

屈折矯正手術後における角膜形状が眼圧計測におよぼす影響

大淀町立大淀病院眼科

小 南 雅 也

奈良県立医科大学眼科学教室

魚 里 博, 西 信 元 嗣

EFFECT OF CORNEAL CONFIGURATION CHANGE ON MEASUREMENT OF INTRAOCULAR PRESSURE IN LASER KERATOREFRACTIVE SURGERY

MASAYA KOMINAMI

Department of Ophthalmology, Oyodo Municipal Hospital

HIROSHI UOZATO and MOTOTSUGU SAISHIN

Department of Ophthalmology, Nara Medical University

Received April 16, 1999

Abstract : Corneal configuration change due to recent keratorefractive surgery such as photorefractive keratectomy (PRK), photherapeutic keratectomy (PTK), and laser in-situ keratomileusis (LASIK) reduce the corneal rigidity, and will result in significant underestimation of postoperative intraocular pressure (IOP) measurement. So we have analyzed the relation between corneal configuration change and postoperative measurement of IOP in keratorefractive surgery (PRK, PTK, and LASIK).

Actual IOP was controlled using a manometer inserted into the anterior chamber of enucleated pig eyes. Clinical IOP was measured with electronic applanation tonometer (Tono-Pen XL, Menter) at several heights of manometer, central corneal thickness (CCT) was measured with ultrasonic pachymeter (SP-2000, Tome) before and after IOP measurement, and anterior corneal curvature with Orbscan (Orbtech). Each measured IOP was analyzed statistically with linear regression and paired t-test.

Measured IOP of the group of normal eyeball with various CCT was increased in every experimentation as CCT increased. And measured IOP of automated lamellar keratoplasty (ALK) performed group was significantly reduced as CCT reduced. Linear correlation was established between set up IOP and measured IOP, with correlation coefficients close to unity. Correlation between CCT and the measured IOP, CCT and the difference of the measured IOP to each sample was statistically highly significant ($P < 0.001$). Measured anterior corneal curvature at 3 mm diameter of central cornea of the ALK performed group was decreased as IOP increased.

Results of our investigation show that CCT has a larger effect on the measurement of IOP than central corneal curvature and corneal hydration. We should take into consideration the corneal configuration change for proper assessment of postoperative IOP measurement in recent keratorefractive surgery.

(奈医誌. J. Nara Med. Ass. 50, 220~232, 1999)

Key words : keratorefractive surgery, postoperative IOP measurement, central corneal thickness, central corneal curvature, corneal hydration

緒 言

屈折矯正手術後に各種眼圧計で計測された眼圧 (intraocular pressure : IOP) が変化することが臨床的に知られている。特に角膜厚を減少させる手術である photorefractive keratectomy (PRK), phototherapeutic keratectomy (PTK), laser in-situ keratomileusis (LASIK) などのレーザー屈折矯正手術の後に、眼圧の計測値が低値を示すことが報告されている。

临床上、眼圧の計測は角膜を介しておこなわれるため、角膜の形状の変化が計測された眼圧に影響していることが考えられているが、特にレーザー屈折矯正手術のように角膜厚に大きな変化をもたらす手術後の、角膜の変形と眼圧の関係については実験的な検討はなされていない。

今回、角膜の形状が眼圧計測値におよぼす影響を、前房内にマノメーターを刺入した摘出豚眼を用い、automated lamellar keratoplasty (ALK) を施行して意図的に中心角膜厚 (central corneal thickness : CCT) を変化させた場合の眼圧を実際に計測して実験的に検討した。眼圧の計測には ALK が角膜切除面の平滑性を損なうおそれがあるため、角膜表面の性状の影響を受けにくいとされる圧平式電気眼圧計を使用した。また、眼圧計測に影響を与える可能性のある要因である角膜曲率半径および含水率の変化による角膜厚の変化と計測眼圧との関係についても、実際に眼圧を計測して検討した。

さらに、角膜の厚さを中心とした角膜形状が眼圧計測に影響し、生理的な角膜厚の範囲内でも、計測眼圧が影響を受けることが報告されており、本実験に先立って、ALK を施行しない群について、角膜の変形と計測された眼圧についても実測のうえ、同時に検討した。

材料と方法

① 摘出豚眼マノメーターは、はじめに、500 ml 生理食塩水のボトルに点滴チューブを接続し、チューブ内の空気を完全に除去してボトル内の液面がマノメーターの水柱高 (以下マノメーター高) となるようにした。点滴チューブの対側端は、いくつか連結した三方活栓を介し、数本の点滴用延長チューブ (チューブ数は2~4本まで変更可能) を経て24 G 注射針につながっており、これを摘出豚眼の前房に輪部強膜から刺入してマノメーターを作製

した。注射針の先端の高さを基準点とし、生食ボトルを支柱台に下げた状態で上下させ、ボトル内の液面の高さの調節によって眼内圧を設定した (Fig. 1)。

② 摘出豚眼は、マイクロケラトーム (カイロン社 ACS) を用い ALK 法にて角膜を切除した群と非切除群とにわけ、それぞれの群の眼圧ができる限り同じ条件で計測できるように、2~4 眼をマノメーターに並列にセットして計測した。

③ マノメーター刺入後に眼内圧が安定してから、まず超音波パキメーター (トーマー社 SP-2000) で中心角膜厚を計測し、マノメーター高を15~80 cmH₂O に設定し、各設定高での眼圧を計測した。眼圧の計測には圧平式電気眼圧計 (メンター社 トノベン XL) を使用し、誤差率 (計測値の標準偏差) が5% 以内の計測値が7回得られるまで計測をくりかえし、最大値と最小値を除いた5回の計測値を平均したものの小数点以下を四捨五入して計測眼圧値とした。トノベンは計測開始前と計測中に適宜カリブレーションチェックをおこなって使用し、眼圧をすべてのマノメーター高で計測した後、再び超音波パキメーターで中心角膜厚を計測した。

なお、角膜表面の乾燥を予防するため、必要に応じてヒアルロン酸ナトリウム点眼液 (0.1% ヒーロン点眼液[®] 以下H点) と生理食塩水を、計測部に塗布しながら超音波パキメーター、トノベンを使用した。

④ 角膜切除群では今回得られた摘出豚眼の平均角膜厚が約920 μm であったことから、ケラトームの設定切除深度を160・300・450 μm とした。なお、角膜切除割合をみるため、ケラトームで切除する直前と直後のサクショニングに吸引のかかっている状態で中心角膜厚を超音波パキメーターで計測した。眼圧の計測は非切除群と同様におこなった。

