

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00364

研究課題名(和文)サブフェムト秒パルスラジオリシスによる熱化前・緩和前活性種の研究

研究課題名(英文) Study of active species before thermalization and relaxation using sub-femtosecond pulse radiolysis

研究代表者

吉田 陽一 (Yoshida, Yoichi)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：50210729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、サブフェムト秒(10-15 fs以下)の高エネルギー電子ビームを用いた超高速時間分解分光法「サブフェムト秒パルスラジオリシス」を構築し、熱化前活性種を直接観測することにより、熱化前活性種の熱化・緩和過程、および、その反応性を調べることを目的として行った。これを実現するため、制作したアンジュレータを設置し、磁気パルス圧縮器によりパルス圧縮した電子ビームと、フェムト秒レーザーパルスをアンジュレータに同軸入射し、アンジュレータ内で電子ビームパルスとレーザー光パルスを交差させ、電子ビーム(32.89 MeV)のレーザー変調を行い、エネルギー変調が起きたことが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気パルス圧縮法、およびレーザー変調法を同時に用いることにより極短パルス電子ビーム発生・測定系の構築ができた。これを用いたフェムト秒を超える超高速時間分解パルスラジオリシスが完成すれば、イオン化直後からの放射線誘起化学反応が直接観測により解明できることになり、量子ビームと物質の相互作用の理解が深化することが期待できる。また、研究の過程において、イオン化で生じた電子だけでなく、親カチオンの観測手法、直接イオン化法によるカチオン観測の手法も確立された。超高速時間分解パルスラジオリシスとこれまでの測定手法とも組み合わせることにより、量子ビームの物質との相互作用が解明できるだけでなく、その応用にも寄与する。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate the thermalization and relaxation processes of prethermal active species and their reactivity by constructing a subfemtosecond pulse radiolysis, an ultrafast time-resolved spectroscopy using a subfemtosecond (<10-15 fs) high energy electron beam, and directly observing pre-thermal intermediates. In order to realize this, an undulator was constructed, and an electron beam pulse compressed by a magnetic pulse compressor and a femtosecond laser pulse were injected coaxially into the undulator. It was confirmed that energy modulation of the electron beam was occurred for 32.89 MeV electron beam by analysing energy dispersion of the electron beam.

研究分野：放射線化学

キーワード：極短パルス電子ビーム 超高速分光 パルスラジオリシス 熱化過程 レーザー変調 放射線化学初期過程 直接イオン化法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子ビームが誘起する反応の出発点は、これまではイオン化によってつくられた熱化電子と緩和したカチオンラジカルとされ、この出発点から最終生成物までの議論がされてきた。しかしながら、これらの前駆体である熱化前電子や緩和前カチオンラジカル(熱化前活性種)が、それ以降の反応や最終生成物に大きく影響していることが、最近になって分かってきた。そこで本研究では、サブフェムト秒(数百アト~フェムト秒)の高エネルギー電子ビームを用いた超高速時間分解分光法「サブフェムト秒パルスラジオリシス」を構築し、熱化前活性種を直接観測することにより、熱化前活性種の熱化・緩和過程、および、その反応性を調べることで、これまで未解決であった量子ビーム化学初期過程の問題点を解明し、新しい量子ビーム応用展開の基盤を確立することを目的とする。

量子ビームと物質の相互作用の主な過程は、「イオン化」と呼ばれる現象である。これまでの放射線照射効果に関する研究は、このイオン化後に生成する熱化電子と緩和したカチオンラジカルを出発点としてきた。この熱化および緩和はフェムト秒からピコ秒で完了することが知られている。従って、イオン化直後のサブフェムト秒時間領域における熱平衡に達する前の時間領域は、観測手段が無かったために未知の領域として取り扱われてきた。

