論文紹介

Gagne e al., 2012, Modeled O2 airglow distributions in the Martian atmosphere, JGR, 117, E06005, doi: 10.1029/2011JE003901.

第35回火星勉強会 中川広務(東北大学) 2013年7月16日(火)

*東北大新田光(現東大院)卒業発表資料も参考に

概要

- 火星大気中の酸素分子大気光に関する3次元数値シ
 ミュレーション(LMD-MGCM)
- 可視Herzberg I帯 II帯・Chamberlain帯、赤外帯の
 発光強度・分布、高度プロファイルを評価
 - 強烈な赤外発光は、観測と合致
 - 未発見の可視発光の存在を示唆
- ダスト・水蒸気に対する応答を評価
- 本発表では特にHerzberg II帯と赤外帯について報告

<u>導入</u>

大気光 = 分子・原子の状態遷移による大気の発光現象



Fig. 5. Energy level diagram of O_2 transitions in the nightglow (after Greer et al., 1987).

酸素分子のエネルギー準位と発光帯 [Hedin et al., 2009]

火星で観測された夜側大気光リストと地球型惑星間の 強度比較 [Gagne et al., 2012, this issue] **Table 1.** Comparison of Measurements of O_2 1.27- μ m Nightglow With OMEGA [*Bertaux et al.*, 2012] and SPICAM [*Fedorova et al.*, 2012] With Modeling Results^a

| | 0 | Model | | | | |
|------------|-------------------|---------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| instrument | $L_{S}(^{\circ})$ | lat (°) | z _{max} (km) | I (MR) | z _{max} (km) | I (MR) |
| OMEGA | 118 | 76.5 S | 42 | 0.24 | 48 | 0.428 |
| OMEGA | 197 | 70 N | 43.5 | 0.15 | 58 | 0.374 |
| OMEGA | 3 | 85 S | 49 | 0.34 | 62 | 0.215 |
| SPICAM | 111 | 83.3 S | 48-52 | 0.22 | 52 | 0.247 |
| SPICAM | 115 | 83.2 S | 48-52 | 0.25 | 52 | 0.162 |
| SPICAM | 120 | 83.0 S | 48-52 | 0.194 | 52 | 0.179 |
| SPICAM | 152 | 82.4 S | 44-60 | 0.344 | 56 | 0.133 |
| SPICAM | 157 | 82.3 S | 44-60 | 0.391 | 56 | 0.178 |
| SPICAM | 161 | 82.2 S | 44-60 | 0.277 | 56 | 0.216 |
| SPICAM | 164 | 82.1 S | 44-60 | 0.385 | 56 | 0.224 |

 Table 3. Average Nighttime Emission Intensity of Selected O2

 Band Systems in the Planetary Atmospheres^a

| | | Wavelength | | | |
|----------------|--|------------|--------|-------|--------|
| | Transition | (nm) | Earth | Venus | Mars |
| Herzberg I | $A^3\Sigma^+_u - X^3\Sigma^g$ | 240-440 | 500 R | 140 R | |
| Herzberg II | $c^1 \Sigma_{\mu}^ X^3 \Sigma_{g}^-$ | 260-450 | 120 R | 5 kR | |
| Chamberlain | $A'^{3}\Delta_{\mu} - a^{1}\Delta_{g}$ | 320-480 | 200 R | 700 R | |
| IR Atmospheric | $a^1\Delta_g, 0 - X^3\Sigma_g^2, 0$ | 1,270 | 100 kR | 5 MR | 280 kR |

^aSee Slanger et al. [2008] and references therein.

