

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 21 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 年度 ～ 2012 年度

課題番号：22500799

研究課題名（和文） 質量分析・電子回折による、原子を直接認識する教材の開発

研究課題名（英文） Development of teaching materials for the study of atom by electron diffraction and mass spectroscopy.

研究代表者

南 伸昌（MINAMI NOBUMASA）

宇都宮大学・教育学部理科教育専攻・教授

研究者番号：80292572

研究成果の概要（和文）：小型電子回折装置を開発し、MgO 微結晶の回折パターン解析を目的とした高校生対象の実験講座を開いて、原子に対する認識の深まりを検証した。「回折」の学習を発展させることにより、結晶の中には非常に小さな原子が規則正しく並んで詰まっていることが、実感を持って受け止められたことが判った。また、原子に対する認識が深まるとともに、関連分野への学習意欲が高まるという効果も見られた。

研究成果の概要（英文）：In order to deepen understanding about atoms for high school students, a small type of an electron diffraction chamber was produced. Its effect was checked by an experimental lecture about analysis of diffraction patterns of MgO micro crystal. The students could realize that the crystal was made of small atoms arranged periodically. Moreover, motivation of learning to related area increased with deepening of the understanding about atoms.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育・教育工学・科学教育

キーワード：電子回折、原子・分子の認識、理科教材、質量分析

1. 研究開始当初の背景

世の中の物質は、生物も含めて全て原子を構成単位として形作られている。この考えに立脚し、物質の性質や生物器官の働きなどを理解していくことが、自然科学の一つの柱となっている。日本の教育課程では、従来、原子の概念は中学校第一分野の「化学変化と原子・分子」の単元で導入され、化学反応式へと導かれる。そして、その後は「原子がある」という前提で高校の化学や物理は構成され

話が進んでいく。しかし、導入が天狗的で、その後も直接的な証拠が物理的、化学的に示されることはなく、身の回りに偏在しながら原子を実感することは難しく、ひいてはイオンや電子といった重要な概念の認識までも曖昧なものになっている。このような事態を打開するために、高校生レベルで元素を実感しつつ、原子の大きさを直接測定でき、しかも、原理及び実験手順を理解できるような教材の開発が望まれていた。

研究レベルでは、透過型電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡などの発展により、当たり前のように物質を原子分解能で観察することができる。しかし、いずれの装置も取扱い、原理、価格の面で、高校の教育現場での活用は困難である。そこで、我々が着目したのは「電子回折」であった。

原子の大きさよりも短い波長を持つ電子線を結晶性の薄膜試料に当てると、結晶格子を回折格子として回折パターンが観測される。その形状と電子線の波長から格子間隔や配列を決定することができる。この原理となる「回折」は、物理Ⅰ（１）イ（エ）光の回折と干渉 で取り扱われており、電子の波動性についても物理Ⅱ（４）ア（ア）粒子性と波動性 で学習する内容である。更に、薄膜試料を作成する一般的な手法である真空蒸着法は、化学Ⅱ（１）ア（ウ）液体と固体において学ぶ「状態変化」の興味深い実例となっている。研究代表者は当時、サイエンスパートナーシッププロジェクト（SPP）において、レーザー光などを用いて回折パターンから回折格子の格子間隔や入射波の波長を求めさせる講座を、高校生に対して複数回開講していた。その結果、高校物理の中でも比較的難易度が高いと考えられる回折を、適切な実験を交えることにより、未履修の高校生にも理解してもらえることを確認した。従って、実際に自分たちで単結晶試料を作成し、電子回折により格子間隔を測定する安全・安価なシステムを構築できれば、高校生レベルで原子の大きさを実感できる教具として提示できると考えた。

また、研究現場では、真空の質を確認するために四重極質量分析器（QMS）で元素を同定し、装置の動作確認のために金の蒸着膜や高配向ポリグラファイト（HOPG）などの標準試料を用いて回折パターンを観察する。このプロセスを抽出し、体験させるだけでも原子に対する認識を深める有効な教材となると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は原子を直接認識できる教材の開発である。まずは手持ちの装置を改造して、大学の教室内で使用可能な真空蒸着-電子回折装置を作製する。ポイントは、コンセントからの電源だけで稼働すること、高校生が近くで観察するので安全面に特に配慮すること、の2点である。並行して高校教育課程への導入方法を検討する。原子の認識は科学一般において重要な概念であるので、物理を選択していない学生にも理解してもらいたい。また、その時期は早い方がそれ以降の学習の深まりを見込むことができる。そこで、講座の流れとしては、レーザーポインターと回折格子を用いた導入実

験を行い、回折現象を理解したあと電子回折実験により格子間隔を求めるというステップを踏むことにする。また、装置に四重極質量分析計（QMS）を組み込むことにより扱う元素をその場で確認し、原子を取り扱っているという実感を深めることも合わせて検討する。その上で理解度調査を行い、履修に適切な学年を選定し、提示方法の工夫を図る。

