

## 地球外気圏 (I)

松浦延夫\*

## 1. はじめに

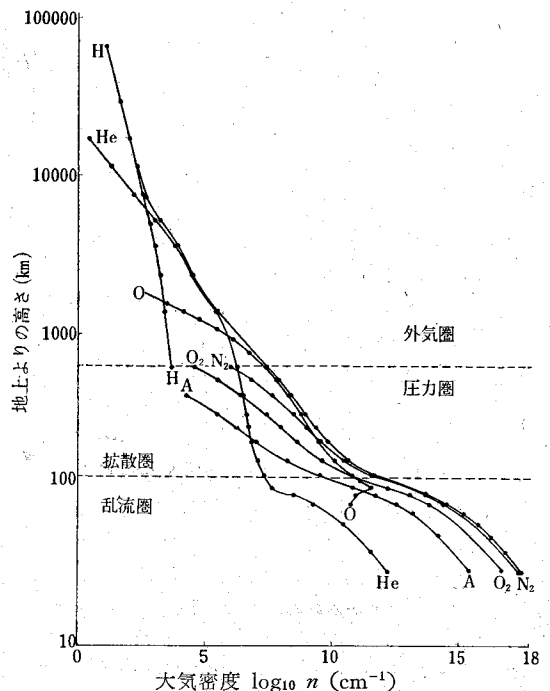
地球の外気圏は地球に属する物質および磁場が占める最も外側の領域であって、絶えず地球圏外からの影響を受けている。ここ数年来急速に進歩してきた宇宙空間物理の好適の対象となってきた。しかし地球外気圏に関するわれわれの知識はまだまだ貧弱であり、複雑多岐にわたる地球外気圏の物理的な状態およびそこに現われる諸現象を完全に理解するには将来の研究を待たねばならない。地球外気圏の状態は種々の様相を呈するので、現在の知識をすべて記述するには大に過ぎるので、本文ではその物理的背景を主体にして述べるつもりである。また地球外気圏内では種々の興味ある物理現象があるが、それについても差し控えない。

地球外気圏の状態を、中性大気を主とした**大気圏**、電離気体を主とした**電離圏**、地球磁場を主とした**磁気圏**、高エネルギー粒子を主とした**放射線帯**の四つに分けて述べる。

## 2. 大気圏

地球の上層大気は部分的に電離された希薄な気体で占められている。大気の密度は地球重力の影響を受けて沿直方向に著しく変化しており、地表で最も大きく、高さが増すにつれて急激に減少している。第1図は1965年の国際標準大気から引用した大気密度で120 km から600 km までは Model 6, 12 h L. T. の値が用いられている。また600 km 以上は Öpik と Singer (1961)<sup>1)</sup> の理論に基づいた大気モデルである。高度が比較的低くて大気密度の大きいところ、つまり粒子間の衝突が頻繁で粒子の平均自由行程が大気の特徴的な長さ(例えば標準大気高)に比べて短かいところでは、大気は静水圧平衡の状態にあり、この領域を**圧力圏**と呼んでいる。圧力圏では大気圧  $p$  は高さ  $h$  と  $dp/p = -dh/H$  の関係で結ばれる。ここで  $H = kT/\bar{m}g$  ( $k$ : ボルツマン定数,  $T$ : 大気温度,  $\bar{m}$ : 平均分子量,  $g$ : 地球重力加速度) で標準大気高と呼ばれ一般に高さの函数である。平均分子量  $\bar{m}$  は第2図に示されている様に地表から高度90 km 付近までは略一定であるが、それ以上では  $O_2$  が解離して  $O$  がつくられると同時に各種の粒子が夫々の拡散平衡を保つようになるために、大気の組成は高さと共に変わり、高度が増すにつれて分子量(原子量)の小さい成分が次第に卓越してくる。

