

手術用顕微鏡の構造と特性

—脳神経外科医に必要な知識—

岩 間 亨

Properties and Characteristics of Surgical Microscopes for Microneurosurgery

by

Toru Iwama, M.D.

from

Department of Neurosurgery, Gifu University Graduate School of Medicine

Objective diameter, stereo base, illumination, anti-reflective coating and design complexity of optical parts (lenses, prisms, etc.) are all essential optical parameters of surgical microscopes. Neurosurgeons should understand the relationship between working distance, magnification, aperture, light output, depth of focus, exit pupil, and heat injury of the tissue. Adjustments of diopter scale and balance, and draping are very important for comfortable microneurosurgery. Operators should keep in mind that surgical procedures are performed at the center of the microscopic operative field with adequate magnification, aperture and light output in a relaxed posture.

(Received December 30, 2009; accepted January 26, 2010)

Key words : microneurosurgery, microscope, optical property

Jpn J Neurosurg (Tokyo) 19 : 504-509, 2010

はじめに

今日の脳神経外科手術において手術用顕微鏡はなくてはならない手術機器であり、脳神経外科医にとって手術用顕微鏡の構造と特性を理解しこれを自在に使いこなすことは高いレベルでの microneurosurgery を遂行するうえで必要不可欠である。

一方で、脳神経外科医が手術用顕微鏡に求める基本的要件としては、第一に明るく鮮明で、透明感のある立体的拡大像が得られること、第二に術者の目や身体に負担が少ないこと、第三には取り扱いが容易なことなどであると思われる。現在市場に出ている手術用顕微鏡には各社のものがあるが、いずれも大変優れたものであり甲乙付け難い。しかしながら、それらの基本構造や設計コン

セプトにはメーカー独自の特徴があり、術者の手術スタイルや優先する特性により手術用顕微鏡の好みがかかれることも事実である。

本稿では脳神経外科医として知るべき手術用顕微鏡の構造と光学的特性について概説し、最後に顕微鏡手術を行う際に著者が注意している点について述べる。

手術用顕微鏡の基本構造

手術用顕微鏡は両側凸レンズのケプラー望遠鏡の構造を基本としてプリズムによって上下左右正立像となるよう設計されており、この基本設計は各メーカーに共通のものである。脳神経外科手術で用いられている顕微鏡では、術者のための主鏡筒に加えて、助手用として左右あ

岐阜大学大学院医学系研究科脳神経外科学分野 / 〒501-1194 岐阜市柳戸 1-1 [連絡先: 岩間 亨]

Address reprint requests to: Toru Iwama, M.D., Department of Neurosurgery, Gifu University Graduate School of Medicine, 1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1194, Japan

るいは対面の側視鏡と CCD カメラが接続されているが、これらへの分岐光路の分け方やプリズムの用い方などにはメーカーやモデルによる相違がある¹⁾。

手術用顕微鏡固有の光学特性とパラメーター

手術用顕微鏡のもつ光学特性にかかわる固有のパラメーターとして、対物レンズ径、対物レンズ間距離、照明方法、顕微鏡内部の光学素子の性能と構造などが挙げられる¹⁾。

① 対物レンズ径 (objective diameter)

対物レンズの径は顕微鏡にとってきわめて重要なパラメーターであり、像の解像度と見やすさに直接関係する。対物レンズ径が大きいほど情報量が多く、解像度の高い、明るく鮮明な像が得られる。また、対物レンズ径が大きいほど射出瞳径（後述）も大きくなるため顕微鏡をのぞいた時に像を捉えやすく術者が疲れにくい。

② 対物レンズ間距離 (stereo base)

対物レンズ間距離は立体視に直接的に影響し、大きいほど立体視が得られやすい。

対物レンズは鏡体を下からのぞぎ込むと観察できる (Fig. 1)。対物レンズ間距離にはメーカーにより 22~25 mm 程度と若干の違いがある。対物レンズ径、対物レンズ間距離を大きくすれば、解像度、立体視ともに向上するが、当然鏡体の幅が大きくなるという欠点がある。

③ 照明 (illumination)

多くのメーカーが視軸に対して 3~6 度程度斜めから照明光を入れる斜照明を採用している。斜照明の最大の利点は視軸に対する照明光の干渉が少ないことである。深く狭い術野に光を入れにくいのが、対象にできる影によって立体感が得られやすい。視軸に対する光軸の角度は各社で微妙に異なっており、また、補助光によって影を薄くする方式を採用しているメーカーもある。

視軸と光軸の一致した同軸照明の利点は深く狭い術野であっても対象が確実に照明されることであるが、視軸を光が通ることや観察対象から反射光により像にギラツキ感が生じ、目の疲労を招きやすい。

