

じきけん (Exos-B) SPW 実験により 検出される磁気圏プラズマの流れ†

大 家 寛*・小 原 隆 博*・小 野 高 幸**

Magnetospheric Plasma Flow

—Results of Analysis of JIKIKEN f_{Qn} resonance observed by SPW—

By

Hiroshi OYA, Takahiro OBARA and Takayuki ONO

Abstract: On JIKIKEN satellite a high power RF transmitter for the generation of the plasma waves in a frequency range from 10 kHz to 3 MHz has been installed for the artificially stimulated plasma wave experiment (SPW observation). In the observed data of the electrostatic plasma resonance (f_{Qn} resonance), there are fine structure of the amplitude modulation due to the encounter of the oppositely propagating plasma waves emanating from the transmission antenna. From the period of the beat structure, the relative velocity with respect to the satellite has been obtained. The deduced speed is in a range from 2 km/sec to 4 km/sec. The excess values over the satellite velocity from 1 km/sec to 2 km/sec can be attributed to the plasma flow in a range outside of the plasmopause. And this flow is consistent with the convection pattern near the plasmopause.

概 要

科学衛星 JIKIKEN に搭載されたプラズマ波動励起実験装置 (SPW) は、ダイポールアンテナに低周波 (10 KHz) から、高周波 (3 MHz) に至る広い周波数帯域の RF 電界を加え、その結果、多くのプラズマ波動共鳴現象が観測されているが、その中で、 f_{Qn} (静電的プラズマレゾナンス) は、その強度が時間的に一定の周期で変調を受けるという特長がある。解析の結果、これらはプラズマと衛星の相対運動によるドップラー効果を受け周波数分離した、2つの波の干渉であることが判明した。そこで、この事実を用いて、プラズマ粒子の流れを計測することが可能となる。得られた結果は、プラズマポーズの内側は完全に地球と共回転運動している一方、プラズマポーズの外側では、しだいに

* 東北大学・理学部

** 国立極地研究所

† 宇宙研特別事業費による研究論文

非共回転運動が目出ってくる。共回転運動からはずれる成分に基づく電場が生じ、プラズマのドリフト運動を発生するが、その速度は、1 km/sec から時に 4 km/sec に及ぶが、ポーズから離れて行くに従って、非共回転は顕著になっていく。

1. 序

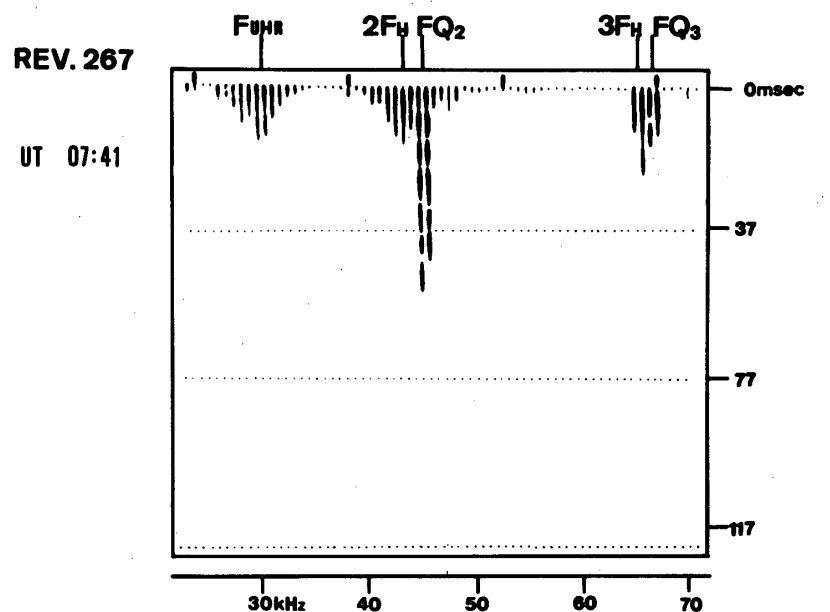
科学衛星 JIKIKEN に搭載された、プラズマ波動励起実験装置 (SPW) は、人工的にプラズマ波動を励起し、同時に励起されたプラズマ波動を自然に存在するプラズマ波動と合わせ観測し、磁気圏プラズマ中において能動的観測を行なうものである。全長 72 m のダイポールアンテナに、大振幅のパルス状高周波電界を印加し、周囲の宇宙空間プラズマに波動励起を行なう。一方受信はこれに直交する全長 102 m アンテナを用い、発射されるパルスの周波数に同調して、周波数同調受信を行なう。その周波数領域は、低周波 (10 KHz) から高周波 (3 MHz) にわたり、全周波数掃引は 64 秒で完了する。このようなシーケンスのくり返しにより、電離層からプラズマポーズの外側に及ぶ広い領域に存在する宇宙空間プラズマの諸性質を能動的手段により把握することが、可能になる。

一連の能動的手法による宇宙空間プラズマの探査は、米国の衛星 Alouette I に源を発している。電離層電子密度のトップサイドサウンディングを主目的としたものであったが、同時に静電的プラズマ波、特に電子サイクロトロン波動が観測されることになった。そして更に、それら諸共鳴現象の詳細に及ぶ研究が、Alouette II の観測データをもとに遂行され、以後 ISIS, GEOS, ISEE と発展した。我国でも、1972 年以後ロケット実験を通じて準備を積み上げ、ついに 1978 年 9 月 JIKIKEN 衛星で、電離層からプラズマポーズ外側に及ぶ広い領域で、波動励起実験を実現するに至った。高周波電界を周囲の宇宙空間プラズマへ印加することにより、多くのプラズマ波動に関する共鳴現象が観測されている。これら一連のプラズマ波動共鳴現象の基本となるものは、プラズマ波動の群速度が熱速度よりずっと低下し、衛星の速度と一致した時、長い継続時間を持って観測される点にある。これらの共鳴状態の波動を検討することにより、プラズマ波動の伝播特性及びプラズマパラメータの値を知ることが可能になる。共鳴波動に関する研究の中に、ドップラー効果に基く、一連の研究がある。ドップラー効果の最初の研究は、 f_{DN} レゾナンス (分散性レゾナンス) に関して行なわれたが (OYA and Benson; 1972), その結果衛星速度が判明している時、電離層プラズマの温度が求められた。その後、GEOS 衛星により観測された f_{QN} レゾナンス (静電的プラズマレゾナンス) が、同様にドップラー効果により 2 つの異なった周波数に分離して観測されていることが報告されている。(Higel; 1978)

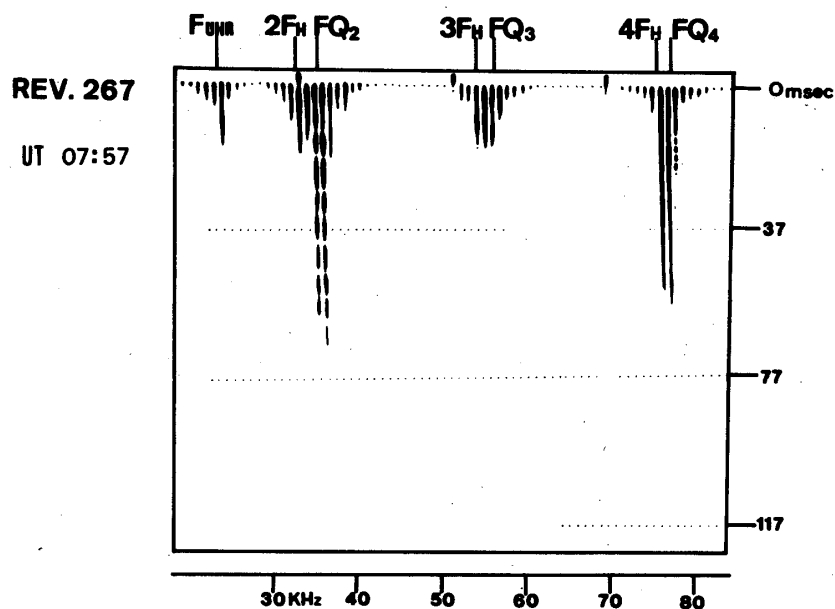
本稿は、JIKIKEN 衛星で観測された f_{QN} 共鳴波動の「うなり」の構造について検討したものである。うなりの原因は、周囲のプラズマに対し相対運動する衛星で観測したドップラー効果により、2 つの異なった周波数に分離した波動の相互の干渉によるものである。この相対運動には磁気圏プラズマの運動、つまり「流れ」(Bulk motion) が入っている。従って、 f_{QN} 波動の「うなり」の周期を観測して磁気圏プラズマの流れの情報を取り出すことができる。以下にその詳細を報告する。

