

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：20106

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04983

研究課題名（和文）チャープパルスを用いた超高速デジタルホログラフィー

研究課題名（英文）Ultrafast digital holography using a chirped pulse

研究代表者

唐澤 直樹（Karasawa, Naoki）

公立千歳科学技術大学・理工学部・教授

研究者番号：00337099

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は超高速現象の波面の時間的发展を正確にとらえるために新たに提案された「チャープパルスを用いたデジタルホログラフィー」の実験的検証を行うことであった。この目的のため、パルス幅が35フェムト秒のレーザー発振器からの超短光パルスを用いて、チャープパルスの参照光と時間間隔3.7ピコ秒の物体光パルス列を生成した。そしてそれぞれの物体光に対応する時間の波面をシングルショットで多重記録する光学系を試作した。この光学系を用いてスリットとレンズの組み合わせ、圧縮空気のノズルからの噴射、スパークプラグからの火花放電等の振幅・位相画像の取得を行い、本手法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は超高速現象の時間的发展を正確に捉えるための新提案手法であるチャープパルスデジタルホログラフィーの実験的検証を行うことである。自然界には放電現象等の超高速現象が存在しており、その時間的发展を正確に画像化することはそれらの現象の解明に非常に重要である。またパルス幅が数フェムト秒の超短パルスが発生可能なレーザーが進展しており、それを用いたレーザーアブレーション等による微細加工等が実用的な面からも重要となっている。本研究で提案した手法はこれらの現象のピコ秒オーダーの間隔の振幅・位相画像がフェムト秒オーダーの分解能で複数枚取得できるため、現象の解明および応用に大きな意義あると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research was to demonstrate “chirped pulse digital holography,” which was proposed recently to obtain the temporal evolution of optical wavefronts in ultrafast phenomena. We prepared a chirped reference pulse and object pulses with a 3.7 picosecond temporal separation using a 35 femtosecond optical pulse from a laser oscillator. These reference pulse and object pulses were used to record object wavefronts at different times simultaneously in a single-shot setup. We have obtained phase images, as well as amplitude images, of a slit with lens, the injection of compressed air from a nozzle, and the spark discharge in a spark plug, and have demonstrated the validity of this method.

研究分野：量子光工学

キーワード：超短光パルス デジタルホログラフィー 超高速現象 チャープパルス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒(1千兆分の1秒)オーダーの超短光パルスを発生可能なレーザー発振器や増幅システムに関する技術が発展し、様々な応用に用いられるようになってきている。超短光パルスレーザーはこのような超短時間における現象を捉えるという点で人類が手にしている唯一の技術である。これを用いることにより放電現象やプラズマ発生、レーザーアブレーション等の超高速現象の画像化が試みられてきた。これらの時間的发展を正確に画像化することは現象の解明に非常に重要である。またパルス幅が数フェムト秒の超短パルスが発生可能なレーザーが進展しており、それを用いたレーザーアブレーション等による微細加工等が実用的な面からも重要となっている。超短光パルスレーザーを用いて超高速現象を画像化する際に、ホログラフィー技術を用いることによりその現象の波面の超高速変化をとらえることが可能であり、特に振幅画像だけでなく位相画像が得られるため重要である。また、最近では CCD や CMOS イメージセンサーおよびコンピュータ技術の進展により、ホログラムをデジタル情報として記録し、計算によって振幅・位相画像情報を得るデジタルホログラフィー技術が進展し、超高速現象の記録に用いられるようになってきている。空気中に超短光パルスを集光することによりプラズマを発生させ、その波面変化をデジタルホログラフィーにより画像化する研究が行われており 2004 年には 1 ピコ秒の間隔で 4 枚の画像が 150 フェムト秒の時間分解能で得られている[1]。また 2007 年には 300 フェムト秒の時間間隔で 3 枚の画像が 50 フェムト秒の時間分解能で得られている[2]。しかしこれらの研究で用いられていた光学系は多重記録のために異なる入射角を持つ参照光パルスを複数用いる必要がある等、かなり複雑なものであった。本研究代表者は 2018 年に参照光パルスとしてパルスを分散素子に通して単一のチャープパルスとして用いるチャープパルスデジタルホログラフィーを提案し、そのシミュレーションによる検討を行った[3]。この光学系ではチャープパルスを用いた参照光パルスと物体光パルスを同一の入射角度で用いることができるため、光学系が単純となる特徴を有している。そしてシミュレーションではピコ秒オーダーの間隔の振幅・位相画像がフェムト秒オーダーの分解能で複数枚取得できることが示された。

