総合報告

表面科学 Vol. 23, No. 5, pp. 262−270, 2002

低エネルギー電子顕微鏡（LEEM）と光電子顕微鏡（PEEM）の像形成過程と将来展望

越　川　孝　範

大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所・学術フロンティア推進センター
〒572−8530　大阪府寝屋川市初町 18−8

（2002 年 2 月 28 日受理）

Image Formation Processes of LEEM and PEEM and Its Future Trend

Takanori KOSHIKAWA

Fundamental Electronics Research Institute, Academic Frontier Promotion Center, Osaka Electro-Communication University
18−8 Hatsu-cho, Neyagawa, Osaka 572−8530

(Received February 28, 2002)

Image formation processes of LEEM and PEEM are described in detail. This study is important in understanding the surface processes by use of such microscopes. LEEM images can be understood by the diffraction and interference contrast. The latter can be classified into geometric phase and quantum size contrast. The LEED patterns that are obtained with LEEM optics are different from those observed with the conventional LEED optics. This characteristic should be taken into consideration in the analysis of LEED patterns in LEEM optics. The future trend in LEEM and PEEM is also described. Improvement of the lateral resolution is being made by adopting the mirror corrector and the new image processing method.

1. は　じ　め　に

表面顕微鏡は表面の局所的な情報を拡大して得ようとするものであるが，大きく分けて 2 種類のイメージング方法がある。

（1）入射ビームを走査する方法：これには走査型電子顕微鏡（SEM），走査型反射電子顕微鏡（SREM）（または μ-RHEED ともいう），走査型オージェ電子顕微鏡（SAM）等である。

（2）像を投影する方法：これには非常に多くの手法がある。いくつか例をあげると，反射電子顕微鏡（REM），低エネルギー電子顕微鏡（LEEM），光電子顕微鏡（PEEM），2 次電子・電子顕微鏡（SEEM），スピン偏極 LEEM（SPLEEM），分光・光電子顕微鏡付き LEEM（SPELEEM）等。これらは未だ一部で電子を励起する方法（電子，イオン，フォトン等）や検出する信号に応じていろいろな組み合わせがあり，実に多くの種類がある[1)]。

入射ビームを操作する方法はすでにいろいろな分野に広く使用されていて，なくてはならない表面の観察手法になっている。一方像を投影する方法は多くの場合実時間で像を得られる場合が多く，大きな特徴になっている。その中でも REM は高エネルギーの電子を試料の表面に低角度で入射して表面の像を得る方法であり，東京工大の本庄や八木らが世界に先駆けて超高真空状態で観察できる装置を開発し，表面に関する多くの知見を報告してきた[2)]。しかし，ここでは比較的低エネルギーの電子を使用する手法に話題を限定する。このような手法は分解能的には REM に比べて劣るが，像に寸詰まりがない等大きなメリットがあり，最近急速に普及しつつある。**Fig. 1** にこれらの装置の概要をまとめた図を示す[1)]。実に多くの種類の顕微鏡があることがわかる。ここでは特に低エネルギー領域の電子の像を得る LEEM と PEEM について述べる。

E-mail: kosikawa@isc.osakac.ac.jp

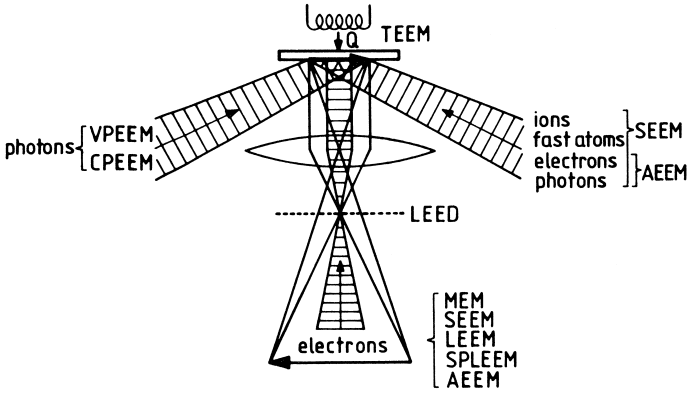


Fig. 1 Surface imaging methods with a cathode lens (Emission microscope).[1] LEEM: Low energy electron microscope. PEEM: Photoelectron emission microscope. VPEEM: PEEM excited by UV light. CPEEM: PEEM excited by X-ray or synchrotron radiation, this is called also XPEEM. SEEM: Secondary electron emission microscope. AEEM: Auger electron emission microscope. MEM: Mirror electron microscope. SPLEEM: Spin-polarized electron microscope.

