

< 1 > 超高密度フォトン利用実証レーザーシステムの開発

< 1 - 2 > 超高密度フォトン反応制御技術の開発

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 青島紳一郎

応用のための計測・制御技術の開発

小テーマ： 相互作用に関するシミュレーションの研究

研究従事者：大阪市立大学大学院工学研究科教授 細田 誠、

光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 青島紳一郎、藤本正俊

## ( 1 ) 研究の概要、新規性及び目標

### 研究の概要

高強度フェムト秒レーザーパルス光と物質との相互作用のダイナミクスに関してシミュレーションの研究をおこなった。特に、荷電粒子加速やこれによって生ずる超短電磁パルス発生に関して、種々の光励起法について探った。さらに、効率的なフェムト秒パルス応用を行うために、相互作用を増大させる方法について検討した。

### 研究の独自性・新規性

高強度フェムト秒レーザーパルスと物質との相互作用のシミュレーションは世の中に多く見られるが、現実のテーブルトップレーザーの特性を踏まえて、フェムト秒パルスをいろいろな条件で衝突や交差させ、その合波した場における電界をサブフェムト秒の時間ステップ毎で行ったものは例がない。また、得られた結果について、超小型サイクロトロンやzepto秒域の電磁放射パルスの可能性を示唆するなどの有用な知見を得た。よって、本研究は独自性が高く、得られた知見は新規性がある。

### 研究の目標

フェーズ Ⅰ では、高強度フェムト秒レーザーパルス光と物質との相互作用のダイナミクスに関してシミュレーションの研究をおこなう。特に、荷電粒子加速やこれによって生ずる超短電磁パルス発生に関して、種々の光励起法について探る。最終的には、励起パルス光の時間波形や波面の変化に伴う相互作用について解明し、この応用を探索することを目指す。フェーズ Ⅱ では、効率的なフェムト秒パルス応用をおこなうために、高強度フェムト秒レーザーパルス光と物質との相互作用のダイナミクスに関するシミュレーションの研究をおこない、相互作用を増大させる方法について検討する。

平成 14 年度は、基本的な高強度光電場に対する考察をおこない、実験条件等に関して有益な情報を得ることをおこなう。

平成 15 年度は、平成 14 年度の共同研究において得られた知見である 2 つの円偏光・高強度フェムト秒レーザーパルスのパルス衝突時における複雑な合成電場の振る舞いを基に、その環境下での荷電粒子の超短時間相互作用ダイナミクスのシミュレーションをおこない、高強度フェムト秒レーザーの様々なダブルパルス照射条件下で生起される相互作用を増大させる方法について検討をおこなう。

具体的には衝突断面に設置した物質に対し、左右回転の円偏光を 90 度や 180 度等で衝突させる場合等について検討を行う。円偏光については、右回りと左回りの円偏光、右どうしの円偏光などの種々の組み合わせがあり、衝突角を変化させる等も考えられる。それらを検討することにより直線偏光のみのシングルパルスによる相互作用と比較してバラエティーに富む相互作用が期待される。

また、これらの光パルス衝突においては、通常のシングルパルス相互作用においては発生しないような光パルス進行方向への成分を持った合成電場が発生するため、荷電粒子のポンドロモータイプ力以外に、粒子加速現象やその粒子エネルギーの増加が期待される。

平成 16 年度は、平成 15 年度の共同研究において得られた知見である 2 つの円偏光・高強度フェムト秒レーザーパルスの正面衝突時における複雑な合成電場の振る舞いを基に、その環境下での荷電粒子の超短時間相互作用ダイナミクスのシミュレーションを引き続きおこない、高強度フェムト

秒レーザーの様々なダブルパルス照射条件下で生起される相互作用を増大させる方法について検討をおこなう。

具体的には衝突経路の中央に設置した物質に対し、左右回転の円偏光を正面衝突させる場合等について検討を行う。円偏光については、右回りと左回りの円偏光、右どうしの円偏光などの種々の組み合わせや、種々の衝突角による変化等も考えられる。これらの光パルス衝突においては、通常のシングルパルス相互作用においては発生しないような特異な合成電場が発生するため、特異なポンドロモーティブ力により、さらなる粒子加速と粒子エネルギーの増加が期待される。

その他、特異な偏光状態を有した光による粒子加速についても超短時間分解でそのダイナミクスを追うシミュレーションを開始する。具体的には各種のベクタービーム、すなわち、radial polarization, azimuthal polarization, Laguerre-Hermitian Gaussian 等の偏光状態を持った光パルスによる相互作用ダイナミクスおよびそれら光パルス衝突時における特異な光電磁場発生等についての検討を開始する。なお、これらベクタービームにおける相互作用の超短時間分解ダイナミクスに関するシミュレーションや光衝突に関する研究は現在も未発達な領域である。

