

令和元年6月14日現在

機関番号：62616

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13467

研究課題名(和文) 金属鏡望遠鏡の開発

研究課題名(英文) Development of Metal Mirror Telescope Technology

研究代表者

浮田 信治 (UKITA, Nobuharu)

国立天文台・ハワイ観測所・特別客員研究員

研究者番号：20184989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：金属鏡を用いた分光観測専用の天体望遠鏡システム構築のための要素技術を検討・開発した。高精度に切削加工された( $2\mu\text{m rms}$ )軽量の(17 kg)アルミパネル(主鏡直径2.1m・焦点距離3.5m用の8分割鏡)をピッチ盤と耐水ペーパー(#2000-5000)や研磨剤(粒子径 $3\mu\text{m}$ )を用いて研磨し、 $0.5\mu\text{m rms}$ (結像性能約10秒角)の鏡面精度を得た。最終段階はバフ研磨を行い、反射率60%を得た。当初目標の3秒角と比べて約3倍悪く、今後に課題を残す結果となった。光ファイバーを用いて主焦点部と低分散分光器とを結び、試験観測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地上から天体観測をする限り望遠鏡の分解能は大気の揺らぎで制限されるので、シャープな星像や上質な金属光沢の反射面にこだわらない望遠鏡システムを検討した。これまであまり試みられてこなかった金属鏡を用いた分光観測専用の天体望遠鏡システム構築のための要素技術を開発した。これらの開発研究により大学の研究室規模でも軽量&低価格&低運用負荷の口径2mクラスの分光専用望遠鏡を短工期で実現する技術的見通しが得られた。

研究成果の概要(英文)：Key technologies to realize a metal mirror telescope system for astronomical spectroscopy observations have been studied and developed. High precision( $2\mu\text{m rms}$ ) and lightweight (17 kg) aluminum panels made with an NC machine for a 8-segmented primary mirror(a diameter of 2.1 m and focal length of 3.5 m) have polished manually using a polishing-pad, water-resistant sandpaper (#2000-5000), and abrasive( $3\mu\text{m}$ ). A mirror surface accuracy of  $0.5\mu\text{m rms}$  (an image size of 10 arcseconds) was obtained. It is about three times worse than an original target value of 3 arcseconds, which shall be challenged in the future. In the final stage, buffing was performed to obtain a reflectance of 60%. Test observations were successfully made with a low dispersion spectrometer, using an optical fiber link to feed light from the prime focus.

研究分野：天文学

キーワード：天体望遠鏡 金属鏡 金属研磨

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

全国大学共同利用の岡山 188cm 光学望遠鏡に対する近年の観測申請状況をみると、中口径望遠鏡を 10 年スケールで長期間に使用する、あるいはある期間集中的に使用するなど観測に対する新たな需要の高まりがみられる。観測天文学では 2020 年頃から大規模で超精密な位置天文観測 (GAIA 衛星計画) や全天反復撮像サーベイ観測 (例えば、LSST 計画など) が利用出来る時代に入ります。もし大学の研究グループが科研費基盤研究 S や A 規模の研究資金を得て低価格&短工期で 2m クラスの望遠鏡を購入あるいは既存の口径 1m 以下の望遠鏡の架台を改造して 2m クラスの主鏡に upgrade 出来るようになれば、特徴のある観測装置を載せて絞り込んだ研究課題に集中使用することでユニークな観測研究を行うことができる世界が広がると期待される。

### 2. 研究の目的

地上から天体観測をする限り、望遠鏡の分解能は大気の揺らぎで制限され、星像の大きさは典型的には 1~3 秒角である (高価な補償光学装置を用いない場合)。ならば分光観測に用いる主鏡面の結像性能は 2~3 秒角でよいと割り切れば、主鏡製作手法の選択肢は広がり、金属鏡もそのひとつである (Ref.1)。鏡の自重変形は (密度/縦弾性率) に依存し、熱変形は (線膨張係数×比熱/熱伝導率) に依存し、アルミと低膨張ガラスとではそれ程変わらない。アルミ合金には優れた機械切削性というガラスには無い特徴があり、軽量化を簡単に行うことができる。これに伴い望遠鏡本体や基礎部の製作コストも大幅に下がると期待できる。

