

論文審査の結果の要旨

氏名 佐藤 堯洋

本論文において、佐藤堯洋氏は、高輝度極端紫外(EUV)域自由電子レーザー(FEL)である SCSS (SPring-8 compact self-amplified spontaneous emission source) を光源として用いて、窒素分子、メタノール、エタノールなどの基本的な分子種について、EUV 域の光による多光子イオン化過程を研究するとともに、He の 2 光子イオン化断面積を決定するなど、原子・分子の極端紫外域の非線形光学過程についての先駆的な成果を挙げた。さらに、近赤外領域の超短パルスレーザー光の高次高調波をシード光として自由電子レーザーのアンジュレーター部分に導入することによって、SCSS の出力をフルコヒーレント化することに成功した。これらの業績は、極端紫外光領域における新しい光科学研究の展開に貢献するものである。

本論文は 7 章から構成されている。第 1 章は序章であり、超短パルスレーザー光の高次高調波の発生技術の進展と極端紫外域の自由電子レーザー光源の開発を踏まえ、論文提出者が原子や分子の極端紫外光による多光子イオン化過程に関する研究を推進したことを紹介するとともに、そして、論文提出者が主体となって自由電子レーザーのシード化を達成したことが紹介されている。

第 2 章では、分子線中の窒素分子に EUV-FEL 光を集光照射したところ、窒素原子イオンが高い運動エネルギーを持って生成したことを報告している。運動エネルギーの解析およびイオン種の生成率の光強度依性から、EUV 光を 2 光子以上の吸収することによって、窒素分子の多価イオンが生成し、クーロン爆発を経て解離反応が進行することを明らかにしている。これは、SCSS を用いた初めての学術的成果である。

第 3 章では、分子線中のメタノール分子およびエタノール分子に EUV-FEL 光を集光照射し、そのイオン化およびイオン化にともなう CO 結合の解離過程を研究している。飛行時間型質量スペクトルの解析によって、2 光子以上の EUV 光の吸収によって多価親分子イオンが生成することが示された。また、メタノール分子の場合、イオン化に伴ってメチル基の水素が水酸基側に移動する水素原子マイグレーション過程の存在を見出し、重水素置換したメタノール分子についての研究から、水素原子マイグレーションが進行することを実証している。

第 4 章では、He の 2 光子イオン化を SCSS の波長可変性を利用して観測し、FEL の波長を 61.4 nm、58.4 nm、56.0 nm、53.4 nm に変化させ、イオン化収率の波長依存性および EUV 光強度依存性を調べている。その結果、波長 58.4 nm において

イオン化収率が大幅に増加することを見出し、これが $1s^2 \rightarrow 1s2p$ の共鳴を経由した増強効果によるものであることを示している。イオン化断面積が既知である水素分子のイオン化過程を同時に観測することによって、He 原子の 2 光子イオン化過程の絶対断面積を 4 つの波長について求めている。これは、EUV-FEL 光を用いた実験において、絶対イオン化断面積の測定が可能である示した初めての例である。

第 5 章では、近赤外域の超短パルスレーザーを Xe ガス中に集光照射することによって高次高調波を発生させている。加速された電子バンチとともに、13 次高調波 (61.4 nm) をシード光として、2 台のアンジュレーター部に導入し、その出力光のスペクトルをシングルショット計測している。得られたスペクトルは単一ピークから成り、超短パルスレーザーの高次高調波による FEL 光のシード化が達成されたことを確認している。これは、高次高調波による EUV-FEL のシード化の初めての成功例である。

第 6 章では、シード化 FEL 光のコントラスト比とシード率を向上させるために、電子バンチ長を伸長した上で、アンジュレーターを 1 台のみ用いて、13 次高調波および 15 次高調波を用いて、シーディング実験を行っている。また、FEL における最適な条件をシミュレーションによって示しており、高次高調波によるシーディングを確実にを行う方法について検討がなされている。

第 7 章は、以上の研究成果をふまえ、高輝度 EUV および X 線光源によって拓かれる研究分野についての将来展望が述べられている。

なお、本論文第 2 章は、沖野友哉、山内 薫、他 8 名との共同研究、第 3 章は、岩崎純史、沖野友哉、山内 薫、他 12 名との共同研究、第 4 章は、沖野友哉、岩崎純史、山内 薫、他 13 名との共同研究、第 5 章は、富樫 格、高橋栄治、緑川克美、青山 誠、山川考一、岩崎純史、大和田成起、沖野友哉、山内薫、神成文彦、柳下明、中野秀俊、矢橋牧名、石川哲也、他 19 名との共同研究、第 6 章は、岩崎純史、大和田成起、山内 薫、他 25 名との共同研究であるが、これらいずれにおいても、論文提出者が主体となって実験および解析を行っており、その寄与が十分にあると判断される。

よって、本論文が博士（理学）を授与するにふさわしい研究であることを審査員は全員一致で認めた。