

薄膜マノメーターで Goldmann 眼圧計を検証する

今村 侑¹⁾, 今村 矢²⁾

¹⁾御所見眼科, ²⁾新潟県立長岡工業高等学校

要 約

圧平眼圧計がどれだけの精度で内圧を測定しているかを知るために、厚さ 0.07 mm の HEMA ソフトコンタクトレンズを貼りつけた薄膜水柱マノメーターを作製し、Goldmann 型圧平眼圧計を用いて内圧を測定した。結果は以下のようになった。フルオレスセインリングの内縁を互いに接触させたとき、測定値は理論値に比べ 5~15 mmHg 低くなった。内圧が高くなるに従い、理論値との差は大きくなった。圧平状態を注意深く観察すると、フルオレスセインリングの内側に幅 0.2 mm 前後の黒いリングが見えた。この黒いリングの内側が互いに接触するまで圧平すると、理論値と測定値はほぼ一致した。接

触面を鏡面反射法で観察したところ、圧平面は境界鮮明な円形を保ち、面内は同心円または地図状の色干渉縞を提示した。さらに、この光干渉面と黒いリングとの境界にはニュートンリングが出現していた。以上の結果から、真の圧平面は黒いリングの内側にあり、フルオレスセインリングの内縁は圧平面のマーカールではないことがわかった。(日眼会誌 98:590-595, 1994)

キーワード：圧平眼圧計，水柱マノメーター，蛍光リング，黒いリング，ニュートンリング

Evaluation of Goldmann Applanation Tonometer with Thin Membrane Water Manometer

Tsutomu Imamura¹⁾ and Tadashi Imamura²⁾

¹⁾Gosyomi-Ganka, ²⁾Nagaoka Technical High School

Abstract

In order to evaluate the accuracy of applanation tonometry, we prepared a thin membrane water manometer with a 0.07 mm thick HEMA soft contact lens and measured the internal pressure using a Goldmann type applanation tonometer (KOWA HA-1). The results were as follows. When the inner rims of the fluorescein ring were in contact with each other, the measured pressure value was lower than the theoretical value by about 5~15 mmHg; the higher the internal pressure, the larger the difference from the theoretical value. When the applanated condition was observed carefully, a dark ring about 0.2 mm in width could be seen inside the fluorescein ring. By applanating until the inner rims of this dark ring contacted each other, the theoretical value and the measured value matched

approximately. Observing the contact surface by means of specular reflection, the applanated surface was located inside the dark ring, maintaining a circular shape with distinct boundary and this plane showed concentric circles or map-like color interference fringes. Newton's rings appeared on the boundary between this light interference surface and the dark ring. So we concluded that the true applanated area existed inside the dark ring and the inner rim of the fluorescein ring did not constitute an indicator of the boundary of applanated area. (J Jpn Ophthalmol Soc 98:590-595, 1994)

Key words: Applanation tonometer, Water manometer, Fluorescein ring, Dark ring, Newton's rings

I 緒 言

我々眼科医が現在使用する各種の眼圧計のなかで、Goldmann 圧平眼圧計は眼の水力学的な圧力を測定する

という点で、測定の実理が最も理解しやすい眼圧計である。それは眼圧を単位面積 (1 cm²) 当たりの力 (グラム重) と定義し、眼に対して眼圧計の圧平子を押しつけたとき、何グラム重の力が必要かというやさしい力学原理

別刷請求先：252 神奈川県藤沢市瀬郷 182-1 今村 侑
(平成 5 年 11 月 9 日受付，平成 6 年 2 月 17 日改訂受理)

Reprint requests to: Tsutomu Imamura, M.D. 182-1 Osogou Fujisawa-shi, Kanagawa-ken 252, Japan
(Received November 9, 1993 and accepted in revised form February 17, 1994)

一いわゆる Imbert-Fick¹⁾の法則^{2)~17)}に基づいている。圧平接触部は円い平面になり、この圧平面の面積が常に単位面積(1 cm²)の13.6分の1になるように眼圧計を押し付けると、眼圧計のグラム目盛の13.6倍の圧力(グラム重/cm²)と均衡する。13.6は水銀の比重であるから、結局はグラム秤を使かつて単位面積にかかる水銀柱の高さを測定するのと同じことになる。したがって、眼圧計のグラム目盛はセンチメートル水銀柱/cm²に等しく、目盛を10倍するとミリメートル水銀柱の圧力になる。さて、この円い接触面は、面積1 cm²の13.6分の1であるから、簡単な計算で、直径3.06 mmになる。

圧平子は透明なプラスチック製で二個の偏角プリズムが内蔵され、このプリズムによって圧平面の像を半円ずつ左右均等に分離する。面の直径が3.06 mmになったとき、接触面の境界を示すフルオレスセイン色素の半円の内縁が一致し、そこが眼圧の読み取り点であるとされている⁹⁾¹⁰⁾。

以上に概説したように、本眼圧計は眼を滑らかで薄く、柔らかい仮想の理想膜⁹⁾¹¹⁾で包まれた球体に見たて、その内圧を精密に測定するように設計されている¹⁶⁾。古くは Imbert, Fick, Makrakoff らにより測定原理はわかっていた⁶⁾が、はじめのうちは極めて粗雑な眼圧計であったため実用にならなかった。近代的な細隙灯顕微鏡の出現により、これに装着して圧平面を確実に観察できるようになり、精密眼圧計として実用化されるに至ったものである。発案者である Goldmann ら⁹⁾¹⁰⁾は種々の摘出動物眼、摘出人眼に水柱マンメーターを繋ぎ、彼の試作眼圧計で内圧を測定した。その結果、新鮮な人眼においては、圧平面の直径が3.0~3.5 mmの範囲で角膜の硬性(Eigensteifigkeit)と接触面に介在する水の表面張力が打ち消し合い、測定値は理論値(Sollwert)とよく一致したとしている¹⁰⁾。以後、この眼圧計は現在でも最も信頼できる標準的な眼圧計として広く臨床で使われている^{13)~15)}。

上述のように、この眼圧計は理想膜を介した圧力を測定する設計になっているから、生体眼の眼圧測定とは別に、薄膜モデルに対してもまず検証がなされなければならないはずであるが、不思議なことに薄膜での検定報告は見当たらないのである。我々の調べた範囲では、ゴム膜マンメーターで圧力と圧平面積の関係を求めたおおよかな実験¹⁷⁾があるだけで、厳密に検証したものはなかった。我々は Goldmann 型圧平眼圧計がどれだけの精度で内圧を測定するかを知るために、薄膜を貼ったマンメーターを作製し、種々な水位における内圧を圧平眼圧計を用いて測定したので報告する。

II 実験方法

1. 眼圧計の検定

使用した眼圧計はコーワ手持ち眼圧計(HA-1)であり、

精度を知るため次の検定を行った。まず、眼圧計を水平にして圧平子の上に1~6 gの重りを順次加重し、各重さに対して眼圧計が正確にそのグラム目盛を表示することを確かめた。

次に圧平子の前面に、φ3.00 mmの正円で囲まれた1/100 mm対物スケールを貼りつけて観察方向から写真撮影し、上下の半円が左右同等にほぼ1.53 mmだけ分離することを確かめた。

以上の検定により、この眼圧計には機械誤差はないものとみなすことができた。

2. 薄膜マンメーターの作製および検定

直径30 mmのプラスチック製円筒形の箱の前方にφ7 mmの穴をあけ、厚さ0.07 mm、サイズ14 mm、含水率40%、屈折率1.43のHEMA(ハイドロキシ・エチル・メタクリレート)プラノソフトコンタクトレンズを、のりしろ2 mmで貼りつけて角膜の代用(以下、角膜)とした。HEMAソフトコンタクトレンズは眼圧測定するとき、フルオレスセインのにじみを打ち消すために薄茶色の着色レンズを用いた。なお、ソフトレンズの厚さと含水率は実測値である。さらに、円筒箱の後方にはφ5 mmの穴をあけ、気泡が混入しないように水を入れ、細管で500 mlリザーバーと連結した。細管はφ3 mmの輸血セットを使った。水位0の位置からセンチメートル巻き尺を吊りさげ、円筒を上下に動かして水圧を調節した。角膜の中央と一致する水柱目盛を角膜の水位とした(図1, 2)。

実験中は時々水滴を噴霧し、常に角膜が柔らかく、含水性を保つように注意した。各水位に対し、角膜の大きさと厚さはほとんど変わらず、曲面は半球状に維持されることを細隙灯顕微鏡下に確認した。

角膜の曲率半径を計測したところ、水圧が増すにつれ、球状のまま曲率半径は小さくなった(表)。

角膜をゼロ水位より1 cm挙上すると、角膜中央は陥入したので、角膜の硬性(Eigensteifigkeit)¹⁰⁾は1 cm水柱=0.7 mmHg以下とみなした。また、眼圧計と角膜との接触部に生じる表面張力の影響は、水の表面張力を70 dyn/cm¹⁰⁾として概算すると、67 dyn/接触面積=0.7

表 各水位における膜の曲率半径

マンメーター水圧 cmH ₂ O(mmHg)	曲率半径(mm)		
	横径	縦径	平均
0 (0)	8.91	8.66	8.78
5 (3.7)	8.52	8.22	8.37
10 (7.4)	7.98	7.89	7.93
20 (14.7)	7.95	7.40	7.67
30 (22.1)	7.23	7.19	7.21
40 (29.4)	7.12	7.07	7.09
50 (36.8)	6.98	6.88	6.93
60 (44.1)	6.90	6.79	6.84
70 (51.5)	6.72	6.67	6.69

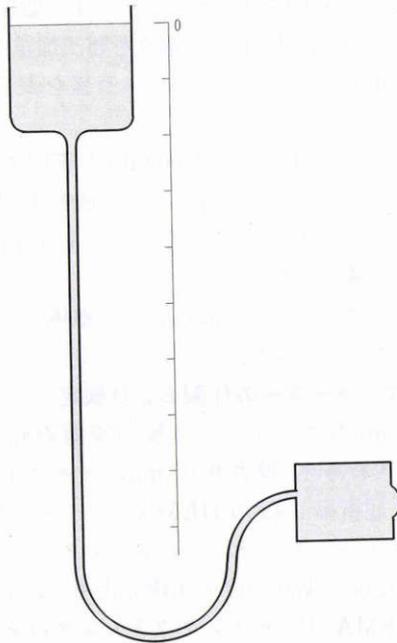


図1 水柱マンメーターの概略.



図2 マンメーター測定部の写真.
目盛は 40 cmH₂O (=29.4 mmHg) の内圧を示す.

mmHg 以下である. したがって, 角膜の硬性と水の表面張力の影響はともに本装置では無視することができ, Imbert-Fick の法則が適用できることが確認された.

III 結 果

1. ごく少量のフルオレスセイン液を角膜表面に滴下して眼圧計を当て, 青い照明で緑色に発色したフルオレスセインリングの内側が互いに一致したときの目盛を読み取った. 一つの水位に対して 7~8 回測定し, 平均値と偏差をプロットすると図3のようになった. いずれの水位においても測定値 Y mmHg は水位差から求めた理論値 X mmHg より 5~15 mmHg ほど低くなり, 水圧の上昇とともにその差はますます大きくなった. 図3のグ

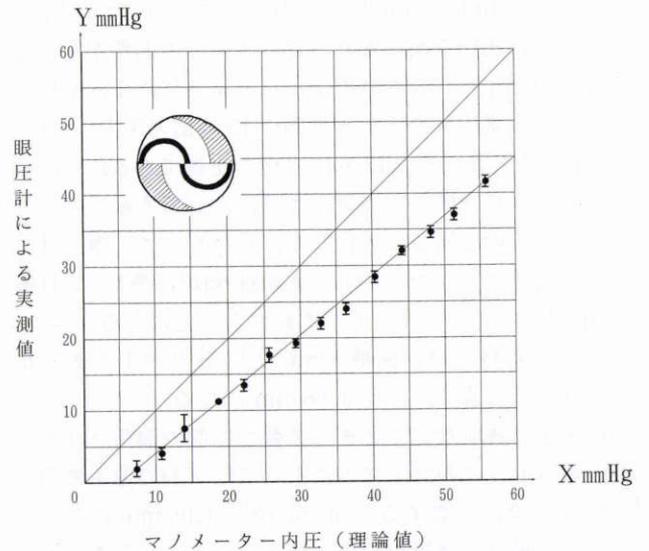


図3 縦軸(Y)は眼圧計による実測値を mmHg で示す.
横軸(X)はマンメーターの水位 cmH₂O を水銀の比重 13.6 で割って mmHg で表す. Y=X の直線は, 理論値と実測値が一致したときの仮定の直線である. 図中のマークは, 通常の方法で, 圧力を判定したことを意味する.

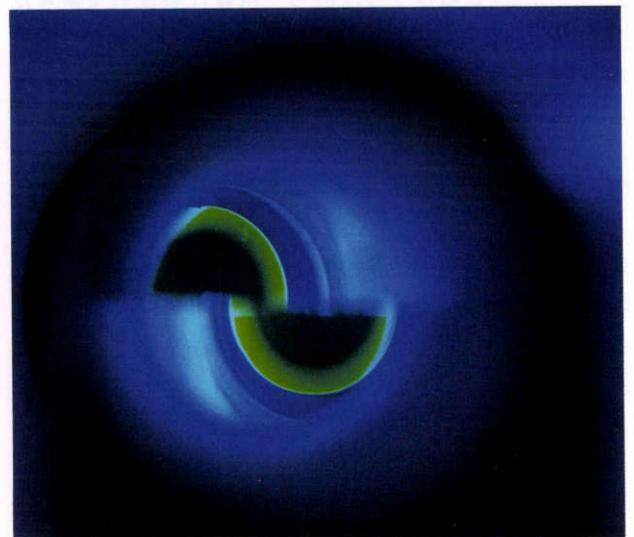


図4 幅 0.2 mm 弱の dark ring が見える.
水位 20 cm. 下側の半円の方が明瞭である.

ラフから $Y=0.82 X-4.09$ mmHg という実験式を得た.

すなわち, 上記の測定法では Imbert-Fick の法則は成立しなかった.

2. 圧平面の観察と測定法の修正

実験結果が理論値に比べてあまりにも低い値であるため, 測定法の再検討が必要になった. マンメーターとした模型眼の内部からの反射光ができるだけ少なくなるように, 円筒の周りを黒いカバーで覆って暗室内で再び測定を試みた. いずれの水位においてもフルオレスセ

イン環の内側に幅 0.2 mm 前後の黒いリング (以下, dark ring) が存在し, 圧平接触面と思われる弱い蛍光を発する円板領域と境界を作っていた(図 4). なお, dark ring の幅は水圧の上昇とともに減少した.

Dark ring の内縁が互いに一致したところで眼圧計の目盛を読み取り, 一つの水位に対し 7~9 回測定し平均値と偏差をプロットすると図 5 のようになった. 測定値 Y と理論値 X はほぼ一致するので実験式は $Y=X$ となり, Imbert-Fick の法則が成り立つことが確認できた.

3. 圧平面の解明

これらの結果から, dark ring の内縁こそが接触面の境界であると考えられたので, 真の圧平面を同定するた

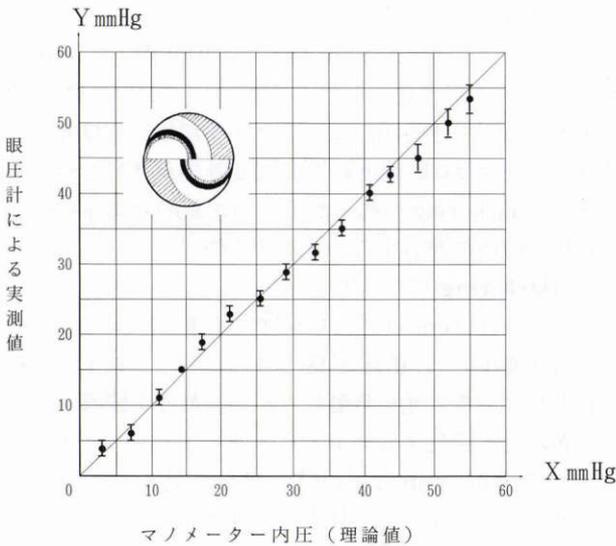


図 5 Y 軸も X 軸と図 2 と同じ.

図中のマークは, dark ring の内縁が接するところで, 圧力を判定したという意味である.

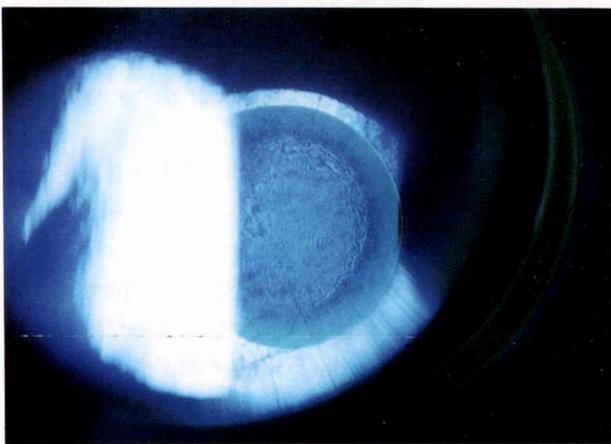


図 6 a 鏡面反射で見た所見 (緑の蛍光アクリル板で押した).

中央の円い光干渉面を囲んで dark ring があり, 緑色の蛍光リングの内縁は圧平面ではないことが一目でわかる. この写真ではニュートンリングは明らかでないが, スリットランプだと辛うじて見える. ブルーフィルター使用.

めにさらに詳細な観察を行った.

厚さ 5 mm のうす緑色の蛍光アクリル板でフルオレスセイン液を滴下した角膜を圧平し, 細隙灯顕微鏡下に青い光で観察した. マノメーター圧は 30 cm 水柱, 約 22 mmHg に保ち, 圧平面の直径がほぼ 4 mm になるように角膜を押し力を加減した. スリット光の照明角度と幅を調整することによって, 圧平面に対して光の入射角と反射角が等しくなるように, つまり, 鏡面反射になるように観察することができた. 圧平面は美しい色干渉縞を呈する円板状に見え, 圧平の仕方によって縞模様は指紋状

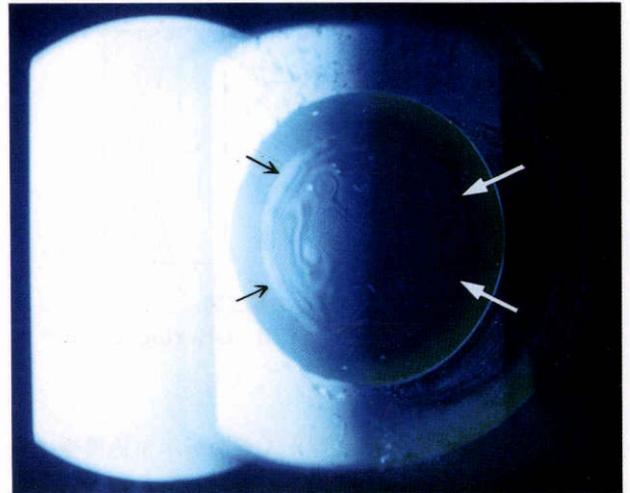


図 6 b 左半分が鏡面反射, 右半分が散乱光になるようにしてブルーフィルターで撮影 (透明アクリル板で押した).

左の光反射面の境界 (黒い矢印) を円周に沿って右になぞっていくと dark ring の内縁 (白い矢印) に一致する. 黒い矢印はニュートンリングの出現部位でもある.

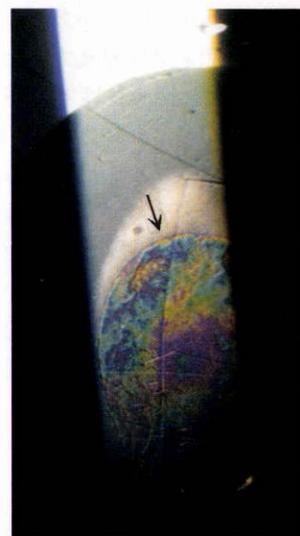


図 7 ニュートンリング出現部位の拡大撮影.

ルーペか倒像レンズで拡大すると 3~4 本の干渉縞を確認できる (矢印). 透明アクリル板で押し, 白色光で撮影.

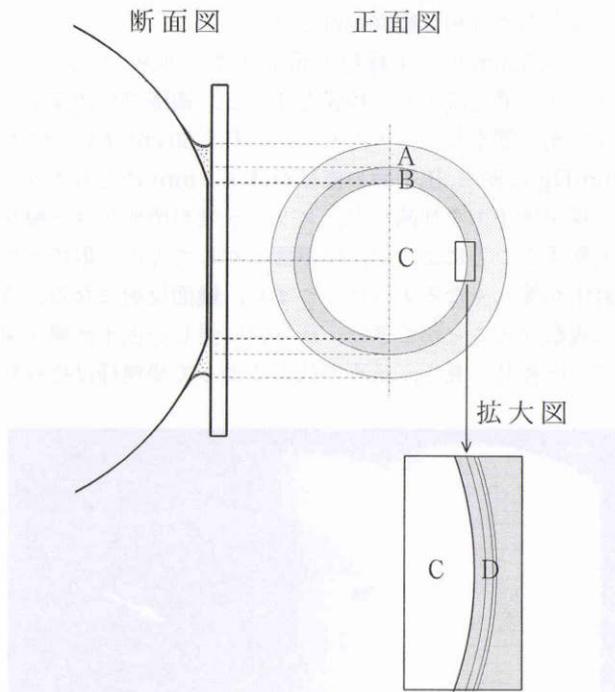


図8 圧平部位の模式図。

A: フルオレスセインリング, B: dark ring, C: 圧平面, D: ニュートンリング

や地図状に変化し、水面に浮かんだ油が示す色模様類似していた。その縞の間隔は圧平面の中央から外側に向かって次第に広がっていた。この光干渉を示す円板の外縁境界は鮮明であり、境界の外縁に沿って、さきの平面の模様とは違った、非常に細く鋭い干渉縞が3~4本見えた。この小さな干渉縞は細隙灯顕微鏡を強拡大にすると一層明瞭になり、縞の間隔は外側に向かって次第に狭くなっていったので、いわゆるニュートンリング¹⁸⁾¹⁹⁾であることがわかった。このニュートンリングをとりまいて、幅0.2mmほどのdark ringがあり、さらにその外側にフルオレスセインリングが見えていた。また、厚さ5mmの透明アクリル板を押し付けて観察しても同じ結果であった(図6a, b, 7)。このようにして、dark ringの内側が真の圧平面であることが裏づけられた。この観察結果を模式図で表すと図8のようになる。

すなわち、従来の測定法では真の圧平面の境界から外側(少なくともdark ringの幅の分だけ)を境界面とみなして測定しており、そのために実際の内圧より低めの測定値を得ていたことになる。

IV 考 按

1. まとめ

薄膜マンメーターを用いた一連の実験により、次のことが明らかになった。

(1) フルオレスセイン環の内縁をGoldmann眼圧計の圧平面の境界と考えたのでは、適正な測定値が得られないこと。

(2) フルオレスセイン環の内側に幅0.2mm前後のdark ringが存在すること。

(3) Dark ringの内縁を圧平面の境界とみなせば、適正な測定値が得られること。

(4) Dark ringの内縁に沿って、ニュートンリングが観察されること。

(5) これらの結果から、dark ringの内縁こそ圧平面の真の境界であると結論されること。

したがって、従来の方法通り、フルオレスセイン環の内側が互いに接する位置で内圧を測定すると、 $\phi=3.06$ mmで、圧平したつもりが、実は $\phi=3.06-0.2 \times 2=2.66$ mm程度の圧平しかしていないことになり、圧平面の小さな分だけ内圧が5~15 mmHgほど低めに測定されてしまうことになる。

そのときは、実験式 $Y=0.82X-4.09$ mmHgとImbert-Fickの式から各水位における実際の圧平面の直径 ϕ を求めることができるが、ここでは圧平接触部の境界を誤認させていたdark ringに関して定性的な考察を行うにとどめ、dark ringの幅と水圧との定量的な関係については稿を改めて検討することにする²⁰⁾。

2. Dark ring について

いま、直径2cmのアクリル球に少量のフルオレスセイン液を滴下し、1/10 m目盛つきのルーペを真上から軽く押し付け、青い光を照射しながら接触面を観察する。濃い黄緑色に発色するフルオレスセインのメニスカスの中央に直径0.5mmほどの暗い部分を見ることが出来る。球の大きさを変えて見ると、球の直径が大きくなるにつれてその暗部も広がってゆく。硬い球面と硬い平面が接触しているので、接触部は本来ほとんど点状になっているはずであるが、暗い部分は広がりをもった円い平面に見えるのである。実際に点接触であることは、この暗部の中心に針でついたくらい小さなニュートンリングが見えることで明らかである。この暗い部分の外縁におけるフルオレスセイン層の厚さを計算で求めると、0.003 mmとほぼ一定値をとる。

我々の作製したマンメーターでは、水圧の上昇とともに薄膜の曲率半径が小さくなっていった。圧平部分に隣接する薄膜のカーブによってフルオレスセイン環の液層の厚さが変わり、液厚が極めて薄くなった部位では、蛍光発色が弱くなるために黒くリング状に見えたものと考えられる。水圧が低いとdark ringの幅が広く、水圧の上昇とともに幅が狭くなったことも、膜の曲率半径の変化で説明することができる。

また、類似の例として我々が日常行っている涙液の染色検査を挙げることができる。BUT (break up time)の判定で涙がbreak upするとき、黄緑色の涙液のなかに突然穴があいたように黒い部分が生じ、黒いまま徐々に広がっていくのが見えるし、涙の三角を注意深く見ていると、角膜との移行部で涙液の曲率が逆転する臨界線

があり、この線上でもフルオレスセインが黒く見えている。いずれの場合も、表面の液体が張力によって引き伸ばされて、液厚が極度に薄くなった結果、緑色の発色が弱くなり、まわりとの対比で黒っぽく見えるものと考えられる。何故ならば、細隙灯顕微鏡のスリットを細くして観察すると、それまで黒く見えていた部分も薄い緑色に発色してくるからである。

フルオレスセイン層が黒っぽく見えるときの液層の厚さ、濃度、照射光の強さの間に一定の関係²¹⁾があることが予想されるが、詳しいことはさらに厳密な実験によって確かめる必要がある。いずれにしても本来境界のないフルオレスセイン層に見かけの境界が現れるのは事実である。

3. 圧平面について

我々の実験で、鏡面反射を使った観察によると、薄膜と圧平子にはさまれた液層部に干渉縞が現れた。その部分では液層の厚さが非常に薄くなっていて、光の波長の数倍しかないことを示している。そうして外側に隣接する dark ring との境界でニュートンリングが確認されたのだから、この部位が接触面の境界線であることも正しい。圧平面内の液厚がまわりの黒いリングの厚さより薄いにもかかわらず、蛍光が見られることは、さきの観察と矛盾するようにみえるけれども、ここでのフルオレスセイン液は平らな反射面にはさまれているので、光の往復反射が起きて蛍光発光が増強されたとも考えられるし、あるいは単に薄膜が圧平により蛍光染色されたともみなす方がわかりやすいかもしれない。

4. 今後の課題

我々が今回の実験で使用した眼圧計はコーワ手持ち眼圧計であったが、Haag-Striet社のGoldmann眼圧計で行っても同じ結果がでるはずである。その理由は、圧平は両者ともグラム秤で行われ、圧平子も同一であること、相違点は、フルオレスセイン色素を照らす明かりの強さだけで、観察倍率や照明角度に関しては本質的な相違はないからである。照明の強弱で dark ring の見え方が若干異なることが考えられるが、細隙灯顕微鏡にとりつけたGoldmann眼圧計でも圧平面に黒いリングが見えるし、そのまま写真撮影してもありありと写っているから、フルオレスセインを指示色素とする眼圧計に共通する特性であろう。ヒト生体角膜を圧平したときの接触面の解析を含め、今後の課題としたい。

本論文の要旨は、平成4年12月13日に行われた新潟眼科集談会で発表した。擲筆に臨み、ご校閲をいただいた森平幸雄博士(高崎市眼科医会)に対し、また、文献の収集にあたり多大のご協力をいただいた日本医師会図書室に対し、厚く感謝の意を表します。

文 献

- 1) Fick A: Über Messung des Druckes im Auge. Arch f Ges Physiol 42: 86—90, 1888.
- 2) 井上洋一: 眼圧検査. 三島濟一, 他(編): 眼科Mook, 3, 眼科一般検査法, 金原出版, 東京, 214—227, 1978.
- 3) 三国政吉, 岩田和雄: 緑内障. 金原出版, 東京, 50—54, 1968.
- 4) 白土城照: 圧平式眼圧測定. 増田寛次郎(監修): 細隙灯顕微鏡および関連検査. 日本眼科学会生涯教育通信講座, No. 15: 2.b, 日本眼科学会専門医制度委員会, 東京, 1992.
- 5) 中谷 一: 眼圧測定に関する諸問題. 眼臨 66: 1—25, 1972.
- 6) Duke-Elder S: In System of Ophthalmology. The foundation of ophthalmology. vol. 7, Henry Kimpton, London, 348—354, 1962.
- 7) Schmidt T: The use of the Goldmann applanation tonometer. Tras Ophth Soc UK 79: 637—650, 1960.
- 8) Schmidt T: The clinical application of the Goldmann tonometer. Am J Ophthalmol 49: 967—978, 1960.
- 9) Goldmann H, Schmidt T: Über Applanationstonometrie. Ophthalmologica 134: 221—242, 1957.
- 10) Goldmann H, Schmidt T: Weiterer Beitrage zur Applanationstonometrie. Ophthalmologica 141: 441—456, 1961.
- 11) Moses RA: The Goldmann applanation tonometer. Am J Ophthalmol 46: 865—869, 1958.
- 12) Olmsted KEP: An evaluation of tonometric techniques. Arch Ophthalmol 62: 459—464, 1959.
- 13) Weekers R, Prijot E: Tonometrie und Tonographie. In: Straub W (Ed): Die Ophthalmologischen Untersuchungsmethoden. Bdl. 309—320, Ferdinand Enke. Stuttgart. 1970.
- 14) Moses RA: Intraocular pressure. In: Moses RA (Ed): Adler's Physiology of the Eye, Clinical Application. C.V. Mosby. St. Luois. 242—247, 1981.
- 15) Hart WM: Intraocular pressure. In: Hart WM (Ed): Adler's Phisyology of the Eye. Clinical Application. Mosby-Year Book, St. Louis. 257—259, 1992.
- 16) 霜島 正: アプラーショントノメーター: 霜島正(編著). 医用光学機械. 永井書店, 大阪, 東京, 157—158, 1971.
- 17) Gloster J, Perkins ES: The validity of Imbert-Fick law as applied to applanation tonometry. Exp Eye Res 2: 274—283, 1963.
- 18) Jenkins FA, White HE: Fundamentals of Optics. Forth Edition. McGraw-Hill, Singapore, 294—295, 1981.
- 19) ニュートン: 光学. 島尾永康(訳): 岩波文庫. 岩波書店, 東京, 181—207, 1991.
- 20) 今村 佑, 今村 矢: ゴールドマン眼圧計の検証. 測定誤差の算出. 眼臨 8 (87): 145—146, 1993.
- 21) 今堀和友, 山川民夫(監修): 生化学辞典. 東京化学同人, 東京, 394—395, 1984.