

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2021

課題番号：18KK0159

研究課題名（和文）超広帯域光源開発のためのナノ粒子の最適化

研究課題名（英文）Optimization of nanoparticles for development of ultra-broadband light sources

研究代表者

米澤 徹 (Tetsu, Yonezawa)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：90284538

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：高強度レーザーパルスと物質、特にコロイドである水分散液を含むナノ粒子などの凝縮系との相互作用は、さまざまな非線形光学効果が期待される。本研究では、フェムト秒パルスレーザーを、種々のナノ粒子分散液に照射して、そこから発生するエネルギー線を検知して解析してきた。結果として、金ナノ粒子水分散液からはX線を効率よく取り出すことができ、Cu<sub>20</sub>/Cu薄層界面からもTHz波の発光が得られた。また、ZnTeナノ粒子の水分散液からもTHzが高い効率で得られ、こうした、ナノ粒子などの凝縮系と高強度レーザーパルスとの相互作用によって、超広帯域での光を取り出すことが可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、フェムト秒という非常に短いパルスの近赤外領域のレーザーを、種々のナノ粒子分散液に照射し、そこから超広帯域発生するエネルギー線を検知した。金やZnTeナノ粒子、Cu<sub>20</sub>/Cu界面を用いることで、プラズマ発生、高次の非線形効果によって、水よりも効率的にアップコンバージョン、ダウンコンバージョンが起こり、光子-光子変換が生じていると考えられる。これによって、超広帯域での光を取り出すデバイスの実現の可能性が生まれた。

研究成果の概要（英文）：Interaction of intense laser pulses with condensed matter, especially, nanoparticle stable aqueous dispersions, is expected to produce a variety of nonlinear optical effects. Among them, there have been independent experimental studies on high-energy pulsed X-ray (keV) generation through high-temperature plasmas for wavelength conversion and on low-energy terahertz wave (meV) generation based on higher-order nonlinear optical effects. In this study, femtosecond pulsed lasers have been irradiated to various nanoparticle aqueous dispersions and the energy generated from them have been detected. As a result, X-rays were efficiently extracted from Au nanoparticle aqueous dispersions, and THz-wave emission was also obtained from the Cu<sub>20</sub>/Cu thin-layer interface. THz emission was also obtained from ZnTe nanoparticle aqueous dispersions, indicating that the interaction of intense laser pulses with condensed systems such as nanoparticles can produce an ultra-broadband light.

研究分野：ナノ粒子科学

キーワード：ナノ粒子 レーザー フェムト秒 パルスレーザー テラヘルツ

## 1. 研究開始当初の背景

高強度レーザーパルスと物質、特に水分散液を含むナノ粒子などの凝縮系との相互作用は、さまざまな非線形光学効果が期待される。そして、こうした効果の体系化をめざした基礎科学的興味に留まらず、2倍波やさらにエネルギーの大きな光あるいはエネルギーの低い光発生と言った波長変換や、アブレーションやプラズマを通じた材料の微細加工、さらには電子加速を通じた新たな計測手法の開発などの応用への展開も考えられてきた。そのなかで、波長変換にあっては高温プラズマを通じた高いエネルギーのパルス X 線(keV)発生や、高次非線形光学効果に基づく低いエネルギーのテラヘルツ波(meV)発生に関する実験研究が独立してなされてきている。こうした研究で対象とあれてきた試料としては、特に表面プラズモン共鳴(SPR)に由来する光増強場を活用するアイデアをもとに、金ナノ粒子に代表される金属ナノ粒子を取り扱う例が多い。また、金属・金属酸化物、化合物ナノ粒子は光子 - 光子変換のための媒体として有力であると考えられるが、このような無機ナノ粒子を波長変換に用いた系統的研究も当初の時点では見当たらなかった。

一方、これまで金ナノ構造基板などで、プラズモン共鳴やプラズマ閉じ込め効果が有利に働いてパルス X 線が発生することなどが、本研究協力者である台湾中央科学院のグループによって立証されてきた。また、重たい元素である Cs 塩の CsCl 水溶液を試料とする高強度フェムト秒レーザー誘起パルス X 線発生は研究協力者である台湾中央科学院グループの独自の手法である(*Appl. Phys. Lett.*, **93**, 064103 (2008))。

