

## フェムト秒レーザースペクトル干渉OCTによる高分解能液膜計測法の原理開発

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2018-11-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 齋藤, 隆之 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10297/00025977">http://hdl.handle.net/10297/00025977</a>

平成 29 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13866

研究課題名(和文)フェムト秒レーザースペクトル干渉OCTによる高分解能液膜計測法の原理開発

研究課題名(英文)Development of high resolution measurement of a thin liquid film on the basis of femtosecond frequency domain interferometry OCT

研究代表者

齋藤 隆之(SAITO, Takayuki)

静岡大学・グリーン科学技術研究所・教授

研究者番号：10324328

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒レーザパルス(FSLP)が有する優れた特性(極短パルス、強干渉性、超高エネルギー密度、多光子吸収、広周波数帯域)をフルに利用して、蒸気タービン静翼に形成される水膜を高精度に計測する手法の原理を開発した。具体的には、FSLPを数百フェムト秒～数ピコ秒という極短の時間差を付けて2つのレーザパルスに分岐し、第1パルスを先行パルス(先行して光路上の水分子に吸収される)、第2パルスをセンシングパルスとしてそのスペクトル領域での干渉強度を利用して水膜を計測する技術の原理を開発した。

研究成果の概要(英文)：Making the best use of extraordinary characteristics (i.e. ultra-short pulse duration, strong coherency, ultra-high energy density, multi-photon absorption and wide band) of a femtosecond laser pulse (FSLP), a new principle of measurement of a thin water film formed on a stator vane of steam turbine. First, the FSLP was split into two laser pulses with an ultra-small interval from several-hundred femtoseconds to several picoseconds. Second, the first pulse was used as a priority pulse that is absorbed by the water molecules in the optical path, and the second pulse was used as a sensing pulse. Thus, a new principle based on the interference intensity of this sensing pulse was developed to accurately measure a thin water film.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 混相流 液膜 スペクトル干渉 フェムト秒レーザパルス 時間分解計測 時間分解照射  
吸収分光計測

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 我が国の電力供給の現状

原子力発電所の再稼働の遅れならびに再生可能エネルギーの普及（太陽光発電と風力発電）の停滞のために、火力発電への過度な依存状態が続いている。一方、二酸化炭素の排出量の削減も思うように進んでいない。このような状況で、火力発電の更なる効率化が喫緊の課題であり、その一つが発電用蒸気タービンの効率化である。中でも、高効率化と動翼の耐久性を向上させる上で、静翼における水膜の発生を防止することが重要であり、発電機器メーカーがその技術開発に凌ぎを削っている。

### (2) 液膜計測技術の現状

透明有機固体薄膜の厚みを計測する装置は既に高精度の市販品が多種販売されている。しかし、水膜では界面変動と光吸収と言う難題のため、これら固体薄膜の計測手法を適用することはできず、水膜を高い分解能で計測する技術は見当たらない。水膜計測には、触針法、静電容量法、定電流法などの電気的方法、超音波の干渉を利用する方法、レーザー光の干渉縞を用いる方法、レーザーフォーカス変位計を利用する方法が提案されているが、これら既存の計測手法により蒸気タービンという狭隘空間に形成される水膜を計測することは困難である。

## 2. 研究の目的

### (1) 液膜厚さの新たな計測原理の提案

フェムト秒レーザーパルス（FSLP）の強い干渉性、極短パルス性、超高エネルギー密度、多光子吸収、広周波数帯域、非熱性という特性をフルに利用して、蒸気タービン静翼に形成される液膜を広いダイナミックレンジで計測する新たな手法、「フェムト秒レーザースペクトル干渉 OCT による高分解能液膜計測」の原理を確立することを目的とする。

### (2) 提案する手法の特徴

提案の手法は、生体計測に利用されている既存 OCT（光コヒーレンストモグラフィ。低干渉性赤外ビームを使用）とは異なり、強い干渉と水への多光子吸収を伴う FSLP とそのスペクトル領域での干渉強度を巧みに利用することを計測原理とする。透明液体の奥行き方向の情報を一括して取得する新原理の提案を目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 先行フェムト秒レーザーパルス（以下、P-FSLP）とセンシング時間遅延フェムト秒レーザーパルス（以下、D-FSLP）の水への吸収特性を明らかにする。具体的には下記項目を実施した。

