

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740370

研究課題名（和文） 水星大気光観測による磁気圏と固体表面の相互作用に関する研究

研究課題名（英文） Interaction between Mercury's magnetosphere and surface

研究代表者

亀田 真吾（KAMEDA SHINGO）

立教大学・理学部・准教授

研究者番号：30455464

研究成果の概要（和文）：

水星は固有磁場を持つが大気は希薄であり、磁気圏と固体表面が直接相互作用しているという点で他の惑星と異なる磁気圏を持つ。ナトリウム大気はその相互作用によって生成されると考えられ地上観測が続けられてきたが、磁気圏観測が行われておらず大気生成過程は謎のままであった。本研究においてメッセンジャー探査機により CME が到達したと考えられる時期に、大気密度がほとんど変動していなかったという結果が得られた。このことから、太陽風衝突による大気放出量は先行研究で予想された量よりも少ないと考えられる。

研究成果の概要（英文）：

Mercury has a thin atmosphere. The most probable primary source process is solar wind proton impact. CMEs toward Mercury probably cause the increase of the sodium density. We observed Mercury's sodium exosphere when MESSENGER observed variation of solar wind magnetic field, which indicated CMEs arrived at Mercury. Despite this, our results have not shown large variation of the sodium density.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：水星 ナトリウム 地上観測

## 1. 研究開始当初の背景

地球・木星・土星の周回衛星観測により、固有磁場と濃い大気を持つ惑星磁気圏の姿が明らかになってきた。水星は固有磁場を持つが大気は希薄であり、磁気圏と固体表面が直接相互作用しているという点で他と異なる磁気圏を持つ。ナトリウム大気はその相互作用によって生成されると考えられ地上観測が続けられてきたが磁気圏観測が行われていないため結論は出ていない。2011年3月に初の水星周回衛星メッセンジャーが周回軌道に投入され、磁気圏の観測を開始した。本研究ではこれに合わせ、メッセンジャーによる磁気圏観測と同時にナトリウ

ム大気の地上観測を行い、磁気圏活動と大気密度分布を捉えることで「水星磁気圏と固体表面の相互作用」の解明を目指し研究を開始した。

金星・火星を除く太陽系惑星は固有磁場を持っており、太陽風との相互作用により周囲に磁気圏を形成している。そして地球や木星以遠のガス惑星には濃い大気が存在しており、電離圏・磁気圏・太陽風間の相互作用により磁気圏活動が維持されている。一方、水星には大気がほとんど存在せず固体表面が磁気圏底となっており、電離圏も存在しないため他の惑星とは大きく異なる磁気圏を形成していると考えられる。

地球だけでなく木星・土星においても磁気圏活動によるオーロラ現象が観測され、周回衛星により磁気圏の姿が少しずつ明らかになってきているが、水星には周回衛星は未だ到達しておらず、数回のフライバイ観測によって磁気圏の一部から全体像を想像している段階である。このような状況の中、水星に存在する希薄なナトリウム大気の特異な密度分布とその変動現象が注目を浴びてきた。水星大気圧は1兆分の1気圧以下であるが、ナトリウムは発光効率が高く数メガレイリー程度(地球オーロラは100キロレイリー程度以下)の明るさで輝いており、地上望遠鏡によって観測できる。ナトリウムは水星環境と固体表面の相互作用、すなわち、太陽紫外線による光脱離、熱脱離、太陽風・磁気圏粒子衝突、隕石・ダスト衝突によって大気中に放出されていると考えられているが、観測された密度を説明できる放出過程は見つかっていない。

月大気中にもナトリウムが検出されている。放出過程に関する基礎実験の結果では光脱離による大気放出量が最も多く、太陽直下点でナトリウム密度が最も高いことから放出過程に関する議論はほぼ収束している。一方、水星ナトリウムは平均密度が月より1-2桁高く、高緯度に濃集し数時間のスケールで密度が変動しており、月とは大きく異なる。高緯度の濃集は太陽風・水星磁気圏粒子の衝突によるものと予想されるが、磁気圏のその場観測が行われていなかったため議論が続いているという状況であった。

