

令和元年6月20日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13703

研究課題名(和文)水パルス圧縮による高強度フェムト秒レーザー光の発生

研究課題名(英文) Generation of intense femtosecond laser pulses with water for dispersion compensation

研究代表者

赤羽 温 (Akahane, Yutaka)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 量子生命科学研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号：00370338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：水の群速度分散を用いてパルス圧縮を行う高強度フェムト秒レーザー装置を実現するための研究開発を行った。光パラメトリック増幅で負チャープの500 nm波長帯高強度パルスを発生、水の正分散でのパルス圧縮により照射点での高強度フェムト秒レーザー光発生が可能になる。研究では分散補償用テーパ型ガラスブロックにパルス圧縮用水槽、そしてレーザー光時間波形計測用PG-FROGの構築・位相計測を通じて水パルス圧縮の有効性・実用性を実証した。本研究を足がかりに水中での高強度フェムト秒レーザー光直接照射が実現し、水中でのフェムト秒レーザーによるLIBS物質検知、高効率レーザー加工可能になると考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では従来Nd:YAG等の産業用レーザーでは実現できなかった波長500 nm帯でフェムト秒レーザー光パルスを計測・制御する技術の開発を行っている。本研究の成果で開発されるレーザー装置は水中でのフェムト秒レーザーLIBS、レーザー加工及びレーザーピーニングの高効率化を実現し、深海資源調査や原子炉等の発電プラント内検査・補修などの学術及び産業分野で社会に多大な恩恵をもたらすことが期待される。また波長500 nm帯の光はヘモグロビンの吸収が最も小さい波長帯であり、人体の60%以上が水分であることから今後生体・医療応用の面でも高強度フェムト秒パルスレーザーの可能性を示せたと考えている。

研究成果の概要(英文)：A novel high-intense CPA laser using water for pulse compression has been studied. An energetic negative-chirped pulse with 500 nm wavelength region that is amplified in OPA process, is compressed to femtosecond pulse by passing through water for its positive dispersion, which enables us an intense femtosecond laser generation on targets in water. In this research a pair of taper-shaped glass block for dispersion compensation, a water tank for suitable pulse compression, and PG-FROG for phase measurement have been developed, which confirmed the effectiveness of this scheme. In near future, a direct femtosecond laser irradiation in water will be realized from the results of this research, which makes possible novel applications such as femtosecond-LIBS material detection, effective material processing in water.

研究分野：レーザー工学

キーワード：チャープパルス増幅 光パラメトリック増幅 分散補償

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

水中でのパルスレーザー照射は LIBS 元素分析等の計測分野、またレーザー加工やレーザーピーニング等の産業分野でも近年注目されているが、現在水中でのレーザー照射には水自身の光吸収による光損失の抑制及び良好な集光性能の実現のため主に Nd:YAG レーザー等のナノ秒 ( $\text{ns}: 10^{-9}$  秒) パルス幅のレーザー光を光ファイバーで照射点近くまで伝送する手法が用いられている。また近年チャープパルス増幅 (CPA) の普及により高強度フェムト秒 ( $\text{fs}: 10^{-15}$  秒) レーザー光パルスによるレーザー照射の応用も進んでおり、非熱加工による高精度微細加工や加工効率向上、また LIBS における分析感度が大幅に向上が期待されるが、フェムト秒レーザーは同じエネルギーでもナノ秒レーザーに対して光強度が 1 万以上高いため、伝送光ファイバーのダメージ閾値が低く、ファイバー 1 本あたり数 nJ (ナノジュール:  $10^{-9}$  J) エネルギーのレーザーパルスしか伝送させることができない。また光ファイバーの分散や伝搬中の非線形効果によるパルス伸張も考慮しなければならない。このため水中で高強度フェムト秒レーザーを高エネルギーで集光照射することは従来から困難であった。

### 2. 研究の目的

本研究は従来不可能であった水中で高強度フェムト秒レーザー光パルスを直接集光照射する技術の開発が目的である。CPA ではレーザー発振器で発生したフェムト秒レーザー光を一度周波数チャープさせることでパルス伸張して光強度を下げてからレーザー増幅し、再びパルス圧縮することで高強度フェムト秒レーザーパルスを発生させる。本研究ではこの増幅光のパルス圧縮に伝搬媒質である水自身の分散を用いることを提案した。図 1 の概念図に示す様に光パラメトリック増幅器 (OPA) 等で負チャープの増幅パルスを発生させ、正分散媒質である水に低強度のまま入射伝搬させることで、集光点までレーザー光がパルス圧縮されながら伝搬する。本研究により水自身を伝搬媒質として用いた高強度フェムト秒レーザー照射が可能になるためビームサイズの制限がなくなり、伝送エネルギーを飛躍的に高めることができる。

