

TMT 次期装置実現に向けたロードマップ

国立天文台 TMT 科学諮問委員会 2020/09-2022/08 期

2022 年 7 月 15 日最終版

1. 目的：次期装置による TMT による科学目標の実現に向けて

すばる科学諮問委員会および TMT 科学諮問委員会のメンバーを中心として国内の多数の研究者の執筆を受けて取りまとめられた「すばる望遠鏡と TMT が結ぶ新たな宇宙像」(Subaru/TMT Science Book 2020)において、すばると TMT の連携の下で挑戦する科学目標として「生命を育む第二の地球の探査」「銀河形成史のゆりかごから墓場まで」「宇宙膨張と構造形成から探るダークマターとダークエネルギーの正体」が 3 本の柱として掲げられた。サイエンスブックの中では、これらの大きな科学目標に挑戦するために、それぞれの目標に対応して TMT で具体的に取り組むべき観測課題として以下が挙げられている(以降、サイエンスブック中のバイオマーカーはバイオシグナチャーとして記述)。

- 「生命を育む第二の地球の探査」
 - 低温度星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出
 - 太陽型星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出
- 「銀河形成史のゆりかごから墓場まで」
 - 初代銀河の物理的性質と宇宙再電離の解明
 - 銀河の形態の起源と活動性の終焉の理解
- 「宇宙膨張と構造形成から探るダークマターとダークエネルギーの正体」
 - 宇宙膨張の測定から探るダークエネルギーの性質
 - マルチメッセンジャー天文学による物質の起源の理解

これらの観測課題を実現する上では TMT の初期観測装置だけではなく、次期観測装置群を搭載し TMT に新しい観測機能を実現することが必要となっている。特に、「低温度星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出」「太陽型星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出」「初代銀河の物理的性質と宇宙再電離の解明」「宇宙膨張の測定から探るダークエネルギーの性質」の課題においては、次期観測装置群が実現する新しい機能が重要な役割を果たす。TMT, GMT, E-ELT の ELT 計画群の中で先行してファーストライトを迎えることが予定される E-ELT においてもこれらの機能は次世代装置としてまだ検討段階のものである。TMT において独自の観測機能としていち早く実現する上でも次世代装置群の早期の詳細検討は重要である。

本文書では、これらの観測課題に焦点をあて、その実現にあたり、装置に要求される機能および性能仕様をセクション 2 でまとめる。ひきつづいて、性能仕様を満たす上で要求される技術仕様、

技術仕様の実現におけるこれまでの到達点とこれからのロードマップ、および要素技術の開発の他分野への波及の可能性についてセクション3でまとめた。これにより

- TMT 国際天文台の科学諮問委員会での次期装置決定に対する国内コミュニティからのインプットの基礎とする、
- 国内での要素技術開発にあたって性能仕様について指針を示す、
- 戦略的基礎開発研究などによる要素技術開発の到達点を可視化する、

こととする。

執筆にあたっては TMT 科学諮問委員会の委員の他に、TMT 基礎開発研究経費の審査委員、TMT 戦略的基礎開発研究経費を用いた研究実施者にも参加していただくと共に、関連する研究者の方にも執筆に協力していただいた。執筆者および協力者の方々は分野ごとに以下の通りである(敬称略)。

低温度星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出

執筆者・執筆協力者 成田憲保(東京大学)、小谷隆行(ABC/国立天文台/総研大)、村上尚史(北海道大学)、河原創(東京大学)、山本広大(京都大学)、入部正継(大阪電気通信大学)、西川淳(国立天文台/総研大/ABC)、田村元秀(東京大学/ABC/国立天文台)、GUYON Olivier (国立天文台)

太陽型星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出

執筆者・執筆協力者 成田憲保(東京大学)、上塚貴史(東京大学)、本田充彦(岡山理科大学)、浅野健太郎(東京大学)、塩谷圭吾(宇宙科学研究所)

初代銀河の物理的性質と宇宙再電離の解明

執筆者 観測課題/性能仕様：小山佑世(国立天文台)、播金優一(東京大学)、中島王彦(国立天文台)、矢島秀伸(筑波大学)、技術仕様/ロードマップ/他分野応用：尾崎忍夫(国立天文台)、美濃和陽典(国立天文台)

執筆協力: 本原顕太郎(国立天文台/東京大学)、櫛引洸佑(東京大学)、高橋英則(東京大学)、中川桂一(東京大学)、佐伯峻生(東京大学)、Xindy Qi(東京大学)、山形豊(理化学研究所)、細島拓也(理化学研究所)、竹田真宏(理化学研究所)、海老塚昇(理化学研究所)、森田晋也(東京電機大学)、石垣剛(岩手大学)、佐々木凜(岩手大学)

宇宙膨張の直接検出とダークエネルギーの性質への制限

執筆者 観測課題・性能仕様：田中雅臣(東北大学)、技術仕様・ロードマップ・他分野応用：川端弘治(広島大学) 執筆協力：三澤透(信州大学)

参考資料： TMT Science Requirements Document issued on 2021 Apr 27, MODHIS HP:
<https://www.tmt.org/page/modhis>, 「超高安定な TMT 用高分散分光器実現のための温度制御技術
開発」小谷隆行ほか private communication

2. 観測課題とそれを実現するにあたって必要となる技術仕様

2.1 低温度星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出

観測課題：晩期型星（Late K～M 型星）は、太陽系の近傍に最も多く存在する天体でありながら、可視光では暗く観測が難しかったが、近年地球型惑星探査の対象として重要視されてきている。近年の高精度視線速度サーベイやトランジットサーベイにより、ハビタブルゾーン内に地球型惑星が見つかりつつあり、これからのサーベイ観測の継続により、その数は今後も増えると予想される。ハビタブルゾーンは、中心星の温度が低くなれば中心星に近くなるが、主星との距離が近くなるほど、惑星は反射光で明るく見えるため、直接撮像観測のターゲットとしても重要となる。

晩期型星のハビタブルゾーンにある地球型惑星のバイオシグナチャーとしては、酸素分子の検出が可能になるという点が重要である。酸素分子は地球における酸素発生型光合成生物が代謝において光合成と水を用いる場合に発生する分子であり（代謝バイオシグナチャー）、なおかつ他の分子と反応し消失しやすいので、多量の酸素が惑星に見つかるということは、定常的大規模な光合成活動が行われている可能性を示唆する。ただし、酸素分子は水や二酸化炭素の光解離など非生物的反応でも生じうるため、そうした偽陽性の可能性にも留意すべきである。

酸素分子を検出する吸収線としては酸素 $0.76 \mu\text{m}$ と $1.27 \mu\text{m}$ の吸収線が有望である。 $1.6 \mu\text{m}$ 付近に存在する二酸化炭素、メタンもバイオシグナチャー候補である。特に酸素とメタンが大気中に同時に存在するような場合は、生命由来の兆候の可能性が高いと言われている。惑星大気中の水蒸気の存在も、直接的なバイオシグナチャーではないが、（少なくとも我々の知る）生命の存在に欠かせないものであり、近赤外線に豊富に吸収線が存在する。

ターゲットとなる近傍（約 10pc 以内）の晩期型星の数としては、100 個というレベルで存在するが、その中でも有望な、分光観測で大気分子を検出可能なターゲットは、数十個程度である。

性能仕様：晩期型星周辺のハビタブルゾーン内にある地球型惑星の直接撮像には、惑星を空間分解するための高い角度分解能と高コントラストが必要である。惑星と主星の明るさの比は、 $2 \mu\text{m}$ 以下の近赤外線では約 8 桁である。そのため、惑星より何桁も明るい主星の散乱光（＝スペckル）を低減させ、惑星の位置（ $0.05\text{au} = 15 \text{ ミリ秒角 @3.3pc}$ 、 $1.7 \lambda/D @ 1.27 \mu\text{m}$ に相当）にて 5 桁の raw contrast（コロナグラフによる恒星除去のみのコントラスト）を達成する。さらに、スペckルと惑星を区別するため、ポストプロセス（恒星と惑星の波長、偏光、コヒーレンスの違いなどを利用して、スペckルをさらに除去すること）により最終的に 8 桁のコントラストを達成する。バイオシグナチャー検出には、分子吸収線を直接分解するために、 $1.0\text{-}2.5 \mu\text{m}$ の波長範囲で惑星光を波長分解能 $R=100,000$ 以上の高分散分光観測すること、あるいは $R=50\text{-}1000$ 程度の低中分散分光観測と差分撮像法などのポストプロセスを組み合わせることなどが必要である。必要な視野角は、1-数秒角程度である。

2.2 太陽型星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出

観測課題：太陽型星周りの地球型惑星探査は、地球と似た環境で生命が普遍的に存在しうるかどうかという根源的な疑問に答えるものである。地上の 30 メートル級望遠鏡で狙えるのは、 α Cen、 ϵ Eri や Tau Ceti といったごく近傍 (< 5 pc) の 3~5 個程度の太陽型星まわりのハビタブルゾーン内地球型惑星の熱放射を、中間赤外線にとらえることである。この波長帯では、オゾン ($9.6 \mu\text{m}$) が酸素と同様に代謝バイオシグナチャーとなり得る。メタン ($7.8 \mu\text{m}$) もバイオシグナチャーの候補の一つである。

