

< 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： 短寿命放射性同位体生成のための計測・制御

研究従事者：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、伊藤晴康、
浦上恒幸、高橋宏典、松門宏治、沖原伸一郎

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

フェーズ においては、< 1 - 2 > 高密度フォトン反応制御技術の開発 のサブテーマ< 1 - 2 - a > 計測・制御技術の開発 における小テーマ

時間波形に関するパルス特性の計測と制御

空間強度分布に関するパルス特性の計測と制御

として進めた。フェーズ では、< 1 - 1 > で開発する高強度フェムト秒レーザーと、< 1 - 2 > で開発する計測・制御・解析系などを一体化した実証レーザーシステムの概念設計を行い、要素技術を抽出し、必要な技術開発をおこなった。特に、< 1 - 2 - a > では、フェムト秒パルス光の計測・解析・制御技術、超高密度フォトンと物質との相互作用の計測・解析・技術、フィードバック技術、これらの一体化技術の開発をおこなった。

実証レーザーシステムに必要とされる、高強度フェムト秒光パルスの時間波形を制御する技術の研究・開発するとともに、光パルスの時間波形を詳細に計測する種々の技術を系統的に研究した。また、時間波形制御の有効性を確認する実験を試行し、フィードバック制御についても検討した。

フェムト秒時間分解偏光画像化計測法(FTOP: Femtosecond Time-resolved Optical Polarigraphy) は、参画企業が有する媒質中を伝播する高密度パルスのスナップショットを観測する新しい計測法であり、パルス光の瞬間強度分布に関して、フェムト秒の超高速時間分解・マイクロメートルの高空間分解での非侵襲計測が可能である。ここで、FTOP は新規な計測法であるため、未だその可能性を十分に利用していない。そこで、系統的なデータ取得により、フェムト秒パルスの振る舞いに対する新たな知見を得ることをおこなった。

また、デフォーマブルミラー等による光の空間特性の制御をおこなった。このために、波面センサーで空間特性の計測も合わせておこなった。

これらの計測・制御結果は、実証レーザーシステムの実現に対して、重要な情報として利用することができる。

フェーズ においては、< 1 - 2 > 高密度フォトン反応制御技術の開発 ~ 応用のための計測・制御技術の開発 における小テーマ

短寿命放射性同位体生成のための計測・制御

として進めた。フェーズ では、< 2 - a > 先導的実証研究で明らかになった有望な産業応用分野に適合する実証レーザーシステムに必要な計測・制御・解析系などの技術開発をおこなった。< 2 > 新規産業開発研究 での先導的探索研究および地域産業育成探索研究の成果を利用して、計測結果をフィードバックする際の制御すべきパラメータを抽出して制御法を研究し、これらの機能を一体化した実証レーザーシステムの開発に寄与した。

テラワットのフェムト秒光パルスの波形制御と計測を実現するとともに、実証レーザーシステムへの適用を図った。また、波形制御された高強度レーザー光(再生増幅光パルス、およびテラワット光パルス)の応用を試行した。開発する実証レーザーシステムにおいて、現象やプロセスに対するレーザーの特性を空間的計測法で観測して、反応生成物との関係を調べ、結果をフィードバックし適切なレーザーパラメータを得ることにより、生成効率を向上することなどをおこなった。

研究の独自性・新規性

本事業において開発される高強度フェムト秒光パルスに、波形を制御する機能が付加されること

により、高強度レーザーの産業応用が期待される。この際、計測技術を導入することにより、高機能実証レーザーシステムを構築することが可能となる。

光パルスの時間波形を詳しく知ることができる計測法として、FROG、TADPOLE、SPIDER などがある。これらはレーザーから直接出力された光パルスの評価には用いられているものの、波形制御された複雑な時間特性を有する光パルスに対する有効性は明らかになっていない。よって、複雑な位相特性を有する波形制御された光パルスを計測するために、これらの測定系を構築し、種々の計測法について実験的に検討することは、独自で新規なものである。また、波形制御された光パルスに対して、種々の計測法について比較・検討した報告は他には無い。

海外の研究グループによって、波形制御技術を用いてパルス幅約 100 fs、ピーク出力 3 GW 程度の再生増幅光パルスの波形を制御し、光パルスの持つ分散を自動的に補正した結果が報告されている。これに対し、我々はピーク出力がテラワットに達する超高強度フェムト秒光パルスの波形を制御し、高速粒子発生に与える影響について調べた。また、再生増幅光の波形整形により、加工形状が大きく変化することを見出した。この様な超高強度光パルスの波形制御、およびこれを用いた反応制御の報告は皆無である。

参画企業および本事業以外で、FTOP によるフェムト秒時間分解画像化計測技術を有している機関はない。また、光パルスの瞬間の強度分布をフェムト秒の時間分解能で、直接観測できる方法が FTOP 以外にない。そのため、FTOP で得られた観測結果や技術的な知見は、参画企業において既に得られているものを除けば、すべて独自で新規なものとなる。

陽電子を放出する放射性同位体モニターとして、シンチレータつき光電子増倍管の対を用いることは、古くからおこなわれている。しかし、本事業では、生成する放射性同位体が微量であると見越して、独自の低雑音化の工夫を施した。

高出力レーザーの応用時には、戻り光によるレーザー装置の損傷が大きな問題となるが、本事業で検討した結果、この対策を実現できた。また、本件に関し、特許化することができた。

パルス面の計測・調整に関しては、海外のレーザー装置研究グループによって、すでに報告されている。しかし、実際にレーザーを応用する上で、このパルス面調整をおこなうことは一般的でない。

高強度フェムト秒レーザーの波面補正は、広くおこなわれているが、我々のように、実際の集光点における波面を最適化して応用した例は他にない。また、実際の集光点における波面が高速粒子発生に与える影響を調べたという報告はない。

以上述べたように、本小テーマにおける成果は、いずれも独自性や新規性の高いものである。

研究の目標

〔フェーズ 〕

< 1 - 2 > 高密度フォトン反応制御技術の開発

フェーズ の中期目標は、< 1 - 1 > で開発する高強度フェムト秒レーザーと、< 1 - 2 > で開発する計測・制御・解析系などを一体化した実証レーザーシステムの概念設計をおこない、要素技術を抽出し、必要な技術開発をおこなうことである。

< 1 - 2 - a > 計測・制御技術の開発

本サブテーマでは、フェムト秒パルス光の計測・解析・制御技術、超高密度フォトンと物質との相互作用の計測・解析・技術、フィードバック技術、これらの一体化技術の開発をおこなう。この中で本小テーマに関連する平成 12、13 年度の小テーマは以下のものである。

時間波形に関するパルス特性の計測と制御

空間強度分布に関するパルス特性の計測と制御

では、フェムト秒レーザーパルスの時間波形について、計測・評価するための FROG を初めとする計測法と時間波形を制御する技術について研究をおこなう。

では、高密度パルス光や相互作用現象を計測するための FTOP 計測と波面制御実験装置等による空間強度分布の制御の研究をおこなう。

フェーズ における目標は次の通りである。

レーザー光を計測・評価するための FROG の高速化・高感度化、高密度パルス光や相互作用現象を計測するための FTOP の高感度化、超高速時間領域における波形整形をおこなうためのデバイスの高耐性化や開発などをおこなう。数値目標として、時間分解能 100 fs、空間分解能 5 μm を同時に満足する超高速二次元計測を達成する。

平成 12 年度は、現状の周辺技術の評価して、改善すべき点を明らかにし、実証レーザーシステムの実現に必要な技術を調査・検討する。

本年度の位置づけは、FROG、FTOP、波形整形等の計測・制御技術の現状を評価して、実用レーザーシステムに適応させるための問題点を抽出する。そして、問題点解決に必要な技術項目についての調査・検討をおこない、一体化技術の概念設計に必要な情報取得を目標とする。

FROG に関しては、高速化と高感度化が重要であると考えられる。そこで、高速化に関しては、個々のデバイスを一体化するために、撮像装置、解析装置、解析結果の表示装置等についての評価・調査・検討をおこなう。また、高感度化に関しては、分光系に用いられるミラー等の光学系についての評価・検討をおこなう。

FTOP に関しては、計測系内の損失に着目して評価・検討をおこなう。具体的には、プローブパルス用の結像レンズ系、撮像素子の評価を行い、次のステップとしての真空チャンバー内の像を十分拡大して計測できるような系の設計に有益な情報を取得する。また、FTOP は新規な計測法であり、未だその可能性を十分に利用していない。そこで、他の周辺技術、例えば、波形整形技術と組み合わせた場合に得られる情報について調査・検討する。

波形整形に関しては、キーデバイスである空間光変調器の耐光強度特性に着目して評価・検討をおこなう。また、高強度フェムト秒レーザーに適用させる場合、何処で波形整形するのが最も効果的かについての検討もおこなう。

平成 13 年度は、現状の周辺技術や一体化技術について、超高密度フォトン利用実証レーザーシステムを実現する際に必要となる計測・制御技術、及び波長域拡大技術に関する要素技術の開発に着手すると共に、平成 12 年度で明らかになった問題点を解決するための方法を実験的に検討し、解決の手段を明確にする。いくつかの課題については実際に解決をおこなう。また、実証レーザーシステムの概念設計に資するデータ取得をおこない、概念設計を継続して推進する。

平成 13 年度は、FROG、FTOP、波形整形、放射線（ガンマ線）検出等の計測・制御技術について、問題点を解決するための方法を検討し、実験に着手するとともに解決の手段を明確にする。いくつかの課題については実際に解決をおこなう。

FROG に関しては、前年度の調査結果を元に、高感度 single shot FROG 装置を構築し、実際に導入したフェムト秒レーザーの評価への適用実験をおこなう。

FTOP に関しては、今年度得られた装置に対する要求を考慮して、FTOP 計測系を構築し、超高速相互作用計測への適用実験をおこなう。ここでは、真空チャンバー内等、離れた位置の撮像を最も有効に行う方法に対する検討をおこなう。また、FTOP と他の周辺技術、例えば、波形整形技術と組み合わせた実験に着手する。

波形整形に関しては、平成 12 年度の調査結果を利用して波形整形器を構築し、凹面鏡やグレーティングの改良による耐光パワー特性の向上の検討をおこなう。

また、上記の要素技術を融合して、 $< 2 - 1 >$ 先導的探索研究において短寿命放射性同位体を生成することを目指す。そこで、本サブテーマでは短寿命放射性同位体崩壊で発生するガンマ線の検出系を構築し、短寿命放射性同位体の生成に関するモニター装置を準備する。

平成 14 年度は、周辺技術や一体化技術について、他の研究テーマからの要求を考慮し、平成 13 年度で明らかになった問題点を解決して、超高密度フォトン利用実証レーザーシステムを実現する際に必要となる計測・制御技術に関する基盤要素技術の開発をおこなう。

平成 14 年度は、時間波形、空間強度分布を中心としたパルス特性の計測と制御などの基盤要素技術を開発し、実証レーザーシステムの設計に着手する。

平成 13 年度の研究で明確になった期待できる応用分野、すなわち、物質改変、非熱加工、強力

なテラヘルツ光源に重要となる基盤要素技術を開発する。そこで、効率良く研究するためにこれまでの研究項目を再構成した。

この中で、本小テーマにおいては、光源のパルス特性、特に時間波形と空間強度分布を変化させることで超高速相互作用が変化し、光源のパルス特性を制御することによって、たとえば前記応用の物質改変の効率、非熱加工の特性、テラヘルツ波の発生効率等が向上すると期待され、これに必要な計測・制御技術を開発する。すなわち、平成 13 年度までの、

時間波形に関するパルス特性の計測と制御

空間強度分布に関するパルス特性の計測と制御

を統合し、

パルス特性の計測と制御

という小テーマで研究を継続する。

これらの取得データと前年度に取得した概念設計に資するデータを利用し、他の研究テーマからの要求を考慮して概念設計を継続し、実証レーザーシステムの具体的な設計に着手する。

時間波形について、時間波形の計測は、構築した高感度 single shot FROG 装置等で行い、他の手法も検討する。波形の制御については、平成 13 年度の結果に基づいて波形整形器の改良をおこない、これを利用してテラワットのピーク強度の高強度フェムト秒パルス光を波形整形することを試みる。このとき、波形整形器を再生増幅パルス光に適用することで、マルチパス増幅光であるテラワットのピークパワーのフェムト秒パルスに対する光位相変調特性を評価して基礎特性を取得し、波形制御の検討をおこなう。

空間強度分布については、昨年度構築したフェムト秒時間分解偏光画像化計測 (FTOP) 装置で、サンプルに照射する前に集光されつつ伝播するフェムト秒パルス光の瞬時強度分布を計測する。比較的低エネルギーである再生増幅パルス光へ適用し、低エネルギーパルスでも計測できる手法を検討する。さらに、1 kHz 程度の高繰り返しパルス光に対する適用性を評価し、短時間計測法の開発を目指す。

集光点近傍の空間強度分布の制御は、昨年度に導入した波面制御実験装置 (可変形状鏡) を用いる。集光点での強度をいかに大きくできるかが、応用の際に最も重要なファクターであるため、光高密度場を如何に実現するかについて、前記 FTOP 計測のほかに平成 14 年度導入予定の波面計測ひずみ補償装置も別途利用し、効率的な計測と制御について検討する。

〔フェーズ 〕

< 1 - 2 > 高密度フォトン反応制御技術の開発

フェーズ の目標は、< 2 - a > 先導的実証研究で明らかになった有望な産業応用分野に適合する実証レーザーシステムに必要な計測・制御・解析系などの技術開発をおこなうことである。< 2 > 新規産業開発研究での先導的探索研究および地域産業育成探索研究の成果を利用して、計測結果をフィードバックする際の制御すべきパラメータを抽出して制御法を研究し、これらの機能を一体化した実証レーザーシステムを開発する。

そこで、要素技術の融合を効率的におこなうために、統合したサブテーマ「応用のための計測・制御技術の開発」の中で、ニーズに基づいた個別テーマをおこなう。本小テーマではその中の、

短寿命放射性同位体生成のための計測・制御

を実施する。

フェーズ における目標は次の通りである。

テラワットのフェムト秒光パルスの波形制御と計測を実現するとともに、実証レーザーシステムへの適用を図る。また、波形制御された高強度レーザー光 (再生増幅光パルス、およびテラワット光パルス) の応用を試行し、産業応用として有望なものはテーマ < 2 - a > 探索研究で実施する。開発する実証レーザーシステムにおいて、現象やプロセスに対するレーザーの特性を FTOP 等の空間的計測法で観測して、反応生成物との関係を調べ、結果を波形整形器や可変形反射鏡等にフィードバックし適切な時間波形や波面を得ることにより、生成効率を向上することなどをおこなう。

平成 15 年度は、フェーズ の成果を踏まえて、開発した個別の要素技術を融合し、< 2 - a > 先

導的実証研究に重要となる計測・制御技術の高度化・適用化の検討をおこなう。

短寿命放射性同位体生成を実現するには、集光強度が最も重要であるため、テラワットパルス波面の計測・制御をおこなう。テラワットパルスを軸はずし放物面鏡で単純に集光するだけでは十分な集光強度が得られないため、平成 14 年度から実施している波面制御実験装置による波面制御を継続しておこなう。この時、波面センサーの計測結果を反映させ、連動動作させることを試みる。また、干渉法等を利用してパルスフロントを計測し、これを整えることにより、集光効率を向上することを試みる。

さらに、テラワットパルス波形の計測・制御をおこなう。波形整形した再生増幅パルス光を増幅することでテラワットパルスの波形を制御する検討を継続しておこなう。同時に、SPIDER により、繰り返し 10 Hz のテラワットパルスの波形計測を試みる。波形整形した再生増幅パルス光を増幅する場合、自己位相変調等の影響により所望の整形が実現できないことが予想されるため、SPIDER 等の計測結果を波形整形器へフィードバックするなどにより、所望の波形のテラワットパルスを得ることを試みる。波形を変形したテラワットパルス照射実験を実施し、X 線発生量や発光スペクトルなどをモニターすることでレーザー誘起プラズマの状態を調べ、時間波形における重要なパラメータを検討する。

平成 16 年度は、引き続き、テラワットパルス波面・波形の計測・制御をおこなう。短寿命放射性同位体生成を実現するには、集光強度が最も重要であるため、テラワットパルス波面の計測・制御をおこなう。波面制御実験装置を用いた波面制御による集光強度の向上の検討を継続しておこなう。

また、波形整形した再生増幅パルス光を増幅することでテラワットパルスの波形を制御する検討を継続しておこなう。SPIDER による波形計測結果を利用して、フィードバック制御するなどにより、短寿命放射性同位体生成を高効率でおこなえるテラワットパルスを得ることを試みる。

この他、戻り光によって実験系が損傷しないような方法を検討し、高強度フェムト秒レーザー利用における本質的な問題解決を試みる。

平成 17 年度は、引き続き、テラワットパルス波面・波形の計測・制御をおこなう。短寿命放射性同位体生成を高効率化するためには、レーザーによる重陽子生成において、生成重陽子の量を多くし、かつ、高エネルギー化することが重要である。そのために、テラワットパルス波面の計測・制御、テラワットパルス波形の計測・制御をおこなう。

テラワットパルスを制御することにより、これを集光照射したターゲットから出射する高速粒子線の性質を変化させる実験をおこなう。波面や時間波形の制御によるテラワットレーザー相互作用の高効率化を検討する。

(2) 研究の進め方及び進捗状況

本小テーマは、フェーズ において実施されたものである。これは、フェーズ で、平成 12 年度から、< 1 - 2 > 高密度フォトン反応制御技術の開発 のサブテーマ< 1 - 2 - a > 計測・制御技術の開発 において、2 つの小テーマ

時間波形に関するパルス特性の計測と制御

空間強度分布に関するパルス特性の計測と制御

として進めていたものを、平成 14 年度に 1 つの小テーマへと統合し、

パルス特性の計測と制御

という小テーマで研究を継続していたものを、さらに、フェーズ で、平成 15 年度以降、< 1 - 2 > 高密度フォトン反応制御技術の開発 ~ 応用のための計測・制御技術の開発 中の小テーマ

短寿命放射性同位体生成のための計測・制御

として研究を推進したものである。

以下では、フェーズ における研究の進め方及び進捗状況から記述する。

フェーズ では、< 1 - 1 > で開発する高強度フェムト秒レーザーと、< 1 - 2 > で開発する計測・制御・解析系などを一体化した実証レーザーシステム概念設計を行い、要素技術を抽出し、

必要な技術開発をおこなった。< 1 - 2 > 高密度フォトン反応制御技術の開発 のサブテーマ< 1 - 2 - a > 計測・制御技術の開発では、フェムト秒パルス光の計測・解析・制御技術、超高密度フォトンと物質との相互作用の計測・解析・技術、フィードバック技術、これらの一体化技術の開発をおこなった。この中で本小テーマに関連する平成 12、13 年度の小テーマは以下のものである。

時間波形に関するパルス特性の計測と制御

空間強度分布に関するパルス特性の計測と制御

では、フェムト秒レーザーパルスの時間波形について、計測・評価するための FROG を初めとする計測法と時間波形を制御する技術について研究をおこなった。

では、高密度パルス光や相互作用現象を計測するための FTOP 計測と波面制御実験装置等による空間強度分布の制御の研究をおこなった。

平成 12 年度は、現状の周辺技術の評価して、改善すべき点を明らかにし、実証レーザーシステムの実現に必要な技術を調査・検討した。FROG、FTOP、波形整形等の計測・制御技術の現状を評価して、実用レーザーシステムに適応させるための問題点を抽出した。そして、問題点解決に必要な技術項目についての調査・検討をおこない、一体化技術の概念設計に必要な情報を取得した。

FROG に関しては、高速化と高感度化が重要であると考えた。そこで、高速化に関しては、個々のデバイスを一体化するために、撮像装置、解析装置、解析結果の表示装置等についての評価・調査・検討をおこなった。また、高感度化に関しては、分光系に用いられるミラー等の光学系についての評価・検討をおこなった。

FTOP に関しては、計測系内の損失に着目して評価・検討をおこなった。具体的には、プローブパルス用の結像レンズ系、撮像素子の評価をおこない、系の設計に有益な情報を取得した。また、他の周辺技術、例えば、波形整形技術と組み合わせた場合に得られる情報について調査・検討した。

波形整形に関しては、キーデバイスである空間光変調器の耐光強度特性に着目して評価・検討をおこなった。また、高強度フェムト秒レーザーに適用させる場合、何処で波形整形するのが最も効果的かについての検討もおこなった。

平成 13 年度は、現状の周辺技術や一体化技術について、超高密度フォトン利用実証レーザーシステムを実現する際に必要となる計測・制御技術、及び波長域拡大技術に関する要素技術の開発に着手すると共に、平成 12 年度で明らかになった問題点を解決するための方法を実験的に検討し、解決の手段を明確にした。いくつかの課題については実際に解決をおこなった。また、実証レーザーシステムの概念設計に資するデータ取得をおこない、概念設計を継続して推進した。