平成 17 年度は、平成 16 年度の共同研究において得られた 2 つの円偏光・高強度フェムト秒レーザーパルスの正面衝突時における複雑な合成電場下における相対論的電子加速度変化による超短電磁波放射に関する知見を基に、その環境下での超短時間相互作用ダイナミクスおよび放射特性のシミュレーションを引き続きおこない、高強度フェムト秒レーザーの様々なダブルパルス照射条件下で生起される電磁波放射特性に関し、それをさらに超短パルス化する方法や放射強度を増大させる方法について検討をおこなう。

具体的には衝突経路の中央付近に設置した電子に対し、左右回転の円偏光を正面衝突させる場合にその相対論的軌道について検討をおこない、初期にどのように電子を配置するのが放射特性の改善に効果的であるのかを調べる。

本テーマは、大阪市立大学大学院工学研究科の細田誠教授との共同研究で実施する。

## (2) 研究の進め方及び進捗状況

フェーズ 1 では、高強度フェムト秒レーザーパルス光と物質との相互作用のダイナミクスに関してシミュレーションの研究をおこなった。特に、荷電粒子加速やこれによって生ずる超短電磁パルス発生に関して、種々の光励起法について探った。フェーズ 2 では、効率的なフェムト秒パルス応用をおこなうために、高強度フェムト秒レーザーパルス光と物質との相互作用のダイナミクスに関するシミュレーションの研究を行い、相互作用を増大させる方法について検討した。

平成 14 年度は、基本的な高強度光電場に対する考察をおこない、実験条件等に関して有益な情報を得た。特に、2 つの円偏光パルスの衝突時においては、特異な電磁場が形成されることがシミュレーションにより明らかとなった。この特異な電磁場を用いると、電子の加速に関して、有用な結果得られると期待された。

これにより、フェーズ 3 においても、引き続き、高強度フェムト秒レーザーパルス光と物質との相互作用のダイナミクスに関するシミュレーションの研究をおこなうこととなった。

平成 15 年度は、平成 14 年度の共同研究において得られた知見である 2 つの円偏光・高強度フェムト秒レーザーパルスのパルス衝突時における複雑な合成電場の振る舞いを基に、その環境下での荷電粒子の超短時間相互作用ダイナミクスのシミュレーションをおこない、高強度フェムト秒レーザーの様々なダブルパルス照射条件下で生起される相互作用を増大させる方法について検討した。

具体的には衝突断面に設置した物質に対し、左右回転の円偏光を衝突させる場合について検討をおこなった。円偏光については、右回りと左回りの円偏光、右どうしの円偏光などの種々の組み合わせがあるので、これらの組み合わせについて検討した。

平成 16 年度は、平成 15 年度の共同研究において得られた知見である 2 つの円偏光・高強度フェムト秒レーザーパルスの正面衝突時における複雑な合成電場の振る舞いを基に、その環境下での荷電粒子の超短時間相互作用ダイナミクスのシミュレーションを引き続きおこない、高強度フェムト秒レーザーの様々なダブルパルス照射条件下で生起される相互作用を増大させる方法について検討した。

具体的には衝突経路の中央に設置した物質に対し、2 つの円偏光を正面衝突させる場合について検討した。円偏光パルス衝突において生成される、特異な合成電場や、特異なポンドロモーティブ

力により、さらなる粒子加速と粒子エネルギーの増加を確認した。

平成 17 年度は、平成 16 年度の共同研究において得られた 2 つの円偏光・高強度フェムト秒レーザーパルスの正面衝突時における複雑な合成電場下における相対論的電子加速度変化による超短電磁波放射に関する知見を基に、その環境下での超短時間相互作用ダイナミクスおよび放射特性のシミュレーションを引き続き行い、高強度フェムト秒レーザーの様々なダブルパルス照射条件下で生じられる電磁波放射特性に関し、それをさらに超短パルス化する方法や放射強度を増大させる方法について検討した。

具体的には衝突経路の中央付近に設置した電子に対し、左右回転の円偏光を正面衝突させる場合にその相対論的軌道について検討を行い、初期にどのように電子を配置するのが放射特性の改善に効果的であるのかを調べた。

以上より、本テーマの目標達成度は 110 % である。

なお、本テーマは、大阪市立大学大学院工学研究科の細田誠教授との共同研究で実施した。

### (3) 主な成果

#### 2 つの円偏光・高強度フェムト秒パルスの衝突時に形成される複雑な合成電場の検討

平成 14 年度は、2 つの高強度フェムト秒レーザーパルスのパルス衝突時における荷電粒子の超短時間相互作用ダイナミクスのシミュレーションを行い、高強度フェムト秒レーザーパルス照射時に生じられるレーザーブレイクダウンプラズマ内の荷電粒子の加速エネルギーを増大させる方法について検討した。荷電粒子としては電子を想定し、光パルスとしては左右回転の円偏光を 90 度や 180 度等で衝突させる場合等について検討をおこなった。この場合、現象は非線形であるため、シングルパルスとは大きく異なる現象が起きることが予想される。円偏光について検討することにより直線偏光と比較してパラエティーに富む相互作用が期待される。

