

第2章 水星の特徴

本章では、これまでに知られている水星の特徴と謎を概括する。これらは全て、BepiColombo計画の科学目標の一環である。宇宙研が開発を担当するMMOに強くリンクする項目については、3章にて詳細を述べる。

現在の知識は、限られた光・赤外線・電波による限られた地上観測と、1974-75年に行われたMariner 10による3回のフライバイ観測に基づくものである。本章に記述された「事実」は不確定な事項も多く、本ミッションによって覆され書き換えられる可能性を持つものである。

水星の基本的な情報は、Appendix 2 に示す。

2.1 水星の公転と自転

水星は、87.97日で公転し、58.65日で自転する。この両者は3:2の共鳴関係にあり、ある特定の季節に特定の表面が太陽を向く(図2.1-1)。多重フライバイによる観測の実現には、惑星と探査機の軌道が同期する必要があるが、この自転・公転同期関係のために特定経度からの観測に限定されてしまう。この制限のため、多重フライバイによるMariner 10の磁場観測や表面観測は全球の情報を得ていない。周回探査機による観測が待たれる所以である。

公転軌道は離心率が大きく、太陽からの距離が0.31~0.47 AUと大きく変化する。最も太陽に近い時期には、太陽からの光・放射線輻射は地球軌道での値よりも一桁増大する。この時期には水星表面は最高温度700Kにも達し、この赤外輻射も加算される。このような厳しい環境下に確実に探査機を送り込み、安定した観測を行うことが本ミッションの大前提である。

金星軌道以内に入り込む探査機は、これまで極めてまれである。この領域で継続的な惑星間空間の観測を行ったのは、1970年代(Mariner 10と同じ時期)に打ち上げられたHelios1及びHelios2がある。この探査機は、この領域における太陽風の密度・温度・波動現象やダスト分布に関する重要な知見をもたらしたが、続報は存在しない。

このため、水星軌道近傍の惑星間空間の(からの)観測もBepiColombo/MMOの目標の一つである。詳細については、次章3.5節を参照されたい。

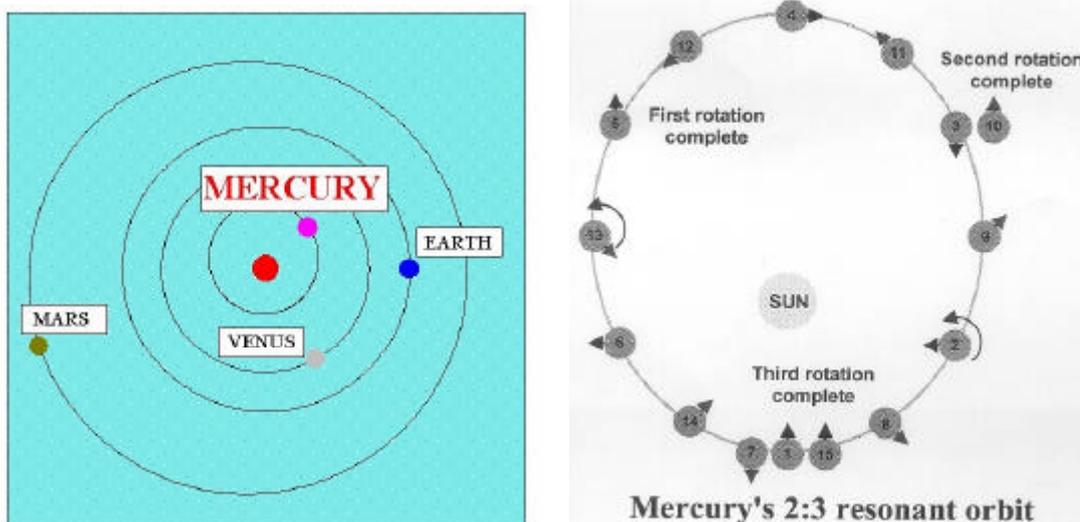


図 2.1-1 水星の公転軌道。右は、公転と自転の関係を示す。 [Courtesy: BepiColombo Study Report]

2.2 内部構造

水星は、原始太陽系星雲の最も高温部分で最後に形成された惑星と考えられている。水星の内部構造は、地球型惑星として極めて特異である。「大きすぎる中心核」と「固有磁場の存在」(2.3節)がそれである。この二つの問題は、水星の起源と進化に基本的な問題を投げかけている。

水星は月と火星の中間程度の大きさである。形状はきわめて球に近く、 $J_2 \sim 6 \times 10^{-5}$ 程度と推定されているが、重力分布の情報は得られていない。このため、その内部情報は限られたものでしかないが、平均密度は他の地球型惑星のトレンドと比較して6割ほど大きい(図 1.1-1)。このことは、鉄が60~70%の割合を占める、即ち中心核が異様に大きいことを示唆するもので、この小さな惑星が固有のダイポールの磁場を有することと深い関係があると思われる。磁場と内部構造との関係は次節に譲り、本節では現在想定されている内部構造について述べる。

想定されている簡単な内部構造モデルを図 2.2-1 に示す。このモデルは、水星の質量、地球型惑星の一般的な化学組成・地殻密度、より原始的なマントル、鉄に富んだコアを前提としたものである。図 1.1-1 に示したように、水星の平均密度 (5.43g/cm^3 、自己重力と温度を考慮した標準状態 [0.1GPa、室温]換算で 5.30g/cm^3) は、地球 (4.10g/cm^3) や火星 (3.80g/cm^3) に比べ、半径が小さいにも関わらず極めて高い。この高密度を実現するには、水星の鉄含有率を 560mg/g を地球 (280mg/g) より約2倍大きくしなければならない。このことは、惑星全質量の70~80%を占める極端に大きなコアの存在を示唆する。

