

特集「金星研究の新展開(2)」

金星のプラズマ粒子・波動環境

町田 忍¹，小野高幸²，寺田直樹³

1. はじめに

金星は火星と同様、固有磁場を持たない惑星であるが、そのサイズや質量、密度の高い大気を持つなど、その諸特性は地球型惑星と呼ばれるにふさわしい様相を呈している。しかし、固有磁場が無いため太陽風と電離圏プラズマ・大気とが直接相互作用し、イオノポーズと呼ばれる特異な上部電離圏の構造を呈することがマリナー5号によって1967年に発見された。以降、パイオニア・ビーナス衛星 (PVO) による観測からイオノポーズを含む金星のプラズマ環境が、集中的に調べられた。PVO 観測が比較的長期にわたる観測データを提供したことなどから (1978年から1980年および1991年より1992年までの間、近金点高度が150-250km、遠金点高度が66,700km、周回時間約24時間の軌道に沿って、プラズマ密度、温度、組成などのパラメータが得られた)、金星の電離圏構造に関してほとんど調べ尽くされているかのような扱いがこれまでなされてきた。しかし、PVO の観測データは、金星のプラズマ粒子・波動環境の研究の観点からは不満足な点が多く、イオノポーズの成因や電離圏ダイナミクスについても、未だ結論を得ていない状態である。

例えば、太陽風と金星の電離大気の相互作用という観点では、電離大気の圧力が重要で、太陽風の動圧と金星電離圏大気の圧力が釣り合う場所にイオノポーズが形成される。さらに太陽風は超音速流であるために、イオノポーズの外側にはバウショックが形成されるが、これらについてプラズマ物理学的な観点に立った深い理解はほとんど行われていない。さらに、詳細な点に

まで掘り下げると、例えば、バウショックの上流域における惑星起源の酸素イオン O^+ のラーマ半径 (旋回半径) の大きさは金星の半径程度で、その結果、イオンの有限ラーマ半径効果が太陽風と金星電離大気の相互作用を考える上で重要になってくる。

磁気圏物理学の最近の進展として、地球のマグネトテイル (磁気圏尾部) では、磁気再結合が実際に起こり、さらに、その特性スケール長に比べてイオンの旋回半径の大きさが無視できないことに起因し、イオンの有限ラーマ半径効果が作用していることが明らかにされた。金星と太陽風の相互作用の過程でもその効果が重要であることが指摘されている。惑星電離圏に起源をもち、太陽風電場で加速されピックアップされた O^+ イオンの旋回半径は、太陽風の主成分である H^+ の旋回半径に比べて、その質量比にあたる16倍ほど大きく、また、付加される運動量も無視できない位大きいため、惑星起源のイオンによる有限ラーマ半径効果は、バウショックやイオノポーズの構造の決定に大きな影響を及ぼしている。

イオノポーズでは、マグネトシースの高速流と金星電離圏の静止したプラズマとの間の速度差 (速度シア) によって、ケルビン・ヘルムホルツ不安定が励起され、イオノポーズに沿って発達した流れの渦が生成される。そして、その渦の中では、太陽風プラズマと金星電離圏のプラズマが混合し、流れる渦とともに惑星間空間に流出してゆく。この過程は、先のピックアップ過程とあわせて、金星大気的主要な散逸機構として作用していることが考えられる。

このように、惑星の大気進化に重要な役割を果たす

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
2. 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻
3. 名古屋大学太陽地球環境研究所

物理過程に、ここ10年あまり国内の研究者が精力的に取り組んできたイオン有限ラーマ半径効果が関与している。そして、その研究を、金星を新たな舞台にして、さらに発展させられる可能性がある。それゆえ、金星周辺のプラズマ環境とそのダイナミクスについて、新しい観測手法を導入してその詳細を解明することは極めて意義深い。本稿では、プラズマ計測器やプラズマサウンダーを用いることによって、金星周辺プラズマ環境の真の描像を得る観測計画についても紹介したい。

