

## 成 果 報 告 書

研究テーマ名：TMT-AGE:TMT Analyzer for Galaxies in the Early universe

業務の実績

(1) 業務の実施日程

業務項目	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
前置補償光学 検討1			←→									
前置補償光学 検討2									←→			
並列計算機計算 速度評価							←→					
開ループ補償光 学試験						←→						
RAVEN調整 作業									←→			

(2) 業務の成果の説明

多天体補償光学系の前置補償光学系の光学設計を行った。オフナー光学系を用いた前置補償光学系について視野を直径10分とした光学設計を検討した(前置補償光学検討1)。仕様検討を行った後に、光学設計はオプトクラフト社に発注し、納品された光学設計の評価を行った。この結果、オフナー系で前置補償光学系を実現した場合には非常に大きな光学系が必要となることが判明した。オフナー系以外での前置補償光学系の検討を行うため、自由曲面鏡を複数面導入することを許容した光学系での検討を進めた。光学設計はフォトコーディング社に発注し、納品された光学設計の評価を行った。視野直径8分を実現し、光学系のサイズも実現性の高い1.5m弱となる解があることが分かった(前置補償光学検討2)。以上の検討結果を踏まえて前置補償光学系の概念検討結果としてまとめた。

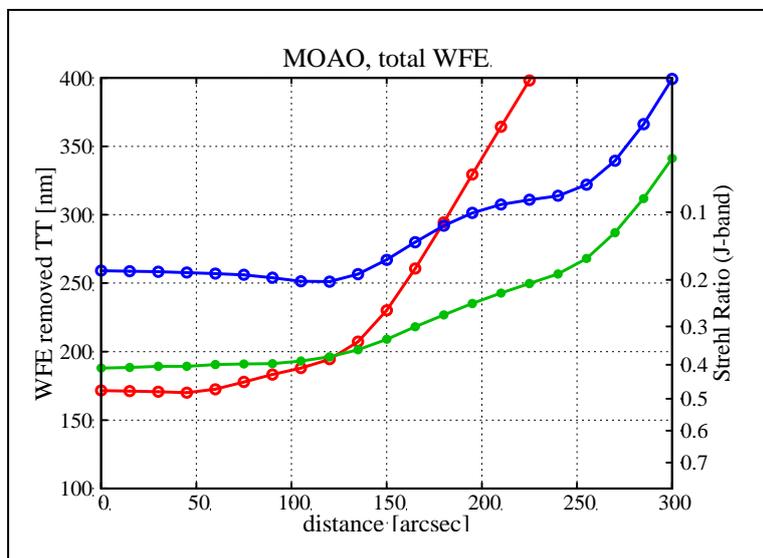
30m望遠鏡の多天体補償光学系に必要な多素子シャックハルトマン波面センサーの画像データ処理計算およびトモグラフィーによる大気揺らぎ推定計算がグラフィックボードを用いた汎用並列計算(GPGPU)で十分に高速に行えることを実証するためにGPGPUボードを搭載した計算機を購入し、波面データの画像処理計算、トモグラフィー推定計算を実装し、計算速度の評価を行った。波面データの画像処理計算については0.2ミリ秒の高速で行えることを確認した。トモグラフィー推定計算については反復の初期値を工夫することで5ミリ秒程度の高速で行えることを確認した。以上の結果を踏まえて並列計算機による計算速度の評価としてまとめた(並列計算機計算速度評価)。

小型開ループ補償光学系の実験室評価実験を行い、可変形鏡の制御特性について評価した。ツェルニケモードを再現する試験を行い、それぞれのモードの再現性について評価をまとめた(開ループ補償光学試験)。

すばる望遠鏡での多天体補償光学系の実証試験となるRAVENプロジェクトにおいて、実証データを取得するために2014年1月より大学院生を国立天文台ハワイ観測所に派遣した。2014年5月の試験観測に向けて光学調整作業を完了した(RAVEN調整作業)。

