

超高压電子顕微鏡の遠隔操作・観察

Remote Control System for the Ultrahigh Voltage Electron Microscope

吉田 清和

Kiyokazu Yoshida

^a大阪大学超高压電子顕微鏡センター

要旨 大阪大学に設置されている H-3000 型超高压電子顕微鏡は世界に 1 台しかなく、この装置でしかできない研究テーマも多い。そこで、利用形態の一つとして世界中から利用できる遠隔操作・観察の開発を進めてきた。本稿では、超高压電子顕微鏡の遠隔操作・観察について主に以下の項目に分けて述べる。まず、遠隔観察に求められる条件、操作方法については小型操作卓及びソフトウェアタイプの操作卓による方法、画像伝送については通常の NTSC 方式の伝送が行える DV 方式とハイビジョン画像が伝送できる HiDVTS 方式について、通信回線、連絡手段、動画撮影、静止画記録、撮影画像の共有、遠隔観察の代表的な例を数例、最後に今後の目標とまとめを述べる。今後の主流となるであろう大型研究装置の共同利用といった場合に、少しでも参考になれば幸いである。

キーワード：超高压電子顕微鏡，遠隔観察，遠隔操作

1. はじめに

透過型電子顕微鏡は、観察窓を通して蛍光スクリーンで像を観察する直接観察方式が主流である。しかしながら、超高压電子顕微鏡でこの方式を採用する場合には、観察者を高エネルギー X 線から遮蔽するための構造が必要となる。そのために、実験を行うのに重要な試料室付近の構造の自由度が制約されたり、観察窓のガラスが厚くなり観察がやりにくかったり、同時に一人しか観察できない等の不都合を余儀なくされる。これらの問題を一挙に解決する方法がテレビカメラと遠隔操作卓を用いて別室から観察を行う遠隔観察方式である。顕微鏡本体とは離れた別室で観察することにより、明るい部屋で複数で議論をしながらの観察が可能となり、また鏡体に外乱を与える原因が少なくなるなどの長所が生まれる。さらにこれを発展させて通信回線で結ぶことによって、世界中から観察が行える遠隔観察が可能となる。

今後は超高压電子顕微鏡のみならず、汎用機でも直接観察方式から遠隔観察方式に移行すると予想される。また、超高压電子顕微鏡では各大学の電子顕微鏡の特徴ある機能を研究の目的に応じて相互に利用しようという構想が進められている。この場合も含めて、今後、遠隔操作・観察はますます重要な技術となると考えている。

本稿では、大阪大学でこれまで約 20 年間にわたって進めてきた超高压電子顕微鏡の遠隔操作・観察の開発を中心に紹介していきたい¹⁾。

2. 遠隔観察に求められる条件

遠隔観察の要素は大きく分けると操作と像観察の二つである。操作については操作性が重要な要素となる。「動作する」と「使える」は同じではない。常に「使える装置」というものを目標としている。そのために本体側で操作するのと同程度の操作性を実現するための工夫が重要である。操作項目は本体操作卓のすべての項目が必ずしも操作できる必要はなく（例えば軸合わせ機能など）、一般的な実験が行える機能があればよいと考えている。遠隔地側での観察画像は、撮影方法や伝送方法によって画質が極めて大きく異なる。しかしながら、視野を選ぶ、フォーカスを合わせるといった基本的な操作を十分に行うには最低限、通常のテレビ方式つまり NTSC 方式の画質は必要と考えている。ハイビジョン画像を用いれば本体側で観察しているのと同レベルの解像度で観察が行える。これ以外の条件として、信号や画像の遅延時間が重要な要素である。これは通信回線の信号走行時間（例えば衛星回線）やルーターなどの信号処理時間、画像圧縮に要する時間などによって生じる。視野の選択やフォーカス合わせの場合、時間遅れがある値を越すと操作性が著しく損なわれる。また、装置を通信回線に接続することからセキュリティについても考慮しておく必要がある。それぞれの具体的な詳細は次項以降で示す。

3. 操作方法

本格的な実験を行うためには、遠隔地側でも図 1 に示す本体側操作卓と同様の操作性が得られることが望ましい。本体側に近い環境を得るために、本体操作卓とほぼ同様の機能を持った小型遠隔操作卓を開発し、相手方に送ることによ

