

手術によって惹起される角膜乱視変化量の計算方法

大鹿 哲郎¹⁾, 鮫島 智一²⁾, 宮田 典男²⁾¹⁾東京大学医学部附属病院分院眼科, ²⁾宮田眼科病院

要 約

眼手術によって惹起される角膜乱視変化量を計算する3方法4パラメーター (JaffeのX軸成分, Jaffeのベクトル長, Cravyの軸乱視量, Holladayの創方向乱視量)を比較検討した。球面およびトーリック面 (spherocylinder) に様々な角度から手術操作を加えて円柱成分を変化させた場合をシミュレートした結果, Jaffeのベクトル長と Holladayの創方向乱視量の2つのみが, 操作方向に関わらず正しい惹起乱視量を計算した。他の2法は, 操作方向が水平あるいは垂直方向からはずれた場合に, 大きく誤った計算結果となった。操作ベクトルが企図し

た軸からずれた場合のシミュレーションでは, Holladay法の誤差が最も少なかった。白内障手術眼 (5.5 mm 上方切開創群 55 眼, 5.5 mm 上耳側切開創群 35 眼, 3.2 mm 切開創群 40 眼) の術前後データを解析した結果では, Holladayの創方向乱視量のみが, 創口の方向を基準とした直乱視化/倒乱視化を正しく計算した。(日眼会誌 99: 901-909, 1995)

キーワード: 角膜乱視, Jaffe法, Cravy法, Holladay法, 白内障手術

Calculation of Surgically Induced Astigmatism

Tetsuro Oshika¹⁾, Tomokazu Samejima²⁾ and Norio Miyata²⁾¹⁾Division of Ophthalmology, Tokyo University Branch Hospital²⁾Miyata Eye Hospital

Abstract

We compared several mathematical methods for the calculation of surgically induced astigmatism, including Jaffe's horizontal component, Jaffe's vector, Cravy's axis-based cylinder, and Holladay's with-the-wound cylinder. Computer simulation indicated that Jaffe's vector and Holladay's with-the-wound cylinder methods correctly calculate the surgically induced astigmatism regardless of the direction of wounds. The remaining two methods, however, were found to give erroneous values when the wound is constructed off the x-y axis. Holladay's parameter was least affected by the deviation of the surgical axis. When pre-and postsurgical data of

eyes undergoing cataract surgery were analyzed (55 eyes were operated on with a 5.5 mm incision located superiorly, 35 eyes with a 5.5 mm incision located supratemporally, and 40 eyes with a superiorly located 3.2 mm incision), only the Holladay's with-the-wound cylinder method could calculate the actual amount of with-and/or against-the-wound changes. (J Jpn Ophthalmol Soc 99: 901-909, 1995)

Key words: Corneal astigmatism, Jaffe's method, Cravy's method, Holladay's method, Cataract surgery

I 緒 言

眼手術によって惹起される角膜乱視は, 術後の視機能に極めて大きな影響を及ぼす¹⁾。この惹起角膜乱視をコントロール, 予防あるいは予測するためには, まず方法論における前提として, 角膜乱視の変化量を正確に計算する手法が必要である。

眼手術による角膜乱視の変化は, 従来, 様々な手法で検討されてきた。比較的単純なものとしては, ケラトメーターの測定値をそのまま用いる方法^{2)~19)}, 水平方向と垂直方向に測定値を分離して検討する方法^{20)~23)}, 強主経線の方法によって乱視パターンを分類する方法^{23)3)6)24)~47)}, 術後乱視の絶対量によって階層分けする方法^{7)38)48)~55)}などがある。一方, 術前と術後の乱視変化量

別刷請求先: 112 東京都文京区目白台3-28-6 東京大学医学部附属病院分院眼科 大鹿 哲郎

(平成7年1月31日受付, 平成7年3月30日改訂受理)

Reprint requests to: Tetsuro Oshika, M.D. Division of Ophthalmology, Tokyo University Branch Hospital. 3-28-6 Mejirodai, Bunkyo-ku, Tokyo 112, Japan

(Received January 31, 1995 and accepted in revised form March 30, 1995)

(惹起乱視量, induced astigmatism) を求める数学的手法^{56)~64)}を用いたものとして, Jaffe 法によって倍角座標の水平成分 (x 軸成分) を計算する方法^{13)65)~88)}, Jaffe 法によって惹起乱視ベクトルの絶対長を計算する方法^{12)28)31)54)57)89)~102)}, Cravy 法によって軸乱視量を計算するもの^{58)94)101)~115)}, Holladay 法によって創方向乱視量を計算する方法⁶⁰⁾¹¹⁶⁾ (Naylor 法^{56)115)117)~119)}, Retzlaff 法⁶¹⁾, Olsen 法⁶⁴⁾も原理は同一), Naeser 法によって polar value を計算する方法⁵⁹⁾⁶³⁾¹²⁰⁾などがある. このように雑多な方法が混在して用いられてきたのは, 各評価方法の得失や特徴が明らかになっていないこと, 惹起乱視量を正確に計算することの重要性があまり認識されていないこと, また, 各計算方法の本質がよく理解されていないことなどが原因であろう. 実際, 乱視変化の解析法が記載されていない文献も少なくない^{121)~125)}.

本研究では, 代表的な惹起乱視量計算法である Jaffe 法⁵⁷⁾, Cravy 法⁵⁸⁾, Holladay 法⁶⁰⁾につき, 計算値のシミュレーションおよび白内障手術症例での解析を行い, 各々の特徴を比較検討した.

II 対象および方法

1. 惹起角膜乱視量計算法

以下の3法によって計算される4つのパラメータを検討に用いた.

1) Jaffe 法

2枚の円柱レンズを重ね合わせる場合の原則^{126)~128)}に基づき, 術前後の円柱レンズ度数を倍角座標上で2本のベクトルとして表し, その差分ベクトルを求める. 差分ベクトルの水平成分 (Jaffe の x 軸成分: パラメータ 1) と絶対長 (Jaffe のベクトル長: パラメータ 2) を以下のように計算した⁵⁷⁾¹²⁹⁾.

Jaffe の x 軸成分 =

$$K_1 \cos(2 \cdot A_1) - K_2 \cos(2 \cdot A_2) \dots\dots\dots (1)$$

Jaffe のベクトル長 =

$$\sqrt{K_1^2 + K_2^2 - 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cos\{2(A_1 - A_2)\}} \dots\dots\dots (2)$$

ただし, ここで K_1 と A_1 , K_2 と A_2 は, 術前および術後の円柱度数とその強主経線角度である.

2) Cravy 法

極座標上での乱視ベクトルの x 軸成分と y 軸成分を求め, 術前後で x 軸成分同士および y 軸成分同士を比較する⁵⁸⁾¹²⁹⁾. まず, 術前の円柱度数とその強主経線を K_1 と A_1 , 術後を K_2 と A_2 としたとき, $|A_2 - A_1| > 90$ ならば $A_1 = A_1 + 180$ とする. 次に,

$$\Delta x = |K_2 \cos A_2 - K_1 \cos A_1| \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta y = |K_2 \sin A_2 - K_1 \sin A_1| \dots\dots\dots (4)$$

を計算し, $|K_1 \cos A_1| > |K_2 \cos A_2|$ ならば Δx に正の符号を与え, 逆ならば負の符号を与える. 同様に, $|K_1 \sin A_1| < |K_2 \sin A_2|$ なら Δy に正の符号を与え, 逆ならば負の符号を与える. Δx と Δy の合計を Cravy の軸

乱視量 (パラメータ 3) とした.

