

## 岡山天体物理観測所188-cm望遠鏡の改修

黒田大介, 泉浦秀行, 柳澤顕史, 神戸栄治, 小矢野 久, 福井暁彦, 筒井寛典, 浮田信治,  
沖田喜一, 戸田博之, 坂本彰弘, 今田 明, 清水康廣

(2014年12月10日受付; 2015年1月16日受理)

## Performance Upgrade of the 188-cm Telescope at Okayama Astrophysical Observatory

Daisuke KURODA, Hideyuki IZUMIURA, Kenshi YANAGISAWA, Eiji KAMBE, Hisashi KOYANO,  
Akihiko FUKUI, Hironori TSUTSUI, Nobuharu UKITA, Kiichi OKITA, Hiroyuki TODA,  
Akihiro SAKAMOTO, Akira IMADA, and Yasuhiro SHIMIZU

### Abstract

The 188-cm reflector at Okayama Astrophysical Observatory has been refurbished to improve the maximum speed, precision, and reliability of its driving system, aiming at future automatic operation for exoplanet searches. The new system employs a feedback control based on high-precision dual-head encoders attached directly to the axes of the English equatorial mount. The transmission of the drives have been simplified by introducing contemporary servo motors with high dynamic range in speed to afford high-accuracy positioning. The focusing drive has also been replaced to eliminate dancing of star images at focusing. A new control interface has been developed to adapt the new driving system to the existing observatory's framework, which provides a high operability of the telescope driving system. Basic performances of the new system have been verified that include pointing and tracking to find that they are 1.2 arcseconds rms and 0.1–0.2 arcseconds, respectively at a finder telescope attached to the tube of the 188-cm reflector. The pointing becomes 4 times faster than before with practically no failure. Dithering capability measured at the Cassegrain focus is as good as 0.3 arcseconds rms. This upgrade becomes a major step forward to the the automatic operation of the 188-cm telescope.

### 要旨

将来の太陽系外惑星系探索の自動化をめざして、岡山天体物理観測所に設置された188-cm反射望遠鏡の駆動系と制御系の速度、精度、信頼度を向上させる改修を実施した。新システムでは、赤経軸と赤緯軸に直結したデュアルヘッドの高分解能エンコーダを基準とするフィードバック制御を導入した。現代的な速度ダイナミックレンジの広い高精度サーボモーターを導入することで、動力伝達系を単純化し、駆動制御の高精度化を実現した。この新制御系を既存の観測所制御フレームワークに適合させる新たな制御インターフェースを開発した。そのインターフェースは望遠鏡駆動・制御系の高い操作性を提供する。新しい駆動系と制御系による望遠鏡の駆動性能の評価を実施し、188-cm望遠鏡の鏡筒に設置したガイド望遠鏡では、指向精度1.2秒角rms、追尾性能0.1–0.2秒角という結果を得た。望遠鏡指向は改修前より4倍速くなり、指向の失敗もほとんどなくなった。カセグレン焦点で計測された微小角移動性能は0.3秒角rmsであった。この改修は188-cm望遠鏡の自動化に向けて大幅な前進となった。

## 1 はじめに

1959年にイギリスのグラブ・パーソンズ社によって製造された岡山天体物理観測所188-cm望遠鏡は、1960年の観測所開所以来、日本の光学赤外線天文学研究の基盤となり、その発展を支えてきた。この188-cm望遠鏡に対してこれまでに2回、天文学研究の発展と共に高まる望遠鏡への要求に合わせ、駆動系あるいは制御系の機能を強化する改修が行われている（湯谷他 1988 [1]；佐々木 1988 [2]；Yoshida et al. 2002 [3]）。

しかしながら10数年の天文学の発展に伴い、望遠鏡に対する技術的要求はより一層高度化している。特に、長期間にわたり多数の天体について精密な視線速度測定を繰り返す太陽系外惑星探索や、極めて精密な追尾観測を必要とする系外惑星のトランジット観測などにおいて高い機能が求められている。精密視線速度測定では、今後も一晩100星に迫る多数の天体を長期的に観測し続ける必要があり、自動化への要請が極めて強い。一方で、改修前の188-cm望遠鏡は、指向性能や精密な駆動性能、駆動の信頼性に課題があり、観測効率が頭打ちとなっていた。

このような背景の下、太陽系外惑星系探索の観測効率の向上と観測の自動化を目指して科学研究費補助金（科学研究費補助金基盤研究（A）「太陽系外惑星系探索の自動化」（代表：泉浦秀行，平成23-27年度））の獲得に成功し、188-cm望遠鏡の駆動系と制御系の改修実施に至った。この改修の最大の目標は、観測の自動化に耐えうるシステムが構築できるように、望遠鏡駆動の信頼性の向上と高精度化、高速化をはかることであった。

改修計画は、以下のようなスケジュールで進めてきた。1年目は、本改修に先行して高分解能エンコーダを赤経軸と赤緯軸に設置するなどして、駆動部の機械的な信頼性を検証する測定を行い、改修すべき部品を特定する調査を行った。2年目は、具体的な改修仕様を決め、3ヶ月間共同利用観測を停止して改修作業を実施した。3年目は、新しい制御システムと既存設備とのつなぎ込みを行い性能評価を行った。

本論文は、2章で改修前の188-cm望遠鏡の構造を紹介して、3章で旧システムの課題とその原因を概説し、改修方針を述べる。続けて改修内容を駆動系（4章）と制御系（5章）にわけて記述し、6章に改修の評価結果を示す。

## 2 改修前の188-cm望遠鏡の構造

188-cm望遠鏡の架台は赤経軸を南北ピアで支え、

赤経軸と赤緯軸が十字に交差したイギリス式赤道儀である。図1に188-cm望遠鏡の概略図を示し、各部の名称を付した。また、表1の第1列には、改修前の望遠鏡システムの主な仕様を挙げる。

この望遠鏡は赤経軸と赤緯軸にそれぞれ駆動速度の異なる2つの独立な駆動系を持ち、併用して駆動する。1つは粗動系で、主に望遠鏡を大きく動かす際に使用し、他方は微動系で、主に天体追尾や微小角の指向をする際に使用する。2つの駆動系はクラッチとクランプの相互排他操作によって切り替えている。クラッチは粗動モーター出力を粗動系を通して駆動軸に接続、解除する役割を持っており、クランプは微動系の回転出力を駆動軸に伝達、解除する役割を持っている。クラッチとクランプを同時に解除した状態（フリー）は、望遠鏡がその軸周りに自由に回転できるので、バランス調整に利用される。

### 2.1 駆動系：赤経軸

188-cm望遠鏡の赤経軸（極軸）は、両端を南北ピア上のベアリングに支持され、地球の自転軸と平行に設置されている。以下では図2に示す赤経軸駆動の仕組みを記述する。

#### 2.1.1 赤経軸粗動系

粗動系は常に赤経軸に固定された粗動平歯車（歯数360）に回転動力を与える駆動系で、主要な部品は南ピアの上に設置されている。粗動モーターの回転出力は、クラッチを接続することで粗動ギアボックスに伝達され、笠歯車にて回転軸を変換したのち、粗動平歯車まで伝達する。後述する微動系による駆動やフリー状態ではクラッチを切断するが、赤経軸の粗動平歯車から粗動ギアボックスにいたるギア系までは、常に接続された状態にある。赤経軸粗動系は最大速度0.7度毎秒で駆動していた。

#### 2.1.2 赤経軸微動系

微動系は赤経軸にベアリングを介して取り付けられ、独立に回転するウォームホイール（歯数960）に回転動力を与える駆動系である。ウォームホイールはクランプを締め付けることで粗動平ギアと一体になり、赤経軸に回転動力が伝達される仕組みである。

微動系の動力源は望遠鏡室階下に設置された3台のモーターを併用していた。その回転出力は、微動ギアボックス内で合成され、微動シャフトを介してウォーム軸に伝わり、ウォームホイールに伝達されていた。

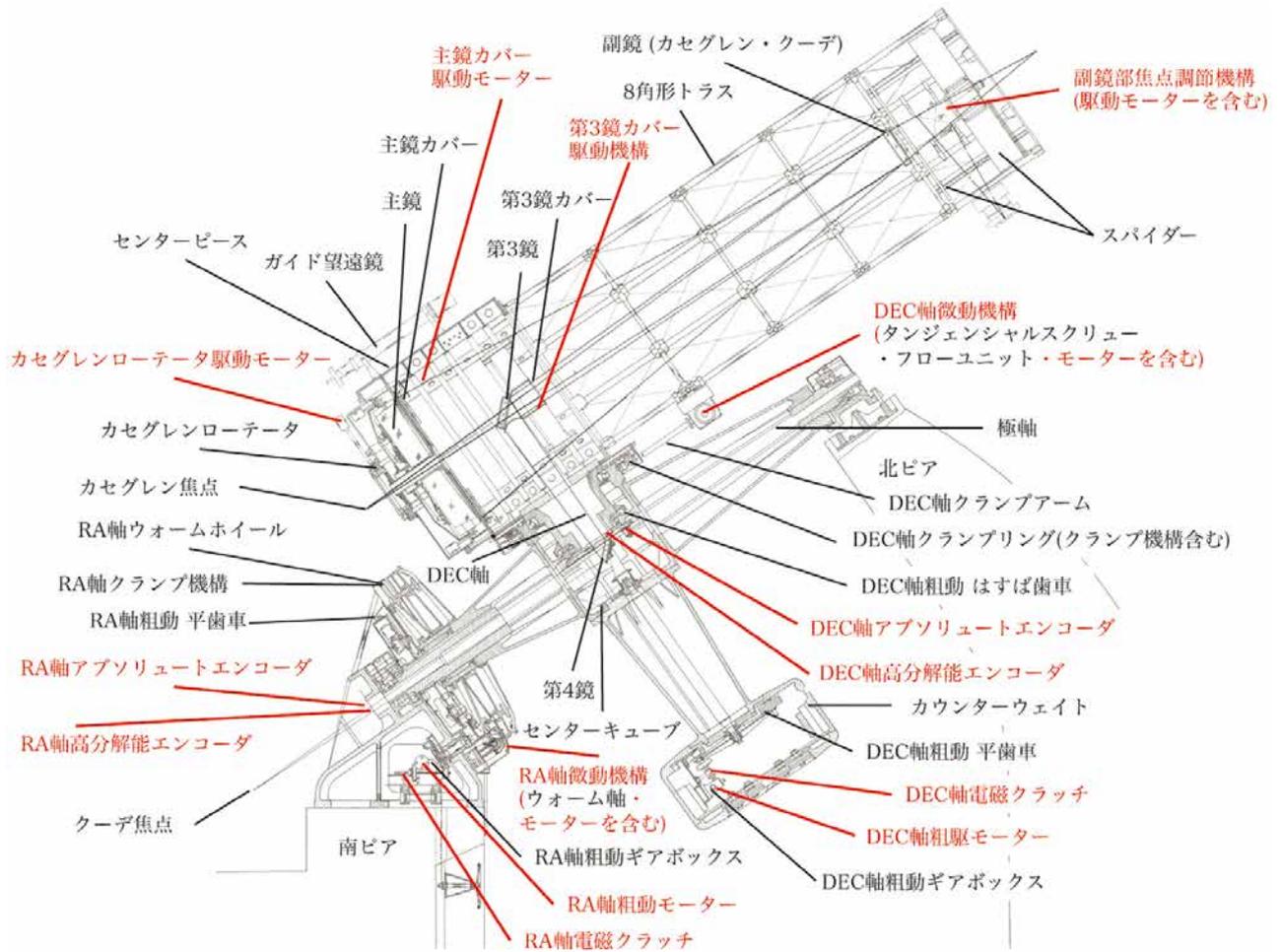


図1：岡山観測所188-cm反射望遠鏡概略図。  
赤文字は今回改修をした部分を示す。

表1：新旧仕様の比較。

	旧来	目標値	現在
RA 軸粗動 (最大)	0.7度 秒 <sup>-1</sup>	4.0度 秒 <sup>-1</sup>	1.5度 秒 <sup>-1</sup> a
DEC 軸粗動 (最大)	0.7度 秒 <sup>-1</sup>	4.0度 秒 <sup>-1</sup>	1.0度 秒 <sup>-1</sup> a
RA 軸微動 (最大)	18秒角 秒 <sup>-1</sup>	75秒角 秒 <sup>-1</sup>	600秒角 秒 <sup>-1</sup>
DEC 軸微動 (最大)	18秒角 秒 <sup>-1</sup>	60秒角 秒 <sup>-1</sup>	100秒角 秒 <sup>-1</sup>
指向精度 (カセ焦点)	18秒角 rms	— b	9.7秒角 rms c
指向時間 (離角 20度)	102秒	< 40秒	16秒
追尾精度 (カセ焦点)	3秒角 3分 <sup>-1</sup>	— d	1秒角 3分 <sup>-1</sup> e
微小角駆動精度	~ 数秒角	~ 0.1秒角 f	0.3秒角 rms g
合焦時星像安定度	> 10秒角	< 3秒角	2秒角

a 現在の運用値

b ガイド望遠鏡での値 (赤経軸と赤緯軸の機械系のみ) rms 5秒角以下

c ガイド望遠鏡で rms 1.2秒角

d 指令値とエンコーダ値の差分で < 0.1秒角 3分<sup>-1</sup>

e 大気揺らぎ, 大気差補正誤差, 主鏡・副鏡光学系込み

f 指令値とエンコーダ値の差分

g カセグレン焦点 ISLEでの実測値

微動ギアボックス内は、遊星歯車機構をベースとした複雑なギアで構成された差動装置で、恒星時駆動モーターの出力（15秒角毎秒）に対して、SETモーター出力（17秒角毎秒）もしくはGUIDEモーター出力（1.25秒角毎秒）のいずれかを増減速する構造だった。図3に微動ギアボックスの外観（a）と内部の差動機構（b）の様子を示す。

