

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340043

研究課題名(和文)

超精密加工法による赤外線高分散分光素子の開発

研究課題名(英文)

Development of infrared high-dispersion grating by high precision processing

研究代表者：

平原 靖大 (HIRAHARA YASUHIRO)

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：30252224

研究成果の概要(和文)：

超精密加工法を用いて、世界初の単結晶ゲルマニウム・イマージョン回折格子(大きさ 30 × 30 × 72mm)を開発し、これを分散分光素子とする、国立天文台すばる 8.2m 望遠鏡のナスミス焦点台に搭載可能な、中間赤外線領域(N-band: 波長 8~13 μm)での高分散冷却エシエル分光器 GIGMICS(波長分解能 R~50,000)の製作を行った。GIGMICS を実験室での分子分光実験に適用し、その性能評価を行った結果、N-band の波長域(8-13 ミクロン)全域に対して波長分解能を確認した。また、これと同じ波長分解能による分子の発光スペクトルを FT-IR を用いて測定、比較し、GIGMICS がより高い感度を有することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：

We have developed a germanium immersion grating mid-infrared cryogenic spectrograph (GIGMICS) designed for the Nasmyth focus stage of NAOJ Subaru 8.2 m telescope, which operates at N-band (8-13 μm) in wavelength with the R ~ 50,000. A single crystal germanium immersion echelle grating (30 × 30 × 72 mm) for collimated beam size of φ28 mm was fabricated by utilizing ultra precision micro-grinding method coupled with the ELID (Electrolytic In-process Dressing) technique. The instrument has been assembled and is now tested for the application to the gas-phase IR high-resolution spectroscopy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：赤外線天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：赤外線天文学、星間物質、赤外分光、イマージョングレーティング、
超精密加工、エシエル分光、振動回転スペクトル、短寿命分子種

1. 研究開始当初の背景

希薄な宇宙空間に見出される星間分子に関する研究は宇宙における物質循環や進化を知る上で重要である。観測によってこれまでに発見された星間分子は 140 種を超え、その多くは星間化学反応の中間体であり、短寿命なラジカルやイオンであることが明らかにされた。これらは従来主としてセン

チ波、ミリ波領域の回転スペクトルによって観測されてきたが、この方法では研究の対象が双極子モーメントをもつ化学種に限られる。双極子モーメントをもたない分子種は、赤外領域の振動スペクトルによって観測が可能である。とりわけ、中間赤外線領域(N-band, 波長 8~13 μm)は有機物の多様な官能基の振動に伴う遷移が現れる

ため指紋領域と呼ばれ、分光分析に際して、炭素骨格の構造決定に用いられる有用なバンドである。また、各種珪酸塩におけるSi-O骨格振動モードもこの領域に現れ、鉱物もしくは非結晶の固体珪酸塩の構造に関する豊富な情報をもたらす。炭素を含む分子のみならず、珪素、マグネシウム、アルミニウムなど宇宙元素存在度の高い金属化合物が検出されてきた晩期型星周辺大気は、星形成領域と並んで、星間分子の探査においてももっとも重要な観測対象天体の一つである。しかしながら、これまでの赤外線領域での分光観測では、30種類程度の分子が検出されているにすぎず、その多くは電波領域の回転スペクトルで先に確認されている。赤外観測のみで検出されたものは10種類以下である。このように過去の研究例が少ない最大の理由は、星間分子の高分散分光観測に用いることの出来る赤外線高分散分光器が国内外においてきわめて少ないことにある。

従来の地上観測における赤外線分光観測には、可動鏡の移動距離を大きくすることにより高分散が比較的容易に得られるフーリエ変換型赤外(FT-IR)分光器が用いられてきた。しかしながら、大気による背景雑音や光源の揺らぎの影響を強く受ける中間赤外線領域では高感度観測が困難であり、観測対象は明るい天体に限られる。このように測定光源の揺らぎが支配的な場合(Background Noise Limited)には、回折格子を用いた分散型分光器が有力である。赤外線領域のイメージング検出器の大型化(2次元アレイ検出器:最大素子数1024×1024)が進んだことにより、エシエル型分光器の検出器にこれを用いることによって、従来の分散型赤外分光器の欠点の一つであった測定波長幅が一挙に拡大し、FT-IR分光器とほぼ同等の波長スキャン効率の達成が可能となった。ただし、通常の反射型回折格子を用いた分散型分光器を構築する場合、10 μm 帯で波長分解能 $R=\lambda/\Delta\lambda=200,000$ を達成するためには大きさが1m程度の回折格子が必要となり、高感度化を行うために必須の光学素子の均一な冷却(液体窒素温度以下)が著しく困難となる。したがって、分散素子の小型化が重要となってくる。