図 1 は二つの右回り円偏光どうしが 90 度の角度をもって衝突した際の合成電場の一例を示したものである。左図は真上から見た説明図である。円偏光の電場の他に新たに 45 度の角度を持った新たな電場面ができ、衝突している光パルスの進行と共にその 45 度面内を新たな光電場が回転していく事が確かめられた。

図 2 はこのような状況下において、電子の散乱ダイナミクスを 0.1 fs おきの時間ステップでシミュレーションした 1 コマを示す。図において、新たに発生した 45 度回転電場による散乱が観測される。

図 3 は、右回りと左回りの円偏光が正面衝突した際の電場を示す。二つのパルスの進行に伴い、(b)と(c)の間を電場分布は時間的に繰り返しながら衝突が進行する。

以上、述べたように二つの円偏光パルスの衝突時には複雑な電場が発生し、これによって高密度光パルスと物質との相互作用においては従来に無い現象が起きる可能性がある。

#### 上記合成電場中の電子から高強度電磁放射の検討

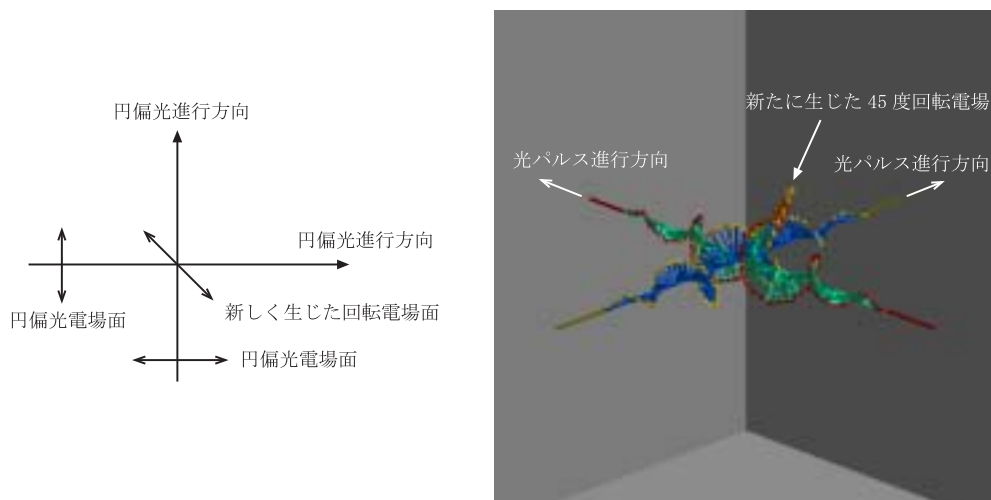


図 1 右回り円偏光どうしの 90 度衝突時の電場

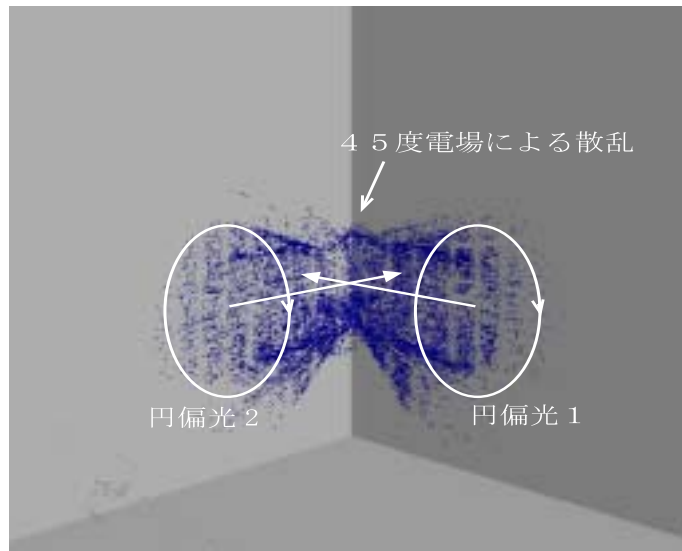


図2 図1の状況下における電子散乱（パルス尖頭出力 = 1 TW）図において、新たに発生した45度回転電場による散乱が観測される。

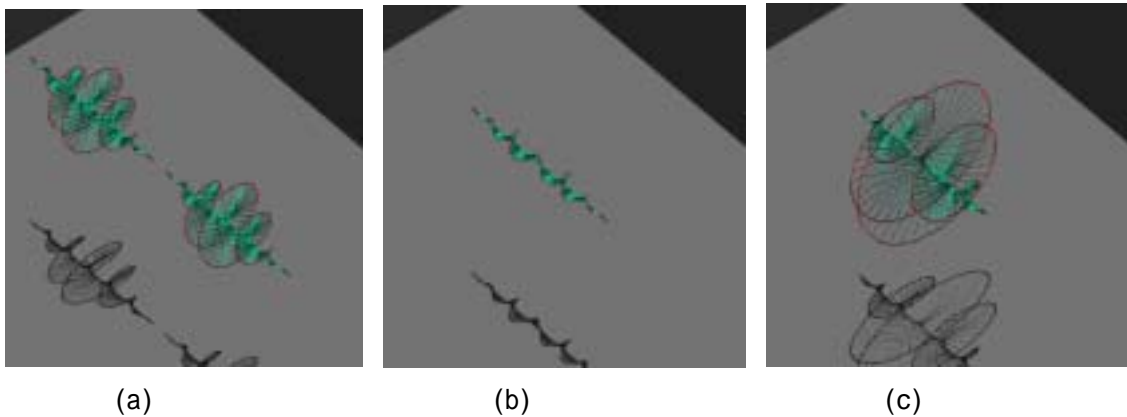


図3 右回りと左回りの円偏光が正面衝突した際の電場を示す。(a) 衝突前、(b) 衝突の際に電場どうしが打ち消し合うタイミング、(c) 衝突の際電場どうしが強め合うタイミング

平成15年度は、2つの高強度フェムト秒・円偏光レーザーパルスの正面衝突時における荷電粒子の超短時間相互作用ダイナミクスのシミュレーションをおこない、高強度フェムト秒レーザーパルス照射時に生じられる荷電粒子の加速エネルギーを増大させる方法について検討した。