本年度は、FROG、FTOP、波形整形、放射線（ガンマ線）検出等の計測・制御技術について、問題点を解決するための方法を検討し、実験に着手するとともに解決の手段を明確にした。いくつかの課題については実際に解決をおこなった。

FROG に関しては、平成 12 年度の調査結果を元に、高感度 single shot FROG 装置を構築し、実際に導入したフェムト秒レーザーの評価への適用実験をおこなった。ここで、集光系に反射型光学系を用いるとともに、検出系の改良により 1 mJ/pulse 以下の光パルスの計測を実現した。

FTOP に関しては、平成 13 年度に得られた装置に対する要求を考慮して、FTOP 計測系を構築し、超高速相互作用計測への適用実験をおこなった。再生増幅パルス光を 2 分岐してポンプ光とプローブ光とし、計測系を組みあげた。今後の実験でポンプ光・プローブ光の各光路の高機能化が予想されるので、空間的に余裕のある配置とした。ここでは、真空チャンバー内等、離れた位置の撮像を最も有効に行う方法に対する検討をおこなった。また、FTOP と他の周辺技術、例えば、波形整形技術との組み合わせについても検討した。

波形整形に関しては、前年度の調査結果を利用して波形整形器を構築し、凹面鏡やグレーティングの改良による耐光パワー特性の向上の検討をおこなった。できる限り高強度のフェムト秒光パルスの時間波形を制御するため、再生増幅光パルス（中心波長 815 nm、パルス幅 45 fs、繰り返し 1 kHz、エネルギー 0.7 mJ）を直接的に波形制御する高強度レーザー用波形整形器を構築して実験をおこなった。この過程で得られた実験結果から、構築した波形整形器の耐光強度特性の限界を明確にし、テラワットのフェムト秒光パルスを波形制御する手法についての指針を得た。

また、上記の要素技術を融合して、〈2 - 1〉先導的探索研究において短寿命放射性同位体を生成することを目指すため、本サブテーマでは短寿命放射性同位体崩壊で発生するガンマ線の検出系を構築し、短寿命放射性同位体の生成に関するモニター装置を整備した。整備したモニター装置は〈2 - a〉の物質改変で利用した。

平成 14 年度は、平成 13 年度までの研究で明確になった期待できる応用分野、すなわち、物質改変、非熱加工、強力なテラヘルツ光源に重要となる基盤要素技術を効率良く開発するため、これまでの研究項目を再構成した。この中で、本小テーマに関連する研究においては、光源のパルス特性、特に時間波形と空間強度分布を変化させることで超高速相互作用が変化し、光源のパルス特性を制御することによって、たとえば前記応用の物質改変の効率、非熱加工の特性、テラヘルツ波の発生効率等が向上すると期待されるため、これに必要な計測・制御技術を開発することとなった。すなわち、平成 13 年度までの、

時間波形に関するパルス特性の計測と制御
空間強度分布に関するパルス特性の計測と制御
を統合し、

パルス特性の計測と制御
という小テーマで研究を継続した。

周辺技術や一体化技術について、他の研究テーマからの要求を考慮し、平成 13 年度で明らかになった問題点を解決して、超高密度フォトン利用実証レーザーシステムを実現する際に必要となる計測・制御技術に関する基盤要素技術の開発をおこなった。時間波形、空間強度分布を中心としたパルス特性の計測と制御などの基盤要素技術を開発し、実証レーザーシステムの設計に着手した。

時間波形について、時間波形の計測は、構築した高感度 single shot FROG 装置等でおこない、他の手法も検討した。FROG とスペクトル干渉法を融合させることにより、TADPOLE (Temporal Analysis, by Dispersing a Pair Of Light E fields) を構築し、後述する波形整形により生成された複雑な位相を有する光パルスの計測を実現した。

波形の制御については、平成 13 年度の結果に基づいて波形整形器の改良をおこない、これを利用してテラワットのピーク出力の高強度フェムト秒パルス光を波形整形することを試みた。このとき、波形整形器を再生増幅パルス光に適用することで、マルチパス増幅光であるテラワットのピーク出力のフェムト秒パルスに対する光位相変調特性を評価して基礎特性を取得し、波形制御の検討をおこなった。また、制御された光パルスをアクリル加工に適用し、加工量および加工状態の改良を実現した。

空間強度分布については、平成 13 年度に構築したフェムト秒時間分解偏光画像化計測 (FTOP) 装置で、集光されつつ伝播するフェムト秒パルス光の瞬時強度分布を計測した。比較的低エネルギーである再生増幅パルス光へ適用し、低エネルギーパルスでも計測できる手法を検討した。さらに、1 kHz 程度の高繰り返しパルス光に対する適用性を評価した。ここで、パルス幅 45 fs のプローブ光を用い、空気を媒質とすることで、時間分解能 45 fs 程度の FTOP 像が得られた。また、3.3 μm の空間分解能を達成した。これにより、FTOP 計測に関する目標を達成した。構築した系の感度についても評価をおこない、大気中にて、10 μJ 程度のパルスエネルギーまで計測できることを確認した。よって、同条件で 0.1 気圧の環境下では、0.1 mJ 程度まで計測可能と評価できた。

集光点近傍の空間強度分布の制御は、波面制御実験装置 (可変形状鏡) を用いて検討した。集光点での強度をいかに大きくできるかが、応用の際に最も重要なファクターであるため、高光密度場を如何に実現するかについて、波面計測ひずみ補償装置を利用し、効率的な計測と制御について検討した。また、波面制御技術を、高密度フォトン発生・計測装置へと適用する方法について検討し、方針を決定した。

以上、フェーズ において、本小テーマに関連する研究は順調に進捗した。さらに、予定していた成果以外の成果も得られた。よって、目標達成度は 120 % である。

フェーズ においてさらなる独自技術を確立するには、個別の小テーマを効率的に融合しつつ応用を試行・適用していくことが必要となった。したがって、他のテーマと連携し、実証レーザーシ

システムの開発を目指すこととなった。特に、新医療分野の PET 技術に適用可能な短寿命放射性同位体生成（物質改変）に資する計測・制御技術に注力した。

要素技術の融合を効率的に行うために、統合したサブテーマ「応用のための計測・制御技術の開発」の中で、ニーズに基づいた個別テーマへの再編をおこなった。本小テーマではその中の、

短寿命放射性同位体生成のための計測・制御を実施した。すなわち、< 2 - a > 先導的実証研究における短寿命放射性同位体生成の産業適用化に重要となる計測・制御技術の検討をおこなった。

平成 15 年度は、フェーズ の成果を踏まえて、開発した個別の要素技術を融合し、< 2 - a > 先導的実証研究における短寿命放射性同位体生成で重要となる計測・制御技術の高度化・適用化の検討をおこなった。

短寿命放射性同位体生成を実現するには、集光強度が最も重要であるため、テラワットパルス波面の計測・制御をおこなった。テラワットパルスを軸はずし放物面鏡で単純に集光するだけでは十分な集光強度が得られないため、平成 14 年度から実施している波面制御実験装置による波面制御を継続しておこなった。この時、波面センサーの計測結果を反映させ、連動動作させた。また、干渉法等を利用してパルスフロントを計測し、これを整えることにより、集光効率を向上した。

さらに、テラワットパルス波形の計測・制御をおこなった。波形整形した再生増幅パルス光を増幅することでテラワットパルスの波形を制御する検討を継続しておこなった。波形整形した再生増幅パルス光をマルチパス増幅器で増幅しても、自己変調等起こらずに、所望の波形が得られることがわかった。

以上、短寿命放射性同位体生成のための計測・制御として、テラワットパルスの時間・空間特性を計測・制御できることを実証し、計画通りの研究成果が得られた。

平成 16 年度は、引き続き、テラワットパルス波面・波形の計測・制御をおこなった。短寿命放射性同位体生成を実現するには、集光強度が最も重要であるため、テラワットパルス波面の計測・制御をおこなった。波面制御実験装置を用いた波面制御による集光強度の向上の検討を継続しておこなった。

また、波形整形した再生増幅パルス光を増幅することでテラワットパルスの波形を制御する検討を継続しておこなった。加えて、波形整形された繰り返し 10 Hz のテラワットパルス光を計測するために SPIDER (Spectral Phase Interferometer for Direct Electric-field Reconstruction) を適用し、整形パルスの計測を実現した。

この他、戻り光によって実験系が損傷しないような方法を検討し、高強度フェムト秒レーザー利用における本質的な問題を解決した。

以上、テラワットレーザーの時間・空間特性を計測・制御することが可能であると実証できた。

平成 17 年度は、引き続きテラワットパルス波面・波形の計測・制御をおこなった。短寿命放射性同位体生成を高効率化するためには、レーザーによる重陽子生成において、生成重陽子の量を多くし、かつ、高エネルギー化することが重要である。テラワットパルスを制御することにより、これを集光照射したターゲットから出射する高速粒子線の性質を変化させる実験をおこなった。波面や時間波形の制御によるテラワットレーザー相互作用の高効率化を検討した。

集光点の波面を波面センサーで計測し、結果をもとに波面制御実験装置を制御することにより、波面歪みを 0.025 μm まで抑制できた。これは、用いているレーザー光の波長が 0.8 μm であるので、 $1/32$ の精度で補償ができていていることを表している。また、実験で得られたトムソンパラボラトレースから、波面制御による高速粒子線の性質の変化を明瞭に観察することができた。

さらに、総エネルギー 156 mJ、パルス幅 66 fs、パルス間隔 400 fs の 2 連パルスを生成し、高速粒子発生・計測実験をおこなった。ここで、生成した 2 連パルスのそれぞれの尖頭出力は 1.2 TW である。また、実験で得られたトムソンパラボラトレースから、波形制御による高速粒子線の性質の変化を明瞭に観察することができた。

以上、テラワットパルス波面の計測・制御、テラワットパルス波形の計測・制御に関して実験的に検討し、イオン発生において発生効率の向上と高エネルギー化を同時に実現する条件を明らかに

することができた。

以上、フェーズ においても、本小テーマに関連する研究は順調に進捗した。さらに、予定していた成果以外の成果も得られた。よって、目標達成度は 120 % である。

(3) 主な成果

フェムト秒時間分解偏光画像化計測 (FTOP) の研究で、空間強度分布に関するパルス特性の計測制御で 1 kHz フェムト秒パルスで FTOP 計測の高 S/N 計測を可能にし、時間分解能 45 fs、空間分解能 3.3 μm を同時に満足する超高速二次元計測を達成した。また、0.4 ps 間隔の 8 つの時点での計測を世界で初めて実現した。

小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を試作し、瞬時強度 10 GW のフェムト秒パルスの波形制御に成功した。この強度レベルで、精密な波形整形を実現した例は過去にない。この試作器を高密度フォトン発生・計測実験装置の再生増幅パルス光に適用してアクリル加工実験を試行し、時間波形制御によって高工率化と高精度化を同時に実現した。

試作した小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を高密度フォトン発生・計測実験装置に適用し、テラワットパルスの波形整形を実現した。また、波面計測ひずみ補償装置を高密度フォトン発生・計測実験装置に適用し、波面のフィードバック制御により、集光点の最大強度を 5 倍程度増強することに成功した。テラワットパルスの波形整形と波面補償を同時に達成したのは世界にも類がない。

フェムト秒光パルスの時間波形の計測

時間波形を計測する装置を種々試作し、比較・検討して適用条件を明らかにした。詳細を以下に述べる。

高強度フェムト秒光パルスの時間波形を制御するためには、光パルスの時間波形を詳細に計測する技術が必要となる。これに関し、高密度フォトン発生・計測実験装置を利用した計測法について系統的に検討をおこなった。

平成 12 年度は、FROG (Frequency Resolved Optical Gating 周波数分解光ゲート) 法に関して、従来品の調査を行った。従来品では、シングルショット計測の場合、計測のために 1 mJ/pulse 以上のエネルギーが必要であることがわかった。これを上回る高感度計測に必要な要素部品を調査して選択し、試作機を構築するための設計に着手した。また、計測結果からパルスの特性を明らかにするための波形再構成アルゴリズムを検討した。

平成 13 年度は、平成 12 年度の調査結果を元に、高感度 single shot FROG 装置を構築し、高密

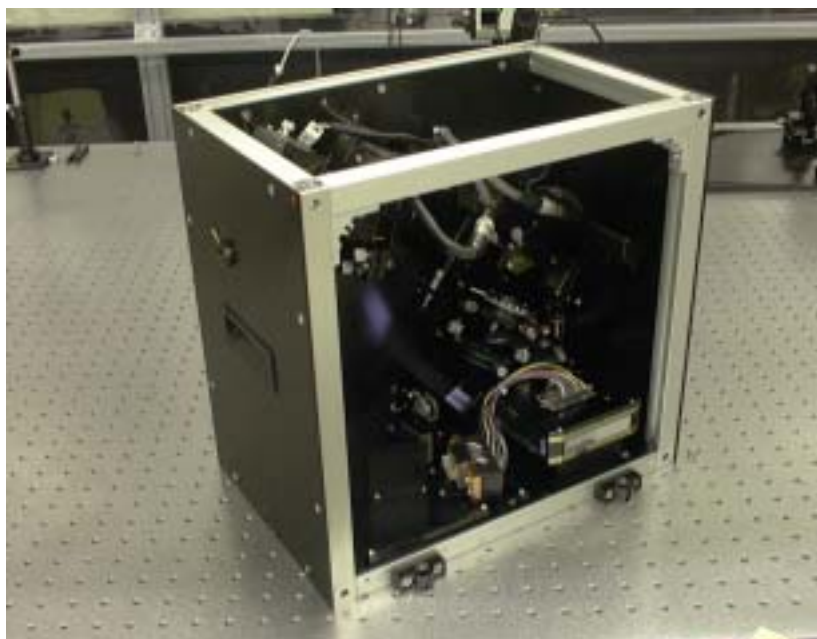


図 1 構築した FROG 装置の外観

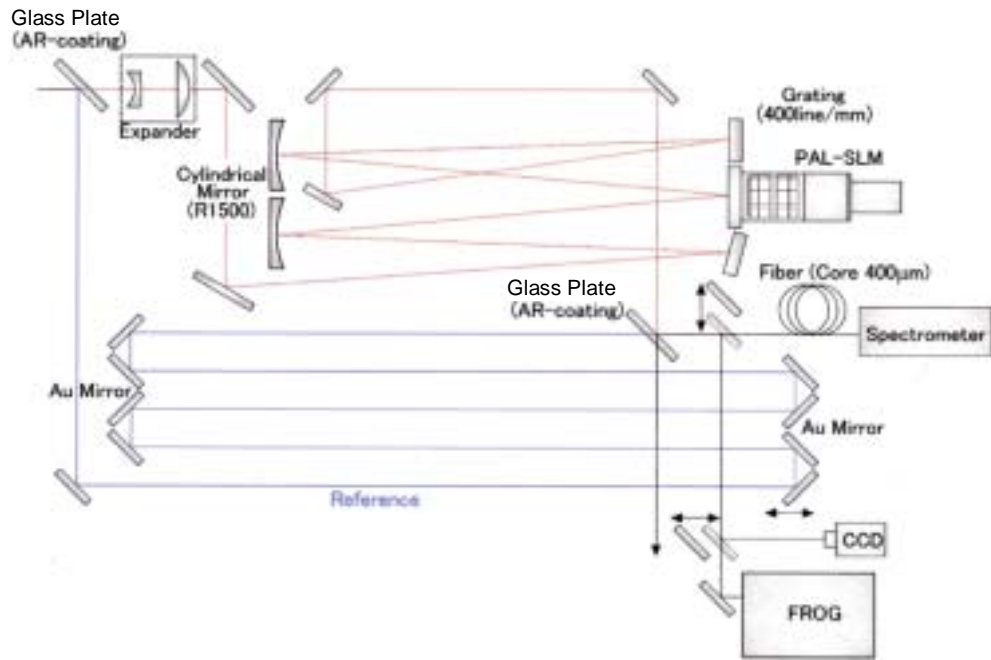


図2 TADPOLE 実験系

度光子発生・計測実験装置から出射されるフェムト秒レーザーの評価への適用実験を行った。

従来の FROG 装置では、集光系に透過素子（レンズ等）を使用しているため、分散の影響を受けて超短光パルスの特性を正確に計測することが困難であった。そこで、集光系に反射型光学系を用いてこの問題点を克服すると共に、光検出系を改良することにより高感度化を図った（地域負担）。構築した FROG 装置の外観を図1に示す。ここで、構築した FROG 装置は、被測定光入力部の変換により、multishot FROG としても用いることができる。

この装置について、実際に導入した高密度光子発生・計測実験装置から出力されるフェムト秒パルス光に対する適用実験をおこなった。その結果、マルチショット計測時には問題ないものの、シングルショット計測時には空間強度分布の影響でパルス幅が正確に測定できないという問題点が確認された。そのため、他の計測法も含めた検討をおこなうこととした。

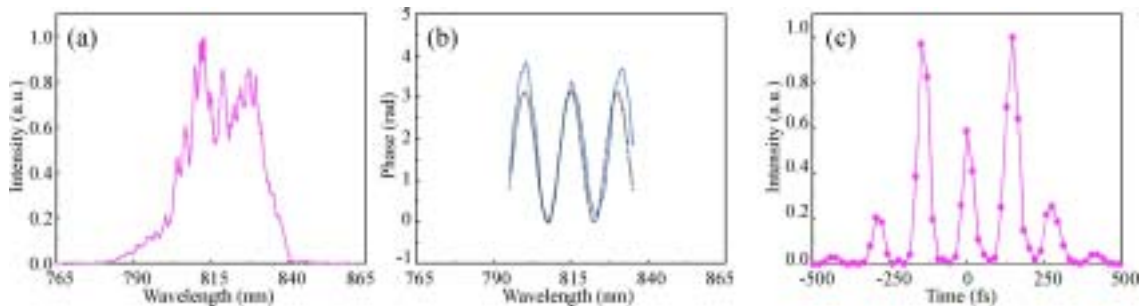


図3 スペクトルに正弦波状の位相変調を与えたときの光パルス波形計測結果

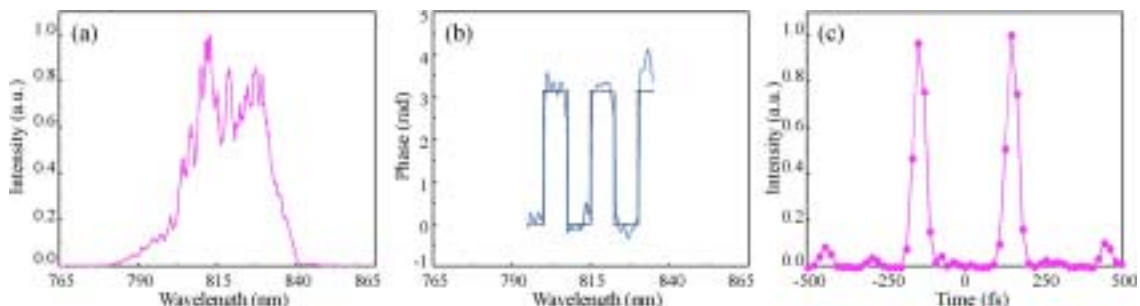


図4 スペクトルに矩形波状の位相変調を与えたときの光パルス波形計測結果

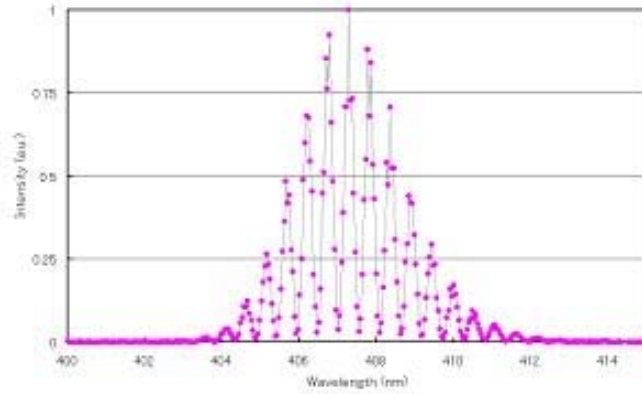


図5 SPIDERにより取得した干渉データ

平成14年度は、波形制御された複雑な時間特性を有する光パルスに対する計測法を検討した。フェムト秒光パルスの時間波形計測に関して、詳細な時間特性を観測することができる計測法としてはFROG、TADPOLE (Temporal Analysis, by Dispersing a Pair Of Light E fields)、SPIDER (Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction)などが知られている。これらはレーザーから出力された無変調光パルスの評価には広く用いられている。しかし、波形制御された光パルスに対する有効性は明らかになっていない。