低エネルギーの電子を情報源とする顕微鏡いわゆる Emission Microscope の開発研究の歴史は古く[3]，電子顕微鏡の開発がドイツで始まる以前に遡ることができる。しかし，電子レンズを用いて本格的な開発が始まったのは，電子顕微鏡の開発が行われ始めた 1930 年代のドイツであった。その後，ドイツを始めとするヨーロッパ，日本，アメリカ等で精力的な開発が進められた。初期のころの研究では，ドイツのベルリン工科大学や AEG，アメリカでは RCA や Bell Lab.，日本では阪大の菅田の名前が見られる。その後，1940–1970 年代にかけては，更に多くのグループが開発に参加した。ドイツの Tübingen 大学における Moellenstedt グループの活発な研究が目立つ，また Barzers は熱励起とイオン励起による“Metioskop”を売り出している。また，日本における研究も活発に行われ，1960 年代には名大の丸勢のグループが内川らとイオン励起の Emission Microscope の開発に取り組んでいる[4]。また，日本電子からも商品としての MEM が売り出された。1961 年にアメリカの China Lake の Michelson Lab. で Bauer が今日広く普及している LEEM/PEEM の原型になるガラス製の LEEM 装置を設計している。1980 年になると，日本では早大の市ノ川による PEEM や LEEM（当時は LEERM といった）の開発が行われている[5]。1985 年には Telieps と Bauer により，表面研究に実用的な応用が可能な LEEM/PEEM が開発された[6, 7]。現在広く普及しているのは Bauer のグループが開発したものが基礎になっている。この成功をもとにして，種々の機能をもった多機能な顕微鏡が開発されつつある。最近では Emission Microscope という名称はほとんど使われず，もっぱら LEEM とか PEEM またはそれぞれの機能を特徴づける名前を使用する場合が多い。現在，この分野のまとまった報告をすることができる国際会議として“LEEM/PEEM Workshop”が Bauer により立ち上げられ，第 1 回は 1998 年米国のアリゾナで，第 2 回は 2000 年フランスのパリで行われた。今年は米国のアルバカーキで開催される。

このように LEEM/PEEM の開発の歴史に果たした我が国の役割も大きかった。しかし，実用的な装置が開発された後での我が国における普及が遅れた経緯がある。その辺りの事情については「Preface」で Bauer が事情の一部を述べている。世界的にみると表面の研究に広く使用されだしている。いろいろな情報が得られ，今後の発展が期待されているという事情があることをふまえ，その基礎的な過程について述べるとともに，その将来展望について述べてみたい。なお，スピンの検出を目的としてスピン偏極した電子源を用いる SPLEEM や放射光の偏光を利用した磁区観察についての原理と結果についてはここでは述べない。

2．LEEM/PEEM 装置の概要

Fig. 2 に Telieps と Bauer により開発された最初の装置の概略図を示す[6]。現在使われている装置の多くがこのような基本構成をもっている場合が多い。左下にある電子源から出射した電子は加速され，照射レンズ系と中央にあるコイル等で試料に垂直に入射する。このとき，入

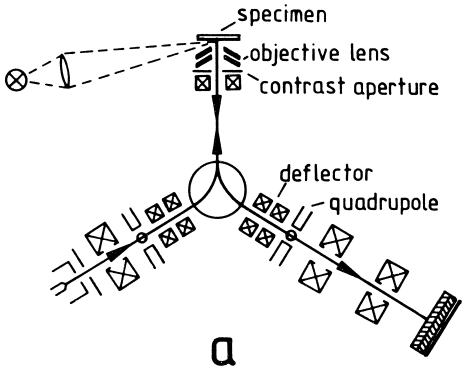


Fig. 2 Low energy electron microscope (LEEM) and Photoelectron emission microscope (PEEM).[1)]

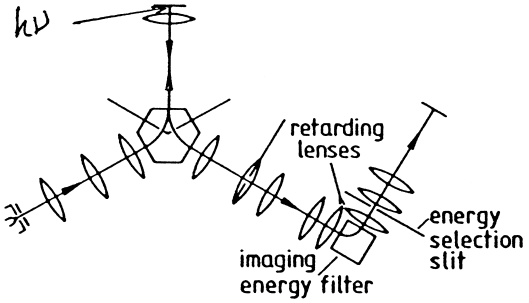


Fig. 3 LEEM and PEEM with the energy filtering system.[1)]

