

# 水星でコーラス波動発見



尾崎 光紀

*Ozaki Mitsunori*

## 1. 国際水星探査計画ベピコロンボ

筆者が、地球からの距離に対して探査の困難な水星で、電子加速に重要な役割を果たすコーラス波動と呼ばれるプラズマ波動を発見した経緯について紹介します。なおコーラス波動は地球磁気圏では頻繁に検出されるものです。太陽系惑星の中で最も小さく、太陽に最も近い惑星の水星は、厳しい熱環境と太陽からの大きい重力のため直接探査機を送ってその場探査することが難しい惑星です。このため、これまでマリナー10号（1974年と1975年に水星へ接近）とMESSENGER探査機（2011～2015年水星の周回軌道で総合観測）のみが、水星やその周辺宇宙での電磁環境を明らかにしてきました。地球は、内部で鉄の流体運動により、固有の磁場を形成し、宇宙空間にも地球の磁石の力が作用する領域である地球磁気圏を形成しています。一方、小さな水星は、内部は固まり惑星固有磁場の形成はないと思われていましたが、マリナー10号により地球と比べて約1%と弱いながら、惑星固有の磁場を有し、水星磁気圏を形成していることが明らかになりました。更にMESSENGER探査機により、磁場の中心は、惑星中心よりも約500km北側へずれていること等、その詳細な磁場環境が明らかにされています。

そして、人類史上3番目となるのが、日欧国際共同水星探査計画のベピコロンボです。ベピコロンボでは、日本がリードする水星磁気圏探査機（以後、みお探査機と呼称）と欧州がリードする水星表面探査機の2機の探査機により、水星の周辺宇宙環境、表面、内部構造に至るまで水星進化を明らかにする総合観測を行います。2018年に打ち上げられ、本稿執筆中の2024年現在、2機の探査機は結合された状態で水星に向けて航行中であり、2025年に水

星の周回軌道へ投入予定です。筆者は、プラズマ波動観測器PWIの交流磁界計測に参画しており、水星でのプラズマの運動に伴う電磁波（プラズマ波動）観測は、世界で初めての実験となります。

## 2. 水星周回軌道到着前のフライバイ観測

水星に向けて宇宙を航行中のベピコロンボは、水星周回軌道到着の2025年まで科学観測をお休みしているわけではありません。水星に向けた軌道変更のため、地球、金星、水星へ接近するフライバイを行う機会があり、フライバイ中に水星のプラズマ波動の動態を垣間見る絶好の機会があります。航行期間中の2021年10月と2022年6月に、水星から約200kmの高度までみお探査機が水星へ近づくフライバイの機会がありました。水星周辺のプラズマ波動を計測するには、衛星本体の雑音等計測条件はよいものではありません。例えるならば、大音響の音楽が流れるスピーカーの傍で、小さな小鳥のさえずりをマイクで収録するような環境です。しかし、みお探査機は打上げ前に不要な電磁雑音を極力低減するように開発され、電磁的にクリーンな探査機です。灼熱の水星環境に対応した日欧で協力開発した交流磁界センサーを用いて世界初の水星周辺のプラズマ波動観測により、探査機本体からの雑音に埋もれることなく、地球磁気圏で頻繁に検出されるコーラス波動の局所的発生が明らかになりました<sup>1)</sup>。コーラス波動とは、定常磁場に対し電子のらせん運動に伴う電磁波放射であり、電子を効率よく加速させる働きがあります。水星磁気圏におけるコーラス波動の存在が確認されたこと自体は、みお探査機搭載のPWI設計時（2000年代）から予想（周波数範囲や強度等）されていたことでした。筆者が最も驚いたことは、水星磁気圏のコーラス波動が、朝側の極め