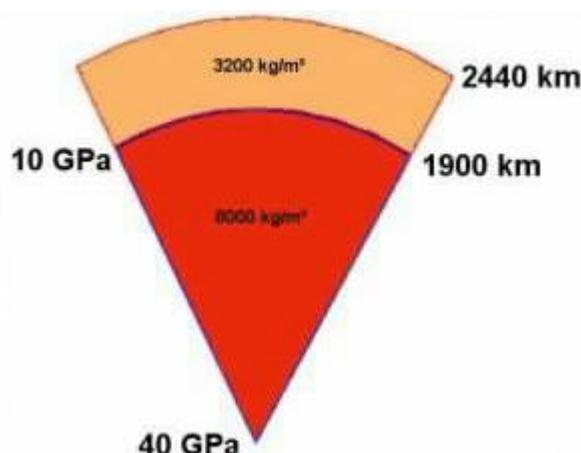


図 2.2-1 水星内部構造の2層モデル。

それぞれの数値は、マントル及びコアの平均密度、コア-マントル境界および中心の圧力、表面およびコアの半径を示す。

[Courtesy: BepiColombo Study Report]

このような巨大なコアを想定すると、マントルと地殻からなる水星の「シリコン化合物シェル」の厚さは、高々500~700kmに過ぎなくなる。これは、表層で見られるテクトニクスや火山活動に強い影響を与えることが予測される。マントル内の対流は、惑星半径 - コア半径比に依存するとされる。マントルが薄いと、その対流パターンは数多くの小セルに分裂するが(図 2.2-2)これは表面テクトニックパターンの均質化につながりうる。実際、Mariner 10が撮像した水星表面のテクトニックパターンは、月と似て比較的滑らかで火星とは大きく異なる。一方、地球からのレーダー観測によると、未撮像領域に大きな火山ドームの存在が示唆されている。これらの表層で見られる特徴は、惑星内部におけるマントル対流の解明のため重要である。

コアの大きさ・質量を含む水星内部の全球的構造の探査に有力な手段として、BepiColombo/MPOで主に実施される「重力測量」がある。「回転軸周りの慣性モーメント」 C と「質量」 M との比は、惑星内での質量分布に制限を与える。Mariner 10では極めて不確実な値として $C/MR_M^2 = \text{約} 0.34$ (R_M : 水星半径) が得られており、精度の向上が求められる。実際の測定

では、2ウェイドップラー計測（重力場の球面調和関数係数 $C_{20} \cdot C_{22}$ 係数）と表面地形データ（物理秤動の振幅・傾斜角）から「惑星の慣性モーメント C 」と「マントルの慣性モーメント C_m 」を求め、惑星質量 M と合わせた3つ独立測定量から、「シリコンシェル密度」、「コア密度」、「コア半径」が決定される。また、水星マントルの粘性も推定できるため、コアの熔融状況の解明にもつながる。

この情報と、表面データから推定される惑星全体の化学組成との組合せによって、水星の内部構造・組成を理解することは、水星および太陽系そのものの形成の理解につながると期待される。

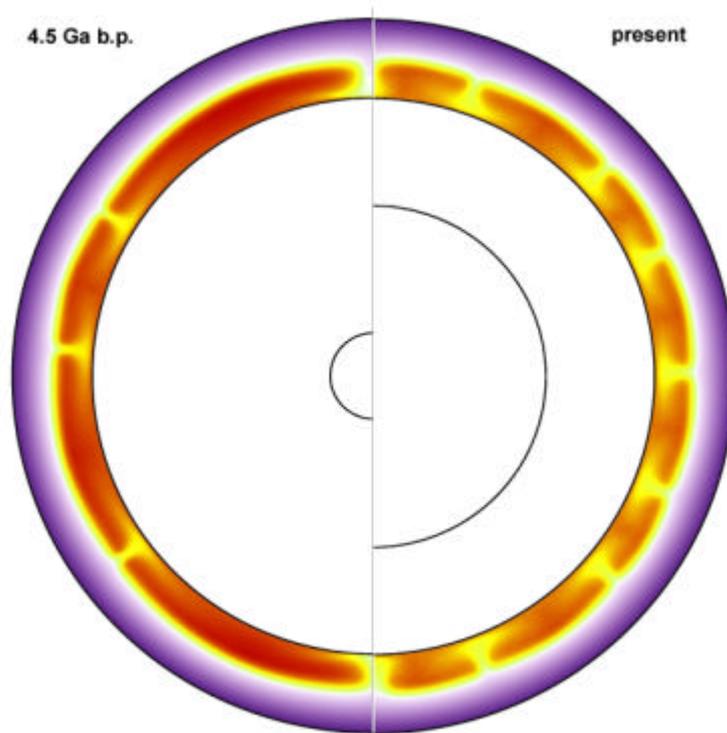


図 2.2-2 水星の熱的進化の計算結果

カラーコード：45 億年前(左)と現在 (右) の温度場、黒実線：各々のコアの大きさ

[Conzelmann and Spohn, 1999]