2. 研究の目的

本研究の目的は超高速現象の時間的发展を正確にとらえるための新提案手法であるチャープパルスデジタルホログラフィーの実験的検証を行うことである。本手法において超短光パルス光源からチャープパルスと超短光パルス列を生成する。そしてそれらの干渉信号を CCD や CMOS イメージセンサーを用いてデジタルホログラムとしてコンピュータに多重記録する。そして記録された干渉信号から異なる時間における振幅・位相画像を再構成する。これらの実験をフェムト秒レーザー発振器からの 35 フェムト秒の光パルスを用いて行う。このときレーザー発振器からの単一パルスを抜き出すためのパルスピッカーを導入し、シングルショットでの実験検証も行う。測定としては静止物体での検証を行った後、圧縮空気のノズルからの噴射画像の取得、高電圧印加によるスパークプラグ電極間の放電画像の取得を行う。またレーザーパルスの液体中の集光による位相変化についても検討する。

3. 研究の方法

チャープパルスデジタルホログラフィーの実験的検証を目指し、そのための光学系を試作し実験を行った。本研究で用いた実験光学系を図 1 に示す。実験のためにチタンサファイア超短光パルス発振器(中心波長 800 nm、パルス幅 35 フェムト秒、平均パワー 550 mW、繰り返し周波数 73 MHz)から単一のパルスを抜き出すためのパルスピッカー、ホログラム記録用の高速 CMOS センサー、チャープパルス発生用の高屈折率ガラスブロック、複数パルス発生に用いる干渉計用の光学素子や光学部品を入手し、実験系を試作した。実験ではレーザーからの超短光パルスを二つのパルスに分割し、一方を長さ 15 cm の高屈折率ガラスブロックに透過させてチャープパルスの参照光を発生させた。他方のパルスは干渉計に類似した光学系を用いてさらにそれらを 3.67 ピコ秒の遅延時間を持つ二つのパルスに分割してこれらを試料に通して物体光パルス列とした。これらの参照光と物体光をオフアキシス配置で CMOS センサー上において干渉させ、取得した干渉画像をコンピュータで解析してそれぞれの物体光に対応する振幅画像および位相画像が独立に得られるかを検証した。ここで画像の再構成の際は物体光パルスと参照パルスが異なる時間(図 1 では t_1 と t_2)で干渉するために干渉する光波の波長が異なり、それにより記録される干渉縞の空間周波数が異なることを利用した。このため再構成の際はまずホログラムをフーリエ変換して時間 t_1 と t_2 に対応する信号を分離し、その後それぞれの信号を逆フーリエ変換することによりそれぞれの時間の振幅・位相画像を取得した。ただしそれらの画像は CMOS センサー上での画像であるため、フレネル変換による計算処理で実際の試料の位置での画像も得た。

画像化のための試料として最初は静止したスリット及びレンズを用いて、測定を多数のパルスの平均画像を用いて行った。その後画像化としては高圧力のノズルから噴射する空気の位相画像の測定を多数のパルスの平均画像を用いて行った。またスパークプラグに高電圧を印加する電子回路を試作し、それにより生じたスパークプラグの電極間の火花放電の位相画像の測定をシングルショットパルスにより行った。

