

氏名	うちだ ぎいちろう		
授与学位	内田 儀一郎		
学位授与年月日	博士 (工学)		
学位授与の根拠法規	平成13年3月26日		
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項		
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻		
指導教官	直流放電プラズマ中微粒子雲の挙動制御		
論文審査委員	主査	東北大学教授 佐藤 徳芳	東北大学教授 犬竹 正明
		東北大学教授 佐藤 徳芳	東北大学助教授 飯塚 哲
		東北大学教授 島山 力三	

論文内容要旨

1. はじめに

微粒子プラズマ中において、負に帯電した微粒子による多彩な物理現象が報告されている。本研究の特徴は、時間的に定常で電位構造の制御が容易である直流放電プラズマを用い、微粒子浮上領域の電位構造を積極的に制御している点である。実験では分割型微粒子浮上電極を用いることにより、軸方向の微粒子浮上電界、並びに径方向の微粒子閉じ込め電界を制御している。本論文では、(1) 電位構造による微粒子群の形状制御、(2) 電子シャワーによるクーロン結晶相転移現象の観測、(3) 磁化プラズマ中空間構造制御による微粒子雲回転運動の駆動、(4) 外部電場によるプラズマ中微粒子除去法の開発について述べる。

2. 電位構造による微粒子群の形状制御

実験は電位分布が比較的制御しやすい直流放電プラズマ中に外部から球形単分散のポリメタクリル酸メチル架橋微粒子 (粒径: $10 \pm 1 \mu\text{m}$, 比重: $1.12 \sim 1.2$) を注入して行った。まず、プラズマ中に分割型微粒子浮上電極を設置することにより、微粒子浮上領域の軸方向並びに径方向の電位分布を積極的に制御し、電位分布と微粒子浮上の相関を明らかにした。本研究ではラングミュアプローブを用い電位分布、並びに密度分布を測定し、また微粒子群の挙動は微粒子群のレーザー散乱光を CCD カメラで撮影するこ

とにより解析している。プラズマ中で負に帯電した微粒子群は、山型の電位分布の時プラズマ中にトラップされた。そしてその微粒子群の形状は分割型電極によって形成される電位分布に従い、円盤形状、リング形状、円錐形状と様々な形状を示し、これらの形状が電位分布により制御可能であることが明らかになった。

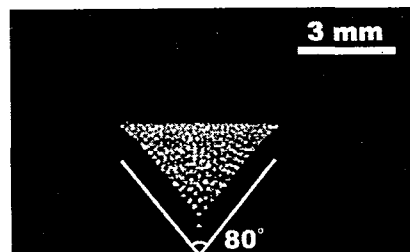


図 1: 凹型円錐形微粒子雲の形成 (横方向から撮影)。

3. 電子シャワーによるクーロン結晶相転移現象の観測

プラズマ中において、ミクロンサイズの微粒子によるクーロン結晶が観測されている。これまでの実験では、RF プラズマ中においてガス圧力を減少させることにより、あるいは RF パワーを増大させることにより相転移現象を観測している。これに対し本実験では、ガス圧力一定の条件下で、電子シャワーを微粒子に注入することにより微粒子帯電量を制御し、相転移現象を実現した。

微粒子浮上電極の上方で主プラズマを、下方で補助プラズマを生成する。微粒子浮上電極の中央電極部分は、メッシュ状になっており、二枚のメッシュ間の電位差により下方から微粒子雲に電子シャワーが入射される。Ar ガス圧力は 130 mTorr である。電子シャワー量のコントロールは、補助プラズマの放電電流 I_a (補助プラズマの電子密度) で制御される。

図 2 に、 $I_a = 1.2$ mA 時の微粒子群の写真を示す。微粒子群は規則正しく配列し、六方晶系のクーロン結晶を形成する。そして I_a (電子シャワー量) が減少するにつれ、クーロン結晶の規則的配列は徐々に崩れていくことが明らかになった。

単純イオンシースモデルを用いた計算により、電子シャワー密度の増大に伴ない、微粒子の電子付着量が増大していく様子が明らかになった。この電子シャワー注入による帯電量の増大は、微粒子間の静電的結合力を増大させ、その結果相転移現象が実現したと思われる。この様な電子シャワー入射により、微粒子群の状態は、自由に動き回れる液体相から、規則正しい配列を示す固体相へと容易に制御されることが明らかになった。

