

本田財団レポート No. 129

第 29 回本田賞授与式 記念講演（2008 年 11 月 17 日）

## 「収差補正による電子顕微鏡の新次元」

マキシミリアン・ハイダー博士

ハラルド・ローズ博士

クヌート・ウルバン博士

## With Aberration Correction to a New Dimension in Electron Microscopy

Commemorative lecture at the 29th Honda Prize  
awarding ceremony on the 17th November 2008

Dr. Maximilian Haider

Dr. Harald Rose

Dr. Knut Urban

財団法人 本田財団  
**HONDA FOUNDATION**

# マキシミリアン・ハイダー博士

Dr. Maximilian Haider



## ■出身

1950年1月23日(58歳) オーストリア・フライシュタット

## ■学歴

キール大学物理学科入学  
ダルムシュタット工科大学 H.ローズ物理学研究室卒業

## ■職歴

1982年 ダルムシュタット工科大学応用物理研究所  
H.ローズ・グループ科学者  
1983年 欧州分子生物学研究所 A.V.ジョーンズ・グループ 科学者  
1987年 ダルムシュタット工科大学 H.ローズ研究室 博士  
1989年 走査型透過電子顕微鏡開発・応用グループ長  
1996年 200 キロボルト級透過型電子顕微鏡収差補正研究  
プロジェクト長  
1996年 CEOS 社 社長(ハイデルベルグ)

## ■Born

23 January 1950, Freistadt, Austria

## ■Education

Pre-diploma examination, University of Kiel  
Continuation of Physics, Darmstadt University of Technology (TU Darmstadt)  
Examination of Physics Diploma, TU Darmstadt, Prof. Rose

## ■Career

1982 Scientist, group of Prof. Dr. H. Rose at Inst. of Applied Physics  
1983 Scientist, European Laboratory, Molecular Biology, Dr. A. V. Jones  
1987 Ph. D. to Dr. rer. nat. at the TU Darmstadt, Prof. Rose  
1989 Head of Group, Application of a Scanning Transmission Electron  
Microscope and development of Electron Microscopes  
1996 Head of research project: Cs-Correction of a 200 kV TEM  
1996 Managing Director, CEOS GmbH, Heidelberg

# ハラルド H. ローズ博士

Dr. Harald H. Rose



## ■出身

1935年2月14日(73歳) ドイツ・ブレーメン

## ■学歴

ダルムシュタット工科大学数理物理学科入学  
ダルムシュタット工科大学物理学科修士/博士課程卒業

## ■職歴

1965年 ダルムシュタット工科大学物理理論研究所 研究員  
1971年 ダルムシュタット工科大学応用物理研究所 准教授  
1976年 ニューヨーク州厚生部 主席研究科学者  
1977年 レンゼラー総合技術研究所物理学 教授(ニューヨーク州)  
1980年 ダルムシュタット工科大学応用物理研究所 教授  
1987年 西安交通大学物理学 客員教授(中国)  
2003年 ローレンス・バークレイ国立研究所 特別研究員  
(カリフォルニア州)

## ■Born

14 February 1935, Bremen, Germany

## ■Education

Studies in Physics & Mathematics, TU Darmstadt  
Master Degree in Physics and Ph. D. in Physics, TU Darmstadt

## ■Career

1965 Post Doc. Position, Institute of Theoretical Physics, TU Darmstadt  
1971 Associate Professor, Institute of Applied Physics, TU Darmstadt  
1976 Principal Research Scientist, New York State Department of Health  
1977 Adjunct Professor, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY  
1980 Professor of Physics, Institute of Applied Physics, TU Darmstadt  
1987 Visiting Professor, Physics, Jiaotong University Xian, China  
2001 Research Fellow, Materials Science, Argonne National Lab., Argonne IL  
2003 Research Fellow, Advanced Light Source, L. Berkeley National Lab.

# クヌート W. ウルバン博士

Dr. Knut Wolf Urban



## ■出身

1941年 ドイツ・シュツットガルト

## ■学歴

シュツットガルト工科大学物理学科卒業  
シュツットガルト工科大学自然科学科博士課程修了

## ■職歴

マックス・プランク金属研究所(シュツットガルト) 研究員  
バーバー原子力研究所(インド・ムンバイ)  
東北大学多元物質科学研究所  
1984年 エアランゲン大学素材科学部 教授(ドイツ)  
1987年 アーヘン大学実験物理部長(ドイツ)  
1987年 ユーリッヒセンター微細構造研究所設立(ドイツ)  
2003年 アーネスト・ルスカ(超高分解能電子顕微鏡)セン  
ター設立(ドイツ)

## ■Born

1941, Stuttgart, Germany

## ■Education

Studied physics and Doctor Degree, natural sciences, Technical Univ. of Stuttgart

## ■Career

Max-Planck-Institute for Metals Research in Stuttgart, Germany  
Section de Recherche de Metallurgie Physique at CEN de Saclay/ Paris, France  
Bhabha Atomic Research Centre, Bombay, India  
Institute for Advanced Materials Processing, Tohoku University, Sendai, Japan  
1984 Professor in Materials Science, University of Erlangen  
1987 Chair for Experimental Physics, RWTH Aachen University  
1987 Founded Institute for Microstructure Research, Research Centre Juelich  
2003 Founded Ernst Ruska Centre  
2004 President and Vice-president, German Physical Society

このレポートは、2008年11月17日 東京、帝国ホテルにおいて行われた第29回本田賞授与式記念講演の要旨をまとめたものです。  
This report is the gist of the commemorative lecture at the 29th Honda Prize Awarding Ceremony on the 17th November 2008  
Imperial Hotel, Tokyo.

# —収差補正による電子顕微鏡の新次元—

マキシミリアン・ハイダー、ハラルド・ローズ、クヌート・ウルバン



図－１ リチャード・P・ファインマン

1959 年講演「極小世界に広がる大きな可能性  
(There's Plenty of Room at the Bottom)」より

〈図－１〉 化学物質の原子の所在が眼で見てわかれば、どんな複雑な物質でも簡単に解析できるようになるでしょう。唯一の問題は電子顕微鏡の性能をあと 100 倍は上げないといけない点です。(中略) 従って私の問題提起としては、電子顕微鏡をもっとパワフルにする方法は存在しないのか、ということになります。

## 1. 序 論



図－２



図－３

〈図－２〉〈図－３〉 科学者は原子を肉眼で見ることを長く夢みてきました。物質の基本構成ブロックを直接見て物質の特性や働きを知るには、自然の「作業場」へと通じる覗き窓が必要です。この覗き窓の役目を果たす電子顕微鏡をもっとパワフルにする方法、すなわち分解能を向上させる方法はないものか。今日の私たちは既に答えを知っています。答えはイエス、先ごろ世に出た収差補正という光学技術を搭載した顕微鏡が私たちからの回答です。

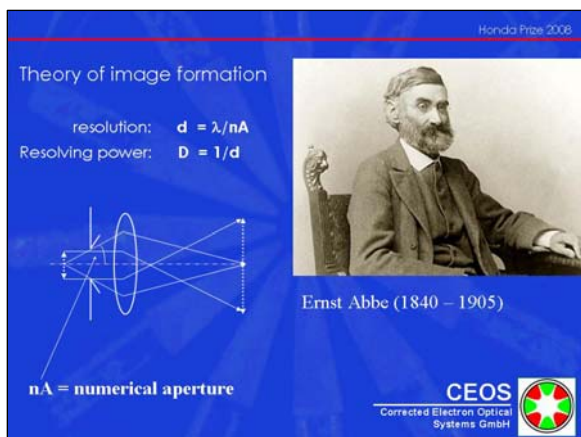


図-4

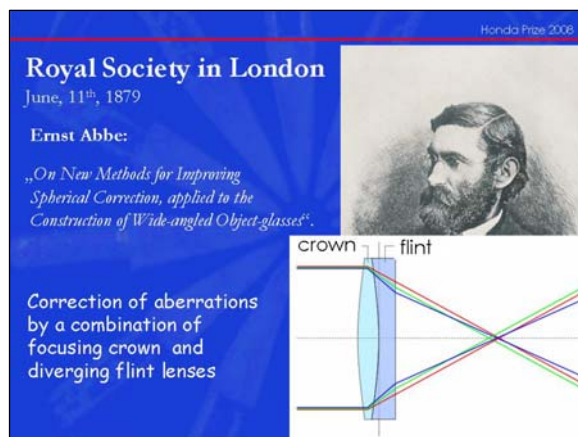


図-5

〈図-4〉〈図-5〉 顕微鏡の分解能の限界は二物点間の最小距離（鏡像上の独立した二点間の距離）によって規定されます。130 年あまり前、エルンスト・アッベという学者が、分解能を上げるには光線の波長を小さくし、観察試料から対物（たいぶつ）レンズへの入射角度の範囲を広げればよいことを発見しました。

電子には粒子としてのみならず波としても振る舞うという際立った性質があります。電子顕微鏡はこの性質を利用した顕微鏡法です。加速器という装置の中で電子を数 10 万ボルトの電位差で加速して高速電子をつくり、観察対象に照射します。電子を高速に加速すればするほど波長は短くなり、分解能が上がります。現在の標準的な電子顕微鏡には 20 万～30 万ボルトを発生させる加速器が搭載されています。電子線の波長は 20 万ボルト加速の場合で 2.5 pm（ピコメートル、1 pm=10<sup>-12</sup> m）、30 万ボルト加速の場合で 2.0 pm になります。

