

非接触眼圧計と Goldmann 圧平眼圧計の測定値の相違— 角膜厚および角膜曲率の影響

松本 拓也¹⁾, 牧野 弘之¹⁾, 魚里 博²⁾, 西信 元嗣²⁾, 宮本止戈雄³⁾

¹⁾星ヶ丘厚生年金病院眼科, ²⁾奈良県立医科大学眼科学教室, ³⁾奈良工業高等専門学校

要 約

目的: 非接触眼圧計(NCT)と Goldmann 圧平眼圧計(GAT)で測定された眼圧値の相違が生じる原因について, 角膜厚と角膜曲率との関係から検討する。

対象と方法: 正常角膜で内眼手術の既往を持たない 115 名 230 眼を対象とし, それらの中心角膜厚, 角膜曲率半径の NCT で得られた値と GAT で測定した値との比([NCT/GAT])に対する影響を調べた。

結果: [NCT/GAT]と角膜厚の間には有意な相関関係があったが($r=0.556$, $p<0.01$), 角膜曲率半径の間には相関関係はなかった($r=-0.035$, $p=0.30$)。

結論: NCT は GAT よりも大きな圧平面積で測定

することで, 角膜の弾性の影響を受けやすく, 厚い角膜ほど NCT で高く測定された。しかし, 角膜曲率は GAT チップ先端の涙液の表面張力にも関与し, 小さな角膜曲率半径をもつ眼球の涙液表面張力は小さく, GAT でも眼圧を過大評価させることが, [NCT/GAT]と角膜曲率半径に相関関係がなかった原因と考えた。(日眼会誌 104: 317—323, 2000)

キーワード: 非接触眼圧計, Goldmann 圧平眼圧計, 角膜厚, 角膜曲率, 角膜形状

The Influence of Corneal Thickness and Curvature on the Difference between Intraocular Pressure Measurements Obtained with a Non-contact Tonometer and Those with a Goldmann Applanation Tonometer

Takuya Matsumoto¹⁾, Hiroyuki Makino¹⁾, Hiroshi Uozato²⁾, Mototsugu Saishin²⁾ and Shikao Miyamoto³⁾

¹⁾Department of Ophthalmology, Hoshigaoka Welfare Pension Hospital

²⁾Department of Ophthalmology, Nara Medical University

³⁾Nara National College of Technology

Abstract

Purpose: The influence of corneal thickness and curvature on the difference between intraocular pressure (IOP) measurements obtained with a non-contact tonometer (NCT) and those with a Goldmann applanation tonometer (GAT) was studied.

Methods: The corneal thickness and curvature were obtained in 230 eyes of 115 subjects. The correlation between them and ratios of measurement with NCT to that with GAT ([NCT/GAT]) were examined.

Results: [NCT/GAT] and corneal thickness showed a significant positive correlation ($r=0.556$, $p<0.01$), but, the correlation between [NCT/GAT] and the radius of corneal curvature was not statistically significant ($r=-0.035$, $p=0.30$).

Conclusion: The thick cornea has more influence

on the measurement with NCT than GAT, because IOP is measured with NCT over a wider applanation area. The corneas with steeper curvature also cause higher corneal rigidity and produce more overestimation of NCT measurement, while they have stronger capillary attraction of the precorneal tear film for the GAT tip and also produce overestimation of GAT measurement. As a result, [NCT/GAT] was believed to be not influenced by the corneal curvature. (J Jpn Ophthalmol Soc 104: 317—323, 2000)

Key words: Non-contact tonometer, Goldmann applanation tonometer, Corneal thickness, Corneal curvature, Corneal configuration

別刷請求先: 573-8511 枚方市星丘 4-8-1 星ヶ丘厚生年金病院眼科 松本 拓也

(平成 11 年 7 月 2 日受付, 平成 11 年 11 月 4 日改訂受理)

Reprint requests to: Takuya Matsumoto, M.D. Department of Ophthalmology, Hoshigaoka Welfare Pension Hospital, 4-8-1 Hoshigaoka, Hirakata 573-8511, Japan

(Received July 2, 1999 and accepted in revised form November 4, 1999)

I 緒 言

非接触眼圧計(non-contact tonometer: 以下, NCT)は角膜に接触せず, 局所麻酔剤を使用しないため, 角膜障害, 感染, 薬剤に対する反応などの可能性がなく, また, 緑内障のスクリーニングを短時間にでき, 測定方法も比較的容易で, 多くの施設で使われている。

