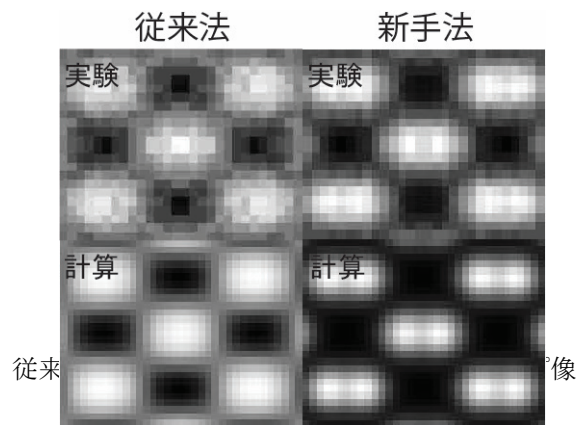


電子顕微鏡による元素分析の常識を覆す

—従来の限界超え原子レベル元素分析を実証—

概要

京都大学化学研究所の吴佳亿博士後期課程学生、治田充貴准教授らの研究グループは、ドイツ・ユーリッヒ研究センターの Juri Barthel 博士、オーストラリア・メルボルン大学の Leslie J. Allen 教授らと共同で、電子顕微鏡による元素分析で、これまで困難と考えられてきた低エネルギー領域での原子レベルの元素分析を実証しました。電子エネルギー損失分光法（EELS）は、電子顕微鏡で元素や電子状態を調べる手法ですが、軽い元素で利用される低エネルギー信号では、電子と原子の相互作用が広い範囲に及ぶため、隣り合う原子を見分けることは難しいと考えられてきました。本研究では、計測対象の原子と相互作用することでエネルギーを失い散乱した電子のうち特定の方向へ飛んだ電子だけを選んで検出する新しい測定法を用いることで、この制約を克服し、100 電子ボルトという低エネルギー領域でも従来法の約 5 倍高い空間分解能でシリコン原子を識別できることを示しました。さらに理論計算により、この性能向上が電子の検出方法に由来することを明らかにしました。本成果は、電子顕微鏡による元素分析の従来の考え方を見直す成果であり、軽元素や半導体材料の高精度電子状態解析への応用が期待されます。本研究成果は、2026 年 7 月 28 日に国際学術誌「*Physical Review Letters*」に掲載されました。



1. 背景

近年の先端電子顕微鏡では、原子を一つ一つ観察できるようになっています。一方、元素の種類や電子状態を分析するためには、計測対象の原子と相互作用することでエネルギーの一部を失った電子を測定する電子エネルギー損失分光法（EELS）（注 1）を組み合わせる必要があります。材料科学分野で幅広く利用されています。これまで、損失エネルギーの高い比較的重い元素の分析では原子レベルの観察が可能でしたが、軽元素を分析する際に利用される低損失エネルギー信号では、入射電子と原子との相互作用が広い範囲に及ぶ「非局在化」（注 2）のため、信号が複数の原子に広がり、原子レベルで元素や電子状態を観察することは原理的に困難と考えられてきました。この考え方は理論と実験の双方から支持され、電子顕微鏡分野で長年受け入れられてきました。そのため、低エネルギー領域で原子分解能を実現することは、元素・電子状態分析研究における重要な課題でした。

2. 研究手法・成果

本研究では、電子エネルギー損失分光法（EELS）で散乱した電子のうち、特定の角度へ散乱した電子だけを環状に選択して検出する「環状電子エネルギー損失分光法（AEELS）」を用いました。従来はすべての散乱電子をまとめて検出していましたが、本手法では低角度に散乱した電子を除外し、高角度に散乱した電子のみを利用することで、非局在化による信号の広がりを効果的に抑えました。

シリコン結晶を用いた実験では、約 100 eV のシリコン L 吸収端において、従来法では約 0.56nm 程度の分解能しかなく、0.136 nm 離れたシリコン原子列分離できていませんでしたが、今回の手法により原子レベルで識別することに成功しました。さらに、電子散乱シミュレーションによって実験結果を再現し、この分解能向上が電子励起そのものではなく、散乱電子をどのように検出するかによって実現されることを明らかにしました。

本成果は、「低エネルギーでは原子分解能は得られない」とされてきた従来の考え方を見直すものであり、電子顕微鏡による軽元素や電子状態の高空間分解能解析に新たな指針を示しました。

3. 波及効果、今後の予定

今後は、リチウムや酸素など低エネルギーの内殻励起を利用する軽元素への応用や、化学結合や電子状態をの原子レベル解析への展開が期待されます。また、検出方法によって空間分解能を向上できるという新しい考え方は、今後の電子顕微鏡法や分析手法の開発にも新たな指針を与えると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、2025 年度京都大学研究費獲得支援事業【いしずえ】の助成を受けたものです。

<用語解説>

電子エネルギー損失分光法（EELS）：入射電子が試料原子の電子を励起することによる非弾性散乱電子を分光し、その損失エネルギーから元素や電子状態を解析する分光法

非局在化：入射電子と試料原子の電子間との相互作用が広い範囲に及び、目的の原子だけでなく周囲の原子からの信号も混ざること、元素分析の空間分解能が低下する現象。

<研究者のコメント>

「低エネルギーでは原子分解能は得られない」という考え方は、長年当然のように受け入れられてきました。本研究では、その原因が電子励起だけでなく検出方法にもあることを示すとともに、信号が大幅に減少すると

いう課題を、多重計測法を組み合わせることで克服しました。既存の常識を見直すことで、新しい計測法や材料解析へと発展していくことを期待しています。（治田充貴）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Atomic resolution in near-edge core-loss mapping beyond the conventional delocalization limit（従来の非局在化限界を超えた低エネルギー元素マッピングの原子分解能化）

著 者：Jiayi Wu, Juri Barthel, Leslie J. Allen, Mitsutaka Haruta

掲 載 誌： *Physical Review Letters*, 137,056402 (2026) DOI : <https://doi.org/10.1103/9v69-62kf>