図4は、右回り円偏光どうしの正面衝突時の電場を示す。

図5はこのような電磁場下における散乱電子の速度分布の一例を示す。図の縦軸は動径方向速度。横軸は光進行方向の速度。疑似カラーはその速度を持っている電子の密度を表現し、赤が高い密度。 $c$ は光速で速度の絶対値は $c$ を越えないため、点線の半円の外には電子が存在しない。半円の付近に存在する電子の速度は高速に近い。左図から右図への0.4 fsという超短時間で図にa, bの矢印で示した電子集団の速度が変わっている。左図のa集団は右図では左右に分離していく。同時にb集団は高いz方向速度を得るように速度を変えていく。両者とも相対論的速度を持った電子集団の速度を超短時間に変えているので、非常に強い加速度が瞬時に生じていることを裏付けている。

図6はその際に生じる電磁波の放射を示す。(a) 単一パルスにおける電磁放射を示し、(b)はダブルパルス衝突による放射を示す。ダブルパルスの正面衝突が起きる20 fs付近であり、シングルパルスに比べて100~1000倍強い電磁放射が観測される。放射角度は0度と180度であり、パルス到来方向の $\pm z$ 軸に沿っている。この方向は図2の結果である電子集団の急激なz方向への加速を裏付けている。

以上述べたように、二つの円偏光パルスの衝突時においては従来に無い現象、すなわち、粒子が特異な光電磁場の下で急激な加速を受けるということが判明した。

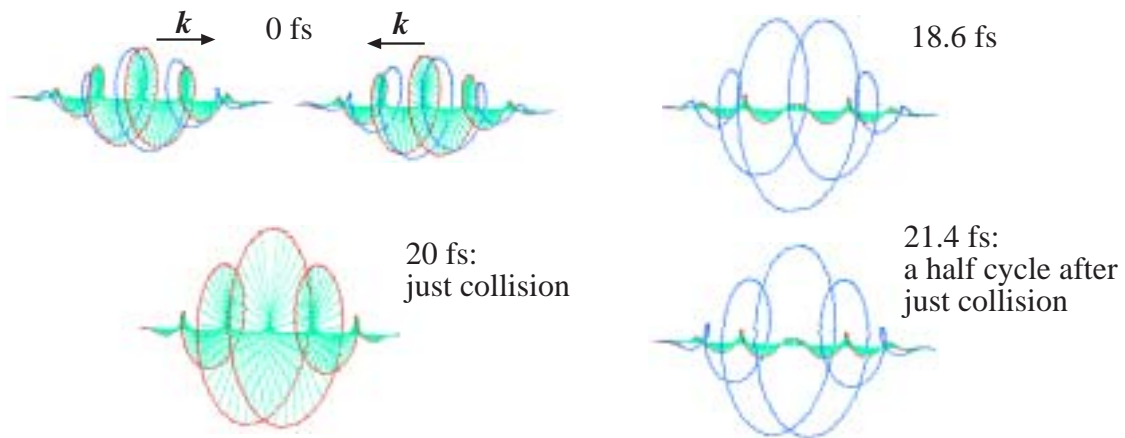


図4 右回り円偏光どうしの正面衝突時の電場  
 (緑の線は電場ベクトル。赤い線はその包絡線。青い線は磁場の包絡線を示す。  
 用いた光波長は 839nm。20 fs (完全衝突時) では磁場はゼロとなる。)

