

Digitized Sky Survey 広域画像作成システムおよび ウェブインターフェースの開発

多賀正敏, 青木賢太郎*, 渡辺大*, 安田直樹, 市川伸一

(2000年10月16日受理)

Development of a New Image Extraction System and a Network Access Interface for the Digitized Sky Survey

Masatoshi TAGA, Kentaro AOKI*, Masaru WATANABE*,
Naoki YASUDA and Shin-ichi ICHIKAWA

Abstract

We have developed a new image extraction system for the STScI Digitized Sky Survey, which is able to create an image of 6×6 degrees at most. The image we provide with this system is the largest one in the optical wavelength in the world, and is useful for the comparison with images of other wavelength. The function to select the image direction and the pixel scale is also newly implemented. A network interface is set up to allow access to this system with web browsers.

1. 序

米国 Space Telescope Science Institute (STScI) のプロジェクトである Digitized Sky Survey 1st/2nd (DSS-1/2) は、北天はパロマー天文台の Oschin Schmidt 望遠鏡、南天はアングローオーストラリア天文台の UK Schmidt 望遠鏡で撮影した写真乾板を全面スキャンしてデジタル化したもので、可視光における基礎データとしてさまざまな研究分野で利用されている。特に最近では、さまざまな波長の観測データを総合的に利用した研究がさかんになってきており、全天で画像が得られる DSS は、電波や赤外線、X 線のデータと比較するための中核となる画像として欠かすことのできないものになっている。

国立天文台天文学データ解析計算センターでは、STScI から DSS データの配布を受け、赤外および電波のサーベイデータである IRAS Sky Survey Atlas および Green Bank Sky Map 1.4GHz/4.85GHz とともにウェブ上で公開している^{#1)}。また、大量の画像を取得したいユーザーのために、電子メールによるリクエストを受けて画像を作成するバッチ処理サービスを行っている。DSS の画像サービスを

行っている機関は、天文学データ解析計算センターの他にもいくつか存在するが、このバッチ処理サービスは天文学データ解析計算センターのみが行っているもので、国内外から非常に多くの利用があり、小惑星の発見など直接的な天文学的成果にもつながっている。また、最近では宇宙科学研究所の宇宙科学企画情報解析センターとの協力のもと、複数の画像データを重ね合わせた画像をウェブブラウザ上で手軽に見られるようにした多波長画像表示サービス MAISON (Multiband Astronomical Imaging Service ON-line) の開発が進んでいるが^{†2)}、天文学データ解析計算センターが提供している DSS は、MAISON システムの中核となる画像サーバーでもある。

任意の天域の DSS の画像は、STScI が開発した getimage と呼ばれるプログラムで、乾板のデジタル化画像から作成される。しかしながら、それによって切り出された画像を他の波長の画像と重ね合わせたり比較したりしようとする時に、以下のような重大な問題が起きる。一般に、現在利用できる電波やX線の画像は、ピクセルサイズが可視光の画像に比べて大きく、数度四方位程度の領域の画像を扱うことも多い。ところが、getimage では、作成できる画像の最大サイズがおおよそ $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ に限られている。また、ピクセルサイズは写真乾板をスキャンしたときのサイズ(DSS-1 で 1.7秒/ピクセル, DSS-2 で 1.0秒/ピクセル)で固定されているため、そのような広い領域の画像を切り出すと、

* 科学技術振興事業団 (Japan Science and Technology Corporation)

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

† <http://maison.isas.ac.jp>

ファイルサイズは非常に大きくなる。例えば、DSS-1ですら1.5度×1.5度のFITS画像を作成すると20MBもの大きさになる。さらに、`getimage`で作成される画像は、もとの写真乾板の端に平行に切り取られるため、乾板の周辺部から作成された画像の上下方向は南北からずれてしまう。FITS画像のヘッダーに座標変換の係数が書かれてはいるが、複雑な変換式を必要としており(3.3節参照)、簡単には画像がどちらの方向を向いているのかが判断できないのである。この問題は、とくに天の両極付近を観測した写真乾板について顕著になる。従って、例えばMAISONサーバーがX線/電波の画像とDSSの画像を重ねた画像を作ろうとすると、DSSサーバーから巨大なファイルをダウンロードすることになり、また画像は一般に正しい方向(北が上、東が左)を向いていないことになる。このような問題を解決するため、我々は `getimage` にかわる広域画像作成システムとそれを公開するインターフェースの開発を行った。

