

Seasonal variation of Mercury's exosphere deduced from MESSENGER data and simulation study

観測データと数値シミュレーションを用いた水星中性 Na 大気の季節変動性に関する研究

*Y.Suzuki(1), K.Yoshioka(2), G.Murakami(3) and I.Yoshikawa(2)

(1) Graduate School of Science, University of Tokyo,

(2) Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo, (3) JAXA/ISAS

要旨

- MESSENGER/MASCS の観測結果の解析と 3 次元理論モデルの構築により、水星中性 Na 大気の季節変動性の要因を議論した。
- MASCS の解析から、LT12 上空でのみ Na 大気量が遠日点付近で極大になることを確認した。
- Na 大気生成過程として熱脱離・光励起脱離・太陽風イオンスパッタリング・微小隕石衝突による蒸発の 4 つのみを考慮したモデルではこの極大を再現することができなかった。
- 遠日点付近では彗星ダストストリームの衝突による一時的かつ局所的な大気放出が発生している可能性がある。

イントロダクション

水星の大気は非常に希薄であり、無衝突大気と見なすことができる。主な大気構成原子は表 1 のようであるが、軌道離心率が大きいいため、柱密度は公転の位相に応じて大きく季節変動する。大気構成原子のうち、水素とヘリウムは主に太陽風により供給され、その他の原子は主に表面からの脱離により大気に供給される。現在、熱脱離・光励起脱離・太陽風イオンスパッタリング・微小隕石衝突による蒸発の 4 つが脱離過程として特に重要視されている。過程により強く働く領域・時期が異なるほか、放出される粒子のエネルギー分布も大きく異なる。水星大気は無衝突とみなすことができ、流体力学的な運動はないため、脱離時の空間分布および速度分布が大気構造に直接反映されるという特徴がある。従って、水星大気は太陽放射や太陽風等の宇宙空間環境の天体への影響が直接見られる領域として重要である。また、月等の衛星や近年発見された水星サイズの系外惑星 (Kepler-37b など) をはじめとする希薄大気保持天体一般の環境理解のためにも、水星大気の研究は重要である。

これまでに水星の周回観測を行った探査機は NASA の MESSENGER 探査機のみである。MESSENGER 探査機に搭載された分光器 MASCS による観測結果の一例を図 1 に示す。水平分布を見ると、Na では弱い朝夕非対称性が見られる一方、Ca や Mg では非常に強い朝夕非対称性があることが分かる。鉛直分布を見ると、図 1 の場合、Na は高度 1,000km を境に分布が折れ曲がり、Ca は 500km 付近で折れ曲

主な原子種	柱密度 ($\times 10^6/\text{cm}^2$)
Na	~200,000
Mg	~100,000
O	<40,000
H	~5,000
K	~1,000
Ca	<1,000
Al	~15

"Mercury Fact Sheet" by NASA.

表 1: 水星大気的主要な構成原子柱密度は大きく季節変動する。

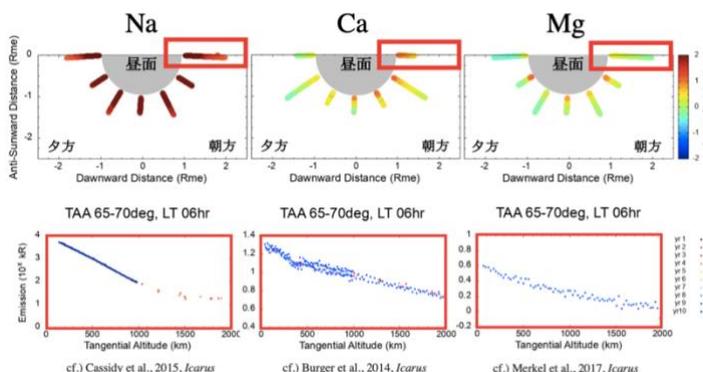


図 1: MESSENGER/MASCS による観測結果の例
上段は南側から見た昼面上空の大気分布、下段は朝方上空の大気の鉛直分布を表している。

がる様子が見て取れる。一方で、Mgについては明瞭な折れ曲がりが見られない。このように原子により大気構造が異なることは、各原子が異なる宇宙空間環境の影響を反映していることを意味している。