まず、平成13年度に構築したFROG装置を評価した。その結果、FROG単体では、レーザーから出力される比較的滑らかな位相波形の光パルスを計測することは可能であるが、波形整形された複雑な位相を有する光パルスを計測することは困難であると共に、計測とデータ処理に長時間(数分間)を要する欠点があることが明らかになった。

この問題点を解決するために、FROGとFTSI (Fourier-Transform Spectral Interferometry フーリエ変換スペクトル干渉法)を組み合わせた計測法であるTADPOLE (Temporal Analysis, by Dispersing a Pair Of Light E fields)を検討した。TADPOLEは構成が少し複雑であるという欠点があるものの、データ処理時間が短くてすむという利点がある。

図2はTADPOLEの実験構成である。ここで、平成13年度に構築したFROG装置も組み込まれている。また、被測定光に対して波形整形をおこなった。光源には、高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される再生増幅パルス光(中心波長815 nm、パルス幅45 fs、繰り返し1 kHz、パルスエネルギー0.7 mJ)を用いた。

波形整形パルス光の位相変調量を実験的に調べた。図3および図4は波形整形器によってスペクトルに正弦波状および矩形波状の位相変調を与えたときの光パルス波形をTADPOLEにおいて計測した結果である。それぞれ、(a)光パルスのスペクトル測定結果、(b)与えた位相変調の設定値(黒点線)とTADPOLEによる計測結果(青い実線)、(c)計測結果から得られた時間波形である。図中(b)の設定値と実測値が良く一致していることからTADPOLEの有効性が確認できた。また、波形整形器

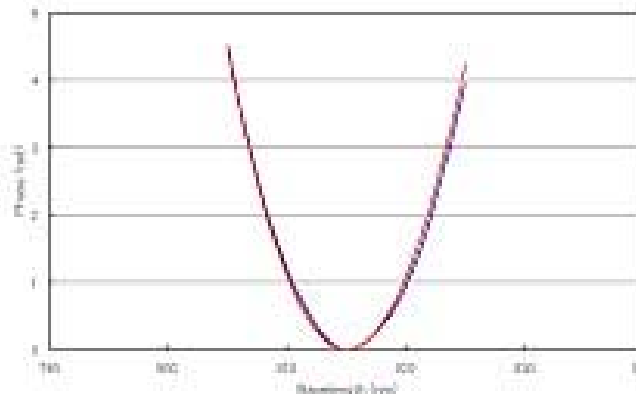


図6 SPIDERの干渉データを解析して得られた被測定光パルスの位相
(青線：理論値、赤線：実測値)

表 1 各種計測法の比較と得られた指針

計測技術	利点	欠点	指針
FROG (Multi Shot)	単純な波形の高繰り返し光パルスの計測に適している。	複雑な波形の計測には適さない。	TADPOLEの一部として構築したシステムを使用している。
FROG (Single Shot*)	単純な波形の低繰り返し光パルスの計測に適している。	複雑な波形の計測には適さない。	不採用。
TADPOLE	高繰り返し光パルスの計測に適している。複雑な波形の計測も可能。	FROGシステムを含むため、低繰り返し光パルスの計測には適さない。	高繰り返し光パルスの波形計測に用いている。
SPIDER	低繰り返し光パルスの計測に適している。ある程度複雑な波形の計測も可能。	測定対象に合わせたシステムの調整が必要。	検討した結果、有力な低繰り返し光パルスの計測法と判明。構築中。

*FROG装置は、被測定光入力部の交換でMulti Shot用とSingle Shot用に使い分けられるように設計されている。

が設計通りに動作していることが実証できた。

以上、FROG 装置を組み込んだ TADPOLE について検討し、これが急峻な位相変調を有する光波形に対しても高波長分解能で計測できる有用な基盤要素技術であることを明らかにした。

高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される繰り返し 10 Hz のマルチパス増幅光の波形を計測するためには、単ショット計測をおこなわなければならない。これに対し、平成 13 年度に構築した高感度 single shot FROG では、ビームの空間強度分布が計測結果に反映され、正確な波形計測が困難であるという問題点が生じた。そこで、平成 14 年度に single shot FROG 装置に代わる手法について調査・検討した結果、詳細かつ高速に光パルスの波形および位相を評価できる干渉計測装置 SPIDER (Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction) が有効であることがわかった。

よって、平成 15 年度に SPIDER の構築をおこなった。構築した SPIDER システムの性能評価の例をここで示す。長さ 25 cm のガラス (BK7) を伝播した後の光パルスを SPIDER で計測した際に得られた干渉データを図 5 に示す。これより、構築したシステムが、感度・分解能において、十分な特性を有していることがわかる。得られた干渉データより算出される被測定光の位相特性を図 6 に赤線で示す。また、長さ 25 cm の BK7 ガラスを伝播することによる位相変化の理論的な値を図 6 に青線で示す。両者がほぼ一致したことにより、構築した SPIDER が正常に動作していることが確認された。

以上により、テラワットパルスの波形計測をおこなうことができた。

なお、本事業において検討した各種計測法の比較結果と得られた指針を表 1 にまとめる。

再生増幅フェムト秒光パルスの波形整形

小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を試作し、瞬間強度 10 GW のフェムト秒パルスの波形制御に成功した。詳細を以下に述べる。

高強度フェムト秒光パルスと物質との相互作用を効率良くおこなわせるためには、光パルスの波形を任意に制御する必要がある。そこで、波形制御のための装置である波形整形器を、検討、構築した。さらに、この波形整形器を高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される光パルスへ適用し、特性を評価した。

平成 12 年度は、波形整形器の原理および全体構成について、調査および検討をおこなった。特にキーデバイスである空間光変調器の耐光強度特性に着目し、超短光パルスの波形整形装置全体としての耐光強度特性を実験的に評価するための検討、準備をおこなった。また、波形最適化アルゴリズムについて調査し、シミュレーテッドアニーリングについて調査、検討した。

平成 13 年度は、平成 12 年度の調査結果を利用して、波形整形器を構築し (地域負担)、凹面鏡や回折格子の改良による耐光パワー特性向上の検討をおこなった。

構築した波形整形器の構成と光線レイアウトを図 7 に示す。入射光は回折格子で分光され、次に、空間光変調器 (PAL-SLM) 上に空間的に波長分解される。さらに、波長分解された光は、再度回折格

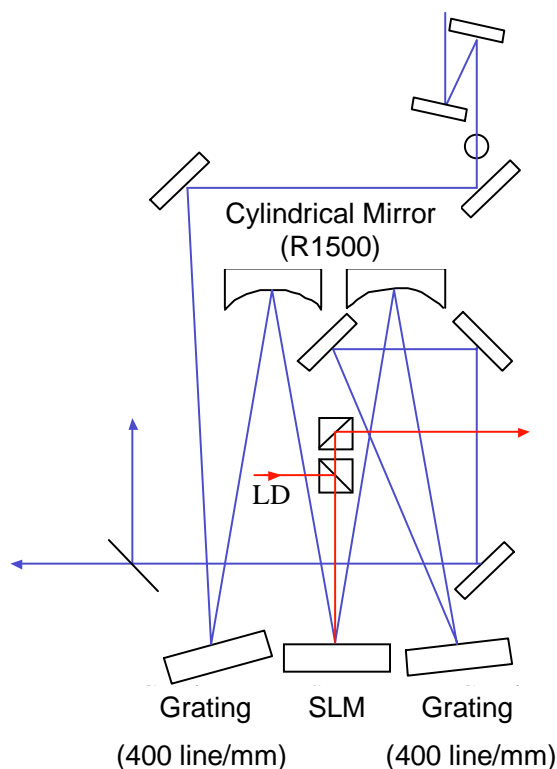


図7 波形整形器の構成と光線レイアウト

子で同軸に集められて出射される。空間光変調器では入射光が波長別に位相変調され、波形整形された光パルスが得られる。このとき、溝本数 400 本/mm の回折格子及び曲率半径 1500 mm のシリンドリカルミラーを用いることにより、空間光変調器の全面を利用することが可能となり、効率 68% (出射光エネルギー / 入射光エネルギー) を得ることができた。

さらに、本事業において、波形整形の対象となるパルス光が高ピークパワー光であることから、波形整形器を構成する空間光変調器の高強度光への適用性を検討、評価した。

波形整形装置内で位相変調を行うために用いる空間光変調器 (PAL-SLM) は、素子裏面に照射した Laser Diode による書き込み光によって空間座標毎の変調量を規定することで、素子の表面に入射する読み出し光 (フェムト秒レーザー) の位相を対応する空間座標毎に変調するデバイスである。高強度の光パルス有位相変調する際には、この読み出し光の光強度が強くなるため、素子裏面の書き込み光の入力領域にまで影響を及ぼしてしまう。これにより、素子に対して書き込み光と同等の作

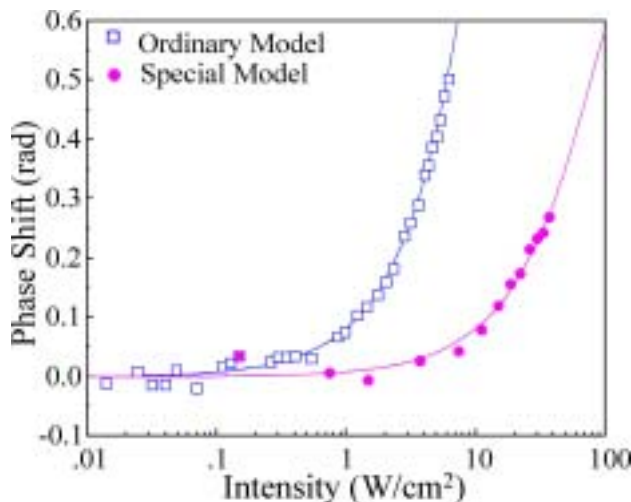


図8 一般仕様 SLM と高強度レーザー用 SLM の再生増幅パルス光に対する耐光強度特性評価結果

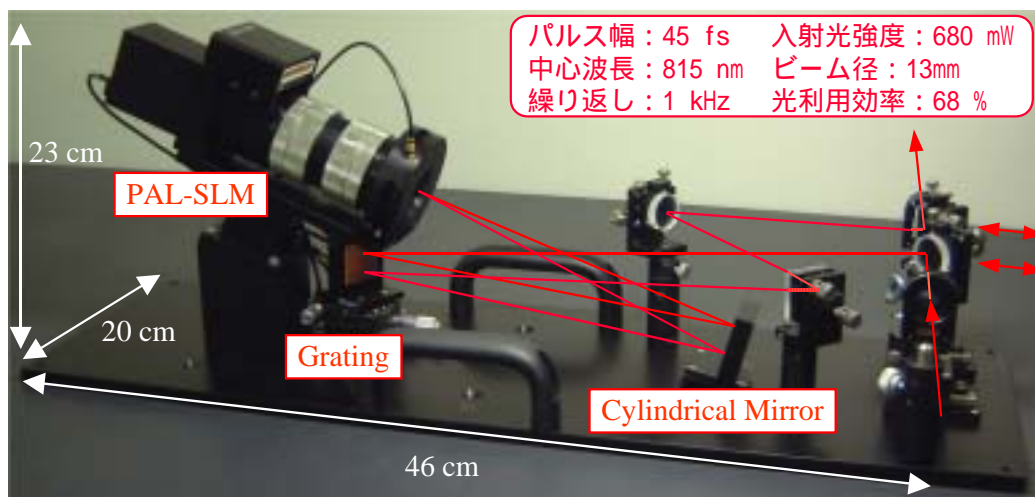


図9 再生増幅フェムト秒パルス対応波形整形器

用がなされ、正しく動作しなくなる。

この効果を見積もるため、読み出し光の強度を変えて、位相変調が正しく行われる入射光強度の範囲を評価し、高強度光パルスに対する空間光変器の適用性を調べた。図8に実験結果を青色で示す。横軸は読み出し光の入射光平均強度で、縦軸は位相シフト量である。空間光変器に入射する読み出し光強度が強くなると、読み出し光自身の位相を変調してしまうことが分かる。これより、位相が1度ずれるときの単位面積当りの平均光強度が、 200 mW/cm^2 であることが分かった。よって、この評価に用いたPAL-SLMを適用した波形整形器は、平均出力68 mW程度の光までしか制御することができない。

これに対して、高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される再生増幅光パルスは、平均出力600 mW程度のものである。よって、PAL-SLMの耐強度性を高めることをおこなった。そして、この対策を施したものを再び評価した。結果を図8に赤色で示す。これより、位相が1度ずれるときの単位面積当りの平均光強度が、 2 W/cm^2 と向上した。このPAL-SLMを用いることにより、波形整形器が平均出力680 mW程度の光まで制御可能となった。

この高強度レーザー用PAL-SLMを用いて、高強度レーザー用波形整形器を構築した。これを図9に示す。今回は、装置の小型化を図るため、溝本数1200本/mmの回折格子と曲率半径500 mmのシリンドリカルミラーを用いた。本配置でも空間光変調器の全面を利用しており、効率は68%（出射光強度/入射光強度）であった。また、光学装置を、幅460 mm×奥行200 mm×高さ230 mmの大きさに収めることができた。ここで、波形整形光学系の実質的な部分の奥行は80 mmと、さらにコンパクトである。

平成14年度は、上記した高強度レーザー用波形整形器を高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される再生増幅パルス光に適用した。実際に、波形整形器へ平均出力700 mWの光を入射させても、問題なく動作することが確認できた。ここで、位相変調特性の強度依存性が若干現れたが、実用上無視できる範囲であった。再生増幅パルス光は繰り返し1 kHzであることから、サブミリジュール/pulse程度の高強度フェムト秒パルス光に対して直接波形制御できることが実証された。入射光パルス幅を約50 fsとすると、ピーク出力10 GW程度までの波形制御が実現したこととなる。

以上、高強度レーザー用波形整形器を構築し、再生増幅パルス光の直接波形整形を実現するとともに、耐光強度特性の限界を明確にした。また、ここで得られた知見や技術がもととなり、テラワットパルスの波形整形、波形整形光によるテラヘルツ波発生、波形整形の非熱加工への応用、フェムト秒パルスのファイバー伝送、など、本事業においてさらに進んだ基盤技術開発をおこなうことができた。

波形整形再生増幅光パルスの非熱加工への応用

再生増幅パルス光を波形整形して、アクリル加工の高工率化と高精度化を同時に実現した。詳細を以下に述べる。

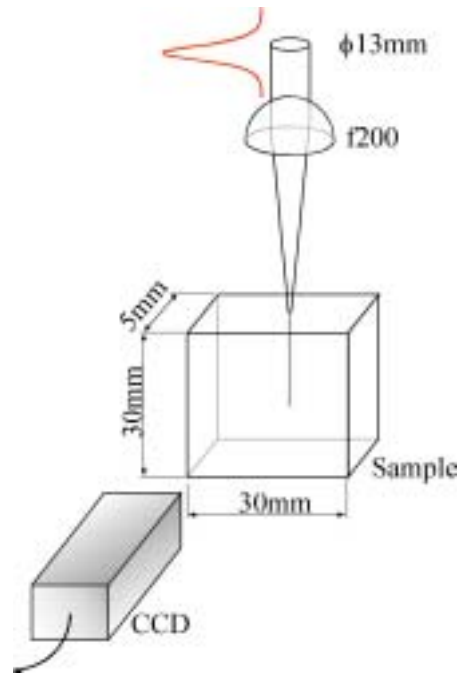


図 10 波形整形された光パルスによる加工実験

平成 14 年度は、時間波形制御の有効性を確認するために、高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される再生増幅パルス光を波形整形し、これにより得られた波形制御パルス光でアクリル加工をおこなって、加工状態を調べた。

実験の構成を図 10 に示す。構築した波形整形器を用いて位相変調がかけられた再生増幅光パルス（中心波長 815 nm、パルス幅 45 fs、繰り返し 1 kHz、パルスエネルギー 0.3 mJ）を、平凸レンズ（ $f = 200$ mm）でアクリル板（30 mm × 30 mm × 5 mm、無色透明）に集光し、側面から CCD カメラを用いて加工状態を観測した。レーザーの照射時間は 20 分とした。

図 11 に実験結果を示す。これらは、(a) 波形整形しない光パルス、(b) 波形整形により正弦波のスペクトル位相変調を与えた光パルス、(c) 矩形波のスペクトル位相変調を与えた光パルス、(d) 長さ 10 cm の BK7 を透過するときと同等なリニアチャープを与えた光パルス、(e) パルスエネルギーを 0.173 mJ に低減した波形整形しない光パルス、の 5 つの条件下で穴あけ加工をおこなった結果

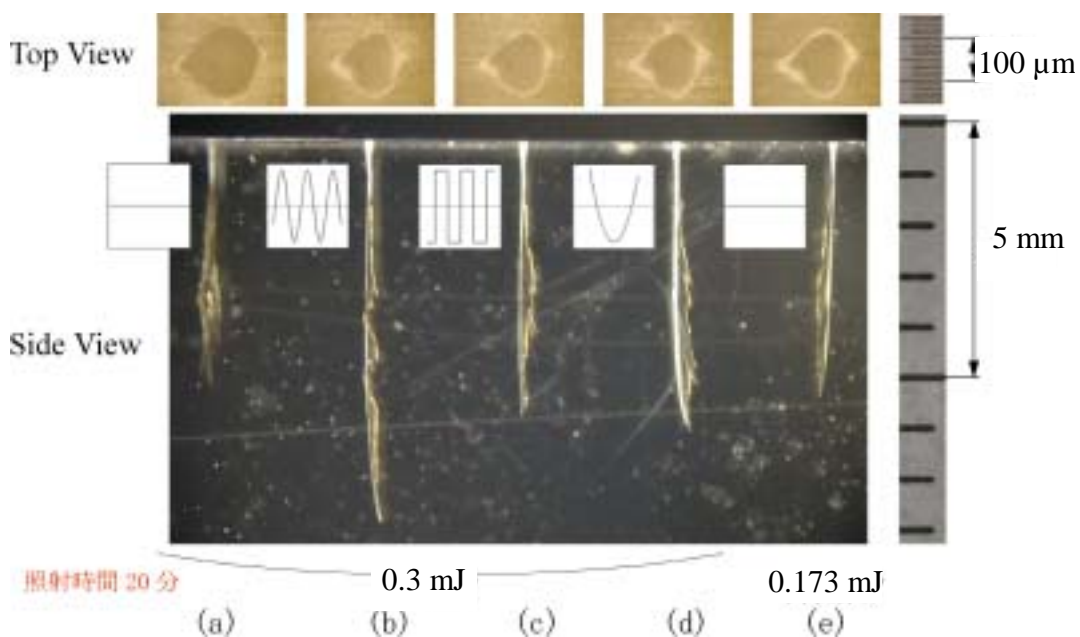


図 11 波形整形された再生増幅光を用いた光パルスによるアクリル加工結果

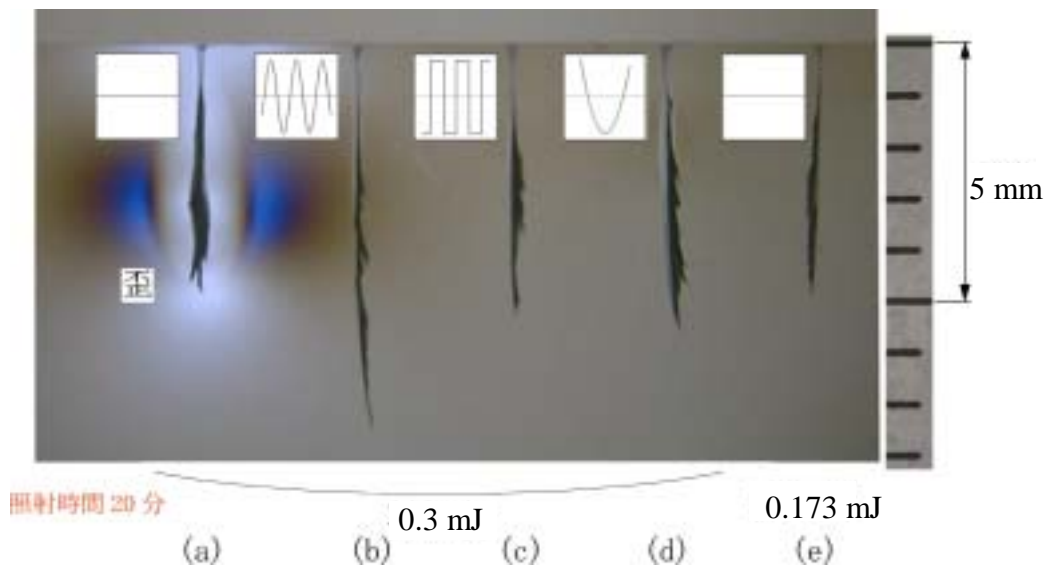


図 12 偏光画像計測法による加工部周辺の歪みの観測結果

である。尚、(b)および(c)においては、それぞれトリプルパルス列、およびダブルパルスの時間波形の光パルスでの加工となる。

(b)の結果は、(a)の結果と比べて、その加工量が約 1.6 倍増加するとともに、細かい加工が実現されている。また、(a)では、加工部周辺の変質が目視で確認できたのに対して、(b)や(c)では加工部周辺の変質を確認できなかった。