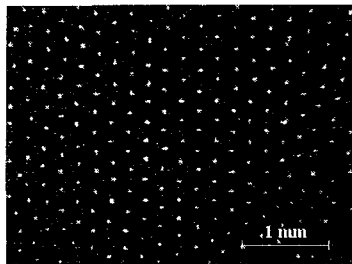


図 2: クーロン結晶形成 (上方向から撮影)。

4. 磁化プラズマ中空間構造制御による微粒子雲回転運動の駆動

本研究においては特に磁化プラズマ中における微粒子群の挙動に着目し実験を行った。

最上位に設置した直流放電のカソードは同心円状に二分割されており、それぞれの電極に流れる放電電流 I_{k1} (中央円形電極), I_{k2} (周辺リング電極) により、径方向のプラズマ密度分布が制御可能となっている。磁場は下方向に 566 G 印加する。

図 3 に I_{k1} を 0.4 mA に固定し、 I_{k2} を変化させた時のイオン飽和電流の径方向分布を示す。 I_{k2} の増

大に従い周辺領域のプラズマ密度は徐々に増大していき、 $0 \leq I_{k2} \leq 0.6$ mA においては山型の密度分布に、また $0.8 \leq I_{k2} \leq 1.4$ mA においては谷型の密度分布に制御される。

図 4 に微粒子雲回転速度 v_d の I_{k2} 依存性を示す。図 3 より山型の密度分布となる $I_{k2} = 0$ mA において、負に帯電している微粒子雲は常磁性方向 (イオンのサイクロトロン運動方向) に回転運動を行う。 I_{k2} の増大と共に、この微粒子雲回転速度は徐々に遅くなり、谷型の密度分布となる $I_{k2} = 0.8$ mA においては先ほどと反対の反磁性方向に回転運動を行う。この様に実験で観測された微粒子雲回転運動の方向は、プラズマ密度勾配により発生するイオンの反磁性電流の方向と良く一致し、この運動の駆動力としてイオン流によるドラッグ力が考察されている。

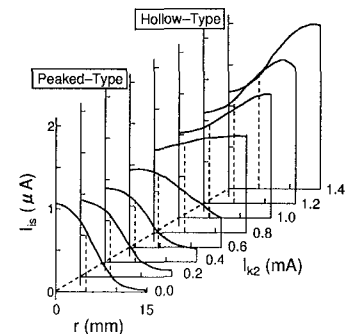


図 3: プラズマ密度径方向分布 I_{k2} 依存性。

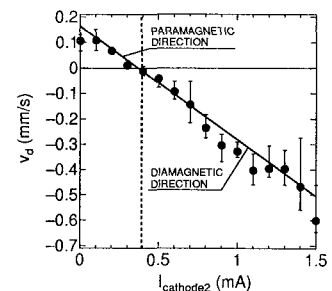


図 4: 微粒子雲回転速度 I_{k2} 依存性。

5. 外部電場によるプラズマ中微粒子除去法の開発

プラズマを用いた半導体プロセスにおいてサブミクロンサイズの微粒子が観測されており、その除去法の確立が産業界から早急に求められている。本研究は、負に帯電した微粒子の性質を利用し、静電的に微粒子群の挙動を制御する新し方法を開発する事を目的としている。

微粒子浮上領域周辺に円筒型電極 (Negatively-charged Fine-Particle コレクター) を設置する. この NFP コレクターは, 内径 2 mm, 外形 3 mm であり, 先端以外はセラミック管で覆われている. このコレクターには, 直流電位 V_{CE} が印加可能である.

NFP コレクター周辺の浮遊電位測定結果を次に示す. 図 5 は, NFP コレクターから遠ざかる方向 (x 方向) に測定した浮遊電位分布である. 領域 I ($V_{CE} < 20$ V) を点線で, 領域 II (20 V $\leq V_{CE} \leq 24$ V) を実線で, さらに領域 III ($V_{CE} > 24$ V) を破線で示す. 領域 I において, コレクター電位 V_{CE} の上昇に伴い, 微粒子閉じこめる電位は徐々に弱められていく. 領域 II において電位分布はほぼ平らになり, さらに電位が増大した領域 III においては, 負に帯電した微粒子をコレクター方向に加速する電位分布となる. 微粒子はこの電位分布に従い, 領域 I でコレクター電極に徐々に近づき, 領域 II, III でコレクターに吸収される.

領域 II における微粒子除去の様子を図 6 に示す. NFP コレクターを写真の左端に設置している. $V_{CE} = 24$ V 時において微粒子雲はホールの方向に向かって加速され, ホール中央部を通過し, プラズマ空間から除去された. 帯電微粒子は電極から 5 mm 離れた地点からホール中央に向かって 15 mm/s まで加速される. この時, 微粒子の運動はほぼ等加速度運動であり, これよりホールに向かう電界強度が 0.05 V/mm 程度であることが分かった. このように, わずかな外部電界を, プラズマ空間から真空容器壁に向かう方向に局部的に生成することにより, プラズマ中微粒子は電氣的に容易に除去されることが明らかになった.