④ 光学素子のコーティング (anti-reflective coating) と構造 (complexity of design)

顕微鏡の内部はレンズやプリズム、ミラーなどの光学素子が多数組み合わされた構造となっている。光学素子

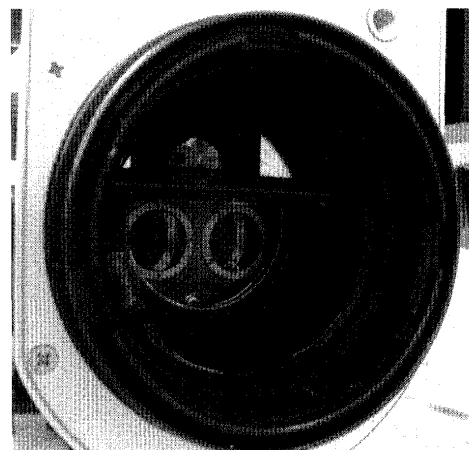


Fig. 1 Photograph of a surgical microscope from the bottom. Two objective lenses are seen and the distance between the lenses is the stereo base.

の境界では内面反射が生じるため、境界面が多いほど、すなわち光学素子が多く複雑な構造の顕微鏡ほど光学性能が劣り、解像度の低下と内面反射による像のギラツキ感が生じる。これを防ぐために光学素子の表面には乱反射防止コーティングが施されているが、その技術にはメーカーによりかなりの実力差があるといわれている。光学性能を総合的に評価する一つの方法は、照明をつけずに室内光で顕微鏡の下に手をかざしてみることで¹⁾、優れた光学性能をもつ顕微鏡では照明をつけなくとも十分に観察が可能である (Fig. 2)。

手術用顕微鏡の光学系可変パラメーター

焦点距離や倍率などの可変域はメーカーやモデルによって若干の差はあるもののほぼ同様の設定となっている。これらの光学系可変パラメーターは術者が状況に応じて手術中に変えていくものであるが、焦点深度などとの関連性を理解しておく必要がある。

① 焦点距離 (working distance)

現在市場に出ている顕微鏡のほとんどでは、対物レンズを交換することなく 200~500 mm 程度まで焦点距離を連続可変できる仕様となっている。ドリルや超音波吸引装置など比較的尺の長い手術器具を用いる時には焦点距離を長くして術野と顕微鏡との間の空間を確保する必要があるが、対物レンズ間距離は固定値であり、焦点距離が長くなるほど立体感は減少する。

② 倍率・拡大率 (magnification)

顕微鏡の倍率比は通常 1:6~1:8 で、接眼レンズとの

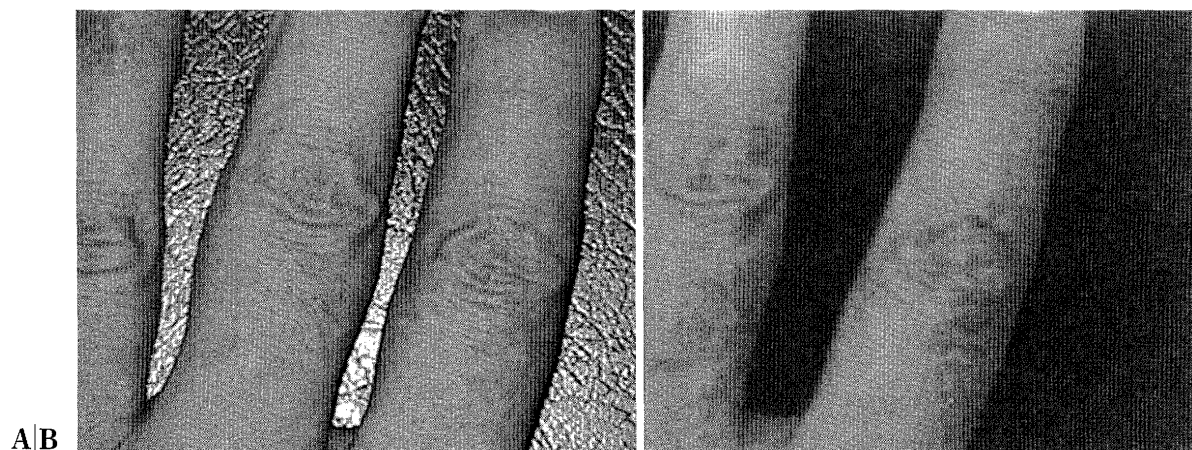


Fig. 2 View of the fingers with (A) and without (B) illumination.

