第55回 日本視能矯正学会

一般講演

高速シャインブルーク技術を用いた眼圧計 Corvis ST と Goldmann 圧平式眼圧計、非接触型眼圧計との比較

西田 知也¹⁾・森川 桃子¹⁾・村田あずさ¹⁾・片岡 嵩博¹⁾・
井藤麻由香¹⁾・磯谷 尚輝¹⁾・洞井 里絵¹⁾・玉置 明野³⁾・
小島 隆司^{1), 2)}・吉田 陽子¹⁾・中村 友昭¹⁾

¹⁾ 名古屋アイクリニック

²⁾ 岐阜赤十字病院

³⁾ 独立行政法人地域医療機能推進機構 中京病院

Comparison of Intraocular Pressure Measurements Obtained by the Scheimpflug-based Tonometer, Non-contact Tonometer, and Goldmann Applanation Tonometer

Tomoya Nishida¹⁾, Momoko Morikawa¹⁾, Azusa Murata¹⁾, Takahiro Kataoka¹⁾,
Mayuka Ito¹⁾, Naoki Isogai¹⁾, Rie Horai¹⁾, Akeno Tamaoki³⁾, Takashi Kojima^{1), 2)},
Yoko Yoshida¹⁾, Tomoaki Nakamura¹⁾

¹⁾ Nagoya Eye Clinic, Nagoya, Japan

²⁾ Gifu Red Cross Hospital, Gifu, Japan

³⁾ Japan Community Healthcare Organization Chukyo Hospital, Nagoya, Japan

要 約

【目的】 シャインブルーク画像から角膜圧平時間と面積を計算することによって眼圧計測を行う Corvis® ST (以下 CST) (OCULUS 社) を用いて、正常眼における眼圧値及び再現性について従来器と比較した。

【対象と方法】 屈折異常以外に眼疾患を有しない20名20眼を対象とした。平均年齢は35.0±12.9歳 (20～60歳)。CST、Goldmann applanation tonometer (以下 GAT)、非接触型眼圧計 (以下 NCT) (TX-F、Canon) の3種類の測定器機で各5回ずつ眼圧を測定し、平均値及び変動係数、級内相関係数 (Intraclass correlation coefficients 以下 ICC) を算出しそれぞれの器機で比較を行った。また2器機間の測定値の相関係数を算出した。統計解析は各器機間でANOVA検定を用いpost-hoc test

別冊請求先 (〒456-0003) 愛知県名古屋市熱田区波寄町25-1 名鉄金山第一ビル3F

医療法人 REC 名古屋アイクリニック

Tel. 052 (872) 0490 Fax. 052 (872) 0491

E-mail: nishida@lasik.jp

Key words: Corvis ST、眼圧、再現性、非接触型眼圧計、Goldmann 圧平式眼圧計
Corvis ST, intraocular pressure, repeatability, non-contact tonometer,
Goldmann applanation tonometer

として Tukey-Kramer test を用いて、有意水準を 5 % 未満とし行った。

【結果】 各器機で測定した眼圧の平均値 ± 標準偏差は、CST が 12.5 ± 2.7 mmHg、GAT が 15.6 ± 2.8 mmHg、NCT が 13.6 ± 2.6 mmHg であり、全ての器機間で有意差が認められた ($p < 0.01$)。平均変動係数 ± 標準偏差は CST が 9.8 ± 5.1 %、GAT が 6.3 ± 4.5 %、NCT が 8.7 ± 3.6 % であり、GAT よりも CST は有意に高値を示し ($p < 0.01$)、CST と NCT、GAT と NCT 間では有意差が認められなかった ($p > 0.05$)。

3つの器機の相関係数は CST と NCT では 0.865 ($p < 0.0001$)、CST と GAT でも 0.865 ($p < 0.0001$)、NCT と GAT では 0.845 ($p < 0.0001$) であった。ICC は CST が 0.792、NCT が 0.812、GAT が 0.876 となった。

【結論】 CST による眼圧値は NCT、GAT とともに高い相関係数を得たが、NCT や GAT と比較すると低値を示し、測定原理の違いが影響している可能性が示唆された。再現性に関しては NCT と同等であった。

Abstract

【Purpose】 Corvis ST (CST, Oculus Co.) is a tonometer that uses the Scheimpflug images for its intraocular pressure (IOP) measurement. The purpose of this study was to compare the IOP measurement in healthy eyes and repeatability among 3 devices: the CST, the noncontact tonometer (NCT; TX-F, Canon), and the Goldmann applanation tonometer (GAT).