従来の金属鏡の製作では柔らかいアルミを研磨して金属光沢を得るのは難しいとされ、硬いニッケルを無電解メッキしてそのニッケル面を研磨していた。我々は上質な金属光沢にはこだわらず、反射率はニッケルと同等の 60% 程度を想定し、直接アルミ面を研磨するアプローチを試みる。これにより従来のガラス鏡の場合に必要な再アルミメッキ作業等の運用時の負担が軽減されるなど大きなメリットがある。

これまでに国内外で散発的に試みられた金属鏡の開発では 1-1.8m クラスの単一口径の望遠鏡であった (例えば、Ref. 2, 3, 4)。今回、我々は 2m クラスの主鏡を 8 枚の分割鏡で構成する望遠鏡システムを念頭に要素技術を開発・試作する。

これらにより軽量&低価格&低運用コストの 2m クラスの望遠鏡を短工期で実現する技術的見通しを得る。そして実際に分光観測に用いてその科学的有用性を実証する。

### 3. 研究の方法

我々はアルミパネル素材製造と切削加工技術においてブレイクスルーを起こして高精度で経年変化の無いサブミリ波電波望遠鏡 (直径 10m) 用の分割鏡 (サイズ約 85cm, 3 点支持) を完成させた (Ref. 5)。この製造技術を用いれば、5cm~1m スケールでの凹凸が  $2\mu\text{m rms}$  の精度で仕上げることができる。この技術が今回の金属鏡製作の第一段階の出発点である。

製作の第二段階では、切削加工による数 cm スケールの周期的な凹凸パターンを研磨により  $0.1\sim 0.2\mu\text{m rms}$  に鏡面形状修正した上で最終の光沢研磨を行う。第三段階は、既存の 65cm 望遠鏡の架台部に 2 枚の金属鏡とファイバーリンク入射部を同架して、分割鏡の相互アライメント補正方法を確立する。Lookup-table 方式の簡単な手法で上記結像性能を満たす複合鏡を実現する。空間スケール毎に許容形状精度を満たすこれらの技術を組み合わせることで、中口径の軽量な分光専用望遠鏡を安価で短期間に製作する。

低分散分光器を観測室の光学定盤上に組み立て、光ファイバーケーブルを用いて主鏡焦点部から光を導く。光ファイバーの入射特性を利用して直接入射し、F 変換マイクロレンズを省略する。これらにより簡素化された観測システムを構築し、試験観測を実行し総合的な評価を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) アルミパネルの設計と製作

我々は有限要素法を用いて口径 2.1m の主鏡用の 8 分割鏡のデザインをした。焦点距離は 3.5m、一枚のパネルのサイズは 820x860x54 mm とし、3 つのパネル支持点を井桁状に組んで連結するリブ形状とした (図 1)。3 点支持の位置や表面スキン厚を 5mm、主リブを 10mm 厚、副リブを 6mm 厚などと最適化して姿勢変化に伴う重力変形による結像性能の劣化が 0.6 秒角以内という設計結像性能を得た。パネル 1 枚の重量は 17 kg (8 枚で 135 kg) と軽量で、岡山 188cm 望遠鏡の主鏡重量 1.7ton と比べて 1/10 以下である。

このデザインに基づき金属加工メーカーによって製作され、門型 3 次元測定器を用いた鏡面精度測定では  $2\mu\text{m rms}$  (5cm グリッド測定) と良好な結果を得た。