そこで、偏光画像計測法を用いて、前記(a)～(d)に対して、加工部周辺の状態をより詳しく調べた。測定結果を図 12 に示す。この図より、(a)の目視で確認された変質部(図中の白い部分)周辺の広範囲にわたって歪み(図中の青色と茶色の部分)が生じていることが確認された。一方で、波形整形された光パルスを用いた(b)や(c)の場合には、変質や歪みが生じていない。

以上、波形整形された再生増幅光パルスを用いることにより、細かい加工(精密加工)が可能となり、かつ、加工量も増加(高効率加工)することがわかった。また、加工部周辺の変質や歪みが回避できることを確認した。このように、レーザー加工において波形整形が有用な基盤要素技術であることを明らかにした。

フェムト秒時間分解偏光画像化計測法(Femtosecond Time-resolved Optical Polarigraphy: FTOP)

時間分解能 45 fs、空間分解能 3.3 μm を同時に満足する超高速二次元計測を達成した。また、0.4 ps 間隔の 8 つの時点での計測を世界で初めて実現した。詳細を以下に述べる。

FTOP は、本事業に参画している地域企業が独自に保有していた、伝播するフェムト秒光パルスの瞬間強度分布をフェムト秒の時間分解能で画像化計測することを可能とする技術である。これについて、本事業でさらに高機能化を進めた。

実際の実験に先駆けて、平成 12 年度は、既存の FTOP 系について問題点等を調査し、高感度試作機構築のための検討、設計をおこなった。また、光カー効果やフィラメント化等に関する基本的な物理に対する調査・検討をおこなった。

平成 13 年度には、装置に対する要求を考慮し、FTOP 計測系を構築して、超高速相互作用計測への適用実験をおこなった。

まず、FTOP 計測系の基本的な構築を行った。構築した系を模式的に図 13 に示す。これは再生増幅パルス光が、集光されながら伝播していくときの様子を計測可能な設計となっている。ここで、平成 12 年度に導入した高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される再生増幅パルス光は、中心波長 810 nm、パルス幅 45 fs、繰返し 1 kHz である。このパルス光は、電場が水平方向に振動している直線偏光であるため、初めにこれを鉛直方向とするなどの工夫を行った。これは光源の波長域が広いので、分散を抑えるためには反射鏡に S 偏光で入射するのが望ましく、また、計測位置直前に位相差板等を挿入する手間を省くためである。結像系はズームレンズを用いて倍率可変性を

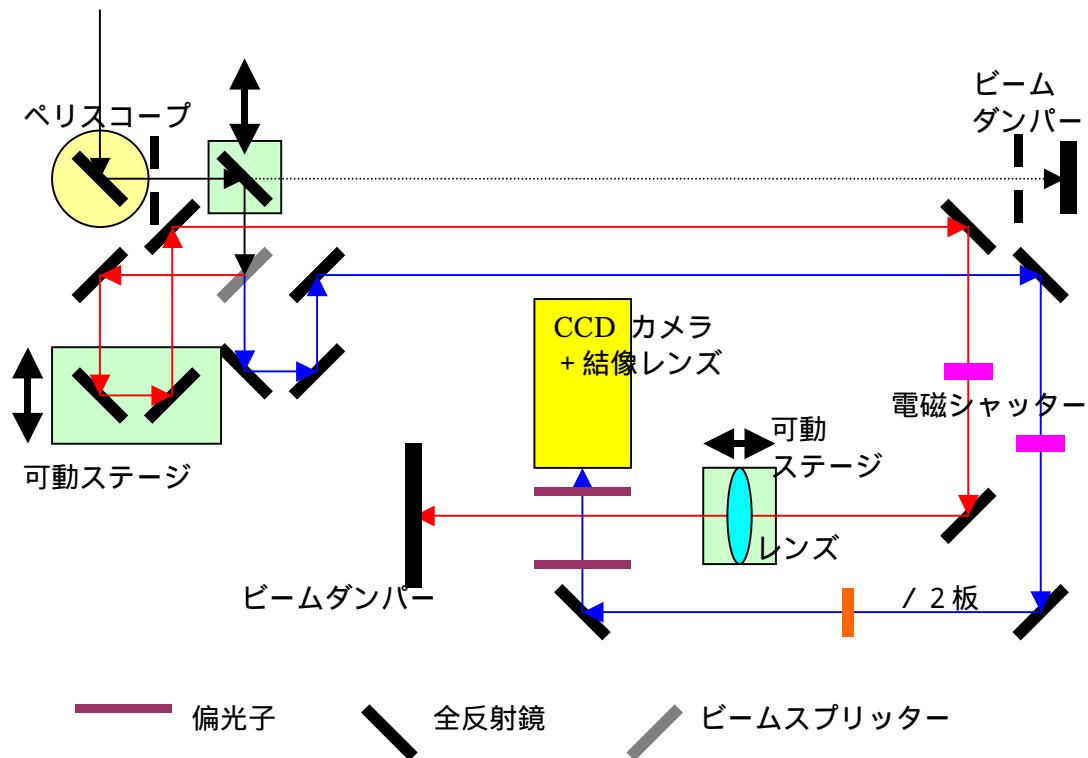


図 13 実験系

図っており、計測条件の設定を容易にすることができた。ズームレンズ+ CCD カメラの系による計測結果について、各倍率毎に画像サイズを実際の被写体大きさと対応づけた。

本装置を用いて、実際の計測を行った。図 14、15 は得られた画像を適当に画像演算した後のデータで、それぞれ FTOP 像・プラズマ発光像を表している。図中で、ポンプ光は上から下へと伝播している。画素数は 640×480 で、 $1.38 \times 1.04 \text{ mm}^2$ の大きさに対応している。高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される再生増幅パルス光は、1 kHz の繰り返しであるため、1 秒の露光時間で、1000 回の積算ができ、S/N 比のよい計測が可能となった。以上により、構築した FTOP 実験系が有効に機能することを確認した。

平成 14 年度は、図 13 の FTOP 計測系を用いて、入射パルスエネルギー・集光レンズ等について検討をおこなった。この系は再生増幅パルス光が、集光されながら伝播していくときの様子を計測可能である。

上記 FTOP 装置で、空气中をレンズで集光されながら伝播していく中心波長 810 nm、パルス幅 45 fs、繰り返し 1 kHz の高強度フェムト秒パルスの様子について観測を行った。図 16 に、取得 FTOP 画像の例を示す。各パネルが一つの FTOP 計測結果に対応している。

各パネルは、実験で得られた画像から、それぞれ $480 \times 70 \text{ pixel}^2$ ($1.04 \times 0.151 \text{ mm}^2$ の大きさに対応) の範囲を抽出したものである。背景雑音は演算によって差し引いている。伝播は図の左から右の向きである。各図はポンプ光の集光レンズを固定して、可変光学遅延器を移動させる毎に取得した一連の FTOP 像で、同じ図中の隣り合うパネルの遅延時間の差は、0.33 ps である。取得画像のスケールは $2.16 \text{ }\mu\text{m/pixel}$ である。ただし、ズームレンズの NA から見積もった分解能の値は、 $6.4 \text{ }\mu\text{m}$ であり、3.0 pixel 程度が光学的分解能となる。

図 16 から分かるように、伝播するフェムト秒光パルスの様子を明瞭に観察することに成功した。本年度は、同じ系を用いて、入射パルスエネルギーや集光レンズを変化させ、一連のデータを取得することで、これらの条件がパルス伝播に及ぼす影響を調べた。

これまで kHz の高繰り返し光源を用いた FTOP 計測の例はなく、計測の積算ショット数を容易に増やせることから、計測画像の SN 比の向上が期待される。そこで、計測可能な入射パルスエネルギーの下限についての実験的検討をおこなった。

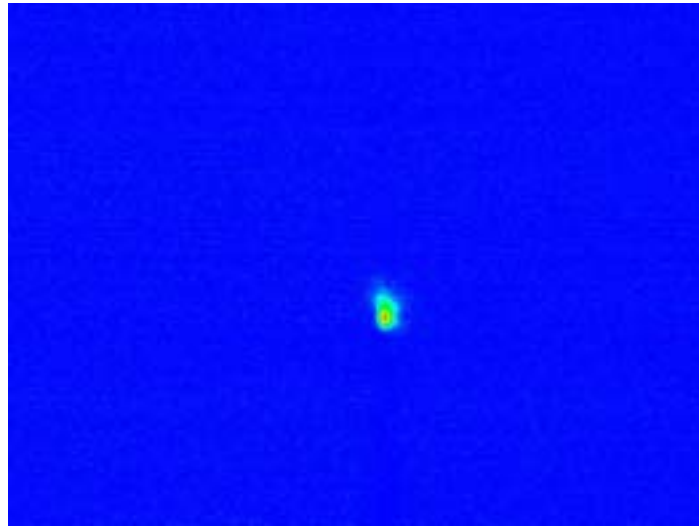


図 14 FTOP 計測像

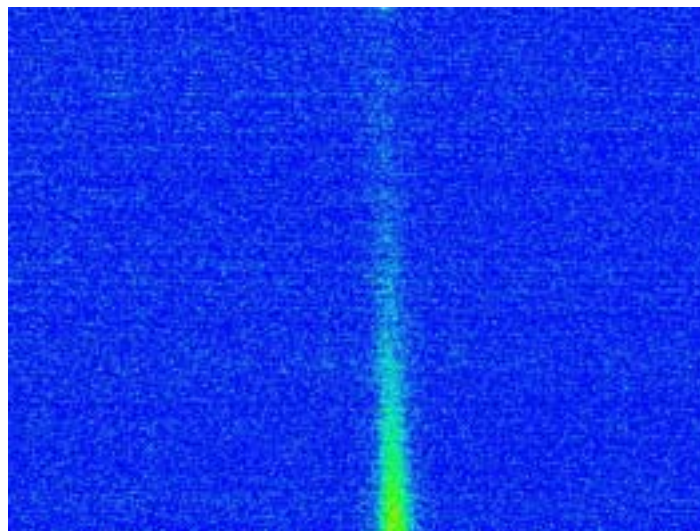


図 15 プラズマ発光の観測像

ポンプ光のエネルギーを減光したあと、ポンプ光を $f = 50 \text{ mm}$ の平凸単レンズで集光したときの焦点付近において、FTOP 計測を行った。図 17、18 に、取得した FTOP 画像を示す。各図が一つの FTOP 計測結果に対応している。これらは、実験で得られた画像から、 $80 \times 32 \text{ pixel}^2$ ($173 \times 69 \text{ }\mu\text{m}^2$ の大きさに対応) だけの範囲を抽出したものである。図 17、18 を計測するときの積算は 550 フレームであり、18,333 パルス数を積算して計測した結果である。背景雑音は演算によって差し引いている。また、伝播は図の左から右の向きである。この比較から、焦点近傍でのみ FTOP 計測が行え、 $f = 50 \text{ mm}$ の平凸単レンズで集光した空気中のパルス伝播について少なくとも約 $10 \text{ }\mu\text{J}$ までは計測可能であることが明らかになった。よって、同条件で 0.1 気圧 の環境下では、1,000 ショット積算で 0.1 mJ 程度まで計測可能と考えられ、マルチパス光増幅器から出力される 100 mJ のパルスであれば単ショットでも計測が可能と予想している。

図 17 については、分布の幅を見積もることも可能であり、FTOP 像における分布の半値全幅 (半値を含む 2 画素間を直線補間して算出) から、ビーム断面の半値全幅が $7.2 \text{ }\mu\text{m}$ であり、集光点でのパルス幅の見積もり値が 90 fs と求められる。以上により、高繰り返しパルスレーザーを用いることで、空気中を伝播するフェムト秒パルスに関し、 $10 \text{ }\mu\text{J}$ 程度まで、定量的解析が可能な画像化計測を行うことができる。

つぎに、一度の計測で伝播の全体の様子を知る試みを行った。このようにすると、例えば伝播の様子を参照しながら調整等を行うことも可能となる。この目的のため、FTOP 装置に対し、プローブ光路に図 19 に示した 8 連パルス列生成器を挿入した。これにより、FTOP 装置は、8 つの時点にお

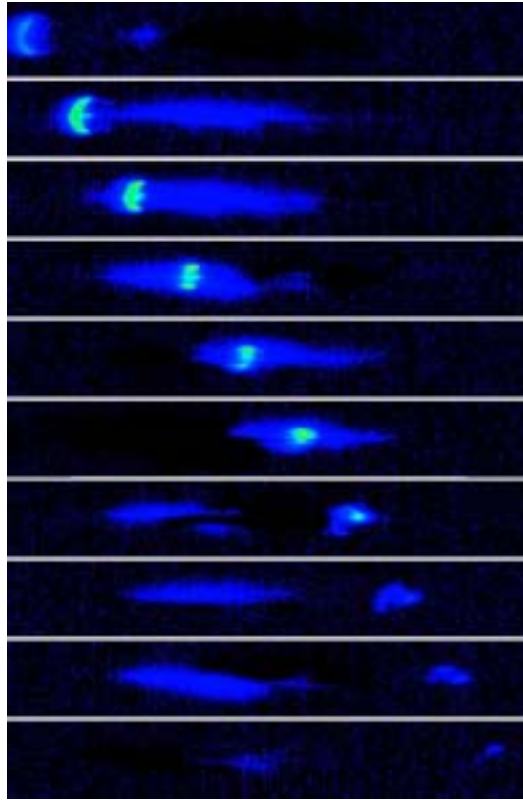


図 16 パルスエネルギー 0.44 mJ の光パルスを $f = 50 \text{ mm}$ の平凸単レンズ空气中に集光した場合の FTOP による観測結果。(0.33 ps ごとの観測像を順に並べて表示した。)

ける計測を一度に行うことのできる系へと、高機能化できた。

実験では、プローブ用の光を $\langle \text{In } 1 \rangle$ に入射させ、8連パルスとしたのち $\langle \text{Out } 1 \rangle$ から出射させ、相互作用領域へと導いた。プローブパルス列のエネルギー比は、相互作用域への到達時間順に、 $0.92 : 0.89 : 0.89 : 0.91 : 0.91 : 1.00 : 0.91 : 0.89$ で、エネルギー利用率 ($\text{Out}1/\text{In}1$) は 49.2% である。この系を用いて、 $f = 200 \text{ mm}$ の色消し2重レンズで空气中を集光されながら伝播するフェ

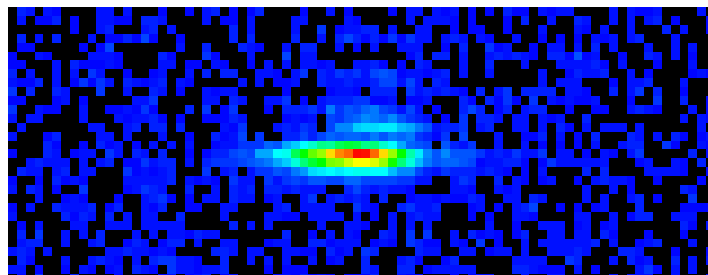


図 17 $12 \text{ } \mu\text{J}$ [0.26 GW peak]パルスの計測結果

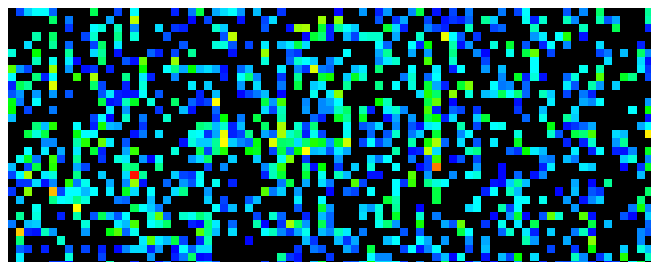


図 18 $8.1 \text{ } \mu\text{J}$ [0.18 GW peak] パルスの計測結果

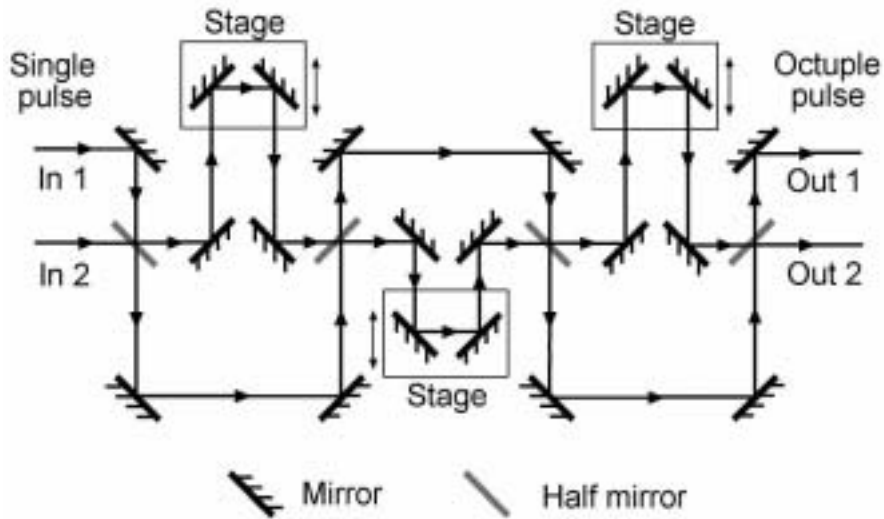


図 19 8連パルス列生成器

ムト秒光パルスの FTOP 測定実験を行った。ポンプ光のエネルギーは集光レンズ前で 0.49 mJ であった。ただし ± 0.01 mJ 程度のゆらぎがパワーメータで観測された。パルス幅が 45 fs であるので、三角波形を仮定し、尖頭出力値は 10.9 GW と算出される。

図 20 に、プローブ光のパルス間隔を 0.4 ps としたときの取得 FTOP 画像を示す。各パネルが一つの計測結果に対応している。これらは、実験で得られた画像から、 $480 \times 70 \text{ pixel}^2$ ($1.04 \times 0.151 \text{ mm}^2$ の大きさに対応) だけの範囲を抽出したものである。背景雑音は演算によって差し引いている。被測定光の伝播は図の左から右の向きである。各計測の積算時間は 2 秒で、2000 ショットに対応している。ここで、各 FTOP 像には、プローブ光のパルス成分間のエネルギー比の重みがかかっている。

以上、伝播するパルスの 8 つの時点における瞬間強度分布を、フェムト秒の時間分解能かつサブピコ秒の時間間隔で、一度の計測で取得できることを実証した。これにより、入射光パルスを制御するための重要な計測技術を提供できると期待される。

つぎに、高性能結像レンズを新たに採用することで、拡大率や空間分解能の向上を行った。

具体的には、図 13 の実験系において、結像レンズにジェネシア製 GE1154 を用い、最大拡大率において計測を行った。このとき、取得画像のスケールは $0.56 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 、光学的分解能は $3.3 \mu\text{m}$ である。