しかし, NCT で測定された値が Goldmann 圧平眼圧計(Goldmann applanation tonometer: 以下, GAT)の値と異なることがあり, それはNCTの測定に固視, 脈拍, 呼吸, 緊張, 睫毛などの測定時での要因が影響するため¹⁾²⁾と考えられていた。しかし, NCT, GAT の両方の眼圧計で測定値が異なる症例を後日再測定して比較したところ, 最初の測定でNCTの測定値がGATよりも3 mmHg以上高かった8眼のうち, 6眼は後日の測定でもNCTの方が高く測定された。一方, GATの値の方が3 mmHg以上高かった13眼のうち, 12眼は後日の測定でもGATの方が高く測定された(自験結果: データー未発表)。再測定でも, NCTあるいはGATで高く測定される傾向が変わらなかったことは, 両眼圧計の測定値の違いが生じる原因に, 被検者のもつ固有の要因が関与していることを推定させるものである。

NCT, GAT はともに角膜面を一定面積で圧平したときの値から眼内圧を推測する圧平眼圧計であるが, 測定時での眼球との接触の違いだけではなく, 違った圧平面積で測定する。Goldmann³⁾は圧平面積を直径3.0 mmに近いときに角膜との接触面の涙液による表面張力が眼球壁硬性を打ち消すことを求め, 直径が3.06 mmのときに1 gの加重が10 mmHgの眼圧と釣り合うことから, GATでは直径3.06 mmで圧平する。一方, NCTでは瞬時の陥凹を読み取らなければならないため, 一般にGATよりも38%大きな圧平面積(直径3.60 mm)をもつ⁴⁾⁵⁾といわれ, 単位面積当たりの加重がGATと同じに設定されており, 10 mmHgの眼圧の角膜を圧平するのにGATよりも大きく, 1.4 gの加重を必要とする⁵⁾。

NCTがGATよりも大きな圧平面積で測定することで, 眼圧測定値に対する眼球壁硬性の影響も異なってくる可能性がある。本研究では, NCT, GAT各測定値の相違と眼球壁硬性の要因となる角膜形状(角膜厚, 角膜曲率)との関係を調べ, その結果に対して, 眼球を薄膜をもつ弾性体から成る球殻と想定し, その球殻を圧平した時の力学的特性から理論的に考察した。

II 対象と方法

星ヶ丘厚生年金病院眼科外来通院中の115名230眼〔年齢 58.1 ± 12.5 (平均値 \pm 標準偏差)歳], (男性55名は 56.9 ± 14.1 歳, 女性60名は 59.2 ± 10.9 歳)の眼圧をNCTとGATの両方で測定した。角膜に病変をもつ者, 内眼手

術を受けている者は, 角膜形状以外の要因が眼球壁硬性に影響していると考えられ, 対象から除外した。

使用したNCTはCT-10[®](Topcon社製)で, 角膜反射光量が最大になったときのチャンバー内圧から眼圧を推測している¹⁾。GATによるマッサージ効果による眼圧変動の影響を除くために, 先にNCTによる測定を行った。NCT測定は, 角膜とNCTとの間に適当なアライメントが得られたときに測定するオートモードに設定し, 固視, 脈拍, 呼吸, 睫毛, 緊張などの測定時における影響をできるだけ排除するために, 連続して測定された3回の眼圧値が3 mmHg以内の変動幅になったときの3回の平均値を代表値とした。GAT測定は, その後に測定され, 測定は著者のみが行い, 角膜表面麻酔剤(オキシプロカイン)とフルオレセインを使い, プリズムを水平位にして測定した。2回測定を行い, その平均値をGAT値とし, その2回の値が2 mmHg以上離れているときは, 3回目を行い, 3回の平均値をGAT値とした。そして, 得られたNCTとGATで測定した値の違いをGAT値に対するNCT値の比(以下, [NCT/GAT])で評価した。

角膜形状は角膜厚と角膜曲率半径を調べた。角膜厚測定は, 角膜光反射の1.5 mm耳側の部位を超音波角膜厚測定装置(Nidek社製, UP-2000)を用いて測定した。最低8回の測定を繰り返し, 得られた測定値の平均値を代表値とした。角膜曲率半径は, オートケラトメータ(Nidek社製, ARK-2000)を用い, 強主経線方向と弱主経線方向から求められる平均値をその角膜曲率半径とし, 角膜乱視が大きいものはGAT測定値に影響する⁶⁾ことが報告され, 角膜乱視が3D以上の者は対象から除外した。

III 結 果

1. NCTとGATによる測定値とその相違

NCTを使って測定された値は 16.9 ± 3.7 (平均値 \pm 標準偏差)mmHg(範囲: 7~25 mmHg), GATを使って測定された値は 16.9 ± 3.2 mmHg(範囲: 8~26 mmHg)であり, NCTとGATとの値の差は 0.0 ± 2.0 mmHgで, 両者には有意な差はなかった($p > 0.05$, paired t test)。両者の相関係数は0.827で, NCTとGAT値の差の絶対値は 1.6 ± 1.3 mmHg, [NCT/GAT]は 1.003 ± 0.130 (平均値 \pm 標準偏差)であった。

