

筑波大学

博士（医学）学位論文

Apparent accommodation in pseudophakic eyes
with refractive against-the-rule, with-the-rule,
and minimum astigmatism

(屈折倒乱視, 直乱視, 微小乱視における
偽水晶体眼の偽調節)

2016

筑波大学

山本 敏哉

目次

第1章 緒言

第2章 本研究の目的

第3章 偽水晶体眼の近視性単乱視の倒乱視と直乱視が視力に及ぼす影響

3-1 目的

3-2 対象と方法

3-3 結果

3-4 考察

3-5 結論

第4章 偽水晶体眼の屈折倒乱視と直乱視が偽調節に及ぼす影響

4-1 目的

4-2 対象と方法

4-3 結果

4-4 考察

4-5 結論

第5章 屈折倒乱視，直乱視，微小乱視における偽水晶体眼の偽調節

5-1 目的

5-2 対象と方法

5-3 結果

5-4 考察

5-5 結論

第6章 結語および今後の展望

第7章 謝辞

第8章 引用文献

第9章 図表

参考論文

第1章 緒言

光は眼球内を通過する際、主に角膜と水晶体という2つの凸レンズで屈折し、網膜に集光する。それにより、網膜に焦点を結んだ像が視神経を通じて脳に送られ、物が見えると認識できる。また、網膜面に焦点するために調節という機能がある。調節は、眼球内の水晶体の厚みを柔軟に変えることにより水晶体の屈折力を変化させ、機能している。そして、水晶体が濁る病気を白内障と呼ぶ。白内障は水晶体の硬化を引き起こし、視力低下のほかに調節機能の低下すなわち老視の原因ともなっている。

現在の白内障手術は、超音波乳化吸引術という濁った水晶体を破砕吸引することにより除去し、水晶体の代わりとなる眼内レンズ（以下、IOL）を水晶体嚢に固定する手術である。このような白内障術後のIOL挿入眼を偽水晶体眼と呼ぶ。レンズの働きを担う水晶体を除去する手術のため、IOLを入れることのできなかつた時代に比べると、IOL挿入は白内障手術後の視機能改善という点において広く確立された手段となっている。また、白内障手術機器や手技、IOL形状や素材などの目覚ましい進化と幅広い臨床応用の結果、患者のより良い見え方を求める需要も高まっている。特に、IOLは硬い素材から柔らかな素材へと改良され、これによりIOLを折り曲げる、または筒状に丸めるなど形状を変化させることが可能となった。硬い素材のIOLの場合、切開創をIOLの大きさまで拡大する必要があったが、改良された柔らかいIOLでは切開創を拡大する必要がなくなり、小切開と呼ばれる低侵襲の術式へと変わっていった。しかし、IOLの屈折力は固定しているため、調節機能が生じることは無く、白内障術後も老視の問題が存在している。

現在、IOLの種類は、従来の球面 IOL やにじみやぼやけなどの症状をより抑えた非球面 IOL が存在するほか、単焦点 IOL では補いきれない老視対策としての多焦点 IOL¹⁻⁴⁾や角膜乱視矯正可能なトーリック IOL⁵⁻⁷⁾など多岐にわたっている。患者の需要に合わせた IOL を選択することで、多くの症例でより良好な術後裸眼視力が得られるようになってきた。しかし、全ての患者に満足が得られている訳ではない。多焦点 IOL に関して、一部の症例では光の過度な散乱や waxy vision と呼ばれるぼやけのような症状のため IOL の交換を行う症例も報告され⁸⁾、多焦点 IOL の適応にはこれらの症状の可能性を含めた十分な説明と慎重なケースの選択が必要である。また、トーリック IOL に関して、乱視のある症例の全てを完全に矯正できる訳ではなく、術後残余乱視の発生は常に念頭に置かなければならない。

乱視は角膜形状が正円ではなく、楕円形となることにより網膜像のぼやけが生じる屈折異常である。縦方向に長い楕円形の乱視の場合、鉛直面の光はより後方に、水平面の光はより前方に焦点する。この時、前方に焦点する集光線を前焦線、後方に焦点する集光線を後焦線、前焦線と後焦線の間位置する光学的中央点を最小錯乱円と呼ぶ。焦点が合わない方向が存在するため、網膜面に焦点しない方向は像のぼやけが生じる。それぞれ縦方向に長い楕円形の乱視を倒乱視、水平方向に長い楕円形の乱視を直乱視、そして斜めの乱視を斜乱視と分類している (図 1)。そして、乱視に関してはデメリットだけでなくメリットがある可能性も示唆されている。表 1 に乱視によって引き起こされる可能性のある症状をまとめる。1940 年に、Fredman⁹⁾がカメラによるシミュレーション研究にて乱視と視力の関係を調査し、倒乱視よりも直乱視の方が視力に関しては良好であるとした。Eggers¹⁰⁾も、倒乱視より直乱視のほうがより良い視力と報告した。その後、Datiles ら¹¹⁾や Sawusch ら¹²⁾は乱視があることにより焦点深度

が増大することを示し、Bradbury ら¹³⁾は白内障術後の単焦点 IOL 挿入眼では老視対策として直乱視が理想的と結論づけた。一方、単焦点 IOL 挿入眼において、Verzella ら¹⁴⁾は倒乱視による多焦点性効果を報告し、Trindade ら¹⁵⁾や Nagpal ら¹⁶⁾が、直乱視よりも倒乱視のほうが裸眼近方視力で有意に良好であったことを報告した。Nanavaty ら¹⁸⁾も単焦点 IOL 挿入眼における明視域の広さと角膜倒乱視との関係を多変量ロジスティック回帰分析で示した。ただし、乱視の中でも斜乱視に関しては、倒乱視や直乱視に比べ視機能の低下を引き起こすとの報告¹⁹⁻²⁴⁾がある。これら、乱視の程度や軸の方向が乱視眼の視機能に重要な役割を果たすとの報告から、乱視、特に倒乱視や直乱視は単焦点 IOL 挿入眼における老視対策になる可能性が伺える。実際に単焦点 IOL 挿入眼にもかかわらず、裸眼における遠方および近方視力の良好な症例が臨床においても散在している。この明視域の拡大現象を一般に“偽調節”と呼んでいる。図 2 に眼内レンズの種類と臨床的意義を表し、偽調節の概念を示す。これまでに、偽調節の要因として瞳孔径²⁵⁻²⁸⁾・乱視^{14,18,28-31)}・角膜多焦点性^{27,32,33)}・高次収差^{33,34)}などが報告されている。

角膜多焦点性とは、前眼部形状解析装置を用いて、個々の瞳孔径の範囲内の角膜形状を分析し、角膜屈折力の最も高い値と最も低い値の差を計算して角膜多焦点性と定義している^{27,32,33)} (図 3)。現在、角膜多焦点性がどのような角膜形状なのかは明らかになってはいないが、Oshika ら³³⁾は角膜の高次収差で表現され得る可能性を示している。

高次収差とは、不正乱視と呼ばれているより細かい屈折異常のことを示している。収差の測定には、波面センサーと呼ばれる機械を用いて眼球内から反射した光の波面を眼外で記録し、形状を分析している。全くの無収差の場合、光学的に完全な正視と呼ばれる状態で、網膜面から反射した光が完全な平面の波面

として記録される。近視や遠視，乱視などがあると，反射した光は複雑な波面となる（図 4）。近視や遠視，不正でない正乱視（倒乱視・直乱視・斜乱視）のみの場合，従来の眼鏡の屈折度数（球面や円柱）に対応し低次収差と呼ばれる眼鏡矯正可能な波面となるが，不正乱視の場合は眼鏡矯正不能で，高次収差と呼ばれる更に複雑な波面となる。基本的に得られた収差は，波面の形状からそれぞれのゼルニケ多項式に展開され（図 5），2 次の収差は低次収差，3 次以上の収差は高次収差として識別されている。3 次の収差は，鉛直トレフォイル，鉛直コマ，水平コマ，水平トレフォイルの 4 つに展開，4 次の収差は，斜めテトラフォイル，斜め 2 次乱視，球面収差，鉛直/水平 2 次乱視，鉛直/水平テトラフォイルの 5 つに展開される。5 次以降の収差は，形状の煩雑化および影響力は軽微となるため，ここでの説明は割愛する。Oshika ら³³⁾は 3 次収差，特に鉛直トレフォイルと偽調節との関与を示し，Nishi ら³⁴⁾は鉛直コマと偽調節との関わりを示唆している。特に鉛直コマは中心付近に鉛直方向の屈折の勾配があり，偽調節との関連を考えるにあたりとても興味深い形状をしている。これらの高次収差を調査することにより，偽調節の要因を特定できるのではないかと考えている。

また，偽調節の要因の一つに IOL 移動も考えられていた。眼内で IOL が前後方向に移動することにより調節のような働きをするのではないかと考えられた説であった。Hardman ら³⁵⁾や Gonzalez ら³⁶⁾は，縮瞳薬と散瞳薬を用いて毛様体筋緊張と緩和による IOL 前後方向の移動距離を測定，その後，Findl ら³⁷⁾は縮瞳薬による IOL 前方移動で最大 1.0 D までの推測調節量を証明した。また，Nawa ら³⁸⁾は，IOL 移動による調節量では短眼軸の眼のほうが大きいことを実証したが，偽調節との相関は認められなかったと報告した。これらの報告の結果，偽調節を説明できるほどの IOL 移動は認められず，IOL 移動と偽調節との関連は

現在否定されている。

これら偽調節に関わる要因の中でも、近視性乱視の役割は長く議論されている。乱視は焦点深度を増大させ、明視域の範囲を広げるという報告^{11,12)}があるが、これとは対照的に、名和ら²⁶⁾や Kamiya ら²⁷⁾は偽調節と乱視との関連は無かったと結論づけ、未だ一致した見解はない。このように、偽調節における乱視の役割は議論の余地がまだ残っている。

このような相違は、偽調節における乱視軸の方向の影響を含め、詳細な乱視の役割を評価した研究がないことが原因と考えられる。実際、前述した研究^{13,15,16)}のように、偽水晶体眼の倒乱視と直乱視が視機能へ及ぼす影響が調査され、乱視軸の方向による視力の違いが示されている。これらの知見から、恐らく偽水晶体眼における乱視量や軸の方向が視機能の一つである偽調節にも影響を与える可能性があると考えている。しかしながら、偽調節における乱視軸の異なる方向での影響を比較した、特に現在の小切開白内障手術後で行われた研究は無い。小切開白内障手術の技法では、外科手技で起こる惹起乱視は減少しているため、偽調節における議論は、従来行われてきた白内障囊外摘出術、そして以前に使用されてきた素材の IOL 挿入を基本にした研究から新たに更始する必要がある。また、乱視軸の方向が偽調節に及ぼす影響に差があるとするならば、トーリック IOL による乱視矯正を行う際に考慮すべきポイントとなり、過矯正を狙うのか低矯正を狙うのか、個々の乱視状態の矯正戦略が変わってくるはずである。以上のことより、白内障術後の視覚の質の向上のためにも、乱視と偽調節の関係を明らかにすることが望ましいと考えた。

第2章 本研究の目的

本研究の目的は、現行の小切開白内障手術後の偽水晶体眼症例で、乱視の有無や乱視軸の方向による偽調節の詳細な要因を調査することとした。

- ① 乱視軸の方向、特に倒乱視と直乱視で、視機能の一つである視力を検討。
このことにより、乱視軸の方向により視機能の評価が変わることを実証。
- ② 特殊な視機能でもある偽調節において、乱視の存在している眼だけを集め、乱視矯正有りの場合と無しの場合で偽調節量を比較、また倒乱視と直乱視に分けた2群間においても比較検討。このことにより、乱視矯正した場合としない場合で偽調節と乱視との関連を実証し、更に乱視軸の方向により偽調節量に違いがあるかを確認。
- ③ 乱視の存在している眼とコントロールとして乱視がほとんど無い微小な乱視眼を含めた3群（倒乱視群・直乱視群・微小乱視群）により偽調節量を比較し、それぞれの群における偽調節に及ぼす臨床的要因を詳細に検討。このことにより、乱視軸方向やほぼ乱視の無い眼との間に偽調節量の違いがあるのか、またそれぞれの偽調節の要因に違いがあるのかを確認。

第3章 偽水晶体眼の近視性単乱視の倒乱視と直乱視が視力に及ぼす影響

3-1 目的

偽水晶体眼における裸眼遠方視力（以下，UDVA = uncorrected distance visual acuity）に関して，近視性単乱視の倒乱視と直乱視の間に有意な差はみられないとの報告^{15,16}がある．近視性単乱視とは，近視や遠視などの球面度数成分が殆ど無く，マイナス（近視）成分の乱視のみ存在する眼のことである．以前の報告について，異なった術式が混在している，または群間の年齢をマッチングしていないなどの問題点があげられる．特に年齢に関しては，加齢とともに倒乱視が増加するため³⁹⁻⁴¹，年齢をマッチングさせないと結果にバイアスがかかり両群を対等に比較することが困難である．

本章の目的は，白内障術後の残余乱視の中でも過去の報告同様，出来る限り純粋な乱視の影響のみを解析するため，球面度数の少ない近視性単乱視を厳選し，同一術式による単焦点 IOL 挿入眼を，年齢のマッチングを行った倒乱視と直乱視の2群に分けて UDVA に違いがあるかを比較検討することである．

3-2 対象と方法

対象は，2010年4月～2013年8月までの間に筑波大学病院眼科で加齢による白内障のみの単独疾患に対し，合併症無く超音波乳化吸引術および単焦点非球面 IOL（SN60WF, Alcon Laboratories, Fort Worth, TX, USA）を水晶体嚢内に固定出来た患者とした．対象者基準は，術後の完全矯正遠方視力（以下，CDVA = corrected distance visual acuity）が0.7以上，術後球面屈折度数 ± 0.5 D（ジオプター）以内，術後マイナス円柱屈折度数0.5 D以上，年齢は50～85歳までとした．

乱視に関して、マイナス円柱屈折軸が $90 \pm 30^\circ$ 方向の時は倒乱視、 $180 \pm 30^\circ$ 方向の時は直乱視と定義した。角膜疾患、緑内障、網膜疾患や視力に影響を与える他の眼疾患は除外した。また、視力における倒乱視と直乱視の影響を比較することが本章の調査の主な目的のため、術後の斜乱視を伴う眼も除外した。仮に両眼ともこれらの基準に合う場合には、研究眼として右眼を選択した。最終的に、本章の調査では 43 例 43 眼（男性 21 例，女性 22 例）が登録された。本章の研究は、筑波大学臨床研究倫理審査委員会承認の上、ヘルシンキ宣言の条文を順守し施行したものである。研究に関する検査の前に、全ての対象患者から同意を得て行っている。

全ての患者において、UDVA, CDVA, 瞳孔径, 眼球波面収差を記録した。UDVA および CDVA は、ランドルト環の縦 3 列視標の 100% コントラスト視力チャートを使用し、標準照明下 5 m の距離で測定した。3 台の視力表（VC-50 / VC-50 / VC-22, Takagi Seiko Co., Nagano, Japan）のうち、ランダムに 1 台を検査時に選択した。全てのランドルト環は縦または横の 4 方向で示され、0.1~1.2 間の視標数は、縦方向で 54, 横方向で 53 であった。横列 3 つ全てのランドルト環を正解した最小視標を視力として記録した（図 6）。得られた小数視力は、対数視力（logMAR）に変換し分析に使用した。瞳孔径は、遠方 5 m の視標を固視した状態で開放型電子瞳孔計（FP-10000, TMI Co., Saitama, Japan）を用いて測定した⁴²⁾。明所視下で両眼開放にて検査を行い、縦と横の 10 秒間の平均瞳孔径を計測、縦横 2 つの平均値を解析に使用した。眼球波面収差は、Hartmann-Shack 型波面センサー（KR-1W, Topcon Co., Tokyo, Japan）を用い、基本的に無散瞳の自然瞳孔にて、暗所室で測定を行った。個々の瞳孔径によって得られた収差データは解析のために 4 回の測定し、平均化した。これらのデータは正規化されたゼルニケ多項式に展開、各収差の合算は、二乗平均平方根（以下、RMS）で換

算した (図 7) .

