

天文学における仮想天文台活動の現状，および 太陽系小天体の表示サービスの構築

中嶋浩一

1. はじめに

前報告⁽¹⁾において筆者は，天文学におけるカタログ・データベースの利用に関して当時の状況の総括を報告し，また将来への課題についての検討を行った．しかしその後10年余り経過した現在，この分野の活動状況は大きな変貌を遂げ，当時には予想もできなかった新しい状況が現出することとなった．

この分野における現状の展開状況を一言で言えば，「インターネットの広範かつ徹底的な利用」となるであろう．前報告でも一応，将来のインターネットの利用・普及ということに言及したが，それはむしろその展開におけるいろいろな困難を予想する，というものであった．しかしそこで予想したいろいろな問題は，インターネット自身の持つ応用性の広さ，およびその拡大によってつぎつぎと解決されつつある．それだけでなく，前回には予想もしなかったインターネットの応用が，「Web 2.0」というような標語のもとに展開されている．

前報告で指摘したインターネットの問題点の一例として，リソースの爆発的な増加ということあったが，現状ではこれらは，インターネット内の「レジストリ」，あるいは「メタデータ」という形で解決に向かっていく．また新しいインターネットの応用の一例として，データの提供サービスからさらに進んでその計算処理，あるいはグラフィカルな表示のサービス

などが次々と開発されつつある。

また前報告で筆者は、データサービスを図書館サービスにたとえて、世界的な統合図書館のようなデータサービスの必要性を論じたが、現状では各地のデータサービスを有機的に統合する「仮想天文台」という概念が確立し、これが各国の天文学者の共通目標となっている。これは、一箇所に統合図書館を作るというのではなく、各地の図書館の蔵書をインターネットで直接検索しまた利用できる、というようなものである。

このほど（2006年8月）チェコ国のプラハで、3年に1度の行事である「国際天文学連合総会」が開かれ、そこでこの仮想天文台の活動を総括する特別シンポジウムが開催された。そして筆者もそれに参加する機会を得たので、この機にこれらの諸活動の現状をまとめた報告を作成することとした。また、このような活動の一環として、筆者が一橋大学において、サーバなどの資源を利用しつつ作成した「太陽系小天体の表示サービス」についても報告する。

2. 天文学とデータについて

前報告においてはまず、天文学研究において天体に関する諸データ（以下、天文データ）の果たす役割の重要性について論じた。この点については、現状においても、増大こそすれ少しも減少していないと考えられる。そこでまず、前報告の1994年の時点での、天文データに関する研究や活動状況をまとめることとする。箇条書きで表記すれば、

- 1) 天文データを整備し利用しやすくしたものを「カタログ」と称する。
- 2) 天文観測データを整備してカタログとして編纂し研究者の利用に供することは、天文学の重要な仕事の一つである。
- 3) 多くのカタログを保持しかつ提供サービスを行うことが、天文台の重要な仕事の一つである。

- 4) そのため各地のおもな天文台・研究機関では「データセンター」を設けている.
- 5) 天文データの収集・整備・公開の活動について、国際天文学連合においても常置委員会を設けて国際的に取り組んでいる.
- 6) 1980年代のパソコンの登場と普及で、マシンリーダブルなデータの整備が重要になった.
- 7) さらに1990年代のインターネットの普及で、オンラインのデータベースと、このためのサービス体制の重要性が増大した.

前報告では、このような議論の後、各地のデータセンターの活動状況の報告と、オンラインデータベースサービスの動向についての検討を行った.

3. 仮想天文台について

前報告の後、1990年代後半は、インターネットの爆発的な普及、およびコンピュータの処理能力の飛躍的な向上により、天文データ本体およびそれらのオンラインサービスの重要性はますます増大している. またそれと共に、その規模も大きく拡大してきた. たとえば前回の報告ではカタログの中で最大のものは2億星程度であったが、近年は10億星に近いものも公開されている. さらに、可視光のみでなく赤外線やX線などのいろいろな波長による、膨大な天体画像データの蓄積も進んでいる.

このような情勢に対応して浮上してきた概念および活動形態が「仮想天文台」(Virtual Observatory, 略称 VO)である. 天文データはすでに、膨大かつ多様なものが各地のデータセンターや天文台で提供されており、おおざっぱな天体画像や天体データはほとんど全天にわたって入手可能である. この意味で、いちいち望遠鏡を動かして目的的天体を観測しなくても、かなりの部分のデータがインターネットで得られる、ということから「仮想天文台」というプロジェクト名になったわけである.

実例としては、ハッブル望遠鏡やすばる望遠鏡、あるいは人工衛星による X 線や赤外線観測データなどが挙げられる。これらは多額の費用を投じて獲得されたものであるがゆえに公的な性格が強いものとされ、比較的速いペースで整備・公開がなされるようになっていく。また、たとえば SDSS⁽ⁱⁱ⁾などは、各種の天文研究に応用可能な「サーベイデータ」として、その最初からデータの迅速な整備・公開を組み込んだプロジェクトとして実行されている。

これらに従来整備が進められてきた「カタログデータ」を加えれば、そのカバーする範囲はかなり広範囲かつ多岐にわたるものとなる。したがってこれらを利用することによって、もはや手間ひまをかけて天文台で観測を行わなくても実際かなりの程度の研究を進めることができる。また各種のデータの組み合わせの中から、新しい発見がもたらされる可能性もある。

しかし、人類がこれまで見たことのない天文学上の現象を新たに発見するというようなことは、仮想天文台では不可能なことであり、この意味で、実際の観測装置を備えたこれまでの天文台が不要になる、ということはない。これはしばしば誤解されるところであるが、実際の仮想天文台プロジェクトを推進している人々の間では、VO が天文台に置きかわるものではないということは当然の共通認識である。

このような概念としての仮想天文台のほかに、「天文研究活動の中核としての仮想天文台」が大きな意味を持つようになってきた。すなわち、概念としての仮想天文台をインターネット空間で実体化させるために、データを収集する、またそれを整備して公開する、さらにそれらを検索可能にする、またそれらの解析のツールを提供する、などの諸活動が、天文学研究の一分野として確立しつつあるということである。そしてこのような活動が、前回の報告の天文データセンターの活動の延長上にあることは言うまでもない。

