

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02821

研究課題名(和文) タンパク質機能発現メカニズム解明のための高強度THzオペランド計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of high power THz Operando-measurement system for investigation of protein dynamics

研究代表者

黒田 隆之助 (Kuroda, Ryunosuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・ラボチーム長

研究者番号：70350428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、高強度テラヘルツ光を用いたオペランド計測手法の開発とタンパク質分光分析への応用を目指した研究である。小型電子加速器ベースのテラヘルツ時間領域分光では、テラヘルツ光のピーク強度が高い一方、プローブ光との時間ジッターやスペクトルの安定化の課題が大きく、時間分解能向上のためにはシングルショット計測が重要である。本研究では小型電子加速器ベースに加え、レーザーベース光源とE0サンプリングシステムの高度化開発を並行して実施した。本システムにより、タンパク質水溶液や低分子化合物を含むサンプルへの計測実験にまで至り、タンパク質機能発現メカニズム解明に向けたオペランド計測実現への重要な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、超短パルス電子ビーム及び超短パルスレーザーをベースとした高強度テラヘルツ光源を開発し、タンパク質の機能発現メカニズムの解明に向けたオペランド計測技術の開発に展開する研究である。本研究成果により、これまで困難であったタンパク質の溶媒計測が実験室系で実施できるようになり、タンパク質の機能発現メカニズム解明への進展に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the Operando-spectroscopy system using high-intensity THz wave for investigating the protein hydration dynamics.

In the THz time-domain spectroscopy (TDS) based on a compact electron accelerator, while the peak intensity of THz wave is high, the measurement problems are the large timing jitter between the electron beam and the probe light and the worse spectrum stabilization. Therefore, single-shot measurement method is very important for improving time-resolution. In this research, we have also carried out the high-power THz-TDS system with E0 sampling method using the ultra-short laser pulses.

These systems have led to successful THz absorption measurement of protein solution samples, and obtained important knowledge for realizing the Operando-measurement for revealing the protein hydration dynamics.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：テラヘルツ光源技術 超短パルス電子ビーム 超短パルスレーザー オペランド計測 時間領域分光 E0サンプリング

1. 研究開始当初の背景

近年様々な研究機関においてテラヘルツ光源の開発とタンパク質に関連した研究がなされてきている。テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) は、THz パルスのサンプルの有無におけるテラヘルツ時間波形の変化を測定し、フーリエ変換することで吸収スペクトルを得る分光法で、複素誘電率なども求めることができ、タンパク質を含めた生体分子測定にも広く使われている。生体が活動する室温(300 K)は、周波数に換算すると約 6 THz(200cm⁻¹)程度であり、それ以下の周波数モードが生体分子の構造変化と機能に大きく関与していることが推測される。それらの低振動数モードを直接観測することができれば、生体分子構造及び機能に関連したより多くの動的な情報がより直接的に得られると考えられる。

一方、産業技術総合研究所(以下、産総研)では、早稲田大学と共同で、キロアンペア級のピーク電流値を持つ超短パルス電子ビームによって、数 kW ~ 数 10kW といった極めて高いピーク強度をもつテラヘルツ領域のコヒーレント光生成をおこなってきた。これまでに植物の水分分布の測定や、生体試料のサブ・テラヘルツ領域のイメージングにより、脂質とタンパク質の識別、及び可視光像では見えないテラヘルツ吸収物質(癌細胞を想定し予め注入したもの)を画像化することに成功している。テラヘルツ領域は振動現象と緩和現象が混在する領域であり、高強度のテラヘルツ光源を用いることで、この現象を水溶液状態で且つ、時間領域で観測することができれば、溶媒分子の挙動(誘電緩和や誘電分散など)の現象解明に繋げることが出来ると考えられ、これまで海外研究機関(インド)との国際共同研究等も行ってきた。また、東京大学と共同で超短パルスレーザー駆動テラヘルツ光源についても、ピーク強度は超短パルス電子ビームベースのテラヘルツ光源に劣るものの、環境安定性から生体材料計測へは適用可能性が高いと考え、EO サンプルング法の高度化とともに開発を進めてきた。

