

特集「金星研究の新展開(2)」

プラズマと大気の散逸

寺田 直樹¹, 品川 裕之¹, 阿部 琢美²

1. 金星大気の散逸とプラズマ過程

惑星大気の散逸過程は多岐にわたり面白い。そこでは大気の力学・構造が大気散逸を規定するのみならず、地殻や海水への吸収、加えて光化学過程やプラズマの過程も散逸に寄与する。また、その散逸過程は各々の惑星で異なる重要性を持ち、長期にわたる散逸の差異が惑星に固有の大気環境をもたらす可能性がある。現在の金星大気は、地球の90倍の表面大気圧を持ち、組成の96%を二酸化炭素が占め、D/H比は地球と2桁の差が見られる。惑星質量、惑星半径、太陽からの距離ともに地球と似通った金星の大気環境が何故このように地球と全く異なる姿となったのであろうか。地球の双子惑星と呼ばれる金星の大気散逸過程およびその長期的変遷を調べることは、二つの惑星が何故異なる運命を辿ったのかという疑問に対する答えを導くためにも意義深い。

金星の大気進化は大まかには、太陽系形成後10億年の期間とその後の35億年の期間に分けることができる[1]。後期35億年の比較的安定な流出期においては、金星の中性大気は非熱的な散逸過程である解離再結合や電荷交換反応、後述するスパッタリング(たたき出し)などによる散逸を受けてきたと予想されている。熱的な散逸過程であるジーンズ散逸やハイドロダイナミック散逸も幾分寄与してきたであろう。しかしながら面白いことに、金星大気の散逸においては、これらの上層大気中での過程のみならず、より高高度の宇宙空間での過程が大気散逸に大きな役割を果たしている可能性が考えられるのである。この過程が中性大気中

で生じる過程ではなく、物質の第四の状態であるプラズマ中で生じる過程というから問題はますます面白い。例えば、外圏底に分布している低温の熱的中性粒子は自らの熱エネルギーで金星の重力圏から脱出することはできなくとも、太陽風と呼ばれる太陽から噴出する超高速のプラズマ(電離気体)流が誘導する散逸によって効率的に重力圏を脱することが知られている。

金星には固有磁場がほとんど存在していない(惑星表面で数ナノテスラ以下)ことが米国のPioneer Venus Orbiter(PVO)の観測により確認されている。この固有磁場の欠如により、金星における太陽風プラズマ流の影響は、地球におけるものと全く異なったものとなる。金星では、地球の「磁気圏」のように太陽からのプラズマ流に対して巨大な磁場の障害物は形成されず、太陽風が金星表面のごく近傍にまで直接到達する。そしてプラズマ過程による大きな太陽風誘導散逸の効果を引き起こすのである。

2. 金星電離圏の構造と熱圏との相互作用

金星超高層で生じるプラズマ過程は、金星大気の散逸やその長期的変遷を考える上で重要な要素である。

ここでは、金星超高層のプラズマ過程による大気の散逸について述べる前に、まず、金星上層の中性大気およびプラズマがどのような構造・ダイナミクスを持ち他領域とどのように結合しているのかを概観する。

金星の上層大気はPVOの10年以上にわたる観測によっ

1. 名古屋大学太陽地球環境研究所

2. 宇宙航空研究開発機構

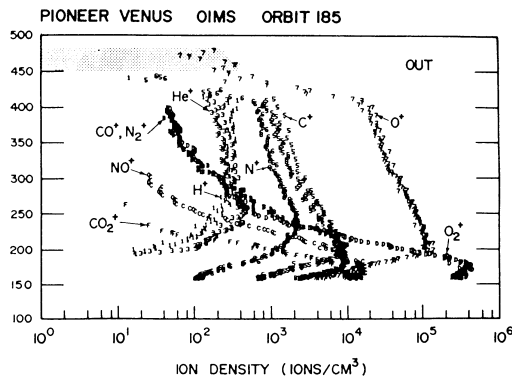
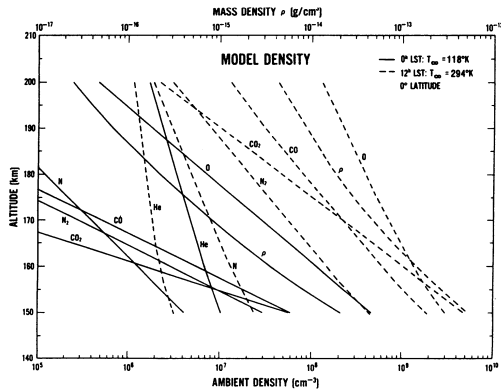


