

平成 30 年 9 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13403

研究課題名(和文) サブナノメートル・フェムト秒分解能X線連写撮影システムの開発

研究課題名(英文) Single-shot X-ray videography with sub-nanometer and femtosecond resolution

研究代表者

中川 桂一 (Nakagawa, Keiichi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：00737926

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：X線自由電子レーザーを用いると、微小かつ瞬間的な現象を高い時間分解能で観察することが可能である。しかしながら、既存の方法では一度きりしか起こらない高速度現象を動画像として取得することはできない。そこで本研究では、X線自由電子レーザーを光源とし、連写撮影を可能とするX線超高速イメージングシステムのデザインを行った。また、提案手法を確認するため、可視のレーザーを用いて光学系を構築し、実験的な原理検証を行った。

研究成果の概要(英文)：X-ray free electron laser allows us to observe microscopic ultrafast phenomena with high temporal resolution. However, with the conventional method, it is not possible to acquire a non-repetitive phenomenon as a motion picture. In this study, we designed an X-ray ultrafast imaging system that enables motion picture acquisition with X-ray free electron laser. For proof-of-principle of the proposed method, an optical system was constructed using a visible laser and experimental verification was performed.

研究分野：光工学，精密工学，医用工学

キーワード：放射光 超高速イメージング X線自由電子レーザー X線光学

### 1. 研究開始当初の背景

我々の身の回りには様々な動的現象が存在し、それらを捉えるためこれまで多くの高速カメラが開発されてきた。しかしながら、既存技術はデバイスの機械的・電気的動作速度に制限され、サブナノ秒の超高速領域のダイナミクスを捉えることはできていない。一方、サブナノ秒のダイナミクスを観察する手法として、時間的にタイミングの異なる何枚ものスナップショットから疑似的に動画を構築する Pump-probe 法がある。しかしながらこの手法は繰り返し撮影を前提としており、非反復的な現象は原理的に撮影することができない。特に極微小領域を対象とした XFEL を用いた撮影では、視野が狭くなることから相対的に高い撮影速度が必要となるが、現在行われている動的撮影法はすべて Pump-probe 法であり、撮影対象が限られていた。

これに対し近年、Sequentially Timed All-optical Mapping Photography (STAMP) と呼ぶ、超高速シングルショット撮影技術が新たに開発された (K. Nakagawa et al., Nature Photonics 2014)。この手法は、従来の連続撮影法において技術的限界 (デバイスの機械的動作や電気的応答) で制限されていた時間分解能を、物理的要求 (フーリエ変換限界) まで高めるものである。図 1 に示すように、STAMP は大きく、(1) 超短パルスレーザー、(2) パルスストレッチャーと波形整形器からなる時間写像装置 (Temporal mapping device)、(3) スペクトラルイメージングを行う空間写像装置 (Spatial mapping device)、(4) 撮像素子、(5) コンピュータ、の 5 つの要素からなる。まず、超短パルスレーザーから発せられた広帯域の超短パルス光が、撮影条件に合うよう時間写像装置にて時間的に引き伸ばされ、波形が整えられる。パルストレインとなった STAMP 照明光は観察対象に次々に照射され、像情報を取得してゆく。これら像情報を有した STAMP 照明光が、空間写像装置にて今度は波長に応じて空間的に分離される。像情報を失うことなく空間的に分離された STAMP 照明光は、露光状態に保たれた撮像素子で検出される。ここで時間と波長、空間と波長に対応関係があるため、取得した一連の画像を動画として再構成することが可能であり、完全なシングルショットでの超高速撮影が実現される。

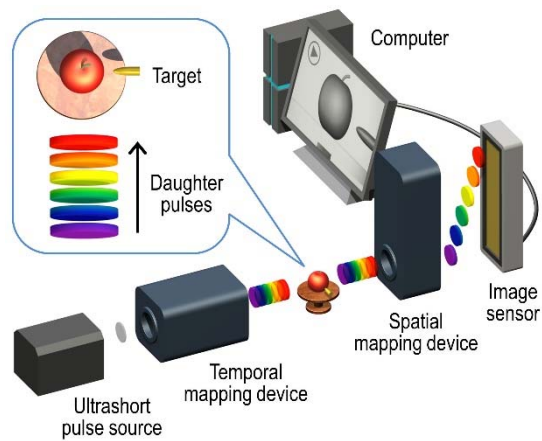


図 1 STAMP

### 2. 研究の目的

本研究では、超高速イメージング STAMP のような超高速連写撮影システムを、X 線自由電子レーザーと組み合わせることで、サブナノメートル・フェムト秒分解能イメージングの実現に挑戦する。このことにより、従来法では撮影が原理的に不可能であった、人類未踏の領域である非反復的な超高速複雑現象に光を差し込む。

### 3. 研究の方法

今回対象としている超高速撮影の時間領域はピコ秒からフェムト秒という超高速時間領域であるため、検出器による時間領域での動画像への分解はできない。そこで、観察光への空間領域またはスペクトル領域における変調を工夫することで、超高速イメージングを実現する。図 1 の STAMP は超高速イメージングの統合的な設計指針であり、基本的には観察対象の前の Temporal mapping device、後の Spatial mapping device にて照明光が操作される。これらは電気的または機械的に稼働する部分が存在しない、パッシブなシステムである必要がある。

X 線自由電子レーザーに対する Temporal mapping device および Spatial mapping device の例を図 2 に示す。X 線自由電子レーザー光源から放射された X 線パルスは X 線光学素子において分光的に分離される。Temporal mapping device ではこれらのパルスが異なる経路を通ることで時間差を取得し、再び同軸へと結合される (図 2 上)。その後、観察対象にて像情報を取得し、Spatial mapping

