

氏 名 谷川 貴紀

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1406 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 機能分子科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 レーザーシーディング技術を用いた真空紫外コヒーレント
放射光発生の研究

論文審査委員 主 査 准教授 繁政 英治
教授 加藤 政博
教授 大島 康裕
准教授 藤 貴夫
教授 大垣 英明 京都大学

論文内容の要旨

シンクロトロン放射光は、今日の学術研究や技術開発には欠かせないツールとして広く利用されているがレーザーとは異なりインコヒーレントな光である。これに対し、放射光を干渉性の高いコヒーレント光に成長させる技術が自由電子レーザー（以下、FEL: free electron laser）である。近年では共振器を組まずに長大なアンジュレータ内を電子ビームが1回通過するだけで自発放射光を増幅するSASE（self-amplified spontaneous emission）と呼ばれる機構に基づいたシングルパスFELの開発が活発に行われている。しかしSASE方式は時間コヒーレンスが良くないという欠点がある。これを改善するのに有効とされているのがレーザーシーディング技術である。

本論文の主要部分の前半は、UVSOR-IIにおけるコヒーレント高調波発生(以下、CHG: coherent harmonic generation)に関するものである。アンジュレータ磁場中で入射されたレーザー光と相互作用することで、レーザー光の波長間隔で電子ビームにエネルギー変調が生じ、これが電子密度変調に変換され、そこからコヒーレント高調波が発生する。CHGは電子蓄積リングにおいて超短パルスで偏光可変な紫外から軟X線領域までの高コヒーレント光を発生することができる手法として今日まで研究されてきた。CHGはマイクロバンチされた電子ビームからのコヒーレントな自発放射光である為、放射スペクトル強度は電子ビーム内の縦方向電子密度分布を直接反映している。高輝度CHGの実現や次世代FEL光源、特にマイクロバンチのオーババンチングを巧みに利用したEEHG（eco-enabled harmonic generation）方式の発展的な開発の為にマイクロバンチング過程を理解することが重要であり、この為CHGは強力なツールとなる可能性がある。

出願者は、真空紫外（以下、VUV: vacuum ultraviolet）領域までのCHGを観測する為、新規にVUV分光装置の設計及び建設を行った。これを利用しUVSOR-IIにおいて、CHGの系統的な測定を行った。まず、入射レーザー（波長800 nm）の第9次高調波(波長89 nm)までのCHGの観測に成功し、そのスペクトルはインコヒーレントな自発放射光に比べ、狭帯域であることを確認した。またコヒーレント放射であることを確認する為、CHGの電子ビーム電流の依存性の測定も行い、2乗則に則っていることを確認した。次に、CHGのピーク波長はアンジュレータギャップを変化させても入射レーザー波長の高調波となる波長で固定されることを確認した。最後に、入射レーザーの尖頭強度に対するCHG強度依存性を測定した結果、CHG強度の飽和現象が観測された。これは、マイクロバンチが最適なバンチング条件に達したことにより強度飽和が起きたことを示している。さらに、CHGの高調波次数によって飽和に必要な入射レーザー尖頭強度が異なることを見出した。加えてCHGの強度飽和後、広範囲に渡ってレーザー尖頭強度を変えるとCHG強度が一方的な減衰ではなく、振動する現象が初めて観測された。上記の現象の理解を深めるために1次元粒子追跡シミュレーションを行った。高調波次数の違いによるCHG強度飽和に必要なレーザー強度の違いはマイクロバンチのフーリエ成分が、高次になればなるほどバンチング形状に敏感であることに起因していることがわかった。また飽和後のCHG強度の振動については、オーババンチング過程においてマイクロバンチの縦方向の電子密度分布上にダブルピークが生じるが、この2つのピークの間隔が高調波波長の整数倍になっている時に干渉が起こる為、強度振動が起こっているという理解に至った。

本論文の主要部分の後半は、SPring-8において建設が進んでいるSASE型X線自由電子レーザーの試験機におけるレーザーシーディング実験に関するものである。コヒーレント長の長いガス高次高調波(チタンサファイアレーザーの第5次高調波)をシード光とし電子ビームに注入した結果、多数のスパイク状のピークからなるスペクトルであったFEL光を安定したシングルモードスペクトルとなった。このことよりFEL光のコヒーレンスを飛躍的に向上することに成功し、レーザーシーディングの有用性を実証した。またシード型FEL光のピーク波長はアンジュレータギャップを変化させてもシード光の波長で固定されたことから、FELの発振波長をシード光により制御でき

ることを実証した。

以上、博士課程の研究成果として、レーザーシーディングを用いたコヒーレント放射発生の研究、特に CHG を用いたマイクロバンチング過程の理解に繋がる系統的な測定を行った。その結果、CHG の強度飽和における特異な振舞いが確認され、シミュレーションや計算によってそれを理論的に説明することができた。これらの研究を通じてレーザーシーディングの有用性を実証し、また、CHG はレーザーと電子ビームの相互作用によって起こるマイクロバンチの形状及びその発展を研究する為の有用な指針になることを明らかにした。

シンクロトロン光は、本来インコヒーレントな光であるが、それを放出する電子ビームの内部に光の波長間隔での集群（マイクロバンチング）が起きた場合には、位相がそろいコヒーレント光となる。自由電子レーザーにおいては、電子ビーム自身の放出するシンクロトロン光との相互作用によりマイクロバンチングが起きる。一方、外部からコヒーレント光を注入し電子ビームと相互作用させることでマイクロバンチングを起こすことも可能であり、レーザーシーディングと呼ばれている。コヒーレント高調波光の発生、自由電子レーザー光の特性改善や短波長化等への応用へ向けて活発に研究が進められているが、理論研究や計算機シミュレーションがその中心であり、系統的な実験的研究はこれまでほとんど行われていない。出願者は様々な実験条件下で電子ビームからのコヒーレント光を観測することで、電子ビーム内でのマイクロバンチの形成を詳細に観測することに成功し、また、シード光としてガス高次高調波光を用い、自由電子レーザー光のスペクトル特性を改善することにも成功した。

論文は8章から構成されており、最初の2章で、研究の背景や基礎理論について述べた後、次の2章では、実験に使用した2つの加速器と実験装置について述べている。第5章では電子蓄積リングUVSOR-IIを用いたシーディングによるコヒーレント高調波発生に関する実験とその結果、第6章では、直線加速器SCSS試験加速器を用いた自由電子レーザーに対するシーディング実験とその結果、第7章では、新しい光源設計の基礎研究の状況について述べている。第8章は研究の総括である。

出願者は、UVSOR-II電子蓄積リングにおいて、800nmの大強度レーザーを電子ビームと相互作用させ、電子ビームの放出するコヒーレント高調波を観測した。このために新たに真空紫外分光装置を構築した。入射レーザー強度を広範囲に変化させると、高強度域でコヒーレント高調波強度が飽和し、さらに過飽和領域では入射光強度に対してコヒーレント光強度が振動する新しい現象を発見した。数値シミュレーションを行い、実験結果と比較することにより、この現象がオーババンチングの過程で形成される電子密度分布のダブルピーク構造に起因するものであることを明らかにした。このような過飽和領域でのマイクロバンチング過程の詳細な観測は初めてであり、ビーム物理学的に極めて興味深い結果であるとともに、レーザーシーディングによる高度な光発生技術の開発において重要な知見となる。この成果は既に出願者を筆頭著者として国際学術雑誌に掲載されている。

出願者は、また、SCSS試験加速器において、ガス高次高調波を用いたシーディングによる単一通過型自由電子レーザーの特性改善に関する実験を行い、チタンサファイアレーザーの5次高調波によるシーディングにより、自由電子レーザー出力光のスペクトル特性を改善することに成功した。また、その中心波長が入射光の波長に固定されることを実験的に確認した。このような試みは世界でも初めてのものであり、短波長自由電子レーザーでのシーディング技術の有用性を実証するとともに、分子科学研究において強力なツールとなる自由電子レーザーの高性能化に大きく貢献する成果である。この成果は既に出願者を共著者として国際学術雑誌に掲載されている。博士論文中では、出願者の分担したシード光発生とその加速器装置への輸送、レーザー光の計測の詳細が記述されている。

以上の通り、本論文は、レーザーシーディングの基礎過程に関する新しい現象と短波長

域でのシーディング技術の有用性を明らかにする成果を報告しており、ビーム物理学的に重要な成果が得られているとともに、将来の分子科学研究の重要なツールとなる自由電子レーザーの性能向上に結びつく成果が得られており、審査委員全員一致で、博士（理学）の授与に値すると判断した。