射電子は試料の直前で急激に減速され，試料に垂直に入射する。試料と相互作用を行い弾性散乱された入射電子が加速電場により，急激に加速され対物レンズ，中央のコイル，イメージングレンズにより偏向・拡大された像がMCPで増幅され，蛍光板上に結像されることになる。このとき，電子顕微鏡と同じように（00）スポットの反射電子線を拡大する明視野，また回折スポットを拡大する暗視野像を得ることができる。このようにして得られるのがLEEM像である。この時の入射エネルギーは数−数十eVであり，0 eV前後になると，試料表面での電界効果により試料の内部には侵入せず表面で鏡面的に反射される，いわゆるmirror像が得られる。つまりmirror像は表面の凹凸等で生じる電界分布により像が生じることになる。このようにMirror像とLEEM像は，その像が持っている情報は全く異なる。 現在LEEM像として，LaB_6電子源を使用した場合，約7 nm，電界放射型の電子源を使用した場合，約5 nmの最高分解能が得られている。また，同じ結像系で入射電子線を使用する代わりに，Fig. 2の左上部に示すようにフォトンを入射させた場合は，光電子のイメージングを行うことができる。これが，PEEM像である。通常実験室では水銀ランプを用いてPEEM像を得るが，このときには主に表面の電子が放出されるときのバリヤーの働きをする局所的な仕事関数の変化を見ていることになる。入射フォトンのエネルギーを大きくし（数十−数keV），イメージングコラムに電子のエネルギーフィルターを入れた場合には，XPSの情報に対応する信号が得られる。このようにして，化学的な結合状態を像として得る手法をXPEEMという。また，同時にLEEM像を同じ結像系でとることができる顕微鏡をSPELEEM（Spectroscopic Photo Emission and Low Energy Electron Microscope）という。フォトンが内殻電子を励起する確率が小さいため，このようなイメージングを行おうとすると，通常強度が強い光源である放射光を使用するのが一般的である。このような装置の概略図を**Fig. 3**に示す[8, 9)]。

3．LEEMの像形成過程

PEEMの像形成に関しては，前の節で簡単に述べた。ここでは，より複雑であると考えられるLEEM像の形成過程につき述べる[1)]。**Fig. 4**にLEEMのコントラストが得られるメカニズムを示す。Fig. 4 a，bは明視野像を，Fig. 4 cは暗視野像を得ていることになる。このような像の取り方は透過電子顕微鏡と全く同じであり，3. 1に述べる回折コントラストにより像の明暗があらわれることになる。それ以外に電子波の干渉によるコントラストが生じる。このコントラストにより，表面の単原子のステップや薄膜の膜厚の違いによるコントラストが生じる。この様子をFig. 4 d，eに示す[1)]。これらについての詳しい説明を3. 2で行う。

3. 1 回折コントラスト

試料は単結晶を使用する場合がほとんどである。そのときの，低エネルギー電子の（00）スポットの反射率を測定した例を示す。**Fig. 5**はW(110）面からのI_{00}（反射率）を実験的に得たものである。下には，〈110〉方向のバルクのバンド構造が示してある。I_{00}はバルクのバンド構造をそのまま反映するわけではない。入射エネルギーが1−6 eVのあたりでは，バルクのバンド構造では禁制帯になっているため電子がすべて反射しなければいけないはずだが，そのようにはなっていない。また，13.5 eVあたりにあるピークも説明できない。これらのことを説明しようと思うと，以下のようなことを考えなくてはいけない。

(1) 電子線の多重散乱，
(2) 電子線の浅い侵入深さ（表面付近の情報をもたらす），
(3) 電子線の非弾性散乱効果，

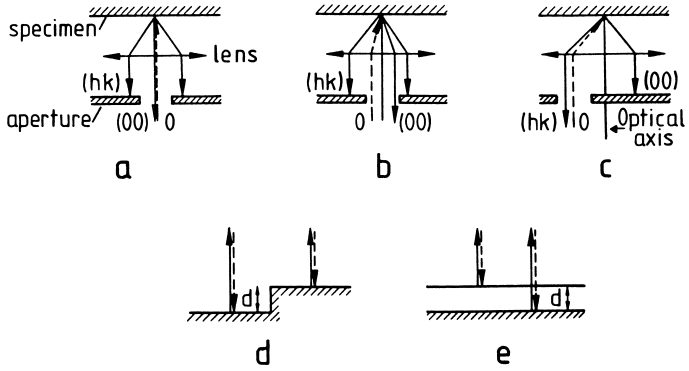


Fig. 4 Contrast mechanism. (a, b) bright field, (c) dark field, (d, e) interference contrast. (d) geometric phase contrast, (e) quantum size contrast.[1)]

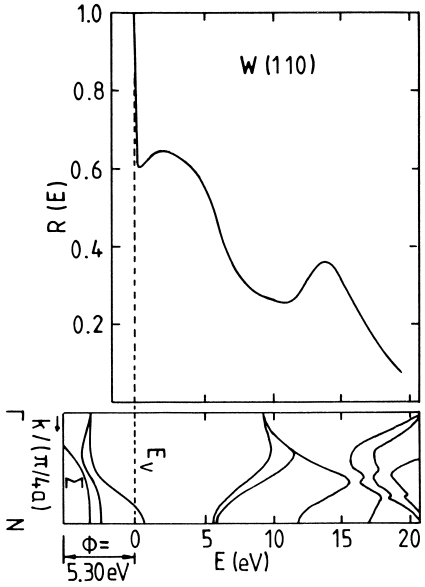


Fig. 5 Reflection coefficient of W(110) surface for slow electrons and the bulk band structure of W along the 〈110〉.[1)]

