

すばる望遠鏡 Suprime-Cam データの位置較正

吉野 彰, 山田善彦, 仲田史明, 榎 基宏^{*1}, 高田唯史, 市川伸一

(2007年 4月27日受付; 2007年 8月16日受理)

Astrometric Calibration of the Subaru Telescope Suprime-Cam Data

Akira YOSHINO, Yoshihiko YAMADA, Fumiaki NAKATA, Motohiro ENOKI^{*1},
Tadafumi TAKATA, and Shin-ichi ICHIKAWA

Abstract

We developed a new method for calibrating position accurately by the sources detected in Subaru Suprime-Cam data, and applied the method to numerous archived data stored in SMOKA (Subaru Mitaka Okayama Kiso Archive) system. The accuracy of our astrometric calibration is within 1 arcsec in the whole field of view of Suprime-Cam, which is much better than that of our previous paper. The improved positional information will be powerful for various scientific activities, for example, in case of searching optical counterparts of the sources detected in other wavelength data.

天体を検出しその位置を測定することは、画像データを解析する上でもっとも基本的な事項の一つである。画像から検出された天体の座標値と、天体カタログに記載された座標値を比較することにより、その天体が如何なる天体であるか、あるいは、これまでに発見されていない新天体であるかどうかを知ることができる。より正確な位置情報を得ることができれば、それ故、より正確な天体の同定が可能になるのである。近年、多波長の様々な観測データが生産されつつあり、それらの観測データを比較して研究を進めるためには、天体の正確な位置情報が必要である。また、研究者がデータアーカイブからデータを検索・収集する際には、できるだけ正確な位置情報を検索条件として使用することが望ましい。膨大な観測データが蓄積されてきている昨今、データアーカイブから必要なデータを効率良く、かつ、正確に選ぶために、精度の高い位置情報の必要性はますます高まっている。

昨今の撮像装置（カメラ）ではモザイク CCD

カメラが主流であり、望遠鏡や観測装置に関する技術の進歩によって CCD チップ数の増加や視野の拡大が実現されている。このようなデータを解析する際、光学的歪みを伴った複数の画像を精度良く重ね合わせるためには、画像データの中の天体の位置決定精度を向上させることがますます重要になってきている。すばる望遠鏡¹⁾の Suprime-Cam²⁾ は、10 個の CCD チップをモザイク化して主焦点面に並べ（図 4 (a) 参照）、34 × 27 分角の広視野を一度に撮像できる観測装置であり、8 m クラスの望遠鏡としては現在において世界最大の視野を持つ撮像装置である。言うまでもなく Suprime-Cam においてもその画像データ中の各天体の正確な位置情報を得ることは大変重要である。

このような状況の下、モザイク CCD カメラの画像データ中の天体の位置を正確に求める、すなわち、位置較正に関する研究が精力的に進められてきている。例えば、Platais ら³⁾ は、散開星団の研究を進めるため、米国の Kitt Peak 観測所 Mayall 4 m 望遠鏡の NOAO CCD Mosaic Imager (CCD チップ 8 個) の画像データの位置較正を行い、CCD のピクセル座標と天球座標との詳細な

^{*1} 東京経済大学
(Tokyo Keizai University)

変換を表現する視野歪みモデルを構築した。また、Platais らは別の論文⁴⁾で、Large Synoptic Survey Telescope (LSST)⁵⁾等の次世代大型広視野望遠鏡の画像データの位置較正に必要な deep astrometric standards (DAS) を確立することを提案し、NOAO CCD Mosaic Imager や、Suprime-Cam のデータを用いて、DAS の実現可能性を実際に示した。

Suprime-Cam の観測データには FITS ヘッダ中に World Coordinates System (WCS) の情報が記載されているが、この WCS はシフトのみを表しており、そのシフトにはずれが最大 20 秒角程度存在する。また、光学的歪みの効果は入っていないため、これにより、視野の隅で 30 秒角以上に達するような系統的ずれが生じる (図 1)。

すばる望遠鏡等のデータを提供するアーカイブシステム SMOKA^{6)–9)}では、利用者からの請求が最も多い Suprime-Cam データの位置較正を行い、請求データの FITS ヘッダにその情報を書き加えるとともに、指定された座標値を含む画像データを選び出すことができる機能を開発し、実装している^{8), 9)}。この位置較正は、観測データ 1 フレーム (CCD チップ 1 個で得られたデータをフレームと呼ぶ) ごとに星を検出し、そのピクセル座標と USNO-B1.0 カタログ¹⁰⁾の座標値でフィットを行うというものである。位置較正の対象 (カタログと同定可能な星が 1 フレーム内に 10 個以上検出でき、それが CCD チップ 10 個分揃う) となるショット (同時に取得された CCD チップ 10 個分の観測データの組) のうちの 60% が目標

精度の 1 秒角を満たしており、精度よく較正されたフレームでは 0.2–0.3 秒角程度の位置精度を達成できているとされていた。しかし、その後の較正結果の検討の結果、残差の上では数値上目標精度に達しているが、実際には位置較正の精度が低いフレームが数多く存在することが明らかになった

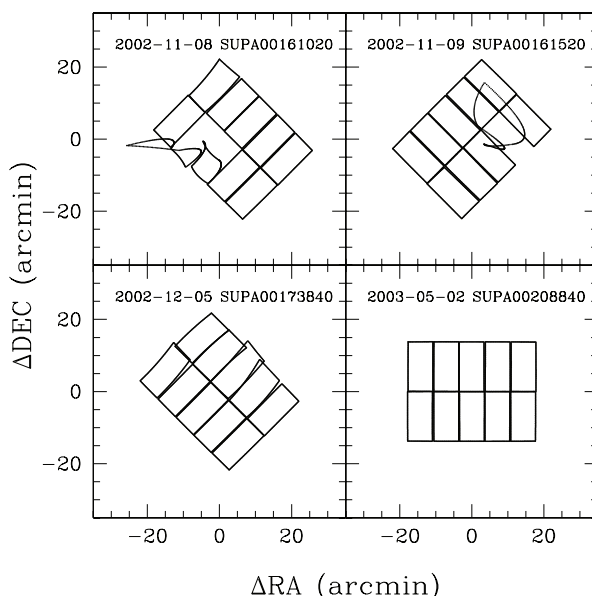


図 2. 従来の SMOKA 位置較正の失敗例

位置較正結果から求めた各 CCD チップの外縁の天球座標 (光軸中心からの角度差分值) を示した図. 4 例を掲げており、それぞれに DATE_OBS と FRAME_ID (最終桁は 0 とした) を示した。右下が成功例で、それ以外が失敗例である。

てきた (図 2)。

位置較正結果から 1 フレームが天球上で占める

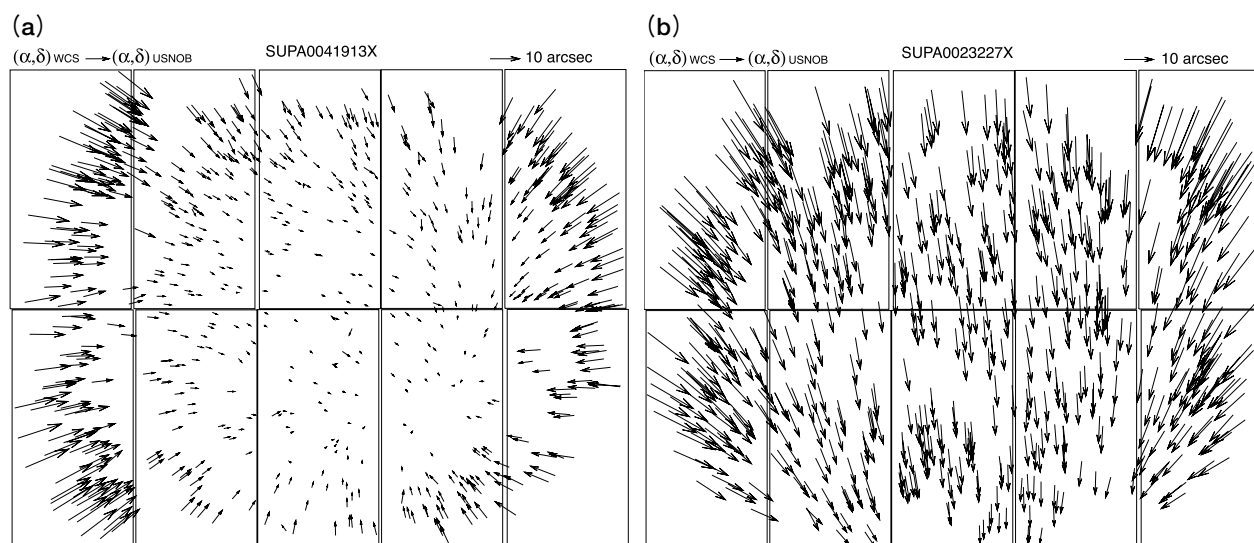


図 1. 観測データ中の WCS 情報から得られる座標値の精度

観測データから検出された星について、FITS ヘッダに記載された WCS 情報から求めた天球座標 $(\alpha, \delta)_{\text{WCS}}$ と USNO-B1.0 カタログに記載された天球座標 $(\alpha, \delta)_{\text{USNOB}}$ を比較した図. 矢印の根本が星の CCD 上の位置を示し、 $(\alpha, \delta)_{\text{USNOB}} - (\alpha, \delta)_{\text{WCS}}$ ベクトルを矢印として表した。図の右上に 10 秒角の長さを示してある。(a) SUPA0041913X: 光学的歪みと思われるずれが見られる。(b) SUPA0023227X: 光学的歪みに加えて全体がずれているのがわかる。

面積や、CCD 各チップ間の相対位置を求めることによって精度の検証を行った結果、目標精度の 1 秒角以内を満たすショットは 17% にまで減少することが判明した。これは従来の位置較正手法を再考する必要性を意味する。この原因として、1 フレーム内の位置標準星（USNO-B1.0 カタログ記載の星）の数が不十分であることやフレーム内での分布の偏り、観測データから検出した星と標準星との mismatch、などが考えられるが、図 2 でも示唆されているように、その根源は観測装置上で固定とみなせる CCD の 10 個のチップの相対位置関係を拘束条件とせずに 1 フレームごと個々に位置較正を行ったことであろうと推測された。

以上のような状況の下、本研究は視野全体での位置較正精度 1 秒角以内を達成すべく、10 個の CCD チップの相対位置関係を考慮した新たな位置較正手法を開発研究し、その方法を入手可能な全ての Suprime-Cam アーカイブデータの中から精選したデータに対して適用することにより、今までにない統計的に高い精度での位置較正を試みたものである。

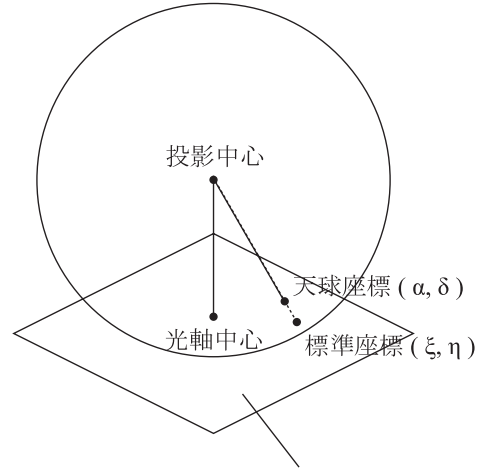
本論文の構成は以下の通りである。2 章では、今回開発した位置較正の手法について述べる。3 章では位置較正の結果を示し、精度の評価について議論する。4 章では今後の研究課題や SMOKA における定常運用化の問題等について論じ、最後に 5 章でまとめを行う。

2. 位置較正の手法

本研究で開発した位置較正の手法は、まず、焦点面上での CCD チップ 10 個の相対位置を求め、その上で焦点面上座標と天球座標の標準座標を介した変換式をモデルフィットによって求めるものである。

2.1. 標準座標と焦点面上座標の変換モデル

本研究は、CCD チップ 10 個の焦点面上での相対位置を考慮して位置較正を行うものである。そのために、光軸中心を原点とし 10 チップを全て含む焦点面上の仮想の大チップ座標 (X, Y) を導入する。この大チップ座標 (X, Y) を標準座標 (ξ, η) へ変換するモデルをまず考える（式 (3)、(4)）。標準座標 (ξ, η) とは光軸中心を接点 (α_c, δ_c) とする接平面に天球を投影した座標系である（式 (1)、(2)、図 3）¹¹⁾。



