顕微鏡システムの設計において あまり知られてない考慮点

嵐　文隆

新たな対物レンズ技術により、高水準の開口数、色収差補正、フラットネスを同時に実現し、光学性能が向上する。

メーカーがシステムに使用する光学部品を検討する際、倍率、開口数（NA）、焦点距離、作動距離などが、よくある仕様として検討される。しかし、最終製品の全体的な品質に大きな影響をもたらす重要な要素が他にもある。本稿では、波面収差補正、無補償設計、新規のレンズ製造技術による向上という3つの要素を紹介する。

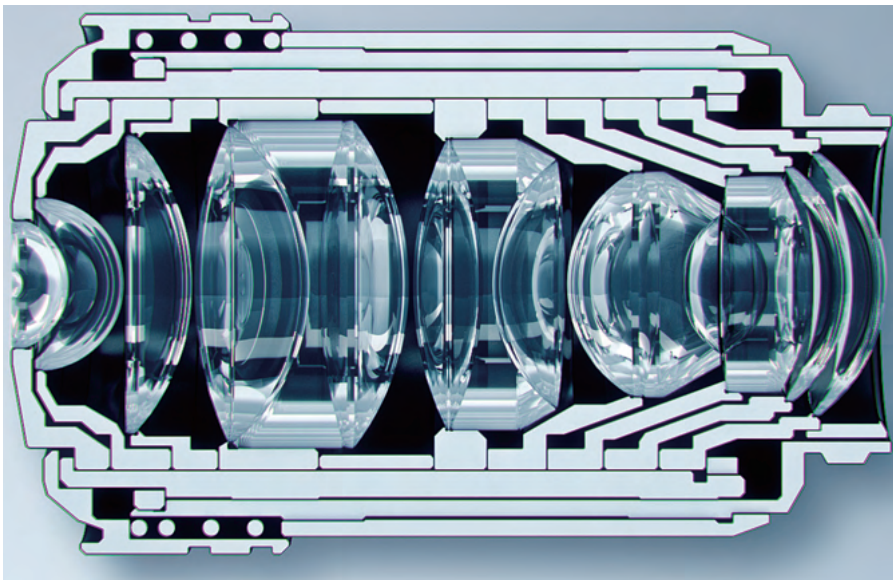

図1　対物レンズ内にある複雑な小型レンズユニットの例。

波面収差制御

波面収差とは、理想的な顕微鏡イメージを形成するために使用する理想的な波面と、実際の波面との差異である。波面収差の大きさは映像の欠陥につながる。対物レンズの性能を評価するには、さらにストレール比、点広がり関数、及び変調伝達関数という3つの方法がある。

対物レンズの光学性能を測る標準的な方法はストレール比である。理想的な無収差光学システムの像面における収束比（中央部の明度）に対して、実際に収差がある光学システムで達成可能な収束比の比率をパーセンテージで示したものである。ストレール比が高いほど光学システムの品質が高いことを意味する。ストレール比が95%以上の対物レンズは光学性能のピークとされている。

点広がり関数（Point Spread Function：PSF）は、実際の解像度を知るために用いられる。一方、変調伝達関数（Modular Transfer Function：MTF）は信号伝達（顕微鏡光学）のための入力信号と出力信号の間に発生する変調やコントラスト変化の割合を示す[2]。MTFは空間周波数、焦点位置、視野数に対してプロットできる。

顕微鏡の対物レンズの性能向上は、レンズ構造の内部の複雑化と小型化をもたらしている（**図1**）。その結果、対物レンズは製造上の誤差による品質の差が生じやすくなり、その差が最終製品の性能のばらつきの原因となることがある。

この種のばらつきの可能性を最小限に抑えるため、ある種の高性能対物レンズの組み立て構成では、技術者が波面収差を測定しなければならない（**図2**）。

波面収差は、結像されたイメージが理想的なイメージからずれることで生じるものであり、品質パラメータとして管理される。理想の状態（無収差）に近づけるために、各対物レンズの波面収差を測定して制御することで、メーカーは従来の対物レンズに比べて光学性能のばらつきが非常に少ない対物レンズを製造できる（**図3**）。