次章では、DSSの概要を紹介する。第3章で、今回開発した広域画像作成システムについて解説する。第4章で、このシステムを公開するためのウェブインターフェースの開発について述べる。最後に、残った問題点を整理し、今後の課題について述べる。

2. Digitized Sky Survey 1st/2nd (DSS-1/2) の概要

DSS-1は、パロマー天文台のOschin Schmidt望遠鏡およびアングロ・オーストラリア天文台のUK Schmidt望遠鏡で観測された写真乾板を、1ピクセル1.7秒でスキャンしてデジタル化したもので、102枚のCD-ROMのセットとして市販されている³⁾。DSS-2は、同じ望遠鏡で新たに観測した写真乾板を、1ピクセル1.0秒でスキャンしたものである⁴⁾。DSS-2は一般には市販されておらず、前述した通り、国立天文台天文学データ解析計算センターを含め、世界で七機関にしか配布されていない。また、DSS-2では、北天のみ B_j , R , I (写真乾板の J , F , N) の三色で観測を行っている。2000年10月現在、 R , B_j についてはほぼ観測を終えているが、 I については観測が継続中で、一部のデータのみ利用が可能である。

一枚の写真乾板をデジタル化した画像のサイズは、DSS-1で14000×14000ピクセル、DSS-2で23040×23040ピクセルにもなり、計算機上で一つの画像として扱うことは困難である。そのため、それぞれの画像は、DSS-1で28×28、DSS-2で30×30の小領域に分割され、それぞれがH-変換⁵⁾と呼ばれるアルゴリズムで圧縮されてファイルに格納されている。また、この画像のピクセル値は写真乾板上での黒度であり、入力光源の強度そのものを表してはいない。よく知られているように、写真乾板の黒度は入力光源に対

し、いわゆる特性曲線に沿って変化する。黒度を入射光の強度に変換するためには、通常写真乾板の隅に焼き付けられたウェッジを使って特性曲線を決定する必要がある。

STScIで開発された画像切り出しプログラム`getimage`は、指定した領域の中心の座標から対応する写真乾板を探し出し、その中の必要な小領域のファイルをH-逆変換した画像を組み合わせ、FITSフォーマットの画像を作成している。その際、その画像の端は、もとの写真乾板の端に平行になるように作られ、また、指定された領域が写真乾板の端からはみ出す場合、その部分はピクセル値0で埋められる。

3. 広域画像切り出しシステム

3.1 システムの機能

今回開発した画像切り出しプログラムは、C言語で作成してある。画像の作成方法は、以下の三種類のモードに大別され、コマンドラインのオプション引数によって選択することができる。

モード1

STScIの`getimage`と同様、作成する画像の上下方向を写真乾板の辺に平行に切り出し、写真乾板からはみ出した場合はその部分を0で埋める。

モード2

作成する画像の上下方向が天球上の南北になるように切り出し、写真乾板からはみ出した場合はその部分を0で埋める。

モード3

作成する画像の上下方向が天球上の南北になるように切り出し、写真乾板からはみ出した場合は隣接する乾板の画像を繋ぐ。

モード1は、STScIの`getimage`との互換性を考えて実装した。DSSでは、隣り合う乾板の観測領域は少しずつ重なっているため、指定した天球上の領域に対して複数の乾板が対応する可能性がある。このように複数回観測された領域の画像は、移動天体や突発天体の検出をするときに有用である。従って、写真乾板を繋がずに、それぞれを独立に切り出すことができるようにするため、モード1や2は必要である。その他に、以下のオプションの選択ができる。

●ピクセルサイズ。

●DSSのバージョン(1 or 2)。

●DSS-2の場合、 R , B_j , I から色を選択できる。

●モード1および2において、指定した領域に複数の乾板が対応する場合、どの乾板から画像を作成するかを選択できる。

●広い領域の画像を効率的に作成するため、もとの乾板のデジタル化画像をビンギンし、一つのFITSファイルにした「縮小画像」を作成した(次節参照)。画像を作成するとき、「縮小画像」を使用すると、ピクセルサイズは粗くなるが、高

