

# フェムト秒時空間画像計測システムの創成

栗辻 安浩

京都工芸繊維大学 大学大学院工芸科学研究科 電子システム工学部門

## 1. 研究のねらい

自然科学において時間発展する現象の解明・理解はより短い時間の領域に興味移っていき、現在はフェムト秒という超高速領域に最先端の注目が集められ、世界的に多くの研究機関で精力的に研究が進められている。これらの研究の殆どが、単にエネルギーのみや分光スペクトルの超高速時間発展を計測しているのみであり、超高速現象の画像情報を記録・撮影できるシステムは世界的に類がない。フェムト秒という極短時間領域で進展する超高速現象を観察することができれば、物理学、化学、生物学などの自然科学における未知の現象の解明ができる。人間が物事を観察することには大きな価値がある。例えば、空間における微小領域を観察する技術として電子顕微鏡がある。現在のナノテクノロジー、ライフサイエンスの発展は電子顕微鏡による観察技術の賜物である。時間領域における微小領域すなわち極短時間の世界を観察できれば、極短時間の超高速技術の創成と発展に不可欠な技術であると考えられる。そこで、本研究では、Light-in-flight ホログラフィを用いてフェムト秒時間領域で進展する現象を動画像として記録・観察できるシステムを創成し、さらにそのシステムを高速現象の時間発展特性の計測への応用を試みる。

## 2. 研究成果

### (1) 光が伝播する様子の3次元像の動画記録と観察

光パルスが伝播する様子を記録・観察できるこれまでの技術では、伝播する超短光パルスの2次元像の時間発展しか記録できていなかった。これは、Light-in-flight ホログラフィでは伝播する超短光パルスと拡散板との交差部分の様子を記録するという原理に基づいていたからである。そこで、超高速の世界の様子について、より忠実かつ多くの情報を得るために、光が伝播する様子の3次元像の動画記録と観察を試みた。

光が伝播する様子の3次元像の動画を記録するために考案した光学系とその実証のために構築した光学系を図1に示す。光パルスの3次元像を観察するには、3次元の拡散体を用いることにより伝播する光パルスの波面全体から拡散光を発生させ、それを物体光とすればよいと考えた。3次元拡散体としてゼラチンで作製したゼリーを用いた。フェムト秒光パルスは拡大した平行光パルスにして、3次元拡散体に導入した。光パルスの3次元像を明瞭に識別するために、図1(a)に示すような「光」という文字パターンで光を遮断するフォトマスクを、ガラス容器の光パルスが入射する面に装着した。光源には、持続時間が224fs、中心波長が720nmの光パルスを発するモードロックチタンサファイアレーザーを、記録材料にはAgfa Holotest 8E75HD乾板を使用した。

本実験により光が伝播する3次元像を動画として記録・観察に成功した。得られた動画は論文誌 *Optics Express* のホームページ(<http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-15-22-14348>)から利用制限無く閲覧できる。その動画から抜き出した4コマの画像を図2に示す。楕円のパターンは伝播する様子をわかり易いように設けた。楕円の歯の間隔は1cmである。光パルスは(a)→(b)→(c)→(d)の順に右から左に進んで行く途中である。(e)「光」の部分拡大した像。各画像の時間間隔は14ピコ秒で、約67 $\mu$ mの薄い光の壁が進んでいく様子の236ピコ秒で起こっている現象の記録とスローモーション観察に成功した。

次に、広げて平行光にしたフェムト秒光パルスが凸レンズによって1点に集光した後、広がっていく様子の3次元動画記録と観察を試みた。得られた動画は連続した動画として観察できるが、その動画中の6シーンを取り出した像を図3に示す。(a)→(c)で光パルスは集光していき、(d)ちょうど集光した瞬間、(e)→(f)で広がっていくのを観察できる。「光」という文字が集光した後、上下左右とも反転して進んで行くことも観察できる。各画像の時間間隔は15ピコ秒で、得られた動画では259ピコ秒で起こっている現象を3次元像のスローモーションで観察できた。光パルス以外の光路が明るく写っているが、これは、光路をわかり易くするために、連続波発振レーザー

で同様のシーンをホログラムで撮影し、得られた像を重ねて観察しているからである。

次に、通信などの光ファイバに用いられる分布屈折率構造では光パルスが曲がりながら伝播する。分布屈折率構造中を光パルスが伝播する様子の3次元像の動画記録と観察を試みた。水とゼラチンで作製したゼリーに連続的な濃度勾配を形成し、屈折率を連続的に変化させることで、この3次元拡散体を作製した。記録したホログラムを再生したときに、得られた動画から抽出した8コマの写真を図4に示す。各図は時間間隔を約26psずつ抽出したものである。図5中でそれぞれの動く輝点が撮影に成功したフェムト秒光パルスであり、図4の(a)–(h)の順にフェムト秒光パルスが分布屈折率媒質中で連続的に屈折を繰り返して、緩やかに曲がりながら進む様子がわかる。

