

戦略的創造研究推進事業
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ

研究領域「高度情報処理・通信の実現に向けた
ナノファクトリーとプロセス観測」
研究課題「ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡
の開発」

研究終了報告書

研究期間 平成14年11月～平成20年03月

研究代表者：大門 寛
(国立大学法人奈良先端科学技術大学院
大学物質創成科学研究科、教授)

1 研究実施の概要

◆ 研究背景と目的

ナノテクノロジーの発展によって、ナノサイズの素子を使用されるようになってきたが、適当な評価技術がない。透過電子顕微鏡の分解能は原子像が見えるほど高いが、原子配列の投影像が得られるだけで、立体的な原子配列や電子状態の情報は得られないものであった。物質はサイズが小さくなると、大きな時とは異なる原子配列や性質を示すようになるため、微小領域の原子配列や性質を直接評価できる顕微鏡の開発が望まれている。

これまでの研究において、我々は「二次元表示型分析器」[1]を開発し、図1のように原子配列の立体写真を観察することに成功[2]していた。試料に X 線を照射し、特定の元素から放出された電子(光電子)をエネルギー選別し、広い角度に渡って二次元的に観測する。その際、光電子は周りの原子によって散乱されるので、その原子の方向に明るいピーク(前方散乱ピーク)が観測される。我々は、円偏光 X 線という右回りや左回りに回転しながら進む X 線を試料に照射したときの前方散乱ピークの方向が左右にずれることを発見し[3]、そのずれが視差角と同じであることを見出したことにより、原子配列の立体視を実現した[2]。本研究では、ナノサイズ物質の原子配列構造を立体的に解析できる顕微鏡を開発するため、我々の発明した「原子配列立体視」の技術を確認し、より簡便に測定できる小型で高性能の分析器を製作するとともに、低倍率での顕微鏡像も得られる顕微鏡機能システムの基礎的な開発を進めることが目的であった。

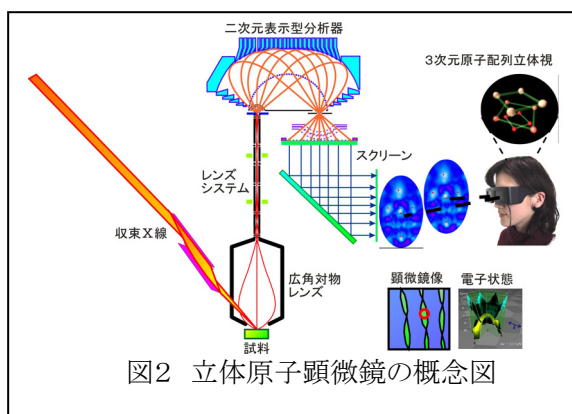
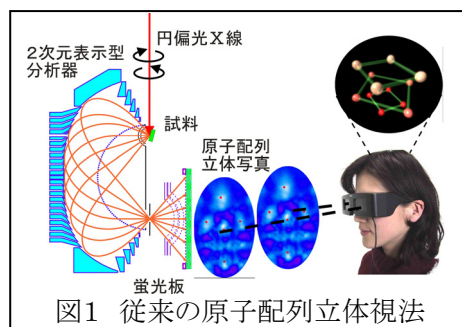
この立体写真の技術は、我々が発明したものであり、装置の独自性もあって現在は我々しか測定できないものである。通常、原子配列構造は、X 線回折や電子線回折で解析されるが、これらはフーリエ変換などの計算を必要とする間接的な方法である。本手法は、計算なしで直接見えるところに意義がある。

これまでいくつかの試料を観察して、原子配列の立体視ができることを実証してきた[4-6]。しかしながらきれいな像がなかなか撮れなかったり、装置が使いづらかったり、見たいところを選ぶ機能が無かったため、単結晶のように一様な原子配列をしているものについての立体視に限られていて、応用範囲が限られているという問題があった。そこで、本研究の戦略目標として、(1)[検証実験]、(2)[小型分析器の設計・製作]、(3)[顕微鏡機能の基礎的な開発]という3つの研究を計画した。

(1) 検証実験

[検証実験]においては、立体原子写真の測定例を増やし、短い時間できれいな像の測定ができるようにすることが目的であった。立体原子写真の技術は、発明されたばかりであり、どのような試料が測定に向いているか、どのような測定条件できれいに撮れるか、などの技術としての確立を行う必要があった。また、従来は、1 枚の写真を測定するのに 1 時間程度かかっていたため、使いづらいものであった。多くの測定をするためには、短時間で測定できるように装置を改良する必要があった。

(2) 小型分析器の設計・製作



本研究の主要装置である「二次元表示型分析器」は研究代表者が発明したものであり、あるエネルギーの電子の放出角度分布を歪み無く広い角度範囲にわたって表示できるという大きな利点がある。しかしながら SPring-8 で使用している分析器(図3)は本体の大きさが60cm、分析真空槽の大きさが1m以上と大きくて、分析器の位置調整や試料の受け渡しが非常に大変であり、多くの人が使える装置にはなっていなかった。

[小型分析器の設計・製作]においては、多くの人にとって使いやすい小型で高性能の分析器の作成を目標とした。

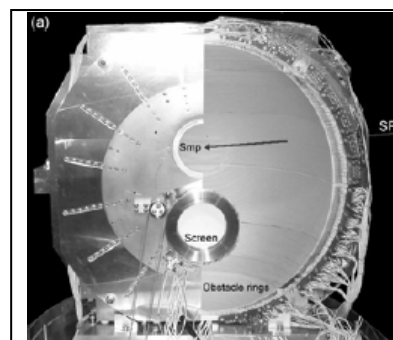


図3 従来の分析器

(3) 顕微鏡機能の開発

通常の立体原子写真法は原子の立体配列構造は見えるが、倍率が10億倍程度に固定されている。ナノ構造の解析などの応用分野に適用するためには、低い倍率で像も見えるような機能を付加し、見たいところを選べるようにする必要がある。この機能の開発により、微小領域や微小結晶の原子配列構造や電子状態解析ができるようになり、ナノ構造の解析や基礎物性の解析に適用しやすくなる。見たいところだけの原子配列の立体視を可能にするために、試料と「二次元表示型分析器」との間に「広角対物レンズ」と「レンズシステム」を挿入して、図2のような「立体原子顕微鏡」を開発する。

本研究のもっとも難しい部分は、「広角対物レンズ」の開発であった。本研究においては、 $\pm 45^\circ$ 以上の開き角で放出された電子を収束してレンズシステムに導く必要がある。しかしながら、従来のレンズは球面収差が大きく、 $\pm 3^\circ$ 程度が限界であった。一挙に10倍以上に性能を高めるには新しい概念が必要であった。本課題では、 $\pm 45^\circ$ 以上の開き角で放出された電子を小さな点に収束する「広角対物レンズ」の開発を第一の目標とした。

このようにして開発した「広角対物レンズ」と「レンズシステム」を組み合わせることで[顕微鏡機能の開発]を行う。しかしながら、分解能の高い顕微鏡の開発には数十年が必要であるため、本研究期間においては、システムの基礎的な動作の確認までを目標とした。

◆ 研究成果（詳しくは3章を参照してください）

(1) 検証実験の成果

①試料の汎用性についての検証

s軌道からの光電子は角運動量が小さいので観測には不向きであったが、s軌道の元素(炭素、ボロン)について実験を行い、きれいに取れることを証明した。このことは、測定対象元素には制限が無いことを示しており、立体写真の技術の応用性が大きく高まった。

②測定精度の向上

立体原子写真における前方散乱ピークの回転角の入射光エネルギー依存性について詳しく解析した結果、晶帯軸とピークが重なっているときには、前方散乱ピークと回折ピークを分離すると原子位置を正確に求められることが明らかになった。

③測定時間の短縮のための装置の改良

分析器の阻止グリッドの改良とともに、電極の補修なども行ったことによって、装置の透過率を高めて測定時間を短縮することに成功し、きれいなデータが短時間で測定できるようになった。

(2) 小型分析器の製作

新しく製作した二次元表示型分析器の写真を図4に示す。従来のものからの改良点は、以下の点である。

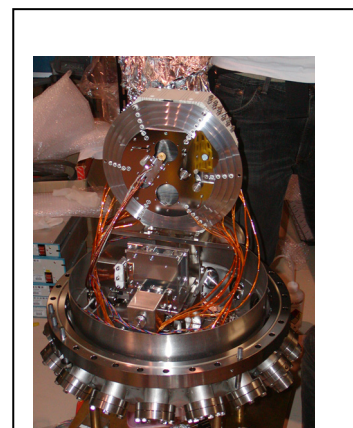


図4 新しく製作した小型二次元表示型分析器

- ① 高エネルギー分解能外球を製作した。
- ② エネルギー分解能や角度分解能を決めているアパチャーの大きさを、真空外から回転導入端子により 0 から 10mm の範囲で変えられるようにした。
- ③ アパチャーの位置調整を真空内に設置した真空モーターにより、コンピュータでできるようにした。
- ④ フィラメントの交換が簡単な電子銃を製作して設置した。
- ⑤ 性能評価試験を行い、エネルギー分解能、角度分布の測定に成功した。
- ⑥ 価電子帯による表面マッピングという新しい分析法に応用した。

(3) 顕微鏡機能の開発

① 「広角対物レンズ」の開発

試料に面するところに、回転楕円体に近い形状のメッシュを置くことにより、 $\pm 50^\circ$ の広い範囲の電子をほぼ一点に収束することに成功した。特許を申請するとともに論文発表を行った[7,8]。

② 「広角対物レンズ」のテスト

試料にメッシュを用いて測定したところ、5 倍の拡大像が観測された。分解能は 20 ミクロン以下であることがわかった。

③ 「回転楕円体メッシュレンズ」の高精度作成法を種々検討した。

④ 「立体原子顕微鏡」の設計と製作

上記にて開発した「広角対物レンズ」を基にして、「レンズシステム」と全体を組み合わせた[顕微鏡機能]を持つシステムを設計製作した。

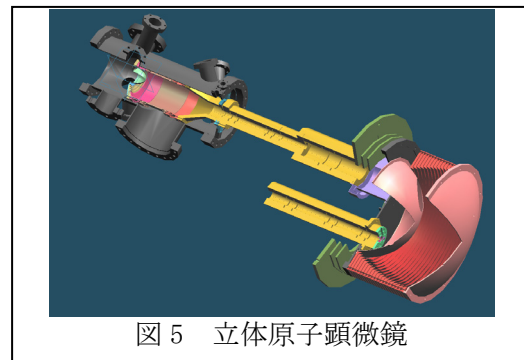


図 5 立体原子顕微鏡

(4) 回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器の検討(初期には無かったテーマ)

「広角対物レンズ」を単独で使い、アパチャーと簡単なレンズを付けるだけで新しい二次元表示型分析器として活用できることが明らかになった。エネルギー分解能、角度分解能を評価した。

(5) 角運動量 X 線の創生(初期には無かったテーマ)

実験室でも「立体原子写真」や「磁性」の研究ができるようにするため、特殊な回折格子ホログラムを考案して特許申請し、角運動量を持った軟 X 線の作成を行った。

◆ 科学技術への貢献

・基礎科学への貢献

「原子配列立体視法の確立」

円偏光励起による光電子の散乱現象を詳細に解明できたことにより、立体視以外の光電子回折の研究にも指針を与えている。

・計測技術への貢献

「小型で高性能の二次元表示型分析器の完成」

この分析器は、原子配列立体視以外にも「電子状態の 3 次元マッピング」、「原子軌道解析」、「光電子回折・ホログラフィー」など多くの応用に効率よく用いられるものであり、汎用性が高い。

「立体原子顕微鏡の開発」

分解能はあまり高くないが、見たいところの原子構造を立体的に観測するという初めての顕微鏡が実現された。分解能の高い顕微鏡の開発には数十年が必要であるため、本研究終了時には、システムの基礎的な動作の確認までしかできないが、分解能の高い測定の実現に向けて、今後も努力を続ける。

「広角対物レンズの開発」

顕微鏡機能システムの初段の対物レンズとして、広角対物レンズを発明した。この対物レンズは、通常の実験室に組み込むことにより、分析器の取り込み角が 100 倍程度向上されるため、既に他のCRESTに採用されており、外国企業と特許実施準備契約を結んでいるなど、汎用性が高い。

「回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器」

上記の「広角対物レンズ」は、簡単な絞りとレンズをつけるだけで、新しいタイプの「光電子顕微鏡機能付き二次元表示型分析器」として使用できることがわかった。従来の球面鏡型二次元表示型分析器よりもはるかに簡単な構成と使いやすさを持っているため、応用範囲も広いと思われる。

「角運動量 X 線の創生」

完成すると角運動量を持つ軟 X 線が実験室で得られるので、立体写真のみならず磁性の研究などにも応用でき、応用範囲が極めて広い。

・一般社会への貢献

「国立科学博物館でのデモ展示」

国立科学博物館においてデモ展示を行い、本研究成果である多くの立体写真を延べ 25000 人以上の一般の人に楽しんでいただいた。物質が原子が並んでできていることを実際に目で見られたということで、多くの人に感激していただいた。親子連れの小学生が多く、科学の好きな青少年を増やす事に貢献したと思われる。

文献

- [1] H. Daimon, Rev. Sci. Instrum. 59, 545 (1988). [Erratum: ibid. 61, 205 (1990)]
- [2] H. Daimon: Phys. Rev. Lett. 86, 2034 (2001).
- [3] H. Daimon, T. Nakatani, S. Imada, S. Suga, Y. Kagoshima, and T. Miyahara, Jpn. J. Appl. Phys. 32, L1480 (1993).
- [4] T. Nakatani, T. Matsushita, S. Okamoto, K. Fukumoto, A. Kobayashi, A. Nakamoto, T. Nohno, K. Hattori, K. Enomoto, Y. Miyatake, M. Kotsugi, Y. Saitoh, S. Suga, H. Daimon, Progress in Surf. Sci. 71, 217-239 (2003).
- [5] F.Z. Guo, F. Matsui, T. Matsushita and H. Daimon: J. Electron Spec. Relat. Phenom. 144-147, 1067 (2005).
- [6] F. Matsui, H. Daimon, F. Z. Guo and T. Matsushita: Appl. Phys. Lett. 85, 3737 (2004).
- [7] H. Matsuda, H. Daimon, M. Kato and M. Kudo, Phys. Rev. E 71, 066503 (2005).
- [8] patent: PCT/jp2004/016602, Japan 2004-208926

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

- 研究開始時に設定した戦略目標としては、以下の3点である。

1. 検証実験

研究開始前には、装置の不具合で観測例が少なく、立体視がうまく行く条件を捜すことができていなかったため、立体原子写真の測定例を増やし、短い時間できれいな像の測定ができるようにすることが目的であった。

2. 小型分析器の設計・製作

装置が大きくて使いにくく、多くの人が使える装置になっていなかったため、多くの人のために使いやすい小型で高性能の分析器の作成を目標とした。

3. 顕微鏡機能の基礎的開発

ナノ構造体の原子配列の立体視を可能にするために、試料と「二次元表示型分析器」との間に「広角対物レンズ」と「レンズシステム」を挿入して、図2のような「立体原子顕微鏡」を開発することを目標とした。

- その後の展開により新しく生まれた目標

2. 2 小型分析器の評価

2で作成した使いやすい小型で高性能の分析器の評価を、立命館放射光(SR)センターで行う。

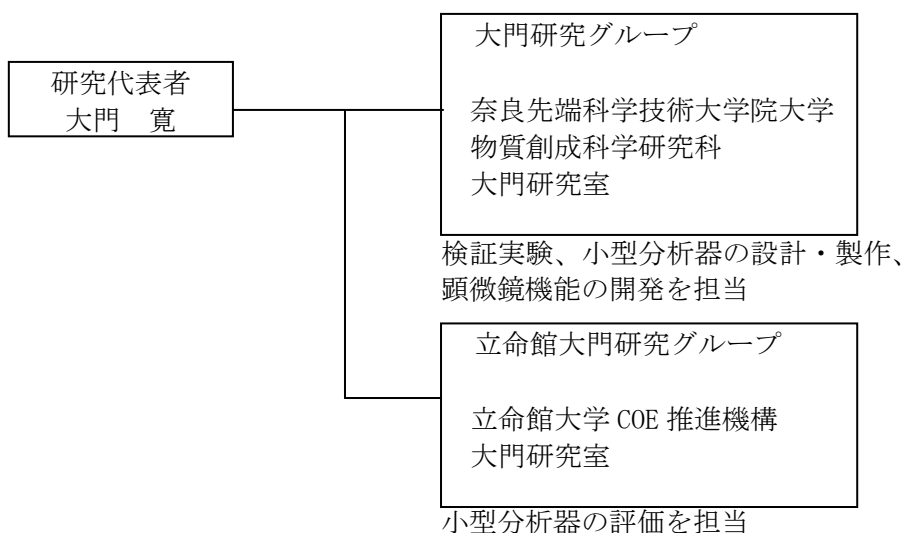
3. 1 回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器の検討

3で開発した「広角対物レンズ」を単独で用いて、新しい二次元表示型分析器として活用するときの性能を評価する。

3. 2 角運動量 X 線の創生

これまで、立体原子写真を撮影するには円偏光が必要であったため、SPring-8などの放射光施設を利用してきた。実験室でも測定できるようにするため、特殊な回折格子ホログラムを作成して角運動量を持った軟X線を生成する。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 検証実験(奈良先端科学技術大学院大学 大門研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①試料の汎用性についての検証

種々の単結晶や薄膜の立体原子配列構造がどのようなときにどのように再現できるかを多くの試料で検証した。エネルギーや元素を変えてみて、普遍性と、最適なエネルギー値を調べた。単結晶としては、グラファイト、Si、Cu、TiS₂ など、薄膜としては Si 上の Fe シリサイド、Cu 上の Fe や Ni 薄膜、さらに薄膜中の不純物として B ドープ超伝導ダイヤモンド中の B についても測定した。

立体原子写真の撮影には、原子の内殻から放出された光電子を用いる。内殻準位のエネルギーは元素によって異なるため、あるエネルギーの光電子を選別して表示することにより、元素を特定して、その元素の周りの 3 次元立体原子配列を直視することができる。立体写真における視差は、内殻の軌道角運動量に 1 を足したものに比例している。内殻軌道の角運動量は、s、p、d、f 軌道の順に、0、1、2、3 となっている。したがって、視差が大きく、立体像がはっきり見えるためには、内殻軌道の角運動量が大い d や f 軌道のほうが良い。s 軌道からの光電子は角運動量が小さいので観測には不向きである。しかしながら多くの有機物は炭素、酸素など内殻が s 軌道しかない元素だけでできている。したがって、s 軌道からの光電子で立体写真を取れるようにならないと、有機物を測定対象にできなくなってしまう。