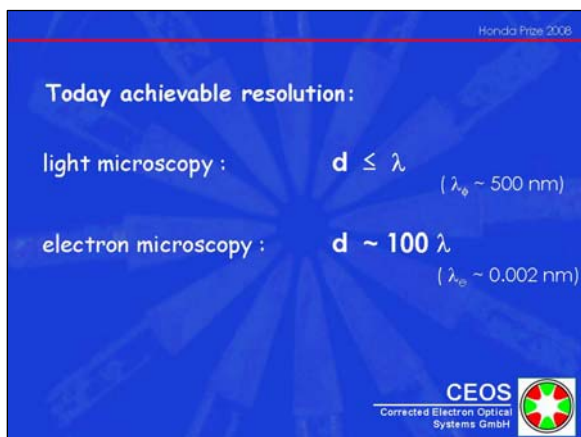


図-6

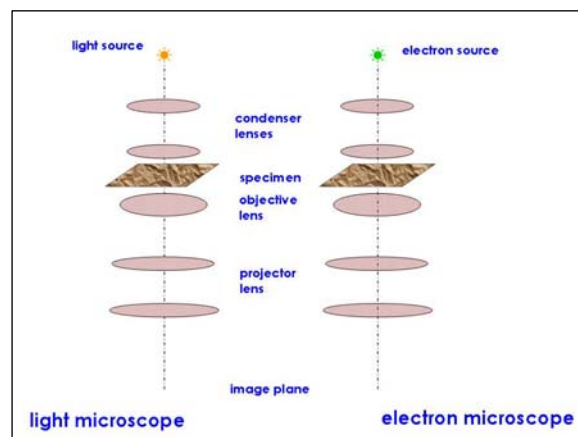
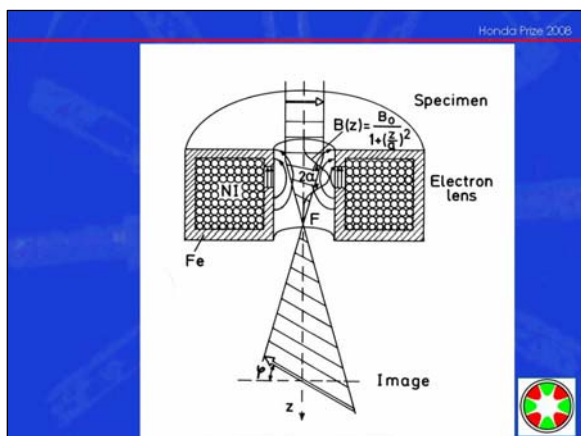


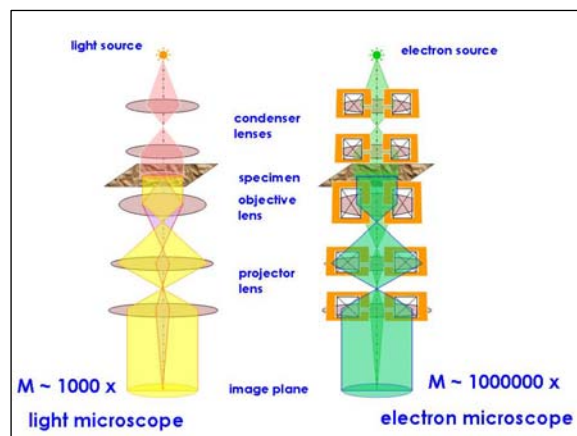
図-7

〈図-6〉〈図-7〉 光学顕微鏡の場合、分解能は光の波長に依存し、現在 0.5 μm（マイクロメートル、1 μm=10<sup>-6</sup> m）程度まで限界性能が向上しています。事実上収差を持たない高性能レンズシステムが製造可能になったおかげです。





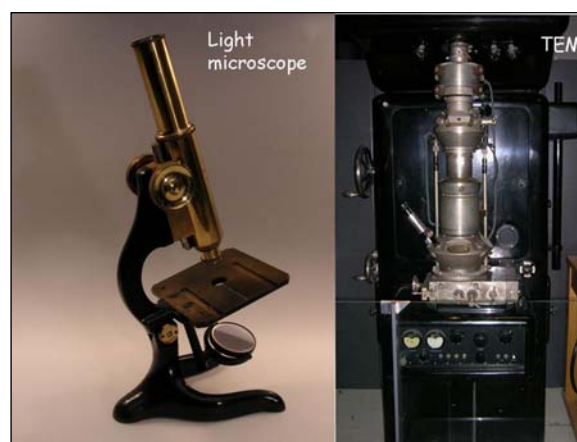
図－8



図－9



図－10



図－11

〈図－8〉〈図－9〉〈図－10〉〈図－11〉 それに対して電子顕微鏡の場合、つい最近まで電子レンズの収差が分解能を制約していたため、200 pm の分解能（現行より 100 倍長い波長）に達するのがやっとでした。収差の壁が科学者や技術者の前に立ちただけ、原子像を直接観察したいという彼らの夢の実現を阻んでいたのです。実際、材料工学から生物学、医学に至るまで原子レベルでの観察・解析の実現は研究者の悲願でした。

ひとくちにレンズの収差といっても、厳密には幾何収差と色収差というまったく性質の異なるふたつの課題が存在します。色収差とは、多色光や一定のエネルギー幅を持つ電子ビームを光源に採用した場合、光線の波長（色）によってレンズの屈折率が異なるため、レンズが様々な色の光線（エネルギー）をひとつの焦点に結べない現象を言います。幾何収差の中で最大の障害は球面収差です。球面収差があると、レンズの焦点距離が光線の入射角によって変わるため、レンズの近軸外（周縁部）を通る光線の焦点距離の方が、レンズの近軸（中央付近）を通る光線の焦点距離より短くなり、像面で一点に収束しません。高性能な電子レンズのなかった時代の技術者は、レンズの後焦点面に開口絞りを設け、観察試料からレンズに入ってくる放射線束の角度をなるべく小さくすることで球面収差の問題に対処していました。しかし原子構造などの微細な情報を含んだ放射線は高角からレンズに入ってくるため、この方法では肝心の高分解能情報が脱落してしまうという致命的な欠点を持っていました。

球面収差の問題を打破したのもエルンスト・アッペでした。アッペは集束（凸）レンズと発散

(四) レンズが相互の収差を打ち消し合う光学顕微鏡システムを開発したのです。ところが電子顕微鏡の場合、電子線を発散させる電子レンズというものは原理的に製造不能であり、アップの方式をそのまま採り入れることはできません。そこで電子レンズには、コイルで電子線の制御に適した電磁場を発生させて電流を流す方式が採用されています。

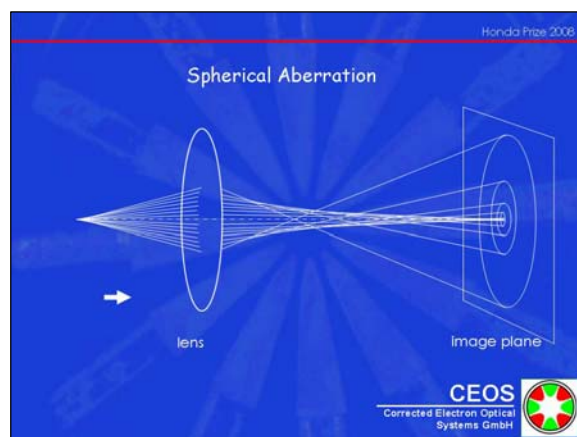


図－12

〈図－12〉 レンズ収差にまつわる原理的困難を初めて認識したのはダルムシュタット工科大のオットー・シェルツァーでした。シェルツァーは収差に関する理論研究を拡張し、収差の課題を克服する鍵が、球面レンズに複数の極子を持たせた「多極子レンズ」にあることを示唆しました。



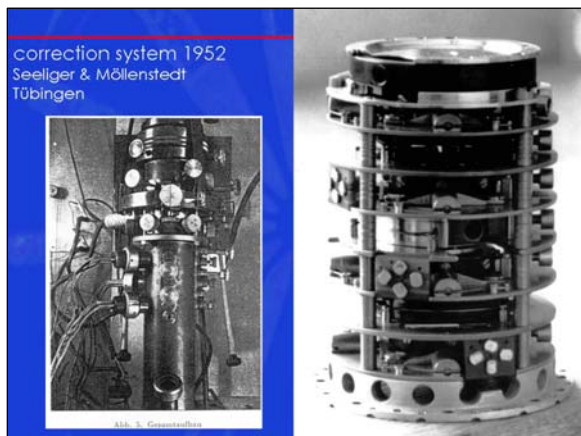
図－13



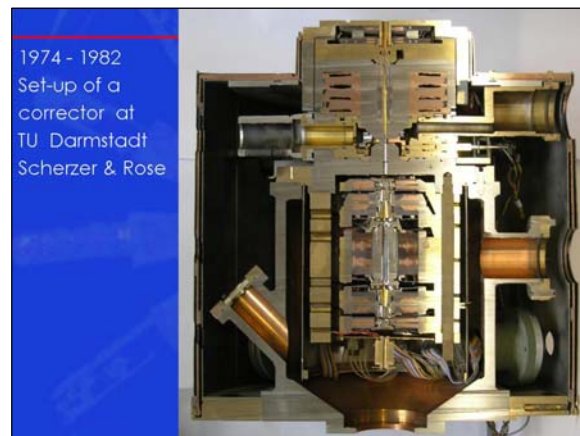
図－14

〈図－13〉〈図－14〉 更に、凹凸双方で構成される特殊なレンズ系が原理上ほぼ収差の影響を受けないことを数学的に証明しました。

このシェルツァーの収差補正原理を受けて、球面収差補正器や色収差補正器の実用化研究が何度も行われましたが、どれも不首尾に終わりました。収差補正の原理的な正当性は証明され、概念検証には成功したものの、肝心の分解能は誰も改善できませんでした。



