

太陽風と月

等 松 隆 夫*

はじめに

アポロ 11 号の月面での観測作業の一つに太陽風の測定があったことはまだ耳新しいことである。筆者はその測定方法については新聞・テレビの報道以上の知識を有しないのであるが、推測するに脱ガスなど特殊処理をほどこしたアルミはくのイオン吸着を利用して太陽風の荷電(イオン)捕集を行なったものと思われる。太陽風の主成分が速さ 300~700 km/sec, 密度 3~20 個/cm³ 程度(いずれも太陽から 1 A.U. 近傍)の陽子であることが知られているが、アポロ 11 号での目的は主としてエネルギーの高い重粒子をねらったものとおもわれる。くわしい観測結果はいまだ知るべくもないが、クリプトン(質量数 84)などの稀ガス元素などが検出されている。

ここではアポロ号の成果とははなれて、太陽風と月という題目でどのような科学観測がなされ、どのような興味で研究がなされているかを簡単に紹介したいとおもう。限られた紙面であるので、太陽風そのものの性質についてくわしく述べることはできないが、ここでは太陽コロナから吹き出している超音速の完全電離した気体(プラズマ)とだけいっていただければよい。そしてその主成分は陽子95パーセント、アルファ粒子5パーセント、そのほか痕跡のヘリウム一価イオン、酸素の高次イオン(O⁺⁵, O⁺⁶, O⁺⁷)などをふくんでいる。太陽風の温度(プロトンの不規則運動成分)は3~8×10⁴ Kである。また忘れてならないことは太陽磁場をひきちぎって吹き出しており、地球近傍で 0.0001 ガウス、すなわち、地球表面での磁場の約1万分の1の磁場を惑星間空間につくっている。プラズマ物理学でよく知られているように、磁束密度 B ガウスの完全電離プラズマは $p_m = B^2 / (8\pi)$ の磁気圧力を持ち、これは力学的には通常の気体の圧力 $p_g = NkT$ (ただし N は数密度、 k はボルツマン定数、 T は温度)と同じ役割をする。前述の条件を代入すれば、太陽風では $p_m \sim p_g \sim 10^{-10}$ dyne/cm² で磁気圧と気体圧が競合していることがわかる。太陽風の速さ、温度、磁場には相当の変動がある。

1. 月と太陽風の流れの変化

天体によって太陽風の流れがどのように影響をうける

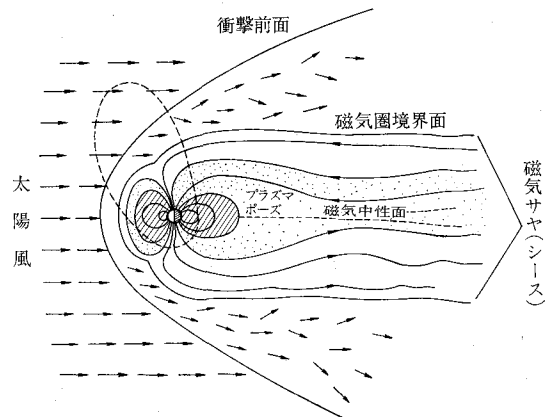
* 東京大学理学部, 地球物理研究施設

T. Tohmatsu: The Moon and the Solar Wind

かは、空中を超音速で飛ぶ弾丸のアナロジーがある程度あてはまり、衝撃波や膨脹波が形成されたりする。この場合、天体に磁場があるか、空気(電離層)があるかによって事情がちがってくる。また逆に天体近傍の太陽風プラズマの構造を調べて、その天体の電磁氣的構造やとりまいているプラズマの状態を知ることでもできるわけである。奇しくも、地球、金星および月付近の太陽風の構造について実測があり、おのおの異なった結果がみちびかれている。

(i) 地球の場合(第1図参照)

