

筑波大学

博士（医学）学位論文

正常角膜における角膜厚の分布と角膜後面乱視

2015

筑波大学附属病院

眼科 病院講師

上野 勇太

目次

- 第 1 章 緒言
- 第 2 章 本研究の目的
- 第 3 章 角膜乱視眼における角膜前後面の乱視の比較
 - 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 角膜前面屈折力・角膜後面屈折力・角膜全屈折力の乱視の加齢変化
 - 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 正常眼の角膜厚分布と角膜後面乱視
 - 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

第1章 緒言

眼球は角膜および水晶体で光を屈折させ、網膜に投影する。眼球全体では約60Dの屈折力を持つが、角膜はそのうちの約40Dを担い、眼球における最大の屈折力を持つ凸レンズである。光は角膜前面において空気から角膜実質内に入り、角膜後面において角膜実質内から前房水に出ていく。角膜というレンズの屈折力は、空気・角膜実質・前房水というそれぞれの媒質の屈折率の差と角膜の曲率半径から算出されるため、一般的に言われている通り空気の屈折率を1、角膜実質の屈折率を1.376、前房水の屈折率を1.336として媒質の屈折率の差を計算すると、角膜前面では0.376 (=1.376-1)、角膜後面では-0.04 (=1.336-1.376)となる。つまり、仮に角膜前面と後面が全く同じ曲率半径を持つとすると、前面は後面の9~10倍もの屈折力を持つことになり、角膜全体の屈折力における後面の占める割合は非常に少ない。

初診時の視力検査や白内障手術の術前検査など、日常臨床において角膜屈折力の測定を行う機会は非常に多い。角膜屈折力の測定に最も汎用されている検査器機はケラトメータである¹⁾。ケラトメータは角膜に測定光を投射して角膜前面涙液層での反射光を解析し、光学的に重要と考えられている角膜前面中央部(3mm前後)の数ヶ所の曲率半径を測定し、角膜屈折力を算出する¹⁾。安価で簡便であることが特徴であり、正常眼の角膜屈折力測定におけるゴールドスタンダードである。ケラトメータの欠点として、角膜中央部の数ヶ所の代表点(最低4点)のみの測定であること、角膜前面のみの測定に留まることが挙げられる¹⁾。1つ目の欠点を補うため、同様の測定原理のままで測定点を大幅に増やし、角膜周辺部までの屈折力を測定することができるプラチド型角膜形状解析装置が開発された²⁾。この器械によって、病的角膜の角膜屈折力を正確に測定するこ

とが可能になり、円錐角膜などの角膜形状異常を呈する疾患の診断・治療が発展することとなった^{3,4)}。また、もう1つの欠点については、角膜換算屈折率 (keratometric index) を用いることで補われている⁵⁾。これは、角膜厚が均一で、角膜前面と後面が平行で同じ形状をしているという仮定に基づいており、測定される角膜前面の曲率半径から角膜厚・角膜後面の屈折力を推測し、角膜全体の屈折力 (角膜換算屈折力 : keratometric power、K 値) を概算している^{6,7)}。角膜換算屈折力は全てのケラトメータおよびプラチド型角膜形状解析装置に導入されている他、白内障手術時に眼内レンズを計算する数式にも反映されており⁸⁾、眼科臨床において keratometric index および角膜換算屈折力の正確性が疑われる機会はほとんど無かった。光学的に角膜全体に占める後面の屈折力の割合が小さいことや、そもそも生体の角膜後面を直接計測する器械が存在しなかったことが、その理由であろう。

大きな転換期が訪れたのは、LASIK に代表されるような、角膜を意図的に削る屈折矯正手術が行われるようになってからである。この手術技術の進歩にもなって角膜厚を詳細に測定する必要が生じ、角膜前面のみならず後面までスキャンし角膜厚の分布を測定することができる、スリットスキャン型角膜形状解析装置やその改良型であるシャインプルーフ型角膜形状解析装置、前眼部光干渉断層計 (前眼部 OCT) が開発された。シャインプルーフ型ではスリット状の可視光を投射して光散乱を利用し、前眼部 OCT では赤外光を投射して光の干渉を利用するという違いはあるものの、どちらの器械でも角膜の断面像が得られ、その断面像の前面および後面の形状から曲率半径データの測定が可能である。1回の測定で8~32方向の断面を高速に撮影し、全ての断面像のデータを角膜全周の曲率半径データとして統合し、そこから角膜屈折力を算出することができる。従来のケラトメータのような角膜前面屈折力を測定できるだけでなく、

角膜後面の屈折力、さらには前面と後面の距離として角膜厚の分布を測定できる。これによって、生体眼において初めて角膜後面屈折力の評価が可能となり、角膜後面形状に関する詳細な検討が行われるようになった⁹⁻¹⁸⁾。これらの報告で、LASIK などの屈折矯正手術を受けた角膜は、前面形状が大きく変化する一方で後面形状の変化は乏しいため、正常角膜に適応されている *keratometric index* を用いた角膜換算屈折力では正確性に欠けると指摘されている¹⁹⁻²²⁾。つまり、屈折矯正手術を受けた角膜において、前面の屈折力から概算された角膜換算屈折力は、前面および後面（つまり角膜全体）を測定した角膜全屈折力と数値が異なってしまうということであり、白内障手術の合併症として問題となる。白内障手術は患者の混濁した水晶体を透明な人工水晶体（眼内レンズ）に置換することで矯正視力の向上を図る手術であり、術前検査の時点で角膜形状と眼軸長を正確に測定することで、適切な眼内レンズを選択・挿入し、患者の術後の屈折値（正視や近視）をコントロールすることが出来る。前述の通り、屈折矯正手術後の角膜において、通常の角膜換算屈折力では真の角膜屈折力を評価できない。そのため、手術後に屈折誤差が生じてしまうことが知られている¹⁹⁻²²⁾。

近年では、乱視矯正用のトーリック眼内レンズが開発された。角膜は凸レンズであり球体に近い形状をしているが、角膜乱視眼では楕円形であり、曲率の強い方向（強主経線）と曲率の弱い方向（弱主経線）で焦点が異なるために、像のぼやけを生じ、視力低下の原因となる。乱視は従来から眼鏡矯正が可能であったが、トーリック眼内レンズの登場により、白内障手術時に角膜乱視の矯正を行い、術後の乱視を軽減させて裸眼視力の向上を図ることが可能となった²³⁻²⁷⁾。トーリック眼内レンズを使用する際の術前検査は従来の眼内レンズを使用する際と同様で、ケラトメータにより角膜換算屈折力を測定し、その乱視を矯正するようなトーリック眼内レンズが選択されている。つまり、正常角膜は前

面と後面の形状はほぼ同じであるという仮定で角膜換算屈折力が使用され、それは角膜の乱視についても同様であると考えられているが、実際に正常角膜の前面と後面の乱視を比較評価した論文は少ない。

既報では、シャインプルフ型角膜形状解析装置を用いて健常者約 400 例の検査を行い、角膜前面と後面の乱視の比較が行われた²⁸⁻³⁰⁾。一方、近年では前眼部 OCT が開発され、シャインプルフ型と同様に角膜前面だけでなく後面形状の測定も可能となった。シャインプルフ型では可視光を用い、1 回の測定に 1 秒以上を費やす一方、前眼部 OCT では赤外光を使用するために測定中の差明がなく、測定時間が 0.3 秒と短いことから、被検者の眼球運動に起因するアーチファクトを軽減可能で、良好な測定精度を持つと報告されている³¹⁻³³⁾。そこで我々は測定精度の高い前眼部 OCT を用いて、角膜前面と後面の乱視の解析を行うこととした。