速で広い範囲の画像を作成することができる。
モード3では、要求された領域の画像は自動的にこの「縮小画像」から作成される。

モード1とモード2では、要求された領域の中心座標から該当する写真乾板を検索し、それから画像を作成する。モード2では、画像の上下が天球上の南北に一致するように領域を回転して画像が切り出される。

モード3では、まず要求された領域を10分×10分の正方形の領域に区切り、それぞれについて、「乾板の端から最も遠くなるような」乾板を選ぶ。それぞれの正方形の領域の画像は、次節で解説する乾板の「縮小画像」から切り出し、それらを繋いで一枚の画像にしている。モード1からモード3のいずれの場合も、ピクセルサイズが指定された場合には、それに合わせてピクセルのサンプリングを行い、指定されなかった場合には、モード1および2では元の画像のピクセルサイズで、モード3では縮小画像のピクセルサイズで画像を作成する。現在、作成できる画像の最大サイズは6度×6度に設定してあるが、プログラム中の定数を若干書き換えることで、より大きな領域に対応することもできる。

3.2 縮小画像の作成

一般に、写真乾板の画像を繋ぐ必要が生じるのは、非常に広い領域の画像を作成したい時である。そのような場合は、元の画像ほど細かいピクセルサイズは必要ない上、H-変換された多数の小領域ををいちいち逆変換して組み合わせると非常に時間がかかる。そこで、乾板一枚分をビンギンして縮小し、一つのFITSファイルにしたものをあらかじめ用意しておき、要求された領域の画像をこの縮小画像から切り出すことにした。

縮小画像の作成自体は単純である。乾板を構成する全ての小領域をH-逆変換し、DSS-1で5×5ピクセル、DSS-2で8×8ピクセルでビンギンして並べ、一つのFITSファイルに変換するのである。縮小画像のピクセル値は、対応する元の画像のピクセル値の単純平均とした。元の画像のピクセル値は、光源の強度ではなく写真乾板上の黒度であるため、一般に元の画像のピクセル値を強度に変換したものとは一致しない。すなわち、ピクセル値の単純平均をとることによって、測光精度若干落ちることになる。しかしながら、広域画像の主な目的は、他の波長の画像との比較を行なうことであり、測光精度はそれほど必要であるとは考えていない。

縮小画像を作成してみると、いくつかの乾板の画像について、H-逆変換ができないものがあつた。さらに、その領域の画像をSTScIなどから取得しようとしても失敗するため、国立天文台天文学データ解析計算センターに配布されている画像のみにエラーが

あるわけではないようである。DSS-1は市販されているが、その中にもエラーが含まれていた。今回検出された画像のエラーについては、STScIに通知して対応をお願いしているところである。

3.3 座標逆変換の係数

赤道座標を入力して乾板から画像を切り出すためには、赤道座標を画像上のピクセル座標に変換する必要がある。DSSでは特殊なWorld Coordinate Systemを採用しており、以下のような方法で画像上のピクセル座標(X, Y)を赤道座標(α, δ)に変換する⁹⁾。

まず、(X, Y)を、乾板の中心を原点にしたmm単位の座標(x, y)に変換する。

$$x = (x_c - p_x X) / 1000, \quad (1)$$

$$y = (p_y Y - y_c) / 1000. \quad (2)$$

ここで(x_c, y_c)は乾板の中心の座標、(p_x, p_y)はピクセルのサイズで、いずれも μm を単位としている。次に、(x, y)から「標準座標」(ξ, η)に、以下の多項式を用いて変換する。

$$\begin{aligned} \xi = & a_1 x + a_2 y + a_3 + a_4 x^2 + a_5 x y + a_6 y^2 + a_7 (x^2 + y^2) + \\ & a_8 x^3 + a_9 x^2 y + a_{10} x y^2 + a_{11} y^3 + a_{12} x (x^2 + y^2) + \\ & a_{13} x (x^2 + y^2)^2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \eta = & b_1 y + b_2 x + b_3 + b_4 y^2 + b_5 x y + b_6 x^2 + b_7 (x^2 + y^2) + \\ & b_8 y^3 + b_9 x y^2 + b_{10} x^2 y + b_{11} x^3 + b_{12} y (x^2 + y^2) + \\ & b_{13} y (x^2 + y^2)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

