

学籍番号：CD151005

科学装置の技術進歩と汎用化の功罪：質量分析計の時系列的研究

Technological Progress of Scientific Instruments and Consequences
of Versatility: A Longitudinal Study on Mass Spectrometry

大学院商学・経営管理研究科

博士後期課程 経営・マーケティング専攻

高田 直樹

謝辞

この博士論文は、多くの方々のご協力とご支援のもとに成り立っている。この場を借りて、特に博士後期課程でお世話になった方々に感謝を申し上げたい。

誰よりも先に感謝を申し上げなければならないのは、指導教員の青島矢一先生である。青島先生には、筆者が先生の学部ゼミに所属して以来、研究面と生活面の双方において、多大なご支援を頂いた。研究面では、熱心に研究指導して頂いただけでなく、研究者になるための素養を磨いて頂いた。先生との対話を通じて、「面白く、意義のある研究」のイメージを掴めるようになったことは、今後の研究生活にとっての、この上ない財産である。心理的に不安定になりがちであった大学院生活において、精神的に支えて頂いたことも、博士研究に取り組む上で大きかったように思う。本論文の研究テーマに行き着くまでに紆余曲折を経る中で、自暴自棄に陥りかけていた筆者を勇気づけて下さったからこそ、こうして博士論文を執筆することができた。特定のアプローチに拘泥することなく広い視野を持って研究に取り組む先生を見習って、今後も邁進していきたい。

論文指導教員である清水洋先生にも、心から感謝申し上げたい。清水先生には、本研究の主張を明確にする上で必要となるエビデンスについて助言を賜っただけでなく、本研究が持ちうる理論的貢献や問題意識の重要性の指摘を通じて、大いに勇気づけて頂いた。先生のゼミで議論を重ね、「時間軸を長く取る」ことの重要性を学ばせて頂いたからこそ、この研究テーマを設定することができたのだと思う。いつまでも、「Young at Heart」な研究者であることを心がけたい。

両名のみならず、一橋大学では多くの先生方から貴重な学びを頂戴した。中でも、沼上幹先生、加藤俊彦先生、軽部大先生、坪山雄樹先生、佐々木将人先生には、学内でお会いするたびに研究相談に乗って頂いたり、励ましの言葉を頂戴したりした。中島賢太郎先生には、実証部分について相談に乗って頂くとともに、将来的な研究についての示唆も頂いた。イノベーションマネジメント・政策プログラム (IMPP) のリサーチ・セミナーでは、米倉誠一郎先生 (現、法政大学)、延岡健太郎先生 (現、大阪大学)、江藤学先生、大山睦先生、カン・ビョンウ先生、吉岡 (小林) 徹先生 (東京大学)、木村めぐみ先生からも有益なコメントを頂いた。鷺田祐一先生、島本実先生、島貫智行先生は、講義等での接点がないにもかかわらず、学会等でお会いするたびに筆者に声をかけて下さった。今の自分があるのは、諸先生方との相互作用のおかげである。感謝申し上げたい。

インタビュー調査に協力して下さった方々にも御礼申し上げたい。第4章でお名前を挙げさせて頂いたように、お忙しい中であるにもかかわらず、複数の専門家の方々が調査に協力して下さった。その中には、質量分析計の初歩的な内容からレクチャーして下さった方や、筆者の研究計画に対して建設的なコメント下さった方など、インタビュー調査の範疇を超えて協力して頂いた方も多くいらっしゃった。自然科学系の科学者でない私にとって、皆様との対話の時間は、新たな発想を生む上で欠くべからざるものであった。加えて、生稲史彦先生（筑波大学）には、一部調査の手筈を整えて頂くとともに、研究の過程で幾度となく議論に付き合ってもらった。ここに感謝の意を表したい。

大学院では、たくさんの先輩や学友にも恵まれた。紙幅の都合で全員のお名前を掲載できず恐縮ではあるが、感謝申し上げたい。先輩である松嶋一成さん（東京女子大学）、久保田達也さん（成城大学）、積田淳史さん（武蔵野大学）、尾田基さん（東北学院大学）、酒井健さん（創価大学）、金東勲さん（一橋大学）、内田大輔さん（九州大学）、高橋大樹さん（武蔵野大学）、渡辺周さん（東京外国語大学）、猪股優史さん（一橋大学）、加藤崇徳さん（茨城大学）、佐々木秀綱さん（一橋大学）、谷口諒さん（一橋大学）、平野貴士さんからは、大学院入学当初から様々な助言を頂いた。諸先輩方の支えは、大学院生活に慣れず右も左も分からなかった筆者にとって、必要欠くべからざるものであった。特に、谷口諒さんには、挙式直後のお忙しい時期にもかかわらず、本論文の草稿に格別丁寧に目を通して頂いた。また、同期である王文さん、および後輩である山口翔太郎さん（現、メリーランド大学博士課程）、寺本有輝さん、新田隆司さんからは、日常的なやり取りを通じて刺激を頂いた。

本論文の作成にあたっては、文部科学省科学技術イノベーション政策における「政策のための科学」推進事業の基盤的研究・人材育成拠点である、イノベーションマネジメント・政策プログラム（IMPP）からの助成を受けた。本プログラムの支援の下で、海外学会等で研究を報告する機会が得られたことは、自らの視野を広げる上でまたとない機会であった。同プログラムからの支援、およびIMPPの学生の皆様に、この場を借りて感謝申し上げたい。

最後に、大学院へ進学するという筆者の意思決定を快く許し、見守ってくれた両親に感謝を捧げたい。学問の道へ進むことを志した筆者をいつも元気づけてくれ、筆者が書いた文章を嬉しそうに読んでくれる両親に、この博士論文を捧げたい。

2018年1月

高田 直樹

目次

1. はじめに.....	1
1.1. 本研究の目的.....	2
1.1.1. 本研究の目的.....	2
1.1.2. より具体的な問い.....	4
1.2. 事例の選択：質量分析計.....	6
1.3. 本論文の構成.....	8
2. 理論的背景.....	10
2.1. リサーチ・テクノロジーとしての科学装置.....	10
2.2. 科学と技術の発展過程.....	12
2.2.1. 科学の発展過程.....	12
2.2.2. 技術の発展過程.....	19
2.3. 発展過程における科学装置と科学技術の関係.....	23
2.3.1. 道具体の役割.....	23
2.3.2. 技術の二重性.....	25
2.4. 科学装置のイノベーション・プロセス.....	27
2.4.1. 科学装置の発展過程.....	27
2.4.2. 科学装置のイノベーション・プロセスにおける分業.....	30
2.5. 小括：残された問題.....	33
2.5.1. 科学者による装置選択.....	34
2.5.2. 長期的な装置性能の向上.....	36
3. 本論文で使用するデータ.....	39
3.1. 技術進歩に関するデータ.....	39
3.2. 普及傾向に関するデータ.....	41
3.2.1. 論文データセットの取得源.....	42
3.2.2. データセットの構築手続き.....	45
3.3. 各プレーヤーの行動に関するデータ.....	47
4. 質量分析計の基本原則と特徴.....	51
4.1. 質量分析計の原理.....	51
4.2. 質量分析計の構造と要素技術.....	53

4.3. 質量分析計の用途	62
4.4. 本論文で注目する時代と技術	65
5. 科学者による技術選択.....	69
5.1. 技術進歩と社会的シグナル.....	69
5.1.1. 技術進歩における不確実性	69
5.1.2. 社会的シグナルとしての地位.....	73
5.1.3. 地位の効果.....	75
5.1.4. 科学と技術における地位の効果.....	78
5.2. 分析方法.....	81
5.2.1. データとサンプル.....	81
5.2.2. 変数.....	83
5.2.3. 分析モデル.....	93
5.3. 分析結果.....	94
5.3.1. 記述統計	94
5.3.2. 相関マトリクス	96
5.3.3. ロジスティック回帰分析.....	98
5.4. 分析結果の解釈.....	105
5.4.1. 分析結果の整理と分析上の限界.....	105
5.4.2. 分析結果から想定される選択の様式.....	107
5.5. 小括	109
6. MALDI の開発と普及.....	112
6.1. MALDI の開発経緯.....	113
6.1.1. 「何でも測れる装置」	113
6.1.2. 高分子測定への方針転換.....	116
6.1.3. 埋もれゆく技術	119
6.2. 科学者コミュニティへの情報伝達.....	122
6.2.1. 契機となった学会発表	122
6.2.2. 育ての親：ヒレンキャンプとカラス	124
6.2.3. 高地位者の介在	126
6.3. 更なる普及と新分野の開拓.....	128

6.3.1. 装置メーカーの参入	129
6.3.2. プロテオミクスの勃興	130
6.4. 小括	135
7. 質量分析計の汎用化	137
7.1. 質量分析計の2つの進歩	138
7.1.1. 質量分析計の基本性能の向上.....	138
7.1.2. 質量分析計のもう1つの進歩：汎用化.....	139
7.2. 質量分析計の進歩史：汎用化に至る道程.....	142
7.2.1. 質量分析計の起源：物理学者のための装置.....	142
7.2.2. 1950年代～1960年代：質量分析コミュニティの勃興.....	146
7.2.3. 1960年代～70年代：GC/MSの登場によるユーザーの拡大.....	152
7.2.4. 1970年代～：コンピュータの搭載による分析の自動化.....	156
7.3. 歴史記述の解釈：共存共栄の道標としての汎用化	161
7.3.1. 歴史記述のまとめ	161
7.3.2. 汎用化に対する利害の一致	162
7.4. 小括	169
8. 汎用化によって失われゆくもの	171
8.1. 汎用化と装置ユーザーの行動	172
8.1.1. 汎用化による信頼性の低下	172
8.1.2. 汎用化による科学的創造性の欠如	174
8.1.3. 問題の所在.....	176
8.2. 汎用化と装置の基礎研究	176
8.2.1. 関連学会の会員数.....	178
8.2.2. 基礎研究の論文著者数	186
8.3. 汎用化による基礎研究の停滞	190
8.3.1. 装置研究者の苦難.....	191
8.3.2. 大学組織における装置研究者.....	193
8.4. 小括	195
9. 結論.....	197
9.1. 要約	197

9.1.1. 科学者による技術選択と地位.....	197
9.1.2. 汎用化と基礎研究の停滞.....	198
9.2. 本研究の貢献とインプリケーション	199
9.2.1. 本研究の貢献.....	199
9.2.2. インプリケーション	203
9.3. 本研究の限界と今後の研究課題	204
参考文献	207

1. はじめに

本研究の目的は、科学装置（scientific instruments）の普及がどのような条件下で進み、普及に伴って装置進歩の方向や速度になぜ変化が生じるのかを解明することにある。より具体的な問いは、次の2つである。すなわち、(1) 科学研究のための道具として生み出された科学装置は、どのように科学者によって採用されていくのか、(2) 普及促進のために装置メーカーが科学装置の汎用化を推し進めると、装置の進歩が停滞するようになっていくのは何故か、である。

これらが重要な問いとして成立するのは、科学装置の進歩が、科学や技術の進歩にとって欠かせない存在として扱われてきたからである。科学装置が進歩すると、人々がこれまでに見ることも測ることもできなかったものが分析・測定可能になる。そうした分析から新規な現象や物質の存在が明らかになると、既存の科学理論が修正されたり、新しい科学理論が生まれたり、その応用によって技術的なブレークスルーが生じたりする可能性がある。このように、科学装置の進歩は、新たな現象や物質の観測を通じて、科学や技術の発展に寄与するという因果関係が想定されてきたのである。

こうした重要性が認められてきたにもかかわらず、科学装置の普及や進歩のパターンを解明しようとした研究は数少ない。科学や技術の進歩に関する議論や、科学技術の進歩を説明するために考案されたモデルは、科学装置という要因を全く考慮に入れていなかったり、単なる外生的な存在として処理したりする傾向にある。しかしながら、科学や技術開発という営為の根幹を支えるものとして分析・測定があるならば、それらの進歩を説明するにあたって、分析・測定の機能を担う科学装置という要因は無視できないはずである。裏を返せば、科学装置の普及や進歩が起こる条件を明らかにすることによって、科学や技術の発展経路に関するより詳細な説明が可能になると思われる。

科学装置のイノベーション・プロセスを明らかにしてきた少数の研究も、他の製品と科学装置とを同列に扱っているという意味で、科学装置の普及や進歩が起こる条件を十分に明らかにしていない。既存の研究は、科学者にとっては科学研究のための個別化された道具である一方で、装置メーカーにとっては利潤を生み出す工業製品である、という科学装置の特徴を見過ごしてきた。換言すると、科学装置の進歩の方向や速度が、(1) 科学者の研究上の必要性だけでなく、(2) 装置メーカーの利潤動機によっても左右されると言う点が科学装置の特徴の1つであるにもかかわらず、そうした特徴は、科学装置のイノベーション・プロセ

スに関する知見に反映されていないのである。

そこで本研究では、科学装置の普及や進歩に影響を及ぼす主体として、科学者と装置メーカーに注目する。科学者は、科学研究のための道具として科学装置を作り上げ、研究のために装置を使用する主体である。これまでも指摘されてきたように、科学装置の多くは、科学者の個別特殊的な必要性に応じて設計される (Rosenberg, 1992)。すなわち、科学装置が生み出される当初の段階では、個別の科学者や、その周辺に存在する科学者が、装置の普及や進歩に大きな役割を果たすことになる。装置メーカーは、科学者コミュニティにおける装置普及に呼応して装置開発・製造に参入してくる主体である。利潤動機に従って装置を開発する装置メーカーは、科学者以外の顧客にも装置を販売できるように装置を改良していく。そのため、装置メーカーが志向する装置改良の方向性は、科学者の志向とは異なる。具体的には、専門的な知識を保有している科学者でなくても扱えるように、装置メーカーは科学装置の「汎用化」を推し進めていく。ここでの汎用化は、専門知識のない者でも装置が扱えるようになることを意味する。

以下では、科学者と装置メーカーが装置の普及や進歩に及ぼす影響を深掘りしながら、本研究の目的を詳述する。とりわけ本研究が注目するのは、科学者コミュニティにおける装置普及に影響を及ぼす要因と、装置メーカーによる汎用化が装置進歩にもたらす影響である。次に、事例として質量分析計を選択した理由について説明する。一口に科学装置といっても、カテゴリだけで十数種類、個別の装置で見ると数百種類もの数が存在するため、質量分析計というカテゴリを選択した理由に触れておくのは、事例の選択基準を示す上でも必要な作業である。最後に、本論文の構成をまとめる。

1.1. 本研究の目的

1.1.1. 本研究の目的

本研究で分析の対象とするのは、科学装置という分析・測定の道具である。「計測は科学の母」(Metrology is the mother of science) という言い回しが存在するように、分析・測定は、科学の進歩にとってきわめて重要な存在であると認識されてきた¹。科学装置の進歩に

¹ 「計測は科学の母」という言い回しの出自は定かではないけれど、伊藤 (2007) は、この言葉を引き合いに出しながら、計測や観察 (の進歩に寄与してきた光学) の重要性を指摘している。

よって科学的発見がもたらされる、あるいは理論的予測を検証するために科学装置が改良されるという想定は、例えば、近年のナノテクノロジーの興隆にも見ることができる。ナノテクノロジーという領域においてマイルストーン的な位置を占めるフラレンが発見されたのは、走査型プローブ（トンネル）顕微鏡の登場によって、極微レベルでの観測が可能になったからである。「ナノの世界を見ることが出来るプローブ顕微鏡が実用化されたからこそ、夢物語のように思われていたことが現実になってきた」（産総研, 2016）という経路で、新たな科学領域が勃興してきたわけである。

技術開発における科学装置の重要性も、例を挙げれば枚挙に暇がない。そもそも、科学的発見が技術機会をもたらすという古典的な想定に則れば、科学装置が進歩することによって科学的発見が生じると、連鎖的に技術開発に対しても大きな影響が及ぶことになる。科学的発見を経由せずとも、分析・測定の進歩それ自体が技術開発行動に影響を及ぼし、結果として技術進歩の方向性や速度を変化させることもあるだろう。これは、開発している技術のパフォーマンスの評価が、分析・測定の技術に依存するからである。堀川（2003）の言葉を借りれば、分析・測定というフィルターを通して技術の性能や問題が認識されるために、分析・測定の技術は、技術開発の課題や問題設定などの技術開発の方向性に強い影響力を持っていると考えられるのである。

このように、科学装置の重要性自体は認識されてきたにもかかわらず、科学装置それ自体がどのように進歩するのかという問題は、半ば手つかずのまま放置されてきた。より具体的には、ある装置がどのように登場し、それがどのような状況下で、あるいはどのようなパターンで普及し、その過程で装置自体がどのように進歩していくのかという一連の問題に対して、十分な回答が与えられていないのである（Cozzens, 1987）。その理由として考えられるのは、科学研究のための道具であるという側面のみが注目されてきたことにある。言い換えると、科学装置は科学者の需要によって進歩していくという、「必要は発明の母」とも言える単純な想定があまりに当然視されてきたのである。

実際には、分析・測定という機能は汎用的なものであり、それを必要とするのは科学者だけではない。そのため、当初ある科学領域の専門家だけが必要としていた科学装置は、一旦その有用性が認識されはじめると、異なる領域へ応用されたり、装置メーカーの手によって商用機が開発されたりすることによって、社会に広く普及していく（Rosenberg, 1992）。このとき、装置メーカーは利潤動機に従う主体であるから、一定数の顧客を見込めるものとして既に科学者間で普及している装置を開発対象に選択し、その装置を科学者以外でも扱え

るように装置を汎用化していくと考えられる。

1.1.2. より具体的な問い

先述したように、本研究では、(1) 科学研究のための道具として生み出された科学装置は、どのように科学者によって採用されていくのか、(2) 普及促進のために装置メーカーが科学装置の汎用化を推し進めると、装置の進歩が停滞するようになっていくのは何故か、という2つの問題に注目する。以下では、科学装置の普及や進歩という主題を扱うにあたって、この2つの問題がなぜ重要なのかを説明する。

(1). 科学者による装置のセレクション

1つめの問いは、科学研究のための道具として生み出された科学装置は、どのように科学者によって採用されていくのか、というものである。この問いは、科学者がある装置を選択しやすいのは如何なる場合か、と言い換えることができる。ユーザー・イノベーションという文脈で科学装置のイノベーション・プロセスを探究した von Hippel (1976) や Riggs & von Hippel (1994) によれば、科学装置の初期の普及を担っているのは他ならぬ科学者であり、装置メーカーは科学者のユーザーニーズを把握してから商用機の導入を決める。

科学装置が科学研究のための道具として生み出されるということは、それが単に個別特殊な用途のために設計されるだけでなく、それが科学的探究の手続きとして正当化されない限り、その後の改良や普及が見込めないことを意味している。ある科学装置が研究手法として不適切であると判断されてしまうと、多くの科学者にとってその装置を採用するメリットは存在なくなってしまうからである。換言すると、科学コミュニティの中でその装置が正当な研究方法あるいは手段として受容されるか否かが、その後の装置の進歩や普及を決定づけているのである。

それでは、どういった要因が科学者による装置選択を左右するのだろうか。この問いは、科学者が常に合理的な選択を行っている限り、さほど追究する価値のないもののように思われるだろう。しかしながら、科学の世界の場合、価格や性能という客観的な情報のみによって装置が選択されるとは限らない。それよりも装置選択の基準として優先されるのは、その科学装置の使用が、正当な研究手続きとして認められていることである。ここで重要なのは、ある科学装置による測定手続きや測定結果が正当であるという判断は、必ずしも科学的には下されず、それ故に、その判断に社会的な規準が持ち込まれることである。ある現象の

存在証明における科学装置の位置付けを探究したハリー・コリンズによれば、ある装置によって望ましい測定結果が得られなかったとしても、その装置の使用が研究手続きとして不適切だということにはならない (Collins, 1981)。その理由は、装置が正常に動作していないと主張することによって、実験者は装置の信頼性に対する判断を留保できてしまうことにある。結果として、科学装置の信頼性判断には、科学的判断とは独立した社会的規準が持ち込まれることになる。それは例えば、実験者の所属や国籍、科学者コミュニティでの地位といった要因である。

裏を返せば、科学装置がこうした社会的規準と紐付くことによって、科学者コミュニティにおいて装置が信頼に足るものとして正当化され、その結果として科学装置の普及が進む可能性がある。例えば、著名な科学者がある装置を採用して論文を発表することによって、周囲の科学者が、その装置を信頼できる研究手段として見なすようになっていくかもしれない。ただし、この場合、性能という点で最適な装置が科学者によって採用されるとは限らない。そのため、社会的な規準による装置の選択は、本来望ましい選択ではない装置へと科学者をロックインさせる、あるいは将来有望なはずの装置に対する投資を抑制することを通じて、装置の進歩に負の影響を及ぼす可能性がある。

(2). 汎用化が装置進歩にもたらす影響

2つめの問いは、普及促進のために装置メーカーが科学装置の汎用化を推し進めると、装置の進歩が停滞するようになっていくのは何故か、である。科学装置のイノベーション・プロセスに関する既存研究は、装置の普及が進んだ後でも、科学者（大学研究者）が科学にとって重要な装置性能の向上を達成すると想定してきた。一方で、Auger と Esca という2つの科学装置の事例を分析した Riggs & von Hippel (1982) は、新たなものを見たり観測したりするという機能を支える基礎的な装置性能の向上が、やがて停滞していくことを示唆している。しかしながら、そうした傾向がなぜ出現するのかについて、明確な回答は存在しないのが現状である。

このように装置性能の向上が停滞していく原因として考えられるのは、科学装置の普及につれて装置メーカーが参入してくることによって、装置開発の方向性が変化することである。装置メーカーが営利を目指して商用機を開発しはじめると、装置の入手や使用が簡単になって研究人口が増加し、科学者間の競争も激しくなる。すると、より短期的に成果が出る研究が優先されるようになり、時間と資源を要する装置開発の仕事は、科学者から敬遠さ

れるようになっていく。そしていつしか、かつては装置を自作することによって独創的な研究に取り組んでいた科学者の認識は、「装置は作るものでなく、買うもの」へと変化していく。その結果として、装置メーカーが最大公約数的な商用機を市場投入するようになると、独創的な科学研究を支える装置開発は生じにくくなる可能性がある。この点について、経済史家のネイサン・ローゼンバーグは、「もし科学装置が純粹に商業的な基盤を始祖としていたら、そうした環境が更なる装置研究や新規領域の開拓に結びついたかは疑わしい」(Rosenberg, 1992, p.389) と主張している。

また、装置メーカーが装置開発を行うようになると、科学装置は装置メーカーの手によって「誰でも扱えるような装置」へと変化していく。装置の使用に専門的な知識や習熟が必要であることは、装置メーカーからすれば普及や市場拡大の障害でしかない。そのため、装置メーカーが参入すると、必然的に科学装置は汎用化されていくことになる。これに対して、装置開発に取り組んできた科学者の中には、装置の汎用化によって、装置に関する基礎研究が行いにくくなってきたと主張する者が存在する。そこで本研究では、そもそも汎用化によって装置の基礎研究が行いにくくなったのかを検証するとともに、汎用化によって装置進歩に負の影響が及ぶメカニズムを明らかにする。

1.2. 事例の選択：質量分析計

本研究では、科学装置の中でも質量分析計 (mass spectrometry/mass spectrometer) を事例として取り上げる。事例として質量分析計を選択したのは、以下で述べる 3 つの基準と照らし合わせた際に、科学装置の中でも、質量分析計が研究対象として最も妥当であると考えられたからである。

1 つめの基準は、現時点で既に汎用化が進んでおり、幅広い分野に応用されていることである。これは、科学研究者による技術選択と、汎用化による装置進歩への影響という 2 つの問いを分析の射程に含める上で、決定的に重要な要素である。それゆえ、重力波検出装置や SPring-8 のような、まだ生み出されてそれほどの時間が経過してない装置や、大規模共同施設でのみ運用されている装置は、分析対象に適していない。とりわけ重要なのは、分析対象に取ることでできる時間軸の長さである。科学装置は基礎的な研究から生まれてくるのが大半であるから、当然ながらその開発や普及には長期の時間を要する。質量分析計は、初期の装置の登場時期が 1900 年代初頭であり、初期の商用機が登場したのは 1940 年代であるから、時間軸の長さという意味では理に適った分析対象である。

2つめの基準は、装置進歩の観察可能性である。主要な測定性能が定義されている科学装置が一般的であるとはいっても、それらのスペックを長期にわたって事細かに確認していくのは困難である。装置の歴史的な進歩を把握する上では、いくつかの傑出した発見ないし発明を識別できるだけでなく、それが継続的に観察できる事例であることが望ましい。質量分析計は、登場時期が比較的早期であるだけでなく、近年にもノーベル賞の受賞対象となっていることから、装置の進歩を継続して観察しやすい科学装置である。質量分析計に関連するノーベル賞受賞者の一覧を、下表 1-1 に示す。

3つめの基準は、データの利用可能性である。いくら時間軸を長期にとっても、調査不可能な期間が長ければ意味はない。大半の科学装置の起源は、科学者自身が研究用途に設計したものであるから、その成果は論文として公開されるのが一般的である。加えて、実験による検証が重要視される科学領域では、その実験手続きを公開する意味で、論文中に装置使用の有無まで掲載されている場合が多い。これは、科学者コミュニティにおける装置の普及傾

年度	氏名	分類	内容
1906	Joseph John Thomson	物理学賞	気体の電気伝導に関する理論および実験的研究
1922	Francis William Aston	化学賞	非放射性元素における同位体の発見と質量分析器の開発
1939	Ernest Orlando Lawrence	物理学賞	サイクロトロンの発明・開発およびその成果、特に人工放射性元素
1989	Hans Georg Dehmelt	物理学賞	イオントラップ法の開発
1989	Wolfgang Paul	物理学賞	イオントラップ法の開発
2002	John Bennet Fenn	化学賞	生体高分子の質量分析法のための穏和な脱離イオン化法の開発 (ESI)
2002	田中耕一	化学賞	生体高分子の質量分析法のための穏和な脱離イオン化法の開発 (MALDI)

表 1-1. 質量分析計に関連するノーベル賞受賞者の一覧

向を観察できることを意味している。後章で見ていくように、本研究ではこうした論文データを活用している。また、長期的に開発が続けられてきたことから、総説や歴史分析が数多く残されているのも質量分析計という事例の魅力である。こちらについても第 3 章で詳述するが、例えばアメリカ質量分析学会が実施しているオーラルーヒストリー・プロジェクト等は、研究を行う上で貴重な資料である。

1.3. 本論文の構成

本論文は全 9 章からなる。本章では、研究の目的と意義、及び質量分析計という事例の選択理由を説明した。

第 2 章から第 4 章は、分析の準備のための章である。第 2 章では、科学装置の進歩というテーマに関連する既存の議論を紹介し、本研究の学術的な位置づけを明らかにしていく。具体的には、既存研究における科学装置の定義を確かめた上で、科学や技術の進歩に関するこれまでの議論において科学装置がどのように位置づけられてきたのかを明らかにする。第 3 章では、分析に使用するデータを紹介する。本論文では、様々な種類のデータを用いて、統計的分析と事例分析の両方に取り組んでいくため、あらかじめ収集したデータが持ちうるバイアスを確認したり、それへの対処策を事前に検討したりすることは、研究手続きとして重要である。第 4 章は、質量分析計の技術の概要を説明するための章である。およそ 100 年にも渡る技術の歴史を総浚いするのは現実的でないものの、質量分析計とは一体何のための装置で、こういった要素から成るものなのかを知っておくことは、その後の章を読み進める上で有益な知識となるであろう。

第 5 章と第 6 章では、質量分析計を科学研究のための道具として見た場合に考えられる問題、すなわち科学者による装置のセレクションという主題を扱う。第 5 章は、2002 年にノーベル賞化学賞の受賞対象となった質量分析計の 2 つの要素技術 (MALDI と ESI) を取り上げて、それを搭載した装置の普及過程における高地位者の役割を分析する。より具体的には、科学コミュニティの中で既に実績を挙げている科学者が採用することによって、新規要素技術を搭載した装置の普及が促進する、という仮説を統計的に検証していく。第 6 章では、MALDI の開発および普及プロセスの事例を分析することによって、高地位者の役割が具体的に如何なるものであったのかを見ていく。

第 7 章と第 8 章は、汎用化が科学装置の進歩に与える長期的影響を解明するためのパートである。第 7 章では、まず質量分析計の汎用化が歴史的にどのように進展してきたのか

を概説し、その上で汎用化が実質的には避けられない過程であったことを示す。第 8 章では、装置の汎用化に対して科学者が表明してきた懸念を取り上げながら、汎用化によって生じうる帰結を考察する。具体的には、科学装置の汎用化によって装置の基礎研究が低調になることを、関連学会の会員数等のデータを用いて検討しながら、そうした現象が生じるメカニズムを提示する。

第 9 章では、本論文の要約もかねて、分析結果から見えてくる科学装置の進歩のパターンを描写するとともに、今後の課題と将来の研究の方向性を提示する。それに加えて、本研究が描く進歩のパターンから示唆される問題点や、それらに対してどのような対処があり得るのかを議論するのも、終章である第 9 章の目的である。

2. 理論的背景

本章の目的は、科学装置に関連するこれまでの研究に触れた上で、本研究の位置づけを明確にすることにある。科学装置に関連する既存研究と一口に言っても、その対象は幅広い。科学装置は科学研究や技術開発の道具であるのと同時に、それ自体もまた、科学や技術の一領域を形成しているからである。

本章ではまず、リサーチ・テクノロジーの既存研究に則って、科学装置の定義を明確にする。第2節では、科学と技術の進歩のパターンを取り扱った主要なモデルをいくつか紹介する。その目的は、何らかのモデルから科学装置の進歩を敷衍するというよりも、むしろ、科学装置はそうしたモデルの中で周縁に位置づけられてきたという事実を示すことにある。第3節では、科学装置をより中心的に捉えた研究の紹介を通じて、科学装置への注目により従来の進歩モデルを捉え直せる可能性があることを指摘する。第4節では、科学装置のイノベーション・プロセスを直接に扱った少数の研究を紹介する。第5節では、科学装置の進歩について未だ取り上げられていない論点を明らかにするとともに、本研究で解明しようとする具体的な問いを提示する。

2.1. リサーチ・テクノロジーとしての科学装置

科学装置の進歩や普及を分析対象とする一部の研究（e.g. von Hippel, 1976; Rosenberg, 1992）は、それが独立したカテゴリや産業を形成する財であるという前提を置いているだけで、そもそも科学装置に特徴的な要素が何なのかという問題には触れていない。Shinn（2005）によると、科学装置はリサーチ・テクノロジーの一種である。そこで以下では、このリサーチ・テクノロジーという概念の説明を通じて、科学装置という技術に顕著な特性を整理してみよう。

リサーチ・テクノロジーとは、技術上のラディカル・イノベーションの先行要因として Shinn（2005）が提示した概念である。Shinn は、リサーチ・テクノロジーが次に示す3つの特性を有するために、科学者や技術者の業務と密接に関連していると主張する。その特性とは、(1) 装置という形態であること、(2) 中間領域で広く使用されること、(3) 計量と密接に関係すること、である。これらの特性は独立しておらず、相互に密接に関連している。

第1の特徴は、装置あるいは器具という形態を伴うことである。大抵のリサーチ・テクノロジーは、検出、測定、あるいは統制を目的とする科学装置や方法論という形態を取る。そ

それぞれの装置は、それ固有の原理によって動作するものであり、多様な装置を組み合わせることによって多様な対象を分析したり、1つの物質に対して多様な分析を行ったりすることができる。ここで重要なのは、検出や測定という用途自体が汎用的だという点である。そのため、ひとたび用途開発が進展すると、リサーチ・テクノロジーは当初目的としていた領域とは異なる応用領域でも使用されるようになる。こうして応用が進んでいったリサーチ・テクノロジーの例としてシンが挙げているのは、トランジスタ、コンピュータ、化学工学、フーリエ変換分光法、超遠心機である²。

第2の特徴は、様々な領域で利用可能なことである。これは、第1の特徴と密接に関連している。先述したように、検出や測定という機能は、本来的に様々な用途へ応用可能である。例えば、理論上は明らかであるはずなのに、定量的な測定や実験が行えないために未解決となっている科学的問題に対して、リサーチ・テクノロジーは一定の貢献を果たしうる（Gökalp, 1990）。こうした重要な特性から、リサーチ・テクノロジーの専門家が多様な領域との関連性について言及したり、異なる領域に存在するユーザーによって応用可能性が見出されたりすると、リサーチ・テクノロジーは多様な領域をまたいで用いられるようになっていく。こうして応用が進んでいくと、異なる領域に属する専門家集団が、同じ装置を研究や開発に使用するという状況が生み出されることになる。

第3の特徴は、計量（metrology）と密接に関係することである。装置や器具によって検出や測定が可能になると、計量単位や標準の策定に用いられるようになる。こうして生み出された計量単位は、様々な領域における共通語の下地となり、異なる専門領域間でのコミュニケーションを容易にする。場合によっては、そうした計量単位が評価基準として広く共有されることによって、リサーチ・テクノロジー自体がある種のパラダイムのような形態を取ることさえある（Shinn & Jorges, 2002）。

このように、科学装置をはじめとするリサーチ・テクノロジーは、測定や検出という機能の汎用性から、多様な科学技術領域で用いられる。こうした特性こそが、科学装置という技

² シンがこれらの技術をリサーチ・テクノロジーとして挙げている理由は、その用途が汎用的であることから、これらの技術が当初想定されていた用途とは異なる応用領域でも用いられるようになったことにある。例えばトランジスタの原型は、半導体表面の電子運動を調査するための実験装置（整流器）であった（奥山, 2008）。それが、トランジスタという電気信号の増幅デバイスに応用されることによって、様々な電子機器に用いられるようになった。

術のカテゴリに独自の地位を与えている。それでは、主要な用途である科学研究や技術開発に関する研究では、科学装置はどのように扱われてきたのだろうか。

2.2. 科学と技術の発展過程

本節では、科学や技術の進歩を主題とする、あるいはそれに対して示唆を与えている先行研究の中でも主要なものを紹介した上で、そうした研究における科学装置の位置付けを明らかにする。

2.2.1. 科学の発展過程

科学の発展過程に関する研究として以下で取り上げるのは、クーンのパラダイム論と、ラボラトリー・スタディーズと総称される研究群である。前者は、イノベーション研究に対しても大きな影響を与えた科学史研究であり、科学者共同体が支持する理論の転換という側面から科学の発展過程を示している。後者は、直接的には科学の発展過程を取り扱っているわけではないけれど、科学的実践のミクロな観察・記述を通じて、従来とは異なる科学観の提示を目指す領域である。

(1). クーンのパラダイム論

ここでは、イノベーション研究に対しても大きな影響を与えた、トマス・クーンのパラダイム論を見ていこう。クーンの『科学革命の構造』は、それ自体は科学史の研究に位置づけられる著作であったけれど、パラダイムという概念によって多様な領域から注目を集めるに至った。以下では、まずクーンが提示した科学的発展のモデルを概観した後に、モデルにおける科学装置の位置づけを見ていく。

クーンが提示したのは、それまで想定されてきたような積み上げ式の進歩とは異なる、知識の非累積性を強調するモデルであった。それを端的にまとめると、「『前科学→パラダイムの形成→通常科学→変則事例の出現→危機→科学革命→新パラダイムの形成→通常科学』という一連のサイクル」(野家, 2008, p.154) として表すことができる。便宜上、ここでは、通常科学という概念を出発点としてモデルを説明していこう。

通常科学 (normal science) とは、科学者共同体が同じ規則や前提を共有しながら研究を進めていく段階である。この段階では、科学者共同体がパラダイムという型を共有することによって、効率的に問題が解決されていく。パラダイムとは、「一般に認められた科学的業

績で、一時期の間、専門家に対して問い方や答え方のモデルを与えるもの」(Kuhn, 1962, 邦訳 p.v) である。パラダイムとして共有されるような業績の特徴は、第 1 にそれが支持集団を形成するほど前例のないユニークさを持っていること、第 2 にそれが科学者集団に対して解くべき諸問題を提示することにある。本研究との関わりで、パラダイムという概念が興味深いのは、その構成要素に科学装置が含まれる点にある。クーンは、パラダイムを次のようにも定義している。

「これらの 2 つの性格を持つ業績を、私は以下では『パラダイム』と呼ぶことにする。この言葉は、『通常科学』に密接に関連しているのである。その言葉を選ぶ際に、私は実際の科学の仕事の模範となっている例—法則、理論、応用、装置を含めた—があって、それが一連の科学研究の伝統を作るモデルとなるようなものを、この言葉で示そうと考えたのである」(Kuhn, 1962, 邦訳 p.13)

特定のパラダイムに沿って行われる通常科学の営みの下では、その領域や厳密性が増大していくという意味で、知識は累積的に積み上げられていく。しかしながら、変則事例(anomaly) と呼ばれる、パラダイムの予測から外れた結果が見出されるに従って、堅固なパラダイムに綻びが生じ始める³。通常、こうした変則事例は、瑣末な問題であるとして科学者共同体に無視されるか、パラダイムの微修正によって対処される。しかしながら、パラダイムによって処理できない変則事例が蓄積され始めると、科学者自身がパラダイムに対して疑念を抱き始める⁴。この危機と呼ばれる段階では、変則事例の解決に値するような新

³ 変則事例が科学理論に対する反証例であるならば、少数の変則事例が発見された時点で、その科学理論や、それを支えるパラダイムは大なり小なりの修正を迫られるはずである。しかしながら、実際にはパラダイムの放棄は研究の放棄を意味するために、容易には捨て去られない。こうした様子を、ラカトシュは「科学的誠実さの規準がユートピアに過ぎない(以下略)」(Lakatos, 1978, 邦訳 p.4) と表現している。

⁴ クーンがパラダイム転換の契機として想定しているのは、既存のパラダイムに依拠している限り説明できないような変則事例が、実際に観察されることにある。これに対して、パラダイム論を技術的知識に敷衍した Constant (1980) は、航空推進手段がプロペラからターボジェットへと移行した事例に基づいて、現実には明らかになっていないけれど理論から予測される変則事例、すなわち想定上の変則事例(presumptive anomaly)もパラダイム転換のきっかけになることを指摘している。具体的には、プロペラという手段では一定の速度

理論が多数現れて競合する。

危機に陥ったパラダイムの行く末は、次の2つのいずれかである。1つめは、変則事例がパラダイムの微修正をはじめとする何らかの形で維持され続け、変則事例の解決が次の世代に委ねられることである。例えば、「その問題は札付きで、もっと進歩した道具を持った将来の世代が現れるまで放置される」(Kuhn, 1962, 邦訳 p.96) のである。

2つめは、異常科学の段階を経て、代替的な理論の選択淘汰の結果として新たなパラダイムが成立することである。クーン自身が政治革命との類似性を指摘しているように、新しいパラダイムの選択は科学的に行われぬ。なぜなら、新旧対立を含む形で併存する複数のパラダイムの間には、前提とする規準や手続きに対して共通の理解が存在しないために、通常科学のフェーズで行っていた科学的判断をパラダイムの比較に持ち込めないからである。すなわち、共通の評価規準が存在し得ないからこそ、科学者共同体の同意でしか解決し得ない問題になってしまうのである。パラダイムの転換に至るこうした過程を、クーンは科学革命という言葉で表現している。

新たなパラダイムが樹立すると、そのパラダイムに沿って通常研究のフェーズが再び訪れることになる。ここで注意すべきなのは、パラダイムの転換過程で知識が引き継がれているとは限らないという点である。パラダイムが転換すると、何を科学的とするかという規則や前提が変わってしまったり、パラダイム転換の前後で概念や用語の意味づけが変わってしまったりするために、異なるパラダイムに所属する科学者間で意思疎通に障害が生じるためである。そのため、科学者共同体が同一のパラダイムを共有している通常科学というフェーズでは知識の累積的発展という見方が成立するものの、その見方は、パラダイムの転換時には当てはまらない。クーンが断続的転換として科学の発展過程を捉えたのは、このような理由による。

クーンが描く科学的発展のプロセスにおいて、科学装置は重要な位置を占めていると考えられる。その理由は、法則や理論と並んで、科学装置がパラダイムの構成要素として挙げられていることにある。クーンが科学装置に言及しているのは、それが科学における事実収集という活動と密接に関連しているからである。クーン曰く、科学装置はパラダイム成立以

を超えるという理論的予測が、プロペラという既存の手段が将来的に頭打ちになるという期待を醸成し、それが想定上の変則事例として機能することによって、ターボジェットという新技術の探索を促したのである。

前から重要な役割を演じる。パラダイム成立以前（前科学）の状況では、ある専門の発展に役立ちうる全ての事実が同じように大切に見えるため、初歩的な事実の収集が熱心に遂行される。このとき、「技術は、偶然に見付きはしないような事実を容易に手に入れようとする際の、一つの資料源であるから、テクノロジーがしばしば新しい科学の発生のために不可欠の役割を演じてきたのである」（Kuhn, 1962, 邦訳 pp.18-19）。ただし、こうした事実収集が学問の発生に不可欠であるとしても、それは必要条件に過ぎないというのがクーンの認識である。むしろクーンがパラダイムの根源として重要視していたのは、事実収集を方向付けるような理論である。

研究のための技術がパラダイムに従属するという発想は、通常科学のフェーズにより色濃く反映されている。通常科学では、パラダイムの導きによって科学装置が設計されたり、改良されたりする。クーンは、事実を求める科学研究には3つの焦点しか存在しないと見て、事実収集や実験が重要になるケースを次の3点にまとめている。それは、(1) 事実の明確化、(2) パラダイムの理論的予測との比較、(3) パラダイムの整備である。

1つめは、事実を示すことである⁵。事実を決定することの意義は、問題解決に使用できることだけではない。一度それが通常科学における問題解決に使用されると、更に精密な事実を特定したり、より多くの状態下で事実を決めたりする意味があることを、パラダイムが保証してくれることになる。換言すると、一度パラダイムの中である事実が問題解決に重要であると認識されると、その事実を見つけること自体がパラダイムに対する貢献として成立するようになるのである。この段階に至ると、事実を確定させるという目的の下で科学装置が繰り返し設計されるようになる。クーンの解釈によれば、当時の時点で最先端だったシンクロトロンや電波望遠鏡という巨大な観測装置に科学者共同体が取りかかったのは、それを使えばパラダイムが重要視している事実を見つけられるという動機からであった。

2つめは、パラダイムによって予測される理論と自然を比較することである。これは、観測によって変則事例を見出すことではなく、パラダイムによって予測される理論と観測をうまく一致させ、理論を肯定的に検証するための営みと言っても差し支えないだろう。クーンが挙げている例によると、理論的に存在が仮定されていたに過ぎなかったニュートリノ

⁵ ここでいう事実とは、事物の性質を示すものである。クーンが示している例は次の通りである。「天文学では、恒星の位置と光度、蝕連星や惑星の周期、物理学では、物体の比重や圧縮率、波長やスペクトル強度、電気伝導度、接触電位差、化学では化学組成、化合量、溶液の沸点と酸度、構造式の光学活性などがある」（Kuhn, 1962, 邦訳 p.29）

は、シンチレーション計数管という特殊な装置を用いることによって観測された。このように、科学装置には、パラダイムが仮定している理論的対象を観測するために設計されるという側面がある。

3つめは、パラダイムの整備である。これは、パラダイムを洗練させるために行われる仕事であり、既知の問題に決定的な回答を下すことを目的とした一群の事実収集活動である。クーンが例としてあげているのは、普遍常数の決定・改良である。数理モデルによって表現できる理論では、モデルに含まれる普遍常数がパラダイムにおいて中心的な位置を占めることがある。クーンが挙げている例で言えば、引力常数は物理理論において中心的な位置を占めるものであるから、多くの実験家たちが実験によって正確な値を特定しようと試みてきたのである。こうした測定値の改良は、理論的予測の精度を高めるものであるから、より高い測定精度を達成できる科学装置の設計は、パラダイムの洗練に貢献するものとなる。裏を返せば、クーンが言うように、測定値の改良に意味を与えてくれるようなパラダイムが存在しなければ、そもそも科学装置を改良するといった面倒事は行われなくてもいい。

このように、パラダイム転換という時にクーンが念頭に置いているのは理論の断絶であって、科学装置の進歩がパラダイム転換を主導するという経路は想定されていない。なぜなら、クーンのパラダイム論における科学装置は、パラダイムによって予測される理論の妥当性を高めるための道具であり、パラダイムに沿って研究に取り組む科学者共同体の需要によって設計・改良される受動的な存在に過ぎないからである。

(2). ラボラトリー・スタディーズ

クーンが科学的知識の発展過程を科学者共同体というマクロな視点から分析してきたのだとすれば、ラボラトリー・スタディーズは、研究室や実験室で研究に取り組む科学者の実践に根ざした形で、科学的知識が構築されるミクロな過程を明らかにしようとする領域である。エスノメソドロロジーの手法を重視する領域であるため、観察対象は現代の科学的実践に限定されているものの、独特の科学観を提示している。

ラボラトリー・スタディーズは、クーンをはじめとする科学史家を取るアプローチとは異なり、科学者の日常的な実践に着目する。そのフィールドワークを通じて描き出されるのは、装置や実験室を用いた人工的な活動としての科学観であり、科学的事実が発見されるのではなくて製作されるという科学観である。クーンのパラダイム論が個別の科学者をパラダイムに従属する没個性的な存在として描いているのに対して、ラボラトリー・スタディーズ

が注目するのは、実験室での何気ない会話、実験における試行錯誤、仮説と説明のアドホックな修正という場当たりの過程である (Bucchi, 2004).

こうした流派に属する研究が示してきた内容は多岐に渡るため、ここでは 3 つの要素のみを取り上げよう。すなわち、(1) 科学観の修正、(2) 科学的言明のレトリック、(3) 社会的規準の介在である。1 つめの科学観の修正は、厳密にはラボラトリー・スタディーズを含む科学知識の社会学に属する議論であるけれど、ここでは便宜的に同様のものとして扱っている。

第 1 の指摘は、非個人性を強調する科学観の修正である。科学知識の社会学は、科学には独自の規準が存在するという素朴な科学観に修正を迫ってきた (Rabinow, 1996)。そうした素朴な科学観とは、例えば社会学者ロバート・マートンが提示した、普遍主義、共同体主義、公平無私、組織的懐疑主義という 4 つの科学的規準である⁶。マートンによれば、これらの相互に関連し合う 4 つの規準に準じることが経験的研究の実践を導き、結果として「保証された知識の拡大」をもたらす。しかしながら、実際の科学者行動を観察した研究からは、この 4 つの規準は必ずしも満たされておらず、時には規準と逆行する活動も科学的知識の構築過程において重要になりうるということが指摘されている。例えば、マートンの基準は科学を社会的な活動と見なして非個人性を重要視する一方で、実際には、独自性への強い執着、卓越した個人的判断、非理性的で奔放な想像力といった個人的な要因が科学的探究につきものである、といった指摘である (Mulkay, 1980)。

第 2 の指摘は、科学的言明が認められていく際に果たすレトリックの役割である。これは、主としてブルーノ・ラトゥールによって展開された議論で、彼は実験過程において科学者が行う推論と、論文の中で行われる推論の過程に大きな差異があり、論文中では支持者を拡大するためのレトリックが使用されることを発見した (Latour & Wooglar, 1979; Latour, 1987)。そのレトリックとは、主張に対する反駁のハードルを高めるものであり、例えば有名ジャーナルの論文を引用するといった戦術を指す。こうした戦術が功を奏するのは、論文中の指摘に異議を唱えようとするならば、その主張の前提となっている先行文献にも異議を唱えなければならないといったように、動員されているアクターがある種の防壁として

⁶ 端的にまとめるならば、科学的真理は非個人的なものであり (普遍主義)、科学は過去の努力の上に築かれる社会的な活動であり (共同体主義)、その実践の動機は真理探究への専心でなければならず (公平無私)、ピアレビュー等の基準を通過してはじめて科学的知識は社会的に評価される (組織的懐疑主義) というものである (Merton, 1949)。

機能することにある。防壁として機能するものの1つとして、ラトウールは科学装置を挙げている。実験結果に疑義を差し向ける者は、それと関連している数多のブラックボックスと対峙せねばならない。例えば、実験動物の生態組織の分析に使われる高速液体クロマトグラフ (HPLC) に疑念の目を向けようとする、反対者は更なるブラックボックスに直面せねばならなくなる。例えば、HPLCからのデータを扱うマイクロプロセッサ、試料であるモルモットの成育、試料調整に使用するジェルの製造、などである。ここで問題なのは、「各々の事実は新たな論争の出発点となりうるし、それが多数のより受け入れられた事実へと導き、しかもその過程が『無限に』続く」(Latour, 1987, 邦訳 p.137) ことにある。既に広く受け入れられている手法や装置に異議を唱えるには、それを受け入れてきた数多の行為者や、その手法や装置の下地になっている基礎的な理論を相手取らねばならない。裏を返せば、こうして反対のコストを高め、より科学的主張を堅固なものとするようなレトリックが存在するのである。

第3の指摘は、ある科学的言明の信頼性評価に、社会的な規準が介在することである。この点を明確に示しているのは、科学上の論争を主題としたハリー・コリンズの研究である。彼が目にしたのは、ある現象の存在証明における科学装置の位置付けである。直観的には、ある装置によって何らかの現象が特定されると、そのことを以て現象の存在が指定されると考えられる。しかしながら、実験者の信念に着目すると、この直観は成立しない。なぜなら、装置が信頼に足ると判断できるのは、現象が存在するという信念を実験者があらかじめ保有しているからである (Collins, 1985)。裏を返せば、装置によって望ましい結果が得られなかった場合、実験者は装置が正常に動作していないと見なして、自らの主張を延命させ続けることができってしまう。そのため、科学装置の信頼性判断には、実験者の信念とは独立した社会的規準が持ち込まれることになる。それは例えば、実験者の所属や国籍、科学者コミュニティでの地位といった要因である (Collins, 1981)。

ここで取り上げたのは、ラボラトリー・スタディーズの中でもごく一部の議論ではあるけれど、個別の科学者あるいは実験者に着目しているという意味で、クーンのパラダイム論とは視座が大きく異なっている。しかしながら、事実の決定に関する合意形成は原則として科学的に行われ得ないという点で、両者の主張は共通しているようにも見える。また、ラボラトリー・スタディーズにおいても、科学装置は新規な発見に資する道具というより、理論を正当化するための道具として扱われる傾向にあると考えられる。これは、ある事実が発見されることよりも、発見された事実が如何に科学的なものとして正当化されていくかに主眼

を置いているためだと考えられる。

2.2.2. 技術の発展過程

科学の発展過程に関する議論では、発展の方向性や速度という論点は扱われないのが一般的である。その理由として考えられるのは、客観的な到達水準を識別するのが困難なことである。技術であれば何らかの性能を軸として発展水準を比較したりできるが、科学の場合はそもそも発展の基準を設定することが難しいだろう。重力波の観測が可能になったことを以て、物理学が他の学問よりも発展していると断定できる者は存在しないはずである⁷。

これに対して、技術の発展過程に関する研究では、発展の方向性や速度という概念が明示的に取り入れられてきた。ここでは、発展の方向性に関するローゼンバーグの焦点化理論と、速度に関する技術の S カーブモデルを見ていく。

(1). ローゼンバーグの焦点化理論

経済史家であるローゼンバーグの主眼は、技術発展の方向性を説明することにあった。従来の説明は、価格の上昇、コストの低下、将来的な利得に対する期待といった要因に基づくものであった。しかしながら、こうした要因に基づく場合、例えばコストが低下するものであれば如何なる改良でも行われうるから、特定の技術の発展経路を説明したことになる。これに対して彼が提示したのは、焦点化装置 (focusing device) による誘引というメカニズムであった。ここでいう焦点化装置とは、人々の注意や、問題解決に向けた資源投入を方向付ける事象やイベントである。具体的に彼が焦点化装置として念頭に置いていたのは、(1) 技術不均衡、(2) 社会的要因、(3) 資源不足の3点であった (Rosenberg, 1969)。

1つめの技術不均衡とは、技術システムの構成要素間の不均衡のことである。技術が実際に稼働している場面では、特定の技術が単体で作動しているというよりも、特定の問題解決を意図してシステムを構成している場合が大半である。彼が注目した工作機械の生産工程の例でいえば、原材料である鉄鋼の精製、部品加工、組み立ての各場面で様々な技術が用いられており、それらの相互依存によって最終的な生産性が決まっている。このとき、相互依

⁷ Nye(1984)によれば、ある科学領域の研究でどの国が先進的かを問うことも容易でない。その理由は、しばしば国家によって研究のスタイルが異なるために、同一の尺度から生産性などを比較することが意味を成さないためである。

存関係にある要素間に不均衡が生じると、それまでの技術システムは機能不全に陥ったり、一部の要素に余剰を抱えた非効率的な状態として見なされたりする。そうした状態は、ボトルネックとしてパフォーマンスを制約している要素の改善に向かって、当事者の探索行為を方向づけることになる。この不均衡が更なる発展の誘引となるという図式を、ローゼンバーグは、兵器という技術システムにおける攻撃兵器と防衛兵器の関係になぞらえている (Rosenberg, 1976)。

2つめの社会的要因とは、投入要素の不確実性をもたらす要因である。ある技術システムが所与の性能を発揮するためには、少なくとも投入要素が安定的に確保可能でなければならない。裏を返せば、投入要素の安定入手が困難な場合、その要素を縮減する方向に技術開発が方向付けられることになる。ローゼンバーグがその例として挙げているのは、産業革命期のイギリスで熟練労働者が機械に代替されていった過程である。彼によれば、当時のイギリスで機械による労働者の代替が進んだのは、製品製造を熟練工に依存していると、熟練工の反発によって生産が完全に停止するという脅威が存在したからである。

3つめの資源不足もまた、投入要素の不確実性と関連している。生産に必要な投入要素が戦争や法規制によって利用不可能になると、従来と同じやり方では既存製品を生産できなくなってしまうため、新たな方策を探索するよう動機づけられることになる。例えば、従来品の代替物を探索するとか、より効率的な製造プロセスを探索するといった方向での探索が進むのである。

ローゼンバーグ自身が主張しているように、彼の議論の特徴は、市場を通じた需要シグナルへの適応という観点から技術発展を説明しようとする需要プル・アプローチを退けていることにある。また、彼は科学的発見によって技術開発が規定されるという技術（科学）プッシュ・アプローチも明確に退けている。その理由は、現存する技術にも科学的説明の及んでいないものが多数存在したり、歴史的には技術的な改良によって駆動された科学的発見も多く存在したりすることにある。要するに、確かに科学的発見によって方向性が規定されるような技術も存在するけれど、そうした因果経路が支配的であるとは言い切れない、というのがローゼンバーグの主張なのである。

また彼は、科学装置が科学の進歩をもたらすという因果関係が支配的であるという主張も受け入れていない (Rosenberg, 1982)。彼によれば、そもそも科学装置と一口に言っても、科学に与えたであろうインパクトや開発の経緯は装置によって異なる。そのため、線形加速器や超遠心機といった特定の領域にのみ関連する装置と、コンピュータのように汎用的に

用いられるようになった装置とを並列して、装置の進歩が科学的発見をもたらしたという一方的な因果関係を想定することはできない。実際には、科学と技術（科学装置）の間に何らかの関係は存在するけれど、それは一方が他方を直線的・直接的に規定するという関係ではないのである（沼上, 1999）⁸。ただし、ローゼンバーグが批判しているのは科学装置と科学との間に一方向的な因果関係を仮定することであって、科学装置が科学に対して影響を及ぼすという因果経路そのものに反駁しているわけではない。

(2). 技術の S カーブモデル

技術の発展速度と研究開発努力の投入量との関係を示したのが、リチャード・フォスターによって提示された技術の S カーブモデルである。これは、理論的な検証によって導出されたモデルではなく、一部の産業で経験的に観察されてきたに過ぎないものである。それでも、資源の投入量に対して得られる成果が発展段階によって異なるという指摘は、後続理論の参照点として機能してきた程度には妥当であると考えられる。

フォスターが主張したのは、ある技術に対する開発資源の投入量と、その結果として達成される技術（の性能）の発展が、図 2-1 のような S 字型の関係にあるということであった。すなわち、ある技術の登場初期には、解決すべき技術的課題が明確に定まっていなかったり、研究を進めるための前提的な知識が整備されていなかったりするために、技術開発に投入された資源量に比べると、成果は芳しくない。開発を前進させる鍵となるような情報が蓄積されてくると、投入する資源量に対して得られる成果も大きくなる。しかしながら、ある一定段階を超えると、その技術に対して改良を加える余地が小さくなっていき、資源を投下しても技術は発展しなくなっていく。

フォスターがこうした S 字型のカーブを提示した前提には、技術の性能向上には自然法則的な意味での限界があるという想定が存在する。S カーブモデルが想定する世界で最終的に技術的成果があがらなくなるのは、その技術固有の限界に接近したことの自然な帰結だ

⁸ Shinn & Joerges (2002) は、これまでの研究で指摘されてきた科学と技術の関係を、次の 5 つに分類している。すなわち、(1) 科学が技術を規定する、(2) 技術が科学を規定する、(3) 科学と技術はそれぞれ別個に発展する、(4) 科学と技術は相互に押し引きする弁証法的 (dialectic) 関係にある、(5) 科学と技術は未分化の連続体を構成している (そもそも別個の存在に分けられない)、である。こうした研究では、科学装置は技術として扱われるのが一般的である。

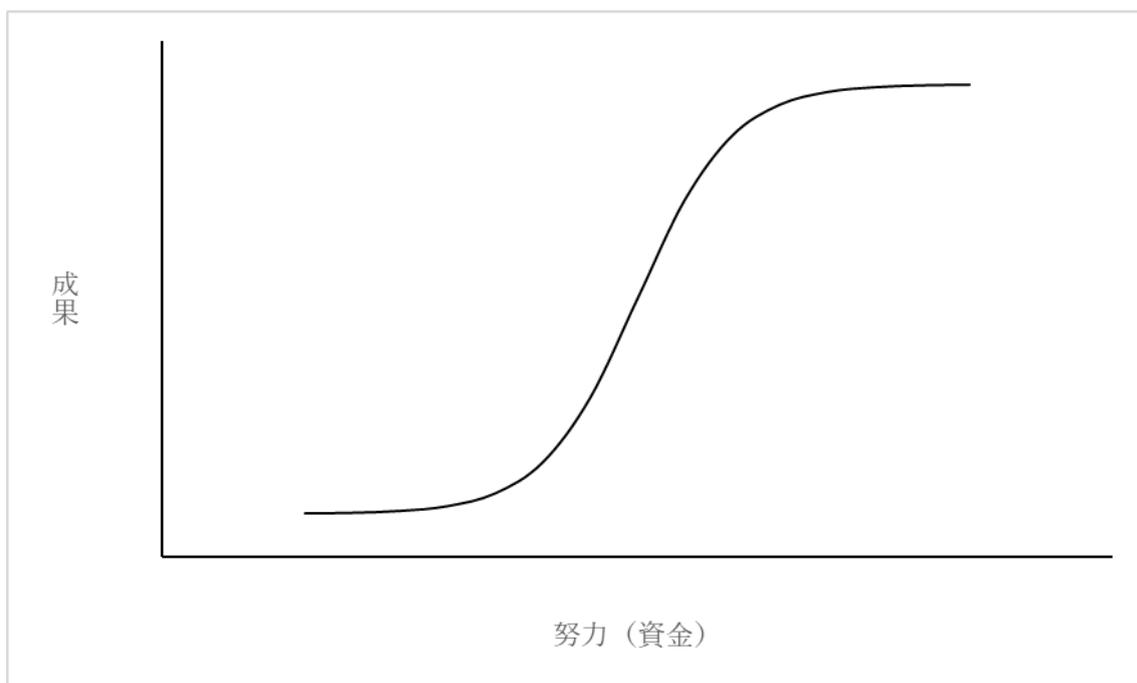


図 2-1. 技術の S カーブ（出典：Foster（1986）邦訳 p.28 をもとに筆者作成）

というわけである。しかしながら、行為者が S カーブにおける自らの位置や、S カーブの終点に至る時期を知ることは困難である。

フォスターが自然法則による技術限界から S カーブが出現すると考えるのに対して、むしろ S カーブを成立させているのが関連する行為主体の期待に過ぎないことを示唆する研究も存在する。その代表例が Henderson（1995）である。ヘンダーソンは、フォトリソグラフィの技術発展史を描くことによって、技術が限界を迎えるという予想は外れてきたとしている。その理由は、要素技術（レンズ）の進歩、顧客の選好と能力の変化、および補完技術の進歩が生じたために、技術システムとしては発展し続けてきたことにある。逆に言えば、S カーブが成立するという予測を立ててしまうのは、要素・補完技術の進歩や顧客の変化が正確に予想されていないか、あるいはその性質が変化しないものとして想定しているからである。こうした想定の下では、技術限界に達しているかどうか明らかではないのに、あたかも技術限界が存在すると思い込んでしまう形で、自己成就的な投資行動が行われることになる。

ヘンダーソンの指摘に基づけば、要素技術や補完的技術が進歩することによって、技術の発展速度は維持されるか、収穫逡減に至るまでの時間は伸長する可能性がある。S カーブの議論に科学装置は登場しないけれど、科学装置が測定や検出の手段として技術システムに

含まれとすれば、科学装置の進歩もまた技術発展の速度に影響を及ぼす可能性がある。この点については、次節で詳細に扱うことにしよう。

2.3. 発展過程における科学装置と科学技術の関係

上述したように、科学や技術の発展過程を示す研究では、科学装置の進歩によって新たな科学的発見がもたらされるとか、それによって技術開発の方向性や速度に影響が及ぶという因果経路は、全く無視されてきたわけではない。そうは言うものの、それらの研究が、科学装置の進歩を発展過程の重要な説明要素として位置づけてきたわけでもないだろう。例えば、ローゼンバーグは科学装置と他の技術をほぼ同一の存在として扱っているし、Sカーブの議論は科学装置という要素に全く触れていない。

そこで本節では、科学装置を科学的実践や技術開発の重要な構成要素に位置づけている研究をいくつか取り上げながら、科学と技術の発展過程をより精緻に示す上で、科学装置という要素が重要であることを示していく。具体的に取り上げる議論は、道具体の役割に関するデ・ソラ・プライスの論考と、堀川裕司の技術の二重性論である。

2.3.1. 道具体の役割

自然に介入したりデータを収集したりするための科学装置や実験手法を「道具体」(instrumentality)と呼称し、科学と技術の発展過程における道具体の重要性を示そうとしたのが、Price (1984)である。彼の問題意識は、より精緻な科学技術史の編纂のために、科学と技術の相互作用を捉え直すことにあった。そこで彼は、科学と技術の相互作用が明瞭に示されるタイミングとして、科学理論や技術の非連続的な進歩に注目した。

プライスは、「通常」の科学や技術を観察対象としている限り、科学と技術には相互作用の余地がないとしている。技術は、その発展経路がひとたび明確になると、自律的なシステムとして進歩を遂げるようになっていく。プライス自身は言及していないものの、ローゼンバーグの技術的不均衡も、技術システム自身が解くべき問題を提示するという自律的な技術進歩像を描いたものと言えるだろう。確かに科学的発見によって技術課題の解決が促進されることもあるけれど、技術の歴史はそこまで強く科学に依存している訳ではない。

科学も、技術とは独立した閉じた世界として描かれてきた。クーンのパラダイム論における通常科学の世界では、知識の発展が内生的なものとして扱われている。科学者共同体が解くべき問題はパラダイムによって提示されているし、パラダイム外部で行われた実験や観

測は非科学的なものとして受け入れられにくい。そのため、パズル解きのように問題解決が進む通常科学の段階では、何らかの新技术を採用することによって科学が大きく進展するという事は起こらない。

裏を返せば、科学と技術の相互作用を観察できる機会が仮にあるとすれば、蓄積的に少しずつ進歩する段階とは全く異なる、科学や技術が非連続的に大きく進展するタイミングだということになる。具体的には、パラダイムの転換や、ラディカル・イノベーションの発生というイベントの進行過程を紐解くことによって、科学と技術の相互作用を理解することができる、というのがプライスのアイデアであった。

事例分析の結果としてプライスが主張したのは、道具体の進歩が、科学と技術の進歩を媒介しており、それが科学理論の抜本的な進歩と、ラディカル・イノベーションの双方に対して大きく貢献してきたということである⁹。天文学の世界では、ガリレオ・ガリレイが望遠鏡を作成することによって、天体を観察できるようになったからこそ、科学革命が起こった。しかしながら、ガリレオは天文学的な発見を目指して望遠鏡を作成した訳ではなく、もともと軍用の用具として発明されたものを改良することによって、予期せぬ形で新しい世界を見出したのである。しかもその後、ガリレオの発見によって望遠鏡の製造が活況となり、ガラス職人が熟練を積むことによって、波及的な効果ももたらした。それは、望遠鏡を製造する熟練工が顕微鏡を生み出し、それが科学者に活用されたことで、細胞や精子の発見がもたらされたのである¹⁰。

このように、プライスは道具体を、科学技術の進歩を説明する重要な要因として取り上げている。道具体は、科学的理解を大幅に進めるような観察の機会を科学者に与えるだけでなく、新たな応用機会を生み出すことによって、それまで十分に対処されてこなかったマーケットニーズを充足するかもしれない。更にプライスは、クーンの言う通常科学的な世界観を

⁹ 実際に事例として取り上げられたのは、(1) 古代の科学と技術（科学なき時代の技術）、(2) 応用科学、(3) ガリレオ・ガリレイの望遠鏡と科学革命、(4) 流電気の発見とその化学的作用である。

¹⁰ プライスが道具体の役割に注目した一方で、そうした道具体の製作者に注目したのが経済史家のジョエル・モキアである。彼によると、17世紀の科学革命や18世紀の産業革命の時点では、同一の人間が科学者と技術者という2つの役割を同時に担っており、そうした人間が科学装置を製作していた。例えば、1600年代初頭に製作された軍事コンパスという測量装置は、ガリレオ・ガリレイが数学的な知識を実際の機械へ落とし込むことによって作成したものである（Mokyr, 2007）。

成立させるものとして、道具体の威力を次のように強調している。すなわち、仮に観察あるいは操作可能な対象に研究や開発のターゲットが限定されるとするならば、科学者や技術者が特定の領域に集中する傾向が観察されるのは、共通のパラダイムや思考法が存在するからではなく、使用している道具体が共通しているからである¹¹。

このように、道具体の進歩によって科学技術が発展するという因果経路は十分に成立しうる。一方で注意が必要なのは、プライスが目的としていたのは科学と技術の相互作用観に若干の修正を加えることであり、道具体こそが科学技術の発展における最大のドライバーであるとまでは主張していないことである。むしろ彼は、従来の研究で見過ごされてきた道具体の価値を再評価し、それが有する科学行政や産業へのインプリケーションを提示することによって、道具体の進歩に関する更なる研究の必要性を指摘していると考えられる。

2.3.2. 技術の二重性

前節で述べたように、技術の発展過程に関する研究は、技術開発における科学装置の存在を考慮してこなかった。これに対して、技術システムが（1）何かを達成する技術と、（2）それが達成したものを評価・計測する技術という 2 つの部分から構成されているという視点に立ち、技術の二重性という概念を提唱したのが、堀川（2003）である。技術の二重性は、科学装置を技術システムの構成要素として捉えた議論として読み替えることができる。というのも、科学装置もまた、測定や検出を目的としたものだからである。

堀川は、評価・計測技術によって技術開発の方向性が左右される可能性を指摘している。そのことを示す上で引き合いに出されたのが、ローゼンバーグの焦点化理論における技術不均衡である。堀川によれば、技術開発の現場にいる行為者は、評価・計測技術というフィルターを通じて開発技術の性能を認識している。これが特に当てはまるのは、人間の五感で

¹¹ 科学と技術が科学装置に依存するという観点を引き継ぐ研究に、Nightingale（2004）がある。ナイチンゲールによると、科学的探究と技術開発の双方に必要な要素として、予測不可能な状態から予測可能な動作を作り出すというものがある。科学的説明には、実験によって予測された動作を再現する必要がある。技術もまた、開発者が望ましいと考える機能を安定的に実現する上で、その動作は予測可能なものでなければならない。こうした予測可能な動作を信頼できる形で作り出し、問題解決を支援するのが、科学装置や実験手法である。これらは、実験が行き詰まる可能性を低下させ、科学者や技術者の集団が特定の興味関心に集中することを可能にすることによって、問題解決の質と速度を高める。

は認識不可能な事象を取り扱うような技術である。このとき、利用可能な評価方法に引きずられる形で、技術開発の方向性は変化する可能性がある。堀川が挙げた仮想例でいえば、ステレオという技術システムの性能評価に用いている評価・計測技術が、空間内の音の分布を評価するためのものである場合、開発者が認識する課題はそれに関連するものに限られるため、技術開発も音の分布を調整する方向へと向かう可能性がある。

CMP (Chemical Mechanical Polishing) 装置産業の事例研究を通じて、堀川は「計測・評価技術の罨」という現象を見出している。これは、より高精度の製品を開発するために、技術と計測・評価技術を相互依存的に進歩させていくことの副産物として、開発の方向性が計測・評価技術によって強く規定されてしまう可能性があることを指摘したものである。計測・評価技術の水準が高まると、従来は気にも留めていなかった部分に加工精度不足が見出されてしまう。真っ直ぐに見えていたものが実は微妙に曲がっているとか、平坦に見えていたものが実は微妙に歪んでいるといった、「技術のあら」が意図せずとも見出されてしまうのである。こうした「技術のあら」は、それを修正することで技術の性能が向上するという期待や、それが何らかの悪影響をもたらすといった懸念を開発者に抱かせてしまう。その結果として、経済的な成果とは直結しない方向に、技術開発が誘導されてしまう恐れがある。

このように、計測・評価技術は技術システムの構成要素であると同時に、技術開発の方向に影響を及ぼしうる存在でもある。堀川は主として技術開発の方向性を議論の主眼に置いていたけれど、それを技術発展の速度と関連づけることも可能だろう。前節で触れた技術のSカーブモデルは、ある水準を超えると技術の性能が向上しなくなると想定している。その理由は、自然法則によって規定される技術限界が存在するからである。しかしながら、ヘンダーソンが指摘しているように、技術システムの構成要素である要素技術や補完的技術が進歩することによって、技術の発展速度が維持されたり、性能向上が止まるまでの時間が伸長したりする可能性がある。堀川の指摘に基づけば、計測・評価技術あるいは科学装置もこうしたシステムの下位要素であるから、その進歩もまた、技術発展の速度に影響を及ぼすと考えられるのである¹²。

ここまで述べた通り、科学装置の進歩は、科学や技術の発展経路（方向性や速度）に影響

¹² 例えば、科学装置の進歩によって新たな現象や原理が発見されたり、理論的に存在が措定されていた現象の観察が可能になったりするといった具合に、科学装置の更新によって科学的知見の応用可能性が高まるという因果経路が考えられる。