本研究の目的

本研究では希薄大気保持天体の宇宙空間環境に対する応答の理解を目的としている。この目的を達成するために、まず MESSENGER/MASCS の観測データの解析および3次元時間発展モデルの構築を通して、水星中性 Na 大気の生成・散逸機構の理解を目指した。ここで Na を選択した理由は、発光効率が非常に高く明るいため、他の原子に比べて観測データが豊富に存在するためである。

先行研究

Leblanc & Johnson (2010) ではシミュレーションにより、各機構による大気放出量の季節変動性を推定している。結果の一例が図2である。水星と太陽の距離が最も小さくなる近日点付近で、熱脱離による大気放出量が極大になることが見て取れる。しかし、光励起脱離については太陽から照射される紫外線によって生じるにもかかわらず、近日点付近では大気放出量が極大にならないことが分かる。熱脱離により表面の Na 密度が著しく減少するため、光励起脱離の効率が最大になる近日点でも大気量は極大にならないと考えられる。先行研究では表面への Na 供給過程やスパッタリング、微小隕石衝突に関するモデル設定が不十分であるという問題があるが、最も問題視すべきは MESSENGER の観測結果を反映し、探査機による観測の強みである細かい空間構造に着目したモデル研究がほとんど存在しないことである。

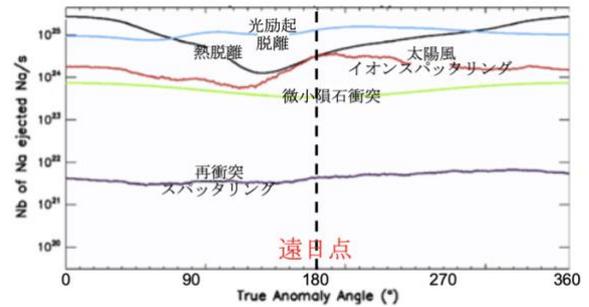
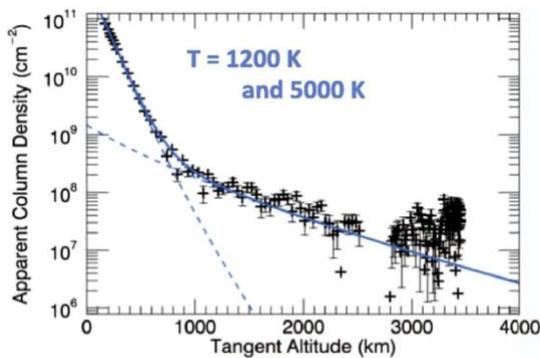


