

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：62616

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13468

研究課題名(和文) 太陽系外惑星大気特性の解明を目指した新しい高分散分光器の開発

研究課題名(英文) Development of a new high-dispersion spectrometer for unveiling exoplanet atmosphere

研究代表者

小谷 隆行 (Kotani, Takayuki)

国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室・助教

研究者番号：40554291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：将来の地球型惑星の高分散分光観測による大気成分の詳細観測のためには、分光器の透過率を現在の数倍以上に高めることとある程度の空間分解能が必要である。本研究では天文応用が限られていたフーリエ分光法を用いてこれらの実現を目指した。フーリエ分光を行う階段状の高精度鏡を製作し、可視光で波長分解能最大30000を実現する段数30段のアルミ階段鏡の製作に成功した。また波長分解能100000を目指した200段ミラーの設計も行った。さらに、明るい恒星光を除去するコロナグラフとフーリエ分光器を組み合わせた室内実証実験も行った。これらの成果は、将来の高コントラスト分光観測の実現に向けた重要な一歩である。

研究成果の概要(英文)：For future direct high-resolution spectroscopic observation to unveil atmosphere composition of Earth-like planets, it is required to increase efficiency of a spectrometer at least a few times, as well as a certain amount of spatial resolution. In this study, we investigated Fourier spectrometer as a solution to these problems. We developed a monolithic, aluminum step mirror to achieve spectrometer without any active mechanism. Spectral resolution up to 30000 requires 30 steps, 204um depth, 10x10mm dimension and our newly developed mirror almost satisfies our specifications. We also designed a step mirror to achieve spectral resolution up to 100000 for spectroscopic observation of the Earth-like planets. Furthermore, we carried out laboratory demonstration of high-contrast spectroscopic observation by combining the Fourier spectrometer with a coronagraphic instrument for eliminating glaring light from a parent star to direct observation of the Earth-like planets.

研究分野：太陽系外惑星

キーワード：太陽系外惑星 高分散

### 1. 研究開始当初の背景

系外惑星大気中の分子種の検出は、惑星の性質を知るための最も基本的なキャラクター化であり、系外惑星分野の究極のゴールである地球型惑星の生命探査でも、水や酸素の検出が最も重要なターゲットとなっている。これまで、ホットジュピターやスーパーアースでの分子検出は、主にトランジット系における透過光や昼側輻射光の低分散分光で行われてきた。しかし、低分散分光ではスペクトルモデルを作成しないと分子種の情報は得られない上に、系統誤差の影響が大きく、これまで検出したとされる分子が後の解析で否定される事態が生じている。これに対し、近年、高分散分光(波長分解能  $R \sim 100,000$ )により、直接、分子線の波長パターンを相互相関解析を介して検出する手法が成功し、続々と一酸化炭素や水などの分子が検出されるようになった(図1)。また、高分散分光の手法を直接撮像天体に応用することにも成功を収め、高分散分光による分子種検出は一躍、脚光を浴びることとなった。さらに、本手法で、次世代の大型望遠鏡を用い地球型惑星の水や酸素を検出出来る可能性が示されている。

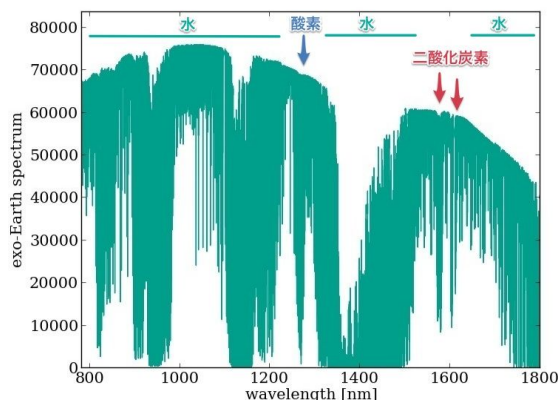


図1：地球を 5pc から観測した場合の理論的な高分散 ( $R=50,000$ ) 反射スペクトル。

### 2. 研究の目的

しかし、この究極の目標のためには、高分散分光装置における二つのブレークスルーが求められている。一つが、現在数%程度しかないスループットを数十%までに高めること、もう一つが、直接撮像天体に応用するために高分散のまま、ある程度の空間分解をおこなえることの二点である。本提案では、これまで天文応用が限られていたフーリエ分光法を用いて、この二つの要求を追求する。フーリエ分光器は、通常のプリズムやグレーティングを用いた分光器よりも、効率と波長分解能を同時に高めることが本質的には可能であるが、高波長分解能を達成しようとする場合は、長時間にわたり遅延線の位置を極めて高い精度でコントロールする必要があり、安定性を保つことが難しい。また、高波

