

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01374

研究課題名(和文) アト秒パルスラジオリシスによる超高速熱化・緩和過程に関する研究

研究課題名(英文) Study of thermalization and relaxation process after ionization using attosecond 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) 36,820,000円

研究成果の概要(和文)：極短パルス電子ビーム発生・輸送の理論的研究では電子ビーム輸送をシミュレーションし、軸方向位相空間分布に三次効果の影響がみられた。二帯域同時マイケルソン干渉計型バンチ長測定装置および光伝導アンテナ等による時間領域測定系を開発し、広範囲のパルス幅の電子ビームパルス幅測定が可能となった。量子ビーム誘起反応の初期過程について、無極性溶媒では、従来の電子拡散定数で記述される運動だけでなく、準自由電子状態の非常に速い電子輸送機構の寄与が無視できない事を明らかにした。四塩化炭素中では、ナノ秒パルスラジオリシスおよびフェムト秒パルスラジオリシスを利用し、光励起とは主たる反応過程が異なることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超短パルス電子ビーム発生・測定系の構築および超高時間分解パルスラジオリシスを用いて、種々の物質で量子ビーム誘起反応の熱化・緩和過程を解明した。本研究のパルスラジオリシスを用いることにより、量子ビーム誘起反応の熱化・緩和過程の測定が可能となり、EUV(極端紫外線)等の次世代半導体微細加工では、新しいレジストプロセスの開発が可能となる。放射線がん治療において重要な放射線のDNAに与える効果として、DNAの直接イオン化や水和前電子の高速反応の寄与が指摘されており、前駆体であるドライ電子や水和前電子の反応性の解明は、放射線の生物影響の理解に大きく寄与する。

研究成果の概要(英文)：Theoretical study of ultra-short electron beam generation found the third order effect in longitudinal phase-space distribution through electron transport simulation. To realize wide range of electron bunch length measurement, electron bunch measurement systems by a Michelson interferometer with dual band detector for frequency domain measurement and by a photoconductive antenna with pulsed laser for time domain measurement were successfully developed. Early stage processes just after ionization induced by ionizing radiation were studied in non-polar solvent and halomethanes. In non-polar solvent, it was found that the contribution of high mobility electron like quasi-free electron cannot be ignored in addition to the well-known diffusion controlled reaction. In halomethanes, the dominant reaction intermediate was not the same in ionizing radiation induced reaction with that in photo-ionization.

研究分野：放射線化学

キーワード：放射線化学 量子ビーム ナノファブリケーション 電子加速器 パルスラジオリシス

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。多くの放射線照射効果は、このイオン化を出発点としており、それ以降に生じる物理・化学・生物学的な現象については、照射効果の重要なテーマとして多くの研究がなされてきた。しかしながら、イオン化直後の非常に速い時間領域は、観測手段が無かったために未知の領域であった。

パルスラジオリシスとは、パルス状の放射線ビーム(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、照射する電子ビームのパルス幅が測定の時間分解能を決める。その多くは、主にピコ秒の電子ビームを使ったパルスラジオリシスである。我々のグループでは、早い時期(2003年~)から、フェムト秒パルスラジオリシスの開発を行ってきており、すでに、240フェムト秒の世界最高時間分解能を実現し、放射線が誘起する水和電子の生成過程を世界で初めて観測した。

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、ナノファブリケーションや放射線がん治療の基礎過程となっていた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。そこで、これらの前駆体の熱化・緩和過程を明らかにするため、アト秒領域の反応を調べることが急務となっている。

2. 研究の目的

本研究では、世界で最も短いアト秒オーダーの高エネルギー電子ビームを発生させ、超高速時間分解分光法「アト秒パルスラジオリシス」を構築し、これを用いて電子ビームによって引き起こされる超高速反応を観測することにより、イオン化直後の出発活性種を探索して熱化・緩和過程を明らかにし、量子ビームの応用展開に資することを目的とする。これらを実現するために、極短パルス電子ビームの発生・測定方法の確立、極短パルス電子線を用いたフェムト秒パルスラジオリシスを実現し、無極性溶媒のアルカンやカチオン生成溶媒として重要な八口メタン、極性溶媒の水、アルコールを始めとする代表的な溶媒中における電子の熱化・緩和過程、初期反応中間体の解明について研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 極短パルス電子ビーム発生 of 理論的研究