パルスラジオリシスとは、パルス状の放射線(主に電子ビーム)を物質に照射し、物質中で引き起こされる超高速反応を調べる時間分解分光法であり、量子ビーム照射効果を直接的に調べる唯一の方法である。これまで我々が開発してきたフェムト秒パルスラジオリシスを用いた研究により、イオン化直後に、熱化電子の前駆体やカチオンラジカルの励起状態が発見された。さらに、これらは非常に短寿命ではあるが、大きな反応性を示すため、熱化電子や緩和したカチオンラジカルを出発点とする従来の反応スキームとは初期過程が異なること示唆された。最近になって、熱化前活性種である熱化前電子や緩和する前のカチオンラジカルを考慮した反応スキームの解析の重要性が明らかになりつつあるが、完全な解明には、熱化前活性種がどのような形で存在し、どの程度の寿命を持ち、どんな反応をするのかを明らかにする必要がある。熱化前活性種は短寿命であるにも関わらず、何故無視できないほどの影響を持つのかを理解する必要がある。サブフェムト秒時間領域における熱化・緩和過程の解明は、これまでの量子ビーム照射プロセスの大きな見直しにつながる可能性があり、残されたままの過去の問題点の解決に繋がるばかりでなく、新しい量子ビーム応用の発見に繋がる可能性を秘めている。

2. 研究の目的

本研究では、サブフェムト秒(10^{-15} s 以下)の高エネルギー電子ビームを用いた超高速時間分解分光法「サブフェムト秒パルスラジオリシス」を構築し、熱化前活性種を直接観測することにより、熱化前活性種の熱化・緩和過程、および、その反応性を調べることを目的とする。これにより、これまで未解決であった量子ビーム化学初期過程の問題点を解明し、新しい量子ビーム応用展開の基盤を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生シミュレーション

新たな電子ビーム圧縮技術の開発において、さらに短パルスの電子ビームパルス列もしくは単パルスを得るためのレーザー変調は有用な手段であることが期待される。レーザー変調とは、アンジュレータ周期磁場中にレーザーと電子ビームを入射することにより、電子ビームの(パルス中のスライス)エネルギー分散を増大させる手法である。一般的には、単一パルスのレーザー光がレーザー変調に用いられ、X線自由電子レーザーの施設では自由電子レーザーのX線強度の増強および安定化のために用いられている。また、レーザー光が存在しない時刻はレーザー変調が行われなため、時間的に強度変調したレーザー光を用いた場合は変調によるエネルギー分散の増大が進行方向のスライスごとに異なる電子ビーム発生も可能となる。そのため、レーザー変調に使用するレーザーの時間プロファイルの操作も、レーザー変調に関連した研究の種類を広げてきた。効率的なレーザー変調を行うためには、入射電子ビームエネルギー・エネルギー分散、使用レーザーの波長・ピークパワー、アンジュレータの発振波長・磁場強度(K値)、下流のビーム光学系(主に転送行列の R_{56})の設計が不可欠である。そのような設計や最適化により、例えば、電子ビームの変調波長におけるパンチング因子を高める等の、効率的なレーザー変調が可能となる。そこで、レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生シミュレーションを行った。フォトカソードRF電子銃加速器からのフェムト秒電子ビーム(エネルギー32.5 MeV、電荷量2 pC、パルス幅9 fs rms)に対して、レーザー変調(レーザー波長800 nm、ピークパワー4 GW、エネルギー/パルス幅の想定0.4 mJ/100 fs)を適用した計算について、シミュレーションコード *elegant* を用いて行った。

(2) レーザー変調のためのアンジュレータの検討

フォトカソードRF電子銃加速器からのフェムト秒電子ビームに対して、レーザー変調を適用し、アト秒電子ビームパルス列もしくは単パルスを得ることを目指している。また、使用アンジュレータは、発振波長をレーザーの波長と同一にする必要がある、基本波の発振波長が800 nmとなるような磁場を想定している。レーザーについては、発振波長800 nm、パルスエネルギー

数 **100 uJ/pulse** オーダーの **Ti:Sapphire** レーザーを使用する。レーザー変調の効果の最適化を行う場合は、光源として使用した場合のアンジュレータの発振波長を変化させるために、電子ビームエネルギーもしくはアンジュレータパラメータを変化させる等の方法がある。しかし、変化可能なパラメータには限界があるために、エネルギー**32.5 MeV**の電子ビームに対する、アンジュレータの基本波の発振波長が**800 nm**となるようなアンジュレータの条件を検討した。