2. 研究の目的

本課題では、超短パルス電子ビーム及び超短パルスレーザーによる高強度テラヘルツ光源を開発し、タンパク質の機能発現メカニズム解明のためのオペランド計測技術の開発に展開することを目指すものである。小型電子加速器からの超短パルス電子ビームベースのテラヘルツ光源では、テラヘルツ光のピーク強度が極めて高い一方、テラヘルツ時間領域分光におけるプローブ光との時間ジッターやスペクトルの安定化の課題が大きく、超短パルスレーザー駆動テラヘルツ光源については、平均出力は一定規模はあるものの、ピーク強度が低いため溶媒計測には難点があるため、強度の向上や、時間領域分光における時間分解能向上のためのシングルショット計測法の開発についても必要であり、同時に EO 結晶の最適化を含んだ EO サンプルング法の高度化・高感度化についても開発を行う必要がある。

3. 研究の方法

本研究では、超短パルス電子ビーム及び超短パルスレーザーによる高強度テラヘルツ光源を開発し、タンパク質の機能発現メカニズム解明のためのオペランド計測技術を開発に展開する。まず、小型加速器による電子ビームベースでは、図1のように高エネルギーの電子ビームをサブピコ秒領域までパルス圧縮することで、ピーク電流値の高い超短パルス電子ビームを生成し、遷移放射及びチェレンコフ放射によるコヒーレント成分(THz-CTR、THz-CCR)を活用することで極めて高いピーク強度のテラヘルツ光源を開発する。また、超短パルスレーザー駆動テラヘルツ光源では、チタンサファイアレーザーとニオブ酸リチウム(LiNbO₃)結晶等を用いることで、光整流によりテラヘルツ光を生成する。

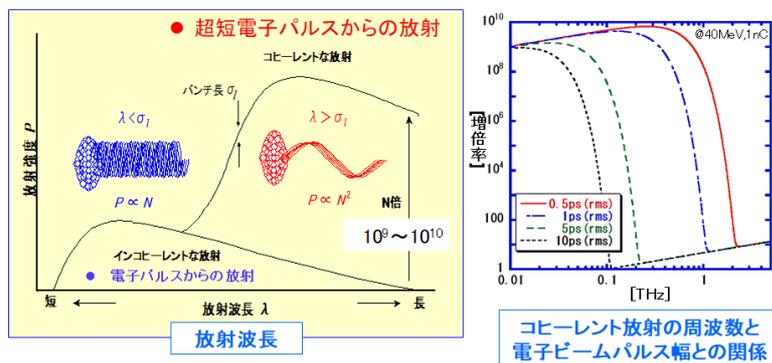


図1：超短パルス電子ビームのコヒーレント放射によるテラヘルツ生成

また、物質の複素誘電率の測定を可能とする広帯域時間領域テラヘルツ分光法は、テラヘルツ電場により誘起された結晶の複屈折性の大きさを精密に測定することにより高感度な測定が可能となり、タンパク質の機能発現メカニズム解明のための強力なオペランド計測ツールとして期待できる。一般に複屈折の精密測定は偏光回転の大きさを差分検出することによりなされるが、本研究で必要となるシングルショット電場波形測定において差分の高感度検出を行うことは困難であった。そのため、EO 結晶の最適化研究と同時に、EO サンプルング法の高感度化・高

度化研究を進めた。

テラヘルツ時間領域分光では、超短パルス電子ベース、超短パルスレーザーベース双方の高強度テラヘルツ光源で、EO サンプリグ法の開発を進め、高感度化、高度化、環境安定化のための研究、及び模擬サンプルの吸収スペクトル測定を実施した。更に、オペランド計測のためのシングルショット計測法の開発を進め、プローブ光の開発や種々の問題点の洗い出しを実施した。タンパク質計測では、水溶液サンプル(アルブミン等)の吸収スペクトル測定を実施し、濃度依存による吸収係数の変化について、テラヘルツ周波数を変化させて調査した。