性能仕様：太陽型星まわりのハビタブルゾーン内にある地球型惑星の直接撮像には、中間赤外線では惑星を空間分解するために高い角度分解能が必要である。またハビタブルゾーン内地球型惑星と主星の明るさの比は $10 \mu\text{m}$ では 7 桁程度であり、主星から 1au の位置にある惑星 (0.33 秒角@3 pc、 $10 \mu\text{m}$ では $\sim 5 \lambda/D$ に相当) にて 4 桁の raw contrast を達成できる補償光学と、惑星よりはるかに明るい背景熱放射を除去するポストプロセスが必要である。バイオシグナチャーであるオゾン検出のためには、 $8\text{-}13 \mu\text{m}$ 帯で $R=30$ 程度の分光観測が必要である。必要な視野角は、数秒角程度である。

2.3 初代銀河の物理的性質と宇宙再電離の解明

観測課題：初代銀河の探査とは宇宙の最果ての探査であり、言うまでもなく TMT が取り組むべき最重要課題の一つである。特にすばる望遠鏡を中心とする次世代の広域深宇宙探査で初代銀河(候補)を発見し、TMT でその素性解明に挑む、というシナジーが強く期待されるテーマである。Subaru/TMT Science Book 2020 で掲げられた初代銀河関係のテーマには以下のようなものがあった。

- 初代銀河の統計的研究
- 初代銀河の形成メカニズム
- 初代銀河のガスの物理状態(金属量・電離状態)の理解
- 初代銀河の星種族, 初代銀河に潜む活動銀河核
- 宇宙再電離における銀河の役割の理解
- 宇宙再電離の始まり
- Pop-III 星の星団としての初代銀河の検出
- $z \sim 10$ の高密度領域(初代銀河群)での銀河形成
- 初代銀河による天体形成へのフィードバックの理解
- 初代銀河周辺のバリオンガス分布($\text{Ly}\alpha$ フィラメント)

これらのキーワードを出発点に検討した結果、次期装置により実現すべきサイエンスは以下のようなものになると考える。

- 1) **初代銀河の素性解明と PopIII 銀河の探査：**Roman などで見つかる非常に遠方($z > 7$)の dropout 銀河(LBG)のなかでもやや暗めの天体を中心に系統的な分光観測を行い、低金属量銀河・Pop III 銀河を探査する。 $z \sim 10$ の UV で明るい銀河の周辺数分角を多天体分光(or 面分光)して $\text{Ly}\alpha$ / $\text{HeII}1640$ エミッターを見つけられれば、形成中の PopIII 天体の証拠となりうる。やや低赤方偏移($2 < z < 7$)の研究でも、化学進化初期にあると考えられる暗い銀河についての分光的性質の調査は重要であり、また銀河周囲の $\text{Ly}\alpha$ フィラメントの調査により遠方宇宙におけるバリオンガス分布とその進化を明らかにすることも重要な課題となる。
- 2) **宇宙再電離プロセスの解明：**こちらも Roman などで見つかる $7 < z < 15$ の dropout 銀河(LBG)の広域にわたる系統的な分光観測が重要となる。各銀河について $\text{Ly}\alpha$ 輝線の有無・強度を測り、 $\text{Ly}\alpha$ エミッターと LBG の空間分布(patchy な電離構造)を広い領域にわたって明らかにする。特に $z > 10$ で $\text{Ly}\alpha$ が強く検出される領域は、宇宙最初期の HII バブルであると期待される。バブル内の銀河の性質を明らかにできれば、宇宙再電離の始まりを担う天体(電離源)の解明へとつながる。ULTIMATE-Subaru で見つかる明るい $\text{Ly}\alpha$ エミッター($z > 7$)がターゲット選定で役立つかもしれない。
- 3) **銀河-AGN 共進化の起源の解明：**初代銀河の分光観測(NV や CIV など)で AGN の有無を調査する。初代銀河に AGN はどのくらい普遍的に存在するのか、またその AGN が近傍宇宙のブラックホール質量とバルジ速度分散の関係に乗るのかを調べることで、銀河の成長とブラック

ホールの成長のどちらが先行しているのかを突き止めることができる。また理論的には、zero metallicity の低質量 AGN が見つかり、ダイレクトコラプスによるブラックホール形成理論の実証になる可能性がある。

性能仕様：上記の検討から、**広い視野(約2分角以上)にわたり、主に近赤外帯(1~2.5 μ m)で高感度の多天体分光または面分光できる装置**が期待される。赤方偏移 2-6 では Ly α が可視域にあるため、銀河周囲のフィラメントの探査では可視面分光の機能(WFOS 面分光)も面白い。なお上記サイエンスの一部は、広視野(5~10分角)の近赤外カメラに多数の NB フィルター(or tunable filter)を搭載することでも実現できるかもしれない。狭視野の面分光と広視野の NB 撮像探査のどちらが観測効率がよいか、予測されるターゲット天体の明るさや個数密度などについて、サイエンス側で具体的な検討が必要である。さらに、**可視光から近赤外線まで一度に分光できるような広帯域の分光装置**(VLT の X-SHOOTER のような装置)も汎用性が高く、特に上記(1),(3)の目的で可視光の赤い側から近赤外にかけての広帯域分光へのニーズは高いという意見があった。まとめると、初代銀河関連からは以下のような装置が魅力的と思われる。

- a) 視野2分角程度を全面分光できる近赤外面分光装置 (VLT/MUSE の近赤外版)
- b) 視野2~5分角程度で近赤外線の多天体分光ができる装置 (IRMOS/IRMS 的な装置)
- c) 視野5~10分角程度で多彩な NB または tunable filter を搭載した近赤外線カメラ
- d) 視野2分角程度を全面分光できる可視面分光装置 (WFOS IFU 的な装置)
- e) 可視光~近赤外線を同時にカバーする広帯域高感度分光装置 (VLT/X-SHOOTER 的)

初代天体サイエンスという観点に限れば、空間解像度よりも**感度面での効率の最大化**が鍵になりそうである。近赤外線での分光感度を最大化するという観点では、波長分解能はおのずと R~3000-4000程度が理想と考えられる。一方で、空間解像度を上げることは感度の向上にも直接的につながるため、広視野/多天体補償光学も期待される。

2.4 宇宙膨張の直接検出とダークエネルギーの性質への制限

観測課題：宇宙の加速膨張を直接検出するというアイデアが提案されてから半世紀以上経過し、TMTの大集光力によって、ついに実現できる可能性が見えている。標準的な宇宙モデル ($\Omega_m=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.7$, $H_0=70$ km/s/Mpc) の場合、宇宙の加速膨張によって期待される速度変化は、たとえば赤方偏移 $z=3$ の場合、10年間（観測系）で $\Delta v=-3$ cm/s 程度 ($z=4$ の場合 $\Delta v=-5$ cm/s 程度) である。クエーサーのスペクトルに見られる多数の銀河間中性水素ガスの吸収線 (Ly α forest) を利用し、長期モニター観測を行い、この宇宙の加速膨張を直接測定する。特に、高い赤方偏移ほど、加速膨張から期待される速度変化が大きく、吸収線検出頻度が上昇するため測定誤差が小さい、という利点があり、明るいクエーサーの赤方偏移分布も考慮して、赤方偏移 $z=2-4$ を主な対象とする。HI21cm を対象とした加速膨張の直接検出が SKA/Phase2 で計画されているが、これは低赤方偏移 ($z<1$) を対象としたものであるため、高赤方偏移を対象とする本課題の独自性は高い。

性能仕様：宇宙の加速膨張 (10年間で $\Delta v = -3$ cm/s 程度の速度変化) を直接検出するため、赤方偏移 2-4 程度の明るい複数のクエーサーで複数のラインを測定し、**速度の決定精度 $v = 2$ cm/s (= 0.02 m/s) を実現すること**。また、**30年以上に渡って $v = 1$ cm/s の安定性**を実現すること。なお、統計誤差のみを考慮した場合、クエーサー40天体を $S/N \sim 2000$ pixel⁻¹ で観測すれば速度決定精度が $\sigma_v \sim 2$ cm/s となると評価されている。

また、赤方偏移 2-3 付近の観測も可能にするため紫外線波長域 ($\lambda = 0.3 \mu\text{m}$ 台) での高分散観測を実現すること。

明るいクエーサー ($m < 16.5$) を観測対象として、一晩の観測時間を 10 時間、望遠鏡の占有率を 20%、データ取得率を 90%、望遠鏡と観測装置の効率を 20% とすると、観測期間は 15 年となる。そのため、**望遠鏡と観測装置の効率は 20% 以上であることが必須**である。これを 2 回行い、またエポック間に十分な間隔 (例えば各観測期間の 2 倍) を設ける必要があることを考えると、トータルで 45 年の時間が必要となる。このプランの場合、 7σ 以上の信頼度で加速膨張の検出が可能となる。ただし、エポック間の間隔を短縮化したり、装置効率の向上 (例えば 40%) が見込めれば、30 年未満での計画の遂行も可能である。