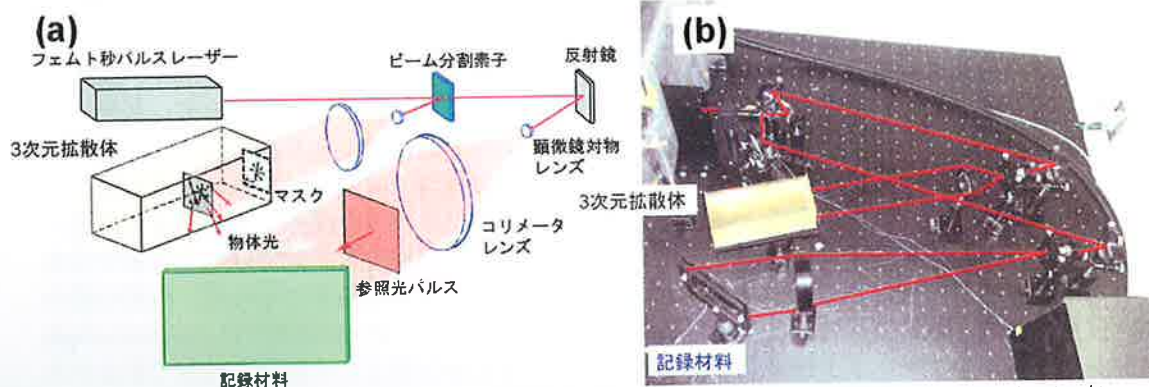


図1. 光が伝播する様子の3次元像の動画記録光学系。(a)概要,(b)構成した光学系の写真。

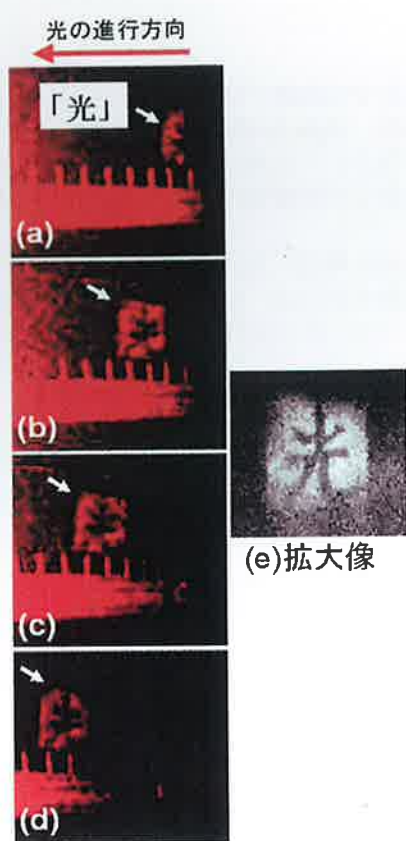


図2 平行光パルスの伝播の3次元像の動画から抜き出した4コマの画像。

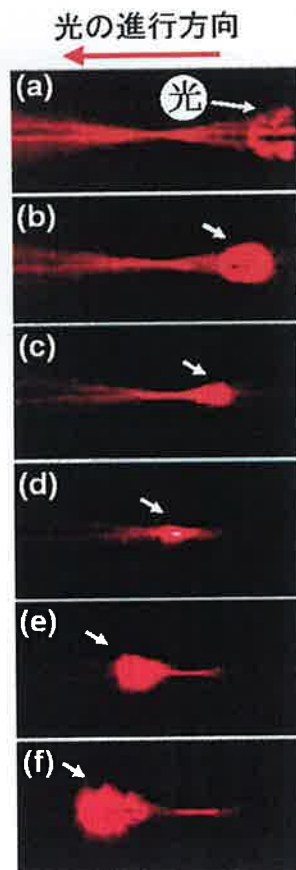


図3 凸レンズにより収束し集光後、発散する光パルスの3次元像の動画から抜き出した6コマの画像。

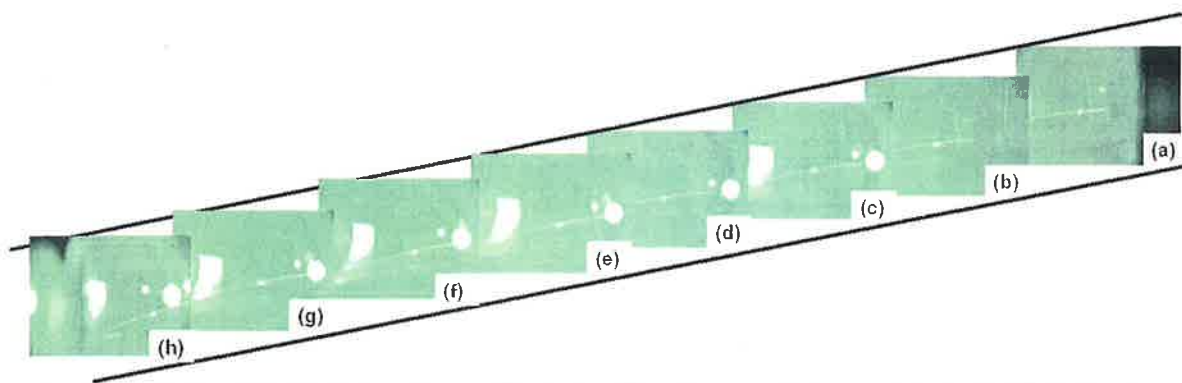


図4 分布屈折率媒質中を緩やかにカーブしながら進むフェムト秒光パルスの3次元像の動画から抜き出した8コマの画像.

### (2) フェムト秒光パルスの第二高調波の伝播の動画記録と観察及び書き換え

これまで利用してきたホログラム乾板 Agfa Holotest 8E75HD が製造中止となり、新たな記録材料を用いる必要が生じた。しかしながら現時点で利用可能なホログラム記録材料の殆どは緑色から青色にかけての可視短波長光に感度を持つ。一方、フェムト秒レーザー光パルスの中心波長は700nm以上の近赤外域であり、このホログラム記録材料では記録できない。しかも可視のフェムト秒光パルスの伝播を記録・観察した例は報告されていない。そこで、利用可能な記録材料を用いても、フェムト秒時空間画像計測システムを構成できるように、フェムト秒光パルスの第二高調波発生(SHG)を行うシステムを構成した。BBO結晶を使用し、中心波長400nmのフェムト秒光パルスのSHGを行った。記録材料にはこの波長に感度があり、解像力が高く入手し易い乾板であるKonica P5600を用いた。平行光パルスの伝播を被写体として記録し、そのホログラムを再生した。得られた動画から抜き出した4コマの画像を図5に示す。伝播する平行光パルスが楕円で示した中に観察でき、フェムト秒光パルスの第二高調波の伝播の動画記録と観察に成功した。

