

第3章 MMOの目指す科学

Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) は、BepiColomboの科学目標の中でも特に、1) 水星固有磁場、2) 水星磁気圏、3) 水星外圏大気、4) 水星表面、5) 太陽系最内縁の環境、の5つを明らかにすることによって、MPO・MSEとともに水星に関する未解明の謎の解明を目指す。

- 水星固有磁場 (3.1 節)
 - 現在の構造・起源
 - 水星内部構造との関わり
- 水星磁気圏 (3.2 節)
 - その普遍性：天体磁気圏の普遍構造・ダイナミクス・物理プロセス
 - 独自性：電離圏の欠如、小スケール性、高速性、異なる太陽風環境のもたらす影響
- 水星外圏大気 (3.3 節)
 - 構造・組成
 - 生成・消失過程
- 水星表面 (3.4 節)
 - 大規模構造
- 太陽系最内縁の環境 (3.5 節)
 - 太陽活動
 - 0.3-0.5AUでの太陽風・ダスト
 - 太陽圏現象

これらは、相互に関連する下記の観測対象を通して達成されよう(図 3.0-1)。また、密接に関連する「重力探査による内部構造の解明」(2.2 節)や「表面観測による表層構造・組成の解明」(2.4 節)は、BepiColombo/MPOの主要テーマである。何らかのトラブルによってMPOが機能しない事態になれば、限定はされるもののこれらの観測目標もMMOの任務となる。

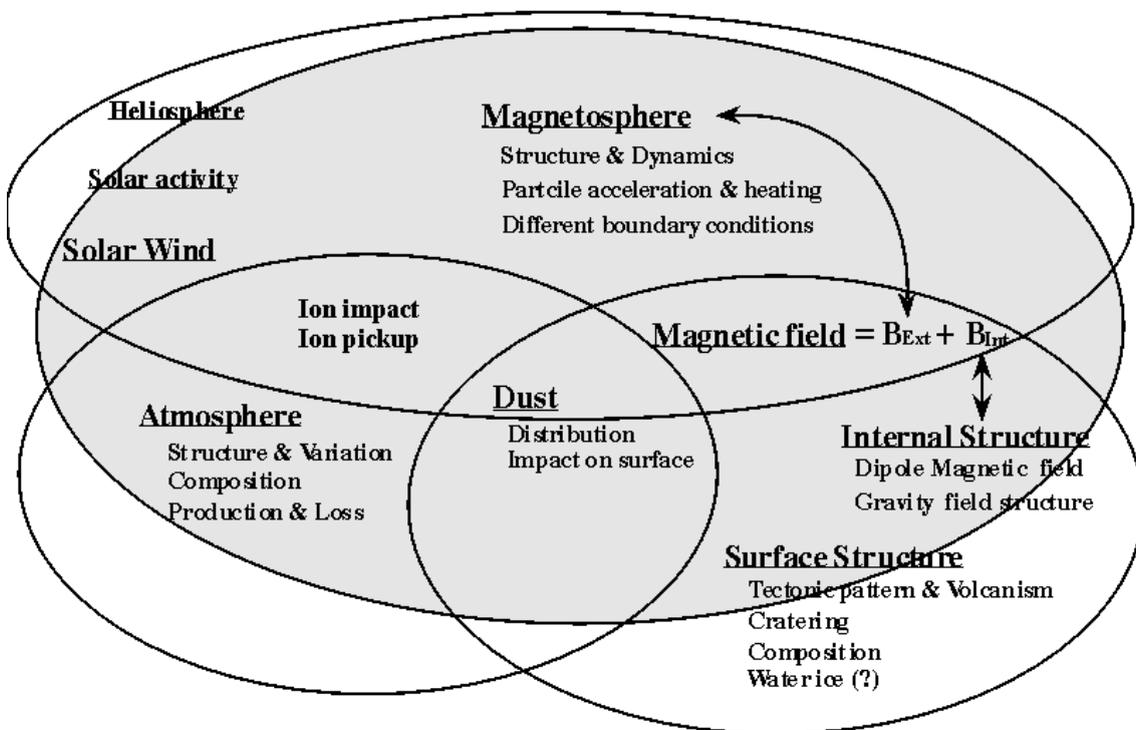


図 3.0-1 MMOのサイエンス

3.1 水星の磁場

3.1.1 水星の内部磁場：構造

水星の内部磁場の起源を明らかにするには、精密な測定によって水星磁場の分布構造を正確に導くことが必要である。

2.3節で述べたように、1974年及び1975年に実施されたMariner 10の2度のフライバイ観測は、水星がダイポールの固有磁場を持っていることを明らかにした。この観測はそれまでの定説、即ち「水星のサイズでは早い段階でコアは冷却・固化し、磁場を生成・維持するダイナモ機構は停止している」を打ち破るものであった。見積もられた水星の磁気モーメントは、約 $300 \text{ nT} \cdot R_M^3$ (R_M :水星半径) $\sim 5 \times 10^{12} \text{ T} \cdot \text{m}^3$ であり、これは地球 ($8 \times 10^{15} \text{ T} \cdot \text{m}^3$) の1/1500、極性は同じである。この固有磁場の起源を説明することは、水星の内部構造と進化を理解するうえで極めて重要である。しかし、このような議論ができる高い精度の磁場データは取得されていない。

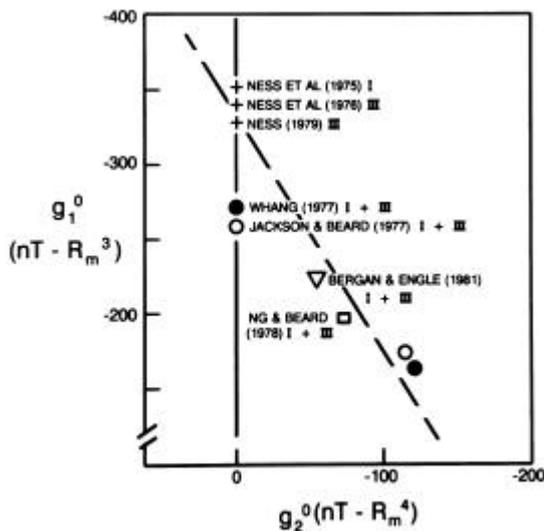


図 3.1-1 Mariner 10 データから見積もられた水星の磁気モーメント [Connerney and Ness, 1988]
 g_1^0 : 双極子モーメント
 g_2^0 : 四重極子モーメント

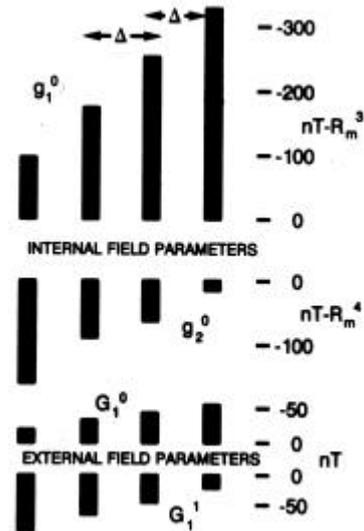


図 3.1-2 水星内部起源磁場（双極子成分：上、四重極子成分：中）と磁気圏起源磁場（双極子成分：下）の推定 [Connerney and Ness, 1988]

Mariner 10の観測は2回のフライバイのデータのみであり、水星の磁気モーメントを正確に求めることは難しい。図 3.1-1 は、Mariner 10のデータを用いて算出された磁気モーメントの双極子・四重極子成分の関係である。どの期間のデータを使うか、磁気双極子の中心をどこにおくか、磁気圏の電流による外部起源磁場をどう仮定するかなどにより、算出される双極子モーメントの大きさは $150 \text{ nT} \cdot R_M^3$ から $350 \text{ nT} \cdot R_M^3$ まで変化する。また、高次項（四重極子以上）の比率やテイルト角（双極子軸が自転軸となす角）の結果も様々である。図 3.1-1 の多くの計算結果がほぼ直線（図中の破線）に乗るのは、現存するデータを用いる限り、この直線上のどの値を取っても観測との誤差が変わらないためである。図 3.1-2 は、この直線上の4点を取って内部起源の双極子成分、四重極子成分、そして磁気圏起源の双極子成分を推定したもののだが、かなりの任意性があることがわかる。

水星の現在の固有磁場構造を明らかにするには、内部起源磁場と外部起源磁場を同時かつ正確に決定する必要がある。BepiColomboでは、MMOに搭載される磁力計（MPOへの搭載も提案中）によって数多くの周回軌道による磁場マッピングを実施し、精密な磁場構造を決定する。

3.1.2 水星の内部磁場：起源

水星磁場の起源としては、「地殻の残留磁化」や「流体コア内のダイナモ作用」が考えられている。もし水星のコアが固化しておれば、印加磁場のもとで地殻が冷却したときに磁化された結果としての「残留磁場」しか存在しないと考えられる。しかし、地殻の温度がキュリー点以下になるまで長期にわたり同方向の磁場が印加される状況は考えにくい。また、観測された磁場強度を説明するには、現在の想定よりも「多くの鉄を含んだ厚い地殻」が必要である。したがって、流体コア内のダイナモ作用による磁場生成がもっともらしい。ただし、これには「溶融コア」の存在が必要となる [cf. Russel, 1987]。

水星ほどの小さいサイズの惑星ではコアは固化してしまっていると考えるのが自然で、コアを「溶かしてやる」ための様々な仮説が提唱された(2.3節)。図 3.1-3 は、Schubert ら[1988]によって計算された、固体内核の半径(左)とダイナモ作用による磁場双極子モーメント(右)の時間発展である。この結果では、コア内での硫黄の重量比が 0.1% 以下だとコアは完全に固化してしまうが、5%程度含まれていれば 45 億年後(現在)でも約 1000 km 厚の球殻が流体として残る。他にも、放射性元素(ウランやトリウム)の発熱、低熱伝導効率のマントルなど、流体コアの存在を説明する様々な仮説が提唱されている。

流体コア内の電磁流体力学的(MHD)ダイナモによる固有磁場の生成機構は、「何らかのエネルギーで電気伝導度の高いコア内に流れ(V)が生じ、その流れが磁場(B)を横切ることにより起電力 $V \times B$ を生じ、この起電力がコア内に電流を流し、この電流が磁場を生成する」というプロセスである。地球では、放射性元素の崩壊、コアの冷却に伴う熱エネルギー、コアの固化の際に放出される軽元素による重力エネルギーなどによって、流体コア内で対流が生じていると考えられている。水星ダイナモの場合にも、その進化の過程において同様の対流が生じ、磁場が生成・維持されている可能性がある。図 3.1-3 右の双極子モーメントの時間発展は、これをモデル化したものである。

地球の場合、外核半径に対する内核半径は約 0.35 であるが、水星ではわかっていない。仮に水星コアの硫黄重量比を 2~3% とすると、半径約 1800 km のコアの外側部分が約 500 km 厚で現在流体として残る、すなわち外核半径に対する内核半径は約 0.7 となる。このような場合には、ダイナモ作用が生じている流体球殻は地球の場合より薄く、コア内のダイナミクス及び磁場生成過程は地球と異なる可能性がある。

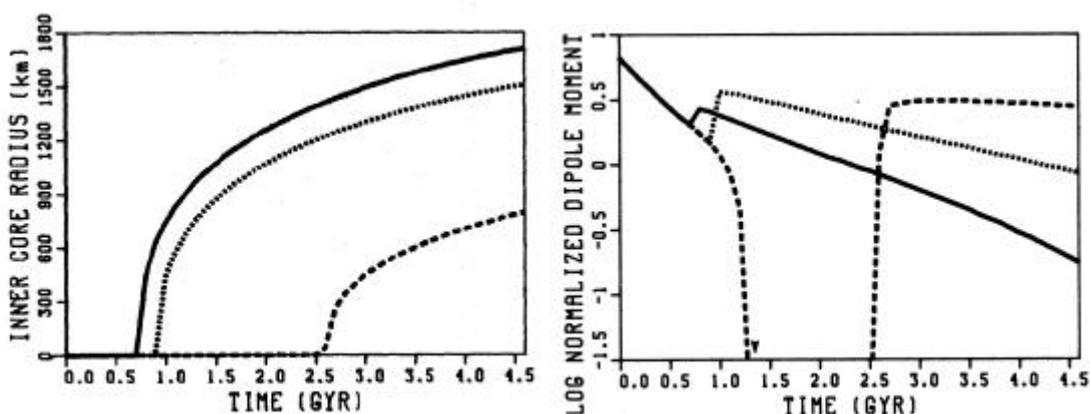


図 3.1-3 内核半径(左)とダイナモ作用による磁場双極子モーメント(右)の時間発展モデル。

実線・点線・破線は、初期のコアにおける硫黄の重量比が 0.2・1・5% の場合。
水星のコア半径は 1800 km。双極子モーメントは地球の値で正規化されたもの。
[Schubert et al., 1988]

近年、3次元回転球殻内の MHD ダイナモの数値計算が可能となり、地球磁場の生成機構の理解が進んでいる [cf. Roberts and Glatzmaier, 2000]。系の特徴は非常に速い回転(非常に小さい工

クマン数) にあり、コリオリ力が卓越するため、流れは 2 次元的になるとうとする。したがって、流体コアは大きく 3 つの部分、すなわち「固体コアに赤道で接して回転軸に平行な円筒面 (タンジェントシリンダ) の外側」、そして「その内側で固体コアの北側」と「南側」に分けることができる (図 3.1-4)。

タンジェントシリンダの外側では、回転軸に平行な柱状の対流セルが生じる。対流セル内では、流れはほぼ赤道面对称で螺旋状になる (図 3.1-4)。したがって大局的にはヘリシティ $\mathbf{v} \cdot \nabla \times \mathbf{v}$ は北半球で負、そして南半球で正となる。球殻外側から流体コアに入る磁力線は、北極側から見たときに反時計回り対流セルの端に集中して外側球面に磁束斑を形成する。このポロイダル磁場の磁力線は、柱状対流や差分回転により経度方向に引き伸ばされ、トロイダル磁場が生成される。トロイダル磁場から柱状対流のヘリカルな流れにより、ポロイダル磁場が生成・維持される。

一方、タンジェントシリンダの内側では、レイリー数が小さい場合には、回転の影響により回転軸方向への流れが抑制される。ところが、ある程度レイリー数が大きくなると、そこでの流れが活発になる。図 3.1-4 に示すように、回転軸に沿った内側から外側への流れに伴い、内側境界付近では東向きの流れが生じ、そして外側境界付近では西向きの流れが生じる。外側境界の極付近において極から赤道方向への流れがあるために、磁場は回転軸付近から掃き出される。

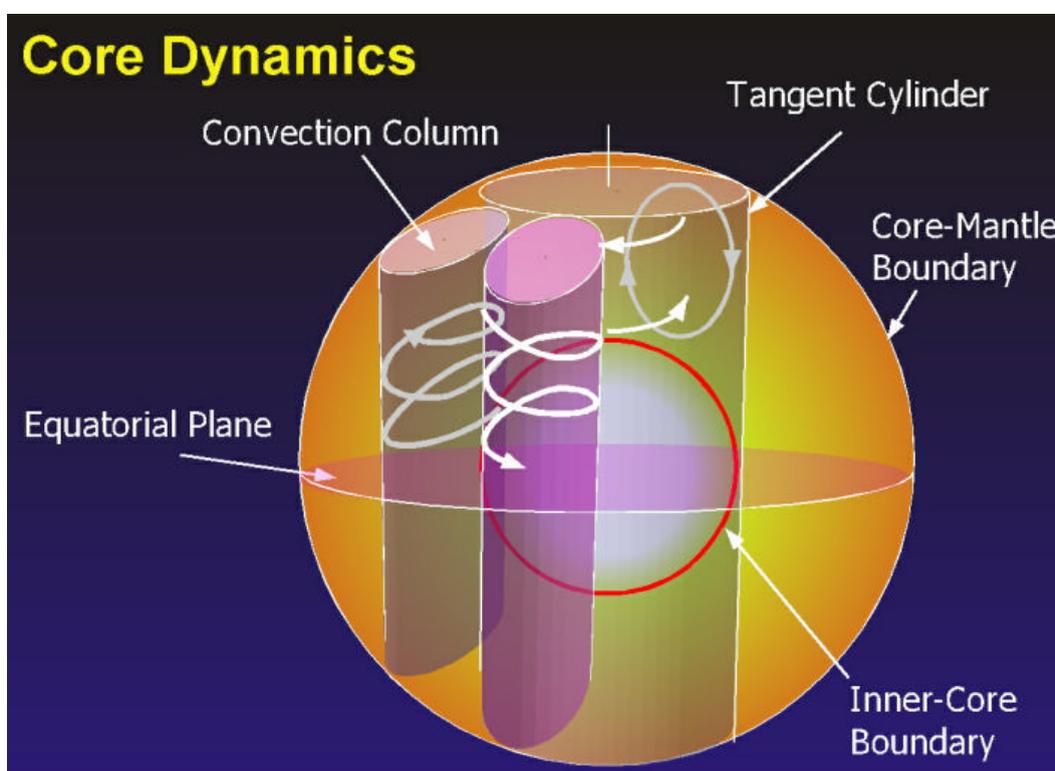


図 3.1-4 地球におけるコア内のダイナミクス [Matsushima, 2001]