【Subjects and Methods】 The study included 20 eyes of 20 participants without any ocular diseases other than refractive error. The mean age was 35.0 ± 12.9 years (range, 20–60 years). Subject's IOP was measured five times each by the three devices. The average IOP, coefficient of variation (CV), and the intraclass correlation coefficient (ICC) were assessed and compared among the three devices. In addition, correlation coefficient was obtained for the measurements by each pair of the three devices. ANOVA with post-hoc Tukey-Kramer test was performed and a significant level < 0.05 was considered statistically significant.

【Results】 The average ($\pm$ standard deviation) IOP measurements by the CST, GAT, and NCT were 12.5 ± 2.7 mmHg, 15.6 ± 2.8 mmHg, and 13.6 ± 2.6 mmHg, respectively. A significant difference was observed among all three devices ($P < 0.01$). The average CV ($\pm$ standard deviation) for the CST, GAT, and NCT were $9.8 \pm 5.1\%$, $6.3 \pm 4.5\%$, and $8.7 \pm 3.6\%$, respectively. The CV for the CST was significantly higher than that for the GAT ($P < 0.01$). However, the CV for the NCT did not significantly differ from those for the CST and GAT ($P > 0.05$). The correlation coefficients were 0.865 ($P < 0.0001$) between the CST and NCT, 0.865 ($P < 0.0001$) between the CST and GAT, and 0.845 ($P < 0.0001$) between the NCT and GAT. The respective ICC values for the CST, NCT, and GAT were 0.792, 0.812, and 0.876.

【Conclusion】 Although the IOP measurements by the CST highly correlated with the measurements by the NCT and GAT, the values appeared to be lower. This might be due to the difference in the measurement principle of the instrument. The repeatability of the CST was equivalent to that of the NCT.

I. 緒言

眼圧検査は緑内障診療において、スクリーニング、診断、経過観察、治療薬や手術の効果判定などに用いられる検査の一つであり、その正確性及び再現性は非常に重要である。眼圧

の測定方法は、一般的には点眼麻酔をせずに非接触で角膜に空気を噴射させて測定する方法 (non-contact tonometer : NCT) と、点眼麻酔後に Goldmann 圧平式眼圧計 (Goldmann applanation tonometer : GAT) を角膜に接触させて測定する方法がある。NCT は検査時間が

短く、測定にあまり熟練を要しないことや、非接触であるために二次感染の危険性が少なく、点眼麻酔を必要としないことなどの利点を有するが、GATと比較して角膜厚の影響を受けやすいため測定結果には注意が必要である¹⁾。また、正常眼圧域では精度は高いが、異常眼圧域では精度が低下し、一般的に高眼圧では低めに、低眼圧では高めに測定される^{2), 3)}。

一方、GATは眼圧値が他の眼圧計と比較して最も信頼性が高く、gold standardな眼圧計であるが、点眼麻酔が必要で、チップが角膜と接触する。そのため、二次感染の危険性や、塩素消毒をしたGATの圧平プリズムによる測定後角膜障害が報告されている⁴⁾。

近年Oculus社(独)から登場した非接触型眼圧計Corvis ST(以下CST)(図1)は、眼圧を測定すると同時に角膜厚及び角膜の生体力学特性を測定する機能を併せ持つ眼圧計である。

CSTにより得られる生体力学特性のパラメーターは、眼圧、角膜厚、圧縮空気により角膜が圧平されるまでの時間(Applanation Time)、最も凹むまでの時間(Highest Concavity Time)、

Highest Concavity時の角膜ピーク間距離(Peak Distance)、角膜頂点までの移動距離(Deformation Amplitude)、Highest Concavity時の凹面の曲率半径(Radius)である(図2)。これらのパラメーターを用いて、角膜が脆弱化する円錐角膜などの診断、治療効果やLASIKなどの屈折矯正手術後の角膜の強度の把握などについての応用が期待されている。

