

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：62616

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654050

研究課題名(和文)すばる次世代補償光学装置開発に向けた地表付近の大気ゆらぎ調査

研究課題名(英文)Ground-layer turbulence evaluation at Subaru Telescope for next-generation adaptive optics development

研究代表者

大屋 真(Oya, Shin)

国立天文台・ハワイ観測所・RCUH職員

研究者番号：80399287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で導入した大気ゆらぎプロファイラにより、すばる望遠鏡サイトにおける地表層もマウナケアのリッジサイトと同様に地表層は80m以下の高度に集中することが実験的に確認された。また多天体補償光学装置の実証実験機RAVENを地表層AOモードで動作させたところ、実際にHバンドで半値全幅0.2秒角を切ることが確認でき、シミュレーションによる予測性能が実験的に検証された。結果として、すばる望遠鏡で地表層補償光学装置は実現可能であることを明らかにした。また北海道大学のピリカ望遠鏡サイトでの測定やすばる望遠鏡ドーム内のシーイング測定準備も行った。今後は長期的な定常観測を継続したいと考えている。

研究成果の概要(英文)：The concentration of the ground-layer turbulence below 80m as observed at the summit ridge site of Mauna Kea, was also confirmed experimentally at the Subaru Telescope site using the turbulence profiler introduced by this research program. Moreover, the image size of less than 0.2 arcsecond in the H-band by ground-layer correction only, was successfully achieved by RAVEN, a demonstrator of multi-object adaptive optics at Subaru Telescope. Thus, the prediction of the performance simulation of a ground-layer adaptive optics was experimentally verified on actual star light through the telescope. As a result of this research, the feasibility of a ground-layer adaptive optics on the Subaru Telescope has been established. The turbulence evaluation work was also expanded to profiling at Pirika Telescope of Hokkaido University in Japan, and also to preparation of the dome seeing measurement at the Subaru Telescope. Activities of seeing evaluation will be continued based on this initial result.

研究分野：補償光学・赤外線天文学

キーワード：大気ゆらぎ 補償光学 国際情報交換 アメリカ：カナダ：オーストラリア

1. 研究開始当初の背景

地上から観測する場合、大気ゆらぎによる星像の劣化を補正して回折限界の解像度を実現する補償光学(Adaptive Optics; AO)は必須の技術となっている。すばる望遠鏡でも現在レーザーガイド星 AO が稼働して科学的研究成果を挙げつつあるが、単一波面センサと単一可変形鏡を組み合わせた従来形式であるので補正が有効な視野は半径 30 秒角程度以内に限られる。

すばる望遠鏡の次世代補償光学装置として広視野 AO の検討が進んでいる。世界における次世代 AO 開発の方向性は大きく分けて二つある。広視野・多天体化の方向と、補正性能を極限まで回折限界に近づける極限 AO の方向である(図 1)。

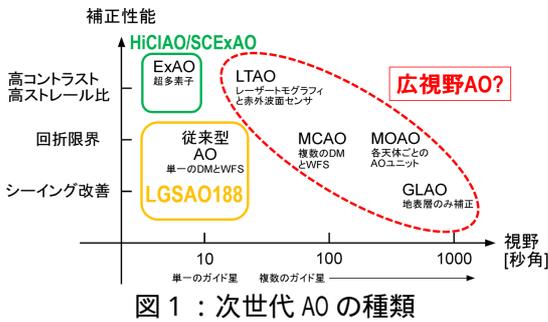


図 1 : 次世代 AO の種類

さらに広視野 AO にはいくつかの種類がある。複数のレーザーガイド星を密に配置し、レーザーガイド星自体のふらつきを検出する自然ガイド星を赤外波面センサで測定することで 30 秒角程度の視野で補正性能を向上させる LTAO (Laser Tomography AO)、複数の可変形鏡を用いて 2 分角程度の視野を補正する MCAO (Multi Conjugate AO)、個別の天体にそれぞれ AO ユニットを用意する MOAO (Multi Object AO)、さらに地表層付近のゆらぎのみを補正し、性能は回折限界ではなくシーイング(大気ゆらぎによる星像のボケ)の改善程度にとどめる代わりに 10 分角以上の最大の視野を達成する GLAO (Ground Layer AO)がある。