2.3 磁場

固有磁場の存在は、Mariner 10 の観測結果で最大の驚きといえるだろう。図 2.3-1 は、第 1 回フライバイの磁場観測である [Whang et al., 1974]。この結果を報告した “Science” の Mariner 10 特集号からは、驚きと興奮、そして固有磁場の存在に対する若干の疑問が伝わってくる。この確認のため、第 3 回フライバイは高緯度側を通過することになった（第 2 回は表面撮像観測のため昼間側を離れて通過）。この結果は、まさしくダイポールのな固有磁場の存在を決定付けた（図 2.3-2）。最近 Galileo 探査機によって、水星とほぼ同じ大きさを持つ木星の衛星 Ganymede でも固有磁場の存在が明らかになり、惑星の磁場発生メカニズムの多様性を感じさせる。

惑星の双極子磁場の成因は、コア内部の「電磁流体ダイナモ」または「熱電気ダイナモ」 [Stevenson, 1987] によるとされる。これらの機構では、コアの外部シェル部分が 500km 厚程度で液体となっていることが必要である。このような「シェル」は、惑星形成初期に完全熔融していたコアが徐々に凍結する結果として形成される。しかしモデルによると、水星のような小さい惑星では、純粋な鉄のコアは現在に至るまでに完全凍結状態まで進行してしまうとされる。

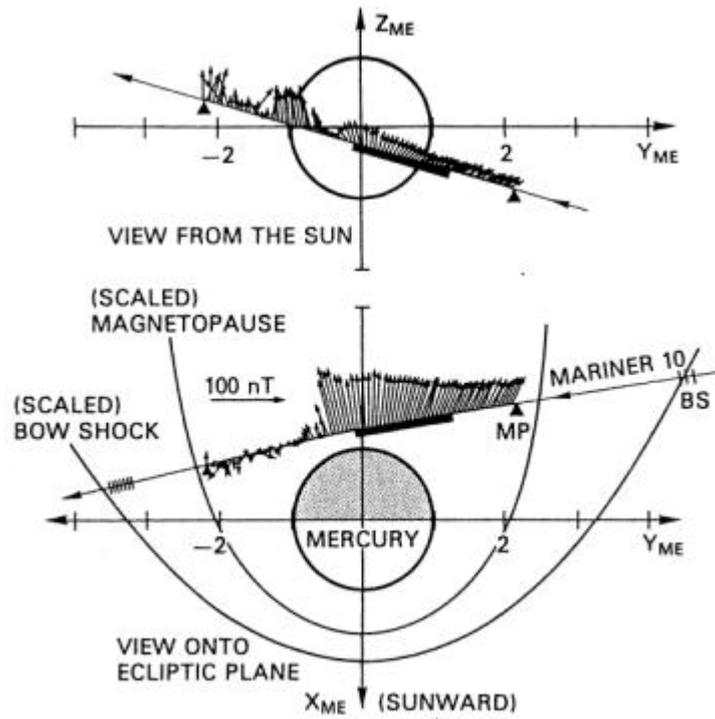


図 2.3-1 Mariner 10 第 1 回フライバイの磁場データ [Connerney and Ness, 1988]

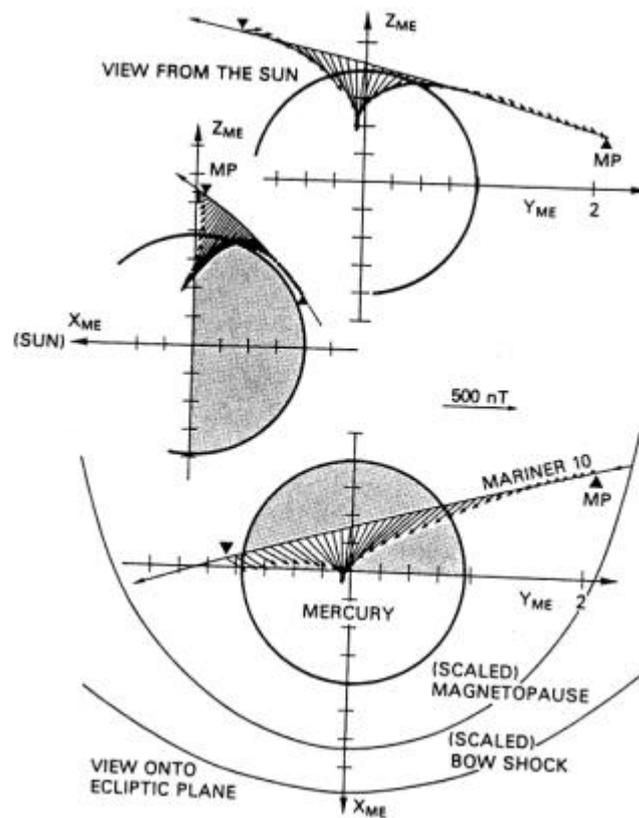


図 2.3-2 Mariner 10 第 3 回フライバイの磁場データ [Connerney and Ness, 1988]