TRANSPORT と General Particle Tracer (GPT) シミュレーションコードを使用して、電子ビームの圧縮条件について理論的な研究を行った。TRANSPORT は、転送行列を解くためのシミュレーションコードであり、漏れ磁場による非線形効果を含む取り扱いをすることができる。GPT は、商用の三次元の粒子トラッキングシミュレーションソフトウェアである。三次元の空間電荷効果の計算も可能であり、GPT では、外部ソフトウェアで計算した電磁場を使用してビームトラッキングシミュレーションを行うことができるため、本研究では、RF 電子銃とソレノイド電磁石、加速管について Poisson/Superfish で計算した電磁場を使用した。また、偏向電磁石と四極電磁石については、漏れ磁場を考慮した組み込みの関数を使用した。

(2) 二帯域同時マイケルソン干渉計型バンチ長測定装置を用いた極短パルス電子ビームの測定方法の確立

二つの異なる周波数帯域を持つ検出器を備えたマイケルソン干渉計によるバンチ長測定系を構築し、電子ビーム(エネルギー 35 MeV, 電荷量 <30 pC) のコヒーレント遷移放射(CTR) を測定することにより、バンチ長計測を行った。二つの検出器(液体ヘリウム冷却シリコンポロメータ及び MCT 検出器) を同時に使うことにより、同一の電子バンチ列について、二つの検出器それぞれが同一のバンチに対しインターフェログラムの各点を与え、それぞれの検出器の信号強度を検討することで、相補的かつ補強的なバンチ長計測が可能になり、より正確なバンチの評価が可能となった。また、本測定系により、磁気パルス圧縮器のアクロマティック条件の検証も行った。

(3) 光伝導アンテナを用いた電子ビームの時間領域測定

可動の光伝導アンテナ(PCA)を用いて、CTR によるテラヘルツ電場の時間・空間分布の測定を行った。時間分布(波形)の測定については、PCA を駆動するフェムト秒レーザーの時間遅延により可能である。水平方向に PCA を可動とすることにより、空間分布の測定が可能となった。パルス圧縮されたフェムト秒電子ビーム(エネルギー 35 MeV, 電荷量 400 pC) を用いて測定を行った。

(4) イオン化後の溶媒中の過剰電子ダイナミクス

フェムト秒パルスラジオリシス実験は、パルス電子線をイオン化源とし、フェムト秒レーザー光を検出光としたパルスプローブ法を用いた。電子線は典型的には電荷量 1 nC、パルス幅 500 fs、エネルギー 35 MeV を用いた。検出光は時間同期したフェムト秒レーザー光を増幅、光パラメトリック増幅器で適宜波長変換し、光学遅延による時間掃引により過渡種の濃度の時間変化を過渡吸収として測定した。無極性溶媒中では溶媒和が起こらないため、熱化前電子、熱化電子が観

測対象となる。一方、極性溶媒では、電子に対する溶媒の配向が存在するため、溶媒和電子、その前駆体である溶媒和前電子が観測対象である。この溶媒和前電子の生成過程の観測は熱化過程を反映しており、従って、熱化過程も研究対象となる。

(5) イオン化直後からの反応中間体の研究

過剰電子のダイナミクスの観測と同様にフェムト秒パルスラジオリシスによる過渡吸収の時間変化を観測した。観測対象は、イオン化で生じる溶媒分子の1価のカチオンラジカルである。このカチオンラジカルは安定とは限らず、ハロメタン等では自己分解して新たな反応活性種を生成することが予想される。また、イオン化直後のカチオンラジカルは熱的に安定な状態ではないため、熱化した(熱平衡状態に達した)カチオンラジカルとは異なる反応性が予想される。これらの時間発展を直接観測するとともに、各種の補足剤との反応から、反応ダイナミクスを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 極短パルス電子ビーム発生 of 理論的研究

図1(上)に、TRANSPORTで計算したアクロマティック条件を満たす時の四極電磁石の条件とGPTで計算した最適な圧縮条件時の四極電磁石の条件の比較を示す。TRANSPORTとGPTの計算結果はよく一致した。Q5-Q8は、本研究で用いているアクロマティックアークの磁気パルス圧縮器中の四極電磁石である。TRANSPORTの計算では、アクロマティック条件下(転送行列 $R_{16} = R_{26} = 0$)では、解析的にも得られるパルス圧縮に関する係数 $R_{56} = -62.6 \text{ mm}$ と一致した。GPTの計算ではQ5,8の磁場勾配が一定の条件で、Q6,7の磁場勾配をパルス幅が最小となるようにGPTの組み込みのソルバーを用いて最適化した。このような数値計算により、アクロマティック条件を満たす場合にパルス幅が最小になることを明らかにした。