世界の口径 8m 級望遠鏡ではいずれの方向性も追求している。すばる望遠鏡では補正性能の向上によりコントラストを上げて系外惑星探査研究を行うために SCEXAO という極限 AO の開発が進んでいる。一方で、広視野・多天体化の方向の開発は未着手であり、早急に検討を進めることが求められている。研究代表者もその一環として、シミュレーションによる検討を行ってきた。その結果として、広視野 AO の方式の一つである GLAO の場合はシーイングが良い時は 10 分角以上の非常に広い視野にわたって K バンド(中心波長 2.2μm)で半値全幅 0.1 秒角台の星像を達成できる可能性を示した。この結果を基に GLAO を用いた広視野赤外線観測装置計画(ULTIMATE-SUBARU)が立案された。

しかしながら、広視野 AO のシミュレーション

の結果は大気ゆらぎの高度方向の分布に強く依存する。現在のシミュレーションは TMT(Thirty Meter Telescope)用サイトである 13N でのシーイング調査の結果を適用している。特に地表付近の大気ゆらぎがすばる望遠鏡サイトとは異なる可能性があり、得られたシミュレーション結果が実際のシステムで実現可能という確証が得られているとは言い切れない。そこですばる望遠鏡サイトで実測データを収集し、GLAO 性能予測評価の確実性を上げる必要があった。

2. 研究の目的

すばる望遠鏡サイトにおける局所的な影響も含めた地表付近の大気ゆらぎの高度分布を実測データにより明らかにし、シミュレーションに基づいた GLAO 実現可能性に裏付けを与えることが目的であり、この研究は「広視野 AO の実現」にチャレンジするための基礎となる。

これまですばる望遠鏡で開発してきた単一波面センサと単一可変形鏡を用いた従来形式の AO と異なり、広視野 AO の場合は大気ゆらぎを高度別に考慮する必要がある。これは観測する方向が異なる場合、開口面付近に近いゆらぎ層ではいずれの方向も共通の部分を透過してくるが、ゆらぎ層の高度が上がるにつれて方向ごとで異なる部分を通過してくるようになるからである(図 2)。

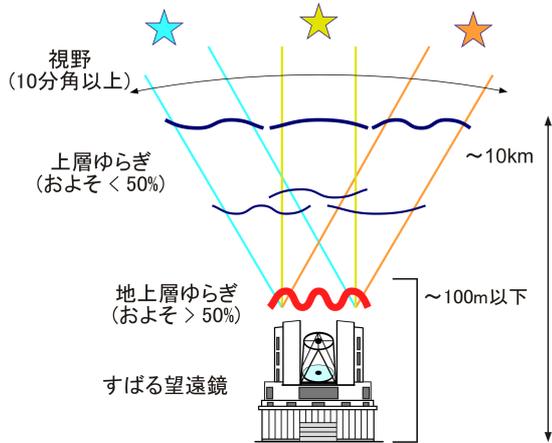


図 2 : 大気ゆらぎ高度分布と広視野化の関係

シミュレーションの確実性を上げて実現可能な性能を見積もることは、広視野 AO の実現へ向けて欠かすことのできない初めの一步である。

マウナケアのゆらぎ層は地表付近の高度 80m 以下に大部分が集中しているという衝撃的な結果が Chun et al. 2009 により得られているが、これはシーイングに影響する大気ゆらぎの高度分布として一般的に考慮されている 10km 程度の範囲に比べて極端に小さく、マウナ・ケアが広視野 AO にとって最適な設置場所であることを示している。特に GLAO の場合は、ドームシーイングを含めた地表面に近い大気ゆらぎのみを直すという方

式なので、ゆらぎ層の大部分が地表付近に集中していると補正がより効果的になる。しかし逆に、もしも 100m~1km の高度範囲にある大気ゆらぎが測定にかからず見過ごされていたとすると、性能がひどく劣化してしまう。