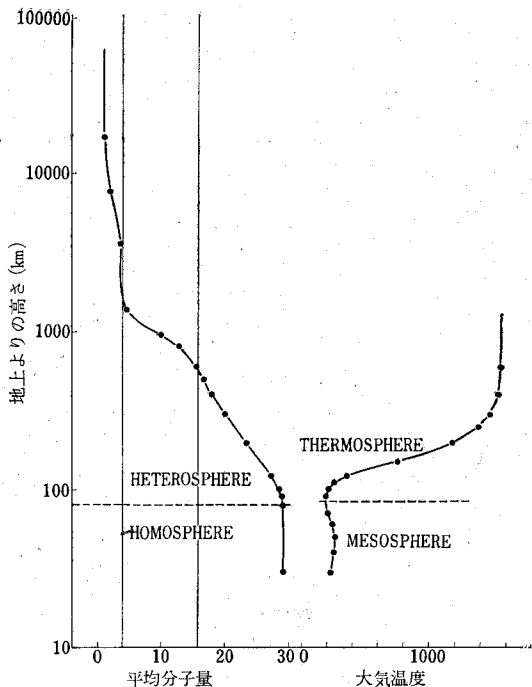
高度が増して大気密度が小さくなり、従って粒子の平均自由行程が標準大気高程度以上になる領域では、粒子間の衝突が殆んど無視出来るようになる。このような領域を**外気圏**と呼んでいる。外気圏と圧力圏の境界つまり外気圏の底は大気粒子の平均自由行程が標準大気高に等しくなる高度で定義されており、大気粒子の衝突断面積を  $3 \times 10^{-15} \text{cm}^2$  とすると、第1図の大気モデルより約600 km が外気圏の底の高さということになる。外気圏の底以下の領域では大気粒子の衝突が頻繁で、粒子速度は Maxwell 分布をしており、外気圏の底から上方に向う粒子は他の粒子と衝突することなしに運動するものと仮定すると、外気圏内を運動する粒子の状態は外気圏の底を出発するときの条件で決まってしまう。このような粒子を弾道成分と呼び、その中には地球重力圏外に逃げ出してしまふ成分と、地球重力に引き戻されて再び外気圏の底まで戻ってくる成分とがある。弾道成分の粒子密度は、外気圏の底での密度、温度および分子量(原子量)で決まる。しかし僅かではあるけれども、実際には外気圏でも衝突が起っているのだから、弾道成分の粒子の一部が



第1図 外気圏温度約1500°K のときの大気密度および大気成分のモデル

\* 郵政省電波研究所

・N. Matuura: Earth's Exosphere.



第2図 第1図のモデルの平均分子量および大気温度の分布

外気圏の底には達することなしに地球の周囲を廻る楕円運動を行う成分(束縛成分)に移ると考えられる。束縛成分はその寿命が長いために、電離や衝突等のために失われ、結局ある平衡状態を保つであろう。この様なモデルに基づいた Öpik と Singer (1961) の理論から得られる O, He, H の密度分布が第1図の 600 km 以上で示されている。このようにして得られた密度は、圧力平衡にあるとして得られる密度よりも、高さと共に速やかに減っている。

大気温度は大気密度分布を支配する重要な物理量の一つであることが上の議論からもわかるであろう。上層大気温度分布は第2図に示されている様な構造を持ち、温度分布の構造に従って地表に近い方から順に Troposphere, Stratosphere, Mesosphere, Thermosphere の名で呼ばれている。人工衛星が大気中を運動している間に特に近地点付近で大気の抵抗を受け、地球の周囲を回転する周期がだんだん短くなっていくことを利用して、大気密度の分布やその変化が詳しく知られるようになった。適当な大気モデルとを比較することによって、大気密度の変動に相当する大気温度の変動が得られる。大気温度を変化させる熱源として太陽紫外線、高エネルギー粒子、ジュール熱によるもの等が挙げられている。Jacchia (1963)<sup>2)</sup> によると thermopause (第2図で 500 km 以上で温度が高さについて一定になっている部分) の温度の変化成分として次のようなものが挙げられてい