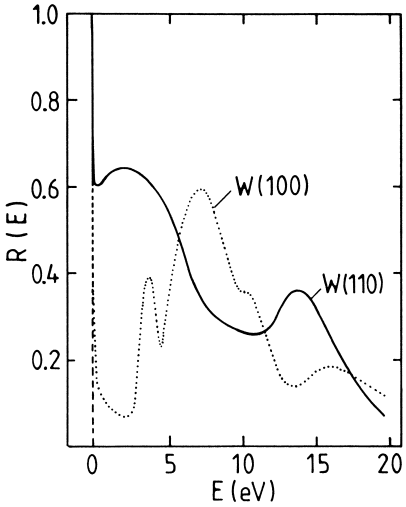


Fig. 6 Specular reflectivity of W(110) and W(100) surfaces at normal incidence.[1)]

(4) 表面での結晶試料の再配列や緩和,
(5) 表面準位の影響,
(6) 表面付近にある欠陥等

である。ちなみに結晶面が異なると反射率も異なってくる。この結果を **Fig. 6** に示す。W(110) と W(100) の場合の反射率を比較した結果である。このように，同じエネルギーでも非常に異なった反射率を示すことがわかる。このような原因でコントラストが生じるのが回折コントラストといわれるものである。

3. 2 干渉コントラスト

(1) 幾何学的位相コントラスト

Fig. 4 d，e には，もう 1 つのコントラストである干渉コントラストが生じる様子が示してある。Fig. 4 d は幾何学的位相コントラストを，Fig. 4 e は量子サイズコントラストをあらわしている。前者は単原子ステップによる位相コントラストが生じる理由を示している。これについて，もう少し詳しく述べる。Altman のグループがこのコントラストが生成する過程の計算を行っているのでその結果を示す[10)]。**Fig. 7** はその計算のモデルである。一原子層のステップが存在することによる位相の違いを，光源と像の位置が有限であるフレネル回折の考え方を用いて計算を行っている。その結果を示したのが **Fig. 8** である。ϕ はステップを横切るときの位相シフトであ

る。横軸のステップからの距離の単位はステップ高さ a_0 である。0がステップの位置を表す。負符号側が上部テラス側に対応している。これを見ると，ステップ位置からかなり離れた距離までコントラストが広がっていることがわかる。このことが原子オーダの空間分解能を持たないLEEMで単原子ステップが観察できる理由である。また，位相シフトによりコントラストが反転していることもわかる。この結果はLEEM像からどちらが上のテラスであるかを判定する唯一の手がかりを与える。**Fig. 9**（a），（b），（c）に実際に得られたMo(100）面の単原子層ステップの像を示す。（a）はE＝8.50 eVで ϕ＝1.50 π，（b）はE＝23.5 eVで ϕ＝2.49 π，（c）はE＝34.0 eVで ϕ＝3.00 π の場合の結果である。位相が変わるにつれてステップのコントラストが反転していることがわかり，どちらが上部のテラスかがわかる。

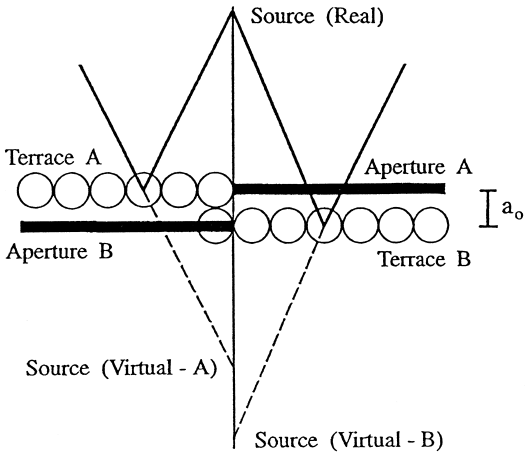


Fig. 7　LEEM step contrast model.[10]

（2）量子サイズコントラスト

次に，量子サイズコントラストについて述べる。この量子サイズコントラストは入射電子線のエネルギーが小さいために電子波の波長が単原子オーダの薄膜で干渉するために生じるもので，低エネルギーの電子線を用いることから容易に得られるようになった。これもAltmanのグループが実験と計算を行っているので，その実験結果と計算結果を示す[11]。Sb/Mo(001）の実験結果を**Fig. 10**（a），（b）に示す。（a）はE＝4.5 eVで（b）はE＝5.5 eVである。島のコントラストが反転していることがわかる。Fig. 10（a）で明るいところは，Sbが2原子層成長し，暗いところは3原子層成長している。入射エネルギーを4.5 eVから5.5 eVに変えるとコントラストが反転している｛Fig. 10（b)｝。残念ながら同じ系に対する計算は行われていない。**Fig. 11**には低エネルギー電子回折で使用している動力学多重散乱法を使用して計算を行ったCu/W(110）の計算と実験結果を示す[11]。当然のことであるが，入射エネルギーに対して反射電子線強度が周期的に変化している。これが量子サイズコントラストの成因である。