3. 性能仕様を満たすにあたって鍵となる技術仕様と実現に向けたロードマップ

3.1 低温度星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出

性能仕様を満たすにあたって鍵となる技術仕様：

波長 $1.27\ \mu\text{m}$ 付近で、主星から 15 ミリ秒角の位置において広帯域で 5 桁以上の raw contrast が達成できる極限補償光学とコロナグラフ

- 小さな IWA (Inner Working Angle) を達成できるコロナグラフ
- Extreme adaptive optics (以後、極限補償光学) のための波面制御系 (2kHz 以上、ストローク $5\ \mu\text{m}$ 以上、10000 素子以上)。制御速度やストローク、精度を最適化するための Woofer (低次波面誤差を補正) / Tweeter (高次波面誤差を補正) 構成。120x120 素子の可変形鏡の実現が望まれるが、より高次の補正が可能な空間光変調器も有望なオプションとして期待される。
- 可視・近赤外線で広帯域光をくまなく利用できる高速読み出し低ノイズ波面センサー
- Predictive control、焦点面波面センシングと speckle nulling などの先進的な波面制御方法およびアルゴリズムの開発

ポストプロセスによる 3 桁以上のコントラスト改善。

- ポストプロセスとしては、高分散分光スペクトルのテンプレートとの相互相関解析、低分散面分光器と ADI (Angular Differential Imaging)、SDI (Spectral Differential Imaging)、PDI (Polarization Differential Imaging)、CDI (Coherent Differential Imaging) の差分撮像技術との組み合わせ、PSF reconstruction などの先進的なアルゴリズム
- 波長範囲 $1.0\text{-}2.5\ \mu\text{m}$ 、波長分解能 $R=50\text{-}1000$ 、視野 1-数秒程度の面分光器
- $1.0\text{-}2.5\ \mu\text{m}$ の惑星光を波長分解能 $R=100,000$ 以上で高分散分光観測し、かつ空間フィルター効果によってスペckルを 1 桁以上低減させるための、近赤外線シングルモードファイバー高分散分光器

残光などの電氣的なアーティファクトが小さい、大フォーマット高感度・低ノイズ近赤外線検出器 (高分散分光器、面分光器用に $4\text{K}\times 4\text{K}$ ピクセル)

技術仕様の実現にあたってこれまでの成果とこれからの開発のロードマップ：

せいめい望遠鏡へ搭載する高コントラスト装置 SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Adaptive optics) の技術実証は、TMT での高コントラスト観測につながる重要なステップである。SEICA に関連して、極限補償光学とコロナグラフ、ポストプロセス技術の

開発が進められている。極限補償光学とコロナグラフに関しては、FY2023 頃のオンスカイ実証を目指している。

- SEICA 用極限補償光学は、tip-tilt 鏡、Woofers/Tweeters 可変形鏡・波面センサーから構成され、現在は室内試験により 8×8 素子の Woofer 系まででストレール比 20%の性能を得ている。Tweeter 系においては、点回折干渉計(Point-Diffraction Interferometer: PDI) ベースの新規原理にもとづく波面センサー（以後、PDI-WFS）の開発が行われており、波面測定精度 $\lambda/20$ の室内実証に成功している。24×24 素子の可変形鏡と組み合わせることで、6.5kHz の制御ループによってストレール比 90%への到達が見込まれる。これとコロナグラフを組み合わせることで、初期目標として 4 桁の raw contrast を目指している。
- 波面測定・補正の高速制御に向けて、FPGA (Field-Programmable Gate Array)回路の開発も進められている。現在は、制御周期 100 μ s 以下の性能（10kHz 以上の制御ループに相当）を実証している。
- 現在までシャック・ハルトマン波面センサー（制御周期 2.5ms）による制御装置実験を行っており、大気位相板による乱れた波面の振幅を 56%まで抑圧することができている。また、シミュレータによる PDI-WFS（制御周期 150 μ s）を使用する条件での制御シミュレーションでも同等の性能を確認している。
- TMT のセグメント主鏡で有効と期待される、共通光路ナル干渉コロナグラフの開発が行われている。現在は、SEICA 搭載機の構築が進行中であり、FY2022 に極限補償光学との接続を目指している。
- 共通光路ナル干渉コロナグラフの開発とともに、speckle nulling の開発研究が進められている。可変形鏡ではなく空間光変調器による開発が行われており、広範囲 speckle nulling の室内実証などに成功している。地上観測の可能性追求のためには、高速波面制御の検討や、波長依存性の調査などが必要である。

すばる望遠鏡 SCExAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics)は、PSI チームによって PSI-Blue のプレカーサー（実証機）と位置付けられており、TMT 高コントラスト観測に向けた重要な技術実証の場である。SCExAO ではすでに、TMT へつながり得る先進的な技術の開発研究が進められている。日本独自の貢献案は以下の通りである。

- 第 2 期装置での 120×120 素子可変鏡の実証に向けて、SCExAO に 64×64 素子可変形鏡を導入し（国立天文台および ABC がサポート）、すばる望遠鏡において、同素子のオンスカイ試験を世界で初めて実現する予定である。
- フォトニック結晶技術にもとづく焦点面コロナグラフ位相マスクが開発中である。特に、フォトニック結晶を多層化した広帯域マスクの実現を目指している。可視光域において、惑星探査領域で 4-6 桁のコントラスト（PSF から推定した値）を得ている。近赤外線域においては、単一波長で設計値どおりのコントラストを得ている。
- 上記コロナグラフは、瞳遮蔽のない円形望遠鏡でのみ高い性能を発揮する。すばる望遠鏡やセグメント主鏡の複雑な瞳をもつ TMT への搭載を目指し、バイナリ瞳マスクの設計・試作が行われている。すばる望遠鏡の瞳形状での試作デバイスの室内試験が行われ、瞳遮

蔽が無いときと同じコントラスト（惑星探査領域で5桁）を得ている。せいめい望遠鏡やTMT 搭載用のバイナリ瞳マスクもすでに設計がなされている。今後は、製造したフォトリソグラフィ結晶多層マスクとバイナリ瞳マスクを組み合わせた SCExAO でのオンスカイ実証の早期実現を目指す。

- すばる望遠鏡では、高速偏光変調差分法（高速に偏光をスイッチし、それと同期して検出器でデータを取得して、偏光差分ポストプロセスによりコントラスト改善を目指す手法）が実用化しているが、さらに高速変調ポストプロセス技術として最近日本で開発された CDI-SAN 法を成熟させ、フォトンノイズ限界に迫る高コントラストを達成する。
- SCExAO と IRD (InfraRed Doppler)を接続することで、可視・近赤外線(0.97-1.75 μm)で高分散コロナグラフ観測（波長分解能 $R\sim 100,000$ ）を可能とする装置 REACH (Rigorous Exoplanetary Atmosphere Characterization with High dispersion coronagraphy)がすばる望遠鏡にて実現している。REACH はマルチコア・シングルモード光ファイバー(7本)によりターゲット惑星とその近傍のスペックル光を同時取得できるユニークな性能を有し、すでに共同利用にてオンスカイ観測が行われている。また、REACH データを利用した系外惑星大気の高分散キャラクタリゼーションに必要なベイズ解析ツール ExoJAX の開発も同時に行われており、ハード・ソフト両面から TMT へとつながる将来技術の創出が期待される。
- SCExAO における新技術として、フォトリソグラフィナリング技術（フォトリソグラフィチップ上に、ナノ干渉型コロナグラフを構成）の開発が行われている。

開発した技術の他分野への応用、社会貢献：

波面センサーは、光路の媒質の屈折率が動的に変化するような環境でクリアな撮像を可能とする。系外惑星探査のためには精密波面センシング・補正技術が必要であり、これらの技術は、細胞イメージング、眼球内撮影、光空間通信、光学検査など多岐にわたる分野への応用が期待される。特に人が立ち入れない遠隔での画像計測が必要な極限環境での応用として、災害要救助者の発見、廃炉技術への応用、火山の噴火口近辺の観測なども期待される。

3.2 太陽型星周りの地球型惑星の直接撮像とバイオシグナチャーの検出

性能仕様を満たすにあたって鍵となる技術仕様：

- 極低温下（～50K 以下）で駆動できる 50×50 素子以上の可変形鏡、Tip-tilt 鏡、近赤外線での高速読み出し(1-2kHz)・低ノイズ波面センサー、数 kHz 以上の制御速度を備えた極限補償光学
- 波長 10 μm 近辺で、主星から 0.33 秒角（～5 λ/D に相当）付近の位置において、4 桁以上の raw contrast が達成できる極限補償光学とコロナグラフ
- 8-13 μm 帯での波長分解能 R=30 程度の面分光器
- チョッピングなどによって 3 桁以上背景熱放射を差し引くポストプロセス方法の開発
- 背景熱放射、スペックルを抑えるための極低温・中間赤外線用シングルモード光ファイバー
- 残光などの電氣的なアーティファクトが小さい、低ノイズ高感度の大フォーマット中間赤外線検出器
- 地球大気の吸収を正しく補正し、系外惑星大気由来の吸収を検出する観測・解析技術