2. 金星のバウショック

まず、金星のバウショックから話しを進めよう。金星のバウショックに関して、PVOの観測で実際に得られた結果を図1に示す[1]。横軸にとった角度は、定義により、 0° の所が太陽風磁場の方向に対応し、 90° の所が太陽風の磁場ベクトルと流速ベクトルの外積で与えられる太陽風電場の方向、 270° の所がその逆方向にあたる。縦軸には金星の中心から測ったターミネータ（金星の夜昼境界）におけるバウショックの距離がプロットしてあるが、 90° 付近、すなわち太陽風電場の方向に測った距離が、その反対側の 270° の方向に比べて、8パーセント程度大きい。このことは、

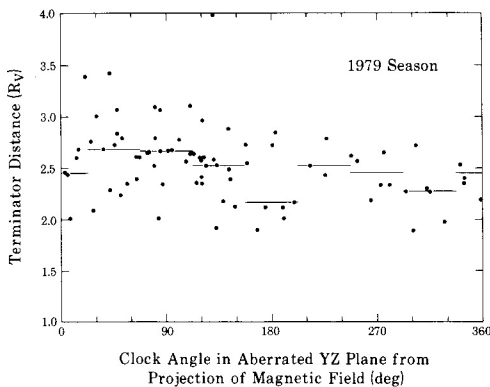


図1: 金星の中心から測ったターミネータにおけるバウショックの距離。
(太陽活動期のPVO観測, Alexander et al. [1986]より.)

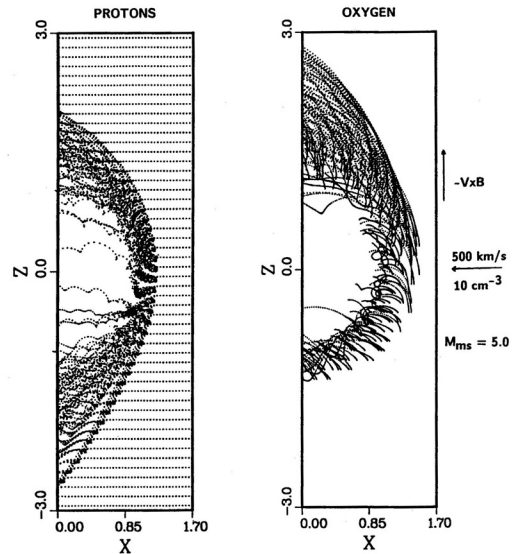


図2: ハイブリッドシミュレーションで得られた、太陽風プロトン $[H^+]$ の軌道(左)と金星大気に起源を持つ酸素イオン $[O^+]$ の軌道(右)。Moore et al. [1991]より。

バウショックが太陽風の電場方向に膨らんでいることを意味する。イオンの有限ラーマ半径効果を取り入れていない電磁流体力学(MHD)的な取り扱いでは、電場に関して対称であり、決してこのような非対称な構造は現れない。しかし、イオンの有限ラーマ半径効果を扱うことのできるハイブリッドコードを用いたシミュレーション計算では、図2にMoore et al.の結果[2]を示すように、バウショックが膨らむ。ただし、バウショックが膨らむ方向は、常に、PVOの観測とは逆方向になってしまう。図の H^+ 、 O^+ は、それぞれ、バウショック周囲のイオンの軌道を示しており、左の方向に進むような H^+ の流れが、大きく軌道を変えられている境界がバウショックのフロントである。その構造は、観測とは異なり、下方の太陽風電場と逆方向に膨らんでいる。この理論と観測の相違を解釈する興味深いモデルがShimazu [3]によって提案されているので、次にその研究を紹介しよう。