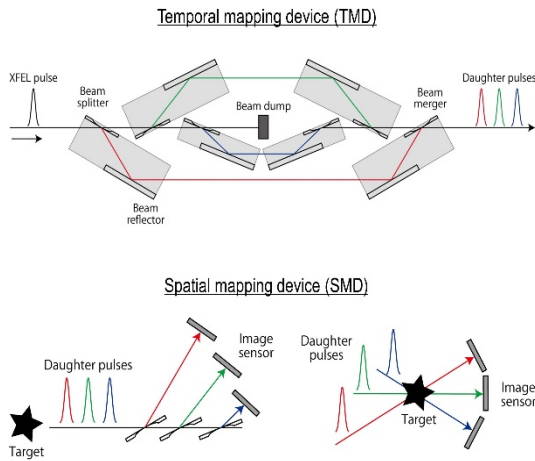


図 2 Temporal mapping device と Spatial mapping device の構成例。

device にて再び分光的に分離され、異なる撮像素子にて画像が取得される (図 2 左下)。

一方、X 線自由電子レーザーにおける光学系においては、

- 使用可能な光学素子が限られている
- 光学系のアライメントが非常に厳密でないといけない
- エネルギーのロスやビームクオリティの低下を避けるため、光学素子はできる限り少なくしなくてはならない
- 観察対象後に分光用シリコン結晶にて分離をすると像が劣化する

といった制限があるため、観察対象に入射する角度をパラメータとした新しい X 線超高速イメージングシステムを設計し、可視のレーザーを用いた検証実験を行った。

#### 4. 研究成果

東京大学三村秀和准教授とともに、次のような X 線超高速イメージングシステムの設計を行った。設計したイメージングシステムを図 3 に示す。

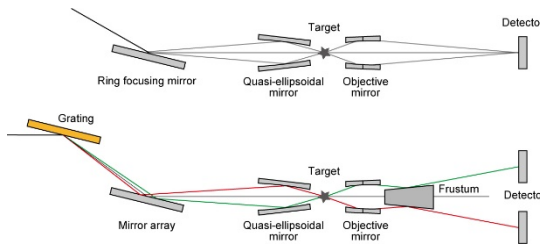


図 3 従来の X 線イメージングのセットアップ (上) とデザインした連写撮影システム (下)。

ベースとなる光学系は、観察対象の上流では、X 線自由電子レーザーのエネルギーを最大限に用いつつ、かつ高い開口にてサンプルに照明光を集める 2 段階のコンデンサレンズ (ミラー) 系となっている。観察対象後のシステム後半はウォルターミラーによる結像系となっている。これを図 3 下のような光学系に変更することで、超高速イメージング/スペクトラルイメージングが実現する。

具体的には、提案手法は次のとおりである。

#### 回折格子&ミラー列光学系

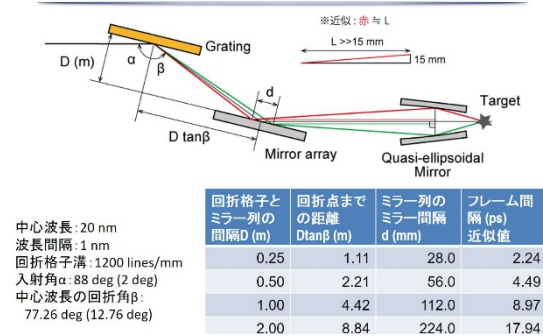


図 4 Temporal mapping device のデザイン。

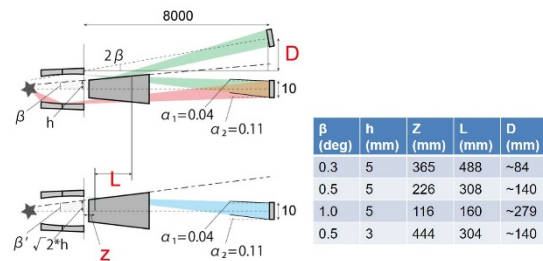


図 5 Spatial mapping device のデザイン。



図 6 原理実証の可視光学系。

これらの原理検証のため、可視のレーザーを用いた光学系を構築し、実験的に原理実証を

行った。構築した実験系を図6に、撮影結果を図7に示す。

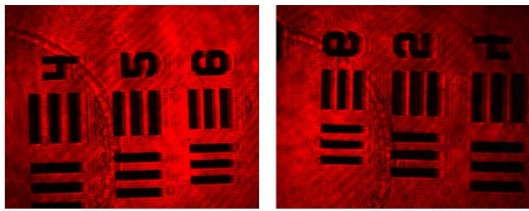


図7 テストターゲットの撮影像。

以上、本研究では、X線自由電子レーザーを光源とした、極微の超高速ダイナミクスを観察する超高速イメージング法の提案および原理実証を行った。本研究の成果は、ナノスケールの極微小領域で生じる超高速ダイナミクスを捉える、挑戦的な課題に対する重要なマイルストーンと位置づけられる。

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

中川桂一，全光学的な時間－空間変換による超高速連写イメージング，レーザー学会 第37回年次大会，2017年1月7日－9日，徳島大学（徳島県・徳島市）[一般社団法人レーザー学会 業績賞・進歩賞 受賞講演]

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：X線撮影方法およびX線撮影装置  
発明者：江川悟，中川桂一，三村秀和  
権利者：東京大学  
種類：特許  
番号：特願 2018-61809  
出願年月日：H30.3.28  
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.bmpe.t.u-tokyo.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 桂一 (NAKAGAWA Keiichi)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：00737926