今回はCSTで得られる眼圧値について、測定原理の異なる眼圧計、NCTとGATによる測定値と再現性の比較、及び2器機間の相関係数検討をした。

II. 対象及び方法

1) 対象

白内障や屈折矯正などの眼手術既往がなく、屈折異常以外に眼疾患を有しない20名20眼(男性3眼 女性17眼)とし、平均年齢は 35.0 ± 12.9 歳(20～60歳)。

2) 方法

図1 Corvis STの外観

図2 Corvis STの測定結果の画面

Appl 1 (Applanation1) : 1度目の圧平状態、Appl 2 (Applanation2) : 2度目の圧平状態、Time : Applanation1または2になるまでの時間、Length : 角膜の圧平長 (mm)、Velocity : 角膜変形速度 (m/s)、IOP : 眼圧、Pachy (Pachymetry) : 角膜厚、Hi Con. (Highest Concavity) : 角膜が最も凹んだ状態、Time : Highest Concavity状態になるまでの時間、Peak Dist. (Peak Distance) : Highest Concavity状態時のピーク時間、Radius : 凹面に一致する円の半径、Deform. Ampl. (Deformation Amplitude) : Apex (角膜頂点)の移動距離

最初にCSTを5回連続で測定し、次にNCTで5回連続測定を行った。

その直後にオキシプロカイン塩酸塩による点眼麻酔を行い、GATにて5回連続で測定し、それぞれの平均値と標準偏差を算出し比較した。検者はCSTとNCTを同一の視能訓練士で測定し、GATは同一医師で測定した。

測定時間は日内変動の影響を考慮し、どの症例も1時間以内に全ての測定を終えるようにした。

また、連続で測定したことによる眼圧の影響を確認するため、各器機での5回の眼圧値を比較した。統計解析は各器機間でANOVA検定を用いpost-hot testとしてTukey-Kramer testを用いて、有意水準を5%未満とし行なった。

各眼圧計による眼圧値の平均値と標準偏差、級内相関係数 (Intraclass correlation coefficients以下ICC) を算出しそれぞれの器機で比較を行った。

またCSTとは測定原理の異なる眼圧計、NCTとGATによる2器機間の相関係数の検討をした。

またICCの計算においてはShapiro-Wilk検定を行い、正規分布を確認して行なった。

各器機間の相関についてはピアソンの相関係

数を用いて算出した。

Ⅲ. 結果

平均眼圧 ± 標準偏差は、CSTが 12.5 ± 2.7 mmHg、NCTが 13.6 ± 2.6 mmHg、GATが 15.6 ± 2.8 mmHgとなりGATが最も高値を示し、CSTはNCT、GATに比べ有意に低値を示した ($p < 0.01$) (図3)。

変動係数は、CSTが $9.8 \pm 5.1\%$ 、NCTが $8.7 \pm 3.6\%$ 、GATが $6.3 \pm 4.5\%$ で、CSTとNCTには有意差を認めず ($p > 0.05$)、CSTとGATではCSTが有意に高値を示した ($p < 0.05$) (図4)。連続測定による影響は、CSTでは1回目が 13.4 ± 3.5 mmHg、4回目は 11.9 ± 2.9 mmHgであり1回目と4回目のみ有意差が認められた ($p < 0.01$) (図5)。

NCTでは5回の測定間に有意差は認められなかった ($p = 0.25$) (図6)。

GATでは1回目が 16.9 ± 2.7 mmHg、2回目が 15.6 ± 3.0 mmHg、3回目が 15.5 ± 2.9 mmHg、4回目が 15.2 ± 2.8 mmHg、5回目は 15.0 ± 3.1 mmHgであり1回目の測定値に対してどの測定値も有意に低値であった ($p < 0.01$) (図7)。

3つの器機の相関係数はCSTとNCTでは

図3 各器機による眼圧の測定結果
CSTの値はNCT、GATと比較して有意に低値を示し ($p < 0.01$)、GATはNCTに対して有意に高値を示した。 ($p < 0.01$)