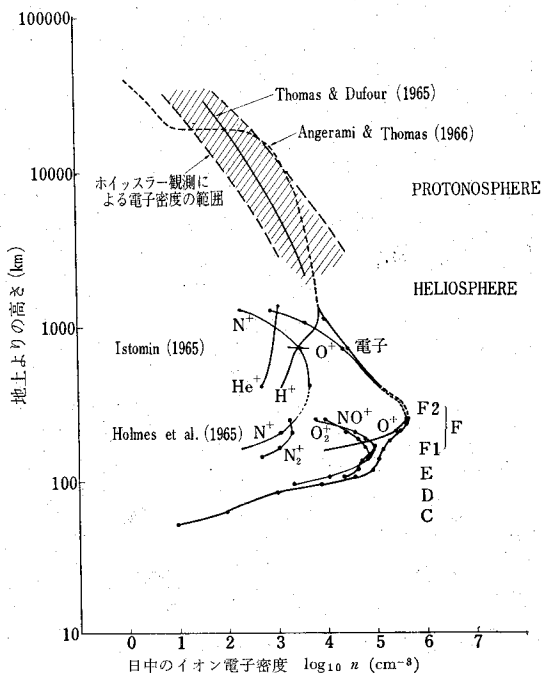
る。

- ① 11 年周期 (10.7 cm の太陽電波強度の月平均値に依存する)
- ② 27 日周期 (10.7 cm の太陽電波強度の日平均値に依存する)
- ③ 日変化 (太陽直下の点との位置関係に依存する)
- ④ 半年周期 (4 月と 10 月に最大値を持ち、振巾は太陽活動度に依存する)
- ⑤ 地磁気効果 (地磁気指数  $a_p$  に依存する)

ここで ①, ②, ③ は太陽紫外線 (主に 200 Å 以上) による加熱を示していると思われるが、④ の原因については未だわかっていない。⑤ の原因は太陽風と思われるがその機構は未だ明らかでない。

### 3. 電離圏

地上 50 km 付近から地球大気圏の外縁までの領域には電離した気体(プラズマ)が存在しており、この領域を電離圏と呼ぶ。電離圏は第3図に示されているように低い方から順に C, D, E, F の各領域と Heliosphere, Protonosphere の六つの領域に分けられる。理論的考察によれば C 領域 (50~70 km) は一次宇宙線による  $N_2$ ,  $O_2$  の電離が主成因であり、D 領域 (70~90 km) は太陽からの Lyman  $\alpha$  線 (1216 Å) による NO の電離が主成因であるとされている。また C, D 領域の電子密度は太陽フレアに伴って、また、オーロラ、地磁気擾乱に伴って可成り増加することが知られている。E 領域 (90~130 km) は Lyman  $\beta$  (1025.7 Å) による  $O_2$  の

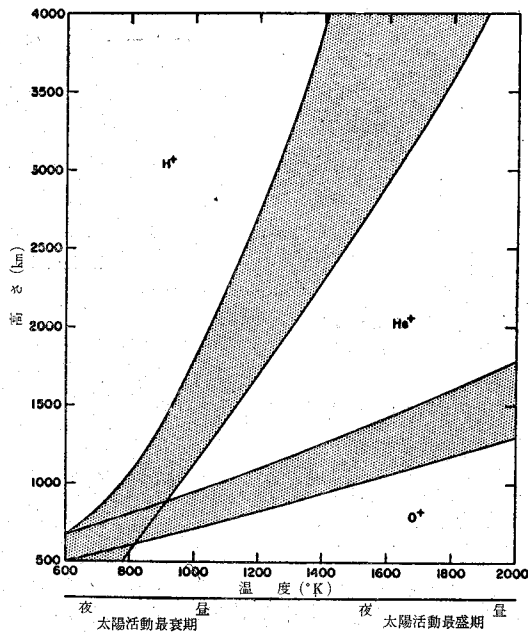


第3図 日中のイオンおよび電子密度分布

電離および X 線 (31~100Å) による O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O の電離が主成因である。これとは全く別の原因で生成される Es (スボラディック E 層) が E 領域に観測されるが、その生因は未だよくわかっていない。F 領域 (130~数千 100 km) の電子密度分布は F1 層と F2 層に分けられるが、F2 層が第 3 図に示されているように明瞭な常に存在する層であるのに対して、F1 層は不安定な層である。F1 層と F2 層のイオン及び電子は太陽紫外線 (EUV) による単一の電離機構によって生成されるが、F1 層では NO<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sup>+</sup> が主なイオンであるのに対して F2 層では O<sup>+</sup> が主なイオンである。

