

## 膨大な天体データを効率的に検索する方法の考察と実装

田中 昌宏<sup>†</sup> 白崎 裕治<sup>†</sup> 大石 雅寿<sup>†</sup> 水本 好彦<sup>†</sup> 石原 康秀<sup>††</sup>  
堤 純平<sup>††</sup> 町田 吉弘<sup>††</sup> 坂本 道人<sup>†††</sup> 中本 啓之<sup>†††</sup> 小林 佑介<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 国立天文台

<sup>††</sup> 富士通(株)

<sup>†††</sup> (株)セック

E-mail: [†masahiro.tanaka@nao.ac.jp](mailto:†masahiro.tanaka@nao.ac.jp)

あらまし 我々は、世界中の天文台が観測したデータを配信するための統一的な規格を策定し、その規格に基づく天文データ配信システムであるヴァーチャル天文台の構築を進めている。これが普及すれば、誰でも膨大な量の天体データに容易にアクセスできるようになるが、その膨大なデータの中から必要なデータを見つけ出すことは容易ではない。そこで我々は、あらゆる天体データについて、その情報の一部をキャッシュすることにより、膨大な天体データを効率的に検索するシステムを開発した。この際に用いた、天文用途における効率的な検索方法とデータベース構造について考察する。

キーワード 科学 DB, 天文 DB

## Implementation of an Efficient Search Method for Large Astronomical Databases

Masahiro TANAKA<sup>†</sup>, Yuji SHIRASAKI<sup>†</sup>, Masatoshi OHISHI<sup>†</sup>, Yoshihiko MIZUMOTO<sup>†</sup>,  
Yasuhide ISHIHARA<sup>††</sup>, Jumpei TSUTSUMI<sup>††</sup>, Yoshihiro MACHIDA<sup>††</sup>, Michito SAKAMOTO<sup>†††</sup>,  
Hiroyuki NAKAMOTO<sup>†††</sup>, and Yuusuke KOBAYASHI<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> National Astronomical Observatory of Japan

<sup>††</sup> Fujitsu Ltd.

<sup>†††</sup> SEC Co. Ltd.

E-mail: [†masahiro.tanaka@nao.ac.jp](mailto:†masahiro.tanaka@nao.ac.jp)

**Abstract** We have developed a Virtual Observatory (VO) system, aiming at easy access to astronomical data in the world. In this activity, we have defined international standard protocols to access astronomical data, and implemented a system based on those protocols. However, the VO architecture does not always alleviate inefficiencies in retrieving all the available information on a certain astronomical object. We thus developed a new efficient search system by caching all the available astronomical data to our unified database. We discuss a fast search method and the architecture of the unified astronomical database including billions of celestial objects.

**Key words** Science DB, Astronomical DB

### 1. はじめに

世界中の天文台では日々観測を行っており、データは蓄積され続けている。その上、天文観測装置も進化し続けており、それによって発生するデータの量も増え続けている。こうして蓄えられたデータを有効活用するため、Virtual Observatory (VO)

と呼ばれるプロジェクトが各国で進められている。VO とは、観測により蓄積された膨大な量の天体データの中から容易にデータを発見できるような仕組みを、情報処理技術によって実現する取り組みである。世界中の天文データを共通に利用できるようにするため、各国の VO プロジェクトが IVOA [1] において連携し、天文データ配信についての統一的な規格を策定し

てきた。その成果には次のようなものがある。天文データサービスの発見を容易にするため、天文メタデータの標準仕様を XML 形式で定義し、そのメタデータを OAH-PMH を用いて配信するという標準仕様が決まった。また、天体データを格納するフォーマットとして、従来から存在する FITS データフォーマットの他に、VOTable という XML によるテーブルデータの仕様が策定された。その他、画像データ配信プロトコルとして SIAP、天体データベースを検索するための SQL を基づく天文検索言語 ADQL [2] といった仕様が策定された。

日本では、Japanese Virtual Observatory (JVO) [3] というプロジェクトを我々が進めている。JVO では、SQL に基づく天文検索言語を開発した。これが IVOA における標準天文検索言語の基になった。また、VO へのアクセスを簡単な操作で行うための Web アプリケーションである JVO ポータルシステム [4] [5] を開発した。このポータルは現在公開 [6] しており、一般ユーザも利用できるようにしている。

