

氏 名 古<sup>こ</sup>屋<sup>や</sup>仲<sup>なか</sup>茂<sup>しげ</sup>樹<sup>き</sup>  
 学位の種類 博士 (エネルギー科学)  
 学位記番号 論エネ博第33号  
 学位授与の日付 平成15年7月23日  
 学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当  
 学位論文題目 A STUDY ON THE MOVEMENT OF FINE PARTICLES UNDER  
 LASER RADIATION PRESSURE  
 (レーザー光放射圧力下における微粒子の挙動に関する研究)

論文調査委員 (主査) 教授 石井隆次 教授 宅田裕彦 教授 野澤 博

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、レーザー光を照射された微粒子に屈折率や形状等の違いに応じた光放射圧が作用することを利用して、マイクロオーダーの微粒子を選択的に輸送・分離する手法について基礎的な観点から検討した結果をまとめたもので、7章から成っている。

第1章は序論であり、レーザー光放射圧を利用した微粒子操作技術について従来の知見を整理するとともに、集光光学系を「トラップ目的型」から「選択・輸送目的型」へ改良することにより、固-固分離を目的とする新しい粒子分離技術を開発できる可能性があることを説明している。また、そのためのアプローチとして、本研究では、弱く収束したガウシアンビーム内における粒子挙動と粒子物性との関係を解明するとともに、処理効率の拡大に向けた装置的な検討を行うことを述べている。

第2章では、レーザー光放射圧による長レンジの粒子輸送特性に対する屈折率の影響について述べている。屈折率の異なる3種の媒体(蒸留水、ベンゼン、1-プロモナフタレン)に分散した直径5 $\mu\text{m}$ 、10 $\mu\text{m}$ のポリスチレンラテックス(PSL粒子)に弱く収束したガウシアンビームを照射し光放射圧下での挙動を比較することにより、光の伝播方向への粒子移動距離が粒子-媒体間の相対屈折率に強く依存することを確認するとともに、屈折率に比例して移動距離が増大することを明らかにしている。そして、そのような粒子輸送特性を決定する要因として、光軸に直交する光放射圧成分の作用方向が重要であることを述べている。また、幾何光学モデルによって定式化した光放射圧、ストークス抗力、重力、浮力を考慮した2次元運動方程式を数値的に解析することにより、PSL粒子の運動を十分な精度で予測可能であることを明らかにしている。

第3章では、同一の媒体(蒸留水)に分散したマイクロオーダーの球形ガラス粒子、球状ニッケル粒子、不定形アルミナ粒子の輸送特性について述べている。ガラス粒子と比較してニッケル粒子は光の伝播方向への移動距離が格段に短く、両者の分離が原理的に可能であることを明らかにしている。そして、前章で確立した粒子挙動解析モデルを3次元に拡張することによって、このようなガラス粒子とニッケル粒子の輸送特性を説明できることを示している。さらに、不定形アルミナ粒子について、光の伝播方向への移動距離の実測値と計算値(粒子形状を球形と仮定)との相違が、球形ガラス粒子の場合よりも大きくなることを見出し、アルミナ粒子の輸送特性が粒子形状の影響を受けていることを明らかにしている。

第4章では、レーザー光放射圧による粒子輸送特性に対する粒子形状の影響について述べている。光の伝播方向への輸送距離の違いに基づいて微粒子を分離する装置を試作して、前章で用いたアルミナ粒子を実際に分離し、分離前後の粒子形状を画像解析によって評価することにより、円形度や嵩張り度で表現される形状等方性と粒子輸送距離の間に相関があることを明らかにしている。また、アスペクト比の異なる数種の直方体粒子に作用する光放射圧とストークス抗力についてモデル的に解析することによって、実験結果の妥当性を示唆する結果を得ている。

第5章では、前章で使用した微粒子分離装置の処理効率に対する集光光学系と粒子供給速度の影響について述べている。レーザービームの水平断面内において透明誘電体粒子の長レンジの輸送を可能とする粒子供給位置の拡がり分離領域と定

義し、その面積値に対する集光光学系及び粒子供給速度の影響を調査した結果、本分離法の処理効率がレーザー出力に比例する傾向を持つこと、また、レーザー出力が一定の場合、集光レンズ開口数と粒子供給速度の組合せを最適化することによって、処理効率を極大化できることを明らかにしている。さらに、代表的な粒子について分離領域を比較する事により、本分離法の適用可能性について述べている。

第6章では、レーザービームを高速で繰り返しスキャンすることによってシート状の分離場を形成した場合の処理効率に及ぼす効果について述べている。レーザースキャンによって蒸留水中に分散した複数のPSL粒子を一括して輸送可能であることを実験的に確認するとともに、処理効率の拡大に適したスキャン条件（スキャン幅、振動数、レーザー出力）を明らかにしている。また、ミクロンオーダーのダイヤモンド粒子とグラファイト粒子の分離実験において、レーザースキャンシステムの導入によって固定ビームの場合と比較して処理効率を70%以上改善できることを明らかにしている。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、レーザー光を照射された微粒子に屈折率や形状等の違いに応じた光放射圧が作用することを利用して、従来法では効果的処理が困難な1~10 $\mu$ mの微粒子を選択的に輸送・分離する手法について検討した結果をまとめたものであり、主な成果は以下のとおりである。

1. 弱く収束したガウシアンビーム内における光の伝播方向への粒子移動距離と粒子物性の関係を検討し、光放射圧を利用した微粒子分離が原理的に可能であることを明らかにした。すなわち、光放射圧が流動する媒体内に存在するミクロンオーダーの微粒子の運動を決定するのに十分な大きさを有していること、また、透明な誘電体粒子の場合、粒子屈折率、粒子径、粒子形状と粒子移動距離の間に相関が見られるのに対して、導体粒子ではそのような傾向はなく、誘電体粒子と比較して移動距離が格段に短くなることを実験的に明らかにした。
2. 幾何光学モデルによって光放射圧を定式化し、他にストークス抗力、重力、浮力を考慮した3次元運動方程式を数値的に解析することによって、レーザービーム内における長レンジの粒子挙動を十分な精度で予測可能であることを明らかにするとともに、上記のような粒子挙動が発現することについて理論的裏付けを与えることに成功した。
3. 光放射圧による輸送距離の違いに基づいて微粒子を分離する装置を考案し、ミクロンオーダーの酸化アルミニウム粒子の形状分離、並びに、ダイヤモンド-グラファイト粒子間の屈折率分離が実際に可能であることを証明した。
4. 処理効率拡大の観点から本分離法の操作条件の最適化について検討し、スケールアップを図る際の設計指針を確立した。すなわち、単位時間当たり処理される粒子数がレーザー出力に比例して増加すること、また、適切な集光レンズ開口数と粒子供給速度の組合せを選定することによって、処理効率を極大化できることを明らかにした。さらに、レーザースキャンシステムの導入により、固定ビームの場合と比較して処理効率を大幅に改善できることを実験的に明らかにした。

以上要するに本論文は、レーザー光放射圧による長レンジの粒子輸送特性と粒子物性の関係を解明し、その知見をもとに従来法にない利点を有する新しい微粒子分離法を提案するとともに、具体例を持ってその有効性を証明したものであり、学術上、實際上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年5月8日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。