

## 非球面レンズを用いた内視鏡の光技術

小野 勝也

医師が人間の体の中を見たいという願望は、古くはギリシャ、ローマ時代からあり、初めてそれを手がけたのは「聖なる医学者」と呼ばれる Hipocrates であるといわれている。当時乗馬が盛んであったため痔を病む者が多く、彼は、肛門に器具を差し入れて広げ、内部を観察して患部を焼く治療を施したそうである。その後、器具は広く普及し、大噴火で消滅したポンペイの遺跡からも同種のもので発掘されている<sup>1)</sup>。そして現代では内視鏡の発明とその改良によって、胃や大腸はもとより体内の腔という腔のほとんどの部分を観察することが可能となった。内視鏡はその用途によって太さや長さはさまざまであるが、大きく2つに分類することができる。1つは体内への挿入部分を曲げることができる軟性鏡であり、もう1つは曲げることのできない硬性鏡である。また、内視鏡には体内で得られた像を体外へ伝送するための機能が不可欠である。このため、軟性鏡にはイメージファイバーや、先端部に配置された CCD (charge coupled device) が用いられており、それぞれファイバースコープ、電子スコープと呼ばれている。また、硬性鏡には一般に良好な像を伝送するために、複数のレンズが用いられている。さらに内視鏡は、従来の診断の用途から、処置、治療の用途にその適用が大きく広がっている。硬性鏡を腹部に差し込み、像を見ながら手術を行う内視鏡下外科手術はその一例であり、従来の開腹手術に比べて、患者の負担は大きく軽減された。このように昨今の医療の進歩とともに発展を遂げてきた内視鏡は、今やなくては

ならない医療機器となった。

人間やカメラなどの撮影装置が直接入り込めない狭い空間を観察する内視鏡にとって、その外径はきわめて重要なスペックであり、たった 0.1 mm の違いが問題になる場合も少なくない。開発者はこのわずかの違いを実現するためにたゆまぬ努力をしており、これは現在も変わらない。開発者にとって性能を落とさずに内視鏡をいかに細くするかということは永遠のテーマであろう。

内視鏡における光学系の役割は2つに分類できる。1つは暗室である体内を照明すること、そしてもう1つは観察することである。外径を小さくする必要性は光学系においても全く同様で、いくら高性能な光学系を設計しても、外径が大きくては内視鏡として致命傷になる。光学系が小さくなければならない、つまりレンズが小さくなければならないという要求は、レンズを製作することを困難にするとともに、設計上も大きな制約である。内視鏡の光学系の設計者は、常にこの制約との闘いを強いられてきたのである。この設計上の制約に大きな自由度を与えてくれたのが1980年代に実用化された非球面レンズであった。オリンパスでは、ピックアップ用レンズとして最初に実用化された後、この非球面レンズを内視鏡の光学系に使用することを試みた。そして従来の球面レンズでは実現不可能であったさまざまな課題を解決し、内視鏡光学系の性能の向上に大きく貢献した。本稿では、この非球面レンズの技術を中心に内視鏡の光学系について解説していきたい。

Aspherical lens application to endoscope optical system  
(1996年5月31日受理)  
Katsuya Ono オリンパス光学工業(株)光学技術部 (〒192 八王子市石川町 2951)

### 1. ファイバースコープの歴史と光学系

1950年、東大病院分院の宇治達郎医師との共同開発のもと、オリンパスが世界で最初に胃カメラを実用化し

た。これは軟性チューブの先端に小型のカメラを取り付けたもので、盲目下で撮影するものであった。その後グラスファイバーの登場により、Hirshowitz が1958年に米国内視鏡学会で発表したのが最初のファイバースコープであり、オリンパスも1963年にGTFファイバースコープ(図1)を発表した。これにより体内をリアルタイムで観察することが可能となり、以後ファイバースコープは急速に発展を遂げていくのである。また対物レンズの構成も、当時は顕微鏡の対物レンズをそのまま流用したり、平凸レンズ1枚という単純な構成であったが、その後メニスカス2枚構成、レトロフォーカスタイプへと進歩し、現在の光学系に近づいていった(図2)。