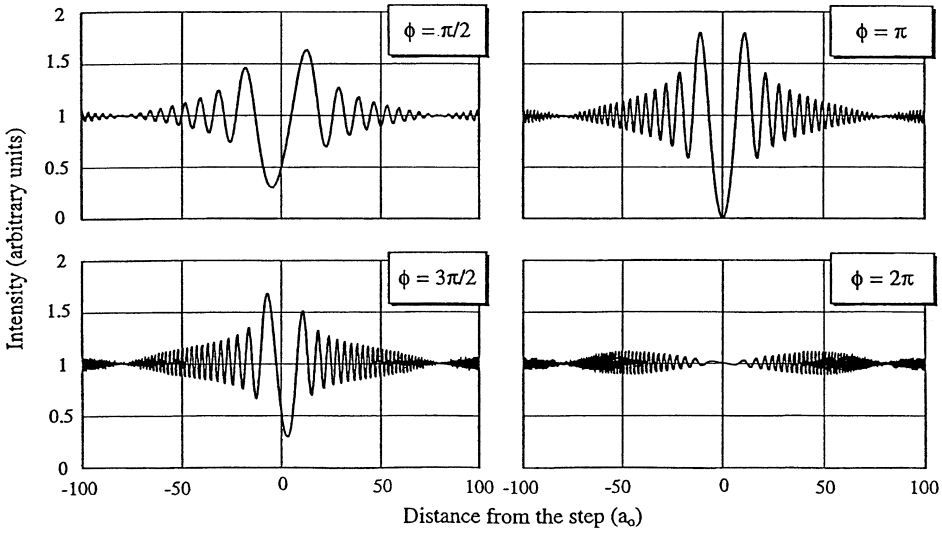


Fig. 8　Step contrast calculated for several values of the wave phase shift, ϕ, across a step. The upper terrace is in the negative half-space. The parameter a_0 is the step height. The source and image plane distance are 1000 a_0 and 40 a_0.[10]

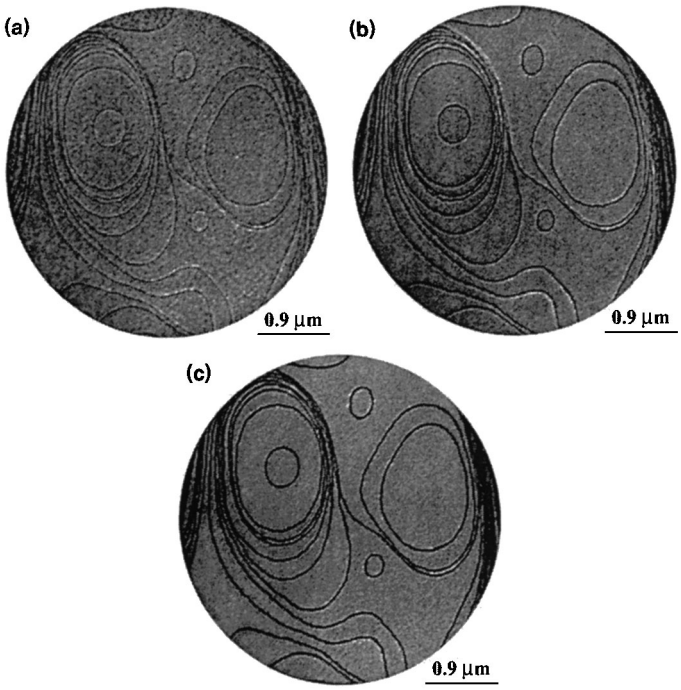


Fig. 9 LEEM images of monoatomic steps on the clean Mo(100). The imaging energies (phase shift) are (a) E＝8.50 eV (ϕ＝1.50 π), (b) E＝23.5 eV (ϕ＝2.49 π), (c) E＝34.0 eV (ϕ＝3.00 π).[10)]

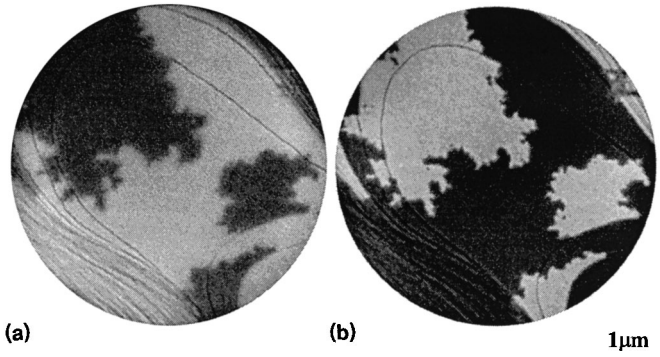


Fig. 10 LEEM images of two and three ML Sb films on the Mo(001), (a) 4.5 eV, (b) 5.5 eV.[11)]

