



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-05-021

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

水星大気の生成メカニズムに関する研究
～MMO搭載機器MSASIでの観測に向けて～

彦坂 健太郎・亀田 真吾・野澤 宏大
吉岡 和夫・山崎 敦・吉川 一郎・笠羽 康正

2006年 3 月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

水星大気の生成メカニズムに関する研究 ～MMO搭載機器MSASIでの観測に向けて～

彦坂健太郎・亀田真吾・野澤宏大・吉岡和夫・山崎 敦・吉川一朗・笠羽康正

Mercury's Exosphere explored by BepiColombo mission

By

Kentaro HIKOSAKA, Shingo KAMEDA, Hiromasa NOZAWA, Kazuo YOSHIOKA,

Atsushi YAMAZAKI, Ichiro YOSHIKAWA, and Yasumasa KASABA.

Abstract : Mercury's Sodium Atmosphere Spectral Imager (MSASI) on BepiColombo is under development. MSASI is a high-dispersion visible spectrometer working in the spectral range around sodium D2 emission using a Fabry-Perot interferometer (FPI).

Discoveries of Na, K and Ca from the ground-based observations clearly arise that the regolith of Mercury releases a fraction of its content to the atmosphere. Some processes are proposed up to now as release mechanisms, e.g. (1) Photon-stimulated desorption, (2) Ion sputtering, and (3) Micro-meteoroid impact/vaporization. Here we use 3D Monte Carlo simulation in these cases to describe the images taken by MSASI.

We can see specific spatial distributions of the Mercury atmosphere in each process. Therefore we conclude that MSASI can identify the mechanism of the Mercury atmosphere comparing with our simulation result.

概 要

我々はBepiColombo水星探査計画の磁気圏探査機(MMO)の搭載機器として、ナトリウム大気の運動を可視化するカメラ(MSASI)を開発している。これはファブリペロー干渉計を用いてナトリウムD2線を分光観測する装置である。

水星のナトリウム大気は地上からの観測により、その放出機構として太陽光による光脱離、微小隕石の衝突による気化、太陽風イオンによるスパッタリングが主な候補として考えられている。今回この三つの場合でそれぞれ数値計算を行いナトリウムのコラム密度を求めた結果、放出機構によりナトリウム大気の分布に特徴が表れることが確認された。さらにMSASIによる撮像を想定し、MMOの軌道・太陽活動度・ナトリウム大気の明るさなどを考慮することでD2線の強度分布を計算した結果、コラム密度の場合と同様に放出機構によってそれぞれ特徴的な大気分布がMSASIで撮像できることを確認した。今回の計算結果より水星探査機に搭載する大気カメラ(MSASI)での観測が実現することで、発見以来謎とされていた水星大気の生成メカニズムを解明することが可能であると結論付けた。

1. 序 論

1.1. BepiColombo国際水星探査計画について

日欧協力によるBepiColombo国際水星探査計画では、磁気圏探査機 (MMO: Mercury Magnetospheric Orbiter) の打ち上げが2013年に予定されている (図1参照)。

MMOの搭載機器の一つには水星大気撮像カメラ MSASI (Mercury's Sodium Atmosphere Spectral Imager) がある。これは水星大気の微発光を捉え、大気の放出・消失過程と磁気圏のグローバル・ダイナミクスの解明を目的としている。

1.2. 水星大気について

水星は1970年代のMariner10号の探査によって、クレーターに覆われたその地表の様子がはじめて撮影され、希薄な大気存在と固有磁場によって磁気圏を形成していることが明らかにされた。Mariner10号以来水星の直接探査は行われていなかったが、地上からの観測によりナトリウムとカリウム大気存在が明らかにされ^{[1][2]}、さらに近年にはカルシウム大気の輝線も発見された^[3]。

- ・ Mariner10 (1974,1975) による flyby で H, He, O が発見
- ・ Potter & Morgan (1985) 水星の Na 大気発見
- ・ McGrath (1986) “熱脱離” と “光脱離” を提唱^[4]
- ・ Morgan et al. (1988) “微小隕石衝突” を提唱^[5]
- ・ Potter & Morgan (1990,1999)

観測結果によると、高緯度に集中していることから、“太陽風イオンスパッタリング”を提唱^{[6][7]}

- ・ Sprague et al. (1992,1997) 観測により水星の朝夕での明るさが違う→ “熱脱離” を提唱^{[8][9]}

水星は地上からの観測が難しく、大気の定量的な値がまだ十分に得られていない。水星中性大気は水星表層の岩石との相互作用で生成されたと考えられている。その放出機構としては主に、太陽光による光脱離、微小隕石の衝突による気化、太陽風イオンによるスパッタリング、熱脱離などが考えられているが、どの放出機構による影響が大きいのかは未解決の問題として残っている。本報告では、水星大気モデルを考え、シミュレーション結果よりMSASIでの観測で予測される結果を紹介する。

2. 大気モデル

2.1. 太陽共鳴散乱

原子の二つの固有状態間の遷移に対応して、光の吸収や放出が行われる。この場合、光の吸収・放出は状態遷移のエネルギーに相当する波長のごく近傍で選択的におこるので、原子の場合には吸収線や輝線が現れる。ナトリウム原子は、太陽光のD1線 ($\lambda_1=589.592\text{nm}$) とD2線 ($\lambda_2=588.995\text{nm}$) の光のエネルギーを共鳴吸収し (図2参照)、励起された原子が等方的に共鳴放射を行なう。このように粒子が特定の波長の光を選択的に吸収し再放