仮想天文台の取り組みはさらに、天文観測者すなわち天文データを生産する立場の研究者に対しても、仮想天文台の目的に沿ったデータ処理の努

力を要求することにもなる。すなわち、データの早期公開、データ形式の標準化、データ整約・観測条件などの周辺データの整備、などの努力である。そしてこれらは、観測者のみでなく機材を提供する天文台側にも要求される努力である。

また他方、データを利用する天文研究者の側に対しても、貴重な観測装置の有効利用のために、これまでの観測データの中で利用できるものは極力再利用すること、そしてそのために広範囲の在来データを十分に検索調査すること、などの努力が要求される。

このようにして仮想天文台の活動は、現在、多方面の天文研究者やソフトウェア研究者などをも含めて、一つの大きな国際的な事業となっている。実際、欧州の天文学者の組織するユーロ VO（詳細は後述）では、欧州共同体組織から5年間で約7億円という予算を得て、全欧州的な活動を行っている。また米国やカナダの一部を含むNVOプロジェクト（詳細は後述）にも、5年間で約12億円という支出が行われている。これらの下に各国各研究機関の独自のVOプロジェクトがそれぞれ立ち上げられ、各々独自の取り組み、あるいは相互に協力した取り組みが行われている。またそれらをまとめる国際組織として「国際仮想天文台連合」（略称 IVOA、詳細は後述）があり、年に2回の定期的な会合を持つなど、活発な活動を行っている。そして前述のように、このたびの2006年夏の、チェコ・プラハでの国際天文学連合の総会では、2週間の会期中の3日間を費やして大がかりな特別セッションが、仮想天文台のテーマのもとに開催されている。

さて、このように活発な活動が行われている仮想天文台プロジェクトではあるが、その現状の進行状況は、仮想天文台の目的とするところの実現にはまだかなりの道のりがあるように見受けられる。実際、天文データの公開や流通のための標準形式の制定などは、試案となる標準は提示されているものの、まだまだ検討の余地を残すという現状である。また、これまでに公開されたデータやツールなどを利用した天文研究の成果なども、ま

だ端緒についたばかりという状況である。

このようなわけで、仮想天文台に関してはまだその全体像の確立に至っていない状況であるが、3年に一度の国際天文学連合総会においての諸報告の総括は現状でも意義あることと考えられるので、この趣旨で以下に、各 VO グループの活動状況をまとめて報告する。

4. 各地での仮想天文台プロジェクトについて

世界各地での仮想天文台プロジェクトの取り組みは、各国の天文研究機関および個々の天文研究者がまず国単位でプロジェクトを組織し、そしてそれらのいくつかがローカルに集まって国際協力組織を作り、さらにこれら全体をつなぐ「国際仮想天文台連合」に結集する、という形態を取っている。また個々の研究機関で、独自の取り組みとして進められているプロジェクトもある。そこで本報告では、このような活動単位ごとに、そのプロジェクトの沿革や組織、そこで提供されるデータやツール、天文学研究の状況（Scientific cases と称する）などを紹介する。

4-1. 国際仮想天文台連合

(International Virtual Observatory Alliance, IVOA)

<http://www.ivoa.net/>

〔沿革と組織〕 IVOA は、2002 年、「仮想天文台としての天文データの利用のために必要なツール、システム、組織などの開発・展開のための国際協力体」として発足した。構成員としては、米、英、日、独、仏などの各国の仮想天文台（以下 VO）グループ、および欧州共同体の VO グループ、がある。2005 年現在では 15 の VO グループを数えていたが、このほかに大型観測装置のプロジェクト、あるいは VO に間接的に関連する組織などの参加をも視野に入れつつ、拡大中であるということである。なお、2006 年現在の本連合の代表は、日本の国立天文台の大石雅寿助教授がそ

の任に当たっている。

〔活動内容〕 IVOA の目的は、主として「標準の確立」というところにある。このためこれに向けて各種のワーキンググループを組織し、それぞれの標準の策定・提案を行う、という活動が中心である。実際これまでに、xml を利用した表形式データの標準、文書形式の標準、多様な天文データの索引（メタデータ）形式の標準など、16 点ほどのテーマについて、定められた手順を踏みつつ標準を作成してきている。定められた手順とは、最初に作業ドラフトの提示、ついで勧告案原案の作成、そして勧告の最終案の提示、などであるが、最終的には国際天文学連合（以下 IAU）の標準としての確定をめざしている。そしてこれらの具体的な打ち合わせの場として、年に 2 回のフォーラムを、各国の VO グループ持ち回りで開催している。

このほか、Global Grid Forum (GGF)、IAU 第 5 常置委員会、各種の大規模天文プロジェクト（ALMA、LSST など）の会合、などに積極的に参加し、国際的な研究協力の窓口としての活動も行っている。

〔天文学研究（Scientific cases）〕 IVOA の公式報告の中では、VO を活用した天文学研究の各種の成果について言及しているが、これらは個々の研究者が独自に行っているものであり、具体例については各国の VO グループのまとめの中で報告する。

4-2. 欧州共同体の VO (Euro-VO)

<http://www.euro-vo.org>

〔沿革と組織〕 2001 年に設立された、欧州の共同研究体制の Astrophysical Virtual Observatory (AVO) が⁸、2005 年からその Phase-B の開始と共に Euro-VO と改称した。2006 年からは欧州の共同研究体制の 6th Framework Program に認定され、5 年間で約 7 億円の予算と、人員 60 人の態勢で活動を行っている。

欧州の共同研究体制の構成員は、共同体各国政府の研究推進機関（例、

フランスの INSU など) であり、これに各研究機関からの代表、研究者などが集まって、Facility Center, Data Center Alliance, Technology Center の3部構成からなる活動体を作っている。

〔活動内容〕 実際の研究開発活動は、予算の配分を受けた各国の VO グループが行っているわけであり、Euro-VO のホームページなどで報告されている研究成果・サービスなどは、各国 VO グループのものである。それらについては、個々の事例の中で報告する。

Euro-VO 固有の主な活動としては、上記 Technology Center において各国の開発研究のすり合わせを行うこと、Workshop などの研究会を開催すること、などがある。

4-3. 欧州宇宙開発機構の VO (European Space Agency VO, ESAVO)

<http://esavo.esaint/>

〔沿革と組織〕 ESA は、米国の NASA のような宇宙開発のための政策機関であり、欧州全体の宇宙開発の要である。しかしこの ESAVO は、ESA 全体の VO ではなく、ESA の主要なセンターの一つであるスペインの研究所 (ESAC, Villafranca del Castillo) における VO 活動である。