4. 研究成果

【超短パルス電子ベースのテラヘルツ光源による EO サンプリグ法開発】

本研究では、5MeV もしくは 40MeV の高エネルギー電子ビームを用い、コヒーレント遷移放射光 (CTR) 及びコヒーレントチェレンコフ放射光 (CCR) による高強度テラヘルツ発生と、時間領域分光 (TDS) への適用研究を行った。結果の 1 つとして、図 2 に 40MeV の超短パルス電子ベースと EO サンプリグ法をベースとした THz-CTR-TDS システムの概念図と、模擬サンプルの吸収スペクトル測定に成功した。しかしながら、電子ベースとプローブ光との時間ジッター及びテラヘルツ強度の安定性などの問題、及び電子ベース起因によるミリ波帯のバックグラウンドが大きく、測定結果の確からしさは十分でなく、特に 2THz 以降のデータは有効ではないと考えられた。これらの結果からも、シングルショット計測の重要性は更に高いことが分かった。

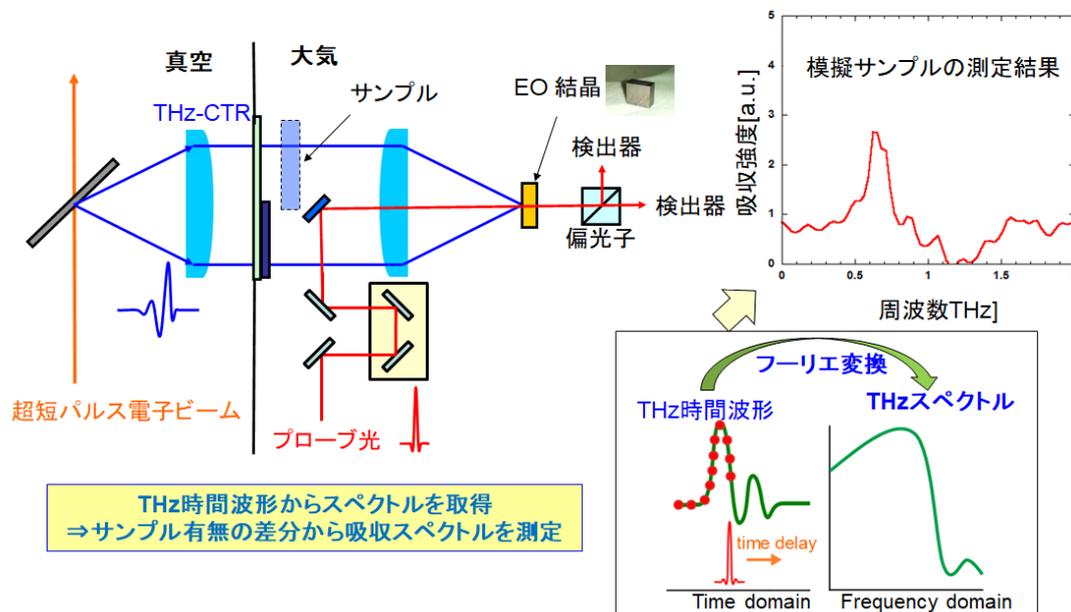


図 2 : 超短パルス電子ベースと EO サンプリグ法をベースとした THz-CTR-TDS システム、及び吸収スペクトル測定の結果

【EO 結晶及びプローブ光の最適化研究】

本研究では小型加速器を用いた高強度テラヘルツ発生及び EO(Electro-Optic)サンプリグ法による検出について行った。EO 結晶及びテラヘルツ発生用の媒質の最適化を実施し、結晶としては、ZnTe・GaP・GaSe を試験した。周波数帯域に関しては、GaP・GaSe が優位であったが、信号強度としては ZnTe が最適であった。これらの特徴を生かし、計測ごとに最適な結晶を選定して利用していく。テラヘルツ発生用媒質としては、密度・屈折率の異なる 3 種類の媒質を試験し、最大強度が得られる媒質として TOPAS(環状オレフィンコポリマー)であった。シングルショット計測に関しては、レーザー光源の準備を実施し、時間・波長に関して相関を持つ光の生成を実施し評価した。