(3) レーザー変調の実験

フェムト秒電子ビームとフェムト秒レーザーを同軸で、アンジュレータに入射し、レーザー変調の実験を行った。レーザー変調された電子ビームは、エネルギー幅が広がる。実験においては、金属蒸着ペリクルを用いて、電子ビームとフェムト秒レーザーを同軸でアンジュレータへ入射することとした。レーザー変調の効果の最適化を行う場合は、光源として使用した場合のアンジュレータの発振波長と使用するレーザーの波長を一致させる必要がある。電子ビームエネルギー**32.5 MeV**において、既存のレーザー波長**800 nm**を考慮し、アンジュレータの基本波の共鳴波長で**800 nm**を満たすような周期長を検討し、磁場周期長で**6.6 mm**、**K** 値/磁場振幅が、**0.15/0.25 T**、周期数**20**のもの（**NEOMAX** エンジニアリング社製）を用いた。さらに下流で、電子ビームを磁場により偏向し、エネルギー幅（ビーム径）を解析し、レーザー変調の実験を行った。測定においては、電子ビームに対するフェムト秒レーザーのアンジュレータへの入射時刻を変更できるようにした。

(4) 電子ビーム・光 2 段階励起パルスラジオリシス

通常のパルスラジオリシス測定にレーザー光を組み合わせ、電子ビーム・光 2 段階励起パルスラジオリシス測定を実現した。また、これらに簡易型クライオスタットを組み合わせることで、**-70** 程度~**100**°までの温度帯で実験できるようにした。特に低温側の拡張は、時間分解能が不足する場合には、時間分解能を補う意味でも反応過程を遅くすることができ、有効である。また、温度に依存しない反応過程を確かめるには、温度の可変性は有効である。

(5) 直接イオン化法によるカチオンラジカル生成

過剰電子に加えて、その親分子のカチオンラジカルの観測も重要である。これまでの溶液中でのカチオンラジカル観測手法は主としてハロメタン等を溶媒として、イオン化でできたハロメタンカチオンラジカルから、観測対象の溶質分子へのホール移動反応を経ていた。この方法ではホール移動反応が拡散律速であり、時間分解能を活用できない。そこで、溶液中でカチオンラジカルを電子ビームのパルス幅と同等の時間で生成する手法を考案し、実現した。原理的には、高濃度に溶質分子を溶解させることで溶質分子の直接イオン化を引き起こすことで、カチオンラジカル生成にかかる時間を電子ビームのパルス幅同等とすることができる。この手法、「直接イオン化法」では、溶媒分子のカチオンラジカルから、拡散を経てホール移動する過程は時間分解能を劣化させるため、たとえば、テトラヒドロフラン（**THF**）のような溶媒が好ましい。これは、生成したカチオンラジカルが速やかに自己分解し、ホール移動能に乏しいカチオン種（**H⁺**）となるためである。自己分解より早くホール移動することは考慮されるべきであるが、**THF** の場合、これが起こるのは最近接分子が溶質である場合であり、この場合は拡散過程を含まないため、問題とならない。**THF** にピフェニルを高濃度に溶解させた場合、飽和濃度付近では、ピフェニル**1** 分子に対し **THF** が **2** 分子であり、すべての **THF** がピフェニルと隣あう状況にあり、直接イオン化法において時間分解能を活かすことのできる状況が実現できることが分かった。

4. 研究成果

(1) レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生シミュレーション

アンジュレータの磁場強度 B_0 （振幅）その下流の自由空間距離 z_0 を変化させながら行った計算結果を図 1 に示す。 $B_0 = 0.25 \text{ T}$, $z_0 = 150 \text{ mm}$ の条件でのレーザー変調後の軸方向位相空間分布（図 1(a) プロット、上）とその時間プロファイル（実線、下）である。位相空間分布の傾き・回転の調整により、時間プロファイルにおけるレーザー変調による変調深さは変化する。図 1(b) は、この時間プロファイルのフーリエ変換によりバンチング因子を算出した結果である。低周波側に基本波として **0.37 PHz** のピークが確認でき、**808 nm** に相当するため、レーザー変調の効果であることが分かった。**2** 倍波に相当する **0.74 PHz** のピークも確認できた。時間プロフ