図－15



図－16

〈図－15〉〈図－16〉 その原因はいくつかあります。第一に、実験の土台となる顕微鏡の性能が安定していませんでした。第二に、外部環境からの干渉が軽視されていました。第三に、システム全体が複雑すぎて短時間で調整できませんでした。そして最後に、分解能を制約する収差を迅速かつ正確に限なく計測し、計測結果に応じて補正を行える電子計器が当時は存在しませんでした。関係者の失望は大きく、1980 年代終わりには、専門家のパネルが、然るべき期間内に有意の進展は見込まれないため、収差補正プロジェクトへの出資をすべて打ち切るよう米国立科学財団に勧告したほどです。

Joint-project on correction of spherical aberration	
1989:	first discussions at conference in Salzburg/Austria
1990:	Submission of grant proposal at VW-Foundation for funding the development of a Cs-corrector for material science applications
1992:	start of the project at EMBL in Heidelberg
1994:	proof of principle
1997:	improvement of resolution from 2.4 Å to 1.2 Å
1997:	transfer of prototype to RC Juelich
2001:	improvement of stability of SAC-TEM
since 2001: important tool in materials science	

図－17

〈図－17〉 時を同じくして 1989 年、ハイダー、ローズ、ウルバンの三名はオーストリアのザルツブルクで開かれた「電子顕微鏡に関する三カ国会議」（オーストリア、ドイツ、スイスの各電子顕微鏡学会の共催）に参加し、集中的な議論を交わしました。そして最新の透過電子顕微鏡（TEM）に六極子レンズ 2 個で構成する新たな補正器（六極子型球面収差補正器）を組み込めば、球面収差の問題は解決できるとの確信に至りました。三人は最新の高分解能 TEM を基本システムに選びました。この TEM は非常に安定した電界放射源を備え、電子線のエネルギーのばらつきを最小限に抑えていたからです。エネルギーのばらつきが少ないので色収差に関する追加的な補正は不要であり、これは大いに開発作業を簡素化します。球面収差の補正のみに注力すれば、期待される分解能を実現できると三人は考えました。



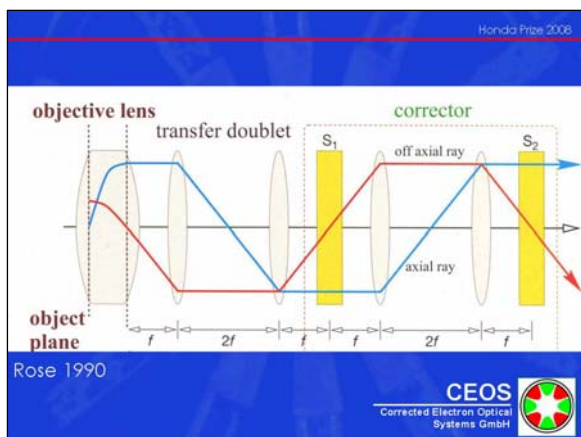


図-18

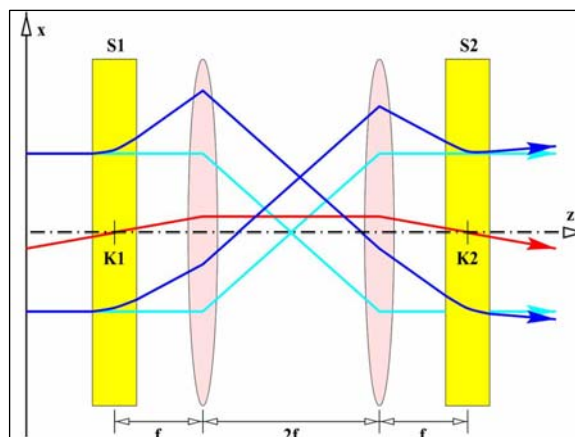


図-19

〈図-18〉〈図-19〉 三人は 1990 年の暮れにドイツのフォルクスワーゲン財団に助成申請を行い、一年後、正式な認可を受けました。プロジェクトは 1992 年 1 月に始動しました。開発目標は中圧顕微鏡の分解能を原子レベルに引き上げる補正器の開発であり、その基礎となる電子光学理論の整備はダルムシュタット工科大のローズが、実験器具の製造はヨーロッパ分子生物学研究所のハイダーが、そして完成した実験器の材料科学への応用面はユーリヒ研究所のウルバンのグループが担当しました。

新開発された六極子型球面収差補正器の補正性能は、1994 年の時点で光学試験台上において原子レベルの結像に成功しました。対物レンズの正の球面収差を打ち消すのに十分な負の球面収差効果が発揮されたのです。この概念検証の成果が認められ、プロジェクトはフォルクスワーゲン財団から、ハイデルベルク実験室における収差補正 TEM 完成器の実装化作業に必要な最終予算を下されました。

## 2. 六極子型球面収差補正器の設計原理

六極子レンズの磁場からは、光軸からの横方向距離の二乗に比例する力が電子に及ぼされます。この力の方角は光軸とのアジマス角によって変わり、60 度ごとに極性が反転します。従って光軸と平行なシリンダーの外被を伝わる電子ビームは、六極子レンズの磁場を通過後、3 倍の歪み（二次的な光線の歪み）を受けることになります。しかし磁場から電子に及ぼされる力は磁場の強度の影響も受けるため、電子ビームには三次的な回転対称方向の歪みも加わります。この結果、顕微鏡の像面上には二次的な軸方向の収差と同時に、回転対称方向の三次的な球面収差が投影されます。このとき後者の三次的な球面収差は球面对物レンズの球面収差と反対の極性（負の収差）を持っており、球面对物レンズの収差（正の収差）を打ち消す効果を発揮します。六極子レンズによる対物レンズの球面収差補正は以上の仕組みを利用したものです。



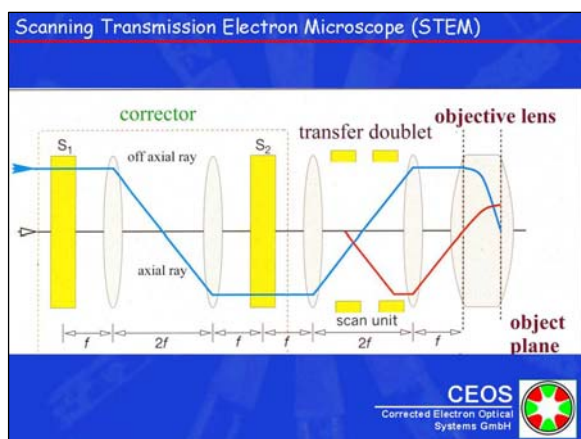


図-20

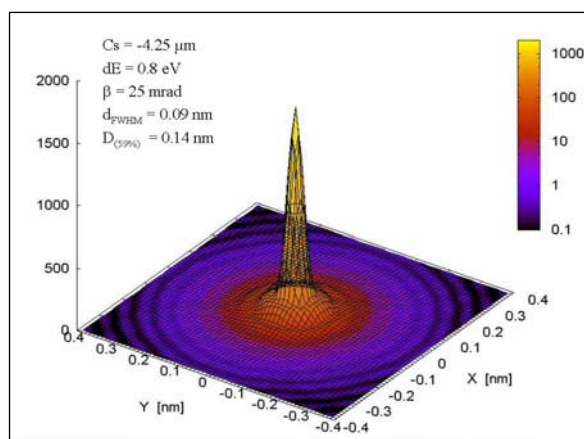


図-21

〈図-20〉〈図-21〉 六極子レンズの負の球面収差を利用する上で最大の課題は二次収差の除去にあります。六極子レンズのみで構成するシステムでは軸方向の歪みを除去できないので、六極子型球面収差補正器においては、極性が反対の六極子レンズ2個と、それらの間にトランスファーレンズ2個を設置して歪みを矯正します。第一の六極子レンズ（凹）は第一のトランスファーレンズ（凸）の前焦点面上に配置し、第二の六極子レンズ（凹）は第二のトランスファーレンズ（凸）の後焦点面上に配置します。2個のトランスファーレンズは第一の六極子レンズに映った像を倒立させて第二の六極子レンズに渡します。このようにすると軸方向の二次変位が打ち消される代わりに、回転対称方向の三次収差は増幅されます。このとき像面上に形成される負の球面収差は六極子レンズの長さの二乗に比例しますから、その長さを適切に調整してやれば、補正器の負の球面収差が対物レンズの正の球面収差を完全に打ち消すことになります。負の球面収差のみを発生させる補正器は、電子顕微鏡の眼である対物レンズの視力を補う「メガネ」だと考えればいいでしょう。

