

令和 5 年 5 月 16 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04291

研究課題名(和文)エバネッセント光による超音波の励起

研究課題名(英文)Generation of ultrasound utilizing evanescent light

研究代表者

松谷 巖 (Matsuya, Iwao)

東京電機大学・理工学部・准教授

研究者番号：00514465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：研究開始当初はエバネッセント光によるアブレーションを検討していたが、パルスレーザーの全反射点でプリズムが不可避免的に破損することが判明した。レーザーの全反射点では重ね合わせによって電界強度が1.75倍にもなるためである。そこで金ナノ粒子を用いてエバネッセント光を照射することによって電界強度を増強し、全反射点の内側を壊すことなくインクジェット現象(水温上昇による気化からのアブレーションおよび液滴吐出)を発現させることに成功した。電磁界シミュレーションによって、金ナノ粒子単体による電界強度は5倍程度向上することを確認した。粒子間距離が0～0.5nmの時、電界強度は平均50倍も増強される事も判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果によって、パルスレーザーのエネルギーを3次元的に閉じ込める事に成功(エバネッセント光の深さ方向および金ナノ粒子が配置されている平面方向)したため、極小点の熱源が構築できたと考えられる。現在のインクジェット技術は印刷だけでなく、3Dプリンタや再生医療等にも応用範囲が広がっている。現状では抵抗線によるヒータが配置されており、熱で気泡を発生させることで液滴を吐出する。しかしながら抵抗線のエネルギー密度が低いため、ヘッドの小型化が律則されていることが問題となっている。今回の成果を活用すれば、極小点の熱源による全く新しいインクジェット機構ができる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：At the beginning of this research, the ablation by means of evanescent light was investigated. But it was figured out that the bottom of the prism where the pulsed laser is totally reflected is unavoidably broken. Because at the reflection point, the intensity of the electric field is enhanced up to 1.75 times. We proposed a new method that the evanescent light is irradiated on Au nanoparticles and the field-intensity is greatly improved. Without the destruction of the prism where the laser is totally reflected, we have achieved to show the inkjet phenomena of a water droplet based on the laser ablation. By using the electromagnetic field simulation (COMSOL), when the distance between two Au nanoparticles is to be from 0 to 0.5 nm, the electric field is enhanced up to fifty times on average. It is obvious that the ablation depends on the temperature increase via the enhanced electric field by the interaction between the evanescent light and the Au nanoparticles.

研究分野：計測工学

キーワード：エバネッセント光 インクジェット 金ナノ粒子 アブレーション

1. 研究開始当初の背景

エバネッセント光(以後、E光)とは、光が媒質1-2界面で全反射するとき、急激に減衰しながら媒質2の側に染み出す光である。これまでの研究で、固体中の弾性波であるくさび波をE光によって励起することには成功しており(Trans. GIGAKU, 6, 1, 2019)液体中においてもE光のエネルギーを吸収した液体の発光を伴う沸騰(アブレーション)が確認できている。ナノオーダーの極浅領域に光を照射する方法としては、E光が唯一の技術である。このような技術に、パルスレーザによる超音波の衝撃力を組み合わせると、非常に小さい標的にも『繊細に』薬を叩き込めるような技術を創出できる。この微弱なE光を利用して標的の極浅領域に超音波の励起を行う。そしてその時の衝撃圧力を駆動力として、微小物質(核酸医薬を想定)の拡散を増強させる検討を行う。この現象をさらに詳細に分析するために、ハイドロフォンによる音圧の測定と、シャドウグラフ法による超音波の伝播や気泡発生の可視化を100ナノ秒オーダーで行う。そして、E光で励起された超音波によって、寒天の中を色素物質が自然状態よりも強力に拡散されることを示す。

2. 研究の目的

光が全反射するとき、媒質2の極浅領域に光を照射することができ、高エネルギーのパルスレーザを使用すれば、非常に小さい領域に光のエネルギーを閉じ込められるので、高いエネルギー密度が実現できる。そこでエバネッセント光で極小点の熱源を構築し、新しいインクジェット技術を創製することを目標にした。入射角を臨界角以上に設定してレーザを全反射させたとき、期待していたインクジェット現象は発現せず、むしろその前に全反射点であるプリズム内部が破損する問題が発生した。これは当初思い描いていた実験は失敗したことを意味している。パルスレーザの入射角が臨界角未満の時にレーザはプリズムを突き抜けて水面の内側で全反射してしまっただが、インクジェット現象の発現を確認することができた。両方に共通して言えることは、全反射点の内側で特殊な現象が生じているということ。そこで金ナノ粒子のプラズモン共鳴を用いることで、エバネッセント光強度を2倍以上にすることできるのではないかと考えた。本研究の目的は、金ナノ粒子にE光を照射して電界強度を増強させ、液体にアブレーションを起こして液滴を吐出する検討を行うことに変更した。