図1: PVO観測によって得られた熱圏中性大気[2]、及び電離圏プラズマ[3]の高度分布。

て調べられ、現在、地球に次いでその理解が進んでいる。図1は太陽活動度極大期における金星熱圏の中性大気および電離圏プラズマの密度の高度分布を示したものである。金星では高度50-70キロメートルに硫酸の厚い雲が形成されており、その遥か上空の高度120キロメートル以上には電離圏と呼ばれるプラズマが比較的高い密度を持つ領域が広がっている。金星電離圏のイオン組成は、下部電離圏で O_2^+ 、上部電離圏で O^+ が主成分である。その他、微量成分として、 NO^+ 、 CO_2^+ 、 CO^+ 、 N_2^+ 、 C^+ 、 N^+ 、 He^+ 、 H^+ などが存在する。図2の電離圏モデルの計算結果に見られるように、電離圏イオンは多くの場合は昼側領域の高度約240キロメートル以上で上昇速度を持ち、上昇した後に、昼夜間のプラズマ圧の差により生じる圧力勾配力や太陽

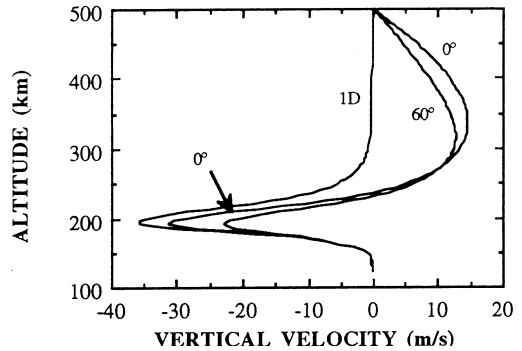


図2: 電離圏プラズマ鉛直速度の二次元 MHD モデル計算結果[4]。図中の 0° 、 60° は太陽天頂角0度、60度における鉛直速度、1Dは一次元モデルの計算結果を表す。二次元モデルでは夜側へのプラズマ供給の為に高度約240km以上で上向き対流を持つ。

風からの運動量輸送などによって夜向きに加速され、夜側領域に運ばれると考えられている(図3)。一方、高度約240キロメートル以下の領域は、主に光化学反応や中性大気との衝突に支配されており、水平対流は数10分の1以下しか持たず、一般にその運動は上部電離圏のプラズマダイナミクスにあまり影響を与えないと考えられている。

電離圏プラズマはその上端域(電離圏界面:イオノポーズ)で太陽風プラズマ流と相互作用するのみならず、下部では熱圏領域の中性大気の構造・ダイナミクスと密接に結合している。例えばPVOの観測によって、下層大気からの大気波動(潮汐波, 惑星波, 重力波)が熱圏大気に運動量やエネルギーを供給している可能性が示唆されているが、熱圏の変動は電離圏下部のプラズマの構造・ダイナミクスにも変動を及ぼし得

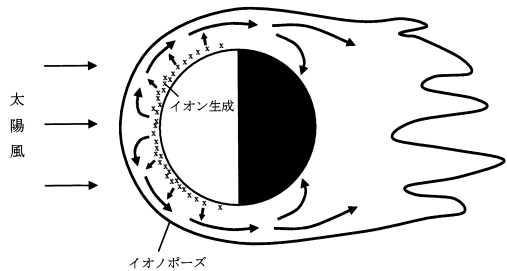


図3: 電離圏対流の模式図。

る。実際に、金星と類似したプラズマ環境を持つ火星では、Mariner 9の初期観測時に電離圏のピーク高度が他の期間と比較して20-30キロメートル高かったことが報告されている。これは、ダストストームの影響によって下層・中層大気が加熱され、火星大気全体が持ち上がった為ではないかと考えられている[5]。

3. 太陽風の影響による大気散逸

1章で述べたように、金星大気の散逸は太陽風の影響を大きく受ける。毎秒数百キロメートルもの超高速で惑星間空間を吹き流れる太陽風プラズマ流は、様々な過程によって金星大気を剥ぎ取っていく。

太陽風による金星大気の散逸過程は大きく二つに分類することができる。一つはイオノポーズより「上空」で起きる過程、もう一つはイオノポーズの「その場」で起きる過程である。イオノポーズとは電離圏の上端境界である。そこでは電離圏プラズマ密度が急激に減少し、太陽風プラズマ流の動圧と電離圏圧力がバランスする、金星電離圏の最も特徴的な構造である。