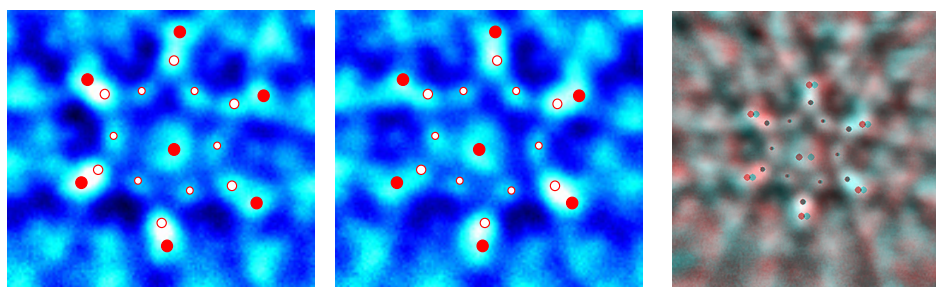


図6 グラファイトの立体原子写真。
左：左目用、中：右目用、右：赤青メガネ用

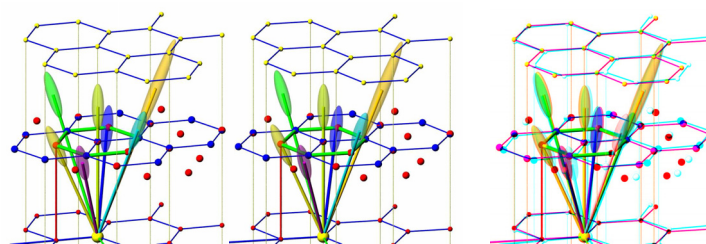
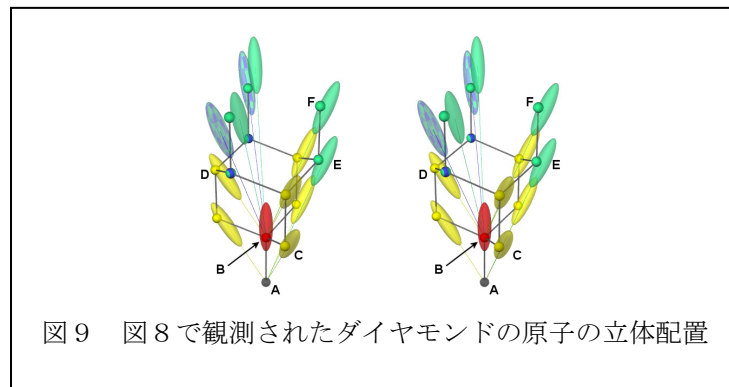
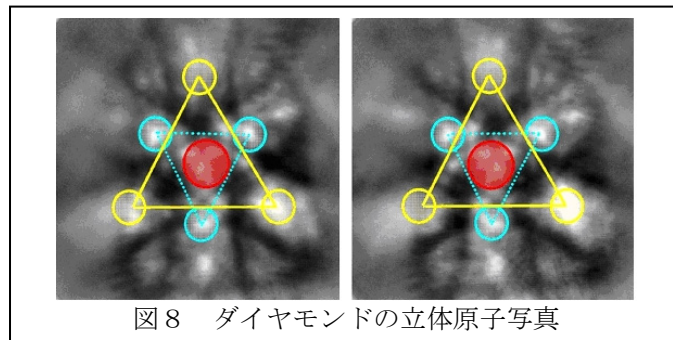


図7 図6で観測されたグラファイトの原子の立体配置
左：左目用、中：右目用、右：赤青メガネ用

s軌道の例として、グラファイトとダイヤモンドについて測定を行って検証した。図6にはグラファイトから得られた立体写真を示す。図の明るいピークの位置が左右の図で少しずれていることが分かる。これらのずれが視差角となっており、図6の左の図を左目で、右の図を右目で見ることにより原子が浮き上がって見えて、グラファイトの原子配列を立体的

に直視することができる。ただし、この図を見るときには、視野角が測定時の視野角(±60°)より大幅に小さいため、前後関係はわかるが距離感は実際のものとは異なっている。

観察された視差角から距離を計算して3次元構造を再現して表示したものが図7である。図7も立体表示になっているので、立体視することにより、原子構造を立体認識することができる。精度はあまり高くないが、グラファイト原子の立体配置を再現できていることがわかる。



同様にダイヤモンドについて測定した結果を図8、図9に示す。ダイヤモンドについても、立体配列がきれいに再現されている。また、図示していないが、ダイヤモンドにドーピングしているボロンについても測定しており、同様に再現されている。

これらの結果から、内殻s軌道でも立体写真がきれいに得られることがわかった。このことは、測定対象元素には制限が無いことを示しており、立体写真の技術の応用性が大きく高まった。

これらの成果は本研究の価値を高める上で貴重なもので、世界でも初めての成果であり、オリジナリティが高い。

②測定精度の向上

立体原子写真の精度は、前方散乱ピークの回転角と視差角がどのくらい良く一致しているかで決まる。前方散乱ピークの回転角の入射光エネルギー依存性について詳しく解析し、立体写真の精度を上げる方法を検討した。図10はSi(001)からのSi2p光電子放出角度分布の光エネルギー依存性である。中心の[001]ピークの回転角は、入射光エネルギーによらずに期待値より小さい値が得られた。この違いの理由を理解するために、中心のピークを、動くピークと動かないピークに分離して解析した結果、晶帯軸における動かない回折ピークを分離した後では図11のように視差角の期待値(角運動量量子数 m の期待値)と非常に良く一致することが明らかになった。つまり、期待値

と合わないのは、回折による動かないピークとの重なりが原因であることがわかった。したがって、晶帯軸とピークが重なっているときには、原子位置を正確に求めるために、回転する前方散乱ピークと回転しない回折ピークを分離すれば良いことが明らかになった。回折ピークは円偏光のヘリシティを変えても動かないので、分離は容易である。このように、簡単な操作で精度を大きく向上させることに成功した。

この成果は、立体写真の精度を高め、本研究の価値を高める上で貴重なもので、世界でも初めての成果であり、オリジナリティが高い。

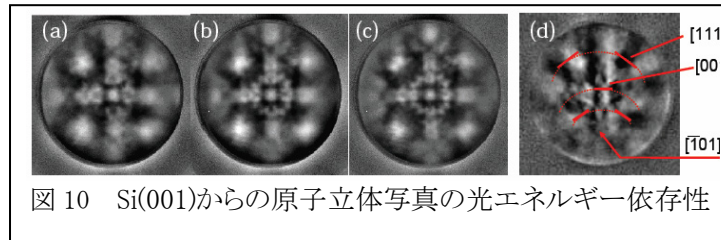


図 10 Si(001)からの原子立体写真の光エネルギー依存性

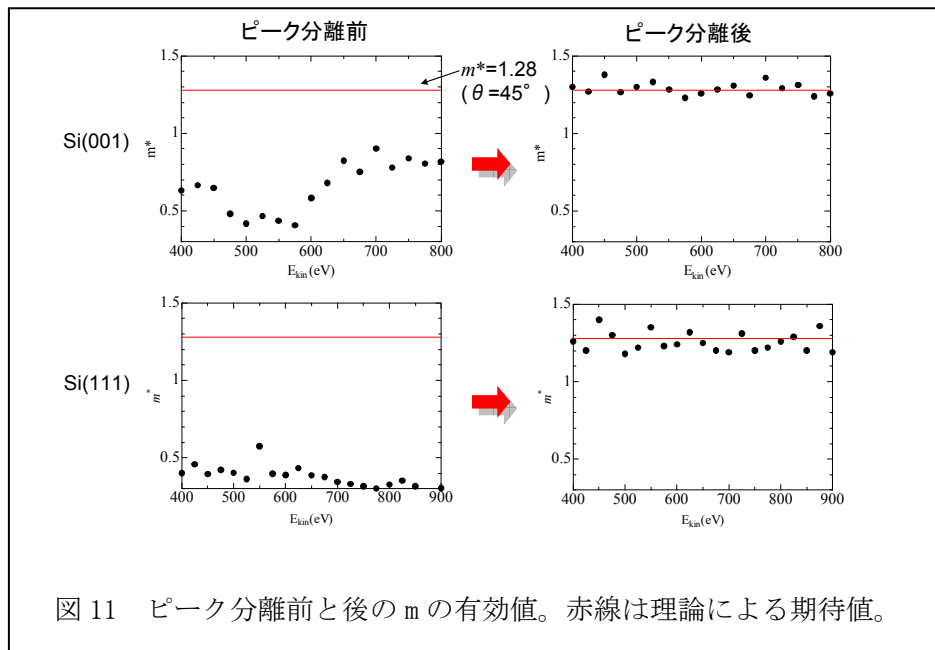


図 11 ピーク分離前と後の m の有効値。赤線は理論による期待値。

②測定時間の短縮のための装置の改良

SPring-8 に設置してある分析器の電極の金膜が一部剥離したり短絡があったために光電子像の広角側の像が測定できなかったり歪みが生じたりしていた。金膜の剥離部に絶縁物を塗りその上から金箔を貼って補修した (図 12)。また、従来の阻止電位グリッドはチタンの板に孔を無数に空け、表裏にメッシュを張ったものであり、透過率が低く、また放電が 600 V 以上で起こっていた。今回はメッシュ単体で構成されるグリッド (図 13) に交換し、絶縁性を良くして高エネルギーまで測定できるようにした。また、試料移動をモーターで行うようにして、測定が簡便にできるようにした。また、試料マニピュレータを交換して試料移動をコンピュータコントロールのモーターでできるようにした。

これらの改造により、分析器の透過率が一桁向上し、高エネルギーまで測定できるようになって、きれいな像が短時間で取れるようになった。

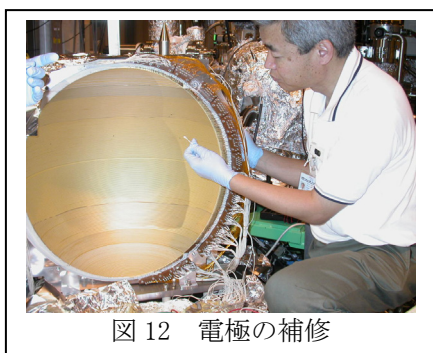


図 12 電極の補修



図 13 交換した阻止グリッド

この測定感度の向上はナノ解析に必須のものである。なぜなら、光の照射スポット径を小さくしても通常は数十ミクロン程度が限界であるが、そのような状況で 100nm のものを見ようとするとは 10,000 倍の感度が必要になるからである。さらに感度を高める必要があるが、測定時間を長くすることで対応も可能になる。

測定例として Cu の (001) 面からの Cu3p 光電子による一連の立体写真を図 14 に示す。光電子の運動エネルギーは 600eV である。中心付近の強いピークを含めた正方形が、fcc 構造の最近接の 4 つの原子を示しており、一番近くに見えるものである。

図 14 の立体写真は、試料を上下に 5 度ずつ回転しながら測定したものである。立体視しながら上下に目を動かしていくと、fcc 構造の原子配列が徐々に回転していく様子が立体的に観測できる。この測定においては、1 枚の写真を得るのにかかる時間は 15 秒であった。シグナルの強いものでは 1 秒以下で測定ができており、短時間で測定できるようにするという目標は達成された。この成果は、ゆっくりした変化であれば実時間で立体構造が測定できるようになったことを示しており、意義のあるものである。

④[検証実験]の類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

これは「立体原子写真法」についての研究であるが、これは我々の独創的な研究であり、装置も光源も特殊なものであるため、他ではできない研究である。光電子の角度分布から立体原子配列構造を求めるという点では、「光電子回折」や「光電子ホログラフィー」という手法があり、励起光が円偏光であることを除けば、測定されるデータは内殻光電子の 2 次元角度分布という点で同様である。しかしながら、「光電子回折」では詳しい計算と実測を比較して構造を解析し、「光電子

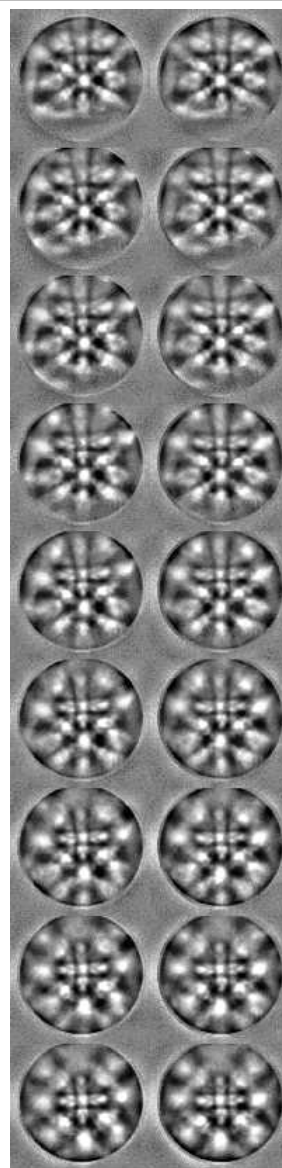


図 14 5度ずつ角度を変えたときの Cu(001) 面の立体写真

ホログラフィー」においては、測定画像をフーリエ変換して構造をもとめており、これらは詳しい計算をしないと構造がわからないという欠点がある。本研究の「立体原子写真法」では、コントラストを上げる程度の画像処理をするだけであり、詳しい計算をしなくても目で直視して構造を認識できるという利点があり、「光電子回折」や「光電子ホログラフィー」とは全く異なる方法である。

得られる構造の精度は、「立体原子写真法」と「光電子ホログラフィー」においては $0.3\text{ \AA}$ 程度であり、「光電子回折」においてはデータの質が良ければ $0.1\text{ \AA}$ 程度である。必要な計算時間は、「立体原子写真法」においては画像処理時間程度なので自動化されれば1秒以下である。「光電子ホログラフィー」においては、単純な高速フーリエ変換ではうまく行かないため、いくつかの画像の差を取ったり、散乱関数を仮定してフィッティングを行うなどの手間がかかり、数時間程度の時間がかかる。「光電子回折」はモデルを仮定して多重散乱の計算をし、測定データと比較して差が小さくなるように計算を繰り返すため数日かかる。「立体原子顕微鏡」の精度は構造解析としては良いとは言えないが、光電子回折のデータも同時に取れているため、大体の構造を目で見て確認しておいて、ゆっくり光電子回折の計算を行えば、初期モデルがわかっているため通常よりも短時間で精度の良い構造が得られることになる。

(2)研究成果の今後期待される効果

今後も引き続き測定例を増やし、適用限界や回折の影響を調べていく。特に、回折の影響を取り除く方法を開発していきたい。光電子回折や光電子ホログラフィーの解析においては、前方散乱ピークが回折パターンよりも強いために邪魔であり、違うエネルギーの画像の差を取って前方散乱ピークを消す「差分ホログラフィー」という技術が開発されたりしている。「差分ホログラフィー」においては、前方散乱ピーク的位置はエネルギーによって不変であるが、回折パターンはエネルギーを動かすと動くという性質を利用して前方散乱ピークを消している。我々の研究ではこれとは逆であり、回折の影響を消して前方散乱を際立たせたい。従って、差分ではなく和をとれば良いことが期待される。このような手法を開発していきたい。

・一般社会への貢献

「国立科学博物館でのデモ展示」

平成 19 年 8 月 25 日から 9 月 2 日まで、国立科学博物館において「上野の山発句の情報発信シリーズ」と題して奈良先端科学技術大学院大学がデモ展示を行ったが、その中で本研究成果である多くの立体写真を延べ 25000 人以上の一般の人に楽しんでもらった。物質が原子が並んでできていることを実際に目で見られたということで、多くの人に感激していただいた。親子連れの小学生が多く、科学の好きな青少年を増やす事に貢献したと思われる。

このように、本研究成果は一般の人にもわかりやすいため、これ以外にも色々な機会を捉えて一般の人々に公開して、日本の科学の発展に寄与したい。

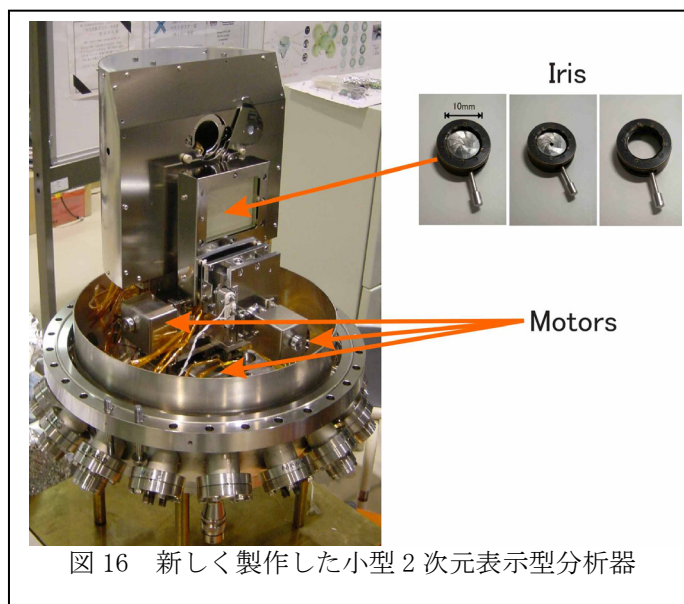


図 15 国立科学博物館でのデモ展示

3. 2 小型分析器の製作(奈良先端科学技術大学院大学 大門研究グループ)

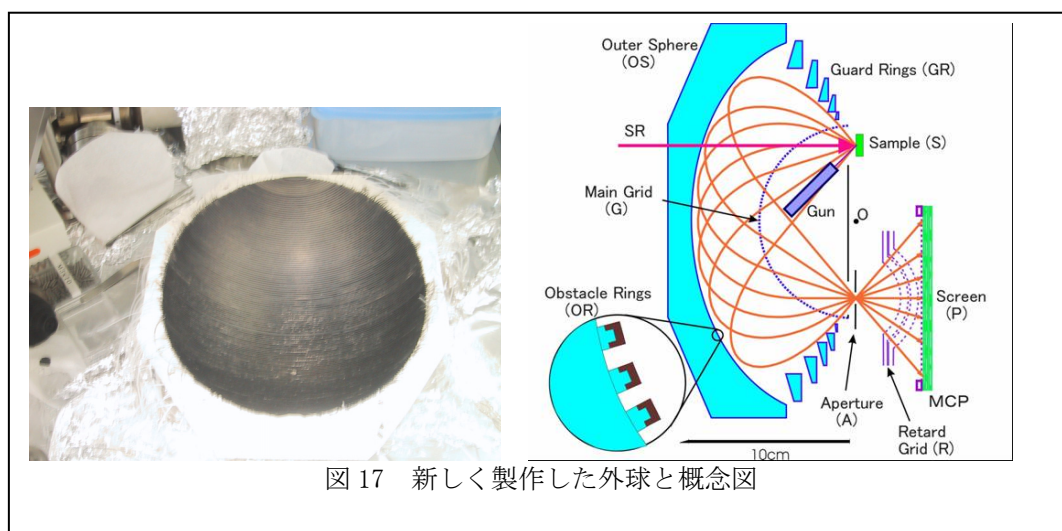
(1)研究実施内容及び成果

新しく製作した2次元表示型分析器の写真を図16に示す。



従来のものからの改良点は、以下のものである。

- ① 高エネルギー分解能外球の製作。小型でもエネルギー分解能の高い分析器とするため、多くの電極をもつマシンナブルセラミック製の外球を図17のように作成した。電極の数を従来の26から156に増やし、滑らかさを増すことによって分解能を高めた。内面にはグラファイトを図17右のように塗布した。30cm程度の大きさであり、SPring-8に設置してあるものよりも大幅に小さい。取り込み角は $\pm 60^\circ$ で不変である。エネルギー分解能 $\Delta E/E$ は0.2%以下であり、50meV程度が得られている。



- ② エネルギー分解能や角度分解能を決めているアパチャーの大きさを、真空外から回転導入端子により0から10mmの範囲で変えられるようにした。大きさを真空の外から変化させられる可変絞りは国内では初めての試みと思われるが、製作に成功して

組み込むことができた。

- ③ アパチャーおよび MCP と蛍光スクリーンの位置調整を真空内に設置した真空モーターにより、コンピュータでできるようにした。このことにより、再現性が高くなり、簡単に使用できるようになった。
- ④ フィラメントの交換が簡単な小型電子銃を製作して設置した。小型電子銃は、図 17 に示すように全長 44 mm、外径 12 mmφ と、組み立て式の電子銃としては世界最小と思われるものを開発・製作することができた。さらに、分解能は 12 ミクロンであるが、SEM（走査電子顕微鏡）像（図 18）をとることに成功し、学会発表を行った（小粥啓子、原田芳仁、神谷博道、齊藤秀一、副島啓義、大門寛、“ミニチュア SEM: Mini-Gun の開発”（2005 年 6 月 1・3 日、日本顕微鏡学会第 61 回学術講演会））。