3. 研究の方法

最初に、ガラス-水界面でパルスレーザを全反射させたとき、ガラスの方が先に壊れてしまう原因を追及するために、電磁界シミュレーションを利用して状況を分析した。すると、媒質1では入射光と反射光の重ね合わせで電界強度が1.75倍にもなっていて、媒質2に発生したエバネッセント光は相対的に電界強度が弱いことが分かった。全反射点の内側にあるプリズムが真っ先に壊れるため、媒質2のエバネッセント光で水にエネルギーを与えるのが困難なことが分かった。また、全反射点の内側に高いエネルギーを与えることができたため、水がアブレーションを起こしてインクジェット現象が発現したことが分かった。純粋なエバネッセント光でインクジェット現象を発現させることには失敗したが、エバネッセント光強度を2倍程度にできれば当初の構想を実現できる見処が立った。

金ナノ粒子にE光を照射して電界強度を増強させ、液体にアブレーションを起こすことでインクジェット現象を発現させる実験を行う。また、単体および複数のナノ粒子に対するE光照射による電界強度を電磁界シミュレータのCOMSOLを利用して解析した。

4. 研究成果

実験で使用する金ナノ粒子のカバーガラス上への配置は以下の手順で行った。最初にアセトンおよび純水でカバーガラスを超音波洗浄する。次にカバーガラス上に金ナノ粒子分散液を塗布し、それを乾燥させることで配置した。この分散液内のナノ粒子個数は 4×10^8 個であり、換算したナノ粒子単体間の距離は400nmであった。カバーガラス上に金ナノ粒子を配置した様子をAFMで撮影した(図1)。金ナノ粒子は、局所的なクラスターを形成しながら平均距離 $2\mu\text{m}$ ではほぼ均一に分布していることが分かった。

図1に金ナノ粒子×エバネッセント光によるインクジェット現象を確認するための実験構成を示す。光源は、波長1064nm、パルス幅6nsのNd:YAGレーザを使用する。ハーフボールレンズ上面に油浸液、金ナノ粒子(シグマ・アルドリッチ製)を蒸着させたカバーガラス、水滴の順に配置する。パルスレーザのエネルギーを5mW以下(このエネルギー密度では先にプリズムが壊れることはない。)に変えてエバネッセント光を励起する。この時のカバーガラス上のエバネッセント光が照射される面積は 1mm^2 に設定した。

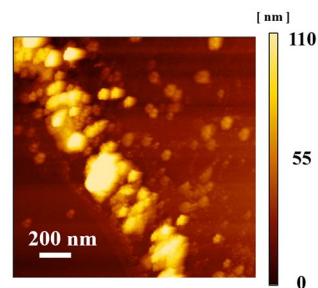


図1 金ナノ粒子の配置

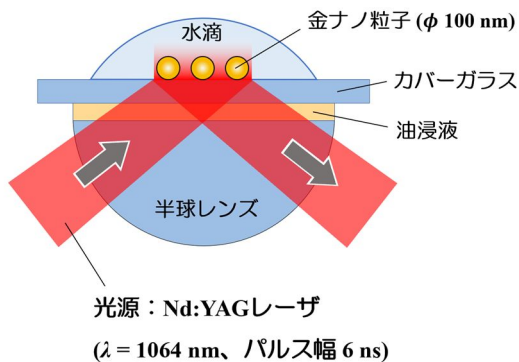


図2 金ナノ粒子×E光の実験構成

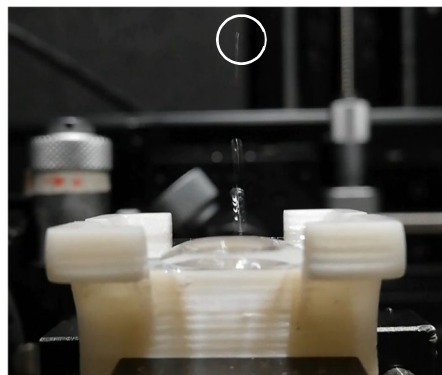


図3 インクジェット現象の発現

図3に金ナノ粒子にE光を照射して水滴にアブレーションを起こし、液滴を吐出している様子を示す。インクジェット現象純粋なエバネッセント光では5MWでプリズムが破損してしまったため、それより低エネルギーである3.8MWでインクジェット現象を起こした。この時、水滴は鉛直方向に20cm飛散した。この現象は、金ナノ粒子×エバネッセント光によるプラズモン共鳴によって電界強度が上昇することで、水温が急激な上昇を起こし、気化・プラズマ化によって、インクジェット現象が発現したと考えられる。

金ナノ粒子が寄り集まっている状況を考慮した電磁界シミュレーションをCOMSOLを用いて行った。図4に金ナノ粒子を「2個」配置してE光を照射したときのシミュレーションモデルを示す。また図5に粒子間距離を0-3nmの範囲で変化させたときの電場分布を示す。横軸がナノ粒子間距離、縦軸が電場増強度を表している。挿入図は、粒子間距離1nmのときの金ナノ粒子周りの電場分布を示している。これらの結果から、粒子間距離が近ければ近いほど電場増強度は上がり、粒子間距離1nm以下から急激に増強度が上がるのが分かる。金ナノ粒子単体による電界強度の向上は高々5倍であったが、ナノ粒子間距離0~0.5nmの時、平均的には50倍も増強されることが分かった。これらの効果によって温度上昇が引き起こされると考えられる。