イオンおよび電子の密度は光化学反応による生成・消滅で影響されるだけでなく、拡散の影響で密度の再分布が行われる。高度が増すにつれて荷電粒子と大気粒子の衝突が減り、荷電粒子は容易に大気中を動けるようになるので、電離気体の拡散の効果は高い所程大きくなり、そのために電離気体の密度分布は高い所では拡散平衡の状態に近づく。電離気体の拡散平衡と前節で述べた中性大気の拡散平衡との相異は、電離気体の場合は荷電変位による電場の影響が加わるために正負両種の荷電粒子の密度分布が殆んど等しくなること、およびその電場のために各種イオンの分布が独立ではないこと、更に荷電粒子の易動度は地球磁場のために異方的となり、磁力線に沿った方向にのみ動き易いことである。

F2 層で電子密度の最大ができるのは丁度その高度で光化学反応の卓越する領域から拡散平衡が卓越する領域に移り変わるためである。F2 層以高では電子密度は高

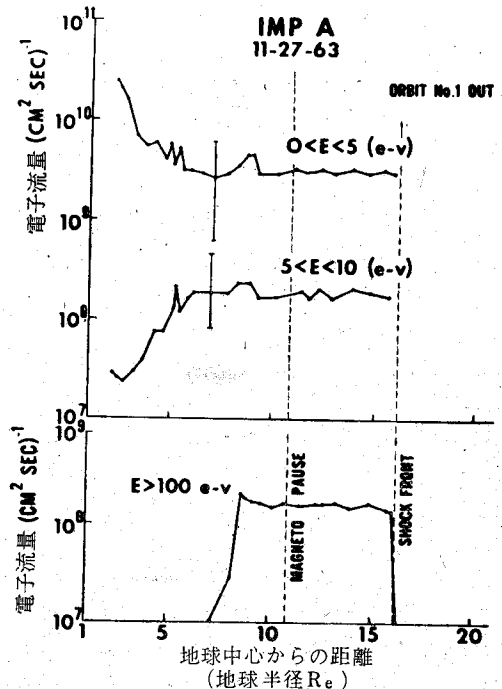


第 4 図 大気温度変化に伴う O<sup>+</sup>-He<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>-H<sup>+</sup> の移りかわりの高さ