〒 567-0047 茨木市美穂ヶ丘 7-1
TEL: 06-6879-7941; FAX: 06-6879-7942
E-mail: yoshida@uhvem.osaka-u.ac.jp
2008 年 7 月 13 日受付



図1 H-3000型超高压電子顕微鏡と操作室

て十分実用的な実験が行えるシステムを開発した²⁾。一方ユーザーのなかには電子顕微鏡の熟練者ではなく、電子顕微鏡ははじめてであるが、研究の手段として試料透過能の高い超高压電子顕微鏡で観察したいという要求も多い。このような場合、本格的な操作卓よりも「操作ソフトをダウンロードし自分のパソコンにインストールして操作すると同時に、本体側でもある程度操作を支援する」というスタイルがこれまでの経験から最良であると思われる。これは試料の注目したい場所や必要な倍率などは観察者にしかわからないからである。このスタイルを実現するためには、装置を利用者に送付する必要のないソフトウェアタイプの遠隔操作装置が適している。目的に適した複数の方式の操作方法を選択することができる。

3.1 小型操作卓による方法

図2に小型操作卓を示す。操作できる項目はほぼ本体操作卓と同じで、試料傾斜、絞りの操作、写真撮影などを含む通常の本格的な観察が行える。ただし、本体側でしか行わない軸合わせなどの調整機能は除いてある。操作性はよいが、遠隔地にこの操作卓自体を持ち込む必要があるのと、操作にノブやスイッチを使用しているため本体側と同時操作ができない欠点がある。長期および本格的利用者向きである。

3.2 操作画面による方法

遠隔操作で最も簡単に思いつく操作方法は、図3に示す



図2 本体側とほぼ同じ機能を持った小型操作卓



図3 操作ボタンを画面に配置した遠隔操作方法

ような画面上に操作ボタンを配置する方法である。操作は可能であるが、同時に二つの操作ができないことや、観察画面から目を離す必要があるなど操作性は小型操作卓より劣る^{3,4)}。そこで我々ではできるだけノブ式の小型遠隔操作卓に近づけるためキーボードに機能を割り付ける方式を考案した⁵⁾。視野の移動、フォーカス、倍率、明るさ位置といった頻繁に操作する項目をファンクションキーに割り当て、矢印キーと組み合わせる操作する。このソフトをノートパソコンにインストールしたのを使ってみると、少し慣れれば観察画面を注視しながら手軽に操作ができる。このソフトウェア方式の場合、本体側の操作卓と同時操作が可能で、本体側で「ある程度の操作の支援」が可能である。ただし安全のために本体側を優先としておく。これによって遠隔地側の利用者が不慣れであっても本体側のオペレーターが操作を支援できる利点がある。最近ではこの操作方式を主流としている。画面の概要を図4に示す。

4. 画像伝送

動画の伝送方法としては、携帯電話による伝送、インターネットによる伝送、テレビ会議システムから本格的なハイビジョン画像伝送までありとあらゆる画像品質及び方法が存在する。前述したように、視野を選ぶ、フォーカスを合わせるといった基本的な操作を十分に行うには最低限、通常のテレ



図4 主な機能をキーに割り当てて操作性を向上したノートパソコン型操作卓

ビ方式つまり NTSC 方式の画質は必要と考える。さらに高画質が必要な場合はハイビジョン方式を用いる。ここではこの二つの方式の伝送について示す。

通常のテレビ方式 (NTSC) の伝送には DV 方式を用いている。これは民生用の高画質のデジタルビデオの方式で、その伝送には WIDE プロジェクトによって開発された DVTS (Digital Video Transport System) というソフトを使用している。短信号遅延時間でほとんど画像劣化のない伝送が可能である。ネットワークの帯域は 30 から 35 Mbps を必要とする。テレビカメラからの信号はメディアコンバーター等を用いて DV 方式に変換する必要がある。この方式の場合、伝送帯域が不足するとブロックノイズが生じたり画像がフリーズすることがあるが、伝送帯域が十分な場合は送信側と見分けのつかない良好な画像が得られる。このソフトをノートパソコンにインストールした装置を含む遠隔操作卓一式を図 5 に示す。