全高次収差は、3 次と 4 次のそれぞれ各高次収差成分の RMS として、3 次収差は、鉛直・水平トレフォイルと鉛直・水平コマの 4 つの高次収差成分の RMS として、4 次収差は、斜め・鉛直/水平テトラフォイルと斜め・鉛直/水平 2 次乱視、球面収差の 5 つの高次収差成分の RMS として換算した。また、3 次の収差の鉛直と水平、4 次の収差の斜めと鉛直/水平の各々対となる高次収差をそれぞれ RMS 換算し、ゼルニケベクトル項のトレフォイル、コマ、テトラフォイル、2 次乱視としても表現した (図 8) . このような波面収差データ表現は、米国規格協会に記載されている (Z80.28-2004) . ゼルニケベクトル項として示された高次収差である簡易表現の有用性は、以前から報告されている⁴³⁻⁴⁸⁾ . また、各高次収差成分も調査した。一般的に、収差の型は同じ対象者の左右の眼で対称となっている⁴⁹⁻⁵¹⁾ため、研究眼が左眼だった際は、右眼データとして置き換えるため、縦軸を中心に左眼の縦軸方向のデータを転換した。

年齢、瞳孔径、等価球面屈折度数、球面屈折度数、円柱屈折度数、UDVA、CDVA、そして眼球波面収差を、対応のない t 検定を用いて倒乱視と直乱視の 2 群間で比較した。UDVA と他の項目との間の相関関係もまた、各群において、ピアソン積率相関係数を用いて確認した。 $P < 0.05$ を統計学的な有意水準とした。全ての統計解析は、Statview 5.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) ソフトを使用した。

3-3 結果

基準に合った倒乱視群の患者は 25 例 25 眼、直乱視群は 18 例 18 眼であった。それぞれの群の臨床データと 2 群間比較を表 2 に示す。UDVA (logMAR) は、倒乱視群で 0.30 ± 0.22 、直乱視群で 0.11 ± 0.15 となり、統計学的有意差があった ($P < 0.01$, 対応のない t 検定) . しかしながら、他の評価項目では 2 群間に有

意差は認められなかった。

UDVA と他の評価項目との相関を表 3 に示す。UDVA は倒乱視群において等価球面屈折度数（ピアソン積率相関係数； $r = -0.51$, $P < 0.01$ ）と円柱屈折度数（ $r = -0.48$, $P = 0.01$ ）（図 9）の両方に有意な相関関係がみられたが、直乱視群では認められなかった（ $P = 0.11$ ）（図 10）。高次収差を含む他の評価項目は、どちらの群においても有意な相関は認められなかった。眼球波面収差に関して、全高次収差、3 次収差、4 次収差、そしてゼルニケベクトル項（トレフォイル、コマ、テトラフォイル、2 次乱視）における有意差は両群間でみられなかった。また、どちらの群においても個々の高次収差成分と UDVA との有意な相関関係はみられなかった。両群における CDVA でも有意な相関の無い結果となった。

3-4 考察

UDVA における乱視の影響を評価する際、網膜面にどのポイント（例えば前焦線や後焦線、最小錯乱円など）で焦点しているかを考えることはとても重要である。本章の研究は、後焦線で UDVA を評価した Trindade ら¹⁵⁾や Nagpal ら¹⁶⁾の研究デザインに従って行われた。言い換えるならば、UDVA 評価において我々の全ての症例で前焦線は網膜の前方に、対して後焦線は網膜上に存在していた。そのため、我々の設定では円柱屈折度数に従って前焦線が前方に移動し、軸方向に対応するボケが増加するため、理論上、UDVA は乱視量に応じて悪化する。しかしながら、本章の結果では、近視性単乱視の倒乱視のある偽水晶体眼において UDVA は乱視量の増加に応じて悪化した。直乱視眼においてはそのような関係が認められなかった。

Watanabe ら⁵²⁾は、偽水晶体眼における等価球面屈折度数が概ね 0 D での倒乱視と直乱視が UDVA へ及ぼす影響を報告している。彼らは、倒乱視眼や直乱視

眼で UDVA に有意差は無く、そして、倒乱視眼において UDVA は円柱屈折度数と負の相関を示したにも関わらず、直乱視眼では有意な相関がみられなかったとした。倒乱視眼や直乱視眼で UDVA に有意差が無かったとする彼らの報告と、有意差のあった我々との結果の相違は、研究デザインの違いに起因するものと考えられる。彼らは、最小錯乱円が網膜上にある状態で視機能に及ぼす乱視の影響を評価しているが、我々は後焦線での評価となっている。しかし、直乱視眼で UDVA と円柱屈折度数に関連が無かったことは、我々の結果とも一致している。彼らは、直乱視眼の瞳孔径が大きければ、UDVA との相関が認められるとしている。つまり、直乱視眼で瞳孔径が小さければ、乱視の影響は受けにくいと考察していた。確かに、偽水晶体眼において、より小さい瞳孔径が焦点深度や偽調節を拡大させることが知られており²⁵⁻²⁸⁾、そのことは、白内障手術後の裸眼視力に理論的には有利に働くとされている。さらに、有水晶体眼における裸眼視力は瞳孔径と乱視量の両方により影響されることが示されている⁵³⁾。しかし、倒乱視眼と直乱視眼で瞳孔径による作用が違う理由の説明がつかない。本章の結果でも、UDVA は倒乱視眼よりも直乱視眼のほうが有意に良好であったが、両群間に瞳孔径や乱視量で有意な差は無かったため、我々は他にも要因があると考えている。

全高次収差、3次収差、4次収差、ゼルニケベクトル項（トレフォイル、コマ、テトラフォイル、2次乱視）、そして各高次収差成分は、乱視軸にかかわらず、我々の研究において UDVA または CDVA のどちらにも影響していなかった。

Pujol ら⁵⁴⁾は、高次収差が乱視により誘発される網膜像の質の低下を軽減すると証明している。我々の結果では、乱視眼の視機能における高次収差の有意な役割を見出すことはできなかった。しかし、いくつかの高次収差成分が複雑に関連し、互いに相互作用することで乱視眼における UDVA に影響している可能性

⁵⁵⁾も完全に否定はできない。乱視のある偽水晶体眼において、視機能における高次収差の影響をより良く理解するためには、ゼルニケベクトル項の大きさだけでなく軸方向も考える、または UDVA の良好群と不良群に分けた解析による各高次収差の規則性や法則性など、眼球波面収差の相互関係を調査する更なる研究が必要である。

さらに、まぶたや眼瞼裂により乱視の影響が修正された可能性がある。近視性単乱視の直乱視眼におけるマイナス円柱屈折度数が高ければ高いほど、鉛直軸方向の焦線が網膜から遠ざかり、視力は低下する。しかし、Huber³⁰⁾は、鉛直方向のぼやけた網膜像が、まぶたを狭めることによって水平方向のスリット型瞳孔となり鮮鋭化する可能性を理論立てている（図 11）。この働きによりある種のピンホール効果が生まれ、焦点深度が増大する可能性がある。彼はまた、水平スリット型瞳孔が近視性単乱視の直乱視眼における UDVA の改善や鉛直方向のみの屈折異常において焦点の改善があるだろうと提唱している。仮に、この理論が正しいとするならば、偽水晶体眼において倒乱視眼よりも直乱視眼で、UDVA がより良かった本章の結果を説明できるであろう。逆に、近視性単乱視の倒乱視眼では鉛直方向の焦線が網膜に最も近く、水平方向の焦線が網膜から最も離れているため、同様の理論で直乱視眼よりも倒乱視眼で裸眼近方視力がより良好となることが容易に想像できる。事実、過去の報告^{15,16)}では、裸眼近方視力における倒乱視の有益性が支持されている。大谷ら⁵⁶⁾もまた、偽水晶体眼における直乱視の比較的良好な UDVA の傾向について、上記記述のようなまぶたの影響があったのではないかと推察している。残念ながら、本章の研究ではまぶたの関与についての調査はしていないため、まぶたに関しては別のデザイン研究が必要と考える。

そして、高次機能が関与する可能性もまた考えるべきである。アルファベッ

トの水平方向のぼやけが他の方向よりも読書時に大きな影響があること^{9,15,57)}、またぼやけの感受性や明視の決定に影響する神経的順応が乱視の存在において起こる可能性⁵⁸⁻⁶⁰⁾が報告されている。しかしながら、本章の研究ではアルファベットではなくランドルト環を用いてのUDVA測定であったため、我々の結果は、乱視軸に起因する神経的順応の影響は最小限であったと考えている。

本章の結果、偽水晶体眼において乱視軸の方向により視力が影響されることが示され、視機能の評価を行う際、乱視軸方向による詳細な検討を行うことはとても重要であることが証明された。加えて、他の視機能である偽調節において乱視軸方向による影響を次章で検討する。

3-5 結論

近視性単乱視の偽水晶体眼において、直乱視よりも倒乱視のほうがUDVAは悪化した。倒乱視眼において、UDVAは乱視量により有意な影響を受けた。しかしながら、直乱視眼においては乱視量との関係はみられず、また、今回調査した他の検査項目とも関連はみられなかった。直乱視眼のUDVAに関しては、倒乱視眼に比べ良好な原因がまだ明らかではなく、いくつかの高次収差成分の相互的作用やまぶたなどの要因も含めた更なる調査の必要性があるのではないかと考えた。偽水晶体眼における乱視軸の方向の違いが裸眼視力に影響を及ぼすことが示された。

第4章 偽水晶体眼の屈折倒乱視と直乱視が偽調節に及ぼす影響

4-1 目的

本章の目的は、屈折乱視を有する偽水晶体眼において乱視矯正の有無による偽調節量を比較し、乱視が偽調節に影響を与えているかを検討、さらに倒乱視眼と直乱視眼に分けて乱視軸の方向による違いにより偽調節に影響があるかを明らかにすることである。

4-2 対象と方法

対象は、2010年4月～2013年8月までの間に筑波大学病院眼科で白内障のみの単独疾患に対し、合併症無く超音波乳化吸引術および単焦点非球面 IOL (SN60WF, Alcon Laboratories, Fort Worth, TX, USA) を水晶体嚢内に固定出来た患者とした。対象者基準は、術後の CDVA が 0.7 以上、術後マイナス円柱屈折度数 0.5 ~ 2.0 D とした。乱視に関して、マイナス円柱屈折軸が $90 \pm 30^\circ$ 方向の時は倒乱視、 $180 \pm 30^\circ$ 方向の時は直乱視と定義した。また、偽調節における倒乱視と直乱視の影響を比較することが本章の調査の主な目的のため、術後の斜乱視を伴う眼は除外した。角膜疾患、緑内障、網膜疾患や視力に影響を与える他の眼疾患も除外した。最終的に、本章の調査では 52 例 68 眼（男性 27 例、女性 25 例）が登録された。本章の研究は、筑波大学臨床研究倫理審査委員会承認の上、ヘルシンキ宣言の条文を順守し施行したものである。研究に関する検査の前に、全ての対象患者から同意を得て行っている。

全ての患者において、CDVA、瞳孔径、角膜多焦点性、眼球波面収差、偽調節を記録した。CDVA、瞳孔径、眼球波面収差は、前章の方法の記述通りに行った。

瞳孔径は、近方 40 cm の距離を固視した状態で測定した。また、眼球波面収差における各高次収差成分は、球面収差のみを調査対象とした。角膜多焦点性は、前眼部形状解析装置 (TMS-4 Advance; TOMIY Co., Nagoya, Japan) を用いて、角膜屈折勾配を記録、角膜多焦点性のインデックスとして使用した^{27,32,33}。偽調節の近点は、僚眼遮蔽の上、アコモドポリレコーダー (HS-9G; KOWA Co. Ltd., Nagoya, Japan) を使用し、それぞれの眼において決定した。完全矯正に+ 2.0 または+ 3.0 D のレンズを加入し、患者が 40 cm の距離で 0.7 のランドルト環視標が答えられる状態から検査を行った。像がぼやけるところまで視標がゆっくり近づき、それから、明視できるまで視標を戻した。検査は 10 回繰り返し行い、ぼやけが起こる位置の平均距離を調節の近点として、偽調節量は 40 cm の距離と調節の近点の差から算出した (ジオプターに換算) (図 12)。これらの方法は過去の報告^{32,33})に準じた。また、乱視矯正無しの偽調節測定として、完全矯正の等価球面度数に+ 2.0 または+ 3.0 D のレンズを加入し、同様に検査を行った。

年齢、術後期間、瞳孔径、角膜乱視量、屈折乱視量、眼軸、IOL 度数、CDVA、角膜多焦点性、眼球波面収差、そして乱視矯正の有りと無しの偽調節量を、Mann-Whitney の U 検定を用いて倒乱視と直乱視の 2 群間で比較した。また、対応のある t 検定を用いて、乱視矯正の有無における偽調節量を全対象患者および各群で比較した。さらに、乱視による偽調節への関わりを詳しく調査するために、乱視矯正無しの偽調節量から乱視矯正有りの偽調節量を引いた値を乱視矯正の有無での偽調節の変化量として算出、正の値のみを乱視により偽調節量が増加した患者として、全対象患者および各群において Spearman の順位相関係数を用い、他の評価項目との相関関係を確認した。 $P < 0.05$ を統計学的な有意水準とした。全ての統計解析は、Statview 5.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) ソフトを使用した。

4-3 結果

全対象患者 52 例 68 眼のうち、倒乱視群は 31 例 40 眼、直乱視群は 21 例 28 眼であった。全対象患者およびそれぞれの群の臨床データと 2 群間比較を表 4 に示す。年齢、瞳孔径、角膜乱視、テトラフォイル収差において、倒乱視群と直乱視群の間に統計学的有意差があった ($P < 0.05$, Mann-Whitney の U 検定)。しかしながら、乱視矯正の有りおよび無しの偽調節量を含む他の評価項目では 2 群間で有意差は認められなかったが、乱視矯正有りでは倒乱視群が直乱視眼より偽調節量が低下傾向にあった。また、乱視矯正の有無における偽調節量の比較とともにそれぞれの平均偽調節量を表 5 にまとめる。全対象患者と倒乱視群において、乱視矯正無しの偽調節量のほうが有意に大きかった (それぞれ、 $P = 0.001$, $P = 0.005$, 対応のある t 検定) (図 13, 14) が、直乱視群において有意差は認められなかった (図 15)。全対象患者および倒乱視群、直乱視群における乱視矯正の有無での偽調節量の散布図も示す (図 16, 17, 18)。乱視矯正無しより乱視矯正有りで偽調節量が多くなる患者も存在するため、全ての患者が乱視により偽調節が得られているとは限らないことが分かった。

乱視による偽調節への関わりを詳しく調査するために、乱視により偽調節量が増加した患者、全対象患者 (41 眼)、倒乱視群 (27 眼)、直乱視群 (14 眼) の乱視矯正の有無での偽調節の変化量と他の評価項目との相関を表 6 に示す。乱視矯正の有無での偽調節の変化量は、全対象患者と倒乱視群において、屈折乱視量 (それぞれ、Spearman の順位相関係数 ; $r = 0.460$, $P = 0.004$, $r = 0.547$, $P = 0.005$) (図 19, 20) に相関関係がみられたが、直乱視群における屈折乱視量では有意な相関は認められなかった ($P = 0.235$) (図 21)。また、倒乱視群では瞳孔径 ($r = -0.403$, $P = 0.040$) (図 22), 4 次収差 ($r = -0.430$, $P = 0.029$) (図 23),

そしてゼルニケベクトル項のテトラフォイル収差 ($r = -0.518$, $P = 0.008$) (図 24) においても相関関係がみられた。その他の項目では有意な相関はみられなかった。

4-4 考察

偽調節を研究する際に、近点検査に使用される視標の大きさを考慮することはとても重要である。名和ら²⁶⁾は、1.0 または 0.7 の近見視標を使用して偽調節調査の結果を比較し、より小さい視標を使用した際に偽調節が減少したことを実証した。Kamiya ら²⁷⁾は、1.0 の近見視標を用いた平均偽調節を測定し、 1.58 ± 0.65 D の値を報告した。対して、Elder ら⁶¹⁾、Fukuyama ら³²⁾、Oshika ら³³⁾は 0.7 の近見視標で平均偽調節を測定し、それぞれ 2.72 ± 1.10 D, 2.00 ± 0.92 D, 2.03 ± 0.93 D と報告した。本章の研究では、0.7 の視標を使用して全対象患者で 2.37 ± 1.33 D の平均偽調節が得られ、これは以前の研究と同等の結果であった。

乱視眼全体における乱視矯正有りとなしとの偽調節量の比較では、乱視矯正有りに比べ乱視矯正無しの偽調節量のほうが有意に大きく、特に倒乱視眼においてその傾向は強かった。Huber³⁰⁾は、乱視と焦点深度との関わりを推察し、近視性単乱視では焦点深度が増大すると報告している。また森下ら³¹⁾は、乱視を有する偽水晶体眼において、乱視量 2.0 D までは乱視矯正時より非矯正時のほうが偽調節量は大きかったことを示した。このことより、乱視が偽調節に関わっている可能性が伺える。しかしながら、乱視の存在が偽調節量の低下を導く症例もある程度存在していた。これは、乱視の存在下で乱視による焦点深度増大よりもコントラスト感度低下やぼやけなどの症状が強かった可能性を考えなければならない。個々の性格や感じ方の違いによる影響も考えるが、何が原因となるかはまだ明らかではない。偽調節が得られる症例と得られない症例の違いを