地球の場合には十分強い双極子形の磁場(地表で約0.5ガウス)と電離圏(電子密度 10⁴~10⁶/cm³)が存在するケースである。1962年頃からマリナー宇宙船や IMP (Inter Planetary Platform) 衛星シリーズによって磁場やプラズマの構造がかなりはっきりしてきた。まず地球半径の約 12.5 倍付近に衝撃波が立ち、太陽風は超音速から不連続的に音速以下のみだれた流れに移行する。また磁場は急激にとび増大する。そしてその内側には地球の双極子磁場が閉じ込められて磁気サヤ(magneto sheath)を形成する。磁気サヤの中の領域を磁気圏と呼んでいる。磁気圏はさらに3つの部分に分れ、斜線で示した部分はほぼ双極子磁場にちかく、この中のプラズマは磁場の中にすっきりとじ込められている。この領域をプラズマ圏(plasma sphere)という。点々をつけた部分は、太陽



第1図 太陽風と地球のプラズマ構造

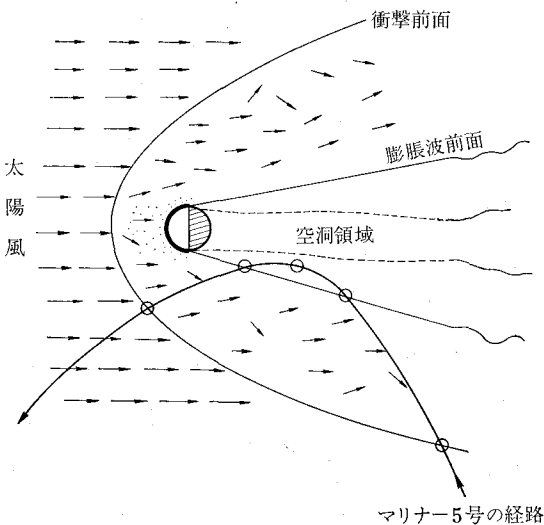
矢印はプラズマの流れ、細実線は磁力線を示す。点線は IMP の軌道であるが地球の公転によって軌道面は回転するので三次元的な観測ができる。

側では磁力線が閉じ、反対側では惑星間空間にむかって開いているので、この中のプラズマはある程度地球外へ流出することができるので、この領域を準捕そく領域 (quasi-trapped region) とよぶ、さらに外側の領域はつねに磁力線が開いており、プラズマはたえず惑星間空間にむかって流出している逃散領域である。これらの3領域の境界は地磁気緯度にしてそれぞれ 60° および 75° 付近に相当する。

地球の場合はかたい地磁気の壁によって太陽風は直接電離層や地表にぶつかるとはならない。ただし、太陽と反対側の磁気尾部から、磁気中性面を通じて間接的に流入する可能性はある。このような磁場、プラズマ構造に関連して種々の地球電磁氣的、超高層物理的現象がある。

(ii) 金星の場合 (第2図参照)

1967年10月19日マリナー5号は金星中心から約10,000 km を通過した。その結果、金星の磁場は地球の1000分の1以下であり非常に弱いことがわかった。またプラズマの構造としては第2図の如くであり、電気伝導度の高い電離領域の存在によって太陽風は大気中に侵入できず、したがって、地球の場合と同様に衝撃前面が形成されている。衝撃前面を通過した太陽風プラズマは金星電離層をかすめてふたたび超音速となり膨脹波を形成し、その中にはプラズマの少ない空洞をのこすことになる。膨脹波より内側の細かい構造については今後の実測にまたねばならない。

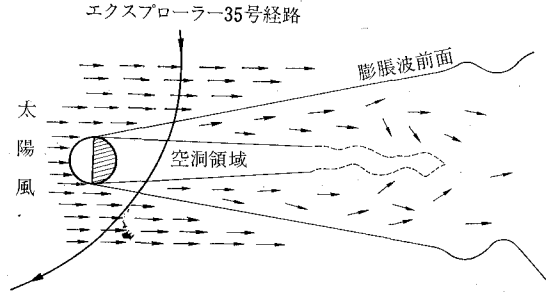


第2図 金星付近のプラズマ構造

電離領域の作用で衝撃前面はできるが、金星磁場はないので磁気サヤはできない。空洞部には太陽風の平均的な磁場がしみ通っているであろう。

(iii) 月の場合 (第3図参照)