次に、高校教諭が高等学校の教室で取り扱うことのできる教材として、装置の小型化・低出力化を検討する。従来の透過型電子回折装置では-20 kV程度の加速電圧を用い、取り扱いの敷居を高めると共に価格を押し上げる要因となっていた。加速電圧が5 kV程度になると、安全面での取り扱いが簡単になり価格も低くなるが、電子線の透過能が落ちる。そこで、HOPGや金属微粒子を活用し、できるだけ薄い試料を作製することで低電圧化を実現し、高校の教諭が安全に取り扱うことのできる仕様を策定する。そして、高校において簡易型装置を用いた講座の実践を検討し、汎用性のある教材とするための更なる提言を収集し改造に努める。また、高校生への受け止め方を調査し、この授業が理科全体のカリキュラムのどこに入ると効果的かということも検討していく。

学術研究として考えれば、電子回折の加速電圧は高ければ高いほど回折パターンは明瞭になり透過能も上がるので、わざわざ低い電圧で結晶構造を観察することはない。しかし、教育現場での活用、という観点に立つと、装置のスペックを犠牲にしても安全性や価格を優先することが必要となる。電子回折は研究機器としてはかなり成熟した装置であるので、性能を少々落としても、「原子の大きさを直接測定する教材」として十分機能する。本研究により、今まで困難であった教育現場での実験による原子の直接認識への道を開き、高校生の、原子のみならず、分子、イオン、電子などへの認識が深まることが期待できる。

3. 研究の方法

研究組織は大学教員と高校教員とで構成し、研究は以下の流れで行う。

(1) 高真空小型電子回折装置の開発

既存の超高真空電子回折装置を高真空対応に改造する。排気系からイオンポンプを取り外して軽量化を図る。ターボ分子ポンプ（TMP）及びロータリーポンプ（RP）のみでの排気で、要求される高真空がどの程度の時間で達成されるのか確認する。

次いで、講座で用いる試料の検討を行う。まずは劈開によりHOPGを薄膜化し、回折パターンの観察を試みる。また、Si(111)やMgO(001)などの安定な基板表面上に金属微粒子を成長させ、高真空下で微結晶のエピタ

キシャル成長条件を探る。QMSによる蒸着させる金属元素の質量分析方法についても検討を行い、異なる原子は質量および大きさが異なることを実感できることもねらいとする。

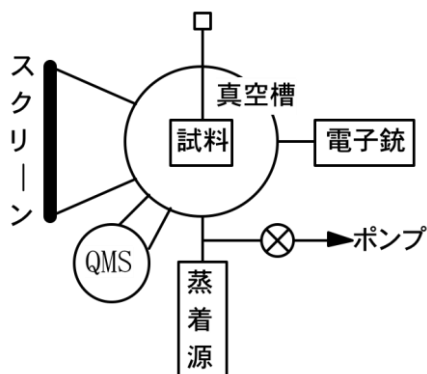


図1 装置概念図

並行して、電子線の加速電圧を $-2\sim-15$ kVにして電子線の調整を行い、高校生の観察に耐えうる回折パターンが得られるかどうか確認する。そして、加速電圧、スクリーンの大きさ、試料とスクリーンの配置などを決定し、実際に高校生講座で用いる装置・電源の設計・作製を行う。

(2) 高校生講座の実践及びデータの収集

小型電子回折装置を用いて高校生対象の科学実験講座を実施する。まずは大学において実施し、高等学校における実践へと展開する。

授業内容については、従来進めてきた「回折」の高校生講座の内容を、高校教員と相談して学習過程に沿ったものに見直し、電子回折の実験へ無理なく発展できるようにアレンジする。実施時期については、原子分子の学習は中学校の範囲だが、「回折」は高校3年生で学ぶので、後者の前後を中心に検討する。

講座実施に当たって、高校教員と共に装置の安全性や使い勝手について検証する。講座実施後、原子に対する生徒の認識の変化を調査する。その際、「回折」の学習や小型電子回折装置自体がどの程度学習の障壁となっているのかも合わせて調査する。その結果を基に講座の内容や学習時期を見直し、次の高校生講座、高等学校での実践へと繋げる。

実践結果を整理し、どの程度「原子を実感できる」効果が得られたのか検証する。また、小型電子回折装置使用のマニュアル及び、それを用いた授業プログラムを整理する。そして、新たな教材として世に提案するために、小型電子回折装置の使用方法及び授業案を報告書の形でまとめる。