本研究ではこの点に関して Chun et al. 2009 とは異なる測定方式によって独立した検証を行う。特にこれまでマウナケア山頂で測定データの蓄積が少ない音波を使用した大気ゆらぎ測定装置も併用する。また、ゆらぎ層がこれ程までに地表に近いと Chun et al. 2009 が測定を行った風上にある山頂東側のリッジサイトと、風下かつ標高が 70m ほど低いすばる望遠鏡サイト(図 3)で地表付近の大気ゆらぎの振る舞いが同じであるという保証はないので、すばる望遠鏡のサイトで測定を行うことが重要である。

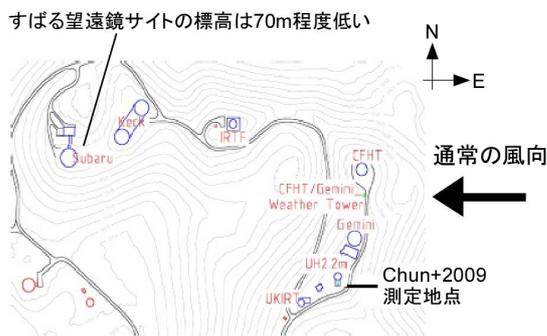


図 3 : マウナケア山頂リッジサイトとすばる望遠鏡サイトの位置関係

本研究の調査結果を基にすばる望遠鏡次世代補償光学装置開発のシミュレーションによる補正性能評価に実験観測的な裏付けを与え、「広視野高解像度天文学」という新たな領域を開拓することを目指す。すばる望遠鏡で GLAO が実現した場合の天文学的な研究テーマとしては、例えば、「 $z=2\sim3$ の銀河の形態」、「 $z=1$ の銀河団中の環境効果」、「固有運動による銀河系内の星団メンバーの抽出」などが挙げられる。その他にも、TMT の将来装置計画、日本国内の中小望遠鏡サイトでの大気ゆらぎ高度分布調査等への波及効果も見込む。

3. 研究の方法

本研究では、大気ゆらぎの高さ方向の分布を取得する必要がある。例えば、星像サイズ(半値全幅)の測定で解るのは地表まで積算されたゆらぎの強度であり、高度情報は失われてしまう。そこで高度を分解して測定できる装置(プロファイラ)をすばる望遠鏡サイトに置いて観測を行う。測定可能範囲が異なる 2 種類の装置(測定方法)を用いて特に 0~1km の高度に着目して網羅的にデータを取得する。SNODAR は音波で測定を行い 8m~100m 以上まで測定可能で 1m の高度分解能を誇る。一方 Lunar SHABAR は、0m~1km まで測定可能で特に地表付近の測定に適している。

(1) SNODAR (図 4 : 例えば Bonner et al. 2010)

音波で測定するプロファイラで、地上 100m 程度まで約 1m という高い高度分解能で測定できる。大気ゆらぎが少なければ 200m 程度まで測定可能である。地表から発射した音波が大気ゆらぎ層で反射されて戻ってくるまでの時間によって高度を測定する。音響式なので日中や曇天でも測定可能という利点がある。オーストラリアのニューサウスウェールズ大学で開発され、南極における地表層大気ゆらぎの測定で実績がある。

音響式の測定装置としては SODAR が普及しており、例えばマウナケアでも TMT の建設予定地である 13N と呼ばれる場所で測定の実績がある。しかし、同種の装置をすばる望遠鏡サイトに設置して測定を試みたところ近隣の Keck 望遠鏡の排気用の大型換気扇からの音響ノイズの影響で有効なデータの取得に支障をきたしていた。SODAR に比較して、SNODAR は遮音用の大型の筒を有していることが特徴である。



図 4 : 測定中の SNODAR

(2) Lunar SHABAR (図 5 : 例えば Hickson et al. 2013)

地上 0m~1km まで測定可能であり特に地表付近の測定に適している。地表に近いほど分解能が高くなるという特徴がある。月からの光を地上の離れた 2 点間で測定すると、両方のビームが重なっている部分のゆらぎで生じたシンチレーションには相関があるという原理を利用している。数種類の間隔を持った複数点で同時に観測した光強度の時間変化を記録し、相関計算をすることで高度を分解することができる。ただし、月を観測する必要があるので明夜のみ測定が可能である。

