

世界初、光渦の輻射力が創るシリコンニードルとその形成過程の可視化に成功
～新しい表面加工技術の提案～

千葉大学の尾松孝茂教授と北海道大学の森田隆二教授らのグループは、JST戦略的創造研究推進事業の一環として、「螺旋波面とドーナツ型（空孔を持つ）の強度分布を持つレーザー光（光渦(注1)）をシリコン単結晶に照射すると単結晶性のシリコンニードルができる」という新奇物理現象を**世界で初めて発見し、その形成過程の可視化に成功**しました。

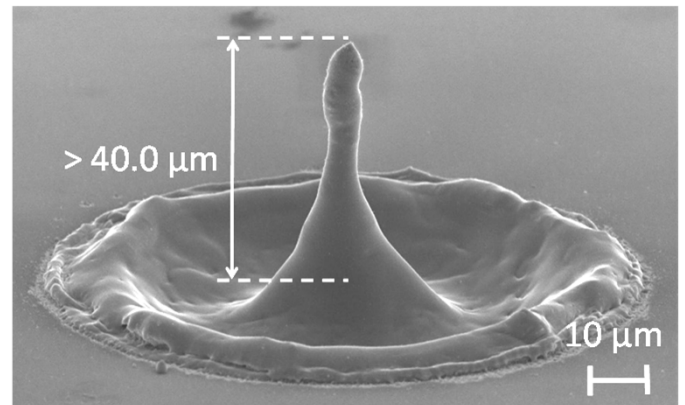
■ **研究の背景 ～レーザーによるシリコン表面加工の課題～**

シリコン単結晶は、現在最も普及している電子材料の一つとして知られています。また、ナノ微細加工を施すことでシリコンの潜在能力は飛躍的に向上します。しかしながら、レーザーによる従来のシリコン表面加工では、表面が多結晶性あるいはアモルファス(注2)になることが多く単結晶性のまま表面に微細構造を施すことは極めて困難でした。

■ **研究成果 ～世界初のシリコンニードル発見～**

「螺旋波面とドーナツ型（空孔を持つ）の強度分布を持つレーザー光（光渦）をシリコン単結晶基板に照射すると、光渦の持つ特異な輻射力(注3)の効果で単結晶性のシリコンニードルが基板上にできる」という新現象を**世界で初めて発見**しました。(研究詳細を参照)

また、ニードルの高さは40マイクロメートル（1マイクロメートルは 10^{-6} メートル）を超えることも発見しました。



▲図1 シリコンニードル
(照射エネルギー0.6 mJ/pulse、照射パルス数12)

■ **今後の展開**

光渦の輻射力によって結晶性を変えずにシリコンのミクロな構造が制御できる本成果は、光マニピュレーション(注4)をはじめとする光科学に多大なインパクトを与えます。また、本成果は、光の輻射力を用いた新しい表面加工技術の提案です。したがって、将来的にはシリコンフォトンクスをはじめ様々な波及効果が期待できます。例えば、モスアイ構造(注5)に変わるシリコン表面加工技術、人体アレルギー性の低いシリコン単結晶無痛針など、先端テクノロジーを支える機能性デバイスが光を照射するだけで創成できます。

また、光渦の輻射力を使うとシリコンの液滴を「針の孔」を通すように直線飛翔させることができますが、この技術は磁性体をはじめとする様々な機能性材料にも応用可能です。(図2参照) 微細な液滴を任意の場所に三次元的に飛翔させて構造体を創る、いわゆるプリンタブルエレクトロニクスの新しい技術としても極めて高いインパクトがあります。

※ **本研究成果は、2016年2月24日（英国時間）Nature系学術誌Scientific Reportsにオンライン版で発行されました。**

※ 論文タイトル：Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle

<本件に関するお問い合わせ>

■尾松 孝茂（オマツ タカシゲ）
千葉大学 大学院融合科学研究科情報科学専攻 教授
Tel : 043-290-3477 Fax : 043-290-3477
E-mail : omatsu@faculty.chiba-u.jp

■森田 隆二（モリタ リュウジ）
北海道大学大学院工学研究院 教授
Tel : 011-706-6626 Fax : 011-706-6626
E-mail : morita@eng.hokudai.ac.jp

■ 研究詳細

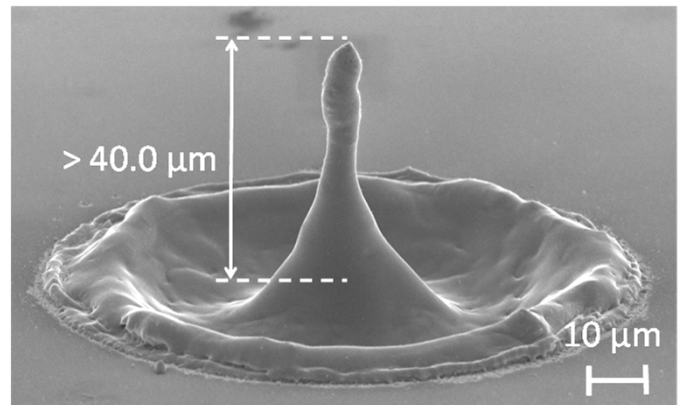
実験には、近赤外の光渦（波長1 μm 、パルス幅20 ps、エネルギー 0.2 mJ-1.6 mJ）を用いました。使用した試料は単結晶シリコン基板です。基板にできたシリコンニードルは、電子顕微鏡を用いて観察しました(図2(a))。