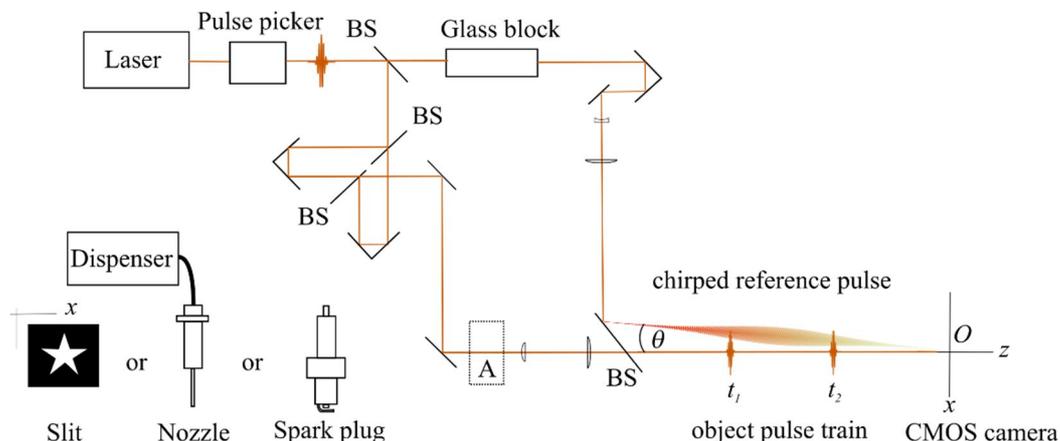


図1 実験光学系。実験ではAに観測対象(スリット、ノズルまたはスパークプラグ)を設置している。

4. 研究成果

(1) スリットとレンズの結果

静止したスリットとレンズの組み合わせを試料として、多数のパルスの平均干渉画像を用いて得た結果を図2に示す[4]。図2において(a)に取得されたホログラムを示す。このとき参照光と物体光の間の角度は 5.7° としており、図2(b)に示されるようにフーリエ変換後に異なる空間周波数の位置に $t_1=0$ と $t_2=3.67$ ピコ秒に対応する信号が得られている。それぞれの信号を分離してから逆フーリエ変換を行い、CMOSセンサーの位置で得られた振幅と位相画像を図2(c) (d')に示す。異なる時間においてほぼ同一の振幅と位相画像が得られていることがわかる。これらの画像をフレネル変換して試料の位置における振幅と位相画像としたものを図2(e) (f')に示す。試料の位置への変換によりスリットの形状がより明瞭になっていることが分かる。ここで距離 d として -129.6 mmを用いている。このようにチャープパルスデジタルホログラフィーの配置により時間差3.67ピコ秒の振幅・位相画像が得られることが実証された。

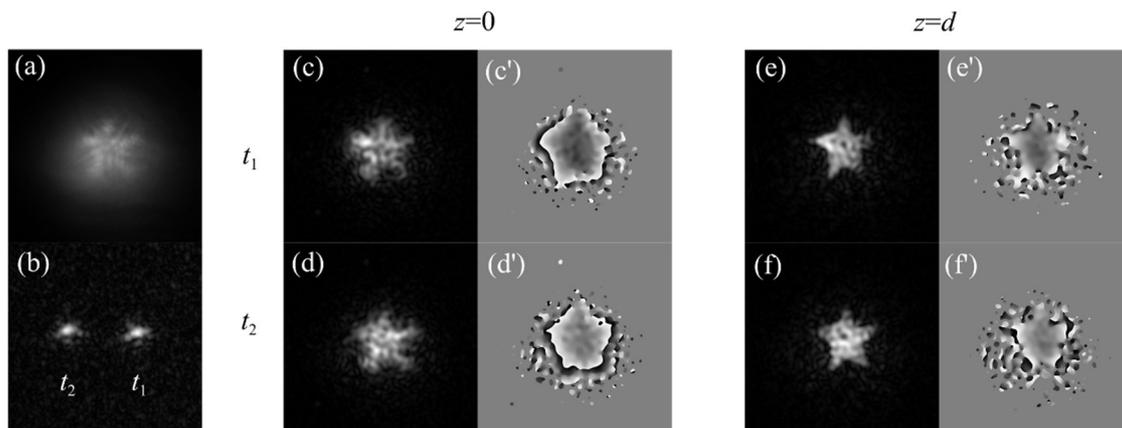


図2 星型スリットとレンズの組み合わせの結果。(a)ホログラム。(b)時間 t_1 と t_2 に対応するフーリエ変換後の信号。カメラ上($z=0$)における t_1 の振幅画像((c))と位相画像((c'))および t_2 の振幅画像((d))と位相画像((d'))。試料の位置($z=d$)における t_1 の振幅画像((e))と位相画像((e'))および t_2 の振幅画像((f))と位相画像((f'))。画像の大きさは縦横とも4.91 mm。