## 2. 統合天体データベース

この VO が天文研究にとって実際に役に立つかどうかは、実際の天文研究における VO の利用方法について考える必要がある。天文では観測データというわずかな手がかりから天文現象の本質を理解することが求められる。そこで、近年の天文研究では、銀河や星など、ある天体について詳しく研究する場合、電波・赤外線・可視光・紫外線・X 線・ガンマ線という多くの波長のデータを組み合わせることが必要になってきている。また、変光星や超新星、ガンマ線バーストなど、明るさの変化が重要な場合には、時間をおいた複数の観測データが必要となる。このように、異なる観測装置によるデータが天文研究には不可欠であり、このとき多くのデータを効率的に集めるために VO を用いることが想定される。

一方、VO によって公開される天文データは、すばるのデータは国立天文台、ハッブル宇宙望遠鏡のデータはアメリカの Space Telescope Science Institute というように、それぞれ観測を行った研究機関により配信されることが多く、別々のサービスとして提供される。そのため、どのサービスに目的の天体が含まれているかわからない場合には、それらのサービスすべてについて検索しなければすべてのデータを得られない。しかしこの手法は次に述べるように非効率である。第一に、すべての天体データ配信サービスにクエリを送信しなければならない。第二に、全天くまなく観測した例はわずかであり、多くの場合は天の一部の領域しか観測していないため、問い合わせたサービスに目的の天体が含まれている確率は小さい。この様子を模式的に図 1 (上) に示す。このように、VO が普及し多くのデータ配信サービスが立ち上がっただけでは、ある天体について多くの観測データを効率的に集めたいという天文研究者の要望がかなうわけではない。

そこで、我々は、Web 検索サイトがあらゆるサイトのページを収集して効率的に検索ができることになり、天体データについても、配信されている天体データを集めて「統合天体データベース」(図 1 下) を構築し、このデータベースに対して効率

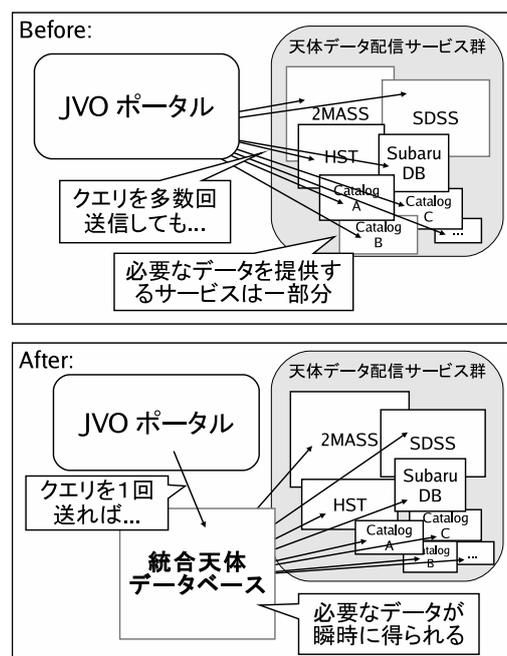


図 1 統合天体データベースによる検索効率の向上  
Fig. 1 Efficient Query with Unified Astronomical DB

的に検索する手法を考察した。以下ではこの手法によるデータベースの設計について述べる。

## 3. 天球面インデクスによるテーブルパーティショニング

統合天体データベースの構築にはリレーショナルデータベースシステムを利用するが、登録する天体数が多いため、検索性能が問題となる。大規模な天体カタログの例として、2MASS [7] 全天カタログは約 5 億、SDSS DR6 [8] カタログは約 3 億もの天体のデータを含んでいる。このように、少なくとも 10 億天体のデータを瞬時に検索できるデータベースが必要である。そこで、レコード数が多いデータベースを効率的に検索するための手法として、テーブルパーティショニングを用いた。

天文検索では、天球座標による検索が基本であることから、天球座標によるテーブルパーティショニングをおこなった。天球座標のインデクス化の手法として、HTM (Hierarchical Triangular Mesh) [9] [10] と HEALPix [11] の 2 種類の方式が提案されている。我々は利用実績のある HTM を採用した。