### 2.1.3 赤経軸エンコーダ

赤経軸の南端に、マルチターンのアブソリュートエンコーダ（21ビット）が、ギアトレインを介して取り付けられており、分解能は1秒角であった。

## 2.2 駆動系：赤緯軸

赤緯軸は、極軸中央部（センターキューブ内）で2つのベアリングに支持された、赤経軸と直交する回転軸である。188-cm望遠鏡の鏡筒は、センターキューブの片側に取り付けられ、赤緯軸回りを回転する。その反対側には、カウンターウェイトがあり、鏡筒とのバランスを保っている。図4に、赤緯軸駆動の仕組みを示す。

### 2.2.1 赤緯軸粗動系

粗動系は、センターキューブ内にある赤緯軸周りのはずば歯車（歯数192）に回転動力を与える駆動系である。カウンターウェイト内に設置された粗動モーターの回転出力は、クラッチを接続することで、減速機構の役割もするギア系を介して、はずば歯車まで伝達される仕組みである。微動系による駆動やフリー状態ではクラッチを切断するが、はずば歯車からカウンターウェイト室までの一連の減速ギア機構は噛み合ったままで、鏡筒の動きと共に回転する。

### 2.2.2 赤緯軸微動系

微動系は、赤緯軸に部分微動回転を与える駆動系で、タンジェントスクリー方式の微動機構が採用されている。この微動機構は動力部となる駆動ユニットとクランプを内蔵した環状部品（クランプリング）で構成されている。駆動ユニットは鏡筒側面に設置され、クランプリングはセンターキューブと鏡筒の間にある。駆動ユニット内のナット状のフローユニットは2本のフレームでクランプリングと結合されていて、クランプを締め付けることで不動部分であるセンターキューブと一体化する。固定されたフローユニットにねじ回転を加えることで、鏡筒と共に赤緯軸は微動回転をす

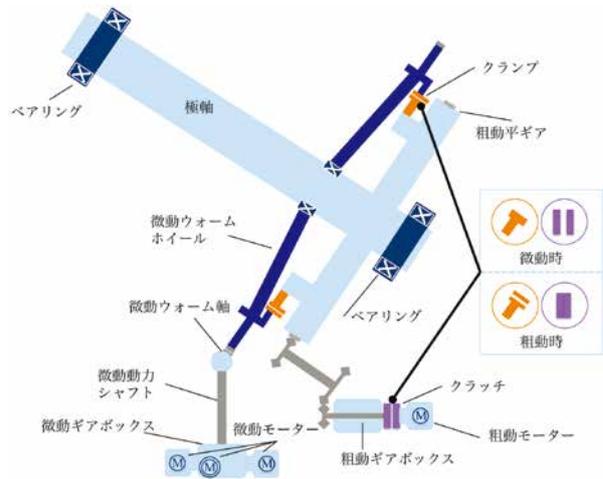


図2：改修前の赤経軸駆動の仕組み。

粗動時はクラッチ接続とクランプ解除、微動時はクラッチ解放とクランプ締付の組み合わせになる。



図3：改修前の赤経軸微動系。

(a)は微動ギアボックスと3台のモーター、(b)はギアボックス内の差動機構を示す。

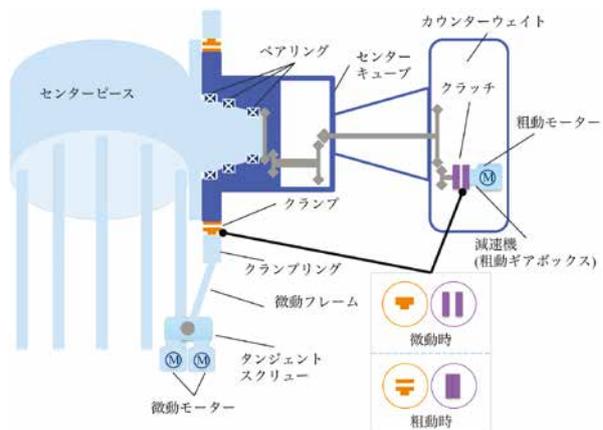


図4：赤緯軸駆動の仕組み。

粗動時はクラッチ接続とクランプ解除、微動時はクラッチ解放とクランプ締付の組み合わせになる。

る仕組みである。一方で、粗動系で駆動する場合はクランプを解除するため、クランプリングは鏡筒と一体化する。

SETモーター出力（17秒角毎秒）もしくはGUIDEモーター出力（1.25秒角毎秒）のいずれかが、駆動ユニット内の遊星歯車をベースとした差動装置を介して、ねじ回転の動力源であった。部分微動であるため、赤緯軸微動系の移動範囲は $\pm 2.75$ 度に限定される。図5に微動駆動ユニットとフレームの外観（a）と内部の差動機構（b）の様子を示す。

### 2.2.3 赤緯軸エンコーダ

赤緯軸にはマルチターンのアブソリュートエンコーダ（20ビット）が、センターキューブの内部に取り付けられていた。エンコーダは赤経軸と同様にギアトレインを介して取り付けられており、分解能は1.5秒角であった。

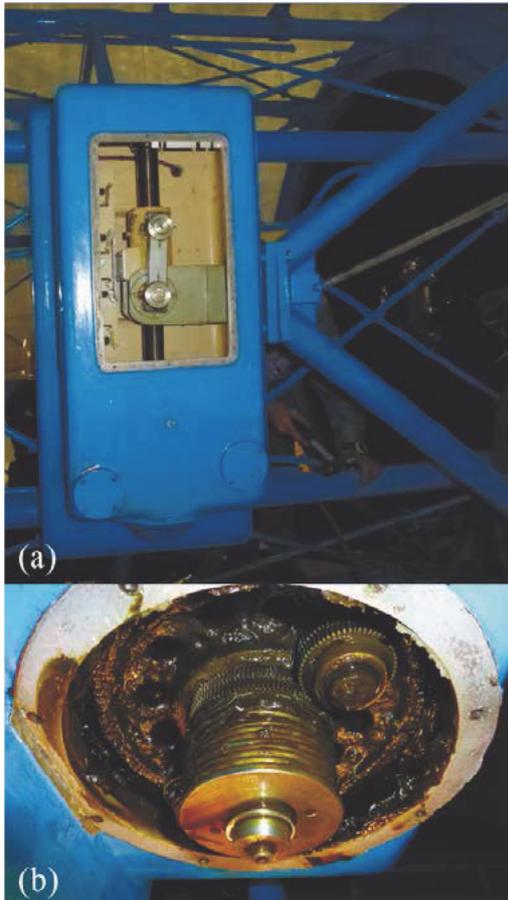


図5：赤緯軸の改修前の微動系。  
(a) は駆動ユニット（タンジェントスクリュー方式）とクランプリングへつながらせるフレーム、(b) は駆動ユニットの底部にあった差動機構の写真を示す。

### 2.3 駆動系：副鏡部焦点調節機構

188-cm望遠鏡では、八角形トラス鏡筒の先端部の副鏡支持部に、副鏡を光軸に沿って前後に動かし、焦点面での合焦を実現する副鏡部焦点調整機構を備える。副鏡支持部は、前後各4本のスパイダーで鏡筒に固定された筒状の外箱の中に収まっている（図6a）。その中に4本のあおり調整ネジで支えられた焦点調整機構が組み込まれている。この調整機構は、金属製円筒の中に嵌合させた金属製心棒をネジで押し引きして摺動させるものである（図6b）。この摺動により、三本足の治具を介して心棒に取り付けられた副鏡は光軸方向に前後動する。なお、副鏡は使う焦点に応じて人手により交換される。

### 2.4 その他の駆動部

188-cm望遠鏡には上述したほかに、カセグレンローテータ、主鏡ミラーカバー、第3鏡ミラーカバーの駆動部がある。

### 2.5 制御系

建設から30年近くにわたって、188-cm望遠鏡は岡

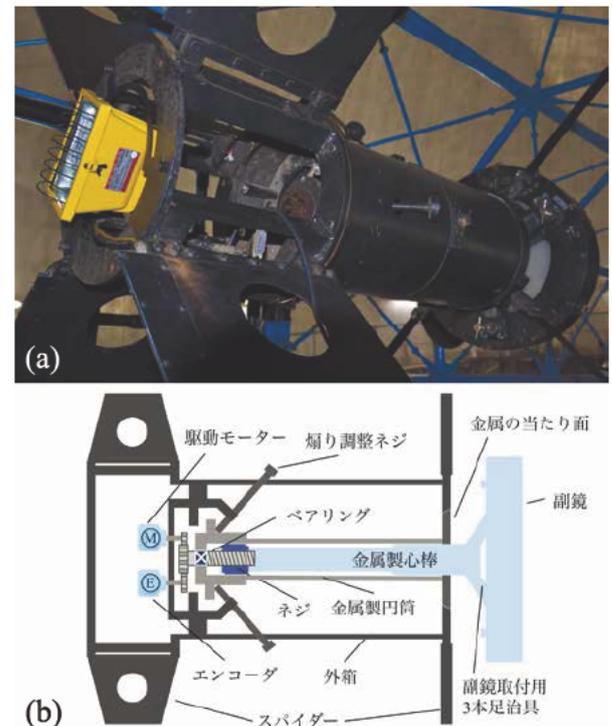


図6：旧副鏡部焦点調節機構。  
(a) は改修前の副鏡部焦点調節機構の写真、(b) はその構造の概略図を示す。

山観測所の所員がオペレータとしてマニュアル操作してきた。操作はアナログ表示機器とボタンで満たされたコントロールデスクを介して行われた。

1988年の改修では、エンコーダによる望遠鏡姿勢の計測やPC98計算機による制御を導入した (cont74-1, 湯谷他 1988 [1]; 佐々木 1988 [2])。この改修をきっかけとしてオートガイダーが実用化され、長時間露出が容易になったほか、望遠鏡と一部の観測装置はMicrosoft Networkによって結合され、装置側の要請に応じて望遠鏡を制御できるようになった (例えば、新カセグレン分光器のSNGモード)。

1990年台後半の改修では、望遠鏡のシーケンサーが岡山天体物理観測所で開発された汎用機器制御ボード (清水, 佐々木 1992 [4]; 清水他 2005 [5]) で構成しなおされ、ホスト計算機のOSとしてUNIX系OSが採用された (Yoshida et al. 2002 [3])。汎用機器制御ボードも、ホスト計算機上の制御ソフトウェア開発も共にインハウスであるところに特徴があった。

上で触れた岡山天体物理観測所製の汎用機器制御ボードは、複数のI/O (50ビット入力, 16ビット出力) とシリアル通信機能を備えたワンチップ・マイコン (H8S) ボードであった。このボードにより、各種のスイッチ制御や、複数の入力 (エンコーダやセンサー) 値を参照しながら、モーターを制御するフィードバック制御を行うことができた。指向シーケンスを見直し、駆動系の切り替え条件を調整した結果、以前と比較して速い指向ができるようになった。

ホスト計算機上では望遠鏡の統合制御ソフトウェア cont74-II が開発され、2000年以降188-cm望遠鏡の共同利用観測において使用されてきた。cont74-II は観測者の利便性を向上させるユーザーインターフェース (UI) を併せ持ち、TCP/IP 通信を介して観測装置と通信ができる機能を備えていた。

### 3 旧システムの課題と改修方針の決定

旧システムには観測の自動化のため、解決すべき課題が複数確認されていた。これらの原因を明らかにする目的で改修に先立ち調査を行った。本節では、これら代表的な課題に対する見解をまとめ、改修の方針について述べる。

#### 3.1 旧システムの課題

たとえば視線速度による太陽系外惑星探索を自動化する場合は、予め登録された観測対象に10秒角以内で指向し、天体を検知してスリットまたはファイバー取

り込み口 (数秒角) に精密に導入し自動追尾する、というシーケンスに従うことになる。

旧システムにおいては、これら一連の動作を困難にする次のような課題があった。

1. 指向プロセスのハングアップ
2. 指向精度の不足
3. 微小角 (数秒角) 移動精度の不足
4. 指向途中のフリー状態の発生
5. 合焦時の星像の飛び
6. 望遠鏡構成部品の劣化

