

南極ロケットによるプラズマ波動実験の問題点

松 本 紘*・木 村 磐 根*

Comments on Plasma Wave Experiments by Sounding Rockets in the Antarctica

Hiroshi MATSUMOTO* and Iwane KIMURA*

Abstract: As a part of the proceedings of "Symposium on future planning of rocket observation at Antarctica", problems of the rocket experiments on plasma wave phenomena are briefly discussed. Engineering requirements for the rocket experiments of the wave phenomena in the future are first described and then scientific missions of plasma wave observations and experiments at Antarctica are discussed.

1. は じ め に

極地における超高層ないし宇宙空間の物理学の一環としてのロケット実験をいかに進めるべきかという将来ビジョンを南極ロケットに直接関係していない者からも募るという事であったので、日常痛感しているところを述べさせて頂くことにした。

「極地ロケット実験」ということであれば、「極地」又は「ロケット」或いはその両方に意義が発見されねばならないが、「極地」の特長を生かすということについては、第3節で述べるとして、ここでは「ロケット」実験ということについて振り返ってみよう。ロケット実験そのものの意義は昨今経済的観点からも色色議論がなされているが、学術的には

- (1) Balloon の最高到達高度 (～40 km) から衛星の最低高度 (～250 km) までの空間の物理現象の観測
- (2) 物理量の vertical profile の測定
- (3) 必要な時点での測定 (つまり情報量の高密度化)
- (4) 衛星のプロトタイプのテスト

等があげられている。

* 京都大学工学部. Department of Electrical Engineering, Kyoto University, Kyoto.

諸外国の衛星による極域の研究と競合するには(2)と(3)の特長を十分に生かすべきであらう。

以下第2節では、これらの衛星実験と競合しうる有意義な波動実験を行なう上で最低限必要とされる技術上の要求を述べ、第3節では科学的立場から将来のミッションについて論じてみよう。

2. 技術的要求

アメリカ、カナダ、ソ連等の諸外国は衛星によるプラズマ波動観測(あるいは実験)を熱心に進めているが、それらと競合しうる科学的使命を南極ロケットに遂行させる上で、最低限必要と思われる技術上の必要事項としては以下のようなものが考えられよう。

2.1. 広帯域テレメーター (wide band telemetry)

波動の観測を通じて宇宙空間プラズマに関する種種の情報を得ることができるが、その観測対象は

- ① 受信強度の時間・高度変化
- ② 受信周波数スペクトルの時間・高度変化
- ③ 受信偏波特性
- ④ エネルギー・フラックススペクトル ($E \times H$) の測定*

等が考えられるが、これらの情報伝送には広帯域テレメーター (W. B. T.) が必要不可欠である。従来わが国のロケット実験では余りにも多くの PI の相乗りによってテレメーターのチャンネルの細分化を余儀なくされており、一部の専用ロケットを除いて W. B. T. は塔載されず、上記必要情報量の断片的側面の観測に終始していることが多い。このような状況の結果、千差万別のプラズマ波動の実態を十分解明出来ないまま、W. B. T. を採用した諸外国の衛星に先をこされている状態である。

従って南極ロケットによって今後プラズマ波動実験を行なうには、少なくとも W. B. T. を採用しなければ、ほとんどその科学的使命を果すことは不可能であると云っても過言ではない。なお、現在使用中の I. R. I. G. テレメーターでも第1～第8チャンネルのサブ・キャリアをつぶせば 0～75 kHz の W. B. T. は可能であるから、テレメーター受信装置の増設が熱望される。

* MOSIER (1969) らは E 成分と H 成分とを別々に求め $E \times H$ ベクトルを算出している。

2.2. 最高到達高度とスピン・プリセッション

現在使用中の S-210 ロケットでは高度 110~120 km までの観測が可能であるが、第 1 節でも述べたように、ロケットの長所である衛星の飛しょう不能な高度 (~200 km) までの領域での観測・実験ということを生かすためには少なくとも 200~250 km の最高到達高度を持つロケット* が一般的に必要であろう。波動観測・実験の立場からいっても中性粒子と荷電粒子との衝突による減衰の大きい 100 km 以下の実験は困難であるばかりではなく、E 層上部から F 層にかけてのプラズマ波動発生の研究が是非実行されねばならない。

又、波動実験の際には、常にアンテナが問題になるが、高感度受信、高能率送信を VLF 帯で行なうには、アンテナ実効長を伸ばすために長大アンテナが要求される。長大アンテナの製造並びに駆動機構は、技術的にはほぼ完成されたがロケットのスピン及びプリセッションは十分小さくする必要がある。そのためには飛行安定性の優れたロケットが要求されよう。

2.3. 同時又は連続打ち上げ

前述のように従来のロケット実験においては、一機に多くの PI が相乗りするため情報の cost performance が悪くなるばかりでなく、PI 同志の相互干渉も問題化している。従って PI の詰めすぎを避け、且つ一つの物理現象を多面的に研究するためにロケットを数発、少なくとも 2 発を同時又は 5 分間おき程度に連続打ち上げが可能になることが望まれる**。具体的にはプラズマの基礎量測定機と他のプロジェクトの実験機は別々に同時又は連続に打ち上げるべきであろう。

3. 科学的使命

アメリカ、カナダ、ソ連等の膨大なデータを有する科学衛星実験及び外国の数多くの sounding ロケット実験と競合が可能で、且つ学術的に非常にユニークで有意義な成果をあげるには、かなり厳しい project design が必要である。プラズマ波動関係での実験の将来の方向をこの節で探してみたい。

波動関係の研究方法は passive な観測と active な実験の 2 つに分類が可能である。それぞれの特長と問題点を拾ってみよう。

3.1. 観 測

自然界のプラズマ波動の観測は既に数多くなされており、今後の観測では昭和基地の特異

* M-4 S の補助ブースターが使用可能かもしれないというコメントが平沢氏（東大・理）からなされた。

** NASA Wallops Island では1970年3月7日の日食の間に30発の観測ロケットを打ち上げている。

性を利用したデータが有意となるものと思われる。その有効な方法として標準波動観測装置を完成し、それによるルーチン観測をいろいろな条件のもとで行ない、そのデータを検討する方法が考えられる。単に散発のロケット実験による異なった装置での異なった方法による観測では学術的意義は薄い。

まず標準波動観測装置はループアンテナとダイポールアンテナによる H バンドと E バンド 2 系統の高感度 ($10 \mu\text{V/m} \sim 10 \text{ mV/m}$ 以上) 且つ広ダイナミックレンジ (60 dB 以上) の受信機とする。テレメーターは H バンド, E バンド共に $0 \sim 30 \text{ kHz}$ の VLF 帯広帯域伝送と $100 \text{ kHz} \sim 20 \text{ MHz}$ のスイープ受信 ($5 \sim 10$ 回/秒, $\text{resolution} \leq 50 \text{ kHz}$) の IRIG 送信の両方を行ない, $0 \sim 20 \text{ MHz}$ までの波動スペクトル及び強度の時間・高度変化を得るものが望ましい。

観測ルーチンに入った場合, どのような時点で観測を行なうかということが次に重要なポイントとなるが, 少なくとも次のような条件で実験を行なうことが実験を有意義とするものと思われる。

3.1.1. 昼, 朝夕, 夜のデータ

昭和基地は地磁気緯度が 69.6° にあり, $L \sim 8.5$ に相当する位置のため昼間と夜間とでは閉磁力線と開磁力線という異なった状況におかれている。従ってプラズマ波動のスペクトルは昼・夜においてどのような変化をなすか, 特に朝・夕の過渡期にはどのような変遷をするかということは VLF エミッション, プラズマ静電波等の発生, 伝搬と密接に関連し, 非常に重要かつ興味深い。

3.1.2. 異なった地磁気条件でのデータ

波動スペクトルが地磁気インデックス Kp , 磁気嵐, サブストーム, sc 等とどのような相関があるかを調べる。特に静電波は地上観測が不可能であるため飛しょう体による統計が必要である。

3.1.3. 特殊現象の総合研究の一環として

オーロラの総合研究の場合のようにあらゆる角度から 1 つの現象を解明する場合, 波動スペクトルが重要な役割を果たすことは論を待たない。この場合ロケット実験は特殊現象の生じた時点で観測が可能という観点からみれば衛星に優る成果が期待できる。但しこの場合も 3.1.1. 及び 3.1.2. のデータが得られていない場合にはその意義は半減するであろう。

以上のような種々の状況の下でのデータから色々な場合の E 成分及び H 成分の高度 (又は時間) に対するスペクトル表示及び $E \times H$ の方向等が得られる。これらのデータの相互比較は勿論, 必要であるが, その他ロケットフライト時に同時に VLF 地上観測及び出来れ

ば, conjugate point での地上観測を行ない, それらのデータとの比較も行なう必要がある. 又, 波動スペクトルを吟味する上で是非必要なデータとして, 電子密度, 温度, 高エネルギー粒子の分布関数等があるが, これらもロケットの同時又は連続打ち上げによってデータを蓄積することも必要であろう.

3.2. 実験

前述のように自然界のプラズマ波動を受信する観測は, 地上を取りまく自然環境を探る上で重要な方法ではあるが, 諸外国の科学衛星等と競合しうるのは数多くのデータを得る必要があることを指摘した. これはコントロールのきかない自然環境の中での作業である限り止むを得ぬことであろう.

一方, ロケット実験を天然プラズマの中での active な実験として捕えることも出来る. 無限に広く, 一様な(波長による)磁化プラズマで, 且つ極地方では豊富な高エネルギー粒子を含むため, 理想のプラズマ波動実験室とみなすことができる. このような理想的実験室

において, 種々のプラズマ波動の実験を行なうことによってプラズマ波動そのものの物理的性質を解明していくのも一つの重要な方向である.

実験の内容については今後の学問の発展によってその重要性は移動していくのは当然であるが, 現時点で実験を行なえば, 有意義と思われるものをいくつか並べてみる.

3.2.1. 伝搬実験

種類のモードの波動の伝搬についてはほとんど解明されているが, 未知のものは勿論, まだ特異な伝搬を行なうと理論的に指摘されながら実証されていないものも存在している. このようなモードの伝搬実験を, 親子ロケット, 科学衛星*—ロケット, 地上一ロケット間で行なえば十分興味ある結果が得られよう.

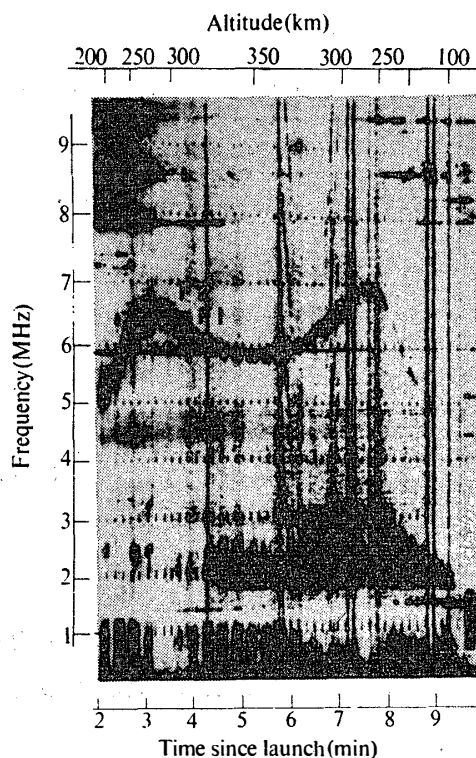


図1 子ロケットで受信されたエミッションのスペクトル (CARTWRIGHT & KELLOGG, 1971)

* 日本の EXOS, カナダの ISIS, アルエット, アメリカの OGO-6 等.

3.2.2. プラズマ波動の非線形励起実験

(a) 地上からの電波による励起・変調

地上から HF 帯の電波を送信することは容易なため送信を効率よく行なうことが可能で、これによってプラズマ波（電子音波，バーンスタイン波）との非線形相互作用による変調又は励起実験が考えられる。

(b) ロケットからの電子ビーム又はイオンビーム放出による波動励起

この実験は，CARTWRIGHT and KELLOGG (1971) によって最近行なわれた。これは，親ロケットに搭載された電子銃（3 kW）より $E=35\text{ keV}\sim 45\text{ keV}$ ，ピッチ角 $=65^\circ\sim 115^\circ$ の電子ビームを間欠的に放射し，種種のモードの電磁波，静電波を励起したもので，ビーム-プラズマ波動相互作用の理論をよく証左するとともに多くの新しい問題を提起している。彼らの得た結果を図 1 に示す。

5~6 MHz に現われたノイズはチェレンコフ放射らしきプロセスによる UHR ノイズ（プラズマ波）で，F1, F2 は，プラズマ周波数及び UHR 周波数を示している。1 MHz 以下のノイズはホイッスラーモード波に相当し，2~3 MHz 帯に現われた強いノイズは第 1 バーンスタインモードであると結論している（詳細は上記論文参照）。

(c) ロケットからのインパルスの電波送信による波動励起

これは (b) とは逆のプロセスをいくもので，強い電波をロケットから送信することによってプラズマに非線形プロセスを誘起しようとする実験である。プラズマの波のスペクトル及びプラズマの速度分布関数の変化を測定することによって，波動-粒子，波動-波動相互作用から成るプラズマ乱流の基礎過程を解明できよう。

このような active な実験は，数少ないロケット打ち上げでも，ねらった多くの情報が得られるという長所を持つことから，将来有望な研究方法と思われる。

4. お わ り に

以上，大まかではあるが極地方でのロケット実験の有意性を向上させるために必要な技術上の問題点と今後推進さるべき科学的テーマについて述べてきた。波動現象は極地方の超高層物理学解明の大きな手掛りを与えるものであるから，多くの関係者の親密且つ忌たんの無い意見の交換を通じて有意義な project design の完成を計ることが望まれる。

最後に常に御指導を賜わっている前田憲一教授に感謝いたします。又，会場でコメントを頂いた大林辰蔵教授，福島直教授その他の皆さまに感謝します。

文 献

- CARTWRIGHT, D. G. and P. J. KELLOGG (1971): Controlled experiment on wave-particle interactions in the ionosphere. *Nature Phys. Sci.*, **231**, 11-12.
- MOSIER, S. R. and D. A. GURNETT (1969): VLF measurements of the Poynting flux along the geomagnetic field with the Injun 5 satellite. *J. Geophys. Res.*, **74**, 5675-5687.

(1971年11月20日受理)