

超高層における電波現象の直接観測

木 村 磐 根*

Observation of Radio Wave Phenomena in the
Ionosphere and Exosphere

By
Iwane KIMURA

Abstract: Direct observations of radio phenomena in the ionosphere and exosphere by means of space vehicles have several merits. Among these, observation of the phenomena which do occur only in these spaces, can not be achieved without the space vehicles. Whistlers which are affected by the effects of ions, whistlers propagated in the non-ducted paths, ion cyclotron whistlers, lower hybrid resonance noise, electrostatic ion waves are typical examples of such phenomena.

In this paper, first, the propagation modes in the magnetoactive cold and hot plasma are briefly introduced. Importance of the effects of ions on the VLF and ELF propagation modes is stressed. Several phenomena relating these ion effects which were observed with satellite borne receivers are introduced. Other radio wave experiments by using satellite and rockets are reviewed and our future experiments by means of the Japanese sounding rockets are proposed.

1. 緒 言

地上で観測される電波現象（周波数で数 10 c/s～数 10 Mc/s 程度のものについて）の中には、電離層、外気圏あるいは磁気圏を通過したもの、およびこれらの空間で発生したものなどいろいろあるが、もしロケットや人工衛星によりこれらの空間内で直接電波現象を観測したとすれば、地上とはかなり違った現象が期待される。その理由には以下のようことがある。

- 1) 電離層内で受ける減衰あるいは電離層下部での反射等により地上に達しない現象がある。これはたとえば太陽電波の低い周波数成分（数 Mc/s）や、VLF の電波でも特に伝ばべくトルの方向が磁力線の向きに近くない場合などがこれらに相当する。
- 2) 電離層や外気圏などの中でなければみられない現象がある。これには後述のような人工衛星 Alouette I で観測された特殊なバンドの雑音、Injun III などで観測された proton whistler、またこれらの空間内でしか伝ばできない electrostatic wave 等々がある。
- 3) 上記の二つの理由のほかに電波の伝ば特性そのものを調べるという目的があり、直接

* 京都大学工学部

測定の必要性が考えられる。これには地上から送信された電波の電磁界強度、偏波などを飛しょう体により観測する。またその飛しょうに基づくドップラーを測定して媒質の性質を調べる手段と/or ができるなどの副産物がある。

これらの理由に基づき、これまで諸外国および我が国では人工衛星およびロケットを用いてこれら電波現象の直接測定がなされ、実に豊富な成果が上げられている。この報告では、以下まずこれら電波現象の基本となるプラズマ中の伝ばモードについて紹介し、続いて諸外国および我が国のこれまでの実験の簡単な review と、今後我々として進むべき方向などを述べる。

2. プラズマ中の電磁波のモード

電離層および外気圏などのプラズマ中の電波の伝ばについては特殊な場合を除けば温度の影響を無視した cold plasma の取扱いで十分である。特殊な場合とはプラズマ中の電波の放射につながる instability や、プラズマ中の音波のモードなどに対応する。ここでは cold plasma を主に考え、hot plasma については簡単に述べる。

a) Cold plasma の場合

電子および各種のイオンを含み、静磁場の存在するプラズマ中の電波伝ばのモードは次の量 R , L , P によって定められる[1]。

$$R = 1 - \sum_r \frac{\Pi_r^2 / \omega^2}{1 + \Omega_r / \omega} \quad (1)$$

$$L = 1 - \sum_r \frac{\Pi_r^2 / \omega^2}{1 - \Omega_r / \omega} \quad (2)$$

$$P = 1 - \sum_r \Pi_r^2 / \omega^2 \quad (3)$$

ただし Π_r , Ω_r は r 番目の種類のイオン（あるいは電子）のプラズマ角周波数、およびジャイロ角周波数であって、そのイオンの密度を N_r , 電荷を $\epsilon_r Z_r e$ (e は電子の電荷, ϵ_r は電荷の符号), M_r を質量とすると次式で与えられる

$$\begin{aligned} \Pi_r^2 &= \frac{N_r Z_r^2 e^2}{M_r \epsilon_0} \\ \Omega_r &= \frac{\epsilon_r Z_r e B_0}{M_r} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで ϵ_0 は真空中の誘電率、 B_0 は静磁場の磁束密度である。また (1)～(3) 式中では電子およびイオンの衝突による項は無視してある。

このプラズマ中の電波のモードについて磁界 \mathbf{B}_0 と平行な伝ばベクトル \mathbf{K} をもつ場合と直角方向に伝ばベクトル \mathbf{K} をもつ場合の extreme cases を考える。

i) $\mathbf{K} \parallel \mathbf{B}_0$ の場合

電波の屈折率を n とすると前述の式 (1)～(3) で定められる量 R , L , P に対応して次の表のように三つのモードが考えられる。

モード	偏波	このモードに対応する通常のモードの名称*	備考
$n^2=R$	右旋円偏波	extraordinary mode whistler mode modified Alfvén mode	横波
$n^2=L$	左旋円偏波	extraordinary mode —Alfvén mode	"
$P=0$ $(\omega^2=\sum \frac{I}{r})$	直線	plasma oscillation	磁界 B_0 方向の綫振動

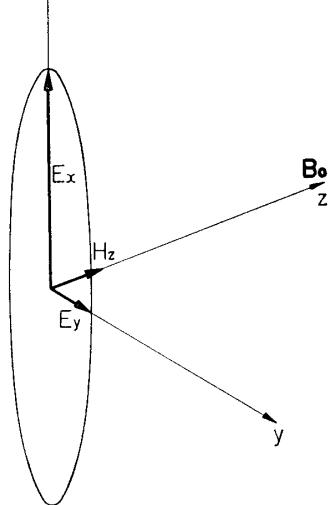
* 周波数の高い方から、低い方へ名称の変りを示す。

ii) $\mathbf{K} \perp \mathbf{B}_0$ の場合

下記の二つのモードがある。

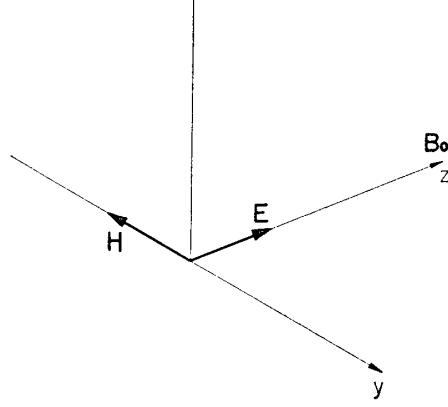
モード	偏波	このモードに対応する通常のモードの名称	備考
$n^2 = \frac{2RL}{R+L}$	第1図参照		準綫波
$n^2=P$	第2図参照	ordinary mode	横波

x ↑ K



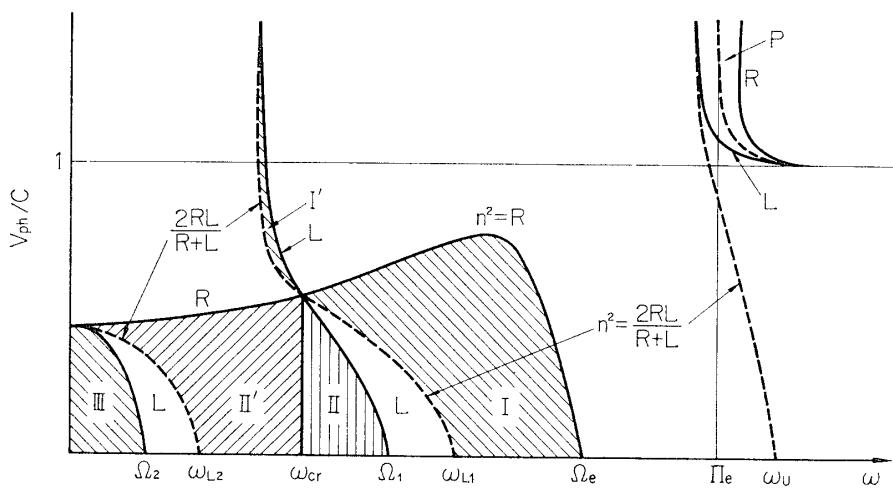
第1図 $\mathbf{K} \perp \mathbf{B}_0, n^2 = 2RL/(R+L)$
のモードの偏波

x ↑ K



第2図 $\mathbf{K} \perp \mathbf{B}_0, n^2 = P$ のモード
の偏波

これらの各モードが周波数に対してどう変るかを示すために第3図には2種のイオンを含むプラズマについて、その位相速度 $V_{ph}(=c/n)$ の周波数に対する依存性を示してある。この図で Ω_e , Ω_i は電子のプラズマ、ジャイロ角周波数, Ω_1 は軽い方のイオンのジャイロ角周波数であり, Ω_2 は重い方のイオンのそれである。また斜線(および綫線)のはいった領域は \mathbf{K} ベクトルが静磁界に対して任意の角をなす場合の位相速度の占める範囲を示す。図で ω_L は lower hybrid resonance frequency と呼ばれ、 B_0 に直角な伝ばモードの位相速度が零になる周波数で、たとえば $\omega_L < \omega < \Omega_e$ の範囲では B_0 に直角な方向の伝ばはできない。 ω_{L1} は



第3図 2種のイオンの存在するプラズマ中のモード

ω_U upper hybrid resonance frequency
 ω_L lower hybrid resonance frequency

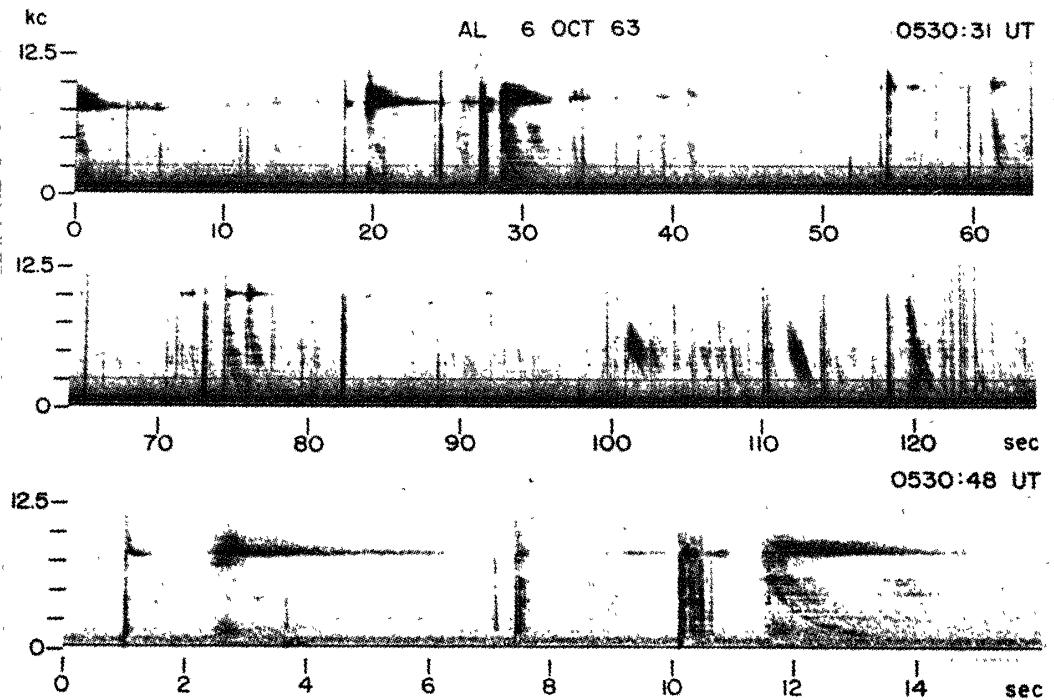
近似的に次式で与えられる[2]

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\omega_{Li}^2} - \frac{1}{M_{eff}} &= \frac{1}{\Pi_e^2} + \frac{1}{Q_e^2} \\ \frac{1}{M_{eff}} &= \frac{\alpha_1}{M_2} + \frac{\alpha_2}{M_2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし M_1 , M_2 は各イオンの電子に対する相対質量であり, α_1 , α_2 はイオンの相対密度 ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$) である.

この周波数では特に、第1図で示される**K**方向の電界 E_x が E_y に比べ非常に大きくなり、わずかの電力の流れ $S = E_y H_z$ に対して見かけ上大きな電界が現われることになる。これが Alouette I で初めて観測されたバンドの雑音 Alouette hiss であって [3], [4], [5]、その後更に地上高 700~1,000 km の所にそれらの周波数で \mathbf{B}_0 に直角方向のモードの波の trapping region があることもわかり非常に興味深い問題である[6]。なお、Alouette hiss band は地上では観測できず、またその noise にはシャープな下限があって、その周波数が ω_{L1} と考えられることから、(5)式を使ってイオンの effective mass, M_{eff} したがって、イオンの相対密度を知ることは重要である。

第3図において $n^2 = R$, $n^2 = L$, $n^2 = 2RL/(R+L)$ の三つのモードが一点で交わる周波数 ω_{cr} は crossover frequency と呼ばれる。この周波数ではあらゆるモードが直線偏波となり、その両側で右旋と左旋の偏波が入れ代る。 ω_{cr} の右側で I の領域の whistler mode は左側では I' の細い領域につながる。また II の領域は II' につながることになる。今地上の雷で放射された電波のうち、ある高さでの ω_{cr} より低い周波数成分で II' の領域には入るものを考える。その電波が B_0 と平行に近い伝ばをしたとすると高度が上昇して静磁界が弱くなり実質上第3図で各、 Ω , ω_{cr} が下ってくると ω は II の領域には入り最後に $\omega = \Omega_1$ の所でレゾナンスを起すことになる。第5図に示されるような Injun 3 で観測された現象は明らかに上述のような過程で生じたもので長い時間に尾を引く周波数はこの場合プロトンのジャイロ周波数で



第4図 Allonetle hiss band

proton whistler と名付けられた[7]. また左の端の尖端は上述の ω_{cr} に対応し、またこの周波数が近似的に

$$\omega_{cr}^2 = \Omega_e^2 \left\{ \frac{\alpha^2}{M_1} + \frac{\alpha_1}{M_2} \right\}$$

で与えられるところから、このホイスラーによっても観測点のイオンの組成、密度などが定められる. これまで 2 種のイオンの場合を考えたがイオンが 3 種あると crossover frequency が 2 か所に現われ、更に低い周波数の所で ion whistler ができる可能性がある. 事実 H⁺, He⁺, O⁺ の 3 種のイオンが存在する外気圏中で Alouette II により Helium whistler が発見された[8].

上述のように各種イオンを含むプラズマ中の電波伝ばんモードの特異性に基づくいろいろの自然現象があり、最近いすれも satellites により続々発見されている.

b) hot plasma の場合

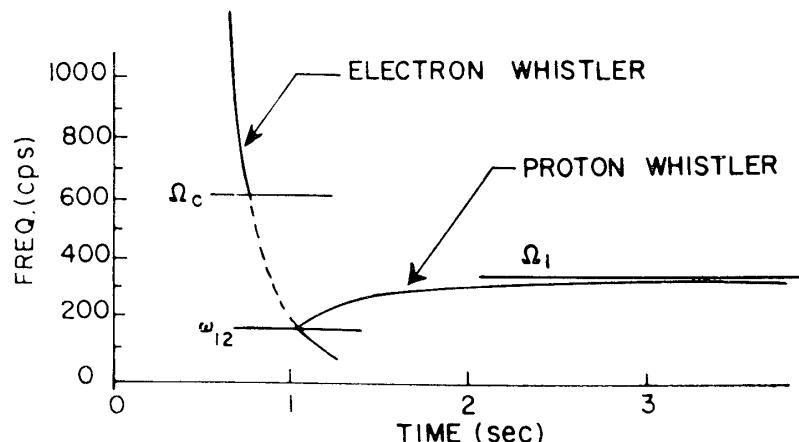
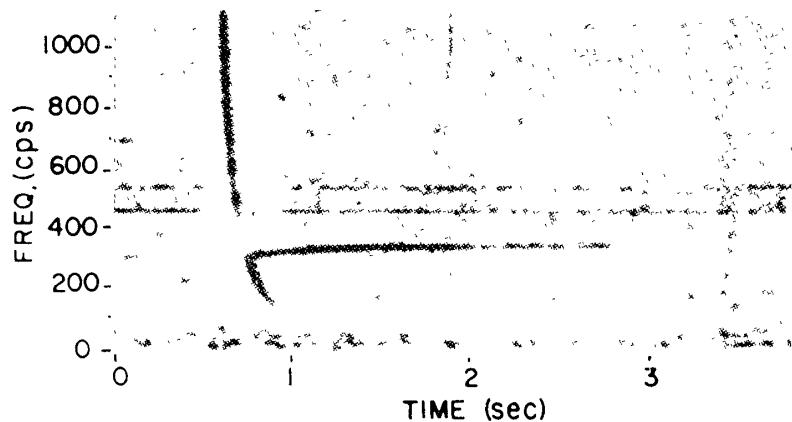
温度の効果を各荷電粒子の速度の分布関数として表現して取扱うことができるが、非常に複雑であり、第 1 近似として温度（特に電子温度）の効果が

$$p_e = N_e \kappa T_e$$

の形の isotropic pressure とし現わるとして取扱うと(3)式の P は

$$P = - \sum_{ion} \frac{\Pi_r^2}{\omega^2} + \frac{1}{k^2 \lambda_D^2}$$

となる. ここで k は伝ば定数、 λ_D は電子のデバイ波長である. そこで cold plasma 中の $P=0$ のモードに対応して $\mathbf{K} \parallel \mathbf{B}_0$ の場合には



第5図 Proton whistler

$$\frac{1}{\omega^2} = \frac{1}{k^2} \left(\frac{m_i}{Z_i \kappa T_e} \right) + \frac{1}{\Pi_i^2}$$

なる分散式が得られる。ここで ion は最も軽いもののみ考慮し, Π_i はそのプラズマ角周波数, m_i はそのイオンの質量, κ はボルツマン定数である。この式からこの波動はイオンのプラズマ周波数および、それより低い周波数の範囲に限られ、電界は存在するが磁界のないモードで electro-static (または acoustic) ion wave と呼ばれる [1]。

3. Satellites および Rockets による観測結果

現在までに発表された米国、カナダの人工衛星による電波現象(おもに低周波帯について)の観測の概要を表1に示す。アンテナとしてはループおよび直線型アンテナが用いられたが前者では断面積 1 m^2 で 1 ターンあれば十分であり、後者では Alouette I のように 45 m というのもあるが $2 \sim 3 \text{ m}$ 程度で十分であると思われる。受信機はホイスラー、emissions を対象としたものは $0.1 \sim 10 \text{ kc/s}$ 程度の wide band、他の場合には通常 narrow band の固定周波受信機が用いられるが、OGO-series では更に $0.1 \sim 100 \text{ kc/s}$ の範囲を 3 band にわけ、それぞれ

第 1 表 Satellite experiments for radio phenomena

Satellite	Date of launch	Apogee (km)	Perigee (km)	Inclination	Antenna	Frequency range	Remarks	References
Vanguard III	Sep. 18 1959	3750	510	33.5°	600 turns coil.	0.3~10 kc	whistlers (NASA)	[9]
Lofti I	Feb. 21 1961	960	166	28.4°	loop 0.5mφ	18 kc/s	NBA, NPG intensity (NRL)	[10]
Alouette I	Sep. 29 1962	1030	995	80.5°	dipole 45 m	0.5~10 kc	whistlers & emissions (CDRTE)	[3], [5], [11], [12] [13]
Injun III	Dec. 12 1962	2780	240	70°	loop 50turns 0.3 mφ	0.5~7 kc W.B.* 0.7~8.8 kc 6 chs	whistler proton whistler emissions (Iowa)	[7] [14]
P 11	Aug. 12 1964	3720	268	96°	whip 0.4 m	1.7, 3.9, 7.35 & 14.5 kc	E-S-ionwave (STL)	[15]
OGO A	Sep. 5 1964	149000	282	31°	loop 1 turn 2.8 mφ	0.3~12.5 kc W.B. 0.2~1.6, 1.6~12.5 12.5~100 kc spectra	whistlers, emissions, (Stanford)	[16]
OGO-C (POGO)	Oct. 14 1965	1510	414	87.4°	ditto	ditto	(Stanford)	[17]
Alouette II	Nov. 29 1965	2983	501	79.7°	dipole 45 m	0.05~30 kc W.B.	helium whistler (CDRTE)	[8]

* W.B.: wide band

第2表 Rocket experiments for radio phenomena

Rocket	Date & Time of launch	Maximum altitude	Antenna	Kagoshima Space Center(20° N geomag)			References
				Frequency range		Remarks	
K-8-11	Dec. 18 '62 1403 JST	202 km	loop 120 turns 21 cm ϕ dipole 9.2 m	17.44, 100, 105 kc		field intensity	[18]
K-9 M-2	May 20 '63 1109 JST	341	loops.	7.2, 17.44, 100, 700 kc		700 kc doppler	[19]
L-2-2	Dec. 11 '63 1400 JST	400	2 monopoles 3 m	0.5, 3, 17.4, 92.5 kc		17.44 kc doppleo whistler	[20]
L-3-2	Jan. 31 '65 1401 JST	337	2 monopoles 3 m	0.5, 1, 1.5, 3.5, 8 kc		whistlers & E-S-ion wave	[21]
K-9 M-6	Feb. 6 '65 1902 JST	332	loop 1.3×1.3 m	0.4~10 kc W.B.		whistlers	[21]
Wallops Is. Virginia (40° N geomag)							
Aerobee 150 A	Apr. 12 '63 0032 EST	200	2 loops 3 m ²	0.5~12 kc W.B. 0.85~9.6 8 chs.		10, 2 kc doppler whistlers & hiss	[22]
Aerobee	May 9 '63 1303 EST	200	ditto	ditto		whistlers & hiss	[23]
Aerobee	Jul. 9 '63 2146 EST	204	ditto	0.2~12.5 W.B		whistlers	[24]

周波数掃引によってそれぞれの範囲で spectrum をとりディジタルで地上に伝送するという新しい方式を用いている[16], [17].

観測結果としては Alouette I によりイオンの効果の現われた SP whistler [11], [12], transverse whistler [13], また Alouette hiss band[3], [4], [5] など地上では観測できない新しい現象が発見された. Injun 3 では proton whistler[7] が発見され, また auroral hiss と 40 keV 電子の緯度的な相互関係を明らかにした[14]. P 11 では electrostatic ion wave と考えられるような 10~100 mV/m という強い電界が観測された[15]. このように人工衛星による観測は明らかに地上観測の守備範囲を越えた新しい現象の発見をもたらし, その成果は期待以上のものがあった. 特に注目すべき点は Injun 3 で proton whistler が発見され, その理論的解釈が行なわると一步進んで helium whistler が予測され Alouette II により見事に確かめられたことである[8].

表 2 には我が国, および米国で行なわれたロケット実験をまとめてある. ロケットでは高さ方向にプロファイルを見る形になるので, ドップラ法により電子密度の観測が可能である. VLF の地上局信号を利用した場合スネルの法則により, 伝ばベクトルの方向が電離層中ではほぼ垂直になるため地上 2,000 km 付近までの電子密度の測定に利用できる. L-3-2 号機では先述の electro static ion wave らしきものが観測され, それを再度確かめるべく実験が計画されている.

4. 今後の問題と展望

これまでのなりゆきからみて, 現在米国などで行ないまた計画している実験はおもに人工衛星を用いて, 地上 1,000 km 近傍のイオンの組成, 密度等を ion cyclotron whistler, Alouette hisses 等から求めること, natural VLF emissions と particles の関連を調べること等々である.

一方我が国ではこれらの世界の情勢を考慮し, できるだけ日本の特異性も生かして, しかも K あるいは L 型ロケットで行なえる実験を考える必要がある. 今後の問題としてたとえば以下のようことが重要であると思われる.

- 1) 電離層下部における VLF 電波の ray path および偏波-電離層下部では電子密度の急変のため, ray theory は成立せず, 厳密には Full wave equation を解かなければならない. しかしこれは困難であるから実験的に調べる必要がある.
- 2) 電離層上部における VLF 電波の偏波-特に日本のように低緯度地方では磁力線に沿った duct 伝ばより non-ducted 伝ばの方が多いと思われるが, その点を確かめることは重要である.
- 3) Electrostatic ion wave のスペクトルおよび位相速度の測定. もしこの種の波動が実在するとすれば, その源の問題もあるが, 媒質の温度と結びつく点が重要である. しかしそのスペクトルはロケットの飛しょうによりかなりドップラーシフトを受けているはずである. この効果は波動の位相速度が決まらなければ決まらないという問題がある. この辺を理論と実験の両方から攻める必要がある.
- 4) Alouette hiss の機構の一部として lower hybrid resonance に近いモードの trapping

zone が地上 1,000 km 前後にあることが予測されているので、この存在をロケットで調べることは興味あることである。

5) VLF emissions とその generation に関する particles との関連を積極的に調べる必要がある。

我が国の実験ではテレメータの方からの制限により、広帯域伝送が非常にむずかしく、これまで 10 kc/s のバンド幅で送れたのは K-9 M-6 号機 1 回である。今後もし新しい現象の発見をも一つの目的とする場合には、やはり広帯域伝送がもっとたやすくできることが強く望まれる。

1966 年 7 月 23 日

参考文献

- [1] Stix, T. H. The theory of plasma waves, McGraw-Hill Book 1962.
- [2] Smith, R. L. and N. M. Brice J. Geophys. Res. **69**, 5029-5040, 1964.
- [3] Barrington, R. E., J. S. Belrose, and D. A. Keeley J. Geophys. Res. **68**, 6539-61, 1963.
- [4] Brice, N. M. and R. L. Smith J. Geophys. Res. **70**, 71-80, 1965.
- [5] Barrington, R. E., J. S. Belrose, and G. L. Nelms J. Geophys. Res. **70**, 1647-64, 1965.
- [6] Smith, R. L., I. Kimura, J. Vigneron, and J. Katsufakis J. Geophys. Res. **71**, 1925-27, 1966
- [7] Gurnett, D. A., S. D. Shawhan, N. M. Brice and R. L. Smith J. Geophys. Res. **70**, 1665-88, 1965.
- [8] Barrington, R. E., J. S. Belrose, and W. E. Mathar, Nature, **210**, No. 5031, 80-81, 1966.
- [9] Cain, J. C., I. R. Shapiro, J. D. Stolarik and J. P. Heppner J. Geophys. Res. **66**, 2677-80, 1961.
- [10] Leiphart, J. P., R. W. Zeek, L. S. Bearce, and E. Toth Proc. IRE, **50**, 6-17, 1962.
- [11] Carpenter, D. L., N. Dunckel, and J. F. Walkup J. Geophys. Res. **69**, 5009-17, 1964
- [12] Kimura, I. Radio Science, New ser. **1**, 269-83, 1966.
- [13] Kimura, I., R. L. Smith, N. M. Brice J. Geophys. Res. **70**, 5961-66, 1965.
- [14] Gurnett, D. A. and B. J. OBrien J. Geophys. Res. **69**, 65-89, 1964.
- [15] Scarf, F. L., G. M. Crook, and R. W. Fredricks J. Geophys. Res. **70**, 3045-60, 1965.
- [16] Trans. AGU **46**, 326-32, 1965.
- [17] Ficklin, B. P., L. H. Rorden, M. E. Mills, R. H. Stehle, L. E. Orsak Technical Memorandum 2. Stanford Res. Inst., March 1965.
- [18] 前田憲一, 木村磐根, 高倉達雄 生産研究, **15**, 304-7, 昭 38.
- [19] Maeda, K., I. Kimura, and T. Takakur. aRep. Ionos Space Res. Japan, XVII, 259-72, 1963.
- [20] Maeda, K., T. Obayashi, I. Kimura, H. Oya and T. Ogawa Rep. Ionos. Space Res. Japan, XVIII 329-44, 1964.
- [21] Iwai, A., J. Otsu and Y. Tanaka Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ. **13**, 1-22, 1966.
- [22] Cartwright, D. G.: Planet. Space Sci., **12**, 11-16, 1964.
- [23] Cartwright, D. G. Planet. Space Sci., **12**, 751-59, 1964.
- [24] Cartwright, D. G.: J. Geophys. Res. **69**, 4031-35, 1964,

質 疑 討 論

前田(坦): 現在 magnetosphere における物理量の直接観測は、磁場、粒子エネルギーおよびフラックスくらいで、たとえば運動（特にプラズマとして）や、電場や温度についてよくわかっていない。magnetosphere 内での電波伝播がこれら物理量の測定に役立たないか。

木村: 電場（静的）の測定は大変むづかしい。温度については Alouette hiss から推定が行なわれている。ただしこの場合 scale height の値等が必要になる。（Alouette の場合には同時に Topside sounder data があったのでこれが使わされた。）運動についてはたとえば、その運動による instability の発生などと結びつければ、運動がわかる場合もあるであろう。

大津: magnetosphere の temperature の information として nose whistler の upper freq. cutoff が使えないだろうか。

木村: Nose whistler の upper cutoff freq. から plasma の温度を出す理論 (Liemohn & Scarf) もあるが、日本のような低緯度ではロケット観測の場合 nose freq. が高いため temperature の推定に使うにはあまり向いていないように思われる。

平尾: (1) 低緯度の観測の利点に magneto-ionic propagation をあげられたが、そのほかにどのようなことが考えられるか。

(2) 特に同時に観測を希望されるようなものがあるか。

木村: (1) 磁力線にそった electromagnetic な noise が少ないから electro-static wave 等に重点がおけるだろう。

(2) low energy particle (数 keV-数 10 keV) の detector と一緒ににはかることが必要であろう。

前田(憲): electrostatic ion wave を hook そのほかの VLF emission の原因と結びつけて考えられないか、つまり satellite が E-I wave を生じている場所の中へ突込んだときに、強く受かり、その時にこの場所から VLF emission を発生しているという考え方である。

木村: satellite が十分高ければ、可能性があると思われる。今のところ VLF emission の source はほぼ赤道面で $L = 2 \sim 3$ 以上のところが考えられているからである。これまでの観測はいづれも高さ数 100 km の所での観測である。なお、今後 loop antenna と whip antenna を併用して noise の電界と磁界を同時に測定すれば本当に electrostatic であるか、VLF emission であるかの区別がつくはずである。今後の再実験が必要である。