このような特徴は、観測される地球磁場分布に反映していると見られる。図 3.1-5 は、地球表面での磁場動径成分の分布だが、双極子磁場で近似されることがわかる。しかし、マントルを電氣的絶縁体と仮定し、地磁気ポテンシャルをコア表面まで下方接続することによって得られる「コア表面における地球磁場分布」の様相はかなり異なる (図 3.1-6)。ここではもはや双極子的ではない。北半球ではカナダ・シベリアの下、南半球ではそれらとほぼ赤道面对称の位置に、磁場の集中した「磁束斑」が見られる。これらは前述の柱状対流の端に対応しているかもしれない [Gubbins and Bloxham, 1987]。実際、図 3.1-6 を北極側から見ると、磁束斑がタンジェントシリンダの延長と思われる位置にくる (図 3.1-7)。現在の数値計算で使用されているパラメータは現実の地球とはまだかけ離れているが、このような特徴は、地球磁場生成機構の本質的な一面を捉えていると考えられる。

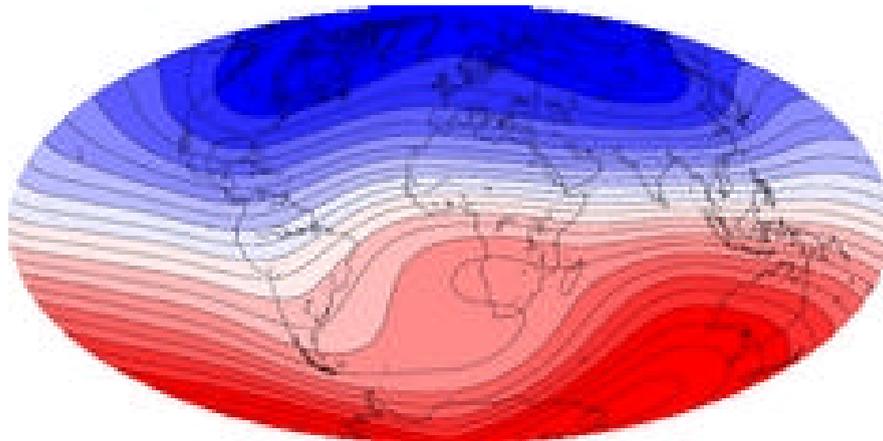


図 3.1-5 地球表面における磁場動径成分の分布
赤は正、青は負に対応する。等高線の間隔は 5000 nT。 [Matsushima, 2001]

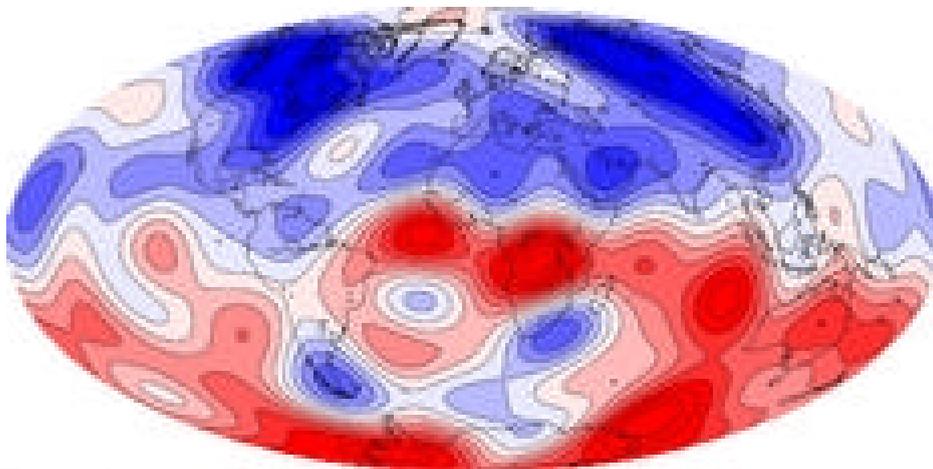


図 3.1-6 地球コア表面における磁場動径成分の分布
赤は正、そして青は負に対応する。等高線の間隔は 100000 nT。 [Matsushima, 2001]

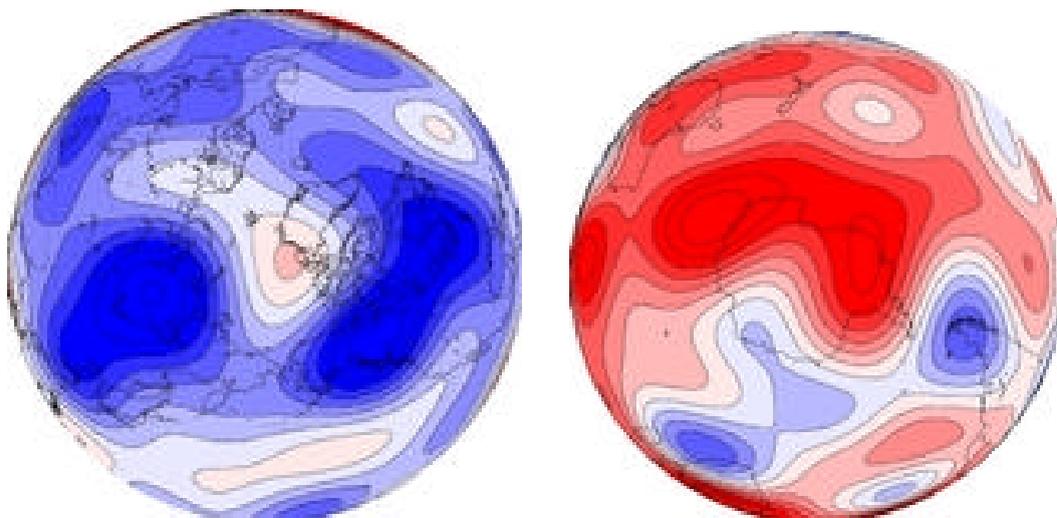


図 3.1-7 北半球 (左) 及び南半球 (右) の地球コア表面における磁場動径成分の分布
赤は正、そして青は負に対応する。等高線の間隔は 100000 nT。 [Matsushima, 2001]

では、水星ではどうか。2度のフライバイ観測データのみでは内部構造に踏み込んだこのような議論は到底できない。また、地球のコア半径は地球半径の約 55% であるのに対し、水星のコア半径は約 75% と見積もられている (図 2.2-1)。したがって、相対的にコアに近い位置での観測が可能で、内部構造に起因する非双極子成分がより確実に観測されよう。また、外部磁場の正確な評価がこのような観測では不可欠であり、その源である磁気圏の構造とダイナミクスを同時に理解しなければならない。

また、地球や火星では地殻における局所的な帯磁強度や極性を測定することによって、過去の磁場変動や地殻変動の情報が得られることが知られている。水星でこのような残留磁場を計測できれば、過去の水星で起きた磁場強度・地殻変動の推移について有力な手がかりが得られる可能性がある。

このような水星磁場の分布構造に関わる諸問題は、BepiColombo/MMO と MPO による精密な全球磁場マッピング観測によって解明されるであろう。

もし、このような水星磁場分布の時間変化が観測にかかれば、水星磁場の発生機構とコアの状態に対して極めて重要な制限を与えることができる。水星磁場が地殻の残留磁化によるものならその時間変化はまず考えられず、ダイナモ磁場との区別が可能である。また、ダイナモ磁場では、磁場分布の時間変化によってコア表面の流体運動を推定できる可能性がある [Bloxham and Jackson, 1991]。数十年以下の短い時間スケールでは、地球磁場の時間変化に対する磁場の拡散の寄与を無視できるが、これはコアを完全導体として扱うことと等価である。このため、磁場強度の短期変動から流体運動速度 v が推定できる (コア - マントル境界層は非常に薄いので、磁場の時間変化は境界層直下の流れによるとする)。この方法は、コア表面の情報しか得られないので磁場生成機構そのものの推定にはつながらないが、ダイナモ機構に対する示唆を与える。

また、水星の外部磁場の変動に対する内部磁場の応答を調べることにより、水星コアの大きさを独立に推定することができる。水星マントルは完全な電氣的絶縁体ではないと考えられるので、外部磁場が変動すれば誘導電流が水星内部を流れる。この電流分布は、内部の電気伝導度構造及び磁場変動周期に依存する。水星内部に電流が流れれば、それに対応する磁場が生成されるので、観測された磁場の変動を内部起源のものと外部起源のものに分離できれば、水星内部の電気伝導度構造を推定することができる。これは、水星の内部構造を確立する上で重要である。

このような水星固有磁場の変動に関わる問題も、BepiColombo/MMO と MPO による磁場観測によって解明されるであろう。

3.1.3 水星の外部磁場：磁気圏構造

水星固有磁場の分布構造を詳細に決定するには、外部磁場、すなわち水星磁気圏を理解することが不可欠である (cf. 図 3.1-2)。水星の外部磁場は、磁気圏を流れる電流の構造で決定される。図 3.1-8 は、Mariner 10 の観測データから推定された磁気圏内の磁場構造を示す [Whang, 1977]。内部磁場としてダイポール項の他に四重極・八重極項まで考慮した場合が最も残差が小さいと報告されており、ダイポール項に対する比はそれぞれ 0.4 と 0.3 という非常に大きな値となっている。四重極項はダイポールの惑星中心からのずれと等価だが、この結果では「ダイポールが 0.2 R_M 北にずれている」という大きな値になり、水星の形状がきわめて球に近い ($J_2 \sim 6 \times 10^{-5}$ 程度) ことを考えるとにわかには信じ難い値である。

しかし図 3.1-8 の推定は、磁気圏内の電流構造によって全く様相が変わる。Whang は、第 1 回フライバイの最接近直後の大きな磁場変化 (図 3.1-9 参照) が「磁気圏尾部の電流層通過」を示すとして尾部電流を評価した。しかし、磁気圏電流は元々大きく変化するものである。実際、次項に述べるように、第 1 回フライバイの途中で太陽風磁場が北向きから南向きへ変化しており、この変化に呼応して磁気圏の様相は大きく変化し、いわゆる「サブストーム」が発生したものと考えられている。図 3.1-8 は、磁気圏の状態を 2 回のフライバイとも同じと仮定しており、このような磁気圏の構造変化に起因した大きなバイアスがかかっている可能性が高い。

このような外部磁場の不確実性は、BepiColombo/MMO による磁場・電場・粒子などからな

る総合的なプラズマ観測によって解消されるだろう。これには水星磁場の観測、特に水星近傍と水星磁気圏内に位置する BepiColombo/MMO と MPO による同時観測が望ましい。この問題の詳細は、3.2 節に譲る。

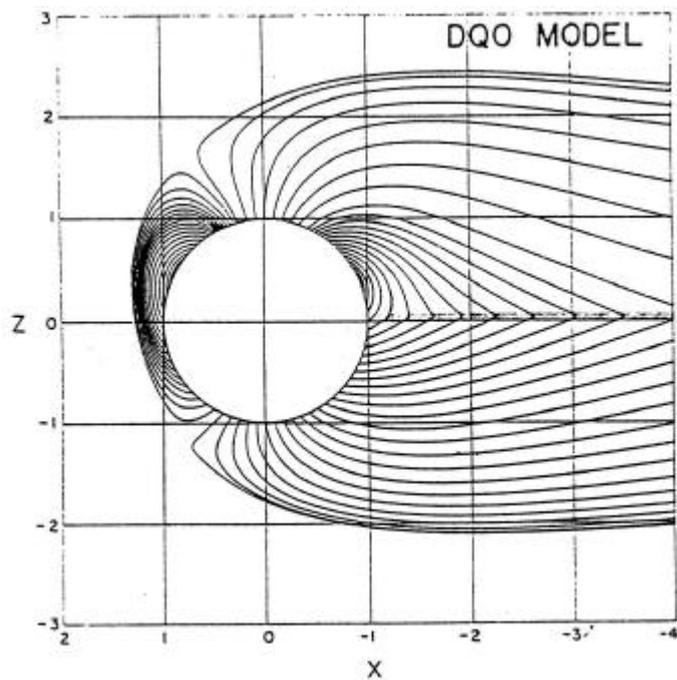


図 3.1-8 Mariner 10 の磁場データから推定した水星磁気圏の磁場構造 [Wang, 1977]

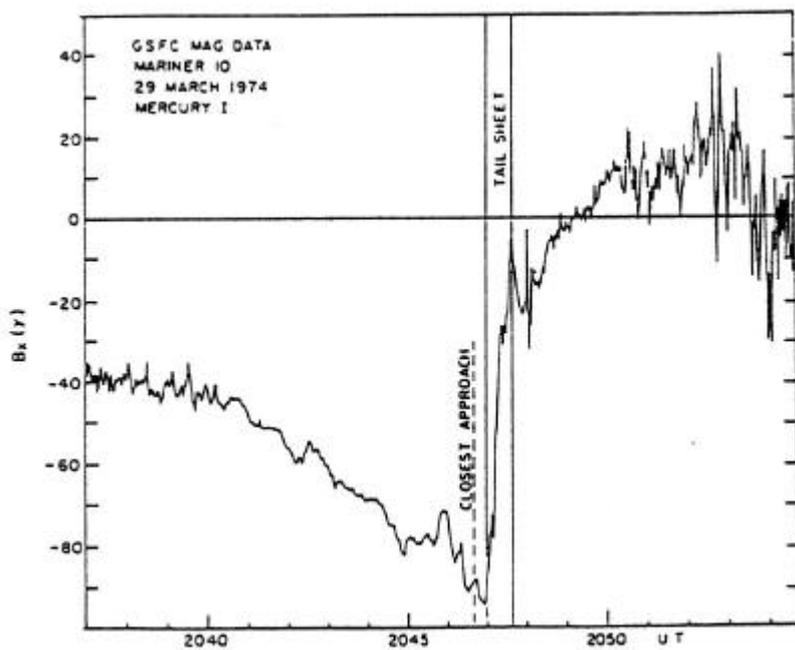


図 3.1-9 Mariner 10 の再接近時の磁場変化 (B_x 成分) の詳細 [Wang, 1977]

3.2 水星磁気圏

水星磁気圏は、その存在が確立したという段階で、その構造やダイナミクスは明らかでない。

BepiColombo/MMO による磁場・電場・粒子・波動などからなる総合的なプラズマ観測は、水星磁気圏の普遍性と独自性を明らかにする。その成果は、様々な磁気圏の普遍的な理解につながるものである。以下の各節では、水星磁気圏における解明すべき問題点を概括する。

3.2.1 水星磁気圏：その普遍性

図 3.2-1 に示すように、宇宙には様々なスケールの「磁気圏」が存在する。磁気圏は、惑星・恒星・銀河など天体の固有磁場と、天体外から飛来する磁化プラズマ流との相互作用によって形成される。これら磁気圏に関する研究は、最も身近である地球磁気圏の研究に端を発し、現在では太陽系諸惑星の人工衛星による直接探査や地上からの各種観測を通じ、次第にその普遍性と独自性が認識されるに至ってきた。

人類が直接探査しうる太陽系内では、太陽から絶えまなく流れ出す「太陽風」が惑星・衛星と衝突することによって磁気圏が形成される。この際、固有磁場や大気の有無など惑星・衛星各々の条件に応じて様々な構造が生成される。これら惑星磁気圏の構造や、そこで生起する物理現象の理解は、宇宙に存在する様々な磁気圏の普遍的な理解につながる。それには、多様な磁気圏の比較を通じて普遍性と独自性を調べ、その機構を明らかにすることが必要である。