を及ぼす可能性がある。これは、科学装置を起点とする技術決定論を意味するわけではない。科学装置も技術の 1 つであるから、装置の原理や設計に関連する科学領域や、技術システム中の要素技術や補完的技術の進歩によって、科学装置におけるイノベーションが達成されるという因果経路も当然ながら存在する。それでもなお、ここで科学装置の役割を強調したのは、科学装置は科学技術の発展に影響する重要な要因として、注目に値することを示すためである。その進歩に注目することによって、科学や技術の発展経路に関するより詳細な説明が可能になると思われる。

2.4. 科学装置のイノベーション・プロセス

きわめて少数ではあるものの、科学装置のイノベーション・プロセスに関する研究も存在する。そこで明らかにされてきたのは、次のような事実である。すなわち、科学装置の発展過程には、科学装置を使用する科学者や、装置の製造を手がける企業といった多様なプレイヤーが関与しており、それぞれのプレイヤーによる分業体制が存在する。具体的には、科学装置の基礎的発明を担う科学者と、それを改良して広く普及させる装置メーカーという役割分担が成立しているのである。以下では、ある科学装置が広範な影響力を有するようになる過程を提示した Rosenberg (1992) と、ユーザー・イノベーションという文脈から科学者と装置メーカーの関係を明らかにしたエリック・フォン・ヒッペルの一連の研究 (von Hippel, 1976; von Hippel, 1988; Riggs & von Hippel, 1994) を見ていこう。

2.4.1. 科学装置の発展過程

科学装置の開発におけるアメリカの研究大学の役割を分析したのが、Rosenberg (1992) である。先述したように、ローゼンバーグは科学装置が一方向的に科学や技術に影響を及ぼすという見方を受け容れてはいないけれど、科学装置が何らかの影響を及ぼすという因果経路の存在自体は認めていた。むしろ、科学装置という存在を重要視していたといっても過言ではない。彼は、重要ではあるが見過ごされてきた大学の基礎研究の機能として、科学装置の発明と普及を挙げている。加えて、基礎研究が経済的なインパクトをもたらす理由の 1 つに、科学装置が様々な分野に応用されることを挙げているのである。

彼にとっての問題は、科学装置が広く社会に対して何らかの影響力を有すると主張する際の、その影響の道筋が体系立てて説明されていないことであった。20 世紀に開発された科学装置の歴史分析を通じて彼が提示したのは、科学装置の起源から普及に至るプロセス

と、科学装置がもたらす波及的な影響である。科学装置の普及や影響のプロセスを端的にまとめると、次のようになる¹³。すなわち、(1) 科学研究での個別具体的な必要性に応じて科学装置が設計される、(2) 開発に成功すると他領域や産業技術への応用可能性が検証される、(3) 応用のための装置改善が行われる結果として普及が進む、(4) 科学者コミュニティが改良された装置にアクセスしやすくなる、そして(5) 異常が観察されやすくなり研究アジェンダの設定に影響が及ぶ。このうち(2)から(5)は、相互に行き来しながら進展していく。

第1に、科学装置の登場である。科学装置は、特定のディシプリンにおける個別特殊な必要性に応じて設計される。例えば、ある種の自然現象の観察や測定能力を高めたような器具が研究で必要となり、その目的に応じた科学装置が設計される、という具合である。この意味において、科学装置の源泉は科学研究におけるニーズにあり、その原型を生み出すのは大学において基礎研究に取り組む科学者である¹⁴。

第2に、他の科学領域や産業への応用が検討される。科学装置の開発にひとたび成功すると、その有用性に関する認識や、装置に関する知識が広まることによって、様々な用途での応用が検討されるようになる。この知識移転は、様々な経路によって達成される。例えば、第二次世界大戦というイベントは、そこで最新の装置や実験手法が用いられたために、動員された多数の企業や科学者にそうした知識を移転する契機となった。また、科学者の領域変更や移住によって、より直接的に知識移転が進む場合もある¹⁵。

第3に、応用のための装置改善が行われる。新規な科学装置は、そのポテンシャルを発揮する際の障害となる様々なボトルネックを抱えている。例えば、性能が低い、性能が予想不可能（安定的でない）、入手困難もしくは高価な部品が必要になるというボトルネックが挙げられる。新規な科学装置の出現は、こうしたボトルネックを解消する方向へと研究活動を

¹³ ローゼンバーグ自身は、こうした箇条書き的なプロセス・モデルを明示したわけではなく、各論的に議論を進めている。ここで要約として提示しているのは、取り上げられたトピックを筆者が再構成したものである。

¹⁴ ローゼンバーグは、大学基礎研究のアウトプットは新たな理論の生成に留まらず、そこには研究用途に開発される装置や技法も含まれるとしている。

¹⁵ この例としてローゼンバーグが挙げているのは、キャベンディッシュ研究所に在籍していた物理学者たちの移住である。彼によれば、物理学者たちが様々な領域へ移っていき、多様な領域へ科学装置を移転したことが、分子生物学という新たな専門分野の出現に大きく寄与したと主張している。

方向付ける。すなわち、装置の改良、補助的な技術の改善、もしくは安価かつ信頼できる素材への置き換えの必要性を目指すような、科学者や企業による研究開発活動の呼び水となる。こうした装置改善は、装置の入手可能性を更に高めることに繋がり、結果として科学装置の普及を促進する。

第4に、装置普及の波及的な影響として、科学者コミュニティが改良された装置にアクセスしやすくなる。強力な研究手段の入手可能性が高まる結果として、例えば国家レベルでの科学研究の生産性が向上すること等が考えられる。この点についてローゼンバーグは、アメリカの科学(者)のパフォーマンスが相対的に高かった理由として、アメリカに強力な科学装置産業が立ち上がったことを挙げている。科学装置産業における装置メーカーは、既存の装置に対する新たなユーザーを探索する強いインセンティブを持っていたため、商用機の開発と普及を熱心に推し進めていった。その結果、科学者も装置を入手しやすくなり、科学研究にも好影響が及んだというのである。

第5に、更なる波及的影響として、様々な領域での研究課題の設定に影響が及ぶ。科学装置は、大学やその他の場所で行われる研究の課題設定に大きく貢献してきた。科学装置が改良された結果として、クーンが言う変則事例に該当するような現象が観察されると、それは観察の前提となっている理論への疑問を生み出すことになる。その疑問は更に基礎的な問いへと繋がったり、新しい問いを生んだりするかもしれない。すなわち、科学装置の存在は、それがなければ追究されていなかったであろう新しい問い(基礎や応用のレベルで)を形成することにも影響していると考えられる。

ローゼンバーグは、科学装置が上記の過程で広範な影響を及ぼすからこそ、科学装置の開発における大学基礎研究の役割を強調している¹⁶。科学装置は、ある科学領域における基礎的な問題と密接に関わっている。だからこそ、科学装置の起源は大学研究にあり、科学装置の性能向上にも基礎研究が必要となる。装置メーカー自身は装置のユーザーではないから、科学的課題とは直接に対峙していない。この意味において、ローゼンバーグは、「もし科学装置が純粋に商業的な基盤を始祖としていたら、そうした環境が更なる装置研究や新規領域の開拓に結びついたかは疑わしい」(Rosenberg, 1992, p.389)としている。このように、科学装置の進歩は、利潤動機から装置の開発に取り組む装置メーカーではなく、科学的な問

¹⁶ 先述の Price (1984) もまた、科学装置に多大な波及効果があるからこそ、大学の基礎研究が重要であるという主張を展開している。

題解決のために基礎研究に取り組む大学研究者によってもたらされる傾向にある。このことが、科学装置を他の技術と分ける特徴となっている。

ローゼンバーグが提示した枠組みでは、主要なプレーヤーとして科学者（コミュニティ）と装置メーカーが登場するけれども、ある特定の装置が発展していく具体的な過程や、その発展過程における装置メーカーの役割を明示しているわけではない。以下では、ユーザー・イノベーションという文脈からこの点に注目した、フォン・ヒッペルの研究を見ていこう。

2.4.2. 科学装置のイノベーション・プロセスにおける分業

フォン・ヒッペルが注目したのは、ある科学装置が生み出されて上市されるまでの過程である。そこでの主要な知見とは、科学装置産業のイノベーション・プロセスにおいて支配的な位置を占めているのは、科学装置のユーザーである科学者だということである。ユーザーがイノベーション・プロセスを主導するというこの知見は、後のユーザー・イノベーション研究の嚆矢となったものである。

von Hippel (1976) は、ガスクロマトグラフ、各磁気共鳴装置 (NMR)、紫外線吸光光度計、および透過型電子顕微鏡の 4 つについて、専門家への聞き取り調査を通じてそれぞれの科学装置におけるイノベーションを特定し、その実現主体が誰であったかを特定している。より具体的には、特定したイノベーションを基礎的なイノベーション (Basic innovations)、大きな改良 (Major improvements)、小さな改良 (minor improvements) の 3 つに分類し、中でも改良の実現主体に注目している¹⁷。

調査の結果明らかになったのは、サンプル中の大きな改良の 81%において、科学者がイノベーションの根幹を担っていることであった。すなわち、装置の改良の必要性を認識し、装置のプロトタイプを作成し、それを利用することでプロトタイプの価値を証明するという活動を行っていたのは、科学者なのである。この事実から出発して、フォン・ヒッペルは科学装置のイノベーション・プロセスを次の 4 点にまとめている。

第 1 に、大きな改良や、それを生み出した装置の作成と価値証明が科学者によって行われる。こうした活動に取り組む科学者の大半は、大学に籍を置いている。ただし、活動に取り組む

¹⁷ 結果として取り上げられたイノベーションの数は、111 である。より細かく分類すると、基礎的なイノベーションは 4、大きな改良は 44、小さな改良は 63 である。フォン・ヒッペルが基礎的なイノベーションに注目していないのは、それが各装置の根本的な原理の発明を指すものであり、各装置について 1 つしか存在しないためである。

動機は科学者によって異なる。例えば、自らの仕事に用いるための道具として装置作成に取り組む者は、その装置がどのように動くのかを気にするというよりも、それが実際に機能するか否かを気にする存在である。逆に、装置がどのように機能するかを知ることが、機能の背後に存在する原則を検証したり、その理解を深めたりするための有益な手段となるから、改良や装置作成に取り組む者もいる。

第2に、公刊物、シンポジウム、直接訪問などによって、「どのようにそれを行うか」(how to do it)に関する情報が拡散される。情報の普及とでも呼ぶべきこの段階では、科学者が装置の有用性や使い方に関する情報を公刊することで、他の科学者や装置メーカーによる発明の採用・模倣を促している。

第3に、少数のユーザーが自ら装置を作成することによって、徐々に装置の普及が進行していく。科学装置に特徴的なのは、少数のユーザーが装置のプロトタイプを模倣して自家製機 (homebuilt) を作成することにより、装置メーカーの商用機投入の前に装置が普及していくことである。フォン・ヒッペルは、ガスクロマトグラフィーと NMR の大きな改良に関するインタビュー調査から、装置メーカーによって商用機が導入される1年も前から、科学者が自家製機を用いた研究結果を論文報告していたことを明らかにしている。

第4に、プロトタイプを模倣する形で、装置メーカーが商用機を開発する。自家製機を製作することが困難な科学者は、装置メーカーから提供される商用機を手にするによって、はじめてその装置を利用できるようになる。装置メーカーは、プロトタイプによって提供される技術的なソリューションを取り入れることによって、開発に取り組む傾向にある。これは、装置メーカーが研究開発と言うよりもエンジニアリングの側面で貢献しており、装置の作動原理に影響するような工夫は行っていない場合が多いことを示している。

まとめると、たいていの場合において、科学装置産業においてニーズを認識し、発明を通じて問題を解決し、プロトタイプを作成し、実際に使用してその価値を証明するのは、装置メーカーではなく科学者である。更に、他の科学者や装置メーカーによる模倣のために、実用性や使い方について情報を公刊することで、発明の普及を促進していたのも科学者である。裏を返せば、装置メーカーは科学者コミュニティでの普及を参照してユーザーニーズを特定し、それに基づいて商業的な普及を推進している存在に過ぎないことになる。このように、科学装置産業では、科学者と装置メーカーの間に分業体制が成立しているのである。

それでは、なぜこうした分業体制が成立するのだろうか。これを各プレイヤーのインセンティブの観点から明らかにしようとしたのが、Riggs & von Hippel (1994) である。彼らは、

オージェ電子分光 (Auger) と化学分析用電子分光法 (Esca) という 2 つの製品群におけるイノベーションを分析した。具体的には、科学的に重要なイノベーションと、事業的に重要なイノベーションの 2 つに分類し、各イノベーションの科学的・事業的重要性を専門家のレーティングによって測定することを通じて、各プレーヤーが担うイノベーションの性質や、それぞれのイノベーションが生じやすい時期を分析している。

彼らの分析結果によれば、科学装置産業では、高い科学的重要性を有するイノベーションほど科学者によって開発され、一方で高い事業的重要性を有するイノベーションほど装置メーカーによって開発されている。具体的には、質的に新しい測定や分析を実行可能にする (新しい機能を有する) ようなイノベーションほど高い科学的重要性を有しており、科学者がそうした装置を開発する傾向にある。他方、装置の利便性や信頼性を増すようなイノベーションほど事業的重要性が高く、それは装置メーカーによって開発される傾向にある。それ以外のイノベーションである、主要性能 (感度や解像度) を漸進的に向上させるような改良は、科学者と装置メーカーの双方によって開発される¹⁸。リグス達の解釈によれば、こうした傾向が生じるのは、科学者と装置メーカーとで特定のイノベーションから獲得できる期待利益が異なるためである。

また彼らは、Auger と Esca のイノベーションが生じる頻度を時系列的に分析している。分析の結果として示されたのは、科学的に重要なイノベーションの頻度が、経時的に減少していくという傾向である (図 2-2)¹⁹。まず観察されたのは、イノベーションの科学的重要性に関する専門家のレーティングは、過去に実現されたイノベーションに対する点数ほど高く、時間が経過するにつれて点数が低下していくという傾向である。これは、Auger と Esca に関するイノベーションの科学的重要性が、経時的に減少していることを示している。一方で、イノベーションの商業的重要性に対する評価は、経時的に漸増しており、後半期になっても評点は下がっていない。また、イノベーションの頻度は、科学者によるものと、装置メーカーによるものの双方ともに、中盤期まで増加傾向にあったものが、後半期に大きく低下するという傾向となっている。

¹⁸ リグスとフォン・ヒッペルが指摘しているように、次の点には注意が必要である。科学装置の種類によって、何が科学的・事業的に重要なイノベーションとして判断されるかは異なる可能性がある。仮にそうであるならば、特定の装置に対して与える科学者と装置メーカーの影響は、そもそも装置自体の特性に左右されていることになる。

¹⁹ 原図には装置の売上高の推移も掲載されているが、ここでは省略している。

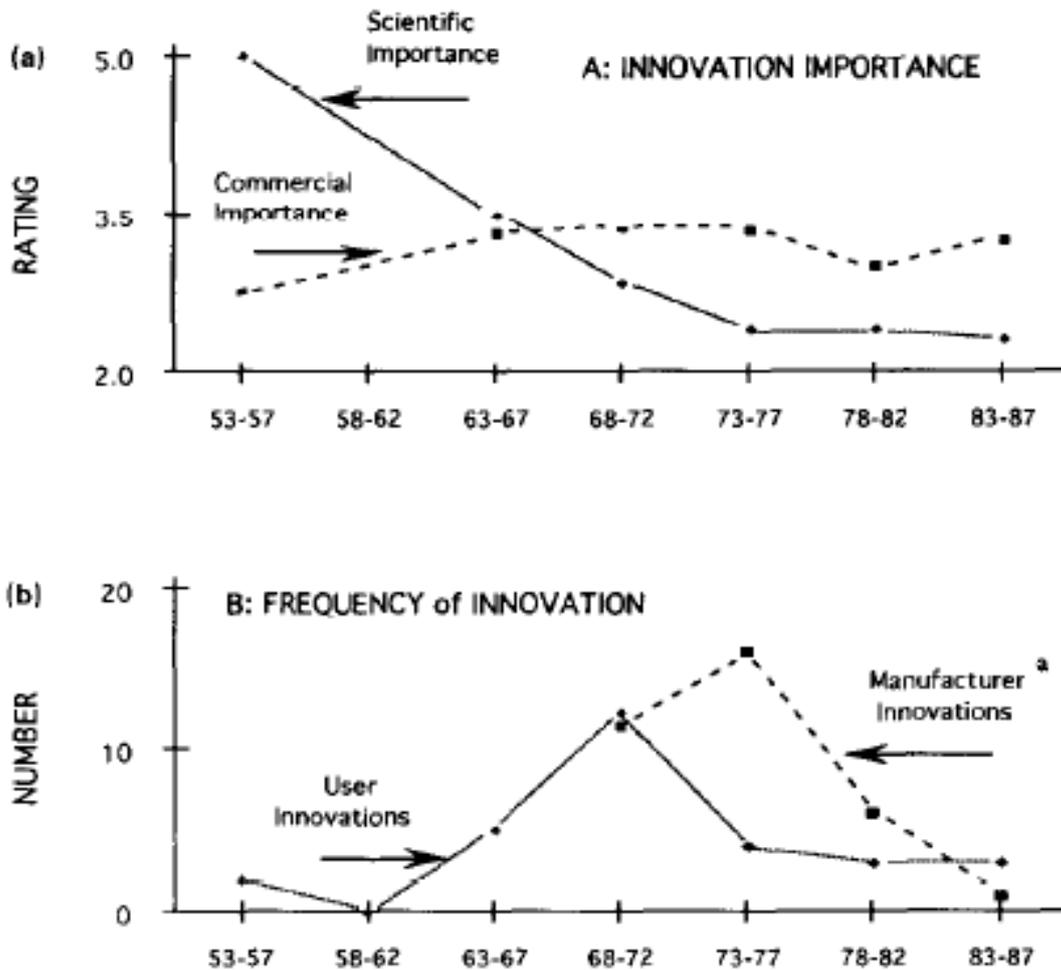


図 2-2. イノベーションの重要度と頻度の推移

(出典：Riggs & von Hippel (1994) p.467, figure2 より一部抜粋)

ただし、なぜ科学的重要性が経時的に減少したり、科学者によるイノベーションの頻度が低下したりするのは、彼らが収集したデータからは明らかになっていない。彼らが指摘しているように、Auger と Esca の性能が物理限界に近づいたり、代替的な装置が出現したりしたために資源配分の優先度が低下したのが、その理由かもしれない。しかしながら、それはあくまで1つの可能性であるため、更なる究明が必要だろう。

2.5. 小括：残された問題

ここまで議論してきたように、科学装置は科学と技術の発展に大きな影響を及ぼす存在であると見なせる一方で、科学装置それ自体が具体的にどのように発展していくかという

問題は、十分に考慮されてこなかった。『Science & Technology Studies』誌が1987年に編成した科学装置特集の巻頭言では、例えば次のような問題に関する回答が十分に与えられていないとされている。すなわち、ある装置がどのように登場し、それがどのような状況下で、あるいはどのようなパターンで普及し、その過程で装置自体がどのように進歩していくのかという一連の問題である (Cozzens, 1987)。これらの問題は、ある装置の普及が進まないのはどのような場合なのか、どのような状況に陥ると装置自体の進歩が止まってしまうのか、という問題に読み替えることもできるだろう。

第4節で議論したローゼンバーグやフォン・ヒッペルの研究は、こうした問いに対して部分的に回答を与えている。彼らの主張を端的にまとめると、次のようになる。すなわち、科学装置の起源は大学の基礎研究にあり、また初期の普及過程においても科学者が大きな役割を果たしている。そうして科学者コミュニティの中で装置が普及していくにつれて、異なる領域での応用可能性が検証されたり、模倣を通じて企業が商用機を開発したりすることにより、装置は更なる普及を遂げていく。このように、装置がどのような背景から誕生するか、その応用や普及がどのようなプロセスで進展していくかという問いに対しては、部分的に回答が与えられている。

ただし、科学装置のイノベーション・プロセスに関する彼らの議論は、大別して2つの点を見落としているように思われる。それは、(1) 科学者による装置選択と、(2) 長期的な装置性能の向上である。1つめは、科学者コミュニティにおける科学装置の普及である。科学者コミュニティにおける装置の普及が、その後のより広範な装置普及に大きな影響を及ぼしているのであれば、ある科学装置がどのような状況下で普及するのかを知るには、科学者による装置選択の論理を解明せねばならない。2つめは、長期的な装置性能の向上である。Auger と Esca の例に基づいてフォン・ヒッペルが示したように、ある装置の基礎性能を大きく向上させるようなイノベーションの頻度は、時間が経つにつれて低下していく。どのような場合に装置の進歩が進むか、あるいはどのような状況に陥ると装置自体の進歩が停滞してしまうのかについて回答を得るには、科学装置における抜本的なイノベーションの頻度が低下していく理由を明らかにする必要がある。以下では、上述した2つの点を解明することの重要性を指摘するとともに、本研究で明らかにする問いを明示する。

2.5.1. 科学者による装置選択

科学装置のイノベーション・プロセスに関する先行研究が明らかにしてこなかった1つ

めの点は、科学者による装置選択あるいは採用である。より具体的には、開発された科学装置が広く普及する以前に、そもそも科学者コミュニティによってそれがどのように受容されていくのかという点は、十分に明らかになっていない。フォン・ヒッペルが指摘しているように、科学装置が社会に普及していく以前には、少数の科学者が装置を自作する段階が存在している。このとき、必ずしも全ての科学者が装置を自作できるわけではなく、自作装置の供給には限りがある。そのため、どこかの段階で装置メーカーが商用機を市場投入しない限り、科学装置が広く普及することはあり得ない。

このとき、装置メーカーによる商用機開発の判断は、科学者コミュニティにおける装置の普及度合いに依存していると考えられる。科学者が使用していない装置の商用機を開発しても、装置メーカーは利得を獲得できないからである。このように考えると、科学者コミュニティの中でその装置が受容されるか否か、あるいは多数の科学者がその装置を選択して、それをを用いて研究に取り組むようになることが、装置の長期的な進歩や普及を決定づけていることになる。この意味で、科学装置の長期的な発展過程を明らかにする上では、その最初期段階における、科学者による装置選択の様相を明らかにする必要がある。そこで本研究は、1つめの問いとして、科学者による装置選択がどのような要因によって左右されるかを明らかにする。

一見すると、科学者がある装置を採用するか否か、もしくは複数の装置からどの装置を選択するかは、科学装置の性能によって一義的に規定される問題のように思われる。仮に科学装置が科学研究で使用される装置ではなく、営利企業のみが使用するものであれば、ある装置が普及した理由の大部分を性能や価格から説明できるかもしれない。しかしながら、科学装置を科学研究のための道具としてみた場合、それが科学者コミュニティの中で普及していくには、科学研究のための手続きとして正当化されなければならない。ある問題を解明する手段として当該装置を使用することが不適切だと判断されてしまうと、装置が普及する見込みは低くなってしまう。このとき、ラボラトリー・スタディーズが明らかにしてきた科学者像や、科学装置の信頼性判断における問題を扱ったコリンズの研究が示唆するように、科学装置の選択には、科学的判断と独立した社会的規準が持ち込まれる可能性がある。

こうした社会的規準の1つとして、本論文が注目するのは、科学者コミュニティにおける装置開発者や装置採用者の地位 (status) である。行為者の地位がもたらす影響に関する研究は、高い地位にある者の行動が社会的シグナルとして機能することによって、他者の行動や意思決定に影響を及ぼすと想定してきた。こうした地位の効果は、科学研究というセッ

ディングにも当てはまることが明らかになっている。例えば、Latour (1987) は、新興領域の科学的業績に対する評価には、その業績に紐付いている科学者の名声が関連するとしている。そこで本論文では、1つめの問いについて具体的に検証する内容として、装置開発者・採用者の地位が、他の科学者の装置選択に及ぼす影響を明らかにする。

2.5.2. 長期的な装置性能の向上

先行研究では十分に明らかにされていない2つめの問題は、長期的な装置性能の向上のパターンである。ローゼンバーグやフォン・ヒッペルの研究は、装置の普及が進んだ後でも、科学者(大学研究者)が科学にとって重要な装置性能の向上を達成すると想定している。すなわち、科学者が科学的に重要な機能を達成するようなイノベーションを実現し、装置メーカーがその成果を取り入れて商用機を更新し、その傍らで科学者が更なるイノベーションを模索する、というサイクルを想定しているのである。しかしながら、フォン・ヒッペル自身が示しているように、ある装置における科学的に重要なイノベーションの頻度は、時間が経つにつれて低下していく。すなわち、新たなものを見たり観測したりするという機能を支える基礎的な性能の向上は、やがて鈍化していくのである。

しかしながら、そうした傾向がなぜ出現するのかについて、明確な回答は存在しないのが現状である。フォン・ヒッペルも指摘しているように、科学装置の性能向上のペースが鈍化していく理由は、ある科学装置が技術限界に達したり、より優れた他の装置が出現したりすることによって、科学者が特定の装置に対して努力投入を行わなくなることにあるのかもしれない。この場合、科学装置の性能向上が時間経過とともに鈍化していく理由は、他の一般的な技術と同様に、Sカーブモデルをはじめとする既存のモデルで説明できることになる。

一方で、装置開発に取り組んできた科学者の中には、技術限界や代替技術の出現とは異なるメカニズムを通じて、装置に関する基礎研究の実施可能性が低下していくことを示唆する者も存在する。そのメカニズムとは、科学装置そのものが、応用や普及の過程で「誰でも扱える装置」へと変化していくことによって、装置研究が成立しにくくなる、というものである。Rosenberg (1992) も指摘しているように、科学装置が広く応用・普及するには、様々な障害を取り除かれなければならない。そこには、使用上の障害も含まれる。科学装置は、専門的な知識を有する科学者によって開発されるため、装置の使用にも専門的な知識や訓

練が必要となる²⁰。知識や訓練の必要性は、装置普及の障害になりうる。そのため、科学装置は、主として装置メーカーの手によって、専門的な訓練を受けた者でなくとも扱えるように修正されていく。

本論文では、装置が誰でも扱えるように改良されることを「汎用化」と呼ぶことにしよう。そして本研究では、2つめの問いとして、装置の汎用化が、装置の基礎性能の向上に対して及ぼす影響を明らかにする。そこで具体的に注目するのは、次の2点である。すなわち、

(1) ある科学装置の汎用化がなぜ、そしてどのように進展するか、(2) 装置が汎用化されることによって、装置開発に取り組む科学者に対してどのような影響が及ぶのか、である。

一見すると、汎用化と装置のイノベーションの間に直接的な関係は存在しないように思われるかもしれない。装置がどれだけ汎用化されていようとも、科学者は装置の基礎的改良に取り組むことができるし、装置メーカーはその成果を商用機に取り込むことができるはずである。しかしながら、こうした想定に反して、装置開発に取り組んできた科学者の中には、装置の汎用化によって自らの立場が失われてきたと主張する者が存在する。そこで本研究では、こうした主張が成立する背景とそのメカニズムの解明を通じて、汎用化によって装置の基礎的な性能向上のペースが鈍化するという因果経路が成り立つのかを吟味する。具体的に本研究で想定するメカニズムは、装置の汎用化によって、大学組織における装置研究

²⁰ 技術の普及における専門的知識・訓練の必要性という観点は、汎用技術の進歩や普及の過程に関する既存研究では、明示的に取り扱われてこなかった。例えば、アメリカの工作機械産業の歴史的発展を事例とした Rosenberg (1963; 1976) は、工作機械産業が発展を遂げた理由として、技術の汎用化を挙げている。アメリカで工作機械産業が成立した 1840 年以前は、工作機械そのものに対する需要は大きくなかったため、繊維産業の機械部門が工作機械を内製していた。1840 年代になると、需要の高まりに呼応する形で独立した工作機械メーカーが複数登場した。当初、これらのメーカーは、特定顧客のニーズに専門特化した機械、およびその製作に必要な技術を開発していた。その後、工作機械メーカーは、様々な顧客や産業に対して転用を推し進める過程で、多様なニーズに対応できるよう工作機械の汎用化を進めていくとともに、新たに獲得した顧客の問題をも解決できるように汎用技術を改良していった。すなわち、顧客に特有の専門技術を汎用化し、その技術を別の顧客や産業へと移転し、新たな顧客に特有の課題にも対処できるよう汎用化された技術をアップデートしていったからこそ、アメリカの工作機械産業は発展を遂げることができたというのである。しかしながら、工作機械の事例では、ある機械を他産業へ応用する試みが比較的容易に進んだものとして扱われている。そのため、工作機械の普及において、ユーザーが専門的知識を学習したり、訓練を受けたりする必要があったのかという論点は含まれていない。

者の価値が低下するために、大学における装置の基礎研究が成立しにくくなる、というものである。

3. 本論文で使用するデータ

質量分析計の発展という比較的長期間にわたる社会現象を分析の対象とするにあたって、明らかにする必要のある事項が数多く存在する。例えば、そもそも質量分析計とは何のための装置でどういった用途に用いられるのか、そこにはどのような要素技術が存在していてそれはどのような進歩を遂げてきたのか、質量分析計はどのような経緯で普及に至ったのか、質量分析計の進歩における科学者と装置メーカーの役割や貢献とは如何なるものだったのか、などである。これらの様々なトピックを特定のデータから一挙に明らかにするのは困難であるため、本論文では目的に合わせて様々なデータを収集した。

本章では、本論文で使用するデータを3つの項目に分けて紹介する。それは、(1) 技術進歩に関するデータ、(2) 普及傾向に関するデータ、(3) 各プレーヤーの行動に関するデータである。質量分析計は1世紀以上の歴史を有する技術であるため、その進歩の過程を詳細に追跡するのは困難である。そこで本論文では、概算の性能データと複数の質的証拠を用いて、質量分析計（の要素技術）の進歩や変化を描いていく。具体的には、専門家によって執筆された資料や歴史記述によって大まかな進歩の様相を確認した上で、量的データや聞き取り調査によるトライアングレーションも踏まえて分析を行っていく。

3.1. 技術進歩に関するデータ

質量分析計の発展の様相を明らかにするには、まずもって質量分析計の技術進歩に関するデータの収集が必要である。しかしながら、質量分析計は登場から1世紀以上も経過している装置であるため、その発展の過程で登場した要素技術の全てをリスト化するのには容易でない。そこで本研究では、質量分析計における主要なイノベーションを特定し、そうしたイノベーションの登場経緯や開発者などについて情報を収集した。

質量分析計における主要なイノベーションを捉えるにあたっては、質量分析計に関連する主要な学会や業界団体によって公刊された歴史資料を参照した。具体的には、日本分析機器工業会が出版している『工業会40周年記念誌』と『工業会50周年記念誌』、質量分析計の専門学会としては世界最大のアメリカ質量分析学会（ASMS）が2002年に発行した記念誌『Measuring mass: from positive rays to proteins』、質量分析の専門家陣が2003年からシリーズ刊行している『The encyclopedia of mass spectrometry』である。これらの資料は、質量分析計の登場時点からの歴史的発展を記載した資料であるため、そこで取り上げられ

ている技術に関する記述を参照することで、主要なイノベーションがどの年代に登場したのかを知ることができる。

これらの資料はいずれも学会や業界の記念誌として位置付けられるものであるから、著者がコミュニティに多大な貢献を果たした者に限定される傾向がある。そのため、資料中に登場するイノベーションに偏りが存在する可能性は否定できない。そこで本研究では、こうした記念誌的な性格を持たない資料として、複数の総説論文（例えば、Borman et al., 2003; Maher et al., 2015）を補完的に参照した。加えて、専門家に対する聞き取り調査においても、主要なイノベーションの登場時期や開発者に関する質問を行うことで、上記文献に記載されている内容の正否を確認した。このように、本研究では複数のデータソースからの情報をクロスチェックするよう努めた。ただし、専門家自身も文献等を通じて相互参照し、それによって記述や発話の内容を変更していると考えるのが当然である。そのため、本来は重要であったイノベーションが過小に評価されるといった類のバイアスを完全に除去できてない点については注意が必要である。

こうして主要なイノベーションを特定した後に、特に本研究で注目する時代の装置進歩に関する情報を収集した。第5章と第6章で分析の対象とするマトリクス支援レーザー脱離イオン化法（MALDI）については、その生みの親として知られる田中耕一氏の書籍（田中, 2003a）、島津製作所のプロジェクトメンバーによる論文（例えば、吉田, 2003a）、装置改良に取り組んだ国外の科学者に対するオーラル・ヒストリー（ASMS, 2013）などを参照した。第7章と第8章で取り扱う装置の汎用化については、ここまでに示した資料から装置の汎用化や簡易化に関連する記述を探索し、その引用文献を追跡することによって情報を収集した。加えて、『工業会 40 周年記念誌』に記載されている国内上市装置の一覧を参照して、汎用化の成果（例えば、コンピュータ搭載装置）の上市年を特定することにより、汎用化の進行過程についての情報を収集した²¹。

²¹ ただし、『工業会 40 周年記念誌』と『工業会 50 周年記念誌』の国内上市製品リストに含まれていない製品も多数存在する。例えば、日本電子株式会社の社史（日本電子, 1986, 2010）に記載されている製品リストによると、日本電子が 2010 年までに上市した質量分析計の数は 78 であるのに対して、工業会記念誌に記載されている製品数は 28 であった。このように、工業会記念誌の製品リストは完全なものではないため、それに基づいて特定した汎用化の成果の上市タイミングについては、本来の上市タイミングと若干の誤差がある可能性には注意が必要である。

続いて、質量分析計の性能の推移や普及傾向である。性能の推移については、文部科学省が2015年に発行した『先端計測分析技術に関する俯瞰報告』を活用した。この資料は質量分析計の専門家（装置メーカーと科学者）の協力のもと作成されたレポートであり、質量分析計の主要性能の一部（分析可能分子量と分解能）について、要素技術ごとの性能の大まかな推移が記されている²²。本論文では、この概算値データの製作者に確認を取り、加えて装置のレンタル用に大学等が公開している装置スペックと照合して、概算値に大きな誤りがないことを確認している²³。この資料は、質量分析計の性能が大きく向上した時代を特定し、分析の対象年代を特定するために活用した。

普及傾向については、上市された全装置について個別に調査することが困難であったため、装置の販売実績情報を参照した。具体的には、アールアンドディ社が発行している『科学機器年鑑』（1995年版から2014年版）を用いて、各装置群について国内市場規模と国内販売台数を調査し、普及傾向と装置単価を調査した。『科学機器年鑑』に掲載されている売上高や販売台数は、装置メーカーや販売代理店による自己申告に基づくものであるため、正確な数値ではない可能性がある。そのため、国内各社の決算説明会資料や聞き取り調査をもとにして、可能な限り掲載数値の妥当性を確かめている。

3.2. 普及傾向に関するデータ

本論文の関心の1つは、科学コミュニティにおける質量分析計の普及にある。装置メーカーが科学コミュニティを参照しながら開発対象を選定していることを考えれば、そもそも科学コミュニティでどのような装置が普及するか（あるいはしないか）が、質量分析計の全体的な技術進歩に大きな影響を及ぼしていることが予想される。しかしながら、『科学機器年鑑』をはじめとする産業レポートは必ずしもセグメントごとの販売実績を詳細に報告していないため、科学コミュニティでの普及傾向を測定するためのデータが別に必要とな

²² 資料に記載されている情報は、あくまでも平均的な性能であり、各年の最高性能を必ずしも表していない可能性がある点には注意が必要である。ただし、第4章で説明するように質量分析計の性能（カタログスペック）の大部分は採用している要素技術によって規定されるため、性能の推移が実態的な傾向を反映していると考えて差し支えないように思われる。

²³ 例えば、大阪大学大学院理学研究科・理学部分析機器測定室のWebページ (<http://analysis.sci.osaka-u.ac.jp/equipment/mass.html>)。

る。そこで本論文では、質量分析計を実験に使用している論文、および質量分析計の開発を目的としている論文のデータセットを構築した。以下では、医学文献データベース MEDLINE/Pubmed がこの目的に見合う特性を備えていることを説明し、データセットの構築手続きやデータが持ちうる限界を検討する。

3.2.1. 論文データセットの取得源

ある科学装置が実験や分析作業に使用されたか否かは、実験手続きとして論文に記載されるのが一般的である。そのため、科学者による装置使用の傾向を確認するには、質量分析計を実験に使用している、もしくは質量分析計の開発を目的とする論文を特定できればよいことになる。さらに、一口に質量分析計といっても多様なタイプの装置が存在し、その用途も様々である。そのため、全ての装置を混同した形で分析を行うよりも、装置のタイプごとに普及傾向を確認し、その上で分析を行えるのが望ましい。要するに、論文データを収集する上では、(1) 個別の論文について質量分析計の使用の有無を識別できること、(2) 使用している装置の種別を識別できることの2つが必須条件となる。

この2つの条件は、一般的な論文データベースでキーワード検索を行うだけでは満たされない。例えば、論文データベースとして学術研究等でも用いられる Web of Science (クラリベイト・アナリティクス社) は、検索対象が論文のタイトルや要旨といった少数の要素に限定されており、論文本文は検索対象に含まれないため、検索によって必ずしも質量分析計との関連の有無を識別できない²⁴。Web of Science では著者によって論文に付されたキーワードの一覧を確認することもできるけれど、キーワードを確認できるのは1991年以降の論文に限定されているため、それ以前の情報を検索することはできない。

そこで本論文では、個別の論文を分析単位として質量分析計の普及傾向を特定しうるデータの取得元として、医学学術文献データベース MEDLINE (Medical Literature Analysis

²⁴ 論文のタイトルや要旨に「質量分析計」という単語が含まれる可能性は、近年になるほど低下している可能性がある。質量分析計の登場当初は、質量分析計の使用自体が研究としての新規性に繋がりうるため、タイトルや要旨にもその旨が記載される可能性は高い。逆に、質量分析計の使用が当然視されるようになっていくと、質量分析計の使用はタイトルや要旨に記載するほどの重要事項ではなくなり、常態的な研究手続きの一部という位置づけになっていく可能性がある。この理由からしても、キーワード検索は妥当なデータ収集方法ではない。

and Retrieval System Online) およびその無料検索エンジンである PubMed を採用する。MEDLINE とは、生命科学領域の文献情報を収集・公開しているオンラインデータベースであり、米国国立衛生研究所 (NIH) の一部門である米国国立医学図書館 (NLM) が運営している。MEDLINE は、1809 年以降に出版された 2200 万報以上の論文の書誌情報を記録しており、生命科学を中心として多様な領域の論文を含んでいる (Canese & Weis, 2013)。医学学術文献データベースであり、かつデータベースへの採録には NIH の評議委員会による審査を経なければならないという特性から、採録されている論文の領域が偏っている可能性は否定できない²⁵。それでもなお MEDLINE/Pubmed をデータソースに選択したのは、質量分析計を実験に使用している、もしくは質量分析計の開発を目的としている論文を客観的に識別する上で重要な機能を有しているからである。

その重要な機能とは、論文内容を指し示す 10 個程度の用語が各論文に対して割り振られていることである。MeSH (Medical Subject Headings) というこの用語は、米国国立医学図書館が各論文に対して統一的に割り振っているものであり、論文の著者自身が付与するキーワードとは異なる。MeSH は実験方法についても割り振られるため、質量分析計に該当する MeSH を含む論文を検索することで、質量分析計に関連する論文を抽出することができる²⁶。また、階層構造を有しているという特性により、ある論文で採用されている質量分析計のタイプを MeSH から識別することができる。質量分析計およびその下位分類を指

²⁵ ジャーナルの審査通過率は約 15% である (NLM, 1990)。実際に歴史資料との照合を試みたところ、年代が古くなるほどデータに欠損 (実際には存在している論文がデータベースに採録されていないケース) がみられた。ただし、本論文で主要な分析対象とする 1970 年代以降に限定すると、聞き取り調査によって確認した質量分析計の主要ジャーナル (例えば、International Journal of Mass Spectrometry) や、歴史資料の引用情報から確認した各応用領域の上位ジャーナルはデータベースに含まれていることから、実態と大きく乖離している可能性は低いと判断した。質量分析計に言及しているだけで実際には利用していない論文をデータから除外するために必要な措置だったとはいえ、質量分析計に関連する論文の全数調査になっているとは限らず、実際よりも過少な数値を報告している可能性がある点には注意が必要である。

²⁶ MeSH では用語の表記揺れも統一されている。例えば、質量分析計の類似語群 ("Mass Spectroscopy", "Spectrum Analysis, Mass", "Analysis, Mass Spectrum", "Analyses, Mass Spectrum", "Mass Spectrum Analyses", "Spectrum Analyses, Mass", "Mass Spectrum Analysis", "Spectrometry, Mass", "Spectroscopy, Mass") は、いずれも "Mass Spectrometry" として扱われる。

し示す MeSH の一覧を、以下の表 3-1 に示す²⁷。

表 3-1 に示したように、質量分析計の MeSH である “Mass Spectrometry” は、「化学的分析法」(Chemistry Techniques, Analytical) のうちの 1 つであり、その上位分類は「調査研究法」(Investigative Techniques), 最上位分類は「分析, 診断, および治療の方法と装置」(Analytical, Diagnostic and Therapeutic Techniques and Equipment Category) となっている。質量分析計の下位分類として 6 つの装置区分が設けられており、それぞれ (1) ガスクロマトグラフィー質量分析法 (GC/MS), (2) エレクトロスプレーイオン化法 (ESI), (3) 高速原子衝撃法 (FAB), (4) マトリックス支援レーザー脱離イオン化法 (MALDI), (5) 二次イオン質量分析法 (SIMS), (6) タンデム質量分析法 (MS/MS) を意味している。この区分のどれにも当てはまらない質量分析計や要素技術には、全て “Mass Spectrometry” という MeSH のみが付与されている。この区分は、装置構成を指すもの (GC/MS, MS/MS) と、要素技術であるイオン化部分を指すもの (ESI, FAB, MALDI, SI) を同列に並べてい

Analytical, Diagnostic and Therapeutic Techniques and Equipment Category

Investigative Techniques

Chemistry Techniques, Analytical

Mass Spectrometry

1. Gas Chromatography-Mass Spectrometry
2. Spectrometry, Mass, Electrospray Ionization
3. Spectrometry, Mass, Fast Atom Bombardment
4. Spectrometry, Mass, Matrix-Assisted Laser Desorption-Ionization
5. Spectrometry, Mass, Secondary Ion
6. Tandem Mass Spectrometry

表 3-1. 質量分析計の MeSH

²⁷ 表 3-1 の数字は、項目が同一階層にあることを明示するために、筆者が便宜的に付したものである。本来の区分に数字は付記されていない。

るため、1つの論文に2つ以上の MeSH が付与される場合もある²⁸。

3.2.2. データセットの構築手続き

データセットは、次に述べる2つの段階を経て構築した。すなわち、(1) 質量分析計に関連する論文の抽出と、(2) Web of Science との接合とデータの整理である。データセット構築の第1段階は、質量分析計に関連する論文の抽出である。前述したように、MEDLINE/PubMed データベースの MeSH を用いることで、該当論文を抽出可能である。しかしながら、技術の登場時期よりもかなり遅れてキーワードとして登場する MeSH もある。すなわち、技術が存在していながら MeSH の分類としては存在していなかったために、正確な MeSH が付与されていない場合が存在する。また、MEDLINE/PubMed データベースは、過去に登録した文献に対して MeSH を再付与しない（シソーラス研究会、2013）。このことは、ある技術が MeSH として登録されていない限り、データベース上では当該技術が存在しないものとして扱われることを意味している。以下の表3-2に示すように、質量分析計の MeSH でも同様の問題が観察された。表3-2の左列に示した現行の MeSH に対応する技術は、それぞれ右列の括弧中の期間に既に存在していたものの、全てが“Spectrum Analysis, Mass”という MeSH として扱われている。裏を返せば、“Spectrum Analysis, Mass”という MeSH が付与されている論文の中に、本来であれば MALDI や ESI という MeSH が付与されていて然るべき論文が存在する可能性があるということになる。

この問題に対して、MEDLINE/PubMed データベースで取得できる論文のタイトルと要旨を検索し、MeSH の補完を行った。具体的には、“Spectrum Analysis, Mass”もしくは“Mass Spectrometry”という MeSH のみが付与されている論文のタイトルと要旨を、Web of Science を用いて全て調査し、表3-2に含まれる各分類の関連キーワードを検索した²⁹。

²⁸ 例えば、MALDI-TOF-TOF という構成の質量分析計は、イオン化部に MALDI を採用しており、かつ装置構成としては2台の TOF-MS を組み合わせた MS/MS である。この場合、単一の論文に対して MALDI と MS/MS という2つの MeSH が付与される。他にも、手法の比較を目的とする論文に対して2つ以上の MeSH が付与されることがある。これは、単一の論文内で2つ以上の方法を用いて実験が行われているためである。

²⁹ 検索したキーワードを括弧内に記す。MALDI (maldi, ms-mald, ms/mald, matrix-assisted laser desorption, matrix assisted laser desorption, seldi, laser-desorption, laser desorption), GCMS (gcms, gc/ms, gc-ms, gas chromatography mass, gas chromatography-mass, gas-liquid chromatography-mass, gas-liquid chromatography mass, gas liquid chromatography mass, gas

現行のMeSH	MeSH 登録時期	それ以前のMeSH（該当期間）
Gas Chromatography-Mass Spectrometry	1975/07/25	Spectrum Analysis, Mass (1971-1976)
Spectrometry, Mass, Electrospray Ionization	2000/06/22	Spectrum Analysis, Mass (1985-2000)
Spectrometry, Mass, Fast Atom Bombardment	1990/05/29	Spectrum Analysis, Mass (1982-1990)
Spectrometry, Mass, Matrix-Assisted Laser Desorption-Ionization	1995/05/26	Spectrum Analysis, Mass (1989-1995)
Spectrometry, Mass, Secondary Ion	1994/05/12	Spectrum Analysis, Mass (1976-1994)
Tandem Mass Spectrometry	2006/07/05	Spectrum Analysis, Mass or specifics (1981-2006)

表 3-2. MeSH の新旧対応表

関連キーワードが含まれる論文に該当 MeSH を補完した結果、補完された論文数はそれぞれ GC/MS が 178 件, ESI が 2921 件, FAB が 195 件, MALDI が 281 件, SIMS が 172 件, MS/MS が 10006 件となった。ESI と MS/MS の補完数が他より多いものの、この 2 つは技術の登場から MeSH 登録までの期間が長いことから、大きな問題は無いと判断した。

第 2 段階は、Web of Science との接合である。MEDLINE/PubMed データベースでは、論文著者の所属等の情報を一括で取得することができないため、異なるデータベースとの接合が必要となる。そこで本論文では、MEDLINE/PubMed データベース中の全ての論文に付与される PMID (PubMed Unique Identifier) という ID を用いて、Web of Science で論文検索を行い、論文著者の所属や被引用回数に関する情報を収集した。また、Web of Science で論文の属性（研究領域、論文分類など）が特定できることを利用して、分析対象論文を英語で執筆された研究論文に限定した³⁰。このため、論文中で著者による実験結果が

liquid chromatography-mass), ESI (electrospray, esi/ms, esi-ms, esi ms), FAB (fast atom bombardment, fab-ms, fab/ms, fab ms), SIMS (secondary ion, sims), MSMS (tandem, MSMS, MS-MS, MS/MS, spectrometry/mass).

³⁰ 具体的には、以下の分類に属する論文をサンプルから除外した。すなわち、Article; Book

報告されているわけではないレビュー論文や、レターやプロシーディングといった通常のジャーナル論文と形式の異なる論文は、データから除外されている。さらに、分析に使用する変数の都合上、別刷り著者が特定できなかった論文もデータセットから除外した。ここまでの処理によるサンプルサイズの変動は、下表 3-3 の通りとなった。結果的なサンプルは、1972 年から 2015 年の間に出版された 15 万 4765 報の論文となった。

3.3. 各プレイヤーの行動に関するデータ

質量分析計の進歩は、科学者の成果であると同時に、企業による開発努力の成果でもある。そして、装置が現在の形に至るまで進歩を遂げてきたことの背後には、単なる合理的選択だけでなく、各プレイヤーの直面していた状況や意図が影響を及ぼしていたはずである。こうした点を分析に反映させるためには、科学者や企業の意図を推察できるような情報が必要となる。本論文では、異なる 3 種類のデータを用いて、各プレイヤーが置かれていた状況や意図を分析に反映させる。

1 つめは、質量分析計の技術開発に関連する論文および学会報告要旨である。論文や学会報告は、科学者や企業が自らの成果を報告する媒体であり、そこでは技術的な特徴だけでな

質量分析計の 関連論文数 N = 219,362	Web of Scienceとの 接合論文数 N = 184,315	研究論文数 N = 166,817	別刷り著者を 特定済みの論文数 N = 154,765

表 3-3. データ整理によるサンプルサイズの変動

Chapter, Article; Data Paper, Article; Proceedings Paper, Article; Retracted Publication, Bibliography, Biographical-Item, Correction, Correction; Addition, Discussion, Editorial Material, Editorial Material; Book Chapter, Item About an Individual, Letter, Meeting Abstract, News Item, Note, Reprint, Retraction, Review, Review; Book Chapter, Software Review.

く、その技術が何にとってなぜ重要であり得るのかも記載されている。例えば、現状の質量分析計のどのような点が問題となっているのか、その技術を深耕することによって将来的にどのような領域への応用が可能になるのかといった内容である。こうした記述は、各プレーヤーが質量分析計に求めていたものや、どういった技術進歩の展望を描いていたのかに関する手がかりを提供してくれる。

質量分析計そのものの開発や改良を目的とする研究論文を扱う雑誌の代表例は、日本では『質量分析』(現 Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan)、海外では『International Journal of Mass Spectrometry』や『Rapid Communication on Mass Spectrometry』である。特に『質量分析』は発刊が1953年であり、科学者による回顧録や展望論文も掲載されることから、比較的長期にわたる情報を収集可能である。他にも、ASMSの関連資料も有益な情報源である。ASMSは、質量分析専門の学会としては世界で最大規模を誇るものであり、2018年度に開催された第66回年次大会での報告件数は3000を超えている(ポスター発表含む)。ASMSは創設50周年の記念事業として、質量分析計の重要イベントをまとめたHistory Postersや、質量分析計の発展に大きく寄与した科学者のオーラル・ヒストリー(Science History Instituteとの共同事業)も公開している。これらの資料は、科学者や企業がどういった成果を目指していたのかを知るだけでなく、その裏返しとして、質量分析計に対してどのようなユーザーニーズが存在していたのかを推察する上でも重要である。

2つめは、業界団体や政府委員会がとりまとめた調査資料である。質量分析計の進歩の全体的な動向については、業界団体である日本分析機器工業会の記念誌や、日本分析化学会による関連書籍(日本分析化学会, 1981, 1996)から大まかに知ることができる。しかし、これらはいくまでも技術進歩の概観を示すものであり、企業の意図や動向を把握するには補完的な資料が必要である。そこで参照したのが、政府委員会や調査団体が発行している調査報告書である。これらは政府予算の増加を求める材料としての意味も兼ねているという意味で純粋な調査資料とは呼びにくい部分があるものの、科学装置産業の競争力を高めるといった目的のもと装置に対するニーズや技術課題を明示しているという意味で、特に企業の開発動向を推察する上では貴重な資料である。日本については、産業技術総合研究所の『日本分析機器産業の国際競争力強化について』、経済産業省『バイオ関連機器に関する産業の現状と課題』、文部科学省『先端計測分析技術に関する俯瞰報告』、工業所有権総合情報館『平成15年度特許流通支援チャート：質量分析』といった報告書が存在する。世界的な動向についても、ASMSの前身となった団体であるASTM Committee E-14 on Mass Spectrometry

(米国試験材料協会の下部組織)の刊行文献や、分析機器の展示会としては世界最大であるピッツバーグ・カンファレンス (PITTCON) の参加記録を報告している論文等から、部分的に推察することができる。

3つめは聞き取り調査であり、これは上記2つの情報を補完するものである。論文や産業レポートに掲載されるのはあくまでも公開可能な情報に限られるため、科学者や企業の意図を正しく反映していない可能性がある。企業が失敗した製品開発について積極的に情報を公開することは稀であろうし、科学者が論文として公開するのも基本的には成功した研究に限られるであろう。このように、論文や特許のデータだけを参照すると、必ずしも実態を反映していない行動のみを捉えてしまう恐れがある。しかも、産業や科学コミュニティから退出した者は公開媒体での情報公開を行わなくなると考えられるため、公開情報からの追究には限界がある。そこで本論文では、質量分析計を用いた研究や製品開発に携わった方々への聞き取り調査を行った。

聞き取り調査では、事前に協力者に質問内容を送付した上で質疑応答を行う、半構造化インタビューの形式を取った。調査では、インタビューの経歴について簡単に確認した上で、研究や事業の内容を公開情報と付き合わせて確認した後に、インタビューが当時(もしくは現在)置かれていた状況や、新技術の台頭に際する対応、質量分析計に限らない全般的な経営戦略や研究方針などについて個別の質問を行った。聞き取り調査には、装置メーカーで研究開発やマネジメントに携わった方々と、質量分析計を含む分析化学領域で研究を行ってきた科学者の方々、計11名にご協力頂いた。以下の表3-4に、聞き取り調査にご協力頂いた方々の一覧を示す。調査協力者に次の対象者を紹介してもらったスノーボールサンプリングによって聞き取り調査の対象者を拡大したため、調査内容にバイアスが生じている可能性がある点には注意が必要である。こうした可能性を鑑みて、本論文では、可能な限り公開資料の記述やデータを併せて参照するなどして、トライアングレーションを行った。なお、以下本論文で聞き取り調査の内容を参照する際には、表3-4に示した番号で出典を表記することとする。

番号	氏名	調査時点での所属と職位	実施年月日	時間	場所
1	山内博志	島津アドコム代表取締役	2017/8/21	15:30-17:05	東京
2	御石浩三	島津製作所経営戦略室技監, 参与	2017/9/15	13:30-15:30	京都
3	山内博志	島津アドコム代表取締役	2017/9/15	13:30-15:30	京都
4	村山和秋	日本電子MS事業ユニットMS技術開発部部长	2017/12/4	13:40-15:50	東京
5	渡邊慎一	日本電子顧問 (特命経営戦略担当)	2018/2/13	11:00-12:00	東京
6	廣川晃大	日本電子ブランドコミュニケーション本部ブランド企画推進部	2018/2/13	11:00-12:00	東京
7	御石浩三	島津製作所経営戦略室技監, 参与	2018/3/16	10:50-13:20	東京
8	小森亨一	日本分析機器工業会業務推進グループ長	2018/3/16	13:30-14:30	東京
9	渡邊慎一	日本電子顧問 (特命経営戦略担当)	2018/4/13	15:00-17:00	東京
10	堀田修	日本電子ブランドコミュニケーション本部本部長	2018/4/13	15:00-17:00	東京
11	金子信	日本電子ブランドコミュニケーション本部副本部長	2018/4/13	15:00-17:00	東京
12	塩野宗一	日本電子ブランドコミュニケーション本部副本部長	2018/4/13	15:00-17:00	東京
13	小熊浩一	千葉大学名誉教授	2018/4/19	14:20-16:20	東京
14	平田岳史	東京大学大学院理学研究科地殻化学実験施設教授	2018/5/10	13:00-15:20	東京

5-6と9-12は清水洋 (一橋大学) と, 13は生稲史彦 (筑波大学) と共同で行ったインタビュアーである。

表 3-4. 聞き取り調査に対する協力者の一覧

4. 質量分析計の基本原則と特徴

本章では、本論文の分析対象である質量分析計の基本原則と要素技術について解説する。質量分析計は、1900年代初頭に登場した技術であるため、その技術体系の全貌を詳説するのは現実的でない。ある要素技術がどの時代に登場したかどうか、その要素技術がいかなる特性を有していたかといった事柄の完全なリストを作成するのは極めて難しいし、また本論文の目的とも合致しない。そのため、本章では、質量分析計の要素技術の中でも教科書や総説論文に登場するような重要技術のみを解説の対象としている。

本章の目的は、次章以降の分析の理解を助けることにある。後章との関連を先に述べておこう。本章で解説する質量分析計の要素技術の中でも、装置の基本性能を決定づける要とも呼べるのが、イオン化部と質量分離部である。本論文の第5章と第6章では、イオン化部の進歩と装置普及に関する分析を行う。具体的には、質量分析計の性能を大きく向上させるようなイオン化部の進歩が生じて、新たなタイプの質量分析計が登場した際に、それが科学者コミュニティの中でどのように普及していくかを分析していく。第7章と第8章では、本章で解説する基礎性能とは異なる次元での装置進歩として、装置の汎用化を取り上げて、汎用化が進行してきた理由や汎用化の影響を議論する。

4.1. 質量分析計の原理

質量分析計とは、物質をイオンの状態にして、イオンの m/z と相対質量を測定することにより、物質の同定や定量を行う装置である(内藤, 2007)³¹。ここで m/z とは、「イオンの質量を統一原子量単位で割った値を、さらにイオンの電荷数の絶対値で割ることで得られる無次元量」(内藤, 2006; Murray et al., 2013; 吉野, 2008)である。相対質量とは、元素の原子量を表す際に用いられる表現であり、その一般的な定義は「質量数 12 の炭素 (^{12}C) を 12 とし、これに対する相対値」(日本化学会, 2015)となっている。すなわち、分析対象の試料中における各物質の相対存在量や比率を特定することによって、対象試料を同定した

³¹ 歴史的には、質量分析器 (mass spectrograph) や、質量分析計と質量分析器の統合名称として質量分析装置 (mass spectroscopy) という用語が使用されていた時期がある。しかし、質量分析計と質量分析器は厳密には異なる機器であり、現存する装置を指す名称として推奨されているのは質量分析計である(内藤, 2007; 吉野, 2007)。本論文には、質量分析器に関連する内容も含まれているものの、簡便のために質量分析計へと表記を統一している。

り、試料中の成分を定量したりするというのが、質量分析計の主な役割である。

蛍光 X 線分析や核磁気共鳴吸収をはじめとして、同定や定量を目的とする分析法は数多く存在する³²。その中でも質量分析計に特徴的なのは、(1)物質をイオンの状態にすること、(2)イオンを電磁氣的に分離することの2点である。こうした特徴を有する質量分析計は、フェムトグラム (10^{-15}g) レベル以下で物質の検出が可能なほど高感度であることや、分子量が大きな生体分子 (タンパク質など) も測定可能であるという利点から有用性が高く、現在は機器分析の中でも最も広く用いられている手法の一つとなっている (長谷部, 2011)。

より具体的な原理を解説しておこう。日本工業規格における質量分析計の定義は、「イオンを一定速度に加速して、電場及び磁場、又は 4 個の電極から構成した四重極場に導き、飛跡を曲げることによって質量スペクトルを求め、存在イオン種の定性及び定量を行う分析方法」(JIS K 0211:2013) となっている。換言すると、原子や分子を「電荷を持ったイオンにすることで、電場や地場で軌道を曲げることができるようにし、その曲がり具合でイオンの質量を求める」(津越, 2015) 手法が質量分析法であり、これを行う装置が質量分析計である。

その基本原理は、磁場中をイオンが移動する際、イオンがその質量に応じて異なる動き方をするという性質に基づいている。すなわち、イオンが磁場の中を通過すると、イオンに対して力が働いてイオンの飛跡が曲がったり、真空中の飛行時間に差が生じたりする。その際に、質量の小さいイオンほど飛跡が曲がりやすかったり、質量の大きなイオンほど検出器までの到達時間が長くなったりするのである。こうした性質を有するために、質量分離部 (アナライザー) 中の磁場の強さを変えることで特定の質量を持ったイオンだけが検出器に到達できるようにしたり、検出器までの到達時間に差が生じることを利用したりするといった操作が可能になり、操作によって様々なものが入り混じっているイオンを分離・検出することができる。分離・検出の結果は、イオンが二次電子増倍管などの検出器に到達し、そこでイオンが電気信号に変換されることで出力される。

質量分析計による分析の目的は質量測定にある。それには分離・検出されたイオンが試料

³² 物理化学的な性質を使用した分析法は、機器分析法 (instrumental analysis) と呼ばれる。機器分析が注目する物質特性は、以下の 7 つに分けられる。すなわち、(1) 物理的性質、(2) 物理化学的性質、(3) 呈色反応、(4) 電気化学的性質、(5) 電磁波に対する性質、(6) 原子の特性、(7) 放射線である (高橋, 1964)。質量分析計は、このうち原子の特性を利用する方法に該当する。

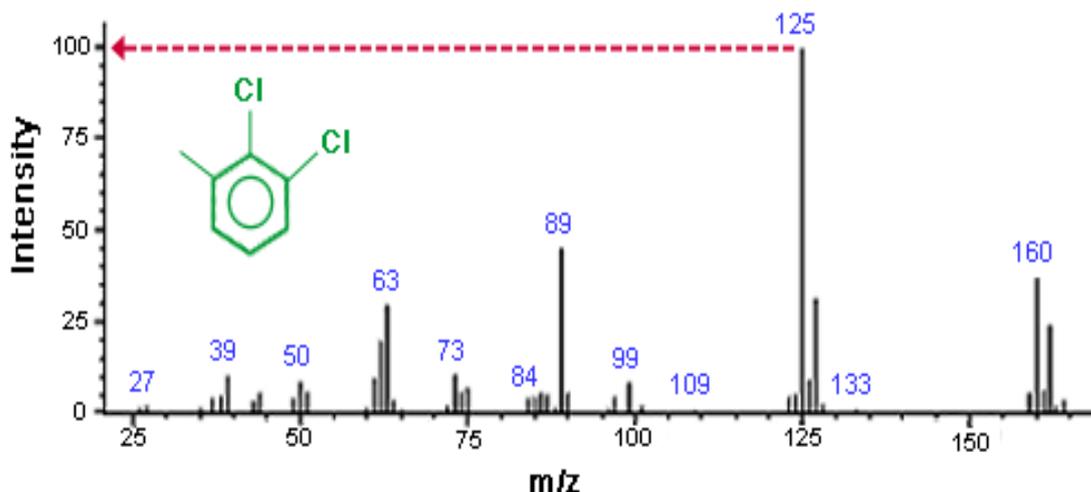


図4-1. 2,3-ジクロロトルエンのマススペクトル

(出典：株式会社島津製作所 Web サイト『GCMS 分析の基礎』)

中にどの程度含まれるかをはじめとして、様々な情報を取得する必要がある。情報の取得は、質量分析計から出力されるマススペクトルを解析することで実現される。マススペクトルとは、横軸に m/z を、縦軸に検出器の信号強度（相対存在量）を取ったスペクトルである。例として、2,3-ジクロロトルエン（分子量 161.03）のマススペクトルを図 4-1 に示す。縦軸は検出器で検出された各種イオンの相対強度を表しており、最も多く生成されているイオンは 100%，その他のイオンはそれに対する相対存在量として描かれている。図 4-1 のマススペクトルからは、様々な情報が得られる。例えば、最も高い質量部分に出現しているピークから分子量情報を得ることができる（図 4-1 中の右端部）。他にも、フラグメントイオン（分子イオンが開裂することで生じるイオン）の分布が低質量側に出現しており、ここから構造情報を知ることができる。また、各ピークのそばに存在する小さなピークからは、対象に含まれる同位体の存在比率が特定でき、そこから分子式中の C や O の数を推定することができる。分子量が同様でも異なる構造を有する物質が存在するため、分子量情報だけでなく、フラグメントイオンや同位体存在比率などの情報と合わせて、物質の同定や定量が行われる。

4.2. 質量分析計の構造と要素技術

質量分析計の性能としてカタログ等で公開されるスペックは 3 つに大別できる。それは、

- (1) イオンの検出が可能な m/z の範囲を示す質量範囲、
- (2) 分離できる m/z の最下限を

表す分解能，そして (3) 検出可能なイオンの最低量を示す感度である。1 つめの質量範囲は，質量分析計によって測定できる試料の範囲を決定するものであり，この範囲を超えた質量を持つ分子は測定することができない。例えば，生体高分子（タンパク質など）を分析するには，質量範囲の大きな装置を用いる必要がある。ただし後述するように，試料の特性によって装置を使い分ける必要があるため，質量範囲の大きい装置を保有しているからといって，その装置だけであらゆる試料を分析できるわけではない。

2 つめの分解能は，種々の m/z を持つイオンをどれだけ細かく識別できるかを指すものである。例えば， $m/z = 1000$ と $m/z = 1001$ を識別できる場合は分解能が 1000， $m/z = 1000.0$ と $m/z = 1000.1$ を識別できる場合は分解能が 10000 というように，微細な差を識別できるものほど分解能が高いとされる。定性・定量の正確性に直結するため，分解能は最も重要な性能の 1 つである。

3 つめの感度は，検出可能なイオンの最低量，すなわち分析に必要となる試料の必要量を表す。質量分析は破壊分析であるため，測定に用いた試料は失われてしまう。試料の中には生体高分子のように入手が難しいものや，精製に手間がかかるものも含まれる。そのため，どれだけ少ない資料で分析できるかどうかは，重要な性能次元となる。

これらの性能を向上させるために，質量分析計の要素技術はそれぞれ発展を遂げてきた。現代的な質量分析計は，図 4-2 に示した 5 つの要素技術から構成されており，大部分がコンピュータによって制御されている。また，イオンは大気中の窒素や酸素分子と衝突すると軌道を妨害されてしまい，検出器まで到達できなくなるため，装置内部は常に高真空に保たれているのが一般的である。5 つの要素技術とは，(a) 試料導入部，(b) イオン化部，(c) イオン分離部，(d) イオン検出部，そして (e) データ処理部である。この中でも上記の主要性能と密接に関連しているのが，イオン化部とイオン分離部である。イオン化部は，測定試料をイオン状にする機構のことで，質量範囲や感度を大きく規定する部分である。イオン分離部は，イオンを m/z ごとに識別できるよう分離する部分であり，分解能に直結する。

多様化する測定対象や測定ニーズに合わせて，各要素技術においても多様な方式が用いられている。図 4-2 には，各要素技術の一部を記載している。質量分析計は，これらの要素技術の組み合わせから構成されており，分析用途にあわせて組み合わせが決定される。例えば，臨床検査における薬物の血中濃度やステロイドの定量においては，液体クロマトグラフによって試料を分離した上で，APCI（大気圧化学イオン化）や ESI（エレクトロスプレーイオン化）によってイオン化するのが一般的だとされている（野村，2013）。原理的には極

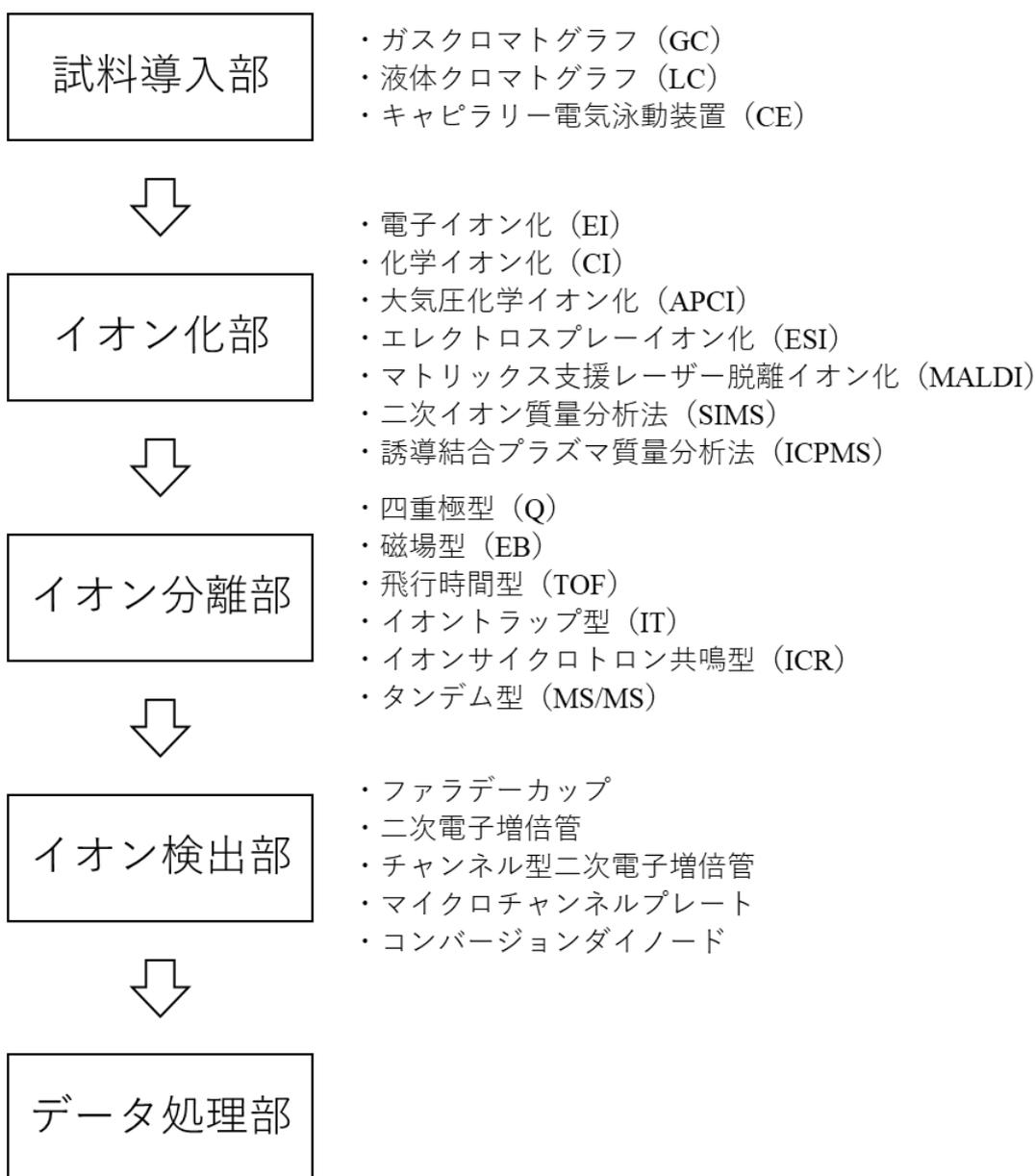


図 4-2. 質量分析計の構成と要素技術

めて多様な装置構成がありうるけれども、実際には要素技術間に相性が存在するため、実用レベルで構成可能な装置は組み合わせの数ほど多くない。

以下では、各要素技術の内容を説明する。説明の目的は、質量分析計における技術進歩の焦点を明確化することにあるため、個別の要素技術の内容について詳述するというよりも、各要素技術の目的や使い分けについて重点的に記述している。

(a). 試料導入部

試料の精製が十分である場合には、直接導入や間接導入という方法を用いることができる。直接導入とは、導入プローブ先端にキャピラリーやエミッター（液体または固体の試料をのせた部品）を装着してイオン化室に導入する方法である。間接導入とは、液体もしくは気体状の試料をリザーバーに入れて、気化させた試料をイオン源に導く方法である。

ただし、目的とする物質への分離が十分でなかったり、イオン化されやすい状態でなかったりすると良好な分析結果を得ることができない（志田, 2001）。もし試料中に複数種の分子が混在している場合、イオン化効率が低い分子や存在量の少ない分子のイオン化が阻害されてしまうからである（吉野, 2017）。そこでしばしば用いられるのが、クロマトグラフと接合する方法である。この方法は、混合物試料をクロマトグラフで分離した後にイオン化室へ導く方法であり、ガスクロマトグラフと接合したガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS）や、高速液体クロマトグラフと結合した液体クロマトグラフ質量分析計（LC/MS）が中心的に用いられている。この他にも、遺伝子研究ではキャピラリー電気泳動装置と接合したキャピラリー電気泳動質量分析計（CE/MS）が用いられることもある（曾我, 2003）。

(b). イオン化部

ここまで述べたように、質量分析計では試料をイオン化する必要がある。特に重要なのが、「試料分子を壊さずに気体状イオンにする」（高山, 2009, p.2）ことである。しかし、質量分析の対象となる試料は多様である。質量範囲でいえば、単純な原子や分子だけでなく、溶媒分子、生体小分子、タンパク質をはじめとする生体高分子、天然物、合成有機分子や合成高分子も測定対象となる。試料の性質も、中性、塩基性、賛成、親水性、疎水性、揮発性（難揮発性）など多様である。試料に対して誤ったイオン化法を用いると、そもそも試料がイオン化されず、結果として正確なマススペクトルが得られなくなってしまう³³。

こうした多様な試料を分析するために、それぞれの試料の特性に合わせたイオン化法が開発されてきた。今日用いられる代表的なイオン化法を表 4-1 に示す。これらはいくまで一例であって、特殊なものまで含めると数十種類ものイオン化法が存在する（高山, 2009）³⁴。

³³ それだけでなく、質量分析計は破壊分析であるため試料が無駄に消費されたり、誤ったイオン化法を選択することでイオン源が汚染されたりすることもある。

³⁴ 他方式に代替されたため用いられなくなったイオン化法も数多く存在する。例えば、試料にレーザーを照射することで気相に脱離させるレーザー脱離イオン化（Laser Desorption

イオン化法	略号	対象化合物 (有機/無機)	試料形態
電子イオン化	EI	有機	気体, 液体, 固体
化学イオン化	CI	有機	気体, 液体, 固体
大気圧化学イオン化	APCI	有機	液体
エレクトロスプレーイオン化	ESI	有機	液体
マトリックス支援レーザー脱離イオン化	MALDI	有機	液体, 固体
二次イオン質量分析法	SIMS	無機	固体
誘導結合プラズマ質量分析法	ICPMS	無機	液体, 固体

表 4-1. 代表的なイオン化法
(出典：長谷部 (2011) をもとに筆者作成)

イオン化法には多様な種類が存在すると述べたけれど、これらはハードイオン化法とソフトイオン化法という 2 種類の方法に大別することができる。この呼称は、イオン化のメカニズムから名付けられたものであって、固有のイオン化法を指し示すものではない。ハードイオン化法とは、イオン化時に試料の分子構造が断片化し、フラグメントイオンが発生しやすい方法を指す。ハードイオン化に分類されるのは、質量分析計の初期から用いられている電子イオン化 (EI) である。EI の原理は、イオン化部で試料を加熱して気化させ、そこに高温フィラメントから放出される熱電子をぶつけることでイオン化するというものである。このとき、試料の分子構造は断片化されてしまうけれども、分子量の小さな試料であれば、生じたフラグメントイオンの分布から元の分子構造を推定できる場合がある。しかし、アミノ酸や糖類のように高極性で分解しやすい官能基を持つ生体分子は、ハードイオン化によ

Ionization) は、試料分子の分解やイオン化効率の低さのために今はほぼ用いられておらず、後継技術であるマトリックス支援レーザー脱離イオン化 (MALDI) に代替されている。エレクトロスプレーイオン化 (ESI) についても、サーモスプレーイオン化という前身技術が存在してただけでなく、近年になってソニックスプレーイオン化やナノスプレーイオン化などの改良版も登場している。このように、普及しなかった手法や改良版の技術まで含めると、これまでに報告されているイオン化法は 50 種類を下らない。

る分析には適さない。そこで追究されてきたのが、分子構造の断片化を起こしにくい方法である。こうした方法はソフトイオン化法と総称されており、高速原子衝撃イオン化法 (FAB)、マトリックス支援レーザー脱離イオン化 (MALDI)、エレクトロスプレーイオン化 (ESI) がその代表例である。

このように、イオン化法は試料によって使い分けられる。裏を返せば、多様な試料の分析を可能にするために、様々なイオン化法が開発されてきたと言える。イオン化法の主たる性能次元は、試料の量、試料の種類・推定分子量、試料の揮発性・溶解性の3つである³⁵。この基準から現存するイオン化法を整理すると、表4-2のようになる。例えば、電子イオン化

イオン化法	対象試料	分子量 (上限)	試料量 (下限)
EI, CI	揮発性の高い物質 (固体・液体) 常温で気体の物質	1,000	1ng
SIMS	熱不安定物質 難揮発性物質 生体関連物質	10,000	数百pmol
MALDI	熱不安定物質 難揮発性物質 生体高分子 合成ポリマー	1,000,000	数fmol
APCI	熱に安定な中性から中極性の有機化合物	1,000	数十pmol
ESI	熱不安定物質 難揮発性物質 生体高分子 極性有機化合物	200,000	数pmol

表 4-2. 代表的なイオン化法の対象試料

(出典：黒野 (2001) pp.66-88, 藤嶽 (2012) p.93 をもとに筆者作成)

³⁵ この3つは、試料の特性によるイオン化法の選択基準 (黒野, 2001, p.66) と符合する。

(EI) や化学イオン化 (CI) は比較的分子量の小さな無機および有機化合物に対して用いられるのに対して、二次イオン質量分析法 (SIMS) は固体状の無機化合物に用いられるのが一般的である (服部ほか, 2006). 生体高分子の分析に用いられるのは MALDI と ESI である. 両者が対象とする試料の特性は似通っているものの, 測定試料の想定分子量, 濃度, および量などに応じて使い分けされる.

