

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25年 4月16日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740320

研究課題名（和文） 超高分散分光システム広帯域化のための基礎技術開発

研究課題名（英文） Development of the external cavity for IR heterodyne spectroscopy

研究代表者

中川 広務（NAKAGAWA HIROMU）

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：30463772

研究成果の概要（和文）：

本研究は、火星メタンの起源解明を目的として、赤外長高分散分光装置の広帯域化技術の確立を目指し開発を進めてきた。Gratingを用いた外部共振器を開発し、発振波長域を20cm⁻¹に広帯域化することに成功した。これは火星メタン・H₂O₂観測要求に十分な広帯域化性能であり、従来の液体窒素タイプの20倍以上の改善を果たした。得られた発振スペクトルは、サイドモードがよく抑えられており、その波長安定度においても赤外ヘテロ分光器搭載用に最適化された。

研究成果の概要（英文）：

We develop the external-cavity system at mid-infrared wavelengths as a local oscillator in a heterodyne receiver for observations of Martian atmospheric methane and related species. Tuneability over 20cm⁻¹ was demonstrated using a Littrow-grating setup, and which allows for good coverage of molecular transitions of methane and hydrogen peroxide. We show that its spectral stability and side mode suppression are excellent for IR heterodyne measurements.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	200,000	60,000	260,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星上層大気

1. 研究開始当初の背景

(1) 火星は地球と似た過程で形成された兄弟星でありながらその環境は大きく異なり、現在は乾燥・寒冷、生命活動・地殻活動のない「死した惑星」と従来見なされていた。しかしながら、近年の探査機・地上観測から火星にメタンの存在が示唆された [Formisano

et al., 2004; Mumma et al., 2009]。これは火星における生命・地殻活動の証拠となりうる非常に興味深い微量成分である。火星メタンの起源、生成・消失メカニズムが注目されており、理論・観測の両面から研究が進められている [Lefvre et al., 2009; Sonnabend et al., 2009]。こうした微量成分大気の観測は、

火星の生命・地殻活動の理解につながるとともに、より普遍的な地球型惑星環境・惑星大気進化への理解、例えば生命を維持する惑星環境の形成条件の解明につながる研究である。

(2) 波長 7~11 μm の中間赤外域からサブミリ波域にかけては、多くの分子振動・回転バンドが重なる。従って、これらの分子吸収スペクトルの位置・ライン幅・強度比から、各成分の存在量・速度・温度場・高度分布の導出が可能となる。このリモートセンシングの特徴は、Mars Express (MEX) 探査機等による局所観測と比較して、空間分布を捉えるイメージング観測である点と連続的に捉えるモニタリング観測である点である。メタン等の微量成分大気の時空間変動はその生成・消滅メカニズムを理解するのに決定的に重要なパラメータであるため、リモートセンシングは重要な意味をもつ。特に中間赤外域のメタン吸収線は線強度が強く、地球大気の吸収が小さいスペクトルの「窓」帯であるため、唯一地上から観測することが可能である。

(3) Mumma et al. [Science, 323, 1041, 2009] は、IRTF/CSHELL を用いて火星メタンの赤外分光観測を行い、その存在量の季節変化を捉えた。しかし観測は限定的で、生成・消滅に絡む重要分子との関係性が不明なため、メタン起源の解明に至っていない。この主たる理由は、既存装置では十分な高分散能力と広帯域能力を兼ね備えた観測が困難な点が挙げられる。微量成分大気検出のためには、強力な地球大気吸収スペクトルとの分離・火星大気主成分吸収スペクトルとの分離、そしてシャープな吸収線の検出が不可欠であるが、現存する最高の波長分解能測器 (IRTF/CSHELL の分解能 40,000~0.08 cm^{-1}) ですら、メタン吸収線幅 (0.004 cm^{-1}) を分解することができていない他、高分散観測は一般的に狭帯域波長観測のため H2O2 等関連分子との同時観測が達成困難という点が挙げられる。火星メタン等微量成分の解明には、これまでにない超高分散分光測器による連続観測が本質的である。しかしそれだけでは不十分で、広帯域化を達成し多波長同時観測を実現することが重要である。それには既存測器では不十分で、自前で観測装置を用意する必要がある。

2. 研究の目的

メタンの起源の解明には、多角的な観測が重要であり、新たに高分散かつ広帯域の装置が必要である。レーザーヘテロダイン分光技術による高分散分光に実績があり、これまで開発してきた赤外超高分散分光装置を広帯域化する技術を獲得することで、火星メタン等を解明するための重要な鍵となる手段を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 本学で開発を進めてきた赤外レーザーヘテロダイン分光装置を流用し、広帯域化するための Grating を含めた Cavity 形成部・レーザー波長安定化駆動部を開発することで、火星メタン等の解明に重要な鍵となる観測手段を確立するため、以下を推進する。