第2章 本研究の目的

keratometric index は 1.3375、角膜実質の屈折率は 1.376、房水の屈折率は 1.336 であるため、角膜換算屈折力 $P(K)$ および後面屈折力 $P(b)$ は、角膜前面の曲率半径 $r(a)$ および角膜後面屈折力 $r(b)$ を使用して、以下のように計算される²⁸⁾。

$$\text{角膜換算屈折力 } P(K) = (1.3375 - 1.0) / r(a)$$

$$\text{角膜後面屈折力 } P(b) = (1.336 - 1.376) / r(b)$$

眼科で汎用されているグルストランドのモデル眼の結果を使用すると、 $r(a)=7.6\text{mm}$ 、 $r(b)=6.8\text{mm}$ であるため、両者の比を算出すると、

$$P(b) / P(K) = -0.134$$

と計算される。つまり、角膜前面と後面が平行であると仮定すると、角膜後面の屈折力は、角膜換算屈折力の約 1/8 であり、逆方向の屈折力を持つことが予想される。

そこで本研究の目的は、前眼部 OCT を用いて先行研究と同程度の正常眼を対象に角膜前面と後面の形状解析を行い、乱視の解析における両者の相似性を検討すること、また角膜換算屈折力および keratometric index の正確性を評価すること、そして今まで言及されていない角膜厚の分布との関連を検討することである。

第3章 角膜乱視眼における角膜前後面の乱視の比較

3-1 目的

本研究の目的は、前眼部 OCT を用いて角膜乱視眼の形状解析を行い、角膜前面から得られた角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の乱視の軸度や大きさの比較を行うことである。

3-2 対象と方法

対象は2010年4月～2012年8月までの間に筑波大学病院眼科を受診した1.0D以上の角膜乱視を有する158例240眼(41.8±23.3歳、男性76例、女性82例)とした。角膜前面の強主経線軸度によって3つに分類し、60～119度を直乱視、0～29度もしくは150～180度(以降、150～180度は全て-30～0度に換算して計算)を倒乱視、それ以外を斜乱視とした。直乱視は120例188眼(33.0±18.9歳、男性59例、女性61例)、倒乱視は38例52眼(68.2±9.5歳、男性17例、女性21例)である。斜乱視は対象から除外した。また、円錐角膜や角膜混濁などの角膜疾患を有する症例や眼科手術歴のある症例、コンタクトレンズ常用者、他の眼疾患により角膜形状に影響があると予想された症例は対象から除外した。

対象を前眼部 OCT (SS-1000、CASIA、Tomey) の角膜形状解析モードである『Corneal map』モードで撮影し、角膜中心3mm地点での角膜屈折力の測定を行った。今回の検討で角膜屈折力としては、角膜前面のデータのみから keratometric index を用いて概算される角膜換算屈折力 P(K)と、角膜後面を測定した角膜後面屈折力 P(b)を使用し、両者の強主経線軸度および乱視度数の比較を行った。乱視度数の比較については、前述の関係式

$$\text{角膜後面屈折力 } P(b) = P(K) \times -0.134$$

を元に、この式から計算された角膜後面屈折力（推測値）と、測定した角膜後面屈折力（測定値）との比較を行った。乱視度数の比較は paired t-test および pearson の積率相関係数を用い、 $P < 0.05$ を有意水準とした。また解析ソフトとして Statview (SAS Inc., USA) を使用した。なお今回用いた検査結果は、全て対象患者への同意を得ており、今回の研究は、筑波大学臨床研究倫理審査委員会の承認の上、ヘルシンキ宣言の条文を厳守し施行したものである。

3-3 結果

直乱視症例で角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の強主経線軸度の比較を行うと、全ての症例で軸度の差が 15 度以内に収まっていた（図 1）。一方、倒乱視症例では一定の傾向を見せず、軸度の差が 15 度以内の症例が 13%、30 度以内の症例が 25%と少なかった（図 2）。

次に、角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の乱視度数を比較した。図 3 が直乱視、図 4 が倒乱視の結果で、図中の $y = 0.134x$ の直線は、角膜の前面と後面が平行であると仮定した際に、角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の関係を示す直線である。直乱視では角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の乱視度数はよく相関した ($r = 0.796$ 、 $P < 0.0001$)。また、全症例が $y = 0.134x$ の直線より上側に分布し、この直線上の推測値は $0.22 \pm 0.10D$ であり、角膜後面屈折力の測定値 $0.42 \pm 0.14D$ との間に有意差を認めた ($P < 0.0001$)。一方、倒乱視では全症例での検討においては相関を認めなかった ($P = 0.7235$)。そこで、角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の強主経線軸度の差が 30 度より大きい群と 30 度以内の群に分けて解析したところ、軸度の差が少ない症例ではよく相関した ($r = 0.720$ 、 $P = 0.0041$)。また、軸度の差が少ない全 13 眼は $y = 0.134x$ の直線の下に分布し、この直線上の推測値は $0.29 \pm 0.07D$ であり、角膜後面屈折力の測定値 $0.16 \pm 0.05D$ との間に

有意差を認めた ($P < 0.0001$)。

図 5~8 に直乱視・倒乱視の代表症例における、角膜換算屈折力マップと角膜後面屈折力マップを並べて表示した。赤や橙色の蝶ネクタイ形状をした部分が屈折力の強い個所であるが、図 5・6 は角膜換算屈折力マップにおいて上下方向に伸びているために典型的な角膜前面の直乱視の症例である。後面もほぼ同じ形をしていることが良く分かるが、乱視度数 (CYL) を見ると、図 5 の症例では角膜換算屈折力の 4.8D に対して後面乱視度数は 0.8D であり割合は 1/6、図 6 の症例では角膜換算屈折力の 2.7D に対して後面乱視度数は 0.8D であり割合は約 1/3 であった。図 7・8 は角膜換算屈折力マップにおいて赤や橙色の蝶ネクタイ形状が水平方向に伸びており、典型的な角膜前面の倒乱視症例である。図 7 の症例においては、後面の形状は前面に近いと言えるが、乱視度数 (CYL) を見ると、角膜換算屈折力の 2.7D に対して後面乱視度数は 0.2D であり割合は 1/13 程度と非常に小さくなっていた。また、図 8 の症例では後面の形状が前面と全く異なっており、図 5・6 の症例のような後面倒乱視のパターンを示していた。

3-4 考察

光の屈折率は、角膜前面においては空気 1 から角膜実質 1.376 に増加し、角膜後面では角膜実質 1.376 から房水 1.336 に減少する。このため、角膜前面は正の屈折力を持つ一方、後面はそれを軽減するような負の屈折力を持つ。その大きさは臨床的に使用されている角膜換算屈折力で割合を計算した場合、後面は約 1/8 程度であると推測されてきた^{5,6)}。これを乱視に当てはめると、直乱視と倒乱視が正と負の関係となっているため、角膜前面が直乱視の症例では後面がそれを軽減するような 1/8 程度の倒乱視を持っており、角膜前面が倒乱視の症例では後面がそれを軽減するような 1/8 程度の直乱視を持っている、と従来考えられて

きた²⁸⁻³⁰⁾。

今回の結果を見てみると、直乱視は図 1 から前面と後面の強主経線軸度がほぼ同じであるため、従来の考え通り後面には倒乱視があることが分かった。しかし、その乱視度数は角膜換算屈折力で推測されているより大きいことが示された(図 2)。つまり、角膜前面が直乱視の症例において、角膜後面には想定されるより強い倒乱視が隠れており、前面の直乱視をより強く軽減していることが分かった。図 5・6 の代表症例においても、角膜前面と後面の相似性は保たれつつ、いずれの症例も想定されている 1/8 より高い割合の後面倒乱視があった。