2. 角膜厚, 角膜曲率半径と[NCT/GAT]の相関(表1)

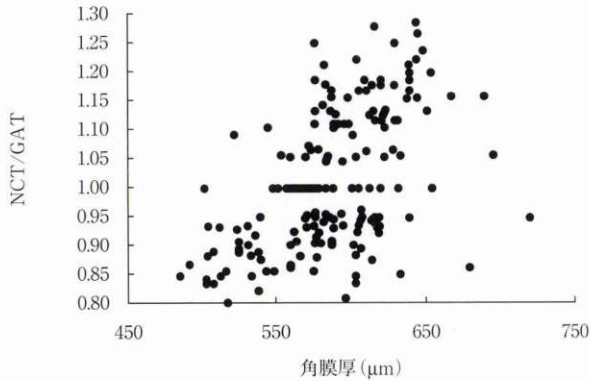
角膜厚と[NCT/GAT]の関係を図1aに示す。両者の間には有意な相関関係があった($p < 0.01$, $r = 0.556$)。この結果が他の要因による可能性があるため, 左右眼別, 男女別でも調べたが, 同様に相関関係があった。

角膜曲率半径と[NCT/GAT]の関係を図1bに示す。両者の間には有意な相関関係はなかった($p = 0.30$, $r = -0.035$)。左右眼別, 男女別に分けた検討でも有意な相関関係はなかった。

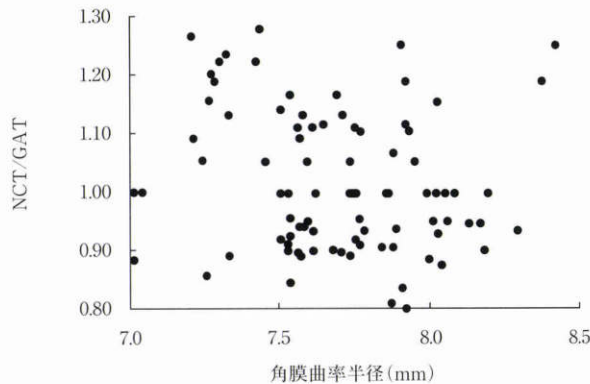
表 1 中心角膜厚, 角膜曲率半径と [NCT/GAT] の相関

対象	眼数	中心角膜厚		角膜曲率半径	
		相関係数	危険率	相関係数	危険率
全症例	230	0.556	p < 0.01	-0.035	p = 0.30
右眼	115	0.602	p < 0.01	-0.052	p = 0.29
左眼	115	0.514	p < 0.01	-0.019	p = 0.42
男性	110	0.549	p < 0.01	-0.086	p = 0.19
女性	120	0.566	p < 0.01	-0.002	p = 0.49

NCT: 非接触眼圧計, GAT: Goldmann 圧平眼圧計



a) 角膜厚と [NCT/GAT] の相関



b) 角膜曲率半径と [NCT/GAT] の相関

図 1 角膜厚および角膜曲率半径と, Goldmann 圧平眼圧計 (GAT) による値と非接触眼圧計 (NCT) による値との比 [NCT/GAT] との関係.

[NCT/GAT] は角膜厚との間には相関関係があり ($r = 0.556, p < 0.01$), 角膜曲率半径との間には相関関係はなかった ($r = -0.035, p = 0.30$).

IV 考 按

角膜厚と [NCT/GAT] との間には有意な正の相関関係があるという今回の結果は, GAT よりも大きな圧平面積をもつ NCT によって測定された値が, GAT よりも眼球壁硬性の影響を受けやすいという我々の仮説を支持するものであったが, 角膜曲率半径と [NCT/GAT] の間には有意な相関関係はなかった.

そこで, NCT, GAT の圧平面積の違いによる角膜厚, 角膜曲率半径の眼圧測定値への影響について, 内圧 (P_0) で, 球殻厚み (d), 半径 (R) の形状をもち, Poisson 比 (ν), Young 率 (E) の性質をもつ弾性体からできた薄膜球殻を想定し, 角膜の弾性体としての性質から弾性力学⁷⁾に基づいて検討した (図 2).