3) Holladay 法

2面のトーリック面 (spherocylinder, 球面レンズと円柱レンズの合成面) の差を求める方法である. 原法⁶⁰⁾¹²⁹⁾を整理した以下の計算式を用いた. 術前の球面度数, 円柱度数, 強主経線角度を S_1, C_1, A_1 , 術後それぞれ S_2, C_2, A_2 , 両者の差に相当するトーリック面を S_3, C_3, A_3 とすると,

$$A_3 = \frac{1}{2} \arctan \frac{C_2 \sin(2 \cdot A_2) - C_1 \sin(2 \cdot A_1)}{C_2 \cos(2 \cdot A_2) - C_1 \cos(2 \cdot A_1)} \quad (5)$$

$$C_3 = K_2 \cos\{2(A_2 - A_3)\} - K_1 \cos\{2(A_1 - A_3)\} \dots\dots\dots (6)$$

$$S_3 = S_2 - S_1 - (C_1 + C_3 - C_2) / 2 \dots\dots\dots (7)$$

となる. ただし, $A_3 < 0$ の場合, $A_3 = A_3 + 180$ とする. これらの値から, Holladay の創方向乱視量 (パラメータ 4) を以下のように計算した⁶⁰⁾¹²⁹⁾.

Holladay の創方向乱視量 =

$$S_3 + C_3 \{\cos(A_3 - \theta)\}^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで θ は, 手術操作が作用した方向 (白内障手術なら切開創の方向) である.

2. シミュレーションによる各計算法の評価

1) 球面からの変化

全く乱視がない術前角膜に対し, 球面度数は変化させず, α° 方向に 1 ジオプトリー (D) のスティーブ化を生じさせる手術操作を行ったと想定した. $\alpha + 90^\circ$ 方向には -1 D の変化が生じるはずなので (球面度数が変化しないことから), 術後は α° を強主経線とした 2 D の乱視が生じることになる. $0 \leq \alpha \leq 360$ の範囲で, 上記の 4 パラメータの計算値をシミュレートした.

2) トーリック面からの変化

強主経線 45° 方向に 1 D の乱視を持つトーリック面 (①) に対し, α° 方向に 1 D のスティーブ化を, $\alpha + 90^\circ$ 方向に 1 D のフラット化を生じさせる手術操作 (②) を行ったと想定した. 術後のトーリック面の dimension は, 面① {球面成分 ψ D, 円柱成分 1 D, 強主経線 45° } と面② {球面成分 0 D, 円柱成分 2 D, 強主経線 α° } を合成させる方法で求めた⁵⁶⁾⁶¹⁾. $0 \leq \alpha \leq 360$ の範囲で, 上記の 4 パラメータの計算値をシミュレートした.

3) 軸ずれによる誤差

90° 方向を中心にして直乱視量/倒乱視量を求める 2 法 (Jaffe の x 軸成分, Cravy の軸乱視量) と, Holladay の創方向乱視量で $\theta = 90$ と固定した場合につき, 実際の手術操作が 90° 方向から α° ずれた場合の計算誤差を求めた. 例えば, 白内障切開創が 12 時方向から意図せずずれた場合や, 12 時方向にあっても閉鎖力や弛緩力が創口の中央部にかかっていない場合などである. 術前の状態および手術操作による変化量は, 上記 1) の場合と同様と想定した. $-45 \leq \alpha \leq 45$ の範囲で, 上記の 3 パラメータを計算した.

3. 白内障術後乱視変化量の検討

術前および術中合併症がなく、術後 6 カ月まで観察が可能であった白内障眼 130 眼を対象とした。手術方法は以下の 3 通りである。

A 群：5.5 mm 上方切開創群 (55 眼)。12 時中心に輪部から約 2.5 mm の強膜上に 5.5 mm 切開創をおき、超音波水晶体乳化吸引術を施行。光学部径 5.5 mm の polymethylmethacrylate (PMMA) 眼内レンズを囊内に挿入した。

B 群：5.5 mm 上耳側切開創群 (35 眼)。右眼では 10 時半を中心に、左眼では 1 時半を中心に 5.5 mm 切開創をおき、A 群と同様の手技で手術を行った。

C 群：3.2 mm 切開創群 (40 眼)。12 時中心に輪部から約 2.5 mm の強膜上に 3.2 mm 切開創をおき、超音波水晶体乳化吸引術を施行。光学部径 6.0 mm のシリコン眼内レンズを囊内に挿入した。

3 群とも強膜止血を行い、創口の閉鎖は原則として自己閉鎖創とした^{130)~133)}。各群の平均年齢は 69.7 歳, 71.7 歳, 71.1 歳, 術前の角膜正乱視量は 0.72 ± 0.50 D (平均値 \pm 標準偏差), 0.88 ± 0.60 D, 0.79 ± 0.48 D で、群間に差はなかった。

各群とも術前および術後 1 週, 1 か月, 3 か月, 6 か月の時点でケラトメータの測定を行った。1 ポイントでもデータが欠落した症例は脱落とみなし、解析対象から除外している。各群、各測定点において、Jaffe の x 軸成分, Jaffe のベクトル長, Cravy の軸乱視量, Holladay の創方向乱視量を計算した。Holladay の創方向乱視量の計算では、A 群と C 群では $\alpha = 90$, B 群では右眼の場合 $\alpha = 135$, 左眼の場合 $\alpha = 45$ とした。

III 結 果

1. シミュレーションによる各計算法の評価

1) 球面からの変化

いずれの計算方法でも、手術操作方向が 90° および 270° の場合には惹起乱視量を 2 D と正しく計算した (図 1)。Jaffe のベクトル長と Holladay の創方向乱視量は、 α の値に関わらず常に正しい値となった。一方、Jaffe の x 軸成分と Cravy の軸乱視量は、手術操作方向が 90° あるいは 270° からはずれずに従い、計算値も 2 D から大きくずれていった。ただし、 $\alpha = 0, 180, 360$ の場合に -2 D となっているが、これは 2 D の倒乱視化という意味で正しい計算値である。

2) トーリック面からの変化

Jaffe のベクトル長と Holladay の創方向乱視量は、 α の値に関わらず正しい計算値となった (図 2)。他の 2 法では、手術操作方向が水平あるいは垂直方向からはずれなかった場合に不正確な計算結果を示した。Cravy の軸乱視量は、 135° と 315° を境に、直乱視から倒乱視へと急激に変化した。Jaffe の x 軸成分と Cravy の軸乱視量を比べる

