

# 超高分解能中間赤外ヘテロダイナミック分光装置の開発現状

中川広務 (東北大理)、青木翔平 (東北大理)、笠羽康正 (東北大理)、村田功 (東北大理)、Guido Sonnabend (ケルン大)、黒田壮大 (東北大理)、岡野章一 (東北大理)

## 概要

本発表では、新たに開発が進められてきた超高分解能中間赤外ヘテロダイナミック分光装置 (MILAH) の開発フェーズが無事に終了し、要求精度を達成することができたので、現況性能についてご報告する。本装置は  $7\text{--}12\ \mu\text{m}$  の波長域を波長分解能  $10^{7-8}$ 、帯域幅  $1\text{GHz}$  で取得することが可能な装置である。これまでの液体窒素タイプに代わって、常温タイプの量子カスケードレーザを新たに導入することで波長可変域を格段に広げ ( $5\text{cm}^{-1}$ )、様々な分子種の観測を可能にした。さらに我々の実験では、外部共振器を組み合わせる事で  $20\text{cm}^{-1}$  という非常に広い波長域をカバーすることが可能な EC-QCL の開発も進めている他、高出力の小型  $\text{CO}_2$  ガスレーザも選択可能なシステムとなっている。惑星・天体観測に必須の長時間積分は、局発光であるレーザ発振波長をガスセルフィードバックにより安定化させることで実現可能となり、 $6 \times 10^7$  という圧倒的な波長分解能を達成している。また、これまで広く用いられてきた音響素子分光器や巨大なフィルタバンク型分光器を最新の小型デジタル FFT 分光器に組み替えることで、高周波数分解能 ( $64\text{kHz}:16384$  チャンネル)、大ダイナミックレンジ、かつ利便性・安定性の高いシステムに改良された。感度も、 $10\ \mu\text{m}$  帯でシステム雑音温度  $3000\text{K}$  を達成し、観測対象の要求精度を十分に満たすレベルに達した。本装置を現在建設が進められている PLANETS 望遠鏡 (東北大、ハワイ大、その他国際コンソーシアムが協力してハワイ・ハレアカラ山頂に建設を進めている惑星観測専用望遠鏡) のクーデ焦点に 2014 年度の実装を予定している。これにより既存機器では実現不可能な「超高波長分解能の惑星連続観測」を実現し、当該分野の進展に広く貢献していく。

## 1. 序論

中間赤外域は回転振動遷移の芳醇な分子種線に恵まれ、惑星観測に非常に有用な分光領域である。この波長域の分子分光遠隔観測は、惑星大気研究にとって最も実績のある強力な研究手段の一つである。特に、高い波長分解能により分子プロファイルを完全に分解することができれば、圧力、温度、存在量、励起状態や風速、さらに鉛直構造に至る多くの基礎物理パラメータを得る事ができる。

加えて、地上観測の場合、地球大気の強い吸収線と混じり合う微弱な惑星大気の信号を分離するのも高波長分解能が必要不可欠である。低波長分解能では地球大気と

の分離が不可能であり、これにより取得された惑星信号の信頼度は格段に落ちることが懸念される。

一方で、ラインプロファイルのドップラー広がり測定するためには波長分解能が $10^5$ 以上、完全な分解には $10^7$ の分解能が必要となる。それに対して、ファイブリペロやフーリエ分光器など現況における中間赤外の直接分光観測による最大の波長分解能は $10^5$ 程度に留まり、ラインプロファイルを完全に分解するには及ばない。また、直接観測では $10^5$ を達成するにも1mに及ぶ巨大な回折素子を用いる必要があるなど、小型化・汎用性の面でも難がある。