⑤ 別に、眼内圧の変化による角膜の形状変化を検討するため、角膜中心から任意の大きさでの角膜前後面それぞれの曲率半径を計測できる角膜形状解析装置 (オーブテック社 オーブスキャン) を使用し、マノメーター高が20・40・60 cmH₂O での角膜形状を、角膜切除群と非切除群についてそれぞれ解析した。オーブスキャンでは計測後の解析に多少の時間を要するので、角膜に対する乾燥・湿潤の影響を極力排除するため、一度にマノメーターに接続する摘出豚眼を2眼とし、角膜非切除群2眼と

ALK を施行した角膜切除群 2 眼(ケラトームの設定切除深度は $160\ \mu\text{m}$ と $450\ \mu\text{m}$)を解析した。また、オーブスキャンで摘出豚眼を計測するためには豚眼を顎台に固定する必要があるため、専用固定具を作製して使用した。

⑥ 摘出豚眼専用固定具は、5 mm 厚アクリル板を用いて作製した。作製に先立って豚眼角膜の長径と短径を計測したところ、長径の平均が 16.5 mm 短径の平均が 13.6 mm で、最大長径が 17.4 mm、最大短径が 14.7 mm であったため、角膜への固定具の直接的な影響を排除するためアクリル板に 18 mm ϕ の円孔を開き、さらに一

側の開口径が 28 mm ϕ となるように 45° の角度で面取りし、底角 45° の円錐台状に開口したものを専用固定具とした(Fig. 2)。

この固定具に輪部結膜を剝離し、強膜を露出した摘出豚眼を少量の接着剤で固定し、輪部強膜より 24 G 針を前房に刺入してマノメーターを接続した。

接着剤は種々の接着剤を検討した結果、低粘度シアノアクリレート系接着剤を使用した。

⑦ さらに角膜の乾燥と湿潤すなわち含水率の変化による眼圧計測値への影響を調べるため、眼科手術用替え刃

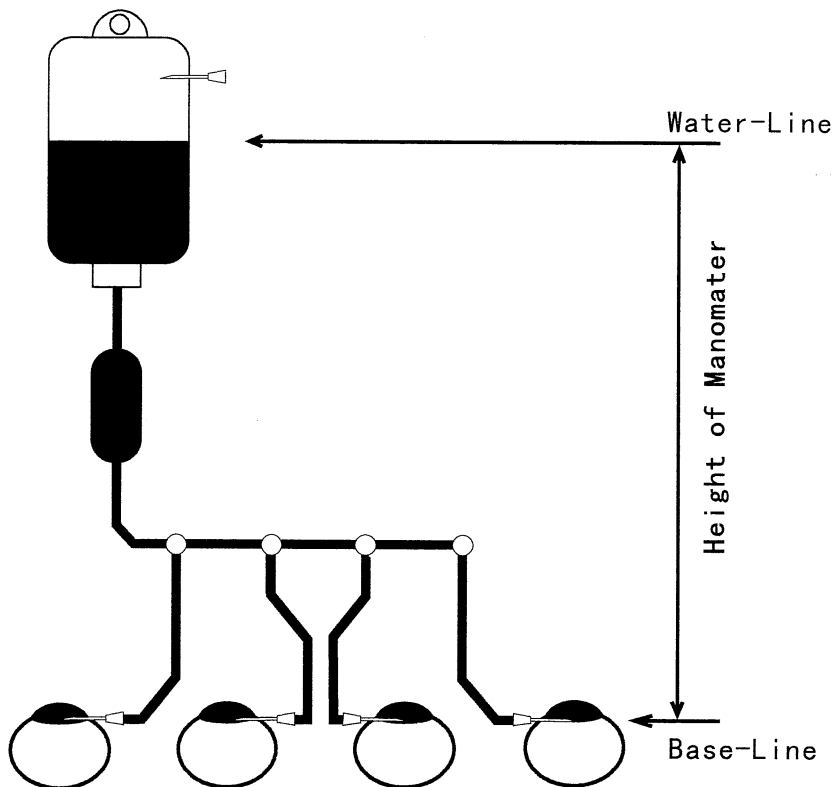


Fig. 1. Experimental setup for intraocular pressure (IOP) control with water manometer.

Base-line is settled at the level of the point of 24G needle inserted at the limbus into the anterior chamber. Each needle is connected to the line from the bottle by the three-way valve. Height of manometer is provided from Base-Line to Water-Line in the bottle.

結 果

1 角膜非切除群の計測結果

角膜厚は最大の豚眼 1 で 930 μm , 最小の豚眼 4 で 885 μm , 平均 903 μm であった. 各マノメーター高での計測眼圧は, 角膜厚が厚いものの方が高値であった. 各眼の各マノメーター高での計測値はほぼ線形性を示した. 得られた計測値に近似直線を加えたものを Fig. 3 に示す. 近似直線の相関係数は 4 豚眼とも 98% 以上 ($P < 0.001$) で, ほぼ線形性を示した. また, 両側 t -検定で, 各マノメーター高での計測眼圧は, 豚眼 1 と 2, 2 と 3, 3 と 4 の間では有意差は認められなかったが, 豚眼 1 と 4 の間で有意差を認めた ($P < 0.002$).

2 角膜切除群の計測結果

ALK を施行した角膜切除群 3 眼の切除前角膜厚は 919 μm , 974 μm , 959 μm で, 設定切除深度 160 μm , 300 μm , 450 μm で切除した. 切除した直後の角膜厚はそれぞれ 785 μm , 615 μm , 404 μm で, 切除した割合は 14.6%, 36.9%, 57.9% であった. これらと角膜非切除で角膜厚が 946 μm の一眼 (豚眼 5) とを用いて眼圧を計測した. この実験でも残余角膜厚が薄いものの方が計測眼圧は各マノメーター高で低値を示し, 各眼の各マノメーター高での計測値はほぼ線形性を示した. 得られた計測値に近似直線を加えたものを Fig. 4 に示す. 近似直線の相関係数は 4 豚眼とも 98% 以上 ($P < 0.001$) で, ほぼ線形性を示した. また, 両側 t -検定で, 各マノメーター高での計測眼圧は, それぞれの豚眼間で有意差を認めた ($P < 0.01$).

3 オープスキャンで眼内圧の変化による角膜の形状変化を解析した結果

角膜非切除群は 928 μm と 872 μm の角膜厚のものを使用し, 角膜切除群は, 切除前角膜厚が 972 μm と 952 μm のものをケラトームの設定切除深度 160 μm と 450 μm で切除し使用した. 切除直後の角膜厚は 821 μm と 494 μm で, それぞれの切除割合は 15.7%, 48.1% であった.

オープスキャンでの解析の結果, 各マノメーター高での角膜前面曲率半径は, 角膜全体でみた場合には 4 眼ともわずかに大きくなり, 中心角膜厚が薄いものほど前面曲率半径が大きい傾向を認めた (Fig. 5).

眼圧の計測に影響する可能性のある角膜中心部 3 mm ϕ の前面曲率半径は, 角膜非切除群ではほとんど変化がないか, わずかに小さくなっただけであったが, 角膜切除群では眼圧の上昇にしたがって前面曲率半径は小さくなった (Fig. 6).