## 2. 研究の目的

2011年3月18日に世界初の水星周回衛星「メッセンジャー」が周回軌道に投入され、観測を開始した。本衛星には磁場・粒子観測器が搭載されており、最短でも1年間に渡る磁気圏の観測を予定しており、実際には2013年5月の時点でも運用が継続されている。大気光観測器も搭載されているが、高分散分光が必要な昼側大気光の観測はできない。磁気圏活動と大気分布変動を同時に捉えるためにはこの期間に地上観測を行うことが必須であった。

地上観測は1カ所では1日最長でも12時間程度しか行えないため、世界各国の研究チームでナトリウム大気光の観測を行い、継続的に大気密度分布の変動を観測する。現在は日本(千葉工大・東北大)、アメリカ(ボストン大)、フランス(IPSL)、イタリア(INAF)のグループで同時期に観測を行った。申請者は日本の研究グループの代表者として、岡山天体物理観測所では単独で観測を行い、ハワイ・ハレアカラ観測所では東北大の協力を得て観測を行う。どちらの施設でも水星観測の実績があり、ハレアカラ観測

所での観測時間は確保済みであり、岡山天体物理観測所には共同利用公募を申請し採択された。また、ハレアカラ観測所では遠隔操作システムが確立しており、岡山とハワイで同時に観測を行うことにより、観測時間の延長・晴天数の増加を見込んでいた。

申請者が過去に岡山天体物理観測所で水星ナトリウム大気光観測を行った結果、大気密度の変動量は3日間で10%程度以下であった。太陽風量は1日でも数倍程度変動するため、この結果は太陽風衝突による大気放出への影響が小さいことを示唆している。しかし、水星近傍での太陽風量変動が観測されていないため、観測時に太陽風変動量自体が小さかった可能性も否定できない。また、申請者は惑星間空間ダスト分布と大気密度変動の関係に着目し、隕石・ダスト衝突による大気放出への寄与を示したが、高緯度濃集現象は説明できていない。メッセンジャーによる周回観測によって水星近傍の太陽風・水星磁気圏活動が捉えられれば、これらの問題は解決されることが見込まれた。

また、2014年には日欧共同水星探査計画による探査機の打上げが予定されており、現在は実機の組み立てが行われている。水星近傍では熱環境が厳しく、観測時間・送信可能データ量に制限がある。複数の観測機器の観測時間・データ量を検討するにあたって、本研究で得られる成果は非常に重要であった。

## 3. 研究の方法

2011年度から水星周回衛星メッセンジャーが磁気圏観測を開始した。本研究ではそれと同時に岡山天体物理観測所とハワイ・ハレアカラ観測所でナトリウム大気光を観測し、磁気圏活動と大気密度変動を捉えることで水星磁気圏と固体表面の相互作用に関する物理過程に関する議論を進めた。

メッセンジャーにより北極付近での太陽風・磁気圏粒子の降り込み現象を観測し、高緯度に濃集するナトリウム大気の変動を観測することで降り込み粒子による大気放出量の変動への寄与を推定する。特に磁気圏サブストームや太陽コロナ質量放出現象が起きた時には大気密度の急激な変動が予想され、メッセンジャーによって検知可能である。欧米の観測チームと協力して行い、観測時間を増やし連続性を高めて大気密度変動を捉え、メッセンジャーによって得られたデータと比較することで、大気放出過程に関する議論を進めた。