4. 研究成果

(1) 電子回折装置の開発

学校現場で教具として活用するためには「教室に入る大きさ」で「100 V 電源で動作」し「安全に取り扱える」ことが求められる。エレベーターへの乗せ降ろしや、暗室での利用を考えると、幅 75 cm、高さ 2 m 程度の出入り口から搬入可能なことが求められる。予備実験の結果、加速電圧が -5 kV でも金微結晶の回折パターンを観察することができた。その際の回折パターンの大きさから、蛍光スクリーンの直径は 13.5 cm、試料とスクリーン間の距離を 20 cm とした。これにより、電子銃からスクリーンまでの距離が 80 cm となったので、排気装置と架台も含めて、幅は 60 cm、高さは 150 cm 以内に収まるようにした。なお、容易に移動できるように架台にはストッパー付キャスターを取り付けた。

電子回折、真空ポンプの電源は 100 V で動作するもので揃えたが、試料が MgO(001) の場合、加熱については 200 V 用の電源を用いる必要がある。しかし、授業で回折パターンを観察する際には加熱の必要は無いので、問題なしとした。

装置本体は超高真空対応のステンレス製真空槽で、電子銃、蛍光スクリーン、試料導入機構、真空計が設置されており、電子銃の外部には電子線収束用のコイル一つと、XY 方向の偏向コイルを一組ずつ取り付けるようになっている。真空排気は RP と TMP との組み合わせで行い、実験は 5×10^{-4} Pa 以下の高真空で行った。

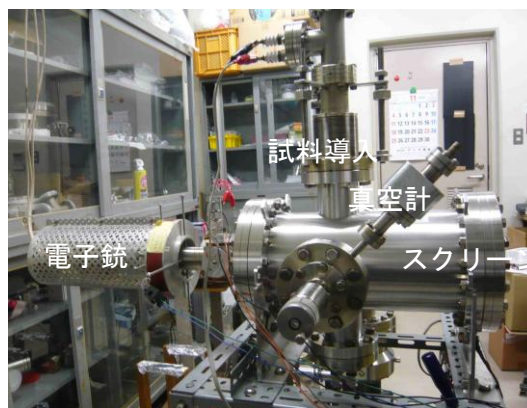


図2 装置外観

なお、QMSに関しては、試料調整に思いの外時間を取られたため、質量計測に最適な配置を詰め切れなかったことと、電子回折という新しい学習事項に加えてマススペクトルを提示することが学習の妨げになる懸念などから、期間内の授業実践からは除外することとした。

(2) 試料の調整

試料は Si(111) 表面上の金微粒子と

MgO(001)表面上のMgO微結晶の2種類を検討した。初めに、超高真空下で清浄化したSi(111)表面を大気に晒した後、高真空下で金を蒸着した。4)蒸着温度が低い場合には結晶性の金微粒子は成長せず、蒸着後の加熱により5×2や6×6の表面超構造を取ることが判った。そして、試料を880°C程度に保った状態で金を蒸着すると、〈111〉方位を鉛直方向とする金の微結晶が、下地にエピタキシャルに成長することが判った。

ところが、Si(111)基板でも、超高真空下で清浄化することなしに金を蒸着した場合、明瞭な表面超構造やエピタキシャル成長した金の回折パターンは観察できなかった。このことから、超高真空下で清浄化することが、Si(111)表面上で金がエピタキシャル成長するために必要だと考えられるが、ベーキングの手間等を考えると高等学校で用いるのは現実的でない。従って、Si(111)基板の使用は見送ることとした。

MgO(001)表面上では、貴金属は様々な方位で結晶成長し、多様な回折パターンを示すことが知られているが、教育目的で考えた場合、単純な回折パターンを示すことが求められる。そこで、本研究ではMgO単結晶を(001)面に沿って劈開することによりその表面上に生じた微細な凸凹を、MgO微結晶とみなし、試料として用いることにした。このパターンは[001]方位を鉛直方向にした正方格子のものとなり、見た目にも判りやすい。

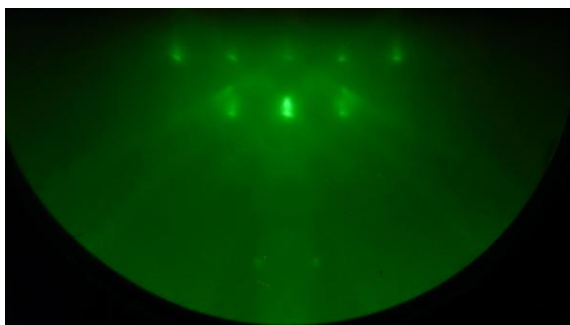


図3 MgO(001) [100]

