

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600149

研究課題名(和文) X線自由電子レーザー絶対強度計測のためのマイクロカロリメータ

研究課題名(英文) Micro-calorimeter for measuring absolute pulse energy of free electron lasers

研究代表者

齋藤 則生 (Saito, Norio)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・副研究部門長

研究者番号：80344191

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)： X線自由電子レーザーのパルスエネルギーを測定できる常温マイクロカロリメータの設計・製作を行った。これまで用いてきたカロリメータの大きさは、およそ、直径10cm×長さ20cm程度の円筒形大きさであるのに対して、製作したマイクロカロリメータのサイズは、直径2.2cm×長さ2.1cmである。

性能評価は、3keV～5keVのシンクロトロン放射光を用いて行った。マイクロカロリメータのパラツキは、極低温放射計と同等の $\pm 1\mu\text{W}$ 程度であることを確認した。マイクロカロリメータによる放射光強度の絶対値は、極低温放射計と約5%以内で一致することを確認した。

研究成果の概要(英文)： Micro-calorimeter operated at room temperature has been developed for measuring the pulse energy of free electron X-ray lasers. The size of the micro-calorimeter is of 2.2 cm in diameter and 2.1 cm in length, whereas the previous calorimeter is of 10 cm in diameter and 20 cm in length.

The performance test of the new calorimeter was carried out using a synchrotron radiation with 3 keV - 5 keV. The statistical variation of the measurement is confirmed to be about  $\pm 1\mu\text{W}$ , which is compatible to our cryogenic radiometer. The absolute value of the incident radiation power measured by the micro-calorimeter agrees with that by the cryogenic radiometer.

研究分野：放射線計測

キーワード：X線自由電子レーザー カロリメータ パルスエネルギー 光強度絶対計測

### 1. 研究開始当初の背景

新しいX線光源としてX線自由電子レーザー(X線FEL)施設の建設が世界的に進められている。現在、稼働しているX線FEL施設は世界中で3施設のみであり、そのうちの1施設がSPring-8に併設され、2012年3月に一般供用が開始された。

我々の研究グループでは、極低温放射光による放射光の絶対強度測定技術の開発からスタートし、真空紫外領域のFELの絶対強度測定、X線FELの絶対強度測定までを、継続的に進めてきた。これら一連の絶対測定では極低温放射計を用いてきたが、時定数が1分程度と長い。そのため、極低温放射計で測定できるのは、X線FELの平均レーザーパワーのみであり、最大60HzのX線FELのパルス毎のレーザーエネルギーを直接得ることはできない。X線FELには発生原理上避けられない強度変動がパルス毎に生じるため、レーザーパワーのパルス毎の絶対強度の測定技術開発が求められてきた。さらに、極低温放射計は液体ヘリウム温度に冷却するため、装置が大きく、取扱および測定が非常に複雑になるといった課題もあった。

### 2. 研究の目的

以上の背景から、本研究では、X線FELのレーザーパワーがパルス毎に測定できるような優れた応答特性と、冷却不要の高い操作性(簡便性)を兼ね備えた常温動作のマイクロカロリメータの開発を行った。特に、応答特性と操作性を両立するため、既存の極低温放射計と比較して装置の大幅な小型化を目指した。さらに、開発したマイクロカロリメータの絶対測定器としての性能を評価した。

### 3. 研究の方法

本研究では、室温で動作するマイクロカロリメータを開発し、その性能評価を2つの方法で行った。

まず、受光部の温度制御用ヒータとは別に受光部に取り付けられたヒータ(外部加熱用ヒータ)によるオフラインテストを行った。オフラインテストでは、外部加熱用ヒータに既知の電力(パワー)を印加し、パワーの測定精度を評価した。外部印加パワーは数 $\mu\text{W}$ から数 $\text{mW}$ までの範囲で行った。

次にX線領域のシンクロトロン放射光の絶対強度測定による性能評価を行った。シンクロトロン放射光での絶対強度測定は、高エネルギー加速器研究機構のPhoton Factoryのビームライン11Bにおいて、X線のエネルギーを3keV~5keVの範囲で行った。具体的には、このビームラインにおいて、極低温放射計(国家標準器)で校正した2台のフォトダイオード(Opt diode社製、AXUVとSXUV)を、マイクロカロリメータでも校正し、校正結果の比較によってマイクロカロリメータの強度の絶対値の妥当性を評価した。