このような高次非線形光学現象による光子 - 光子変換、つまりアップコンバージョン(エネルギーのさらに高い光の放出)とダウンコンバージョン(エネルギーのさらに低い光の放出)のメカニズムの解明はパルスレーザーを用いた超広帯域の新しい光源開発に重要である。しかしながら、この光源開発には、粒子径、形状、結晶性が制御されたナノ粒子が均一・安定に独立分散した水分散液の存在が不可欠であると考えられる。

研究代表者らのグループでは、これまで金属・金属酸化物・化合物を含む多くの種類の無機ナノ粒子の合成を行い、触媒・電子材料をはじめとした多くの応用可能性を追求してきた。また、光学材料としてもプラズモン材料やシングルナノレベルの蛍光材料、高屈折率材料などを提案してきた。一方、研究協力者の台湾中央研究院のグループではこれまでに、高強度近赤外(eV)フェムト秒レーザーパルスと各種水溶液膜との相互作用の結果、空気中で効率良く X 線/超音波パルスを発生する技術を確立した。

両者は数年前から、粒子径を制御して合成したプラズモン共鳴を示しうる金ナノ粒子水分散液を用いて、フェムト秒レーザーパルスを照射することによって X 線を誘起発生ができると考えた。金ナノ粒子はそのサイズ・形状によってプラズモン吸収波長が異なることから、様々な種類の各種金ナノ粒子分散水溶液を研究代表者らが合成し、博士課程学生を台湾に派遣するなどして実験を繰り返し、新しい知見を見出した。具体的には図 1 に示すように、金ナノ粒子の粒子径によって、フェムト秒レーザーを分散液に照射したときに得られる X 線強度に変化があることである。また、近年、水溶液試料を対象とした X 線(keV)発生だけでなくテラヘルツ波(meV)発生に関する実験も独自に開始しており、フェムト秒レーザーパルスと各種溶液試料を巧みに合わせ用いることで、通常の実験室レベルでのフェムト秒レーザーをエネルギー源として用いた超広帯域パルス光源の利用を可能に出来るのではないかとの発想に至った。研究代表者のグループと研究協力者の台湾グループとが出会わなければ本研究は実現しなかった。

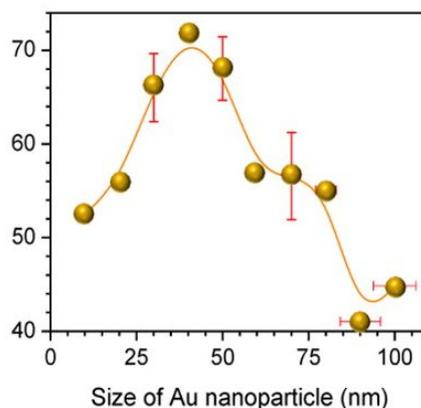


図 1. 金ナノ粒子水分散液にフェムト秒レーザーを照射して X 線発生させた時の得られる X 線強度と粒子径との関係。

## 2. 研究の目的

前節に述べた背景をもとに、本国際共同研究において、材質、大きさ、形状などが異なる水分散性無機ナノ粒子を系統だてて、種々合成する。それを凝集を防いで独立に均一分散させたコロイド水分散液を北海道大学で作製して、台湾でのフェムト秒パルスレーザー照射実験に用いる。高強度近赤外(eV)フェムト秒レーザーパルスとナノ粒子との相互作用の結果得られる X 線(keV)やテラヘルツ波(meV)を検出する実験を行う。

試料の特性ならびに励起レーザーの特性(光強度、パルス幅、波長、偏光、ダブルパルス励起)に対して、分散液から発生するエネルギー線(X 線ならびにテラヘルツ波)がどのように変化する

かを実験的に明らかにして、通常の実験室レベルでの超広帯域光源の実現を目指した知見の蓄積を目的とする。

### 3. 研究の方法

ナノ粒子は、金属イオンの還元法による金属ナノ粒子、水熱法などを用いた金属酸化物、さらには分散媒中での化合物形成を用いた化合物ナノ粒子を用いる。研究代表者らのグループで最適なナノ粒子合成法を選択する。

