

フロー速度シア及び負イオンによるドリフト波の変調

市 來 龍 大, 林 賢 一 郎, 金 子 俊 郎, 畠 山 力 三*

Influences of Plasma Flow Velocity Shear and Negative Ions on Drift Waves

By

Ryuta ICHIKI, Kenichiro HAYASHI, Toshiro KANEKO, and Rikizo HATAKEYAMA*

Abstract: The collisionless electron drift wave instability in a plasma involving sheared magnetic-field-aligned positive-ion flow and negative ion species has been experimentally investigated. We found that negative ions tend to stabilize the instability, which is the opposite result to a number of earlier studies on negative ion plasmas. The kinetic dispersion relation predicts that the current-driven shear-modified drift wave is excited for the positive shear range, and that the D'Angelo instability is brought about instead for the negative shear range. However, the wave observed is the current-driven shear-modified drift wave through both signs of the shear.

Key words: Flow velocity shear, Negative ion, Drift-wave instability, D'Angelo instability

1. 研究背景

流体の速度が流れる方向に対して垂直に勾配を持つ場合、これをフロー速度シアと呼ぶ。フロー速度シアは流体中には必然的に存在するであろう一見単純な現象であるが、この現象が流体に Kelvin-Helmholtz 不安定性などの不安定性をもたらすことが知られている [1]。これはプラズマに関しても言えることであり、特に磁化プラズマ中では外部磁力線に垂直なフロー（主に $E_r \times B_z$ ドリフト）の速度シア（垂直シア）、及び平行なフローの速度シア（平行シア）の2種類の速度シアが考えられ、一般にこれらはプラズマに異なる影響を与える。垂直シアは核融合プラズマ閉じ込めの研究と非常に密接に関わっており、基礎研究においても長い間研究されている [2-4]。一方、平行シアについては古くは 1960 年代に D'Angelo らにより D'Angelo モードと言われる不安定性の研究が行われた [5, 6]。彼らにより理論的及び実験的研究がなされてはいるものの、平行シアの実験ではシア強度制御の困難さゆえ詳細な研究は実現されず、それ以降、平行シア駆動/変調不安定性の実験は長らく行われなかった。しかし近年、地球周辺プラズマ研究における平行シアの重要性が再認識されてきており、例えば極域電離圏で観測されたイオン音波不安定性に対して平行シアを用いた理論モデルが提唱されている [7]。彼らの用いた分散関係からは、平行シア変調イオン音波と D'Angelo モードはそれぞれ異なる平行シアの符号において励起されることが導出される [8]。この平行シア変調イオン音波は実験的に検証されている [9, 10]。

この様な状況において、東北大学では Q マシンの改良により世界に先駆けて平行シア強度及び垂直シア強度の制御法を確立し [11]、この手法を用いて平行・垂直シア駆動/変調低周波不安定性の実験的研究を推進してきた。上述したイオン音波の議論は密度勾配のない場合にのみ一般性があると言え、すなわち密度勾配を考慮した場合にはイオン

* Tohoku University

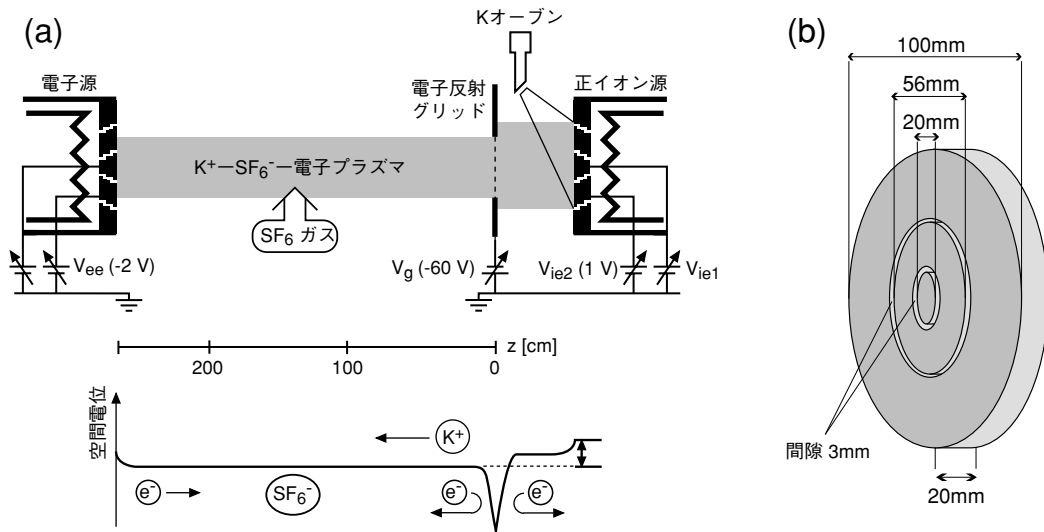


図1 (a) 平行シア制御に装備された Qr-Upgrade Machine の概略図. (b) 分割型タングステンホットプレート (正イオン源) の概略図. 内部より第1, 第2, 及び第3電極.

音波の代わりにドリフト波を研究対象とする必要がある．そこで金子らは，ドリフト波不安定性が平行シアから受ける影響を実験的に観測し，その特性を運動論により説明した [12, 13]．さらに一般性を追求すべく，現在では平行シア・垂直シアの重畳効果の観測，及び多種イオンプラズマ系でのシア駆動/変調不安定性の研究を推進している．その中の1テーマとして，宇宙プラズマには多種のイオンを含むプラズマや微粒子を含むプラズマが多く存在していることを考慮に入れ，負イオン種を含むプラズマ（負イオンプラズマ）を用いた実験を行っており [14, 15]，ここでは負イオンプラズマ中における平行シア変調ドリフト波不安定性の実験に関して報告する．負イオンプラズマ中の平行シア実験は筆者の知る限りでは1例のみ存在し，AnらがQマシンプラズマ中で観測されたD'Angeloモードについて報告している [16]．理論的には負イオンの導入がD'Angeloモードの成長率を増加させると予測され [17]，彼らはその負イオンによる不安定性助長特性を観測したと報告している．

我々はこれまでに以下の2つの結果を得ている．

- 負イオンの導入により，ドリフト波は全シア強度範囲において抑制された．
- シア変調ドリフト波のみが観測され，D'Angeloモードは励起されなかった．

これらの結果についての詳細を報告する．

2. 実験装置

実験は東北大学のQr-Upgrade Machineを用いて行った．装置の概略を図1(a)に示す．生成される磁化プラズマの各パラメータはプラズマ密度 $n \simeq 10^9\text{ cm}^{-3}$ ，電子・正イオン温度 $T_e \simeq T_i \simeq 0.2\text{ eV}$ ，プラズマ空間電位 $\phi_s \simeq -6\text{ V}$ ，プラズマ直径 $L \simeq 40\text{ mm}$ ，磁場強度 $|\mathbf{B}| = 0.24\text{ T}$ である．このQマシンは沿磁力線正イオンフロー及びその速度シア（平行シア）制御用に装備されている [11]．その特徴は以下の3点である．（1）カリウム正イオン (K^+) 源であるタングステンホットプレートが同心円状に分割されている．（2）真空容器端のもう一方に電子源用のタングステンホットプレートが装着される．（3）正イオン源の前面に負にバイアスしたメッシュグリッドが配置される．

沿磁力線正イオンフローは図に示されるように正イオン源電位とプラズマ空間電位 ϕ_s の差により発生させるため，フロー速度制御は ϕ_s を固定した上で正イオン源電位を変化させて行う．ここでもし正イオン源からの熱電子がプラズ

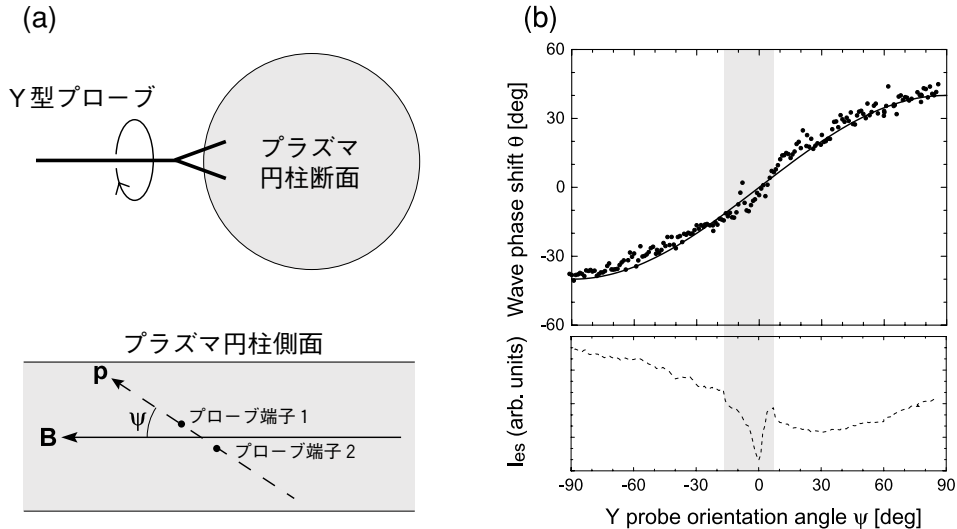


図 2 (a) Y型プローブ配置図。(b) Y型プローブにより検出した揺動位相差 (上) 及び電子飽和電流 (下)。実線は $k_{\parallel} = 0$ を仮定した理論曲線であり、この曲線と陰影部以外の位相差データに差異があることより k_{\parallel} が有限の値を持つことが評価できる。

マに供給されれば、 ϕ_s が正イオン源電位に引きずられ変化してしまいフロー速度制御は達成されないため、正イオン源からの電子をメッシュグリッドにより反射する。プラズマを構成する電子は電子源から供給するため、 ϕ_s は電子源電位を一定にすることにより固定することができる。また、電子源からの熱電子は half-Maxwell 分布で放出されたのちメッシュグリッド到達時に反射され逆方向に進むため、結果的に Maxwell 分布となる。

平行シアの生成についてであるが、図 1(b) のように正イオン源を同心円状に分割しているため、それぞれの部分に独立にバイアスすることができ (正イオン源電位を内側から V_{ie1} , V_{ie2} で表す。なお、今回の実験では第 3 電極は使用していない。), すなわち各プラズマ層の沿磁力線正イオンフロー速度を独立に制御することができる。このとき、各層 (直径 20 mm の第 1 層, 外径 56 mm の第 2 層) の境界に平行シアが生成・制御されることになる。今回の実験では $V_{ie2} = 1$ V に固定しており、第 2 層での K^+ フロー速度はイオン音速 $\sqrt{T_e/M_+}$ の 8 倍程度である。この速度と第 1 層でのフロー速度の差が平行シアを生むため、実験においてはシア強度の目安として電極電位差 $\Delta V_{ie} = V_{ie2} - V_{ie1}$ を用いる。

負イオン種生成のため、0.1 eV 程度の電子エネルギー領域において高い電子付着断面積を有する SF_6 ガスをプラズマ中に導入する [18]。結果的にプラズマは $K^+ - SF_6^-$ 電子プラズマとなる。電子が負イオンに置き換わる割合 (負イオン交換率) $\varepsilon = n_-/n_+$ は、 SF_6 ガスの分圧を変えることにより制御する。

プラズマパラメータの測定及び揺動時系列の検出は、真空容器側面から挿入した Langmuir プローブを用いて行った。沿磁力線 K^+ フロー速度は静電イオンエネルギーアナライザーを用いて測定した。

3. ドリフト波不安定性の同定

プラズマ中に自己励起しているドリフト波が平行シア及び負イオンから受ける影響を報告していくわけであるが、その前に、観測された揺動がドリフト波である証拠を 3 例挙げておく。

- (A) 電子反磁性ドリフト速度での周方向伝搬
- (B) 有限の沿磁力線 (軸方向) 波数の存在
- (C) プラズマ密度勾配の急峻な場所での局所的励起

このうち、(A) 及び (B) の波数測定に関してこの章で説明する。

図 2(a) のように先端に 4.5 mm の距離をおいた 2 つのプローブ端子を有する Y 型プローブをプラズマ円柱側面から挿

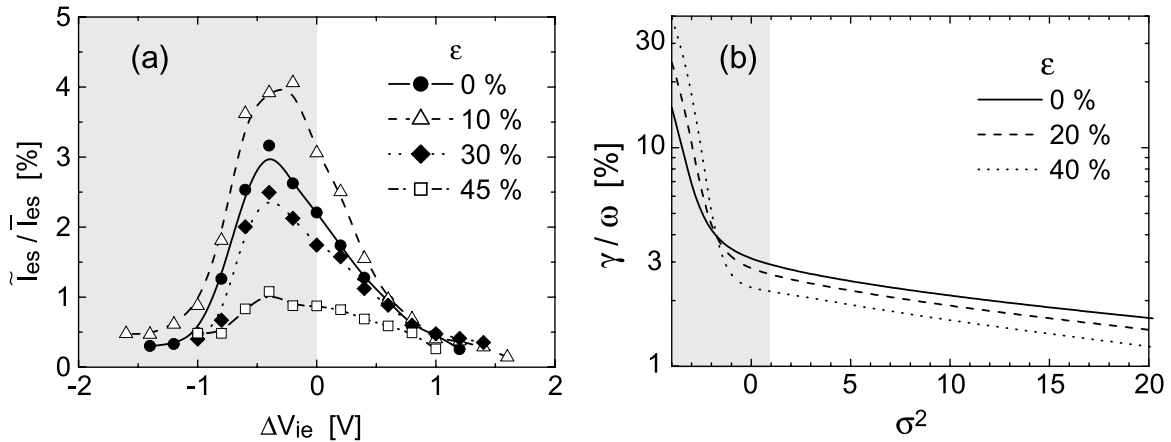


図3 (a) 実験で観測されたドリフト波の規格化振幅。(b) 局所分散関係から導出した波動成長率 ($U_+ = 8$, $W = 0.15$, $\tau_+ = 1$, $\tau_- = 0.1$, $\mu_- = 39/146$, $u = 30$, $b = 0.05$). 陰影部は負シア領域を表す。

入し、2点間の揺動時系列の位相差から波数を求めた。波数ベクトルを \mathbf{k} 、プローブ端子間を結ぶ直線方向を向いた単位ベクトルを \mathbf{p} 、磁場ベクトル \mathbf{B} と \mathbf{p} のなす角を ψ とすると、観測される波数は $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ となる。その値に比例する位相差は図 2(b) の黒点で示されるように正弦波となり、最大位相差を与える ψ から波動の伝搬方向も決定される。結果として、揺動はほぼ周方向に伝搬する ($\psi \simeq 90^\circ$) 波動であり、電子反磁性ドリフト方向に電子反磁性ドリフト速度で伝搬していることが確認された。得られた k_\perp の値より、周方向モードは $m=3$ であることが分かった。

続いて k_\parallel の測定について報告する。ドリフト波の特徴として、微小ではあるが有限の k_\parallel が存在することが挙げられる。原理的には、 k_\parallel は図 2(b) の $\psi = 0^\circ$ における揺動位相差から求められる。 ψ のゼロ点を正確に決定する必要があるが、我々は以下の手法を採用してそれを行った。Y型プローブの一方の端子で測定した電子飽和電流は、ある ψ 付近において急激に減少する [図 2(b) の波線]。これはもう一方の端子によるプラズマの幾何学的遮蔽によるものであり、すなわち電子飽和電流が最小になる点が $\psi = 0$ であると決定した。しかしながら、幾何学的遮蔽のために図 2(b) の陰影領域において位相差データが乱されており、 $\psi = 0$ での位相差から直接的に k_\parallel を導出することはできない。従って、他の乱されていない ψ 領域の位相差データと $k_\parallel = 0$ を仮定した理論曲線との差異から、 k_\parallel を評価した。結果として、 k_\parallel は有限であり $k_\perp/k_\parallel \sim 10$ であることが分かった。

4. 平行シア及び負イオンの影響

ここからは、ドリフト波振幅の平行シア強度 ΔV_{ie} 及び負イオン交換率 ϵ 依存性を調査し、それらによる不安定性の変調について考察を行う。まず実験結果を図 3(a) に示す。得られた波動振幅の特徴は具体的に以下のようにまとめることができる。

- ϵ 依存性： ϵ の増加に伴い、 $0\% \leq \epsilon \leq 10\%$ においては振幅は増加するが、 10% を超えると振幅は減少し、 50% を超えると波動は抑制され観測されなくなった。
- ΔV_{ie} 依存性： 振幅は負のシア強度 $\Delta V_{ie} = -0.4$ V 付近において最大となり、その ΔV_{ie} からシアを正方向に強くすると徐々に減少し、逆に負方向に強くすると急激に減少した。

これらの特性から、観測したドリフト波不安定性の物理機構について考察を行うが、まずは簡単に波動に対する負イオン及び平行シアの効果の理論について説明する。負イオンプラズマ中電流駆動型ドリフト波の局所分散関係は

$$\sum_{j=+, -, e} \frac{\epsilon_j}{\tau_j} \left[\hat{\sigma}_j^2 + \Gamma_0(\mu_j \tau_j b) \sqrt{\frac{\mu_j}{2\tau_j}} (\sigma_j^2 V_{ph} - U_j \pm \tau_j u W) Z \left(\sqrt{\frac{\mu_j}{2\tau_j}} (V_{ph} - U_j) \right) \right] = 0 \quad (1)$$

となる。ここで、添字 $j = +, -, e$ はそれぞれ正イオン、負イオン、電子を表し、規格化沿磁力線位相速度 $V_{ph} = \omega / (k_{\parallel} C_s)$ 、 j 種粒子の規格化沿磁力線フロー速度 $U_j = v_{\parallel j} / C_s$ 、規格化電子反磁性ドリフト速度 $W = v_{De} / C_s$ 、 $\epsilon_j = n_j / n_+$ (すなわち、 $\epsilon_+ = 1$ 、 $\epsilon_- = \epsilon$ 、 $\epsilon_e = 1 - \epsilon$)、 $\tau_j = T_j / T_e$ 、 $\mu_j = m_j / m_+$ 、 $u = k_{\perp} / k_{\parallel}$ 、イオン音速 $C_s = \sqrt{T_e / M_+}$ である。

また、

$$Z(\xi) : \text{プラズマ分散関数} \quad (2)$$

$$\Gamma_0(y) = I_0(y) e^{-y} \quad [I_0(y) : \text{変形ベッセル関数}] \quad (3)$$

$$b = k_{\perp}^2 \rho_s^2 \quad (4)$$

$$\rho_s^2 = M_+ T_e / (e^2 B^2) \quad (5)$$

である。平行シア強度は分散関係中では

$$\sigma_j^2 = 1 - u \frac{v'_{\parallel j}}{\Omega_{cj}} \quad (6)$$

$$\left(\hat{\sigma}_j^2 = 1 - \Gamma_0(\mu_j \tau_j b) u \frac{v'_{\parallel j}}{\Omega_{cj}} \right) \quad (7)$$

で表される。ここで $v'_{\parallel j}$ は $v_{\parallel j}$ の半径方向微分、 Ω_{cj} はサイクロトロン周波数である。平行シアの存在しない状況 ($v_{\parallel j} = 0$) では $\sigma_j^2 = 1$ となる。我々の実験系では正イオンのみ平行シア強度 $v_{\parallel+}$ を有しているため $\sigma_{-e}^2 = 1$ であり、今後は簡単のため σ_+ を σ 表す。

負イオンの不安定性への効果は以下の通りである。プラズマ中への負イオンの導入により電子が減少するため、遮蔽効果の低減などによる理由から波動の位相速度が変化し、それに伴い波動と電子・イオンとの Landau 共鳴が影響を受けて不安定性の特性が変調される。

平行シアの効果は以下のように説明される。平行シアにより荷電粒子の速度揺動が変調され、その結果位相速度 V_{ph} が平行シアのない時に比べておおよそ σ 倍になる。電流駆動型不安定性の場合、我々の実験条件においては $k_{\parallel} < 0$ となるため、 $v_{\parallel+}$ が正 (実験における $\Delta V_{ie} > 0$ に対応) の時に $\sigma > 1$ となり、すなわちドリフト波の位相速度が増加し、上で説明した負イオンの効果と同様の理由から不安定性の特性が変調される。これが平行シア変調ドリフト波である。ところが、 $v_{\parallel+}$ が負 (実験における $\Delta V_{ie} < 0$ に対応) の場合、 $-1 < u (v_{\parallel+} / \Omega_c) < 0$ の範囲では $0 < \sigma < 1$ となりドリフト波の位相速度が平行シアのない状況に比べ減少するが、 $u (v_{\parallel+} / \Omega_c) < -1$ では σ は虚数となる。つまり波動の周波数が虚数となり、これが成長率として導出される。これが D'Angelo モードである。このように、理論的には正シア領域では電流駆動型ドリフト波、負シア領域では D'Angelo モードが励起すると予測されるため、実験結果に対しても正シア及び負シア領域に分けて考察を進める。

正シア領域

線形局所分散関係から計算した波動成長率の σ^2 、 ϵ 依存性を図 3(b) に示す。正シア領域においては、シア強度の上昇に伴い成長率は徐々に減少しており、これはドリフト波位相速度の増加による電子逆 Landau 減衰の減少によるものである [図 4(a) 参照]。この結果は実験で得られた波動振幅の挙動と一致している。また、理論では負イオン導入によっても成長率が減少しているが、この事実も実験により $\epsilon > 10\%$ の範囲で観測されている。この負イオンの影響の解明こそ我々の実験の要であるが、今のところ明確な物理機構はまだ明確になっておらず、鋭意調査中である。いずれにしても、実験と理論の定性的な一致から、観測された波は平行シア変調ドリフト波不安定性であると考えられる。今後は各種パラメータを変更した場合の波の特徴を明らかにし、平行シア及び負イオン存在下でのドリフト波の振る舞いを体系的にとらえるべく実験を進める必要があると考えている。

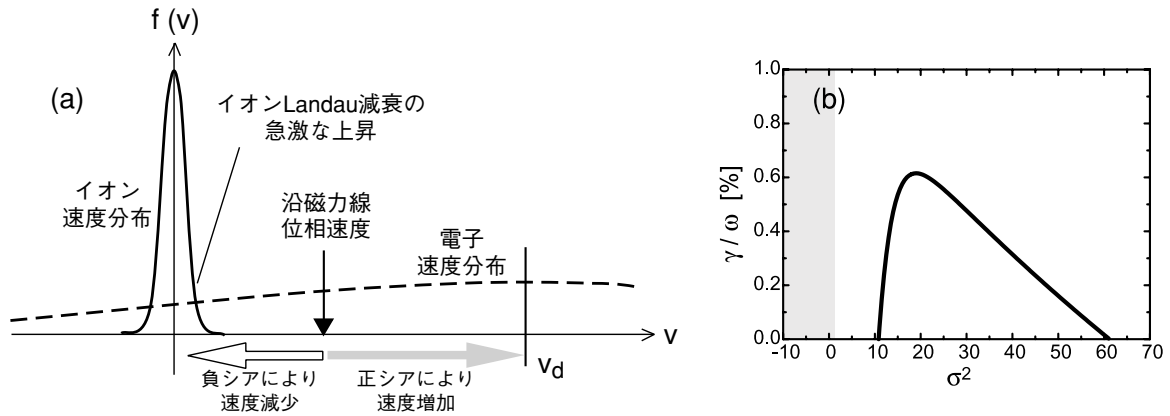


図4 (a) 速度空間における正イオン・電子速度分布関数及びドリフト波の位相速度。(b)典型的な電流駆動型イオン音波不安定性の成長率の例。陰影部は負シア領域を表す。

負シア領域

図3(b)に示されるように、 σ^2 を負の方向に増加させると急激に成長率が上昇する。これがD'Angeloモードの成長率であり、正シア領域での電流駆動型不安定性成長率とは桁違いに大きい。さらに、この成長率は線形理論においては、 σ を負方向に強くすればするほど単調に増加する。しかしながら、実験においてシア強度 ΔV_{ie} を0から負方向に強くしていくと、初期には波動振幅がわずかに増加はするもののその後急激に減少し、結局不安定性は抑制されてしまう。さらに、 ε 依存性に関して理論と実験では逆であり、理論的には負イオンがD'Angeloモードを助長するのに対し[16, 17]、我々の実験においては抑制する傾向があった。これら波動振幅のシア強度・負イオン交換率依存性から、負シア領域で見られた波動はD'Angeloモードではないということが言える。

ところで、Anらの実験において、 ε 増加に伴うD'Angeloモード振幅の増加に加え、 $\varepsilon > 70\%$ でのプラズマ密度分布の激変による振幅減少が観測されているが、我々の系ではプラズマ密度分布はほとんど変化していない。

むしろ、負シア領域で観測された波動は正シア領域で観測されたドリフト波と振幅などの特性が連続するため、負シア領域での波動もドリフト波である可能性が高い。もしそうであれば、負シア領域で観測される急激な振幅減少は、小さな負シアによるドリフト波位相速度の減少に起因するイオンLandau減衰の急激な上昇[図4(a)参照]の結果として起こっていると説明ができる。事実、図3(a)のデータ形状は、図4(b)に例として挙げた電流駆動型イオン音波不安定性の成長率の形状と非常に似ている。このイオン音波と観測したドリフト波の違いは、ドリフト波の沿磁力線方向位相速度がイオン音波よりも大きいため、図4(b)では正シア領域内に位置していた成長率の「山」が、図3(a)では負シア領域にずれ込んでいることである。

すなわち、上の議論より今回観測した波動は電流駆動型ドリフト波である可能性が非常に高く、従って図3(a)に示される結果は、負シア領域において励起するはずのD'Angeloモードが全く励起していないという証拠になると考えている。

5. 結論

平行シア制御用に装備したQマシンを用いて、負イオンプラズマ中での平行シア変調ドリフト波不安定性の実験的研究を行った。今回得られた結果及びそれらの意義について以下にまとめる。

負イオンの導入により、ドリフト波は全シア強度範囲において抑制された。

負イオンプラズマ中のD'Angeloモード[16]、電離不安定性[19]、イオン音波不安定性[20]、イオンサイクロトロン不安定性[21]など過去に行われた負イオンプラズマ研究の多くは、「負イオン導入により系の不安定化が助長さ

れる」という結果を出している。今回紹介した平行シア変調ドリフト波不安定性への負イオンの効果はそれらとは逆のものであり、物理学的に大変興味深い結果であると言える。図 3(b) のように負イオンが成長率を下げるという成長率の解があることも確認された。負イオンによる不安定性抑制の物理機構解明に向け、さらなる実験的及び理論的研究が必要であろう。

シア変調ドリフト波のみが観測され、D'Angelo モードは励起されなかった。

D'Angelo モードに関しては第 1 章で述べたように、実験的困難からこれまで十分な研究が行われてきておらず、従ってその物理機構すら明確にはなっていない現状である。今回、世界に先駆けて平行シアの制御を実現した装置を用いることにより、D'Angelo モードの非励起を示す結果を得ることができた。D'Angelo モードの観測例は過去に数例存在するが [6, 12, 16]、それらとは異なり今回の実験系では観測されなかった物理的機構を明らかにすることにより、D'Angelo モードの解明に対しても貢献できると期待している。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、技術面において多くの有用なご指導及び助言を下さった石田裕康氏に心より感謝申し上げます。また、米国 West Virginia 大学 Mark E. Koepke 教授及び米国 Naval 研究所 G. Ganguli 博士には、フロー速度シア現象に関する議論を通して実験の推進に多大な貢献をして頂きました。

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（課題番号：16684018 及び 16・2954）のもと遂行されました。

