

各報道機関文教担当記者 様

## 水星特異の磁力線がもたらす高エネルギー電子降下と 水形成メカニズムの一端を解明

金沢大学理工研究域電子情報通信学系の尾崎光紀准教授、八木谷聡教授らの研究グループは、コンピュータシミュレーションを用いて水星の特異な磁力線構造により水星の周りにある電磁波が増強され、その電磁波が高エネルギー電子を効率よく水星表面へ降下させることを明らかにしました。降下した電子は、惑星の鉱物と化学作用し、水が形成されることが期待されます。

太陽に最も近い灼熱の水星ですが、南北極域にあるクレーターには、太陽からの光が差し込まない永久影になる領域（温度マイナス 170℃以下）があります。水星の永久影には氷の存在が報告されていますが、その氷（水）の形成メカニズムの詳細は分かっていません。これまで、水を含んだ彗星などの衝突による「外因性供給」が有力として考えられています。しかし一方で、水星と同じく大気を有しない月では、地球からの高エネルギー電子が月の水形成に影響を与える研究結果が報告されるなど、惑星や衛星の表面物質中の酸素イオンとプラズマの化学作用による「その場の水形成」という仮説もあります。本研究では、後者の「その場の水形成」への寄与が期待される高エネルギー電子（keV～数十 keV）が電磁波の一種であるホイッスラ波動により効率よく水星表面に降下する様子を明らかにしました。特に、水星の磁力線構造は、南北非対称な構造となっていると考えられており、この特異な磁力線構造によりホイッスラ波動の成長が促され、対称な磁力線構造を仮定した場合に比べて、3.8 倍も多くの高エネルギー電子を惑星の南北極域表面へ降下させることを明らかにしました。

これらの知見は、2026年に水星への周回軌道投入が予定されている日欧の水星探査ミッション「ベピ・コロンボ」により詳細が明らかにされることが期待され、灼熱の水星での水形成の解明に貢献することが期待されます。

本研究成果は、2024年10月31日9時（米国東部標準時間）にアメリカ地球物理学連合の学会誌『*Geophysical Research Letters*』に掲載されました。



ホイッスラ波動により高エネルギー電子が水星表面へ降下するイメージ図  
水星表面では、惑星の鉱物と高エネルギー電子が化学作用し、  
水が形成されることが期待される

## 【研究の背景】

月は全球で磁場を有していないため、太陽から吹き付ける高速なプラズマの流れである太陽風が月面に直接衝突します。この際、太陽風の陽子と月面岩石中の酸素イオンが化学作用し、水形成が生じると考えられています。一方で、水星は固有の磁場を有しており、その惑星磁場の影響が支配的な領域である磁気圏を作り出しています。水星磁気圏は、その磁場の力で太陽風が水星表面へ直接衝突するのを防ぐ役割があります。このため「その場の水形成」において、太陽風の直接衝突以外のメカニズムが大切です。

## 【研究成果の概要】

日欧の水星探査ミッション「ベピ・コロombo」による2021年と2022年の水星フライバイ観測において、水星で初めての電磁波観測が行われ、ホイッスラ波動が水星磁気圏内に存在することが確認されました。ホイッスラ波動は、高エネルギー電子を効率よく散乱し、地球では特殊なオーロラを発光させる原因にもなっています。このことから、本研究グループは、水星のホイッスラ波動による電子散乱の影響をコンピュータシミュレーションにより評価しました。コンピュータシミュレーションのコードは、共著者の京都大学生存圏研究所の大村善治特任教授らが開発したものです。これは、磁力線に沿ったプラズマの運動と電磁波の振る舞いを逐次解き進めていき、プラズマと電磁波が相互に影響する様子を厳密に評価できます。特に、水星の磁力線は南北で非対称な形状を有していると考えられていることから、その影響について詳しく調べました。シミュレーション結果より、南北で非対称な磁力線の影響を考慮することで、南半球側で電子の温度異方性（※1）が強まり、考慮しない場合に比べて3.8倍もの高エネルギー電子を南北極域へ降下できることが明らかになりました（図1）。さらに降下する電子の数は、数十ミリ秒オーダーでホイッスラ波動の強度変化とよく似た変動を示し、効率のよい電子降下はホイッスラ波動による非線形なプラズマ散乱メカニズムが担っていることが示されました。