明らかにすることも今後の研究課題としている。

本章では、乱視による偽調節への関わりを詳しく調査するために、乱視矯正の無しの偽調節量のほうが乱視矯正有りより大きかった眼に対し、乱視矯正の有無での偽調節の変化量と屈折乱視量との関係を調べている。結果として、倒乱視眼において、乱視矯正の有無での偽調節の変化量が瞳孔径と乱視量、4次収差、テトラフォイル収差と有意な相関がみられた。瞳孔径に関しては、以前より小瞳孔が焦点深度を広げ、それにより偽調節の幅が拡大することが知られている²⁵⁻²⁸⁾。また、倒乱視と偽調節との関連性については、1991年に森下ら³¹⁾が初めて報告して以来、いくつかの報告がなされている^{13-16,18)}。今回の結果では、4次収差、中でもテトラフォイル収差において偽調節の変化量と負の相関を示したことから、これらの収差の影響が少ないほうが倒乱視眼の偽調節に対する乱視の影響がある可能性も示された。しかしながら、直乱視眼における偽調節の報告はほとんど無い。我々の結果においても、乱視矯正の有無での偽調節の変化量は直乱視眼における屈折乱視量との関係を示さず、また、他の検査項目との関連も示されなかった。また、直乱視眼は倒乱視眼に比べ偽調節に対する乱視量の影響が乏しい傾向にあるにもかかわらず、乱視矯正有りや無しの偽調節量において直乱視眼が倒乱視眼より高い傾向にあった。本章では直乱視眼における乱視量以外の偽調節の要因については明らかになってはいないが、倒乱視眼と比べると、直乱視眼では年齢が若い、瞳孔径が大きいなどの要因が偽調節に影響した可能性を考えなければならない。さらに今回、両眼を含む症例も存在しているため、それらがバイアスとして影響した可能性も否定出来ない。我々は、偽水晶体眼における直乱視と高次収差は偽調節において相互的に関与し得る可能性も推察している。これらのバイアスをできるだけ排除した研究デザインを用い、また屈折乱視がほとんど無いコントロール群を加え、乱視軸の

方向による偽調節の影響を次章で検討する。

4-5 結論

屈折乱視を有する偽水晶体眼において、乱視量が偽調節に関与することが示された。また、倒乱視眼と直乱視眼の偽調節量に有意な差は認められなかったが、倒乱視眼よりも直乱視眼のほうで偽調節量が高い傾向にあった。乱視矯正ありと無しの偽調節量を比較することによって、倒乱視眼において偽調節量は乱視量により有意な影響を受けることを証明した。しかしながら、全ての患者が乱視により偽調節が得られているとは限らなかった。直乱視眼においては乱視量との直接な関係は認められず、また、他の関連も認められなかったが、直乱視眼では偽調節の要因が異なる可能性が示された。

第5章 屈折倒乱視，直乱視，微小乱視における偽水晶体眼の偽調節

5-1 目的

本章の目的は，偽水晶体眼において，屈折乱視がほとんど無い微小な乱視をコントロールとして加え，倒乱視と直乱視の3群間の偽調節量を比較し，偽調節量に有意差があるかを検討，また，それぞれの群における偽調節の要因が何かを明らかにすることである．

5-2 対象と方法

対象は，2010年4月～2015年7月までの間に筑波大学病院眼科で白内障のみの単独疾患に対し，合併症無く超音波乳化吸引術および単焦点非球面 IOL (SN60WF, Alcon Laboratories, Fort Worth, TX, USA) を水晶体嚢内に固定出来た患者とした．対象者基準は，術後の CDVA が 0.7 以上，術後マイナス円柱屈折度数が 2.0 D までとした．乱視に関して，マイナス円柱屈折軸が $90 \pm 30^\circ$ 方向の時は倒乱視， $180 \pm 30^\circ$ 方向の時は直乱視，乱視軸にかかわらず 0.5 D 未満の屈折乱視を微小乱視と定義した．また，術後の斜乱視を伴う眼は除外した．角膜疾患，緑内障，網膜疾患や視力に影響を与える他の眼疾患も除外した．最終的に，本章の調査では 87 例 87 眼（男性 44 例，女性 43 例）が登録された．本章の研究は，筑波大学臨床研究倫理審査委員会承認の上，ヘルシンキ宣言の条文を順守し施行したものである．研究に関する検査の前に，全ての対象患者から同意を得て行っている．

全ての患者において，CDVA，瞳孔径，角膜多焦点性，眼球波面収差，偽調節を記録し，前章の方法の記述通りに行った．偽調節検査については，完全矯正

の等価球面度数に+2.0 または+3.0 D のレンズを加入しての検査のみを行った。

年齢，術後期間，瞳孔径，角膜乱視量，屈折乱視量，眼軸，IOL 度数，CDVA，角膜多焦点性，眼球波面収差，そして偽調節量を，Kruskal-Wallis 検定を用いて倒乱視と直乱視，微小乱視の 3 群間で比較した。もし有意差が認められた場合には，多群間比較として Steel-Dwass 検定を行った。偽調節量と他の評価項目との間の相関関係も，ピアソン積率相関係数を用いて全対象患者やそれぞれの群で調査した。さらに，偽調節と複数の要因の関係も合わせて調べるために，ステップワイズ重回帰分析を行った。目的変数として偽調節量を，説明変数は偽調節に影響を与える可能性として知られている瞳孔径，角膜および屈折乱視度数，角膜多焦点性，そして眼球波面収差を含めた。さらに，全対象患者では他の条件を標準化させるため，倒乱視群，直乱視群，微小乱視群をカテゴリ変数に変換し，説明変数として新たに加え，各群の純粋な影響も分析した。

Kruskal-Wallis 検定，Steel-Dwass 検定，ピアソン積率相関係数において， $P < 0.05$ を統計学的な有意水準とした。全ての統計解析は，Statview 5.0 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) ソフトを使用した。

5-3 結果

全対象患者 87 例 87 眼のうち，倒乱視群は 33 例 33 眼，直乱視群は 24 例 24 眼，微小乱視群は 30 例 30 眼であった。全対象患者およびそれぞれの群の臨床データと 3 群間比較を表 7 に示す。角膜および屈折乱視量において，倒乱視群，直乱視群，微小乱視群の 3 群間に統計学的有意差があった（それぞれ，倒乱視群と直乱視群で $P = 0.003$ ；倒乱視群と微小乱視群で $P < 0.001$ ，倒乱視群と微小乱視群で $P < 0.001$ ；直乱視群と微小乱視群で $P < 0.001$ ，Steel-Dwass 検定）。他の評価項目では 3 群間に有意差は認められなかった。

偽調節量と他の評価項目との相関を表 8 に示す。全対象患者において、偽調節量は瞳孔径（ピアソン積率相関係数； $r = -0.227$, $P = 0.034$ ）（図 25）、屈折乱視量（ $r = 0.228$, $P = 0.034$ ）（図 26）、そしてゼルニケベクトル項のコマ収差（ $r = 0.229$, $P = 0.032$ ）（図 27）と弱い相関を示した。また、3 群それぞれにおける結果は、倒乱視群では、瞳孔径（ $r = -0.470$, $P = 0.005$ ）（図 28）と屈折倒乱視量（ $r = 0.529$, $P = 0.001$ ）（図 29）に、直乱視群では、ゼルニケベクトル項のコマ収差（ $r = 0.409$, $P = 0.047$ ）（図 30）に、微小乱視群では、角膜多焦点性（ $r = 0.464$, $P = 0.009$ ）（図 31）にそれぞれ偽調節と有意な相関関係を示した。

ステップワイズ重回帰分析の結果を表 9 に示す。全対象患者においては瞳孔径、コマ収差の順で、倒乱視群では屈折乱視量、瞳孔径、トレフォイル収差の順で、直乱視ではコマ収差のみ、微小乱視群では角膜多焦点、トレフォイル収差の順で偽調節量に有意に寄与する変数が選ばれた。

5-4 考察

本章の研究においても、全対象患者の平均偽調節は 2.53 ± 1.38 D で以前の研究^{32,33,61)}と比べても同等の結果となった。また、倒乱視群、直乱視群、微小乱視群の 3 群間で偽調節量に有意差は無かった。このことは、各群における偽調節の要因がそれぞれに存在する可能性を示唆している。実際に、我々の結果では各群で偽調節に関連する臨床項目は異なっていた。

倒乱視眼では、瞳孔径と屈折乱視量が偽調節量と有意な相関を示し、ステップワイズ重回帰分析においても、屈折乱視量が最も関与する変数で、次に瞳孔径、トレフォイル収差が選ばれた。偽調節と屈折乱視の関連に関しては、以前の報告^{13-16,31)}や前章の結果とも一致し、屈折倒乱視が偽水晶体眼の偽調節における重要な役割果たしているという議論をさらに強化する結果となった。

また、小瞳孔が焦点深度を広げ、それにより偽調節の幅が拡大することが知られている²⁵⁻²⁸⁾。1983年にNakazawaとOhtsuki²⁵⁾が、偽水晶体眼の小さい瞳孔ほどより大きな偽調節に関連していたことを示し、瞳孔径が偽調節において、最も重要な因子であると報告した。偽水晶体眼62眼によるより大きな研究として、Kamiyaら²⁷⁾もまた、多変量解析を用いて偽調節に最も関連のある変数が瞳孔径であったと確認した。これら過去の研究は乱視軸の方向の違いによる影響を調査していないが、我々の結果と同様の傾向を示し、倒乱視と瞳孔径の相互的な関与が考えられる。

トレフォイル収差もまた、関与のある変数として選ばれた。Oshikaら³³⁾は、3次収差のトレフォイルのような高次収差成分が、偽調節に寄与すると報告した。しかしながら、単相関分析では偽調節量と有意な相関は示さなかった。乱視を有する偽水晶体眼において、高次収差が及ぼす視機能への影響をより良く理解するためには、眼球波面収差の相互関係を調査する更なる研究が必要である。

直乱視眼では、単相関やステップワイズ重回帰分析の両方において、コマ収差が偽調節量と有意に関連した。Nishiら³⁴⁾は、鉛直コマ成分が大きいほど偽調節の範囲が大きくなることを報告した。また、de Graciaら^{62,63)}は、乱視にコマ収差が加わったほうが乱視単独よりも視覚の質が改善することを示している。これらのことから、特にコマ収差成分が直乱視に協調して偽調節に寄与する可能性が伺える。しかしながら、今回の結果において、ステップワイズ重回帰分析の決定係数が少なかったことから、直乱視眼における偽調節の要因はコマ収差だけでは完全には説明できていない。また、狭い眼瞼裂が鉛直方向の瞳孔径を見せかけ上軽減し焦点深度を広げる可能性^{30,56)}があるため、我々は、まぶたの動きや眼瞼裂による調節への影響も推察している。偽調節におけるまぶたの動きの正確な役割を明らかにするためには、より大きな症例数での別な研

究が必要である。

微小な乱視眼では、角膜多焦点性と偽調節との間に有意な相関がみられ、ステップワイズ重回帰分析においても、最も関与のある変数として角膜多焦点性が、2番目にトレフォイル収差が選ばれた。偽水晶体眼における角膜多焦点性と偽調節との関連にはいくつか報告^{27,32,33)}がある。本章の結果は、屈折乱視の少ない眼における偽調節の要因として、角膜多焦点性の役割を裏付けた。さらに、Oshikaら³³⁾は、角膜多焦点性とともにも角膜の3次収差、特に鉛直方向のトレフォイル成分が偽調節に寄与することを実証し、そのことはステップワイズ重回帰分析の結果と一致している。また、彼らは、角膜多焦点性がトレフォイルに似た角膜屈折度数の分布で表現されると仮定している。我々も、角膜多焦点性を誘発する形状がどんな形か興味を持っている。本章の結果では、角膜と屈折乱視との間に比較的大きな差が観察された。我々が測った屈折乱視は、角膜後面乱視⁶⁴⁾を含む内部乱視により角膜前面乱視が軽減⁶⁵⁾した結果と推測している。角膜乱視やトレフォイル収差のようなこれらの要因を解析することによって多焦点角膜の形状を表現することが可能かもしれない。したがって、この関係をより理解するために、大きな症例数による研究が必要である。

全対象患者では、倒乱視群と似た結果が得られた。比較的倒乱視群の数が多いことも起因しているかもしれない。しかしながら、全対象患者における相関係数は0.3以下と低く、各群に分けることによりそれぞれの相関係数は0.5近くまで増加した。このことから、乱視の有無や乱視軸の方向で分けた場合に偽調節との関連性が強まったこと、偽調節の要因がそれぞれの群で異なったことが重要で、偽調節においては乱視の有無や乱視軸方向で分けた評価をしなければ、誤った結論に導かれる可能性があることを強調したい。

ただし、我々の研究には、いくつかの制限がある。第一に、我々の主な目的

は倒乱視や直乱視の眼における偽調節の要因を比較することだったため、我々は斜乱視眼を排除し、我々の研究集団の中に斜乱視のある患者はほとんど存在していなかった。いくつかの研究では、非矯正時の斜乱視眼は非矯正時の倒乱視や直乱視眼よりも視覚性能が劣ることが示されている¹⁹⁻²⁴⁾。斜乱視眼における偽調節がどのように起こるかを理解することは興味深く、今後の研究の対象となる。第二に、年齢や瞳孔径を含むいくつかの項目が登録時に群間で一致していなかった。そのことは我々の結果にいくらかのバイアスが含まれた可能性がある。しかしながら、乱視軸方向や瞳孔径は、著しく年齢に依存しているため、そのようなマッチングは難しい。第三に、各群の眼数が小さかった。我々は少ないサンプル数がこれらの結果に寄与した可能性を完全には否定できない。したがって、我々の知見を確認するために、より多くの対象で別のうまくデザインされた研究が行われるべきである。第四に、これが現行の小切開白内障手術後の臨床的に実行可能な条件であると判断していたため、また、2.0 D より大きい乱視眼は病的な状態による影響を受けている可能性があるために、我々は2.0 D 以下の乱視眼のみを集めた。そのため、我々の研究結果は従来の白内障嚢外摘出術、および以前の素材の IOL 挿入を伴う過去の研究結果と直接比較することはできないであろう。第五に、本研究では、偽調節は臨床的に有利な現象なのかを客観的に評価していない。あくまで見せかけの調節のため、コントラスト感度低下などの代償を伴っている可能性があり、個々の患者によって偽調節の評価は変わるかもしれない。偽調節という現象は、全ての人に受け入れられるものなのかも合わせて、今後、偽調節を評価していかなければいけないと考えている。

まとめとして、本章の研究結果では、乱視の有無または乱視軸の方向による偽調節量に有意な差は無く、さらに、偽調節への影響においてはそれぞれ別の

要因が関与していることが示された。

5-5 結論

2.0 D までの屈折倒乱視眼では，小さい瞳孔径ほど，そして大きい乱視量ほど偽調節に寄与することが示された．直乱視眼では，コマ収差と偽調節との関連が認められた．微小な乱視眼では，角膜多焦点性が偽調節に寄与していた．これらの知見で，白内障手術後の単焦点 IOL 挿入眼における乱視の有無や乱視軸の方向に応じて，偽調節の要因が異なることが示された．

第6章 結語

本研究は、小切開白内障手術後の屈折乱視の有無や軸方向で分けて偽調節への影響を調査した初めての研究である。そして、偽水晶体眼の偽調節においてその要因は一様ではなく、乱視の有無や乱視軸方向によって偽調節の要因が異なることが示された。このため、従来から議論されてきた偽調節の様々な要因は、個々の乱視の条件によって異なる可能性が推察できる。今後、視機能への評価を研究する際には、倒乱視や直乱視、斜乱視といった乱視の条件について十分に留意する必要がある。

今後の展望

偽調節のメカニズムにおいては、角膜多焦点性など推測される要因はあるけれど、どのような形状でなぜ焦点深度が増大するのかまでは解明できていない。もし、偽調節のメカニズムの完全な解明に至るならば、術後の視覚の質に大きく貢献することになるであろう。老視に対する患者の要望は、依然、強いことが臨床においてもよく感じられる。偽調節を得るという観点では、2.0 D までの倒乱視の小瞳孔や直乱視においては、トーリック IOL による乱視矯正をしない選択が伺える。しかし、偽調節という現象は、本来の調節ではない。あくまで見せかけの調節であるため、コントラスト感度の低下やぼやけなどの代償を伴っている可能性も十分に考えていかなければならない。偽調節という現象を受け入れられないと言う患者の可能性も含め、白内障術後の視覚の質をより高めるためには、最も優先される視機能および代償となり得る症状の許容を個々の患者において考え、治療を行うことが望ましい。

第7章 謝辞

まず研究に携わるきっかけや環境，そして研究に関する様々な御指導御鞭撻を賜りました筑波大学大学院人間総合科学研究科 疾患制御医学 眼科学分野 大鹿哲郎教授に深く感謝の意を表します。

そして常に親身に，常にタイムリーに相談に乗ってくださり，丁寧かつ熱心なご指導また多くの知識や適切な指示を賜りました筑波大学大学院人間総合科学研究科 疾患制御医学 眼科学分野講師 平岡孝浩先生に厚く御礼申し上げます。

また本研究を行うにあたり筑波大学眼科外来の先生，看護師，視能訓練士，外来スタッフの皆様には様々なご協力を頂き，深謝いたします。

最後に，これまでの不平不満に耐え，筆者を支えてくれた，また励まし，そして私の論文を最も喜んでくれた，愛する妻・佐和子には感謝しきれないほどの有り難みを感じております。一緒に遊びたい気持ちを抑えて，いつも私を笑顔で送り迎えをしてくれた2人の子供・匠真と結衣とともに，私の掛け替えの無い家族に対し心より感謝の気持ちを示したいと思います。

本当に有難うございました。

第 8 章 引用文献

1. Mesci C, Erbil HH, Olgun A, Yaylali SA. Visual performances with monofocal, accommodating, and multifocal intraocular lenses in patients with unilateral cataract. *Am J Ophthalmol.* 2010; 150: 609-18.
2. Cochener B, Lafuma A, Khoshnood B, Courouve L, Berdeaux G. Comparison of outcomes with multifocal intraocular lenses: a meta-analysis. *Clin Ophthalmol.* 2011; 5: 45-56.
3. Gundersen KG, Potvin R. Comparative visual performance with monofocal and multifocal intraocular lenses. *Clin Ophthalmol.* 2013; 7: 1979-85.
4. Ji J, Huang X, Fan X, Luo M. Visual performance of Acrysof ReSTOR compared with a monofocal intraocular lens following implantation in cataract surgery. *Exp Ther Med.* 2013; 5: 277-81.
5. Holland E, Lane S, Horn JD, Ernest P, Arleo R, Miller KM. The AcrySof Toric intraocular lens in subjects with cataracts and corneal astigmatism: a randomized, subject-masked, parallel-group, 1-year study. *Ophthalmology.* 2010; 117: 2104-11.

