



展 TENBO 望

X線自由電子レーザー強度の絶対測定技術の現状と展望



田中 隆宏
Tanaka Takahiro
(産業技術総合研究所)

1 はじめに

自己増幅自発放射 (Self-Amplified Spontaneous Emission: SASE) による自由電子レーザー (Free-electron laser: FEL) 施設の建設が世界的に進められている。2005年のドイツのFLASH (Free electron LASer in Hamburg) での極端紫外 (波長 4.5 nm~48 nm) 領域の SASE 型 FEL の発振¹⁾ をきっかけに、2009年にアメリカのLCLS (Linac Coherent Light Source)²⁾、2011年に日本のSACLA (SPring-8 Angstrom Compact free-electron LASer)³⁾ などが稼働を開始し、FELを利用した様々な研究開発が進められている。特に、LCLSとSACLAでは、FELの波長は0.1 nm近傍 (もしくはそれ以下) のX線領域に達しており、世界でも数少ないX線FEL施設である (現在のところ、X線領域のFEL施設は、世界的に2施設のみ)。ドイツやスイスなどでX線FEL施設が建設中であり、今後もFELの利用研究は増加していくものと考えられる。

SASE型FELはパルス光源であり、フェムト秒 (10^{-15} s) オーダーの短いパルス幅、ギガワット (10^9 W) 以上のピーク強度、空間コヒーレンスといった特徴を有する。X線FELは、これまでのX線光源には無かった空間コヒーレンスはもちろんのこと、パルス幅やピーク強度についても高輝度光源であるSPring-8をもはるかに凌ぐ性能を持っている (SACLAの場合、パルス幅はSPring-8の1/1,000以

下、ピーク強度はSPring-8の10億倍以上)。このように短パルスの強力なX線FELは、放射光などで利用されている既存の測定器 (例えばフォトダイオードなど) を飽和もしくは破損させるため、X線FELに特化した測定技術の開発が求められる。特に、SASE型FELには、FEL発生原理上避けられないパルス毎の強度のばらつきが伴う。レーザー強度は、X線FEL利用実験のみならず光源性能を表す基本的な物理量のひとつである。

これまで筆者らの研究グループは、極低温放射計を国家標準としたX線領域の放射光フルエンス標準の供給を行ってきた。そこで、その技術基盤を活かし、X線FEL用に改良した極低温放射計によるSACLAのX線FELの絶対強度測定を行った。本稿では、X線FELの絶対強度測定に関する筆者らのグループのこれまでの取り組みについて概観し、最後に今後の展望について簡単に紹介する。

2 極低温放射計によるX線FELの絶対強度測定

もともと極低温放射計は、赤外から紫外の波長領域の光やレーザーの強度 (平均パワー) の絶対測定器⁴⁾ であったが、シンクロトロン放射光の登場により真空紫外線やX線の波長領域の光にも応用されている⁵⁾。筆者らのグループにおいても極低温放射計を開発し、シンクロトロン放射光を用いた0.1 keV

～4 keV の光子エネルギー領域の標準供給を行っている⁶⁾。筆者らのグループが所有する極低温放射計⁷⁾の模式図を図1に示す。極低温放射計は、入射光をほぼ全吸収する受光部とリファレンスブロックで主に構成され、これらを液体ヘリウム温度(約4 K)に冷却して使用する。真空紫外からX線の波長領域では、受光部は銅(Cu)や金(Au)などが主に使われる。これらの金属は液体ヘリウム温度まで冷却すると、常温と比べて、比熱容量(J/K/kg)が約1,000分の1、熱伝導率は約10倍になる。特に、比熱容量は受光部の感度(K/W)と密接に関係している。

極低温放射計は不確かさ1%以下(場合によっては0.1%以下)という非常に高い精度での光強度の絶対測定を実現している。光強度の絶対値は、光強度を電気的なパワー(電力)に置換して求められる。具体的には、入射光による受光部の温度上昇から入射光の強度を求める。この時、受光部の温度上昇と入力電力との関係を、SIトレーサブルな既知の電力を受光部のヒータに印加することによって求めておくことにより、入射光の絶対強度(平均パワー)を求めることができる。受光部の感度の入力電力依存性を図2に示す。この感度の入力電力依存性は、受光部の比熱容量の温度依存性を反映している。