この標準座標から、赤道座標 α, δ は、

$$\alpha = \arctan \frac{\xi}{\cos \delta_c (1 - \eta \tan \delta_c)} + \alpha_c, \quad (5)$$

$$\delta = \arctan \frac{(\eta \tan \delta_c) \cos(\alpha - \alpha_c)}{1 - \eta \tan \delta_c}, \quad (6)$$

のように求められる。以上の式中の係数 $p_x, p_y, x_c, y_c, \alpha_c, \beta_c$ および a_i, b_i ($i=1, \dots, 13$)は、各乾板に対してSTScIによって求められている。

今回開発した切り出しプログラムでは、(α, β)から(X, Y)への逆変換は以下のような方法で行っている。標準座標(ξ, η)は、(5), (6)から解析的に得られる。(ξ, η)から(x, y)に変換するために、

$$\hat{x} = x / x_0, \quad (7)$$

$$\hat{y} = y / y_0, \quad (8)$$

$$\hat{\xi} = \xi / \xi_0, \quad (9)$$

$$\hat{\eta} = \eta / \eta_0, \quad (10)$$

として、変換式を

$$\begin{aligned} \hat{x} = & p_0 + p_1 \hat{\xi} + p_2 \hat{\eta} + p_3 \hat{\xi}^2 + p_4 \hat{\xi} \hat{\eta} + p_5 \hat{\eta}^2 + p_6 \hat{\xi}^3 + \\ & p_7 \hat{\xi}^2 \hat{\eta} + p_8 \hat{\xi} \hat{\eta}^2 + p_9 \hat{\eta}^3 + p_{10} \hat{\xi}^4 + p_{11} \hat{\xi}^3 \hat{\eta} + \\ & p_{12} \hat{\xi}^2 \hat{\eta}^2 + p_{13} \hat{\xi} \hat{\eta}^3 + p_{14} \hat{\eta}^4 + p_{15} \hat{\xi}^5 + \\ & p_{16} \hat{\xi}^4 \hat{\eta} + p_{17} \hat{\xi}^3 \hat{\eta}^2 + p_{18} \hat{\xi}^2 \hat{\eta}^3 + p_{19} \hat{\xi} \hat{\eta}^4 + p_{20} \hat{\eta}^5, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{y} = & q_0 + p_1 \hat{\xi} + q_2 \hat{\eta} + q_3 \hat{\xi}^2 + q_4 \hat{\xi} \hat{\eta} + q_5 \hat{\eta}^2 + q_6 \hat{\xi}^3 + \\ & q_7 \hat{\xi}^2 \hat{\eta} + q_8 \hat{\xi} \hat{\eta}^2 + q_9 \hat{\eta}^3 + q_{10} \hat{\xi}^4 + q_{11} \hat{\xi}^3 \hat{\eta} + \\ & q_{12} \hat{\xi}^2 \hat{\eta}^2 + q_{13} \hat{\xi} \hat{\eta}^3 + q_{14} \hat{\eta}^4 + q_{15} \hat{\xi}^5 + q_{16} \hat{\xi}^4 \hat{\eta} + \\ & q_{17} \hat{\xi}^3 \hat{\eta}^2 + q_{18} \hat{\xi}^2 \hat{\eta}^3 + q_{19} \hat{\xi} \hat{\eta}^4 + q_{20} \hat{\eta}^5, \end{aligned} \quad (12)$$

のように仮定する。ここで (x_0, y_0) は、mm 単位での乾板の一辺の大きさで、 (ξ_0, η_0) は(3)および(4)に (x_0, y_0) を代入して求められる、規格化のための値である。 p_i, q_i ($i=0, \dots, 20$)は、ピクセル座標 $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, j$ は全てのピクセルにわたる)と、それを順変換の式(3), (4)にあてはめて得られる $(\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_i)$ の値を、実測値として(11)および(12)にあてはめた最小二乗法によって求めることができる。こうして求めた $x_0, y_0, \xi_0, \eta_0, p_i, q_i$ を、縮小画像のFITSヘッダーとして格納し、逆変換 $(\alpha, \delta) \rightarrow (x, y)$ が必要となるときに参照するようにした。

