

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20361

研究課題名（和文）リアルタイム非破壊イメージングを可能にする蒸散冷却型X線標的の開発

研究課題名（英文）Development of Ablation-cooled Metal-liquid Target for Real-time X-ray Imaging

研究代表者

渋谷 達則（Tatsunori, Shibuya）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：50874525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：超高速電子パルスと動的液体金属変化を組み合わせた新しいタイプのX線発生技術を提案した。このX線発生は光電効果によって発生した高速電子線パルスが流れる液体に高速に衝突させることで、熱伝導よりも高速なX線発生と流体による冷却効果を利用するものである。本研究では電子線発生に必要な電子銃の開発と液体金属フローシステムを開発し、その正常動作を確認した。さらに、放出するX線の平均出力を決定するショットの繰り返しレートを評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案したX線発生法は、原理的に放出できるX線出力に制限がなく、また、フェムト秒からナノ秒までの時間分解能を達成することが期待される。これにより、卓上白色X線源の更なる高輝度化と高分解能化が可能となり、例えば、エンジンやモーターなどの産業アセンブリ品の動作中イメージングなどが可能となる。

研究成果の概要（英文）：A new type X-ray target combining with ultrafast electron pulse and dynamical liquid metal changing was proposed. This scheme utilizes the bremsstrahlung of X-rays faster than heat conduction by colliding ultrafast electron pulses generated by the photoemission and the high-speed liquid-flowing. For the experiment, the electron gun and the liquid metal flow system was developed and confirmed their fine operation. In addition, the shot repetition rate, which determines the average power of emitted X-rays, was evaluated.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：X線 標的 ビーム物理 レーザー レーザー加工

### 1. 研究開始当初の背景

2050年のカーボンニュートラルを実現するためには、ガソリンエンジンやEV用モーター等の自動車動力部における更なる高効率化を達成することは必須であり、動力機器の材料開発や設計改良を繰り返して開発指針を決定する上で、機器内部での現象を解明することは極めて重要となる。X線非破壊イメージングは今では自動車部品の耐久性や不良品検査などに欠かせない技術である一方で、機器の動作をリアルタイムに非破壊イメージングするための更なる技術開発が必要である。

2003年、スウェーデン王立工科大のH. M. Hertzらは液体金属と連続波電子ビームを組み合わせた新しいX線法を提案した。この方法では標的材料である液体金属を高速に循環することで、電子銃から液体金属内に伝搬する熱を効率的に除去することを可能にしており、2023年現在、テーブルトップサイズの光源としては世界最高の出力となる1kW級が達成されている。ただし、動作条件として液体金属は常に融点以下に保つことは必要であり、この制約が光源としての性能を制限している。また、応用先からの要望としてもX線の動的なイメージングにはさらなる瞬間的な出力の向上と光源サイズの極小化(または輝度)が望まれている。そこで、本研究では、新たな考え方としてX線標的内で起きる(1)放射線発生、及び(2)熱流体現象に着目することで、「X線標的は融点以下の温度に保ち、操作するもの」という定説から脱却し、液体金属でも融点を超えてもX線を発生することのできる、言い換えれば、投入する電子ビームの出力に制限のない新しいX線発生技術を提案するに至った。

### 2. 研究の目的

新提案するX線発生法の基本的な考え方は、X線発生の原理である制動放射が、電子が原子核ポテンシャルから偏向されるフェムト秒程度の短時間で起こることと、この時間スケールは標的内に熱が蓄積され標的が蒸散し始めるナノ秒よりも速いという時間差に着目している。つまり、励起する電子のパルス幅がナノ秒よりも十分短時間であれば、標的の熱流体力学的な運動(特に沸騰現象)には制限されることなく、X線が発生する、というものである。さらに、標的内のエネルギー密度が十分に高い場合、蒸散という固体や液体から気体に相変化して物質が除去される現象が起こり、電子が衝突した部分の標的はなくなるのだが、仮に標的が液体であれば、その粘性係数に依存した速度で再生するため、「X線発生→標的除去→標的再生→X線発生…」というサイクルで繰り返し使用することができると考えられる。これは、応用上必要なX線の繰り返し発生が可能であることを意味する。