近赤外フェムト秒レーザー照射実験は図2に示す実験系で行う。レーザー照射は、ナノ粒子の水分散液を2方向から衝突させながら一定の水流で流すことにより、液膜を空中に作る。測定時には、こうして作製する液膜は十分に安定に、定期的に生成されなくてはならないため、液膜をその直下で容器に受け、循環ポンプを用いて還流し、再度液膜化する。実験再現性の確保のためにはナノ粒子の分散安定性を向上させなくてはならず、粒子表面に十分な電荷を持たせたり、保護剤をごく少量添加してナノ粒子の分散安定性を高めたナノ粒子コロイド水分散液を作製する。分散液でレーザー照射実験ができない場合には、副次的な選択として、ナノ粒子を基板の上に堆積したものを実験に用いることとした。

一方、ナノ粒子の構造解析には詳細な電子顕微鏡観察が欠かせないため、文部科学省のナノテックプラットフォーム制度を利用して解析実験を行った。

### 4. 研究成果

本研究では、フェムト秒パルスレーザーを、種々のナノ粒子分散液に照射して、そこから発生するエネルギー線を検知して解析してきた。

直径約 20 nm 金ナノ粒子を 1cc あたり  $3.5 \times 10^{11}$  個程度の濃度で含むコロイド水分散液にフェムト秒パルスレーザー (>35 f / 変換限界、波長 800 nm, 水平偏光、0.5 kHz) を照射して得られる X 線発光を、レーザーのダブルパルス励起で強く増強することに成功した。その X 線発光の増強については、レーザーの焦点領域と分散液膜の最適なオーバーラップにより、パルス照射によって、分散液膜表面がナノメートルレベルでラフになり、そこにナノバブルが発生して強い局在化 (ENZ 領域) と光の吸収が起こるといった観点での議論ができると考えられた。金ナノ粒子のコロイド分散液からの X 線の発生は、蒸留水(7-8 ns)と比較して速い(約 1 ns)ことが分かった。以前の結果(Yonezawa, Hatanaka *et al.*, *ACS Photonics*, 3, 2184, (2016))と比較すると、ナノ粒子の粒子径を変えることでさらなる増強も期待できるとも考えられた。

一方で、テラヘルツ波(meV)の発生についても検討を行った。まずは、ZnTe ナノ粒子を合成し、その安定な水分散液を作製した。ZnTe ナノ粒子による THz 発光強度を検定するために、1.60 mmol/L と 1.07 mmol/L の 2 種類の粒子密度の ZnTe ナノ粒子を含む安定なコロイド水分散液を作製した。得られる ZnTe ナノ粒子の粒子径は 5 nm であった。(図) 非常に小さなナノ粒子が得ら

