

## 地球型惑星探査の研究課題

前沢 洸\*

### Science objectives of planetary missions to Mars and Venus

By

K. MAEZAWA

**Abstract:** Mars and Venus are very different from other planets of the solar system in that their intrinsic magnetic field is minimal and cannot fully withstand the solar wind pressure. Therefore, the planetary ionospheres may directly interact with the solar wind plasma. This fact, established for Venus and to be confirmed for Mars, has made these planets interesting targets for future planetary missions. In this article, a brief review is presented on what we have learned from previous missions on these unique planetary environments. Scientific returns from the future missions are discussed with emphasis on the value of comparisons of diverse magnetospheres. This approach is the key to the ultimate understanding of the interaction between the solar wind and planetary magnetospheres.

#### 1. はじめに

磁気圏学の立場からは、地球近傍の惑星（水星、金星、火星）のうち、水星だけが地球と似かよっており、金星と火星の環境は、地球と大幅に違っている。水星は地球と同様に、太陽風をはねかえすだけの固有の双極子磁場を持っているが、火星と金星の固有磁場は非常に小さく、惑星の大気が直接太陽風にさらされていると考えられるからである。太陽系を見渡しても、木星型の惑星はみな大きな双極子磁場を持っているから、火星と金星は太陽系の中で、かなりユニークな存在である。

このように根本的に違う環境を持つ惑星であるがゆえに、今までの我々の理解は、非常に不十分なものであった。ヴォエジャーによる、強磁場を持つ外惑星の探査が一段落したいま、

---

\* 名古屋大学理学部

世界の研究の趨勢も近隣の惑星の探査に戻ってきている。磁気圏学の理解をさらに一步深めるには、磁場のある惑星と、磁場の非常に小さい惑星のプラズマ環境の比較が欠かせないのである。わが国の衛星打ち上げ能力からいっても、金星と火星は次期計画の最もよいターゲットである。こういった観点から、この小文では地球型惑星のうち、特に金星と火星の科学観測意義についてのべる。水星についても多くの謎が存在するが、それについては別の機会に述べたい。

## 2. 金星の研究課題

磁場のない、大気を持った天体とプラズマ流の相互作用の問題は、金星と火星のほか、タイタンなどの衛星や彗星にも共通するところがある。現在これらを考える上で基本となる知識は、やはりパイオニアヴィーナスオービター (PVO) のもたらした金星の長期にわたる観測である。そこでまず金星の観測により形作られた基本的描像について述べ、そのうえでPVOで解けていない問題、およびさらに分かっていない火星について述べたい。

PVOの最近接点は約高度200kmの赤道域にあったから、この高度より上の、金星前面の境界領域の磁場とプラズマ密度についてはかなり詳しいデータがある。前面の太陽風領域で最も顕著なのは、電離層に近づくにつれ、太陽風中の磁場圧力がプラズマ圧にくらべ著しく上昇することである。つまり金星の前面では、太陽風の磁力線が密に圧縮されて停滞しており、逆に、太陽風のプラズマはすりと脇に逃げさっているように見える。これは、プラズマは逃げる方向に3次元の自由度があるが、磁力線の運動は本質的に磁力線に直角の二次元方向しか自由度がないことによると思われる。(地球でも同様な磁場の停滞効果の存在が指摘されているが、相互作用に本質的な役割は果たしていない)。このため、金星の電離層の上端では、太陽風の圧力の大部分を太陽風磁場が占め、それを電離層のプラズマがささえているかたちとなる。これは地球とはまったく逆の状況である(地球では、太陽風のプラズマ圧を地球の磁場がささえている)。

さて、太陽風磁場と金星電離層の間には、イオノポーズとよばれる境界層が出来て、金星の最も重要な特徴になっている。その位置は圧力平衡から決まり、したがって太陽風の圧力の変動とイオノポーズの高度、及びそこでの電子密度の変動の間にはきれいな相関がある。