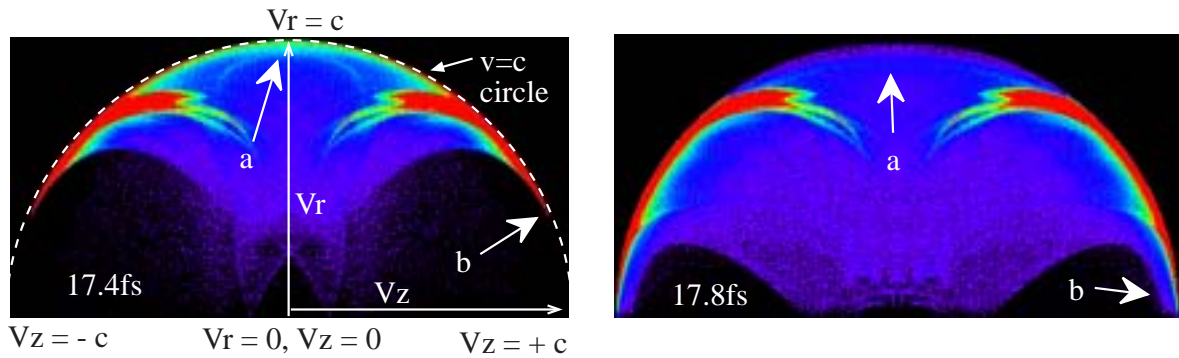
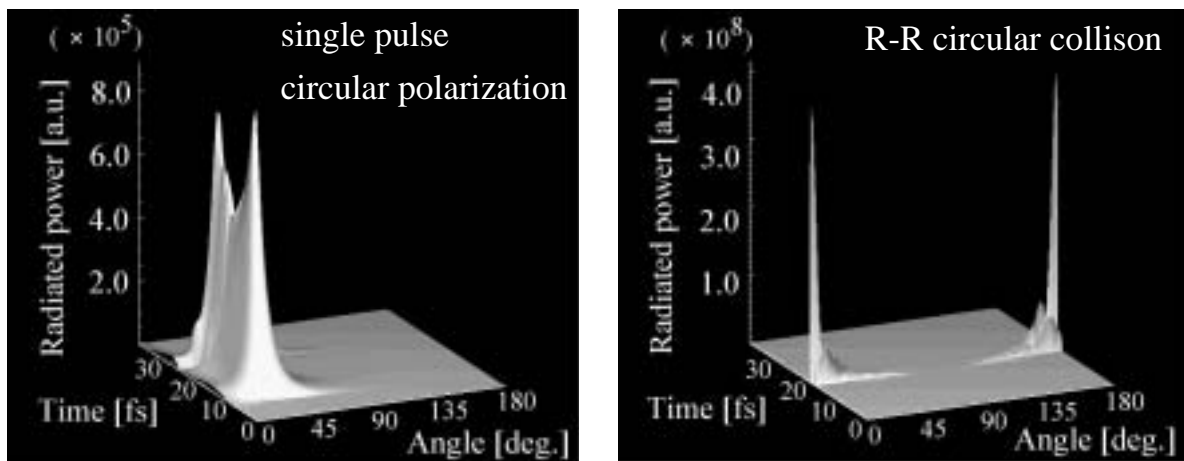


図5 図4の状況下における電子速度分布 (パルス出力=4 TW)