ファイバースコープの光学系の基本構成を図3に示す。この基本構成は、現在の内視鏡にも継承されているものである。内視鏡の光学系に照明光学系が不可欠であることは先述の通りである。古くは先端部に豆ランプを配置していたが、グラスファイバーの登場により体外の

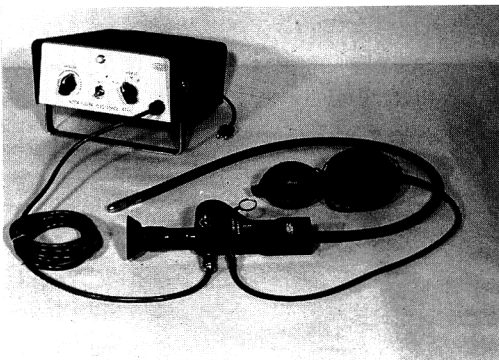


図1 GTFファイバースコープ(1963年)。

大光量の光源の光をライトガイドで先端部に伝送することが可能となった。一方、観察光学系もより広い範囲を見たいという要求から、現在は視野角が $100^\circ$ を超えるものが主流になっている。このとき照明光学系には、物体面を効率よく、かつ均一に照らすことが要求される。このような広角の内視鏡の場合、単にライトガイドから出射する光で照明するだけでは、その範囲はライトガイドのNAでほぼ決まってしまう。現在では、高NAの

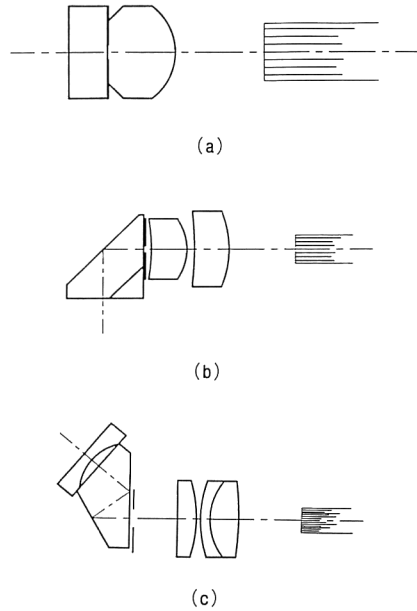


図2 内視鏡対物レンズの変遷。(a)平凸単レンズタイプ(1968年頃)、(b)メニスカス2枚タイプ(1969年頃)、(c)レトロフォーカスタイプ(1971年頃)。

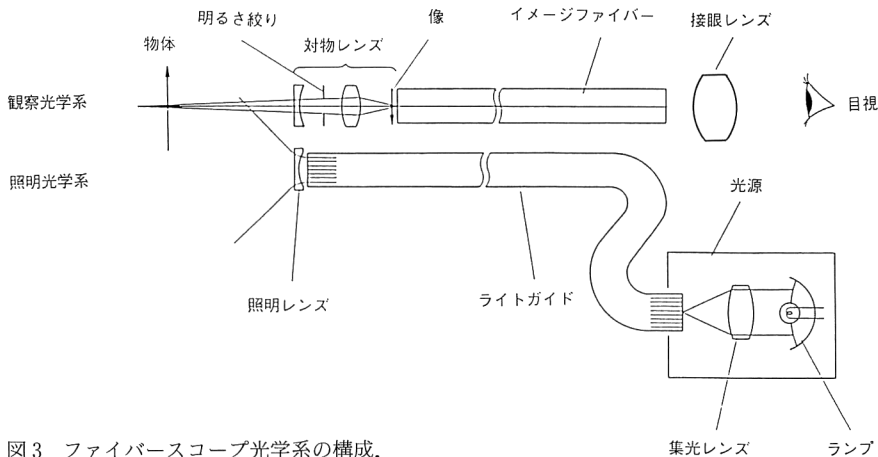


図3 ファイバースコープ光学系の構成。

ライトガイドも存在するが、一般にその透過率は低いため光量が減ってしまい使用しにくい。そのため比較的低NAの透過率の高いライトガイドを用いて光を伝送し、内視鏡先端部に照明範囲（配光角）を広げるためのレンズを配置することにより広い視野を効率よく照明している。

