

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04733

研究課題名(和文) 高強度パルスコヒーレント放射の非線形作用による水の物性と生理活性の探索

研究課題名(英文) Investigation of the non-linear effects of the high-intensity pulsed coherent radiation for water molecules and biological activities

研究代表者

奥田 修一 (Okuda, Shuichi)

大阪府立大学・研究推進機構・客員研究員

研究者番号：00142175

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：加速電子からのコヒーレント放射は、THz域の光成分を持つ強力なピコ秒パルス光である。この生物への作用について、新たな研究領域を開拓するために研究を行った。京大原子炉実験所の電子ライナックで独自に開発したコヒーレント遷移放射光源を利用した。光源の特性を調べ、吸収分光と光照射が同時に行える実験系を開発した。生体の基本構成物質である水について非線形現象の可能性が、また食塩水では、透過率の大きな変化が観測された。菌、微生物、細胞の照射では、明らかな影響は観測されなかったが、今後の重要な指針が得られた。

研究成果の概要(英文)：The coherent transition radiation (CTR) is generated from the high-energy electron beams of a linear accelerator (linac) and is used as the intense light source in a THz region. The CTR light source established by using an electron linac in Kyoto University Research Reactor Institute was used for the present work. The new system for absorption spectroscopy and irradiation was developed. In the CTR absorption experiments, for the basic materials of living things, water and water solution of NaCl, the possibility of non-linear effect and the dependence of the concentration of NaCl were observed. In the irradiation experiments for bacillus, cell and microorganism any change was not observed, which showed the future direction in the researches.

研究分野：量子ビーム材料科学

キーワード：コヒーレント遷移放射 電子ライナック THz光源 半サイクル光 吸収分光 非線形作用 水 生理活性

1. 研究開始当初の背景

電子ライナックで加速される電子バンチからのコヒーレント放射は、1989年東北大での初観測以来、極めて高強度のTHz光源として利用されてきた。研究代表者らは、これを世界に先駆けて光源として利用し、特に水の吸収分光や、植物のイメージングなど、種々の研究を行ってきた。これらの成果については、高強度コヒーレント放射の新たな応用として、チェレンコフ生誕100年記念国際シンポジウムで招待講演を行った。さらに京都大学原子炉実験所では、電子ライナックの強力なビームを基に安定な光源と分光系が開発され、吸収分光実験が行われてきた[1-3]。

コヒーレント放射は、他にない強力なTHz光源として、世界の限られた機関で利用研究が進められている。本研究では、研究代表者らが提案し光源を準備してきた極めて強力な単一極電場を持つ半サイクル光の利用が特徴である。光パルスの時間波形は、電子バンチ形状を反映しており、1-10 psのパルス幅(長さ0.3-3 mm)、周波数では、0.1-1 THzとその周辺領域である。コヒーレントでありながらレーザーとは異なるブロードバンドで、これまでにない概念の新しい光である。コヒーレントな放射の特徴からこの光の作用を光子の吸収で考えると、エネルギーが大きく異なる多光子の短時間同時吸収である。これらの光子の中心波長は、パルス幅程度で、電子ビームからの高強度放射による新しいTHz光量子ビームと位置づけられる。光の時間波形や強度は、これまでに培われた高度な加速器技術により、制御が可能である。物質中に10 MV/cm以上の強いパルス電場が印加できる。広く普及している小型THz光源では、最大1 MV/cm程度で、エネルギーでは2桁以上低く、時間波形の制御は困難である。

研究代表者らはパルスコヒーレント放射による半サイクル光の重要性を1990年代の半ばから指摘してきた。近年ようやく注目され、小型のTHz光源で実験が行われるようになったが、光強度は1桁以上低い。最近研究代表者らの実験で、水への吸収が光強度によって変化する非線形現象の兆しが認められた。水は反応プロセスや生体の基本媒質で、新しい物性の発見は多様な応用につながる。この視点でのコヒーレント放射の光源としての利用はまだ行われていない。本研究は、研究代表者らのほか、世界でもわずかなグループだけが実施可能であった。

2. 研究の目的

加速電子バンチからのコヒーレント放射は、THz域の光成分を持っており、他にない強力な単極電場を持つピコ秒パルス光(半サイクル光)の生成が可能である。この新しい概念の光の作用で、新たな研究領域を開拓する。本研究では、電子ライナックをベースに開発されたコヒーレント放射光源を利用する。反応プロセスや生体の基本媒質である水

を対象に光の吸収を調べ、新しい水の物性を探索する。極性を持つ水分子へのパルス電場の作用により、水分子全体が同方向に配向され、この過程での非線形な光吸収で新たな水の性質が明らかになることが期待される。この光を微生物に照射し、その影響を調べ、水および生理食塩水への作用に関する基礎的知見を得て、生体における新しい生理活性を探索し、量子ビームの応用分野を開拓することを目的とした。

