

# 中間赤外線高分散分光観測に向けた

## CdZnTe 製イマージョン・グレーティングの開発と実用化

馬場俊介<sup>1</sup>, 中川貴雄<sup>1,2</sup>, 松原英雄<sup>1,3</sup>, 平原靖大<sup>4</sup>, 榎木谷海<sup>1</sup>, 古賀亮一<sup>5</sup>, 李源<sup>4</sup>, 趙彪<sup>4</sup>, 趙宸溟<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ISAS/JAXA, <sup>2</sup>東京都市大学, <sup>3</sup>総合研究大学院大学, <sup>4</sup>名古屋大学, <sup>5</sup>名古屋市立大学

### 概要

我々は、様々な分子ラインを含む波長10–20  $\mu\text{m}$  を大気の影響のないスペースから高波長分解能で分光することを目指し、光学系縮小化の鍵である、CdZnTe 製イマージョン・グレーティング (CZT-IG) を開発している。そのために、光学特性の極低温精密測定や、反射防止コートの開発などを進めている。製造した CZT-IG は、専用に開発する分光装置に組み込み、地上望遠鏡での観測を通して性能試験する計画である。本稿では、CZT-IG および実証用分光装置の開発状況について報告する。

### 1. はじめに：スペース中間赤外線高分散分光観測の必要性和、そのための中核技術

中間赤外線の波長 10–20  $\mu\text{m}$  は、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、といった基本的な分子、炭素骨格を持つ有機分子など、多様な分子の振動回転遷移が存在しており、スペクトルの指紋領域と呼ばれる。これらの分子輝線・吸収線を高分散分光で分解すれば、新たな星間物質サイエンスが開拓されると期待されている。しかし、この波長域は大気の吸収が強く地上観測が困難であるため、スペース観測が必要となっている。例えば、次期戦略的中型ミッションの候補である口径 1.0 m 冷却宇宙望遠鏡 GREX-PLUS では、高分散分光器 HRS (波長範囲 10–18  $\mu\text{m}$ 、波長分解能  $R \equiv \lambda/\delta\lambda \geq 25,000$ ) がオプション装置として検討されており、その高い分散でこそ可能となるサイエンスとして、原始惑星系円盤から放射される  $\text{H}_2\text{O}$  輝線の速度分解を通じたスノーラインの探査が提案されている (Inoue et al. 2024)。

しかし、分光装置は一般に高分散であるほど大型になるので、容積・重量の制限が厳しいスペース機器で高分散分光を実現するのは容易ではない。そこで我々は、GREX-PLUS を始めとする将来の宇宙望遠鏡に向けた、分光光学系を劇的に小型化する技術として、イマージョン・グレーティング (IG) という分散素子に着目している。これは図 1 に示すように、回折面を高い屈折率 ( $n$ とする) の媒質中に設けるエシェル格子である。実距離の  $n$  倍の光路差を稼ぐことができるため、素子および光学系全体の大きさを  $1/n$  倍に (体積で  $1/n^3$  倍に) 縮小できる。

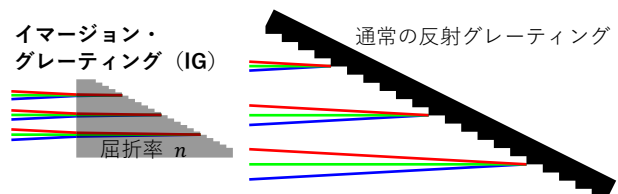


図 1：通常の反射グレーティングと IG の比較。

これまでに、指紋領域で使用可能な高屈折率の透明材料として、 $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$  (CZT;  $n \sim 2.64$ ) が有望と分かっている (Sarugaku et al. 2012)。しかし、CZT 結晶による IG はこれまで実用化された例がなく、技術的成熟度が不十分である。本研究では、CZT-IG を製作する技術を確認するとともに、それを利用した地上望遠鏡用の観測装置を開発し、天文用途での性能を実証することを目指している。

### 2. CZT-IG の実用化における課題

CZT-IG を開発するうえでの課題として、CZT の極低温光学特性の評価、表面反射防止 (AR) コートの開発、脆性材である CZT の機械加工が挙げられる。本稿では、光学特性の評価についてと、AR とし