波面収差を補正した対物レンズの採用

ここでは、波面収差を補正した対物レンズを顕微鏡の設計に組み込むべき理由を3点挙げる。

1. 安定した高品質画像の生成：

画質は、機器のソフトウエアがどれだけ早く正確に計測できるかに影響を及ぼす。波面収差を補正した対物レンズは、安定した高品質画像を提供できる。そのため、最終製品で信頼性が重要な場合には、波面収差を制御した対物レンズの採用は必須となる。

2. コストの削減:

対物レンズの性能のばらつきが原因で撮像装置が適切に動作しないと、余分なコストが発生する。例えば、対物レンズを破棄して代替品を購入する必要があるかもしれない。波面収差を補正した対物レンズは高性能であるため、余分なコストを削減できる。

3. 製品の納期の安定:

高性能が要求される機器では、対物レンズの性能のばらつきに対処するための調整が余分に必要となる。製造のリードタイムが長くなってしまう要因である。これに対し、波面収差を補正した対物レンズを設計に取り入れることで品質が安定し、予定した期間で機器を納品できる。さらに、信頼性の高い対物レンズのバックアップ在庫を確保できる。

図2　顕微鏡の対物レンズの波面収差を検査するオリンパスの技術者。

波面収差補正は上記の理由で重要だが、ハイエンドの対物レンズを組み立てるときには、波面収差補正だけが設計上のキーポイントではない。特にシステムメーカーにとっては、高画質と設計・商業的な柔軟性を確保するためには、補償のない光学系が極めて重要である。

無補償の光学系とその利点

顕微鏡における無限遠補正イメージングシステムは、一般的に対物レンズとチューブレンズから構成されており、最もシンプルな構成である。対物レンズは対象物の近くに設置され、チューブレンズは対物レンズからの集光をカメラのセンサまたは眼球に対して焦点

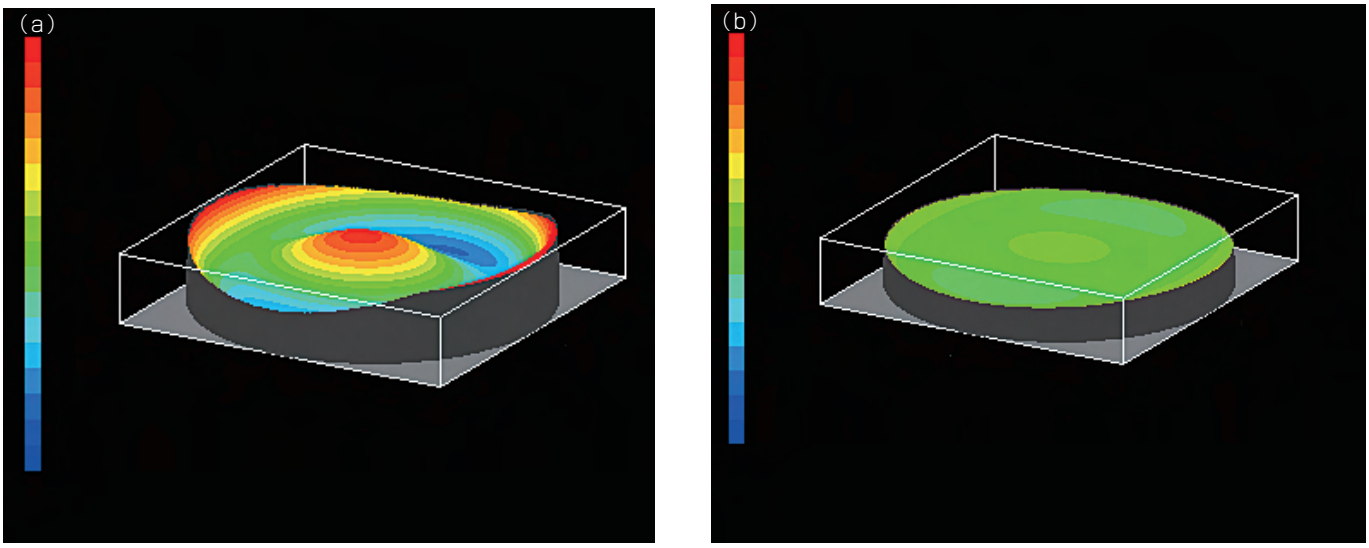

図3　理想の状態（無収差）に近づけるために各対物レンズの波面収差を測定して制御することで、メーカーは従来の対物レンズに比べて光学性能のばらつきが非常に少ない対物レンズを製造できる（a）。安定した品質の結果を（b）に示す。