焦点近傍の 3 次元レーザー強度分布  
先行 FSLP の水分子への吸収過程  
先行 FSLP の変調

(2) P-FSLP の強度と気泡核生成・気泡成長との関係を明らかにする。具体的には下記項目を実施した。

気泡核形成の時間発展

気泡成長の時間発展

(3) FSLP 干渉 OCT を行うための D-FSLP の照射タイミング、照射位置、照射強度を明らかにする。具体的には下記項目を実施した。

FSLP 干渉 OCT に最適な時間遅延量と照射位置

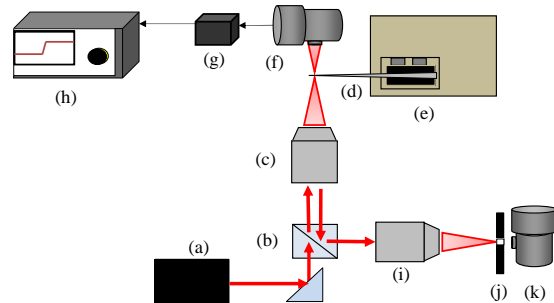
P-FSLP と D-FSLP の最適照射強度

### (4) 実験装置の概要

下記に各実験に使用した装置の概略図を示す。

焦点近傍の 3 次元レーザー強度分布（ナイフエッジ法）計測実験装置

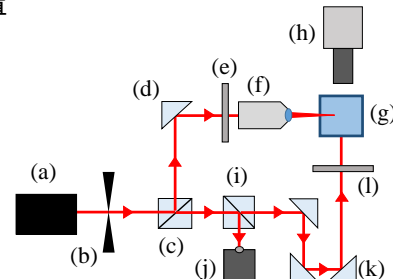
ナノオーダー移動ステージに固定された光学ナイフを、2 組の対物レンズとピンホールからなる共焦点光学系において fs レーザーパルスの集光位置へ移動させた。次に、光軸と垂直な面でナイフを移動し、光検出器へ入射するレーザー光を徐々に増加させた。



(a) fs-laser system, (b) beam splitter, (c) objective lens 1, (d) knife edge, (e) nano-order stage, (f) PMT 1, (g) amplifier, (h) data logger, (i) objective lens 2, (j) pin-hole, (k) PMT 2

図 1：3 次元強度分布計測装置の概要

### ポンププローブ法時間分解可視化計測実験装置



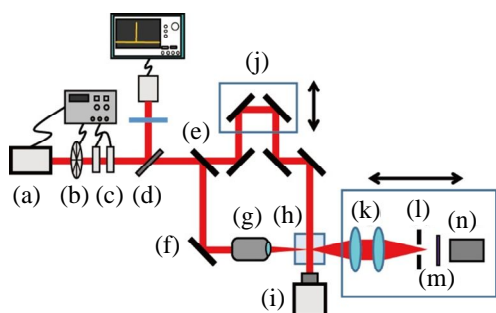
(a) fs-laser system, (b) mechanical shutter, (c) beam splitter 1, (d) mirror, (e) ND filter 1, (f) objective lens, (g) cell, (h) camera, (i) beam splitter 2, (j) photo diode, (k) optical delay, (l) ND filter 2

図 2：ポンププローブ法時間分解可視化計測実験装置

フェムト秒からピコ秒の時間分解能で P-FSLP と水分子との相互作用を計測する装置の概要を図 2 に示す。光学遅延を使用して高い時間分解能を達成した。

ポンププローブ法と共焦点光学系を組み合わせた fs パルスの変調計測装置

本実験系では、fs パルスの変調 (blue-shift continuum) を直接計測することが困難なため、図 3 に示す装置 (ポンププローブ法と共焦点光学系とを組み合わせた独自装置) を考案・製作し、fs パルスの集光位置を精密に計測することにより、blue-shift の発生を間接的に捉えた。



(a) fs-laser system, (b) optical chopper, (c) mechanical shutter, (d) half mirror, (e) beam splitter, (f) mirror, (g) objective lens, (h) cell, (i) camera, (j) optical pass delay, (k) objective lenses, (l) pin hole, (m) short-pass filter, (n) photomultiplier