一方、金星の前面の電離層に引っかかった磁力線はヘアピン状に金星を包む形にまがって彗星状のテイルをつくる。一見地球のテイルに似た構造だが、地球のテイルは地球の磁力線でできているのに対し、太陽風の磁力線で出来ているところが地球と逆である。実際、PVOの遠地点付近では、テイルの磁場の極性が同時期の太陽風の磁場とよくあっていることが確かめられている。

金星に関しては以上のような基本的な描像ができてきたが、PVOのデータにはこの解釈をはみだすことが大幅にふくまれている。第一に、時々、電離層深くまで太陽風磁場起源と思われる細い磁力線の束(フラックスロープ)が侵入してきていることが報告されている。第二に、太陽風圧力が高まって、イオノポーズが高度250km付近まで降りてくると、イオノポーズは、明確な境界面としての性質を急に失い、電離層の下に強い太陽風磁場がしみ込んでくる。

ヘリカルな構造を持つフラックスロープは、境界不安定(K-H不安定)でイオノポーズ

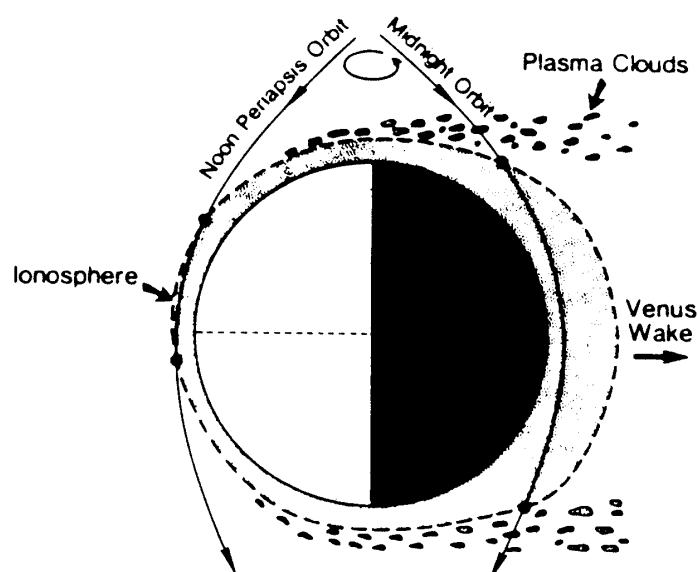


図1. パイオニアヴィーナスの電子密度観測からの金星電離層想像図. 金星の脇から夜側にかけて、アイランド状に電離層がちぎれて流出している. (Braceet al., 1982)

に表面波がたち、波頭が剥離した結果できた磁束であると考えることが出来るかもしれない。地球の磁気圏境界面のように惑星側に line-tying 効果(境界を安定化する効果)を持つ磁力線のつくる境界面とどう違うか、詳細な比較がまたれる。

イオノポーズの消失に関しては、磁場のない惑星大気に特有の、もっと本質的な事柄を指し示していると考えられる。つまり、境界面が低高度になると、大気はもう理想的なプラズマとしては考えられなくなり、中性粒子を考慮に入れた複雑な相互作用の場と化すことである。こうなると太陽風粒子と電離層の大気は混じり合い、また、侵入した太陽風磁力線の運動は電離層に対流を誘起し、電離層のイオン組成も強い影響を受けると考えられる。

金星の昼側から夜側にかけてイオノポーズの高度はだんだん高くなり PVO の軌道からはずれるため、夜側のイオノポーズに関しては、それが定常的に存在するかどうかも分かっていない。特に昼夜の境界線付近では、太陽風の磁場は電離層を押さえつけるよりむしろ流出させるとも考えられ、太陽風磁場の圧力のないところでイオノポーズがどんな形を取るか非常に興味のかいところである。実際 PVO の観測データから、夜側では電離層の一部が流されて切れ切れのストリーマになったりアイランドになったりしているとの推測もある(図1)。また、テイル(磁気圏尾部)の中のプラズマの供給源、対流の有無など、地球磁気圏と比較すべき、テイル構造形成のもっとも本質的な部分がこれからの解明を待っている。