そこで本研究では、短パルスの電子線パルスと流動する液体金属を組み合わせることで、X線標的上の熱伝導よりも高速にX線を発生させることのできる、標的の熱負荷にとらわれない新しいX線発生の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

最終的なX線発生システムとして、図1に示すようなレーザー駆動電子銃と液体金属X線標的から構成されるシステムが必要であり、これらの要素技術に関する研究開発が必要である。レーザー駆動電子銃としては所有しているフェムト秒レーザーシステムを改良することで紫外線の発生等を目指した。また、電子の効率的な発生のために電極の設計・製作が必要であった。さらに、液体金属X線標的としては、液体金属をフローできるシステムの開発が必要であった。本研究ではこれらの開発を同時並行で行なってきた。

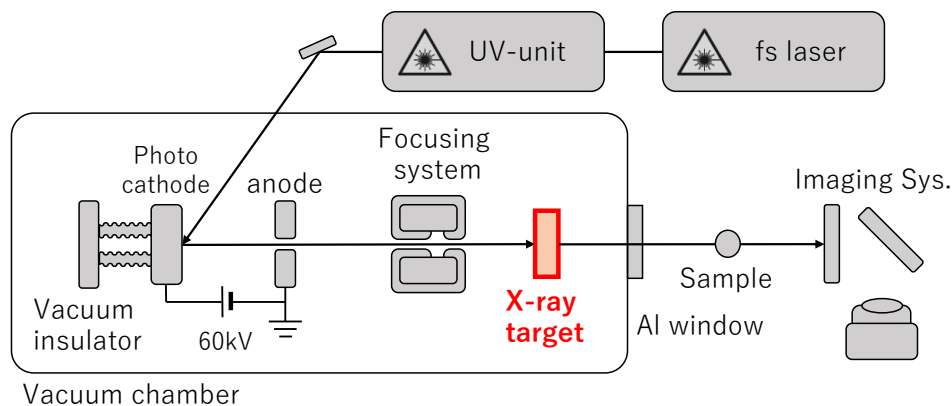


図1: X線発生システムの概念図

#### 4. 研究成果

研究開始初年度目は、レーザー駆動電子銃の設計・開発を行った。電場及び粒子軌道の計算には、Superfish/poission code と General particle tracer code を用い最適化を行った。計算によって得られた結果と放電特性を加味することで、図 2 に示したようなチタン製の電極を製作した。また同時に、液体金属 X 線標的の設計を行った。はじめに、液体金属の循環方法について検討した。液体金属を循環させる方法には、主に、バスプール方式と呼ばれる液体金属の浴槽を真空容器の中に配置してブレードなどを含浸して液体金属を循環させる方法とドロップレット・ジェット方式と呼ばれる液体金属に高圧をかけてノズルから噴射させる方法の 2 つに大別される。電子ビームのトラッキング計算による検討を行うことで、電子ビームは最小で  $10\mu\text{m}$  程度まで集束できることがわかり、液体金属と電子ビームが衝突する点の位置を  $10\mu\text{m}$  精度で位置合わせする必要性が出てきたため、マイクロメートルでの位置合わせが可能なドロップレット・ジェット方式を採用することとした。その設計に基づいて図 3(a) に示したシステムを製作した。