以下に、調査に基づいた個々の課題についての見解をまとめる。

##### 3.1.1 指向プロセスのハングアップ

指向中、粗動から微動へ切り替える前後で、望遠鏡が停止状態を維持してしまうことや、目標姿勢に近づいたにもかかわらず何度か微動と粗動を切り替える挙動を示して指向プロセスが終了しないことが、およそ12回に1回の頻度で発生していた。このような指向プロセスの不安定な挙動は、指向時の目標位置までの離角と時間をグラフ化した際に、データ点のばらつきとしてもみられた (図16)。具体的な原因の特定には至らなかったが、制御方法に原因があることは明らかであった。改善できなかったことは、インハウスによる開発限界と判断した。

##### 3.1.2 指向精度の不足

指向精度は18秒角 rms であったため、天体追尾を補正するオートガイダーの焦点面での視野内に天体を一度で導入することは困難であった (図15b 参照)。指向精度が不十分であった原因は、望遠鏡姿勢の把握と制御にあった。

1つ目の原因はエンコーダの扱いにあった。エンコーダは各軸からギアトレインを介して取り付けられていたため、出力数値には周期誤差が上乘せされていた。赤経軸の周期誤差の振幅は15秒角であった。この周期誤差を補正せずに、生のエンコーダ出力値を使用し制御していたことは、適切ではなかった。

2つ目の原因はモーターの選択と制御にあった。指向の最終段階では微動 (SET スピード: 17秒角毎秒) で望遠鏡を駆動し、目的地のおよそ10秒角以内に近づく恒星時モーターのみの駆動となるように操作をしていた。SET 駆動モーターはブレーキのないインダクションモーターであったので、モーター出力を停止し

でも瞬時に駆動を停止できなかった。意図通りにモーターの駆動制御ができないことは、指向精度が劣化する要因であった。

### 3.1.3 微小角移動精度の不足

天体を視野内にとらえた後で、所定の位置に移動させる場合に、望遠鏡に相対移動量を与えても、実際に移動する角距離には平均で30%程度の増減があった(図20aとbを参照)。微小角移動が困難であった原因は、微動系の駆動機構と望遠鏡姿勢の把握にあった。

1つ目の原因は、複雑なギア系で構成された微動系の差動装置にあった。特に、赤緯軸の差動装置の遊びが大きく、移動角距離が数秒角の場合は、モーター入力に応じた線形出力が得られなかった。観測者は差動装置の遊びの分を余計に駆動する必要があり、手間と時間がかかるプロセスとなっていた。

2つ目の原因は、エンコーダの分解能不足であった。赤経が1秒角、赤緯は1.5秒角しかなく、周期誤差もあった。1秒角幅のスリットに天体を載せる場合に、エンコーダ出力数値を参照しながら相対移動させることは、もともと困難な仕様であった。

### 3.1.4 指向途中のフリー状態の発生

望遠鏡の指向時に駆動系の切り替えトラブルが発生し、望遠鏡がフリー状態になってしまうことがあった。その原因は、駆動モードの切替機構と制御にあった。

188-cm望遠鏡は、2つの駆動系をクランプとクラッチで切り替えることで、望遠鏡を天体に指向する。クランプとクラッチは、ともに偏芯カムを使用した梘子機構で動作していて、偏心カムの停止位置で、クラッチとクランプの作用状態(接続-切断あるいは締付-解除)が決まっていた。偏芯カムへの回転停止命令は、カムの位置角をセンスするメカニカルスイッチの状態変化をきっかけとして発行していた。このスイッチ入力から停止命令発行までに遅延があり、結果として偏芯カムにオーバーランが発生していた。遅延が長すぎた場合には、偏心カムは元の状態へ戻ってしまい、切り替えに失敗していた。このように、クランプあるいはクラッチのどちらか一方が切り替えに失敗するとフリー状態に陥り、望遠鏡は平衡姿勢まで移動し続け停止した。あらゆる望遠鏡姿勢で赤経軸、赤緯軸廻りのバランスが完全にはとれていなかったため、フリー状態で望遠鏡姿勢を維持できなかった。

### 3.1.5 合焦時の星像の飛び

焦点調節の際、副鏡の移動方向を逆転させると、星像の結像位置に10秒角以上の飛び(大きなずれ)が生じていた(図21aを参照)。また、同じ方向へ移動させても、結像位置には2秒角程度のばらつきがあった。この飛びは焦点調節と天体導入の手間を増やすため、観測効率を下げ、観測の自動化の障害であった。飛びの生じる原因は、副鏡部焦点調節機構の仕組みにある可能性が高いと判断した。

この飛びの原因の所在を、副鏡部焦点調節機構の本体(外箱の中)と、その支持機構(外箱の外)にわけて検討したところ、前者に原因があることが明らかになった。すなわち、外箱に対する副鏡裏面の傾きをレーザー変位センサーで調べたところ、望遠鏡の姿勢に依存して副鏡に面振れ変位のあることが分かった。また、その変位にヒステリシスのあることが確認された。なお、この際、副鏡セル内の鏡の動きは無視できるほど小さいことも同時に明らかになった。後者の支持機構については、外箱の鏡筒に対する変位を計測することが困難だったので、有限要素法による3Dモデリングシミュレーションによって検討した。その結果、飛びの原因やヒステリシスの原因となる要素は見当たらなかった。

副鏡部焦点調節機構本体内部の飛びメカニズムは明確にできなかったが、金属同士の嵌合機構からなる摺動部が深く関与すると判断した。摺動部分には、ある程度の隙間(遊び)が必要であり、それが飛びの主要因の1つであったと考えられる。

### 3.1.6 望遠鏡構成部品の劣化

望遠鏡の運用中、ごく稀に指向や副鏡移動の命令が効かなくなる事態が発生した。これらの原因は、ケーブルの劣化に伴う断線や抵抗の増大、またはセンサー部品の劣化であった。

## 3.2 改修方針の策定

調査結果に基づく改修方針は以下の通りとした。

1. 望遠鏡の低レベル制御器は実績のある業者が開発したシステムを採用し、制御の信頼度を向上させる。既存のフレームワークに制御システムを組み込む作業を岡山観測所が行う。
2. 粗動系、微動系を併用する駆動系は踏襲し、微動系の機構および制御について次の2つの措置をとるこ

とで、高精度制御を実現する。

(a) 高分解能エンコーダを赤経・赤緯軸に直付けして、高精度のフィードバック制御を実現する。

(b) 微動系駆動機構を単純化し、モーターの動力を直接駆動シャフトに伝達する。

3. クラッチ・クランプ制御は、信頼性を高めるために偏芯カムの再現性を向上させる、もしくは別の製品に置き換える。
4. 副鏡部焦点調節機構は、鏡支持のスライド部を精密高剛性化して、円滑な駆動を実現する。
5. ケーブルワイヤーを含む部品は、すべて更新し、信号処理の信頼性を向上させる。

高精度制御を実現するには、エンコーダ数値に基づくフィードバック制御が必須である。その見通しを得る目的で行った検証試験結果を以下に述べる。

### 3.2.1 軸直付けエンコーダに基づくフィードバック制御の検討

改修に先立ち、我々は高分解能エンコーダ（ハイデンハイン社、ERA4280Cシリーズ）を望遠鏡の赤経軸、赤緯軸に直付けしてフィードバック制御の見直しを検討した。

図7に微小角移動に伴う星像位置と高分解能エンコーダの読み取り値を比較した。この図は望遠鏡に星を導入し、赤緯軸方向に微小角移動をしながらカセグレン焦点で撮像を繰り返した結果をまとめたもので、横軸は検出器上の星像位置、縦軸はエンコーダ読み取り値の相対値である。シンボルの違いは望遠鏡の姿勢の違いを反映しており、データの取得は子午線上、卯酉線上の7姿勢で行った。

いずれの姿勢においても星像位置とエンコーダ出力値は同一直線上にのっている。さらに、この傾きから求めたカセグレン撮像装置の画像スケールと、画像の星像位置から求めた画像スケールには0.2%の違いしかなかったため、論理的に矛盾がないことを確認した。

以上より、高分解能エンコーダは、望遠鏡の動きを正確に反映することを確認できた。エンコーダ数値に基づくフィードバック制御が期待通りに機能すれば、指向と微小角移動の高精度化を実現できる見通しが得られた。

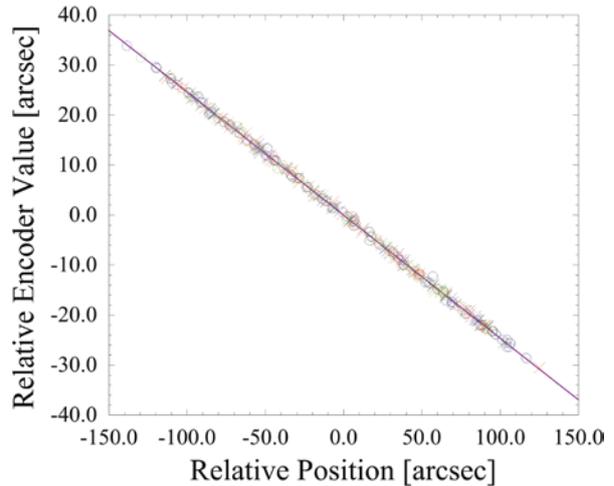


図7：赤緯微小角移動時の星像位置と高分解能エンコーダの出力の比較。

縦軸は赤緯軸の高分解能エンコーダ出力の相対値、横軸は検出器上の結像位置の相対値を示す。各シンボルはそれぞれ望遠鏡の姿勢が異なることを示す。丸は時角0上を示し、黒は赤緯0度、赤は赤緯35度、緑は赤緯+75度、青は赤緯-24度を表す。クロスは赤緯+35度を示し、黒は時角+3時、赤は時角+5時、緑は時角-3時、青は時角-5時を表す。紫色の直線は、すべてのデータの線形回帰直線である。

## 4 駆動系の改修

改修対象となった部分は、図1に赤文字で表記した。以下では、赤経軸、赤緯軸、副鏡部焦点調節機構、新規配線とその他の部品更新の順で詳細を記述する。

### 4.1 赤経軸

赤経軸の微動系は、差動装置を廃し、単純な動力伝達機構に更新した。具体的には、ウォーム軸にバックラッシュがないハーモニック減速機（減速比1:50）を挟んでサーボモーターを直接取り付け付けた。また、採用したサーボモーターは、1回転あたり18ビットの高精度の位置決めが可能で、恒星時追尾を含む微動のすべての速度領域を担う十分なダイナミックレンジを持っている。赤経軸の微動モーターによる駆動は、分解能0.1ミリ秒角に相当する。

図8aと図8bはそれぞれ改修前後の概略図、図8cは改修後のウォームギア駆動部の写真である。粗動モーターも、サーボモーターに変更して、最大駆動速度をおおよそ2倍の1.5秒角毎秒に高速化した。

駆動系の切り替え部では、クラッチを交換し、クランプは再現性を高める措置を行った。クラッチ機構は、偏芯カムを必要とする機械式から、必要としない電磁式に置き換えた。クランプ機構は、偏芯カム機構はそ

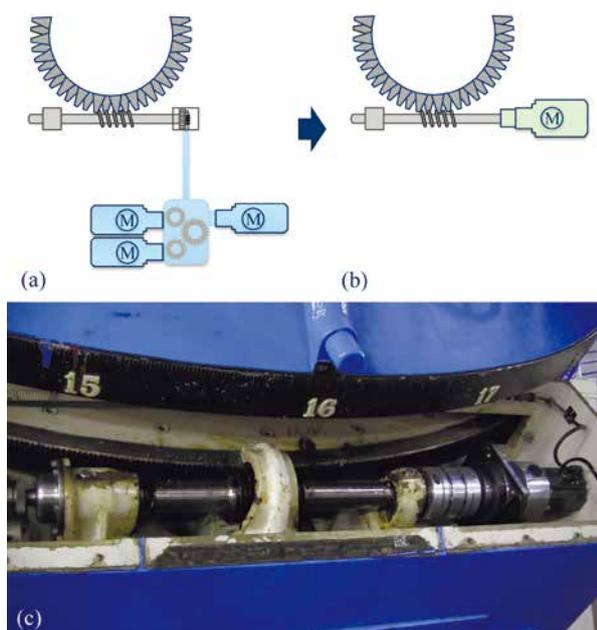


図8：赤経軸微動系。

(a) は改修前，(b) は改修後の概略図，(c) は改修後の実物写真である。新システムではウォーム軸に減速機を挟んでモーターが直付されている。

のまま使用したが、インバーターを導入してモーターのブレーキ制御をすることで、偏心カムの停止位置の再現性を高めた。以上の改修により、駆動系の切り替え時の信頼性が高くなり、切り替え時間を改修前の4秒から2秒に短縮できた。

赤経軸の南端には、高分解能エンコーダを直付けた。採用したエンコーダは、ハイデンハイン社製 ERA4280C シリーズの縦スリット数が1周40,000本の製品で、スリット間隔を4096分割して計測しており、27.3ビット相当の分解能を持っている。望遠鏡の姿勢を固定した状態で、エンコーダ出力の安定性を評価した結果、24.4ビット相当(0.057秒角)の実効分解能を確認した。よって、目標とする0.1秒角の制御を実現する能力を持っていると評価できる。