### 3. 球面収差補正 TEM の調整機構

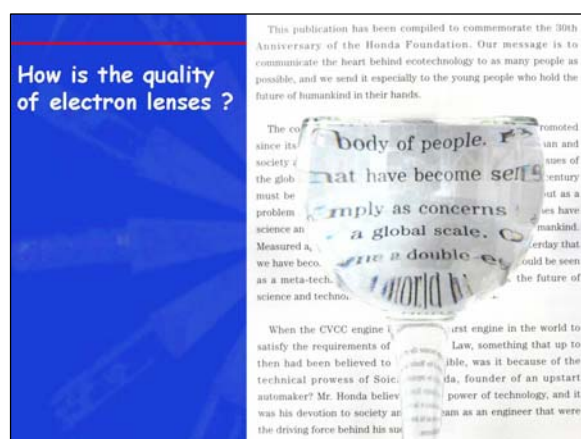


図-22

〈図-22〉 光学顕微鏡のレンズはマイクロメートル ( $1 \mu\text{m}=10^{-6} \text{ m}$ ) 単位の精度で作られ、半永久的に安定した配置で装置に据え付けられます。電子顕微鏡で原子レベルの分解能を得るには、電子レンズをナノメートル ( $1 \text{ nm}=10^{-9} \text{ m}$ ) 単位の精度で作り、据え付ける必要があります。

す。電極と極子を構成する電子光学部品をそのような精度で製造し、物理的に据え付けるのは不可能です。たとえ理想的な形状の極子を作れたとしても、不可避に生じる磁気的な不均一性によって像面の精度が損なわれます。レンズ系内の電子線の経路に必要な精度を持たせるには、どうしても微調整のための電磁氣的装置が必要になります。この目的で顕微鏡の適切な位置に組み込まれる装置が、スティグメータ（非点収差補正器）と偏向器です。これらの追加的補正器の働きがあって、はじめて満足 of いく原子像が得られるのです。



図-23

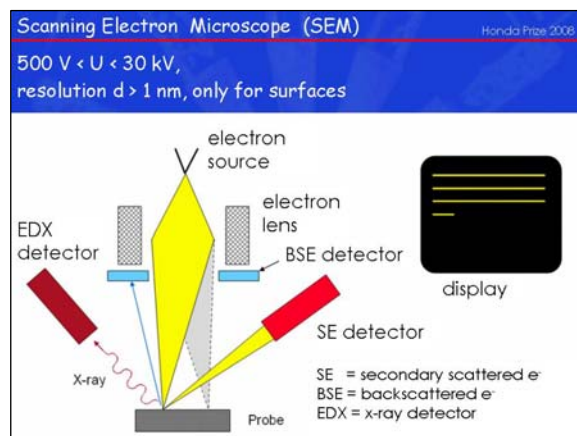


図-24

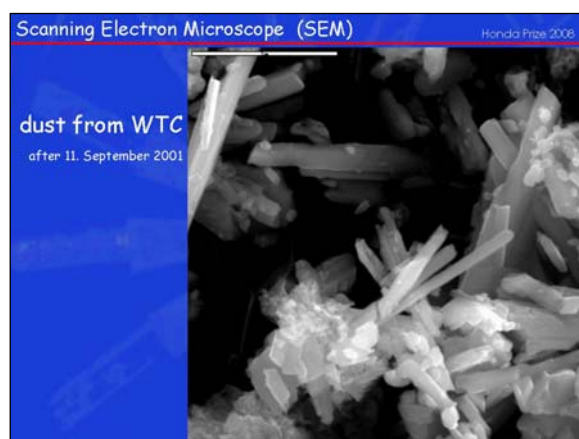


図-25

〈図-23〉〈図-24〉〈図-25〉 スティグメータと偏向器を六極子型球面収差補正器に適切に組み込み、補正器を十分に機能させるためには、収差の現況と各機器の配置関係の現況を正確に知る必要があります。実際、高精度な診断手順、配置手順の設計と実装はプロジェクトの成否を分ける重要な作業でした。残収差は「ディフラクトグラム・タブロー法」という方法で計測できます。ディフラクトグラムとはコンピュータ上でフーリエ変換したアモルファス試料の高倍像図形のことで、ディフラクトグラム・タブローとは次々に方位角を変えて撮った複数のディフラクトグラムを、入射ビームの方向に沿って配置したものです。このタブローを計測することで、分解能の限界を決めるコヒーレント収差、すなわち顕微鏡全体の補正状況を正確に知ることができます。

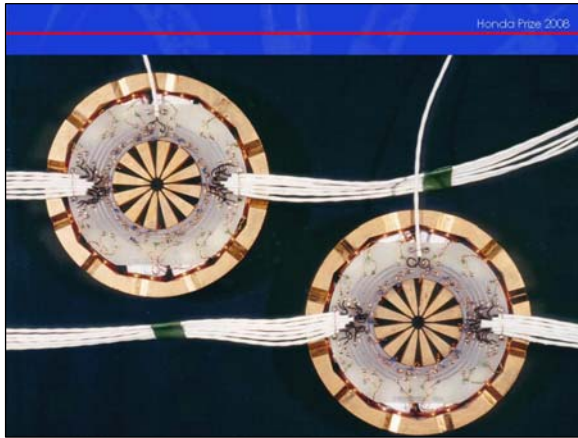


図-26



図-27

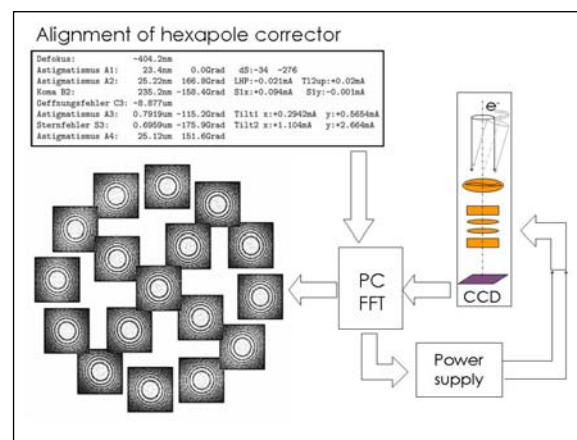


図-28

〈図-26〉〈図-27〉〈図-28〉 できるだけ短時間で必要な高精度調整を行うためには、まずコンピュータ接続した CCD カメラで試料を撮影し、その場で、写した画像のディフракトグラムを算出します。次に、焦点と入射方向を変えることで生じた二次的な非点収差を計測すると、ディフракトグラムから収差の推定値が得られます。この解析では残存する高次収差の値も同時に判明します。また追加計算を行えば、収差補正用スティグメータと偏光器の電圧・電流ドライバに必要な出力値を求めることもできます。その場合、出力後の電圧・電流はマイクロプロセッサで制御され、適切な電極とコイルへ送られます。

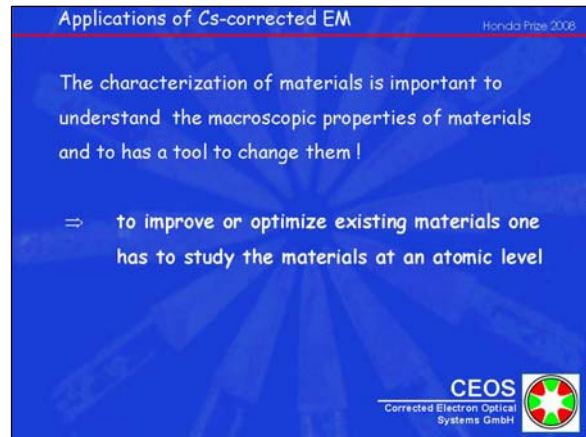
#### 4. 応用研究の成果

私たちは 1997 年前半、0.245 nm だった非補正顕微鏡の限界分解能を収差補正によって約 0.125 nm に高めた収差補正 TEM で実証実験を行いました。同時にウルバンのグループにいたベルント・カビウスが、この装置の材料科学への応用研究を開始し、同じ年の 6 月 24 日、超高速エレクトロニクス向け半導体の材料となるガリウム砒素を原子分解能で結像させることに成功しました。その後、世界初の収差補正 TEM はユーリヒに移送され、研究所に設置されました。