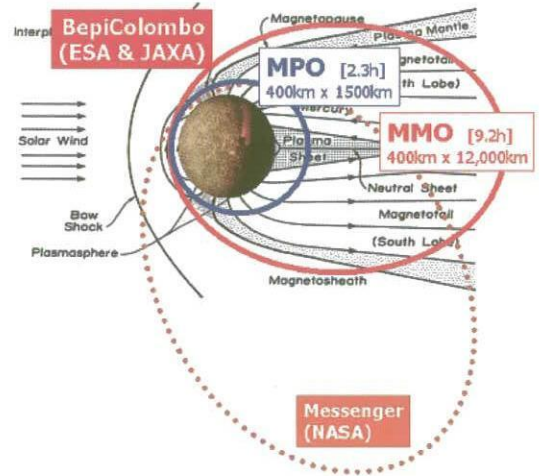


図1: MMOの軌道。MMOは水星の極軌道を取り、水星表面から400km-12000kmの大きな楕円軌道で回る。

出する性質を共鳴散乱と言う。

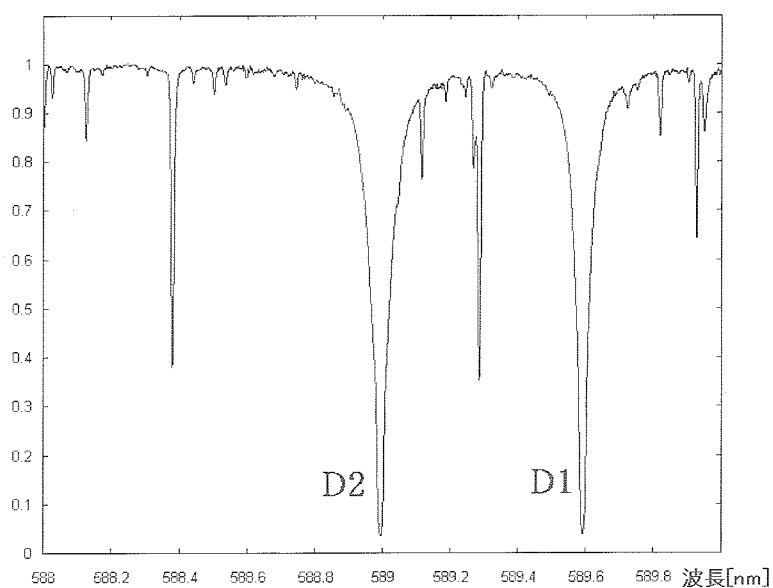


図2：D線付近の太陽スペクトル。ナトリウムの吸収線のD1線（589.592[nm]）とD2線（588.995[nm]）に着目する。

2.2. 基礎方程式

水星の公転軌道は離心率 $e=0.2056$ と大きな楕円軌道をとる（地球の場合は $e=0.01671$ ）（図3）。太陽との距離が近日点で0.31AU、遠日点で0.47AUとなり他の惑星に比べ大きく変化することが分かる（図4）。これは水星の太陽方向の速度成分が大きく変化することを表し、ドップラーシフトの影響が大きいことを意味する。水星の太陽に対する位相角をTAA（true anomaly angle）と呼ぶ。

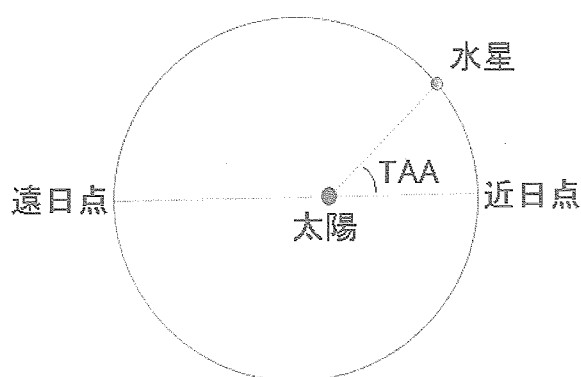


図3：水星軌道。水星の太陽に対する位相角をTAAと呼ぶ。水星が近日点にあるときを $TAA=0^\circ$ とし、遠日点にあるときを $TAA=180^\circ$ とする。

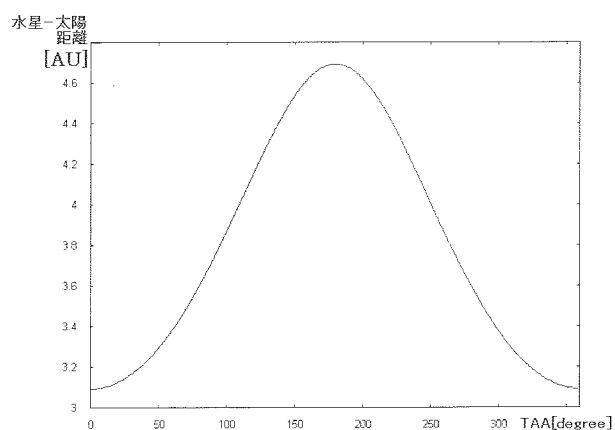


図4：水星と太陽の距離。

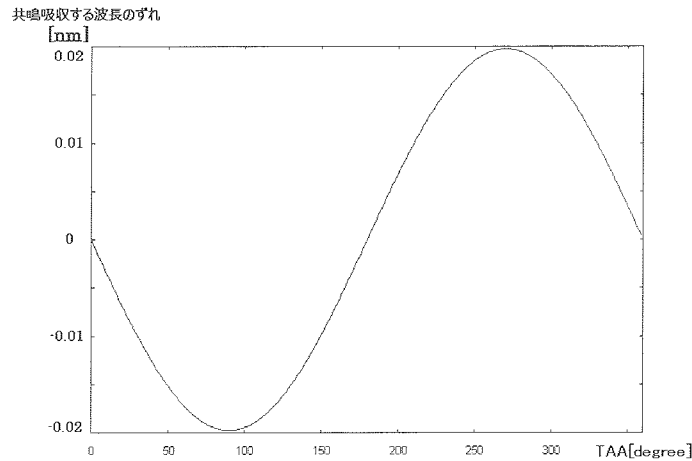


図5：ドップラーシフトにより共鳴吸収する波長のずれ。ドップラーシフトにより見かけの波長が長くなると、D線に相当する部分の波長はドップラーシフト前に比べ短い波長にずれる。

ナトリウム中性大気は重力の他に太陽放射圧の影響を大きく受け、その大きさは太陽と水星の位置関係TAAに依存する。これは太陽光を共鳴吸収するD線波長がドップラーシフトによりずれるからである（図5）。水星の大気は非常に希薄なため粒子同士の衝突は無視できる。よって中性ナトリウム原子に働く力は、太陽重力・水星重力・太陽放射圧となり、次式のように表せる。

$$\frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2} = -\frac{GM_s}{r^3} \mathbf{r} - \frac{GM_m}{r'^3} \mathbf{r}' + \mathbf{b}$$

これは太陽を原点とした座標系であり \mathbf{r} はナトリウム原子の位置ベクトル、 \mathbf{r}' は水星中心から見たナトリウム原子の相対ベクトル、 M_s は太陽質量、 M_m は水星質量、 \mathbf{b} は太陽放射圧をそれぞれ表す。数値計算では水星を原点とした慣性系に直した。

2.3. 太陽放射圧

水星大気中のナトリウム原子は、太陽光のD1線とD2線の光のエネルギーを共鳴吸収し、励起された原子が等方的に共鳴放射を行なう。この結果、全体としては反太陽方向へと加速を受ける、これを太陽放射圧による加速と呼んでいる。太陽放射圧による加速度 \mathbf{b} は次のように表せる^[10]。

$$\mathbf{b} = \frac{1}{m_0} \left(\frac{h\nu_1}{c} J_1 + \frac{h\nu_2}{c} J_2 \right) \quad [\text{cm/s}^2]$$

m_0 はナトリウム原子の質量、 h はプランク定数、 c は光速である。、 J_1 、 J_2 はナトリウム原子がD1線、D2線で光子を吸収する割合で、次のように表せる。

$$J_i = \gamma_i \cdot \left(\frac{\pi e^2}{m_e c} \right) \cdot \left(\frac{\pi F_\nu}{R_{ob}^2} \right) \cdot f_i \quad (i=1,2) \quad [\text{photons/atom/s}]$$