本エンコーダは薄いドラム形状である。内径180 mm、外径254.93 mmの外周部にスケールが刻まれている。クーデ光束は中央部に開いた穴を通過し、エンコーダドラムによるケラレは発生しない。位置読み取りヘッドは外周部から0.15 mm 隔て、本体とは独立に取り付ける仕様なので、本体とヘッドの相対変位がエンコーダ数値の変化を招くことがある。そこで、こうした相対変位に伴うエンコーダ出力の変化を相殺する目的で、2台のヘッドを使用し、対向するように配置した。以下では、対向デュアルヘッドと呼ぶ。対向デュアルヘッド化の効果は、6.6章に詳しく記述する。

この高分解能エンコーダは、インクリメント方式であるため、電力供給がなくなると原点を見失ってしまう。そこで、停電時でも位置を失わない低分解能(21.1分角)10ビット・アブソリュートエンコーダ(オムロン E6C3-A)を併用して、この弱点を補完した。この低分解能エンコーダは、改修前のエンコーダと同じ場所に取り付けられ、赤経軸に刻まれたギアを利用して望遠鏡の姿勢を計測する。高分解能エンコーダの原点は時角0時付近となるように取り付け位置角調整し、安全な姿勢で原点復帰ができるように配慮した。

## 4.2 赤緯軸

赤緯軸の微動系は赤経軸同様に差動装置を廃し、単純な動力伝達機構に更新した。具体的には、タンジェントスクリューの軸端にハーモニック減速機(減速比1:120)を挟んで赤経軸と同じサーボモーターを取り付けた。赤緯軸の微動モーターによる駆動の分解能は、0.004ミリ秒角の相当である。図9aと図9bにはそれぞれ改修前後の赤緯微動系の概略図、図9cは改修後のタンジェントスクリュー式駆動部の写真を示す。

粗動モーターもサーボモーターに更新して、最大駆動速度1.0度毎秒と、おおよそ1.5倍に高速化した。駆動系の切り替え部では、赤経軸と同様に、クラッチを電磁式に置き換え、クランプ機構にはインバータを採用して偏心カムの停止位置の再現性を高めた。

赤緯軸用の高分解能エンコーダ(ERA4280Cシリーズ 52000パルス)は、赤経軸用より円周が大きい内径270 mm、外径331.31 mmを持ち、ハイデンハイン社の

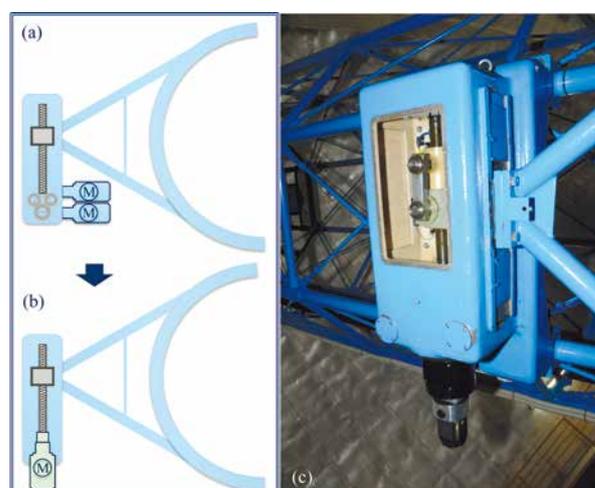


図9：赤緯軸微動系。

(a) は改修前，(b) は改修後の概略図，(c) は改修後の実物写真である。新システムでは差動機構が撤去され、減速機を挟んでモーターが直結されている。

カタログ値で27.7ビット相当の分解能である。実際に、赤緯軸に直結して検証した結果から、赤緯軸エンコーダは24.7ビット相当(0.044秒角)の実効分解能を持つと確認できた。赤経軸と同じくインクリメントエンコーダであるため、赤緯軸にも低分解能アブソリュートエンコーダが設置されている。赤緯軸の原点復帰は赤緯0度付近で行う。

### 4.3 副鏡部焦点調節機構

焦点調節機構は、改修前の金属同士の嵌合構造から、高剛性のリニアガイドステージ上を駆動する構造に更新した。図10aは駆動機構の補強用の支持アングルの一部が記述されていない断面図で、図10bは実物の写真である。副鏡の重量がかかる駆動部品は、リニアガイドステージ上に載せて、点でなく面で支持する。副鏡セルの取り付け心棒は、ボールねじを回転させることでリニアステージ上にガイドされ、前後に動く。動力はサーボモーターで、ボールネジ1回転で2mm、ストロークは改修前の3.5倍の112.5mmとなった。副鏡の位置は、電池バックアップ式のサーボアンプによって、擬似的にアブソリュートに保持されている。新駆動機構を収めスパイダーで固定する外箱、副鏡セルを取付ける治具は再利用した。

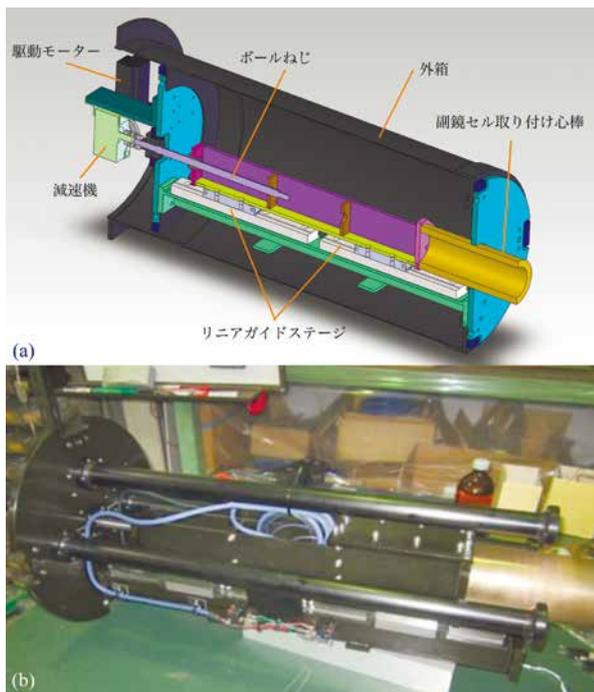


図10：新しい副鏡部焦点調節機構。  
(a)は概略断面図，(b)は実際の部品の写真である。

### 4.4 新規配線とその他の更新部品

過去の改修とは異なり、すべての配線は新たなケーブルを敷線した。188-cm望遠鏡の建設から50年以上にわたって使用してきた、あるいは使わずに残されていた古い配線や端子台、スイッチ類などは、すべて撤去した。従来は、信号線も1本ずつつなぐ必要があり、複雑な配線が多数存在していた。今回は、複数のスイッチ信号を1対のケーブルで伝送する省配線ユニット(オムロン リンクターミナルB7AS-R6B36とB7AS-T6B6)を採用することで、制御点数は多いまま省配線化を実現した。このリンクターミナルは、最大16点分の入力あるいは出力通信を1対(または3本線)のケーブルを通して、伝送遅延3ミリ秒でやりとりできる。

赤経・赤緯軸、副鏡部焦点調節機構の駆動モーターの更新に合わせ、主鏡ミラーカバーとカセグレンローテータの駆動もサーボモーターに更新した。カセグレンローテータは、動力伝達機構との結合部を一部改良した。第3鏡のミラーカバーの駆動は、モーターを再利用し配線のみ更新した。

ハードウェアリミットとして使用する望遠鏡姿勢センサー2台は、センターピース内に設置した。天頂距離76度(減速用)と80度(停止用)で感知する。センサーの挙動については、次章で記述する。

## 5 制御系の改修

188-cm望遠鏡の駆動系の改修に合わせ、制御系も一新した。新しい制御システムは、その役割によって、望遠鏡ハードウェアの低レベル制御を行う制御器、天体位置計算と制御器および外部計算機との通信を担うLinux計算機、既存の観測設備を統合するインターフェースとなるLinux計算機の3つのサブシステムからなる。1番目と2番目は、主に、望遠鏡を駆動するハードウェアとその制御に関する役割を持ち、今回の改修でアウトソーシングとなった部分である。3番目は、新しい望遠鏡制御システムを既存の観測所制御フレームワークに組み込む特殊性から、インハウスの部分である。

図11は、望遠鏡の新制御システムの接続ブロックダイアグラムである。水色は改修前の部分、緑色とオレンジ色は新しく改修した部分、桃色は岡山観測所の担当した部分を示す。以下では、望遠鏡の低レベル制御、天体位置計算と通信インターフェース、新制御システムと既存の観測設備の統合について記述する。

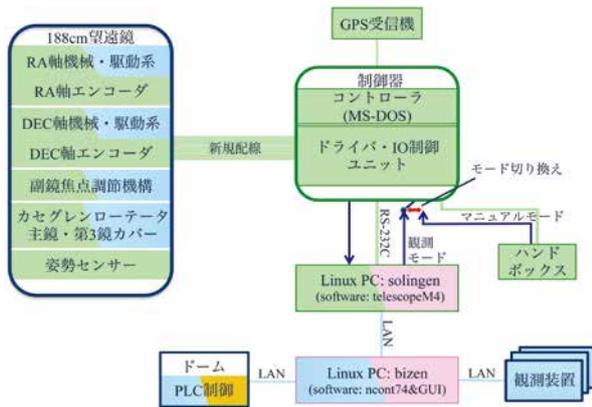


図11: 望遠鏡の新制御システムの接続ブロックダイアグラム。水色は改修前の部分、緑色とオレンジ色は新しく改修した部分、桃色は岡山観測所の開発部分を示す。計算機制御可能な観測モードとハンドボックス操作のマニュアルモードは、どちらかしか使えない排他処理となっている。

## 5.1 望遠鏡の低レベル制御

新たに導入した制御器は、請負い業者である株式会社西村製作所が経緯台用に開発した制御器を、初めて赤道儀式の望遠鏡に適用したものである。大きく分けて制御器は、各デバイスのドライバユニットと制御指令を司るコントローラ部分で構成されている（図12）。コントローラは、MS-DOSをオペレーティングシステムとする計算機で制御の中核である。コントローラの役割は、姿勢を計測するエンコーダの読み取り、時刻較正用GPSセンサーの入力を元にした時計管理、モータードライバへの指令、各種IOの送受信、望遠鏡の駆動系の切り替えのロジック管理などである。ドライバユニット部分には、各デバイスのモータードライバ、リンクターミナルモジュール、電源類などが収納されている。

望遠鏡を駆動する2つの操作モードは、コントローラが管理する。1つは機械（押しボタン）式のハンドボックスによる操作で動く「マニュアルモード」で、もう1つは計算機からの命令で動く「観測モード」である（図11モード切り替え部分参照）。

マニュアルモードは、装置交換やその他のメンテナンスを行う際に使用され、安全面から計算機からの命令は無視される。ハンドボックスでは、赤経と赤緯のそれぞれで粗動と微動、副鏡焦点調節、カセグレンローテータを駆動することができる。4.4章の最後に記述したハードウェアリミット用の姿勢センサーが働くと、コントローラが反応して、天頂距離76度で望遠鏡を減速、80度で安全に停止する。これを超える手動での作業や赤経軸、赤緯軸のフリー動作は、コントローラにあるキースイッチを入れ、センサーを無視す

ることによって行うことができる（マニュアルモードのオプション機能）。

観測モードでは、後述する計算機経由でコントローラに命令値を送る。天体追尾や微小角移動では、赤経軸と赤緯軸の高分解能エンコーダで正確な望遠鏡姿勢を把握し、命令値と現在値の差が0.1秒角に収まるようにフィードバックをかけ、各軸の駆動を調整する。望遠鏡指向時には、目的位置からの離角によって粗動系と微動系の切り替えをコントローラが適切に行っている。その他、副鏡部焦点調節機構、カセグレンローテータ、主鏡ミラーカバーの駆動は、サーボモーターの持つ位置決め精度の範囲で制御する。

## 5.2 天体位置計算と通信インターフェース

上述したコントローラとシリアル通信で接続されたLinux計算機が、専用ソフトウェア（telescopeM4）によって、1対1で命令とステータス受信を100ミリ秒間隔で行う。また、telescopeM4をソケット通信サーバとして、クライアントとなるほかの計算機から、望遠鏡の駆動命令やステータスの取得が可能である。現状、そのクライアントは、観測時の安全面の配慮から、後述する観測機能を統合するソフトウェア（ncont74）のみに限定している。

telescopeM4は、コントローラに望遠鏡の各駆動部分を動作させる命令を出す。天体の指向時には、天体の平均位置座標（例えばJ2000.0など）から視位置を計算して、大気差補正、器差補正を加えた望遠鏡を向けるべき位置を計算し、100ミリ秒ごとにその位置を更新しながらコントローラへ送り続ける。望遠鏡が天体追尾を始めても、常に大気差補正と器差補正を加味した位置を計算し直し命令を送り続けているので、天体追尾は短時