<u>大気光観測の意義</u>

➡ 超高層での酸素原子密度・プロファイルの推定

➡ 酸素原子の衝突がCO2放射冷却効果を大きく左右

➡ 温度構造・エネルギーバランスを決定する重要要素

[コメント] 加えて、

- ➡ 大気波動擾乱を可視化
- ➡ 大気上下間結合に重要
- ➡ 地球ISS/IMAP的なサイエンス

OMEGAで捉えた酸素分子発光強度擾乱 [Altieri et al., 2012]



<u> 発光メカニズム</u>



Figure 1. A schematic of the vertical and latitudinal distribution of Mars $O_2({}^1\Delta_g)$ emission (kR/km, color contoured) for $L_S = 95-100^\circ$ as simulated by the LMD GCM. The meridional stream function (10^9 kg/s) is superimposed in white contour lines. Two primary pathways for $O_2({}^1\Delta_g)$ production are the photolysis of ozone over solar illuminated latitudes (60S-90N) below 40 km, and the three body recombination of atomic oxygen over (mostly) unilluminated fall-winterspring polar latitudes above 40 km altitudes.

LMD GCMで計算された発光強度分布(緯度-高度) [Clancy et al., 2012] *ローカルタイム分布ではないですが.

- 昼側は、オゾンの光解離 $O_3 + h\gamma \rightarrow O_2(a^1\Delta_g) + O(^1D)$
- 夜側は、昼側から回り込んできた酸素原子の再結合
 O(³P)+O(³P)+CO₂→O^{*}₂+CO₂
 [コメント]
 発光高度が昼夜で異なる
 - ハドレー下降流の指標

<u>火星赤外大気光観測のレビュー</u>

<昼側> (強度 = 1-30 MRayleigh)

- 昼側発光の発見はNoxon et al. [1976]
- 地上観測で盛んに観測 [Krasnopolsky, 2007]
- MEX/SPICAMで数年間観測 [Fedorova et al., 2006]

<夜側>

- MEX/OMEGAによって発見 [Bertaux et al., 2012]
- MRO/CRISMでも確認 [Clancy et al., 2012]
- MEX/SPICAMでも観測 [Fedorova et al., 2012]
- ➡ 夜側大気光は非常に最近になって発見された。

<u>本論文の動機(発表者の憶測含む)</u>

- 数値モデルで観測困難とされていた夜側赤外発光が [Krasnopolsky, 2003]、予測よりも10倍以上の強い 強度で検出された [Bertaux et al., 2012]
- 同じCO2大気である金星では、可視域大気光が検
 出されているが、火星では未検出のまま
- 最近観測された夜側赤外発光と数値モデルとの比較 検証、それを踏まえた上で、火星の可視域大気光の 検出検証

<u>LMD-MGCM(詳細割愛)</u>

- プリミティブ方程式系による大気大循環モデル
- CO2放射効果、浮遊ダスト、CO2凝結 [Forget et al., 1999]、水循環 [Montmessin et al., 2004]、下層 大気の光化学反応 [Lefevre et al., 2004]を考慮。
- 地表面から高度250kmまで計算高度を拡張。それ に伴いnon-LTEも含めた放射バランス、紫外線加 熱、分子拡散、上層での光化学反応を考慮
 [Gonzalez-Galindo et al., 2009]
- 3Dグリッド (Lat3.75° X Lon5.6° X Ver.50level)

<u>計算条件(ダスト、水に対する応答)</u>

 Run 1: ダスト固定、水蒸気固定(?)、下層光化学のみ

 Run 2: MGS-TESダスト観測のみを反映、上層光化学も

 Run 3: MGS-TESダスト・水蒸気観測を反映

図. 夜側*00LT, Ls=180°*における*CO2・O・O3*密度, 温度のプロファイル。*Run 1(*破線), *Run 2(*点線), *Run 3(*実線)。 左が緯度67.5°、右が赤道におけるプロファイル計算結果。

| Table 5. | Kinetics Parame | eters Used in the | e Calculations | s of the VI | ER of the | Herzberg II Band |
|----------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|-----------|------------------|
|----------|-----------------|-------------------|----------------|-------------|-----------|------------------|

