電子光学的剛性設計による 透過型電子顕微鏡の耐振性の改善*

羽 持 満** 沢 田 英 敬*** 涌 井 伸 二†

Improvement of the Vibration Tolerance for Transmission Electron Microscope by Electron-Optical-Stiffness Design Method

Mitsuru HAMOCHI, Hidetaka SAWADA and Shinji WAKUI

This paper addresses a countermeasure of the vibration for electron microscopy. The mechanical design method against the environmental vibration disturbance for Transmission Electron Microscope (TEM) that magnifies the specimen image 1 million times must be different from the ordinary machine design. We described the specific vibration models of TEM and STEM (Scanning Transmission Electron Microscope) from the point of view on the electron optics, and showed the stiffness of the structure around the objective lens (in other words, the loop stiffness between the specimen and the pole piece of the objective lens) has the largest influence on electron-optical-stiffness. We increased the stiffness around the objective lens of TEM, and showed significant improves on the electron-optical-stiffness on both TEM and STEM images. This electron-optical-stiffness design method will be expanded with the software combination of the mechanical structure and electromagnetic analysis to calculate the amount of the image vibration caused by the environmental vibration disturbance and will be used for the optimization of TEM structure.

Key words: transmission electron microscope, vibration, electron optics, stiffness, natural frequency, TEM, STEM

1. 緒 言

透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope : 以下, TEM)の分解能は, 近年開発された多極子の収差補正機の登場により 0.1nm 以下に達した¹⁾. TEM 設置室に存在する床振動や騒音の環境外乱は装置を弾性変形させ, 同変形に起因する像振動が観察分解能の律速条件になる. TEM の高分解能化にともない, 設置環境の許容外乱の上限はより厳しく制限された. 筆者らは環境外乱の対策として TEM 用の耐騒音試料ホルダの開発²⁾を行い, また架台の固有モードと床の傾斜振動の連成による数 10 から数 100Hz に渡る床振動増幅の抑制³⁾を行った. しかし, これらの対策では数 Hz の低周波床振動の影響を抑制することはできない.

本稿は電子顕微鏡の鏡筒の耐振性デザインに関するものである. TEM 鏡筒の機械デザインは十数年にわたり大きく変更されていない. 一般機械の耐振性向上のための設計指標は軽量・高剛性化であり, 電子光学機器においても同様に考えられてきた⁴⁾. TEM の電子ビーム鏡筒は細長く, 床振動伝達に起因する弾性変形を抑制するために鏡筒全体の剛性を高めるのは容易でない. しかし, TEM は 100 万倍という他に類の無い高倍率観察を行う電子光学系を有しており, 一般機械とは異なる耐振性の設計指針が与えられるべきである. 2 章において, 一般に耐振性の指標として用いられる 1 自由度系の振動モデルと, これとは異なる TEM 鏡筒の耐振性モデルについて, TEM の概略構造を用いて説明する. そして, 今回試みた電子光学的観点に基づく剛性の改良点について述べる. そして, 3 章において効果の

検証実験結果を示し, 4 章に結言を記す.

2. TEM の振動モデルと耐振性の電子光学的検討

2.1 1 自由度系の振動モデル

一般に機械構造の耐振性の指標としては, 1 自由度系の振動モデルを用いて説明がなされる. 図 1 中に示す 1 自由度系の振動モデルにおいて, ベースが周波数 f Hz, 変位 z_0 で強制振動した際, 質量の変位を z とおいて, ベースと質量との標準化された相対変位 $|z_0 - z|/z_0$ は図 1 の特性を示す⁵⁾. λ は系の固有振動数 f_n に対する周波数 f の比である. なお, 系の減衰比は一般的な機械構造の値である 2.5% とした. λ が 1 より十分に小さな領域において, 相対変位は λ の 2 乗に比例する(床振動でしばしば問題になるのは 1 章で述べたように数 Hz の周波数成分であり装置の固有振動数より十分に低く, この条件を満たす.). 強制振動の周波数 f が一定のとき, 相対変位は系の固有振動数 f_n の 2 乗に反比例する. よって, 相対変位を小さくするためには f_n を

Fig.1 Relative displacement ratio of 1-degree-of-freedom model⁵⁾

* 原稿受付 平成 20 年 8 月 26 日

** 正 会 員 日本電子 (株) (東京都昭島市武蔵野 3-1-2)

*** 日本電子 (株) (東京都昭島市武蔵野 3-1-2)

† 正 会 員 東京農工大学大学院 (東京都小金井市中町 2-24-16)