6. Alió JL, Piñero DP, Tomás J, Alesón A. Vector analysis of astigmatic changes after cataract surgery with toric intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg.* 2011; 37: 1038-49.
7. Sasaki H, Yoshida M, Manabe S, Yoshimura K, Hayashi K. Effects of the toric intraocular lens on correction of preexisting corneal astigmatism. *Jpn J Ophthalmol.* 2012; 56: 445-52.
8. Kamiya K, Hayashi K, Shimizu K, Negishi K, Sato M, Bissen-Miyajima H. Multifocal Intraocular Lens Explantation: A Case Series of 50 Eyes. *Am J Ophthalmol.* 2014; 158: 215-20.
9. Friedman B. Acceptance of weak cylinders at paradoxical axes. *Arch Ophthalmol.* 1940; 23: 720-6.
10. Eggers H. Estimation of uncorrected visual acuity in malingers. *Arch Ophthalmol.* 1945; 33: 23-7.
11. Datiles MB, Gancayco T. Low myopia with low astigmatic correction gives cataract surgery patients good depth of focus. *Ophthalmology.* 1990; 97: 922-6.
12. Sawusch MR, Guyton DL. Optimal astigmatism to enhance depth of focus after cataract surgery. *Ophthalmology.* 1991; 98: 1025-9.

13. Bradbury JA, Hillman JS, Cassekks-Brown A. Optimal postoperative refraction for good unaided near and distance vision with monofocal intraocular lenses. *Br J Ophthalmol.* 1992; 76: 300-2.
14. Verzella F, Calossi A. Multifocal effect of against-the-rule myopic astigmatism in pseudophakic eyes. *Refract Corneal Surg.* 1993; 9: 58-61.
15. Trindade F, Oliveira A, Frasson M. Benefit of against-the-rule myopic astigmatism to uncorrected near acuity. *J Cataract Refract Surg.* 1997; 23: 82-5.
16. Nagpal KM, Desai C, Trivedi RH, Vasavada AR. Is pseudophakic astigmatism a desirable goal? *Indian J Ophthalmol.* 2000; 48: 213-6.
17. Morlet N, Minassian D, Dart J. Astigmatism and the analysis of its surgical correction. *Br J Ophthalmol.* 2001; 85: 1127-38.
18. Nanavaty MA, Vasavada AR, Patel AS, Raj SM, Desai TH. Analysis of patients with good uncorrected distance and near vision after monofocal intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg.* 2006; 32: 1091-7.
19. Hubel DH, Wiesel TN. Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex. *J Physiol.* 1959; 148: 574-91.

20. Campbell FW, Kulikowski JJ, Levinson J. The effect of orientation on the visual resolution of gratings. *J Physiol.* 1966; 187: 427-36.
21. McMahon MJ, MacLeod DI. The origin of the oblique effect examined with pattern adaptation and masking. *J Vis.* 2003; 3: 230-9.
22. Murray IJ, Elliott SL, Pallikaris A, Werner JS, Choi S, Tahir HJ. The oblique effect has an optical component: Orientation-specific contrast thresholds after correction of high-order aberrations. *J Vis.* 2010; 10: 10.
23. Rosenfield M, Hue JE, Huang RR, Bababekova Y. The effects of induced oblique astigmatism on symptoms and reading performance while viewing a computer screen. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2012; 32: 142-8.
24. Kobashi H, Kamiya K, Shimizu K, Kawamorita T, Uozato H. Effect of axis orientation on visual performance in astigmatic eyes. *J Cataract Refract Surg.* 2012; 38: 1352-9.
25. Nakazawa M, Ohtsuki K. Apparent accommodation in pseudophakic eyes after implantation of posterior chamber intraocular lenses. *Am J Ophthalmol.* 1983; 96: 435-8.
26. 名和良晃, 中塚三恵子, 吉井稔章, 小南雅也, 原嘉昭, 魚里博. 近見 1.0 の視標を用いた偽調節の測定. *日眼会誌.* 2001; 105: 171-6.

27. Kamiya K, Kawamorita T, Uozato H, Kasugai H, Shimizu K. Effect of astigmatism on apparent accommodation in pseudophakic eyes. *Optom Vis Sci.* 2012; 89: 148-54.
28. Yamamoto S, Adachi-Usami E. Apparent accommodation in pseudophakic eyes as measured with visually evoked potential. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1992; 33: 443-6.
29. Huber C. Planned myopic astigmatism as a substitute for accommodation in pseudophakia. *J Am Intraocul Implant Soc.* 1981; 7: 244-9.
30. Huber C. Myopic astigmatism a substitute for accommodation in pseudophakia. *Doc Ophthalmol.* 1981; 52: 123-78.
31. 森下仁子, 佐川正治, 峯克彰, 植村佐知子, 魚里博. 偽水晶体眼の術後乱視は偽調節 (みせかけの調節) に寄与するのか? *日本眼科紀要.* 1991; 42: 1596-601.
32. Fukuyama M, Oshika T, Amano S, Yoshitomi F. Relationship between apparent accommodation and corneal multifocality in pseudophakic eyes. *Ophthalmology.* 1999; 106: 1178-81.

33. Oshika T, Mimura T, Tanaka S, Fukuyama M, Yoshitomi F, Maeda N, Fujikado T, Hirohara Y, Mihashi T. Apparent accommodation and corneal wavefront aberration in pseudophakic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2002; 43: 2882-6.
34. Nishi T, Nawa Y, Ueda T, Masuda K, Taketani F, Hara Y. Effect of total higher-order aberrations on accommodation in pseudophakic eyes. *J Cataract Refract Surg.* 2006; 32: 1643-9.
35. Hardman Lea SJ, Rubinstein MP, Snead MP, Haworth SM. Pseudophakic accommodation? A study of the stability of capsular bag supported, one piece, rigid tripod, or soft flexible implants. *Br J Ophthalmol.* 1990; 74: 22-5.
36. Gonzalez F, Capeans C, Santos L, Suarez J, Cadarso L. Anteroposterior shift in rigid and soft implants supported by the intraocular capsular bag. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 1992; 230: 237-9.
37. Findl O, Kiss B, Petternel V, Menapace R, Georgopoulos M, Rainer G, Drexler W. Intraocular lens movement caused by ciliary muscle contraction. *J Cataract Refract Surg.* 2003; 29: 669-76.
38. Nawa Y, Ueda T, Nakatsuka M, Tsuji H, Marutani H, Hara Y, Uozato H. Accommodation obtained per 1.0 mm forward movement of a posterior chamber intraocular lens. *J Cataract Refract Surg.* 2003; 29: 2069-72.

39. Gudmundsdottir E, Jonasson F, Jonsson V, Stefánsson E, Sasaki H, Sasaki K. "With the rule" astigmatism is not the rule in the elderly. Reykjavik Eye Study: a population based study of refraction and visual acuity in citizens of Reykjavik 50 years and older. Iceland-Japan Co-Working Study Groups. *Acta Ophthalmol Scand.* 2000; 78: 642-6.
40. Asano K, Nomura H, Iwano M, Ando F, Niino N, Shimokata H, Miyake Y. Relationship between astigmatism and aging in middle-aged and elderly Japanese. *Jpn J Ophthalmol.* 2005; 49: 127-33.
41. 三宅俊之, 神谷和孝, 天野理恵, 清水公也. 白内障術後の角膜乱視. *日眼会誌.* 2011; 115: 447-53.
42. 小阪晃一, 根岸一乃, 大沼一彦, 小口芳久. 開放型手持ち電子瞳孔計による明室および準暗室の瞳孔径測定. *新しい眼科.* 2004; 21: 1281-4.
43. Campbell CE. A new method for describing the aberrations of the eye using Zernike polynomials. *Optom Vis Sci.* 2003; 80: 79-83.
44. Guirao A, Tejedor J, Artal P. Corneal aberrations before and after small-incision cataract surgery. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2004; 45: 4312-9.
45. Kosaki R, Maeda N, Bessho K, Hori Y, Nishida K, Suzuki A, Hirohara Y, Mihashi T, Fujikado T, Tano Y. Magnitude and orientation of Zernike terms in patients with

- keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2007; 48: 3062-8.
46. Applegate RA, Donnelly WJ 3rd, Marsack JD, Koenig DE, Pesudovs K.
Three-dimensional relationship between high-order root-meansquare wavefront error, pupil diameter, and aging. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* 2007; 24: 578-87.
47. Nakagawa T, Maeda N, Kosaki R, Hori Y, Inoue T, Saika M, Mihashi T, Fujikado T, Tano Y. Higher-order aberrations due to the posterior corneal surface in patients with keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2009; 50: 2660-5.
48. Applegate RA, Marsack JD, Sarver EJ. Noise in wavefront error measurement from pupil center location uncertainty. *J Refract Surg.* 2010; 26: 796-802.
49. Marcos S, Burns SA. On the symmetry between eyes of wavefront aberration and cone directionality. *Vision Res.* 2000; 40: 2437-47.
50. Porter J, Guirao A, Cox IG, Williams DR. Monochromatic aberrations of the human eye in a large population. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* 2001; 18: 1793-803.
51. Smolek MK, Klyce SD, Sarver EJ. Inattention to nonsuperimposable midline symmetry causes wavefront analysis error. *Arch Ophthalmol.* 2002; 120: 439-47.
52. Watanabe K, Negishi K, Dogru M, Yamaguchi T, Torii H, Tsubota K, Effect of

- pupil size on uncorrected visual acuity in pseudophakic eyes with astigmatism. *J Refract Surg.* 2013; 29: 25-9.
53. Kamiya K, Kobashi H, Shimizu K, Kawamorita T, Uozato H. Effect of pupil size on uncorrected visual acuity in astigmatism eyes. *Br J Ophthalmol.* 2012; 96: 267-70.
54. Pujol J, Arjona M, Arasa J, Badia V. Influence of amount and changes in axis of astigmatism on retinal image quality. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* 1998; 15: 2514-21.
55. Atchison DA, Guo H, Charman WN, Fisher SW. Blur limits for defocus, astigmatism and trefoil. *Vision Res.* 2009; 49: 2393-403.
56. 大谷伸一郎, 宮田和典, 坂上裕志, 鮫島知一, 高橋哲也, 中原正彰. 白内障手術における乱視矯正同時手術の適応. *IOL&RS.* 2001; 15: 142-5.
57. Atchison DA, Fisher SW, Pedersen CA, Ridall PG. Noticeable, troublesome and objectionable limits of blur. *Vision Res.* 2005; 45: 1967-74.
58. Guo H, Atchison DA. Subjective Blur Limits for Cylinder. *Optom Vis Sci.* 2010; 87: 549-59.
59. Ohlendorf A, Tabernero J, Schaeffel F. Visual Acuity with Simulated and Real Astigmatic Defocus. *Optom Vis Sci.* 2011; 88: 562-9.

60. Ohlendorf A, Taberner J, Schaeffel F. Neuronal adaptation to simulated and optically-induced astigmatic defocus. *Vision Res.* 2011; 51: 529-34.
61. Elder MJ, Murphy C, Sanderson GF. Apparent accommodation and depth of field in pseudophakia. *J Cataract Refract Surg.* 1996; 22: 615-9.
62. de Gracia P, Dorronsoro C, Gamba E, Marin G, Hernández M, Marcos S. Combining coma with astigmatism can improve retinal image over astigmatism alone. *Vis Res.* 2010; 50: 2008–14.
63. de Gracia P, Dorronsoro C, Marin G, Hernández M, Marcos S. Visual acuity under combined astigmatism and coma: Optical and neural adaptation effects. *J Vis.* 2011; 11: 1-11.
64. Ueno Y, Hiraoka T, Miyazaki M, Ito M, Oshika T. Corneal thickness profile and posterior corneal astigmatism in normal corneas. *Ophthalmology.* 2015; 122: 1072-8
65. Bregnhøj JF, Mataji P, Naeser K. Refractive, anterior corneal and internal astigmatism in the pseudophakic eye. *Acta Ophthalmol.* 2015; 93: 33-40.

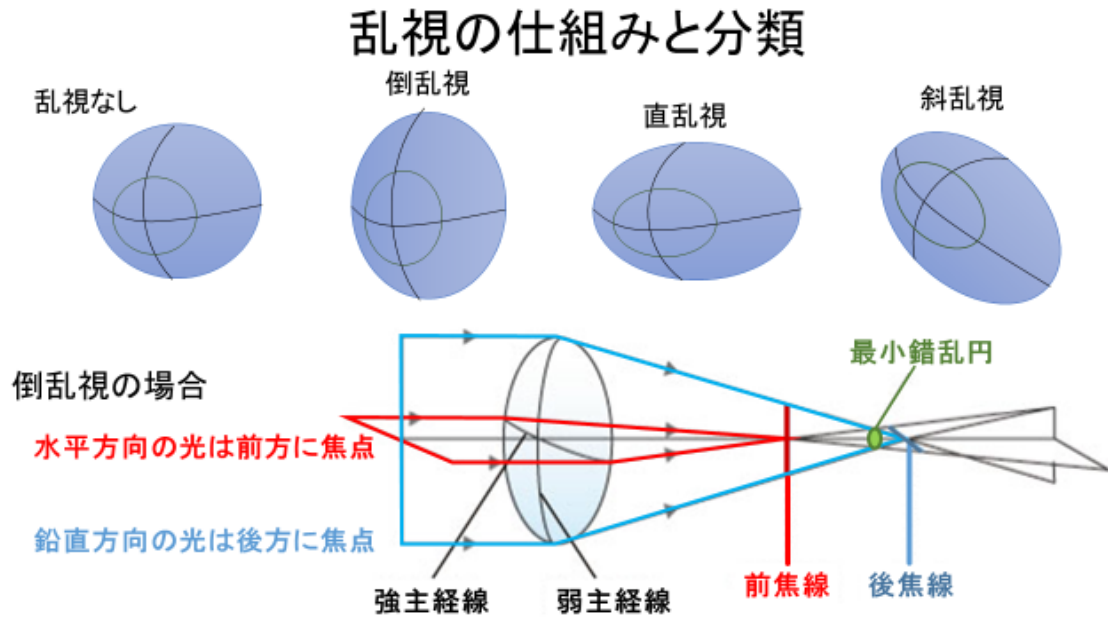


図1 乱視の仕組みと分類.

それぞれ縦方向に長い楕円形の乱視を倒乱視，水平方向に長い楕円形の乱視を直乱視，そして斜めの乱視を斜乱視と分類している．縦方向に長い楕円形の乱視の場合，鉛直面の光はより後方に，水平面の光はより前方に焦点する．この時，前方に焦点する集光線を前焦線，後方に焦点する集光線を後焦線，前焦線と後焦線の間に位置する光学的中央点を最小錯乱円と呼ぶ．

眼内レンズの種類と臨床的意義

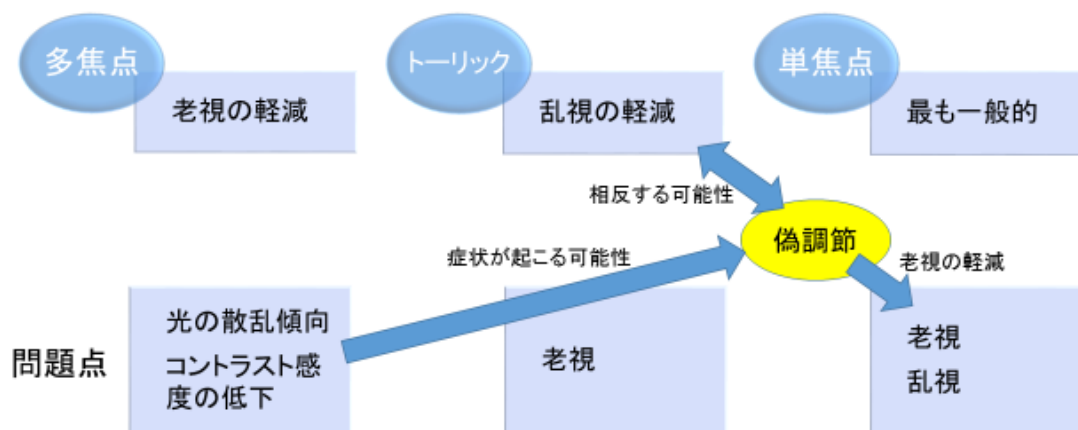
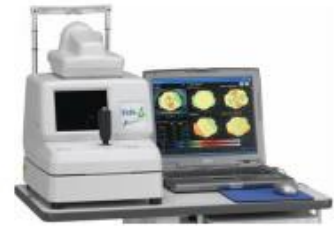
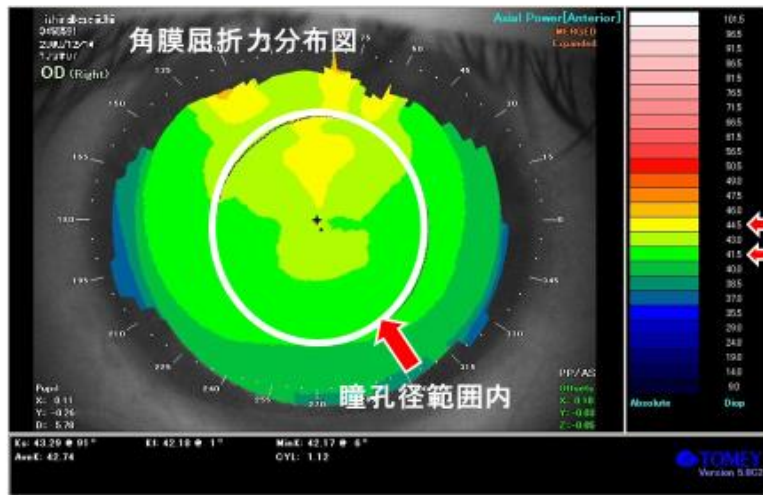


図2 眼内レンズの種類と臨床的意義.