天球との接点が光軸中心である接平面

図 3. 標準座標と天球座標

標準座標と天球座標の関係を示した模式図。天球と接平面の断面の様子を示している。

$$\xi = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_c)}{\sin \delta_c \sin \delta + \cos \delta_c \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_c)} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\cos \delta_c \sin \delta - \sin \delta_c \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_c)}{\sin \delta_c \sin \delta + \cos \delta_c \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_c)} \quad (2)$$

モデルとして式 (3)、(4) の 3 次多項式を用いる。従来 SMOKA で行ってきた Suprime-Cam データの位置較正ではフレームごとに較正するため、視野が狭く、フィットに用いる星の数も多くとれない。そのため、2 次の多項式を用いてきた。FITS 規約上では WCS の扱う式に次数の制限はないので、本研究では CCD 10 チップ全てに渡る広い視野の歪曲を表現できるように、より高次の多項式を用いることを考えた。まず、試験的に W-C-RC バンド 162 ショット（サンプルの選択については 3.1 節を参照すること）を対象に、2 次、3 次、4 次、5 次式モデルでそれぞれモデルフィットを行った。位置精度評価の結果、2 次式では我々の目的とする較正精度 1 秒角は全く達成できず（2 次式フィットの残差平均： 2.51 ± 0.13 秒）、3 次式以上で目的とする較正精度 1 秒角は十分に達成できることがわかった（3 次式： 0.37 ± 0.06 ）。ただし、4 次、5 次と次数を上げても大幅な精度向上はなかったため（4 次式： 0.37 ± 0.06 、5 次式： 0.36 ± 0.06 ）、本研究では 3 次式を用いることとした。便宜上 ξ と η は単位が度になるように係数をとることにした。

$$\begin{aligned} \xi = & a_1 + a_2 X + a_3 X^2 + a_4 X^3 + a_5 Y + \\ & a_6 XY + a_7 X^2 Y + a_8 Y^2 + a_9 XY^2 + a_{10} Y^3 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\eta = b_1 + b_2 X + b_3 X^2 + b_4 X^3 + b_5 Y + b_6 XY + b_7 X^2 Y + b_8 Y^2 + b_9 XY^2 + b_{10} Y^3 \quad (4)$$

フレーム内で検出された星のうち USNO-B1.0 カタログに記載されている（すなわち天球座標が得られる）星を標準星と呼ぶことにする．フィットの際には同一ショットの 10 フレーム全てに標準星が多数存在し，2.4 節で述べるような標準星の選択後も各フレームに 10 個以上存在するようなショットを選ぶ．次節に詳述する座標変換を行って，そのショットの中に存在する標準星の (X, Y) と (ξ, η) のリストを用意する．そのリストを用いて式 (3)，(4) で係数 $(a_1, a_2, \dots, a_{10}, b_1, b_2, \dots, b_{10})$ をフィットする．フィットプログラムは C 言語で書かれており，Levenberg-Marquardt 法 (Numerical Recipes¹²⁾) を元に 2 次元に改良したものである．これは以下で定義される χ^2 ，

$$\chi_1^2 = \sum (\xi_{\text{catalog}} - \xi_{\text{model}}(a_1, a_2, \dots, a_{10}))^2 / \sigma_1^2 \quad (5)$$

$$\chi_2^2 = \sum (\eta_{\text{catalog}} - \eta_{\text{model}}(b_1, b_2, \dots, b_{10}))^2 / \sigma_2^2 \quad (6)$$

を最小にする係数 $(a_1, a_2, \dots, a_{10}, b_1, b_2, \dots, b_{10})$ の組を求めるサブプログラムである．ここで $\xi_{\text{catalog}}, \eta_{\text{catalog}}$ は USNO-B1.0 カタログ記載の (α, δ) を標準座標に変換したもので， $\xi_{\text{model}}, \eta_{\text{model}}$ はそれぞれ式 (3)，(4) で表されるモデルである．また， σ_1, σ_2 はそれぞれ ξ と η 方向の各標準星のカタログにおける誤差であり，各データ点に付ける重みに相当する．本研究では重みを付けないので

1 とする．

2.2. CCDチップ配置定数の算出

CCD 各チップのピクセル座標を (x_i, y_i) ($i=0,1,\dots,9$) とする．前節で述べたフィットを行うために，まず (x_i, y_i) を大チップ座標 (X, Y) に変換する．それぞれの座標を以下のように定義する (図 4，式(7)，(8))．

- (1) 各チップ座標 (x_i, y_i) : 単位 pixel
 - ・原点：各チップの左下，ただしチップ上の座標は $(1, 1)$ から始まる．
 - ・軸： x_i ：右向きが正 y_i ：上向きが正
(北が上のとき， $x_i : \alpha$ の負の方向 $y_i : \delta$ の正の方向)
- (2) 大チップ座標 (X, Y) : 単位 pixel
 - ・原点：光軸中心 (X_c, Y_c)
 - ・軸： (X, Y) の正の方向： (x_i, y_i) の正の方向と同じ．
(北が上のとき， $X : \alpha$ の負の方向 $Y : \delta$ の正の方向)

そうすると， (x_i, y_i) から (X, Y) への変換式は

$$X = x_i \cos(\theta_i) + y_i \sin(\theta_i) + dx_i \quad (7)$$

$$Y = -x_i \sin(\theta_i) + y_i \cos(\theta_i) + dy_i \quad (8)$$

となる．ここで，

- ・ (dx_i, dy_i) : 光軸中心 (X_c, Y_c) から各チップ座標の原点までのシフト量ベクトル $(X, Y$ の正

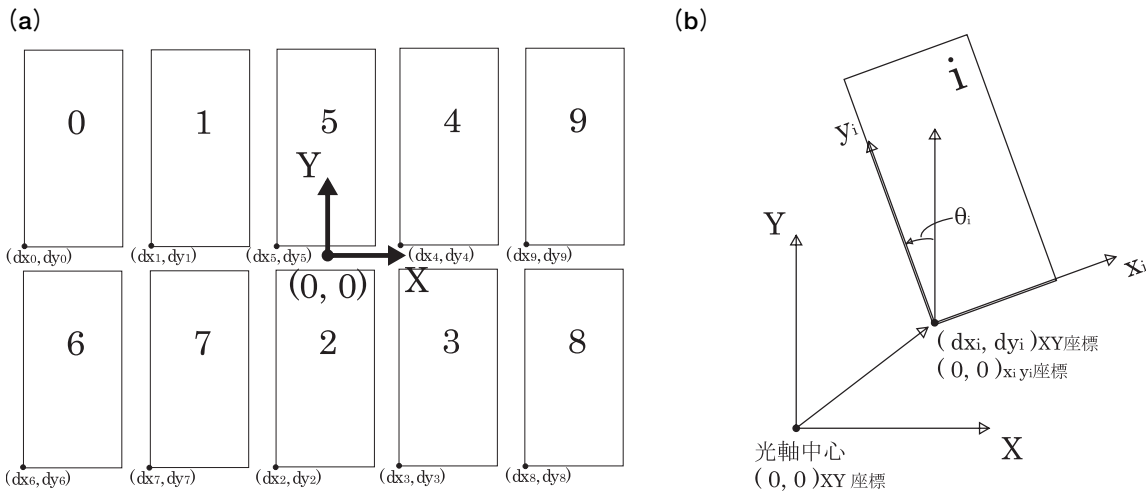


図 4. 大チップ座標と CCD チップ配置定数

大チップ座標と各 CCD チップ上のピクセル座標，CCD チップ配置定数の関係を示した図．

- (a) 大チップ座標と CCD チップ配置定数 (シフト) を示した．
- (b) i 番 CCD チップにおける配置定数 (シフトおよび回転角) を示した．

の方向を正とする)。

・ θ_i : 各チップの傾き (各チップ座標原点を回転軸とした, 反時計回りを正とする回転角)。

とする。光軸中心の位置は主鏡等の光学系の調整などによって動く可能性があるが, CCD チップ相互の位置関係は Suprime-Cam の焦点部の改修 (CCD の再配置や交換) を行わない限り動かないものとする。

まず, CCD 各チップのシフト (dx_i, dy_i) の初期値を以下のようにして定めた。同一ショット内 10 チップ全てについて従来のフレームごとの位置較正が精度検証済のショットを選択し, それらを用いて 2 次式の各係数の典型的な値 (平均値) を求めた。今回はカラーバンドによらず, 653 ショットを選択した。更に, (dx_i, dy_i) の原点である光軸中心 (X_c, Y_c) を視野中心付近の 2 番と 5 番チップの中間にあるものと仮定し初期値とした。採用した (dx_i, dy_i) の初期値を表 1 に示した。

chip	dx_i	dy_i
0	-5293.5	3.5
1	-3164.5	-1145.5
2	-1037.5	-4105.5
3	1085.5	-4106.5
4	1079.5	15.5
5	-1008.5	8.5
6	-5260.5	-4103.5
7	-3132.5	-4106.5
8	3247.5	-4098.5
9	3207.5	15.5

表 1. CCD 配置定数 (シフト値) の初期値 (単位: pixel)
光軸中心から各 CCD チップの参照点までのシフトの初期値。これを初期値としてフィットをし, CCD 配置定数を決定する。

また, CCD チップの傾き (回転角) は微小であると考えられるため, 初期値は全て 0 とした。

本研究では, 簡便のためフィットに用いる式を単純化して, まず θ_i を初期値 0 に保ったまま (dx_i, dy_i) を改良し, その後に θ_i を改良する方法を採った。まず天球座標 (α, δ) が分かっている標準星のフレーム上の検出座標値 (x_i, y_i) をシフト初期値を用いて大チップ座標 (X, Y) に変換し, 標準星の (X, Y) と (α, δ) の対応リストを作る。また, その (α, δ) を光軸中心を接点とした標準座標 (ξ, η) に変換する。光軸中心の (α, δ) は, 対象データの FITS ヘッダに記載されている WCS から算出した。図 1 (b) で示したような実際の座標と WCS 記載の座標の間に大きなずれがある場合

には回転角が適切でない値となる恐れがあるが, 3.3 節で述べるようにフィットの結果として得られた式 (3), (4) の係数が不適な値となったものとして除外した。ここで (ξ, η) の正の方向は (α, δ) の正の方向と一致するように定めた。この変換には slalib¹³⁾ を用いた。以上によって標準星の (X, Y) と (ξ, η) の対応リストが作成される。次に, 天頂付近 (高度 60 度以上) にあって, 2.4 節で述べる標準星分布の均一化を行ったあと, それらの (X, Y) と (ξ, η) の対応リストを用いて式 (3), (4) の係数を最小自乗フィットで求める。標準星の選択については 2.4 節で述べる。各フレームのフィット残差の平均値 ($\Delta x_i, \Delta y_i$) を (dx_i, dy_i) の真の値からのずれと見なし, ($dx_i - \Delta x_i, dy_i - \Delta y_i$) を改良されたシフト値として (X, Y) を求め直し, まだ残るシフトのずれを求める。これを繰り返し, フィット残差平均が ± 0.25 pixel (0.05 秒) 以内に収束したとき, シフト定数の決定値 (dx_i, dy_i) とする。

次に, 各チップの傾きの角度 (回転角 θ_i) を求める。上で得たシフト定数の決定値 (dx_i, dy_i) と回転角初期値 0 を用いて各チップ座標 (x_i, y_i) から大チップ座標 (X, Y) への変換を行い, 再び式 (3), (4) の係数のフィットを行う。その結果, まだ残る残差を回転成分であると見なし, 回転角を求めその平均をとり, CCD チップの傾きの決定値とする。

2.3. CCD 配置定数を固定したモデルフィット

2.2 節で求められた CCD 配置定数を固定し, 2.1 節で述べたフィットを行い, 式 (3), (4) の各係数 ($a_1, a_2, \dots, a_{10}, b_1, b_2, \dots, b_{10}$) を定める。式 (5), (6) の χ^2 を最小にする係数の組合わせを求めるために, 収束まで 10 回から 20 回のフィットの繰り返しをしている。一度収束した後, モデル (式 (3), (4)) から得られる座標値とカタログの座標値との間に 1 秒角以上のずれがあるデータ (全体の約 1 ~ 2 %) を除いて再び同様のフィットを行う。

2.4. 標準星の選択

1 フレーム内で検出された星の分布が偏っている場合や, 1 ショット内のフレームによって星の数に大差がある場合には, フィットが多数の星に引きずられてしまい, 望ましい結果が得られない恐れがある。それを避けるべく, 星を適当に間引く段階を加えている。試行の結果, 1 フレームを x 方向 4 個, y 方向 8 個のグリッドに分割し, 各