Fig.2 Structure of TEM

高くすることが必要であり、したがってばね定数を高める、あるいは質量を軽減することが重要である。

2.2 TEMの概略構造とその特徴

図2にTEMの概略構造を示す。電子ビーム鏡筒はベースプレートに固定され、これらは床の上におかれた架台上部に設けられた除振機上に設置される。除振機の固有振動数は1~2Hzに設定され、それより高い周波数の床振動の伝達を抑制している。その一方、除振機の固有振動数付近においては床振動が増幅される。この対策としてアクティブ除振機によりこの増幅を抑制することは可能であるが、数Hzの低周波床振動は比較的大きなレベルで環境に存在していることが多く、十分に除振することができない。よって、数Hzの床振動による影響を抑制するためには、TEM鏡筒の剛性を十分に高くすることが必要である。鏡筒の曲げ変形の原因は、伝達した床振動により発生する各部の慣性力によるモーメントである。このモーメントを減じる目的で、鏡筒の上部を支持する構造を設けた例⁹⁾もあるが、鏡筒自体の構造の再検討はなされなかった。鏡筒の機械剛性の設計指標を論じるためには、TEMの電子光学系を理解する必要がある。TEMには複数の観察モードがあり、それぞれの場合で電子光学系の働きが異なる。これを図2で説明する。まずTEM像観察モードにおいては、電子銃のエミッタで発生した電子ビーム(図中実線で示す)をコンデンサレンズ、コンデンサミニレンズ、および対物レンズを用いて平行ビームとして試料に照射し、透過したビームを対物レンズ、中間レンズ、そして投影レンズで拡大し、蛍光板あるいはカメラ上で結像させて像を観察する。試料を保持する試料ホルダは位置決め用のゴニオメータに挿入されている。次に走査透過電子顕微鏡(Scanning

Transmission Electron Microscopy : 以下、STEM)の像観察モードにおいては、電子ビームが試料に対し平行照射ではなく1点に収束され(図中試料近傍の破線で示す)、透過した電子ビームの強度を下方のSTEM検出器で測定する。そして、電子ビーム照射位置を偏向コイルにより試料面上で2次元走査することによって、透過電子ビーム強度の強弱からSTEM像を得る。一般に鏡筒の試料より上部を照射系と、下部を結像系と称する。上記の説明から理解されるように、TEM像観察モードの場合には試料の像と蛍光板との相対変位が観察分解能に影響する。このとき、照射系の弾性変形は照射される平行ビームの位置が移動するだけで分解能に影響を与えない。これに対しSTEM像観察モードにおいては、ビームの照射位置と試料との相対変位が像振動の振幅と一致するため、照射系の弾性変形が影響する。その一方、結像系の変形はTEMモードでは観察分解能に影響するがSTEMモードでは影響しない。以上のように、TEMの耐振性の設計指標を提示するためには、機械構造に電子光学的な検討を加えた振動モデルが必要である。

2.3 TEM鏡筒の電子光学的振動モデル

TEM鏡筒の機械剛性に対しては、2.1節で説明した1自由度系のモデルをそのまま適用することはできない。その理由を2つ挙げる。まず、2.2節で説明したようにTEM、STEMのどちらの観察モードかによって観察分解能に影響する機械構造の部位は異なっており、鏡筒全体の弾性変形量が影響するのではない。次に、より重要なことであるが図2で示されるようにTEMの内部において電子ビームはそれぞれの部位で拡大・縮小されている。つまり、観察分解能に影響する各部位の機械剛性を設計する際には、影響の度合いに応じた重みをつけることが必要になる。本稿では、このように電子光学的見地から重みをつけた機械剛性を電子光学的剛性と称する。鏡筒の弾性変形の原因は各部の慣性力による曲げモーメントであると述べた。振動入力方を考慮した動的な説明は複雑となるため、図3のように鏡筒を水平に倒し除振機位置を固定した片持ち梁に対し、鉛直方向に重力(加速度)がかかっている静的なモデルで説明を行う。このとき、各部にかかる重力によって発生する鏡筒への曲げモーメントが各部位を弾性変形させる。本稿では各部位の特性を分離して説明するために、鏡筒を照射系、結像系、そしてこれらに挟まれる対物レンズ周辺部に分けて検討を行う。また、鏡筒には含まれないがゴニオメータと試料ホルダも同時に検討に加える。まずゴニオメータと試料ホルダに関しては、自重による弾性変形がそのまま試料の移動量となるため、2.1節で説明した1自由度系のモデルが適用できる。次に、STEM像観察モードにおいては、電子銃のエミッタ部の弾性変形量がSTEM像の移動量に影響する。しかし、照射系では電子ビーム径はおおよそ