2. 観測例

JIKIKEN 衛星により観測されたプラズマグラム (図 1(a)~(b)参照) に示すように, f_{UHR} , $2f_H$, $3f_H$, f_{Q2} 及び f_{Q3} の各共鳴波動は, 長い継続時間をもって受信されているが, その中で特に注目をひくのは f_{Q2} 共鳴波動が, いずれも「うなり」に基づく周期的強度変調を受けた構造を示していることである. このデータの中から Rev. 253, Rev. 267, Rev. 547 そ



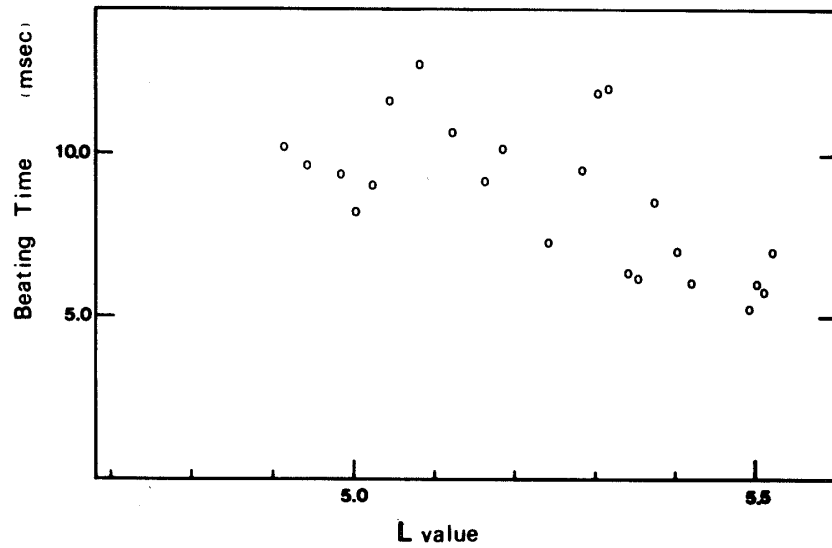
(a)



(b)

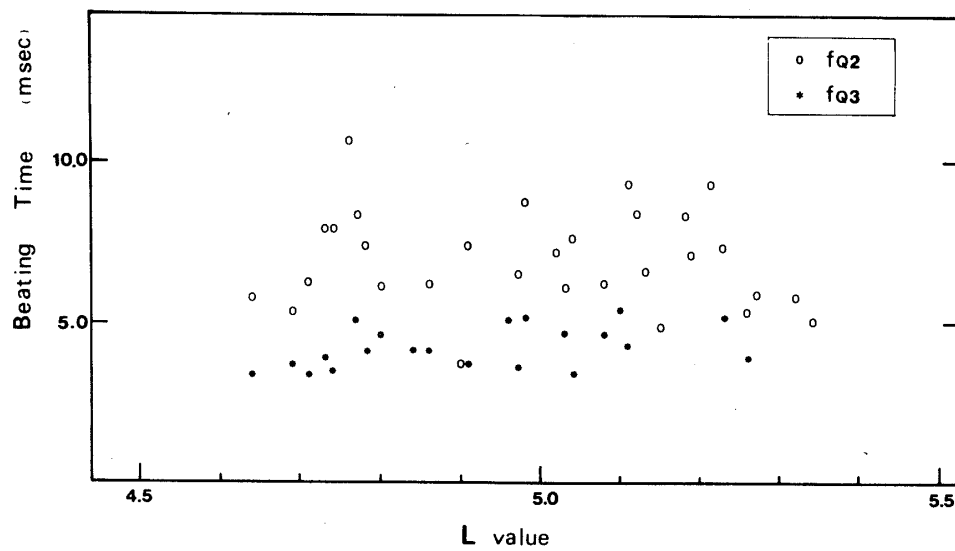
第1(a), (b)図 SPWにより観測されたプラズマグラム f_{Q2} の強度が一定の周期で変調を受けている.

REV. 253 '78.12.15



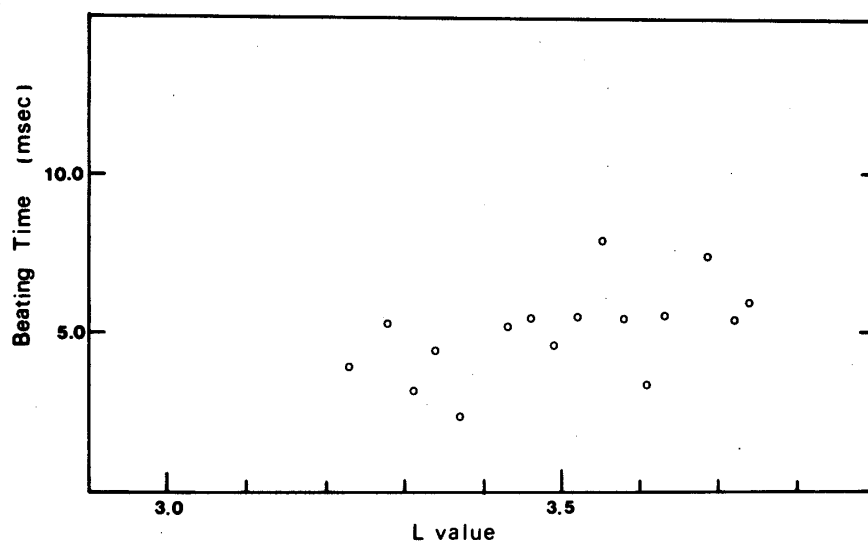
第 2(a)図 Rev. 253 の「うなり」の周期. 横軸は L 値.

REV. 267 '78.12.20



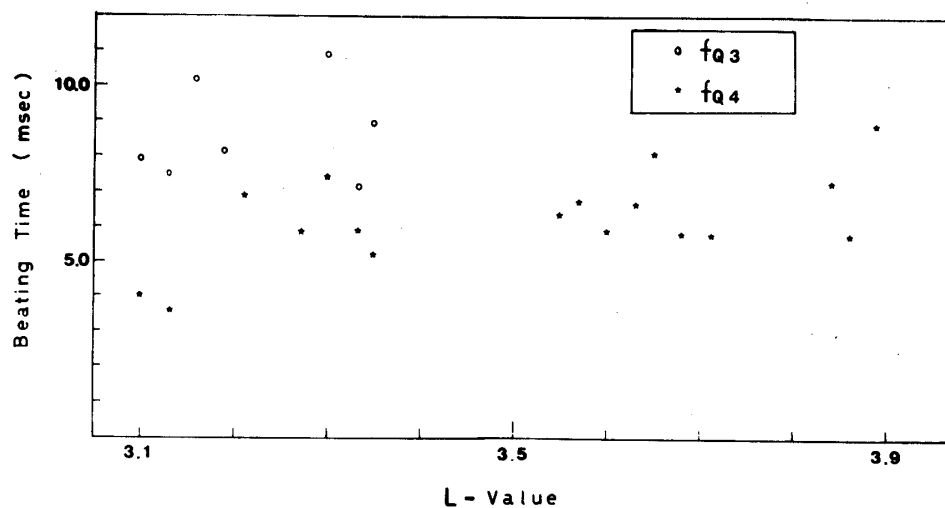
第 2(b)図 Rev. 267 の場合 (第 2(a)と同じ)

REV. 547 '79. 3.28



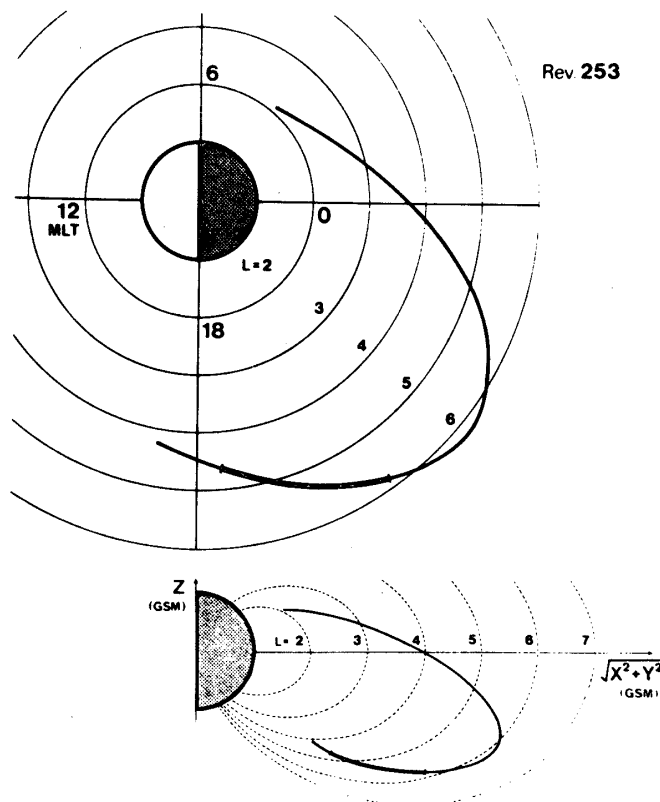
第2(c)図 Rev. 547 の場合 (第2(a)図と同じ)

REV. 550 '79. 3.29

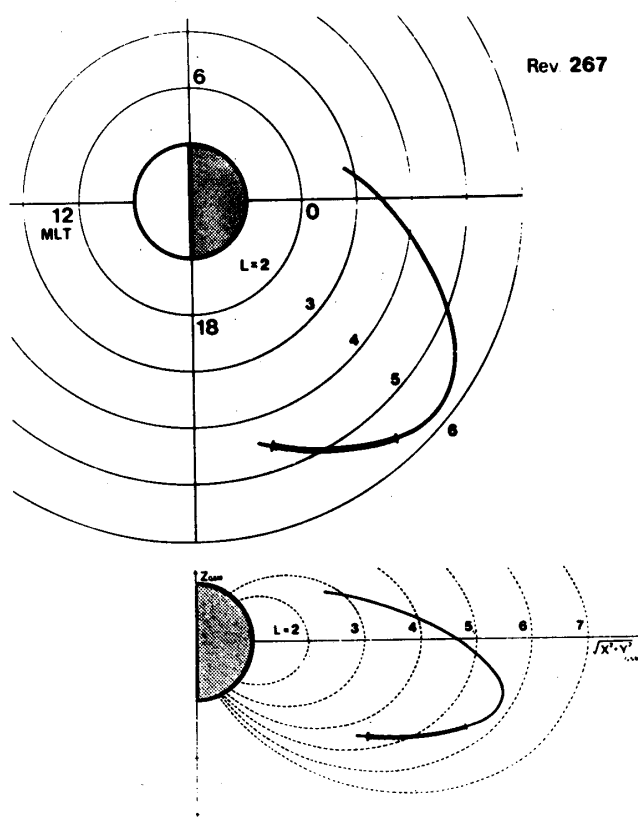


第2(d)図 Rev. 550 の場合 (第2(a)図と同じ)

して Rev. 550 について, うなりの周期を L 値で示した衛星の位置の関数としてプロットしたものが, 図 2(a)~(d)である. 大きなゆらぎを伴っているが, かなり系統的な値を示している. つまり Rev. 547 においては全体として「うなり」の周期が L 値が大きくなるに連れて増加し, 他方 Rev. 267, Rev. 253 及び Rev. 550 ではほとんど平坦か又は減少の傾向を示している. これら f_{QN} レゾナンスが観測されている領域を, それぞれの軌道上に太い実線で示し (図 3(a)~(d)参照), f_{UHR} 又は f_{Q2} から算出した電子密度を図 4(a)~(d)に示すが, まず基本的にプラズマポーズをはさんでプラズマ圏から磁気圏プラズマシートまでの観測が行なわれている. 昼側の観測である Rev. 547 においては, Detached Plasma が観測されている. ここで特に取り上げた f_{Q2} が存在するためには, プラズマパラメータ q ($\equiv f_p/f_H$) に対して, $q < 2$ の条件が必要となるが, この f_{Q2} の存在する領域のひとつとしてプラズマポーズの外側が登場するが, そそこはプラズマの大きな速度をもった「流れ」が考えられる領域である.



第 3(a)図 Rev. 253 における SPW観測時の衛星の軌道

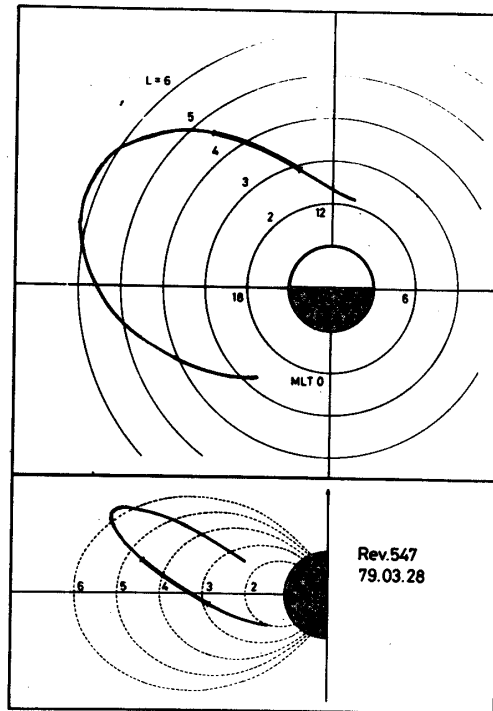


第3(b)図 第3(a)図と同じで Rev. 267 の場合

3. うなりの原因

「うなり」の現象は、 f_{QN} レゾナンスを与える静電波動に関するドップラー効果が本質的に働いている。図5は、 $q (= f_p / f_H) = 1$ の場合におけるプラズマ波動の分散曲線であるが、観測されたプラズマグラムにこれを対比させてみると、サイクロトロン波の分散曲線の Maximum 周波数部分、すなわち $\partial\omega / \partial k = 0$ のひとつで、UHR 以上のセクションで対する整数 n に応じ、 f_{QN} レゾナンスが生ずる (Warren and Hagg; 1968)。厳密には、衛星がプラズマに対して相対的に運動している為に共鳴条件としては波動が一定の群速度を持つことが要請される。つまり、相対的に速度 \vec{V} で運動している衛星に、長い継続時間を持って波動が受信されるためには

$$\partial\omega / \partial \vec{k} = \vec{V} \quad (1)$$



第3(c)図 Rev. 547 の場合 (第3(a)図と同じ)

でなければならない。 f_{Q2} の場合、約 1 km/sec の衛星速度に対し共鳴を与える点は、図 6 にしめすようなハッチでしめた部分である。この 2 つの部分では $\partial\omega/\partial k$ は、互いに逆符号になっている (図 7 参照)。つまり (1) 式を満たす点は 2 つ存在するが、この時対応する波数ベクトルの向きは互いに逆向きになっている。そのひとつは $k_1 = 1.40/R$ で他のひとつは $k_2 = 1.45/R$ であるが、これらは次の関係式を満足させるものである。

$$\left. \begin{aligned} |V| &= |\partial\omega/\partial k|_{k=k_1} = |\partial\omega/\partial k|_{k=k_2} \\ \text{及び} \quad \partial\omega/\partial k|_{k=k_1} &= -\partial\omega/\partial k|_{k=k_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