次に観察光学系について説明するが、内視鏡対物レンズは通常テレセントリックな光学系を使っている。これは、画像を伝送するイメージファイバー内を伝搬する光が、光ファイバーのNA内でなければ伝搬できないため、光学設計上対物レンズの主光線出射角度を光軸とほぼ並行にする必要があるためである。内視鏡先端部にCCDを用いた電子スコープも対物レンズの主光線出射角度が大きくなると色シェーディングなどの問題が生じるため、同様の光学系を用いている。そのため対物レンズの射影系は、

$$H(\theta) = f \sin \theta \quad (1)$$

で表されるいわゆる正射影系となる。ここで $H$ は像高、 $\theta$ は半角、 $f$ は焦点距離である。この正射影系は、第一に視野角が大きくなるほど強い負のディストーション（歪曲収差）が発生すること、第二に $\cos 4$ 乗則による視野周辺の光量の低下がないという特徴がある。前者は視野周辺の画像が潰れてしまうというデメリットがあるが、後者は照明系によって物体を照らしている内視鏡にとって視野の周辺まで明るく観察するためにきわめて都合のよい特徴になっている。

ところで、この正射影系で発生するディストーションについて少し説明しておく。例えば、内視鏡としては一般的な視野角 $100^\circ$ の対物レンズで発生するディストーションはおよそ $-36\%$ にも達し、カメラレンズなどに比べれば桁違いに大きい。

ディストーションは入射瞳への主光線の入射角 $\theta$ に依存する。像高 $H$ と焦点距離 $f$ の関係を式(2)で表すとディストーションは式(3)で表すことができる。

$$H(\theta) = f A(\theta) \quad (2)$$

$$DT(\theta) = 100 \times \{A(\theta) / \tan \theta - 1\} \quad (3)$$

一般に関数 $A(\theta)$ は瞳の結像関係のみに依存し、近軸瞳倍率( $\beta_E$ )と瞳の結像における収差(瞳を物点として追跡したときの正弦条件不満足量と球面収差)の2つに分けられる。瞳の収差がなければ、 $A(\theta)$ は近軸瞳倍率( $\beta_E$ )のみで決まり、式(4)が得られる。

$$A(\theta) = \sin \theta / (1 - \sin^2 \theta / \beta_E^2)^{1/2} \quad (4)$$

テレセントリック条件を保つためには近軸瞳倍率の絶対値を十分大きくする必要があり、その場合

$$A(\theta) = \sin \theta \quad (5)$$

となり、結局この式は先述の式(1)の正射影系を表す。またディストーションは

$$DT(\theta) = 100 \times (\cos \theta - 1) \% \quad (6)$$

となる。したがって、 $\theta$ が増加すると大きな負のディストーションが発生する。このことからテレセントリック条件を満たす内視鏡の対物レンズで発生するディストーションは瞳の近軸関係に起因するといえる。そのため、テレセントリック条件を満足したままディストーションを補正することが困難だったのである。

## 2. 非球面レンズと内視鏡への応用

非球面レンズの内視鏡光学系への応用に関しては、設計上の制約の大きい先端部に対して、光学系を複雑にせず、または外径を大きくすることなく、品質や性能の向上を目的として検討を進めた。

### 2.1 照明光学系への応用

非球面レンズを内視鏡の光学系に応用するにあたり、まず照明レンズを選んだ。その理由は照明光学系のレンズは観察光学系のレンズほど高精度が要求されないためである。内視鏡の照明光学系は、ライトガイドによって伝送された照明光を観察光学系の視野内に効率よく、かつ均一に照明することが要求される。観察光学系の視野の広角化に伴い、照明光学系の先端部には視野を均一に照明するための照明レンズが不可欠になっている。非球面レンズが実用化される前はライトガイドからの出射光を平凹レンズで広げていたが、この方法では広角で出射する光がレンズの縁に当たると視野周辺が暗くなってしまうため、レンズの外径を大きくする必要がある。また視野の中心から周辺まで均一に照明するためには凹面の曲率半径を小さくすればよいが、その場合視野外を照明する光の割合が増えるため照明の効率が落ち、視野内全体の明るさは低下してしまう。この問題を解決したのが非球面レンズであった。

図4に従来の平凹レンズによる照明レンズと最初に実用化した非球面照明レンズを示す。ライトガイドから光軸に平行に出射する光線のライトガイド出射端面の光線高を $h$ とし、照明レンズから出射する角度を $\alpha(h)$ とすると、従来の平凹レンズは $h$ の増加に伴って $\alpha(h)$ が急速に大きくなる。そのため視野周辺で光線密度が低下し、配光が悪くなってしまう。さらに、 $h$ が大きい光線は凹面で強く屈折するため平面側での光線高が高くなる。一方非球面レンズはある光線高 $h$ までは $\alpha(h)$ も増加するが、そこを超えると今度は $\alpha(h)$ は小さくなって

くる。これは、球面の場合面の傾きが光軸から離れるにつれだんだん大きくなるのに対し、非球面の場合、光軸から離れたある距離からさらに離れるにつれ、球面の場合とは逆に面の傾きが小さくなっているためである。図

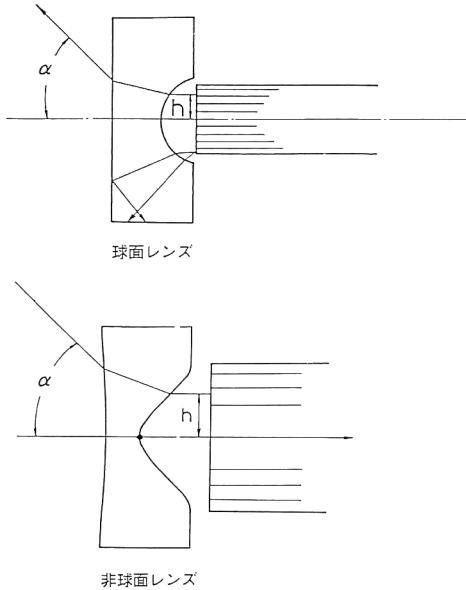


図4 照明レンズ。非球面レンズは球面レンズに対し約2倍拡大して表示してある。

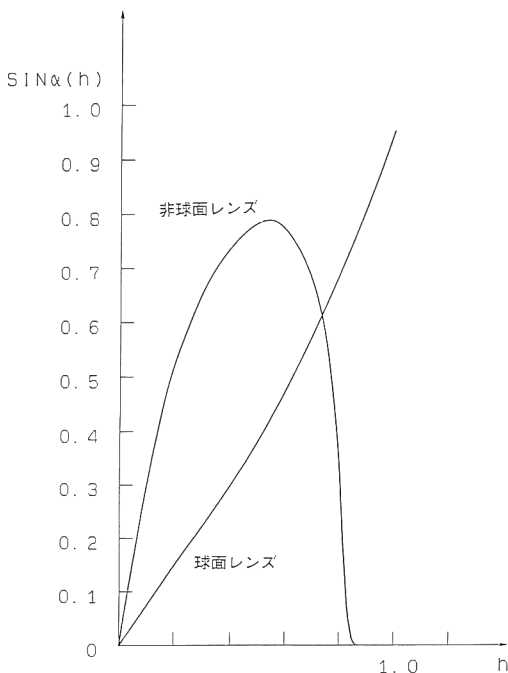


図5  $h$  と  $\sin\alpha(h)$  の関係。

5に球面レンズと非球面レンズの場合の  $h$  と  $\sin\alpha(h)$  の関係を示す<sup>2,3)</sup>。平凹レンズの場合、視野の周辺を照明する光がライトガイド出射端面の周辺部から出た光線であるのに対し、前述のような面形状の非球面レンズでは中間部から出た光線であるためレンズ内の最大光線高を低くすることができる。また、平凹レンズの場合視野周辺に向かうにつれ光線の密度が小になるが、非球面レンズではほぼ均一にすることができる。これらの効果によって、レンズの外径を大きくすることなく、視野周辺まで均一で明るい、効率のよい照明が可能となったのである。このように内視鏡用照明レンズは、非球面レンズの実用化により、球面レンズでは達成不可能であったレンズの小径化と均一で明るい照明の両立を実現することができた。

## 2.2 観察光学系への応用

非球面レンズの観察光学系への応用にあたり、最初の目標となったのはディストーション（歪曲収差）の補正であった。前述の通り、内視鏡の対物レンズは通常テレセントリックな光学系となっており、式(6)で表されるように大きな負のディストーションが発生する。このディストーションを補正するためには、瞳の結像における正弦条件を強制的に大きく崩せばよい<sup>5)</sup>。しかしながら、通常それほど発生しない特定の収差のみを強制的に発生させ、他の収差に影響を与えないようにすることは簡単ではない。図6に球面レンズのみでディストーションの発生を極力少なくした対物レンズの設計例を示す<sup>4)</sup>。第1レンズが大きく、内視鏡用対物レンズとしてとても使いそうにないことが一目でわかる。そしてこのような大きなレンズを用いずに、ディストーションの補正を可能にしたのが非球面レンズである。

ところで、通常のカメラレンズとは異なり内視鏡レンズにおけるディストーションは必ずしもなくしたほうがよいわけではない。というのも、ディストーションは物体面が光軸に対して垂直な平面であることを想定して計算されているが、内視鏡は狭い空間を観察するため物体面の形状が平面であるとは限らないからである。例えば

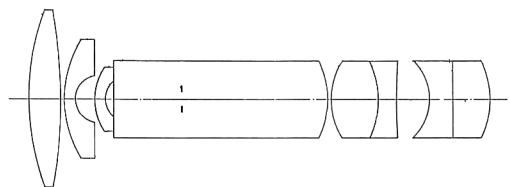


図6 球面レンズによるディストーション補正の設計例。

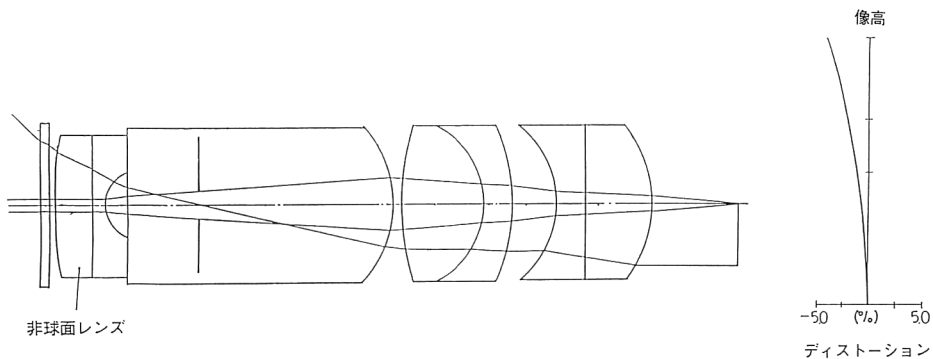


図7 非球面对物レンズと収差図.

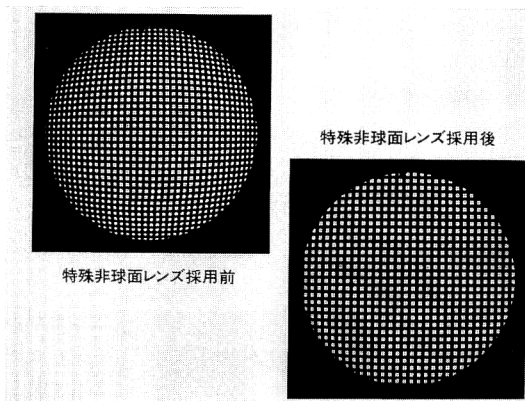


図8 格子状被写体の見え.

腸のような管腔内を広角の対物レンズを用いて観察する場合、視野周辺は中心に比べて比較的近距离の物体を観察していることになる。このような場合、ディストーションがまったくないと倍率の関係上視野周辺はより大きく、中心付近はより小さく観察され、視野全体を同時に良好に観察するうえで支障となるケースが生じる。このためディストーションの補正は、内視鏡の用途によってその必要性や価値が変わるのである。

オリンパスで非球面レンズを最初に観察光学系に採用したのは硬性鏡の一種である腹腔鏡であった。視野角は約70°で非球面レンズを用いない場合のディストーションは約20%発生していた。腹腔鏡は内視鏡としては比較的広い空間内で平面的な物体を見ることが想定されるため、ディストーション補正の効果が期待された。図7に腹腔鏡に採用された対物レンズと収差図を示す<sup>6)</sup>。カバーガラスの次の面(第3面)が非球面である。この非球面は近軸の曲率半径に対し、周辺に向かって徐々にローカルな曲率半径が小さくなる形状を呈している。従来の対物レンズとディストーションを除去した対物レンズ

で格子状の被写体を観察した場合の像を図8に示す。近似球面からのズレ量は最大でもわずか10 $\mu\text{m}$ 程度のきわめて小さな量であるにもかかわらず、ディストーションは良好に補正されていること、また図6と図7の違いから考えても非球面レンズの効果の大きさは歴然である。

この光学系のもう一つの特徴は、従来の内視鏡対物レンズの特徴である $\cos^4$ 乗則による周辺光量の低下がないことを維持しながら、ディストーションが良好に補正されていることである。射影系はディストーションが補正されているのだから

$$H(\theta) = f \tan \theta \quad (7)$$

になっており、本来ならばカメラレンズと同様 $\cos^4$ 乗則の影響があってもよさそうである。理由は、軸外の入射瞳径が軸上の入射瞳径に対し極端に大きくなっているというきわめて単純なことなのである。つまり、対物光学系全系では式(7)の射影系を満たしているが、絞り後側の光学系では正射影系なのである。絞りの前側に非球面レンズを配置した設計を行ったため、ディストーションの補正と $\cos^4$ 乗則による周辺光量の低下がないことの両立が可能になったのだが、このことは照明系で物体面を照らす内視鏡にとって、実際に製品に用いるうえできわめて重要なことであった。いくらディストーションが補正できても周辺光量が減ってしまえば、内視鏡の光学系としては致命傷になってしまうからである。

### 3. 非球面レンズの検査

これら非球面レンズを実際に製品に用いるにあたり、その検査方法は大きな問題であった。非球面レンズを簡単に測定する方法などもちろんなく、開発段階でその形状評価に使用していた触針式の形状測定機では時間がかかり、また一次元の測定しかできなかったため、工場のラインでの検査には不向きであった。そのため測定装置

の開発も並行して進める必要があった。

### 3.1 照明系用非球面レンズの検査

照明光学系用の非球面レンズの検査は、実際にライトガイドの先端にレンズをのせてその配光角を測定して行っている。この方法はきわめて簡単で、照明レンズがその目的を達成しているかどうかが明確に判断できる点で優れている。欠点としては、問題が発生したときに原因がすぐにわからないため、前工程にフィードバックできないことである。しかしながら、非球面レンズの製造技術はピックアップレンズ用にすでに確立されており、面形状の精度が比較的ラフな照明光学系用としては十分な精度で製造可能であったため、実用面での問題はなかった。

### 3.2 観察系用非球面レンズの検査

観察光学系用の非球面レンズの検査は、照明用の場合と異なり困難を極めた。面形状の精度は、照明系のレンズと比べ格段に高いレベルが要求される。当時は高精度な非球面レンズの面形状を工場のラインで検査する適当な装置もなかったため、干渉計を用いた検査装置の開発も並行して行われた。しかしながらこの検査装置は最初の腹腔鏡の開発には間に合わなかった。そのため、非球面レンズの部分だけ着脱可能な製品と同じ光学系をもつ簡易検査装置を作成し、できあがったレンズを装着して画像評価を行い可否の判断をしたのである。カメラなどに比べれば比較的生産台数が少ない内視鏡とはいえ、この作業は大変であった。定量的な判断基準が設定しにくく、検査する人により判断が異なる可能性もあるためである。そのため干渉計の開発が終了するまで、工場の特定の検査作業者に負荷をかけることになった。ここで幸いだったのは、非球面レンズの配置が対物レンズの先端レンズであったことである。もし先端レンズでなければ、外径数mmのレンズが着脱可能な簡易検査装置など作れなかっただろうし、そうなれば実際に製品に使用する決断はできなかったかもしれない。その後専用の干渉計により定量的な検査ができるようになったのでこの検査方法もなくなったが、新しい技術を製品に導入する場合それを評価あるいは検査する装置がいかに重要なものであるかを痛感した。

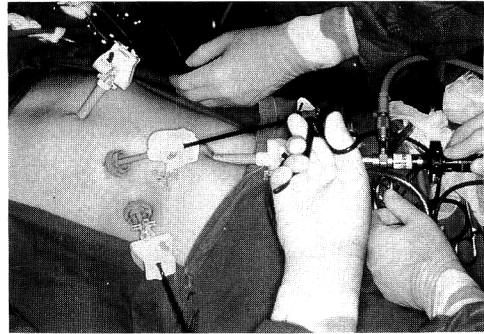


図9 内視鏡下外科手術の様子。

定量的な測定方法の確立に伴い、非球面レンズを応用した内視鏡の光学系も増え、その用途も広がり、商品の差別化に貢献している。

内視鏡を用いた治療は、内視鏡下外科手術（図9）にみられるように患者の負担を大きく軽減してきた。これらは医師たちの並々ならぬ努力により実現してきたものだが、内視鏡の貢献も重要であった。これからも内視鏡の進歩に対する医療現場の期待は大きい。光学系もより小さく、より自然な見えを実現していかなければならないが、内視鏡というきわめて限られたスペースの中では、設計に合わせて実装技術や検査技術の確立が不可欠である。ただ、内視鏡が医療機器である以上その目的はあくまで治療や診断であり、光学技術はそれを実現するためのひとつの手段でしかない。もちろん光学技術がすぐに不要になることは考えられないが、医療の進歩に伴い内視鏡やその光学系に対する要求も少しずつ変わっていくはずである。私たち技術者はこれからもそれら医療現場の要求に応じていけるよう努力する必要があると感じている。

## 文 献

- 1) 多賀須幸男：“内視鏡検査の歴史—胃内視鏡を中心に”，*Gastroenterological Endoscopy*, 20 (1978) 319-329.
- 2) 西岡公彦：特開昭 62-156616.
- 3) 五十嵐勉：特開昭 64-3616.
- 4) 高橋 進，西岡公彦：特開昭 60-80816.
- 5) 五十嵐勉：特開平 2-277015.
- 6) 金森 巖，岡部 稔：特開平 3-39915.