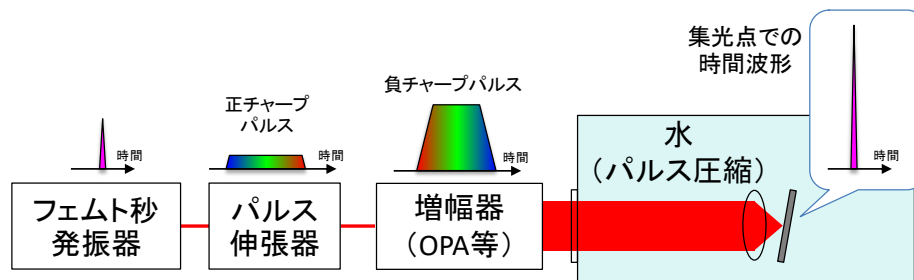


図 1 水パルス圧縮による高強度フェムト秒レーザー光発生概念図

また本研究は本来超短パルスレーザー光の伝搬を阻害する物質である水自身を分散補償媒質として用いることを特徴としている。水をレーザー伝搬媒質として見た場合、強い光吸収と波長分散、及び非線形効果の 3 要素が問題になる。フェムト秒レーザー装置では通常中心波長 800 nm 付近の超短パルスレーザー光が得られるが、この波長付近での水の吸収係数は  $0.02 \text{ cm}^{-1}$  であり、1 m の水透過で 1/100 に減衰してしまう。また群速度分散も大きいため、50 fs のフェムト秒パルスは 50 cm 透過で約 700 fs と 10 倍以上パルス幅が広がってしまう。本研究では波長 500 nm 帯 (吸収係数  $3.25 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 、800 nm 帯の約 1/60) でフェムト秒レーザー光パルスを発生させることにより光吸収を回避、水の群速度分散によるパルス幅伸張を逆手に取り、負チャープの増幅パルスを水自身でパルス圧縮することで波長分散の問題を克服する。また負チャープの増幅レーザー光パルスを直径数 cm と大口径で水に入射させ、光強度を下げて伝搬させることで非線形効果を抑制し、水中伝搬でのフェムト秒レーザー光照射が可能になる。

### 3. 研究の方法

本研究の実験配置を図 2 に示す。モードロック発振器で発生した中心波長 1020 nm、パルス幅 57 fs のフェムト秒レーザー光パルスはビームスプリッターで二つに分けられ、一つは低温冷却 Yb:YLF ポンプレーザーのシード光として、もう一つは OPCPA のシグナル光として用いた。ポンプレーザーから得られた最大 20 mJ、10Hz 繰り返しのピコ秒出力パルスは 2 倍波に波長変換 (SHG) され、コリメートされて OPCPA のポンプ光として用いる。OPCPA のシグナル光は位相変調用の空間光変調器 (SLM) を通過した後にガラスブロック (オハラ製 S-TIH10) を 2 個透過する。このガラスブロックは片面がテーパ状になっており、2 個 1 組で用いることで光路長を調整することが出来る。ガラスブロックにより 1.5 ps 程度にパルス伸張された正チャープのシグナル光を縮退条件付近で光パラメトリック増幅 (OPA) することで中心波長 1  $\mu\text{m}$  の負チャープのアイドラー光パルスを得た。アイドラー光を 2 倍波に波長変換後、水槽透過時の非線形効果を防ぐため拡大した後水槽を通過させる。圧縮パルスは縮小コリメーション後 PG-FROG と呼ばれる位相計測装置に入射する。PG-FROG は非線形媒質中での光カー効果を利用して非測定光と参照光の重なった

時間及び場所のみで偏光回転を起こして相関をとる手法で、測定光の波長を変えずに計測が行えるメリットがある。測定光は通常の回折格子や CCD を用いた自作の 2 次元分光器に入射し、位相が観測される。

