

超高分解能電子顕微鏡法の原理解明

－ 光学古典理論の最先端顕微鏡への適用 －

東京大学大学院工学系研究科の阿部 英司 准教授の研究グループは、(株) 日本電子のグループと共同で、近年、水素やリチウムなどの軽元素観察が可能な顕微鏡法として注目を集めている「環状明視野顕微鏡法^(注1)」の結像原理の解明に成功しました。これによって、電子顕微鏡が装置の公称分解能を超える「超高分解能」を実現できることが理論的に裏付けされ、物質構造を直接決定する手法のよりいっそうの高度化が見込めることから、ナノテクノロジー研究に不可欠な計測法として広く応用されていくことが期待されます。

本研究チームは、相反定理^(注2)に基づけば、走査型透過電子顕微鏡法 (STEM^(注3)) における環状明視野法が、従来の透過電子顕微鏡法 (TEM^(注3)) におけるビーム斜め入射法と等価な結像法となることを看破しました。ビーム斜め入射法は、電子顕微鏡以前の光学顕微鏡の時代より、レンズの「色収差^(注4)」に起因するピンぼけ現象を抑えることで高分解能を実現することが知られていました。この古典光学の考え方を、「球面収差^(注4)」が補正された高性能磁場レンズを搭載した最先端電子顕微鏡へと適用し、その装置パラメーターを基に分解能計算したところ、水素の原子半径 53pm (1 pm は 1 兆分の 1m) を越える超高分解能が実現できることが分かりました。最適化された環状明視野条件で STEM 観察された水素化合物 (YH₂) 原子像の強度分布は、計算機シミュレーションと非常に定量性よく一致することが確認されました。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費特定領域研究「機能元素のナノ材料科学」の一環として行われました。本研究成果は、平成 23 年 2 月 13 日 (英国時間) に英国科学雑誌「ネイチャー・マテリアルズ」のオンライン速報版で公開されます。

【研究の背景】

電子顕微鏡法は、物質特性を支配する局所的な内部欠陥構造などを、原子分解能での直接観察により決定可能とする最も強力な計測法です。電子ビームを強く散乱する原子番号の大きな元素の観察法は早くから確立されていましたが、散乱能の極めて弱い水素やリチウム等の軽元素をいかにして観察するかが大きな課題となっていました。近年、電子ビーム走査型電子顕微鏡（STEM）による「環状明視野法」（図 1）によれば、軽元素観察が可能であるとの報告がいくつか相次ぎましたが、なぜ高感度観察が可能であるのか、については十分に理解されていませんでした。

【本研究の成果】

本研究では、相反定理によれば、環状明視野 STEM 法が、従来より知られていた「電子ビーム斜め入射型」の透過電子顕微鏡法（TEM：図 1）と等価な結像法式となることを指摘しました。図 1における STEM、TEM それぞれの光線図は、上下を逆さまにすることで他方に一致することがすぐに読み取れます。斜め入射の利点は、古く光学顕微鏡の時代から、色収差と呼ばれる波長のゆらぎに伴うピンぼけ現象（図 2 参照）をなくすことで高分解能・高感度を実現することが知られていました。近年の最先端電子顕微鏡は、磁場レンズの「球面収差（図 2 参照）」補正技術の著しい進展によって分解能が飛躍的に向上してはいましたが、未だ色収差の完全な補正ができてはいなかったのです。環状明視野法では、古典的な斜め入射法と等価な色収差フリーの結像条件となっていたため、超高分解能を実現していることが明らかとなりました。この考えに基づいて、最先端装置パラメーターから分解能（レンズ伝達特性）を計算したところ、水素の原子半径 53pm（1 pm は $1/10^{12}$ m）を越える超高分解能（およそ 44pm）が実現できることが判明しました。最適化された環状明視野条件で水素化合物（ YH_2 ）の STEM 観察を行ったところ、その原子像（図 3）の水素を含めた強度分布は、計算機シミュレーションと定量性よく一致することも確認されました。