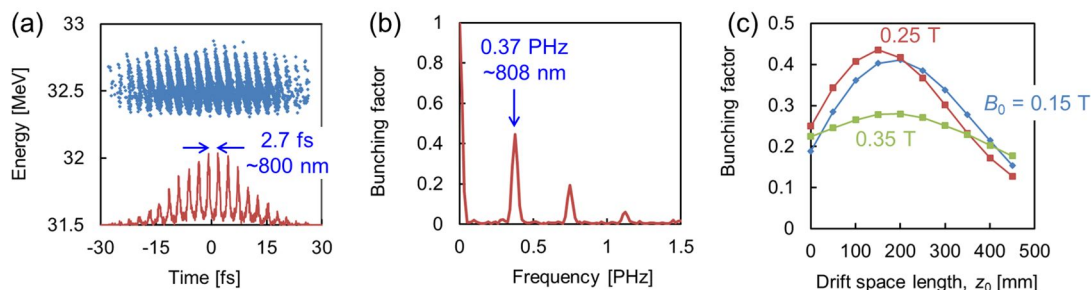


図 1 (a)軸方向位相空間分布の計算結果 ($B_0 = 0.25 \text{ T}$, $z_0 = 150 \text{ mm}$) (b)バンチング因子 (c) 0.37 PHz のバンチング因子について、アンジュレータ磁場強度 B_0 、その下流の自由空間距離 z_0 の依存性

ファイルにおける周期的なデルタ関数は、周波数スペクトルではその周期を基本波とする倍波の成分が現れる。従って、短パルス化も同時に起こっていると考えられる。図 1(c)は、基本波(~ 0.37 PHz、レーザー波長)のバンチング因子に着目して、磁場強度、自由空間距離の両方の最適化を行った結果である。自由空間距離は R_{36} を変化させることとなり、レーザー変調後の軸方向位相空間分布の回転量を調整することができる。そのため、自由空間距離によりバンチング因子が変化することが分かった。さらに、アンジュレータの共鳴条件に関する最適な磁場強度からも予想されるように、 $B_0 = 0.25$ T でバンチング因子は最大化、つまり、レーザー変調の効率を最大化できることが分かった。本計算による最適化の結果、バンチング因子の最大は、磁場強度 0.25 T、自由空間距離 150 mm で 0.44 となった。

(2) レーザー変調のためのアンジュレータの検討

Poisson Superfish を用いて、数値計算結果から検討を行った。実現できそうなアンジュレータの磁場と周期について、磁場周期長を 6.6 mm に固定し、 32.5 MeV の条件において、共鳴の波長を 800 nm (基本波) とするためには、 K 値/磁場振幅は、 $0.15/0.25$ T が必要条件となった。図 2 (a) に概略図に示すように磁場測定を行った。磁石は、ネオジウム磁石 ($30 \times 3.3 \times 10$ mm, N54, NeoMag) である。ホール素子を光学ステージに設置し、ビーム進行 z 方向に垂直 y 方向磁場の測定を行った。ステージを掃引した際に出されるホール電圧を、データ収集・制御装置により記録した。図 2 (b) に示すように、定盤上に計算体系と同様な 40 個のネオジウム磁石を、片側のアンジュレータとして設置し、ホール素子をビーム進行方向に掃引した。磁場の周期数は 20 であり、磁石列の全長は 132 mm (40×3.3 mm) となる。図 2(c) の、約 5 周期の磁場を示すように、ビーム進行方向で周期的に振動する垂直方向の磁場が得られた。予想されるように、磁石に近い方が磁場の振幅は大きく、垂直方向の位置 $y = 1.5$ mm において、約 0.2 T の磁場が確認できた。また、この結果は、数値計算からも同程度の磁場であることを確認することができた。

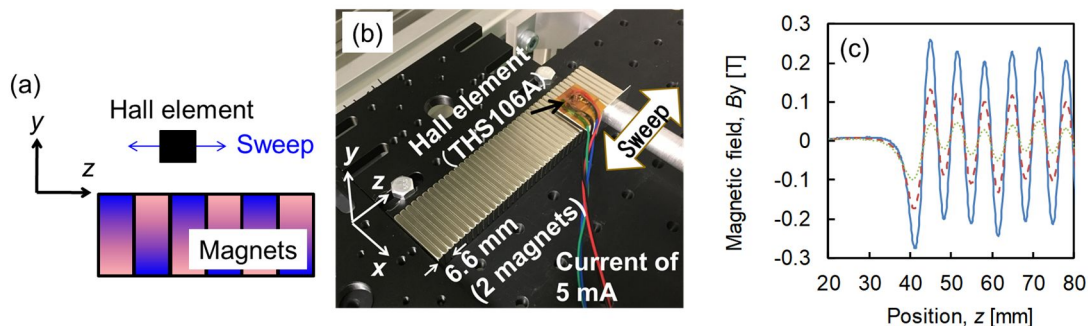


図 2 (a)磁場測定の概略図。(b)磁石上端は $y = 0$ mm である。(b) 測定の写真。(c) y 方向磁場(B_y)の z 位置依存性。実線、破線、点線は、それぞれ、 $y = 1.5, 2.5,$ and 3.5 mm である。