長分解能と空間情報を同時に得ることは、フーリエ分光器に限らずどんな分光器でも難しい。我々は、これらの問題を解決して将来の系外惑星直接検出と生命の兆候検出を可能にする、全く新しいフーリエ分光器を考案した。本研究では、この新しい分光器のプロトタイプを製作し、実験室での実証実験を行うことを目指した。

### 3. 研究の方法

本研究の目標は、高分散・高効率かつ空間分解能を持つ、時間定常なフーリエ分光器を実証することである。従来のフーリエ分光で必要な光路長スキャンミラーを、2枚の平面鏡を階段状に配置したものに置き換え、波長分解能  $R=1000$  程度の時間定常なフーリエ分光が可能であることを既の実証している。さらに、太陽光を望遠鏡と光ファイバーを用いて光学系に導入し、太陽光スペクトルを取得した。観測したスペクトルは理論スペクトルと良く一致しており、H アルファ線や地球大気中の酸素・水の吸収線検出に成功している。次のステップは、より高い波長分解能を持たせることと、空間分解能を持たせることであるが、以下述べる手法により、これらを実現する。

#### 1) 一体化階段ミラーによる高分散化

フーリエ分光器の波長分解能は、スキャンできる最大光路長に比例している。高分散化に必要な長い光路長を確保するには、光路長スキャン用階段ミラーの多段化が必須である。これまでは2つのミラーをわずかにずらして並べることで対応していたが、この手法は多段化に限界があり、高分散化に必要な10段以上には対応できない。そのため本研究では、一つのアルミブロックあるいはガラスを超精密加工機により階段状に加工することで、約10段以上の階段状ミラーを実現する(図2)。階段は平行平面であり、段差の精度は10ミクロン程度あれば良く、近年の精密加工技術の進歩により、このような加工は十分に可能である。一体加工とすることで、安定性の向上にも寄与する。

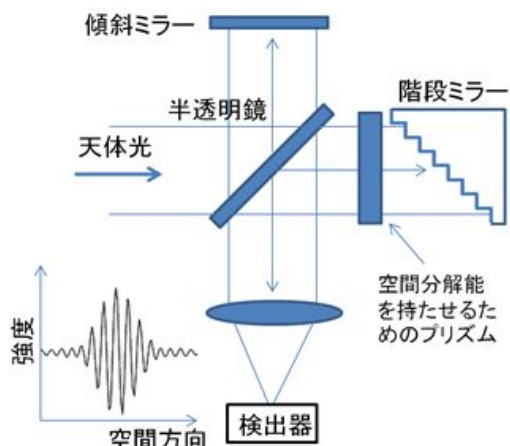


図2：フーリエ分光部分の全体図

## 2) 光ファイバーと像反転光学系による空間分解能の付与

時間定常なフーリエ分光器では、時間方向のスキャンを行わない代わりに、検出器のほぼ全面を用いて干渉縞を取得するため、そのままでは天体の空間情報を得ることができない。本研究では、2つの手法を組み合わせることにより、2次元の空間分解能を持つ分光器を実現する。まず、天体の光をファイバーアレイにより分割（例えば3x3のアレイ）し、出口側のファイバーの位置を並び替える。次に、フーリエ分光光学系内部に、像を反転させる光学系を挿入することで、天体の位置に応じた向きに干渉縞が生じさせる。この像反転光学系は、干渉光学系の腕の片側にプリズムを1つ挿入するだけで実現できる。これにより、スペクトルと空間情報を分離できるため、空間情報を保持しつつ高分散分光が可能になる。