| 金星VIRTIS観測と整合 | Case 1 | 室内実験も考慮 Case 2 | Krasnopolsky, 2011に準拠 Case 3 |
|---|--------------------------------------|--|---|
| α | 0.02 ^a | 0.04 ^b | 0.023 ^c |
| $k_1 (cm^{\circ} s^{-1})$ $\tau (s)$ | 2.5×10^{-320} 3.45^{g} | $2.5 \cdot 2.7 \times 10^{-33}$ 3.7^{h} | $(300/T)^{2^{\circ}}$ $2.5 \cdot 3 \times 10^{-33} \cdot (300/T)^{3.23^{\circ}}$ $5-7^{\circ}$ |
| k_{CO_2} (cm ³ s ⁻¹) | 2.45×10^{-16a} | 6 × 10 ⁻ | $14i$ 1.2×10^{-16c} |
| $k_O (cm^3 s^{-1})$ | 5.9×10^{-121} | 5.9×10^{-1} | 8×10^{-12} c |

| Table 6. | Kinetics | Parameters | Used | in the | Calculations | of the | VER | of the | IR | Atmosphe | eric Bar | nd |
|----------|----------|------------|------|--------|--------------|--------|-----|--------|----|----------|----------|----|
| | | | | | | | | | | | | |

| 地上観測と整合 | Case 1 VIRTIS夜光 | と整合 Case 2 Krasnop | olsky, 2011に準 処se 3 |
|--|---|---|--|
| $ \frac{\alpha}{k_1 (cm^6 s^{-1})} \\ \tau (s) \\ \frac{k_{CO_2} (cm^3 s^{-1})}{k_O (cm^3 s^{-1})} $ | 0.67^{a} $1.2 \times 10^{-32} \cdot (300/T)^{2 d}$ 4470^{g} $5 \times 10^{-21 c}$ | 0.5^{b} 2.5×10^{-32e} 4545^{h} 2×10^{-20i} 2×10^{-16i} | $\begin{array}{r} 0.7^{c} \\ 2.5 \cdot 3 \times 10^{-33} \cdot (300/T)^{3.25 \mathrm{f}} \\ 4460^{\mathrm{g}} \\ 10^{-20 \mathrm{j}} \\ 2 \times 10^{-16 \mathrm{i}} \end{array}$ |

<u>結果:鉛直分布 (H-II)</u>

- Case毎の違いはCO2衝
 突係数の違い
- 51-66kmに発光ピーク
- 赤道上空でダブルピーク
- ➡ O原子分布に依存
- ➡ 再結合反応が温度依存

図. 夜側*00LT, Ls=180°*における*O2*発光体積放射率プロ ファイル。*Case 1(*青*), Case 2(*赤*), Case 3(*緑*)*。 上が緯度*67.5°*、下が赤道における計算結果。

3(緑)。上が緯度67.5°、下が赤道における計算結果。

Figure 7. Global distribution of intensity of the O_2 emission bands for the (a) Herzberg I emission; (b) Herzberg II emission; (c) IR Atmospheric emission at 12 LT; and (d) IR Atmospheric emission at 00 LT (see text for details). The color bar is the intensity in R for the upper panel and in MR for the lower panel.

<u>ダスト・水蒸気効果</u>

- 水蒸気の化学反応への影響は強く高高度大気光に
 反映される(特に夜側)
- 高度50km以下ではダス
 トの影響が強くみられる
 (特に昼側)

図. 夜側00LT, Ls=180°におけるO2発光体積放射率プロファイル。Run 1(青), Run 2(赤), Run 3(緑)。上が緯度 67.5°、下が赤道における計算結果。

まとめ

- 火星大気光の緯度-季節変動、高度分布を3D-LMD-MGCMで評価
- 大気光分布は、温度場とOx種の分布に強く依存
- ダブルピークが頻繁にみられる
- 赤外昼側大気光は、Case 2で観測強度を再現・分
 布もおよそ合致
- 赤外夜側大気光は、定量的な比較は難しいものの、発光強度の程度はおよそ合致
- 可視域ではHerzberg II帯が最も強く観測対象候補