〔活動内容〕 この研究所は、以前から紫外線や赤外線観測データのセンターとして重要な役割を果たしており、現状では ISO の赤外線データの VO プロトコル⁽ⁱⁱⁱ⁾による提供を行っている。またカナリー諸島の天文台との関連で XMM-Newton のデータについても同様のサービスを行っている。またこれらのデータの SkyNode や Archive InterOperability System という VO サービスも行っている。

VO ツールとしては、VOSpec という、VO データのスペクトル表示のツールを提供する。

4-4. フランス VO (VO-France)

<http://www.france-vo.org/>

〔沿革と組織〕 これはフランス国内のいろいろな研究機関・研究グループが、VO を共同開発するために組織した連絡会のようなものである。実際の個々の VO サービスの開発などは、それぞれの研究機関ごとに進められている。フランスは以前から、ストラスブールの天文データセンター (Centre de Donnees astronomiques de Strasbourg, 以下 CDS) を中心に、天文データに関連したこのような研究開発が盛んであり、多くの研究機関が参加している。年度始めの参加公募では、25 の研究機関から 41 件の応募があったということである。

〔活動内容〕 VO-France 全体としての活動は、スペクトルデータ、理論計算データ、ワークフロー仕様、グリッドコンピューティング、測地データ、などの共通課題について研究チームを作り、開発を進めることが中心である。

CDS の活動については別項で報告するので、CDS 以外の各研究機関の活動についていくつか取上げると、IMCCE の SkyBot, リヨン大学の HyperLeda, IAP の TERAPIX ツール, カナダ・フランス・ハワイ天文台のレガシーサーベイデータ, パリ・ムードン天文台の太陽観測データベース BASS2000 などがある。

〔天文学研究〕 太陽観測データベースを利用した太陽活動領域の研究, および VO のツールを利用した恒星の種族に関する研究, などが報告されている。

4-5. CDS における VO 活動

<http://cdsweb.u-strasbg.fr/>

〔沿革と組織〕 前出の CDS については、前報告にも述べたように、フランス、ストラスブール大学天文台の中の組織であり、世界の天文データセンターのさきがけとして 1972 年以來活動を続けてきている。そして近年の VO プロジェクトに関しても、国際的な研究開発体制をリードしつつ、他方で独自の VO サービスを開発するなど、米国のグループと並んで VO

の中心的存在となっている。

〔活動内容〕 CDSでは、これまでの SIMBAD や VizieR などのデータベースサービスのほかに、以前から開発を進めてきた天体画像表示・同定サービスである ALADIN を、VO に合わせて拡充し独自の VO ツールとして提供している。これは、入出力データを VO のデータ標準形式に合わせるなどのほか、いわゆる「ポータルサービス」として、各地に散在する多様な天文データを検索表示する機能をも組み込むようになっている。

このほか CDS では、Unified Column Descriptor (UCD) などの各種の VO 標準の開発センターの役割をも担っている。また各種の Web サービスツールの開発・提供も行っており、後述の、著者らの開発した「太陽系小天体表示サービス」もここで提供する xml 形式データ (VOTable) パーサーツール SAVOT を利用している。

4-6. 英国の VO (AstroGrid)

<http://www2.astrogrid.org/>

〔沿革と組織〕 英国のエディンバラ大、レスター大、ケンブリッジ大などの天文学研究機関が主体となり、素粒子物理・天文学研究審議会 (PPARC) のもとで進められている VO プロジェクトであり、9 億円近い予算を確保して大掛かりに行われている。特に、ジョドレルバンク天文台の電波天文グループ MERLIN (Multi-Element Radio Linked Interferometer Network) の活動が顕著である。

〔活動内容〕 前述のようにこのグループは大規模な活動を行っており、特にツール群の開発で多様なサービスを提供している。これらは、Workbench および Astro Runtime (AR) の 2 グループのソフトとして提供され、それぞれに含まれるサービスツールは以下のようなものがある：

1) Workbench として提供されるもの

- ・ AstroScope = レジストリ^(iv)から関連データを探す (天体毎)。
- ・ HelioScope = 太陽観測データのレジストリからデータを探す (日付

毎).

- ・ Task Launcher = タスク (例, Anomaly detection など) の始動.
- ・ Science Workflows = VO を利用する際の多様な Workflow (作業手順) の内, 標準的な手順を提供する. ユーザはこれをテンプレートとして, 各自の手順を構成することができる. 例として, Solar Movie Maker, CTIP model, Redshift Maker, ColourCutter, Merlin Imager などがある.
- ・ Workflow Builder = 前項のような手順の作成を, インタラクティブな GUI を用いて構成するツール.
- ・ Myspace = 作業結果の置き場.
- ・ Lookout = Workflow などの実行時に進行状況などを見る.
- ・ Resources = AstroGrid のレジストリのサービスを検索する.

2) Astro Runtime のサービス

= 各種の VO サービスを利用するためのミドルウェアとして, 各種のプログラム言語から利用可能. ダウンロードの上, 各自の OS の上で利用できるようになっている.

またこれらのほかに, Java 言語の jar 形式で提供されるツールもある.

さらに, これらのコアとなる開発グループとは別に, 各方面からの寄与も統合されて AstroGrid から提供されており, 以下のようなものがある:

- ・ TOPCAT (Tool for OPerations on Catalogues And Tables)
= テーブルデータの可視化と編集. 旧 Starlink から続く.
- ・ SPLAT (Spectral Analysis Tool) = 天体スペクトルのデータベースからデータを取得し, 各種の解析を行う GUI ツール. 旧 Starlink から続く.
- ・ GAIA PLASTIC (Graphical Astronomy and Image Analysis Tool)
= 天体画像データを表示し解析するツール. 旧 Skycat から続く.
- ・ Virgo Consortium for Cosmological Supercomputer Simulations
= the Institute for Computational Cosmology in Durham からの寄

与で、宇宙論のシミュレーションのためのスーパーコンピュータ利用のツール、および補助を提供する。

ツールサービス以外では、今後電波天文学関連の観測データベースの構築に力を注いでゆく予定であるということである。

4-7. ドイツの VO (German Astrophysical VO, GAVO)

<http://www.g-vo.org/portal>

〔沿革の組織〕 マックス・プランク研究所の天文学分野のグループやハンブルグ天文台などが中心となり、ほかにミュンヘン大学、ポツダム大学などの情報科学研究分野も協力して実施している。