夜側の電離層で不思議なことは、テイルの中心をはさんで両側に、電子密度の小さい場所(ホール)があることである。しかも、そこでの磁場は鉛直に近く、あたかも磁力線が惑星から出ているように見える。この現象は、惑星の固体部分と太陽風磁場との相互作用に関係していると思われ、火星の観測意義のところでもう一度述べる。

電離層からのイオン流出にかんしては、大気の進化にまで影響を与えるかも知れない。これは非常に重要なことであるにもかかわらず、定量的なことはまだ分かっていない。その一つの原因は、PVOのイオン検出器のエネルギーレンジが狭かったこと、およびPVOの軌道特性により、イオンの流出先である近いテイルの観測がほとんどないことである。

### 3. 火星探査の研究課題

火星は、金星に比べ、低高度のプラズマ環境のデータがさらに乏しかった。米ソの着陸船は、電離層密度以外は観測をせず、昨年ソ連のフォボスの観測によって地上850kmまでの状況がやっとわかってきたが、一番の鍵となる。固有磁場の大きさがまだ定まっていない。逆にいえば、火星は、固有磁場のある惑星として振舞うかどうかぎりぎりのところにあるらしい。そのため、今までの観測の解釈も、人によってまちまちのところがある。観測する立場から云うと、自由に想像をのばせる余地が多く魅力的である。ここでは、まず、磁場の大きさによって2つの場合に分けて論じてみよう。

#### 1) 火星に磁場のない場合の電離層レベルの相互作用

この場合、太陽風と上層大気の相互作用は、時間的に非常にダイナミックに移り変わると予想される。その理由は、火星の電離層、特にその上部（高度200キロ以上）の電子密度が非常に薄いことである。Viking Landerの観測によれば火星電離層の電子密度はピーク高度では $10^5/\text{cc}$ 程度であり、金星の数分の一程度の濃さであるが、高度250キロレベルでは主成分イオンのちがい（火星では $\text{O}_2^+$ 、金星では $\text{O}^+$ ）から、金星のわずかな数十分の一のうすさとなる。金星では普通イオノポーズが太陽風の圧力を支えているが、太陽風の圧力が極度に高くなってイオノポーズが250キロ付近までおいてくる場合は、突然それより下の電離層全体に太陽風磁力線（IMF）が侵入してくるのが観測されている。これは前に述べたように、高度250キロ以下では有効粒子衝突の増大により、イオノポーズの概念が成立しなくなる（イオノポーズがIMFを支えきれなくなる）ためだと思われる。金星ではこのようなことが観測される頻度は少ないが、火星では電子密度が低いため、このようにイオノポーズがIMFを支えきれない事態がむしろ基本的に頻繁に起こり得る。さらに、この高度での火星の中性大気の密度（ $10^7/\text{cc}$ ）が、金星より十倍程大きいことを考えると、太陽風プラズマと電離度の低い大気との相互作用が、金星よりさらに重要な影響を大気に及ぼすはずである。

この意味で、火星の電離層は、非常に興味ある場所となる。平均的な太陽風の圧力下でも、太陽風が原子分子衝突の多い大気と直接相互作用しあう場が観測できるはずである。完全電離気体と不完全なそれとが混ざりあって、運動量とエネルギーを互いに伝達する場合のミクロのプロセスは、我々にとって未知の分野である。特に粒子波動相互作用の貢献度や、そのマクロな方程式へのはねかえりの解明に期待がもたれる。

火星ではまだイオノポーズが観測されていないが、太陽の圧力が弱い場合は、イオノポーズが形成されるはずである。太陽風の圧力は時間的に大きく変動するので、火星の電離層は、イオノポーズのある状態とない状態をひんぱんに遷移している可能性がある。それぞれの状態の間に、大気の上層からのイオン流失量はどう変わるか、尾部の磁場構造にはどう影響するか、強い興味もたれる。また、まったく逆の可能性として、太陽風の圧力が弱い（密度が低い）時は、高高度でのイオンピックアップによる影響が相対的に増大し、明確なイオノ

