

氏 名	さ さ き あき ひと 佐 々 木  尠 彦
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 4 年 2 月 7 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 4 4 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	イオン波エコーにおける衝突効果の研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 八田 吉典 東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 安達 三郎 東北大学助教授 佐藤 徳芳

## 論 文 内 容 要 旨

### 1 序 論

近年のプラズマ物理学の発展は目覚ましく、人類最終のエネルギー源としての制御された熱核融合の実現を目前とした、高温、高密度プラズマの発生の研究が各国で活発に行なわれている一方、宇宙空間の 99% 以上を占めるプラズマの本質を見極めようとする基礎的研究が、詳細に広範囲になされている。最近、特に非線型現象に関心が寄せられ、研究が進められているが、この様な進歩に伴って、現象の解明には理論との定量的一致が不可欠になってきている。

筆者の研究したイオン波エコーも、非線型効果を本質的に含み、プラズマの特徴的振舞を顕著に示す、非常に興味ある現象の一つである。プラズマ以外にもエコーの報告があるが、いずれの場合にも次の様に説明できる。微視的素子（プラズマの場合には粒子の速度分布関数）の持つ情報が、一般に巨視量には干渉効果のために観測されない場合に、ある場所あるいは時刻に干渉が起らなくなって現われるのがエコーである。現象の本質は、分布関数が記憶を保っていることであるから、この記憶を破壊する様に働く粒子間衝突に、エコーは非常に敏感である。従って、エコーを詳しく調べることは、粒子間衝突の機構を知ることができる可能性もあって興味ある課題である。

プラズマ波（電子プラズマ波、イオン波）エコーが存在し得ることが指摘されて以来、多くの実験がなされた。イオン波エコーについては、Ikezi 等、Wong 等によって詳しく実験されたが、

重要な現象の一つである荷電粒子間衝突について非常に異なる結果が得られている。エコーの減衰は、距離、周波数、プラズマ密度に依存する。筆者は、それ等の組合せを変えて実験し、エコーの振幅、位相速度、波形等の特性を詳細に調べ、他の実験グループの報告とも違った結果を得た。筆者はこれ等の相違の解明のために、実験条件に則した数値計算を行ない、実験事実極めて近い結果を得ると共に、各実験結果の相違点が良く説明できることを見出した。また、エコーは実験的には外部励起された1次変動量同志の相互作用で形成されるものであるため、その励起のされ方に特性が依存する。筆者は、この波動の励起について検討し、イオン波、エコーの特性を良く説明できるモデルを導いた。

## 2 エコーの機構

最初にエコーの機構を簡単に述べる。x = 0 および  $\ell$  の位置にそれぞれ  $\exp(-i\omega_1 t)$ ,  $\exp(i\omega_2 t)$  の時間依存の摂動を与えると、励起された波動は Landau 減衰するが、分布関数は2度摂動を受けて  $\exp[i\omega_3 t - i\omega_3(x - \ell^*)/v]$  の形の記憶を留めている ( $\omega_3 = \omega_2 - \omega_1$ ,  $\ell^* = \ell\omega_2/\omega_3$ )。一般の位置では、v について積分した巨視量は干渉で消えるが、 $x = \ell^*$  では v によらなくなるため干渉が起らず、角周波数  $\omega_3$  の信号、即ちエコーが現われる。一方、荷電粒子間衝突によって、分布関数の変動は、x が大きい場合  $\exp[i\omega x/v - D_2(v)\omega^2 x^3/3v^5]$  の形で減衰する。D<sub>2</sub>(v) は速度空間の拡散係数である。イオン波は Landau 減衰が大きく衝突の影響は一般に小さいが、波動が消えた後で現われるエコーには、実効的な衝突周波数 ( $D_2\omega^2 x^2/v^4$ ) が距離が大である程大きいために、衝突効果が重要になる。

実験的に測定されるイオン電流密度を Boltzmann-Vlasov, および Poisson の式をもとに詳しく計算すると、比誘電率、外部励起電界を  $\epsilon(k, \omega)$ ,  $E_{ex}(k)$  とおいて、次式が得られる。

$$j(x, \omega_3) = C \cdot n \omega_3 (x - \ell) \int_0^\infty dv \frac{1}{v^3} \frac{\partial f_i^{(0)}(v)}{\partial v} E_{ex1}\left(-\frac{\omega_1}{v}\right) E_{ex2}\left(\frac{\omega_2}{v}\right) \\ \times \frac{\exp\left\{i\frac{\omega_3}{v}(x - \ell^*) - \frac{D_{2i}(v)}{3v^5}(\omega_1^2 \ell^3 + \omega_3^2(x - \ell)^3)\right\}}{\epsilon(-\omega_1/v, -\omega_1) \epsilon(\omega_2/v, \omega_2) \epsilon(\omega_3/v, \omega_3)} \quad (1)$$

被積分関数内の、指数関数部と誘電率の部分の積分に対する寄与の大小によってエコーの特性が大きく変化する。また、誘電率はイオン、電子の温度比に大きく依存し、拡散係数 D<sub>2</sub>(v) と共に、イオンの流れと温度の関数であるため、プラズマ諸量の違いがエコー特性の大きな変化を産む。また外部信号が式に顕に含まれており、この形にエコーの特性が依存する。

## 3 実験および検討

実験は、Q<sub>T</sub> machine (Q machine of Tohoku University) でセシウムプラズマを用いて行なわれた。装置は single end 型で、プラズマは  $2 \times 10^8 - 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  と比較的低密度

であるため、電子の中をビーム性の強いイオンが流れている系を考えるのが適当である。軸方向の磁場強度は 2 kG で実験空間内で一定で、密度の一様性も良い。プラズマ径は 4.5 cm  $\phi$ 、電子温度はプローブ測定から約 0.22 eV が得られた。プラズマ中に挿入された 2 つのグリッド  $G_1, G_2$  にそれぞれ  $\omega_1, \omega_2$  の角周波数の信号を印加して、差の周波数のエコーを可動グリッド  $G_3$  で受信し、Lock-in Amplifier を通して X-Y レコーダに記録させる。 $G_1$  は可動で、 $\ell$  を 2.5 - 17.5 cm 変化できる。イオン波、エコーともプラズマの上流で励起し、下流で受信した。励起信号の大きさは 0.5 V/ms で、10% 程度の密度変動が得られる。

測定されたイオン波は、理論的に導かれる分散に従い、位相速度、減衰比（減衰距離と波長の比）ともに 20 - 360 kHz の範囲で一定で、それぞれ  $1.4 - 1.5 \times 10^5$  cm/sec, 1.2 - 1.3 である。この特性から、既知の電子温度  $T_e$  の値を用いてイオン温度  $T_i$ 、流れの速度  $u$  が計算でき、それぞれ 1,600° K ( $T_e/T_i = 1.6$ )、 $7 \times 10^4$  cm/sec (イオン熱速度  $a_i$  の 1.6 倍) が得られる。また、イオン波の振幅は、密度に比例し、エコーの実験を行なった 90 kHz 以上の周波数領域では、周波数依存を示さない。通常、計算ではダイポールグリッドの励起モデルが用いられる。この場合、イオン波振幅は  $\omega^2$  に比例し、密度に依存しないことが導かれて実験結果に矛盾する。また、この計算からは、定常密度で規格化したエコー振幅は  $\omega_1^2 \omega_2^2 / n^2$  に比例することが得られる。実際には励起グリッドには粒子の吸収がある。その効果を Boltzmann の式にソースの項として次式の形で組入れる。 $S = r \phi v f_1^{(0)}(v) \delta(x) e^{-i\omega t}$ 。即ち、吸収量は印加電圧に比例し、流れ（電流密度） $v f_1^{(0)}(v)$  に比例し、局所的に吸収が行なわれると仮定される。 $r$  はグリッド形状等で決まる定数である。この吸収作用によって波動が励起される場合、イオン波振幅は密度に比例し、周波数に依存しないことが導かれ、実験に特性が一致する。この場合、定常密度で規格化したエコー振幅は、周波数、密度に依存しない。

実験的には、電子、イオンの温度、流れの速度は装置で決まり、密度を変えてもそれ等の変化は小さい。従って、(1)式から、 $x = \ell^*$  における、 $n\omega_1 \ell$  で規格化したエコーの振幅は、励起に依存する因子を除いて、衝突効果の大きさを表わす特性量  $\Gamma = (\beta\omega_2/3\omega_1\omega_2)^{1/3} \omega_1 \ell/a$  で決まる ( $\beta$  はイオン-イオン衝突周波数で  $n$  に比例する) が導かれる。また、(1)式の積分が誘電率で決まる場合は、エコーの位相速度はイオン液の速度に一致して規格化した振幅の対数は  $-\Gamma^3$  に比例する。逆に指数関数部で決まる場合には、流れが無い時は簡単に求まり、速度が  $\Gamma^{0.3}$  に比例して振幅の対数は  $\Gamma^{0.6}$  に比例した減衰を示すことが導かれる。Wong 等は、double end 型の装置で実験をしているが、減衰は後者の傾向に一致し、速度は  $\ell$  の増加に伴って増加することを報告している。Ikezi 等の用いた装置は筆者のそれと同じ型であるが、 $\ell$  で規格化した振幅の対数が  $-\ell/\lambda_1$  ( $\lambda_1$  は  $\omega_1$  の角周波数のイオン波の波長) に比例して、密度に弱く依存し、位相速度はイオン波のそれに一致すると報告されている。

筆者の実験では、 $\ell$  だけでなく、 $n$ 、周波数の組合せの変化に対しても、 $n\omega_1 \ell$  で規格化した振幅と  $\Gamma$  の関係は一本の曲線に近似でき ( $\Gamma$  の指数は 1.4 程度)、その特性は、粒子吸収の励起モデルの特性に一致する。また、先に示した温度、流れの速度を持つ Maxwell 分布を仮定した(1)式の計算結果とも傾向だけでなく絶対値も近い。 $x = \ell^*$  における位相速度は、一義的に  $\Gamma$  で決定され、 $\Gamma$