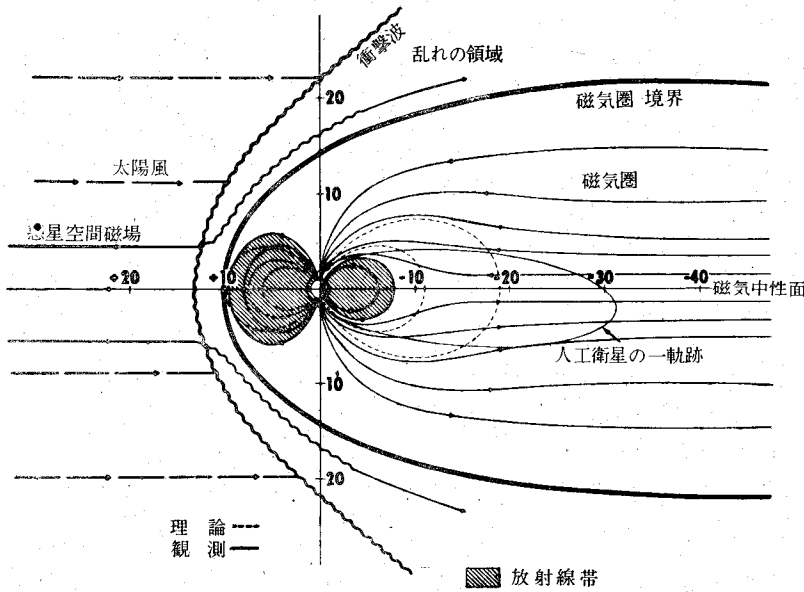
さと共に減少する。高度 1000 km 付近からは O<sup>+</sup> に比べて He<sup>+</sup>, H<sup>+</sup> が多くなり、更に高い所では H<sup>+</sup> が主なイオン成分となる (Protonosphere)。He<sup>+</sup> は太陽紫外線 (EUV) による He の電離によってつくられ、また外気圏下部では H<sup>+</sup> の密度は荷電交換反応 H<sup>+</sup>+O<sub>2</sub>→O<sup>+</sup>+H によって支配される。第 3 図に示されているイオン分布では、He<sup>+</sup> が卓越する Heliosphere は見られないが、第 4 図に示されている Bauer (1966)<sup>9)</sup> のモデルによれば、その様子は大気温度によって可成り変化することがわかる。

ホイッスラー観測から得られた外気圏での磁気赤道面に沿ったプラズマ密度が第 3 図に示されているが、地球半径の 4 倍の距離 (4 Re) 付近で密度が 1 桁からそれ以上急激に減少しているが、その様なところをホイッスラー knee 或は plasmopause と呼んでいる。knee の位置は地磁気活動に応じて 3 Re から 6 Re の付近まで変化している。knee ができる原因は未だわかっていない。knee より内側の部分でのプラズマの密度分布は Thomas 等 (1965)<sup>9)</sup> の理論計算で示される様に、プラズマが磁力線に沿って拡散平衡の状態にあることで説明されるようである。Thomas 等の計算では 500 km 以高で O<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>, H<sup>+</sup> および電子が磁力線に沿って拡散平衡の状態にあり、1000 km での電子密度が高緯度程低くなっている点が考慮されている。

前節の外気圏の底に対応する、プラズマ外気圏の底は衝突断面積 (クーロン衝突) を 10<sup>-11</sup> cm<sup>2</sup> として平均自



第 5 図 各エネルギー範囲の電子流量



第6図 地球磁気圏のモデル

由行程が地球の半径程度になるところとすると、そこでの電子密度は約  $1.5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$  となる。この高さは第3図によれば  $4 \text{ Re}$  付近に相当する。従ってここから外側では前節の中性大気の弾道成分に相当する分布を考慮しなければならない。ただしプラズマは磁力線に沿って動くので、磁力線が閉じている限り地球圏外に逃れ出る成分はなく、その代りに磁力線に沿って反対半球のプラズマ外気圏の底に達する成分がでてくる。衝突が無視出来る場合の磁力線に沿ったイオン分布の理論計算は Eviatar 等 (1964)<sup>6)</sup> によってなされている。また、その生因は異なるけれども中性大気の束縛成分に対応する荷電粒子として、磁力線に捕捉された放射線帯粒子があるがこれについては第5節で述べる。

電離気体の温度についての特徴は昼間だけでなく夜間でもF領域での電子温度  $T_e$  がイオンの温度  $T_i$  より高いことである。このことは電子に対して選択的に熱が供給されていることを示し、上層大気の熱源を知る上で重要な手掛りとなっている。この熱源は前節で述べた中性大気への熱源につながるものである。

外気圏でのプラズマの温度については未だよくわかっていないが、その手がかりとして Serbu (1965)<sup>7)</sup> の人工衛星 Imp 1 によるプラズマのエネルギースペクトルの観測がある。第5図は三つのエネルギー範囲での電子の流量を地球中心からの距離  $\text{Re}$  に対して示したもので、 $0 < E < 5 \text{ eV}$  は熱的なプラズマを示し、ホイッスラーで観測されるような knee を示している。 $5 < E < 10 \text{ eV}$  は  $300 \text{ km}$  以上の電離層から磁力線に沿ってやって来た光電子を示し、また  $E > 100 \text{ eV}$  の電子は太陽プラズマが