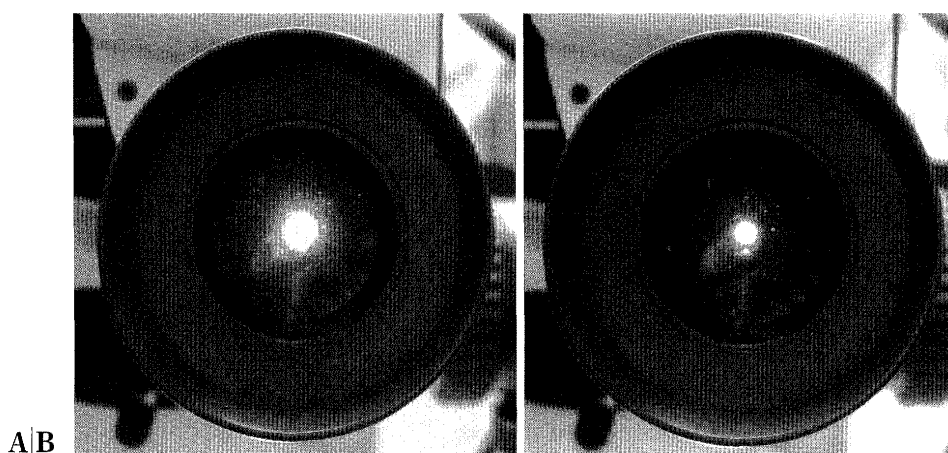


Fig. 3 Image circles at lower (A) and higher (B) magnification rates.

組み合わせで数倍～20倍程度までの連続的な変倍機構をもつものが多い。対物レンズの交換により30～50倍の高倍率での観察が可能な機種も販売されている。

射出瞳径 (exit pupil)¹⁾とは image circle とも呼ばれ、接眼レンズから観察される光束であり (Fig. 3), これが大きいかほど接眼レンズに目を当てた時に視野を捉えやすく術者は疲れにくい。対物レンズ径に比例し倍率とは反比例の関係にあるため倍率を上げると小さくなる。

倍率を上げると焦点深度 (depth of focus) が浅くなる。血管吻合術の場合など、髄液があまり排除されていない段階では脳表の拍動が顕著なため、高倍率では拍動で焦点がずれてしまう。心拍数の多い小児で問題となるが、髄液が排除されるにつれて拍動の程度が減少し焦点がずれにくくなる。

③ 絞り (aperture)

絞りは観察野と焦点深度に関連している。カメラと異なり手術用顕微鏡では照明光に絞りが付けられている。絞りを絞ると観察野は縮小するが焦点深度が深くなる。

倍率を上げると焦点深度が浅くなるため、高倍率の時には絞りを絞ったほうが見やすい。同時に、視野外での照明による組織熱損傷を防ぐといった安全面からも、高倍率にした時には絞りを絞ったほうが安全であり、倍率と絞りの自動調節を採用しているメーカーもある。

④ 照度 (light output)

多くの顕微鏡ではマニュアルで照度の調整が可能である。必要以上に照度が高いと反射により術者の目の疲労をきたすばかりでなく、前項で述べたように組織熱損傷の危険性があり注意が必要である。観察野内の熱損傷を予防するために焦点距離を近くすると照度を自動的に下げる機能を採用しているメーカーもある。

手術用顕微鏡の操作性にかかわる要因

顕微鏡の光学性能と同時に鏡体の大きさや形、重量、バランス調整機能、左右方向へのチルトとあおり、微動操作機能、スタンドとアームなどが顕微鏡の操作性に関

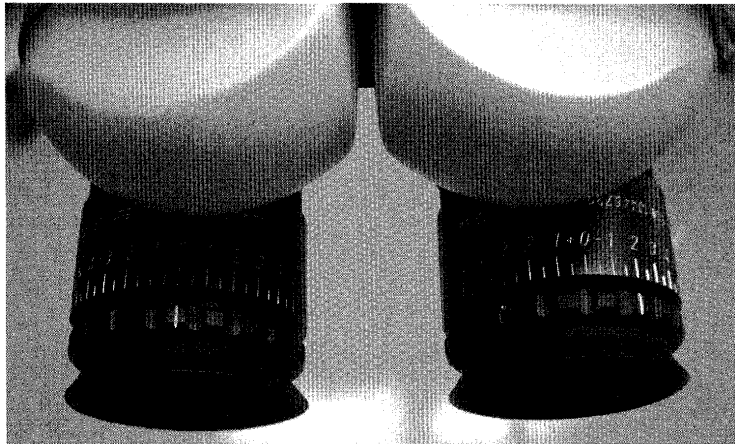


Fig. 4 Diopter scale

The diopter scales are adjusted to the author's eyes
(right : -2, left : 0).

