J22105

光渦を用いたナノ粒子操作における流体力学的粒子間相互作用の影響

Effect of hydrodynamic inter-particle interaction on nanoparticle manipulation using an optical vortex

○正 辻 徹郎^{*1}, 学 中塚 遼治^{*2}, 正 中島 吉太郎^{*2},
 正 土井 謙太郎^{*2}, 正 川野 聡恭^{*2}
 Tetsuro TSUJI^{*1}, Ryoji NAKATSUKA^{*2}, Kichitaro NAKAJIMA^{*2},
 Kentaro DOI^{*2} and Satoyuki KAWANO^{*2}

^{*1} 京都大学 Kyoto University

^{*2} 大阪大学 Osaka University

Key Words : Optical vortex, Hydrodynamic interaction, Particle manipulation

光渦はリング状の強度分布と軌道角運動量を有するレーザーで, Allen らによって提案された⁽¹⁾. 光渦をターゲット粒子に照射すると, 粒子はリング状強度分布上に捕捉されつつ円周上の公転運動を行うことが知られている. 通常の光トラップと異なり, 光渦は粒子を拘束しつつ一定方向に運動させるため, 光による微小粒子操作方法に新しい自由度を与えている. ここで, 粒子に働く力は散乱力と勾配力から構成されるが, これらの力の大きさは粒子サイズに強く依存し, 一般に, 粒子サイズが小さいほど働く力は小さくなる. 特に, 粒子サイズがサブミクロンスケールの場合, 粒子のブラウン運動が相対的により激しくなることから, 公転運動を誘起することは困難となる. 一方で, 円周軌道の上にトラップされている粒子数が増加するにつれて, 公転運動の速度が上昇することが報告されている⁽²⁾. これは粒子間の流体力学的相互作用⁽³⁾や光の電磁場と粒子の相互作用⁽²⁾によるもので, これらを利用することでより安定した公転運動を誘起することが可能となる. しかし, これらの研究では粒子サイズが比較的大きい場合を対象としており, ウイルスのようなサブミクロンスケールの誘電体粒子については検証されていない. 本研究では, 粒子サイズが直径 200 nm ~ 2 μm のポリスチレン粒子について, 粒子数と公転速度の関係を実験およびシミュレーションを用いて調べた結果⁽⁴⁾を報告する.

実験にはラゲール・ガウシアンビームを光渦として用いる. ガウシアンビームを空間光変調器 (LCOS-SLM; X13138-03, Hamamatsu Photonics K.K., Hamamatsu, Japan) に入射させると, その反射光は m 次のラゲール・ガウシアンビームに変調される. 本研究では $m = 1, \dots, 7$ である. 直径 $d (= 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 \mu\text{m})$ のポリスチレン粒子分散液を高さ 3 μm のマイクロスリット流路に導入し, 対物レンズで集光したラゲール・ガウシアンビームを粒子に照射すると, 粒子群は半径 $r_p \approx 1 \mu\text{m}$ の円周軌道の上に公転運動する. 粒子数が多くかつ粒子径が 500 nm 以下の場合, 粒子追跡法による粒子速度解析が困難になる. ここでは, 粒子群のうち 1 つのみを蛍光観察し, その速度を代表値として解析した. 直径 200 nm の粒子の場合, 単一では公転運動を誘起できないが, 多数の粒子が存在する場合はブラウン運動に比べて有意な公転運動をすることが確認され, シミュレーションの結果とも定性的に一致した.

本研究は JSPS 科研費課題番号 JP18H05242, JP16H06504, JP18K13687 および大学共同利用機関法人自然科学研究機構新分野創成センター・先端光科学研究分野プロジェクト課題番号 01211901 の助成を受けたものである.

文 献

- (1) L. Allen, M. Beijersbergen, R. Spreeuw and J. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes," *Phys. Rev. A*, Vol. 45 (1992), 8185.
- (2) M. Tamura, T. Omatsu, S. Tokonami and T. Iida, "Interparticle-interaction-mediated anomalous acceleration of nanoparticles under light-field with coupled orbital and spin angular momentum", *Nano Lett.*, Vol. 19 (2019), 4873-4878.
- (3) M. Reichert and H. Stark, "Circling particles and drafting in optical vortices", *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 16 (2004) S4085.
- (4) T. Tsuji, R. Nakatsuka, K. Nakajima, K. Doi, S. Kawano, "Effect of hydrodynamic inter-particle interaction on the orbital motion of dielectric nanoparticles driven by an optical vortex", *Nanoscale*, Vol. 12, (2020), pp. 6673-6690.