## 4. 研究成果

高い波長分解能を得るには、フーリエ分光では大きな光路長の変化が必要であるが、本研究では可動部を持たない特殊な階段状のミラーを用いることでこれを実現する。階段ミラー製作に必要なパラメーター検討により、可視光（波長 633nm）で波長分解能最大 30000 を実現するには、階段の段数 30 段、階段高さ 204 $\mu\text{m}$ 、大きさ約 10mmx10mm という最適解を得ることができた（図3）。また鏡の基盤素材について検討を行い、ガラス製とアルミ切削鏡の2つを検討した結果、ガラス製の場合は階段の幅や深さが非常に小さいことにより製作が難しく、一体加工が可能なアルミ切削鏡が良いとの結論を得た。階段ミラー製作の結果、階段深さ、幅についてはほぼ仕様を満たすミラーの製作に成功した（図4）。一方、予想されていたことではあるが、面粗さについては 16nm Ra 程度と、ガラス鏡に比べるとかなり大きいことがわかった（図5、6）。めっきや研磨加工を施すことにより、面粗さは少し改善する可能性がある。また鏡面の一部に筋状のパターンが見られるが、面粗さと共に分光測定への影響を見積もる必要がある。

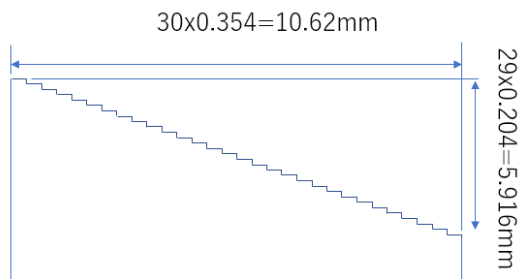


図3：階段ミラーの概略図

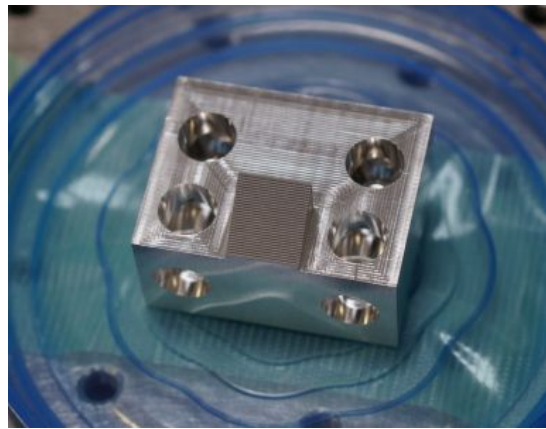


図4：製作した階段ミラー

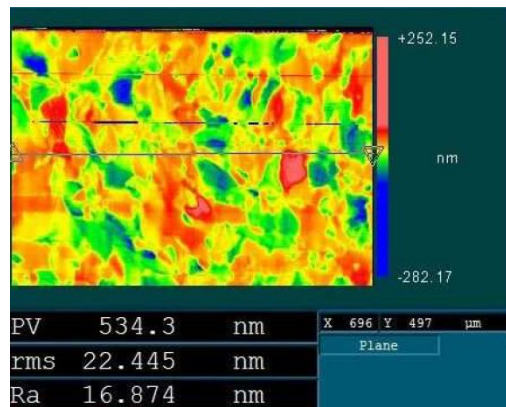


図5：製作した階段ミラー(1段目の拡大図)

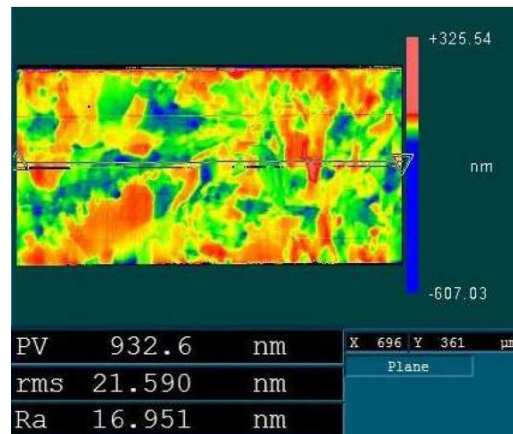


図6：製作した階段ミラー(30段目の拡大図)

我々はまた、将来の地球型惑星観測を目指して、波長分解能  $R \sim 100000$  の分光観測のための階段ミラー設計を行った。地球型惑星のような微弱な光を観測する上で、高効率な設計をすることは非常に重要である。しかしながら、シンプルな階段ミラー（階段高さがすべての段で等しい設計）では、光の利用効率が低下してしまうという問題があることが明らかとなった。これを解決するために、階段高さを段ごとに異なるように設計した「不平等階段ミラー」を提案した（図7）。図7の階段ミラーは、段数 200 段とすることで、波長 1.2 $\mu\text{m}$  において波長分解能  $R=100000$  と

