

イメージライサー型面分光ユニット開発に向けた要素技術開発

北川祐太郎

東京大学 天文学教育研究センター

e-mail: y_kitagawa@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

I 面分光とは

近年、可視赤外天文学において面分光(Integral Field Spectroscopy)と呼ばれる観測手法が急速に発展している。面分光とは一言で表すなら、「視野内の空間情報を保持したまま、その波長情報も同時に取得できる」観測手法と呼ぶことができ、3次元(X, Y, λ)のデータキューブから銀河内部の力学状態や物理量を空間分解して調べることが可能になる。

この面分光観測を実現するために用いられる光学系は面分光ユニット(IFU)と呼ばれ、主に3つの光学系に大別することができる^[1]。それぞれ(1)マイクロレンズアレイ型、(2)ファイバー束型、(3)イメージライサー型と呼ばれ、いずれも一度の露出で2次元視野内の各空間領域のスペクトルが取得できる。なお、実際の装置では望遠鏡焦点面像の拡大/縮小を行う前置光学系がつく場合が多い。これらそれぞれの方式から、目的とするサイエンスに応じて最適なものが選ばれる。特に近赤外装置では後述の理由から、イメージライサー型IFUが広く用いられているようになってきた。

このイメージライサー型IFUの概念図を図1に示した。まずIFUに入射してきた光はスライスミラーと呼ばれるミラーアレイ上で望遠鏡焦点面像をむすび、かつそれらが小スリット像群に分割される。それぞれの像は異なる方向へと反射されていき、後段の瞳ミラーがこれを1次元ロングスリット状に並び替える。この再結像した像をスリットミラーによって分光器本体へと射出する。このようにイメージライサー型IFUは2次元の視野をあたかも1次元スリットのように変換する光学素子の働きをする。得られたデータはソフトウェア上で空間情報を復元することで、最終的に3次元のデータキューブを取得できる。この方式の利点は視野を連続的に分割するため空間情報が失われない点であり、検出器受光面の利用率は3つの方式の中で最も高い。また全ての光学素子を支持構造と同じ金属のミラーで構成できるので、光学系全体の冷却が必要な赤外域の観測装置に向いている。そしてアレイの一体加工はアライメントの手間を著しく軽減する利点もある。短所としては複雑な形状をもったミラーアレイの設計とその製作である。筆者が現在、開発しているSWIMS-IFUもこの方式を採用している。

II SWIMS用面分光ユニット SWIMS-IFU^[3]

近年はダストに埋もれた星形成領域の物理状態や、 $z > 1$ の遠方銀河の研究のための近赤外面分光装置の需要が高まっている。一方、開発期間の長期化やコストの観点から中・大型望遠鏡の装置開発を一から立ち上げることは決して容易ではない。そこで本研究では既に完成している多天体分光装置を利用し、そこに面分光モードを新たに付加するというアイデアを採用した^[4]。これは図2に示すような多天体分光用スリットマスクと同様に取り扱える小型・軽量のIFUモジュールを製作することで可能となる。他の光学系(分光系、フィルター)や機械構造(真空冷却デューワー)は既存の装置のものと共有できるため、ゼロから装置を立ち上げるよりも開発期間とコストをはるかに低減できるという利点を有する。これらのコンセプトを実現するために現在、筆者が開発を進めているのが、イメージライサー型近赤外面分光ユニットSWIMS-IFUである。