与し重要である。

鏡体内部の光学系構造や設計コンセプトの違いから鏡体の形状や幅、重量はメーカーやモデルによりさまざまである。一般論としては鏡体が短く、幅も狭く、軽量のほうが使い勝手がよい。特に座位手術を行う場合、腕の短い日本人脳神経外科医にとって、鏡体が短く、対物・接眼レンズ距離が短いことが必須の条件となる。鏡体の幅が広いと手術操作の邪魔になりやすく、重いとたとえ電磁クラッチ付きのカウンターバランス方式のスタンドであっても顕微鏡を移動させた後安定するのに時間を要し、術者の疲労にもつながる。

手術用顕微鏡を単なる照明や拡大鏡として用いるのではなく、その倍率や角度を自在に動かすことによって最小限の開口部から深部病変の処置を行うことを神髄とする microneurosurgery にとって、顕微鏡のバランスはきわめて重要である。最近のモデルではバランス調整が簡便に行えるように工夫され、オートバランス機構が搭載されているものも多いが、中にはバランス調整の手順がやや複雑な機種もある。術中に助手鏡を大きく動かすとバランスが崩れる。術中にバランスが崩れた場合でもボタン一つのワンタッチ操作で再調整できるモデルや助手鏡を動かしてもバランスが崩れないように接続が工夫された機種もあるが、手術の前に術者自身が助手鏡の位置を設定し自分でバランスを調整しておくことが望ましく、その際には手術に必要な鏡体の側方へのチルトやあおりがスムーズに行えるかどうか確認しておくべきである。

最近の多くの手術用顕微鏡に備えられている電動式の微動操作機構は有用で、フットペダルにより操作すれば、マウススイッチと同様に両手操作を続けながらの術野移

動が可能で大変便利である。

最近の顕微鏡支持部はほとんどのメーカーが電磁クラッチ付きのカウンターバランス方式を採用しており、アームはリーチが長くオーバーヘッドポジションの取れるアーチ型のものが主流となっている。さまざまな手術器具を用いる場合でも顕微鏡の配置が容易となり、重要な要素の一つである。

手術用顕微鏡のオプション機能

近年発達した顕微鏡下での ICG による血管の蛍光観察²⁾、5-ALA を用いた腫瘍の蛍光観察³⁾の機能が多くのモデルで搭載可能となっている。その方式はメーカーにより若干異なるが、きわめて有用なオプションであり、詳細に関しては別稿を参照されたい。

内視鏡画像や MR 画像などの視野内あるいは視野外表示やナビゲーションシステムとの接続も機種を選定する場合には考慮すべきポイントであると思われる。

術者と手術用顕微鏡とのインターフェイス

術者と顕微鏡とのインターフェイスとして、主鏡筒の接眼レンズ、助手用の側視鏡、ハンドグリップ、フットスイッチ、ドレープが挙げられる。

① 接眼レンズ

目の屈折度は人それぞれで異なっている。術者と助手が自身の目に合わせて左右の接眼レンズの視度 (diopter scale) を調整することにより、術者、助手、CCD カメラ映像のすべてで焦点が合うことになる (Fig. 4)。自分の

視度を知るには、CCD カメラのモニターで顕微鏡のフォーカスを合わせた後、接眼レンズをのぞきながら、片目ずつ視度調節リングを回してフォーカスを合わせる。その時の目盛りが自分の左右それぞれの視度となる。CCD カメラや助手鏡の接続部で術者の視野とは独立して焦点や倍率を調整できるモデルもあるが、その場合でも左右の視度は調整しなければならず、自分の視度は必ず認識しておくべきである。

接眼レンズの幅を合わせ、顕微鏡の角度によって接眼レンズの角度も修正し、顕微鏡の角度が変わっても自然な姿勢で手術を行うことが疲労を防ぐために重要である。

② 助手鏡

助手用の側視鏡には完全立体視を採用しているメーカーと、主鏡筒の左右いずれかの光路を分割した弱立体視を採用しているメーカーがある。側視鏡の完全立体視には、助手が手術に積極的に参加しやすくなるという利点と、光学系を含め構造が複雑となるという欠点があり、それぞれの施設がその手術スタイルによって必要性を判断すべきものであろう。

助手鏡にも視度調整、接眼レンズの幅と角度の調整、術野の回転リングなどが備えられている。

③ ハンドグリップとフットスイッチ

ハンドグリップの位置や角度が変わると顕微鏡の扱いやすさが微妙に異なってくる。どのようなタイプであっても使いこなしていけば慣れるものだとは思いますが、ハンドグリップの位置や角度、スイッチの配置などにメーカーによる違いがあることは認識しておくべきである。