2. 研究の目的

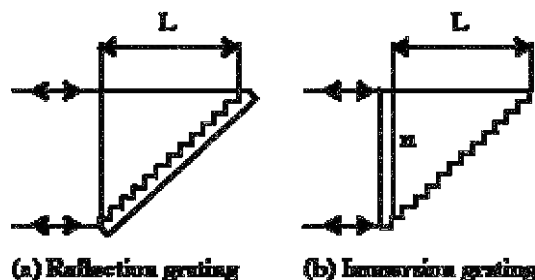
本研究では、中間赤外線領域での星間分子の高分散分光観測を実現するため、ゲルマニウム単結晶イマージョングレーティングと、それを用いた世界初の中間赤外線冷却エシエル高分散分光観測装置GIGMICS(Germanium Immersion Grating Mid Infrared Cryogenic

Spectrograph)の製作をおこない、その分光性能評価を、感度および波長分解能の双方について、実験室での分光実験に適用することで行った。

3. 研究の方法

図1. 回折格子(グレーティング)の模式図

イマージョングレーティング(Immersion grating)とは、回折格子の前面の光路を高い屈折率を有する透明媒質で満たした反射型回折格子である(図1(a))。



グレーティングの波長分解能は光路差 ΔL によって $R=\Delta L/\lambda$ と表され、通常の反射型回折格子(図1(a))の場合、 $\Delta L=2L$ である。一方イマージョングレーティング(図1(b))においては ΔL は媒質の屈折率がnのとき、 $\Delta L=2nL$ になる。ゲルマニウム(Ge)は1.6~20 μm において屈折率が約4と大きく、Geでイマージョングレーティングを製作できれば通常の反射型回折格子の1/4のサイズの光学素子で同一の分解能を得ることができ、コリメート入射光のビーム直径も1/4に、また分光器の体積を1/64に小さくすることが可能になる。

このような深い溝をもつ可視高分散や赤外線用のイマージョングレーティングを実用化するため、様々なマイクロマシニング技術を用いた、光学材料への直接の溝加工による回折格子(Solid gratings)の製法に関する研究が行われている。様々な方法の検討、試験をふまえ、本研究では、理化学研究所・素形材工学研究室で開発されたElectrolytic In-Process Dressing(ELID)研削法に着目し、超精密3次元加工装置にて単結晶ゲルマニウム・イマージョングレーティングの製作を行った。このグレーティングは、老化した星(晩期型星)の大気のスペクトル観測を行う上で十分な分解能である $R=50,000$ を達成できる分光器用とし

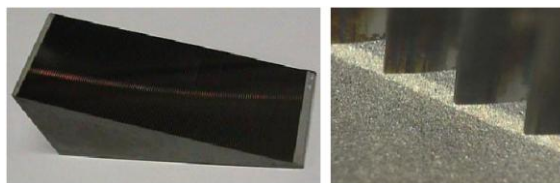


図2 ゲルマニウムイマージョングレーティング

て設計され、サイズが 30(W) x 30(H) x 72(L) mm, 頂角 68.75°である (図 2)。

グレーティングに対する性能要求は(i)高い反射効率, (ii)波長分散とゴーストの低さ, および(iii)低い散乱光強度, の 3 点に集約され, それぞれ(i)格子形状, 特に直角な溝の底部の曲率半径 R , (ii) 溝の間隔 (ピッチ) のランダム誤差と周期誤差, および(iii)表面荒さ, に依存する。

(i)格子形状: プロトタイプ of イメージンググレーティングにおいては, 反射効率が 90%以上である必要があり, 各溝の底部の曲率半径 R に対して $10\mu\text{m}$ 以下に押さえなければならない。研削法による溝加工においては, 砥石の摩耗に十分留意する必要がある。

(ii)ピッチ誤差: リトロ型に近い配置のイメージンググレーティングの場合, 回折の条件式は以下のように表される:

$$m\lambda = 2nds \sin \alpha \quad (1)$$

(λ :波長, n :屈折率, d :格子間隔, α :回折角) 格子間隔に Δd のピッチ誤差がある場合, 次の波長 λ' の光も同じ方向 α に回折される:

$$m\lambda' = 2n(d \pm \Delta d) \sin \alpha \quad (2)$$

この 2 式より, ピッチ誤差による入射光の波長拡がりは

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda' = (\Delta d/d)\lambda \quad (3)$$