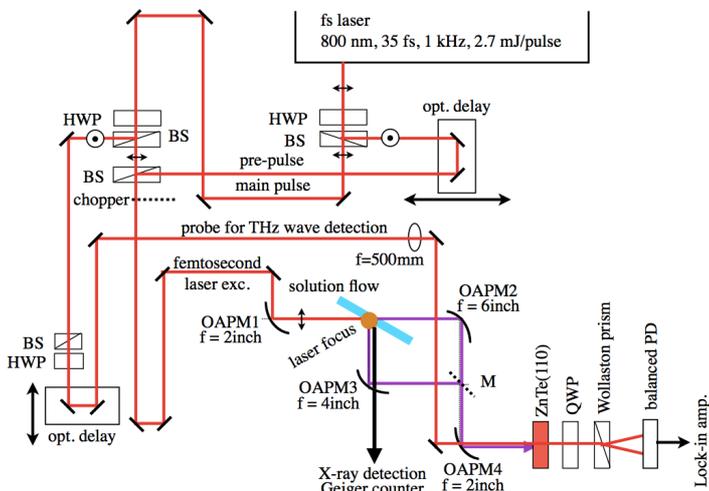


図2. 近赤外フェムト秒レーザー照射による X 線・テラヘルツ波測定光学系の模式図。

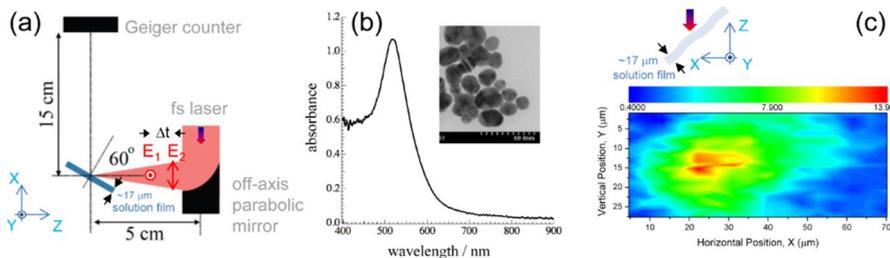


図3. (a) レーザー入射面 (xz 面) におけるプリパルス  $E_1$  とメインパルス  $E_2$  の偏光を示す実験の模式図。(b) 試料である金ナノ粒子水分散液の紫外可視吸収スペクトルと金ナノ粒子の TEM 画像。(c) プレパルス (エネルギー  $E_1 = 80 \mu\text{J}$ ) とメインパルス ( $E_2 = 700 \mu\text{J}$ ) の間に 100 ps の遅延を入れた際における X 線発生の最高収率を得るための xy 投影におけるビームステアリングの最適化。水膜とガイガーカウンターとの距離は 15 cm、開口部は 2 mm であった。参考までに  $E_1$  偏光の向きを上を示す。

れたが、XRD から電子線回折像からもこれらの粒子はバルクと同じ構造を取って結晶化していることが分かる。紫外可視吸収スペクトルからパルスレーザー波長の 800 nm の吸収は少なかった。

このナノ粒子を含むコロイド水分散液を厚さ 17  $\mu\text{m}$  の液膜として流し、パルスレーザーを照射した。液膜は分散液を一定速度でフローさせ、その際、水流を細くすることで作製した。分散液は循環させ、定常的な状態での液膜を長時間キープできる。THz 波放射を、大気中でフェムト秒レーザー (>35 f / 変換限界、波長 800 nm, 水平偏光、0.5 kHz) 照射しながら時間領域分光法 (TDS) により測定した。

図に得られた TDS 信号波形を示した。蒸留水の水膜と、2 種類の異なる濃度での ZnTe ナノ粒子水分散液の信号とを比較している。ZnTe ナノ粒子水分散液から得られる蒸留水と比較して強度が増加し、ピークがシフトしたことから、水分散液中の ZnTe ナノ粒子に THz 波放射が誘起されていることがわかった。

これらの結果から、凝縮系である無機ナノ粒子分散液に、フェムト秒パルスレーザーを照射することで、蒸留水の水膜よりも効率よくアップコンバージョン・ダウンコンバージョン双方の光子 - 光子変換が可能であることが示され、広帯域な光源となりうることが示された。

さらにいくつかの系での検討を進めた。プラズモン吸収での効率のよい光子 - 光子変換のために、 $\text{Cu}_2\text{O} / \text{Au}$  の界面を用いることを検討した。しかしながら、この構造を持つコアシェル構造ナノ粒子の合成は比較的難しく、さらなる酸化も進む可能性も高かった。実際、図 6 に示す通り、日数がたつと、粒子の形状やスペクトルが変化することが明らかとなった。粒子として、金コアは球状になるものの、シェルの亜酸化銅部分が不定形となり、均一・安定な分散液を作製することが困難であった。分散媒中のアルコール / 水比を変更することによって、安定性を向上させられる可能性もあるため、今後、さらに検討を重ねたい。

そこで、同じくプラズモン共鳴を示す銅を用いることとし、銅酸化膜を表面にもった界面を作ることとした。本研究では、Si 基板に、金ならびに銅の薄膜をその順に形成し、表面酸化を行った。表面酸化は焼成作業で行い、亜酸化銅 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) を形成させた。酸化については、XRD と E 酸化された重量比は XRD から RIR 法で検定した。

その結果、シリコン基板上に金が 54 nm、銅が 80 nm の厚みで薄膜形成されており、その表面に亜酸化銅層 ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) が形成されていることが明確となった。これにより、銅と亜酸化銅の界面に