グリッドの中の星を明るさ順に並べ替え、各グリッドの中の星の数が平均値（1 フレーム内の星数 / 32）を超えたグリッドについては、明るい順に平均値の数まで星を選定することとした。

また、検出された星のピーク値（簡便のため最近ピクセルの値を採った）を求め、それを標準星の選択に用いている。これは飽和によって星像がのびたり、尾を引いたりしているものを除くためである。実際には上記の間引きの前に、ピーク値による選択をかけている。

3. 位置較正の結果と精度の評価

3.1. 対象データ

本論文で述べる解析には、SMOKA で公開されている Suprime-Cam データのうち、CCD フォーマット（画像サイズやオーバースキャン部の位置）が変更されていない、2002 年 9 月から 2005 年 8 月までの 3 年間、約 30 万フレームの中から対象データを選択して用いた。選択の基準、および、選択したショット数はそれぞれの節で述べる。

3.2. CCDチップ配置定数の決定

フレーム数の多い W-C-RC バンド*2（以下では

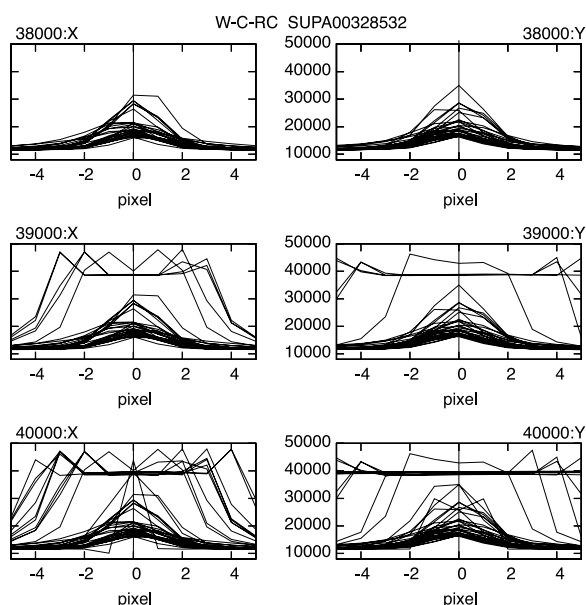


図5. 星の x 方向, y 方向 プロファイル

観測データから検出された星の x 方向 (左列) と y 方向 (右列) のプロファイル (横軸: pixel, 縦軸: ADU) を示した図。上段, 中段, 下段はそれぞれ, ピーク値 38000, 39000, 40000 ADU 以上の星を除外したもの。

カラーバンドを表すためにフィルター名を用いることにする) で高度 60 度以上, ピーク値 38000 ADU 以下の標準星が各フレームに 10 個以上ある 162 ショットを対象とした。ピーク値 38000 ADU 以下という基準は, 38000 ADU よりも高い値にすると飽和による星像の流れが顕著になる (図 5) ことと, 低い値にすればするほど使用できるショット数が減ってフィット精度の確保が難しくなることを考慮して定めたものである。

2.2 節で述べた通り, 光軸中心の (α, δ) は, 対象データの FITS ヘッダに元々記載されている WCS 情報から算出した。実際の座標と WCS 情報から得た座標の間に大きなずれがある場合にはフィットに悪影響を及ぼす恐れがあるが, 図 6 に示した通り, 大部分のショットでは 10 秒角程度以内であり, 星の同定は十分に可能である。星の同定が出来れば, このずれはフィットにおけるシフトに相当するだけであり, フィットには深刻な影響は与えない。

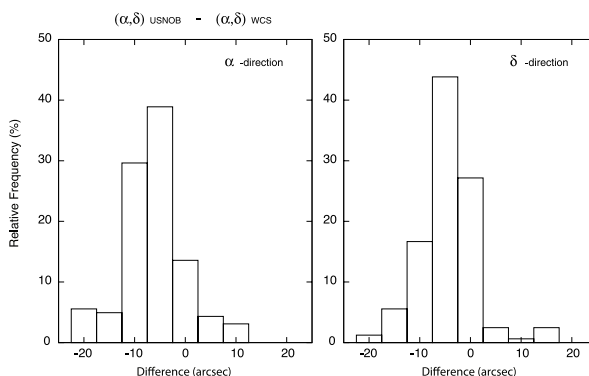


図6. 観測データ中の WCS 情報による天球座標の精度
W-C-RC バンドの 162 ショットについて, USNO-B1.0 カタログ記載の (α, δ) と観測データ中の WCS 情報から得られる (α, δ) の差をショット毎に平均した値の頻度分布を示した。光軸中心の近傍である, CCD チップ 2 の上半分と, 5 の下半分で検出された標準星を用いて求めた。平均を取る際には, 差が極端な値 (標準偏差の 3 倍以上) を示す星は除外している。

2.2 節で述べた方法にしたがい, フィットを 2 回繰り返し, 最後の残差を加えてシフト値 (dx_i, dy_i) 決定値として表 2 の値を得た。

*2 Suprime-Cam で使用されているバンド (フィルター) については <http://subarutelescope.org/Observing/Instruments/SCam/sensitivity.html> を参照のこと。

chip	dx_i	dy_i
0	-5294.357	7.801
1	-3169.207	9.680
2	-1040.665	-4107.447
3	1085.876	-4107.948
4	1080.727	13.219
5	-1011.594	9.080
6	-5260.792	-4110.721
7	-3134.652	-4110.798
8	3244.009	-4103.241
9	3203.974	15.337

表 2. CCD 配置定数 (シフト値) の採用値 (単位: pixel)
高度 60 度以上のフレームに対してフィットを行った結果, 得られた CCD 配置定数 (シフト値).

また, その後のフィット残差から回転角 θ_i の決定値として表 3 の値を得た.

chip	$\theta_i[10^{-4}\text{rad}]$	$\theta_i[10^{-2}\text{deg}]$
0	2.951 ± 0.992	1.691 ± 0.568
1	2.563 ± 0.912	1.469 ± 0.523
2	2.663 ± 0.816	1.526 ± 0.467
3	2.072 ± 0.899	1.187 ± 0.515
4	2.498 ± 1.224	1.431 ± 0.701
5	1.967 ± 1.068	1.127 ± 0.612
6	1.673 ± 1.154	0.958 ± 0.661
7	1.967 ± 0.706	1.127 ± 0.404
8	2.740 ± 1.019	1.570 ± 0.584
9	2.277 ± 1.114	1.305 ± 0.638

表 3. CCD 配置定数 (回転角) の採用値
高度 60 度以上のフレームに対してフィットを行った結果, 得られた CCD 配置定数 (回転角).

ここで我々の求めた配置定数が妥当な値かどうかを考える必要がある. 配置定数はシフト dx_i , dy_i と回転角 θ_i で与えられるが, θ_i は微小角であるため, 無視できる. 従ってここではシフトのみを考える. チップのシフトの真の値に対し, 我々の採用したシフト決定値に誤差がある場合, あるチップ上の星のモデル大チップ座標はどれも同じ方向にずれるはずである. 多くのフレームについて傾向を見れば, そのずれが誤差の範囲に収まる程度のものか, それとも明らかにずれがあるのかが分かると考えられる. そこで, チップ i 上のある標準星 j に対する残差の x, y 成分 (カタログ値 - フィット値) を $\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$, チップ i の標準星の数を N_{stari} としたとき, チップ i 内の残差ベクトル平均の x, y 成分はそれぞれ

$$\Delta x_i = \sum_{j=1}^{N_{\text{stari}}} \Delta x_{ij} / N_{\text{stari}} \quad (9)$$

$$\Delta y_i = \sum_{j=1}^{N_{\text{stari}}} \Delta y_{ij} / N_{\text{stari}} \quad (10)$$

となる. 他のチップについても同様に計算する. この式 (9) と (10) に示される, 各フレームの残差ベクトル和 $\Delta x_i, \Delta y_i$ について, W-C-RC バンドの全てのフレームに対する平均と標準偏差を求めた (表 4). その結果, 全てのチップにおいて, 残差ベクトル和の平均 (ずれ) は, $\pm 1\sigma$ 程度の範囲に収まるので, 我々の求めたチップのシフト値 dx_i, dy_i は妥当なものであると結論できる.

chip	Δx_i	Δy_i
0	-0.030 ± 0.213	0.076 ± 0.188
1	0.099 ± 0.146	-0.091 ± 0.170
2	0.159 ± 0.186	-0.083 ± 0.156
3	-0.169 ± 0.169	-0.080 ± 0.190
4	-0.025 ± 0.156	-0.042 ± 0.190
5	-0.113 ± 0.170	0.008 ± 0.153
6	-0.159 ± 0.274	-0.082 ± 0.240
7	0.068 ± 0.172	0.062 ± 0.143
8	0.078 ± 0.166	0.147 ± 0.160
9	-0.056 ± 0.137	0.076 ± 0.173

表 4. W-C-RC バンドにおけるフィット残差のベクトル和平均 (単位: pixel)

x 方向と y 方向それぞれについて, 各フレームでの各星の残差を単純平均し, 更にそれをフィットに用いたフレーム全てで単純平均した値. これにより CCD 配置定数の妥当性を確認する.

また, W-C-RC バンドについて, フレーム毎のフィット残差平均の分布を図 7 の上から 3 段目に示した.

図 7 の結果 (W-C-RC バンド) から, 決定した CCD 配置定数は本研究の目的に対して十分な精度を持っていると判断できる. また, CCD 配置定数 (回転角) 決定値を見ると, CCD チップは高い精度 (CCD チップの縦 4000 pixel に対し 1 pixel 程度ですべて同じ側に傾いている) で互いに平行に取りつけられていることがわかる.

Platais ら⁴⁾ の Table 2 には, Suprime-Cam の 2002 年 5 月のデータから求めた CCD 配置定数が掲載されている. しかしながら, 焦点面上座標のとりかたが不明 (本研究と異なっていると推測される) であり, また, 本研究の対象データとは CCD フォーマットが異なっている時期のデータであり, 配置定数の比較はできなかった.

さらに, 上記の W-C-RC バンドで定めた CCD 配置定数を使って W-J-B, W-J-V, W-C-IC, W-S-Z+ の各バンドのデータで同様のフィットを行い, そ

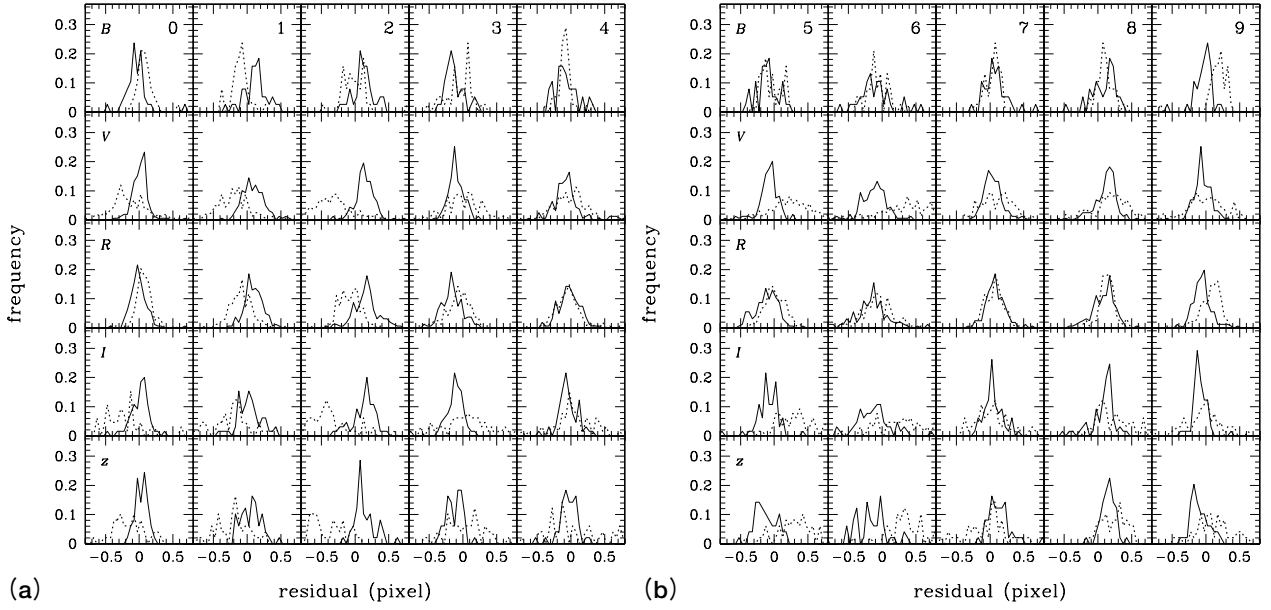


図7. フレーム毎残差平均の分布

CCD 配置定数の決定値を用いたモデルフィットの x 方向残差 (実線), y 方向残差 (破線) を示した図. 横軸は残差 (pixel), 縦軸は相対頻度. 上から1, 2, 3, 4, 5 段目はそれぞれ, W-J-B, W-J-V, W-C-RC, W-C-IC, W-S-Z+ のカラーバンドの結果を示している. また, (a) の左から1列目から5列目は CCD チップ 0-4 を, (b) の左から1列目から5列目は CCD チップ 5-9 の結果をそれぞれ示している.