図 17 小型電子銃

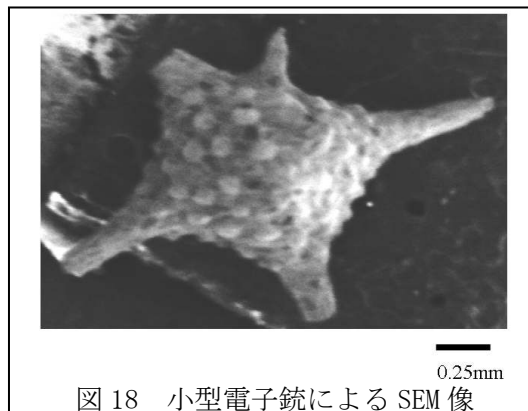


図 18 小型電子銃による SEM 像

現在は、立命館大学 SR センターの BL7 に設置して性能評価を行っている。

[小型分析器の設計・製作]の類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

2 次元表示型の分析器としては、他に Eastman 型の回転楕円面鏡を用いるものがあり、米国 ALS とスイス SLS に設置されているが、あまり稼動していない。本研究の分析器は、試料からの出射角とスクリーンへの投影角が平行で、像がまったく歪んでいないが、Eastman 型の分析器では歪んでいるために元に戻すための変換操作が必要であり、本研究のように直視する顕微鏡として使用することはできない。すなわち、原子配列を直視するのに使用できる分析器は、本研究による分析器のみである。

(2)研究成果の今後期待される効果

本プロジェクトによって、信頼性が高く使いやすい、高エネルギー分解能で小型の分析器が製作できたことは、本研究のみならず、バンドマッピングによる電子状態研究、光電子回折による構造分析、取り出し角度分布測定による深さ分析など多くの分野で利用できる高性能の分析器ができたことを意味しており、波及効果は大きいと思われる。

また、内蔵の電子銃により 12 ミクロンの太さのビームでオージェ分析ができるが、その時のオージェ電子のエネルギーに本分析器のエネルギーを合わせておけば、オージェパターンでマッピングができるようになったことを意味しており、「走査オージェ回折顕微鏡」という新しい分析器ができたことを意味している。SPring-8 で測定したオージェ電子の角度分布パターンの例を図 19 に示す。このようなパターンが Cu (001) 面では得られ、違う面では違うパターンが予想される。このように、同じ物質でも違う方位のマイクロ結晶を区別できる新しい走査顕微鏡として役に立つと期待できる。

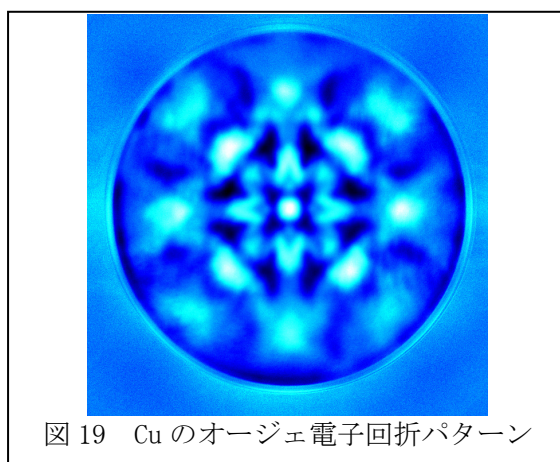


図 19 Cu のオージェ電子回折パターン

分解能は現在 12 ミクロンであるが発展が期待できる。このオージェパターンは立体写真ではないが、構造を反映しており、内蔵の電子銃による励起で簡単に得られるという利点があるので、この「走査オージェ回折顕微鏡」は大きく発展すると期待できる。

3. 2. 2 小型分析器の評価(立命館大学 大門研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

①性能評価試験

前項で作成した使いやすい小型で高性能の分析器を、立命館放射光(SR)センター BL7 に設置して性能評価を行った。

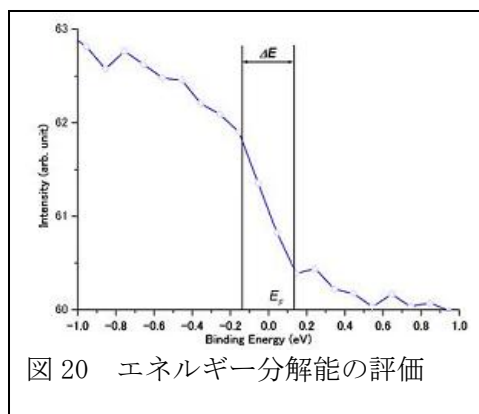


図 20 エネルギー分解能の評価

図 20 に、光のエネルギー40eV で測定した金の蒸着膜からの角度積分型光電子スペクトルを示す。放射光のエネルギー幅も入れた全エネルギー分解能として約 230 meV, $\Delta E/E$ は 0.55%という結果が得られている。従来よりも分解能が数倍向上しているが、調整によりさらに向上できる予定である。

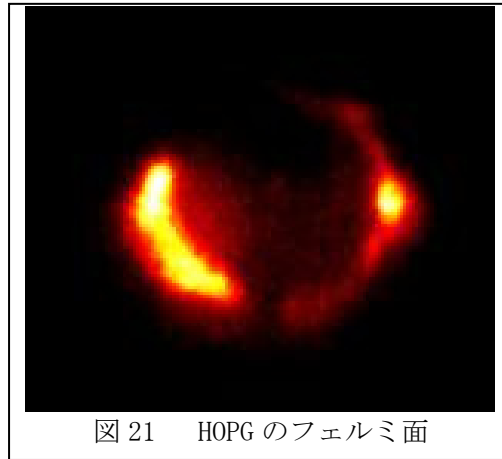


図 21 HOPG のフェルミ面

図 21 に、HOPG から得られたフェルミ面の画像を示す。HOPG では、面内方向がランダムな多くの微結晶のデータの重なりとなるため、単結晶グラファイトの6個の点が回転して重なり、円形のパターンが得られている。励起光が水平直線偏光の放射光であるため、上下が暗くなっており、フェルミ面がpz軌道からできていることが示されている。このような軌道解析が簡単に行える分析器として活躍が期待される。

②価電子帯による表面マッピングへの応用例

この分析器の特徴を活かした新しい分析法の例として、タンタルで囲まれた Kish グラファイトのバンド構造による表面マッピングの結果(N. Takahashi to be published)を示す。図 22 は、結合エネルギーが 1eV 付近の価電子帯の断面であり、(a)では Kish グラファイトのバンド構造の特徴である6つの点が見える。励起光の当たる位置によって、図 22(b)のように6角形が回転したり、(c)のように12個の点が見えたりする。その分布を図 23 に示す。図 23 は、実際の試料の写真の上に、パターンの分布を重ねて表示している。同じパターンの見えるところを白い線で囲ってみると、向きの違う単結晶のドメインの様子が良くわかる。

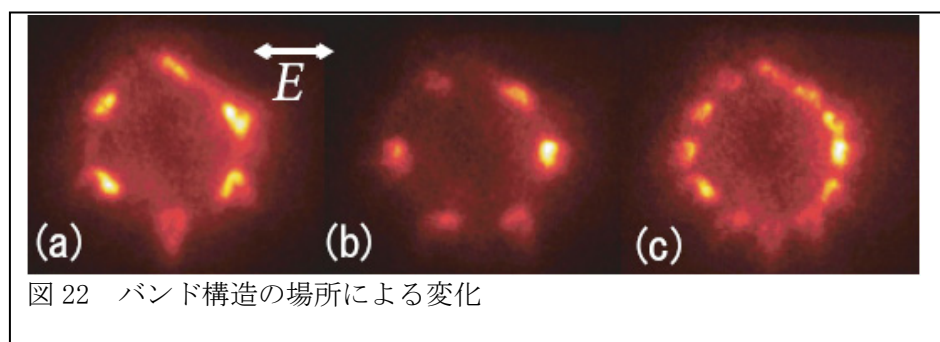


図 22 バンド構造の場所による変化



図 23 バンド構造による表面マッピング

[小型分析器の評価]の類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

電子状態による表面の二次元的評価については、米国の放射光施設 ALS で行った「ある方向でのバンド分散」を見ながら、試料上の良いところを選ぶ、という仕事があった。「ある方向でのバンド分散」は市販の分析器でも光源が強ければ可能であるものであるが、本研究は二次元バンドマッピングを行いながら表面を走査しているので、バンドの対称性や軌道の対称性の分布がわかるという点で情報量が非常に多く、全く新しい成果である。

(2)研究成果の今後期待される効果

このような価電子バンドによる表面マッピングは世界でも例が無く、今後の発展が期待される。

前項で述べた「走査オージェ回折顕微鏡」では、原子構造マッピングが可能になるので、本項で説明した電子状態によるマッピングと合わせて、微小領域の電子状態と原子構造をマッピングできる新しい顕微鏡として成長することが期待され、この研究プロジェクトの目的の「顕微鏡機能の開発」に沿った成果が別の方法で達成され得ることを意味している。

3.3 顕微鏡機能の開発(奈良先端科学技術大学院大学 大門研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

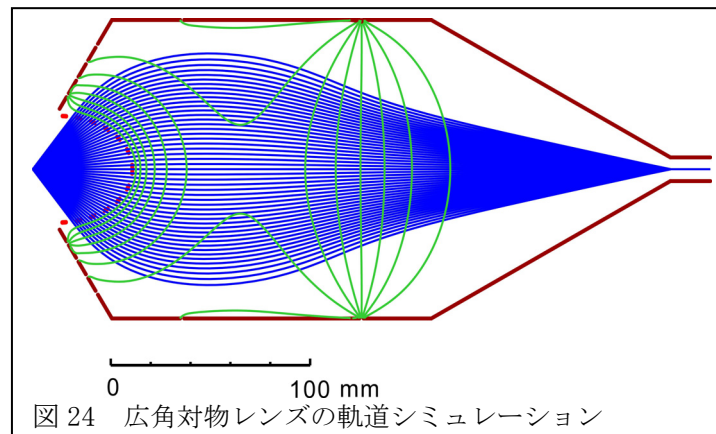
立体原子写真法をナノ構造の解析などの応用分野に適用するためには、低い倍率で像も見えるような機能を付加し、見たいところを選べるようにする必要がある。この機能の開発により、微小領域の解析ができるようになり、各種分析や基礎物性の解析に適用しやすくなる。そのためにはレンズシステム(後述の国内特許1)を試料と分析器の間に挿入する。

図2に示すように、試料にX線を収束して照射し、広い角度に出てくる光電子を「広角対物レンズ」で収束し、「レンズシステム」で「二次元表示型分析器」に導く。この立体原子顕

微鏡のスクリーンには、各レンズの電位のかけ方を変えることで、試料の拡大顕微鏡像、または試料のある元素から放出された光電子の角度分布像が映し出される。試料表面の拡大像を測定しながら、制限視野絞りで見える領域を選び、個々の表面のナノ構造や微小領域だけからの「立体原子写真」を測定できるようにするものである。右回りのX線のときの光電子の角度分布を右目で、左回りのときの角度分布を左目で見るような眼鏡を用いて、図2のようにそれぞれの像を観察すると、見たい領域の原子配列の立体像を直視することができるはずである。また、電子状態も見えるため、この方法によって個々のナノ粒子の構造と電子状態の解析が可能になる。

① 「広角対物レンズ」の開発(後述の国内特許2, 3、国際特許1)

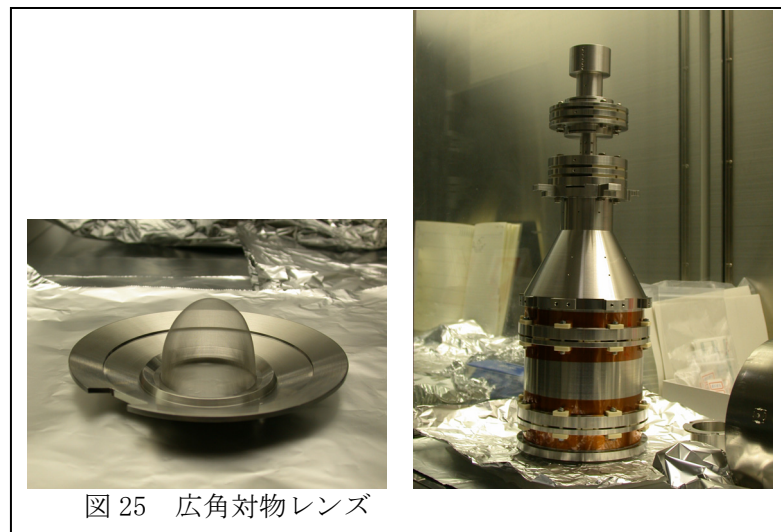
この顕微鏡においては、初段の広角対物レンズを用いて、一点から広い角度に出た電子を、レンズの出口で如何に小さなスポットに収束できるかが鍵となる。試料に面するところに、回転楕円体に近い形状のメッシュを置くことにより、 $\pm 50^\circ$ の広い範囲の電子を非常に小さな点に収束することに成功した。特許を申請するとともに論文発表を行った[7,8]。 $\pm 45^\circ$ 以上の開き角で放出された電子を非常に小さな点に収束する「広角対物レンズ」の軌道シミュレーションの結果を図9に示す。



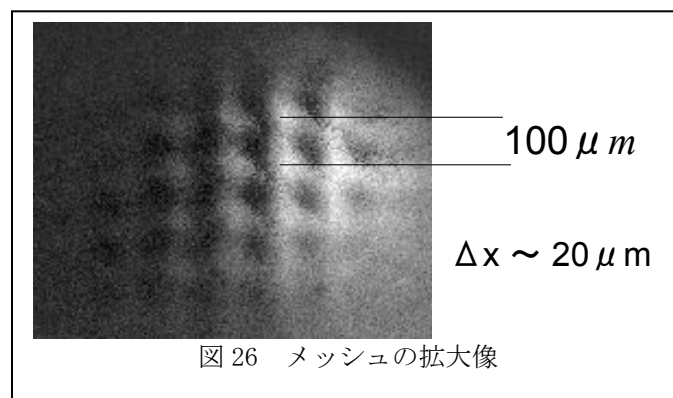
この「広角対物レンズ」の発明は、本プロジェクトでの大きな成果の一つである。従来の対物レンズでは、電子の運動エネルギーが 1keV 程度においては $\pm 10^\circ$ 程度の取り込みが限界であった。半球メッシュを用いた場合、 $\pm 30^\circ$ まで収束できるという特許があったが、収束点のスポットサイズが1mm程度であり、顕微鏡としては使用できないものであった。今回、軌道解析を進め、メッシュを回転楕円体に近い特殊形状にすることにより、 $\pm 50^\circ$ に出た電子を、数ミクロンに絞れる広角対物レンズを発明することができ、特許を申請し(特願 2004-208926)、外国への PTC 出願(PCT/JP2004/016602)も行った。この対物レンズは、本研究の目的のみならず、市販の電子エネルギー分析器のインプットレンズに使用することによって大立体角の分析器が実現でき、元素の深さ依存性などが一度に測定できるようになる。既に、スウェーデンの Gamdata—Scientia 社と実施契約の検討覚書を交わしており、インパクトの高い成果である。

② 「広角対物レンズ」のテスト

広角対物レンズだけを製作してテストを行った。試作した特殊形状メッシュとその周りの電極を組み合わせたものの写真を図 25 に示す。



広角対物レンズの収束をテストするために、試料として 250 メッシュの金網を用い、それに斜めから電子線を照射し、散乱された電子の収束位置に蛍光板を置いて観測した結果を図 26 に示す。このレンズは拡大率が 5 倍であり、試料のメッシュの網線の間隔は 100 ミクロンであり、ほぼ計算どおりの拡大率で拡大されて 0.5mm 程度の間隔に見える。画像の解析から、分解能は 20 ミクロン程度以下が得られていることがわかった。分解能や像の質は、メッシュの改良により今後改善される予定である。



③ 「回転楕円体メッシュレンズ」の高精度作成法の検討

本研究における想定外の困難としては、メッシュの穴の大きさを相当小さくし、工作精度を相当上げる必要があることがアドバイザー委員の先生のご指摘および計算の結果わかったことが挙げられる。この問題への対処については種々の手法を検討している。

図 25 に製作した回転楕円体メッシュレンズの写真を示したが、この場合はステンレスのワイヤーを編んだ金網を成形して作成している。透過率の良いメッシュがきれいにできていることを示している。さらに精度の良い物を作成するために、図 27 のような平面の板にフォトリソで小さな穴を開けたものをプレスするテストを開始している。

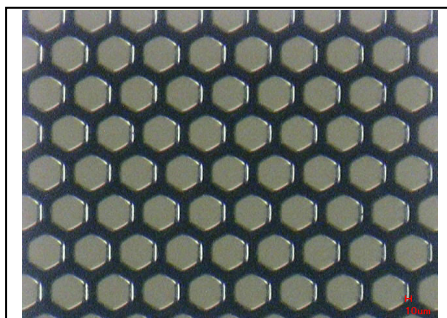


図 27 平面メッシュ (60 μ m 穴)

また、別の手法として、鍍金により薄膜を成型し、それにレーザーで穴を開けていく方法を試みた。図 28 は鍍金して作成した薄膜を示す。鍍金薄膜の試作は順調で、厚さ15ミクロンで精度の良い曲面が得られている。

図 29 は、図 28 の薄膜にレーザーで穴を開けた結果を示している。穴は図 29 の右のように 20 μ m の穴が 50 ミクロン間隔で開いている。時間と予算をかければこの手法である程度解決できそうなことがわかった。ただし、図 29 で穴を開けた薄膜は、下地と溶接されてしまって、はがすことができず、製作には成功していない。現在、溶接されない下地を準備している。



図 28 鍍金して作成した薄膜

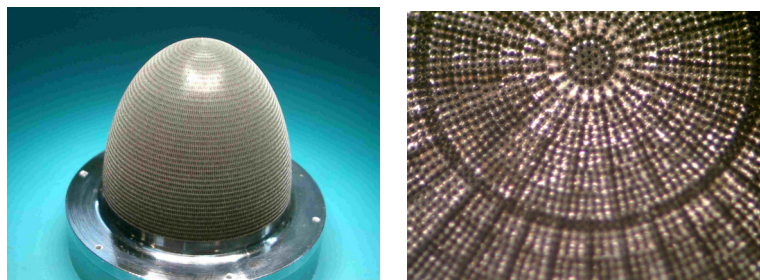
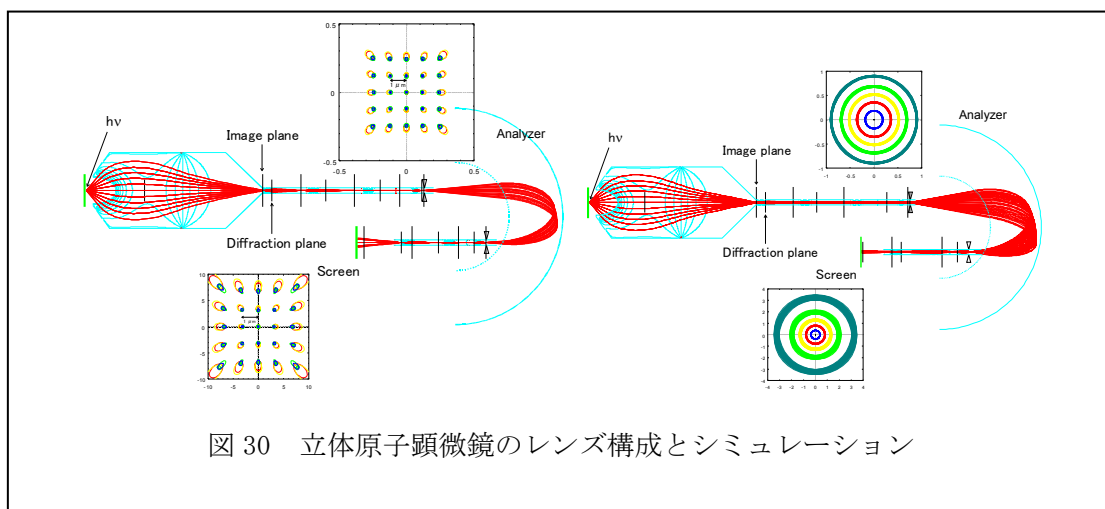