なお本研究では負チャープ増幅光パルス発生には CPA の一種である光パラメトリックチャープパルス増幅 (OPCPA) で発生するアイドラー光を用いている。OPCPA の増幅過程である光パラメトリック増幅 (OPA) ではエネルギー保存則の関係からシグナル光増幅と同時にアイドラー光が発生する。このアイドラー光はシグナル光と反対の周波数チャープを持っているため正チャープのシグナル光増幅時には負チャープのアイドラー光が発生する (①)。従来負チャープの増幅パルス発生にはプリズム対や回折格子対等を複雑に組み合わせたパルス伸張器の構築が必要であった。しかし本研究では OPCPA でのチャープ反転を用いることで、正分散媒質透過によるパルス伸張だけで負チャープの増幅光パルスを発生させることができる。

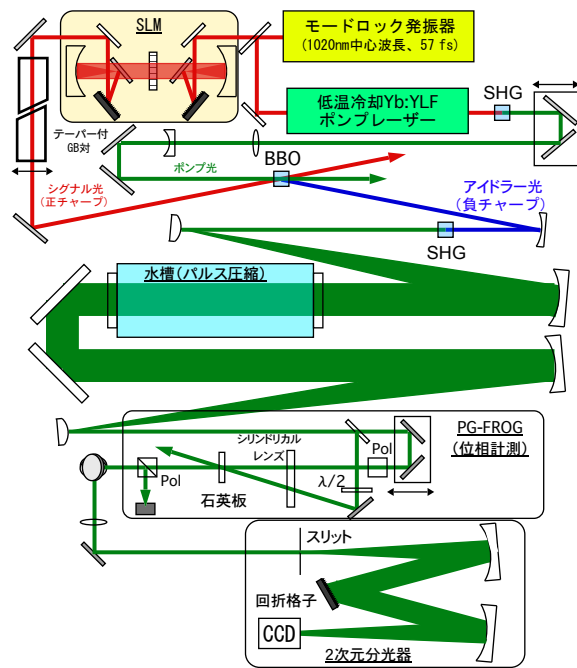
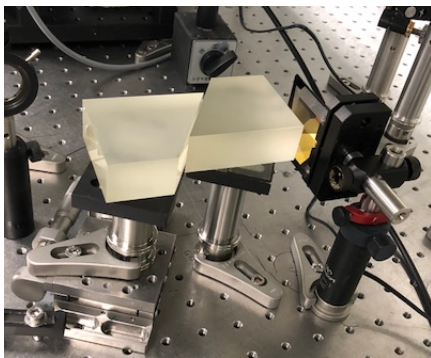


図2 水パルス圧縮実験配置

#### 4. 研究成果



最初に圧縮パルスの分散補償及び位相計測に必要なテーパ型ガラスブロック対の設計及び制作を行った。制作したガラスブロック対 (図3 写真) は高屈折率ガラス (オハラ製S-TIH10) を用いており、光路長は約80 mm~130 mmと大きな可変量を有している。またレトロリフレクターを用いた2回透過構成とすることで装置のコンパクト化も実現している。

図3 テーパー型ガラスブロック

またパルス圧縮に用いる水槽を準備した。水槽の長さ基本波位相計測から得られた分散を元に長さ47 cm に設定した。水槽は内径70 mm程度 of SUS製フランジを用い、両端に取り付けた反射防止コートをしたウェッジ付き光学ウインドウを用いて中の純水を封じ切る構造になっている。水槽全体の透過率は 87.2%と高く、水によるパルス圧縮の実用性を確認できた。入射光パルスのエネルギーを上げていくと図4の様に水槽内部で自己収束が起こり、透過後の出力光ビームサイズが縮小した (図4)。自己収束から確認した非線形効果のしきい値は7.6 GW/cm<sup>2</sup>であり、今後の実験及び実用化の検討時に考慮すべきデータが得られた。

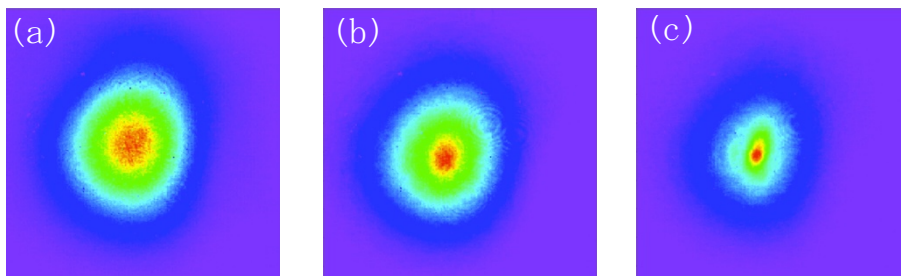


図4 水槽透過光パルスのビームプロファイル : (a)透過前に対して 5.2 GW/cm<sup>2</sup> 光強度 (b) では透過後プロファイルに自己収束の効果が無いが、29 GW/cm<sup>2</sup> 光強度 (c) では透過後にビームサイズが急速に縮小し、自己収束の効果が顕著に見られる。