の残差を求めてみた. 対象データ選択の基準は W-C-RC バンドと同じであり, ショット数はそれぞれ, 38, 159, 65, 49 である. CCD 配置定数はカラーバンドには依らないはずである. W-C-RC バンド以外のバンドについて, 式 (9) と (10) に示された Δx_i , Δy_i の平均と分散を表5に示した.

その結果, カラーバンドに依る明確な差は見られず, W-C-RC バンドで求められた配置定数を用いることに問題は無いと考えられる. CCD チップ 6 の決定精度が悪いが, これはこのチップには様々な問題があること*3と, 背景光の傾きが検出ソフトの苦手な方向であるため検出できる星が少

chip	W-J-B Δx_i	W-J-B Δy_i	W-J-V Δx_i	W-J-V Δy_i
0	-0.042 ± 0.165	0.077 ± 0.226	0.001 ± 0.220	-0.157 ± 0.383
1	0.115 ± 0.172	-0.106 ± 0.124	0.083 ± 0.194	-0.213 ± 0.325
2	0.120 ± 0.150	-0.014 ± 0.191	0.140 ± 0.140	-0.319 ± 0.344
3	-0.124 ± 0.138	-0.059 ± 0.199	-0.103 ± 0.115	0.015 ± 0.316
4	-0.073 ± 0.166	-0.054 ± 0.214	-0.083 ± 0.267	-0.053 ± 0.377
5	-0.103 ± 0.162	-0.045 ± 0.151	-0.096 ± 0.176	0.238 ± 0.382
6	-0.163 ± 0.376	-0.050 ± 0.375	-0.123 ± 0.203	0.340 ± 0.493
7	0.077 ± 0.170	0.079 ± 0.231	0.046 ± 0.140	0.117 ± 0.247
8	0.086 ± 0.179	0.107 ± 0.124	0.115 ± 0.156	0.190 ± 0.453
9	-0.033 ± 0.134	0.161 ± 0.182	-0.044 ± 0.167	-0.004 ± 0.283

chip	W-C-IC Δx_i	W-C-IC Δy_i	W-S-Z+ Δx_i	W-S-Z+ Δy_i
0	-0.046 ± 0.355	-0.309 ± 0.400	0.028 ± 0.084	-0.206 ± 0.298
1	0.031 ± 0.178	-0.233 ± 0.317	0.054 ± 0.145	-0.187 ± 0.267
2	0.127 ± 0.169	-0.392 ± 0.302	0.142 ± 0.146	-0.479 ± 0.309
3	-0.122 ± 0.140	0.036 ± 0.363	-0.128 ± 0.115	0.028 ± 0.274
4	-0.041 ± 0.145	0.032 ± 0.339	-0.038 ± 0.135	0.035 ± 0.370
5	-0.098 ± 0.164	0.322 ± 0.384	-0.130 ± 0.156	0.306 ± 0.286
6	-0.133 ± 0.263	0.312 ± 0.578	-0.187 ± 0.257	0.381 ± 0.407
7	0.045 ± 0.133	0.063 ± 0.359	0.133 ± 0.168	-0.035 ± 0.298
8	0.074 ± 0.177	0.243 ± 0.374	0.151 ± 0.104	0.211 ± 0.232
9	-0.103 ± 0.147	-0.014 ± 0.367	-0.117 ± 0.187	0.140 ± 0.290

表5. 他の4バンドにおけるフィット残差のベクトル和平均 (単位: pixel)

同様に他のバンドでも CCD 配置定数の妥当性を確認する.

なくなっていることが原因ではないかと考えられる。

また、他の4バンドについて、フレーム毎のフィット残差平均の分布を図7の上から1段目、2段目、4段目、5段目に示した。他の4バンドでのフィット結果でも CCD 配置定数が妥当な値であると判断できるが、W-J-V, W-C-IC, W-S-Z+ バンドの y 方向残差がピークが低い平坦な分布を示している。これは、y 方向は電荷転送方向で星像が延びやすく、星像中心の決定精度が低いからである、という仮説が立てられるが、原因の解明は今後の課題である。

3.3. 光学的歪みの評価

ピクセル座標 (X, Y) と標準座標 (ξ, η) の関係式 (3), (4) は、視野が十分に狭くかつ無収差ならば、シフトと定数倍の回転のみで表されるので一次変換となる。しかし、視野が広くなり、また介在する光学系の欠点または微分大気差が存在すると、一次変換では表しきれないずれが発生する。このずれのことをここでは画像の歪みという。具体的には、式 (3), (4) から一次変換項を除いた

$$\xi' = a_3 X^2 + a_4 X^3 + a_6 XY + a_7 X^2 Y + a_8 Y^2 + a_9 XY^2 + a_{10} Y^3 \quad (11)$$

$$\eta' = b_3 X^2 + b_4 X^3 + b_6 XY + b_7 X^2 Y + b_8 Y^2 + b_9 XY^2 + b_{10} Y^3 \quad (12)$$

から求められる。 $\sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}$ を本論文で評価する画像の歪みの大きさとする。

画像の歪みとしては、光学的歪み以外に微分大気差による歪みがある。本章では微分大気差の歪みが小さくて無視できる、高度 60 度以上のデータのみを用いて光学的歪みを求めることを考える。宮崎ら²⁾ における画像の歪みは微分大気差成分を含まないもので、本章で求める画像の歪みの大きさと同じ定義である。

前節で定めた CCD 配置定数を用いてモデルフィットを行った。ショットの選択基準は前節と同じである。2.3 節で述べたように、残差の大きな星を除く段階を加えている。フィットで得られた式 (3), (4) の係数の比較を行うため、北が上 (Y 正方向) になっているショットで評価を行った。用いたショット数は、W-J-B, W-J-V, W-C-RC, W-C-

IC, W-S-Z+ の各バンドでそれぞれ、20, 113, 55, 32, 30 である。さらに、式 (1), (2) の定数項 a_1, b_1 (実際には b_1 のみであった) が 20–30 秒ずれているショット (各カラーバンドで、それぞれ、0, 7, 2, 1, 0 ショット) を除いて各定数の平均をとった。表 6 に W-C-RC バンドでの式 (3), (4) の係数 $a_1, \dots, a_{10}, b_1, \dots, b_{10}$ の決定値 (ξ, η が度の単位で表されるとき値) を示した。フィットの結果から得られる光学的歪みと、宮崎ら²⁾ の光学設計のモデルから計算した光学的歪みの比較を図 8 に示した。

Coefficient			
a_1	-1.7232	$\pm$	15.8550 $\times 10^{-4}$
a_2	-5.6085	$\pm$	0.0006 $\times 10^{-5}$
a_3	-2.7331	$\pm$	0.8616 $\times 10^{-12}$
a_4	2.2379	$\pm$	0.0299 $\times 10^{-14}$
a_5	-5.2528	$\pm$	5.9852 $\times 10^{-8}$
a_6	-6.2776	$\pm$	0.7207 $\times 10^{-12}$
a_7	-6.0311	$\pm$	3.0525 $\times 10^{-16}$
a_8	-7.1279	$\pm$	0.8096 $\times 10^{-12}$
a_9	2.2302	$\pm$	0.0282 $\times 10^{-14}$
a_{10}	8.7336	$\pm$	4.2745 $\times 10^{-16}$

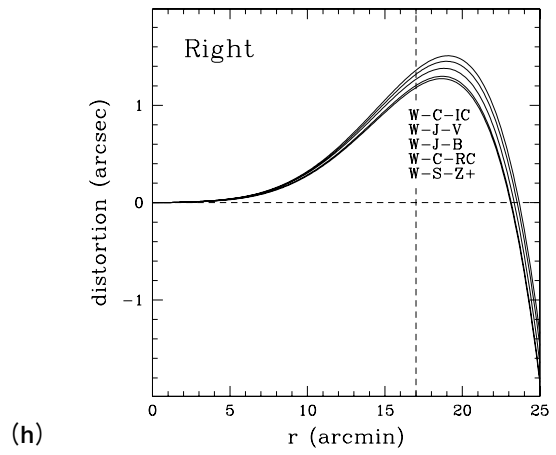
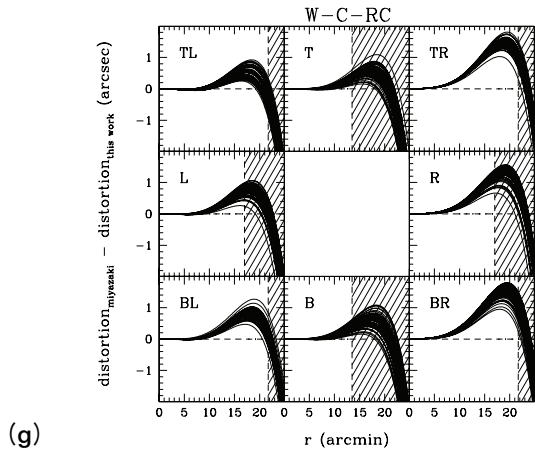
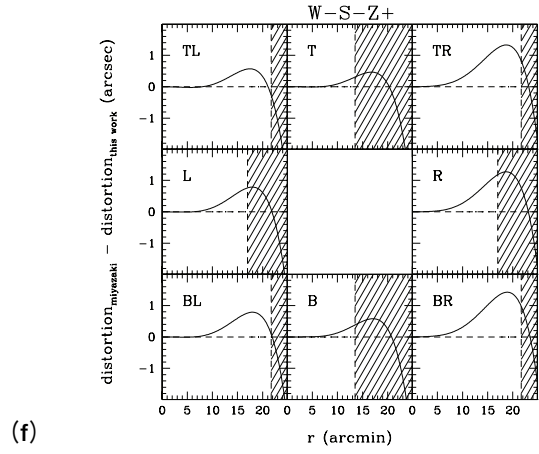
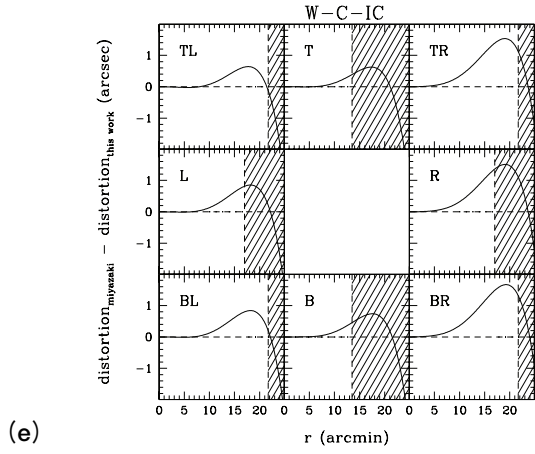
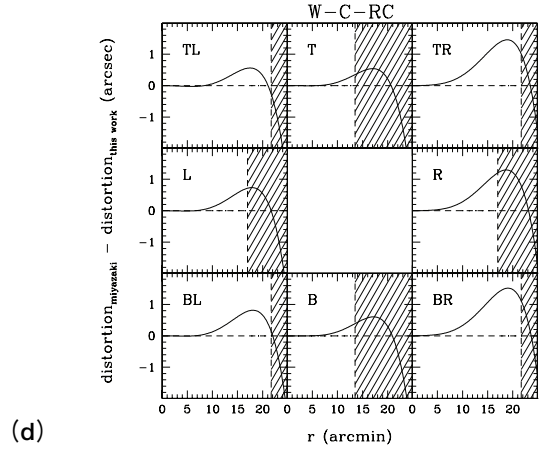
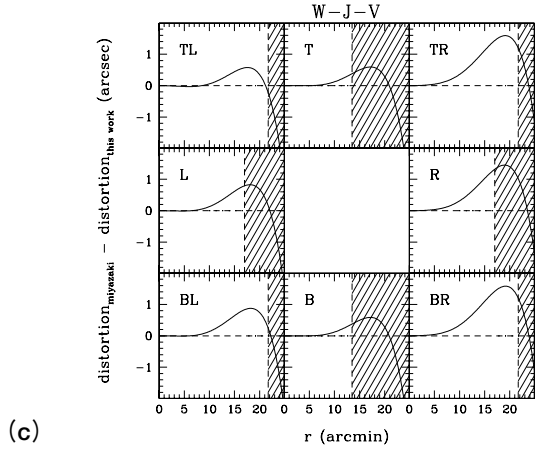
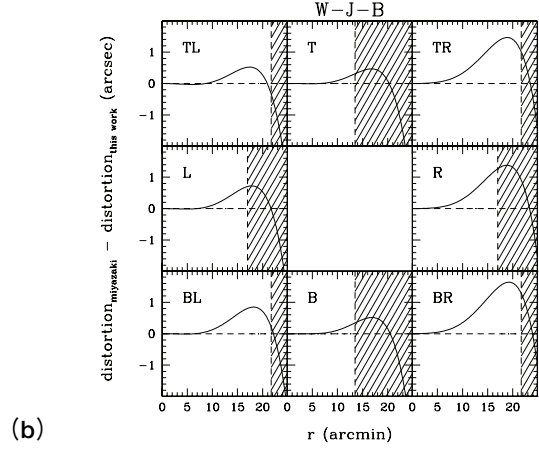
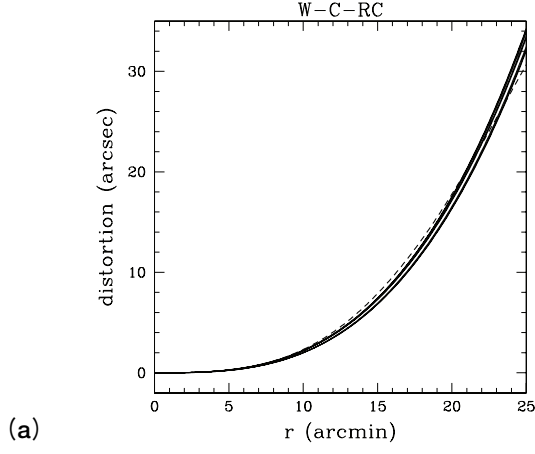
Coefficient			
b_1	-1.7742	$\pm$	1.3007 $\times 10^{-3}$
b_2	-4.5835	$\pm$	6.0021 $\times 10^{-8}$
b_3	-4.5175	$\pm$	0.4844 $\times 10^{-12}$
b_4	-4.1932	$\pm$	2.0577 $\times 10^{-16}$
b_5	5.6078	$\pm$	0.0006 $\times 10^{-5}$
b_6	9.3228	$\pm$	7.2936 $\times 10^{-13}$
b_7	-2.1500	$\pm$	0.0177 $\times 10^{-14}$
b_8	-6.0247	$\pm$	9.3085 $\times 10^{-13}$
b_9	-7.1040	$\pm$	31.8899 $\times 10^{-17}$
b_{10}	-2.3178	$\pm$	0.0383 $\times 10^{-14}$