Shimazu [3]のモデル計算ではMoore et al.[2]らと同様の3次元のハイブリッドシミュレーションコー

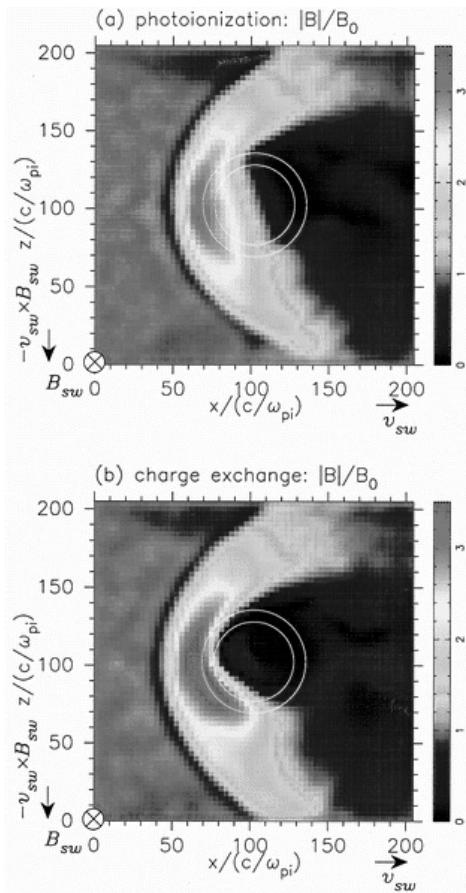


図3: ハイブリッドシミュレーションの結果, 光電離効果のみを仮定した場合 (上), 荷電交換反応のみを仮定した場合 (下). Shimazu [2001] より.

ドを使用しているが, 化学反応に特別な仮定を行った点異なる. すなわち, 一つは通常のモデルに対応させて, 光電離, すなわち, 太陽から放射される紫外線で金星周辺の酸素原子 O が電離され, イオン化された O^+ と電子が生成され, それらが太陽風に付加される過程のみを与えたものを考える. もう一つのモデルでは, 荷電交換反応, すなわち, 太陽風の主成分である H^+ と金星周辺に分布する O が, 電子のやりとりを行って, 中性の H と O^+ イオンが生成される過程のみを与えて, 両者の結果を比較した. すると, 図3に示すように, 荷電交換反応を仮定したモデルでは, 観測結果と同じ, 太陽風電場の方向にバウショックが

膨らむ構造が見いだされた. 原論文の中では, 荷電交換反応に伴って発生する電流が磁気バリアー (電離圏上部に存在する磁気圧の高い領域) を発達させ, 電場方向の半球のパウショックフロントを惑星から遠ざけるためであると説明されている. 磁気バリアーは PVO 観測でも見つかっている構造で, 今後のさらなる研究成果が期待される.

3. 金星イオノポーズ

次に, イオノポーズに対するイオンの有限ラーマ半径効果について説明しよう. 図4に示すデータは, PVO で得られたイオノポーズ高度を太陽天頂角に関してプロットしたものである [4]. 4種類の図はそれぞれ異なる方法で求めた高度プロファイルであり, 各図において, 太陽風電場の向いた半球における高度プロファイルとその反対側の半球におけるプロファイルが示されている. 図からわかるように, いずれの方法によっても, 太陽風電場と逆方向の半球において, イオノポーズの高度の高いこと, すなわち, その半球において電離圏が膨らんでいることがわかる. バウショックの膨張する方向と逆の点が実に興味深い. この原因についてこれまで解明が進んでいなかったが, 最近

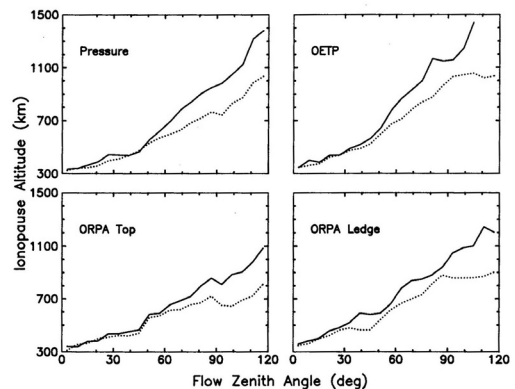


図4: 金星イオノポーズの高度を太陽天頂角の関数としてプロットしたもの. 各図において, 点線と実線は太陽風電場の向きおよびそれと反対の半球におけるプロファイル. 4つの図はそれぞれ異なる方法で求めたものであるが, 傾向はすべての場合で一致する. Phillips et al. [1988]より.