(2) 圧縮空気の噴射の結果

試料としてディスペンサーから圧縮空気を内径0.65 mmのノズルから噴射した際の結果を図3に示す[5]。この結果も多数のパルスの平均画像から得られたものである。図3(a)にノズル内の圧力が5気圧のときのホログラム画像を示す。このホログラムより異なる時間 $t_1=0$ と $t_2=3.67$ ピコ秒における位相画像上記と同様な方法で取得している。図3(b)から(e)には $t_1=0$ における圧力が2気圧から5気圧の場合の位相画像を示す。ただしこれらの位相は圧力が1気圧の場合の位相を差し引いた位相差画像となっており、疑似色で位相変化量を表示している。図3(b')から(e')には $t_2=3.67$ ピコ秒における同様に得た位相差画像を示す。これらの画像より空気がノズルから噴射する際にその圧力分布が変化し、それが位相変化となって画像化されていることがわかる。この画像における位相変化量から、ノズルから噴射された空気の圧力は最大で1.6気圧程度であることが推測されている。なおチャープパルスデジタルホログラフィーの理論検討より位置(図2の x 方向)の2乗に比例する位相が印加されることが見いだされた。しかしこの位相変化量はチャープパルスを発生させるときの2次位相分散量によって決まり、容易に補正可能であることが示されている[5]。

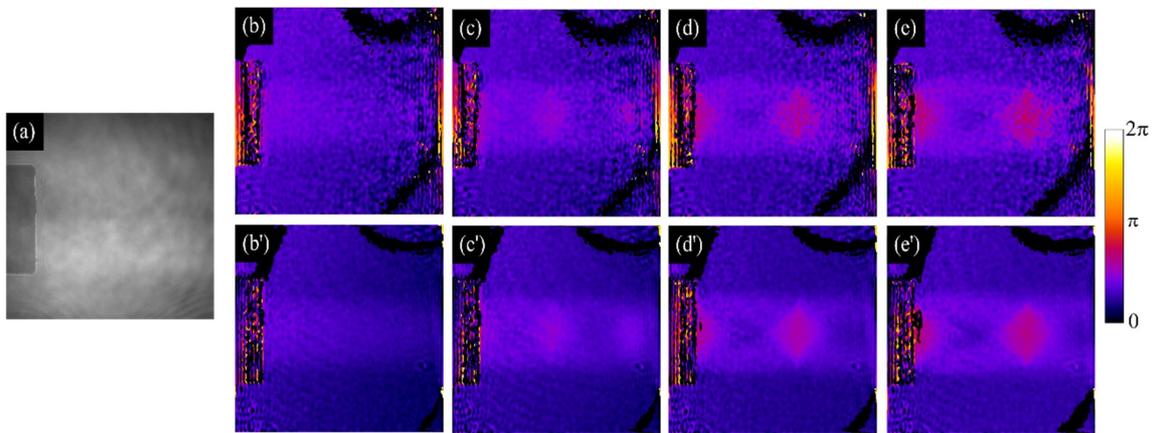


図3 圧縮空気のノズルからの噴射による結果。(a) 圧力が 5 気圧の時のホログラム画像。(b) (b') に圧力が 2 気圧の時の t_1 (t_2) の位相差画像、(c) (c') に圧力が 3 気圧の時の t_1 (t_2) の位相差画像、(d) (d') に圧力が 4 気圧の時の t_1 (t_2) の位相差画像、(e) (e') に圧力が 5 気圧の時の t_1 (t_2) の位相差画像を示す。画像の大きさは縦横とも 7.1 mm。

(3) スパークプラグにおける放電の結果

試料としてスパークプラグを用い、その電極間に 7 kV の高電圧パルスを印加して放電を起こし、それによる位相変化画像を取得した。この場合はパルスピッカーを用いてレーザーから単一のパルスを取り出しシングルショットでの画像を取得した。この結果を図 4 に示す[5]。図 4 (a) にホログラム画像を示す。この画像には放電によって生じる発光が同時に記録されている。図 4 (b) はそれから得られた $t_1=0$ における位相画像であり、図 4 (c) の電圧を印加していない場合の位相画像を用いて図 4 (d) の位相差画像が得られている。図 4 (b') (d') に同様に得られた $t_2=3.67$ ピコ秒の画像を示す。これらの画像より放電が起きた領域において位相変化は負であり、これはプラズマ発生による負の屈折率変化がおきていることを示している。この結果よりプラズマの自由電子密度が $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ と推定されている。