源である可能性が強い。また Serbu は  $4.6 \text{ Re}$  での電子のエネルギースペクトル ( $30 \text{ eV}$  以下) から電子の平均エネルギーとして  $1.4 \text{ eV}$  を与えている。つまり等価な温度として  $16400^\circ \text{K}$  を与えている。

#### 4. 磁気圏

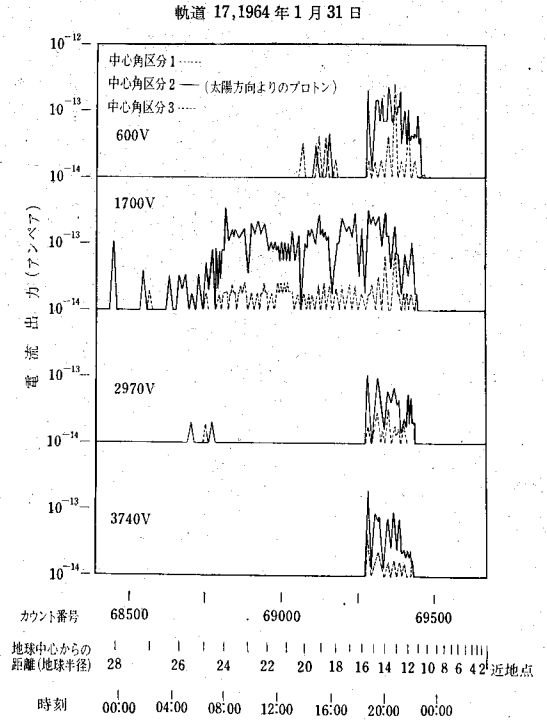
プラズマおよび高エネルギー荷電粒子によって占められている地球の磁力圏を磁気圏と呼び、磁気圏内ではプラズマは磁力線に凍結 (frozen) されていると考えられる。凍結の条件は  $\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = 0$  ( $\mathbf{E}$ : 電場,  $\mathbf{V}$ : プラズマの流速,  $\mathbf{B}$ : 磁場) で表わされ、荷電粒子の衝突回数が磁場  $\mathbf{B}$  のまわりの旋回運動の周波数

に比べて小さい場合に成立する。地球の上層大気でこの条件は電子の場合高度約  $85 \text{ km}$  で、イオンの場合高度  $150 \text{ km}$  付近で充たされる。従って磁気圏の下端は高度  $150 \text{ km}$  付近と考えられる。プラズマが磁力線に凍結されている場合、一般にプラズマが磁場を変えたり、逆に磁場の変化がプラズマを変えたりするが、どちらが一次的な原因になるかは両者の圧力 (プラズマの圧力と磁場の圧力) の大小に係る。

地表から遠く離れた所での地球磁場は、地表で知られている磁場の球函数展開から得られたものとは可成り違った分布をしている。地球磁場を大きい規模でゆがめる要素としては、磁気嵐の説明のために導入された環電流の効果と太陽プラズマの影響が挙げられる。

地球のまわりを取り巻く環状電流を最初に提唱したのは Störmer で、その後 Chapman-Ferraro, Alfvén, Akasofu-Chapman, Apel 等によって磁気嵐の理論として展開されてきた。一方 Pioneer I, Lunik I, II, Explorer VI, Pioneer V, Vanguard III, Explorer X によって測定された磁気圏内の磁場が理論値と数  $10$  ガンマ程度 ( $1 \text{ ガンマ} = 10^{-5} \text{ ガウス}$ ) ずれることが知られており、その差を環状電流で説明しようとする試みがなされた。しかし現在のところ磁気圏で観測されている荷電粒子流で説明される磁場の水平成分の減少は地表で  $10$  ガンマ程度で、磁気嵐の時に地表で観測される  $100$  ガンマ或はそれ以上の水平成分の減少を説明するに足る荷電粒子流は未だ見出されていない。結局環電流の存否は未解決で磁場の尾の存在も含めて考慮することが必要ではなからうか。