さて問題の月の場合であるが、1967年7月に打上げら



第3図 月と太陽風の相互作用

磁場も大気も存在しない月では太陽風プラズマは月面に直接衝突しているであろう。そして金星よりははっきりした空洞部が観測されている。

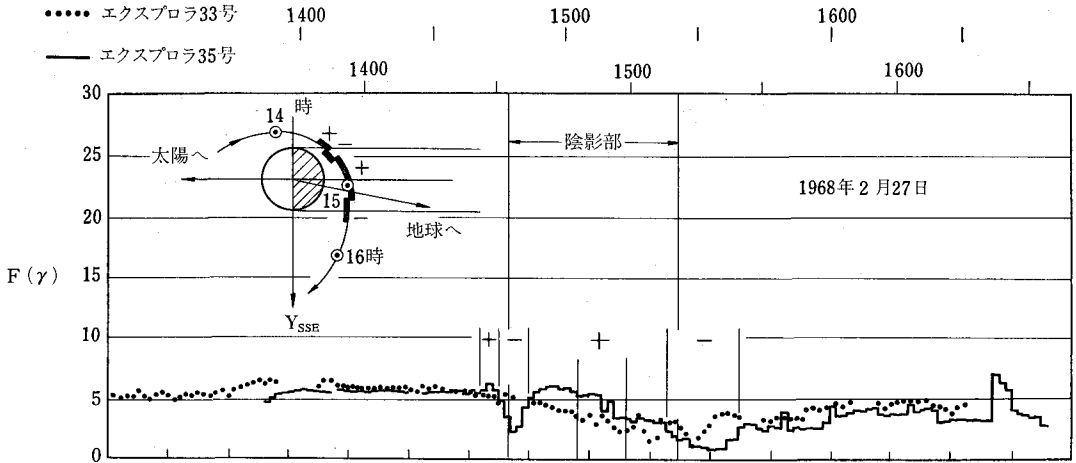
れた月の孫衛星エクスポローラー35号によってかなりはっきりした月周辺のプラズマの構造が発見されている。結果的には月による磁場変化は25パーセント以下で、したがって月磁場は事実上存在せず、これは電磁流体的に月は“死んでいる”ことを意味する。また大きな磁場変化のないことは、衝撃波前面が存在しないこと、すなわち、電気伝導度が高い電離層および月面が存在しないことを意味している。

月には太陽風をせき止める磁場も電離層も存在しないので太陽風は昼間側では月面を直接たたいているのであろう。このことは将来月面に恒久的な太陽風観測所をつくれる可能性をしめしている。そして月の太陽風の風下にはプラズマの無い空洞領域が形成されるであろう。定常状態では太陽風磁場は空洞領域に侵透するであろうから圧力のバランスからすると空洞の中の磁場は太陽風の中にくらべてある程度圧縮されているとおもわれる。太陽風中では $p_0 \approx p_m$ であるから、空洞中の磁束密度はその外側の太陽風の磁場の約 $\sqrt{2}$ 倍位までにはなりうることになる。また膨脹波の中では断熱膨脹の結果、ガスは稀薄になり磁束密度はむしろ低下する。第4図はエクスポローラー35号による磁場測定の一例であり、月周辺の各プラズマ領域を通過した際の磁場変動をよく示している。

2. 太陽風と月の内部構造

前節では定常的な太陽風を考え、太陽風磁場は十分時間をかけて、月の固体部分を通過して空洞内にしみ通ると仮定したわけである。太陽風磁場に変動があった場合はどうなるであろうか？ もし月が完全導電体であったならばその変動は永久に空洞内に侵透することはできない。