表 6. フィットに用いた式 (3), (4) の係数 ($a_1, a_2, \dots, a_{10}, b_1, b_2, \dots, b_{10}$)

式 (3), (4) の係数. W-C-RC バンドでチップの上方向 (y の正方向) が北になっている 53 ショットの平均値。

図 8 (a) は光軸中心から 8 方向への光学的歪み (8 本の実線) を光軸中心からの距離を横軸にとって描いたものである。これは破線で示される宮崎ら²⁾ の計算した光学的歪みともほぼ一致するものであると言える。図 8 (b)–(f) は、5 バンドそれぞれに対して視野の隅まで宮崎ら²⁾ の光学的歪みと比較したものであるが視野の右側端で 1.5 秒角程度の差があるものの、概ね 1 秒角以内に収まっていることがわかる。光学的歪みがショットによってどの程度変わるのかを評価するために、図 8 (g) に W-C-RC バンドの場合について、フィット結果から求めた各ショットごとの光学的歪みの

*3 http://smoka.nao.ac.jp/help/help_supdetail.jsp を参照のこと。



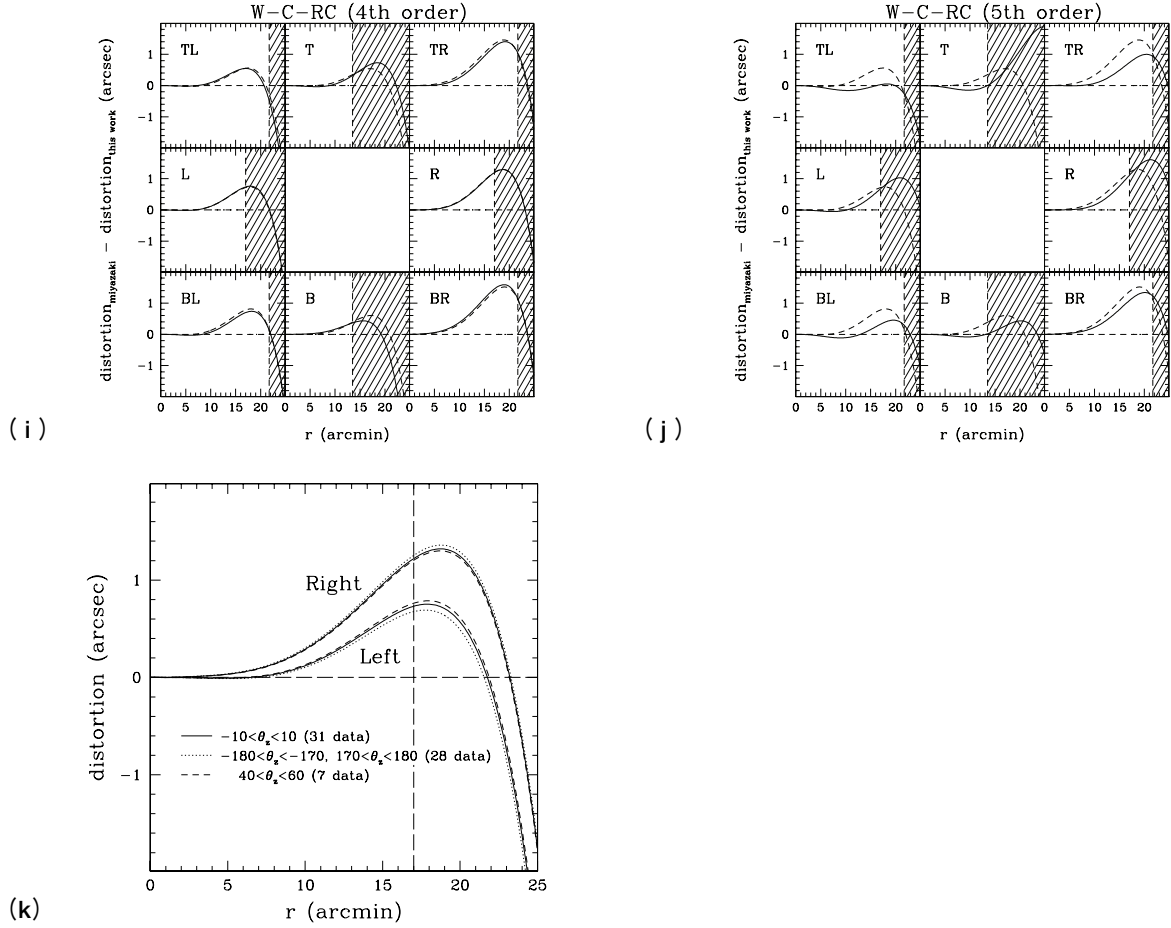


図 8. 光学的歪み

- (a) 宮崎ら²⁾ の Fig. 21 の光学的歪みとの比較. W-C-RC バンドの結果を光軸中心から上, 下, 左, 右, 右上, 右下, 左上, 左下の 8 方向を 8 本の実線で示した. また, 宮崎らの光学的歪みを破線で示した.
- (b) – (f) 宮崎ら²⁾ の光学的歪みとの差分を光軸中心から上 (T), 下 (B), 左 (L), 右 (R), 右上 (TR), 右下 (BR), 左上 (TL), 左下 (BL) 方向 (上が北のデータのみ採用) で示した図. 縦の破線は CCD チップ面の端を示したものである. 関数型を明らかにするため, 視野外 (影付き部分) まで表示してある.
- (b) W-J-B バンド.
- (c) W-J-V バンド.
- (d) W-C-RC バンド.
- (e) W-C-IC バンド.
- (f) W-S-Z+ バンド.
- (g) W-C-RC バンドの場合について, 各ショットごとの光学的歪みの差分を示した図.
- (h) 光学的歪みの差分 (右方向) を 5 バンド重ねて示した図. 上から W-C-IC, W-J-V, W-J-B, W-C-RC, W-S-Z+ バンド.
- (i) W-C-RC バンドの場合について, 4 次式でフィットした結果から求められた光学的歪み差分. 点線は 3 次式から求められた光学的歪み差分.
- (j) (i) と同様であるが, 5 次式の場合.
- (k) 光学的歪みの差分 (右方向と左方向) を CCD 面の上方向 (図 4 の y 方向) と天頂方向との角度で分類して示した図. 天頂方向 -10 度から $+10$ 度までを実線, -180 度から -170 度と $+170$ 度から $+180$ 度までを点線, $+40$ 度から $+60$ 度までを破線で示してある.

差分を示したが, 最大 1 秒角程度のばらつきが見られるものの, 傾向はほぼ同じであることが分かる. また, 図 8 (h) よりカラーバンドによる違いもほとんどないことがわかる. 今回得られた, 実際の星の分布から求めた Suprime-Cam の光学的歪みは, 宮崎ら²⁾ の光学設計のモデルと視野の殆どで 1 秒角程度の誤差で一致したことが確かめられたわけである. ただし, 宮崎ら²⁾ の計算した光

学的歪みは軸対称を仮定した光追跡によるものであるのに対し, 我々は実際の星の分布から求めたものであるから, もし歪みに非対称性があれば我々の方法で検出できるはずである. 図 8 (b) – (f) より, 焦点面上での位置 (光軸中心からの方向) による差 (光軸に対する非対称性) があることがわかる. 試みに, 歪みの非対称性が光軸中心位置のずれ (本研究の設定位置との違い)

に因ると仮定し、歪みを対称にする光軸中心位置を求めてみたが、そのような位置は見出すことができなかった．図 9 に W-C-RC バンドの場合について、位置座標決定精度の視野中心からの距離の依存性を示す．図 9 を見て分かるとおり、決定精度は視野中心から視野端までほぼ一定で、0.3–0.4 秒角程度であることが分かる．図 8 (b) – (f)

で見られる画像の歪みの差分は、画像の右側端 (TR, BR) で約 1.5 秒角、画像の左側端 (TL, BL) で約 0.7 秒角であるから、決定精度より大きな差があることが分かる．

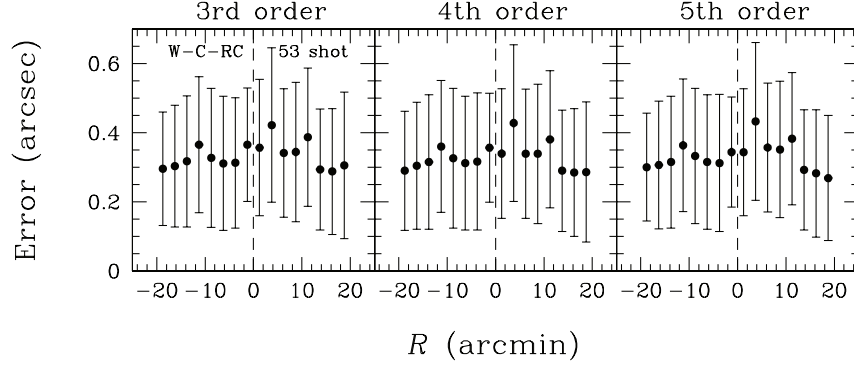


図 9. フィット誤差の視野中心からの距離の依存性

W-C-RC バンドのサンプル 53 ショットについて、フィットに使った星の位置座標と求められた座標の差を、視野中心からの距離ごとに平均、標準偏差を求めたもの．フィットをする際、式 (3), (4) の次数が 3 次, 4 次, 5 次の場合をそれぞれ 左, 中, 右 に示す．原点を中心とし X 軸方向に左右頂角 30 度の扇形の範囲に入る標準星をサンプルに用いている．位置決定精度は視野中心からの距離に依存せず、ほぼ一定であることが分かる．また、Y 軸方向や他の方向に沿って調べた場合も、同様の結果が得られることも確認している．

