

## 磁気圏プラズマとオーロラサブストーム

大 家 寛\*

### Effects of Magnetospheric Plasma on Auroral Substorm

Hiroshi OYA\*

**Abstract:** A recommendation to scientific objectives of the polar rocket measurements is presented with respect to studies on the relationship between the magnetospheric plasma and the aurora breakup stages or substorms. The qualitative consideration on the wave-particle interaction in a turbulence involving the plasma instability and nonlinear interactions suggests a possibility of energetic aurora particle production in the magnetospheric plasma. This should be investigated quantitatively using a correlated observation system established between the polar rockets and the orbiting satellites in the magnetosphere. Conventional parameters, which describe the aurora and the substorm, such as the magnetic field, particle energy spectrum, electron density and photo-chemical productions, should also be measured by the rockets, while the electric field spectrum in the turbulent plasma will be measured by the satellites being correlated with the energetic particle spectrum in the magnetosphere.

#### 1. 序

磁気圏プラズマ研究の三つの重要な領域は、中性シート(neutral sheet)、カusp (cusp) とプラズマ圏境界(plasmopause), および衝撃波前面域(shock front)と磁気境界域(magnetopause)であることが知られて久しい。図1に示されるように、これらの領域からはエネルギー粒子群を極域におくりこむことができ、南極ロケット観測が、オーロラ、あるいは極域サブストームの現象観測にとどまらず、それらに関連して磁気圏域プラズマのエネルギー粒子成生、および消滅、電磁波の発生および吸収に伴うドラマを解明する役割をもつことは、これも古くから予想されていた。

磁気圏の物理の定性的な描像は、古くから完成している磁場測定、さらに最近その測定精度が向上してきた粒子エネルギースペクトル測定によってなされた。ところでこの数年、サブ

\* 京都大学工学部. Ionosphere Research Laboratory, Kyoto University, Kyoto.

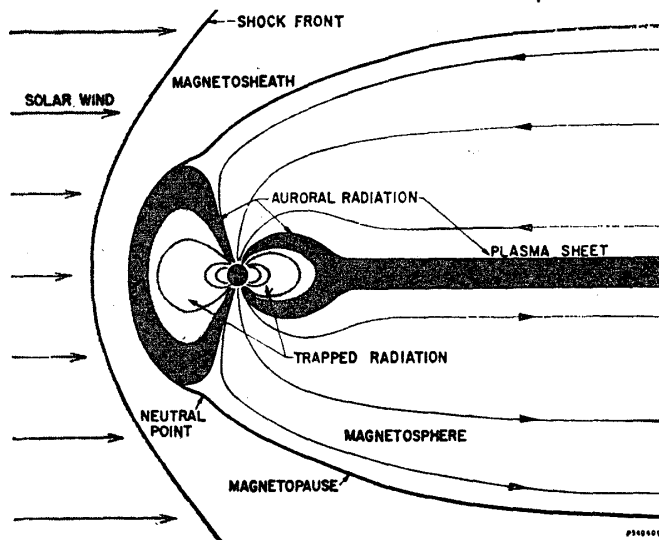


図1 磁気圏の構造と極域との関連、オーロラゾーンでの諸現象は、plasmopause, cusp および neutral sheet といった三つの重要な点からくるエネルギー粒子群とつながっている (図は O'BREIEN, 1967 より)。

ストームの形態学的解明は大きな進歩をとげてきたが、さらに原因の物理像を明らかにするにあたっては、未知のパラメータが多く、HULTQVIST (1969) の言葉をかりれば、“現段階では、データを少し曲げれば、なんとか、物語の筋書きに合わされる”という点がある。つまり定量的な評価をもった、一義的に決定されるような力学的描写、あるいは原因の物理像を得るのは、これからの問題である。

そこで新しくつけ加えなくてはならぬパラメーターの一群は、従来の流体的記述の中にはなかった、乱流的プラズマ波動と、その中にある波動—粒子相互作用等の、磁気圏プラズマのミクロの要因である。一方、マクロな量に関しても、電界の準定常成分については、未だ限られた部分でのみ、知られているにすぎなく、近年の研究にひきつづき今後も大きな問題である。又この電界についても、磁気圏にあっては、プラズマのミクロの状態を反映しているという理由で、磁気圏域プラズマ状態の研究と同じ範ちゅうに属する。

磁気圏プラズマ現象の関連する謎の一つは、オーロラの急始 (breakup) の主因であるエネルギー粒子の注入と加速の問題である。わが国の南極ロケット観測が、従来外国でおこなわれた極域超高層観測に対して新しいものを加えることができるならば、そのひとつは、磁気圏プラズマのミクロの現象との関連を追求することであろう。この点で IMS 計画とも関連し、将来の南極観測計画の一助になることを願って、二の提案をしてみる。