Fig.3 Vibration model of TEM

1/1,000 に縮小される⁷⁾。すなわち、エミッタ部の振動量の像振動への影響は 1/1,000 に縮小される。具体的には STEM 像の分解能を 0.1nm とすれば、エミッタ部の許容移動量はその 1,000 倍の 0.1 μ m となる。一方、TEM 像観察モードにおいて影響の発生する結像系においては電子ビーム径が拡大されるため、結像系の機械的弾性変形量も拡大され観察像の移動をもたらす。このモデルにおいては照射系の質量による曲げモーメントが結像系を変形させるため、照射系の質量を減らす、あるいは長さを短くすることが重要である。しかし、観察倍率が 100 万倍である場合にも結像系におけるビーム拡大率はおよそ 10,000 倍である。つまり、蛍光板上では観察分解能 0.1nm の 100 万倍、すなわち 0.1mm が分解能に対する許容量であるのに対し、この 1/10,000 の 10nm が結像系の弾性変形の許容値となる。これは先に述べた STEM 像観察モードにおける照射系の影響に比べれば 1 桁大きい、弾性変形の許容値が観察分解能に一致するゴニオメータと比較すれば影響は 2 桁小さい。

最後に対物レンズ周辺部の剛性に関して検討する。図 4 にこの部位周辺の構造をより詳しく示す。対物レンズの 1 対のポールピースは非磁性材のスペーサを介して一体で形成されている。ポールピースは対物レンズの内ヨーク上に固定されており内ヨークは外ヨーク A に固定されている。外ヨーク B は外ヨーク A 上に固定され、同ヨーク B の上部はポールピースの上極と機械的に接合されず、磁路を妨げない程度のわずかなギャップが設けられている。外ヨーク B と内ヨークとの間にはコイルが設置され、このコイルに電流を流すことで、磁場レンズが形成される。外ヨーク A の上部内側には非磁性材のゴニオステージが固定され、ゴニオメータは同ステージに設置されている。図 3 のように外ヨーク A に曲げモーメントがかかり図 4 の実線で示すように弾性変形が発生すると(破線は変形のない状態)、外ヨーク A の上部に固定されたゴニオステージおよびゴニオメータ、そして試料ホルダの移動量は、外ヨーク A のたわみ角によってさらに拡大される。すなわち、外ヨーク A の弾性変形の許容値

は観察分解能よりも小さくなり、その影響度はゴニオメータ自身の弾性変形より大きい。さらに、外ヨーク A には照射系の質量による全モーメントがかかるため、この部位の機械剛性は鏡筒全体の電子光学的剛性に非常に大きな影響を与える。外ヨーク A の弾性変形の影響は試料の移動と等価であるため、TEM、STEM 像観察モードの両者において分解能に影響する。

以上、簡単なモデルを用いて TEM 鏡筒の各部位に関する電子光学的剛性の検討を行ったが、機械的剛性が最も高い必要があるのは対物レンズ周辺部、その次が結像系、最後に照射系となる。一般機械の振動モデルに基づき、鏡筒全体の曲げ剛性を高めるため、例えば照射系を含めて外径を等しい太さでより大きく設計することは電子光学的観点からは無駄なことであり、照射系の慣性モーメントの増加により耐振性をかえって低めることになる。

2.4 対物レンズ周辺部の剛性改良

2.2 節で述べたように、対物レンズの外ヨーク A の曲げ剛性は電子光学的剛性において非常に重要である。そこで、図 5 に示すように外ヨーク A の上部と内ヨークとを、ボルトで固定された 2 つの部品からなる非磁性材の補強用フランジで接続した。これらの部品の各ヨークとの接続部は接合部の全面を接着し、高剛性に接合されるようにした。外ヨーク A と内ヨークの接合によって外ヨーク A の曲げ剛性を高めるだけではなく、両ヨーク間の相対変位すなわちポールピースと試料との相対変位が抑制される。換言すれば、対物レンズのポールピースと試料間のループ構造の剛性(ループ剛性)を高めた。

3. 対物レンズ周辺の剛性向上による効果の検証

3.1 鏡筒への荷重による像移動量の比較

耐振性の評価のためには、装置全体を加振機に搭載し、加振時の像の振動量を測定するのがよい。しかし、この方法による評価の結果にはゴニオメータなど他の部位の弾性変形による影響も含まれるため、鏡筒剛性改善の効果のみを評価できない。