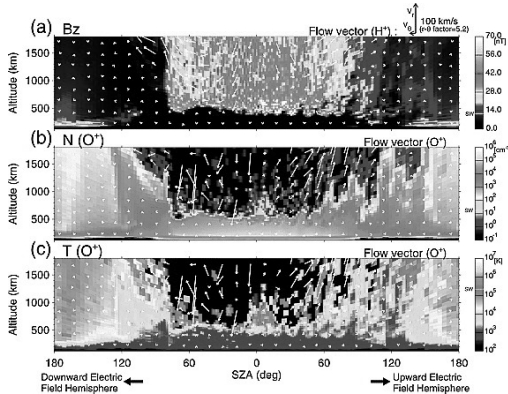


図5: 太陽天頂角と高度に関する平面における各種パラメータの分布. Terada et al. [2002]より.

Terada et al. [5]のハイブリッドシミュレーション計算によって、その現象が再現されたので、次にその研究を紹介する。

彼らの計算結果を図5に示す。横軸は太陽天頂角で、縦軸に各種パラメータの高度分布が示してある。さらに、イオンの流速ベクトルも重ねて示されている。上から2番目の O^+ イオンの密度の図を見ると、右側の半球では、その反対の半球よりも、イオノポーズ周辺に大きく波打った構造が発達しているのがわかる。これは、既に述べたように、太陽風に由来するマグネトシースの速い流れとほぼ静止した電離圏プラズマの間の速度シアによって、ケルビン・ヘルムホルツ不安定が励起されているためである。面白いのは、この不安定の成長・発達にもイオンの有限ラーマ半径効果が作用している点である。

話を少しもとに戻して、イオノポーズの高度に関して説明しよう。再び、図5の一番上にある磁場強度の高度分布に注目していただきたい。白黒の濃淡の変化の著しい、高度500 km付近がイオノポーズであるが、その平均的な高度は左側の領域、すなわち、太陽風電場の向きと逆側の半球で、その反対半球よりも高くなっていて、観測結果と一致している。このイオノポーズ高度に関する非対称性の原因は、イオノポーズより上部で生成された O^+ が太陽風電場で加速され、ピックアップされる際に、電場と逆方向のマグネトシース内

の圧力が下がり、それに起因してイオノポーズが上昇することによるものと解釈されている。

これら一連の現象を研究するためにはプラズマの3次元速度分布関数の計測が物理過程の手がかりを得る上で大変有効である。例えば、太陽風電場によってピックアップされるイオンは、サイクロトロン運動に伴って、3次元速度空間で、リング状もしくは、波動によって散乱されたシェル（球殻）状の構造を呈するので、容易に、局在化した塊として存在する太陽風成分と分離できる。また、ケルビン・ヘルムホルツ不安定によって生成される渦の中では、太陽風プラズマと金星電離圏のプラズマが混合するが、速度空間における両者の構造は、物理過程を理解する上で重要な手がかりを与えてくれる。金星電離層圏起源のイオンは、温度が低く、主として磁力線に沿って惑星間空間に流れ出してゆくことが予想されるが、場合によっては、地球でよく見られるような、電離圏高度で磁力線に対して直角方向に加熱され、その後、磁気ミラー効果によって上昇してゆくコニックスと呼ばれる成分も、発見することができるかも知れない。そのようなイオンの速度分布関数が金星でも存在するか興味深い。金星の大気散逸を地球における大気散逸と比較する上で重要なポイントである。

さて、さらに、個々の例を見ると、図6のラングミュアプローブによるプラズマ密度計測と磁場計測との結

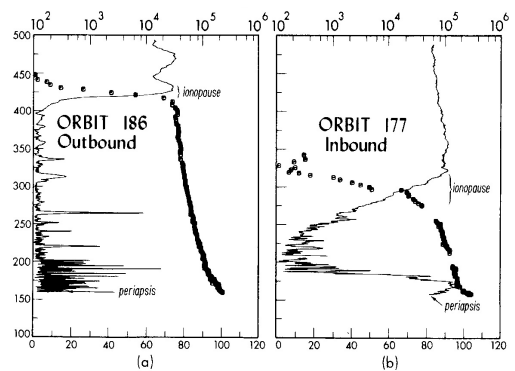


図6: Pioneer Venus Orbiter (PVO) による金星電離圏観測例。プラズマ密度ならびに磁場観測データを同時に示している。Elphic et al. [1981]より。

