

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

(要 旨)

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

1. 本論文の目的

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、(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のが分析・測定であるならば、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逃してきた。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。

2. 本論文の要約

本論文は、全9章から構成される。各章における議論の概要は、以下の通りである。

第1章 はじめに

第1章では、上述した研究目的のうち、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という論点を深掘りしながら、本研究の目的を詳述した。とりわけ本研究が目にしたのは、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した。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。

第2章 理論的背景

第2章では、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した。具体的には、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した。次に、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

介することを通じて、科学装置が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明らかにした。その上で、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した。最後に、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した。

既存研究の検討を通じて明らかになったのは、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ことである。この論点を取り扱っていると見なせる既存研究も、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。Riggs & von Hippel (1994) 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。

第 3 章 本論文で使用するデータ

第 3 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した。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のような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。

収集したデータは、(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) 各プレイ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容易ではない。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。

第4章 質量分析計の基本原理と特徴

第4章では、本論文の分析対象である質量分析計の基本原理と要素技術について解説した。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であるとか、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、第4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た。

第5章 科学者による技術選択

第5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した。既存研究が指摘したように、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。

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。これを分析するにあたって、本論文では、MEDLINE/PubMed データベースと Web of Science を接合して作成した、学術論文データセットを使用した。このデータの特徴は、MEDLINE/PubMed が各論文に振り分けている MeSH というキーワードを用いることで、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。

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。

第6章 MALDI の開発と普及

第6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た。事例として取り上げたのは、実証分析の対象でもあった MALDI (マトリックス支援レーザー脱離イオン化法) 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。

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。

第7章 質量分析計の汎用化

第7章では、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した。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、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。

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った。

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。

第8章 汎用化によって失われゆくもの

第8章では、科学装置の汎用化に対して一部の科学者が抱いてきた懸念を取り上げて、汎用化によって生じうる現象とそのメカニズムを考察した。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。

第8章の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第 8 章で提示したデータは、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。

第 9 章 結論

第 9 章では、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という問いに対する回答を、分析結果の要約という形で提示し、本研究の貢献、インプリケーション、限界、および今後の研究課題を議論した。

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。この知見は、科学や技術の進歩や、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。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。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。

一方で、本研究は次のような限界も抱えている。それは、(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。これらの限界は、質量分析計とは異なる事例を追加的に分析することによって、克服される可能性がある。