〔活動内容〕 まず天文データサービスとして、ドイツ主導のプロジェクトの X 線観測衛星 ROSAT のデータ、あるいは理論計算シミュレーションのデータの提供など、次のようなものがある：

- ・ ROSAT (Röntgen Satellite) に関するデータ一般のサービス。
- ・ RASS cone search = ROSAT All-Sky Survey データの検索サービス。
- ・ RASS source identification = 上記データの天体の分類サービス。
- ・ SED classifier = Spectral Energy Distributions (天体スペクトルの強度分布) データの分類サービス。
- ・ RAVE (RAAdial Velocity Experiment) = オーストラリアの天文台などと協力して現在進行中の、銀河系内の多数の恒星の視線速度データ等、詳細なデータを取得するプロジェクトのデータサービス。
- ・ Planck simulations = 宇宙背景放射の詳細な観測のために 2007 年に打ち上げられる予定のプランク衛星の、準備段階でのシミュレーションデータの提供。
- ・ LSS simulation exploration = Large Scale Structure (宇宙の大規模構造) の理論計算の際のシミュレーションデータの提供。特に、英国のダーラム大学の計算宇宙論研究所 (ICC) との共同プロジェクト。

ト Virgo のシミュレーションのデータ Millennium Database を提供.

- ・ Hydro simulation visualization = 銀河団の流体力学的シミュレーション計算の可視化サービス.

また、VO 関連のツールの開発・提供として、次のようなものがある：

- ・ ClusterFinder = 銀河のカatalogデータから、銀河のまとまりとしての銀河団を抽出するツール.
- ・ Cone Search = データベース形式の天文データから、特定の範囲の天体を検索表示する Web アプリケーションプログラムで、データベースサーバに組み込んで使用する.
- ・ MCMCS (Multi-Catalogue Multi-Cone Search) Download Manager = 前項の Cone Search を複数のデータベース、複数の検索について、一括して行うためのツール.
- ・ SOAP/WSDL tools = 近年の Web サービスソフト体系の中で、標準的に用いられるツールの SOAP や WSDL を、天文コミュニティに提供.

〔天文学研究〕 上記の RASS と、前出の SDSS の比較から、X 線での銀河団の検出を行った研究が報告されている.

4-8. スペインの VO (Spanish VO, SVO)

<http://svo.laeff.esa.es/>

〔沿革と組織〕 宇宙物理・基礎物理研究所 (LAEFF) の科学データセンター (SDC) が中心となり、国立天文学・光学・電子工学研究所、計算機科学大学などの研究機関が協力する形で活動している. 人員配置としては、約 10 FTE (Full Time Equivalent) を確保する.

〔活動内容〕 天文データのサービスとして、次のようなものがある：

- ・ GAUDI (Ground-based Astroseismology Uniform Database Interface) = COROT (CONvection, ROTation and Transit of planet) 衛星のデータサービス. COROT 衛星は、恒星の光度の微小な変動

を測定して、星震、自転、惑星の通過などを捕えようとするもので、フランスを中心にヨーロッパやブラジルの天文学機関が協力して打ち上げ予定のもの。

- ・ INES System (IUE archive) = 紫外線観測衛星 IUE のスペクトルデータのサービス。
- ・ OMC=ESA の 2002 年のミッションである INTEGRAL 衛星搭載の Optical Monitoring Camera のデータサービス。OMC は常時天体を監視して、突発的な現象を発見しようとするものである。
- ・ 理論シミュレーションモデルのデータサービス。(GAVO と同様)

また、ツール開発では次のようなものがある：

- ・ Light curve characterization = 変光星の光度曲線の解析ツール。
- ・ TSAP (Theoretical Spectra Access Protocol) = 理論モデルと観測の比較のためのツール。
- ・ SSAP Prototype = 前出の VO プロトコルの一つの Simple Spectral Access Protocol
- ・ VOSED = SED (スペクトルエネルギー分布) の作成・解析ツール。原始惑星系円盤のスペクトル解析に用いる。
- ・ PVOL (Planetary Virtual Observatory and Laboratory) = 太陽系の外惑星を研究するプロジェクト IOPW (International Outer Planets Watch) のデータ利用のためのツールを提供。

[天文学研究] 上記の VOSED を利用した原始惑星系円盤の研究が報告されている。またメキシコの PGos3 (後述) を利用して、銀河内の星形成の研究もなされている。

4-9. イタリアの VO (VObs.it)

<http://vobs.astro.it/>

[沿革と組織] 以前 DRACO というプロジェクトが天文データの研究を行っていたが、2005 年に VObs.it というプロジェクトになった。実務的

なことは、情報システムユニット (SI) とイタリア国立天体物理研究所 (INAF) が行っている。

〔活動内容〕 データサービスとしては、次のようなものがある：

- ・ INAF, IA 2 archive = TNG (イタリア国営ガリレオ望遠鏡) の観測データサービス。
- ・ INAF, OATo = VO 形式での全天の画像データサービス。
- ・ VVDS (VIMOS-VLT Deep Survey) = Very Large Telescope 望遠鏡に設置した観測装置 Visible MultiObject Spectrograph のデータサービス。フランスの CENCOS (プロヴァンス大学, マルセイユ天体物理学研究所) サービスと同様。
- ・ BaSTI (A Bag of Stellar Tracks and Isochrones) = 恒星進化の理論計算データベースのサービスで、恒星の種族の分類などに利用される。
- ・ ITVO (The Italian Theoretical Virtual Observatory) = 理論シミュレーションのデータベースサービス。
- ・ ASDC (the ASI Science Data Center) = イタリアの宇宙開発機構 ASI のいろいろなミッションのデータサービス。

これらのサービス活動のほかに、UCD (CDS の項参照)、VO プロトコル SNAP (注 iii 参照) などの VO 標準の開発への協力、理論シミュレーションデータと観測データとの比較のためのツールの開発、天体データ可視化のためのツール VisIVO (Visualisation Interface to the Virtual Observatory) の開発、ニューラルコンピューティングを利用した Astronural の研究、VO とグリッドコンピューティングの結合の研究、などを行っている。

4-10. ロシアおよび旧ソ連邦諸国の VO (Russian VO, RVO)

<http://www.inasan.rssi.ru/eng/rvo/>

〔沿革と組織〕 ロシアでは、ロシア科学アカデミーの天文学研究所

(INASAN) が VO の中心的な役割を果たし、これにモスクワ大学ステルンベルグ天文学研究所、サンクトペテルブルグ大学、ソボレフ天文研究所、および旧ソ連邦の国のグループが参加する形で活動が行われている。ただしアルメニアは、後述のように独自の VO グループを立ち上げている。