を合わせる。最高品質の画像を得るためには収差補正が重要である。一般的には、補償方式と無補償方式の2つの方法がある。

補償方式は、対物レンズとチューブレンズが補完的に、複合的に収差を補正するように設計されている（**図4**）。オリンパス（Olympus）が採用している無補償方式では、対物レンズとチューブレンズが独立して完全に収差を補正する（**図5**）。これにより、技術者や設計者は、対物レンズまたはチューブレンズ、もしくは両方をより柔軟に選択できる。

無補償方式にはいくつかの利点がある。レーザを用いる蛍光や単色イメージング向けの照明システムでは、レーザはチューブレンズと対物レンズの間の光路に入り、対物レンズによってサンプルに照射される。この場合、チューブレンズはレーザ焦点に影響を与えないため、無補償の設計によって最適な焦点、可能な限り絞ったスポットサイズ、（理にかなった範囲内で）レーザ波長に依存しない色補正が実現できる。

もう1つの利点として、チューブレンズと関係なく対物レンズを使用しても、視野内の色ブレがほとんどなく、鮮明な画像を取得できることである。これは特に重要で、視野数やカメラセンサのサイズが大きくなっているからである。例えば、X Line対物レンズと超広角チューブレンズ（SWTLU-C）は400～1000nmの収差を補正する。さらに、26.5nmの広い視野で対物レンズとチューブレンズが必要なイメージングシステムに対応する。無補償なので、対物レンズとチューブレンズをそれぞれ単独で使用しても、上記のような幅広いスペクトル幅で強力な色補正が可能である。

製造チームやシステム設計者にとって、サードパーティ製の市販の在庫レンズを使用しても、超広角の視野（Field Of View：FOV）で一貫して均一な画質と色補正を維持できるのが無補償方式である。

対物レンズの品質向上

研究者は科学を発展させるための必要不可欠なツールとして顕微鏡やイメージングデバイスを使用し、対物レンズはシステムの重要な部品である。多くのアプリケーションでは広角FOVの高画質画像からベネフィットが得られる。しかし通常は、フラットネスなど画像の一面が向上すると別の面が低下するというトレードオフがある。

製造技術のイノベーションにより、より大きなNA、画像のフラットネス、幅広い色補正という3つの重要な項目において光学性能が向上した新規の高性能対物レンズを使用できるようになり、研究が広がっている。これらの利点により、高品質で広角FOVの画像が多種多様なアプリケーションで利用できる。

従来の対物レンズの製造技術では、NA、画像のフラットネス、色補正はトレードオフの関係となってしまい、1つの対物レンズで3つすべての性能を上げることは困難だった。かつてのエンジニアは、ユーザーが各自のアプリケーションに最適な対物レンズを選べるよう、3つの重要な項目のいずれかに優れた対物レンズを設計することに注力していた。こうした対物レンズは、比較的狭い範囲（小さいFOV）で高解像度の画像を取得するように設計されていた。しかし、こうした画像は、画像解析ソフトウエアを使用するときにしばしば問題となる。アルゴリズム処理では、光学収差や周辺暗部がない画像を前提としているためだ。高解像度、高画質、大きいFOVを得る対物レンズでなければ、信頼性の高い正確な処理データを得るのは難しい。

これらの課題を解決するのが、より高度な対物レンズを製造するための新規技術である。オリンパスを含むいくつかの企業は、画像解析や顕微鏡を使ったイメージングシステムのメーカー