硫黄は鉄合金の凝固点を下げる事が良く知られており、少量の硫黄の濃縮によって溶融殻の維持の説明が試みられている [Stevenson et al., 1983]。また、珪素と酸素も同様に要素として考えられている。このため、固体である「内核」の成長によってこれらの合金要素の濃縮度を外核で上昇させ、コア上層での凝固点の降下を促して液層に保つモデルが提唱されている。マントル対流による「熱移送」を基礎とした熱史モデル [e.g., Schubert et al., 1988] によれば、コアの硫黄濃度が 1~5% あれば、上記シナリオにしたがって現在に至るまで水星コアの溶融は維持できる。また内核における潮汐加熱が、液相の外部コアの維持を助ける事も示されている [Schubert et al., 1988]。より最近の計算 [Conzelmann and Spohn, 1999] では、地球型惑星の冷却は主にリソスフェアの厚さが増大する事によって起き、奥深い所では比較的熱いままである事が示されている (図 2.3-3)。これらのモデルは凡そにおいて古いモデルの結果と一致しているが同じ硫黄濃度における外核層の厚さはより厚くなっている。モデルによっては、たとえ硫黄濃度が 0.1% しかなくてもコア内部に液体層を持つ事はさほど困難ではないとされている。

このような磁場構造とその生成機構の解明は、先に述べた重力分布の情報と合わせて、水星の内部構造と熱史の研究、ひいては起源と進化の研究に繋がる重要な問題である。この探査は、BepiColombo/MMO の最重要目標の一つである。詳細については、次章 3.1 節を参照されたい。

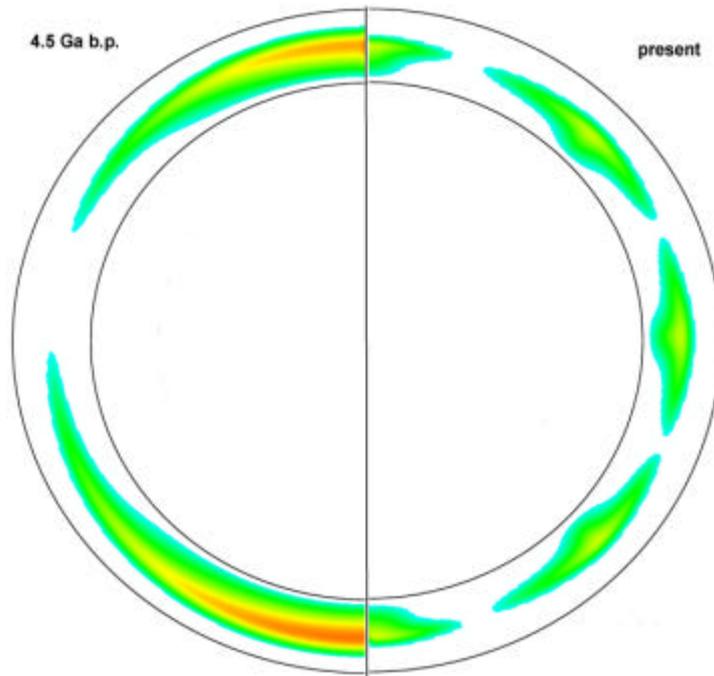


図 2.3.3 熱的進化モデルを用いて計算した 45 億年前と現在の溶融部分

カラーは溶融の割合：70%(暗い赤)~1%(明るい緑) [Conzelmann and Spohn, 1999]

2.4 表面

水星表面の詳細な撮像データは、Mariner 10 の 3 回のフライバイ観測に限られる (図 2.4-1、図 2.4-2)。詳細な化学・鉱物学組成分布は不明であり、起源・進化の評価は不可能な状況にある。

Mariner 10 の撮像範囲は全球の約 45%、表面地質が判読できる空間分解能と角度条件を満たすものは約 35% に留まる。これまで多くの惑星や衛星で半球スケールごとの特徴の異なる「2 分性」が見出されているが、Mariner 10 のデータは片側半分の撮像データしかないため、この点も不明である。

とはいえ、2 色 (335 nm, 575 nm) の多色分光用カメラは、空間分解能は 2~3 km (単色では 1~1.5 km [最高 100 m]) と限られたものではあるが、興味深い特徴を明らかにした。水星表面はクレーターの多い「高地」と比較的平坦な「平原」からなり、見かけ上は月と類似点が多い。しかし、

反射スペクトルは月で見られる領域差がなく、全体が「高地」と似ている。これが平均的な特徴なのか、あるいは未観測領域に月の海のような玄武岩質溶岩流があるかは不明である。