それぞれ多焦点，トーリック，単焦点の眼内レンズの臨床的意義および問題点を表示．偽調節は老視の問題を軽減する働きがあるが，乱視との関わりがある場合にはトーリック眼内レンズにより作用が相反する可能性あり．また，偽調節はあくまで見せかけの調節のため，多焦点眼内レンズにみられるようなコントラスト低下などの症状が引き起こされる可能性も含む．

前眼部形状解析装置



最大値から最小値の
差を角膜屈折勾配

||
角膜多焦点性

図3 角膜多焦点性解析法.

前眼部形状解析装置を用いて瞳孔径の範囲内の角膜形状を分析し、角膜屈折力の最も高い値と最も低い値の差を計算して、角膜多焦点性と定義。現在のところ、どのような形状であるかは規則性がみられず明らかではない。

波面収差

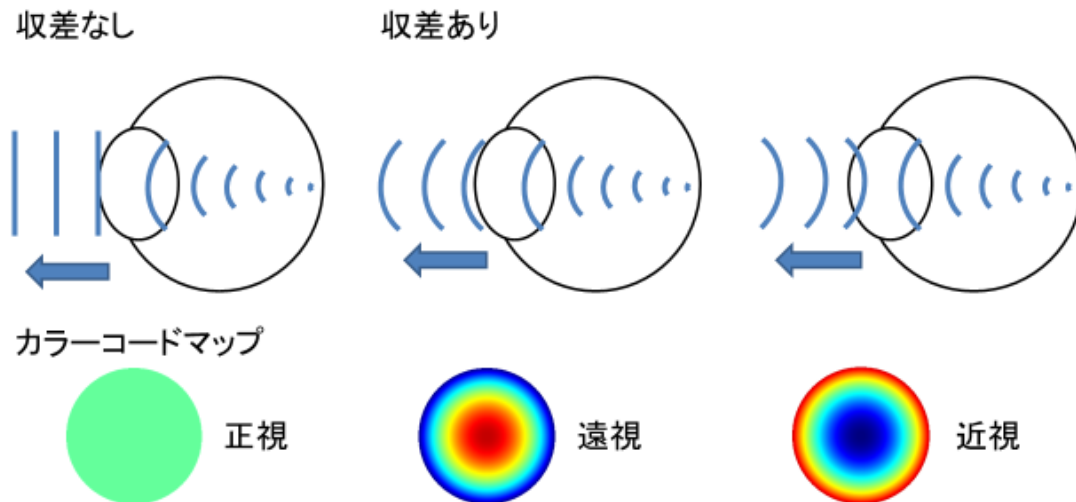


図4 波面収差の説明.

仮に、正視と呼ばれる眼球に収差がない（光学的に完全に）無収差の場合、眼内から眼外に反射した光は平面な波面となり、カラーコードマップで示すと緑1色となる。一方収差がある場合は、眼内から眼外に反射した光は複雑な波面となる。遠視のみの場合、反射した光は発散方向となり、この時の波面を中心部が早く、周辺部が遅くなると表現する。これをカラーコードマップにすると、中心部の進んだ光は暖色系、周辺部の遅れた光は寒色系で表される。逆に近視のみの場合は、収束方向となり、中心部が遅く、周辺部が早い形となり、カラーコードマップ表示では、遠視とは逆に周辺部の遅れた光が寒色系、周辺部の進んだ光が暖色系で表される。

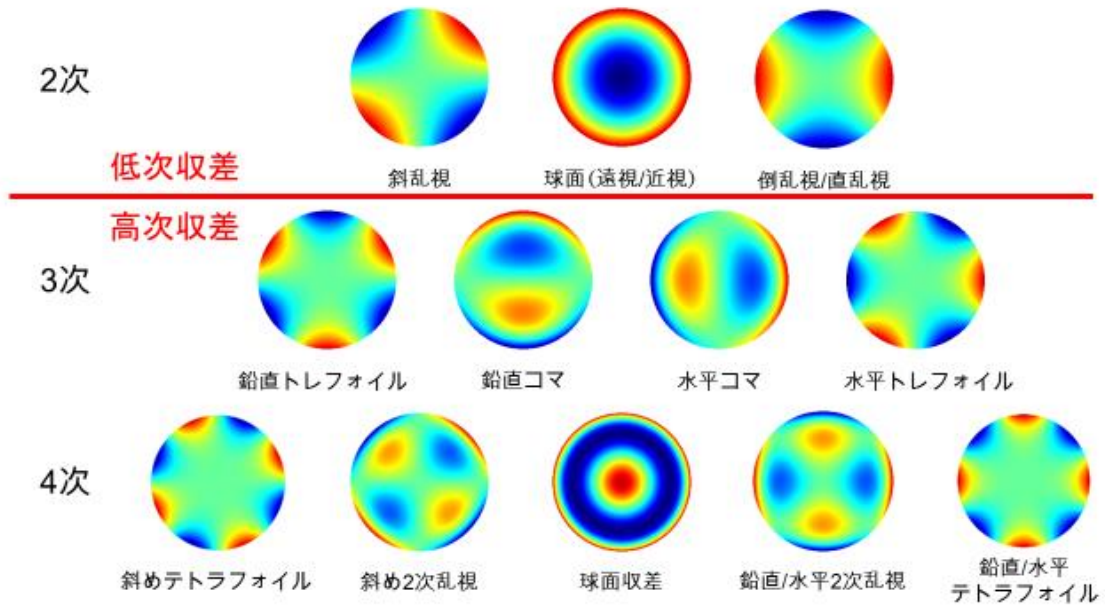


図5 ゼルニケ多項式のカラーコードマップ展開図.

得られた波面の形状から進んだ光は暖色系、遅れた光は寒色系に表現され、それぞれのゼルニケ多項式に展開される. 2次の収差は低次収差とも言われ、眼鏡による矯正が可能. 3次以降の収差は眼鏡による矯正は不能で、そのため、3次以上の収差は高次収差として識別される.

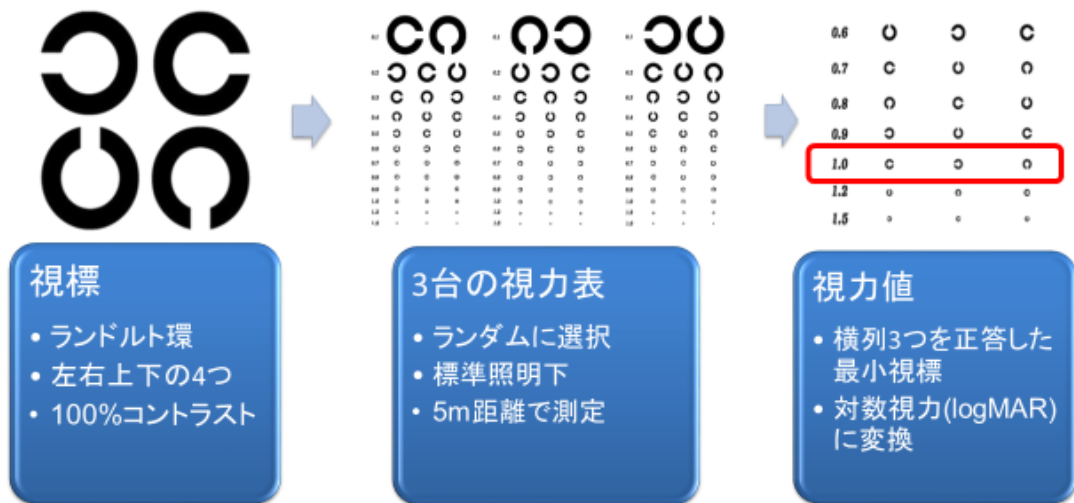


図6 視力測定法.

全てのランドルト環は縦または横の4方向で表示. 縦3列視標の100%コントラスト視力チャートを使用, 標準照明下5mの距離で測定. 3台の視力表のうち, 検査時にランダムに1台を選択. 横列3つ全てのランドルト環を正解した最小視標が視力値. 得られた小数視力は, 対数視力(logMAR)に変換し記録.

眼球波面収差測定および解析の流れ

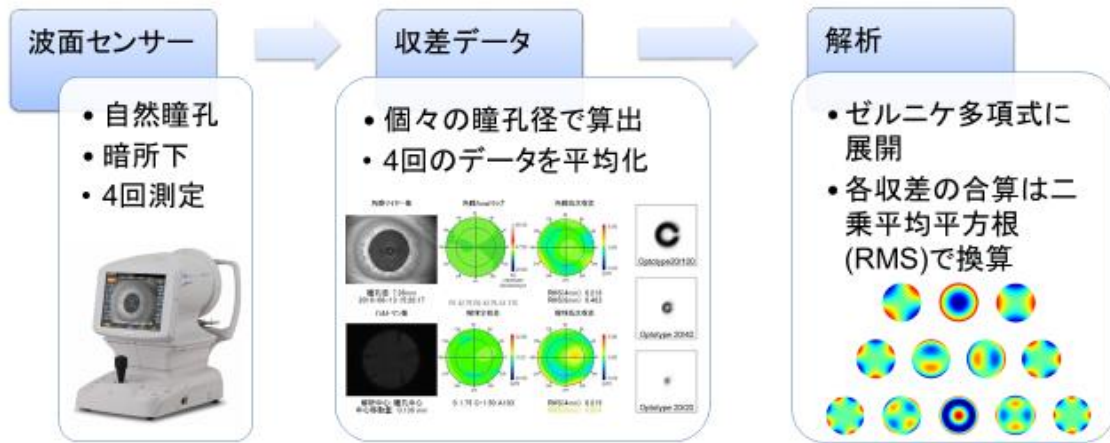


図7 眼球波面収差測定および解析の流れ。

基本的に無散瞳の自然瞳孔にて、暗所室で測定。個々の瞳孔径によって得られた収差データ解析のために4回測定し平均化。これらのデータは正規化されたゼルニケ多項式に展開、各収差の合算は、二乗平均平方根 (RMS) で換算。

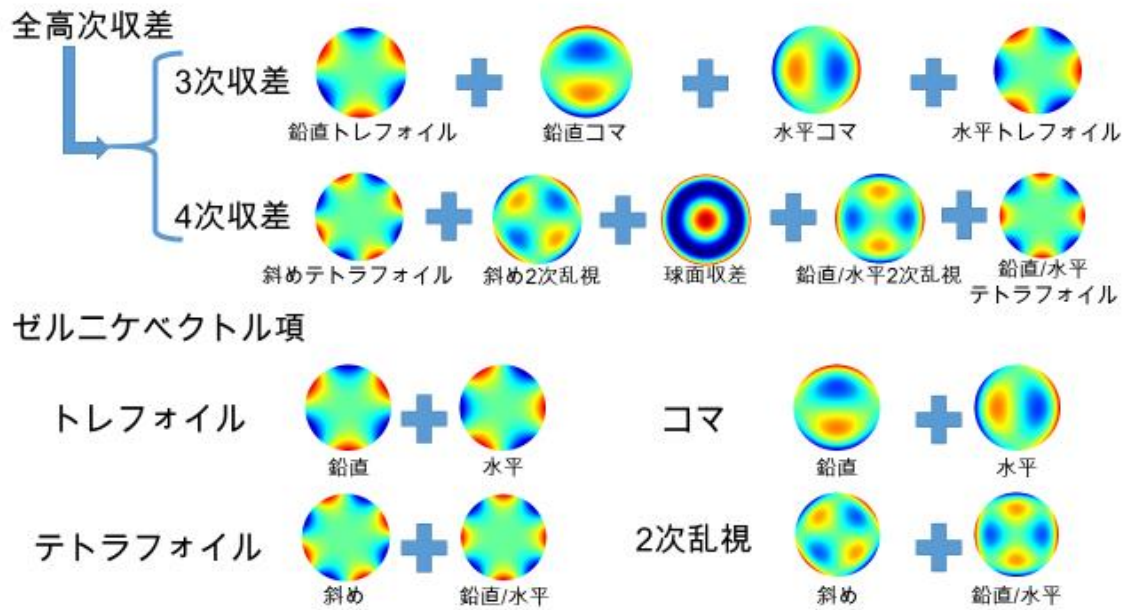


図8 高次収差の分類.

今回の研究において、全高次収差は、3次収差と4次収差の高次収差成分を合わせた収差として表現。3次収差は、鉛直・水平トレフォイルおよび鉛直・水平コマの4つの高次収差成分を、4次収差は、斜め・鉛直/水平テトラフォイルおよび斜め・鉛直/水平2次乱視、球面収差の5つの高次収差成分を合わせた収差として表現。また、3次の収差における鉛直と水平、そして4次の収差における斜めと鉛直/水平の各々対となる成分をそれぞれ合わせた収差をゼルニケベクトル項のトレフォイル、コマ、テトラフォイル、2次乱視として表現。

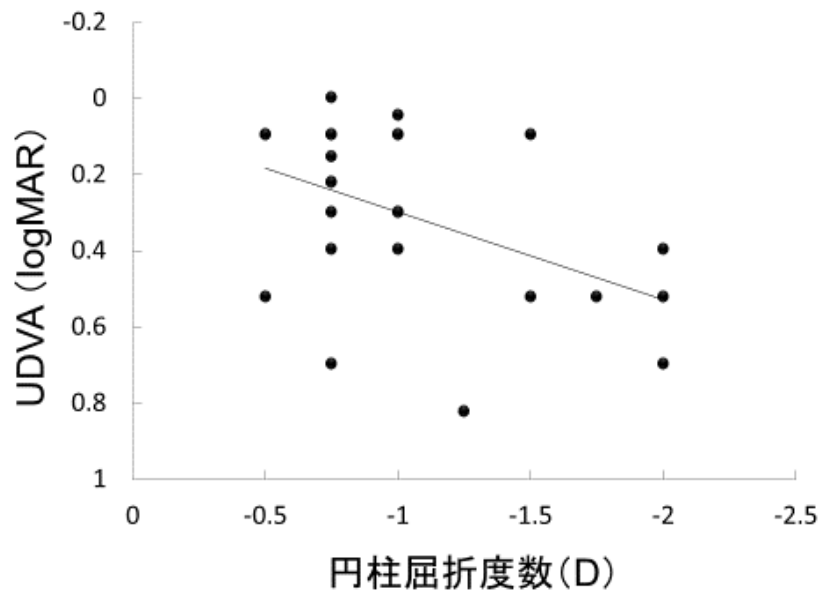


図9 倒乱視群（25眼）における裸眼遠方視力（UDVA）と円柱屈折度数を示した散布図.

円柱屈折度数は、裸眼遠方視力と負の相関を示した（ピアソン積率相関係数； $r = -0.48, P = 0.01$ ）.

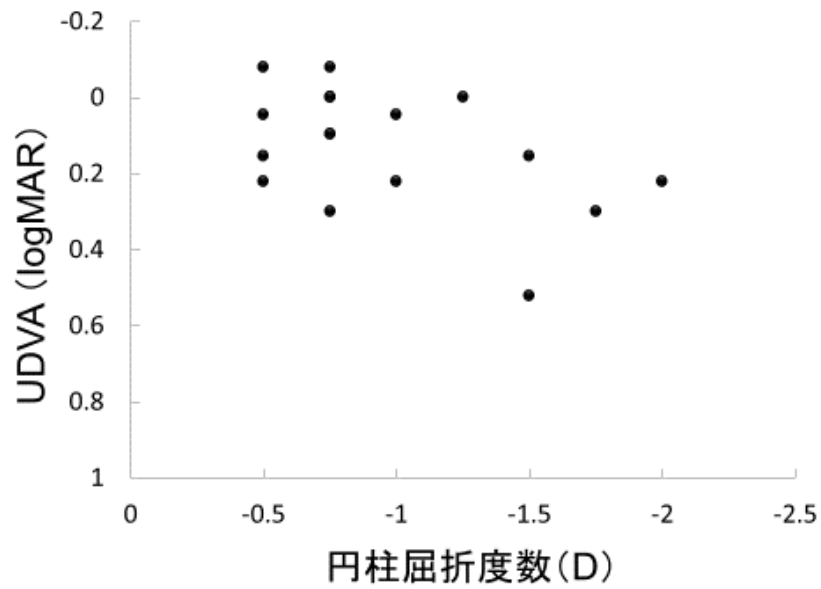


図 10 直乱視群（18 眼）における裸眼遠方視力（UDVA）と円柱屈折度数を示した散布図.

