

次世代を切り開く近赤外面分光ユニットの開発 —A new near-IR IFU for Subaru telescope—

北川 祐太朗 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学教育研究センター)

Abstract

近年、面分光と呼ばれる観測手法が可視赤外天文学において急速に発展してきた。これは「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」観測手法であり、8–10 m 級望遠鏡の登場に伴い、銀河形成進化に関する新しい知見を我々にもたらしている。その特徴として、通常の撮像やスリット分光観測が 2 次元のデータ構造 (X vs Y 、又は X vs λ) を有するのに対し、面分光観測では一度の露出で 3 次元のデータキューブ (X vs Y vs λ) が取得可能であることが挙げられる。特に近赤外面分光は遠方宇宙探索 ($z > 1$) やダストに埋もれた星形成の現場など銀河形成進化を解き明かすうえで重要である。

本集録では前半で面分光の観測原理の説明を、後半では現在筆者が開発を進めている近赤外面分光ユニット SWIMS-IFU の要素技術開発、特に超精密切削加工と呼ばれる手法に焦点をあてて紹介する。これら要素技術は複雑形状を有する特殊な光学素子の高精度製作など次世代天文観測装置の開発にもつながっており、今後の装置開発において日本が競争力をもつ装置提案をおこなうための重要な技術の一端を担っているといえる。

1 面分光観測の原理

1.1 面分光とは

近年、面分光 (Integral Field Spectroscopy) と呼ばれる観測手法が銀河天文学をはじめとして広く用いられるようになってきた。これは文字通り、天球面上で広がりをもった天体を「面」全体で一度に分光できる観測手法といえる。天体から我々に届く光子にはさまざまな情報が含まれているが、もっとも基本的なものは、その天球面上での位置情報 X 、 Y と波長 (=エネルギー) λ であろう。そして天文学において基本的な観測手法である撮像観測と (スリット) 分光観測は上記のうちそれぞれ、 $\{X, Y\}$ 、 $\{X, \lambda\}$ の情報を検出器面上に取得することに対応する。一方、面分光観測では後述する方法により、一度の露出で $\{X, Y, \lambda\}$ の 3 次元情報を同時に取得することが可能である。

このような面分光観測を用いる利点として以下が挙げられる。銀河のような広がった天体全体のスペクトル情報を得る方法としてロングスリットをあてる場所を次々変えていくスリットスキャンが考えられる。しかしこの方法に要する積分時間は一般に多大

なものになり、観測時間が非常に貴重な大型望遠鏡では銀河全体を上記方法で連続的に埋めていくのは、現実的な困難を伴う。一方、面分光観測を用いれば (視野にも依るが) 1 回の積分で銀河全体の空間領域のスペクトル情報を一度に取得することが可能である。すなわち高効率な観測手法ということが出来る。また、空間全体のスペクトル情報を得られるということはガスの運動の様子 (速度や速度分散) を「場」として抽出することができるということである。たとえば速度場の乱れや速度分散場の局所的な上昇からは、過去の衝突・合体の痕跡やアウトフローの兆候などの議論に結びつけることができる。力学状態を観測から直接取得できることは銀河形成シミュレーションの結果とも比較が可能であり、従来の形態のみを用いた場合よりもより直接的かつ詳細に銀河形成進化を議論することが可能になる。

1.2 面分光を実現するために

面分光観測を実現する光学系は面分光ユニット (Integral Field Unit, 略して IFU) と呼ばれている。現在稼働中の装置に用いられている手法はそれぞれ、(1)