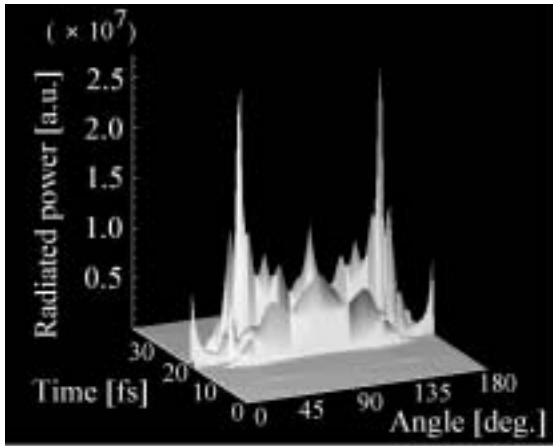
(a) 単一パルスにおける電磁輻射 (b) ダブルパルス衝突による電磁輻射

図6 電磁輻射に関するシュミレーション結果

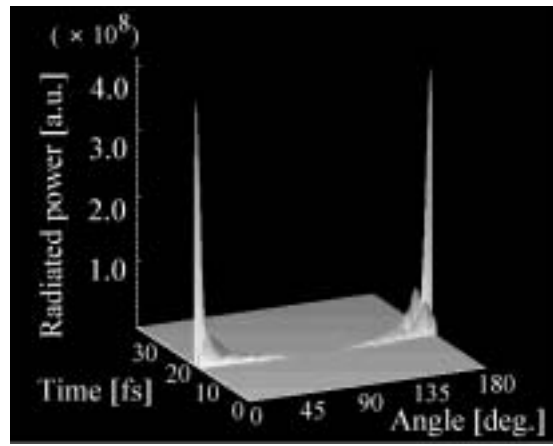
パルス幅 130 ゼプト秒の極超短パルス生成の可能性の発見

平成 16 年度は、2 つの高強度フェムト秒・円偏光レーザーパルスの正面衝突時における荷電粒





(a) R-R 衝突下における放射



(b) R-L 衝突下における放射

図7 電子からの放射対時間・角度分布

子の超短時間相互作用ダイナミクスのシミュレーションをおこない、高強度フェムト秒レーザーパルス照射時に生じられる荷電粒子の相対論的加速度が急激に変化するために生ずる電磁放射について研究した。

2つの円偏光・高強度フェムト秒レーザーパルスの正面衝突時における電子の相対論的加速のシミュレーションにおいては、これまでシングルパルスとは大きく異なる現象が起きていることが我々によって確認されている。右円偏光と左円偏光パルスどうしの正面衝突時 (R-L 衝突) や、二つの右円偏光パルスどうしの正面衝突時 (R-R 衝突) に起こる特異な光電磁場下における電子加速によって生じる電磁放射について、その時間挙動に関する検討をおこなった。その結果、衝突時に生じる特異な合成電磁場によって電子の相対論的速度が急激に変化するため、通常の単一パルスの場合に比べ非常に強く、かつ超短パルスの電磁波が放射されることが分かった。

図7はその際に生じる放射の時間・角度分布を示す。ここで、(a)はR-R衝突における、(b)はR-L衝突における放射を示し、正面衝突が起きる20 fs付近でのみ強い電磁放射が観測される。すなわち、光ダブルの衝突時に生じる特殊な光電磁場によってこれらの現象が起きている。放射角度においては、R-L衝突における特徴は90度付近(光パルス進行方向に垂直な方向)に比較的強い放射ピークがあることである。これに対し、R-L衝突における特徴は0度と180度にも放射が生じ、この方向はパルス到来方向の $+/-z$ 軸に沿っている。これは光ダブルの衝突時に生じる特殊な光電磁場下での電子集団の $z$ 方向加速度の急激な変化を示唆している。

つぎにR-L衝突における特徴的な90度放射の原因について検討した。図8は衝突面の中心付近にある電子がR-L衝突電磁場によってどのような軌跡を描くかを示したものである。