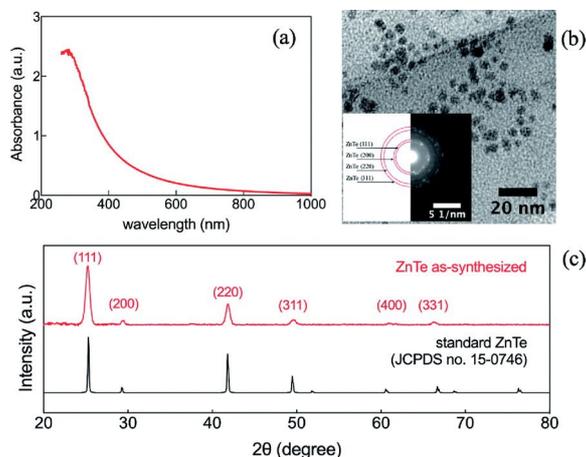


図 4. (a) ZnTe ナノ粒子コロイド水分散液の吸収スペクトル、(b) ZnTe ナノ粒子の TEM 像 (挿入図は選択領域電子回折パターン)、(c) 合成したままの ZnTe ナノ粒子の X 線回折パターンと標準パターン (JCPDS 15-0746)。

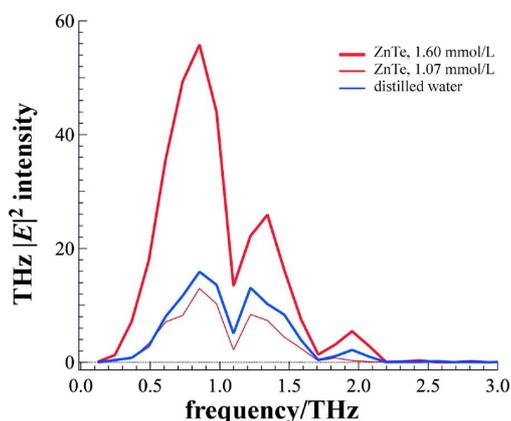


図 5. 蒸留水と濃度の異なる 2 種類の ZnTe ナノ粒子の均一コロイド水分散液が形成する液膜にフェムト秒パルスレーザーを照射して発生するテラヘルツ波発光スペクトル。レーザー強度は 0.75 mJ/pulse である。ナノ粒子の濃度は図内に表記している (1.07, 1.60 mmol/L)。

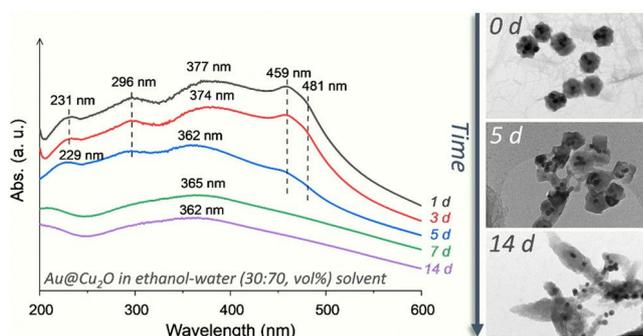


図 6. Au@ $\text{Cu}_2\text{O}$  ナノ粒子分散液の UV-Vis のスペクトル (エタノール : 水混合比 = 3:7 (vol/vol)) と TEM 像の時間変化。

おけるフェムト秒レーザーパルス照射時に起こるダウンコンバージョンの光子 - 光子変換の状況が観測できると考えられた。

図 8 に、それぞれの基板からの THz-TDS 測定結果と、対応する発光スペクトルを示した。Cu<sub>2</sub>O/Cu 界面が THz 発光に影響することが分かり、さらに Au 層がそれを強めると考えられ、Cu/Au/Si の 3 層基板が最も強い発光を示すことが分かり、表面プラズモン共鳴の THz 発光への影響を明らかとした。また、熱処理温度が高くなると発光強度は減少した。

この積層基板の熱処理温度と Cu<sub>2</sub>O 組成比を見ると、80 °C の熱処理ですでに 47% の銅が Cu<sub>2</sub>O に酸化されていた。それ以上の過酷な酸化条件は必要ないと考えられる。また 250 °C 以上の焼成では、CuO が生成することが XRD から分かっており、250 °C 以上で THz 発光がほとんど見えなくなるのはそれが理由であると考えられた。

