

# 超短パルスレーザーの周波数-時間対応を用いたシングルショット超高速連写撮像法の展開

## Applications for Single-shot Ultrafast Burst Imaging

### Utilizing Frequency-to-time Encoding of an Ultrashort Laser Pulse

鈴木 敬和 (D2), 根本 寛史 (M2)

Takakazu Suzuki, Hirofumi Nemoto

#### Abstract

Single-shot ultrafast imaging is expected to pave a way to measure transient phenomena in femtoseconds to nanoseconds domain in real-time. Among them, a frequency-to-time encoding of Sequentially Timed All-optical Mapping Photography (STAMP) is the only method capable of direct 2D-burst imaging with both high temporal and spatial resolution with a single-shot basis. This study aims to reveal various ultrafast nonrepetitive phenomena in real-time by applying the modified version of STAMP utilizing Spectral Filtering (SF-STAMP). SF-STAMP addresses the single-shot measurements of photo- and THz-induced irreversible ultrafast phase transition, that can be observed for the first time by virtue of SF-STAMP's notable features of a single shot and ps-temporal and  $\mu\text{m}$ -spatial resolution. Moreover, a real-time in-situ measurement application has been demonstrated by combining a conventional high-speed camera and SF-STAMP. These results highlight the STAMP method has advantages over other single-shot ultrafast imaging methods.

#### 1. はじめに

過去 10 年にわたり様々なシングルショット (連続または連写) 超高速 2 次元光学イメージング手法が提案されてきた [1]. 連写手法は、時間情報を対応づける超短レーザーパルスプローブの対象に応じて、空間-時間, 空間周波数-時間, 角度-時間, 周波数-時間対応の 4 つに分類できる. 本研究では、この

中の周波数-時間対応関係を活用した異波長光ストロボ光による Sequentially timed All-optical Mapping Photography (STAMP) [2] を扱う. STAMP は、サブピコ秒の高時間分解能を有し、画像再構築のポストプロセスの必要がない直接的なシングルショット超高速 2 次元連写イメージング手法である. これまでに、回折光学素子 (DOE) とバンドパスフィルタ (BPF) による波長フィルタリングを 4f 結像光学系に組み合わせたマルチスペクトラルイメージング光学系を STAMP に適用する STAMP utilizing Spectral Filtering (SF-STAMP) を開発し、大幅な簡素化・小型化 [3], 撮影枚数の向上 (最大 25 枚) [4], さらには Free-space Angular-Chirp-Enhanced Delay (FACED) [5] を用いた波長掃引遅延パルス列プローブを利用することにより計測時間窓のナノ秒領域への拡張を実現してきた [6]. Fig. 1 に、超高速イメージング手法が対象とする時間軸上における STAMP の立ち位置を示す. このように STAMP はフェムト秒からナノ秒領域の超高速現象をシングルショットで連写撮影できる手法である.

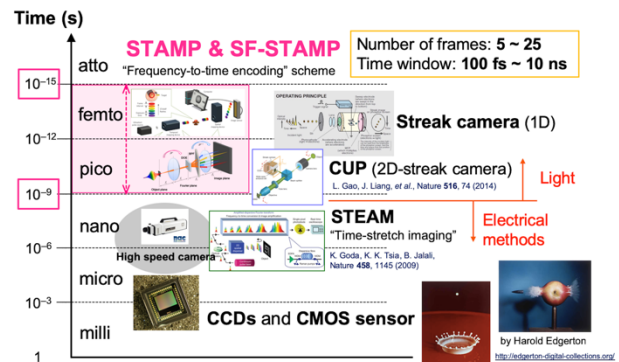
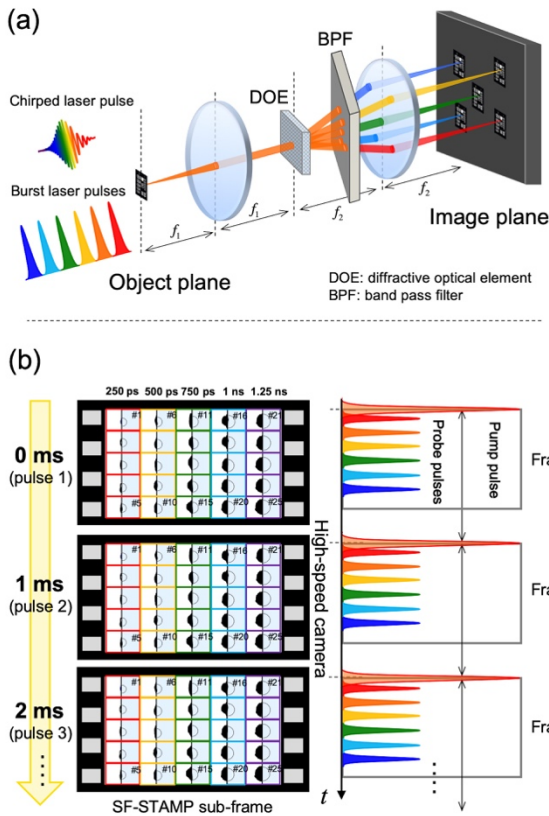