(2) 本開発で既にも実績のあるケルン大学へ中期滞在し、我々の量子カスケードレーザを持ち込む事で仕様検討と光学設計に加え、装置に必要な物品の調達と、機構設計・試作機の製作を実施する。単一発振モードへの移行方法についても検討を行い、フィードバック手法の最適化を図る。

(3) 波長安定化システムを開発するため、ガスセル及び Diplexer の製作を行い、観測に必要な波長安定度を達成する。

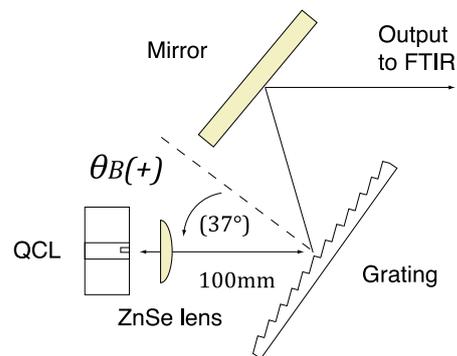
(4) 開発された外部共振器を用いて性能評価、特に発振波長域の広帯域化が達成できたかを検証する。同時に、別途開発を推進する赤外レーザーヘテロダイン分光器に搭載可能なブレードボードモデルへ小型化を進める。

(5) 国内観測拠点において試験観測を行い、装置の総合評価を行うとともに、火星観測を実現する。

(6) 相補的に赤外・サブミリ波観測を継続実施し、火星メタン解明に貢献する。

4. 研究成果

(1) ケルン大学 G. Sonnabend, D. Stupar らと共同で仕様検討・光学設計を実施し、Littrow-Grating によるフィードバック方式が採用された (図 1)。単一発振モードへの移行手法も検討がなされ、レーザ窓材等光学系の配置を工夫することで余計な外部フィードバックを回避する方法が検討された。



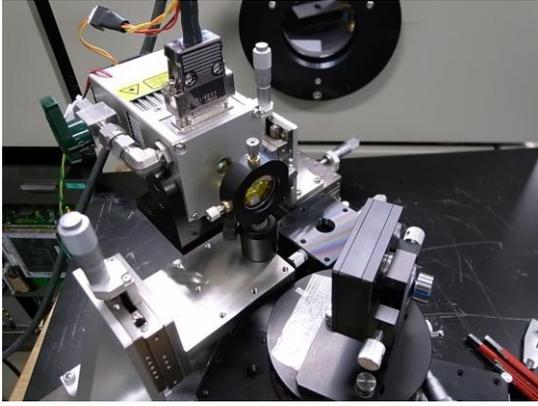


図 1. Grating を含めた Cavity 形成のための外部共振器セットアップ概念図（上）と外観図（下）。

(2) 波長安定化システムにおいて、ガスセルを用いた方式が採用された。設計されたガスセルはケルン大学・東北大学内で独自に製作を進め（図 2）、地球オゾン試験観測を行う事で性能評価がなされた。その結果、ガスセル吸収線（図 3）の位置をフィードバックすることで、20MHz 以下の波長安定度を達成することに成功した（図 4）。これは達成目標である火星メタン・H2O2 観測に十分な波長分解能であり、ガスセル内圧力を最適化することで更なる安定化が見込める。また、本装置を搭載する赤外ヘテロダイン分光器の開発が別経費で推進され、ノイズレベルなど火星メタン観測等に十分な性能に達し初号機完成となった（図 5）。