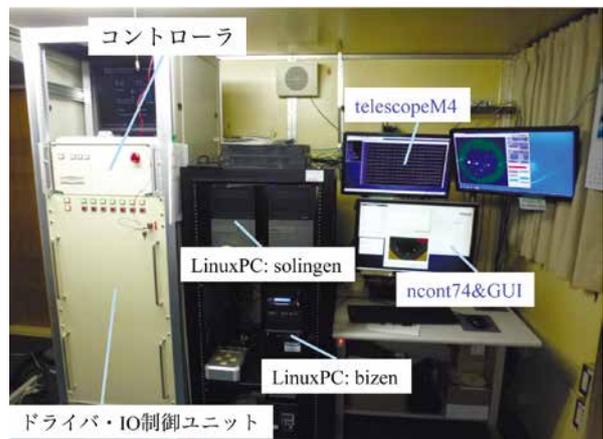


図12: 188-cm望遠鏡ドーム内制御室内に設置された新しい望遠鏡制御システム。

間の指向の繰り返しといえる。この制御方式は、望遠鏡の姿勢によって刻々と変わる追尾速度を追随できるため、追尾性能の向上につながる。

岡山観測所では、telescopeM4の天文位置計算に、アメリカ海軍天文台が開発したNaval Observatory Vector Astrometry Subroutines (Kaplan et al. 1989 [6])を導入した。この位置計算ライブラリは、視恒星時の計算、平均位置を視位置あるいはその逆算を容易に行うことができ、より正確で信頼性の高い計算結果が得られる。さらに、大気差の補正には、可視から近赤外波長までの装置を搭載する188-cm望遠鏡に合わせ、気温と気圧に加え、波長と湿度を加味できる方程式 (Schubert and Walterscheid 2000 [7])を適用した。telescopeM4では、観測所内に設置された気象タワーから得られた気象データを、3分おきに読み込み大気差補正の計算に使用する。

### 5.3 新制御システムと既存の観測設備の統合

改修前の制御ソフトウェア cont74-II (Yoshida et al. 2002 [3])は、新たなソフトウェア ncont74としてアップデートした。ncont74は、共同利用観測装置と双方向通信機能を補完する接続インターフェースとなる。通信方式は、装置側の互換性を考慮し、改修前のソケット通信の仕様を踏襲している。開発言語も同じJavaを採用し、最近のバージョンで推奨されない機能などは今後の互換性を考え置き換えた。

188-cm望遠鏡は、イギリス式赤道儀であるため、姿勢によってドーム内構造物に衝突する危険がある。そこで、ncont74では、あらかじめ定義された危険領域マップを避けるように指向経路を探索して、telescopeM4に動作命令を出す。ncont74を利用したポインティングシーケンスは図13に示す。複数の経路がある場合は、望遠鏡は最終パスまで粗動系のみで動き、最後の1回では微動系に切り換わり天体追尾を開始する。単一パスの場合は、目標位置までの離角によって、微動のみで動く場合と、目標位置近くまで粗動で動き微動に切り替わる場合がある。この経路探索機能は、cont74-IIから継承した機能の1つである。

望遠鏡の改修に合わせ188-cm望遠鏡ドーム・スリットの制御システムは、従来のものから、汎用のプログラマブルロジックコントローラ (PLC) 制御に変更した。ドーム・スリットもソケット通信を介して、ncont74から操作できるようになった。

観測者が望遠鏡やドームを操作する際に利用するグラフィカルユーザーインターフェース (GUI)は、ncont74で一新された。このGUIは、10年以上使用されてきた旧システムのユーザーインターフェー

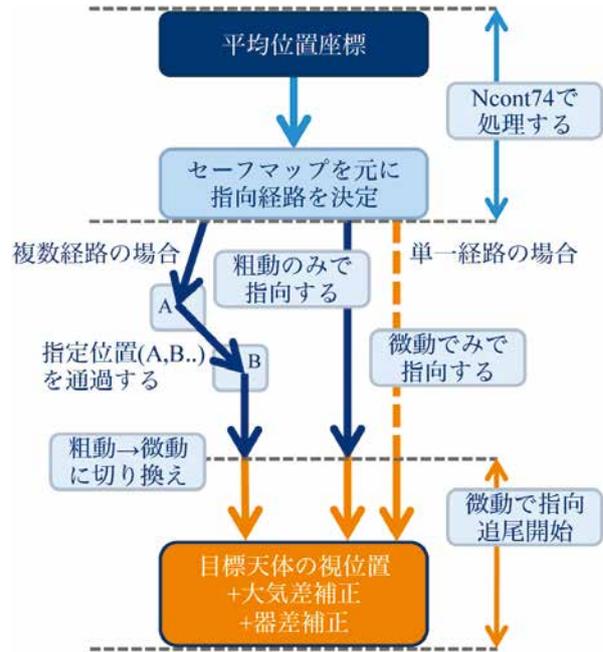


図13：指向シーケンスのブロックダイアグラム。

スに似た外観を備えるが、より豊かな描画機能を搭載した (図14 GUI)。ターゲット位置の可視化には、JFreeChart<sup>1)</sup>を利用することで、多天体を表示した際に有用なズーム機能を新たに追加した。望遠鏡とドームの現在位置のグラフィックでは、Java3D<sup>2)</sup>ライブラリを導入し、よりリアルな表現とした。また、ncont74には、近い将来の遠隔地からのリモート観測を実施するために、従来の外付け手動ハンドセットではなく、計算機の画面上でマウスクリックで望遠鏡を動かすタッチパッド、操作の音声案内やドーム内音声を拾う機能も付加した。

## 6 改修前後の性能比較と評価

4章で記述した改修後の各駆動部は、それぞれ性能評価を行い、指向性能と駆動精度の向上、および駆動の高い再現性を確認した。カセグレン焦点における駆動性能は、実際の観測時を模した評価である。一方、望遠鏡の指向性能と追尾性能の評価は、センターピース側面に設置した口径10cmのガイド望遠鏡も使用した。ガイド望遠鏡の使用は、改修対象でない188-cm望遠鏡の光学系を含まない、架台の機械性能のみを評価するためである。

1) <http://www.jfree.org/jfreechart>

2) <https://java3d.java.net>

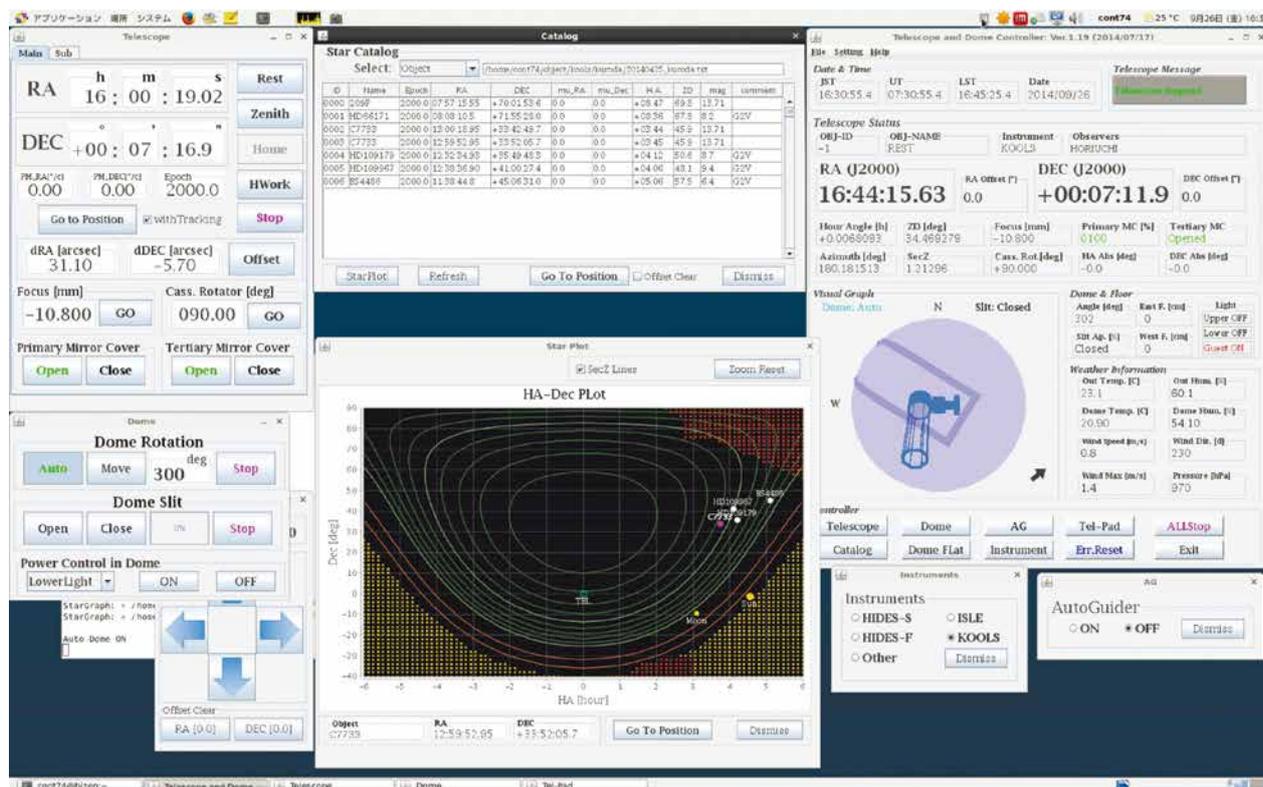


図14：観測者が操作を行う新しいGUIの画面。

以下では、改修前のシステムと比較を行う形で、更新した188-cm望遠鏡の性能、特に指向精度、指向時間、追尾性能、微小角移動の性能、焦点調節駆動機構の検証、エンコーダ読み取りデュアルヘッド化の効果について詳細に記述する。

望遠鏡の指向モデルフィットの残差 (rms) は、改修前10.9秒角 (図15a)、改修後1.2秒角 (図15c) と大幅に改善された。一方、カセグレン焦点の残差は、改修前

### 6.1 指向精度

ガイド望遠鏡における指向精度は、1.2秒角rmsを達成した。このことから、機械・駆動系に由来する指向精度の劣化は、ほぼ解消したと考えている。カセグレン焦点の指向精度は、改修前に比べrmsで約2倍向上して、9.7秒角rmsとなった。

この指向精度の評価は、指向解析ソフトウェアTPOINTを使用して行った。TPOINTは、望遠鏡をターゲットに指向する際に、あらかじめ様々な方向で得られた指向ずれをメカニカルな特性として解析してモデルフィットする。このTPOINTのモデル化パラメータを器差補正值として、指向すべき位置に加えることで、望遠鏡の指向精度が向上する。

望遠鏡指向解析用データは、全天で100天体ほどを位置星表から選び、ガイド望遠鏡とカセグレン焦点でそれぞれ取得した。改修前後どちらも同じ13個のモデルパラメータ (付録A) を適用した場合、ガイド望

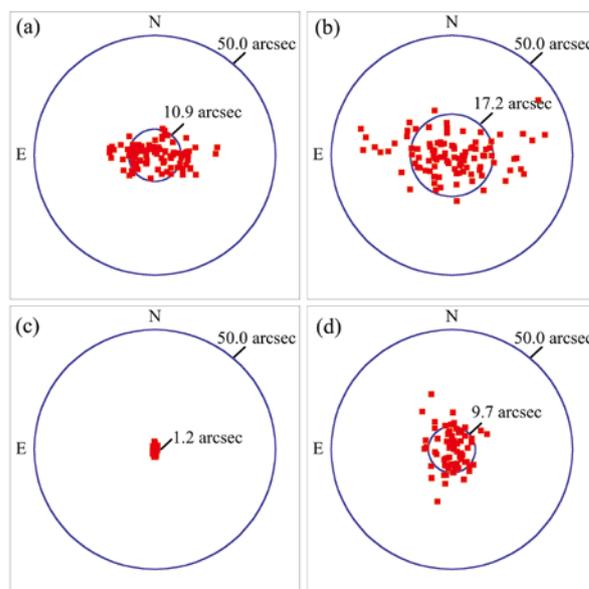


図15：TPOINTによる指向解析結果 (rms)。(a)は改修前ガイド望遠鏡、(b)は改修前カセグレン焦点、(c)は改修後ガイド望遠鏡、(d)は改修後カセグレン焦点の結果を示す。

17.2秒角 (図15b), 改修後9.7秒角 (図15d) という結果を得た。カセグレン焦点とガイド望遠鏡による指向精度の差は、光学系 (主鏡/副鏡など) に由来の指向性能の劣化があることを示唆する結果である。よって、カセグレン焦点では、まだ解消できていない要因が残っており、さらなる指向精度の向上が見込めることが分かった。