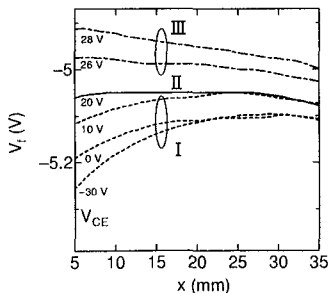


図 5: 浮遊電位 x 方向分布 (x 方向: NFP コレクターから遠ざかる方向).

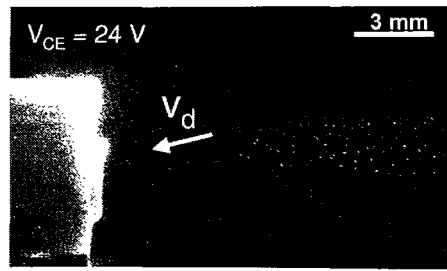


図 6: NFP コレクターを用いた静電的微粒子除去の様子.

6. まとめ

プラズマ制御が容易な直流放電プラズマを用いプラズマ中微粒子群の挙動解析を行った. 研究成果を以下に示す.

(1) 分割型微粒子浮上電極を用いて, 微粒子浮上領域の電位分布を制御した. 微粒子雲は電位分布の変化に従い, 二次元的円盤形から三次元的円錐形へとその形状を変化させる. この構造変化は, イオンシース中の軸方向における閉じこめ電界の変化による.

(2) 電子シャワー注入により, クーロン結晶の相転移を観測した. 電子シャワー量を増大させることにより, 微粒子群は, 液体相から固体相へと状態を変化させる. この変化は電子シャワーの入射により, 微粒子群の帯電量が增大し, 微粒子間の静電的結合力が強まったために生じたものと思われる.

(3) 弱磁場を印加する事により微粒子雲の剛体的回転運動を観測した. この回転運動の方向はプラズマ密度勾配により発生するイオンの反磁性電流の方向と良く一致し, 駆動力としてイオン流によるドラッグ力が考えられる.

(4) 局部的に外部電界を印加することにより, プラズマ空間からの微粒子除去を実現した. この静電的微粒子除去法の原理はいたって単純であり, プラズマ空間からの微粒子除去に極めて有効である.

論文審査結果の要旨

プラズマ中の微粒子およびダストの研究はプラズマが関与するあらゆる研究分野において重要な研究課題となってきた。特に、材料・デバイスのプラズマプロセスにおいては、その除去が極めて重要な課題となっているばかりでなく、微粒子生成とその回収法も重要な課題である。本論文は、プラズマ中における微粒子の基礎的挙動に関する実験とダスト除去・回収への応用をまとめたもので、全編7章から成る。

第1章は序論であり、微粒子プラズマ研究の意義と本論文の目的・構成を述べている。

第2章では、直流低圧放電プラズマ中に浮遊する微粒子雲の形状制御について述べている。微粒子はプラズマ中において負に帯電するが、微粒子浮上用電極および閉じ込め用電極へ印加する電位の組み合わせによって、逆円錐状および円環状微粒子雲を形成して、理論的解析を行っている。

第3章では、浮上する微粒子雲に下方から電子を追加供給して微粒子間の結合状態を変えることによって、液体-固体（クーロン結晶）間の相変化を制御することに成功している。これは微粒子プラズマの相変化に関する物理実験に新しい手法を提供するものである。

第4章では、弱磁界を鉛直方向に印加すると微粒子雲が水平面上で回転することを発見し、詳細な実験をしている。その結果、磁界によって変化するイオンの運動が微粒子雲の回転を駆動することを明らかにしている。この実験は、プラズマ中微粒子雲への弱磁界の効果を世界に先駆けて見出したもので、国内外で高い評価を得ている。

第5章では、微粒子雲中に導入された小電極に電位を印加して、微粒子雲の渦形成に成功している。電極の配置を変えることによって、渦の大きさ・形状を制御し、微粒子雲渦流の興味ある振る舞いを解明しており、今後の微粒子プラズマの研究に新しい知見を提供している。

第6章では、プラズマ中のダスト・(微粒子)の静電的除去の手法が述べられている。プラズマ中に浮上する微粒子雲から離れた位置に穴あきの小電極を配置して、これに正の電位を印加すると、微粒子雲は電極の穴の中に吸収される。除去用電極構造は極めて単純であり、要求に応じて各種の形状が考えられ、ダスト除去・回収の新技术として注目され、その実用化が進められている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、微粒子プラズマの基礎的性質を解明するとともに、その応用としてダスト除去・回収に新技术を提案しており、プラズマ理工学、電気・電子工学、材料工学の進展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。