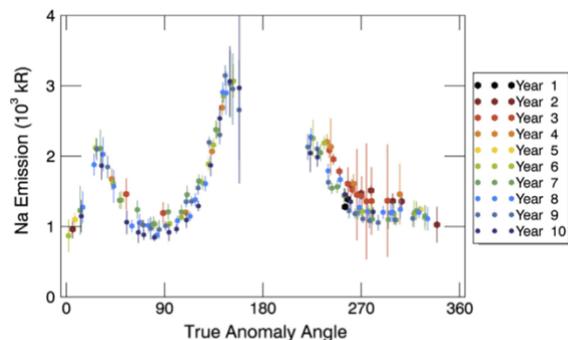
図2：各機構による大気放出量の季節変動性

Cassidy et al. (2015) では、MASCS の観測結果をもとに Na 密度の鉛直プロファイルを導出し、Na の脱離時の速度分布を推定している (図3)。結果、高度 1,000 km 以下に存在する Na の脱離時の速度分布は 1,200 K の Maxwell 分布に近く、主に光励起脱離によって放出されていることが確認された。この結果は地上観測の結果とも整合的である。しかし、1,000 km 以上に存在する Na については温度の推定誤差が著しく大きく、主脱離機構の特定に至っていない。同じ研究で、Na 大気量の季節変動性も見積もられている。地上望遠鏡では発光効率 (g-factor) が極大になる TAA60°, 300°付近で大気量が極大となり、近日点および遠日点付近で極小になる様子が観測されていた。しかし、MASCS の観測結果からはローカルタイム (LT) 12 上空では大気中の Na 放射輝度が遠日点付近で極大になるという結果が得られた (図4)。この原因として (1) Na に富んだ地表面の夜面から昼面への自転速度の増加 (2) 太陽放射圧の弱化による昼面上空大気の膨張 (3) “cold-pole longitude” と呼ばれる特定経度への Na の濃集、の3つの仮説が考えられている (Cassidy et al., 2015, 2016)。



Cassidy et al., 2015, *Icarus*

図3：MASCS の観測結果から推定される Na 密度の鉛直プロファイル



Cassidy et al., 2015, *Icarus*

図4：MASCS の観測結果から推定される LT12 上空 300 km における Na 放射輝度の季節変動

MESSENGER/MASCS のデータを用いた季節変動性解析

Cassidy et al. (2015)ではLT12 上空の季節変動性解析が主であったが、LT06, LT18 上空 300 km の Na 放射輝度の季節変動性も解析すると図 5 のようになる。LT06, LT18 上空については遠日点付近で放射輝度が極小になっており、地上観測の結果と整合的である。遠日点における放射輝度の増大は局所的であることが窺える。

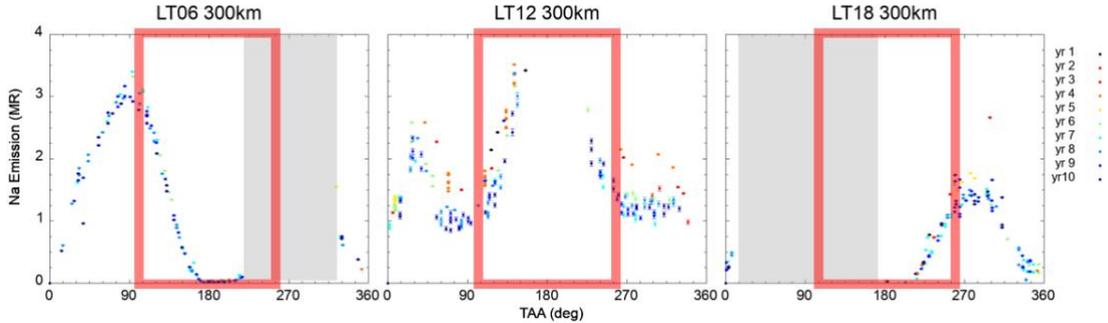


図 5: MASCS の観測結果から推定される LT06, LT12, LT18 上空 300 km における Na 放射輝度の季節変動

モデル計算を用いた季節変動性解析

Na 大気中の放射輝度の季節変動性の要因を考察するため、理論モデルの構築を行った (図 6)。Na を全て水星表面に均一に分布させた状態を初期条件とし、熱脱離・光励起脱離・太陽風イオンズパattering・微小隕石衝突の 4 つの過程により Na が放出されると仮定した。放出時の粒子の速度ベクトルは各過程ごとに特定の速度分布関数に従って確率的に決定し、モンテカルロ法により大気分布を計算した。大気中では粒子が太陽重力・水星重力・太陽放射圧の 3 つの力を考慮した運動方程式に従って運動するとした。損失過程は光電離による損失のみを考慮した。

初期条件

- Naは全て表面に分布
- 熱脱離のみを考慮して2水星年計算した後の表面Na密度を適用

表面から大気への放出率

熱脱離 (TD)

$$R_{TD} = \left[1 - \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{U}{k_B T_s}\right) \right\}^{\nu_{AT}} \right] \sigma_{Na}$$

光励起脱離 (PSD)

$$R_{PSD} = F_{ph(>5eV)} Q_{PSD} \cos Z \sigma_{Na}$$

太陽風イオンズパattering (SWS)

$$R_{SWS} = F_{SW} Y_{SWS} f_{Na}$$

微小隕石衝突 (MIV)

$$R_{MIV} = F_{meteo} \overline{M}_{vapor} f_{Na}$$

大気中での運動方程式

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_0}{dt^2} = -\frac{GM_{Sun}}{r_0^3} \mathbf{r}_0 + \frac{GM_{Mercury}}{r_1^3} \mathbf{r}_1 + \mathbf{b}$$