図1(下)に、GPTを用いて計算した圧縮後の電子ビームの軸方向位相空間分布を示す。パルス幅は6.5 fsであるが、位相空間分布が三次関数のような形状になっていることがわかる。これは、エネルギー分散の三乗に比例する三次効果の影響であると考えられる。すなわち、アト秒電子ビームの発生を行うためには、三次効果を低減する必要がある。今後は、三次効果を低減するためには、磁気パルス圧縮器に八極電磁石を導入し三次効果の補正を行うか、磁気パルス圧縮器の中央にスリットを導入し、機械的にエネルギー偏差の大きい電子を取り除く方法が考えられる。また、上記以外にも、径方向ビームサイズおよび径方向エミッタンスも圧縮後のパルス幅に影響があることが分かったため、カソードに入射するUVパルスの形状や径方向のサイズ・パルス幅の最適化や、フォトカソードRF電子銃の構造の最適化など、エミッタンスを低減することにより、アト秒電子ビームの発生に展開する。

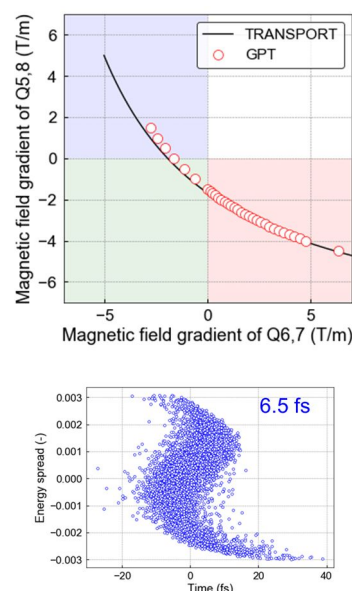


図1 TRANSPORTとGPT計算による四極電磁石についての最適圧縮条件の比較(上) 圧縮時の軸方向位相空間分布(下)

(2) 二帯域同時マイケルソン干渉計型バンチ長測定装置を用いた極短パルス電子ビームの測定方法の確立

図2(左)に、二帯域同時マイケルソン干渉計型バンチ長測定装置で得られた、感度補正された実験的なバンチ形状因子と理論的な曲線を示す。各検出器系の有効な信号を与える周波数領域(塗りつぶし)ではバンチ形状因子と実験で得た周波数スペクトルはよく一致した。他方、有効な信号を与える周波数領域外では一致しなかった。MCT系について、高周波領域に対する実験と光学系の感度補正を用いた平均二条

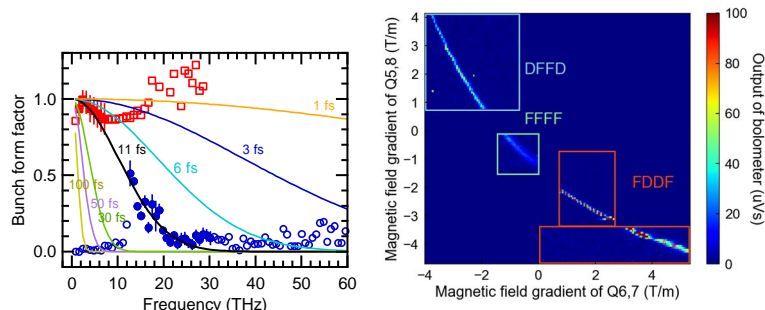


図2 感度補正された実験的なバンチ形状因子と理論的な曲線。各プロットは、バンチ長11 fsのポロメータ系(/)とMCT系(/)である(左)。ポロメータ出力(放射強度)の圧縮条件依存性(右)。

誤差の解析から、30.6 THz 以上の周波数では CTR の強度が弱いため検出できておらず、有効な信号が得られていないため、この領域はノイズ成分である。この測定結果では、1.5 ~ 7 THz までと 12.4 ~ 30.6 THz の実験的なパンチ形状因子を求めることができた。また、測定帯域の解析から、3 fs 程度までは十分測定が可能であることを明らかにした。CTR の光子数が現状と同程度であれば、1 fs の電子ビームも測定可能と考えられる。