〔活動内容〕 主な活動は、INASAN における、ロシア国内のための天文データ・ミラーリングサービス、およびロシア独自のデータのサービス、などである。ロシア独自のデータとしては、ステルンベルグ天文学研究所、特殊天体物理観測所、エストニアのタルトゥ天文台、などの観測データを保持している。

このほか、これまでの観測で蓄積された天体写真乾板のデジタル化という大きなプロジェクトに取り組んでいる。これは、ステルンベルグ天文学研究所、ウクライナのキエフ天文台、などが中心で、ブルガリア、ソフィアの広域天体写真乾板データベースプロジェクトチームとの共同作業となっている。

またタルトゥ天文台では、2dF サーベイデータから銀河団を抽出するカタログ開発を行っている。

〔天文学研究〕 上記の天体写真乾板のデジタル化データを利用して、キエフの天文台では、太陽系小天体の研究を行っている。

4-11. ハンガリーの VO (Hungarian VO, HVO)

<http://hvo.elte.hu/en/>

〔沿革と組織〕 これについては該当のホームページ等に記述がないので詳細は不明であるが、エートヴェシュ大学の複合物理システム部やコンコリー天文台などの機関が参加している模様である。

〔活動内容〕 ここでは特に、天体スペクトルのデータベースを重点的に開発・提供している。また photoz という呼称で、photometry (測光) データから z (赤方偏移) を推定する方法を開発している。また、太陽観測データベースに関して、デブレチェン太陽天文台で、これまでのグリニジ

太陽写真データベースを引き継いで Debrecen Photoheliographic Data (DPD) を維持し、EGSO (Euro-VO の項参照) に貢献している。

4-12. アルメニアの VO (Armenian VO, ArVO)

〔沿革と組織〕 アルメニアでは古くからビュラカン天文台において活発な天文研究が行われており、ここで VO 関連のサービスが提供されている。

〔活動内容〕 ビュラカン天文台は「マルカリアン天体」のサーベイに特色があり、VO 活動としてはこのカタログ (Second Byurakan Survey, SBS) のデータベースサービス、および SDSS カタログとの比較研究などが行われている。

4-13. 米国の VO (US National VO, NVO)

<http://www.us-vo.org/>

〔沿革と組織〕 米国の VO は、全米科学財団 (NSF) から、情報技術研究プログラムの分野で 5 年間で約 12 億円という予算を認められ、2001 年から活動を行っている。このため、参加組織・研究者の中には、情報科学・工学の分野のものが多くの特徴である。また NSF ではグリッドコンピューティング関連の TeraGrid というプロジェクトも支援しており、NVO はこれにも関連している。

参加機関としては、カリフォルニア工科大学など多くの大学・研究所があるが、詳細は省略する。

〔活動内容〕 NVO では、その詳細な活動報告を、4 半期ごとにプロジェクトマネージャが行っており、以下のまとめはその 2006 年 4～6 月期の報告^(v)をもとに作成した。

NVO の活動内容は多くの参加機関を含んで多岐にわたっており、ここでは概略のみを記す。また分類に当たっては、データサービスとツールの分類ではなく、上記の報告での分類に従って報告する。

1) システムアーキテクチャ開発関連

- ・グリッドコンピューティング開発プロジェクト GGF (Global Grid Forum) において、標準技術の開発に貢献.
- ・TeraGrid を利用して、USNO PPM や 2MASS などの大量画像データ (数 10 TB) を提供.
- ・画像を合成するツールとしての Montage code の開発.
- ・Web サービス関連技術の DSpace を開発.

2) レジストリの整備関連

- ・xml 形式のメタデータ記述スキーマ VOResource の標準の検討.
- ・レジストリの維持に関し、VOEvent プロトコルを作成.
- ・レジストリのレジストリを作成.
- ・レジストリ検索のためのインターフェイスを改良.

3) データモデル関連

- ・空間一時間座標 (STC) メタデータモデルに合わせた「スペクトル線データモデル」を開発.
- ・STC メタデータモデルの改良.
- ・特徴記述 (characterization) データモデルの開発.
- ・UCD (CDS の項目参照) の開発を通じて、天文用語の概念の整理と体系化を行う.

4) データアクセス関連のツールやプロトコルの整備関連

- ・SSAP (注 iii 参照) などのプロトコルの改良.
- ・VO データアクセスのための Java 言語ツール VOClient の開発.
- ・2次元データ, データキューブなどのデータ形式の扱い方の研究.

5) クエリー言語開発関連

- ・VO クエリー言語 ADQL (Astronomical Data Query Language) の開発.
- ・VO サービスを統合的に利用するためのツール SkyNode の開発.

6) Web および GRID サービス関連

- ・ VOSpace = 各種の VO データを一括して扱うためのワーキングスペースを提供するツール。Web サービスの標準である SOAP をメタデータに適用する。
- ・ Montage = 取得した画像データを合成して、新しい画像を作成するツール。

7) アプリケーション開発関連

- ・ NVO Datascope = レジストリから天体毎あるいは天域毎にデータを探すツール。AstroGrid の AstroScope と同様。
- ・ VOEventNet = 突発的な天文現象を常時監視し、また通報するネットワーク。
- ・ WESIX = Web Enabled Source Identification with XMatching, 天体の、画像とカタログデータのクロスマッチを行う Web サービス。
- ・ WCSFixer = 広く用いられている再像処理ソフト IRAF の操作を、Web サービスとして提供。
- ・ SkyView = 各天体・天域の画像をいろいろな波長にわたって Web で表示するサービス。Java など、各種のインターフェイスを提供。
- ・ Specview = 1 次元のスペクトルデータの可視ツール。
- ・ SNAP = 数値シミュレーションデータ用のプロトコルの開発。

8) サーベイデータベース関連

これについては、前述の NVO 報告書には言及されていないが、米国では、宇宙望遠鏡科学研究所 (STScI) を始めとする多くの研究機関でいろいろなデータベースサービスを行っている。前述の SDSS を始め、DSS, USNO-B1.0, PMM, MAST, ADS, GSC2.3, 2MASS, POSS-I/II, HEASARC などがあるが、ここでは詳細は省略する。