図 29 レーザー加工したメッシュとその先端部分の拡大像

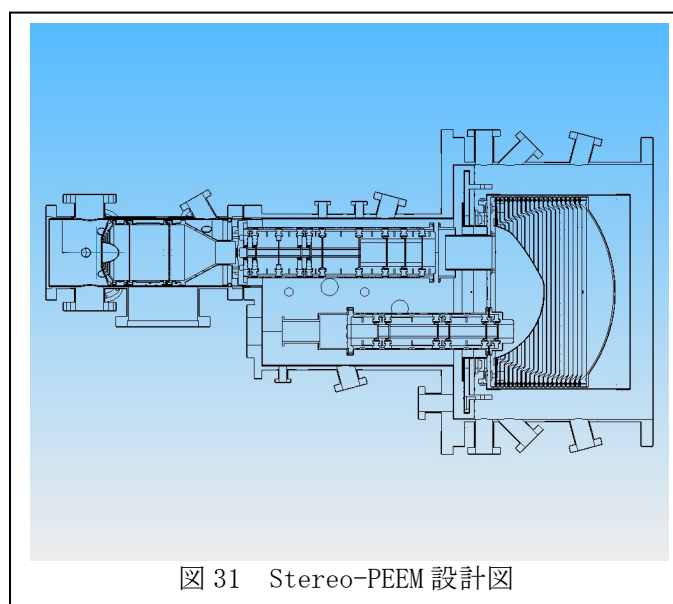
④ 「立体原子顕微鏡」の設計と製作

上記にて開発した「広角対物レンズ」を基にして、「レンズシステム」と全体を組み合わせた[顕微鏡機能]を持つシステムを設計・製作した。

試料に面するところに、回転楕円体に近い形状のメッシュを用いた広角対物レンズを置き、 $\pm 50^\circ$ の広い範囲の電子をほぼ一点に収束し、レンズシステムとエネルギーフィルターを通してスクリーンに像を映す。この構成におけるシミュレーション結果を図 30 に示す。このレンズシステムは、各レンズの電位のかけ方を変えることで、通常の顕微鏡像(図 30 左)と、原子配列の立体写真の像(または放出角度分布、図 30 右)をとりわけることができる。この方法によって、個々のナノ粒子の構造と電子状態の解析が可能になる。



このシミュレーション結果を基に、全体の顕微鏡システムを設計した設計図を図 31 に示す。部品点数が多く、3 次元 CAD を使って設計したために、設計に時間がかかってしまい、予定よりも半年遅れている。現在、全ての部品の製作が終わり、図 32 のように組み立てている。11月までに基礎的なデータを取得できるように進めている。



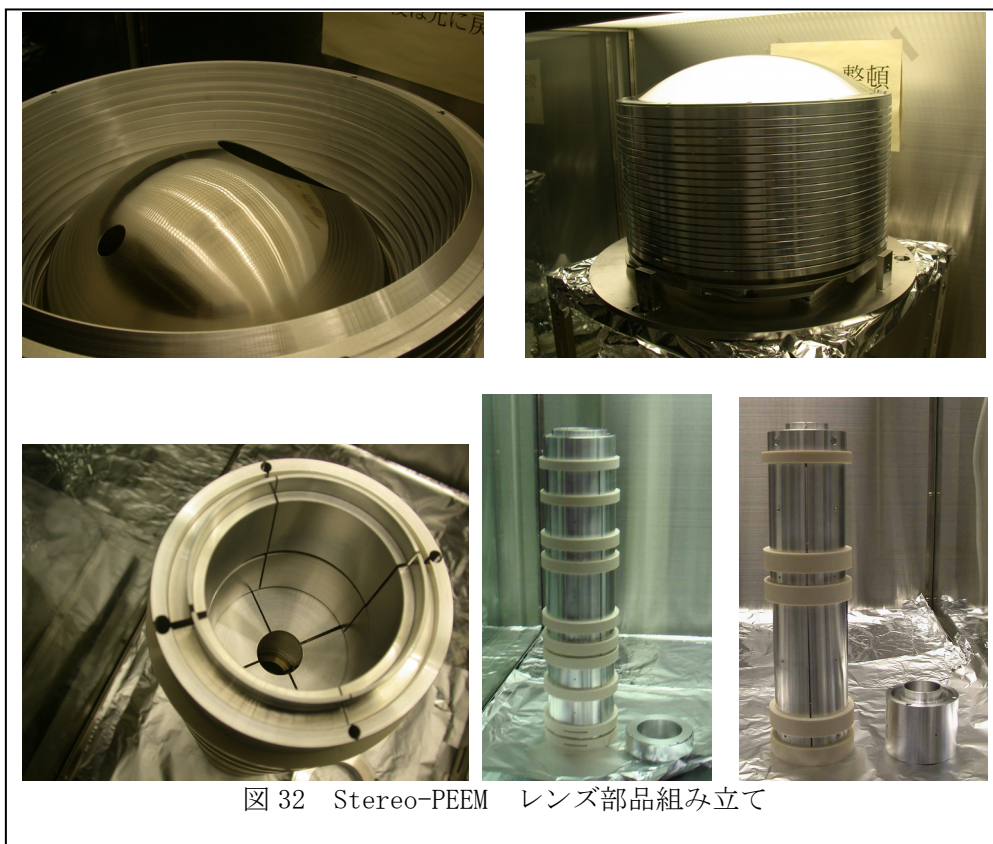


図 32 Stereo-PEEM レンズ部品組み立て

図 33 には、これらのレンズを格納する真空槽の写真を示す。また、図 34 にはコントローラの写真を示す。

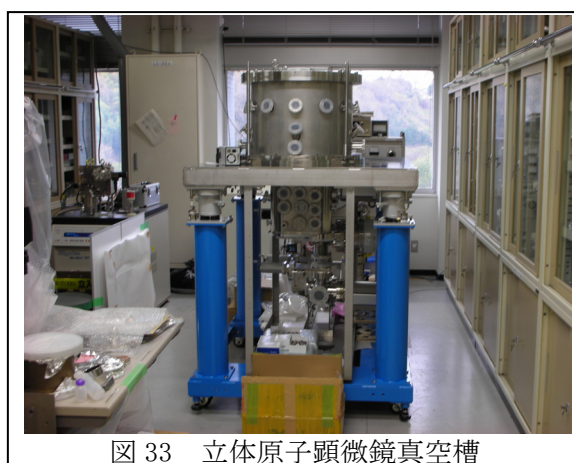


図 33 立体原子顕微鏡真空槽

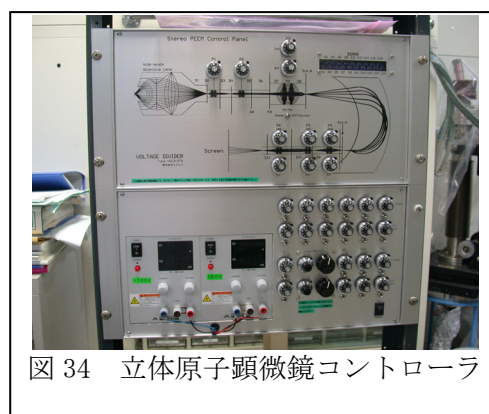


図 34 立体原子顕微鏡コントローラ

[顕微鏡機能の開発]の類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

同様な多機能の顕微鏡として、Focus 社などの光電子顕微鏡 PEEM、さらに低速電子回折機能がついた Elmitec 社の LEEM-PEEM がある。従来の PEEM では、20eV 程度のエネルギーの低い光電子については広い角度範囲にわたって像を出すことができるが、

立体原子顕微鏡や光電子回折に適当な数百 eV 以上の運動エネルギーにおいては 20° 程度しか表示できず、パターンの測定はできない。従って、原子配列構造の知見は得られないものである。LEEM-PEEM では、LEED パターンが測定できるので、逆格子空間での構造の情報は得られるが、本研究のような直接的な原子配列構造解析はできない。従って、本研究で開発しているものは、従来機の性能を大きく超える新しい分析器となる。

また、今回発明した広い取り込み角の対物レンズは、従来機の性能を大きく凌駕している。すなわち、従前の特許では球面メッシュをもちいて $\pm 30^\circ$ の範囲の電子を 1mm のスポットに収束していたが、今回の特殊形状のメッシュでは $\pm 50^\circ$ という広い角度範囲の電子を数ミクロンに収束することができる。このレンズを通常の分析器の入り口に付けることにより、大きな角度範囲の電子を一度に取り込む分析器を実現することができる。現在広く使われている球面分析器の取り込み角を 100 倍以上向上することができるので、明るさが 100 倍になるのみならず、取り込み角度が 90° 以上になるために、表面に垂直から表面すれすれまで一度に測定でき、その解析によって不純物の深さ分布など、深さ依存性のデータを一度に取れるユニークな分析器となる。

(2)研究成果の今後期待される効果

上記のように、広い取り込み角の対物レンズの性能テストも順調に終わっているが、試作システムからのデータ取得に向けて努力している段階である。今後は、まず最初のデータを取得し、グリッドの製作精度の向上やレンズの性能評価を行い、改良を繰り返して像の質を上げていく。性能が向上すれば、試料の拡大像とエネルギーバンド構造、原子配列構造が立体的に測定できる新しい分析器として多くの分野で幅広く活躍するものと期待されるので、プロジェクト終了後も続けて行きたい。

3. 3. 1 回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器の検討(奈良先端科学技術大学院大学 大門研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

3で開発した「広角対物レンズ」を単独で使い、アパチャーと簡単なレンズを付けるだけで新しい二次元表示型分析器として活用できると思われるため、特許を申請(国内特許5)し、性能を評価した。図 35 に回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器の構成図を示す。広角対物レンズの出口のところに、エネルギー選別アパチャー(EA)を置き、数個の投影レンズをとおしてスクリーンに像を映し出す。レンズの電圧の切り替えて、スクリーンには試料のイメージと電子の放出角度分布が映しだされる。

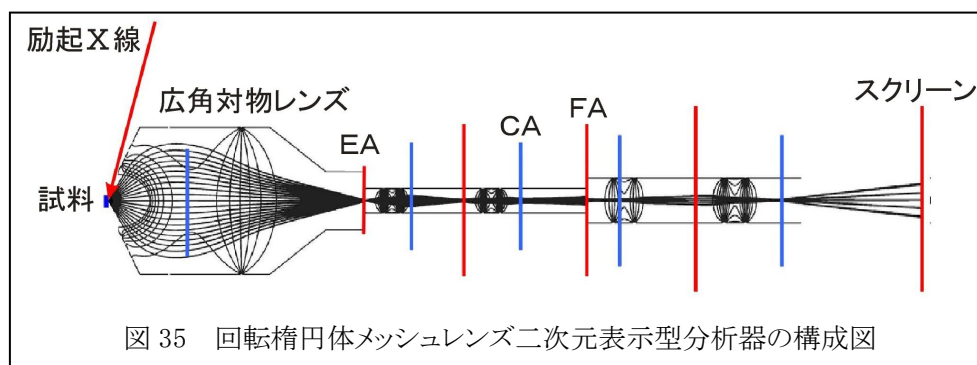


図 35 回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器の構成図

① エネルギー分解能

エネルギーがパスエネルギーの場合と、それより2%高い場合と低い場合の電子の軌跡を図 36 に示す。エネルギーがパスエネルギーの時には小さく収束しているのでアパチャーを通り抜けられるが、エネルギーが異なる場合には収束しないので通り抜けられないことがわかる。

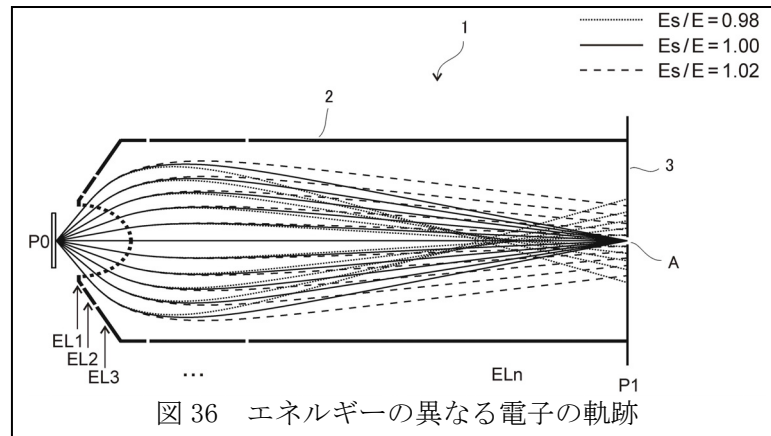


図 36 エネルギーの異なる電子の軌跡

アパチャーサイズを変えた時の、エネルギーに対する透過率のグラフを図 37 に、その時のエネルギー分解能のグラフを図 38 に示す。1mmのアパチャーの時に、1%以下の分解能が得られることが判る。このアパチャーの大きさは、試料上で $200\mu\text{m}$ に相当するので、 $200\mu\text{m}$ 以下の大きさの観察をする場合には制限視野絞りなどの働きと独立に考えることができる。

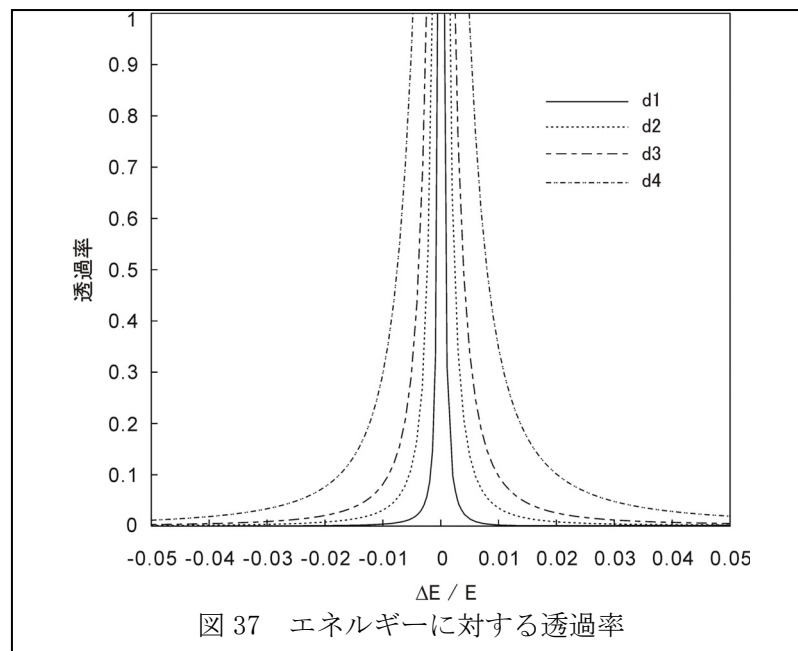
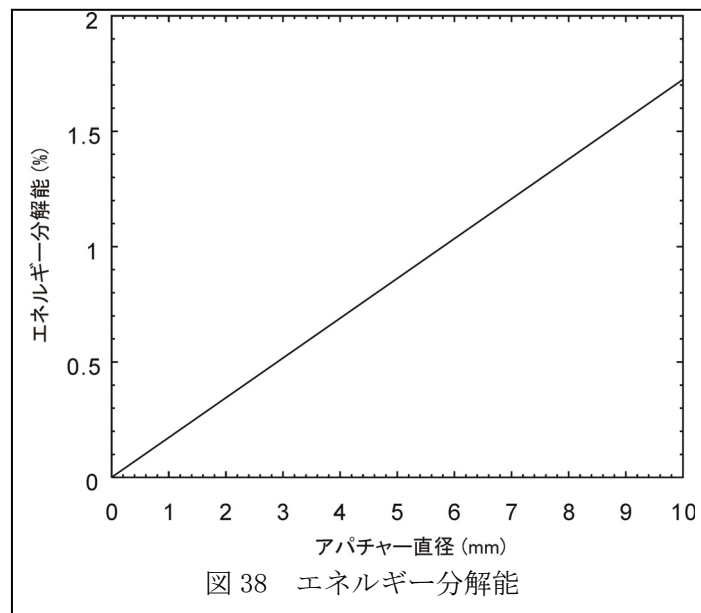


図 37 エネルギーに対する透過率



実際にエネルギー分解能のテストをした結果を図 39 に示す。図 39 は、1000eV の電子を試料に当てて、散乱してきた電子を1mmのアパチャーで分析したものである。

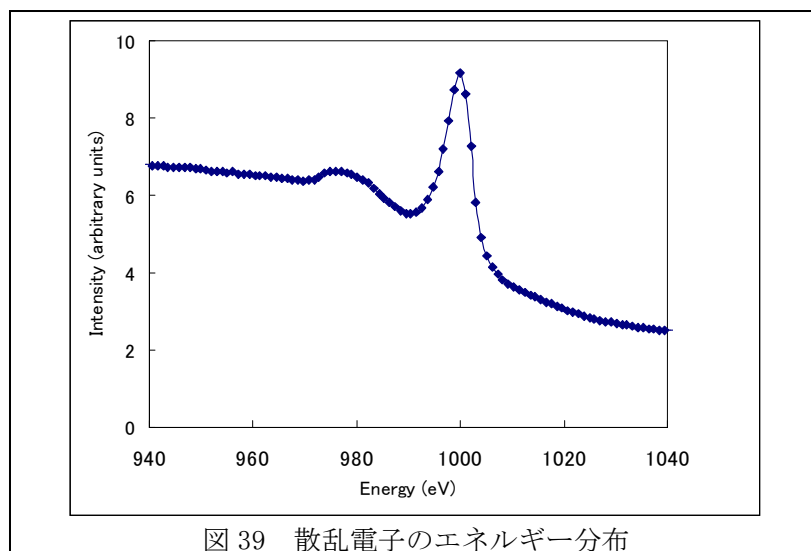


図 40 には、実測したエネルギー分解能と、シミュレーションで得た分解能を示す。実測の分解能は、透過率から考えた単純な図 38 の分解能よりも良くなっているが、試料の大きさを考慮したシミュレーションでは良く再現されている。図 24 から、1mmのアパチャーのときに、約 0.5%の分解能で分析できていることがわかる。

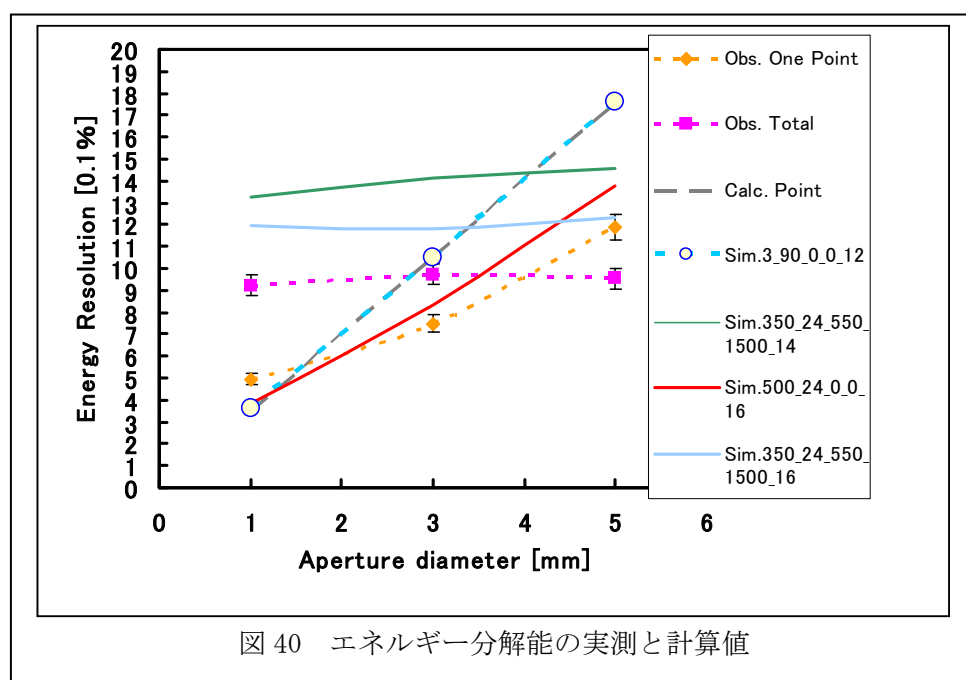


図 40 エネルギー分解能の実測と計算値

② 角度分解能

本分析器の角度分解能を評価するために、MgO 結晶からの LEED (低速電子線回折) パターンの測定結果を図 41 に示す。角度分解能 1° 以下程度で角度分布が得られていることがわかる。

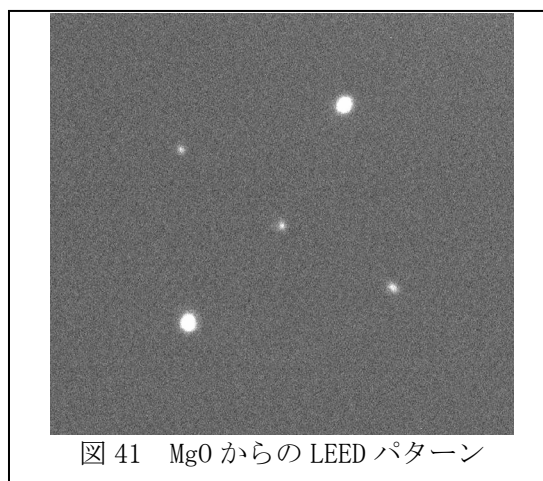


図 41 MgO からの LEED パターン

試料の拡大像が取れることは前節で述べたので、さらにエネルギー分解と角度分解ができる簡単な「光電子顕微鏡機能付き二次元表示型分析器」として働くことが証明できた。顕微鏡機能は、現在は 5 倍、分解能 20 ミクロン程度であるが、この性能はメッシュの改良とレンズの追加により向上することができる。エネルギー分解能は 0.5%、角度分布は $\pm 60^\circ$ まで、角度分解能 1° 程度で測定することができる。

[回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器]の類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

アドバイザー委員にご指摘いただいた Steib の分析器は、角度分布は表示できるが、エネルギー分析機能としてハイパスフィルターしか付いていないため、エネルギー分析

器としては使用できないものである。すなわち、LEED (低速電子回折) の球面スクリーンと本質的に同じデータが得られるものであり、場合によっては使い道があるが、本研究の二次元表示型分析器とは比較にならないものである。エネルギー分析の可能な二次元表示型分析器には、Eastmann の回転楕円鏡型と我々の球面鏡型があるが、どちらも放出角度分布は測定できるが、試料の拡大像は取れないものである。今回開発した回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器は、エネルギー分解能はあまり高くないが、試料の拡大像が測定でき、見たいところを絞りで選べるという新しい大きな利点がある。試料もアース電位で良く、試料周りも広いので、応用に便利である。

(2)研究成果の今後期待される効果

構成が簡単で製作が容易な光電子顕微鏡機能付き二次元表示型エネルギー分析器が開発できた。特に、従来のものと異なり、試料周りの空間が大きく、試料に電圧がかからない構成のため、大きなウエハーも測定でき、他の分析手段とも組み合わせが容易であるので、 $10\ \mu\text{m}$ 程度の領域の物質の表面観察、電子状態観察、原子構造観察に広く用いられるようになると期待される。

3. 3. 2 角運動量 X 線の創生 (奈良先端科学技術大学院大学 大門研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

これまで、立体原子写真を撮影するには円偏光が必要であったため、SPring-8 などの放射光施設を利用してきた。実験室でも測定できるようにするため、特殊な回折格子ホログラムを考案して特許申請 (国内特許4) し、作成を行った。

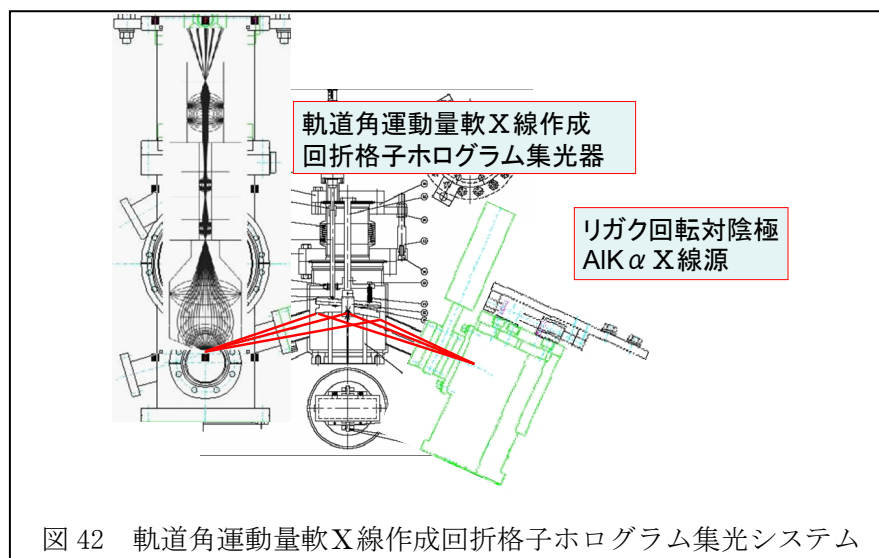
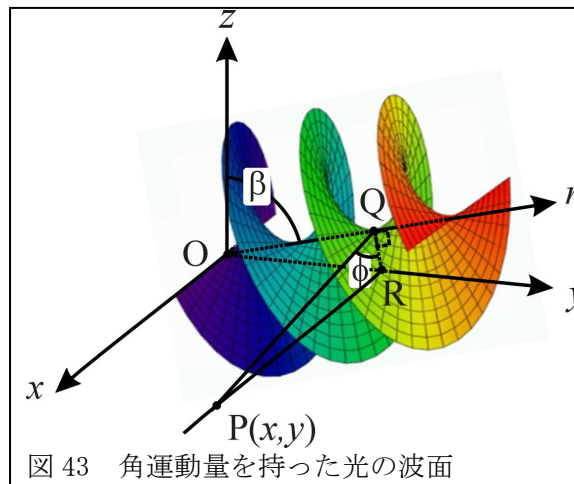
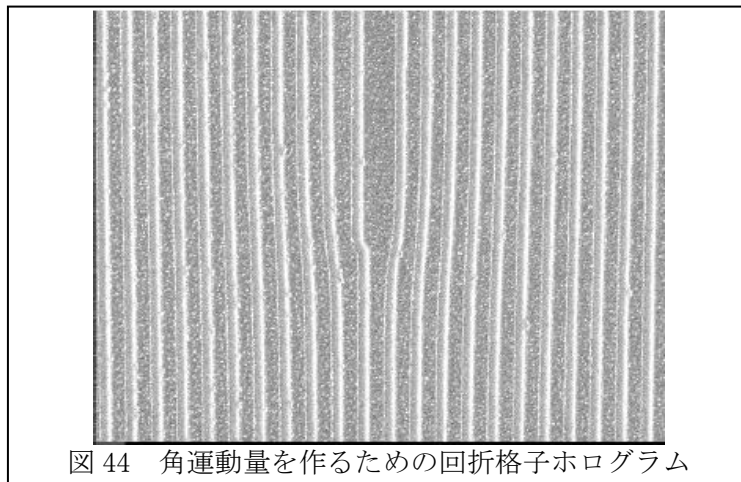


図 42 に、全体の構想図を示す。リガクの回転対陰極 X 線源から出た X 線を、特殊な回折格子ホログラムを表面に描いたトロイダル鏡で反射して、試料上に角運動量を持った X 線を集光する。

ここで、角運動量を持った光というのは、図 43 に示すような、波面が螺旋階段のようになっているものである。



また、特殊な回折格子ホログラムとは、図 44 のように、刻線が平行ではなくて、図のように上下で本数が違うものである。この曲線は、図 43 の螺旋面を延長して平面と交わったところをプロットしたのになっている。



この回折格子ホログラムで通常の X 線を回折させると、0 次の光は通常の光であるが、+1 次と-1 次で回転する方向が逆になっている。従って、この回折格子ホログラムを微量回転するだけで、右回りと左回りの角運動量光を得ることができる。

[角運動量 X 線の創生]の類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

角運動量光は、可視光での研究例は多く、レーザーを用いて行われている。可視光では回折格子の刻線間隔と波長が同程度であるため、ホログラムの概念がそのまま適用できる。軟 X 線領域では、ドイツの放射光施設 BESSY で透過型の回折格子で実験が行われた例が一つだけ存在する。しかしながら、透過型では右回りと左回りの切り替えが難しく、収束も難しいという欠点がある。本研究では、トロイダル反射鏡の上に回折格子を切り、試料上への集光と回転方向の切り替えを簡単に実現している点が独創的であり、新しい。また、刻線間隔が波長の 1000 倍にもなっている時のホログラムの関係を導いており、理論的にも新しい。

(2)研究成果の今後期待される効果

これまで、立体原子写真の撮影や磁性の研究には円偏光軟X線が必要であったため、SPring-8などの放射光施設の利用が不可欠であった。しかしながら本開発によって角運動量を持つ軟X線が実験室でも利用できるようになると、これらの実験がどこでもできるようになるため、影響は計り知れない。物理実験以外にも、生物や宇宙への利用も取りざたされている。

成果の科学技術への貢献のまとめ

・基礎科学への貢献

「原子配列立体視法の確立」

円偏光励起による光電子の散乱現象を詳細に解明できたことにより、立体視以外の光電子回折の研究にも指針を与えている。

・計測技術への貢献

「小型で高性能の二次元表示型分析器の完成」

この分析器は、原子配列立体視以外にも「電子状態の3次元マッピング」、「原子軌道解析」、「光電子回折・ホログラフィー」など多くの応用に効率よく用いられるものであり、汎用性が高い。

「立体原子顕微鏡の開発」

分解能はあまり高くないが、見たいところの原子構造を立体的に観測するという初めての顕微鏡が実現された。分解能の高い顕微鏡の開発には数十年が必要であるため、本研究終了時には、システムの基礎的な動作の確認までしかできないが、分解能の高い測定の実現に向けて、今後も努力を続ける。

「広角対物レンズの開発」

顕微鏡機能システムの初段の対物レンズとして、広角対物レンズを発明した。この対物レンズは、通常の実験室に組み込むことにより、分析器の取り込み角が100倍程度向上されるため、既に他のCRESTに採用されており、外国企業と特許実施準備契約を結んでいるなど、汎用性が高い。

「回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器」

上記の「広角対物レンズ」は、簡単な絞りとレンズをつけるだけで、新しいタイプの「二次元表示型分析器」として使用できることがわかった。エネルギー分解能が中心で低いという欠点があるが、従来の球面鏡型二次元表示型分析器よりもはるかに簡単な構成と使いやすさを持っているため、応用範囲も広いと思われる。

「角運動量X線の創製」

これまで、角運動量を持つ軟X線はSPring-8などの放射光施設でしか発生できなかったため、実験室で原子配列立体写真を撮影することはできなかった。まだ未完成であるが、完成すると立体写真のみならず磁性の研究などにも応用できるため、応用範囲が広い。

・一般社会への貢献

「国立科学博物館でのデモ展示」

国立科学博物館においてデモ展示を行い、本研究成果である多くの立体写真を延べ25000人以上の一般の人に楽しんでいただいた。物質が原子が並んでできていることを実際に目で見られたということで、多くの人に感激していただいた。親子連れの小学生が多く、科学の好きな青少年を増やす事に貢献したと思われる。

4 研究参加者

①大門研究グループ(検証実験、小型分析器の設計・製作、顕微鏡機能の開発)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
大門 寛	奈良先端科学 技術大学院大 学	教授	グループリーダー	平成 14 年 11 月～ 平成 19 年 10 月
服部 賢	同上	准教授	検証実験、小型分析器 の設計・製作	平成 14 年 11 月～ 平成 19 年 10 月
松井 文彦	同上	助教	検証実験、小型分析器 の設計・製作	平成 14 年 11 月～ 平成 19 年 10 月
松田博之	同上	CREST 研 究員	小型分析器の設計・製 作、顕微鏡機能の開発	平成 14 年 12 月～ 平成 19 年 3 月
Janathul Nayeem	同上	CREST 研 究員	検証実験	平成 15 年 8 月～ 平成 17 年 3 月
Laszlo Toth	同上	CREST 研 究員	小型分析器の設計・製 作、顕微鏡機能の開発	平成 16 年 5 月～ 平成 19 年 10 月
武田 さくら	同上	助教	検証実験	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 10 月
Zsuzsa Janosfalvi	同上	留学生	検証実験	平成 18 年 10 月～ 平成 19 年 10 月

①立命館大門研究グループ(小型分析器の評価)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
大門 寛	立 命 館 大 学 COE 推進機構	特別招聘 教授	グループリーダー	平成 14 年 11 月～ 平成 19 年 10 月
松井 文彦	奈良先端科学 技術大学院大 学	助教	小型分析器の評価	平成 14 年 11 月～ 平成 19 年 10 月
高橋 伸明	同上	D3	小型分析器の評価	平成 14 年 11 月～ 平成 19 年 10 月

5 招聘した研究者等

氏 名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 0 件、国際誌 39 件)

- (1) Application of atomic stereomicroscope to surface science,
T. Nakatani, T. Matsushita, Y. Miyatake, T. Nohno, A. Kobayashi, K. Fukumoto,
S. Okamoto, A. Nakamoto, F. Matsui, K. Hattori, M. Kotsugi, Y. Saitoh, S. Suga,
H. Daimon,
[Progress in Surf. Sci., 71, 217-239 \(2003\).](#)
- (2) Stereoscopic Photographs of Atomic Arrangements in Single Crystal MoS₂,
F. Z. Guo, F. Matsui, M. Fujikado, T. Matsushita, H. Daimon,
[Applied Surf. Sci., 237, 616-620 \(2004\).](#)
- (3) Visualization of graphite atomic arrangement by stereo atomscope,
F. Matsui, H. Daimon, F. Z. Guo, T. Matsushita,
Appl. Phys. Lett., 85, (17), 3737-3739 (2004).
- (4) Atomic structure of Fe thin-films on Cu(001) studied with Stereoscopic
photography,
A. N. Hattori, M. Fujikado, T. Uchida, S. Okamoto, K. Fukumoto, F. Z. Guo,
F. Matsui, K. Nakatani, T. Matsushita, K. Hattori, H. Daimon,
[Applied Surf. Sci., 237, 311-315 \(2004\).](#)
- (5) Si(111)2×2-Fe surface reacted with nitric oxide,
K. Hattori, T. Nishimura, K. Kataoka, Y. Shimamoto, H. Daimon,
Thin Solid Films, 464-465, 5-9 (2004).
- (6) Atomic Stereo-photographs of Cu Single Crystal,
F. Guo, F. Matsui, T. Matsushita, H. Daimon,
Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 144-147, 1067-1070 (2004).
- (7) Magnetism-induced symmetry breaking in photoelectron diffraction patterns,
A. Chasse, W. Kuch, M. Kosugi, X. Gao, F. Offi, S. Imada, S. Suga, H. Daimon, J. Kirschner,
Phys. Rev. B. 71, 01444-1-10, (2005).
- (8) Visualization of in-plane dispersion of hole subbands by photoelectron spectroscopy,
S. Nishino Takeda, N. Higashi, H. Daimon,
Physical Review Letters, 94, 037401-1-4, (2005).
- (9) Anisotropy of surface vibration measured by temperature dependence of RHEED spot
intensity,
M. Hashimoto, S. Takeda, H. Daimon,
Phys. Rev. B. 71, 11314-1-4, (2005).
- (10) Approach for simultaneous measurement of two-dimensional angular distribution of
charged particles: Spherical aberration correction using an ellipsoidal mesh,
H. Matsuda, H. Daimon, M. Kato, M. Kudo,
Physical Review E. 71, 066503-1-8, (2005)
Virtual Journal of Biological Physics Research, July (2005)
- (11) Scanning Tunneling Microscopy Observation of Germapericycline on a Graphite Surface,
J. Nayeem, S. Nishino Takeda, F. Matsui, K. Hattori, H. Daimon,
Journal of the vacuum Society of Japan, 48, 304-308, (2005).
- (12) Atomic-orbital analysis of the Cu Fermi surface by two-dimensional photoelectron
spectroscopy,

- F.Matsui, H.Miyata, O.Rader, Y.Hamada, Y.Nakamura, K.Nakanishi, K.Ogawa, H.Namba, H.Daimon,
Physical Review B, 72, 195417-1-5, (2005).
- (13) Structural analysis of oxygen segregated Nb(110) surface by photoelectron diffraction
F. Matsui, M. Fujikado, H. Daimon,
Czech. J. Phys. 56, (1), 61-68, January (2006).
- (14) Atomic stereophotograph of intercalation compound $\text{Fe}_{1/3}\text{NbS}_2$,
F. Z. Guo, T. Matsushita, K. Kobayashi, F. Matsui, Y. Kato, H.Daimon, M.Koyano,
Y.Yamamura, T. Tsuji, Y. Saitoh,
Journal of applied physics, 99, 024907, January (2006).
- (15) Structure analysis of thin iron silicide film from phi-scan RHEED Patterson function",
O. Romanyuk, K. Kataoka, F. Matsui, K. Hattori, H. Daimon,
Czech. J. Phys. 56, (3), 267-276, March (2006).
- (16) Approach for simultaneous measurement of two-dimensional angular distribution of charged particles. II . Deceleration and focusing of wide-angle beams using a curved mesh lens",
H. Matsuda, H. Daimon,
Phys. Rev. E 74, 036501, September (2006)
- (17) Atomic Structure Analysis of Ultra Thin Fe Silicide Films by Stereo Atomscope,
K.Kataoka, F.Matsui, Y.Kato, F.Z.Guo, T.Matsushita, K.Hattori, H.Daimon,
Surface Review and Letters, April (2006).
- (18) Adsorption and Reaction of Nitric Oxide on Si(111)-Au Surfaces,
T. Nishimura, K. Hattori , K. Kataoka, Y. Shimamoto, H. Daimon,
Surf. Rev. Lett. 13, 191-196, April & June (2006).
- (19) Chemisorption of L-cysteine on Au(111)/Si(111) and Si(111) sqrt3-sqrt3 - Au Surfaces,
M. Honda, F. Matsui, H. Daimon,
Surf. Rev. Lett, 13, 197-200, April (2006).
- (20) Iron silicides grown by solid phase epitaxy on a Si(111) surface: Schematic phase diagram,
K. Kataoka, K. Hattori, Y. Miyatake, H. Daimon
Phys. Rev. B 74, 155406, October (2006).
- (21) Photoelectron angular distribution of 2H-NbSe₂ Studied by Display-Type Spherical Mirror Analyzer and Circularly Polarized Light,
F.Z.Guo, T.Matsushita, F.Matui, Y.Kato, H. Daimon,
Surface and Interface Analysis, 38, (12-13), 1604-1606, December (2006).
- (22) Stereophotographs of diamond and graphite,
Y.Kato, F.Matsui, T.Shimizu, T.Matsushita, F.Z.Guo, T.Tsuno, H.Daimon,
Science and Technology of Advanced Materials (STAM), 7, S45-S48, August (2006).
- (23) Two-dimensional angle-resolved photoelectron spectroscopy using display analyzer
---Atomic orbital analysis and characterization of valence band,
H. Daimon, F. Matsui,
Progress in Surface Science, 81, (8-9), 367-386, September (2006).
- (24) Construction of Two-dimensional Photoelectron Spectroscopy Beamline at Rits SR Center for Investigation of Surface Electronic Structure, Y. Hamada, F. Matsui, Y. Nozawa, K. Nakanishi, M. Nampei, K. Ogawa, S. Shigenai, N. Takahashi, H. Daimon, H.Namba, AIP Conf. Proc., 879 (2006) 547
- (25) New Display-type analyzer for Fermi surface mapping and atomic orbital analysis at Ritsumeikan SR Center, N. Takahashi, F. Matsui, H. Matsuda, S. Shigenai, Y. Hiramata, Y. Hamada, K. Nakanishi, H. Namba, H. Daimon,
AIP Conf. Proc., 879 (2006) 1180
- (26) A Real-Time Imaging System for Stereo Atomic Microscopy at SPring-8's BL25SU,
T. Matsushita, F. Z. Guo, T. Muro, F. Matsui, H. Daimon,
AIP Conf. Proc., 879, 1164-1167, (2006).
- (27) Site-Specific Orbital Angular Momentum Analysis of Graphite Valence Electron Using Photoelectron Forward Focusing Peaks,
F. Matsui, T. Matsushita, Y. Kato, F.Z. Guo, H. Daimon,

- Journal of the Physical Society of Japan(JPSJ), 76, 013705-1-4, January (2007).
- (28)Three-dimentional atomic-arrangement reconstruction from an Auger-electron hologram,
T. Matsushita, F. Z. Guo, F. Matsui, Y. Kato, H. Daimon,
Phys. Rev. B 75, 085419-1-5, February (2007).
 - (29)Approach for simultaneous measurement of two-dimensional angular distribution of
charged particles. III. Fine focusing of wide-angle beams in multiple lens systems,
H. Matsuda, H. Daimon, L. Toth, F. Matsui,
Phys. Rev. E 75, 046402, April (2007).
 - (30)Circularly polarized X-ray photoelectron diffraction - Stereo photograph of atomic
arrangement,
H. Daimon, F. Matsui, F. Z. Guo, T. Matsushita,
J. Electron Spectrosc. Rel. Phenom., 156-158, 1-9, May (2007).
 - (31) β -FeSi₂ thin film grown on a Si(111) surface with ferromagnetic interface,
A. N. Hattori, K. Hattori, H. Daimon,
Journal of Physics: Conference Series 61, 404-408, (2007).
 - (32)Stereo Photography of atomic arrangement and atomic-orbital analysis by two-dimentional
photoelectron spectroscopy,
F. Matsui, T. Matsushita, F. Z. Guo, H. Daimon,
Surf. Rev. Lett. 14, 3, 1-7, July(2007).
 - (33)Fermi energy band dispersion and orbital symmetry of Bi₂Sr₂CaCu₂O_y studied by
non-polarized-light two-dimensional photoelectron spectroscopy
C. Sakai, F. Matsui, N. Takahashi, S. N. Takeda, H. Daimon,
Physica C 467 August 43 (2007).
 - (34)Stereo-PEEM for three-dimensional atomic and electronic structures of microscopic
materials
H. Daimon, H. Matsuda, L. Toth, F. Matsui,
Surface Science, 601, 20, 4748-4758, October (2007).
 - (35)Variety of iron silicides grown on Si(001) surfaces by solid phase epitaxy: Schematic phase
diagram,
H. Nakano, K. Maetani, K. Hattori, H. Daimon
Surface Science, 601, 22, 5088-5092, November (2007).
 - (36)Total analysis of surface structure and properties by UHV transfer system,
H. Yamatani, K. Hattori, T. Matsuta, T. Ito, T. Nohno, M. Hori, Y. Miyatake, S. Konno,
T. Tanaka, Y. Hamada, H. Katagiri, M. Hibi, T. Miyai, M. Hashimoto, K. Kataoka,
T. Tatsuta, A. N. Hattori, N. Higashi, M. Honda, N. Masunaga, H. Mino, S. Yasui, J. Nayeem,
T. Shimizu, N. Takahashi, Y. Kato, C. Sakai, M. Yoshimura, S. N. Takeda, F. Matsui, H.
Daimon
Surface Science, 601, 22, 5284-5288, November (2007).
 - (37)Dopant-site effect in superconducting diamond (111) studied by atomic stereo-photography,
Y. Kato, F. Matsui, T. Shimizu, T. Matsushita, F. Z. Guo, T. Tsuno, H. Daimon,
Appl. Phys. Lett. 91, 251914 (2007).
 - (38)Depth resolved electronic structure of cuprate superconductor analyzed by two-dimensional
X-ray Auger resonance emission spectroscopy, Chikako Sakai, Fumihiko Matsui, Tomohiro
Matsushita, Yukako Kato, Takashi Narikawa, and Hiroshi Daimon, e-Journal of Surface
Science and Nanotechnology, 5 (2007) 143.
 - (39)Circular dichroism of forward focusing peaks in 2π steradian Si 2p photoelectron pattern,
K.Inaji, F. Matsui, Y. Kato, C. Sakai, T. Narikawa, T. Matsushita, F. Z. Guo, H. Daimon,
Appl. Surf. Sci.,(2008) accepted.

(2)その他の著作物（総説、書籍など）

著書

1. Orbital Angular Momentum of Photoelectrons Excited by Circularly-Polarized Light-Rotation of Forward Scattering Peaks in Photoelectron Diffraction Pattern
H. Daimon
Developments in Quantum Physics, Chap.10, pp.261-278
Frank Columbus and Volodymyr Krasnoholovets (Editors)
Nova Science Publishers, Inc. New York. 2004.
2. 光科学研究の最前線
「光電子ホログラフィー・イメージング」
「光科学研究の最前線」編集委員会(2005)
大門分担執筆 II 2-4 108-109

総説

1. 円偏光二次元光電子分光による原子配列立体写真撮影
大門寛
日本放射光学会誌 VOL.16,NO.5,273-277,Sept.2003
2. ナノの世界の究明に不可欠な世界初の立体原子顕微鏡
大門寛・村田泰隆 対談 (百語往来)
Metamorphosis No.9, 4-6, December 2003
3. Fe/Cu(001)表面の原子配列立体写真
服部梓、藤門倫明、升永典史、郭方准、松下智裕、松井文彦、大門寛
Nanotechnology in Spring-8
文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクト Spring-8 研究成果報告書
Vol.2,140-142,2003 年 A
4. 立体原子写真
松井文彦、郭方准、大門寛
応用物理(2004)
5. 光電子ホログラフィー・イメージング
大門寛
光科学研究の展開
6. 円偏光二次元光電子分光による原子構造の立体写真撮影
松井文彦、加藤有香子、郭方准、松下智裕、大門寛
表面科学 第 26 巻第 12 号(2005)
7. 研究集積を活用して競争力維持を
大門寛
関西電力 Community Information No.204(2005)

8. 立体原子顕微鏡が拓く3Dの世界
松井文彦・大門寛
化学と工業 Vol.58-9(2005)
9. 巻頭言 Beyond Einstein
大門寛
表面科学 第26巻第12号(2005)
10. 表面超構造を用いた半導体量子井戸作成と井戸中の電子状態の測定
武田さくら、東直人、大門寛
機能材料 第26巻第3号(2006)
11. 光電子ホログラフィーと立体原子/写真法による原子配列の観測
松下智裕、郭方准、安居院あかね、松井文彦、大門 寛
まてりあ 第45巻第11号(2006)

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

① 招待講演 (国内会議 4件、国際会議 8件)

- (1) 大門寛、松田博之、L.Toth、清水達也、嘉藤誠、工藤政都(招待講演)
原子配列光電子顕微鏡 Stereo-PEEM の開発
日本顕微鏡学会第61回学術講演会
(2005年6月1-3日、つくば国際会議場)
- (2) 武田さくら(招待講演)
名古屋大学21世紀COE第2回物理化学若手研究会「ナノサイエンスの最前線」
(2005年11月11日-12日、名古屋大学)
- (3) 大門 寛(招待講演)
立体原子顕微鏡による3次元原子配列イメージング
表面科学会関西支部講演大会
(2005年10月28日、大阪大学)
- (4) F. Matsui, Y. Kato, T. Shimizu, F. Z. Guo, T. Matsushita, T. Tsuno, H. Daimon
3Graphite and Diamond viewed by Stereo Atomscope
IWSDRM2005
(December. 7-9, 2005, Tsukuba, Japan)
- (5) Y. Kato, T. Shimizu, F. Matsui, F. Z. Guo, T. Matsusita, T. Tsuno, S. Katsumoto, H. Daimon
Local boron site of B-Diamond determined by photoelectron intensity angular distribution

IWSDRM2005

(December. 7-9, 2005, Tsukuba, Japan)

(6) 大門寛(招待講演)

二次元角度分解光電子分光による表面研究

第 215 回X線分析研究懇談会

(2005 年 12 月 22 日、豊田工業大学)

(7) H.Daimon (招待講演)

Recent Advance of Stereo Photograph of Atomic Arrangement

Symposium on Surface Physics 2006

(January 11-17, 2006, Shizukuishi, Japan)

(8) H. Daimon (基調講演)

Circularly Polarized X-Ray Photoelectron Diffraction – Stereo Photograph of Atomic Arrangement

ICES10

(Aug. 28 – Sept. 1, 2006, Foz do Iguacu, Brazil)

(9) H. Daimon, T. Matsuta, S. N. Takeda, K. Hattori, F. Matsui(招待講演)

Total analysis of surface structure and properties by UHV transfer system

ISSP10

(Oct. 9 – 13, 2006, Kashiwa Campus, the University of Tokyo, Japan)

(10) Daimon Hiroshi (基調講演)

Stereo photograph of atomic arrangement and atomic orbital analysis by two-dimensional photoelectron spectroscopy.

Asian Pacific Conference on Surface and Engineering

(Dec. 19-21, 2006, Lam Woo International Conference Center, Hong Kong Baptist University)

(11) 大門寛、松田博之、Laszlo Toth、松井文彦

原子立体写真の撮れる新しい光電子顕微鏡 (Stereo-PEEM)

日本顕微鏡学会第 63 回学術講演会

(2007 年 5 月 20-22 日、朱鷺メッセ、新潟)

(12) 武田さくら (若手奨励賞受賞講演)

Si 反転層中の価電子サブバンド分散の実験的決定

日本物理学会第 62 回年次大会

(2007 年 9 月 24 日、北海道大学札幌キャンパス)

② 口頭発表 (国内会議 60 件、国際会議 11 件)

- (1) H.Daimon, H.Matsuda, L.Toth, T.Shimizu, F.Matsui
New Photoemission Electron Microscope for Three-dimensional Atomic and Electronic Structure of Nano-materials
EPS13
(July.11-15, 2005, Bern, Switzerland)
- (2) 松井文彦、出野卓、高橋伸明、武田さくら、大門寛
二次元光電子分光による Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag 表面の表面準位の光電子放出角度分布とバンド構造
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日-22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (3) 服部梓、服部賢、片岡恵太、大門寛
Si(111)表面上の強磁性 Fe シリサイド相
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日-22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (4) 松下智裕、郭方准、安居院あかね、加藤有香子、松井文彦、大門寛
二次元球面鏡電子アナライザーによる Cu オージェ電子ホログラムの観測と原子配列の再構成
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日-22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (5) 橋本美絵、武田さくら、大門寛
Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag 表面の HCT-IET 相転移
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日-22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (6) M. Hashimoto, S. Nishino Takeda and H. Daimon
Anisotropy difference of surface vibration on Si(111) $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ga and -In measured by RHEED-DW method
International Symposium on Surface Science and Nanotechnology
(November 14-17, 2005, Omiya, Saitama, Japan)
- (7) 松井文彦、加藤有香子、清水達也、橋本美絵、松下智裕、郭方准、大門寛
円偏光二次元光電子分光によるグラファイトの光電子構造因子と軌道モーメント解析
第 19 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
(2006 年 1 月 7-9 日、名古屋大学)
- (8) H.Daimon
Recent Advance of Stereo Photograph of Atomic Arrangement

Symposium on Surface Physics 2006
(January 11–17, 2006, Shizukuishi, Japan)

- (9) 郭方准、松井文彦、加藤有香子、松下智裕、小林啓介、大門寛
DIANA と円偏光によるカルコゲナイト層状化合物の原子配列直接観察
日本物理学会第 61 回年次大会
(2006 年 3 月 27–30 日、愛媛大、松山大)
- (10) 松井文彦、松下智裕、郭方准、加藤有香子、橋本美絵、清水達也、稲地加
那子、大門寛
二次元光電子分光による c 軸選択的 XAFS 測定
日本物理学会第 61 回年次大会
(2006 年 3 月 27–30 日、愛媛大、松山大)
- (11) 服部梓、服部賢、児玉謙司、細糸信好、大門寛
 β -FeSi₂ 薄膜の界面の磁性
第 67 回応用物理学会学術講演会
(2006 年 8 月 29 日–9 月 1 日、立命館大学びわこ・くさつキャンパス)
- (12) 松下智裕、郭方准、室隆桂之、松井文彦、大門寛
光電子ホログラムと立体原子写真をリアルタイムで観測するシステムの開発
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23–26 日、千葉大学)
- (13) 武田さくら、西出昌弘、大門寛
Si(111)7×7 及び 5×5-Ge 表面電子状態における電子相関効果
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23–26 日、千葉大学)
- (14) 松井文彦、松下智裕、郭方准、加藤有香子、橋本美絵、稲地加那子、大門
寛
二次元 XFS/XMCD 法による Ni 薄膜の原子層分解電子磁気構造解析
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23–26 日、千葉大学)
- (15) 酒井智香子、松井文彦、高橋伸明、武田さくら、大門寛
2 次元光電子分光による Bi₂Te₂ フェルミ準位近傍の原子軌道解析
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23–26 日、千葉大学)
- (16) 服部梓、服部賢、児玉謙司、細糸信好、大門寛
Si(111)表面上に SPE 成長した β -FeSi₂ 薄膜系の磁性
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23–26 日、千葉大学)

- (17) H. Daimon
Stereo-PEEM for Three-dimensional Atomic and Electronic Structure of Microscopic-materials
LEEM/PEEM-V
(Oct. 15- 19, 2006, Egret Himeji, Hyogo, Japan)
- (18) 服部賢、片岡恵太、服部梓、大門寛
Si(111)表面に SPE 成長した Fe シリサイドの構造と磁性
第 26 回表面科学講演大会
(2006 年 11 月 6-9 日、大阪大学コンベンションセンター)
- (19) 澤田大輔、梅里計匡、服部賢、大門寛
RDE 成長した Si(111)2×2-Fe シリサイドの構造
第 26 回表面科学講演大会
(2006 年 11 月 6-9 日、大阪大学コンベンションセンター)
- (20) 梅里計匡、澤田大輔、服部梓、服部賢、児玉謙司、細糸信義、大門寛
RDE 成長した Si(111) 2×2-Fe シリサイドの磁性
第 26 回表面科学講演大会
(2006 年 11 月 6-9 日、大阪大学コンベンションセンター)
- (21) 服部梓、服部賢、児玉謙司、細糸信義、大門寛
 β -FeS₂/Si(111)の強磁性ヘテロ構造
第 26 回表面科学講演大会
(2006 年 11 月 6-9 日、大阪大学コンベンションセンター)
- (22) 松井文彦、大門寛、加藤有香子、稲地加那子、松下智裕、郭方准、
宮田洋明、Oliver Rader、中西康次、浜田洋司、難波秀利
Atomic layer resolved analysis of Ni thin film by 2D-photoelectron and X-ray
absorption.
関西薄膜・表面物理セミナー
(2006 年 12 月 1-日、立命館びわこ・くさつキャンパス)
- (23) 無偏光二次元光電子分光による Bi₂Sr₂CaCu₂O_y
高温超伝導体のフェルミ準位近傍の混成軌道対称性の決定
酒井智香子、松井文彦、高橋伸明、武田さくら、大門寛
第 25 回吸着分子の分光学的研究セミナー
(2006 年 12 月 8-9、ラフォーレ琵琶湖)
- (24) Si(111)7×7 及び 5×5 表面における電子相関効果
武田さくら、西田昌弘、桑子敦、大門寛
第 25 回吸着分子の分光学的研究セミナー
(2006 年 12 月 8-9、ラフォーレ琵琶湖)

- (25) 松井文彦、松下智裕、加藤有香子、稲地加那子、郭方准、大門寛
円偏光光電子分光・回折によるグラファイトの価電子帯軌道モーメント解析
第 20 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム(JSR07)
(2007 年 1 月 12-14 日、広島国際会議場)
- (26) 服部梓、服部賢、竹松愛美、石井晃、小森文夫、大門寛
「Si(111)1×1,2×2-Fe 表面の界面強磁性」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (27) 武田さくら、東直人、西出昌弘、大門寛、東口光晴、三浦雄一、
飛田尚寿、崔小宇、島田賢也、相浦義弘、生天目博文、谷口雅樹
「Si 反転層中の 2 次元正孔ガスの角度分解光電子分光:光エネルギー依存性」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (28) 酒井智香子、松井文彦、竹内恒博、松下智裕、郭方准、加藤有香子、稲地
加那子、成川隆史、大門寛
「円偏光励起光電子立体写真法による Bi2201 及び Bi2212 の局所構造解析」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (29) 加藤有香子、松井文彦、稲地加那子、松下智裕、築野孝、大門寛
「ボロンドープダイヤモンド(111),(001)のローカルドーパントサイトの研究」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (30) 高橋伸明、浜田洋司、中西康司、小川浩二、難波秀利、松井文彦、大門寛
「高エネルギー分解能型 2 次元光電子分光器の開発」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (31) 森田誠、武田さくら、加藤有香子、桑子敦、吉川雅章、大門寛
「角度分解光電子分光による Si(111)6.3×6.3-Ga 表面下のホールサブバンドの
分散測定」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (32) 吉川雅章、森田誠、加藤有香子、桑子敦、武田さくら、大門寛
「Si(111)4×1-In 表面下の反転層サブバンドの角度分解光電子分光」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)

- (33) 成川隆史、松井文彦、加藤有香子、稲地加那子、酒井智香子、松下智裕、郭方准、大門寛
「円偏光軟 X 線 Auger 光電子回折を用いた EtOH/Si(111)7×7 の三次元的構造解析」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (34) 宮内國男、服部賢、大門寛
「Si(111)7×7 表面への NO 吸着反応サイトのサイト選択性および温度依存性 II」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (35) 澤田大輔、服部賢、大門寛
「Si(111)表面上に RDE 成長した Fe シリサイドの STM 観察 その 2」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (36) 片山泰斗、服部梓、服部賢、大門寛
「Si(111)表面上に SPE 成長した多結晶 Fe シリサイド相の構造と磁気特性」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (37) 松井文彦、松下智裕、加藤有香子、稲地加那子、酒井智香子、成川隆史、郭方准、大門寛
「Ni 磁性薄膜のスピン配向転移と原子層分解磁気構造解析」
日本物理学会春季大会
(2007 年 3 月 18-21 日、鹿児島大学)
- (38) 服部梓、服部賢、竹松愛美、石井晃、小森文夫、大門寛
「Si(111)1×1,2×2-Fe の界面強磁性」
第 54 回応用物理学会
(2007 年 3 月 27 日、青山学院大学相模原キャンパス)
- (39) K. Miyauchi, K. Hattori, H. Daimon
Initial adsorption of nitric oxide on Si(111)7x7 surface at room temperature: correlation function analysis
IVC-17/ICSS-13/ICN+T2007
(Jul. 1 - 6, 2007, Stockholm, Sweden)
- (40) A. Ishii, E. Takematsu, A. Hattori, K. Hattori, H. Daimon
DFT study for ferromagnetic thin film of iron silicide on Si(111) surface
IVC-17/ICSS-13/ICN+T2007
(Jul. 1 - 6, 2007, Stockholm, Sweden)

- (41) A. Hattori, K. Hattori, Y. Katayama, K. Kodama, N. Hosoi, F. Komori, H. Daimon
 Ferromagnetic iron silicides on Si(111) surface grown by solid phase epitaxy
 IVC-17/ICSS-13/ICN+T2007
 (Jul. 1 – 6, 2007, Stockholm, Sweden)
- (42) K. Hattori, A. Hattori, E. Takematsu, A. Ishii, F. Komori, K. Sekiguchi, T. Takahashi, H. Daimon
 Magnetism of Si(111)1x1- and 2x2-Fe surfaces
 IVC-17/ICSS-13/ICN+T2007
 (Jul. 1 – 6, 2007, Stockholm, Sweden)
- (43) Laszlo Toth、松田博之、清水達也、松井文彦、大門 寛
 New simple PEEM with an energy filter
 分子科学研究所研究会
 (2007 年 9 月 10-11 日、岡崎コンファレンスセンター)
- (44) Laszlo Toth、大門 寛、松田博之、松井文彦(ホスター)
 回転楕円メッシュを用いたエネルギーフィルター付き簡易型 PEEM の開発
 分子科学研究所研究会
 (2007 年 9 月 10-11 日、岡崎コンファレンスセンター)
- (45) 松井文彦、松下智裕、郭方准、加藤有香子、酒井智香子、稲地加那子、成川隆史、大門寛
 原子配列の立体写真・・・撮影と解析技術の確立
 ナノファクトリー領域会議
 (2007 年 9 月 14-15 日、静岡グランドホテル中島屋)
- (46) Laszlo Toth、松田博之、清水達也、松井文彦、大門寛
 ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の作成現状
 ナノファクトリー領域会議
 (2007 年 9 月 14-15 日、静岡グランドホテル中島屋)
- (47) 松井文彦、松下智裕、郭方准、加藤有香子、酒井智香子、成川隆史、大門 寛
 X 線 Auger 電子回折吸収分光法による表面・薄膜研究
 日本物理学会第 62 回年次大会
 (2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (48) 森田誠、武田さくら、加藤有香子、吉川雅章、大門寛
 角度分解光電子分光による Si(111)3√3×3√3-PbGa ホールサブバンド解析
 日本物理学会第 62 回年次大会
 (2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)

