

レーザーで作ridす μm スケールの 非平衡開放系

Periodic Bursting of Dispersed Beads in μm -Sized Laser-Field

市川 正敏 馬籠 信之* 北畑 裕之 野村 慎一郎 吉川 研一

京都大学大学院理学部物理学第一教室

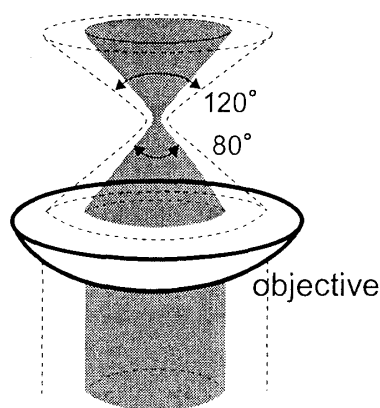


図1、集光角を狭くしたレーザー光の模式図。通常、光トラップは顕微鏡用対物レンズでレーザーを集光し、集光角 $90 \sim 120^\circ$ で行われる。光トラップ力 F の式は一般的に以下の(1)式で表される。

光ピンセットは、レーザー光を大きな角度で集光することにより引力ポテンシャルを発生させ、物体を焦点に捕らえる。この集光角を小さくすると、進行方向への光圧が大きくなり、トラップの不安定度が増す。換言すると、レーザーによるトラップ場は、光子の流れの中にある定常的な熱力学的開放系となっている。そこで、非平衡系に見られる、様々な非線形現象が生じることが期待される。本研究ではこの状態で、直径 $0.2 \mu\text{m}$ のポリスチレンビーズを適度な濃度で水に分散させた溶液に対して実験を行った。この集光したレーザー光を入れると、焦点におけるビーズのクラスタリングと分散しているビーズがいっせいに動くことによって生じる流れ(対流)との間で力比べが起こる。この力比べの中で、レーザーの出力を変えてみたところ、clusteringとburstingを繰り返す振動領域がある事が見出された。

本研究ではこの振動現象を解析するとともに、ビーズの集合度とビーズの流れに着目した非線形方程式を用いたモデルと比較し、その妥当性を検証した。

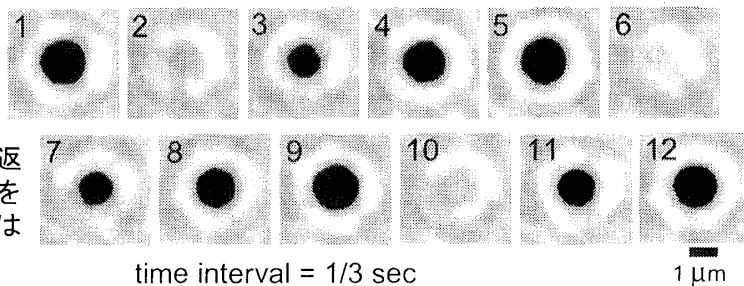


図2、ビーズの集合と放出を繰り返す振動現象。集まったビーズは光を遮る為黒く見える。レーザー出力は一定である。

$$F = \alpha \left(\frac{1}{2} \nabla E^2 + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \right) \quad (1)$$

α は対象物の分極率、 E と B は光の電磁場、 c は光速。この式は対象物が一つの分極したものとみなせる場合に適用できる光トラップ力の式である。大きさにして $1 \mu\text{m}$ 以下がその対象となる。よって、水溶液中に分散する個々のビーズの受ける力は良く表せるが、クラスタ化したビーズに関しては必ずしも正確とは言えなくなってくる。

* 現所属；名古屋大学大学院環境学研究科 都市環境学専攻 地圏空間環境学講座

この様にその大きさを光の波長以下から以上へと連続的に変化させる物体の光トラップの定式化は難しい。今回はクラスタの大きさ n と流れ u を変数としたモデル方程式を考えた。

$$\dot{n} = k(n_c - n)^\gamma - u$$

$$\dot{u} = n - (u - a)^\eta + cu - b$$

k はレーザーパワー、 γ は成長則であり実験の結果から $1/2$ を入れた、 $\eta = 3$ とした。他はすべて定数である。これを実験 (図 3) と比較したのが次の図 4 である。

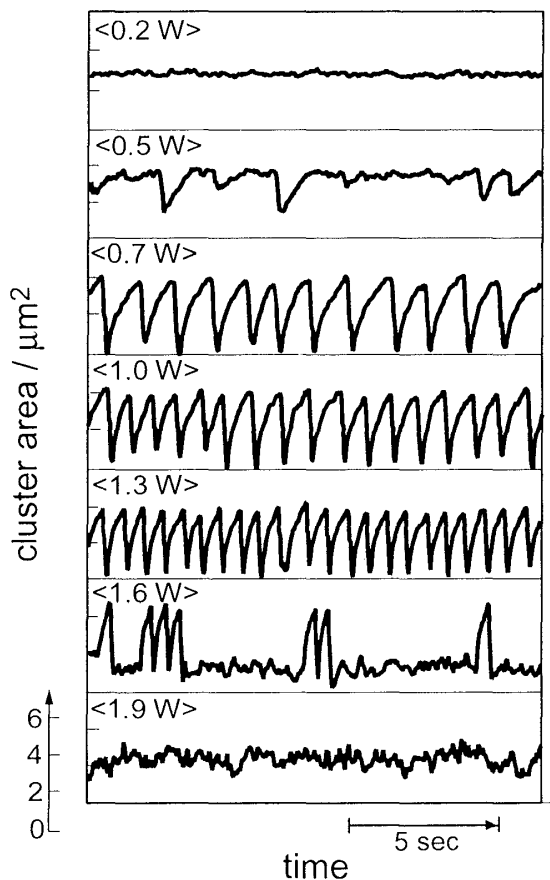


図3、実験によって、クラスタの大きさの時間変化を、レーザー出力ごとに記録したもの。縦軸は体積ではなく、焦点平面に射影されたクラスタの面積である。

図4、シミュレーションによって求めた、クラスタの大きさの時間変化。ノイズや揺らぎの効果をに入れていないので、定常状態と振動状態の間にあるintermittentな振動は見られない。

実験(上)とシミュレーション(下)は、それぞれ焦点に集まったビーズのclusterの大きさを時間依存で表したものであり、振動現象を直接グラフ化している。実験において、レーザーの出力が小さい時は定常的なClusteringが観察される(出力0.2W)。出力を上げると次第に流れの効果が強くなり、intermittentな領域になる。さらに出力を上げると、振動領域に入り、出力に依存して周期が短くなる。また更に出力を上げると流れの効果が前面に出てきて、最終的には定常的な流れへと変わる。下の図はシミュレーションの結果であり、それぞれの変数が実験の変数と対応している。

実験とシミュレーションはよく一致しており、その意味では妥当なモデルと結論づけられる。

μm スケールの非平衡開放系は、そのスケールに比べて熱の散逸や物質の拡散速度が極めて速い。そのため、我々が普通に目にするスケールでの非平衡系の構築とは異なる難しさがある。一方で、まったく新しい機構で非平衡系が構築できるとも言える。今回、我々は光圧という μm までスケールダウンしてやっと重力とオーダーが同じになるものを使って非平衡系を作り、非線形振動を作り出した。