今後は、本手法による軽元素観察と、すでに確立されている重元素観察法とを効果的に併用することによって、顕微鏡直接観察による構造解析法が飛躍的に進展することが大いに期待されます。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費特定領域研究「機能元素のナノ材料科学（領域代表者：東京大学大学院工学系研究科 幾原雄一教授）」の一環として行われたことを付記します。

【参考図】

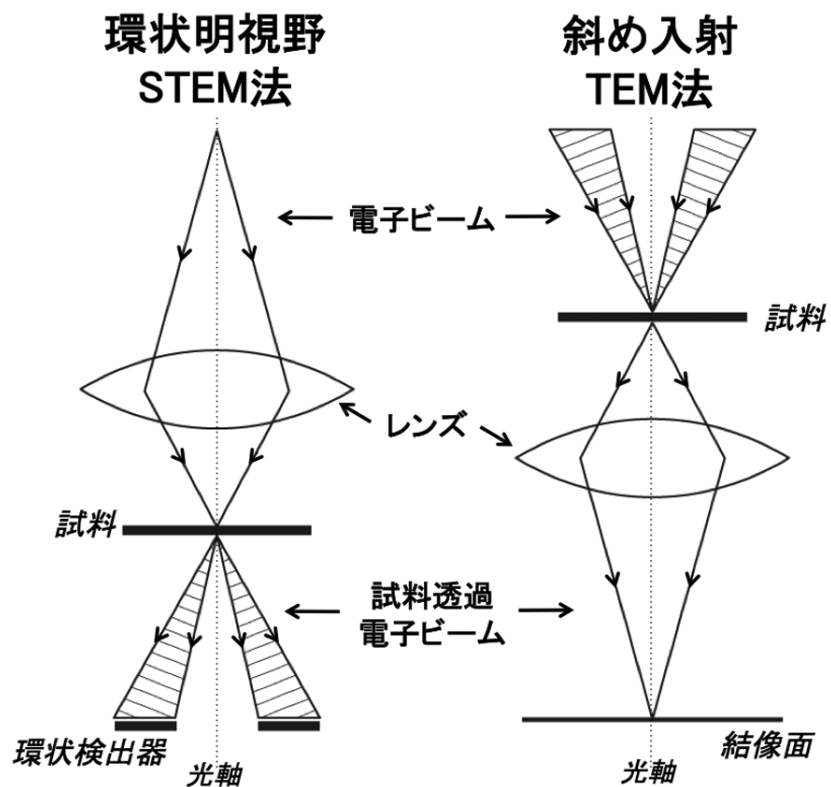


図 1 相反定理の模式図。TEM 法におけるビーム斜め入射の効果は、STEM 法における試料透過ビームの角度制御で実現される（図中斜線で示す範囲）。

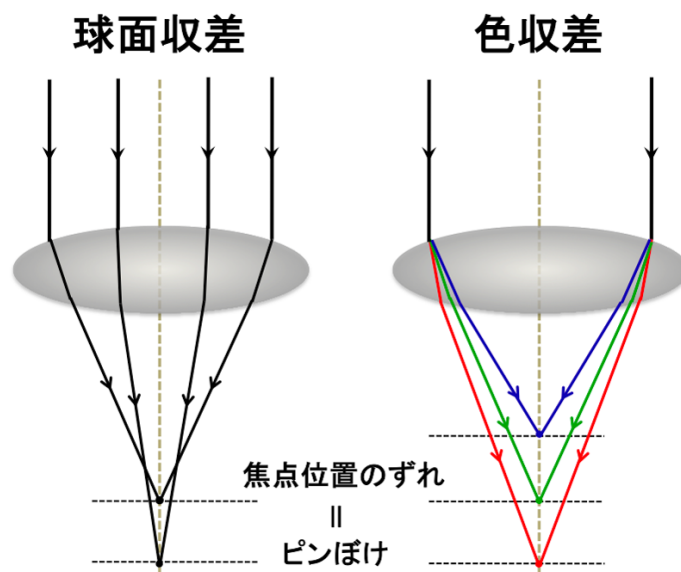


図 2 レンズの球面収差と色収差の模式図。最先端電子顕微鏡では、球面収差の問題は解消されたが、色収差が取りきれていなかった。

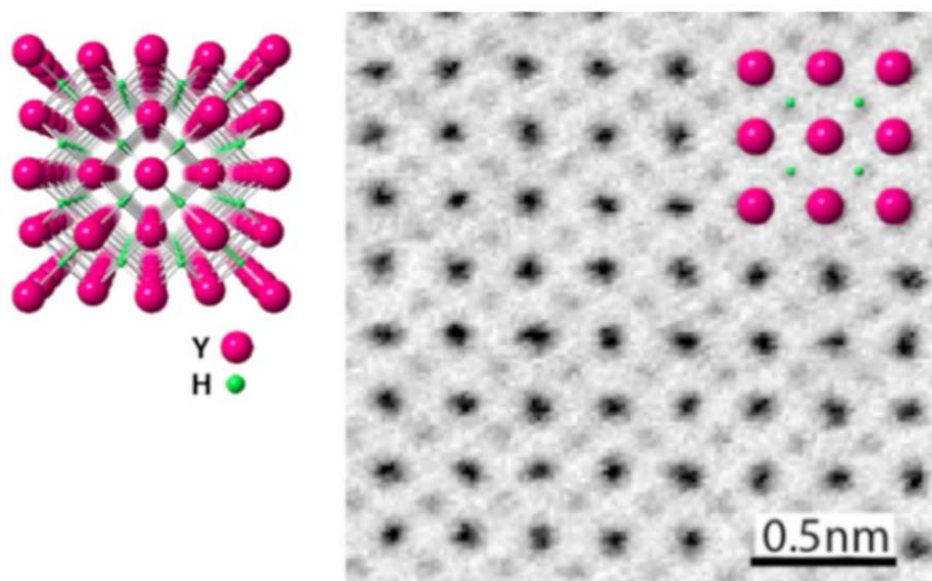


図3 古典光学的に最適化された環状明視野条件で撮影された水素化合物の原子像。水素原子が、定量性に優れた強度で明瞭に結像されている。

【用語解説】

(注1) 明視野顕微鏡法

入射ビームのうち、試料に散乱されずに真っ直ぐに透過してくるものを「ダイレクトビーム」と呼びます。明視野顕微鏡法とは、このダイレクトビームを用いて結像する方式です。これに対して、入射ビームが散乱されたものを用いる結像方式は、暗視野顕微鏡法と呼ばれます。

(注2) 相反定理