円柱屈折度数は、裸眼遠方視力と相関を示さない（ピアソン積率相関係数； $r = -0.39$, $P = 0.11$ ）.

まぶたや眼瞼裂が乱視に影響する可能性

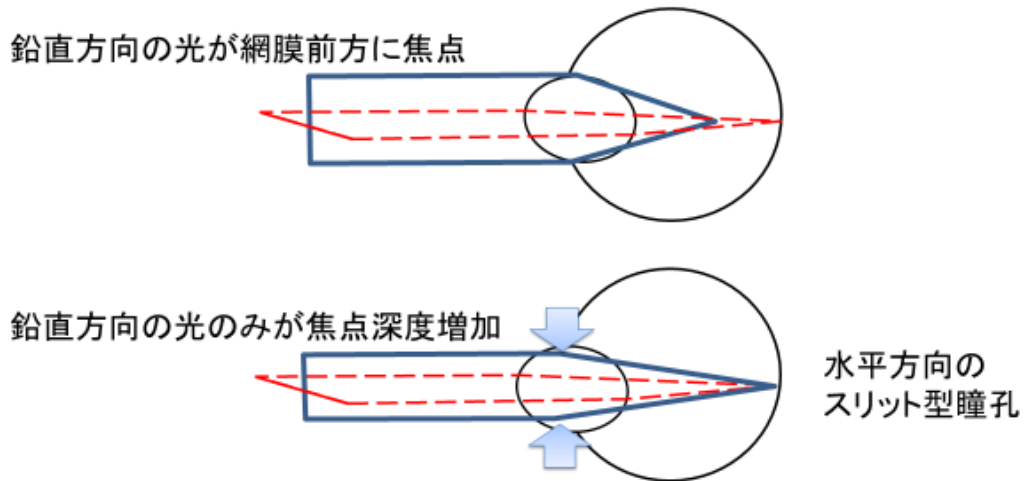


図 11 まぶたや眼瞼裂が乱視に影響する可能性.

Huber は、鉛直方向のぼやけた網膜像が、まぶたを狭めることによって水平方向のスリット型瞳孔となり鮮鋭化する可能性を指摘。この働きによりある種のピンホール効果が生まれ、焦点深度が増大する可能性あり。

偽調節測定法

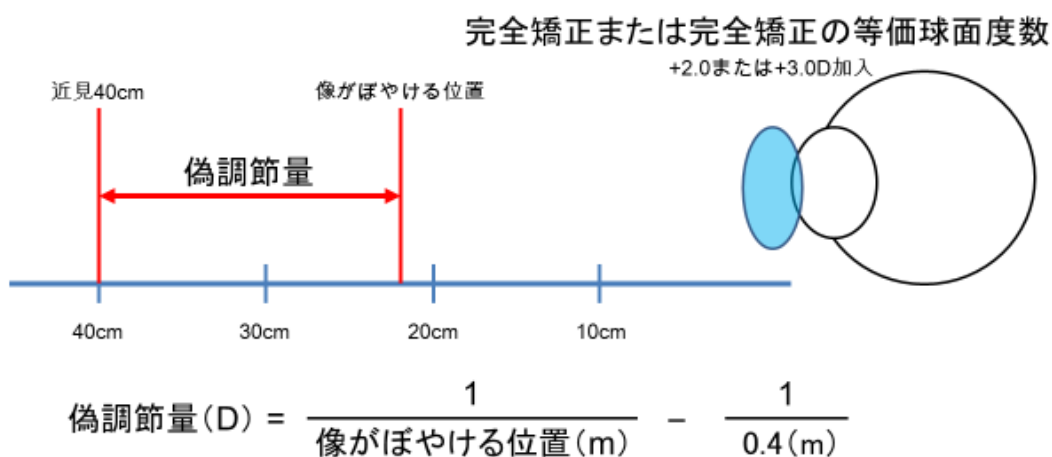


図 12 偽調節測定法.

完全矯正または完全矯正の等価球面度数に+ 2.0 または+ 3.0 D のレンズを加入し、40 cm の距離で 0.7 のランドルト環視標が答えられる状態から検査開始。像がぼやけるところまで視標がゆっくり近づき、明視できるまで視標を戻す。検査は 10 回繰り返す、ぼやけが起こる位置の平均距離を調節の近点として、偽調節量は 40 cm の距離と調節の近点の差から算出（ジオプターに換算）。

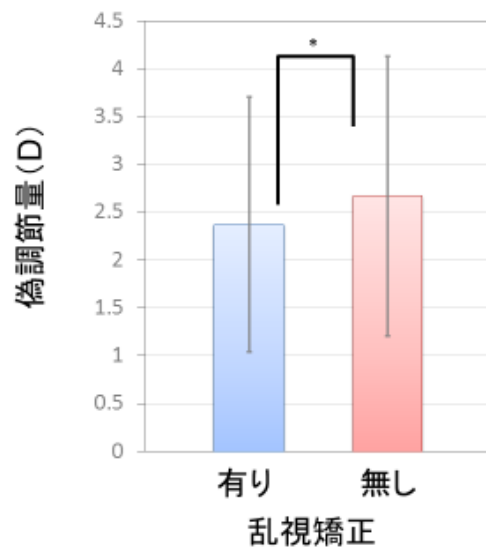


図 13 全対象患者（68 眼）の乱視矯正有りと無しにおける偽調節量の比較.

乱視矯正有りよりも乱視矯正無しの偽調節量のほうが有意に大きい ($P = 0.001$, 対応のある t 検定).

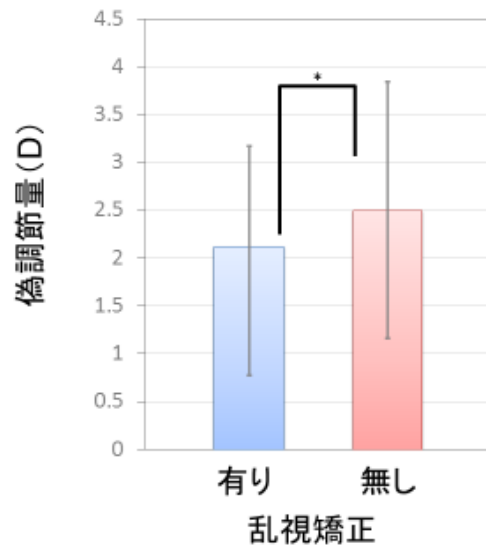


図 14 倒乱視群 (40 眼) の乱視矯正有りと無しにおける偽調節量の比較.

乱視矯正有りよりも乱視矯正無しの偽調節量のほうが有意に大きい ($P = 0.005$, 対応のある t 検定).

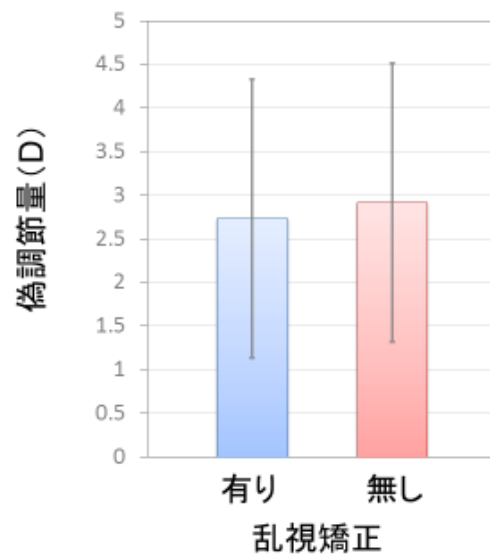


図 15 直乱視群 (28 眼) の乱視矯正有りと無しにおける偽調節量の比較.

乱視矯正有りと乱視矯正無しで偽調節量に有意差は認められない ($P = 0.115$, 対応のある t 検定).

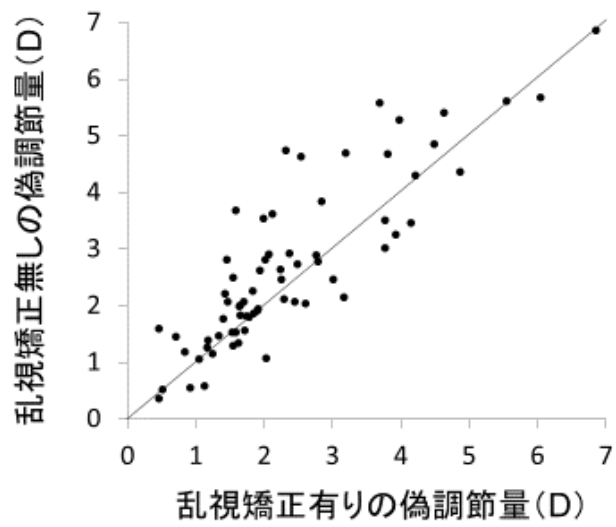


図 16 全対象患者（68 眼）における乱視矯正の有無での偽調節量の散布図.

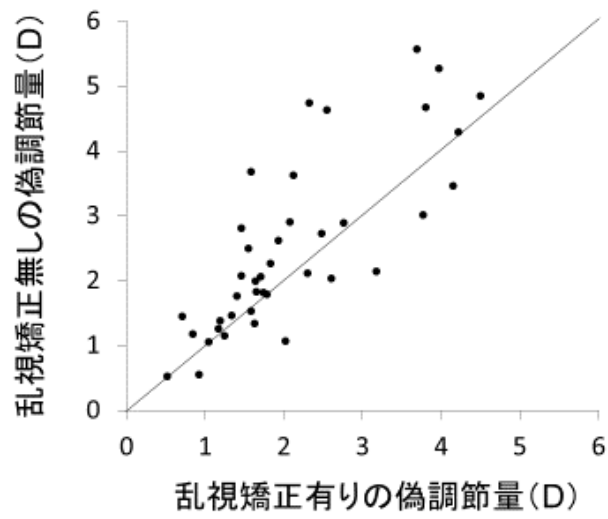


図 17 倒乱視群（40 眼）における乱視矯正の有無での偽調節量の散布図.

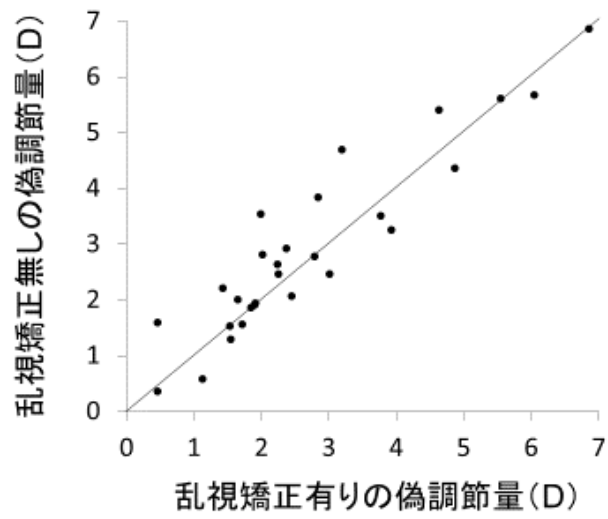


図 18 直乱視群 (28 眼) おける乱視矯正の有無での偽調節量の散布図.

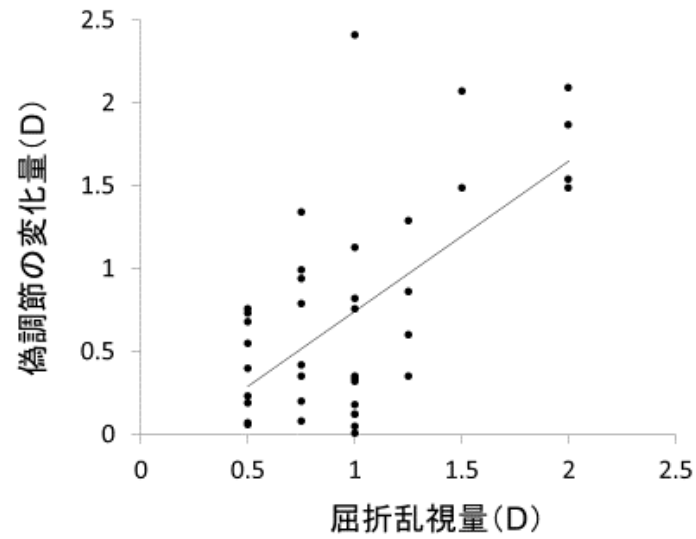


図 19 全対象患者（41 眼）における乱視矯正の有無での偽調節の変化量と屈折乱視量を示した散布図.

屈折乱視量は、偽調節の変化量と正の相関を示した（Spearman の順位相関係数 ; $r = 0.460$, $P = 0.004$ ）.

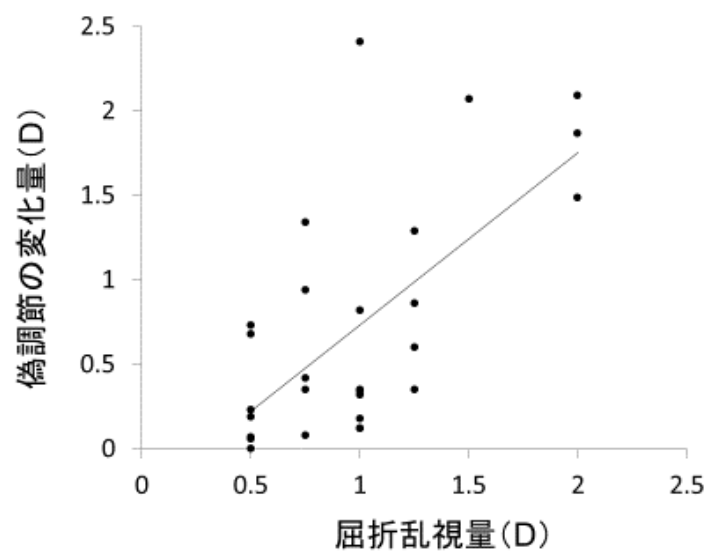


図 20 倒乱視群 (27 眼) における乱視矯正の有無での偽調節の変化量と屈折乱視量を示した散布図.

屈折乱視量は、偽調節の変化量と正の相関を示した (Spearman の順位相関係数 ; $r = 0.547$, $P = 0.005$).

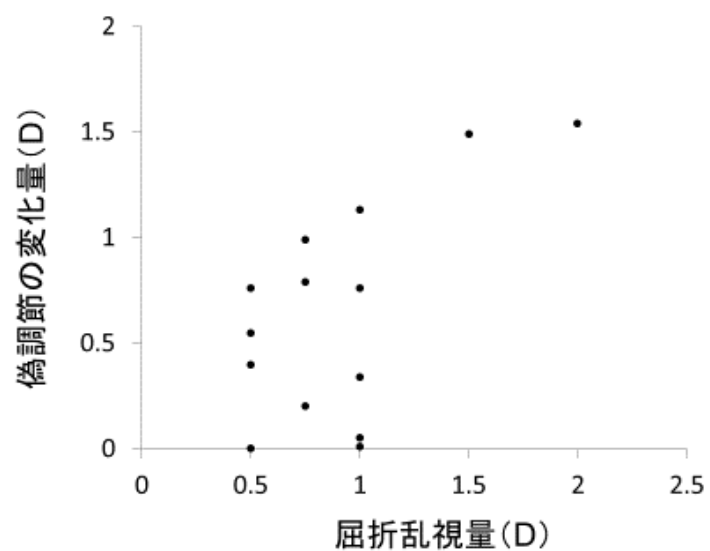


図 21 直乱視群（14 眼）における乱視矯正の有無での偽調節の変化量と屈折乱視量を示した散布図.

屈折乱視量は、偽調節の変化量と相関を示さない (Spearman の順位相関係数 ; $r = 0.330$, $P = 0.235$).

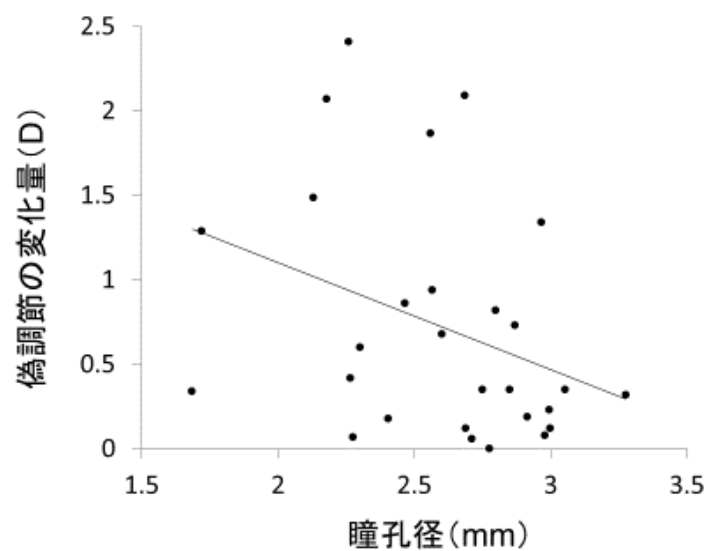


図 22 倒乱視群（27 眼）における乱視矯正の有無での偽調節の変化量と瞳孔径を示した散布図.