て開発中の2つの方式、少数層誘電体多層膜とサブ波長モスアイ構造のうち、前者についてのみ詳しく述べる。機械加工については超精密加工の有望な条件を発見できており、モスアイ構造 AR については構造周期の微細化を試みている段階である。

中間赤外線天文観測における前提として、観測装置は、自身の熱放射を抑えるために、極低温 ( $\leq 20$  K) に冷却して運用する必要がある。ゆえに CZT についても、極低温での光学特性 (吸収係数・屈折率) の理解が不可欠である。先行研究による測定例が無かったため、我々はそれらの精密測定を行った。

吸収係数については、装置のスループットを高めるために低い値であることが重要であり、例えば HRS では  $\alpha < 0.01 \text{ cm}^{-1}$  が要求されている。これまでに、Maeshima et al. (2022) によって、低電気比抵抗 ( $\sim 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ ) の結晶では不純物準位に束縛されたホールによる吸収が極低温で卓越することが明らかにされており、その結果に基づいて、要求を満たすためにはホールの少ない高電気比抵抗 ( $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ) の結晶でなければならないと推測されていた。そこで我々は、高抵抗 ( $\sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ) の CZT 結晶を製作して透過率測定を行い、吸収係数の要求がこれらの結晶で満たされていることを初めて実証した (Li et al. 2025, 図 2)。本番用として作成した大型結晶 (抵抗度  $\sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ ) についても、同様の測定を同じインゴットから取得した検証用サンプルに対して行い、吸収係数に問題がないことを確認している。

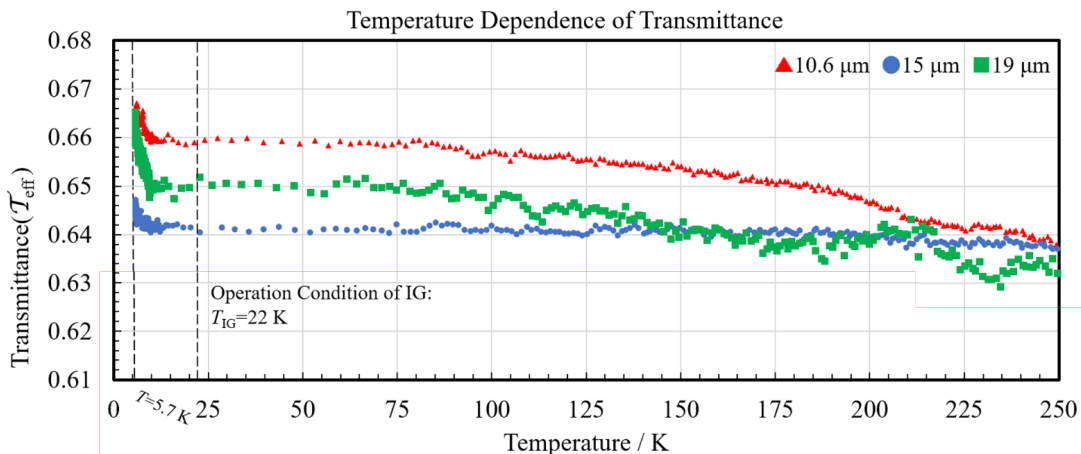


図 2：高電気比抵抗の CZT 結晶 (厚み 10 mm) で測定された中間赤外線透過率の温度依存性 (Li et al. 2025 一部改変)。この透過率から無限回フレネル反射を仮定して吸収係数を導出することで、極低温において要求値が満たされていると明らかになった。

屈折率については、装置設計のために高精度の測定が必要である。我々は、冷凍機で冷却しながらサンプルの屈折率を測定できるシステムを独自に構築し、CZT の屈折率を極低温で初めて測定した (Enokidani et al. 2025, Enokidani et al. in prep., 図 3)。測定精度は  $\delta n \sim 10^{-3}$  を達成しており、これはエシエログラムの設計に十分な値である。ただしこの測定で、屈折率の温度係数が極低温でも比較的大きい ( $dn/dT \sim (1-3) \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) ことが判明し、これに起因する波長較正の不安定性が懸念されている (4 節)。