Fig. 1 Time scales in various ultrafast and high-speed imaging techniques [7]

## 2. SF-STAMP の応用展開

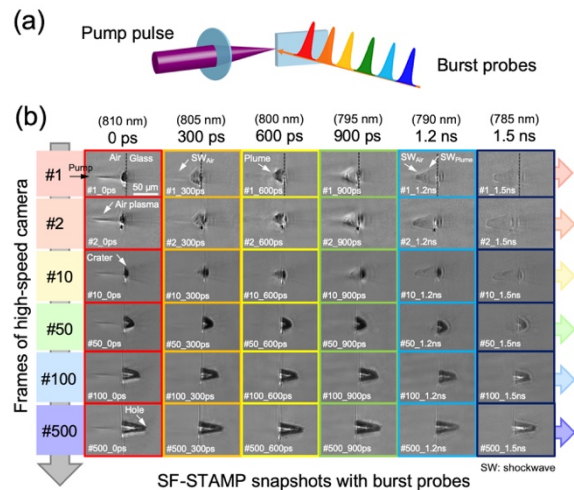
以下では、SF-STAMP を用いたリアルタイム *in-situ* 計測応用 [8]と THz 波誘起による不可逆的な超高速相転移過程 [9]を対象としたシングルショット計測応用を報告する。



**Fig. 2** (a) SF-STAMP snapshot multispectral imaging system composed of a diffractive optical element (DOE) and a bandpass filter (BPF); (b) Concept of real-time consecutive 1 kHz ultrafast 2D-burst imaging by the combination of SF-STAMP system and a 1000-fps high-speed camera.

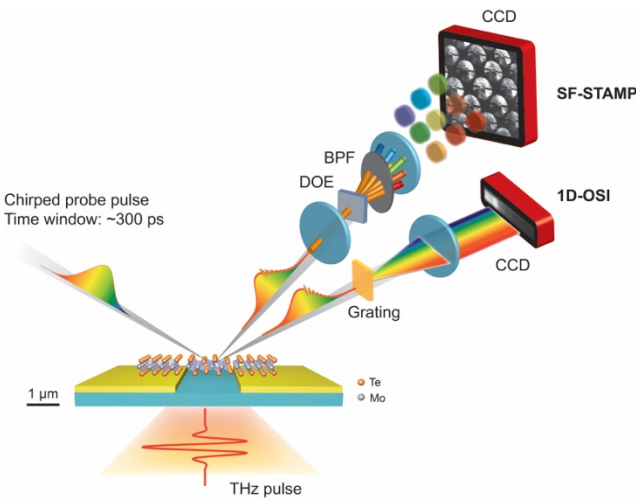
Fig. 2 に示すように、kHz フレームレートの高速度カメラと SF-STAMP を組み合わせることで、1 kHz のフェムト秒レーザーによるガラス加工のパルス積算加工状況における各パルスでのアブレーション前駆過程や加工進展中の変化をリアルタイムで超高速 2 次元バーストイメージ計測した [8]。

フェムト秒からピコ秒領域に対しては周波数チャーププローブを用いることでパルス毎に 7 枚 (時間窓 5 ps), ピコ秒からナノ秒領域には FACED による波長掃引遅延バーストプローブを用いることで 6 枚 (時間窓 1.5 ns, Fig. 3 参照) の超高速時間分解能を有するリアルタイム連写イメージングを加工パルス 500 発分に対して実現した。この結果は、様々なレーザーパルスパラメータや材料特性に対するレーザー加工の比較を容易にするデータベースを短時間で取得できることを示唆している。



**Fig. 3** (a) Schematic of single-shot measurement of femtosecond laser pulse ablation of glass with spectrally sweeping burst probe laser pulses. With 1000-fps HS-camera, we observed each laser ablation shot. Shockwaves (SWs) generated by laser-induced plasma (SW<sub>Air</sub>) and by ablation plume (SW<sub>Plume</sub>) are indicated on images; (b) Measured pulse-by-pulse single-shot burst images of laser ablation and shock-wave evolution on glass by SF-STAMP with 300-ps interval spectrally sweeping pulses (220×150 pixels). Horizontal column corresponds to ultrafast single-shot snapshot with six frames. Vertical column corresponds to HS-camera shots. Number in vertical direction is equivalent to number of cumulative pump pulses. Scale bar represents 50 μm.

また, SF-STAMP のシングルショット計測応用として, 多層  $\text{MoTe}_2$  の THz 波誘起相転移過程における不可逆的な過渡反射率変化計測を 1 次元光ストリークイメージング分光 (Optical streak imaging: 1D-OSI) と共に実施した (Fig. 4 参照). 半導体相から準安定相を介して金属相に変化する約 200 ps 間の過程を可視化することに成功し, THz 波誘起相転移ダイナミクスの知見を得た [7].