メッセンジャーは過去3回のフライバイ観測時に粒子・磁場の観測に成功しており、2011年3月より周回衛星での観測が開始された。本研究ではメッセンジャーの観測期間中

に岡山天体物理観測所とハワイ・ハレアカラ観測所でナトリウム大気光の観測を行った。岡山天体物理観測所では日中に長時間継続した観測を試みた。高分散分光器を使うことで昼間の地球大気光、水星地表反射光と水星大気光を分離することが出来る。日の出前、日没後に観測を行う場合、観測時間は30分程度に限られるが、日中にも観測を行うことで8時間程度まで観測時間を延長可能である。また検出効率が高いため、時間分解能は5分程度となる。過去に他の望遠鏡を使って行われた観測では時間分解能は1時間程度であり、それに比べて1桁以上時間分解能が高い。また、メッセンジャーではより短時間の磁気圏粒子密度・磁場の変動を観測する。太陽からのコロナ質量放出時や1975年にマリナー10号のフライバイ時に観測されたサブストームが起きた時には、数分程度で降り込み粒子が1桁以上増大する可能性があるため、これらの現象による大気密度変動を捉えることができる。他の観測所では時間分解能は1時間程度であり、数分程度の密度変動を検出できるのは岡山天体物理観測所だけである。しかしながら、2011年度には4週間程度の観測時間が割り当てられたものの、期間中に悪天候が続いてしまい、有効なデータを得ることができなかった。

ハレアカラ観測所では広視野の高分散分光器を使い、水星昼面から尾部領域の観測を行う。ナトリウムは太陽光を共鳴散乱することで発光しており、光が等方散乱されるため太陽光の運動量がナトリウム原子に与えられる。この太陽光圧により原子群は平均的に尾部方向に輸送され、1-3時間程度で紫外線により電離し、一部は水星磁場に捉えられて地表に戻るが大部分は太陽風磁場に捉えられて惑星間空間に散逸すると考えられる。大気放出量を知るためには大気密度と散逸速度の計測が必要である。ハレアカラ観測所では昼側大気密度だけではなく、尾部領域において輝線のドップラーシフトを計測することにより、散逸速度を求めることができる。また、ハレアカラ観測所は、他の観測所に比べ晴天率が高いため観測を実施しやすいだけでなく、インターネットを通じて遠隔制御が可能であるため、長期間の観測が実施しやすいことも利点の一つである。現状ではハレアカラ観測所の光学系は夜間観測用に設計されており、水星観測を行う日中あるいは薄明時においては迷光対策が十分ではないため、本研究期間中に光学系の設計変更を行った。計画当初はハレアカラ観測所における日中観測の開始は2012年度になると想定していたが、太陽光遮蔽フードなどの製作・取付が順調に進んだため、2011年中から日中観測を実施で

きるようになった。ハレアカラ観測所の方が岡山天体物理観測所より晴天率が圧倒的に高いため、2012年からはハレアカラ観測所での観測に注力することとした。また、メッセンジャー搭載機器チームとも打ち合わせを行っており、複数の研究発表会に参加し、観測状況に関する情報交換を行った。

#### 4. 研究成果

長時間連続した観測を行ったことにより、太陽風イオンが水星表面に衝突してナトリウム原子を大量に放出させることによる原子密度の増加現象を捉えられる可能性を高めた結果、メッセンジャーの磁場データからコロナ質量放出が水星に到達したと考えられる日に大気光観測を行うことが出来た。メッセンジャーで観測された水星近傍の惑星間空間磁場の時間変動から、我々が観測を行った時刻における水星表面への太陽風流入量の時間変動を予測する事ができる。図1はメッセンジャーで観測された惑星間空間磁場の時間変動を表している。(12時間ごとのピーク(赤矢印)は惑星間空間磁場ではなく水星磁場の強度である。)

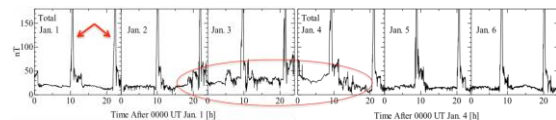


図1 メッセンジャーで観測された、2012年1月1日から6日の水星近傍惑星間空間磁場の時間変動

1月2日18:30(UT)頃から1月4日の20:00(UT)頃の平均磁場強度は、定常状態における平均強度の2倍以上であった。よってこの期間、水星に多量の太陽風イオンが流入した可能性が高い。