4．LEEM Optics における LEED パターンの解析

LEED パターンは表面原子の配列を反映している。このパターンを解析することにより，表面の原子の配列を解析することが可能である。LEEM では制限視野アパーチャにより表面の局所的な部分からの LEED 像を得ることができるので，表面が一様でない場合，局所的な場所の構造を解析できる可能性がある。現在のところ 0.1–0.2 μmϕ 程度の領域からの LEED パターンを得ることができる。ところが，LEEM Optics を使用して LEED 像を得る場合は，通常の LEED Optics を用いて得る LEED 像と基本的に異なる点がある。ここでは，そのことについて述べる[12, 13)]。

Fig. 12 は LEEM Optics を用いて LEED パターンを得る場合の模式図である。V_0 は入射電子エネルギーに対応するバイアス電圧だと考える。V は LEEM Optics に

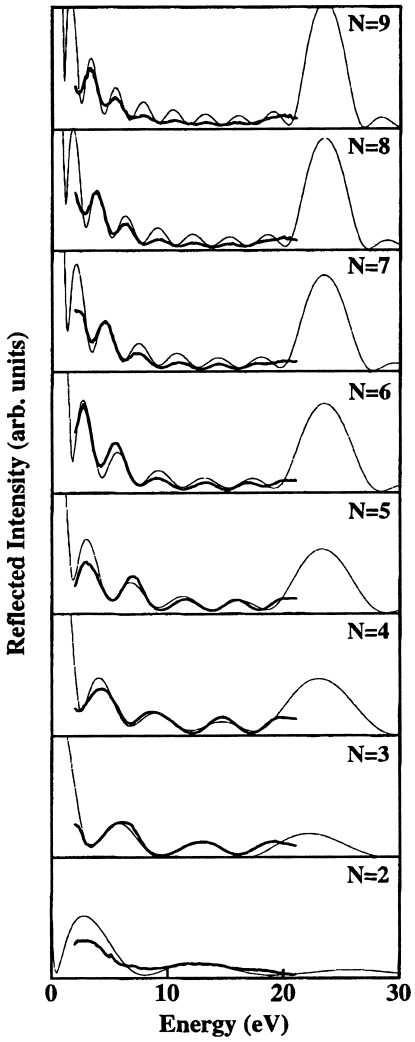
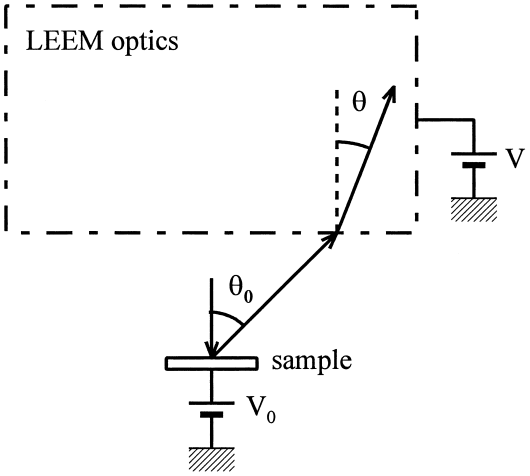
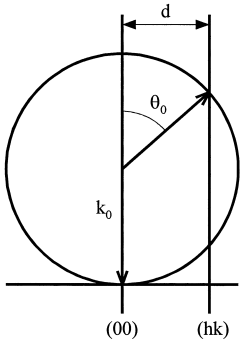


Fig. 11 Quantum size effect interference peaks for N atomic layer thick Cu films on W(110): experimental (thick line) and the calculation (thin line). The large feature above 20 eV in the predicted curve is a Bragg peak associated with the Cu film.[11)]



$$\sin\theta = \sin\theta_0\sqrt{\frac{V_0}{V}}$$

Fig. 12 Schematic diagram of the LEED pattern formed on the screen in the LEEM optics. The high voltage is applied to the LEEM optics. The primary energy of the electron is shown as V_0.[12, 13)]



$$\sin\theta_0 = \frac{d}{k_0}$$

$$k_0 = 1/\lambda = \sqrt{\frac{V_0}{150}}$$

observed angle of diffracted beam θ

$$\sin\theta = \sin\theta_0\sqrt{\frac{V_0}{V}} = d\sqrt{\frac{150}{V}}$$

θ does not depend on electron energy

Fig. 13 The observed angle θ on the screen is shown by using the de Broglie equation. The primary electron is perpendicular on the surface. The $\sin\theta$ does not depend on V_0.[12, 13)]