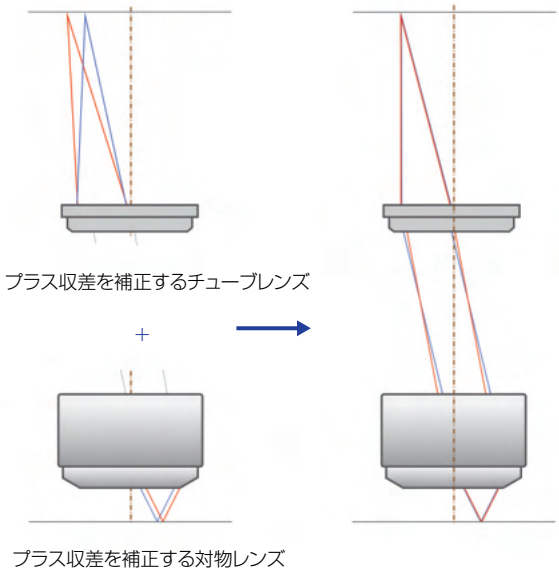

図4　補償方式による収差補正のメカニズム。対物レンズとチューブレンズは補完的に機能して補正する。

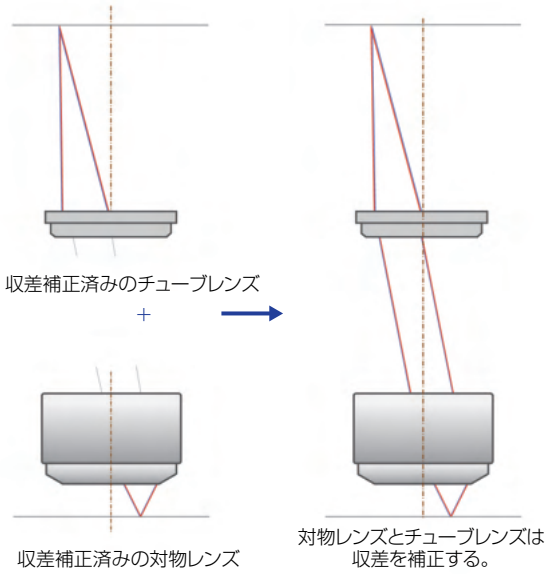

図５　無補償方式による収差補正のメカニズム。対物レンズとチューブレンズはそれぞれ独立に収差を補正する。

に最新の高性能対物レンズを提供し、機器に導入することで、ライフサイエンスや産業、医療の研究・診断分野での役割を果たそうとしている。

メーカーと対話すると、機器が均一な品質の画像を作ることに苦労していることがわかる。メーカーが高性能な機器を設計しても、顕微鏡に組み込む対物レンズの性能によって製造工程に大きなばらつきや誤差が生じてしまうと、期待する品質、コスト、リードタイムを達成できなくなるだろう。

最新の画期的なイメージング対物レンズであるX Lineは、従来のイメージングの壁を打ち破るものである。過去にはお互いにトレードオフの関係にあったNA、色収差補正、フラットネスという3つの重要なパラメータを同時に高水準で実現する[1]。これを採用するもう1つの利点は、波面収差補正であり、光学エンジニアやシステム設計者は、対物レンズ性能のばらつきに起因する問題を解決できるだろう。対物レンズとチューブレンズは通常、倍率、NA、焦点距離、作動距離で定義される。メーカーの標準的なフレームに対物レンズを使用する際は、これらのデータで十分である。ところが、設計者やシステムメーカーにとっては、公表されている仕様以外にも知るべき点はある。上述したレンズ補正、フラットネス、収差、設計スペクトル、補償方式はあまり知られていない。しかし、システムを最適化して性能を最大限に発揮するためには、こうした特徴を理解することは必要かつ重要である。

通知

X Lineはオリンパスの商標である。

参考文献

(1) https://bit.ly/XLineObjectives.

(2) D. B. Murphy, Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging, 252 (2001).

著者紹介

嵐文隆はオリンパス サイエンスソリューションOEMマネージャー。

LFWJ

LaserFocusWorld JAPAN

無料購読 お申込み方法

Laser Focus World Japanは、レーザ/フォトニクス/オプトエレクトロニクス応用技術/製品の開発、研究、マーケティングなどに携わっている方に無料でお届けする雑誌です。ご希望の方はオンラインよりご登録ください。ご登録内容を確認させていただいたうえで読者として正式登録させていただきます。

●オンライン登録
http://ex-press.jp/lfwj
登録内容の変更もこちらから可能です。

ご登録の流れ

お申し込み

登録審査

ご登録内容から、お申し込みの方が無料購読対象の方かどうか確認させていただきます。

登録完了/購読開始

登録完了後、約1～2ヶ月後の発行号から無料購読を開始いたします。

ご購読の更新

約1年毎に購読継続の確認をさせていただきます。
＊更新の段階で有料購読に切り替わることはありません。

個人情報に関する当社の方針はこちらをご確認ください。
≫ http://ex-press.jp/lfwj/privacy/

お問い合わせ：株式会社イーエクス プレス
Tel: 03-6721-9890
email: lfwj@lfw-japan.jp