## 6.2 指向時間

4章で記述したように、駆動モーターの更新によって粗動の最高速度は赤経方向で2倍、赤緯方向で1.4倍に高速化されたが、それ以上に指向時間は短縮した。

図16は実際の共同利用観測中の指向ログから得られた、次のターゲットまでの角距離 (2点間の距離) と指向開始命令から追尾開始までの経過時間をプロットしたものである。改修前はデータ点のばらつきが顕著であるけれども、改修後の指向時間は、おおよそ4分の1に短縮されたといえる。指向中に粗動に切り替わらない $\pm 1$ 度 (図中はおおよそ2度以下になる) 以下の範囲を除けば、改修後の相関係数は、0.95 (改修前は0.73) と得られた。望遠鏡は、角距離に比例して、再現性良く指向することが確認された。

## 6.3 追尾精度

ガイド望遠鏡による天体追尾の性能試験は、恒星をオープントラック (オートガイダーによる補正をしない) で追尾しながら、30Hzの頻度で星像の変位を計測した。旧システムで確認されていた赤経方向のうねりや赤緯方向の周期的なスパイクパターンはなくなり、改修後の追尾中の変位は、スムーズな単調変化のトレンドが残る結果を得た (図17)。

5章でも記述したように、新しい望遠鏡制御では、常に大気差補正や器差補正を行いながら追尾できることが特徴の1つである。改修後の追尾試験は、ガイド望遠鏡用ではなく、カセグレン焦点用の器差補正 (TPOINTパラメータ) を使用して追尾していたため、時間とともに追尾にずれが生じたと説明できる。

同様のオープントラック追尾試験は、時間分解能は粗いが、カセグレン焦点においても行った。東西南北の方向でそれぞれ実施した結果、赤経軸、赤緯軸ともに望遠鏡の姿勢によって、30分で最大10秒角のドリフトがあることが分かった (図18)。追尾中のエンコーダフィードバック制御による命令値と目標値とのずれは、0.1-0.2秒角程度に収まっていることから、このドリフトは主鏡・副鏡の光学系由来の誤差に起因すると考えられる。

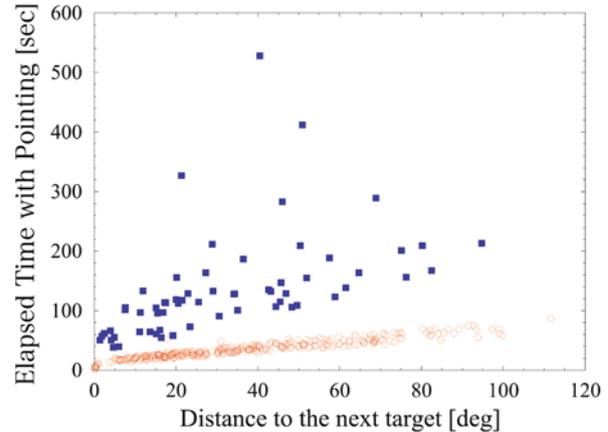


図16：改修前と改修後の観測時の指向時間の比較。

縦軸は指向開始から追尾開始までの経過時間、横軸はターゲットまでの角距離を示す。改修前のデータ点は青四角、改修後は赤丸で示す。

現時点では、岡山天体物理観測所の各観測装置は、実際の星のゆらぎを計測して補正をするオートガイドシステムを搭載している。図19aと図19cにはそれぞれ、改修前後のオートガイド機能を使用した実際の観測から赤経軸エンコーダ出力の変化を追尾誤差としてプロットした。また、それらの追尾誤差を周期解析した結果のペリオドグラムは、図19bと図19dである。改修前は、エンコーダ周りのギアや微動ギアトレイン、動力伝達シャフトに起因する周期的な振幅が顕著であった。改修後は、改修前に確認されていた周期的な誤差がほぼなくなった。改修後 (図19c) では、0.463 Hz, 1.111 Hz, 1.667 Hz等の成分が見えるが、これらはそれぞれ、採用したエンコーダの縦スリット刻みが1周40,000本であることに由来するもの、ハーモニック減速機の歯数に由来するもの、および未同定の成分 (1.667 Hz) である。それ以外にも0.1-1 Hzに複数のピークがあるが、0.05秒角より大きい振幅のものはない。よって、オートガイドシステムを利用する限り、追尾誤差が実際の観測に与える影響はほとんどないといえるだろう。時角と共に変化するグローバルなパターン (図19c) は、主鏡と副鏡に起因した変化と考えられ、今後の継続調査課題の1つとなった。

## 6.4 微小角移動の性能

微小角移動の性能は、命令値に対する移動量の誤差が0.3秒角rmsと大幅な改善を果たした。微小角移動は、観測時のディザリングや天体をスリットやファイバーに導入するなど、ターゲット指向後に任意の位置に移動させる場合やオートガイド機能で利用されるため、

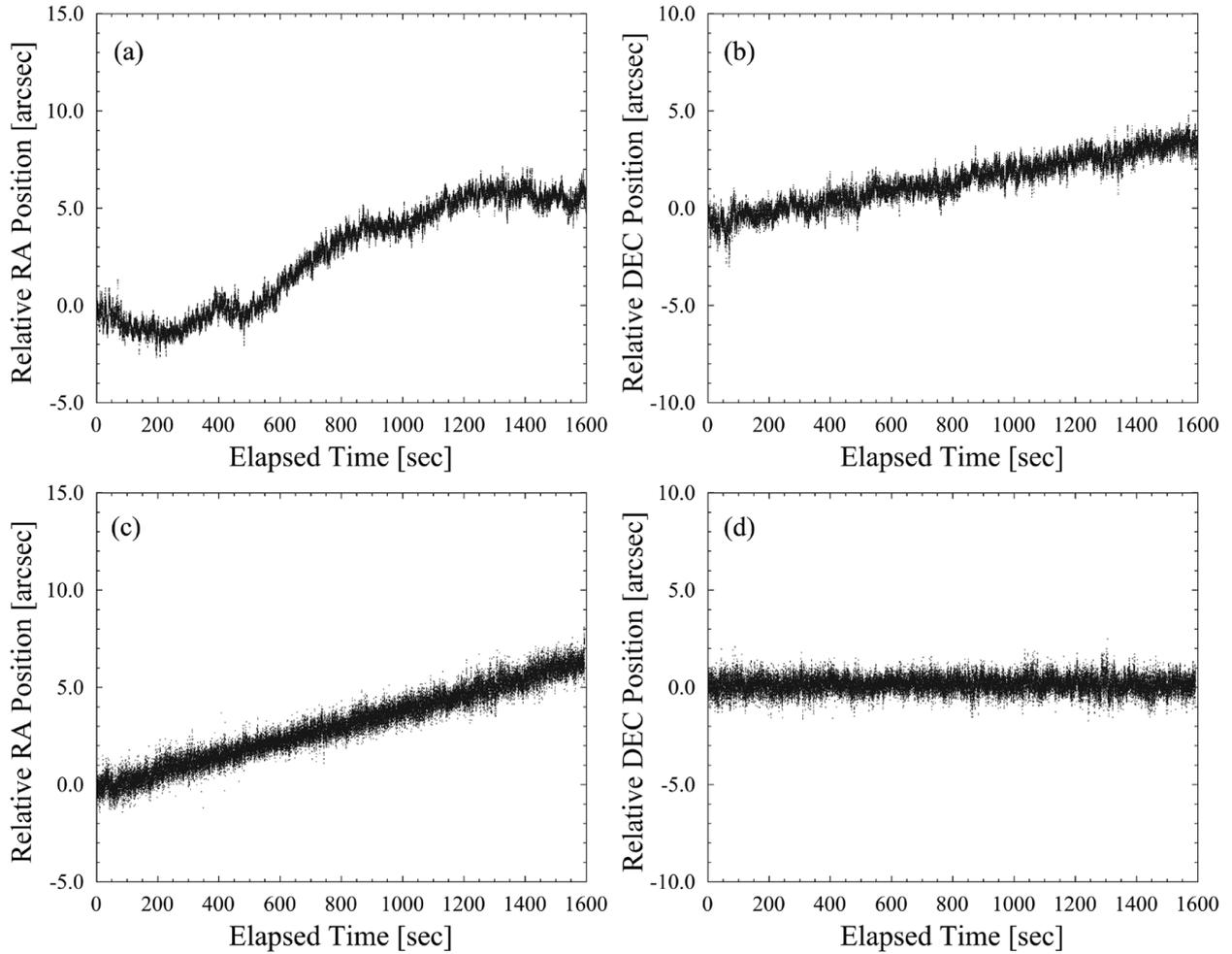


図17：赤経軸と赤緯軸の追尾試験の改修前後の比較。

(a) は改修前赤経方向，(b) は改修前の赤緯方向，(c) 改修後の赤経方向，(d) は改修前の赤緯方向の追尾中の相対位置変化を示す。縦軸は相対変位，横軸は追尾時間を示す。

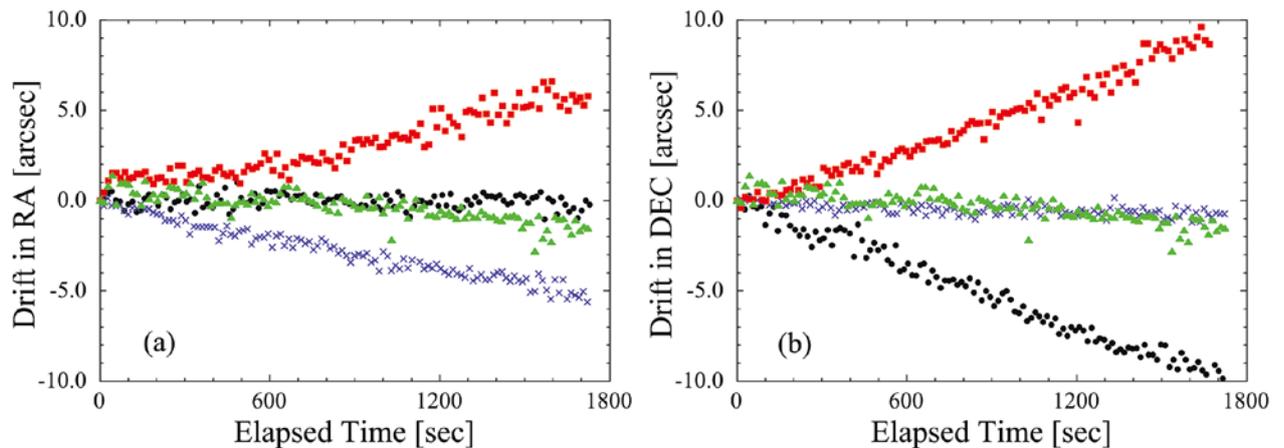


図18：様々な姿勢で計測したカセグレン焦点における追尾ドリフト。

(a) は赤経方向，(b) は赤緯方向の追尾中の相対位置変化を示す。縦軸は各軸における恒星の相対位置変化，横軸は追尾の経過時間である。それぞれ、赤四角は東、黒丸は西、青バツは南、緑三角は北に、望遠鏡を向けデータを取得したことを示す。

