

P-21「赤外レーザーヘテロダイン分光器広帯域化のための外部共振器開発」

中川広務, 青木翔平, 笠羽康正, 村田功(東北大), 岡野章一(ハワイ大)

1. 序論 開発の狙い

中間赤外域は多くの分子振動・回転バンドが重なり, これら分子スペクトルから各成分の存在量・速度・温度などの基本物理量が導出可能となる. 近年, 中間赤外域において量子カスケードレーザーが目覚ましい発展を遂げ, レーザ分光・リモート観測技術革新に大きな影響を与えている. 近年では数百 cm^{-1} に渡る幅広い波長領域でゲインを担保することに成功した常温駆動型の多波長発振量子カスケードレーザーなどが成果を挙げており(例 *Hugi et al.*, 2009), これらを外部共振器等で単一発振駆動することができればレーザー分光・リモート観測技術の更なる発展が期待できる.

特に, 我々が開発を進めている赤外レーザーヘテロダイン分光器において局発光として使用する量子カスケードレーザーを広帯域化することができれば, 様々な分子種を単一レーザー源で観測可能となることから, 他に類をみない超高分解能・多波長観測が実現できる. これは火星メタン等微量成分の生成・消滅機構の解明をはじめとして惑星環境・進化の理解につながる. 本研究では, これまで開発してきた赤外レーザーヘテロダイン分光器を広帯域化する技術を獲得し, 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.

本研究で扱う赤外ヘテロダイン分光技術は, 赤外域の他測器では達成不可能な究極の波長分解能 10^{7-8} を誇る(例 *Sonnabend et al.*, 2008)一方で, レーザ波長可変範囲は 1cm^{-1} 程度にすぎなかったため複数分子を観測するためには複数レーザーを用意し都度取り替え作業・アラインメント調整作業が必要であった. 広帯域化のために Grating を含めた Cavity 形成により, 波長可変範囲を 10 倍以上向上させることが可能である. 例えば, 従来の波長可変範囲では不可能だったメタン・ H_2O_2 の同一レーザーによる連続観測が可能となる. サイズ・重量・コストも十分小さくできる.

2. 装置概要

赤外レーザーヘテロダイン分光装置に搭載することを目的として, 広帯域化のための 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. Cavity 部のセットアップを図 1 に示す. レーザ波長安定化駆動部は本紙では割愛する.

量子カスケードレーザー(QCL)は, メタン吸収線と H_2O_2 吸収線が網羅することができる浜松ホトニクス社製の発振波長 $8.0\ \mu\text{m}$ 常温駆動型 FB-QCL を用いた. これは駆動温度をペルチェ電子冷却による温度安定化により -30°C から 30°C までを 0.01°C の

精度で安定化させることで、従来の液体窒素冷却型に比べて温度を大きく可変調整することができるため波長可変範囲拡大に重要である。20cm⁻¹ に渡る広いゲインプロファイル中で複数線の発振が確認でき(図 2)，外部共振器によって単一モード化できれば従来の液体窒素冷却型に比べて 20 倍以上の波長可変範囲拡大が見込める。出力は～120mW 程度である。線幅については、我々のこれまでの CO₂ ガスレーザと QCL の干渉ヘテロダイン実験により同等のレーザの線幅が 10MHz(0.0003cm⁻¹)以下であることがわかっている。本件では、QCL デバイスに Antireflection (AR) コーティング処理は施していない。

図 1 に示したセットアップは、QCL に加えて光をコリメートする光学系およびフィードバックを生み波長選択を行うための Grating が含まれている。外部共振距離は 10cm とした。レーザ光をコリメートするために ZnSe レンズ(f = 25.4 mm, 直径 25.4 mm)を用いた。Grating は Laser Components 社製の 150 grooves/mm (大きさは 25 mm×25 mm)を用いて、1 次光をレーザ側に戻す。リトロー配置により光学フィードバックを得ることで、複数発振モードを単一発振モード化することができる(図 3)。レーザ側に戻す 1 次光の波長を Grating の角度を回転させることで変化させるため、Grating は回転ステージに乗せ微調整をする。出力されたスペクトルは FTIR によって計測し(波長分解能 0.125, 0.03 cm⁻¹)，出力スペクトルを確認しながら Grating の鉛直・水平角度の調整を行った。それにより、フィードバック効率の最適化を行い、単一モード化を達成する。加えて、QCL と外部共振器の効率的なカップリングには、コリメート光学系(この場合レンズ)の位置精度が重要である(Stupar et al., 2008)。

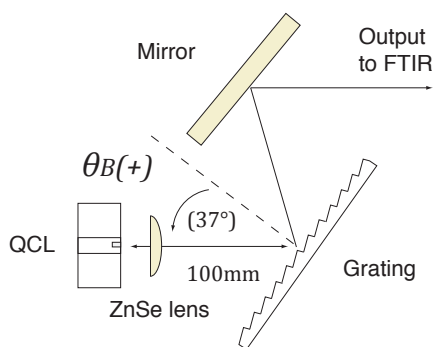


図 1. 外部共振器セットアップ.