技術仕様の実現にあたってこれまでの成果とこれからの開発のロードマップ：

チリ・アタカマに建設中の TAO (The University of Tokyo Atacama Observatory) は、TMT での赤外線観測に向けた技術実証の場としても重要である。特に、中間赤外線観測装置 MIMIZUKU (Mid-Infrared Multi-field Imager for gaZing at the UnKnown Universe) の開発において、TMT での高コントラスト観測へつながる各種キーテクノロジーの開発が進められている。

- 赤外線域での焦点面コロナグラフマスクとして、AGPM (Annular Groove Phase Mask) の開発が進められている。これはサブ波長グレーティング技術によるベクトル渦マスクであり、具体的には、観測波長よりも小さな構造の繰り返しからなる同心円構造を用い、その中心を通過する入射光のみの位相を制御し、光波干渉を利用する事で中心通過光(主星光)を強力に除去するタイプの新型コロナグラフである。AGPM コロナグラフの主な利点は、どの波長帯においても原理的に適応が可能である点、主星光を理論的には完全に除去できる点、主星光の除去領域が主星の非常に近傍にのみ作用する点である。試作マスクの設計波長は TAO 望遠鏡中間赤外線観測装置 MIMIZUKU に最適化された 31.7 μm であり、裏面には、モスアイ構造 AR コーティングを施す事で高透過率 (>80%)、高コントラスト (8-9 桁) を達成する。FY2020 年代中盤の TAO でのファーストライトを目指している。
- 背景熱放射を差し引くための冷却チョッピング技術の開発が進められている。冷却チョッピングは、赤外線観測用冷却光学系に設置する高速駆動鏡 (チョッパー) により視野を頻繁に切り替え、各視野で取得したデータの差分を取ることで背景熱放射を高精度に差し引く技術である。これまで開発したチョッパーは、室内試験により 20K の低温において 2-5Hz のチョッピング動作を、振幅 0.84 度で達成している。これは MIMIZUKU において 60 秒角のチョッピングに相当する振幅であり、現在の TMT/MICHI に設置した場合 12 秒角

のチョッピングが実現できる性能である。このような動作を 5mW 程度の低発熱で実現しており、極低温環境で求められる低発熱性を達成している。動作の遷移時間は 50ms を達成しているが、より高速のチョッピングを必要とする場合はさらなる高速化が必要である。今後は MIMIZUKU に搭載し、冷凍機振動の影響を確認するなど実地的な試験をおこない、FY2023 頃のオンスカイ実証を目指している。

- 現在主流の大フォーマット中間赤外線検出器は Raytheon 社製 Aquarius である (Si:As; 1024 × 1024pixel)。本検出器は MIMIZUKU においても動作しており、その動作の実現のための検出器制御・中継バッファアンプ技術は将来的にも有効と期待される。しかし Aquarius 検出器では顕著な低周波超過雑音 (Low-Frequency Excess Noise: ELFN) が存在し、背景光リミットの感度達成が難しいという認識が広く持たれている (MIMIZUKU では ELFN はまだ明確には確認されていない)。これを解決する方法の一つは、10Hz 程度の高周波チョッピングにより低周波数で顕著な ELFN を除去する手法であるが、本手法にはチョッピングの高速化、および検出器読み出し系の高速・低ノイズ化が求められる。Aquarius 以外の大フォーマット中間赤外線検出器として、近年 Teledyne 社製の GeoSnap 検出器が注目されている。本検出器は近赤外線で実績のある HgCdTe 検出器の感度を波長 13 μ m まで拡張した検出器で、Aquarius で問題となっているような ELFN が発生せず、量子効率の点でも優れる可能性がある。観測波長域が N バンドまでに限定されてしまうが、用途によってはこのような検出器の利用も検討するのが良いと考えられる。
- 地球大気による吸収の補正に関して、通常は分光標準星と観測天体の観測スペクトルを比較することで実施する。正確な補正を行うためには標準星と観測天体の同時観測が有効である。そのような観測を行うために、MIMIZUKU では単一視野ではとらえられない二天体を同時観測するためのシステム「フィールドスタッカー」を搭載している。本システムを用いた観測例はまだ少ないが、数十%の透過率変動がある条件下でも、同時観測によってオゾン吸収フィーチャの影響を 10%以下のレベルまで補正することができた例がある (下図)。系外惑星のバイオシグナチャー検出のためにはこのような工夫が必要になると考えられる。系外惑星の観測の場合は主星を参照星として使用できる可能性もあるため、主星・系外惑星の同時分光観測の技術を確立することで大気吸収補正の課題を解決できる可能性がある。

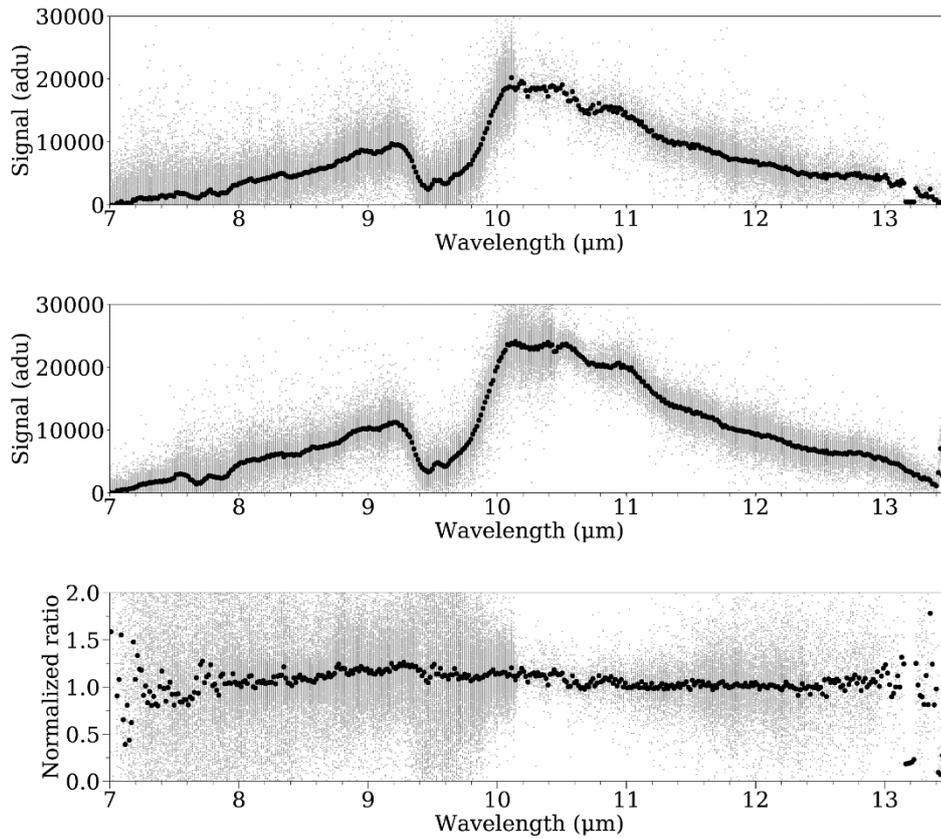


図: MIMIZUKU フィールドスタッカーを用いた二天体同時分光観測の例 (Kamizuka et al. 2020)。灰色の点は短時間取得した個々のフレームのデータ、黒色の点はそれらを平均化したデータである。上部の二つのスペクトルは観測した二天体の生のスペクトルで、 $9.6\ \mu\text{m}$ 付近に地球大気のおゾンの吸収が確認できる。三つ目のスペクトルはこの二天体のスペクトルの割り算の結果を示している。灰色の点を見るとオゾンの吸収帯ではその分散に超過が見られ、数十%の変動を示唆する。しかし平均化された黒色の点を見ると、オゾンフィーチャの影響は10%以下に抑えられていることがわかる。

- 赤外線域での $R \sim 100,000$ の高分散分光には、イメージンググレーティング技術も有効であると考えられる。系外惑星大気の特徴づけ一般に有効であり、特に Ge や CdZnTe 等のイメージンググレーティングは CANON、京都産業大学、東京大学のグループが開発している日本からの寄与が期待できる技術である。

赤外線天文観測衛星 SPICA (Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics) に向けて、赤外線コロナグラフの開発が行われた。開発されている技術として、主星の回折光を除去して周囲の惑星探査を可能にするバイナリ瞳マスク (基板を用いない自立型で、瞳遮蔽を回避