3. 研究の進捗状況（継続の場合のみ。詳細は別途報告書を参照するので要約のみで構わない。報告書の内容の補足や、それ以降の進展があれば記載すること）

我々は多天体補償光学系の広視野での補償性能を向上するアルゴリズムとして、複数のタイムステップの測定を用いる複タイムステップトモグラフィック波面推定の方法を提案している。この方法について計算機上での補償シミュレーションを行い、広視野での補償性能が従来のトモグラフィック推定に比べて十分に向上することを確認した。左図は補償後の波面残差を視野中心からの距離で書いたものである。赤線と青線は従来の方式でのトモグラフィック推定の結果であり、ガイド星を狭く配置した場合（赤）には視野中心では補償が効くが、視野周辺では悪い、ガイド星を広く配置する（青）と視野全体で同じ程度の補償になるが全体に補償性能が下がる。緑線は複タイムステップトモグラフィック推定を用いた場合である。広視野にわたって良い補償が実現できることがわかる。ただし、この方法を用いるには上層大気揺らぎ層の揺らぎの強度分布と風向・風速を情報として与える必要がある。揺らぎの強度分布については複数の波面センサーの同時刻の測定の相関を取ることで、風向・風速についてはトモグラフィック推定された各高さの揺らぎのパターンの異なる時刻での相関を取ることで推定することが出来る。これらの方法について計算機上でのシミュレーションを通じて十分な精度での推定が可能であることを確認した。

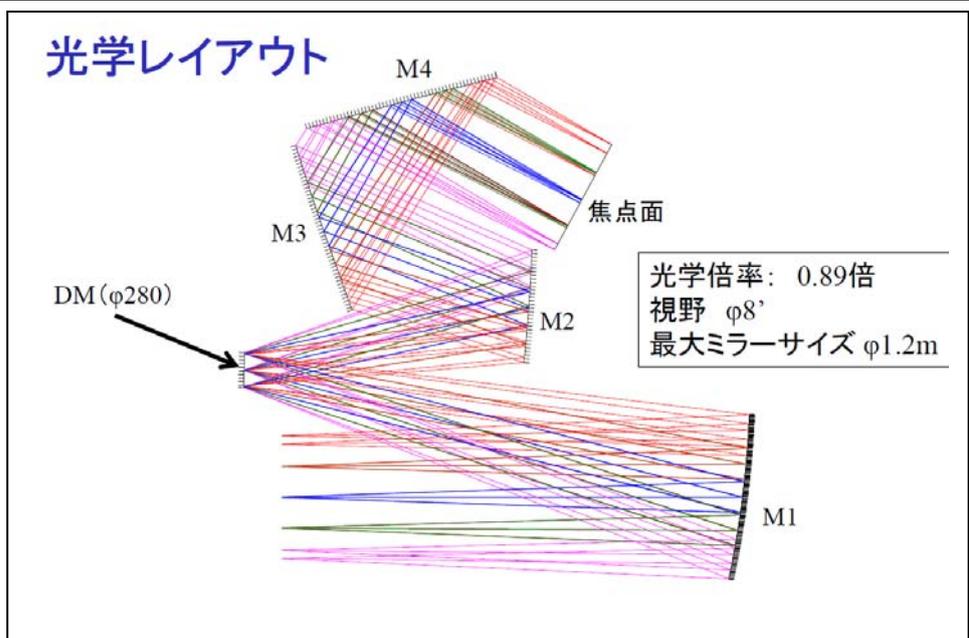


ラフィック推定に比べて十分に向上することを確認した。左図は補償後の波面残差を視野中心からの距離で書いたものである。赤線と青線は従来の方式でのトモグラフィック推定の結果であり、ガイド星を狭く配置した場合（赤）には視野中心では補償が効くが、視野周辺では悪い、ガイド星を広く配置する（青）と視野全体で同じ程度の補償になるが全体に補償性能が下がる。緑線は複タイムステップトモグラフィック

推定を用いた場合である。広視野にわたって良い補償が実現できることがわかる。ただし、この方法を用いるには上層大気揺らぎ層の揺らぎの強度分布と風向・風速を情報として与える必要がある。揺らぎの強度分布については複数の波面センサーの同時刻の測定の相関を取ることで、風向・風速についてはトモグラフィック推定された各高さの揺らぎのパターンの異なる時刻での相関を取ることで推定することが出来る。これらの方法について計算機上でのシミュレーションを通じて十分な精度での推定が可能であることを確認した。