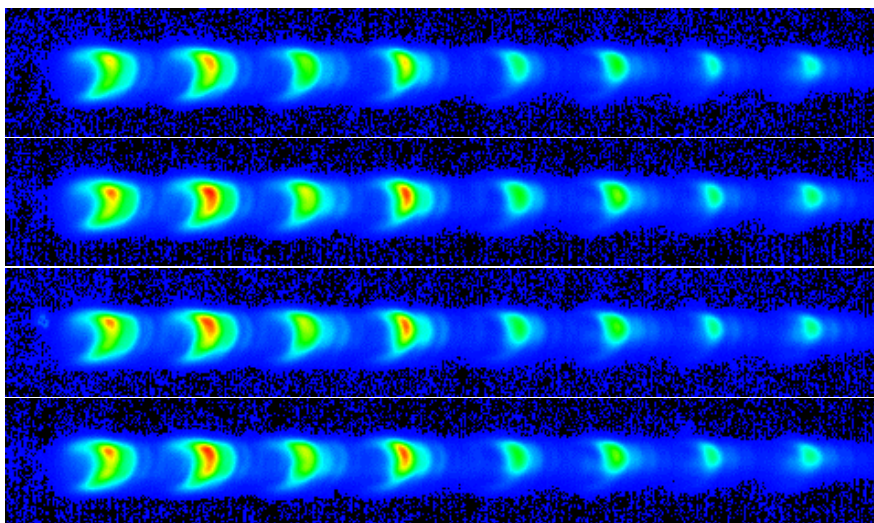


図 20 0.4 ps 間隔の 8 連パルス列プローブを用いた FTOP 計測結果

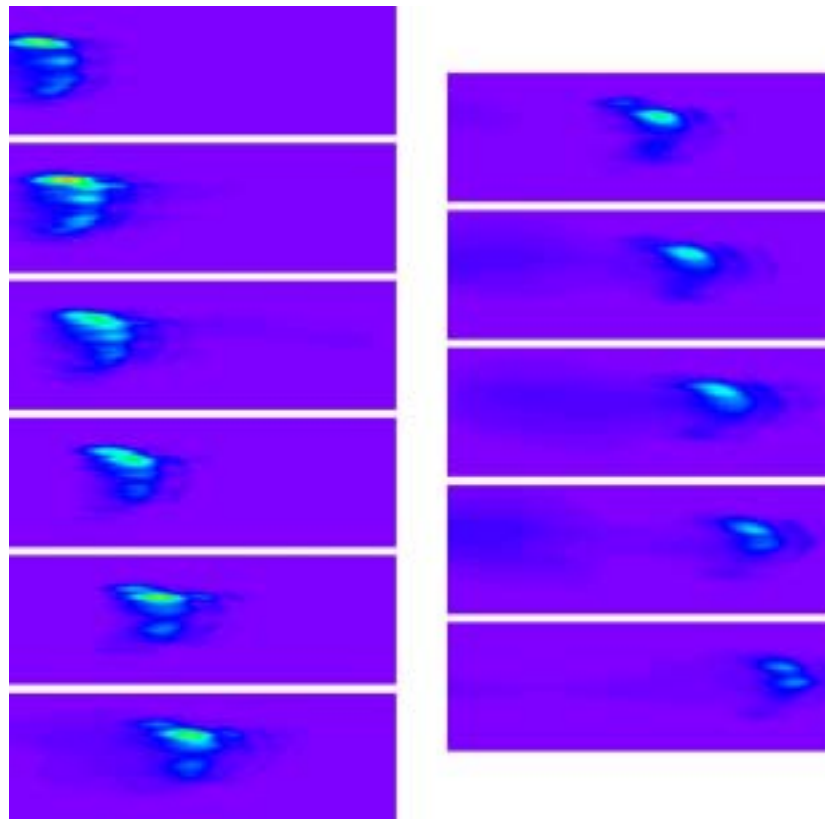


図 21 遅延時間 66.7 fs 間隔で取得した一連の FTOP 像 (最大輝度値 23387 で規格化した。)

f = 50 mm の平凸レンズで空気中を集光されながら伝播する、中心波長 810 nm、パルス幅 45 fs、エネルギー 0.50 mJ (よって、尖頭出力 11.1 GW) の光パルスについての FTOP 測定結果を図 21 に示す。各パネルが 1 つの計測結果に対応しており、実験で得られた画像から、 $480 \times 160 \text{ pixel}^2$ ($267 \times 88.9 \text{ } \mu\text{m}^2$ の大きさに対応) だけの範囲を抽出したものである。隣接パネル間の遅延時間差は 66.7 fs である。背景雑音は演算によって差し引いている。ポンプ光の伝播は図の左から右の向きである。各計測の積算時間は 1 秒で、1000 ショットに対応している。ここで、プローブ光のパルス幅も 45 fs なので、各画像の時間分解能は 45 fs である。図 16 に比べ、パルスの集光していく過程がより明確に観測できるようになった。

以上、FTOP の拡大率や空間分解能の向上をおこない、光伝播計測技術を高機能化した。

以上述べてきたように、FTOP という、伝播するフェムト秒光パルスの瞬間強度分布をフェムト秒の時間分解能で画像化計測する技術に関して、既存技術の検討をした上で、実際の計測系の構築をおこなった。また、構築した FTOP 装置を用いて、高強度フェムト秒光パルスが集光されつつ伝播していく様子を、各条件にて計測した。さらに、8 連プローブパルスや高性能結像系を用いて、FTOP 計測系の高機能化をおこなった。

短寿命放射性同位体のモニター装置の整備

モニター装置を整備し、レーザー生成放射性同位体検出を効率化した。詳細を以下に述べる。

<2-a> 先導的探索研究における短寿命放射性同位体の生成に関する研究を推進するためには、短寿命放射性同位体から放出される微量な β 線を計測するための技術が必須である。よって、平成 13 年度に、使用する放射線計測器の仕様を検討し、必要な計測装置を整備した。

<2-a> 先導的探索研究において生成予定の短寿命放射性同位体は、陽電子放出核種である。核から放出された陽電子は、周辺に存在する電子と対消滅し、2 つの γ 線 (消滅線) となる。これに関して、微量な短寿命放射線同位体から放出される消滅線を計測するためには、NaI シンチレータと光電子増倍管を結合させた 2 つの検出器を用いて、コインシデンス計測 (同時計数) をおこなうことが有効であることがわかった。この際、検出器出力の波高分布を測定することによって

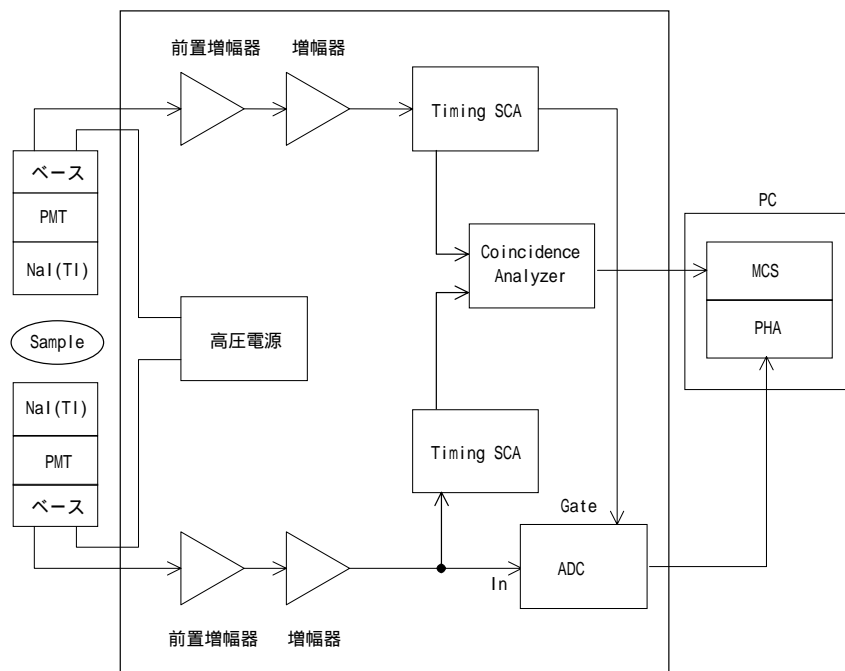


図 22 放射線計測器の構成

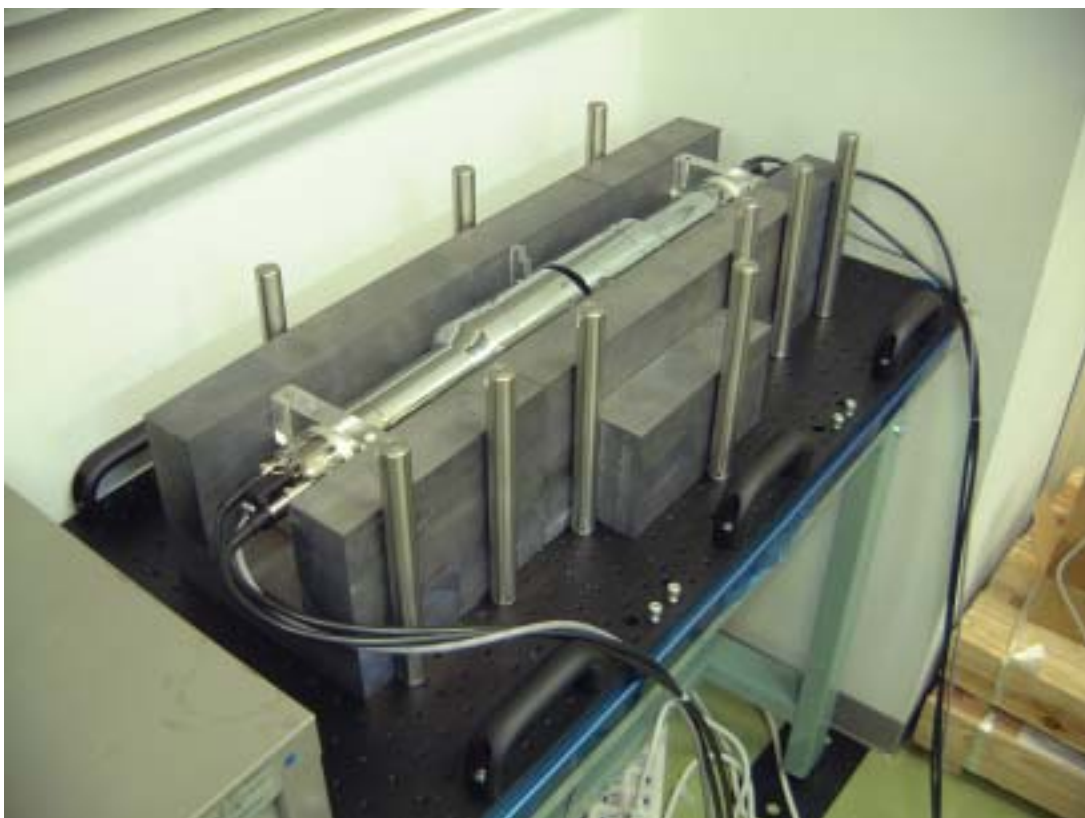


図 23 鉛ブロックに囲まれた検出器（上面の鉛は撮影のために取り外してある）

線のエネルギー分布を求め、さらに、時系列測定を行うことによって放射性同位体の半減期を評価することができる。

図 22 に整備した放射線計測器の構成を示す。被測定試料は、直径 3 インチ高さ 3 インチの NaI (Tl) シンチレータと、カリウム比率が 300 ppm 以下の低カリウムガラスを用いた光電子増倍管で構成される 2 組の検出器の間に置かれ、増幅された検出器の出力信号のタイミングを検出してコインシデンス計測（同時計数）をおこなう。そして、エネルギースペクトル測定、及び波高弁別器の閾値設定を行うために波高分布を取得する（PHA 機能）。また、数分程度と短い半減期を測定するため

に計数値の時系列測定（MCS 機能）をおこなうことによって放射性同位体の半減期を評価する。なお、外部からの背景放射線を遮蔽するために、図 23 に示すように検出器周りを鉛ブロックで覆った。これにより、背景放射線の計数率を 0.3 cps にまで低減することができた。

以上、必要な放射線計測器について、その仕様を検討し、整備をおこなった。なお、本装置を用いた短寿命放射性同位体の計測結果については、テーマ<2-a> - において報告する。

戻り光対策

レーザー装置における戻り光を低減し、レーザー損傷問題を解決する手法を考案し実証した。詳細を以下に述べる。

高密度フォトン発生・計測実験装置のマルチパス増幅パルス光を用いた放射化実験系の最適化を進めていったところ、前段の再生増幅器内の反射鏡に損傷が起こる現象が頻繁に生じるようになった。再生増幅器内反射鏡が損傷を受けた場合、再生増幅器以降で光パルスが得られなくなり実験継続が不可能となる。このような場合、反射鏡を回転させて、損傷のない反射面を利用するなどの調整が必要となる。さらに、この調整で生じるわずかなビーム位置変化は、マルチパス増幅パルス光の特性にも影響を与えて実験条件が変化し、安定に実験を継続することが困難となる大きな問題を生じる。

そこで、平成 16 年度にこの損傷の原因を調べた。結果、レーザー照射実験に使用している固体ターゲットから戻り光が発生し、この戻り光が増幅媒質中に残存している利得によって増幅され、再生増幅器内反射鏡に損傷を与えることが明らかになった。そこで、戻り光によって実験系が損傷しない方法を検討し、高強度フェムト秒レーザー利用における本質的な問題解決を試みた。原理は、本事業における出願済特許に基づいたものである。

コア研究室に設置した高密度フォトン発生・計測実験装置のマルチパス増幅器は、再生増幅器の 1 kHz パルスから、10 Hz のパルスを取り出して、3 パスで増幅をおこなっている。ここで、改良前は 2 台の励起用 YAG-SHG パルス光（各 850 mJ）を用いて、チタンサファイア結晶を励起している。このとき、この 3 パス増幅により、入力 0.5 mJ 程度に対し、出力 200 mJ 程度が得られる。マルチパス増幅器を新しい構成にすることにより、マルチパス増幅器の残留利得を減少させることに成功した。また、4 パス増幅させることで 2 台の励起用 YAG-SHG パルスエネルギーを各 750 mJ と小さくしても、マルチパス出力エネルギーをこれまで以上の 260 mJ とすることができた。

以上より、戻り光が増幅されて、前段の光学素子を損傷する現象を抑制でき、マルチパス増幅パルス光を安定に実験に用いることができるようになった。同時に、マルチパス増幅パルス光のピークパワーを 30% 増強することができた。

なお、励起用 YAG-SHG パルスエネルギーをこれまで通り各 850 mJ で使用すると、マルチパス増幅光を 360 mJ とすることができ、パルス圧縮器の回折格子を損傷する恐れがあるため上記のように 260 mJ に抑制して実験に使用している。この時、パルス圧縮器の光利用効率は約 60% であるため、パルス圧縮後の光パルスは、パルスエネルギー約 160 mJ、パルス幅約 50 fs、ピークパワー約 3.1 TW である。

テラワットパルスのパルス面の計測・制御

パルス面を計測・制御することで、レーザー集光強度を増大させた。詳細を以下に述べる。

短寿命放射性同位体生成を実現するには、集光強度が最も重要である。ここで、光は波面（光波の等位相面）に垂直な方向へと伝播する一方で、光電場のエネルギーはパルス面（パルス伝播軸上の最大出力を示す位置をつないだ面）にそって分布している。波面とパルス面の不一致は、パルス全体で見たときの実効的なパルス幅の増大につながるため、改善する必要がある。

これに関して、平成 15 年度に、パルス面計測系を構築し、パルス面と波面とを一致させることで、集光効率を向上させることを試みた。具体的には、パルス面を計測しながら、パルス圧縮器の回折格子のあおり角を調整した。

実験はコア研究室に設置した高密度フォトン発生・計測実験装置に関しておこなった。構築したパルス面計測系を図 24 に示す。パルス圧縮器の参照窓から出射した光線（桃色）を、干渉計（薄緑色）へと導いた。光線の反射角をなるべく小さくすることで 2 インチ径反射鏡の使用を可能とし、全体的にコンパクトな形状を実現した。実験に際し、単ショット自己相関器による計測結果から、

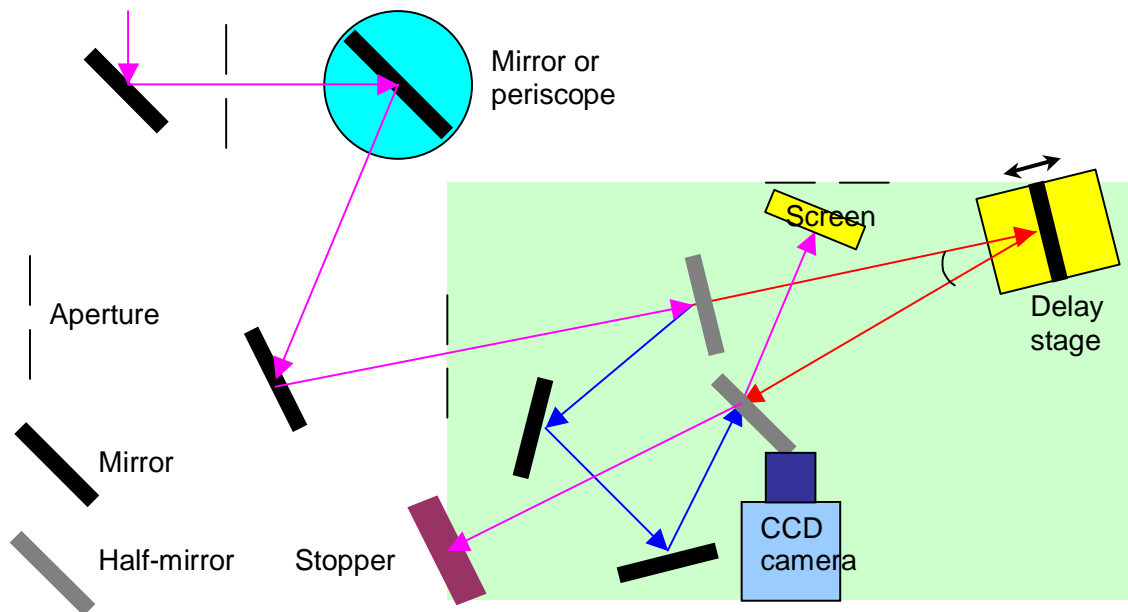


図 24 実験系

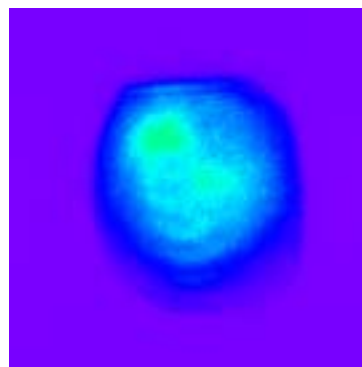


図 25 ビーム断面の様子

ガウス型波形を仮定することで、パルス波形の半値全幅が 50 fs 以下であることを確認した。

干渉計に入射した光は、半透鏡で 2 分岐されたのち、一方（青色の光路）は 2 枚の全反射鏡で反射されてからもう一つの半透鏡へ、他方（赤色の光路）は遅延ステージにのせた全反射鏡 1 枚で反射されてから半透鏡へ、と導かれる。半透鏡で 2 つの光路からの光を重ね合わせることで、干渉が生じるが、2 つの光路における反射回数の偶奇が異なるため、互いに鉛直軸に関して反転したビーム同士の重ね合わせとなっている。そのため、パルス面が波面に対して水平方向に傾きを持っていると、ビームの一部でしか干渉縞が生成しない。また、干渉縞の位置は、遅延ステージの変位によって移動する。ここで、干渉縞を見やすくするため、2 分岐ビームを重ね合わせる際、一方を少しだけ鉛直方向に傾けた。これより、一様な干渉縞が生じるように、パルス圧縮器の回折格子のあおり角を調整することで、パルス面が波面に対して平行となる出力を得ることができる。干渉縞の計測は、図に示した CCD カメラで単ショット計測した。また、反射鏡の配置から、 $\theta = 0.31 \text{ rad} = 18^\circ$ と見積もられ、これより、遅延ステージの移動量 d に対し、遅延時間の変化が $1.98 d / c$ (c は光速) の関係式で求められることがわかる。

図 25 - 27 は、パルス面計測装置によって取得した結果を示す。それぞれが横 $52.2 \times$ 縦 53.7 mm^2 の大きさに対応している。

まず、ビーム断面の水平方向に関する調整をおこなうため、図 24 の水色部分に反射鏡 1 枚を設定した状態で、実験をおこなった。干渉計測に先駆けて、圧縮器出射光の参照用窓から出てくるビームについて、その断面の様子を計測した。これを図 25 に示す。これは、図 24 の系で、青色の光路を遮り、赤色の光路のみを通過したビームをスクリーンにあて、CCD カメラで観測して得られた