する設計)、赤外線域での波面制御のための冷却可変形鏡などがある。バイナリ瞳マスクコロナグラフについては、可視光・波面補償なしで7桁のコントラストが実証されている。冷却可変形鏡については極低温(4K まで)対応型の開発と、動作実証がなされている。スペース応用のため、DC での動作実証がなされている(地上での高速制御については将来の開発項目である。ただし MEMS による構造とクーロン力による動作原理を考慮すると、相応の高速制御ができる可能性がある)。また、宇宙科学研究所にて、コロナグラフ関連技術に特化した可視光真空チャンバーHOCT (High-dynamicrange Optical Coronagraph Testbed)、赤外線域極低温真空チャンバーPINOCO (Prototype-testbed for Infrared Optics and Coronagraph)が構築されている。

開発した技術の他分野への応用、社会貢献：

冷却チョッパー機構は低温装置や衛星装置内の指向補正 tip-tilt ミラーにも応用が考えられる。

3.3 初代銀河の物理的性質と宇宙再電離の解明

性能仕様を満たすにあたって鍵となる技術仕様：

1) 面分光装置:

面分光には大きく分けてマイクロレンズアレイ方式、ファイバーバンドル方式、イメージスライサー方式の3つの方式がある。マイクロレンズアレイ方式は検出器受光面を有効活用できないため、どうしても視野が小さくなる、あるいは波長範囲が狭くなる。ファイバーバンドル方式はマイクロレンズアレイ方式より検出器受光面を有効活用でき、視野あるいは波長範囲をよりかせげるが、Focal Ratio Degradation (FRD)やファイバーの曲がり具合によってスループットが微妙に変化するというファイバー特有の問題がある。イメージスライサー方式は検出受光面を一番有効活用できるが、光学系が複雑であるという難点があった。しかしこの難点も徐々に克服されつつあり、現在では汎用用途であるならイメージスライサー方式が一番の選択肢となる。

現在 WFOS IFU (イメージスライサー方式) では、スライス幅を典型的なシーイングサイズである 0.75"にしたときの視野は 20"×13.5"である。視野を広く取るために空間サンプリングを妥協してスライス幅を 1.5"にしたときの視野は 20"×27"である。面分光専用装置の場合、前置光学系の倍率をスライス幅方向と長さ方向で変えることで視野サイズを倍にすることが可能であるが、それでも要求視野 2 分角には及ばない。これは一度の露出で得られる情報量は検出器のピクセル数によってリミットされるという本質的な問題であるので、容易に克服することはできない。そのため 2 分角の視野を得るためには、1) 視野の狭い単一の面分光装置でマッピング観測するか、2) MUSE のように複数面分光装置を並列化させるかのどちらかとなる。

2) 広帯域分光装置:

R~3000-4000 で広帯域をカバーする場合、エシエル分光器が第一候補に挙がる。

3) 補償光学:

近赤外線波長域で TMT による高感度の多天体分光観測を行うためには、広視野補償光学の技術が必須となる。バックグラウンドリミットの観測の場合、感度(=S/N)は(口径/イメージサイズ)に比例する。例えば、マウナケアにおけるシーイング (~0.5 秒角)での 30m 望遠鏡で到達できる感度は、8m 望遠鏡において~0.13 秒角の解像度で到達できる感度に相当する。この解像度は、すばる望遠鏡 ULTIMATE-Subaru の地表層補償光学 (GLAO) が、好シーイング条件時 (全体の 25%) に達成できると期待されている (Rigaut et al. 2018)。TMT が広視野多天体分光 (撮像) 観測において、既存の 8m 望遠鏡と比べて圧倒的な感度を達成するには、広視野補償光学技術の導入が不可欠となる。

TMT 第一期装置の補償光学システムである NFIRAOS は、多層共役補償光学 (MCAO) である。この装置では、複数レーザーガイド星による波面測定値から大気揺らぎの 3 次元的な推定 (トモグラフィ推定) を行い、低層、高層における大気揺らぎを別々の可変形鏡を用いて補正する。この方式では、高層大気揺らぎの非等方性により補正できる視野が最大 2 分角に限られている。

2 分角以上の広視野での多天体分光 (撮像) 観測を実現するためには、さらに広視野を実現できる補償光学が求められる。広視野補償光学の方式としては、地表層補償光学 (GLAO) と多天体補償光学 (MOAO) が考えられる。GLAO は、大気揺らぎのうち、地表に近い部分の揺らぎだけを取り出し、補正する方式である。マウナケアにおいては、地表層の大気揺らぎが、高層大気揺らぎと比べて卓越しており (Chun et al. 2009)、地表層の揺らぎを直すだけで、TMT の最大視野である 15 分角の広視野に渡って均一な解像度の向上 (半値幅で約 2 倍のゲイン) が得られると期待される。この方式では、波面補正誤差は主に補正していない高層大気揺らぎで決まるため、8m 望遠鏡と 30m 望遠鏡で到達できる解像度に差異は無いと考えられる。そのため、TMT において GLAO を導入した場合の感度向上は、ULTIMATE-Subaru の GLAO と比べて、口径の比率である 3.7 倍程度となる。

一方、MOAO では、MCAO と同様に複数レーザーガイド星による大気揺らぎのトモグラフィ推定を行うが、波面センサーによる揺らぎの測定は可変形鏡を通さず開ループで行われ、観測天体毎に専用の可変形鏡を用意し、それぞれの天体の方向に合わせた補正を行う。そのため、MCAO と比較して視野を拡大する事ができる。TMT に MOAO を搭載した場合、視野 5 分角程度までは近赤外線波長域でストレール比 50%以上が期待されており (Akiyama et al. 2014)、TMT の回折限界である 10mas に迫る解像度を達成できる。また、視野 10'程度までは GLAO と同程度の補正性能が期待される。視野 5 分角の MOAO の場合、期待できる感度ゲインは ULTIMATE-Subaru の GLAO と比べて 75 倍程度となる。MOAO では、観測天体周辺視野の限られたエリアのみ可変形鏡で補正するため、MCAO と異なり視野全体での補正は期待できない。そのため、MOAO は多天体 (面) 分光と組み合わせて使用される事が想定されている。

以上の事から、本件で求められる観測仕様に対して、最適な補償光学方式を以下にまとめる。

- a) **視野 2 分角程度を全面分光できる近赤外面分光装置 (VLT/MUSE の近赤外線版):** 第一期装置である NFIRAOS がカバーできる視野であり、NFIRAOS に装置を搭載し、レーザーガイド星の配置とそれによる補償を広視野に最適化することで実現可能である。
- b) **視野 2 ~ 5 分角程度で近赤外線多天体分光ができる装置 (IRMOS/IRMS 的な装置):** MOAO と組み合わせた観測装置の開発が必要となる。
- c) **視野 5 ~ 10 分角程度で多彩な NB または tunable filter を搭載した近赤外線カメラ:** GLAO と組み合わせた観測装置開発が必要である。感度ゲインは口径比にしかならず、大きくはない。

d) 視野2分角程度を全面分光できる可視面分光装置 (WFOS IFU 的な装置): 可視域の分光でバックグラウンドリミットにならない場合、補償光学を使う事による感度の向上は期待できない。観測天体を空間分解するようなサイエンスケースがない限り、補償光学と組み合わせた観測装置開発は必要とならないだろう。

e) 可視光～近赤外線を同時にカバーする広帯域高感度分光装置 (VLT/X-SHOOTER 的): 近赤外波長域は第一期装置である NFIRAOS が使える。可視波長域では、新規 MCAO、または LTAO の開発が必要となるが、回折限界分解能を目指すためには、広視野補償光学でも必要となるトモグラフィ推定の高精度化に加え、可視光補償光学での波面測定用検出器、制御計算機といった新たなデバイス開発など、広視野補償光学とは異なる別の技術要素が必要となるだろう。

技術仕様の実現にあたってこれまでの成果とこれからの開発のロードマップ:

1) 面分光装置開発の視点から:

我が国でのスライサー型 IFU の開発実績は FOCAS IFU (Ozaki et al. 2020, PASJ, 72, 97) と SWIMS IFU (Kushibiki et al. 2020, Proc. SPIE, 11451, 114512Y) がある。FOCAS IFU はすばる望遠鏡の運用開始時期から稼働している可視光撮像分光装置 FOCAS に組込まれている IFU で、2010 年に開発が開始され、2018 年に完成し 2019 年から共同利用に供されている。SWIMS IFU は TAO 望遠鏡に搭載される近赤外線撮像分光装置 SWIMS に組込まれている IFU であり、2011 年に開発がスタートし、2022 年 3 月 27 日にファーストライトを迎えた。これらの開発経験から今後の IFU 開発に必要と思われる課題について以下に整理する。

a) 光学設計から加工装置へ入力するデータへの変換作業

光学設計は Zemax などの光学設計ソフトで設計される。光学素子の加工装置へ入力されるデータはツェルニケ係数や表面の点群データなど加工機によってバラバラであり、粗加工と仕上げ加工で用いる加工機に入力するデータが異なることもあり得る。現在、光学設計データから加工機に入力するデータへの変換作業は手作業で行われており、人為的ミスが混入しやすい。この変換作業を効率化・自動化できればスライサー型 IFU の開発のハードルが大きく下がると期待される。

b) 製造・組立・調整を意識したオプトメカ設計

SWIMS IFU の開発においては理化学研究所の先端光学素子開発チームの全面的な協力により、光学素子の製造・組立・調整までを意識した設計が行われた。その結果、実験室での光学性能評価試験では一つの光学素子を微調整するだけで、所定の仕様を達成することができた。このことから、精密光学システムに精通したチームとの協力関係やそのようなスキルをもつ人材の育成が重要となる。

c) 超精密切削加工での表面粗さ低減

金属を超精密切削加工することで複数のミラーを一体加工するという手法が IFU 製造技術の 1 つの選択肢となっている。SWIMS IFU はこの手法を取り、26 個のミラーを一体加工することで、ミラー間の相対アライメント誤差を低減させることに成功している。しかし、波長 0.9 μm において IFU 単体で 70% 以上のスループットを達成するためにミラー表面粗さ 10 nm RMS 以下を目指したが、実測では 9–19 nm RMS と、一部のミラーで目標を達成することができなかった。これは母材の材質に起因すると考えている。今後は母材の選択や、メッキ等の表面処理の必要性、加工手法の見直しにより、表面粗さを低く抑えることが期待される。

d) 高反射率誘電体多層膜の品質チェック

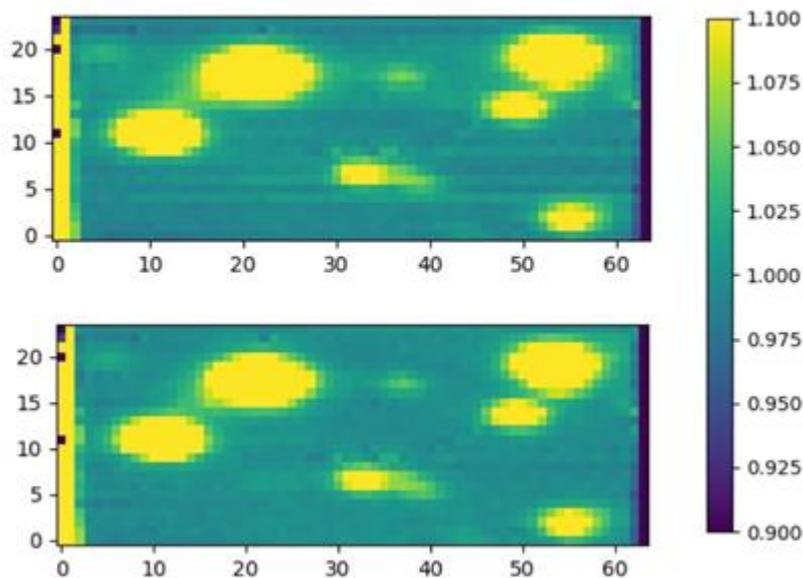
一般的にスライサー型 IFU は光路に多くのミラーが入るので、個々のミラーの反射率を少しでも上げたい。そのため誘電体多層膜だけで反射膜を形成する高反射率誘電体多層膜が有力候補の一つとして挙がるが、成膜誤差により波長幅 1nm 程度以下のシャープな吸収パターンが分光反射率に生じる可能性がある。実際に FOCAS IFU ではそのような吸収パターンが見られている。そのため、品質チェックのときには観測時に使用する以上の波長分解能で測定する必要がある。WFOS IFU では最高の波長分解能が $R=15,000$ 程度であるが、そのような分解能で十分な S/N を稼げる分光反射率測定器は存在しない。そのような場合には分光反射率測定システムを自作する必要がある。

e) ガラス製イメージスライサーのアライメント精度向上

FOCAS IFU ではイメージスライサーを含む全ての反射面に高反射率誘電体多層膜を採用し、高いスループットを目指した。この膜を金属基板上に安定的に施すことは技術的に困難であるので、FOCAS IFU では金属を超精密加工するのではなく、ガラス板側面に反射膜を施したスライスミラーを積み重ねてイメージスライサーを製作する手法を採用した。しかしこの膜の高い応力のためにスライスミラーの基板に歪みが生じてしまった。この結果、各スライスミラー間の目標相対アライメント誤差が 0.005° 以内のところは 0.04° 程度の誤差が生じてしまった。高反射率誘電体多層膜をイメージスライサーに採用する場合には、アライメント精度を向上させる製造技術を確認する必要がある。

f) フラット処理誤差に対する補正ソフト開発

複雑な光学系である IFU は迷光や散乱光の影響のためと思われるフラット処理誤差が生じる可能性が高い。そこでフラット処理誤差を補正するソフトの開発も望ましい。例えば FOCAS IFU ではスカイバックグランドはフラットであるという仮定のもとに補正するソフトを開発中である(下図)。同様のソフトは MUSE でも実用化されている。



FOCAS IFU で取得した星団のデータ。上) 通常のフラット処理を行ったデータ。スライス方向は横方向であるが、数%レベルのフラット誤差が横縞となって見られる。下) フラット誤差補正ソフトで更に処理した後のデータ。フラット誤差がかなり改善されている。

g) 複雑な形状の光学素子の形状測定

スライサー型 IFU では複数枚のミラーが並んだミラーアレイを用いる。例えば SWIMS IFU の瞳ミラーの場合、各ミラーが $\pm 22^\circ$ 程度の範囲で向きが異なっているため、一度にミラーアレイ内の 26 個のミラー面を測定することができず、両端と中央のグループに分けて向きを変えて 3 回の測定を行った。それぞれのグループでオーバーラップしているミラー面形状を参照して 3 回の測定データの位置合わせしたが、系統誤差が残ってしまった。ミラーアレイのアライメント誤差を精度良く測定する方法がなく、ミラーアレイの品質確認が十分にできない。非接触共焦点式 3 次元測定器に取り付けられる NA が大きく、収差も十分に小さい対物レンズを開発できれば、傾斜の大きな面も測定可能になるので、一度の測定で全てのミラー面を測定できる。SWIMS IFU の瞳ミラーの場合は NA が 0.7 程度あれば測定できた。

h) 実験室での性能評価手法の確立

実験室での性能評価項目は以下のようなものがある。

- 疑似スリットのプロファイル
- 疑似スリット間隔
- 各スライスチャンネルの射出瞳形状
- 各スライスチャンネルからの射出光の方向

これらの評価のためには望遠鏡からの入射光を模した光源システムを用意する必要がある。FOCAS IFU や SWIMS IFU の評価試験のために組んだ光源システムは簡単なもので十分な性能であるかどうかの検証がなされていない。

また、各スライスチャンネルからの射出光の方向の測定においては、目測を頼りにしている部分がある。目測の精度でも大きな問題を生じない評価方法をとっているつもりだが、不定性を抑えた測定手法の確立が望まれる。

i) 複数面分光装置の製造

これまでに述べた課題は面分光装置一般に当てはまるが、複数面分光装置を並列に並べて広視野化を図るためには、視野を分割し各面分光装置へと光を導入する前置光学系が必要となる。また、特に近赤外用途では、各面分光装置をコンパクトに収める工夫が、実現性向上のために重要となる。

これからのロードマップを以下に示す。

- 高反射率誘電体多層膜の品質チェック、E)ガラス製イメージスライサーのアライメント精度向上、F)フラット処理誤差に対する補正ソフト開発は WFOS IFU へ向けた技術開発として既に進行中である。
- 実験室での性能評価手法の確立についても WFOS IFU 開発へ向けた基礎開発の一環として取り入れることができる。
- 複雑な形状の光学素子の形状測定に記載の対物レンズは理研からアイデアが提供されており、それをベースに検討を開始することができる。
- に記載のデータ変換ソフトの開発は光学設計ソフトの業者と加工機に詳しい理研のチームと共同開発体制を組む必要がある。原理的にはできるはずだが、ハードルは高そうである。
- 複数面分光装置の製造は近い将来に実施される予定はない。
- 製造・組立・調整を意識したオプトメカ設計は実際に開発がスタートしてからの課題である。人材育成は恒久的な課題である。

2) 広帯域分光器開発の視点から:

国内ではすばる望遠鏡に搭載する可視近赤外広帯域分光器 NINJA の開発が進められており、その概念設計において判明してきた技術課題についてまとめる。

一般的にエシェル分光器では主分散素子として反射型グレーティングが用いられる（例えば VLT/X-Shooter）。しかし反射型を用いる場合、ケラレを避けるためにグレーティング前後の光学素子をグレーティングの近くに配置できないという制約が生じてしまい、光学系が大きくなってしまふという欠点があった。この欠点を回避するために、分散された光をほとんど同じ経路でコリメ

ーターへ戻し、スリット位置付近にできるスペクトル像を検出器へ再結像させる White pupil layout と呼ばれるレイアウトも考案されているが、光が経由する光学素子が多くなってしまう。