純水のみでの THz 発光についてもダブルパルス法によって詳細に観察した。これまでと同様の装置を用い、プレパルスとメインパルスの 2 つのパルス照射の間の遅延時間をパラメータとして、図 9 に示すようにレーザー照射の透過側と反射側の THz と X 線発光の増強について調べた。この実験で得られた THz 波の発光スペクトルは、低周波側にピークがシフトしており、プリパルス照射によるレーザーアブレーションからの影響であると考えられる。ダブルパルスによるの THz 波発光強度は最大で  $|E|^2 = 1.5 \times 10^3$  倍以上増強されており、従来の ZnTe 結晶からの THz 波発光の 10 倍の強度であると再計算できることがあきらかとなった。

本研究により、ナノ粒子のコロイド水分散液から液膜を作製し、フェムト秒パルスレーザーを照射することで、X 線や THz 光を純粋よりもより効率よく発光させることができた。今後は、さらにさまざまなエネルギーをもつ光を取り出すことを目指していきたい。

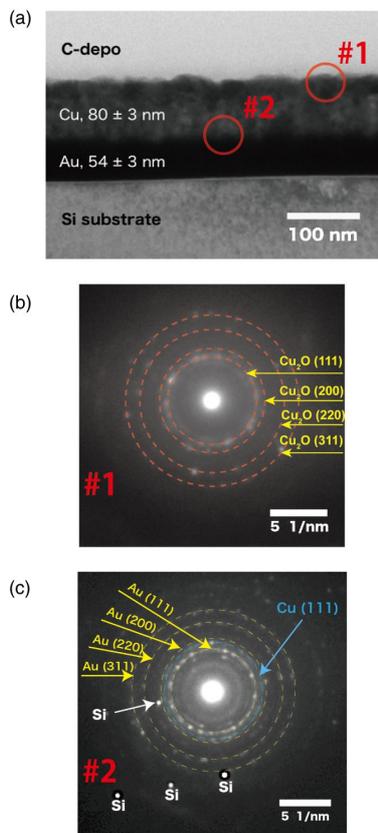


図 7. THz 発生用試料としての Si/Au/Cu/Cu<sub>2</sub>O 基板の TEM および SAED 像。#番号は SAED 測定が行われた場所を TEM 像に表示している。

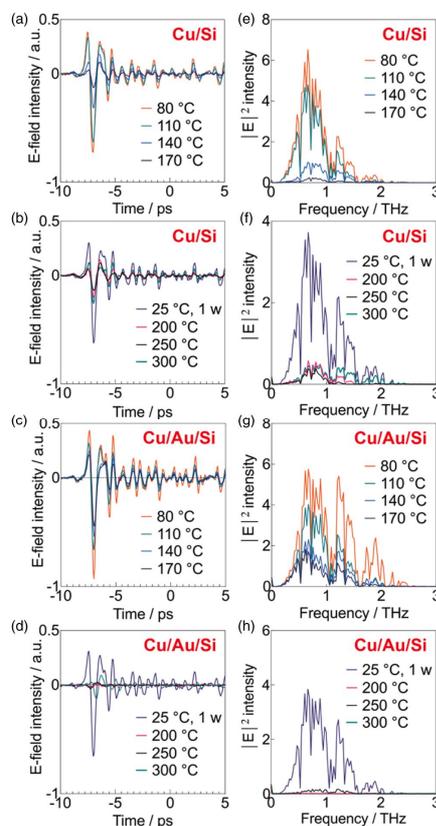


図 8. 熱処理した(a)-(b) Cu/Si および (c)-(d) Cu/Au/Si 構造の THz-TDS 測定と、(e)-(h)熱処理条件を変えたときの(a)-(d)に対応する発光スペクトル。