大気圧と P_0 との差 (ΔP) は, 薄膜球殻では半径方向への変位 (ΔR) を使い

$$\Delta P = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{2d}{R^2} \cdot \Delta R \quad (\text{図 2 ⑥ 式})$$

で求められる. この球殻を圧平したときには, ΔR が変化し, それにより ΔP も変化する. それを, それぞれ $\Delta R'$, $\Delta P'$ とすると,

$$\Delta P' = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{2d}{R^2} \cdot \Delta R' \quad (1)$$

A の面積を圧平に要する力 (W) は

$$W = A(P_0 + \Delta P') = A(P_0 + \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{2d}{R^2} \cdot \Delta R') \quad (\text{図 2 ⑦ 式}) \quad (2)$$

$$\frac{W}{A} = P_0 + \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{2d}{R^2} \cdot \Delta R' \quad (\text{図 2 ⑧ 式}) \quad (3)$$

と計算される. (3) 式から, 角膜を一定面積で圧平した値である圧平眼圧計の測定値は P_0 だけではなく, $\Delta P'$ すなわち,

$$\frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{2d}{R^2} \cdot \Delta R'$$

の影響も受けていることが示され, これが従来からの眼球測定値に影響する眼球壁硬性の要因であると思われる.

しかし, Goldmann³⁾ は, この眼球壁硬性の影響を除くため, チップ先端の涙液による表面張力を考え, GAT では圧平に要する力 (W) には, P_0 , 眼球壁硬性 (B) 以外に, チップ先端の涙液のもつ表面張力による力 (N) がかり, その関係は,

$$W = P_0 \times A + B \cdot N \quad (\text{Imbert-Fick の法則}) \quad (4)$$

となり, 圧平の直径が 3.0 mm に近いときには B は表面張力による N で打ち消すことを実験で求めた (図 3). したがって, GAT では,

$$W = P_0 \times A$$

となり, 眼球壁硬性の影響を除いた状態で測定ができるとしている. しかし, N は涙液の接触面積に比例し, 角膜厚や角膜の状態には直接に影響されない. それらの違いによって生じた眼球壁硬性を打ち消すことができず, やはり, GAT の眼圧測定値にも眼球壁硬性が影響する.

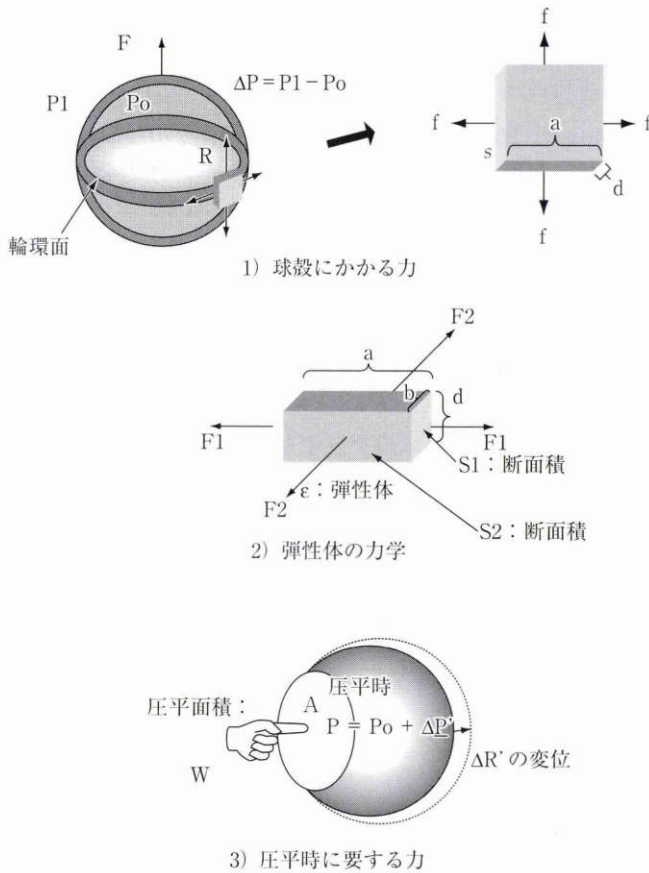


図2 薄膜球殻(半径(R), 球殻厚み(d), Poisson比(ν), Young率(E), 内圧(P0))の圧平時に要する力。

(1) 大気圧を P1, ΔP=P1-P0 とすると, 球殻の半径方向への力 F は, 球殻の断面積は πR² なので
 $F = \pi R^2 \cdot \Delta P$

で示される。この力を支えるのは輪環面で, その面積は $S = 2\pi R d$, よって

$$\frac{F}{S} = \frac{\pi R^2 \Delta P}{2\pi R d} = \frac{R \Delta P}{2d} \quad (*)$$

となる。

(2) 弾性力学から, 力 F1 によって, a が a+Δa, b が b+Δb, d が d+Δd となるように変形されるとする (Δa > 0 のとき Δb < 0, Δd < 0)