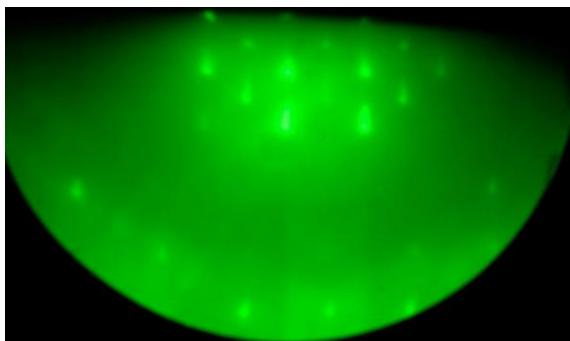


図4 MgO(001) [110]

MgOは絶縁体であり、そのままとチャー

ジアップしてしまうので、タンタル板の試料ホルダーに固定し、高真空中で1200°C程度に加熱してタンタル板と電気的なコンタクトを取った。適度な加熱は、表面の清浄化および微結晶の形状を整える効果もあった。

(3) 実験講座の内容

高校生講座は大学における90分の特別講座として一回実施した。対象は宇都宮市内の私立高等学校3年生8名である。全員物理選択者だが、講座の時点では「回折」は学習前であった。講座は、前半部でレーザー光と回折格子を用いた実験により格子の形状と回折パターンの関係を学び、後半部で電子回折によるMgO微結晶の構造解析へと展開した。

前半部では光学顕微鏡による回折格子の観察を取り入れた。これによりブラックボックス化しがちな回折格子を点列の集まりと認識することができ、電子回折へ滑らかに接続することができた。また、2次元格子や3次元格子をいろいろな向きのスリットの集まりと捉えさせることで、結晶の回折パターンの方位依存性も理解できたようである。

MgO微結晶の電子回折パターンの観察は、受講者数が少ないこともあり、観察条件に適した実験室において観察を行った。小型電子回折装置は講座の前にTMPを起動し、真空度および試料の状況確認を行い、バルブを閉めて待機状態としていた。受講生は2、3名一組で観察を行わせ、一組目の受講生が観察する直前にバルブを開け、電子回折の電源類を起動した。一組の観察に要した時間は5分程度であった。

観察は[100]、[110]両入射方位で行い、入射方位により回折パターンが異なること、面心立方構造の結晶なので回折パターンは体心立方構造となっていることを確認させた。そして、[100]入射方位における、蛍光スクリーン上での回折スポットの間隔を実測させ、データとして教室に持ち帰り解析を行った。実測値は多少のばらつきはあったが、MgOの格子定数が0.40 nmと、文献値0.42 nmに近い値となった。講座終了後、高校において理解度調査のアンケートを実施した。

(4) 実験講座の効果

アンケート結果の集計から、講座の内容自体は特に問題無く理解できたようであった。懸念された、小型電子回折装置に対しても、抵抗や違和感はほとんど感じなかったようであった。第一の目的であった「原子・分子に関する認識の深まり」に関しては、8割の受講生が「深まった」と回答していた。「回折」についても、ほとんどの受講生が実感を伴って理解できた、という回答であった。原子の配列による回折を実感することで、両概念の理解に関する相乗効果が発揮された

と考えられる。

学習内容理解以上に効果が見られたのが、学習に対する動機付けの向上である。自由記述からは、「よく判った」、「理解できた」以上に、「面白かった」、「感動した」、「驚いた」、「興味が増した」、「すごいことだと思った」、「よりよく学ぶ事ができた」、「光の授業は理解したいと思った」など、これからの学習に対する意欲関心の高まりを見てとることができた。この理由として、原子・分子という、今までも学習して知ってはいたが実感の乏しい存在であったものが、回折パターンという形でその存在を顕わにしたことによる認識の深まりが、学習者の知的好奇心を刺激したためと考えられる。理科は身近な事物・現象を扱う学問であるが、いろいろな切り口を提示することにより、学習者の意欲を高める題材の一つとして本教材を提示できたのではないかと思う。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

南伸昌、電子回折による、原子の認識を深める教具の開発、宇都宮大学教育学部教育実践総合センター紀要、査読無、第36号、2013、印刷中。

[学会発表] (計1件)

出口明子・伊東明彦・人見久城、教員養成学部の大学生を対象とした理科・自然に関する意識調査、日本理科教育学会全国大会発表論文集、10、11B-202 (p.120)、2012。

[その他]

ホームページ等

・電子回折による原子の大きさの認識

<http://ks001.kj.utsunomiya-u.ac.jp/~minami/high/24/kaken22/kaken22.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

南 伸昌 (MINAMI NOBUMASA)

宇都宮大学・教育学部・教授

研究者番号：80292572

(2) 研究分担者

伊東 明彦 (ITO AKIHIKO)

宇都宮大学・教育学部・教授

研究者番号：70134252

(3) 研究分担者

山田 洋一 (YAMADA YOUICHI)

宇都宮大学・教育学部・教授

研究者番号：50143186

(3) 研究協力者

梶川 崇 (KAJIKAWA TAKASHI)

文星芸術大学附属高等学校・教諭