## 2. 磁気圏プラズマのもつ重要性

地球スケールで起こる現象の解明は、物理現象を巨視的にとらえることによって進められてきた。すなわち、最も古典的事象のひとつである磁気嵐主相の説明にたてられた環電流

(ring current) とか、比較的新しいところでは磁気圏尾部 (magnetospheric tail) とシート電流 (sheet current) の存在の予測はこの例であり、またプラズマ圏境界は流体的にとらえた、磁気圏プラズマの対流の概念 (AXFORD and HINES, 1961) によって説明されているのも (NISHIDA, 1966) 同様である。前二者の電流生成の概念は Ness 等, 1969 (Review として) によって磁気圏にもちこまれたアルカリ金属磁力計 (オプティカルポンピング磁力計とも呼ばれる) による高精度測定にひきつづき、最近、5~50,000 eV の範囲において豊富な結果を出しつつあるチャンネルトロン型エネルギースペクトルアナライザー (たとえば DEFOREST and McILWAIN, 1971; FRANK and ACKERSON, 1971) によってあきらかにされた粒子流の確認によって実証されつつある。これらの場合のように、粒子流による電流と磁場の生成は、式

$$\text{rot } H = \sum_i e \int f_i(v) v dv \quad (1)$$

(但し  $i$  は荷電体の種類の別を示す添字) にしたがう。(1) 式の右辺は、 $f(v)$  の関数形によっては、 $v$  の大きな部分すなわち  $f_i(v)$  の尾部がきいてくる。高エネルギー粒子群が電流形成に寄与するのはこの辺の事情も反映している。

普通、宇宙空間では  $\sum_i f_i(v) v = 0$  が最も安定した形と想象され、(1) 式の右辺が 0 でなくなるところは、なんらかの均質性をやぶる混とん状態を生じているといえる。たしかに前記の magnetopause, shock front, neutral sheet および cusp といったところは、磁気圏の代表的混とん状態であることが観測によって証明されつつある。

電場の発生は、

$$\text{div } E = \sum_i e \int f_i(v) dv \quad (2)$$

にもとづくが、従来は静かな磁気圏の概念ともいうべく、

$$\sum_i \int f_i(v) dv = 0$$

が仮定されてきた。しかし、ここで話題にしている (1) 式の右辺を 0 にしないような混とん状態にあっては、たぶん (2) 式の右辺も 0 にしない状態が出現するであろう。ところで (2) 式の積分は、 $f_i(v)$  そのものによるため、 $v$  の小さいところに最大の寄与がある。これがいわゆるプラズマ状態が電界発生に重要な役割をもつゆえんである。

粒子のエネルギー分布関数は、しかし、波動-粒子相互作用を介して、時間的に変動を起す。つまりプラズマとエネルギー粒子の相互作用として表われ、磁気圏の物理を解明する上に大切な、ミクロ的作用として、(1) 式および (2) 式は不可分となる。

## 3. Plasma Turbulence とオーロラ粒子

第(2)式は、いわゆる VLASOV の式

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + v \frac{\partial f_i}{\partial r} + (E + v \times B_0) \frac{\partial f_i}{\partial v} = 0 \quad (3)$$

と組み合わせられて解かれるが、分布関数  $f_i$  については、準定常的な成分から、その媒質での電子サイクロトロン周波数の数倍に至る高い振動周波数に至る成分まで、広いスペクトルをカバーする。このスペクトルを明確にすることは、前節での議論も合わせ考えるとき、 $f_i$  そのものの準定常成分を測定するとともに必要となる。

周波数の高い成分では、粒子と、静電的プラズマ波 (kinetic wave と呼ぶ提案もあった) が強度にカップルして、いわゆる非線形波動現象を生ずるがこれは流体としての静かな状態をやぶって turbulent な状態となっている。図2は KENNEL *et al.* (1970) により 4~8 Re (地球半径) 附近までの距離にわたる cusp, および neutral sheet 内で観測された electrostatic electron cyclotron harmonic wave の一例であるが、これは、非線形相互作用をともなっていることが、Alouett-2 衛星で得られた人工 turbulence の実験の帰結 (OYA, 1970) として明らかになりつつある。この結果得られた neutral sheet 内のプラズマ状態が図3に示されている。観測された電界強度は数 10 mV/m (KENNEL *et al.*, 1970) といわれ、これが trapped particle と作用した場合、いわゆる pitch angle diffusion を