ものである。これより、ビーム断面全体の径は、おおよそ横 24 mm×縦 26 mm 程度であることがわ

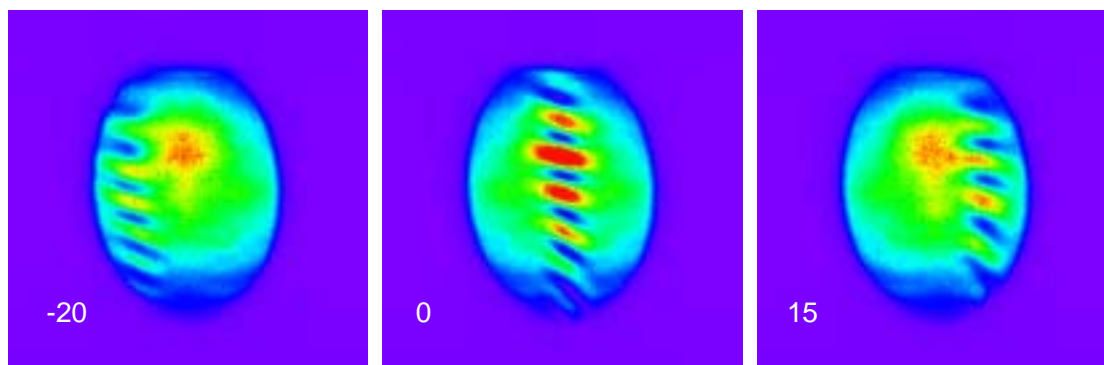


図 26 調整前の状態における干渉縞

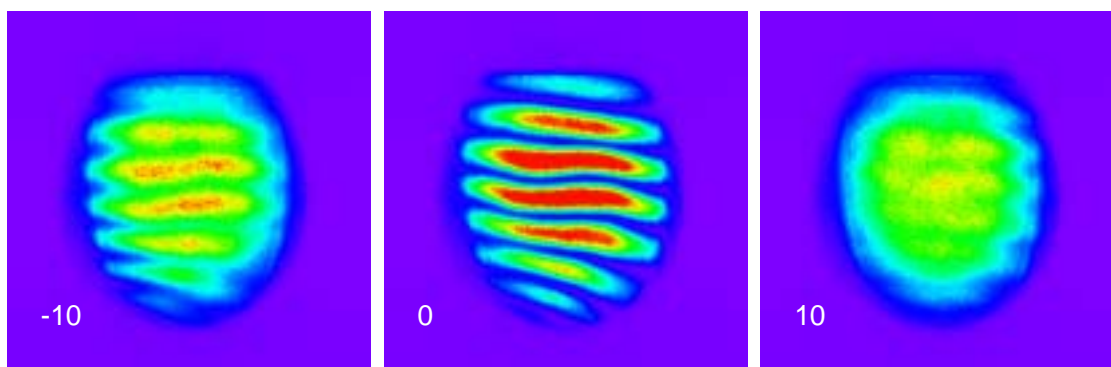


図 27 回折格子の水平方向あおり調整終了時における干渉縞

かる。

次に、干渉計の両腕に光を入射させることで、パルス面の計測をおこなった。この結果を図 26 に示す。各画像の左下に示した数値は、赤色の光路に設定された遅延ステージの変位を μm 単位で表示したものである。ここで、2 つ選んだ画像の左下に記した数値の差に $6.59 \text{ fs}/\mu\text{m}$ をかければ、各画像間の遅延時間が得られる。図 26 より干渉縞の水平方向幅は 6.0 mm 程度であり、2 つのビームが $1/4$ 程度しかオーバーラップしていないことがわかる。また、ステージの変位 $1 \mu\text{m}$ ごとに 0.50 mm の縞移動があった。よって、ビーム断面の端から端まで縞を移動させると、ステージは $48 \mu\text{m}$ だけ変位させなければならず、これはパルス面の傾きが 320 fs 相当であったことを示している。

計測画像をもとに、回折格子の水平あおり角の調整をおこなった。図 27 には、回折格子の水平方向あおり調整終了時のパルス面のようすを示す。図中の表記は、図 26 と同じである。水平方向のパルス面の傾きが除去されたことを受け、縞が断面全体に一樣に現れている。これにより、水平方向のパルス面の調整に成功したことが確認できる。

引き続き、図 24 の水色部分に、ペリスコープを置き、ビーム断面を 90° 回転させることで、回折格子の鉛直方向あおり角の調整もおこなった。図 26 と同様な計測により、パルス面の鉛直方向の傾きも補正した。

以上により、テラワットレーザーのパルス面と波面を一致させることに成功した。これにより、ビームの実効的なパルス幅を最適化できた。

テラワットパルスの時間波形の制御

高密度フォトン発生・計測実験装置において、テラワットパルスの波形整形を実現した。詳細を以下に述べる。

2 TW 程度のピーク出力のパルス光を用いて短寿命放射性同位体生成をおこなうには、波形を制御することが重要となる。そこで、テラワットパルスの時間波形の制御について、本事業で導入した高密度フォトン発生・計測実験装置に適合した波形整形の方法について検討した。

前述のように、平成 13 年度には、高密度フォトン発生・計測実験装置から出射される再生増幅

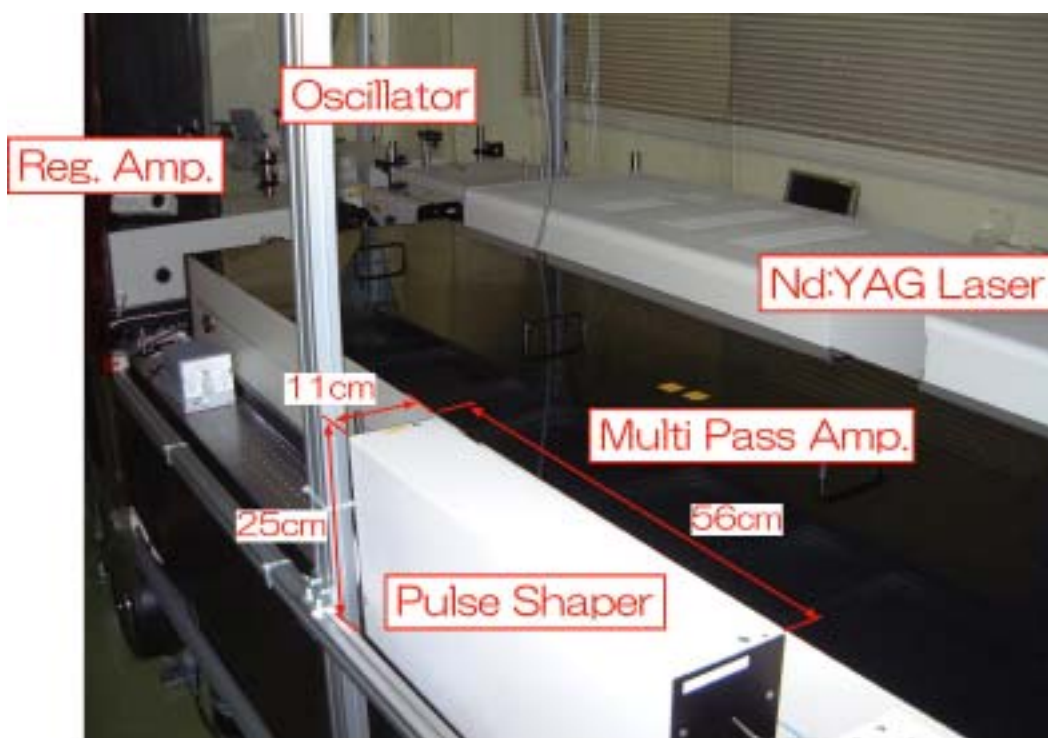


図 28 テラワット波形整形システムの外観

光パルス波形を制御することのできる波形整形器を構築した。これをもとにして、平成 14 年度に、マルチパス増幅パルス光を直接波形整形するための検討をおこなったが、この直接波形整形は困難であることが明らかになった。そこで、検討を進めた結果、再生増幅器から出射したチャープパルス光を、まず波形整形器で波形整形し、その後にマルチパス増幅器で増幅するという手法が有効であると結論づけられた。このように、テラワットのフェムト秒光パルスを波形制御する手法についての指針が得られた。

平成 15 年度には、高密度フォトン発生・計測実験装置から出射されるテラワットパルス光を波形整形するため、上記の指針のもとで波形整形器を設計、構築し、高密度フォトン発生・計測実験装置へと組み込んだ。さらに、テラワットパルスの時間形状を変化させる検討をおこなった。

組み込む上で、再生増幅パルス光の波形を制御した後にマルチパス増幅する方法を採用した。実際のレーザーシステムへの組み込みを考慮して、従来器(長さ 65 cm×幅 16 cm×高さ 25 cm)に比べ 1/2 程度の小型化(長さ 56 cm×幅 11 cm×高さ 25 cm)をおこない、これに成功した。波形整形器をレーザーシステムに組み込んだ状態の外観を図 28 に示す。

次に、テラワットパルス光の波形整形を実証するための実験をおこなった。パルス形状の計測は、パルス圧縮器の参照窓から出射された光を、単ショット自己相関器(SSA)へと導くことでおこなった。

まず、増幅光パルスを評価するため、波形整形器の位相変調を平坦なものとした状態で、SSA を用いて計測した。このとき、単一パルスが得られると期待される。ここで、この状態でパルス幅が最短となるよう、パルス圧縮器の回折格子間隔を調整した。SSA による計測結果(図 30 の黒線)から、ガウス型パルス形状を仮定することで、パルスの半値全幅が 74 fs であることを確認した。これより、パルスがガウス型であるとして 0.55 TW の尖塔出力が得られていることが確認された。ただし、パルス幅が広めに見えてしまうのは、真空チャンバーの光学部品の問題により高出力パルスの計測に難点が生じてしまっているためと考えられる。よって、実際には、低出力時からの類推で、パルス幅 50 fs、したがって 0.8 TW 程度のパルスであると期待される。

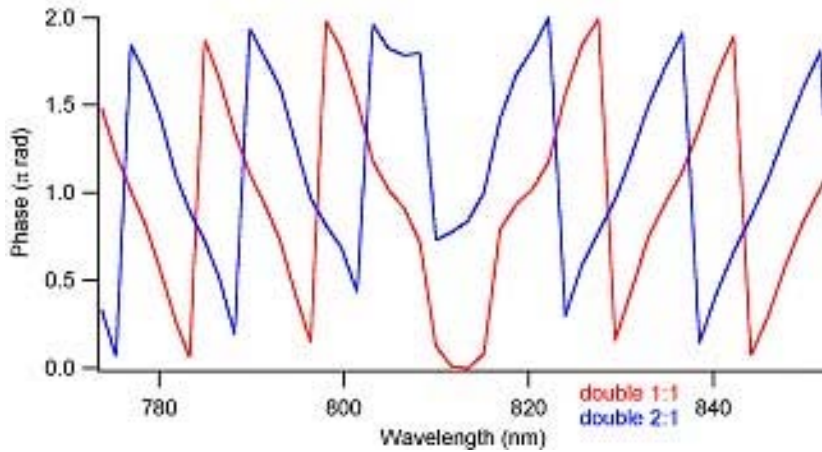


図 29 与えた位相変調様式

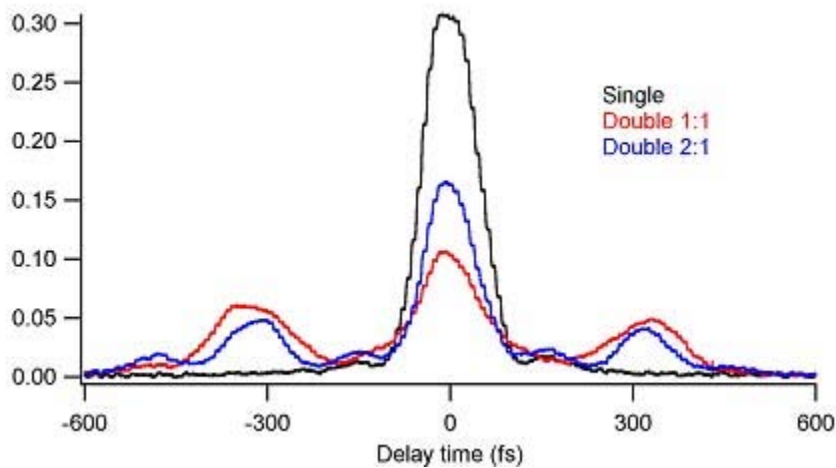


図 30 SSA によるパルス形状計測結果

図 29 の位相変調を波形整形器にかけることで、得られる増幅光の評価をおこなった。期待されるのは、300 fs の間隔を持ったダブルパルスで、エネルギー比が、1:1 のものと 2:1 のものである。これらに関して、SSA によってパルス形状を計測した結果を図 30 に赤・青線でそれぞれ示す。結果から、所望のパルス形状がほぼ得られていることが確認される。また、SSA 信号の中心ピークの時間幅から、ダブルパルス化したときも、それぞれのパルスの半値全幅が 74 fs 程度であることが保証される。よって、エネルギー比が 1:1 のものは、それぞれが 0.27 TW のダブルパルスとなっており、エネルギー比が 2:1 のものは、0.36 TW と 0.18 TW のダブルパルスとなっていると考えられる。この結果から、今回の条件では、波形整形された光パルスがマルチパス増幅器を通過するにあたって、自己位相変調等による非線形効果の影響を受けないこともわかった。

波形整形器を配置したことによる増幅光のエネルギー損失も調べた。まず、波形整形器を経由しない配置で、増幅光のエネルギーを計測すると、マルチパス出射位置で 185 mJ であった。他方、波形整形器を経由する配置では、マルチパス出射光は 72 mJ のエネルギーを有していた。ここで、このエネルギー値は、与えた位相変調によらず一定であった。よって、このときの配置では、波形整形器を経由したことにより、エネルギーが 40%以下になってしまうことがわかった。波形整形器の透過率は 65%であり、増幅光がさらに小さく 40%以下となるのは、ビーム品質の劣化によるものと考えられる。

以上により、テラワットパルスの波形整形が可能であるということを実験的に示した。

平成 16 年度は、高出力の波形整形を実現するため、波形整形器を挿入した系の増幅効率の改善をおこなった。

波形整形器通過後のビームの様子を観察した結果、水平方向のビーム広がりが無視できないほど大きいことが分かった。マルチパス増幅効率の低下は、波形整形器挿入によるビームパターンの劣

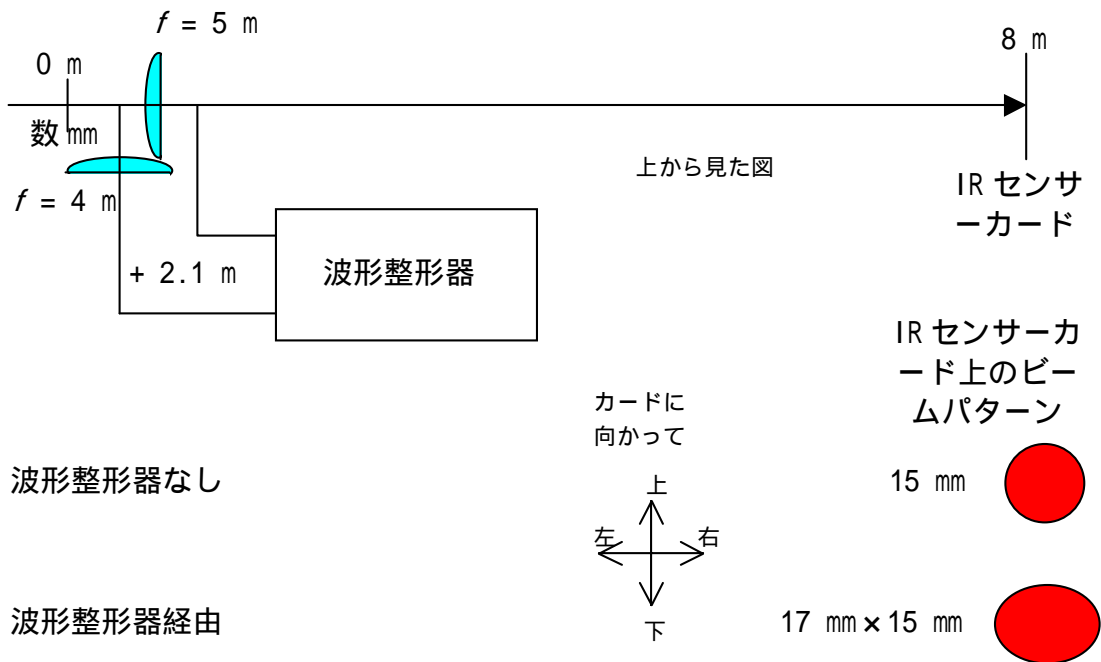


図 31 遠方におけるビームパターン計測のための光学素子の位置関係と、IR センサーカード上での断面形状の様子

化が大きな原因であると考えられた。そこで、波形整形器を、水平方向のビーム広がり鉛直方向の広がりと同程度になるよう調整した。

実際に波形整形されるビームを波形整形器に入射させ、遠方におけるビーム断面の観測をおこなった。この観測における光学系の位置関係を図 31 に示す。図中の光路長は、波形整形器入射用可動ミラーの 0.1 m 程度手前を原点としている。図に示した配置の下、波形整形器を経由しないときと経由するときの、ビーム断面の大きさを計測した(波形整形器を経由すると余分に約 2.1 m の光路長が追加される)。各条件における断面形状の概略を図 31 に記載する。波形整形器の再調整に伴い、波形整形器を経由したときにも、ほぼ円形のパターンが得られることが分かった。これにより、波形整形器が好適に調整されたことを確認できた。

再調整した波形整形器を経由する光路の透過率を見積もるため、マルチパス増幅器へと入射するパルスのエネルギーを計測した。その結果、波形整形器なしで 0.75 mJ、波形整形器経由で 0.51 mJ であった。これより、透過率が 68%と求まる。

さらに、マルチパス増幅後のエネルギー計測をおこなった。ここで、平成 15 年度はマルチパス増幅器が 3 パスであったのに対して、平成 16 年度には 4 パスへと改良したため、増幅効率自体も向上している。光路長の違いから、それぞれにおいてマルチパス増幅器を励起するための YAG レーザーの Q-switch のタイミングを最適化した。

その結果、マルチパス出射パルスエネルギーは、波形整形器なしのとき 245 mJ であるのに対し、波形整形器経由のとき 205 mJ であった。波形整形器経由のときのエネルギーは、波形整形器なしのときの 84%であるが、このエネルギー差は、波形整形器経由によりマルチパス増幅器に入射するパルスのエネルギーが小さくなったことが原因であると考えられる。

以上、波形整形器挿入時の光学系を再調整することで、波形整形器を経由する光パルスのマルチパス増幅効率を向上することに成功した。これにより、エネルギーの大きな波形制御パルスを生成できると期待される。

光と物質との相互作用においては、光パルスが最短の時間波形を有するとき相互作用の効率が必ずしも最大になるわけではない。よって、さまざまな波形の高出力パルスを得る方法を検討する必要がある。そこで、平成 16 年度には、波形整形した再生増幅パルス光をマルチパス増幅することで得られるパルスの波形を SPIDER で計測することで、高出力パルスの波形を制御する検討をおこ

なった。

実験はコア研究室に設置した高密度光子発生・計測実験装置に波形整形器を組み込んだ系を用いておこなった。得られたパルスの時間波形は、マルチパス増幅器出力光の一部分岐光を、平成15年度に構築したSPIDERへと導くことで計測した。計測系の不具合を抑制するため、マルチパス増幅用YAGレーザーのタイミングを変化させマルチパス増幅効率を落とした状態で実験した。

まず、波形整形器にスペクトル位相の変調を与えずに実験をおこなった。SPIDER計測結果をもとに得られる時間波形は、単ショット自己相関器の計測結果と対応していることが確認された。これより、SPIDER計測系が良好に機能していることが分かった。

次に、波形整形器に時間幅が300 fsの矩形パルスに対応するスペクトル位相の変調を与えた。与えるスペクトル位相は、時間波形、スペクトル波形を拘束条件として与えて、Fourier Iteration法により求めた。与えたスペクトル位相変調をもとにして、パルスの強度時間形状を計算した結果を、図32に示す。波形整形器に上記の位相変調を与え、マルチパス増幅後圧縮された光パルスの分岐光をSPIDER計測した。計測によって得られたスペクトル位相から、実際のパルス波形を再構成した結果を図33に示す。図より、ほぼ予想通りの強度時間形状が得られていることが分かる。また、相対位相の時間変化も計測できている。その他、ダブルパルスやチャープパルスの生成もおこない、SPIDER計測できた。