3. 研究の方法

京都大学原子炉実験所(KURRI)では、Lバンド電子ライナックを用いて、CTRによる吸収分光系が確立された。比較的簡単な配置で測定を行うことができ、この特徴を活かして種々の物質に対する吸収分光実験が行われている[1-3]。本研究ではこの光源を利用した。

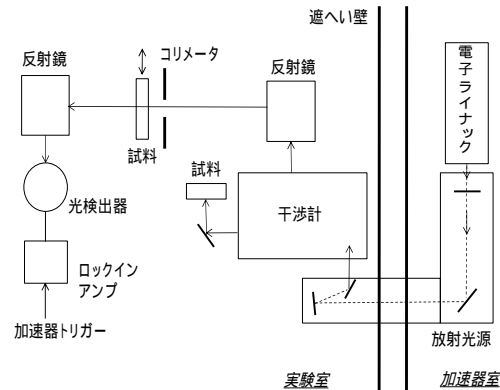


図1 光照射と吸収分光測定配置の概念図

代表的な電子ビームの条件は、エネルギー42 MeV、マクロパルス幅47 ns、パルス繰り返し60 Hzであった。ライナックは、通常の条件でビーム調整を行った後、CTR強度をモニタしながら、最も高い光強度が得られるように加速器の運転条件を最適化した。この過程で、光強度は、最初の条件と比べて2-3桁増加した。この運転条件に関する定量的な評価は行っていないが、主として加速管での比較的強いバンチ圧縮による結果と考えられる[2]。CTRの照射、吸収分光測定系全体の概念図を図1に示す。アルミニウム箔から放射されたCTRを、光学窓を通して実験室へ輸送する。Martin-Puplett型干渉計で分光し、直径約8 mmのコリメータの位置に集光する。検出器は、液体ヘリウム冷却のシリコンボロメータである。試料への光照射と吸収分光測定を同時に行うことができる。

生物関連試料として、水およびNaCl水溶液に対して吸収分光を行い、光強度に対する変化などを調べる実験を行った。

生物試料は、標準的な菌および微生物(大腸菌、酵母、ユーグレナ藻)と細胞を選んだ。無水石英板にはさんだ厚さ0.5 mm以下の水に生物試料を浮遊させて光照射を行った。

4. 研究成果

干渉計のインターフェログラムから、光パルス幅は、約 3 ps と推定され、その解析で光のスペクトルが得られる (図 2)。この図で横軸の光の波数 10 cm^{-1} は、波長 1 mm に対応する。4 回の測定結果は良く一致しており安定である。スペクトルは、波数約 7 cm^{-1} においてピークを持ち、THz 領域に広く分布している。この形状を決める主な要因は、電子バンチ形状である。ピーク周辺での周期的な変動は、主として真空容器の窓での入射光の反射と干渉による。CTR の光源強度は、ピーク付近で約 $10^{-7} \text{ W}/0.1\% \text{ b.w.}$ と推定される。以前の測定では、高圧水銀灯の光強度の約 10000 倍の強度が得られている。ただ、パルスとしてピーク強度の比較を行うと、両者にはさらに

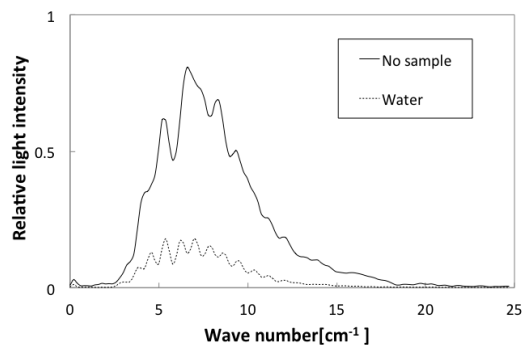


図 2 試料ホルダーに厚さ 120 μm の水試料を挿入したものであるものに対する CTR 透過スペクトル (点線) と光源スペクトル (実線) の比較。

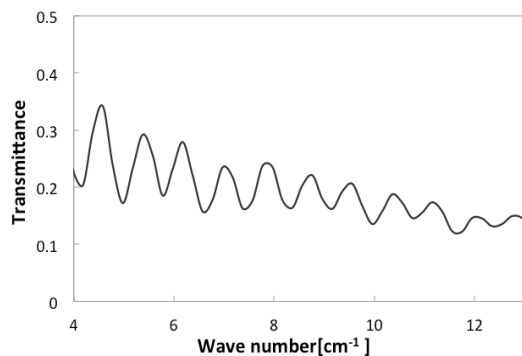


図 3 CTR 透過スペクトルから得られた水の光透過率の波数依存性

大きな差がある。4-13 cm^{-1} の範囲において、全測定時間約 30 分間の光強度の変動による誤差は $\pm 2-3\%$ に収まり、非常に安定なスペクトルが得られた。ピークの両側で光強度が比較的低い波数領域においては、回折格子による分光を行うか、スペクトル強度が高い部分をフィルター等でカットすると、より誤差が少なく測定できると推定される。