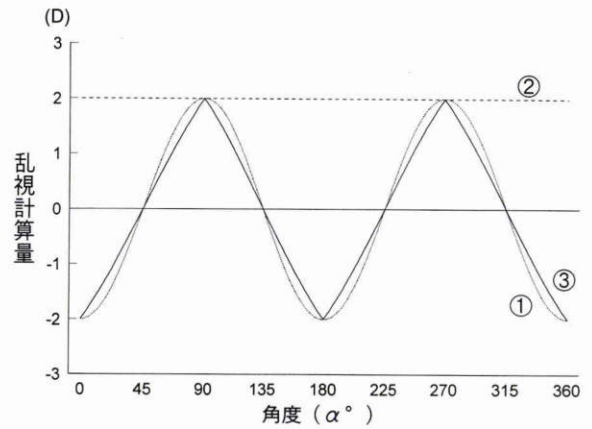


図 1 球面に対して手術操作を行った場合のシミュレーション。

乱視のない球面に対し、 α° 方向に 1 D のスティープ化、 $\alpha + 90^\circ$ 方向に 1 D のフラット化が生じる手術操作を行った場合を想定した。

① 細かい点線：Jaffe の x 軸成分, ② 粗い点線：Jaffe のベクトル長および Holladay の創方向乱視量, ③ 実線：Cravy の軸乱視量。

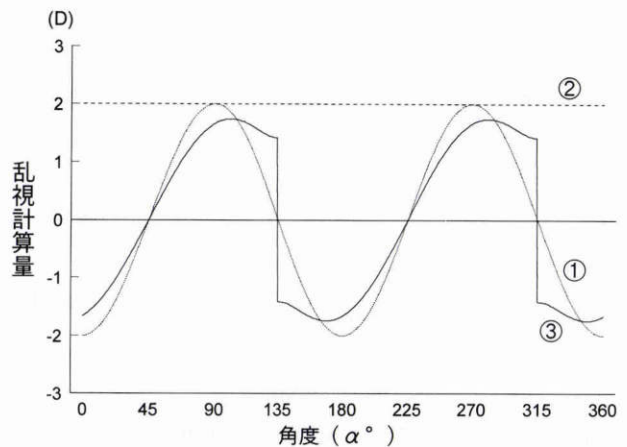


図 2 Spherocylinder に対して手術操作を行った場合のシミュレーション。

45° を強主経線として 1 D の乱視を持つ spherocylinder に対し、 α° 方向に 1 D のスティープ化、 $\alpha + 90^\circ$ 方向に 1 D のフラット化が生じる手術操作を行った場合を想定した。

① 細かい点線：Jaffe の x 軸成分, ② 粗い点線：Jaffe のベクトル長および Holladay の創方向乱視量, ③ 実線：Cravy の軸乱視量。

と、 $105 \leq \alpha \leq 165$ と $285 \leq \alpha \leq 345$ で Cravy の軸乱視量の方が ± 2 D に近い値となり、それ以外で Jaffe の x 軸成分の方が ± 2 D に近い値となった。

3) 軸ずれによる誤差

手術操作の中心が 90° 方向から $\pm \alpha^\circ$ ずれた場合、Jaffe の x 軸成分, Cravy の軸乱視量, Holladay の創方向乱視量 ($\theta = 90$ で固定した場合) は、いずれも惹起乱視計算量を過小評価した (図 3)。過小評価の量は、手術操作方向のずれが大きくなるほど増大した。3 法の中では、Hol-

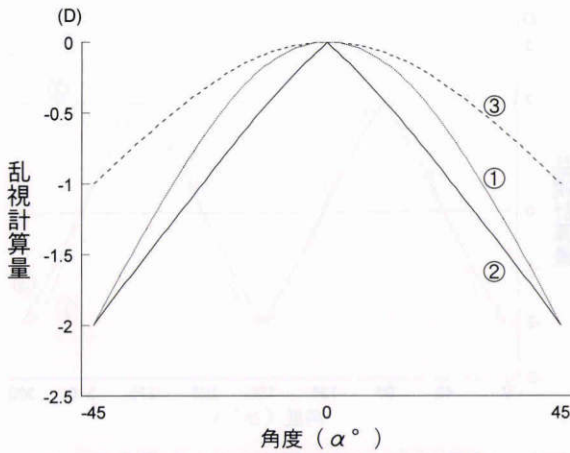


図3 手術操作の軸ずれによる計算誤差。

90°方向を企図して行った手術操作の方向が α° ずれた場合の誤差を、シミュレーションした。

①細かい点線：Jaffeのx軸成分，②実線：Cravyの軸乱視量，③粗い点線：Holladayの創方向乱視量($\theta=90$ と固定した場合)。

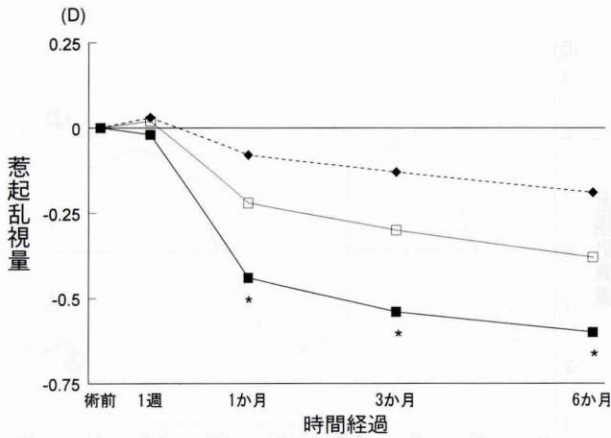


図4 白内障手術前後の乱視変化—Jaffeのx軸成分。菱型：3.2 mm 切開創群，白四角：5.5 mm 上耳側切開創群，黒四角：5.5 mm 上方切開創群。*：一元配置分散分析で有意差があり ($p<0.01$)，かつ Bonferroni 多重比較ですべての群間に有意差あり ($p<0.01$)。

laday 法の誤差が最も小さかった。

2. 白内障術後乱視変化量の検討

Jaffeのx軸成分(図4)とCravyの軸乱視量(図5)では、3.2 mm 切開創群の変化量が最小、5.5 mm 上方切開創群の変化量が最大で、5.5 mm 上耳側切開創群がその中間の値となった。それぞれ術後1か月以降の時点において、すべての群間に有意差がみられた ($p<0.01$ ，一元配置分散分析および Bonferroni 多重比較)。

Jaffeのベクトル長(図6)では、術後全期間において一元配置分散分析で有意差がみられたものの ($p<0.01$)、5.5 mm 上方切開創群と5.5 mm 上耳側切開創群の間には統計的な差はなかった ($p<0.05$ ，Bonferroni 多重比較)。

