

福井大学

工学部 研究報告

第23巻 第2号

昭和50年9月

磁化プラズマ中のホイッスラー波

木田 雅 隆*・出原 敏 孝*・石田 美 雄*

Whistler Wave in a Magnetized Plasma

Masataka KIDA, Toshitaka IDEHARA, Yoshio ISHIDA

(Received Apr. 10, 1975)

It is verified that the wave excited by a coaxial antenna propagates along the magnetic field. The dispersion relation determined by measuring the propagating wave patterns is consistent with a theoretical prediction for the Whistler wave. The fact that the wave is right-handedly polarized and can propagate only within the resonance cone, confirms that the observed wave is the Whistler one. The spatial damping may be explained by the cyclotron damping, since it increases resonantly near the electron cyclotron frequency.

1. 序 論

磁化されたプラズマ中の波動には4つの主波動 (principal wave) が存在する。これらの波動については、プラズマ粒子が熱運動をしていない冷たいプラズマを仮定し、Allis らによって解析された¹⁾。4つの主波動とは、磁場方向に伝播する、左円偏波、右円偏波 (ホイッスラー波)、磁場に垂直に伝播する正常波 (ordinary wave)、異常波 (extraordinary wave) である。本論文で取り扱うのは、磁場方向に伝播する右円偏波、一般に、ホイッスラー波と呼ばれる波動である。自然界に存在するホイッスラー波には、その語源となったホイッスラー空電と、磁気圏内で発生すると考えられている種々の VLF エミッションがある²⁾。ホイッスラー空電は1880年代にはすでに、長距離の電話線に奇妙な雑音が混入することがオーストリアで報告されているし、イギリスでは、オーロラの際にホイッスラーや VLF コーラスと思われる

ようなものが聞かれている。その後、Eckersley によって、この電波が極地近くで起った雷放電がもとになっているらしいことをつきとめたのは1931年である。

1953年、L.R.O. Storey がこの電波は電離層をつきぬけ磁力線に沿って大気圏外のプラズマ中を伝播してきたものであることを発表して以来³⁾、地球物理学の分野において、ホイッスラー波の研究が進められた。ホイッスラー空電の理論的な基礎になったのは、Appleton-Hartree の Magneto-ionic 理論である⁴⁾。

ホイッスラー波の理論的な分散関係は、Allis, Briggs らによって、冷たいプラズマの場合および温かいプラズマの場合について解析された¹⁾⁵⁾⁶⁾。温かいプラズマの場合には、衝突による減衰がない場合でも、プラズマ粒子の熱運動によるサイクロトロン減衰が現われ、ホイッスラー波は減衰を受ける。この解析

*応用物理学科

は Stix らによって行なわれ⁷⁾⁸⁾, 2~3の実験報告がある⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾. 大久保, 田中らは, Bers によって解析された方法を用い⁶⁾, プラズマの直径で決まるような臨界密度よりも高い密度では, ホイッスラー波が励起され, それ以下の密度では, Trivelpiece mode が励起されることを実験的に確認した. また, 種々のプラズマパラメーターに対して, ホイッスラー波の減衰率を測定し, 理論との比較を行なった¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾.

本論文では, ホイッスラー波の分散関係と減衰率について報告する. また, われわれが測定した波がホイッスラー波であることを, 共鳴錐の測定, 円偏波の測定から確認する.

2. 実験装置および方法

実験装置は図1に示したように, 全長 1.4m, 内径

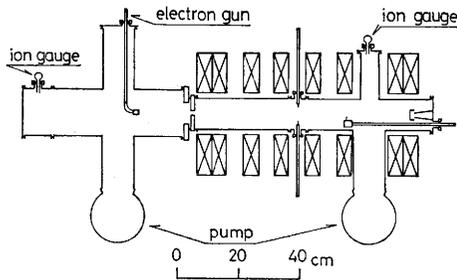


図1 装置図

9.5cm の円筒状 パイレックスガラス管が主体をなしている. 静磁場を印加するために 8 個の空心コイルが配置され, ガラス管はこの空心コイルの中心に置かれている. 容器は放電領域 (測定領域) と電子ビーム発生領域とから成っており, 2つの 4 インチ油拡散ポンプにより, 2×10^{-6} Torr の真空にまでひかれる. プラズマはカソードとアノード間の直流放電により作られたアルゴンプラズマで, 実験は測定領域の圧力, $10^{-4} \sim 10^{-3}$ Torr, 電子ビーム発生領域の圧力, 10^{-5} Torr で行なった. 8 個の空心コイルによって印加される静磁場は, 図2のように測定領域でほぼ一様な強度分布になっており, 磁場電流を 400A 流した時, 測定領域での磁場強度は約 2000 Gauss, 電子サイクロトロン周波数 $\omega_c/2\pi$ は, 5.6GHz である. 実験装置には, 管の半径方向に可動の 3 本の r プローブと, 管軸方向に可動の 1 本の z プローブと名付けた 4 本の同軸プローブが挿入されており, 波の送信, 受信, プラズマパラメーターの測定, 共鳴錐の測定, 円偏波の測定に用いられる. 生成されたプラズマの電子温度 T_e

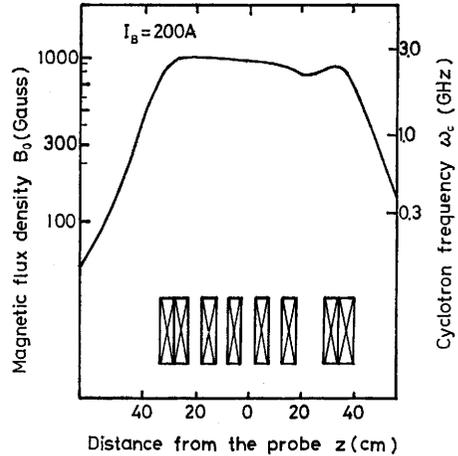


図2 磁場の強度分布

は 8.0~10.0 eV であり, 密度は 1 cc あたり 4.0×10^{11} コ~ 1.1×10^{12} コ, プラズマ周波数 $\omega_p/2\pi$ は 9.2~5.7 GHz であり, 電離度が 10^{-2} の強電離プラズマである. 電子の衝突周波数 $\omega_{coll}/2\pi$ (電子-電子間および電子-中性粒子間の衝突周波数の和) は 8.7~9.7 MHz であり, 励起される波の周波数 $\omega/2\pi$ (3.82 GHz) に比べ充分小さく無衝突の仮定が成り立っている. Debye 波長 λ_D は, 上記の電子密度に対して, 0.05~0.06mm で, 使用した同軸プローブの先端の長さ (2.0mm) に比べて充分短かくなっている.

図3はホイッスラー波の干渉波形を測定するために用いた装置のブロック図である. クライストロンで発

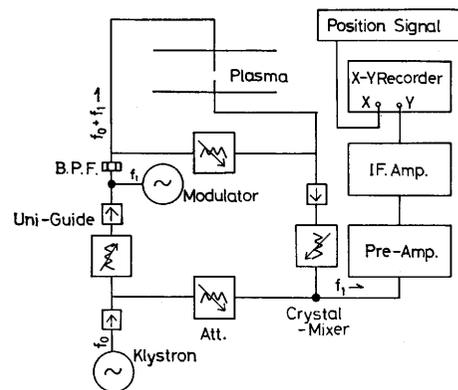


図3 ブロック図

振した 3.76 GHz (f_0) の信号を 2 つに分け, その一方を減衰器, 単向管を通した後に 70MHz (f_1) の変調をかける. この変調をかけたあとは, $f_0 + nf_1$ の

信号になるが、バンドパスフィルターによって $f_0 + f_1$ の信号だけを取り出し、r プローブからプラズマ中に波を励起する。プラズマ中を伝播してきた波をz プローブで受信し、方向性結合器内で、プラズマ中を通さなかった信号とを干渉させ、単向管、減衰器を通してクリスタルミキサーに導く。クライストロンで発振したもう一方の信号は、減衰器を通してクリスタルミキサーに導き、そこで 70MHz (f_1) の変調分だけを取り出し、プリアンプ、中間周波増幅器で増幅して、X-Y レコーダーの Y 軸に入れる。干渉した信号の位相は、測定器間の同軸ケーブルの長さを変えない限りは、送信、受信プローブ間の距離のみの関数である。従って、X-Y レコーダーの X 軸にプローブ間の距離に比例した量を、Y 軸には中間周波増幅器で増幅した信号を入れれば、X-Y レコーダー上にはプローブ間の距離に対する干渉波形が描かれる。

われわれが観測した波がホイッスラー波であることを確認するために共鳴錐と呼ばれるものを測定する¹⁵⁾。というのは、ホイッスラー波はこの共鳴錐の内側を静磁場にほぼ平行に伝播するからである。従って、ホイッスラー波が励起される条件下で、しかも、共鳴錐の内側を伝播する波が観測されれば、その波がホイッスラー波であることが確認される。共鳴錐は 2 本の同軸プローブ (r プローブと z プローブ) の相対位置を変化させることによって測定することができる。上記の干渉系を用い、r プローブで波を励起し、z プローブを磁場方向に動かしてゆくと、ホイッスラー波が励起される条件下では、共鳴錐の内側でホイッスラー波が受信され、共鳴錐のところでポテンシャルが大きくなる。そして、ホイッスラー波が受信されない領域があり、再び共鳴錐のところでポテンシャルが大きくなり、そして、ホイッスラー波が受信されるようになる。r プローブと z プローブの相対位置を変化させて同じ測定をくりかえせば、プローブ間の距離に対する共鳴点の距離が求まり、共鳴錐の頂角が決定される。

3. 実験結果および考察

前節で述べた干渉系を用いて測定したホイッスラー波の伝播波形を図 4 に示す。プラズマパラメーターおよび周波数 $\omega/2\pi$ は一定で、電子サイクロトロン周波数 ω_c をパラメーターにした z 方向の伝播波形である。横軸には励起プローブ(r プローブ)からの距離、縦軸には中間周波増幅器の出力をとってある。z = 0 の点に励起プローブが設置されており、ここで波が励起される。励起プローブの両側に強く減衰を受けなが

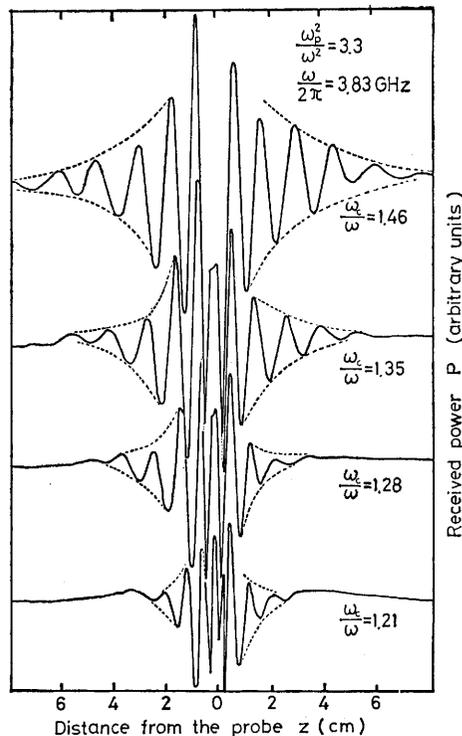


図 4 ホイッスラー波の伝播波形

ら伝播している様子がよくわかる。サイクロトロン周波数 ω_c がクライストロンの発振周波数に近づくとつれ波長が短くなっていることがわかる。この波長を測定し、横軸が規格化された波数 ck/ω (c は真空中の光の速度)、縦軸が規格化されたサイクロトロン周波数 ω_c/ω の $k-\omega$ 平面にプロットすると分散関係を得る。図 5 がこのようにして得られた、規格化されたプ

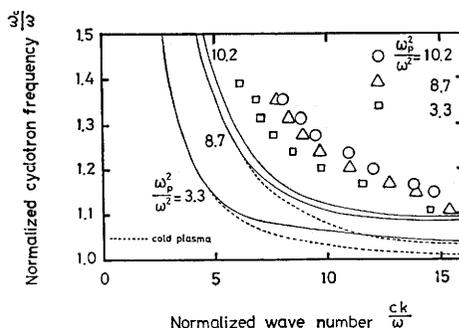


図 5 分散関係図

ラズマ周波数 ω_p^2/ω^2 が 10.2, 8.7, 3.3 の場合の分散関係である。プラズマ周波数 ω_p の自乗は、 $\omega_p^2 = n_e e^2 / \epsilon_0 m_e$ (e , m_e はそれぞれ電子の電荷と質量、 ϵ_0

は真空中の誘電率)と表わされ、プラズマの密度に比例する量である。プラズマの密度が高くなると、分散曲線は周波数の低い方へずれている。

図4の伝播波形の傾きから減衰率を求めることができる。図6が、横軸が規格化された波数、縦軸が規格

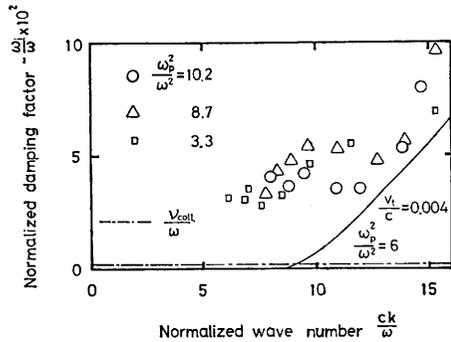


図6 減衰率の比較

化された減衰率の平面にプロットした減衰率であり、先程の分散曲線にそれぞれ対応している。サイクロトロン周波数 $\omega_c/2\pi$ がクライストロンの発振周波数に近づくほど、減衰率が大きくなっていることがわかる。

以上の実験結果は、ホイッスラー波の分散関係から説明することができる。

無限大で一樣な密度をもち、電子がマックスウェル分布をしていると仮定されたプラズマ中のホイッスラー波の分散関係式は、

$$D(\omega, k) = \frac{c^2 k^2}{\omega^2} - 1 - \frac{\omega_p^2}{\sqrt{2} k v_t \omega} Z(\xi_0) = 0 \quad \dots\dots(1)$$

と与えられる⁵⁾。ここで $Z(\xi_0)$ は Fried と Conte によって定義されたプラズマ分散関数¹⁶⁾、 $v_t = (kT_e/m_e)^{1/2}$ は電子の平均熱速度である。(1)式を波数 k を実数、周波数 ω を複素数として数値計算したのが、図5および図6の実線である。図5の実線は、プラズマの密度がそれぞれの実験値に対応した理論曲線であり、実験値と同じ傾向を示していることから、われわれが観測した波はホイッスラー波であろうと思われる。実際には有限の大きさをもつプラズマ中の現象を、無限大で一樣な密度をもつと仮定した理論により、よく説明できることがわかる。

図6の実線は、プラズマ構成粒子間衝突がない場合の減衰であり、従って、プラズマ電子の熱運動によって起こるサイクロトロン減衰である。定性的にはあるが実験値はこの傾向を示しており、ホイッスラー波の減衰はサイクロトロン減衰によるものであること

がわかる。図6の一点鎖線は衝突減衰によるものであり、実験値とはかなり傾向が異っていることから、この減衰はサイクロトロン減衰であると結論される。

前節で述べた方法により、共鳴錐を測定したのが図7である。サイクロトロン周波数 ω_c 、プラズマ周波

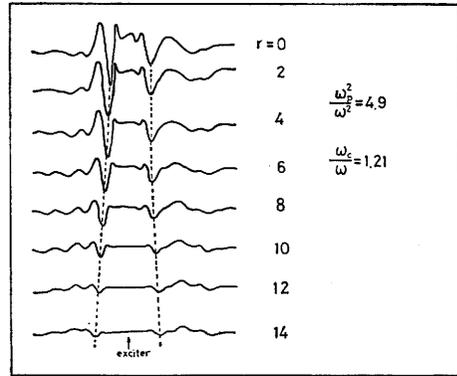


図7 r をパラメーターにした伝播波形

数 ω_p を固定して、2本の同軸プローブ (r プローブ、z プローブ) 間の距離 r をパラメーターとして描かれている。 r が大きくなるほど、励起プローブから離れたところの伝播波形を測定していることになる。1本の伝播波形のポテンシャルの絶対値が最大となる点の距離を測定し、2本のプローブ間の距離に対してプロットしてゆくと共鳴錐が決定される。このようにして得られたのが図8である。横軸には規格化されたサイクロトロン周波数の自乗、縦軸には共鳴錐の角度 x がとってある。

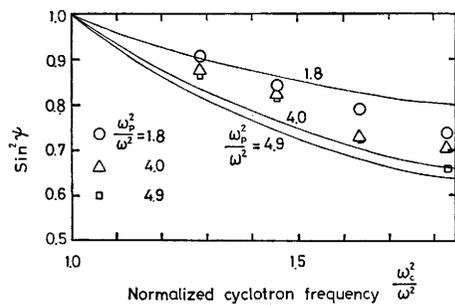


図8 共鳴錐の角度 x と実験結果との比較

共鳴錐は 1971年 Fisher と Gould によって考察され

$$\sin^2 x = \frac{\omega^2(\omega_p^2 + \omega_c^2 - \omega^2)}{\omega_p^2 \omega_c^2} \quad \dots\dots(2)$$

と与えられる⁵⁾。図8の実線が(2)式を数値計算したものであり、それぞれの実験値に対応している。実験値

が理論曲線とよく一致していることから、われわれが測定したのが共鳴錐であることが保証される。図7の共鳴錐の内側を静磁場方向に伝播する波があり、この

波がホイッスラー波である。

ホイッスラー波は静磁場に対して右まわりに円偏向する電磁波である。これを測定したのが図9である。

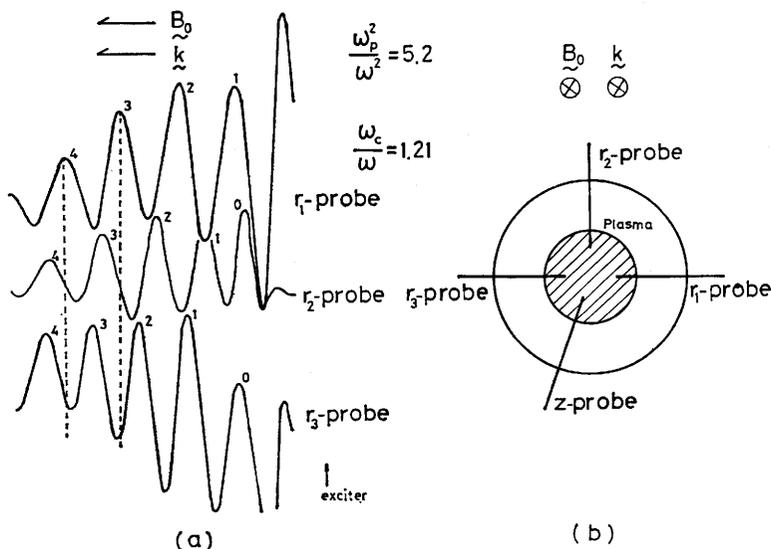


図9 励起プローブを変えたときの伝播波形

3本の r プローブ (r_1 プローブ, r_2 プローブ, r_3 プローブ) と, 1本の z プローブを用いて干渉波形を測定すると図9(a)の結果が得られた。図9(a)の上が r_1 プローブで波を励起した場合, 中が r_2 プローブ, 下が r_3 プローブで励起した場合の干渉波形である。静磁場の方向と波の伝播方向が図9(b)のように, 紙面の手前から向こう側に向っている時には, もし右円偏波なら, r_1 プローブで励起した波が1番早く z プローブで受信されるはずである。そして, r_2 プローブで励起した波, r_3 プローブで励起した波の順となる。 r_1 プローブで励起した波と r_3 プローブで励起した波とは位相が π , r_2 プローブで励起した波とは位相が $\pi/2$ だけずれているはずである。図9(a)をみると, 励起プローブの近傍では励起プローブ自身の特性があるために, 位相のずれがわからないが, 励起プローブから少し離れたところでは確かにこの傾向が認められる。干渉波形の山につけた番号がそれぞれに対応した山だと考えられる。 r_2 プローブ, r_3 プローブで波を励起した時に, 0番目の山が受信されるまでに時間がかかるので (r_1 プローブで波を励起した時よりも), 1番目の山の前の山, すなわち0番目の山が受信されたものと考えられる。 r_2 プローブの0番目の山は充分に成

長しきれずに受信されたので, 波長が短くなっているが r_3 プローブの0番目の山はもう波長が同じになっていることから, この波は右円偏波であろうと思われる。

4. 結 論

磁化プラズマ中のホイッスラー波について以下のことが結論される。

- (1) 実験で得られた分散関係を理論と比較することにより, われわれが測定した波はホイッスラー波であろうと思われる。
- (2) われわれが測定した波がホイッスラー波であることを確認するために, 共鳴錐を測定した結果, この波は共鳴錐の内側を磁場にほぼ平行に伝播していることがわかった。
- (3) われわれが測定した波の偏向を調べた結果, この波は静磁場に対して右まわりに円偏波していることがわかった。
- (4) この波の減衰率を測定した結果, この減衰は, プラズマ粒子間の衝突による減衰だけでなく, むしろ電子の熱運動によって起るサイクロトロン減衰によるものだと結論される。

参考文献

- 1) W.P. Allis, S. T. Buchsbaum and A. Bers; *Waves in Anisotropic Plasmas*, M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, (1963).
- 2) 大林辰蔵; 宇宙空間物理学, 裳華房, (1970).
- 3) L.R.O. Storey; *Phil. Trans, Roy. Soc., LondonA*, **246** (1953) 113.
- 4) 武田進; プラズマの基礎, 朝倉書店 (1969).
- 5) R.J. Briggs; *Electron-Stream Interaction with Plasmas*, M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, (1964).
- 6) NASA Research Grant NGR 05-020-176; *Investigation of Space-Related "Whistler" Propagation Phenomena in Laboratory Plasma*, SU-IPR Report No. 199.
- 7) T.H. Stix; *The Theory of Plasma Wave*, Mcgrow-Hill Book Company, New York, (1962).
- 8) L. Spitzer; *Physics of Fully Ionized Gases*, John Wiley & Sons, New York, (1967).
- 9) B. Mcvey and J.Scharer; *Phys. Rev. Letters*, **31** (1974) 14.
- 10) K. Minami and S. Takeda; *Phys. of Fluids*, **12** (1969) 1089.
- 11) P. Palmadesso and G. Schmidt; *Phys. of Fluids* **14** (1970) 1411.
- 12) K. Ohkubo, Y. Yamamoto and S. Tanaka; *Phys. Letters* **35A** (1971) 189.
- 13) K. Ohkubo and S. Tanaka; *J. Phys. Soc. Japan* **36** (1974) 572.
- 14) K. Ohkubo and S. Tanaka; *J. Phys. Soc. Japan* **36** (1974) 843.
- 15) R.K. Fisher and R.W. Gould; *Phys. of Fluids* **14** (1971) 857.
- 16) B.D. Fried and S.P. Conte; *The Plasma Dispersion Function*, Academic Press, New York (1961).