また、シングルショット EO サンプリグ法のため、ターゲット形状の最適化を実施し、最大で 2 倍程度のテラヘルツ強度増強を確認した。準単色なテラヘルツ光の生成試験を実施し、準単色化に成功した。特定の振動モードなどを励起する場合には強度をその周波数に合致させることが可能であるため、非常に有用であることがわかった。更にテラヘルツ分光における試料条件決定のために、単色サブ・テラヘルツ光源を用いた水溶液試料の吸収測定についても並行して行った。次に、シングルショット EO サンプリグの実現に向けて、プローブ光の高度化を図った。ファイバーレーザーの増幅及び薄ディスクレーザーの広帯域化とチャープミラーによる圧縮の両面から検討し、薄ディスクレーザーを広帯域化したパルスでは十分なスペクトル幅と強度が得られ、シングルショット計測のプローブ光に適していることがわかった。

【超短パルスレーザー駆動テラヘルツ光源による EO サンプリグ法開発】

小型加速器を用いた高強度テラヘルツ発生及び EO(Electro-Optic)サンプリング法による計測システムに加えて、高強度レーザーと非線形光学結晶を用いたレーザー駆動テラヘルツ光源と EO サンプリングシステムの開発も並行して行った。レーザー駆動テラヘルツ光源は、小型加速器と用いたテラヘルツ光源と比べて先頭出力では劣るが、非常に小さなシステムで済み、環境ノイズが少ないなどの利点がある。本研究では、平均出力 3W のモード同期チタンサファイアレーザーからの超短パルス光をニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 結晶に照射し、光整流によってテラヘルツ波を発生した。ここでは、光からテラヘルツ波への高効率の波長変換と高い集光強度を得るため、パルス波面傾斜法という方法を用いた。本研究で開発したレーザー駆動テラヘルツ光源と EO サンプリングシステムの概略図を図 3 に示す。本システムを用いて、平均出力 1.5 mW のテラヘルツ波の生成に成功し、軸外し放物面鏡を用いて直径 1mm 以下まで集光できることをテラヘルツカメラで確認した。また、EO サンプリングでは、前述のシステムと同様に ZnTe 結晶等と単一差分検出器を用いてレーザー駆動テラヘルツ波の電場波形とスペクトルの計測を行った。その結果、本システムでも同様に、テラヘルツ波照射によって生じる微小な偏光回転を検出した。図 4、図 5 はレーザー駆動テラヘルツ波の電場波形とそのスペクトルの計測結果をそれぞれ示す。本結果より、テラヘルツ波はモノサイクルの電場波形を有しており、比較的広帯域のスペクトルを有していることを確認した。そして、本システムを用いて、タンパク質水溶液サンプルのオペランド計測に向けて、図 3 に示すサンプル位置にタンパク質水溶液サンプルや低分子化合物を含む水溶液の照射実験を行うまでに至った。

