

論文審査の結果の要旨

氏名 井上 伊知郎

本論文は、新規の X 線光源である X 線自由電子レーザー (XFEL) の特徴である、高い空間コヒーレンス、フェムト秒の極短パルス、従来の放射光源と比較して 10^8 倍もの超高輝度、にそれぞれ関係した 3 つの新しい実験計測法 (拡張型ヤングの実験、X 線強度干渉法、X 線ポンプ・X 線プローブ法) の考案と日本の XFEL である SACLA における実証実験の結果についてまとめたものである。本論文は、全 7 章から構成される。

第 1 章では、序論として X 線領域の初めてのレーザー光源である XFEL の特徴が述べられている。続いて、XFEL の光特性評価や、XFEL と物質との相互作用を研究することの重要性が述べられている。最後に、新しい手法開発を通して XFEL 科学を進展させることが本論文の目的として述べられている。

第 2 章では、拡張型ヤングの実験および X 線強度干渉法の基礎となる光のコヒーレンス理論について述べられている。放射光や XFEL の光のコヒーレンスを扱う際には、光をスカラー波として扱うことが可能であることが説明されている。そして、光のコヒーレンスの特別な場合として、空間コヒーレンスおよび時間コヒーレンスを取り上げ、その定義と性質について述べられている。

第 3 章では、自己増幅自発放射方式 (Self-Amplification by Spontaneous Emission; SASE) を利用した XFEL の発振原理が説明されている。SASE 方式によるレーザー増幅原理の定性的な説明のあとに、1 次元モデルに基づく増幅過程の解析解が紹介されている。そして、SACLA を例とした XFEL の加速器部・X 線光源部・ビームラインの装置構成が述べられている。

第 4 章では、XFEL の空間コヒーレンスを測定するために、論文提出者らが考案した「拡張型ヤングの実験」について述べられている。パルス毎に空間プロファイルが異なる XFEL の光を評価するために、通常ヤングの実験で用いられる同一形状のスリットの代わりに、この手法では大きさの異なる球状粒子 2 つを利用する。そして、粒子間の散乱波干渉を計測することで、X 線強度の空間分布の情報なしに 2 粒子の位置間の空間コヒーレンスを評価できることが説明されている。この手法を SACLA における集光 X 線パルスに適用した結果、XFEL は集光ビームサイズと空間コヒーレンス長が同程度の非常に高い空間コヒーレンス特性を持つことが明らかになった。さらに、集光ビームサイズと空間コヒーレンス長の比が水平・垂直方向でほとんど等しいことから、XFEL の光がビーム光軸に垂直な平面において等方的なコヒーレンス特性を持つことが示唆されている。

第 5 章では、XFEL を発振させている電子バンチの時間構造を評価するために、論文提出者らが考案した「X 線強度干渉法」について述べられている。この手法では、電子バンチがアンジュレータ 1 台を通過した際の放射光を分光し、異なる位置の光強度の相関を測定する。さまざまな分光結晶を利用し、コヒーレンス時間を変えながら強度相関の程度を測定す

ることで電子バンチの時間構造の情報を得ることが可能になることが説明されている。この手法を SACLA において光子エネルギー10.5 keV の X 線を発振させている電子バンチに応用した結果、電子バンチの電流値が半値全幅 8 fs 程度、ピーク電流値が 20 kA というピーク状の時間構造を持っていることが明らかになった。この結果と XFEL のゲイン長の測定結果から、電子バンチの規格化エミッタンスが 1.1 mm・mrad と見積もられ、電子バンチの加速および圧縮の過程でのエミッタンス劣化が起こっていることが推測された。

第6章では、高強度の XFEL による試料へのダメージ過程を捉えるために、論文提出者が考案した「X 線ポンプ・X 線プローブ法」について述べられている。この手法では、SACLA のアンジュレータ列を上下流2つのセクションにおいて、それぞれのセクションで独立に XFEL を発振させる。そして、セクション間の磁場シケインによって電子ビームを迂回させて、上下流それぞれの XFEL の間に時間差をつける。このダブルパルスをそれぞれ、試料にダメージを与える光（ポンプ光）、X 線ダメージの時間発展を捉える光（プローブ光）として用いる。この方法のデモンストレーション実験として、ダイヤモンドにおける X 線ダメージ過程を調べた結果、ポンプ光照射後 20 フェムト秒以降から格子点からの炭素原子の変位量が増加していく様子が観測された。これは、XFEL が引き起こすダメージの時間発展過程を捉えた初めての実験結果である。

第7章では、本論文で得られた結論がまとめられている。そして、本論文で開発した計測法が単純な原理に基づいていることから、これから運転が始まる各地の XFEL での利用が期待出来ることが強調され、今後の展望について述べられている。

なお、本論文は、登野健介、城地保昌、小川奏、篠原佑也、雨宮慶幸らとの共同研究であるが、いずれも論文提出者が主体となって理論の構築および実験とその結果の解析を行なったもので、その寄与が十分であると言える。したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。