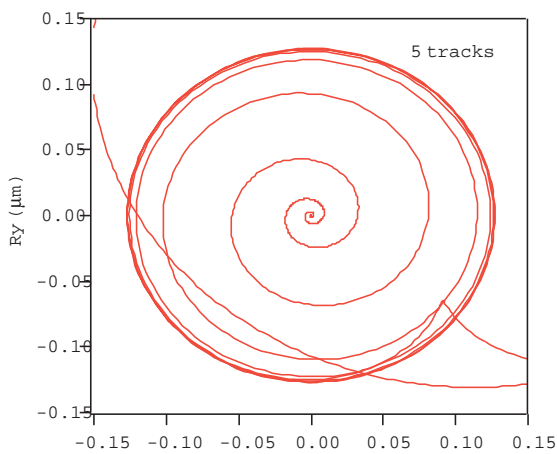


図8 R-L 衝突電磁場下における衝突面の中心付近にある電子の軌道

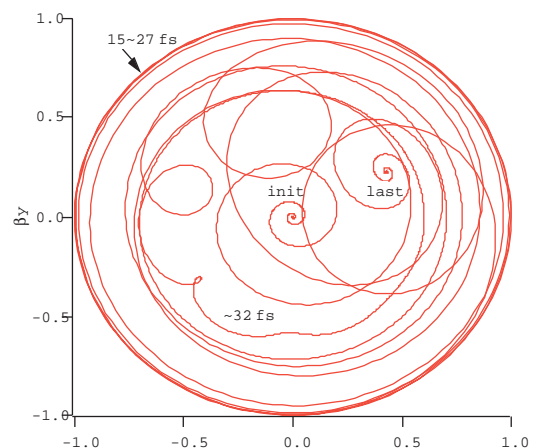


図9 R-L 衝突電磁場下における電子の速度図

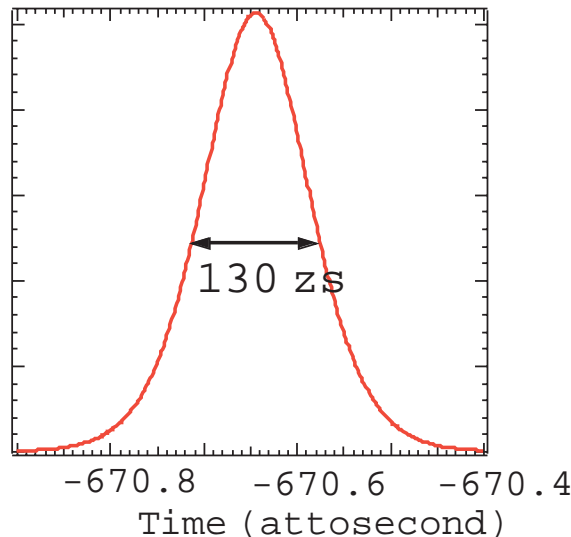


図10 電子からの放射パルス

最初、中心 ( $R_x = 0$ ,  $R_y = 0$ ) に静止していた電子は光パルス衝突が起きるに従い、特殊な電磁場による加速を受けてサイクロトロン運動を始める。R-L 光パルスの衝突が完全に起きる時間帯においては図に示したように直径  $0.2 \mu\text{m}$  程度の円軌道を 5 回周回する。その後、特殊な電磁場が消えるに従い、円軌道からはずれて光ビームの外周へと空間的なポンデロモーティブ力ではじき出される。

図9はその際の電子の速度図であり、図における  $15 \sim 27 \text{ fs}$  の時間帯が円軌道を 5 周している時間帯に相当する。図より、X 方向の速度と Y 方向の速度を表す  $v_x$ ,  $v_y$  共に 1 に近く、 $v = v/c$  であることから、ほぼ光速の速度を持って円軌道を周回している。

以上より、R-L 衝突電磁場下において衝突面の中心付近に置かれた電子は光速に近い相対論的速度で直径 0. 数ミクロンの周回軌道を運動し、シンクロトロン放射として強い電磁波を放射することが分かった。周回する面は光ビームに垂直であり、すなわち、これが R-L 衝突における 90 度の放射を構成する原因である。

図10はこのようなマイクロ・シンクロトロンから出る電磁放射パルスを示している。パルス幅 130 ゼプト秒 (zeptosecond =  $10^{-21}$  乗秒) という極超短パルスが放射されることが分かる。

以上、述べたように二つの円偏光パルスの衝突時においては従来に無い興味深い現象が起きることを明らかにできた。なお、この研究成果を特許出願した。

#### 電子集団からの電磁放射についての検討

平成 17 年度は、二つの同一円偏光、すなわち右円偏光パルスどうしの正面衝突 (R-R 衝突) 時に起こる特異な光電磁場下における電子加速によって生じる電磁放射について、その時間挙動に関する検討をおこなった。その結果、衝突時に生じる特異な合成電磁場によって層状の電子部分でその相対論的速度が急激に変化するために強い超短パルスの電磁波が放射されることが分かった。この方式はこれまでの R-L 衝突よりも多くの電子数が放射に寄与するため、より強い放射が期待できる。

図11は R-R 衝突時に生じる電磁放射を示す。図では  $101 \times 101$  個の電子をシート状に光パルス衝突面から少し Z 方向に離して置いた場合に得られる放射を示す。光パルス衝突によって生じる複雑な電磁場によって複数の放射ピークが見られる。インセットはそのうちの一つを拡大したものであり、3 as という短い時間幅の放射が生じていることがわかる。

次に、2つの高強度フェムト秒レーザーパルスがともに右偏光であるときの正面衝突 (R-R 衝突) 時に起こる特異な光電磁場下における電子加速によって生じる電磁放射について、その成因に関する検討をおこなった。その結果、衝突時に生じる特異な定在波によって電子集団の光進行方向に対する正負の 2 分極化、すなわち、新規な放射現象である bifurcation 放射が生じることがシミュレーションより確かめられた。bifurcation 時には電子の Z 方向における相対論的速度が急激に変化