(c). イオン分離部

イオン化法と同じように, イオン分離の方法も複数存在する. 上述したように, イオン分離の原理は, 電場や磁場の中を飛行させると, イオンが質量に応じて異なる動き方をするとという性質に基づいている. このときのイオンの運動のさせ方により, イオン分離部の原理を

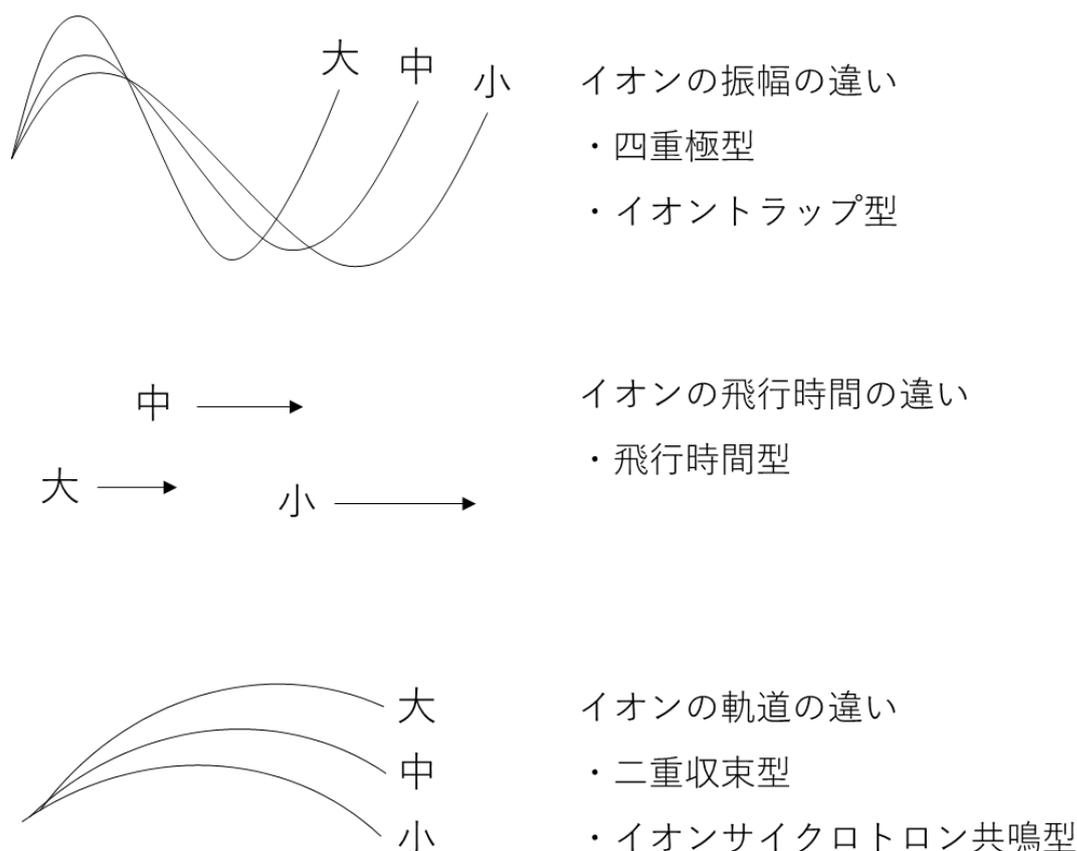


図.4-3. 各イオン分離部におけるイオン運動の模式図

(出典: 特許庁 (2006) p.55 をもとに筆者作成)

分けることができる。具体的には、イオンの振幅の違い（四重極型，イオントラップ型），飛行時間の違い（飛行時間型），そしてイオンの軌道の違い（二重収束型，イオンサイクロトロン共鳴型）である。それぞれの違いを模式化したものが，図 4-3 である。こうした動きの違いを用いて，検出器に到達できるイオンを意図的に選択したり，検出器までの到達時間を特定したりすることによって，イオンの分離・識別を行うのがイオン分離部の大まかな原理である。

どのようなイオン分離の原理を用いるかによって，分解能や質量範囲が変わってくる。イオン分離部についても，測定範囲の拡大や高分解能の実現のために複数のイオン分離法が開発されており，いずれも特性が異なる。各イオン分離部の特性を表 4-3 に示す。質量分析計の登場時に用いられていたのが二重収束型（あるいは磁場型）である。二重収束型装置は，質量分解能こそ高いものの，装置自体が大きく，かつ操作も難しいものであった。その後四重極型や飛行時間型が開発された。最も普及が進んでいるのは四重極型（Q）であり，ガスクロマトグラフ質量分析計で頻繁に採用されているほか，質量分離部を 2 つ以上接合したタンデム質量分析計（MS/MS）でも四重極型が連結対象となる場合が多い。飛行時間型

イオン分離部	略号	質量分解能	質量範囲	装置の大きさ	操作性
四重極型	Q	低	低	小～中	易
二重収束型（磁場型）	EB(BE)	高	中	中～大	難
飛行時間型	TOF	低	高	小～中	易
イオントラップ型	IT	低	低	小～中	易
イオンサイクロトロン共鳴型	(FT)ICR	超高	中	大	難

表 4-3. 質量分離部の特徴（出典：特許庁（2006） p.55 をもとに筆者作成）

は、理論上は質量範囲の制限がないという特性のために、1950年以前から提唱されていた方式である。しかし、分解能と感度が実用レベルに達するまでには約30年の時間を要している。現在は、主にMALDIと組み合わせてMALDI-TOFとして用いられるのが一般的である。イオントラップ型とイオンサイクロトロン共鳴型は比較的近年になって開発されたもので、イオンを限られた空間に閉じ込めるための手法として考案されたものである。生成されたイオンが逐次放出される他の方式と異なり、イオンを装置中に長時間保持できることから高感度分析が可能だという特徴がある。

(d). イオン検出部

イオン分離部によって分離したイオンを検出・記録するのがイオン検出部の役割である。質量分析計が開発された当初は、写真乾板に直接イオンを当てて感光させることによって、写真像として検出するという機構が用いられていた(中田, 2014)。現在は、装置自体の高性能化と多様化に伴って、複数のイオン検出器が開発されている。現在一般的に用いられているのは、二次電子増倍管である。二次電子増倍管とは、高電圧を印加した電極を対抗させながら並べることで、入射した電荷を増加させる構造をもたせた真空管である。これはイオンが二次電子放出材料(酸化ベリリウムなどの金属)の表面に衝突すると二次電子が放出される性質を利用した検出器であり、放出された二次電子を増幅することによって電流として検出するというものである。

二次電子増倍管のほかにも、ファラデーカップ、チャンネル型二次電子増倍器、マイクロチャンネルプレート、コンバージョンダイノード、光電子増倍管といった検出器が存在する(大村・山口, 2007)。これらの検出器は、それぞれイオンから電子への変換効率や時間応答特性が異なるため、他の構成要素に合わせて使い分けされる。

(e). データ処理部

イオン検出部で検出した電気信号をバーグラフやマススペクトルに変換出力する部分がデータ処理部である。かつてデータ処理部の役割を担っていたのは、人間の手作業であった。写真乾板に続く方式としてガルバノメーターがイオン検出部として用いられていた1960年代の様子を、中田(2014)は次のように記している。

「測定といっても、コンピュータ制御などあまりポピュラーではなかった時代である。

スペクトルの記録は古くから使われていた写真乾板を用いる方法よりは多少進歩して、電子増倍管に受けたイオンの量に応じた電流でガルバノメーターの鏡を振らし、その光を巻紙状になった写真の印画紙にあてながら印画紙を一定の速度で移動させ、今で言うプロファイル形式のピークを描かせるといった方式であった。得られた印画紙は、現像、定着、水洗い、乾燥というプロセスを経てようやく1枚のスペクトルとなる。次に、低質量部の炭素 12, 水 18, 窒素 28 などのピークを基準としてピークの m/z を一つずつ高質量側へ数えていく。測定試料の質量数が大きいとこれが結構たいへんな作業であった。そして各 m/z ごとのピーク強度を最大ピークのパーセントに換算して手書きでバーグラフを書いて1枚のスペクトルを完成。一つの試料を測定して現在のよるような通常のバーグラフ形式のスペクトルができるまでに3~4時間を要した。」(中田, 2014, p.97)

こうした状況は、質量分析計とコンピュータの接続が実現されて以降、大幅に改善されている。現在の質量分析計は、マススペクトルの作成だけでなく、分析条件の調整まで含めてコンピュータ制御されている場合が大半である。コンピュータ制御のおかげで操作が容易になるだけでなく、人間では実現不可能な処理速度でマススペクトルを取得できる。加えて、マススペクトルデータベースを参照することによって、未知試料の特定をより簡便に行うことができる。このように、データ処理部は質量分析計の基本性能を大きく高めるものではないけれど、装置の利便性に大きく寄与しているという意味で、間接的に性能向上に貢献している。

4.3. 質量分析計の用途

質量分析計を用いた測定の目的は、分子量測定、フラグメントによる構造解析、イオン量による定量や年代測定に分けられる(志田, 2001)。これらの測定を必要とする領域は実に多様であり、当初は物理学研究のためにのみ用いられる装置であったものが、現在は科学研究のみならず産業でも幅広く活用されている。ここでは、科学研究における用途と、産業での用途を確認しておこう。

質量分析計の起源が物理学にあることは上述の通りだが、第3章で説明したデータでの分類によると、これまでに75の研究領域で質量分析計が用いられている。質量分析計を利用した研究が多い上位20領域について出版論文数を示したのが、図4-4である。図4-4

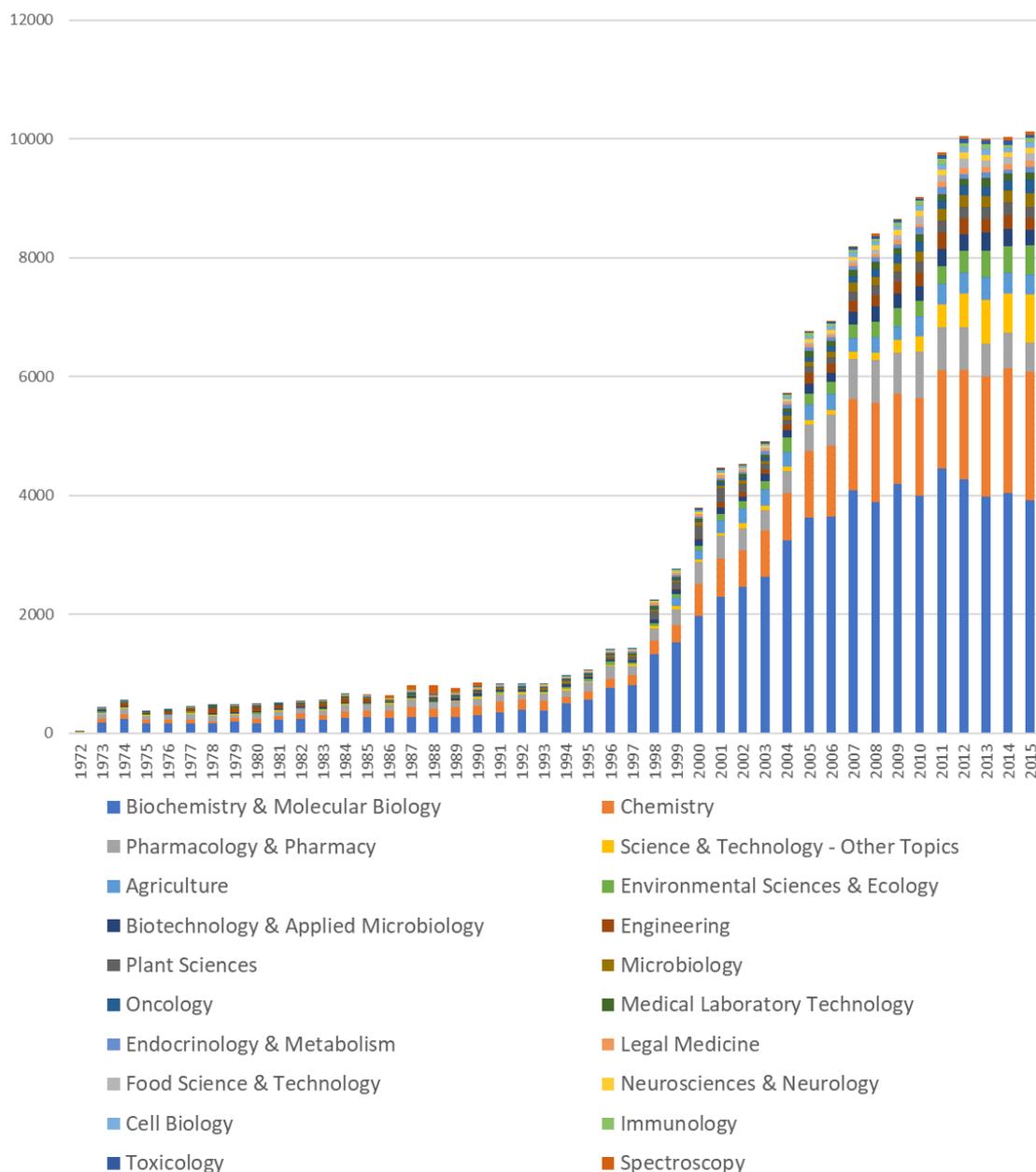


図 4-4. 上位 20 領域における年度ごと論文数

からは、整理に使用しているデータの都合もあり、生命科学や生物学の関連領域で頻繁に用いられる傾向が観察される。その理由は、1990年代に勃興したプロテオミクス（タンパク質の構造や機能を系統的に研究する学問）において、タンパク質の分離と同定技術としての質量分析計に注目が集まったことにある。生命活動を維持する上でタンパク質は不可欠な役割を果たしているものの、分子量が大きいために、その単離や分析には膨大な時間や労力

がかけられていた。また、遺伝子解析の一般的な手法である二次元電気泳動では、高分子・疎水性のタンパク質を分析することは困難であった（山田, 2004）。そこで MALDI や ESI というイオン源を備えた質量分析計に大きな注目が集まったのである。

測定可能な質量範囲の増大とともに、他の領域でも質量分析計が用いられるようになってきた。例えば、薬理学、農業、環境科学、植物科学、食品科学など有機化合物を対象とした測定が中心となる分野で威力を発揮している。他にも、腫瘍学、臨床検査技術、分泌学、法医学、神経科学といった医学関連領域でも質量分析計が活用されている。これに比べると、質量分析計が古くから用いられている物理学や地質学などの領域では、相対的に重要性が低下していると言えるかもしれない。

産業用途としての用途も多様である。中でも質量分析計が重用されているのは、製薬産業、バイオテクノロジー産業、化学産業、環境試験、食品産業である。製薬産業やバイオテクノロジー産業では、特に化合物の定性（構造解析）の点で質量分析計が大きく貢献したとされている（Hoke et al., 2001）。具体的には、候補化合物（ニューケミカルエンティティ）および生体高分子の特性評価、生体試料中の薬物濃度分析、代謝物の同定、不純物や分解生成物の同定に用いられている。医薬品開発では 1 つの製品のために 1 万を超える候補化合物が合成されるため、それを効率よくスクリーニングするためには化合物の特性を素早く分析しなければならない。しかも、化合物の構造が微妙に異なるだけで構造活性が大きく異なることもあるため、（一定以上の分解能を備えた装置に限られるが）類似化合物を正確に識別できる装置が必要とされる。さらに、上市のために必要となる新薬承認申請を突破するには、分解生成物の同定等によって人体に害を及ぼすような副作用が生じていないことを示すデータも必要となる。このように、質量分析計は医薬品開発から臨床検査に至るあらゆる段階で用いられている。ここでは特徴的な例として製薬産業について記述したが、製薬産業以外に、化学（材料）産業も化合物の構造解析の手段として質量分析計を用いている。

定量の手段として質量分析計を用いる産業も複数存在する。代表的なのが、大気や土壌中の汚染物質を検出する環境分析の分野であろう。質量分析計は他の手法に比べて感度が優れているため、汚染物質が微量しか含まれていなくても検出できる可能性が高い。加えて、環境調査に用いる試料は純品ではなく混合物である場合が大半なのに対して、ガスクロマトグラフ質量分析計や液体クロマトグラフ質量分析計を用いることで混合物の分離が可能な点も、環境分析に適している。特定の物質を検出するという機能には用途が多く、例えばドーピングや違法薬物の検出、品質管理、残留ガス分析、爆発物探知システムにも用いられ

てきた。中でも違法薬物の検出では重要な位置を占めており、我が国では定期的に警察が新規装置を導入し、科学捜査研究所や各県警に装置を配布している³⁶。

4.4. 本論文で注目する時代と技術

上述したように、質量分析計は100年以上の歴史を有する科学装置である。本論文では、その中でも主に1970年代以降の装置の進歩に注目している。第7章で議論するように、この時期は質量分析計の普及が本格的に開始した時期であり、質量分析計そのものが大きな変化を経験した時期でもある。例えば、ソフトイオン化法の発展により質量分析計で測定できる対象の範囲が拡大されたのは、上述の通りである。それ以外にも、ガスクロマトグラフとの接合や、マイクロエレクトロニクス技術の応用により装置の汎用化が強力に押し進められたのも、1970年代に入ってからのものである。逆に、1970年代以前の質量分析計は、特定の分野の専門家のみが使用する装置という位置づけに留まっていた。

質量分析計の具体的な進歩とそれによる影響については後章に譲るとして、ここでは質量分析計の普及傾向を確認しておこう。売上高でみると、質量分析計の市場規模（全世界）は、1960年代後半の時点で2千万ドル程度であった。それが、1990年には約3億ドル、2000年には約10億ドル、2008年には約25億ドルにまで成長している（Finnigan, 2016; Schmid, 2002）。特に2000年代前半は年平均10%以上ものペースで成長しており、この成長率は同時期の他装置（核磁気共鳴装置や原子吸光光度計）と比べても非常に高いものとなっている。これは、質量分析計の応用領域が広がっていくことによって顧客層が広がり、民間企業や公的機関も質量分析計を使用するようになったためだと考えられる。

質量分析計の普及が進んだのは民間部門や公的部門だけではない。アカデミアにおいても、質量分析計は重用されるようになってきた。図4.4で示したように、質量分析計の応用分野は近年になるにつれて拡大してきた。また、質量分析計に関連した論文数も大幅に増加している。第3章で説明したMEDLINE/PubMedデータを用いて、図4.5に関連論文数の推移を示した。本図が示すように、1980年代までは論文件数がほぼ一定なのに対して、1990年代を境に急激に論文数が増大している。特に2000年代から急激なペースで論文数が増大しており、近年は年間1万報以上の論文で質量分析計による分析結果（もしくは装置改良の

³⁶ 例えば、2010年度版の『科学機器年鑑』には、2009年度に警察が102台（総計で約25億円）の液体クロマトグラフ質量分析計（LC/MS）を購入したことが記載されている。

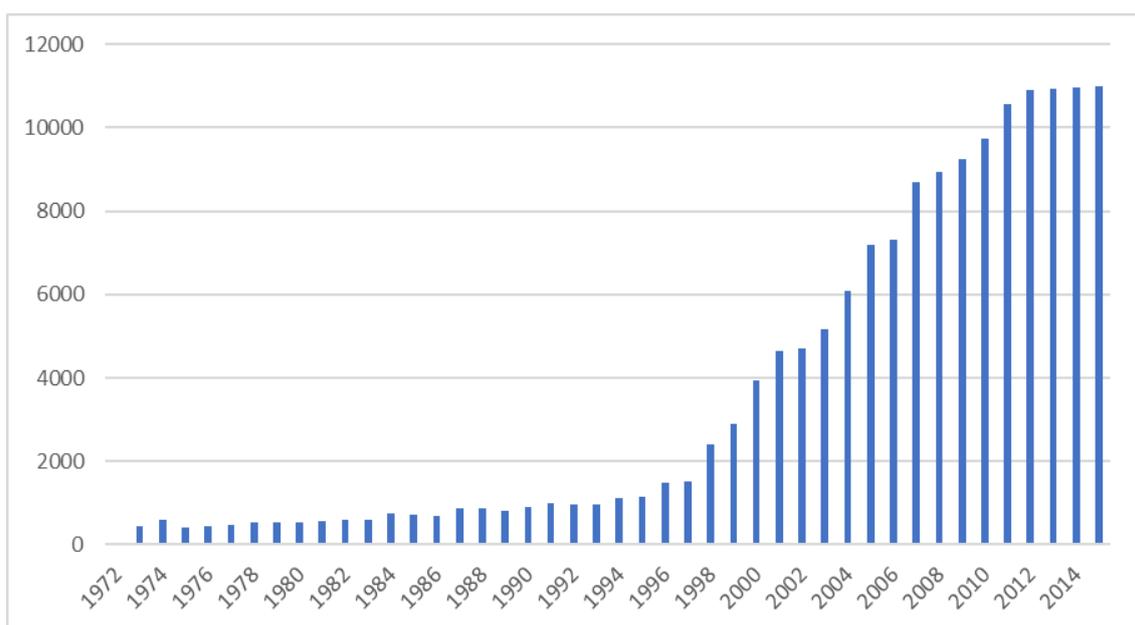


図 4-5. 質量分析計の関連論文数

結果) が報告されている³⁷.

質量分析計の市場規模が拡大していくに伴って、新たな装置メーカーが複数登場したのも 1970 年代以降の特徴である。表 4-4 は、Stephen & Babcock (2010) をもとに筆者が作成した質量分析計の製造企業リストである。本表に掲載しているのは、2010 年時点で質量分析計に参入していた企業と、その企業の創業年や規模である³⁸。表 4-4 に含まれる企業の多くは、古くから質量分析計を一部門として手がけてきた企業（例えば PerkinElmer や Waters Corporation）と、1970 年代以降に参入してきた新興企業（表 4-4 中で売上が掲載されてい

³⁷ 1990 年代後半から急激に論文数が増大した理由として、MALDI や ESI の登場により、質量分析計が生命科学の領域で使用されるようになったことが挙げられる。図 4-4 で示したように、2000 年代以降で質量分析計の関連論文数の割合が最も高い領域は、生命科学（生化学や分子生物学）である。この領域では、ファンドやポストをめぐる科学者間の競争が激しくなったために、近年ほど研究の時間軸が短くなったとされている (Fujimura, 1988)。このように、短期間で論文を量産することが科学者の生存にとって重要な領域で質量分析計が用いられるようになったことは、論文数増大の一因になっている。

³⁸ 表 4-4 は、企業買収や倒産により質量分析計の事業から撤退した企業を含んでいない。例えば、1997 年に Waters Corporation に買収された Micromass（本拠地イギリス）は、LC/MS において高い評価を得ていた企業の 1 つであるけれど、本表には含まれていない。このように、後章の議論において、表 4-4 中に存在しない企業が登場する場合がある。

ない未上場企業)である。分社化や買収により大規模な装置メーカーが台頭してきたのもこの時期である。例えば、Hewlett Packard からの分社化によって設立された Agilent Technologies や、Fisher Scientific と Thermo Electron の合併によって 2006 年に誕生した Thermo Fisher Scientific がこれに該当する。

1970 年代以前は、単独の事業として収益を挙げられるほど市場規模が大きくなかったた

企業名	本社所在地	創業年	2009年度売上高 (百万ドル)
Agilent Technologies	California, USA	1999	4481
Australian Scientific Instruments	Fyshwick, Australia	1998	—
Bergmann Messgeräte Entwicklung	Murnau, Germany	1991	—
Biorad	Hercules, CA	1952	1784
Bruker Corporation	Massachusetts, USA	1980	1114
CAMECA	Gennevilliers, France	1929	—
Comstock	Tennessee, USA	1979	—
AB Sciex	Washington, DC, USA	1981	1150
GSG Analytical Instruments	Bruchsal, Germany	1982	—
Hidden Analytica	Warrington, UK	1982	—
日立ハイテクノロジーズ	Tokyo, Japan	1910	9650
日本電子 (JEOL)	Tokyo, Japan	1948	931
LECO	Michigan, USA	1936	—
KORE Technology	Cambridgeshire, UK	1992	—
Monitor Instruments	Cheswick, PA, USA	1992	—
MKS Instruments	Massachusetts, USA	1961	411
NU Instruments	North Wales, UK	1995	—
PerkinElmer	Massachusetts, USA	1937	1812
Physical Electronics	Chanhassen, MN, USA	1969	—
島津製作所	Kyoto, Japan	1909	2644
Stanford Research Systems	Sunnyvale, CA, USA	1980	—
Thermo Fischer Scientific	Massachusetts, USA	2006	10109
Thermolinear	Bremen, Germany	1998	—
Vitalea Sciences	Davis, CA, USA	2003	—
Waters Corporation	Massachusetts, USA	1958	1575

注: 売上高は、当該企業の連結売上高であり、質量分析計の売上高を意味しない。

表 4-4. 質量分析計の参入企業リスト (2010 年時点)

(出典: Stephen & Babcock (2010) p.79 をもとに筆者作成)

めに、新規参入企業が相次いだり、大型企業同士の買収や統合が生じたりすることは稀であった。第7章で示すように、1970年代以前の質量分析計は、一部の例外を除けば、GEをはじめとする大企業の一部門が片手間で取り扱っている類いの製品だったのである。このように、1970年代以前は独立した産業を形成しているとは言い難い状況にあったのが、1970年代以降から新規企業や大企業の参入が相次いで競争を展開するように変化していったのが、質量分析計産業なのである。

5. 科学者による技術選択

第2章で触れたように、科学装置のイノベーション・プロセスは、装置のユーザーである科学者によって支配されている (von Hippel, 1976; Riggs & von Hippel, 1994). すなわち、科学装置のイノベーションの発端は科学者にあり、装置メーカーは科学者のコミュニティからユーザーニーズを把握することによって、商用機の導入を決定する。このことを前提にすると、科学装置（あるいは特定の要素技術）の進歩や普及を大きく規定しているのは、装置メーカーではなく科学者だといえる。それでは、科学装置の技術進歩を規定しているのはどのような科学者行動なのだろうか。

本章では、科学者による質量分析計の選択行動を実証的に分析する。分析の主眼は、科学者による装置選択には社会的シグナルの介在する余地が存在することを示す点にある。社会的シグナルとして注目するのは、質量分析計を採用した、あるいは開発した科学者の地位 (status) である。分析結果からは、装置の登場初期において、高地位の科学者による装置の採用が後発者による当該装置の採用可能性を高めることが示唆された。ただし、確かに地位という社会的シグナルによって技術選択が誘導される側面はあるけれど、その効果は装置の普及を説明する他の要因よりも小さく、普及の中盤以降になると効果は低減もしくは消滅する。そのため、高地位者の採用によって、ある装置や要素技術が他の選択肢を排除して独占的な地位を形成するという技術選択の様式は、長期的には成立しない。

以下本章では、次の通り議論を進めていく。まず、技術進歩と技術選択に関する既存の議論から社会的シグナルに注目する必要性を明らかにした上で、行為者の地位の影響に関する既存研究をもとに仮説を導出する。次に、導出した仮説を検証するための分析方法と分析のセッティングを説明する。その後分析結果の報告と、それに関する議論を行い、最後に本章の小括を述べる。

5.1. 技術進歩と社会的シグナル

5.1.1. 技術進歩における不確実性

技術進歩に関するこれまでの研究は、技術の性質や進歩の方向性を規定する要因の探究にあたって、様々な立場に依拠してきた。そうした研究の知見は、技術進歩の方向性を規定する2つのメカニズムとしてまとめることができる。以下では、特定の研究というよりも、理念型としての2つのメカニズムに言及する。ただし、以下に示す2つの立場はあくまで

も理念型であり、実際には多くの研究が両者の中間領域に位置すると考えられる点には注意が必要である。

1つめのメカニズムは、技術決定論である。技術決定論の基本的想定は、(1) 技術変化は社会の外で自律的に生じる、(2) 技術の変化が社会の変化を引き起こすという2点にまとめられる (Arthur, 2009; MacKenzie & Wajcman, 1985; Williams & Edge, 1996)。技術進歩の先行要因に関する技術決定論の主張は、技術進歩の様相は技術自身によって決定づけられていると換言することができる。このように、技術決定論では、技術が人間の諸活動とは独立した論理を有しているために、技術によって人間の行為が一方向的に規定されると想定されているのである (加藤, 2011)。この素朴な構図は、科学的知識の発展こそがイノベーションの源泉であり、技術開発における焦点は科学が提示する技術機会によって規定されると考える技術プッシュ・アプローチ (Gibbons & Johnston, 1974; Mayers & Marquis, 1969) に色濃く反映されている。こうした単純な決定論的構図は、イノベーションという社会現象を単純に扱いきりすぎたために、市場需要こそがイノベーションの源泉であると想定する需要プル・アプローチとともに批判を集めた (加藤, 2011)、そのため現在は、次に述べるような社会的次元にまで踏み込んだ議論が行われるようになってきている。

いま1つの立場は、技術の社会的形成論である。社会的形成論は、技術進歩の方向性が経済社会的な文脈に依存することを念頭に置いているという意味で、技術決定論を否定している³⁹。技術の社会的形成論には多様な研究が含まれるものの、技術的要因と社会的要因とが、相互に影響しながら形成されていくプロセスに焦点を当てている点は共通している⁴⁰。また、技術が社会的形成されるプロセスを分析するための枠組みとして、解釈の柔軟性 (interpretative flexibility) という概念が頻繁に引き合いに出されるのも特徴である。ある技術が登場した当初は、様々な社会集団が技術に対して異なる解釈や意味を与えうる。しか

³⁹ これは、社会が技術を規定しているという社会決定論ではなく、技術と社会が相互に構成要素であることを意味している。(Mackenzie & Wajcman, 1999; 宮尾, 2016)。

⁴⁰ 技術の社会的形成論では、説明の対称性が重視される。これは、技術決定論が技術の成功と失敗に対して非対称的な説明を行ってきたことへの反駁として見ることができる。講義の技術決定論者は、ある技術が世の中に定着したのは良い技術だったからだと言明する一方で、定着に失敗した原因を社会的な要因に求める傾向にある。これに対して技術の社会的形成論は、ある技術が定着に成功する場合にも社会的な要因を考察に含める必要があるとしている (Pinch & Bijker, 1984)。

しながら、これらの解釈が柔軟であり続けることはなく、そうした異なる解釈は収斂の傾向を示す。多様な社会集団による解釈や意味づけを通じて技術が形成されていく点に注目しているという意味で、技術の社会的形成論は、社会的な側面を強調しているアプローチだと言える⁴¹。

想定している構図は大きく異なっているものの、技術が進歩の過程で特定の方向に収斂していくと想定している点において、上記 2 つのアプローチは共通している。技術決定論の世界では、進歩の方向はあらかじめ技術自身によって規定されている。対する技術の社会的形成論でも、当初は多様な解釈が存在するにもかかわらず、ある時点から技術進歩の方向が定まっていくことが想定されている。このことは、Bijker (1995) や Kline & Pinch (1995) が事例分析を通じて提唱した、人工物の閉鎖 (closure) と安定化 (stabilization) という 2 つの概念に表れている。閉鎖とは、ある人工物や技術に対する支配的な解釈が出現することである。閉鎖は、ある解釈に基づく人工物が支配的になり、その開発が集中的に進むという安定化を伴う。ここで重要なのは、閉鎖が生じると、人々が特定の解釈を所与として扱いはじめ、他の解釈は採用されにくくなっていく点である⁴²。

しかしながら、いずれのアプローチとも、技術がどの方向に進歩あるいは収斂していくのかという点に対して明確な答えを与えているわけではない。技術決定論について言えば、仮

⁴¹ このように見ると、技術的決定論はあまりにイノベーション・プロセスを単純化して捉えすぎている嫌いがあるため、多様なプレーヤーの相互作用を取り扱う技術の社会的形成論の方が、技術進歩の先行要因を包括的に捉える上で妥当なアプローチのようにも思われる。しかしながら、技術の社会的形成論には、技術開発拠点となる組織や市場を軽視しているとか、回顧的な方法を取らざるを得ないために選択バイアスの可能性を否定できないといった批判が存在する (Bijker, 1993; Podolny & Stuart, 1995; Tushman & Nelson, 1990)。

⁴² この点について、バイカーは自転車の空気入りタイヤを事例として挙げている (Bijker, 1987)。当時、空気入りタイヤに対する開発者とユーザーの解釈は異なっていた。開発者であるダンロップは、車体の振動という問題を解決する手段として空気入りタイヤを捉えていた。一方で、自転車をスポーツ用具として捉えていたユーザー達は、車体の振動を問題視していなかった。このように解釈が対立する中で、空気入りタイヤが広く受け入れられるようになったのは、高速走行性能を実現する手段という新たな解釈が支配的になったためである。直接の契機は、自転車レースの中で、空気入りタイヤを装着した方が高速で走行できるという特性が偶然明らかになったことにある。こうして、空気入りタイヤに対する開発者とユーザーの解釈は、高速走行を実現する手段という点で一致し、そうした解釈が所与として扱われるようになっていった。

に科学的知識の発展により技術機会が提示されるとしても、技術機会に対する解釈は様々ありうるはずである。また、仮に技術それ自身によって解くべき課題が提示されていたとしても、特定の技術的企てを完遂する典型的な方法など存在せず、技術的課題の要求を満たす代替的な方法はいくつも存在するかもしれない (Hughes, 1987)。技術の社会的形成論も、閉鎖や安定化によって解釈が固定化されていく様子は描いているものの、それがどのようなメカニズムによって作動するのかは明らかにされていない。すなわち、上記 2 つのアプローチは、ある集団の中で技術がどのように進歩していくか、より具体的に言えば進歩する技術がどのようにして選択されるのかという問いには必ずしも答えていないのである。

この問いを解く手掛かりは、技術選択を行う人々の意思決定にあるかもしれない。例として、優れた特性を有する新技術が開発され、人々がその採否の意思決定を行う場合を考えてみよう。この新技術が既存技術と容易に対比可能で、明らかに新技術の方が優れている（高性能で安価である）という場合であれば、この新技術はほぼ確実に既存技術を代替すると思われるかもしれない。しかしながら、経路依存性に関する研究 (Arthur, 1989; David, 1985) が示してきたように、実際には必ずしもそうならない。例えば、ネットワーク外部性の存在下では、相対的に劣った技術が市場を支配するという現象が生じうる。ネットワーク外部性は、ある技術のユーザーが増えるほど、ユーザーがその技術から得る便益が増加していくことを指す (Pierson, 2000)。こうした特性を有する技術が既に存在する場合、新技術を採用することの便益が既存技術のそれを下回ってしまう。加えて、補完的技術、制度、インフラストラクチャ等が技術と密接に紐付いていくことで、新技術を採用することの相対的な便益は更に低下することになる。こうした経路依存性が作用する条件を、Arthur (1994) は以下の 4 つにまとめている。すなわち、(1) 膨大な初期投資、(2) 学習効果、(3) 調整効果、(4) 適応的期待である。最初の 3 点を端的にまとめると、費用が高く、技術に関するこれまでの学習が通用せず、補完的技術や制度の恩恵を受けにくいと知覚される程度が高いほど、新技術への移行は困難になるということになる。ここで注目したいのは、4 点目の適応的期待である。これは、技術の将来的な価格や利用可能性に対する期待によって、技術選択の意思決定が影響されることを意味している (Katz & Shapiro, 1985; Katz & Shapiro, 1994)。換言すると、技術選択には予言の自己成就の側面があるのである。

期待という要素が存在するということは、裏を返せば技術選択に伴う不確実性が存在するということでもある。技術の将来的な価格や利用可能性、より根源的には将来的な発展の度合いや普及の度合いを、技術の登場時点に予測することは不可能であろう。そのため、行

為者は様々な手掛かりを用いて不確実性に対処し、技術の将来的な見通しについて判断を下している。こうした判断は、必ずしも実態に基づくものではなく、期待として現れることになる。より現実的な技術選択の場面を例にとって考えてみよう。ある試みを実現するための手段として技術を選択するとき、行為者は合理的な選択を必ずしも行っていない。なぜなら、あり得る全ての選択肢を客観的に評価して序列付けするという試みが困難であるだけでなく、技術の真の質を評価すること自体にも困難が存在するからである⁴³。そのため、行為者は何らかのシグナルに基づいて技術を選択せざるを得ない⁴⁴。このように多大な不確実性が存在する状況での意思決定の実態として、これまでの研究は、行為者が観察可能な何らかの社会的シグナルに依拠していることに注目してきた。

5.1.2. 社会的シグナルとしての地位

新制度派組織論や経済社会学が想定してきたのは、行為者が他者の判断から手掛かりを得て意思決定を行うという社会的な人間像である (DiMaggio & Powell, 1983; Festinger, 1954; Rao et al., 2001)。そこでとりわけ強調されるのが、その領域で成功している者や、正当な存在であると見なされている者との関連性である。企業の模倣行動に関する既存研究は、規模の大きい企業や、成功している企業に模倣の対象が集中することを見出してきた (Haveman, 1993; Haunschild & Miner, 1997)。その理由は、このような傑出した行為者が、不確実性下でも正確な評価を行う能力があるからこそ成功を取めてきたとか、質の高い財や技術を生み出す能力を有する存在として認識されることにある (Stuart, 1998)。換言すると、成功している行為主体は正確な意思決定を行っているはずだという認識のもとで、他の

⁴³ 他者が成果を発展させるほど十分な時間が経過していない限り、ある技術や科学的発見に対する評価は困難なはずである (Merton, 1968; Podolny & Stuart, 1995)。また、技術の社会的形成論が示してきたように、技術の登場当初には多様な解釈が共存しうるため一義的な評価指標が存在せず、それ故にあり得る選択肢を一意に列挙すること自体が困難であると考えられる。

⁴⁴ 第2章でレビューした Rosenberg (1969) の焦点化装置は、こうしたシグナルの1つとして考えることができる。焦点化装置とは、問題解決に向けた資源投入を特定の方向へ向かわせる事象やイベントである。彼が焦点化装置の例として挙げたのは、(1) 技術不均衡、(2) 社会的要因、(3) 資源不足である。これらの焦点化装置は、生産者に対して解くべき問題を提示したり、その問題を解決することによって期待利得が向上するという生産者の期待を醸成したりすることによって、生産者による技術選択を誘導することになる。

行為者は類似の慣習を採用して正当性を獲得しようとしたり (Meyer & Rowan, 1977), 傑出した行為者から高い評価を得ることで自らの評価を向上させようとしたりするのである (Rao, 1994). このように, 不確実性下にある行為者は, 選択肢を正確に評価しているというよりも, 選択肢の質や正しさを推察できるような社会的シグナルに基づいて意思決定を行っている⁴⁵.

こうした社会的シグナルの介在は, 多様な状況に当てはまる. 例えば, 引用すべき論文, 購入すべき製品, パートナーにするべき相手などを選ぶ場面では, 対象の真の質とは必ずしも関係しない社会的シグナルが意思決定に介在することが明らかにされてきた. 中でも注目されてきたのは, 関連する行為者が焦点となる集団内で獲得している地位 (status) あるいは社会的顕著さ (social prominence) が高い者 (あるいはそれと関連の深い事物) ほど, 多大な注目を集めるという現象である⁴⁶. ここでいう地位とは, 社会や集団における行為者

⁴⁵ こうした意思決定が合理的であるとは限らない. 社会的シグナルに基づく選択肢の評価は, 類似の環境下にある他者の実績等を参照して行われるに過ぎないため, 現在の意思決定が正しいことを必ずしも保証しない (Haunschild & Miner, 1997; Rao et al., 2001). ただし, 社会的シグナルによる意思決定の結果として, 当初は質の評価が困難であった選択肢が, 事後的に正当化されるという因果経路も存在する (Lynn et al., 2009).

⁴⁶ 地位と類似の概念として評判 (reputation) が挙げられる. 評判とは, 過去の行為や実績に基づいて間主観的に形成される期待であり, それは評価対象の属性や品質についてのシグナルとなる (Milgrom & Roberts, 1986; Weigelt & Camerer, 1988). 地位と評判の識別を試みる研究 (Jenson & Roy, 2008; Sorenson, 2014; Washington & Zajac, 2005) は, 地位とは社会的序列の差異を示す社会的概念であり, 知覚された品質や価値を捉える評判とは異なる概念であるとしている. すなわち, 評判は対象の実績に基づいて形成されるのに対して, 地位は必ずしも実績に依存しないという区別が成されているのである. 確かに一時点だけを切り取ればこのような区別は可能かもしれないが, 地位が形成される過程に実績が関与することを考えると, 両者を厳密に区分けすることは難しい. 事実, これまでの研究の中には, 地位と評判を厳密に区別していない研究も見受けられる (Elsbach & Kramer, 1996; Sutton & Hargadon, 1996). 例えば, Sutton & Hargadon (1996) は, 個人の技能に関する評判を表すものとして地位を捉えている. このように, 地位と評判を厳密に区別することは難しい. ただし, 想定している場面という点で地位と評判は異なる. 評判が想定している場面は, 取引における情報の非対称性である. この場合, 情報が非対称であるというだけで, 少なくとも誰かは真の質を知っていることになる. 一方の地位が扱うのは, 誰もが真の質を知らない不確実な状況である. 本論文が扱う状況は後者であるため, 術語としては地位を用いることとする. そのため, レビューしている論文が評判と定義しているものを, 本論文中

の階層的位罫 (hierarchical position) に由来する、行為者が獲得する名声や尊敬を表す概念である (Gould, 2002). 尊敬, 影響力, および名声の総量という形で単純に定義されることもある (Anderson et al., 2001; Groysberg et al., 2011). すなわち, 地位の高い行為者とは, 社会階層で高い位罫を占め, 多大な名声や尊敬を集めた者を指している. 地位の形成過程に関する研究では, 地位が行為者の実績と関連することが明らかにされている. 具体的には, 問題解決の過程で行為者に対する評価や信念が確立されていき, そうした評価に基づいて次なる問題解決が実行されて評価や信念が強化されていくというように, 地位の形成は行為者の実績に基づく自己強化的な過程を辿る (Berger et al., 1980; Magee & Galinsky, 2008; Sorenson & Waguespack, 2006).

重要なのは, 地位の高さが行為者 (および関連する事物) の質に関してシグナルを発する点である. 特定の業界でトップの位罫を占める企業は, それまでの実績があったからこそトップの位罫に到達できたのであり, それが可能なだけの高い能力を有しているはずである. このように考えると, 本当にその能力があるかどうかを評価できなくとも, その簡便法として, 行為者の地位から質が推定される可能性は十分にある. このようなシグナルに基づいて多様な選択肢を評価するという方法が機能する保証はどこにもないという意味で, 評価者は無意識的なバイアスに突き動かされるといえる. こうしたシグナルには, 所属, 賞罰, 風評, 製品レビューといった間接的な指標も含まれる. 能力に乏しい科学者がノーベル賞を取ることは難しい, 高品質な製品を製造している企業に対して悪い風評が立つはずがない, 権威ある雑誌で好意的なレビューが掲載されているのだから良い製品に違いない, というように間接的な指標も質に関するシグナルを発しているのである.

5.1.3. 地位の効果

地位に関する既存研究の多くは, 高い地位にある行為主体が独自の恩恵を被っていることに注目してきた. 特に注目されてきたのが, 行為者や事物の質に関する基準が曖昧な状況における地位の効果である. 代表的な効果は, 地位が高いことによって, 財やサービスの品質が (本来よりも) 高く見積もられることである. Podolny (1993) は, 引き受け広告における投資銀行の並び順によって地位を測定し, 投資銀行の地位が高いほど, 証券の引き受けを行う際のスプレッドが高いことを示した. 類似のセッティングとして, 会計事務所の解散

で地位の効果として記述している場合があることに注意されたし.

というセッティングを用いた研究もある。同様に、Benjamin & Podolny (1999) は、専門家によって同等の品質であると評価されたワインを比較し、高地位のワイナリーが販売しているワインほど販売数量が多いことを発見した。金銭的な便益ではなく、高地位者が高い評価を得たり、時には依怙鼻肩のような裁定をされたりすることを示す研究もある。Jensen & Roy (2008) は、2002年に会計事務所アーサー・アンダーセンが解散した際に、企業が新たな監査役を選択せねばならなくなった状況に注目し、地位の高い会計事務所ほど選択の集合に残り続けたことを明らかにしている⁴⁷。また、メジャーリーグにおけるアンパイアリング (Kim & King, 2014) は、高い地位にある選手ほど有利な判定を受けるとしている。具体的には、メジャーリーグのオールスターゲームへの出場回数をもとに地位を測定し、地位の高いピッチャーほど裁定が甘くなる（ボール球がストライク判定される可能性が高くなる）ことを示している。こうした現象は、全米大学運動協会によるポストシーズン・トーナメントへの招待チームの選択 (Washington & Zajac, 2005)、NBAにおける選手採用の意思決定 (Ertug & Castellucci, 2013)、標準策定コミュニティにおける技術プロトコルに対する注目度 (Simcoe & Waguespack, 2011)、後世に名を残す美術家の特徴 (Lang & Lang, 1988) といった様々な領域で観察される。

地位の高い行為者と関連を有することによってスピルオーバーが生じることを示す研究も、数多く存在する。代表的なのは、市場で高い地位にある企業と提携を結ぶことの効果だろう。Stuart et al. (1999) は、高い地位にある企業と提携を結んでいたり、高地位の投資家と関係を有しているバイオベンチャーほど、新規上場までの期間が短く、かつ新規上場時の評価額が高くなることを発見している。これは、高地位の主体と関連を持っているということとは、それだけ経験豊富な行為主体から高い評価を得ているということであり、そうした評価を得ているのだからそのバイオベンチャーは将来有望に違いないというシグナルを発するためだと考えられる。こうした地位のスピルオーバーは、ビジネススクールの教員 (Rindova et al., 2005)、参入する産業のカテゴリ (Sharkey, 2014)、人材の出身大学 (Phillips & Zuckerman, 2001; Stuart & Ding, 2016)、映画に登場する俳優 (Rossman, Esparza, &

⁴⁷ 評判という用語を使用して同様の現象を指摘する研究も存在する。例えば、Dollinger et al. (1997) は、ジョイントベンチャーを設立するかどうかの意思決定に、相手企業の評判が関連することを明らかにしている。ドリンジャー達は、被験者に相手企業に関するスクリプトを読ませた上で質問に回答してもらおうという実験手法を用いているけれど、スクリプトの記述では、地位と評判がほぼ同義のものとして扱われている。

Bonacich, 2010) などからも生じうる⁴⁸.

行為者が経験豊富な行為主体からの評価を参照しているという意味では、第三者による認証も地位のスピルオーバーと見なせるだろう。オープンソースのソフトウェア開発者コミュニティ Advogato.org を調査した Stewart (2005) は、開発者コミュニティの中で地位の高い者から認証されている開発者ほど、自らもコミュニティの中で高い評価を得ることを示している。また、アメリカの自動車産業におけるコンテストに注目した Rao (1994) は、コンテストに勝利し続けることによって、企業の生存期間が伸張することを示している⁴⁹。コンテスト等を通じて発行されるランキングも、選択肢間の比較を可能にしたり、行為者の序列を生み出したりする。例えば、ビジネス雑誌で毎年公表される経営者ランキングによって地位を測定した Wade et al. (2006) や Graffin et al. (2008) は、トップランクの経営者ほど報酬を獲得していること、およびそうした経営者と協働するトップマネジメントチームのメンバーもその恩恵を受けることを明らかにしている⁵⁰。

⁴⁸ 高地位者の所属しているカテゴリによっては、スピルオーバーが生じない場合もある。組織の活動領域や活動内容と合致しない高地位者と関連を有していても、その高地位者に能力があるとは見なされにくいためである (Sharkey, 2014)。このことは、同一産業内の組織間ほど相互参照や模倣が生じやすいという組織生態学の知見と共通している (Hannan & Freeman, 1989; Porac & Thomas, 1989)。

近年の研究の中には、行為者や事物のカテゴリと地位の関係を超えて、カテゴリによってそもそも地位が異なるという主張を展開するものもある (Carroll & Swaminathan, 2000; Zhao & Zhou, 2011)。

⁴⁹ Rao (1994) は、コンテストに勝利することで企業が能力に関する評判を得ることを説明の主眼としていて、第三者による評価そのものを重要視しているわけではない。しかしながら、コンテストが自動車産業における社会序列を決定する媒体の 1 つであると考えれば、コンテストの開催主体や参加者から認証を得たというように考えることも可能だと考えられる。

⁵⁰ Wade et al (2006) によれば、ランキングによる地位向上の効果は、それが最初に告示された時点で最も強く、長期的な影響はむしろマイナスである。同様に、負のスピルオーバー効果を指摘している研究に、高地位者の存在がリーダーの出現を阻むことを発見した Kehoe & Tzabbar (2015)、特定の科学者の地位向上によって近接する科学領域への傾注が削がれることを示した Reschke et al. (2017)、地位の急激な向上によって離婚率が增大することを示した Jensen & Kim (2015) が挙げられる。

5.1.4. 科学と技術における地位の効果

ここまで述べてきたような地位の効果は、科学者行動や技術進歩に関する研究でも、古くから観察されてきた。Merton (1968) が示したマタイ効果 (Matthew effect) がその典型である。マートンが指摘したのは、科学コミュニティにおける階層の位置によって配分される資源の量が変わり、その結果として科学者の業績や認知度に格差が生じるという構造であった⁵¹。こうした構造は、(1) 階級の異なる研究者が協働する場合と、(2) 階級の異なる科学者が類似の成果を同時期に報告した場合という、2つのケースで観察されている。具体的には、これら 2つのケースにおける個別の科学者の貢献は同程度であると考えられるはずなのに、既に有名な科学者のみが評価を受ける一方で、まだ名が立っていない若手の研究者は蔑ろにされるという現象が観察されたのである⁵²。

このように、科学者や科学的業績の評価が地位によって左右されるという現象の背景として、科学者が大量の情報の中から重要な手掛かりを探す手段として地位を参照していることも明らかにされてきた⁵³。しばしば参照されるのは、論文を執筆している科学者の所属や、参照している文献の著者である。人類学の視点から科学者行動を探究した Latour (1987) は、次のようなスクリプトを提示している。

- A. 「小人症に対する新しい治療法があるのに、どうしてそんなことが言えるのかい？」
- B. 「新しい治療法？ どうして分かる？ でっち上げにすぎない。」
- A. 「雑誌で読んだ。」
- B. 「ほう、色刷りの付録にあったんだらう。」

⁵¹ マートン自身は地位という術語を使用していないものの、科学者の報酬は認知度であるという構図を Parsons (1950) から引き継いでいることから、地位の高さと評価の関係を扱っていると考えて差し支えないだろう。

⁵² ただし、著名な科学者と協働した時点では十分に評価されなくても、その後のキャリアで単独の成果を出すことに成功すれば、遡及的に協働での役割を再評価される可能性はある (Merton, 1968)。

⁵³ Ackoff & Halbert (1958) は、大学研究者と企業研究者あわせて約 1500 名に対する調査から、化学分野で公刊された論文の中で少なくとも 1 名以上に読まれるものは約 0.5% しかないことを指摘している。1958 年時点よりも科学者がアクセス可能な論文数は増大していることは想像に難くないことから、現在でもこの背景は通用すると考えられる。

- A. 「いや、『ザ・タイムズ』さ。それを書いたのは、ジャーナリストではなくて、博士号を得ている人物だ。」
- B. 「それがどうしたって言うんだ？RNA と DNA の違いも知らない失業中の物理学者かなんかだろう。」
- A. 「いや、著者は『ネイチャー』にノーベル賞受賞者のアンドリュース・シャリーと六人の共同研究者が発表した論文を引用していた。その大きな研究は、国立衛生研究所、国立科学財団といったあらゆる類の巨大機関から資金を得て行われたもので、ホルモンのどのような配列が成長ホルモンを放出するのかについて語っていた。それは何の意味もないのだろうか？」
- B. 「えっ、それを最初に言うべきだよ。…それなら話は別だ。正しいと思うよ。」⁵⁴

このスクリプトでは、小人症に新しい治療法があることを A が B に説得している場面が描かれている。B は、当初 A の発言を信用していなかったが、新しい治療法を報告している論文の著者が博士号取得者であること、しかもその著者がノーベル賞受賞者の論文を引用していることを知り、最終的には A が提示した新しい治療法の存在を信用するようになっていく。このような科学者行動の存在から、Latour (1987) は、とりわけ何が重要な貢献となるのかに関する議論に決着が付いていないような不確実な研究領域では、業績に紐付いている科学者の名声が、科学的業績に対する専門的な評価に影響を及ぼすと主張している。

この主張は、地位の高い科学者ほどその業績を高く評価されやすいために、もしくは高地位者が手がけているのだからその領域は将来有望に違いないという判断が働いてしまうために、後発の科学者とその領域に参入しやすくなる可能性を示唆している。この可能性を技術開発の文脈で実証したのが、Podolny & Stuart (1995) である。ポドルニー達は、アイデアやイノベーションが資源と傾注 (attention) をめぐって競争している中で、ある技術が他者の関心や傾注を惹きつけて「勝者」になる一方で、技術的に行き詰まってしまう「敗者」が存在することに注目し、勝者と敗者を分かつ要因を地位の観点から探究した。特許の引用

⁵⁴ 川崎・高田訳 (1999), pp.50-51. 簡便化のために、発言者の名称を省略している。原典中の発言者名称は、A がミスター・エニイボディ (Mr. Anybody), B がミスター・サムボディ (Mr. Somebody) である。

関係によって地位を測定した分析から、ある技術を開発した企業の地位が高いほど新規参入の可能性が高まることが明らかにされた⁵⁵。ただし、技術開発企業そのものの地位よりも、その技術に価値を見出して算入してくる関連企業の地位の方が、新規参入の可能性を高められていることも同時に明らかになっている。

これらの研究が示しているのは、科学的業績や技術という人工物に付随する行為者の地位によって、その知見の受容や採用に関する意思決定が影響を受けるということである。科学装置についても、同様のことが言えるかもしれない。ある科学装置が登場した際、それに対する評価が確定しているとは限らない。その装置のパフォーマンスを知ることは可能であるけれども、その装置を使ってどのような研究が行えるか、行える研究が果たして将来有望なものとなるだろうか、装置の価格が低下することによって研究仲間が増える可能性はどの程度だろうか、といった様々な点について不確実性が残されているからである。このように装置の総体的な有用性が不明瞭な中で、高地位の科学者が装置を採用するという事象は、シグナルとして機能するかもしれない。すなわち、あの科学者が採用しているのだから有望な研究に用いられる装置なのだろう、装置に注目が集まって更に多様な用途へ展開されるかもしれないという期待が醸成されることによって、予言の自己成就的に装置が選択されていく可能性がある。このような論理から、仮説1が導出される。

仮説1. 地位の高い科学者によって装置が開発もしくは採用されると、その後の装置の普及速度が高まる。

しかしながら、ある装置の普及過程において、地位の効果が常に一定であるとは考えにくい。これには2つの理由がある。1つは、普及にしたがって装置そのものが魅力的になっていくために、普及の中盤以降になると、採用者の地位とは関係なく装置の普及が生じることである。知識や技術の進歩と、その普及ないし採用は密接に関連している。すなわち、知識や技術は普及にしたがって発展する傍らで、進歩にしたがって潜在的な採用者にとって魅

⁵⁵ ここでは単純に技術と呼称しているが、ポドルニー達が実際に議論しているのは技術的ニッチ (technological niche) への参入である。技術的ニッチとは、技術のネットワーク、および当該ネットワークにおける行為者の位置を示す概念である。操作上は、ある技術と、それに関連する技術から構成される技術群 (あるいはネットワーク) と読み替えることができる。

力的なものになっていき、更にそのことが次なる改良や発展の速度にも影響を及ぼす (Podolny & Stuart, 1995)。普及が進むことによって装置の性能が良くなったり、価格が低下したりするというのは自然な想定だろう。そのため、普及の初期段階では高地位者の参入によるシグナルが機能しやすい一方で、それ以降は装置自体の特性の方が、普及に対して相対的に大きな効果を有するようになると予想される。

もう 1 つは、科学コミュニティにおいて、当該装置の使用が正当化されていくという側面である。装置が登場したての段階では、それが科学的に信頼できる手法なのか、その装置を採用することでより科学的に重要な知見にたどり着くのかという点で不確実性が残されている。この不確実性は、装置の使用者が増えていくことで低減されるだろう。なぜなら、装置の使用が増えることによって技術的課題が発見および解決されやすくなり、結果として科学的信頼性が向上していくからである。こうした過程を経て、ある科学装置は特定の研究領域に深く紐付くことになると思われる⁵⁶。この状況では、装置に関連する科学者の地位は重要でなくなり、装置が多くの研究者によって採用されてきたという事実自体が、その後の普及に対してより大きな効果を有すると考えられる。以上から、仮説 2 が導出される。

仮説2. 高地位者の参入による効果は、時間依存的に低下していき、一定程度の普及以後には、地位の効果は低下もしくは消失する。

5.2. 分析方法

本節では、次節で行う分析に用いるデータとサンプルについて述べる。その後に、変数の構成と分析モデルを提示し、その限界についても若干の議論を行う。

5.2.1. データとサンプル

上述した仮説を検証するにあたって、第 3 章で紹介した論文データセットを使用する。

⁵⁶ 当該装置の使用が半ば義務のような状況に陥ることも考えられる。科学領域の中でパラダイムが確立してくると、解くべき問題、概念、理論、装置、および方法論が相互に密接な関連を持つようになる (Kuhn, 1962)。このような状況では、科学者が自由に装置を選択しているというよりも、その領域で必須とされている装置を自動的に採用しているかもしれない。すなわち、パラダイムと密接に関連する装置を採用していない限り、ある研究成果が信頼に足るものとは見なされなくなってしまう可能性がある。

このデータセットは、MEDLINE/PubMed データベースと Web of Science を接合して作成したもので、質量分析計に関する内容を含んだ 154,765 の論文から構成される。最大の特徴は、MEDLINE/PubMed が各論文に振り分けている MeSH を用いることで、論文中で用いられた質量分析計のタイプ（核となる要素技術）を識別できることである⁵⁷。

ただし、第 3 章でも述べたように、質量分析計の下位分類として用意されている MeSH に該当する装置を全て同列に分析対象とすることはできない。該当する MeSH には、装置構成を指すもの（GC/MS, MS/MS）と、要素技術であるイオン化部分を指すもの（ESI, FAB, MALDI, SI）の両方が含まれているからである。しかも、これらの装置や要素技術は、用途も登場時期も大きく異なるため、全てを合算して分析を行うと、結果の解釈が複雑になってしまう恐れがある。

そこで以下の分析では、分析の対象を MALDI と ESI の 2 つに限定した。これらはいずれもイオン化法であり、登場時期も、衆目を集めた時期も似通っている。MALDI は田中耕一（島津製作所）の研究グループによって、1987 年に開発された（田中ほか, 1987; Tanaka et al., 1987）。ESI を開発したのは、ジョン・フェン（当時イエール大学）の研究グループである（Yamashita & Fenn, 1984a; Yamashita & Fenn, 1984b）。また、この 2 つのイオン化法の開発者は、2002 年にノーベル化学賞を受賞した⁵⁸。2 つのイオン化法の出自は企業発とアカデミア発で異なっているけれど、それ以外の属性や時代背景には大きな差がないと考えて差し支えないだろう。以下の分析では、この 2 つのイオン化法が普及していく過程で、地

⁵⁷ 一方で、サンプルが質量分析計に関連する研究に限定されているために、他装置との関係を捉えることは困難であるという限界も存在する。質量分析計の使用傾向は、それに参入する科学者の地位だけでなく、他装置の性能向上や新技術にも依存していると考えるのが自然であろう。しかしながら、本論文で扱うデータのサンプルは質量分析計に関連する研究に限定されているため、上述したような他装置・他技術との代替関係や、それによる使用傾向の変化は捉えられない。そのため、本論文で行う分析は、あくまで学術コミュニティにおいて高い地位にあると考えられる科学者が質量分析計に関連する論文を出版することによって、その後の質量分析計の使用が増大するか否かを明らかにするものであって、そこには他装置に比して普及したか否かという観点は必ずしも含まれていない。

⁵⁸ 2002 年のノーベル化学賞は 3 人に対して与えられた。半分を与えられたのが、NMR によるタンパク質の構造解析手法を開発したクルト・ヴェトリッヒ（当時チューリッヒ工科大学）であり、田中とフェンには、それぞれ賞の四分の一が与えられた。2 人の受賞理由は、「生体高分子の質量分析におけるソフト脱離イオン化法の開発」であった。

位による促進効果があったか否かを検証していく⁵⁹。

5.2.2. 変数

分析モデルに投入する変数を、表 5-1 に示す。以下では、それぞれの変数の内容と構築方法を説明するとともに、変数構築に使用したデータの入手方法とそれによるバイアスについても議論する。

(1). 従属変数

従属変数には、各論文で採用されている質量分析計のタイプを表すダミー変数 (MALDI/ESI 採用ダミー) を用いる。具体的には、(1) 論文中で MALDI を採用している場合を 1、別のタイプの質量分析計を採用している場合を 0 とするダミー変数 (MALDI 採用ダミー)、および (2) ESI を採用している場合を 1、そうでない場合を 0 とするダミー変数 (ESI 採用ダミー) の 2 変数を従属変数として設定した。

(2). 独立変数

先行研究における地位の測定方法は様々である。地位が階層的な位置であることを主眼とする研究は、特定組織におけるメンバーシップ (Berger et al., 1972)、墓石広告における引受人の並び順 (Podolny, 1993)、集団内での評価を示す賞罰 (Reschke et al., 2017)、コミュニティにおける議長経験 (Simcoe & Waguespack, 2011) などの指標を用いて、行為者の地位を識別してきた。例えば、Simcoe & Waguespack (2011) は、インターネット技術タスクフォースという標準策定コミュニティでワーキンググループの議長経験がある者を高地位、そうでない者を低地位と分類している。一方で、他者から与えられる尊敬という側面に注目を置いて、行為者の実績から地位を直接的に測定する研究も複数存在する (例えば、Podolny & Stuart, 1995; Sutton & Hargadon, 1996)。

⁵⁹ 2つのイオン化法を分析対象に取り上げているのは、両者の比較よりも、一致法によってロバストネスを確認することが目的である。すなわち、地位の効果が MALDI と ESI の両方で観察されれば、それだけ効果の存在を妥当であると考えられる。ただし、こうした方法によって明らかになるのは、あくまでも必要条件である点に注意が必要である。

変数名	類型	内容
MAIDI/ESI採用ダミー	従属	論文中でMAIDI (ESI) を採用している場合を1, それ以外を0とするダミー変数
MS経験ダミー	統制	論文の別刷り著者が, 論文出版の前年までに質量分析計を使用したことがあれば1, それ以外を0とするダミー変数
MAIDI/ESI経験ダミー	統制	論文の別刷り著者が, 論文出版の前年までにMAIDI/ESIを採用したことがあれば1, それ以外を0とするダミー変数
国ダミー	統制	論文の別刷り著者の所属国家表すダミー変数
研究領域ダミー	統制	出版された論文が属する研究領域を示すダミー変数
所属組織ダミー	統制	論文の別刷り著者の所属が大学である場合を1, そうでない場合を0とするダミー変数
論文著者数	統制	論文の著者数
保有ファンド数	統制	論文の別刷り著者が出版時に保有していたファンド数
MAIDI/ESI累積論文数*	統制	MAIDI/ESIを採用した論文の累積数
MAIDI/ESI装置価格*	統制	MAIDI/ESI搭載機の各年の平均価格
MAIDI/ESI採用者の地位*	独立	MAIDI (ESI) を採用した科学者がそれまでに獲得していた前方引用数の全科学者中最大値を各年について算出し, 前年度との階差を取ったもの

* は, 2年ラグを取った変数.