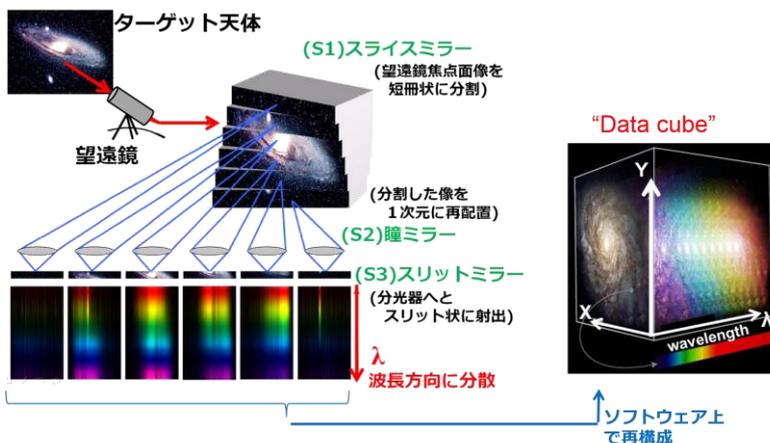


図1: イメージライサー型面分光の概念図^[2]。図中の脚注は筆者によるもの。

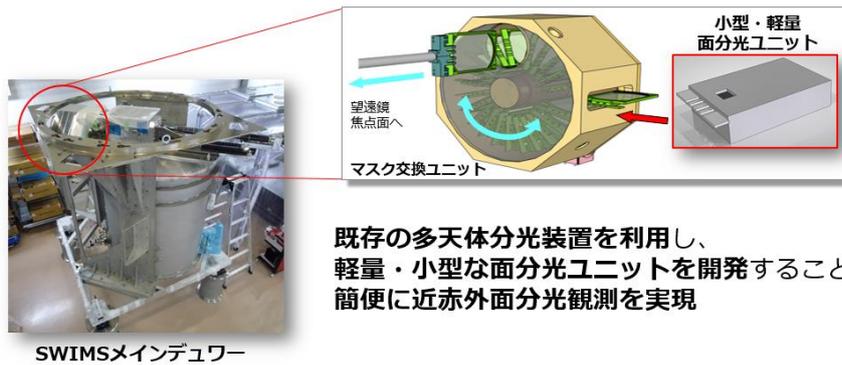


図 2: SWIMS-IFU の概念図。SWIMS メインデューワーの中に分光光学系が格納されている。マスク交換ユニットには通常の多天体分光用マスクに加え、小型・軽量の IFU モジュールを収納し、ロボットアームで焦点面まで引き出す。

本研究の IFU では、ホスト装置となる多天体分光装置は現在、東京大学天文学教育研究センターが開発を行っている TA06.5m 望遠鏡の第 1 期装置 SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infra-red Multi-object Spectrograph) を用いる^[5]。SWIMS では、多天体分光用のマスクを 20 枚近く収納するカラーセルから、観測天体に応じて必要なスリットマスクを焦点面までロボットアームで引き出してくる。前述の小型・軽量 IFU が開発できれば、同様にロボットアームによる遠隔操作で簡単に面分光観測モードに切り替えることができる。すなわち、SWIMS では撮像、多天体分光、面分光の 3 観測モードが、真空・冷却状態を破ることなく一晩の観測中でも自在に交換できる。

SWIMS はすばる望遠鏡にも取り付けることが可能であり、両望遠鏡で観測した場合の面分光スペックを表 1 に載せた。既存の近赤外 IFU がいずれも AO 併用を想定した非常に細かい空間サンプリングをもつものに対して、本研究の IFU は seeing-limited 観測に最適化されている。その結果、既存の IFU に対して広がった天体の淡い構造を高 SN で検出でき、また銀河を一度に面分光できる程度の十分広視野を確保することが可能になっている。そして一番の特徴は SWIMS の二色同時分光を合わせた $0.9\text{-}2.5\mu\text{m}$ のデータキューブを一度に取得できることである。

III SWIMS-IFUの要素技術開発

次に SWIMS-IFU の要素技術開発について述べる。まずサイズ・重量の問題である。前述のとおり、IFU にはカラーセルに収められる程度の小ささ、そしてロボットアームで出し入れ可能な軽量さが同時に要求される。カラーセル内で IFU に割り当てる空間をスリットマスク 2 枚分と規定すると、IFU のサイズに対する制限は $170\text{ mm} \times 220\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ となる。また重量については重さを 50 g 刻みで変更のできるダミーマスクを用意し、ロボットアームの握力上限値を実験で確かめた。その結果、重量に対する上限を 900 g と算出した。このようなサイズに収まるように光学素子を配置し、かつシーイング限界観測で問題にならない程度まで収差を抑え込めるかは決して自明な問題ではない。そこで本研究ではまず近軸計算で、矛盾なく光学素子を配置できるような光学解を解析的に計算した。そして近軸解に基づいて、光線追跡シミュレーションを行い、SWIMS 検出器上での最終的な結像性能を評価した。光線追跡シミュレーションには ZEMAX を使い、その結果を図 3 に示した。与えられたサイズ制限に対し、実光線追跡に基づいた光学レイアウトのサイズは、 $150\text{ mm} \times 185\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ と十分収まっていることがわかる。また検出器場でのスポット径については、最も悪化した視野端においても 0.3 arcsec (RMS 直径) 以内に収まっている。IFU の空間サンプリングが 0.4 arcsec のため、このスポット径は許容とした。

装置/望遠鏡	Subaru 8.2m	TAO 6.5m	SINFONI / VLT
波長	$0.9\text{-}2.5\ \mu\text{m}$		$1.1\text{-}2.45\ \mu\text{m}$
$\lambda / \Delta\lambda$	~ 1000 - 1500		~ 3000
空間サンプリング	0.4"	0.5"	0.025" (w/ AO)
視野	14" x 5.2"	17.2" x 12.8"	0.8" x 0.8" (w/ AO)