また、2 節で述べたように、我々は 4 次式、5 次式でもフィットを行っている．ここで、4 次式、5 次式でフィットする際には、式 (3), (4) に対して以下のような 4 次項 (ξ_{4th}, η_{4th}), 5 次項 (ξ_{5th}, η_{5th}) を加えた．

$$\xi_{4th} = a_{11}X^4 + a_{12}X^3Y + a_{13}X^2Y^2 + a_{14}XY^3 + a_{15}Y^4 \quad (13)$$

$$\eta_{4th} = b_{11}X^4 + b_{12}X^3Y + b_{13}X^2Y^2 + b_{14}XY^3 + b_{15}Y^4 \quad (14)$$

$$\xi_{5th} = a_{16}X^5 + a_{17}X^4Y + a_{18}X^3Y^2 + a_{19}X^2Y^3 + a_{20}XY^4 + a_{21}Y^5 \quad (15)$$

$$\eta_{5th} = b_{16}X^5 + b_{17}X^4Y + b_{18}X^3Y^2 + b_{19}X^2Y^3 + b_{20}XY^4 + b_{21}Y^5 \quad (16)$$

表 6 と同様に、W-C-RC バンドでの各係数の平均値を表 7 (4 次式), 表 8 (5 次式) に示した．これらの結果を基に、光学的歪みの差分を求め、図 8 (i), (j) に示したが、どちらも画像の右側端 (TR, BR) と左側端 (TL, BL) で約 0.8 秒角程度の差があることが分かる．図 9 より 4 次式、5 次式でフィットした場合も位置座標決定精度は 0.3–0.4 秒角程度であることが示されており、非

対称性は有意であると考えられる．よって、図 8 (b) – (f) で見られる非対称性は、フィットの次数が低いことに因るものではないことが分かる．

次に、CCD チップから見た鉛直方向（重力による光学系の歪みを生じる方向）によってこの非対称性がどう変わるかを図 8 (k) に示した．光学的歪みを生み出す最大の源と考えられる主焦点補正光学系は、望遠鏡側に固定しており、CCD チップから見た鉛直方向は変わらない．一方、ローテーターに乗った CCD カメラ（デュワー窓やフィルターを含む）の鉛直方向は変化する．従って、主焦点補正光学系に原因がある場合、鉛直方向の違いによって非対称性の方向が変わるという予想ができる．しかし、図 8 (k) の結果はそうならなかった．つまり、今回見られた非対称性は、CCD カメラ側に付いた光学要素が原因であることが考えられるが、説明は今後の課題である．

本節では、ここまで宮崎ら²⁾ で述べられている動径方向の光学的歪みとの比較を行ってきたが、非動径方向の光学的歪みについても調べてみた．図 10 に W-C-RC バンドの場合について、宮崎ら²⁾ と我々の光学的歪みの差をベクトルで示したものを示した．図 10 より光学的歪みには宮崎ら²⁾ には述べられていない非動径方向成分があることが分かる．差分ベクトルの方向が動径方向と

Coefficient			
a_1	-1.6945	$\pm$ 15.8405	$\times 10^{-4}$
a_2	-5.6085	$\pm$ 0.0006	$\times 10^{-5}$
a_3	-2.6593	$\pm$ 2.5157	$\times 10^{-12}$
a_4	2.2365	$\pm$ 0.0305	$\times 10^{-14}$
a_5	-5.2395	$\pm$ 5.9842	$\times 10^{-8}$
a_6	-7.4020	$\pm$ 2.1571	$\times 10^{-12}$
a_7	-6.1618	$\pm$ 3.1974	$\times 10^{-16}$
a_8	-9.2763	$\pm$ 2.9875	$\times 10^{-12}$
a_9	2.2317	$\pm$ 0.0279	$\times 10^{-14}$
a_{10}	8.5012	$\pm$ 4.2229	$\times 10^{-16}$
a_{11}	2.9606	$\pm$ 95.0673	$\times 10^{-21}$
a_{12}	6.0601	$\pm$ 8.9627	$\times 10^{-20}$
a_{13}	-1.5960	$\pm$ 12.0375	$\times 10^{-20}$
a_{14}	1.9986	$\pm$ 14.2911	$\times 10^{-20}$
a_{15}	1.6508	$\pm$ 1.9876	$\times 10^{-19}$

Coefficient			
b_1	-1.7554	$\pm$ 1.3002	$\times 10^{-3}$
b_2	-4.3995	$\pm$ 5.9978	$\times 10^{-8}$
b_3	-9.4858	$\pm$ 1.8080	$\times 10^{-12}$
b_4	-5.2281	$\pm$ 2.1096	$\times 10^{-16}$
b_5	5.6080	$\pm$ 0.0006	$\times 10^{-5}$
b_6	-1.3583	$\pm$ 2.1932	$\times 10^{-12}$
b_7	-2.1620	$\pm$ 0.0206	$\times 10^{-14}$
b_8	-4.0049	$\pm$ 3.2512	$\times 10^{-12}$
b_9	-2.1598	$\pm$ 3.6021	$\times 10^{-16}$
b_{10}	-2.3296	$\pm$ 0.0398	$\times 10^{-14}$
b_{11}	2.0229	$\pm$ 0.6645	$\times 10^{-19}$
b_{12}	5.4409	$\pm$ 8.2470	$\times 10^{-20}$
b_{13}	9.1402	$\pm$ 10.8905	$\times 10^{-20}$
b_{14}	1.7482	$\pm$ 1.6334	$\times 10^{-19}$
b_{15}	2.1102	$\pm$ 1.9286	$\times 10^{-19}$

表 7. 4 次式でフィットした場合の係数 ($a_1, a_2, \dots, a_{15}, b_1, b_2, \dots, b_{15}$)
4 次式でフィットした場合の係数. W-C-RC バンドでチップの上方向 (y の正方向) が北になっている 53 ショットの平均値.

Coefficient			
a_1	-1.6656	$\pm$ 15.8389	$\times 10^{-4}$
a_2	-5.6097	$\pm$ 0.0010	$\times 10^{-5}$
a_3	-3.1745	$\pm$ 2.4769	$\times 10^{-12}$
a_4	2.4223	$\pm$ 0.1130	$\times 10^{-14}$
a_5	-5.7406	$\pm$ 5.8201	$\times 10^{-8}$
a_6	-7.7515	$\pm$ 2.1775	$\times 10^{-12}$
a_7	-1.0753	$\pm$ 1.1543	$\times 10^{-15}$
a_8	-1.0394	$\pm$ 0.2533	$\times 10^{-11}$
a_9	2.3566	$\pm$ 0.1502	$\times 10^{-14}$
a_{10}	2.6238	$\pm$ 1.9287	$\times 10^{-15}$
a_{11}	2.8528	$\pm$ 9.3884	$\times 10^{-20}$
a_{12}	4.4683	$\pm$ 9.3792	$\times 10^{-20}$
a_{13}	-2.3506	$\pm$ 13.5997	$\times 10^{-20}$
a_{14}	6.6938	$\pm$ 16.0766	$\times 10^{-20}$
a_{15}	2.4925	$\pm$ 1.7943	$\times 10^{-19}$
a_{16}	-6.6696	$\pm$ 3.1582	$\times 10^{-23}$
a_{17}	2.7418	$\pm$ 4.0372	$\times 10^{-23}$
a_{18}	3.5130	$\pm$ 5.6221	$\times 10^{-23}$
a_{19}	-1.0619	$\pm$ 7.2600	$\times 10^{-23}$
a_{20}	-1.2502	$\pm$ 0.8127	$\times 10^{-22}$
a_{21}	-9.4520	$\pm$ 10.2219	$\times 10^{-23}$

Coefficient			
b_1	-1.7597	$\pm$ 1.3001	$\times 10^{-3}$
b_2	-4.2436	$\pm$ 6.0780	$\times 10^{-8}$
b_3	-7.8751	$\pm$ 1.5710	$\times 10^{-12}$
b_4	-1.2999	$\pm$ 0.8307	$\times 10^{-15}$
b_5	5.6107	$\pm$ 0.0010	$\times 10^{-5}$
b_6	6.2944	$\pm$ 17.0004	$\times 10^{-13}$
b_7	-2.6409	$\pm$ 0.0818	$\times 10^{-14}$
b_8	-3.0815	$\pm$ 3.6407	$\times 10^{-12}$
b_9	3.6302	$\pm$ 11.9945	$\times 10^{-16}$
b_{10}	-2.6586	$\pm$ 0.1732	$\times 10^{-14}$
b_{11}	1.3725	$\pm$ 0.5553	$\times 10^{-19}$
b_{12}	-3.8963	$\pm$ 7.7034	$\times 10^{-20}$
b_{13}	1.0714	$\pm$ 11.8109	$\times 10^{-20}$
b_{14}	7.6764	$\pm$ 12.7311	$\times 10^{-20}$
b_{15}	1.6621	$\pm$ 2.1054	$\times 10^{-19}$
b_{16}	3.1690	$\pm$ 2.3690	$\times 10^{-23}$
b_{17}	1.4906	$\pm$ 0.2884	$\times 10^{-22}$
b_{18}	-5.6177	$\pm$ 38.3438	$\times 10^{-24}$
b_{19}	1.6751	$\pm$ 0.4785	$\times 10^{-22}$
b_{20}	-2.0342	$\pm$ 6.5403	$\times 10^{-23}$
b_{21}	1.1523	$\pm$ 0.8144	$\times 10^{-22}$

表 8. 5 次式でフィットした場合の係数 ($a_1, a_2, \dots, a_{21}, b_1, b_2, \dots, b_{21}$)
5 次式でフィットした場合の係数. W-C-RC バンドでチップの上方向 (y の正方向) が北になっている 53 ショットの平均値.

大きく違えば、宮崎ら²⁾と我々の光学的歪みの差（スカラー値）が図8（b）－（f）に示した差分の値よりもかなり大きくなるわけだが、図10上のベクトルの大きさは右側で最大1.3秒角であるなど、図8（d）で示された差分の値と大きな違いは無いことが分かる。また、図10により歪みの非対称性の様子がより鮮明に示されたと言える。

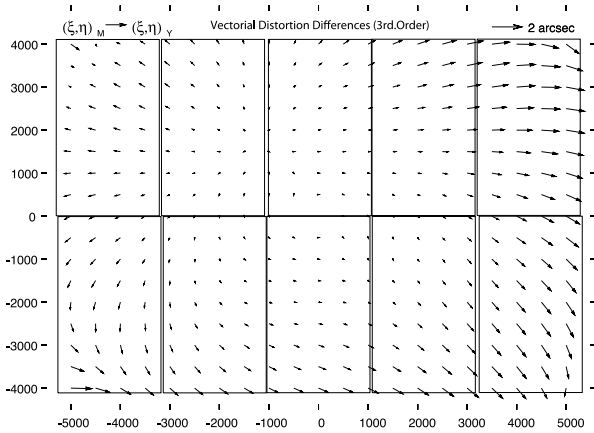


図10. 光学的歪みの方向と大きさ

本論文で求めた光学的歪みベクトル（式（11），（12））から宮崎ら²⁾の光学的歪みベクトル（動径方向/軸対称）を引いて得られた差分ベクトルをCCD座標（大チップ座標）上にプロットした図。矢印の根本がCCD座標上の位置を示し、差分ベクトルを矢印として表した。図の右上に2秒角に相当する矢印の長さを示してある。表6の値を用いて計算した。

3.4. 大気差の評価

3.2, 3.3 節では高度60度以上で撮られたデー

タを対象にしたが、それより低い高度で撮られたデータについてもフィットを行い、大気差による影響が見られるかどうかを調べた。W-J-B, W-J-V, W-C-RC, W-C-IC, W-S-Z+の各カラーバンドにおけるサンプル数は、高度45–60度でそれぞれ、97, 133, 172, 45, 41, 高度30–45度でそれぞれ、53, 292, 124, 108, 15, 高度30度以下でそれぞれ、12, 90, 31, 8, 2ショットである。W-C-RCバンドについて、式（3），（4）の係数から計算した、鉛直方向、水平方向の5000 pixelに相当する角度秒と天頂距離との関係を図11に示した。なお、高度が低いときのフィットの精度は高度が高い場合と大きく違わなかった。

