

# せいめい望遠鏡の分割鏡制御

木野 勝

〈京都大学大学院理学研究科附属天文台 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: kino@kwasan.kyoto-u.ac.jp



せいめい望遠鏡の主鏡は日本で初めての分割鏡方式となっている。望遠鏡架台の上に並べた18枚のセグメント鏡を理想的な位置・姿勢に保ち、1枚の主鏡として機能させるための分割鏡制御システムを開発した。本稿ではこの分割鏡制御システムを構成する変位センサやアクチュエータ・制御器などの紹介に加え、その立ち上げと観測開始後2年間の運用状況について報告する。

## 1. 分割主鏡

せいめい望遠鏡の主鏡は大きさ1 mほどの鏡を18枚並べて口径3.8 mの1枚の鏡として機能させる分割鏡方式を採用している(図1)。分割主鏡式の望遠鏡は1979年に運用を開始したMultiple Mirror Telescope[1]に始まり、Keck-I・II望遠鏡[1]の成功により単一鏡での製造・運搬が困難な口径10 m超の大型望遠鏡を実現する手法として欠かせない存在となった。建設中の超大型望遠鏡であるThirty Meter Telescope (TMT) [2]やEuropean Extremely Large Telescope (E-ELT) [3]もこの方式の延長と言える。

Keck型の望遠鏡はRitchey-Chrétienをはじめとする中心無収差の光学系を採用しており、補償光学を併用することで回折限界像を得られる。せいめい望遠鏡も同様に回折限界像を目指した設計となっている。



図1 せいめい望遠鏡の分割主鏡。

一方で結像性能をシーイングサイズ程度まで緩和することで、より安価に大集光力の望遠鏡を実現する方式としてHobby-Eberly Telescope (HET) [1], Southern African Large Telescope (SALT) [4]やLarge Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope (LAMOST) [1]がある。これらの分割主鏡の形状は球面であり、この方式は分割された全てのセグメント鏡が同じ球面であること、球心に測定器を置くことでセグメント鏡のずれを検出しやすいといった利点を持つ。

せいめい望遠鏡の3.8 m主鏡は分割鏡でなければ作れない大きさではない。それにも関わらず分割鏡方式を採用したのは超大型望遠鏡に必要な技術を独自に獲得することに加え、様々な光学実験・制御実験のテストベッドとして活用するという目的がある。

## 2. 分割鏡制御システム

分割鏡制御システムは重力や温度変化など様々な外乱で変形する望遠鏡架台の上で全ての鏡面を理想面上に並べ、その状態を維持するための仕組みである。観測を始める前に各セグメント鏡面の相対的な傾き・段差を光学式のセンサで測定し、理想面に一致するよう鏡を支えるアクチュエータを駆動し調整する。観測中は鏡の裏面に取り付けられた変位センサ(エッジセンサ)でセグメント

鏡の姿勢変化を読み取り、リアルタイムにアクチュエータへフィードバックすることで、最初に光学センサで決定した理想鏡面状態を保つ。観測中のリアルタイム制御は本章で、観測前に使用する光学式センサについては3章で詳細を述べる。

### 制御対象と目標精度

制御対象となるのは内周セグメント鏡6枚と外周セグメント鏡12枚、および副鏡に隠される中心部に置かれた内周リングと呼ぶ機械基準を加えた19個である(図2)。内周リングは光学的には不要だが、エッジセンサによる鏡のずれの検出を容易にする効果がある。セグメント鏡間には4-8 mmの隙間があり完全に切り離されている。

大気揺らぎ下での観測において十分な結像性能を得るため、また補償光学を使用時には可変形鏡の駆動レンジに対して十分に小さな波面誤差に抑えるために、各鏡の姿勢には傾斜成分rms 0.1秒角、並進成分rms 50 nm程度の精度が求められる。これに対し望遠鏡が指向方向を変えたときの重力変形や気温変化に伴う熱変形により約100  $\mu\text{m}$ 、風圧による振動で数100 nmの外乱が生じるため、