透過型グレーティングならば前後の光学素子をグレーティングの近くに置けるので、この問題を避けることができ、全体的にコンパクトなレイアウトにできる。しかし従来の透過型回折格子は $R \sim 3000-4000$ を達成しようとする、屈折率 $n < 2.0$ の一般的な光学硝材ではブレイズ角を $50-60^\circ$ としなければならず、製作が非常に困難となる。近赤外線域であれば $ZnSe(n \sim 2.4)$ や $ZnS(n \sim 2.3)$ といった硝材を用いればブレイズ角は $30-40^\circ$ に収まるが、これら脆性材の加工という別の技術課題が生じる。

透過型グレーティングについては Volume Binary Grating などの新たな方式のグレーティングが開発されている。また脆性材の精密加工も徐々に可能となってきている。これらの技術が発展すれば、広帯域分光器で利用できる透過型グレーティングも容易に手に入るようになると期待される。

3) 補償光学開発の視点から:

我が国では、すばる望遠鏡において広視野補償光学における技術検討、実証を行なっている。2015 年にはカナダビクトリア大学、東北大学、国立天文台の協力により、MOAO の技術実証、科学実証を行うための RAVEN を開発し、試験観測を行うと共に、共同利用観測において科学観測も行なった。また、国立天文台では、2011 年より次世代広視野補償光学システムの検討を開始し、2018 年に GLAO システムの概念設計を完了した。現在、GLAO プロジェクトは国立天文台の A プロジェクトとして開発検討を進めており、2022 年中に基本設計を完了した上で製作を開始し、2028 年度中に観測運用を開始することを目指している。また、GLAO の前段階として、2017 年より同様の複数レーザーガイド星、波面センサーを用いるレーザートモグラフィ補償光学 (LTAO) である ULTIMATE-START の開発が東北大、国立天文台により進められている。この装置では、GLAO 及び将来の広視野補償光学で用いるレーザー、波面センサー検出器といった要素デバイスの技術実証、トモグラフィ波面推定アルゴリズムの実証を行う。また、同装置を共同利用観測に供し、科学観測性能の実証も行われる予定である。ULTIMATE-START は 2022 年度中にハワイ観測所に持ち込まれ、2023 年度にすばる望遠鏡において観測を開始する予定である。TMT 広視野補償光学の開発に向けた開発課題と、すばる望遠鏡における広視野補償光学開発を通じた開発ロードマップを以下に整理する。

a) マウナケアにおける大気揺らぎの統計的調査

広視野補償光学では、大気揺らぎのトモグラフィ推定が必要になる。そのためのアルゴリズムを最適化するためには、マウナケアにおける大気揺らぎの性質を理解する必要がある。これまで、マウナケアにおいてはキャンペーン的な調査が行われているが (Chun et al. 2009, Els et al. 2009)、地表層から高層までの大気揺らぎ分布の統計的な調査はまだ行われていない。東北大、国立天文台では、すばる望遠鏡に搭載する大気揺らぎプロファイラ (SLODAR/SH-MASS) を開発しており、この装置により、今後すばる望遠鏡内のドームシーイングも含めた大気揺らぎ分布の統計的調査を行う予定である。また、GLAO がすばる望遠鏡に搭載されれば、焦点面において半径 $2 \sim 10$ 分角の間で自在に配置できる 4 つのレーザーガイド星、及び波面センサーにより大気揺ら

ぎを測定できる。これらの統計的なデータ取得により、MOAO に最適なトモグラフィ推定アルゴリズムの開発ができると期待される。

b) 大型可変形鏡の較正

可変形鏡の形状測定、影響関数の評価には、干渉計での計測が必要になる。また、波面センサーによる制御行列を評価するためには、人工光源を用いた計測が必要になる。GLAO では広視野を1度にカバーする大型な可変形鏡が必要になるため、大型の鏡を較正する専用のシステムが必要である。すばる望遠鏡の GLAO では、直径 1.26m の可変形副鏡を、1.7m の非球面鏡を用いたビーム拡大光学系、及び人工光源により計測する較正光学系を設計している。これらの較正光学系の開発は、TMT に GLAO を搭載する場合にも必須となるため、すばる望遠鏡の可変形副鏡において、大型計測光学系の製作、調整、較正手法を確立することで、TMT における大型可変形鏡の開発に繋げる事ができる。

c) 波面センサー光学系、機械系の設計、製作、調整、評価

波面センサーで用いる機械系、光学系の性能は極端に高精度である必要はないが、その較正精度、アライメント安定性が求められる。特に、MOAO で用いられる波面センサーは、ピックオフミラー位置を天体の動きに合わせて高精度に動かす必要がある。これらの高精度の操作を実現するためには、光学系、機械系の公差解析、構造解析、品質保証、光学計測といった技術が必要になる。これらの要素技術をすばる望遠鏡の LTAO および GLAO の開発を通して獲得し、その技術を日本のコミュニティの中で継承していくことで、TMT における広視野補償光学の開発に備える必要がある。

d) 望遠鏡, 観測装置における準静的収差の較正

広視野補償光学においては、波面センサーが見ているガイド星と、観測天体で視野内の位置が異なるため、望遠鏡、観測装置光学系による収差に視野依存性があると、共通ではない光路による波面誤差 (non-common path error) を生ずる事になる。特に、望遠鏡のリッチークレチアン光学系では、非点収差が残るため、視野の場所により収差が大きく異なる事になる。また、外的要因 (たわみ、熱など) によるアライメントずれによっても、ガイド星と観測天体で波面収差の違いにより、non-common path error が生じる。TMT において、回折限界を達成するには、これらの準静的な波面誤差を 100nm 以下の高精度で計測し、補正する手法が必要となる。すばる望遠鏡の GLAO システムでも、必要な較正精度に大きな違いはあるものの、同様の問題が起こるため、波面センサー光学系内に動的な非点収差補正レンズ、広視野撮像装置を用いた焦点面での波面計測手法、近赤外線検出器の部分読み出しによる Tip/Tilt 補正などの検討を行なっている。すばる望遠鏡の GLAO において、これらの手法を確立することで、TMT の MOAO/GLAO にも応用できる事が期待される。

e) システムズエンジニアリング

補償光学系は複雑なサブシステムの重ね合わせであり、なおかつ望遠鏡と観測装置の中間的な性質を持つ装置である。これらのサブシステム、及びコンポーネントの重ね合わせにより導かれるシステムの性能を正しく把握し、設計に反映させ、実現させるには、システムズエンジニアリングの技術が必須である。TMT における補償光学の開発に向けて、すばる望遠鏡の補償光学の開発を通して、システムズエンジニアリングのスキルを持つ人材を育成していく必要がある。

f) 補償光学運用の最適化

広視野補償光学を用いた観測は、天体の積分を開始するまでに、ガイド星の導入、制御ループの開始、制御パラメータの最適化など数多くのステップが必要となる。これらのステップを効率よく行うことも、補償光学の観測システムとしての性能を決める重要な要素の一つである。すばる望遠鏡の GLAO システムを用いたサーベイ観測において、広視野補償光学の運用手法を確立し、最適なアルゴリズム、ソフトウェアを開発する事が必要である。

開発した技術の他分野への応用、社会貢献：

空間 2 次元と波長 1 次元の情報を得る手法は天文分野外では一般にハイパースペクトルイメージングと呼ばれており、工業分野や医療分野、生物分野など様々な分野で広く活用されつつある。面分光装置開発に関する技術は、このような分野への応用が期待される。

また、ハイパースペクトルイメージングではないが、SWIMS IFU のスライサー製造技術はフェムト秒からナノ秒スケールの変動現象を捉える超高速連写カメラ Sequentially timed all optical mapping photography (STAMP) の開発に利用されており (Saiki et al. 2020, Optics Express, 28, 31914)、材料科学や物理学、バイオ・医療などの先端科学研究に用いられている。

広視野補償光学の要となるトモグラフィ推定技術は、大気揺らぎを広範囲で断層的に計測する必要がある、衛星-地上間の高速度・大容量通信のための光通信や、地球周回軌道上の宇宙ゴミの監視、およびその除去といった分野への応用が期待される。また、生体組織の強い密度揺らぎを通した生体細胞の観測、航空機などによる強い乱流の計測といった高強度揺らぎの計測技術との融合、発展が見込まれる。

3.4 宇宙膨張の直接検出とダークエネルギーの性質への制限

性能仕様を満たすにあたって鍵となる技術仕様：

波長分解能については、典型的な Ly α forest のプロファイル (FWHM \sim 20-30 km/s) を分解できればよいので $R \sim 50,000$ 程度で十分である。CCD の画素サイズについても、既存の同類装置の仕様 ($\Delta \lambda \sim 0.015 \text{ \AA}$) であれば、例えば波長 5000 \AA における $R \sim 50,000$ のスペクトルの resolution element ($\Delta \lambda \sim 0.1 \text{ \AA}$) に 6-7 ピクセル入るため、サンプリングは十分である。このように統計誤差を考えるうえでは、既存の分光器、検出器の仕様で十分であり、あとはいかに効率よく「フォトンを稼ぐか」が重要である。