中間赤外領域において、最も波長分解能が高い分光手法としてヘテロダイン手法がある (Kostuik and Mumma, 1983)。赤外ヘテロダイン信号は、惑星からの信号を局発光 (赤外レーザ) と重ね合わせ、そのビート信号を赤外検出器で高速検出することで得られる。重ね合わせで得られるビート信号は赤外光源の情報を保持したまま電波帯にダウンコンバートされるため、電波同様増幅・検出・解析することが可能となり、これにより圧倒的な波長分解能が達成される。

中間赤外ヘテロダイン分光装置が達成する超高波長分解能 $10^7$ は、高精度にラインプロファイルを測定可能にすることで、ミリ波・サブミリ波帯のヘテロダイン装置がするように、シングルラインから高精度の大気鉛直情報を得る事ができる。またこれは、ドップラー速度では10m/s相当の風速を分解可能であることを意味する。局発光源の出力が十分大きければ、装置ノイズは局発光源のショットノイズで決まり、量子雑音限界レベルの高感度を達成しうることも特筆すべき点である。さらに、分解能が装置サイズに依存しないため、非常にコンパクトな設計が可能であり、将来気球や飛行体搭載機器としても期待が大きい。

我々東北大グループでは、地球大気中の微量大気成分観測のため、1980年代より赤外ヘテロダイン分光器の開発を進め、地球オゾン等微量大気の大気鉛直構造の解明に貢献してきた (Okano et al., 1989; Fukunishi et al., 1990; Taguchi et al., 1989)。一方で、世界で赤外ヘテロダイン分光は、地球大気観測のみならず惑星大気観測でも大きな成果を挙げてきた (例えば, Kostuik et al., 1996; Fast et al., 2010)。さらに、これまで局発光の可変範囲の制約や出力不足により用途が限定的であったが、近年の量子カスケードレーザの目覚ましい発展に伴い、 $10^7$ を達成しうる本手法は、惑星観測にとって非常に強力なツールとなってきた。ドイツ・ケルン大グループでは、量子カスケードレーザを用いた金星・火星の風速場観測が積極的に展開されている (例えば, Sonnabend et al., 2012; Sornig et al., 2012)。

一方で、時々刻々とダイナミックに変化していく惑星大気やその進化を理解する上

で、連続モニタリングは非常に重要である。例えば、火星大気を理解する上で、大気成分の時空間変動の特徴を明らかにし、大気-表層さらにはエアロゾルやダストとの相互作用を定量的に理解することは特に重要であるにもかかわらず、未解明な点が多い。日変化、季節変化、年変化、太陽活動変動など様々なタイムスケールの時間変動を理解することで、初めて火星大気的气象・気候システムを掌握することができる。しかし、現況においてそれを達成しうる観測拠点は世界に存在しない。大型望遠鏡のほとんどは公募制によるものであり、限定的な観測しか実現できず、飛翔体による観測も時空間的に限定的な情報が得られるにとどまる事が一般的である。

東北大学本グループでは、ハワイ大を始めとする国際コンソーシアムの協力の下、世界で初めてとなる「惑星観測専用望遠鏡 PLANETS」計画を推進している。我々は惑星専用の赤外ヘテロダイン分光器を新たに開発し、PLANETS 望遠鏡に実装することで、他に類を見ない中間赤外域超高分解能分光連続観測の実現を企図する。本研究では、装置の概要・コンセプトとその性能について、特筆すべき点について抜粋し、記述する。

## 2. 装置概略・性能

赤外レーザヘテロダイン分光装置 (MILAH) は、惑星大気の主成分・微量大気成分等の観測に適している 7-12  $\mu\text{m}$  の中間赤外波長域をカバーする受信機である。波長分解能は帯域 1GHz 中で  $10^6$  を達成しており、フィードバック方式を最適化することで  $10^7$  以上が今後見込まれている。詳細な仕様は、表 1 にまとめた。装置は、(70×1100×60)  $\text{cm}^3$  の光学部を含むフロントエンドとエレキ部を含むバックエンドで構成されている。特徴的な構成要素を以下に記述する。