水パルス圧縮の実用性を評価するため、水槽透過光の波面計測を行った。中心波長510 nmのポリメートしたフェムト秒レーザー光に作成した水槽を透過させ、透過後のレーザー光を波面センサーで受光することにより水槽の有無による波面歪みの変化およびレーザー光の揺らぎの影響を調査した。計測の結果水槽透過光の波面歪みはP-V値で0.20 μm (有効径2.4 mm φ)と観測

され、透過しない場合 に対して0.09  $\mu\text{m}$  (同)と1/10波長程度の増加に留まった。このため透過による波面歪みは集光にほとんど影響をもたらさないことが分かった。また計測データからは少なくとも静置された水環境では水媒質自身の時間的ゆらぎ等は計測される透過波面にほとんど影響を与えていないことが分かった。よって水槽透過光はLIBS等水中レーザー光照射実験に十分利用可能な集光が得られることが判明した。

波長500 nm光の超短パルス計測手法確立のためFG-FROG位相計測器を用いて波長500 nm帯の圧縮光パルスの位相計測を行った。計測結果を図5に示す。光パラメトリック増幅(OPA)に用いる中心波長510 nmのピコ秒ポンプ光では観測された(a)のFROGトレースから反復計算アルゴリズムにより(b)(c)の様な時間波形、スペクトル及び各位相が得られた。この位相計測により波長500 nm光の超短パルス計測が同手法で実現することが確認でき、計測にはピーク出力で100 MW程度の測定光入力が必要と判明した。

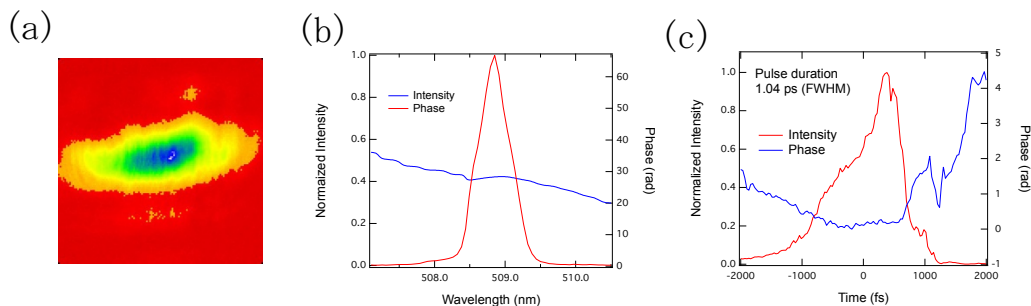


図5 位相計測結果：(a)PG-FROG トレース (b)時間波形及び位相  
(c)スペクトル及び位相

上記の結果を得た後にOPAでアイドラー光を発生させた。しかしながら発生アイドラー光のエネルギーは空間光変調器の導入に伴うシグナル光のエネルギー、利得低下に伴い10  $\mu\text{J}$ に届かず2倍波出力は数  $\mu\text{J}$ であった。このため今回発生させたアイドラー光2倍波ではピーク出力が10MW程度とPG-FROGによる位相計測が困難で、ポンプ光出力の増強により2段のOPAを行って発生アイドラー光のエネルギーを10倍程度に高めることで計測が可能になると考えられる。その後前述の結果を受けて装置の改良を行い出力増強の予定であったが、実験に使用する光パラメトリックレーザーシステムのポンプレーザー増幅部に不具合があり、実施期間中に改修が間に合わなかったため水圧縮パルスの出力増強ができず、位相計測に十分な光強度が得られなかった。今後ポンプレーザー増幅部の改修を行って光パラメトリック増幅の利得を高め、水槽によるアイドラー光パルス圧縮を 実用化するとともに、他の生体媒質を用いたパルス圧縮研究へのステップとしていきたいと考えている。

<引用文献>

- ① Y. Akahane, et. al. Appl. Phys. Express 2, 072503 (2009)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

- ① 赤羽 温、水媒質による高強度フェムト秒レーザー光パルスの分散補償、第 65 回応用物理学会春期学術講演会 20p-P3-1 2018 年 3 月

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。