

E 領域の低周波プラズマ波動の観測

森 弘隆*・小川忠彦*・宮崎 茂*

Rocket Observations of Plasma Density Irregularities in the Polar *E* Region

Hiroataka MORI,* Tadahiko OGAWA* and Shigeru MIYAZAKI*

Abstract: On the records of electron densities obtained by the Langmuir probe, the superpositions of rapid fluctuations (10-100Hz) are often detectable in the auroral *E* region. These density irregularities have not been investigated in detail because the design of the Langmuir probe method used in the past is not adequate to clarify this phenomenon.

A new three spherical probes method is proposed for the self-consistent observation of the electron density, and DC electric field together with the spectra of the small scale irregularities. The possibility of measuring the propagation vector of AC fields is also discussed.

1. はじめに

過去数回の南極ロケット観測の結果、搭載されたラングミュアプローブのデータに、高度90~120kmの範囲で、しばしば低周波のプラズマ密度変動が観測された。観測結果の詳細は他の報告で述べるが、ラングミュアプローブが搭載されたロケットのほとんどすべてに、何らかの密度変動が観測されていたので、これらの密度変動は、この領域にほぼ定常的に存在する現象と考えられる。しかしながら、搭載されたラングミュアプローブは電子密度、温度の高度分布の観測を行うもので、このような密度変動の観測を目的としたものではなかった。そのため、詳細な解析ができず、この現象の実体を明確にすることはできなかった。

外国における密度変動の観測例としては、最近 KELLEY *et al.* (1973) が、強い磁気嵐時にフォトチャーチルからロケットを打ち上げて、電場と電子密度の直流、および交流成分の測定を行い、二流体不安定によるイオン音波の発生を観測した。地上観測では、BALSLEY *et al.* (1973) がアラスカでオーロラレーダー観測を行い、低緯度で観測された二流体不安定とクロスフィールド不安定によると考えられる反射波と類似の型の反射波が極域でも観測されることを指摘し、さらに、それらとは異なる型の反射波が、全体の70%を占めて存在して

* 郵政省電波研究所。Radio Research Laboratories, Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo.

いることを報告している。この第3の型に対して、D'ANGELO (1973) は降下粒子により励起される静電型イオンサイクロトロン波不安定を提案している。このように、高緯度 E 領域には各種のプラズマ不安定が存在すると考えられ、これらの不安定機構の解明は、地球物理学的にもプラズマ物理学的にも大変興味深い問題である。

さて、これらのプラズマ不安定を観測する場合、不安定の種類によってそれを引き起す条件が異なるので、その不安定機構を解明するには、不安定の発生している領域の状態をできる限り詳しく測定し、どの環境条件が不安定に関与しているかを正確に知ることが重要である。重要な測定項目としては、プラズマの密度、温度の高度分布、直流電場の強度と方向の高度分布、降下粒子のエネルギースペクトルとその高度特性、そして、電場およびプラズマ密度の低周波変動成分の測定が考えられる。これらの測定項目は、ロケットにより同時に直接測定することが望ましい。さらに、地上からの観測としては、特に、全天カメラや映画撮影などによって、ロケット飛しょう中の軌道付近のオーロラの運動や状態を精密に記録しておくことが非常に有益である。現在、南極の地上施設として観測が行われているアイオノゾンデ、オーロラ・レーダー、リオメーター、地磁気測定器などもロケット実験に呼応して精密な同時観測が行われることが望ましい。

以下の節で、ロケットによるプラズマ密度変動と電場変動の同時観測法について考察する。

2. 低周波領域のプラズマ密度変動の観測法

一般に、低周波領域（イオンプラズマ周波数以下）の波動は位相速度が遅くロケット速度と同程度になるので、ロケットに搭載されたプローブで波動を観測するとロケット速度による観測周波数のドップラーシフトの効果が無視できず、観測周波数 ω_0 は $\omega_0 = \omega + \mathbf{K} \cdot \mathbf{V}_R$ (ω : 真の周波数, \mathbf{K} : 真の波数, \mathbf{V}_R : ロケット速度) と表わされる。従って真の周波数 ω を求めるには、 ω_0 のほかに波数 \mathbf{K} の観測が重要である。通常、プラズマ波の波長の測定は実験室プラズマでは干渉法などにより行われているが、これらの方法は飛しょう体搭載用としては不適當である。一般に、プラズマ波は電場変動とともに密度変動をも伴うが、以下に述べるように、飛しょう体上でのこの密度変動の観測から波動の波長を求めることができる。