表 5-1. 分析に使用した変数の一覧

こうした多様な測定方法がある中で、本論文は、地位の操作的定義として「行為者の過去の実績や、行為者が過去に果たしてきた貢献に関する、知覚された質ないし重要性」(Podolny & Stuart, 1995, p.1232) という比較的単純なものを用いて、科学者の地位を測定した。科学者の主たる仕事は知識の創出とその伝達であることを考えれば、学術コミュニティに対して果たしてきた貢献は、科学者が創出してきた知識、より直接的には科学者による論文をもとに測定することは妥当であると考えられる。

より具体的には、MALDI もしくは ESI を採用した科学者が論文出版時点までに獲得した前方引用数の最大値を算出し、各年度の最大値について、マイナスを無視する形で階差を取ったものを使用した⁶⁰。この変数は、次の3つの手順に従って構築した。すなわち、(1) パブリケーション・ヒストリーの収集、(2) 論文出版時点までに獲得した前方引用数の算出、(3) 階差の計算である。

第1に、サンプルに含まれる科学者の地位を測定するために、質量分析計に関連する論文著者のパブリケーション・ヒストリーのデータを収集した。パブリケーション・ヒストリー作成の際に問題となるのが、論文著者名の名寄せである。この作業のためには、論文の著者を特定した上で、それぞれの著者が執筆した全論文(質量分析計に関連しない業績を含む)をリスト化する必要がある。しかしながら、データベース上では同姓同名の他人が同一著者として扱われている場合があり、これらの者を異なる科学者として識別するのは容易ではない。そこで本論文では、Web of Science で取得可能な研究者識別子である Researcher ID および ORCID (Open Research and Contributor Identifier) を用いて、科学者を識別した。Researcher ID はクラリベイト・アナリティクス社によって全世界的に運営されているサービスで、科学者が自身の業績を自己申告することで、論文と特定の著者を示す ID が紐付いて公開される。ORCID も科学者自身による登録を基本としているが、ORCID の場合は ORCID メンバー機関にも業績の編集権限が与えられる(蔵川・武田, 2012)。第三者である

⁶⁰ 科学者の業績を測定する指標として一般的に用いられるのは、論文出版と特許取得である(Stephan, 1996; 2010)。それに対して、ここでは論文の前方引用数に注目している。その理由は、科学コミュニティに対する貢献という視点にたった場合、単に論文出版数や特許取得数の多寡よりも、後続の礎となった(他者に参照された)度合いの方が貢献の度合いを測定する指標として妥当であると判断したためである。この視点は、科学者の報酬が認知度や可視性にあるという古典的な主張(Merton, 1968; Parsons, 1951, p.127)を踏まえてもいる。

ORCID メンバー機関が介在することによって情報の信頼性が高められている点が、ORCID の特徴だと言える（宮入, 2016）。Researcher ID および ORCID の欠点は、自己申告による登録という原則のために、必ずしも全ての科学者に対して ID が付与されていない点にある⁶¹。こうした欠点はあるけれども、現状では科学者の誤同定を防ぐことが困難であるため、Researcher ID と ORCID を用いることとした。

サンプルである 154,765 報の論文は、約 45 万人の著者によって報告されたものである。これらの著者のうち、55,959 人が Researcher ID か ORCID のいずれかを保有しており、サンプル中の 81,457 報の論文については著者のうち少なくとも 1 名以上の ID を特定できたことになる。特定した ID を利用して、Web of Science から各科学者の論文リストを取得してパブリケーション・ヒストリーのデータを別途作成し、加えてパブリケーション・ヒストリーのデータに含まれる各論文の年度ごと前方引用件数を取得した。結果として、55,959 人の科学者による 612,392 報の論文データを収集した。

第 2 に、パブリケーション・ヒストリーをもとにして、MALDI もしくは ESI を採用した研究を論文化している科学者全員について、論文出版時点までに獲得した前方引用数を算出した。より具体的には、MALDI/ESI を用いた研究を論文化した科学者が過去に出版した論文全てについて、Web of Science を用いて各論文が何年に何回引用されているのかを調査した⁶²。その上で、算出した前方引用数をもとにして、ある年に MALDI もしくは ESI を採用した科学者の中で、それまでの獲得前方引用数が最も多い者を特定し、年一最大獲得前方引用数の組み合わせを求めた。こうして求めた MALDI/ESI 採用者の地位の推移を示したのが、図 5-1 である。

第 3 に、図 5-1 のように算出した地位の値を、過去の最大値を更新していく形式に修正し、その上で各年の値について 1 年前との階差を取った。すなわち、ある年に MALDI/ESI

⁶¹ これらの ID は全ての研究者に割り振られていないため、ID を持たない研究者の中に極めて高い生産性を有する者、もしくは学術コミュニティに対する貢献を果たしてきた者が含まれている可能性は否定できない。仮にそうであった場合、質量分析計に関連する研究を行っている者の地位（貢献度）を本来よりも過少に算出していることになる。この意味において、分析結果にバイアスがかかっている可能性には注意する必要がある。

⁶² 具体的には、1985 年に出版された A という論文が、1986 年に何回引用されていて、1987 年には何回引用されているか、といった事項を、パブリケーション・ヒストリーのデータに含まれる全論文の全著者について調査した。

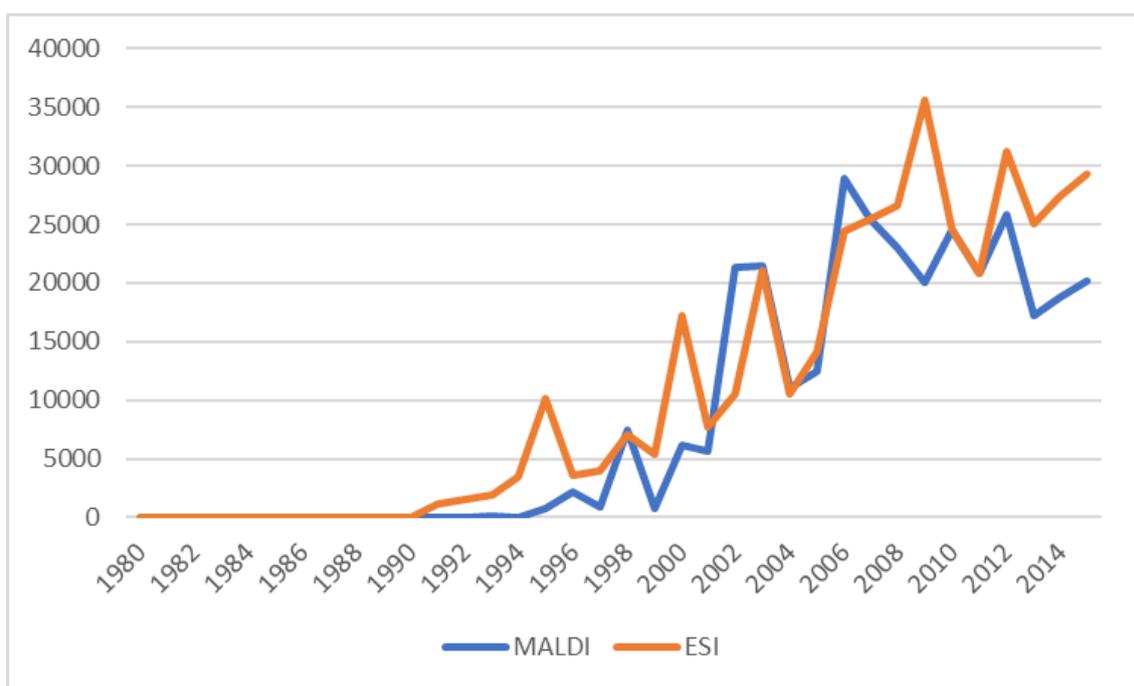


図 5-1. MALDI/ESI 採用者の地位の推移

を採用した科学者の地位が過去より低い場合、その科学者の地位をそのまま用いるのではなく、代わりに、それまでに MALDI/ESI を採用した者の中での最高地位を使用し、地位が純増するような形式に修正した。この修正結果を反映させた地位の推移を、図 5-2 に示した。こうした修正を加えた理由は、高地位の科学者が MALDI/ESI を採用するタイミングによっては、MALDI/ESI 採用者の地位が低下しているように見えてしまうという問題へ対処するためである。図 5-1 に示したように、例えば 2000 年に MALDI を採用した高地位の科学者は、2001 年には論文を出版していない。しかしながら、2001 年に偶然その科学者が論文を出版していないからといって、高地位者が MALDI を採用していないとするのは、妥当ではないだろう。

分析では、こうして修正した地位の値について、前年度との階差を取ったものを変数に使用した。階差を取った理由は、大きく 2 つある。1 つは、本研究が関心を抱いているのは、地位の絶対的な値がもたらす効果というよりも、MALDI/ESI 採用者の地位が大きく上昇した後で、同型装置の採用者が増大するか否かである。この関心からすれば、地位が大きく上昇するというイベントのみを識別した変数の方が、解釈が容易である。また後述するように、時間経過に従って増大していく変数 (MALDI/ESI 累積論文数) を分析モデルに投入しているため、その変数との多重共線性を回避する上でも、階差を取るという処置は有用である。

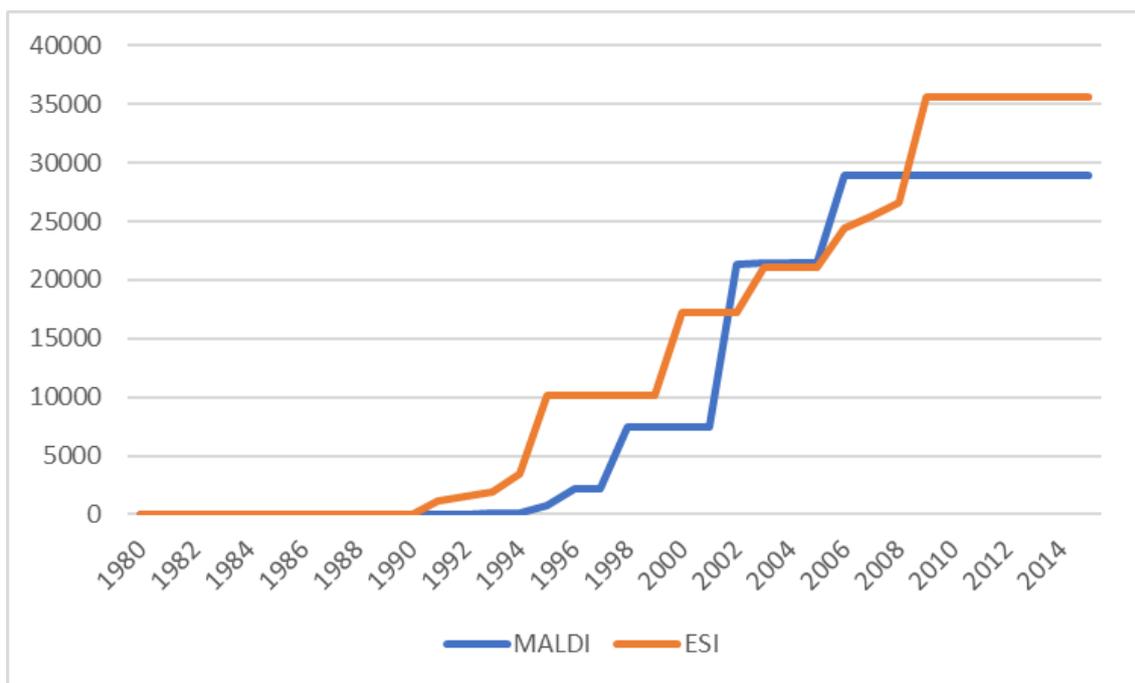


図 5-2. MALDI/ESI 採用者の地位の推移（最大値更新版）

もう 1 つの理由は、地位の値が時間経過とともに自動的に高くなることへの対処である。MALDI/ESI 採用論文の出版時点を参照して地位を計算したため、同じ著者による論文がサンプル中に複数含まれている場合、より最近の年度になるほど地位（それまでの獲得前方引用数）は大きくなる。この点を、具体的な仮想例を用いて説明しよう。例えば、1999 年までに獲得した被引用数が 1000 件という科学者 A が、2000 年に MALDI を採用して論文を出版したとする。そして、A はその後 4 年間論文を発表せず、その間に論文を発表した別の科学者の獲得被引用数（地位）は、最大でも 1000 件に満たなかったものとする。こうした状況で、科学者 A が 2005 年に再び MALDI を用いて論文を発表し、その時点までに A の獲得被引用数が 1500 件にまで上昇していたとしよう。これは、科学者 A が 2001 年から 2004 年の間に 500 件の被引用を獲得したことを意味する。しかしながら、この新たに獲得した 500 件の被引用を、科学者 A の地位が増大したものとして操作化するのは適切ではない。本来であれば、科学者 A の地位の効果は最初に MALDI を採用した 2000 年時点の 1000 という値に対応しているはずであり、2001 年から 2004 年の間に獲得した被引用の中には、MALDI を採用して発表した論文による被引用も含まれる可能性がある⁶³。

⁶³ 本来であれば、MALDI/ESI を採用した時点で、当該科学者をその後の地位の計算から除

このように、同一の科学者が異なる期間をまたいでサンプル中に複数回登場する場合、後年ほど当該科学者の地位が上昇しているように見えてしまうという問題が存在する。ただし、仮に同じ著者がサンプル中に複数回登場するとしても、当該著者の地位が数年間で爆発的に増大するとは考えにくい。すなわち、高地位者がサンプル中に複数回登場していたとしても、その地位の向上は、別領域から高地位者が参入してくる場合に比べれば相対的に微々たるものであると考えられる。そのため、同一の科学者がサンプルに複数回登場することの影響は、前年までの最高地位（サンプル中の科学者が獲得した被引用数の最大値）との階差を取ることによって、ある程度緩和することができる。

図 5-2 で示した地位の推移について階差を取ったものが、図 5-3 である。図中の突出部

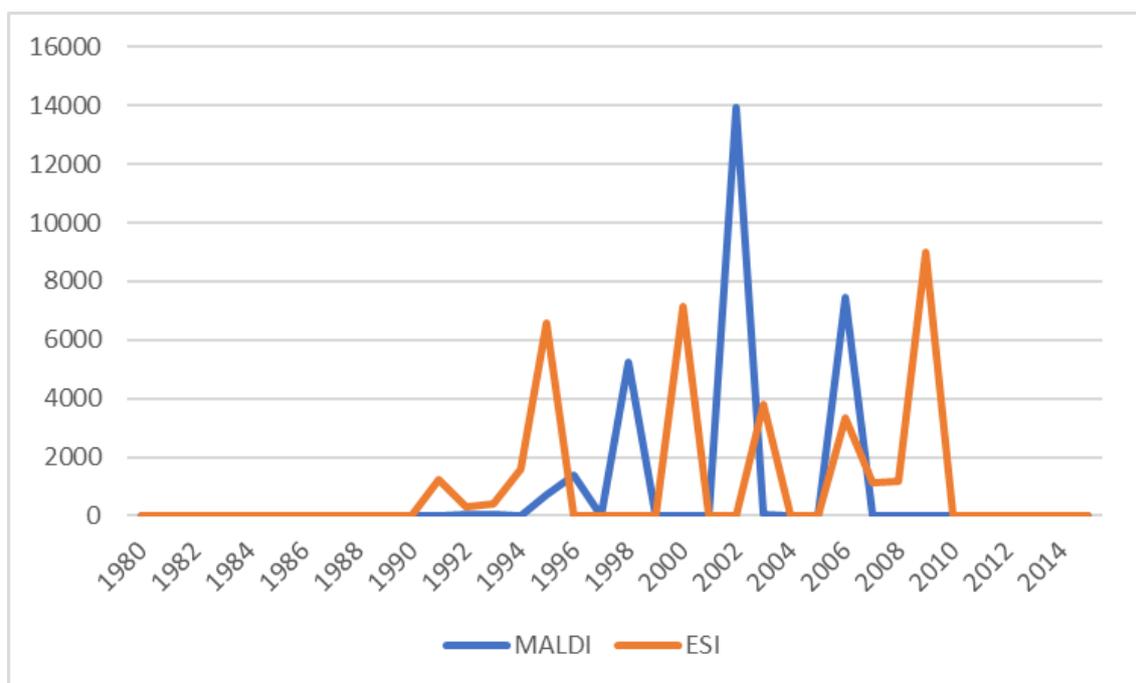


図 5-3. MALDI/ESI 採用者の地位の推移（最大値更新版，階差）

外するのが望ましい。しかしながら、本研究では、論文著者の Researcher ID/ORCID を全て確認できておらず、それ故に、必ずしも全ての科学者について MALDI や ESI の初採用時点を正確に識別できていないため、上記の処理を行えなかった。また、獲得被引用数の計算対象とする科学者の業績を、MALDI/ESI の登場前（例えば、1985 年まで）に限定することも考えられる。ただし、この場合、近年に至るまで MALDI/ESI を採用せずに研究を行っていた科学者の獲得被引用数は、過小評価されることになる。

は、当該時期に装置採用者の最大地位が更新されたことを意味する。換言すると、過去の採用者よりも著しく地位の高い者が装置を採用した場合、変数の値は大きな正の値を取り、地位の高い者が装置を採用しなかった年の変数の値は0となる。また、同一著者がMALDIもしくはESIを再度使用した場合も、変数は正の値は取るけれど、その値は大きくない。実際の分析では、このグラフに示した値について2年のラグを取った値を変数として用いた⁶⁴。

(3). 統制変数

分析では、統制変数として9つの変数を用いる。すなわち、(1) 国ダミー、(2) 研究領域ダミー、(3) 所属組織ダミー、(4) 論文著者数、(5) 保有ファンド数、(6) 装置価格、(7) MS 経験ダミー、(8) MALDI/ESI 経験ダミー、(9) MALDI/ESI 累積論文数である。これとは別に、装置のスペックを表す分析可能分子量と質量分解能のデータも収集したものの、いずれも経年的に数値が上昇しているために他変数との相関が高い、もしくは登場してから数値に変化がないために、結果的に分析には使用しなかった。

国ダミー、研究領域ダミー、および所属組織ダミーは、いずれも場所や研究領域による使用傾向の差をコントロールするための変数である。国ダミーは、論文の別刷り著者の所属国家を表す変数である。ここでは、質量分析計の使用者数の上位5国家（アメリカ、中国、日本、ドイツ、イギリス）についてダミー変数を作成し、それ以外の国家がベースラインとなるように変数を設定した。研究領域ダミーは、出版された論文が属する研究領域を示す変数である。論文数の上位3領域（生命科学、化学、薬学）についてダミー変数を作成し、それ以外の領域をベースラインとした⁶⁵。所属組織ダミーは、論文の別刷り著者が所属する組織

⁶⁴ 2年ラグを取るのには、1年ラグでは期間が短すぎると判断したためである。1年ラグの場合、ある年度に出版された論文でMALDIもしくはESIが採用されていることを説明する要因の1つとして、1年前に出版された論文の著者属性を想定していることになる。つまり、科学者は、1年前に出版された論文の著者属性を参照した時点で装置を購入して研究を開始し、そこからわずか1年足らずで論文文化にまで至るといった仮定を置いていることになってしまう。装置購入の意思決定から研究開始までに装置の設置や操作習熟の時間を要すること、更には論文の査読にかかる時間もジャーナルによっては数ヶ月かかることを踏まえると、1年ラグというのは現実を無視した仮定であると考えられる

⁶⁵ 各論文の属する研究領域のデータは、Web of Scienceによって収集した。Web of Scienceでは論文が出版されたジャーナルに従って研究領域を割り振っている。例えば、Natureなどの総合誌は、“Science & Technology Other Topics”という研究領域に分類されている。

の類型を識別する変数である。サンプルに含まれる論文著者の約 7 割が大学所属であったため、ここでは大学所属の場合に 1、そうでない場合に 0 となるダミー変数を作成した。

論文著者数と保有ファンド数は、論文著者が保有している資源の多寡をコントロールするための変数である。質量分析計は高額であるため、保有している資源の量が多い科学者ほど採用しやすい可能性がある。この可能性を統制するため、ここでは研究グループの規模を表す論文著者数と、資源量を表す保有ファンド数の変数をモデルに投入する。いずれの変数も間接的に資源量を測定しているに留まるけれども、装置採用に関連する要因としては重要なものである。

装置の使用傾向に大きな影響を及ぼすのは、装置の性能と価格であろう。性能が良くて安価な装置ほど使用者数が多くなるというのは、ごく自然な想定である。裏を返せば、装置の性能や価格を統制してもなお地位の効果が観察されてはじめて、科学者の装置選択において社会的シグナルが介在していることを示せたことになる。こうした目的のもと、MALDI と ESI のそれぞれについて、装置価格、分析可能分子量、および質量分解能を調査した。装置価格については、上市された全装置について個別に価格を調べることが困難であったため、販売された装置の平均価格を用いた。具体的には、アールアンドディ社の『科学機器年鑑』（1995 年版から 2014 年版）を用いて、MALDI と ESI それぞれに関連する装置群について国内市場規模と国内販売台数を調査し、1 台あたりの価格を算出した⁶⁶。装置の性能についても、上市された個別の全装置について調査することが困難であったため、概算値を特

そのため、必ずしも論文の内容と研究領域が一致していない可能性がある点には注意が必要である。

⁶⁶ 『科学機器年鑑』の製品カテゴリの集計方法は時期によって異なっており、MALDI や ESI という言葉は必ずしも製品カテゴリを代表する名称ではない。そこで、本論文では以下のような手続きで MALDI と ESI の価格を特定している。MALDI については、1995 年版から飛行時間型質量分析計（MALDI-TOF/MS もしくは MALDI-TOF/TOF）に関する記述があるため、その記述を用いて平均価格を算出した（ただし、1995 年版には市場規模や台数が概算値でしか記述されていなかったため、1995 年版では価格を算出していない）。ESI の名前が独立した製品カテゴリとして登場するのは 2003 年版に登場する ESI-TOF からである。しかし、1996 年版の液体クロマトグラフ質量分析計（LC/MS）の項目に、「インターフェースも ESI、APCI などに絞られてきており」（p.168）との記述があることから、1996 年版から 2002 年版までは LC/MS の価格を ESI の価格として扱い、その後は LC/MS と ESI-TOF の平均をもって価格を算出している。

定するに留まっている。具体的には、文部科学省（2015）『先端計測分析技術に関する俯瞰報告』に示されている分析可能分子量と質量分解能の概算値データ（pp.55-56）の製作者に確認を取り、加えて装置のレンタル用に大学等が公開している装置スペックと照合して、概算値に大きな誤りがないことを確認した⁶⁷。これらの変数についても、地位の変数と同じ仮定を適用するために、2年ラグを取った。ただし、先述したように装置の性能は時間依存的に向上している、他変数ときわめて高い相関関係にある。結果として、分析可能分子量と質量分解能の変数は分析モデルに投入できず、あくまでも全体的な傾向を確認するに留まっている。

過去に質量分析計を採用したことがある科学者ほど装置採用に積極的であったり、特定のタイプの装置を使ったことがある者ほど当該装置を使い続けたりするかもしれない。その理由としては、装置の必要性に対する理解、装置使用の習熟によるスイッチングコストの増大などが考えられる。こうした可能性を統制するために作成したのが、MS 経験ダミーと MALDI/ESI 経験ダミーである。論文の別刷り著者を基点とする研究グループのパブリケーション・ヒストリーを確認した上で、ある論文の出版前年までに装置の使用経験があれば1、そうでない場合を0とするダミー変数を作成した。これを全てのタイプの質量分析計について作成したのが MS 経験ダミーであり、MALDI と ESI のそれぞれについて作成したのが MALDI/ESI 経験ダミーである⁶⁸。

仮説 2 では、装置が普及していくことによって、地位の効果が減衰していくことを指摘した。その理由として考えられるのは、普及が進むことによって装置のコストパフォーマンスが向上していくこと、および科学コミュニティにおいて、当該装置の使用が正当化されていくことである。そこで、装置の普及度合いを測定する変数として MALDI/ESI 累積論文数を作成した。これは、MALDI と ESI を利用して行われた研究それぞれの累積論文数を年度ごとに計算したものである。この変数についても、地位の変数と同様に 2 年ラグを取っている。

⁶⁷ 例えば、大阪大学大学院理学研究科・理学部分析機器測定室の Web ページ (<http://analysis.sci.osaka-u.ac.jp/equipment/mass.html>)。

⁶⁸ 当然ながら、MALDI と ESI の経験ダミーはそれぞれ別個に算定している。分析では、MALDI の使用傾向を従属変数とするモデルでは MALDI 経験ダミーを、ESI のモデルでは ESI 経験ダミーを使用している。

5.2.3. 分析モデル

先述の通り、分析で使用する従属変数は、MALDI もしくは ESI の採用を示す二値変数である。そのため、クロスセクションデータを用いたロジスティック回帰分析によって仮説を検証する。クロスセクションでの分析を行うのは、データの特性から生存時間解析やパネルデータ分析という手法を用いるのが困難であったためである。

事物の普及や地位の影響に関する研究では、同一主体について複数時点でのデータを取得し、観察されない異質性を統制することを目的として、Cox 比例ハザード分析をはじめとする生存時間解析や、パネルデータ分析（とりわけ固定効果モデル）という手法を用いるのが一般的である。生存時間解析とは、基準時点から目的のイベントが発生するまでの時間情報を用いて、イベント発生までの時間や、イベントの発生確率と共変量の関係を検証する手法である（Kalbfleisch & Prentice, 2002）。生存時間解析の特徴は、観察期間中にイベントが生じない打ち切りデータ（censored data）を扱う点にある。経営学の領域では、組織の生存率など生態レベルでの現象を分析対象とする組織生態学の分野で特に多く用いられる手法である（Amburgey & Rao, 1996）。技術の普及に関する研究でも生存時間解析は用いられており、例えば、技術開発への後続企業の参入を促進する要因として、参入企業の地位の効果を分析した Podolny & Stuart (1995) が挙げられる。彼らは、各企業の出願特許と引用関係のデータを扱い、分析対象となっている各企業の特許が前方引用された時点を打ち切り時点として生存時間解析を行っている。本論文の場合でも、あるタイプの装置の普及速度に影響を及ぼす共変量を解明するという目的のもと、装置採用の時点を打ち切り時点として、生存時間解析の手法を用いるが考えられる。ただし、生存時間解析の手法を用いる場合、各個体（本論文の場合は、別刷り著者を基準とする研究グループもしくは大学等の組織）の生存時間を特定する必要がある。本論文はあらかじめ特定の研究グループや組織を研究の対象としているわけではないため、データセットに含まれる主体（科学者）の生存期間、具体的には科学者たちがいつそのキャリアを開始したのか（例えば学位取得年）に関する情報は含まれていない。そのため、生存時間解析の手法を本論文の分析に応用することは難しい。

いま 1 つの手法として、固定効果モデルを用いたパネルデータ分析でも観察されない異質性を統制することが可能である。しかしながら、固定効果モデルを用いる場合、観察期間中に一度しか登場しない主体や、従属変数に変化が生じない主体、すなわち一度しか質量分析計を用いていない主体や、一貫して同じタイプの装置を使用し続けている主体を分析に

含めることができない⁶⁹。こうした問題があるため、本論文では、時間依存的に増加していく統制変数や、別刷り著者を基準とする変数を統制変数として投入した上で、クロスセクションデータをを用いた回帰分析を行う。

5.3. 分析結果

5.3.1. 記述統計

分析に使用する変数の記述統計を示したのが表 5-2 である。従属変数である MALDI/ESI 採用ダミーからは、サンプル中の論文のうち MALDI を採用しているものが 15%、ESI が 18% を占めていることが判る。採用科学者の地位の階差も ESI の方が若干高く、MALDI が 8.86 (s.d. = 28.78)、ESI が 12.17 (s.d. = 24.97) となっている。なお、他の変数と単位を合わせるために、地位変数は 100 で除している。そのため、実際の平均値は MALDI が 886、ESI が 1217 である。

統制変数からは、それぞれの装置の採用が特定の地域や領域に偏っていることが見て取れる。国ダミーからは、アメリカに籍を置く科学者が全体の 3 割弱を占めており、また全体の 4 割強が生命科学領域での論文である。MS 経験ダミーからは、全体の約半数以上の論文が、過去に質量分析計を使用したことのある研究グループによって執筆されていることが伺える。裏を返せば、質量分析計をはじめて採用した研究グループによる論文が、サンプルの半数弱を占めていることになる。MALDI 経験ダミーと ESI 経験ダミーの平均値は、ESI の方が経験者による継続使用の傾向が強いことを示している。ただしこれは、装置価格の変数が示すように MALDI の方が高価であり、それ故に ESI よりも普及が遅れたことが原因かもしれない。

⁶⁹ 例えば、MALDI を採用したか否かを示す変数を従属変数とする場合、出版論文の全てで MALDI を採用している主体や、データ内での初登場時に MALDI を採用して以降論文を出版していないサンプルは、分析から除外されることとなる。

変数	N	平均	標準偏差	最小	最大
MALDI採用ダミー	154,765	0.15	0.36	0	1
ESI採用ダミー	154,765	0.18	0.38	0	1
MS経験ダミー	147,485	0.54	0.50	0	1
MALDI経験ダミー	147,485	0.17	0.38	0	1
ESI経験ダミー	147,485	0.26	0.44	0	1
国ダミー：アメリカ	153,779	0.28	0.45	0	1
国ダミー：中国	153,779	0.10	0.30	0	1
国ダミー：日本	153,779	0.07	0.26	0	1
国ダミー：ドイツ	153,779	0.07	0.26	0	1
国ダミー：イギリス	153,779	0.04	0.20	0	1
研究領域ダミー：生命科学	154,765	0.43	0.50	0	1
研究領域ダミー：化学	154,765	0.16	0.37	0	1
研究領域ダミー：薬学	154,765	0.08	0.27	0	1
所属組織ダミー：大学	154,765	0.68	0.47	0	1
論文著者数	154,765	5.53	3.09	1	246
保有ファンド数	154,765	1.12	1.66	0	42
MALDI累積論文数 (t-2) *	154,295	93.61	68.56	0	202.39
ESI累積論文数 (t-2) *	154,295	115.78	85.43	0	248.44
MALDI装置価格 (t-2) **	136,775	37.44	5.72	25.28	44.26
ESI装置価格 (t-2) **	136,775	20.10	4.14	16.60	36.52
MALDI採用者の地位 (t-2) *	153,299	8.86	28.78	0	139.50
ESI採用者の地位 (t-2) *	153,299	12.17	24.97	0	89.97

* 実際の値を 100 で除したもの.

** 実際の値を 1,000,000 で除したもの.

表 5-2. 記述統計

長期間に渡るデータをクロスセクションでまとめて報告しているため、MALDI と ESI がどのように普及していったのかを記述統計から知ることはできない。そこで、累積論文数から両者の普及傾向を示したのが、図 5-4 である。サンプル中における MALDI 採用論文の初出は 1990 年、ESI 採用論文の初出は 1989 年である。図 5-4 から判るように、MALDI と ESI の普及は 1995 年辺りから進み、2000 年付近から普及のペースが加速した。このように、いずれの装置（イオン化法）も普及に成功したと見て良いだろう。

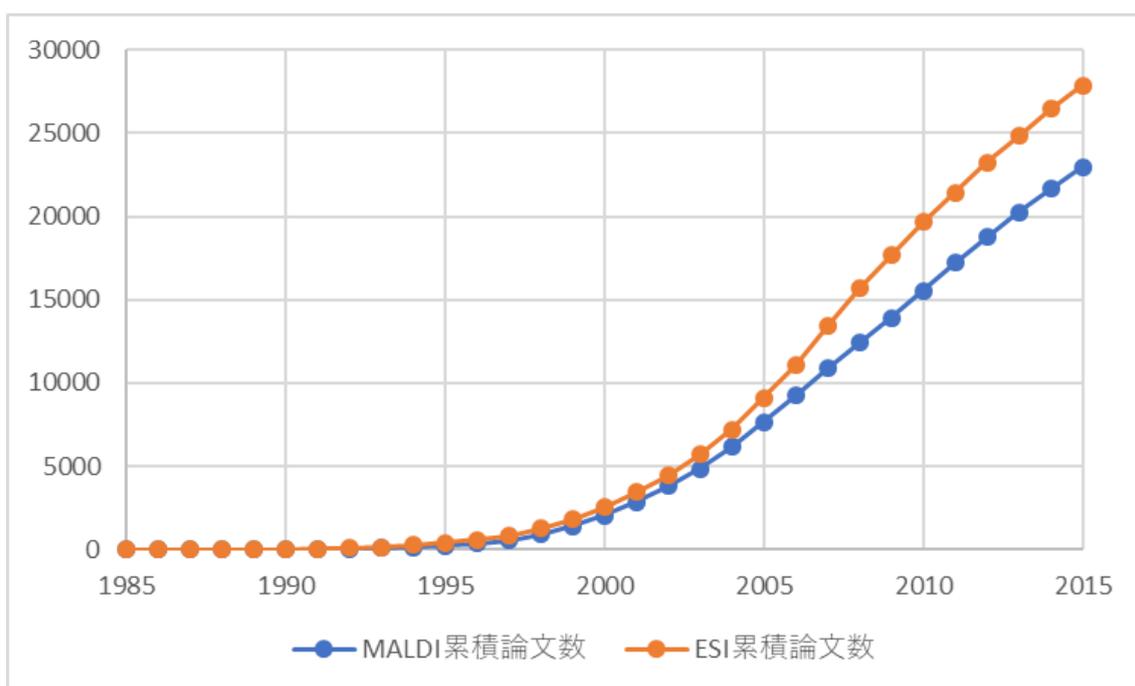


図 5-4. イオン化法ごとの累積論文数

5.3.2. 相関マトリクス

分析に使用する変数の相関マトリクスを表 5-3 にまとめた。表にあるように、MALDI/ESI 採用ダミーと採用科学者の地位は、正の相関関係にあるものの、相関係数はきわめて小さい。ただし、これはサンプル中の全期間を集計したものであるため、期間による地位の効果の違いを相殺している可能性も考えられる。同様のことは、MALDI/ESI 累積論文数についても言える。MALDI/ESI 累積論文数は MALDI/ESI 採用ダミーと負の相関関係にある。その理由として考えられるのは、近年になるほど質量分析計に関連する論文の絶対数が増加している中で、MALDI と ESI の相対的な採用率が低下していることである。MALDI/ESI 経験ダミーは、MALDI/ESI 採用ダミーと正の相関関係にある。これは、当該装置を採用した研究グループが同型の装置を使用し続ける傾向を示唆している。研究領域ダミーは、MALDI と ESI に対して異なる傾向を示している。具体的には、化学と薬学のダミー変数は MALDI 採用ダミーと負の相関関係にあるのに対して、ESI 採用ダミーとは正の関係にある。このことは、領域によっては MALDI よりも ESI が独占的に普及している傾向にあることを示唆している。

No.	変数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	MALDI採用ダミー	1.00																					
2	ESI採用ダミー	-0.14	1.00																				
3	MS経験ダミー	-0.02	0.08	1.00																			
4	MALDI経験ダミー	0.22	0.00	0.43	1.00																		
5	ESI経験ダミー	-0.05	0.20	0.55	0.33	1.00																	
6	国ダミー：アメリカ	-0.01	-0.01	0.01	0.04	0.02	1.00																
7	国ダミー：中国	-0.01	0.04	0.09	0.06	0.13	-0.21	1.00															
8	国ダミー：日本	0.01	-0.02	0.04	0.01	-0.02	-0.16	-0.09	1.00														
9	国ダミー：ドイツ	0.04	-0.01	0.01	0.01	0.00	-0.17	-0.10	-0.07	1.00													
10	国ダミー：イギリス	-0.01	0.00	-0.02	-0.01	-0.02	-0.12	-0.07	-0.05	-0.06	1.00												
11	研究領域ダミー：生命科学	0.08	0.08	0.08	0.10	0.09	0.00	-0.04	-0.01	0.02	0.02	1.00											
12	研究領域ダミー：化学	-0.05	0.07	0.07	0.03	0.10	0.02	0.04	-0.02	-0.04	0.00	-0.39	1.00										
13	研究領域ダミー：薬学	-0.07	0.04	-0.01	-0.06	-0.01	0.00	0.01	0.06	-0.03	-0.02	-0.24	-0.12	1.00									
14	所属組織ダミー：大学	0.03	0.03	0.06	0.07	0.07	-0.08	0.16	-0.01	-0.02	0.01	0.00	0.00	-0.01	1.00								
15	論文著者数	0.05	-0.06	-0.04	0.03	-0.04	-0.04	0.08	0.03	-0.02	0.01	-0.04	-0.09	0.03	-0.03	1.00							
16	保有ファンダ数	0.00	-0.05	0.07	0.11	0.07	0.06	0.12	-0.10	-0.07	-0.01	-0.04	0.00	-0.05	0.12	0.27	1.00						
17	MALDI累積論文数 (t-2)	-0.06	-0.08	0.13	0.12	0.14	-0.10	0.19	-0.08	-0.03	-0.04	-0.12	0.05	-0.04	0.08	0.17	0.47	1.00					
18	ESI累積論文数 (t-2)	-0.07	-0.08	0.13	0.12	0.13	-0.10	0.18	-0.08	-0.03	-0.04	-0.12	0.05	-0.04	0.08	0.17	0.47	1.00	1.00				
19	MALDI装置価格 (t-2)	-0.03	-0.03	0.11	0.11	0.13	-0.08	0.14	-0.07	-0.04	-0.04	-0.08	0.04	-0.02	0.08	0.14	0.36	0.76	0.76	1.00			
20	ESI装置価格 (t-2)	0.02	0.03	-0.11	-0.09	-0.11	0.07	-0.12	0.06	0.02	0.03	0.07	-0.04	0.03	-0.06	-0.12	-0.28	-0.64	-0.64	-0.54	1.00		
21	MALDI採用者の地位 (t-2)	0.03	0.03	-0.04	-0.05	-0.05	0.04	-0.07	0.03	0.02	0.02	0.05	-0.02	0.01	-0.03	-0.06	-0.18	-0.36	-0.36	-0.34	0.07	1.00	
22	ESI採用者の地位 (t-2)	0.02	0.03	-0.02	-0.01	-0.01	0.02	-0.04	0.02	0.01	0.01	0.03	-0.01	0.02	-0.02	-0.04	-0.08	-0.25	-0.19	0.23	0.01	1.00	

* リストワイズ除去により推定, N = 135245.

表 5-3. 相関マトリクス

一部の変数間には、極めて強い相関関係が観察される。例えば、装置価格と累積論文数の相関係数は、MALDIで0.76、ESIでは-0.64である。これらの変数は、各年につき1つの値しか取らない変数であるため、相関が高くなりやすい。このように強い相関関係にある変数を同時にモデルに投入すると、多重共線性のために推定結果の信頼性が損なわれる場合がある。加えて、装置価格のデータは1996年以降（2年ラグを取ると1998年以降）のものしか存在しないため、リストワイズ除去によって推定すると、MALDI/ESIの普及初期に関する情報が全く分析に反映されなくなってしまう恐れもある。これらの事情から、以下のでは装置価格を統制していないモデルと、統制したモデルの双方について分析結果を報告するとともに、価格を統制したモデルについては分散拡大係数（VIF）も併せて報告する。

5.3.3. ロジスティック回帰分析

表5-4にMALDIの採用に関するロジスティック回帰分析の結果を、表5-5にESIに関する分析結果を示した。いずれの装置についても、サンプル中の全期間を分析対象とするモデル、2000年以前のみを対象期間とするモデル、および2000年以後を対象とするモデルの分析結果を報告している。ここで分析の対象期間を区切っているのは、普及の序盤と中盤以降で、地位変数の効果がどのように異なるのかを明らかにするためである。表に掲載した分析は、頑健標準誤差を用いたものである。なお、簡便のために、国ダミー、研究領域ダミー、所属組織ダミーの係数の報告は省略した。

MALDIの採用に関する分析結果から確認しよう。表5-4に示したのは、従属変数をMALDI採用ダミーとしたモデルである。統制変数のみを投入したモデル1からは、MALDI経験ダミーが有意な正の効果を有していることが判る。すなわち、MALDI搭載装置を用いたことのある研究グループほど、同型装置を用いてその後に論文を出版する傾向にある。論文著者数の変数も正に有意である。これは、規模の大きい研究グループほど、MALDI搭載装置を使用する傾向にあることを意味している。MALDI経験ダミーと論文著者数は、モデル1からモデル7にかけて一貫して正に有意である。したがって、これらの要因は、MALDIの普及段階に依存せず、通期にわたってMALDI採用確率と正に関連していると言える。

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	全期間	全期間	1990-1999	2000-2015	全期間	1990-1999	2000-2015
定数項	-1.9130 *** (0.0276)	-1.9800 *** (0.0280)	-4.7140 *** (0.1480)	-1.4020 *** (0.0312)	-2.0300 *** (0.0692)	-18.2900 *** (4.9580)	-1.8540 *** (0.0720)
MS経験ダミー	-0.9670 *** (0.0210)	-0.9710 *** (0.0210)	-0.6450 *** (0.0855)	-1.0490 *** (0.0218)	-1.0270 *** (0.0212)	-0.7460 *** (0.0952)	-1.0500 *** (0.0218)
MALDI経験ダミー	2.0050 *** (0.0228)	2.0070 *** (0.0229)	2.5910 *** (0.1480)	1.9770 *** (0.0234)	1.9740 *** (0.0230)	2.5200 *** (0.1510)	1.9740 *** (0.0234)
論文著者数	0.0544 *** (0.0032)	0.0536 *** (0.0032)	0.0583 *** (0.0146)	0.0432 *** (0.0032)	0.0438 *** (0.0031)	0.0540 *** (0.0159)	0.0429 *** (0.0032)
保有ファンダ数	0.0022 (0.0054)	0.0047 (0.0054)	0.1250 * (0.0677)	0.0234 *** (0.0053)	0.0220 *** (0.0053)	0.2210 *** (0.0766)	0.0234 *** (0.0053)
MALDI累積論文数 (t-2)	-0.0024 *** (0.0001)	-0.0020 *** (0.0001)	0.2940 *** (0.0182)	-0.0048 *** (0.0002)	-0.0055 *** (0.0002)	0.7180 *** (0.2160)	-0.0058 *** (0.0002)
MALDI装置価格 (t-2)					0.0170 *** (0.0021)	0.4460 *** (0.1480)	0.0148 *** (0.0021)
MALDI採用者の地位 (t-2)		0.0032 *** (0.0002)	0.0107 *** (0.0014)	0.0007 *** (0.0002)	0.0011 *** (0.0002)	-	0.0009 *** (0.0003)
国ダミー	Included	Included	Included	Included	Included	Included	Included
研究領域ダミー	Included	Included	Included	Included	Included	Included	Included
所属組織ダミー	Included	Included	Included	Included	Included	Included	Included
Wald chi2	10363.13	10505.32	1037.58	9518.49	9885.24	550.87	9526.33
自由度	14	15	15	15	16	15	16
Prob > chi2	0	0	0	0	0	0	0
Log pseudolikelihood	-56990.99	-56911.88	-2970.19	-52339.90	-54835.22	-2339.29	-52315.95
Pseudo R2	0.09	0.10	0.18	0.10	0.10	0.12	0.10
N	146,499	146,499	11,262	129,015	135,245	6,230	129,015

注：値は偏回帰係数を，括弧内は頑健標準誤差を示す。

注：ハイフンは，当該変数が多重共線性のためにモデルに投入されなかったことを示す。

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

表 5-4. ロジスティック回帰分析の結果 (MALDI)

	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
	全期間	全期間	1989-1999	2000-2015	全期間	1989-1999	2000-2015
定数項	-2.1080 *** (0.0265)	-2.1600 *** (0.0270)	-3.4520 *** (0.1190)	-1.6420 *** (0.0305)	-1.3050 *** (0.0572)	0.3730 (1.1760)	-1.5850 *** (0.0723)
MS経験ダミー	-0.2220 *** (0.0189)	-0.2240 *** (0.0189)	-0.1560 ** (0.0708)	-0.2730 *** (0.0198)	-0.2570 *** (0.0193)	-0.0786 (0.0839)	-0.2730 *** (0.0198)
ESI経験ダミー	1.2070 *** (0.0194)	1.2020 *** (0.0194)	1.8480 *** (0.1120)	1.1290 *** (0.0198)	1.1390 *** (0.0195)	1.6950 *** (0.1200)	1.1290 *** (0.0198)
論文著者数	-0.0080 *** (0.0026)	-0.0082 *** (0.0026)	0.0034 (0.0131)	-0.0212 *** (0.0028)	-0.0210 *** (0.0027)	-0.0219 (0.0154)	-0.0212 *** (0.0028)
保有ファンド数	-0.0487 *** (0.0056)	-0.0511 (0.0056)	0.1550 *** (0.0572)	-0.0260 *** (0.0055)	-0.0278 *** (0.0055)	0.1710 ** (0.0697)	-0.0262 *** (0.0055)
ESI累積論文数 (t-2)	-0.0019 *** (0.0001)	-0.0017 *** (0.0001)	0.1450 *** (0.0098)	-0.0037 *** (0.0001)	-0.0039 *** (0.0001)	0.2280 ** (0.0932)	-0.0038 *** (0.0001)
ESI装置価格 (t-2)							
ESI採用者の地位 (t-2)		0.0027 *** (0.0003)	0.0044 ** (0.0021)	0.0000 (0.0003)	0.0009 *** (0.0003)	-	0.0001 (0.0003)
国ダミー	Included	Included	Included	Included	Included	Included	Included
研究領域ダミー	Included	Included	Included	Included	Included	Included	Included
所属組織ダミー	Included	Included	Included	Included	Included	Included	Included
Wald chi2	9325.71	9416.05	1083.18	8601.27	8901.52	509.06	8600.76
自由度	14	15	15	15	16	15	16
Prob > chi2	0	0	0	0	0	0	0
Log pseudo likelihood	-65385.66	-65335.88	-3803.87	-59834.32	-62579.43	-2612.52	-59833.98
Pseudo R2	0.07	0.07	0.13	0.08	0.07	0.10	0.08
N	146,499	146,499	11,835	129,015	135,245	6,230	129,015

注：値は偏回帰係数を，括弧内は頑健標準誤差を示す。

注：ハイファンは，当該変数が多重共線性のためにモデルに投入されなかったことを示す。

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

表 5-5. ロジスティック回帰分析の結果 (ESI)

予想に反する結果を示したのが、MALDI 累積論文数である。仮説導出の段階では、累積論文数が多いことによって更に普及が促進するという自己強化的な普及プロセスを念頭に置いていた。しかしながら、モデル 1 では MALDI 累積論文数の係数が負に有意となっている。モデル 1 における MALDI 累積論文数の係数は -0.0024 であり、これをオッズ比にすると $\exp(-0.0024) = 0.9976$ となる。つまり、MALDI 累積論文数が一単位、すなわち累積論文数が 100 本増えると、後発者が MALDI を採用する確率は 0.9976 倍になるのである。MALDI 累積論文数が負の効果をもつ理由として考えられるのは、MALDI を採用している論文の数は増えている一方で、近年になるほど装置の選択肢が増加したために、MALDI の採用率が相対的に低下したことである。普及初期である 2000 年以前のみを対象としたモデル 3 や 6 では係数の符号が正になっていることから、累積論文数は常に負の効果をもつわけではない。

モデル 1 に地位の変数を投入したのが、モデル 2 である。モデル 2 の分析結果は、MALDI 採用者の地位が正に有意な効果をもつことを示している。すなわち、高い地位にある科学者が MALDI を採用（もしくは開発・改良）すると、その後に MALDI が採用される可能性が上昇するのである。同様の結果は、モデル 2 に装置価格の変数を投入したモデル 5 でも確認できる⁷⁰。モデル 2 における地位変数のオッズ比は、 $\exp(0.0032) = 1.0032$ である。これは、MALDI 採用者の最大地位（最大獲得被引用数）が前年から 100 増加すると、その後の MALDI 採用確率が 1.0032 倍に増加することを意味する。ただし、本モデルはクロスセクションでの分析であるため、この分析結果から高地位者の採用によって MALDI の普及が促進したとは言い切れない点にも注意が必要である。この点については、次節で詳細に議論する。

モデル 3 と 4 の分析結果が示すように、地位の効果は普及の段階によって異なる。1990 年から 1999 年の 10 年間を対象期間とするモデル 3 では係数が 0.0107（オッズ比 = 1.0107）なのに対して、2000 年から 2015 年を対象とするモデル 4 では係数が 0.0007（オッズ比 = 1.0007）である。いずれのモデルにおいても地位の変数は有意に作用しているものの、地位変数の係数及びオッズ比は、モデル 3 の方が大きい。このことから、地位の効果は普及初期

⁷⁰ 1998 年以前には装置価格の変数が存在しないため、モデル 2 とモデル 5 のサンプルは若干異なる点には注意が必要である。具体的には、モデル 5 は 1998 年以降のデータのみを分析対象としているのに対して、モデル 2 はそれ以前のデータも対象としている。

ほど大きく、その効果は普及中盤以降になると低下するものと判断できる。モデル 3 における地位変数のオッズ比は、1.0107 である。このことは、MALDI 採用者の最大地位が前年から 100 増加すると、後発者による MALDI 採用確率が 1.0107 倍になることを意味する。

モデル 3 に装置価格の変数を投入したモデル 6 では、多重共線性により、地位の変数が分析から除外された。多重共線性が生じた原因の 1 つとして、1998 年以前のデータがリストワイズ除去されたために、実質的な観察期間が 2 年（1998 年と 1999 年）しか存在しないことが考えられる。モデル 4 に装置価格の変数を投入したモデル 7 では、地位の効果はモデル 4 から引き続いて正に有意である。しかしながら、そもそもモデル 6 で地位の効果が確認できていない以上、装置価格を統制した上でも、MALDI 採用者の地位が有意に作用するかは明らかになっていない⁷¹。

地位の効果が普及中盤以降に低下するメカニズムとして想定していたのが、装置の普及度合いであり、その効果を捉えたのが MALDI 累積論文数である。この変数も、採用者の地位と同じように、時期によって係数の符号や値が異なる。上述したように、全期間を対象としたモデル 1 とモデル 2 では係数が負に有意である一方で、2000 年以前のみを対象としたモデル 3 では正に有意であり、2000 年以降を対象としたモデル 4 で負に有意である。この傾向は、装置価格を統制したモデル 5 からモデル 7 でも同様である。具体的には、全期間のモデル 5 では負に有意であり、2000 年以前（実際には 1998 年と 1999 年）のモデル 6 では正に有意に、2000 年以降のモデル 7 では負に有意である。これは、普及の初期では累積論文数が普及に対して正の効果をもっているのに対して、普及の後期になると、その効果が負に転じることを意味している。その理由としては、近年になるほど代替的な技術が登場しているために、絶対数では MALDI 採用論文数が増加している一方で、MALDI を採用している論文の割合は近年になるほど低下していることが考えられる。つまり、累積論文数は普

⁷¹ 表 5-3 で見たように、MALDI 累積論文数と MALDI 装置価格は強く相関するため、同じモデルに投入すると、多重共線性の問題が生じる可能性がある。そこで価格変数を含むモデルについて分散拡大係数（Variance Inflation Factor, VIF）を確認したところ、モデル中の変数で最も高い VIF の値は、モデル 5 では 2.74、モデル 6 では 4.29、モデル 7 では 2.44 だった。必ずしも明確な基準があるわけではないけれど、一般的には VIF が 10 以上になると多重共線性の問題が極めて深刻であると判断される（Cohen et al., 2003）。上記の VIF はいずれもこの基準を下回っていることから、これらの分析結果では多重共線性の恐れが軽微であると判断した⁷¹。ただし、いずれにせよ強い相関関係にある変数を同時に投入しているため、少なからず多重共線性の問題が存在する点には注意が必要である。

及に従って増加していくのに対して、近年になるほど MALDI 採用率は低下していくので、結果としてモデル 4 と 7 では両者に負の相関関係が見出されていると考えるのが妥当であろう。後述するように、この傾向は ESI の採用に関する分析でも観察された。

続いて、ESI の採用に関するロジスティック回帰分析の結果を見ていこう。表 5-5 に示した ESI の分析結果は、MALDI の場合と概ね同様の傾向を示している。まず全期間を対象とするモデル 8 では、ESI 累積論文数は負に有意となった。モデル 8 に ESI 採用者の地位の変数を投入したモデル 9 では、累積論文数の係数は引き続き負である一方で、地位の係数は正に有意である。このことから、ESI の場合においても、高地位者による採用が、後発者による ESI 採用確率を高めたと言える。

普及初期と中盤以降で分析の対象期間を分割したモデル 10 と 11 の結果も、MALDI の場合とほぼ同様である。1989 年から 1999 年までを対象とするモデル 10 では、ESI 採用者の地位は正に有意となった。この傾向は、モデル 10 に ESI 装置価格を投入したモデル 12 でも同様である。一方で、2000 年以後を対象期間としたモデル 11 では、地位の変数は非有意となった。オッズ比をもとに、高地位者による採用の効果の程度を確認してみよう。モデル 9 における地位変数のオッズ比は、 $\exp(0.0027) = 1.0027$ である。これは、ESI 採用者の地位（最大被引用数の前年からの増分）が 100 増えると、他科学者による ESI 採用確率が 1.0027 倍になることを意味する。2000 年以前を対象期間とするモデル 10 では、地位変数のオッズ比は $\exp(0.0044) = 1.0044$ となった。すなわち、2000 年以前では、ESI 採用者の地位が 100 増えると、後発者による ESI 採用確率が 1.0044 倍に増加していたことになる。2000 年以後を対象としたモデル 11 において地位変数は非有意である。このことを踏まえると、ESI の場合、高地位者が採用することによって普及が促進するという効果は、普及の初期段階にのみ存在しており、その効果は普及中盤以降には存在しなかったことになる。

ただし、装置価格を統制したモデル 12（全期間）でも地位の変数は正に有意であるものの、2000 年以前（実質的には 1988 年と 1989 年）を対象とするモデルでは、地位の変数が多重共線性により分析から除外された⁷²。そのため、装置価格を統制してもなお普及初期に

⁷² 装置価格の価格変数を統制したモデルにおける VIF の最高値は、モデル 12 では 2.13、モデル 13 では 16.55、モデル 14 では 2.12 である。モデル 13 では、地位の変数が除外されているにもかかわらず、ESI 装置価格と ESI 累積論文数が強い相関関係にあるために、多重共線性の問題が存在する。モデル 12 とモデル 14 では、VIF の値からは深刻な多重共線性は存在しないと判断できるものの、装置価格と累積論文数の変数を同時投入している以上、

採用者の地位が有意な効果を有するの否かは、本分析から確認できない。

累積論文数についても、MALDIと同様のことが言える。ESI累積論文数の係数は、全期間を対象とするモデル8、モデル9、およびモデル12で負であり、2000年以前を対象期間とするモデル10と13では正に有意、2000年以後のモデル11とモデル14では負に有意である。こうした傾向が生じる理由も、MALDIの場合と同様だと考えられる。すなわち、ESIの累積論文数自体は増加しているのに対して、ESI採用率は近年になるほど相対的に低下しているために、結果として係数が負になるのだと思われる。

MALDIとESIに関する分析結果で唯一異なる傾向が観察されたのは、装置価格が普及に与える影響である。すなわち、MALDI装置価格はモデル5からモデル7にかけて一貫して正に有意であるのに対して、ESI装置価格はモデル12から13で負に有意、モデル14では非有意である。換言すると、MALDIの場合は装置価格が上昇することによって装置の採用確率が上昇するのに対して、ESIの場合は装置価格の低下によって普及が促進したことになる。

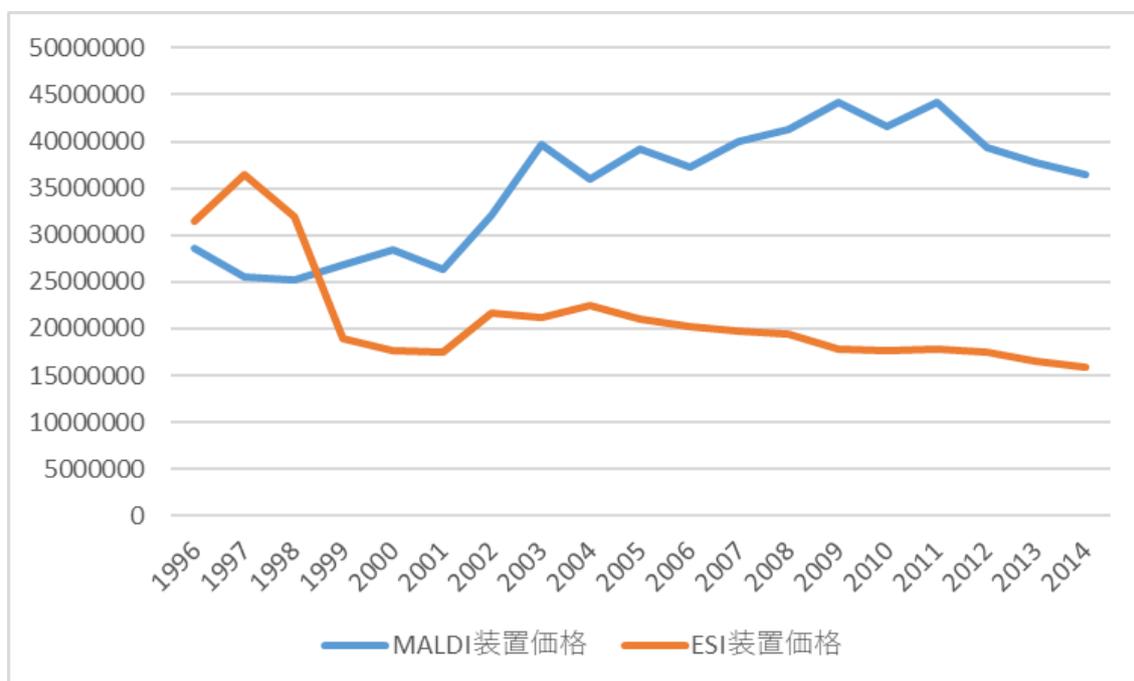


図 5-5. MALDI と ESI の装置価格の推移

(出典：『科学機器年鑑』をもとに筆者作成)

多少なりとも多重共線性が存在すると考えるのが適切だろう。

る。こうした傾向が現れるのは、図 5-5 に示したように、MALDI は装置価格が経時的に増大していったのに対して、ESI の装置価格は概ね減少していったためである。MALDI の装置価格は普及と並行して上がっていったため、装置価格と装置の採用確率が正に関連するという結果になったものと解釈できる。

5.4. 分析結果の解釈

5.4.1. 分析結果の整理と分析上の限界

MALDI と ESI の採用に関する分析結果から明らかになったのは、以下の 2 点である。第 1 に、過去の貢献から見た地位が高い科学者によって装置が採用されることによって、その後の当該装置の採用確率は増加する可能性がある。換言すると、装置に対して移転される科学者の地位が高まることによって、当該装置に対する期待が高まり、結果としてその後に同型の装置が採用される可能性が高まるかもしれない。これが正しいとすると、新規な質量分析計が登場した際の装置（技術）選択は、装置の性能や価格に基づいて合理的に行われるだけでなく、「誰がその装置を使った（作った）か」という社会的な側面も同時に参照した形で行われることになる。

第 2 に、高地位者が装置を採用することの効果は、普及の段階によって異なるかもしれない。仮説 2 では、装置の普及が進行すると、装置自体の性能が向上したり、装置の選択に際する不確実性が低減されたりするために、地位の効果は相対的に低下し、むしろ装置が使用されてきたという事実そのものが説明力を有するようになると予想した。こうした傾向は、装置価格を統制しないモデルにおいてのみ観察された。すなわち、高地位者が採用することの効果は、普及初期ほど大きく、普及の中盤以降ではその効果が減衰する。ただし、この結果はあくまでも装置価格を統制しないモデルでのみ観察されたものである。

これらの点を総合すると、本章で提示した 2 つの仮説は、どちらも概ね支持されたと言えるだろう。ただし、本章で行った分析にはいくつか深刻な問題が存在しており、高地位者による採用が装置普及を促進するという因果効果の存在までは指摘できない。分析上の問題は、大きく 3 つにまとめることができる。すなわち、(1) 変数の欠落、(2) トレンドへの対処、および (3) 分析の頑健性である。

1 つめの問題は、重要な統制変数が欠落しているという問題である。上記の分析では、装置性能についてのデータをモデルに投入しておらず、また装置価格のデータについても、1998 年以降の価格を一部のモデルに投入したに留まる。その理由は、時間依存的に増大す

る他の変数（例えば、MALDI/ESI 累積論文数）と強く相関するために、多重共線性が生じてしまうことである。しかしながら、これらの要因は装置の普及に大きな影響を与えるはずであるから、それらの変数を除外した分析結果に欠落変数バイアスが生じている可能性を否定できない。この問題を解決するためには、個別の論文を参照して科学者が実際に採用した装置の型番と、当該装置の性能や価格を詳細に調査して、分析に反映させる必要がある⁷³。

2つめの問題は、タイムトレンドの影響を除去しきれていない点である。図 5-4 に示したように、MALDI と ESI の普及は上昇トレンドを持つ。こうしたデータをクロスセクションで分析しているために、MALDI/ESI 採用者の地位の効果は、こうした上昇トレンドとの疑似相関であるかもしれない。上記の分析では、モデルに MALDI/ESI 累積論文数という時間依存的に増加する変数を含めることで、この問題への対処を試みた。また、MALDI/ESI 採用者の地位の変数についても、前期との階差を取り、かつ装置採用時点から 2 年のラグを取ったため、装置採用者の地位が時間に依存して機械的に増加していくという問題は緩和されていると考えられる。それでもなお、時系列モデルによる分析ではないため、上昇トレンドへの対処は完全でない点に注意が必要である。

3つめの問題は、分析の頑健性である。上記で示した分析結果は、必ずしも頑健なものではない。例えば、上記の分析では MALDI/ESI 累積論文数、MALDI/ESI 装置価格、および MALDI/ESI 採用者の地位の 3 変数について 2 年のラグを取った。しかしながら、これらの変数のラグを 3 年に変更すると、一部のモデルでは結果の傾向が変化する。3 年ラグ版変数を用いることによって結果が大きく変化したのは、モデル 3 とモデル 5（表 5-4）であり、その他のモデルでは分析結果に大きな違いは生じなかった。モデル 3 では、2 年ラグ変数の場合は正に有意だった地位の変数が、3 年ラグ変数では負に有意となった。モデル 5 では、2 年ラグを取った場合の MALDI 採用者の地位は正に有意であるのに対して、3 年ラグを取った変数では非有意となった。これらのモデルにおいて結果が変化したのは、3 年ラグ変数を用いることによって分析対象期間が 1 年減少したためだと考えられる。このように、一部のモデルでは変数のラグを変更することによって結果の傾向に変化が生じてしまう。そのため、上記の分析結果は仮説を支持している傾向にあると考えられる一方で、頑健性とい

⁷³ 現状、装置性能や装置価格の間に強い相関関係が存在するのは、これらが各年につき 1 つの値しか取らない変数だからである。すなわち、装置の性能や価格を識別しているのが実質的には時点の違いのみであるために、変数の効果を確認するためのバリエーションを確保できていない。この問題は、MALDI/ESI 採用者の地位の変数にも当てはまる。

う点でも分析に改善の余地が残されている。

5.4.2. 分析結果から想定される選択の様式

上述したように、科学装置を採用した科学者の地位と、後発者による装置採用確率の間には、正の相関関係が存在するかもしれない。この結果は、次のように言い換えることができる。すなわち、科学者による装置（技術）選択は、高地位者による採用という社会的シグナルに誘導されている可能性がある。ただし、上述の分析結果で地位変数の係数やオッズ比が小さなものであったことからわかるように、こうした地位の効果は、他の要因を押しつけて装置選択を誘導するほど強いものではない。したがって、確かに地位という社会的シグナルによって技術選択が誘導される側面はあるけれど、高地位者によって選択された技術が他の選択肢を排除して独占的な地位を形成するという技術選択の様式は、成立しない。

このことは、各モデルに投入した MALDI/ESI 累積論文数という変数の影響からも見て取れる。この変数で捉えようとしたのは、既に使用されている装置がその後も使用されやすい傾向にあるという、自己強化的な選択の影響であった。しかしながら、MALDI と ESI に関する分析のいずれにおいても、累積論文数の係数は総合的には負である。先述したように、こうした傾向が得られるのは、近年になるほど質量分析計に関連する論文数が多くなっており、しかも代替的な技術の数が増えているために、MALDI/ESI 採用数は増えているのに対して、サンプル中の割合で見ると MALDI/ESI の採用率が低下しているためだと考えられる。

この傾向を確認するために、サンプル中の全論文に対する MALDI/ESI 論文の割合と、MeSH の分類のいずれにも該当しない装置を採用している論文 (MS others) の割合の推移を確認してみよう⁷⁴。MS others の論文数は、存在している代替技術の数を直接に示すものではないけれど、この中には複数の代替技術が含まれていると考えられる⁷⁵。MALDI/ESI

⁷⁴ 第3章で示したように、MeSH に採録されているカテゴリは、(1) GC/MS, (2) ESI, (3) FAB, (4) MALDI, (5) SIMS, (6) MS/MS の6つであり、この区分に当てはまらないものには、全て Mass Spectrometry という MeSH のみが付与されている。MS others は、Mass Spectrometry という MeSH しか付与されていない論文を指す。

⁷⁵ 少数の代替技術しか含まれていないのであれば、その使用数は無視できないほど大きい。そのため、MeSH に採録されているはずである。そのため、MS others を構成する装置や技術は、MeSH に採録されるほどには普及していないか、開発されて時間が経っていないものであ

登場時期である 1990 年を起点に推移を示したのが、図 5-6 である。図から明らかなように、MALDI/ESI 採用率は 2000 年代中盤まで増加の一途を辿り、2005 年には全体の約半数の論文が MALDI と ESI のいずれかを採用している。一方で、MeSH に採録されているタイプのどれにも当てはまらない装置群（MS others）の採用率は 1990 年から漸減しており、1990 年代後半には MALDI/ESI の採用率を下回っている。しかしながら、この傾向は 2000 年代後半から逆転している。具体的には、MALDI/ESI 採用率は 2006 年から低下し続けるのに対して、MS others の採用率は 2006 年から微増の傾向を示し、2011 年には MS others 採用率が MALDI/ESI 採用率を上回っている。

採用率の推移から見えてくる技術選択の帰結とは如何なるものだろうか。MALDI と ESI の採用率の上昇と対応するかのように、MS others の採用率が低下していることから、次のように考えられるかもしれない。すなわち、MALDI と ESI の普及が高採用者の地位によって促進されていく背後で、技術の多様性が損なわれていた可能性がある。技術が普及していくには、関連する行為者の傾注や資源を惹きつける段階での競争に勝利しなければならな

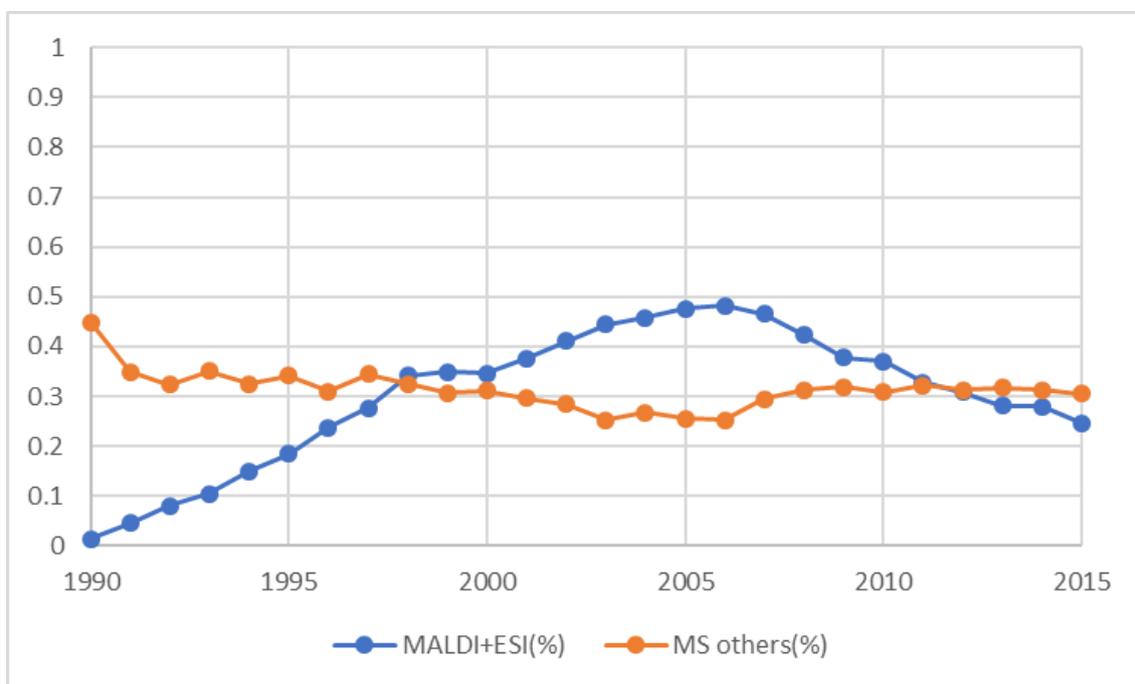


図 5-6. MALDI/ESI 採用率の推移

ると予想できる。

い (Podolny & Stuart, 1995). 裏を返せば、普及に成功した技術は、有望だったかもしれない技術から傾注や資源を奪い取ることによって、その地歩を固めていくのである。この過程において、地位は行為者による傾注の配分を特定の対象に集中させることで、有望であったかもしれない他の技術に対する資源動員を抑制し、結果として技術の多様性を減少させていたのかもしれない。この点だけを切り取ると、高地位者の採用という社会的シグナルは技術の普及に対して正に作用する可能性がある一方で、それが傾注や資源の過剰な集中をもたらすことによって技術の多様性が損なわれる、というトレードオフの構図を見て取ることができる。

しかしながら、本章の分析結果からも示唆されるように、高地位者の採用は必ずしも他の選択肢を排除しない。高地位者による採用によって誘導された技術選択によって多様性が失われるという構図は、あくまで可能性の話であって、その存在を分析結果から確認できたわけではない。また、仮にそうした構図が存在するとしても、図 5-6 で近年に MS others 採用率が上昇していることからわかるように、その構図は決して持続的なものでなく、むしろ長期的に見ると技術の多様性は維持されている。こうした様相を呈する理由は、いくつか考えられる。例えば、特定の装置によって与えられる研究機会、あるいはその装置を使用することで果たしうる貢献の幅が時間依存的に狭まっていくとか、参入者が閾値を超えると研究競争の側面が強まる (Reschke et al., 2017) といった背景から、新たな技術が模索もしくは採用されるのかもしれない。このように、高地位者の採用という社会的シグナルが装置選択を誘導する側面は存在する可能性があるものの、その誘導の程度は、他の選択肢を根絶するほど強力なものではない。

5.5. 小括

本章では、科学者による装置の選択が地位という社会的シグナルによって左右されている可能性を議論し、高地位者による採用が装置普及に及ぼす効果の統計的検証を試みた。高地位者の採用が社会的シグナルとして機能しうるのは、それが装置採用に伴う不確実性を低減するからである。ある科学装置が新たに登場した場合、その装置の性能が高かったとしても、採用者にとっては次のような不確実性が残されている。例えば、その装置を使って行える研究が果たして将来有望なものとなるか、といったものである。これに対して、高地位の科学者が装置を採用することは、「あの科学者が採用しているのだから有望な研究に用いられる装置なのだろう」という推論を誘発することによって、一種のシグナルとして機能す

る可能性がある。具体的に提示した仮説は、次の2点である。すなわち、(1) 地位の高い科学者によって装置が開発もしくは採用されると、その後の装置の普及速度が高まる、(2) 高地位者の参入による効果は、時間依存的に低下していき、一定程度の普及以後には、地位の効果は低下もしくは消失する。

MEDLINE/PubMed データベースより作成した論文データセットを用いた分析からは、高地位者による MALDI/ESI の採用が、後発者による当該装置の採用確率を上昇させる可能性を見出した。加えて、地位と装置採用の関連が最も大きいのは普及初期であり、普及中盤以降になると、この関連は低下もしくは消失する可能性があることを発見した。このように、仮説1と仮説2は支持されたと言えるだろう。しかしながら、本章で提示した分析には方法論上の課題が多数残されており、高地位者の採用による普及促進という因果効果を十分に解明していない点には注意が必要である。

装置採用者の地位と装置普及の間に正の関係が存在するとしても、その関係は必ずしも強いものではない。したがって、短期的には高地位者の装置採用によって傾注や資源の配分が歪む可能性があるけれども、それが技術の多様性を損なっている可能性は小さい。むしろ、台頭する技術が移り変わる中で技術の多様性は維持されている。換言すると、高地位者の関与に触発されて「選ばれていく」装置があるからといって、選ばれなかった装置が捨て去られるわけではない。それは社会の中で生存し続けており、次なる科学的発見や応用開発のために、そうした装置に対する努力が注がれ続ける。