RAVENは多天体補償光学系のすばる望遠鏡での実証試験であり、トモグラフィック波面推定や風向・風速の推定の精度について評価する。2014年1月より大学院生の大野がハワイ観測所の特別共同利用研究員として試験に参加し、光学調整やキャリブレーションユニット性能評価を行った。キャリブレーションユニットを用いて模擬大気揺らぎを複数の波面センサーで測定したデータを取得し、揺らぎの強度分布や風速・風向を波面センサーデータの相関を取ることで推定する手法を確立した。キャリブレーションユニットを用いて、オンソースの単層共役補償光学（SCAO）、地表層補償光学（GLAO）、多天体補償光学（MOAO）のそれぞれの補償方法を用いた試験で得られた疑似星像を前頁の図にまとめた。キャリブレーションユニットを用いた結果を見るとそれぞれの補償光学の特性から予想されるのと合致する補償性能が得られており、実際の天体を用いた観測に向けた準備は進んでいる。最初の試験観測は2014年5月に予定されている。

我々は多天体補償光学系のシステムとして各天体の補償を行う小型の補償光学系の前にすべての天体に共通の大气揺らぎ成分の補償を行う前置補償光学系を置く設計について光学設計の検討を行い、前置補償光学系を置



く場合と置かない場合の性能と実現可能性の比較を行っている。我々は昨年度の検討に引き続いて改良オフナー光学系を用いた前置補償光学系について視野を直径10分角と拡大した光学設計をオプトクラフト社に依頼して行い、性能の評価を行った。この結果、直径10分角の視野に対しても焦点面の星像は後段の補償を考えると十分に良い像が得られること、副鏡の部分で視野全体の光が十分にきれいな瞳像を作ることが出来て補償光学系として機能すること、を確認した。一方で直径5分角の視野の場合には直径3.2mのミラーで系の全長が6.6mとなり、直径10分角の視野の場合には直径4.7mのミラーで系の全長が8.4mという大きな光学系が必要となることが判明した。このような大きな光学系では実現可能性が低いと考え、改良オフナー系以外で小型化した前置補償光学系の可能性を探った。自由曲面鏡を複数面導入することを許容して小型化した光学系が出来るかどうかの検討を行った。光学設計をフォトコーディング社に依頼して行い、性能の評価を行った。これまでのところ、複数の自由曲面鏡を用いる場合、視野直径8分を実現し、鏡のサイズも1.5m弱で系の全長も3.5mとなる解があることが分かった(上図)。2014年度に引き続き自由曲面鏡で視野直径10分を実現する解について検討を進め、前置補償光学系の性能評価とその有無による性能の比較検討をまとめる。

30m望遠鏡の多天体補償光学系の波面センサーデータの解析とトモグラフィック波面推定においては素子数が多いために高速な制御計算が必要となる。また我々は波面センサーデータの相関を取るなどして風速・風向の情報を得ることを想定しており、要求される計算量はさらに増える。要求される高速な計算を行うためにグラフィックボードを用いた汎用並列計算(GPGPU)を導入し、計算速度の評価を行って来た。波面センサー画像の処理については60x60素子のシャックハルトマン波面センサーについてそれぞれの素子を15x15ピクセルでカバーするレーザーガイド星用波面センサーのシミュレーション画像を用意してGPGPUでの処理速度の評価を行った。その結果データの転送を含めて0.2ミリ秒の十分に高速に画像処理が可能であることが分かった。トモグラフィック波面推定の計算については反復解法で解いている。1回のイテレーションにつき0.7ミリ秒かかり、収束には少なくとも5回程度のイテレーションが必要で、現状ではトータルで3.5ミリ秒かかることになる。ただし、並列計算に用いるボードの数を増やすなどすればさらに高速化することも可能であり、要求される1ミリ秒での計算も技術的にか

け離れた計算速度ではないことが分かった。

MEMSを用いた小型多素子大ストローク可変形鏡の開発については新しい設計での試作を進めている。これまで試作を行って来たばね方式では、ばねの立ち上がり量が小さく大ストロークの実現が難しいことが判明した。新しい設計では Au-Si 共晶化によるウェハー接合により大ストロークに必要な大きなギャップを持つ構造を実現する。これまでのところプロセスの途中で破壊が生じるなどまだ一通りの試作が完了していない段階であり、2014年度も引き続いて試作と評価を進める。

使用実績報告書

1. 総括表

区分	費目	予算額 (円)	決算額 (円)	委託費の 充当額 (円)	備考
支出	設備備品費	500,000	1,499,400	1,499,400	
	消耗品費	1,270,000	873,100	873,100	
	人件費	0	0	0	
	その他の経費	2,230,000	1,627,500	1,627,500	
	合計	4,000,000	4,000,000	4,000,000	
収入	委託費の額	4,000,000	4,000,000		
	自己調達額	0	0		
	その他	0	0		
	合計	4,000,000	4,000,000		