図1に、典型的な乾板の逆変換の順変換に対する誤差を示す。乾板の端では誤差がやや大きくなっているが、おおむね1/1000秒程度の誤差しかないことがわかる。順変換による位置精度はおよそ0.5秒程度であるので、これは完全に無視してよい誤差になっている。

3.4 作成される画像とその問題点

画像切り出しプログラムを使って作成した画像を図2から図4に示す。いずれもM81を中心とする6度×6度の画像で、図2はDSS-1から、図3はDSS-2のRバンドの乾板から、図4はDSS-2のB_Jバンドの乾板から作

成したものである。これらの画像を作成するのに、Sun Ultra 5 (UltraSPARC Ili 270MHz)で1枚あたりおよそ1分30秒ほど必要である。これを見ると、以下のような問題点があることが分かる。

図2では比較的なめらかに乾板の画像が繋げられているが、図3では中央やや左下に小さな空白部分が見られる。また、図4では空白部分があるだけでなく、乾板ごとのスカイレベルの差が大きいため、繋ぎ目の段差が激しくなっている。空白部分は写真乾板の隅に焼き付けてあるウェッジが入り込んでいるものである。これは、写真乾板上でウェッジの占める領域が、隣接する乾板の重なり領域より大きいために起こる。また、スカイレベルの差は、乾板ごとの露出時間の違い(この例では45分と80分)が大きく影響している。このようなスカイレベルの違いは、非常に明るい星やアンドロメダ銀河などの大きな天体が写っている場合でも起こりうる。この画像切り出しシステムでは、ピクセル値は露出時間で規格化してあるが、写真乾板の黒度は露出時間に比例せず、いわゆる特性曲線に従って変化するため、十分になめらかにはできていない。これらの問題を完全に回避する方法を現在模索中である。

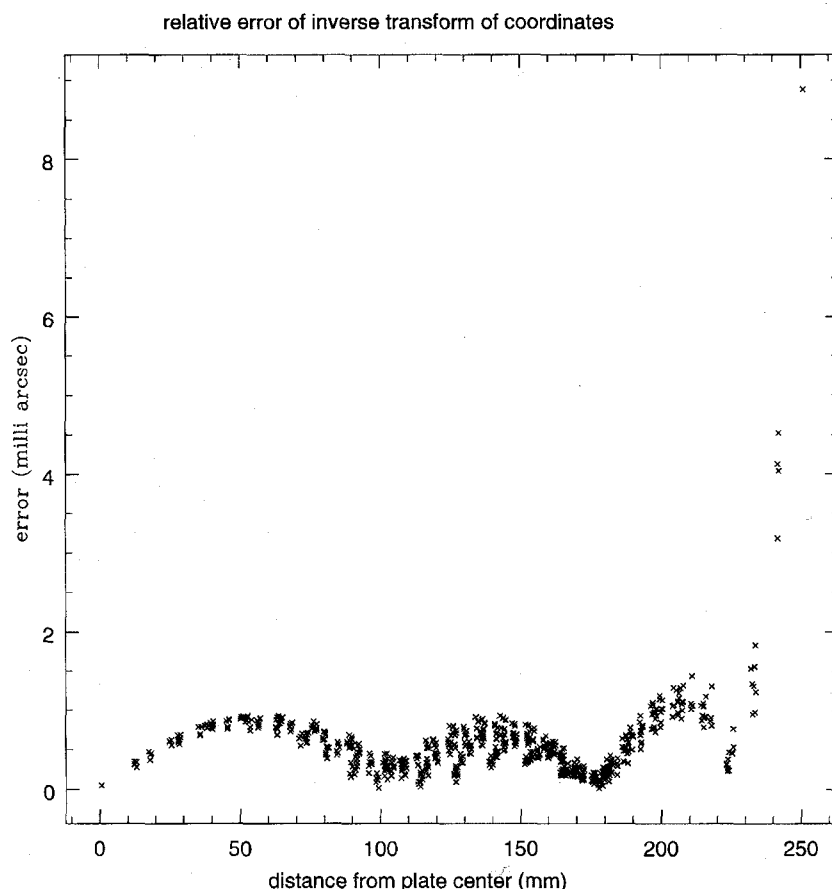


図1 座標逆変換の相対誤差

図1 座標の順変換に対する逆変換の誤差。横軸が乾板の中心からピクセルまでの距離、縦軸が逆変換の誤差(秒)。乾板の端では1/100秒程度の誤差があるが、ほとんどの領域で1/1000秒程度におさまっている