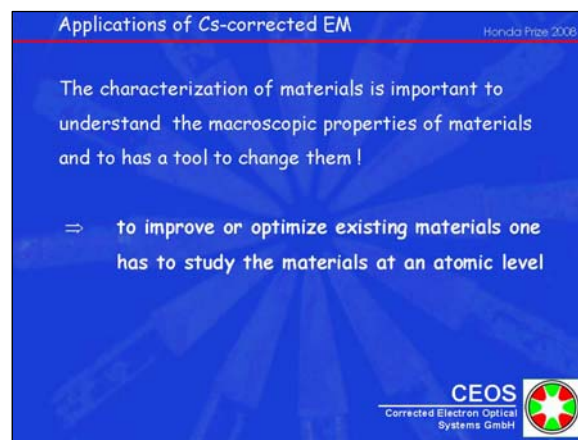




図－29



図－30

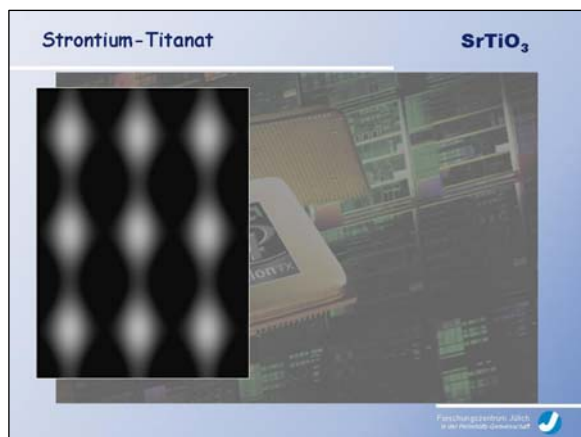


図－31

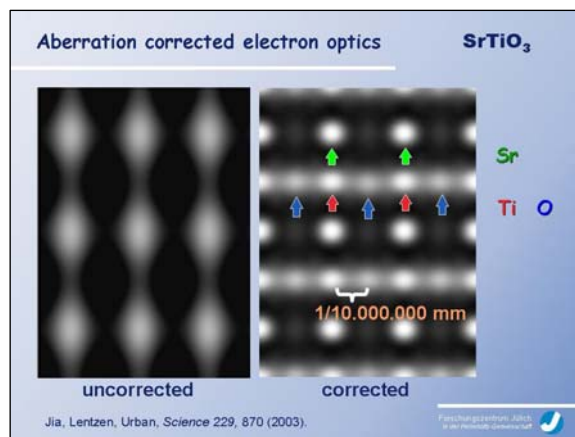
〈図－29〉〈図－30〉〈図－31〉 ユーリヒでの収差補正 TEM の運用試験は当初の数年間、大変忍耐を要するものでした。新たに開発した光学系は完璧に機能したのですが、それ以外の、従来型の技術障害を特定し解決するのに二年の月日を費やしました。この期間にハイダーは装置の電気的安定性を高めるための改良をいくつか実施しました。2000 年末、最終的な収差補正 TEM が完成し、それ以後今日に至るまで素晴らしい性能を発揮し続けています。2001 年 4 月 17 日、サンフランシスコで開かれたアメリカ材料科学会の会議で、私たちのグループは初めて詳細な研究報告を行いました。正真正銘の原子分解能という長足の進歩は、材料科学界の人々に熱狂的に迎え入れられました。最新の成果を聞こうと押し寄せた科学者で会場はごった返し、廊下まで出る盛況ぶりでした。立見の人たちにも聞こえるよう会場の扉は報告中も開け放ったままでした。

その後もユーリヒでは応用研究が続けられ、収差補正顕微鏡によるまったく新しい操作モードを数種類開発しました。新操作モードの仕様はいずれも然るべき理論基盤の上に設計されましたが、特に NCsI と呼ばれる負の球面収差を利用した結像技法は、原子分解能による材料研究の分野にまったく新たな地平を切り開きました。実際、酸化物やセラミクスなど技術的に重要な化合物の研究者は、この操作モードの実現によって初めて、じかに酸素など核電荷の軽い元素の原子像を観察できることとなり（それ以前は顕微鏡下での酸素研究など不可能事でした）、収差補正 TEM の可能性に目をみはっています。

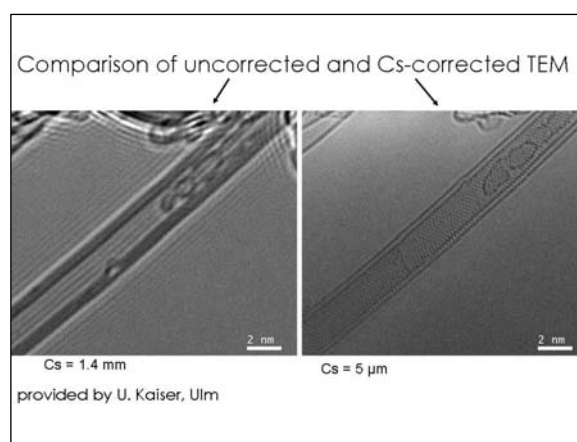




図－32



図－33



図－34

〈図－32〉〈図－33〉〈図－34〉 ユーリヒにおける収差補正 TEM の応用研究は様々な成果をもたらしましたが、その代表例のひとつがチタン酸バリウム ( $\text{BaTiO}_3$ ) やチタン酸ストロンチウム ( $\text{SrTiO}_3$ ) などの誘電体材料における酸素原子個々の原子位置の特定です。 $\text{BaTiO}_3$  と  $\text{SrTiO}_3$  はペロブスカイト構造を持つセラミック材料で、キャッシュカードのメモリチップなど薄膜用の素材として広く利用されています。ペロブスカイト材料の売りである高い誘電性を保証するためには、原子レベルに至るまで均一な化学組成を保持させる必要があります。しかし従来は個々の元素の原子位置を特定できないので化学的手法によってその平均分布を推定する以外なく、材料特性の安定性は十分に確保されていませんでした。そこで収差補正 TEM の原子解析モードを使って新たな計測手法を開発した結果、任意の原子位置における酸素原子個々の分布状況を正確に観察できるようになりました。実際、TEM を使った解析で、従来の薄膜製造技術が工程の途中で素材の化学組成を大きく棄損し、本来酸素が存在すべき三番目の酸素位置が空きになっていることがわかりました。この棄損により素材の電子特性は劇的に変化してしまいます。以上の原子解析から得た知見を有力な科学専門誌で報告すると、大きな関心が寄せられました。このような成果は薄膜形成技術の改良、ひいては素材品質や搭載機器の性能の向上に大いに貢献するものと考えます。