2. 決算費目別内訳

(A) 支出

a 設備備品費

品名	仕様	数量	単価 (円)	金額 (円)	発注年月日	引取年月日	支払年月日	備考
ワークステーション	MAS-XE5-Silent	1台	1,499,400	1,499,400	13.12.16	14.1.24	14.2.25	
計				1,499,400				

b 消耗品費

品名	仕様	数量	金額(円)	支払年月日	備考
丸型コネクタ	FGG. 1B. 303. CLAD52	1個	4,935	13.10.25	
直流安定化電源	PAN35-5A	1台	79,380	13.11.25	
直流安定化電源	PAN35-10A	1台	110,250	13.11.25	
光学設計ソフトウェア	Zemax Standard	1式	262,500	13.11.25	
Zemaxデータベースソフト	Zebase	1式	63,000	13.11.25	
高真空アングルバルブ 手動	1FLV-16M	1個	24,675	13.11.25	
レイキャクプレート オオガタペルチェ	CS438-X0111-00	1個	28,770	13.11.25	
レイキャクプレートヨ	CS438-X0114-00	4個	11,760	13.11.25	

ウブシュ					
センターリング	VP2016 (NW16)	2個	1,323	13.12.25	
センターリング	VP2025 (NW25)	1個	756	13.12.25	
ブロックフランジ	VP4016 (NW16)	2個	1,008	13.12.25	
ブロックフランジ	VP4025 (NW25)	1個	525	13.12.25	
カップリング	VP1016N (NW16)	2個	1,218	13.12.25	
カップリング	VP1025N (NW25)	1個	609	13.12.25	
カップリング	VP1040N (NW40)	2個	1,407	13.12.25	
MS I ビデオカード	N780Ti-3GD5	1台	98,700	13.12.25	
Threaded Cage Plate	CP02/M	2個	4,368	14.3.25	
Cage Plate Mounting Bracket	CP02B	2個	3,822	14.3.25	
High Precision Translating Lens Mount for 1" Optics	CXY1	1個	23,076	14.3.25	
Stackable Lens Mount For 1" Optic-Usable Depth 1"	SM1L10	1個	1,945	14.3.25	
Stackable Lens Mount For 1" Optic-Usable Depth 1/2"	SM1L05	1個	1,719	14.3.25	
DOUBLE DENSITY200 × 600×12.7 M6/26	MB2060/M	1個	39,675	14.3.25	
A4フラットファイル	CF-A4SB	1袋	325	14.4.25	
ボードマーカー中黒	パイロットWBM12LB	2本	200	14.4.25	
変換アダプタ	TAP-AD7T	1個	1,220	14.4.25	
Wクリップ小	CO-クリ-35N	2個	42	14.4.25	
アクロマティックレンズ	TS 25*125 MGF2	1個	10,028	14.3.31	
正方形マイクロレンズアレイ	10*10 300UM ±0.5°	1個	69,300	14.3.31	
ステンレス製マウントポスト	TS M4 38.1MM	3個	3,307	14.3.31	
ステンレス製マウントポスト	TS M6 38.1MM	3個	3,307	14.3.31	
オス-オス型アダプター ハイブリッド	TS	5個	3,675	14.3.31	
U1/4変換用アダプター (マウントポスト用)	TS	5個	3,675	14.3.31	
ポスト用ベースプレート 縦方向スロット穴タイプ	TS	3個	6,300	14.3.31	
ポスト用ベースプレート 横方向スロット穴	TS	3個	6,300	14.3.31	

タイプ					
計			873,100		

c 人件費

氏名	摘要	金額(円)	支払年月日	備考
該当なし				
計		0		

d その他の経費

種別	摘要	数量	単価(円)	金額(円)	発注年月日	引取年月日	支払年月日	備考
委託費	TMT多天体補償光学装置	1式	630,000	630,000	13.6.27	13.7.10	13.8.28	国立天文台にて会計処理
委託費	TMT多天体補償光学装置の共通前置広視野縮小光学系検討業務	1式	997,500	997,500	13.12.25	14.3.14	14.4.25	
計				1,627,500				

(B)収入

種別	摘要	金額(円)	備考
委託費の額		4,000,000	このうち630,000円は国立天文台にて会計処理
自己調達額		0	
その他		0	
計		4,000,000	

(注) 委託業務の実施に際し、収入を得た場合や取引相手先からの納入遅延金が発生した場合には、収入の欄におけるその他に計上すること。