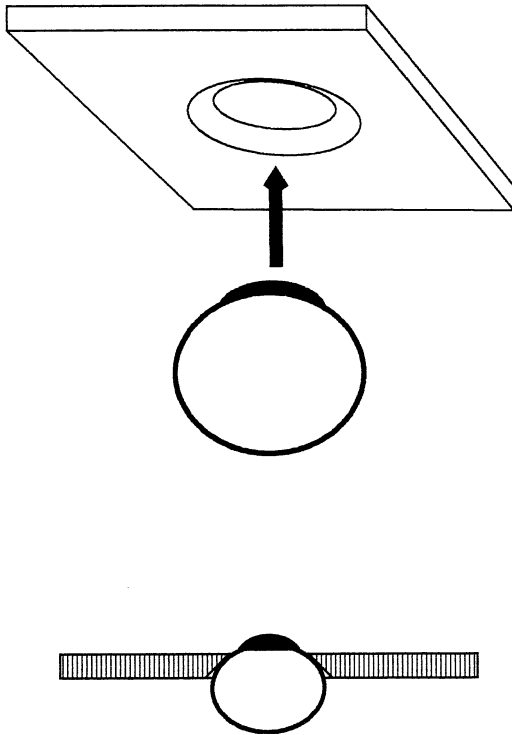


Fig. 2. Fixation-plate for the enucleated pig eyeball. Upper figure is the bottom side view of the fixation-plate which is made of acrylic resin. A beveled hole is made at the center of this plate. Lower figure is the cross section of this plate.

メスを用いて上皮を完全に剝離した 2 眼と, 上皮を残した 2 眼について, 各眼にマノメーターを接続し以下の各設定で眼圧と角膜厚を計測した. マノメーター高は一連の計測を通じて 30 cm に設定した. I : まずマノメーター接続直後, 計測開始前の角膜厚での眼圧を計測し, II : 約 1 時間何も塗布しない状態で自然乾燥させた場合, III : さらに H 点を塗布してから 30 分間自然乾燥させた場合の眼圧と角膜厚をそれぞれ計測した. III の後, 生理食塩水と H 点を交互に塗布し続けながら経時的に 3 回 (IV : 30 分後, V : 60 分後, VI : 90 分後) トノペンにて眼圧を計測した後超音波パキメーターで角膜厚を計測した.

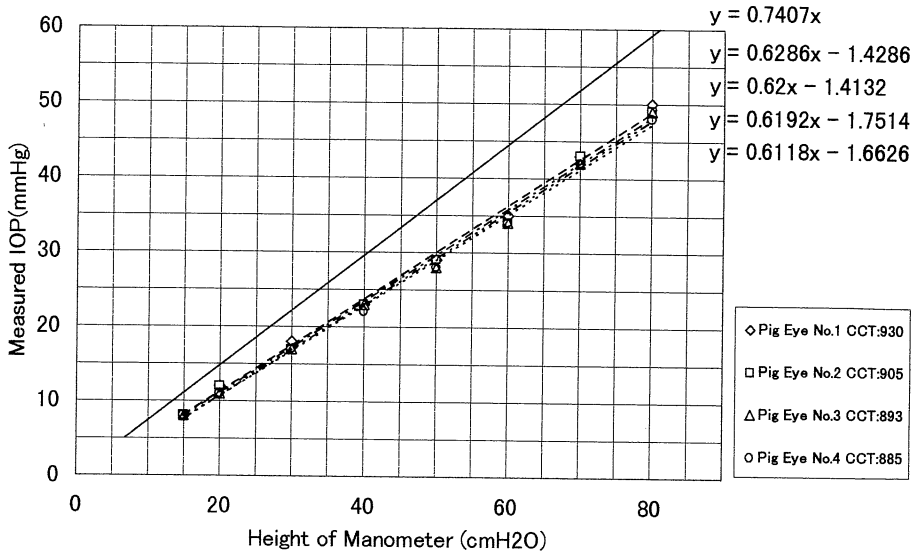


Fig. 3. Relationship between measured IOP and height of manometer in normal pig eyes as a function of central corneal thickness (CCT).

Fig. 3 means that the deviation of CCT of normal cornea cause the change of measured IOP. It tend to overestimate IOP in structurally thicker corneas. Linear regression is shown as each dotted line. And rigid line means actual IOP of manometer.

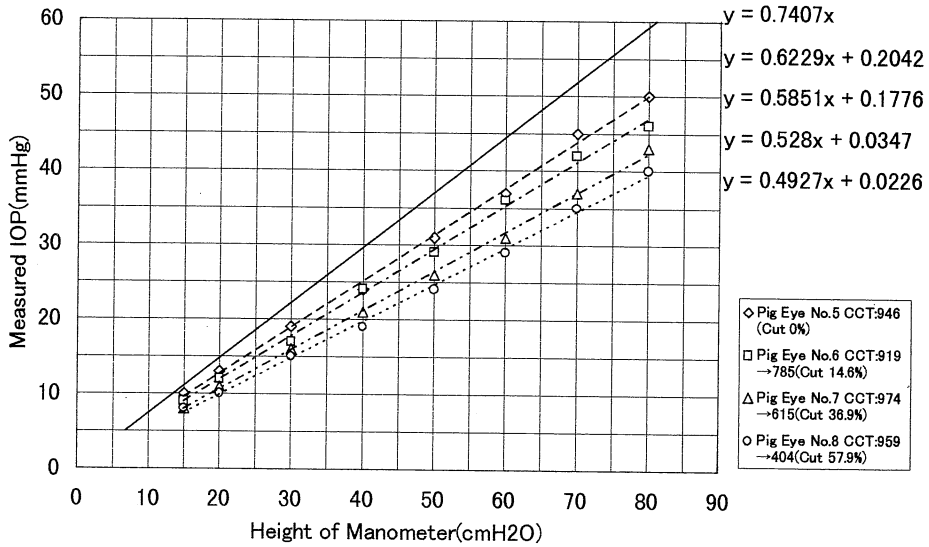


Fig. 4. Relationship between measured IOP and height of manometer in resected pig eyes with microkeratome as a function of CCT.

Fig. 4 means that the deviation of CCT sliced thinly by ALK cause the change of measured IOP. It tend to underestimate IOP in structurally thinner corneas.