Holladayの創方向乱視量では、5.5 mm 上方切開創群

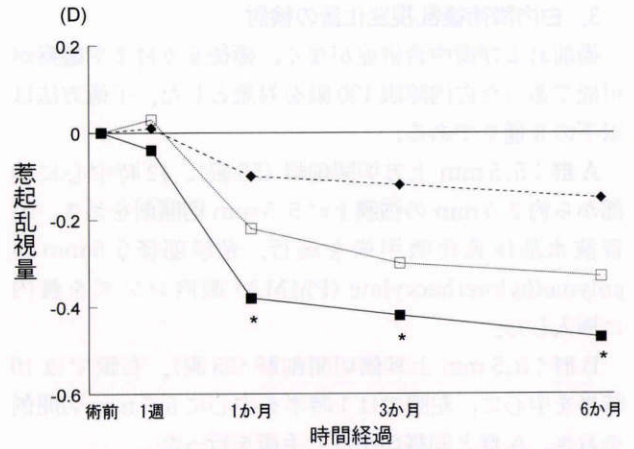


図5 白内障手術前後の乱視変化—Cravyの軸乱視量。

菱型：3.2 mm 切開創群，白四角：5.5 mm 上耳側切開創群，黒四角：5.5 mm 上方切開創群。*：一元配置分散分析で有意差があり ($p<0.01$)，かつ Bonferroni 多重比較ですべての群間に有意差あり ($p<0.01$)。

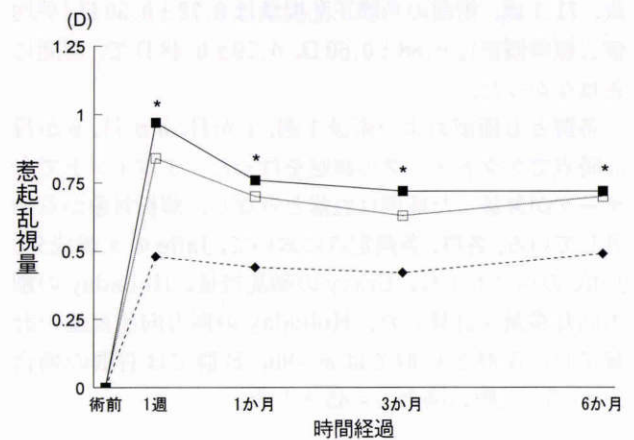


図6 白内障手術前後の乱視変化—Jaffeのベクトル長。

黒四角：5.5 mm 上方切開創群，白四角：5.5 mm 上耳側切開創群，菱型：3.2 mm 切開創群。*：一元配置分散分析で有意差があり ($p<0.01$)，かつ Bonferroni 多重比較で3.2 mm 切開創群と5.5 mm 上方切開創群，3.2 mm 切開創群と5.5 上耳側切開創群の間に有意差あり ($p<0.01$)。

と5.5 mm 上耳側切開創群との間に差は全くなく(図7)，3.2 mm 切開創群と5.5 mm 切開創の各群の間に、術後3か月，6か月で差がみられた ($p<0.01$ ，Bonferroni 多重比較)。

IV 考 按

球面およびトーリック面(spherocylinder)に様々な角度から手術操作を加えた場合をシミュレートした結果では、Jaffeのベクトル長とHolladayの創方向乱視量の2つのパラメーターが、操作方向に関わらず正しい惹起乱視量を計算した(図1, 2)。ただし、Jaffeのベクトル長は常に正の値をとるスカラー量であり(図6)、手術操作

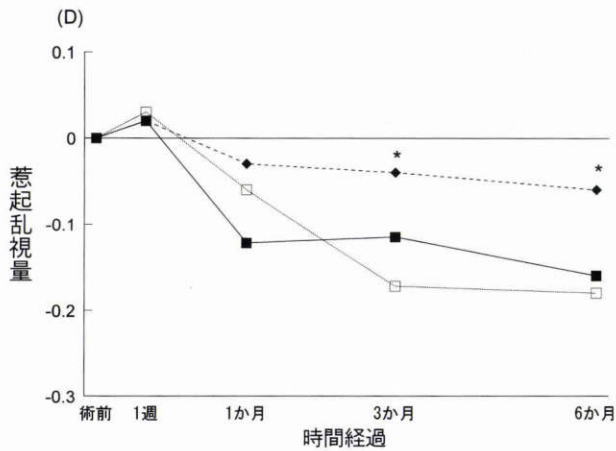


図7 白内障手術前後の乱視変化—Holladayの創方向乱視量。

菱型：3.2 mm 切開創群，黒四角：5.5 mm 上方切開創群，白四角：5.5 mm 上耳側切開創群。*：一元配置分散分析で有意差があり ($p < 0.01$)，かつ Bonferroni 多重比較で 3.2 mm 切開創群と 5.5 mm 上方切開創群，3.2 mm 切開創群と 5.5 mm 上耳側切開創群の間に有意差あり ($p < 0.01$)。

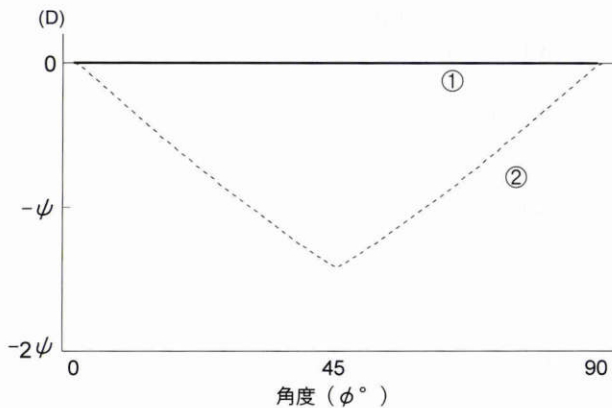


図8 術前 $\psi D \times \phi^\circ$ で術後 $\psi D \times 180 - \phi^\circ$ の場合の計算値。

① 実線：Jaffe の x 軸成分，② 点線：Cravy の軸乱視量。Jaffe の x 軸成分は，計算値が 0 D となっている。

がスティーブ化を誘発するものであってもフラット化を誘発するものであっても，それを区別することができないという点には注意する必要がある。すなわち，手術操作の方向に関わらず，常に直乱視化/倒乱視化（あるいは with-the-wound 変化と against-the-wound 変化⁶⁰⁾ を正しく計算できるのは，現時点で Holladay の創方向乱視量だけということになる。

Jaffe の x 軸成分と Cravy の軸乱視量の二者は，手術操作が水平方向あるいは垂直方向からはずれた場合に全く無意味な値となった (図 1, 2)。近年，白内障手術における新しい切開法として，斜め方向に創口を作製する方法が提唱されている³⁷⁾⁷⁶⁾⁷⁸⁾⁸⁰⁾⁹⁸⁾，この切開法を評価する際に Jaffe の x 軸成分や Cravy の軸乱視量を用い

るのは誤りである。図 1 から明らかなように，これらのパラメータは手術操作方向が斜め ($\alpha = 45, 135, 225, 315$) の場合に，惹起乱視量を全く検出できないからである。手術操作の方向が水平あるいは垂直方向でない場合は，Holladay の創方向乱視量を用いなければ，乱視変化を正しく把握することはできない。このことは，今回行った白内障手術症例での検討でも示された。すなわち，5.5 mm の上方切開創群と上耳側切開創群を比較した場合，Holladay の創方向乱視量と Jaffe のベクトル長では両群に差がなく，つまり，with-the-wound 変化は両術式で同様に生じていることが示されたが (図 6, 7)，Jaffe の x 軸成分と Cravy の軸乱視量では 12 時方向からみた変化量を計算するために誤った差を検出している (図 4, 5)。上方切開と外上方切開をベクトル解析で比較した福山ら⁹⁸⁾は，乱視軸に関係なく純粋に手術によって作られた乱視量は切開創の方向に関わらず同じであると述べているが，今回の我々の結果も彼らの結論と一致するものである。