となる。よって, プロトタイプ of イメージンググレーティング ($d=600\mu\text{m}$) で, Δd による線幅の拡がり $\Delta\lambda$ を理論分解能での線幅 $0.002\mu\text{m}$ (波長 $10\mu\text{m}$ で分解能 50,000) より小さくするためには, $\Delta d < 12\text{nm}$ が必要である。

誤差がランダムな場合には上記のような線幅となるが, 格子 p 本ごとの周期をもつ誤差の場合は, さらに本来のスペクトルに隣接して Rowland ghost とよばれる随伴線が現れる。本来のスペクトルと ghost との間隔 $\Delta\lambda'$ および強度比 r は

$$\Delta\lambda' = \pm\lambda/mp \quad (m: \text{次数}) \quad (4)$$

$$r = (\pi m \Delta d/d)^2 \quad (5)$$

となる。プロトタイプ・イメージンググレーティングは波長 $10\mu\text{m}$ での回折次数が 448 で, ghost の強度を本来のスペクトルの 0.1% に抑える必要があるため, $\Delta d < 13.4\text{nm}$ が要求される。

(iii)表面粗さ: 一面あたりの散乱光の入射光に対する強度比は次のように表される:

$$\gamma = 16\pi^2 n^2 H_{rms}^2 / \lambda^2 \quad (5)$$

全波長域で散乱光の強度が入射光の 0.01% 以下とするためには, $H_{rms} < 1.49\text{nm}$ である必要がある。

このような世界初のイメージンググレーティングを主分散素子として冷却エシエル

分光器 GIGMICS の設計・製作を行った。図 3 に分光器のレイアウト設計を、図 4 に完成後の分光器全体の写真を示す。

国立天文台すばる 8.2m 望遠鏡以外の様々な望遠鏡への搭載を可能とするため、

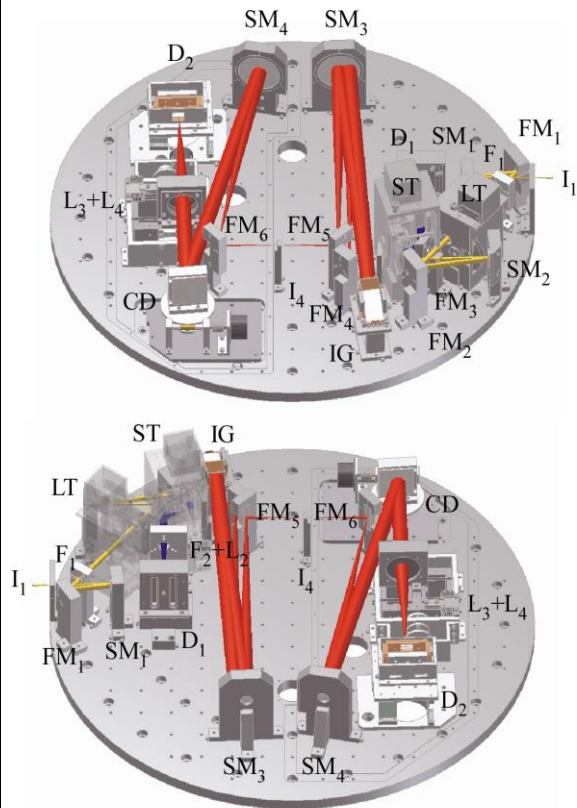


図 3 GIGMICS の光学系レイアウト

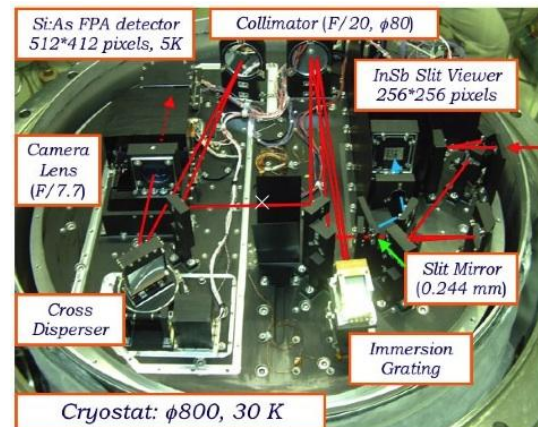


図 4 製作した GIGMICS の光学系コンパクトな, かつ調整が容易な, 球面鏡 (F20) および平面ミラーによる基本的なリトロ光学系とした。実際に望遠鏡に搭載し観測を遂行する上で必要な機構は全て備えている。また, 高い感度を得るために, 全ての光学系や機械部品をクライオスタット (真空冷却装置) 内に収めた。クライオスタットは直径 1m, 高さ約 1.5m, 重量約 1t であり, GM 冷凍機 2 台によって光学