図 2 (右) に、ポロメータ出力 (放射強度) の圧縮条件依存性を示す。アクロマティック条件を満たさない場合に圧縮条件があるかを実験的に検討するために、四極電磁石 (Q6,7 と Q5,8) の磁場勾配を変化させながら、本測定系により CTR の強度を取得した。アクロマティック条件から外れる場合には、パルス幅が長くなり、CTR の強度が低下した。この結果は GPT で計算したパルス幅が極小値を取った条件とも良く一致しており、図 1 (上) の理論的な計算と実験を十分に一致させる結果であると考えられる。

(3) 光伝導アンテナを用いた電子ビームの時間領域測定

図 3 に、CTR 測定における、PCA 設置位置 x によるテラヘルツ電場波形の違いを示す。PCA 駆動用フェムト秒レーザーの波長とパルスエネルギーは、それぞれ、800 nm、280 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ であった。それぞれ 5 回の光学遅延の掃引の平均値を示す。光軸中心 ($x = 0$ mm) では振幅が小さく、中心から離れると ($x = -6, +6$ mm) では振幅が大きくなることが分かった。さらに、位置により波形の極性も異なることが分かった。PCA はテラヘルツ電場の波形を計測できるため、幾何的配置による測定電場方向の反転により、波形の極性が反転したと考えられる。つまり、CTR はラジアル偏光特性があるため、電子の片側と反対側では電場方向が逆であり、このような反転が観測されたと考えられる。

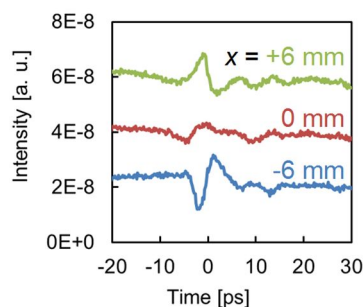


図 3 PCA の設置位置によるテラヘルツ電場波形の違い

(4) イオン化後の溶媒中の過剰電子ダイナミクス

図 4 は 10 mM ビフェニル-直鎖アルカン溶液 (n -hexane, n -octane, n -dodecane) のフェムト秒パルスラジオリシスによる 420 nm における過渡吸収の時間変化である。0~20 ps にかけて溶媒に依存しない時間分解能でビフェニルラジカルアニオンの生成と 20~200 ps にかけて溶媒によって異なる挙動が観測された。遅い時間領域でのビフェニルラジカルアニオンの生成速度は、鎖長が長くなるに従って低下しており、報告されている易動度から計算される拡散律速反応によるものと理解できる。直鎖アルカンは、鎖長が長くなるにつれて粘度が大きくなり、易動度は小さくなる。一方、0~20 ps の速い生成は、装置関数での立ち上がりだけが観測され、溶媒による差は見ることができないが、モンテカルロシミュレーションによる反応速度の見積もりからは概ね 10 倍程度の反応速度であることが示唆された。観測された時間領域の異なる 2 段階的なビフェニルラジカルアニオンの生成挙動は、直鎖ドデカンだけでなく、直鎖オクタン、直鎖ヘキサンでも同様に見られた。従って、過剰電子の反応ダイナミクスには拡散律速より速い過程の存在が無視できないことがわかった。

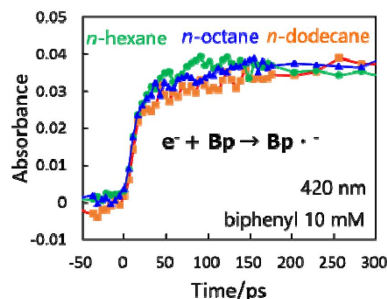


図 4 フェムト秒パルスラジオリシスによる直鎖アルカンの過渡吸収の時間変化

(5) イオン化直後からの反応中間体の研究

四塩化炭素のフェムト秒パルスラジオリシス (図 5) およびナノ秒パルスラジオリシスにより、340 nm において観測される過渡種が 480 nm において観測される過渡種の前駆体であることがわかった。また、340 nm の過渡種は 480 nm の過渡種とは関係のない生成ダイナミクスをもち、反応性として、水素引き抜き反応を行うこと等からトリクロロメチルラジカルまたはトリクロロメチルラジカルカチオンであることが示唆された。これは、四塩化炭素の光イオン化による報告の 340 nm で観測される過渡種が 500 ps 程度で消失する点と大きくことなり、量子ビーム誘起反応では主となる反応中間体に違いがあり、従って、反応生成物も異なることを示している。