また、新規ホログラム材料として書き換え可能ホログラム材料である光導電性プラスチックホログラム(PPH)にフェムト秒光パルスの伝播の動画記録と観察も行い、記録と観察に成功した。これらにより、構成するシステムでは従来ホログラム材料に代わる新しい材料の可能性を示した。

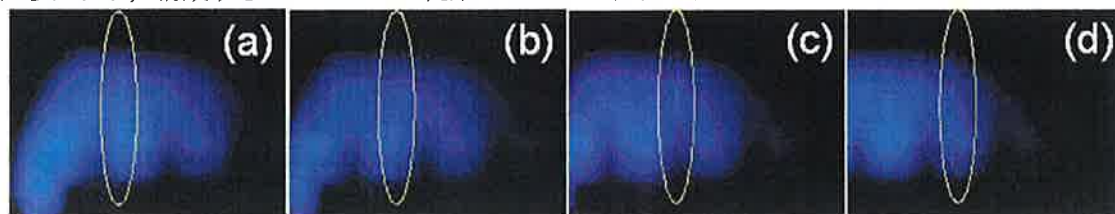


図5 フェムト秒光パルスの第二高調波の伝播の動画から抜き出した4コマの画像.

### (3) 微小領域で起こる超高速現象の発生とその動画像記録システムの構築

超高速現象の時間発展を動画として記録するために、顕微鏡観察領域の現象を本システムで記録できる光学系の設計と、そのシステムを製作した。製作したシステムの概要と写真を図6に示す。微小領域で起こる超高速現象の例として、フェムト秒光パルスをレンズで集光してプラズマを発生させ、そのプラズマが誘起される時間発展の様子を動画記録することを想定した。プラズマを誘起するために、再生増幅器を光学系に導入した。記録には物体光、参照光、プラズマを誘起させるためのポンプ光のタイミングが合致するように遅延光学系を構成し、数 $\mu\text{m}$ の調整を可能にした。直径10mm、光パワー密度 $20\text{mW}/\text{cm}^2$ にコリメートしたポンプ光を凸レンズで集光し、焦点付近でレーザー誘起プラズマを発生できた。この現象の動画像記録を試みたが、光量不足のために現在の光学系では困難であることが判明した。光学系の途中でフェムト秒光パルスの集光によって生じる空気の電離を避けつつ、ビームサイズが小さい平行光パルスを形成できる光学系を、現在、設計している。また、得られた動画像を解析し定量的評価ができるように、CCDカメラへのホログラム記録も並行して進めている。