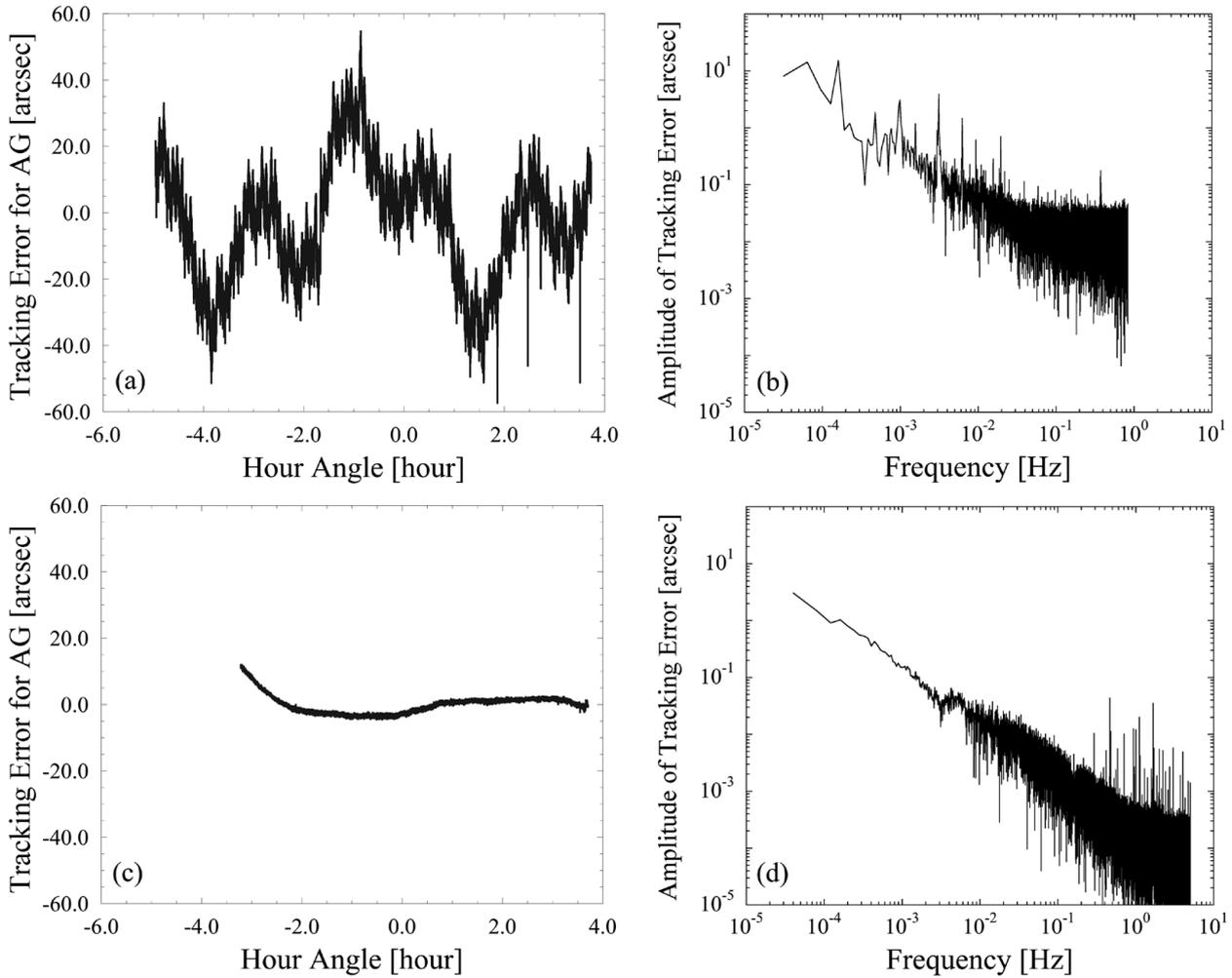


図19：オートガイド時の追尾誤差とそのペリオドグラム。

(a) は改修前の追尾誤差, (b) は改修前の追尾誤差のペリオドグラム, (c) 改修後の追尾誤差, (d) は改修後の追尾誤差のペリオドグラムを示す。(a) と (c) の縦軸は追尾誤差 (赤経軸エンコーダの変化から恒星時成分を引き算した), 横軸は時角である。(b) と (d) の縦軸は追尾誤差の振幅, 横軸は周波数を示す。

観測に最も影響を与える機能の1つである。

微小角移動の試験は, カセグレン焦点において, デザリングする度に天体を撮像して, 結像した検出器上の移動量を計測した。この試験のデータは, 望遠鏡を東西南北, 天頂にそれぞれ向け, 赤経方向, 赤緯方向にそれぞれ別に行った。図20は, その結果をまとめてグラフにしたものである。両軸とも, 10秒角ずつ5回動かす, その後逆方向へ10秒角ずつ5回動かすサイクルを3回繰り返した。

改修前の微動系は, 駆動モーターにブレーキ機構がなかったことやギアトレインのバックラッシュの影響で, 指令値と実際の移動量にずれが大きく, 再現性も悪かった。特に赤緯軸では顕著に現れていた (図20b)。

改修後の微動系は, 軸に直結した高分解エンコーダフィードバック制御と高精度の位置決めが可能なサーボモーター1台 (ハーモニック減速機含む) で駆動さ

れるようになったため, 指令値に対する実際の移動量の誤差は, 0.3秒角rmsと極めて小さくなった (図20c, 図20d)。これにより視野の微調整やガイド性能の安定性が増し, 実際の観測では, 観測効率の向上や光量ロスの低下などの高効率化を期待できる。

## 6.5 焦点調節駆動機構の検証

4.3章で記述した新しい焦点調節駆動機構では, 副鏡がどの位置にあっても, また, 望遠鏡の姿勢によらずスムーズな動作が可能になった。焦点調節駆動機構は, 望遠鏡に設置する前に, オートコリメータとダイヤルゲージを使用した測定を行った。この測定では, 相対位置精度は約  $8\mu\text{m}$ , 移動中および移動方向逆転時の面振れは, 2秒角未満という値が得られ, 目標値を達成することを確認した。

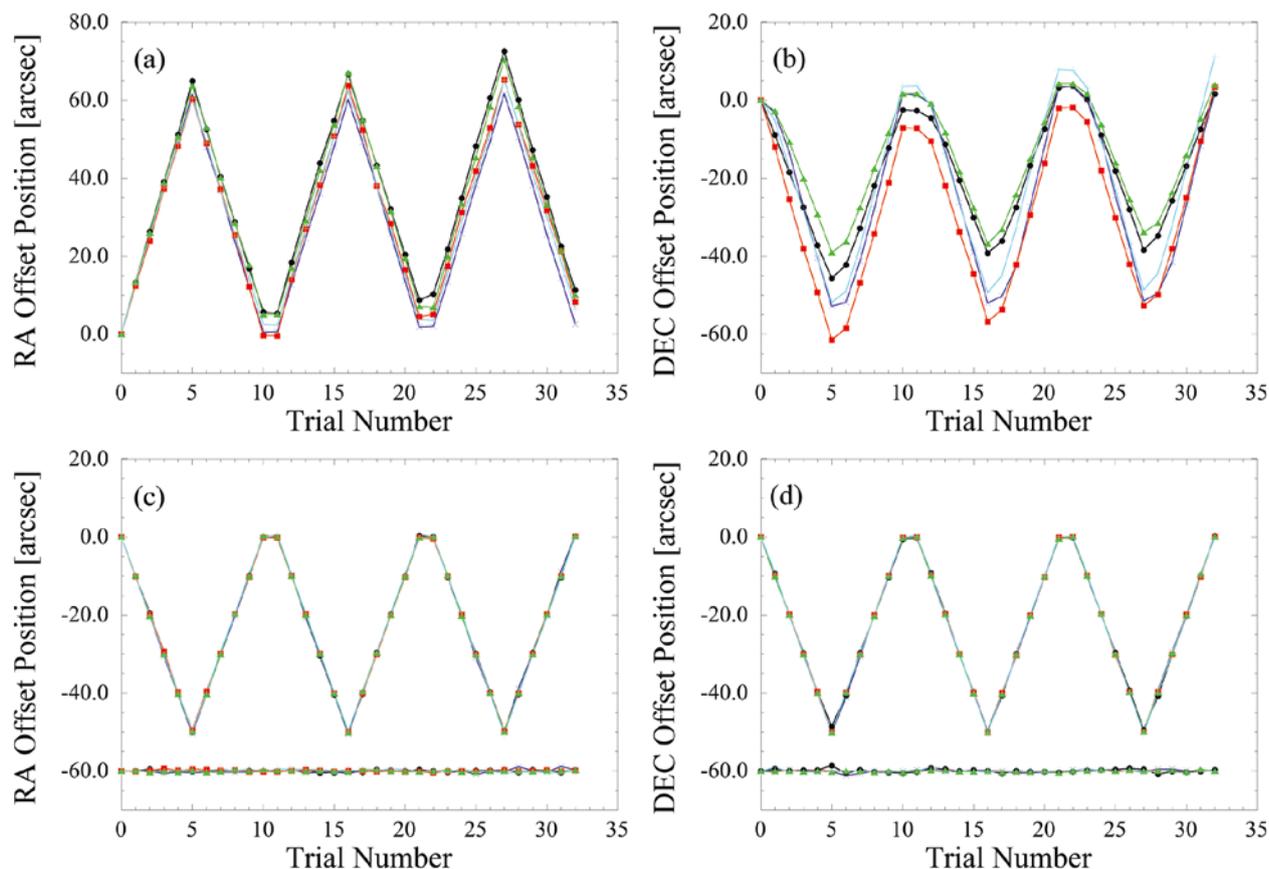


図20：微小角移動性能の比較。

(a) は赤経方向（改修前），(b) は赤緯方向（改修前），(c) は赤経方向（改修後），(d) は赤緯方向（改修後）を示す．縦軸は、それぞれの軸の移動量，横軸は試行した回数を示す．(c) と (d) には、命令値と移動値の残差が、 $-60$ 秒角オフセットしてプロットしてある．それぞれ、赤四角は東、黒丸は西、青バツは南、緑三角は北、水色十字は天頂に望遠鏡を向けデータを取得した．

この追試も兼ねて、カセグレン焦点では、副鏡位置を合焦位置を挟んで前後に移動させ結像位置の変化を調べた．改修前は2カウント ( $0.093\text{ mm}$ ) 刻みで同一方向へ15回、反転して15回の出し入れをしながら、一刻みごとに撮像した．図21aに示す相対位置変化は、3往復分のデータをプロットしたものである．改修後は、同様な手法で、 $0.1\text{ mm}$ 刻みで同一方向へ22回ずつ前後駆動を行い、3往復分の相対位置変化を図21bとして示した．その結果、駆動方向を逆転する際の結像位置は、改修前には10秒角以上の飛びがあったが、改修後には平均値で0.4秒角となり大きく改善した．改修後の同一方向へ駆動させた際の結像位置のずれは、 $0.3\text{ 秒角 mm}^{-1}\text{ rms}$ 、最大差は1.4秒角と得られた．この結果は、望遠鏡へ搭載前の試験結果と整合する．実際の観測中における焦点調整幅は、 $0.5\text{ mm h}^{-1}$ 程度である．岡山天体物理観測所の典型的なシーイングやオートガイダーの使用を考慮すると、露出中に焦点調節を行っても、ほとんど影響はないと考えられる．

レーザー変位計による副鏡裏面の測定では、望遠鏡

の姿勢による変位の再現性が良くなり、一部を除いて、ヒステリシスは大幅に改善されたことが確認された．実際の移動量の測定からも、副鏡焦点調節駆動機構が、スムーズに動作することを確認した．再現性が良い変位は、TPOINTによる指向解析によってモデル化できるため、指向精度の向上にも貢献していると考えられる．

## 6.6 エンコーダ読取りデュアルヘッド化の効果

3.1章で記述したように、今回の改修では、エンコーダの対向デュアルヘッド化を行い、極軸の温度差に依存した出力値ドリフトのキャンセルに成功した．

2012年に先行して設置した赤経軸の高分解能エンコーダは、1個の読取りヘッドを使用していて、その出力値に25秒角のドリフトがあった．そこで、ドリフトの原因が熱変形による極軸の湾曲に起因する可能性を調査した．