果の対比にあるように、電離圏の構造について太陽活動や太陽風パラメータとの関係を示す重要な情報が得られている。この影響は具体的にはイオノポーズ位置と太陽天頂角との関係に見られる。天頂角が大きな領域におけるイオノポーズ位置は大きな分散を持つが [6, 7]、この分散の理由の一つとして、ケルビン・ヘルムホルツ不安定による電離圏構造の大きな波打ち現象が考えられる。これらの現象の物理的特性を調べるためには、詳細なイオンの速度分布関数を計測することが不可欠である。また、直接観測によって軌道に沿った変化をとらえるだけでなく、プラズマサウンダーや極端紫外線による O^+ イオン撮像などによる遠隔観測の方法が、次世代の金星プラズマ研究を進展させる上で極めて重要である。

さらに、金星の夜側電離圏には、ホールと呼ばれるプラズマ密度が極端に減少する領域が存在することが見出されている。このホール構造についても衛星軌道に沿う直接観測からその実体を把握するだけでなく、その3次元的な構造を新たな観測手段を用いて究明することが重要な課題である。

PVO 観測結果において他方の観点から指摘されるべき問題点は、プラズマ波動現象に関する情報がないことである。イオノポーズ生成の物理において、太陽風と金星電離圏プラズマとの境界に発生すると考えられるプラズマ波動の観測は、たとえば電離圏構造の数値シミュレーションの実施に際して必要な仮定である粘性項の妥当性や、その根源となるマイクロプロセスを評価する上でも重要な問題である。PVO で観測されたプラズマ波動は100Hz, 750Hz, 7.35kHz 及び30kHz の4チャンネルにおける強度データのみであるが、Strangeway and Russell [8] によれば、イオノポーズ近傍の領域においてこれらの周波数帯におけるプラズマ波動の発生が報告されている。しかし、これらの極端に限られたデータのみで Langmuir 波、Whistler 波、電磁波のスペクトルやその強度分布などにおいて金星近傍のプラズマ波動現象を論ずるのは困難であり、惑星電離圏・磁気圏近傍のプラズマ密度、温度、磁場強

度、低エネルギー粒子分布の変化に呼応した多様なプラズマ波動現象の実体を把握する今日の惑星探査機概念からすれば金星電離圏内のプラズマ波動やイオノポーズ付近の電場ゆらぎに関する詳細な探査は必須な事項としてあげられる。プラズマ波動観測に関連して、金星の大気の擾乱あるいは金星の火山活動によって発生している可能性が指摘されている雷を捉える試みも残された課題である。これまで PVO の観測データに対する雷放電の可能性の議論があった他、Galileo 探査機 (Gurnett et al., [9]) 並びに Cassini 探査機 (Gurnett et al., [10]) フライバイ時の観測データについても肯定的・否定的両面の結果が提出されており、結論を得るには長期間の金星周回軌道上での観測が必要とされている。雷放電による広帯域電磁波ノイズはプラズマ波動観測装置により捉えることが可能であり、存在が確認された場合、その発生域分布を得ることにより火山活動や大気の擾乱に関する重要な情報が得られるものと期待される。

4. 搭載観測器について

金星周辺のプラズマ環境を計測する衛星搭載装置について、筆者らの考えているプラズマ粒子計測器ならびにプラズマサウンダー装置に関して、次に簡潔に説明する。

イオンを計測する機器としては、3軸制御の非スピン衛星であることを前提とすると、図7に示すような静電デフレクターを粒子入射部に設けたトップハット型の静電分析方式が有効である。太陽風と同時に金星の大気を起源とする O^+ イオンも種類を判別しながら観測できるよう、質量分析機能を備えたものが必要である。計測エネルギーは、PVO で詳細な計測を行わなかった 1 eV から 40 keV の高温プラズマに設定し、エネルギー分析部にはトロイダル型の電極を置く。その後段に、マグネット方式による質量分析部を設けて計測する構成をとる。アノード部分に位置検出機能を持たせ、現在、 H^+ 、 He^{++} 、 O^+ のイオンを弁別して計