図4 各器機による変動係数の測定結果
CSTとNCT、NCTとGATで有意差は見られなかったが ($p > 0.05$)、CSTはGATと比較して有意に高値を示した。 ($p < 0.05$)

	平均±標準偏差	n=20
1回目	13.4±3.5mmHg	* *: P<0.01
2回目	12.7±2.9mmHg	
3回目	12.4±2.6mmHg	
4回目	11.9±2.9mmHg	
5回目	12.5±2.9mmHg	

図5 CSTによる連続測定的眼圧値の変動
4回目の値は1回目と比較して有意に低値を示した。(p<0.01)

	平均±標準偏差	n=20
1回目	13.7±3.2mmHg	
2回目	13.7±2.9mmHg	
3回目	14.1±2.4mmHg	
4回目	13.7±2.8mmHg	
5回目	13.2±2.9mmHg	

図6 NCTによる連続測定的眼圧値の変動
全ての結果において有意差は見られなかった(p=0.25)。

	平均±標準偏差	n=20
1回目	16.9±2.7mmHg	* *: P<0.01
2回目	15.6±3.0mmHg	
3回目	15.5±2.9mmHg	
4回目	15.2±2.8mmHg	
5回目	15.0±3.1mmHg	

図7 GATによる連続測定的眼圧値の変動
2回目以降は1回目の測定結果に対して、どの回数も有意に低値であった。(p<0.01)

0.865 (p< 0.0001) CSTとGATでも0.865 (p< 0.0001)、GATとNCTでは0.845 (p< 0.0001)であり、CSTはどの器機とも高い相関を得た。(図8、9、10)

ICCはCSTが0.792、NCTが0.812、GATが0.876となり、GATが最も高く、CSTは最も低い値となった。

平均中心角膜厚はCSTで測定し、 $539.4 \pm 28.8 \mu\text{m}$ であった。

Ⅳ. 考案

今回、新しく臨床応用された眼圧計を一般的に日常診療で最も用いられているNCTとGATと比較した。

過去にHong Jらは、正常眼と緑内障の中国人を対象としてCSTとGAT、NCTの眼圧値を比較しCSTの眼圧値は低い値を示す傾向があり、NCTとの互換性がない可能性があることを報告している⁵⁾。

それに対しAdrian Sらによると、CSTとGAT、アイケア手持眼圧計の値を比較した結果CSTの眼圧値は有意に高値であった⁶⁾。

図8 CSTとNCTの相関
CSTとNCTの測定値の間には高い相関を認めた（相関係数0.865、 $p < 0.0001$ ）。

図9 CSTとGATの相関
CSTとGATの測定値の間には高い相関を認めた（相関係数0.865、 $p < 0.0001$ ）

図10 NCTとGATの相関
NCTとGATの測定値の間には高い相関を認めた（相関係数0.845、 $p < 0.0001$ ）

今回の眼圧測定の結果は、Hong Jらの報告と同様にCSTはGATと比較して低値を示し、Adrian Sらの報告とは異なっていた。

この要因の一つとして、角膜厚による影響が考えられる。本研究の対象者は、屈折異常以外に眼疾患を認めないものであったが、Adrian Sらの研究では、正常眼以外に、緑内障、円錐

角膜、角膜浮腫の疾患を持つものも含まれていた。平均角膜厚（±標準偏差）は、本研究の対象者では $539.4 \pm 28.8 \mu\text{m}$ であり、Hong Jらの対象者では $552.2 \pm 39.0 \mu\text{m}$ であったのに対して、Adrian Sらの場合は $543.7 \pm 52.7 \mu\text{m}$ であり、Adrian Sらの研究では角膜厚の測定値のばらつきが大きい。Lukas RらはCSTでの眼圧値は、GATと比べてより角膜厚の影響を受けると報告⁷⁾している。また、角膜中心が菲薄化する円錐角膜の例では、病変部はそれ以外の部位でのGATに比べてより低い眼圧値になるとの報告⁸⁾があり、角膜浮腫においてもGATで測定した眼圧値は低値を示すとの報告⁹⁾があるため、正常眼のみの本研究と角膜疾患を含むAdrian Sらの研究とでは、異なる傾向の眼圧値が算出されたと考えられる。