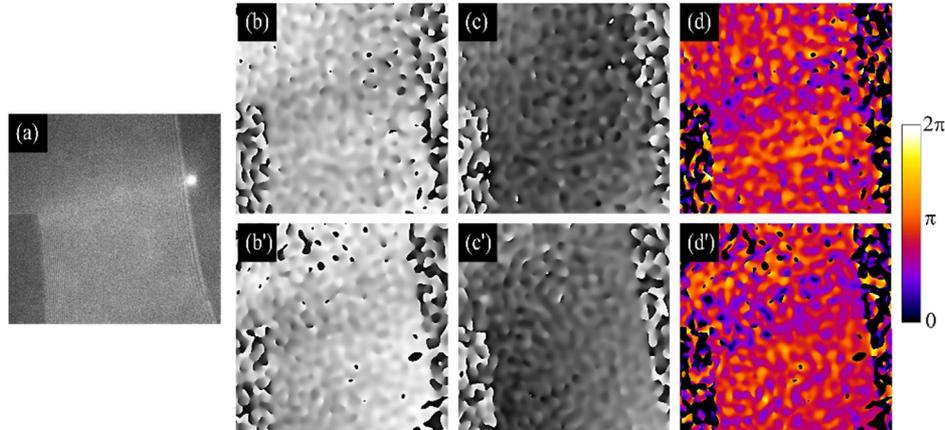


図4 スパークプラグにおける放電による結果。(a) 高電圧を印加したときのホログラム画像。(b) (b') に t_1 (t_2) の高電圧を印加した時の位相画像、(c) (c') に電圧を印加しないときの位相画像、(d) (d') にそれらの差である位相差画像を示す。画像の大きさは縦横とも 3.5 mm。

本研究では様々な試料を用いた実験によりチャープパルスデジタルホログラフィーが超高速現象の位相・振幅画像の取得に有用であることを実証することができた。この構成による他の超高速現象の観測およびチャープを用いたデジタルホログラフィーの更なる光学系の発展が期待される。

参考文献

- [1] M. Centurion, Y. Pu, Z. Liu, D. Psaltis, and T. W. Hänsch, Opt. Lett., 29 (2004) 72.
- [2] X. Wang, H. Zhat, and G. Mu, Opt. Lett., 31 (2006) 1636.
- [3] N. Karasawa, Opt. Commun., 413 (2018) 19.
- [4] N. Karasawa and A. Hirayama, Opt. Commun., 447 (2019) 42.
- [5] N. Karasawa, S. Yamada, and H. Kanaya, Opt. Commun., 473 (2020) 125941.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Naoki Karasawa and Airi Hirayama	4. 巻 447
2. 論文標題 Experimental demonstration of single-shot chirped pulse digital holography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 42-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2019.04.089	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 Naoki Karasawa	4. 巻 413
2. 論文標題 Chirped pulse digital holography for measuring the sequence of ultrafast optical wavefronts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 19-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/J.optcom.2017.12.021	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 N. Karasawa, A. Yoshida, and K. Watanabe	4. 巻 43
2. 論文標題 Soliton-like pulse propagation in a normal dispersive liquid-core optical fiber	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3897-3900
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.43.003897	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 唐澤直樹、多田量宏	4. 巻 5
2. 論文標題 フォトニック結晶ファイバー-CARS分光計測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 フォトニクスニュース	6. 最初と最後の頁 8-12
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Naoki Karasawa, Shogo Yamada, and Hiroki Kanaya
2. 発表標題 Ultrasfast Phase Imaging by Single-Shot Chirped Pulse Digital Holography
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田章五、金谷豊輝、唐澤直樹
2. 発表標題 チャープパルスデジタルホログラフィーによる超高速現象の観測
3. 学会等名 第55回応用物理学会北海道支部第16回日本光学会北海道支部合同学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 唐澤直樹、山田章五、金谷豊輝
2. 発表標題 超高速現象のチャープパルスデジタルホログラフィーによる観測
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 唐澤直樹
2. 発表標題 チャープパルスを用いた超高速デジタルホログラフィー
3. 学会等名 2019年度第2回PST-net例会2019年度第1回光テクノロジー応用懇談会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Karasawa, A. Yoshida, and K. Watanabe
2. 発表標題 Fundamental soliton-like pulse propagation in a normal dispersive liquid-core optical fiber
3. 学会等名 19th Chitose International Forum on Photonic Science and Technology (CIF '19)2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 唐澤直樹、平山愛梨
2. 発表標題 チャープパルスデジタルホログラフィーの原理検証
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 唐澤直樹
2. 発表標題 超短パルスレーザーによる広帯域光波の発生とその分光・計測への応用
3. 学会等名 レーザー学会「ファイバーレーザー技術」技術専門委員会第2回委員会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------