

最近の技術から

微粒子の移動制御技術

清水勲

茨城工業高等専門学校機械工学科 〒312 勝田市中根深谷津 866

1. まえがき

空気中に浮遊している粒子をレーザー光束で空気中からはぎとり排除したり、粒子を空中にトラップする技術は、半導体製造における汚染粒子の排除など¹⁾高度な実用技術や、熱核融合における燃料ペレットの非接触遠隔操作など²⁾として多方面でその利用価値が認められはじめた。またこの技術は空中に浮揚させた粒子からの光散乱強度分布を調べる、基礎的学術研究にも用いられている³⁾。さらにレーザー光によるこの制御法は真空中での粒子輸送や遠隔操作技術としてもその開発が注目されている。

2. 大気中照射収束レーザー光中の粒子に働く力

図1で光進行方向を α とする。レーザー光束中に入った粒子によって光子が吸収や散乱され、光子と粒子の持つ運動量保存則から粒子は光進行方向(α 方向)に力を受ける。ガウス分布強度を持つレーザー光束中では粒子は光軸と直交する方向にも光圧力を受ける。これらの光圧力はMie散乱から求められ⁴⁾、最近ではマイクロコン

ピュータでその計算ができるようになった⁵⁾。ガウス分布強度入射光の焦点で粒子が光軸中心からはずれたとき、 x 方向に受ける光圧力の計算値を図2に示した。 x 方向ではレーザー光束中心に向って光圧力の復元力が働いていることがわかる。

一方、収束光中でフォトホレシス(photophoresis)と呼ばれる光泳動力が粒子に働く場合がある。光泳動力は粒子球が光によって不均一に温められるために周囲雰囲気中のガス分子が高温側から低温側に衝突力を加えるためである。このように粒子に働く力は光圧力、重力、光泳動力(熱泳動力)があって、これらの複合力がレーザー光の焦点付近で強く働き、光トラップ力(捕捉力)が形成されると考えられる。

3. 空気中での粒子の移動制御

3.1 鉛直方向での制御法

Arレーザー、ビーム直径1.25 mm、波長 $\lambda=488.0\text{ nm}$ で最大出力1.3 W出力、TEM₀₀モード、ガウス分布強度の光束をビームエクスパンダで10倍の拡大平行光とし、焦点距離 $f=35\sim100\text{ mm}$ レンズで鉛直上方に収束した。図3にポリスチレンラテックス球、直径 $d=5.0$