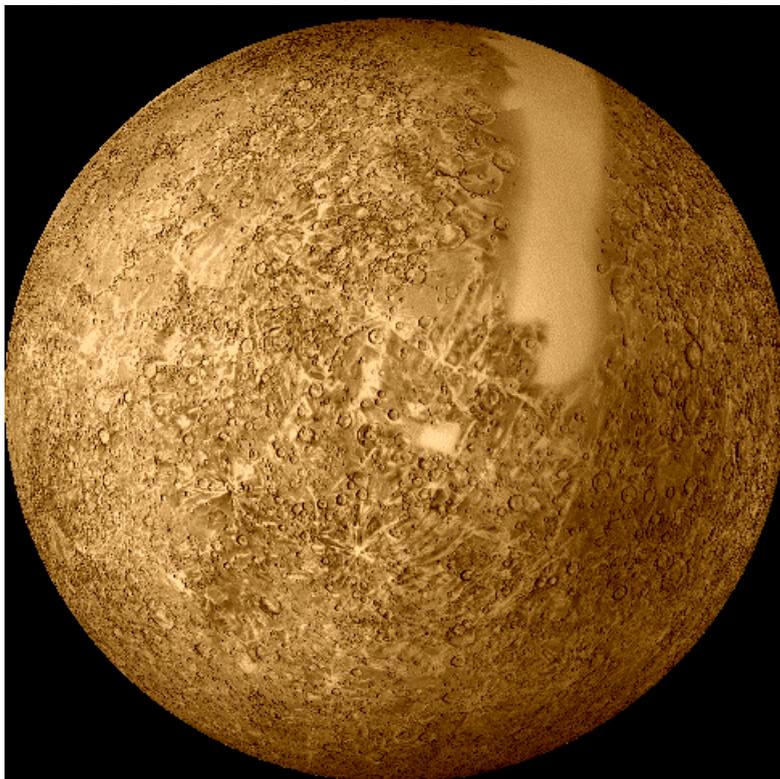


図 2.4-1 Mariner 10 が撮像した水星表面全データ
裏側及び図中の白い帯状の部分は撮像がなされていない。 [Courtesy: NASA/JPL]

2.2 節で述べたように、予測される水星マンツルの薄さからくるマンツル対流の小セル化（図 2.2-2）は、表層における火成活動やテクトニクスに影響を与えたと思われる。水星には火成活動によると考えられる平原があるものの、地球型の火山やテクトニクスは発見されていない。火成活動に関しては、地球からのレーダー観測によって未撮像領域に巨大な火山の存在が示唆されており、不明部分の観測が待たれる。また、Mariner 10 が撮像した水星表面には、多くの巨視的な「線構造」が見られる（図 3.4-1）。その中には自転速度の減少に伴う応力場で生じたと解釈されるものがある。この応力場はある空間分布をもった断層群を全球的に形成するはずだが、低太陽高度でないと観測困難のため、全体像はまだ不明である。

詳しい鉱物組成はわかっていない。地球からの限られた可視・近赤外分光観測では、輝石カンラン石の FeO 含有量の指標である $0.9\sim 1.0\mu\text{m}$ の吸収スペクトルが小さく、金属鉄の特徴とされる赤化も見られず、全体として表面における鉄酸化物の量は少ないと見られる。本来、水星には鉄は大量に存在するはずだが、この結果は鉄の多くが「金属鉄」の状態で存在することを示唆するのかもしれない。この推測は、「還元的」とされる惑星形成初期の水星軌道の環境と矛盾しないものの、結論は出ていない。

表層の状態も不明だが、Mariner 10 では水星表面からの熱放射計測も行われ、結果は「全表面がレゴリスに覆われている」とした場合の熱計算とよく一致している。夜は最低で 90 K（遠日点）、昼は最高 700 K（近日点）に達することがわかっている[Chase, 1976]。

また、最近のトピックとして、図 2.4-3 に示すように、極域の永久影の中に氷が存在する可能性を示したレーダー観測がある [Slade et al., 1992; Harmon et al., 1994]。現在のところ、その実態および成因は不明である。最近、月において極域の永久影の中に多量の氷の存在が示唆されていることもあり、この比較も興味ある課題である。

表面地形の広域構造の探査は、BepiColombo/MMO の目標の一つである。詳細については、次章 3.4 節を参照されたい。

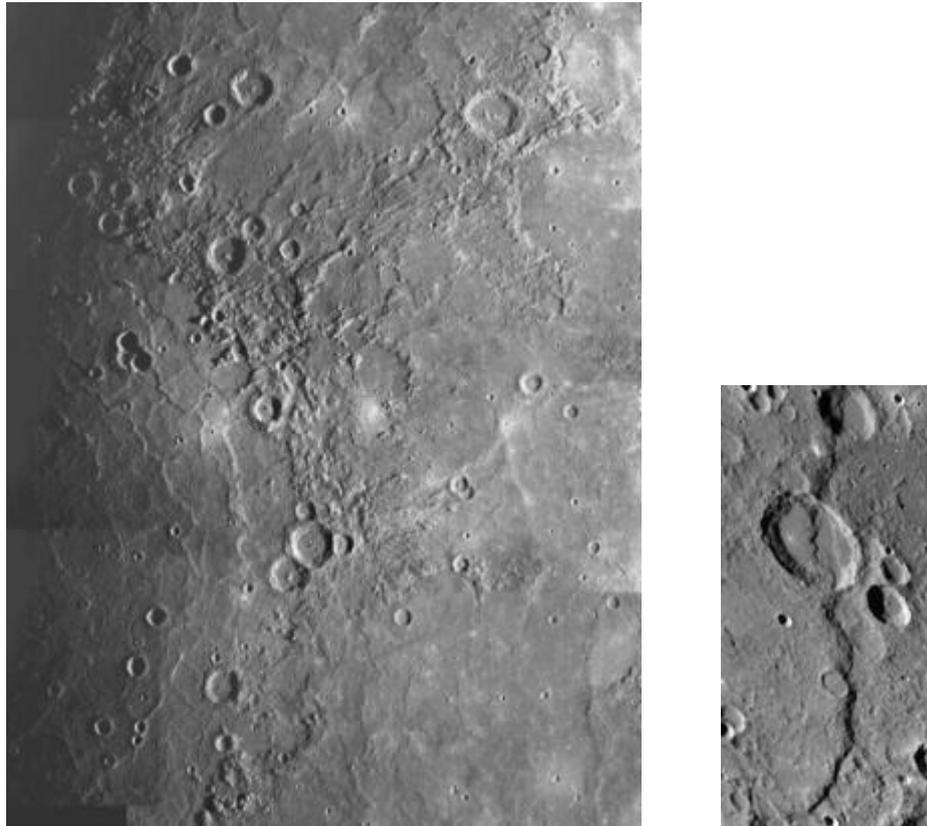


図 2.4-2 水星の起源に関わる構造的地形の例 (左: Caloris 盆地 右: Discovery 峡谷)
[Courtesy: NASA/JPL]

