

サブミリ波サウンダーによる火星大気科学

佐川英夫^[1], 笠井康子^[2], Paul Hartogh^[1], Philippe Baron^[2], 黒田剛史^[1],
Jana Mendrok^[2], 落合啓^[2], 入交芳久^[2], 菊池健一^[3], 瀬田孝将^[2], 鈴木広大^[4]

[1] Max Planck Institute for Solar System Research, Germany, [2] NICT, [3] JAXA, [4] 東京学芸大学

1. はじめに

火星は寒冷(地表付近の気温 ~ 220 K)で希薄(~ 7 hPa)な乾燥大気を持つ。この独特な大気環境は、どのような進化プロセスを経て形成されたのであろうか? この問いに答える為には、現在の火星大気の状態(気温、大気組成や大気循環)の3次元的な分布およびその時間変動を観測し、火星における気候システムを理解することが不可欠である。この10年余の間、Mars Global Surveyorを始めとする飛翔体探査や地上観測によって、火星大気に関する観測データは大幅に増加した。しかし、未だ多くのトピック—水蒸気や微量成分の鉛直・水平分布、様々な時間スケール(日内～季節)での大気変動、極冠や地表と大気との相互作用、ダストストームの成長メカニズムなど—において観測が欠けている。

これまでの火星大気リモートセンシングは、可視・近赤外領域での撮像・分光観測が主体であった。一方、近年の地球大気観測に目を向けると、ミリ波・サブミリ波サウンダー(UARS/MLS, ODIN/SMRなど)の登場によって、地球大気成層圏の理解に飛躍的な進展がもたらされている。本研究では、この新たな観測技術であるサブミリ波サウンダーを利用した火星大気観測の可能性について述べる。

2. サブミリ波観測が拓く火星大気科学

サブミリ波帯を利用した火星大気観測の特色として、以下の点が挙げられる。

a. 大気微量成分および気温の鉛直分布: ミリ波・サブミリ波帯には、惑星大気微量成分の回転遷移線が多数存在する。高分散分光(波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda > 10^6$)が可能なサブミリ波ヘテロダイン分光を利用することで、それらの分子スペクトルの輪郭から、分子混合比や気温の鉛直分布を導出可能になる(リトリーバル解析)。サブミリ波ではミリ波よりも多くの種類の分子スペクトルが、より強い強度で観測される。これは、リトリーバル精度や鉛直分解能の向上に繋がる。サブミリ波帯で観測可能な火星大気中の微量成分は、[1] 比較的安定で、大気循環のトレーサになるもの(CO , H_2O), [2] 光化学反応で重要な役割を担う HO_x 分子(O_2 , O_3 , H_2O_2 , HO_2 , OH), [3] 気体分子の凝縮や散逸に伴う同位体分別を示すもの(^{13}CO , $\text{C}^{17,18}\text{O}$, HDO , $\text{H}_2^{17,18}\text{O}$, $\text{O}^{17,18}\text{O}$)などが考えられる。これらの分子の多くが可視・赤外領域での観測が困難なものであり、サブミリ波観測によって初めてその分布が明かされるものである。(観測されるスペクトルの一例として、図1に波長 0.3 mm 帯での火星大気スペクトルを示した。)

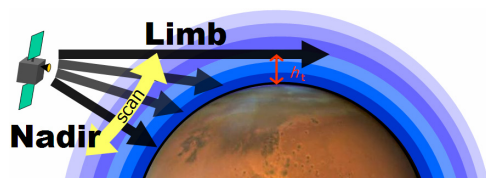
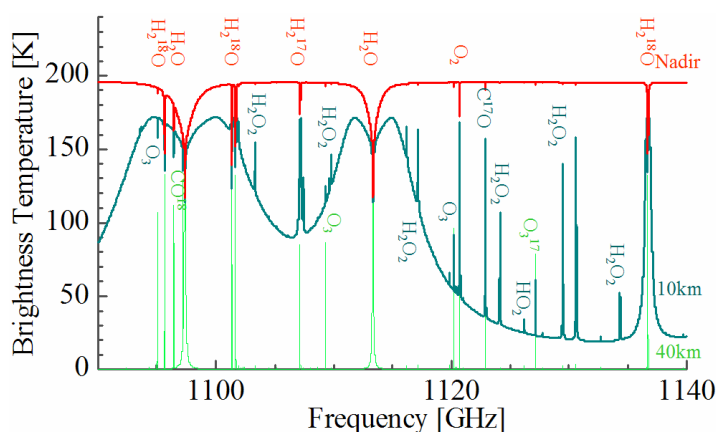


図1. 観測ジオメトリの模式図と波長 0.3 mm 帯での火星スペクトル(Nadir観測および $h_c=10, 40$ kmでのLimb観測を想定)。Nadir観測は水平方向のマッピングが可能なのに対して、大気中の光路長が長くなるLimb観測では微量成分の検出が可能になる。