次に、倒乱視の結果を見ると、図 3 から前面と後面の強主経線がバラバラであり、ほとんどの症例で前面と後面の相似性がないことが分かった。また、乱視度数についても関連性が見られず、一部相似性がある症例についてのみ、角膜換算屈折力で推測されているより小さいことが示された(図 4)。つまり、角膜前面が倒乱視の症例において、図 7 の代表症例のように角膜後面には想定されるより小さい直乱視があり前面の倒乱視を軽減する効果が弱くなっているか、図 8 の代表症例のように後面にも倒乱視があり前面の倒乱視を助長している、ということが分かった。

このように、明らかな病気を持たない角膜であっても、角膜前面と角膜後面は形状が微妙に異なっている。乱視の解析において、角膜前面の解析結果と **keratometric index** を用いて計算された角膜換算屈折力によって角膜乱視を評価するという従来の方法は、正確性に欠ける可能性が示唆された。今回測定に使用した前眼部 OCT は、全ての施設に導入できる器械では無いため、今後も個々の患者の検査は汎用性の高いケラトメータに依存せざるを得ないと思われる。そのため、角膜換算屈折力が生じる誤差について、どのような規則性があるのかを検討する必要がある。

3-5 結論

角膜前面に直乱視がある症例において後面の倒乱視は想定より大きく、前面の乱視度数を軽減していることが分かった。一方、角膜前面に倒乱視がある症例において後面には想定より小さい直乱視があり前面の乱視度数を軽減しているか、逆に後面にも倒乱視があり前面の乱視度数を助長していることが分かった。角膜前面の解析結果から **keratometric index** を用いて算出された角膜換算屈折力は、乱視の解析において正確性に欠ける可能性が示唆された。

第4章 角膜前面屈折力・角膜後面屈折力・角膜全屈折力の乱視の加齢変化

4-1 目的

本研究の目的は、前眼部 OCT を用いて正常眼の形状解析を行い、角膜換算屈折力・角膜後面屈折力・角膜全屈折力の乱視の加齢変化を調べることで、また年齢が乱視の評価における角膜換算屈折力および keratometric index の正確性にどのような影響を与えるかを検討することである。

4-2 対象と方法

対象は2010年4月～2012年8月までの間に筑波大学病院眼科およびいとう眼科を受診した正常眼419例419眼（49.5 ± 23.1歳、男性218例、女性201例）とした。対象は全て右眼のみで、円錐角膜や角膜混濁などの角膜疾患を有する症例、眼科手術歴のある症例、コンタクトレンズ常用者、その他の眼疾患により角膜形状に影響すると予想された症例は除外した。

対象を前眼部 OCT（SS-1000、CASIA、Tomey）の角膜形状解析モードである『Corneal map』モードで撮影し、角膜中心3mm地点での角膜屈折力の測定を行った。今回の検討で、角膜前面のデータのみから keratometric index を用いて概算される角膜換算屈折力、角膜後面を測定した角膜後面屈折力、角膜前面および後面の角膜全体を測定した角膜全屈折力の、3種類の角膜屈折力を使用した。

強主経線軸度によって乱視を直乱視・倒乱視・斜乱視の3つに分類した。つまり角膜換算屈折力および角膜全屈折力については、60～119度を直乱視、0～29度もしくは150～180度を倒乱視、それ以外を斜乱視とした。一方、角膜後面屈折力については、0～29度もしくは150～180度を直乱視、60～119度を倒乱視、それ以外を斜乱視とした。加齢による乱視軸の変化を検討するため、対象

を表 1 の通り年齢別に 8 群に分け、各年代における直乱視・倒乱視・斜乱視の割合を比較した。

角膜換算屈折力および keratometric index の正確性を評価するため、角膜換算屈折力と角膜全屈折力の乱視を比較した。まずは、両者の乱視度数について paired t-test を用いて比較し、pearson の積率相関係数を用いて相関を検討した。さらに、乱視は大きさだけでなく軸度を持つパラメーターであるため、過去の報告^{28,30)}に習って、両者の差についてベクトル解析を行い倍角座標系に表示した。また、ベクトル解析によって算出された差と年齢との相関を、pearson の積率相関係数を用いて検討した。解析ソフトとして Statview (SAS Inc., USA) を使用し、有意水準を $P < 0.05$ とした。

今回用いた検査結果は、全て対象患者への同意を得ており、今回の研究は、筑波大学臨床研究倫理審査委員会の承認の上、ヘルシンキ宣言の条文を厳守し施行したものである。

4-3 結果

角膜換算屈折力において、若年者ではほとんどが直乱視であり、加齢に伴って直乱視が減少し、倒乱視の占める割合が増加した (図 9)。角膜後面屈折力において、全年代を通じて、ほとんどの症例で倒乱視であり、50 歳以上になるとわずかに直乱視や斜乱視が認められた (図 10)。角膜全屈折力においては、図 9 の角膜換算屈折力の結果と近いグラフが得られたが、全年代において直乱視の症例がやや減少し、その分、倒乱視の症例がやや増加した (図 11)。

角膜換算屈折力の乱視度数は $1.08 \pm 0.71D$ 、角膜全屈折力の乱視度数は $1.03 \pm 0.69D$ であり、両者に有意差を認めるものの ($P < 0.0001$)、両者の間には有意な相関を認めた ($r = 0.956$, $P < 0.0001$)。ベクトル解析にて、角膜全屈折力の

乱視から角膜換算屈折力の乱視を減じた差分の乱視を計算すると、図 12 に示されるようにほとんどの症例が-15~+15 度の範囲に収まり、平均ベクトルは $0.24 \pm 0.09D$ であった。また、このベクトル解析で算出された乱視の差は、加齢とともに増大する傾向があることが示された ($r = 0.407$ 、 $P < 0.0001$; 図 13)。

4-4 考察

角膜は若年者で直乱視が多く、加齢とともに倒乱視が増えていくことが知られている³⁴⁾。一方、近年まで角膜後面の形状解析がなされていなかったため、後面の乱視については前面の逆という認識であり、若年者で倒乱視が多く、加齢とともに直乱視が増えていくのではないかと推測されていた。しかし、今回の結果では、若年者も高齢者もほとんど症例で角膜後面は倒乱視を示した(図 10)。つまり角膜後面が直乱視であると推測されていた症例のほとんどで、実は角膜後面が倒乱視であったということの意味する。これにより角膜換算屈折力を用いて解析したグラフ(図 9)より、角膜全屈折力を用いて解析したグラフ(図 11)の方が、全体的に倒乱視の症例が増えていた。今まで角膜換算屈折力を用いた検討では直乱視だと思っていた症例の中に、実際には倒乱視の症例も混在していた訳である。この傾向は、Ho ら²⁹⁾や Koch ら³⁰⁾がシャインプルーフ型角膜形状解析装置を使用して解析した報告と同様であり、我々は前眼部 OCT を使用して同じ結果を得た。

なぜほとんどの症例で角膜後面が倒乱視になるのか、過去に報告は無い。しかし、角膜前面と角膜後面が平行な関係に無いということであるため、角膜厚の分布が一様でないということの意味している。実際、Liu らは角膜厚の分布は、上方が一番厚く、下方・鼻側・耳側の順に薄くなっていると報告している³⁵⁾。また、Li らは、上方が一番厚く、鼻側・下方・耳側の順に薄くなってい

ると報告している³⁶⁾。どちらの報告からも、上方と下方の和である鉛直方向の角膜の方が、鼻側と耳側の和である水平方向の角膜よりも厚いことを示しており、この傾向が角膜後面の鉛直方向の急峻なカーブを生み、後面の倒乱視を作り出していると考察できる。