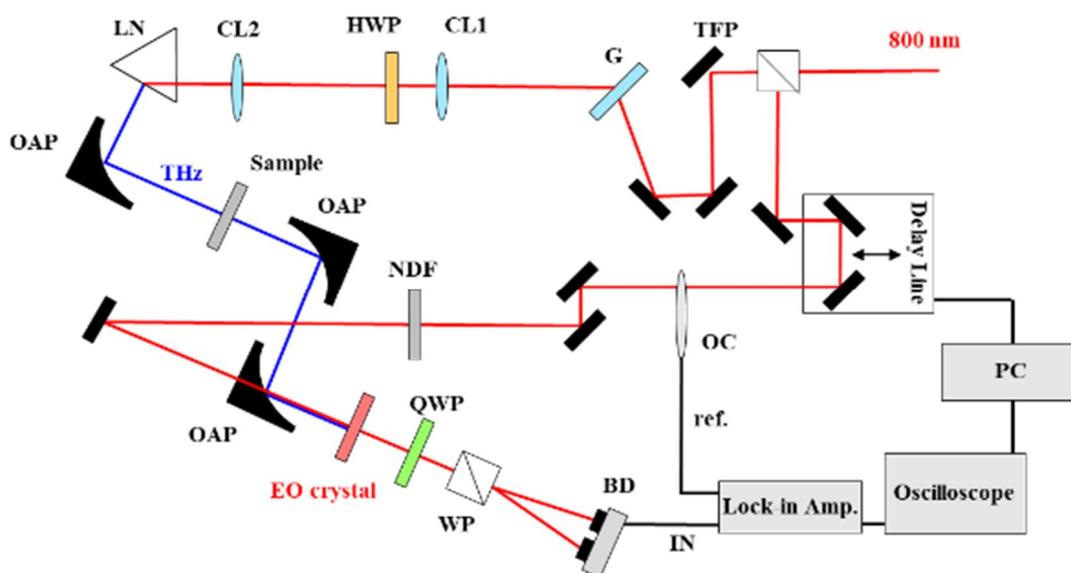


図 3 : レーザー駆動テラヘルツ光源と EO サンプリングシステムの概念図

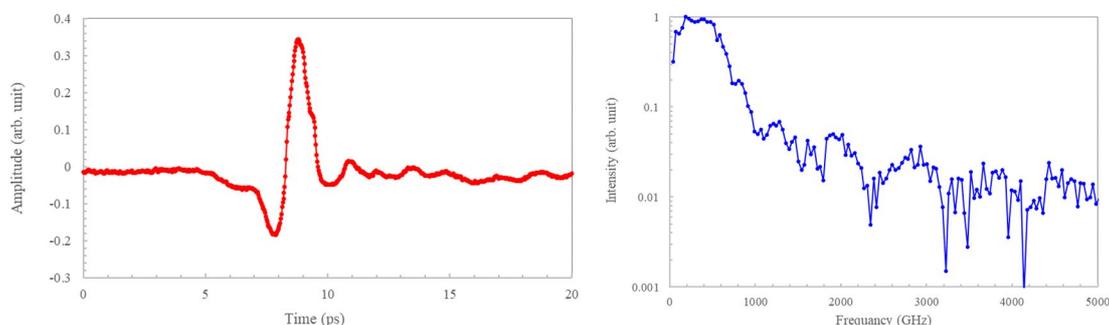


図 4 : テラヘルツ波の時間波形、及びテラヘルツ波のスペクトル

【シングルショット計測に向けた EO 検出の高感度化】

物質の複素誘電率の測定を可能とする広帯域時間領域テラヘルツ分光法は、テラヘルツ電場により誘起された結晶の複屈折性の大きさを精密に測定することにより高感度な測定が可能となる。一般に複屈折の精密測定は偏光回転の大きさを差分検出することによりなされるが、本研究で必要となるシングルショット電場波形測定において差分の高感度検出を行うことは困難であった。また、テラヘルツ周波数帯でのシングルショット時間波形測定手法として、チャープしたフェムト秒パルスを用いて時間領域の情報を周波数領域に転写する手法が主として用いられ

ている。時間領域の情報をシングルショットで取り出すため手法として、従来、回折格子と CCD を組み合わせた多チャンネルスペクトル撮像手法およびストレッチャーと高速フォトダイオードを組み合わせたタイムレンズ型スペクトル撮像手法の研究が行われてきた。CCD を用いたスペクトル撮像手法は、簡便に広い時間領域でシングルショット撮影を可能とする一方、バランス検出を用いた差分手法による高感度検出を利用できないことから、高いシグナルノイズ比を実現することが困難であった。他方、タイムレンズ型のスペクトル撮像手法は数 GHz を超える超高速 AD コンバーターが必要であるとともに、タイムレンズで伸張できるパルス幅の限界(典型的に数ナノ秒程度)のため、1 MHz 未満の比較的低い繰り返し領域では、帯域を有効活用することができず、高感度な測定への妨げとなっていた。