スペクトルの計算には、放射伝達計算コード MATRAS [Baron et al., 2008]を利用し、各分子の鉛直分布には Urban et al. [2005]で使用された大気モデルを使用した。

- b. 風速：波長分解能 10^6 以上といった高分散分光では、各高度における風速の視線方向成分によって生じるドップラーシフトを検出することが可能になる。風速を直接的に測定可能なことは、サブミリ波観測の大きな特色である。
- c. 火星の昼夜両面での観測：サブミリ波サウンダーでは、太陽や星といった背景光源を利用する掩蔽観測とは異なり、大気自身からの放射を観測する。この為、火星の昼夜を問わず観測することができ、大気の日内変動が把握できる。
- d. ダスト・氷雲：氷雲粒子サイズ ($r_{\text{eff}} = 0.3 \mu\text{m}$, Toigo and Richardson, 2000) に比べて十分に波長が長いサブミリ波帯では、氷雲による放射の吸収・散乱は無視できる。一方、ダストに関しては、その粒径の大きさ ($r_{\text{eff}} = 1.6 \mu\text{m}$, Tomasko et al., 1999) から、氷雲よりもサブミリ波帯での放射に与える影響が強いと考えられる。図 2 は、観測される輝度温度に対するダストの影響を示したものである (計算の詳細に関しては Mendrok et al., 2008 を参照)。500 GHz 帯と 2 THz 帯というような異なる周波数帯での同時観測が実現すれば、ダスト層の異なる高度まで見通すことができ、ダストの鉛直分布を議論することが可能になる。
- e. 地表面：分子吸収線の無い波長域 (連続波) では (ダスト分布の薄さにもよるが)、火星地表面まで見通すことができる。この時に観測される熱放射は、地下数波長分の深さから射出されるものであり、その強度には火星地表面・地表直下の温度だけではなく、レゴリスの組成、水含有量などが反映される。サブミリ波帯での偏光観測によってこれら地表面物理パラメータに制約を与えることができ、大気と地表との相互作用を理解する上で不可欠な情報が得られる。

今後は、上記物理量導出のシミュレーションを行ない、より定量的な観測計画の立案を行っていく。また、上記サブミリ波サウンダーでの観測は、可視や赤外領域といった他の波長での同時観測と併せることで、火星大気をより多角的に議論することができ (例を挙げれば、可視カメラによる画像と比較することで氷雲とダストの分布とを区別することが可能。また、 H_2O に並ぶ重要分子とも言える CH_4 は、サブミリ波帯には強い吸収線を持たないが、赤外領域では検出可能) ことを付記しておく。

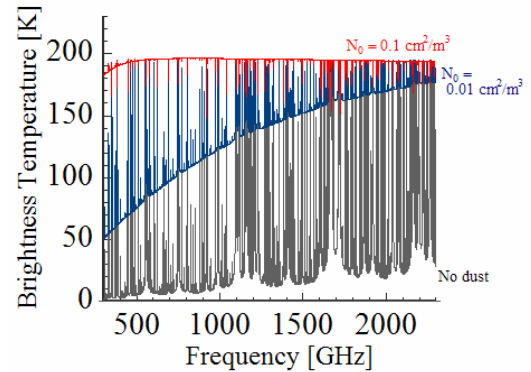


図 2. Limb 観測 ($h_t=20 \text{ km}$) におけるダスト分布の影響。黒線がダスト無しの大気モデル、青・赤線が、それぞれ、地表での含有率 0.01 および $0.1 \text{ cm}^2/\text{m}^3$ 、スケールハイト 8 km のダスト分布を仮定したもの。ダスト分布が濃くなると、Limb を観測した場合でも高高度までしか見通せなくなる。

3. 観測装置

高感度のサブミリ波観測を実現する為には、観測装置を冷却することが必須となる。また、空間分解能力の向上を求めると、アンテナ口径も大きくしなければならない。これらの理由から、サブミリ波観測装置は、重量・サイズがどうしても大きくなってしまいうという面を持つ。現在、我々は、口径 30 cm (火星上空 300 km の高度から観測周波数 1 THz で Nadir 観測をした場合、1 km 以下の空間分解能)、重量 10 kg, 消費電力 30 W クラスを出発点として、装置の小型化・省電力化を検討中である。具体的検討内容としては、高感度 SIS ミキサ・高温超伝導技術の利用、小型ソーブション冷却機 (ESA/Planck ミッションなどに採用, Bhandari et al., 2004) の利用、地球大気観測用サブミリ波サウンダー SMILES (本グループのメンバーが開発に参加) の技術応用、などである。

[参考文献]

- Baron et al. (2008), *NICT Journal*, in press.
 Bhandari et al. (2004), *Cryogenics*, 44, 395.
 Mendrok et al. (2008), *NICT Journal*, in press.
 Toigo and Richardson (2000), *JGR*, 105, 4109.
 Tomasko et al. (1999), *JGR*, 104, 8987.
 Urban et al. (2004), *App. Opt.*, 44, 2438.