瞳孔径は、偽調節の変化量と負の相関を示した（Spearman の順位相関係数； $r = -0.403$, $P = 0.040$ ）.

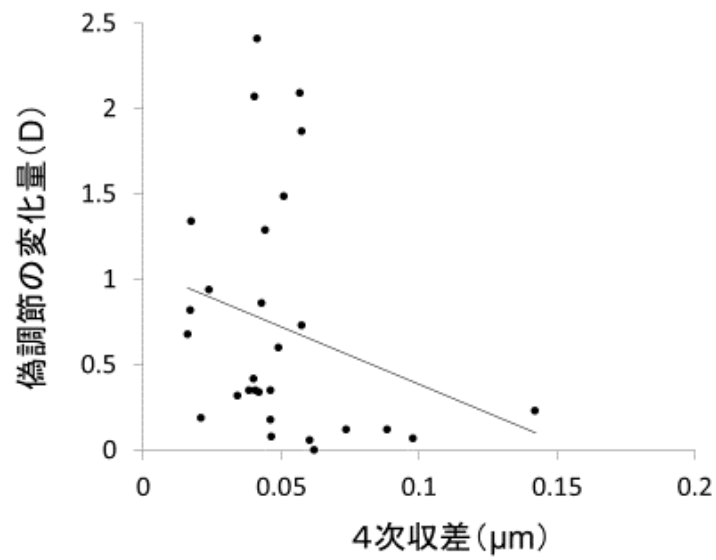


図 23 倒乱視群（27 眼）における乱視矯正の有無での偽調節の変化量と 4 次収差を示した散布図.

4 次収差は、偽調節の変化量と負の相関を示した (Spearman の順位相関係数 ; $r = -0.430$, $P = 0.029$).

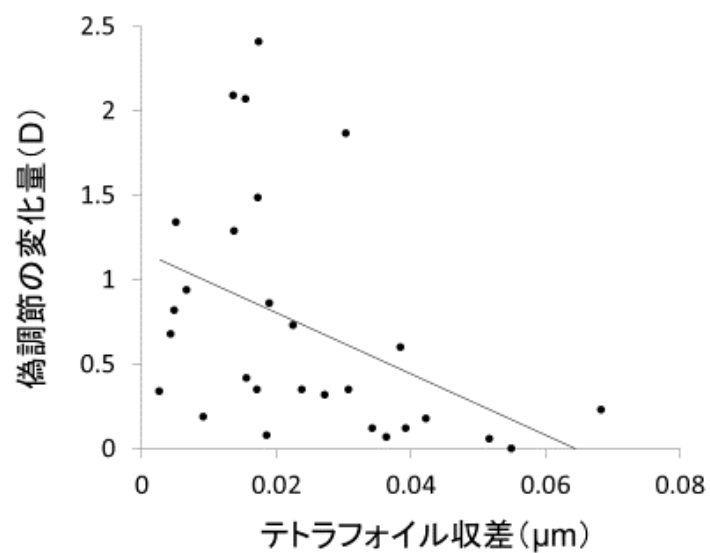


図 24 倒乱視群（27 眼）における乱視矯正の有無での偽調節の変化量とテトラフォイル収差を示した散布図.

テトラフォイル収差は、偽調節の変化量と負の相関を示した（Spearman の順位相関係数； $r = -0.518$, $P = 0.008$ ）.

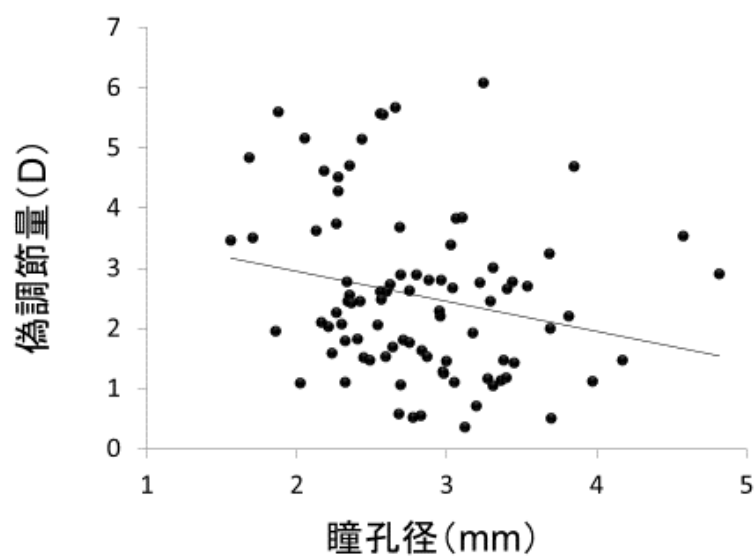


図 25 全対象患者（87 眼）における偽調節量と瞳孔径を示した散布図.

瞳孔径は、偽調節量と負の相関を示した（ピアソン積率相関係数； $r = -0.227$, $P = 0.034$ ）.

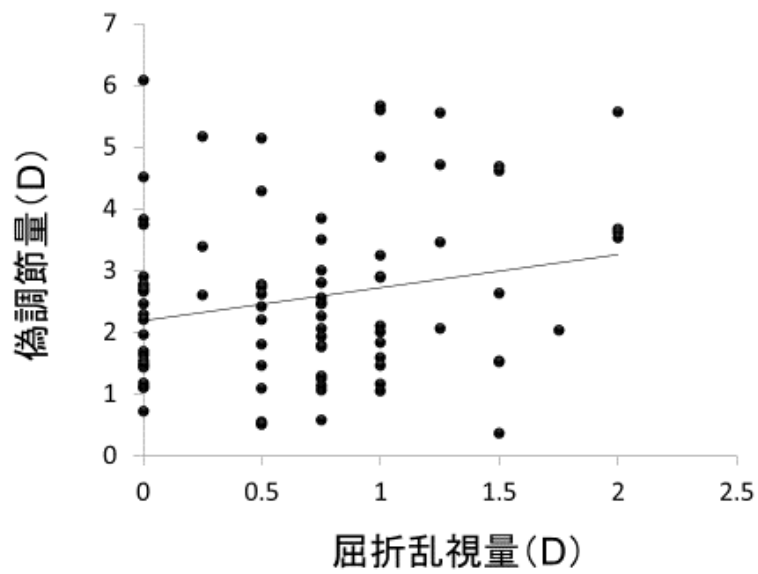


図 26 全対象患者（87 眼）における偽調節量と屈折乱視量を示した散布図.

屈折乱視量は、偽調節量と正の相関を示した（ピアソン積率相関係数; $r = 0.228$, $P = 0.034$ ）.

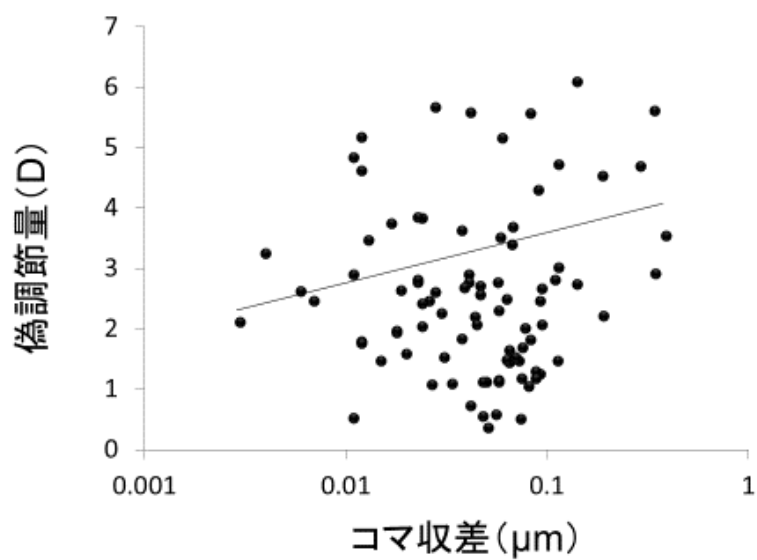


図 27 全対象患者（87 眼）における偽調節量とコマ収差を示した散布図.

コマ収差は、偽調節量と正の相関を示した(ピアソン積率相関係数; $r = 0.229$, $P = 0.032$).

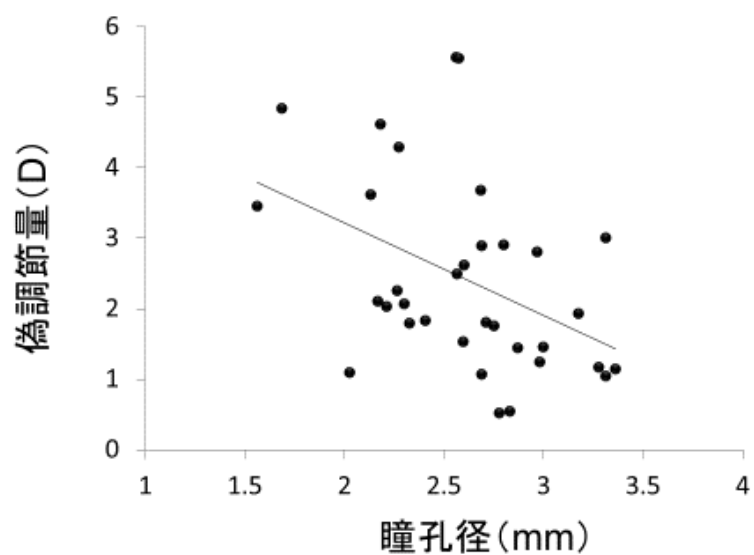


図 28 倒乱視群 (33 眼) における偽調節量と瞳孔径を示した散布図.

瞳孔径は, 偽調節量と負の相関を示した (ピアソン積率相関係数 ; $r = -0.470$, $P = 0.005$).

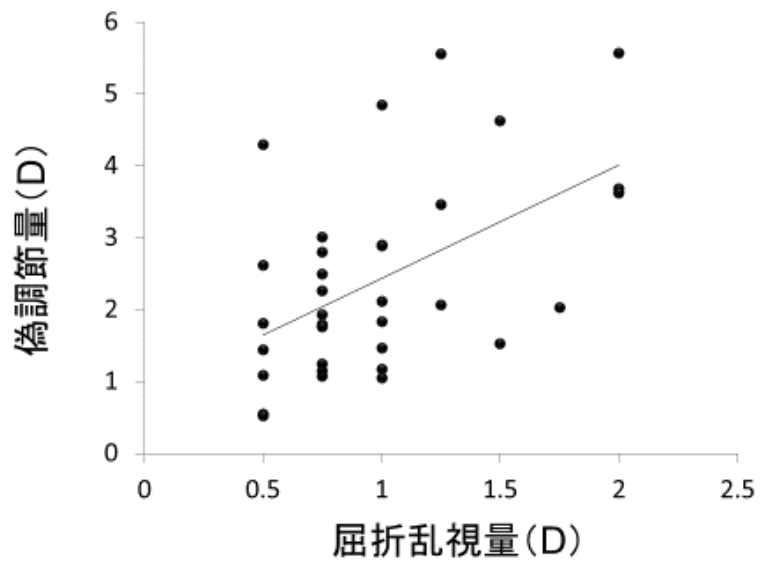


図 29 倒乱視群 (33 眼) における偽調節量と屈折乱視量を示した散布図.

屈折乱視量は, 偽調節量と正の相関を示した(ピアソン積率相関係数; $r = 0.529$, $P = 0.001$).

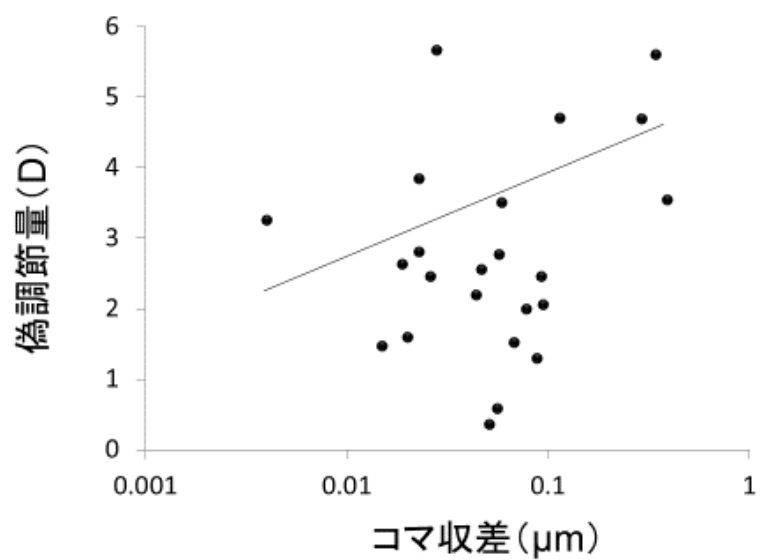


図 30 直乱視群 (24 眼) における偽調節量とコマ収差を示した散布図.

コマ収差は, 偽調節量と正の相関を示した(ピアソン積率相関係数; $r = 0.409$, $P = 0.047$).

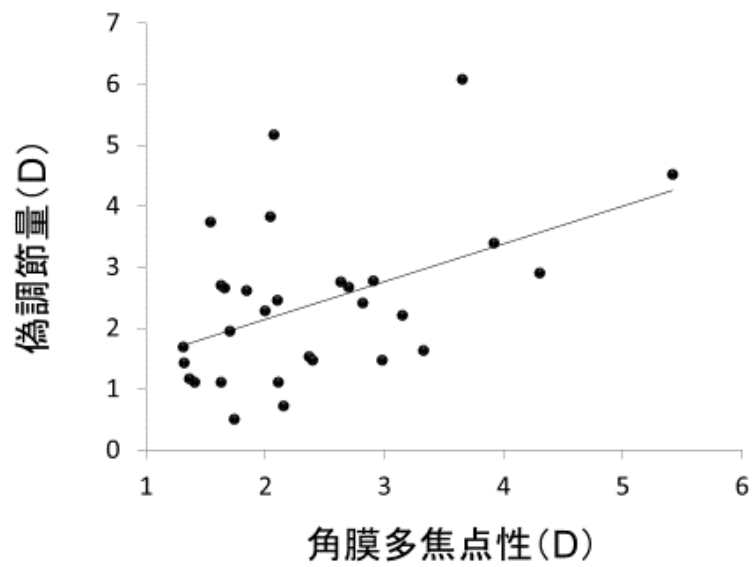


図 31 微小乱視群 (30 眼) における偽調節量と角膜多焦点性を示した散布図.

角膜多焦点性は、偽調節量と正の相関を示した (ピアソン積率相関係数 ; $r = 0.464$, $P = 0.009$).