このプロファイラは、特に GLAO で必要となる大気ゆらぎの高度とマッチングが良い。ドームの高さ以下の高度も分解できる上に、500m~1km 程度までのグレーゾーンと呼ばれる領域まで同時にデータを取得することが可能である。GLAO の性能は積算されたシーイングが同じでも特にグレーゾーンの高度が高いと急激に悪化してしまうので、グレーゾーンのゆらぎの高度・強度を実測しておくこ

とは GLAO の性能を見積もる上で重要である。



図 5：測定準備中の PTP2

Portable Turbulence Profiler (PTP)という構造が簡単な Lunar SHABAR がカナダのブリティッシュ・コロンビア大学で開発された。近隣の CFHT 望遠鏡(Canada France Hawaii Telescope)で実績があった PTP は他の観測所に貸し出し中だったので、新型の PTP2 を製作した。

4. 研究成果

(1) プロファイラによる測定

本研究における最も重要な成果は、すばる望遠鏡サイトにおける地表層の高度をプロファイラによって直接測定できたことである。SNODAR で得られたすばる望遠鏡サイトによる地表ゆらぎの高度分布を図 6 に示す。

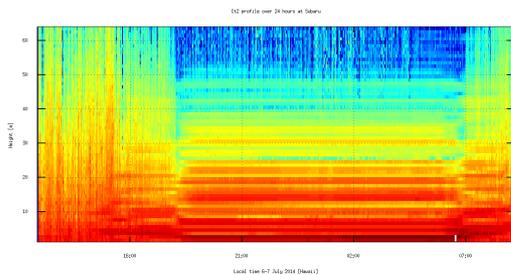


図 6：SNODAR による測定結果

青から赤に向かって強度が強い。夜間はほとんどのゆらぎが高度 50m 以下に集中している。

すばる望遠鏡サイトにおける地表層もマウナケアのリッジサイトと同様に地表層は 80m 以下の高度に集中することが実験的に確認された。この成果は国際研究集会で発表を行った(Oya, 雑誌文献、学会発表)。

この様に SNODAR はすばる望遠鏡サイトでも非常によく動作しており有効なデータが取得できることが示せた。その成功の要因の一つは、遮音用の大型筒により近隣の Keck 望遠鏡の排気用換気扇からの雑音の影響を遮断できることが挙げられる。導入に先立ってすばる望遠鏡サイトで環境音響雑音の調査を行った(図 7)が、その予想通りの効果があった。



図 7：すばる望遠鏡サイトにおける環境音響雑音調査(左)と簡易遮音筒(右)

Lunar SHABAR でも測定を行ったが、現状では電気雑音の影響があり有効なデータが取得できていない。

一方で当初計画に含まれていた長期的な定常観測は継続的な課題となっている。SNODAR に関しては、有効な測定に不可欠な大型遮音筒のために設置に苦慮している。すばる制御棟屋上を定常観測用設置場所として事前に許可を取り計画を進めていたが、2015年1月の強風を伴う吹雪の後に屋根構造の強度不足が懸念される事態となった。設置には本格的な補強工事が必要となり本研究課題の範囲を超えてしまう。そこで一時的に屋外に設置する方針に転換することを考えているが、マウナケア山頂は環境保護のために制限が厳しく許可取得に時間を要する見込みである。PTP2 は電気的な雑音の問題でデータの有効性に難があるが、小型の可搬式であるため設置場所の問題は少ない。引き続き雑音低減に努めていく。

(2) GLAO シミュレーションと RAVEN による実証

RAVEN は MOAO の実証試験装置で、カナダのピクトリア大学で開発された(Lardiere et al. 雑誌論文)。MOAO は TMT 時代には共同利用観測装置用の補償光学系として活躍することが期待されている。現在、持ち込み装置としてすばる望遠鏡で観測を行っている。RAVENは補正モードの一つとして GLAO 補正モードを有しており、2014 年中の試験観測では良好なシーイング条件下とはいえ H バンド(中心波長 $1.6\mu\text{m}$)で半値全幅 0.2 秒角を切る空間分解能を達成した。