表 1: SWIMS-IFU のスペック表。比較のため、同じイメージスライサー型 IFU である VLT の SINFONI のデータも併記してある。

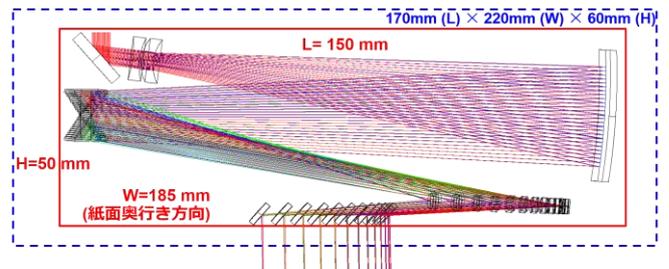
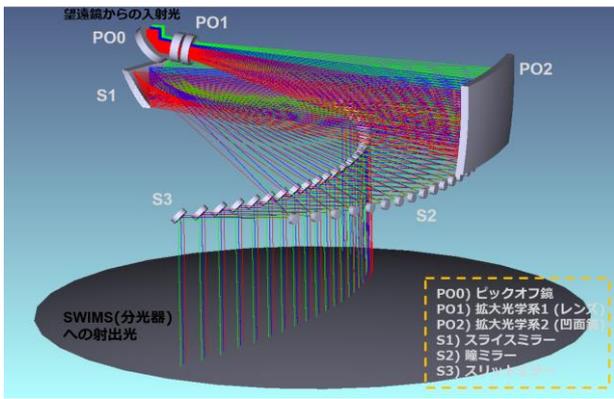


図 3: (左) 光線追跡シミュレーションの結果。(右) IFU の最終的サイズ。

SWIMS-IFU の光学設計が完了し、本研究は次の段階であるミラーアレイの製作に着手している。イメージスライサー型 IFU のミラーアレイ製作の方法は 2 通り考えられ、(i) ガラス研磨で個別の反射面を研磨で製作ののち組み上げる、(ii) 金属切削による一体加工が挙げられる。すでに述べたように近赤外装置の光学系は冷却下に置かれるという観点から、支持構造と同じ金属 (e. g. アルミ合金) でミラーを製作できる (ii) が望ましい。しかし、複雑な形状をもつミラーアレイを近赤外域での要求精度 (表面粗さ $< 10\text{nm}$ 、形状誤差 $< 100\text{ nm P}\{V\}$) で一体加工することは非常にチャレンジングな課題となっている。一方、この困難を解決すべく現在着目しているのが近年発展著しい超精密加工技術による金属切削加工である。これは厳密に温度管理された環境下 ($\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$) において 1 nm オーダーで加工機の動きを制御することにより、刃先の軌跡を加工対象に精確に転写する技術である。すでにこの加工技術を用いた 3 反射面をもつ試作スライスミラーの製作・評価を行っており、上記仕様に近い値が得られることを実証済みである。現在は理化学研究所の先端光学素子開発チームと連携し、加工条件等の検討を行っている。今後は他の瞳ミラーアレイ、スリットミラーアレイについても同様の試作を行う予定である。

加工以前の更に基本的な検証実験として、我々は鏡材評価も同時に進めている。すなわちダイヤモンド工具による超精密切削加工に対して、そもそものような金属が加工の観点から有利なのかという問題である。表面粗さだけで言えば、通常のアリウム合金 (たとえば A5052) に無電解 NiP メッキを施し、それを超精密切削加工することで表面粗さ 10 nm RMS は十分に達成可能である。一方でやはり赤外装置特有の冷却下での使用という問題も起こる。これは A5052 のような通常のアリウム合金と NiP メッキとでは熱膨張率が異なるため、ミラーを 80 K 近くまで冷却すると熱膨張率の差異による形状歪みを引き起こしてしまうという問題である。この問題を検証するため、国立天文台のオプトショップ所有の Zygo GPI を用いて冷却下での形状測定を行った。ミラーは A5052 に厚さ $100\text{ }\mu\text{m}$ の NiP メッキが施されたもので、常温と低温における測定結果を図 4 に示した。低温では外縁部、特に四隅に大きな変形が起きているのが見て取れる。変位量は P-V で $0.3\text{--}0.4\text{ }\mu\text{m}$ となっており、この歪みが光学性能に与える影響は決して無視できない。そこでこの問題を解消するため我々は RSP 社の特殊アリウム材 (A160%:Si40%) を用いた検証実験を予定している。このアリウム材は Si の混合量を変えることで NiP と同じ熱膨張率に調整された鏡材となっている。これに NiP メッキを施し、超精密加工をしたのち、低温で形状歪みが起こらないかを今後同様の測定で検証する予定である。