HTM による天球面の分割の概念図を図 2 に示す。HTM では、まず天球面を  $x$ - $y$ ,  $y$ - $z$ ,  $z$ - $x$  軸をそれぞれ含む大円で 8 分割する。それぞれの領域は 3 つの大円を辺に持つ球面三角形であり、北側は  $N_0, N_1, N_2, N_3$ 、南側は  $S_0, S_1, S_2, S_3$  というインデクスをつける。それらのうちの 1 つの球面三角形に着目して、3 辺の中点を結ぶ線で区切ると、さらに 4 つの球面三角形の領域に分割できる。 $S_0$  の領域を分割してできた 4 つの領域には、 $S_{00}, S_{01}, S_{02}, S_{03}$  というインデクスをつける。同様のことを繰り返すことにより、さらに細かい領域へと分割することができる。このように球面三角形の 4 分割を繰り返

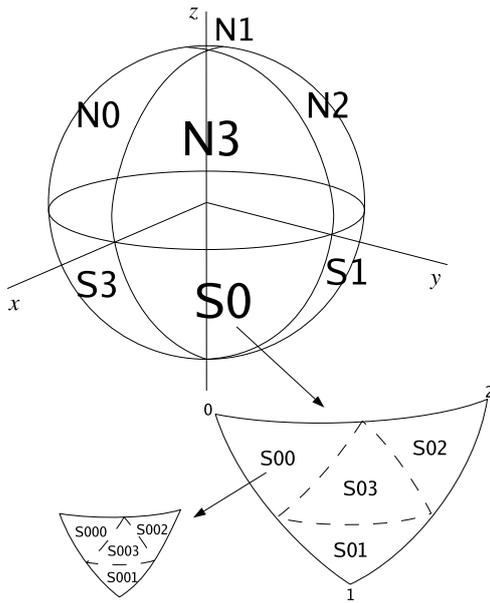


図 2 HTM による天球面の分割  
Fig. 2 Splitting the Celestial Sphere by HTM

すことにより、天球面上の領域を分割しインデックス化する手法が、HTM である。最初の 8 分割をレベル 0 と呼び、次の 4 分割はレベル 1 と呼ぶ。したがって、レベル  $N$  では、天球面を  $8 \times 4^N$  分割することになる。1 回の分割は 4 であるから、これを 4 進数とみなせば 10 進整数に対応づけることができる。このとき、最上位ビットを常に 1 にしておき、レベル 0 では、N0 は 8、N1 は 9、...、S9 は 15 とする。レベル 1 では、N00 は 16、...、S33 は 63 とする。こうすることにより、数値から分割レベルを判別できる。

HTM のレベルを決めれば、与えられた天体の座標が属する HTM インデックスが決まる。レベルが大きいほど位置の精度が良くなるが、桁が大きくなってしまふ。ここでは、0.3 秒角の精度に相当するレベル 20 を採用する。

天体データを DB のテーブルに格納する際、この HTM インデックスによりパーティショニングを行った。今回は、天球全体をレベル 6、すなわち  $8 \times 4^6 = 32768$  で分割し、その領域ごとにテーブルを分けた。分割したテーブル名は、psc\_32768, psc\_32769, ... , psc\_65535 とした。これらのテーブルに対して座標による検索を行うには、座標の範囲条件から HTM の範囲条件に変換する必要がある。VO では、検索条件の記述に、SQL を拡張した天文検索言語 ADQL [2] を用いる。ADQL では座標検索を次のように記述する。

```
select ra, dec, j_m
from psc where Region('Circle 0 0 1');
```

ここで Region('Circle 0 0 1') は ADQL 拡張構文であり、天体の座標が赤経 0 度赤緯 0 度半径 1 分角以内であるという条件を表す。この座標範囲に対応する HTM の範囲がわかれば、どのテーブルを検索すべきかがわかる。この HTM 範囲の計算には、HTM 開発者による Java ライブラリを利用した。HTM