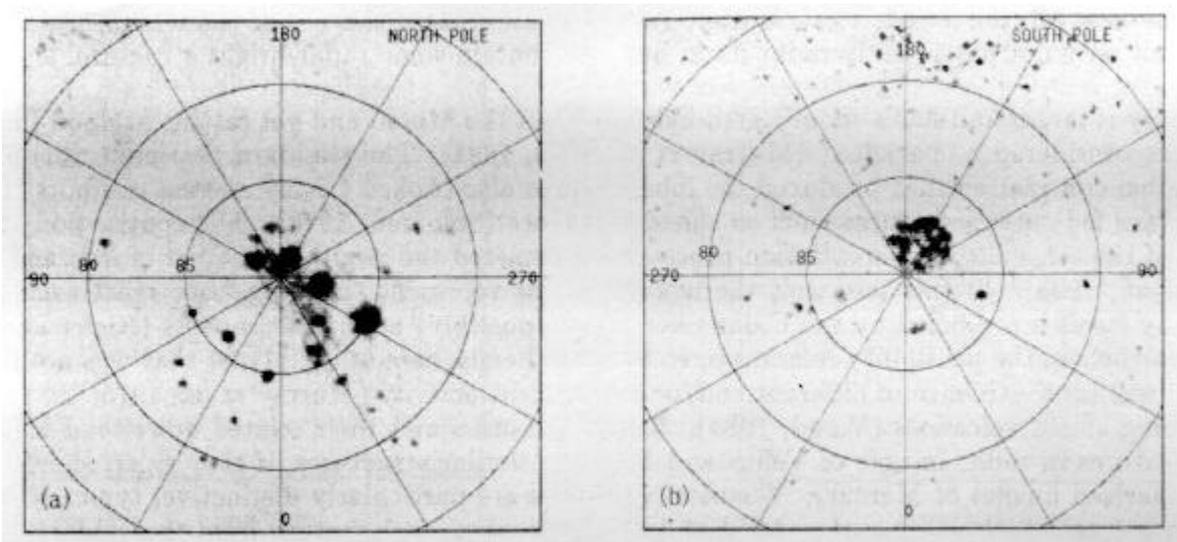


図 2.4-3 地球からの水星極域のレーダー観測データ [Harmon et al., 1994]
それぞれ、(a)北極域および (b)南極域の観測。黒い部分が氷からの反射と思われる。

2.5 外圏大気

水星には極僅かながら「大気」が存在する。但し、量としては表面で高々 10^6cm^3 程度であり、地球でいう「外圏大気」(Exosphere)レベルに過ぎない。この為、個々の分子は弾道飛行をしており、その力学構造において分子間衝突は無視出来る。現在確認されている大気成分は、表面近傍における存在比の多い順に、「O、Na、He、K、H、Ca」の6種である。O、He、HはMariner 10の紫外線スペクトル計測から、Na、K、Caは地上からの可視光スペクトル計測から同定された [Potter and Morgan 1985, 1986; Bida et al., 2000]。この6種の原子のうち、Hは太陽風起源、O、Na、K、Caは惑星起源と考えられるが、Heは何れの説もあり結論は出ていない。

このうち、惑星表面での大気の生成は、「内部要因」(拡散、火山活動等)と「外部要因」(太陽光による光脱離、微小隕石衝突による気化、イオンによるスパッタリング)からなると考えられているが、結論は出ていない。NaとKは地球からの光学観測で発見されたが [Potter and Morgan, 1990]、その多量さ (Na: $2 \times 10^4\text{cm}^3$, K: $5 \times 10^2\text{cm}^3$) は驚きを呼んだ。また、想定される表面元素組成に基づき、原子蒸気圧と種々のガス放出・散逸機構を入れたモデルでは、Mgも観測されうる [Morgan and Killen, 1997]。また、極の氷の存在が事実であれば、OHが存在する可能性もある。

地上望遠鏡による観測が可能なNaとKに関しては、その空間分布と時間変化に関する興味ある報告がなされている。すなわち、両者とも高緯度に多く、かつ互いに相関した南北非対称性を示す [cf. Potter and Morgan, 1997] (図 2.5-1)。このことは、NaとKが同じプロセスで生成されていること、すなわち双方とも「太陽風や磁気圏の高エネルギーイオンが表面に衝突することによる表面スパッタリング」が基本プロセスではないかと推定される。しかし、現状では観測データが限定されており、推論の域を出ない。

また、分布状況は少なくとも1日毎に大きく変化する。このような早い時間変動を引き起こすには、速やかな大気の喪失機構が必要である。その機構としては、希薄な外圏大気が太陽紫外線によって電離され、太陽風磁場によって持ち去られる「Ion Pickup」や、太陽輻射による光圧が想定されている。前者は太陽風や磁気圏活動の影響を強く受けると思われ、大気構造のモニターと太陽風・磁気圏観測の結合がその解明の鍵となる。