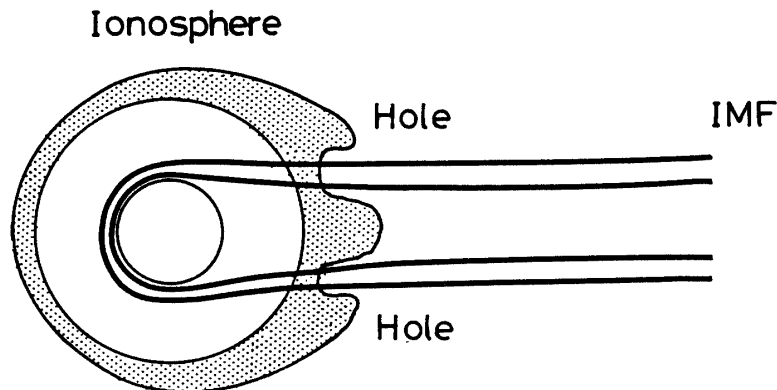


図2. 金星（火星）のマンツルまたはコアにひっかかった IMF 磁力線。  
電離層ホールの原因になるかも知れない。

ポーズの形成が阻まれる可能性も起こる。

## 2) 火星の地殻への IMF の侵入

IMF を通じてかかる太陽風圧力をイオノポーズが支えきれないとすると、電離層をとおりぬけて拡散した IMF の磁力線は、瞬時に大気中をとおりぬけ、地表にいたる。地殻の電気伝導度を地球と同じく  $10^{-2}$  mho/m 程度とすれば、IMF は時間にして十分のオーダーで地殻を通り抜け、マンツルにいたると考えられる。マンツルの電気伝導度を 1 mho/m 程度とすればマンツル内の拡散時間は10日から1カ月程度、コアの拡散時間はそれよりはるかに長い。これを IMF セクター構造の平均持続時間の2週間と比べると、IMF は、少なくとも上部マンツルまではしみこみ、そこにしばらく引っかかっているように見えるはずである。この磁場の存在が、火星の夜側の電離層と、テイルの構造をユニークにしている可能性がある。

マンツルに「引っかかった」磁力線は、夜側では radial な成分を持ち、見かけ上惑星に根を持つ固有の磁場のように見えるに違いない（図2）。このようなことは、金星でも起こっている可能性があり、夜側で観測された電離層のホールは、このような機構によるのかも知れない。radial な磁場成分の存在は、昼側から夜側への水平方向の電離層イオンの輸送をさまたげ、また夜側電離大気のテイルへの逸散を助長するから、夜側の電離層の形成維持、および尾部のプラズマ分布に大きな影響を与えるであろう。

この radial な成分を持つ磁場は、少し以前に拡散した古い IMF の方向を記憶しているといってもよい。IMF のセクター構造の方向がかわれば、新しい方向の磁場は古い磁場と大気や地殻中で再結合し、その結果テイルの磁場は短時間で入れ替わることになる。

## 3) 火星に磁場がある場合の相互作用

もし火星に有意な固有の磁場があれば、上の推論はドラステイックに変わる。昨年ソ連のフォボス衛星の観測では、高度850キロまでしか近づかなかったため、固有の磁場があるかどうか結論が下せなかった。しかし同じフォボスの Bow shock の位置の観測は、惑星との相対的大きさにおいて、金星より火星の方が太陽風を押し止める断面積が大きいことを示しており、火星表面上数百キロのところで太陽風を止め得るだけの大きさの固有磁場がある可能性がある。もし固有磁場が双極子磁場であれば、対応する双極子モーメントは地球の一