このような努力投入が維持されるためには、それが可能な主体や、持続的な努力投入を可能とする制度的なインフラストラクチャが必要なはずである。しかしながら、普及にしたがって、ある装置の開発主体は科学者から企業へと変化していくし、企業が開発主体となることで、装置進歩の方向性は変化するかもしれない (von Hippel, 1976)。このような変化の中で、科学者が次なる装置のために努力投入を続けられるか否かは定かではない。なぜなら、企業が開発主体となることで科学者の貢献は相対的に低下する（もしくは、そのように見積もられる）可能性があり、結果として装置開発を行ってきた科学者が、そのために必要な資源を手に入れるのが難しくなるかもしれないためである。装置の汎用化という点からこの問題を議論するのが、第7章と第8章である。

それよりもここで問題とすべきなのは、地位高き科学者の採用による装置の普及という因果関係が、普及の過程で実際に生じうるイベントを捨象しているという点であろう。例えば、ある装置の普及にどのようなハードルがあり、それがどのような経路で普及への道を辿

り、その過程で役割を果たした行為者とはどのような存在なのだろうか。そして、普及の過程で、高地位者はどのような貢献をしたのだろうか。この点を議論するために、次章では MALDI の開発と普及のプロセスを概観しよう。

6. MALDI の開発と普及

第 5 章では、科学者による装置の選択が、科学者の地位という社会的シグナルによって左右されている可能性を明らかにした。具体的には、科学者コミュニティの中で地位の高い科学者がある装置を採用すると、他の科学者がその後に同型の装置を採用する確率が高まる。この地位の効果は、装置普及の初期に顕著なものであり、普及の中盤以降になると地位の効果は低下もしくは消失する。そのため、いくら地位の高い科学者がある装置を採用したからといって、他の全ての科学者が当該装置を採用するとか、科学者が特定の装置にロックインしてしまうという事態には陥らない。

しかしながら、前章の分析によって地位の効果が十分に明らかになったとは言い難い。1 つの理由は、分析の設計上タイムトレンドの影響を排除しきれておらず、それ故に地位の因果効果を十分に識別できていない点である。もう 1 つの理由は、地位の高い科学者の採用が後発者による装置採用を促したり、普及の中盤以降に地位の効果が減衰したりする具体的なメカニズムを特定できていない点にある。

そこで本章では、装置の普及過程についての事例記述を通じて、ある装置がどのような経路で普及への道を辿り、その過程で高地位者が具体的に果たした貢献を検討していく。事例として取り上げるのは、実証分析の対象でもあった MALDI である。MALDI は、日本の装置メーカーである島津製作所が起源とされるイオン化法（及びそれを搭載した質量分析計）である⁷⁶。MALDI のもととなったソフトレーザー脱離イオン化法の開発者である田中耕一は、2002 年にノーベル化学賞を受賞するものの、その普及過程は順調なものではなかった。というのも、装置に関する最初の学会報告の時点では国内の科学者コミュニティで十分に評価されていたわけではなく、評価が確立するまでに数年の時間を要したのである。しかもその後、島津製作所における開発は一時中断された。

こうした状況にありながら MALDI が普及に成功した理由の 1 つとして、開発成果を欧米の科学者コミュニティに発信した者や、それに呼応して MALDI の改良を行った科学者、および MALDI を実際に用いて新たな研究領域を開拓していった科学者の存在が挙げられ

⁷⁶ MALDI はイオン化法を指す名称だけれど、『科学機器年鑑』で飛行時間型質量分析計 (MALDI-TOF) として取りまとめられているように、MALDI を搭載した質量分析計は独自の製品カテゴリを形成している。ここでは、この製品カテゴリの総称として MALDI という名称を使用している。

る。こうして普及の地歩を固めた MALDI は、その後、日本の国家戦略に織り込まれる形で更なる普及を遂げていった。本章では、普及過程におけるチャンピオンとでも呼ぶべき科学者や制度に主眼を置いて、MALDI の普及過程を記述していく。

6.1. MALDI の開発経緯

6.1.1. 「何でも測れる装置」

後に MALDI と呼ばれるソフトレーザー脱離イオン化法の起源は、島津製作所の中央研究所で開始された新規研究テーマにある。島津製作所は、コンピュータ応用システム部より選抜した人材を中核として、1980 年 8 月に中央研究所を設立した。この時期、島津製作所では新分野への展開を意図して、多様な領域での研究に着手し始めていた⁷⁷。中でも中央研究所は、新規研究テーマの 1 つとしてレーザー応用機器を検討しており、その候補としてレーザーラマン分光計とレーザーイオン化質量分析計を挙げていた。吉田多見男が中心となってテーマの検討を進めた結果、レーザーラマン分光計は国内に先行企業が存在するのに対して、レーザーイオン化質量分析計を手がけている企業は世界的に見てもほぼ存在しないことが判明した。そこで 1982 年 4 月に、レーザーイオン化マイクロプローブ質量分析計の研究開発プロジェクトが、2 年半という期限付きで開始されることとなった。

プロジェクト発足当初のメンバーは、吉田多見男（リーダー）、吉田佳一、秋田智史の 3 名であった。彼らが開発の目標として掲げたのは、特定の物質を測定するための装置ではなく、「何でも測れる装置」であった。すなわち、「単に有機化合物の質量分析だけではなく、せっかくならレーザーの光を一点に集められるという性質を利用して、同じ装置で金属や半導体の表面を調べたりもできる、応用範囲の広い製品」（田中, 2003a, p.120）を目指したのである。そこで 3 名が目指したのは、飛行時間型質量分析計（TOF）という質量分離方

⁷⁷ 島津製作所の 1995 年版社史によると、1980 年代に全社プロジェクトとして支援した新分野研究には、光通信技術・光通信機器、核磁気共鳴診断装置、医用サイクロトロン（超伝導磁石）、細胞電気泳動を応用した腫瘍診断システム、全自動血液分析システム、アモルファス太陽電池製造装置、遺伝子操作のマイクロマニピュレータ、ハイパワーレーザー・エキシマレーザー、油圧無段変速装置といった多様な領域が含まれる。中央研究所で取り扱われたテーマ（質量分析計以外）は、焦電型赤外線センサー、SQUID（超伝導量子干渉素子）、デジタル X 線センサー、シリコンフォトダイオード、ISFET（イオン選択性電界効果型トランジスタ）であった（島津製作所, 1995, pp.44-46）。

式であった。TOF の原理は 1940 年代に提唱されており、1950 年代には Bendix 社によって製品化もされていたため、1980 年代には TOF の存在は知られていた (Wiley, 1956; Wolff & Stephens, 1953)。彼らは何でも測れる装置として TOF を選択したのは、TOF が構造的に簡単なだけでなく、原理的には無限大の質量を分析することができるためであった (吉田, 2003a)。ただし、それはあくまで原理上の話であって、実用に供する装置に仕立て上げるには、様々な課題を解決する必要があった。例えば、レーザー照射で生成されたイオンが初期エネルギーを持つために同じ m/z のイオンでも飛行時間が異なってしまうとか、レーザー照射に伴って試料が破壊されてしまうために分子量の大きい試料を測定できないといった問題を解決せねばならなかった。

1983 年には、プロジェクトに田中耕一と井戸豊が参画し、以降は 5 名体制のプロジェクトが研究に取り組んだ⁷⁸。この 5 名は、いずれも化学や質量分析計の専門家ではなく、そのバックグラウンドは電気工学や物理学であった。そのため、プロジェクトでは各々が得意とする分野に集中して要素技術を開発し、月に 1 度の進捗報告会で互いに問題点を議論するという分業体制が取られた (吉田, 2003b)。それぞれのメンバーが行った研究開発の内容は、表 6-1 のようになっている。

これらの研究開発は、当時存在していた TOF の問題を解決し、実用レベルに TOF を改良するためのものであった。問題の 1 つは分解能の低さであった。当時の TOF は、レーザー照射によって生成されたイオンが初期エネルギーを有するために、同じ m/z のイオンでも飛行時間が異なってしまう、結果として分解能が低下してしまうという問題を抱えていた。これに対して、吉田佳一は傾斜電界型イオンリフレクタ (リフレクトロン) を開発した⁷⁹。それ以外にも、イオンの生成がレーザーパルス幅以上の時間以上に継続して発生してしまい、同じ m/z のイオンでも飛行開始時間が異なってしまうことも分解能を低下させていた。この問題は、吉田多見男が遅延イオン引き出し法を開発することによって解決された⁸⁰。

もう 1 つの問題は、感度が低いことであった。TOF は、真空中でのイオンの飛行速度が

⁷⁸ 5 名という規模は、当時の島津製作所の中央研究所では、平均的な規模であった (田中, 2003a)。

⁷⁹ 生成したイオンをリフレクターに導き、途中で方向転換させることにより、運動エネルギーの分散やイオンの時間分布の拡大を収束させる機構 (田中ほか, 2009)。

⁸⁰ イオンの生成が終了してから加速電界を印加し、生成終了後に一気にイオンを飛行管へ導く方法 (吉田ほか, 2003)。

氏名	内容
吉田多見男	遅延イオン引き出し法
吉田佳一	傾斜電界型イオンリフレクタ 時間デジタル変換回路 UFMPマトリックス法
秋田智史	高速アナログデジタル回路・積算回路
田中耕一	生態薄膜サンプルの作成 ソフトレーザー脱離イオン化法
井戸豊	ブラインド型イオン-電子コンバーター

表 6-1. プロジェクトメンバーの研究開発内容
(出典：窪寺 (2006), Tanaka (2002) をもとに筆者作成)

m/z の平方根に反比例するという原理を使用しているため、高質量イオンほど飛行速度が低下することになる。しかしながら、従来のイオン検出器では低速度イオンを十分に捉えることができなかった。そこで井戸は、検出器の直前でイオンを加速して電子に変換するブラインド型イオン-電子コンバーターを開発した。それでもなお、レーザーパルスに対応して検出器で発せられる信号は微弱なものであり、ここから高感度にスペクトルを作成するのは容易ではなかった。この問題を解決するために、秋田智史は高速アナログデジタル回路および積算回路を、吉田佳一は時間デジタル変換回路を開発した。

ソフトレーザー脱離イオン化法は、TOF に固有の問題というよりも、イオン化法全般にかかわる問題であった。1980 年代以前から、光エネルギーを用いて有機化合物をイオン化する方法は提唱されていたものの、その質量範囲は限定されていた。というのは、イオン化の際に与えたエネルギーによって、試料分子がバラバラに壊されてしまうという問題があったからである。そこで吉田佳一が注目したのは、急速加熱による気相への脱離であった。急速加熱による気相への脱離とは、試料を可能な限り速く高温にすることで、分解よりも気化が優勢になるという現象である。この現象を利用するために必要となったのが、レーザーから発せられるエネルギーを集めて熱エネルギーに変換する媒体である。吉田がこの媒体

として目を付けたのが、ジャパニーズパウダーとも呼ばれる金属超微粉末 (Ultra Fine Metal Powder, UFMP) であった。UFMP の粒径はレーザーの波長と同程度であり、しかも粒子感に空間があるために、熱エネルギーが散逸する可能性も低い。この UFMP を試料に添加することによって、分子量 1500 程度までの分子イオンを計測できるようになった (吉田ほか, 2003)。

かくして、1984 年の 9 月に、レーザーイオン化マイクロプローブ質量分析計の試作機が完成した。しかしながら、約 2 年という短期間で開発されたこの質量分析計は、結果的に製品化されなかった。というのも、この時期に英国ケンブリッジマス社が同等の製品を発表したために、島津製作所は製品化の見送りを決定したからである (窪寺, 2006)。この判断により、レーザーイオン化マイクロプローブ質量分析計の研究開発プロジェクトは、中止の瀬戸際に追い込まれた。

6.1.2. 高分子測定への方針転換

プロジェクト解散という窮地に立たされた吉田多見男が取った行動は、質量分析計のプロダクトマネジャー (当時) であった窪寺俊也に相談することであった。この行動により、レーザーイオン化マイクロプローブ質量分析計の開発方針は、「何でも測れる装置」から「高分子のイオン化法の開発」へ変化した。というのは、GCMS の営業を通じて市場の状況を把握していた窪寺が、分子量の大きな試料をイオン化し測定することが大変強く求められていることを鑑みて、「高分子のイオン化法の開発に切り換えてチャレンジしてみてもどうか。その可能性が見えてきたら商品化を約束する」(窪寺, 2006, p.597) と明言したからである。窪寺との取り決めの結果、1984 年 10 月から、1 年半という期限付きで継続プロジェクト「高質量イオンの生成とその計測技術の開発」を開始することとなった。継続プロジェクトには高い目標が課された。もともと、吉田多見男は目標とする m/z を 1 万に設定して研究計画書を仕上げているのに対し、窪寺から課された m/z は 5 万だった。結果として目標とする m/z は 1 万に設定されたものの、1980 年当時、 m/z が 1 万以上の生体高分子を壊さないでイオン化することは不可能だと考えられていた (田中, 2003b)。このように、プロジェクトの開発目標は非常に高いものであった。

先述した UFMP の使用を基本線として、プロジェクトは先行するイオン化法も参照した。当時使用されていた、あるいは注目されていたイオン化法には、電子イオン化 (EI) や化学イオン化 (CI) といった旧来の方法に加えて、電界脱離 (FD) やプラズマ脱離 (PD) をは

はじめとする新規手法があった。中でも広く注目を集めていたのが、熱的に不安定な化合物をイオン化する方法として考案された高速原子衝突（FAB）である。FAB は、試料に中性粒子を衝突させてイオン化する方法であり、固体試料を液体に保持するためにマトリックス（イオン化補助剤）を使用するのが特徴である⁸¹。

マトリックスを使用するという点に着想を得た田中は、まず FAB で一般的に使用されるグリセリンをマトリックスに使用してみることに開始した。しかし、グリセリンは研究グループが当時使っていたレーザー（窒素レーザー）を吸収せず、高分子測定への道を直ちに拓くものではなかった。UFMP の使用という方法でも、有機溶媒の濃度を变化させるなどの試行錯誤を繰り返しても、高分子のスペクトルは見えてこなかった。すなわち、この段階で研究は暗礁に乗り上げてしまったのである。

そんなある時、1985年2月頃、田中は、偶然から高質量イオンの測定に先鞭を付ける発見をした。当時、UFMP を試料に混合させる際、保持剤としてアセトンを用いるのがプロジェクト内での一般的な方法であった。しかし、田中は間違えてアセトンの代わりにグリセリンを UFMP と混合させ、それをマトリックスとして使用してしまった。保持剤を間違えているのだから、失敗作として見過ごすのが通常の反応であるのに対して、田中は当時の様子を以下のように述懐している⁸²。

「UFMP の保持剤の有機溶剤として通常アセトンを用いていましたが、ある日、間違えてアセトンの代りにグリセリンを使ってしまったのです。UFMP は高いので捨ててしまうのはもったいない、これでも試してみるかと思い、何とその失敗作をマトリックス溶液として使ってしまいました。試料分析装置では通常真空中でイオンを測定する。グリセリンは真空中で徐々に気化します、いずれなくなる、待っていればそのうちイオンが見えるようになるだろう。でも、1分でも速く結果を見たい。レーザーを当てなが

⁸¹ 質量範囲だけを見れば、当時の最高は PD で、その分析可能質量は約 10 万であった。しかし、PD は分析に放射線源を用いるため、特別な実験室を必要とするものであり、簡便な方法とは言い難かった（日本質量分析学会、1989）

⁸² 近年になるほど、こうした実験を行うに至った経緯に関する田中自身の説明は、詳細なものとなっている。例えば、修士時代に専攻していた電磁波吸収の知見が活かされていた、といった説明である（田中ほか、2007）。しかし、これらは事後的な解釈である可能性が否定できないため、ここでは開発時期に比較的近い述懐のみを取り上げている。

らスペクトルを見ていました」(田中, 2003b, p.382)

ビタミン B12 を試料として行ったこの測定から、田中は、「ノイズと思われるピーク」(田中, 2003b, p.382), すなわち分子イオンによるわずかな信号らしきものを見出した。この成果に対して、当初はプロジェクトメンバーも半信半疑であった。しかも、この時に田中が見せたマススペクトルは、通常見せるような複数回の試行を積算したスペクトルではなく、1 回のみレーザー照射で得たものだった。リーダーの吉田多見男は、科学雑誌ニュートンのインタビューに対し、「実験では、最初から質量数がわかっている試料を使っています。信号が出るとしたらこの辺の時間だというのが計算からだいたいわかっているのです、そこをねらって見えています。田中君は、そこに信号が出たということです。しかし見に行ってみると、問題の場所にノイズのようなものがでる頻度が多いという程度でした」(ニュートン, 2003, p.44) と答えている⁸³。

その後、試料を変えて実験を繰り返す中でノイズと思われるピークが何度も観察されたことを以て、田中らは装置開発を急いだ。第二科学計測事業部から和気宏明と稲継範人が、システム部から大場克彦、湯村修司、磯部公造の計 5 名が参画し、一方で機械設計やデータ処理システムの開発を加速させながら、もう一方でグリセリンの混合量やレーザー光強度の最適化を行った。装置完成と試料作成条件の確立後には、吉田が目標としていた 1 万を大きく超えるカルボキシペプチターゼ ($m/z=34500$) の分子イオンの測定にも成功し、最終的には m/z 10 万のイオンの生成・計測にも成功した(吉田ほか, 2003)。

しかしながら、この成果もすぐには製品化に至らなかった。というのは、今度はプロジェクトメンバー自身がこの成果を過小評価したためである。1985 年には、引き続き行っていた積算回路やコンバーターの開発も一段落し、その成果を特許として出願することになった(JP01731501 と JP01769145)。しかし、特許出願の後が続かなかった。性能の一部が 2 から 3 倍向上しただけでは意味が少ないというプロジェクト内の意見に基づいて、市場調査もせずに製品化を見送る判断を下してしまったのである(田中, 2003a, p.49)。結局、この装置が製品化されたのは、プロジェクト完了(1986 年 3 月)以降のことであった⁸⁴。また、

⁸³ 引用中では質量数という言葉が使われているが、現在は m/z と呼称するのが一般的である。

⁸⁴ 田中は、新規装置の製品化のために、1986 年 5 月に事業部へ異動している。

プロジェクト完了以前は事業戦略の都合から学会報告を控えていたのに対し、プロジェクト完了以降になって、プロジェクトメンバーは相次いで学会報告を行った。

6.1.3. 埋もれゆく技術

島津製作所は、開発したレーザーイオン化 TOF を、1987 年に LAMS-50K という名称で発売した。事業部に異動していた田中も、その販売のために日本国内の顧客へ訪問し、分析の実演を繰り返した。LAMS-50K は、1 万以上の質量を有する有機化合物を測定できる質量分析計としては世界初のものであった。同年には、京都工業繊維大学で開催された日本質量分析連合討論会で吉田多見男、吉田佳一、秋田、田中、井戸の 5 名が報告を行い、続く 1988 年には 5 名が連名で『質量分析』誌へと 2 報の論文を投稿した。これらの研究報告に対して、日本質量分析学会は、吉田佳一と田中耕一に 1998 年度奨励賞を与えた。こうして、島津製作所の中央研究所から出でた新しい質量分析計は、新たな潮流を生み出すきっかけとなるかと思われた。

しかしながら、LAMS-50K は大きな注目を浴びなかった⁸⁵。1989 年に米国のシティオブホープ・メディカルセンターのテリー・リーが購入した以外に、この装置を購入する者が現れなかった。1 台が 5000 万円以上する装置であったことに加え、分解能や感度が不十分であったために、いまひとつ実用性に乏しいという評価を受けてしまったからである（田中、2003a, p.44）。国内の科学者コミュニティの間でも、当初 LAMS-50K は十分な評価を受けなかった。1988 年に日本質量分析学会で奨励賞を受賞したものの、それでも直ちに LAMS-50K の後続となるような装置は国内で現れなかった。窪寺は、当時の状況を「新たな測定分野を切り開いた LAMS-50K に期待する研究者もいましたが、おおかたの研究者は醒めた感じであった」（窪寺、2006, p.604）と振り返っている。その理由は、日本質量分析学会でソフトイオン化の研究を行っている科学者は 10 名程度と少数であり（能美、2003）、成果の重要性を認識できる科学者が多くなかったことにあると考えられる。結果として、国内では、レーザーイオン化の研究に追随する者はすぐには登場しなかった。

こうした状況に加えて、島津製作所内部での優先順位もレーザーイオン化質量分析計の

⁸⁵ 論文の被引用回数に基づいて田中の業績を評価した調（2004）は、「1989 年に田中氏は日本質量分析学会奨励賞を受賞しているとはいえ、後付け的ではあるが、ノーベル賞受賞まで妥当な評価を受けてきたとはいえないであろう」（p.93）としている。

開発中止に拍車をかけた。島津製作所全体としては、より汎用的な分析が可能なガスクロマトグラフ質量分析計の開発に重点を置いていたからである。質量分析計の開発に携わっていた島津製作所の御石浩三は、1980年代の島津製作所の方針と、レーザーイオン化を次のように関連づけている。

「一方で、クロマトグラフとの複合化はどんどん進めて、こちらのほうでビジネスをメインに進めていたっていうのが80年代です。ただ一方で、やはり大きな分子でイオン化というのもずっと無視し続けるわけにはいかないので、研究所レベルで、とにかく対競合戦略の中で従来に無いものを作ろうというのが、レーザーを使ったイオン化での技術開発の動機付けじゃないかと思います。島津は親和性の問題もありますけど、クロマトグラフを持っていたということと、クロマトグラフとの複合化を軸足にして動いていた。その分、イオン化への取り組みは遅れていたものの、突発的にMALDIのような成果が出たケースもありますけども。」⁸⁶

このように、そもそも島津製作所が重視していたのは、クロマトグラフとの接合によって装置を汎用化していくことであり、レーザーイオン化の開発は中央研究所での探索的研究の域を出なかったのである。もともとクロマトグラフの製造販売を行っていた島津製作所は、GC/MSの開発に出遅れると、クロマトグラフのシェアまでをも失いかねなかった。しかも、1990年代からは液体クロマトグラフ質量分析計(LC/MS)の開発も重要な課題として登場した。このような状況の中で、LAMS-50Kの後継装置を社内で公式的に開発することは叶わなかった。そのため、事業部に異動してガスクロマトグラフ質量分析計の開発・販売を手がけることになった田中は、非公式的にレーザーイオン化質量分析計の開発を続行した。結果的に、以下に示す御石の発言のように、島津製作所が1989年に買収した英国のKRATOS社を研究拠点として、そこに田中が1992年に出向することで、研究が何とか継続されるという状況となった⁸⁷。

⁸⁶ インタビュー[2].

⁸⁷ KRATOS社では、島津製作所の意向とは別に、レーザーイオン化の研究が行われていた(インタビュー[2])。田中がKRATOSに出向した直接の契機は、同社の顧問を務めていたロバート・コッター(当時ジョンホプキンス大学)が田中を指名したことにある(日経バイオビジネス, 2002)。

「我々（事業部）が（上層部から）求められたのは、LC/MSを何とかしようというものでした。90年代の前半ぐらいからですね。一個ビジネスとして足元を作っているGC/MSの対海外メーカーとの競合と、新しい製品としてのLC/MSへの展開というのが90年代です。その中でMALDIはもうKRATOSでせっせとやってもらおうと、その状況でMALDIはもう本社では開発できない。社内的にはもうやっぱりGC/MSはGCのビジネスに影響するように、LC/MSがあるかないかがLCのビジネスに影響するという事実が起こりうる。というか、まず間違いなく起こっていたので、ここをなんとかするのが最優先課題として出てきたというのがその時期ですね。」⁸⁸

KRATOS社に出向した田中は、Kompact MALDIというベンチトップ（卓上）型の製品を持ち帰り、1992年から本社営業部隊が販売活動を開始した。この頃でも、島津製作所は世界を事実上リードしていた⁸⁹。加えて、MALDIという名称が製品名に含まれているように、この頃には手法が1980年代よりも洗練されたものとなり、かつその知名度は向上していたと言えるだろう。しかしながら、当の開発者が田中であることは、島津製作所内ですら十分に認知されていなかった。MALDIの営業を当時行っていた島津製作所の山内博志は、レーザーイオン化法に使用するマトリックスを改良して分析対象を押し広げ、その手法にMALDIという名称を付けたフランツ・ヒレンkamp（当時ミュンスター大学）と、ポストドクとしてヒレンkampの弟子になったマイケル・カラス（当時フランクフルト大学）が開発者であると誤認していたという。

⁸⁸ インタビュー[2]。括弧は筆者による補足。このことは、MALDIが対象とするマーケットの想定規模が小さかったことを意味しない。むしろ「世界中がやっぱりタンパク質とか、いわゆる大きな高分子を捕まえたいという目標みたいのがあって、それを実は狙っていたんですよね」（インタビュー[1]）。それでも、GC/MSやLC/MSの市場の方が遥かに大きかったために、そこでのシェア獲得が最優先事項となったと思われる。

⁸⁹ 『科学機器年鑑』によると、1995年の国内トップシェアは島津製作所である（正確な実績値が公開されていないため、参考値による推定）。1996年から島津製作所は国内トップシェアの地位を失っている。1996年から1999年の国内トップシェアはPerceptive社である。本論文は島津製作所がMALDIを普及させられなかった原因を追及する性格のものではないため、業績に関する議論は本論文の範囲ではない。

「ただ、私が売り始めた時なんかは、私もてっきりヒレンキャンプ先生とかカラス先生の技術だと思いながら売ってましたから。社内の人間でもそこまで。田中自身は知っていたかもしれませんが。私自身は知らずに、『海外の技術なのに、お前よく知っているな』という感じでした。私ら売っている本人たちも、『実はうちにはすごいエンジニアがいますね』ぐらいしか言ってなかったですから。」⁹⁰

このように、1980年代に島津製作所内部では十分に評価されていなかったレーザーイオン化飛行時間型質量分析計（後のMALDI/TOF）は、1990年代になると海外産の技術として国内で評判が立ち始めた。換言すると、島津製作所がLAMS-50Kを上市したのに若干ばかり立ち後れる形で海外での改良が大きく進み、その研究結果が国内にフィードバックされるという流れの中で普及を遂げてきたのである。それでは、なぜこの期間に海外での改良が進み、大元の成果が海外産であるかのように喧伝される（もしくは、そのように認識される）という結果になったのだろうか。次節では、科学者コミュニティにおけるMALDIの普及を促進した数名の行為者について記述する。

6.2. 科学者コミュニティへの情報伝達

先述したように、ソフトイオン化法の国内科学コミュニティは規模が小さく、島津製作所でも開発が一時中断されたために、そこでレーザーイオン化飛行時間型質量分析計の発展が止まってしまうかと思われた。しかし実際には、島津製作所の成果は海外の科学者コミュニティに引き継がれ、そこでの成果がMALDIを歴史の表舞台へと引き上げることになった。本節では、高地位者の採用による効果の1つとして、成果を科学者コミュニティに引き継ぐにあたって役割を果たした科学者に注目する。

6.2.1. 契機となった学会発表

研究成果が広まる契機として通常考えられるのは、学会発表や論文というチャンネルであろう。最初の学会発表は、1987年5月に京都工業繊維大学で開催された日本質量分析連合討論会におけるもので、ここでは当時のプロジェクトメンバーであった5名がそれぞれ報告を行った（木村・青山, 2002）。この成果を取りまとめたものは、日本質量分析学会の雑誌

⁹⁰ インタビュー[1].

『質量分析』(現 Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan) に 1988 年に掲載され (吉田ほか, 1988), 1988 年度の日本質量分析学会奨励賞を受賞した。このように, 成果に対して一定の評価は与えられていた。しかしながら, 前節で示した窪寺の述懐のとおり, この時点での国内科学者コミュニティによる反応は大きなものではなかった。

島津製作所の研究グループによる研究成果に対する追従が国内ではすぐに生じなかったのに対して, 海外では実績のある科学者が追従の姿勢を見せた。この追従を招いた直接的な契機は, 1987 年 9 月 15 日から 18 日にかけて開催された日中共同質量分析シンポジウム (Second Japan-China Joint Symposium on Mass Spectrometry) でのポスター発表 (Tanaka et al., 1987) であった。というのは, この発表成果が質量分析の分野で著名な科学者の目にとまり, データを自国へ持ち帰るなどして, その成果を他の科学者へと広めたのである。

中でも後の MALDI の発展に重要だったと考えられるのが, 松尾武清 (当時大阪大学) とロバート・コッターである。当時, 大阪大学の助教授として質量分析計の研究を行っていた松尾は, シンポジウムで田中の講演を直接聞いており, その成果の重要性をいち早く認識していた。そこで, 松尾は田中に対して, レーザーイオン化の技術を英語論文にすることを強く要請した。当初, 田中は英語で正式論文など書けないと考え, 渋々ながら受諾する程度のみ心持ちであった (田中, 2003b, p.383)。研究グループの助けを借りながら執筆した論文は, 1988 年 6 月 6 日に『Rapid Communication in Mass Spectrometry』誌に投稿され, 投稿と同時に受理されている (Tanaka et al., 1988)。投稿と同時に受理された背後には, 論文のスポンサー・レフェリーとして著者に名を連ねていた松尾の後押しがあった (毎日新聞, 2002)。その後この論文は, MALDI の元祖として扱われるようになっていった。

海外雑誌という公式のチャンネルへの道筋を整えたのが松尾だとすれば, コッターは非公式なチャンネルで海外科学者へ情報を伝えた存在であった。コッターは, シンポジウムの時点で質量分析分野における権威と評されていた人物であり, 後にアメリカ質量分析学会 (ASMS) の学会長を務めた程の人物である⁹¹。シンポジウムに参加していたのも招待講演を行うためであった。このとき, コッターは招待講演で「レーザーイオン化質量分析法では高分子量イオンの検出は不可能だろう」(吉田, 2003a, p.173) と述べ, プラズマ脱離 (PD) が有望な手法であると考えていた。それを聞いた田中は, コッターに対して自分たちが測定したスペクトルを見せ, レーザーイオン化で高分子量イオンの検出が行えることを主張し

⁹¹ コッターが ASMS の会長を務めたのは, 1998 年から 2000 年にかけてである。

た。コッターは当初驚いたものの、田中のポスターに示されているスペクトルを見て納得し、スペクトルのコピーを持ち帰った。そして、後にコッターの妻となるキャサリン・フェンスロー（当時メリーランド大学）とともに、持ち帰ったスペクトルのコピーを用いながら、田中が開発した技術の説明を欧米の科学者コミュニティに広めていったのである（ASMS, 2014）⁹²。

6.2.2. 育ての親：ヒレンキャンプとカラス

国内で日の目を見なかったソフトレーザー脱離イオン化法は、コッターの手によって欧米へ伝えられ、ドイツでMALDIとして花開くこととなった。田中たちの成果は、討論会の抄録がまとめられるよりも早く質量分析関連の学会に速報され、質量分析に携わる科学者の中で話題を呼んだ（田中, 2003a, p.58）。1987年にミュンスターで開催されていたシンポジウムでも、レーザーイオン化によって高質量分子が分析できるらしいとのニュースが科学者間で飛び交った。それを聞いてレーザー脱離イオン化に再挑戦することを決めたのが、MALDIの「育ての親」となるヒレンキャンプとカラスである。

ヒレンキャンプは、LAMMA 500 とその後継機である LAMMA 1000 というレーザーマイクロプローブ質量分析計の開発を手がけたこともある、レーザーイオン化の専門家であった（Feigl et al., 1983）。しかも彼は、1983年にポスドクとして研究グループに参加したカラスとともに、LAMMA 1000 を用いてジペプチドの分析を行い、試料にマトリックスを混合するという方法にたどり着いていた。彼らは、1985年の論文で、「マトリックス支援レーザー脱離」（Matrix-Assisted Laser Desorption）という用語を使用した（Karas et al., 1985）。

しかしながら、技術的な困難と資金調達の失敗のために、研究には苦労が伴った。ヒレンキャンプによれば、当時はレーザーイオン化でマススペクトルを記録するという試み自体が信頼されておらず、ドイツ研究評議会（German National Research Council）のファンドに2回リジェクトされており、分析化学の世界で最大規模の『Analytical Chemistry』誌にもレーザーイオン化研究の論文をリジェクトされた経験があるという（Handley & Harris, 2001）。

⁹² フェンスローもまた、優れた女性化学者を顕彰するための Garvan-Olin Medal を1985年に受賞した科学者である。ASMS とケミカル・ヘリテージ財団（現 Science History Institute）が共同で実施したオーラルヒストリー・プロジェクトでは、フェンスローに対するインタビューも実施されている（ASMS, 2014）。そこで彼女は、田中らの成果を国際的に広めたこと、および国際学会で田中と会うたびに議論を繰り返したことなどに触れている。

加えて、最終的にファンド提供者となった評議会が高分子測定に興味を示さなかったために、1986年の時点で彼らが測定できていたのは、 m/z が 3000 に満たないメリチンに留まっていた (ASMS, 2013).

このような状況の中で田中の成果について聞き及んだヒレンキャンプとカラスは、レーザーイオン化によってタンパク質の測定を行える可能性があることを認識しただけでなく、田中の成果に改良の余地が存在することを認識した。そこでヒレンキャンプとカラスが改良策として注目したのは、マトリックスを調整することと、装置の電圧を上げることであった。田中がマトリックスに使用していたのは UFMP という無機化合物であったのに対して、ヒレンキャンプとカラスは有機化合物を使用することによって、分析可能分子量の上限を高めることに成功した。これと同時に、真空中のイオンに印加する電圧を高めることで、より高速にイオンを飛ばすことによって分解能を高めた⁹³。こうした改良の結果、1988年にボルドーで行われた国際質量分析会議 (International Mass Spectrometry Conference) では、 m/z 100000 を超える β -ガラクトシダーゼのスペクトルを報告するに至った (Karas & Hillenkamp, 1988)。この報告は、フランク・フィールド (当時ロックフェラー大学) とその弟子であるブライアン・チャイトの関心を焚きつけ、フィールドは自分たちも同型装置を製作しようチャイトを説得し、レーザーイオン化の研究を本格的に開始した (ASMS, 2009)。

その後、ヒレンキャンプ達は、マトリックスにシナピン酸を用いたソフトイオン化に成功していたロックフェラー大学の研究グループ (Beavis et al., 1989) と共同研究を行い、低分子化合物をマトリックスとして用いる手法を確立するとともに、レーザー光源の調整を含む多種の改良に取り組んだ。こうした改良の結果として誕生したのが MALDI である。彼らは 1991年に『Analytical Chemistry』に掲載された総説の中で、MALDI (Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization) という名称を用いながら、タンパク質の分析に応用可能な手法であることを喧伝したのである⁹⁴。

振り返ってみると、島津製作所のプロジェクトと、ヒレンキャンプとカラスのグループは、

⁹³ 彼らが実験装置に用いていた LAMMA 1000 の電圧は 3kv であったが、最終的には約 10kv にまで電圧が引き上げられた (Handley & Harris, 2001)。

⁹⁴ MALDI (Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization) という用語の初出は、この 1991年の論文 (Hillenkamp et al., 1991) である。1985年の時点では、Matrix-Assisted Laser Desorption という用語を使用している。

ほぼ同時期にレーザーイオン化飛行時間型質量分析計の開発に取り組んでおり、開発を競っていたと言えないこともない（茂里ほか, 2015; 上野, 2003）⁹⁵。タンパク質の分析を実用化レベルにまで引き上げたのはヒレンキャンプとカラスであるため、田中にノーベル化学賞を与えたのは間違いである、という意見を持つ専門家も一定数存在する⁹⁶。しかしながら、田中の研究がベースとなって MALDI が進歩したという側面は否定できないであろう。というのも、ヒレンキャンプ達も 1985 年の時点で UV レーザーを用いた脱離イオン化が有機物のイオン化を促進することや、そこにマトリックスを導入するというアイデア自体は持っていたものの、そこで分析の対象となっていたのはタンパク質よりも分子量の小さなジペプチドであり、 m/z 10000 を超えるようなタンパク質を分析するには至っていなかったのである（山垣, 2007）。そんな時に田中の成果を知った彼らは、自分たちが取り組んでいる技術がタンパク質の分析に応用可能であることを認識し、タンパク質測定への挑戦を再開したと考えられるのである（Handley & Harris, 2001）⁹⁷。

6.2.3. 高地位者の介在

このように、島津製作所で開発されたレーザーイオン化飛行時間型質量分析計およびソフトレーザー脱離イオン化法は、ヒレンキャンプとカラスをはじめとする科学者の尽力によって MALDI という形に結実した。この過程において、タンパク質分析の可能性を示した田中をはじめとする島津製作所のプロジェクトメンバーだけでなく、その改良に取り組んだ

⁹⁵ ヒレンキャンプに対して行われたオーラル・ヒストリーによれば、当時レーザーイオン化に本気で取り組んでいた研究グループは、世界で3つか4つであった（ASMS, 2103）

⁹⁶ 田中が 2002 年のノーベル化学賞を受賞したのは、ヒレンキャンプ達が田中論文を引用したために、初めてタンパク質の分析に成功したのが田中であると判断されたからである（木村・青山, 2002）。一方で、ヒレンキャンプとカラスの開発した手法こそが MALDI の源流であって、田中の成果は厳密には MALDI と異なるという主張も散見される（例えば, Griffith, 2008）。確かに、マトリックスに低分子化合物を用いて感度を向上させ、その手法に MALDI という名称を最初に付けたのは、ヒレンキャンプとカラスである。本論文は、MALDI の原理を示したのは田中であり、それを MALDI として実用化したのがヒレンキャンプとカラスであるという、ノーベル賞選考委員会の判断を基準としている。

⁹⁷ 田中は、ヒレンキャンプとカラスが MALDI の改良に尽力したのは、自身の研究について知って以降のことだとしている（田中・和田, 2005）。一方、ヒレンキャンプ自身は、田中の研究を見て改良に着手したとは明言していない。

ヒレンキャンプとカラスが重要な役割を果たしたのは言うまでもないだろう。

事後的な解釈になるけれども、田中の成果を欧米の科学者コミュニティへ広める手助けをした松尾とコッターが果たした役割も無視できない。田中の研究成果が公表された第2回日中連合質量分析討論会は、開催地が日本だったこともあり、必ずしも世界的な注目を集めるものではなかったと想像できる。こうした状況での発表に対して、松尾は自らも編集委員を務める国際誌への投稿を熱烈に要請し、ソフトレーザー脱離イオン化法を科学者コミュニティへ伝達する手助けをした。コッターとフェンスローもまた、田中が提示していたスペクトルのコピーを持ち帰り、ソフトレーザー脱離イオン化法の存在を科学者コミュニティに流布させた。こうした活動は、それまでに質量分析の世界で種々のイオン化法を研究し、幅広いネットワークを有していた2人だからこそ可能なことであったと思われる。

加えて、MALDIの開発に成功したのがヒレンキャンプとカラスであったことも幸いだったかもしれない。というのは、後にノーベル化学賞を受賞する田中の業績に比べて、ヒレンキャンプ達の業績は速いペースで学术论文に引用されていったのである。Web of Scienceによると、『Analytical Chemistry』誌に掲載されたヒレンキャンプ達の1988年の論文(Karas & Hillenkamp, 1988)は、出版後3年で516報、5年で1420報もの論文に引用されている。一方で、田中たちが『Rapid Communication in Mass Spectrometry』に投稿した論文(Tanaka et al., 1988)は、出版後3年で16報、5年で39報の論文にしか引用されておらず、10年でも58報にしか満たない(原・赤池, 2017)。両ジャーナルのインパクトファクターが異なるため同列に比較することはできないけれど、田中の業績はノーベル化学賞を受賞するまで比較的埋もれた存在となっていたのである。これに対して、ヒレンキャンプとカラスの業績は一挙に広まっていった。ヒレンキャンプ自身は、「高分子の分析に関する論文を出す前の1986年を思い浮かべて欲しい。その後多くの人たちが流行に乗ってきた(jumped the bandwagon)けれど、当時そんな様子は全くなかった」(ASMS, 2013, p.107)と述べている⁹⁸。このような流行が生み出されたのは、開発者が既に質量分析の分野で実績を挙げてきたヒレンキャンプとカラスであったことと、無関係ではないだろう⁹⁹。

⁹⁸ 邦訳は筆者による。原文は、"Remember, 1986, that was before the first publication of larger protein [came out.] So later on, of course, many people jumped the bandwagon, but not at that time, yet, I may say.", である。

⁹⁹ 論文の内容を厳密に比較することはできないし、ヒレンキャンプ達の成果の方が優れていたという言説も存在する(Griffith, 2008)。しかし、後にノーベル化学賞を受賞しているの

要約すると、質量分析によってタンパク質の分析が可能になっていった背景には、単にその可能性を有する技術が開発されただけでなく、その技術をより広い科学者コミュニティに伝達する者や、それに呼応して技術を進歩させ、ある種の流行を生み出した者が存在したのである。これらの行為者が存在しなければ島津製作所の成果が海外の科学者コミュニティに伝達されるのは遅れ、結果的に MALDI の普及も立ち後れるか、そもそも実用化可能な成果として成立しなかった可能性が高い。

6.3. 更なる普及と新分野の開拓

前節で述べたように、島津製作所で生まれたソフトレーザー脱離イオン化法が MALDI という手法へ進歩を遂げたのは、ドイツのヒレンkamp とカラスの貢献が大きかった。ヒレンkamp とカラスの成果は、科学者コミュニティに迅速に広まっただけでなく、装置メーカーの参入も誘発した。MALDI を飛行時間型質量分析計とバインドした MALDI/TOF という装置の普及は、装置メーカーを通じてグローバルに展開されていったのである。

しかし、ヒレンkamp 自身がバンドワゴンという言葉を用いたように、MALDI の勃興は一時的な熱狂を生むに留まっていた可能性もあったはずである。加えて、ただ単に商用機が多数投入されただけでは、普及が進んできたことの説明にならない。説明すべきなのは、単に新機軸の装置が上市されたという事実でなく、それが科学者コミュニティに根付き、確固たる地位を築いていった過程であろう。

そこで本節では、MALDI/TOF が特定の研究領域で欠かせない存在となっていった過程を見ていく。1 つの流れとして注目するのは、1990 年代中盤に登場したプロテオミクス (proteomics) という研究領域である。プロテオミクスは、タンパク質の構造と機能の解析を主目標とする領域であり、ヒトゲノムの解読が完了するのと前後して、科学者だけでなく政府や企業といった多様なプレーヤーを巻き込みながら進展してきた。MALDI/TOF は、この領域が進展するために欠かせないツールであったのと同時に、領域がブームのような形で勢力を増し、国家的な戦略と結びついていくことによって一挙に普及が進んだ。こうした普及過程から判るのは、普及の中盤以降になると、高地位者による採用や関与よりも、補完的な技術や制度の発展が普及を後押しするようになっていくということである。

が田中であることを考えると、田中の成果の質が低いために引用されなかったという説明は、部分的にしか成立しないと思われる。

6.3.1. 装置メーカーの参入

MALDI の確立だけでなく、商用機の開発に先行したのも欧米企業であった。1990 年代前半には、フィニガン・インストゥルメント（以下フィニガン）やブルカーといった業界大手の企業が、続々と MALDI/TOF への参入を果たした。最も早期に参入したのはフィニガンである。1988 年からヒレンキャンプ達との共同研究を開始していたフィニガンは、Vision 2000 という装置を開発した (Bahr et al., 1992)。ただし、Vision 2000 を以てフィニガンにおける MALDI/TOF の開発は打ち切られた。

このことが幸いしてか、ドイツ出身企業であるブルカー社も同時期に参入を果たした。フィニガン社における開発の中心的人物であったウルリッヒ・ギースマンが、ブルカーへ移動したのである (ASMS, 2013)¹⁰⁰。ヒレンキャンプ達にとっても、これは好都合なことであったと考えられる。彼らだけでもあるレベルの装置までは作れるものの、彼らはエンジニアではないため、「装置メーカーの人間が入ってこないパフォーマンス上がらなくなる」(インタビュー[3]) 恐れがあったからである。

初期に最大のシェアを獲得したのは、パーセプティブ・バイオシステムズ（以下、パーセプティブ）という新興企業であった¹⁰¹。1989 年に米国マサチューセッツで創業したパーセプティブのマーヴィン・ヴェスタルは、ボルドーのシンポジウムでヒレンキャンプ達の成果を目にしており、そこで商用 MALDI/TOF の開発を決めた (ASMS, 2013)。しかも彼は、MALDI/TOF の市場がアカデミアになることを予見して、科学者との連携関係を構築することを重視した¹⁰²。その後、パーセプティブ社は 1997 年にパーキンエルマーに買収され、パーキンエルマーの一部門であったアプライド・バイオシステムズの傘下に入った。

このように、MALDI/TOF には登場初期から装置メーカーの参入が相次ぎ、海外で普及が進展していった¹⁰³。それでも、1990 年代の市場規模は決して大きくなく、2000 年までに

¹⁰⁰ Finnigan 社は、1990 年に Thermo Instrument Systems (現 Thermo Fisher Scientific) に買収された。

¹⁰¹ 『科学機器年鑑』1997 年版によると、1996 年の MALDI/TOF 国内トップシェアはパーセプティブ社であり、二番手が島津製作所、三番手がブルカー社であった。

¹⁰² インタビュー[3]。

¹⁰³ 日本では島津製作所での開発が一時中断されていただけでなく、日本電子や日立ハイテクテクノロジーズといった大手企業も MALDI の開発には参入しなかった。日本電子は、主要製

MALDI/TOF を採用した論文数は、400 報弱であった (図 5-1)。それが 2000 年代に入ると普及のペースが加速し、2005 年には約 1750 報、2010 年には約 3800 報の論文で、MALDI/TOF が採用されるに至った。

6.3.2. プロテオミクスの勃興

生体高分子の研究は、化学と生物学が互いに発展を促してきたという歴史を持つ (佐々木・二木, 2014)。その中でも注目されてきたものの 1 つが、タンパク質である。古くは戦前からタンパク質化学という分野によって生体内におけるタンパク質の作用が探究されてきたし、1980 年代には、新しい機能を持ったタンパク質を人工的に創製することを目指すタンパク質工学という領域も登場している。生物学の分野でも、タンパク質や核酸などの生体高分子の構造に基づいて生体高分子の機能を探究する試みが行われてきた。

こうした動きが古くからありながら、タンパク質解析に全世界的な注目が集まりプロテオミクスという領域が勃興したのは、1990 年代に入ってからであった。むしろそれまで注目されていたのは、生物の全遺伝子情報の集合体を指すゲノムの解析であった。ワトソンとクリックによって DNA の二重らせん構造が発表されて以来、遺伝子の配列と機能の解明に大きな注目が集まっていたのである (兼崎, 2017)。ゲノム解析が注目を集めたのは、単にそれが生命現象の解明に向けた大きな一歩であっただけでなく、診断治療や創薬といった分野に絶大な威力を発揮することが期待されたからである。この期待は政府予算に反映さ

品であった磁場型質量分析計からの移行に手間取り、パーセプティブ社の製品を輸入販売するに留まっていた (インタビュー[4])。日立ハイテクノロジーズは、神原秀記を中心として 1980 年代初頭まではイオン化法の研究を行っていたものの、「質量分析のような古い分野でなく、これから世界をリードして新しい分野を開拓するような技術開発でなければ人も研究費もつけられない」(神原, 2014, p.18) という上層部の判断により、DNA シーケンサの開発に移行していった。島津製作所で開発が再開されて以降も、海外装置メーカーとの差は中々埋まらなかった。島津製作所の山内は、当時の様子を次のように振り返っている。すなわち「最初のうちは一瞬海外メーカーに勝つんですけども、先ほど言ったマトリックスの使い方であるとかノウハウが、論文の通り実験をやっていくことで、だんだんよそのメーカーにも蓄積されてきますよね。そうすると、やっぱり海外の論文のほうがはるかに多く出ますから、みんなやっぱりそれを真似して買うわけですよ。機械もそこに載ってる装置の方が良いものだと当然思っちゃう。改良もブルカーや海外メーカーの方が成功していきまして、先に行っていましたしね」(インタビュー[1])。

れた。1990年に発足したヒトゲノム計画には、2003年に30億の塩基対の解読完了宣言が出されるまでに、約30億ドルもの予算が投じられた。ゲノム配列が明らかになるにつれて、ゲノムの支配下で生産されるタンパク質の研究に大きな注目が集まるようになった。それは、タンパク質がゲノムに刻まれた生命情報の最終産物であり、それが生命現象を説明する重大な要因であると考えられたからである（磯辺, 2000）。科学雑誌『Nature』には、生体組織のタンパク質の包括的分析が最も進歩すべき分野であると同時に、それがゲノミクスよりも困難な課題であるという論考が掲載された（Nature, 1999）。

一般的に、プロテオミクスという領域が成立可能になった理由として挙げられるのは、(1) 遺伝子/タンパク質情報の蓄積（配列データベース）、(2) バイオインフォマティクスツールの拡充、(3) 高性能な質量分析計の開発とされる（渡邊, 2004）。ただし、タンパク質の解析に質量分析を用いるという発想は1980年代まで現実的なものと考えられておらず、質量分析計をタンパク質解析に用いる研究の展望について不確実性が残っていた。そのため、高性能な質量分析計をプロテオミクスへ応用できる可能性が、どのように拓かれていったかを考える必要がある。

プロテオミクスという領域で質量分析計が大きな役割を果たすようになるにあたって、2つの要因が欠かせなかったと考えられる。1つは科学者による質量分析計の喧伝であり、もう1つが質量分析計を使うためのインフラストラクチャの整備である。1つめの喧伝という点については、一部の科学者が質量分析計に関する言説を構築していったことが、プロテオミクスにおける質量分析計の地位を固めることに繋がった可能性がある。2つめのインフラストラクチャは、個別の科学者という枠組みを超えてデータベースが構築されることにより、質量分析計を使用することの便益が高まったことを意味している。

(1). 質量分析学者による喧伝¹⁰⁴

先述のように、質量分析計を用いてタンパク質の分析を行うという構想は、比較的近年になって登場したものである。MALDIやESIという技術が開発された直後の時点でも、それを用いた研究に大量に科学者が流れ込んだ訳ではない。これらの装置を用いて研究を行うことが将来的に貴重な知見をもたらすか否かという意味での不確実性は、この時点では低減されていなかったためだと考えられる。実際、プロテオミクスという概念が提唱されるの

¹⁰⁴ 本項の記述は、高山（2003）を参考にしている。

は、MALDI/ESI の開発よりも少し遅れた 1995 年である。プロテオミクスという概念は、ゲノム配列の解析は出発点に過ぎず、生体機能を理解する最初の一步に過ぎないという問題意識のもと、1995 年にマーク・ウィルキンスが提唱した (Wilkins et al., 1995)。彼がタンパク質の分析に注目したのは、遺伝子の発現を大規模に検証するアプローチの 1 つとしてそれを見ていたからである。

こうした状況の中で、一部の質量分析計の専門家はプロテオミクスという概念に注目し、質量分析計を用いた研究論文を出版したり、コミュニティにおいてオピニオン・リーダー的な役割を演じたりすることによって、その可能性を説いて回った。中でも早期からこの発想に目を付けたのが、欧州分子生物学研究所 (EMBL) で装置研究のグループリーダー (当時) を務めていたマティアス・マンであった。彼はエレクトロスプレーイオン化法 (ESI) の開発によって 2002 年にノーベル化学賞を受賞したジョン・フェンの弟子であり、自らもナノ・エレクトロスプレー法というタンパク質同定技術の開発により 1996 年にエドマン賞を受賞している。彼は、フェンの弟子であった時代から ESI の研究に携わっていたことに加え、EMBL のグループでは、銀染色ポリアクリルアミドゲルを用いたタンパク質のシークエンス研究を行っていた (Fenn et al., 1989; Shevchenko et al., 1996)。これらの研究成果から、彼は「質量分析法に基づくプロテオミクス」(Aebersold & Mann, 2003) と題する論文で、今やプロテオミクスには質量分析計が欠かせないものとなっている、と喧伝したのである。

質量分析計に関連する科学者がプロテオミクスに進出していった例は、他にも見られる。高山 (2003) は、日米で開催されたタンパク質関連の研究会で主導的な役割を演じたのが、質量分析学者であったとしている。日本では、1997 年 5 月に大阪大学蛋白質研究所でプロテオーム研究に関する国内初のシンポジウムが開催され (平野, 1998)、この時の参加者のほとんどが、タンパク質化学と質量分析の専門家であったという (高山, 2003)。その後、日本ではこうしたコミュニティを核として、プロテオミクスに関する学会が形成されていくことになる。米国で開催されたタンパク質構造解析研究会 MPSA2000 でも、質量分析の専門家が複数の講演を行っている (Appella et al., 2001)。研究会で最初の報告者を務めたドナルド・ハント (当時バージニア大学)、マティアス・ウィルム (当時 EMBL)、ニール・ケルハー (当時イリノイ大学)、スコット・パターソン (当時アムジェン社) といった専門家が報告したほか、ルエディ・アーバーソルド (当時チューリッヒ工科大学) をはじめとする生物学者が、質量分析計を用いてタンパク質解析を行おうとしている旨を報告した。その後 2001 年には、プロテオミクスの国際雑誌『Proteomics』が刊行され、海外でもプロテオミ

クスの科学コミュニティが拡大していった。MALDI や ESI の普及は、そうしたコミュニティの拡大とともに進展していったのである。

注意が必要なのは、プロテオミクスという領域は特定個人の活躍によって形成されたわけではないという点である（高山, 2003）。すなわち、特定の科学者が質量分析計を用いて華々しい発見を行ったがために注目が集まったわけではなく、マンをはじめとする研究グループが質量分析計の応用可能性を喧伝していくことによって、漸次的にコミュニティが拡大していったというのが実際の姿だろう。ガン研究に関する学説が原ガン遺伝子説に収斂していく様子をバンドワゴンと表現した Fujimura (1997) の説明を参考にすると、次のように言えるかもしれない。すなわち、一部の専門家の喧伝によって、タンパク質解析による生命現象の理解という理論的言明と、それを分析するための質量分析計という装置が「理論と方法の標準化されたパッケージ」（Fujimura, 1997; 福島, 2017）という形で語られるようになり、「やれる」（doable）研究としての期待が高まっていったのである。換言すると、研究対象に特定の手法が示されることで、一定の時間軸の中で成果を挙げると予測できるようになる、もしくはそうなるであろうという期待が高まっていったと考えられる。

(2). インフラストラクチャの整備

如何に専門家によって有用性が喧伝されようと、それだけで MALDI や ESI の普及が進んだわけではない。というのも、質量分析計でタンパク質の解析が可能になったとしても、解析対象となるタンパク質の種類があまりに膨大であるために、網羅的解析を行おうにも個別のタンパク質を同定する手間が尋常ではなかったからである。そこで重要な役割を果たしたのが、プロテオーム情報のデータベースであった。

質量分析計を用いた一般的なタンパク質同定の流れは、①プロテアーゼによるタンパク質の消化・断片化、②消化物の脱塩・濃縮、③マスペクトルの測定、④データベースとの照合となっている（吉野ほか, 2004）。現在は広く利用可能なデータベースが存在しているため、③から④は簡便に行えるようになっている。具体的には、得られたマスペクトルを用いてタンパク質や核酸の配列データベースに対して検索を行い、そこに登録されている中で最もマスペクトルに適合するアミノ酸配列を探し出して、タンパク質を同定することができるのである。仮にデータベースが存在しない場合、測定したマスペクトルをもとにタンパク質のアミノ酸配列を解読し、試料が何であったのかを特定することになる。しかし、アミノ酸配列の解読には人手と時間を要するだけでなく、配列を解読してからでない

解析したタンパク質についての情報を得にくい。そのため、科学者は、時間をかけて解析したタンパク質が何にも使えない「くずタンパク質」であるという不確実性を背負わなければならない。こうした状況では、よほど潤沢な資金がある研究室でない限り、タンパク質解析に取り組もうと思わないかもしれない。

遺伝子の塩基配列やタンパク質のアミノ酸配列に関するデータベースは、科学者コミュニティを超えた国家のレベルが整備を進めてきた。これは、個別の科学者によって対処可能な問題でなかっただけでなく、こうしたデータベースを創薬基盤として産業に応用する試みが存在したためである。実際、ゲノムやタンパク質の網羅的解析を行う政府主導のプロジェクトは複数存在した。その代表例は、先述したヒトゲノム計画である。ヒトゲノム計画の後でも、国立衛生研究所 (NIH) による「医学研究のための NIH ロードマップ」を中心として、米国では政府主導で大規模な解析やライブラリの構築が試みられた (Kantor, 2008)。日本においても、創薬への応用を意図して、3000 種類にもものぼるタンパク質の基本構造の解明を目的とする「タンパク 3000」プロジェクトが実施された¹⁰⁵。2002 年から 5 年間行われたこのプロジェクトには、総額で約 580 億円もの予算が計上され、約 4000 もの立体構造を報告するに至った (文部科学省, 2007)。

このように収集された配列情報は、複数のデータベースに掲載されている。遺伝子の塩基配列については、日本の国立遺伝学研究所によって運営されている DDBJ (DNA Data Bank of Japan)、米国の生物工学情報センター (NCBI) が運営する GenBank、欧州バイオインフォマティクス研究所 (EBI) の EMBL-Bank から構成される国際塩基配列データベースなどが用いられている。タンパク質のアミノ酸配列については、米国 NCBI の GenPept、スイスバイオインフォマティクス研究所と EBI が共同で運営している Swiss-Prot、JST と大阪大学蛋白質研究所が支援している PDBj (Protein Data Bank Japan)、NIH の支援による PIR (Protein Information Resource) などが現存する。これらは科学者による報告を基にして構築されているデータベースであり、登録件数が 2000 年代初頭から爆発的に増大しているのが特徴である。Genbank と Swiss-prot に採録されている配列の件数推移 (図 6-1) は、タンパク質配列の件数 (Swiss-prot, 右軸) が 2000 年代中盤から一気に増大していることを示

¹⁰⁵ このプロジェクトは、タンパク質の立体構造決定を目的とするものであったため、NMR や X 線解析による測定が中心となっている。質量分析計は二次元構造を同定するものであるため、このプロジェクトでは中心的な役割を占めていない。

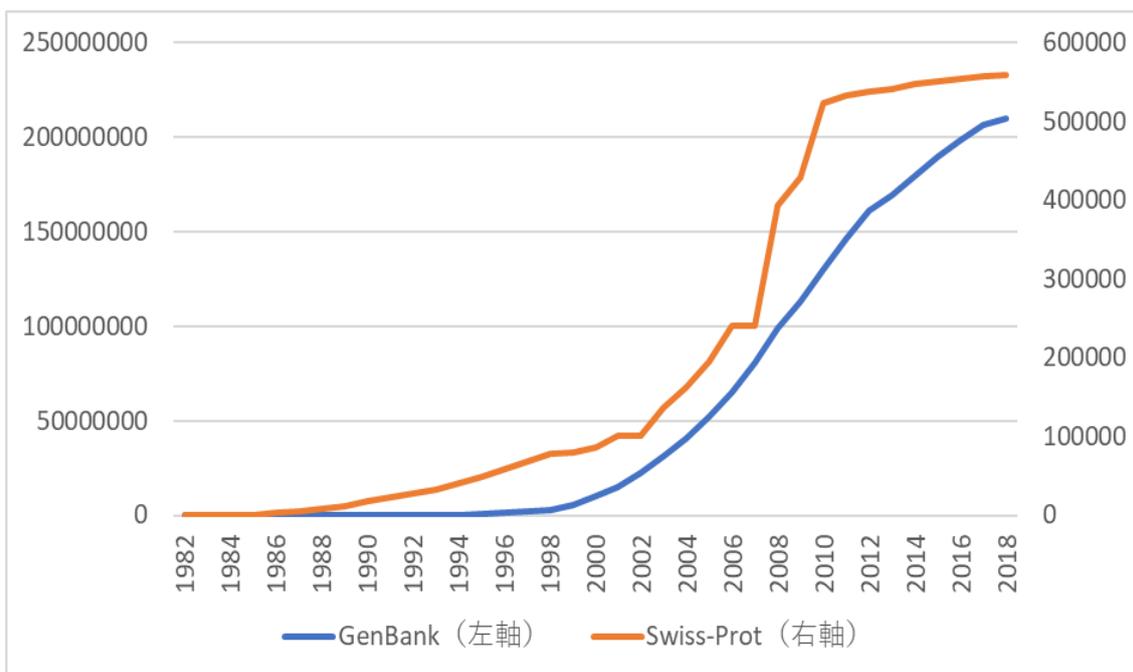


図 6-1. 配列のデータベース採録件数

(出典：各データベースの Web サイトより筆者作成)

している。

このように、分析において参照できる情報が一気に増大したことで、質量分析計を使用するメリットは相対的に増大したと考えられる。これは、解析の手間が軽減されるという理由だけに留まらず、解析の手間が軽減されるとそれまで参入できなかった科学者がタンパク質の解析を簡便に行えるようになるため、領域全体が活発化しやすくなるという理由もありうるだろう。科学者人口が増えていくことで研究の速度は上がっていき、それが装置の改良やデータベースという知識インフラの更なる充実に繋がり、それが更に領域の相対的魅力度を高める、という連鎖的な構造が存在していると考えられる。

6.4. 小括

本章では、MALDI の普及過程を追跡し、その過程で役割を果たしたと考えられる種々の要因に言及してきた。中でも重要なのは、島津製作所で生み出された成果を国外の科学者コミュニティに伝達した科学者の存在であろう。島津製作所では戦略的方针により一時中断された研究開発が、国内で埋もれることなく MALDI という成果に結実した理由の 1 つとして挙げられるのは、松尾やコッターという科学者がその成果を科学者コミュニティの情

報チャンネルに乗せたことである。ヒレンカンプとカラスは独自で MALDI に辿り着いていたかもしれないが、コッター達の貢献がなければ「レーザーでイオン化する」という発想が矢面に立つことなく、プラズマ脱離の研究に多くのリソースが割かれ、結果として MALDI の普及は大幅に立ち後れていたかもしれない。

MALDI の開発時点までに役割を果たした科学者もいれば、MALDI が生命科学分野で欠かせない装置としての地位を獲得していく段階で、宣教師的な役割を果たした科学者も複数存在した。島津製作所で開発が行われていた段階でも、タンパク質のような高分子を測定するというビジョンは確かに存在した。しかしながら、ヒレンカンプとカラスによって MALDI が開発されてから、生命科学領域で重点的に使用される装置となるまでには、10 年程度のラグが存在する。その理由として考えられるのは、タンパク質の解析が本当に「やれる研究」なのかという点に不確実性が存在したことである。原理的には可能な研究であっても、それが科学者のキャリアを存立可能にする研究であるか否かは、周囲がそれをどう捉えるかに依存している。質量分析計を用いてタンパク質を解析するという研究は、MALDI や ESI という技術の登場によって原理的には可能になったはずだけれど、それが研究領域として将来有望であることを認識するには、多少の時間を要したはずである。この意味において、プロテオミクスという新興領域に対する専門家の喧伝が、質量分析計の利用可能性に関する期待を発生させることによって普及を促進した、というのがここでの解釈である。

研究が「やれる」ようになっていく上では、知識インフラとでも呼ぶべきデータベースが整備されてきたことも促進要因であった。創薬基盤の成立という国家戦略は、当初は MALDI の普及と独立してデータベースの拡充を検索してきたものの、今やロードマップ上でプロテオミクスという用語で一括りにされ、MALDI もその傘の下に入っている。(日本学術会議, 2010; 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2004)。このように国家戦略に取り込まれて更なる普及を遂げていった背後には、データベースの拡充により解析の手間が軽減され、それによって科学者人口が増加し、それが更にデータベースの拡充を推し進めていき、それが更に科学者人口の増加をもたらすという自己強化的な構造が存在しているのかもしれない。

7. 質量分析計の汎用化

第5章と第6章では、主として質量範囲を規定するイオン化部の性能向上という観点から、質量分析計の技術進歩と普及に関する分析を行った。こうした基礎的なスペックの向上は、確かに質量分析計をはじめとする科学装置の進歩を語る上で欠かせないものである。しかしながら、質量分析計が今日までに普及を遂げてきた背後には、性能向上とは異なる次元での装置の進歩が存在する。それは、装置の汎用化という次元である。

本章の目的は、装置の歴史を振り返ることによって、質量分析計が汎用化していった過程とその必然性を明らかにすることにある。本章で見ていくように、質量分析計の発端は物理学研究であり、当初は物理学の専門家のみが質量分析計を取り扱っていた。この頃の質量分析計は、装置自体が巨大であることに加えて、専門的な教育を受けた者にしか十分に取り扱いえないものであった。すなわち、専門家以外の人間にとっては、あまり魅力的でない装置だったのである。1970年代になると、マイクロエレクトロニクスの進歩によって装置の汎用化が大きく進展し、装置使用のハードルが大きく低下した。具体的には、専門的な教育を受けた者しか操作できなかった装置が、徐々に「誰でも扱える」装置へと変貌を遂げてきたのである。医学や化学という領域に質量分析計ユーザーが登場し始めたのも、こうした汎用化の帰結である。

結論を先取りして言うのならば、装置の汎用化は、科学者と産業の双方にとって望ましい事態であった。科学からすれば実験者の技能を排除して客観的な知識を獲得することに繋がるし、装置メーカーからすればアプローチできる顧客の幅を広げることができるからである。質量分析計をラボや品質管理等で使用するユーザー企業からしてみても、装置の専門家を雇用したり育成したりする必要性がなくなる。このように、装置の汎用化によって不利益を被る主体が存在しなかったからこそ、質量分析計の汎用化が進行してきたのである。

本章では、まず質量分析計の進歩に2つの方向性があったことを指摘した上で、汎用化の意味内容と重要性を説明する。続いて、質量分析計の歴史を汎用化という観点から概観し、各時代でどのように装置の汎用化が進んできたのかを明らかにする。最後に、1970年代以後に汎用化が強力に推進されてきた過程を示しながら、質量分析計の汎用化が進んだ理由と、それが汎用化されることの意義を考察する。

7.1. 質量分析計の2つの進歩

本節では、質量分析計の進歩の方向性が、(1) 装置の基本性能の向上と、(2) 装置の汎用化という2つに大別できることを示す。その上で、装置の汎用化という次元がとりわけ近年の装置進歩を語る上で重要な位置づけになっていることを明らかにする。

7.1.1. 質量分析計の基本性能の向上

質量分析計をはじめとする科学装置の進歩という場合、通常想起されるのは基礎的な性能の向上であろう。基本性能の向上は、分析できる対象を広げたり、これまでよりも高精度での分析を可能にしたりと、新たな分析価値を付与するという意味で、重要な進歩の次元である。こうした進歩があるからこそ、これまで見ることも測ることもできなかった対象が分析の遡上に乗り、その結果として新たな科学的発見が生じることになる。第4章で説明したように、質量分析計の基本性能は、(1) イオンの検出が可能な m/z の範囲を示す質量範囲、(2) 分離できる m/z の最下限を表す分解能、そして(3) 検出可能なイオンの最低量を示す感度の3つである。ここでは、質量範囲と分解能がどのように向上してきたのかを見ていこう。

新たな分析機能の創出という点を直接に反映しているのが、質量範囲である。質量範囲は、質量分析計によって測定できる対象の範囲を決定するものである。質量範囲の拡大を支えてきたのはイオン源の改良であり、測定できる物質の範囲を広げるために、これまでに様々なイオン源（イオン化法）が開発されてきた。イオン源の改良による質量範囲の向上をグラフにまとめたものが、図7-1である。質量分析計の登場当初に使用されていたグロー放電イオン化や、その後に登場した電子イオン化（EI）は、扱える質量の範囲が小さかったため、当時の質量分析計では元素の測定を行うに留まっていた。1960年代からは無機化合物や有機低分子の分析が可能なイオン化法が登場するようになった。1980年代には、生体高分子をはじめとする高分子化合物の測定を可能とするイオン源も登場した。近年になるほど多様なイオン化法が提唱されているのは、質量分析計のポテンシャルが明らかにされることによって、分析者のニーズも多様化し、そうした多様な分析ニーズに応えうる装置が希求されるようになったためだと考えられる。

質量範囲だけでなく、分解能（質量分離部の性能）も大きく向上してきた。第4章で示し

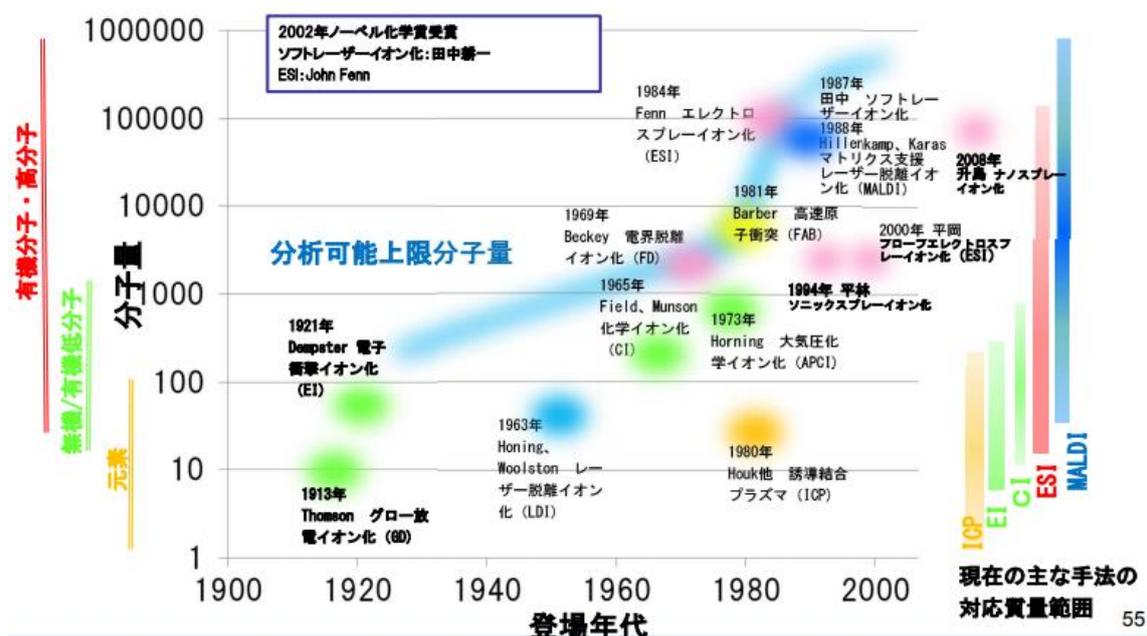


図 7-1. イオン化法の分析可能分子量と登場年代

(出典：文部科学省 (2015) p.55)

たように、分解能とは、種々の m/z を持つイオンを細かく識別できる度合いを指すものである¹⁰⁶。図 7-2 に、質量分離部が登場した年代と、それらの方式の分解能をグラフ化したものを示した。質量分析計が登場した当初は、二重収束型（磁場型、セクター型）というタイプの質量分離部しか存在しなかった。それが現在は、二重収束型よりも分解能は劣るけれど小型で取り回しの良い四重極型や飛行時間型、および二重収束型よりも高い分解能を誇る（フーリエ変換）イオンサイクロトロン共鳴型という方式が広く使用されるようになって

7.1.2. 質量分析計のもう 1 つの進歩：汎用化

質量範囲や分解能が向上することによって、質量分析計で分析できる対象の範囲が広がり、それに伴って質量分析計の応用分野も拡大してきた。しかしながら、こうした基礎性能の向上によって直ちに応用分野が拡大したと見なすことは難しい。というのも、質量分析計

¹⁰⁶ $m/z = 1000$ と $m/z = 1001$ を識別できる場合は分解能が 1000、 $m/z = 1000.0$ と $m/z = 1000.1$ を識別できる場合は分解能が 10000 というように、微細な差を識別できるものほど分解能が高いとされる。

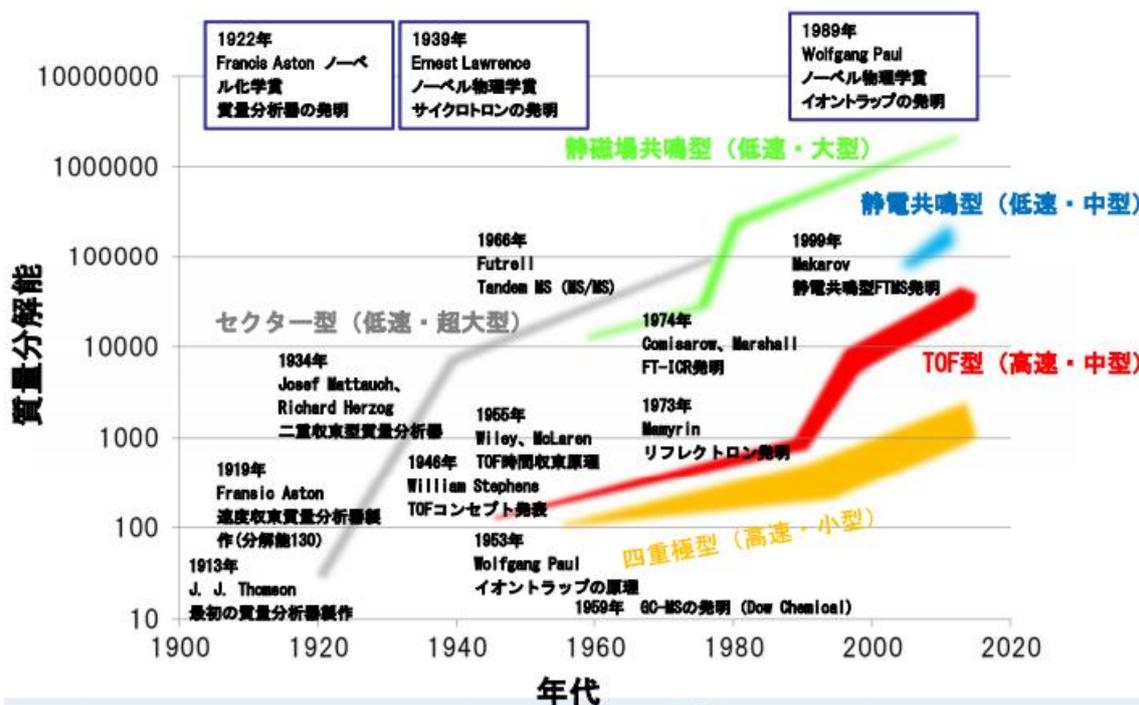


図 7-2. 質量分析方式と分解能の変遷

(出典：文部科学省 (2015) p.56)

は長らく、専門的な知識や訓練がなければ正しく使用することの難しい装置であったからである (Okimoto & Fung, 2016)。仮に専門的な人材のみが使用できる装置であり続けたとすれば、基礎性能の向上による便益を享受するのは既存のユーザーが中心であるから、今日のように多様な分野で装置が活用されるようにならなかったはずである。そのため、質量分析計が今日のように多様な領域で用いられるようになった背後には、単なる性能向上とは異なる次元での進歩が同時に存在していたと考えるのが妥当である。装置メーカーで質量分析計の開発に携わってきた島津製作所の御石は、過去半世紀の質量分析計の開発動向について以下のように述べている。

「大きな流れで言うと、質量分析という方法で有機化合物のいろんな情報が取れることがある程度分かってきたのが、石油化学燃料などを端緒として、1950年代から1960年代前半ぐらいだと思います。そこで最初に進んだのが、クロマトグラフとの複合化です。このクロマトグラフとの複合化の中で GC/MS というのが確立されていくわけですが、これが1つの大きな流れとしてできます。一方で、いろいろ分析法として

の有用性を皆さんが認知してくると、イオンにできない化合物がいっぱいあるという課題が出てきます。というよりも、イオンにできる化合物の方がはるかに少なかった。そこで、色々なイオンを作る方法の研究というのが、もう 1 本の軸として登場してきた、という流れです。」¹⁰⁷

このように、質量分析計の進歩においては、イオン化部や質量分析部といった基本的な要素の性能を上げることとは別の流れとして、クロマトグラフとの接合によって質量分析計の扱いやすさを向上させるという改良の流れも存在していた。こうした改良を、ここでは汎用化 (generalization) と呼ぶことにしよう。ここでいう汎用化とは、専門的な知識を持たない者でも、装置を用いて分析・測定ができる状態になることを指している。より具体的には、装置使用の簡便性や利便性が高まった結果として、使用者の知識水準に依存せずに分析・測定を遂行できるようになることを意味する¹⁰⁸。この意味の汎用化に該当する改良は、非常に数多く存在する。例えば、クロマトグラフとの接合は、質量分析計の質量範囲や分解能を直接高めているわけではないけれど、分析試料の調整や分離の手間を大幅に削減することによって、多様な領域での混合物分析を実用レベルに引き上げたといえる。他にも、笠間(2001)が質量分析計の「うらの性能」として挙げている諸要因(設置面積、装置重量、電源と冷却水、騒音、装置寿命)も、装置運用のコストを低減して相対的な利便性を高めているという意味で、汎用化の次元に属する。

「誰でも扱える」という意味で最も重要だった汎用化は、コンピュータとの接続による分析の自動化である。1980年代から進められてきたこの改良は、装置のパラメータ調整やスペクトルの作成といった専門的な仕事をコンピュータ制御に置き換え、専門的な訓練を受けたオペレーターの必要性を大きく低下させた。今や、コンピュータ上でマウスをクリックしたり、ボタンを押したりするだけで分析作業が完了してしまう場合も多い。東京大学で

¹⁰⁷ インタビュー[2].