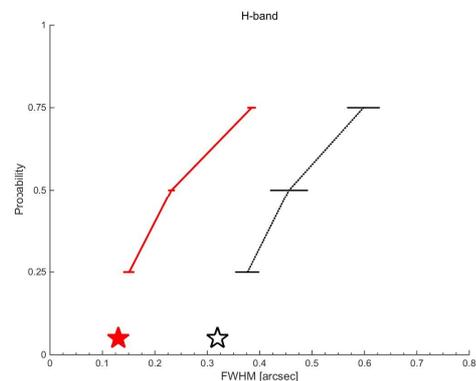


図 8：シミュレーション(実線)と RAVEN 観測結果(星印)の比較

この結果は、ULTIMATE-SUBARU の GLAO のシミュレーション(Oya et al. 雑誌論文、)と一致する(図8)。横軸はシーイングの半値全幅(秒角)、縦軸はマウナケアの気象統計でその半値全幅以下の値になる確率(累積確率)。黒はシーイング(何も補正を行わない場合)、赤は地表層 AO (GLAO)で補正した場合の半値全幅を示す。RAVEN 観測時はシーイングが非常に良く、シミュレーションで計算した範囲外であるが、シミュレーション結果を外挿した値に近い。

RAVEN は開ループ制御である等、ULTIMATE-SUBARU とはシステム設計が異なるが、GLAO の場合は補正されずに残った上層大気ゆらぎで性能が決まることから両者で一致が見られると考えられる。

(3) 日本国内サイトへの展開

MASS-DIMM (図9: 例えば Kornilov et al. 2007)は、現在最も普及している大気ゆらぎプロファイラであり 0、0.5、1、2、4、8、16km のデータが取得できる。



図9: ピリカ望遠鏡における MASS-DIMM

DIMM (Differential Motion Monitor)は、ある間隔を隔てた2つの開口を通ってきた星の光が焦点面上に結ぶ像それぞれの相対位置の差により、上層から地表まで積算されたシーイングを測定する。MASS は大気ゆらぎが地表面に生成するシンチレーションパターンの空間方向の典型的な大きさがゆらぎ層の高度に依存するという原理を利用している。単一星からの光を開口面で同心円状に分割して各領域間の光強度の相関を計算する。0.5km 以上の大気ゆらぎに感度がある。0km のゆらぎ強度も DIMM データと MASS データの差分として求まるが、低層の分解能が不足気味である。

マウナケア山頂のリッジにある CFHT 望遠鏡サイトで MASS-DIMM による定常的な観測を行っている。本研究申請時の計画では、すばる望遠鏡サイトでも測定を行って CFHT サイトとの整合性を確認する予定であったが、交付予算減額のためマウナケアでの測定はあきらめた。

しかし、北海道大学のピリカ望遠鏡サイト

での測定に興味があり MASS-DIMM を搭載可能な望遠鏡も所有しているということであったので、すばる望遠鏡で所有していた MASS-DIMM の検出器部分を貸し出して測定を行うことに成功した(合田他、学会発表、)。今後可能であればすばる望遠鏡サイトに持ってきて CHFT 望遠鏡の定常観測結果と比較して機器間の較正確認を行いたいと考えている。

<引用文献>

Mark Chun, Richard Wilson, Remy Avila et al., Monthly Notices of Royal Astronomical Society, Vol. 394, 2009, pp. 1121-1130

C. S. Bonner, M. C. B. Ashley, X. Cui et al., Publication of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 122, 2010, pp. 1122-1131

P. Hickson, R. Gagne, T. Pfrommer, E. Steinbring, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, Vol. 433, 2013, pp. 307-312

V. Kornilov, A. Tokovinin, N. Shatsky et al., Monthly Notices of Royal Astronomical Society, Vol. 382, 2007, pp. 1268-1278

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

Shin Oya, Ground-layer turbulence evaluation project at Subaru Telescope, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 595, 2015, id. 012024 (6pp)
DOI: 10.1088/1742-6596/595/1/012024