## 【今後の展開】

本研究で着目した南北で非対称な磁力線の影響により、月に比べて太陽風の直接衝突が難しい水星において、磁気圏に補足された高エネルギー電子が効率よく水星表面へ降下するホイッスラ波動による非線形なプラズマ散乱メカニズムが明らかになりました。これは、高エネルギー電子と水星表層物質との化学作用を促し、「その場の水形成」への新しい源として注目すべき現象です。本研究で明らかにされた高エネルギー電子降下メカニズムは、水星表面での水形成への直接的な影響や、水形成後に宇宙空間に流出してしまった場合においても、輸送効果による水形成への間接的な影響が予想されます。そして、2026年に水星への周回軌道投入が予定されているベピ・コロomboによる詳細観測との協調により、灼熱の水星での氷の形成メカニズムの定量理解の進展へ貢献します。

本研究は、三谷研究開発支援財団と科学研究費助成事業（24K00898、24K00691、23H05429）の支援を受けて実施されました。

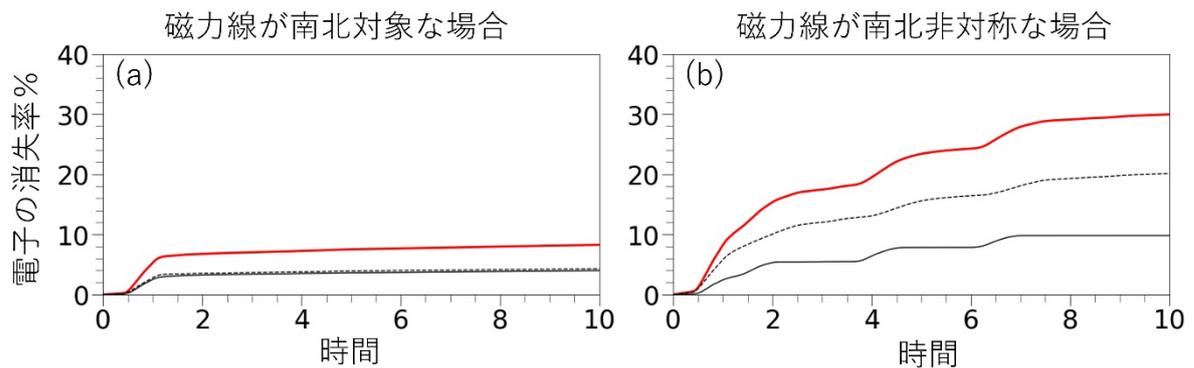


図1：磁力線の (a) 南北対象と (b) 南北非対称な場合における補足電子の消失率  
(赤：総消失率、黒実線：北側への消失率、黒点線：南側への消失率)

水星環境を模擬した南北非対称な場合は、わずか数秒で、約 30%もの補足電子をホイッスラ波動が惑星表面へ降下させることが明らかになった。

### 【掲載論文】

雑誌名： *Geophysical Research Letters*

論文名： Implications of asymmetric loss cone distribution on whistler-driven electron precipitation at Mercury (水星におけるホイッスラ波動による電子降下に対する非対称ロスコーン分布の影響)

著者名：尾崎光紀<sup>1</sup>、近藤岳琉<sup>1</sup>、山田裕都<sup>1</sup>、八木谷聡<sup>1</sup>、疋島充<sup>2</sup>、大村善治<sup>3</sup>

1：金沢大学大学院自然科学研究科

2：マグネデザイン株式会社

3：京都大学生存圏研究所

掲載日時：2024年10月31日9時（米国東部標準時間）にオンライン版に掲載

DOI：10.1029/2024GL111744

## 【用語解説】

### ※1 電子の温度異方性

背景にある磁力線の垂直方向と平行方向の電子温度が異なること。電子の温度異方性は、ホイッスラ波動の励起の源として働く。

---

## 【本件に関するお問い合わせ先】

### ■研究内容に関すること

金沢大学理工研究域電子情報通信学系 准教授

尾崎 光紀（おざき みつのり）

TEL : 076-234-4857

E-mail : ozaki@is.t.kanazawa-u.ac.jp

### ■広報担当

金沢大学理工系事務部総務課総務係

廣田 新子（ひろた しんこ）

TEL : 076-234-6821

E-mail : s-somu@adm.kanazawa-u.ac.jp