従来、高解像度のハイビジョン画像を伝送するには約 100 Mbps の伝送容量と高価な機器が必要であった。近年、民生用に開発された HDV 方式ハイビジョンを用いると、高解像度の画像 (1440 × 1080i) でありながら DV 方式とほぼ同じ約 30 から 35 Mbps の帯域で伝送ができる。観察画像伝送にこの HDV 方式を用いると、従来の DV 方式と同じ回線でハイビジョン画像による観察が行える。伝送用ソフトとして DV 方式と同じく WIDE プロジェクトによって開発された HiDVTS を用い、これをインストールしたノートパソコンを本体側 (送像側) と遠隔地側 (受像側) に設置してネットワークに接続する。この場合もカメラの信号は HDV 方式である必要があり、異なる場合はコンバーターによって HDV 方式に変換する必要がある。この方式の場合、伝送帯域が不足すると全く画像が出なくなる。十分な場合は送信側と見分けのつかない良好な画像が得られる。図 6 に DV 方式と HDV 方式の簡単な比較表を示す。

これ以外に、非圧縮画像信号あるいは JPEG2000 を用いた

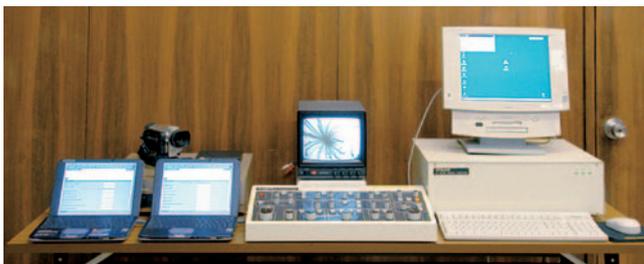


図 5 DVTS 端末を含む遠隔操作卓一式

HDV Format / DV Format	HDV (1080i)	DV
Video Signal	1080/60i	480/60i
Number of Pixels	1440X1080	720X480
Aspect Ratio	16:9	4:3
Compression	MPEG2 Video	DV
Bit rate after Compression	Approximately 25Mbps	Approximately 25Mbps

図 6 DV および HDV の方式の比較

圧縮方式で電子顕微鏡画像の米国へのフルハイビジョン画像伝送の実験を行ったことがあるが、まだ一般的に手軽に利用できるとは言い難い。

5. 通信回線

本体側と遠隔地の間で画像と操作信号を伝送する通信回線が必要である。帯域は上記 DV または HDV 方式を用いる場合で約 30 から 35 Mbps である。ファイル転送などの場合と違って、重要なのは常時この帯域が利用できることである。そうでないと画像のフリーズや操作の中断が生じる。そのような理由から一般的なインターネットより SINET3 (Science Information NETwork3) や JGN2Plus, 海外との場合は APAN (Asia-Pacific Advanced Network) といった回線を利用するのがよい。ただし、すべての場所とつなぐことができるわけではなく、遠隔地側のネットワーク環境に依存する。

ネットワークの設定は、本体側および遠隔地側のネットワーク担当者に設定をお願いする必要がある場合が多い。最近ではセキュリティの設定が強化されている場合が多いので、ポートの再設定などの必要性から利用できるまでにある程度の時間を要する場合がある。

6. 連絡手段

本体側と遠隔地の間で連絡手段が必要である。ネットワーク接続や準備段階では電話回線が便利である。接続完了後の観察中や操作支援などの場合にはテレビ会議システムやインターネットを利用した会話手段が利用できる。

7. 観察動画像撮影

伝送する画質に応じて、標準の NTSC 画像またはハイビジョン画像用のカメラを切り替えて専用の蛍光板を撮像する。画像伝送の方式に対応した信号形式に変換する必要がある。

8. 静止画記録

従来、高解像度の静止画像の記録は銀塩フィルム方式を採ってきた。しかしながら、その場で高解像度のデジタルデータが欲しい、遠隔地ですぐに画像データを手にしたいという目的には不都合である。そこで、4096 × 4096 ピクセルの SSCCD を用いている。蛍光板や光学系は高エネルギー電子のため、後方散乱電子の影響も考慮して設計する必要がある。そのため、蛍光板を光学レンズで結像して撮像する方式を採っている。また、超高圧電顕の場合の特有の問題として、X線が CCD を貫くことによってランダムに多くの白点がノイズとして現れる場合がある。この対策の詳細は別に報告している⁶⁾。