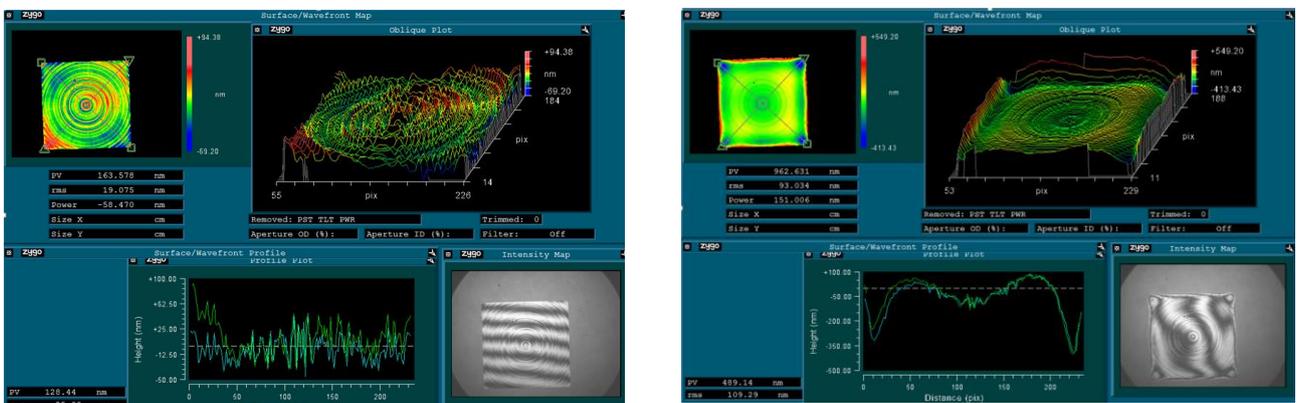


図 4: A5052+NiP メッキ $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚の形状測定の結果。(左) 常温での形状 (右) 80K での形状

IV 今後の展望

最後に、SWIMS-IFU で蓄積される要素技術の応用の可能性について述べておく。現在、面分光装置の開発は多天体化という新しい局面をむかえつつある。すでに KMOS/VLT が稼働しており、TMT の第二期装置提案にある IRMOS でも多天体面分光が仕様に含まれている。本研究の光学設計はコンパクトな空間でイメージライサ型面分光を実現することから、このような多天体 IFU においても有用であると期待される。また「モジュール化されたコンパクト IFU」というコンセプトは、SWIMS-IFU を複製(+微調整)することで既存の多天体分光装置(e.g. MOIRCS/Subaru)に短期間・省コストで面分光モードを付加できるという特徴を有する。一方で、複雑形状をもつ金属ミラーアレイの超精密切削加工やそれに適した鏡材の選定は今後の検討事項である。これらの技術蓄積は将来の装置開発に対して重要な寄与を果たすと思われる。

筆者は既存の多天体分光装置を利用することで、将来有用な要素技術を蓄積しつつ近赤外 IFU を短期間で実現することを目標として研究を進めてきた。今後、SWIMS は 2015 年度中にハワイに輸送され、すばる望遠鏡での初期科学観測を予定している。自ら開発した IFU で銀河がどのような進化を辿ってきたのか、その謎を解き明かせる日を楽しみにしている。

謝辞

本研究は本原頭太郎 准教授を筆頭とする SWIMS 開発チーム(東京大学天文学教育研究センター)と協力して行われている。共同研究者である尾崎忍夫氏(国立天文台 TMT 推進室)には光学設計に対して一貫して有益なコメントを頂いてきた。そして超精密切削加工では山形先生をはじめとする理化学研究所の先端光学素子チームの協力を頂いている。簡単ではあるがここに謝意を述べたい。なお本研究の一部は JSPS 特別研究員奨励費 266780 の助成を受けて行われた。

【参考文献】

- [1] Allington-Smith J, 2006. NAR. 50:244
- [2] Vives S, et al. 2008. Proc. SPIE 7018
- [3] Kitagawa Y, et al. 2014. Proc. SPIE 9151
- [4] Ozaki S, et al. 2012. Proc. SPIE 8450
- [5] Konishi M, et al. 2012. Proc. SPIE 8446