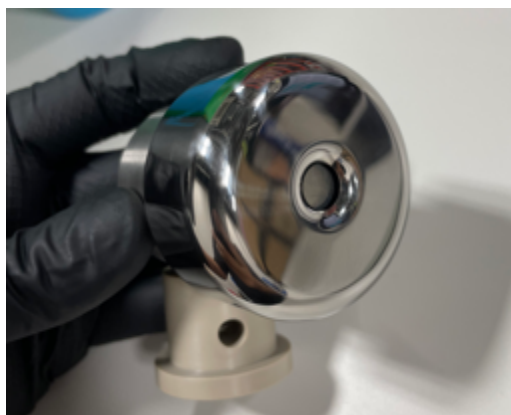


図 2: 製作したチタン製の電極

研究開始 2 年度目は、開発したシステムの動作試験等を行った。まず、液体金属フローシステムの動作試験としては、ダミー材料の超純水を用いてドロップレット・ジェット方式のジェットを生成した(図 3(b)を参照)。この水ジェット流をレーザーパルス照射することで動作試験とした。動作確認には、パルスショットの様子を正確に測定するために、パルスごとの現象をストロボ撮影できる高速カメラと高出力ランプを用いた数十マイクロ秒の時間分解能を持つ撮影システムを新規に構築した。実際、液体のフロー速度は配管の最小径と押出圧力によって決定される。配管の最小直径はノズル先端部の  $70\mu\text{m}$  であり、押出圧力は最大  $0.4\text{MPa}$  であった。パルスショットによってジェット流と同一及び反対方向に衝撃波が生成された。この衝撃波によって  $10\mu\text{s}$  から  $100\mu\text{s}$  の間でジェット流を乱す不安定性が発生することがわかり、ショット周波数を少なくとも  $1\text{kHz}$  以上で運転できることがわかった(図 3(c)参照のこと)。今後、押出圧力をさ

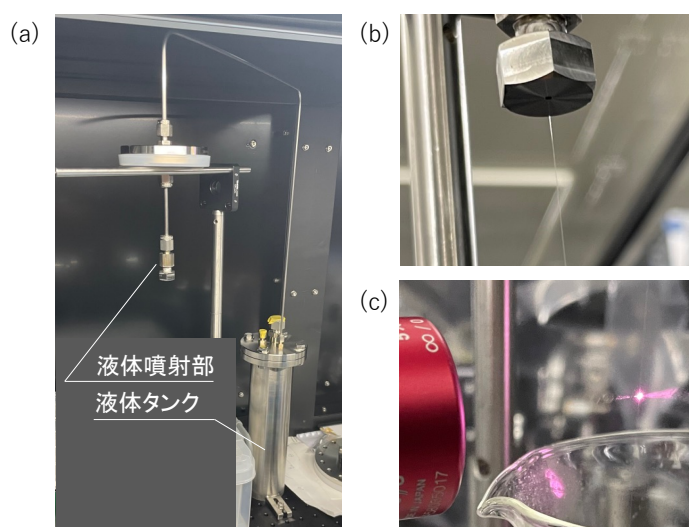


図 3: 液体の照射実験。(a)設計・製作した液体タンクと液体噴射部分の写真、(b)液体金属のダミーとして純水を流動させた様子、(c)液体を  $1\text{kHz}$  でパルス運転した際の様子。

らに上げること、また、ショット出力を小さくかつショット面積を小さくすることでこの運転周波数をさらに向上してゆくことが期待できる。また、液体金属フローシステムを導入する超高真空システムを立ち上げ、真空度  $5 \times 10^{-7}$  Pa 以下の真空度を得ることができた。

また、液体金属による X 線発生の予備実験として、超高エネルギー X 線発生加速器装置 (4MeV) と X 線固体標的 (0.3mm 厚さタングステン) を用いて X 線発生の実験を行い、X 線の発生及び遮蔽と透過力評価、検出器の動作などを確認した。この予備実験には、測定サンプルとして 6000 rpm で回転動作しているモーターをストロボ的に X 線イメージングすること、パルス状の X 線発生ができ、かつ、システムとしての正常動作を示した。今後液体金属 X 線システムと融合させることで標的の最大熱負荷量と X 線発生量との相関性を見出すことが期待できる。

[雑誌論文]

なし

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名	澁谷達則, 坂上和之, 小川博嗣, 佐藤大輔, チンタンフン, 石野雅彦, 田中真人, 鷲尾方一, 東口武史, 錦野将元, 小林洋平, 黒田隆之助
2. 発表標題	超高速光パルス誘起形態変化現象における光学的減衰長の役割解明
3. 学会等名	2021年（令和3年）秋季学術講演会
4. 発表年	2021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
---------	---------