このような希薄かつ不安定な大気しかないため、金星・地球・火星で見られる定常的な「電離圏」は形成されていないと思われる。地球では、電離圏に流れる電流が磁気圏の構造やダイナミクスに大きく影響を与えている。Mariner 10では、固有磁場の存在の自然な帰結である磁気圏が観測されているが、電離圏の存在なしにどのような磁気圏が形成されるのか、重要な問題である。

この領域の探査は、BepiColombo/MMOの重要目標の一つである。研究対象の詳細については、次章 3.3 節を参照されたい。

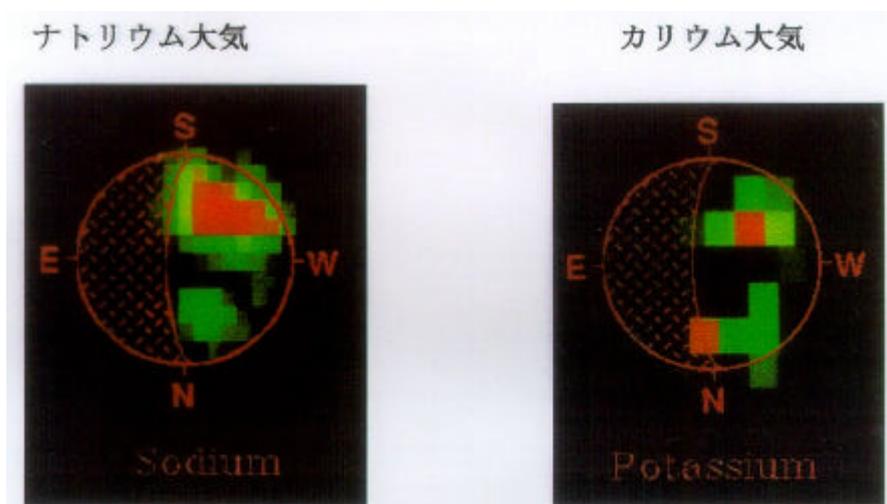


図 2.5-1 地上から観測された Na・K の輝線分布 [Potter and Morgan, 1997]

2.6 磁気圏

水星の磁気圏は、太陽系の中で地球磁気圏との比較対照として最もふさわしい存在である。金星や火星は固有磁場を有さず、また木星の巨大な磁気圏は、太陽風のエネルギーではなく自己の自転エネルギーで支配されると見られるためである。

しかし、現状では、水星磁気圏に関する情報は、Mariner 10 による 2 回の限られた磁場観測(2.3 節：図 2.3-1、図 2.3-2)と狭いエネルギー範囲の電子観測のデータがあるにすぎない。

現状では、水星磁気圏は地球磁気圏と似た構造をしているものと想定されている。Mariner 10 は、第一回フライバイで水星の夜側を通過する際に「磁気圏」と見られる領域を観測している。通過するのに要した時間は約 17 分程度で、フライバイ時の水星に対する相対速度(11km/s)を考慮すると、その幅は約 11,200km になる。このサイズを基礎にして、地球磁気圏をスケールアップさせた磁気圏の構造が想定されている(図 2.6-1)。

図 2.6-2 は、水星磁気圏の様相を伺える唯一の観測結果で、Mariner 10 が第 1 回フライバイ時に観測した高エネルギー電子、磁場、およびプラズマ電子のデータである。磁場データに沿った滑らかな曲線は、Whang [1977] が示した水星周辺の磁場モデルにおける値である。このデータからは、図 2.6-1 に現れるような磁気圏の前面に位置する「衝撃波」、太陽風と磁気圏との境界である「磁気圏境界面」、磁気圏尾部を支える電流系の源である高温の「プラズマシート」といった基本構造が見つけられる。また、再接近時以降に出現する電子バースト(図中の B, C, D)とそれに呼応した磁場擾乱は、地球磁気圏で見られる磁場エネルギーの開放現象「サブストーム」に相当するものと考えられている [Siscoe et al., 1975]。

しかし、共通点は見られるものの、水星磁気圏は地球磁気圏とかなり異なる現象が支配していると見られている。磁気圏のサイズは、惑星磁場のダイポールモーメントの大きさと太陽風の動圧のバランスで決まると考えてよい。水星では、前者は地球の約 1/1000、後者は 5~10 倍程度で、水星磁気圏のサイズは「地球の 1/20 程度」と見積もられている。図 2.6-1 はこの予測を元にしたかなり荒っぽい描像だが、まずは惑星本体が磁気圏のなかに占める割合がずいぶん大きいことが感じられよう。水星磁気圏では、地球磁気圏よりも固体惑星の相対的な大きさが 8 倍大きい。地球磁気圏に置き換えると、惑星表面は静止軌道あたり、つまり電離圏 (Ionosphere) はおろか、プラズマ圏 (Plasmasphere) も惑星内部におさまってしまうことになる。また、この予測に出てくる典型的な構造の大きさは、せいぜいイオンのラーマー半径と同程度に過ぎず、そもそも地球磁気圏のアナロジーで議論してよいのか疑問がある。

また、大気が希薄なため定常的な電離圏はなく、特に夜側にはほとんど存在しないものと想定されている。このため、磁気圏はじかに惑星表面と接していると見られる。地球では、「導電体」である電離圏が磁気圏と電気的に結合にすることによって、「サブストーム現象」や「オーロラ現象」を大きく左右している。水星の表面はほぼ「絶縁体」と考えられており、地球とは全く境界条件が異なることになる。