の範囲がわかれば、パーティショニングテーブルに対する検索条件は、サブクエリを用いて次のように記述できる。

```
select ra, dec, j_m
from ( select * from psc_63488 where
      htm_id between 0 and 65535
union select * from psc_63488 where
      htm_id between 217088 and 218111
union select * from psc_47104 where
      htm_id between 0 and 65535
...
) psc;
```

こちらの構文は標準 SQL に基づいているから、そのまま RDB に送信できる。この座標範囲構文を置換するプログラムは Java で実装した。ところで、この HTM 範囲条件だけでは厳密には円の領域を表すものではないため、さらに領域の境界条件を加える必要がある。

#### 4. 提案手法による検索効率の測定

前節で述べた手法による検索性能を測定した。測定の際に 2MASS カタログの全 5 億天体のデータを用いた。利用した RDBMS は PostgreSQL version 8.2、OS は Linux、用いたマシンの CPU は Pentium-4 2.8 GHz、メモリーは 2 GHz である。検索に要した時間を、検索範囲を変えて測定した結果を表 1 の「独自方式」の項目に示す。この経過時間には、天球座標から HTM インデックスへの条件変換にかかる時間 (0.5 秒以下) は含まれていない。測定の結果、検索半径が 1 分角という天体近傍の検索では、0.04 秒と瞬時に済むことがわかった。さらに、半径 180 分=3 度、天体数で約 6 万という、天文においては広い範囲の検索についても、1 秒以下という比較的短時間で検索できることがわかった。このように、我々の手法は大規模な天文データベースにおいても十分な性能を持つことがわかった。

ところで、PostgreSQL には、version 8.1 よりパーティショニング機能が導入されている。この機能を用いることにより、パーティショニングテーブルをあたかも 1 つのテーブルのように SQL を書くことが可能であり、前節のようなサブクエリを用いる必要がなくなる。そこで、このパーティショニング機能が利用できるかどうか検証するため、両者の性能の比較を行った。ところが、前節と同様にテーブルを分割した上で PostgreSQL のパーティショニング機能を用いると、検索ができないことがわかった。理由は、テーブル数が多すぎるため、検索の際に多くの shared memory を必要とし、不足するからである。我々の環境では、テーブル数を 16 分の 1 にすると動作するようになったため、その条件で測定した。結果を表 1 の「PostgreSQL」の項目に示す。その結果、検索半径 1 分角でも 6 秒、半径 1 度では 9 秒と、1 回の検索でもしばらく待たされるという結果となった。しかも、検索半径と検索時間が相関していない。表 1 には where 句に含まれる HTM 範囲条件の数も示しているが、検索時間はむしろその HTM 条件数と相関しているように見える。これらの結果から、理由は不明だが、現時点の PostgreSQL の

表 1 パーティショニング性能測定結果

Table 1 Performance of Partitioning Table

検索半径	天体数	経過時間 (秒)			HTM 条件数	
		独自方式	PostgreSQL	比	独自方式 <sup>1</sup>	PostgreSQL <sup>2</sup>
1	2	0.04	6.46	154	32	32
10	165	0.03	3.81	127	16	16
60	6697	0.11	6.47	60	32	32
100	26720	0.31	2.02	7	16	4
180	57246	0.71	9.04	13	72	48

1: union でつなげたサブクエリ条件数

2: where 句中における between でつなげた HTM 条件数

パーティショニング機能は検索性能を十分には発揮できていないようである。このため、「統合天体データベース」は前節で述べたような独自の実装で構築することとした。

## 5. テーブルの設計

次に統合天体データベースのテーブル設計について述べる。一般的な天体カタログはテーブル形式のデータである。多くの場合、1行が1天体に対応し、1天体について多くの種類のデータがカラムとして並べられる。そのデータのうち主なものは、座標 (赤道座標)、明るさ (可視光では主に等級)、およびそれらの誤差である。明るさのデータとして、Bバンド (青)、Vバンド (緑)、Rバンド (赤)、Iバンド (赤外) など、いくつかの波長について記載されることが多い。その他のデータとして、銀河であれば視直径や赤方偏移 (地球から遠ざかる速度の指標であり距離の指標になる) などのデータが加えられることもある。このように、カラムの種類は天体カタログによって様々である。こうした多種多様な天体カタログを、そのまま1つのテーブルにすることは困難である。明るさのカラムだけでX線から電波まで数え切れないほどの種類があり、特殊な波長で観測される場合もある。そこで、従来の1行に1天体の情報を含む形式ではなく、1行に1つの明るさのデータを含むようなテーブル設計とした。このようなテーブル形式を持つ例として、論文に掲載された赤外線観測データをまとめた Catalog of Infrared Observation [12] という天体カタログがある。