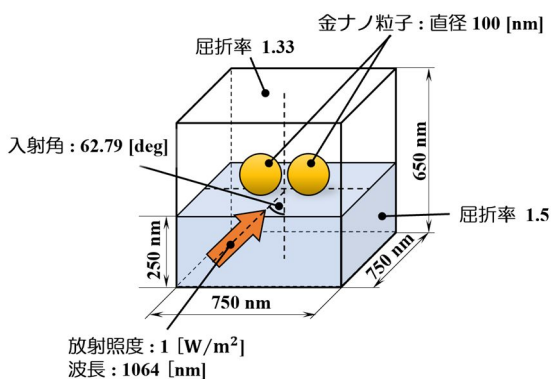


図4 シミュレーションモデル

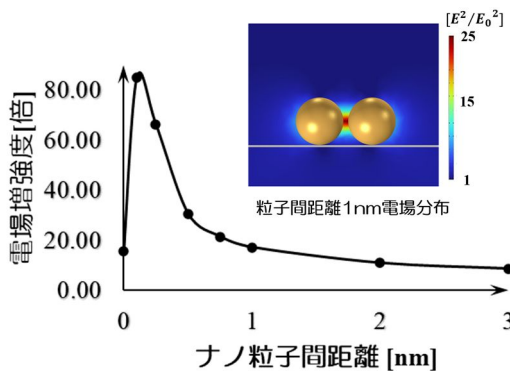


図5 ナノ粒子間距離と電場増強度

金ナノ粒子にエバネッセント光を照射する新たな構成を提案し、実験によってインクジェット現象の発現に成功した。また、シミュレーションで電界強度を調査した。以下に本研究成果のまとめを示す。

- 純粋なエバネッセント光を励起すると、全反射点の内側の方が電界強度が強いため、インクジェットを起こす前にプリズムが壊れることが判明した。
- 金ナノ粒子×エバネッセント光によって電界強度を増強し、全反射点の内側を壊すことなくインクジェット現象を発現させることに成功した。
- シミュレーションによって、金ナノ粒子単体による電界強度は5倍程度向上することを確認。粒子間距離が0~0.5nmの時、平均50倍も増強される。
- 今後の課題としては、インクジェット現象を定量的に捉え、金ナノ粒子の密度と凝集状態を変えたときのインクジェット現象の変化を調査する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 新井悠太、遠藤正樹
2. 発表標題 平板に衝突する不足膨張噴流に関する実験的研究
3. 学会等名 数理科学会 第41回数理科学講演
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新井悠太、遠藤正樹
2. 発表標題 平板に衝突する不足膨張噴流のBOS 法による可視化
3. 学会等名 計測自動制御学会計測部門 第39回センシングフォーラム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Iwao Matsuya and Osamu Furuya
2. 発表標題 Design of Optical Inclinator Composed of a Ball Lens and Viscosity Fluid to Improve Focusing
3. 学会等名 IEEE Sensors 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯塚達也、松谷 巖、遠藤正樹
2. 発表標題 エバネッセント光と金属ナノ粒子の相互作用で増強された電場とアブレーションに関する研究
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 第30回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池谷首彦、松谷 巖、遠藤正樹、飯塚達也
2. 発表標題 エバネッセント光と金属ナノ粒子の相互作用による電場増強に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 関東学生会第62回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉澤由華、松谷 巖、清水裕貴、藤田竜成
2. 発表標題 粘性流体を用いたボールレンズ傾斜計の開発
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 関東学生会第62回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 飯塚達也、松谷 巖、遠藤正樹
2. 発表標題 エバネッセント光と金属ナノ粒子の相互作用で増強された電場とその応用に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第29期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水裕貴、松谷 巖
2. 発表標題 外乱振動を低減する光学式傾斜計の開発
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第29期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 横島直大、飯塚達也、松谷 巖
2. 発表標題 金属ナノ粒子との相互作用によるエバネッセント光強度の向上とその応用
3. 学会等名 第70回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西村 真輝, 松谷 巖, 古屋 治
2. 発表標題 ボールレンズを利用した光学式傾斜計に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 真輝, 松谷 巖, 古屋 治
2. 発表標題 ボールレンズを利用した光学式傾斜計に関する検討
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第28 期総会・講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 傾斜角度測定器	発明者 松谷 巖、古屋 治	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-135443	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

東京電機大学 機械要素研究室
http://www.rm.dendai.ac.jp/matsuyalab/index.html
東京電機大学 教員情報
https://ra-data.dendai.ac.jp/tduhp/KgApp/k03/resid/S000007

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	遠藤 正樹 (Endo Masaki) (80259837)	東京電機大学・理工学部・教授 (32657)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------