これらをリアルタイムに検知し補正するのが分割鏡制御システムの役割である。

### アクチュエータと主鏡支持機構

各セグメント鏡は3軸のリニアアクチュエータによって支持されており、傾斜2軸と鏡面の法線方向への並進運動の計3つの駆動自由度を持つ。主鏡全体では内周リングに取り付けられるものも含め計57個のアクチュエータが使われる。駆動にはステッピングモータと送りネジを組み合わせたリニアアクチュエータを使用している。アクチュエータ自体の分解能は約3  $\mu\text{m}/\text{step}$ と粗い。そこで図3に示す1/30倍の機械式減速器を介したうえで、128分割のマクロステップ駆動を行うことで電気的な分解能を0.8 nmまで向上させた。減速器の支点には弾性変形を利用した捻りバネを使っており、サブミクロンの駆動に対しても高い直線性が保たれている。

減速器からの出力軸は3本腕のWhiffle-tree構造を介してセグメント鏡を支える。セグメント鏡1枚あたりの支持点数は9点であり、望遠鏡の方向が天頂の場合と水平の場合での変形量の差は

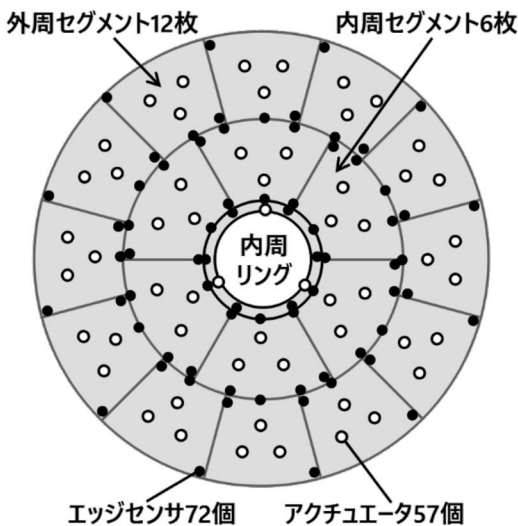


図2 制御対象の鏡とアクチュエータ(白丸), エッジセンサ(黒丸)の配置。エッジセンサはセグメント鏡の境界から僅かにずれた位置にある。



図3 セグメント鏡を駆動するアクチュエータと減速器。支点部分に捻りバネを使うことで高い直線性を実現した。

rms 30 nm以下と十分に小さく抑えられている。この鏡面支持構造にはセグメント鏡材に力をかけることで鏡面形状を微調整するWarping Harness (WH) 機能が組み込まれている。各セグメントあたり6自由度の駆動で鏡面を最大1  $\mu\text{m}$ 程度変形させられる。これにより残存加工誤差や望遠鏡に設置したときの機械的歪みを取り除く。なお、大気揺らぎ下での観測ではWHを使用しなくても十分な結像性能を得られており、補償光学装置の稼働にあわせて本格的な運用を行う予定である。

### エッジセンサ

セグメント鏡間の相対的なずれを検出するエッジセンサには渦電流式の変位センサを採用している。Keck望遠鏡などで用いられている静電容量式の変位センサ [5] と異なり、湿度による誘電率変化の影響を受けにくい。マウナケア山頂と比較して湿度変化が大きな岡山の観測環境に適している。

このセンサは回路基板上に形成された渦巻きコイルと増幅器内部の浮遊容量によりLC発振回路を構成している。コイルに対向金属板が接近することによるインダクタンスの変化を発振周波数のカウントにより検出する。測定周期5ミリ秒のとき分解能は約2 nmとなる。ただし静電容量式よりも安定しているとはいえ周囲の環境変化、とくに温度変化による測定誤差は無視できない。そこで測定用センサの近くに対向板までの距離を固定した参照用センサを取り付けて測定結果を補正する。これにより5-25°Cでrms 30 nmの安定性を実現した。

測定用センサと参照用センサは図4に示すように1本のアームに実装された状態でセグメント鏡の裏面に固定されている。センサアームは主鏡全体で計72個取り付けられている。エッジセンサの回路基板、およびアームの材質には鏡と同じ熱膨張ゼロ素材であるクリアセラム-Zを使用しており熱変形の影響を受けない。同様に対向金属板も