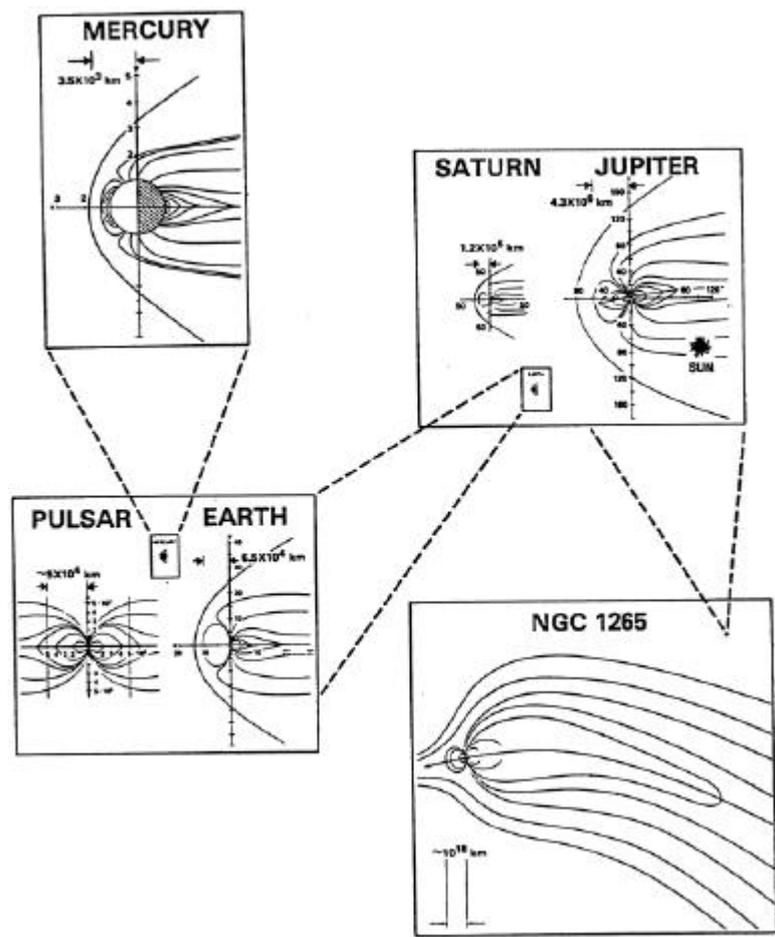


図 3.2-1 様々なスケールの天体磁気圏：水星、地球、土星、木星、パルサー、銀河 [Lepping, 1994]
(Courtesy: L.J. Lanzerotti, NRL, and NASA/GSFC)

比較研究には、対象とする現象を構成する基本要素の「共通性」と「特異性」の双方が必要である。金星や火星においてもプラズマ観測はなされているが、両惑星とも固有磁場を有さない。また、木星は強い固有磁場と巨大な磁気圏を有するが、太陽風からのエネルギー流入よりも自己の自転エネルギーの寄与が大きい「パルサー型」である点で、地球磁気圏とはかなり異なると思われる。水星は、「固有磁場とそれに伴う磁気圏を持つ地球型惑星」である点で、太陽系の中では最も地球との「比較磁気圏学」の対象としてふさわしい資格を持っている。

2回のフライバイにおける磁場と電子のみの観測ではあったが、Mariner 10は「水星磁気圏」が地球磁気圏と似た基本構造を持つことを明らかにした(図 2.6-1)。

- 固有磁場と太陽風との相互作用によって磁気圏が形成されている。太陽風は、固有磁場に阻まれて磁気圏には直接侵入していないと思われる。
- 「前面に形成された衝撃波」、「はっきりした磁気圏境界面」、「長く伸びた尾部」、「高温プラズマからなるプラズマシート」など、共通する基本構造を有していると見られる。
- 太陽風から注入されたエネルギーが「磁場エネルギー」として蓄積され、それが磁力線再結合を介して一気に開放される普遍的な現象「サブストーム」らしき現象が存在した。

BepiColombo/MMO は、これら水星磁気圏の「普遍的」な構造・ダイナミクス・物理プロセスを明らかにし、地球磁気圏との比較を行う。これは、惑星・恒星・銀河の様々なスケールで見られる宇宙一般の磁気関連現象の解明に資するものである。

一例を挙げる。様々な磁気圏におけるエネルギー現象は、一般に磁場を横切るプラズマの運動によって引き起こされる。このような「磁場に起因するエネルギー現象」では、例えば図 3.2-2 に示すような普遍的なスケール則の存在が示唆されている [Makishima, 2000]。この図は様々な天体磁気圏で見られる「粒子加速」と「磁場中のプラズマ運動による典型的エネルギー」との比をあらわしたのだが、水星はこれまで知られている自然界の「磁気圏」としては最小スケールだが、この図では「Auroral Substorm」(地球)と「Reverse Field Pinch Machine」(実験室)の中間に来ると見られる。水星磁気圏は、そのスケール長がイオンの回旋半径と同程度に過ぎず、磁気流体力学(MHD)的な近似が成立するぎりぎりの点に位置することを考えると、実験室プラズマ以上に「小さな」系とも言える。このため、BepiColombo/MMO による水星磁気圏の探査は、宇宙における磁場現象の「普遍性」を下限において考える上でも、非常に重要と言える。

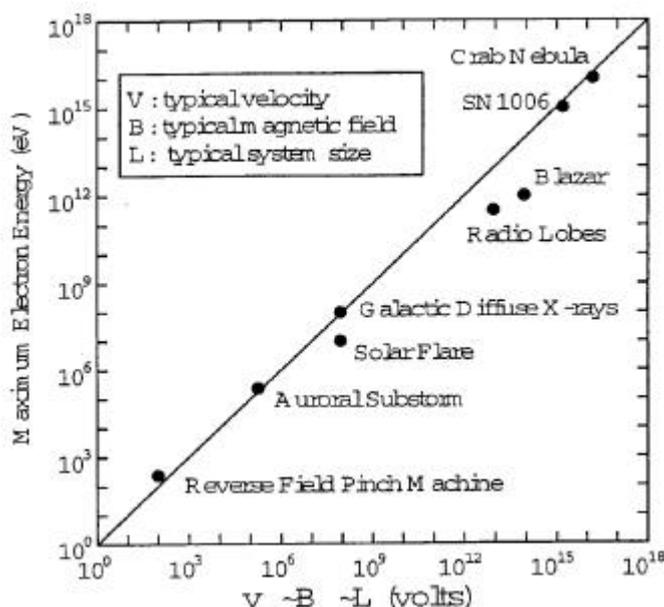


図 3.2-2 天体磁気圏における粒子加速の大きさ (磁気圏現象のスケール則の一例)

縦軸は、「生成される加速粒子の最高エネルギー」、横軸は「 $V \times B \times L$ 」(V, B, L は、典型的なプラズマ速度、磁場強度、システム長)。 [Makishima, 2000]

一般にこのような比較研究は、磁場・電場構造やプラズマ密度・温度などの局所的な観測の積み上げでもたらされる。

また、ふたつの巨視的な観測手段がありうる。一つは「プラズマ波動・電波計測」である。プラズマ波動は、磁気圏内に存在する自由エネルギーによって励起される。これらの特性を調べることによって、磁気圏の巨視的情報を得る事が出来る。例えば、Alfvén 波や Whistler 波は、電離圏（や表面）の導電性のリモートセンシング、伝播経路のプラズマ密度の推定、磁力線の接続状況などの情報を含んでいる。また、電波活動が確認されれば、電波源の情報や、そのエネルギー開放規模の情報を伝えることができる。もう一つは、「高速中性粒子観測」である。高速中性粒子は、磁気圏の高エネルギーイオンと希薄大気の中性原子との荷電交換衝突によって生成される。荷電交換衝突では運動量交換がほとんど行われなため、生成された高速中性粒子は磁気圏プラズマ粒子のエネルギー・質量分布の情報を保持している。このため、この観測によって磁気圏プラズマの大規模構造を調べる事が出来る可能性がある。磁気圏のサイズが小さい水星磁気圏は、地球に比べて急激な変化をすると考えられるため、時間変化と空間変化の分離を果たすことができるこのような巨視的観測は重要である。

BepiColombo/MMO は、微視的情報と巨視的情報との組み合わせによって、水星磁気圏の構造とダイナミクスを初めて明らかにする。

3.2.2 水星磁気圏：その特異性

水星はしかし、「極めて希薄な大気」、「より小さな固有磁場」、「より太陽に近い軌道」といった特徴の帰結として、地球磁気圏と比較して次のような特異性を有すると考えられている。

- 地球の「外圏」程度の希薄な大気しか存在しないため、特に夜側では「電離圏」が存在せず、磁気圏が直接惑星表面と接すると思われる。
- 磁気圏の中に占める固体惑星の相対的な大きさは、地球磁気圏より8倍大きいと推測される。水星表面は、地球磁気圏における「静止軌道より少し外側」に相当する位置にあり、その内部に形成されるはずのプラズマ圏などの構造を有さないと思われる。
- 磁気圏の典型的な時間スケールが、地球磁気圏のその数十分の一と小さい。このため、エネルギー開放現象などのタイムスケールは地球より数10倍早い。
- 固有磁場が弱いため、太陽風の変動の影響が地球に比べて非常に大きい。また、太陽からの距離が大きく変化するため、太陽風の変動幅も大きい。また、太陽風の速度・密度・磁場強度は地球軌道付近と同等・5~10倍・4~8倍で、太陽風の Alfvén マツハ数が低い。

BepiColombo/MMO は、これらに起因する水星磁気圏の「特異性」を明らかにし、磁気圏の構造やダイナミクスに占める基本的な役割の解明を目指す。以下、個々の特異性の影響を概括する。

1) 「電離圏」の不在

地球と異なり、水星には安定した電離圏は存在しないと思われる。そもそも、水星には地球の「外圏」に相当する程度の希薄な大気しかなく、電離圏はあってもその電気伝導度は非常に低いと考えられる。

大気の詳細は2.5節及び3.3節に譲るが、H、He、O（表面近傍で各々 $0.2\sim 2\times 10^2\text{ cm}^{-3}$ 、 $6.0\times 10^3\text{ cm}^{-3}$ 、 $4.4\times 10^4\text{ cm}^{-3}$ ）とほぼ同等に、水星表面で生成されるより重いNaとKが存在する（ $2\times 10^4\text{ cm}^{-3}$ 、 $5\times 10^2\text{ cm}^{-3}$ ）。ここではナトリウムに注目する。光学観測によって、表面近くでの密度 $2\sim 4\times 10^4\text{ cm}^{-3}$ 程度、温度約500Kのナトリウムの存在が示唆されている [Potter and Morgan, 1985]。

地球の電離圏では、イオンと中性粒子の衝突が「磁力線を横切る電気伝導度」(Pedersen 伝導度)に寄与して、磁気圏とつながる電流系を形成できる。水星では中性粒子は少なすぎ、この機構による電気伝導度は期待できない。しかし、昼側表面近くでは、新たに放出されたNaが太陽光で電離する過程が頻繁に起きると見られる。Naは電離したとたんに磁場に捕らえられるが、この遷移過程でほぼジャイロ半径分、電場方向にイオン位置がシフトし、結果として電気伝導度を生じる(図3.2-3)。この「Ion Pick-up Conductivity」による水星大気の電気伝導度は0.1 - 0.3 mho、地球(1 - 10 mho)の1/10 - 1/100程度と推定されている [Cheng et al., 1987]。

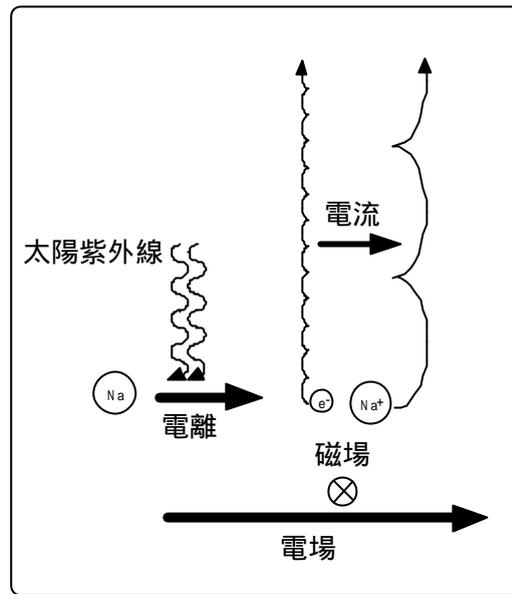


図 3.2-3 Ion Pick-up Conductivity の概念図

一方、夜側では太陽紫外光による電離が無く、このような電気伝導度の生成過程はまず起こらない。このため、夜側表面に接続する磁力線上では、水星表面の電気伝導度しか期待できないことになる。これが水星磁気圏の構造にどのような影響を与えるのか、現在まったく未知である。

BepiColombo/MMO は、この特異な電離圏（及び水星表面）の電気伝導度が与える磁気圏構造・ダイナミクスへの影響を明らかにする。

2) 小スケールの磁気圏

水星の磁気圏全体の実サイズは地球の 1/20 程度である。太陽風の電場が地球と同様のプロセス（例えば、10%の効率の磁気リコネクション）で磁気圏内に侵入すると仮定すると、磁気圏尾部の両脇にかかる電位差は地球の 7~15%、5~10kV 程度である。

地球磁気圏のアナロジーに基づいて模式的に描いた水星磁気圏の構造を図 2.6-1 及び 図 3.2-4 に示したが、惑星本体が磁気圏の中に占める割合が非常に大きい。惑星表面は、地球磁気圏における静止軌道より外、 $8 R_E$ あたりに位置することになり、地球と共回転する「プラズマ圏」が存在するはずの領域は水星の内部にすっぽり収まってしまう。磁気圏尾部の半径は約 $2R_M$ 程度で、夜側では距離 $2 R_M$ 付近で既にダイポール状から外れ「尾部構造」を示すと思われる。

このような特異な水星磁気圏の巨視的構造については、磁気流体力学（MHD）的数値実験によるモデル化も試みられている [ex. Kabin et al., 2000]。しかし、水星表面（及びその近傍の「電離圏」）と太陽風・磁気圏との相互作用が不明で、不定性が大きい。また、イオンの特徴的な運動スケールであるジャイロ半径と同程度のスケール長でしかない構造が多く、そもそも MHD の描像で表現されうのか自体が問題である。

また、地球磁気圏では Pc 3 - 5 と呼ばれる周期 1 - 10 分の MHD 波動が観測される。これらは Alfvén 波・Fast-mode 波（速い磁気音波）で、電離圏ないし表層の電気伝導度が十分高ければ、反射によって定在波を生じる。定在波の周期は「領域スケール長を波動伝搬速度で割った程度」で、水星磁気圏ではもし存在すれば数秒のオーダーとなる。これは、水星磁気圏のイオンサイクロトロン波の周期と同程度で、MHD 現象とサイクロトロン運動とが複雑にカップリングを起こす、即ち、閉じた磁力線間をバウンスするプラズマ粒子が複雑なエネルギー交換を行う可能性も指摘されている。

BepiColombo/MMO は、このような小スケール磁気圏特有の構造・ダイナミクスやプラズマプロセスを明らかにし、磁気圏一般に見られる描像がどこまで適用可能なものなのかを明らかにする。

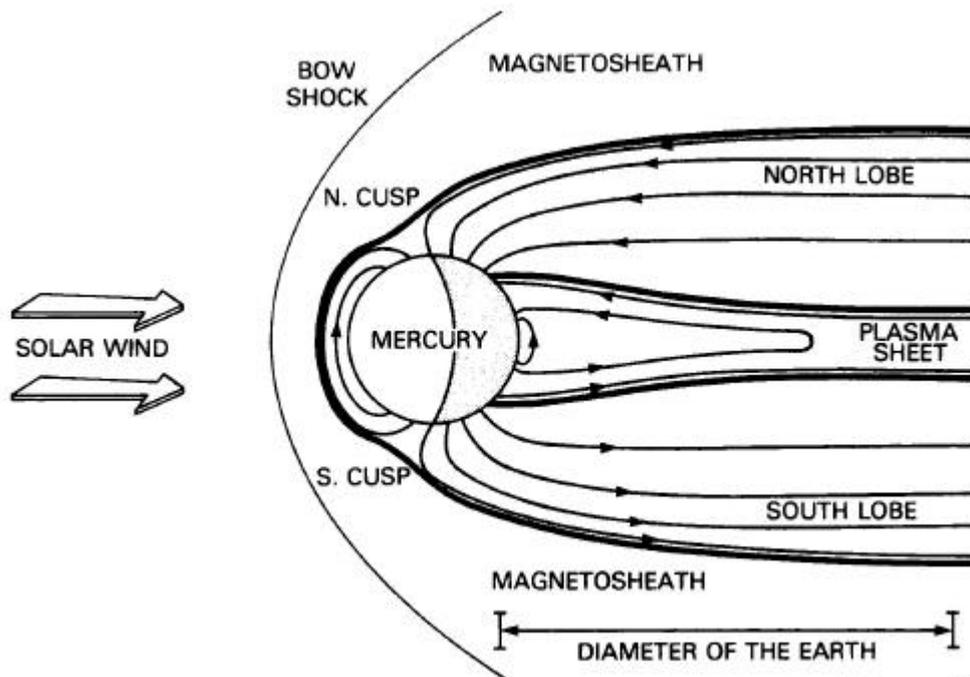


図 3.2-4 水星磁気圏 [Slavin et al., 1997]