角膜換算屈折力と角膜全屈折力の乱視度数を比較すると有意差を認めた。また、更に両者の差をベクトル解析すると、角膜全屈折力の乱視は角膜換算屈折力の乱視よりも、相対的に平均ベクトル $0.24 \pm 0.09D$ の倒乱視に偏っていることが分かった (図 12)。Ho らや Koch らの既報においても同様に、ベクトル解析にて角膜全屈折力の乱視は角膜換算屈折力の乱視よりも、相対的に倒乱視を示す、と言及されている^{28,30)}。Ho らの報告によると平均ベクトルは $0.28 \pm 0.16D$ ²⁸⁾、Koch らの報告によると平均ベクトルは $0.22 \pm 0.14D$ であり³⁰⁾、本研究の結果とほぼ同様であった。つまり、従来通り角膜換算屈折力の乱視を真の角膜乱視であると信じてトーリック眼内レンズを使用した白内障手術を行うと、術後にこの平均ベクトル分の倒乱視 (約 $0.25D$) が残存する可能性があることを意味している。実際に、トーリック眼内レンズの術後には倒乱視が残存することが多いと報告されており²⁴⁾、術前検査の段階で角膜換算屈折力の数値を使用し、角膜後面乱視を無視していることが原因のひとつであると考察できる。更に今回我々は、角膜乱視の差の平均ベクトルが年齢とともに増加することを示した (図 13)。つまり、白内障手術を受けるような高齢者においては特に差が大きくなっており、高齢者に対してトーリック眼内レンズを使用した白内障手術を行う際には特に角膜後面乱視を考慮する必要がある。

4-5 結論

角膜前面の乱視は、若年者で直乱視が多く、加齢とともに倒乱視が増えてい

た。一方、角膜後面の乱視は全年代を通じてほとんどの症例で倒乱視であり、前面の変化と一致しないことが分かった。角膜全体を測定した乱視は、角膜前面の乱視から全体を推測した角膜換算屈折力の乱視より倒乱視であり、その差は加齢とともに大きくなった。トーリック眼内レンズを使用して白内障手術を行う際には角膜後面乱視を考慮する必要があると示された。

第5章 正常眼の角膜厚分布と角膜後面乱視

5-1 目的

乱視の解析において、角膜前面と後面の形状は相似性が乏しいことが報告されているが²⁸⁻³⁰⁾、その成因については明らかにされていない。ここで、前面と後面の相似性が乏しいことから角膜厚の分布が一様でないことが予想される。本研究の目的は、前眼部 OCT を用いて正常眼の形状解析を行い、角膜厚の分布の不均一性を調べること、また角膜厚分布の不均一性が角膜後面乱視に与える影響を検討することである。

5-2 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およびいとう眼科を受診した正常眼418例418眼(49.0±23.4歳、男性213例、女性205例)とした。対象は全て右眼のみで、他覚屈折値が-10.0～+3.0Dの症例である。円錐角膜や角膜混濁などの角膜疾患を有する症例、眼科手術歴のある症例、コンタクトレンズ常用者、その他の眼疾患により角膜形状に影響すると予想された症例は除外した。

対象を前眼部 OCT (SS-1000、CASIA、Tomey) の角膜形状解析モードである『Corneal map』モードで撮影し、中心角膜厚、角膜中心3mm地点での傍中心角膜厚および角膜屈折力の測定を行った。

傍中心角膜厚については角膜を4象限(上方・下方・鼻側・耳側)に分け、それぞれの測定値を比較した。また、上方と下方の平均値として鉛直角膜厚を、鼻側と耳側の平均値として水平角膜厚を定義し、両者の比較を行った。角膜厚の加齢性変化を検討するため、各4象限の角膜厚、鉛直角膜厚、水平角膜厚、

更に鉛直角膜厚と水平角膜厚の差について、それぞれの年齢との相関を調べた。

角膜屈折力については、角膜後面乱視に注目し、2種類の方法で算出した。1つは角膜換算屈折力の乱視から算出される角膜後面乱視（仮想値）である。一般的に角膜換算屈折力および角膜後面屈折力について、keratometric index 1.3375、角膜実質の屈折率 1.376、房水の屈折率 1.336、角膜前面の曲率半径 $r(a)$ および角膜後面屈折力 $r(b)$ を使用して、以下の関係式が成り立っている²⁸⁾。

$$\text{角膜換算屈折力 } P(K) = (1.3375 - 1.0) / r(a)$$

$$\text{角膜後面屈折力 } P(b) = (1.336 - 1.376) / r(b)$$

$$= P(K) \times -0.119 \times r(a) / r(b)$$

これより、仮想角膜後面乱視の度数は $[0.119 \times r(a) / r(b)] \times$ （角膜換算屈折力の乱視）であり、乱視軸は角膜換算屈折力の乱視軸と直交していると考えられる。一方で、もう1つは器械で測定した角膜後面乱視（測定値）である。両者をそれぞれベクトル座標上に表示して比較した上で、両者の差をベクトル解析して年齢との相関を調べた。

角膜厚分布の不均一性が角膜乱視後面乱視に与える影響を調べるため、鉛直角膜厚と水平角膜厚の差と、ベクトル解析で算出された2種類の角膜後面乱視の差の相関を検討した。

4象限の傍中心角膜厚の比較は Bonferroni 多重比較法を併用した one-way ANOVA で行い、鉛直角膜厚と水平角膜厚の比較は paired t-test を用いた。各種角膜厚およびベクトル解析で算出された2種類の角膜後面乱視の差と年齢との相関、更に鉛直角膜厚と水平角膜厚の差とベクトル解析で算出された2種類の角膜後面乱視の差の相関は pearson の積率相関係数を用いて検討した。解析ソフトとして Statview (SAS Inc., USA) を使用し、有意水準を $P < 0.05$ とした。今回用いた検査結果は、全て対象患者への同意を得ており、今回の研究は、筑波大

学臨床研究倫理審査委員会の承認の上、ヘルシンキ宣言の条文を厳守し施行したものである。

5-3 結果

各種角膜厚と年齢との相関を表 2 に示した。傍中心角膜厚について 4 象限で上方・鼻側・下方・耳側の順で厚く、上方は鼻側 ($P = 0.0111$)、下方 ($P < 0.0001$)、耳側 ($P < 0.0001$) より有意に厚く、鼻側は下方 ($P < 0.0001$) と耳側 ($P < 0.0001$) より有意に厚く、下方と耳側の間には有意差を認めなかった。上方が一番厚い症例が 337 眼 (80.6%)、鼻側が一番厚い症例が 71 眼 (17.0%)、下方が一番厚い症例が 10 眼 (2.4%) であった。また、耳側が一番薄い症例が 258 眼 (61.7%)、下方が一番薄い症例が 158 眼 (37.8%)、鼻側が一番薄い症例が 2 眼 (0.5%) であった。

中心角膜厚は加齢とともに薄くなり ($r = -0.101$ 、 $P = 0.0386$)、傍中心角膜厚は上方を除いた 3 象限で加齢とともに薄くなっていた。また、鉛直角膜厚は水平角膜厚よりも有意に厚く、その差は加齢とともに増大した ($r = 0.518$ 、 $P < 0.0001$: 図 14)。

各種角膜乱視を表 3 に示した。角膜後面乱視の仮想値と測定値の間に有意差を認めた ($P < 0.0001$)。角膜後面乱視の仮想値と測定値をそれぞれ倍角座標系に表したが (図 15、16)、仮想値は均一に分布している一方で、測定値は ± 30 度以内の倒乱視側に偏って分布した。両者の差をベクトル解析で算出すると、平均ベクトルは $0.23 \pm 0.10D$ であり、加齢とともに増大した ($r = 0.533$ 、 $P < 0.0001$: 図 17)。