(3) レーザー変調の実験

図 3(a)に、レーザー変調の実験の測定系を示す。電子ビーム発生では、フォトカソード RF 電子銃加速器からのフェムト秒電子ビームの発生を行った。フェムト秒レーザーの三倍高調波からの紫外光パルスをもフォトカソード RF 電子銃に入射し、光電子による電子ビームを用いた。パルス圧縮されたフェムト秒電子ビーム(エネルギー 32.5 MeV 前後)を発生した。電子銃へのレーザー入射位相と加速管における加速位相は、それぞれ、 30° と 100° を用いた。発生したフェムト秒電子ビームをチタン箔のビーム窓から低真空中に取り出し、レーザー変調実験を行った。レーザー変調用のレーザーは、上流で分岐したフェムト秒レーザーの基本波を用いた。変調時の

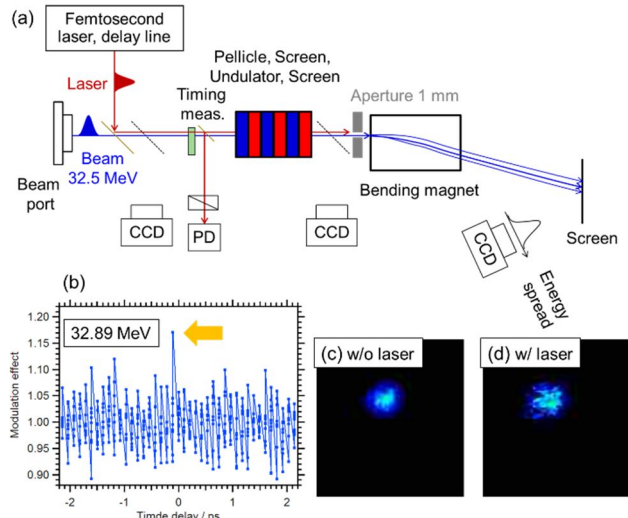


図 3.(a) レーザー変調測定系 CCD: CCD カメラ、点線:脱着可能スクリーン、PD:フォトダイオード;(b) 変調の効果のレーザー入射時刻依存性 矢印は電子ビームとレーザー光が時間的に一致して起きた変調部分;レーザー光の有無によるビームプロファイル (c)有(d)無

エネルギー幅とビームプロファイル幅の関係として、**35 MeV** 条件に対しては、 $R_{16} = 0.125 \text{ m}$ と見積もられた。レーザー変調を行うためには、電子ビームとレーザーの軸を一致させ、かつ、アンジュレータ入射時刻を一致させる必要がある。金蒸着ペリクルにより、電子ビームとレーザーを同軸上に合流させた。軸調整については、測定系の脱着可能なスクリーンを用いた。入射時刻調整については、フェムト秒レーザーを光学遅延するとともに、脱着可能な電気光学結晶 (**ZnTe**) におけるポッケルス効果を利用して、偏光測定により確認を行った。図 **3(b)** に、電子ビームエネルギーが **32.89 MeV** の時のエネルギー幅の測定結果を示す。レーザー変調された電子ビームは、レーザーの存在する時間においてスライスのエネルギー幅が広がる。エネルギー幅測定を行うために、偏向磁石とスクリーンを用いて、測定される電子ビームプロファイルの幅がエネルギー幅に相当するとして、測定を行った。レーザーの有無によるエネルギー幅(ビーム径)の比をレーザー変調の効果 (**Modulation effect**) とした。その結果、各入射時刻で **10** 回ずつの測定で、フェムト秒レーザーの入射時刻 **0 ps** の時の内の **1** 点でレーザー変調の効果が増加していることが分かり、変調の効果として **1.17** が得られ、ビームプロファイルの変化が確認された (図 **3(c)**, 図 **3(d)**)。