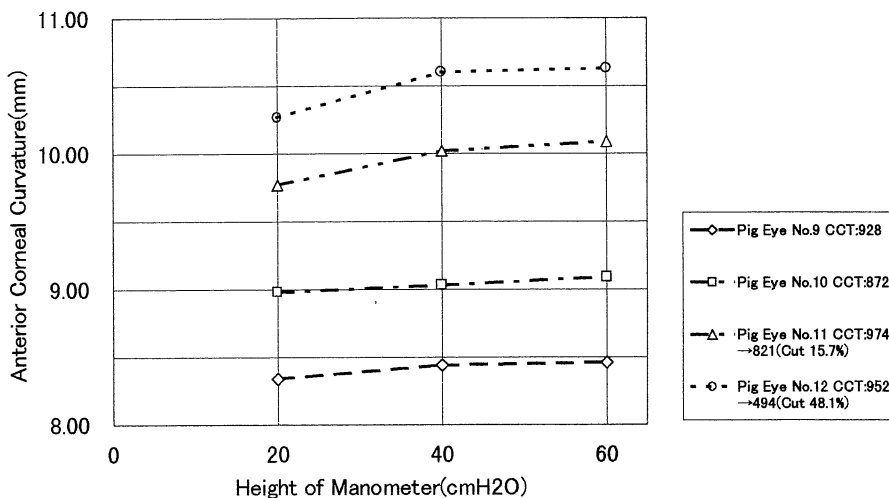


Fig. 5. Effect of IOP changes on the anterior curvature of the whole cornea.
Anterior corneal curvature was slightly increased as actual IOP increased.

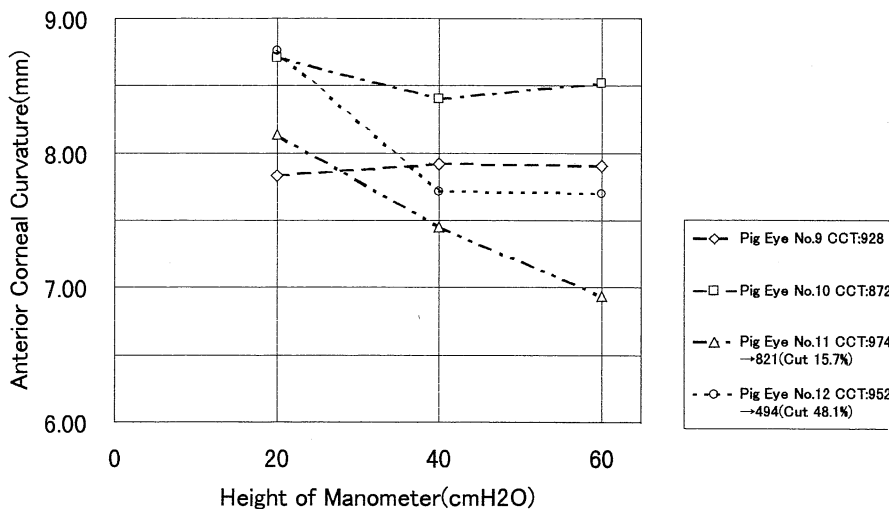


Fig. 6. Effect of IOP changes on the anterior curvature of the central cornea (3 mm ϕ).

At the 3 mm diameter of central cornea, the anterior corneal curvature was differently recorded between ALK performed group to ALK not performed group. ALK not performed group did not change so much in anterior curvature of cornea as the increased actual IOP. Anterior corneal curvature of ALK performed group was decreased as actual IOP increased.

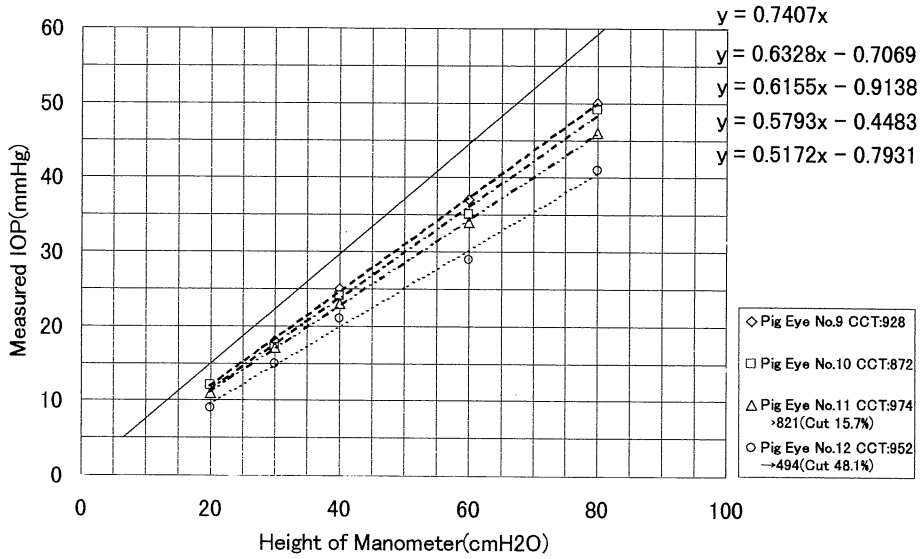


Fig. 7. Relationship between measured IOP and height of manometer in normal and resected eyes as a function of CCT.

Fig. 7 shows the similar result to Fig. 3 and 4. Deviation of CCT cause the change of measured IOP. Structurally thinner corneas tend to underestimate IOP.

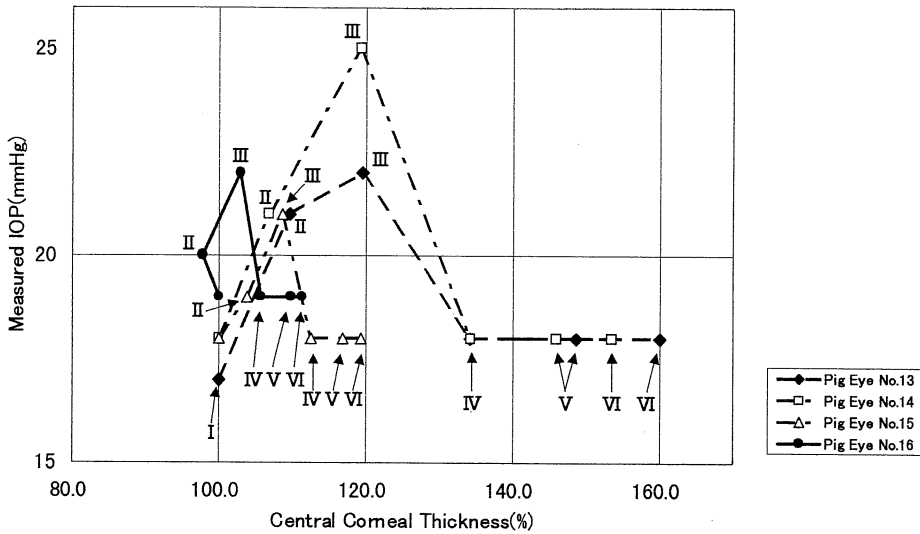


Fig. 8. Effect of corneal hydration on measured IOP and CCT.

Each mark pointed I is the results of the original hydrated cornea. II, III are the results of dry surface condition. IV, V, VI are the results of wet surface condition. Corneal hydration increased from IV to VI. The height of manometer settled at 30 cmH₂O.