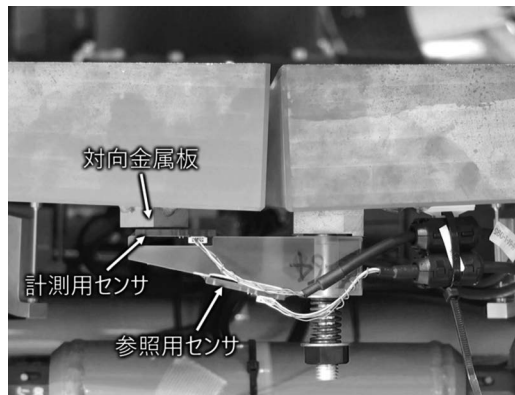


図4 セグメント鏡を真横から見たときのエッジセンサ取り付け部。センサアームは右側のセグメント鏡に固定されており、左側のセグメント鏡に貼り付けた対向金属板との距離を測定する。アームの下面には距離固定の参照用センサが貼り付けられている。

母材はクリアセラム-Zであり、その表面に銅メッキと酸化防止のための金メッキを施してある。

分割鏡制御の性能は、このエッジセンサが決めると言っても過言ではない。エッジセンサの開発は、せいめい望遠鏡プロジェクトが始まった初期から運用開始までの実に14年にわたり携わってきた数多くの学生・研究者の集大成である。

### 通信と制御器

エッジセンサからのデータは各セグメント鏡の下側に取り付けた読み出し回路でEthernet信号に変換されナスミス台に置かれた1台の制御PCに集約される。それをもとに制御PCで各鏡の位置・姿勢を推定し、目標位置との偏差に比例したアクチュエータへの速度指令値を決める。速度指令値はEthernetを通してセグメント鏡下のアクチュエータ・ドライバ回路に送出される。このサイクルを毎秒200回繰り返して鏡の位置を一定に保つ。位置指令ではなく速度指令としているのは急激な鏡の駆動による機械振動を抑えるためである。

分割鏡制御では絶対平面などの基準が存在しないため、隣り合うセグメント鏡間の相対位置からセグメント鏡の絶対位置を推定する必要がある。

そのためエッジセンサの配置と、その出力を鏡の位置に変換するプロセスが制御性を決める重要なポイントとなる。とくに、せいめい望遠鏡で採用した扇状のセグメント鏡では、主鏡全体での曲率半径が変化するような姿勢変化はセグメント鏡の境界では変位を生じないため検出が難しい。そこでセグメント鏡の境界部分にセンサを設置するのではなく、図4に示すように長さ50 mmのアームの先端にセンサを取り付けて相手のセグメント鏡の下に潜り込ませ、対称性をあえて崩すことで解決した[6]。図2に黒丸で示したエッジセンサの位置がセグメント境界から僅かにずれているのもこのためである。使用しているエッジセンサの数は72個であり駆動自由度=アクチュエータ数の57個よりも多い。これは前述の検出が困難な変位に対するS/Nを高めると同時に、一部のセンサが故障しても運用を続けられるよう冗長性を確保するためである。任意のセンサ1個が故障しても、残りの71センサで観測を継続できるよう設計されている。

エッジセンサから読み出したカウント値は対向板との距離に換算した後、変換行列をかけることで各セグメント鏡が持つ3つの剛体運動成分（傾斜2軸および光軸方向への並進成分）に変換される。目標値との差分をとった偏差にゲインをかけた後、再び行列演算を行ってアクチュエータへの指令値に変換される[7]。現在は1秒程度の制御帯域となるゲインで運用しているが、剛体運動成分への変換誤差を減らすことで10倍程度速い制御を実現できる見通しである。

これ以外にも駆動するセグメント鏡周辺にあるごく少数のエッジセンサの情報のみを用いて制御を行う手法も試している。制御の安定性は低下するものの、極めて大規模な分割鏡システムであってもセグメント鏡ごとに分散して演算を行うため、計算機や通信の負荷がボトルネックとならない利点を持つ。このような実験的運用を気軽に行えるのもせいめい望遠鏡の特長である。