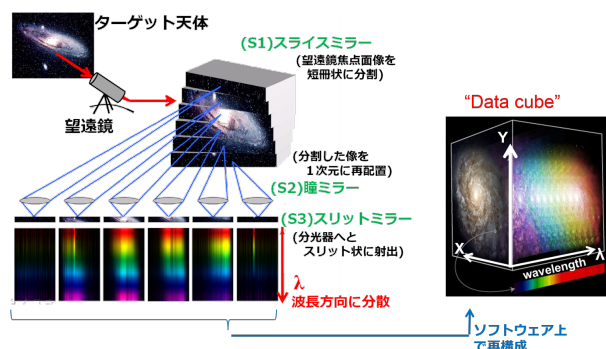


図 1: イメージスライサー方式による面分光の概念図^[1]。図中の日本語脚注は筆者によるもの。

マイクロレンズアレイ方式、(2) ファイバー束 (+ レンズアレイ) 方式、(3) イメージスライサー方式の 3 種類に大別できる。ここでは本研究で採用している (3) についてその原理を簡単に紹介する。概念図を図 1 に示した。まず望遠鏡の焦点面像は適切な倍率に拡大されたのち、スライスミラーアレイ (図中 S1) と呼ばれる特殊な光学素子の上に結像される。このスライスミラーアレイは細い短冊状のミラーが互いに角度をつけながら積層した形状になっており、この上に結ばれた像は小スリット群に分割され、それぞれ異なる角度へと反射される。これらは瞳ミラーアレイ (図中 S2) 位置でそれぞれ望遠鏡の瞳 (赤外波長であれば一般には副鏡) に対応した射出瞳をつくる。瞳ミラーアレイの個々のミラーはある曲率半径をもっており、スライスミラーアレイが分割した小スリット群を 1 本のスリット状へと再配置する役割をもつ。この「ロングスリット」はスリットミラーアレイ (図中 S3) によって分光器へと射出される。すなわち、この光学系全体の役割は、「2 次元視野を分割し、1 次元のロングスリットに変換する」ことにある。射出されたスリット像は通常のスリット分光と同様に波長方向に分散され検出器上にスペクトルを形成する。最後にソフトウェア上で位置情報を復元してやれば、データキューブとよばれる $\{X, Y, \lambda\}$ の 3 次元情報を一度の露出で同時に取得することができる。これがイメージスライサー方式の原理である。この方式を採用している装置の例としては可視波長では MUSE/VLT^[2]、近赤外波長では SINFONI/VLT^[3] などが挙げられる。

1.3 なぜ、いま面分光装置が必要なのか

すでに述べたように面分光観測は観測効率という実面的な利点に加え、銀河の力学状態や物理量 (*e.g.* 星形成率、電離度 *etc...*) の空間分布を直接議論できる強力な観測手段を我々に与えてくれる。これらを実現する IFU は 2020 年台に天文学を大きく進展させるであろう次世代望遠鏡 (*e.g.* TMT、JWST) の装置にも搭載が予定されている。一方でその需要に対する IFU 開発はまだまだ発展途上にあり、特にすばる望遠鏡では Kyoto3D-II (レンズアレイ型可視 IFU) 以降の開発実績がなく、特に銀河形成進化を解き明かすうえで重要な遠方宇宙探索 ($z > 1$) やダストに埋もれた爆発的星形成の物理を探るための近赤外 IFU 開発は非常に重要である。

2 近赤外面分光ユニット SWIMS-IFU

前節のとおり、近赤外 IFU の開発は次世代の装置開発も視野に含めたうえで重要な意味をもっている。そこで私はすばる望遠鏡に搭載可能な近赤外面分光ユニット SWIMS-IFU の開発を行ってきた。これは前述のイメージスライサー方式を採用した近赤外 IFU であり、図 2 にある通り既存の装置と比較して、広視野 ($14'' \times 5.2''$)、広波長帯 ($0.9 - 2.5 \mu\text{m}$) のデータキューブを取得できるという特徴を有している。

SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph)^[4] とは現在、東京大学天文学教育研究センターが開発を進めている近赤外撮像/多天体分光装置で、本研究の IFU は SWIMS に面分光観測モードを新たに付加するような設計になっている。装置コンセプトと光学設計に関しては文献 [5] に詳しく述べられている。ここでは SWIMS-IFU

Telescope	Subaru	VLT	Gemini	Keck
Instrument	SWIMS-IFU	SINFONI	NIFS	OSIRIS
Method	Image slicer	Image slicer	Image slicer	Lenslet array
wavelength	0.9- 2.5 μm	1.1 - 2.45 μm	0.94 - 2.4 μm	1.0- 2.4 μm
$\lambda / \Delta\lambda$	~ 1500	~ 3000	~ 5000	~ 4000
Spatial Sampling	0.4" (26 slice)	0.025" - 0.250" (32 slice)	0.103" (29 slice)	0.02" - 0.1"
Field of View	14" x 10.4"	0.8" x 0.8" ~ 8" x 8"	3.0" x 3.0"	0.3" x 1.3" ~ 3.2" x 6.4"