πF_ν はD1線、D2線付近の太陽光フラックスを表わしSolar2000のモデルより 5.18×10^{14} [photons/cm²/s] (at 1[AU]) (図6) を、 γ_i は連続光に対するD線の強度を表し計算より求めた図7のデータの値を用いた。 e は自然対数の底、 m_e は電子質量、 R_{ob} は水星 - 太陽の距離[AU]であり、 f_i は振動子強度と呼ばれる定数で、一本一本の共鳴線に固有な数値を持っている。ナトリウムD1線の振動子強度 f_1 は0.327であり、D2線では $f_2=0.655$ である。

太陽フラックス

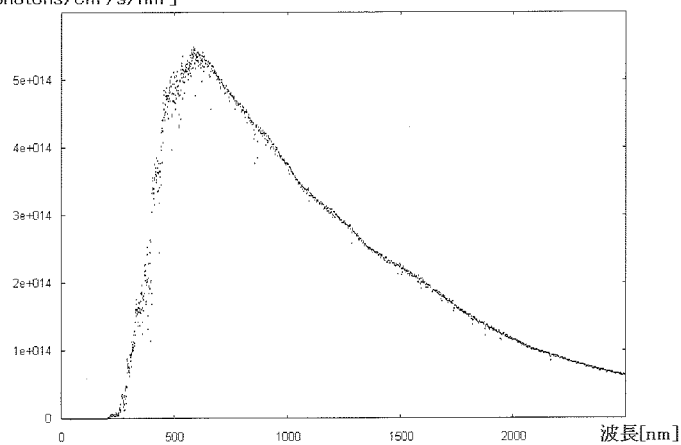
[photons/cm²/s/nm¹]

図6：1[AU]における太陽フラックスの波長と強度の関係。Space Environment TechnologiesのSolar2000の2006年1月のモデル。

連続光に対する強度

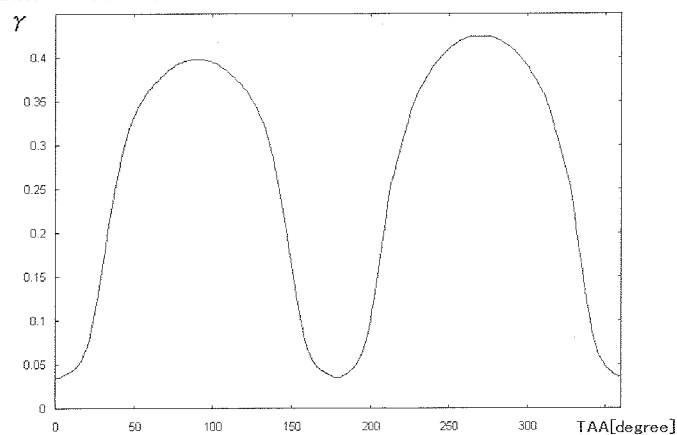


図7：太陽連続光に対するドップラーシフトしたD2線の相対的な強度。

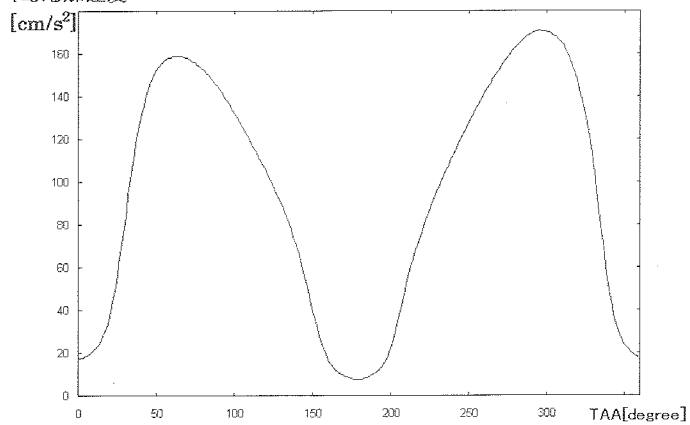
太陽放射圧
による加速度

図8：太陽放射圧による加速度の大きさ。

ナトリウム原子が太陽放射圧により受ける加速度の大きさはTAAによって10～170[cm/s²]と10倍以上変化することが分かる(図8)。これより、水星の位置(TAA)がナトリウムの大気の分布に大きな影響を持つことになる。また、水星の表面での重力は370[cm/s²]であり、太陽放射圧の影響が無視できないことが分かる。太陽重力は5[cm/s²]程度で影響してくる。

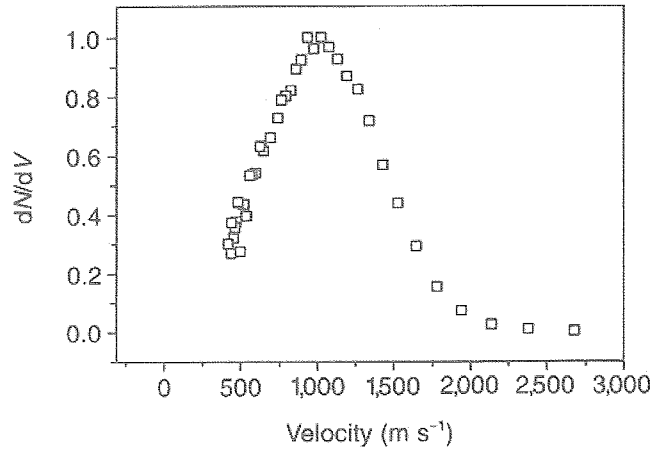


図9：電子衝突実験によるNaの放出速度分布。月面を模擬したナトリウムを付着させたSiO₂のフィルムに200[eV]の電子を衝突させ、放出されるナトリウム原子の速度分布を測定した^[11]。

3. 放出機構

3.1. 太陽光脱離 (PSD: photon stimulated desorption)

入射した光子のエネルギーにより電氣的に励起されて生じた電子と地表面に付着していたナトリウムイオンとが結合し、非熱的な速度分布を持ってナトリウム原子が放出される現象をいう。

放出される時の速度分布は、月面を模擬したYakshinskiy et al. (1999)^[11]の電子衝突実験の結果(図9)をもとにピークが1 [km/s]になるマクスウェル・ボルツマン分布

$$f(v) = \left(\frac{4}{\sqrt{\pi}} \right) \left(\frac{m_0}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}$$

に近似した。 m_0 はナトリウム原子の質量、 k はボルツマン定数、 T は温度、 v は放出速度を表す。 $T=1400\text{K}$ としたときが、実験結果とよく一致する。放出量に関しては次式を用いた^[12]。

$$Flux_{PSD} = \frac{1}{2} \frac{1}{3} Q \cdot \sigma_{Na} \cdot F_{UV} \frac{1}{R_{orb}^2} \cos(\text{zenith})$$