の単調増加関数になり、計算結果とも絶対値が良く合っている。また、1つのエコー内でも位相速度に変化があり、一般に遠方程、速度が速くなることを見出された。これは、衝突効果の距離依存性により、遠方程、効果が大きくなり、 $\Gamma$ の増加と同様な傾向を示して、速度の遅い粒子のエコー形成に対する寄与が減少していくためであると解釈される。さらに、衝突効果が小さい場合には  $x = \ell^*$  付近で速度が最小になることを見出された。この現象は、エコー形成には粒子の集団運動（波動）だけでなく、自由粒子流も効果があり、後者の影響が現われたものと解釈できる。イオン波に対する励起電極近傍のこの効果は、既に筆者等の実験で確かめられている。これ等の特性は、数値計算の結果とも良く一致している。

得られたエコーの波形は、一般に  $\ell$  が小さい場合は急な立ち上がりを示してピーク前後で非対称であるが、 $\ell$  の増加に伴って波形が平坦になると共に対称に近づく。またピークは、一般に  $\ell$  よりも遠くに観測されるが、 $\ell$  の増加に従って、衝突効果の距離依存性から遠い程、減衰が大きくなるため、励起電極側にずれて来る。これ等の傾向は、実験をシミュレートして行なった数値計算に良く一致している。

筆者はさらに、流れ（イオンビーム）の速度と、電子、イオンの温度比をパラメータにしてエコーの減衰特性を数値計算した。温度が等しく、流れが無い場合には減衰が急で、規格化した振幅の対数は  $-\Gamma^{0.6}$  に比例し、Wong 等の実験結果に近い。温度比あるいは流れの速度を増加させると減衰は緩かになる。この様に、プラズマ諸量の違いでエコーの特性が大きく変化する。従って Ikezi 等、Wong 等の実験結果の違いが衝突の大小に因るという Nishikawa の指摘より、プラズマの特性の違い、特に流れの有無に起因すると考えるのが適当である。

#### 4 結 論

実験で得られたエコーの各特性は、粒子が (shifted) Maxwell 分布をしていると仮定した数値計算で得られた結果に良く一致する。また、実験結果を良く説明できるイオン波、エコーの励起モデルが導かれた。さらに、エコーに対するプラズマ諸量、特に流れの効果が大きいことが明らかにされ、実験者によって得られた結果の違いが矛盾無く説明される。従って、本研究でイオン波エコーの総まとめが行なわれたと結論できよう。

## 審査結果の要旨

核融合研究に関連して、プラズマ物理工学の近年における発展には著しいものがある。特に非線形現象は多くの研究者の興味の対象となり、幾多の特徴的性質が解明されてきている。プラズマ波のエコーは、プラズマの無衝突集団運動において、荷電粒子の速度分布関数が摂動を記憶していることに起因する現象で、最初理論的に予言され、後に実験的に検証された。しかし、その実験結果にはいくつかの不備な点があり、特にイオン波エコーに対する衝突効果について互に矛盾する結果が発表されている。本論文は、これを解明することを目的として、イオン波エコーにおける衝突効果について詳細な測定を行い、理論的検討を加えたもので、全文5章よりなる。

第1章は序論で、研究が計画された経緯を明らかにしている。

第2章では、まずエコーの機構を簡単に紹介し、次いでイオン波エコーにおける衝突効果の理論的背景と実験へ適用する場合の注意について述べ、さらにエコーの性質に重要な影響を与える波動励起モデルとして粒子吸収に基く新しい提案を行っている。

第3章は実験装置、方法および結果を述べ、最後に過去の実験との比較を行っている。プラズマはQマシーン（接触電離プラズマ発生装置）によって生成され、互の間隔 $l$ が変えられる二つの励起格子に周波数 $f_1$ 、 $f_2$ のイオン波励起用信号を印加する。励起される二つのイオン波は格子近傍で無衝突減衰するように条件を選び、ほぼ $l = lf_2 / (f_2 - f_1)$ なる位置に現れる二次のエコー（周波数 $f_2 - f_1$ ）を検出用格子で測定する。密度、 $l$ 、 $f_2$ と $f_1$ の組合せを変えエコーに対する衝突効果を調べた結果、エコー振幅の空間的減衰について過去の実験とは異なる結果を得たばかりでなく、新たにエコーの位相速度の空間的变化を見出した。

第4章では、第2章で提案した波動励起モデルによるイオン波エコーの理論式を数値計算し、実験結果を検討している。数値計算は、過去の報告をも考慮して、種々のパラメータの組合せについて行われた。その結果、プラズマの流れが重要であることが明らかになり、これを考慮することによってイオン波エコーの実験結果が良く説明できることが判明した。このことは、今まで解明できなかった矛盾を解決したばかりでなく、エコーの位相速度の空間依存をも解明し、しかも波動励起について重要な示唆を与えるもので高く評価できる。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文はイオン波エコーにおける衝突効果を明らかにし、プラズマ波動励起に対する重要な知見を得たもので、プラズマ物理工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。