受光部はキャビティ構造となっており、30度に傾いたベース板と、円筒状のカバーで構成されている。ビーム状の入射光はベース板に照射されるため、そのほとんどはベース板に吸収されるが、ベース板からの散乱線や蛍光などによる損失を抑えるために円筒状のカバーが取り付けられている。これまでのシンクロトロン放射光用の受光部は、ベース板とカバー共にCu製であったが、X線FEL用では高いエネルギーの光子にまで対応できるように、ベース板をAu製に改造した。この改造により、40 keVの光子に対する吸収率が0.4から0.997にまで改善した⁷⁾。また、受光部の改造前後の極低温放射計の同等性をシンクロトロン放射光を使い評価し、約0.4%以内での一致を確認した(不確かさが約1%)。

この改造した極低温放射計を使い、X線FELの絶対強度測定を、SACLAの硬X線ビームランBL3⁸⁾で行った。BL3には、FELパルス毎の強度と位置の測定が可能な専用のビームモニタ⁹⁾が取り付けら

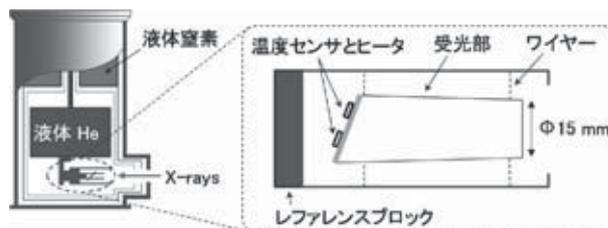


図1 極低温放射計の全体(左)および受光部近傍(右)の模式図
参考文献7)の図1を修正して掲載

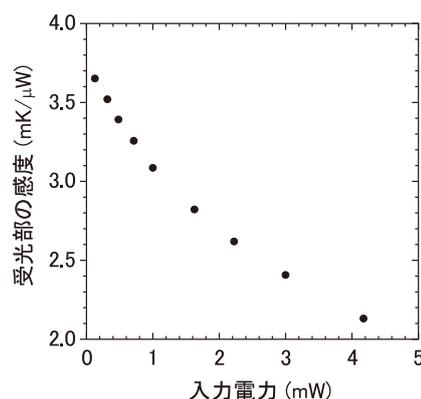


図2 極低温放射計の受光部の感度の入力電力依存性
参考文献7)の図2を修正して掲載

れており、極低温放射計を使い、このビームモニタの校正を行った。さらに、ドイツの研究グループが開発しているガスモニター(Gas Monitor Detector: GMD)^{10,11)}との比較も併せて実施した。このGMDは、希ガスの電離計測を基にしたFEL専用を開発された絶対強度測定器であり、極低温放射計(熱量計測)とは全く異なる測定原理に基づいている。前述の通りX線FELは強力であるため、GMDはターゲットガスの密度を抑えて測定でき、BL3の光子エネルギー範囲(4 keV～17 keV)ではX線FELの透過率は99.9%となる。そのため、FEL光源側(上流側)にGMDを設置し、極低温放射計を下流側に設置することにより、X線FELの強度を両測定器で同時に測定し、絶対強度の比較を行った¹²⁾。図3に示す通り、両検出器は不確かさの範囲で一致することを確認した。これにより、熱量計測と電離量計測の両方がFELの絶対強度測定に有効であることが明らかとなった。

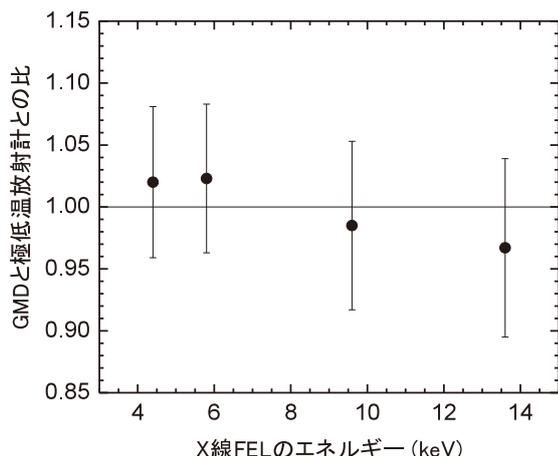


図3 X線FELの絶対強度測定結果の極低温放射計とGMDとの比¹²⁾

3 新しい絶対測定技術の開発 (常温カロリメータ)

前述の極低温放射計を用いたX線FELの絶対強度測定により、熱量計測がX線FELに対しても有用であることが確認された。しかし、極低温放射計は正確に強度を測定できる反面、液体ヘリウムによる冷却が必要となるため、①装置の大型化、②取り扱いの煩雑性、③冷媒のランニングコスト、④冷却準備期間(3~4日)、⑤感度の入力電力依存性(図2参照)などの課題がある。最大の欠点は、極低温放射計内部に超電導ワイヤー(NbTi)を用いているため、受光部の温度が転移温度(約9K)を超えるような高いパワー(筆者らの極低温放射計では約4mW以上)を計測できないことである。そのため、極低温放射計はSACLAの最大パワー(数十mW)までカバーできない。そこで、極低温放射計の操作性の向上とダイナミックレンジの拡張を目指し、新たに常温カロリメータを開発した¹³⁾。図4に常温カロリメータの概略図を示す。常温カロリメータの受光部は極低温放射計のものと同一の構造であり、受光部の周囲を二重の熱シールドで囲っている。受光部と二重の熱シールドのそれぞれに温度センサー(NTCサーミスタ)とヒータ(チップ抵抗)が取り付けられており、各部の温度が一定になるように、各ヒータ出力をPID制御している。この時、受光部と二重の熱シールドの各温度が、(受光部) > (内側熱シールド) > (外側熱シールド) > (室温)とすることにより、外気温(室温)の変動の影響

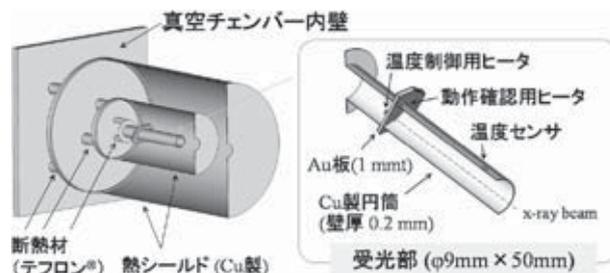


図4 常温カロリメータ全体(左)及び受光部(右)の概略図
参考文献13)の図1と図2を修正して掲載

響を最小限にすることが可能となる。

常温カロリメータでは、受光部の温度がX線FELの有無に関わらず常に一定となるように受光部のヒータ出力を制御している。この時、外部からX線FELが受光部に入射すると、X線FELのパワーの分だけ受光部ヒータ出力は低下する。つまり、常温カロリメータでは、X線FELのパワーを、受光部ヒータ出力の低下として即時的に計測することが可能となる。このため、常温カロリメータでは、極低温放射計のような感度校正が不要となり、より迅速な測定が可能になった。また、常温動作であるため、極低温放射計のような動作温度の制約がなくなり、より高いパワーの測定が可能となった。常温カロリメータは、X線領域のシンクロトロン放射光を用いて極低温放射計との比較により、十分な同等性が確認されている(不確かさ1%の範囲内での一致)。

この常温カロリメータを使い、前述のビームモニタを再校正し、X線FELでの常温カロリメータの有用性を検証した。図5にビームモニタの感度(校正定数の逆数)の光子エネルギー依存性を示す。極低温放射計では、校正に約5日間(冷却時間含む)を要したが、常温カロリメータでは図5に示した全ての校正を1日で行った。図5に示す通り、常温カロリメータと極低温放射計の校正結果は良い一致を示したのと同時に、常温カロリメータによる詳細な校正によってビームモニタの感度のエネルギー依存性が明らかとなった。この詳細な校正結果により、X線FEL利用実験のユーザーに正確な絶対強度を提供することが可能となった。

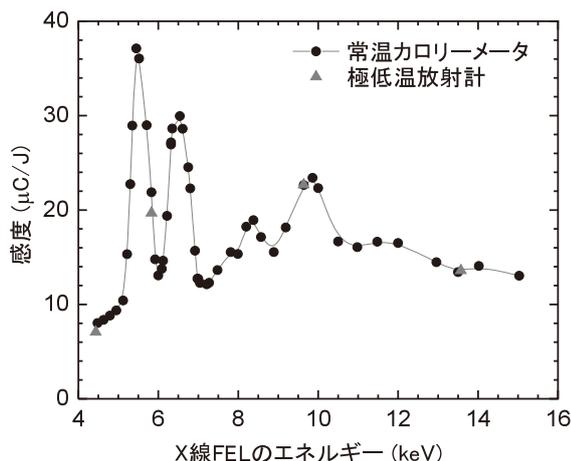


図5 SACLAのビームモニタの感度の光子エネルギー依存性
参考文献14)の図4を修正して掲載

4 展望

ここまで極低温放射計から常温カロリメータまでのX線FELの絶対強度測定に関する筆者らの取り組みを簡単に紹介した。本稿で紹介した極低温放射計や常温カロリメータは共に据置き型の装置であるため、利用時間の限られたX線FEL施設での使用にはまだ不向きである。

SACLAではX線FELのビームラインが3本(BL1~3)稼働しており、将来的には計5本のビームラインが稼働する計画である。また、世界的にもFEL施設の建設が進んでおり、FELの絶対強度測定は今後も求められることが予想される。そこで現在、ビームラインへの出し入れが可能な小型カロリメータの開発を進めている。放射光による性能評価を終え、X線FELによる最終テストを近々に行う予定である。これにより、より簡便にX線FELの絶対強度測定が可能となるであろう。筆者らが開発を進めているX線FELの絶対強度測定技術は、今後建設されるFEL施設やビームラインの評価、既存のビームラインの経年変化のチェックな

ど、X線FEL施設の高度化の支えになるのではないかと期待している。

【謝辞】

ここに紹介した研究は、筆者が所属する産業技術総合研究所分析計測標準研究部門の放射線標準研究グループの齋藤則生研究副部門長及び加藤昌弘主任研究員、理化学研究所放射光科学研究センターXFEL研究開発部門ビームライン研究開発グループ矢橋牧名グループディレクター及び高輝度光科学研究センターXFEL研究推進室利用技術開発・整備チーム登野健介チームリーダーのグループ、ドイツの物理工学研究所(PTB)のMathias Richter部門長、ドイツ電子シンクロトロン(DESY)のKai Tiedtke研究員らのグループ等との共同研究の成果です。また、本研究の一部は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業「X線自由電子レーザー利用推進研究課題(平成21年度—22年度)」及び理化学研究所「SACLA利用装置提案課題(平成23年度)」の支援を受けて行いました。

参考文献

- 1) W. Ackermann et al, Nat. Photonics **1** 336 (2007)
- 2) P. Emma et al, Nat. Photonics **4**, 641 (2010)
- 3) T. Ishikawa et al, Nat. Photonics **6**, 540 (2012)
- 4) J.E.Martin et al, Metrologia **21** 147 (1985)
- 5) H. Rabus et al, Applied Optics **36** 5421 (1997)
- 6) T. Tanaka et al, Metrologia **49** 501 (2012)
- 7) T. Tanaka et al, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. **A659**, 528 (2011)
- 8) K. Tono et al, New J. Phys. **15** 083035 (2013)
- 9) K. Tono et al, Rev. Sci. Instrum. **82** 023108 (2011)
- 10) M. Richter et al, Appl. Phys. Lett. **83** 2970 (2003)
- 11) K. Tiedtke et al, J. Appl. Phys. **103** 094511 (2008)
- 12) M. Kato et al, Appl. Phys. Lett. **101** 023503 (2012)
- 13) T. Tanaka et al, Rev. Sci. Instrum. **86** 093104 (2015)
- 14) T. Tanaka et al, Metrologia **53** 98 (2016)