図 14 と図 17 の散布図は類似した症例分布をしているが、鉛直角膜厚と水平角膜厚の差を横軸に、後面乱視の差を縦軸に取って図 18 に示した。両者はとて

もよく相関した ($r=0.819$ 、 $P<0.0001$)。

5-4 考察

これまで角膜厚の加齢性変化について、中心角膜厚は多くの報告で言及されている³⁷⁻⁴⁴⁾。それらの多くでは、中心角膜厚が加齢とともに薄くなっていくと示されているが³⁷⁻⁴²⁾、反対に相関が無いとの報告もある^{43,44)}。一方、傍中心角膜厚について言及している報告は少ない。これは、傍中心角膜厚を測定するのが困難であったからであるが、近年ではシャインプルーフ型角膜形状解析装置や前眼部 OCT の登場で、傍中心角膜厚の正確な測定が可能となり、これまで2つの報告で傍中心角膜厚は加齢性変化がないと報告された^{43,44)}。本研究において、我々は中心角膜厚および上方を除く3象限の傍中心角膜厚が加齢とともに薄くなることを示した。これまでレーザー共焦点顕微鏡を使用した角膜微細構造の変化の検討がなされており、角膜基底下神経線維・角膜実質細胞・内皮細胞の密度が加齢とともに減少し、Bowman 膜が加齢とともに薄くなると報告されている^{45,46)}。これらの既報で報告されているような加齢変化は、我々の研究で中心角膜厚および傍中心角膜厚が加齢で薄くなったことの原因となったと考えられた。加えて、今回の研究では上方の傍中心角膜厚のみが加齢性変化を認めなかったが、これは上方の角膜は上眼瞼で保護されているために加齢による微細構造の変化が他の部位よりも乏しかったと推測された。この不均一な加齢変化によって、高齢者の角膜は鉛直方向と水平方向で厚さの差が生じてしまうのであろう。

角膜前面と後面の乱視の差について、Ho らや Koch らが過去に報告している²⁸⁻³⁰⁾。特に、角膜換算屈折力と全屈折力の乱視の差について、ベクトル解析を使用すると、角膜全屈折力が相対的に 0.22 D~0.28D 倒乱視に偏っていると報告さ

れた^{28,30)}。今回、我々は後面乱視のみに注目し、前面の形状から推測された角膜後面乱視の仮想値と、器械で測定した角膜後面乱視について、ベクトル解析で差を算出すると、既報とほぼ同様に $0.23 \pm 0.10D$ の差があることが分かった。この差は、鉛直方向と水平方向の角膜厚の差ととても良く相関した (図 18)。角膜換算屈折力は角膜厚が一定であるという前提の元で、角膜前面のカーブと keratometric index から算出される概算された角膜屈折力である⁵⁾。つまり、この中で想定されている角膜後面のカーブは前面のカーブと相似である (図 19 左)。しかし、今回我々が示した通り、角膜厚は一定でなく、特に鉛直方向では水平方向よりも厚くなっている。つまり、実際の角膜後面は鉛直方向において、角膜換算屈折力の計算において想定されたカーブよりも曲率が強くなっていると言える (図 19 右)。角膜後面は負の屈折力を持つことから、鉛直方向のカーブが強いということは倒乱視に偏る傾向があることを示しており、今まで言われていた角膜換算屈折力よりも角膜全屈折力に倒乱視が多い理由について説明することができた。

5-5 結論

角膜厚は一定ではなく、上方・鼻側・下方・耳側の順で厚かった。特に上方以外の部位が加齢とともに薄くなるため、角膜厚の不均一性は年齢とともに増大した。角膜厚の不均一性は、近年注目されている角膜後面乱視の倒乱視化を生み出しており、特に高齢者において角膜後面の倒乱視化は顕著であった。

第6章 結語

正常角膜において、角膜厚は一定でなく、上方・鼻側・下方・耳側の順で厚くなっているため、角膜は前面と後面で完全な相似形ではなく、やや異なる形状をしている。このため、従来から角膜屈折力として汎用されてきた角膜換算屈折力は、乱視の解析において正確性に欠けることが分かった。実際の角膜乱視は、角膜換算屈折力で測定された乱視の値より、0.25D 程度の倒乱視に偏った数値となる。つまり、角膜換算屈折力が直乱視の症例において実際の角膜では直乱視の度数が小さくなり、角膜換算屈折力が倒乱視の症例において実際では倒乱視の度数が大きくなる。角膜厚の分布は加齢とともに不均一性を増すため、高齢者において角膜換算屈折力の乱視を使用する際には特に注意を要する。

今後の展望

近年、白内障手術の際にトーリック眼内レンズを用いることで、角膜乱視を打ち消して術後の良好な裸眼視力を得ることが可能となっている。この際に、本研究で得られた知見を適用することで、より良好な術後裸眼視力を得ることが可能であると考えられる。前眼部 OCT など角膜後面を正確に測定できる装置がある施設においては、術前検査において角膜全体を測定した乱視度数を測定し、それに適した眼内レンズを挿入することが望ましい。一方、通常のケラトメータしか常備していない施設においては、角膜換算屈折力を使用せざるを得ないが、実際の角膜より 0.25D 程度の倒乱視を無視してしまっていることを意識して、挿入する眼内レンズの選択を行う必要がある。今後は、従来通り角膜換算屈折力をそのまま参照して眼内レンズを選んで手術をした群と、角膜全体を測定した屈折力を参照して眼内レンズを選んで手術をした群に分け、術後の成績を比較することで、本研究で得られた知見が臨床成績に直結することを検証していきたい。

第7章 謝辞

本稿を終えるにあたり、ご指導いただきました大鹿哲郎教授をはじめ共著者である平岡孝浩先生、また多大なるご協力をいただきました筑波大学眼科外来の皆様へ深謝いたします。

第 8 章 引用文献

1. Corneal topography. American Academy of Ophthalmology. *Ophthalmology*. 1999; 106: 1628-38.
2. Hannush SB, Crawford SL, Waring GO 3rd, Gemmill MC, Lynn MJ, Nizam A. Accuracy and precision of keratometry, photokeratoscopy, and corneal modeling on calibrated steel balls. *Arch Ophthalmol*. 1989; 107: 1235-9.
3. Klyce SD, Smolek MK, Maeda N. Keratoconus detection with the KISA% method-another view. *J Cataract Refract Surg*. 2000; 26: 472-4.
4. Maeda N, Klyce SD, Smolek MK, Thompson HW. Automated keratoconus screening with corneal topography analysis. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1994; 35: 2749-57.
5. Olsen T. On the calculation of power from curvature of the cornea. *Br J Ophthalmol*. 1986; 70: 152-4.
6. Fam HB, Lim KL. Validity of the keratometric index: large population-based study. *J Cataract Refract Surg*. 2007; 33: 686-91.

7. Ho JD, Tsai CY, Tsai RJ, Kuo LL, Tsai IL, Liou SW. Validity of the keratometric index: evaluation by the Pentacam rotating Scheimpflug camera. *J Cataract Refract Surg.* 2008; 34: 137-45.
8. Retzlaff JA, Sanders DR, Kraff MC. Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula. *J Cataract Refract Surg.* 1990; 16: 333-40.
9. Oshika T, Tomidokoro A, Tsuji H. Regular and irregular refractive powers of the front and back surfaces of the cornea. *Exp.Eye.Res.* 1998; 67: 443-7.
10. Liu Z, Huang AJ, Pflugfelder SC. Evaluation of corneal thickness and topography in normal eyes using the Orbscan corneal topography system. *Br J Ophthalmol.* 1999; 83: 774-8.
11. Tomidokoro A, Oshika T, Amano S, Higaki S, Maeda N, Miyata K. Changes in anterior and posterior corneal curvatures in keratoconus. *Ophthalmology.* 2000; 107: 1328-32.
12. Kawamorita T, Uozato H, Kamiya K, Bax L, Tsutsui K, Aizawa D, Shimizu K. Repeatability, reproducibility, and agreement characteristics of rotating Scheimpflug photography and scanning-slit corneal topography for corneal power measurement. *J Cataract Refract Surg.* 2009; 35: 127-33.