高度が低くなれば大気差によって天球上の天体の見かけ上の大きさは鉛直方向に縮んでいく。つまり、図11で示した5000 pixelに対応する天球座標上の距離は、高度が低くなれば鉛直方向で大きくなっていく。図11はそれを鮮やかに示している。田中¹⁴⁾とCox¹⁵⁾を用いて計算したマウナケア山頂（温度0度、気圧600 hPaとする）における650 nm（W-C-RCバンド付近に相当）での微分大気差（図11と同じ単位に換算）は0.172である。これは図11（a）の回帰直線の傾き 0.197 ± 0.012 と近く、大きく矛盾しない。また、同様に田中¹⁴⁾とCox¹⁵⁾を用いて計算したW-J-B, W-J-V, W-C-IC, W-S-Z+に対する微分大気差は0.175, 0.173, 0.172, 0.171であり、本研究では、それぞれ、 0.179 ± 0.030 , 0.201 ± 0.018 , 0.197 ± 0.019 , 0.160 ± 0.028 であった。カラーバンドによる系統的違いは統計的誤差範囲内に収まってしまった

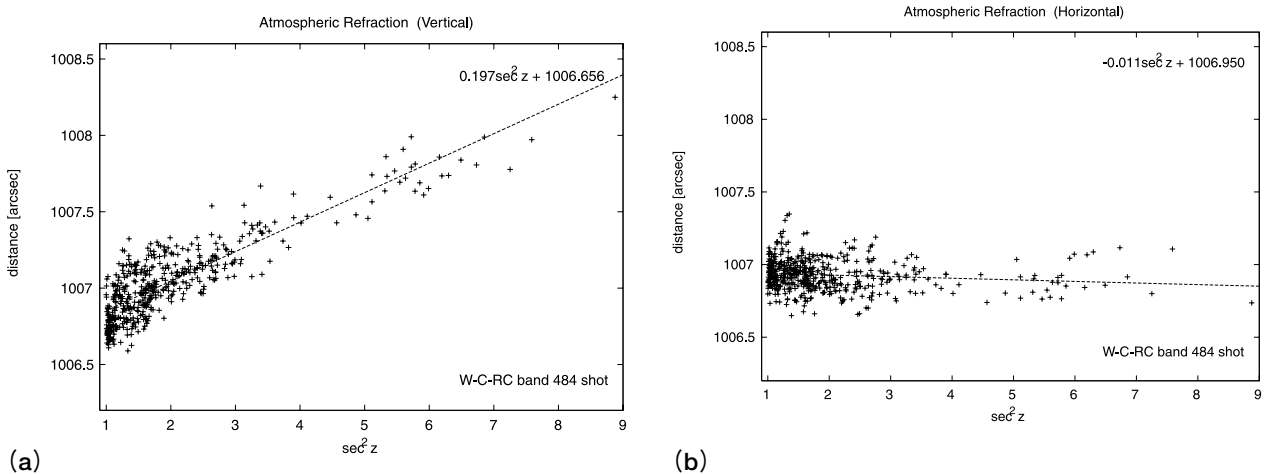


図11. 焦点面上スケールと天頂距離の関係

- (a) 鉛直方向の5000 pixelに相当する天球上の角度と $\sec z$ (z は天頂距離) の関係を示した図。W-C-RC バンド484ショットについてプロットし、回帰直線とその係数を示した。
 (b) 水平方向の5000 pixelに相当する天球上の角度と $\sec z$ (z は天頂距離) の関係を示した図。

め、これを考察するには至らなかった。

3.5. 位置較正の精度評価

まず、位置較正の精度は次のように与えられる。1 ショット内にある標準星 i に対する残差の ξ , η 成分 (カタログ値-フィット値) を ξ_i , η_i , 1 ショット内の星の数を N_{star} としたとき、あるショットにおけるフィット誤差 R は

$$R = \sum_{i=1}^{N_{\text{star}}} \sqrt{\Delta\xi_i^2 + \Delta\eta_i^2} / N_{\text{star}} \quad (17)$$

さらに、これを全ショットに対して平均を取ったものが位置較正の精度 A である。

$$A = \sum_{\text{shot}} R / N_{\text{shot}} \quad (18)$$

図 12 はフィット残差 R の分布を全てのショットについて描いたものであり、これから我々の達成した位置決定精度は 0.2–0.5 秒角程度であると言える。この精度は、以下の 3 つの要因で決まっていると考えられる。

(1) カタログの誤差：Zacharias ら¹⁶⁾ は、USNO-B1.0 カタログの精度に関して、より精度の高いとされる UCAC2 カタログ¹⁷⁾ からの系統的な誤差が 0.2 秒角程度、ランダムな誤差が 0.2 秒角程度であることを明らかにしている。1 ショットより大きなスケールの系統的な誤差は我々の方法ではシフトとして吸収されてしまうため、フィットの残差としては検出されない。従って、我々の結果に影響を与えるのは乱数的な誤差であり、本研究の位置決定精度がこの精度を上回ることができないことは明白である。

(2) 星像中心位置の決定精度：次に述べる二つの試行を行って評価した。

(a) 人工星による試行：画像フレームに (明るさ・位置・ポワソンノイズを設定した) 人工的な星を挿入し、それを我々のソフトウェアで検出し、その中心位置を元の位置と比べる。試行を行った結果、ずれは 0.01–0.03 秒角であった。

(b) 撮像データ解析で用いられる他のソフトウェアと比較：天文学の撮像データを解析する際によく用いられる SEXtractor¹⁸⁾ と IRAF の DAOPHOTO パッケージ中の DAOFIND¹⁹⁾ で、

本論文で使ったフレームの幾つかの星像中心位置を測定し、本論文の中心位置検出ソフトウェアと比較する。これを行った結果、互いのずれは 0.02 秒角程度であった。

この二つの試行から星像中心位置の決定精度は概ね 0.03 秒角以下であると結論できる。

(3) フィットにおける誤差：ここには、(a) 3 次式では吸収できないずれ、(b) 星の分布の偏りによる誤差、(c) 大気の揺らぎによる誤差等が含まれると考えられる。(a) については 2.1 節で述べたように、4 次以上にすることによっても僅かな改善しか見られないことから、0.05 秒角程度以下ではないかと推測される。(b) は、星が多すぎる領域では間引くことによって、なるべく平均化しているものの、それでもなお偏りが存在することに起因する誤差である。(c) は露出の長さに関連する。露出が短い画像では基本的に星像は小さくシャープであるものの、局所的な大気の揺らぎを大きく受けるため、大気の揺らぎスケールと関係する誤差を生じる。逆に露出が長い場合には、大気の揺らぎは時間的に平均されて均されるものの、星像が大きくなり星像中心位置の決定精度が落ちると推測される。図 12 に示されるフィット

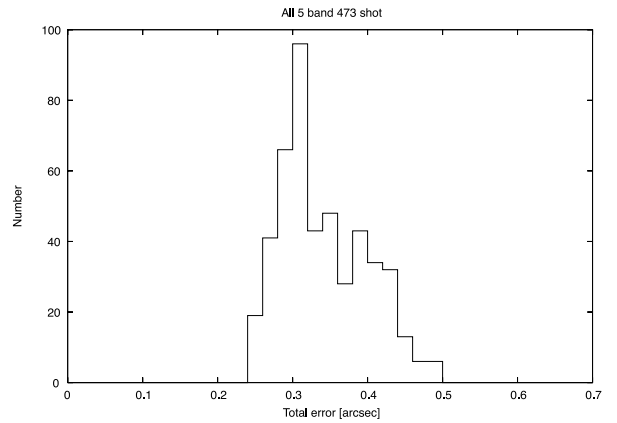


図12. フィット誤差の統計

5 バンドの全サンプル 473 ショットについてのフィット誤差のヒストグラム。ここでフィット誤差 (Total error) とは以下のことである。ある標準星 i について $\Delta\xi_i$, $\Delta\eta_i$ をそれぞれ ξ , η 方向の (カタログ値-フィット値) として、各星の残差が

$$\sqrt{(\Delta\xi_i^2 + \Delta\eta_i^2)}$$

となる。 N_{star} を標準星の数として、各星の残差を 1 ショット内の全ての標準星に対して取った平均値

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{star}}} \sqrt{(\Delta\xi_i^2 + \Delta\eta_i^2)} / N_{\text{star}}$$

が、あるショットにおけるフィット誤差である。

の残差は前記の (1), (2) の誤差を含んだものであるため、フィットの過程での誤差のみの評価は困難である。ただし、要素としては一番大きいと推測されるカタログ誤差が 0.2 秒角であり、全体の残差が 0.2–0.5 秒角であることから、フィットの誤差は 0.4 秒角以下であると考えられる。

本研究の位置較正の統計的精度は、目標の 1 秒角を越える 0.2–0.5 秒角 (1–3 pixel) 程度を達成した。また、3.3 節の結果より我々が求めた光学的歪みが光学設計のモデルとよく合致していること、3.4 節の結果より大気差が量的に正しく検出されたことがわかり、本研究の手法の精度が十分に高いことが検証された。図 13 は位置較正の前と後それぞれの WCS を用いて計算した標準星の (α, δ) と USNO-B1.0 での座標値との差をベクトルで示した図である。この図からも Suprime-Cam データが高い精度で位置較正されたことが見てとれる。

4. 今後の課題

4.1. 位置較正に関する今後の研究課題

Suprime-Cam による観測データは現在も増加中であり、本研究で使用できなかった (SMOKA でまだ公開されていない 2005 年 9 月以降) データが、2007 年度後半に計画されている CCD チップ交換までの分として約 2 年間分 (約 20 万フレーム) あり、順次使用可能になる見込みである。

使用可能データが 30 万フレーム (約 3 年間) から 50 万フレーム (約 5 年間) に増えることによって、さらなる研究の進展が期待できる。

今後、本研究で原因が解明できなかった、3.2 節の W-C-IC, W-S-Z+ バンドにおける y 方向残差分布が平坦である件、および、3.3 節の光学的歪みが非対称である件等について明らかにしたいと考えている。また、使用可能なデータの増加により、3 章で述べた CCD チップ配置定数や 3 次フィットの各係数の望遠鏡高度やカラーバンド (フィルター) への依存性をさらに究明することができると期待される。また、以下も検証していきたいと考えている。

(1) 各定数, 係数の時間変化の検証

各定数や係数の時間変化を調べることで、望遠鏡や観測装置の経年変化の有無・程度を推測できる可能性がある。現在と同じ CCD チップ配置である Suprime-Cam は 2007 年度後半に運用を終える予定であるが、これらの結果や手法はアーカイブデータ利用者に役立つのはもちろん、CCD チップ交換後の Suprime-Cam の運用や次世代の撮像装置の開発、また、観測データの品質評価 (望遠鏡や観測装置の不調の検出を含む)²⁰⁾ に役立つものと期待される。

(2) USNO-B1.0 カタログの精度の検証

USNO-B1.0 カタログは 1,042,618,261 個の天体

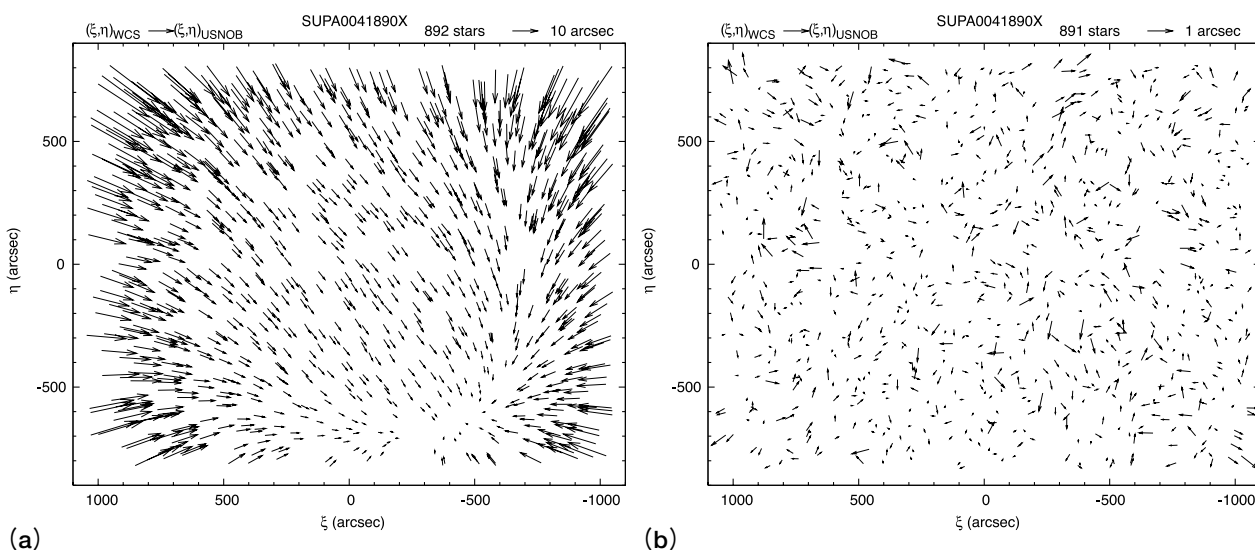


図13. 較正前後の比較

(a) SUPA0041890X の 10 フレームそれぞれの較正前の WCS による (ξ, η) から USNO-B1.0 カタログによる (ξ, η) へとした残差ベクトル。残差は視野周辺で 20–30 秒に達する。右上に矢印で 10 秒の大きさが描いてある。