(4) 電子ビーム・光 2 段階励起パルスラジオリシス

各種直鎖アルコール中を電子ビーム照射し、生成させた溶媒和電子を光励起したところ、溶媒和電子の吸光度はブリーチし、励起された溶媒和電子は再生しなかった。また、**1**-ペンタノールの低温 (**-60**) での測定では、溶媒和電子に加えて、溶媒和前電子も観測できたが、レーザー光パルスによる光励起に伴う溶媒和前電子生成は観測されなかった。これらの実験結果は、レーザー光による光イオン化で発生した溶媒和電子に対する光励起の実験結果とは大きく異なるものであった。この理由として、光イオン化ではヨウ素アニオンを光励起しており、従って、イオン化後の親分子は中性となる。一方、電子ビームによるイオン化では、中性の溶媒分子をイオン化するため、親分子はラジカルカチオンとなる。光励起された溶媒和電子は、この親分子とのクーロン力により、再結合し、再生することがなかったと考えられる。溶媒和前電子が観測されなかった理由としては、この再結合が高速な過程であることを示唆している。これらの実験事実は、溶媒和電子の光励起は、溶媒和電子の分子内の電子遷移ではなく、溶媒和電子から、溶媒が作る伝導帯への電子遷移であることを強く示唆している。伝導帯準位へと遷移した電子は、いわゆる準自由電子であるが、移動度が早いことが知られており、従って、光励起された電子がほぼ定量的に再結合したものと結論される。これらの実験は、溶媒和電子の吸収スペクトルが分子内遷移によるものではなく、伝導帯準位への電子遷移に帰属されるべきことを意味している点は重要である。同時に、溶媒電子の前駆体である溶媒和前電子は、その分子構造が溶媒和電子とは異なることを強く示唆する点も重要である。溶媒和電子、溶媒和前電子はともに、溶媒中の放射線誘起化学反応の重要な初期中間体であり、その分子としての性質を解明できたことは意義がある。

(5) 直接イオン化法によるカチオンラジカル生成と観測

直接イオン化法を用いて、ビフェニルの **THF** 溶液のパルスラジオリシスによる過渡吸収の時間変化を測定し、過渡吸収スペクトルを得た。図 **5** のとおり、可視部の吸収帯は時間変化し、これはビフェニルのアニオンラジカルとカチオンラジカルが重なって測定されていることを示している。この高濃度溶液にカチオン捕捉剤のトリエチルアミンを添加すると、ビフェニルカチオンラジカルの吸収が消失し、可視部はアニオンラジカルの吸収となった。ビフェニル濃度依存性を検討した結果、**100 mM** 程度から観測可能な直接イオン化の寄与があることが分かった。また、高濃度溶液では、たしかにカチオンラジカルが生成されていることを実験的に示すことができた。従って、直接イオン化法は高濃度溶液が調製できれば、十分に有効な手段であり、高時間分解能測定においては、不安定なカチオンラジカル種をも観測できる手法となることが実証できた。

(6) 研究全体のまとめ

本研究全体において、レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生シミュレーションを行い、最適化の結果、パンチング因子の最大は、磁場周期長 **6.6 mm** において、磁場強度 **0.25 T**、自由空間距離 **150 mm** で **0.44** となった。レーザー変調のためのアンジュレータの検討では、片側のアンジュレータの数値計算と測定結果の比較を行い、ビーム進行方向で周期的に振動する垂直方向の磁場が得られ、垂直方向の位置 $y = 1.5 \text{ mm}$ において、約 **0.2 T** の磁場が確認され、計算結果とよく一致した。レーザー変調の実験では、レーザー変調の有無による電子ビームエネルギー幅の計測を行い、レーザー変調の効果として最大で **1.17** が得られた。今後の装置開発とともに電子ビーム利用が期待される。また、量子ビーム誘起反応の初期中間体である溶媒和電子および溶媒和電子の基礎的性質を新たに開発した光・電子 2 段階励起パルスラジオリシスを用いて明らかにした。さらに、溶液中で高時間感分解測定を活用できるカチオンラジカル生成法として、直接イオン化法を提案し、カチオンラジカルが観測できることを実証した。このような量子ビーム誘起超高速反応の測定と解析から、次世代半導体微細加工における新しいレジストプロセス開発や放射線がん治療における放射線の生物影響の理解が期待される。