さらに、各眼の眼圧計測もおこなったが、他の実験と同様角膜厚が薄いものほど低値を示し、各眼の各マンメーター高での計測値はほぼ線形性を示した。得られた計測値に近似直線を加えたものを Fig. 7 に示す。近似直線の相関係数は4 豚眼とも 98 % 以上(P<0.001)で、ほぼ線形性を示した。また、両側 t-検定で、各マンメーター高での計測眼圧は、角膜厚差が 50 μm の豚眼 10 と 11 の間では有意差は認められなかったが、他の豚眼の間では有意差を認めた。(P<0.001)

4 角膜の含水率による眼圧計測値への影響

結果を Fig. 8 に示す。角膜上皮を完全に剝離した2眼の上皮剝離後の角膜厚は豚眼 13 が 768 μm, 豚眼 14 が 808 μm で、上皮を残した2眼の眼圧計測前の角膜厚は豚眼 15 が 898 μm, 豚眼 16 が 672 μm であった。Fig. 8 では角膜厚は計測開始前値からの%表示としたが、眼圧は、角膜厚にかかわらず、すべての豚眼で角膜表面が乾燥している場合には高値を示した。表面が湿潤している場合には角膜厚は増大したが、どの眼球も計測値に変化はみられなかった。

なお、角膜表面の乾燥による眼圧計測値への影響は角

膜厚が薄いほど大きくなり、角膜上皮のないものの方が大きくなった。また、角膜の膨潤による影響も、角膜厚がより薄いものと上皮がないもので大きかった。なお、角膜厚は計測開始時より最大 160 % まで増大した。

考 察

レーザー屈折矯正手術(PRK, PTK, LASIK)のように角膜の切除をおこなって、角膜厚が薄くなれば術後の眼圧は低値を示す¹⁻⁶⁾。また、高眼圧症と正常眼圧緑内障や開放隅角緑内障では、高眼圧症眼の角膜厚が有意に厚いことなどがこれまでに報告されている⁷⁾。これらから角膜の厚さなどの形状の要素が眼圧の計測に影響をおよぼし、計測眼圧と実際の眼内圧との間に差を生じさせているためであると考えられている。

そこで今回、摘出豚眼を用いて、マンメーターで眼内圧を制御しながら様々な角膜厚での眼圧を実際に計測した。マンメーターは基準点や液面設定の誤差などをできるだけ排除するため、複数個の眼球を同時に制御できるものを作製して使用した。

結果 1, 2 では、各豚眼の計測眼圧値はマンメーター高

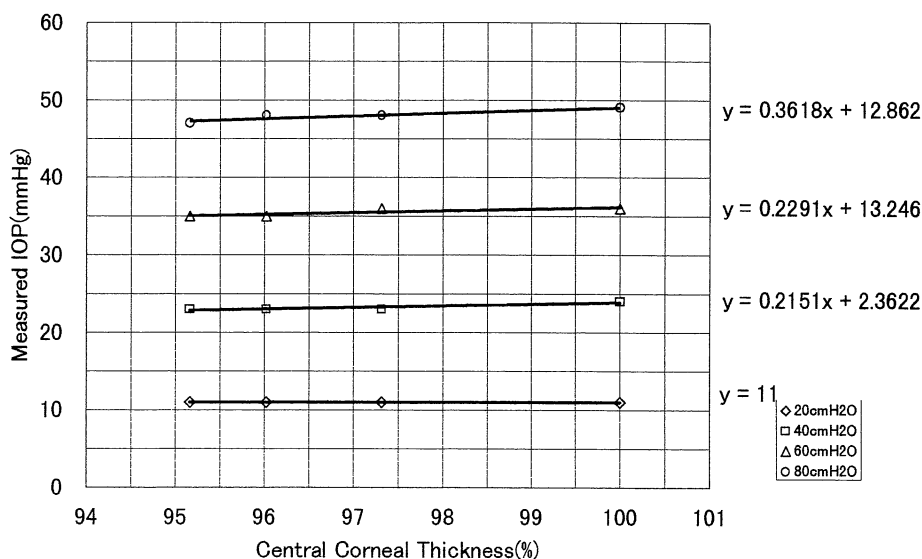


Fig. 9. Measured IOP versus normalized CCT in normal corneas. Each rigid line is linear regression of measured IOP. The linear regression inclines as the increase of actual IOP.

が上がるに連れて高値となり、ほぼ線形性を示した。

結果 1 では生理的な角膜の厚さの範囲内でも厚さが 5 % 程度異なれば眼圧計測値に有意な差を生じている。この結果から、角膜に何ら手術などの操作が加えられていない場合でも角膜が厚い場合には眼圧が過大評価されることを示している。これは実際に人眼の角膜厚の違いと眼圧の関係を各計測機器を用いて計測した諸家の報告⁸⁻¹²⁾と同様であり、臨床的に高眼圧症では角膜厚が有意に厚く、そのために眼圧が過大評価されていることが考えられているが⁷⁾、本実験結果の傾向からもその可能性は示唆される。

結果 2 は、角膜厚が手術的に変化する屈折矯正手術を想定してのものであるが、結果 1 以上に眼圧の計測結果が角膜厚により変化している。この結果も諸家の報告^{1,13)}が実験的に検証されたものと考えられる。

角膜非切除群の最大角膜厚 930 μm のものを基準にして、各豚眼の角膜厚の割合と眼圧の関係を同じマノメーター高で比較したものを Fig. 9 に示す。

角膜切除群は ALK 施行前後の角膜残存比率と眼圧の関係を同じマノメーター高で比較したものを Fig. 10 に示す。

Fig. 9, Fig. 10 とも同じマノメーター高での各眼の計測眼圧に近似直線を追加した。各近似直線の相関係数は、角膜非切除群で 80 % 以上 (P < 0.05), 角膜切除群で 98 % 以上 (P < 0.02) で、設定眼内圧が高いほど近似直線の傾きが大きくなった。これは、角膜厚が薄い場合には眼内圧が高いほど眼圧の過小評価の割合が大きくなることを示しており、角膜厚が薄くなるレーザー屈折矯正手術後には眼圧が過小評価されて、本来眼内圧が上昇して開放隅角緑内障と診断されるべき症例が、手術を受けたために正常眼圧緑内障と同様に見過ごされてしまう危険性が高くなることが考えられる。

結果 3 でもマノメーター高および角膜厚と計測眼圧の関係は結果 1, 2 と同様であった。

さらに、結果 3 でのオープスキャンを用いた角膜形状解析では、設定眼内圧の上昇とともに角膜形状はそれぞれ変化した。角膜曲率半径を検討した結果、角膜全体の前面曲率半径は切除・非切除にかかわらず、眼内圧の上昇とともにわずかに大きくなり、角膜が全体としては扁平化している傾向を認めた。そこで眼圧計測に影響をおよぼす可能性のある中心部 3 mm 径の角膜前面曲率半径を比較したが、こちらは眼内圧の上昇とともに、角