- (49) 武田さくら、桑子敦、森田誠、吉川雅章、大門寛
角度分解光電子分光による Si サブバンド分散: 入射光方位依存性
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (50) 吉川雅章、森田誠、武田さくら、大門寛
Pb 吸着 Si(111)4×1-In 表面でのホールサブバンドの ARPES 測定
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (51) Laszlo TOTH、松田博之、清水達也、井文彦、大門寛
New two-dimensional display-type electrostatic analyzer
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (52) 染田政明、服部賢、大門寛
SPE 成長した Si(001)-Fe 表面の STM・LEED 観察
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (53) 松下智裕、郭方准、加藤有香子、稲地加那子、酒井智香子、成川隆史、松井文彦、大門寛
InP の光電子ホログラフィー
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (54) 吉村真史、松井文彦、大門寛
Si(111)7×7 表面上における L-Tyrosine 分子の吸着状態
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (55) 尾野正樹、松井文彦、大門寛
Au/Si(111)超構造上のベンゼンチオール吸着
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (56) 田中章泰、松井文彦、高橋伸明、難波秀利、大門寛
光電子放出角度分布中のウムクラップ散乱のエネルギー依存性と高速反射電子回折
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)
- (57) 成川隆史、松井文彦、加藤有香子、酒井智香子、松下智裕、郭方准、大門寛

軟 X 線 Auger 電子回折を用いた O₂/Si(111)7×7 の三次元的構造解析
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)

(58) 服部梓、服部賢、片山泰斗、大門寛
SPE 成長させた Si(111)-Fe の磁気構造相図
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)

(59) 酒井智香子、松井文彦、竹内恒博、松下智裕、加藤有香子、稲地加那子、
成川隆史、大門寛
Bi 系高温超伝導体の電子状態のオージェ電子回折・X 線吸収分光による深さ
分解解析
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)

(60) 加藤有香子、松井文彦、酒井智香子、成川隆史、松下智裕、築野孝、大門
寛
ボロンドープダイヤモンド(111),(001)の加熱処理による内殻スペクトルの変化
日本物理学会第 62 回年次大会
(2007 年 9 月 21-24 日、北海道大学札幌キャンパス)

(61) 武田さくら
磁気量子数の異なる Si 価電子サブバンドの放射光エネルギー依存性
第27回表面科学講演大会
(2007 年 11 月 1 日-3 日、東京大学生産技術研究所)

(62) S. N. Takeda, M. Morita, M. Yoshikawa, Y. Kato, H. Daimon,
Probing the surface potential of Si inversion layers through quantum levels (口
頭)
ACSIN-9
(Nov.11-15,2007, Tokyo, Japan)

(63) M. Yoshikawa, S. N. Takeda, M. Morita, A. Kuwako, Y. Kato, H. Daimon,
Subband dispersion in Si(111) inversion layer induced by Si(111)4x1-In
measured by ARPES (口頭)
ACSIN-9
(Nov.11-15,2007, Tokyo, Japan)

(64) 大門寛
低次元原子構造の電子状態の 3 次元解析と立体原子顕微鏡 (口頭)
物性研究所短期研究会「物性化学のフロンティア2007」
(2007 年 11 月 20-22 日、東京大学柏キャンパス)

- (65) 森田 誠、武田さくら、吉川雅章、大門 寛
Ga および Pb 吸着 Si(111)ホールサブバンドのエネルギー準位の解析(口頭)
関西薄膜・表面物理セミナー
(2007 年 11 月 30～12 月 1 日、グリーンビレッジ交野)
- (66) 後藤謙太郎、松井文彦、松下智裕、大門 寛
Fe(111)表面の円偏光二次元光電子回折(口頭)
関西薄膜・表面物理セミナー
(2007 年 11 月 30～12 月 1 日、グリーンビレッジ交野)
- (67) 酒井智香子、松井文彦、竹内恒博、松下智裕、加藤有香子、稲地加那子、
成川隆史、大門寛
Bi 系高温超伝導体の電子状態の光電子・オージェ電子回折・X 線吸収分光
による深さ分解解析
第 3 回放射光表面科学部会シンポジウム
2007 年 12 月 4～5 日、東京大学)
- (68) Toth Laszlo、松田博之、松井文彦、大門 寛
New two-dimensional analyzer for the measurement of angular distribution and
surface image(口頭)
表面・界面スペクトロスコーピー
(2007 年 12 月 14～15 日、東北大学電気通信研究所、ホテルクレセント)
- (69) 森田 誠、武田さくら、吉川 雅章、桑子 敦、加藤 有香子、大門 寛
Ga 吸着による Si(111)ホールサブバンドの ARPES 測定(口頭)
表面・界面スペクトロスコーピー
(2007 年 12 月 14～日、東北大学電気通信研究所、ホテルクレセント)
- (70) 武田さくら、森田 誠、吉川雅章、大杉拓也、谷川洋平、桑子 敦、西出昌
弘、東 直人、大門 寛
Si p 型反転層中のサブバンド分散の測定 (口頭)
第 13 回ゲートスタック研究会 ―材料・プロセス・評価の物理―
(2008 年 1 月 14～15 日、東レ総合研修センター)
- (71) H. Daimon(口頭)
New approach for simultaneous measurement two-dimensional angular
distribution of charged particles and magnified images on surfaces
表面・ナノ科学シンポジウム 2008(SSNS'08)
(2007 年 1 月 22～25 日、安比高原ホテル)

③ ポスター発表 (国内会議 30 件、国際会議 45 件)

- (1) 小粥啓子、原田芳仁、神谷博道、齊藤秀一、副島啓義、大門寛
ミニチュア SEM: Mini-Gun の開発
日本顕微鏡学会第 61 回学術講演会
(2005 年 6 月 1-3 日、つくば国際会議場)
- (2) 松田博之、大門寛、嘉藤誠、工藤政都
非球面メッシュを用いた球面収差補正
日本顕微鏡学会第 61 回学術講演会
(2005 年 6 月 1-3 日、つくば国際会議場)
- (3) K. Kataoka , F. Matsui , Y. Kato , F. Z. Guo , T. Matsushita ,K. Hattori , H. Daimon
Atomic structure analysis of ultra thin Fe silicide films by stereo atomscope
ICMAT2005, 9th IUMRS-ICAM, VASSCAA-3
(July.3-8, 2005, Singapore)
- (4) K. Hattori, T. Nishimura, K. Kobayashi, K. Kataoka, H. Daimon
NO adsorption on Si(111)-(Fe, Au, B) reconstructed surfaces
ICMAT2005, 9th IUMRS-ICAM, VASSCAA-3
(July.3-8, 2005, Singapore)
- (5) A. N. Hattori, K. Hattori, K. Kataoka, H. Daimon
Structure and magnetism of Fe deposited Si(111) surfaces
ICMAT2005, 9th IUMRS-ICAM, VASSCAA-3
(July.3-8, 2005, VASSCAA-3, Singapore)
- (6) M. Honda, F. Matsui, H. Daimon
Chemisorption of Amino Acid on Au(111)/Si(111) and Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ - Au Surfaces
ICMAT2005, 9th IUMRS-ICAM, VASSCAA-3
(July.3-8, 2005, Singapore)
- (7) S. N. Takeda, M. Nishide, N. Higashi, H. Daimon
Valence subband dispersion in Si inversion layer
EPS13
(July.11-15, 2005, Bern, Switzerland)
- (8) F. Matsui, N. Takahashi, M. Akasaka, K. Nakanishi, Y. Nozawa, H. Namba, Y. Hamada, H. Daimon
Atomic orbital analysis of three-dimensional band dispersion of MoS₂ by two-dimensional photoelectron spectroscopy
SSP10,
(July.10-15, 2005, Prague, Czech Republic)

- (9) F. Matsui, A. Kobayashi, M. Fujikado, H. Daimon, B.C. Sell, C.S. Fadley
Structural analysis of oxygen segregated Nb(110) surface
by photoelectron diffraction
SSP10
(July.10–15, 2005, Prague, Czech Republic)
- (10) 武田さくら、東直人、西出昌弘、大門寛
Si(111)-7x7 表面電子状態の高分解能角度分解光電子分光
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日–22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (11) 酒井智香子、高橋伸明、武田さくら、松井文彦、大門寛
2 次元光電子分光による Bi2212 単結晶の価電子帯の研究
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日–22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (12) 茂内晋、高橋伸明、酒井智香子、松井文彦、武田さくら、大門寛
二次元光電子分光による Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pt の電子状態の研究
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日–22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (13) 高橋伸明、茂内晋、松井文彦、中西康次、浜田洋司、松井文彦、難波秀利
NbSe₂ のフェルミ面の原子軌道及び結合状態の解析
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日–22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (14) 内田崇、服部賢、服部梓、大門寛
Si(111)表面上の Co 島の構造
日本物理学会秋季大会
(2005 年 9 月 19 日–22 日、同志社大学田辺キャンパス)
- (15) 松田 博之、Laszlo Toth、清水 達也、松井 文彦、大門 寛
広角無収差対物電子レンズの開発
日本真空協会
(2005 年 11 月 9 日–10 日、学習院大学)
- (16) 本田充紀、松井文彦、升永法史、山谷寛、大門寛
真空蒸着アミノ酸膜の吸着状態と電気化学特性評価
第25回表面科学講演大会
(2005 年 11 月 17 日–19 日、大宮ソニックシティ)
- (17) 松井文彦、高橋伸明、出野卓、茂内晋、橋本美絵、武田さくら
Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag のバンド分散と光電子放出角度分布

表面科学会関西支部講演大会
(2005 年 10 月 28 日、大阪大学)

- (18) 前谷 健、服部 賢、服部 梓、大門 寛
Si(001)表面上の Fe シリサイドの構造と磁性
表面科学会関西支部講演大会
(2005 年 10 月 28 日、大阪大学)
- (19) F. Matsui, T. Matsushita, F.Z. Guo, Y. Kato, T. Shimizu, H. Daimon
Optimization of Display-type Analyzer for High-Performance Stereoatomscope
International Symposium on Surface Science and Nanotechnology
(November 14-17, 2005, Omiya, Saitama, Japan)
- (20) N. Takahashi, F. Matsui, S. Shigenai, K. Nakanishi, Y. Hamada, H. Namba, H. Daimon
Atomic orbital analysis of Fermi surface of NbSe₂ by Display-type Analyzer (DIANA)
International Symposium on Surface Science and Nanotechnology
(November 14-17, 2005, Omiya, Saitama, Japan)
- (21) S.N. Takeda, N. Higashi, M. Nishide, H. Daimon,
Fine structure of Si valence subbands
International Symposium on Surface Science and Nanotechnology
(November 14-17, 2005, Omiya, Saitama, Japan)
- (22) F. Matsui, T. Wada, K. Sakamoto, S. Takada, T. Suzuki, A. Harasawa, T. Okuda, T. Kinoshita, H. Daimon,
Si 2p core-level photoemission study of initial stage of Si(001) surface oxidation
International Symposium on Surface Science and Nanotechnology
(November 14-17, 2005, Omiya, Saitama, Japan)
- (23) 松下智裕、郭方准、安居院あかね、吉越章隆、加藤有香子、松井文彦、大門寛
2D-PES による Cu(001)の光電子、オージェ電子ホログラフィー
第 19 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
(2006 年 1 月 7-9 日、名古屋大学)
- (24) 浜田洋司、松井文彦、野澤有司、中西康次、南平誠、小川浩二、茂内晋、高橋伸明、大門寛、難波秀利、
表面電子構造測定のための二次元光電子分光ビームラインの構築
第 19 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
(2006 年 1 月 7-9 日、名古屋大学)

- (25) 松井文彦、加藤有香子、清水達也、橋本美絵、松下智裕、郭方准、大門寛
円偏光二次元光電子分光によるグラファイトの光電子構造因子と軌道モーメント解析
第 19 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
(2006 年 1 月 7-9 日、名古屋大学)
- (26) 橋本美絵、松井文彦、郭方准、松下智裕、加藤有香子、清水達也、稲地加那子、大門寛
光電子回折リングにおける円二色性
日本物理学会第 61 回年次大会
(2006 年 3 月 27-30 日、愛媛大、松山大)
- (27) 前谷健、服部梓、服部 賢、大門寛
Si(001)表面上の Fe シリサイドの磁気特性
日本物理学会第 61 回年次大会
(2006 年 3 月 27-30 日、愛媛大、松山大)
- (28) 稲地加那子、松井文彦、松下智裕、郭方准、加藤有香子、橋本美絵、清水達也、大門寛
円偏光励起による Si2p 光電子放出角度分布の光電子波数依存性
日本物理学会第 61 回年次大会
(2006 年 3 月 27-30 日、愛媛大、松山大)
- (29) 中野浩文、前谷健、澤田大輔、宮内國男、片岡恵太、服部賢、大門寛
Si(001)表面上の Fe シリサイドの STM・RHEED 観察
日本物理学会第 61 回年次大会
(2006 年 3 月 27-30 日、愛媛大、松山大)
- (30) F.Matsui, Y.Kato, H. Daimon, T. Matsushita, F.Z. Guo
Photoelectron forward focusing peak as an element and cite specific local probe
SRI 2006
(May 28 – June 3, 2006, EXCO Center, Daegu, Korea)
- (31) Y. Kato, F. Matsui, H. Daimon, T. Matsushita, F. Z. Guo, T. Tsuno
Determination of Local Dopant site in Superconducting-diamond by Photoelectron Intensity Angular Distribution
SRI 2006
(May 28 – June 3, 2006, EXCO Center, Daegu, Korea)
- (32) T. Matsushita, F. Z. Guo, T. Muro, F. Matui, H. Daimon
Real time imaging system of stereo atomic microscope at BL25SU in SPring-8
SRI2006
(May 28 – June 3, 2006, EXCO Center, Daegu, Korea)

- (33) N. Takahashi, F. Matsui, S. Shigenai, Y. Hirama, Y. Hamada, K. Nakanishi, H. Namba, H. Daimon
New Display-type analyzer for 3D Fermi surface mapping and atomic orbital analysis
SRI2006
(May 28 – June 3, 2006, EXCO Center, Daegu, Korea)
- (34) A. N. Hattori, K. Hattori, H. Daimon
 β -FeSi₂ thin film on Si(111) surface with ferromagnetic interface
ICN&T 2006
(July 30 – August 4, 2006, Basel, Switzerland)
- (35) H. Nakano, K. Maetani, K. Hattori, H. Daimon
Variety of Iron Silicides Grown by Solid Phase Epitaxy on Si(001) Surfaces
ICN&T 2006
(July 30 – August 4, 2006, Basel, Switzerland)
- (36) A. N. Hattori, K. Hattori, K. Kataoka, H. Daimon
Ferromagnetic phase of iron silicide on Si(111) surface
The 17th International Conference on Magnetism (ICM)
(Aug. 20–25, 2006, Kyoto, Japan)
- (37) Element and site selective XAFS and XMCD for surface and thin film
F. Matsui, T. Mathushita, F. Z. Guo, Y. Kato, M. Hashimoto, K. Inaji, H. Daimon
ECOSS 24
(Sept. 4–8, 2006, Paris, France)
- (38) Wide acceptance angle electrostatic lens for high sensitive and two-dimensional analyzer
L. Toth, H. Matsuda, T. Shimizu, F. Matsui, H. Daimon
ECOSS 24
(Sept. 4–8, 2006, Paris, France)
- (39) 平間芳輝、高橋伸明、松井文彦、大門寛
グラファイト上の白金薄膜の構造と電子状態の温度依存性
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23–26 日、千葉大学)
- (40) 桑子敦、武田さくら、加藤有香子、東直人、大門寛
シリコン反転層中の価電子サブバンドの面内方位依存性
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23–26 日、千葉大学)
- (41) 澤田大輔、服部賢、大門寛
Si(111)表面上に RDE 成長した Fe シリサイドの STM 観察

日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23-26 日、千葉大学)

- (42) 宮内國男、服部賢、大門寛
Si(111)7×7 表面への NO 吸着反応のサイト選択性および温度依存性
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23-26 日、千葉大学)
- (43) 稲地加那子、松井文彦、松下智裕、郭方准、加藤有香子、橋本美絵、清水達也、大門寛
円偏光励起による Si2p 光電子放出角度分布の光電子波数依存性 II
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23-26 日、千葉大学)
- (44) 梅里計匡、服部梓、服部賢、大門寛
Si(111)表面上に RDE 成長した Fe シリサイドの磁気特性
日本物理学会秋季大会
(2006 年 9 月 23-26 日、千葉大学)
- (45) C. Sakai, F. Matsui, N. Takahashi, S. N. Takeda, H. Daimon
Atomic orbital analysis of the Fermi surface of Bi₂Sr₂CaCu₂O_y
by Two-dimensional photoelectron spectroscopy
ISSP10
(Oct. 9 – 13, 2006, Kashiwa Campus, the University of Tokyo, Japan)
- (46) A. N. Hattori, K. Hattori, H. Daimon
Structure and magnetic properties of Si(111)-Fe system grown by solid phase epitaxy
ISSP10
(Oct. 9 – 13, 2006, Kashiwa Campus, the University of Tokyo, Japan)
- (47) H. Nakano, K. Maetani, K. Hattori, H. Daimon
Solid phase epitaxy grown iron silicides on Si(001) surface studied with STM, LEED and RHEED
ISSP10
(Oct. 9 – 13, 2006, Kashiwa Campus, the University of Tokyo, Japan)
- (48) F. Matsui, T. Matsushita, Y. Kato, K. Inaji, F.Z. Guo, H. Daimon
Site-specific orbital angular momentum analysis of graphite valence band
ISSP10
(Oct. 9 – 13, 2006, Kashiwa Campus, the University of Tokyo, Japan)
- (49) F. Matsui, T. Matsushita, Y. Kato, K. Inaji, F.Z. Guo, H. Daimon
Atomic layer resolved two-dimensional XAFS: Ni wedged film on Cu(001)

ISSP10

(Oct. 9 – 13, 2006, Kashiwa Campus, the University of Tokyo, Japan)

- (50) F. Matsui, T. Matsushita, Y. Kato, K. Inaji, F. Z. Guo, H. Daimon
Lateral electronic structure analysis in atomic scale by 2D-XAFS/XMCD
LEEM/PEEM-V
(Oct. 15– 19, 2006, Egret Himeji, Hyogo, Japan)
- (51) C. Sakai, F. Matsui, N. Takahashi, S. N. Takeda, H. Daimon
The Hybridized orbital symmetry of the Fermi Energy band of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$
determined by non-polarized light two-dimensional photoelectron
spectroscopy
ISS 2006
(Oct. 30 – Nov. 1, 2006, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan)
- (52) 吉村真史、松井文彦、大門寛
Au/Si 表面超構造上における L-Tyrosine 分子の吸着構造
第 26 回表面科学講演大会
(2006 年 11 月 6–9 日、大阪大学コンベンションセンター)
- (53) C. Sakai, F. Matsui, N. Takahashi, S. N. Takeda, H. Daimon
Hybridized orbital symmetry determination of the Fermi Energy band of
 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ superconductor
by non-polarized light two-dimensional photoelectron spectroscopy
Kyoto conference on Solid State Chemistry
(Nov. 14–18, 2006, Shirankaikan, Kyoto, Japan)
- (54) F. Matsui, T. Matsushita, Y. Kato, M. Hashimoto, K. Inaji, Ch. Sakai, T. Narikawa,
F. Z. Guo, H. Daimon (ホスター)
Angle diffraction XANES and XMCD for atomic-layer-resolved magnetic
structure analysis of Ni magnetic thin film
VUV-XV
(Jul. 29 – Aug. 3, 2007, Berlin, Germany)
- (55) N. Takahashi, Y. Hamada, H. Matsui, K. Nakanishi, H. Namba, H. Daimon (ホスター)
Display-type Analyzer(DIANA) for valence band spectroscopy and microscopy
VUV-XV
(Jul. 29 – Aug. 3, 2007, Berlin, Germany)
- (56) F. Matsui, T. Matsushita, Y. Kato, K. Inaji, Ch. Sakai, T. Narikawa, F. Z. Guo, H.
Daimon (ホスター)
Origin of forward focusing peaks in graphite valence band photoelectron pattern
and their circular dichroism