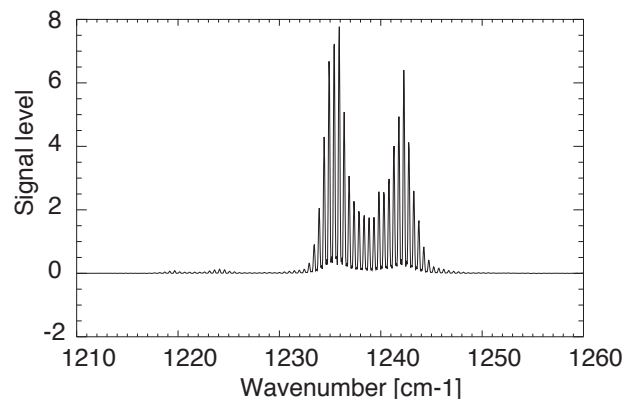


図 2. 外部共振器無し FP-QCL 多波長発振スペクトル.

3. 結果

得られた出力スペクトルを図 4 に示す。駆動電流・駆動温度はそれぞれ、270–283 K, 800–900 mA で変化させた。外部共振距離と Grating 角度を変化させることで、発振波長域を大きく変化させることが確認でき、更に Grating・光学系・駆動電流の微調整により単一モード化に成功した(図 3)。加えて、駆動温度を変化させることで発振波長を微変化できることが確認でき、これにより各角度のモード間を埋めることができる。一方で、駆動電流独立では発振波長を微調整することが困難であることがわかった。先行研究 *Stupar et al.* (2008)によれば、駆動電流と外部共振距離のカップリングを担保したままフィードバックをかけて同時変化させることで、モードホップ無しの連続波長スキャンが実現可能となることがわかっているが、本研究では将来課題とした。本研究では、定性的な波長変化の特徴の掌握と、単一モード化の最適化が行われた。

得られた単一モードの発振スペクトルは、サイドモードがよく抑えられており、赤外ヘテロダイン分光器の局発光に適している。これは、主に AR コーティングをしないため外部共振器による高い波長選択性が得られているためと考えられる。

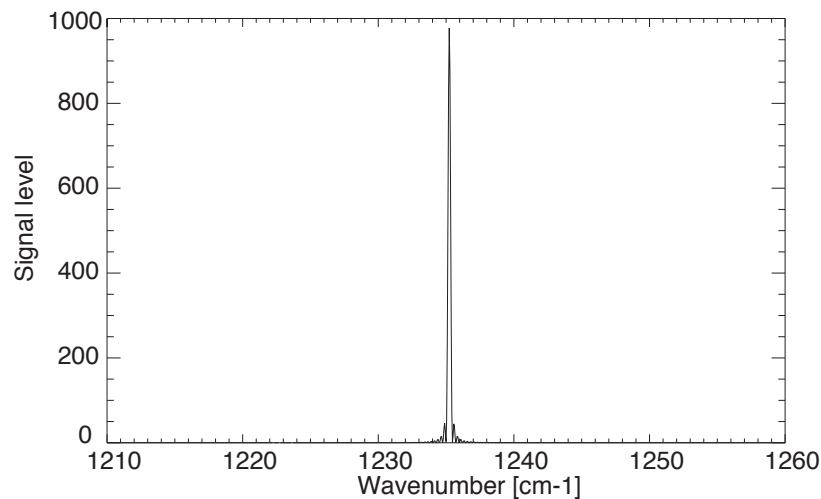


図 3. 外部共振器有り FP-QCL 単一発振モードスペクトル。

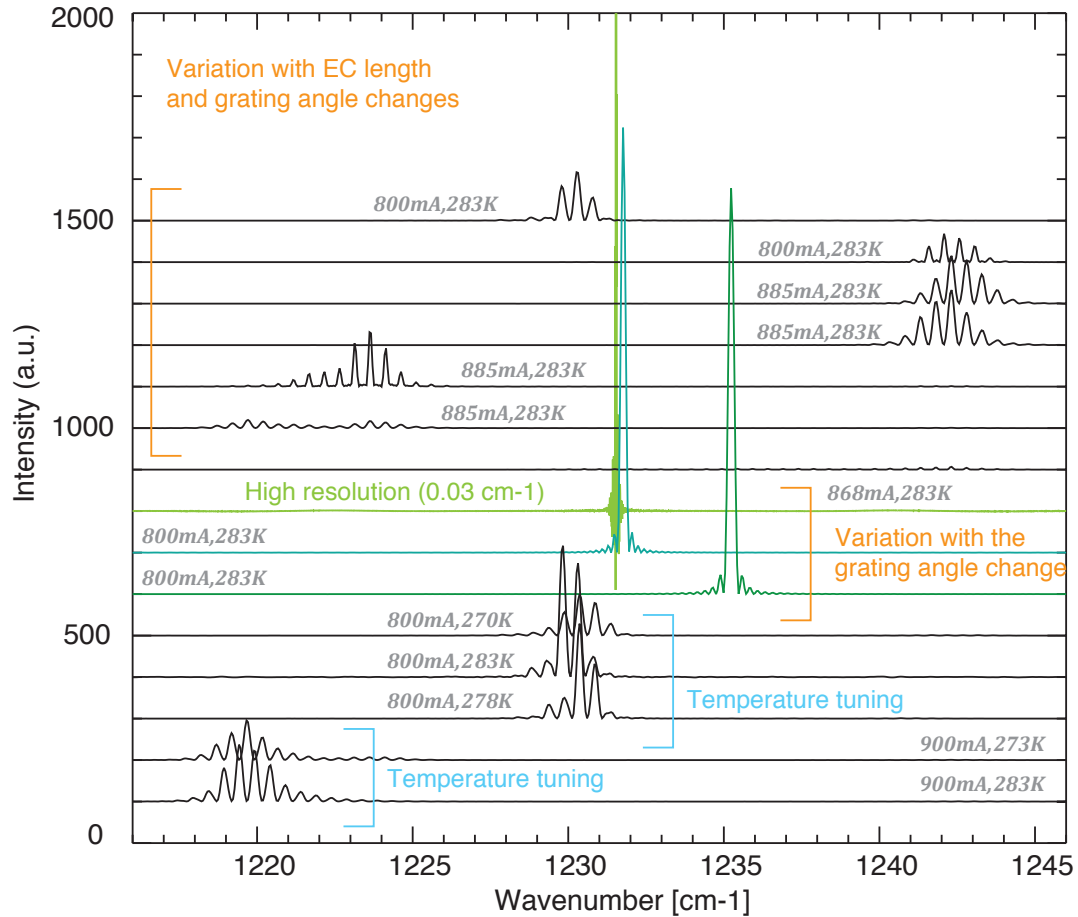


図 4. 外部共振器有り FP-QCL 発振スペクトル. 駆動電流・温度ならびに外部共振距離・Grating 角度を変化させた際の波長変化の様子.

4. 結論と今後の展望

本研究では、赤外レーザヘテロダイン分光器の観測波長を広帯域化するため、外部共振器を用いた量子カスケードレーザ発振波長の広帯域化システムを開発した。その結果、20cm⁻¹以上の広範囲で発振を確認でき、光学系・駆動環境の微調整により単一モード化に成功した。連続波長スキャンには至っていないが、今後は駆動電流(or 温度)と外部共振距離を同時に変化させることで達成を試みる予定である。さら

に、今回は第一段階として AR コーティング無しでの実験を行ったが、AR コーティングをレーザーの output ファジレットに施す事で波長可変範囲をさらに拡大することができるため、今後の重要課題である。外部共振器を搭載した赤外ヘテロダイン分光器は、複数レーザーを用いるよりも小型化・軽量化に優れ、光学調整作業も簡略化することができるため、気球や飛翔体搭載を視野に入れた次世代器には重要な技術である。今後は 2013 年から開始されるハワイ山頂での惑星観測にて実践的な応用を行うことで、本装置の確立を目指す。

5. 謝辞

本研究の計測は、国立環境研究所 森野勇博士の協力のもと、FTIR を用いて実施された。

6. 参考文献

Hugi, A., R. Terazzi, Y. Bonetti, A. Wittmann, M. Fisher, M. Beck, J. Faist, and E. Gini, *Applied Physics Let.*, **95**, 061103, 2009.

Sonnabend, G., M. Sornig, P. Krotz, D. Stupar, and R. Shieder, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **109**, 1016–1029, 2008.

Stupar, D., J. Krieg, P. Krotz, G. Sonnabend, M. Sornig, T. F. Giesen, and R. Schieder, *Applied Optics*, **47**, 16, 2993–2997, 2008.