フットスイッチの配置は変更可能な場合が多いと思われるが、スイッチの感触は各メーカーで異なっている。

④ ドレープ

ドレープがきつすぎると顕微鏡を動かす妨げとなり、逆にだぶついていると手や手術器具が引っかかり手術操作の妨げとなるため、適切なドレーピングは快適な手術のための必要条件である。最近、ドレープ内の空気を微吸引して適切なドレーピングを行う機能をもつモデルも開発されたが、実際のところ、優れた術者の手術で不適切なドレーピングをみることはほとんどなく、逆にいえば顕微鏡のドレーピングをみれば術者の技量が想像できるほどである。

手術用顕微鏡を使いこなすために

著者が常日頃、顕微鏡手術を行う際に意識していることを述べてまとめて代えたい。

第一に自分の使う顕微鏡についてよく知ることが何よりも大切である。分解できるモデルなら接眼レンズ部や側視鏡、CCD カメラなどを一度外して、組み立ててみる。鏡体に付いているつまみ、ボタンはすべて触ってその役割を確認しておく。最近のコンピュータ制御の顕微鏡でもとにかく自分で触ってみることが大切で、最低限でもバランス調整と焦点距離、拡大率、絞り、照度の操作法を熟知していなければ手術をする資格はないと思う。

手術前、助手鏡や CCD カメラなどの取り付け位置を確認し必要に応じて付け替えを行う。顕微鏡の角度、助手鏡を手術中の位置に合わせバランス調整を行う。最後に接眼レンズの視度と幅を合わせてビデオモニターに像が正しく鮮明に写っていることを確認する。

ドレーピングの際には鏡体周囲、特にハンドグリップ周りにドレープのたるみがないように留意する。アーム周囲には若干のゆとりをもたせ、顕微鏡の移動やチルト、あおりがスムーズにできるか確認する。

顕微鏡操作に入る前にはモニターのホワイトバランスをとり、術野が術者とモニターでずれていないか、焦点は合っているかを確認する。

手術中は顕微鏡の角度と倍率を適宜変更し、繊細な操作は高倍率で、全体の観察や比較的大きな器具を使う時などは低倍率で操作を行う。高倍率での操作を続ける時には絞りと照度を調整する。顕微鏡の位置や角度、倍率を変えても常に操作部位が術野の中央となるようにすることが大切で、手術に集中するあまり術野の中心がずれた時には助手や看護師に遠慮なく声をかけるよう頼んでおく。同様に、集中していると自分が無理な姿勢で手術をしていることに気づかないことがある。無理な姿勢による疲労は集中力や判断力の低下につながり、ひいては手術結果に影響する。背筋を伸ばし顎を引いた自然体で、肩や腕、手先に力が入りすぎていないか、術野の映像だけでなく、手術中の自分の姿に対しても、第三者の眼を意識しながら手術を行うことが、より高いレベルに到達する一つの道ではないかと考えている。

文献

- 1) 金 彪: 手術用顕微鏡の構造と特徴. 脊椎脊髓 19: 178-186, 2006.
- 2) Raabe A, Nakaji P, Beck J, Kim LJ, Hsu FP, Kamerman JD, Seifert V, Spetzler RF: Prospective evaluation of surgical microscope-integrated intraoperative near-infrared

indocyanine green videoangiography during aneurysm surgery. *J Neurosurg* 103: 982-989, 2005.

- 3) Stummer W, Novotny A, Steep H, Goetz C, Bise K, Reulen HJ: Fluorescence-guided resection of glioblas-

toma multiforme by using 5-aminolevulinic acid-induced porphyrins: A prospective study in 52 consecutive patients. *J Neurosurg* 93: 1003-1013, 2000.

要 旨

手術用顕微鏡の構造と特性
—脳神経外科医に必要な知識—

岩間 亨

手術用顕微鏡固有の光学的特性にかかわるパラメーターとして、対物レンズ径、対物レンズ間距離、照明、光学素子のコーティングと構造の複雑性について概説した。脳神経外科医は、焦点距離、倍率、絞り、照度と焦点深度、射出瞳径、組織熱損傷との関係について十分理解しておかなくてはならない。顕微鏡手術の際には、接眼レンズの視度調整、顕微鏡のバランス調整、ドレーピングが重要であり、手術中には倍率と絞り、照度を適宜変更し、リラックスした姿勢で術野中央部での手術操作に心がけるべきである。

脳外誌 19: 504-509, 2010