また、CSTの眼圧値がGATとNCTに比べて低値を示した要因として、それぞれの器機による測定原理の違いが考えられる。CSTの測定原理は、圧縮空気を角膜に吹き付け、毎秒4,330フレームの超高速シャインプルーカカメラにより角膜の変形を動画で記録し、角膜が凸状態から凹状態になるまでに要した時間および圧面積等から眼圧値を算出している。測定自体は従来のNCTと同じ方法で行っているが、圧平されたタイミングの検出方法について、CSTの場合にはシャインプルーカ画像を用いている点が異なる。

NCT、GAT、CSTは全て圧平眼圧計に分類され、Imbert-Fickの法則により眼圧が計算される。この法則では眼圧（P）は眼球を押す圧力（W）と圧平される面積（A）で $P=W/A$ で求められる。一般的にNCTはLED光を一定面積に当てその反射光が最大になる場合の圧力を求めることで眼圧を測定している。これに対してCSTではシャインプルーカ画像で圧面積とそれに要した時間から空気圧を算出し眼圧を最終的に計算している。このようにNCTとCSTでは角膜が平坦になったタイミングの検出方法が異なるため、圧平までにかかる時間に相違が生じればWは変化する。以上の要因から、それぞれの器機で異なる眼圧値が算出されたと考えられる。

今回、眼圧を5回連続で測定したことによる眼圧値の変動は、GATでは1回目の測定値に対して2回目3回目4回目5回目の、どの測定値も有意な低下を認められた ($p<0.001$)。この結果からGATでは過去にも報告があるように、連続測定によって眼圧値が低く示されている^{10), 11)}と考えられる。

一方、CSTでも1回目の測定値に対して4回目のみ有意に眼圧値の低下が認められたため、CSTにおいても連続測定によって眼圧値が低下する可能性が示唆された。

従来型のNCTでは連続測定によって眼圧値が低下することはなかったが、CSTでは連続測定による低下が認められる要因として、従来型のNCTでは測定時に噴射される圧縮空気圧が30mmHgであるのに対して、CSTでは60mmHgとCSTのほうが高い。眼球には外力が加わったときに眼圧を一定に保とうとする機能がある。今回は連続測定によって、マッサージ効果により眼圧が低くなった可能性も考えられた。

本研究の測定順序はCST、NCT、GATの順でありCSTとNCT、またNCTとGATでの測定は連続の状態では測定しており、CSTによるマッサージ効果が続いている状態でNCTとGATを測定していることが言える。それにも関わらず、眼圧値の測定結果はCSTに比べてGATとNCTが有意に高値を示しているため、それぞれの器機で測定する間隔を空けマッサージ効果を取り除いた場合では、NCTとGATの眼圧値はより高値になり、さらにCSTとの差が開く可能性がある。

そのため、同一時間の別日に測定順序を変更した状態で測定するなどの検討が今後必要と思われる。

再現性に関しては、過去の報告ではCSTの同一検者での再現性は、変動係数が6.7%、ICCが0.9でありCSTのほうがNCTよりもGATとより相関が高く、2検者間の再現性は変動係数が8.9%、ICCが0.78でありNCT、GATと比較してCSTが最も良好であったと述べている⁹⁾。今回は同一検者での変動係数とICCを指標とし、変動係数はCSTが $9.8 \pm 5.1\%$ 、NCTが $8.7 \pm 3.6\%$ 、

GATが $6.3 \pm 4.5\%$ となった。ICCはCSTが0.792、NCTが0.812、GATが0.876となり、どの眼圧計でも0.7以上と高い信頼性が得られ、CSTの再現性はNCTと比較して遜色ない値であった。

CSTのメリットとしては、非接触型の眼圧計のためGATのような二次感染の危険性がない点であり、検査上のメリットとしては、シャインプルーク画像が確認できるため、眼球の向きが正しいかどうか確認できる点であった。検査の注意点としては、NCTとほとんど変わらないが、空気圧が高く圧縮空気を噴射する際にNCTよりも大きめの音がするので、患者が驚かないように検査前に伝えておくことが大切である。