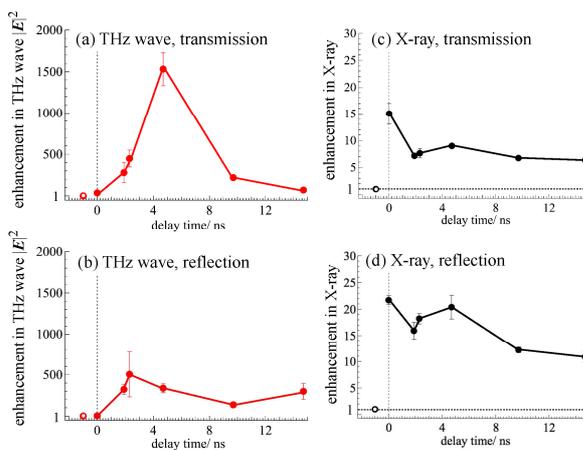


図 9. フェムト秒パルスレーザーを用いたダブルパルス法におけるプレパルスとメインパルス照射の間の遅延時間の関数として、透過側と反射側の (a,b) THz 波の増強 ( $|E|^2$ ) と (c,d) X 線の増強結果。縦軸は単一パルス励起条件での発光強度で規格化している (○)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Chau Yuen-Ting Rachel、Huang Hsin-hui、Nguyen Mai Thanh、Hatanaka Koji、Yonezawa Tetsu	4. 巻 14
2. 論文標題 THz wave emission from the Cu20/Cu interface under femtosecond laser irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 012006 ~ 012006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abd070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nguyen Mai Thanh、Wongrujipairoj Krittaporn、Tsukamoto Hiroki、Kheawhom Soorathep、Mei Shuang、Aupama Vipada、Yonezawa Tetsu	4. 巻 8
2. 論文標題 Synergistic Effect of the Oleic Acid and Oleylamine Mixed-Liquid Matrix on Particle Size and Stability of Sputtered Metal Nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry & Engineering	6. 最初と最後の頁 18167 ~ 18176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.0c06549	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhu Shilei、Deng Dan、Nguyen Mai Thanh、Chau Yuen-ting Rachel、Wen Cheng-Yen、Yonezawa Tetsu	4. 巻 36
2. 論文標題 Synthesis of Au@Cu20 Core-Shell Nanoparticles with Tunable Shell Thickness and Their Degradation Mechanism in Aqueous Solutions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 3386 ~ 3392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.0c00382	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Huang Hsin-hui、Nagashima Takeshi、Yonezawa Tetsu、Matsuo Yasutaka、Ng Soon Hock、Juodkazis Saulius、Hatanaka Koji	4. 巻 10
2. 論文標題 Giant Enhancement of THz Wave Emission under Double-Pulse Excitation of Thin Water Flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2031 ~ 2031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10062031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Deng Lianlian, Nguyen Mai Thanh, Shi Jingming, Chau Yuen-ting Rachel, Tokunaga Tomoharu, Kudo Masaki, Matsumura Syo, Hashimoto Naoyuki, Yonezawa Tetsu	4. 巻 36
2. 論文標題 Highly Correlated Size and Composition of Pt/Au Alloy Nanoparticles via Magnetron Sputtering onto Liquid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 3004 ~ 3015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.0c00152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Huang Hsin-hui, Chau Yuen-ting Rachel, Yonezawa Tetsu, Nguyen Mai Thanh, Zhu Shilei, Deng Dan, Nagashima Takeshi, Hatanaka Koji	4. 巻 49
2. 論文標題 THz Wave Emission from ZnTe Nano-colloidal Aqueous Dispersion Irradiated by Femtosecond Laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 597 ~ 600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chau Yuen-ting Rachel, Nguyen Mai Thanh, Zhu Mingbei, Romier Arnaud, Tokunaga Tomoharu, Yonezawa Tetsu	4. 巻 44
2. 論文標題 Synthesis of composition-tunable Pd-Cu alloy nanoparticles by double target sputtering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Chemistry	6. 最初と最後の頁 4704 ~ 4712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0NJ00288G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松原正樹・蟹江澄志・米澤 徹	4. 巻 5
2. 論文標題 高分子修飾微粒子・ナノ粒子の熱的構造制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 材料表面	6. 最初と最後の頁 11 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wan-Yu Chung, Yi-Chin Lai, Tetsu Yonezawa, Ying-Chih Liao	4. 巻 9
2. 論文標題 Sintering Copper Nanoparticles with Photonic Additive for Printed Conductive Patterns by Intense Pulsed Light	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 1071 ~ 1071
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano9081071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Saw Min Jia, Ghosh Batu, Nguyen Mai Thanh, Jirasattayaporn Kridsada, Kheawhom Soorathep, Shirahata Naoto, Yonezawa Tetsu	4. 巻 4
2. 論文標題 High Aspect Ratio and Post-Processing Free Silver Nanowires as Top Electrodes for Inverted-Structured Photodiodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 13303 ~ 13308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.9b01479	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chau Yuen-ting Rachel, Deng Lianlian, Nguyen Mai Thanh, Yonezawa Tetsu	4. 巻 4