系全体および補助撮像検出器(InSb 256 x 256 素子 2次元アレイ検出器)を 30K まで、また Si:As BIB 主検出器は更に 5K 程度まで冷却する。F 比変換光学系・スリットビューアー光学系からなる前置光学系、続いて 2 枚のコリメータミラー、Immersion Grating, クロスディスペルザ, レデューサーレンズ, および Si:As BIB 検出器 (512 x 412 pixels) からなる主光学系は、単一の光学プレート(直径 800mm)に配置した。主光学系のクロスディスペルザは、短波長側 (8~10 μm) および長波長側 (10~13 μm) の 2 種類を用いて、検出器上に展開される Echelle フォーマットにおけるスペクトル間隔を最適化するように設計し、8~13 μm 全スペクトルのサーベイは短波長用 4 回、長波長用 4 回の計 8 回の異なるクロスディスペルザ回折角設定で可能である (図 5)。

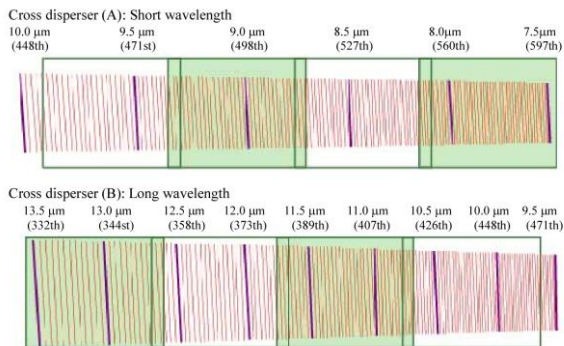


図 5 エシエルフォーマットの図. 2 種類のクロスディスペルザ(A), (B)を、N-band の短・長波長側で切り替えて用いる。

この全観測波長域に対して、各スペクトル要素の検出器上の結像サイズは 60 μm 程度であり、検出器 2pixel x 2pixel (pixel size: $\square 30\mu\text{m}$) 上に収束する。可動部分はクロスディスペルザのほか、スリットホルダ、レンズ交換部、および焦点調節機構の計 4 ヶ所である。これらの駆動には市販のステップモーターを用いたが、その際、内部のベアリングを交換することにより、極低温 (~30K) 環境でも動作可能にした。

2 つの二次元アレイ検出器: Si:As BIB 検出器と InSb 検出器の制御 (クロックパターン生成および蓄積光電荷読み出し) のドライバーとして、専用のハードウェアを製作した。複雑なクロックパターンの生成と、それに正確に同期したデータ取得を実現するため、16 ビット 2.5MSPS の $\Delta \Sigma$ 型 A/D コンバーターと、Field Programmable Gate Array(FPGA)を搭載した Compact PCI 規格のボードを独自に設計し、これを linux ベースの FA コンピューターに実装することで、柔軟性が高い独自の検出器ド

ライバの開発に成功した。

光軸調整は、炭酸ガスレーザー (10.6 μm)、ヘリウム-ネオンレーザー (0.6328 μm)、ジंकセレン円形材、絞りおよび赤外線ボロメータからなる光学調整用レーザー光学系を構築のうえ、主に常温での光学調整を行った。さらに、主検出器である Si:As BIB 512 x 412 素子 2 次元アレイ検出器の低温 (5~7K)・単独での動作試験にも成功した。

4. 研究成果

名古屋大学キャンパス内の実験室において、完成した GIGMICS の真空冷却下での詳細な総合動作試験を行った。分光器が動作する温度条件(分光器光学系の温度 ~30K, Si:As BIB 検出器の温度 5~7K)に到達するまでの時間は設計通り 7 日間で、本研究期間内において約半年間の連続運転を 3 回、のべ 1.5 年間、実験室分光器としての動作が確認された。また、4 つの可動機構全てにおいてほぼ円滑な動作が確認できた。

分光器の性能評価を行うために N-band 全域に振動回転スペクトルが現れる NH₃ をはじめ、多種多様なガス試料を、加熱、冷却および放電が可能なガスセルに導入し、その吸収、発光スペクトルを実際に測定した。その例として、NH₃ ν_2 band の波長 10.2 μm 付近(波数: 948~952 cm^{-1})のスペクトルを示す。セル全体を 100 $^{\circ}\text{C}$ に加熱し、NH₃ を 2Torr 程度に調節したとき、市販の FT-IR 分光器と比較して、およそ 100 倍の感度が得られた (同一の実験条件、測定時間、および波長分解能で)。また、そのスペクトル波長分解能は 20,000~30,000 以上で、スリット幅から計算される分解能と一致する結果が得られた。これにより、GIGMICS が天体観測のみならず、実験室での高感度かつ高分散の赤外線分光実験に対しても適用可能な性能を有することが示された。

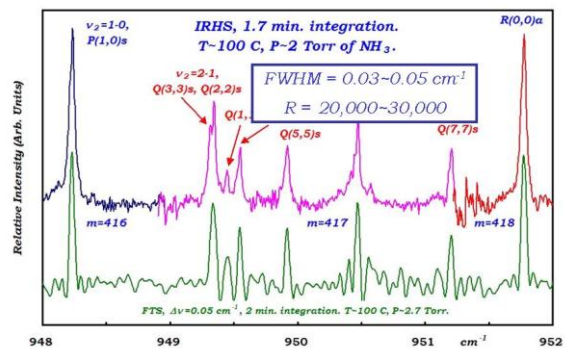


図 6. GIGMICS による NH₃(ν_2)振動回転発光スペクトル (上段) と FT-IR(下段)との比較

本研究期間終了後、東広島天文台かなた 1.5m 望遠鏡による GIGMICS のファーストライト観測も成功裏に完了した。

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3件)

1. Hirahara, Y., Hirao, T., Tatamitani, Y., Yonezu, T., Ebizuka, N., Kawaguchi, K., Tokoro, H., Oka, T. N., "Development of the mid-IR echelle high-dispersion spectrograph employing the germanium immersion grating", Proceedings of SPIE, 7735, 46(2010)
2. Kobayashi, N., Sarugaku, Y., Ikeda, Y., Kawakita, H., Enya K., Nakagawa, T., Kataza, H., Matsuhara H., Hirahara, Y., Tokoro, H., "Mid-IR High-resolution Echelle Spectrometer (MIRHES) for SPICA", Proceedings of SPIE, 7010, 181(2010)
3. 平原 靖大、"宇宙と化学のつながり", 月刊化学, 第64巻8号 24-28 (2009)

[学会発表] (計6件)

1. 平尾 強司、豊谷 仁男、岡 知路、所 仁志、海老塚 昇、平原 靖大、川口 建太郎、"Ge イメージングレーティングを用いた中間赤外線高分散分光器の分光性能評価", 分子分光研究会, 富山大学(富山県) 2009年5月16日
2. Ebizuka, N., Nakajima, K., Kodate, K., Ichikawa, T., Yamada, T., Kawabata, K., Hattori, T., Iye, M., Tokoro, H., Hirahara, Y., Sato, S., Hori, M. "Spectrographs and Gratings for the Subaru Telescope and for Plasma Diagnoses", International Symposium on "Application of Spectroscopy to Research and Development", 日本分光学会年次講演会、東京工業大学(東京都) 2009年11月17日
3. Tatamitani, Y., Hirao, T., Yonezu, T., Oka, T. N., Tokoro, H., Ebizuka, N., Hirahara, Y., Kawaguchi, K., "Emission Spectroscopy of Unstable Molecules in Discharge Plasma by Using Mid-IR High-Dispersion Echelle Spectrograph", 日本分光学会年次講演会、東京工業大学(東京都) 2009年11月18日
4. 平原 靖大、平尾 強司、豊谷仁男、米津 朋尚、岡 知路、海老塚 昇、川口 建太郎、所 仁志、"Ge イメージングレーティングを用いた中間赤外線高分散分光器の分光性能評価", 日本天文学会 2010年春季年会、広島大学(広島県) 2010年3月27日
5. Hirahara, Y., Hirao, T., Tatamitani, Y., Yonezu, T., Ebizuka, N., Kawaguchi, K.,

Tokoro, H., Oka, T. N., "Development of the mid-IR echelle high-dispersion spectrograph employing the germanium immersion grating", SPIE conference on Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III, Town & Country Resort and Convention Center (米国 サンディエゴ) 2010年6月30日

6. Kobayashi, N., Sarugaku, Y., Ikeda, Y., Kawakita, H., Enya K., Nakagawa, T., Kataza, H., Matsuhara H., Hirahara, Y., Tokoro, H., "Mid-IR High-resolution Echelle Spectrometer (MIRHES) for SPICA", SPIE conference on Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III, Town & Country Resort and Convention Center (米国 サンディエゴ) 2010年6月30日

[図書] (計1件)

山口 靖、平原 靖大、地球化学講座 第8巻：“地球化学分析法” (2010)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.eps.nagoya-u.ac.jp/system/member/hirahara.html/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平原 靖大 (HIRAHARA YASUHIRO)

名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授

研究者番号：30252224

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし