

氏 名	佐 藤 直 幸
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	局所高周波電場によるプラズマ電位形成
指 導 教 官	東北大学教授 佐藤 徳芳
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 安達 三郎 東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 渡辺 博茂 東北大学助教授 畠山 力三

論 文 内 容 要 旨

I 序論と理論 (第 1 章, 第 2 章)

プラズマと高周波電磁場の相互作用に関する研究は多種多様に亘り, 宇宙空間中あるいは実験室内プラズマを問わず古くから興味の的とされてきた。近年は, 核融合プラズマ達成に向けての高周波電磁場によるプラズマの加熱と輸送制御の観点から, 精力的に研究が行われている。

直線型閉じ込め装置においては, 高効率閉じ込め実現の為に, 高周波を利用した電位による端損失抑制を目的として, 特殊な沿磁力線電位分布を用いたサーマルバリア付タンデムミラー実験¹⁾や高周波の動重力電位を利用した高周波プラギング²⁾の研究がなされてきた。後者は高周波電位が実効電位である為に, 周波数によって荷電粒子をそれぞれ独立に制御できることが特徴である。これらの研究展開において, 波動現象も密接に関与していて, 特に大振幅波動が存在する場合は, その伝搬・減衰に伴うプラズマ形態変化, 粒子加速³⁾・加熱などが発生しその発展としてプラズマ電位形成も予想される。これまで, 局所高周波電磁場とプラズマの相互作用の結果生ずるプラズマ電位形成現象についての本質的な実験は極めて少なく,⁴⁾ 電子ビーム不安定波を励起し, その電場の動重力効果により電気二重層形成を試みた程度であるが, 空間電位分布は明らかにされていない。

本研究においては, 一層発展した非線形現象としてのプラズマ電位形成に注目して, 局所高周波電場として大振幅電子波を流れのあるプラズマ中で直接外部励起し, その空間減衰に起因する磁力

線方向の電位段差形成に初めて成功した。⁵⁾

II 実験装置 (第3章)

実験はQマシーンで行なった。無衝突磁化プラズマ [密度 $n_0 = (5-250) \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, 電子温度 $T_{e0} \simeq 0.2 \text{ eV}$] は, ホットプレート (H.P.) で生成され, 拡散しエンドプレート (E.P.) に向かう。軸対称電場分布を考慮し, プラズマの中央部 ($Z=0 \text{ cm}$) にリング状アンテナをリング面が磁力線に垂直にかつ, H.P.面と同心円上に配置した。アンテナはプラズマと静電結合しており, 時間変動磁場を誘起しない。アンテナで励起された電子波の電場揺動をプローブで受信し干渉波形を得た。RF印加による密度変化は先端まで高周波シールドされた軸方向掃引プローブ (Zプローブ) で測定した。Zプローブはエミッシブプローブとしても働き, 電位分布の空間連続測定に用い, パルス実験の際は高時間分解能 ($\gtrsim 1 \mu\text{s}$) 電位測定法を併用した。また, 電子エネルギー分布関数 f_0 は静電アナライザを用い, その電圧-電流特性を微分して得られた。

III 実験結果 (第4章)

高周波 (RF) 電圧 $V_{RF} = 50 \text{ mV} (< T_{e0}/e)$ を印加すると T-G モードの線形電子波が励起され, V_{RF} が T_{e0}/e を越えるあたりから干渉波形は, 既知の非線形現象を経てアンテナを境 ($Z=0 \text{ cm}$) に上下流側に巨り非対称になる。更に, V_{RF} の増加と共にアンテナ下流側で波の減衰と波長の縮小が著しくなってアンテナ付近の電場勾配が大きくなり, 非常に強い非線形性を示す (図1)。

$V_{RF} \gtrsim 2 T_{e0}/e$, $\eta (= \omega / \omega_{pe}, \omega_{pe} / 2\pi$: 電子プラズマ周波数) $\lesssim 1$ を満たし, 干渉波形 (Interferometer Pattern) が非対称になると, 空間電位 ϕ の分布については, アンテナ近傍で正電位の最大値をとり下流に向かい単調に減少してゆき負に深い電位となり (電位段差 $\Delta \phi \simeq 20 T_{e0}/e$), 電子温度 T_e は下流側で上昇する (温度段差 $\Delta T_e \simeq 30 T_{e0}$) ことが判った (図1)。この時, 密度分布にも段差が観測された。更に, ϕ の2次元分布から RF を印加するとしめないのかかわらず上流側及びアンテナ端の外側で変化は見られないが, RF印加時には, アンテナ下流側においては磁力線に沿う深い電位の谷をプラズマ柱の中心部に作り出すことも明らかになった (電気二

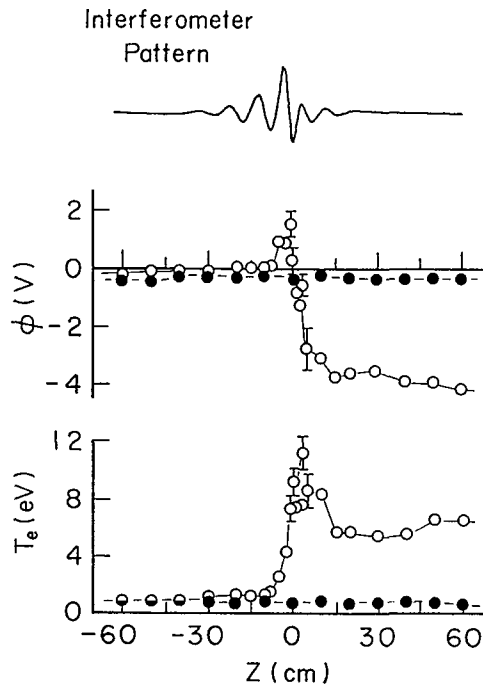


図1 上から干渉波形, ϕ , T_e の磁力線方向分布 (● $V_{RF} = 0 \text{ V}$, ○ 40 V). $n_0 \simeq 5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, $\omega / 2\pi = 45 \text{ MHz}$ ($\omega / \omega_{pe} = 0.71$).

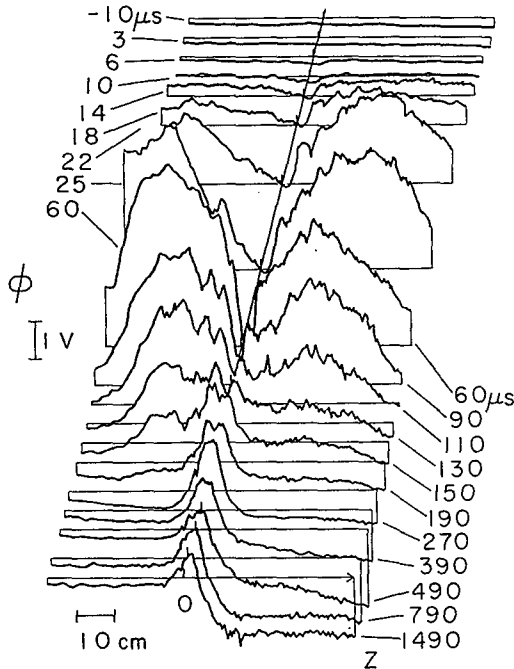


図2 RF印加時の ϕ の時間発展。 $n_0 \approx 5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, $\omega / 2\pi = 45 \text{ MHz}$ ($\omega / \omega_{pe} = 0.71$), $V_{RF} = 40 \text{ V}$ 。