Fig.4 Structure of the objective lens system

Fig.5 Stiffness improvement of the objective lens system

そこで、鏡筒の側面にばねばかりを用いて一定の荷重をかけた場合の像移動量を比較測定した。測定は STEM, TEM の両観察モードでそれぞれ実施した。荷重をかける位置を高さ方向に数点設け、それぞれによる像移動量を測定した。荷重は、試料ホルダの挿入方向とそれに直交する 2 方向にかけた。STEM 観察モードにおける結果を図 6 に示す。電子銃の最上部を試料ホルダ挿入方向へ荷重したとき改良前の像移動量が 1 となるように係数を乗じて比較を行った。図の横軸は除振機位置から荷重を加えた位置までの高さであり縦軸が上記の像移動量である。改良の効果は顕著であった。試料ホルダに直交する方向で電子銃最上部に荷重をかけたときに像移動の方向が反転したことは、像移動に支配的な要素が顕著に抑制され、他の要素の影響が現れたことを示す。改良前の荷重高さと像移動量との関係はほぼ直線状に並び、像移動量 0 との交点は、図 4 の対物レンズ外ヨーク A 下部にはほぼ一致した。これは改良前においては像移動の支配的な弾性変形原因が外ヨーク A に集中しており、弾性変形量が荷重による曲げモーメントに比例するためと推定された。

次に TEM 観察モードにおける同様の比較を図 7 に示す。縦軸は図 6 と同様の係数を乗じている。改良の効果は TEM 観察モードにおいても顕著であった。改良前の TEM 観察モードの像移動量は STEM 観察モードにおける量と同程度であった。また、改良前の荷重高さと像移動量との関係は STEM 観察モードの場合と同様で、やはり対物レンズ外ヨーク A 下部のフランジ高さにほぼ一致した。よって TEM 観察モードにおいてもこの部位の剛性が像移動に対して支配的であった。以上の結果から STEM, TEM 両観察モードに対して、鏡筒の電子光学的曲げ剛性は顕著に改善した。よって本装置において、対物レンズから

Fig.8 Mode shape of the bending mode

試料への機械的なループ剛性が、電子光学的な鏡筒の曲げ剛性に対し支配的であったことが証明された。

本改良の前後において、インパクト法の実験モデル解析を行い鏡筒の曲げ振動モードの固有振動数を測定した。その結果、鏡筒の曲げモードはおよそ 100Hz に観察された。モードシェイプを図 8 に示す。図中の破線は変形の無い場合の構造を示す。ループ剛性の改良前後を比較すると、このモードの固有振動数は 5% 程度しか増加しなかった。鏡筒全体の構造は円柱に類似している。円柱の固有振動数に最も影響するのは長さのパラメータである⁹⁾。したがって、構造の中央付近のごく一部分だけの剛性を高めても曲げモードの固有振動数にはほとんど影響しない。一方、図 6, 7 に示したように電子光学的な鏡筒の曲げ剛性は顕著に向上した。これらの結果は、2.1 節で示した 1 自由度系のアナロジーでは電子顕微鏡の耐振性を設計できないことを証明している。

3.2 音響加振による評価

3.1 節で述べたように鏡筒の前後方向の曲げモードが約 100Hz に観察された。そこで、このモードによる音響による像振動発生量の変化を調べるため、装置正面から 1/3 オクターブバンドパスフィルタ (100Hz 帯) を通したピンクノイズによる音響加振を行い、補強用フランジ組み込み前後で観察像を比較した。評価には TEM 観察モードにおける Diffractogram (アモルファス試料の高倍像フーリエ変換図形) の変化を利用する方法を用いた。図 9 上段に音響加振を行わないとき、中段に改良前に等価音圧レベルで 88dB (平坦特性) の音響加振時、下段に改良後に 99dB の音響加振時の Diffractogram をそれぞれ示す。Diffractogram に見られる同心円図形の直径が大きいほど観察分解能が高いことを示しており、像振動により分解能が低下すると直径は小さくなる。また図の中、下段の矢印で示すように同心円の欠けに方向性がある場合には像振動の方向性を知ることができる。欠けの大きい方向が振動の方向に一致する。図中段の改良前においては像の欠け方向は鏡筒の前後方向に一致しており、像振動は図 8 の鏡筒曲げモードによる影響と考えられた。一方、図 9 下段の改良後においては、まず、同程度の Diffractogram の欠けを生じさせる音圧レベルが 10dB 以上高くなり、像観察の許容音圧レベルが向上した。さらに、図中矢印で示す欠けの方向も変化した。これは像振動の主要原因が変化したことを示す。しかし、3.1 節で述べたように改良前後で鏡筒の

Fig.6 Image shifts with horizontal load (STEM mode)

Fig.7 Image shifts with horizontal load (TEM mode)

Fig.9 Diffraction patterns under 1/3 octave band acoustic noise excitation (100Hz)