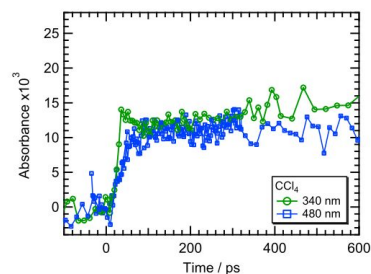


図 5 フェムト秒パルスラジオリシスによる四塩化炭素の過渡吸収の時間変化

(6) 研究全体のおまとめ

本研究全体において、極短パルス電子ビームの発生・測定方法の確立では、理論的な数値計算を行った。また、二帯域同時マイケルソン干渉計型パンチ長測定装置の測定帯域の評価で 3 fs 程度までは十分測定が可能であることを明らかにし、CTR の光子数が現状と同程度であ

ば 1 fs の電子ビームも測定可能と考えられる。光伝導アンテナ等による時間領域測定の時間分解能はサブピコ秒であるが、今後の装置開発とともに時間分解能向上が期待でき、アト秒電子ビーム発生とその評価を行う測定に関する進展があった。また、量子ビーム誘起反応の熱化・緩和過程を直鎖アルカンおよびイソオクタンについて解明した。フェムト秒パルスラジオリシス法による測定と解析の結果、無極性溶媒では、従来の電子拡散定数で記述される運動だけでなく、偽自由電子状態の非常に速い電子輸送機構の寄与が無視できない事を明らかにした。四塩化炭素中における量子ビーム誘起化学反応初期過程の解明では、ナノ秒パルスラジオリシスおよびフェムト秒パルスラジオリシスを利用し、両手法の測定波長 340 nm および 480 nm の結果を比較した結果、光励起とは異なる反応過程があることを明らかにした。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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yang Jinfeng, Gen Kazuki, Naruse Nobuyasu, Sakakihara Shouichi, Yoshida Yoichi	4. 巻 4
2. 論文標題 A Compact Ultrafast Electron Diffractometer with Relativistic Femtosecond Electron Pulses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quantum Beam Science	6. 最初と最後の頁 4~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/qubs4010004	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 Yang Jinfeng, Yoshida Yoichi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Relativistic Ultrafast Electron Microscopy: Single-Shot Diffraction Imaging with Femtosecond Electron Pulses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Condensed Matter Physics	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2019/9739241	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 野澤一太, 菅晃一, 神戸正雄, 楊金峰, 近藤孝文, 吉田陽一	4. 巻 16(1)
2. 論文標題 二帯域同時マイケルソン干渉計型バンチ長測定装置の開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 加速器	6. 最初と最後の頁 2-14
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 楊金峰, 吉田陽一	4. 巻 144
2. 論文標題 時空を細かく観る100fs-1nm分解能MeV級電子顕微鏡の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 放射線と産業	6. 最初と最後の頁 29-32
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 Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida, Hidehiro Yasuda	4. 巻 67
2. 論文標題 Ultrafast electron microscopy with relativistic femtosecond electron pulses	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 291-295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfy032	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 近藤孝文	4. 巻 66
2. 論文標題 凝縮系におけるジェミネートイオン再結合	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RADIOISOTOPES	6. 最初と最後の頁 451-458
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3769/radioisotopes.66.451	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 楊金峰, 吉田陽一	4. 巻 66
2. 論文標題 高速バルスラジオリシスと短寿命中間活性種の検出	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RADIOISOTOPES	6. 最初と最後の頁 395-406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3769/radioisotopes.66.395	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 柴田裕実	4. 巻 66
2. 論文標題 宇宙と放射線化学	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 RADIOISOTOPES	6. 最初と最後の頁 617-623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3769/radioisotopes.66.617	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 -