¹⁰⁸ ある事物が複数の用途や分野に利用可能になること、というのが汎用化の一般的な意味であり。ここで汎用化という言葉に簡便性や利便性という独特の意味合いを持たせているのは、用途展開のためにそれが必要となると考えられるからである。すなわち、用途特異的な知識や技能を伴わなくても使用できるものでなければ、そもそも別の用途へ展開するのに困難が生じるはずであり、それ故に汎用化と簡便性・利便性はセットとして考えても差し支えないはずである。

ICP-MS の研究を行っている平田岳史は、質量分析計の汎用化が進んできたことを次のように表現している。

「メーカーさんが装置を開発されて、『ボタンポン』でデータが出る時代になってきています。そうすると、昔は同位体分析なんて僕らしか、専門知識を持っている人しかできなかつたのが、今は専門外の卒検生でも同じクオリティのデータを出すようになってきています。それは、装置の性能が上がったからではなくて、誰でも使える装置という方向での改良が進んだからだと思います。」¹⁰⁹

7.2. 質量分析計の進歩史：汎用化に至る道程

前節では、質量分析計の進歩を語る上で、汎用化という次元が重要な位置を占めていることを示した。本節では、装置の汎用化と応用分野という観点に軸足を置きながら、質量分析計の進歩の歴史的な過程を見ていく¹¹⁰。100年程度という時間軸にわたるイベントの全てを詳述するのは困難であるため、ここではいくつかの時代やイベントをピックアップする形で歴史を記述する。すなわち、(1) 質量分析計の起源：物理学者のための装置、(2) 1950年代～1960年代：質量分析コミュニティの勃興、(3) 1960年代～70年代：GC/MSの登場によるユーザーの拡大、そして(4) 1970年代～：コンピュータの搭載による分析の自動化、である。

7.2.1. 質量分析計の起源：物理学者のための装置

質量分析計の起源は、陰極線 (cathode ray) の研究にある。これは、後に電子と呼称されるようになる未知の現象の正体を解明するための研究である。ガス放電管を用いた研究では、陽極付近が蛍光を発することが知られており、陰極から陽極方向に何かが発生していることがその理由だと考えられていた。当時の科学者は、この「何か」に陰極線という名前を付け、それが直進する性質を持つことや、磁石によって軌道が曲がることを突き止めていた。しかしながら、19世紀の末まで、陰極線の正体は明らかにならなかった。

¹⁰⁹ インタビュー[14].

¹¹⁰ こうした目的のため、以下の歴史記述では、イオン化法や質量分離法の進歩には触れていない。総説等では、有機高分子の分析におけるタンデム型質量分析計の登場なども重要なトピックとして扱われるけれど、これらの点については参考文献を示すに留めている。

この正体を解明したのが、最初の質量分析計（正確には質量分析器）を設計したジョゼフ・ジョン・トムソン（当時ケンブリッジ大学）である。トムソンは、1897年に、陰極線が電場によって曲がることを示し、さらに陰極線の曲がり方を比較することによって陰極線を構成する粒子電荷の相対量を推定した¹¹¹。特に、陰極線が電場によって曲がることを示した点が重要だった。というのも、陰極線が電場によって曲がることは、陰極線が電荷を帯びた粒子の集合体（すなわち電子）であることを示唆したからである。このように、電子の発見という偉業の背後には、質量分析計の原型と呼べるものが存在していたのである。その後トムソンは、陽極線（anode ray）の研究に対して上記の手法を応用し、写真乾板に2つの放物線が記録されるという証拠から、ネオンに2種類の同位体が存在することも発見した。この方法は、トムソンの弟子であるフランシス・ウィリアム・アストン（当時ケンブリッジ大学）たちに引き継がれ、主として同位体の分析装置として発展を遂げた¹¹²。このように、当初の質量分析計は、物理学の諸問題を解くために設計開発されたものだったのである。

その後、装置の性能向上と並行しながら、科学者たちは質量分析計を他分野へ応用しようとする試みを展開した。例えば、生みの親であるトムソンは自著『Rays of Positive Electricity and Their Application to Chemical Analysis』（1913）の中で、質量分析計の化学分析への応用可能性を示し、応用分野を広げようとした。実際、彼は大気中のヘリウムの検出に成功していたことから、ガス分析などの用途に対する質量分析計の可能性を実証していた。1930年代には、化学や生物学への応用を試みる科学者も少数ではあるが存在していた。例えば、アルフレッド・オットー・カール・ニールは地代測定への応用を検討していた（Grayson, 2016a）。しかしながら、これらの応用努力は個別の科学者の散発的な努力に留まり、その後30年ほど、質量分析計は物理学の下位領域で用いられるに過ぎなかった。すなわち、「第2次世界大戦までの40年間近くは、同位体の発見と存在比の問題、原子質量と原子核の結合エネルギーの問題、電子衝撃による原子・分子のイオン化・解離の問題と物理学の片すみのごく限られた分野のみをその領域としてきた」（緒方, 1968, p.1561）のである。

こうした状況を生んだ1つの原因は、商用の質量分析計を製造販売する装置メーカーが存在せず、取引によって装置を調達できなかったことである。Nier (2016) は、1940年代

¹¹¹ 「気体の電気伝導に関する理論および実験的研究」により、トムソンは1906年のノーベル物理学賞を受賞している。

¹¹² 「非放射性元素における同位体の発見と質量分析器の開発」により、アストンは1922年のノーベル化学賞を受賞している。

に至るまでの質量分析計は個人の研究用器具であり、自作が必須であったとしている。すなわち、どれだけ資金を豊富に有していたとしても完成品の装置を購入することはできず、部品を購入して自分で組み立てるか、組み立てられる人材を探してこなければならなかったのである。仮に自作しようとするれば、装置の作動原理や分析方法を知っているだけでなく、装置を作成するための真空技術、ガラス工芸、電気回路などの知識も必要となる (Maestro & Maestro, 1973)。一部の企業も研究用に質量分析計を製作していたものの、そうした企業は普及用の商用機を製作していたわけではなく、特定の顧客に対して特注品を作成するという契約を行っていただけであった。そのために、科学者が質量分析計を手にするのは容易でないどころか、そもそもその存在さえ十分に知られていなかったのである。

質量分析計が市民権を得ていく初期の過程で重要な役割を果たしたのは、科学者というよりも企業や政府であった。具体的には、ハーバート・フーヴァー・ジュニアが創業した石油採掘企業と、第二次世界大戦のマンハッタン計画という 2 つの場面で質量分析計が使用されたことによって、質量分析計の認知度は高まっていった。

ハーバート・フーヴァー・ジュニアは、1937 年に 2 つの企業を設立した。多様な装置で油田の探索を行う United Geophysical Corporation と、油田探索に必要な装置の設計製造を行う Consolidated Engineering Corporation (CEC) である¹¹³。彼は、掘削によって得られた土壌や泥に含まれる炭化水素類 (volatile hydrocarbons) が、地下に油だまりが存在する証拠になると考えていた。そこで必要になったのが、メタンやブタンなどの炭化水素類に対する、敏感で高速な土壌分析手段であった。そこで彼は、リサーチディレクターであったハロルド・ウォッシュバーンに装置の探索を依頼した。そこでウォッシュバーンは、土壌分析のための装置として質量分析計に目をつけた。当時 CEC の新入社員であったデイヴィッド・テイラーがカリフォルニア工科大学から装置を借り受けて分析を行ったところ、質量分析計で土壌中の軽質炭化水素を測定できることが明らかになった。この結果は、アメリカ中から分析のための土が送りつけられる程度には関心を惹いた。しかしながら、彼らは軽質炭化水素の大半が土壌の至る所で検出されることを突き止めてしまった。質量分析計は、油田のみを選択的に探索する手段としては不適當だったのである。

結果として、質量分析計を用いて油田を探索するというハーバート・フーヴァー・ジュニアの計画は、失敗に終わってしまった。これに伴って CEC での質量分析計プロジェクトも

¹¹³ 本段落の記述は、Grayson (2009) に基づいている。

終了となる予定だったが、Universal Oil Products Company (UOP) が石油精製プロセスへの応用に興味を抱いたことで、プロジェクトは続行されることとなった。UOP が求めているのは、航空用ガソリンの蒸留から生じるフラグメンテーションをより高速に分析する方法だった。既存の分析方法では分析に 1 日もの時間を要してしまうのに対して、ウォッシュバーンは質量分析計を使えば 1 時間で分析できることを示したのである。

第二次世界大戦でも質量分析計がいくつかの用途に用いられた。1 つは、燃料や合成ゴムなどの低分子化合物の評価である。燃料の評価については、既に CEC がその用途に対する質量分析計の有用性を示していたこともあって、質量分析計は燃料燃焼プロセスの評価による戦闘機の燃費改善に用いられることになった (Stevenson, 2018)。質量分析計のユーザー増大という観点からより重要だったのは、マンハッタン計画において、ウラニウム同位体の分離、ひいては原爆製造に質量分析計が用いられたことである。当時の質量分析計ではウラニウムの同位体比を分析することが困難であったため、米国政府は複数の企業を集めて新たな質量分析計の作成を試みた。この新装置はきわめて巨大なもので、質量分離に使用する電磁石だけでも 2 トンの重量を有するものであった。この装置の作成には、Westinghouse, General Electric (GE), Eastman Kodak などの大企業が関与していた (Parkins, 2005)。石油産業向けの質量分析計を得意としていた CEC が別用途への応用に二の足を踏んでいたのに対して、GE は戦後期までに 100 台を超える質量分析計を製造したとされている (Nier, 1989)。最終的に、第二次世界大戦が終わるまでに数百台の質量分析計が作成され、その稼働経験を持つ者が多数マンハッタン計画から排出された。

第二次世界大戦における質量分析計の活用は米国以外でも試みられており、戦後には、その経験をもとにして、各国の装置メーカーは質量分析計の商業化を進めていった。Nier (2016) によると、マンハッタン計画で質量分析計の作成が行われた米国では、質量分析計の事業を早期から行っていた CEC に加えて、GE や Westinghouse も一時的に質量分析計の市場に参入を遂げ、更にはマンハッタン計画参加者が Vacuum Electronic Engineering という企業を興して質量分析計の開発販売を開始した¹¹⁴。イギリスの Metropolitan Vickers Electrical Corporation, ドイツの Atlas Werke Company, フランスの Thomson-CHF, 日本の日立製作所といった企業が、戦後に質量分析計の商用機開発を開始した。

¹¹⁴ Grayson (2009) によると、GE と Westinghouse はいずれも 1945 年に質量分析計を上り市したものの、両社とも CEC に敗北し、1950 年代に市場から撤退した。

こうした商用機開発の流れの背後で、初期の二重収束型とは異なるメカニズムで作動する質量分離部も提唱されはじめた。飛行時間型質量分析計 (TOF) がその一例である。TOF のコンセプトが最初に示されたのは 1946 年で、考案者はウィリアム・ステファン (当時ペンシルバニア大学) であった。ステファン自身は作成した装置を公開できる状態になかったものの、2 年後の 1948 年には、マンハッタン計画時に Y-12 工場でウランの同位体比分析に携わっていた Tennessee Eastman Corporation (Eastman Kodak の子会社) のエンジニアが、ヴェロシトロン (Velocitoron) という名前の装置を公開した (Cameron & Eggers, 1948)。しかしながら、TOF の性能は二重収束型ほど分解能が高くなかったために、当時の装置メーカーは、TOF の商用機開発に取り組まなかった。

7.2.2. 1950 年代～1960 年代：質量分析コミュニティの勃興

1950 年までに登場した装置メーカーの主要顧客の大半を占めていたのは、無機化合物の測定や分析を行う大学研究者だった (Nier, 2009)。それ以外にも、化学反応の速度論的研究や機構の研究、石油系統の混合物の分析や気体中の微量不純物の迅速検出、化学結合の強さの測定、原子核反応の研究、地代測定など、多様な分野の科学者が質量分析計を使用しはじめていた (佐々木, 1953)。これらのユーザーや装置メーカーの協力体制が構築され、質量分析計の専門家が独自のコミュニティを立ち上げたのが、1950 年代である。

質量分析の専門学会が最初に設立されたのは日本であった、1953 年 4 月 25 日に設立された日本質量分析研究会は、質量分析計の普及のために、関連する行為者の協力体制を構築することを目的としていた。会誌の創刊号には、「要は質量分析計の普及にあるのであって、この点から見て、使用者、製作者および学者の三身一体の研究を切望してやまないものである」(千谷, 1953, p.26) とある。また、佐々木申二 (当時京都大学) は、質量分析研究会の発会式挨拶で、まず質量分析計の認知度を高めなければならないという問題意識を提示した。佐々木の発言を以下に引用する。

「わが国の現状に鑑み、また創立精神からみて、本会の使命は『早く、よいものが廉価で作られ、普及して活用される』ように努力することだと平たく言えるでしょう。ではこの使命はどうしたらうまく果せるのでしょうか。それは何よりもまず多くの人々が質量分析計に親しみをもつようにことです。たとえよりよい品ができて、原理の点や取扱いの点や価格の点で頭から敬遠されたのでは致し方がありません」(佐々木, 1953,

p.4)

質量分析計の普及を目指す動きは、米国でも同時期に立ち上がった。米国では、戦後期から CEC を中心として定期的な会合が組織されており、それを引き継いだ米国材料試験会 (ASTM) の下部委員会 E-14 部会が質量分析部門を立ち上げ、1953 年から質量分析に関する年次大会を開催するようになった。E-14 部会は、その後、フランスの GAMS やイギリスの Institute of Petroleum HRG と協力し、1950 年代終盤から質量分析の国際会議を定期開催するようになった。この E-14 部会は、1969 年にアメリカ質量分析学会 (ASMS) に改称され、現在まで続いている。

こうしたコミュニティ構築が功を奏してか、1950 年代から 1960 年代にかけて、質量分析計の応用分野が拡大し、更に多くの装置メーカーが質量分析計の商用機を上市していった。Wiberley & Aikens (1964) と Ewing (1969) によってまとめられた当時の商用機の一部を、表 7-1 に示した¹¹⁵。表からも明らかなように、1950 年代から 1960 年代にかけてはアメリカ企業による参入が相次いだ。ここに掲載されている装置は、基本的には低分子の構造決定や同位体比分析のための二重収束型装置、もしくはガス分析のための廉価版装置である。ただし、中には特殊な用途向けに開発されたものもあった。例えば、Nuclide Corporation は、月の大気分析という NASA の要望向けに、TOF 型質量分析計を作成した (Herzog & Gryczuk, 1968)。他にも、いくつかの企業はこの頃からガスクロマトグラフとの接合や TOF の採用を試みていた。表中の企業でいえば、Electronic Associates からのスピアウト企業である Finnigan Instruments Corporation や、スウェーデンの LKB Instruments は、他企業に先がけて GC/MS を上市した。Bendix Corporation は、TOF 型質量分析計を専門とする世界で最初の企業だった。

このように、1950 年代から 1960 年代には、アメリカ企業が先導する形で二重収束型装置の商用機開発が進んだのと同時に、一部の先進的な企業が応用領域の拡大を目指して、飛行時間型質量分析計をはじめとする新規装置の開発に着手していった。しかしながら、それでも化学や医学といった他領域では質量分析計が用いられる機会は少なく、市場規模も 1960 年代後半の時点で 2 千万ドル程度と小規模なものであった (Finnigan, 2016)。

¹¹⁵ 出典には装置メーカーの本社所在国は記されていないため、化学雑誌の広告記事や、論文に記載されている著者所属を用いて適宜補完した。

装置メーカー（アルファベット順）	本社所在国	型番
Aero Vac Corporation	アメリカ	Model 685, Model 686
Associated Electrical Industries	イギリス	MS-9, MS-10
Atlas-MAT	ドイツ	CH-5, CH-7, SM-1-B
Avco	アメリカ	Model 90000, Model 91000
Bendix Corporation	アメリカ	Model 3012, Model MA-1など
Consolidated Electrodynamics Corporation	アメリカ	21-110, 21-440, 21-612など
Electronic Associates, Inc.	アメリカ	Quad-150A, Quad-250A, Quad-300
Finnigan Instruments Corporation	アメリカ	Model 1015
General Dynamics	アメリカ	Modulated Beam Mass Spectrometer
Hitachi	日本	RMS-1, RMD-1, RMU-6Aなど
Japan Electronics Optics（日本電子）	日本	JMS-01B, JMS-01SC, JMS-01SG
Johnston Laboratories, Inc.	イギリス	CMS Coincidence
LKB Instruments, Inc.	スウェーデン	LKB-9000
Nuclide Corporation	アメリカ	12-90-G, 6-60-G, TOF-1
Perkin-Elmer Corporation	アメリカ	Model 270
Picker Nuclear-AEI	アメリカ	MS-7, MS-9, MS-12, Minimass
Varian Associates	アメリカ	M-66, Syratron

表 7-1. 1960 年代までの商用機（出典：Lewin（1964），Ewing（1969））

質量分析計がこのような地位に甘んじていた理由は、いくつか考えられる。1つは、天然物や有機分子の構造決定という当時の化学者の目的は、先行して存在していた別の道具でもある程度は実現可能だったことである（Tokes, 2017）。化学者によって当時採用されていた装置の多くは、赤外分光光度計や紫外分光光度計であった。米国科学アカデミーが行った、化学者の科学装置の利用動向に関する調査結果を、図 7-3 に示した¹¹⁶。本図から明らかなように、1950 年代に化学者によって最も頻繁に使用されていた装置は赤外分光光度計であり、次いで用いられていたのは紫外分光光度計であった。質量分析計（表中では MASS SPEC）は、1958 年までは化学者によって 3 番目に頻繁に使用される装置であったが、そこから 1964 年まで使用率が伸長せず、その間に核磁気共鳴分析装置に使用率で追い抜かれた。

¹¹⁶ 図 7-3 の本来の出典は、National Academy of Science（1965）の figure 16 である。原著の入手が困難であったため、ここでは Ravkin（1987）が再整理したものを掲載した。

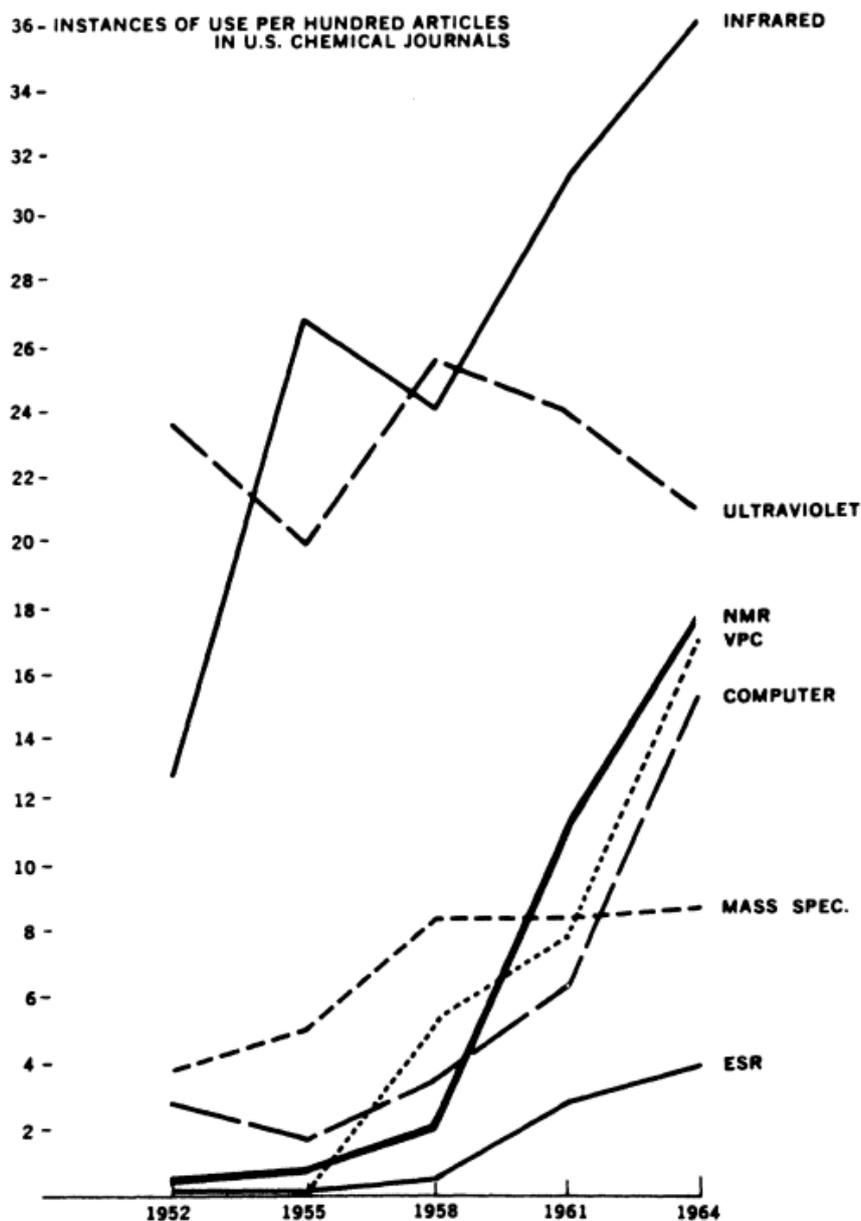


図 7-3. 1950 年代から 1960 年代の科学装置の利用動向 (出典: Ravkin (1987) p. 33)

先行する装置が存在していたことに加えて、装置の運用コストが比較的高価であったことも質量分析計の普及が進まなかった一因だと考えられる。Okimoto & Fung (2016) によると、化学分野で質量分析計を使用する場合、化学者が純粋な試料を用意し、その試料を質量分析計の専門スタッフに渡し、数日後に単純なスペクトルになって戻ってくることを祈りながら待つというのが当時の常識だった。すなわち、装置の購入に加えて専門スタッフの雇用が必要であったにもかかわらず、必ずしも望んだ分析結果が得られるわけではないと

というのが、当時質量分析計を使用するにあたって大きなハードルになっていたのである¹¹⁷。しかも、質量分析計を取り扱う場合、分析業務に携わるスタッフだけでなく、装置の保守点検を行う人員も必要だった。マサチューセッツ工科大学で質量分析計の研究を行っていたクラウド・ビーマンの回顧録によると、1960年代初頭までに、アメリカの大学の化学部門で質量分析計を保有しているところは1つも存在しなかった。ビーマン自身も、上司に質量分析計の購入を打診したところ、フルタイムの電気工学者を雇わなければいけないため、購入は認められなかったという (Biemann, 2015)¹¹⁸。

加えて、そもそも他の装置と比較して質量分析計は高価であった。Berlowitz et al. (1981) が Science 誌で報告した合成化学系研究室の立ち上げ費用の試算表を、表 7-2 に示す。表中の装置価格は、最小構成で装置を購入した際の価格であり、追加部品の価格を含んでいない。表 7-2 から読み取れるのは、年代を経る毎に必要な装置の数と費用が多くなっていくこと、及びこれらの装置の中でも質量分析計は比較的高価だということである。1970年の時点では、部署レベルでの購入が必要な装置の中でも質量分析計が最も高価 (6 万ドル) であり、1979年の時点でも二番目に高価な装置となっている (16 万ドル)。しかも興味深いのは、1970年からの約 10 年間で装置価格が 2 倍以上になっていることである。これは、合成化学の研究で必要とされる装置の最低水準が上昇し、これに対応するために装置の高機能化が進展し、結果として価格が上がったことを示唆している (Berlowitz et al., 1981)。当時の科学者も、他の装置と比して、質量分析計は分析速度や正確性に長けている一方で、コストが高く装置が複雑である点を問題視していた (Eliel et al., 1957)。

¹¹⁷ Mercelis et al. (2017) は、より一般的な科学装置についても同様の問題が生じていたことを報告している。彼によれば、19世紀から20世紀にかけて大学研究に生じたのは、金銭と組織構造上の変化である。実験室環境の構築には多大な金銭が必要となっていったため、民間企業をスポンサーに付けなければならない状況が生じた。加えて、科学装置の保守点検のために、専門のチームを編成したり、外部の専門家を雇ったりと、実験室の組織体制にも変更の必要性が生じた。

¹¹⁸ 装置の汎用化という点に直接関係しないため本章では記述を割愛しているが、ビーマンは有機化合物の質量分析の草分け的存在であり、タンデム型質量分析計を用いた有機化合物分析の潮流を作り上げていった人物である。ビーマンの師弟をはじめとする関連人物をまとめた「Biemann Family Tree」が論文化されるほど、質量分析コミュニティの中でも重要な人物として扱われている。ビーマンの研究経歴や、タンデム型質量分析計による有機化合物の研究の歴史については、Biemann (1994) Biemann (2015) を参照のこと。

1970		1979	
Instrument	Cost (\$)	Instrument	Cost (\$)
Two Rinco evaporators	300	<i>Laboratory instruments</i>	
Two vacuum pumps	400	Rotovac evaporators	1,700
Spinning band distillation apparatus	825	Preparative liquid chromatograph with fraction collector	7,200
Three solvent stills	600	Analytical liquid chromatograph with recorder and data system shared with capillary column	13,250
Melting point apparatus	150	Gas chromatograph	11,300
Gas chromatograph and recorder	1,450	Solvent stills with fire safety hoods	4,500
Hot plates, stirrers, heating mantles	275	Hot plates, stirrers, and heating mantles	600
Glassware	500	Microwave with standard taper joints	3,000
Infracord infrared spectrometer	3,500	Glassware	800
		Thin-layer chromatographic plates and tanks	1,500
Total	8,000		43,850
		<i>Departmental instruments to which access is needed</i>	
A-60 NMR spectrometer	40,000	90-mHz R-32 NMR spectrometer	52,000
Cary 14 ultraviolet/visible spectrometer	14,000	200-mHz wide-bore NMR spectrometer	225,000
Hitachi RMU-6 mass spectrometer	60,000	CFT-20 carbon-13 NMR spectrometer	80,000
Precision refractometer	2,500	Finnigan 4000 mass spectrometer and data system	160,000
		Cary 17 ultraviolet/visible/near-infrared spectrometer	32,000
		Digilab FT-infrared spectrometer	82,000
		High resolution mass spectrometer CEC-21-110	110,000
Total	116,500		741,000

表 7-2. 合成化学系研究室の立ち上げ費用 (出典: Berlowitz et al. (1981) p.1015)

7.2.3. 1960年代～70年代：GC/MSの登場によるユーザーの拡大

1950年代から60年代の質量分析計は、化学や医学という大領域へ直ちに应用されるほど簡便な装置ではなかった。しかしながら、1960年代に登場したガスクロマトグラフとの接合技術が、質量分析計のユーザビリティを一挙に高めることになる。具体的には、ガスクロマトグラフとの接合によって混合物の分離分析が簡便に行えるようになっただけでなく、四重極型という新たな質量分析部の採用によって装置の小型化が可能になった。それでもなお、装置の使い勝手という点では大きなハードルが残されていた。

四重極型質量分析計とは、ウォルフガング・ポール（当時ボン大学）が1953年に提唱した質量分離メカニズムである。当初は難解な技術であると思われていたけれど、次第に装置メーカーが関心を抱くようになり、1961年にはAtlas-MAT社がAMP3という残存ガス分析用の四重極マスフィルター（質量分離部）をいち早く上市し、他企業も四重極型質量分析計の開発に乗り出した。四重極型の利点は、二重収束型よりも分解能は劣る一方で、制御が容易、構造的に単純、小型化が容易という点にあった。しかも、これらの利点を活かすことによって、従来よりも安価な装置が提供できるというのも装置メーカーにとって大きな利点であった。島津製作所の御石浩三は、四重極型質量分析計の利点を次のように述べている。

「磁場型の装置って重いんですよ。平気で1トンを超えるので、普通のラボでは大きさだけでも導入しにくい。それで値段は高い、しかもオペレーターを一生懸命教育しないといけないという3点セットがある。オペレーターの問題はしばらく残りますが、機械としてかなり小型になってくる、普通のラボの実験室に置けるようになってくるというのが、四重極型の装置が普及したポイントになると思います。」¹¹⁹

しかしながら、低分解能という欠点が従来用途では大きな問題として残っていたために、四重極型がその威力を発揮したのはガスクロマトグラフとの接合を経て、新たな用途で活用されてからであった。ガスクロマトグラフと質量分析計を接合するという試みは、1950年代中盤から行われていた。既にガスクロマトグラフが環境分析などで用いられていたことから、装置メーカーは、官公庁向けの需要が存在すると見込んでいたのである。

例えば、早期からGC/MS作成に取り組んでいたBendix Corporationsは、飛行時間型質

¹¹⁹ インタビュー[7]。ここでいう磁場型は、二重収束型と同義である。

量分析計の応用として GC/MS が適しているという思想のもと試作機の開発を進め、1957年には論文を公開した (Holmes & Morrell, 1957). 同時期には、Beckman Instruments も GC/MS の試作機を公開した. しかしながら、これらの GC/MS には未解決の問題があった. というのも、GC/MS ではガスクロマトグラフで分離した成分の検出に質量分析計を用いるわけだが、ガスクロマトグラフと質量分析計では動作気圧が異なるために、2つの装置を単純に接合しただけでは上手く作動しなかったのである. 言い換えれば、GC と MS を繋ぐ適切なインターフェースが開発されていなかった.

初期の研究によってインターフェース開発の必要性が明らかになると、改良版 GC/MS が論文で報告されるようになっていった. 例えば、Dow Chemical のローランド・ゴルケは、Bendix 製の飛行時間型質量分析計をベースとして改良版 GC/MS を製作し、早くも 1959 年に論文掲載にこぎ着けた (Gohlke, 1959). ゴルケは、針状のバルブを使用することによって試料をガスクロマトグラフからイオン源へと導く方法を考案した. しかしながら、ゴルケが製作した装置では、ガスクロマトグラフで分離した試料の中で質量分析計へ到達するものの割合は約 1% に過ぎなかった. その結果として、その後の研究では、ガスクロマトグラフから質量分析計へ輸送される試料の量を最大化するという前提のもとで、様々なインターフェースが探索された. 例えば、当時マサチューセッツ工科大学に在籍していたスロック・ワトソンとクラウス・ビーマンの研究グループは、1964 年に分子噴流装置というインターフェースを開発した. これに対して、アーウィン・ベッカー (当時カールスルーエ工科大学) やラグナー・リハーゲ (当時カロリンスカ研究所) は、分子ジェットセパレーターというアプローチでの開発を試みた (Grayson, 2016b)¹²⁰. 窪寺 (2006) によると、これらの技術のうちリハーゲのジェットセパレーターが、性能で圧倒的優位な位置にあった.

こうした各種技術の開発によって、1960 年代末には GC/MS の商用機が上市され始めた. 最初期に上市したのは Finnigan Instruments Corporation で、彼らは独自開発した四重極型質量分析計とガスクロマトグラフを接合して GC/MS を作成し、1968 年に商用機を上市している. GC/MS は、それまでに質量分析計を扱ってこなかった装置メーカーの参入をも誘発した. GC/MS によって質量分析計の分野に参入した企業の多くは、既にガスクロマトグ

¹²⁰ Grayson (2016b) によると、後にクロマトグラフに使用するキャピラリーカラムの改良によって、ガスクロマトグラフと質量分析計を直接に接続できる技術が開発された. これによりインターフェースの必要性は薄れたものの、現在でもジェットセパレーターは使用されている.

ラフの事業を行っている企業であった。その代表例が日本の島津製作所である。島津製作所は1965年にGC/MSの調査を開始し、分子ジェットセパレーター開発者であるリハーゲと密接な関係を持っていたLKB社との技術提携を行うという方針を立てた。当初LKB社は技術提携を拒否したものの、1969年6月には提携の調印にこぎつけ、1971年にはLKB-9000型の国産第一号機を北海道工業試験所に納入するに至った(窪寺,2006)。他にも、同じくガスクロマトグラフの製造を行っていたHewlett-Packardは、1971年に自社製GC/MSを上市した。

ただし、GC/MSは当初から評価されたわけではなかった。というのも、当時使用されていた質量分析計の大半は二重収束型であり、大学科目等でも基本的に二重収束型装置の設計や扱い方についてしか教えていなかったために、専門家はGC/MSに使用される四重極型質量分析計を直ちに受け容れることができなかつたのである(Grayson,2002)。それでもなおGC/MSの応用分野が拡大していったのには、アメリカの環境保護庁(EPA)による導入を皮切りにして、混合物の分析に絶大な威力を発揮することが明らかになっていったという理由があった。

1970年に設立されたEPAは、環境分析の手段としてガスクロマトグラフを用いていた。EPAが当時抱えていた問題は、水質調査の煩雑さであった。水域の状態を修復し維持することを目的とする水質浄化法(clean water act)が存在していたアメリカでは、汚染物質の定量的評価などが求められていた。しかしながら、当時の方法は、単一の環境試料の分析に100人がかりでも6ヶ月もの時間を要するという煩雑さぶりであったのである。そこで、EPAは次なる分析手段の探索を開始し、1971年にGC/MSを候補装置として挙げるに至った(Heller et al.,1975)。GC/MSの評価のために専門委員会を組織したEPAは、複数社の装置を評価した上で、Finnigan Instruments Corporationの四重極型GC/MSに目を付け、20台という当時の水準では極めて多い台数をFinniganに発注した。GC/MS導入の結果として、分析業務は100人で6ヶ月から、1人で数時間にまで短縮された(Heller et al.,1975)。その後、EPAが1979年に標準的な環境分析方法のリストにGC/MSを付け加えたことによって、GC/MSを導入する企業が登場し始めた¹²¹。

¹²¹ 日本では、1974年に当時の環境庁が化学物質の環境残留調査を開始するとともに、GC/MSによる分析法の検討を進め、1984年にマニュアルとしてまとめている(古武家,2000)。

このように、GC/MS の登場は他分野への応用の足がかりとなった。事実、この時期になると環境分析だけでなく、化学や医学の領域でも質量分析計が用いられ始めた。GC/MS の顧客の変遷について、日本電子の村山和秋は次のように整理している。

「GC/MS ができてから、ユーザーのメインの人が物理系から化学系に移っていったという感じです。本当に人がガラッと変わった。大学の分析のプロの人たちとか、あとやたらお金を持っている製薬の分析センターみたいなところから順番に入っていく感じですね。」¹²²

ただし注意せねばならないのは、GC/MS によって簡略化されたのは試料の調整や分離という分析作業の一部であって、それ以外の部分には、専門家による技能や解釈が入り込む余地が多大に残っていたという点である。換言すると、装置の使い勝手という点では、未だに課題が残っていた。そのため、GC/MS の初期の顧客も、質量分析計を使用した経験をもつ生化学者であったり、分析の専門家を内部に抱えるだけの余裕があった大手製薬メーカーであったりと、一部の顧客に限定されていた。当時の装置の使い勝手について、島津製作所の御石浩三は以下のように振り返っている。

「昔のいわゆる CPU 以前の装置というのは、非常に面倒くさい。オペレーターがついていないとまともに動かさないし、思うように動いてくれないという状況が市販の装置でもあったと思います。分析のセットアップにも時間はかかっていたし、その後のデータの解析も面倒だったと思います。今だと全部マススペクトルはデータとしてコンピュータの中に蓄えられていくのでデータ取得は容易ですけど、当時は記録計で紙に書かれますからね。出てきたデータも、目盛りの上にピークが出てくるわけですけど、その位置と高さを全部ものさしで測って計算して、表を作って、という解析だったので、ものすごく手間がかかる。そこで人の手が入っているというのも、今から見ればとんでもない話ですけど、信頼性を怪しまれる要素の 1 つにはなっていたと思います。」¹²³

¹²² インタビュー[4].

¹²³ インタビュー[7].

GC/MS の登場それ自体は応用領域の拡大に貢献したけれども、御石が振り返っているように、それが直ちに装置の汎用化を意味するわけではなかった。装置から出力された結果を取りまとめるのは手計算であったし、専属オペレーターでなければ装置の調整や運用が難しいという点は、それ以前の質量分析計と大差なかったのである。Stevenson (2018) によると、当時の Finnigan Instruments Corporation に対するクレームの 8 割は全くの初心者によるものであって、装置の性能というよりも使用者の習熟とか専門性が問題になっていた。これらの問題は、質量分析計にコンピュータが接続されて、大半の業務をデジタルで行えるようになっていくことで、改善されていった。この意味において、装置の汎用化という意味では、真の転換点はコンピュータとの接続にあったと言える。

7.2.4. 1970 年代～：コンピュータの搭載による分析の自動化

GC/MS の開発と並行する形で世界的に進展したのが、質量分析計とコンピュータの接続である。1965 年に DEC のミニコンピュータ PDP-8 が誕生して以来、多くの科学装置でコンピュータ搭載の動きが生じ始めた。その理由は、科学装置により高度な情報を求めるためには、装置の複雑化を避けて、使用者の労力を低減する必要があったためである(菱田・高橋, 1971)。実際、EPA は、採用する装置を選択する基準の 1 つに、装置の制御やデータの加工に適したデータハンドリングシステムが備え付けられているか否かを含めていた(Grayson, 2002)。GC/MS の登場によって混合物の迅速分析が可能になり、結果としてスペクトル化しなければならないデータの量が増大したことを考えると、コンピュータとの接続に至ったのは自然な流れだったとも言える。

コンピュータに接続する初期の試みが生じたのは、アメリカであった。マサチューセッツ工科大学に在籍していたクラウス・ビーマン達の研究グループは、1967 年に GC/MS とコンピュータのドッキングの試みを開始し、磁気テープに記録したデータをメインフレーム・コンピュータで読み取るというシステムを試作した。コンピュータ上のソフトウェアが読み込んだデータから自動的にマススペクトルを作成するという代物であった。1969 年には、スタンフォード大学の研究グループが Finnigan Instruments Company の Model 1015 とミニコンピュータを接続した分析システムを発表した¹²⁴。こうした成果を受けて、装置メーカ

¹²⁴ その後、このシステムには System 150 という名称が付けられ、スタンフォード大学の研究グループが立ち上げた Systems Industries という企業によって上市された。

ーは 1970 年代初頭にデータシステム付属 GC/MS, もしくはデータシステム単体の販売を開始した。具体的には, Perkin-Elmer, Finnigan Instruments, Hewlett-Packard, LKB Instruments, Varian Associates といった企業が, こぞってデータシステムの販売を開始したのである (Serum, 2016)。しかしながら, この時点ではマススペクトルの描画作成を支援するためのデータシステムが構築されるに留まっており, 質量分析計の操作をコンピュータ制御するには至っていなかった。質量分析計の制御からスペクトルの記録に至るほとんどの工程を自動化するには, 更なる改良が必要であった。

この改良を実現したのは, 質量分析計とコンピュータの両方を事業として手がけていた Hewlett-Packard であった。Hewlett-Packard は, 1976 年に全コンピュータ制御の GC/MS/DS システム HP 5990A を上市した¹²⁵。この装置の特徴は, 世界初の卓上型 GC/MS であっただけでなく, 装置の大半の要素がコンピュータ制御されていることにあった。適切な試料を導入して装置の設定を行えば, コンピュータが最適な条件で分析が実行されるように装置のパラメータを調整し, 人の手を入れずにマススペクトルの作成まで行える装置が登場したのである。この改善によって, 質量分析計をルーチンワーク的な分析に使用することが可能になった¹²⁶。Hewlett-Packard の HP 5992A 以降, 各装置メーカーは完全コンピュータ制御の質量分析計を市場に投入するようになっていった。

その後, 更なる自動化としてマススペクトルのライブラリ化が進められていった。マススペクトルのライブラリを作成して分析結果をライブラリと照合するという仕組み自体は, 1960 年代中盤から存在していた。実際, 二重収束型装置の時代から CEC は顧客にスペクトル情報の公開を求めていたし, ASTM E-14 部会も 1968 年にマススペクトル集を公開した (Sparkman, 2016)。他にも, スタンフォード大学で実施されていたデンドラル (Dendral) という人工知能プロジェクトでは, 有機化合物の構造情報を集積し, 未知の化合物の特定に役立てることを目的として, システムの構築を行っていた (Lindsay et al., 1993)。結果としてデンドラルは失敗に終わったものの, コンピュータ側の処理能力向上や低価格化, および各種イオン化法の開発による分析範囲の拡大によって, ライブラリに対する需要は増大した。1970 年代後半になると, 政府や科学者によってマススペクトルのデータベースが公開

¹²⁵ GC/MS/DS の DS は, データシステムの略である。

¹²⁶ Serum (2016) によると, こうした装置を作成する基本的なアプローチは, 専門家による分析作業をひたすら模倣し, コンピュータ上でその動作を再現していくというものであった。

されるようになった。例えば、米国の国立標準技術研究所、国立衛生研究所、環境保護庁の共同作成データベースである NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library や、コーネル大学のフレッド・マクラフティの研究グループによって公開された Wiley Registry of Mass Spectral Data である。

こうした動きの中で、装置メーカーの開発の方向性も大きく変化していった。というのは、各装置メーカーも装置の自動化を推し進めたり、自社装置向けのライブラリシステムを構築したりすることによって、他社製品よりも利便性が高い装置であることをアピールしていったのである。例えば、もともと二重収束型装置をメインビジネスとしていた日本電子では、イオン源や質量分離部の専門研究者を配置するという体制が、1990年代末にかけて無くなっていき、代わりにソフトウェアの開発が重視されるようになっていった。日本電子の村山は、筆者のインタビューに対して次のように答えている。

「(イオン源や質量分離部の) 専門の研究者が2, 3人いるという体制は、今はもうないですね。片手間くらいには色々やっていますけど、本当に専任でやるっていうスタイルはもうないです。九十何年くらいの頃は、アナライザーの光学系の計算(アナライザーの設計) だけしかやらないみたいな人が何人かいたんですけど、そこからは汎用化が中心で、もうそれだけです。入社(1997年)した時にアナライザーの設計とかもやれと最初は言われていたんですけど、1年もたたないうちに雑用が大量にきて、そんなもんやらなくていいよみたいな感じになっちゃいましたからね。それよりも『新しいソフトの仕様書け』みたいなのが大きくて、イオン源と分析部分は、ぼちぼちいじっておけばもう十分って感じでした。」¹²⁷

業務におけるソフトウェア開発の比重が高くなっていったのは、島津製作所でも同様であった。顧客との共同作業によってデータ解析部分に対する要求に応じていった側面があったとして、島津製作所の御石は次のように述べている。

「90年代ぐらいになるとデータ解析のウェイトが高くなってくるので、その辺の操作

¹²⁷ インタビュー[4]。括弧は筆者による。ここでいうアナライザーとは、質量分離部のことである。

性であったり機能であったりについてのリクワイアメントが出てきて、それに応えるような形で共同作業するという感じでした。装置単体で勝負という時代ではなくなってきていて、ユーザーインターフェースにかかる部分の勝負がかなり比率としては高くなってきています。お客さんはカタログスペックだけではなくて、例えば文献で自分たちが調べているデータがあったときに、同じようなデータが取れるかどうかということに非常に気にされます。だから、購入調査の中には、お客さんからのサンプルを預かって、分析データを出すというプロセスは入ります。」¹²⁸

1970年代から試みられてきた質量分析計の汎用化は、コンピュータとの接続やマススペクトルのライブラリ化によって大きく進展し、結果として質量分析計ユーザーの裾野を大きく広げることになった。その後も装置の汎用化は大きく進み、本章第1節で紹介したように、現在は「ボタンポン」で専門家レベルのデータを出せる程になっている¹²⁹。振り返ってみると、装置メーカーがソフトウェアや操作インターフェースの改良を重視するようになっていったのは、極めて自然な流れであったと言えるだろう。

装置メーカーの立場からすれば、イオン源や質量分離部といった質量分析計の基礎的な要素技術に関する研究に取り組むことによって、装置性能を大きく上げたり、新たな分析価値を生んだりするよりも、インターフェースの改良によって顧客の幅を広げる方が、短期的には高い利益を見込めたはずだからである。基礎的な研究には多大な時間と資源が必要であるにもかかわらず、その成果が直ちに応用されるとは限らないし、商用装置として開発するにも費用がかかる。それよりも、インターフェースの改良によって「誰でも扱える装置」に仕立て上げていく方が、低い開発費用で顧客の幅を広げることができたはずである。

顧客の中に占める企業の割合が増えていったことも、汎用化を推し進める強力な要因に

¹²⁸ インタビュー[7].

¹²⁹ ただし、用途によっては未だに自動化が不十分と判断する者もいる。例えば、臨床検査に対する質量分析計の応用の現状を報告している野村（2017）は、「初期投資に費用がかかり、機器の操作、維持、管理に専門的知識が要求されること、現時点ではマニュアル操作に頼る部分が多く、サンプルの前処理操作（臨床検体からの抽出、分離精製、誘導体化など）が必要なことが問題であり、現状では外来患者に対するいわゆる診察前検査としての利用は困難である」（p.57）としている。実際、如何に自動化されようと装置に関する知識を伴ってなければ意味がないことは、質量分析の専門家によってしばしば指摘される（例えば、吉野, 2017）。この点については、次章で議論する。

なっていた。これには、そもそも分析の専門家を抱えていない企業に対して装置を売っていくには汎用化が必要だったというだけでなく、近年になって多くの企業が、質量分析計を扱う専門のオペレーターを雇い入れたり育成したりする余裕を失っていったことも関係している。もともと質量分析計が高価であることに加えて、ユーザー企業の多くは、分析業務が付加価値の創造に必ずしも直結しないという認識を持っていた。そのために、ユーザー企業は、人件費削減の一環として装置のオペレーターをパートや派遣社員に置き換えたり、複数種類の装置を1人で扱えるようにオペレーターを多能工化していったりしたのである。科学者や企業内で分析業務に携わる者は、質量分析計に限らない科学装置について、企業が次に示すような態度を持っていることを指摘している。

遠藤昌敏（山形大学大学院理工学研究科）「…採用する側の考えとしては、『分析はもっと若い人、高卒や派遣の人がやる』というのが、一般的な傾向としてあるようです」（伊澤ほか, 2011, p.168）

梅香明子（オルガノ（株）開発センター）「ボタンを押すだけで、というのは購入する企業側の人件費の問題が影響しています。パートの人など、人件費が安くて分析の経験がない人にも使ってもらうためには、そうするしかないのが現状です」（伊澤ほか, 2011, p.172）

千葉大学名誉教授の小熊幸一もまた、ユーザー企業が内部で分析人材を育成することができなくなっていることを指摘している。彼は、日本分析化学会のセミナーで講師を務めた経験から、企業の分析現場の現状を以下のように述べている。

「会社も結局自社で教育できなくなって、結局は我々が学会でやっているセミナーに人を預けるようになっていきます。本当に初心者にレクチャーするという感じで、何々をどう溶液にするかとか、そういうところから全部やっていますよ。セミナーの受講料も予算化しているみたいです。何故こうなっているかという、企業の場合、その分野の人がその分野の上司になるとは限らないから、企業で教えられないんです。」¹³⁰

¹³⁰ インタビュー[13].

このように、分析の専門家を抱えていないユーザー企業が増えていった、あるいはユーザー企業が分析の専門家を内部化する余裕を失っていったために、汎用化装置の需要は高まっていった。しかも、一旦汎用化された装置が登場すると、少数ながら存在していたはずの企業内の分析の専門家も装置に代替されていく結果となった。すなわち、企業の中で分析の専門家の地位が低くなっていったのは、装置の汎用化が進んだことの原因でもあり、結果でもあったのである。

7.3. 歴史記述の解釈：共存共栄の道標としての汎用化

7.3.1. 歴史記述のまとめ

質量分析計は、当初は物理学の一部領域でしか用いられていなかったけれど、第二次世界大戦前後を境に石油や合成ゴムの分析に使用されるようになったことで、質量分析計で有益な情報を取得可能であることが認知されはじめた。しかしながら、装置の操作性や簡便性という点がボトルネックであったために、比較的近年までは化学や医学という他領域で重用されるには至っていなかった。この課題を解決したのが、GC/MS やコンピュータとの接続という、1960年代から引き続いて生じた汎用化であった。これらの技術によって徐々に汎用化が実現していくことによって、環境や化学という領域で質量分析計が採用されるようになっていった。こうした応用領域分野の広がり、質量分析計の有用性をより広く知らしめることになった。これに呼応した装置メーカーは、「誰でも扱える装置」を目指して装置の更なる汎用化を推し進めていった。

ここまで見てきた質量分析計の歴史を端的にまとめるならば、汎用化と普及の相互依存的な進行ということになる。すなわち、装置の汎用化が進んで質量分析計ユーザーの幅が広がると、そうしたユーザーを起点として質量分析計に有用性を見出す潜在的なユーザーの幅がより広がり、そうしたユーザーを捉えるために更なる汎用化が進められていく、というサイクルが存在したのである。とりわけ近年の汎用化と普及の関係について、島津製作所の御石は以下のように述懐している。

「誰がやってもとは言いませんけど、ある程度いろんな人が使えるようになってくると、MS の情報というのが非常に珍重される、重要視されるようになってきて、それが

また普及をドライブしているというふうに思います。」¹³¹

このようなプロセスで科学装置の普及が進行していくこと自体は、Rosenberg (1992) も示唆していた。第2章の振り返りにはなるが、今一度、科学装置のイノベーション・プロセスを見ておこう。彼は、科学装置が誕生してから応用されていく過程を、次の5段階に分けている。すなわち、(1) 科学研究での個別具体的な必要性に応じて科学装置が設計される、(2) 開発に成功すると他領域や産業技術への応用可能性が検証される（この際、戦争などの多様なイベントによって装置技術の知識移転が行われる）、(3) 応用のための装置改善が行われ、結果として普及が進む（当初の研究の目的から離れた方向での改善が進む）、(4) 科学コミュニティが改良された装置にアクセスしやすくなる、そして(5) 異常が観察されやすくなり研究アジェンダの設定に影響が及ぶ。質量分析計の事例において5つめの段階が実際に生じたのかは確認できていないものの、4つめの段階までは、質量分析計も同様のプロセスを辿ったと言える。

この過程で重要な役割を果たしたのが、科学装置の汎用化である。多様なイベントによって装置技術の知識移転が進んだからといって、直ちに多様な領域での応用が進むわけではない。質量分析計の場合、第二次世界大戦を契機として知識移転が進んだからといって、直ちに多様な領域での応用が進んだわけではなかった。なぜなら、いくら装置技術の知識移転が進んだといっても、装置自体が巨大かつ高価であり、装置の使用や運営に関わる暗黙知を備えた人材の供給も限定的であったからである。裏を返せば、そうした暗黙知まで含めて装置化し、複雑な要素のある種のブラックボックスに追いやって「誰でも扱える装置」に仕立て上げてしまうことが、応用範囲を広げていく上で重要であった。

7.3.2. 汎用化に対する利害の一致

質量分析計がこのように汎用化していったのは、自然な帰結であった。そう判断できる理由は、関連するプレイヤーの利害が一致していて、装置が汎用化されることのデメリットは存在しないものとして認識されていたと考えられるからである。以下では、関連するプレイヤーを大きく3つに分けて、それぞれの利害を考察していく。すなわち、(1) 大学で装置開発に携わる科学者（装置開発者）、(2) 装置メーカー、(3) 装置ユーザーである。

¹³¹ インタビュー[7].

7.3.2.1. 装置開発者

Rosenberg (1992) が示しているように、装置開発者の基本的な目的は、科学研究での個別具体的な必要性に応じて、科学装置を設計することにある。質量分析計の場合、それまでに見ることも測ることもできなかったものを観察・測定可能にするために、新しいイオン化法や質量分離部を考案する、というのが装置開発者の大目標である。このように考えると、装置開発者は必ずしも積極的に汎用化を押し進めてきたわけではないと思われるかもしれない。しかし、それは汎用化を拒否していたからというよりも、汎用化に必要なエンジニアリングを得意としていたのは企業の方だったから、と言う方が正しいだろう。

事実、近年の装置開発者は汎用化を志向するようになってきている。その理由の1つは、「誰でも扱える」ということがデータの信頼性を保証することにある。東京大学で ICP-MS の開発に携わってきた平田岳史は、「誰でも測れるということも分析化学上の進歩」であるとした上で、その理由をデータの正確性に求めている。

「例えば、iPhone にはマニュアルがないですよ。あれがユーザーの困りそうなところを全て設計に落とし込んでいるように、分析法も究極は落とし込む必要があると思います。それが中途半端だから危険なデータが出ているのではないかと、というのが僕のスタンスです。分析法が不完全だから脆弱なデータで議論せざるを得ないのだったら、誰がやっても同じ信頼性があるデータが出るまで落とし込めばよいと。これが大学の1つの開発の方向です。」¹³²

データの信頼性を保証することは、単に装置の有用性を高めるだけでなく、装置が設計された大元の目的である科学研究に対して、後続の科学者を呼び込むことにも繋がるだろう。更にいえば、ユーザーを獲得できるような装置や方法を開発できなければ、ユーザーとの共同研究を通して新たな研究に取り組んだり、後続の科学者による改善の手が入りにくくなったりして、次なる研究費獲得に困難が生じる可能性もある¹³³。この意味において、装置を

¹³² インタビュー[14]。ただし、誰がやっても同じ信頼性があるデータを出力可能にするというのは、あくまでも大学が行う開発の方向性の1つであって、世界で実現されていない技術を開発することも大学における装置開発の目標であることには注意が必要である。

¹³³ この点は、大学研究に対する予算縮小も関係している。平田いわく、「学術研究だけで

汎用化することは装置開発者にとって有益なことであり、また生存を図る上でも重要なことであった。

7.3.2.2. 装置メーカー

汎用化によるメリットを最も享受したのは装置メーカーだろう。前節でも触れたように、営利企業である装置メーカーからすれば、装置の汎用化によって市場を広げるといのは、基礎的な改良を装置に反映させて新機軸を開発するよりも、望ましい選択肢であった。

Rosenberg (1992) が指摘しているように、新規な科学装置に共通する点として、当初の性能や安定性が低いこと、入手困難もしくは高価な部品や素材が求められること、特定の専門家には魅力的かもしれないがポテンシャルの発揮にはボトルネックの克服が必要となることなどが挙げられる。こうした状況下では、どれだけのユーザーが装置を購入するか明らかでないし、ユーザーが属する領域で装置が重要な存在になっていくかどうかも予想できない。それまで観ることも測ることもできなかったものが観測・計測可能になったとしても、それがどの程度の意義を持っているかは、事前には明らかでないのである。実際、島津製作所の御石は、汎用化される以前の装置は、必ずしも事業と成立していなかったとしている。

「70年代ってやっぱり機械もそれほど安定ではないので、研究支援の要素はかなり強かったと思います。どちらかといえばボランティアみたいなところがあって、ビジネスとしては成立しにくかった。そこで大学の先生が何か研究成果を出されて、論文を書かれて、この装置がコレに使えるとなると、別のビジネス機会が生まれるという、多分それを狙うような格好になっていたと思いますし、ある意味で広告宣伝費とも言い換えられますね。今の時点で言えば、将来の顧客を青田買いしていたというか。」¹³⁴

それに対して、装置を汎用化する際に直面する不確実性は、新規装置を設計するよりも小さい。ベースとなる装置は既に存在しているし、装置の用途もある程度は明確である。しかも、既存ユーザーの要望に応じて装置を改良していけば、少なくとも既存ユーザーによる買

は予算が取れなくなっているのだから、この研究をするとこんなところで役に立つところまで歩み寄れと言っています。僕らの上の世代は誰もやってこなかったんですけど、海外の先生は普通にやってきたことなんですよ（インタビュー[14]）。

¹³⁴ インタビュー[7].