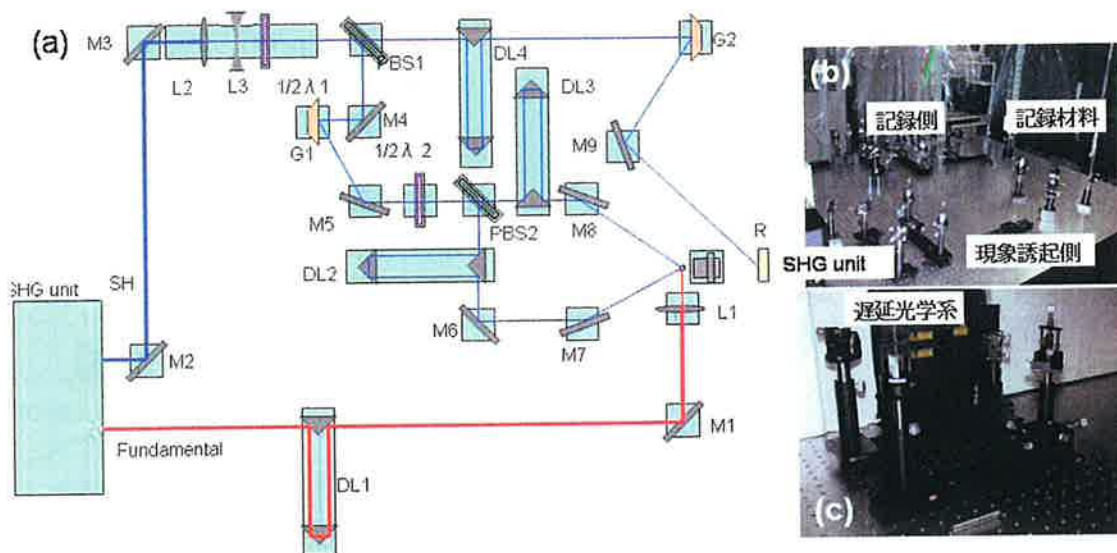


図6 微小領域のフェムト秒動画を記録するシステム。(a)概要, (b)全体, (c)遅延光学系部。

### 3. 主な発表

#### 論文

- Y. Awatsuji, M. Sasada, A. Fujii, and T. Kubota, "Scheme to improve the reconstructed image in parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Applied Optics* **45**, pp.968-974 (2006).
- T. Takaoka, N. Kawano, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Design of a reflective aspherical surface of a compact beam-shaping device," *Optical Review* **13**, pp.77-86 (2006).
- Y. Awatsuji, A. Fujii, T. Kubota, and O. Matoba, "Parallel three-step phase-shifting digital holography," *Applied Optics* **45**, pp.2995-3002 (2006).
- T. Kubota, K. Komai, M. Yamagiwa, and Y. Awatsuji, "Moving picture recording and observation of three-dimensional image of femtosecond light pulse propagation," *Optics Express* **15**, pp.14348-14354 (2007).

#### 招待講演

- 栗辻安浩, "フェムト秒光速動画システム," 日本分析化学会第55年会講演要旨集, p.462, 豊中市, 2006年9月22日。
- Y. Awatsuji and T. Kubota, "Observation of femtosecond laser pulses propagating in space and time," *2006 IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 2006) Conference Proceedings*, pp.70-71, Montreal, Canada, Oct. 2006.
- 駒井和斉, 葛原あゆみ, 栗辻安浩, 西尾謙三, 裏 升吾, 久保田敏弘, "ホログラフィを用いた光伝播の3次元像動画記録と観察," 第54回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, p.52, 相模原市, 2007年3月28日。
- Y. Awatsuji and T. Kubota, "Moving picture of three-dimensional image of femtosecond light pulse propagating in three-dimensional space," *Sixth Euro-American Workshop on Information Optics 2007*, Reykjavik, Iceland, June 2007.
- 栗辻安浩, 西尾謙三, 裏 升吾, 久保田敏弘, "超短パルスレーザー光伝播のホログラフィック動画記録と観察," レーザー学会学術講演会第28回年次大会講演予稿集, pp.201-202, 名古屋市, 2008年2月1日。

### 4. 受賞

- 第4回堀場雅夫賞 (2007年10月)