3) 高速の磁気圏

磁気圏における典型的な時間スケール T は「磁気圏の対流時間」である。磁気圏尾部に存在する磁場のフラックスを F 、磁気圏尾部にかかる電位を Φ とすると、この時間は $T = F/\Phi$ で見積もることができる [Siscoe et al., 1975]。この値は、地球磁気圏で約 1 時間、水星磁気圏で約 1 ~ 2 分となり、その比は 1:30 ~ 1:50 となる。つまり水星磁気圏における物理現象は、一般に地球の数十倍高速に生起することが予想される。

Mariner 10 の観測 (図 2.6-2) では、プラズマ電子のカウント数の様相が再接近時 (20:47 頃) の直後を境に大きく変化している。このような変化は、太陽風中の惑星間空間磁場 IMF (Interplanetary Magnetic Field) の変動に起因するものと推定される。すなわち、ちょうど最接近時付近で IMF の極性が北向きから南向きに反転したことによる影響ではないかと考えられる。通例、地球におけるこの現象の応答時定数は 1 時間程度だが、Mariner 10 はそもそも 17 分しか水星磁気圏内に留まっていなかったことを考えると、数分のオーダーで太陽風の変化の影響が尾部まで及んだことになる。この反応時間は地球に比べて確実に早い。

BepiColombo/MMO は、この高速変動する磁気圏における構造・ダイナミクスの変動特性を明らかにし、磁気圏一般に見られる普遍性がどこまで適用可能なものなのか明らかにする。

4) 強い太陽風の影響

一般に、惑星磁気圏、特にバウショックや昼側の構造は、磁気圏に吹き付ける太陽風のパラメータ変化に伴って大きく変化する。例えば、前面の磁気圏界面の位置は、太陽風の動圧と水星固有磁場の圧力とのバランスで決まる。水星の場合、惑星半径の割には固有磁場が十分大きくないため、元々バウショックや磁気圏界面は水星表面に近く、太陽バーストの影響で極端に太陽風動圧が大きくなった場合 (太陽風速度: ~ 1100 km/s) には、バウショックや磁気圏界面は水星表面に達する可能性すらある [Goldstein et al., 1981]。このため、ごく普通の太陽風パラメータの変動が大きな変動を誘発する可能性がある。

水星は太陽から 0.31 - 0.47 AU の位置にあるため、そもそも地球近傍とは太陽風の条件が大きく異なる。表 3.2-1 に、太陽風パラメータの距離依存性を示す。Helios の観測結果では、水星軌道での太陽風の速度は地球付近と殆ど変わらないものの、平均的な密度では約 5 ~ 10 倍、磁場強度では約 4 ~ 8 倍で、太陽風の Alfvén マッハ数は地球軌道近傍より明らかに低い。また、公転に

伴う太陽からの距離変動が大きいため、太陽風条件の「季節変化」の幅が非常に大きい。

BepiColombo/MMO は、このような異なる太陽風影響下における磁気圏の構造・ダイナミクス・物理プロセスの特性を明らかにし、より普遍的な磁気圏の描像を明らかにする。

Planet	R (AU)	V_{SW} (km s^{-1})	N_P (cm^{-3})	B (nT)	T_P (10^4K)	T_E (10^4K)
Mercury	0.31	430	73.	46	17	22
	0.47	430	32.	21	13	19
Venus	0.72	430	14.	10	10	17
Earth	1.0	430	7.0	6.0	8.0	15
Mars	1.5	430	3.1	3.4	6.1	13
Jupiter	5.2	430	0.26	0.83	2.7	8.7
Saturn	9.6	430	0.076	0.44	1.8	7.1
Uranus	19.1	430	0.019	0.22	1.1	5.6
Neptune	30.2	430	0.0077	0.14	0.82	4.8
Scaling	—	R^0	R^{-2}	$(2R^{-2}+2)^{1/2}/2R$	$R^{-2/3}$	$R^{-1/3}$

表 3.2-1 各惑星軌道における太陽風パラメータ [Russel et al., 1988]

以下では、これらの特異性の帰結として予想される水星磁気圏独自の諸現象について、個々に詳細を述べる。いずれも、BepiColombo/MMOの重要観測目標である。

3.2.3 サブストーム：粒子加速機構

Mariner 10 は、第 1 回フライバイにおいて、磁気圏における基本的なプロセスである磁場エネルギーの開放現象「サブストーム」らしき高エネルギー現象を観測した。BepiColombo/MMO は、地球磁気圏とは異なる境界条件と空間・時間スケールを持つ水星磁気圏のサブストーム現象の解明を目指す。

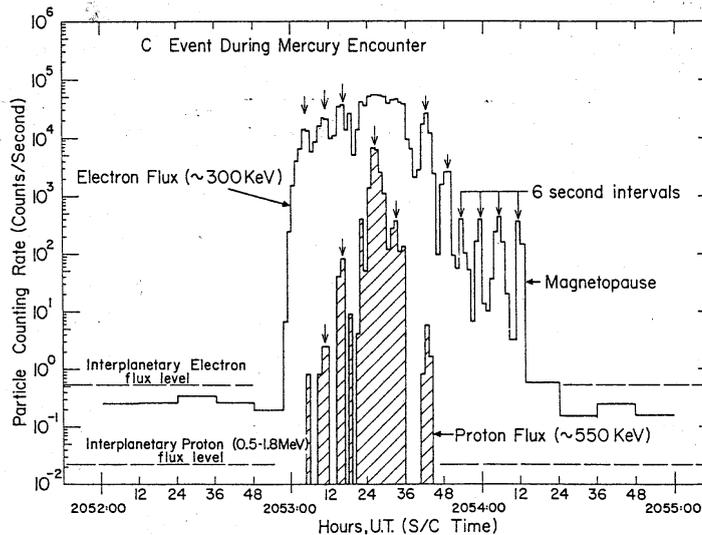


図 3.2-5 Mariner 10 の第一回フライバイで観測した高エネルギー電子のバースト現象

[Simpson et al., 1974]

Mariner 10 は、第一回フライバイにおいて夜側磁気圏を横断した際、「プラズマシート」と思われる高温プラズマ領域と、サブストームと関連すると思われる数回の「高エネルギー電子バースト」を観測した [Simpson, et. al., 1974; Christon et al., 1979; Christon, 1987] (図 2.6-2)

図 3.2-5 に、この高エネルギー電子バーストの一つを示す。200keV以上の電子フラックスが数秒で10000倍以上増加し、1分以下で終息した。また、同時に磁場変動も観測されている。磁場は、立ち上がり時にBz(北向き)成分が減少、その後2-3秒で増加に転じ、電子フラックスの高い間は磁場強度も強い。

このような変動は、地球磁気圏の静止軌道(6.6R_E)近傍においてもサブストームの開始時に見られる。図 3.2-6 に、地球で見られるサブストームを示す。サブストーム時には、北向き磁場(Bz)は最初に1-2分程度の急激な減少、次の数分で増加する。これは、磁気圏が「一旦引き伸ばされた後、よりダイポールのになる」変化をしたことを意味する。また、地球では、最初の磁場の急減とともに「電子フラックスの増加」と沿磁力線電流の発生に伴う「磁場の東西方向変動」が始まるが、水星でもこの両者の現象が見受けられた。

ただし、イオン・電場・波動などの観測はなく、波動-粒子相互作用による微視のプロセスまで包含したサブストームの機構にどの程度の共通性が見出せるかは不明である。BepiColombo/MMO では、高速かつ総合的な磁場・電場・粒子・波動観測を通し、水星磁気圏におけるエネルギー開放現象機構を解明し、地球磁気圏との比較を可能とする。

また、水星の「サブストーム現象」は、時間スケールの点で地球と大きく異なる。観測された電子バーストは30秒~1分程度続き、鋭い立ち上がりと指数関数的な早い減衰を持つ。間隔(3~5分)も短い。これらのタイムスケールは、数十倍拡大すると地球で見られるサブストームのタイムスケールに相当する。

この水星磁気圏の「小さな時間的スケール」は重要である。サブストームの頻度が数十倍多いことを意味し、「水星磁気圏の1年間の観測は、地球磁気圏の数十年分の観測に匹敵する」ことになる。また、太陽風環境が変化するタイムスケール(通例数分~数十分程度)に比べても水星磁気圏の反応時間は同程度もしくはより早いと見られるため、地球磁気圏研究の大きな障害となっている「現象の推移中における太陽風の時間変動の影響」を切り離すことができ、太陽風パラメータの影響をより理想的に解明できる。

このように BepiColombo では、地球磁気圏では得る事の出来ない、より統計的、より理想的な磁気圏の高エネルギー現象の解明が可能である。

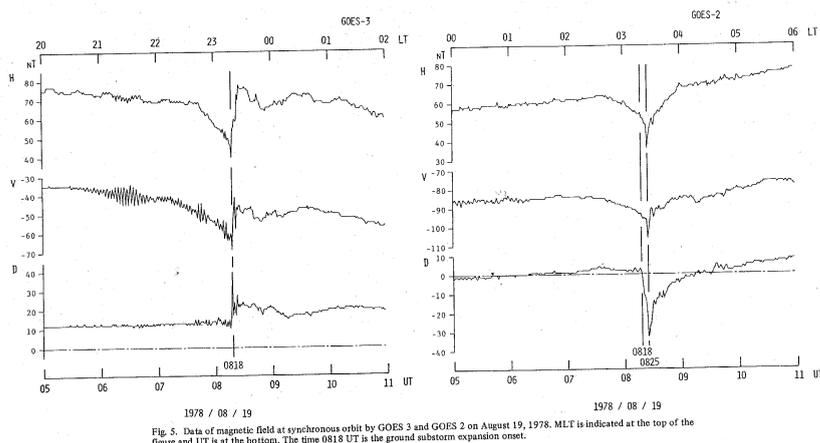


Fig. 5. Data of magnetic field at synchronous orbit by GOES 3 and GOES 2 on August 19, 1978. MLT is indicated at the top of the figure and UT is at the bottom. The time 0818 UT is the ground substorm expansion onset.

図 3.2-6 地球磁気圏におけるサブストーム時の磁場変動

Mariner 10の第1回フライバイのデータでは、惑星間空間磁場は現象の前では北向き、後では南向きであった。この反転時に昼間側の磁気圏境界で磁気再結合が起き、磁力線が磁気圏尾部に

運ばれたと思われる(図 3.2-7)。太陽風の動圧が地球よりも 10 倍程度高いため、水星磁気圏はかなり押しつぶされていると思われる、尾部での磁気再結合の条件はより整いやすい可能性がある。電子の加速は、磁気再結合時の磁場変動によって誘導される電場によると考えられている。仮に $1 R_M$ 程度の大きさの領域で Mariner 10 が観測した規模の磁場変動が起きれば、20 mV/m 程度の電場が誘起されることになる。これは、地球磁気圏で観測される電場の大きさと同程度だが、水星では空間スケールが小さいため、低エネルギー(数百 eV)の電子を観測された 300keV 程度まで加速するのはほぼ不可能に近く、加速領域における磁場・電場・粒子・波動観測が待たれる。

他にも説明出来ない点が多い。例えば、図 3.2-5 の高エネルギー電子バーストには、約 6 秒おきに周期的な sub-peak が現れるが、今のところ満足出来る説明は存在しない。個々の 6 秒周期の変動が磁気再結合起源の「誘導電場」による電子加速の結果とすれば、6 秒間で 10^{10} J 以上という莫大なエネルギー消費が要求される [Eraker and Simpson, 1986]。このためには、加速効率を 1% とすると 10^{11} W の太陽風エネルギーが水星磁気圏に供給される必要があるが、これは地球磁気圏に匹敵する値で、スケールの小さい水星磁気圏ではありえない。これに対し、実際の加速は最初だけで、6 秒周期は「磁場勾配ドリフト」で水星を周回するドリフト・エコーではないか、という解釈もある [Baker et al., 1986]。しかし、減衰を考慮するとドリフトでは 1 - 2 分の継続時間を維持できないように、電子の軌道が磁気圏境界面に達してしまっても水星を一周出来ない可能性もある。「電子バースト自体、35keV 以上の電子によるパイルアップではないか」という指摘がある [Christon, 1987]。

このような水星磁気圏における高エネルギー電子の加速機構の解明は、BepiColombo/MMO の重要な研究主題である。

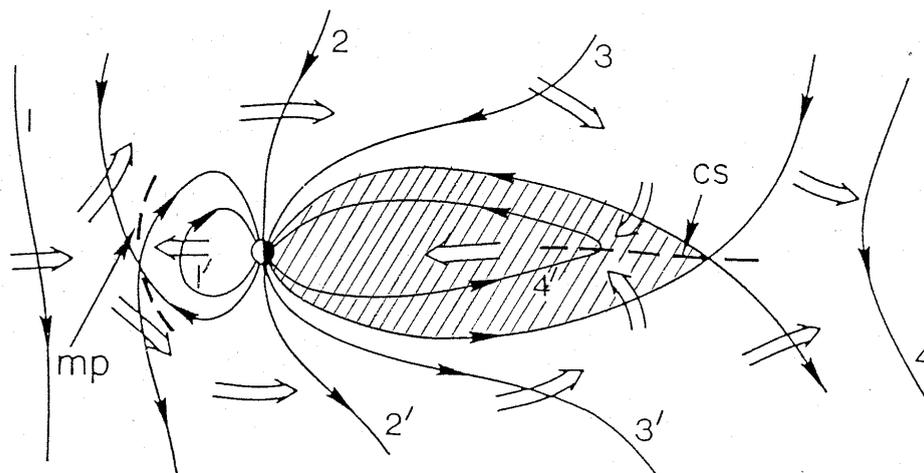


図 3.2-7 磁気圏のリコネクション対流モデル

3.2.3 夜側電離圏・プラズマ圏の欠如：電流系

サブストームに密接に関連する問題として、磁気圏と電離圏をつなぐ「電流系」の問題がある。水星と地球の間には「電離圏の有無」という大きな相違がある。地球では、沿磁力線電流・オーロラなど「サブストーム」の重要な特徴は、電離圏と磁気圏との結合が前提となって成立する。しかし、この結合は、水星の場合存在しないか、もしくは全く異なるはずである。果たして「サブストーム」は同様なメカニズムで起きうるであろうか。

昼側では、既に述べた「Ion Pick-up Conductivity」によってある程度電離圏に類似した環境が成立するかも知れない。(ただし、主なイオンは Na^+ など大質量のもので、地球とは異なるし「Hall 伝導度」がない、という大きな違いもある。)

しかし、夜側で期待できるのは、今のところ「惑星表面のわずかな電気伝導」だけである。地球では、サブストームを引き起こすには「尾部電流を切って電離圏に流す」(図 3.2-8) ことが必

要と考えられるが、水星では事実上不可能である。また、尾部に起源を持つ電場変動の惑星による反射波の位相が、「導電体」である地球電離圏と「絶縁体」である水星表面とは逆になると思われ、この影響も注目される。これらの点による影響を概括したい。