VUV-XV

(Jul. 29 – Aug. 3, 2007, Berlin, Germany)

- (57) S. N. Takeda, N. Higashi, M. Nishide, H. Daimon, M. Higashiguchi, Y. Miura, N. Tobita, X. Cui, K. Shimada, Y. Aiura, H. Namatame, M. Taniguchi(ポスター)
m_j-dependent intensity modulation in ARPES spectra of Si valence subbands
VUV-XV

(Jul. 29 – Aug. 3, 2007, Berlin, Germany)

- (58) O. Rader, H. Wolf, W. Gudat, A. Tadich, L. Broekman, E. Huwald, R. C. G. Leckey, J. D. Rieley, F. Matsui, H. Miyata, H. Daimon, A. M. Shikin(ポスター)
On the problem of the "three-dimensional" Fermi surface of the Ni monolayer on Cu(100)
VUV-XV

(Jul. 29 – Aug. 3, 2007, Berlin, Germany)

- (59) Ch. Sakai, F. Matsui, T. Takeuchi, T. Matsushita, F. Z. Guo, Y. Kato, K. Inaji, T. Narikawa, H. Daimon(ポスター)
Local Structure analysis of Bi2201 and Bi2212 by photoelectron stereophotograph using circularly polarized light
VUV-XV

(Jul. 29 – Aug. 3, 2007, Berlin, Germany)

- (60) 加藤 有香子, 松井 文彦, 酒井 智香子, 成川 隆史, 松下 智裕, 郭 方准, 築野 孝, 大門 寛
超伝導ボロンドープダイヤモンドのドーパントサイトの不均一性と加熱処理による電子状態の変化
第27回表面科学講演大会
(2007 年 11 月 1 日-3 日、東京大学生産技術研究所)

- (61) 宮内 國男、服部 賢、大門 寛
室温 Si(111) 7x7 表面への NO 初期吸着反応: 相関関数解析
第27回表面科学講演大会
(2007 年 11 月 1 日-3 日、東京大学生産技術研究所)

- (62) Laszlo Toth、松田博之、清水達也、松井文彦、大門寛
New simple PEEM with an energy filter
第 48 回真空に関する連合講演会
(2007 年 11 月 14-16 日、学習院創立百年記念会館)

- (63) M. Yoshimura, F. Matsui, H. Daimon,
Adsorption structure of L-Tyrosine on Si(111)7x7 surface(ポスター)
ACSIN-9
(Nov.11-15,2007, Tokyo, Japan)

- (64) S. Yasui, S. N. Takeda, K. Matsuda, K. Shima, C. Sakai, H. Daimon,
Conductance and structure changes at the very initial stage of K adsorption on
Si(111)(ポスター)
ACSIN-9
(Nov.11-15,2007, Tokyo, Japan)
- (65) T. Narikawa, F. Matsui, Y. Kato, K. Inaji, C. Sakai, T. Matsushita, H. Daimon,
Direct observations of Si adatom and dimer atom from O atoms inserted in
backbonds by Auger electron diffraction(ポスター)
ACSIN-9
(Nov.11-15,2007, Tokyo, Japan)
- (66) M. Morita, S. N. Takeda, M. Yoshikawa, A. Kuwako, Y. Kato, H. Daimon,
ARPES measurements on Si(111) hole subband induced by Ga adsorption(ポ
スター)
ACSIN-9
(Nov.11-15,2007, Tokyo, Japan)
- (67) Z. Janosfalvi, F. Matsui, N. Takahashi, M. Akasaka, H. Namba. H. Daimon,
Atomic orbitals and photoelectron intensity angular distribution patterns of
MoS 2 valence band(ポスター)
ACSIN-9
(Nov.11-15,2007, Tokyo, Japan)
- (68) K. Inaji, F. Matsui, Y. Kato, C. Sakai, T. Narikawa, T. Matsushita, F. Z. Guo, H.
Daimon,
Circular dichroism of forward focusing peaks and diffraction rings in Si 2p
photoelectron intensity angular distribution(ポスター)
ACSIN-9
(Nov.11-15,2007, Tokyo, Japan)
- (69) 後藤 謙太郎、松井 文彦、松下 智裕、加藤 有香子、大門 寛
Fe(111)表面の原子立体写真
第3回放射光表面科学部会シンポジウム
(2007年2月4~5日、東京大学)
- (70) 武田さくら, 東直人, 西出昌弘, 大門寛, 東口光晴, 三浦雄一, 飛田尚寿,
崔小宇, 島田賢也, 相浦義弘, 生天目博文, 谷口雅樹 13P053
シリコン2次元ホールサブバンドの角度分解光電子分光:磁気量子数と光エネ
ルギー依存性
13P053 第21回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム(2008年
1月12~14日、立命館大学)

- (71) 田中章泰、松井文彦、高橋伸明、難波秀利、大門寛
光電子の umklapp 散乱の運動エネルギー依存性
13P055 第 21 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム(2008 年 1 月 12～14 日、立命館大学)
- (72) 松下智裕、郭方准、加藤有香子、稲地加那子、酒井智香子、成川隆史、松井文彦、大門寛
光電子ホログラフィー:異種元素の原子像を再生する場合の影響
2B001 第 21 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム(2008 年 1 月 12～14 日、立命館大学)
- (73) 後藤謙太郎、松井文彦、松下智裕、加藤有香子、大門寛
Fe(111)表面の原子立体写真
14P050 第 21 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム(2008 年 1 月 12～14 日、立命館大学)
- (74) 松井文彦、松下智裕、加藤有香子、酒井智香子、成川隆史、郭方准、大門寛
Auger 電子回折・X 線吸収分光による原子層ごとの磁性構造解析の研究
14P051 第 21 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム(2008 年 1 月 12～14 日、立命館大学)
- (75) 森田 誠、武田さくら、吉川雅章、加藤有香子、大門 寛
角度分解光電子分光による Pb と Ga 吸着 Si(111)ホールサブバンドの解析(ホスター)
第 13 回ゲートスタック研究会 ―材料・プロセス・評価の物理―
(2008 年 1 月 14～15 日、東レ総合研修センター)

(4)特許出願

①国内出願 (5件)

1. 発明の名称:電子顕微鏡
発明者:大門 寛
出願人:㈱島津製作所
出願日:平成 14 年 1 月 16 日
出願番号:特願 2002-007387
特開:2003-208866
特許査定:平成 18 年 3 月 31 日
2. 発明の名称:非球面メッシュによる球面収差補正レンズ
発 明 者:大門寛 松田博之 嘉藤誠 工藤政都
出 願 人:奈良先端科学技術大学院大学、日本電子(株)
出 願 日:H16 年 7 月 15 日
出願番号:特願 2004-208926

3. 発明の名称:球面収差補正減速型レンズ、球面収差補正レンズシステム、電子分光装置および光電子顕微鏡

発明者:大門 寛、松田 博之

出願人:国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学

出願日:2006/7/26

出願番号:特願 2006-203318

4. 発明の名称:反射型回折格子ホログラム及びX線集光システム

発明者:大門 寛

出願人:国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学

出願日:2007/3/2

出願番号:特願 2007-053492

5. 発明の名称:エネルギー分析器、2次元表示型エネルギー分析器および光電子顕微鏡

発明者:大門 寛、Laszlo Toth、松田 博之

出願人:国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学

出願日:2007/3/16

出願番号:特願 2007-069574

②海外出願 (1件)

1. 発明の名称:非球面メッシュによる球面収差補正レンズ

発明者:大門寛 松田博之 嘉藤誠 工藤政都

出願人:奈良先端科学技術大学院大学

出願日:H17年 1月14日

出願番号:PCT/JP2004/016602

(5)受賞等

①受賞

2003/10/1-4 松井文彦助手 アジア太平洋表面界面分析会議(APSIA)でベストポスター賞受賞

2003/11/14 D1 片岡恵太 The 3rd NAIST/K-JIST Joint Symposium on Advanced Materials でベストポスター賞受賞

2004/3/13 大門 NAIST 学術賞受賞

2005/7/3-8 D3 片岡恵太 ICMAT2005 and IUMRS-ICAM 2005 でベストポスター賞受賞

2005/7 松田博之研究員の論文 "Approach for simultaneous measurement of two-dimensional angular distribution of charged particles: Spherical aberration correction using an ellipsoidal mesh" が Phys.Rev.E に掲載されるとともに、選ばれて「Virtual Journal of Biological Physics Research」に掲載

2006/5/28-6/2 D2 高橋伸明 ベストポスター賞受賞 SRI2006

New Display-type analyzer for 3D Fermi surface mapping and atomic orbital analysis

N. Takahashi, F. Matsui, S. Shigenai, Y. Hirama, Y. Hamada, K. Nakanishi, H.

Namba, H. Daimon

- 2007/3/17 松井文彦 NAIST 学術賞 受賞
『二次元光電子分光法:表面の電子・原子・磁気構造の立体像構築』
- 2007/09/24 武田さくら 日本物理学会若手奨励賞受賞
Si 反転層中の価電子サブバンド分散の実験的決定
- 2008/1/15 M2 森田 誠 服部賞受賞
角度分解光電子分光による Pb と Ga 吸着 Si(111)ホールサブバンドの解析
第 13 回ゲートスタック研究会 ー材料・プロセス・評価の物理ー(東レ総合研修センター)

②新聞報道

- ◆ 読売新聞平成 18 年 3 月 18 日夕刊
- ◆ 2007/3/13 プレスリリース「ナノの世界を電子ホログラムで覗く」
ー触媒反応などの表面での反応現象の可視化に向けた新技術の開発ー
日経産業新聞 3/14 化学工業日報 3/14 日刊工業新聞 3/14 毎日新聞(東京版)3/14
神戸新聞 3/18 産経新聞 4/2

③その他

なし

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

年月日	名称	場所	参加人数	概要
特になし				

8 研究成果の展開

(1)他の研究事業への展開

「広角対物レンズの応用」

広角対物レンズ、通常の実験器に組み込むことにより、実験器の取り込み角が 100 倍程度向上されるため、他のCRESTである「先端計測分析技術・機器開発事業」の中の「3次元化学状態解析硬X線光電子分光装置」(チームリーダー:小林啓介)に採用されており、装置の実現のキーテクノロジーとして貢献している。

(2)実用化に向けた展開

「広角対物レンズ」

上記のCREST「先端計測分析技術・機器開発事業」に参画している外国企業と特許実施準備契約を結んでおり、すでに契約料が大学に納付されている。

「回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型実験器」

上記の「広角対物レンズ」は、簡単な絞りとレンズをつけるだけで、新しいタイプの「二次元表示型分析器」として使用できることがわかった。エネルギー分解能が低いという欠点があるが、従来の球面鏡型二次元表示型分析器よりもはるかに簡単な構成と使いやすさを持っているため、応用範囲も広いと思われる。特許を出願して、測定データを取得しており、CREST 研究員がベンチャー企業(株式会社 Daisy Micro Tech)を設立し、協力して実用化を進めている。

「角運動量 X 線の創製」

これまで、角運動量を持つ軟 X 線は SPring-8 などの放射光施設でしか発生できなかったため、実験室で原子配列立体写真を撮影することはできなかった。未完成であるが、完成すると立体写真のみならず磁性の研究などにも応用できるため、広い分野で使われると思われる。特許を出願して、測定データを取得しつつあり、今後、X 線発生装置メーカーや角運動量作成光学素子メーカーと協力して実用化を進めていくつもりである。

9 他チーム、他領域との活動とその効果

(1) 領域内の活動とその効果

本研究にとって、分解能を高めるためには回転楕円体メッシュの穴の大きさがナノサイズになる必要があるが、現在の技術では困難であるために分解能が高くない。同領域内の技術が利用できそうで、下記のような相談はしているがもう少し時間がかかるようである。

研究領域内の彌田チームで作成している高分子ナノ構造体を応用すると、ナノ薄膜に穴が開けられるようになってきた。この技術がもう少し発展すると、現在作成している 60 ミクロン程度の穴の上からナノメッシュをかぶせることによって分解能を高めることができるため、期待している。

また、本間チームの開発しているカーボンナノチューブでも、長いものを粗く漉いたものができる、同様に分解能が向上すると思われるので、相談したところ、産総研の齋藤氏を紹介していただいた。すでにカーボンナノチューブをメッシュにかぶせるところまで進展した。目で見ても透明で見えないが、強い光を当てると膜が有ることがわかるという優れたものである。今後のテストに期待している。

(2) 領域横断的活動とその効果

特になし

10 研究成果の今後の貢献について

(1) 科学技術の進歩が期待される成果

「原子配列立体視の発展」

さらに多くの試料について測定が進み、いくつかの動画も見せられるようになるであろう。原子構造の直視という夢に近づく。

また、最近「元素ごと」ではなく「各原子層の元素ごと」の物性も得られるようになってきており、原子レベルでの研究の大幅な進展が期待されている。

「二次元光電子分光の発展」

完成した小型高性能分析器の性能評価がなされ、多くの人に使いやすいことが示されるであろう。さらに、装備してある電子銃は、走査電子顕微鏡の機能を持っているため、微小領域のオーグ電子回折パターンをとりながらマッピングできるはずであり、前述した価電子帯によるマッピングと合わせて、従来の元素マッピングから大きく飛躍した分析ツールになる可能性が高い。

「微小領域科学の発展」

分解能はあまり高くないが、見たいところの原子構造を立体的に観測するという初めての「立体原子顕微鏡」が実現されたことにより、微小領域科学が発展する。また、近年、放射光施設では1ミクロン程度のマイクロビーム軟X線が生成できるようになってきているので、それと今回開発した「小型で高性能の二次元表示型分析器」を組み合わせると、やはり微小領域科学が発展する。最近話題のグラフェンやナノ構造の原子配列や3次元エネルギーバンド構造などが個々に測れるようになる。表面には不均一な場合が多いし、ナノ構造は本質的に不均一なため、これまで平均的な情報しか得られなかったものがこの微小領域について得られるようになる意義は大きく、微小領域科学という大きな分野が発展する可能性が高い。

「円偏光光電子回折の発展」

従来の光電子回折は、前方散乱ピークによる原子結合方向の情報と、回折縞による原子間距離の情報との重ね合わせの解析であり、一枚の画像の情報からだけでは解析が難しかった。今回、円偏光励起による光電子の前方散乱ピークの動きが詳細に解明されたことにより、上記の2つの情報のほかに前方散乱ピークの動きの情報が加わったことにより、簡単に解析できる情報が種類増えたことになり、光電子回折の解析精度が大きく向上するものと思われる。

(2)社会・経済の発展が期待される成果

・種々の計測装置の開発

「小型で高性能の二次元表示型分析器の完成」

この分析器は、原子配列立体視以外にも「電子状態の3次元マッピング」、「原子軌道解析」、「光電子回折・ホログラフィー」など多くの応用に効率よく用いられるものであり、汎用性が高いため、実用化の可能性が高い。

「広角対物レンズの開発」

顕微鏡機能システムの初段の対物レンズとして、広角対物レンズを発明した。この対物レンズは、通常の実験室に組み込むことにより、分析器の取り込み角が100倍程度向上されるため、既に他のCRESTに採用されたこともあり、多くの応用が期待される。

「回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器」

エネルギー分解能が低いという欠点があるが、従来の球面鏡型二次元表示型分析器よりもはるかに簡単な構成と使いやすさを持っているため、多くの応用が期待される。

「角運動量X線の創製」

未完成であるが、完成すると実験室で角運動量を持つ軟X線が使用できるようになるため、立体写真のみならず磁性の研究などに多くの応用が期待される。

・一般社会への貢献

国立科学博物館でのデモ展示で好評を博したように、一般の人にとって物質は原子が並んでできているということを実際に目で見られることは感激するものである。今後も多くの人に原子配列の立体視を楽しんでいただいて、科学の好きな青少年を増やし、将来の日本の科学技術の発展に貢献したい。

研究の目標から見た達成度：

最初に立てた3つの目標は（1）検証実験、（2）小型分析器の製作、（3）顕微鏡機能の開発であった。（1）は予想以上にきれいな立体写真が多く撮れたので、達成度は十分と思われる。（2）は順調に完成したので、これも達成度はほぼ満足いくものとする。（3）が予定よりも遅れていて、達成度の考え方にもよるが、50%程度に感じている。顕微鏡の初段の広角対物レンズの開発はうまく行き、既に応用が始まっているのは評価できるとされる。しかしながら、全体の顕微鏡としてのシステムの立ち上げが遅れていて、テストデータが出せるかどうか怪しいのが問題であると認識している。3次元CADを用いて設計をすることが大変困難であったことが大きな理由である。現在使用しているCADソフトのSolidEdgeは、出来上がるときれいであり、3次元的な干渉が良くわかるというメリットが大きい、修正が困難であるなど未熟なソフトと言え、相当なエネルギーを消費するとともに時間がかかってしまった。

また、システムが完成したとしても、最初の対物レンズで分解能が決まり、それがまだ20 μ m程度であることも問題である。最初に考えていたナノサイズの分析に至るには相当時間がかかりそうである。もともと、何も無いところから始めて、5年間で新しい顕微鏡の性能がフルに出せるはずはないため、テスト機を作って基礎的なデータを出すにとどまり、という目標で始めたことではあるが、見通しが良くないことに問題を感じている。

メッシュを使用するため、メッシュの穴の付近の電場の影響によって像がぼけて分解能がわるくなるという問題に突き当たった。分解能を高くするには穴の小さなメッシュを高精度で成形する必要がある。現在の金属加工技術の最先端は、穴の径が20ミクロン、曲面精度が数ミクロンであろう。最初に作成して使用しているメッシュの穴の径は250ミクロン、精度は100ミクロンであることを考えると、最先端の技術で作成すればサブミクロンの分解能も可能かもしれないので、限界まで試してみたい。

研究を進める過程で出てきた目標として、（4）回転楕円体メッシュレンズ二次元表示型分析器の開発と（5）角運動量X線の創生というものがある。（4）は光電子顕微鏡の機能を持った新しい二次元表示型分析器として幅広い応用が期待でき、性能評価も順調にできている。（5）は理論的に解析して作成したが、現在の設計の反射角度では、最先端の研磨技術でも反射率が高くないことがわかり、設計変更の必要がある。当面、予算が無いので実験データが出るのが遅れそうなのが残念である。しかしながら、理論的には問題ないので、完成すると実験室で使える角運動量軟X線として大きな応用が開けるのは間違いないと思われる。

以上を総合すると、困難に遭って見通しが暗いものもあるが、成功したり夢が開いているものが多いことを考えると達成度は悪くないのではないかと考えている。

プロジェクト運営について：

CREST 研究員に設計図を描いて貰っていたが、前述のように設計図を描くことに多くの労力を使い、本来の実験能力を活かす時間が少なくなってしまうことが悔やまれる。設計図は相談しながら作成するために外注には出せないが、なれている人を別に雇えると良かったと思う。人材派遣会社にもずっとお願いして探していたが、見つからなかった。

それ以外は、若手の助手や学生が多くの成果を出してくれて、研究室はお蔭様で順調に成長した。研究費の使い方も、必要なものがほぼ揃えられてきたので、適切だったと考えている。ただ、やり直せるとしたら、値段は相当高いが真空槽を μ メタルで作りたい。そのほうが、きれいな像が簡単に出了ことと思う。

戦略的創造研究推進事業について：

CREST 事業は支援がしっかりしていて、種々の相談に乗ってくれ、融通を利かせていただけるので、科研費よりもはるかに仕事がしやすい。今後も研究者の良き支援者として科学の発展に力を貸していただきたい。5年間、本当に有難うございました。



2006 年 10 月 CREST 推進中の研究室のメンバー