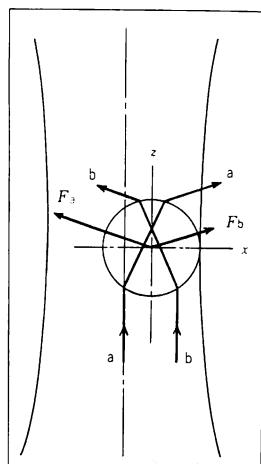


図1 光散乱強度と光圧力との関係

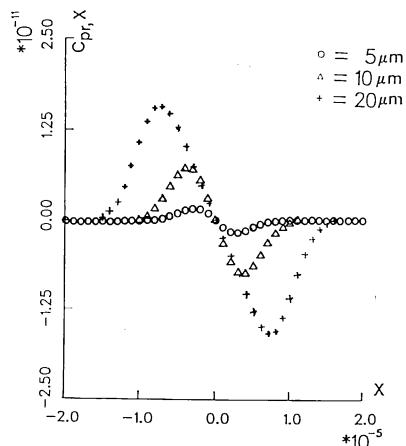


図2 粒子が光照射方向と直交する方向に受ける光圧力

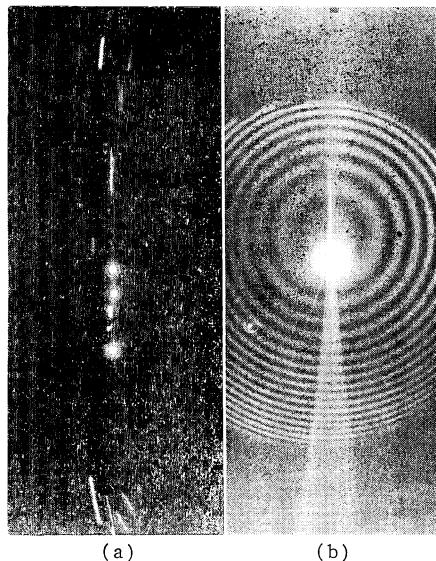


図3 鉛直照射光中で受ける光圧力と粒子捕捉

μm , 屈折率 1.592, 密度 1.056 g/cm^3 をトラップした例を示した。図3(a)には焦点位置とそのやや下側に総計6個のトラップされた粒子が示されている。トラップされる粒子位置の多くはレーザー光の焦点の光源側にある。焦点を越えた位置ではトラップされる粒子はほとんど見当らず、そこでは粒子はレーザー光の進行方向に跳ねとばされるようである。図3(b)には1個のトラップ粒子を示した。空気中での粒子トラップは収束レーザー光の鉛直上向き照射の場合が上向き光圧力と下向きの重力とのバランスがとれて水平方向照射の場合に比較してトラップの安定性がよい。

3.2 水平方向での制御法

水平方向への粒子輸送実験光学系概略を図4に示した。図5(a)には $f=40 \text{ mm}$ レンズでの水平方向収束光で焦点付近で捕捉した $d=5.0 \mu\text{m}$ 粒子の写真を示す。図5(b)には図4中のガルバノミラーを手動で x 方向に振ったときの捕捉粒子群の軌跡を示した。光トラップ力はレーザー光の収束角が大きく焦点のスポットが小さいほど大きくなるようである。水平方向照射では粒子が重力によって落下するのを防ぐためにレーザー光束のガウス分布強度をしっかりと保つことが必要となる。

4. まとめ

レーザー光圧力で粒子を空气中で重力に逆って安定に保持することは粘性の高い液体中でのそれに比べて困難である。しかし 1 W 程度以下のレーザー光で収束の仕方を変えることによって $1 \mu\text{m}$ から $20 \mu\text{m}$ 程度の粒子

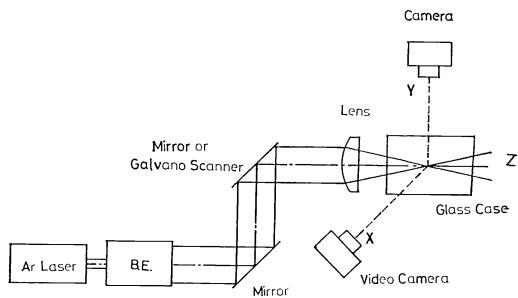


図4 水平方向照射光による粒子捕捉・排除実験光学系

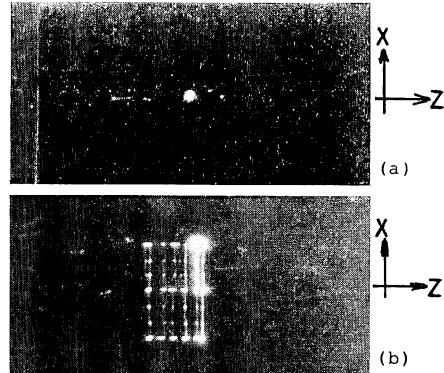


図5 水平方向照射レーザー光束による粒子捕捉と粒子移動制御

を捕捉したり、排除することが可能となり、水平方向でも空中で粒子を三次元的に遠隔操作できることがわかった。この技術がさらにサブミクロン以下の粒子の遠隔操作技術に発展することに期待がかけられている。

文 献

- 1) 清水 獻, 菅沢秀行, 山本信雄, 鈴木佐年, 高原淑恵, 安久正絃: “レーザビームのパリアによるウェハ汚染防止”, 日本空気清浄協会, 第10回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究会予稿集 (1991) pp. 97-100.
- 2) G. Roosen : “A theoretical and experimental study of the stable equilibrium positions of spheres levitated by two horizontal laser beams,” Opt. Commun., **21** (1977) 189-194.
- 3) G. Gréhan and G. Gouesbet : “Optical levitation of a single particle to study the theory of the quasi-elastic scattering of light,” Appl. Opt., **19** (1980) 2485-2487.
- 4) G. Gouesbet, B. Maheu and G. Gréhan : “Light scattering from a sphere arbitrarily located in a Gaussian beam, using a Bromwich formulation,” J. Opt. Soc. Am., **5** (1988) 1427-1443.
- 5) G. Gouesbet, G. Gréhan and B. Maheu : “Computation of the G_n coefficients in the generalized Lorenz-Mie theory using three different methods,” Appl. Opt., **27** (1988) 4874-4883.

(1991年10月7日受理)