

南極ロケットによるプラズマ波動実験

松本 紘*・木村磐根**

Plasma Wave Experiments in the Polar Ionosphere

Hiroshi MATSUMOTO* and Iwane KIMURA**

Abstract: Some important points on the plasma wave experiments in the polar ionosphere are indicated. Concrete proposals of the antarctic rocket experiments on the plasma waves are given. One is a passive observation of the plasma waves and the others are active experiments of linear and nonlinear wave-particle and wave-wave interactions.

1. 序

1971年9月に「南極ロケット観測将来計画シンポジウム」が開催され、ほぼ3年の歳月が流れた。そのシンポジウムでわれわれは南極ロケットによるプラズマ波動実験の意義とその問題点を技術的・科学的両面から捕え、報告を行った(松本・木村, 1972)。今回は IMS 期間に行われる第二期南極ロケット実験を目指して、具体的な実験テーマを提唱しつつ、南極ロケットによるプラズマ波動実験のあり方を考えてみたい。

極地方におけるプラズマ波動の研究の重要性は、すでに報告されている(松本・木村, 1972; 大家, 1972, 1975)ので詳細はそちらに譲り、ここでは簡単に述べるにとどめたい。

2. プラズマ波動に関する観測と実験の相補性

磁気圏の物理学を解く上で、非常に重要な位置を占めるのが、極地方の現象であることは衆目の一致する所である。従って、極域プラズマ中のプラズマ波動のスペクトルを直接ロケットによって観測することは、地上観測と共に非常に重要である。しかし、単にプラズマ波動のスペクトルを観測するだけでは、その中に含まれている多くの波動-波動および波動-粒子相互作用の情報を解析することは、ロケット数に制約のある現状では非常に困難なことと思われる。この困難さは、極地方プラズマの速度分布が、地上プラズマや中低緯度電離層ブ

* 京都大学工学部附属電離層研究施設. Ionosphere Research Laboratory, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto.

** 京都大学工学部電気第二教室. Department of Electrical Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto.

ラズマの速度分布と全く異なることに主として起因するものと思われる。

従って、極地方でプラズマ波動の研究を行う場合は、天然のプラズマ波動を単に観測するだけではなく、極地方プラズマという天然プラズマ実験室の中で、積極的にプラズマ波動に関する実験を行う必要がある。この積極的実験 (active experiments) は、極地方プラズマの中での波動-粒子相互作用、波動-波動相互作用等の基礎過程を明らかにし、観測されるプラズマ波動のスペクトルの解析に役立つ他、プラズマ物理学固有の問題も提起できるものと思われる。

第二次南極ロケット実験においては、是非この観測と積極的実験の両者を推進してほしいものである。

3. プラズマ波動の観測

プラズマ波動の観測については、第一次南極ロケット実験でも行われており (KAMADA, 1975), その目的や対象については多言を要しないが、内之浦では望めないようなプラズマ波動・不安定性の宝庫を探索するわけであるから、その方法については、十分検討してかかるねばならない。わが国のロケット実験プラズマ波動研究グループが重ねてきたいくつかの経験から、図1に示すような「プラズマ波動標準観測装置」を確立し、同じ装置で観測を重ね、装置の差異によるデータの差異を除去すべきと考えられる。

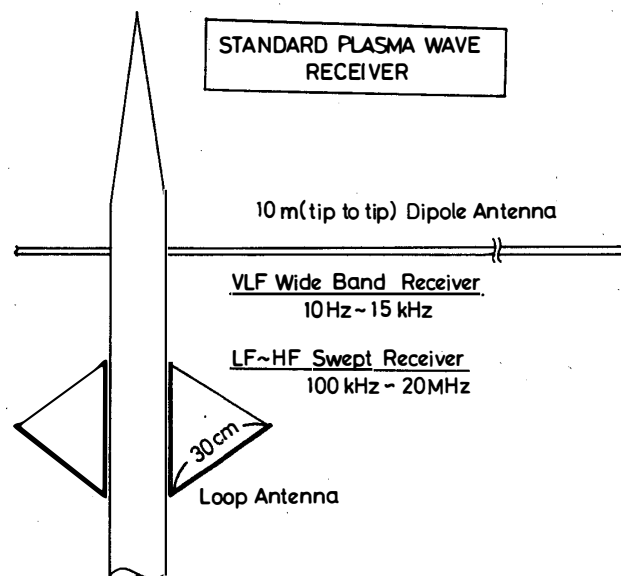


図 1 プラズマ波動標準観測装置の模式図

Fig. 1. Schematic illustration of plasma wave receiver.