Q はナトリウム原子の光脱離断面積であり $3.0 \times 10^{-20} [\text{cm}^2]$ を用いた^[11]。水星表面温度は昼面で575[K]～700[K]程度になることが知られており^{[13][14]}、光脱離断面積は温度依存性をもつことが報告されている^[12]。1/2はこの温度による影響を表している。また水星表面は平らではなく月の表面と同様にレゴリスであると考えられている。レゴリスでは、スパッタリングにより生成された粒子のうち2/3は放出されず、レゴリス内に留まることが報告されており^[12]、1/3はこれを表す。表面の密度 σ は $7.5 \times 10^{14} [\text{atoms}/\text{cm}^2]$ であり、ナトリウム原子の割合 $f_{Na}=0.0053$ より、 $\sigma_{Na} = \sigma \times f_{Na} = 3.975 \times 10^{12} [\text{Na}/\text{cm}^2]$ とした。 F_{UV} は太陽光脱離が起こるとされる0～247.9[nm]の総フラックス量としてSolar2000の2006年1月1日のモデルより $2.28 \times 10^{14} [\text{photons}/\text{cm}^2/\text{s}]$ (at 1[AU])を用いた。光脱離は太陽光の当たる昼面でのみおこり、入射する太陽光の強度には天頂角依存性を考慮した。

3.2. 太陽風イオンスパッタリング (CPS: charged particle sputtering)

太陽風起源のイオンの照射によってナトリウム原子が放出される現象。水星は磁場をもつため、この現象が起こるのはカスプ領域とされる。太陽活動により入射するイオンの量や領域は変動すると考えられているが、ここでは水星昼面の20%から放出されるという仮定のもとに図11の桃色部分に示すような範囲でイオンスパッタリングが起こるとし計算を行った。また、放出速度の分布はWiens et al. (1997)^[15]の室内実験の結果(図10)より、シグメント・トンプソン分布での近似が良く、これを用いた。

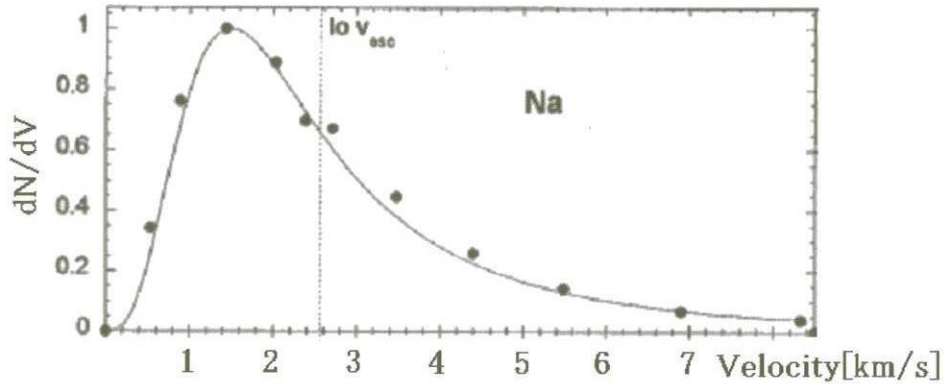


図10：スパッタリングの実験の結果[15]

放出量に関しては次式で表せる。

$$Flux_{CPS} = \Phi_i Y_i f_{Na} \quad [Na/cm^2/s]$$

Φ_i は単位時間・単位面積あたりの入射イオンの数[atoms/cm²/s]を表す。水星平均公転軌道である0.42[AU]のとき、太陽風の速度を750[km]、密度を66[cm⁻³]と仮定し、 $\Phi_i=4.95 \times 10^9$ [atoms/cm²/s]を用いた。この値は距離の逆二乗に比例する関係を用いると他のTAAにおける値も求まる。 Y_i は太陽風粒子1個のスパッタリングによりレゴリスから放出される粒子の割合で0.19を用い、 f_{Na} はレゴリス中のナトリウム原子の割合であり0.0053を用いた^[12]。

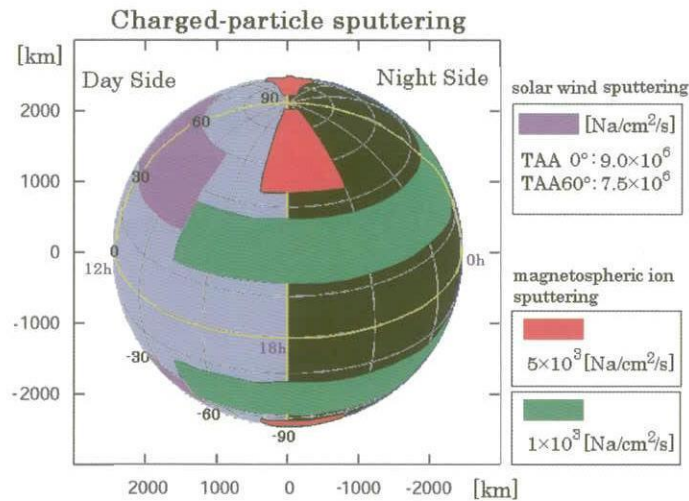


図11：イオンスパッタリングによるナトリウムの放出領域。太陽風イオンによるスパッタリングが起こる領域を桃色に、太陽光電離によりイオン化したナトリウムによる再衝突スパッタリングを頻度により赤と緑色に示した。Delcourt et al. (2003)では水星磁場を仮定し再衝突スパッタリングによるナトリウム原子の放出量を計算している。

太陽光電離によりイオン化したナトリウムは、水星磁場にその運動を支配され水星表面に再衝突する。この再衝突イオンのスパッタリングによるナトリウム原子の放出量はDelcourt et al. (2003)^[16]の計算結果を参考に、図11の赤色部分からは 5×10^3 [Na/cm²/s]、緑色部分からは 1×10^3 [Na/cm²/s]であると仮定し、これを計算に用いた。

3.3. 微小隕石衝突 (MIV: meteoroid impact vaporization)

水星は地球と異なり大気が非常に希薄なため、星間塵や微小隕石がそのまま水星表面に衝突する。その際に発生したエネルギーで地表物質が飛散すると考えられる。この過程で放出されるナトリウムの速度は室内実験の結果^[17]をもとに $T=5000$ [K]のマクスウェル・ボルツマン分布に近似した (図12)。 $T=5000$ [K]の場合3 [km/s]以上の速度で放出される割合が多くなっていく。

微小隕石の衝突は、観測結果より地球の場合は朝方のほうが夕方より二倍フラックスが大きくなることが報告されているが、水星で同様のことがいえるかは定かではないため、ここでは衝突は全球で一様に起こると仮定した。