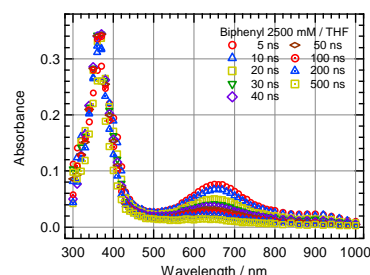


図 5 直接イオン化法によるビフェニルのカチオンラジカルの生成と観測

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 楊 金峰, 保田 英洋, 吉田 陽一	4. 巻 18
2. 論文標題 相対論的フェムト秒パルス電子顕微鏡の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 加速器	6. 最初と最後の頁 81 - 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.50868/pasj.18.2_81	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 K Kan, M Gohdo, J Yang, I Nozawa, Y Yoshida, H Kitahara, K Takano, R Kuroda, H Toyokawa	4. 巻 11
2. 論文標題 Time-domain measurement of coherent transition radiation using a photoconductive antenna with micro-structured electrodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125319
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0067586	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 Masao Gohdo, Seiichi Tagawa, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida,	4. 巻 196
2. 論文標題 Direct ionization-driven observational approaches for radical cation formation in solution for pulse radiolysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Radiation Physics and Chemistry	6. 最初と最後の頁 110105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.radphyschem.2022.110105	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 Yasunobu Arikawa, Masato Ota, Makoto Nakajima, Tomoki Shimizu, Sadashi Segawa, Thanh Nhat Khoa Phan, Youichi Sakawa, Yuki Abe, Alessio Morace et al.,	4. 巻 91
2. 論文標題 The conceptual design of 1-ps time resolution neutron detector for fusion reaction history measurement at OMEGA and the National Ignition Facility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 63304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5143657	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 Masato Ota, Koichi Kan, Soichiro Komada, Yasunobu Arikawa, Tomoki Shimizu, Valynn Katrine Magusara, Yoichi Sakawa, Tatsunosuke Matsui, and Makoto Nakajima	4. 巻 14
2. 論文標題 Longitudinal and transverse spatial beam profile measurement of relativistic electron bunch by electro-optic sampling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 26503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abd867	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 -