【天文学研究】 前述のように、NVO は研究体制・予算の面で情報技術指向のプロジェクトとなっている。このため Web ページの報告などでもソフト開発などが中心であり、天文学研究についてはあまり報告されてい

ない。しかし実際には、VOの発足直後よりいろいろな天文研究成果が発表されており、現状ではもはやVOの成果であることをとりたてて強調する必要もない状況であると言ってよい。ここでは、最近NVOが奨励金を提供した天文研究テーマを、いくつか紹介する：

- ・ 2MASS データから、合体しつつある銀河を見出す。
- ・ スターバースト後の銀河の周りの、ダストの多いハローを探す。
- ・ 活動銀河核とスターバーストの関係を、赤方偏移 X 線の探査から調べる。
- ・ 隠された中間質量星の探査。
- ・ 赤色系列銀河団のサーベイと、 $z=1$ 近辺のクェーサーの周辺環境。
- ・ 測光的赤方偏移による銀河団の発見。
- ・ VLA の FIRST サーベイ電波源の、Spitzer 望遠鏡 SWIRE サーベイとの比較による広域多波長特性の研究。

4-14. カナダの VO (Canadian VO, CVO)

<http://www2.cadc-ccda.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/cvo/>

〔沿革と組織〕 カナダ天文データセンター (CADC) が中心であり、他にヘルツベルグ天体物理研究所などが協力している。

〔活動内容〕 上記の CADC は、前項の NVO にも参加機関として名前を連ねており、大部分の活動は NVO の範囲内で行われていると考えられる。CADC 独自の開発プロジェクトとして、Observation Catalog Exploration Tools (Octet) というツールがあるが、これは CADC のアーカイブデータから多波長にわたって有効にデータを取得するための補助ツールである。

〔天文学研究〕 広範囲の質量と重元素量をカバーする、恒星進化モデルの計算データ「ヴィクトリア女王モデル」を作成、またデータベースとして提供。

4-15. 中南米の VO

〔沿革と組織〕 中南米ではブラジルおよびメキシコの VO 活動が報告されている。ブラジルでは、国立天文台、国立天体物理研究所、などがコアとなり、前国立情報工学研究所（現 Renato Archer 研究センター）などが協力して VO 活動を行っている。またメキシコでは、国立天体物理・光学・電子工学研究所（INAOE）や、国立自治大学（UNAM）、ソノラ大学などが、スペインや米国と共同しつつ、独自の VO 活動を行っている。

〔活動内容〕 ブラジルでの VO 活動は、現在のところ国内への各種ミラーリングサービス、あるいはリンク先を取りまとめたポータルサービスが中心である。

またメキシコでは、INAOE において、スペインとも協力しつつ PGos3 というサービスシステムを提供している。これは、恒星の種族の解析のための理論モデル（大気モデルなど）や恒星種族のデータベースなどを提供する Web サービスである。またメキシコの UNAM では、太陽 VO（OVS）が、太陽観測データベースの提供などを行っている。

4-16. 日本の VO (Japanese VO, JVO)

<http://jvo.nao.ac.jp/>

〔沿革と組織〕 国立天文台、天文学データ解析計算センター（当時）において、2002 年から JVO の取り組みが開始され、現在に至っている。

〔活動内容〕 JVO ポータルサービスの開発と運用を中心に、次のような活動を行っている。

- ・ VO 上のデータサービスに対する検索ツールの開発。
- ・ 取得したデータの表示機能の開発。これはテーブルやイメージのビューアー、汎用のプロッターなどを含む。
- ・ すばる望遠鏡のデータの解析機能の開発。
- ・ ワークフロー機能の開発。
- ・ グリット技術を応用した並列解析実行システムの開発。

- ・ 日本独自の SkyNode ツールキットの開発.
- ・ VO に対応した形態で、カタログや画像のデータをサービス.
- ・ VO 対応のレジストリサービスの運用.

〔天文学研究〕 $z=1\sim3$ のクエーサーについて、その周辺環境を JVO のツールを用いて解析し、クエーサーや銀河の構造形成史を探る研究、およびすばる望遠鏡のデータを用いた、重力レンズ効果によるコスミックストリングの探査研究、などを行なっている.

4-17. 中国の VO (China-VO)

<http://www.china-vo.org/en/index.php>

〔沿革と組織〕 中国国立天文台 (NAOC)、広天域多天体ファイバー分光望遠鏡 (LAMOST) グループを中心とし、各大学の天文研究グループが協力する形で、VO 活動が行われている.

〔活動内容〕 上記の LAMOST は、4000 本のファイバーを用い、20.5 等級まで分光可能であるので、今後大量のデータの生産が予想される. そこで中国の VO 活動は、このデータの処理やサービスのためのプロセス・ツールの開発作業が中心となる.

またほかのサーベイとして、北京—アリゾナ—台湾—コネティカット (Beijing-Arizona-Taiwan-Connecticut, BATC) 広天域多色サーベイのデータサービスがすでに NAOC の世界データセンター天文部 (WDC-Astronomy) から提供されている.

このほか、デジタル画像データの可視化のためのツール VO_IMPACT, あるいはレジストリから天体データを検索するサービス SkyMouse (AstroScope と同様であるが、簡易化されている) などを開発している.

4-18. インドの VO (VO-India)

<http://vo.iucaa.ernet.in/%7Evoi/>

〔沿革と組織〕 プーンの天文学・天体物理学大学共同研究センター

(IUCAA)を中心に、民間会社の Persistent Systems Pvt. Ltd. (PSPL),
ムンバイのインド工学技術研究所 (IIT), などが関わっている。

〔活動内容〕 インドでは、進んだソフト開発技術を活用して、次のよう
ないろいろなツールを開発している：

- ・ VOConvert=VOTable 形式のデータを FITS や ASCII 形式データ
に相互変換するツール。
- ・ VOTable JAVA Streaming Writer=Java のストリーム出力を逐次
VOTable 形式に変換するツール。
- ・ C++ parser for VOTable=VOTable 形式ファイルにアクセスする
ための C++ ツール。
- ・ VOPlot=多様な天文データをそれぞれに可視化するツール。
- ・ VOMegaPlot=巨大データを扱いやすいように変換しておいて、高
速で描画する。
- ・ FITSManager=FITS 形式ファイルを作成・編集・描画・形式変換
する Web ツール。
- ・ VOStat=R を利用した統計処理ツール。米国で行われているがイ
ンドからも開発に参加している。