<u>不確定要素(文中より)</u>

- CO2大気中でのCO2-O2, O-O2衝突による励起緩和の係数(消失率)
- 準安定状態下のO2同士の相互作用(考慮外)
- 再結合の係数(生成率)

Table 5. Kinetics Parameters Used in the Calculations of the VER of the Herzberg II Band

| | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|---|-------------------------|--|--|
| α | 0.02 ^a | 0.04 ^b | 0.023° |
| $k_1 (cm^6 s^{-1})$ | 2.5×10^{-32} d | $2.5 \cdot 2.7 \times 10^{-33} \cdot (300/T)^{2e}$ | $2.5 \cdot 3 \times 10^{-33} \cdot (300/T)^{3.25 \text{ f}}$ |
| τ (s) | 3.45 ^g | 3.7 ^h | 5–7° |
| k_{CO_2} (cm ³ s ⁻¹) | 2.45×10^{-16a} | 6×10^{-14} | $1.2 \times 10^{-16 c}$ |
| $k_O (cm^3 s^{-1})$ | 5.9×10^{-12i} | 5.9×10^{-12} | $8 \times 10^{-12 c}$ |

Table 6. Kinetics Parameters Used in the Calculations of the VER of the IR Atmospheric Band

| | Case 1 | Case 2 | Case 3 |
|---|--|-------------------------|--|
| α | 0.67 ^a | 0.5 ^b | 0.7 ^c |
| $k_1 (cm^6 s^{-1})$ | $1.2 \times 10^{-32} \cdot (300/T)^{2d}$ | 2.5×10^{-32} e | $2.5 \cdot 3 \times 10^{-33} \cdot (300/T)^{3.25 \text{ f}}$ |
| τ (s) | 4470 ^g | 4545 ^h | 4460 ^g |
| k_{CO_2} (cm ³ s ⁻¹) | $5 \times 10^{-21 c}$ | $2 \times 10^{-20 i}$ | 10^{-20j} |
| $k_0 (cm^3 s^{-1})$ | | 2×10^{-16i} | 2×10^{-16} |

<u>[捕捉] 赤外夜光観測との比較 Bertaux+12</u>

<u>[捕捉] 赤外夜光観測との比較 Clancy+12</u>

Figure 15. (left) Averaged $O_2(^1\Delta_g)$ VER profiles are presented from October 17, 2010 ($L_s = 166^\circ$) CRISM limb observations at high southern (75S-90S, dashed lines) and high northern (75N-90N, solid lines), and compared to LMD GCM $O_2(^1\Delta_g)$ VER model profiles for (middle) standard and (right) interactive aerosol simulations averaged for the same L_s , LT, latitude, and longitude conditions in this pre northern fall equinox, southern spring equinox period.

・上図は比較的よい一致を示した例だが、全体的に観測とモデルとは大きな不一致を示す
・現モデルでは冬極域へのO原子の輸送を再現できていないのではないか(totalで40%も小さい季節も)

[捕捉] 昼側観測との比較 Klasnopolsky+03

Fig. 9. The distribution of the O2 dayglow intensity as a function of season and latitude. The observations cover a period from aphelion to fall equinox.

Fig. 5. Mars in the celestial coordinates as seen on March 20, 1999, April 20, 2001, and April 23, 2003. Subsolar points are shown. Central meridians are at 106°, 191°, and 30° E, respectively.

Fig. 6. Mars O₂ dayglow intensities along the disk during the observations on March 20, 1999, April 20, 2001, and April 23, 2003. Terminators are to the right. This figure in combination with Fig. 5 makes it possible to find the dayglow intensity for any aerographic location on the disks.

- •極域で強い強度増加
- •低緯度で強度減少
- •Ls=112,148で緯度方向

Fig. 8. Variations of the O2 dayglow intensity with latitude.