### 2.1. 局発光源 (赤外レーザ)

観測波長は、局発光源の発振波長によって決まる。そのため、様々な観測対象・観測分子を網羅するためには、広い波長域をカバーする局発光源が必要となる。また、惑星からの微弱な信号を高い S/N で捉えるためには長い積分時間が必要であることから、高い波長分解能を達成するためには長時間安定した発振波長が得られる事が重要である。また、局発光源の発振波長は、その駆動電流と温度を変化させることで調節することができる。しかし、これまでに用いられてきた液体窒素冷却型の量子カスケードレーザは温度を大きく変化させることができないため、 $1\text{cm}^{-1}$  程度の可変波長域しか獲得することができなかった。本装置では、より波長可変範囲を広げるため、常温冷却型の量子カスケードレーザを新たに導入した。図 1 に様々な温度・駆動電流による発振プロファイルを示す。本レーザでは、駆動温度を  $-30^\circ\text{C}$  から  $30^\circ\text{C}$  まで変化可能であり、それにより  $5\text{cm}^{-1}$  の波長可変範囲を達成することができている。

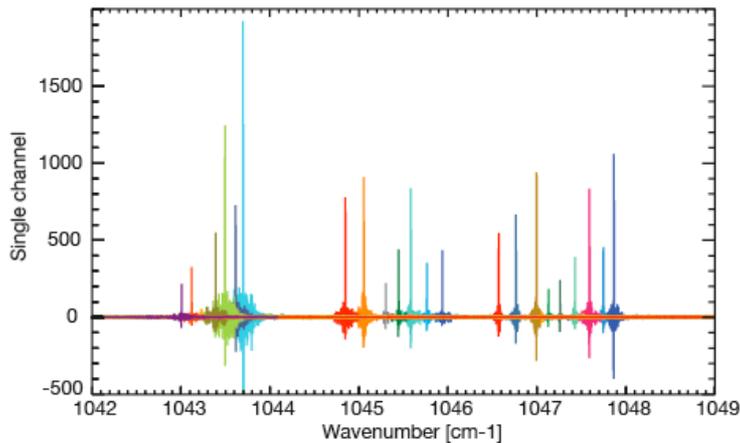


図 1. 常温駆動型量子カスケードレーザの発振プロファイル.

上記常温タイプの量子カスケードレーザは、ペルチェ素子により 0.1°C レベルで温度を制御している。これによる発振波長の安定度をガスセル実験で計測したところ、70MHz 程度達成できていることがわかっており（図 2），これは波長分解能で  $2 \times 10^6$  に相当する。さらに、参照ガス吸収の底位置をフィードバックに波長安定化することで、20MHz つまり  $7 \times 10^7$  の波長分解能を達成することができている。さらにガス圧等を最適化することでより高い安定度を獲得できることが見込まれている。

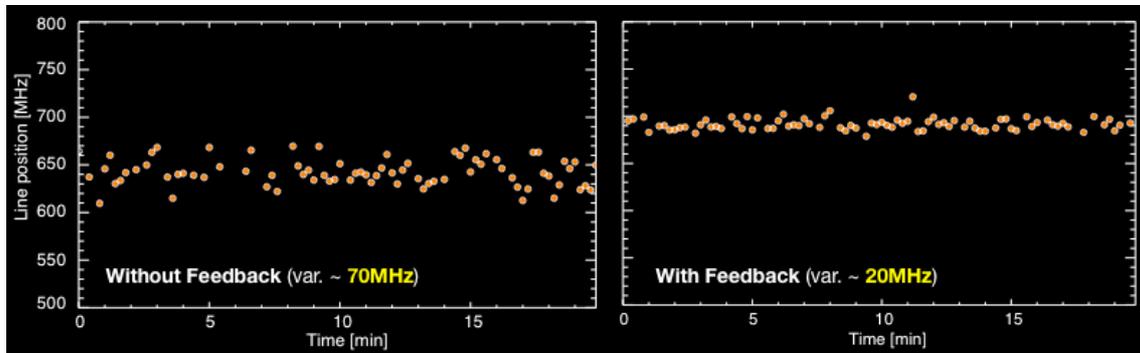


図 2. 常温駆動型量子カスケードレーザの波長安定度。参照ガスの吸収位置をモニタした結果を示す。左がガスセルフフィードバック無し，右がフィードバック有りの際の吸収位置の変動結果。