Young 率の定義から, F1 のかかる部分の断面積を S1 とすると

$$\textcircled{1} \quad \frac{F1}{S1} = E \cdot \frac{\Delta a}{a}$$

Poisson 比の定義から

$$\textcircled{2} \quad \frac{-\Delta b}{a} = \frac{-\Delta d}{d} = \nu \quad (E \text{ と } \nu \text{ は物質に固有の定数})$$

$$\textcircled{1} \text{ から } \frac{\Delta a}{a} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F1}{S1} \quad \textcircled{1}'$$

②, ①' から

$$\textcircled{3} \quad \frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta d}{d} = -\nu \cdot \frac{\Delta a}{a} = -\nu \cdot \frac{F1}{ES1}$$

一方, F2 によって, a が a+Δa', b が b+Δb', d が d+Δd' となるように変形すると

$$\frac{\Delta b'}{b} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F2}{S2} \quad \textcircled{1}' \text{ から}$$

Goldmann の実験は平均中心角膜厚 520 μm の対象で行われたが, その値から離れた角膜厚をもつ場合には, N で B の影響を打ち消すことができない。

また, 今回使用した NCT (CT-10) では, 圧平時のチャンパー内圧から眼圧を推測しているが, このときのチャンパー内圧は (2) 式の W に相当し, やはりその測定値も Po 以外に眼球壁硬性の影響も受けていることがわかる。

それらの測定値に対する影響は, (3) 式から, 角膜厚に相当する d が大きい, 角膜曲率半径に相当する R が小さいほど, あるいは角膜の Young 率に相当する E が大きいほど, 測定値が過大評価を受けることがわかる。ここでは ΔP' の大きさが問題となるが, Schmidt⁸⁾ は GAT 測定時に内圧の変化は無視できるほど小さいことを報告し, それが今日まで GAT 測定時には眼球壁硬性の影響を受けない根拠となっている。しかし, 表 2 に示すように, GAT での測定値においても角膜形状が影響することを推測させる報告^{9)~20)} があり, これらが示す結果はこの式から求められるものと一致する。また, E の影響は, Simon ら²¹⁾ は角膜浮腫によって E が小さくなったときに

$$\textcircled{4} \quad \frac{\Delta a'}{a} = \frac{\Delta d'}{d} = -\frac{\kappa}{E} \cdot \frac{F2}{S2} \quad \textcircled{3} \text{ から}$$

a の変形の割合 $\frac{\Delta a + \Delta a'}{a}$ (これを $\frac{\Delta a''}{a}$ とする)

は, ①', ④ から

$$\textcircled{5} \quad \frac{\Delta a''}{a} = \frac{F1}{ES1} - \frac{\kappa}{E} \cdot \frac{F2}{S2}$$

で示される。球殻では F1=F2=F, S1=S2=S なので

$$\frac{\Delta a''}{a} = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{F}{S}$$

で示される。(*) から

$$\frac{\Delta a''}{a} = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{R \Delta P}{2d}$$

球殻の半径 R に比べて, 厚み d がごく小さいときには

$$\frac{\Delta a''}{a} \div \frac{\Delta R}{R} \quad (**) \quad (\Delta R \text{ は } R \text{ の半径方向への変位})$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{R \Delta P}{2d}$$

$$\textcircled{6} \quad \Delta P = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{2d}{R^2} \cdot \Delta R \text{ で示される。}$$

(3) 圧平することで体積が不変だとすると, 圧平時には, ΔR は変化し (ΔR' とする), ΔP も変化する (ΔP' とする)。面積 A を圧平するのに要する力 W は, ⑥ から

$$\textcircled{7} \quad W = A(P0 + \Delta P') = A(P0 + \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{2d}{R^2} \cdot \Delta R')$$

$$\textcircled{8} \quad \frac{W}{A} = P0 + \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{2d}{R^2} \cdot \Delta R'$$

一定面積を圧平する力には内圧だけではなく, 球殻の形状や弾性の関与することをこの式は示す。また, 圧平面積が大きくなれば ΔR' も一致して大きくなり, GAT よりも圧平面積の大きい NCT の方が測定時の ΔR' が大きい。よって, 角膜形状 (d や R) の影響を受けやすい。