一般に半径 R 、導電率 σ 、透磁率 μ の球の磁場拡散

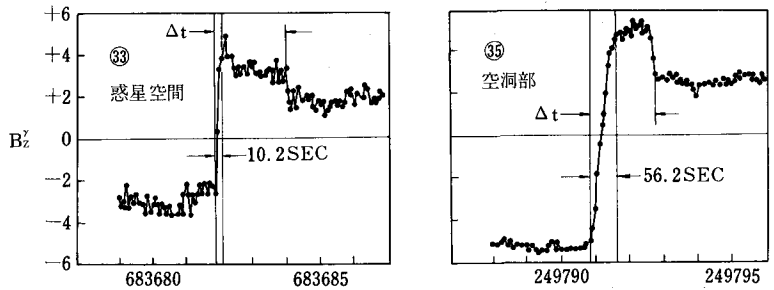


第4図 エクスプロラによる月の近傍の磁場構造

33号は月付近の惑星間空間に、35号は月の陰影部を通過していった。実線および点線はそれぞれ35号、33号で測定された磁場の強さ(ガンマ単位, $1\gamma=10^{-5}$ ガウス)をあらわしている。上の挿入図は35号の軌道と磁場の変化に対応する点を示している。33号で観測された磁場の変化は太陽風そのものの変化を示しているが35号ではそれに重なって月による変化がみられる。

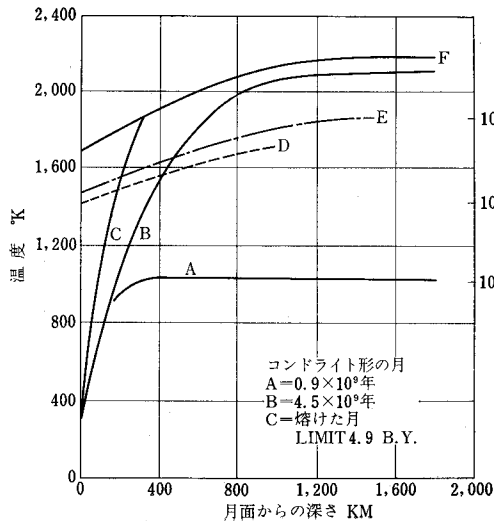
の時定数は $\tau = \mu\sigma R^2/\pi^2$ であることが知られている。このような性質を利用して、太陽風の磁場の急変化をしらべて月の導電率、あるいは月の内部組成を求める試みがエクスプロラ33号および35号の資料をもちいておこなわれた。すなわち35号が月の空洞内にあるときに別の33号が付近の惑星間空間での磁場変動を同時に観測して、その変動の立ち上り(下り)の相異から前述の関係式を利用して σ を求めるのである。第5図はそのような観測の一対であり、 τ として約56secが求まっている。これから σ を求めると $5 \times 10^{-5} \Omega/m$ となる。

もし月が月質学的に推定されているようにカンラン石類似の組成をもったコンドライトであるとすると、電気伝導率は温度によるから、内部の温度分布をいろいろなモデルで求めた場合 1000~2000°K となり、放射性物質による発熱と輻射損失の計算から温度



第5図 エクスプロラ33号、35号で見いだされた磁場急変動の比較

33号の変動は太陽風内の特有な構造(衝撃波)であり、それを空洞部にある35号で観測した場合、月の渦電流によって磁場拡散に有限の時間がかかると解釈される。



第6図 月の内部温度分布モデル

A, B, C は均一なコンドライト組成を仮定して、熱史的に放射性物質による加熱を考慮してきめたもの。右側のスケールはコンドライトとした場合の導電率を示す。Dはアルバイト、Fはダイオプサイトモデルである。

履歴を考えた場合、月の年齢として 10^9 年となり地球の年齢 5×10^9 年に比してかなり若く計算される。別の可能性としては、放射性物質の分離がおこって比較的地表付近に集ったと解釈することによって、その年齢はほぼ地球の年齢にまですることもできる。