\mathbf{r}_0 : 太陽から見た粒子の位置
 \mathbf{r}_1 : 水星から見た粒子の位置
 \mathbf{b} : 共鳴散乱による放射加速度

光電離に対する寿命 $\tau \sim 1.9 \times 10^5$ 秒 @ 1au

図 6: 本研究で用いた計算モデル

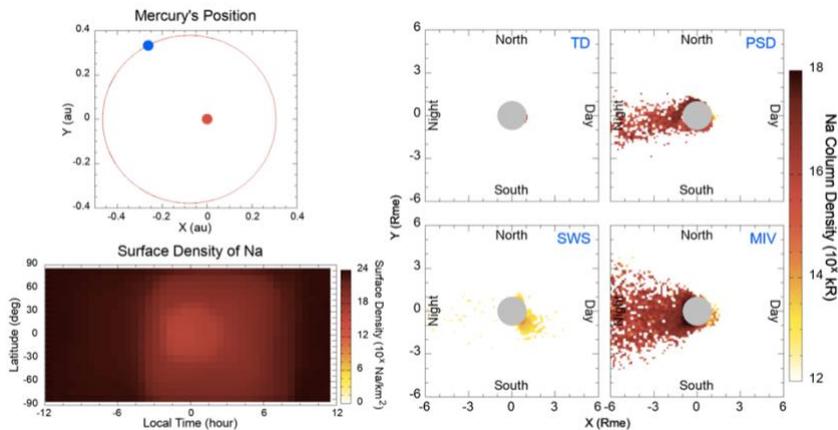


図 7: 計算結果の一例

計算結果の一例を図 7 に示す。図 7 は TAA120° 付近における Na 表面密度および各脱離過程によって放出された Na の大気中での分布を表している。南側から真北方向へ大気中の放射輝度を視線積分し、MASCS の観測結果を再現すると図 8 のよう。さらなるパラメーター調整の必要はあるものの、LT06, LT18 の放射輝度については、遠日点で極小になるという点で MASCS の観測と整合的である。しかし、LT12 については遠日点での放射輝度の極大を再現することができなかった。まず、この不整合が熱脱離のパラメーターの不定性に起因する可能性を数値計算により考察したが、パラメーターを変更しても

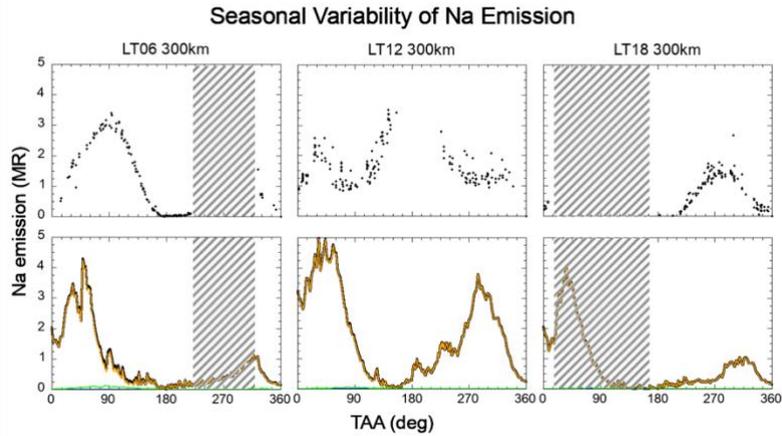


図 8 : MASCS の観測結果とモデルの計算結果の比較

上段は MASCS の観測結果、下段はモデルによる計算結果を表している。

図中の網掛けは MASCS のデータの欠損時期を示している。

LT12 上空の遠日点付近における大気放射輝度の極大を再現できなかった。熱脱離に着目した理由は、熱脱離は表面 Na 密度を変化させることにより間接的に他過程による大気放出量を左右するので、大気量の熱脱離パラメーター依存性を定性的に考察することが困難であると考えたためである。