〔学会発表〕 計34件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Koichi Kan, Masao Gohdo, Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Study on Laser Modulator for Electron Beam Density Modulation
3. 学会等名 IPAC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調における電子ビームのシミュレーション
3. 学会等名 第58回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神戸 正雄, 岡田 尚通, 菅 晃一, 吉田 陽一
2. 発表標題 溶媒の誘電率の時間変化を取り入れたイオン化分布の時間発展の試行的計算
3. 学会等名 第59回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 超短パルス電子ビーム発生のためのレーザー変調におけるアンジュレータ
3. 学会等名 第18回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊 金峰, 菅 晃一, 神戸 正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 RF電子銃を用いた超高圧パルス電子顕微鏡の開発
3. 学会等名 第18回日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Kan, Masato Ota, Soichiro Komada, Yasunobu Arikawa, Valynn Mag-usara, Verdad Agulto, Youwei Wang, Youichi Sakawa, Tatsunosuke Matsui, Makoto Nakajima
2. 発表標題 Initiation of THz Spherical Wave of Electron Bunch near Metallic Boundary
3. 学会等名 IRMMW-THz (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato Ota, Koichi Kan, Soichiro Komada, Yasunobu Arikawa, Valynn Mag-Usara, Verdad Agulto, Youwei Wang, Youichi Sakawa, Tatsunosuke Matsui, Makoto Nakajima
2. 発表標題 Lorentz Contraction of an Electric Field around Relativistic Electron Beams
3. 学会等名 IRMMW-THz (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神戸 正雄, 田牧 諒哉, 菅 晃一, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 パルスラジオリシス法による高濃度溶液中の放射線化学反応の解析
3. 学会等名 第64回放射線化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 超短パルス電子ビーム発生のためのレーザー変調におけるアンジュレータ磁場計測
3. 学会等名 第64回放射線化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田牧 諒哉, 神戸 正雄, 菅 晃一, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 n-ペンタノール中の溶媒和電子生成過程の検討
3. 学会等名 第64回放射線化学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調のためのアンジュレータの磁場評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊 金峰, 菅 晃一, 神戸 正雄, 吉田 陽一
2. 発表標題 相対論的フェムト秒電子線パルスを用いた不可逆構造変化現象の測定技術の開発
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神戸 正雄, 菅 晃一, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 溶媒の誘電率の時間変化を取り入れたイオン化分布の時間発展の試行的計算
3. 学会等名 日本原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永石 隆二, 神戸 正雄, 桑野 涼, 伊藤 辰也, 吉田 陽一, 田牧 諒哉
2. 発表標題 炭酸塩スラリーの親水性変化に伴う水素保持に関する放射線分解研究 (2) スラリー間隙水の局所粘度のパルスラジオリシス測定
3. 学会等名 原子力学会 2021年秋の大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yoshida
2. 発表標題 Radiation chemistry in attosecond time region
3. 学会等名 TSRP-2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Gohdo
2. 発表標題 Direct ionization-driven radical cation formation observation methods in solution
3. 学会等名 TSRP-2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Kan
2. 発表標題 Generation of femtosecond and attosecond electron bunches for ultrafast pulse radiolysis
3. 学会等名 TSRP-2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅 晃一, 太田 雅人, 駒田 蒼一郎, 王 有為, Verdad C. Agulto, Valynn K. Mag-usara, 有川 安信, 村上 匡且, 坂和 洋一, 松井 龍之介, 中嶋 誠
2. 発表標題 電気光学結晶を用いた電子ビームのシングルショット計測の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神戸 正雄, 田牧 諒也, 田川 精一, 菅 晃一, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 高濃度溶液を用いたラジカルカチオンの反応性の研究
3. 学会等名 日本原子力学会 2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楊 金峰, 蘆田 湧一, 成瀬 康延, 中村 芳明, 菅 晃一, 神戸 正雄, 吉田 陽一
2. 発表標題 フェムト秒電子線回折による光誘起構造相転移現象の測定
3. 学会等名 日本原子力学会 2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調された電子ビームの測定
3. 学会等名 日本原子力学会 2022年春の年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅 晃一, 太田 雅人, 中嶋 誠, 有川 安信, 清水 智貴, 瀬川 定志, 坂和 洋一, 駒田 蒼一郎, 松井 龍之介
2. 発表標題 電気光学サンプリングによる電子ビーム周りのテラヘルツ電場計測
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 晃一, 上野 浩一, 楊 金峰, 神戸 正雄, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生シミュレーション
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古川 和弥, 菅田 義英, 磯山 悟朗, 岡田 宥平, 徳地 明, 吉田 陽一, 楊 金峰, 菅 晃一, 神戸 正雄, 細貝 知直
2. 発表標題 阪大産研量子ビーム科学研究施設の現状報告
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玄 一貴, 楊 金峰, 神戸 正雄, 菅 晃一, 吉田 陽一
2. 発表標題 相対論的フェムト秒電子線パルスを用いた超高速時間分解電子線回折に関する研究
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調を用いた超短パルス電子ビーム発生の研究
3. 学会等名 日本原子力学会2020年秋の大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川 和道, 柴田 裕実, 吉田 陽一, 前川 康成
2. 発表標題 放射線化学の宇宙実験への参画の可能性
3. 学会等名 第63回放射線化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神戸 正雄, 菅 晃一, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 溶液中の放射線分解ダイナミクスの溶質濃度依存性
3. 学会等名 第63回放射線化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 アンジュレータ中のレーザー変調による電子ビーム圧縮の研究
3. 学会等名 第63回放射線化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玄 一貫, 楊 金峰, 神戸 正雄, 菅 晃一, 吉田 陽一
2. 発表標題 時間分解電子線回折法による単結晶シリコンの光誘起構造変化の観測
3. 学会等名 第63回放射線化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅 晃一, 神戸 正雄, 楊金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 レーザー変調のためのアンジュレータ設計と測定
3. 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊 金峰, 菅 晃一, 神戸 正雄, 吉田 陽一
2. 発表標題 RF電子銃を用いた超高圧パルス電子顕微鏡の開発現状
3. 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神戸 正雄, 菅 晃一, 楊 金峰, 吉田 陽一
2. 発表標題 高濃度溶液中の放射線分解ダイナミクス
3. 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Royya TAMAKI, Masao GOHDO, Koichi KAN, Jinfeng YANG, Seiichi TAGAWA, Yoichi YOSHIDA
2. 発表標題 The electronic structure of the solvated electron in 1-pentanol
3. 学会等名 The 26th SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

RFガン電子ライナック https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/RF-gun_linac.html 極短パルス電子ビーム https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/e-beam.html パルスラジオリシス https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/pulse_radiolysis.html 集団イオン化 https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/collective_ionization.html RFガン電子ライナック https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/RF-gun_linac.html 極短パルス電子ビーム https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/e-beam.html パルスラジオリシス https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/pulse_radiolysis.html 集団イオン化 https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/collective_ionization.html
--

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	神戸 正雄 (Gohdo Masao) (60705094)	大阪大学・産業科学研究所・助教 (14401)	
研究分担者	菅 晃一 (Kan Koichi) (60553302)	大阪大学・産業科学研究所・助教 (14401)	

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