13. Piñero DP, Alió JL, Alesón A, EscafVergara M, Miranda M. Corneal volume, pachymetry, and correlation of anterior and posterior corneal shape in subclinical and different stages of clinical keratoconus. *J Cataract Refract Surg.* 2010; 36: 814-25.
14. Kovács I, Miháltz K, Ecsedy M, Németh J, Nagy ZZ. The role of reference body selection in calculating posterior corneal elevation and prediction of keratoconus using rotating Scheimpflug camera. *ActaOphthalmol.* 2011; 89: 251-6.
15. Nakagawa T, Maeda N, Higashiura R, Hori Y, Inoue T, Nishida K. Corneal topographic analysis in patients with keratoconus using 3-dimensional anterior segment optical coherence tomography. *J Cataract Refract Surg.* 2011; 37: 1871-8.
16. Koh S, Maeda N, Nakagawa T, Higashiura R, Saika M, Mihashi T, Fujikado T, Nishida K. Characteristic higher-order aberrations of the anterior and posterior corneal surfaces in 3 corneal transplantation techniques. *Am J Ophthalmol.* 2012; 153: 284-90.
17. Yamaguchi T, Ohnuma K, Tomida D, Konomi K, Satake Y, Negishi K, Tsubota K, Shimazaki J. The contribution of the posterior surface to the corneal aberrations in eyes after keratoplasty. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2011; 52: 6222-9.
18. Higashiura R, Maeda N, Nakagawa T, Fuchihata M, Koh S, Hori Y, Inoue T, Nishida K. Corneal topographic analysis by 3-dimensional anterior segment optical

- coherence tomography after endothelial keratoplasty. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2012; 53: 3286-95.
19. Seitz B, Langenbacher A. Intraocular lens calculations status after corneal refractive surgery. *Curr Opin Ophthalmol.* 2000; 11: 35-46.
20. Gimbel HV, Sun R. Accuracy and predictability of intraocular lens power calculation after laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg.* 2001; 27: 571-6.
21. Shamma HJ, Shamma MC, Garabet A, Kim JH, Shamma A, LaBree L. Correcting the corneal power measurements for intraocular lens power calculations after myopic laser in situ keratomileusis. *Am J Ophthalmol.* 2003; 136: 426-32.
22. Argento C, Cosentino MJ, Badoza D. Intraocular lens power calculation after refractive surgery. *J Cataract Refract Surg.* 2003; 29: 1346-51.
23. Ruhswurm I, Scholz U, Zehetmayer M, Hanselmayer G, Vass C, Skorpik C. Astigmatism correction with a foldable toric intraocular lens in cataract patients. *J Cataract Refract Surg.* 2000; 26: 1022-7.
24. Mendicutte J, Irigoyen C, Aramberri J, Ondarra A, Montes-Mico R. Foldable toric intraocular lens for astigmatism correction in cataract patients. *J Cataract Refract Surg.* 2008; 34: 601-7.

25. Lane SS, Ernest P, Miller KM, Hileman KS, Harris B, Waycaster CR. Comparison of clinical and patient-reported outcomes with bilateral AcrySof toric or spherical control intraocular lenses. *J Refract Surg.* 2009; 25: 899–901.
26. Statham M, Apel A, Stephensen D. Comparison of the AcrySof SA60 spherical intraocular lens and the AcrySof Toric SN60T3 intraocular lens outcomes in patients with low amounts of corneal astigmatism. *Clin Exp Ophthalmol.* 2009; 37: 775–9.
27. 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.
28. Ho JD, Tsai CY, Liou SW. Accuracy of corneal astigmatism estimation by neglecting the posterior corneal surface measurement. *Am J Ophthalmol.* 2009; 147: 788-95.
29. Ho JD, Liou SW, Tsai RJ, Tsai CY. Effects of aging on anterior and posterior corneal astigmatism. *Cornea.* 2010; 29: 632-7.
30. Koch DD, Ali SF, Weikert MP, Shirayama M, Jenkins R, Wang L. Contribution of posterior corneal astigmatism to total corneal astigmatism. *J Cataract Refract Surg.* 2012; 38: 2080-7.

31. Yun SH, Tearney G, de Boer J, Bouma B. Motion artifacts in optical coherence tomography with frequency-domain ranging. *Opt Express*. 2004; 12: 2977-98.
32. Jhanji V, Yang B, Yu M, Ye C, Leung CK. Corneal thickness and elevation measurements using swept-source optical coherence tomography and slit scanning topography in normal and keratoconic eyes. *Clin Experiment Ophthalmol*. 2013; 41: 735-45.
33. Szalai E, Berta A, Hassan Z, Módis L Jr. Reliability and repeatability of swept-source Fourier-domain optical coherence tomography and Scheimpflug imaging in keratoconus. *J Cataract Refract Surg*. 2012; 38: 485-94.
34. Saunders H. Changes in the axis of astigmatism: a longitudinal study. *Ophthalmic Physiol Opt*. 1988; 8: 37-42.
35. Liu Z, Huang AJ, Pflugfelder SC. Evaluation of corneal thickness and topography in normal eyes using the Orbscan corneal topography system. *Br J Ophthalmol*. 1999; 83: 774-8.
36. Li Y, Tang M, Zhang X, Salaroli CH, Ramos JL, Huang D. Pachymetric mapping with Fourier-domain optical coherence tomography. *J Cataract Refract Surg*. 2010; 36: 826-31.

37. Foster PJ, Baasanhu J, Alsbirk PH, Munkhbayer D, Uranchimeg D, Johnson GJ. Central corneal thickness and intraocular pressure in a Mongolian population. *Ophthalmology*. 1998; 105: 969-73.
38. Nomura H, Ando F, Niino N, Shimokata H, Miyake Y. The relationship between age and intraocular pressure in a Japanese population: the influence of central corneal thickness. *Curr Eye Res*. 2002; 24: 81-5.
39. Nemesure B, Wu SY, Hennis A, Leske MC; Barbados Eye Study Group. Corneal thickness and intraocular pressure in the Barbados eye studies. *Arch Ophthalmol*. 2003; 121: 240-4.
40. Suzuki S, Suzuki Y, Iwase A, Araie M. Corneal thickness in an ophthalmologically normal Japanese population. *Ophthalmology*. 2005; 112: 1327-36.
41. Wang D, Huang W, Li Y, Zheng Y, Foster PJ, Congdon N, He M. Intraocular pressure, central corneal thickness, and glaucoma in chinese adults: the Liwan eye study. *Am J Ophthalmol*. 2011; 152: 454-62.
42. Hwang YH, Kim HK, Sohn YH; Namil Study Group, Korean Glaucoma Society. Central corneal thickness in a Korean population: the Namil Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2012; 53: 6851-5.
43. Zheng Y, Huang G, Huang W, He M. Distribution of central and peripheral corneal

thickness in Chinese children and adults: the Guangzhou twin eye study. *Cornea*. 2008; 27: 776-81.

44. Huang J, Ding X, Savini G, Pan C, Feng Y, Cheng D, Hua Y, Hu X, Wang Q. A Comparison between Scheimpflug imaging and optical coherence tomography in measuring corneal thickness. *Ophthalmology*. 2013; 120: 1951-8.

45. Niederer RL, Perumal D, Sherwin T, McGhee CN. Age-related differences in the normal human cornea: a laser scanning in vivo confocal microscopy study. *Br J Ophthalmol*. 2007; 91: 1165-9.

46. Germundsson J, Karanis G, Fagerholm P, Lagali N. Age-related thinning of Bowman's layer in the human cornea in vivo. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2013; 54: 6143-9.