## 2.2. デジタル FFT 分光器

バックエンドとして、従来先行研究では音響光学素子分光器（AOS）や巨大なフィルタバンク型分光器が用いられてきた（Sonnabend et al., 2008; Kostuik et al., 1996）。本装置の基本的な要求として、(1) ドップラーシフトによる風速観測のため非常に高い周波数分解能、(2) 正確にラインプロファイルを得る為にリップルや定在波の少ない綺麗なベースライン、(3) 比較的広い帯域、(4) 汎用性が高くコンパクト等がある。以上の観点から、本装置では新たにデジタル FFT 分光器（DFS）を導入した。DFS は、近年

ミリ波・サブミリ波電波天文観測で幅広く用いられるようになった先端技術であり、高速 A/D 変換・FPGA による高速 FFT 処理により実現されたものである。主な優位点として、比較的広い帯域、高周波数分解能、高感度、大ダイナミックレンジ、低重量、小型かつ複雑な光学・機械部がないなどが挙げられる。

### 2.3. 観測視野と感度

ヘテロダイン受信機のエタンデュは  $A\Omega \sim \lambda^2 \text{cm}^2 \text{sr}$  により決まる ( $A$ :有効開口面積,  $\Omega$ :ビーム立体角,  $\lambda$ :波長)。よって、装置の視野は回折限界によって決まり、例えば  $10 \mu\text{m}$  帯で  $1.5\text{m}$  望遠鏡の場合  $1.7''$  の視野となる。これは、同じくヘテロダイン受信が一般的に用いられているサブミリ・ミリ波領域のそれに比べ、非常に高い空間分解が可能となる (例えば  $230\text{GHz}$  帯で  $30\text{m}$  望遠鏡を用いた場合の視野は  $12''$  程度となる)。つまり、火星のような小さい光源の分布を地上から取得することが可能となる。

装置の感度は、最も重要な性能の一つであり、検出限界は感度と観測積分時間によって決まる。感度は、温度が予め既知の小型黒体炉や常温光源等を用いて測定され、その結果を図3に示す。システム雑音温度が  $10 \mu\text{m}$  帯で約  $3000\text{K}$  達成できていることがわかる。これは当該波長域における量子雑音限界  $1400\text{K}$  の2倍程度であり、これは他のヘテロダイン受信機に比べて格段に良い数値である。 $3000\text{K}$  というシステム雑音温度は、 $1.5\text{MHz}$  分解能  $10$  分積分時に輝度温度  $38\text{mK}$  の差が区別可能であり、広がった天体に対して  $0.48 \text{ ergs/cm}^2 \text{cm}^{-1} \text{sr sec}$  のフラックスが検出可能であることに相当する。