ニードルの高さは40 マイクロメートル（1マイクロメートルは 10^{-6} メートル）を超えます。また、電子線回折法とラマン分光法によって、できあがったシリコンニードルが単結晶であることを明らかにしました。

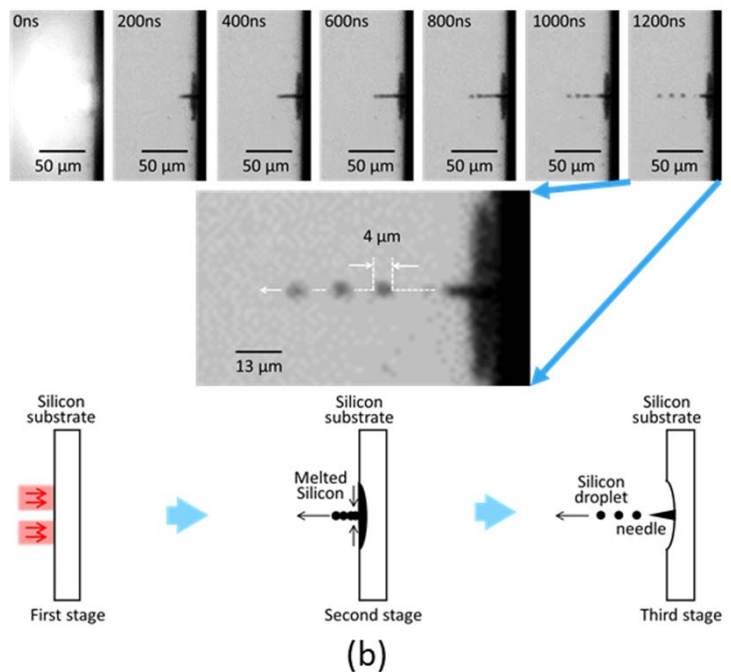
さらに、ニードルができるまでのプロセスを超高速度カメラで捉え可視化することにも成功しました(図2(b))。

光渦照射後、融解したシリコンが光渦の輻射力によって空孔に集められてシリコン基板に堆積することでニードルができあがります。光渦照射後からニードルができるまでの時間は、照射したレーザーのパルス幅（20ピコ秒= 20×10^{-12} 秒）よりはるかに長い1-2マイクロ秒（ 10^{-6} 秒）でした。この長いプロセス時間がニードルを単結晶化する要因になります。

ニードルができる過程で余剰となったシリコンは光渦の輻射力の効果と表面張力波の効果によって粒径1-2マイクロメートルの液滴として「針の孔」を通すように直線的に指向性良く飛翔します(図2中の拡大図)。通常のレーザー照射では、このような指向性の良い液滴の飛翔運動は決して起こりません。



(a)



(b)

▲ 図2

(a)シリコンニードル

(b)シリコンニードルの形成プロセス。200 ns毎フレームの時間で撮影した。レーザー照射から800 ns経過後、ニードル先端からシリコンの液滴が飛び出しはじめることが分かる。

■用語解説：

注1)光渦 光の等位相面である波面が螺旋状（螺旋波面）になっている光を光渦と呼ぶ。光渦の螺旋波面は光の波長に対する波面の螺旋の巻き数 l （整数）で定義される。

注2)アモルファス（非晶質） 周期的に原子が配列している結晶に対して、周期的な原子配列を持たない物質のこと。代表例としてガラスなどが挙げられる。

注3)輻射力 光のエネルギーの流れに沿って物質に働く力を輻射力という。螺旋波面を持つ光渦の輻射力は、進行方向に沿った前方の輻射力の他にドーナツ型強度分布に沿った周回方向の輻射力を持つ。周回方向の輻射力は、光渦の螺旋の巻き数を表す l によって制御できる。

注4)光マニピュレーション レーザー光の放射圧を用いて非破壊・非接触に微粒子を捕捉および操作すること。医学生物分野で応用されている。

注5)モスアイ構造（蛾の目構造） 光に対する屈折率を連続的に変化させて反射光を抑制するために施された光の波長よりも短い周期を持つ構造体。太陽電池の表面に施される場合がある。また、この構造体は水や空気の抵抗を抑制することもできるので飛行機や自動車などの外壁にも応用されている。

■論文タイトル：

“Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle”
（ピコ秒光渦パルス照射が形創る単結晶シリコンニードル）