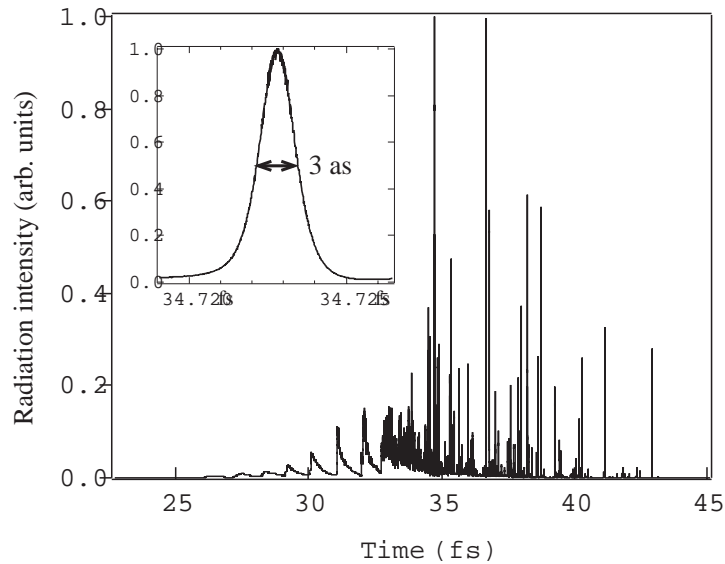


図 11 R-R 衝突時の電磁放射

するために強い超短パルスの電磁波が光進行軸方向に放射されることとなる。

図 12 に、R-R 衝突時に生じる Poynting vector を実線で、光パルスのエンベロップを波線で示す。中央の一点鎖線は衝突中心を示す。時間は上から下へ経過する。Poynting vector で中心の水平線よりも上にある部分が正の方向値を持ったエネルギーの流れ、下にある部分はその逆向きの流れを示し、その方向が図中の小さな矢印で示されている。電子は電磁場から力を受け、その向きは Poynting vector の流れの向きと同じになることがローレンツ力の考察から分かる。電子は矢印の方向に相対論的速度で加速されエンベロップの動きとほぼ同じ速度で移動するが、衝突中心を越えた電子は逆方向に戻されるために、bifurcation が起こる。この現象は光パルスの立ち上がりエッジ部で加速された電子でより多く発生すると考えられる。

以上、2つの右円偏光の高強度フェムト秒レーザーパルスが正面衝突すると 3 as という短い時

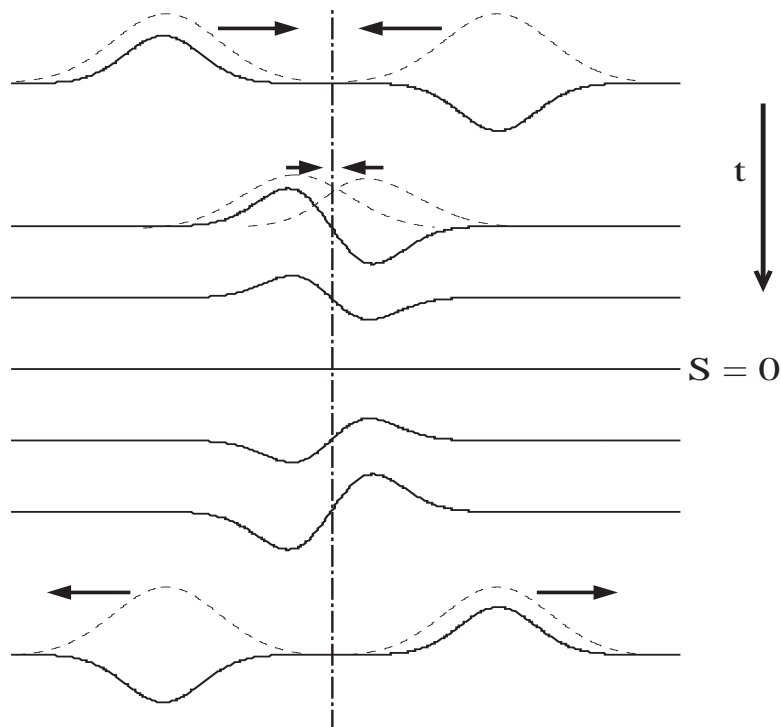


図 12 2つの R-R 円偏光フェムト秒パルス衝突時の Poynting vector



間幅の放射ピークが生じること、さらに衝突時に生じる特異な定在波によって電子集団から bifurcation 放射が生じ、電子の相対論的速度が非常に急激に変化することが明らかになった。また、左右回転の円偏光を正面衝突させる場合に、 $101 \times 101$  個の電子をシート状に配置する事が有効な解のひとつであることを確認できた。

本テーマは、大阪市立大学大学院工学研究科 細田誠教授との共同研究で実施した。

特許件数：1      論文数：13      口頭発表件数：27

#### (4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

超小型サイクロトロンやzept秒域の電磁放射パルスの可能性を示唆するなど、非常に先端的な内容であり、学会等でも高い評価が得られている。

実用化に向けた波及効果

レーザーを用いた小型放射光装置を実現できる可能性を示した。この放射光装置は実験室に収まる程度の大きさを想定しているため、これまで超大型施設でしか実験できなかった放射光分光等が、広く普及すると期待される。また、得られる放射光は、広いスペクトルを有する超短時間のパーストであるため、従来の放射光を利用する場合と比較して、高時間分解能の計測をおこなうことも可能となる。

#### (5) 残された課題と対応方針について

高強度フェムト秒レーザーパルス光と物質との相互作用のダイナミクスに関してシミュレーションの研究を行った。特に、荷電粒子加速やこれによって生ずる超短電磁パルス発生に関して、種々の光励起法について探り、好適な配置を提案した。さらに、効率的なフェムト秒パルス応用を行うための相互作用を増大させる方法について明らかにし、その成因についても検討することができた。今後は、地域への展開を見越して、シミュレーションで仮定した系を実現する方法について検討を進めていく。また、共同研究機関の大阪市立大学大学院工学研究科では、引き続き先端的なシミュレーション研究を進めていく。