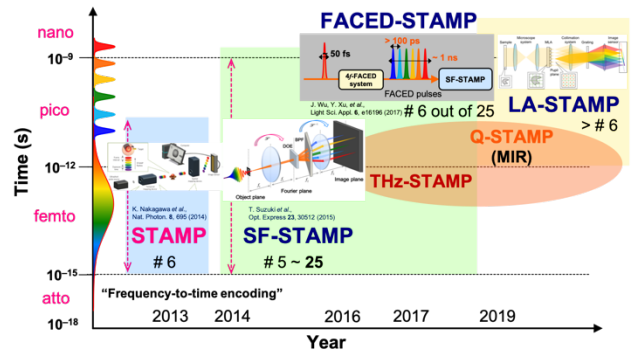


**Fig. 4** Measurements of irreversible THz-driven phase transition dynamics in multilayer  $\text{MoTe}_2$  by multiple single-shot spectroscopy. Schematics of multilayer  $\text{MoTe}_2$  on the THz metamaterial structure with a single THz pulse (410 kV/cm) excitation and single-shot microscopic probes: 2D-burst imaging of SF-STAMP and 1D-OSI. By probing the sample with a chirped laser pulse and analyzing the reflected pulse, SF-STAMP and 1D-OSI can capture the irreversible phase transition with a ~300-ps time window and 100-fs to 10-ps temporal resolution.

### 3. まとめと今後の展望

本研究では, SF-STAMP による STAMP 手法の応用展開として, リアルタイム計測および超高速シングルショット不可逆現象計測応用を行った. 上述のように SF-STAMP はナノ秒以下の領域で有用なイメ

ージングツールである. 一方で, SF-STAMP では, ビームの複製と波長フィルタリングによりプローブパルスの光利用効率が低いことやサブナノ秒領域を対象とする FACED による波長掃引バーストプローブと SF-STAMP の組み合わせにおいて, 波長イメージ成分の不一致箇所が存在するためプローブパルス列を十分に活用できないことも明らかになった. 今後は, 光利用効率が高く, かつ FACED パルス列を有効利用可能な面分光によるスナップショットマルチスペクトルイメージング系による STAMP の実現 [10] および, 従来, 超高速イメージングが実現されて来なかった中赤外領域および THz 波領域のような長波長帯での STAMP 展開が期待される. 最後に, STAMP 手法発展の時系列と計測対象とする時間軸を示した概念図を Fig. 5 に示す.



**Fig. 5** Schematic of the time series in STAMP development and the time scale for the measurement target

### References

1. J. Liang and L. V. Wang, "Single-shot ultrafast optical imaging", *Optica* **5**, 1113 (2018).
2. K. Nakagawa, A. Iwasaki, Y. Oishi, R. Horisaki, A. Tsukamoto, A. Nakamura, K. Hirokawa, H. Liao, T. Ushida, K. Goda, F. Kannari, and I. Sakuma, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)," *Nat. Photon.* **8**, 695 (2014).

3. T. Suzuki, F. Isa, L. Fujii, K. Hirose, K. Nakagawa, K. Goda, I. Sakuma, and F. Kannari, "Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering," *Opt. Express* **23**, 30512 (2015).
4. T. Suzuki, R. Hida, Y. Yamaguchi, K. Nakagawa, T. Saiki, and F. Kannari, "Single-shot 25-frame burst imaging of ultrafast phase transition of  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  with a sub-picosecond resolution", *Appl. Phys. Express* **10**, 92502 (2017).
5. J. Wu, Y.-Q. Xu, J. Xu, X. Wei, A. C. Chan, A. H. Tang, A. K. Lau, B. M. Chung, H. Cheung Shum, E. Y. Lam, K. K. Wong, and K. K. Tsia, "Ultrafast laser-scanning time-stretch imaging at visible wavelengths", *Light Sci. Appl.* **6**, e16196 (2017).
6. H. Nemoto, T. Suzuki, Y. Yamaguchi, and F. Kannari, "Single-shot Ultrafast Burst Imaging by Spectrally Sweeping Pulse Train with 100-ps Interval", in *CLEO Pacific Rim Conference 2018*, OSA Technical Digest (Optical Society of America), Th1B.3 (2018).
7. T. Suzuki, "Study on Single-shot Ultrafast Burst Imaging Utilizing Frequency-to-time Encoding of an Ultrashort Laser Pulse," PhD thesis, Keio University, Japan.
8. T. Suzuki, H. Nemoto, K. Takasawa, and F. Kannari, "1000-fps consecutive ultrafast 2D-burst imaging with a sub-nanosecond temporal resolution by a frequency - time encoding of SF-STAMP," *Appl. Phys. A* **126**, 135 (2020).
9. J. Shi, Y. Bie, W. Chen, S. Fang, J. Han, Z. Cao, T. Taniguchi, K. Watanabe, V. Bulović, E. Kaxiras, P. Jarillo-Herrero, and K. A. Nelson, "Terahertz-driven irreversible topological phase transition in two-dimensional  $\text{MoTe}_2$ ," arXiv:1910.13609 (2019).
10. 根本 寛史, "シングルショット 2 次元イメージング法における計測時間窓拡張に関する研究", 慶應義塾大学大学院修士論文 (2019).