Shin Oya, Yutaka Hayano, Olivier Lai, Ikuru Iwata, Tadayuki Kodama, Nobuo Arimoto, Yosuke Minowa, Masayuki Akiyama, Yoshito H. Ono, Hiroshi Terada, Tomonori Usuda, Hideki Takami, Tetsuo Nishimura, Naruhisa Takato, Daigo Tomono, ULTIMATE-SUBARU: simulation update, Proceedings of SPIE, 査読無, Vol. 9148, 2014, id. 6G (8pp)
DOI: 10.1117/12.2055701

Olivier Lardiere, Dave Andersen, Celia Blain, Colin Bradley, Darryl Gamroth, Kate Jackson, Przemek Lach, Reston Nash, Kim Venn, Jean-Pierre Veran, Carlos Correia, Shin Oya, Yutaka Hayano, Hiroshi Terada, Yoshito Ono, Masayuki Akiyama, Multi-object adaptive optics

on-sky results with Raven, Proceedings of SPIE, 査読無, Vol. 9148, 2014, id. 1G (14pp)
DOI: 10.1117/12.2055480

Shin Oya, Masayuki Akiyama, Yutaka Hayano, Yosuke Minowa, Ikuru Iwata, Hiroshi Terada, Tomonori Usuda, Hideki Takami, Tetsuo Nishimura, Tadayuki Kodama, Naruhisa Takato, Daigo Tomono, Yoshito Ono, A preliminary simulation result of the next-generation, Proceedings of SPIE, 査読無, Vol. 8447, 2012, id. 3V (11pp)
DOI: 10.1117/12.926556

[学会発表](計8件)

大屋真、高遠徳尚、沖田博文、すばる望遠鏡サイトにおける地表層ゆらぎ評価活動の概要、日本天文学会 2015 年春季年会、V204c、2015 年 3 月 19 日(大阪大学)、大阪府・吹田市

合田周平、渡辺誠、仲本純平、大屋真、MASS-DIMM による名寄の大気擾乱高度プロファイルの測定(2)、日本天文学会 2015 年春季年会、V210b、2015 年 3 月 19 日(大阪大学)、大阪府・吹田市

沖田博文、高遠徳尚、大屋真、すばる望遠鏡におけるドームシーイングの測定、日本天文学会 2015 年春季年会、V205b、2015 年 3 月 19 日(大阪大学)、大阪府・吹田市

Shin Oya, Ground-layer turbulence evaluation project at Subaru Telescope, Adapting to the Atmosphere Conference 2014, 15-18 September 2014, Durham (UK)

合田周平、渡辺誠、仲本純平、大屋真、渡部重十、MASS-DIMM による名寄の大気擾乱高度プロファイルの測定、日本天文学会 2014 年春季年会、V213c、2014 年 3 月 21 日(国際基督教大学)、東京都・三鷹市

大屋真、他 23 名(高遠徳尚を含む)、ULTIMATE-SUBARU: 地表層補償光学系シミュレーション III、日本天文学会 2013 年秋季年会、V16a、2013 年 9 月 12 日(東北大学)、宮城県・仙台市

大屋真、他 23 名(高遠徳尚を含む)、すばる次世代広視野補償光学:地表層補償光学系シミュレーション II、日本天文学会 2013 年春季年会、V16a、2013 年 3 月 21 日(埼玉大学)、埼玉県・さいたま市

大屋真、他 23 名(高遠徳尚を含む)、すばる次世代広視野補償光学:地表層補償光学系シミュレーション I、日本天文学会 2012

年秋季年会、V219b、2012 年 9 月 19 日(大分大学)、大分県・大分市

[その他]
ホームページ等
<http://www.naoj.org/staff/oya/Seeing/SubaruGL/SubaruGL-JPN.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大屋 真 (OYA, Shin)
国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員
研究者番号: 80399387

(2) 研究分担者 該当者なし

(3) 連携研究者

高遠 徳尚 (TAKATO, Naruhisa)
国立天文台・ハワイ観測所・准教授
研究者番号: 50261152