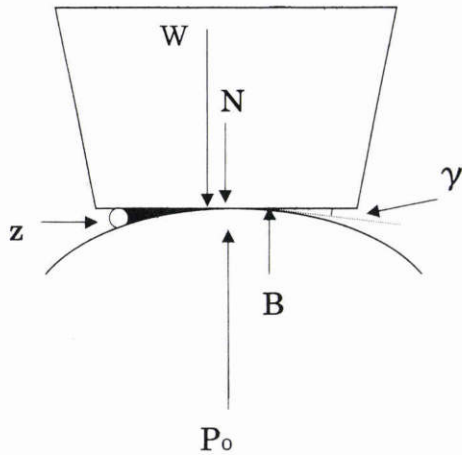


図3 GATチップと角膜の間の涙液がGATチップを角膜側に引っ張る力への角膜曲率の影響。

GATでは角膜を圧平する力(W)には、 P_o 、眼球壁硬性B以外に、涙液の表面張力も影響する。GATチップと角膜の間の涙液がGATチップを角膜側に引っ張る力Nは、涙液の表面張力はその接触面積に比例するため、角膜曲率半径が小さいとその接触面積が小さくなり、力は小さくなる。また、力学的にもGATチップと角膜に挟まれた涙液層でできた円の半径z、GATチップと角膜面でできた半分の角度 γ 、涙液の表面張力 α を使い

$$N = \alpha / z \cdot \sin \gamma$$

で表される²¹⁾、角膜曲率半径が小さいときは、zが大きくなり、Nは小さくなる。同じ眼圧をもつ眼球を圧平するのに余分の加圧が必要となり、角膜曲率半径が小さい眼球のGATを使つての眼圧は過大評価される。

は眼圧測定値が過小評価されることを摘出眼球に圧センサーをつけた実験で証明したが、これも $\Delta P'$ の大きさが無視できないことを示す。

以上のように、圧平眼圧計の測定値には角膜形状が影響することが報告されているが、NCTはGATよりも大きく角膜を圧平するため、その影響も異なる。圧平面積が大きいほど、より角膜が変形されて半径方向の変位 $\Delta R'$ も大きくなる[図2(**)から]。したがって、(3)式から、NCTはGATよりも圧平面積が大きいために $\Delta R'$ が大きく、dの影響がより測定値に生じやすく、それは角膜厚と[NCT/GAT]の関係が正の相関関係になった本研究の結果と一致する。

一方、同様にWに対するRの影響も、 $\Delta R'$ が大きいNCTにおいて生じやすいと考えられるが、角膜曲率半径と[NCT/GAT]は角膜厚のような有意な相関関係がなかった。それは、Goldmann³⁾も涙液の表面張力により2mmHg測定値に影響があると報告しているように、角膜曲率半径はGATチップ先端の涙液の表面張力に影響し、角膜曲率半径が小さいときは(4)式のNが小さくなり²²⁾、余分の加圧が必要となり高く測定される(図3)。よって、角膜曲率半径が小さいときには、NCTだけではなく、GATでも涙液の表面張力の関与で過大評価される

表2 角膜形状(角膜厚,角膜曲率)が眼圧測定値に影響をすることを推定する報告

角膜厚	角膜曲率
<ul style="list-style-type: none"> ● マノメーターを使った実験で角膜が厚いときには眼圧は過大評価された⁹⁾¹⁰⁾ ● 高眼圧症眼の角膜は正常眼、緑内障眼に比べ厚い^{11)~15)} ● 正常眼圧緑内障眼の角膜は、正常眼に比べて薄い^{14)~16)} ● 末端肥大症眼の角膜は厚く、そのため眼圧も高い¹⁷⁾ ● ステロイド長期内服による眼圧上昇眼の角膜は厚い¹⁸⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> ● 角膜曲率半径と眼圧値との間には、角膜曲率半径が1D大きくなれば、0.34mmHg高くなる関係がある¹⁹⁾ ● 正常眼圧緑内障の角膜曲率半径は大きい²⁰⁾

ことが[NCT/GAT]には角膜曲率半径が影響しなかった原因と考えられる。

今回の結果から、NCTはGATよりも大きな圧平面積をもつために角膜厚の影響を受やすいことが示され、特異な角膜厚をもつ場合のNCTでの眼圧評価には注意を要すると思われる。特に、近年行われている近視に対する屈折矯正手術では術後眼圧が低下する^{23)~30)}ことが報告されているが、それは、手術後、角膜形状が変化し、(1)~(3)式のdが小さくなること、Rが大きくなることによる $\Delta P'$ の低下が原因の見かけの眼圧値の低下であることがわかる。報告されている近視に対するエキシマレーザーによる近視の屈折矯正手術(excimer laser photorefractive keratectomy, PRK)とレーザー角膜内切削形成術(laser in situ keratomileusis, LASIK)の術後眼圧低下を表3に示す。母集団が違い、施設による照射時の条件も違うので単純に比較はできないが、術後眼圧低下はGATを使った報告よりもNCTを使つての報告の方が大きい傾向があり、また、屈折矯正された単位等価球面度数当たりの眼圧低下、および切除角膜深度100 μ m当たりの眼圧低下もNCTを使った報告の方がGATを使った報告よりも大きい。これらの結果からも、NCTの方が角膜形状の影響を受けやすいことが推測され、このような症例の眼圧評価にはNCTよりもGATを使った測定がふさわしい。同様に、高眼圧症症例の多くは厚い角膜を持っている^{11)~15)}と報告されており、それらはNCTではより過大評価されやすいため、NCTで高眼圧症と診断されたときにはさらにGATでの再検が必要と考える。