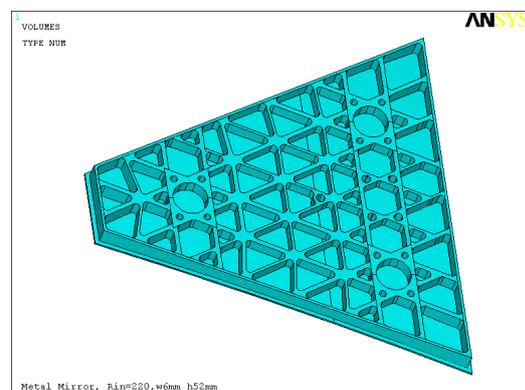


図 1. 3 点支持位置やリブ形状が最適化されたアルミパネルの設計

## (2) パネル支持機構

パネル支持は市販品の球面座と1軸ステージを組み合わせた簡素な3点キネマティック支持機構とした。これにより設計通りの3点支持による自重変形とアルミパネルと望遠鏡架台部(鉄)のパネル支持フレームとの間の熱膨張の差を吸収することが出来る。



図2. ピッチ盤と研磨剤(酸化アルミニウム、 $3\mu\text{m}$ )を用いた研磨の様子

## (3) 金属鏡の研磨

研磨の第一段階は実験室内での研磨作業である(図2)。切削加工による数 cm スケールの周期的な凹凸パターンを除くためピッチ盤と耐水ペーパー(#2000-5000)や研磨剤(粒子径 $3\mu\text{m}$ )を用いた研磨を行った。切削痕が一様に消失していく様子を見ながら研磨を進めた。

第二段階は分割鏡を望遠鏡架台に載せ(図3)、鏡面形状の測定と修正研磨を繰り返した。明るい恒星を光源とした Hartmann 測定を行い、各小開口を通る光束の傾きを求め、その解析から鏡面の凹凸形状を求める(Ref.6)。これをもとに鏡面修正作業を行った。

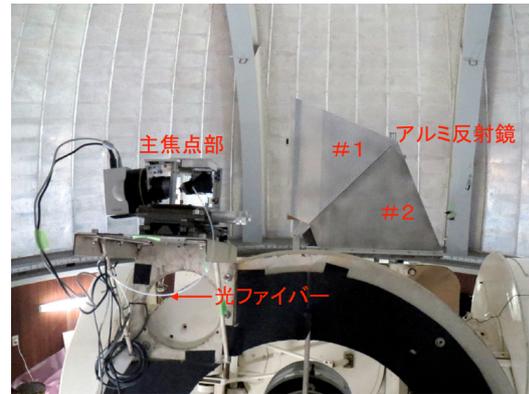


図3. 65-cm 望遠鏡の架台部に載せた2枚の分割鏡とファイバーリンク入射部

## (4) 結像性能

焦点面での像サイズは約 10 秒角(図4)、 $0.5\mu\text{m rms}$  の鏡面精度を得た。当初目標値の3秒角、 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$  と比べて約3倍悪く、今後課題を残す結果となった。

我々は最初の試みとして手作業で研磨を行なった(図2)が、研磨パッドへの荷重や研磨速度等の研磨条件のコントロールが上手に出来ないため修正研磨をスムーズには進められなかった。今後は室内で研磨機を用いた研磨作業と形状測定ができる設備を持った専門業者等と共同開発・製作する道などを探ることも必要であろう。

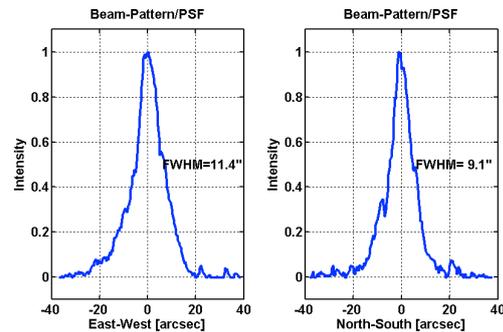


図4. 焦点面の恒星像の広がり。目標の結像性能3秒角に比べて3倍程度悪い。

## (5) 反射率

最終段階はピッチ盤にフェルト状のバフをつけて光沢研磨を行い( $1\mu\text{m}$  の酸化アルミニウム)、反射率 60%を得た。

## (6) パネルアライメント機構

3つのパネル支持機構とパネル支持フレームとの間に市販品のZ軸ステージを配置し、パネル光軸の傾きを調整する。2枚の分割鏡の光軸の相互傾斜アライメントは、現状の支持フレーム構造では約15分間の観測時間で約5秒角のずれが発生することが分かった。事前誤差測定によるlookup-table方式で補正を行いながら観測する。