かけている高電圧である。通常，5–25 kV 程度の高圧電圧をかけている。θ_0 は入射電子が試料の垂線となす角度，θ は LEEM Optics に入射し最終的にスクリーン上に電子線が入射するときの角度である。$\sin\theta$ と $\sin\theta_0$ の間には Fig. 12 の下部に示すような関係がある。今試料が入射電子線と垂直になっているとすると，**Fig. 13** のような回折条件が得られる。それぞれ 2 次元の逆格子ロッドとエバルト球が描いてある。今（hk）スポットの回折点が θ_0 の方向に生じたと考える。（00）と（hk）との間の逆格子の距離を d，入射電子の $\boldsymbol{k}$ ベクトルを $\boldsymbol{k}_0$（大き

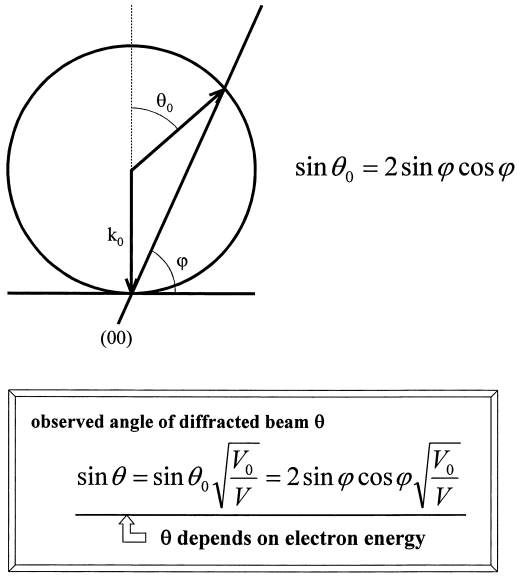


Fig. 14 The observed angle θ on the screen is shown on the inclined surface to the primary electron. The sinθ depends on V_0.[12, 13]

さを k_0 とする），λ を入射電子線の波長とすると，sinθ_0 と k_0 はドウ・ブロイの物質波の関係から，Fig. 13 の右に示すようになる。すると，スクリーン上で観察される回折スポットに対する角度 θ に対して，Fig. 13 の下部に与えたような関係が得られる。これを見ると，sinθ は d と V だけで与えられることがわかる。V_0 つまり入射電子のエネルギーに関係しない。このことは，LEEM Optics で LEED パターンを見ると，入射エネルギーを変えても，回折パターンの位置が動かないことに対応している。

しかし，表面にファセットのように傾いた面が生じた場合にはどのようになるだろうか。その様子を示したのが **Fig. 14** である。ファセット面が表面から ϕ だけ傾いていると考える。その場合の，（00）スポットの角度を θ_0 とする。すると，θ_0 と ϕ との間には Fig. 14 の右に示すような関係がある。そのことを考慮して，やはりスクリーン上での角度 θ に対応する sinθ を求めると, Fig. 14 の下部にあるような関係が得られる。これを見ると, sinθ は入射エネルギー V_0 に依存している。つまり，入射エネルギーを変えると，回折パターンの位置が動くということである。高次の回折に対しても同じように，回折パターンは動く。このことを利用すると，入射電子線に垂直な表面と傾いた表面を区別することができ，容易に回折パターンの解析ができる場合がある。その例が本特集号の安江と越川が執筆した論文等に示してある[12, 13]。

5. 将 来 展 望

LEEM/PEEM が実用的に使用され始めてから約十数年以上が経過した。その間分解能等の向上，磁区構造観察，特定のエネルギーの光電子等をイメージングする手法の開発等さまざまな新しい技術が開発されてきた。多機能性を持っているために表面や界面の研究分野では強い注目を浴びている。しかし，空間分解能という意味では通常の TEM や SEM 比較すると劣る。そのために分解能を向上させる試みが精力的に行われている。勿論，対物レンズ等の球面収差等を小さくするということについては従来から多くの試みが行われてきた。しかし現在は球面収差を取り除いて分解能を向上させようという試みが進行中である。原理的には電子光学系は凸レンズしかないために球面収差を取ることができなかった。この収差を取るために 50 年来世界中で研究が行われてきたが成功しなかった経緯がある。最近原理的に取れない球面収差を電子顕微鏡で取ることに成功した例が報告されている。1 つはハード的に電子の軌道を修正する手法であり[14]，もうひとつは画像処理の手法を応用した実時間焦点位置変調球面収差除去法を使用するものである[15]。どちらも成功を納め見事な像が取れ始めている。このような手法を LEEM や PEEM に応用しようというものである。現在 Ag/W(110) のエネルギー分光をした像で得られている分解能は 22 nm である[8]。球面収差等をとりナノメータオーダの分解能を得ようというものである。勿論エネルギーの大きさも異なるため簡単に応用することはできない。1 つはドイツの放射光施設 BESSY-II で使用することを目的に開発が行われている SMART 計画というものである。これは Rose らが考案したミラーコレクターを使用する手法である[16, 9]。ミラーコレクターで電子の軌道を修正して球面収差を取るということに変わりはない。もう 1 つは著者らが現在進めているプロジェクトによるもので，実時間焦点位置変調法を応用したものである。これは大阪電通大の生田によって提案された手法である。いずれも現在開発中であるので最終的な結果はでていないが，分解能向上が期待されている。