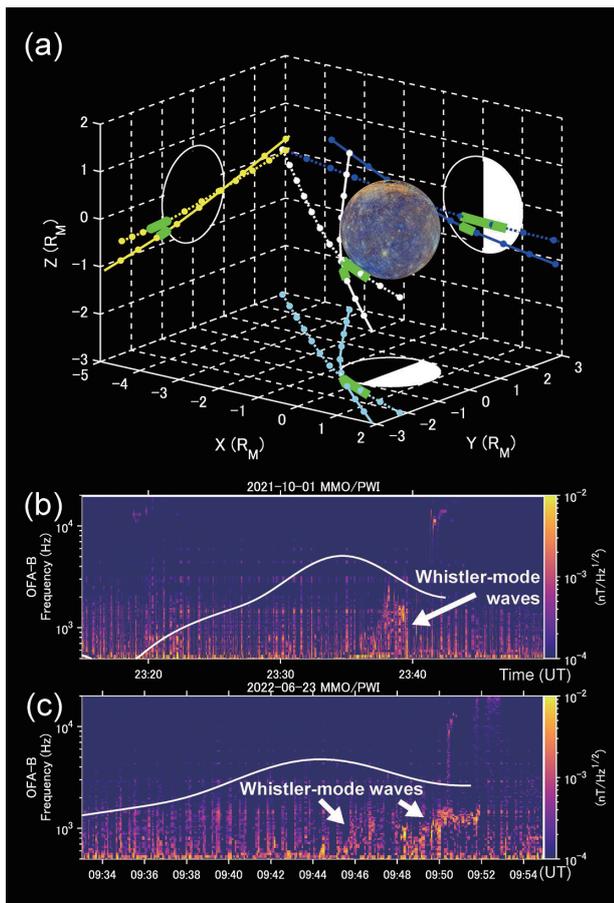


図1 2回の水星フライバイで観測されたコーラス波動<sup>1)</sup>  
 (a)水星周辺でのフライバイ時の探査機軌道(緑の領域でコーラス波動を検出, 実線が1回目, 点線が2回目のフライバイ時)。(b)(c)1回目と2回目の水星フライバイ時のプラズマ波動の交流磁界計測結果。白実線が電子サイクロトロン周波数を表しており, 同じ電子サイクロトロン周波数を示す夜側では観測されず, 朝側のみでコーラス波動が検出された

て限られた領域にのみ, 2回のスイングバイにおいて検出されたという「空間局所性」でした。これは, 水星磁気圏の朝側特有のコーラス波動を発生させやすい物理メカニズムがあることを意味します(図1)。

### 3. 地球観測に基づいた理論の適用

朝側に発生していたコーラス波動発生 の要因として, 筆者は地球での観測等に基づき確立されたコーラス波動の非線形成長理論<sup>2)</sup>を水星環境に適用し, 太陽からのプラズマ流(太陽風)により強く変歪する水星磁場の曲率の影響を評価しました。夜側の磁力線は太陽風に引き延ばされるのに対し, 朝側の磁力線はその影響は小さく曲率は小さくなります。この磁力線の特徴と非線形成長理論より, 朝側は磁力線に沿って効率よく電子から電磁波にエネルギーが

授受され, コーラス波動の発生しやすい条件となることを明らかにしました<sup>3)</sup>。その効果は高性能コンピュータにより, 水星環境を模擬した数値シミュレーションにおいても確認されました。「観測」「理論」「シミュレーション」の一体的な解析より, 太陽の影響を強く受け吹き流される磁力線によるコーラス波動発生 の局所性への影響を明らかにしました。

筆者は, 観測データを見たときにすぐに朝側と夜側の違いとして磁力線の変歪の影響が考えられるだろうと直感はしたのですが, 水星環境を模擬する値で理論計算をすることで説明できた時には, 理論は本当にすごいと感激しました。異なる惑星環境でも, その環境を反映するプラズマ温度, 密度, 定常磁場を入力とすることで, 惑星のプラズマ波動を再現できる理論の普遍性はすばらしいものです。

### 4. 水星での本格観測に向けて

日本がリードするみお探査機により, 人類が垣間見たことの無い水星プラズマ波動環境の一端が分かり始めてきました。惑星磁気圏で電子加速の担い手となるコーラス波動の発見は, 小さい水星磁気圏(地球磁気圏の約1/8倍)でも瞬時的に放射線に成りえるような電子加速現象が生じることを暗示します。大きさが異なりながら似ている地球磁気圏と水星磁気圏を比較できることは, 電子加速現象に留まらず, 太陽風と磁気圏相互作用に伴う惑星大気流出等, 地球の将来像を予想するうえでも重要です。2025年に予定する水星周回軌道到着後の詳細な観測は, 水星環境の変遷と共に地球磁気圏でのプラズマ環境の理解の深化につながると考えると, ますます研究を進めるのが楽しみになります。

#### 謝辞

本研究の一部は, 三谷研究開発支援財団の支援を受けて実施されました。

#### 参考文献

- 1) Ozaki, M., et al., *Nature Astronomy*, **7** (2023)
- 2) Omura, Y., *Earth, Planets Space* (2021)
- 3) Ozaki, M., et al., *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (2024)

(金沢大学理工研究域)