

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 4日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740307

研究課題名（和文） 火星大気観測用二次元分光器の基礎開発

研究課題名（英文） Development of the two-dimensional spectrograph for observation of Martian atmosphere

研究代表者

福原 哲哉（FUKUHARA TETSUYA）

北海道大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：70435808

研究成果の概要（和文）：本研究では、冷凍機が不要で小型軽量化が実現できる「非冷却ボロメータカメラ」に、透過型ゲルマニウムレンズよりも高い光量を得られる反射光学系を適用した「宇宙用赤外二次元分光器」の実現に向けた基礎開発を行った。反射光学系には鏡の枚数を最小限にして最大の光量を得るために表面を凹面加工した回折格子を採用し、ボロメータ検出器（平面）に焦点を結ばせる（フラットフィールドタイプ）こととし、汎用のナノ切削加工機を用いて回折格子の試作品（焦点距離 100mm、F1.4）を製作して面精度を評価した。結果、目標である 0.5 μ m 僅かに上回る 0.59 μ m であったが、これは加工用の刃先の損傷による傷であることが確認でき、汎用加工機によって安価に回折格子が製造できる見通しがついた。

研究成果の概要（英文）：We have started the development of the two-dimensional spectrograph for observation of Martian atmosphere. This spectrograph mounts an uncooled micro bolometer array (UMBA) which does not need a cryogenic systems and is small and light weight. In the present study, a diffraction grating of which the optics has fewer losses of the input radiance than germanium lens has been produced for the UMBA. It has made by a general-purpose processing machine and the surface tolerance has been evaluated. The result shows that the diffraction grating can be manufactured in low price.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：赤外分光、火星

1. 研究開始当初の背景

火星気象における水循環が注目されており、近年の探査機による観測は、火星の極冠が厚さ数 km の水氷から成り、その表層を数 m のドライアイスが覆っている構造であることや、高緯度帯の地下に大量の水を蓄えていることを示している。極冠や地中に蓄えられた水は、季節変動と共に大気中への放出や地表への再配置を繰り返し、1 年間の移動量は大気中の水蒸気総量と同程度に及ぶという指摘もある。これらの結果は、新たに以下の問題を提起している。

- ・火星における水の存在形態や大気中の水蒸気量はどのようにして決まるのか？
- ・大気中の水蒸気は傾圧波、ハドレー循環、局所的擾乱による輸送に伴い、火星気象にどのような役割を果たしているのか？
- ・ダストと水は大気中でどのような相互作用（ダストは氷晶雲の凝結核となっている可能性が指摘されている）を及ぼしあっているのか？

これらの問題を解決するには、探査機を火星の周回軌道上に投入し、大気と地表・極冠の間の水の出入りや水蒸気・雲の分布、ダストの分布、および二酸化炭素からなる大気温度場（とそれに伴う風速場）を水平スケール数十～千 km で同時に観測し、季節や地域による違いを調べる必要がある。米国の火星探査機 Mars Odyssey や欧州の Mars Express に搭載された赤外カメラは、 $9\mu\text{m}$ 帯や $2\mu\text{m}$ 帯の観測から大気中のダストや水蒸気の分布を捉え、米国の Mars Global Surveyor に搭載されたフーリエ分光計は二酸化炭素の $15\mu\text{m}$ 吸収帯の分光観測を行い、リトリーバル解析から鉛直一次元の大気温度構造を導出した。しかし、それぞれ独立に観測されたこれらのデータを用いて水循環に着目した解析研究を行うには限界があり、更に Mars Global Surveyor のフーリエ分光計は空間二次元情報を得る事ができないという致命的な制約がある。

このような状況を踏まえ、国内で検討が進められている火星探査計画「MELOS」には水蒸気やダストの分布観測と共に火星大気二次元分光観測が盛り込まれた。しかし $15\mu\text{m}$ 帯の空間二次元情報を得る観測装置の目処は立っておらず、2010 年代の打上げを実現するための早急な問題解決策が求められている。

申請者は、「ボロメータ検出器」に回折格子を用いた反射光学系を適用し、空間×波長を捉えるスペクトログラフ型の分光器を実現することでこれを解決できると考えている。

スペクトログラフ型の分光器は近赤外領域 ($1\text{--}5\mu\text{m}$) では既に宇宙用として実用化されており、Venus Express 探査機にも搭載されている。一方、ボロメータ検出器は非冷却の熱型素子を採用しているため小型・軽量化が可能で、日本の金星探査機「あかつき」搭載の中間赤外カメラとして実用化されている。当時は感度不足のために分光器としての開発が見送られたが、近年は感度が向上して素子数も 320×240 から 1024×768 まで増大している。ボロメータ検出器を用いた分光器の実用化に向けた条件がようやく整い、本研究を実施するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、冷凍機が不要で小型軽量化が実現できる「非冷却ボロメータカメラ」に、透過型ゲルマニウムレンズよりも高い光量を得られる反射光学系を適用した「宇宙用赤外二次元分光器」の実現に向けた基礎開発を行うことを目的とする。特に $15\mu\text{m}$ 帯に最適化した回折格子の安価な製造方法の実現を目指す。Mars Global Surveyor のフーリエ分光計は波数分解能 5cm^{-1} の観測データから大気温度の鉛直構造を 1/4 スケールハイト（約 2.5km ）間隔で導出しているのをこれを本研究の性能目標とし、 $\lambda/\Delta\lambda=150$ を回折格子の目標仕様とする。F 値をできる限り小さく抑え、かつ、回折格子をできる限り大きくすることで光量を稼ぐ。

3. 研究の方法

従来のボロメータカメラの光学系は殆どの場合、透過型の Ge レンズが採用され、透過波長帯は $8\text{--}12\mu\text{m}$ に制限されている。本研究ではボロメータ検出器の感応域 ($5\text{--}17\mu\text{m}$) を最大限活用するため、反射型の光学系を設計した。設計には CODE-V を用いた。図 1 に設計の結果を示す。ここで 1 は赤外光入力

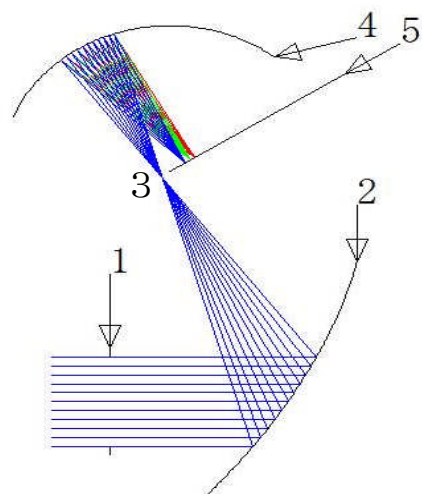


図 1 反射光学系構成図

面、2は放物面、3は焦点面（スリット挿入面）、4は回折格子、5は検出器面である。ここでの特徴は、回折格子の形状を凹面型にすることで光路を単純化し（反射の回数を最小限にとどめ）、光量の損失を軽減していることである。一方で、10 μm 帯の分光における回折格子の面精度は0.5 μm 以下を目指さなくてはならない。また、回折格子は、ポロメータ検出器（平面）に焦点を結ばせる（フラットフィールドタイプ）を実現する必要がある。

一般に、回折格子の溝を掘る加工手法は、①ルーリングエンジンと呼ばれる加工機で直接溝を掘るルールド方式、②鏡面に印紙を貼って感光させるホログラフィック方式（フォトレジスト法）が挙げられる。前者は平面に直線的な溝を掘る事に優れているが、検出器表面（平面）に焦点を結ぶために凹面鏡に曲線の溝を掘ることができないこと、後者も曲面に印紙を密着させて感光させることが困難である。更に、回折格子は主に可視～近赤外領域の製品が普及している一方、15 μm 帯では用途が限られて民生品の種類が限られているため、これらのうちいずれかの手法を改善して凹面の回折格子を製作していくとコストが大幅に増大してしまい、現実的ではなくなってしまう。そこで汎用のナノ切削加工機を用いて機械的な溝堀加工による安価な回折格子の製作を検討した。その結果、

（株）ジェイテクト製の加工機で試作品を製作できる見込みを得た（表1参照）。この加工機は供試体取り付け治具およびスライドテーブルの移動量の制約によって、製作できる回折格子の最大径は $\phi 75\text{mm}$ であることから、焦点距離100mm、F1.4の回折格子を製作することとした。

表1 AHN15-3D仕様

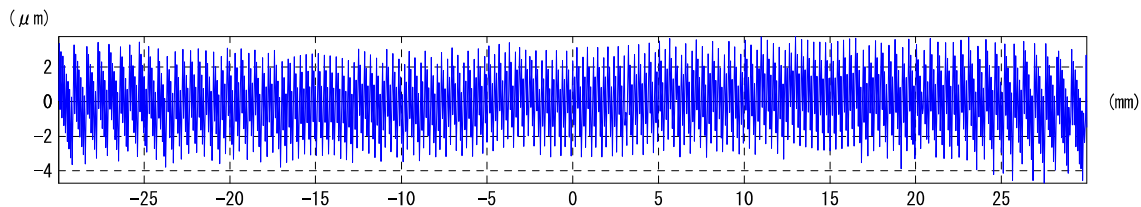
最大加工径	$\phi 150\text{mm}$
スライドテーブル移動距離	X:400 Y:100 Z:250mm
B軸テーブル回転角度	360°
主軸回転速度	50~4,500min ⁻¹
早送り速度(XYZ軸)	1000mm/分
切削送り速度(XYZ軸)	1000mm/分
最小設定単位(XYZ軸)	1nm
最小設定単位(B軸)	0.000001°

4. 研究成果

(1) 回折格子の面精度評価

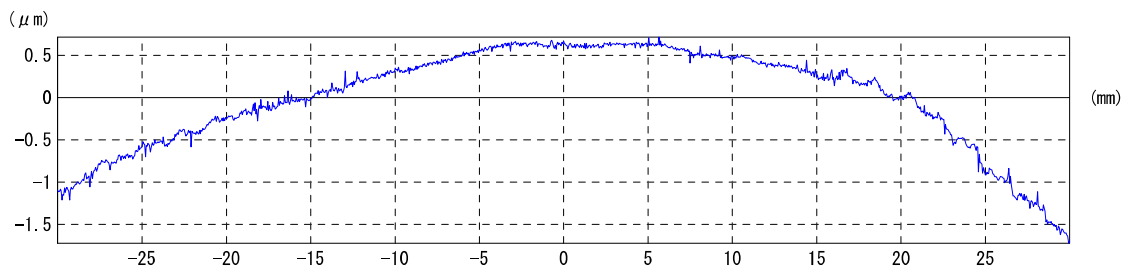
製作したフラットフィールドタイプの反射型凹面回折格子（焦点距離100mm、F1.4）の検査結果を図2に示す。ここで、X軸は溝に対して垂直方向、Y軸は溝に対して平行方向である。X軸方向は溝の深さを反映しているので、Y軸の面精度を見ると、RMS=0.59 μm であり、目標である0.5 μm 以下をわずかに上回った。原因を調査すると以下の2

(a) X軸



処理対象ファイル名	D:\nh-3data¥断面データ¥赤外カメラ用回折格子¥赤外カメラ用回折格子X.nh2				
表示オフセット [μm]	0.000	Z軸倍率	1000	データ数	1201
最大値 [μm]	3.774	最小値 [μm]	-4.716	平均値 [μm]	-0.002
RMS [μm]	2.06516				

(b) Y軸



処理対象ファイル名	D:\nh-3data¥断面データ¥赤外カメラ用回折格子¥赤外カメラ用回折格子Y.nh2				
表示オフセット [μm]	0.000	Z軸倍率	5000	データ数	1201
最大値 [μm]	0.715	最小値 [μm]	-1.721	平均値 [μm]	-0.003
RMS [μm]	0.59215				

図2 回折格子評価結果

点が判明した。①今回設計した凹面は X 軸と Y 軸の曲率が異なるトロイダル面であり、溝を掘るにはバイト（刃）を平行移動させる必要があった。かつ、焦点距離 100mm を確保しつつ、より径が大きい鏡を実現するには、凹面の端部と刃先が干渉しないよう（逃げ角を確保するため）刃先を鋭利（従来は 70-80° であるものを 35° 以下）にする必要があった。このバイトを特注したものの、刃先角度が小さいために刃先稜線の剛性が落ちて刃先が欠けてしまい、その結果、溝に傷線が入って面精度が落ちてしまった。②バイトを平行移動させると曲率の異なる凹面の中心から端にかけての主分力と背分力が変化し、面精度を悪化させてしまった。②を改善するには加工機そのものと治具を改修する必要があるために費用が大掛かりとなってしまうが、①の刃先の改善が実現すれば面精度の向上が見込まれる。そこで刃先の剛性を保ちつつ（刃先を鋭角にせず）逃げ角を確保するため、スクイ面をネガティブにした形状の刃先を再設計して製造し、再度回折格子の加工を行うこととした。現在再加工の途中であるが、刃先の損傷を免れれば面精度 0.5 μ m 以下の回折格子の製作は容易であり、汎用加工機による安価な凹面回折格子の製造に見通しを立てることができた。

(2) 今後の展開

回折格子の再加工後には実際の撮像による光学系の性能評価を行っていく。民生品ボロメータカメラ（素子数 640x480）と回折格子を含む光学系を光学ベンチ上で取り付け、分光後の画像中の輝度値から感度を評価する。ターゲットには陽極酸化処理が施された放射率 \sim 0.95 のアルミ黒体板（あかつき搭載中間赤外カメラの開発資産）を用いる。試算では、温度 300K の黒体撮像時に温度分解能 \sim 1K 程度が見込まれるが、光学系自身の熱放射の擾乱成分の影響により期待された結果を得るのは難しい場合には、光学系を断熱材で覆うなどの対策を施し、更に回折格子に熱電対を取り付けて温度をモニタしながら撮像を繰り返すことで最大の性能が得られる撮像環境を探る。この結果を踏まえて光学系に必要な改良を加えていく。

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 1 件）

持田篤人 次期惑星探査用中間赤外分光カメラの光学設計, 2010 年度 立教大学理学部物理学科 卒業論文

〔学会発表〕（計 1 件）

福原哲哉, 田口真, 今村剛, 次期火星探査機搭載中間赤外カメラ, 第 33 回太陽系科学シンポジウム, JAXA 宇宙科学研究本部, 2011, 11.

〔図書〕（計 0 件）

〔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
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福原 哲哉 (FUKUHARA TETSUYA)
北海道大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号：70435808

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし