イオンビームの発生部内での右回り 円偏波の Decay 現象

中村定男, 湯山哲守, 久保 熙, 三谷健次

(京大教養)

(48年10月9日受理)

§ 1. はしがき

前に¹⁾イオンビームとプラズマの相互作用による電子サイクロトロン周波数附近での電子サイクロトロン波(右回り円偏波)の強調を報告したが今回は Neufeld 等²⁾の理論で予測されるような低周波領域での波の増大の観測を目的として実験を行なった。その結果低周波側においても強い波の励起が観測された。しかしながらイオンビームと右回り円偏波との相互作用による不安定波ではなくイオンビーム発生部内での電子ビームとの相互作用による非線形現象と思われるものが観測されたので未だ明確な証明は得られていないがこれについて報告する。この現象はビーム・プラズマ系に外部より振動($f_{in} = 40 \sim 50 \text{ MHz}$)を加えると別の振動($f_h = 38.6 \text{ MHz}$, $f_\ell = 1 \sim 10 \text{ MHz}$)が励起されるものである。これ等の振動数間には常に $f_{in} = f_h + f_\ell$ なる関係が成立している。他方波数 K_z (静磁場 B_0 の方向)については測定誤差があり明確ではないが装置の中央部イオンガ

Decay Interaction of Right Handed Wave in an Ion Beam Accelerator

Sadao Nakamura, Tetumori Yuyama, Hiroshi Kubo
and

Kenji Mitani

Yoshida College, Kyoto University, Kyoto

ン寄りて $f_{in} = 41.5 \text{ MHz}$ の時, $K_{zin} \approx 0.05/cm$, $K_{zh} \approx 0.03/cm$, $K_{z\ell} \approx 0.03/cm$, $K_{z\ell} \approx 0.02/cm$ が観測された。しかしこの現象は初めに意図したイオンビームによるものではなくイオンビームの加速部内に浸入したプラズマ電子が加速電位によりビーム化して加速部内でのプラズマと相互作用をした結果発生したもので右回り円偏波が右回り円偏波と電子ビームの空間電位波とに分解するデケイ現象³⁾であろうと思われる。この現象の発生条件は外部より加える振動の周波数及びその強度, 外部磁界 B_0 及びビームの加速電圧によって決まる。

§ 2. 実験装置

装置の概要は1図に示す通りで右側がT P-Dタイプのプラズマ発生部で, 陽極Aは接地され中間電極は放電維持電圧を下げるために陽極に対し-12 Vに保持されている。左端にイオンガン部があり加速電圧は0~10 kV, 加速部内での電子密度は $1.8 \times 10^{10}/cc$, ビーム電流~1 mA, ビーム密度は中央部で $\sim 5 \times 10^6/cc$ で速さは加速電圧3.8 kVの時 $V_{bi} \approx 0.6 \times 10^8 cm/s$ である。図のGは格子状の加速電極で接地して使用される。ビームに振動を励起するために加速部の外側に数ターンのコイルを取付けこれに信号発生器をつなぐ。振動の測定は固定及び可動のダイポールで行い, イオンの密度及び温度はイオンセンとティップローヴ⁴⁾により, ビームの速さは飛行時間の測定により行なった。使用ガスはヘリウム, プラズマ諸量は $T_e = 2.0 \sim 2.2 \text{ eV}$, $T_i = 0.4 \sim 0.6 \text{ eV}$, $N_e = 0.1 \sim 1.2 \times 10^9/cc$ (中央部), $D = 8 \text{ m}\phi$, ガンとカソード間は, $L = 150 \text{ cm}$ である。 B_0 の一様度は中央部で径方向に $\Delta B_0 (r = 2.5 \text{ cm}) / B_0 < 0.9\%$, 軸方向には中央より前後15 cmまで2.5%以下である。

§ 3. 実験方法及び結果

方法はビームのみでも $f = 39 \text{ MHz}$ の所に特定の磁界強度 B_2 , B_3 で強い振動が発生する(2図の一番下の曲線)がこれにプラズマを加えると新らしく B_1 の所に強くより鋭い振動が励起される。これ等の振動は受信周波数を高めると全体が B_0 の大きい方へ移動する。この関係を示したのが次の3図で縦軸に受信周波数, 横軸は励起コイル下の磁場強度より求めた f_{ce} である。中央の磁場強度を使用しないのは励起コイル部にわずかなガウスを印加してもピークの位置が変動することより現象はコイル部下で発生していると思われるからである(中央で $B_0 = 1300 \sim 2800$ ガウス)。

図中の実線及び点線は後に説明するもので右回り円偏波を定在波が発生するとして取扱った場合の周波数と f_{ce} の関係である。実験はこの B_1 の少し下の所に外部磁界 ($f_{ce} = 160 \text{ MHz}$) を固定

イオンビームの発生部内での右回り円偏波の Decay 現象

№ 1 ; 1 図 実験装置の概略。左端側が
ビーム発生部，右端側はプラズマ
ソース部 K；カソード，A；ア
ノード，G；グリッド，SG；信
号発生器，使用ガスはヘリウム。

№ 2 ; 2 図 プラズマ+ビーム系よりの
振動出力。縦軸は任意スケール，
横軸は励起コイル直下での磁場強
度。受信周波数 $f = 39 \text{ MHz}$ ，ビ
ーム加速電圧 $V_b = 3.82 \text{ kV}$ ，外部
印加電圧 $V_{in} = 0$ ， $p = 1.0 \times$
 $1.0^{-3} \times 7 \text{ Torr}$ 。 B_1 はプラズ
マを加えると振動が発生する磁
場。

№ 3 ; 3 図 前 2 図の各ピーク値での
周波数の磁場依存性。放電電流
 $I_d = 4 \text{ mA}$ ， $V_b = 3.82 \text{ kV}$ ，
図中の実線は(4)式より求めたも
ので， n は波数 k の次数を示す。
 N_e は加速部内での電子密度。

№ 4 ; 4 図 f_{in} による f_h 及び f_e の励起
の代表例。 f_{in} を印加すると f_h と
 f_e が同時に励起される。 $f_{in} = 41.5$
 MHz ， $V_{in} = 7 V_p - p$ ， $I_d = 4 \text{ mA}$ ，
 $V_b = 3.82 \text{ kV}$ ， $B_0 = 58 \text{ Gauss}$ 。

№ 5 ; 5 図 f_{in} による f_h の励起の様子。 f_h がわずかに自然励起されるよう外部磁場を設定し種々な周波数の f_{in} ($V_{in} = 1 V_{p-p}$ 一定) を印加した場合に $f_{in} > f_h$ では f_{in} により f_h は強調され同時に f_l が励起される。しかし f_h は変化しない。 $f_{in} < f_h$ では f_h は強調されず f_l も観測されない。 $V_b = 3.82 \text{ kV}$, $B_0 = 58 \text{ ガウス}$, $I_d = 4 \text{ mA}$ 。

№ 6 ; 6 図 種々の f_{in} による f_l の励起の様子。 f_{in} により f_l の位置も強度も変化する。 $V_b = 3.82 \text{ kV}$, $B_0 = 58 \text{ ガウス}$, $I_d = 4 \text{ mA}$ 。

№ 7 ; 7 図 f_{in} と f_h , f_l 間の周波数関係。この3者間にはほぼ正確に $f_{in} = f_h + f_l$ の関係が成立している。 $V_b = 3.82 \text{ kV}$, $B_0 = 58 \text{ ガウス}$ 。

№ 8 ; 8 図 f_h 及び f_l の強度の V_{in} 依存性。横軸は V_{in} , 縦軸は $V_{in} = 7 V_{p-p}$ で規格化した f_h , f_l の強度で V_{in} に対して飽和現象を示している。 $f_{in} = 41.5 \text{ MHz}$, $V_b = 3.82 \text{ kV}$, $B_0 = 58 \text{ ガウス}$, $I_d = 4 \text{ mA}$ 。

イオンビームの発生部内での右回り円偏波の Decay 現象

しておき外部よりコイルに振動を加えて B_1 の所に励起される f_h 及び同時に励起される f_ℓ を調べた。

4 図に示すのは f_{in} による f_h 及び f_ℓ の励起の代表例である。左側の鋭いピークは外部より印加した信号 ($f_{in} = 41.5 \text{ MHz}$, $V_{in} = 7 V_{p-p}$) , 中央が励起された周波数の高い方で, $f_h = 38.6 \text{ MHz}$, 右側のブロードにみえる振動が周波数の低い方でピークでの周波数は $f_\ell = 2.9 \text{ MHz}$ となっている。この時の条件は, $p = 1.0 \times 10^{-3} \times 7 \text{ Torr}$, $V_b = 3.82 \text{ kV}$, 励起コイル部で $B_0 = 58$ ガウス, 中央では 1328 ガウスである。 f_{in} により f_h が励起された場合のみ f_ℓ が観測されるもので, 自然に f_h に対応するものが強く発生している場合は f_{in} を印加しても f_ℓ に対応するものは観測されない。

5 図は f_{in} ($V = 1 V_{p-p}$) による f_h の励起の様子を示したもので, f_{in} がなくてもわずかに振動が発生している所 (一番下の曲線) に, $f_{in} < f_h$ なる f_{in} を印加しても f_h はほとんど強調されない。しかし $f_{in} > f_h$ の場合には f_h の成長がみられる。が $f_{in} = 54 \text{ MHz}$ を越えると f_h は成長しなくなる。

6 図に示すのは前図と同一条件下での f_ℓ の励起の様子を示したものである。 f_h と異り f_{in} の周波数を上げると f_ℓ も増加するが振動の強度は徐々に低下し $f_{in} = 50 \text{ MHz}$ より大きくなると f_ℓ は励起されなくなる。

次の 7 図は f_{in} , f_h , f_ℓ の周波数関係を示したもので横軸に印加周波数, 縦軸は観測された振動の周波数である。この 3 者の間にはそれぞれの軸上でほぼ正確に $f_{in} = f_h + f_\ell$ なる等式が成立している。

8 図は $f_{in} = 41.5 \text{ MHz}$, $Ne = 10^8 / \text{cc}$ (加速部で $1.8 \times 10^{10} / \text{cc}$) に固定しておいて f_{in} の入力振巾に対する f_h , f_ℓ の振巾の依存性を調べたものである。図の横軸は V_{in} で縦軸は $V_{in} = 7 V_{p-p}$ の時の振巾でそれぞれ規格化されている。両者共に V_{in} に対して飽和現象がみられる。次の 9 図は $f_{in} = 41.5 \text{ MHz}$, $V_{in} = 7 V_{p-p}$ に固定しておいて中央部でのプラズマ密度を変化させた場合の f_ℓ の振巾の変化を示したもので, 同じく N_e の大きい方で飽和現象がみられる。

10 図はビームの加速電圧と f_ℓ の強度の関係を示したもので, f_ℓ の振巾は V_b に対してほぼ直線的に増大する。しかしこの図に示すように $V_b = 3.6 \sim 3.82 \text{ kV}$ の範囲内でしか f_h , f_ℓ の励起

は出来なかった。この事はビームの速さがこの現象に大きく影響しているものと思われる。

§ 4. 実験結果の吟味

ビーム・プラズマ系中に存在し得る波としてはいろんなものが考えられるが磁場に対する依存性を有する事及びデケイ現象らしいものが発生している事よりビームと同方向に伝播する右回り円偏波と縦波のビーム波を考えることが最も自然なように思われる。これ等の分散式は単純化された形⁵⁾で

$$\left(\frac{ck}{\omega}\right)^2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - \omega_{ce})} - \frac{\omega_{pi}^2}{\omega(\omega + \omega_{ci})} - \frac{\omega_{pb}^2(\omega - kV_b)}{\omega^2(\omega - kV_b - \omega_c)}, \quad (1)$$

及び

$$0 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} - \frac{\omega_{pi}^2}{\omega^2} - \frac{\omega_{pb}^2}{(\omega - kV_b)^2}, \quad (2)$$

と表わされる。ここで ω_{pe} , ω_{pi} , ω_{pb} は電子、イオン及びビームのプラズマ振動数である。

ω_{ce} , ω_{ci} は電子及びイオンのサイクロトロン振動数, k は波の波数, V_b はビームの速さである。

現象は励起コイル下の弱い磁場 ($B_0 \approx 60$ ガウス) で発生しているらしい事と $\omega_{pe}^2 \gg \omega_{pi}^2$ より

上式で ω_{pi} , ω_{ci} の項は他の項に比べてほとんど無視出来る。すると上式で主要項は (1) 式で右

辺 2 項まで (2) 式では右辺 1 項及び 4 項となる。 f_h の系列が磁場に対して飛びが発生 (3 図) し

ている点は装置の有限性による定在波ではないかと思われる。すると (1) 式よりこの波と f_{ce} の関係は,

$$f_{ce} \approx f \left(1 + \frac{f_{pe}^2 \left(\frac{2\pi}{c}\right)^2}{k^2 - \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2} \right) \quad (3)$$

となる。この式に $f_{pe} = 1200 \text{ MHz}$ (励起コイル下の電子密度 $N_e = 1.8 \times 10^{10} / \text{cc}$ より) 及

び $k = nk_0$, n は整数, k_0 に $k_0 = \pi/L = 0.0209 / \text{cm}$ を代入すると

$$f_{ce} \approx f \left(1 + \frac{158}{n^2 - 0.00011f^2} \right) \quad (4)$$

を得る。この式に $n = 5, 6, 7$ を入れると 3 図の実線が得られる。これは実験値と傾向及び大きさが大体一致する。点線は $f_{pe} = 1150 \text{ MHz}$ とした場合である。このことより $f = 40 \sim 50 \text{ MHz}$

イオンビームの発生部内での右回り円偏波の Decay 現象

№ 9 ; 9 図 f_l の強度と中央部の電子密度との関係。プラズマ電子密度を上げるにつれて f_l の強度は増加し $N_e = 2 \times 10^8 / \text{cc}$ 位より飽和し始めている。縦軸は $N_e = 10^8 / \text{cc}$ での f_l の強度で規格化されている。 $V_b = 3.82 \text{ kV}$, $f_{in} = 41.5 \text{ MHz}$, $V_{in} = 7 \text{ V}_{p-p}$, $B_0 = 58 \text{ ガウス}$ 。

№ 11 ; 11 図 右回り円偏波 (曲線) とビーム空間電位波 (直線) の分散関係。 f_{pe} は加速部内での電子密度より, $v_{be} = 2.99 \times 10^9 \text{ cm/s}$ でグリッドを通過して加速部に侵入したプラズマ電子にかかる電位 ($V = 2/3 V_b$) より求めたもの。点 P_{in} , P_h , P_l はデケイ条件をみたす所, n は $k = nk_0$ の n で定在波の次数。

№ 10 ; 10 図 ビームの加速電圧と f_l の強度の関係。縦軸は $V_b = 3.82 \text{ kV}$ での f_l の値で規格化されている。 f_l の強度は V_b に対してほぼ直線的に増加している。しかし f_l の出現する範囲は 150 V とせまい。 $f_{in} = 41.5 \text{ MHz}$, $V_{in} = 7 \text{ V}_{p-p}$, $B_0 = 58 \text{ ガウス}$ 。

の振動は波数 k が装置の長さで定まる右回り円偏波の定在波と考えられる。又この図で $n=7$ の直線が f_h の振動に対応するが、これは丁度加速部内の終段電極と格子電極 G とのきよりより求められる波数、 $\pi/2.1\text{ cm}$ に等しい。

この図では次数の高い方磁場の低い方にあり妙な感じであるがこれは次の 11 図より説明される。周波数一定、例えば 40 MHz で観測した場合、波数 k にとびとびのバンド、 $k=nk_0$ が有ると、この観測周波と $k=nk_0$ のパスバンドが一致している所にプラズマの分散曲線が入った時にはじめて振動は観測されることになる。したがって磁場を低い方から増加させるとこれにつれて分散曲線は上方へ移動し次数の高い方より一致点を通過するからである。しかし周波数がほぼ 40 MHz 附近に限定される点については別の理由が必要と思われる。又、 $n=1\sim 4$ の低次が観測されないのは磁場を更に強くする必要があるからである。

次に f_{in} により f_h 及び f_ℓ の波が励起される機構については加速部内での波数が現在確定出来ていないので不明であるが上記右回り円偏波と電子ビームの空間電位波との相互作用によるデケイ現象であろうと思われる。このことを (1) 及び (2) 式を単純化して 11 図に示す。直線は $V_{be} = 2.99 \times 10^9 \text{ cm/s}$ の時のビーム空間電位波、曲線は $f_{ce} = 160\text{ MHz}$ 、 $f_{pe} = 1200\text{ MHz}$ に対する右回り円偏波の分散関係である。この図でビームの速さはイオンでなく電子となっているがこれは初め意図したイオンビームとプラズマとの相互作用として現象を説明するにはイオンビームの速が遅くデケイに必要な条件を作り得ないためである。他方グリッド G を通ったプラズマ電子はイオン加速用の電位の影響で電子ビームを形成しておりこの時ビームの空間電位波の形成も期待出来るからである。図中の点 P_{in} 、 P_h 、 P_ℓ は実験の周波数条件より求めたものでデケイ現象に必要な波のエネルギー及び運動量保存を満足し得る。しかしそれぞれの点の波数と実験値は一致しない。これは k_z の測定が装置の中央部で行われたのに対し現象の発生がイオンビームの加速部であると云う差によるものと思われる。つまり中央部では N_e が加速部より小さく B_0 が大きいために分散曲線は急激に立上っているので $f \approx 40\text{ MHz}$ 近傍では $k_z \approx k_0$ となるからと思われる。このことは加速部内での k_z を測定することにより明確化出来るものと思われる。 f_h の発生についてはツービーム不安定⁶⁾によるものと考えられ、 f_ℓ は散乱によるものではないかとして検討中である。今後はプラズマ電子がイオンビームの加速部に侵入しないような電位を作り初め意図したイオンビームによる不安定波及び非線形現象を観測すべく準備中である。これと同時に f_h 、 f_ℓ の印加電圧 V_{in} 、電子密度 N_e やビーム加速電圧 V_b への強度依存性については、右回り円偏波が右回り円偏波とビーム空間電位波への Decay の確率³⁾を理論的な式より数値的に算出して比較検討し後に報告したい。

参 照 文 献

- 1) 中村・湯山・久保・三谷; 核融合研究 28 巻 5 号 (1972) P. 251.
- 2) Jacob Neufeld and Harvel Wright; Phys. Rev. 129 (1963) 1489. Phys. Fluids. 7(1964) 1527.
- 3) V.N. Tsytovich; Nonlinear Effects in Plasma. (Plenum Press, 1970) P.105; P.317
- 4) I. Katumata, and M. Okazaki; Japan, J. Appl. Phys. 6(1967) 123
- 5) R.J. Briggs; Electron Stream Interaction with Plasma (The M.I.T. Press 1964) p.72, p.54.
- 6) T.H. Stix; The Theory of Plasma Waves (McGraw-Hill Book company INC, New York, 1962) p. 110.