このように太陽風と月の進化の問題はある場合は物理的な因果関係において、ある場合は電磁流体力学的な測定手段として興味あるものの一つである。今後月面資料の解析とあいまわっているいろいろと論議されることであろう。

アポロ計画と月の地震

水谷 仁*

1969年7月21日、人類はついに月に着陸した。長い人類の歴史の中で、宇宙時代の夜明けというべき瞬間であった。このアポロ11号の成功は世界中の人々の耳目を月へ引き寄せたが、これはまた科学者にとっても同じであった。月の科学、惑星の科学の新しい段階がこの時に始まったといって過言ではない。特に月面で採集された岩石については、新聞、ラジオ、テレビで広くその成果が注目されているが、その岩石にまさるとも劣らぬ重要な情報を送ってくるはずである地震計の活躍に対してはそれほどでもない。しかし月面に設置された地震計は過去10年間におよび地震学者の汗と努力の結晶であり、これによって月の歴史、内部の構造に関するいくつかの謎が解かれる日も近い。本稿では月面に設置された地震計からどのようなことが解ってくるか、ということを中心に解説を試みた。

1. アポロ地震計の性能

まずアポロ11号が持って行き、オールドリン宇宙飛行士によって設置された地震計の性能について簡単にのべておこう。

アポロ地震計は総重量 11.5 kg、体積 $2 \times 10^4 \text{ cm}^3$ で3成分の長周期地震計、1成分の短周期地震計の他に、月面のゆっくりした変動を記録する3成分の歪計と温度計より成っている。電源は太陽電池で、地震計の温度を一定に保つためのヒーターには少量のプルトニウム238を燃料として使っている。これで1年間は地球に記録を送信してくるはずになっている。第1表にアポロ地震計の機能をまとめておいた。これをみてわかるように、この地震計によって潮汐による月面の運動から、隕石の衝突による衝撃までを記録できる。

2. 月には地震はあるか？

月の地震と言う言葉は多少奇妙な感じがしないでもない。月震と称すべきかもしれない。英語では earthquakes (地震) に対して moonquakes (月震) という単語がもはや成立したようであるので、それに合わせ月震という言葉も作り得る。しかしここではひとまず月も地球も区別せず地震という言葉にしておく。さて表題の疑問は月には地震はないが、月震はあるといった洒落ではない。もし月が死んでしまった静かな天体ならば、地震などというものが存在するかどうかかわからないからである。しかし大多数の科学者は月面には相当数の地震があると考えている。

月の地震の主な原因として2つのものが考えられる。ひとつは地球の地震と同じく、地下の岩石の一部が何らかの原因で破壊することによって生じるものであり、他のひとつは、月面に隕石(隕鉄)が衝突する時に生じるものである。前者は内的原因によるもの、後者は外的原因によるものといえる。地球では厚い大気のため隕石の落下も月にくらべてわずかで、後者によるものは極めて少ない。

さて内的原因によるものと称する地震は究極的に内部に蓄えられた熱エネルギーが機械的エネルギーに変わる

第1表 アポロ地震計の性能

名前	機能	探知できる 最小の信号	周期
LPZ	長周期地震動の垂直成分	$0.3 \text{ m}\mu$	15秒
LPX	" 水平成分	$0.3 \text{ m}\mu$	15秒以下
LPY	" 水平成分	$0.3 \text{ m}\mu$	15秒以下
SPZ	短周期地震動の垂直成分	$0.1 \text{ m}\mu$	0.1秒
Z-FB	重力の変動	$8 \mu \text{ gal}$	∞
X-FB	月面の傾斜	$0.01''$	∞
Y-FB	月面の傾斜	$0.01''$	∞
TEMP	地震計の温度	0.02°C	

* 東京大学理学部地球物理学教室

H. Mizutani: Apollo Project and Moonquakes