太陽から放出される太陽プラズマ（太陽風）は地球磁場を閉じ込め、また同時に地球磁場は太陽プラズマに対して壁のはたらきをしている。この壁が磁気圏の外縁であり、Magnetopause と呼ばれている。Magnetopause の概念は既に Chapman-Ferraro によって取り入れられているが、最近では人工衛星による磁場の観測或はプロトン、電子等の荷電粒子流の観測からその形態が調べられている。第6図には Ness (1965)<sup>9)</sup> によって与えられた磁気圏のモデルが示されている。Magnetopause の位置は太陽風の強さによって変化するが、太陽側で平均 10 Re 付近にあり太陽と反対側では可成り遠くまで伸びており、少なくとも 60 Re 付近までは達していると考えられている。このことから夜側の領域を磁場の尾と呼んでいる。夜側での磁力線は太陽と地球を結ぶ線に略平行になっており、磁場が零になる様な面状の領域（磁気中性面）を境にしてそれより北側では磁場は地球の方に向い、南側では地球から遠ざかる向きになっている。このことは太陽プラズマ流によって地球の磁力線が太陽と反対側に吹き飛ばされていることを示している。さらにこれを裏書きする事実として、太陽プラズマ流の強さが増加して、地表で地磁気擾乱が激しくなる時、つまり  $K_p$  が増加する時に磁場の尾での磁場の強さが増加していることが Ness 等<sup>9)</sup> (1966) によって見出されており、更にこれと同時に粒子（電子 E >

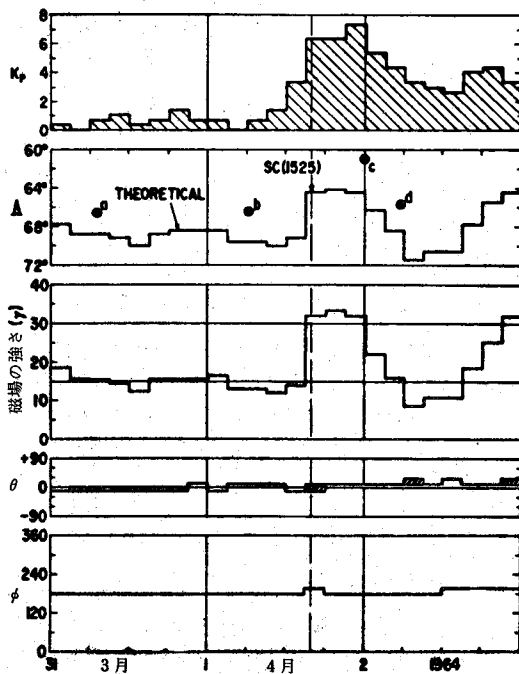


第8図 Imp-1 によるプロトン流量

280 KeV) 捕捉の外限界が地球に近づいていることから、磁気中性面が地球に近づいていることがわかる。(第7図)

Magnetopause の太陽側数 Re の所には弓状の衝撃波があり、衝撃波を境にして太陽側では比較的安定した惑星間磁場と一様な太陽プラズマ流があり、地球側では乱れた磁場と略等方的な速度分布を持つ太陽プラズマがあることが見出されている。第8図は Imp 1 に搭載した低エネルギープロトン流測定器で測定された各エネルギー範囲のプロトン電流を示したもので (IG Bulletin 1964)<sup>10)</sup>、衝撃波と Magnetopause で囲まれた領域で顕著なプロトン電流の増加が見られる。また、この領域で太陽プラズマのエネルギーの再分布が行われていることがわかる。

(以下次号)



第7図 地磁気指数  $K_p$ 、放射線帯外縁の地磁気緯度  $A$ 、磁場の尾での磁場の強さおよび磁場の向きの関係