第9章 図表

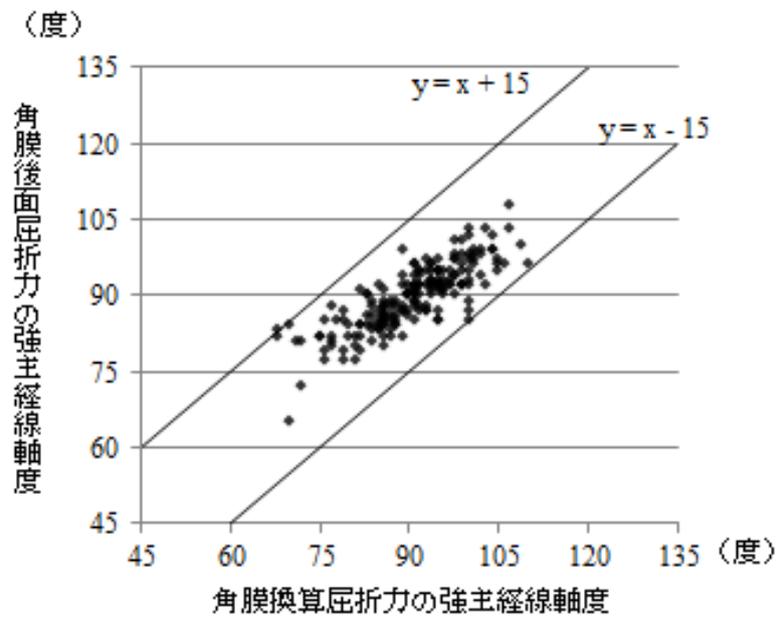


図1 直乱視における角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の強主経線軸度

全ての症例が $y = x + 15$ と $y = x - 15$ の2直線の中に収まった。

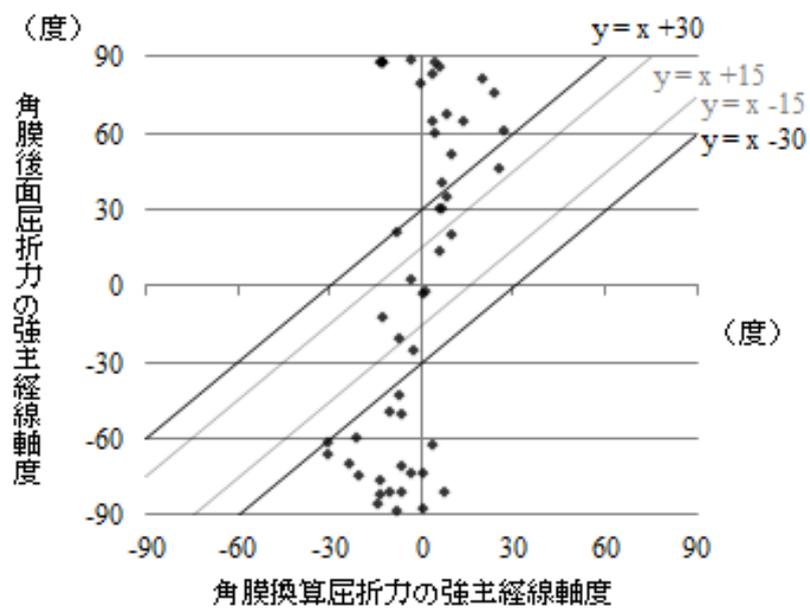


図2 倒乱視における角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の強主経線軸度

$y = x \pm 15$ の2直線の間に入った症例が7眼 (13%)、 $y = x \pm 30$ の2直線の間に入った症例が13眼 (25%) であった。

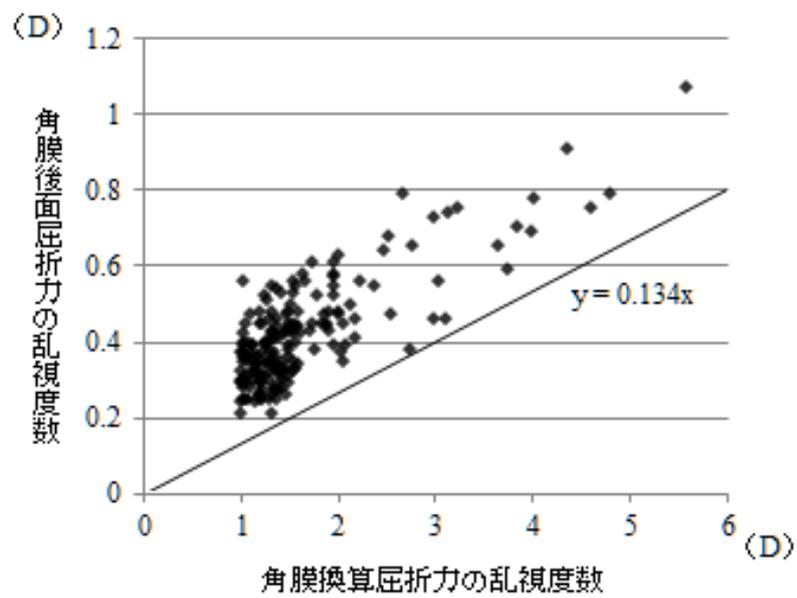


図3 直乱視における角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の乱視度数

両者に相関を認めた ($r = 0.796$ 、 $P < 0.0001$)。また、全ての症例が $y = 0.134x$ の直線より上に分布していた。

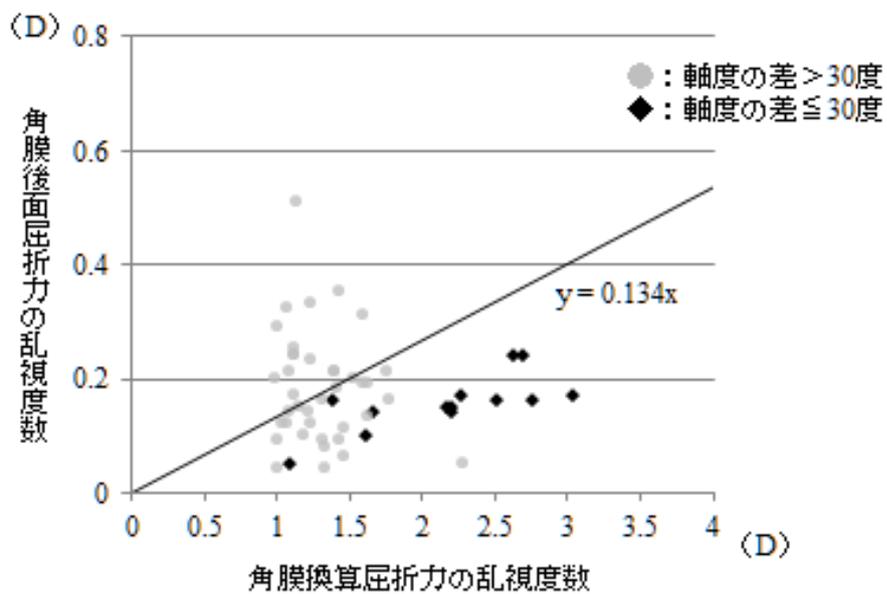


図4 倒乱視における角膜換算屈折力と角膜後面屈折力の乱視度数

全症例では両者に相関を認めなかった ($P = 0.7235$)。強主経線軸度の差が 30 度以内の症例に限定して検討すると相関を認め ($r = 0.720$ 、 $P = 0.0041$)、 $y = 0.134x$ の直線より下に分布していた ($P < 0.0001$)。