今回はNCT, GATの測定値の相違を角膜形状との関係から調べ、眼球を薄膜をもつ弾性体の球殻に置き換えて力学的に考察した。しかし、生体である眼球は今回想定した球殻とは違った構造をもつ。前房、後房、硝子体腔という3つのコンパートメントから成り、内容物は房水、硝子体という性質の違う物質で満たされている。角膜の曲率半径と眼球の半径と一致せず、また眼球壁も角膜と強膜という違った力学的特性をもつ構成物から成る理由で

表3 報告されている屈折矯正手術による眼圧低下(過小評価)

使用 眼圧計	著者	術前眼圧 (mmHg)	術後眼圧 (mmHg)	術後眼圧 低下 (mmHg)	屈折矯正され た等価球面度 数1D当り の眼圧低下 (mmHg/D)	切除角膜深度 100 μm 当り の眼圧低下 (mmHg)	Transition [ablated] zone (直径) (mm)	術後眼圧 評価時期
PRK								
	Chatterjee et al ²³⁾	13.0 (3.3)	9.6 (3.3)	3.5 (2.7)	(0.4)*	/	6.5~7.5	平均 34.9週
NCT	Cennamo et al ²⁴⁾	16.1 (3.85)	13.2 (3.14)	2.9	0.58**	10.0	[5.0]	9か月
	増田 他 ²⁵⁾	14 (2)	12 (3)	2	(0.4)*	(6)*	/	/
GAT								
	Faucher et al ²⁶⁾	16.0 (2.67)	13.7 (2.02)	2.4 (3.02)	0.31	3.27	/	5か月 ~2年
	Mardelli et al ²⁷⁾	14.6 (2.6)	13.6 (2.5)	1.0 (2.8)	0.30	4.35	[5.0]	12か月
LASIK								
NCT	増田 他 ²⁸⁾	14.1 (2.2)	10.7 (1.9)	3.4	/	/	/	/
GAT								
	Emara et al ²⁹⁾	16.1 (2.9)	13.6 (3.3)	2.5 (2.7)	/	3.2	[5.5~6.6]	3か月
	Fournier et al ³⁰⁾	15.5 (2.6)	13.6 (2.7)	1.9 (2.9)	0.32	2.4	5.5~7.0***	1か月

平均(標準偏差)

括弧*: 回帰直線の勾配から算出。それ以外は矯正等価球面, 術後角膜厚変化から計算。

** : 対象眼は矯正等価球面度数 1 ~ 5D としているので, 1D 当りの眼圧低下は0.58mmHg 以上となる。

*** : Fournier は 145 眼のうち 126 眼が 5.5 ~ 7.0mm の範囲であったとしている。

● : 斜線箇所は文献に記載されず。

PRK : excimer laser photorefractive keratectomy LASIK : laser *in situ* keratomileusis NCT : non-contact tonometer
GAT : Goldmann applanation tonometer

厳密には同じではない。しかし, 眼球は弾性体であり, その特徴から弾性体から成る薄膜球殻を仮想して弾性力学を応用することによって, NCT と GAT の圧平面積の違いが角膜形状によって測定値に違いが生じる原因となっていること, 測定値が角膜形状の影響を受ける原因に眼球壁の弾性体としての性質が関与していることを理論的に証明することができた。

本論文の要旨は, 第 103 回日本眼科学会総会で発表した。

文 献

- 1) 難波克彦, 中山 徹, 阿部春樹, 関 伶子, 岩田和雄 : トプコン・ノンコンタクトトノメーター CT-10 の臨床評価. 眼紀 41 : 1708—1711, 1990.
- 2) 難波克彦, 中山 徹, 岩田和雄 : 非接触眼圧計による眼圧測定値と脈波との関係について. 日眼会誌 93 : 155—160, 1989.
- 3) Goldmann H : Applanation tonometry. In : Newell FW (Ed) : Glaucoma Transactions of the Second Conference. Josia Macy Jr Foundation, New York, 167—220, 1957.
- 4) Grolman B : A new tonometer system. American Journal Optometry & Archive American Academy Optometry 49 : 646—660, 1974.

- 5) Shields MB : The non-contact tonometer. Its value and limitations. Surv Ophthalmol 24 : 211—219, 1979.
- 6) Holladay JT, Allison ME, Prager TC : Goldmann applanation tonometry in patients with regular corneal astigmatism. Am J Ophthalmol 96 : 90—93, 1983.
- 7) 後藤廉平, 平井西夫, 花井哲也 : レオロジーとその応用 6 版. 共立出版, 東京, 1—5, 1975.
- 8) Schmidt TAF : The clinical application of the Goldmann applanation tonometer. Am J Ophthalmol 49 : 967—978, 1960.
- 9) Ehlers N, Bramsen T, Sperling S : Applanation tonometry and central corneal thickness. Acta Ophthalmol 53 : 34—43, 1975.
- 10) Whitacre MM, Stein RA, Hassanein K : The effect of corneal thickness on applanation tonometry. Am J Ophthalmol 115 : 592—596, 1993.
- 11) 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.
- 12) Argus WA : Ocular hypertension and central corneal thickness. Ophthalmology 102 : 1810—1812, 1995.

- 13) Herndon WL, Choudhri AS, Cox T, Damji KF, Shields BM, Allingham RR: Central corneal thickness in normal, glaucomatous, and ocular hypertensive eyes. *Arch Ophthalmol* 115: 1137—1141, 1997.
- 14) Copt R, Thomas R, Mermoud A: Corneal thickness in ocular hypertension, primary open angle glaucoma, and normal tension glaucoma. *Arch Ophthalmol* 117: 14—16, 1999.
- 15) 渡辺牧夫, 松岡里佳, 目代康子, 上野脩幸: 緑内障患者における角膜厚の重要性. *眼紀* 49: 745—758, 1998.
- 16) Morad Y, Sharon E, Heffetz L, Nemet P: Corneal thickness and curvature in normal-tension glaucoma. *Am J Ophthalmol* 125: 164—168, 1998.
- 17) Bramsen T, Klauber A, Bjerre P: Central corneal thickness and intraocular tension in patients with acromegaly. *Acta Ophthalmol (Copenh)* 58: 971—974, 1980.
- 18) 松本拓也, 牧野弘之, 魚里 博, 西信元嗣: 長期ステロイドの全身投与による角膜厚と眼圧測定値に対する影響. *視覚の科学* 18: 84—88, 1998.
- 19) Marc HH: Corneal curvature in applanation tonometry. *Am J Ophthalmol* 76: 223—224, 1973.
- 20) Tomlinson A, Leighot DA: Ocular dimensions in low tension glaucoma. *Br J Ophthalmol* 56: 97—103, 1972.
- 21) Simon G, Small RH, Ren Q, Parel JM: Effect of corneal hydration on Goldmann applanation tonometry and corneal topography. *Refract Corneal Surg* 9: 110—117, 1993.
- 22) Whitacre MM, Stein R: Sources of error with use of Goldmann-type tonometers. *Surv Ophthalmol* 38: 1—30, 1993.
- 23) Chatterjee A, Shah S, Bessant DA, Naroo SA, Doyle SJ: Reduction in intraocular pressure after eximer laser photorefractive keratectomy (Correlation with pretreatment myopia). *Ophthalmology* 104: 355—359, 1997.
- 24) Cennamo G, Rosa N, La RA, Bianco S, Sebastiani A: Non-contact tonometry in patients that underwent photorefractive keratectomy. *Ophthalmologica* 211: 341—343, 1997.
- 25) 増田あこ, 清水公也, 庄司信行, 榎本喜久子: エキシマレーザー屈折矯正手術後の眼圧評価. *臨眼* 53: 323—326, 1999.
- 26) Faucher A, Gregoire J, Blondeau P: Accuracy of Goldmann tonometry after refractive surgery. *J Cataract Refract Surg* 23: 832—838, 1997.
- 27) Mardelli PG, Piebenga LW, Whitacre MM, Siegmund KD: The effect of eximer laser photorefractive keratectomy on intraocular pressure measurements using the Goldmann applanation tonometer. *Ophthalmology* 104: 945—948, 1997.
- 28) 増田あこ, 清水公也, 庄司信行, 榎本喜久子: LASIK後の眼圧過小評価. 第 21 回日本眼科手術学会抄録集: 232, 1998.
- 29) Emará B, Probst LE, Tingey DP, Kennedy DW, Willms LJ, Machat J: Correlation of intraocular pressure and central corneal thickness in normal myopic eyes and after laser *in situ* keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 24: 1320—1325, 1998.
- 30) Fournier AV, Podtetenov M, Lemire J, Thompson P, Duchesne R, Perreault C, et al: Intraocular pressure change measured by Goldmann tonometry after laser *in situ* keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 24: 905—910, 1998.