Ca の大気放出量が TAA25° 付近で極大になる要因として、彗星ダストストリームによる大気放出が注目されている (Killen and Hahn, 2015; Christou et al., 2015)。本研究では、遠日点付近における Na 大気量の増大にも彗星ダストストリームによる大気放出が寄与している可能性を新たに考察する。先の 4 脱離過程に加え、彗星ダストストリームによる大気放出量を式(1)のようにガウス分布 (図 9) で仮定し、LT12 上空の大気放射輝度の季節変動性を評価した。

$$R_{CDS} = R_0 \exp\left(-\frac{(TAA - 180^\circ)^2}{2\sigma_{TAA}^2}\right) \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{(LT - 12hr)^2}{\sigma_{LT}^2} + \frac{latitude^2}{\sigma_{latitude}^2}\right\}\right] \quad (1)$$

式中の R_0 の値を 3 通りに変えて計算した結果を図 10 に示す。MASCS の観測結果と比較すると、 $R_0 \sim 10^{22} \text{Na}/\text{km}^2/\text{sec}$ 、すなわち 1 水星年に 10^8kg 以下の彗星ダストストリーム粒子の衝突が起こると仮定すると遠日点付近の放射輝度の増大を再現できることが分かる。実際にはストリーム粒子の衝突による地表面への Na 供給も大気量の増大に寄与すると考えられるためこの値は過大評価である可能性が高いが、地球へのダスト降着量 ($5 \times 10^7 \text{kg}/\text{年}$) と同程度であり、現実的な仮定であると言える。

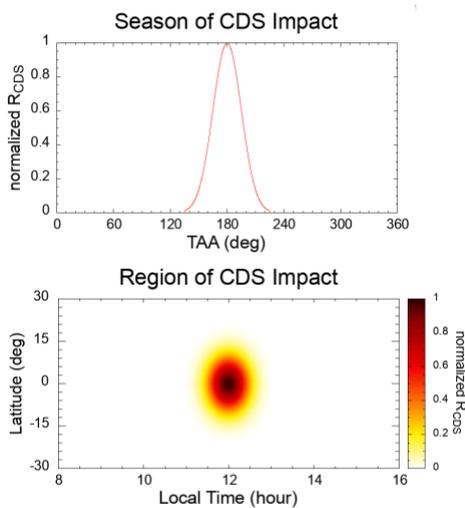


図 9 : 彗星ダストストリームによる大気放出量の仮定

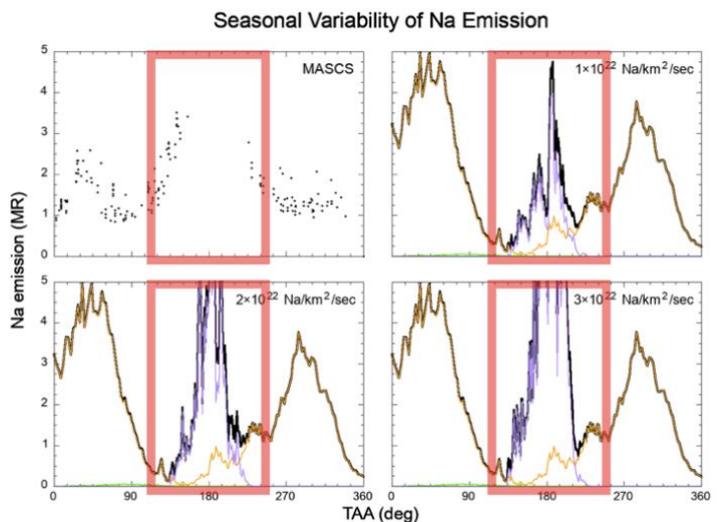


図 10 : MASCS の観測結果と彗星ダストストリームを考慮したモデルの計算結果の比較

左上図が MASCS の観測結果、その他 3 つの図がモデル計算の結果である。紫色の線がストリーム粒子の衝突に起因する大気量である。