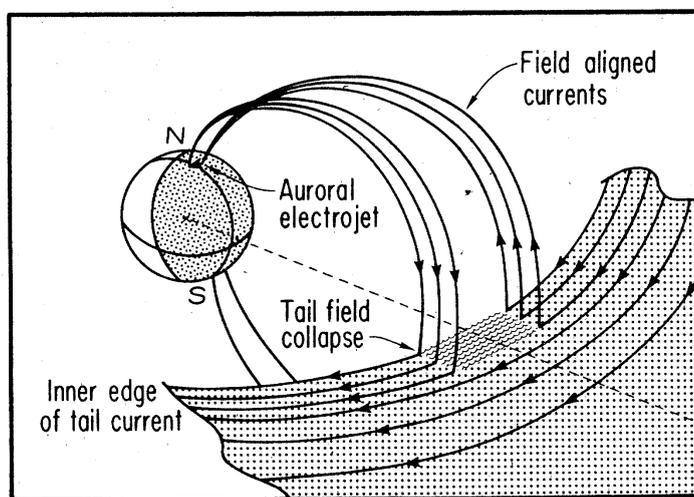


図 3.2-8 地球磁気圏におけるサブストーム時の電流系

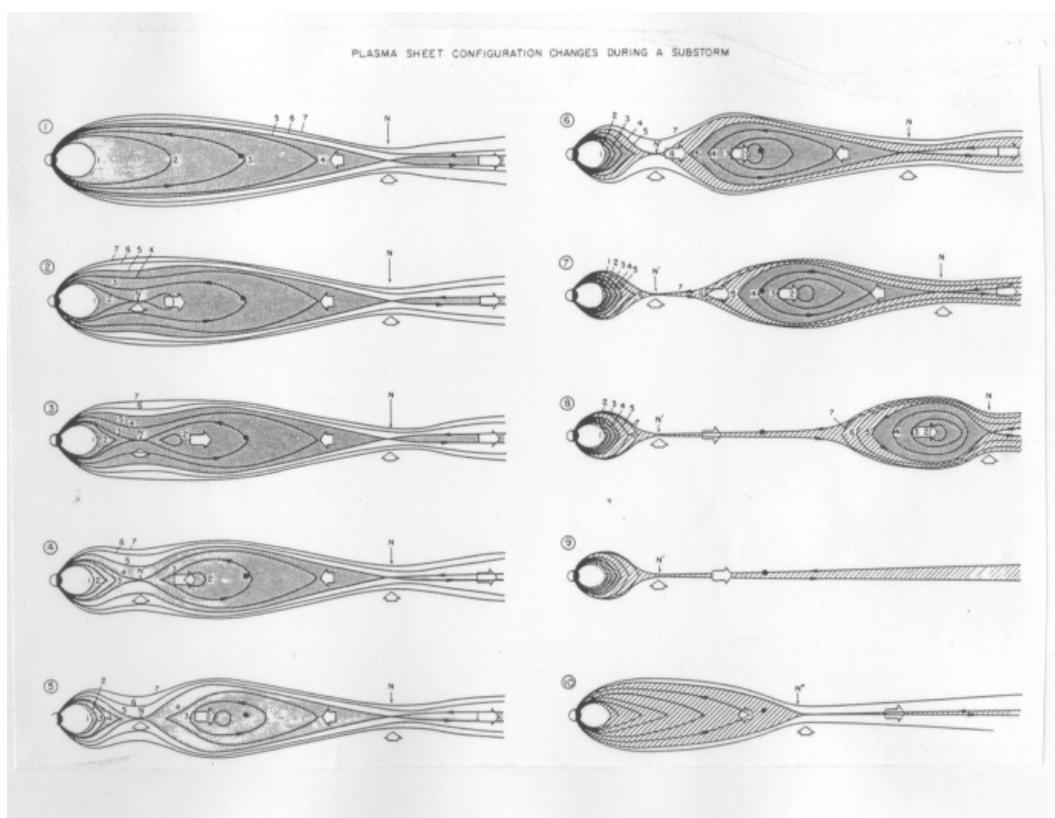


図 3.2-9 地球磁気圏サブストームにおける磁力線再結合とプラズモイドの生成 [Hones, 1980]

地球磁気圏のサブストームでは、まず磁気圏尾部を東西方向に流れる「尾部電流」が切られ（Current Disruption: CD）電流は電離圏につながる磁力線上への迂回を強いられる（「沿磁力線電流」）。この情報は Alfvén 波を介して伝達され電離圏に伝わり、異なる磁力線上にやってくる沿磁力線電流同士が電離圏の中でつながれ、電流系として完結することで尾部の CD が維持される。磁気圏を東西に流れる尾部電流は、長く引き伸ばされた「尾部」を維持する機能を持つ。CD が維持されるということは、これが途中で切られてしまうということの意味する。これにより、CD 周囲の磁力線再結合がどんどん拡大誘発され、より後ろ側の磁気圏は切り離されて「プラズモイド」として太陽風とともに流されていくと考えられている（図 3.2-9）。

では、水星ではどうか。電離圏が無い場合、磁気圏からの沿磁力線電流を電離圏では「閉じられない」。このため「磁力線再結合過程が拡大しない」という考えがある。つまり、磁気圏の電流系が切れて情報が Alfvén 波として水星に向かっても、絶縁体である水星表面では地球と異なり位相反対の反射波が生まれてしまう。この反射波は元の領域に戻ると負帰還として働くので、磁気圏尾部電流は強制的に元に戻され、結果としてサブストームの進行は停止する。また別の描像もあり、この「反射波」の往復によって現象が繰り返しトリガーされ、先の電子バーストの「6 秒周期」を引き起こす、という可能性も指摘されている。

他の「沿磁力線電流を閉じる」機構も提案されている。例えば、水星表面近傍では磁場の空間勾配が大きく、磁場平行の Alfvén 波は磁場垂直の Fast-mode 波（速い磁気音波）に変換しやすい。Fast-mode 波は磁力線を横断する電流を流せるので、この波を介して沿磁力線電流が閉じられる可能性が指摘されている。このプロセスは地球磁気圏でも存在しているはずだが、地球には電離圏の影響が大きくこのプロセスを分離できない。水星では、この問題を理想的に解明できると考えられる。

BepiColombo/MMO は、Alfvén 波やホイッスラーモード波の測定による「電離圏」ないし「地表」の電気伝導度推定、広範囲における沿磁力線の強度分布、尾部における総合的なプラズマ観測の結合によって、電離圏不在の影響を調べる。

沿磁力線電流に関連する問題として、「オーロラ現象」がある。夜側に有意な大気が存在しない以上、夜側磁気圏から降り込む高エネルギー粒子は地球で見られるような大気の発光現象「オーロラ」は期待できないと思われる。しかし、以下の別の手段によって「オーロラ」を捉えられる可能性がある。

一つ目は、磁気圏からの高速粒子が表面を直接叩くことによる、「表面からの粒子スパッタリング」や「蛍光 X 線放射」である。スパッターされる粒子の多くは中性粒子で磁場の影響を受けないため、探査機と磁力線で繋がっていない領域の現象も観測出来る。X 線も同様で、高速粒子が注入される磁力線の位置や規模が明らかとなる。また、スパッター粒子のエネルギー分布は降り込み粒子のエネルギーを反映するため、観測できれば原因となる粒子現象のエネルギー推定が可能と考えられる。

もう一つは、極域への高エネルギー粒子注入に伴う電波放射現象である。地球では、電子サイクロトロン共鳴に基づくオーロラキロメートル波が知られるが、水星でも同様の機構による電波活動が観測される可能性は否定できない。その場合、極域の電子サイクロトロン周波数から、観測される電波の周波数は数 kHz ~ 数十 kHz の範囲が予想される。

これらの現象は、地球におけるオーロラ観測同様、その領域と磁力線で繋がった磁気圏内で起こる粒子加速現象の巨視的なモニターとなり得る。例えば磁気圏尾部での粒子加速・加熱現象と同時に等価的な「オーロラ」現象を捉えることができれば、その現象の大局的な規模や時間変化が推定出来る。BepiColombo/MMO では高速中性粒子及び電波の計測、BepiColombo/MPO では X 線計測を予定しており、水星におけるこのような「オーロラ現象」を捉える。

電離圏のより上層に存在する「リングカレント」も問題である。水星の磁気圏に単純にスケールリング則を当てはめると、プラズマ圏は全て惑星内部に入ってしまう。単純な想定では、「ヴァン・アレン帯」（放射線帯）は元より、惑星を取り巻く「リングカレント」（環電流）は存在しないことになる。地球磁気圏では、「サブストーム」あるいは「磁気嵐」に伴う磁気圏磁場の急激な構造変化によって高エネルギー粒子が生成され、地球を取り巻く環電流（リングカレント）や

放射線帯（ヴァン・アレン帯）の粒子フラックスが増大する。水星磁気圏で、同様な高エネルギー粒子分布領域が存在しているかどうか、また存在できるのかは不明である。

ただし、サブストームに伴って尾部から注入される高速プラズマが、表面近傍の強い磁場勾配のある領域で誘導電場によって加速され、その一部が磁場勾配ドリフトによって「リングカレント」的な構造を作る可能性はある。現在の磁場構造モデルでは、昼間側磁気圏境界面は表面からわずか $0.5R_M$ 程度離れているに過ぎない。この小さい「昼間側磁気圏」は、想定される強度 200 nT の磁場を仮定した場合、500 keV の高エネルギープロトンのジャイロ半径と同程度で、安定してリングカレント的な構造が存在するとは考えにくい。一方、電子のジャイロ運動にとっては十分なスケールなので、電子が担うリングカレントが発達する可能性はある。これは地球磁気圏の様相とは大きく異なる。

BepiColombo/MMO では、高エネルギー粒子観測によるイオン・電子のエネルギー・ピッチ角分布の測定、及び電場・磁場波動が媒介する様々な相互作用の測定によって、このような「リングカレント」の存在、およびそのサイズ・構造・成因を明らかにする。

3.2.4 プラズマシート：粒子の加熱機構

地球磁気圏では、尾部に磁場は弱いが高温度・高密度の「プラズマシート」が存在する。このプラズマシートは、太陽風方向に延びる細長い尾部を維持するに必要な「尾部電流」を流す為に必須で、尾部が存在する以上、水星磁気圏にも存在するものと見られる。しかし、この推論はプラズマシートの形成機構に関しては何の情報をもたらさない。

Mariner10が観測した低エネルギープラズマ電子のカウンタ数（図 2.6-2）は、前半において水星磁気圏は低温高密度の状態であったのに対し、後半では高温低密度に一変している。この変化は、太陽風磁場方向の極性変化に対応していると考えられている。地球でも同様の変化が見られるが、水星ではこの変化が極めて早く、また低温プラズマと高温プラズマの差が大きい。

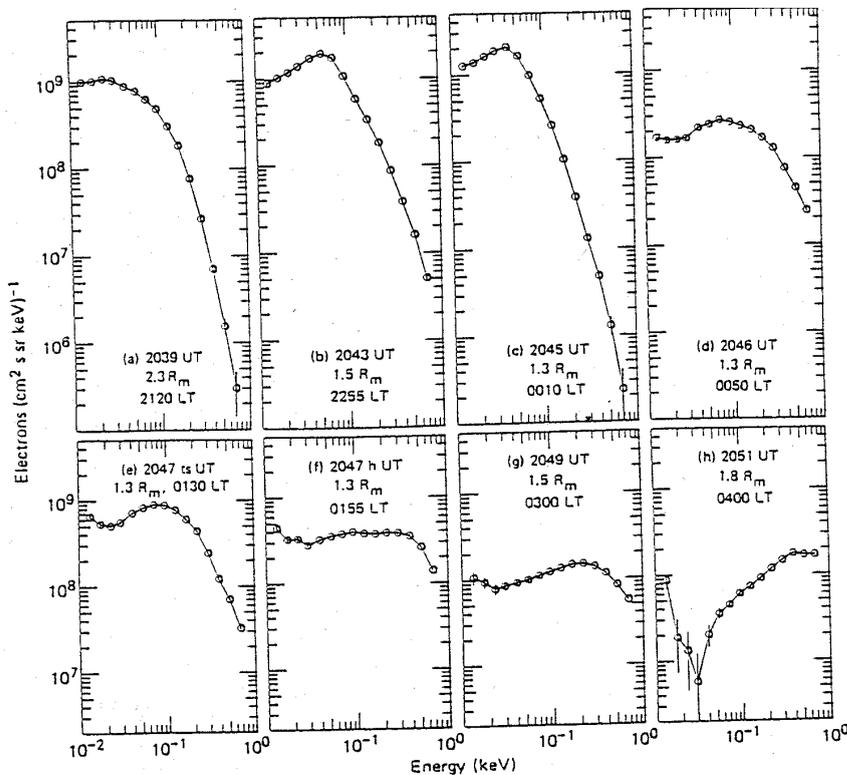


図 3.2-10 Mariner 10 が観測した水星磁気圏の低エネルギー電子 [Christon, 1987]

この事は、**図 3.2-10** に示すエネルギースペクトルではより明らかである。前半の「低温高密度プラズマ」の電子スペクトルは、地球と同様「カッパ分布」($f \sim p^2 [1 + v - V_b / kv_0]^2$: 低エネルギーでマックスウェル分布 [$E_0 = (1/2)mv_0^2$]、高エネルギーで冪関数 [$f = E^{-k}$]) で近似される。ただし、温度は 30eV 程度で、地球の低温高密度プラズマシート (~200eV) に比べずいぶん低い (冪は $k = 7$ 、地球と同程度) [Christon, 1987]。「30eV」という温度は太陽風の温度と大差なく、太陽風プラズマが加熱を受けずに磁気圏の中に拡散的に輸送された可能性があるが、密度は約 3 cm^{-3} 程度で、太陽風密度 14 cm^{-3} との比は地球の場合 (~10%) より 2-3 倍高い。このため、水星磁気圏ではより効率的な太陽風プラズマの磁気圏内への輸送プロセスが働いているのかも知れない (cf. 3.2.5 節)。

一方、後半の「高温低密度プラズマ」では、エネルギースペクトルは一転して極めてハードである。特に**図 3.2-10(h)** では、ピークエネルギーが測定エネルギーの上限 (0.7 keV) を超えてしまっている。この電子温度は地球の高温プラズマシートと同程度かむしろ高い。また、**図 3.2-10(f)** のスペクトルなどは単純な関数でフィット出来ず、0.4 keV 以下が平坦な「flat-top 型分布」を示す。地球でも、同様の分布関数はある特殊な条件で、かつ磁力線平行方向成分に観測されているが、その成因は定まっていないのが現状である。

以上は、反太陽方向にのみ単一視野をもつ Mariner 10 の電子データだけを元にしており、イオンなどのデータがないためこれ以上の議論には無理がある。BepiColombo/MMO は、**粒子分布関数、磁場、電場、波動の総合観測を通し、水星プラズマシートの構造や成因を初めて明らかにする。**

プラズマシートに関わる重要な問題の一つとして、プラズマの加熱機構がある。磁気圏内の磁場圧と均衡する為、プラズマシートはプラズマ圧が高い、すなわち密度・温度とも高くなる必要がある。しかし、その加熱機構は地球磁気圏でも未だ大きな問題である。

最も有力な候補は「磁気リコネクション」である。いわゆる「リコネクション対流モデル」(**図 3.2-7**) は、太陽風の侵入、プラズマ加熱、高温プラズマの赤道面領域への閉じ込めの三者をよく説明する。しかし、この過程から直接予想出来るのは「加速」(流速)であって、温度ではない。プロトン温度については次の 2 つの機構による予測がある。地球では似た値が導出されるが、水星では桁が異なる結果となる。

- 1) 加速プラズマの運動エネルギーが緩和され、熱エネルギーに変換されるとする。 最終流速はローブ領域 (プラズマシートの南北に広がる低密度域) の Alfvén 速度 (1000 ~ 1500 km/s) で決まる。この値は地球では 5 ~ 10 keV になる。水星でも同程度の 5 ~ 10 keV と推定される。
- 2) プラズマシート内での電場方向の蛇行運動によって、磁気圏尾部の両脇にかかる電位差のエネルギーを得て加熱されるとする。 効率を電位差の 10% 程度とすれば、地球ではやはり 5 ~ 10 keV になる。これは、リコネクション確率を尾部全体で 10% とする事と等価で、この値は磁気圏前面の推定値と矛盾しない。水星は磁気圏の幅が小さいために電位差も一桁小さく、同程度の効率を仮定すると 0.5 ~ 1 keV にしかならない。

また、ローブの磁気圧と釣り合う条件から導くと、地球 (ローブ磁場: ~10nT、プラズマシート密度: $0.1 \sim 0.2 \text{ cm}^{-3}$) では上記と矛盾しない値となるが、水星では 3 keV ローブ磁場: ~40nT、プラズマシート密度: ~ 1 cm^{-3} を仮定) となる。但し、この導出で得られるのは電子とイオンの合計である。地球では電子温度はプロトン温度の約 1/7 であまり影響ない。水星でもこの温度比が成立するとすれば、Mariner 10 の観測した電子温度 ~1keV は、1) のプロトン温度を支持するものとなる。

ただし、このような高温では、そもそもプロトンのジャイロ半径が想定されるプラズマシート厚 (~1000 km) と同程度になってしまう。特に磁場の弱い「磁気中性面」では、イオンや高エネルギー電子の旋回運動のスケールは尾部の直径と同程度となる。このことは、高温イオンはプラズマシートに保持されない、ということの意味する。このため、「水星のプラズマシートは常に非定常状態にあり、尾部電流の担い手は電子 (旋回半径が小さい) だけである」という仮説も提示されている。