図 2: 大型望遠鏡における現在稼働中の近赤外 IFU のスペック比較。

の開発にあたり、その心臓部であるミラーアレイの要素技術開発に焦点をあてることにする。なお、すばる望遠鏡の近赤外 IFU としては MOIRCS 用のマイクロレンズアレイ方式の開発も進んでいる [6]。

3 技術課題と本研究の目的

SWIMS-IFU は $0.9 - 2.5 \mu\text{m}$ の近赤外波長域で使用する。そのため光学系は、熱による背景ノイズの抑制を目的として観測時には $\sim 80\text{K}$ に冷却する必要がある。光学系に使用されるミラーの母材には硝材と金属合金を候補に挙げることができるが、冷却時の熱収縮率の差異によるアライメントずれの発生を防ぐためには、支持構造と同じ材料 (*e.g.* アルミニウム合金) を用いることがのぞましい。更にイメージスライサー方式の IFU では図 3 に示したような複雑形状を有するスライスミラーアレイを製作する必要がある。この場合、常温でのアライメントが冷却環境下でも保持されるのかという問題、アライメントの手間、精度の観点から一体加工による形状創成が有力となる。この「複雑形状を有するミラーアレイの一体加工」という技術課題に対して要求される加工精度は、(1) 近赤外波長域でスループットを上げるために表面粗さ $< 5 \text{ nm RMS}$ 、(2) 形状誤差に関しては $< 0.1 \mu\text{m P-V}$ という高精度の加工が要求される。上記の技術課題に対してこれら要求精度を満足することは現在においても非常にチャレンジングな課題である。そこで本研究では近年発展目覚ましい超精密切削加工技術に着目し、原理検証実験としてスライスミラーアレイの試作を行うことで製作可能性を議論した。

4 超精密切削加工によるスライスミラーアレイの製作

今回の実験で製作したスライスミラーアレイは幅 $500 \mu\text{m}$ の 5 枚の反射面が 0.4° ずつ傾いた sample A (母材: A5052) と、25 枚の反射面が約 0.4° ずつ傾いた sample B (母材: A5052 + NiP メッキ) である。加工手法は、sample A をシェーパー加工で、sample B はエンドミル加工でそれぞれおこなった。sample

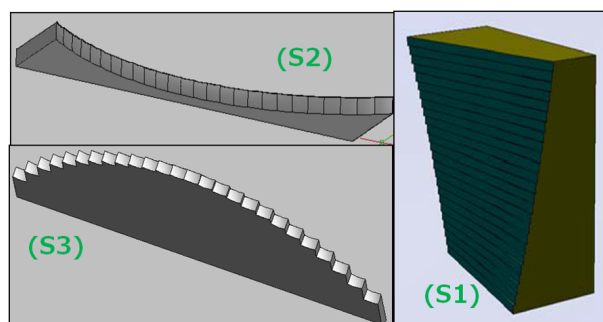


図 3: イメージスライサー方式の心臓部となる光学素子。(S1) スライスミラーアレイ (S2) 瞳ミラーアレイ (S3) スリットミラーアレイ

A の加工では 5 軸制御の超精密加工機 ((株) ナガセインテグレックス) を使用し、極細ダイヤモンド R バイト (先端曲率半径 $= 20 \mu\text{m}$) を用いて、ミラー長手方向のシェーパー加工を短手 (幅) 方向に $1 \mu\text{m}$ 間隔で繰り返すことで鏡面を形成していった。一方、sample B の加工では、超精密研削盤 ULG-100A (東芝機械 (株)) の工具主軸に $\phi 500 \mu\text{m}$ の単結晶ダイヤモンドエンドミルを取り付けて使用した。被加工物は A5052 に無電解ニッケルリンめっきを厚さ $100 \mu\text{m}$ つけたものを鏡面仕上げした。形状測定は非接触三次元形状測定機 PFU-3 ((株) 三鷹光器)、粗さ測定は白色光干渉顕微鏡 Newview7200 (ZYGO) でそれぞれ評価した。