### 3. 光学的な位置調整

ナスミス焦点には個々のセグメント鏡の傾斜を測定するShack-Hartmann (SH) カメラとセグメント鏡間の段差を測定する位相カメラを搭載しており、ピックアップ鏡で科学観測用の装置から光路を切り替えて選択する。観測開始前や観測中に気温などが大きく変化した場合にこれらの光学センサを用いて分割鏡制御の目標位置を修正する。

なお2021年1月時点において、位相カメラは望遠鏡上での試験運用中であり、観測運用にはSHカメラのみを使用している。

#### Shack-Hartmann カメラ

せいめい望遠鏡用のSHカメラにはセグメント鏡1枚あたり1点を測定するモードと、約40点を測定する多点モードがある。光学系は共通であり、マイクロレンズアレイの手前に置かれたマスクの挿抜でモードを切り替える。

1点モードは各セグメント鏡の傾斜のみの測定だが、測定レンジは $\phi 80$ 秒角と広い。多点モードは測定レンジが $\phi 8$ 秒角と狭くなるが、多点の測定結果を平均することで鏡面傾斜を精度良く決定できるとともに、ピント調整にも使用する。また必要に応じて、セグメント鏡ごとのピント調整や副鏡の光軸調整、WHによる鏡面形状の微調整にも多点モードを使用する。分割主鏡では星像の肥大化が分割主鏡の制御誤差によるものか、副鏡の軸ずれで生じたものか一見して判別することは難しく、光軸調整作業にはSHカメラなどの定量化された測定手法が必須と言える。

#### 位相カメラ

セグメント鏡間の段差の測定には双方の鏡に跨った2開口での光の干渉を利用する。焦点に置いた点光源からの光は望遠鏡で平行光となり、セグメント鏡間に置かれたハーフミラーで反射した後、再び焦点面に結像し干渉縞を形成する。15×15 mmの矩形開口2つを持ったハーフミラーは主鏡全体で24ヶ所に設置される。光源に2つの波

長固定レーザーと1つの波長可変レーザーを用いることで、位相の周期性に対する縮退を解き、長い測定レンジ（～数100  $\mu\text{m}$ ）を実現できる見通しである。

#### 4. 立ち上げと運用の状況

##### 鏡の設置から観測開始まで

2018年7月29日に分割鏡18枚に副鏡・第3鏡を合わせた全20枚の鏡が搭載された。この時点での鏡は単に載せただけであり、肉眼でも鏡面に映った景色に段差が見える状態であった。

そこから約半年間をかけて全ての分割鏡の位置がアクチュエータの駆動レンジ内に入るよう粗調整を行った。12月12日には18枚の鏡の焦点を1つに集めることに成功し、これをエンジニアリング・ファーストライトとした。とはいえ、この段階ではSHカメラ・フィードバック制御ともに実装されておらず、焦点面に置いた紙に写った1等星の像を目で見ながら、18個の焦点が視野中心に集まるようアクチュエータへの指令値を1つずつ入力するという手作業であった。このときの星像サイズは図5左端に示すように20秒角を超えていたが、翌週にはSHカメラを用いて自動的に分割鏡を調整できるようになり、その後1ヶ月ほどで副鏡も含めた望遠鏡全体の光軸調整も進めた結果、観測に向けての目安としていた約2秒角の星像が得られる状態となった。

そして2019年2月28日に初の科学観測を行った。しかし、この時点でもエッジセンサを用いた分割鏡制御はまだ動作しておらず、目標天体を分光器で1回積分するごとに輝星に向け直してSH

カメラでの分割鏡の調整を繰り返すという無理矢理な観測であった。機器のユーザーインターフェースなども不十分であったため、現地の職員が総出でドーム内に集まり、各自が担当する機器にひたすらコマンドを打ち込んでいたのは良い思い出である。

3月上旬にはエッジセンサの取り付けが完了し、まずは3枚の分割鏡で制御試験を開始した。その後、徐々に制御対象の鏡を増やしていき、3月12日によく18枚全ての鏡を制御することに成功した。3月22日からは本格的な科学観測への供与開始が予定されており、まさに綱渡りの立ち上げであった。