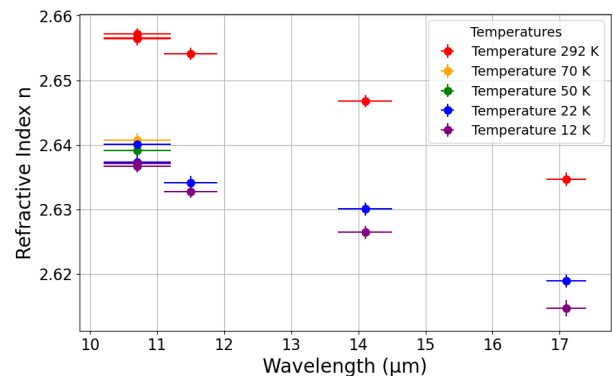


図 3：中間赤外域で室温から極低温にかけて測定した CZT 屈折率 (Enokidani et al. in prep.)。

IG の材質は高屈折率であるため、そのまま使用するとフレネル反射による損失が大きい。観測の感度を高めるには、IG の端面に効果的な AR コートを施すことが必須である。AR コートとして広く用いられるのは、誘電体多層膜による干渉を利用するものである。しかし従来、波長 10–20  $\mu\text{m}$  の広帯域で十分な透過率 (1 面あたり  $> 95\%$ ) を達成するしようとすると、選択できる膜材に適当な屈折率のものが無

いたため10層以上の厚いコートとなり、基板との熱膨張差で冷却時に損傷するだろうと考えられていた。そこで我々は、新たな膜材を探索すべく単層コート試作を行うことでBaF<sub>2</sub> (n=1.41) が使用可能であることを見出し、それをZnSe (n=2.40) と組み合わせることで、わずか3層 (ZnSe/BaF<sub>2</sub>/ZnSe) での設計解を得た。現在、コートを実際に試作し、冷却への耐性を試験している。その結果、83 Kまで冷却したのち室温に戻した際に、10%ptほど透過率が低下した可能性が示唆された。ただし、透過光と参照光の強度を別々に測定しているなど系統誤差の懸念が残されているため、測定系の改良を進めている。また、蒸着前の表面洗浄が基板に悪影響を及ぼした可能性も疑い、前処理工程の条件探索も試みている。

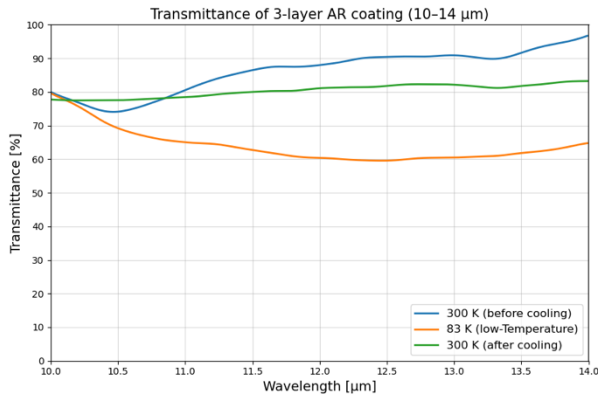


図4：ZnSe/BaF<sub>2</sub>/ZnSeによるARコートを施したCZT基板(2mm厚)の透過率(無コートの裏面の影響も含む)の変化。83 Kにおける透過率は冷却前から最大30%ptほど低下している。再び室温に戻した際も透過率は完全には回復せず、冷却前から10%ptほど低くなっている。

### 3. CZT-IGを実証するための地上望遠鏡用分光装置の開発状況

CZT-IGを天文観測で実証するため、地上望遠鏡用の分光装置を開発中である。波長帯Nバンド(~7.5-13 μm)において、GREX-PLUS/HRSと同等の波長分解能 $R = 30,000$ を目指している。地上観測であるためHRSより波長範囲が狭く感度も低い、CZT-IGによる中間赤外線高分散分光は実証できる。

搭載先は、東広島天文台かなた望遠鏡のナスミス焦点である。かなた望遠鏡は主鏡有効口径1.5 mの国内では大型の望遠鏡である。架台は経緯式、光学系はリッチー-クレチアンで、ナスミス焦点の合成F値は12.2である。ナスミス焦点台は面積が $2.0 \times 1.4 \text{ m}^2$ で最大積載重量も1,000 kgと大きく、余裕を持った観測装置設計が可能である。この焦点には過去に、Ge製IGを用いた分光装置GIGMICSが搭載されたことがあり、それによってNバンド高分散分光観測が行われた実績もある(Hirahara et al. 2012)。