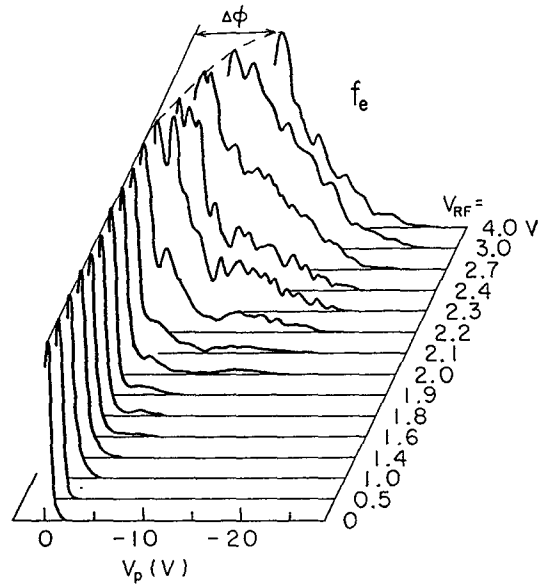


図3 静電エネルギー分析器による f_e の V_{RF} 依存性。 $Z = 50 \text{ cm}$, $n_0 \approx 7 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, $\omega / 2\pi = 48 \text{ MHz}$ ($\omega / \omega_{pe} = 0.64$)。

重層形成)。そして $\Delta\phi$ の特性長は、デバイ長の数十倍であり古典的電気二重層の理論的幅に近い値を示している。次に、 $\Delta\phi$ の時間発展を測定した。RF印加後 ($t > 0$)、 ϕ は $t \approx 60 \mu\text{s}$ まで、アンテナ近傍でのみ負電位となる上下流対称な正電位分布となり、 $t \approx 190 \mu\text{s}$ まで全体的に下がっていくと同時にアンテナ付近では上昇してくる。その後 $t \approx 790 \mu\text{s}$ には、アンテナ付近は一定の正電位分布を保ち、下流では深い負電位分布となり定常に至る(図2)。一方、 $n > 1$ の場合、波動伝搬は観測されずアンテナ近傍場が支配的となり、 ϕ 、 T_e はアンテナ付近で正電位、高温分布となる上下流対称分布を示す。

最後に、 $n \leq 1$ の場合、下流側で f_e を測定した結果を示す(図3)。大振幅励起時に波が局在してくると f_e に高エネルギー電子群(テイル)が見え始め、RFの増加で波が急峻に減衰し始めるとテイルの熱化が起こりテイルのピーク位置は低エネルギー電子群のそれに近づいていく($V_{RF} = 2 \text{ V}$)。波の減衰が更に強くなると、テイルの熱化が進み低・高温マックスウェル分布が形成される(2温度プラズマ, $V_{RF} = 2.3 \text{ V}$)。更に、高温部が低温部に合体していく過程でほぼ1温度高温分布に近づき(ΔT_e 形成)、 ϕ が負側に移動し $\Delta\phi$ が形成される($V_{RF} = 3.0 \text{ V}$)。

IV 討論 (第5章)

パラメータ段差の時間発展の周波数依存性から、 $\Delta\phi$ の形成過程及び機構を理論モデルを通じ定性的に明らかにしていく。実験結果から、動重力電位 ϕ_p による f_e の変化とその結果生ずる正の静電電位 [図1の ϕ , 図2 ($t=\infty \mu s$); $Z \simeq 0 \text{ cm}$] による f_i の変化, 及び電子流がアンテナを通過する際に一部が加速あるいは加熱され下流に向かう場合を考える (図1のT_e)。荷電粒子流束は ϕ_p によって変化を受けるが, 特にアンテナを境に電子流束が一定である為, 下流側で電子温度が増加すると電子密度が減少する。この時, 下流側におけるプラズマの準中性条件からイオン密度の現象がなくてはならず, 下流側へイオンを加速する負電位構造が期待される。これらを考慮し, 電位段差 ϕ_d が ϕ_p , 温度比, 密度比等に依存する1次元モデルを提案し, 数値計算により ϕ_d を求めた。

V 結論 (第6章)