##### これまでの観測運用とトラブルへの対処

科学観測の開始以降もエンジニアリング用に確保された時間などを利用し、分割主鏡の微調整や、望遠鏡の指向に連動した副鏡光軸の補正などの機能を付加し、2019年7月には1秒角程度の星像が得られるようになった。これは岡山での典型的なシーイングサイズ～1.5秒角に対して遜色ない値である。

分割鏡制御システムが観測者に求める操作は制御の開始と停止だけであり複雑な操作は必要ない。これに加えSHカメラでの調整が必要となるが、こちらも3等星程度の明るい星に望遠鏡を向け、測定開始と主鏡制御システムへの反映ボタンを押す操作を数回繰り返すだけであり、数分間で完了する。

約2年間にわたり運用してきたが、幸いにも観測が長期間にわたり停止するような重大なトラブルは発生していない。運用開始直後にはエッジセンサの取り付けアームを硝材に固定する接着剤の剥離が発生し、半夜ほどの観測停止が度々あったが2019年7月に構造用アクリル接着剤に変更してからは同種のトラブルは起きていない。またセグメント鏡と支持構造の接着が剥離するトラブルが2回発生したが、再接着時には接着面積を増やすなど再発防止への対処を行っている。開発時に

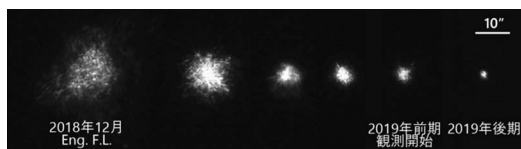


図5 エンジニアリング・ファーストライト（左端）から安定運用（右端）までの星像の変遷。

懸念されたエッジセンサ・アクチュエータの故障については、2年間でそれぞれ1個の交換にとどまっており、十分に低頻度に抑えられている。

### 今後の発展

現状ではシーイング限界での観測において十分な性能を達成できているが、分割鏡制御をより安定化することで、現状では一晩に数回行っているSHカメラでの測定頻度を減らすとともに、測定-補正作業の自動化を進めるなど観測の効率化や観測者の負担低減を進めていく。

今後せいめい望遠鏡には開発中の太陽系外惑星の直接撮像装置SEICAの搭載が計画されている。それまでに補償光学と組み合わせて回折限界を得られるよう性能を向上する必要がある。これは位相カメラを用いてセグメント鏡間の段差を解消するとともに、分割鏡制御誤差の更なる低減やWHによる鏡面形状の微修正により達成できる見込みである。

## 5. おわりに

国産技術での分割鏡の実現には期待も大きかった一方で本当にできるのか懐疑的でもあったと思う。蓋を開けてみれば鏡の搭載から8ヶ月で科学観測を始めることができ、極めて順調な滑り出しであった。これは我々天文分野に閉じることなく制御工学の研究者と共同して開発を進められたからだと感じている。今後はせいめい望遠鏡の安定運用だけでなく、ここで獲得した技術を更に発展

させ次の望遠鏡開発へと活かしていければ幸いである。

### 参考文献

- [1] Willson, R. N., 1999, Reflecting Telescope Optics II (Springer-Verlag), chapter 3
- [2] <https://www.tmt.org/page/optics> (2021.1.12)
- [3] <https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/telescope/mirrors/> (2021.1.12)
- [4] <https://www.salt.ac.za/telescope/#telescope-primary-mirror> (2021.1.12)
- [5] Jared, R. C., et al., 1990, Proc. SPIE, 1236, 996-1008
- [6] Shimono, A., et al., 2012, Proc. SPIE, 8444, 84445Z
- [7] Jikuya, I., et al., 2020, Proc. SPIE, 11451, 1145152

### Segmented Mirror Control System for the Seimei 3.8 m Telescope

Masaru KINO

*Astronomical Observatory, Graduate School of Science Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan*

Abstract: The primary mirror of the Seimei telescope consists of 18 petal-shaped segments. The real-time feedback control system mounted on the telescope keeps the ideal positions and orientations between the segments. I introduce the details of the control elements and current operational status of the control system.