図2 DSS-1の乾板から作成された、M81を中心とする領域の画像。

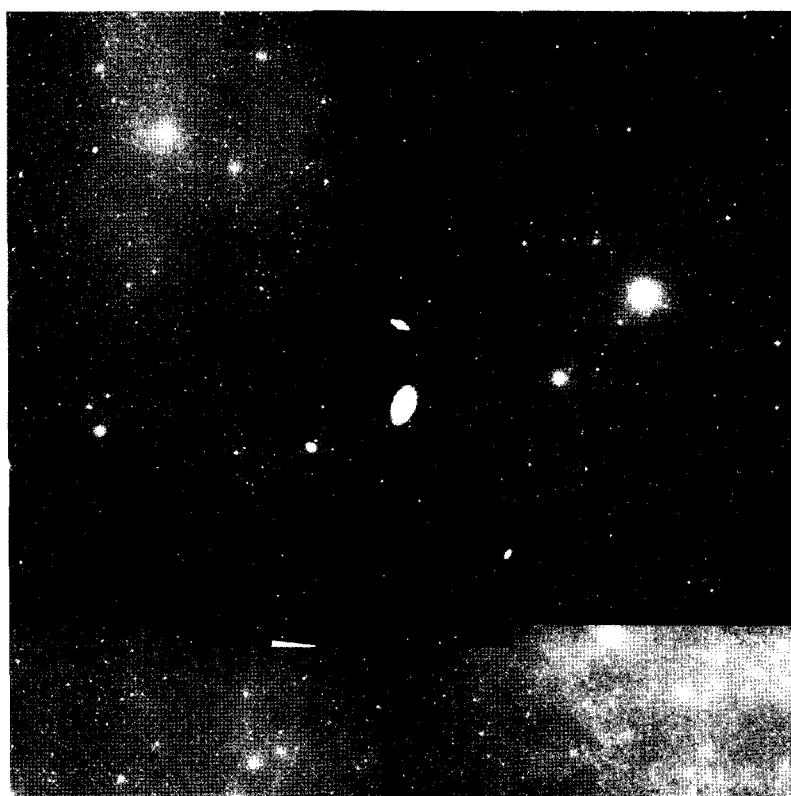


図3 DSS-2 Rバンドの乾板から作成された、M81を中心とする領域の画像

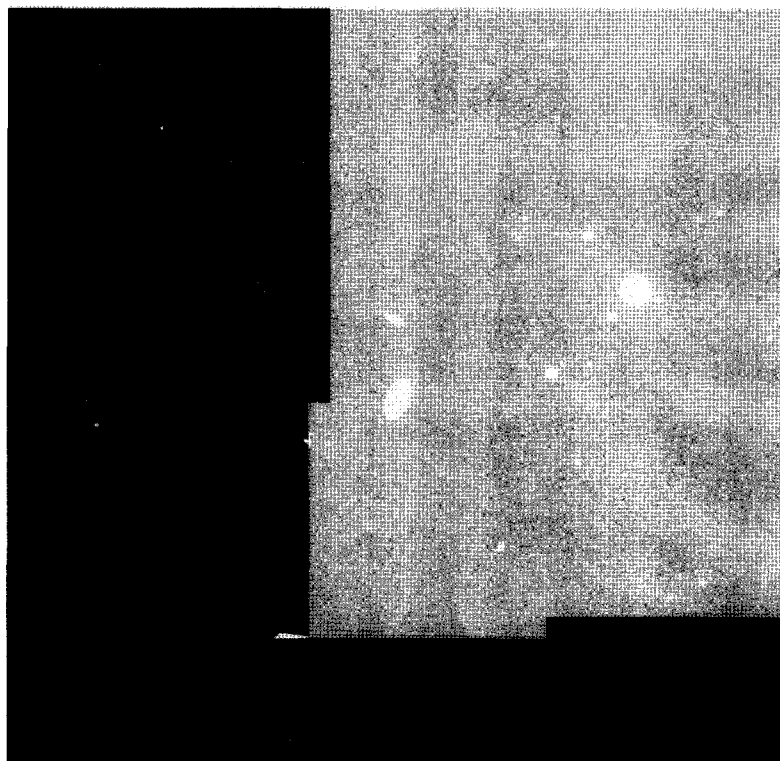