一方、系統誤差については検討すべき点が多い。既存の高分散分光器で導入されている Th-Ar ランプによる波長校正の系統誤差は $\sigma_v \sim 1 \text{ km/s}$ であり、要求される決定精度に遠く及ばない。最近導入が進んでいるレーザーコムの場合、コム単体での測定誤差は $\sigma_v \sim$ 数 cm/s という極めて高いレベルに達しているが、装置全体を含めた決定精度は数 m/s に留まる。装置の波長校正精度が数十年という長期にわたって担保される必要もある。

観測系の固有運動も考慮すべきポイントである。例えば、銀河系中心に対する太陽系の加速度は $\sim 0.7 \text{ cm/s/yr}$ 、局所銀河群の重心に対する銀河系の加速度は $\sim 0.04 \text{ cm/s/yr}$ であり、宇宙加速膨張から期待される加速度と同程度である。一方、宇宙の静止系 (宇宙背景放射) に対する局所銀河群の加速度は分からない。しかしターゲットを全天から満遍なく選べば、その影響をキャンセルできるのみならず、宇宙背景放射に対する局所銀河群の加速度そのものを測定できるかもしれない。ELT/HIRES も同様な観測を計画しているが、対象天域が南天のため、北天をターゲットとする TMT による観測とは相補的である。

視線速度の測定に関して、10 年以上に渡って 1 cm/s の測定安定性を実現し得る TMT 用高分散分光装置として、紫外-可視域の HROS、近赤外域の MODHIS が挙げられる。このうち、遠方のクエーサーの観測により赤方偏移 2-3 付近のライマン α 吸収線系が観測できるのは HROS のみとなる。

第 2 期観測装置として提案されている HROS は、光学系の詳細な構成は未定ではあるが、入射光を複数波長域 (チャンネル) に分けてそれぞれ高効率の高分散分光を達成する構成となっており、波長分解能 50,000 の Standard Mode に加え、波長分解能 100,000 の High Resolution Mode が提案されている。High Resolution Mode における HROS の主たる要求仕様は以下の通り。

- 波長域: $0.31\text{-}1.1 \mu\text{m}$ (goal $0.31\text{-}1.3 \mu\text{m}$)
- 波長分解能: 100,000
- Seeing limited 観測において Fiber Slicing $1''$ sky / $0.2''$ sampling / 19 fibers

- GLAO 観測において Fiber Slicing 0.6" sky / 0.2" sampling / 7 fibers

なお、入射部は image slicer のほか、青側のチャンネルでは fiber による効率減を避けるために単 slit を用いることも検討されており、チャンネル分けを含めて入射部の光学系をどのように構成・実現するかが一つの重要な開発項目になり得ることに注目しておきたい。

宇宙の加速膨張を直接検出するためには、 ~ 1 cm/s の視線速度測定精度と長期安定性が要求され、分光器本体を真空チャンバー（内圧 $\sim 10^{-5}$ mbar）に入れて断熱しつつ、複数の熱エンクロージャに分けてミリ K レベルの温度制御を行うこと、および十分な波長域をカバーする安定した波長較正基準を用意することが肝要である。この技術は、既に ESO HARPS や VLT 8.1m-ESPRESSO 等で実現しており、ESPRESSO では 10 cm/s 以下の視線速度精度が達成されていることから、その技術に倣うことにより早期の実現が見込まれる。

一方、ファーストライト装置への編入が検討されている MODHIS は、TMT-AO による回折限界像を活かして 10 cm/s という視線速度安定性を達成しようとする近赤外線高分散分光器である。MODHIS の波長域は 0.95-2.4 μ m、波長分解能は $>100,000$ である。同類の観測装置である Subaru-IRD (~ 1 m/s = 100 cm/s レベルの装置安定性を達成) の開発経験から、分光器の 1 ミリ K の温度変化により 100 cm/s ほどの絶対変動が生じること、その大部分は波長基準光源の同時参照により補正できるものの、検出器ピクセル間の感度ムラやピクセルサイズの不均一性、天体光と参照光との PSF の違いなどの影響で、絶対変動の 100 分の 1 程度の不定性が残ることが判っている。このことから、日本の MODHIS チームでは 1 cm/s の視線速度精度を達成するため、分光器の温度変動を 1 ミリ K 以下に抑えようとしている。これと同程度の温度制御要求は可視域の VLT-ESPRESSO においても指摘されていることから、本テーマにおいて鍵となる技術仕様として、一つは

- HROS 分光器本体の 1 ミリ K 以下での温度制御

に集約されよう。また、十分な波長較正基準として、赤方偏移 2-3 のライマン α 線は波長 0.36-0.48 μ m に来ること、および多チャンネル分光器を構成するため

- 0.36-0.48 μ m 帯をカバーし、波長安定性が ~ 1 cm/s に達するレーザー周波数コムの実現
- 多チャンネル分光器の構成によっては、高効率と観測モードを両立させるための入射部光学素子の工夫（スリット/image slicer/ファイバー）

も求められる。

技術仕様の実現にあたってこれまでの成果とこれからの開発のロードマップ：

近赤外分光器 MODHIS は元々、技術リスクの低い装置として選定された経緯があり、必要な技術の多くが実証済みであることや、Subaru/IRD の開発実績を活かせる強みがある。Subaru-IRD の

開発経験から、MODHIS において $\sim 1 \text{ cm/s}$ ($= 0.01 \text{ m/s}$) の視線速度精度を達成するには分光器の温度変動を 1 ミリ K 以下に抑える必要があるとされており、また可視分光器 VLT-ESPRESSO においても ~ 1 ミリ K レベルの温度安定化により 10 cm/s 以下の視線速度精度が得られていることから、HROS においても分光器本体の 1 ミリ K 以下の温度均一化・安定制御をどのように達成するか鍵となる。温度安定化のための技術そのものはポピュラーなものであり、

1. 分光器全体の真空チャンバーでの封入・断熱化
 2. 複数の熱エンクロージャ（放射シールド含む）に分けた設計とすること
 3. 十分な個数密度でセンサー・ヒーターを実装して分光器内温度を均一・一定に保つこと
- を実現・実証していけば良いと考えられる。

3. に関して、Subaru-IRD では放射シールドの導入や光学ベンチの断熱支持、ヒーターによる温度コントロールによって、光学ベンチの温度を数十ミリ K レベルで安定化に成功していることを受け、1 ミリ K 以下の安定化を目指すために、光学ベンチに設置する温度センサーとヒーターの設置密度の ~ 10 倍増 ($0.16 \text{ m}^2/\text{個} \rightarrow 0.01 \text{ m}^2/\text{個}$) および放射シールドの多重化と温度制御の導入、温度ドリフトを極限まで抑えた温度計測・制御法の開発が有効であると考えられる。HROS においては、光学系全体をなるべくコンパクトなものとすることや、ESO HARPS や VLT-ESPRESSO の関係者から温度制御のより詳細なノウハウを得ることに加え、IRD/MODHIS チームによる温度制御のノウハウを引き継いで、HROS 実機を模した小型試作機を用いた実験室での実証試験および結果に基づいた設計仕様の改良を繰り返すことが必要となろう。既存の高分散分光器 (GAOES、HIDES 等) をテストベンチとして用いることができればより有効であろう。MODHIS の分光器温度安定化を目指すグループとの協力も有効であろう。

レーザー周波数コム安定化の向上に関しては、Subaru-IRD 用に $\sim 10 \text{ cm/s}$ のレーザーコムが既に実用化されており、波長帯は異なるものの $\sim 1 \text{ cm/s}$ の実機の実現の技術リスクはさほど高くはないと考えられる。早めの実証を目指したい。

入射光部の工夫については、HROS に求められる他の観測モードとの共存化の議論をフォローしつつ、HROS にメリットのある構成を提案し、その鍵となる光学素子の開発にあたることが考えられる。ファイバーを使って光を導く場合には、ファイバーが外気に晒されることによる測定精度への影響がどこまで抑えられるかを実証試験により確認しておくことも求められよう。

また、そもそも HROS の検討グループには、インドのメンバーを中心に中国が加わり、日本からも参加しているグループがあるものの、そこではこのテーマの性能仕様にあるような極端に高い安定度の達成を目指すことはコンセンサスにはなっていないと思われる。日本のコミュニティとしてこの機能の実現を目指すのであれば、今検討されている HROS の仕様が決まる前に提案するなど、早めに HROS の検討グループと交渉することも必要であろう。

開発した技術の他分野への応用、社会貢献：

光学系の精密な温度制御と高精度な光測定（分光、イメージング）は、汎用的な実験技術の高度化であり、様々な応用が考えられる。KAGRA などの同類の大型実験設備における真空・冷却光学系の技術との共通性を理解し、相互に技術を高め合っていくことも有効であろう。レーザーコム的小型化・安定化は、超高精度分光の広い実用化と周波数制御による原子冷却・量子情報技術への応用が期待されている。

高波長分散スペクトルの長期にわたるアーカイブデータに基づいて、地球高層大気定点モニタリングを行うことは、地球科学の発展や環境対策への貢献に繋がる。