図 3 : fs パルス変調計測装置

#### 4. 研究成果

##### (1) 焦点近傍の 3 次元レーザー強度分布 (ナイフエッジ法)

ナノオーダー移動ステージに固定された光学ナイフを、2 組の対物レンズとピンホールからなる共焦点光学系において fs レーザーパルスの集光位置へ移動させた。次に、光軸と垂直な面でナイフを移動し、光検出器へ入射するレーザー光を徐々に増加させる。レーザー強度の累積分布関数を得て、この導関

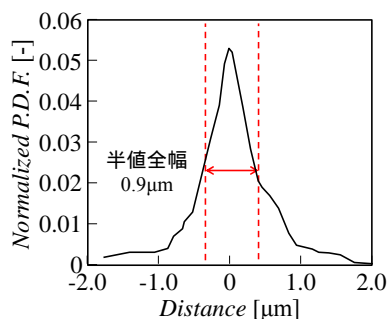


図 4 : 焦点面における FSLP の正規化強度分布

数から fs パルスの強度分布が求めた。図 4 は焦点面における正規化強度分布を示す。本

図から分かるように、fs パルスでは、その自己収束 (多光子吸収による水分子のプラズマ化と屈折率変化) のために、通常のレーザーによる集光径よりかなり小さくなった。

自己収束には揺らぎがあるため、水分子がイオン化 (プラズマ化) される領域は、光軸方向に揺らぐことになる。D-FSLP を照射する最適領域を見出すために、P-FSLP により最も強くプラズマ化される領域を 3 次元レーザー強度分布から明らかにした。

##### (2) P-FSLP の水分子への吸収過程

非常に高いエネルギー密度の P-FSLP を照射するため、多光子吸収による電子の励起が生じる。これにより、水分子がプラズマ化する。この過程 (水分子のプラズマ化の時間発展) は、D-FSLP を照射するタイミングを考察する上で極めて重要である。

図 5 は、P-FSLP 照射後の屈折率の変化の時間発展を 100fs の時間分解能で時間分解計測した一例である。屈折率の変化領域とプラズマ化領域とは一致すると考えられることから、屈折率の変化を fs レーザー光の干渉により可視化した結果である。P-FSLP 照射後、数百 fs から干渉縞が観測され、徐々に成長する。干渉縞は 700ps ~ 800ps まで観測された。

この結果から、D-FSLP を照射する最適遅延時間を明らかにした。

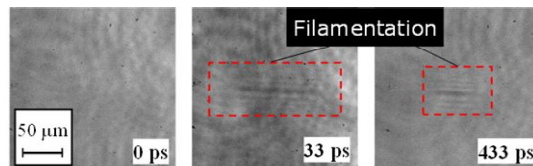


図 5 : 焦点面における FSLP の正規化強度分布

##### (3) 先行 FSLP の変調

Blue-shift continuum が生じると、焦点位置が光軸前方に引き伸ばされるはずである。これを図 3 に示した実験装置により捉えた。

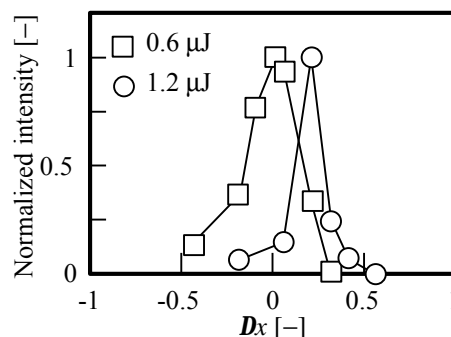


図 6 : fs パルスの変調 (Blue-shift continuum)

図 6 に示すように光強度の分布が光軸方向に引き伸ばされたことが分かる。これを引き起こしたのが fs パルスの変調 (blue-shift continuum) と考えられる。

この実験結果と(1)ならびに(2)の結果から、D-FSLP を照射する最適位置を求めた。

(4) 先行フェムト秒レーザーパルス (P-FSLP) の強度と気泡核生成と気泡成長

図 7 に気泡核生成 (1.5ns)、気泡成長、気泡消滅直前 (10 $\mu$ s) までの時間分解可視化計測の結果を示す。水分子のプラズマ化部分から気泡核が形成されるが、気泡核と気泡の最大サイズは、プラズマ化領域のサイズにより決定されること、またバンドギャップが影響することが分かった。