2. 論文標題 Monitor the Growth and Oxidation of Cu-nanoparticles in PEG after Sputtering	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MRS Advances	6. 最初と最後の頁 305 ~ 309
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/adv.2019.55	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saw Min Jia, Nguyen Mai Thanh, Kunisada Yuji, Tokunaga Tomoharu, Yonezawa Tetsu	4. 巻 7
2. 論文標題 Anisotropic Growth of Copper Nanorods Mediated by Cl <sup>-</sup> Ions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 7414 ~ 7420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.2c00359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Liu Haoran, Ikeda Kai, Nguyen Mai Thanh, Sato Susumu, Matsuda Naoki, Tsukamoto Hiroki, Tokunaga Tomoharu, Yonezawa Tetsu	4. 巻 7
2. 論文標題 Alginate-Stabilized Gold Nanoparticles Prepared Using the Microwave-Induced Plasma-in-Liquid Process with Long-Term Storage Stability for Potential Biomedical Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 6238 ~ 6247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.1c06769	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hsin-Hui Huang, Saulius Judkasis, Eugene G. Gamaly, Takeshi Nagashima, Tetsu Yonezawa, Koji Hatanaka	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Spatio-temporal control of THz emission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 米澤 徹
2. 発表標題 ナノ粒子を利用するSDGs
3. 学会等名 千歳市立北斗中学校科学講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mingbei Zhu, Mai Thanh Nguyen, Tetsu Yonezawa
2. 発表標題 Pt/Ag solid solution alloy nanoparticles synthesized by co-sputtering onto liquid polymer
3. 学会等名 第56回応用物理学会北海道支部・第17回日本光学会北海道支部合同学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mai Thanh Nguyen and Tetsu Yonezawa
2. 発表標題 Mixed oleic acid and oleylamine as the matrix for synthesizing metal nanoparticles by sputter deposition
3. 学会等名 日本化学会第101回春季年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米澤 徹
2. 発表標題 金属微粒子のインク・ペースト化と配線材としての利用
3. 学会等名 第7回 分散・凝集のすべて (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsu Yonezawa
2. 発表標題 Controlled Polycationic Gold Nanoclusters
3. 学会等名 An International Conference on Colloid & Interface Science Celebrating the 70th Anniversary of the Divisional Meeting of Division of Colloid and Surface Chemistry, The Chemical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsu Yonezawa
2. 発表標題 Cationic Gold Clusters: Preparation and Reactions with Ligands
3. 学会等名 Research Center of Applied Sciences (RCAS) seminar (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森田晃広・石田洋平・米澤 徹
2. 発表標題 カチオン性チオコリン保護金クラスターの合成および金コア構造の電子顕微鏡観察
3. 学会等名 化学系学協会北海道支部2019年冬季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuen-ting Rachel Chau・Lianlian Deng・Mai Thanh Nguyen・Tetsu Yonezawa
2. 発表標題 Growth and oxidation of Cu-nanoparticles Sputtered in PEG
3. 学会等名 平成30年度 日本鉄鋼協会・日本金属学会両支部合同冬季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米澤 徹
2. 発表標題 ナノ粒子を用いた材料科学の進展
3. 学会等名 東北大学 理学部化学教室 一般雑誌会講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsu Yonezawa, Yohei Ishida
2. 発表標題 Structural Control of Quaternary Ammonium Cationic Gold
3. 学会等名 2018 Material Research Society Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

先進材料ハイブリッド工学研究室  
<https://nanoparticle.hokkaido.university/>

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	グエン タンマイ (Nguyen Thanh Mai) (00730649)	北海道大学・工学研究院・助教  (10101)	
研究分担者	徳永 智春 (Tokunaga Tomoharu) (90467332)	名古屋大学・工学研究科・助教  (13901)	
研究分担者	塚本 宏樹 (Tukamoto Hiroki) (90629346)	北海道大学・工学研究院・学術研究員  (10101)	

	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
研究協力者	畑中 耕治 (Hatanaka Koji)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	黄 心慧  (Hsin-Hui Huang)		

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		
中国	中央科学院（台湾）		