これらのツール開発のほか、ヒマラヤ・チャンドラ望遠鏡 (HCT) の
観測データアーカイブシステム開発のプロジェクトも行われている。

4-19. オーストラリアの VO (Australian VO, Aus-VO)

<http://aus-vo.org/>

〔沿革と組織〕 2003 年にシドニーで IAU 総会が開催されたのを契機に、
Aus-VO が、メルボルン大学、英豪天文台、豪州連邦科学産業研究機構
(CSIRO)、シドニー大学などによって組織され、現在に至っている。

〔活動内容〕 サーベイ観測およびそのデータサービス関連で、次のよう
な活動が行われている：

- ・ HIPASS=HI Parkes All Sky Survey, パークスの 64 m 電波望遠鏡

- による中性水素サーベイで、1997～2002年の観測データのサービス。またこれによる4,329の南天の銀河の電波カタログもある。
- ・2QZ=2dF望遠鏡のデータから得られた22,000あまりのクエーサーのカタログ。
- ・ACTA archive=豪州コンパクト電波干渉計（ACTA）の13年間の観測データのアーカイブ。
- ・モロングロ天文台843 MHz電波干渉計による、100,000あまりの電波源のカタログの作成。
- ・6dFGS=UK Schmidtの6dF望遠鏡を用いた南天銀河赤方偏移サーベイで、英国エディンバラ大学の広域天文学ユニット（Wide Field Astronomy Unit, WFAU）と共同で行われている。
- ・RAVE=Radial Velocity Experiment, ドイツのVOの項参照。

またツール類として、画像可視化ツール Remote Visualisation System (RVS)、グリッドコンピューティング利用のツール Distributed Volume Renderer (DVR) などの開発が行われている。

4-20. その他各国のVO活動

以上のようなさまざまなVO活動のほかに、韓国や台湾の研究者によるVOプロジェクトの存在も、IVOAの会議などで報告されているが、2006年秋現在でインターネット上にWebページなどの報告はなされておらず、データセンター活動なども含めてまだ準備中の模様である。

5. 太陽系小天体の表示サービスの構築 (一橋大学におけるVOツール作成の試み)

VOにおける種々のツール・サービスは、基本的にWebサービスを志向しているものであり、最近のWeb 2.0の流れに沿ったものである。以前から提供されているデータサービスなどは、まだ簡単なhtml文のFORM

タグと cgi プログラムによるものもあるが、新しいものは Java servlet, JSP や tomcat サーバを多用したものが主流となっている。またデータの授受には xml 形式や SOAP プロトコルが用いられる。

そこで本研究においても、これらの技術を利用した Web サービスのプロトタイプを作成し、今後の技術動向を実際に検討することとした。

作成した Web サービスは、小惑星など、軌道の求められている太陽系小天体について、特定の天域・時間でどのように観測されるかを図示するものであり、たとえば天体写真の撮影の際に画面に写るはずの小天体の移動映像を、図 1 のように見ることができる。

この Web サービスのデータ処理手順は次のようになっている：

- ・クライアントがサービスにアクセスすると、JSP プログラムがリクエスト入力画面を提示し、またそこに入力されたリクエストを受け取る。(入力フォームにはデフォルトのデータが入っており、図 1 の例はそのデータによる出力である。)
- ・受け取ったリクエストは、servlet プログラムによって SkyBot サービス (フランス VO の項参照) に渡される。
- ・結果は xml の VOTable で受け取るので、そのパーサープログラム SAVOT (CDS の項参照) を利用してデータを解析、表示プログラムに渡す。
- ・表示プログラムは Java applet で、これを JSP プログラムを介してクライアントに送信する。

以上のようにこのサービスは簡単なプログラムであるが、一応の Web サービスの流れをカバーしており、これによって種々の検討を行うことができる。詳細な検討は、さらに大掛かりなシステムにおいて行わねばならないと考えられるが、このような簡単なケースでも、複雑なプログラム構造、長い処理時間など、いろいろな問題点が指摘される。これについての検討は、VO 全体の問題として、次の節で考察する。

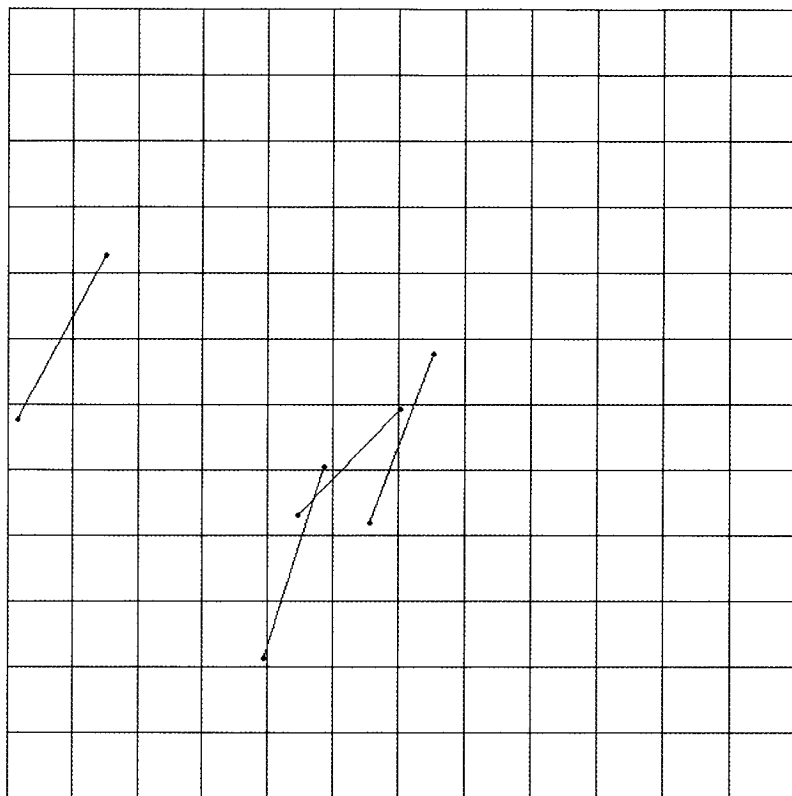


図 1. 太陽系小天体の移動映像の表示例

6. VO 活動についてのまとめと検討

以上のように、現在の天文データに関する研究開発活動は、情報科学やインターネットの研究開発と足並みをそろえて、VO という世界的な大きな潮流の中で行われているといえる。一つの研究プロジェクトが、このように世界的かつ統合的に進められるというのは、あまり前例のないことではないだろうか。事業の遂行の面から言えば、たいへん好ましい流れであると言えよう。