手術操作が正しく水平方向あるいは垂直方向に行われていれば，Jaffe 法も Cravy 法もおおむね正しい計算結果を導く (図 2)。ただし，注意が必要なのは，手術操作を正しく 90° 方向あるいは 180° 方向におくことがいつも可能とは限らないということである。例えば，白内障の創口は術者の利き手の方向に傾きやすい。また，創口に対する閉鎖力や弛緩力は，いつもの創口の中央部にかかるとは限らない。これらの状況をシミュレートした結果 (図 3)，Jaffe の x 軸成分と Cravy の軸乱視量は，軸ずれに対して大きな誤差を生じることが示された。これに対し，Holladay の創方向乱視量で $\theta = 90$ に固定した場合は，誤差の程度が比較的小さかった。生体眼に手術を行い，その生体反応 (乱視変化) を計測するという，極めて誤差の混入しやすい状況を考えた場合，Holladay 法のこの特性は決してマイナスにはならないと思われる。

今回検討した計算方法のうち，Holladay 法以外は，球面度数の変化を無視し，円柱成分ベクトルのみを計算の対象としている⁵⁷⁾⁵⁸⁾。この点は，術前後の球面度数が変化するような状況 (coupling ratio が -1 でない場合¹⁾³³⁾⁶⁰⁾¹²⁹⁾ において問題となる可能性がある。例えば，乱視矯正角膜切開術やエキシマレーザーによる屈折矯正手術などの場合には，球面度数変化と円柱度数変化の両者を考慮した評価法が必要になると考えられるが，Jaffe 法や Cravy 法ではこの要請に応えられない。また，この問題とは別に，手術操作の方向が固定されていない屈折矯正手術においては，操作方向に依存しない解析結果を与える Holladay 法が最も応用価値が高いのではないと思われる。

上記した以外に，Jaffe の x 軸成分法の重大な欠点は，術前の円柱成分ベクトルと術後の円柱成分ベクトルの方向が大きく違っていても，手術による変化量を 0 D と計

算してしまうケースがあるということである。最も端的な例は、術前 $\psi D \times 30^\circ$ 、術後 $\psi D \times 150^\circ$ のように、術前後の円柱成分ベクトルが y 軸を挟んで左右対称な場合である。これは、術前の強主経線角度が ϕ° 、術後の強主経線角度が $180-\phi^\circ$ の場合に、倍角座標上では x 軸を挟んで上下対称となる ($2\phi^\circ$ と $360-2\phi^\circ$) ためである。このような場合には、倍角座標上での水平成分の変化だけに注目する方法では、差が全く検出されない (図 8)。より一般的には、術前 $K_1 \cos 2A_1 =$ 術後 $K_2 \cos 2A_2$ の場合に、Jaffe の x 軸成分の計算値は 0 D となる。近似例として、術前 $+2.0 D \times 30^\circ$ 、術後 $+1.25 D \times 162^\circ$ の場合を挙げる。

これまで惹起乱視量の解析には、本邦では Jaffe の x 軸成分が好んで使われ^{13)65)~88)}、欧米では Jaffe のベクトル長^{12)28)31)54)57)89)~102)}や Cravy の軸乱視量^{58)94)101)~115)}が多く用いられるという傾向にあった。特に、Jaffe の x 軸成分 (倍角座標の水平成分) は、原法では独立したパラメータとして扱われておらず⁵⁷⁾、欧米ではいっさい用いられていないにもかかわらず、我が国でのみ盛んに利用されるという奇妙な指標であった^{13)65)~88)}。これは、同指標の計算が簡単であるということ、また、Cravy 法計算用のコンピューターソフトが欧米では利用可能であったという理由によるものかも知れない。しかし、パーソナルコンピューターが広く普及した今日、計算方法の簡便さ/難しさに左右されることなく、状況に応じて正しい解析方法を用いる姿勢が求められよう。また同時に、各計算方法の背景や理論、あるいは利点や欠点のある程度把握しておくことも必要と思われる。

文 献

- Swinger CA: Postoperative astigmatism. *Surv Ophthalmol* 31: 219-248, 1987.
- Singh D, Kumar K: Keratometric changes after cataract extraction. *Br J Ophthalmol* 60: 638-641, 1976.
- Luntz MH, Livingston DG: Astigmatism in cataract surgery. *Br J Ophthalmol* 61: 360-365, 1977.
- Moore JG: Incidence of astigmatism after cataract surgery. *Trans Ophthalmol Soc UK* 97: 104-105, 1977.
- 加藤桂一郎: Polyglycolic acid (PGA, Dexon 7-0) 縫合糸の検討. *眼紀* 29: 895-900, 1978.
- Thygesen J, Reersted P, Fledelius H, Corydon L: Corneal astigmatism after cataract extraction. *Acta Ophthalmol* 57: 243-251, 1979.
- 山岸和矢, 永田 誠: 眼内レンズ挿入術後の乱視と角膜形状について. *眼紀* 34: 991-995, 1983.
- Heslin KB, Guerriero PN: Clinical retrospective study comparing planned extracapsular cataract extraction and phakoemulsification with and without lens implantation. *Ann Ophthalmol* 16: 956-962, 1984.
- 井村尚樹, 菅 謙治, 横尾夏代, 吉田浩司, 大西雅憲, 西垣昌人: 後房レンズ挿入眼の術後角膜乱視. *眼臨* 80: 2180-2185, 1986.
- 切通 彰, 大路正人, 木下 茂: 手術における角膜形状の変化. 第 1 報. 白内障手術. *眼紀* 37: 1248-1251, 1986.
- Koch DD, Del Pero RA, Wong TC, McCulloch RR, Weaver TA: Scleral flap surgery for modification of corneal astigmatism. *Am J Ophthalmol* 104: 259-264, 1987.
- Kronish JW, Forster RK: Control of corneal astigmatism following cataract extraction by selective suture cutting. *Arch Ophthalmol* 105: 1650-1655, 1987.
- 鈴木員章, 溝上國義, 山本 節, 石井好子, 金谷いく子: 術後角膜乱視の推移. 一各種切開別の検討一. *眼臨* 82: 2252-2256, 1988.
- 湯浅久美, 三好輝行: 白内障術後乱視の経時的変化. *眼紀* 39: 1781-1785, 1988.
- 吉田紳一郎, 小原喜隆, 川崎真木生, 波紫秀厚: 白内障手術の術式による術後成績の比較. *眼紀* 41: 315-319, 1990.
- Kershner RM: Sutureless one-handed intercapsular phacoemulsification. The keyhole technique. *J Cataract Refract Surg* 17: 719-725, 1991.
- Kondrot EC: Keratometric cylinder and visual recovery following phacoemulsification and intraocular lens implantation using a self-sealing cataract incision. *J Cataract Refract Surg* 17: 731-733, 1991.
- 白井正彦, 小林有紀: 小切開白内障手術における術後乱視. *眼臨* 86: 2399-2403, 1992.
- Allan BDS, Barrett GD: Combined small incision phacoemulsification and trabeculectomy. *J Cataract Refract Surg* 19: 97-102, 1993.
- Reading VM: Astigmatism following cataract surgery. *Br J Ophthalmol* 68: 97-104, 1984.
- van Rij G, Waring GO III: Changes in corneal curvature induced by sutures and incisions. *Am J Ophthalmol* 98: 773-783, 1984.
- 本田 治, 本田 実, 小川奈保子, 石郷岡均, 上野聡樹: 手術用オートケラトメーターにより、術後の角膜乱視を制御する試み. *眼臨* 82: 2257-2260, 1988.
- Hugkulstone CE: Changes in keratometry following trabeculectomy. *Br J Ophthalmol* 75: 217-218, 1991.
- Beasley H: Keratometric changes after cataract surgery. *Trans Am Ophthalmol Soc* 65: 168-179, 1967.
- 戸張幾生, 渋谷英美, 阿曾須己子, 増田春夫: 8-0 絹糸 5 針前置縫合と、10-0 ナイロン連続縫合による白内障手術の術後角膜乱視について. *眼紀* 26: 95-100, 1975.
- 難波克彦, 戸張幾生, 佐藤 渡, 増田春夫: 白内障術後の角膜乱視. その 2. 術前の角膜乱視との関係. *眼紀* 28: 1481-1486, 1977.
- 難波克彦, 戸張幾生, 佐藤 渡, 増田春夫: 白内障術後の角膜乱視 (その 3). *眼紀* 29: 901-905, 1978.