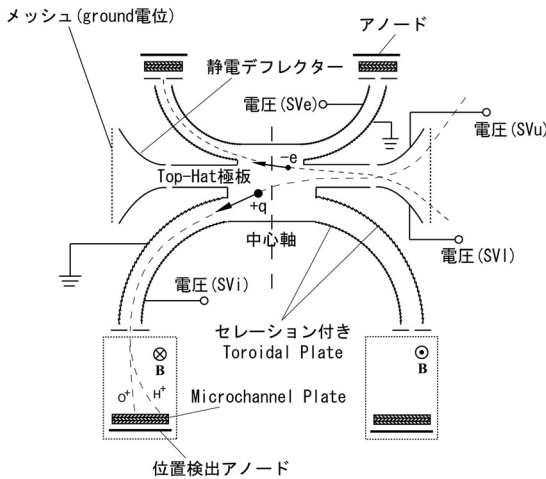


図7: プラズマ粒子計測器構造の模式図

測することを考えている。

電子計測器としてはイオンと同様に、トップハット型の静電分析方式を用いる。粒子の入口口にあたるデフレクターの部分はイオン計測器と共通化して用い、トロイダル電極でエネルギー分析された電子は、マイクロチャンネルプレート (MCP) によって電荷増幅され、アノードで検出されてカウントされる。位置検出を行って、電子の到来方向を求める。

プラズマサウンダー(Ono et al., [11])による金星電離圏の遠隔探査機能は図8に示すように、探査機から発射される周波数(ω)の電磁波パルスが電離圏トップサイドにて反射して帰って来るエコーの遅延時間(t)が、伝搬経路に沿う金星電離圏プラズマ密度プロファイル $N(h)$ を用いて、

$$\tau(\omega) = 2 \int_{z_s}^{z_R} \frac{1}{V_g} dz = \frac{2h}{c} + \frac{2K}{c\omega^2} \int_{z_s}^{z_R} N(z) dz$$

の様に分られることから、逆に遅延時間の周波数関係を用いて上部電離圏プラズマ密度プロファイルを得るものである。従ってプラズマサウンダー観測は金星電離圏トップサイドのプラズマ密度構造の詳細な探査を可能とする。金星におけるプラズマ密度のレンジ $10^2 - 10^6/cc$ の多くをカバーするため、衛星システム上問題がない範囲で可能な限り長いアンテナシステムを用意