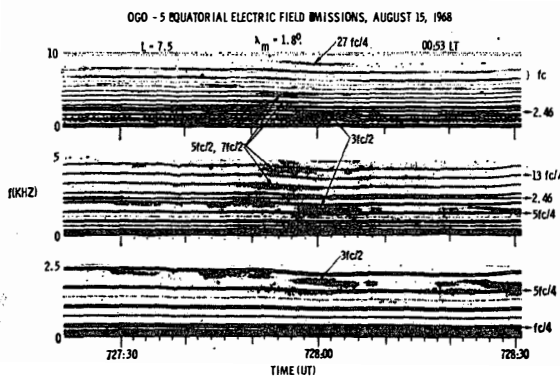


図2 Electrostatic plasma 波の観測結果の一例。最上段は 0~10 kHz までのスペクトル、これを 0~5 kHz の部分を拡大したものが中段で、0~2.5 kHz の部分を拡大したものが下段である。観測は、夜側 neutral sheet (0053LT,  $\lambda_m = 1.8^\circ$ ,  $L = 7.5$ )で行なわれている。3 $f_c/2$ , 5 $f_c/2$ , 附近にあるものが 10 mV/m オーダーの強度をもつ electrostatic wave (KENNEL *et al.*, 1970).

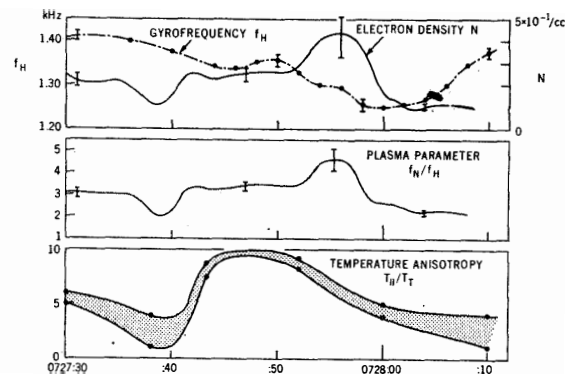


図3 Turbulent plasma の状態、図2で示す観測値に electrostatic wave の非線形相互作用の条件をあたえると、このように電子密度のゆらぎ、温度の非等方性の大きな変化が、磁場変動にもなって生ずることが明らかになる (OYA, 1970). 位置は全く図2と同じ。

起こして, particle の loss cone への注入を起こすことは想像にかたくない. この波の波長は 1 km のオーダーをもち, したがって一波長間の電位差は 10 V になる. つまり neutral sheet 中である程度のひろがりをもった turbulence 中を粒子がぬける場合には統計的加速を受けて, 数 keV のエネルギーを得る粒子の生成数はさして少なくないと想像される. Neutral sheet でのオーロラ粒子の成因として見のがすことはできない.

Turbulence の生成には, プラズマの不安定が原因となっているが, いかなる不安定を生ずるかは, 最初に注入されるエネルギー粒子とプラズマがいかなる形で相互作用するか, また境界条件 (たとえば磁場の構造) がいかに変形を受けるかにかかわっている. 相互作用のプロセスはまず分布関数が二つの山を作る状態 (FREDRICKS, 1971) から, それがさらに速度空間で diffusion を起して行って, 温度に非等方性をもったプラズマ状態へと移行してゆくときに生ずる不安定である. これは HARRIS 型の不安定として知られ多くの人によって, とりあつかいが正確になり, その理論は turbulent state の実験とも一致を示すまでになった (OYA, 1971). 前記 5~50,000 eV にわたる粒子エネルギースペクトルの観測が高精度化していることは, この分野の研究に一層の進歩を約束しているが, ここに話題としている turbulence にともなう電界の周波数スペクトル測定と同時に行なうことが強くのぞまれる.

#### 4. DC 成分の電界

極地域の電離層電場は, neutral sheet 近傍の plasma convection にともなう電界が影響している. このことを考慮するとき 1000 km 附近での極軌道衛星によって電離層トップサイドでの電界測定をすることは磁気圏プラズマの対流をさぐる上の鍵となる. 電界測定には, トップサイドで人工のプラズマ波をパルス状に発射し, そのパルスの群速度を測定してプラズマの対流を求める方法が考えられる (OYA, 1971). プラズマの無衝突領域では

$$E + V \times B_0 = 0 \quad (4)$$

であることを考慮すれば電界そのものを求めることにもなる.

ところで第2節でものべたように

$$\text{div } E' = e \int f(v) dv \neq 0$$

という状態では

$$E = E' - V \times B_0 \quad (5)$$

となり電界は (4) 式であたえられるような単なる対流が翻訳された量ではなくなる. プラズマポーズ近傍でこうした点が明らかにされる必要がある.