現在臨床で使用されている眼圧計の測定値は角膜厚や眼球の剛性の影響を受けているため、円錐角膜やLASIK後では低く測定される傾向がある¹²⁾。また、角膜厚が厚い場合は実際の眼圧値よりも高く、角膜厚が薄い場合は実際の眼圧値よりも低く検出される傾向がある^{13)~16)}。CSTは今後ソフトウェアのアップデートにより、角膜厚を補正した眼圧値の測定が可能となるため、より正確な眼圧値が算出されることが期待され、補正後の眼圧値についても今後検討していく必要があると思われる。

参考文献

- 1) Tonnu PA, Ho T, Newson T, El Sheikh A, Sharma K, White E, Bunce C, Garway-Heath D, et al.: The influence of central corneal thickness and age on intraocular pressure measured by pneumotonometry, noncontact tonometry, the Tono-pen XL, and Goldmann applanation tonometry. *Br J Ophthalmol*, 89: 851-854, 2005.
- 2) Moseley MJ, Evans NM, Fielder AR: Comparison of a new non-contact tonometer with Goldmann applanation. *Eye* 3: 332-337, 1989
- 3) Rouhiainen H, Terasvirta M: Incidence of open angle glaucoma and screening of the intraocular pressure with a non-contact

- tonometer. *Acta Ophthalmol (Copenh)* 68: 344-346, 1990
- 4) Maldonado MJ: Corneal epithelial alterations resulting from use of chlorine-disinfected contact tonometer after myopic photorefractive keratectomy. *Ophthalmology* 105: 1546-1549, 1998
- 5) Hong J, Xu J, Wei A, Deng SX, Cui X, Yu X, Sun X. A new tonometer-the Corvis ST tonometer: clinical comparison with noncontact and Goldmann applanation tonometers. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 54: 659-665, 2013
- 6) Smedowski A, Weglarz B, Tarnawska D, Kaarniranta K, Wylegala E. Comparison of three intraocular pressure measurement methods including biomechanical properties of the cornea. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 55: 666-73, 2014
- 7) Reznicek L, Muth D, Kampik A, Neubauer AS, Hirneiss C. Evaluation of a novel Scheimpflug-based non-contact tonometer in healthy subjects and patients with Ocular hypertension and glaucoma. *Br J Ophthalmol* 97: 1410-1414, 2013
- 8) 道本修一郎. 反跳式眼圧計を用いた角膜周辺部における眼圧測定. *新調医学会雑誌* 第123巻第11号: 573-584, 2009
- 9) Kaufman HE. Pressure measurement: which tonometer? *Invest Ophthalmol* 11: 80-85, 1972
- 10) Moses RA. The Goldmann applanation tonometer. *Am J Ophthalmol* 46: 865-869, 1958
- 11) Motolko MA, Feldman F, Hyde M, Hudy D. Sources of variability in the results of applanation tonometry. *Can J Ophthalmol* 17: 93-95, 1982
- 12) Ali NQ, Patel DV, McGhee CN. Biomechanical Responses of Healthy and Keratoconic Corneas Measured Using a Noncontact Scheimpflug-Based Tonometer. *Ophthalmol Vis Sci* 55: 3651-3659, 2014
- 13) Whitacre MM, Stein RA, Hassanein K: The effect of corneal thickness on applanation tonometry. *Am J Ophthalmol* 115: 592-596, 1993
- 14) Johnson M, Kass MA, Moses RA, Grodzki WJ.: Increased corneal thickness simulating elevated intraocular pressure. *Arch Ophthalmol* 96: 664-665, 1978
- 15) Hansen FK: A clinical study of the normal human central corneal thickness. *Acta Ophthalmol (Copenh)* 49: 82-89, 1971
- 16) Bhan A, Browning AC, Shah S, Hamilton R, Dave D, Dua HS.: Effect of corneal thickness on intraocular pressure measurements with the pneumotonometer, Goldmann applanation tonometer, and Tono-pen. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 43: 1389-1392, 2002