プラズマの密度変動を観測するには、プローブに定電圧を印加し低入力インピーダンスで流入する電流の変動を検出する通常のラングミュアプローブ法が有効である。この方法は技術的に容易であり、次に述べるように、複数個のプローブを立体的に配置することにより波長の測定も可能である。

例として、図1のように、2個の完全に等しい球プローブを単色平面波の伝播方向に沿って配置した場合を考える。プローブの間隔を $2l$ とし、密度変動が $n_0 \sin(\omega t + kx)$ で表わ

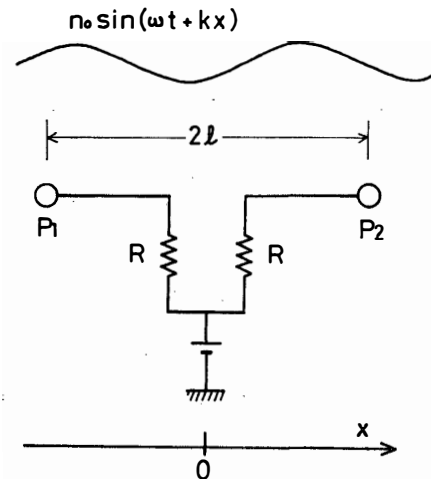


図1 2個の球プローブを単色平面波の伝播方向に配置した場合の模式図

Fig. 1. Schematic diagram of two spherical probes placed along the propagation direction of a monochromatic plane wave.

されるものとする。ただし、 x 軸の原点は2個のプローブの中間にとる。プローブ P_1 , P_2 に流れる電流のうち周波数 ω 成分をそれぞれ I_1 , I_2 とすると、次式のように表わされる。

$$I_1 = Aen_0 \sin(\omega t - lk) \quad (1)$$

$$I_2 = Aen_0 \sin(\omega t + lk) \quad (2)$$

ここで、 A はプローブの表面積、印加電圧、およびプラズマ温度に依存する定数である。 e は素電荷である。 k は波数で波長 λ とは $k = 2\pi/\lambda$ の関係がある。これらの電流の差を求めると次のようになる。

$$I_2 - I_1 = Aen_0 \{\sin(\omega t + lk) - \sin(\omega t - lk)\} = 2Aen_0 \sin(lk) \cos(\omega t) \quad (3)$$

従って、電流をそれぞれ2乗検波し比をとると次式が得られる。

$$\frac{|I_2 - I_1|^2}{|I_1|^2} = \frac{4A^2e^2n_0^2 \sin^2(lk)}{A^2e^2n_0^2} = 4 \sin^2(lk) \quad (4)$$

この式から、 $lk < \pi/2$, すなわち $\lambda > 4l$ ならば波長が一義的に求められる。例えば、 l を 1 m とすると測定できる波長は 4 m 以上ということになる。測れる波長の上限は、電流検出器の感度やテレメーターのダイナミックレンジ等により決定される。

次に問題を具体化して、これらのプローブをロケット軸に対して垂直に突き出した場合を考える。この場合、ロケット速度、およびスピンが観測に与える影響を考察しなければならない。まずロケット速度の影響としては、上で述べた観測周波数のドップラーシフトの問題があるが、幸い波長測定には影響をおよぼさないの、波長の正確な測定により解決できる。次

にロケットスピンの効果を考える．図2のように，波動はロケット軸と直角な平面内でx軸方向に伝播し，ロケットは周期 ω_s でスピンしているものとする，(4)式中の lk を $lk \cos$

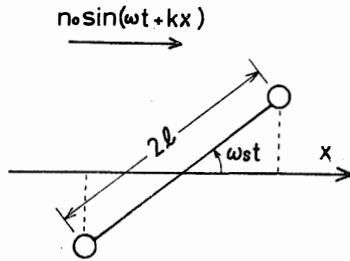


図2 単色平面波中をスピン運動しているプローブ系
Fig. 2. Probe system spinning in a monochromatic plane wave.

$(\omega_s t)$ と書き換えなければならない．この場合，(4)式は次のように修正される．

$$\frac{|I_2 - I_1|^2}{|I_1|^2} = 4 \sin^2 \{lk \cos(\omega_s t)\} \quad (4)'$$

(4)'式は，2個のプローブを結ぶ線が波の伝播方向に向いたとき最大値 $4 \sin^2(lk)$ ，直角に向いたとき0になることを示している．この性質を利用して波の伝播方向を知ることができる．さらに，(4)'式の最大値から波長を求めることができる．

一般には，波動の伝播方向はロケット軸に対して任意の方向を向いているので，上述のプローブ配置では波のベクトルのスピン平面内の成分しか得られない．そこで，ロケット軸方向の成分を得るためには，さらに図3のようにロケット軸上にプローブ P_3 を追加すればよ

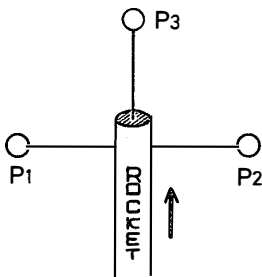


図3 波動の伝播方向を測定するためのプローブの配置の例
Fig. 3. An example of probe arrangement for measuring the propagation direction of waves.

い．これとプローブ P_1 ，または P_2 とから上述と同様にして，軸方向の波長成分が得られる．このように，固定電圧の完全に等しい球形ラングミュアプローブを3個ロケット周囲に配置することにより，プラズマ波の真の波長，および周波数を得ることができる．

3. 電場の観測法

電離層E領域では，イオンと電子の運動の仕方が異なっている．この高度では，イオンは中性分子との衝突が卓越するので地球磁場の影響は受け難く，直流電場が存在すると電場方

向にドリフトする傾向がある。一方、電子の中性分子との衝突距離はサイクロトロン半径に比べてずっと大きいので、運動は磁力線に束縛されており、直流電場が存在すると $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト運動をする。このように、E 層に直流電場が存在すると、イオンと電子の運動方向が

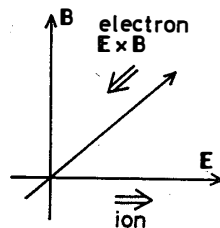


図 4 E 領域の電子と正イオンのドリフト運動

Fig. 4. Drift motions of electrons and plus ions in the ionospheric E region.

異なるので、相対速度が生じ、この速度が音速を越えるとイオン波不安定が生じ、また、密度勾配があるとクロスフィールド不安定などを引き起こす原因となる。従って、直流電場とプラズマ密度の高度分布の測定は重要である。

さらに、電場の変動成分と密度の変動成分の振幅の比較をすることにより、波動のモードを決定する重要な手がかりを得ることができる。これらの厳密な比較を行うには、共通のプローブを時分割で使用する方が、個々のプローブの特性の違いや配置の違いに伴う面倒な補正を必要としない点で有利である。

通常行われているプローブによる電場測定法は、次のようなものである。図5に示すよう

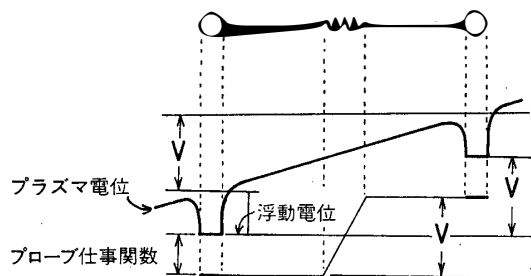


図 5 2個の球プローブによる電場測定法の原理図

Fig. 5. Principle of electric field measurement using two spherical probes.

に、2個の球プローブを適当な間隔に浮動電位でおき、プラズマ抵抗に比べて十分高インピーダンスの抵抗で両プローブを接続し、この抵抗の両端の電位差を測定し、その値をプローブ間隔で割って電場を求める。

4. ロケットによる総合的観測法

さて、上に述べたいいくつかの重要な観測項目、プラズマ密度の高度分布、直流電場、プラズマ密度変動、電場変動をロケットにより同時にセルフコンシステントに観測するために、

次のような観測法を提案する。

プローブには3個の球形導体を使用し、図3のようにロケット先端部に配置する。ロケット周囲のじょう乱を避けるため、ロケット壁から各プローブまでは1 m以上離れていることが望ましい。これらの3個のプローブを共用して、プラズマの密度と電場の測定を時分割で行う。図6, 7はその測定回路系の概略である。図6は各プローブへの電圧印加、および検出抵抗の接続図で、図7は電圧検出回路のブロック図である。測定は2秒毎の切り換えで、図6の CD 間, AB 間, AC 間の電圧を図7の a, b 端子に入力して検出する。入力され

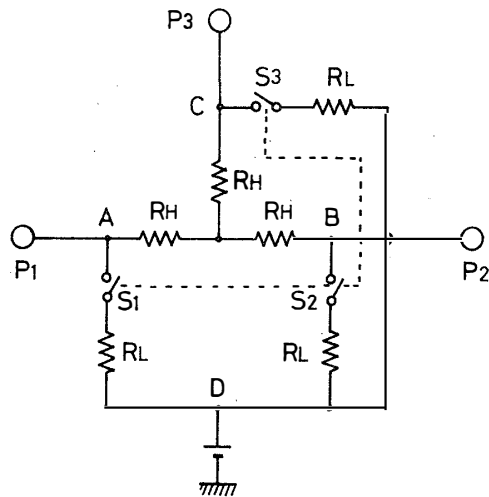


図6 ロケットに搭載された3個の球形プローブにより連続的にプラズマ密度と電場を測定するための電気回路図

R_H : 高抵抗 $\sim 10^8 \Omega$ ON: 密度観測モード

R_L : 低抵抗 $\sim 10^3 \Omega$ OFF: 電場観測モード

S_1, S_2, S_3 : スイッチ (同期動作)

Fig. 6. Electric circuit for sequential measurement of plasma density and electric field by three spherical probes on board a rocket.