このような設計にした場合の問題は、上で述べたような明るさ以外の様々なデータをどう扱うかということである。ここでこの統合天体データベースの目的を考えると、様々な天体カタログをキャッシュして高速な範囲検索を実現することであった。したがってデータベースを複雑化してすべてのデータを取り込むことはせず、座標や明るさなどの基本的な情報のみを保持することとした。一方で、元の天体カタログに存在し、統合天体データベースに含まれないデータが必要な場合もある。そこで、統合天体データベースには元のデータを配信しているサービスへのリンク情報を保持し、必要であればその情報を基に元のサービスにアクセスすることにより、すべての情報を引き出すことが可能になる。

このような方針に基づき、設計したテーブルのカラムのリストを表2に示す。以下にこれらのカラムについて説明する。

表 2 統合天体データベースのカラム設計

Table 2 Columns in the Unified Astronomical DB

category	column	description
Object	id	Object ID
	name	Object name
Position	ra	Right Ascension
	dec	Declination
	pos_err	Position Error
	htm	HTM index
Wavelength	band_name	Band name
	band_unit	Unit of band
Flux	flux	Flux value in catalog
	flux_err	Flux error
	flux_unit	Unit of flux
	flux_srch	Flux in Jy
Reference	link_ref	Link URL to reference
	org_id	ID in original catalog
	cat_id	Catalog ID

### a) Object カラム

カラム id はこの統合天体カタログにおいて一意な ID 番号であり、カラム name はこの天体の名称である。

### b) Position カラム

天体カタログには必ず天体の座標が記載されているが、その座標系にはいくつか種類がある。統合天体カタログでは、現在一般的に用いられる 2000 年分点の赤道座標系に統一し、カラム ra に赤経、カラム dec に赤緯を格納する。単位は度とする。天体の位置の精度は観測装置や観測条件により異なるため、位置の精度をカラム pos\_err に格納する。この位置の精度は、東西南北の方向によって異なる場合があり、誤差を形にすると円でなく楕円であったり他の形であったりする。ここでは単純化のため、最大の誤差を使用することとする。カラム htm には HTM インデックスを格納する。

### c) Wavelength カラム

天体の明るさは、特に可視光・赤外線では、ある波長範囲だけ透過するフィルターを通して測定されることが多い。よく用いられる標準的な波長帯 (バンド) には、V バンドというように名前がつけられている。統合天体データベースのテーブルには、カラム band\_name を設け、天体の明るさを測定したバンド名をここに格納する。明るさを測定した波長帯が一般的なバンドでない場合や、波長が記されている場合などは、その中心波長を band\_name に格納する。その場合、波長の単位を band\_unit に格納する。

この波長情報のカラムを含むことが、通常为天体カタログと大きく異なる部分である。通常为天体カタログでは、1つの明るさのカラムは同じバンドで測定されたものであるから、波長のカラムを必要としない。

### d) Flux カラム

明るさのデータはカラム flux に格納する。明るさにはさまざまな単位がある。可視光では等級の単位が主流である。その他の波長域ではエネルギーの単位などが用いられる。その単位

をカラム flux\_unit に格納する。また、明るさの誤差をカラム flux\_err に与える。

天体の明るさを比較する場合は、同じ単位系にする必要がある。そこで、天体データをデータベースに格納する際に、天文において標準的な明るさの単位であるジャンスキー (Jy) に変換し、flux\_srch カラムに格納する。これにより明るさの単位が異なっても比較できるようにする。ただし、バンドが違ったり、同じバンドでも透過特性が異なる場合などは、明るさを正しく比較できない可能性がある。flux\_srch カラムは、あくまで目安として使用し、利用者は収集したデータから総合的に判断すべきである。