〔学会発表〕 計64件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 18件）

1. 発表者名 神戸正雄, 近藤孝文, 荒木一希, 菅晃一, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 Re-investigation of radiation induced reaction of carbon tetrachloride
3. 学会等名 the 14th Tihany Symposium on Radiation Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Femtosecond pulse radioysis study on primary process of radiation chemistry of liquid alkane
3. 学会等名 the 14th Tihany Symposium on Radiation Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊金峰、吉田陽一、保田英洋
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電子顕微鏡の開発
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 第75回学術講演会
4. 発表年 2019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 コヒーレント遷移放射により発生したテラヘルツ電場の解析
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神戸正雄, 近藤孝文, 荒木一希, 菅晃一 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 四塩化炭素の放射線誘起反応初期過程の解明
3. 学会等名 第56回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅晃一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 コヒーレント遷移放射によるテラヘルツ電場の時間・空間分布の測定
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 菅晃一, 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の研究
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 楊金峰, 玄一貴, 菅晃一, 吉田陽一
2. 発表標題 フェムト秒電子線パルスを用いた超高速電子線回折と電子顕微鏡の開発
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 菅見一
2. 発表標題 電子ビームを用いたテラヘルツ波の研究
3. 学会等名 光科学の最新トレンド2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masao Gohdo, Takafumi Kondoh, Kazuki Araki, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Femtosecond pulse radioysis study re-investigation of radiation chemistry of carbon tetrachloride-
3. 学会等名 ICRR2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Kan, Masao Gohdo, Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Spatio-temporal Analysis Of Terahertz Electric Field Of Coherent Transition Radiation
3. 学会等名 IRMMW-THz 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊金峰, 玄一貴, 菅見一, 吉田陽一, 保田英洋
2. 発表標題 フェムト秒時間分解電子顕微鏡開発の現状
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玄一貴, 楊金峰, 菅晃一, 吉田陽一
2. 発表標題 低エミッタンスのフェムト秒電子線パルスを用いた超高速電子回折の研究
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅晃一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 光伝導アンテナにより測定したテラヘルツ電場分布の解析
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田陽一
2. 発表標題 パルスラジオリシス
3. 学会等名 第 62 回 放射線化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅晃一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 電子ビームのテラヘルツ電場分布測定
3. 学会等名 第 62 回 放射線化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅見一
2. 発表標題 電子ビームの光伝導アンテナと電気光学結晶による測定
3. 学会等名 第16回 高輝度・高周波電子銃研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅見一
2. 発表標題 電子ビームが纏うテラヘルツ電場の測定
3. 学会等名 2019年度ビーム物理研究会、若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jinfeng Yang, Kazuki Gen, Koichi Kan, Masao Ghodo, and Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Ultrafast electron microscopy with relativistic femtosecond electron pulses
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium, The 18th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichi Kan, Jinfeng Yang, Masao Gohdo, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 THz Measurement of Femtosecond Electron Beam
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium, The 18th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Gen, Jinfeng Yang, Masao Gohdo, Koichi Kan, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Femtosecond relativistic electron diffraction
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium, The 18th SANKEN Nanotechnology International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅晃一, 楊金峰, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 自由空間中の電子ビームのテラヘルツ電場計測
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020年)
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 電気光学結晶を用いた電子ビーム測定
3. 学会等名 日本原子力学会2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 電子顕微鏡用1.4セルRF電子銃の製作
3. 学会等名 第15回高輝度・高周波電子銃研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅見一, 楊金峰, 神戸正雄, 近藤孝文, 吉田陽一
2. 発表標題 熱型赤外光源とコヒーレント遷移放射の比較
