

氏名	Wenyang Zhao
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 9390 号
学位授与年月日	令和2年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

X-ray snapshots of elements: instrumentation and application to inhomogeneous system and chemical diffusion

(X線による元素のスナップショット画像:装置開発および不均一系や化学拡散の観察への応用)

主査	筑波大学教授(連係大学院)	工学博士	桜井健次
副査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(理学)	唐捷
副査	筑波大学教授(連係大学院)	博士(工学)	武田良彦
副査	筑波大学教授	工学博士	上殿明良
副査	高エネルギー加速器研究機構准教授	博士(工学)	平野馨一

論文の要旨

本論文は、化学組成によって機能や特性が大きく左右される材料の開発に際しほぼ必須のツールとも言える元素イメージングの新しい方法および装置の開発と、そのさまざまな観察例、および物質・材料研究への応用について論じている。第1章は、序論であり、光学顕微鏡や電子顕微鏡等、各種のイメージング技術を駆使した観察がいかに科学の根底をなし、発展を促進してきたかを説明し、最近多用されるようになってきたX線によるイメージング、特に元素のイメージングの物質・材料工学における意義を述べている。第2章では、機器開発について説明している。これまでのX線による元素イメージングとは、X線の微小ビームをXY走査し、各地点の蛍光X線スペクトルを取得し、多くのスペクトルを収集した後に画像を得るものであった。これに対し、2次元の半導体検出器、とりわけ最近のデジタルカメラに用いられているCCD/CMOSセンサーを用い、X線が照明されている視野全体をスナップショット画像として取得する方法は新たな発展可能性を有している。この撮像技術では、センサー内に入射したX線が作り出す電荷が複数の画素に分散する結果、総電荷数がわかりにくくなるチャージシェアリングの問題が知られていたが、解決法を見出すことに成功した。その方法を用い、通常の蛍光X線分析装置と比較してまったく遜色のない高品位のスペクトルが得られ、またピンホールやコリメータープレートと組み合わせ、高い空間分解能の元素画像が得られることを示した。第3章では、放射光の偏光性に着眼し、極限的にバックグラウンドが低く、ほとんど観測されない条件下で、微量元素のイメージングを達成したと報告している。非対称反射モノクロメータによってビーム形状をイメージングに適した形に変換し、コリメータープレートによって偏光方向と同じ方向から撮像を行った。実験室系の通常のデータと比較して、格段に信号対バックグラウンド

比が高い結果が得られた。また、偏光度とコリメーターの平行性と信号対バックグラウンド比のユニバーサルな関係を理論的に導き、得られる偏光度に応じ、最適な測定条件を決める指針も明らかにされた。第4章では、化学反応により物質移動が生じる系の多元素同時の動画イメージングについて報告している。ケミカルガーデンでは、鉄とカルシウムが異なる拡散挙動になることが定量的に示された。また、電解析出による結晶成長過程の動画像も取得され、検討が行われた。第5章は、多数のスナップショット画像のX線入射角度ごとに収集することにより、不純物元素の深さ分布を求める新技術について述べている。この方法は、X線定在波法と呼ばれる、動力学的回折現象を応用した分析法に、イメージング機能を付与するものである。ミラーに使用されるNi/C周期多層膜にFeの不純物が含まれていることがわかった。その含まれている場所を通常のX線定在波法で調べたところ、ニッケル層中であることがわかったが、更にイメージング機能のある新技術によって検討したところ、単に平均としてそうであるだけでなく、実際にどの地点でも同じように分布していることが示された。この研究では、非常に大量の画像から得られる膨大なプロファイルデータを統一的に自動解析する方法も考案された。第6章は、通常よりも約10倍高いエネルギーのX線を用い、地中に埋もれている重金属の検出技術についての基礎実験とそこから得られる知見について論じている。第7章は本研究で得られた結論を総括し、将来の発展方向を展望している。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

蛍光X線による多元素同時の元素イメージングは、試料に対する前処理がほぼ不要、さらには大気中を含め、自由度の高い環境条件で適用可能であり、さらに非破壊的であるため、他の手法による同じ試料の再検証の余地を残している等、多くの利点を備えた手法である。従来は、微小なX線ビームを試料上でXY走査することにより主になされていた。本論文の主題はXY走査をせずに一度に画像をスナップショットで取得する新しい多元素同時の元素イメージングである。これまで困難もしくは不可能とされていたそのような画像を取得するために、特にチャージシェアリング問題に対する新たな解決策が考案された。さらに開発された機器を用い、微量元素の高感度イメージング、化学反応などにより時間とともに元素が移動する系の動画イメージング、ナノレベルで積層された薄膜の層・界面に着眼した3次元のイメージング等への発展を試みるなど、顕著な業績を挙げた。可視光用に広く市販されているCCDやCMOSカメラを2次元のエネルギー分解能のある検出器として使用できることを見出し、実際に科学研究でデータを示すことができていることから、今後大きな波及効果も期待される。

〔最終試験結果〕

令和2年2月17日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。