本研究のCZT-IG分光装置では、開発リスクおよびコストを抑えるために、GIGMICSのクライオスタット、検出器系、駆動系を(一部に追加工を施して)活用する。検出器はRaytheon社製Si:As BIBアレイ(412×512 pix)である。検出器の1辺の素子数が少ないため、十分なサンプリングができるよう、回折次数を高次(~260-480)に設定して各次数の波長範囲を狭める。結果としてバンド内でのスペクトルの分割数が多くなり、全波長範囲を同時に観測できなくなるため、クロスディスペルザを回転させることで次数のスキャンを行う。この方針はGIGMICSと同様であるので、GIGMICSに使用されていた極低温回転駆動機構を活用する。

現在、かなた望遠鏡およびGIGMICS真空チャンバーの使用を前提として光学系の最終化を進めている(図5)。望遠鏡焦点は、チャンバー内に入るよう、ノミナルから引き出した位置で観測する(F/12.2→12.4)。前置光学系では更なるF変換(F/18.0)を行ってコリメータとカメラの焦点距離を伸ばし、収差を抑制する。分光系は、レイアウトをコンパクトにするため、IGとクロスディスペルザの間にwhite pupilを設けないクラシカルな構成とする。結像系にはレンズではなく、三枚鏡アナステigmat (TMA)を採用する。これは、常温・可視でも一定の光学調整を行えるようにするため、また、将来的に海外適地へ移設し、さらなる長波長帯での観測に拡張できるようにするためである。

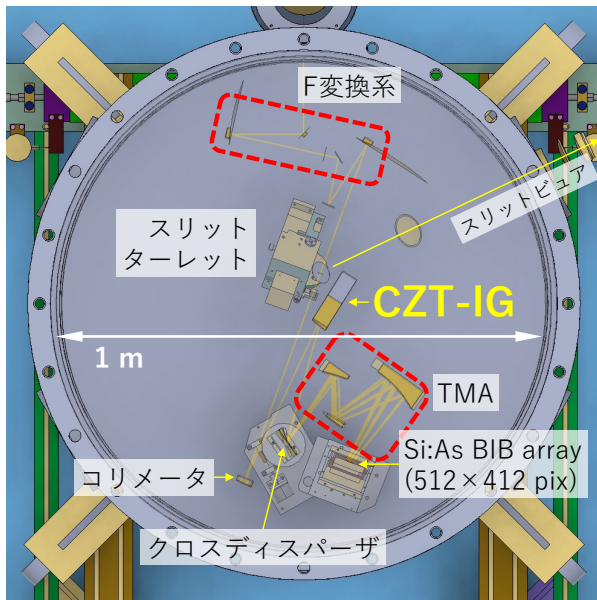


図 5：CZT-IG 分光装置の光学レイアウト。GIGMICS の真空チャンバー、検出器ユニット、駆動系（クロスディスペルザ回転機構およびスリットターレット）の使用を前提としている。チャンバーは直径 1 m の円筒型であり、そこへ光学系が収められている。回転機構と検出器ユニットは、現状ではフットプリントが重なるため、支持部に追加加工を施す。分光スリットは複数種類を製作し、それらをターレットで切り替えられるようにする。スリットミラーで反射したビームは平面鏡で折り曲げ、チャンバー側面のポートを通してビュー用カメラで撮影する。

#### 4. IG 媒質の屈折率温度依存性をもたらす影響

開発を進めたことで初めて認識された懸念として、波長校正の安定性の問題がある。IG を用いた分光において、各次数のブレイズ波長は  $\lambda_b = (2n\sigma \sin \delta)/m$  であり ( $n$  は屈折率、 $\sigma$  は溝間隔、 $\delta$  はブレイズ角、 $m$  は次数で、リトロー配置を仮定)、屈折率に比例している。波長分解能  $\lambda/\delta\lambda = 25,000$  の観測で波長校正を  $\delta\lambda/4$  の精度で安定させるとすると、波長の相対変化は  $10^{-5}$  以内となり、屈折率にも同じ割合の安定性が求められる。しかし、屈折率には温度依存性があるので、温度変動が大きいと基準を満たせなくなる。測定された屈折率および温度係数 (図 3) から換算して、12 K における屈折率変化が  $10^{-5}$  以下であるためには、温度変化は 0.1 K 以内でなければならない。構築した冷却系で IG 温度が自然にこの精度で安定するかは自明ではなく、冷却試験の結果次第では、能動的な温度コントロールを導入する必要がある。なお、この問題は、IG 中の光路差という基本原理に起因するため、検出器フォーマットや回折次数といった設計によらず、スペース観測機器でも同様に生じる。CZT-IG が抱えるこの本質的なリスクは、本研究の地上望遠鏡用装置をテストベッドとして早期に定量化すべきである。