前報告においては、天文データセンターの概念は、サービス業務主体の図書館のようなものとしてとらえられ、天文学全体の発展のためにどこかが「犠牲」となってこのようなサービスを提供しなければならない、あるいは皆が少しずつ協力して実現してゆかねばならない、というようなものであった。

これに対し、今回の VO の概念は、データサービス自体が大きな研究テーマであり研究目標であるようにとらえられている。各地でかなりの予算措置が取られていることが、これを良く示している。実際、一般の人々の生活やビジネスの世界で、インターネットやそこでの Web サービスをどのように活用するか、またこれらが今後どのように発展してゆくかというのが、現在各方面の大きな関心を集めている状況であり、このような流れが VO の活動を後押ししているということも考えられる。

このような状況は確かに好ましいことではあるが、やはり天文学の究極の目標にはなりえないことであろう。したがって今後は、どこかに具体的な到達目標を設定し、そこに到達した時点でプロジェクトを整理終了するというを常に考えなければならないのではなかろうか。これについてはまだ、現時点では具体的なことは言えないが、たとえば、各種の VO 標準がある程度固まり、天文台、観測所、衛星プロジェクトなど、各データサービスの主体がこれらに則ってデータを提供できるようになれば、計画終了と考えてよいのではないだろうか。最も避けなければならないことは、計画がいつまでも続くと考えてなかなか結論を出さず、そのうちにエネルギーが途絶えて中途半端に終わってしまうということであろう。

このように考えると、VO プロジェクトで最も重要なことは、いろいろなツールを開発することよりも「VO 標準」をどのように決めるかということであると考えられる。実際これについては、IVOA の Web ページにその進行状況が逐一報告されており、順調に進んでいると考えられるが、これを早く決定して広く利用するという意識が、各方面でまだ希薄であるように見受けられる。

また本報告の中で、「サーベイ」と呼ばれるデータサービスの活動についてもできるだけ詳細にまとめてきたが、このようなサービスは本来の天文学研究に該当するものであり、上述のような VO の計画の終了後も引き続き追求されるべき研究活動である。むしろ、天文データサービスは今後このような形でさらに発展すべきものではないだろうか。

サーベイなどのデータは今後ますます膨大なものになり、またデータの取得についてもビッグサイエンス的なコストが要求される。このような場合、これまでの天文カタログデータサービスのように 1 箇所のデータセンターで集中的にサービスするというのは不可能である。そこで、各サーベイ等の実施主体が、それぞれサーバを維持しつつ Web サービスを提供する、ということが不可避である。そしてこのような状況を円滑に実現・維持するのが「VO 標準」であり「VO ツール」であると言える。

ところで、これまでの天文カタログデータは、その作成者の提供するものはさまざまな問題や例外部分、さらには誤りなどを多く含んだものとなっており、そのままではとてもユニフォームなデータサービスとしては提供できない、ということが多かった。これを整理修正し、標準的な形式にしてサービスに乗せるということが、たとえば CDS などのデータセンターの大きな仕事であった。これには筆者も関わっており、日々実感しているところである^(vi)。このようなことが、今後各データ提供者が自身でデータサービスを行うようになるとどういう状況になるだろうか。実際このような問題のために VO 標準があるわけであるが、これまでの筆者の経験からすると、状況はかなり困難であるように思われる。特に VO 標準が、仮に非常に論理的なものであったとしてもたいへん複雑なものである場合には、なかなか利用されないのではないと思われる。現状の、xml などを多用する標準体系では、それにマッチしたサービスコードを構成するコストは多大なものになると考えられる。実際、我々の開発した Web サービスプロトタイプでさえ、かなりの負荷を生じることが実感されている。まして信頼性ということになると、我々のサービスは他者のサービス

に幾重にも依存しているわけであり、信頼性は指数関数的に減少してしまうのではないかという懸念が生じる。

信頼性ということは、VO データやツールを利用した研究において、さらに重要になると考えられる。確かに近年は、データの解析などはなるべく迅速に行い、結果を早期に出すことが重要となりつつある。しかし研究活動において誤った解析や計算は絶対に避けなければならないことは、昔も今も変わりはないことである。VO ツールなどを使用した場合でも、独自の別の方法で再度確認の計算を行うことは不可欠であろう。この点に関し、現在の VO プロジェクトの流れは異なった方向を指向しているように思われる。解析結果がデリケートであるような研究に関しては、実際に観測装置を動かして、自身で確認するということが必要なのではないだろうか。

いずれにしろこのような問題は、学問研究の根幹に関わっている問題であり、軽々に論ずることはできない。今回の VO の事例を、各自が、本質的な観点から見据えてゆくことが肝要であろう。

本報告は国立天文台 JVO グループの各氏、とりわけ大石雅寿助教授、水谷好彦教授、白崎裕治上級研究員の多大の後援と助言を得てはじめて世に出たものであり、ここに各氏に深甚なる謝意を表する。また本報告の web サービスプロトタイプ「太陽系小天体の表示サービス」は、筆者の構想に基づいて、一橋大学、大学教育研究開発センターの辻村とも子助手が主にコーディングを行ったものであり、記して感謝する。またこのサービスは、筆者の一橋大学在職中に、地学研究室のサーバを用いて作成・提供した。

各種 VO の技術やサービスの調査は、国立天文台、天文データセンター、一般共同利用計算機システムを利用して行った。

国際天文学連合総会（於チェコ、プラハ、2006 年 8 月 14～25 日）における VO の調査は、国立天文台、天文データセンター研究費の補助によ

って行われた。

註

- (i) 一橋大学研究年報, 自然科学研究 29 (1994 年 12 月) pp 3-33
- (ii) Sloan Digital Sky Survey, <http://www.sdss.org/> を参照
- (iii) Simple Image Access Protocol (SIAP), Simple Spectrum Access Protocol (SSAP), Simple Numerical data Access Protocol (SNAP) など.
- (iv) Registry. VO の中核的な機能の一つで, VO 関連データ群の所在や形式・内容を保持するデータベース, 「メタデータ」とも呼ばれる.
- (v) Quarterly Report April-June 2006 : “Building the Framework for the National Virtual Observatory”, Robert Hanisch (STScI)
- (vi) これに関しては, 別報 Hitotsubashi Journal of Arts and Sciences, Vol. 47, No. 1 (2006) pp 1-7 参照.