- 28) 難波克彦, 戸張幾生, 佐藤 渡, 増田春夫: 白内障術後の角膜乱視(その4)年齢との関係. 眼紀 30: 1979—1982, 1979.
- 29) Meredith TA, Maumenee AE: A review of one thousand cases of intracapsular cataract extraction: II. Visual results and astigmatic analysis. Ophthalmic Surg 10 (12): 42—45, 1979.
- 30) 中村啓子, 宮田典男, 中村ヤス子, 丸山節男: 白内障術後の角膜乱視について. 第1報. 切開の大きさ(3mm, 160度)と縫合糸(非吸収性, 吸収性)について. 臨眼 35: 787—797, 1981.
- 31) 川田博文, 加藤桂一郎, 酒井正典, 阪内圭子, 山野智敬, 山内 健, 他: 白内障術後の角膜乱視の追跡調査. 眼紀 36: 1919—1922, 1985.
- 32) Axt JC: Longitudinal study of postoperative astigmatism. J Cataract Refract Surg 13: 381—388, 1987.
- 33) Brown NAP, Aparrow JM: Control of astigmatism in cataract surgery. Br J Ophthalmol 72: 487—493, 1988.
- 34) 濱田 潤: 異なる術者による IOL 術後角膜乱視変化について. 1. バーজনシルクを用いた場合. あたらしい眼科 5: 1347—1349, 1988.
- 35) 稲垣有司, 田中 稔, 太田俊彦, 黒川真理, 中川正昭: 白内障術後の角膜乱視について. 臨眼 44: 520—521, 1990.
- 36) 鈴木 亮, 田中一成, 藤原紀男, 栗本晋二: 白内障手術における術前倒乱視の転帰. 臨眼 44: 1987—1990, 1990.
- 37) 鈴木 亮, 田中一成, 杉原いつ子, 藤原紀男, 栗本晋二: 超音波乳化吸引術と囊外摘出術の比較. —とくに術前倒乱視の度数(その1)—. 眼紀 41: 1978—1981, 1990.
- 38) 猪野健二郎, 樋口眞琴, 山本登紀子, 大塚秀勇: 眼内レンズ移植後の角膜乱視の検討. 眼紀 42: 1524—1526, 1991.
- 39) 藤原紀男, 鈴木 亮, 杉原いつ子, 田中一成, 栗本晋二: 超音波乳化吸引術による術後角膜倒乱視例の解析(その2). 臨眼 45: 1221—1223, 1991.
- 40) 鈴木 亮, 杉原いつ子, 田中一成, 藤原紀男, 栗本晋二: 超音波乳化吸引術による術後角膜倒乱視例の解析. —その3—. 眼紀 42: 1718—1721, 1991.
- 41) 小川徹郎, 斉木貴美, 谷口有子, 中村利衣: 眼内レンズの移植術後の角膜乱視. 眼臨 85: 766—770, 1991.
- 42) Suzuki R, Kurimoto S: Similarities and differences between the Kelman phacoemulsification and extracapsular cataract extraction procedures in the spontaneous regression of corneal astigmatism from against-the-rule astigmatism. Ophthalmic Res 24: 134—141, 1992.
- 43) Gimbel HV, Sun R: Postoperative astigmatism following phacoemulsification with sutured vs. unsutured wounds. Can J Ophthalmol 28: 259—262, 1993.
- 44) Lemagne JM, Kallay O: Astigmatism after a large scleral pocket incision in extracapsular cataract extraction. J Cataract Refract Surg 19: 613—615, 1993.
- 45) Stanford MR, Fenech T, Hunter PA: Timing of removal of sutures in control of post-operative astigmatism. Eye 7: 143—147, 1993.
- 46) 杉田美由紀, 中村 聡, 熊谷直樹, 磯部和美: 計画的な水晶体囊外摘出・眼内レンズ挿入術後における角膜乱視の変化. 眼科手術 6: 119—122, 1993.
- 47) 高橋雅彦, 榊田英郎: 初心者の方の計画的白内障摘出術の手術成績. —他覚的乱視の変化について—. 眼科 35: 689—694, 1993.
- 48) Iliff CE, Khodadoust A: The control of astigmatism in cataract surgery. Trans Am Ophthalmol Soc 65: 160—167, 1967.
- 49) Cory CC: Prevention and treatment of postimplantation astigmatism. J Cataract Refract Surg 15: 58—60, 1989.
- 50) Brint SF, Ostrick DM, Bryan JE: Keratometric cylinders and visual performance following phacoemulsification and implantation with silicone small-incision or poly (methyl methacrylate) intraocular lenses. J Cataract Refract Surg 17: 32—36, 1991.
- 51) Watson A, Sunderraj P: Comparison of small-incision phacoemulsification with standard extracapsular cataract surgery: Postoperative astigmatism and visual recovery. Eye 6: 626—629, 1992.
- 52) Davison JA: Keratometric comparison of 4.0 mm and 5.5 mm scleral tunnel cataract incisions. J Cataract Refract Surg 19: 3—8, 1993.
- 53) Axt JC, McCaffery JM: Reduction of postoperative against-the-rule astigmatism by lateral incision technique. J Cataract Refract Surg 19: 380—386, 1993.
- 54) Leen MM, Ho CC, Yanoff M: Association between surgically-induced astigmatism and cataract incision size in the early postoperative period. Ophthalmic Surg 24: 586—592, 1993.
- 55) 山本領子, 竹山知永子, 岸本直子, 志水一夫, 宮谷寿史, 山岸和矢: 超音波白内障手術の導入とその術後成績. 眼臨 87: 1450—1454, 1993.
- 56) Naylor EJ: Astigmatic difference in refractive errors. Br J Ophthalmol 52: 422—425, 1968.
- 57) Jaffe NS, Clayman HM: The pathophysiology of corneal astigmatism after cataract extraction. Trans Am Acad Ophthalmol Otolaryngol 79: 615—630, 1975.
- 58) Cravy TV: Calculation of the change in corneal astigmatism following cataract extraction. Ophthalmic Surg 10: 38—49, 1979.
- 59) Naeser K: Conversion of keratometer readings to polar values. J Cataract Refract Surg 16: 741—745, 1990.
- 60) Holladay JT, Cravy TV, Kock DD: Calculating the surgically induced changes following ocular surgery. J Cataract Refract Surg 18: 429—443, 1992.
- 61) Retzlaff J, Paden PY, Ferrell L: Vector analysis of astigmatism. Adding and subtracting spherocylinders. J Cataract Refract Surg 19: 393—398, 1993.