表 1 乱視によって引き起こされる可能性のある症状

メリット	デメリット
焦点深度の増大（偽調節）	ぼやけ かすみ（コントラスト低下） 二重視など

表 2 倒乱視群（25 眼）と直乱視群（18 眼）の臨床データ

	倒乱視群	直乱視群	<i>P</i> 値
年齢（歳）	72.9 ± 7.2 (61 ~ 85)	69.1 ± 8.8 (51 ~ 83)	0.12
瞳孔径（mm）	2.95 ± 0.40 (2.26 ~ 3.95)	3.16 ± 0.50 (2.40 ~ 4.25)	0.14
等価球面屈折度数（D）	-0.58 ± 0.41 (-1.50 ~ 0.25)	-0.66 ± 0.38 (-1.38 ~ 0)	0.52
球面屈折度数（D）	-0.05 ± 0.33 (-0.50 ~ 0.50)	-0.19 ± 0.30 (-0.50 ~ 0.50)	0.71
円柱屈折度数（D）	-1.06 ± 0.48 (-0.50 ~ -2.00)	-0.93 ± 0.41 (-0.50 ~ -2.00)	0.54
UDVA（logMAR）	0.30 ± 0.22 (0 ~ 0.82)	0.11 ± 0.15 (-0.08 ~ 0.70)	<0.01*
CDVA（logMAR）	-0.01 ± 0.08 (-0.08 ~ 0.16)	0.01 ± 0.07 (-0.08 ~ 0.16)	0.68
全高次収差（μm）	0.14 ± 0.08 (0.05 ~ 0.44)	0.16 ± 0.08 (0.04 ~ 0.36)	0.42
3 次収差（μm）	0.12 ± 0.08 (0.04 ~ 0.42)	0.14 ± 0.08 (0.04 ~ 0.35)	0.37
4 次収差（μm）	0.06 ± 0.03 (0.02 ~ 0.16)	0.06 ± 0.03 (0.02 ~ 0.16)	0.92

トレフォイル収差 (μm)	0.08 ± 0.05 (0.02 ~ 0.18)	0.11 ± 0.08 (0.02 ~ 0.34)	0.18
コマ収差 (μm)	0.08 ± 0.07 (0.02 ~ 0.38)	0.08 ± 0.05 (0.03 ~ 0.20)	0.99
テトラフォイル収差 (μm)	0.03 ± 0.02 (0.01 ~ 0.09)	0.04 ± 0.02 (0.01 ~ 0.11)	0.42
2次乱視収差 (μm)	0.04 ± 0.03 (0.01 ~ 0.13)	0.04 ± 0.03 (0.01 ~ 0.10)	0.57
球面収差 (μm)	0.01 ± 0.01 (-0.01 ~ 0.05)	0.01 ± 0.02 (-0.03 ~ 0.04)	0.95

平均 \pm 標準偏差 (範囲) ; D=ジオプター, UDVA=裸眼遠方視力, CDVA=完全矯正遠方視力 ; *統計学的有意 ($P < 0.05$)

表3 倒乱視群（25眼）と直乱視群（18眼）における裸眼遠方視力と他の評価項目との相関

	倒乱視群		直乱視群	
	相関係数	<i>P</i> 値	相関係数	<i>P</i> 値
年齢（歳）	0.11	0.61	-0.31	0.90
瞳孔径（mm）	-0.01	0.99	-0.08	0.78
等価球面屈折度数（D）	-0.51	<0.01*	-0.31	0.21
球面屈折度数（D）	-0.30	0.15	-0.12	0.66
円柱屈折度数（D）	-0.48	0.01*	-0.39	0.10
全高次収差（ μm ）	0.24	0.25	0.15	0.55
3次収差（ μm ）	0.20	0.34	0.16	0.53
4次収差（ μm ）	0.33	0.11	0.00	0.99
トレフォイル収差（ μm ）	0.08	0.71	0.22	0.39
コマ収差（ μm ）	0.21	0.31	-0.04	0.87
テトラフォイル収差（ μm ）	0.29	0.15	0.22	0.38
2次乱視収差（ μm ）	0.38	0.06	-0.12	0.65
球面収差（ μm ）	-0.16	0.45	-0.21	0.42

D=ジオプター；*統計学的有意（ $P < 0.05$ ）

表 4 全対象患者（68 眼）と倒乱視群（40 眼），直乱視群（28 眼）の臨床データ

	全体	倒乱視群	直乱視群	P 値
年齢（歳）	71.5 ± 7.5 (20 ~ 86)	72.0 ± 6.8 (52 ~ 86)	65.5 ± 12.0 (20 ~ 83)	<0.01*
術後期間（日）	42.0 ± 94.8 (6 ~ 748)	41.0 ± 93.0 (6 ~ 748)	45.5 ± 118.8 (7 ~ 544)	0.99
瞳孔径（mm）	2.70 ± 0.36 (1.56 ~ 4.58)	2.62 ± 0.31 (1.56 ~ 3.36)	2.99 ± 0.43 (1.71 ~ 4.58)	0.01*
角膜乱視量（D）	1.02 ± 0.36 (0.06 ~ 2.53)	0.91 ± 0.26 (0.06 ~ 2.17)	1.42 ± 0.43 (0.12 ~ 2.53)	<0.01*
屈折乱視量（D）	1.00 ± 0.19 (0.50 ~ 2.00)	1.00 ± 0.25 (0.50 ~ 2.00)	0.75 ± 0.19 (0.50 ~ 2.00)	0.64
眼軸（mm）	23.34 ± 0.74 (22.00 ~ 30.06)	23.33 ± 0.56 (22.00 ~ 30.06)	23.43 ± 1.50 (22.19 ~ 29.99)	0.46
IOL 度数（D）	21.5 ± 2.3 (6.0 ~ 26.0)	21.5 ± 1.6 (8.0 ~ 25.5)	21.1 ± 3.1 (6.0 ~ 26.0)	0.44
CDVA（logMAR）	-0.08 ± 0.04 (-0.30 ~ 0.22)	-0.04 ± 0.04 (-0.18 ~ 0.22)	-0.08 ± 0.04 (-0.30 ~ 0.15)	0.76
角膜多焦点性（D）	2.53 ± 0.49 (0.99 ~ 5.74)	2.32 ± 0.57 (1.00 ~ 4.56)	2.56 ± 0.43 (0.99 ~ 5.74)	0.13

全高次収差 (μm)	0.099 ± 0.040 (0.020 ~ 0.532)	0.096 ± 0.037 (0.022 ~ 0.408)	0.101 ± 0.037 (0.020 ~ 0.532)	0.21
3次収差 (μm)	0.087 ± 0.036 (0.016 ~ 0.526)	0.081 ± 0.031 (0.016 ~ 0.383)	0.089 ± 0.036 (0.017 ~ 0.526)	0.21
4次収差 (μm)	0.046 ± 0.016 (0.010 ~ 0.302)	0.044 ± 0.014 (0.014 ~ 0.162)	0.054 ± 0.020 (0.010 ~ 0.302)	0.35
トレフオイル収差 (μm)	0.057 ± 0.022 (0.001 ~ 0.436)	0.050 ± 0.024 (0.001 ~ 0.176)	0.058 ± 0.028 (0.008 ~ 0.436)	0.15
コマ収差 (μm)	0.045 ± 0.029 (0.003 ~ 0.393)	0.040 ± 0.029 (0.003 ~ 0.344)	0.056 ± 0.031 (0.004 ~ 0.393)	0.11
テトラフオイル 収差 (μm)	0.023 ± 0.015 (0.003 ~ 0.112)	0.018 ± 0.010 (0.003 ~ 0.077)	0.029 ± 0.014 (0.008 ~ 0.112)	0.02*
2次乱視収差 (μm)	0.023 ± 0.014 (0.001 ~ 0.110)	0.017 ± 0.014 (0.001 ~ 0.110)	0.026 ± 0.011 (0.003 ~ 0.110)	0.20
球面収差 (μm)	0.009 ± 0.012 (-0.242 ~ 0.057)	0.007 ± 0.011 (-0.024 ~ 0.038)	0.013 ± 0.014 (-0.242 ~ 0.057)	0.48
乱視矯正有りの 偽調節量 (D)	1.97 ± 0.70 (0.46 ~ 6.66)	1.77 ± 0.57 (0.52 ~ 4.50)	2.25 ± 0.90 (0.46 ~ 6.66)	0.09
乱視矯正無しの 偽調節量 (D)	2.23 ± 0.98 (0.36 ~ 6.86)	2.09 ± 0.89 (0.52 ~ 5.57)	2.55 ± 0.91 (0.36 ~ 6.86)	0.24

中央値 ± 四分位偏差（範囲）；D=ジオプター，IOL=眼内レンズ，CDVA=完全矯正遠方視力；*統計学的有意（ $P < 0.05$ ）

表 5 全対象患者（68 眼）と倒乱視群（40 眼），直乱視群（28 眼）の乱視矯正有りとなしにおける偽調節量の比較

	乱視矯正有りの 偽調節量 (D)	乱視矯正無しの 偽調節量 (D)	<i>P</i> 値
全体	2.37 ± 1.33	2.67 ± 1.46	0.001*
倒乱視群	2.12 ± 1.05	2.50 ± 1.34	0.005*
直乱視群	2.73 ± 1.60	2.91 ± 1.60	0.115

平均 ± 標準偏差 ; D=ジオプター ; *統計学的有意 ($P < 0.05$)

表 6 全対象患者（41 眼）と倒乱視群（27 眼），直乱視群（14 眼）の乱視矯正の有無での偽調節の変化量と他の評価項目との相関

	全体		倒乱視群		直乱視群	
	相関係数	<i>P</i> 値	相関係数	<i>P</i> 値	相関係数	<i>P</i> 値
年齢（歳）	0.081	0.609	0.207	0.290	-0.353	0.203
術後期間（日）	0.225	0.154	0.198	0.313	0.326	0.240
瞳孔径（mm）	-0.110	0.485	-0.403	0.040*	0.322	0.246
角膜乱視量（D）	-0.001	0.996	0.084	0.667	-0.030	0.915
屈折乱視量（D）	0.460	0.004*	0.547	0.005*	0.330	0.235
眼軸（mm）	-0.152	0.336	-0.343	0.080	0.003	0.991
IOL 度数（D）	0.142	0.369	0.345	0.079	-0.064	0.818
CDVA（logMAR）	0.051	0.746	0.215	0.272	0.229	0.409
角膜多焦点性（D）	0.163	0.303	0.137	0.486	0.226	0.415
全高次収差（ μm ）	-0.049	0.759	-0.279	0.155	0.374	0.177
3 次収差（ μm ）	0.009	0.957	-0.173	0.377	0.357	0.198
4 次収差（ μm ）	-0.169	0.284	-0.430	0.029*	0.352	0.204

トレフォイル収差 (μm)	0.112	0.479	0.136	0.487	0.141	0.611
コマ収差 (μm)	-0.156	0.323	-0.181	0.357	-0.046	0.868
テトラフォイル収差 (μm)	-0.266	0.092	-0.518	0.008*	0.214	0.441
2次乱視収差 (μm)	-0.078	0.623	-0.068	0.728	-0.220	0.427
球面収差 (μm)	-0.070	0.657	0.052	0.790	-0.218	0.432

D=ジオプター, IOL=眼内レンズ, CDVA=完全矯正遠方視力; *統計学的有意
($P < 0.05$)

表 7 全対象患者 (87 眼) と倒乱視群 (33 眼), 直乱視群 (24 眼), 微小乱視群 (30 眼) の臨床データ

	全体	倒乱視群	直乱視群	微小乱視群	P 値
男 : 女	44 : 43	17 : 16	12 : 12	15 : 15	
右 : 左	48 : 39	20 : 13	12 : 12	16 : 14	
年齢 (歳)	67.3 ± 14.0 (18~86)	72.0 ± 8.7 (52~86)	62.3 ± 17.8 (20~83)	66.3 ± 14.1 (18~86)	0.064
術後期間 (日)	231.0 ± 337.4 (6~1434)	150.7 ± 199.4 (6~748)	303.8 ± 450.2 (7~1434)	261.1 ± 346.9 (6~1214)	0.815
瞳孔径 (mm)	2.82 ± 0.62 (1.56~4.82)	2.59 ± 0.43 (1.56~3.36)	2.89 ± 0.67 (1.71~4.58)	3.01 ± 0.68 (1.86~4.82)	0.070
角膜乱視量 (D)	0.96 ± 0.54 (0.06~2.53)	0.87 ± 0.50 (0.06~2.17)	1.29 ± 0.58 (0.12~2.53)	0.80 ± 0.45 (0.13~2.15)	0.002*
屈折乱視量 (D)	0.66 ± 0.57 (0.00~2.00)	0.99 ± 0.45 (0.50~2.00)	0.96 ± 0.39 (0.50~2.00)	0.04 ± 0.09 (0.00~0.25)	<0.001*
眼軸 (mm)	24.00 ± 1.79 (21.30~30.06)	23.68 ± 1.59 (21.86~30.06)	24.11 ± 2.08 (21.31~29.99)	24.26 ± 1.75 (21.30~28.11)	0.319
IOL 度数 (D)	20.1 ± 4.3 (6.0~26.0)	20.8 ± 3.8 (8.0~26.0)	20.1 ± 5.1 (6.0~25.5)	19.2 ± 4.0 (6.0~24.0)	0.146
CDVA (logMAR)	-0.04 ± 0.08 (-0.30~0.22)	-0.03 ± 0.08 (-0.18~0.22)	-0.05 ± 0.09 (-0.30~0.15)	-0.04 ± 0.07 (-0.18~0.15)	0.856

角膜多焦点性 (D)	2.45 ± 0.93 (1.00~5.74)	2.25 ± 0.74 (1.00~4.28)	2.78 ± 1.03 (1.00~5.74)	2.41 ± 0.98 (1.31~5.42)	0.123
全高次収差 (μm)	0.125 ± 0.093 (0.020~0.532)	0.096 ± 0.044 (0.022~0.177)	0.141 ± 0.126 (0.020~0.532)	0.145 ± 0.097 (0.041~0.442)	0.122
3次収差 (μm)	0.108 ± 0.086 (0.016~0.526)	0.082 ± 0.043 (0.016~0.190)	0.122 ± 0.116 (0.017~0.526)	0.125 ± 0.090 (0.032~0.408)	0.149
4次収差 (μm)	0.058 ± 0.044 (0.010~0.302)	0.045 ± 0.025 (0.014~0.110)	0.064 ± 0.057 (0.010~0.302)	0.068 ± 0.048 (0.025~0.259)	0.163
トレフォイル 収差 (μm)	0.071 ± 0.062 (0.001~0.436)	0.055 ± 0.036 (0.001~0.136)	0.083 ± 0.083 (0.002~0.436)	0.078 ± 0.063 (0.018~0.250)	0.263
コマ収差 (μm)	0.067 ± 0.072 (0.003~0.393)	0.047 ± 0.035 (0.003~0.141)	0.087 ± 0.104 (0.004~0.393)	0.072 ± 0.069 (0.007~0.347)	0.218
テトラフォイル 収差 (μm)	0.030 ± 0.021 (0.003~0.112)	0.022 ± 0.015 (0.003~0.055)	0.037 ± 0.025 (0.008~0.112)	0.032 ± 0.023 (0.004~0.109)	0.059
2次乱視収差 (μm)	0.031 ± 0.027 (0.003~0.136)	0.026 ± 0.023 (0.003~0.099)	0.034 ± 0.025 (0.003~0.110)	0.034 ± 0.031 (0.005~0.136)	0.525
球面収差 (μm)	0.007 ± 0.034 (-0.242~0.086)	0.008 ± 0.014 (-0.014~0.038)	-0.002 ± 0.056 (-0.242~0.057)	0.013 ± 0.026 (-0.057~0.086)	0.457
偽調節 (D)	2.53 ± 1.38 (0.36~6.08)	2.40 ± 1.38 (0.52~5.57)	2.86 ± 1.49 (0.36~5.67)	2.40 ± 1.30 (0.51~6.08)	0.331

平均 ± 標準偏差 (範囲) ; D=ジオプター, IOL=眼内レンズ, CDVA=完全矯正遠方視力; *倒乱視群, 直乱視群, 微小乱視群の3群間の統計学的有意 ($P < 0.05$)

表 8 全対象患者（87 眼）と倒乱視群（33 眼），直乱視群（24 眼），微小乱視群（30 眼）の偽調節量と他の評価項目との相関

	全体		倒乱視群		直乱視群		微小乱視群	
	相関 係数	<i>P</i> 値	相関 係数	<i>P</i> 値	相関 係数	<i>P</i> 値	相関 係数	<i>P</i> 値
年齢（歳）	0.086	0.427	0.313	0.076	-0.053	0.808	0.191	0.314
術後期間（日）	-0.067	0.538	-0.091	0.616	-0.058	0.790	-0.154	0.419
瞳孔径（mm）	-0.227	0.034*	-0.470	0.005*	-0.114	0.601	-0.233	0.217
角膜乱視量（D）	0.108	0.319	0.094	0.606	0.032	0.882	0.003	0.989
屈折乱視量（D）	0.228	0.034*	0.529	0.001*	0.074	0.736	0.145	0.447
眼軸（mm）	-0.016	0.887	0.024	0.894	0.103	0.635	0.166	0.385
IOL 度数（D）	0.035	0.748	0.017	0.926	-0.023	0.916	-0.129	0.502
CDVA（logMAR）	-0.174	0.107	-0.185	0.305	-0.225	0.294	-0.035	0.857
角膜多焦点性 （D）	0.196	0.069	0.060	0.742	-0.065	0.765	0.464	0.009*
全高次収差（ μm ）	0.059	0.587	0.066	0.717	0.187	0.386	0.124	0.533
3 次収差（ μm ）	0.069	0.524	0.062	0.735	0.202	0.349	0.097	0.612
4 次収差（ μm ）	-0.005	0.961	0.062	0.735	0.049	0.821	0.199	0.294

トレフオイル 収差 (μm)	0.046	0.672	0.079	0.664	0.287	0.178	-0.216	0.254
コマ収差 (μm)	0.229	0.032*	-0.049	0.790	0.409	0.047*	0.252	0.181
テトラfoil 収差 (μm)	0.120	0.271	-0.115	0.526	0.126	0.562	0.314	0.092
2次乱視収差 (μm)	0.027	0.802	0.008	0.965	0.227	0.289	0.086	0.655
球面収差 (μm)	0.002	0.982	0.119	0.513	0.032	0.883	-0.217	0.251

D=ジオプター, IOL=眼内レンズ, CDVA=完全矯正遠方視力; *統計学的有意
($P < 0.05$)

表 9 全対象患者（87 眼）と倒乱視群（33 眼），直乱視群（24 眼），微小乱視群（30 眼）の偽調節量に有意に寄与する変数

	自由度調整済み 決定係数	<i>P</i> 値	寄与の高い順で 調査された変数	回帰係数
全体	0.172	< 0.001	瞳孔径	-0.937
			コマ収差	8.010
			屈折乱視量	1.222
倒乱視群	0.423	< 0.001	瞳孔径	-1.161
			トレフォイル収差	12.129
直乱視群	0.129	0.047	コマ収差	5.870
微小乱視群	0.355	0.001	角膜多焦点性	0.741
			トレフォイル収差	-9.130

参 考 論 文