### 4. 研究成果

図1に本研究で開発したマイクロカロリメータを示す。マイクロカロリメータの主な構成要素は受光部、内側熱シールド、外側熱シールドの3つである。受光部の大きさは、直径約4mm×長さ約13mmと、極低温放射計の受光部の体積の約200分の1のサイズまで小型化することに成功した。また、図1に示す通り、全体的なサイズもICF70サイズの真空フランジから導入可能な大きさに抑え、フォトダイオード程度のサイズの可搬性に優れた測定器となった。既存の極低温放射計は液体ヘリウムや液体窒素などが内蔵されているため据え置き型であったのに対し、直線導入器によってマイクロカロリメータを任意のタイミングで光軸上に設置できるようにしたことは、時間とスペースが限られた加速器施設(放射光施設やX線FEL施設)では大きなメリットである。

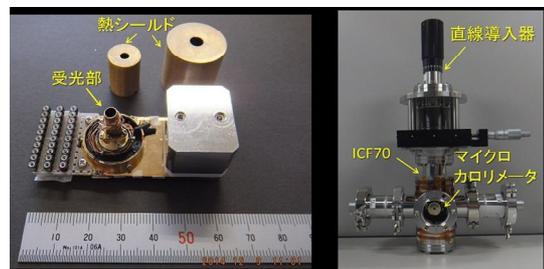


図1: 開発したマイクロカロリメータ:(左)本体内部の構成写真、(右)全体写真

図2に開発したマイクロカロリメータの模式図を示す。受光部の基本的な構造は極低温放射計と同様で、Au板とCu筒で構成されるキャビティ型である。しかし、時定数を短くするため、Au板の厚さを1mmから0.5mmに薄くした。これによって、20keV以上の光子に対する受光部の吸収率の低下は避けられないが、X線FELのエネルギーは主に15keV以下であるため、大きな問題にはならない。

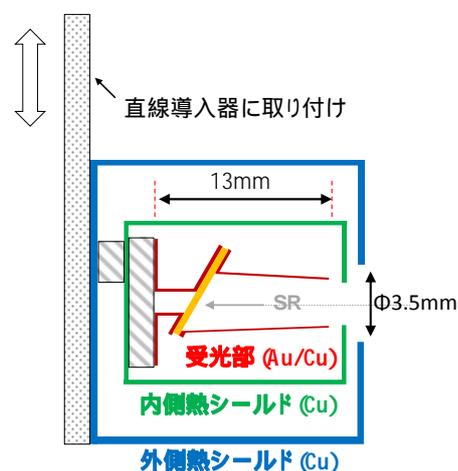


図2: マイクロカロリメータの模式図

マイクロカロリメータの各部(受光部ならびに二重の熱シールド)には、温度計とヒ-

タが取り付けられており、各部の温度が、(室温) < (外側熱シールド) < (内側熱シールド) < (受光部)となるように、各部に取り付けられたヒータの出力をPID制御する。この時、受光部は入射光(シンクロトロン放射光や X線 FEL)の有無に関わらず常に一定温度になるように制御する。外部から放射光が受光部に入射すると、受光部の温度を一定に保つため、ヒータの印加電力は入射光の強度の分だけ低くなる。この減少した分のパワーが、入射光の強度となる。

オフラインテストでは、受光部に取り付けた外部加熱用ヒータに既知の電力を印加し、パワー測定の精度を評価した。図3にオフラインテスト時のマイクロカロリメータの動作の一例を示す。

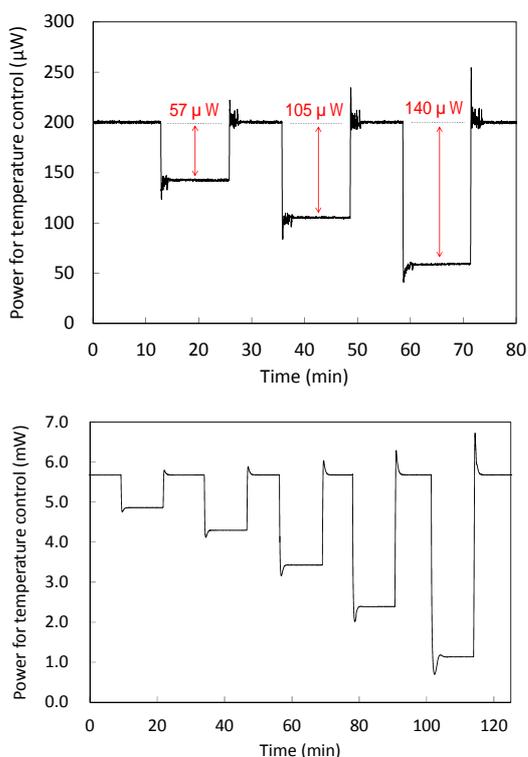


図3：開発したマイクロカロリメータのオフラインテストでの動作例、(上)マイクロワットオーダーの微小パワー計測の例、(下)ミリワットオーダーの大強度パワー測定の例

図3に示す通り、オフラインテストでは、 $\mu\text{W}$  オーダーから  $\text{mW}$  オーダーまでのパワーを、約 1%という高い精度で測定できること確認した。シンクロトロン放射光の強度が  $\mu\text{W}$  オーダー、X線 FEL の強度が  $\text{mW}$  オーダーであることから、開発したマイクロカロリメータはシンクロトロン放射光から X線 FEL まで幅広いダイナミックレンジを有する測定器であるといえる。

また、小型化によって高感度となり、数  $\mu\text{W}$  オーダーの非常に微弱なパワーに対しても感度を持たせることに成功した。しかし、図3から分かるように、PID 制御による時間が

約 1 分程度かかってしまっており、応答特性の劇的な改善は見られなかった。応答特性については制御装置の改造などにより、今後改善を図る必要があると考えられる。

図4に、マイクロカロリメータによるシンクロトロン放射光の強度測定の例を示す。

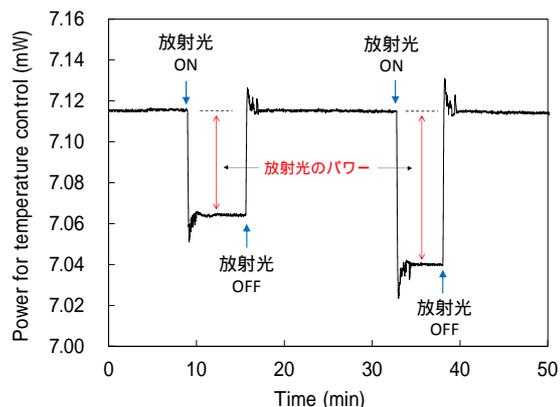


図4：マイクロカロリメータによる放射光強度の測定例(約  $50\mu\text{W}$  と約  $70\mu\text{W}$  のパワーを測定)

図4に示す通り、数十  $\mu\text{W}$  オーダーのシンクロトロン放射光に対して安定に測定できることを確認した。マイクロカロリメータによって2台のフォトダイオードを校正した結果、マイクロカロリメータのパワーの測定値が極低温放射計と比べて約 3%程度高いことが分かった。この比較は  $3\text{keV} \sim 5\text{keV}$  のシンクロトロン放射光で行ったが、どのエネルギーにおいても、同様の結果になった。この原因として、受光部内部の温度分布の影響が考えられる。小型化に伴い、温度センサと受光部の温度制御用熱源(ヒータもしくはシンクロトロン放射光)との距離が近くなり、入射光の有無間での受光部の温度分布の微妙な違いが、パワーの測定精度に影響しているものと考えられる。今後、温度制御ヒータや温度センサの配置変更などにより温度分布の影響の改善の可能性があると考えられる。

以上の結果から、温度分布の影響による 3%程度の誤差が含まれているが、本研究で開発したマイクロカロリメータは、シンクロトロン放射光( $\mu\text{W}$  オーダー)から X線 FEL( $\text{mW}$  オーダー)までの幅広いダイナミックレンジを有した絶対測定器であることを確認した。さらに、常温駆動かつ ICF70 サイズまで小型化することにより、優れた操作性と可搬性を有した測定器となった。今後、X線 FEL でも性能を実証していきたいと考えている。

## 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 5件)

田中隆宏、加藤昌弘、齋藤則生、矢橋牧名、登野健介、石川哲也、カロリメータによるX線自由電子レーザーの絶対強度測定、2015年度NMIJ成果発表会、2016.2.9、産総研共用講堂、茨城県

田中隆宏、加藤昌弘、齋藤則生、矢橋牧名、登野健介、石川哲也、X線自由電子レーザー用常温カロリメータの開発、第29回日本放射光学会年会、2016.1.11、東京大学柏の葉キャンパス駅前サテライト、千葉県

Norio Saito、Takahiro Tanka、Masahiro Kato、Absolute laser power determination of X-ray free electron laser using calorimeters, TCRI Workshop、2015.10.31、デジョン国際展示場、韓国

田中隆宏、加藤昌弘、齋藤則生、矢橋牧名、登野健介、石川哲也、X線自由電子レーザー(XFEL)用常温カロリメータ、JASIS展2015分析計測標準研究部門第1回シンポジウム、2015.9.4、幕張メッセ、千葉県

田中隆宏、加藤昌弘、齋藤則生、矢橋牧名、登野健介、石川哲也、X線自由電子レーザー用常温カロリメータの開発、2014年度NMIJ成果発表会、2015.1.23、産総研共用講堂、茨城県

〔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

産業技術総合研究所公式ホームページ

<https://www.aist.go.jp>

計量標準総合センターホームページ

<https://www.nmi.j.jp>

放射線標準研究グループホームページ

<http://www.nmi.j.jp/~quant-rad/xg/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤則生(Saito Norio)

産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・副研究部門長

研究者番号: 80344191