- 62) **Alpins NA**: A new method of analyzing vectors for changes in astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 19: 524-533, 1993.
- 63) **Naeser K, Behrens JK, Naeser EV**: Quantitative assessment of corneal astigmatic surgery: Expanding the polarvalues concept. *J Cataract Refract Surg* 20: 162-168, 1994.
- 64) **Olsen T, Dam-Johansen M**: Evaluating surgically induced astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 20: 517-522, 1994.
- 65) **佐藤 孜, 杉田孝子**: 白内障術後の角膜乱視変化について, 8-0 デキソンおよびナイロン使用. *臨眼* 35: 1497-1502, 1981.
- 66) **宮田典男**: 眼内レンズ移植時における角膜乱視のコントロール. *あたらしい眼科* 3: 35-42, 1986.
- 67) **平山義章, 秋山和人, 松園哲行, 本多繁昭, 迎 亮二**: 後房レンズ移植眼の早期術後角膜乱視. *眼紀* 38: 1865-1870, 1987.
- 68) **石黒真美, 川島幸夫, 田淵昭雄, 千羽 一, 宮田典男**: 眼内レンズ移植術後の角膜乱視の経過. 一自然経過と異常経過一. *眼紀* 40: 2896-2899, 1989.
- 69) **宮島弘子, 安藤靖恭, 宮田 博, 木村啓二郎**: 強角膜cauterizationの角膜乱視へ及ぼす影響. *眼臨* 83: 2319-2320, 1989.
- 70) **宮田和典, 清水公也**: 偽水晶体眼における術後乱視—その予防と矯正. *眼科手術* 2: 193-205, 1989.
- 71) **宮田和典, 田中俊一, 小松真理, 清水公也**: 眼内レンズ移植術後の角膜乱視の検討. 強角膜切開創の大きさと術後乱視. *臨眼* 43: 459-463, 1989.
- 72) **川野晃嗣, 上村昭典**: 6.5 mm 上耳側切開と上方切開の早期術後乱視の比較. *IOL* 4: 221-227, 1990.
- 73) **衣川康弘, 菅 謙治**: 白内障術後乱視: 8-0 パージンシルク端々縫合による成績. *眼科手術* 4: 106-110, 1991.
- 74) **甘利富士夫, 太田浩一, 田中紀子, 裏川佳夫, 戸塚清一**: 白内障術後乱視の検討—術前角膜乱視との関係について. *眼科手術* 4: 471-475, 1991.
- 75) **岡 知巳, 川島幸夫, 正城良樹, 市橋宏亮, 田淵昭雄**: 10-0 Polyester (Mersilene®) 使用による術後角膜乱視. *眼紀* 42: 1527-1532, 1991.
- 76) **川野晃嗣, 上村昭典**: 白内障術後乱視を軽減するための新しい切開法. —バント切開の成績について—. *IOL* 6: 75-82, 1992.
- 77) **中木直美, 横山 連, 加茂雅朗**: 白内障術後の角膜乱視について—縫合糸の比較. *眼紀* 43: 68-72, 1992.
- 78) **Kawano K**: Modified corneoscleral incision to reduce postoperative astigmatism after 6 mm diameter intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg* 19: 387-392, 1993.
- 79) **甘利富士夫, 安藤文隆, 甘利秀美, 太田浩一, 窪田俊樹**: 6.0 mm 切開自己閉鎖創と水平縫合白内障手術の比較. *眼紀* 44: 268-271, 1993.
- 80) **飽浦淳介, 八田史郎**: 術後乱視変動の少ない 8.5 mm ブリッジ切開 ECCE. *眼紀* 44: 272-279, 1993.
- 81) **飽浦淳介, 八田史郎**: 術前倒乱視を軽減させるための側方自己閉鎖創 ECCE. *眼紀* 44: 1513-1517, 1993.
- 82) **中西徳昌, 江口秀一郎, 大鹿哲郎, 荻野公嗣, 三島宣彦**: 自己閉鎖創白内障手術術後長期成績. *臨眼* 47: 464-465, 1993.
- 83) **中神哲司, 矢田清身, 渡瀬誠良**: 切開と縫合の違いによる白内障術後乱視の比較. *臨眼* 47: 689-682, 1993.
- 84) **戸田裕隆, 高橋扶左乃, 原田隆文, 安淵幸雄**: 4 mm ラジアル切開白内障手術の評価. *臨眼* 47: 796-797, 1993.
- 85) **竹本喜也, 井上達郎, 小岸淳一, 市岡 博**: 術後乱視からみた PEA における術創の検討. *IOL* 7: 274-279, 1993.
- 86) **大西健夫, 小池 昇, 浅野 徹, 小出良平, 深道義尚**: 白内障術後24時間における瞳孔径・眼圧・角膜乱視の経時的変化. *あたらしい眼科* 10: 835-839, 1993.
- 87) **宮田和典**: 自己閉鎖創白内障手術によるコントロール. *あたらしい眼科* 11: 363-369, 1994.
- 88) **清川達矢, 小林定男, 山本 節**: 各種白内障手術術式の角膜乱視による比較. *眼紀* 45: 498-502, 1994.
- 89) **Perl T, Binder PS, Earl K**: Post-cataract astigmatism with and without the use of the Terry keratometer. *Ophthalmology* 91: 489-493, 1984.
- 90) **Bambery SJ**: Reduction of astigmatism following cataract surgery. *Trans Ophthalmol Soc UK* 105: 647-649, 1986.
- 91) **Wishart MS, Wishart PK, Gregor ZJ**: Corneal astigmatism following cataract extraction. *Br J Ophthalmol* 70: 825-830, 1986.
- 92) **Flaharty PM, Siepser SB**: Surgically induced astigmatism in human cadaver eyes. *J Cataract Refract Surg* 15: 19-24, 1989.
- 93) **池澤暁子, 宮田和典, 田中俊一, 小松真理, 清水公也**: 4 mm 切開眼内レンズ移植の術後早期乱視. *臨眼* 43: 489-492, 1989.
- 94) **Steinert RF, Brint SF, White SM, Fine IH**: Astigmatism after small incision cataract surgery. A prospective, randomized, multicenter comparison of 4- and 6.5-mm incisions. *Ophthalmology* 98: 417-424, 1991.
- 95) **Singer JA**: Frown incision for minimizing induced astigmatism after small incision cataract surgery with rigid optic intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg* 17: 677-688, 1991.
- 96) **Grabow HB**: Early results of 500 cases of a no-stitch cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 17: 726-730, 1991.
- 97) **Buzard KA, Shearing SP**: Comparison of postoperative astigmatism with incisions of varying length closed with horizontal sutures and with nosutures. *J Cataract Refract Surg* 17: 734-739, 1991.
- 98) **福山 誠, 諸岡居織, 吉富文昭**: 無縫合白内障手術後の乱視変化: 12時切開と BENT 切開との比較. *眼科手術* 5: 657-661, 1992.
- 99) **Choplin NT, Monroe JF**: Surgically-induced astigmatism in combined ECCE with filtering procedures compared to ECCE alone. *Ophthalmic Surg* 23: 81-84, 1992.
- 100) **Dam-Johansen M, Olsen T**: Refractive results after phacoemulsification and ECCA. A comparative study. *Acta Ophthalmol* 71: 382-387, 1993.