#### e) Reference カラム

cat\_id カラムは出典の天体カタログを表す ID である。この ID には、IVOA で策定された識別子の仕様に則ったものを用いる。org\_id カラムは出典カタログ内における ID である。たいの天体カタログには、その天体ごとの ID 番号あるいは記号が付与されており、これによって同一天体についてのデータであることを判別する。link\_ref カラムはリンク情報を示し、データを提供するサービスへの URL である。これら 3 つの情報に基づいて元のサービスへアクセスすることにより、元のカタログから詳細な情報を取得することが可能になる。

## 6. ユーザインタフェース

この統合天体データベースは、現在 2MASS など一部のデータを登録して JVO ポータル [6] から利用できるようにしている。ユーザインタフェースは図 3 のようにシンプルであり、検索結果は図 4 に示す機能豊富なテーブルブラウザから閲覧することができる。今後は順次データを増やしてゆき、VO から利用できるほとんどのデータを登録する計画である。

## 7. 今後の課題

### 7.1 テーブルの正規化

今回設計したテーブルは、出典のカタログを外部の情報とリンクすることにより、冗長性を減らしている。その他に、1 つの天体に対して複数の明るさのデータが存在するという冗長性が残っており、理論的には正規化が可能である。今回は、データベースの管理が煩雑になると予想されるため、さらなる正規化は行わないこととした。

### 7.2 統合天体データベースの管理

今後、統合天体データベースへデータを追加・削除するという管理が必要になるが、膨大な量のデータを管理することは容易ではない。VO の世界には非常に多くの種類のデータが配信されるため、手作業ですべてのデータを追加することは不可能である。そのため、データ管理の自動化が必須となる。

公開される天体カタログは、通例では一部が頻繁に書き換えられるようなものではない。新しいバージョンが出るとしても、丸ごと新たにリリースされる場合がほとんどである。したがって、データの更新の単位は、その天体カタログごと行うことを考えればよい。つまり、天体カタログの単位で、追加・削除ができればよい。そのような作業が容易に行えるインタフェース

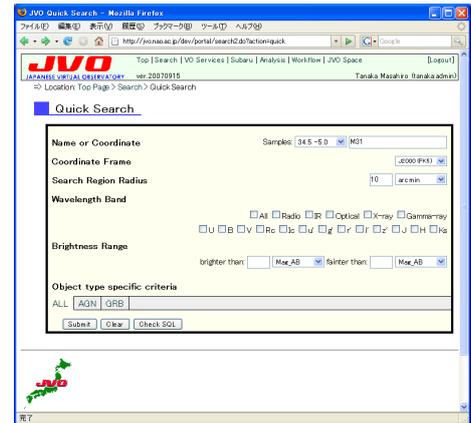


図 3 天体検索インタフェース

Fig. 3 Query Interface for the Unified Astronomical DB

Alias Name	ID	NAME	RA	DEC	POS_ERR	LINK_REF	CAT_ID	BAND	NAME	BAND_CENTER	BAND_UNIT	FLUX	FLUX_ERR	FLUX_UNIT	FLUX_SRCH
0	187	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	H	1.6	um	15.146	0.163	mag	0.00029701		
1	188	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	H	1.6	um	15.217		mag	0.00024208		
2	189	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	Ks	2.15	um	15.404		mag	0.00049794		
3	190	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	J	1.26	um	15.000	0.076	mag	0.00064147		
4	191	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	H	1.6	um	14.864	0.091	mag	0.00119012		
5	192	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	Ks	2.15	um	14.402	0.072	mag	0.00110481		
6	193	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	J	1.26	um	14.616	0.163	mag	0.00040892		
7	194	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	H	1.6	um	15.056	0.155	mag	0.00047708		
8	195	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	Ks	2.15	um	15.203	0.151	mag	0.00004475		
9	196	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	J	1.26	um	14.782	0.167	mag	0.00020703		
10	197	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	H	1.6	um	15.004	0.153	mag	0.0000199		
11	198	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	Ks	2.15	um	15.440	0.203	mag	0.00007722		
12	199	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	J	1.26	um	14.692	0.166	mag	0.00001798		
13	200	10.284402	41.284405	5e-05	Lik	Increase	H	1.6	um	17.766		mag	0.00113073		