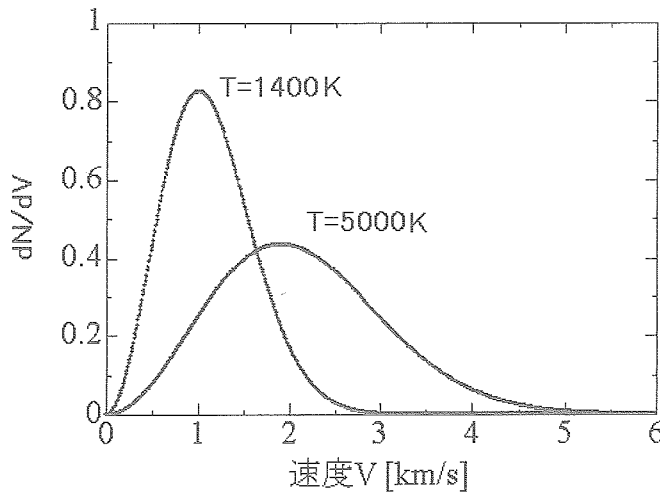


図12：マクスウェル・ボルツマン分布。光電離の場合の $T=1400$ [K]と微小隕石衝突の場合の $T=5000$ [K]とした時の速度分布。

放出量については、水星の近日点 (0.31 [AU]) における微小隕石衝突による蒸発量は 5×10^{-15} [g/cm²/s]とされており^[18]、これより放出されるナトリウム原子の量は 6.9×10^5 [Na/cm²/s]と求まる。 R_{orb} を太陽からの距離[AU]とすると、衝突する微小隕石の量は $R_{orb}^{-1.9}$ に比例するので^[19]、微小隕石衝突による放出量は

$$Flux_{MIV} = 7.5 \times 10^4 \cdot R_{orb}^{-1.9} \quad [\text{Na}/\text{cm}^2/\text{s}]$$

と表せる。

各放出機構における $TAA=0^\circ$ 、 60° 、 180° での単位時間あたりに生成され放出される量については表1、表2にまとめた。

表1：水星全体からの総放出量

	太陽光脱離 (PSD)	イオンスパッタリング (CPS)	微小隕石衝突 (MIV)
TAA = 0°	8.8×10^{24} [Na/s]	6.7×10^{23} [Na/s]	5.2×10^{23} [Na/s]
TAA = 60°	7.4×10^{24} [Na/s]	5.6×10^{23} [Na/s]	4.4×10^{23} [Na/s]
TAA = 180°	3.8×10^{24} [Na/s]	2.9×10^{23} [Na/s]	2.4×10^{23} [Na/s]

表2：単位面積あたりの放出量（太陽直下点での値）

	太陽光脱離 (PSD)	イオンスパッタリング (CPS)	微小隕石衝突 (MIV)
TAA = 0°	4.7×10^7 [Na/cm ² /s]	9.0×10^6 [Na/cm ² /s]	7.0×10^5 [Na/cm ² /s]
TAA = 60°	4.0×10^7 [Na/cm ² /s]	7.5×10^6 [Na/cm ² /s]	5.9×10^5 [Na/cm ² /s]
TAA = 180°	2.0×10^7 [Na/cm ² /s]	3.9×10^6 [Na/cm ² /s]	3.2×10^5 [Na/cm ² /s]

4. 消失過程

中性ナトリウムの損失機構としては、太陽紫外線により光電離されることでナトリウムイオンへ消失していく過程が支配的である。

4.1. 太陽活動度

太陽活動度についてはMMOが水星に到着し観測を始める2017年の様子を知るために、ここではSpace Environment Technologiesの予測データ（図13）を用いる。これを見ると水星探査ミッション期間中は太陽活動度が弱い時期にあることが分かる。

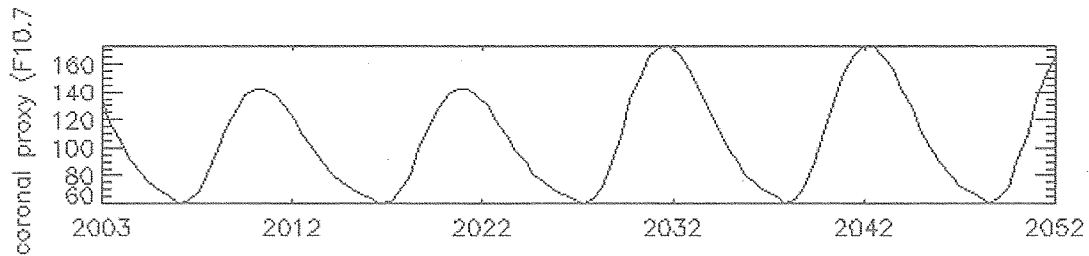
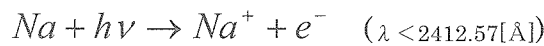


図13：太陽活動予測値。Space Environment Technologiesのデータを使用。

4.2. ナトリウム原子の寿命 (lifetime)

ナトリウムの光電離に関してはHuebner et al. (1992)^[20]より、



Rate coefficient (at 1[AU], quiet Sun)

実験値： 1.62×10^{-5} [s⁻¹]

理論値： 5.92×10^{-6} [s⁻¹]

という結果がまとめられている。太陽活動によりこの値は一割程度変化するが、今回の数値計算ではMSASIの観測時期に合わせて、静穏時における理論値を用いた。これより水星軌道におけるナトリウム原子のライフタイムは光電離で4.5～10時間と求まる。

光電離以外で考えられる消失機構については、電子衝突におけるライフタイムは23～64時間^[21]であり、電荷交

換では～3000時間^[22]であることが報告されている。これより水星において中性ナトリウム原子の消失は光電離による過程が支配的であることが確認できる。

5. シミュレーション

5.1. 計算方法

2-2で記した基礎方程式を成分ごとに数値的に解くことでナトリウム原子の運動を求めることができるが、初期条件としてナトリウム原子の放出位置と放出速度を与える必要がある。放出されたナトリウム原子が持つ初速によって、その大気分布の様子は大きく変化する。

各放出機構の放出位置・速度・量には第三章で仮定した値を用い、放出方向は等方的に放出されると仮定しモンテカルロ法を用いてナトリウム原子の軌道を計算した。

また水星表面一様となるように約一万箇所の放出点を定め、各放出点から多粒子を放出させた。多粒子を放出させるのは時間発展とともに太陽光電離による消失の効果を取り入れるためである。時間発展の計算には4次の精度のルンゲクッタ法を用い、時間刻みは10秒とした。