図4 DSS-2 B_j バンドの乾板から作成された、M81を中心とする領域の画像。

図5 DSS画像の検索画面。

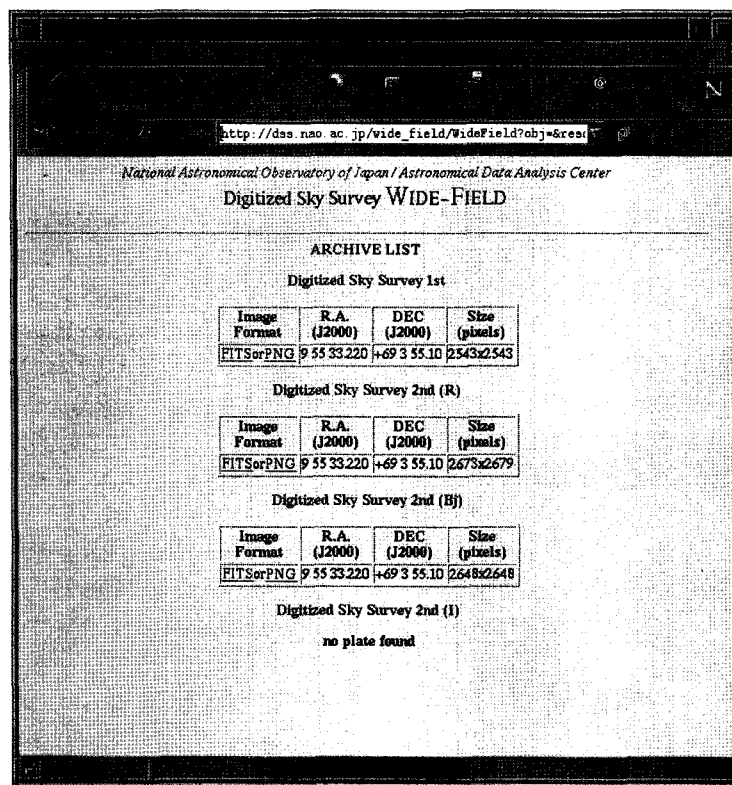


図6 画像の検索結果画面。

FITSをクリックすると、FITS画像がダウンロードされ、PNGをクリックするとPNG画像を表示するページになる(図7)