以下にこの標準観測装置について簡単に説明を加えておく。アンテナは、電磁波と静電波とを区別するために、ホイップアンテナとループアンテナを併用しなければならない。ホイップアンテナは、すでに確立された技術の片側 5 m のダイポールアンテナが望ましい。これはロケット近傍の雑音、シース等の影響を小さくし、できる限り自然の状態でのプラズマ波を観測する目的の他、電磁波ではないが、波長の長くなった静電波—例えば K-9M-41 号機で観測された LHR エミッション (MATSUMOTO *et al.*, 1974) 一等を感度良く受信するためにも必要である。また、アンテナに関して重要なのは、静電波を受信するために必ず、正の直流バイアスを印加し、アンテナ電位をプラズマ電位近傍に引き上げておくこと、およびループアンテナの垂直効果を完全に除去しておくことである。

受信機に関しては、テレメーター上の制約から、ULF~VLF 帯のプラズマ波は広帯域受信機を用い、LF~HF 帯のプラズマ波は、掃引受信機を採用しなければならない。特に広帯域受信を行う場合は、電界、磁界両成分について、同時測定を行うことが望ましい。また、極域ではイオンに関するプラズマ波（イオン音波、イオンサイクロトロン波等）が重要な役割を果たしているから、1kHz 以下のスペクトルをテレメーター伝送可能周波数まで引き上げる工夫も要求されよう。

4. プラズマ波動に関する積極的実験

プラズマ波動に関する積極的実験としては、大別して、波動をプラズマに注入する波動法と粒子をプラズマに注入する粒子法の二つが考えられる。

波動法はさらに次の二つに分類できる。一つは地上に送信局を設け、電離層や磁気圏に電磁波を打ち込み、その応答を地上、または飛しょう体で受信する方法である。これには大電力後方散乱レーダーによって、電離層中にイオン音波を励起させる実験 (WONG and TAYLOR, 1971) や、VLF 送信機による ASE 実験 (HELLIWELL and KATSUFRAKIS, 1974) 等が知られている。他の一つは、飛しょう体から直接、周囲プラズマ中へ波動を送信し、その応答を飛しょう体で受信する方法である。この方法による実験には、有名な Alouette の トップサイド・サウダー実験、カナダのロケットによる LHR エミッションの人工励起実験 (BARRINGTON, 1968) およびわが国の K-9M ロケットによる非線形プラズマ波実験 (宮武・松本・木村, 1972, MIYATAKE *et al.*, 1974; MATSUMOTO *et al.*, 1974; 大家, 1972) 等が存在する。

一方、粒子法には、電子ビーム放出、イオンビーム放出、プラズマ放出等の方法がある。

いずれもロケットによる実験がすでに試みられている (HENDRICKSON *et al.*, 1971; HESS *et al.*, 1971; CARTWRIGHT and KELLOG, 1971, 1974等). 高エネルギーの電子ビーム, イオンビームを放出する場合には, ロケット電位の浮沈を補償するための特別な工夫が要求されるが, わが国では全く未経験の技術である. しかし, 低エネルギー ($<10\text{eV}$) 電子ビーム実験はわが国においてすでに実行され, 非常に興味あるプラズマ波動現象が発見されている (MATSUMOTO *et al.*, 1974; 大家, 1975). プラズマ放出に関してもわが国で計画が進められている (河島, 1975).

われわれは, 内之浦で積み上げてきたプラズマ波動に関する積極実験の技術と経験とを是非極地ロケットで実行したいと考え, 先に述べた「プラズマ波動標準観測装置」と共に, 次の二つの積極的実験装置を提案したい.

4.1. 非線形プラズマ波動相互作用実験

この実験は, 大振幅電子プラズマ波, または電子サイクロトロン波をプラズマ中に送信し, その非線形特性, 特に低周波イオン音波, イオンサイクロトロン波のパラメトリック励起を研究するものである. 極地方のオーロラ発生にイオン音波の乱流状態が重要な役割を果すことが最近よく言われるようになったが, その発生機構の研究は, 今後の重要な課題である. 従って, 電子領域プラズマ波とイオン領域プラズマ波との非線形結合の実験的研究は, 重要な問題と考えられる.

大振幅電子プラズマ波によるイオン音波のパラメトリック励起実験は, すでに内之浦上空電離層内で二度行われた (K-9M-35, K-9M-41). この非線形励起は, いわゆる非線形三波プロセスの周波数関係を満たすときにのみ, 実現されるという理論結果と一致する結果が得られているが (宮武・松本・木村, 1972, MIYATAKE *et al.*, 1974), 励起されたイオン音波の周波数スペクトルは図2に示すように, いわゆる VLF エミッションのそれと非常に似かよっていることが見い出されている.

極地ロケットでも図3に示すように, 大振幅プラズマ波送信用のメッシュを設け, この実験を行い, プラズマ速度分布の異なった条件での実験データを得ることが望ましい.

4.2. 低エネルギー電子ビームによる波動-粒子相互作用実験

図4に K-9M-41 号機で得られた VLF 帯のプラズマ波のスペクトルを示す. このロケットでは, $0\sim 3\text{eV}$ の低エネルギー電子ビームが, ロケットより放出された. 図にはホイッスラー, LHR エミッションの他, 半スピン周期に同期したU字型のディスクリット・エミ

ッションが見られる。LHR エミッションは、電子ビームの有無に係わらずに、ロケットの飛しょう中ずっと観測されていたが、このU字型エミッションは、電子ビームの放出時のみ観測されたものである。このエミッションの周波数は、電子ビームエネルギーが高い程低くなることが明らかにされたが、これを線型のビーム不安定で説明することは

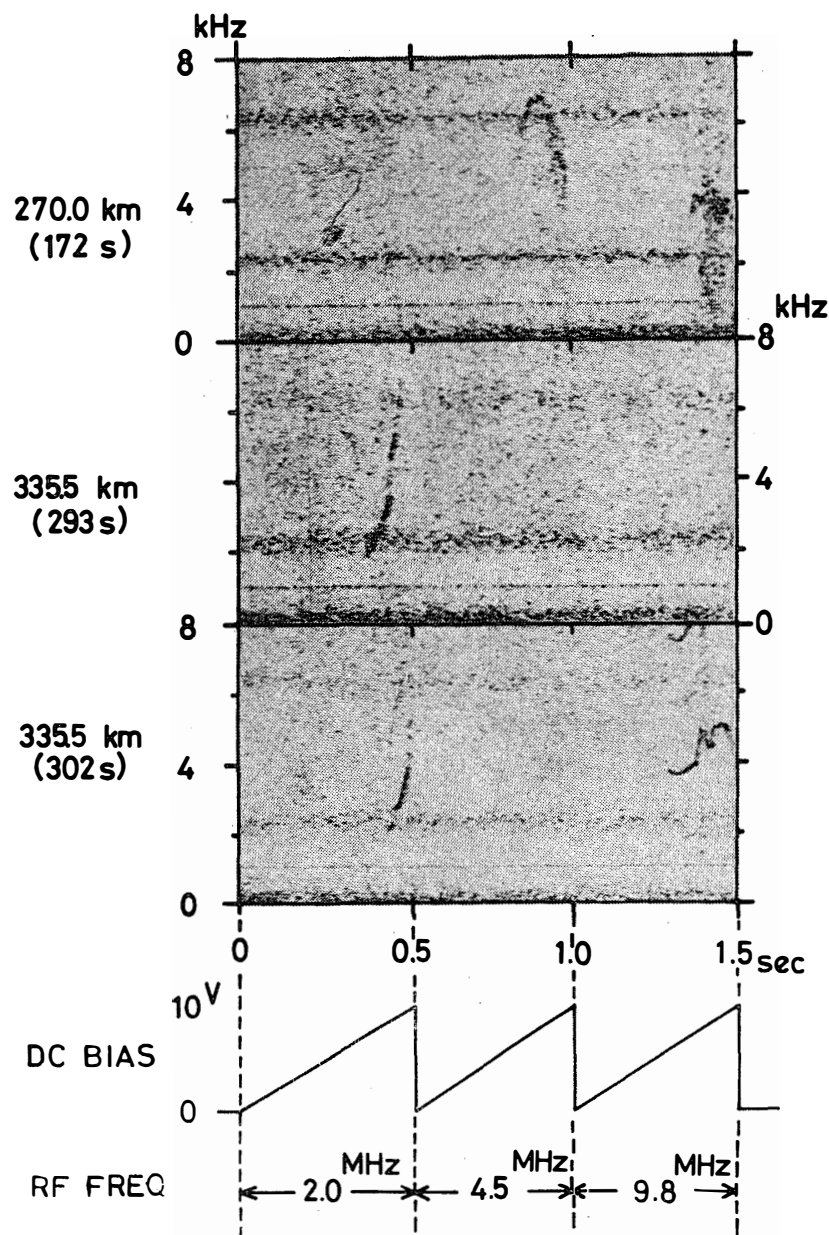


図 2 非線形電子プラズマ波によってパラメトリック励起されたイオン音波のスペクトル (K-9M-35)

Fig. 2. Dynamic spectrum of ion acoustic waves excited by non-linear electron waves.

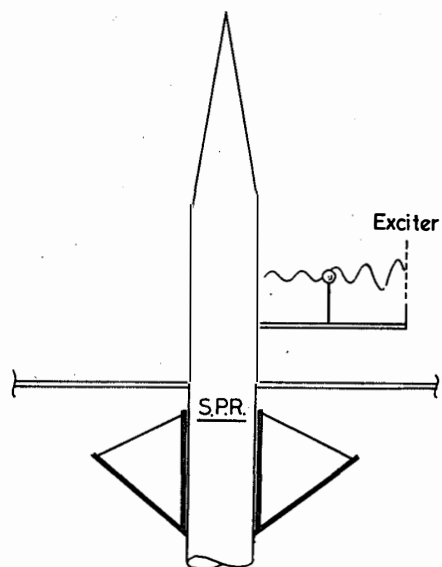


図 3 非線形波動-波動相互作用実験装置の
模式図

Fig. 3. Experiment of non-linear wave-wave
interaction.

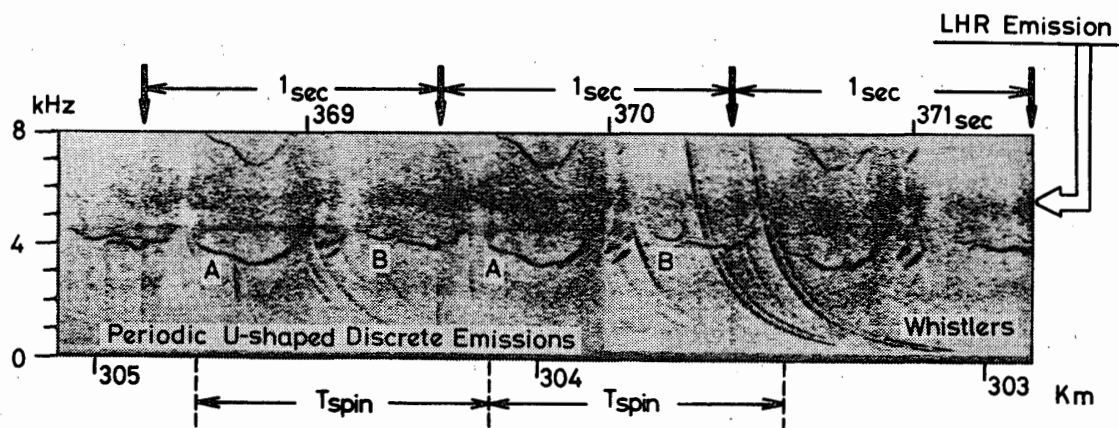


図 4 低エネルギー電子ビーム放出時の VLF 帯プラズマ波のスペクトル (K-9M-41)

Fig. 4. Dynamic spectrum of VLF-plasma waves excited by low-energy electron beams.

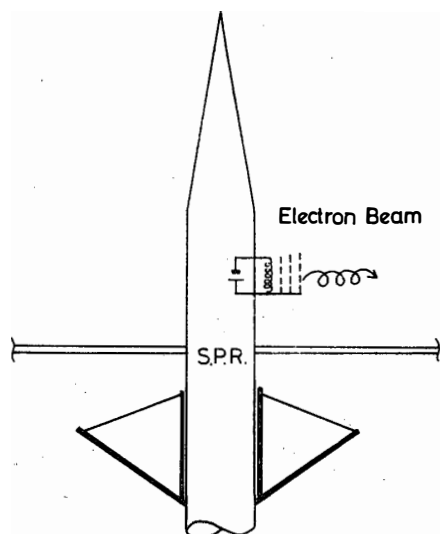


図 5 低エネルギー電子ビームによる波動
-粒子相互作用実験の模式図

Fig. 5. Experiment of wave-particle interaction
using low-energy electron beam.

現在のところ成功していない（詳細については，MATSUMOTO *et al.*, 1974参照）。

上に述べたように，低エネルギー電子ビームをロケットより放出することによっても，容易にプラズマ波動が励起されることが実験的に示された．この場合は，電子ビームのエネルギーが明らかであるため観測されるプラズマ波動から，波動-粒子相互作用の特性の解明が著しく進められよう．

図5に電子ビーム実験の模式図が描かれている．この実験も極地ロケットで行われることが望ましい．

5. 結 言

以上，われわれが従来経験してきた内之浦ロケット実験を基に，プラズマ波動に関する極地ロケット実験の問題を具体的提案を含めて述べてみた．

極地方のプラズマ波の宝庫で観測を行うことは，無論必要かつ重要であるが，単なる観測に加えて，積極的実験を行い，極地プラズマの特性を探ることも，非常に有意義と考えられる．このことは極地プラズマ波現象が複雑であるがゆえにより一層必要であろう．

文 献

- BARRINGTON, R. E. (1968): A preliminary rocket investigation of very low frequency ionospheric resonances. Paper presented at COSPAR, Tokyo, Japan.
- CARTWRIGHT, D. G. and P. J. KELLOG (1971): Controlled experiment on wave-particle interactions in the ionosphere. *Nature*, **231**, 11-12.
- CARTWRIGHT, D. G. and P. J. KELLOG (1974): Observations of radiation from an electron beam artificially injected into the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **79**, 1439-1458.
- HELLIWELL, R. A. and J. P. KATSUFRAKIS (1974): VLF wave injection into the magnetosphere from Siple Station, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **79**, 2511-2518.
- HENDRICKSON, R. A., R. W. McENTIRE and J. R. WINCKLER (1971): Electron echo experiment: A new magnetospheric probe. *Nature*, **230**, 564.
- HESS, W. N., M. C. TRICHEL, T. N. DAVIS, W. C. BEGGS, G. E. KRAFT, E. STASSINOPOULOS and E. J. R. MAIER (1971): Artificial aurora experiment: Experiment and principal results. *J. Geophys. Res.*, **76**, 6067-6081.
- KAMADA, T. (1975): Preliminary report of rocket observations of the auroral hiss. *Nankyoku Shiryo (Antarctic Rec.)*, **52**, 151-155.
- 河島信樹・矢守 章・佐々木進・村里幸男・岡村昇一・金子 修 (1975): 極域電離層におけるプラズマ銃を用いた controlled active experiment. *南極資料*, **52**, 92-98.
- 松本 紘・木村磐根 (1972): 南極ロケットによるプラズマ波動実験の問題点. *南極資料*, **43**, 46-52.
- MATSUMOTO, H., S. MIYATAKE and I. KIMURA (1974): Frequency spectra of VLF plasma waves observed by Japanese ionospheric sounding rocket K-9M-41. *Rep. Ionos. Space Res. Japan*,

28, 89-109.

宮武貞夫・松本 紘・木村磐根 (1972): K-9M-35 号機による非線形プラズマ波動相互作用の実験. 東大宇宙研報告, **8**, 108-120.

MIYATAKE, S., H. MATSUMOTO and I. KIMURA (1974): Rocket experiment on nonlinear wave-wave interaction in the ionospheric plasma. *Space Res.*, **14**, 385-390.

大家 寛 (1972): 磁気圏プラズマとオーロラサブストーム. 南極資料, **43**, 53-59.

大家 寛 (1975): 南極ロケットによるプラズマ波動の観測計画. 南極資料, **52**, 55-59.

OYA, H. (1971): Verification of theory on weak turbulence relating to the sequence of diffuse plasma resonance in space. *Phys. Fluids*, **14**, 2487-2499.

WONG, A. Y. and R. J. TAYLOR (1971): Parametric excitation in the ionosphere. *Phys. Rev. Lett.*, **27**, 644-647.