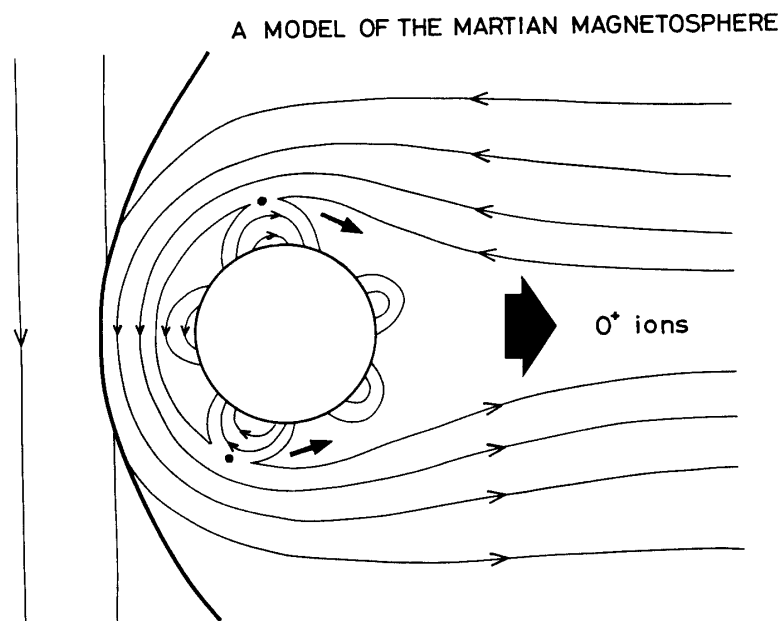


図3. 火星の多極子磁場と太陽風磁場のリコネクションとそれによって起こるイオン加速の想像図

万分の一程度でよい。(金星の双極子磁場は地球の十万分の一以下と考えられている。)

固有の磁場で太陽風を止め得る場合も、その境界は惑星表面のすぐ上であり、磁気圏の大部分を火星本体が占めてしまうので、地球とはまったく似て非なる磁気圏となろう。ここで興味深いのはこの磁気圏境界面での物理過程、特にリコネクション(磁気再結合)過程である。磁気再結合は、地球では太陽風との相互作用の中心的位置を占める過程であり、その本質は磁場凍結の特異的な破れである。火星のように、磁気圏側の磁場に初めから衝突頻度の多い電離層プラズマが詰まっているような磁気レイノルズ数の低い状況で、再結合の生起条件がどう変わるか、理論的に非常に興味深い。

火星固有の磁場は、双極子でなく多極子磁場である可能性も大きい。この場合、太陽風との相互作用はさらに複雑多彩のものとなろう。例えば、局所的に、ある経度では磁場が太陽風を支えており、別の経度では太陽風が大気と直接相互作用をしているというようなことが起こりうる。このようなとき電離層は水平方向にいちじるしく非一様になり、水平方向のイオン輸送、運動量輸送が非常に重要になろう。磁気再結合は多極子磁場ループの突端で局所的におこり易く、そのような場所がたまたま昼夜境界線の近くにあれば、夜側磁気圏への強いイオンの加速が考えられる。次に述べるフォボス探査機で観測されたイオン加速は、このような過程で電離層から加速されたイオンかも知れない(図3)。

#### 4. テイルの形成と粒子加速

磁場の小さい惑星におけるテイルの成因は地球と同じでは有り得ない。事実 Pioneer Venus は、金星のテイルが、IMF の磁力線でできていることを示した。火星におけるテイルの観測は金星のばあいより数少ないが、昨年ソ連のフォボス探査機の観測によれば、テイルの磁場の極性は IMF と一致するが、外の太陽風との間にかなり明確な境界があると報