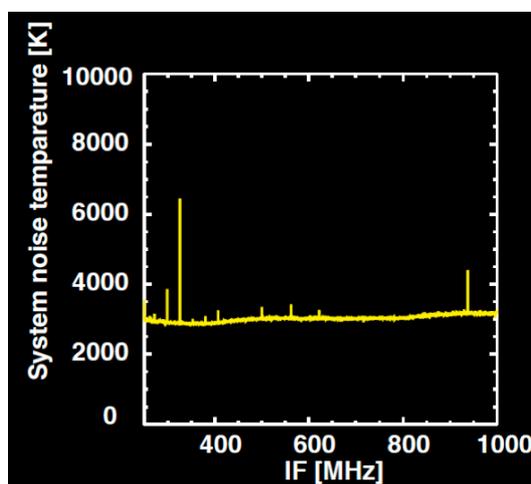


図3.  $10 \mu\text{m}$  波長帯におけるシステム雑音温度。

### 2.5. 試験観測結果

装置の総合評価のため、太陽を背景光源にした地球大気試験観測を東北大学実験室内で実施した。得られたスペクトルは紙面上割愛するが、計算結果と非常によい一致を示した。ノイズレベルもほぼ期待どおりであった。さらに、微弱な月光源を背景にして同様に地球大気試験観測を、東広島かなた望遠鏡 ( $1.5\text{m}$  鏡) のナスミス焦点に実装

し、2012年1月に実施した(図4)。1045.6 $\text{cm}^{-1}$ のオゾン吸収スペクトルであり、積分時間は約30分である。計算結果を水色実線で付して示した。背景光が微弱なためノイズレベルが大きい、期待される吸収プロファイルが問題なく取得されていることがわかる。引き続き、かなた望遠鏡を用いて金星観測を実施した。天候不良のためスペクトル取得には至らなかったが、金星信号と局発光とのヘテロダイン信号取得に成功することができ、信号強度も期待値と同程度であったことをここに述べておく。

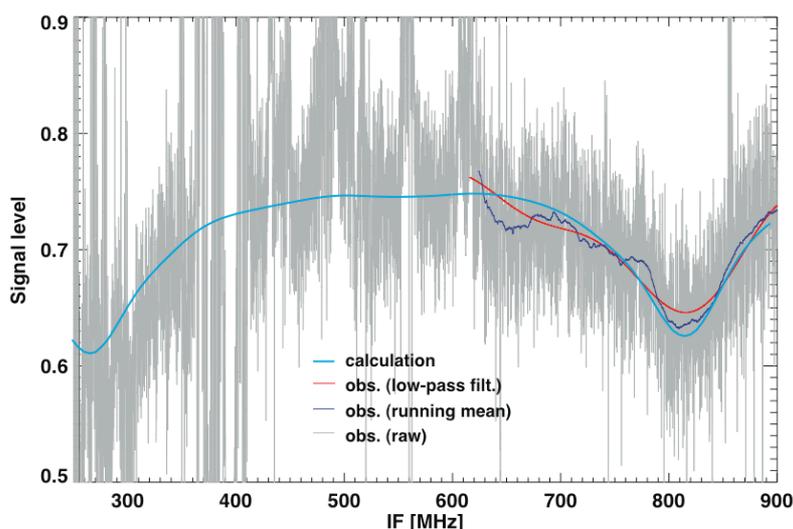


図4. 月光源にした地球大気オゾン吸収スペクトル。灰色線が観測結果、水色線が計算結果を示す。青色・赤色はそれぞれ移動平均処理・ローパスフィルタ処理した観測結果である。

### 3. 結び

東北大学で長年開発が進められてきた超高分解能中間赤外ヘテロダイン分光装置(MILAHl)の開発が無事に終了し、観測に必要な要求精度を達成することができた。本発表では、特に波長分解能や感度等の現況性能について述べ、国内望遠鏡に実際に実装した際に得られた地球大気スペクトルを示した。現在は、本グループが所有する飯館望遠鏡(60cm鏡)をハレアカラ山頂に移設する計画が進んでおり、2012年度11月以降に移設が完了する予定である。本装置は、本年度実施される小型化・リモート制御化の後、ハレアカラ山頂に輸送され、新飯館望遠鏡のクーデ焦点に実装され、惑星大気試験観測が実施される予定である。

### 謝辞

著者らは、広島大学宇宙科学センター川端弘治を始め東広島かなた望遠鏡スタッフ・学生の皆様に感謝の意を述べたい。飯館望遠鏡での試験観測が困難な状況になった我々を温かく受け入れて下さり、また貴重な観測時間を割いてご協力いただきました。