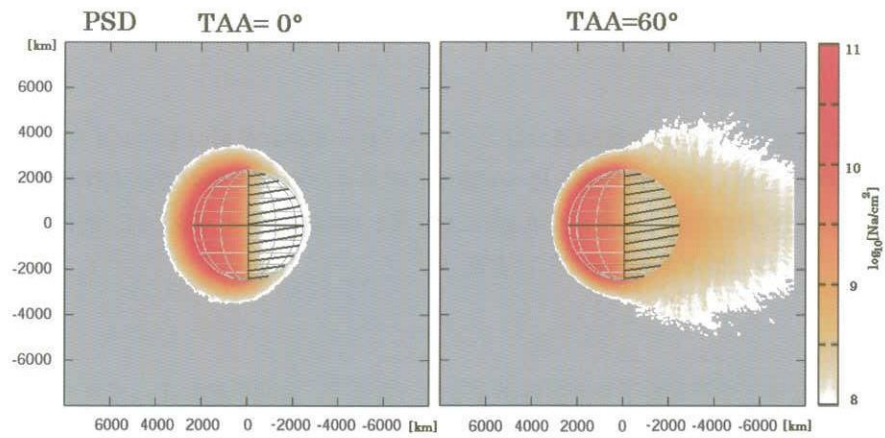
5.2. 計算結果

ナトリウム原子を放出する初期条件（放出位置・放出速度）は各放出過程において上述のように仮定し、運動方程式を数値的に解くと以下のような結果が得られる（図14）。

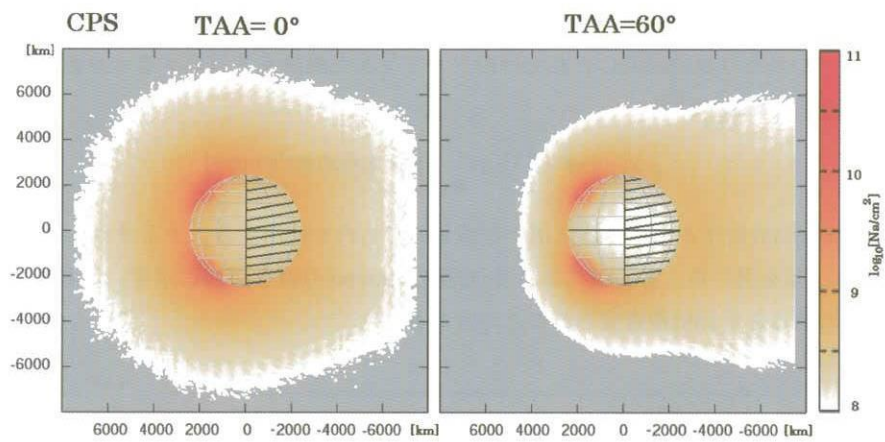
水星の脱出速度は4.4[km/s]、第一宇宙速度は3.1[km/s]であるが、中性ナトリウム原子は太陽放射圧の影響で反太陽方向に大きな力を受けるため3[km/s]以上の初速度を持って水星表面から放出されると、その多くは水星重力を振り切り反太陽方向へ飛んでいく。放出位置と方向によってはこれ以下の速度でも太陽放射圧の影響で水星重力を振り切ることが今回の数値計算の結果確認された。ここでは比較のため太陽放射圧の影響の小さいTAA=0°と影響の大きいTAA=60°の場合で放出機構による違いを見ていく。

TAA=0°の場合は太陽放射圧の大きさが水星重力に比べ小さいため（1/20以下）、水星重力が支配的な力となる。各放出機構とも水星の脱出速度（4.4[km/s]）に達するナトリウム原子の割合は非常に少ない。

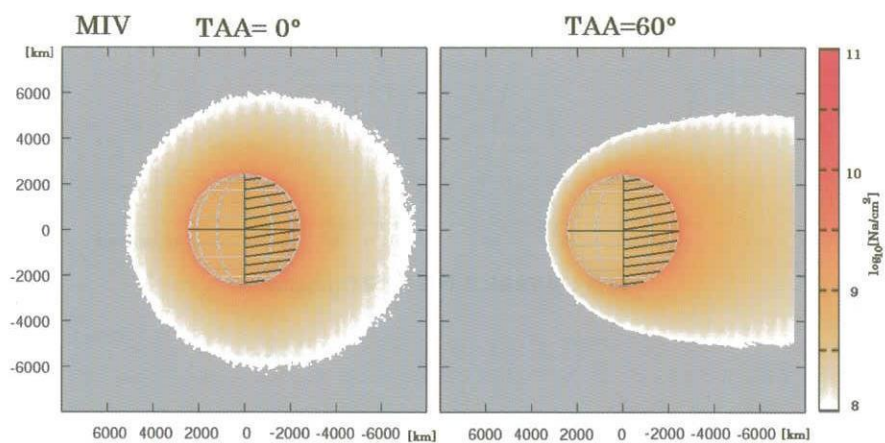
TAA=60°の場合は太陽放射圧の影響で反太陽方向にナトリウム原子が尾を引く形で分布される。より早い速度分布をもつ太陽風イオンスパッタリング（CPS）と微小隕石衝突（MIV）では尾の部分が大きな広がりを持つことが確認できる。これは地上観測により報告されているテール構造に相当すると考えられる^[23]。



(a)



(b)



(c)

図14：数値計算結果をナトリウムのコラム密度で表わした図。水星を赤道面・夕方の方向から見ており、斜線部は夜面を表す。水星の赤道半径は2440[km]。(a)太陽光脱離PSD, (b)太陽風イオンスパッタリングCPS, (c)微小隕石衝突 MIV

6. 光量に関する考察

6.1. MSASIについて

MMOに搭載する水星大気撮像カメラMSASIではファブリペロー干渉計を用いてナトリウムD2線を分光観測する。観測する波長にD2線を選んだのはD1線と比べ光度が二倍あるため、D2線の方がより確実に検出できると考えたからである。これはD1線の振動子強度が $f_1=0.327$ に対して、D2線では $f_2=0.655$ と約二倍となり、次に説明するg-factorの値がD2線の方が約二倍大きくなることによる。

6.2. g-factor

MSASIによる観測ではナトリウム粒子を直接検出するのではなく、共鳴散乱によってナトリウムから放出された光を検出する。このため、ナトリウムのコラム密度[Na/cm²]から推定される光量[Rayleigh] (1[Rayleigh]=10⁶/4 π [photons]) を計算する必要がある。コラム密度Nから光量Eに変換するには次式を用いる。

$$E = gN \quad [\text{Rayleigh}]$$

gはナトリウム原子一つ当たり単位時間にどれだけのフォトン共鳴散乱で放出するかを表すg-factorである。g-factorは次のように定義されている^[24]。

$$g = \left[\gamma \times \pi F \times \frac{\lambda^2}{c} \right] \cdot \pi \cdot \frac{e^2}{mc} \cdot f \quad [\text{photons/atom/s}]$$

ここで γ 、 πF には太陽放射圧を求める際に用いた値と同じものを使用する。ナトリウムD2線を観測するので $\lambda=588.995$ [nm]、 $f=0.655$ を用いた。各TAAにおけるD2線のg-factorの値を図15に示す。これを見ると、TAAによってナトリウム大気の明るさが10倍程度変わることが分かる。

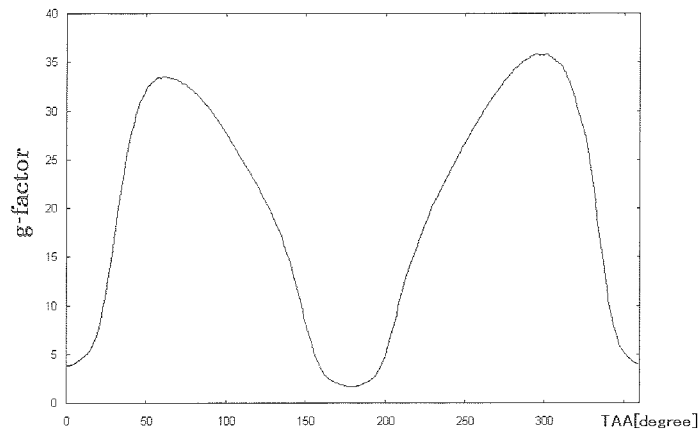


図15：各TAAにおけるD2線のg-factor

6.3. 多重散乱

散乱粒子の数密度が大きくなってくると多重散乱の影響を考慮する必要があるが出てくる。ナトリウムのコラム密度と光量の関係には次の図16のようなデータがある^[24]。

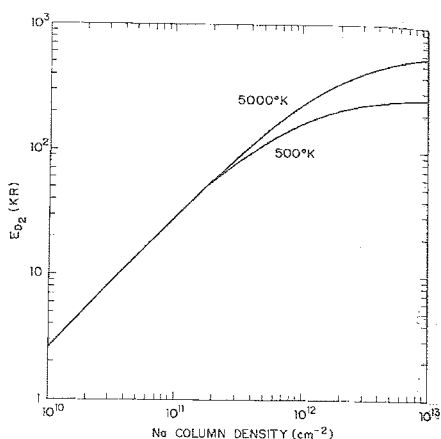


図16：ナトリウムのコラム密度と光量の関係^[24]

この図を見るとコラム密度が 2×10^{11} [Na/cm²]以上の場合は多重散乱の影響でナトリウムのコラム密度と光量が比例しなくなっていることが分かる。しかし、数値計算の結果によると太陽光脱離の場合のコラム密度で 1×10^{11} [Na/cm²]を超える部分があるが、 2×10^{11} [Na/cm²]を超えることはないため先に述べた一次近似で十分に取り扱いえると考えられる。

6.4. MSASIで期待される観測結果

g-factorの値が大きく放出機構の解明に適していると思われるTAA=60°の場合についてコラム密度から光量に変換した結果を示す(図17)。ナトリウムから放出されるD線は太陽共鳴散乱によるものなので、水星の影になり太陽光の当たらない部分のナトリウム原子は光を放出しないためMSASIでは検出できない。カラースケールはMSASIで検出できる光量の範囲(10[kR]~10[MR])に合わせている。

これを見ると放出機構によるナトリウム大気分布の違いがMSASIでも撮像できることが分かる。

太陽光脱離：昼面の特に太陽直下点付近の光量が多く、逆に夜側に明るい分布はほとんど見られない。これは太陽光脱離ではナトリウム原子の放出速度が遅いため、夜側にあるナトリウム原子のほとんどが水星の陰になり太陽光が当たらないからである。

太陽風イオンパattering：カスプ領域で局所的に明るく光る。昼面のカプス領域以外の部分は放出がほとんどないため、ナトリウム大気分布も少なくD2線が検出されない部分もある。夜側には大気の広がりが確認できる。

微小隕石衝突：極付近から夜側にかけてナトリウム大気が伸びており、大きな広がりができる。昼面と夜面の明るさの違いが少ないのが特徴。

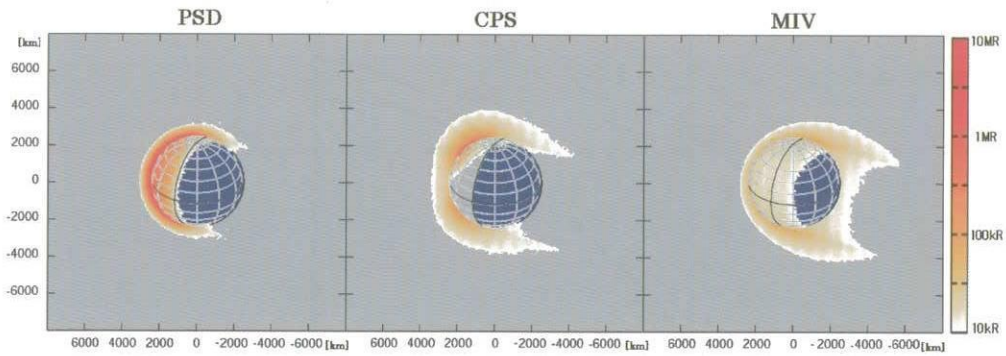


図17：MSASIの位置から見たときのシミュレーション結果
左から太陽光(PSD)、イオンスパッタリング(CPS)、微小隕石衝突(MIV)

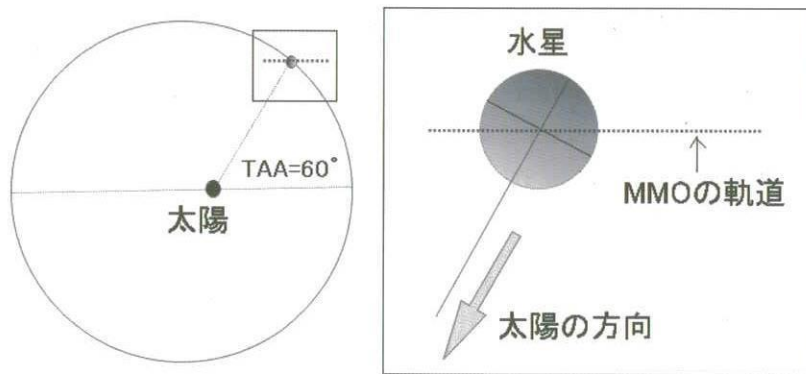


図18：極方向から見たときの水星とMMOの位置関係。MMOの軌道は近日点 (TAA=0°) と遠日点 (TAA=180°) を含む面に平行になるため、MSASIでの観測は水星の位置 (TAA) によってどの向きから撮像するかが制限される。TAA=60°のときは夕方側の昼夜境界よりも30°夜側からの観測となる。

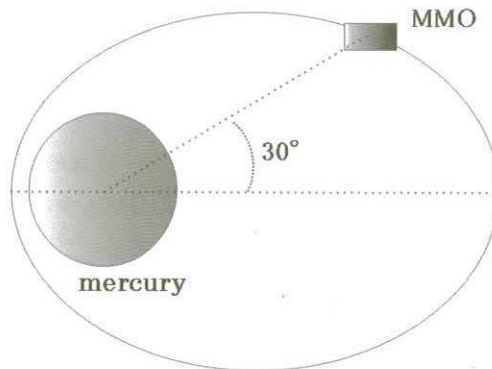


図19：赤道方向から見たときの水星とMMOの位置関係。MMOは極軌道をとるため、MSASIは水星の極付近も観測が可能である。今回の数値計算ではMSASIの視野角を考慮しMMOが水星赤道面から30°極域に位置する場合を選んだ。

7. まとめ

本稿では数値計算によりMSASIでの撮像イメージを作成し、特徴的な大気分布がD2線により観測できることを確認した。MSASIの空間分解能は水星半径の1/64 (38km) であり、今回のシミュレーションの結果はこれと同じ精度である。これまで行われてきた地上観測と比較するとこの分解能は10倍以上である。また、水星周回軌道からの撮像のため、地上観測では問題となる大気のゆらぎ等の問題がなく鮮明な画像データの取得が期待できる。このためMSASIではどの放出機構が水星大気生成のメカニズムにもっとも寄与しているのか解明する観測が実現できる。

地上観測によると、光量を説明するには光脱離が支配的であるがこれでは広がりが説明できず、また広がりを説明するには隕石衝突・スパッタリングとなるが逆に光量が説明できない。このような矛盾点を解決するためにも光量・広がりの正確な観測が必要であり、現在我々はそれが実現できるような観測カメラMSASIを開発しているところである。

補 遺

水星大気モデルを考える際に重要となる物理的性質を挙げる。

	地球	水星	月
太陽との距離[AU]	0.983~1.017	0.31~0.47	—
離心率	0.01671	0.20563	0.0554
公転周期[days]	365.26	87.97	27.322
自転周期[days]	0.997	58.65	27.322
赤道半径[km]	6378	2440	1738
質量[kg]	5.97×10^{24}	3.3×10^{23}	7.3×10^{22}
赤道重力	978	370	162
第一宇宙速度[km/s]	7.91	3.14	1.68
脱出速度[km/s]	11.2	4.43	2.38
平均表面温度[K]	282	440	250

参考文献

- [1] Potter, A.E., and Morgan, T.H., 1985. Discovery of sodium in the atmosphere of Mercury, *Science*, Volume 229, pp. 651-653.
- [2] Potter, A.E., and Morgan, T.H., 1986. Potassium in the atmosphere of Mercury, *Icarus*, Volume 67, pp. 336-340.
- [3] Bida, T., Killen, R.M., and Morgan, T.H., 2000. Discovery of Ca in the atmosphere of Mercury, *Nature*, Volume 404, pp. 159-161.
- [4] McGrath, M.A., Johnson, R.E., and Lanzerotti, L.J., 1986. Sputtering of sodium on the planet Mercury, *Nature*, Volume 323, pp. 694-696.
- [5] Morgan, T.H., Zook, H.A., and Potter, A.E., 1988. Impact-driven supply of sodium and potassium to the atmosphere of Mercury, *Icarus*, Volume 75, pp. 156-170.
- [6] Potter, A.E., and Morgan, T.H., 1990. Evidence for magnetospheric effects on the sodium atmosphere of Mercury, *Science*, Volume 248, pp. 835-838.
- [7] Potter, A.E., Killen, R.M., and Morgan, T.H., 1999. Rapid changes in the sodium exosphere of Mercury, *Planet*,

Space Sci, Volume 47, pp. 1441-1448.

- [8] Sprague, A.L., 1992. Mercury's atmospheric sodium bright spots and potassium variations: a possible cause, *J. Geophys. Res.*, Volume 97, pp. 18257-18264.
- [9] Sprague, A.L., Kozlowski, R.W.H., and Hunten, D.M., 1997. Distribution and abundance of sodium in Mercury's atmosphere, 1985-1988. *Icarus*, Volume 129, pp. 506-527.
- [10] Smyth, W.H., 1979. Io's sodium cloud :explanation of the east-west asymmetries, *Astrophys. J.*, Volume 234, pp. 1148-1153.
- [11] Yakshinskiy, B.V., and Madey, T.E., 1999. Photon-stimulated desorption as a substantial source of sodium in the lunar atmosphere, *Nature*, Volume 400, pp. 642-644.
- [12] Killen, R.M., Sarantos, M., Potter, A.E., and Reiff, P., 2004. Source rates and ion recycling rates for Na and K in Mercury's atmosphere, *Icarus*, Volume 171, Issue 1, p. 1-19.
- [13] Butler, B.J., 1997. The migration of volatiles on the surface of Mercury and the Moon, *J. Geophys. Res.*, Volume 102, pp. 19283-19291.
- [14] Hale, A.S., and Hapke, B., 2002. A time-dependent model of radiative and conductive thermal energy transport in planetary regoliths with application to the Moon and Mercury, *Icarus*, Volume 156, pp. 318-334.
- [15] Wiens, R.C., Burnett, D.S., Calaway, W.F., Hansen, C.S., Lykken, K.R., and Pellin, M.L., 1997. Sputtering products of sodium sulfate: implications for Io's surface and for sodium bearing molecules in the Io torus, *Icarus*, Volume 128, pp. 386-397.
- [16] Delcourt, D.C., Grimald, S., Leblanc, F., Berthelier, J.-J., Millilo, A., Mura, A., Orsini, S. and Moore, T.E., 2003. A quantitative model of the planetary Na⁺ contribution to Mercury's magnetosphere. *Ann. Geophys.* 21, pp. 1723-1736.
- [17] Sugita, S., Shultz, P.H., and Adams, M.A., 1997. In situ temperature measurements of impact-induced vapor clouds with a spectroscopic methods, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 28, pp. 1393-1394.
- [18] Leblanc, F., and Johnson, R.E., 2003. Mercury's sodium exosphere, *Icarus*, Volume 164, pp. 261-281.
- [19] Killen, R.M., Potter, A.E., Reiff, P., Sarantos, M., Jackson, B.V., Hick, P., and Giles, B., 2001. Evidence for space weather at Mercury. *J. Geophys. Res.* 106, pp. 20509-20525.
- [20] Huebner, W.F., Keady, J.J. and Lyon, S.P., 1992. Solar photo rates for planetary atmospheres and atmospheric pollutants. *Astrophys. Space Sci.* 195, pp. 1-294.
- [21] Smyth, W.H. and Marconi, M.L., 1995. Theoretical overview and modeling of the sodium and potassium atmospheres of Mercury. *Astrophys. J.* 441, pp. 839-864.
- [22] Killen, R.M., and Ip, W.-H., 1999. The surface bounded atmospheres of Mercury and the Moon. *Rev. Geophys.* 37, pp. 361-406.
- [23] Potter, A.E., Killen, R.M., and Morgan, T.H., 2002. The sodium tail of Mercury. *Meteor. Planet. Sci.* 37, pp. 1165-1172.
- [24] Brown, R.A., and Yung, Y.L., *Jupiter : studies of the interior, atmosphere, magnetosphere and satellites / edited by Tom Gehrels, with the assistance of Mildred Shapley Matthews, Tucson : University of Arizona Press, c1976.*

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-021

発行 平成 18 年 3 月 10 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL:<http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株)フジプランズ

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

©2006 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。