図 4 検索結果表示画面

Fig. 4 Result table Browser

が必要となる。

その他に、テーブル変換の自動化も必要になる。天体カタログのデータを統合天体データベースに追加する際、前述のように両者のテーブルの形式が異なることから、天体カタログから座標や明るさのデータを探してテーブルを再構築する必要がある。ここに VO の成果が利用できる。IVOA では、UCD (Unified Content Descriptors) と呼ばれるデータの意味を表すための語彙のセットが定義されている。VO で配信される天体カタログには、この UCD によるカラムの意味づけが行われている。したがって、VO を通じて得られたデータについては、統合天体データベースに格納するデータ項目を、UCD から自動判別することが可能である。

以上のような自動処理方法を実装することにより、あらゆる天体データを格納することが実現できれば、統合天体データベースは天文研究にとって非常に有益なものとなるはずである。

## 8. まとめ

天文学研究において VO サービスを利用する際の効率の問題から考えた統合天体データベース、およびその実現のために開発した効率的な検索手法とテーブル設計について述べた。実装したデータベースは、一部のデータを登録して JVO ポータル [6] のサービスとして公開しており、一般ユーザでも利用できる。今後このデータベースに登録するデータを拡充する予定

である。

## 文 献

- [1] International Virtual Observatory Alliance. <http://www.ivoa.net/>.
- [2] N. Yasuda, Y. Mizumoto, M. Ohishi, W. O’Mullane, T. Budavári, V. Haridas, N. Li, T. Malik, A. S. Szalay, M. Hill, T. Linde, B. Mann, and C. G. Page. Astronomical Data Query Language: Simple Query Protocol for the Virtual Observatory. In F. Ochsenbein, M. G. Allen, and D. Egret, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIII*, Vol. 314 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 293, July 2004.
- [3] M. Ohishi, Y. Shirasaki, M. Tanaka, S. Honda, N. Yasuda, Y. Masunaga, Y. Ishihara, J. Tsutsumi, H. Nakamoto, and Y. Kobayashi. Development of Japanese Virtual Observatory (JVO) : Experience on Interoperation with other Virtual Observatories and its Future Plan. In C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, and S. Enrique, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, Vol. 351 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 375, July 2006.
- [4] Y. Shirasaki, M. Tanaka, S. Honda, S. Kawanomoto, N. Yasuda, Y. Masunaga, Y. Ishihara, J. Tsutsumi, H. Nakamoto, and Y. Kobayashi. Japanese Virtual Observatory (JVO): implementation of VO standard protocols. In C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, and S. Enrique, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, Vol. 351 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 456, July 2006.
- [5] 田中昌宏, 白崎裕治, 本田敏志, 大石雅寿, 水本好彦, 安田直樹, 増永良文. パーチャル天文台 JVO プロトタイプシステムの開発. 日本データベース学会 Letters, Vol. 3, No. 1, pp. 81–84, 2004.
- [6] JVO portal. <http://jvo.nao.ac.jp/portal/>.
- [7] M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D. G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J. D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, K. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. Van Dyk, and S. Wheelock. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *Astronomical Journal*, Vol. 131, pp. 1163–1183, February 2006.
- [8] J. K. Adelman-McCarthy and for the SDSS Collaboration. The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *ArXiv e-prints*, Vol. 707, , July 2007.
- [9] P. Z. Kunszt, A. S. Szalay, I. Csabai, and A. R. Thakar. The Indexing of the SDSS Science Archive. In N. Manset, C. Veillet, and D. Crabtree, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems IX*, Vol. 216 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 141, 2000.
- [10] Hierarchical Triangular Mesh. <http://www.sdss.jhu.edu/htm/>.
- [11] K. M. Górski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, F. K. Hansen, M. Reinecke, and M. Bartelmann. HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere. *Astrophysical Journal*, Vol. 622, pp. 759–771, April 2005.
- [12] D. Y. Gezari, P. S. Pitts, and M. Schmitz. Catalog of Infrared Observations, Edition 5, July 1999.