このように、地球磁気圏からの類推で水星の高温プラズマシートの様相を考察すると、地球とはかなり異なる様相が導かれることになる。BepiColombo/MMO は、水星の特異なプラズマシートの全貌を初めて明らかにする。これは、地球磁気圏におけるプラズマシートの成因についても貴重な情報を与えることとなる。

3.2.5 水星磁気圏へのプラズマ供給

水星磁気圏を構成するプラズマは、どこから供給されるのだろうか。地球磁気圏では、大部分が太陽風で、一部電離層からの流出プラズマもある。大気が少ない水星では、ほぼ全て太陽風起源と思われるが、水星表面から流出する粒子も一部寄与すると考えられている。

太陽風プラズマの磁気圏への侵入は、磁気圏前面あるいは高緯度における「太陽風磁場と水星固有磁場との再結合」(図 3.2-7) によると思われる。この場合、太陽風プラズマは再結合された磁力線に導かれて容易に磁気圏内に注入される。流入したプラズマは、プラズマシートに注入されるか、そのまま尾部方向に流れ去る。また、Kelvin-Helmholtz 不安定による異領域プラズマの混合などの「拡散的輸送」機構もあるが、これらは地球でも不明点が多い。また、「磁力線再結合による侵入領域」と、「拡散的輸送による侵入領域」とは空間分布や磁場構造が異なる。

水星磁気圏は、スケールが小さいため荷電粒子の回旋半径が相対的に大きく、「拡散的輸送」がより効果的に働く可能性が指摘されている。ただし、地球と同様の領域差が見られるかは不明である。また、水星磁気圏では固体惑星の占める割合が大きいため、水星に向かう荷電粒子は、ミラー反射される前に表面に到達してしまい、プラズマ粒子の磁気圏への蓄積は困難と思われる。

全く異なるプロセスも指摘されている。太陽風の速度は水星近傍でも地球近傍とほぼ同じ(430km/s 程度)だが、磁場強度は地球近傍の約 4~8 倍程度と見られる。このため、条件によっては太陽風の Alfvén マッハ数が 1 を下回る事も予想される。惑星磁気圏の上流には通常「速い磁気音波」による衝撃波(パウショック)が存在しているが、こうした場合には「遅い磁気音波」によるパウショックが形成される可能性がある。こうしたケースでは、パウショックと昼側磁気圏境界面が融合してしまう可能性があり、全く違うプロセスによる太陽風プラズマの磁気圏内への輸送機構が働く可能性がある。

BepiColombo/MMO は、プラズマの組成・密度・温度の空間分布や時間変動、また圏界面などにおける粒子-波動相互作用の解明を通して、これら太陽風からの「プラズマの供給機構」を明らかにする。

また、表面からの粒子供給も指摘されている。「大気生成」に関する議論を含むので、詳しくは次節 3.3 において述べるが、ここでは磁気圏と直結する問題を概観する。

太陽風や磁気圏起源の高エネルギー粒子の表面衝突は、二次的粒子を生成する(スパッタリング)。これを示唆するものとして、Na 輝線の観測例がある。図 3.2-11 は、地上望遠鏡で水星近傍の Na 輝線(D₂-line)を観測したものだが、一日毎に空間分布が変化している。これは、太陽風の変化などによって表面衝突する高エネルギー粒子量が変化し、その結果 Na 生成量が変動しているのではないかと見られている。スパッタリングで生成される粒子のエネルギーは高い。図 3.2-12 は、10 keV の H⁺ の表面衝突で生成される Na のエネルギー分布予測だが、数百 eV 以上の粒子が 1% 以下ではあるが生成される。放出粒子の多くは中性と考えられるので、「高速中性粒子」の直接観測により、水星表面での粒子生成領域や表面組成の情報を得ることも期待される。

放出された中性ガスは、光解離によるイオン化の後に磁気圏内に供給されると思われるが、この輸送過程の観測はない。また、エネルギーの高い重イオンの回旋半径は磁気圏の空間スケールを凌駕してしまうことも考えられる。このため、磁気圏にどのような影響を与えるか、そもそも影響しうるか、また蓄積されうるか、などについては全く不明である。昼間側表面では、光脱離などによって、低エネルギー粒子も生成されうると見られる。こうしたより低エネルギーの粒子がどの程度期待できるかは不明だが、磁気圏への影響はより大きいかもしれない。

BepiColombo/MMO は、「大気撮像」「高速中性粒子計測」と各種「プラズマ観測」の結合によって、水星表面-磁気圏の直接相互作用、および水星表面起源粒子の輸送経路やその果たす役割を解明するための最良の機会を与える。

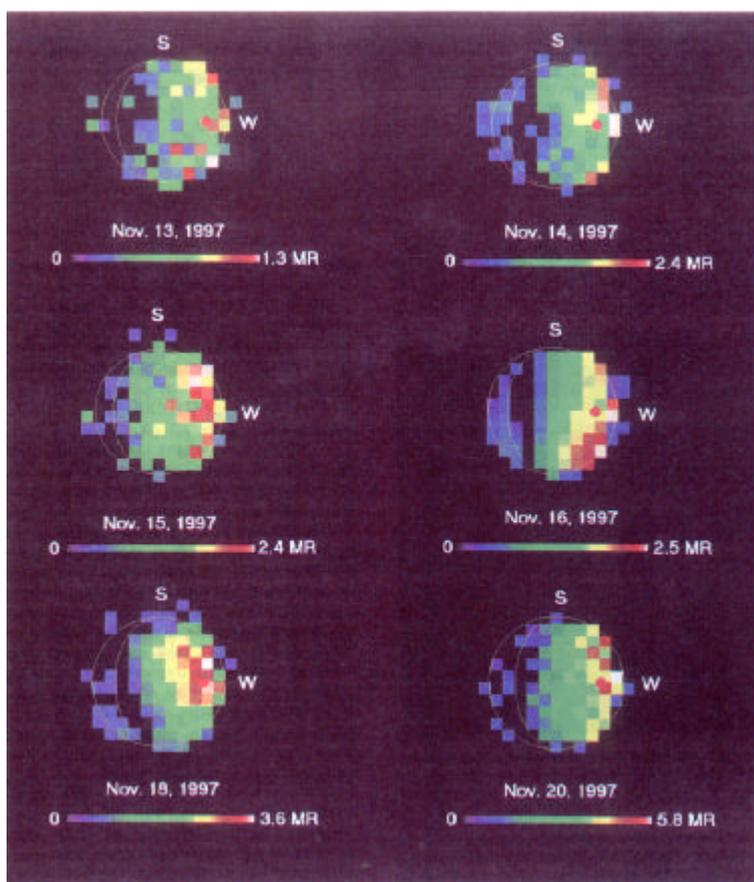


図 3.2-11 地上観測による水星近傍の Na D₂ line の分布 [Potter et al., 1999]

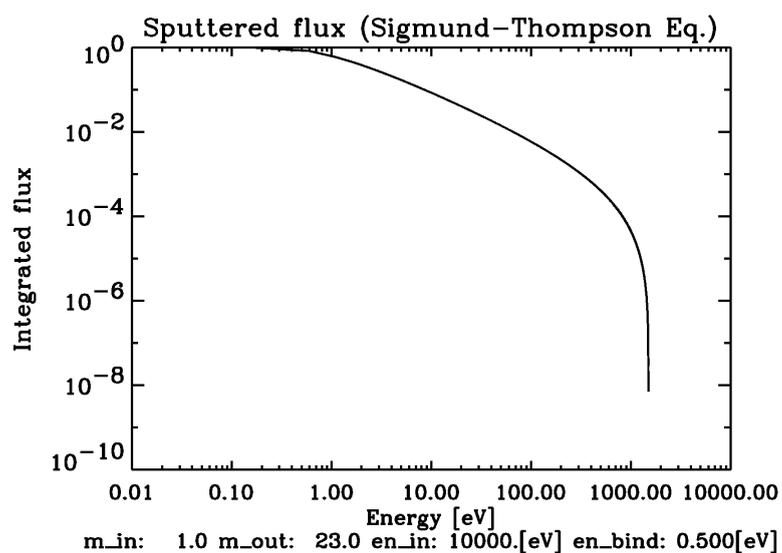


図 3.2-12 10keV の H⁺ により表面から生成される Na のエネルギー分布予測。
Sigmund-Thompson 式による。
縦軸：該当エネルギー(横軸)から最高エネルギーまで積分したフラックス。

3.3 水星外圏大気

水星は、惑星表面が「外圏底」となる大気圏を持つ（cf. 2.5節）。水星表面付近の大気の密度は高々 10^6cm^{-3} 程度に過ぎない。粒子間の衝突が卓越する地球の大気圏とは異なり、個々の粒子同士の相互作用は殆どなく、粒子運動は基本的に弾道軌道をとる。

大気の生成には、惑星表面における直接相互作用が大きなウェイトを占める（図 3.3-1）。現在想定されているガス放出機構としては、拡散や火山活動等の「内部要因」や、太陽光による光脱離、ダストの衝突による気化、太陽風や磁気圏の高エネルギーイオンによるスパッタリングなどの「外部要因」が考えられている。観測から得られる大気組成・構造の情報はその生成機構の解明に直結するものだが、各放出機構の定量評価には、表面元素組成、ダスト、プラズマ粒子の各観測との結合が必要である。

一方、大気の散逸機構としては、「光電離や電荷交換によるイオン化」、および「ジーンズ・エスケープや太陽光輻射圧による散逸」が考えられる。最終的には、何れの場合も電離されて太陽風磁場あるいは水星磁場に捉えられ、太陽風・磁気圏へ流出する。後者の成分の一部は、再び表面に衝突することによって大気の生成の放出に寄与する。この「リサイクル」過程の効率が高い場合、極端なケースでは「正帰還」がかかって大気量の急激な変動につながる可能性もある。電離成分の軌道は、磁気圏内での電場ドリフト、磁場勾配ドリフト、湾曲ドリフトに強く影響されるので、リサイクル的な大気放出では「dawn-dusk 非対称」などの非対称性が生じる可能性も指摘される。

このように、水星大気は太陽風・磁気圏・表面と強く結合している。BepiColombo では、「大気撮像」とプラズマ・表面・ダスト計測によって、水星大気の放出・散逸機構の解明を目指す。

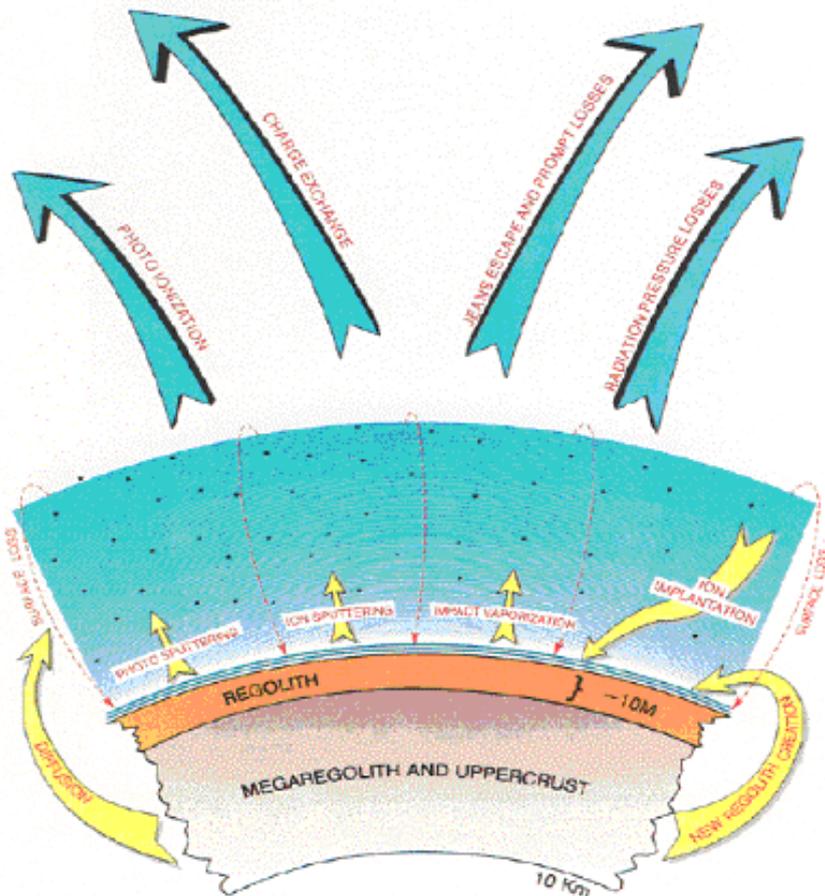


図 3.3-1 予想される水星大気の放出・散逸過程 [Morgan and Killen, 1997]

水星大気の研究は、可視域での Na 及び K 輝線を用いた地上観測に主導されて進んできた。発光域の空間分布と時間変化は、特に興味深い。図 3.3-2 は、連続した3日間の Na 発光の2次元撮像データだが、高緯度で明るく、南北非対称性を持つ。また、1日以下の時間スケールで変動することが報告されている [Potter and Morgan, 1997]。K 輝線でも同様の、かつ Na 輝線と同期した空間的・時間的変動が見られる。Na と K の変動に見られる同期性は、「同様の過程で放出されていること」を示唆している。また、高緯度で明るいことから、「高緯度域に振り込む太陽風・磁気圏イオンによるスパッタリングがその生成の主因」であり、時間変動は何らかの磁気圏活動の帰結ではないか、として注目された。

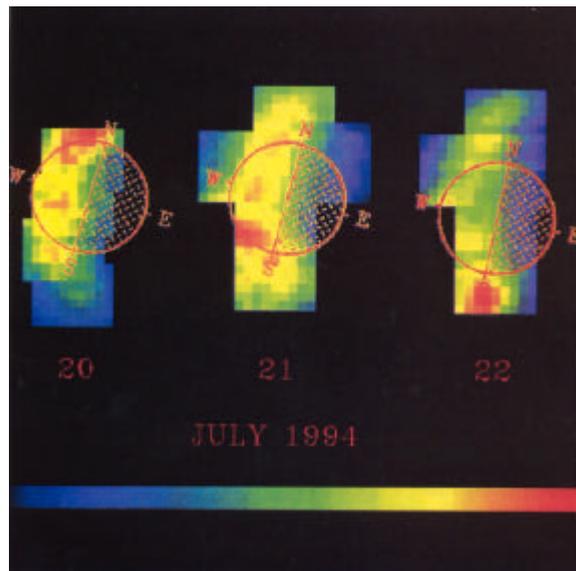


図 3.3-2 Na 大気発光分布の日変化 [Potter and Morgan, 1997]

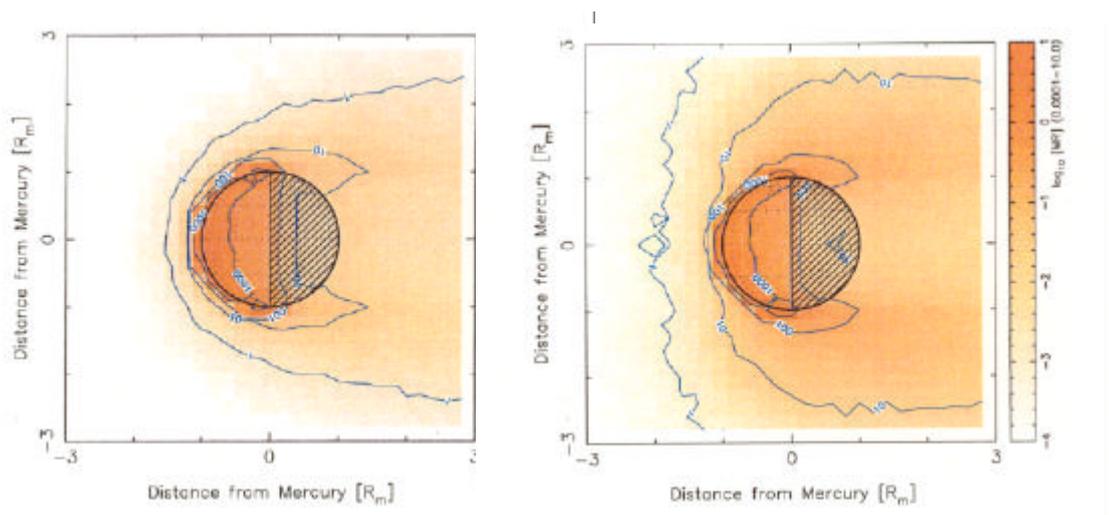


図 3.3-3 太陽光による光脱離、イオン・スパッタリング、およびダスト衝突による気化過程を考慮したモデル計算による Na 発光分布。右図は、イオン・スパッタリングによる Na 放出量のみを左図の 1000 倍にした場合。図中の数字は発光量（単位：KR）。 [Misawa, 2001]