(b) 上と同一ショットの較正後の WCS (X, Y の 3 次式モデル) による (ξ, η) から USNO-B1.0 カタログによる (ξ, η) へとした残差ベクトル。スケールは (a) の 10 倍にしてある。残差は視野全面に渡って 1 秒以内に収まっている。1 秒を超える星が最周辺に 1 つだけあったのが、フィットでは除外された。

を含み、V 等級が 21 等までの恒星を完全に網羅し、J2000.0 分点で位置測定精度 0.2 秒角以内、5 色の波長帯での測光精度 0.3 等級以内、恒星と非恒星天体の判別精度 85 % 以上の品質を持っているとされている¹⁰⁾。本研究における位置較正はフィットがうまくいった場合には精度 0.2–0.5 秒角に達しており、フィットの残差を統計的に扱うことによって USNO-B1.0 カタログの精度の検証に貢献できるのではないかと期待される。また、大きな固有運動を持った星の確認にも役立つ可能性がある。

4.2. 定常運用化に向けての課題

本研究で開発した位置較正法を、SMOKA に実装して定常運用化する予定である。安定して効率的な運用を実現するために解決しなければならない課題として定常運用としての手順の確立が重要である。

実際の運用では、2 章で述べた位置較正の手順を常にとれるとは限らない。なぜならショット内各フレームに十分な数の標準星を採れるとは限らないからである。定常運用の際にはすべてのショットについて 2 章で述べたフィットを行うのではなく、標準星が多く採れないショットでは、3.3, 3.4 節で求められた式 (3), (4) の係数の平均値をあてはめることを考える。十分な数の標準星が採れるショットに対しては、通常のフィットを続けていき、その係数平均値を常に改良していくことを考える。このような方法でどの程度精度が保たれるか検討することが今後の課題である。

定常運用化のためにはできる限りの省力化及び自動化をはからねばならず、このような手順をどのように定常運用に乗せるかが課題となる。また、何らかの障害が発生した場合の対策や運用要員が状況を把握しやすいログの作成なども検討課題である。さらに、処理時間も重要である。高精度な位置較正が実現できてそのために長い時間（例えば 1 晩分のデータの処理に数日かかるなど）を要するのでは定常運用としては望ましくない。

4.3. 高位置精度撮像データの活用

本研究の定常運用化によってこれまでよりも高い位置精度の Suprime-Cam データが得られることになる。SMOKA ではそれを活用して以下に述べる高度な検索機能の実現を計画している。

(1) 高精度位置検索

SMOKA 論文 4⁹⁾ で述べた高精度位置検索（ピ

ンポイント検索）の精度が高まるわけであるが、それだけにとどまらず、各種天体カタログとの連携をとった検索が可能になると期待される。すなわち、フレーム内の天体名一覧を表示したり、早見画像上にそれをオーバープロットする機能である。

(2) 重複領域検索

特定の天域や天体を検索条件にするのではなく、複数回の観測が行われている領域、という条件で検索を行う機能（重複領域検索）の開発を計画している。これは例えば、場所を限定せずに 3 色以上の観測が行われている領域や、積算撮像時間が一定時間を越えている、あるいは、複数回観測されている領域を探す機能である。これらは天体の色指数を求めたい場合や、後者は深い撮像データを得たり、位置や明るさが変化する天体を調べたりしたい場合に有効である。

4.4. 他の観測装置への適用

本研究では、SMOKA において最も利用数が多く、かつ 34×27 分角という広視野な撮像データを提供する Suprime-Cam の観測データを対象としたが、他の観測装置についても取り組んでいくことが望まれる。特に視野が 4×7 分角と赤外線撮像装置としては比較的広く、利用者も多い近赤外線多天体撮像分光装置 (MOIRCS)²¹⁾ の位置較正は検討に値する。MOIRCS は光学的歪みは大きくないと考えられるが、視野が Suprime-Cam ほど広くなく、赤外波長域のデータであるために位置標準星が十分な数確保できるかどうか懸念される。また、木曽観測所の 2K-CCD カメラ²²⁾ は 50×50 分角の広視野を持っており、検討に値すると思われるが、画素サイズが 1.5 秒角と大きく、PSF サイズも大きいため、位置較正の精度を高くできない恐れがある。いずれも今後取り組んでいくべき課題である。

5. まとめ

本研究は、アーカイブ (SMOKA) より入手可能な Suprime-Cam データ約 30 万フレームから選択したデータを対象にして、1 秒角の精度の位置較正を実現できる手法を開発した。本研究は観測装置立ち上げ時に少数の画像データを用いて行われた位置精度の確認とは異なって、大量のデータを用いることによって得られた統計的精度の高い位置情報であり、今後計画される Suprime-Cam データを用いた大規模な天体カタログ作成に基づ

く研究において大きな威力を発揮するものと期待される。このような大量のアーカイブデータを用いた統計的精度の高い位置情報に基づいた研究は、今後発展が予想される大量の多波長データを用いた天体物理学の研究においても利用価値の高いものであり、本研究の方法はその礎をつくる上で重要な役割を果たすものと確信している。また、本研究のような大量のデータを用いる統計的研究は、アーカイブの有用な利用方法の一つであると言える。

謝辞

本研究の遂行にあたって、貴重な助言を下さった八木雅文氏、および、小宮山裕氏に感謝する。また、数々の有益な助言、とりわけ3.3節に関する詳細かつ綿密な意見を下さった匿名の査読者にも深く感謝したい。

本研究は、国立天文台天文学データ解析計算センター（平成 18 年度より天文データセンターに改組）プロジェクト経費の援助を得て行なわれた。

参考文献

- 1) Kaifu, N.: Subaru Telescope, in *Advanced Technology Optical/IR Telescopes VI, SPIE*, **3352**, 14–22 (1998).
- 2) Miyazaki, S., Komiyama, Y., Sekiguchi, M., Okamura, S., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Imi, K., Kimura, M., Nakata, F., Okada, N., Ouchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M. & Yasuda, N.: Subaru Prime Focus Camera - Suprime-Cam, *PASJ*, **54**, 833–853 (2002).
- 3) Platais, I., Kozhurina-Platais, V., Girard, T.M., van Altena, W.F., Klemola, A.R., Stauffer, J.R., Armandroff, T.E., Mighell, K.J., Dell’Antonio, I.P., Falco, E.E. & Sarajedini, A.: WIYN OPEN CLUSTER STUDY VIII. THE GEOMETRY AND STABILITY OF THE NOAO CCD MOSAIC IMAGER, *AJ*, **124**, 601–611 (2002).
- 4) Platais, I., Wyse, R.F.G. & Zacharias, N.: Deep Astrometric Standards and Galactic Structure, *PASP*, **118**, 107–123 (2006).
- 5) Claver, C.F., Sweeney, D.W., Tyson, J.A., Althouse, B., Axelrod, T.S., Cook, K.H., Daggert, L.G., Kantor, J.C., Kahn, S.M., Krabbendam, V.L., Pinto, P., Seabag, J., Stubbs, C. & Wolff, S.C.: Project status of the 8.4-m LSST, *Proc. SPIE*, **5489**, 705–716 (2004).
- 6) 馬場肇, 安田直樹, 市川伸一, 八木雅文, 岩本信之, 高田唯史, 洞口俊博, 多賀正敏, 渡邊大, 奥村真一郎, 小澤友彦, 山本直孝, 濱部勝: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発, 国立天文台報, **6**, 23–36 (2002).
- 7) 山本直孝, 野田祥代, 多賀正敏, 小澤友彦, 洞口俊博, 奥村真一郎, 古莊玲子, 馬場肇, 八木雅文, 安田直樹, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発2, 国立天文台報, **6**, 79–100 (2003).
- 8) 榎基宏, 多賀正敏, 小澤友彦, 野田祥代, 奥村真一郎, 吉野彰, 古莊玲子, 馬場肇, 洞口俊博, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発3, 国立天文台報, **7**, 57–84 (2004).
- 9) 出田誠, 榎基宏, 小澤友彦, 吉野彰, 仲田史明, 奥村真一郎, 山本直孝, 古莊玲子, 矢治健太郎, 山田善彦, 八木雅文, 洞口俊博, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡公開データアーカイブシステムの開発4, 国立天文台報, **8**, 59–84 (2005).
- 10) Monet, D.G., Levine, S.E., Canzian, B., Ables, H.D., Bird, A.R., Dahn, C.C., Guetter, H.H., Harris, H.C., Henden, A.A., Leggett, S.K., Levison, H.F., Luginbuhl, C.B., Martini, J., Monet, A.K.B., Munn, J.A., Pier, J.R., Rhodes, A.R., Rieke, B., Sell, S., Stone, R.C., Vrba, F.J., Walker, R.L., Westerhout, G., Brucato, R.J., Reid, I.N., Schoening, W., Hartley, M., Read, M.A. & Tritton, S.B.: The USNO-B Catalog, *AJ*, **125**, 984–993 (2003).
- 11) Green, R.M.: *Spherical Astronomy*, Chap.13, Cambridge University Press (1985).
- 12) Teukolsky, S.A., Press, W.H., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P.: *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press (1993).
- 13) Wallace, P.: The SLALIB Library, *ASP Conf. Ser.* **61**, 481–484 (1994).
- 14) 田中済: 高精度望遠鏡ポインティングに必要な天体位置の補正, 国立天文台報, **1**, 349–360 (1992).
- 15) Cox, A.N. ed.: *Allen's Astrophysical Quantities* Fourth Edition, Chap.11.20, Springer (2000).
- 16) Zacharias, N., Monet, D.G., Levine, S.E., Urban, S.E., Gaume, R. & Wycoff, G.L.: The Naval Observatory Merged Astrometric

Dataset (NOMAD) AAS, **205**, 4815 (2004)
<http://www.nofs.navy.mil/nomad.html>.

- 17) Zacharias, N., Urban, S.E., Zacharias, M.I., Wycoff, G.L., Hall, D.M., Monet, D.G. & Rafferty, T.J.: The Second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2) *AJ*, **127**, 3043–3059 (2004).
- 18) Bertin, E. & Arnouts, S.: SExtractor: Software for source extraction. *A&AS*, **117**, 393–404 (1996).
- 19) Stetson, P.B.: DAOPHOT - A computer program for crowded-field stellar photometry *PASP*, **99**, 191–222 (1987).
- 20) 仲田史明, 出田誠, 八木雅文, 榎基宏, 吉野彰, 山田善彦, 高田唯史, 市川伸一: すばる望遠鏡観測データ品質評価システムの開発, 国立天文台報, **8**, 43–57 (2005).
- 21) Ichikawa, T., Suzuki, R., Tokoku, C., Uchimoto, Y.K., Konishi, M., Yoshikawa, T., Yamada, T., Tanaka, I., Omata, K. & Nishimura, T.: MOIRCS: multi-object infrared camera and spectrograph for SUBARU, *SPIE*, **6269**, 626–916 (2006).
- 22) Itoh, N., Soyano, T., Tarusawa, K., Aoki, T., Yoshida, S., Hasegawa, T., Yadomaru, Y., Nakada, Y. & Miyazaki, S.: A very Wide-Field CCD Camera for Kiso Schmidt Telescope, *Publ. Natl. Astron. Obs. Japan*, **6**, 41–48 (2001).