図22は、極軸の4方向（左右上下）に温度センサーを取り付けた温度計測とエンコーダ読み取り値を比較

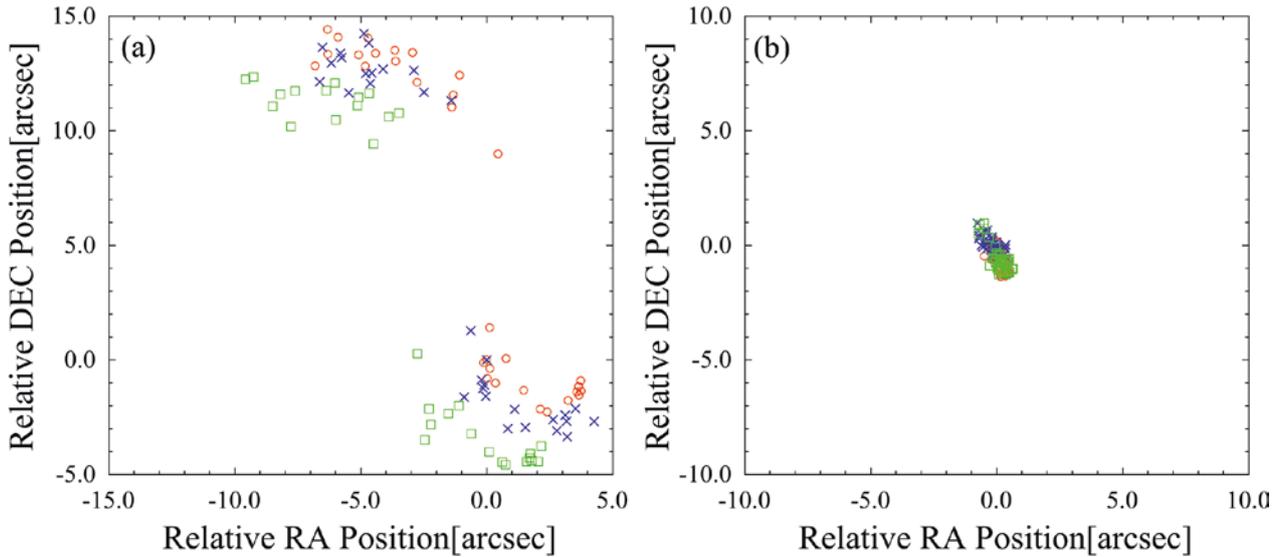


図21：改修前後の副鏡焦点調節試験の比較。

(a) は改修前，(b) は改修後の結像位置の相対変位を示す。縦軸は赤緯方向の相対値，横軸は赤経方向の相対値である。

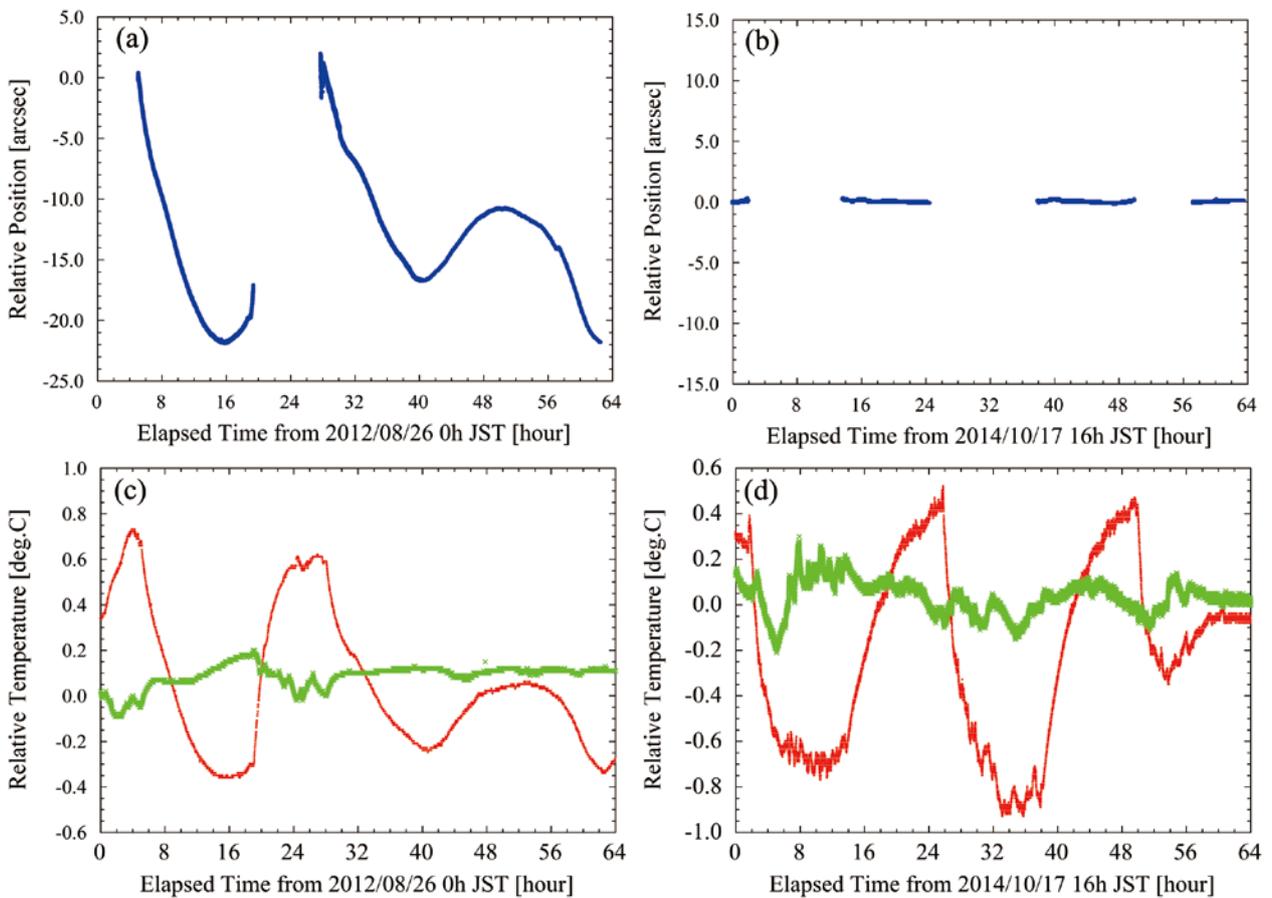


図22：エンコーダ出力と極軸温度勾配の関係図。

(a) は1ヘッド時のエンコーダドリフト，(c) はそのときの極軸の温度差，(b) は対向デュアルヘッド時のエンコーダドリフト，(d) はそのときの極軸の温度差を示す。(a) と (b) の縦軸はそれぞれの軸のエンコーダ出力値，横軸は経過時間を示す。(c) と (d) の縦軸は極軸の温度差，横軸は経過時間を示し，赤は天地の温度差，緑は東西の温度差を示す。

した結果である。日中の日射で温まったドームからの放射により温かくなった上面（天井側）と陰となる下面（床側）の温度差変化と、エンコーダ出力のドリフト量には相関関係が認められた。この測定では、温度差が0.5度あると、極軸は4秒角たわむと見込まれる。赤経軸の場合、極軸の固定点となる南ピアのベアリングの位置から、エンコーダを設置した位置が0.77mと離れていた。よって、赤経のエンコーダは、極軸の歪みの影響を受け、15 $\mu$ mの変位が発生し25秒角の読み取り誤差が生じたと考えている。

一方で、極軸の東西の温度差は小さいことが分かったため、赤経軸では、東西に対向するようにヘッドを設置した。極軸の湾曲によってエンコーダドラムが床側にずれた場合、読み取りヘッド一方の数値は大きくなるが、もう片方のヘッドの数値は小さくなる。したがって、双方の読み取りヘッドの平均値を赤経軸の位置角として使用することで、極軸の熱変形による出力値の変動は相殺される。対向デュアルヘッド化の結果、エンコーダ値のドリフトは、温度変化によらず、0.08秒角rmsの値を示し、その影響はほとんど無視できるようになった（図22bと図22d）。赤緯軸では、赤経軸とは異なり、1ヘッドであっても、エンコーダ出力値の相対変位は最大0.6秒角、rmsで0.2秒角と小さいことが確認されている。この改修で導入したエンコーダフィードバック制御は、その出力値を元に望遠鏡を駆動するため、エンコーダ出力値の信頼性の検証は重要であった。

## 6.7 総合的な信頼度

改修後の指向・追尾性能、微小角駆動、焦点調節機構の駆動が高精度化され、高い再現性を持って動作することを上述してきた。2013年9月から約13ヶ月間の共同利用観測では、改修後の望遠鏡関連のトラブルが原因で観測できないケースはほとんどなかった。間接的で定性的な評価であるが、総合的な信頼度の高い望遠鏡制御システムが構築されたといえるだろう。

## 7 まとめ

今回の改修では、回転軸に直結したデュアルヘッド高分解能エンコーダによるフィードバック制御を導入し、各駆動系部品を単純な構造に更新した。新旧の望遠鏡システムの仕様一覧は、表1の通りである。光学系から機械系と駆動系を分けて評価するために、ガイド望遠鏡を使用した指向性能や追尾性能の評価では、改修前に比較して大幅な性能向上を確認した。微小角

駆動精度と副鏡焦点調整機構については、改修の対象ではない主鏡が含まれるカセグレン焦点にて測定したが、駆動の高精度化と良い再現性を確認した。結果として、岡山天体物理観測所では、半年に満たないダウンタイムで、188-cm望遠鏡と全4台の観測装置を使用する共同利用を再開することができた。

目標である観測システムの自動化には、観測装置が搭載されるカセグレン焦点やクーデ焦点における指向性能をより精密にする必要があることが分かった。指向性能の劣化要因である主鏡については、中心穴の位置ずれをレーザー変位計で測定した結果、副鏡と同様に望遠鏡姿勢によって、ヒステリシスを持つ変位が確認されている。今回は、その原因となる部分を完全に特定できなかったことや予算不足から改修対象から除外した。

望遠鏡の姿勢を正確に把握し制御できるようになったので、光学系に起因する要因を詳しく調査し解決していくことで、188-cm望遠鏡のさらなる性能向上の見通しが得られた。

## 8 謝辞

的確なコメントを頂いた匿名のレフェリーの方に感謝する。本研究は、科学研究費補助金 基盤研究（A）（課題番号 23244038）の助成を受けている。また、本研究は、文部科学省 光・赤外線天文学研究教育大学間連携事業による補助を一部受けている。有限要素法によるシミュレーションでは、Ansys Multiphysics（Ver.10.0）を用いたのであるが、その所有者である国立天文台チリ観測所に感謝する。

## 参考文献

- [1] 湯谷正美, 佐々木敏由紀, 清水康廣, 渡辺悦二, 天文学に関する技術シンポジウム1988 集録, pp.66 (1988).
- [2] 佐々木敏由紀, 天文学に関する技術シンポジウム1988 集録, pp.69 (1988).
- [3] M. Yoshida, Y. Shimizu, E. Watanabe, K. Yanagisawa, and F. Uruguchi: New Control Software of the 188-cm Telescope of Okayama Astrophysical Observatory, Advanced Telescope and Instrumentation Control Software II, ed. Lewis, Hilton, **4848**, 425-433 (2002).
- [4] 清水康廣, 佐々木敏由紀, OOPS 制御系, 天文学に関する技術シンポジウム1992 集録, pp.31-34 (1992).
- [5] 清水康廣, 柳澤顕史, 吉田道利, 稲田素子, 長山省吾, 沖田喜一, GRB50 cm 望遠鏡制御系のハードウェア, 第25回天文学に関する技術シンポジウム2005 集録, pp.88-91 (2005).
- [6] G. H. Kaplan, J. A. Hughes, P. K. Seidelmann, C. A. Smith, and B. D. Yallop: Mean and apparent place computations in the new IAU system. III - Apparent, topocentric, and astrometric places of planets and stars, *Astronomical Journal*, **97**, 1197-1210 (1989).
- [7] G. Schubert and R. L. Walterscheid, In Allen's Astrophysical Quantities, ed. A N Cox, 4th edition, Springer-Verlag, pp.262 (2000).

## 付録 A 器差補正 (TPOINT) パラメータ

188-cm望遠鏡の器差補正パラメータを以下に示す。これらのパラメータは、望遠鏡指向解析ソフトウェア TPOINT を使用して導いた。表 A.1 は、新旧の器差補正 (TPOINT) パラメータの一覧を示す。表 A.2 は、器差補正 (TPOINT) パラメータの対応する関数と主な要因を挙げる。

表 A.1: 新旧の器差補正 (TPOINT) パラメータの一覧。

パラメータ	改修前ガイド ( $\sigma$ )	改修後ガイド ( $\sigma$ )	改修前カセグレ ( $\sigma$ )	改修後カセグレ ( $\sigma$ )
IH	+111.6 (12.6)	-174.9 (2.0)	+124.1 (17.3)	-178.5 (15.5)
ID	+6.0 (16.1)	+304.4 (2.9)	+31.2 (23.4)	+488.1 (23.6)
NP	+30.1 (6.4)	+23.6 (1.1)	+31.5 (7.7)	+18.1 (8.4)
CH	+124.6 (11.9)	+61.2 (1.8)	+67.1 (16.8)	+137.3 (14.8)
ME	-163.3 (7.6)	-155.7 (1.5)	-179.3 (10.2)	-145.7 (12.8)
MA	-2.5 (7.6)	-1.9 (0.3)	-6.1 (2.6)	-2.6 (2.3)
HCES	+17.5 (15.2)	-2.9 (2.9)	-22.6 (19.5)	-32.4 (22.8)
DCES	+42.2 (15.0)	+28.8 (3.1)	+44.6 (19.9)	-41.2 (25.1)
DCEC	-6.5 (15.2)	-3.0 (2.4)	+32.6 (20.1)	-62.6 (19.0)
DAF	-74.0 (8.1)	-80.4 (1.4)	-60.7 (10.8)	-78.1 (10.5)
TX	-1.8 (4.9)	-3.6 (1.3)	-21.8 (5.7)	-31.2 (10.7)
TF	-8.3 (17.3)	+9.5 (3.4)	+137.3 (23.0)	+172.7 (27.1)
HDCH2	+1.1 (3.2)	+11.7 (0.5)	+12.5 (4.3)	+2.0 (3.4)

表 A.2: 器差補正 (TPOINT) パラメータに対応する関数と主な要因。

パラメータ	HA 補正項	DEC 補正項	主な要因
IH	IH	...	時角軸エンコーダ原点のずれ
ID	...	ID	赤緯軸エンコーダ原点のずれ
NP	$NP \tan D$	...	時角軸と赤緯軸の非垂直性
CH	$CH \sec D$	...	東西方向のコリメーションエラー
ME	$ME \sin H \tan D$	$ME \cos H$	高度方向の極軸のずれ
MA	$-MA \cos H \tan D$	$MA \sin H$	方位方向の極軸のずれ
HCES	$HCES \sin HA$	...	時角軸中心のずれ sin 成分
DCES	...	$DCES \sin D$	赤緯軸中心ずれ sin 成分
DCEC	...	$DCEC \cos D$	赤緯軸中心ずれ cos 成分
DAF	$-DAF (\sin L \tan D + \cos L \tan H)$	...	赤緯軸 (片持ち鏡筒) の急変化
TX	$TX (\cos L \sin H \sec D) \beta^{-1}$	$TX (\cos L \cos H \sin D - \sin L \sin D) \beta^{-1}$	鏡筒のたわみ tan 成分
TF	$TF \cos L \sin H \sec D$	$TF (\cos L \cos H \sin D - \sin L \sin D)$	鏡筒のたわみ sin 成分
HDCH2	...	$HDCH2 \cos 2H$	—

H: 時角, D: 赤緯, L: 観測値緯度,  $\beta = \sin D \sin L + \cos D \cos H \cos L$