なるように設計されている。このような階段ミラーが実現できれば、望遠鏡の光利用効率が理論上は、64%から98%に向上することを示した。しかしながら、階段ミラーの望遠鏡搭載に向けて、さらなる修正設計が必要であることが明らかとなった。また、階段の微細構造から生じる回折効果などが、分光観測性能にどのような影響を及ぼすかを詳しく調査する必要がある。より現実的な状況下での階段ミラー設計、およびその性能評価は、今後の重要な課題の一つである。

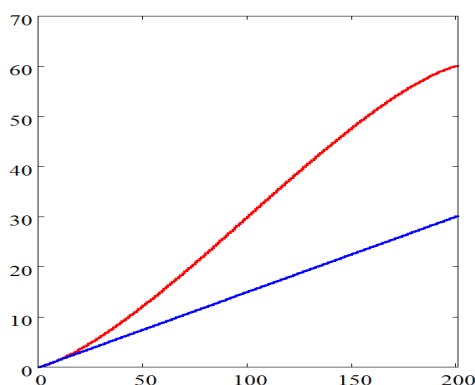


図7：設計した階段ミラー（波長分解能 $R=100000$ ）。青はシンプルな等高階段設計、赤は高効率観測を目指した不等高階段ミラー。

地球型惑星観測実現のためには、すぐ近傍の明るい主星（恒星）を除去するコロナグラフ装置が重要な役割を果たす。我々は、コロナグラフ装置とフーリエ分光器を組み合わせることで、惑星観測性能が向上することを、室内実験により実証した（図8）。階段ミラーとして従来の2段ミラー方式を用い、恒星モデル光と惑星モデル光として異なる波長のレーザー光を使用した。図8の上の画像は、2段ミラーで得られたインターフェログラムであり、コロナグラフの導入により恒星モデル光が強力に除去されていることを示している。下のグラフは、復元したスペクトルである。コロナグラフの効果がない場合、恒星モデル光のスペクトル（波長532nm）のみが観測されるが、コロナグラフの効果がある場合は、恒星モデル光が3桁ほど除去され、惑星モデル光のスペクトル（波長670nm）が観測できていることが分かる。このように、コロナグラフ装置とフーリエ分光器を組み合わせることにより、分光観測の高コントラスト化が実現できることを、実験的に実証した。

一方、空間分解能力については、実証実験には成功していないが、Doveプリズムと呼ばれる像回転光学系を用いることで、異なる空間位置による干渉縞を分離できることは、数値的には確認している。実際の光学系での確認は、今後の課題である。

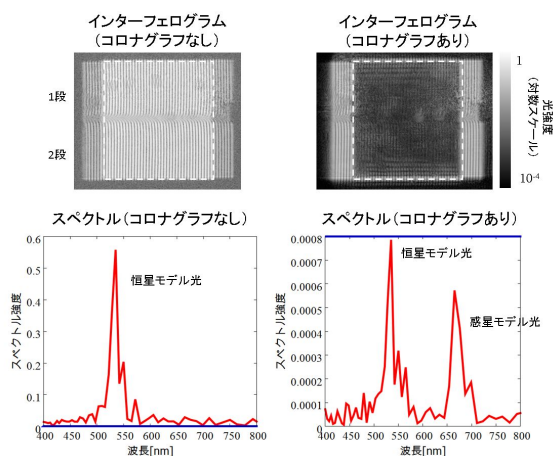


図8：コロナグラフ装置とフーリエ分光器を組み合わせた高コントラスト分光観測の実証実験。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- [1] 高橋瑞樹、村上尚史、小谷隆行、河原創  
「太陽系外惑星観測を目指した高コントラスト静的フーリエ変換分光器の基礎実験」  
第52回応用物理学学会北海道支部学術講演会C-15(2017年1月7日、北見工業大学、北海道、北見市)
- [2] 高橋瑞樹、村上尚史、河原創、小谷隆行、松尾太郎、馬場直志  
「系外惑星の直接視線速度観測に向けた分光コロナグラフの性能評価」  
日本天文学会2015年秋季年会 P211b(2015年9月10日、甲南大学、兵庫県、神戸市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小谷隆行 (KOTANI, Takayuki)  
国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室・助教  
研究者番号：40554291

### (2) 連携研究者

河原創 (KAWAHARA, Hajime)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：90649758

### (3) 連携研究者

村上尚史 (MURAKAMI, Naoshi)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：80450188