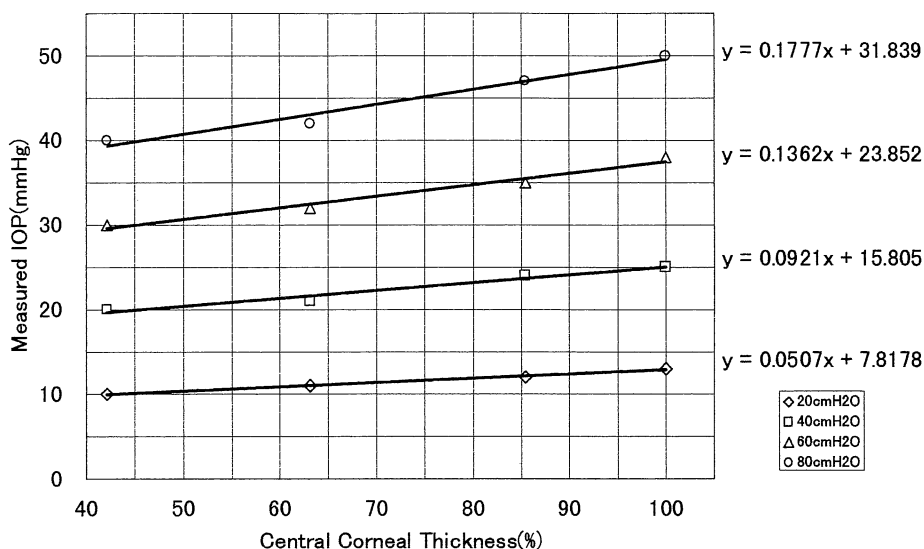


Fig. 10. Measured IOP versus remained CCT after corneal resection.

Linear regression is shown as a rigid line. The inclination of linear regression increased more remarkably as actual IOP increased.

膜切除群では前面曲率半径が小さくなり、非切除群ではほとんど変化が認められなかった。

角膜切除群では角膜全体が薄くなっているだけでなく、角膜中心の約6mmφの部位のみが薄くなっている。角膜は生理的な状態でも周辺部に比べ中心部が薄い、本来の構造を保っている角膜と、中心近辺が切除されて薄いために相対的に脆弱な部位をもつ角膜では眼内圧による変形の仕方が異なることが考えられる。本実験では眼球を輪部強膜で専用固定具に接着しているため、実際の角膜の変形と同条件ではないが、この実験結果から、本来の角膜は眼圧の上昇とともに複雑に変形した結果、全体として扁平化する一方、角膜切除群では周辺の本来の構造をもった部位の変形にもかかわらず、脆弱な中心部が眼内圧により前方に突出してくることが原因ではないかと考えられた。

結果4では含水率の変化による眼圧計測値の変化について検討した。

角膜厚の変化は含水率の変化を反映している¹⁴⁻¹⁶⁾。今回の実験では含水率の変化による眼圧計測値への影響をみる目的で、計測開始前後の角膜厚を超音波パキメーターで計測した。この実験を除く今回の各実験の内、5眼にALKを施行して角膜実質が露出された状態での計測となるために、角膜の含水率の変化による影響を極力排除するために角膜表面に生理食塩水とH点を塗布して眼圧を計測した。これは両者を塗布した場合に生理食塩水のみを塗布するより角膜形状の安定性がよい¹⁷⁾ためであり、計測の条件を一定にするために角膜非切除群でも同様に塗布して眼圧を計測した。

角膜の生理的含水率の変化が放射状角膜切開術後の屈折に眼圧よりも影響を与えるとの報告¹⁸⁾や、角膜の乾燥が眼圧計測値に影響を与えるとの実験的報告¹⁹⁾、角膜表面に生理食塩水とH点を塗布した場合には含水率が上昇するとの報告¹⁷⁾がある。そこでマノメーター高を一定にしていくつかの乾燥・湿潤条件で眼圧を計測してみた。

実験結果から、すべての豚眼でⅢのH点を塗布してから角膜表面を乾燥させた時の眼圧が最も高く計測され、ついでⅡの何も塗布せずに角膜表面を乾燥させた場合、角膜表面にH点と生理食塩水を塗布して十分に湿潤させてからのⅣ、Ⅴ、Ⅵでは眼圧の計測結果は同じ値を示した。自然乾燥時に含水率の低下により角膜厚が薄くなった1眼を除き、他は表面の乾燥にもかかわらず、角膜厚は厚くなり、含水率が上昇していることが示唆された。乾燥時の角膜厚の上昇は計測時にわずかに塗布した生理食塩水の影響であると考えられる。角膜表面が十分に湿潤している状態では、角膜厚が最大60%増大するまで含

水率を上昇させても得られた計測値は変化しなかった。以上から眼圧の計測は表面の乾燥・湿潤によって影響されたが、角膜表面を湿潤させておこなった今回の実験では含水率の変化は眼圧の計測に影響しなかったと考えられた。

なお、角膜表面の乾燥による眼圧計測値への影響は角膜厚が薄いほど大きくなり、上皮を剝離して角膜実質が露出したもので大きくなった。角膜の含水率への影響も、角膜実質が露出したものと角膜厚が薄いものほど含水率が上昇したことから、一過性であっても手術部位の上皮欠損を生じさせるPRKやPTK、LASIKでは術中・術後の含水率の変化による角膜の変形は、切除量などに誤差を生じさせ手術成績に影響する可能性がある¹⁷⁾。

今回の各実験中には角膜表面にH点と生理食塩水を塗布して十分に湿潤させて眼圧を計測したため、最大58.9%の角膜厚の増加が認められた。含水率の増加にもなって超音波パキメーターの圧計測値は過大評価されるとの報告²⁰⁾があり、実際にはこれほど角膜厚が増加していないものと考えられるが、結果4から、結果1. 2. 3には含水率の変化による各豚眼間の眼圧計測結果の関連については影響はなかったものと考えられる。

魚里らの示した球殻シェルモデルによる理論的計算式では球殻の変位量 μ は、 $\mu = (1-\nu)r^2p/2tE$ で示される。実際の眼球においては、 r は角膜曲率半径、 p は眼内圧、 t は角膜厚、 E は角膜弾性係数に相当する¹⁾。

今回の一連の実験では角膜厚の変化や角膜表面の乾燥により眼圧計測値は変化した。

トノペンは、Mackay-Marg眼圧計の理論に基づく圧平式電気眼圧計で、眼圧計測に際して角膜の硬さや曲率、表面張力による影響を受けにくい装置であるとされており²¹⁾、Goldmann眼圧計やNon-contact tonometerで計測値が不正確となるような角膜の状態でも比較的正確な眼圧の計測ができるという報告^{22,23)}がある。本実験ではALKを施行して角膜表面の平滑さを損なうことが考えられたため、トノペンを使用することとした。

しかし、トノペンによる人眼の計測で、角膜厚の変化により眼圧が有意に変化したとの報告²⁴⁾もあり、眼圧計が角膜の変形度を眼圧に置き換えて計測している以上、角膜の変位量が大きいほど圧平、圧入などの変形に要する力が小さくなるため、眼圧は低く計測されることから、トノペンも角膜変位量の影響を受けたものと考えられる。今回の摘出豚眼を用いた眼圧の計測では、角膜厚(t)が小さいほど眼圧は低く計測されたことは、前述の計算式に

反しない。

また、各マノメーター高での設定眼内圧と比較して、すべての計測結果が一樣に低値を示している。これは、Goldmann 眼圧計で生体家兎眼の眼圧をマノメーターを使用して計測した際に、人眼に比べ様に低値を示したとの報告⁹⁾の傾向と一致する。

臨床での眼圧計測で Goldmann 眼圧計と比較した場合に、トノペンは高眼圧領域では Goldmann 眼圧計より低値を示し、低眼圧領域では高値となることが多い²⁵⁻³¹⁾が、トノペンでの計測値が全域で低くなるという報告³²⁾もあり、今回のように眼内圧をかなり高値にまで設定して実験した場合には、トノペンでの計測結果が設定値より低くなる可能性が考えられる。また摘出眼にマノメーターを設置しておこなった実験で、トノペンでの計測値は設定値とよく相関したが、生体人眼にマノメーターを設置しての眼圧計測ではトノペンでの計測値は設定値より低値を示したとの報告³³⁾もある。

今回実験に使用したのが摘出豚眼で、角膜厚、角膜曲率半径、角膜弾性係数、眼球温度のいずれもが生体眼と異なっていることが眼圧計測値が低値を示した原因と考えられるが、実験 4 の結果では、計測の経過とともに角膜の含水率が増加しても眼圧に変化がなかったことから、豚眼入手時点までの時間的な経過で各豚眼角膜の含水率が生体の含水率よりある程度増加しており、角膜変形度が一樣に低下していたために計測眼圧値が低値を示した可能性も考えられる。今回の実験結果からは計測眼圧値が低値を示した原因は確定できなかった。

また、前述の球殻シェルモデルによる理論的計算式では角膜曲率半径が小さくなった場合は、曲率半径(r)の二乗に比例して角膜変位量(μ)が大きくなり眼圧は高く計測されるはずである。それにもかかわらず、今回 ALK 施行群の計測眼圧が角膜切除量に応じて有意に低値を示していることから、角膜曲率の低下は角膜厚の低下に比べ、影響が非常にすくなかったものと考えられた。臨床的には角膜の変形に影響する角膜の厚みの因子に曲率半径を加えて形状因子とした場合に視野異常群の検出率が上がったとの報告³⁴⁾もあるが、この報告の眼圧計測が Imbert-Fick の法則に則った Goldmann 眼圧計によるものであり、今回使用したトノペンの圧感知部位である plunger が 1.02 mm ϕ と小さいことと中心部角膜前面曲率半径での変化量がすくなかったことが角膜曲率半径の変化による計測眼圧への影響が小さかった原因と考えられる。

以上のことから、角膜厚の変化が計測眼圧に大きな影響を与えることが実験的に確認された。また、角膜表面

の乾燥は眼圧計測に影響したが、今回の実験結果からは眼圧の上昇による角膜曲率半径の変化と、角膜含水率の変化による眼圧計測値への影響は角膜厚の変化のように認められなかった。

今後、本邦でも屈折矯正手術が普及し、被術者が増加した場合、その中で開放隅角緑内障の発症が増加する中年以降に、正常眼圧緑内障と同様に眼圧計測値と視神経の緑内障性変化が相関しないことが充分におこり得る。あらゆる角膜形状でも真の眼内圧を計測することのできる機器、または現行機器で得られた計測眼圧を真の眼内圧に置き換える方法の解明が待たれるが、今回の実験結果でも角膜曲率半径、角膜厚、角膜弾性など、角膜は多くの要素によってその形態を複雑に変化させており、一般に適用できるような法則性を導き出すことは困難であろう。

緑内障の診断・治療にあたっては眼圧に惑わされることなく、視野検査はもちろんのこと、視神経乳頭の形態学的検査などあらゆる対策を講じていかねばならないと考えられた。

また、屈折矯正手術については、現在も有水晶体眼に人工水晶体を挿入するなどの角膜に手術操作を極力加えない方法も種々試みられているが、眼圧計測に影響をおよぼさない屈折異常眼の裸眼視力向上という点では、白内障手術の分野で近い将来実用化されるであろう『調節力のある眼内レンズ』は、角膜形状にほとんど影響をおよぼさないうえ、現行の人工水晶体にはない『調節力』が得られるため、屈折矯正手術においても主流となり得るものであると考えられる。

結 論

近年日本でもおこなわれている屈折矯正手術の内、角膜厚を減少させる手術の後に眼圧計測値が有意に低下することが臨床問題になっている。今回、摘出豚眼を用いてマノメーターで眼内圧を設定したうえで眼圧を計測し、計測眼圧の有意な低下を認めたことから、術後の計測眼圧の低下は眼内圧が実際に低下しているのではなく計測値が低下しているのであること、すなわち眼圧が過小評価されており、この傾向は角膜厚が薄いほど、眼内圧が高いほど顕著となることが検証された。

また、角膜厚の生理的な個体差によっても角膜厚が厚ければ眼圧は実際に高値なのではなく、過大評価されることも確認された。

文 献

- 1) 魚里博：眼圧と屈折矯正手術。Vision Times 4：7-

- 10, 1997.
- 2) **Fournier, A. V., Podtetenov, M., Lemire, J., Thompson, P., Duchesne, R., Perreault, C., Chehade, N. and Blondeau, P.** : Intraocular pressure change measured by Goldmann tonometry after laser in situ keratomileusis. *J. Cataract Refract Surg.* **24** : 905-910, 1998.
- 3) **Schipper, I., Senn, P., Thomann, U. and Suppiger, M.** : Intraocular Pressure After Excimer Laser Photorefractive Keratectomy for Myopia. *Journal Of Refractive Surgery* **11** : 366-370, 1995.
- 4) **Chatterjee, A., Shah, S., Bessant, D. A., Naroo, S. A. and Doyle, S. J.** : Reduction in Intraocular Pressure after Excimer Laser Photorefractive Keratectomy (Correlation with Pretreatment Myopia). *Ophthalmology* **104** : 355-359, 1997.
- 5) **Mardelli, P. G., Piebenga, L. W., Whitacre, M. M. and Siegmund, K. D.** : The Effect of Excimer Laser Photorefractive Keratectomy on Intraocular Pressure Measurements Using the Goldmann Applanation Tonometer. *Ophthalmology* **104** : 945-948, 1997.
- 6) **Faucher, A., Gregoire, J. and Blondeau, P.** : Accuracy of Goldmann tonometry after refractive surgery. *J. Cataract Refract Surg.* **23** : 832-838, 1997.
- 7) 松本拓也・牧野弘之・魚里博・西信元嗣 : 角膜厚の眼圧測定値に対する影響とそれによる視野への影響. *あたらしい眼科* **13** : 1925-1928, 1996.
- 8) **Hansen, F. K.** : A CLINICAL STUDY OF THE NORMAL HUMAN CENTRAL CORNEAL THICKNESS. *Acta Ophthalmol. (Copenh)* **49** : 82-89, 1971.
- 9) **Ehlers, N., Bramsen, T. and Sperling, S.** : APPLANATION TONOMETRY AND CENTRAL CORNEAL THICKNESS. *Acta Ophthalmol. (Copenh)* **53** : 34-43, 1975.
- 10) **Johnson, M., Kass, M. A., Moses, R. A. and Grodzki, W. J.** : Increased Corneal Thickness Simulating Elevated Intraocular Pressure. *Arch. Ophthalmol.* **96** : 664-665, 1978.
- 11) **Whitacre, M. M., Stein, R. A. and Hassanein, K.** : The Effect of Corneal Thickness on Applanation Tonometry. *Am. J. Ophthalmol.* **115** : 592-596, 1993.
- 12) **Argus, W. A.** : Ocular Hypertension and Central Thickness. *Ophthalmology* **102** : 1810-1812, 1995.
- 13) 水流忠彦・金井淳・西信元嗣・高橋圭三・大橋裕一・増田寛次郎 : スキャニングエキシマレーザー装置 EC-5000 による治療的角膜切除術の臨床成績. *あたらしい眼科* **13** : 1295-1309, 1996.
- 14) **Ytteborg, J. and Dohlman, C. H.** : Corneal Edema and Intraocular Pressure (II. Clinical Results). *Arch. Ophthalmol.* **74** : 477-484, 1965.
- 15) **Hedbys, B. O. and Mishima, S.** : The Thickness-Hydration Relationship of the Cornea. *Exp. Eye Res.* **5** : 221-228, 1966.
- 16) **Waring III, G. O.** : Corneal Anatomy and Physiology as Applied to Refractive Keratotomy. In : *Refractive Keratotomy for myopia and astigmatism*, 17-35, Mosby Year Book, St Louis 1992.
- 17) 増田紀子・魚里博・榊田浩三・西信元嗣 : 角膜表層形成術中における角膜厚測定へのヒアルロン酸ナトリウム点眼液の影響. *眼科手術* **10** : 589-594, 1997.
- 18) **Maloney, R. K.** : Effect of Corneal Hydration and Intraocular Pressure on Keratometric Power after Experimental Radial Keratotomy. *Ophthalmology* **97** : 927-933, 1990.
- 19) 松本拓也・牧野弘之・魚里博・西信元嗣 : 眼圧測定値に対する角膜形状の影響の薄膜マノメーターを用いた実験的検証. *あたらしい眼科* **15** : 419-423, 1998.
- 20) 増田紀子・桜井一郎・魚里博・西信元嗣 : 角膜含水率が超音波パキメトリーに及ぼす影響. *眼科手術* **9** : 561-564, 1996.
- 21) **Mackay, R. S., Marg, E. and Oechsli, R.** : Automatic Tonometer with Exact Theory ; Various Biological Applications. *Science* **131** : 1668-1669, 1960.
- 22) **McMillan, F. and Forster, R. K.** : Comparison of Mackay - Marg, Goldmann, and Perkins Tonometers in Abnormal Corneas. *Arch. Ophthalmol.* **93** : 420-424, 1975.
- 23) **Rootman, D. S., Insler, M. S., Thompson, H. W., Parelman, J., Poland, D. and Unterman, S. R.** : Accuracy and Precision of the Tono-Pen in Measuring Intraocular Pressure After Keratoplasty and Epikeratophakia and in Scarred Corneas. *Arch. Ophthalmol.* **106** : 1697-1700, 1988.

- 24) **Dohadwala, A. A., Munger, R. and Damji, K. F.** : Positive Correlation between Tono-Pen Intraocular Pressure and Central Corneal Thickness. *Ophthalmology* **105** : 1849-1854, 1998.
- 25) **Kao, S. F., Lichter, P. R., Bergstrom, T. J., Rowe, S. and Musch, D. C.** : Clinical Comparison of the Oculab Tono-Pen to the Goldmann Applanation Tonometer. *Ophthalmology* **94** : 1541-1544, 1987.
- 26) **Frenkel, R. E. P., Hong, Y. J. and Shin, D. H.** : Comparison of the Tono-Pen to the Goldmann Applanation Tonometer. *Arch. Ophthalmol.* **106** : 750-753, 1988.
- 27) **Hessemer, V., Rössler, R. and Jacobi, K. W.** : Tono-Pen, a new tonometer. *Int. Ophthalmol.* **13** : 51-56, 1989.
- 28) **Kooner, K. S., Cooksey, J. C., Barron, J. B., Zimmerman, T. J., Gupte, R. K. and Wall, J. L.** : Tonometry Comparison ; Goldmann Versus Tono-Pen. *Ann. Ophthalmol.* **24** : 29-36, 1992.
- 29) 三浦優子・諏訪雄三・山本良・内堀恭孝・桑山泰明 : Tono-Pen の試用経験—ゴールドマン圧平眼圧計 および非接触式眼圧計との比較—, *眼紀.* **40** : 2885-2889, 1989.
- 30) 高橋奈美子・尾上正軒・菅原岳史 : Tono-Pen 2® の使用経験—Goldmann 眼圧計と比較して—, *眼紀.* **41** : 2112-2116, 1990.
- 31) 上田満之・佐伯智幸・輪島良平 : Tono-Pen 2 と Goldmann 圧平眼圧計の臨床的比較, *眼科臨床医報.* **87** : 276-278, 1993.
- 32) 満留武宣・高橋圭三・山元章裕・直井信久・澤田惇 : 簡便な眼圧測定装置 Tono-Pen 2 の使用経験について, *眼科臨床医報.* **86** : 1663-1666, 1992.
- 33) **Eisenberg, D. L., Sherman, B. G., McKeown, C. A. and Schuman, J. S.** : Tonometry in Adults and Children (A Manometric Evaluation of Pneumatometry, Applanation, and TonoPen In Vitro and In Vivo). *Ophthalmology* **105** : 1173-1181, 1998.
- 34) 松本拓也・牧野弘之・新井麻美子・松村洋臣・魚里博・西信元嗣 : 開放隅角緑内障と高眼圧症眼の角膜形状が眼圧測定値に及ぼす影響, *臨床眼科* **52** : 177-182, 1998.