これまで LEEM は明視野像や暗視野像を得るため反射電子線や回折電子線を用いていたため，単結晶をベースにした試料の観察を行い多くの成果が上げられてきた。多結晶等の実用材料への応用は試みられてきたが期待したような結果が得られていなかったことも事実である。そのために LEEM は一部の表面の研究者が使うものであるというイメージができあがってきた。しかし，最近新日鐵の林らは鉄鋼の実用試料の観察を LEEM で試みた[17]。実に見事に相転移や欠陥や転位等の生成・消

滅等を実時間で観察した。従来の透過電子顕微鏡と異なるところは，薄膜にせずに観察ができるので，薄膜にしたために転位や欠陥の生成の状況が変わる効果を防ぐ状態で観察できることである。このようにLEEMは実用材料にも使われようとしている。分解能の向上が実現されれば，多機能性という大きなメリットを生かしてさらに多くの研究や開発に使用されることになる日も近いと思われる。

我が国では研究の立ち上げが遅れたが，これからは性能の向上等を積極的に進め多くの成果が上がることを期待したい。

謝　辞

著者がドイツの北部ハルツ山の小さな町にあるクラウスタール工科大学に滞在した22年前に研究の指導を受けたBauer教授が私をこの方面の研究に導いてくださった。私がBauer教授の研究室に滞在していたときはまだLEEM/PEEMは完成していなかった。Teliepsがドクターを取るため，ものになるのかどうか未だ見通しがつかない装置と格闘していた。しかし，そのわずか数年後に見事な像が発表され出した。最初の試作機から25年近い年月が流れている。残念ながらTeliepsはその2年後に交通事故で亡くなってしまった。Bauer教授が行ってきた研究のスパンは随分長いが，教授の卓越した能力と地道に努力を行った結果がこのような成功を導き出したと思っている。永年近くで見てきた著者としては実に感慨深いものがある。このような分野の研究の方向を示してくださったBauer教授に深く感謝したい。

また，我々がこのような研究を行うことができるのは日本学術振興会マイクロビームアナリシス第141委員会の援助に寄るところが非常に大きい。ここに各委員の方々に深く感謝を表したい。

また，我々が得てきた結果とこれからのプロジェクトは以下のサポートを受けているので併記し感謝したい。科学研究補助金・学術創成研究費（13 GS 0022），科学研究補助金・創成的基礎研究費（09 NP 1201），科学研究補助金・国際共同研究費(現，基盤研究C，10044184)，文部科学省・学術フロンティア推進事業費および村田科学技術財団補助金等である。

文　献

1) E. Bauer: Rep. Prog. Phys. **57**, 895 (1994).
2) K. Yagi: J. Appl. Cryst. **20**, 147 (1987); 八木克道：応用物理 **55**, 1036 (1986).
3) O.H. Griffith and W. Engel: Ultramicroscopy **36**, 1 (1991).
4) Y. Uchikawa, M. Kojima, M. Ichihashi and S. Maruse: Jpn. J. Appl. Phys. **8**, 436 (1969) 等.
5) 市ノ川竹男：日本結晶学会誌 **24**, 385 (1982).
6) W. Telieps and E. Bauer: Ultramicroscopy **17**, 99 (1985).
7) E. Bauer: Ultramicroscopy **17**, 51 (1985).
8) TH. Schmidt, S. Heun, J. Slezak, J. Diaz, K.C. Prince, G. Lilienkamp and E. Bauer: Surf. Rev. Lett. **5**, 1287 (1998).
9) E. Bauer: J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **114−116**, 975 (2001).
10) W.F. Chung and M.S. Altman: Ultramicroscopy **74**, 237 (1998).
11) M.S. Altman, W.F. Chung, Z.Q. He, H.C. Poon and S.Y. Tong: Appl. Surf. Sci. **169/170**, 82 (2001).
12) T. Yasue, T. Koshikawa, M. Jalochowski and E. Bauer: Surf. Sci. **493**, 381 (2001).
13) 安江常夫，越川孝範：表面科学 **23**, 271 (2002).
14) M. Haider, H. Rose, S. Uhlenmann, B. Kabius and K. Urban: J. Electron Microsc. **47**, 395 (1998).
15) T. Ikuta: J. Electron Microsc. **38**, 415 (1989).
16) H. Rose, P. Hartel and D. Preikszas: Proc. of 3rd Int. Symp. on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (Nara, 2001) in press.
17) 林　俊一，藤岡政昭，安江常夫，越川孝範，E. Bauer (in preparation).