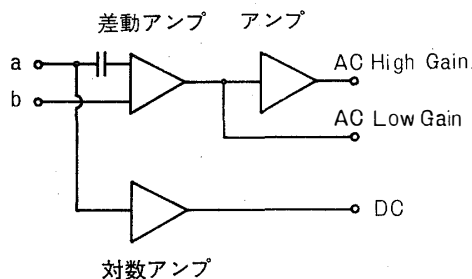


図7 プローブ電流検出部のブロック図

Fig. 7. Block diagram of probe current detector.

た電圧は、直流成分は対数圧縮されて、通常の IRIG チャンネルで伝送される。交流成分については、30kHz までの帯域幅を持った wide band telemeter (略称 WBTM) により伝送される。WBTM はサブキャリアを立てて、帯域幅 10kHz のバンド2チャンネルを作り、それぞれに high gain, low gain の出力が入力され、同時に伝送される。プラズマ密度観測と電場観測は、6秒毎にスイッチ S_1, S_2, S_3 を同時に切り換えることにより時分割で行う。図8はこれらの観測のタイムシーケンスである。以上の方法により、プラズマ密度の高度分布、直流電場の大きさとその方向、および波長数 m から数 100 m にわたる低周波のプラズマ波のベクトル的な測定がセルフコンシステントに行える。

密度観測			電場観測		
S ₁ , S ₂ , S ₃ : ON			S ₁ , S ₂ , S ₃ : OFF		
CD	AB	AC	CD	AB	AC

時間 (sec)

図 8 各観測モードの観測時間経過図

Fig. 8. Time sequence of observation modes.

ロケット先端部に配置された3個のプロープは互いに全く等しい環境条件になければならないので、ロケットの姿勢の安定は最も重要である。ロケットの打ち上げ方向、および角度は、図9のように上昇時高度 100km 付近でロケット軸が磁力線方向と一致するように設定することが望ましい。このようにすれば、地球磁場をロケットが横切ることにより、誘起

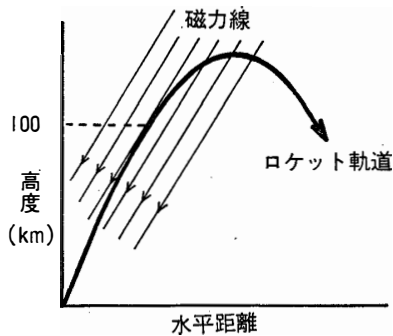


図 9 期待されるロケット軌道の模式図

Fig. 9. Schematic diagram of desired rocket trajectory.

される $V_R \times B$ 電場の効果を防ぐことができるし、観測の方からは、観測対象の磁力線方向成分と直角方向成分とを明瞭に分離できるからである。

5. お わ り に

複雑に変化する極域電離層に対して数少ないロケット観測を有効に活用するには、各ロケットの観測目的を明確にし、そのために必要な観測項目や観測条件等について事前に十分な検討がなされることが必要である。

特に、プラズマ不安定を観測する場合には、観測毎に電離層の条件がかなり異なることが通例なので、他のロケット観測との比較は困難である。従って、1機のロケット毎に、その時発生していた不安定の状態について結論が下せるような観測項目の組合せを考えることが重要である。プラズマ不安定を解明するために必要な観測項目は、前節で述べたように非常に多いので、ロケットに搭載される観測器が互いに干渉せず、しかも有機的な観測が行えるよう十分考慮されなければならない。さらに、ロケット観測と合わせて、地上からの観測を積極的に活用すべきである。

文 献

- BALSLEY, B. B., W. L. ECKLUND and R. A. GREENWALD (1973): VHF doppler spectra of radar echoes associated with a visual auroral form: Observations and implications. *J. Geophys. Res.*, **78**, 1681-1687.
- D'ANGELO, N. (1973): Type III spectra of the radar aurora. *J. Geophys. Res.*, **78**, 3987-3990.
- KELLEY, M. C. and F. S. MOZER (1973): Electric field and plasma density oscillations due to the high-frequency hall current two-stream instability in the auroral *E* region. *J. Geophys. Res.*, **78**, 2214-2221.