イオノポーズより「上空」で起きる大気散逸過程の代表的なものとしては、イオンピックアップ過程が挙げられる。太陽光による光電離、太陽風陽子との電荷交換反応、太陽風電子との衝突、によって電離された金星外圏コロナの中性粒子は、コロナの奥深くイオノポーズ直上まで侵入する太陽風中の電磁場によって捕捉（ピックアップ）され、惑星重力圏外に運び去られる。モデル計算の見積りによると、この過程によって流出するイオンは主に O^+ であり、金星全面からの総流出量は毎秒 10^{25} 乗個にも達する[6]。さらに、ピックアップ過程によって太陽風の高速度流からエネルギーを得たイオンの一部はラーモア運動により金星大気に再突入し、金星中性大気粒子を大量にはじき出すと考えられている。スパッタリングと呼ばれるこの過程による流出粒子の数はピックアップ過程の数十倍にも達することが指摘されている[7]。中性酸素原子の他の過程による流出量が毎秒 10^{25} 乗個程度であることが

らも、プラズマ過程による大気散逸の重要性が理解できよう。

次にイオノポーズ「その場」での散逸過程をみる。イオノポーズは、太陽風プラズマ流と金星電離圏プラズマが直接相互作用をする境界領域であることから、そこでは様々な過程による二領域プラズマ間の物質輸送や運動量輸送がなされる。電離圏上部領域のプラズマの一部はこの様々な輸送過程を通して太陽風の高速度流から運動量を得て、金星重力圏から脱出する。イオノポーズ「その場」での散逸過程には、イオノポーズの速度シアア中で生じる不安定性（ケルビン-ヘルムホルツ不安定性など）に伴う粘性運動量輸送、不安定性に伴うプラズマの拡散輸送、プラズマの塊としての輸送などが考えられる。まず粘性運動量輸送によって流出する電離圏プラズマについて考えよう。粘性によって太陽風から運動量を得た電離圏上部領域のプラズマの大部分は、電離圏尾部領域から宇宙空間に流出することがモデル計算によって予想されている[8]。尾部領域にはホールと呼ばれる大規模なプラズマ密度減少・磁場強度増大領域が存在し、ホールからも電離圏プラズマが流出していると考えられているが、PVOの観測によると尾部領域からの流出量は O^+ が毎秒 5×10^{25} 乗個程度[9]であると推測されている。不安定性に伴う拡散輸送による流出量はモデル計算によるとこれより一桁ほど小さく、毎秒 3×10^{24} 乗個程度[8]と予想されている。プラズマの塊としての輸送には、パッチやプラズマ雲の放出、テイルレイなどがある。プラズマの塊としての流出量の見積りは、不確定な要素が多々あるが、その値は大きなものである可能性が指摘されている。例えば図4に見られるプラズマ雲の放出は最大で毎秒 7×10^{26} 乗個にも達するというPVO観測に基づいた推定がBraceら[10]によってなされている。

ここで、プラズマ過程による金星大気流出量の上限值について簡単な考察を行ってみよう。上では様々な大気流出率の推定値を紹介したが、プラズマ過程が担う大気流出量の最大値はどの程度まで達し得るのであ

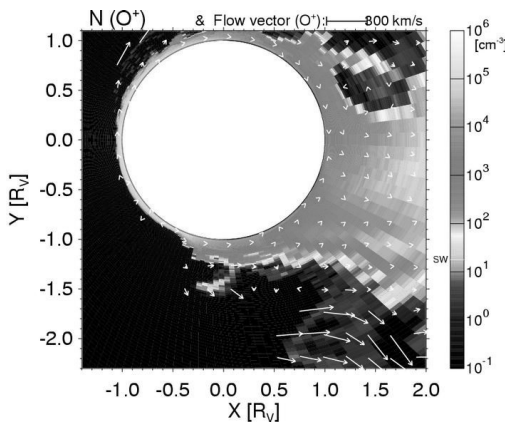


図4: 金星電離圏と太陽風の相互作用の二次元ハイブリッドモデル計算結果. 図の下側にプラズマ雲の放出が見られる.