この実験結果を詳細に解析することにより、気泡が形成されない P-FSLP の強度を求めた。

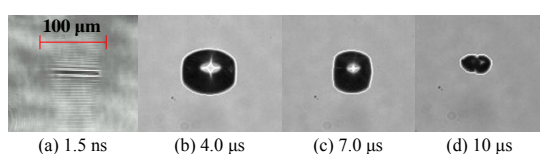


図 7 : 気泡核生成と気泡成長の時間発展

(5) センシング時間遅延フェムト秒レーザーパルス (D-FSLP) の最適強度

上記(4)と(2)ならびに(3)の結果を総合的に解析することにより、D-FSLP の照射により、気泡が生成されない強度を求めた。

(6) まとめ

フェムト秒レーザーパルス (FSLP) が有する優れた特性 (極短パルス、強干渉性、超高エネルギー密度、多光子吸収、広周波数帯域) をフルに利用して、蒸気タービン静翼に形成される水膜を高精度に計測する手法の原理、すなわち、FSLP を数百フェムト秒～数ピコ秒という極短の時間差を付けて 2 つのレーザーパルスに分歧し、第 1 パルスを先行パルス (先行して光路上の水分子に吸収される)、第 2 パルスをセンシングパルスとしてそのスペクトル領域での干渉強度を利用して水膜を計測する技術の原理を開発した。

なお、現在、特許申請準備中である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件) \*責任著者

Takayuki Saito, Optical fibre probing for bubble/droplet measurement, and its possibility of the application to biotechnology, Springer, Advances in Intelligent Systems and Computing 519, 231–246, (2016). 査読有、DOI: 10.1007/978-3-319-46490-9\_33.

Yuki Mizushima and \*Takayuki Saito, Nonlinear bubble nucleation and growth following filament and white-light continuum generation induced by a single-shot femtosecond laser pulse into dielectrics based on consideration of the time scale, Applied Physics Letters, Vol. 107, 114102-1 ~ 114102-5, (2015) 査読有、DOI: 10.1063/1.4931362.

[学会発表] (計 6 件) \*責任著者

清水大夢、村松浩也、ハンナ キエジュコ ヴスキ パウラク、\*齋藤隆之、フェムト秒レーザーパルスによるマイクロバブルの生成・成長の高時間分解可視化計測、混相流シンポジウム 2017、電気通信大学 (東京都調布市)、2017 年 8 月 19 日 ~ 21 日 (採択済み)。

Yuki Iburi and \*Takayuki Saito, Investigation of the interactions between a femtosecond laser pulse and ultrapure water, The 4th International Forum of Heat Transfer (IFHT2016), Sendai International Conference Center, Sendai, Miyagi, Japan, November 2 – 4, 2016.

Hiromu Shimizu \*Takayuki Saito, Novel measurement for dispersed droplets through a single tip optical fibre probe with post-signal processing. 9th International Conference on Multiphase Flow (ICMF2016), Firenze Fiera Palazzo dei Congressi Piazza Adua 1, Firenze, Italy, May 23 – May 27, 2016.

水嶋祐基、\*齋藤隆之、フェムト秒レーザー加工を施した単一光ファイバーによる液滴流計測法の開発、日本鉄鋼協会第 171 回春季講演大会、東京理科大学葛飾キャンパス、東京都葛飾区、2016 年 3 月 23 日 ~ 25 日。

Takayuki Saito, Novel bubble formation by a femtosecond laser pulse irradiated into pure-water/acetone: the bubble formation process on a time scale from sub-picoseconds to microseconds, 7th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, invited, Hotel Beau Site, Zermatt, Switzerland, October 11 – October 15, 2015.

Yuki Mizushima and \*Takayuki Saito, Ultra-short-time-resolved visualization of femtosecond-laser-pulse-induced bubble nucleation in water and acetone, Proceedings of The 26th International Symposium on Transport Phenomena, ID 114, 4 pages, Montan University, Leoben, Austria, September 27 – October 1, 2015.

水嶋祐基，\*齋藤隆之、フェムト秒パルスレーザーを用いた水素気泡生成の高時間分解可視化、混相流シンポジウム 2015、高知工科大学、高知県香美市, 2015 年 8 月 4 日～6 日。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

URL: <http://flow.eng.shizuoka.ac.jp/>

URL: <http://www.green.shizuoka.ac.jp/>

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

齋藤 隆之 (SAITO, Takayuki)

静岡大学・グリーン科学技術研究所・教授

研究者番号：10324328