そこで、シングルショット電場波形測定の高感度化のための測定装置の検討・試作を行った。その結果、まずは単一差分検出器において 10^{-6} レベルの偏光回転を検出することに成功した。次に、単一差分検出器において最適化された結果を基に、多チャンネルリニア型アレイディテクタ及び並列差分増幅回路による高シグナルノイズ比をもつ高感度シングルショットテラヘルツ電場検出装置の設計と開発を進めた。具体的には、32 チャンネルリニア型アレイディテクタと自作した差分増幅回路を組み合わせ、並列型バランス増幅検出器の開発を行った。当初想定していた高精度オペアンプ OPA627 を用いた差分増幅回路では、実装面積と回路全体の消費電力のため十分な性能が困難であったことから、INA128 を用いた増幅回路での実装を行い、差分信号の検出が可能であることを確認した。これらの増幅された信号を多チャンネル高精度の AD コンバーターと組み合わせることで多チャンネル高感度差分増幅測定装置として動作する検証を進めた。

次に、開発した差分増幅器を用いたテラヘルツ電場波形測定光学系を構築し、GaP 結晶から発生させたテラヘルツ電場を対象として、テラヘルツ電場測定の感度試験を行った。具体的には、チタンサファイア再生増幅器を光源とする 1 kHz のフェムト秒パルスから微弱テラヘルツ波を発生させ EO 検出を行った。差分増幅器からの信号に対してさらに一段低ノイズ電圧アンプを追加し、光学チョッパーと同期させたロックイン検出器による検出を行うことで、1 kHz のシステムを利用して取得したデータとしては最高クラスである $50 \text{ V/cm} / (\text{shot})^{1/2}$ の感度を実現することに成功した。

【機能発現ダイナミクス解明に向けたタンパク質計測研究】

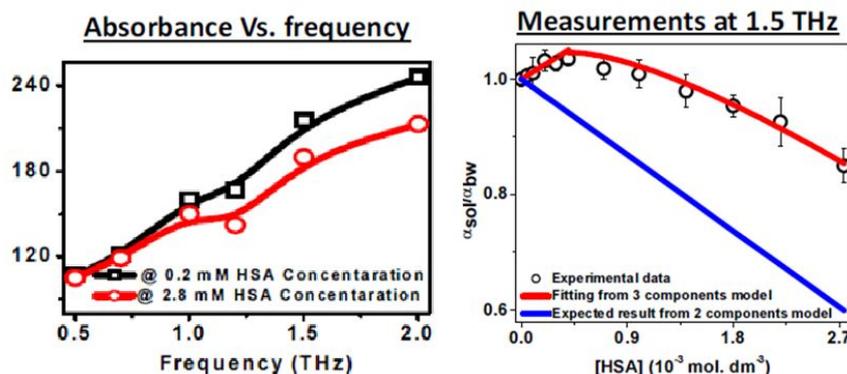


図 5 : タンパク質サンプル (ヒト血清アルブミン水溶液) の

テラヘルツ領域における吸収係数スペクトル (左) と 1.5 THz における濃度依存性 (右)

本研究では上記のように開発した高強度テラヘルツ光源をベースにタンパク質水溶液の吸収計測システムを開発し、機能発現ダイナミクス解明に向けた溶液タンパク質の計測研究を進めた。特に超短パルス電子ビームベースの光源はピーク強度が高く、吸収の強い水溶液の計測に比較的有効であった。また、超短パルスレーザーベース光源では、システム全体が小型且つ環境ノイズ等が少ないため、計測の安定性には大きな利点があった。

バンドパスフィルターによりテラヘルツ光を単色化し、タンパク質水溶液サンプルのオペランド計測に向けた吸収分光システムを構築した。図 5 にこのシステムでの測定結果の 1 例を示す。タンパク質としてヒト血清アルブミン (HSA) を用い、セル長 20 ~ 100 マイクロメートル程度の溶液セルを用いて測定した。