るうか? イオノポーズでの過程ではなく, 他の過程がボトルネックとなって流出量の上限值が定められることは無いのであろうか? そのような観点に立ってプラズマ過程による大気流出量の上限值の考察を行ってみる. 流出量の上限を定めるものの一つの可能性として, 電離圏上部領域 (イオノポーズ近傍域) に供給可能なプラズマの量の上限值が考えられる. 前述したように, 金星電離圏の下部領域は光化学反応や中性大気との衝突に支配されており, 電離圏上部領域へのプラズマ供給にほとんど寄与しない. 拡散平衡の下端である高度約240キロメートルよりも上部領域で電離・生成されるプラズマのみがイオノポーズからの流出に寄与し得る. PVO 観測データに基づいた大気の電離率モデルを用いて高度約240キロメートルよりも上部領域で生成されるプラズマの量を見積ると, 太陽活動極大期で毎秒 2×10^{26} 乗程度となる. すなわちイオノポーズへのプラズマ供給量の上限及び (スパッタリングを除いた) プラズマ過程による大気流出量の上限は毎秒およそ 2×10^{26} 乗個止まりであることがわかる. ここで求めた毎秒 2×10^{26} 乗個という上限値 (及び様々な著者によって求められた大気流出量の推定値) の見積もりには, 幾つかの不確定な要素が存在するので, この上限値の数値自体を用いた議論には注意が必

要である. しかし上記考察は, プラズマ過程による流出のボトルネックが電離圏の下部領域に在る可能性を示唆し, 大気流出に於ける熱圏 - 電離圏カップリングの重要性を示唆するものであるという点で興味深い. すなわち, 前節で述べた下層からの大気波動の加熱などによって生じる拡散平衡の下端位置の変化やその上部でのプラズマ生成量の変化が, プラズマ過程による大気流出の上限値を規定している可能性が考えられる. また, 電離大気の流出とは異なるが, 熱圏・電離圏下部の構造は, スパッタリングや解離再結合などによる中性粒子の流出量を変更し散逸量を増加させ得ることからもその重要性が理解できる.

電離圏における磁場の存在も, プラズマ過程による大気流出の上限値に影響を与え得るので興味深い. 金星は惑星固有の磁場をほとんど持たない惑星であるが, 太陽風流の動圧が大きいの条件下では, 惑星間空間の磁場が電離圏内に侵入し, 電離圏の昼側領域に大規模な磁場構造を形成することが知られている[11]. この磁場構造は高度160キロメートル付近に強度ピークを持ち, 下部電離圏のダイナミクスや密度、温度に大きな影響を及ぼす. また磁力線が下部電離圏と太陽風領域を直接繋ぐので, 電離圏プラズマの流出量に変化する可能性も考えられる. この大規模磁場構造の他にも, 太陽風の動圧が小さいときに出現する磁気フラックスロープと呼ばれる現象も興味深い. 磁気フラックスロープはPVOによって電離圏内で無数に観測されたが, その生成過程のみならず生成領域すら未だ解明されていない謎に満ちた現象である. 電離圏内をぐねぐねと巻き上がる磁気フラックスロープは, 図5にあるように電離圏の下部領域と上部領域を磁力線で複雑につながっていると考えられる. この下部電離圏と上部電離圏を上下につなぐ磁力線の効果によって, 高度240キロメートル以下の領域から電離圏の上部領域へ供給されるプラズマの量が変化する可能性があり, プラズマ過程による大気散逸量の上限值が上昇する可能性があるかもしれない. 磁場の効果はこの他にも, 夜側のホール領域からの電離圏プラズマの流出や, ター

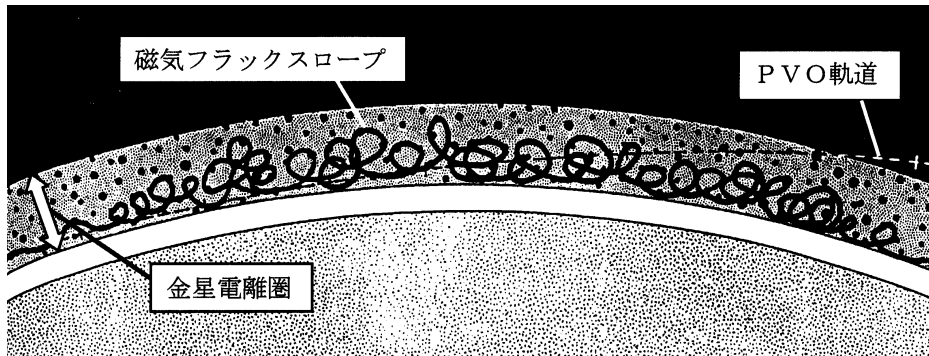


図5: 磁気フラックスロープの模式図 [12].