磁気圏におけるエネルギー開放を担う「尾部」はどうだろうか。水星磁気圏は、磁場的なスケールも小さいため、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。実際、Mariner 10 で観測された「太陽風の変動に伴う磁気圏内の擾乱」や「電子バースト」の時間スケールは、明らかに地球の数 10 倍早い。また、固有磁場が弱いために、太陽風の変動の影響を受けやすいうえに、公転に伴って太陽からの距離が大きく変化する(0.3~0.5AU)ため、太陽風の変動幅も大きい。このため、地球よりも「早く激しい変動」が予測される。

これらの特異性がどのような影響を磁気圏の構造・ダイナミクス・物理プロセスに与えているのか、現在のところは全く不明である。「磁気圏」は、惑星・恒星・銀河など固有磁場とプラズマ流がぶつかる様々な場所で見られる普遍的な構造でもある。その中で最小といえる「水星磁気圏」は、地球磁気圏および宇宙一般の磁気関連現象の解明に別の視点を与えてくれるだろう。

この領域の探査は、BepiColombo/MMO の最重要目標の一つである。研究対象の詳細については、次章 3.2 節を参照されたい。

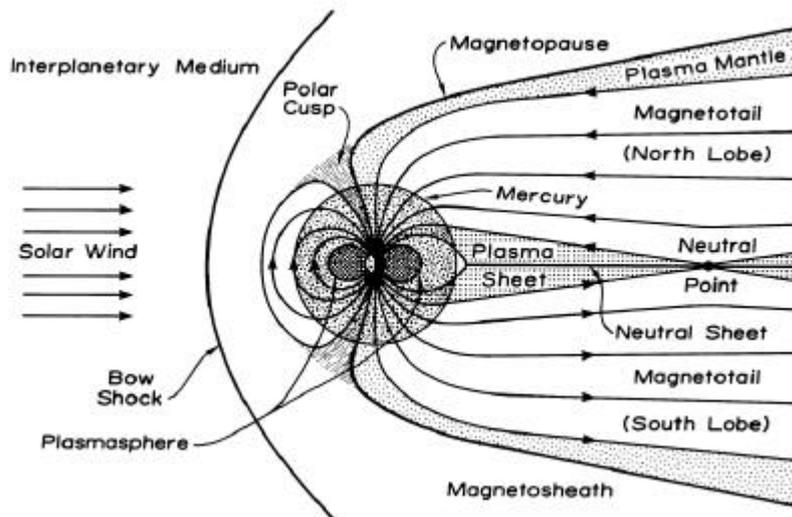


図 2.6-1 水星磁気圏の構造(模式図) [Russel et al., 1988]

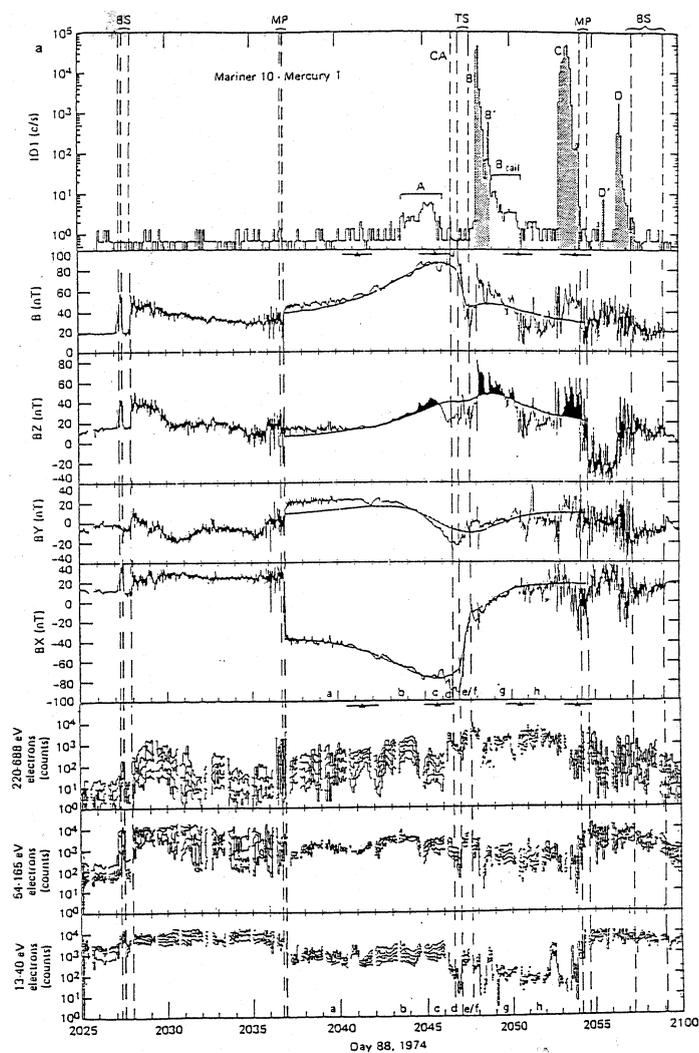


図 2.6-2 Mariner 10 の第 1 回水星フライバイ時に観測したプラズマデータ [Christon, 1987]
最上段：高エネルギー電子、2-4 段：磁場、5-最下段：プラズマ電子

