

光渦の下での光熱・光圧による連続体の質量輸送の理論研究

Theoretical study of mass transport of continuum under optical vortex irradiation

阪大院基礎工¹, 阪公大 LAC-SYS 研², 千葉大院工³, 千葉大キラリティー研⁴, 阪公大院理⁵

◦田村 守^{1,2,*}, 尾松孝茂^{3,4}, 飯田琢也^{2,5}

Grad. Sch. Eng. Sci. Osaka Univ.¹, RILACS Osaka Metro. Univ.²,

Grad. Sch. Eng. Chiba Univ.³, MCRC Chiba Univ.⁴, Grad. Sch. Sci. Osaka Metro. Univ.⁵

◦Mamoru Tamura^{1,2,*}, Takashige Omatsu^{3,4}, Takuya Iida^{2,5}

*E-mail: m.tamura.es@osaka-u.ac.jp

光ピンセットは光が物質に及ぼす力、光圧を用いて液中の微小粒子を遠隔操作する技術である。従来、光照射で生じる発熱は光による物質操作を妨げる要因として排除すべき対象であったが、最近では発熱に由来する溶液の対流現象などを利用して分散質の操作に利用する研究も報告されている[1]。これらの例における光操作の主役は分散粒子だが、一方で、流動性を持った連続体、すなわち流体が光操作の対象となる状況も存在する。例えば、光渦パルスを用いてレーザー加工を行うことで様々な物質に螺旋状の突起構造を形成できることが知られているが[2,3]、この形成過程において光照射で溶融した金属が、光誘起の発熱や光圧によって駆動された可能性がある。これまでに我々は、このような光で流体が駆動される現象を理論的に評価するための手法を研究し、下記の光渦レーザー加工などの問題に適用してきた[4]。本発表ではその成果を中心に紹介し、光熱・光圧による連続体の質量輸送の理論研究について議論する。

光渦レーザー加工 光渦は螺旋状の波面を持ち、起動角運動量を運ぶ光である。この光渦のパルスを用いてレーザー加工を行うことで、様々な材質において螺旋状の突起構造を形成できることが知られているが[2]、その形成機構が完全に理解されているとは言い難い。螺旋構造の形成については、光渦の角運動量が転写された結果と見なせる。また、突起が形成される理由に関しては、plasma plumeによる影響などが議論されてきた[2,5]。一方で我々は、光照射で溶融した金属が光渦によるリング状の加熱の下で、マランゴニ効果が中心力として作用し、ビーム軸中心へと質量輸送が生じ突起構造を形成した可能性を報告した[4]。これを評価するために、数値流体力学のソルバーであるOpenFOAMによるレーザー加工のシミュレーションに基づき、特に光渦やマランゴニ効果を独自に導入し用いてきた。Fig. 1は結果の一例であり、パルス幅30 nsの光渦照射によって溶融・輸送・再凝固を経て形成された構造である。ここでは角運動量の転写を無視しているが、数値計算に光圧の効果を含めることで、角運動量を考慮した評価も可能であると考えている。初歩的な計算として、完全に溶融していることを想定した金属の液相に対する光渦照射と光圧駆動によって、Fig. 2に示すように螺旋状の構造が生じることも確認している。

本研究の理論は、更に多様な系への適用可能性を期待でき、光熱と光圧による物質操作の新機軸を切り開くことを確信している。

謝辞：本研究の実施にあたり石原一先生(大阪大学)、床波志保先生(大阪公立大学)、瀬戸浦健仁先生(神戸市立工業高等専門学校)に有益な議論を頂いた。また、JSPS 科研費若手研究(No. JP20K15196)、JSPS 科研費新学術領域「光圧ナノ物質操作」(No. JP16H06507)、JST 未来社会創造事業(No. JPMJMI18GA, No. JPMJMI21G1)、JST CREST (No. JPMJCR1903)などの支援を受けた。

- [1] S. Tokonami, et al., *Sci. Adv.* **6**, eaaz5757 (2020).
- [2] T. Omatsu, et al., *Opt. Express* **18**, 17967 (2010).
- [3] K. Toyoda, et al., *Nano Lett.* **12**, 3645 (2012).
- [4] M. Tamura, et al., *Opt. Express* **30**, 35136 (2022).
- [5] D. Nakamura, et al., *Sci. Rep.* **10**, 20512 (2020).

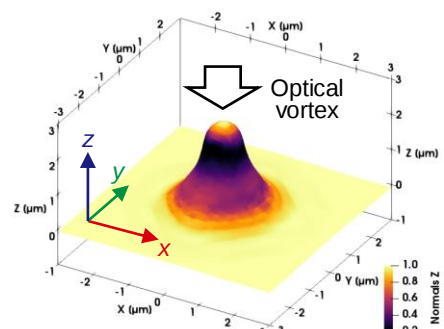


Fig. 1. Protrusion structure formed by the thermal effect under the optical vortex. The color indicates the z-component of the normal vector.

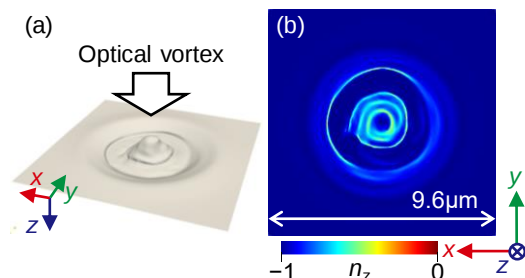


Fig. 2 Helical structure formation of molten metal under the optical vortex. (a) 3D view and (b) top view (color indicates the z-component of normal vector).