ミネーター付近でのドレープ磁場による電離圏プラズマの加速を引き起こすなど、流出過程に果たす役割は大きいと考えられる。

4. 金星大気の変遷

およそ45億年前に形成された金星の原始大気は主に水素が豊富であったと考えられている。太陽系形成時の太陽活動は活発で、太陽放射は現在と比べ極めて激しかった。その為に大気の熱的散逸過程は効果的に働き、その散逸量は水素が毎秒 1.5×10^{33} 乗個、酸素が毎秒 3×10^{32} 乗個という極めて大きな値であったと推測されている[13]。現在の金星には海洋は存在せず、大気中の水蒸気も僅かに含まれる程度である。大気中のD/H比からは金星にもかかわらずは大量の水が存在していたことが示唆されているが、Chassefiereは金星形成初期の1000万年の間に金星大気中の大部分の水分子が宇宙空間に散逸してしまったと予想している。

大気散逸量を決定する重要な要因となる太陽放射量や太陽風パラメータは、惑星大気進化の時間スケールで大きく変化してきたと予想されている。この外部要因の変化によって、比較的安定な後期の35億年の流出期においても、金星大気散逸量の変遷は顕著なものであったと考えられる。例えば、今から35億年前においては、極端紫外域の太陽放射フラックスは約7倍[14]、太陽風速度は約2倍[15]、太陽風密度は20倍程度[16]であっ

たと推測されており、金星の外圏粒子密度は現在より一桁程度多かったと考えられる。このような環境下では、金星外圏粒子の電離には、現在においても最も重要な外圏粒子電離過程である太陽風電子の衝突電離が支配的な役割を果たしていたと考えられ、現在のおよそ200倍以上もの量の外圏酸素がイオン化され太陽風にピックアップされていたと考えられる。太陽放射フラックスが時間の -1.2 乗に依存して変化するとし[16]、ピックアップによって散逸したイオンの量を35億年にわたって積分すると、この期間に金星から流出した酸素の総量はおよそ1ペタトン（1ペタ=1000兆）にも上る。この流出酸素量は水の体積に換算すると全地球表面を2メートルの高さで覆う量に相当する。これは金星大気環境の変遷に重大な影響を及ぼすのに十分な量である。スパッタリングの効果や、（過去の値の見積りは困難であるが）イオノポーズでのプラズマ塊の放出、また、解離再結合による中性大気の新熱的散逸過程などを考慮すると値はさらに大きくなると考えられる。

ここで、最後にではあるが、読者の方々に本稿で紹介した散逸量の数値や結論に対しての注意を促しておきたい。本稿で紹介した散逸量の数値は大部分がPVO観測に基づいたものであるが、PVO観測では散逸量の推定に必要な速度場に関する情報がほとんど得られておらず、散逸量の導出には不確定な要素や大胆な仮定が数多く用いられている。従ってその数値は本

来量的な議論に耐えうるものではない。大気散逸量の観測を通して各散逸過程・粒子種についての外部からのエネルギー入力と大気粒子総流出量の関係を正確に把握することが、長期の大気散逸量を推定する為に必要とされる。金星大気の進化のさらなる理解、ひいては地球の大気環境の過去・現在・未来の理解を深める為にも、金星大気散逸現象の観測的実証と散逸量の正確な推定を可能とする探査の実施が望まれる。

5. 参考文献

- [1] Luhmann, J. G. and Bauer, S. J., 1992: AGU monograph, 66, 417.
- [2] Niemann, H. B. et al., 1980: J. Geophys. Res., 85, 7817.
- [3] Taylor, H. A. et al., 1980: J. Geophys. Res., 85, 7765.
- [4] Shinagawa, H., 1996: J. Geophys. Res., 101, 26911.
- [5] Zhang, M. H. G. et al., 1990: J. Geophys. Res., 95, 17095.
- [6] Zhang, M. H. G. et al., 1993: J. Geophys. Res., 98, 3311.
- [7] Luhmann, J. G. and Kozyra, J. U., 1991: J. Geophys. Res., 96, 5457.
- [8] Terada, N. et al., 2002: J. Geophys. Res., 107, 1471.
- [9] Brace, L. H. et al., 1982: Planet. Space Sci., 30, 29.
- [10] Brace, L. H. et al., 1987: J. Geophys. Res., 92, 15.
- [11] Shinagawa, H. et al., 1987: J. Geophys. Res., 92, 7317.
- [12] Luhmann, J. G. and Cravens, T. E., 1991: Space Sci. Rev., 55, 201.
- [13] Chassefiere, E., 1997: Icarus, 126, 229.
- [14] Zahnle, K. J. and Walker, J. C. G., 1982: Rev. Geophys., 20, 280.
- [15] Newkirk, Jr., G., 1980: Geochim. Cosmochim. Acta Suppl., 13, 293.
- [16] Lammer, H. et al., 2003: Icarus, in press.