3. 学会等名 第15回高輝度・高周波電子銃研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神戸正雄, 近藤孝文, 菅見一, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 ハロメタンの放射線誘起反応初期過程
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 近藤孝文, 神戸正雄, 法澤公寛, 菅見一, 楊金峰, 田川精一, 吉田陽一
2. 発表標題 ピフェニル-ドデカン溶液のフェムト秒パルスラジオリシスとモンテカルロシミュレーションを用いたドデカンのイオン化G値の推定
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 楊金峰, 菅見一, 高富俊和, 樊寛軍, 照沼信浩, 浦川順治, 吉田陽一
2. 発表標題 超高速電子顕微鏡用のRF電子銃の開発
3. 学会等名 第15回日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永石隆二、桑野涼、近藤隆文、神戸正雄、吉田陽一
2. 発表標題 海水由来のハロゲン化物イオンによる・OHラジカル捕捉の塩濃度依存性の評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2018年秋の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Activities of Research and Application on adiation Chemistry in Japan
3. 学会等名 THE 7TH ASIA PACIFIC SYMPOSIUM ON RADIATION CHEMISTRY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jinfeng Yang, Hiromi Shibata, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Ultrafast electron microscopy for observation of chemical reactions
3. 学会等名 THE 7TH ASIA PACIFIC SYMPOSIUM ON RADIATION CHEMISTRY (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Attosecond/Femtosecond Pulse Radiolysis
3. 学会等名 The 4th Osaka Univ. - KAERI Joint Workshop on Radiation Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊金峰, 吉田陽一, 谷村克也
2. 発表標題 フェムト秒時間分解電子線回折と構造相転移の研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年)(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅晃一, 楊金峰, 神戸正雄, 近藤孝文, 吉田陽一
2. 発表標題 光伝導アンテナによるコヒーレント遷移放射の時間・空間分解計測
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神戸正雄, 近藤孝文, 荒木一希, 菅晃一, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 ハロメタン中の放射線化学反応の再検討
3. 学会等名 日本原子力学会2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 楊金峰, 吉田陽一, 高富俊和, 福田将文, 浦川順治
2. 発表標題 超高速電子顕微鏡用1.4セル高周波電子銃の製作
3. 学会等名 日本原子力学会2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅見一, 神戸正雄, 近藤孝文, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 コヒーレント遷移放射の位置・時間分解計測
3. 学会等名 日本原子力学会2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Yoshida, Takafumi Kondoh, Masao Gohdo, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Seiichi Tagawa
2. 発表標題 Recent progress on primary processes of radiation chemistry studied by femtosecond pulse radiolysis
3. 学会等名 30th Miller Conference on Radiation Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takafumi Kondoh, Masao Gohdo, Kimihiro Norizawa, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Seiichi Tagawa, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 The study of the excess electron dynamics in alkanes using a femtosecond pulse radiolysis
3. 学会等名 30th Miller Conference on Radiation Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masao Gohdo, Takafumi Kondoh, Tomohiro Toigawa, Kiminori Norizawa, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Seiichi Tagawa, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Pre-solvated electrons in alcohols and their precursors: formation kinetics and reactions with scavengers
3. 学会等名 30th Miller Conference on Radiation Chemistry (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jinfeng Yang, Yoichi Yoshida, Katsumi Tnimura
2. 発表標題 A Relativistic-energy Femtosecond-pulse Electron Microscopy
3. 学会等名 11th Asia-Pacific Microscopy Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楊金峰, 吉田陽一, 谷村克己
2. 発表標題 フェムト秒電子線パルスによる超高速電子顕微鏡の開発
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第73回学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅川稜, 楊金峰, 吉田陽一, 谷村克己
2. 発表標題 フェムト秒電子線パルスによる超高速電子線回折装置の開発
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第73回学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤孝文, 神戸正雄, 法澤公寛, 菅晃一, 楊金峰, 田川精一, 吉田陽一
2. 発表標題 フェムト秒パルスラジオリシスを用いたアルカン中の過剰電子ダイナミクスの研究
3. 学会等名 第54回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野澤一太, 菅晃一, 楊金峰, 近藤孝文, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 超短パルス電子ビーム発生に向けたパンチ圧縮条件の検討
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 楊金峰, 浅川稜, 菅晃一, 近藤孝文, 神戸正雄, 吉田陽一, 谷村克己
2. 発表標題 フォトカソード高周波電子銃を用いた超高速電子顕微鏡の開発