以上、波形整形器を用いてさまざまな波形のマルチパス増幅パルスを生成することに成功した。これにより、エネルギーの大きな波形制御パルスを生成できると期待される。

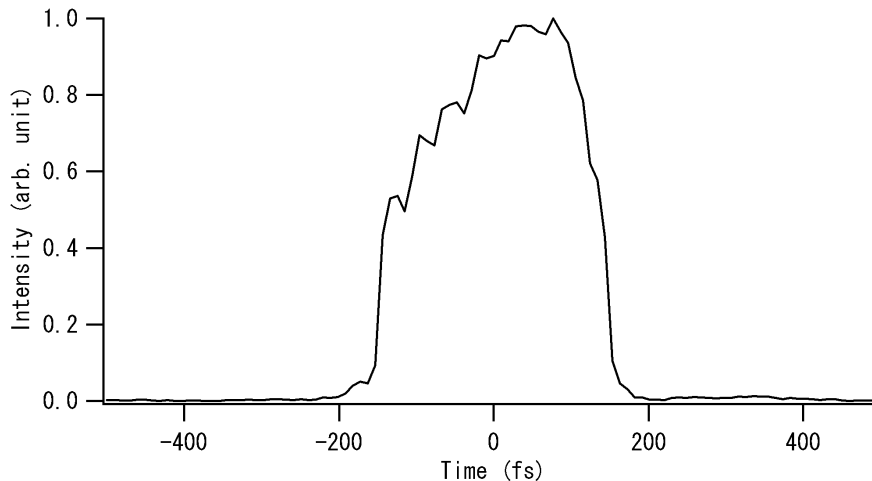


図32 波形整形器に与えた位相変調から予測される時間波形

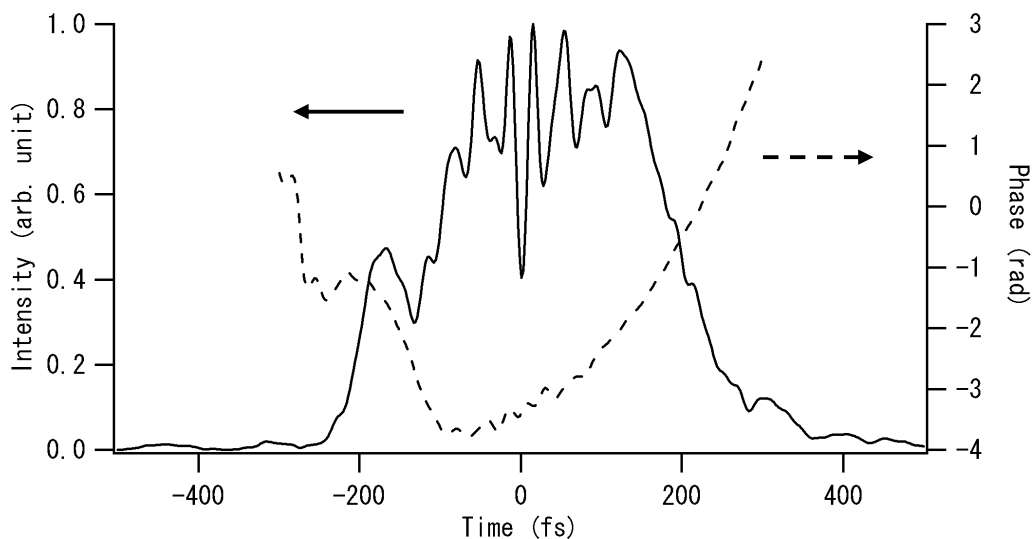


図33 SPIDERにより計測したスペクトル位相から求めた時間波形

波形制御したテラワットパルスを用いた高速粒子生成

照射するテラワットパルスの波形に応じた高速粒子生成の様子の変化を確認した。詳細を以下に述べる。

平成 16 年度までの研究成果として、コア研究室（浜松工業技術センター内）に設置した高密度フォトン発生・計測実験装置のテラワットパルスの光路内に設置した波形整形器を用いて、テラワット光パルスの波形整形を実現している。この研究成果を適用し、波形を変化させれば、レーザーによる高速粒子の生成効率が変化すると期待される。よって、平成 17 年度に、波形整形したテラワット光パルスを用いて高速粒子発生実験をおこなった。

高密度フォトン発生・計測実験装置に対して、波形整形器をマルチパス増幅器前に設置することで、テラワット光パルスの波形制御が可能な系とした。一方で、パルス幅圧縮後の光を一部分岐し、単ショット自己相関器へと光パルスを導くことにより、波形計測を行った。波形計測時においては、励起用の Nd:YAG グリーンレーザーの Q-switch のタイミングを調整することで、マルチパス増幅器出射光が 7 mJ 程度となるまで減光して用いた。

テラワット実験用真空チャンバー内には、高速イオン発生・計測系を組み込んだ。高速イオン発生・計測系は、レーザー光を軸はずし放物面鏡で D_PTFE 膜上に集光し、D_PTFE 膜から生成された高速イオンをトムソンパラボライオン分析器で弁別し、弁別された高速イオンを CR-39 で検出するという系である。今回、トムソンパラボライオン分析器の電極にかかる電圧は、 ± 3 kV とした。ここで、印加する電圧の極性を反転させることにより、同じ系を用いて 2 度の計測をおこなった。また、電圧をかけないときのトレースから、横軸が分かる。

上記の実験系で、高速粒子発生実験をおこない、生成イオンを評価した。ここで、高速粒子発生実験時の光パルスの総エネルギーは 156 mJ であった。まず、照射パルスのスペクトル位相変調を 0 とした。このときの単ショット自己相関器による計測結果から、照射パルスがパルス幅 66 fs の単パルスであることを確認した。よって、尖頭出力は 2.4 TW である。この条件のもと、200 発のレーザー光パルスを D_PTFE 膜に照射し、生成イオンの計測をおこなった。次に、照射パルスのスペクトル位相を、光パルスが 400 fs 間隔の 2 連パルスとなるよう設定した。このときの単ショッ

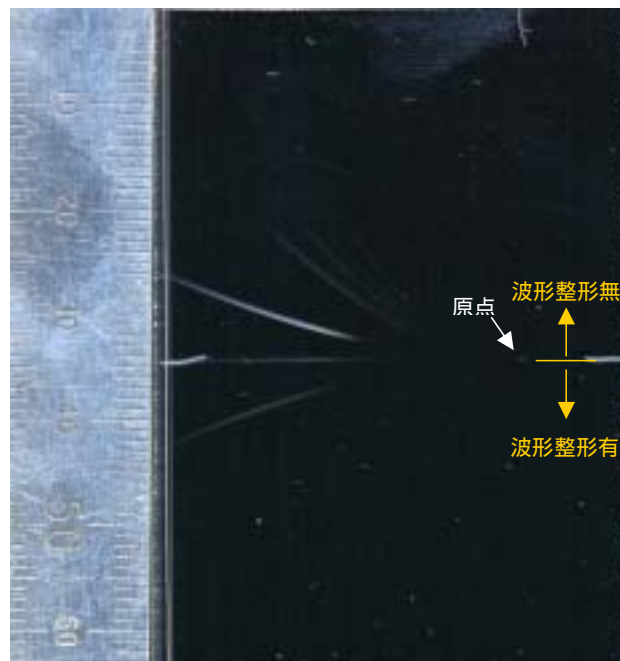


図 34 実験で得られたトムソンパラボラトレース

（上半分が波形整形を行ってない単一パルスするとき、下半分が波形整形を行った 2 連パルスときの結果を表す。また、水平方向へと伸びているトレースはトムソンパラボライオン分析器に電場をかけないときに得られたものである。）

ト自己相関波形は、照射パルスがパルス幅 66 fs、パルス間隔 400 fs の 2 連パルスであることを示した。よって、各パルス光の尖頭出力は 1.2 TW である。この状態でトムソンパラボライオン分析器の電極にける電圧を反転させて、再度 200 発のレーザー照射を行い、生成イオンを計測した。以上の実験後、CR-39 をエッチングして、トムソンパラボラトレースを得た。結果を図 34 に示す。上半分が波形整形をおこなっていないときに得られたトレースを、下半分が波形整形をおこなったときに得られたトレースを、それぞれ表す。その他、図 2 には、トレースの原点と横軸も明瞭に現れている。

この図から明らかのように、2 連パルスのおときは、単パルスのおときと比べて、

A：各トレースの線が薄く現れている、

B：各トレースが短くなっている、

という特徴があると分かる。A は各イオンの生成量が減少したことを、B は各イオンの最大エネルギーが減少したことを、それぞれ示している。これにより、光パルスの波形に応じてイオン発生の様子が異なることが明らかとなった。

以上、テラワット光パルスの波形整形をおこなった場合とおこなっていない場合とで、粒子発生・計測実験をし、光パルスの波形による生成イオンの違いについて評価した。その結果、テラワット光パルスの波形整形により、高速イオンの生成効率を変化させられることが明らかになった。

テラワットパルスの波面補償

波面ひずみを補償し、集光点の最大強度を 5 倍程度増強することに成功した。テラワットパルスの波形整形（前記）と波面補償を同時に達成したのは世界にも類がない。詳細を以下に述べる。

テラワットパルスの応用では、集光強度を大きくすることが重要となる。ところが、一般に高強度フェムト秒レーザーシステムから出射する光ビームは、大口径の光学素子や、増幅結晶の熱効果などのために、波面に歪みが生じている。波面歪みは、集光実験において、集光点における最大強度を減少させる原因となる。そこで、テラワットパルスの波面を波面センサー（WS）で計測し、計測結果を高密度フォトン発生・計測実験装置のテラワットパルス光路内に設置した可変反射鏡（DM）へとフィードバックすることで、波面歪みの除去について検討をおこなった。

平成 14 年度においては、光ビームの集光点近傍の空間強度分布の制御について、DM を用いた実験的検討をおこなった。集光点での強度を大きくするためには、レーザー光の波面をそろえることが重要となる。DM はこれに適した装置である。また、WS による波面計測で、集光点の様子をモニターすることができる。これらを用いた効率的な計測と制御について、LD 光を用いたテスト実験系を利用して検討をおこなった。

図 35 に実験系を示す。図の灰色で囲んだ部分が波面の計測系であり、それ以外の部分はテラワット集光系を模擬的に光学定盤上に組んだものである。830 nm の連続発振 LD を用いた模擬的な系は、高密度フォトン発生・計測実験装置のテラワット系における DM 挿入予定位置と実際の集光位

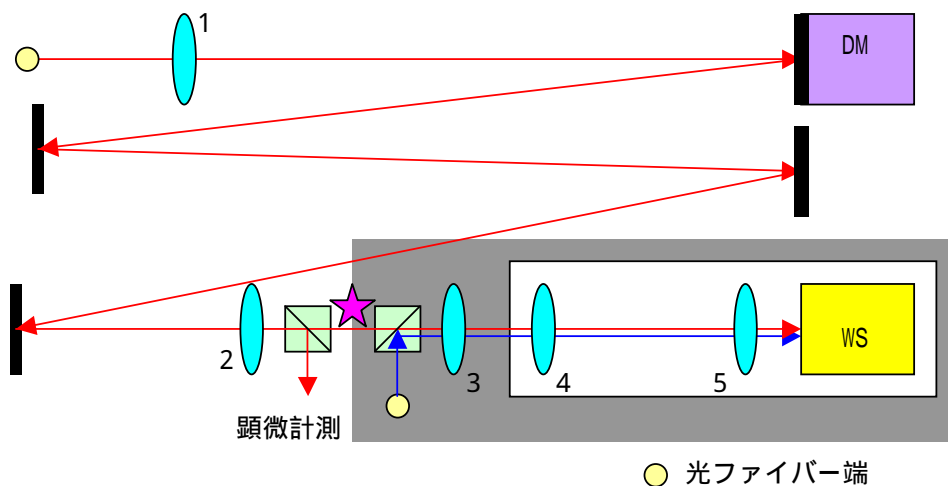


図 35 集光点近傍の空間強度分布制御の実験系

置との間の距離が概略同一となるよう設計されたもので、図の星マークが、実際の集光位置を模している。

赤線がテラワットレーザーの模擬ビームで、光ファイバー端から出射した光はレンズ1でコリメートされ、4 m程度伝播した後、集光される（実際は放物面鏡による集光だが、ここではレンズ2によっている）。一旦集光された光は、レンズ3でコリメートされ、レンズ4で一旦集光された後、広がっていくところでWSへと入射している。レンズ4による集光点は、レンズ5内となっており、そのため、レンズ5はコリメート光に対しては何ら作用しない。また、ビームの星印集光点の直前にビームスプリッターを挿入し、集光点の様子を顕微計測可能としている。WSにより波面を参照しながらDMを制御することで、集光に最適な波面を得ることができる。

図36(a)(b)は、波面補償制御前後の集光点の様子を顕微計測した結果を示す。画像は、顕微計測系に設置したCCDカメラで取得し、スケールは $0.270\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ である。対物レンズが、NA 0.42なので、空間分解能は $\sim \lambda/\text{NA} = 1.9\ \mu\text{m}$ と見積もられる。これらは共に1秒間の積算によって取得された画像で、それぞれが $81 \times 81\ \mu\text{m}^2$ ($300 \times 300\ \text{pixel}^2$)の大きさに対応している。光を入射しない状態の画像（背景画像）は差し引いている。また、図36(b)の最大輝度値27940がTIFFの255となるよう規格化している。

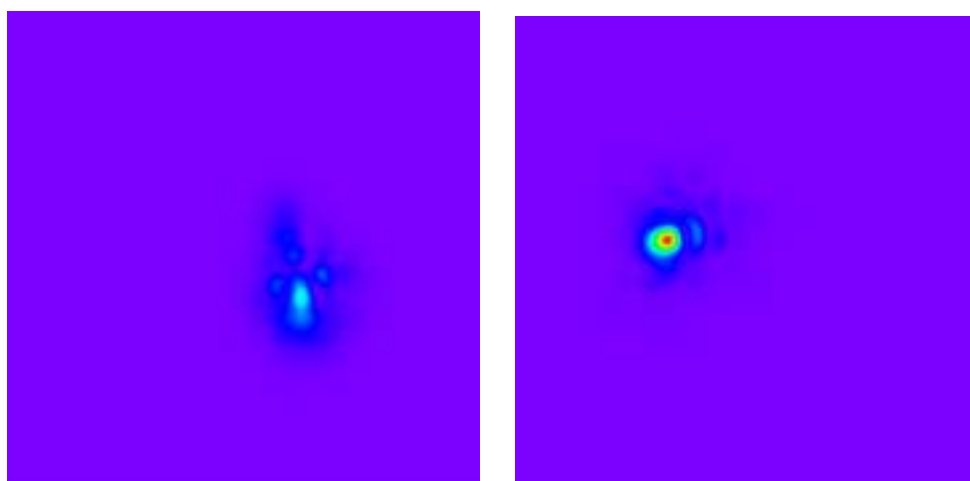
被補償光は単一モードの光ファイバー端から出力されているため、理想的な波面を有しているにも関わらず、長距離伝播によって有効な集光を得られなくなっている。これに対して、波面補償制御を行うことで効率的な集光をおこなうことができた。波面補償制御後の最大輝度値は制御前に比べて2.6倍になった。尚、集光点が $30\ \mu\text{m}$ 程度平行移動しているのは、参照光のファイバー出射端の位置が同程度ずれていたためである。

以上、波面制御に関して模擬的な実験系を用いることで、集光効率を向上させる可能性を示すことに成功した。

平成15年度は、実際の高密度フォトン発生・計測実験装置によって生成されたテラワットパルスに対して、波面の計測・制御をおこなった。DMとWSを用いた波面補償によって、テラワットパルスの集光効率を向上できると期待される。

図37に実験系を示す。実験は、DMをテラワット用のパルス幅圧縮器の直前に配置し、テラワット集光用の軸外し放物面鏡の集光効率が向上するようなフィードバックをかけることで、おこなった。装置の構成上、集光点近傍を真空にすることが困難であるため、レーザー出力を抑え、大気環境中で実験した。非線形効果による波面の乱れは大きくないと考えられるので、本配置で十分波面補償をおこなうことができる。

波面計測を可能にするため、放物面鏡の集光光路の途中にビームスプリッターを配置してレーザー光の一部を反射させた。反射光は、集光されることとなるが、この集光点は、ビームスプリッターを挿入しないときの集光点と同一のものである。ただし、ビームスプリッターの収差は気にならないとしている。この反射光について、集光点から発散してくる光をレンズでリレーすることで、



(a) 波面補償制御前

(b) 波面補償制御後

図36 集光点を顕微計測した結果

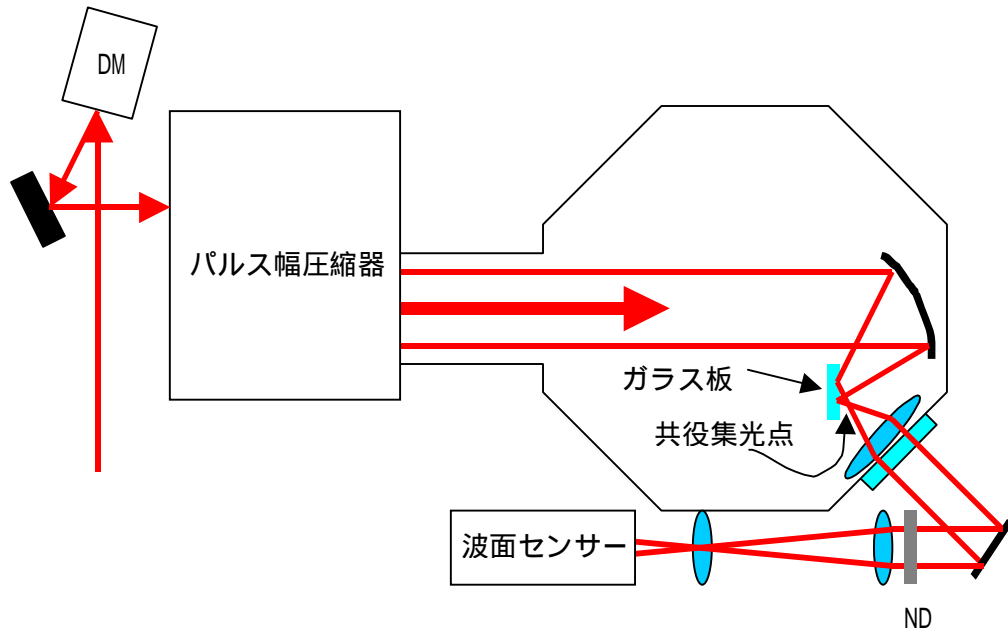


図 37 波面補償フィードバック制御のための実験系

WS へと導いた。ここで、DM と WS とは、互いに共役な光学配置になっている。本配置によれば、集光点へと収束してくるビームの波面を計測することが可能となるため、集光鏡も含めた収差の補正をおこなうことができる。よって、直接的に集光効率の向上が帰結される。

実際のビーム計測に先立ち、理想的な波面情報を得るための計測をおこなった。このために、放物面鏡の集光点に光ファイバーの出射端を配置し、光ファイバー入射端から LD 光を入射した。ここで、光ファイバーは断面方向に等方的な単モードのものであり、そのため、この出射端から出てくる光の波面が、理想的なビームの集光をおこなったときに発散してくるビームの波面と一致することとなる。よって、この光ファイバー出射の LD 光の波面を参照用波面として用いることが可能となる。参照用波面の計測は、上記したものと同一レンズリレーを利用して、WS にておこなった。このとき得られた波面データは、放物面鏡の集光点から WS までの光路の収差を反映したものである。

次に、光ファイバーを取り外し、実際の高密度フォトン発生・計測実験装置によって生成されたビームの波面計測をおこなった。このとき、上記参照用波面との差を集光点における波面データとして採用した。これにより、集光点から WS をつなぐ光路における収差はデータには含まれないこととなる。波面計測の結果を図 38 に示す。図 38 において、水色で囲んだ部分が計測された波面を表示したものである。これは、WS の開口の各位置における波面の傾きを直線で表している。この計測波面から遠距離場でのビームの様子を算出することが可能だが、使用した制御ソフトはこのビームの様子を直接表示する機能を備えている。この画像は、図 38 の桃色で囲まれた部分に表示されている。これにより、テラワットパルスは、一点に集光されているわけではないことがわかる。すなわち、集光点へと導く際のビーム光学系の収差のため、放物面鏡の焦点において、強度の小さな広い分布が、形成されることとなる。このため、集光点での最大強度が、理想的な集光と比較して小さくなることがわかる。図 38 の赤色で囲まれた部分は DM の各素子に印加された電圧を表すが、本条件ではすべて 0 V であり、DM は平坦な鏡面を形成している。

この状態から、なるべく理想的な集光条件を実現するよう、DM の制御をおこなった。DM の各素子に試験的に電圧をかけ、それによる計測波面変化を調べた。そして、必要な波面を実現するための電圧を算出し、得られた電圧値を DM にかけることで、収差の補償された光学系を得た。ここで、DM の可動範囲はそれほど大きくないため、光学調整は可能な限り正確におこなっておいた。

このフィードバック制御をおこなった結果の波面データを図 39 に示す。ここで、それぞれの画像が表す意味は図 38 と同じである。集光点でのビームの様子（桃色の枠で囲まれた画像）から、フィードバック制御によって、集光ビーム形状が改善されたことが確認できた。このとき、赤色の枠で囲まれた部分に一部示されているように、DM の素子ごとに、適切な電圧が印加されていること