濃度を变化させた際の吸収係数スペクトルの変化 (図 5 左) や、周波数 1.5 THz における吸収係数の詳細な濃度変化 (図 5 右) を測定することに成功し、図 5 右の結果を 3 コンポーネントモデルによりフィッティングすることで水和層の厚さを推定した (図 5 右、赤線)。

以上のように、本研究により、高強度テラヘルツ光源の開発と EO サンプリング法の高度化を実施し、タンパク質水溶液や低分子化合物をため、含む水溶液サンプルへの計測実験にまで至り、タンパク質機能発現メカニズム解明に向けたオペランド計測実現への重要な知見を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Tadenuma, T. Murakami, M. Brameld, M. Washio, K. Sakaue, R. Kuroda, and Y. Taira	4. 巻 15
2. 論文標題 Quasi-monochromatic THz pulse generation using Cherenkov radiation from a spatially modulated electron beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C04016-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI: 10.1088/1748-0221/15/04/C04016	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 BISWAJIT MANNA, AMITABHA NANDI、田中 真人、豊川 弘之、黒田 隆之助、DIPAK K PALIT	4. 巻 132-8
2. 論文標題 Effect of aggregation on hydration of HSA protein: Steady-state Terahertz absorption spectroscopic study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JOURNAL OF CHEMICAL SCIENCES	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1007/s12039-019-1696-4	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