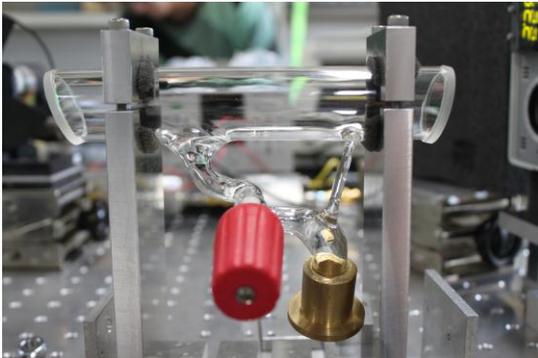


図 2. ガスセル外観図。

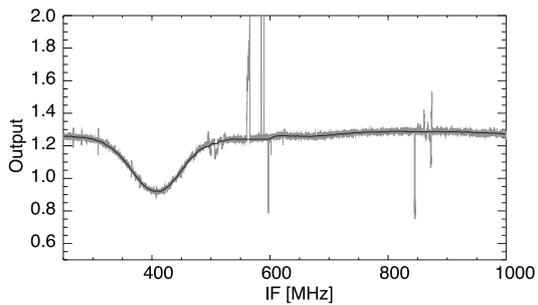


図 3. 参照ガスセル吸収スペクトル例。

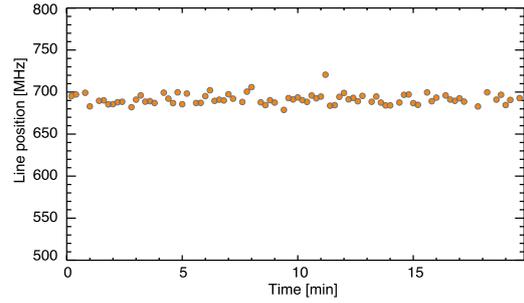


図 4. 参照ガスセルフィードバック時の観測された地球オゾン吸収線位置の時間変動。

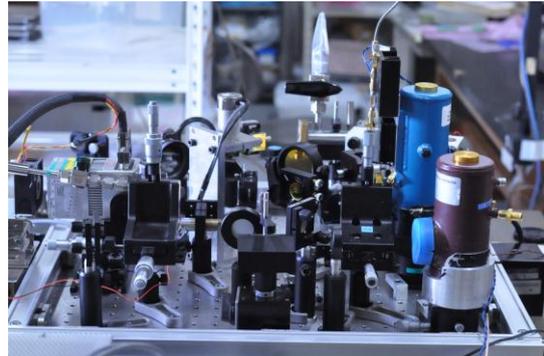


図 5. 赤外レーザヘテロダイン分光器外観。

(3) 単一発振モードへの移行手法は、国立環境研究所での評価試験を通じて定量的に評価され、Grating 角度による観測波長調整可能なシステムに構築された。これまでの検討を活かし、Grating 鉛直・垂直角度ならびに光学系の調整によりフィードバック効率を最適化し単一モード化を達成した。結果、外部共振器距離と Grating 角度を変化させることで、発振波長域 20cm^{-1} に渡り大きく波長を変化させることに成功した（図 6）。これは、火星メタン・H2O2 観測要求には十分な広帯域化性能であり、従来の液体窒素タイプの 20 倍以上の改善がなされたことになる。得られた発振スペクトルは、サイドモードがよく抑えられており（図 7）、赤外ヘテロダイン分光器の局発光に最適である。これは、主に Anti-reflection (AR) コーティングを施さなかったため外部共振器による高い波長選択制が得られているためと考えられる。非常に狭い線幅を実現したまま広帯域化できた意義は大きく、レーザ分光・リモート観測技術の高波長分解化に大きく貢献することが期待できる。観測要求を満たす装置が分光器に搭載可能なサイズ（ $100\text{mm} \times 200\text{mm}$ ）へ小型化できたことから、観測準備は整った。

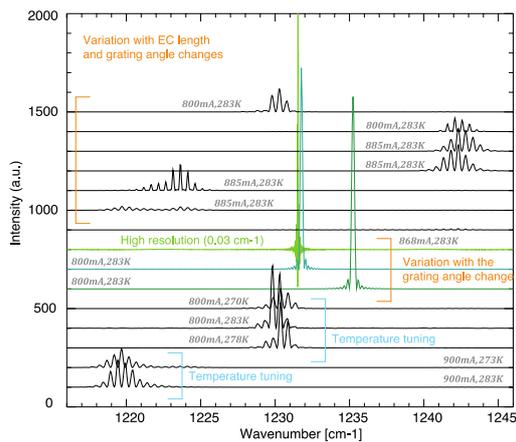


図 6. 様々な条件下における発振スペクトル。20cm⁻¹以上の広帯域化に成功した。

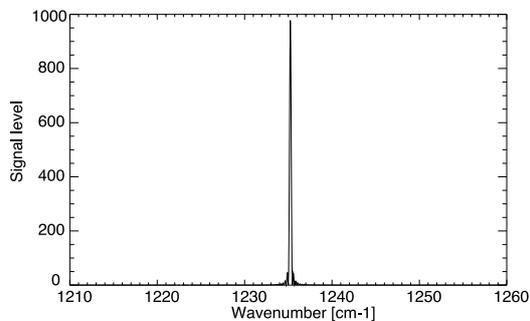


図 7. 単一発振モードスペクトル例。

(4) 当初は、福島飯館における東北大 40cm 望遠鏡・北海道大学名寄観測所により本装置の確立を目指す計画だったが、東日本大震災により福島飯館における中長期作業が困難となったことから、現在はハワイ大との協力により飯館望遠鏡をハワイ・ハレアカラ山頂へ移設、ハワイ山頂での惑星観測を目指し計画を推進している。赤外観測に最適なハワイ山頂での観測に注力望遠鏡し実施を目指したが、移設計画は本年度研究計画申請時の予定よりも遅れ、平成 25 年度 11 月移設完了を目指して進められている。本申請期間中に外部共振器を用いた本格的な観測に至ることはできなかったが、ハワイ山頂における観測を今年度秋には開始し、火星メタン等解明に貢献する予定である。