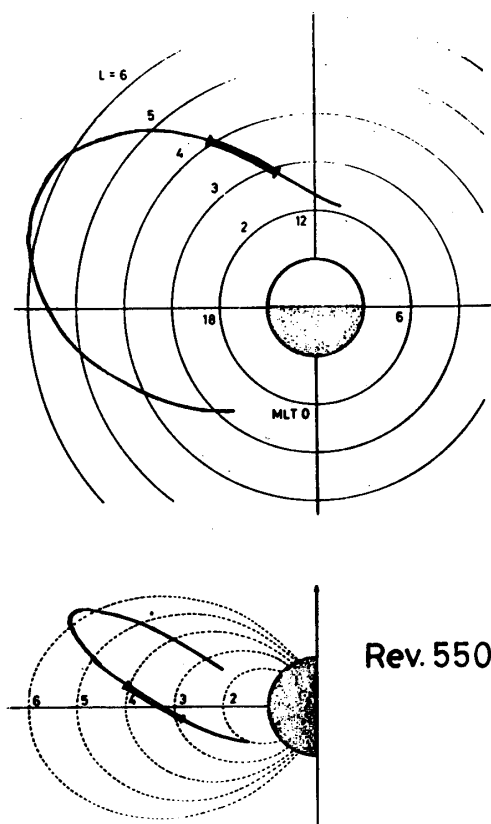
これら 2 つの波は、それぞれドップラーシフトを受けて ω_1 及び ω_2 となって受信される。即ち、

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega - k_1 V \\ \omega_2 &= \omega + k_2 V \end{aligned} \quad (3)$$

となる。この 2 つの波は受信機に同時に入り、うなり現象をともなって受信されるが、その角周波数はこれらの角周波数の差で与えられる。つまり、

$$\omega_2 - \omega_1 = (k_2 + k_1) V \quad (4)$$

となり、従って



第3(d)図 Rev. 550 の場合

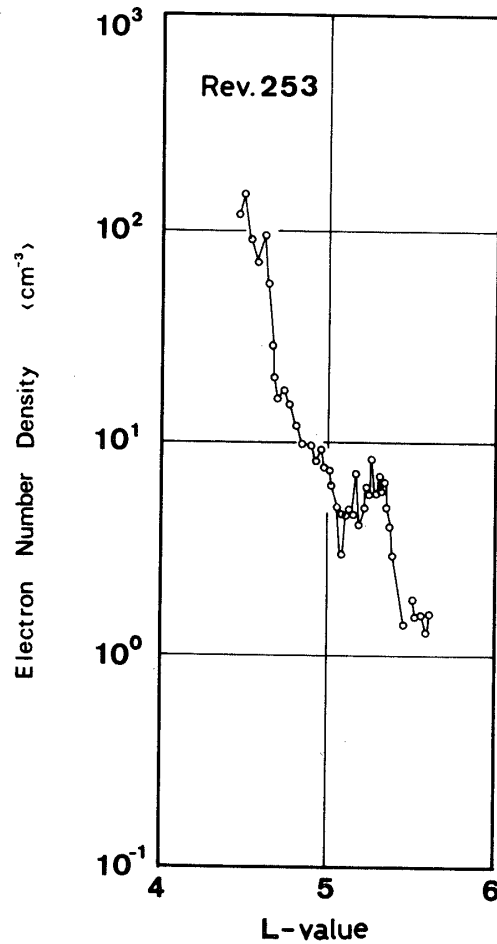
$$T = \{ 2\pi / (k_1 R + k_2 R) V \} R \quad (5)$$

のうなりの周期が期待される。従ってうなりの周期は、電子サイクロトロン半径 R 又は、衛星の周囲の宇宙空間プラズマに対する総合速度 V の情報を含んでいる。

さて式(1)で与えた条件を広く角度をもって伝播する。ESCH波（静電的電子サイクロトロン波）について考えると、対応する θ と屈折率の実数部は図8にハッチでしめす領域となる。ハッチされた領域では、群速度

$$\vec{V} = \partial\omega / \partial\vec{k} = (\partial\omega / \partial k) \hat{k} + (\partial\omega / k \partial\theta) \hat{\theta} \quad (6)$$

を持って衛星とともに伝播することになる。 $\theta \cong 88^\circ$ では、いわゆる Bernstein 波としてではなく、磁力線より若干波数ベクトルが角度をもって伝播している。 θ が、 90° でないことから波は減衰を受ける。しかしその値は小さい上、磁気圏ではフリーエネルギーを持ったプラズマ成分が絶えず存在していて、波の減衰をさまたげてもある。波がある時間たつてその強度を弱めるのはこのような減衰によるものよりはむしろ、プラズマの Irregularity によって、



第 4(a)図 Rev. 253 における SPW 観測時の電子密度

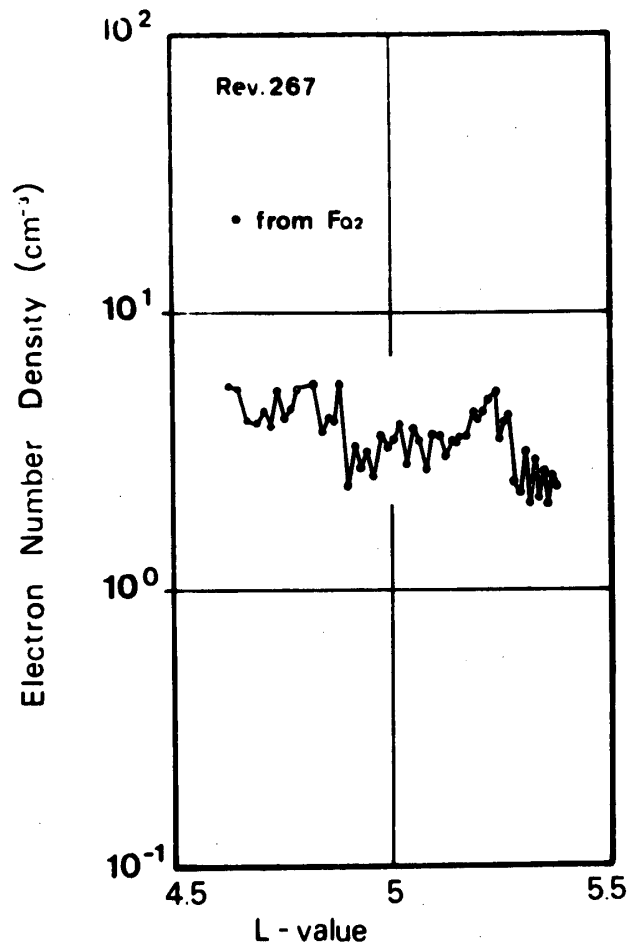
衛星から周辺に拡散していく事が大きな原因となる。

f_{QN} 点付近で、これに対応する kR の値は、 f_{QN} の次数 n とプラズマパラメータ q ($= f_p / f_H$) の値を定めることにより、決められる。これを $(kR)^*$ とした時、温度の情報があれば、電子サイクロトロン半径 R は定められ、

$$k = (kR)^* / R \quad (7)$$

として k を求めることが可能である。まず図 9(a)に、種々のプラズマパラメータ ($q = 1 \sim q = 3$) に対する、 $(kR)^*$ の値を横軸次数 n の関数としてプロットしたが q が一定の場合、直線関係にのることが分かる。すなわち、近似的に

$$(kR)^* = \alpha + \beta \cdot n \quad (8)$$



第4(b)図 Rev. 267の場合

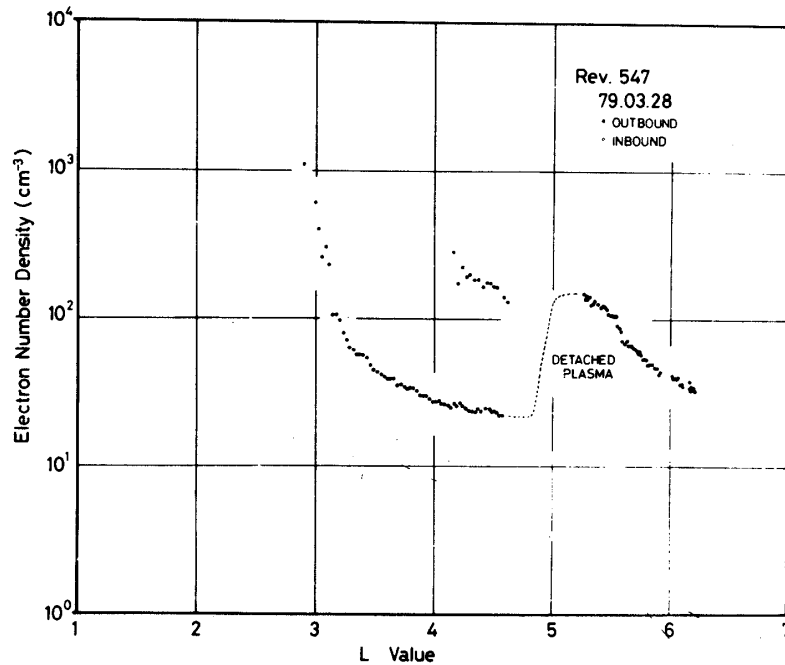
と表わしうる。ただし係数 α , β はプラズマパラメータ q の関数である。図9(b)にその値をプロットしている。以上より、 $(kR)^*$ は次数 n とプラズマパラメータ q の関数として求まり

$$(kR)^* = (0.82 + 0.02q^2) \cdot n - 0.18q^2 \quad (9)$$

となる。 $|k_1| - |k_2| \ll k_1, k_2$ という点を考慮すれば、式(5)は次のように書くことができる。

$$T = \pi R / (kR)^* \cdot V \quad (10)$$

f_{Q2} と f_{Q3} の周期の比は、この式(10)を用いて波数の比に対応づけられる。



第4(c)図 Rev. 547 の場合

$$\frac{Tf_{Q3}}{Tf_{Q2}} = \frac{(kR)*f_{Q2}}{(kR)*f_{Q3}} \quad (11)$$

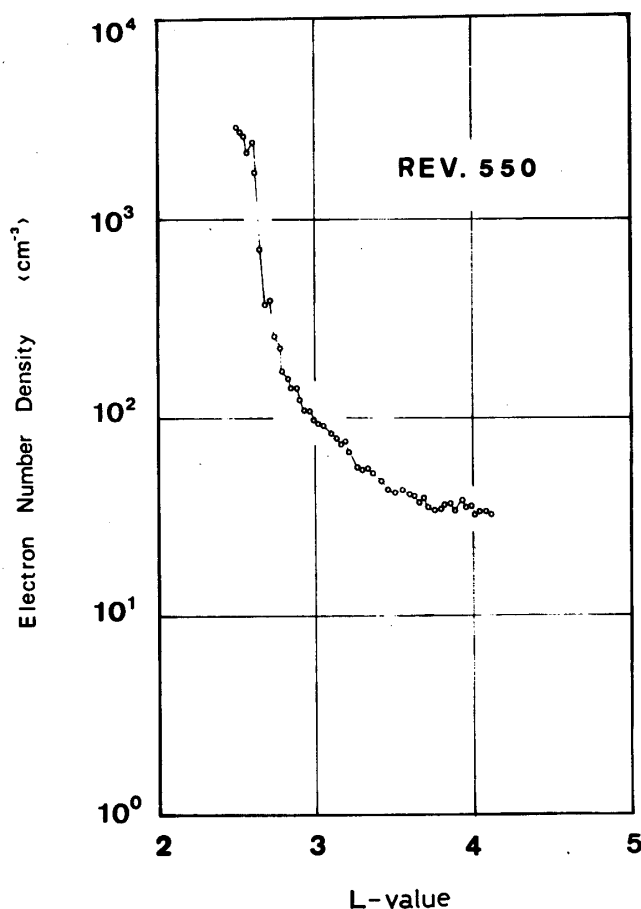
となる。これを Rev. 270 及び Rev. 267 に適用した結果を表1にしめすが、観測された周期の比は、その誤差の範囲内で理論的に予想される値と良い対応をしめしている。従って、現象はドップラー効果により生ずるものであることが結論づけられる。

以上の内容を模式的にまとめると図10のようになる。まず原点に衛星があり、慣性系に対して速度 \vec{V}_s で運動している。プラズマもマクロな運動をしているとし、その速度を \vec{V}_p とする。従って相対速度は $\vec{V} = \vec{V}_s - \vec{V}_p$ であり、Bernstein 波の場合は、磁力線に対して波数ベクトルの向きが直交し、互いに逆向きの波数ベクトルを持った波が同時に衛星に受信される。

4. プラズマの流れ

4.1 昼側プラズマポーズ前後の流れ

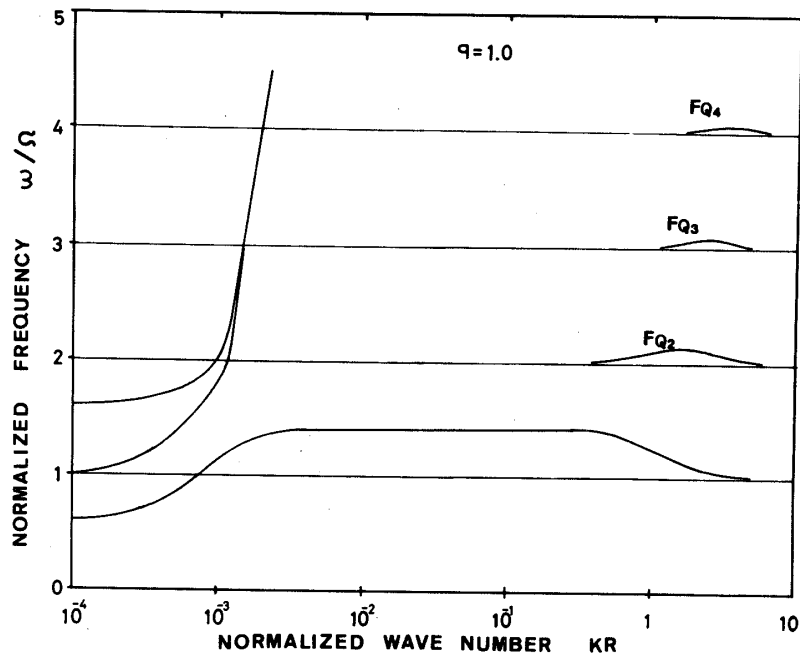
昼側プラズマポーズ付近のデータは、現在までに、Rev. 547 及び Rev. 550 で得られている。Rev. 547 の場合は、MLT \cong 14 時付近、L 値が 3.2 から 3.8 付近で f_{QN} 共鳴波動が観測されているが、昼側の特徴として相対的にプラズマパラメータ、 f_p/f_H が大きく、 f_{Q4} まで観測が可能となっている。特にこの場合、Detached Plasma の内側に位置する領域で



第4(d)図 Rev. 550 の場合

観測を行なっているが、L値の増加と共にうなりの周期が増している。図11(c)は、プラズマ運動が完全に地球と共回転状態にあるとして計算した相対速度を、うなりの周期から求めた速度に重ねてプロットしたものである。共回転速度の前後にゆれはあるが、平均として一致を示し、プラズマの運動が地球の自転に従っていることを強く示唆する。UHR周波数から求めた電子密度プロファイル(図4(c)参照)と比較した時、この観測が完全に Detached 領域の内側にあることはすでに述べたところであるが、結果は従ってこの部分では完全に地球と共回転していると断定し得る。又、流速を求めるにあたり設定している温度は 3×10^4 °Kであるが、この温度はこの Detached 領域にわたり、この結果では十分に保証されている。

昼側でもう一例観測されているのは、Rev. 550 である。この場合に注目すべき点は、L値が大きくなるにつれて、つまり Plasmopause から離れていくに従って、地球との予想される共回転からの系統的なずれが生じていることである。そして共回転速度との差は定常的にL値の増大とともに顕著になってゆく(図11(d)参照)。このずれは後に出るように夜側の観測例の Rev. 253 及び Rev. 267 の場合と比較する時、逆センスに生じていることが判明す

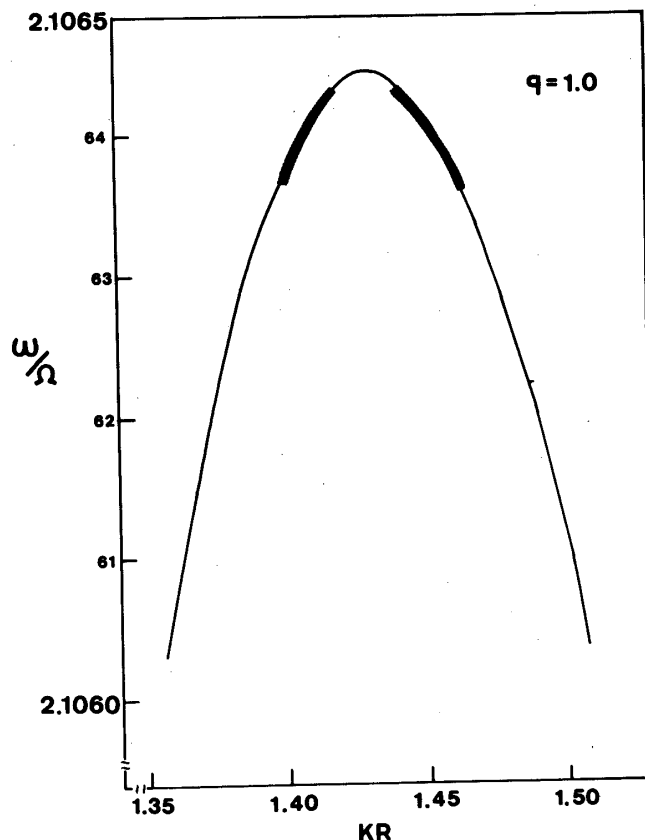


第5図 マックスウェル分布を仮定した時の、プラズマ波動分散曲線。縦軸、横軸はそれぞれ電子サイクロトロン周波数、電子サイクロトロン半径で規格化している。

るが、共にその流れは太陽方向へのプラズマ流の成分が卓越しているとすれば、うなずけるものである。つまり、プラズマポーズの外側では、地球との共回転からはなれ、太陽と地球を結ぶ方向を示すことは、磁気圏内の対流のパターンと定性的に一致する方向になっている。

4.2 夜側のプラズマポーズ近傍のプラズマ流

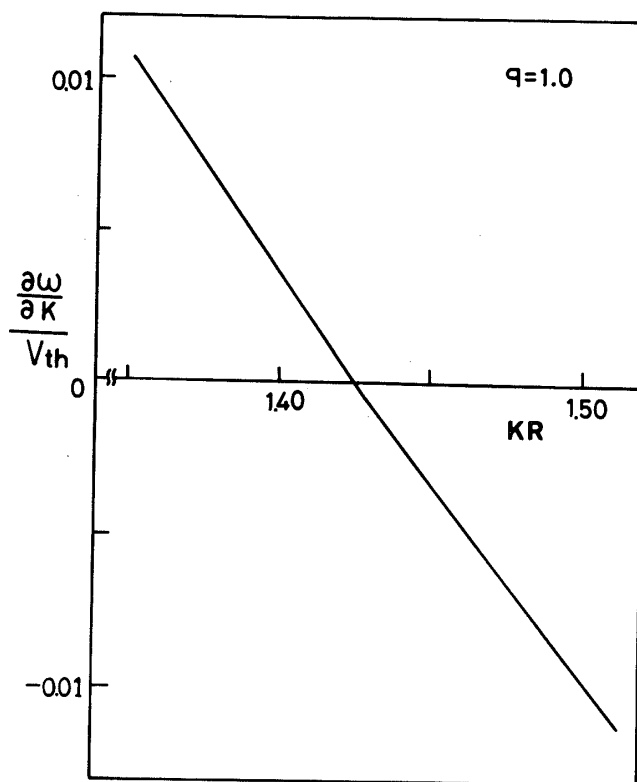
夜側のプラズマポーズ近傍の観測として、Rev. 253 及び Rev. 267 の例が得られている。まず Rev. 253 の例では、観測はプラズマポーズを横切って得られているが、ポーズの外側に出たところ、つまりプラズマパラメータ q の値が2以下になった $L = 4.9$ の付近から f_{Q2} が観測されはじめた。まず観測された「うなり」の周期から求めた相対速度 V を L 値の関数としてプロットした結果を、図 11 (a) にしめすが、 $L = 5.3$ 附近から速度の増加が見られる。一方、UHR 周波数から算出される電子密度プロファイル (図 4 (a) 参照) と比較する時、速度増加が密度増加と対応している様相がうかがわれる。これは、流れの強まる部分がプラズマの大きな塊となっている様子が示唆される。さて、プラズマの運動が地球と共回転するとして求めた衛星との相対速度 ($V_{SL} - V_{C0}$) を図 11 (a) に示すが、Rev. 267 の場合と同様、観測値と理論的に予想される相対速度の一致を得ようとすると、プラズマの温度が、 $6 \sim 8,000^\circ\text{K}$ とかなり低く見積られねばならない。従って $20,000 \sim 30,000^\circ\text{K}$ という常識的



第 6 図 f_{Q2} に対する Bernstein mode 波の分散曲線

な値を得ようとする、大きなプラズマの「流れ」があることを示し、図 11 (a) のような系統的に共回転プラズマからはずれたプラズマ流の存在が、仮定される。

Rev. 267 の場合は、夜側 MLT \cong 21 時付近、L 値が 4.6 ~ 5.1 の領域で観測が行なわれている。全体として、かなりのゆらぎは存在するが、「うなり」の周期は L 値で表わした衛星の位置に対し、ほぼ一定に近い分布となっている。プラズマ密度の分布図 (図 2 (b)) には示されていないが、プラズマポーズは L = 4.5 の付近に存在している。従って観測結果はプラズマポーズの外側でのプラズマの運動の様子を示している。Rev. 253 の場合と同様「うなり」の周期から、温度を 3×10^4 °K と仮定して、得られた相対速度 V を L 値に対してプロットしたのが、図 11 (b) である。すでに Rev. 253 でみたように、温度 30000 °K 以上では、この場合も同様にプラズマポーズ外側でのプラズマの流れの存在をしめしている。このプラズマ流は、従来考えられてきた磁気圏プラズマ対流 (Axford Hined ; 1960, Nishida ; 1964, Brice ; 1967) を支持するものである。つまり、夜側では共回転を越して高速で自転と



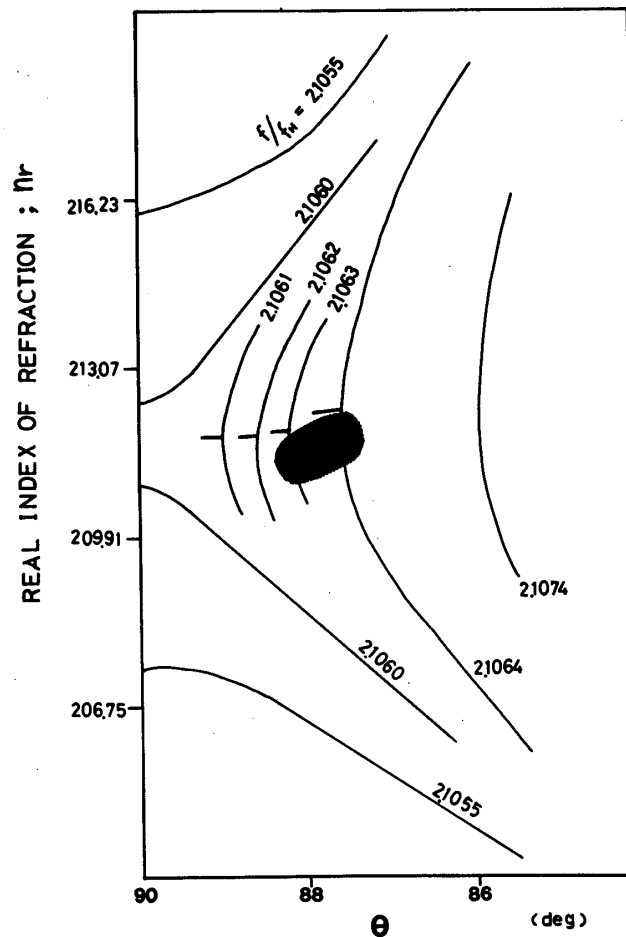
第7図 図6より求めた群速度 $\partial\omega/\partial k$ 、電子の thermal velocity 及び電子サイクロトロン半径で規格化している。

同じ方向に起こっていることを示唆している。

5. 結 び

科学衛星 JIKIKEN により観測された、プラズマグラムに表われる静電的プラズマレゾナンス (f_{QN} レゾナンス) の「うなり」のパターンに対し、その周期の解析を行なったが、その結果としては互いに逆向きの波数ベルトルを持って伝播している2つのグループの、静電的プラズマ波動がプラズマと衛星の相対運動によるドップラー効果により、2つの異なった周波数に分離した結果作られる「うなり」であることが判明した。うなりの周波数からドップラー周波数が求められるが、これは即プラズマに対する衛星の相対速度を、正規化波数 (kR) の関数 (但し R は、電子サイクロトロン半径) として求め得る。これは又、温度を仮定する時、 R 値が求められ即相対速度 V が求められることになる。そこでプラズマの運動速度が、仮定された温度をベースとして算定された。

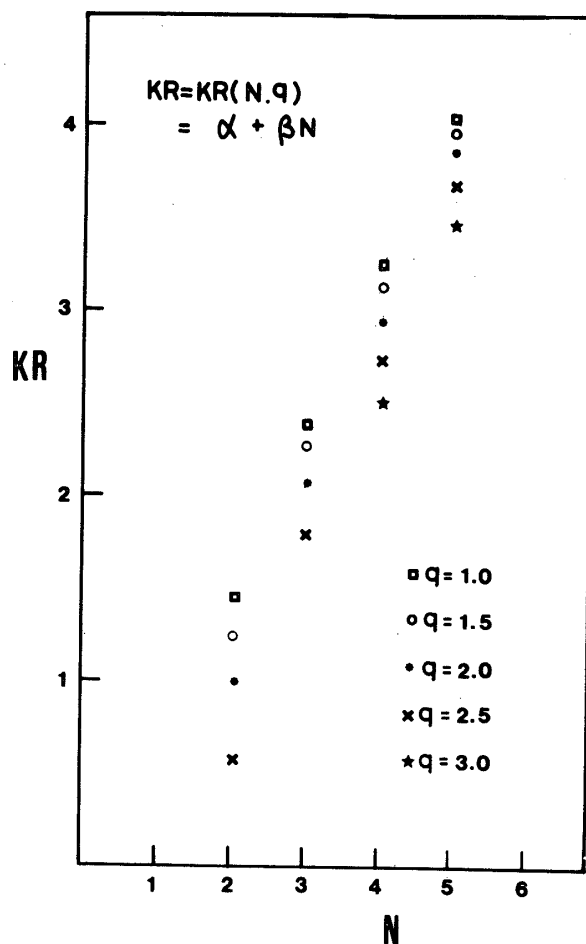
昼側の Detached 領域ではその内側で完全に地球と共回転している。一方、プラズマポー



第 8 図 屈折率と波数ベクトルの磁力線となす角度 θ との関係。黒くハッチしている部分が共鳴を与える点である。

ズの外側ではプラズマ流は、共回転からはずれ、共回転速度より $1 \text{ km/sec} \sim 4 \text{ km/sec}$ の速い速度をもって運動していることが判明した。また、この傾向はプラズマポーズから離れるに従って顕著になる事が、示されたが、これは対流が太陽—地球方向の成分を持つことが示され、プラズマポーズを離れるに従って、この太陽、地球方向の寄与が大きくなっていくことをしめしている。つまり、昼側及び夜側とも、広く言われている磁気圏対流のパターンと一致することが示された。

SPW 実験は、人工的に周波数のパラメータを制御した条件下で波動励起実験を行なっているが、受動的な観測で自然電波やプラズマ波動を受けるだけでは知ることのできない磁気圏プラズマの密度分布や流れ、つまり構造やダイナミックスについてのデータを提供してく

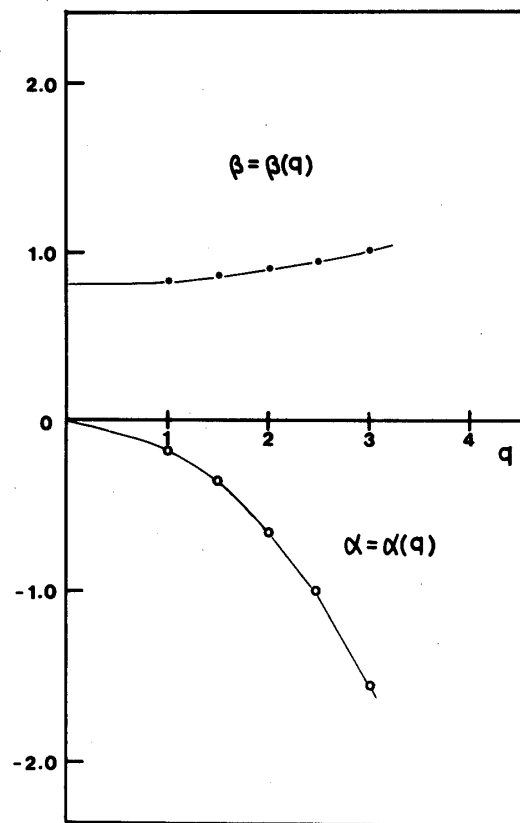


第 9(a)図 種々のプラズマパラメータに対する, $(kR)^*$ の値. 横軸は次数. $\alpha \cdot \beta$ を q の関数とみて近似的に $(kR)^* = \alpha + \beta \cdot n$ とかける.

れる. 今後更にこの方面の多くの重要な結果をもたらすものと期待される.

謝 辞

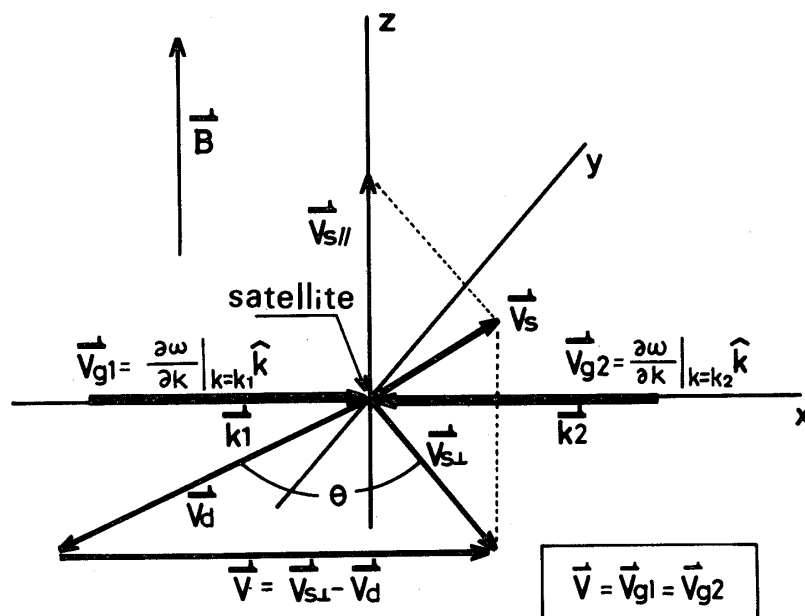
最後に JIKIKEN (Exos-B) の実験を成功させ, 一連の観測を遂行してゆくにあたって, 東京大学宇宙航空研究所大林辰蔵教授, M-3H-3 号ロケット実験主任秋葉鏖二郎教授はじめ, Exos-B/M-3H 班全員の努力と支援に深く感謝いたします. 1980年11月10日



第9(b)図 プラズマパラメータ q に対する係数 α 及び β の値

参考文献

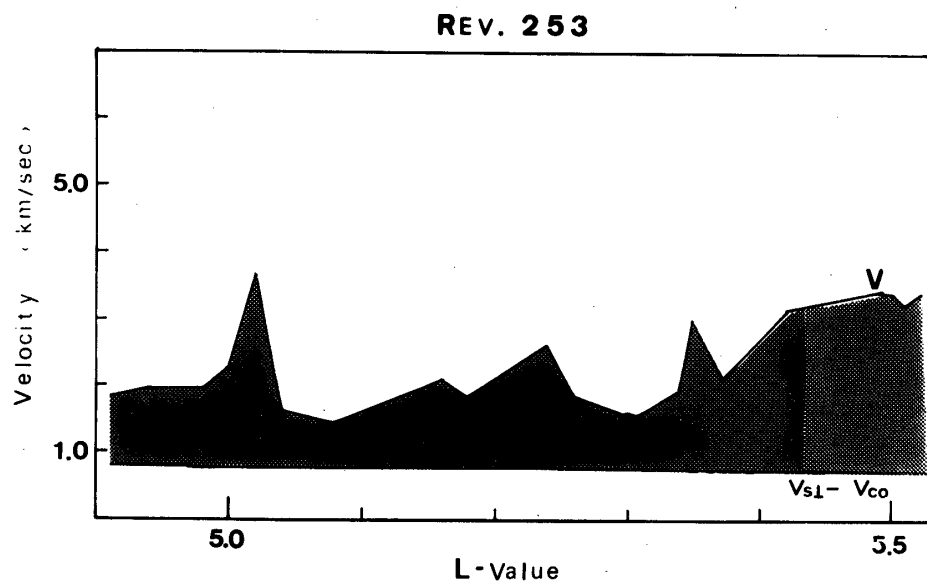
- [1] Higel, B., Small scale structure of magnetospheric electron density through on line tracking of plasma resonance, Space Sci. Rev., 22, 611 (1978)
- [2] H. OYA and R.F. Benson, A New Method for In Situ Electron Temperature Determinations From Plasma Wave Phenomena, J.G.R., 77, 4272 (1972)
- [3] 大家 寛, 小野高幸, 鎌田哲夫; 宇宙航空研究所報告, 第15巻, 第3号 (B), 669 ページ.
- [4] 大家 寛, 小野高幸; 宇宙航空研究所報告, 第15巻, 第3号 (B), 691 ページ.



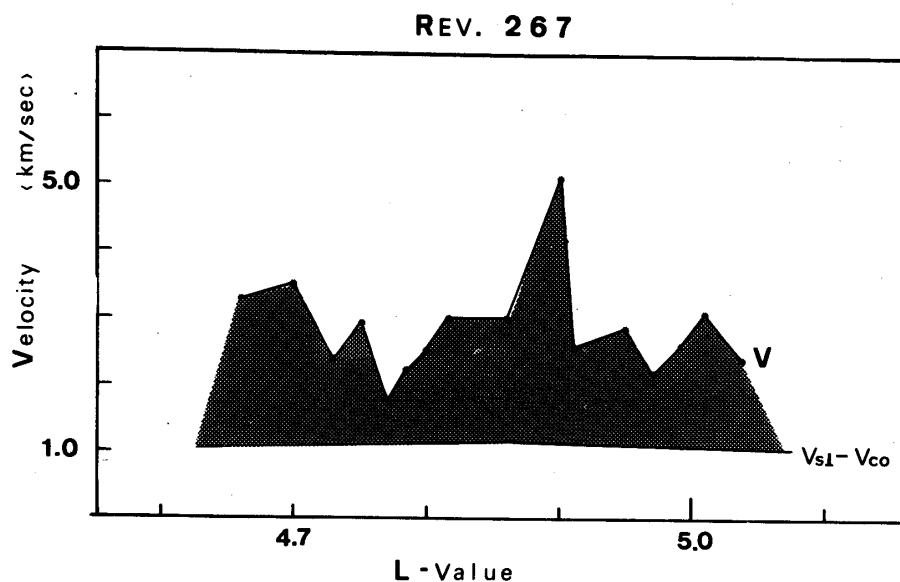
第 10 図 f_{QN} 共鳴波動観測時の概念図. 互いに異なった向きの波数ベクトルを持った波動が衛星に同時に観測され「うなり」を形成する.

Theory		
	$\frac{Tf_{Q_3}}{Tf_{Q_2}} = \frac{(KR)^* f_{Q_3}}{(KR)^* f_{Q_2}} = 0.58$	
Observations		
Rev. 267	$\frac{Tf_{Q_3}}{Tf_{Q_2}} = 0.51$	
Rev. 270	$\frac{Tf_{Q_3}}{Tf_{Q_2}} = 0.60$	

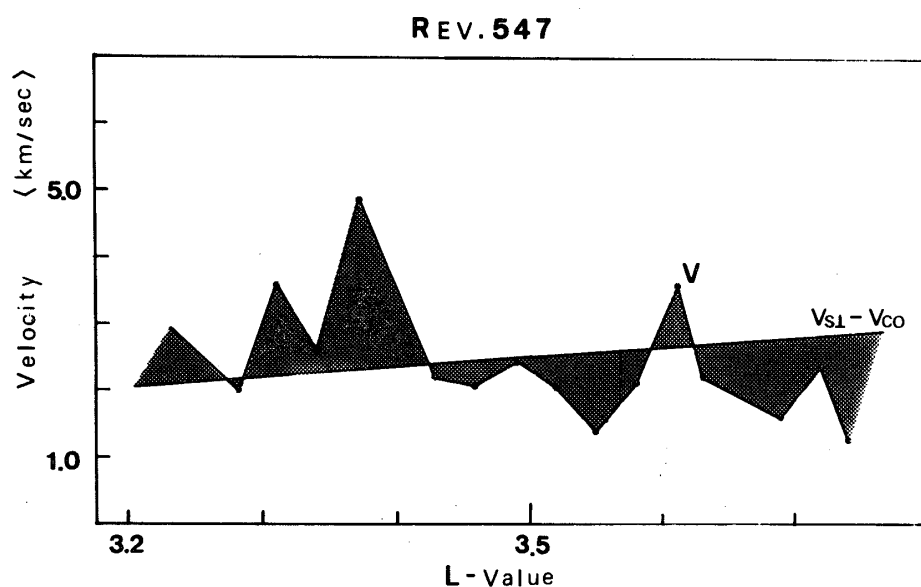
表 1 Tf_{Q_3} と Tf_{Q_2} の比の理論値と観測値の比較



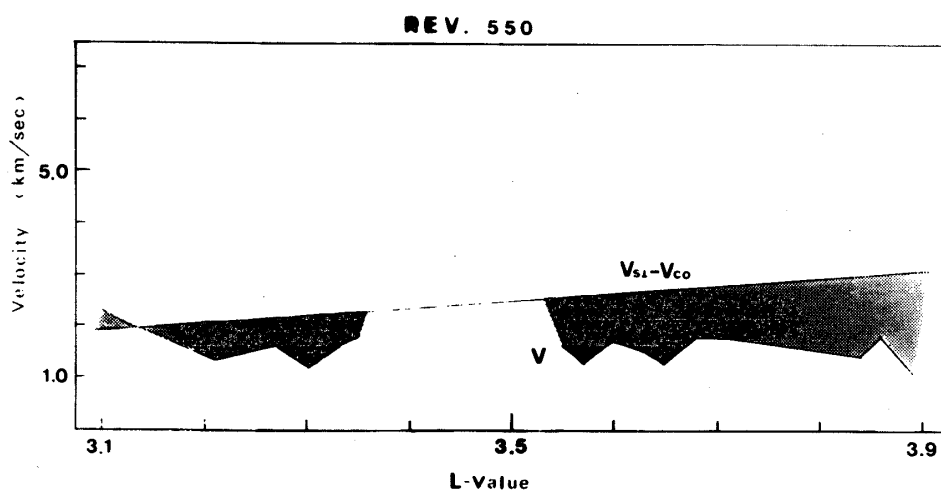
第11(a)図 うなりの周期から求められた相対速度 V 及びプラズマが完全に地球と共回転しているとして求められた理論的な相対速度 $V_{sl} - V_{co}$ の L 値に対する関係。両者が一致しないことは、プラズマの運動が共回転からずれていることを示す。観測は、Rev. 253 (1978年12月15日) に行なわれた。



第11(b)図 第11(a)図と同様に、Rev. 267 (1978年12月20日) のデータを示す。



第11(c)図 Rev. 547 (1979年3月28日) の例。観測と理論がよりよい一致を示している。この事は、プラズマが完全に地球と共回転している事を意味している。(その他、第1(a)図と同様)



第11(d)図 Rev. 550 (1979年3月29日) の例。共回転からのずれが、プラズマポーズから離れていくに従って大きくなっていく。夜側 (Rev. 253 及び Rev. 267) とは逆センスのずれであるが、ともに太陽方向へのプラズマのドリフト運動を考えることにより、現象は説明できる。プラズマポーズ周辺のプラズマ対流のパターンと良い一致が見られている。(その他、第11(a)図と同じ)