曲げモードの固有振動数はほとんど変化していない。よって、音響加振による鏡筒の曲げ振動の振幅にはほとんど差が無いと考えられる。それにもかかわらず TEM 像観察モードにおける像振動量は顕著に減少した。したがって、本実験により鏡筒の電子光学的剛性の顕著な改善が再確認され、また 100Hz 近辺の騒音に対する観察許容レベルの向上にも役立つことが明らかになった。

4. 結 言

TEM 鏡筒の床振動に対する耐振性を高める目的で電子光学的な観点から構造を検討した。そして、以下の結果が得られた。

- (1) 電子光学系の各部位において電子ビーム径は拡大・縮小されており、外力による各部の機械的弾性変形と像移動量とが必ずしも一致しないことを示した。また、STEM、TEM 観察モードにおいて像振動の影響を与える部位はそれぞれ異なることを示した。このような電子光学的な見地を考慮し重みをつけた機械剛性を電子光学的剛性と呼称した。
- (2) 試料と対物レンズのポールピース間のループ剛性が電子光学的剛性にとって重要であることを示し、この知見に基づく改良を行った。
- (3) 改良前後において、鏡筒の側面荷重時の像移動量が STEM、TEM 像の両観察モードにおいて顕著に減少した。また、鏡筒の曲げモードを含む周波数帯における許容音圧レベルが改善された。これらの結果より、鏡筒の電子光学的剛性の顕著な改善が確認された。

本稿で示した電子光学的剛性を考慮した設計手法は、既に最新の TEM に適用され市場に提供されつつある。なお、この設計手法は TEM に限らず荷電粒子ビームを応用した装置一般に広く適用可能であり、耐振性デザインの最適化に役立つと期待される。今後の課題を以下に述べる。本稿では TEM の耐振性を図 3 のような簡易的モデルを使って論じた。しかし実際の設計時には、より詳細に各部位の弾性変形の影響を考慮する必要がある。複雑な構造の計算には有限要素法を用いた構造解析が有効である。これにより得られた結果を元に、電磁場解析を用いて電子ビームの軌道計算を行うことで、構造の弾性変形と像の移動量との関係が求まる。このとき、例えば図 4 に示したポールピースの上・下極間の相対変位による磁場レンズの歪によって電子ビームが偏向される影響も考慮できる。また、除振機位置に外乱振動が入力する現実の系の動的な応答についても、静的な場合と同様に計算が可能である。上記の 2 つの解析手法を組み合わせ、電子光学的剛性をより正確に求めることで、さらなる耐振性の向上が期待される。

参 考 文 献

- 1) Hidetaka Sawada, Fumio Hosokawa, Toshikatsu Kaneyama, Toshihiro Ishizawa, Mitsuhiro Terao, Muneyuki Kawagoe, Takumi Sannomiya, Takeshi Tomita, Yukihito Kondo, Takayuki Tanaka, Yoshifumi Oshima, Yasumasa Tanishiro, Naoki Yamamoto, Kunio Takayanagi: Achieving 63 pm Resolution in Scanning Transmission Electron Microscope with Spherical Aberration Corrector, Japanese Journal of Applied Physics, **46**, 23 (2007)568.
- 2) 羽持満, 沢田英敬, 涌井伸二: サブ A オーダの微振動を抑制する透過型電子顕微鏡用耐騒音試料ホルダの開発, 精密工学会誌, (掲載予定).
- 3) 羽持満, 沢田英敬, 涌井伸二: 電子顕微鏡における同調薄層機構による床振動の相殺補償, 精密工学会誌, **74**, 10(2008)1125.
- 4) 精密工学会 超精密位置決め専門委員会: 次世代精密位置決め技術, フジ・テクノシステム(2000)106.
- 5) 羽持満, 大橋茂, 須賀三雄, 涌井伸二: 走査型電子顕微鏡における電子ビーム偏向による像ノイズの低減, 精密工学会誌, **73**, 9(2007)1080.
- 6) Toshikatsu Kaneyama, Takeshi Tomita, Fumio Hosokawa, Hidetaka Sawada, Takumi Sannomiya, Syunji Deguchi, Muneyuki Kawagoe, Takahisa Miyata, Eiji Kobayashi, Yukihito Kondo, Yasumasa Tanishiro, Kunio Takayanagi: Design and Development of 300 kV Super-High Resolution FETEM "R005", 第 16 回国際顕微鏡会議前刷集, (2006)616.
- 7) 日本電子(株): 透過電子顕微鏡基本用語集, <http://www.jeol.co.jp/technical/dictionary/EMTerms/01.htm> (2005).
- 8) 國枝正春: 実用機械振動学, 理工学社(2001)168.