9. 撮影画像の共有

撮影された画像データは観察者または共同研究者が即座に入手あるいは共有できる仕組みが必要である。ここでは大阪

大学サイバーメディアセンターで構築されているデータグリッドシステムを利用している。撮影と同時にデータグリッドシステムのサーバーに蓄積される。観察者または共同研究者はパスワードを用いてそのデータを共有することができる。概念図を図7に示す。

10. 遠隔観察の例

今まで行ってきたいいくつかの代表的な利用形態を示す。

10.1 新しい共同利用形態が実現できる双方向で対話可能な遠隔観察

近年、ネットワークの大容量化が進み、画像信号を双方向に伝送することが可能になってきた。つまり、今まで本体側から観察者に電頭画像を送っていただけであったが、観察者側からも画像と音声を伝送することにより、遠隔地側と本体側の研究者が議論をしながら観察できる新しい共同利用形態を実現することができる。

図8は双方向通信の機器接続の概略図である。実験は、ネットワークに双方向分の伝送容量が得られる高速大容量のJGNを用いて行った。

10.2 世界の複数の地点が参加して共同研究が行える新しい共同利用形態の実現

上記のシステムを発展させると世界の複数地点を結んだ共同利用形態が実現する。世界の複数の地点が参加して共同研究が行えることが実証できた例として、iGrid2002のデモとして行った、大阪、アムステルダム、サンジェゴ、台湾の4地点を結んだ実験の様子を図9に示す。

10.3 ハイビジョン画像と操作ソフトをインストールしたノートパソコンを用いた遠隔操作・観察

ハイビジョン画像を用いた遠隔観察の例として、約1000 km離れた遠隔地から行ったものを示す。画像伝送は上記HDV方式を用いた。伝送用ソフトをインストールしたノートパソコンを本体側（送像側）と遠隔地側（受像側）に設置してネットワークに接続した。ネットワークはSINETを利用した。操作は操作ソフトをインストールしたもう1台のノートパソコンで行った。受信画像は操作に対して遅延時間を感じることなく表示され、画質も本体側と見分けのつかない鮮明な画像が得られた⁷⁾。この様子を図10に示す。