$n \simeq 1$ を境に大振幅電子波の波動性が大きく変化し, パラメータ段差の過渡応答も大きく変化する。波動伝搬あるいは局在が強い時 ($n \lesssim 1$), 始めに f_e 上でのテイルの発生とその熱化の開始がみられ, イオンプラズマ振動周期の数十倍の時間スケールで熱化によるバルクの高温化すなわち ΔT_e が生じ始め, ϕ はアンテナ付近で正電位分布となる。更に, 音速で決定される時間経過後から定常に至るまで ΔT_e , アンテナ付近の正電位を維持しながら下流側で負電位の $\Delta\phi$ が形成される為 (電気二重層形成), 一層強い非線形効果による $\Delta\phi$ 形成は, 大振幅電子波による ΔT_e 形成に強く依存する。提案モデルの理論結果は, 下流側で温度が上昇する場合に電位段差値が大きくなる点で実験結果と矛盾しない。

『参考文献』

- 1) D.P.Grubb et al., Phys.Rev.Lett.**53**, 783(1984).
- 2) H.Fujita et al., J.Phys.Soc.Jpn.**57**, 504(1987).
- 3) N.Sato et al., Phys.Rev.Lett.**37**, 1684(1976).
- 4) V.N.Aldokhin et al., Sov.Phys.Tech.Phys.**30**, 880(1985); J.S.Levine et al., phys.Lett.**65A**, 27(1978).
- 5) 佐藤直幸 他, 電気学会プラズマ研究会資料, EP-88-44, p.45 (1988).

審査結果の要旨

スラズマと高周波電場との相互作用を明らかにすることは、制御核融合を目指すプラズマの閉じ込め、加熱の高効率化、宇宙空間プラズマ中の粒子加速機構の解明などに関連して極めて重要である。著者は、非線形電子プラズマ波による局所高周波電場に着目し、プラズマへ与える影響を実験的に調べ、局所高周波電場によってプラズマ電位勾配が形成されることを明らかにした。本論文は、その研究成果を取りまとめ、さらに理論的吟味を加えたもので、全編6章より成る。

第1章は序論であり、研究の背景、研究の目的などを述べている。

第2章においては、高周波電場が電子へ及ぼす動重力について説明し、粒子の運動方程式に基づいてその数式的表示を導いている。

第3章では、実験に使用する装置及び測定系について述べている。実験は接触電離プラズマ発生装置を用いて行われ、生成される磁化プラズマ柱のほぼ中央に、プラズマ柱を取り囲むリング状アンテナを設置し、これに高周波信号を印加して電子プラズマ波を励起する。プラズマの密度、温度、電位、エネルギー分布関数の測定、およびプラズマ柱に沿って伝搬する電子プラズマ波の検出には、熱電子放出可能な探針を用いている。

得られた実験結果は第4章で述べられている。周波数が電子プラズマ振動数より小さい場合、線形領域における電子プラズマ波の減衰（ランダウ減衰）は比較的小さいが、振幅の増加とともに大きくなり、大振幅電子プラズマ波においては、その高周波電場が励起点近傍に局在するようになる。その結果、生成されるプラズマ流中の電子は、励起点近傍で強い動重力を受ける。一方、下流では、電子プラズマ波の強い減衰に伴って、電子の加速が起こることが、電子のエネルギー分布の測定によって明らかにされている。このような条件下で、プラズマ電位の軸方向分布を測定すると、励起点近傍から下流で大きな電位降下が見出される。この結果は、局所高周波電場によるプラズマ電位勾配形成を検証したもので、高く評価できるものである。なお、周波数が電子プラズマ振動数より大きい場合の挙動、電位形成の過程などについても有用な知見を得ている。

第5章においては、実験結果を説明するモデルを提案し、実験値と理論値の比較、将来の展望などについて検討を行っている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、局所高周波電場による動重力、粒子加速に基づくプラズマ電位形成を明らかにしたもので、プラズマ理工学、電子工学の発展に資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。