い換えの需要は維持できる。すなわち、営利を求めるにあたっては、世界で十台しか売れない装置の開発を行うよりも、既にマーケットが見えている装置の汎用化に取り組む方が、（短期的には）合理的だったのである。

企業の製品戦略として汎用化が優勢になっていったことを、実際に特許を用いて確認してみよう。元データには、日本特許のデータを使用する。本来であれば、グローバルな潮流を見るために米国特許や欧州特許も参照すべきであるけれど、特許庁（2003）が指摘しているように、国際的な技術分類では質量分析計の関連特許のみを抽出することは難しい。そこで本研究では、特許庁（2003）の方法に倣って、Fタームで質量分析に関連する特許を抽出した¹³⁵。Fタームには下位分類としてより詳細な分類項目が設けられており、それを用いることで、大まかではあるけれど基礎と応用の区別を付けることができる。具体的には、下表7-3に示すタームを参照して、応用に分類されるタームを含んだ特許を応用特許、そうでないものを基礎特許に分類した¹³⁶。ここで信号処理や表示記録を応用に分類しているのは、必

分類	コード	内容
基礎	2G041DA	イオン源
基礎	5C038GG	イオン源の種類
基礎	2G041GA	装置部品
応用	2G041AA	目的
応用	2G041LA	信号処理
応用	2G041MA	表示
応用	5C038HH21	表示記録部

表 7-3. 質量分析計の関連特許の F ターム（出典：特許庁パテントマップガイダンス）

¹³⁵ 抽出に使用した F タームは、2G041（その他の電気的手段による材料の調査・分析）と 5C038（計測用電子管）である。抽出件数は 9001 件（1971 年から 2018 年 6 月まで）。

¹³⁶ 本来であれば、より詳細な分類も可能であるけれど、上記のタームだけで全体の約 8 割をカバーしており（上記いずれのタームも持たない特許数は全体の 2 割程度）、特に基礎特許についてのタームにはイオン源と質量分離部に関するタームを全て含めているた

ずしも装置の性能に直結するわけではなく、むしろ装置のユーザビリティを高める技術だと判断したためである。

この分類に従って出願特許におけるタームの出現頻度の傾向を表したのが、図 7-4 である。ここでは、比較を簡便にするために、各タームの出現回数を3年移動平均の形で整理した。図 7-4 から判るのは、信号処理 (2G041LA) の出現頻度がここ 30 年で大きく増大しており、同様の傾向が表示 (2G041MA) でも観察されることである。これは、信号処理や表示記録という汎用化に属する発明成果が特許として出願されやすくなってきていることを

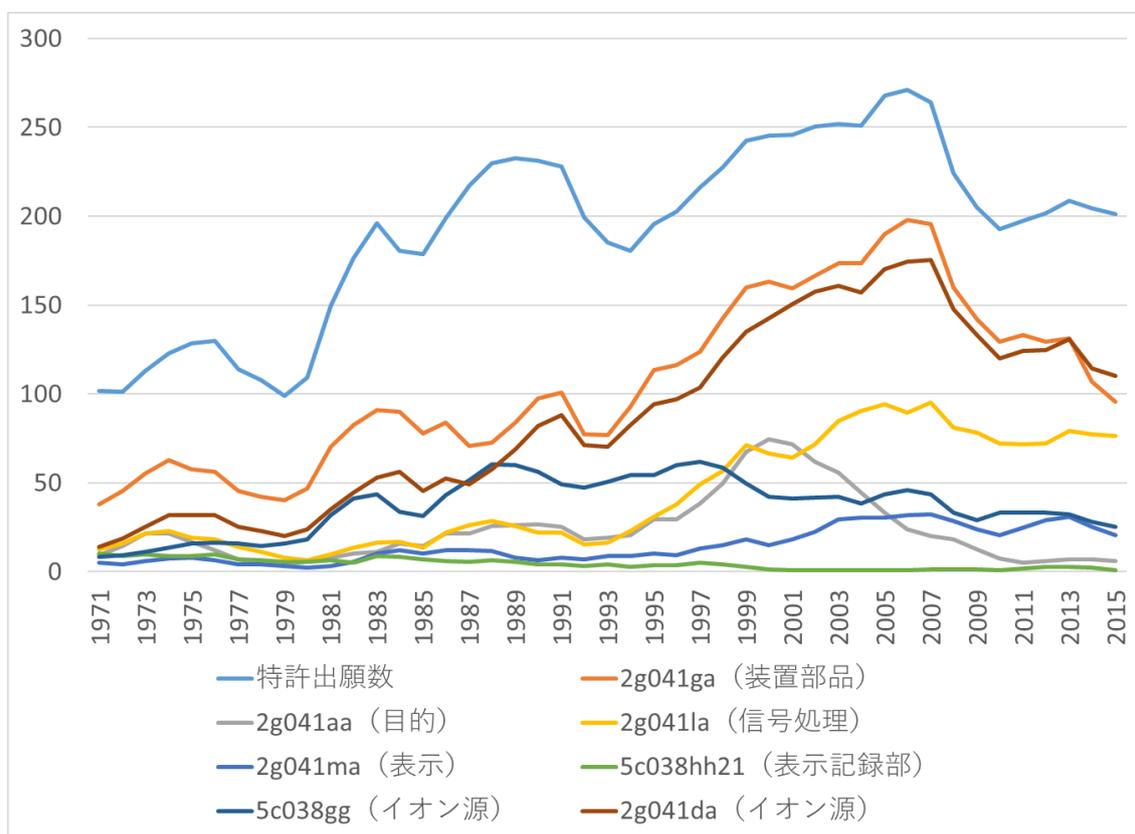


図 7-4. 日本特許における各 F タームの出現頻度

め、傾向の確認という目的に照らし合わせて十分な水準に達していると判断した。また、ここで応用的なタームを含むものを応用特許に分類しているのは、サンプルとして抽出した特許の約 3 分の 2 が何れかの基礎的タームを有しており、基礎と応用の識別には適さないと判断したためである。

意味する¹³⁷。更に言うと、2007 年を境に特許出願数が減少すると、それに伴ってイオン源や装置部品のタームの出現頻度は減少しているにもかかわらず、信号処理のターム出現数はほとんど低下していない。出現頻度自体は信号処理に比べて少ないけれど、近年でもタームの出現頻度が低下しないという傾向は、表示にも見て取れる。すなわち、より近年になるほど、信号処理や表示に関する技術が必須なものとなっており、装置メーカー間の競争によって重要な次元になっているのである。

F タームの出現頻度の傾向を、年代ごとの成長率という形で示したのが、表 7-4 である。表 7-4 に示した成長率の数値は、1970 年から 2015 年までの各年代についての、F タームの出現頻度の 10 年平均成長率（2010 年から 2015 年については 5 年平均成長率）である。本表からも、表示や信号処理に関連する技術の重要性が相対的に高まってきたことを読み取れる。より具体的には、基礎的な技術（装置部品やイオン源）に関連する F タームの出現頻度は 2000 年代から低下している傾向にあるのに対して、信号処理の F タームの出現頻度は増加傾向にある。2000 年以降について見ると、装置部品やイオン源に関連する F タームの出現頻度の成長率は、軒並みマイナスである。これに対して、信号処理（2g041la）の出現

	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2015
特許出願数	1.37%	8.20%	1.17%	-2.16%	1.72%
2g041ga（装置部品）	5.54%	10.35%	5.08%	-0.54%	-14.21%
2g041aa（目的）	16.65%	20.85%	14.47%	-24.01%	5.74%
2g041la（信号処理）	4.04%	22.03%	20.23%	3.00%	0.76%
2g041ma（表示）	0.00%	29.15%	14.31%	11.32%	-9.64%
5c038hh21（表示記録部）	4.04%	14.93%	-100.00%	0.00%	0.00%
5c038gg（イオン源）	9.28%	13.40%	0.28%	-1.51%	-20.74%
2g041da（イオン源）	7.12%	17.14%	5.02%	-1.67%	-8.15%

表 7-4. F ターム出現頻度の年代ごと成長率

¹³⁷ 信号処理の F タームの下位分類は次の通り。LA01（ノイズ除去）、LA02（特殊なアナログ回路）、LA03（ラベリング）、LA04（世代の割り当て）、LA05（シミュレーション）、LA06（データベース）、LA07（物質同定用）、LA08（定量測定）、LA09（イオン強度軸補正）、LA10（質量軸補正）、LA11（派生イオンの統合）、LA12（パターンマッチング）、LA20（その他）である。これらは、いずれも分析結果の解釈を容易にするための機構を指しているものと考えられる。簡便のためにターム間の階層関係に関する記述は省略した。

頻度の成長率は全時期にわたってプラスである。表示 (2g041ma) は、2010 年以降の成長率は-9.64%であるけれど、2000 年代の成長率は 11.32%である。このように、近年になるにつれて、装置メーカーはイオン源や装置部品に関連する発明を減少させ、その代わりとして表示や信号処理という汎用化に属する発明を多く行うようになったのである。

7.3.2.3. 装置ユーザー

装置のユーザーは、品質管理や分析業務に装置を用いるユーザー企業と、装置を使って研究や実験に取り組む科学者の 2 つに大別できる。このうち前者のユーザー企業が汎用化によって享受した便益については、前節で述べた。すなわち、人件費削減の一環としてオペレーターをパートや派遣社員に置き換えたり、複数種類の装置を 1 人で扱えるようにオペレーターを多能工化していったりする上では、装置が汎用化されていることが必須の条件であった。むしろ、こうした需要が存在していたために、装置メーカーが汎用化を推し進めていった側面もある。

科学的実践においても、装置の汎用化は大きな意味を持っていたと考えることができる。「再現可能なロバストな知識の確立」(福島,2017,p.99)を目標とする科学では、再現実験を必要とするのが通例である。すなわち、単一の研究室が実験成果を報告するだけではロバストな知識としては確立せず、他の研究室が再現実験に成功することによって、はじめて知識の堅牢性は高まっていく。しかしながら、再現実験にはある種の困難が伴う。Collins(1985)が指摘したところによると、使用装置の同一性が保証されていない場合、そもそも同じ実験であることが立証できなくなるため、水掛け論が生じる。具体的には、A 研究室が装置 X を使って実験結果を報告しているのに対して、B 研究室が類似装置 X⁺を使ってそれを反証する結果を報告した場合、A 側は使用している装置が異なっているのだから反証ではないとして、主張を退け続けることができってしまうのである(福島,2017)。しかも、科学装置の使用には専門的な知識や習熟が必要となる場合が多いため、論文で報告された結果を再現できないという事態もしばしば生じる。

ロバストな知識の確立という場合、そこには一定の客観性が求められる。すなわち、知識を積み重ねていくという集合的作業を実現する上では、何らかの統一的な規則に従うことによって、習熟やノウハウのような主観的要素が入り込む余地を削減した方が望ましい。実験生理学におけるカイモグラフ(運動記録装置)の役割を研究した Borell(1987)は、自動記録装置のイノベーションが発生した背後には、定量化と主観性の排除という動機が存在

したとしている。このように、装置を汎用化することの意義は、主観性の排除にあったと考えられる。すなわち、装置を汎用化しさえすれば、「誰がやっても同じ結果に辿り着くことができる」可能性を高めることができる。分析化学者がデータの信頼性という観点から装置の汎用化を志向してきたのも、このような理由によると思われる。

科学者のより日常的な実践においても、装置の汎用化が果たした役割は大きいものであったことは想像に難くない。本章の表 7-2 に示したように、科学者が扱わなければならない装置は増加傾向にある。そうなると、研究室で処理せねばならない情報量は多くなり、個別の科学者にかかる負担も増大していったと考えられる。そうした状況にあった科学者が、装置の自動化やライブラリといった機能を求めたとしても何ら不思議ではない。さらに、研究や実験が装置なしには成立しなくなり、装置のスループットが研究の生産性を大きく規定するようになったために、汎用化が重要視されるようになった可能性もある。実際に、文部科学省が 2015 年に発行した報告書は、科学装置の重要な競争次元として、装置のスループットを挙げている。すなわち、「…計測機器の開発課題の一つとして、『自動化・高速化』が上げられる。特に、前処理等が不要になる新技術、前処理等を含め自動化する技術や高速にデータを取得する技術は、研究の効率性（ハイスループット）を上げることから、どの機器においてもニーズは高く、購入の決定要因ともなる」（文部科学省, 2017, p.7）。

7.4. 小括

本章では、質量分析計の進歩を概観し、汎用化という観点に注目しながら進歩の過程を記述してきた。この記述によって示そうとしたのは、汎用化の進展が必然的な過程だったことである。それによって不利益を被る主体が（表面上は）存在しなかったために、質量分析計の汎用化は望ましい事態として受け容れられてきた。装置メーカーからすれば、装置の基礎性能を大きく向上させるような研究に投資するよりも、既存の装置を汎用化することによって、顧客の範囲を広げる方が合理的であった。装置のユーザーからしても、汎用化された装置を使用することでオペレーターの人件費を削減したり、実験の手間を削減することによって生産性を高めたりすることができる。このように、装置メーカーの利潤動機と、簡便かつ客観的な分析手段を求める装置ユーザーの動機が合致していたために、今日に至るまで質量分析計の汎用化は大きく進んできたのである。こうした汎用化の過程は、質量分析計とは異なる科学装置でも生じる可能性がある。なぜなら、科学装置が科学者の個別特殊的なニーズのもとに登場する装置であっても、ひとたびその有用性が明らかになると、利潤動機

によって参入した装置メーカーが、装置の汎用化を押し進めていくからである。

本章で議論した内容に基づくと、質量分析計の汎用化は、科学や技術の進歩にとっても有益に作用したと考えられる。装置が汎用化されることによって装置の利用可能性が高まり、ユーザーである科学者や企業は、それまで用いることの難しかった分析手段を採用しやすくなった。化学や医学をはじめとする領域からすれば、それまで入手することの難しかった化合物の構造情報などを、質量分析計によって取得しやすくなったことになる。こうした情報を研究や技術開発に用いることができるようになったことは、経済的な便益に結びついたはずである。

このように、科学装置の汎用化はあらゆる主体にとって望ましい事象であると考えられる一方で、一部の科学者は、手放しに喜べない事態であるとして汎用化に対する不信感や懸念を表明してきた。それらの科学者が表明してきた懸念には様々なタイプが存在する。例えば、質量分析計が汎用化されてから実験データの質が低下しているとか、質量分析計の基礎性能の向上を担う基礎研究者が蔑ろにされるようになった、といったものである。そこで次章では、実際に表明されてきた科学者の懸念を取り上げて、科学装置の汎用化によって生じる現象を提示し、その論理を考察する。そこで特に注目するのは、装置や分析手法を開発する大学研究者に対して、装置の汎用化がもたらした影響である。

8. 汎用化によって失われゆくもの

第7章では、質量分析計が辿ってきた汎用化の歴史を概観し、その進展が不可避的なものであったことを示してきた。その理由は、質量分析計のイノベーション・プロセスに参与する種々の行為者にとって、その汎用化が望ましい事態であったことにある。一方で、そうした汎用化が、科学や技術の進歩に貢献してきたのかについては、科学装置の汎用化によって失われたものが存在するのではないかという懸念という形を以て、一部の科学者から疑念の眼差しが向けられている。

科学者によって提示されてきた懸念は、次の3点にまとめることができる。すなわち、(1) 分析の信頼性の低下、(2) 科学的創造性の欠如、(3) 基礎研究の後退である。この3つの懸念は、科学装置の汎用化によって分析・測定が容易な作業であると捉えられるようになったことを踏まえているという意味で、相互に関連している。前者2つは、装置ユーザーの行動が変化することによって生じる問題を指摘したものである。ただし、これらの問題は、装置が汎用化されてユーザー数が増えたことの一時的な副作用に過ぎない可能性が高く、装置の進歩や、それに引き続く科学技術の進歩に対して影響を及ぼすとは言えない。

汎用化が科学や技術の進歩に対してもたらしうる影響として重要なのは、3つめの基礎研究の後退である。いかに装置が汎用化されようとも、基礎的な要素技術が更新されない限り、その装置で分析可能な対象の範囲には限りがある。だからこそ、新たな科学的発見や技術開発の機会をもたらすには、これまでに見ることも測ることもできなかったものを分析の俎上に挙げるために、装置の基礎的な性能の向上が図られねばならない。換言すると、汎用化によって基礎研究が後退することこそ、長期的な科学技術の進歩に対して影を落とす可能性がある。

本章では、装置の汎用化によって基礎研究が後退していく可能性と、そのメカニズムを、種々のエビデンスを援用しながら示していく。結論を先取りすると、次のようになる。装置研究者は、科学装置が汎用化される以前から、学問上の地位が低いものと見なされたり、論文生産性を高めにくいために研究費獲得に不都合が生じてきたりと、ある種の苦境に立たされてきた。そうした中で装置の基礎研究が継続されてきたのは、分析・測定が装置の専門家の領分だったことにある。しかしながら、科学装置が汎用化されて、装置が誰でも扱えるようになると、他領域の科学者が測定や分析において専門家の手を借りる必要性は低下する。そして、分析・測定が容易な作業であるという認識が広まると、学問上の地位や論文生

産性が低いという装置開発研究の特性も手伝って、研究手段を開発するという装置研究者の仕事の重要性が認識されにくくなり、それに対する大学における資源配分の優先度も低下していく。こうした論理を示すにあたって本章で提示するデータは、主として質量分析計に関するものであるけれど、汎用化によって基礎研究が後退するという因果関係は、他の科学装置にも該当すると考えられる。

本章の構成は次の通りである、第 1 節では、科学装置の汎用化に対して一部の科学者が表明してきた懸念のうち、データの信頼性の低下と科学的創造性の欠如という 2 つの問題を取り上げる。第 2 節では、関連学会の会員数データ等を用いながら、汎用化によって装置の基礎研究者にどのような変化が生じたのかを明らかにする。第 3 節では、装置の汎用化によって基礎研究が後退していくメカニズムを示す。第 4 節では、本章での議論を小括としてまとめる。

8.1. 汎用化と装置ユーザーの行動

8.1.1. 汎用化による信頼性の低下

装置が汎用化される以前から、専門家たちは、質量分析計の原理や構造を知っていることが装置を正しく使用する上で決定的に重要であると主張してきた。そうした主張が成されてきた理由は、旧来の質量分析計は全てマニュアル操作であり、構造や原理を知らなければ操作さえ困難であり、それ故に誤りのあるデータを報告する可能性があったためである（阿久津, 2010）。実際、質量分析計の専門家が学会というコミュニティを形成してきたのにも、正しい分析法の普及を目的としてきた側面がある。日本質量分析学会で会長を務めた緒方惟一（当時、大阪大学）は、1965 年の時点で次のように記している。

「その結論に至る経過即ち実験データを得る段階において、それを得るに使用した装置の特性乃至は性能を正しく利用されていないならば、又その限界を超えるごとき結論となっていれば惟も全く無意味であるばかりでなく、人をあやまるも甚だしいということになります。そしてそのような点の検討はそれぞれの専門分野においては当然のこととして不可能な場合が多いでしょう。これが先にも述べた様に世界的に国際的に、或は国内的に質量分析の会合のもたれる所以と考えています」（緒方, 1965, p.238）

しかしながら、装置の汎用化が進んで、誰でも比較的容易に装置を扱えるようになった近年になって、装置の正しい使用法が再び布告されるようになった。例えば、日本分析化学会の『ぶんせき』誌では、2017年に「分析機器の正しい使い方」という入門講座を紙上連載している。その目的は、「測定原理を理解しなくても装置を使用できる『装置のブラックボックス化』が進んでいる中で、装置の使い分けや正確な測定値を得るために必要な基礎知識、適切な試料前処理法などを分析機器・測定分野別に解説するため」（吉野, 2017, p.216）である。

近年になって装置の使用法に関する注意喚起が再び成されるようになった背後には、装置の汎用化がかえってデータの信頼性を損ねているのではないかという懸念が存在する。東京大学の平田は、データの信頼性のレベルが全体的に低下しているのではないかという懸念を、以下のように表現している。

「僕らからすると、誰でも測れるということ（汎用化）も分析化学上の進歩なんですよ。ただ、変なデータが出たときに、それが変なデータであることを気づけない人が増えている印象は持っています。（中略）本来は干渉でデータがおかしくなっているのに、それに気づかないで、それが正しいとして論文を書いているという例はいくつかあります。」¹³⁸

こうした懸念は、汎用化された装置への過剰な信頼を咎める警鐘として捉えられる。本来であれば分析結果を吟味しなければならないのに、装置が分析結果を自動で出力してくれるのを良いことに、それを信用しきっている科学者が現れるようになったという指摘である。平田によると、そうした分析結果を報告している論文には、査読の過程を通過してしまったものもある¹³⁹。これは、実験の客観性を保証するための手続きでもあった汎用化が、逆

¹³⁸ インタビュー[14]。括弧は筆者による追記。ここで平田が問題視しているのは、計測装置の限界や問題点を知らずに、装置の出力結果を信じて研究に取り組んでいる科学者が存在していることである。そうした科学者の割合の変化ではなく、その存在自体が問題だというのが、平田の主張である。

¹³⁹ 今までのところ、分析結果が精査されないまま査読を通過してしまうという現象は、掲載後に撤回ないし修正された論文数には反映されていない。第5章の実証分析に使用した論文データの生データによると、2000年以後に撤回された論文数は1、修正された論文数

説的にデータの信頼性を損ねてしまうという因果経路の存在を示唆しているかもしれない。

8.1.2. 汎用化による科学的創造性の欠如

装置の汎用化に対するもう 1 つの懸念は、装置の汎用化によって知識や経験上のロスが発生しているのではないか、というものである。例えば、ファイザーのミシェル・グリーブスは、質量分析計の本来の強みは、研究者のニーズに柔軟に対応できることにあったはずなのに、それが失われてきているとして、次のように主張している。

『データの質に対する潜在的な影響とは別に、感度や選択性が最適である場合でも、包括的システム (generic system) を広範に応用することは、分析の経験や専門技能を縮減することによって、また真の『実験』の自由を制限することによって、間接的な影響を及ぼしているかもしれない』(Gleave, 2011, p.245)

グリーブスの主張から読み取れるのは、装置の汎用化によって、実験の自由が制約されるという点である。装置が汎用化されるということは、分析に使用するサンプルを投入しさえすれば半自動的に結果が出力される汎用システムとして、装置がパッケージ化されることを意味する。こうした標準的機能を提供するために、昨今の市販装置では、使用者に装置を改造や改良する余地が与えられない場合が大半である¹⁴⁰。『ぶんせき』誌の座談会記事でも、「実際、今の装置は自分たちで改造などほとんどできないので、装置のことは装置屋さんに任せておけば良いと思います」(伊澤ほか, 2011, 168) という装置ユーザーの発言を確認できる。

汎用化された市販装置を用いている限り、重要な科学的発見に至らないのではないかと

は 10 に過ぎない。データの質が低下しているという問題は、それが論文の撤回や修正に反映されない程度のもので、すなわち重大な問題ではないとして認識されている可能性がある。

¹⁴⁰ その理由は、装置が複雑化していてユーザーが装置に手を加えることが困難なことに加えて、改造によるトラブルを避けるという装置メーカーの志向が反映されていることにあると思われる。例えば、「使い勝手良くするため、ご要求の改善で、隠しキーにより調整できるように開放すると、いじるのが好きな人が居り、ついいじることにより標準的な状態でなくなってしまう、トラブルになることをよく聞きます」(伊澤ほか, 2011, p.172) というトラブルが報告されている。

いう懸念は、装置が汎用化される以前から唱えられていた。例えば、先述の緒方は、「与えられた特に金で買える道具にのみ自分の研究をまかせることになれば、それが作られた目的の範囲以上には研究を飛躍させることは不可能で、程度の差はあるにしても本質的には『銅鉄主義』的なことに終わらざるを得ないでしょう」（緒方, 1965, p.237）と主張している。ここでいう「銅鉄主義」とは、分析化学の世界で使用されるジャーゴンであり、ある分析手法を別の対象に応用するだけの安直な研究（者）を指した言葉である¹⁴¹。

一部の科学者が汎用化に対して懸念を表明してきた背後には、科学者たるもの装置を自ら作る、あるいは改良するべしという信念が存在する。前掲の緒方の主張によれば、装置を用いて独創的な科学的発見を目指そうとすれば、単なるデータ集積の媒体としてお仕着せの装置を使っているだけでは不可能で、装置の改造や作成を以て新たな研究手段を創るところから始めなければならない。換言すると、本来であれば新しいものを見たり測ったりすることが科学的発見の源泉であるからこそ、それを可能にする装置や方法論を作り上げるところまで含めて研究を行うことが重要視されてきたのである。

一方で、「昔は一人一人の科学者が熟練した職人の助けを借りて、研究に必要な装置一式を工夫のすえつくり上げたものだが、しかしながらそういう昔に逆戻りすることはもうできない」（Ziman, 1994, 邦訳 p.59）という認識が蔓延しているのが昨今の状況である¹⁴²。汎用化に対する科学者の懸念は、こうした状況を鑑みたものである。すなわち、科学者が汎用化された市販装置に依存する傾向を強め、装置を自ら作成・改良しなくなってきた（あるいは、できなくなってきた）ことが、重要な科学的発見の生起確率を低下させているのではないか、というのが懸念の内容なのである。

¹⁴¹ インタビュー[13]。インタビューイの発言は、「銅でこういう方法がありましたというのを鉄に変えて同じことをやって論文が書けるといふ安直な研究をしている人に対して『銅鉄』なんて言います。」

¹⁴² その理由の1つは、個別の科学者の手に負えないほど装置が複雑化していて、装置作成に必要な専門技術の全てを修めるのが難しくなっていることにある。しかも装置が汎用化し、内部機構がブラックボックス化されていくと、既成装置のリバースエンジニアリング等によって装置作成を学習する機会が減少していくと考えられる。そのため、汎用化以後に市販装置への依存傾向が強まったことは想像に難くない。

8.1.3. 問題の所在

ここまで述べてきたように、科学装置の汎用化によって、装置ユーザーの行動は変化する可能性がある。より具体的には、科学装置が汎用化されることによって、論文で報告される分析結果の信頼性が低下したり、ユーザーが独創的な研究を行いにくくなったりするかもしれない。しかしながら、こうした行動変化によって科学研究に負の影響が及んでいるとは言えない。実際には、科学装置が汎用化されることによって、深刻な誤りのある分析結果が発表されてしまう可能性は低下しているかもしれない。加えて、汎用化されることによって装置の使用が容易になり、装置を使用する科学者の数が増えることによって、既知の科学領域における問題発見や解決がより効率的に行われるようになってきている可能性もある。

むしろここで重要視すべきなのは、科学装置が汎用化されることによって、装置自体の進歩にどのような影響が及ぶかである。結局のところ、科学装置が汎用化されて、ユーザーが市販装置に依存する傾向を強めていくこと自体は、科学や技術開発に対して大した影響を及ぼさない。なぜなら、ユーザーが自ら装置改良に取り組まずとも、何らかの形で装置の基礎性能が抜本的に向上し、そうした成果が装置メーカーによって広く普及してしまえば、ユーザーもその恩恵に預かって、新しい研究や技術開発に取り組むことができるからである。すなわち、科学者が市販装置へ依存するしかなかったとしても、装置自体が何らかの形で進歩を続けてさえいれば、科学全体の進歩に影を落とすような事態にはならないはずなのである。

したがって、汎用化の影響としてここで注目すべきなのは、装置の基礎研究に取り組んできた科学者（大学研究者）に対する影響である。装置ユーザーとは異なり、基礎研究者の存在は装置の進歩に直結するものである。そのため、仮に汎用化が基礎研究者に対して何らかの影響を持っているとすれば、それは装置の進歩に留まらず、幅広い領域の科学研究に対しても影響を与えるはずである。換言すると、仮に科学装置の進歩によって新たな科学的発見がもたらされるのだとしたら、科学装置が進歩しなくなると、連鎖的に新たな科学的発見の頻度も低下することになる。

8.2. 汎用化と装置の基礎研究

本節では、装置の汎用化がその基礎研究に対して及ぼした影響を示す。具体的には、質量分析計だけでなく、機器分析一般を扱う分析化学という領域が凋落してきた傾向を示す。こうした傾向は、短期的には大きな問題として認識されにくいように思われるけれども、長期

的な装置の進歩を阻害することによって、科学の進歩やイノベーションに負の影響を及ぼすかもしれない。

一見すると、装置が汎用化したとしても、基礎研究（者）に対して特段の影響があるとは考えにくいだろう。そもそも汎用化は、基礎研究とは独立して進むはずだからである。汎用化を担ってきたプレーヤーは装置メーカーであり、基礎研究を担ってきた大学研究者と役割が完全に重複していたわけではない。そのため、どれだけ装置が汎用化されようとも、大学において科学者が装置に関する基礎研究に従事しつづける限り、その成果として装置の基礎性能は向上していくことになる。

しかしながら、専門家が「分析機器が小型化、汎用化し専門職としてのマス屋は我々が最後かもしれません」（志田, 2011, p. 62）という記述を残しているように、質量分析計に関連する科学者の一部は、汎用化によって装置の基礎研究が成立しにくくなってきたとしている¹⁴³。更にいうと、この傾向は質量分析計以外の装置にも当てはまる。科学装置や分析機器の開発を主目的の1つとする分析化学という領域全般についても、例えば次のような指摘が投げかけられているのである。

「ここ数十年の間に、世の大学から分析化学研究室はほとんど姿を消してしまった。もはや『分析機器を作る』とか、『分析法を確立する』という目的の研究は、きわめて成り立ちにくい時代なのである。（中略）現代の分析機器の開発はもっぱら企業によって担われ、分析法の開発は研究のアペリティフとして行われる（少なくとも、そう見えるようにしないとイケない）。しかし、科学の発展を長らく支えてきた（そしておそらく今後も支える）重要な礎をビジネス指向の強い担い手に大きく頼り、科学者の本流の仕事として位置づけられない現代の科学の在り方に、筆者は少なからず懸念を持っている」（大河内, 2017, p.419）

ここで興味深いのは、装置の基礎研究が行われにくくなってきたことの原因として、装置の小型化・汎用化が挙げられていることである（志田, 2011）。前章で述べた汎用化の必然性と併せて考えると、汎用化によって装置の基礎研究が停滞していくことは避けられない事態である可能性さえある。ただし、ここに示したのはごく一部の科学者の意見であるため、

¹⁴³ 引用中における「マス」という単語は、質量分析計の略称である。

必ずしも実際の状況を反映していない可能性がある。

そこで以下では、装置の基礎研究が行われにくくなっているという指摘の真贋をデータから確認していくことにしよう。前掲の大河内の発言にあるように、科学装置や分析手法の開発が研究として成立しにくくなっており、分析化学という名を冠する研究室の数も大きく減少している、というのがその領域に関わる専門家の理解である。このことは、(1) 関連学会の会員数と、(2) 基礎研究の論文著者数という 2 つの傾向から大まかに判別することができると思われる。

8.2.1. 関連学会の会員数

科学者は通常、その領域の専門家コミュニティである学会に所属しており、そこには基礎研究に取り組んできた者も含まれる。そのため、仮に科学装置や分析手法の開発が研究として成立しにくくなっているのであれば、その影響は学会員数の減少として現れるだろう。そこで以下では、日本の質量分析計の専門家コミュニティである日本質量分析学会と、質量分析計をはじめとする機器分析一般を取り扱う分析化学の領域を代表する学会として、日本分析化学会の会員数の推移を見ていく。その上で、総務省による科学技術研究調査のデータを用いて、これらの学会の会員数の推移と、日本全体の科学者数の推移を比較する。

(1). 日本質量分析学会の会員数

日本質量分析学会の会員数を確認したのが、図 8-1 である。図 8-1 の左軸に示したのは、学会誌に掲載されている会告(学会総会の報告記事)から抽出した合計会員数と正会員数である¹⁴⁴。右軸には正会員比率(正会員数を合計会員数で除したもの)を示した。なお、グラフに一部欠損があるのは、会告上で学会員数が報告されていない年度があるためである。そのため、2016 年度については前後年の平均を取り、前後年の平均を取れない年度については欠損値のままとしている。

図 8-1 から明らかなように、日本質量分析学会の合計会員数はここ 10 年で減少している。

¹⁴⁴ 2018 年時点での日本質量分析学会の会員種別は、(1) 正会員、(2) 学生会員、(3) 永年会員、(4) 名誉会員、(5) 賛助会員である。このうち永年会員は、正会員として別に定める期間以上在籍した者であり、永年会員になるには学会理事会の承認を得なければならない。名誉会員は、質量分析の発達に関し功績のあった者、または学会に対し特に功労のあった者である。賛助会員は、学会の事業を賛助する法人または個人である。

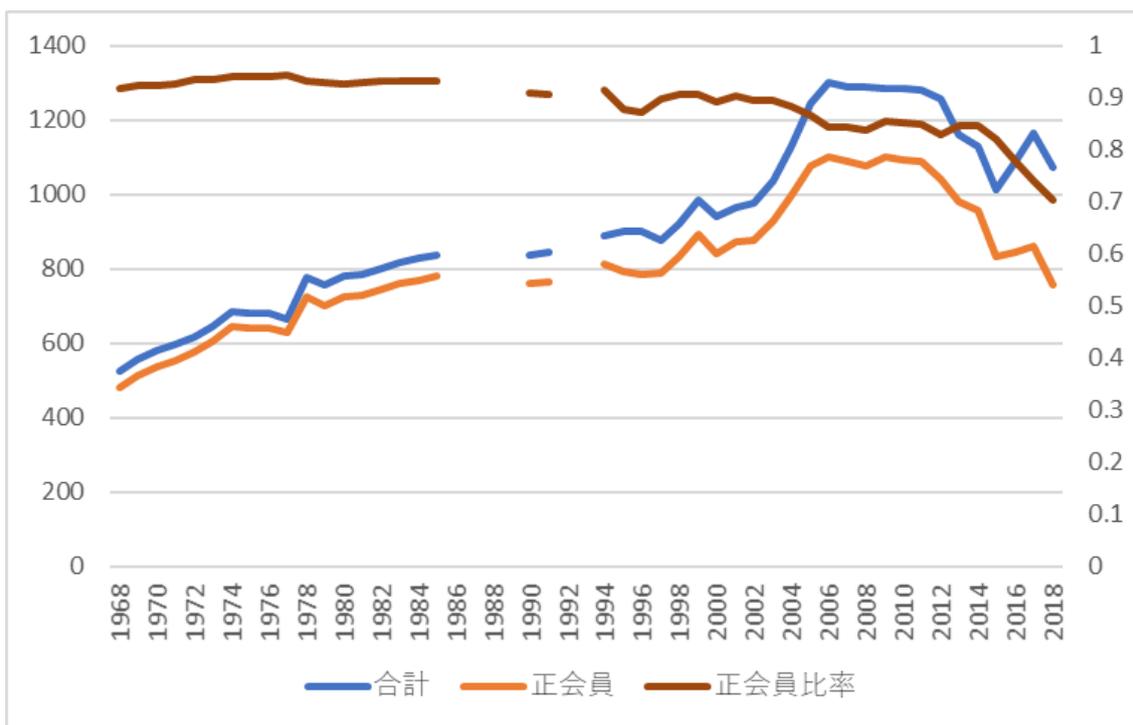


図 8-1. 日本質量分析学会の会員数

(出典：『質量分析』および『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』各号)

合計会員数の減少は、正会員数の減少によってもたらされたものである¹⁴⁵。正会員の数は2010年に至るまでほぼ一貫して増加傾向にあったものの、それ以降は急激に減少しており、2018年3月31日現在では正会員数が800人を割っている。これは1990年代と同水準であるように見えるけれど、正会員比率は20年前よりも下がっている。具体的には、1990年代の正会員比率は9割を超えていたのに対して、2015年を境として正会員比率は大きく減少しており、2018年度の正会員比率は7割という過去最低値となっている。

このように、第一線で質量分析計の研究に取り組む者の数は、ここ数年で大きく減少して

¹⁴⁵ 図中には示していないものの、他の会員区分の人数については、次の通りである。永年会員と名誉会員の数は、年による若干の増減はあるとはいえ、基本的には微増傾向にある。賛助会員（団体）の数は、1995年に100というピークを記録するものの、これはむしろ例外的に高い数値であり、1997年に65に一気に減少して以降、70程度の数に落ち着いている。最も人数の増減が激しいのは学生会員である。学生会員数は、2006年に108人という値を記録するまで一貫して増加傾向にあったものの、そこから2014年には38人まで減少した。しかしながら、学生会員数はそこから一気に増大し、2017年には170人、2018年には185人にまで増加している。

きたのである。ただし、日本質量分析学会に在籍しているのは、装置の基礎的な研究に取り組む者だけではない。例えば、装置を使用した応用研究に取り組む者も多く在籍している。しかしながら、世界的な潮流としてアプリケーションの研究が劇的に増加していることを考えると、応用研究に従事する者が大幅に減少したとは考えにくい¹⁴⁶。そのため、減少した学会員数の中には、装置の基礎的な研究を行ってきた者も一定程度含まれると考えるのが妥当だろう。むしろ、2000年代中盤までにかけて正会員数が増大していったのは、質量分析計に関連する2002年のノーベル化学賞が引き金となり、応用領域として急激に確立したバイオ系の応用科学者が中心かもしれない。

(2). 日本分析化学会の会員数

日本質量分析学会の正会員数がここ数年で減少しているのは、単に質量分析計が技術的に成熟したために、科学者が他の領域や装置に鞍替えしただけかもしれない。そこで次に、日本分析化学会の動向を確認してみよう。分析化学とは、物質の構成成分の調査・決定を目的とする化学の一分野であり、質量分析計をはじめとする機器分析一般を取り扱う。より具体的な研究対象は、存在する元素、化学種などの検出、同定、含有率の決定、およびこれを行うために必要な分析用試料の採取、分解、濃縮、データ処理などである（東京化学同人、1989）。分析化学の世界でも、近年になって、学会の要職にある科学者が誌上で警鐘を鳴らすほどに、会員の減少が問題視されるようになってきた。例えば、『ぶんせき』誌の近年の記事では、次のような記述が散見される。

「時代とともに全国的に『分析化学』の名前を残す研究室は減少し、分析化学会会員も減少しています」（金田, 2017, p.443）

「日本分析化学会の会員総数は、平成元年には9千人を超え、もうすぐ一万人だねと言われた。平成29年度の会員総数は6千人を切り、昭和42年当時の会員総数に近い。会員数の減少は当然のこととして会費収入の減となり、本会の財政悪化の大きな要因

¹⁴⁶ インタビュー[2]。島津製作所の御石によると、アメリカ質量分析学会で報告される成果では、アプリケーションの研究が爆発的に増大したために、装置のハードに関する成果の割合は大きく低下しているという。

となっている」(田中, 2018, p.85)

指摘されている会員数の減少傾向を実際に確認したのが、図8-2である。前図と同様、左軸には会告から抽出した合計会員数と正会員数を、右軸には正会員比率(正会員数を合計会員数で除したもの)を示した¹⁴⁷。図からも明らかなように、日本分析化学会の会員数は1990年代初頭を境にして減少傾向にあり、合計会員数の推移は、おおむね正会員数の推移と軌を一にしている。大学研究者が分類される正会員数という種別に限ってみれば、2000年時点

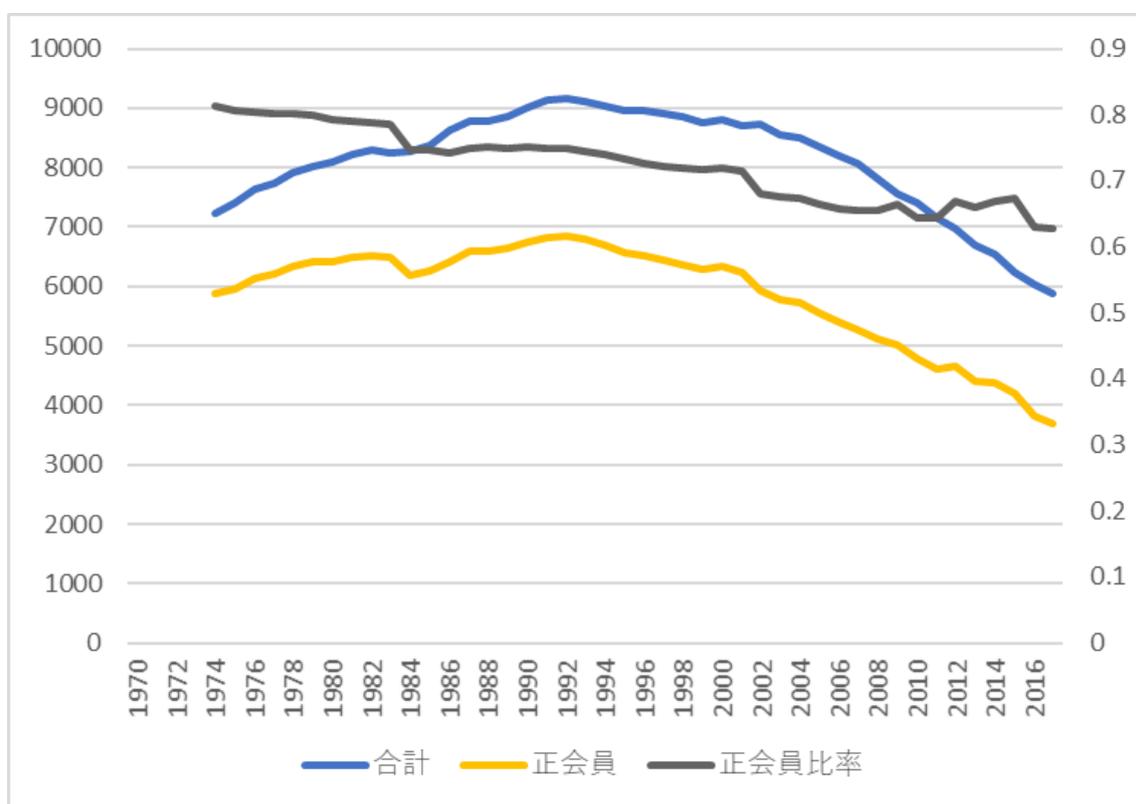


図8-2. 日本分析化学会の会員数 (出典:『ぶんせき』各号)

¹⁴⁷ 日本分析化学会の会員種別は、(1) 正会員、(2) 学生会員、(3) 永年会員、(4) 名誉会員、(5) 特別会員、(6) 維持会員、(7) 公益会員である。永年会員と名誉会員の扱いは、日本質量分析学会と同様である。特別会員とは、日本質量分析学会でいう賛助会員と同様で、法人(もしくは法人事務所)を対象とした種別である。維持会員も類似の種別で、学会の事業維持に協力する法人と個人を対象としている。公益会員とは、分析化学に関係のある国公立の試験所・研究所、または学校法人(図書館・図書室など)を対象とする種別である。

では 6300 人程度だったのが、2018 年 3 月 31 日現在では 3699 人にまで減少している。最盛期であった 1992 年の正会員数は 6851 人であるから、そこから四半世紀で正会員数は約半分になったことになる。

日本質量分析学会の場合と同じく、日本分析化学会の正会員は必ずしも基礎研究者だけでなく、割合で言えば企業で分析業務に携わる者や、科学装置を用いた応用研究に取り組む者の方が多い。加えて、分析化学という領域で取り扱う機器は幅広いため、そのいずれかが成熟したことによって新規参入が減少し、時を経る毎に会員数が減少していったに過ぎない可能性もある。それでも、分析従事者や応用研究者だけが学会から脱退していったとすゝる妥当な根拠はなく、会員数の減少には基礎研究者の撤退も反映されていると考えられる。

(3). 日本全体の科学者数との比較

ここまで見てきたように、日本の学会員数という単位で見ると、質量分析計のみならず、分析化学という領域で基礎的な研究に従事する科学者の数は減少傾向にあるようだ。ただし、こうした基礎研究者の減少は、日本全体での基礎研究者の推移を反映しているだけかもしれない。そこで以下では、我が国の研究活動の実態を調査するために総務省が行っている科学技術研究調査のデータから、基礎研究費や基礎研究者数を確かめてみよう。

科学技術研究調査とは、日本の科学技術に関する研究活動の実態を調査し、科学技術振興のための基礎資料を得ることを目的として、日本の総務省が 1953 年から開始した調査である¹⁴⁸。この調査は企業、非営利団体・公的機関、および大学等という 3 つの調査対象について、研究関係従業者数や研究費の実態を明らかにしている。総務省による研究関係従事者の分類は、表 8-1 の通りである。具体的には、研究関係従業者には、研究者、研究補助者、技能者（テクニシャン）、および研究事務その他の関係者が含まれる。研究者数は、本務者数と兼務者数を足し合わせたものである。本務者は、教員、大学院博士課程の在籍者、医局員、およびその他研究員のいずれかに該当する。

大学の自然科学領域における研究従業者数の中でも、表 8-1 中の「研究者」に該当する者の人数を示したのが、大学で自然科学領域の研究に従事する者の数を示したのが、図 8-3 である。図 8-3 には、研究者数の推移と、各領域（理学、工学、農学、保健）における近年の研究者の推移を示した。図が示しているように、我が国における自然科学領域の科学者数は、

¹⁴⁸ 総務省統計局 Web サイト (<https://www.stat.go.jp/data/kagaku/gaiyou/index.html>)

研究関係従業者数							
総数	研究者						
	計	本務者					兼務者
		計	教員	大学院博士 課の在籍者	医局員	その他の研 究員	

表 8-1. 科学技術研究調査における研究関係従業者の分類
 (出典：総務省「科学技術研究調査：調査票」をもとに筆者作成)

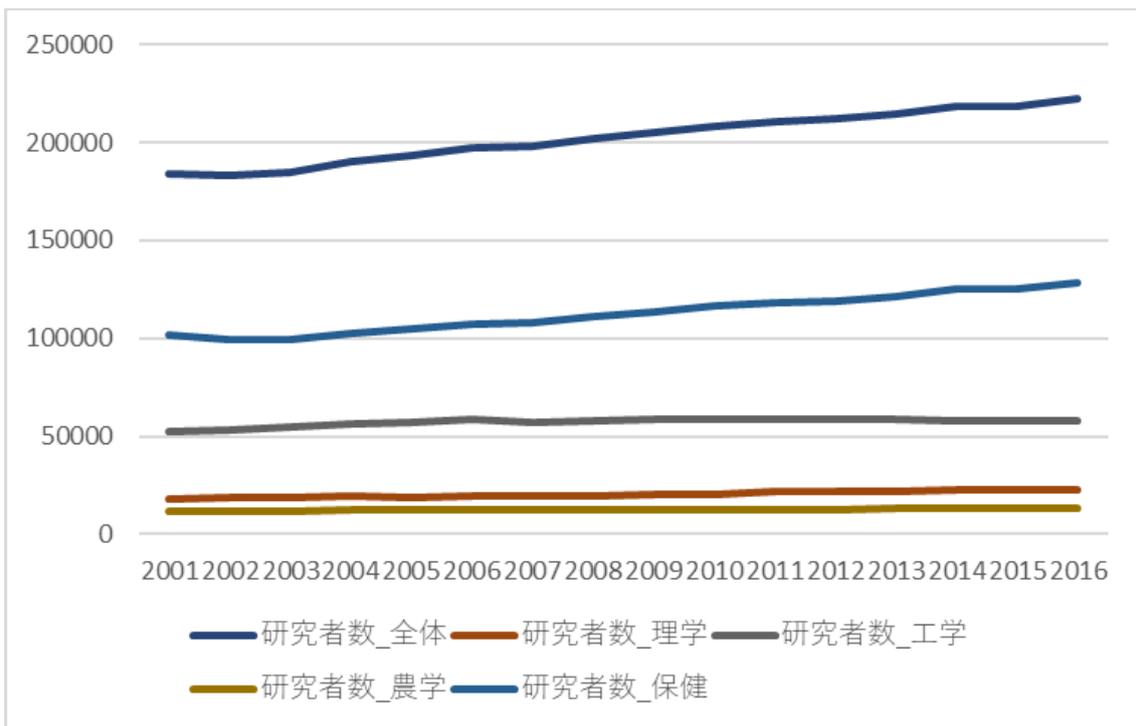


図 8-3. 自然科学領域の大学科学者数の推移

(出典：総務省統計局「日本の長期時系列」および「科学技術研究調査」より筆者作成)

ここ二十年ほど一貫して増加傾向にある。また、調査票に設けられている各学問領域の科学

者数を見る限り、保健領域の科学者数が増大しており、他の3領域の科学者数もほぼ横ばいで、少なくとも研究者数が大きく減少しているわけではない。

図8-3に示した科学者数は、大学の研究人材の総数であり、そこには大学教員だけでなく博士課程の学生や研究員も含まれる。したがって、科学者数の増大は、学生数や研究員数の増大によってもたらされている可能性が存在する。そこで、自然科学系の大学教員数のみの推移を示したのが、図8-4である。図から読み取れるように、大学教員数という単位で見ても、自然科学系の科学者数は全体的に増加傾向にある。ただし、教員数の増加に寄与しているのは保健系であり、理学、工学、農学の3分野の教員数は2000年以降大きく変化していない。

科学技術研究調査では、基礎研究者と応用研究者を区別していないため、図8-3と図8-4からは、大学における基礎研究の傾向を識別することはできない。そこで次に、研究費という側面から、大学の自然科学領域における基礎研究の規模がどのように変化してきたのかを確認しよう。科学技術研究調査は、科学研究の費用を基礎研究、応用研究、および開発研

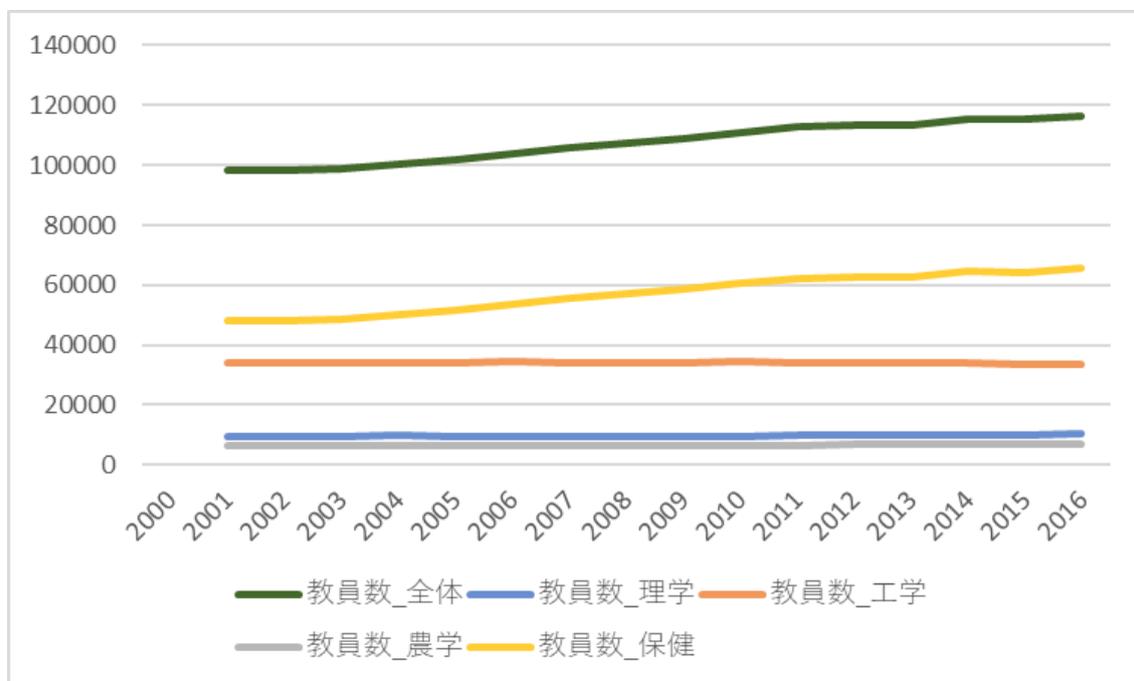


図8-4. 自然科学領域の大学教員数の推移

(出典：総務省統計局「科学技術研究調査」より筆者作成)

究の3つに分類した上で、それぞれの研究に投じられた費用を整理している¹⁴⁹。このうち、ここで主に注目するのは基礎研究費であるけれど、科学装置の作成に関連するものとして、開発研究費の推移も併せて見ていく。上述した3区分の研究費用の推移を、図8-5に示した。図から明らかなように、自然科学領域の研究に対して大学が投じてきた研究費用は、全ての区分において増加傾向にある。3区分の中で最も増加しているのは基礎研究費である。全体の研究費に占める基礎研究費の割合は、1976年の58%からほぼ変化しておらず、2016年の基礎研究費の割合は54%である。また、応用研究費と開発研究費も一貫して増大

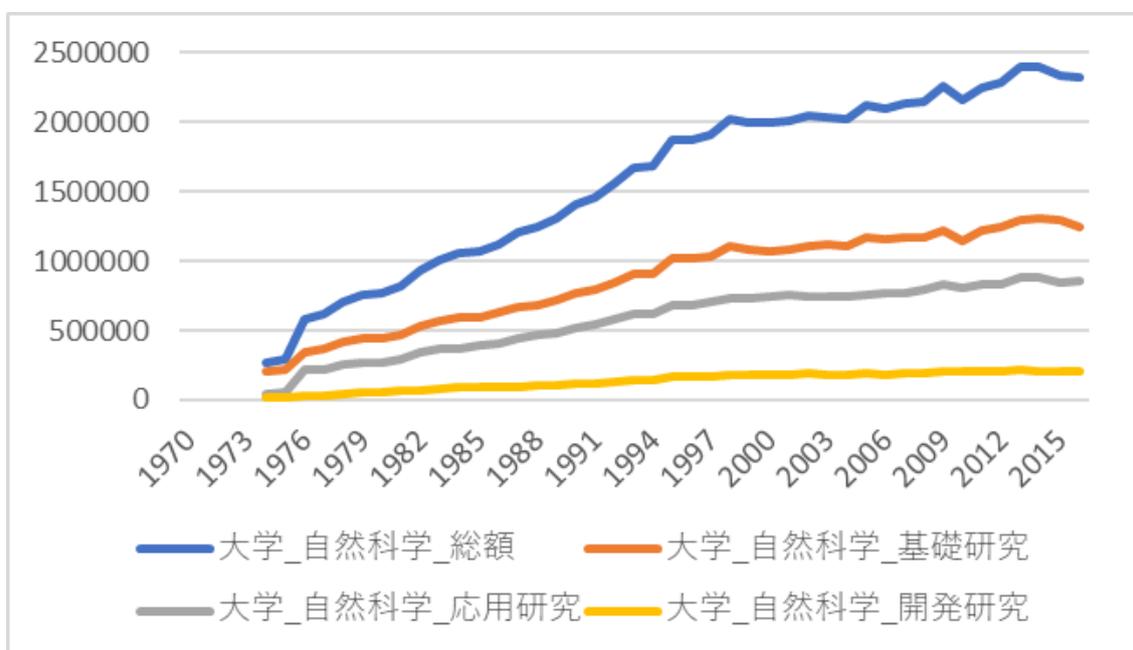


図8-5. 自然科学領域における大学研究費の推移 (単位：百万円)

(出典：総務省統計局「日本の長期統計系列」および「科学技術研究調査」より筆者作成)

¹⁴⁹ 科学技術研究調査の平成30年版質問票の第6面において、それぞれの研究は以下のよう
に定義されている (<https://www.stat.go.jp/data/kagaku/pdf/30hei.pdf>)。基礎研究は、「特
別な応用、用途を直接に考慮することなく、仮説や理論を形成するため又は現象や観察可能
な事実に関して新しい知識を得るために行われる理論的又は実験的研究」である。応用研究
は「特定の目標を定めて実用化の可能性を確かめる研究や、既に実用化されている方法に
関して新たな応用方法を探索する研究」、開発研究は「基礎研究、応用研究及び実際の経験か
ら得た知識を活用し、付加的な知識を創出して、新しい製品、サービス、システム、装置、
材料、工程等の創出又は既存のそれらのものの改良を狙いとする研究」である。

してきた。

要約すると、日本においては、大学研究における研究者や基礎研究費は増加してきたにもかかわらず、日本質量分析学会と日本分析化学会の会員数は、近年になって減少している。このことは、近年になって基礎研究が行いにくくなってきたという指摘が、質量分析計をはじめとする科学装置の世界にのみ当てはまる可能性があることを示している。

8.2.2. 基礎研究の論文著者数

世界的に見ると質量分析計の基礎研究者は減少しているのだろうか。このことを直接に示すのは難しく、またそうしたデータも存在しない。というのも、何が基礎研究に該当するかを客観的な基準によって識別するのは困難である一方で、応用領域が急速に拡大していったために、基礎と応用を合算した全科学者数だけで見れば世界的には増加傾向にあっても不思議ではないからである。そこで以下では、質量分析の国際誌に投稿される論文データをもとにして基礎研究と応用研究を区別し、基礎研究の傾向を見ていくことにしよう。

基礎研究と応用研究を客観的に識別することは容易でない。そこで本研究では、PubMedの機能を使用して、質量分析の装置化に関わる研究を基礎、そうでないものを応用研究として区別する。PubMedには、論文の内容を指し示すMeSHに加えて、MeSHをより限定して検索を行うためのキーワードとして副見出し(subheadings)が用意されている¹⁵⁰。例えば、論文中にある物質が登場するとして、それが疾患の薬物療法という文脈で登場しているのか、薬物の副作用という文脈で登場しているのかを、副見出しを用いて識別できるのである。科学装置の作成あるいは改良に関連する副見出しは、装置化(instrumentation)である。装置化の定義は、「器具、装置、あるいは設備の開発ないし改良のために、診断や治療の手法、分析技法、専門知識、ないし熟練を用いること」である¹⁵¹。

この定義からもわかるように、装置化というMeSHが割り振られている論文は、装置の開発もしくは改良に関与したものである。より具体的には、イオン化部、質量分離部、他装

¹⁵⁰ 使用可能な副見出しリストは、PubMedのマニュアル (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK3827/table/pubmedhelp.T.mesh_subheadings/) に掲載されている。

¹⁵¹ NLMのWebサイト (<https://www.nlm.nih.gov/mesh/topsubscope.html>) における原文は、"Used with diagnostic or therapeutic procedures, analytic techniques, and specialties or disciplines, for the development or modification of apparatus, instruments, or equipment". 邦訳は筆者による。

置とのドッキング機構をはじめとする要素技術の開発・改良に何らかの形で関連している論文には、装置化という MeSH が振り分けられる。そのため、装置化という副見出しが付与されている研究は、基礎研究に分類することができる¹⁵²。逆に、質量分析計に関連する論文の大半は、既知の装置や要素技術を使用して測定・分析の結果を報告するタイプの論文である。これらの論文は装置の開発や改良の結果を報告したものではないから、それらに装置化の MeSH は割り振られない。本研究では、このように装置の開発や改良に関連していない研究を、応用研究に分類する。

使用する論文データは、質量分析を専門に扱う国際誌『Rapid Communications in Mass Spectrometry』(RCM)と『Journal of Mass Spectrometry』(JMS)の2誌に関するものである。前者は速報性を重視している雑誌であり、後者は質量分析に関わるトピックを広く取り扱う雑誌である¹⁵³。他にもいくつかの国際誌がある中でこの2誌に限定しているのは、創刊から現在までの全記事がPubMedに全て採録されているのが、この2誌のみであったためである。以下では、これらの2誌について、MeSHの副見出しを用いて論文を基礎研究と応用研究に分類し、年度内重複を除去した上で各類型に属する論文の著者数を数え上げることによって、基礎研究者数と応用研究者数の推移を見ていこう。なお、ここでの目的は著者数推移の全体的な傾向を把握することにあるため、以下では、著者数の推移を3年移動平均の形で示している。

(1). Rapid Communications in Mass Spectrometry (RCM) の論文著者数

図8-6は、RCMに掲載された論文をもとに算出した著者数の推移である。ここでは、左軸に基礎研究論文(装置化論文)と応用研究論文(非装置化論文)の著者数を、右軸に全著者に占める基礎研究論文著者の割合を示した。図8-6から判るのは、雑誌創刊の時点から一

¹⁵² 装置の改良を含むため、実際には基礎研究の論文数を過大評価している可能性がある点には注意が必要である。

¹⁵³ 島津製作所の御石(インタビュー[2])によると、質量分析のジャーナルの中で装置ハードに関連するトピックを重点的に取り扱っているのは、『International Journal of Mass Spectrometry』(略名:IJMS,旧名:International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics,およびInternational Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes)である。しかしながら、PubMedにはIJMSの一部しか再録されておらず、分析結果にバイアスが生じる可能性があるため、ここでは分析対象に含めていない。

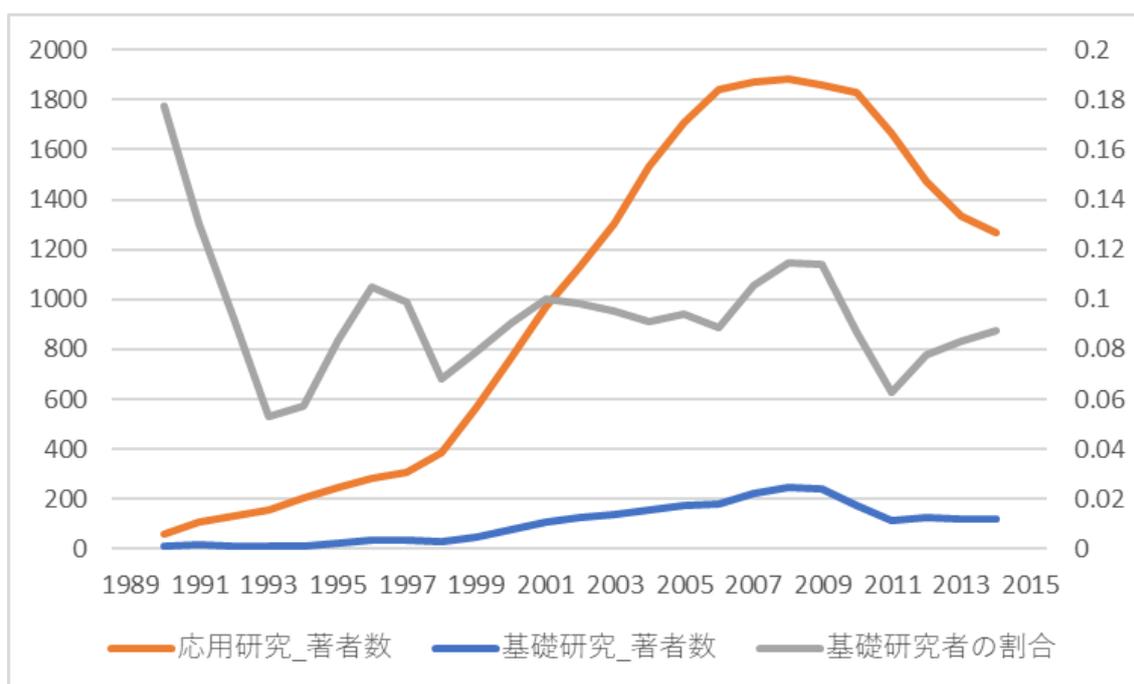


図 8-6. Rapid Communications in Mass Spectrometry における論文著者数の推移

貫して応用研究者の方が多く、基礎研究論文の著者の割合は、ほぼ一貫して RCM 全体の 10 分の 1 程度であったということである。これは、RCM の創刊が 1989 年であり、この時期には既に装置の汎用化がかなり進展していたために、創刊当初から応用研究の投稿数が多かったためだと思われる。近年のみの傾向を見ると、2010 年を境に応用研究論文の著者数は減少しているものの、それによって基礎研究論文の著者数の割合（右軸）が増えているわけではない。

より全体的な傾向を見ると、基礎と応用のいずれについても 2000 年代末まで著者数が増加し続けてきたものの、2010 年以降は減少傾向にある¹⁵⁴。応用研究論文の著者数は、2007 年に 1873 人という最大値を記録して以降は減少し続けており、2014 年には約 3 分の 2 である 1267 人となっている。これに比べると、絶対的な規模は小さいものの、基礎研究論文の著者数はよりドラスティックに減少している。具体的には、2008 年の 244 人という最大人数から、2014 年には半分の 122 人にまで半減しているのである。

¹⁵⁴ これは、1 論文あたりの著者数が減少したわけではなく、いずれについても論文数が減少したためである。

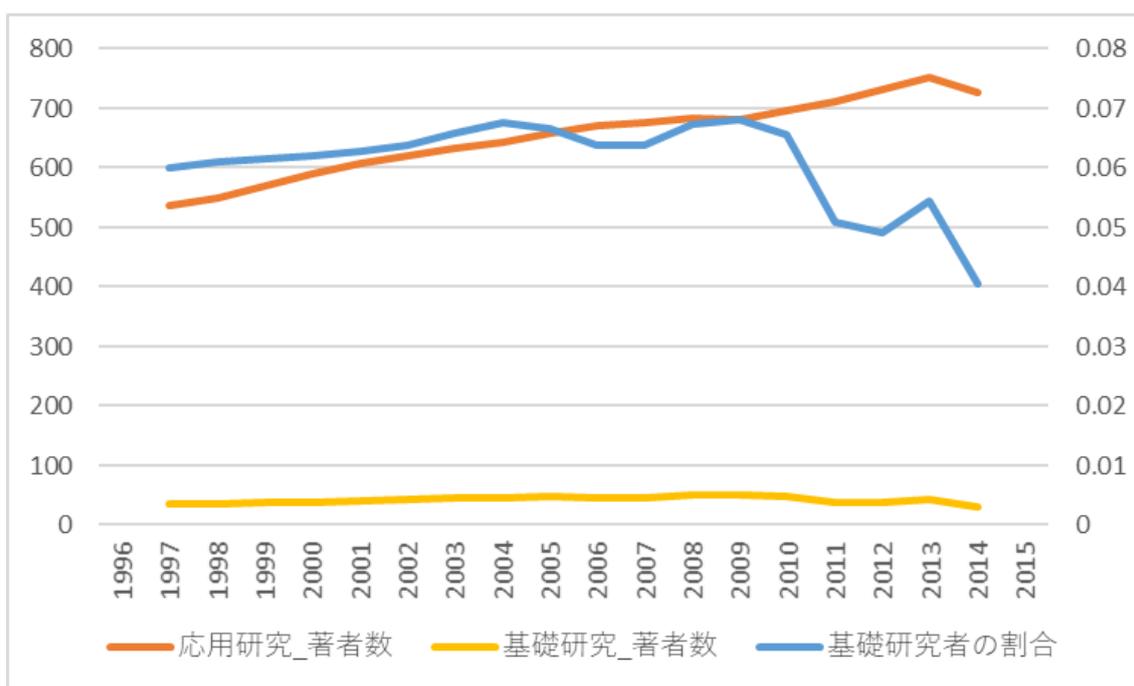


図 8-7. Journal of Mass Spectrometry における論文著者数の推移

(2). Journal of Mass Spectrometry (JMS) の論文著者数

JMS 採択論文の著者数の推移を示したのが、図 8-7 である。前図と同様に、左軸に基礎研究論文と応用研究論文の著者数を、右軸に基礎研究論文著者の割合を示した。この図で注目すべきは、RCM の場合と同様に基礎研究者の割合は 10% 弱であり、その割合が 2010 年から減少していることである。1990 年代から 2009 年までは、応用研究者の数が增大しても、同じく基礎研究者の数も僅かに増加傾向にあったため、基礎研究者の割合は低下していなかった。ところが、2009 年以降、応用研究者の数は相変わらず増えているにもかかわらず、ただでさえ低水準であった基礎研究者の割合は、更に低下していった。具体的には、2009 年に 50 人（2008 年から 2010 年までの平均値）存在した基礎研究者は、2014 年には 30 人（2013 年から 2015 年までの平均値）へと減少している。

たかだか 20 人弱の減少ではあるけれど、応用研究者が増加しているにもかかわらず基礎研究者が減少している（少なくとも増加はしていない）ことは、質量分析計に関する研究の中でも、装置を分析・測定に用いるだけの応用研究は阻害されず、装置の開発や改良を目的とする基礎研究のみに対して、ある種のハードルが選択的に現れた可能性があることを示唆している。

8.3. 汎用化による基礎研究の停滞

前節では、「汎用化によって装置の基礎研究が成立しにくくなってきた」という主張のうち、「装置の基礎研究が成立しにくくなってきた」という部分について、質量分析計の基礎研究者が近年になって減少していることを示してきた。日本分析化学会の会員数の減少は、基礎研究の停滞という潮流が質量分析計だけでなく、他の科学装置でも生じていることを示唆している。基礎研究者の減少は、装置の進歩速度に負の影響を及ぼすことを通じて、幅広い領域の科学研究に対しても影響を与えうる。

ここで説明すべきなのは、装置の汎用化が基礎研究者の減少に及ぼした影響である。科学装置が汎用化されると、なぜ装置の開発を目的とする基礎研究は行いにくくなるのだろうか。「分析機器が小型化、汎用化し専門職としてのマス屋は我々が最後かもしれません」（志田, 2011, p. 62）という記述が残されているように、質量分析計の専門家は、専門外の人間でも装置を比較的容易に装置を扱えるように使えるようになったことが、基礎研究者の重要性を低下させたと考えてきた。

装置の汎用化が基礎研究者の重要性を低下させたと考えてきたのは、質量分析計の専門家だけではない。千葉大学名誉教授の小熊幸一は、分析化学という領域において、大学研究者という専門家の重要性が低下してきたことを、次のように述べている。

「大学なんかでもよく言われるんですけど、機器がどんどん進歩しちゃって、『これ測って下さい』と持ってきてすぐにできちゃうような、そういう風に色んな人が考えるようになったんですよね。専門としている以外の人間は。」¹⁵⁵

分析作業が簡便になった（もしくはそう捉えられるようになった）ために、わざわざ専門家の手を借りる必要が無くなった、というのが小熊の発言の趣旨である。そうは言っても、仮に専門外の人間が自ら分析を行えるようになったとしても、それが直ちに基礎研究者の仕事を奪うことはないように思われる。なぜなら、基礎研究者の本来の仕事は装置や分析手法に関する研究であって、分析作業そのものには限らないからである。

しかしながら、基礎研究者の所属先が基本的には大学であることを考慮に入れると、事情は変わってくる。大学間での競争が当たり前となった現代では、どのような研究分野に重点

¹⁵⁵ インタビュー[13].

的に投資するかという問題が、資源配分上の意思決定に付きまとうことになる。このとき、科学装置の汎用化は、大学における装置研究者の必要性を低下させてしまい、装置に関する基礎研究の拠点が失われることを通じて、装置進歩の停滞をもたらす可能性がある。

以下では、科学装置の汎用化によって基礎研究者が減少したことを、次のように示す。まず、基礎研究者の減少の背景として、装置開発に携わる科学者がある種の苦境に陥ってきたことに触れる。ただし、装置系の科学者が苦境に陥ってきたのは、装置が汎用化される以前からの話であるため、そうした背景的な要因によっては、基礎研究者の減少が近年になって生じてきたことを説明できない。そこで、装置の汎用化による直接的な影響として、装置の汎用化以後に、装置研究者の大学内での位置付けがどのように変化したのかを見ていく。

8.3.1. 装置研究者の苦難

分析化学領域の科学者は、科学装置や分析手法の開発という固有の目的ゆえに、2つの問題に直面してきた。それは、学問上の地位が低いと見なされてきたこと、および研究の性質からして論文生産性を高めるのが困難だったことである。こうした問題があったために、分析化学系の科学者は、その役割を過少に評価されてきた可能性がある。

(1). 装置開発者の地位

分析化学者の多くは、自らが探究している学問の重要性を自己認識する傍らで、学問全体の中では低い地位に追いやられてきたものとして認識してきた。このことは、例えば緒方惟一の次の主張に見て取ることができる。

「我が国では自然科学輸入以来、自からその研究手段（装置、方法等）を開発、進展せしめたことが殆んどなく、それは金を積んで買ってくれば（輸入）上等舶来が手に入り、そおゆう他より与えられた一特に舶来品で一道具で仕事をするのが研究であり、装置の開発改良等は貧乏人か研究者でない技術屋のやることとして研究者と自称する人々は自他ともに研究手段の開発をいやしめて来たようにみえます」（緒方，1965，p.237）

管見の限り、こうした地位の低さは近年になっても改善されていないようだ。2015年と2016年度に日本質量分析学会で会長を務めた和田芳直は、『Journal of Mass Spectrometry

Society of Japan』の誌上会議で、次のように記述している。

「大学における分析科学（化学）の位置づけが弱く、木に登らせれば大きくなるはずの人材が雑木林で肩身狭く生きている状況が何ら改善されず、必然的に学生も少ないという悪循環。その背景は、物理では素粒子や理論、化学では合成化学が圧倒的な主流派であって、分析科学という位置づけがない理学部や工学部では、装置を作ること自体は目的ではなく単なる実験道具を作るためだから、『目的不明の活動』すなわち『サイエンスではない』となる」（升島ほか, 2008, p.278）

要するに、本人達はそこから新たな科学的発見がもたらされることを期待して研究に取り組んでいるにもかかわらず、その活動はサイエンスとして見なされない傾向にある。なぜなら、特定の課題に取り組む研究領域では従たる活動として見なされる研究手段の開発こそが、分析化学の主たる研究目的だからである。こうなると、周辺領域からすれば、分析化学が行っているのはエンジニアリングではあるけれど、直接に何かの科学的課題を解いているわけではないからサイエンスではない、と評価が下されてしまうことになる。

(2). 装置開発と論文生産性

今ひとつの問題は、研究資金の規模から見た場合の論文生産性の低さである。これは、分析法の小さな改良であれば大した問題にならないかもしれない。しかし、新しいイオン化部や質量分離部を作成するといったような場合や、新たな機構に基づく装置の試作機を実際に作成するといった場合には、多額の資金がかかるだけでなく、頻繁に論文を投稿することも難しい。東京大学の平田は次のように述べている。

「分析法の開発ってお金がかかるんですよ。1年頑張っようやく論文ができましたというので、論文を書くのは難しいところがあります。多くの人が自分のところで分析装置を作らない理由は、1つは5年で陳腐になってしまうというのと、もう1つは分析法の開発をやっても論文を書けないんですよ。業績が出ないんです。それに、予算申請もできないし、獲得できたとしても論文が出ないので、次に繋がらない。そもそも手を出

しにくいですし、それを経験する研究室も少なくなっている。」¹⁵⁶

平田が指摘しているように、分析法の開発には資金が必要であるにもかかわらず、論文数で測定すると他領域よりも生産性が低く見積もられてしまうために、次なる研究費を獲得しにくい。要するに、ある種の悪循環が存在するというのである¹⁵⁷。投じた費用の割に論文生産性が高まりにくいという問題は、大学レベルでの資源配分を考えると、より深刻な問題として浮かび上がってくる。というのは、大学運営の資金が限られている以上、他大学との競争を制するためには、そうした論文生産性の低い領域よりも、より低コストで短期的に成果を見込める領域へ重点的に資源を配分する（例えば有用だと思われる領域に教員のポストを多く設ける）方が、合理的な選択肢になりやすいからである。

8.3.2. 大学組織における装置研究者

ここまでに取り上げた 2 つの問題、すなわち装置開発が科学的営為として見なされにくかったり、論文生産性が低いために研究費獲得において困難が生じたりするという問題は、確かに基礎研究者の減少に寄与してきた可能性がある。しかしながら、これらの問題は、装置が汎用化される以前から存在した問題であり、汎用化によってこれらの問題が顕在化したとは考えにくい。少なくとも、日本質量分析学会や日本分析化学会の会員数が近年になって減少してきたことを、これらの問題によっては説明できないと考えられる。

¹⁵⁶ インタビュー[14].

¹⁵⁷ これを回避する方策として、応用研究に取り組むユーザーとの共同研究によって一定以上の論文投稿を維持し続けることがありうる。実際に、東京大学の平田もそのような方法を取ることによって研究を継続している。平田は次のように述べている。「外の大学の方とか、国立の機関の方にはお金取らずに、共同研究という形で使って頂いて、論文を書いて頂くというスタイルですね。僕らも助かるし、ユーザーの方も助かるという関係で、これは上手くいっていると思いますね。これは僕らにとって必須条件で、コミュニティがここに来てもらうためには、僕らとしては性能を常に上げ続けなければならないで、ユーザーが来てくれれば、論文が書ける。そうすると僕らは新しい分析法の予算申請ができるので、また新しい研究ができると。これがどこか1つでも回らなくなると、もう続かないですね」（インタビュー[14]）。一見すると、これは一種の成功のモデルを示しているようにも見えるけれど、裏を返せば、それだけ綱渡りのような状況でしか研究が継続できなくなっていると捉えることもできる。

汎用化による影響としてむしろ重要なのは、装置の汎用化が進んで分析・測定が特殊な行為でなくなり、専門外の間でも比較的容易に分析作業を行えるようになったことである。具体的には、装置が汎用化される以前は、分析・測定のためには装置や手法に関する知識の習得が必須であったために、分析化学系の科学者、あるいは分析・測定という行為そのものに対する専門性が認められていた。ところが、装置の汎用化によって、大多数の科学者が分析・測定作業を容易なものとして認識するようになると、分析・測定という仕事に対する専門性は認められなくなっていく。

装置の汎用化によって分析・測定が容易だと認識されるようになると、大学組織における装置研究者の価値も低下する。千葉大学名誉教授の小熊幸一は、大学における講座制の崩壊とともに、分析化学の研究室が減少してきた経緯を次のように説明している。

「有機なら有機、合成なら合成と、それぞれの流れを継続するという形を講座制として守ってきたわけだけでも、人事の柔軟性を持たせるという話が出てきて、研究室の准教授をそのまま教授にあげるといった流れが無くなってきたのはありますね。化学なら、化学科で違う研究室の助教授で優秀な人がいれば、その人をこちに振り替えてしまう。こうして講座制というのは崩壊していったわけですけど、その中で、分析というのは他の分野の人でもできそうだと出てきちゃったわけですよ、装置が発達したから、我々みたいな色々な反応なんかを長年経験を積んでそこにこだわる人の立場というのが、薄れてきてしまった。」¹⁵⁸

小熊は、日本の大学において講座制という組織体制が崩壊していく過程で、分析化学系の科学者に対してポストが与えられなくなってきたとしている¹⁵⁹。その理由は、装置が汎用化

¹⁵⁸ インタビュー[13].