まず、R バイトを用いたシェーパー加工で製作した sample A の表面粗さはシェーパー方向で評価した場合 $R_a \sim 5 \text{ nm}$ と良好な値が得られた。これは A5052 単体でありながら要求精度の 5 nm RMS 以下を満たしている。一方、 $140 \mu\text{m} \times 105 \mu\text{m}$ の平面領域でみると $S_a \sim 25-30 \text{ nm}$ と若干の悪化がみられた。これはシェーパー加工の切削痕が支配的な要因である。形状誤差については角度公差 $< 0.1 \%$ 、平面度 $\sim 0.1 \mu\text{m P-V}$ と要求精度を満たす値が得られた。

次にエンドミル加工による sample B であるが、表面粗さについては無電解ニッケルリンを施して鏡面仕上加工を行ったため、 $S_a \sim 3 \text{ nm}$ と要求精度を十分満たす値が得られた。この結果は 1 反射面を 1 回の走査で形成できることも寄与しているものと思われる。形状誤差についても sample A で得られた値

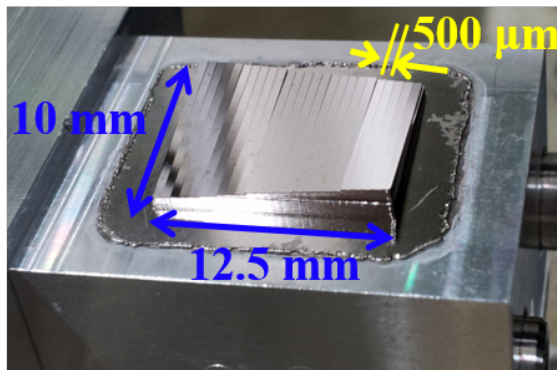


図 4: sample B の鏡面仕上げ加工後の写真。幅 500 μm 、相対角度 $\sim 0.4^\circ$ の反射面が 25 枚連なった形状を有している。

と同等の角度公差 $< 0.1\%$ 、平面度 0.1 μm P-V の水準で加工できていることが実証された。鏡面仕上げ後の写真が図 4 に載せた。

5 結論

今回の実験ではイメージスライサーのような複雑形状を有するミラーアレイを超精密切削加工による一体加工で製作し、その加工精度を検証した。結果はシェーパー加工、エンドミル加工いずれも形状に関しては要求精度を満たす精度で加工ができることが実証された。表面粗さに関しては改善の余地があり、シェーパー加工の場合は高精度な工具アライメント手法の確立に加え、加工プログラムに補正を与えるために事前にテストカットを行うことが粗さ向上につながるものと思われる。いずれにしてもセッティングの手間を減らす工夫は必要であり、それらに関しては現在検討中である。

6 今後の展望

近赤外 IFU は既存の 8m 級大型望遠鏡はもちろん、次世代の 30m 級超大型望遠鏡においても標準的な装置として搭載予定であり、今後もその重要性が増していくことは間違いない。特にイメージスライサー方式は近赤外波長では広く採用されており、複雑形状ミラーアレイを高精度製作するための要素技術蓄

積は次世代の天文装置開発において重要な役割を果たすことになる。本研究では近赤外 IFU の開発を通じてこれらの技術蓄積をおこなってきた。すでに述べたいくつかの原理検証実験から超精密切削加工技術は有用であることが示されており、今後は本番用のミラーアレイの製作をおこなっていく。SWIMS-IFU は 2016 年度にすばる望遠鏡でのファーストライトを目指して現在鋭意開発中である。自ら開発した装置で銀河形成進化の謎に切り込める日を今から楽しみにしている。

謝辞

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。指導教員の本原顕太郎氏 (東京大学)、および共同研究者である尾崎忍夫氏 (国立天文台)、山形豊氏 (理化学研究所)、森田晋也氏 (東京電気大学) には一貫して有益なコメントを頂いてきた。簡単ではあるがここに謝意を述べたい。また基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台の夏の学校開催への厚い支援に感謝する。

Reference

- [1] Vives S, et al., Proc. SPIE 7018 (2008)
- [2] Bacon R, et al., Proc. SPIE 7735 (2010)
- [3] Eisenhauer F, et al., Proc. SPIE 4841 (2003)
- [4] Konishi M, et al., Proc. SPIE 8446 (2012)
- [5] Kitagawa Y, et al., Proc. SPIE 9151 (2014)
- [6] 石垣剛、他 2015 年度日本天文学会春季年会 講演 V238a