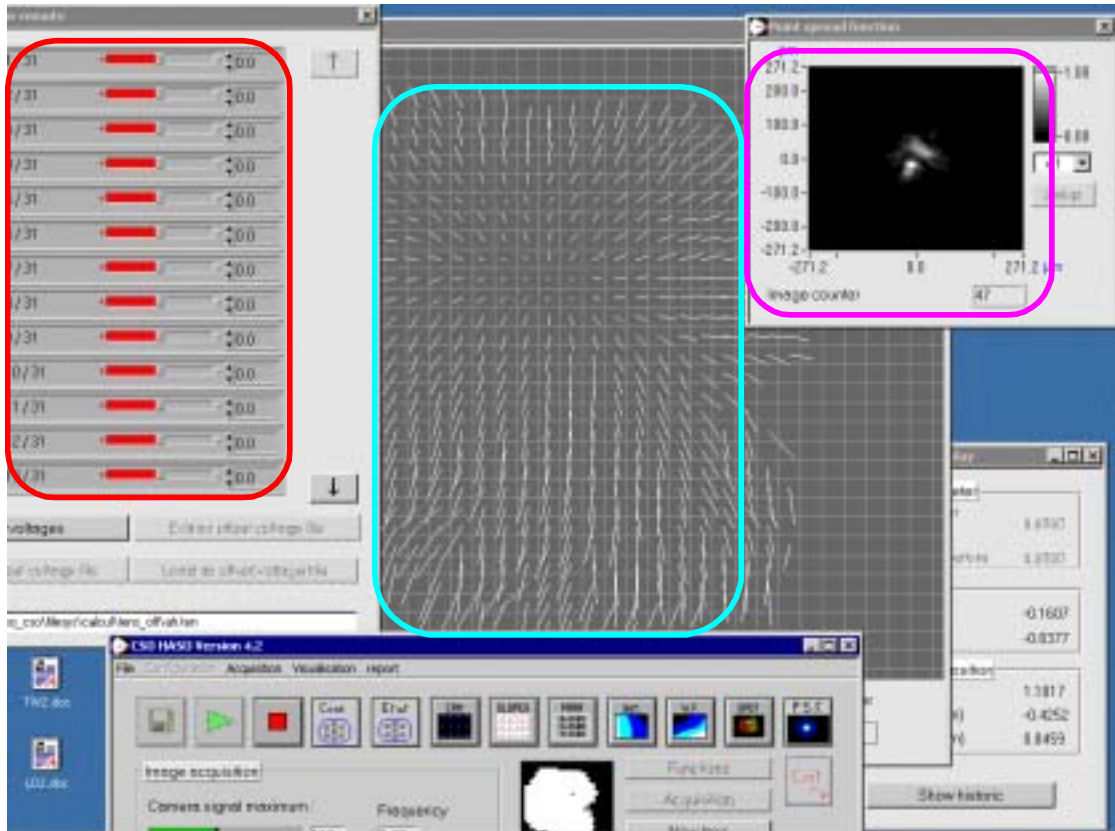


図 38 DM 非制御時の集光点における波面計測結果

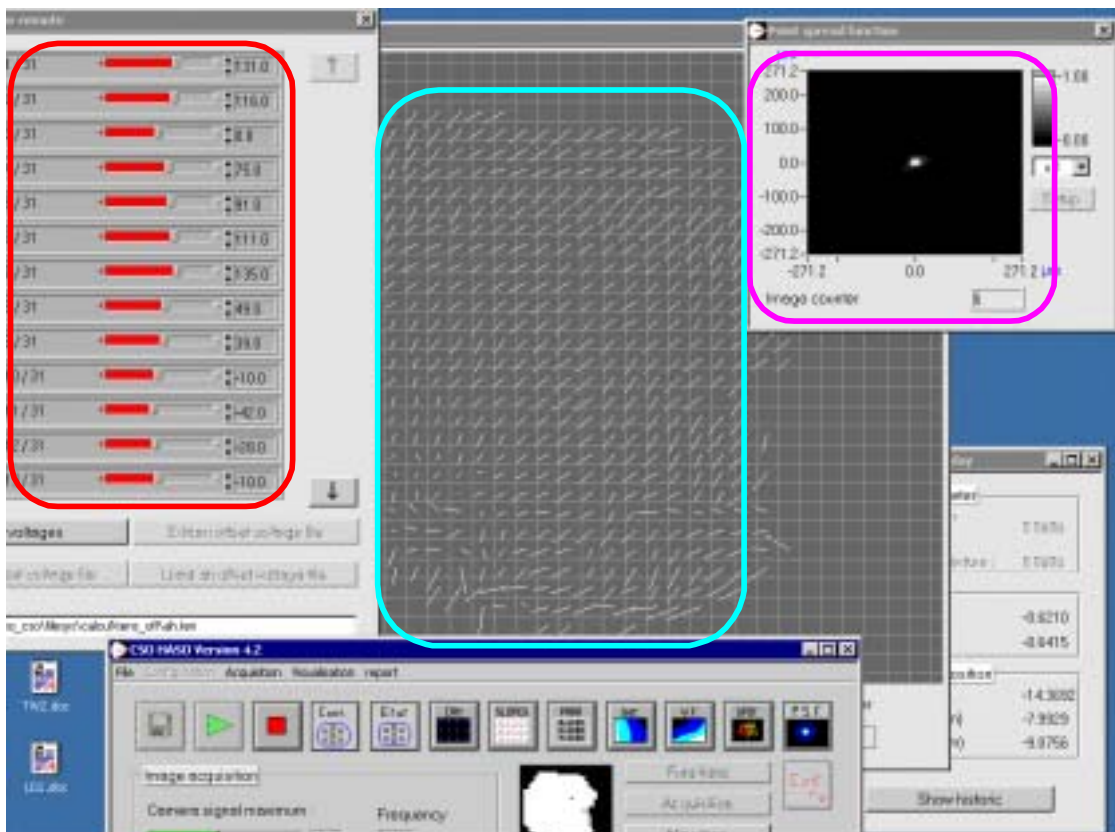


図 39 DM フィードバック制御時の集光点における波面計測結果

がわかる。

以上、DM と WS を高密度光子発生・計測実験装置へ組み込み、フィードバック制御をおこな

うことで、レーザー光の波面を補償し、集光ビームの形状を改善することができることを、実験的に確認した。これにより、集光点での最大強度が向上すると期待できる。

平成 15 年度の実験では、真空チャンバーを大気開放していたため、実際のテラワットパルス集光実験時と厳密には同じ系となっていない。すなわち、真空と大気を分離するためのガラス窓の影響や、チャンバーにかかる圧力差等により、照射実験時の波面が歪んでしまう恐れがある。そこで、平成 16 年度は、実際に集光実験をおこなうときと同様な真空環境にした上で、集光点における波面計測結果を DM へとフィードバックすることで、波面歪みの除去をおこなった。

実験系は図 37 に示したものである。光パルスは、励起 YAG レーザーの Q-switch のタイミングを変更することで、マルチパス増幅器による増幅がない状態まで減光して用いた。光路の途中におかれた DM によって、波面補償を試みた。

まず、真空チャンバー内において、軸はずし放物面鏡の集光点の手前にガラス板を置いてビームの一部を反射し、図のようなレンズリレー系を使って、波面センサーへと光パルスを導いた。ここで、パルス幅圧縮器と真空チャンバーの間に設置されている窓付ゲートバルブは閉まった状態で、チャンバーは大気に開放した。

次に、被測定光パルスを遮断し、図の共役集光点に端面が来るようにシングルモード光ファイバーを設置した。このファイバーに LD 光を通し、ファイバー端からの出射光を波面センサーへと導いた。ここで、このシングルモードファイバーからの出射光は理想的な集光点からの発散光と同じ波面を有しているため、これを参照光として用いる。波面センサーで計測されたファイバー出射波面を記録してパソコンに保存した。

さらに、ファイバーをはずし、再度、被測定光パルスを波面センサーへと導いた。ここで、前のステップで保存したファイバー出射光の波面を基に、これからどれだけ波面がずれているかを計測した。これにより、軸はずし放物面鏡の集光点と、図の共役集光点が全く同じであるという仮定のもとで、放物面鏡の集光点が理想的な集光からどれくらいずれているかを見積もることができる。

計測ソフトは、被測定光パルス波面の参照光波面からのずれの特性を表す量を計算し、表示することができる。以下では、Tilt や Focus 位置ずれに帰着できるような波面ずれの成分を除いた波面歪みの rms 値を評価する。窓付ゲートバルブを閉め、真空チャンバーを大気開放した状態で、DM を制御していないときの波面計測の結果、波面歪みは rms で $0.164 \mu\text{m}$ であった。

最後に真空チャンバーを真空に引き、窓付ゲートバルブを開けた。この配置において、波面の状態がよくなるよう、DM をフィードバック制御した。ここで、DM の制御電極にかける電圧分布のモードの個数を選択でき、個数が大きい程細かい制御をおこなえる。選ばれるモードの個数が小さいほどフィードバックは収束しやすいが、補正はより不完全なものとなる。今回、選んだモードが 15 個以下のときフィードバックは収束し、モードを 16 個以上選んだときは発散した。したがって、今回の実験では 15 個が妥当ということになる。モード数を 15 としたとき、波面歪みは rms で $0.024 \mu\text{m}$ であった。これにより、波面が大きく改善された。

以上の計測結果を基に、相対的な集光効率を Strehl ratio (以下では、 S とおく) で見積もってみる。まず、大気中で制御をしなかったとき、rms $0.164 \mu\text{m}$ に公式を適用すると、 $S \sim 0.19$ となる。フィードバックしたときの rms $0.024 \mu\text{m}$ に公式を適用すると、 $S \sim 0.97$ となる。この結果から、波面のフィードバック制御により、集光点の最大強度を 5 倍程度にできると期待される。

以上、DM を組み込んで、真空チャンバーを真空引きした系で、テラワットパルスの波面計測を W S にておこない、得られた計測結果をもとに波面をフィードバック制御することに成功した。

波面制御したテラワットパルスを用いた高速粒子生成

波面補償して、重陽子の発生効率の向上と高エネルギー化を同時に実現することができた。詳細を以下に述べる。

コア研究室(工業技術センター共同研究室)に設置した高密度フォトン発生・計測実験装置の光路内に設置した可変反射鏡(DM)を用いると、出射テラワット光パルスの波面歪みの除去をおこなうことが可能となる。波面歪みを除去すれば、光パルスの集光効率を向上させることができると期待される。そこで、平成 17 年度には、波面補償を行ったテラワット光パルスを用いて高速粒子発生実験を実施した。

実験は、コア研究室に設置した高密度フォトン発生・計測実験装置を用いておこなった。DM をパ

ルス幅圧縮器前に設置することで、テラワット光パルスの波面制御が可能な系とした。一方で、実験用真空チャンバー内において、軸はずし放物面鏡の集光点の手前にガラス板を置いてビームの一部を反射し、レンズリレー系を使って、波面センサーへと光パルスを導くことにより、波面を計測した。参照光を利用することにより、理想的な集光波面からのずれに相当する波面歪みを評価した。

波面計測時において、波面補償対象の光パルスは、励起用の Nd:YAG グリーンレーザーの Q-switch のタイミングを調整することで、マルチパス増幅器出射光が 4 mJ 程度となるまで減光して用いた。また、波面計測は、レーザーに同期させて、1 ms 間積算した。

真空チャンバー内で光学素子の調整をおこなうときには、パルス幅圧縮器と真空チャンバーの間に設置されている窓付ゲートバルブを閉めた状態で、真空チャンバーは大気開放していた。このとき波面計測をおこなうと、波面歪みが $0.075 \mu\text{m}$ (rms) であることが分かった。その後、真空チャンバーを真空引きし、波面歪みが小さくなるよう、DM にフィードバックをおこなった。このとき、Command matrix のモードが 12 個のときフィードバックは収束したが、13 個以上のときフィードバックは発散した。モードが 12 個のときに得られた結果の波面に対して歪みを計測すると、 $0.025 \mu\text{m}$ (rms) であった。歪みが小さくなり、波面が改善された。モードが 12 個のときのフィードバック制御で得られた、DM にかける高電圧分布を、ファイルに保存した。

以上の波面補償をおこなった上で、真空を解除して、波面計測用のガラス板やレンズを真空チャンバーより取り出し、高速イオン発生・計測系を組み込んで、再度真空引きをおこなった。高速イオン発生・計測系は、レーザー光を軸はずし放物面鏡で D_PTFE 膜上に集光し、D_PTFE 膜から生成された高速イオンをトムソンパラボライオン分析器で弁別し、弁別された高速イオンを CR-39 で検出するという系である。今回、トムソンパラボライオン分析器の電極にかける電圧は、 $\pm 3 \text{ kV}$ とした。ここで、かける電圧の極性を反転させることにより、同じ系を用いて 2 度の計測が可能となる。また、電圧をかけないときのトレースから、横軸が分かる。

高速粒子発生実験時の光パルスのエネルギーは 146 mJ、パルス幅は 54 fs であった。よって、ターゲットへ照射した光パルスの尖頭出力は 2.7 TW と見積もられる。

上記の実験系で、高速粒子発生実験を実施し、生成イオンの評価をおこなった。まず、DM をフィードバック制御して得られた、波面歪みを最小化する高電圧分布を DM にかける、200 発のレーザー光

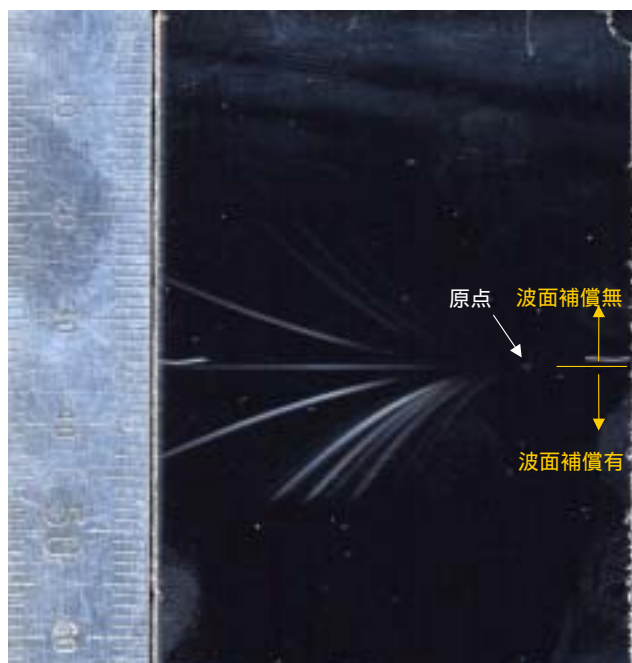


図 40 実験で得られたトムソンパラボラトレース

(上半分が波面補償制御しないとき、下半分が波面補償制御をしたときの結果を表す。また、水平方向へと伸びているトレースはトムソンパラボライオン分析器に電場をかけないときに得られたものである。)

パルスを D_PTFE 膜に照射した。次に、トムソンパラボライオン分析器にかける電圧の極性を逆にした上で、DM にかける高電圧を全て 0 V (制御なし) にして、再度 200 発のレーザー照射をおこなった。そして、実験後、CR-39 をエッチングして、トムソンパラボラトレースを得た。結果を図 40 に示す。上半分が波面補償をしていないときに得られたトレースを、下半分が波面補償をおこなったときに得られたトレースを、それぞれ表す。その他、図 40 には、トレースの原点と横軸も明瞭に現れている。

図 40 から明らかなように、波面補償有りのときは、波面補償無しのとくと比べて、

A : 各トレースの線が濃く現れている、

B : 各トレースが高エネルギーに対応する方向へと伸びている、

という特徴がある。A は各イオンの生成量が増大したことを、B は各イオンの最大エネルギーが増加したことを、それぞれ示している。これにより、テラワット光パルスの波面補償が良好におこなえ、光パルス波面の補償によって、イオン発生において発生効率の向上と高エネルギー化を同時に実現することができた。

以上、テラワット光パルスの波面補償をおこなった場合とおこなわない場合とで、粒子発生・計測実験をし、光パルスの波面による生成イオンの違いについて評価した。その結果、テラワット光パルスの波面補償により、光パルス波面の補償によって、イオン発生において発生効率の向上と高エネルギー化を同時に実現することができた。

特許件数 : 7 論文数 : 7 口頭発表件数 : 20

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

小型・高効率・高耐光強度 フェムト秒波形整形器を試作し、これまで他の研究機関で報告されている数値を上回るピーク出力 10 GW のフェムト秒光パルスの直接制御を達成した。この強度レベルで、精密な波形整形を実現した例は過去にない。また、この試作器を高密度フォトン発生・計測実験装置の再生増幅パルス光に適用してアクリル加工実験を試行して時間波形制御によって高工率化と高精度化を同時に実現し、波形制御の有効性を確認した。さらに、この制御された光パルスを増幅することで、ピーク出力がテラワットに達するフェムト秒光パルスの波形整形も実現した。ここで、波形制御を制限する要因が明らかになったため、これを解決する特許を出願した。加えて、種々の計測法を比較・検討し、それぞれの特長と適用条件を明らかにした。以上、国内外の研究と比較して、十分に高いレベルの研究成果が得られた。

FTOP は参加企業が有する全くオリジナルな技術である。本事業において、1 kHz の高繰り返しレーザーを用いた計測が世界で初めて可能となり、高 S/N 比化を実現できた。時間分解能 45 fs、空間分解能 3.3 μm を同時に満足する超高速二次元計測を達成した。また、これまで明確にならなかったフェムト秒パルスの振る舞いのいくつかを直接計測して明らかにすることができた。さらに、0.4 ps 間隔の 8 つの時点での計測を世界で初めて実現した。

短寿命放射性同位体のモニター装置の整備により、放射性同位体計測時の背景雑音を非常に小さくすることができた。これにより、< 2 - a > 先導的実証研究における短寿命放射性同位体生成において生成された微量な放射性同位体を同定することができた。このように、レーザーによる短寿命放射性同位体の生成という先端的な研究に大きく寄与することができた。

レーザー装置の応用においては、常に戻り光の問題が生じている。特に高出力レーザーに関しては、戻り光によって装置の損傷を引き起こしてしまう。これに関して、他で類を見ないような優れた対策をおこなうことができ、レーザー装置における戻り光を低減し、レーザー損傷問題を解決する手法を考案し実証した。また、パルス面を最適な状態に調整した上で、レーザーを応用するという、世界的にもあまりおこなわれていない高度な条件で実験を実施し、研究を推進できた。さらに、波面ひずみを補償し、集光点の最大強度を 5 倍程度増強することに成功した。テラワットパルスの波形整形と波面補償を同時に達成したのは世界にも類がない。加えて、波面補償して、重陽子の発生効率の向上と高エネルギー化を同時に実現することができた。レーザーに関するこれらの周辺技術をもとに < 2 - a > 先導的実証研究における短寿命放射性同位体生成において実際の短寿命放射性同位体生成に成功に寄与できた。

< 2 - a > 先導的実証研究における短寿命放射性同位体生成 は、レーザープラズマから生成された高速粒子を用いておこなった。ここで、生成される高速粒子が、入射するレーザーパルス波形によってどのように変化するかについて、他の研究機関から報告されたことはない。また、入射レーザー波面の制御による高速粒子生成の変化についても、現在のところ明確な報告はない。本事業における研究では、これらに対する先端的な知見を得ることができた。

以上、フェムト秒光パルスを用いた光と物質との相互作用に関する研究は、世界的に見ても注目されているが、レーザーシステムの問題を解決し、元々有していた高度の技術をさらに発展して適用し、波形制御、波形計測、波面制御、波面計測のすべてを実現した例は皆無である。また、得られた技術や知見は、レーザーによる短寿命放射性同位体の生成という先端的な研究に大きく寄与した。このように、世界的にも他に類を見ない高水準の研究レベルで事業を推進して完了した。

実用化に向けた波及効果

開発された超高密度フォトン反応制御技術を用いることにより、光と物質との相互作用を制御できる可能性がある。反応を任意に制御することによって、新しい加工技術、物質改変技術、テラヘルツ応用などへの展開が期待される。

再生増幅光パルスを直接波形制御できる波形整形器や、高繰り返し光パルス計測用 TADPOLE、単ショット計測用 SPIDER は、実用レベルに達しつつある。本事業で、それらの有効性を示し、実証レーザーシステムへ適用することで産業に利用できる可能性を示すことができた。これより、本研究で得られた成果の波及効果は大きい。

光パルスの瞬間の強度分布を、フェムト秒の時間分解能で非侵襲的に直接観測できる方法が、FTOP 以外にないため、フェムト秒光パルスの応用に際して、FTOP で得られる計測結果が非常に重要となる。また、FTOP は相互作用の計測にも利用できるため、これを用いることにより初めて明らかとなる現象や知見、応用時の最適化法がフェムト秒パルスの産業応用への足がかりになると考えられる。本事業により FTOP の有効性を示すことで、FTOP の実装装置の出現も期待される。

高出力フェムト秒レーザーを応用する際には、戻り光対策やパルス面調整が重要であることを示した。これにより、産業用の超高密度フォトン反応装置を実用する上で、装置に付随させなければならない機構が新たに明らかとなった。また、高速粒子生成において、波面補償や波形整形の有用性を示すことができた。これらは、一般の超高密度フォトン反応応用においても重要な周辺技術と考えられる。よって、高効率化を実現するための装置には考慮されるべき技術である。これらの実証レーザーシステムに対する付加的な要求を新たに発見できたことは、大きな波及効果をもたらすと考えられる。

(5) 残された課題と対応方針について

本研究テーマでは、フェーズ 1、2 における目標を達成した。よって、フェーズ 3、4 におこなう予定だった内容に関して、残された課題は特にない。「< 2 > 新規産業開発研究」の「物質改変」での「レーザーによる陽電子放出核種生成実験」に適用しているため、フェーズ 1 においては、参画企業においてリーディングプロジェクト等を利用して研究を継続していく。