#### 5. 今後のスケジュール

今後のスケジュールを図 6 に示す。CZT の光学特性については、IG 設計に必要なだけの情報を集められている。本番 IG 用に調達した大型結晶についても透過率に問題が無いことが確認できているので (2 節)、現在、プリズム形状への切断加工を進めている。2026 年度に、まず端面の鏡面研磨を行い、次に、斜面に対する溝加工を行う。分光装置については、コールドワークサーフェス上の詳細機械設計と並行して、その他の部品製作を進める。実験室での組み立て・試験を行なったのち、かなた望遠鏡に移設し、2026 年度中にファーストライトを迎えることを目指している。

	FY2023	FY2024	FY2025	FY2026	FY2027
CZT 材料特性の把握	←		本番用結晶透過率確認 CTE 議論		
反射防止技術の確立	←				
グレーティング製作			本番プリズム調達 試験片加工 小型IG加工試験	端面の研磨 本番IG加工	
分光装置の製作・評価			設計	部品製作、組立て、実験室試験	
試験観測					←

図 6：CZT-IG 分光観測装置の今後の開発スケジュール。

図 6 のスケジュール表は、FY2023 から FY2027 までの期間をカバーしています。CZT 材料特性の把握は FY2023 から FY2024 にかけて完了し、本番用結晶の透過率確認と CTE 議論は FY2025 に実施されます。反射防止技術の確立は FY2023 から FY2024 にかけて完了します。グレーティング製作は FY2025 から FY2026 にかけて完了し、本番プリズムの調達と試験片加工、小型 IG 加工試験は FY2025 に実施され、端面の研磨と本番 IG 加工は FY2026 に実施されます。分光装置の製作・評価は FY2025 から FY2026 にかけて完了し、設計は FY2025 に実施され、部品製作、組立て、実験室試験は FY2026 に実施されます。試験観測は FY2026 から FY2027 にかけて実施されます。

## 6. まとめ

本研究では、スペクトル指紋領域の高分散分光観測を将来の宇宙望遠鏡で実現することを目指し、光学系を小型化するための基幹技術である、CZT-IGの開発を進めている。CZTの極低温光学特性については、IG設計のために必要な測定がほぼ完了している。ARコートのうち、少数層誘電体多層膜方式については、冷却サイクル後の透過率低下の可能性の精査と、前処理工程の条件探索を進めている。本番IGに使用する高抵抗CZTの大型結晶は既に入手済みであり、現在、プリズム形状への切断加工を行っている。製作するCZT-IGの性能を実証するため、それを用いた分光観測装置を開発し、かなた望遠鏡に搭載して試験観測を行う計画である。既に装置の光学設計を終えており、今後は詳細機械設計および部品製作を進める。実験室での組み立て・試験を行なったのち現地に移設し、2026年度中にファーストライトを受けることを目標としている。

## 7. 引用文献

- Enokidani, U., Matsuhara, H., Nakagawa, T., *et al.*, *J. Astron. Tele., Inst., and Sys.* **11**(2), 028004 (2025)
- Hirahara, Y., Aoki, K., Ohta, K., *et al.*, *Proceedings of SPIE* **8446**, 84463Y (2012)
- Inoue, A. K., Yamamura, I., Suzuki, T., *et al.*, *Proceedings of SPIE* **13092**, 130920Y (2024)
- Li, Y., Hirahara, Y., Koga, R., *et al.*, *J. Astron. Tele., Inst., and Sys.* **11**(3), 038003 (2025)
- Maeshima, H., Matsumoto, K., Hirahara, Y., *et al.*, *Journal of Electronic Materials* **51**(2), 564 (2022)
- Sarugaku, Y., Ikeda, Y., Kobayashi, N. *et al.*, *Proceedings of SPIE* **8442**, 844257 (2012)