吸収分光の代表的な試料として、強い光吸収がある水についての測定結果を示す。厚さ約 120 μm の純水を、厚さ 3 mm の 2 枚の無水石英板で挟んで保持した。室温 20 において測定を行った。試料を透過した光は、その空

間的な広がり測定結果に基づき、全光を集められるよう、試料ホルダーの開口径や光学系の配置を選択した。試料ホルダーに入れた水試料に対する透過光スペクトルの測定結果を、試料がない場合の光源スペクトルと比較して図 3 に示す。それぞれ 4 回の測定結果を平均した。この試料透過後のスペクトル上に見られる周期的な振動は入射光と無水石英板表面での反射光の干渉によるものである。試料に対する光の透過率は、両者の比で求められる。この測定で、試料による 70-80% の光吸収とその波数依存性が得られた。水の物性値である吸収係数と屈折率は、この透過率曲線を解析することによって求めることができる。本研究で測定対象とした液体の水は、サブミリ・ミリ波領域で強い光の吸収体であり、通常用いられている他の光源では、透過測定が困難である。CTR を用いると、水を含む有機、生体物質や、水溶液の吸収分光が容易である。これまでに、この光の特性を活用して、水、食塩水などの物質に対する吸収分光の測定を、温度などの条件を変えて行った。

CR のピーク強度は、他の THz 光源などと比べると極めて高い。この光源の重要な応用は、S バンドや L バンド電子ライナックの典型的なバンチ長である 1-10 ps に対応する短い時間で、物質の非線形光吸収を調べることである。また通常の条件では光の平均強度が温度上昇の影響が十分に無視できる程度に低く、高いパルスピーク強度によって、特に生物にどのような影響があるかについて調べる照射実験を行った。その結果、水では、光強度に依存する非線形現象の可能性が明らかになった。また食塩水では、わずかな食塩濃度の違いで、透過率が大きく変化する挙動が明らかになった。

大腸菌や酵母では、照射後に培地での培養における増殖率の変化を調べ、定量化して結果を評価した。単細胞真核藻類のユグレン藻では、光照射中の挙動を実体顕微鏡で直接観察して影響を調べた。水はサブミリ、ミリ波の強い吸収体であり、試料の全厚さを 0.5 mm 以下として、試料に照射される光強度の減衰を抑えた。結果として、これまでに生物への明らかな影響は観測されなかった。しかし、より高強度での照射、半サイクル光の特徴を活かした照射条件の開発、生物のより繊細な変化を明らかにする計測法が必要であるという重要な指針が得られた。

以上のようにこれまでの利用実験で、種々の物質に対して吸収分光を行い、一部非線形効果と推定される現象の可能性が明らかになった。また生物試料に対する照射実験では、現在のところ明らかな変化は観測されていない。

本研究で用いたような光源は世界でもほとんどなく、さらに高性能な光源による利用拠点を構築することによって、極めて高いパルスピーク強度に伴う新しい現象の探索と

作用の過程の解明が必要である。そのために、加速器側の改善としては単パルスを生じ、パルスピーク強度をさらに高めると共に、光源側では単極の電場で構成される半サイクル光発生のための CSR の利用を検討している。また、広い利用分野に対応するために、様々な研究分野の利用研究者に協力を求める準備を行っている。

<引用文献>

T. Takahashi, J. Particle Accelerator Soc. Japan 2 (2005) 11-15.
S. Okuda and T. Takahashi, Infrared Phys. Technol. 51 (2008) 410.
S. Okuda and T. Takahashi, J. Jpn. Soc. Infrared Sci. & Technol. 25 (2016) 49.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

奥田修一、高橋俊晴、高エネルギー電子ビームによるコヒーレント遷移放射光源とその特性評価、日本赤外線学会誌、査読有、25 巻 2 号、2016、49-54

奥田修一、高橋俊晴、田中良晴、木田侑、高強度パルスコヒーレント放射の水および微生物への作用に関する研究、KEK Proceedings 2015-11、査読なし、2016、111-113

[学会発表](計 10 件)

奥田修一、田中良晴、高橋俊晴、コヒーレント遷移放射光源の改良と生物影響の研究、日本原子力学会「2018 年春の年会」、2018、吹田市

奥田修一、高橋俊晴、京大炉電子ライナックによるコヒーレント放射 THz 光源とその応用、第 15 回赤外放射応用関連学会年会、2018、東京都

S. Okuda and T. Takahashi, High-intensity coherent transition radiation light source for absorption spectroscopy in a THz range, Conf. 4th Microwave/THz Science and Applications, 2017, Okayama, Japan

奥田修一、高橋俊晴、京大炉電子ライナックのコヒーレント放射 THz 光源と研究拠点の形成、第 27 回日本赤外線学会研究発表会、2017、大阪市

6. 研究組織

(1)研究代表者

奥田 修一 (OKUDA, Shuichi)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00142175

(2)研究協力者

田中 良晴 (TANAKA, Yoshiharu)
高橋 俊晴 (TAKAHASHI, Toshiharu)