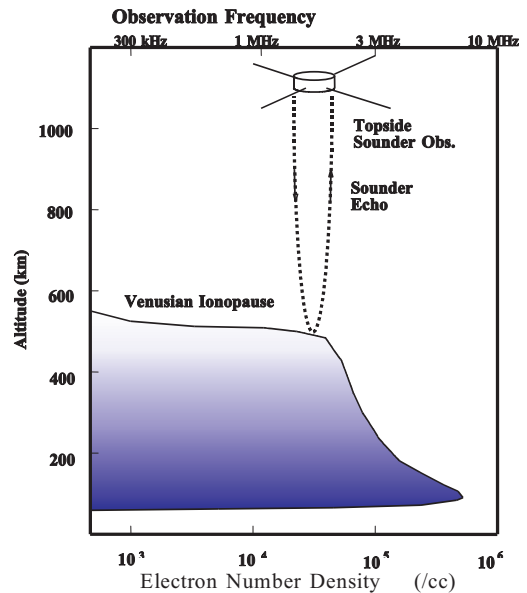


図8: 金星プラズマサウンダー観測の概念図

することになる。通常、プラズマサウンダーの周波数掃引に要する時間は約30秒であり、この間に衛星は最大200km程度移動するためこれがノミナルな空間分解能を決定するが、これまでのPVO衛星観測に比しては飛躍的に高い空間分解能で電離圏構造のデータが得られることとなる。さらに高時間分解能の電離圏観測データを得る場合には、Planet-B ミッションにて開発された高度計観測モード(Oya and Ono [12])を用意する。高度計観測では約1秒程度の高時間分解能で衛星直下の電離圏全電子数の観測が可能となり、金星電離圏のダイナミクスに関する興味深い事実が明らかにされるものと期待される。この高度計観測ではさらに金星固体の観測として表面の地形ならびに表面物質の誘電率に関する情報を得ることが可能であり、プラズマサウンダーの機能をフルに用いた金星の探査が実施できるものと期待される。Planet-C などの3軸制御衛星で問題となるのはアンテナモーメントのため衛星姿勢への外乱が大きくなる点であるが、この点については、詳細な検討を進め、先端長8mのCFRP製ロッドアンテナの機械性能では光学観測からの姿勢の

要求条件を十分満足できる事が示されている。Planet-Cの現状では質量資源の問題から全ての目的をカバーすることのできる機器構成は不可能な状態であるが、今後のミッション形態の変更などによってこれらが実現可能となることが期待されている。

5. まとめ

以上のように、金星の電離大気は太陽風と直接相互作用を行って、パウショック、イオノポーズ、ホールなど特徴的な領域を形成している。パウショック、イオノポーズの構造を決定する上では、イオンの有限ラーマ半径効果が重要な役割を果たしていることを述べた。その詳細を調べる上で、高温プラズマの直接計測が重要であり、さらに、プラズマサウンダーによる遠隔探査はこれらの領域やホールの構造を研究する上で極めて有効な手段であることを説明した。また、同時に観測結果を理解する上で、コンピューターシミュレーションによる理論研究が有力な手段を提供することをパウショックとイオノポーズの太陽風電場の向きに対する非対称性という観点から紹介した。Planet-Cを含む今後の金星探査によって非磁化惑星の代表である金星周辺のプラズマ環境やその素過程の理解が進み、大気進化を議論する上で重要な散逸過程について重要な手がかりが得られることが期待される。

謝辞

本稿の作成にあたり、スウェーデン宇宙物理学研究所 (IRF) の Stas Barabash 教授、山内正敏博士、日本学術振興会特別研究員の二穴喜文博士、さらに、京都大学大学院生の下田忠宏氏には有益な議論と情報提供をいただきました。ここに謹んで感謝いたします。

参考文献

- [1] Alexander C.J., Luhmann J.G. and Russell C.T., 1986, *Geophys. Res. Lett.*, 13, 917.
- [2] Moore K.R., Thomas V.A. and McComas D.J., 1991, *J. Geophys. Res.*, 96, 7779.
- [3] Shimazu H., 2001, *J. Geophys. Res.*, 106, 18751.
- [4] Phillips J.L., Luhmann J.G., Knudsen W.C. et. al., 1988, *J. Geophys. Res.*, 93, 3927.
- [5] Terada N., Machida S. and Shinagawa H., 2002, *J. Geophys. Res.*, 107, Art No. 1471.
- [6] Brace L.H., Theis R.F., Hoegy W.R. et. al., 1980, *J. Geophys. Res.*, 85, 7663.
- [7] Elphic R.C., Russell C.T., Luhmann J.G., Scarf F.L. and Brace L.H., 1981, *J. Geophys. Res.*, 86, 11430.
- [8] Strangeway R.J. and Russell C.T., 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 17313.
- [9] Gurnett D.A., Kurth W.S., Roux A., Gendrin R., Kennel C.F. and Bolton S.J., 1991, *Science*, 253, 1522.
- [10] Gurnett D.A., Zarka P., Manning R., Kurth W.S., Hospodarsky G.B., Averkamp T.F., Kaiser M.L. and Farrell W.M., 2001, *Nature*, 409, 313.
- [11] Ono T., Oya H., Morioka A., Kumamoto A., Kobayashi K., Obara T. and Nakagawa T., 1998, *Earth Planets Space*, 50, 213.
- [12] Oya H., and Ono T., 1998, *Earth Planets Space*, 50, 229.