最近ではこの組み合わせを主流としている。

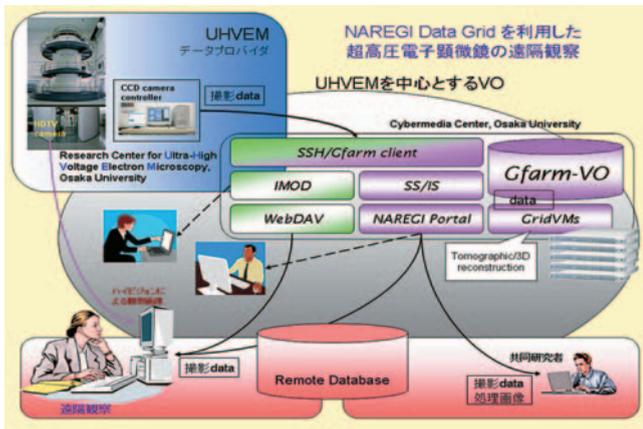


図7 データグリッドシステムの概略図

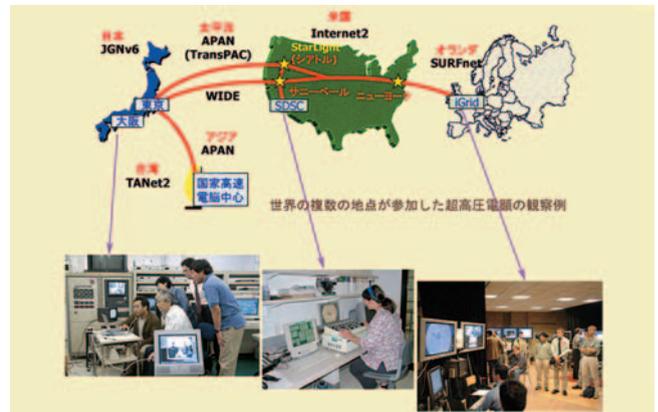


図9 世界4地点を結んで共同研究を行った実験例

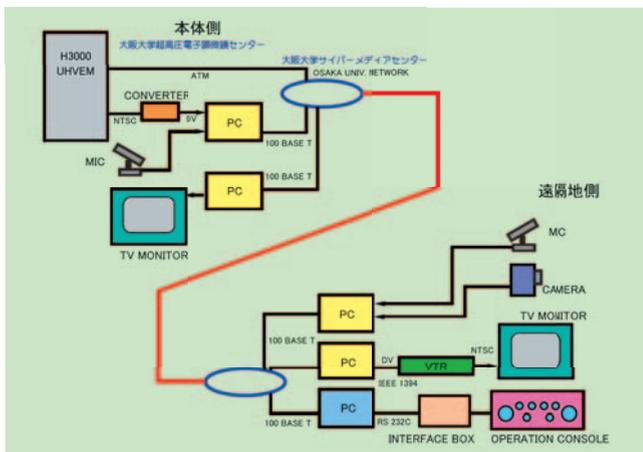


図8 双方向通信を行う場合の機器接続概略図



図10 ハイビジョン画像とノートパソコンにソフトをインストールした操作卓を用いた遠隔観察

11. 今後の目標

超高圧電顕は厚い試料が観察できることから多様な実験が行われている。なかでも立体的な情報が得られる電子線トモグラフィーの実験が盛んに行われている。この実験では大量の画像を撮影する必要がある。そのため、根気よく長時間撮影作業を進めなければならない。しかし研究者にとって重要なのは注目する視野と倍率を決めることである。この作業を自分の研究室から行い、スタートボタンを押せば一連の撮影が自動で行われるようになれば遠隔観察の価値が飛躍的に高まる。これを実現するために、装置面で次のようないくつかの開発を進めてきた。

高精度試料傾斜装置、自動視野位置補正ソフト、高速撮影法、自動撮影ソフト、画像ファイルの共有等である。これらを統合して、従来利用者が多大の労力と時間を費やしていた実験が、大きく省力化できる高効率の遠隔観察システムが実現しつつある。

12. まとめ

超高圧電子顕微鏡の利用形態のひとつとして、最新のネットワーク技術を用いて、同時に世界の複数の地点の研究者が参加できる新しい形態の共同利用・研究が行える実用的な遠隔観察システムの構築を進めてきた。また、電子顕微鏡本体

の自動化も進め、研究者が遠隔地からもできるだけ少ない労力で目的の成果が得られるようシステムの機能向上を進めている。これらは本顕微鏡だけでなく今後の大型研究装置の方向になると予想され、いままでの成果が少しでも役に立てば幸いである。

文 献

- 1) 藤田広志, 裏 克己, 森博太郎, 吉田清和, 小松正雄, 坂田孝夫, 宮内恭一, 松井 功, 勝田禎治: 日本電子顕微鏡学会第 45 回学術講演会予稿集, 1989, p. 193
- 2) Yoshida, K., Mori, H., Shimojo, S., Kadobayashi, Y., Akiyama, T., Ellisman, M.H.: *Journal of Electron Microscopy*, 51, Supplement, S253-S257 (2002)
- 3) Takaoka, A., Yoshida, K., Mori, H., Hayashi, S., Young, S.J., Ellisman, M.H.: *Ultramicroscopy* 83, 93-101 (1999)
- 4) Yoshida, K., Takaoka, A., Hayashi, H., Matsui, I.: *Journal of Electron Microscopy* 48 (6), 865-872 (1999)
- 5) Yoshida, K., Shimojo, S., Mogaki, H., Ozawa, M., Shibayama, T., Mori, H.: Proc. 16th Inter. Conf. on Electron Microscopy, 2006, Sapporo, 1064CD
- 6) Yoshida, K., Furutsu, T., Shimojo, S., Mori, H.: Microscopy and Microanalysis 2005, 2005, Honolulu, 614-615CD
- 7) Yoshida, K., Shimojo, S., Sakane, E., Mogaki, H., Ozawa, M., Shibayama, T., Nishi, R., Mori, H.: Proc. 34th Annual meeting, Microscopical Society of Canada, 2007, Edmonton, Gen.-13