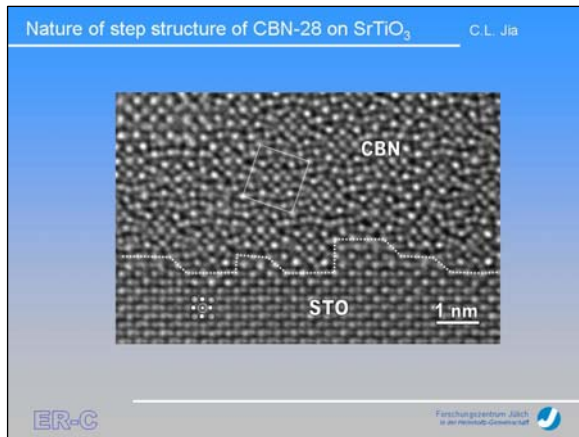


図-35

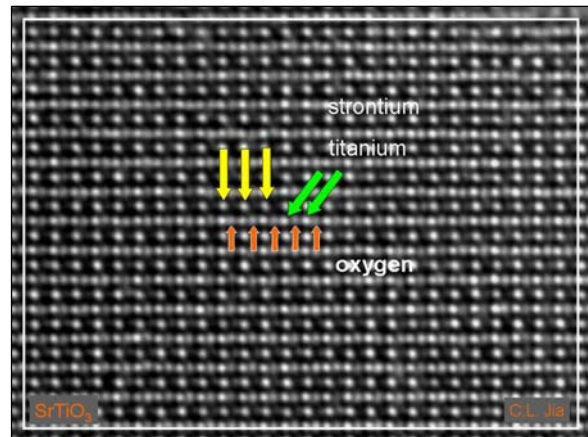


図-36

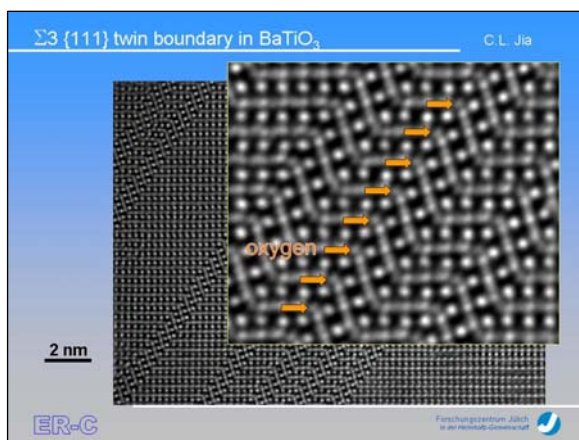


図-37

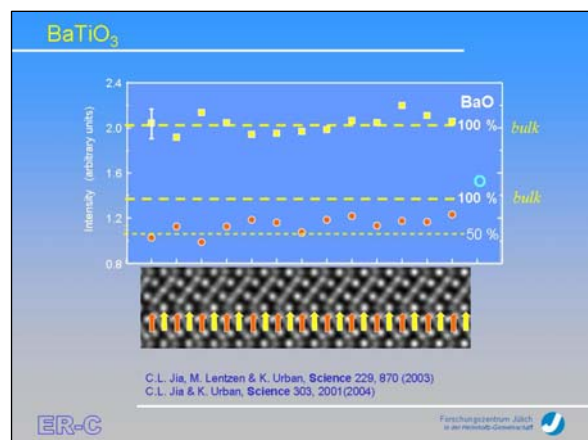


図-38

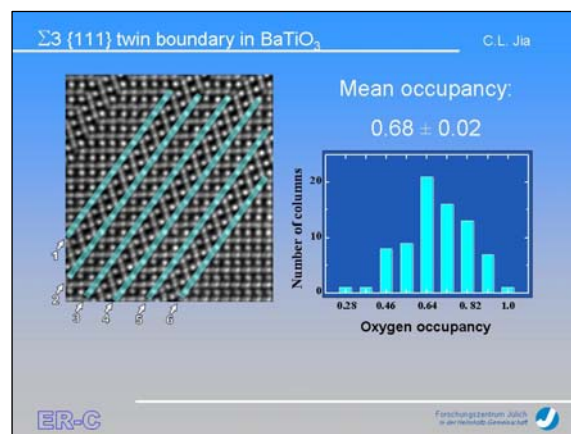
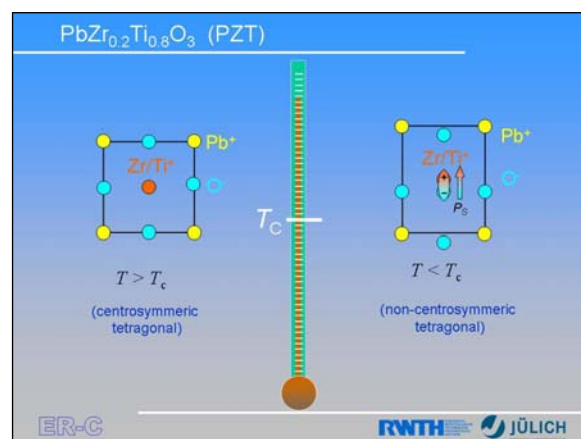


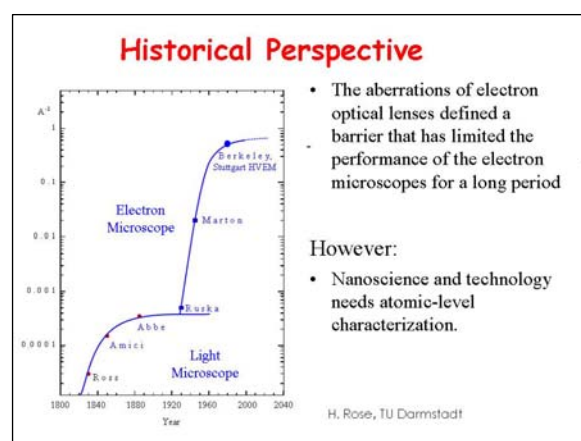
図-39

〈図-35〉〈図-36〉〈図-37〉〈図-38〉〈図-39〉 収差補正 TEM にはこれ以外にも無限の用途が考えられますが、ここではもうひとつだけ利用例をご紹介します。収差補正 TEM でなければなし得ない、ピコメートル精度での原子配置の計測です。1 pm は典型的な原子の直径の100分の1という大きさですから、これは前例のない高精細な原子解析への挑戦です。



図－40

〈図－40〉 強誘電体メモリの薄膜などに使われる強誘電体材料として有名な化合物に  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$  があります。ユーリヒの研究グループは収差補正 TEM を使って、この化合物の強誘電性分極の方向の切り替えに関する原子の詳細を調べました。情報を素材に書き込み保存するという最も基本的なプロセスは、この分極の方向を切り替えることで達成されています。



図－41

〈図－41〉 このように技術的に重要な意味を持つプロセスの原子的背景がわかれば、今後は新たに得られた原子レベルの知見に基づいて、材料の改良や最適な物理特性を備えた新素材の開発が可能になります。



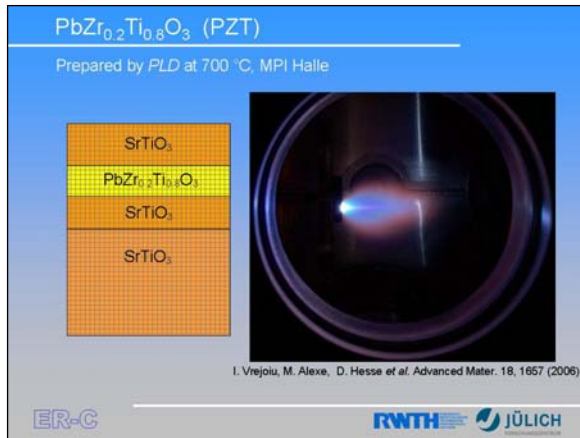


図-42

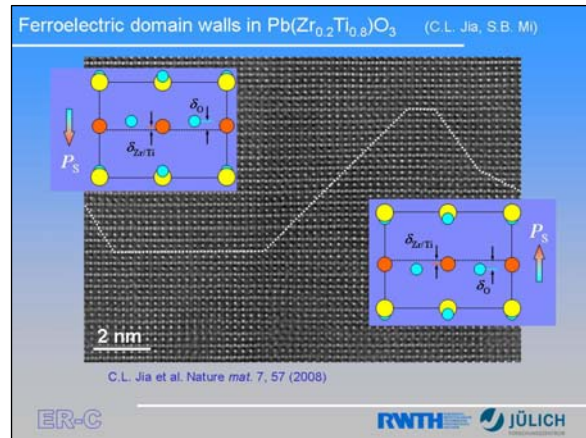


図-43

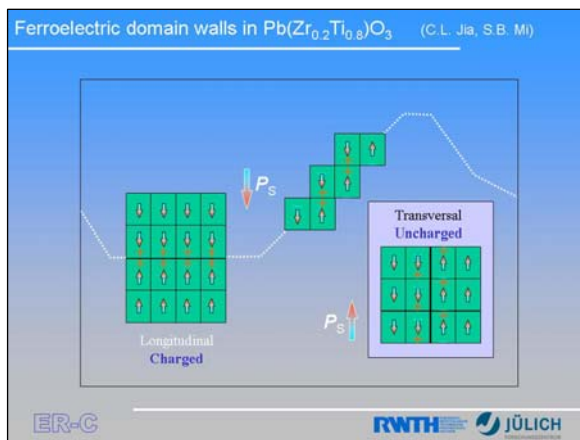


図-44

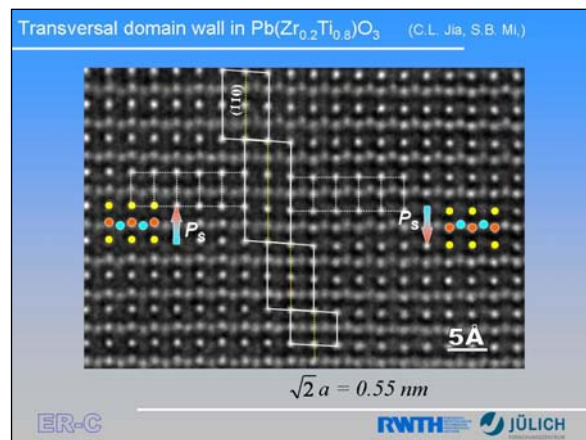


図-45

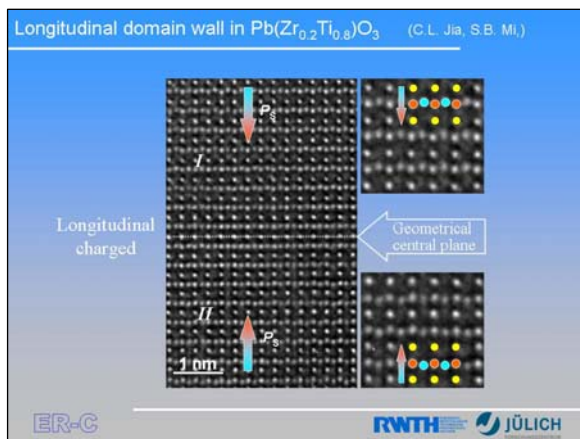


図-46

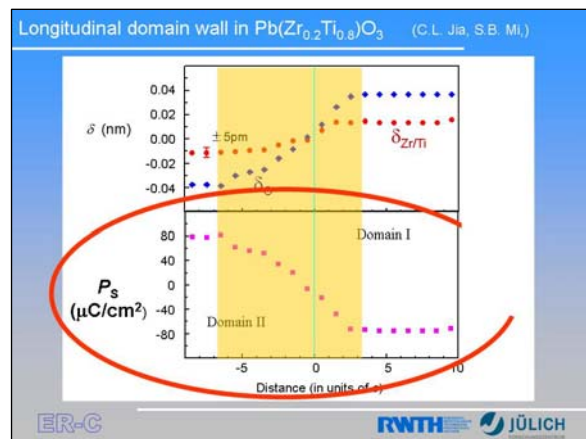
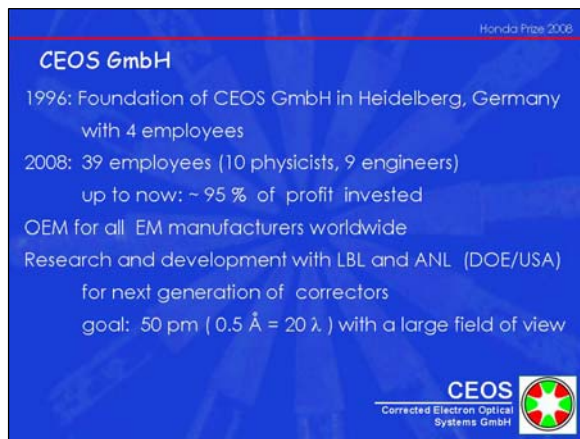