また、発光分布のローカルタイム依存性の報告もなされている。すなわち、Na 発光は朝方側

が夕方側より 3~4 倍程大きいというものである [Sprague et al., 1997]。この解釈として、「日の出とともに暖められた地表面から Na が気化していくため」とする考えと、前述した「磁気圏イオンの降下領域の偏在を反映したもの」とする考えがあるが、決着はついていない。

また、Na の発光領域がディスク面を遙かに越えて広領域に広がる現象が報告されている。これは、極域上空で顕著である。通常の昼側水星大気温度は、発光輝線幅から 1500K 以下と見積もられている。しかし、「広域分布」(Na コロナと称されている)を示す場合には、5000K を越える非熱的成分の存在が示唆されている。独立に行われた観測でも、このような非熱的成分の存在を肯定する結果が報告されている [Killen et al., 1998]。Na 原子の平均熱速度に換算すると、「5000K」は 2km/s 以上に対応する。このような高速ガスの放出過程としては、「イオン・スパッタリング」または「ダスト衝突」が候補である。複数の放出過程の組み合わせによるモデル計算では、イオン・スパッタリングによる放出粒子を増加させた場合にこのような「広域分布」が再現されている (図 3.3-3) [Misawa, 2001]。

大気生成過程の議論を進めるには、時間分解能が高く、かつ精度のよい観測が必要である。BepiColombo/MMO による大気撮像は、この機会を提供する。

これまでの観測では、同じアルカリ金属である Na と K の空間分布・時間変動にははっきりした差は見られない。しかし、表面からの放出過程においては「光脱離時の放出エネルギーの違い」 [Madey et al., 1998]、散逸過程においては「光電離のライフタイム、太陽輻射圧、イオン・ラーマー半径等の違い」 [cf. Smyth and Marconi, 1995] が、それぞれ存在するはずである。ただし、これらを地上観測で捉えるのは困難である。空間分解能の制約もあるが、K の発光量が Na より 1~2 桁程小さく、十分な観測ができないことによる。BepiColombo/MMO は、Na と K の同時観測によって、この相違を手懸かりに大気の放出・散逸過程への制約を与えることができる。

また、月にみられるような珪土質表層を想定した場合、種々のガスの放出・散逸機構を考慮すると、可視域の K 輝線と同程度の明るさで Mg 輝線 (紫外域) や Ca 輝線 (可視域) が存在する可能性が示唆され [Morgan and Killen, 1997]、最近になって、予想より 1~2 桁ほど小さいものの Ca 輝線が確認された [Bida et al., 2000]。また、レーダー観測によって水星極域付近に氷が存在する可能性が指摘されている [Harmon and Slade, 1992]、本当であれば大気中に OH が存在する可能性もある。BepiColombo/MPO に提案されている可視・紫外線分光観測は、このような大気の新成分の発見、およびその起源となる水星表面の情報を与えてくれる可能性ももつ。

3.4 表層地形

周回軌道からの表層観測は BepiColombo では MPO の主任務であり、また米国の探査機 MESSENGER においても行われる。しかし、水星は公転・自転が同期しているため、3 軸衛星による直下点に集中された観測では、位置と「太陽高度」がリンクしてしまうため、条件が悪い経度に位置する領域では細かい地形の特徴を捉えきれない。

水星表面には、その起源・進化の帰結とされる多くの微小な特徴的地形が存在する (cf. 2.4 節: 図 2.4-1、図 2.4-2)。水星表層には、高さ方向 km オーダーの断崖や線構造などの微小テクトニック地形が全面に広がっている。これらは水星全体の冷却、内核の固化、自転速度の低下、地下のマントル対流の結果と考えられる重要地形である可能性がある [Melosh and Mckinnon, 1988]。

Mariner 10 の lobate scarp の解析からは水星形成後まもなく半径方向 1-2km の収縮が起こったことが示唆されている [Watters et al., 1998]。一方、熱・構造進化の理論的研究 [Hauck et al., 2001; Strom et al., 1975] は 2-6 倍の収縮を推定しており、両者の間に矛盾がある。内核の固化が起こる場合は特に収縮量が大きくなる。この問題に対しては、画像では捉えられない長周期の変形 [Dombard et al., 2001] をレーザー高度計で抽出するとともに、100 m オーダーの分解能で広範囲のテクトニック地形を低太陽高度画像やステレオ画像を取得し、形状の分析、空間的な非均質性

などを詳しく解析することによって明らかにすることができると考えられる。

また、最近 Mariner 10 のステレオ画像を用いたデジタル高度モデルの作成が行われている [Cook et al., 2000] が、Watters et al. [2001] は最大級の lobate scarp である Discovery 峡谷（長さ 500km）の DEM を検討し、その断面図を弾性的リソスフェアの変形モデルにフィッティングさせることによって断層角度、深さ、断層形成時の弾性的リソスフェアの厚さや温度勾配を推定している(図 3.4-1)。このような解析を全面に対して高精度で展開することにより、初期のリソスフェアの状態および温度の情報が得られると考えられる。

このような微小地形は適切な条件で撮像を行わなければ判別が難しい。月の微小地形（Marius 丘）の太陽高度による判別性の変化を図 3.4-2 に示す。典型的な微小地形を画像から影で認識するには昼夜境界線付近（低太陽高度 5 - 15 度）でないと難しい。また、ステレオ画像から構成したデジタル高度モデル：DEM を解析することも有効な手段である。こうしたデータは MPO および MESSENGER の場合、上記の経度・太陽角のリンクにより、データの取得領域が限られる。

この両者において、MMO はスピン位相に対する撮像タイミングをずらした斜め撮像を利用して、最適な位置関係のステレオ画像を取得し、さらに広い領域の低太陽高度画像を得ることにより相補的なデータを取得できる。

さらに溶岩流や火山跡などが存在する可能性 [cf. Kereszturi, 2001] も指摘されており、その歴史などを推定するには微小地形の上下関係などの情報が必要である。これらは、全球的な構造を持っている可能性も高く、大規模構造を捉えるには、上述の詳細な撮像とともに均質な広域撮像を最適な照明条件で行うことが要請される（図 3.4-3）

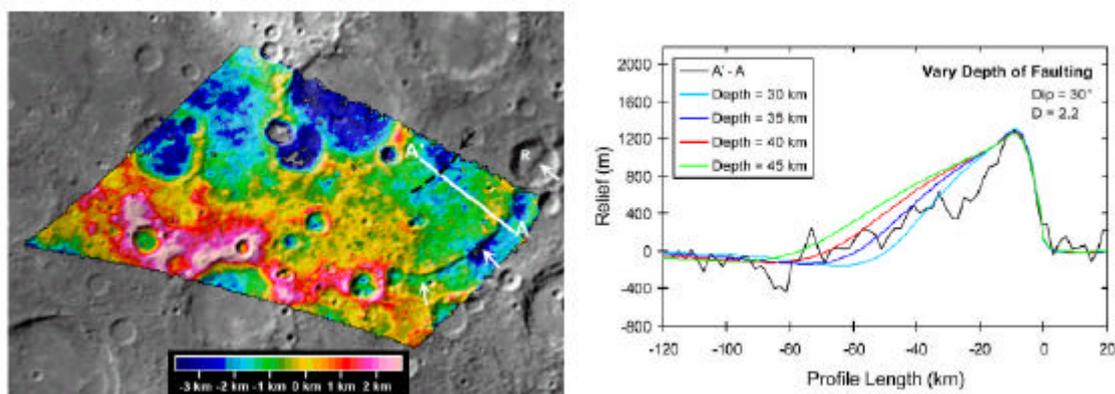


図 3.4-1 Discovery 峡谷付近（67W-22W, 63S-48S）の解析結果。 [Watters et al. 2001]
 (左) ステレオ画像から作成した DEM（高度 3~2km）。白矢印が Discovery 峡谷。
 (右) DEM の AA' 断面のプロファイルと弾性リソスフェアのモデル計算例
 (パラメータ：断層の深さ)。

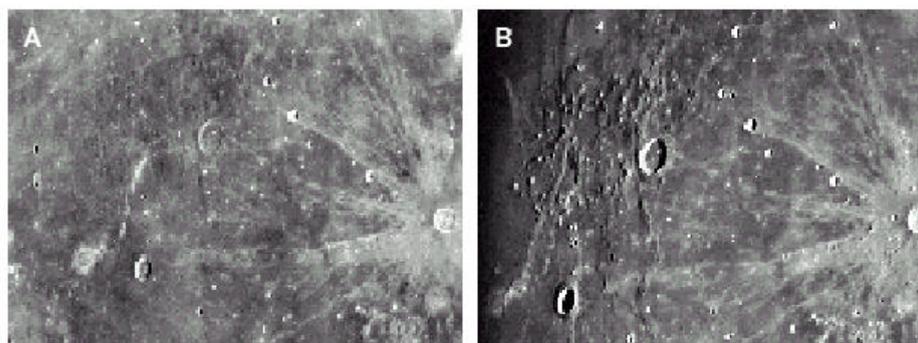


図 3.4-2 月の Marius 丘（~12N, ~310E）の 2 種類の画像。 [Milkovich and Head, 2001]
 左は太陽角 26°、右は 6°。
 (中央左よりの Marius クレーター：直径 45km、空間解像度 2km/pxl。)

また、風化作用などの表面状態を明らかにするには、入射角・出射角・位相角に依存する光学特性を明らかにする必要がある。このような情報は、様々な太陽光入射角を設定することによって得られるもので、表層物質の情報を留まらず、MPO による撮像・スペクトル情報の解釈に必要とされるものである（図 3.4-4）。MMO では斜め撮像によって同一地点を様々な照明、観測条件で観測することができるため、表層物質の物理的状态や組成の影響を取り除いた、精度の高い特性を求めることができる。また、表層の物理的状态（巨視的粗さなど）の観測もおこなうことができ、レゴリスの状態など表層過程の情報も得られると考えられる。

BepiColombo/MMO における表層観測は、このように「斜め撮像」に的を絞り、地形の解析に好適な太陽条件での高分解能（～100m オーダー）撮像や広域撮像を可能とするように最適化されている。これにより、MPO や MESSENGER ではカバーしきれない上記の領域において相補的な役割を果たす。



図 3.4-3 Mariner 10 のデータから合成された水星表面の「大規模地形」

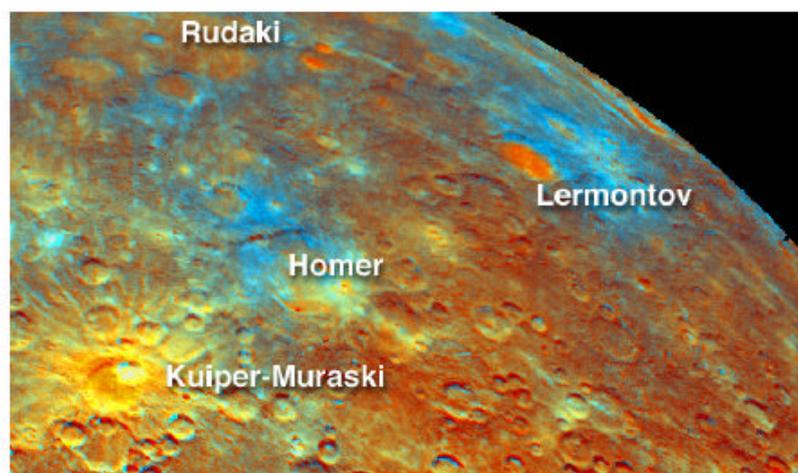


図 3.4-4 Mariner 10 のカラーパラメータ画像。 [Robinson et al., 2001]
赤は不透明鉱物指標の逆数、緑は宇宙風化のパラメータ（iron-maturity）、青は相対カラー（UV/オレンジ）。Lemontov クレーターは直径は～160km で、不透明鉱物の少ない物質（赤）で埋められている。

3.5 太陽系最内縁の環境

太陽系最内縁、「地球軌道より内側の惑星間空間」のプラズマ・ダスト観測は不足している。これまでこの領域の継続的な太陽風観測を行ったのは、1970年代（Mariner 10 と同時期）に打ち上げられた Helios1 及び Helios2 のみである。この2つの探査機は、水星軌道の内側から地球軌道に至る領域における太陽風の密度・温度の遷移、アルフベン波などの波動現象、ダストの分布などに重要な知見をもたらした。しかし、これ以降の観測はない。太陽の近傍から地球軌道に至る領域についての知識の欠如は、「太陽風の加速機構」などの基本的な問題が未だに解かれぬ最大の原因となっている。

BepiColombo/MMO は、0.3-0.5AUの惑星間空間観測においても、その高い能力を發揮しうる。また同時期に太陽に近づく「SolarProbe」が計画されており、共同観測の期待もある。本節では、「太陽からの距離 0.3~0.5AU に位置する観測点」がもたらす成果について述べる。

3.5.1 太陽の観測

BepiColombo/MMO による水星軌道からの「太陽の観測」は、フレアによるコロナ放出(Coronal Mass Ejection : CME [図 3.5-1]) など、水星磁気圏へ強い影響を与える太陽活動のモニターとして、また地球から見えない太陽面の活動状況の観測として重要である。以下の二つを柱とする。

1) 太陽活動度の観測

太陽風の変動に対する水星磁気圏の応答を捉えるため、水星磁気圏へのエネルギーインプット量に直結する太陽活動度や CME の発生時刻や規模を、BepiColombo/MMO による低周波電波観測、及び MPO の X 線モニターの利用によって捉える。特に前者は、CME の伝播速度計測によって、水星への到着時刻の推定につながるため重要である。

2) 太陽フレア起源中性子の測定

フレアに伴って生成される太陽中性子は、磁場に影響されず、加速時の情報を保持している。BepiColombo/MPO に提案されている中性子観測器による観測を、地球での観測と組み合わせる。

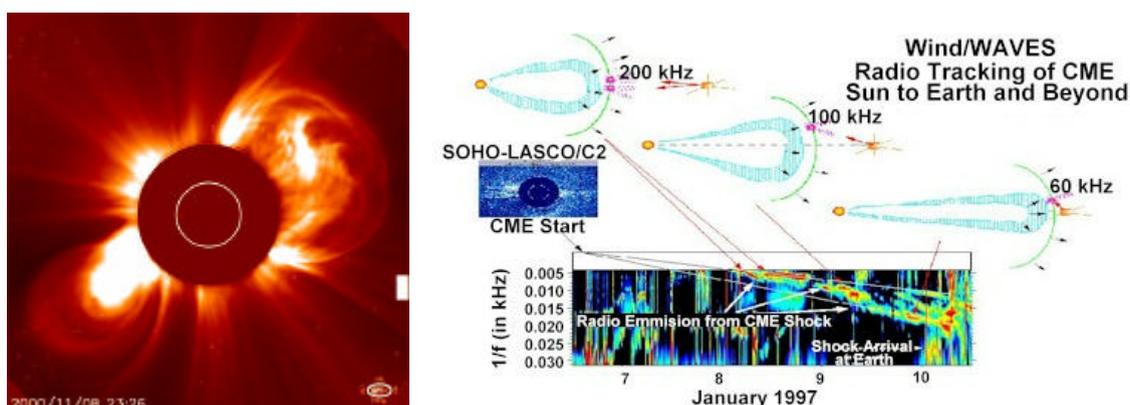


図 3.5-1 太陽フレアに伴う Coronal Mass Ejection (CME)

(左) SOHO によってとらえられた CME。中央の白丸が太陽外縁。

(右) 太陽風中を伝播する CME が出す電波「Solar Type-II burst」

3.5.2 太陽風の観測

BepiColombo/MMO による水星軌道での「太陽風の観測」は、Solar-Probe と共同して太陽近傍における太陽風環境を明らかにする。以下の3つを柱とする。

1) 太陽風加速機構の検証

太陽風の速度は「コロナの圧力勾配」と「重力」とのせめぎ合いで決定される。この基本的な機構は提唱されて久しいが [Parker, 1958]、現実の太陽風速の説明には、コロナが「プラズマ」であること、即ち「光球の運動エネルギーを磁場エネルギーの形で輸送」する高効率の加熱機構の存在が必要である。具体的には、「磁場エネルギーの蓄積したカレントシートを無数の小さなフレアで解放する」モデルと、「MHD 波でエネルギーを運ぶ」モデルに大別される。