この期間中に我々が観測したナトリウム原子密度の時間変動を図2に示す。この結果は水星近傍において惑星間空間磁場の大きな変動が検出された時に、ナトリウム原子密度の時間変動を観測した唯一の例であり世界初の結果である。惑星間空間磁場の増大が示唆するように、このとき多量の太陽風イオンが水星表面に衝突していた場合、太陽風イオンスパッタリングがナトリウムの主放出過程であればナトリウム密度が増大するはずである。しかし図2が示すように我々の観測結果からは太陽風イオンの流入に伴った原子密度の大きな変動を捉える事は出来なかった。また数日後においても原子密度の大きな変動を確認する事は出来なかった。これは太陽風衝突が原因となる放出過程は、ナトリウム大気形成において支配的ではない事を示唆している。

この結果は、太陽風衝突によると考えられる短時間のナトリウム大気密度の変動を

議論する先行研究の結果とは大きく異なるが、我々の観測データの質、解析手法に起因するような問題は確認されていない。今後はより注意深くこのデータの解析を見直し、またその他のデータについても同様に確認し、先行研究との違いについて検証する予定である。

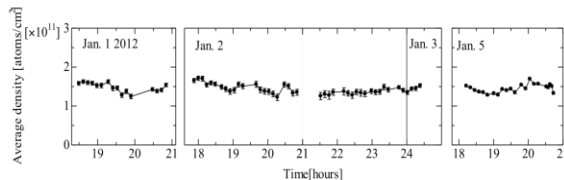


図2 2012年1月1日18:29(UT)から1月5日20:46(UT)の間に観測したナトリウム原子密度の時間変動。IMFの変動に伴った密度の増加を捉える事は出来なかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計9件)

① Fusegawa, A., Dairoku, H., Kameda, S., Kagitani, M., Okano, S. Temporal variation of Mercury's sodium density, European Geoscience Union General Assembly 2013, 2013年4月8日, ウィーン(オーストリア)

② 亀田真吾, 村上豪, 吉川一朗, Oleg Korablev, Victor Gnedykh, David Rees, 水星ナトリウム大気分光カメラMSASIフライトモデルの性能試験, 2012年SGEPSS秋学会, 2012年10月22日, 札幌

③ Kameda, S., Murakami, G., Yoshikawa, I., Korablev, O., Gnedykh, V., Rees, D., Current Status of Mercury Sodium Atmosphere Spectral Imager (MSASI) on BepiColombo/MMO, Asia Oceania Geoscience Union General Assembly 2012, 2012年8月14日, シンガポール(シンガポール)

④ Dairoku, H., Kameda, S., Fusegawa, A., Kagitani, M., Okano, S., Time variability of sodium density in Mercury's atmosphere, Asia Oceania Geoscience Union General Assembly 2012, 2012年8月14日, シンガポール(シンガポール)

⑤ 亀田真吾他, 水星ナトリウムテイルの観測から推測される大気放出量の時間変動, 2011年SGEPSS秋学会, 2011年11月5日, 神戸大学

⑥ 亀田真吾他, Evidence of a meteoroid impact or variability of solar wind flux in Mercury's sodium tail, 2011年惑星科学会秋季講演会, 2011年10月24日, 相模女子大学

⑦ Shingo Kameda et al., Temporal variability of Mercury's atmospheric Na, AOGS2011(招待講演), 2011年8月11日, 台北(台湾)

⑧ Shingo Kameda et al., Interplanetary Dust Distribution Near Mercury's Orbit Inferred from the Long-term Variability of Mercury's Exospheric Sodium Density, AOGS2011, 2011年8月9日, 台北(台湾)

⑨ 亀田真吾他, 水星外圏ナトリウム密度の長期変動, JpGU2011, 2011年5月24日, 幕張メッセ

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: K-Ar年代測定装置及び方法

発明者: 亀田真吾

権利者: 立教大学

種類: 特許

番号: 特願2012-126314

出願年月日: 2012年6月1日

国内外の別: 国内

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

亀田真吾 (KAMEDA SHINGO)

立教大学・理学部・准教授

研究者番号: 30455464

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし