火星大気進化解明に向けた地上高分解能分光観測

中川広務[a*]，笠羽康正[a]，青木翔平[a]，村田功[a]，岡野章一[a]，前澤裕之[b]，佐川英夫[c]，笠井康子[c]

[a] *東北大学*, [b] *名古屋大学太陽地球環境研究所*, [c] *情報通信研究機構*

1. 序論

地球型惑星である火星・金星は、地球と似た過程で形成された兄弟星であると考えられているが、近年の観測によりその環境は地球とは大きく異なることが報告され、大気のダイナミクスや組成の違いが注目されている。地球型惑星の進化を解明することは、生命を維持しうる惑星環境の形成条件を理解することにつながる重要課題である。そのための突破口は、大気ダイナミクスの鍵を握る「風速場」「温度場」、および大気変動の鍵を握る「大気微量成分」の高精度かつ連続的な捕捉にある。

惑星大気の主成分および変動の鍵を握る微量成分を含む赤外～サブミリ波帯の分子吸収スペクトルは、各成分の存在量・速度場・温度場・高度分布の導出を可能とする。これらの導出にはライン分解のための「高分散分光能力」が必要だが、特に分子線が芳醇に存在する中間赤外域において、波長分解能不足で高精度検出が困難な状況にある。地上観測においては、地球大気の強力な吸収と分離せねばならず、飛翔体観測においては、そのリソース制限により波長分解能が制限されている。この状況下において、2004年の火星メタン発見[*Formisano et al.*, 2004; *Krasnopolsky*, 2004]以来、火星メタンならびにその関連微量大気成分の検出・変動に関する観測的研究が盛んに行われている[*Mumma et al.*, 2009; *Encrenaz et al.*, 2008; *Geminale et al.*, 2009]。

しかし、地上大型望遠鏡による単発的観測・衛星搭載器による低分散観測による抜本的解決はなく、現在もその起源・消滅機構は未解明のままである。故に、火星における「生命・地殻活動の探査、気候環境の理解」「微量成分大気の高精度検出とその変動・局在性の把握」「水循環・気候システムの理解」を目指した将来火星探査ミッション提案［*Webster et al.*, 2009; *Zurek et al.*, 2009; *佐藤他, 2010*]にみられるように、火星大気の高分散分光観測への期待は高まっている。

我々の研究グループでは上記動向を踏まえ、(A)最新赤外線レーザー技術による中間赤外高分散分光システムによる新たな実装装置の実現を図るとともに、現在なしうる(B)赤外～サブミリ波域の高分散分光観測によって、火星大気の進化解明を探求する。

2. 現在なしうるサブミリ波域の高分散分光観測

名古屋大学太陽地球環境研究所の協力のもと、チリ・アタカマサブミリ波望遠鏡(ASTE)を用いて火星本体起源の微量成分、SO ならびに SO_2 の検出を試みた［*Nakagawa et al.*, 2009］。観測は 2007 年 12 月 25-26 日に実施されたものであり、このとき火星は北半球冬に相当する時期であった。観測状況を表 1 に、観測スペクトルを図 1 に示す。我々の結果は、SO_2 の上限値を 2 ppb と与えた。火星マグマからの脱ガスにおいて、SO_2 は無視できない量が含まれていることが期待されていることから[*Gaillard and Scaillet*, 2009]、火星現況における火山・熱水活動が非常に弱いことを示した。また、このことより、最近の研究で発見されたメタンは火山・熱水活動によるものではなく、他に地下貯蔵された炭化水素源を起源とする可能性があることを示唆した。

同観測において ^{12}CO, ^{13}CO の観測にも成功しており、火山履歴・炭素循環・気相-固相相互作用に関する情報が得られるものと期待している。

また、2009 年に実施したチリ・アタカマサブミリ望遠鏡 APEX: Atacama Pathfinder Experiment による火星微量成分観測は、不具合により中絶してしまったが、今後も引き続き実施していく予定である。

3. 次世代赤外超高分散分光システムの開発

我々のグループでは、将来の惑星周回・着陸観測へ展開を目指す「小型中間赤外域・超高分散分光システム」の開発を行ってきた。「小型」・「軽量」が求められる探査機への展開も可能な有力方式として、本グループが 1990 年代から開発してきた「レーザーヘテロダイン分光」技術がある。これは、現況測器では達成不可能な究極の波長分解能（10^{7-8}＝数～数十 m/s に相当）を量子雑音限界で達成できる。微弱な信号を扱う惑星観測への適用には、大出力レーザーならびに広帯域分光器・検出器が不可欠だが、従来の半導体レーザー・検出器では不十分で惑星展開は困難であった。しかし本開発で、東北大でのヘリテイジを継承しつつ、近年開発が急速に進む大出力の「量子カスケード半導体レーザー」をこの「ヘテロダイン分光システム」へ適用し、この隘路を打開した。

これまでに構築した試験システムの基礎にたち、量子カスケードレーザーを用いた中間赤外高分散分光システムの駆動・評価システムを構築し、地上観測を想定した新たな分光器・検出器の検討ならびに実装装置の実現に成功しつつある。

電子冷却型のレーザーの性能検証を実施し、ヘテロダイン AC 信号の DC 整流・光軸調

整法の確立によって、理論予測の 1/10 強度の実現に到達した。本システムに太陽光・月光をサントラッカーを介して導入し、ヘテロダインによる DC 整流出力および AC スペクトル出力の取得に取り組んだ。地球上層大気の観測には成功していないが、作業は継続中であり、常温型オゾン波長帯レーザーの来着をもって発展させる。

また、従来の音響光学分光器に代わり、高速 FFT デジタル分光器（1GHz サンプリング, 8bit）を導入、長時間積分・高精度化の評価を実施したことで、分光部に関して惑星観測準備が整った段階にある。一方で、現有する MCT 検出器は帯域 100MHz 程度であり、現状では狭帯域のため惑星観測は困難である。高速応答する現有「量子井戸型センサ」の評価を実施したが、感度不足であることが判明した。NASA/GSFC と米社が共同で開発を進めつつある広帯域高感度検出器（1GHz）の導入が今夏に予定されており、その導入によりシステムは完了、本格惑星観測始動となる予定である。

4. 今後の展望

現在構築中の「要素検証機」を東北大飯館観測所の望遠鏡に装着し、太陽・月を光源とした試験観測に入る予定である。さらにこの成果を基礎に、本観測に向けた初号機の開発および金星・火星地上観測の開始を図る。小型・高アラインメント安定・調整機能を持つ「実用機」を、現在開発途上にある「惑星・系外惑星望遠鏡」に常設導入することで、 地球型惑星の大気変動とその進化（例えば、(a)金星スーパーローテーションの高度分布変化、(b)惑星本体起源の大気微量成分の分布・変動、(c)有機性分子の分布・変動、(d)オゾン・水循環の長期変動、(e)惑星大気微量酸化成分の変動、(f)同位体比計測、(g)中間圏風速場・温度場計測）の解明に挑戦する予定である。

本研究の核となる装置は、将来の展望として、次期火星探査周回機・着陸機搭載への展開を念頭に置いた小型軽量の高分散分光器の母体となる。中長期的には、本グループが推進中の近赤外分光器の開発・検討とともに進め、将来計画を目指す本格的開発および観測的研究の核となって推進していきたいと考えている。

References

Formisano, V., S. Atreya, T. Encrenaz, N. Ignatiev, and M. Giuranna, Detection of methane in the atmosphere of Mars, *Science*, **306**, 1758, 2004.

Krasnopolsky, V. A., J. P. Maillard, and T. C. Owen, Detection of methane in the Martian atmosphere: evidence for life?, *Icarus*, **172**, 537, 2004.

Mumma, M. J., G. L. Villanueva, R. E. Novak, T. Hewagama, B. P. Bonev, M. A. DiSanti, A. M. Mandell, and M. D. Smith, Strong release of methane on Mars in northern summer 2003, *Science*, **323**, 1041, 2009.

Nakagawa, H., Y. Kasaba, H. Maezawa, A. Hashimoto, H. Sagawa, I. Murata, S. Okano, S. Aoki, N. Moribe, A. Mizuno, M. Momose, T. Ohnishi, N. Mizuno, and T. Nagahama, Planetary and Space Science, 57, 2123, 2009.

Encrenaz, T., T. K. Greathouse, M. J. Richter, B. Bezard, T. Fouchet, F. Lefevre, F. Montmessin, F. Forget, S. Lebonnois, and S. K. Atreya, Simultaneous mapping of H_2O and H_2O_2 on Mars from infrared high-resolution imaging spectroscopy, Icarus, 195, 547, 2008.

Geminale, A., PFS-MEX: Mapping methane in Martian atmosphere, Workshop on Methane on Mars, ESA/ESRIN, Italy, 2009.

Zurek, R., A New Mission Concept: The Search for Atmospheric Trace Gases in the Mars Atmospheric, Workshop on Methane on Mars, ESA/ESRIN, Italy, 2009.

Webster, C., Measuring Methane and its Isotopic Ratios 13C/12C and D/H With the Tunable Laser Spectrometer (TLS) on the 2011 Mars Science Laboratory (MSL) mission, Workshop on Methane on Mars, ESA/ESRIN, Italy, 2009.

佐藤毅彦, 久保田孝, 岡田達明, 藤田和央, 宮本英昭, MELOS 火星探査 WG, 第 11 回惑星圏研究会, 2010.

Gaillard, F., and B. Scaillet, The sulfur content of volcanic gases on Mars, Earth Planet. Sci. Lett., 279, 34, 2009.

● Workshop on Methane on Mars: http://www.congrex.nl/09c26/

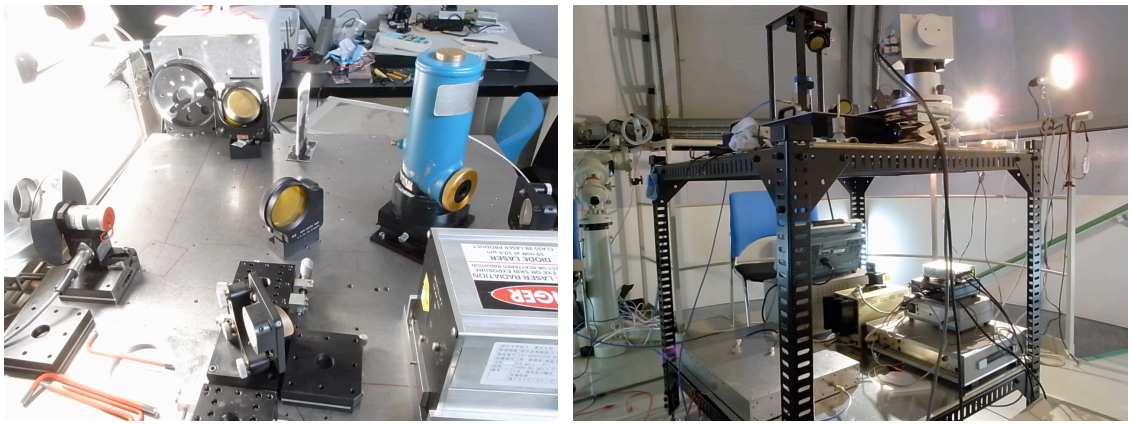

図. 開発中の小型中間赤外域・超高分散分光システム外観図.