惑星間空間シンチレーションの観測は、太陽半径の 10-20 倍以内の短い距離で太陽風が 700km/s 以上に加速されることを示している (図 3.5-2 左)。また、重いイオンほど高温で高速であることが、ACE 衛星等の粒子観測で示されている。これらを説明するものとして、「サイクロトロン共鳴機構」が提案されている。「ジャイロ半径が大きい重いイオンほど、長波長でパワーの大きい MHD 波動と共鳴して多くのエネルギーを受け取る」というものである。この過程では共鳴イオンにエネルギーを渡すため、MHD 波のスペクトルはイオンサイクロトロン周波数で折れ曲がり、高周波数成分が速く落ちるとされる(図 3.5-2 右)。

この現象は水星軌道近傍 (太陽半径の 100 倍程度) まで続いている可能性が指摘されており、Solar-Probe と BepiColombo/MMO との共同磁場波動観測で検証できる可能性がある。

2) 太陽風の構造・エネルギー組成の観測

水星軌道の太陽風現象の観測は、太陽に近いこと、太陽面の現象と探査機で直接観測される磁場・粒子構造の対応付けがより容易である。また、地球軌道との同時観測により、「太陽表面起源の構造」と「惑星間空間で発達した構造」との切り分けを行うことができる可能性がある。

例えば、「重イオンリッチ」と呼ばれる CME では、初期に重イオンが多くその後急激に減少することが報告されているが、この重イオンの加速機構は不明である。また、数十~100keV で見られるイオンの High-energy tail は、低速太陽風中で顕著だが、太陽と惑星間空間のどちらで生成されるものなのか、定説がない。これらの問題は、異なる太陽からの距離を持つ観測点での同時観測により、解明できると期待される。

3) 太陽近傍起源のピックアップイオン

地球近傍で観測される太陽風中の C と S の低温ピックアップイオンは、「太陽近傍でダストから放出された中性粒子」が起源という説が出されている。水星軌道におけるプラズマの質量分析とエネルギー分布計測は、この粒子の起源の解明に重要である。

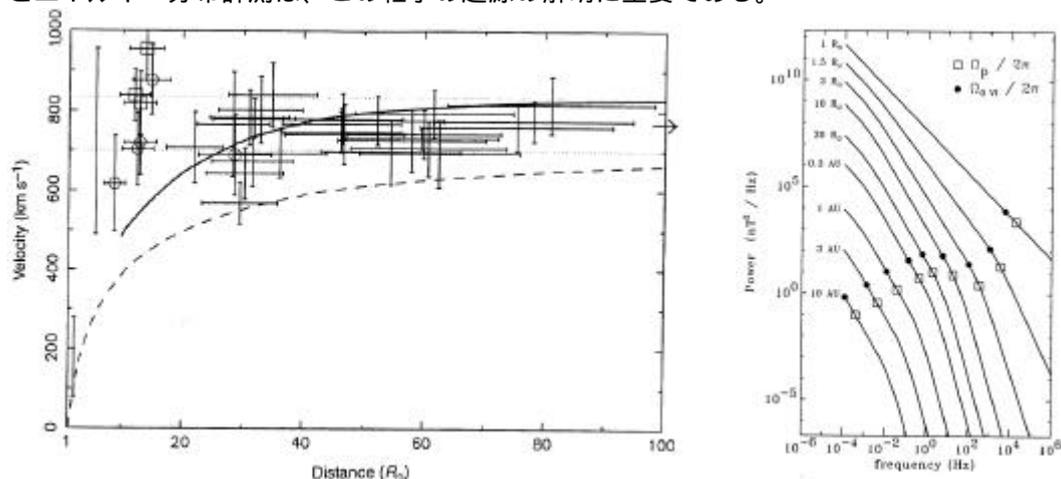


図 3.5-2 太陽風の加速機構

(左) 太陽からの距離に対する太陽風速 [Grall et al., 1996]。10 太陽半径で既に 700km/s に達するが、100 太陽半径までゆるやかに続くとの指摘がある。

(右) 磁場のパワースペクトルの太陽からの距離依存のモデル計算 [Cranmer et al., 1999]。
(黒丸：プロトン、白四角：5 価酸素イオンのサイクロトロン周波数)

3.5.3 衝撃波と粒子加速の観測

衝撃波は、惑星磁気圏・恒星フレア・超新星残骸・パルサー・宇宙ジェットなど、宇宙空間におけるほとんど全ての高エネルギー粒子の起源である。衝撃波における粒子加速過程を支配する物理過程は普遍的で、その理解は広く宇宙における非熱的高エネルギー粒子形成の理解に重要である。宇宙に存在する多様な衝撃波の中で、直接に微視的プロセスの観測が可能なのは、CMEに伴う「惑星間空間衝撃波」と惑星前面の「パウショック」(定在衝撃波)の二つである。

太陽から放出される CME は、衝撃波を形成しつつ惑星間空間を伝播する。CME 前面から放出される type-II 太陽電波の観測 (図 3.5-1 右) によって、CME は太陽からの距離 0.3AU まではほとんど減速されず 4000km/s もの高速で伝わり、その後減速されて地球軌道近傍では 1000km/s 以下となることが示されている (図 3.5-3)。従って、水星の近日点近くでは、地球軌道で観測できない高速衝撃波を捉えることができると思われる。MMO が水星軌道に投入されるのは、マッハ数 10 を越える強い衝撃波を多数観測できる可能性がある。

1970~80年代にかけて地球磁気圏を観測した米国 ISEE 衛星により、衝撃波の加速・加熱過程がマッハ数 3 (臨界マッハ数) を境にして大きく遷移することが明らかにされた。すなわち、衝撃波面で一部イオンが衝撃波上流に反射され、熱的平衡状態から著しく外れた速度分布関数を形成し、プラズマの加熱やフェルミ加速などに関連する「乱流磁場」の源になることが議論された。一方、最近の Geotail 観測や理論発展により、さらに強い衝撃波では、イオンに加えて、電子波動相互作用によって高エネルギー電子が効率よく加速される可能性が指摘されている。

また水星軌道では、マッハ数の小さな衝撃波の研究でも新しい展開が期待される。水星近傍での太陽風速度は 1AU とほぼ同じ 430km/s 程度であるが、太陽風磁場は約 4~8 倍程度となる。このため、水星磁気圏の前面に形成される「パウショック」はマッハ数の低い衝撃波となる。太陽風の条件によっては、マッハ数が 1 を下回ることも予想される。この場合には、通常考えられる「速い磁気音波」の MHD 衝撃波ではなく、「遅い磁気音波」によって支配される衝撃波が形成されると考えられ、「遅い衝撃波」物理観測の絶好の舞台となりえる。また、既に述べたが、こうした場合には磁気圏境界面と融合した新たな「太陽風-磁気圏相互作用」にもつながることが予想される。地球においてパウショック上流で見られる衝撃波起源の電子・イオン・波動現象が、このような弱い小スケールの衝撃波でも見られるかどうか興味深い。

このように、BepiColombo/MMO による水星軌道での衝撃波観測は、幅広いマッハ数範囲に及ぶ衝撃波、及びその中で粒子加速・加熱過程を理解するうえで重要な機会となる。

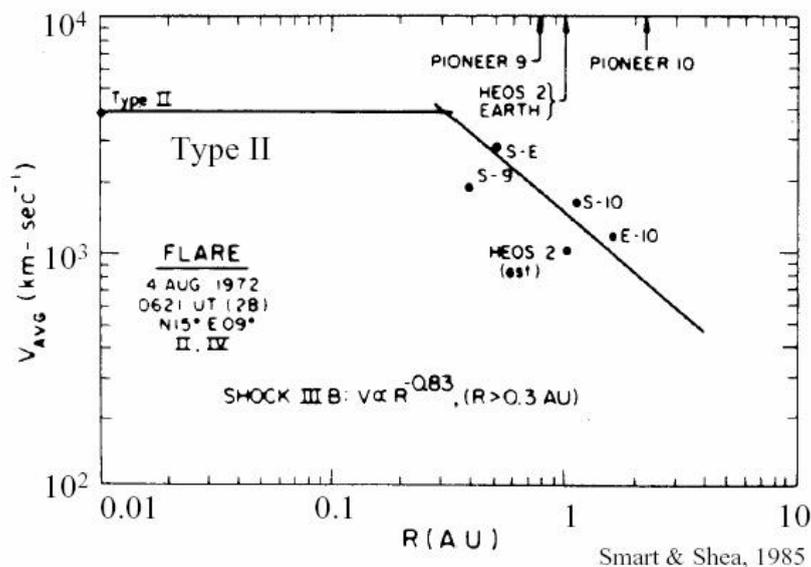


図 3.5-3 0.01~10AU の惑星間空間衝撃波の速度。水星は 0.3-0.5AU に位置する。

[Smart and Shea, 1985]

3.5.4 太陽圏の観測

「太陽圏」は、太陽が星間プラズマの海の中で形成する「磁気圏」である。BepiColombo/MMOは、地球近傍以外での太陽圏関連現象の観測点を提供するという意味で重要である。以下の三つを柱とする。

1) 星間物質起源中性ヘリウムの重力収束コーン

星間物質起源の中性ヘリウムは、太陽圏に侵入しつつ太陽重力の影響を受け、下流側で収束する。この「収束コーン」の内端は、太陽の極端紫外線が弱く輻射圧が小さい時期には水星軌道より内側に入る可能性がある。水星の軌道傾斜角が7度であることから、黄道面から6度傾いている「ヘリウムコーン」の中心軸付近を観測できる機会があると考えられる。このため、0.3~0.5AUでコーンの空間構造や太陽活動度依存性が検出できる可能性がある。

1AU以内でのHeの電離には、「光電離」以外に「電子衝突」が効くと考えられている。このため、このような観測には太陽風電子およびHe⁺の分布関数の精度よい計測を要する。

2) 銀河宇宙線のモジュレーション観測

銀河宇宙線のモジュレーションは、太陽圏構造の情報をもたらしてくれる。水星軌道からの観測は、太陽圏でのモジュレーションの位置依存性を調べる貴重な機会である。また、太陽極方向からの銀河宇宙線の侵入可能性も予想されている。太陽活動の変化に伴う宇宙線の多点同時観測は、太陽圏の時間発展に関するパラメータを与えてくれると期待される。

これには50-100MeV程度の陽子の強度変化を数分~1時間程度の時間分解能でモニターする必要がある。このエネルギー範囲は「放射線モニター」の計測対象だが、2010年頃にはVoyager探査機のデータは既に無いと考えられ、地球軌道以外の観測データとして重要である。

3.5.5 ダスト環境

惑星間空間には、黄道光、F-コロナ、彗星の尾などのダスト（惑星間塵）が存在している。過去、ダストの研究は黄道光の地上観測が主で、散乱特性や特徴的な粒子サイズなどが「積分値」として予測されてきた。また、地球近傍のフラックスが、地球周回衛星のよるダスト計測と「月の石」のダスト衝突痕の解析から測定された。

地球軌道より内側では、ヘリオス探査機・ガリレオ探査機(金星スイングバイ)による直接測定が行われ、「比較的小さな軌道傾斜角・離心率を持つ群」、「離心率の大きな($e > 0.7$)微小粒子からなる群」、「離心率が小さく軌道傾斜角が大きい群」の混在が示唆されている。これらのダストは、彗星・小惑星などの母天体から供給されたものと考えられる。これらは、太陽光輻射圧に起因する「ポインティング・ロバートソン効果」によって徐々に太陽に近づき、太陽近傍で輻射圧により押し戻されたり、熱のため昇華したりする。このため、内惑星領域は、ダスト進化の最終段階を観測できる場として重要である。またこれらのダストや隕石の水星表面への衝突によって、新たなダストが水星から生成される可能性もある。

BepiColombo/MMOによって検出可能と思われるダストの種類を図3.5-4に示した。

A) 太陽系外からのダスト(星間塵): 1 μm 以下は磁場のため内惑星領域まで入れない。1 μm 以上は水星軌道まで流入しうる。また、黄道面外からの流入もありうる。

B) 彗星起源ダスト: 太陽近辺で多く、彗星軌道に沿って分布する。

C) メテオロイド: 太陽方向から外向きに運動するダスト。太陽近傍で昇華しサイズの小さくなった粒子が、太陽輻射圧で外向きに運動するものとされ、サイズは1 μm 以下、高速である。

D) 水星からのダスト: 水星表面への衝撃ダストが2次粒子を放出。水星の脱出速度は $\sim 4 \text{ km s}^{-1}$ と、比較的低速である。

E) 太陽系内ダスト: 起源は様々で、多くは黄道面内で円運動に近い軌道を持つ。太陽輻射圧を受け、運動エネルギーを失った分だけ軌道半径が小さくなり、やがて太陽近傍に至って昇華するかメテオロイドとなる。

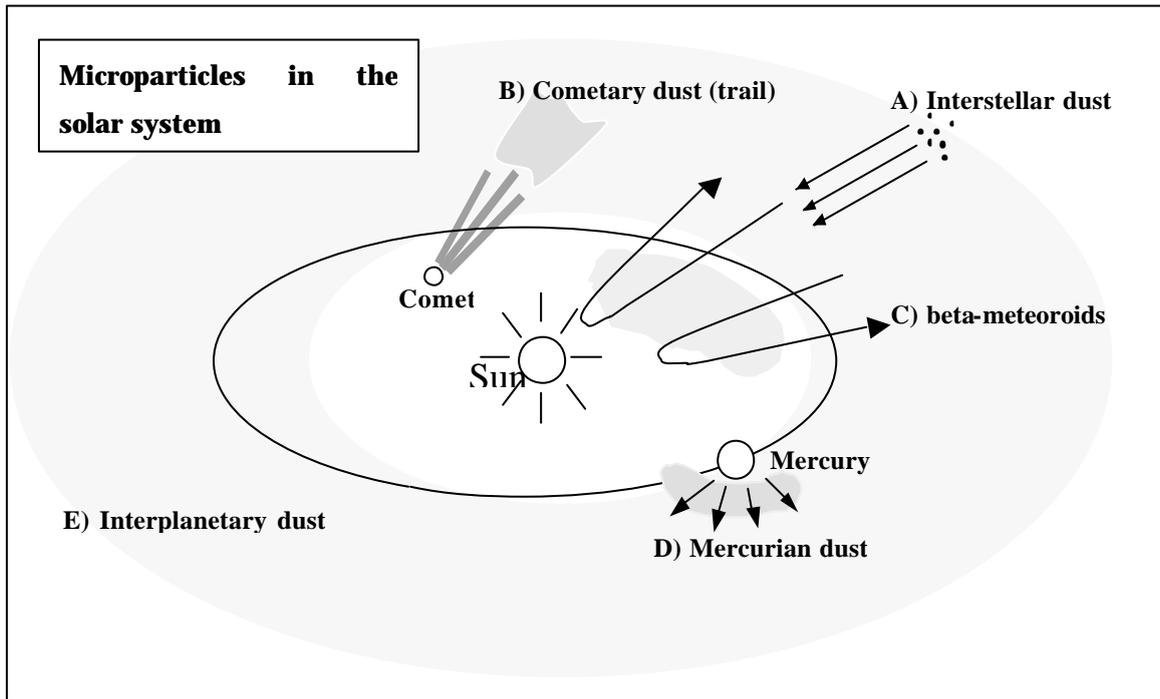


図 3.5-4 水星軌道近傍で計測されうるダスト

特に、ダストの量・質の日心距離への依存性に注目したい。これまでの観測では、ダストの量には（日心距離）^{-1.3} の依存性が報告されており、予測よりも多くのダストが内惑星領域に存在しているらしい。しかし、これが彗星などからの「供給」によるのか、ダスト同士の「衝突破壊」による数の増大なのかは不明である。また、黄道光の赤外観測から、ダストの温度に（日心距離）^{-0.5} 程度の依存性が見出されており、太陽に近い領域でのダストの平均アルベドの増大が示唆されている。この原因も、太陽放射や太陽風による変化の影響なのか、ダストの起源の違いを反映したものなのか不明である。前者はダストの数・質量の計測から、後者はダスト組成の計測から、それぞれ明らかになるものである。BepiColombo/MMOでは、前者の解明を行うことができよう。

また、ダストは惑星の表層に衝突し、その進化に影響を与えうる。一つの微粒子の衝突効果は微弱だが、そのフラックスの大きさから、惑星・衛星・小惑星などの表面風化に影響しうると考えられる。また、ダストの衝突はエネルギーが大きく、表面物質を微小ながら気化させることによって大気生成に結びつく。このため、水星周辺のダスト計測は、「表面の風化作用」や「大気の生成機構」の定量評価に資することが期待できる。

BepiColombo/MMO では、トランスファー軌道及び水星周回軌道におけるダスト計測によって、これらの問題の解明を目指す。