図-47

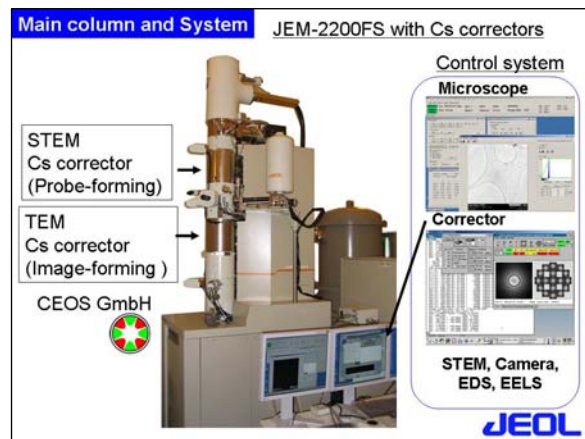
〈図-42〉〈図-43〉〈図-44〉〈図-45〉〈図-46〉〈図-47〉 こうしてリチャード・ファインマンの有名な講演からおよそ半世紀後、収差補正 TEM の登場によって材料科学者の夢は現実となったわけです。



## 5. 収差補正技術の事業化と現状



図－48

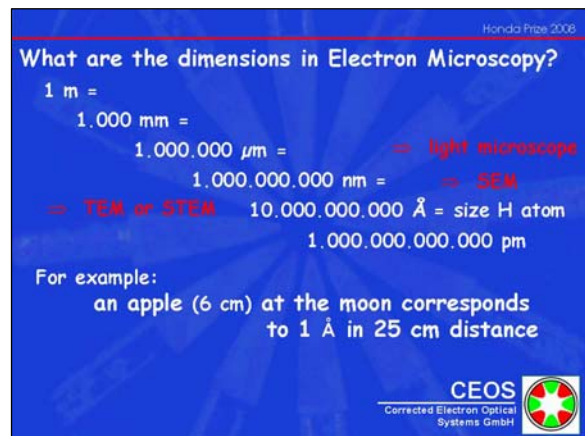


図－49

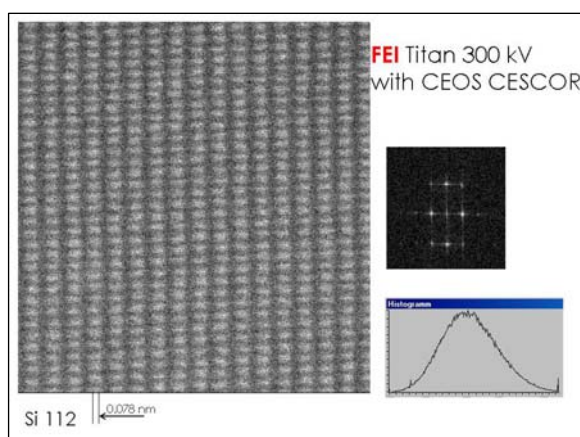
〈図－48〉〈図－49〉 1996 年、マキシミリアン・ハイダーはヨアヒム・ザックと共同でハイデルベルクに CEOS (Corrected Electron Optical Systems) GmbH を設立しました。



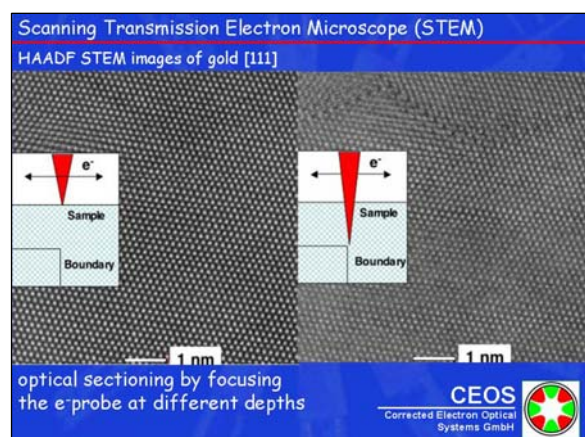
図－50



図－51



図－52



図－53

〈図－50〉〈図－51〉〈図－52〉〈図－53〉 CEOS は透過型電子顕微鏡 (TEM)、走査型電子顕微鏡 (SEM)、走査型透過電子顕微鏡 (STEM) 向けの先進光学製品の研究開発・製造を行っています。主な製品に収差補正器と電子モノクロメータがありますが、新世代器向けの高度先進製品

の開発にも従事しています。設立に当たって資金面の支えとなったのが日本電子（JEOL）からの SEM 用球面収差・色収差補正器の開発注文でした。JEOL 以外の主要顧客に日本の日立製作所、アメリカ（オランダ発祥）の FEI、ドイツのCarl Zeissがあります。現在擁する従業員は 40 名ほどになります。

受賞グループが開発した世界初の球面収差補正透過型電子顕微鏡は、市販用の新世代収差補正 TEM 全体にとって母なる存在であり、旺盛な需要に対して業界の生産能力が追い付いていない現状です。



図－54

〈図－54〉 発展を続ける電子光学業界ですが、関連応用技術の研究機関を含め、いま深刻な人材難に直面しています。この 15 年ほど世界各国の大学が電子光学教育・研究の規模を縮小させてきたせいです。現在、物理学者や技術者の絶対数が不足し、電子光学テクノロジーの専門家の喫緊のニーズに十分対応しきれいていませんし、企業や政府系の研究機関でも収差補正技術によって電子顕微鏡界に開けた新たなチャンスを実現していくエキスパートが不足しています。この新技術は科学政策担当者や出資機関の大いなる関心を集めており、その関心に見合ったイニシアティブが始動され、専門教育・トレーニングの拡充に結びついていくことを願っています。

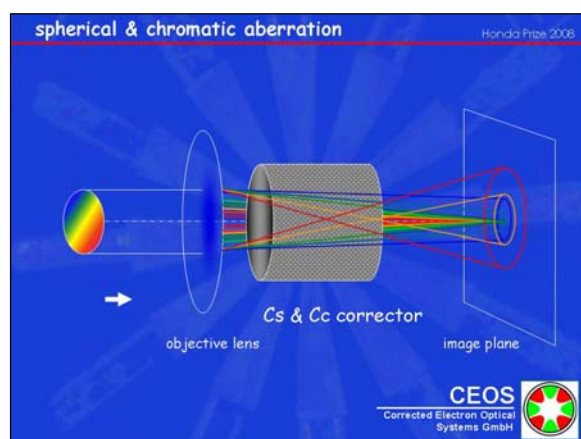
## 6. 更なる進化への挑戦



図－55

〈図－55〉 球面収差補正技術の実現を受け、新世代の収差補正顕微鏡が世界の科学研究所を席卷しようとしています。まだ技術的に改良の余地はあるでしょうか？

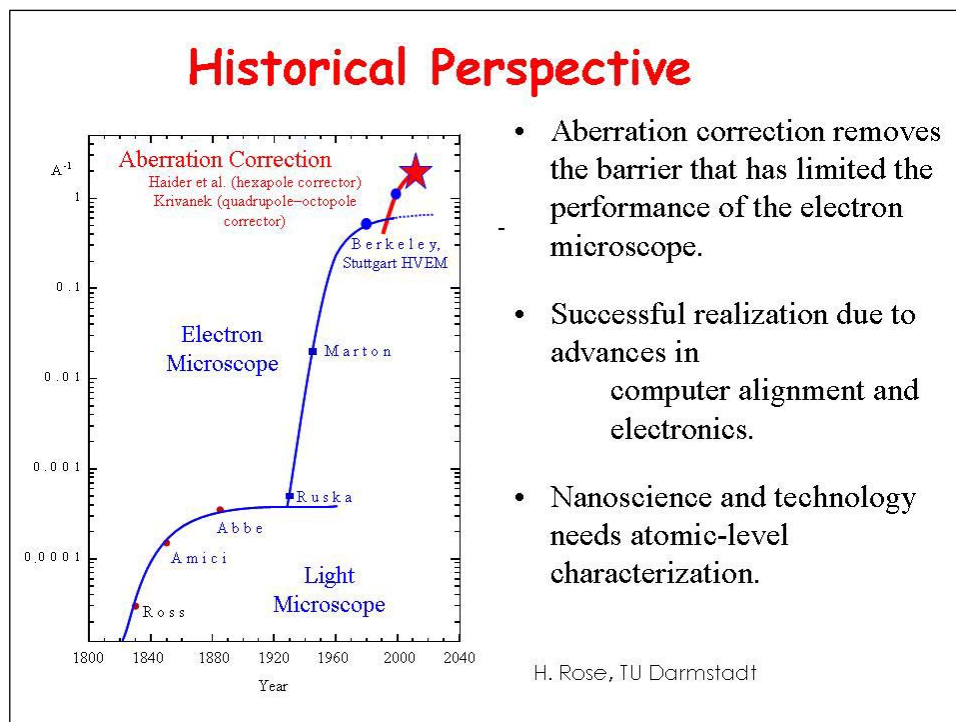
現在、最上位機種は 0.08 nm の分解能によって数 pm 単位の精度で原子位置の計測を可能にしています。更に高精細なイメージングは可能でしょうか？この問いに答えるためには、何が現行器の光学性能を制約しているかを探る必要があります。