〔学会発表〕 計28件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 谷峻太郎、小林洋平
2. 発表標題 超短パルスレーザーにより駆動される不可逆破壊現象
3. 学会等名 電気学会 第2回コヒーレント光源とデバイス応用技術調査専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷峻太郎、小林洋平
2. 発表標題 超短パルスレーザーはなぜ面白いのか：ガラスによる光の自己組織化と極限状態形成
3. 学会等名 第51回ガラス部会夏季若手セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷峻太郎
2. 発表標題 不可逆系の物理学：レーザー加工とツールとしての深層学習
3. 学会等名 第26回レーザー夏の学校（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷峻太郎、小林洋平
2. 発表標題 フェムト秒レーザーパルスにより駆動される半導体表面の不可逆ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷峻太郎、小林洋平
2. 発表標題 半導体におけるフェムト秒アブレーション過程の時空間ダイナミクス
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Tadenuma, Tatsuki Murakami, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Yoshitaka Taira, Ryunosuke Kuroda
2. 発表標題 Study on Coherent THz Radiation Using Tilt Control of Electron Beam
3. 学会等名 RREPS2019ベルゴロド・ロシア（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今清水 正彦、田中 真人、保科宏道、竹内 恒
2. 発表標題 Terahertz radiation and temperature increase: Opposite effect on transcription by RNA polymerase
3. 学会等名 第57回 日本生物物理学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今清水 正彦、田中 真人、杉山 順一、保科宏道、竹内 恒
2. 発表標題 Terahertz radiation and temperature increase: Opposite effect on transcription by RNA polymerase
3. 学会等名 9th IL ANIT/FISEB Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今清水 正彦、田中 真人、田上 俊輔、保科宏道、竹内 恒
2. 発表標題 テラヘルツ光照射が生化学反応に及ぼす影響
3. 学会等名 第13回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田 隆之助、田中 真人、小川 博嗣、佐藤 大輔、澁谷 達則、三浦 永祐、豊川 弘之、O'Rourke Brian、大島 永康、盛合 靖章、寺澤 英知
2. 発表標題 先端オペランド計測技術開発のためのSバンド小型電子リニアック・超短パルスレーザー施設の現状
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田 隆之助
2. 発表標題 産総研加速器施設における光・量子ビーム技術の産業利用への取組みと超伝導加速器への期待
3. 学会等名 応用超伝導加速器コンソーシアム設立記念シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田 隆之助
2. 発表標題 先進部材のレーザー加工と計測技術開発
3. 学会等名 第92回レーザー加工学会講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒田 隆之助
2. 発表標題 深紫外光を含む超短パルスレーザー加工プラットフォーム
3. 学会等名 2019年度第4回フォトニクス技術フォーラム研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒田 隆之助、田中 真人、三浦 永祐、佐藤大輔、藤原 健、澁谷 達則、大島 永康、O'Rourke Brian
2. 発表標題 先端オペランド計測技術開発のためのSバンド小型電子リニアック・超短パルスレーザー施設の現状
3. 学会等名 第15回日本加速器学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒田 隆之助
2. 発表標題 社会に役立つ光・量子ビーム技術と単位系について
3. 学会等名 学びと働きを連携させた信州創生のための新たな人材育成モデル事業（松本工業高校）（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 真人、他
2. 発表標題 産総研つくばセンター電子加速器施設の現状
3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷峻太郎、小林洋平
2. 発表標題 チュートリアル講演「不可逆系の光物理：超短パルスレーザー加工の基礎と応用」
3. 学会等名 第8回光科学異分野横断萌芽研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 蓼沼 優一、ブラメルド 真理、沈 奕?、村上 達希、坂上 和之、鷺尾 方一
2. 発表標題 電子ビームの傾き制御を用いたコヒーレントTHz放射の高強度化に関する研究
3. 学会等名 第15回日本加速器学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 夢沼 優一、柳沢 稜、ブラメルド 真理、坂上 和之、鷲尾 方一
2. 発表標題 電子ビームの傾き制御を用いたコヒーレントTHz放射の高強度化に関する研究
3. 学会等名 第55回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Brameid、K. Sakaue、Y. Tadenuma、 M. Washio、 R. Yanagisawa、 R. Kuroda、 Y. Taira
2. 発表標題 Evaluation of Coherent Terahertz Radiation Generated from Tilted Electron Beams Aiming for Higher Light Intensity
3. 学会等名 IPAC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷 峻太郎、小林 洋平
2. 発表標題 レーザーアブレーションダイナミクスの遠赤外波長領域計測
3. 学会等名 第15回赤外放射応用関連学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷 峻太郎、小林 洋平
2. 発表標題 光で物質を操る ~レーザー加工における極限的光と物質の相互作用とそのダイナミクス~
3. 学会等名 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「光操作の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂上和之
2. 発表標題 電子線の傾きを用いたコヒーレントチェレンコフ放射によるテラヘルツパルス発生
3. 学会等名 第24回FELとHigh-Power Radiation研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sakaue
2. 発表標題 Study on THz Cherenkov radiation by electron bunch tilting at Waseda University
3. 学会等名 ELPH Workshop 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sakaue, M. Brameld, Y. Tadenuma, R. Yanagisawa, M. Washio, R. Kuroda, Y. Taira, J. Urakawa
2. 発表標題 Study on Cherenkov laser oscillator using tilted electron bunches
3. 学会等名 Free Electron Laser Conference (FEL 2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂上和之、ブラメルド真理、柳沢稜、蓼沼優一、鷲尾方一、東口武史、平義隆、黒田隆之助、浦川順治
2. 発表標題 Ybファイバレーザーを用いたテラヘルツパルスの時間領域分光
3. 学会等名 第14回日本加速器学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sakaue, M. Brameld, M. Nishida, T. Toida, R. Yanagisaawa, M. Washio, R. Kuroda, Y. Taira, J. Urakawa
2. 発表標題 Investigation of the coherent Cherenkov radiation using tilted electron bunch
3. 学会等名 International Particle Accelerator Conference (IPAC 2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒田 隆之助、田中 真人、三浦 永祐、大島 永康、O'Rourke Brian、藤原 健、澁谷 達則、高鍋 彰文、Mao Wenfeng、豊川 弘之
2. 発表標題 先端オペランド計測技術開発のためのSバンド小型電子リニアック・超短パルスレーザー施設の現状
3. 学会等名 第14回日本加速器学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	田中 真人 (Tanaka Masahito) (30386643)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	
研究 分担者	坂上 和之 (Sakaue Kazuyuki) (80546333)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・主幹研究員 (12601)	
研究 分担者	谷 峻太郎 (Tani Shuntaro) (80711572)	東京大学・物性研究所・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	佐藤 大輔 (Satoh Daisuke) (40780086)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員 (82626)	