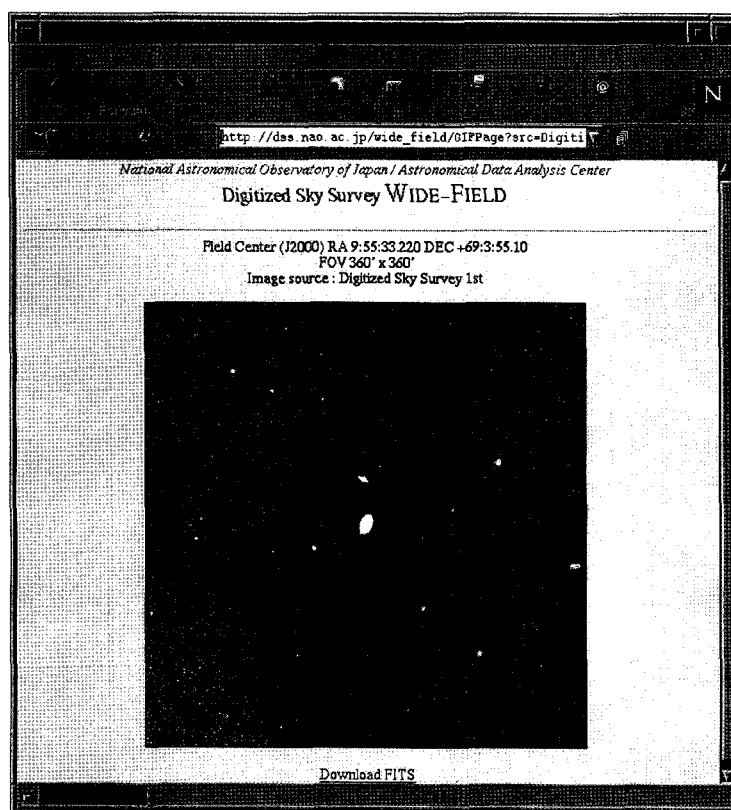


図7 PNG画像の表示画面。

ここからもFITS画像をダウンロードすることができる。

4 ウェブインターフェース

今回開発した画像切り出しプログラムをウェブ上で公開するために、ウェブインターフェースを作成した。ユーザーは、図5に示す検索画面において領域やピクセルサイズなどを入力して送信すると、対応する画像の一覧が表示される(図6)。ここでFITSを選択すると、FITSフォーマットの画像がダウンロードされ、PNGを選択すると図7のようにPNGフォーマットの画像を表示したウェブページになる。ここからもFITS画像のダウンロードは可能になっている。

このインターフェースの内部はJava Servletでプログラムされている。Submitボタンをクリックして要求を送信すると、ウェブサーバーと連動して一連のJavaプログラムが起動される。このJavaプログラムが外部コマンドとして画像切り出しプログラムを起動してFITS画像を作成し、必要ならばPNG画像に変換してウェブブラウザに転送する。これによって、世界ではじめて6度×6度もの広い領域のDSSの画像をウェブ上で提供することができるようになった。

5 今後の課題

以上のように、STScIのgetimageでは不可能であった、広い天域の画像をDSSの乾板のデジタル化画像から切り出すことができるようになった。この画像の上下方向は天球上の南北に正しく向いており、また画像のサイズもピクセルサイズを適当に選択することによって小さく押さえることができる。これによって、DSSの画像を他の波長のさまざまな観測データと比較することが非常に容易になった。多波長画像表示サービスMAISONとのインターフェースは、近日中に整備されることになっているが、これによってMAISONの利用価値は飛躍的に向上するであろう。

実は、天文台で公開しているIRAS Sky Survey MapやGreen Bank Sky Mapなども、同様の問題を持っている。すなわち、もとの画像データから任意の領域の画像を切り出すときに、端が切れたり、北を向いていなかったりという問題は、同様に存在する。今回の開発を、これらの画像データにも適用し、より使いやすい天体画像サービスを構築していくことが今後の課題である。

謝辞

このシステムを開発するに当たって、国立天文台天文学データ解析計算センターの計算機資源を利用させていただきました。また、同センターのデータセンター実務会の方々には、様々な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺大, 青木賢太郎: 天文学データ解析計算センターにおけるCD-ROM画像データのネットワーク上での公開システムの開発, 国立天文台報, **4**, 87-99 (1999).
- 2) 渡辺大, 青木賢太郎, 三浦昭, 宇野伸一郎: 多波長天文画像データ検索・閲覧サービス「MAISON」の開発, 国立天文台報 (本号).
- 3) B. M. Lasker, C. R. Sturch, B. J. McLean, J. L. Russell, H. Jenkner and M. M. Shara: The Guide Star Catalog. I - Astronomical foundations and image processing, *Astron. J.*, **99**, 2019-2058 (1990).
- 4) B. M. Lasker, J. Doggett, B. McLean and C. Sturch: The Palomar-ST ScI Digitized Sky Survey (POSS-II): Preliminary Data Availability, in *Astronomical Data Analysis Software and System V*, ASP Conference Series, eds. G. H. Jacoby and J. Barnes, 101, 88-91 (1996).
- 5) K. Fritz, M. Lange, M., Möstel, G. M. Richter and R. Ziener, *Astron. Nachr.*, **309**, 69 (1977).
- 6) J. L. Russell, B. M. Lasker, B. J. McLean, C. R. Sturch, and H. Jenkner: The Guide Star Catalog. III - Production, database organization, and population statistics, *Astron. J.*, **99**, 2059-2081 (1990).