図－56

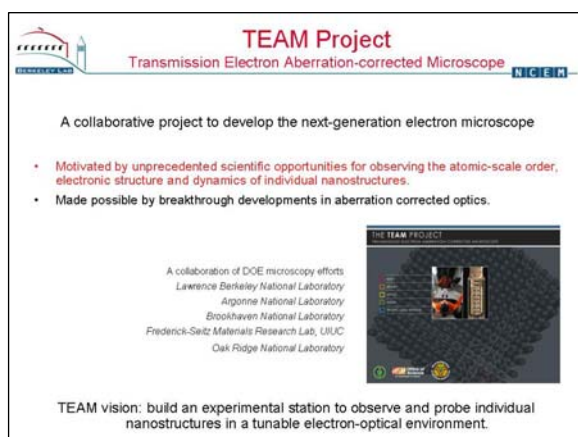
〈図－56〉 分解能に常時影響する要素には、鏡体の機械的振動やノイズなどの外部環境要因からの振動、設置面の振動、気温の変化などがあります。また現代の技術環境に通有する浮遊磁場からも影響を受けます。こうした障害に対しては様々な対策技術を施し、可能な限りその影響を除去もしくは低減しています。以上の物理的障害の他に電子的・光学的な限界が存在します。例えば、電子源から放出された電子のエネルギー幅は有限ですし、電子加速器・電磁レンズ・スティグメータ・偏光器などの主要部品への電気供給も完全に安定させるのは至難の業です。



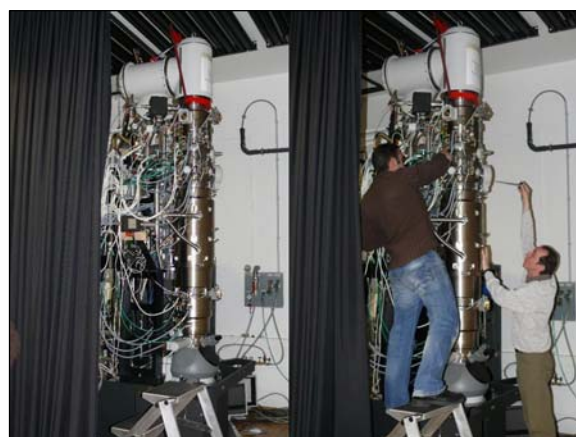


図－57

〈図－57〉 加えて指摘すべきは、これまでに補正できたのは球面収差だけであり、電子顕微鏡の更なる進化を実現するためには対物レンズの色収差を補正しなければならない点です。色収差の影響を最小限に抑える方法はふたつあります。ひとつは電子源の背後に電子エネルギーフィルタ（モノクロメータ）を設置し、電子のエネルギー幅を低減する方法であり、もうひとつは色収差と球面収差を同時に補正する新たな多極子補正器をつくる方法です。その際、最新の技術手段を総動員して供給電流・電圧を電子的に最大限安定させる工夫も欠かせません。



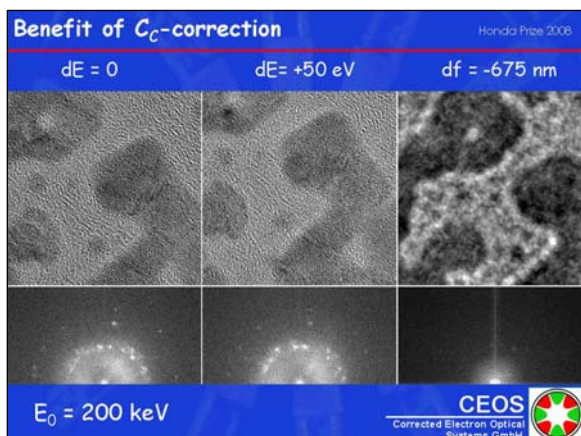
図－58



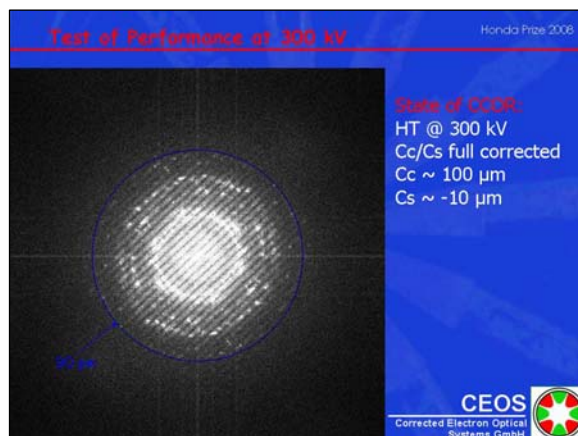
図－59

〈図－58〉〈図－59〉 更なる進化を求めて現在、米エネルギー省で TEAM と呼ばれるプロジェクトが進められています。TEAM の目標は  $0.05 \text{ nm}$  ( $=50 \text{ pm}$ ) の分解能を持つ電子顕微鏡の開発です。この装置が完成すれば、原理的には  $1 \text{ pm}$  の精度で原子位置を計測できるようになります。





図－60



図－61

〈図－60〉〈図－61〉 TEAM プロジェクトの開発作業は主に CEOS が担当していますが、このような遠大な目標を達成するためには現行の球面収差補正器に比べて非常に複雑高度な要件を満たさねばなりません。色収差と球面収差を同時に補正する補正器の全長は、現行の複六極子型補正器のおよそ 3 倍にもなります。CEOS が設計した両収差補正器は 17 個の光学部品で構成され、操作には 150 個の電流ドライバが必要です（六極子型補正器の電流ドライバは 28 個）。色収差補正器の加速電圧・電流の供給系には 1 億分の 1 という空前の相対安定度が要求されます。このような極端に安定的な電源はほんの数年前なら技術的に実現不能であり、CEOS の設計にも最新のエレクトロニクス技術の成果が採り入れられています。TEAM プロジェクトの試作器は現在、CEOS のハイデルベルク実験室に設置されていますが、現段階でも色収差と球面収差の同時補正を実証可能なレベルに到達しており、プロジェクトは目標期間内に成功裏に完了する見通しです。本装置完成の暁には、第一世代の収差補正顕微鏡に倍する分解能が科学者に供されることになります。



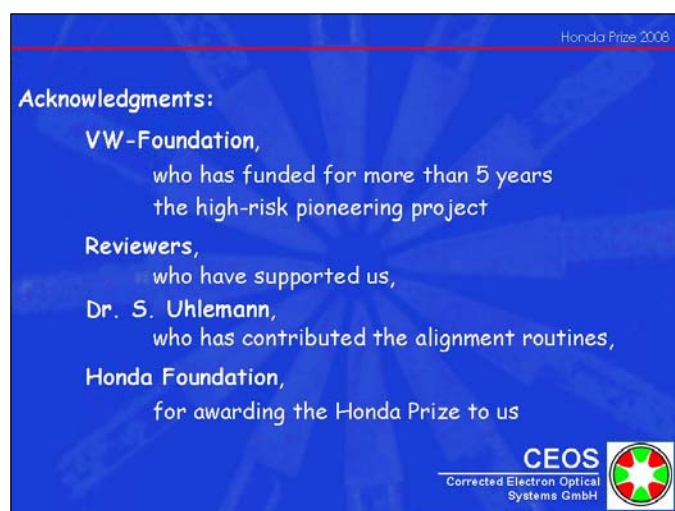
図－62



図－63

〈図－62〉〈図－63〉 とはいえ、分解能の向上それ自体が目的なわけではありません。高性能顕微鏡は最先端の研究現場において、CO<sub>2</sub> フリー発電所や高効率太陽電池の研究開発に、あるいは生命科学の人工光合成、生体細胞機能、生体機能分子やその集合体の研究に使われてこそ真価を発揮します。私たちの生きるこの世界をより深く理解し、今より健全で暮らしやすい世界を築くために、そして子供たちや未来の世代に手つかずのまま引き渡すためにこそ私たちの電子光学技術は存在するのです。

## 謝 辞



図－64

〈図－64〉 収差補正 TEM プロジェクトの成功は寛大な資金提供を続けられたフォルクスワーゲン財団、ならびに当プロジェクトを評価し推奨してくださった審査員の皆様の賜物です。私たちは大目標に到達するために数々の小目標を設定しました。それらは技術的にも精神的にも困難なプロジェクトを完遂する上でとても重要な里程標でした。例えば、ステファン・ウーレマンの弛まない努力なしに装置の配置手順は完成しなかったでしょう。最後に、栄えある本田賞を贈ってくださる本田財団のご決定を大変名誉に感じております。このような高名な賞を与えていただき感激に堪えません。

〈MEMO〉

■このレポートは本田財団のホームページに掲載されております。

講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得て下さい。



財団法人 本田財団  
**HONDA FOUNDATION**

発行責任者 原 田 洋 一  
Editor in chief Yoichi Harada

104-0028 東京都中央区八重洲 2-6-20 ホンダ八重洲ビル

Tel. 03-3274-5125 Fax. 03-3274-5103

6-20, Yaesu 2-chome, Chuo-ku, Tokyo 104-0028 Japan

Tel. +81 3 3274-5125 Fax. +81 3 3274-5103

<http://www.hondafoundation.jp>