- 101) **Oshika T, Tsuboi S, Yaguchi S, Yoshitomi F, Nagamoto T, Nagahara K, et al**: Comparative study of intraocular lens implantation through 3.2- and 5.5-mm incisions. *Ophthalmology* 101: 1183—1190, 1994.
- 102) **大鹿哲郎, 原 玲子, 坪井俊児, 江口甲一郎**: 白内障・眼内レンズ手術後の屈折変化. *日眼会誌* 98: 974—982, 1994.
- 103) **Jampel HD, Thompson JR, Baker CC, Stark WJ**: A computerized analysis of astigmatism after cataract surgery. *Ophthalmic Surg* 17: 786—790, 1986.
- 104) **Masket S**: Comparison of suture materials for closure of the scleral pocket incision. *J Cataract Refract Surg* 14: 548—551, 1988.
- 105) **Shepherd JR**: Induced astigmatism in small incision cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 15: 85—88, 1989.
- 106) **Parker WT, Clorfeine GS**: Long-term evolution of astigmatism following planned extracapsular cataract extraction. *Arch Ophthalmol* 107: 353—357, 1989.
- 107) **Cravy TV**: Long-term corneal astigmatism related to selected elastic, monofilament nonabsorbable sutures. *J Cataract Refract Surg* 15: 61—69, 1989.
- 108) **Masket S**: Comparison of the effect of topical corticosteroids and nonsteroidals on postoperative corneal astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 16: 715—718, 1990.
- 109) **Talamo JH, Stark WJ, Gottsche JD, Goodman DF, Pratzner K, Cravy TV, et al**: Natural history of corneal astigmatism after cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 17: 313—318, 1991.
- 110) **Cravy TV**: Routine use of a lateral approach to cataract extraction to achieve rapid and sustained stabilization of postoperative astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 17: 415—423, 1991.
- 111) **Masket S**: Horizontal anchor suture closure method for small incision cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 17: 689—695, 1991.
- 112) **Pacifico RL, Morrison C**: Astigmatically neutral sutured small incision. *J Cataract Refract Surg* 17: 710—712, 1991.
- 113) **Siepsner SB**: Sutureless cataract surgery with radial transverse incision. *J Cataract Refract Surg* 17: 716—718, 1991.
- 114) **Gimbel HV, Raanan MG, Deluca M**: Effect of suture material on postoperative astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 18: 42—50, 1992.
- 115) **Martin RG, Sanders DR, Van Der Karr MA, DeLuca M**: Effect of small incision intraocular lens surgery on postoperative inflammation and astigmatism. A study of the AMO SI-18NB small incision lens. *J Cataract Refract Surg* 18: 51—57, 1992.
- 116) **大鹿哲郎, 富所敦男**: 白内障術後角膜不正乱視の定量的検討. *臨眼* 49: 365—371, 1995.
- 117) **Neumann AC, McCarty GR, Sanders DR, Raanan MG**: Small incisions to control astigmatism during cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 15: 78—84, 1989.
- 118) **Gills JP, Sanders DR**: Use of small incisions to control induced astigmatism and inflammation following cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 17: 740—744, 1991.
- 119) **Martin RG, Sanders DR, Miller JD, Cox CC III, Ballew CB**: Effect of cataract wound incision size on acute changes in corneal topography. *J Cataract Refract Surg* 10: 170—177, 1993.
- 120) **Nielsen PJ**: Induced astigmatism and its decay with a frown incision. *J Cataract Refract Surg* 19: 375—379, 1993.
- 121) **Drews RC**: Astigmatism after cataract surgery: Nylon versus Mersilne. *Ophthalmic Surg* 20: 695—696, 1989.
- 122) **浦田謙二, 佐古博恒, 小松真理, 清水公也, 富田 憲**: 角膜切開による白内障手術の検討. *眼科手術* 5: 471—474, 1992.
- 123) **山本成章, 大嶋英裕, 田上勇作, 並木真理, 森野以知朗, 五藤 宏**: 縫合法の相違と切開長の比較による術後乱視の検討. *眼科手術* 5: 467—470, 1992.
- 124) **樋口眞琴, 石丸裕晃, 山本登紀子, 猪野健二郎, 大塚秀勇**: 無縫合白内障手術と術後乱視—7 mm 切開例の検討. *臨眼* 47: 466—467, 1993.
- 125) **渡辺牧夫, 吉田 理, 橋田正継, 松岡佳住, 安岡一夫, 高橋 徹, 他**: 高知医大眼科における自己閉鎖創無縫合白内障手術後の角膜乱視の検討. *臨眼* 88: 715—717, 1994.
- 126) **Stokes GG**: 19th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, Transactions of the Sections, London, 10, 1850.
- 127) **Southall JPC**: Mirrors, prisms, and lenses: A textbook of geometrical optics. 3rd ed, Macmillan Co, New York, 320—326, 1940.
- 128) **Ogle KN**: Optics: An Introduction for Ophthalmologists, Charles C Thomas, Springfield, 1968.
- 129) **大鹿哲郎**: 小切開創白内障手術. *医学書院*, 東京, 164—171, 1994.
- 130) **McFarland MS**: McFarland surgical technique. In: Gills JP, et al (Eds): Small-Incision Cataract Surgery. Slack, Thorofare, NJ, 107—116, 1990.
- 131) **Kock PS**: Structural analysis of cataract incision construction. *J Cataract Refract Surg* 17: 661—667, 1991.
- 132) **Fine IH**: Architecture and construction of a self-sealing incision for cataract surgery. *J Cataract Refract Surg* 17: 672—676, 1991.
- 133) **McFarland MS**: The clinical history of sutureless surgery: The first modern sutureless cases. In: Gills JP, et al (Eds): Sutureless Cataract Surgery. An Evolution Toward Minimally Invasive Technique. Slack, Thorofare, NJ, 3—5, 1992.