(5) 本研究の成果は、当該分野学術会議にて成果報告がなされてきた。その際、惑星観測への応用について関連研究者と議論を重ね、今年度の本格運用立案に役立てられた。加えて、本研究で開発を進めてきた波長安定化システムを用いたケルングループ・赤外ヘテロダイナミクス分光器の観測データを用いて金星風

速変動研究を行い、その波長安定度の高さから金星中間圏における風速場の時間変動を 10m/s の精度で捉える事に成功し、数値実験との比較からそれらの擾乱が下層で発生した小・中規模重力波が大きく影響を及ぼしている事を世界で初めて突き止めた。成果は、専門誌 Icarus にて公表された [Nakagawa et al., 2013]。

(6) 加えて、相補的なサブミリ・赤外観測を実施・検討してきた。すばる望遠鏡での火星観測を 2012 年 1 月・4 月に実施、大型サブミリ波計画 ALMA への火星観測プロポーザルを提出した。後者は残念ながら不採択となったが、すばる望遠鏡による火星観測は完遂し、北半球春の HD0/H2O 緯度分布の導出に成功、夏の季節に極冠が昇華することで HD0 が増大する様子を初めて捉えるなど、火星大気進化解明に大きく貢献している。火星メタン等重要微量成分のデータ解析は継続推進予定である。ALMA ワークショップの運用も引き続き行い、今年度実施される ALMA 金星観測の実施、次年度火星観測好機のプロポーザル提出への準備を進める。

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)

① Nakagawa, H., N. Hoshino, M. Sornig, Y. Kasaba, G. Sonnabend, D. Stupar, S. Aoki, and I. Murata, Comparison of general circulation model atmospheric wave simulations with wind observations of venusian mesosphere, Icarus, doi:10.1016/j.icarus.2013.02.029, 査読有, 2013 年, 印刷中。

[学会発表] (計 9 件)

① 中川広務, 青木翔平, 笠羽康正, 村田功, 赤外レーザヘテロダイナミクス分光器広帯域化のための外部共振器開発, 第 27 回大気圏シンポジウム, 2013 年 2 月 28 日, 宇宙科学研究所。

② Nakagawa, H., S. Aoki, Y. Kasaba, I. Murata, External cavity for QCL installed in IR Heterodyne Spectroscopy, Symposium Planetary Science 2013, 2013 年 2 月 20 日, 東北大学。

③ Nakagawa, H., S. Aoki, M. Kuroda, Y. Kasaba, I. Murata, G. Sonnabend, S. Okano, Mid-Infrared Laser Heterodyne Instrument (MILAH) for dedicated telescope, PLANETS, at the top of the Mt. Haleakala, Hawaii, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, 2012 年 8 月 13 日, リゾートワールドコンベンションセンター, シンガポール (招待講演)。

- ④ 中川広務, 青木翔平, 黒田壮大, 笠羽康正, 村田功, G. Sonnabend, 岡野章一, 超高分解能中間赤外ヘテロダイン分光装置の開発現状, 大気圏シンポジウム, 2012年3月2日, 宇宙科学研究所.
- ⑤ 中川広務, 青木翔平, 黒田壮大, 笠羽康正, 村田功, 岡野章一, High-resolution for planetary atmospheres, 宇宙科学シンポジウム, 2012年1月4日, 宇宙科学研究所.
- ⑥ 中川広務, 青木翔平, 黒田壮大, 笠羽康正, 村田功, 岡野章一, 中間赤外域における超高分解能分光装置レーザヘテロダイン分光, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2011年11月4日, 神戸大学.
- ⑦ Nakagawa, H., S. Aoki, M. Kuroda, Y. Kasaba, I. Murata, S. Okano, Mid-infrared Heterodyne Spectroscopy Dedicated to Observation of Planet at Haleakala, Hawaii, EPSC-DPS Joint Meeting 2012, 2011年10月5日, Nantes, France.
- ⑧ 中川広務, 青木翔平, 黒田壮大, 笠羽康正, 村田功, 岡野章一, Heterodyne infrared spectroscopy for high-spectral resolution observation of planetary atmosphere, JPGU 2012, 2011年5月25日, 東京.
- ⑨ Nakagawa, H., Y. Kasaba, S. Aoki, I. Murata, S. Okano, H. Maezawa, H. Sagawa, Y. Kasai, Search for volcanic or crustal gas in the recent Martian atmosphere by ground-based observation, COSPAR 2010 General Meeting, 2010年7月22日, Bremen, Germany.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 広務 (NAKAGAWA HIROMU)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 30463772