¹⁵⁹ 島津製作所の御石も、大学における装置研究者が減少してきたことを、講座制と関連づけている。具体的には、企業では基礎研究に取り組みにくい一方で、大学での基礎研究も低調であるという認識を、次のように述べている。すなわち、「企業の規模感もあるが、企業の中でやるとどうしても出口が見通せる範囲での研究開発になってくると思います。そういう意味で、出口のあまり見えないレベル、いわゆる基礎研究レベルに近いようなところでの研究というのは中々厳しくなっていて、成果も出にくいのかなという気はしますね。アカデミアでやれば良いと言ってもそうはいかなくて、分析化学全般について言えることですが、アカデミアで方法論を開発するというのはかなり低調です。だんだんそうなってい

したために、分析化学系の科学者でなくても分析・測定は行えるのだという認識が広まってきたことにある。そうした認識は、大学組織における分析化学者（あるいは装置研究者）の価値を低下させてしまう。少なくとも、装置が汎用化されると、他領域の科学者からすれば、目的とする分析・測定を行う上で、分析化学者の手を借りる必要は低下する。そのために、大学という組織の中では、分析・測定に対する専門性が認められにくくなっていく。換言すると、分析・測定に必要な知識や熟練こそが、大学組織の中における装置研究者の重要性の根源であったのに、装置の汎用化が進んで分析・測定が特殊な行為でなくなったために、大学にその専門家を配置する意義は低下していったと考えられる。

8.4. 小括

本章では、質量分析計をはじめとする科学装置の汎用化がもたらす負の側面を考察してきた。これまでも、データの信頼性の低下や、科学的創造性の欠如という問題が科学者によって指摘されてきた。これに対して本章では、より重要な問題として、装置の汎用化によって、科学装置の性能向上を目的として行われる基礎研究が停滞する可能性を示してきた。そのメカニズムは、装置の汎用化によって分析・測定という仕事が専門的なものとは認められにくくなるために、基礎研究者の大学内での重要度が低下していくことである。

見方を変えると、科学装置を作るという仕事は公共財的な性質を持っていたと考えることができるかもしれない。分析手法や装置の開発によって分析・測定の性能を高めるという研究目的は、それ自体で何かの課題を解いたことになる場合もあるけれど、その成果が他領域に応用されることに大きな意味がある。しかしながら、装置が金銭で容易に購入できるようになり、しかも汎用化によって専門外の人間でも扱えるようになると、大多数の科学者のニーズは市販装置によって充足されるようになり、装置研究者からの直接的な知識移転は必要とされなくなっていく。そうなると、個別の大学からすれば、装置研究者を自大学に置いておかなくても、別の大学の科学者による成果が次なる汎用機として市場に出回るのを待っている方が、研究費用を低減する上で合理的になる。その結果、社会全体のレベルで、装置の基礎研究に対する投資が過少になってしまい、装置進歩が停滞することになる。

っているという印象は持っているんですよ。一世代前であれば、この装置であればこの先生あの先生というのは随分名前が出たと思うんですけど、(講座制の)代替わりの段階で、段々と競技人口が減っていつているという認識は持っています」(インタビュー[7], 括弧は筆者による補足)。

このように、科学装置の汎用化には、十分に認識されてこなかった陥穽が存在するのである。この陥穽は、単に科学装置の性能向上を鈍化させるだけでなく、それによって科学や技術の進歩が停滞するという連鎖的な影響をもたらす可能性がある。しかも、汎用化によって基礎研究者が減少し、科学装置に関する基礎的な研究成果が出にくくなってくることは、喫緊の課題として認識されにくい。汎用化された装置が普及してユーザー側の研究人口が増えてしまえば、短期的には科学研究の生産性も向上するはずだからである。

9. 結論

本研究では、科学装置の普及がどのような条件下で進み、普及に伴って装置進歩の方向や速度になぜ変化が生じるのかを解明するという目的のもと、質量分析計を事例として分析を行ってきた。本章では、これまでの議論を総括した上で、本研究の貢献とインプリケーションを提示する。その後、本研究の限界と、今後の研究課題を議論する。

9.1. 要約

本研究で科学装置という対象に注目してきたのは、その進歩が、科学や技術の進歩に大きく寄与すると考えられてきたからである。具体的には、科学装置が進歩すると、人々がこれまでに見ることも測ることもできなかったものが分析・測定可能になる。そうした分析から新規な現象や物質の存在が明らかになると、既存の科学理論が修正されたり、新しい科学理論が生まれたり、その応用によって技術的なブレークスルーが生じたりする可能性がある。

科学装置の普及や進歩が起こる条件を明らかにすることは、科学や技術の発展経路に関するより詳細な説明を可能にする。そうであるにもかかわらず、従来の研究は、科学装置を他の製品と同列に見なしてきたために、その普及や進歩を十分に説明してこなかった。そこで見落とされてきたのは、科学装置は、科学者にとって科学研究のための個別化された道具である一方で、装置メーカーにとっては利潤を生み出す工業製品である、という特徴である。そこで本研究では、既存研究が見落としてきた科学装置の特徴に注目しながら、2つの具体的な問いに焦点を当てた。2つの具体的な問いとは、(1) 科学研究のための道具として生み出された科学装置は、どのように科学者によって採用されていくのか、(2) 普及促進のために装置メーカーが科学装置の汎用化を押し進めると、装置の進歩が停滞するようになっていくのは何故か、である。

9.1.1. 科学者による技術選択と地位

1つめの問いとして注目したのが、コミュニティ内で高い地位にある科学者が装置を採用することの普及促進効果である。既存研究によれば、科学装置の商用生産が行われるようになる以前には、科学者間での普及の段階が存在する。このとき、装置メーカーによる商用機開発の判断は、科学者コミュニティにおける装置の普及度合いに依存していると考えられる。すなわち、多数の科学者がその装置を選択して、それをを用いて研究に取り組むようにな

ることが、装置の長期的な進歩や普及を決定づけていることになる。それでは、科学者による装置選択は、どのような要因によって左右されるのだろうか。

その要因として本研究で注目したのが、装置を採用する科学者の地位である。行為者の地位がもたらす影響に関する研究は、高い地位にある者の行動が社会的シグナルとして機能することによって、他者の行動や意思決定に影響を及ぼすと想定してきた。こうした想定は、科学装置にも当てはまる。例えば、高地位者による装置の採用は、あの科学者が採用しているのだから有望な研究に用いられる装置なのだろう、装置に注目が集まって更に多様な用途へ展開されるかもしれない、という期待を醸成することによって、他の科学者に装置選択に影響を及ぼす可能性がある。

第5章では、MALDIとESIの普及要因の分析を通して、次の2点を明らかにした。すなわち、(1)高地位者によるMALDI/ESIの採用は、後発者による当該装置の採用確率を上昇させる可能性があること、(2)高地位者の採用による普及促進効果が最も大きいのは普及初期であり、普及中盤以降になると、その効果は低下もしくは消失する可能性があること、である。ただし、高地位者の採用による普及促進効果は、他の選択肢を排除するほど強くはない。そのため、短期的には高地位者の装置採用によって傾注や資源の配分が歪む可能性があるけれども、それが社会における装置の多様性を損なっている可能性は小さい。

第6章では、MALDIの事例分析から、高地位者の具体的な貢献を明らかにした。MALDIの開発と普及において高地位の科学者が果たした役割とは、新規装置の有用性を喧伝することであった。すなわち、日本国内で発明された装置を海外の科学者コミュニティに伝達した科学者や、質量分析計を生命科学研究に用いることの意義を説いて回った科学者が、装置普及に寄与したのである。ただし、高地位の科学者による貢献が顕著なのは普及初期である。普及中盤以降になると、データベース等をはじめとするインフラストラクチャが整備されることによって、質量分析計の利用可能性が高まったことが、科学者による装置採用を促したと考えられる。

9.1.2. 汎用化と基礎研究の停滞

2つめの問いは、普及促進のために装置メーカーが科学装置の汎用化を推し進めると、装置の進歩が停滞するようになっていくのは何故か、である。科学装置は、科学者の個別特殊な問題を解決するために生み出される装置であるため、誰しものが扱える装置であるとは限らない。そのため、装置メーカーが商用機を普及させようと考えた場合、専門的な知識を

持たない者や、訓練を受けていない者でも装置を用いて分析・測定ができるように、装置を汎用化することになる。

第 7 章では、質量分析計が汎用化されてきた経緯を見てきた。装置の汎用化によって不利益を被る主体が短期的には存在しなかったために、汎用化の進展は必然的なものであった。装置メーカーにとっての合理的な選択は、装置の基礎性能を大きく向上させるような研究に投資するよりも、既存の装置を汎用化することによって、顧客の範囲を広げることであった。装置のユーザーも、汎用化された装置を使用すれば、オペレーターの人件費を削減したり、実験の手間を削減したりすることができる。加えて、装置の汎用化は、実験において習熟やノウハウのような主観的要素が入り込む余地を削減する。このように、今日に至るまで質量分析計の汎用化が進んできた理由は、装置メーカーの利潤動機と、簡便かつ客観的な分析手段を求める装置ユーザーの動機とが無矛盾だったことにある。

第 8 章では、一部の科学者が装置の汎用化に対して抱いてきた懸念を紹介し、その中で装置に関連する基礎研究の停滞という現象に注目して、そうした現象が生じる理由を明らかにした。基礎研究の停滞に関して、一部の科学者は、「汎用化によって装置の基礎研究が成立しにくくなってきた」という主張を展開してきた。実際、日本において研究者数や基礎研究費は増加傾向にあるにもかかわらず、質量分析計に関連する学会の学会員数は近年になって減少している。このように基礎研究者が減少してきた理由は、装置の汎用化によって、大多数の科学者が分析・測定作業を容易なものとして認識するようになり、分析・測定という仕事に対する専門性が認められなくなってきたことである。装置の汎用化によって分析・測定が容易だと認識されるようになると、大学組織における装置研究者の価値が低下してしまい、大学に装置の専門家を配置する意義も低下してしまう。そのために、大学改革の過程で装置研究者にポストがあてがわれなくなっていき、世代交代の失敗という形を以て装置研究者の数は減少してきたのである。

9.2. 本研究の貢献とインプリケーション

9.2.1. 本研究の貢献

本研究では、科学装置の普及がどのような条件下で進み、普及に伴って装置進歩の方向や速度になぜ変化が生じるのかを明らかにした。こうした本研究の貢献は、次の 2 点に大別できる。それは、(1) 科学装置の普及と進歩のパターンを解明したこと、(2) 汎用化とイノベーションの関係を明らかにしたことである。

1 つめの貢献は、科学装置の普及と進歩のパターンを明らかにしたことである。本研究でも度々言及してきたように、科学装置の進歩は、新たな分析・測定を可能にすることを通じて、科学や技術の進歩に対して大きな影響力を持つ。したがって、ある科学領域や技術の発展過程を説明する上では、研究や技術開発の手段である科学装置の存在を避けて通れないはずである。そうであるにもかかわらず、科学や技術の進歩のパターンに関するこれまでの研究は、科学装置を科学研究や技術開発の重要なインプットであると捉えてこなかった。これに対して本研究は、そうしたインプットがどのように広く利用可能になるのか、及びそれがどのように進歩していくのか（あるいは進歩しなくなっていくのか）を明らかにした。この知見は、科学や技術が進歩しただけでなく、どのようにして科学や技術の進歩が止まってしまうのかを説明する上で、極めて有用な材料になるはずである。例えば、ある科学領域が行き詰まってしまうのは、その領域で重用されている科学装置が汎用化されて、基礎的な性能が向上しなくなり、その装置で行える研究がやり尽くされてしまうためだ、という説明が可能かもしれない。

より重要な貢献は、科学装置という財に関する分析を通じて、イノベーション・パターンに対する新たな発見を行ったことにある。より具体的には、汎用化されることによって技術が行き詰まってしまうというメカニズムを明らかにしたことが、本研究の重要な貢献である。このメカニズムによって技術進歩が停滞していくことは、科学装置とは異なる技術を対象とした既存研究からは、必ずしも明らかにされてこなかった。

第 2 章でレビューしたフォスターの S カーブモデルは、技術進歩が停滞する原因を技術限界に求めていた。ただし、通常の技術の場合、新規参入者が新たな技術を持ち込むことによって脱成熟が起こり、再び技術進歩の軌道が生じる可能性は残されている。ここで脱成熟とは、支配的な製品設計（ドミナント・デザイン）に依拠していた成熟産業に、新たな技術や設計概念に基づくドミナント・デザインが持ち込まれることによって、その産業が再び活性化するという現象である（Abernathy et al., 1983）。自動車産業におけるイノベーション・パターンを探究したウィリアム・アバナシーによると、ドミナント・デザインが出現すると、新しい製品やサービスの導入を指すプロダクト・イノベーションの重要性は低下し、代わりに工程上の革新を指すプロセス・イノベーションの重要性が増大していく。しかしながら、プロセス・イノベーションによる生産性の向上にも限りはあり、やがてプロセス・イノベーションの重要性も低下して、産業内では漸進的な改良しか生じなくなる。

アバナシーは、ドミナント・デザインが成熟しても、新たなイノベーションが生じて、そ

のドミナント・デザインが更新される可能性を指摘している。ただし、既存のドミナント・デザインに依拠してきた既存企業は、それまでに構築してきた能力を放棄するような投資を行っていく（Christensen & Bower, 1986; Tushman & Anderson, 1986）。そのため、脱成熟の契機をもたらすのは、多くの場合は新規参入企業である。裏を返せば、新規参入企業が存在する限り、産業には脱成熟の可能性が残されていることになる。

しかしながら、科学装置の場合、脱成熟の機会は失われていくと考えられる。その理由は、科学装置が汎用化されていくことによって、大学研究者が基礎研究に取り組めなくなっていくことにある。第 2 章でも触れたように、科学装置のイノベーションにおいて重要な役割を担ってきたのは、それを科学研究の道具として用いる科学者である。そのため、科学装置産業に新たな技術を持ち込むような新規参入者がいるとすれば、それは科学者だということになる。しかしながら、第 8 章で明らかにしたように、装置の汎用化が起こると、大学に所属する科学者ですら、基礎研究を行えなくなっていく。

科学者が装置の基礎研究に取り組めなくなっていく理由の根幹には、科学研究における公的資金の投入が抑制され、大学や科学者が外部資金をめぐって競争せねばならなくなった状況がある。Slaughter & Leslie (1997) は、1980 年代以降にアメリカの高等教育に生じた前掲の状況を、アカデミック・キャピタリズムと呼称している。アカデミック・キャピタリズムの元では、大学や大学研究者は、研究費獲得のために熾烈な研究競争を展開し、それに敗退すると、研究費が獲得できないために研究は中断されることになる。競争的資金だけで賄えない部分については、ライセンスや大学発ベンチャーを通じて自己資金を調達したり、民間企業から研究費を獲得したりすることになる。

この状況下では、装置研究者は不利な立場に立たされる公算が高い。その理由は 2 つある。1 つは、アカデミック・キャピタリズムの元では、大学は市場価値を高めるために、研究費獲得に長けた科学者に対して、重点的に資源を配分することである（上山, 2010）。第 8 章で指摘したように、装置研究者の論文生産性は他領域に比べて低くなりやすいため、研究費獲得に困難を抱えている装置研究者を大学に配置するメリットは小さい。もう 1 つは、大学が自己資金を調達するために企業経営に乗り出そうとする場合、そこで重視されやすいのは実践的な知識だということである。科学者による装置開発の目的は、新規な現象や物質の存在を明らかにすることによって、既存の科学理論を修正したり、新しい科学理論を生み出したりすることにある。確かに、そうした知見を応用することによって技術的ブレークスルーが生じる可能性はあるけれど、実際にその段階に至るまでには時間を要するだろう。

そのため、短期的に見れば、科学装置開発が大学の自己資金調達に寄与する可能性は小さい。

基礎研究者以外が装置性能の抜本的向上に寄与する可能性も、低いだろう。装置の改良に何らかの形で関与しうる主体として考えられるのは、(1)装置メーカー、(2)装置ユーザー、(3)他領域からの新規参入者である。

第1の主体は、装置メーカーである。第7章では、質量分析計の基礎研究に取り組んできたのは主として科学者であり、装置メーカーの役割は汎用化にあったことを指摘した。装置メーカーが基礎研究に取り組んでこなかった理由は、仮に新しい装置を生み出したとしても、その市場規模がきわめて限定的なことにある。第2章で触れたように、科学装置は、科学研究での個別具体的な必要性に応じて生み出される。すなわち、発明当初の段階では、科学装置は少数の科学者のニーズを充足するだけの装置に過ぎないのである。このように限られた規模の市場しか存在しない装置を開発するために、装置メーカーが基礎研究を実行するのは困難だろう。加えて、装置メーカーは装置ユーザーではない。そのため、科学装置における重要なイノベーションに寄与するのはユーザーであるという von Hippel (1976) の指摘に則ると、科学的発見に寄与するような新しい装置（あるいは要素技術）を開発する上で、装置メーカーが果たす役割は、そもそも限定的だということになる¹⁶⁰。

第2の主体は、装置ユーザーである。第2章でも指摘したように、科学装置の抜本的な性能向上を実現するのは、装置を使用する科学者である (von Hippel, 1976)。しかしながら、科学装置が汎用化されて、市販装置を購入することで分析・測定が容易に行えるようになると、ユーザーである科学者は、装置上のイノベーションを起こすインセンティブを持たなくなっていく。その理由は、装置研究に取り組むよりも、市販装置を購入して実験に取り組む方が、高い論文生産性を維持することができることにある。第8章でも指摘したように、科学装置の開発によって高い論文生産性を維持するのは困難である。そのため、研究費を継続的に獲得することを望む科学者からすれば、装置研究に取り組むよりも、最先端の市販装置を購入する方が、論文生産性という点では合理的な選択となる。

第3の主体は、他領域からの新規参入者である。装置メーカーやユーザーが装置に対する基礎的な改良に取り組まない場合でも、他領域のプレーヤーが、そこで使用している装置

¹⁶⁰ この点について、島津製作所の御石は次のように述べている。すなわち、「自動車とかは開発者がユーザーになりますよね。ところが、分析装置だと開発者はユーザーにならないので、ユーザーを想像するしかない世界です。そういう観点でも、ユーザーとの協働が非常に重要だというふうに思っています」(インタビュー[7])。

の技術を転用することによって革新を起こす可能性がある。しかしながら、科学装置が汎用化されると、そうした転用が生じる可能性は低下するかもしれない。その理由は、科学装置が汎用化されて、装置の応用領域が広がることによって、産業間で技術が同質化するためである。様々な領域のプレーヤーが同じ装置を使って、同じ分析・測定を行うようになると、それだけ領域間での装置の多様性は低下する。そのため、科学装置の汎用化が進むに伴って、異なる領域からの技術移転は生じにくくなる。ただし、現時点では用途に合わせて複数の科学装置が存在しているため、装置間で技術移転が生じる可能性は残されている。そのため、他領域からの新規参入が生じなくなるとすれば、それは、将来的にさらに装置の汎用化が進み、単一装置で様々な分析が行えるような汎用装置が登場した際のことだと考えられる。

要約すると、科学装置の場合、ひとたび装置が汎用化されると次なるイノベーションの源泉となる基礎研究が成立しなくなり、また他のプレーヤーによる革新の可能性も乏しい（あるいは乏しくなる）ために、脱成熟の余地が失われていくのである。この問題は、例えば企業の生産現場で使用される製造装置には当てはまらないだろう。製造装置のユーザーである企業は、その装置を改良するインセンティブを持っていると考えられる。製造装置の改良結果を公表する必要はなく、それ故に、改良による生産性向上という恩恵を独占的に享受できるからである。裏を返せば、汎用化によって科学装置に脱成熟が起こらなくなる理由は、その開発をアカデミアに依存せざるを得ないことにある。

9.2.2. インプリケーション

本研究の結果から示唆されるのは、汎用化による基礎研究の停滞は半必然的に生じる問題であるため、問題の対処に何らかの施策が必要だということである。第7章で指摘したように、科学装置の汎用化は短期的には望ましい事態である。科学装置の汎用化によって、装置メーカーは利潤を増大させることができるし、装置ユーザーも、その恩恵にあやかって生産性を向上させることができる。むしろ、分析や測定が特殊な仕事であり続けたならば、質量分析計やその他の科学装置が今日のように普及することもなければ、それが従来では考えられなかったような用途に応用されることもなかったかもしれない。

しかしながら、それが喜ばしい事態であるからこそ、装置の汎用化によって分析や測定が容易であるという認識が広まり、結果として装置の基礎研究が成立しにくくなることも、避けがたい問題として浮上してしまう。しかも、汎用化によって基礎研究者が減少し、科学装置に関する基礎的な研究成果が出にくくなっていくことは、喫緊の課題として認識されに

くい。汎用化された装置が普及してユーザー側の研究人口が増えてしまえば、短期的には科学研究の生産性も向上するはずだからである。分析や測定が科学の進歩にとって重要であるという前提に立てば、装置の基礎的な技術が更新されなくなり科学的発見の頻度が低下するとか、科学進歩のペースが鈍化するといった事象を現時点で観察するのは困難であり、その観察もしくは問題認識には、きわめて長い時間を要する。だからこそ喫緊の課題として認識されにくいわけだが、長い時間を経た後で問題を認識したとしても、その頃には基礎的な知識を備えた者が社会に存在しない可能性さえある。

それでは、科学装置の汎用化によって基礎研究が停滞し、ひいては科学や技術の長期的な進歩に負の影響が及ぶという問題に対して、どのような対処がありうるのだろうか。大まかな方針を把握する上で認識しておく必要があるのは、大学という研究組織の自助努力によってこの問題を解決するのは困難だということである。なぜなら、個別の大学からすれば、自らの大学で装置研究に費用を投じなくても、別の大学の科学者による成果が次なる汎用機として市場に出回るのを待つことによって、新たな装置へアクセスすることができてしまうからである。このように、各大学に投資のインセンティブが存在しないのであれば、政策的な介入によって、装置研究に対する何らかの動機を与えなければならないことになる。装置研究に対する投資を促進するような施策ないし制度として、具体的にどのようなものが考えられるのかについては、将来の研究課題としたい。

9.3. 本研究の限界と今後の研究課題

前節で述べたような貢献がある一方で、本研究にはいくつか限界が存在する。科学者の装置選択に関する実証分析の問題点については、既に第5章で指摘した。それ以外の限界は、(1) 観察対象が質量分析計という単一装置に限定されている点、(2) 科学装置の汎用化によって基礎研究者に及んだ影響を示すエビデンスが不足している点、および(3) 科学装置の成熟と汎用化を十分に区別できていない点である。これらは、科学装置に関連する基礎研究者が減少した理由や背景の更なる吟味の必要性を示しているという意味で、相互に密接に関係した問題点である。

1つめの限界は、数ある科学装置の中でも質量分析計という単一カテゴリの装置のみを分析対象として取り上げたために、本研究の結果が、他の科学装置にも当てはまるかどうか不明瞭だという点である。この限界があるために、本研究の結果を一般化するのは現時点では難しく、また装置（あるいは技術）の汎用化による基礎研究の停滞という論理が成立する境

界条件も、十分に明らかになっていない。他の科学装置や、科学研究には用いられないけれど技術開発で重用される装置との比較研究を行うことによって、これらの限界を克服できる可能性がある。

例えば、高エネルギー物理学で使用される加速器との比較事例研究は、装置が汎用化されることの影響をより正確に捉える上で有望である。例えば、装置が汎用化されることの影響は、装置の特性によって異なる可能性がある。平田（1999）が指摘しているように、高エネルギー物理学とは、「(装置の) 建設か死か」と言われるほど実験装置（加速器と測定器）の開発が決定的に重要であり、そのための専門家集団を保有している領域である。高エネルギー物理学で使用される加速器の特徴は、施設型装置だという点にある。施設型装置の場合、加速器技術の一部が民生用途へ転用されようとも、加速器を使用するための共同利用機関を作って独自の財源を確保することで、研究体制を維持できるかもしれない。

このように、科学装置の汎用化によって基礎研究が停滞する場合と、そうでない場合とを分かつ条件は複数存在すると考えられる。そのため、科学装置の汎用化によって基礎研究が停滞しやすい条件を明らかにする上では、様々な科学装置について、装置がどのように進歩してきて、それが汎用化される中で装置開発者の重要性がどのように変化してきたのかを解明する必要がある。

2つめの限界は、装置の汎用化によって質量分析計の基礎研究が停滞していったことを指し示す材料が、関連学会の会員数、論文著者数、および一部の装置研究者に対するインタビューデータのみであり、いずれも基礎研究の後退を直接的に指し示すエビデンスではない点である。本来であれば、基礎研究の停滞という点については、装置の基礎研究に取り組む研究室（講座）数が減少していることや、質量分析計の基礎的な性能が近年に大きく上がっていないことを示さなければならない。装置の汎用化による影響という点については、より多くの装置研究者に対してインタビュー調査を行って、装置の汎用化以後に彼らがどのような処遇を受けたのかを、より詳細に明らかにする必要がある。

3つめの限界は、本研究で中心的に取り扱ってきた質量分析計について、その成熟と汎用化を十分に区別できていないという点である。そのため、本研究は、質量分析計に関する基礎研究が停滞してきたのは、それが汎用化されたからではなく、単に質量分析計の技術限界が近づいてきたために、関連科学者が他装置の開発へ移行したからだ、という対抗仮説を排除できていない。

本研究では、科学装置の汎用化を「誰でも扱えるようになること」と定義した上で、それ

を技術の成熟と独立した概念として扱ってきた。しかしながら、科学装置の場合、装置の汎用化と成熟は並列して生じると考えられる。というのも、科学装置を汎用化するには、相応の時間が必要だからである。そもそも、ある科学装置の有用性が明らかになって、そこに装置メーカーが参入して商用機を開発するには、一定の時間を要するだろう。装置メーカーの商用機開発も、熟練した分析者の動作を機械的に再現する機構やシステムを一から構築せねばならないから、相応の時間を要するはずである。一方で、ある科学装置の汎用化に時間を費やしている背後では、それ相応に装置の基礎研究も進展している。したがって、科学装置の汎用化がある程度進んだということは、その装置が成熟状態に近づいたことを同時に意味することになってしまう。

この問題は、比較的近年になって登場した科学装置の事例と比較することによって、解決できる可能性がある。質量分析計の場合、その汎用化に大きく寄与するような補完技術（コンピュータ）が登場してきたのは、装置誕生の約60年後であった。すなわち、質量分析計の場合、装置の汎用化が進んだのは、それがある程度成熟して以後のことだったと判断できる¹⁶¹。これに対して、より近年に登場した科学装置では、コンピュータによる制御を前提として設計される場合が大半であると考えられるから、成熟よりも早く汎用化が進んでいくと予想できる。すなわち、基礎研究が停滞したという事実を、汎用化が成熟に先行するようなセッティングでも確認できれば、装置の汎用化によって基礎研究の停滞がもたらされるという結論の妥当性は高まることになる。

¹⁶¹ 事実、装置開発に携わってきた実務家は、質量分析計の汎用化がはじまったのは、装置の主要原理に関するアイデアが一通り揃った後だと認識している。島津製作所の御石は、次のように述べている。すなわち、「質量分析関係の原理的な部分って結構古くて、50年代から60年代までに基本的なアイデアは出尽くしたという印象を持っています。80年代以降になってCPUが急激に進歩すると、アイデアはあってもアナログの回路では具体化が非常に困難であったものが比較的容易に実現できるようになった、というのが私の理解です」（インタビュー[7]）。

参考文献

- Abernathy, W. J., Clark, K. B., & Kantrow, A. M. (1983) *Industrial renaissance*. Basic Books, New York. (望月嘉幸監訳『インダストリアルルネサンス—脱成熟化時代へ』TBSブリタニカ, 1984年)
- Ackoff, R. L., and Halbert, M. H. (1958) *Research study of the scientific activity of chemists*. Case Institute of Technology, Cleveland.
- Aebersold, R., & Mann, M. (2003) Mass spectrometry-based proteomics. *Nature*, 422, pp. 198-207.
- 阿久津弘明 (2010) 「装置の原理, 構造を知る事は・・・」『TMS 研究』2010(3), p. 1.
- Amburgey, T. L., & Rao, H. (1996) Organizational ecology: Past, present, and future directions. *Academy of Management Journal*, 39(5), pp. 1265-1286.
- American Society for Mass Spectrometry (2009) FRANK H. FIELD, Transcript of an Interview (Conducted by Michael A. Grayson) <https://www.asms.org/docs/oral-histories/field---complete.pdf> (2018/10/24 閲覧)
- American Society for Mass Spectrometry (2013) FRANZ HILLENKAMP, Transcript of an Interview (Conducted by Michael A. Grayson) https://www.asms.org/docs/default-source/oral-histories/hillenkamp_f_0704_full.pdf (2018/10/23 閲覧)
- American Society for Mass Spectrometry (2014) CATHERINE FENSELAU, Transcript of an Interview (Conducted by Michael A. Grayson) <https://www.asms.org/docs/default-source/oral-histories/fenselau---complete.pdf> (2018/10/23 閲覧)
- Anderson, C., John, O. P., Keltner, D., & Kring, A. M. (2001) Who attains social status? Effects of personality and physical attractiveness in social groups. *Journal of Personality and Social Psychology*, 81(1), pp. 116-132.
- Appella, E., Fox, J. W., & Anderson, C. W. (2001) Meeting report. *Protein Science*, 10(2), pp.

459-461.

Arthur, W. B. (1989) Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *The Economic Journal*, 99(394), pp. 116-131.

Arthur, W. B. (2009) *The nature of technology: What it is and how it evolves*. Free Press, New York. (日暮雅通訳『テクノロジーとイノベーション:進化/生成の理論』みすず書房, 2011年)

Bahr, U., Deppe, A., Karas, M., Hillenkamp, F., & Giessmann, U. (1992) Mass spectrometry of synthetic polymers by UV-matrix-assisted laser desorption/ionization. *Analytical Chemistry*, 64(22), pp. 2866-2869.

Beavis, R. C., Chait, B. T., & Fales, H. M. (1989) Cinnamic acid derivatives as matrices for ultraviolet laser desorption mass spectrometry of proteins. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 3(12), pp. 432-435.

Benjamin, B. A., & Podolny, J. M. (1999) Status, quality, and social order in the California wine industry. *Administrative Science Quarterly*, 44(3), pp. 563-589.

Berger, J., Cohen, B. P., & Zelditch Jr, M. (1972) Status characteristics and social interaction. *American Sociological Review*, 37(3), pp. 241-255.

Berger, J., Rosenholtz, S. J., & Zelditch Jr, M. (1980) Status organizing processes. *Annual Review of Sociology*, 6(1), pp. 479-508.

Berlowitz, L., Zdanis, R. A., Crowley, J. C., & Vaughn, J. C. (1981) Instrumentation needs of research universities. *Science*, 211(4486), pp. 1013-1018.

Biemann, K. (1994) The Massachusetts Institute of Technology mass spectrometry school. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 5(5), pp. 332-338.

Biemann, K. (2015) Structure determination of natural products by mass spectrometry. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 8, pp. 1-19.

- Bijker, W. E. (1993) Do not despair: there is life after constructivism. *Science, Technology, & Human Values*, 18(1), pp. 113-138.
- Bijker, W. E. (1995) *Of bicycles, bakelites, and bulbs: Toward a theory of sociotechnical change*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Borell, M. (1987) Instrumentation and the rise of modern physiology. *Science & Technology Studies*, 5(2), pp. 53-62.
- Borman, S., Russell, H., & Siuzdak, G. (2003) A mass spec timeline. *Today's Chemist at Work*, 12(9), pp. 47-49.
- Bucchi, M. (2004) *Science in society: An introduction to social studies of science*. Routledge, London and New York.
- Cameron, A. E., & Eggers Jr, D. F. (1948) An Ion "Velocitron". *Review of Scientific Instruments*, 19(9), pp. 605-607.
- Carroll, G. R., & Swaminathan, A. (2000) Why the microbrewery movement? Organizational dynamics of resource partitioning in the US brewing industry. *American Journal of Sociology*, 106(3), pp. 715-762.
- Canese, K., & Weis, S. (2013) PubMed: the bibliographic database. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK153385/> (2018/09/18 閱覽)
- Christensen, C. M., & Bower, J. L. (1996). Customer power, strategic investment, and the failure of leading firms. *Strategic Management Journal*, 17(3), pp. 197-218.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2003) *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences* (3rd ed.). Erlbaum, Mahwah, NJ.
- Collins, H. M. (1981) The place of the 'core-set' in modern science: social contingency with methodological propriety in science. *History of Science*, 19(1), pp. 6-19.
- Collins, H. (1985) *Changing order: Replication and induction in scientific practice*. Sage,

London.

Collins, H. M., & Pinch, T. J. (1979) The construction of the paranormal: Nothing unscientific is happening. *The Sociological Review*, 27(1), pp. 237-270.

Constant, E. W. (1980) *The Origins of the Turbojet Revolution*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

Cozzens, S. E. (1987) Instrumentation. *Science & Technology Studies*, 5(2), pp. 51-52.

David, P. A. (1985) Clio and the Economics of QWERTY. *The American Economic Review*, 75(2), pp. 332-337.

DiMaggio, P., & Powell, W. W. (1983) The iron cage revisited: Collective rationality and institutional isomorphism in organizational fields. *American Sociological Review*, 48(2), pp. 147-160.

Dollinger, M. J., Golden, P. A., & Saxton, T. (1997) The effect of reputation on the decision to joint venture. *Strategic Management Journal*, 18(2), pp. 127-140.

Eliel, E. L., Prosser, T. J., & Young, G. W. (1957) The use of mass spectrometry in organic analysis. *Journal of Chemical Education*, 34(2), p. 72.

Elsbach, K. D., & Kramer, R. M. (1996) Members' responses to organizational identity threats: Encountering and countering the Business Week rankings. *Administrative Science Quarterly*, 41(3), pp. 442-476.

Ertug, G., & Castellucci, F. (2013) Getting what you need: How reputation and status affect team performance, hiring, and salaries in the NBA. *Academy of Management Journal*, 56(2), pp. 407-431.

Ewing, G. W. (1969) Mass spectrometers, Part Three: Commercial spectrometers. *Journal of Chemical Education*, 46(4), pp. A233-A254.

Feigl, P., Schueler, B., & Hillenkamp, F. (1983) LAMMA 1000, a new instrument for bulk

- microprobe mass analysis by pulsed laser irradiation. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics*, 47, pp. 15-18.
- Fenn, J. B., Mann, M., Meng, C. K., Wong, S. F., & Whitehouse, C. M. (1989) Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules. *Science*, 246(4926), pp. 64-71.
- Festinger, L. (1954) A theory of social comparison processes. *Human Relations*, 7(2), pp. 117-140.
- Finnigan, R. (2016) Development of the Business Mass Spectrometry (1960-75). In Nier, K. A., Yergey, A. L., & Gale, P. J. (Eds.) *The Encyclopedia of Mass Spectrometry, Volume 9: Historical Perspectives, Part A: The Development of Mass Spectrometry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 315-317.
- Foster, R. N. (1988) *Innovation: The attacker's advantage*. McKinsey & Co. (大前研一訳『イノベーション：限界突破の経営戦略』TBS ブリタニカ, 1987年)
- Fujimura, J. H. (1988) The molecular biological bandwagon in cancer research: Where social worlds meet. *Social Problems*, 35(3), pp. 261-283.
- Fujimura, J. H. (1996) *Crafting science: A sociohistory of the quest for the genetics of cancer*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- 藤嶽美穂代 (2012) 「有機化学実験のための易しいマススペクトロメトリー」『大阪薬科大学紀要』6, pp. 85-106.
- 福島真人 (2017) 『真理の工場：科学技術の社会的研究』東京大学出版会.
- Gibbons, M., & Johnston, R. (1974) The roles of science in technological innovation. *Research Policy*, 3(3), pp. 220-242.
- Gleave, M. (2011) The strengths of mass spectrometry are not just sensitivity and selectivity. *Bioanalysis*, 3(3), pp. 245-247.
- Gökalp, I. (1990) Turbulent reactions: Impact of new instrumentation on a borderland

- scientific domain. *Science, Technology, & Human Values*, 15(3), pp. 284-304.
- Gohlke, R. (1959) Time-of-flight mass spectrometry and gas-liquid partition chromatography. *Analytical Chemistry*, 31(4), pp. 535-541.
- Gould, R. V. (2002) The origins of status hierarchies: A formal theory and empirical test. *American Journal of Sociology*, 107(5), pp. 1143-1178.
- Graffin, S. D., Wade, J. B., Porac, J. F., & McNamee, R. C. (2008) The impact of CEO status diffusion on the economic outcomes of other senior managers. *Organization Science*, 19(3), pp. 457-474.
- Grayson, M. A. (Ed.). (2002) *Measuring mass: from positive rays to proteins*. Chemical Heritage Foundation.
- Grayson, M. A. (2009) Thomson's vision: Commercialization of Mass Spectrometry. <https://www.asms.org/docs/history-posters/thomson's-vision-commercialization-2009.pdf?sfvrsn=2> (2018/11/08 閱覽)
- Grayson, M. A. (2016a) Magnetic and Electrostatic Analyzers before 1960. In Nier, K. A., Yergey, A. L., & Gale, P. J. (Eds.) *The Encyclopedia of Mass Spectrometry: Volume 9: Historical Perspectives, Part A: The Development of Mass Spectrometry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 13-32.
- Grayson, M. A. (2016b) A History of Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC/MS). In Nier, K. A., Yergey, A. L., & Gale, P. J. (Eds.) *The Encyclopedia of Mass Spectrometry: Volume 9: Historical Perspectives, Part A: The Development of Mass Spectrometry*. Elsevier: Amsterdam, pp. 152-158.
- Griffiths, J. (2008) A brief history of mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 80(15), pp. 5678-5683.
- Groysberg, B., Polzer, J. T., & Elfenbein, H. A. (2011) Too many cooks spoil the broth: How high-status individuals decrease group effectiveness. *Organization Science*, 22(3), pp. 722-

737.

Gryczuk, S. R., & Herzog, L. F. (1968) The analysis of the lunar atmosphere by a mass spectroscope. Prepared under Contract No. NASw-1480 by NUCLIDE CORPORATION.

Handley, J., & Harris, C. M. (2001) Great ideas of a decade. *Analytical Chemistry*, 73(23), pp. 660A-666A.

Hannan, M. T., & Freeman, J. (1993) *Organizational ecology*. Harvard University Press, Cambridge, MA.

原泰史・赤池伸一 (2017) 「革新的研究に至る背景と研究者の歩み：大隅オートファジー研究の解析を通じて (速報版)」科学技術イノベーション政策研究センター (SciREX センター) ワーキングペーパー, SciREX-WP-2017-#05.

長谷部潔 (2011) 「質量分析法」

<https://www.jaima.or.jp/jp/analytical/basic/mass/method/> (2018/10/01 閲覧)

服部敏明・川口健・瀬瀬守・吉野明広編 (2006) 『機器分析ナビ』化学同人.

Haunschild, P. R., & Miner, A. S. (1997) Modes of interorganizational imitation: The effects of outcome salience and uncertainty. *Administrative Science Quarterly*, 42(3), pp. 472-500.

Haveman, H. A. (1993) Follow the leader: Mimetic isomorphism and entry into new markets. *Administrative Science Quarterly*, 38(4), pp. 593-627.

Heller, S. R., McGuire, J. M., & Budde, W. L. (1975) Trace organics by GC/MS [gas chromatography/mass spectrometry]. *Environmental Science & Technology*, 9(3), pp. 210-213.

Henderson, R. (1995) Of life cycles real and imaginary: The unexpectedly long old age of optical lithography. *Research Policy*, 24(4), pp. 631-643.

Hillenkamp, F., Karas, M., Beavis, R. C., & Chait, B. T. (1991) Matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry of biopolymers. *Analytical Chemistry*, 63(24), pp.

1193A-1203A.

平野久 (1998) 「プロテオーム解析の現状」『化学と生物』36(12), pp. 771-777.

平田光司 (1999) 「大型装置純粋科学試論」『年報 科学・技術・社会』8, pp. 51-74.

菱田真三郎・高橋弘一 (1971) 「理化学機器の動向について」『有機合成化学協会誌』29(12), pp. 1154-1158.

Hoke II, S. H., Morand, K. L., Greis, K. D., Baker, T. R., Harbol, K. L., & Dobson, R. L. (2001) Transformations in pharmaceutical research and development, driven by innovations in multidimensional mass spectrometry-based technologies. *International Journal of Mass Spectrometry*, 212(1-3), pp. 135-196.

Holmes, J. C., & Morrell, F. A. (1957) Oscillographic mass spectrometric monitoring of gas chromatography. *Applied Spectroscopy*, 11(2), pp. 86-87.

堀川祐司 (2003) 「技術の二重性：CMP 装置産業における計測・評価技術の意味」『組織科学』37(2), pp. 62-74.

Hughes, T.P. (1987) The evolution of large technological systems. In Bijker, W.E., Hughes, T.P., Pinch, T. (Eds.), *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*. MIT Press Cambridge, MA, pp. 51-82.

磯辺俊明 (2000) 「プロテオームからの創薬研究」『化学と生物』38(11), pp. 742-750.

伊藤良一 (2007) 「光学とフォトニクス」『光学』36(4), p. 1.

伊澤和祥・梅香明子・小西徳三・近間克己・遠藤昌敏 (2011) 「企業の分析現場の現状と将来」『ぶんせき』(435), pp. 166-175.

Jensen, M., & Roy, A. (2008) Staging exchange partner choices: When do status and reputation matter? *Academy of Management Journal*, 51(3), pp. 495-516.

Jensen, M., & Kim, H. (2015) The real Oscar curse: The negative consequences of positive status shifts. *Organization Science*, 26(1), pp. 1-21.

株式会社アールアンドディ 『科学機器年鑑』 (1995 年版から 2014 年版)

株式会社島津製作所 『GCMS 分析の基礎』

<https://www.an.shimadzu.co.jp/gcms/support/faq/fundamentals/iontype.htm>

(2018/10/02 閲覧)

Kalbfleisch, J. D., & Prentice, R. L. (2011) *The statistical analysis of failure time data* (Second Edition). John Wiley & Sons, NJ.

金田隆 (2017) 「若手育成の悩み」『ぶんせき』 2017(10), p. 443

兼崎友 (2017) 「ゲノム研究の歴史と技術革新」『生物工学会誌』 95(3), pp. 136-139.

神原秀記 (2014) 「40 年の技術開発の経験」『Perceptive Plants』 7, pp. 16-23.

Kantor, L. W. (2008) NIH roadmap for medical research. *Alcohol Research & Health*, 31(1), pp. 12-13.

Karas, M., Bachmann, D., & Hillenkamp, F. (1985) Influence of the wavelength in high-irradiance ultraviolet laser desorption mass spectrometry of organic molecules. *Analytical Chemistry*, 57(14), pp. 2935-2939.

Karas, M and Hillenkamp, F. (1988) Ultraviolet Laser Desorption of Proteins up to 120,000 Daltons. International Mass Spectrometry Conference Report A, 11(1988), pp. 416-417.

笠間健嗣 (2001) 「質量分離装置の常識」志田保夫・黒野定・高橋利枝・笠間健嗣・高山光男『これならわかるマスペクトロメトリー』化学同人, pp. 27-64.

加藤俊彦 (2011) 『技術システムの構造と革新』白桃書房.

Katz, M. L., & Shapiro, C. (1985) Network externalities, competition, and compatibility. *The American Economic Review*, 75(3), pp. 424-440.

Katz, M. L., & Shapiro, C. (1994) Systems competition and network effects. *Journal of Economic Perspectives*, 8(2), pp. 93-115.

Kehoe, R. R., & Tzabbar, D. (2015) Lighting the way or stealing the shine? An examination of the duality in star scientists' effects on firm innovative performance. *Strategic Management Journal*, 36(5), pp. 709-727.

経済産業省 (2003) 『バイオ関連機器に関する産業の現状と課題』

http://www.meti.go.jp/policy/tech_research/report/report5_bio.pdf (2018/10/11 閲覧)

Kim, J. W., & King, B. G. (2014) Seeing stars: Matthew effects and status bias in major league baseball umpiring. *Management Science*, 60(11), pp. 2619-2644.

木村美実子・青山紘一 (2002) 「ノーベル化学賞受賞田中耕一氏の業績」『情報管理』45(8), pp. s6-s14.

Kline, R., & Pinch, T. (1996) Users as agents of technological change: The social construction of the automobile in the rural United States. *Technology and Culture*, 37(4), pp. 763-795.

古武家善成 (2000) 「LC/MS の歴史と概要」環境省総合環境政策局環境保健部環境安全課『LC/MS を用いた化学物質分析法開発マニュアル』 pp. 7-11.

国立研究法人産業技術総合研究所 (2016) 「未来の科学者のために：ナノテクノロジー」

https://www.aist.go.jp/science_town/scientist/scientist_03/scientist_03_01.html

(2018/11/22 閲覧)

工業所有権総合情報館 (2004) 『平成 15 年度特許流通支援チャート：質量分析』

<http://www.inpit.go.jp/blob/katsuyo/pdf/chart/fippan12.pdf> (2018/10/11 閲覧)

窪寺俊也 (2006) 「複合分析装置の誕生：究極の分析装置「ガスクロマトグラフ質量分析装置」真壁英樹編著『島津分析機器「ひと・モノがたり」：パイオニアからリーダーへの 60 年』島津製作所, pp. 554-605.

Kuhn, T. S. (1962) *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press, Chicago. (中山茂訳『科学革命の構造』みすず書房, 1971 年)

蔵川圭・武田英明 (2012) 「研究者識別子 ORCID の取り組み」『情報管理』54(10), pp. 622-631.

- 黒野定 (2001) 「イオン化法の常識」志田保夫・黒野定・高橋利枝・笠間健嗣・高山光男『これならわかるマスマススペクトロメトリー』化学同人, pp. 65-90.
- Lakatos, I. (1978) *The methodology of scientific research programs*. Cambridge University Press, Cambridge. (村上陽一郎・井山弘幸・小林傳司・横山輝雄訳『方法の擁護』新曜社, 1986年)
- Lang, G. E., & Lang, K. (1988) Recognition and renown: The survival of artistic reputation. *American Journal of Sociology*, 94(1), pp. 79-109.
- Latour, B. (1987) *Science in action: How to follow scientists and engineers through society*. Harvard university press, Cambridge, MA. (川崎勝・高田紀代志訳『科学が作られているとき 人類学的考察』産業図書, 1999年)
- Latour, B., & Woolgar, S. (1979) *Laboratory life: The social construction of scientific facts*. Sage, Beverly Hills, CA.
- Lindsay, R. K., Buchanan, B. G., Feigenbaum, E. A., & Lederberg, J. (1993) DENDRAL: a case study of the first expert system for scientific hypothesis formation. *Artificial Intelligence*, 61(2), pp. 209-261.
- Lynn, F. B., Podolny, J. M., & Tao, L. (2009) A sociological (de) construction of the relationship between status and quality. *American Journal of Sociology*, 115(3), pp. 755-804.
- MacKenzie, D.A. & Wajcman J. (1985) *The social shaping of technology. How the refrigerator got its hum*. Open University Press, Milton Keynes.
- Maestro, C. J., & Maestro, J. C. (1973) Mass spectrometer for solid samples. *Journal of Chemical Education*, 50(6), p. 439.
- Magee, J. C., & Galinsky, A. D. (2008) Social hierarchy: The self-reinforcing nature of power and status. *Academy of Management Annals*, 2(1), pp. 351-398.
- Maher, S., Jjunju, F. P., & Taylor, S. (2015) Colloquium: 100 years of mass spectrometry:

- Perspectives and future trends. *Reviews of Modern Physics*, 87(1), pp. 113-135.
- 毎日新聞 (2002) 「ノーベル賞受賞者対談 (その 2) : うれし忙しノーベル賞」2002 年 11 月 1 日号, 東京朝刊, p.15.
- Mayers S., & Marquis D. (1969) *Successful Industrial Innovations*. National Science Foundation NSF 69-17.
- Mercelis, J., Galvez-Behar, G., & Guagnini, A. (2017) Commercializing science: nineteenth- and twentieth-century academic scientists as consultants, patentees, and entrepreneurs. *History & Technology*, 33(1), pp. 4-22.
- Merton, R. K. (1949) *Social theory and social structure*. Free Press. (森東吾・森好夫・金沢実・中島竜太郎訳『社会理論と社会構造』みすず書房, 1961 年)
- Merton, R. K. (1968) The Matthew effect in science: The reward and communication systems of science are considered. *Science*, 159(3810), pp. 56-63.
- Meyer, J. W., & Rowan, B. (1977) Institutionalized organizations: Formal structure as myth and ceremony. *American Journal of Sociology*, 83(2), pp. 340-363.
- Milgrom, P., & Roberts, J. (1986) Price and advertising signals of product quality. *Journal of Political Economy*, 94(4), pp. 796-821.
- 御石浩三 (2009) 「四重極質量分析計から四重極イオントラップ: 飛行時間ハイブリッド型装置に至る質量分析装置の開発とその普及」『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』57(1), pp. 23-29.
- 宮入暢子 (2016) 「研究者識別子 ORCID : 活動状況と今後の展望」『情報管理』59(1), pp. 19-31.
- 宮尾学 (2016) 『製品開発と市場創造: 技術の社会的形成アプローチによる探求』白桃書房.
- Mokyr, J. (2007) The Market for Ideas and the Origins of Economic Growth. *TSE G/Low Countries Journal of Social and Economic History*, 4(1), pp. 3-38.

文部科学省 (2007) 「タンパク 3000 プロジェクト評価報告書」

http://www.tanpaku.org/about/old_project_protein02a.php (2018/10/27 閲覧)

文部科学省 (2015) 『先端計測分析技術に関する俯瞰報告』

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu17/houkoku/1368123.htm

(2018/10/01 閲覧)

Mulkay, M. (1980) Interpretation and the use of rules: The case of the norms of science.

Transactions of the New York Academy of Sciences, 39(1 Series II), pp. 111-125.

Murray, K. K., Boyd, R. K., Eberlin, M. N., Langley, G. J., Li, L., & Naito, Y. (2013)

Definitions of terms relating to mass spectrometry (IUPAC Recommendations 2013). *Pure and Applied Chemistry*, 85(7), pp. 1515-1609.

内藤康秀 (2006) 「 m/z の定義とその使用法について」『Journal of the Mass Spectrometry

Society of Japan』 54(5), pp. 217-217.

内藤康秀 (2007) 「質量分析関連用語の基礎知識」『Journal of the Mass Spectrometry Society

of Japan』 55(3), pp. 149-156.

中田尚男 (2014) 「あの頃の有機マススペクトロメトリーを振り返る」『Journal of the Mass

Spectrometry Society of Japan』 62(6), pp. 97-102.

Nature (1999) The promise of proteomics. *Nature*, 402(6763), p. 703.

National Academy of Science (1965) *Chemistry: Opportunities and Needs; a report on basic*

research in U.S. chemistry. National Academy of Science, National Research Council, Washington.

Nier, A. O. (1989) Some reminiscences of mass spectrometry and the Manhattan Project.

Journal of Chemical Education, 66(5), pp. 385-388.

Nier, K. A. (2016) Mass Spectrometry Manufactures and Markets from the Beginning to 1960.

In Nier, K. A., Yergey, A. L., & Gale, P. J. (Eds.) *The Encyclopedia of Mass Spectrometry: Volume 9: Historical Perspectives, Part A: The Development of Mass Spectrometry*.

Elsevier, Amsterdam, pp. 312-314.

Nightingale, P. (2004) Technological capabilities, invisible infrastructure and the un-social construction of predictability: the overlooked fixed costs of useful research. *Research Policy*, 33(9), pp. 1259-1284.

日経バイオビジネス (2002) 「初めて明かす技術者の本音：島津製作所フェロー・田中耕一」
2002年12月号, pp. 55-60.

日本分析化学会編 (1981) 『日本分析化学史』東京化学同人.

日本分析化学会編 (1996) 『機器分析ガイドブック』丸善.

日本分析機器工業会 (2000) 『工業会 40 周年記念誌』.

日本分析機器工業会 (2010) 『工業会 50 周年記念誌』.

日本電子株式会社 (1986) 『日本電子三十五年史』.

日本電子株式会社 (2010) 『創造と開発：日本電子 60 年のあゆみ』.

日本学術会議 (2010) 「報告：基礎医学分野の展望」

<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-h-2-5.pdf> (2018/10/27 閲覧)

日本化学会原子量専門委員会 (2015) 「原子量表 (2015) について」

<http://www.chemistry.or.jp/activity/doc/atomic2015.pdf> (2018/10/01 閲覧)

日本工業規格 (2013) 『分析化学用語 (基礎部門) JIS K 0211:2013』

<http://kikakurui.com/k0/K0211-2013-01.html> (2018/10/01 閲覧)

日本質量分析学会 (1989) 「奨励賞：高質量分子イオンの検出を可能とするレーザーイオン化飛行時間型質量分析法の研究」

<http://www.mssj.jp/about/pdf/awards/research/s-1989b.pdf> (2018/10/22 閲覧)

葦澤崇 (2010) 「超高性能質量分析計による最新アプリケーション」『TMS 研究』2010(2), pp. 25-30.

- 野家啓一 (2008) 『パラダイムとは何か：クーンの科学史革命』講談社.
- 能美隆 (2003) 「2002 年度ノーベル化学賞 John B. Fenn 博士 & 田中耕一氏：生体高分子の同定および構造解析のための手法の解析」『蛋白質核酸酵素』48(2), pp. 177-184.
- 野村文夫 (2013) 「質量分析の臨床検査分野への導入」『日本内科学会雑誌』102(12), pp. 3096-3102.
- 野村文夫 (2017) 「質量分析技術の臨床検査応用：現状と課題」『モダンメディア』63(3), pp. 56-62.
- 沼上幹 (1999) 『液晶ディスプレイの技術革新史：行為連鎖システムとしての技術』白桃書房.
- Nye, M. J. (1984) Scientific decline: Is quantitative evaluation enough? *Isis*, 75(4), pp. 697-708.
- ニュートンプレス (2003) 「柴昌俊博士・田中耕一フェロー ノーベル賞の軌跡：天体物理学と生命科学の分野に新たな扉を開いた2人」『ニュートン』3月号, pp. 24-53.
- 緒方惟一 (1965) 「ASTM-E14 (USA), GAMS (France), HYDROCARBON RESEARCH GROUP (GB) の JOINT MEETING に出席して」『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』12(28), pp. 237-245.
- 緒方惟一 (1968) 「質量分析の現状」『分析化学』17(12), pp. 1561-1571.
- Okimoto, M., & Fung, P. A. (2016) Mass Spectrometry Buyer's Guide: An Overview of Mass Spec Systems and Emerging Applications. <https://www.biocompare.com/188387-2016-Mass-Spectrometry-Buyer-s-Guide/> (2018/11/8 閲覧)
- 奥山幸祐 (2008) 「19 世紀 トランジスタ誕生までの電気・電子技術革新」『SEAJ Journal』115, pp. 38-42.
- 大河内直彦 (2017) 「科学における分析の立ち位置」『科学』87(5), pp. 418-419.
- 大村孝幸・山口晴久 (2007) 「質量分析計の検出器－二次電子増倍管」『真空』50(4), pp. 258-

263.

大阪大学大学院理学研究科・理学部分析機器測定室『分析機器』

<http://analysis.sci.osaka-u.ac.jp/equipment/mass.html> (2018/10/01 閲覧)

大沢利昭・大木道則・田中元治・千原秀昭 (編)(1989) 『化学大辞典』 東京化学同人.

Parkins, W. E. (2005) The uranium bomb, the calutron, and the space-charge problem. *Physics Today*, 58(5), pp. 45-51.

Parsons, T. (1951) *The social system*. Free Press, New York.

Phillips, D. J., & Zuckerman, E. W. (2001) Middle-status conformity: Theoretical restatement and empirical demonstration in two markets. *American Journal of Sociology*, 107(2), pp. 379-429.

Pierson, P. (2000) Increasing returns, path dependence, and the study of politics. *American Political Science Review*, 94(2), pp. 251-267.

Pinch, T. J., & Bijker, W. E. (1984) The social construction of facts and artefacts: Or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other. *Social Studies of Science*, 14(3), pp. 399-441.

Podolny, J. M. (1993) A status-based model of market competition. *American Journal of Sociology*, 98(4), pp. 829-872.

Podolny, J. M., & Stuart, T. E. (1995) A role-based ecology of technological change. *American Journal of Sociology*, 100(5), pp. 1224-1260.

Porac, J. F., Thomas, H., & Baden - Fuller, C. (1989) Competitive groups as cognitive communities: The case of Scottish knitwear manufacturers. *Journal of Management Studies*, 26(4), pp. 397-416.

Price, D. de S. (1984) The science/technology relationship, the craft of experimental science, and policy for the improvement of high technology innovations. *Research Policy*, 13(1), pp.

3-20.

- Rabinow, P. (1996) *Making PCR: A story of biotechnology*. University of Chicago Press, Chicago. (渡辺政隆訳『PCRの誕生：バイオテクノロジーのエスノグラフィー』みすず書房, 1998年)
- Rao, H. (1994) The social construction of reputation: Certification contests, legitimation, and the survival of organizations in the American automobile industry: 1895-1912. *Strategic Management Journal*, 15(S1), pp. 29-44.
- Rao, H., Greve, H. R., & Davis, G. F. (2001) Fool's gold: Social proof in the initiation and abandonment of coverage by Wall Street analysts. *Administrative Science Quarterly*, 46(3), pp. 502-526.
- Rabkin, Y. M. (1987) Technological innovation in science: The adoption of infrared spectroscopy by chemists. *Isis*, 78(1), pp. 31-54.
- Reschke, B. P., Azoulay, P., & Stuart, T. E. (2017) Status spillovers: The effect of status-conferring prizes on the allocation of attention. *Administrative Science Quarterly*, 63(4), pp. 819-847.
- Riggs, W., & Von Hippel, E. (1994) Incentives to innovate and the sources of innovation: the case of scientific instruments. *Research policy*, 23(4), pp. 459-469.
- Rindova, V. P., Williamson, I. O., Petkova, A. P., & Sever, J. M. (2005) Being good or being known: An empirical examination of the dimensions, antecedents, and consequences of organizational reputation. *Academy of Management Journal*, 48(6), pp. 1033-1049.
- Rosenberg, N. (1963) Technological change in the machine tool industry, 1840-1910. *Journal of Economic History*, 23(4), pp. 414-443.
- Rosenberg, N. (1969) The direction of technological change: inducement mechanisms and focusing devices. *Economic development and cultural change*, 18(1, Part 1), pp. 1-24.
- Rosenberg, N. (1976) *Perspectives on technology*. Cambridge University Press, New York.

- Rosenberg, N. (1992) Scientific instrumentation and university research. *Research Policy*, 21(4), pp. 381-390.
- Rosenberg, N. (1982) How exogenous is science. in *Inside the Black Box: technology and economics*, Cambridge University Press, New York, pp. 141-59.
- Rossmann, G., Esparza, N., & Bonacich, P. (2010) I'd like to thank the Academy, team spillovers, and network centrality. *American Sociological Review*, 75(1), pp. 31-51.
- 産業技術総合研究所 (2011) 『日本分析機器産業の国際競争力強化について』
https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/field/riif_report.pdf
(2018/10/11 閲覧)
- 佐々木茂貴・二木史朗 (2014) 「薬学における生命指向型化学 (生命の謎を探る化学の力)」
『YAKUGAKU ZASSHI』 134(4), pp. 499-500.
- 佐々木申二 (1953) 「發会式挨拶」『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』
1953(1), pp. 1-7.
- Schmid, L. S. (2002) Mass spectrometry shines bright in an otherwise bleak market for spectroscopy instrumentation.
http://files.pharmtech.com/alfresco_images/pharma/2014/08/22/25076512-c765-42df-8296-6e3f3476f34b/article-11559.pdf (2018/10/11 閲覧)
- Serum, J. W. (2006) Reflections on the History of Computers in Mass Spectrometry. In Nier, K. A., Yergey, A. L., & Gale, P. J. (Eds.) *The Encyclopedia of Mass Spectrometry: Volume 9: Historical Perspectives, Part A: The Development of Mass Spectrometry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 189-196.
- Sharkey, A. J. (2014) Categories and organizational status: The role of industry status in the response to organizational deviance. *American Journal of Sociology*, 119(5), pp. 1380-1433.
- Shevchenko, A., Wilm, M., Vorm, O., & Mann, M. (1996) Mass spectrometric sequencing of proteins from silver-stained polyacrylamide gels. *Analytical Chemistry*, 68(5), pp. 850-858.

- 島津製作所 (1995) 『科学とともに百二十年：島津製作所の歩み』 株式会社島津製作所.
- 調麻佐志 (2004) 「学術論文データベースを利用した研究評価：bibliometrics 指標の限界と可能性」『情報の科学と技術』 54(6), pp. 317-323.
- 志田保夫 (2001) 「はじめて質量分析計に出会う人のために」志田保夫・黒野定・高橋利枝・笠間健嗣・高山光男『これならわかるマスペクトロメトリー』 化学同人, pp. 1-26.
- 志田保夫 (2011) 「退職記念講演：質量分析と 40 年歩んで」『TMS 研究』 2011(2), pp. 55-62.
- 茂里康・中田誠・絹見朋也 (2015) 「マトリックス支援レーザー脱離イオン化質量分析法 (MALDI-MS) の現状とその展望」『生物工学会誌』 93(5), pp. 307-308.
- 清水洋 (2016) 『ジェネラル・パーパス・テクノロジーのイノベーション：半導体レーザーの技術進化の日米比較』 有斐閣.
- Shinn, T. (2005) New sources of radical innovation: research-technologies, transversality and distributed learning in a post-industrial order. *Social Science Information*, 44(4), pp. 731-764.
- Shinn, T., & Joerges, B. (2002) The transverse science and technology culture: Dynamics and roles of research-technology. *Social Science Information*, 41(2), pp. 207-251.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2004) 「『臨床インフォマティクス』分野の開拓に関する調査：成果報告書」 <http://www.jbic.or.jp/enterprise/survey/1501.pdf> (2018/10/27 閲覧)
- Simcoe, T. S., & Waguespack, D. M. (2011) Status, quality, and attention: What's in a (missing) name? *Management Science*, 57(2), pp. 274-290.
- Slaughter, S., & Leslie, L. L. (1997) *Academic capitalism: Politics, policies, and the entrepreneurial university*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- 曾我朋義 (2003) 「CE-MS のメタボローム解析への展開」『Journal of the Mass Spectrometry

- Society of Japan』 51(3), pp. 407-411.
- Sorenson, O. (2014) Status and reputation: Synonyms or separate concepts? *Strategic Organization*, 12(1), pp. 62-69.
- Sorenson, O., & Waguespack, D. M. (2006) Social structure and exchange: Self-confirming dynamics in Hollywood. *Administrative Science Quarterly*, 51(4), pp. 560-589.
- 総務省統計局『科学技術研究調査』（平成 14 年版から平成 30 年版）
<https://www.stat.go.jp/data/kagaku/kekka/index.html>（2018/12/26 閲覧）
- 総務省統計局『日本の長期時系列 第 17 章 科学技術』
<http://www.stat.go.jp/data/chouki/17.html>（2018/12/26 閲覧）
- Sparkman, O. D. (2016) A History of Development of Mass Spectral Databases. In Nier, K. A., Yergey, A. L., & Gale, P. J. (Eds.) *The Encyclopedia of Mass Spectrometry: Volume 9: Historical Perspectives, Part A: The Development of Mass Spectrometry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 199-208.
- Stephan, P. E. (1996) The economics of science. *Journal of Economic Literature*, 34(3), pp. 1199-1235.
- Stephan, P. E. (2010) The economics of science. B. Hall, N. Rosenberg, eds. *Handbook of the Economics of Innovation* (Vol. 1). Elsevier, Amsterdam, pp. 218-227.
- Stephen, N., & Babcock, P. T. (2010) Mass Spectrometry in Drug Discovery and Development. *Drug Discovery World*, Fall 2010, pp. 73-85.
- Stevenson, R. L. (2018) Growth of Mass Spec From 1960s to Present: Interview with Professor O. David Sparkman. <https://www.americanlaboratory.com/347045-Growth-of-Mass-Spec-From-1960s-to-Present-Interview-With-Professor-O-David-Sparkman/>
(2018/11/08 閲覧)
- Stewart, D. (2005) Social status in an open-source community. *American Sociological Review*, 70(5), pp. 823-842.

- Stuart, T. E. (1998) Network positions and propensities to collaborate: An investigation of strategic alliance formation in a high-technology industry. *Administrative Science Quarterly*, 43(3), pp. 668-698.
- Stuart, T. E., & Ding, W. W. (2006) When do scientists become entrepreneurs? The social structural antecedents of commercial activity in the academic life sciences. *American Journal of Sociology*, 112(1), pp. 97-144.
- Stuart, T. E., Hoang, H., & Hybels, R. C. (1999) Interorganizational endorsements and the performance of entrepreneurial ventures. *Administrative Science Quarterly*, 44(2), pp. 315-349.
- Sutton, R. I., & Hargadon, A. (1996) Brainstorming groups in context: Effectiveness in a product design firm. *Administrative Science Quarterly*, 41(4), pp. 685-718.
- 高橋武雄 (1964) 「機器分析法の史的展望」『分析化学』13(3), pp. 275-281.
- 高山光男 (2009) 「質量分析装置のためのイオン化法：総論」『ぶんせき』2009(1), pp. 2-7.
- Tanaka, K. (2002) The origin of macromolecule ionization by laser irradiation. Nobel lecture. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/tanaka-lecture.pdf> (2018/10/22 閲覧)
- 田中耕一 (2003a) 『生涯最高の失敗』朝日新聞社.
- 田中耕一 (2003b) 「A Monumental Blunder」『電子情報通信学会誌』86(6), pp. 377-388.
- 田中耕一・井戸豊・秋田智史・吉田佳一・吉田多見男 (1987) 「レーザーイオン化飛行時間型質量分析装置の開発IV：高質量有機化合物からの擬分子イオンの生成」『質量分析連合討論会講演要旨集』1987, pp. 22-23.
- Tanaka, K., Ido, Y., Akita, S., Yoshida, Y., & Yoshida, T. (1987) Detection of high mass molecules by Laser Desorption Time-of-Flight Mass Spectrometry. *Proceedings of the Second Japan -China Joint Symposium on Mass Spectrometry*, pp. 185-188.
- Tanaka, K., Waki, H., Ido, Y., Akita, S., Yoshida, Y., Yoshida, T., & Matsuo, T. (1988) Protein

and polymer analyses up to m/z 100000 by laser ionization time-of-flight mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2(8), pp. 151-153.

田中耕一・和田芳直 (2005) 「質量分析計をめぐるノーベル化学賞受賞エンジニアと医師の産学連携の実際」『産学官連携ジャーナル』2005(9), pp. 2-9.

田中耕一・伊澤達夫・中平佳裕 (2007) 「対談：アンテナを張る」『電子情報通信学会誌』90(9), pp. 769-779.

田中耕一・佐藤貴弥・吉野健一 (2009) 「遅延引き出し法の基礎」『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』57(1), pp. 31-36.

田中俊逸 (2018) 「少子化時代の会員増強」『ぶんせき』2018(3), p. 85.

シソーラス研究会 (2013) 『MeSH 入門』情報科学技術協会 (INFOSTA).

Thomson, J. J. (1913) *Rays of Positive Electricity and Their Application to Chemical Analysis*. Longmans, London.

千谷利三 (1953) 「質量分析の将来」『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』1953(1), pp. 21-26.

Tórkés, L. (2017) The allure of mass spectrometry: From an earlyday chemist's perspective. *Mass Spectrometry Reviews*, 36(4), pp. 520-542.

特許庁 (2006) 「平成 17 年度標準技術集：質量分析技術（マススペクトロメトリー）」

津越敬寿 (2015) 「質量分析とは」『化学と教育』63(12), pp. 596-599.

Tushman, M. L., & Anderson, P. (1986). Technological discontinuities and organizational environments. *Administrative Science Quarterly*, 31(3), pp. 439-465.

Tushman, M. L., & Nelson, R. R. (1990). Introduction: Technology, organizations, and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), pp. 1-8.

上野民夫 (2003) 「田中耕一氏の業績」『学術の動向』8(1), pp. 68-69.

- 上山隆大 (2010) 『アカデミック・キャピタリズムを超えて：アメリカの大学と科学研究の現在』 NTT 出版.
- U.S. National Library of Medicine (1990) FAQ: Journal Selection for MEDLINE® Indexing at NLM. https://www.nlm.nih.gov/lstrc/j_sel_faq.html (2018/10/11 閲覧)
- Von Hippel, E. (1976) The dominant role of users in the scientific instrument innovation process. *Research Policy*, 5(3), pp. 212-239.
- Von Hippel, E. (1988) *The Sources of Innovation*. New York: Oxford University Press. (榎原清則訳『イノベーションの源泉：真のイノベーターはだれか』ダイヤモンド社, 1991年)
- Wade, J. B., Porac, J. F., Pollock, T. G., & Graffin, S. D. (2006) The burden of celebrity: The impact of CEO certification contests on CEO pay and performance. *Academy of Management Journal*, 49(4), pp. 643-660.
- Washington, M., & Zajac, E. J. (2005) Status evolution and competition: Theory and evidence. *Academy of Management Journal*, 48(2), pp. 282-296.
- 渡邊俊宏 (2004) 「マトリックス支援レーザー脱離イオン化質量分析法 (MALDI-TOFMS) の開発とその歴史について」『MaLS FORUM』 1, pp. 34-50.
- Weigelt, K., & Camerer, C. (1988) Reputation and corporate strategy: A review of recent theory and applications. *Strategic Management Journal*, 9(5), pp. 443-454.
- Wiberley, S. E., & Aikens, D. A. (1964) Mass spectrometry, part two. *Journal of Chemical Education*, 41(3), pp. A153-A180.
- Wiley, W. C. (1956) Bendix time-of-flight mass spectrometer. *Science*, 124(3226), pp. 817-820.
- Wilkins, M. R., Sanchez, J. C., Gooley, A. A., Appel, R. D., Humphery-Smith, I., Hochstrasser, D. F., & Williams, K. L. (1996) Progress with proteome projects: why all proteins expressed by a genome should be identified and how to do it. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 13(1), pp. 19-50.

- Williams, R., & Edge, D. (1996) The social shaping of technology. *Research policy*, 25(6), pp. 865-899.
- Wolff, M. M., & Stephens, W. E. (1953) A pulsed mass spectrometer with time dispersion. *Review of Scientific Instruments*, 24(8), pp. 616-617.
- 山田哲司 (2004) 「プロテオミクスの現状と将来：国立がんセンターにおける試み」『モダンメディア』50(10), pp. 227-232.
- 山垣亮 (2007) 「理学のキーワード第7回：MALDI MS」『東京大学理学系研究科・理学部ニュース』39(1), pp. 9-11.
- Yamashita, M., & Fenn, J. B. (1984a) Electrospray ion source. Another variation on the free-jet theme. *The Journal of Physical Chemistry*, 88(20), pp. 4451-4459.
- Yamashita, M., & Fenn, J. B. (1984b) Negative ion production with the electrospray ion source. *The Journal of Physical Chemistry*, 88(20), pp. 4671-4675.
- 吉田多見男・田中耕一・井戸豊・秋田智史・吉田佳一 (1988) 「レーザー脱離 TOF 質量分析法による高質量分子イオンの検出」『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』36(2), pp. 59-69.
- 吉田多見男 (2003a) 「企業の研究・開発現場からみたノーベル賞：挑戦とチームワーク」『分光研究』52(3), pp. 168-174.
- 吉田多見男 (2003b) 「(株)島津製作所において」『ぶんせき』342, p. 305.
- 吉田多見男・田中耕一・井戸豊・秋田智史・吉田佳一 (2003) 「たんぱく質が壊れずに飛び出した!!：ソフトレーザー脱離イオン化質量分析計開発の経緯」『応用物理』72(8), pp. 999-1003.
- 吉野健一 (2007) 「目から鱗のマスマスペクトロメトリー 第11回 「質量分析器」～ Mass Spectrometer は質量分析器ではありません～」『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』55(5), pp. 353-361.

吉野健一 (2008) 「用語を通して学ぶ質量分析基礎の基礎 第 2 回: m/z と質量電荷比」
『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』 56(4), pp. 209-213.

吉野健一 (2017) 「分析機器の正しい使い方: 質量分析」『ぶんせき』 2017(6), pp. 216-223.

吉野健一・大城紀子・徳永千春・米澤一仁 (2004) 「質量分析法と配列データベースを利用
するタンパク質同定法」『Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan』 52(3), pp.
106-129.

Zhao, W., & Zhou, X. (2011) Status inconsistency and product valuation in the California
wine market. *Organization Science*, 22(6), pp. 1435-1448.

Ziman, J. M. (1994) Prometheus bound: science in a dynamic “steady state”. Cambridge
University Press, New York. (村上陽一郎・川崎勝・三宅苞訳『縛られたプロメテウス: 動
的定常状態における科学』シュプリンガー・フェアラーク東京, 1995 年)