光の屈折・散乱に伴う伝播が、光の進行向きを逆にしても、全く同じ振る舞いをするというものです。相反性は、電磁気学、電気回路や素粒子の散乱過程など、様々な物理現象において見られます。

(注3) 透過電子顕微鏡法 (TEM) ・ 走査型透過電子顕微鏡法 (STEM)

電子ビームを定常照射し、試料を透過して出てくる電子波を干渉させて原子像を得る方式が TEM と呼ばれます。一方、STEM では非常に細く絞り込んだ電子ビームを走査し、試料を透過して出てくる電子を検出器で捉えて強度測定を行い、原子像を得ます。

(注4) レンズ収差

レンズで結像する際、焦点ずれを発生させる因子を分類したものが「ザイデルの5収差」と呼ばれるものです。ザイデル収差のうち、球面収差と色収差に関する補正が、電子顕微鏡で用いる磁場レンズでは原理的に困難であるため、分解能を制限する主因子となっていました。近年、球面収差補正技術は開発されたのですが、色収差補正に関する技術開発は現在も進行中です。

【発表雑誌・論文名】

Nature Materials, 2011年2月13日 Advanced On-line Publication (AOP)

“Direct imaging of hydrogen-atom columns in a crystal by annular bright-field electron microscopy”

(環状明視野電子顕微鏡法による結晶中水素原子コラムの可視化)

【注意事項】

公開日時：日本時間2月14日午前3時00分

(英国時間2月13日午後6時00分)

【問い合わせ先】

阿部 英司 (アベ エイジ) 准教授

東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1