参 考 文 献

- [1] S. Chandrasekhar, “*Hydrodynamic and hydromagnetic stability*,” Oxford U.P., Oxford (1961).
- [2] G. I. Kent, N. C. Jen, and F. F. Chen, “Transverse Kelvin-Helmholtz instability in a rotating plasma,” *Phys. Fluids* **12**, 2140 (1969).
- [3] D. L. Jassby, “Transverse velocity shear instabilities within a magnetically confined plasma,” *Phys. Fluids* **15**, 1590 (1972).
- [4] R. Hatakeyama and T. Kaneko, “Sheared flow excitation and suppression of electrostatic instabilities in laboratory collisionless magnetoplasmas,” *Phys.* **T107**, 200 (2004).
- [5] N. D'Angelo, “Kelvin-Helmholtz instability in a fully ionized plasma in a magnetic field,” *Phys. Fluids*, **8**, 1748 (1965).
- [6] N. D'Angelo and S. v. Goeler, “Investigation of the Kelvin-Helmholtz instability in a cesium plasma,” *Phys. Fluids* **9**, 309 (1966).
- [7] V. V. Gavrishchaka, S. B. Ganguli, and G. I. Ganguli, “Origin of low-frequency oscillations in the ionosphere,” *Phys. Rev. Lett.* **80**, 728 (1998).
- [8] G. Ganguli, M. J. Keskinen, H. Romero, R. Heelis, T. Moore, and C. Pollock, “Coupling of microprocesses and macroprocesses due to velocity shear: An application to the low-altitude ionosphere,” *J. Geophys. Res.* **99**, 8873 (1994).
- [9] E. Agrimson, N. D'Angelo, and R. L. Merlino, “Excitation of ion-acoustic-like waves by subcritical currents in a plasma having equal electron and ion temperature,” *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5282 (2001).
- [10] C. Teodorescu, E. W. Reynolds, and M. E. Koepke, “Experimental verification of the shear-modified ion-acoustic instability,” *Phys. Rev. Lett.* **88**, 185003 (2002).
- [11] T. Kaneko, Y. Odaka, E. Tada, and R. Hatakeyama “Generation and control of field-aligned flow velocity shear in a fully ionized collisionless plasma,” *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 4218 (2002).
- [12] T. Kaneko, H. Tsunoyama, and R. Hatakeyama, “Drift-wave instability excited by field-aligned ion flow velocity shear in the absence of electron current,” *Phys. Rev. Lett.* **90**, 125001 (2003).
- [13] T. Kaneko, E.W. Reynolds, R. Hatakeyama, and M.E. Koepke, “Velocity-shear-driven drift waves with simultaneous azimuthal modes in a barium-ion Q-machine plasma,” *Phys. Plasmas* **12**, 102106 (2005).

- [14] R. Ichiki, K. Hayashi, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, "Suppression of drift wave instability due to sheared-field-aligned flow and negative ions," *Bull. Am. Phys. Soc.* **51**, 44 (2006).
- [15] R. Ichiki, K. Hayashi, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, "Enhancement and suppression of velocity-shear-driven drift instability due to negative ions," *Fusion Sci. Technol.* **51**, 241 (2007).
- [16] T. An, R. L. Merlino, and N. D'Angelo, "The effect of negative ions on the Kelvin-Helmholtz instability in a magnetized potassium plasma," *Phys. Lett. A* **214**, 47 (1996).
- [17] N. D'Angelo and B. Song, "Kelvin-Helmholtz instability in a plasma with negative ions," *IEEE Trans. Plasma Sci.* **19**, 42 (1991).
- [18] A. Y. Wong, D. L. Mamas, and D. Arnush, "Negative ion plasmas," *Phys. Fluids* **18**, 1489 (1975).
- [19] J. A. Johnson III and R. Ramaiah, "Plasma instability in the presence of negative ions," *Phys. Rev. A* **36**, 774 (1987).
- [20] B. Song, R. L. Merlino, and N. D'Angelo, "Potential relaxation instability and ion acoustic waves in a single-ended Q-machine plasma with negative ions," *Phys. Lett.* **153**, 233 (1991).
- [21] B. Song, D. Suszcynsky, N. D'Angelo, and R. L. Merlino, "Electrostatic ion-cyclotron waves in a plasma with negative ions," *Phys. Fluids B* **1**, 2316 (1989).