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 近藤孝文, 神戸正雄, 大島明博, 菅晃一, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 電子加速器を用いた薄膜パルスラジオリシスの検討
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 菅晃一, 楊金峰, 近藤孝文, 神戸正雄, 野澤一太, 吉田陽一
2. 発表標題 中空誘電体管における多モードテラヘルツ波発生と電子ビーム加速の理論的研究
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 古川和弥, 菅田義英, 藤乗幸子, 磯山悟朗, 岡田宥平, 久保久美子, 徳地明, 楊金峰, 近藤孝文, 菅晃一, 神戸 正雄, 吉田 陽一
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14回日本加速器学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Study of primary process of radiation chemistry by femtosecond pulse radiolysis
3. 学会等名 4th Asian Congress of Radiation Research (ACRR2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楊金峰, 吉田陽一, 谷村克己, 保田英洋
2. 発表標題 RF電子銃を用いたMeV電子顕微鏡の開発
3. 学会等名 日本原子力学会 2017年秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤孝文, 神戸正雄, 菅晃一, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 飽和炭化水素および高分子溶液のフェムト秒パルスラジオリシス
3. 学会等名 日本原子力学会 2017年秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神戸正雄, 近藤孝文, 菅晃一, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 溶液中の放射線誘起化学反応機構解明 ジクロロメタン中の放射線誘起化学反応
3. 学会等名 日本原子力学会 2017年秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅川稜, 楊金峰, 近藤孝文, 菅晃一, 神戸正雄, 谷村克己, 吉田陽一
2. 発表標題 フェムト秒電子線パルスによる超高速電子線回折装置の開発
3. 学会等名 日本原子力学会 2017年秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤孝文, 神戸正雄, 法澤公寛, 菅晃一, 楊金峰, 田川精一, 吉田陽一
2. 発表標題 フェムト秒パルスラジオリシスによるアルカン中の過剰電子ダイナミクス
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野澤一太, 菅晃一, 楊金峰, 近藤孝文, 神戸正雄, 吉田陽一
2. 発表標題 超短パルス電子ビーム発生・計測の現状
3. 学会等名 第60回 放射線化学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 近藤孝文, 神戸正雄, 法澤公寛, 菅晃一, 楊金峰, 田川精一, 吉田陽一
2. 発表標題 フェムト秒パルスラジオリシスによるイオン化後のアルカン中の過剰電子ダイナミクス
3. 学会等名 第60回 放射線化学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神戸正雄, 近藤孝文, 菅晃一, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 溶液中の放射線誘起化学反応機構解明
3. 学会等名 第60回 放射線化学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jinfeng YANG, Yoichi YOSHIDA, Hidehiro YASUDA
2. 発表標題 Ultrafast Electron Microscopy using Femtosecond Relativistic-energy Electron Pulses
3. 学会等名 The 20th SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takafumi Kondoh, Masao Gohdo, Kimihiro Norizawa, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Seiichi Tagawa, Yoichi Yoshida
2. 発表標題 Ultrafast electron transport in n-alkanes studied by a femtosecond pulse radiolysis
3. 学会等名 The 21st SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takafumi Kondoh, Masao Gohdo, Koichi Kan, Jinfeng Yang, Yoshida Yoshida
2. 発表標題 Decomposition process of alkanes studied by femtosecond pulse radioysis
3. 学会等名 Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry (TSRP-2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神戸正雄, 近藤孝文, 菅晃一, 楊金峰, 吉田陽一
2. 発表標題 ジクロロメタン中の化学反応解析のための反応初期中間体の研究
3. 学会等名 日本原子力学会 2018年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤孝文, 神戸正雄, 菅晃一, 楊金峰, 田川精一, 吉田陽一
2. 発表標題 フェムト秒パルスラジオリシスを用いた電子ビーム誘起現象の研究
3. 学会等名 日本原子力学会 2018年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤孝文, 神戸正雄, 法澤公寛, 菅晃一, 楊金峰, 田川精一, 吉田陽一
2. 発表標題 フェムト秒パルスラジオリシスによるイオン化後のアルカン中の電子輸送
3. 学会等名 日本化学会 2018年春の年会 会議の会期(西暦): 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Jinfeng Yang, Koichi Kan, Masao Gohdo, Yoichi Yoshida	4. 発行年 2020年
2. 出版社 IntechOpen	5. 総ページ数 20
3. 書名 "Femtosecond pulse radiolysis" in "Novel Imaging and Spectroscopy" edited by Jinfeng Yang,	

1. 著者名 Masanobu Wakasa, Tomoaki Yago, Atom Hamasaki, Masao Gohdo	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 91
3. 書名 "Reactions in the magnetics field" in Encyclopedia of physical organic chemistry	

〔産業財産権〕

〔その他〕

吉田研究室：ナノ極限ファブリケーション研究分野 - 大阪大学産業科学研究所 https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/yoshi lab.htm
--

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	菅 晃一 (Kan Koichi) (60553302)	大阪大学・産業科学研究所・助教 (14401)	

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	近藤 孝文 (Kondoh Takafumi) (50336765)	大阪大学・産業科学研究所・助教 (14401)	削除：2019年1月10日
研究 協力者	柴田 裕実 (Shibata Hiromi)	大阪大学・産業科学研究所・特任研究員(客員 准教授) (14401)	
連携 研究者	神戸 正雄 (Gohdo Masao) (60705094)	大阪大学・産業科学研究所・助教 (14401)	