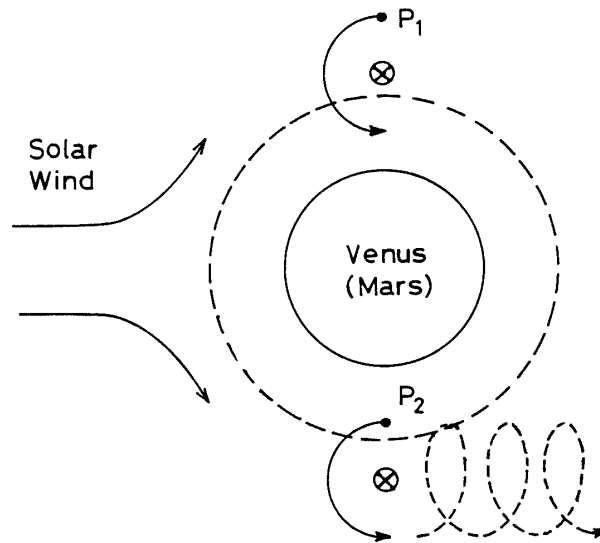


図4. イオンピックアップ機構. ラーマー半径が大きいため太陽風磁力線の方向に大きく影響される. 図のような場合,  $P_2$ 点(流出半球にある)で電離したイオンは太陽風磁場に捕えられるが,  $P_1$ 点(非流出半球)で電離したイオンは電離層に突入する.

告されている. またテイルの断面積は, 惑星から遠ざかるにつれ相対的に金星のテイルより大きく広がっており, テイルの中への太陽風プラズマの侵入は非常に少ないようである.

もともとテイルの内も外も同じIMFの磁力線でできていれば, どうしてそこに明確な境界ができるのであろうか. またテイルの磁力線はどこからどのように供給され, どのくらいの時間の後にまた太陽風中に失われて行くのであろうか. これは, 地球のテイルに於ける似通った問題(静穏時のテイル内のプラズマ対流)にも通じる問題を含んでいる. これらを総合的に明らかにするためには, 特に, 昼夜間電離層レベルおよびテイルの内部での磁力線の輸送の速さと方向を, 対流電場の観測やイオンドリフトの観測を通じて明らかにする必要がある.

フォボス探査機による一番の発見は, 火星のテイル内に吹き出している電離層の $O^+$ の加速された流れであった. この加速は, その流量からいっても, 火星大気の影響を得るほど重要なものである. 金星でもイオン流出が問題になっているが, 両方の惑星の加速機構が同一であるとは限らない. 一般に惑星の周囲で起こる加速過程としては次のようなものが考えられる.

- (1) Bow Shock に於ける加速
- (2) 太陽風電場による電離層粒子のピックアップ(イオンピックアップ)
- (3) リコネクションをはじめとするマクロな磁場の張力による加速
- (4) 波動粒子相互作用による加速
- (5) プラズマ対流によるベータトロン加速

イオンの種類から云って、(1)の可能性はのぞいて考えてよいだろう。金星では(2)のイオンピックアップの効果がいちじるしいと考えられている（ピックアップとは、イオノポーズの上まで飛び出した大気の中性粒子がそこで電離されて太陽風の磁力線に捕えられることである、図4参照）。事実ピックアップの起こり易い半球（太陽風の対流電場が外向きの半球）ではテイルの中を太陽風のプロトンと、電離層から逃げだした $O^+$ イオンが一体となって流れていて、磁場の境界面もあまりはっきりしない。これらの観測は、イオン流出がテイルの形成にまで大きな影響を与えていることを示唆している。

さて、火星の場合も、当然イオンピックアップの機構が $O^+$ の加速を説明する有力候補だが、一方、フォボスで観測された速度分布関数の形から、それ以外の火星独自の加速機構が働いている可能性も大きい。特に述べたように、火星に多極子磁場がある場合は、昼夜境界線あたりで磁場再結合が起こり得るから、それによる加速の可能性もある。また、固有磁場がなくても、テイルを形作るIMF磁力線の自己張力により、自発的にテイル内で再結合が起こる可能性もある。いずれにしろ、いままで未探査の、テイルへの遷移領域の観測をすることがこれからのひとつの焦点となる。

最後に火星や金星の周辺の特徴として、イオンのラーマー半径がエネルギーによっては惑星のスケールと同じくらいになるという著しい事実があり、それが地球と比較してどのような効果を及ぼすか興味もたれる。フォボス探査機では、昼側の近地点近くでMeVオーダーの粒子が観測されたとの報告もあり、数十nT程度の磁場でどこまで加速が可能か非常に興味深いところとなろう。