## (7) ファイバーリンクの設計と製作

光ファイバーリンクは現状の結像性能に合わせてコア径  $200\mu\text{m}$ 、 $\text{NA}=0.12$  のファイバー(12秒角相当)を用いて製作した。光ビームの入射角はほぼ  $F=4$  相当であり、2枚の分割鏡からの光を効率良く導き入れることが出来る。

## (8) 分光器の設計と製作

光学ベンチ上に光ファイバー出射部、コリメータレンズ( $f=200\text{mm}$ ,  $F4$ )、グレーティング(600本/mm)、カメラレンズ( $f=50\text{mm}$ ,  $F1.2$ )、CCDカメラ(Bitran BJ-53L, 画素  $4.54\mu\text{m}$ ,  $2750 \times 2200$  pix)を配置した。

波長域  $430\sim 800\text{nm}$  をカバーし、分解能は約  $1.7\text{nm}$  である(図5)。

## (9) 試験観測

分光標準星(A型)、晩期型星(M、S、C型)などのスペクトルを取得した(図5)。波長校正用光源として蛍光灯を用い、HgやArのスペクトル線を同定した。

(10) まとめ

これらの開発研究により大学の研究室規模でも軽量&低価格&低運用負荷の口径 2m クラスの分光専用望遠鏡を短工期で実現する技術の見通しが得られた。

<引用文献>

- (1) 山下泰正、1992、「反射望遠鏡」、東京大学出版会
- (2) 佐藤修二、1988, 天文月報 86, pp. 245-248
- (3) Wilson, R. N., 1999, "Reflecting Telescope Optics II," Springer ;
- (4) Dierickx, P. & Zigmann, F., 1991, ESO Messenger No65; pp. 66-68
- (5) Ukita et al., 2000, SPIE 4015, pp. 177-184
- (6) Mayall, N. U. & Vasilevskis, S. 1960, A. J. 65, pp. 304-317

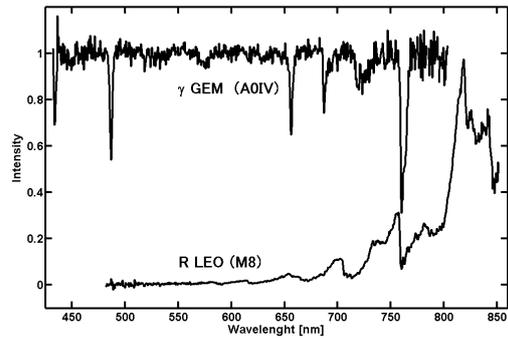


図5. システム全系統合試験観測時のサンプルスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

浮田信治、筒井寛典、神戸栄治、柳澤顕史、泉浦秀行、黒田大介、松永典之、「金属鏡望遠鏡の開発」、日本天文学会 2019 年春季年会、法政大学小金井キャンパス(東京都小金井市)、2019/3/14-17

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：松永 典之

ローマ字氏名：MATSUNAGA, Noriyuki

研究協力者氏名：泉浦 秀行

ローマ字氏名：IZUMIURA, Hideyuki

研究協力者氏名：神戸 栄治

ローマ字氏名：KAMBE, Eiji

研究協力者氏名：柳澤 顕史

ローマ字氏名：YANAGISAWA, Kenshi

研究協力者氏名：黒田 大介

ローマ字氏名：KURODA, Daisuke

研究協力者氏名：筒井 寛典

ローマ字氏名：TSUTSUI, Hironori

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。