### 5. 衛星とロケットの連繫観測

従来、極地あるいはオーロラゾーンで、多くのロケット観測がなされてきた (Review として PFISTER, 1967). こうした観測をわが国も技術習得の筋道として踏襲するとしても、早い時期に一流の貢献をする必要がある. ここでわが国が南極ロケット観測に見いだせる、新しい道のひとつは、衛星と、ロケットとの連繫観測によってマイクロとしてのプラズマ現象が、マクロのオーロラ現象にあたえる関係を追求することにある. これは、具体的には、ロケットに相乗りする観測機器の測定対象の間の相関はもとより、neutral sheet あるいは cusp 領域でのプラズマ波のスペクトルおよびオーロラ粒子観測に対してオーロラ域の電離層中での諸パラメーター (電子密度, 電子温度, イオン組成および温度, 光学的スペクトル, 下降粒子エネルギー, 磁場) をロケットで連繫させて観測することが必要となる.

連繫観測にはわが国の衛星を上記ミッションをもつ遠距離軌道にのせる必要があると同時に、すでに観測を続けている OGO, あるいは ATS のような優れた衛星とは積極的に科学上の共同観測をする必要がある\*.

### 6. 結 び

オーロラ粒子の生成には、粒子注入と加速の謎がこのこされているがこの解明はオーロラ域での、光学的観測、磁気観測、およびエネルギー粒子観測に加えて、プラズマの素過程とも呼ばれる、マイクロな領域での不安定と turbulence の観測を必要とする. これには極域での諸現象と呼応して、plasmopause, あるいは neutral sheet で乱流的プラズマ状態のスペクトルを DC 成分から高周波成分にわたって検出することが要求される. これは単独観測ではその成果はうすく、直接にロケットで観測される極域現象と磁気圏衛星との連繫観測が必要となる. この場合粒子のエネルギースペクトル、および電界の周波数スペクトルは衛星で、極域電離層での典型的パラメーターはロケットで観測されることになる. この連繫観測が実現すれば、他の sophisticate された観測はやはり低高度の極軌道衛星に分担させることが、極地ロケットのもつ制約された環境を思うとき、より実際的であろう.

### 文 献

AXFORD, W. I. and C. O. HINES (1961): A unifying theory of high latitude geophysical pheno-

\* 科学上の国際協力は、地球が一つの集団になろうとする理念にかかわる人間活動の一環とみると、主義主張のちがいを超えて是認される.

- mena and geomagnetic storms. *Can. J. Phys.*, **39**, 1433-1464.
- DEFOREST, S. E. and C. E. McILWAIN (1971): Plasma clouds in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, **76**, 3587-3611.
- FRANK, L. A. and K. L. ACKERSON (1971): Observations of charged particle precipitation into the aurora zone. *J. Geophys. Res.*, **76**, 3612-3643.
- FREDRICKS, R. W. (1971): Plasma instability at  $(n+1/2) f_c$  and its relationship to some satellite observations. *J. Geophys. Res.*, **76**, 5344-5348.
- HULTQVIST, B. (1969): Auroras and polar substorms: Observations and theory. *Review of Geophysics*, **7**, 129-177.
- KENNEL, C. F., F. L. SCARF, R. W. FREDRICKS, J. H. McGEHEE and F. V. CORONITI (1970): VLF electric field observations in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, **75**, 6136-6152.
- NESS, N. F. (1969): The geomagnetic tail. *Review of Geophysics*, **7**, 97-127.
- NISHIDA, A. (1966): Formation of plasmapause, or magnetospheric plasma knee by combined action of magnetospheric convection and plasma escape from the tail. *J. Geophys. Res.*, **71**, 5669-5679.
- O'BRIEN, B. J. (1967): Interrelations of energetic charged particles in the magnetosphere. *Solar Terrestrial Physics*, Academic, New York and London, 169-211.
- OYA, H. (1970): Sequence of diffuse plasma resonances observed on Alouette 2 ionograms. *J. Geophys. Res.*, **75**, 4279-4285.
- OYA, H. (1971): Verification of theory on weak turbulence relating to the sequence of diffuse plasma resonances in space. *Phys. Fluid*, **14**, 2487-2499.
- 大家 寛 (1971): 宇宙空間の電場測定. *IASY シンポジウム論文集*, 東大宇宙研出版, 335-344.
- PFISTER, W. (1967): Auroral investigations by means of rockets. *Space Sci. Rev.*, **7**, 642-688.

(1971年11月20日受理)