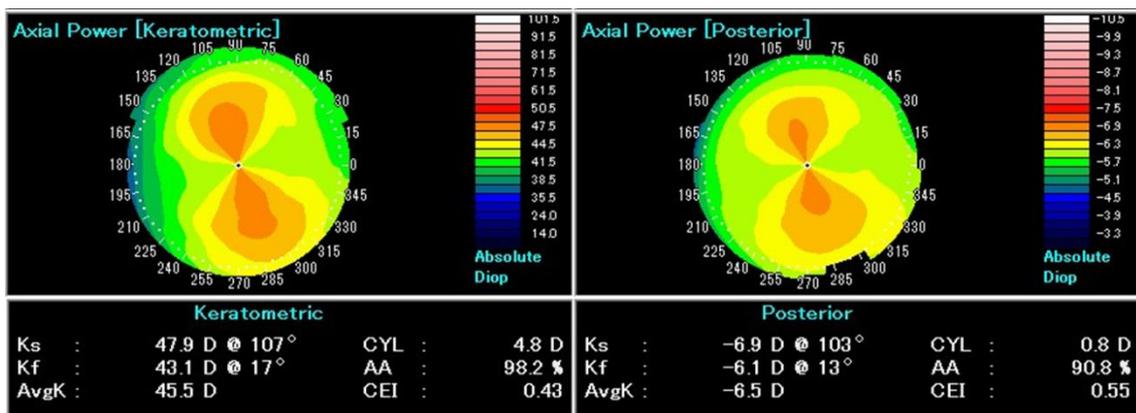


図5 直乱視の代表症例の角膜屈折力マップ

左：角膜前面の結果から算出された角膜換算屈折力マップ（Keratometric）

右：角膜後面屈折力マップ（Posterior）

赤や橙色の蝶ネクタイ部分が屈折力の強い部位を表し、これが上下の鉛直方向に広がるのが直乱視である。左右のマップはかなり近い形状であり、角膜前面と後面は相似していると言える。数値を見ると、強主経線（Ks）の軸度は、角膜換算屈折力の107度に対して後面で103度とほぼ同じ値であり、形状の相似を反映している。一方、乱視度数（CYL）は、角膜換算屈折力の4.8Dに対して後面乱視度数はその1/6の0.8Dである。

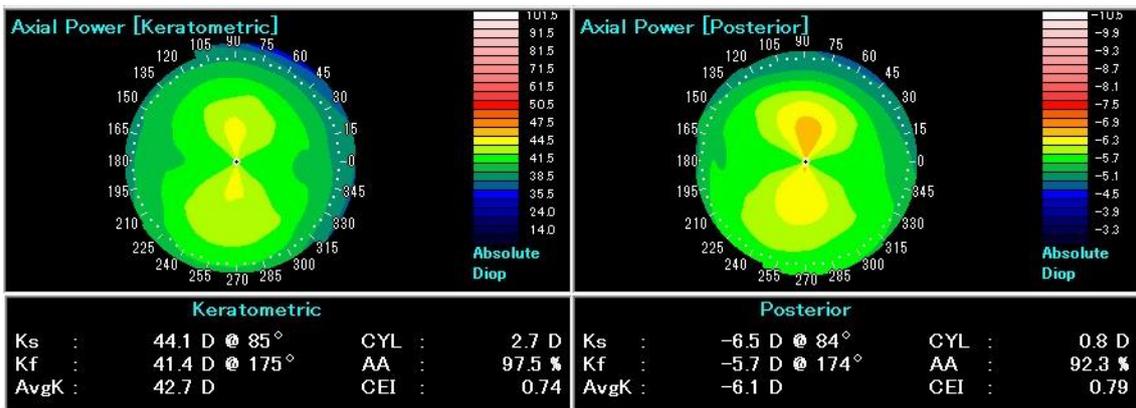


図 6 直乱視の代表症例の角膜屈折力マップ

図 5 の症例と同様、左右のマップは形状が近く、角膜前面と後面が相似形であることを示す。数値を見ると、強主経線 (Ks) の軸度は、角膜換算屈折力の 85 度に対して後面で 84 度とほぼ同じ値である。一方、乱視度数 (CYL) は、角膜換算屈折力の 2.7D に対して後面乱視度数はその約 1/3 の 0.8D である。

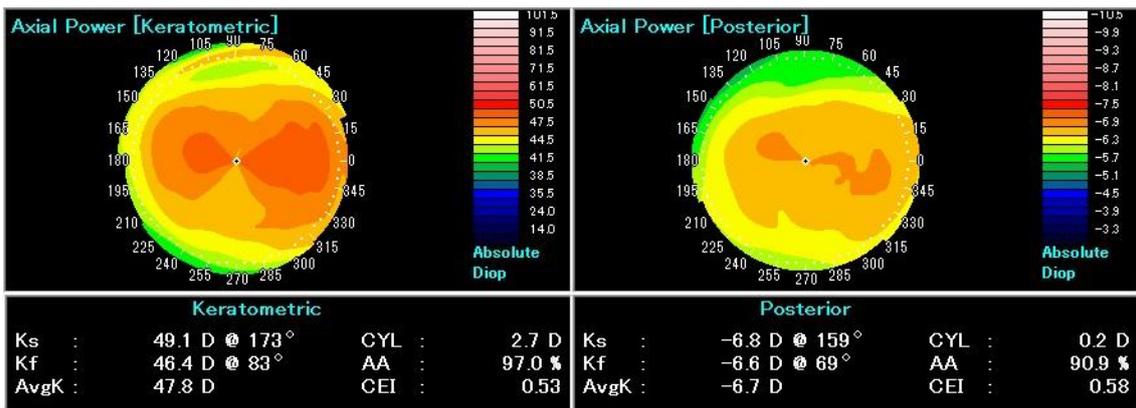


図7 倒乱視の代表症例の角膜屈折力マップ

屈折力の強い蝶ネクタイ部分が水平方向に広がるのが倒乱視であり、直乱視との違いである。左右のマップはそれなりに近い形状であり、角膜前面と後面は相似していると言える。数値を見ると、強主経線（Ks）の軸度は、角膜換算屈折力の173度に対して後面で159度と近い値であり、形状の相似を反映している。一方、乱視度数（CYL）は、角膜換算屈折力の2.7Dに対して後面は0.2Dであり約1/13である。

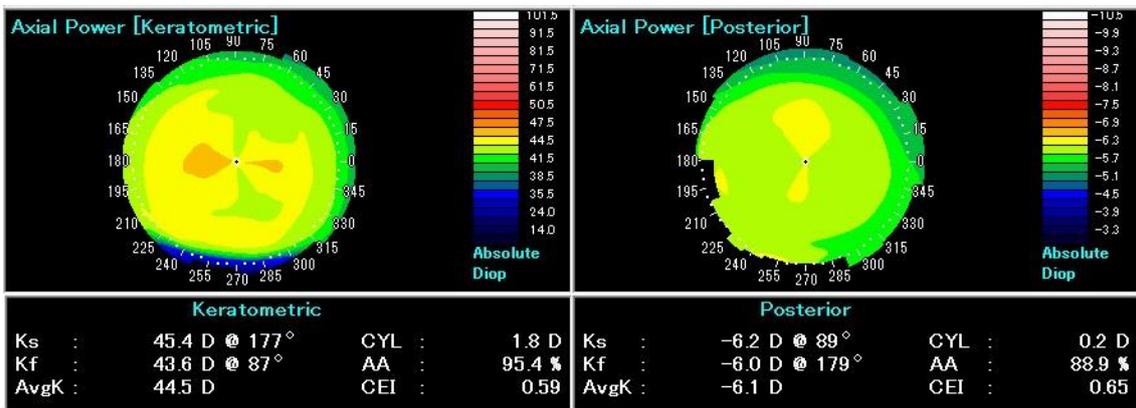


図 8 倒乱視の代表症例の角膜屈折力マップ

左の角膜換算屈折力マップは図 7 と同様に倒乱視パターンであるが、右の角膜後面屈折力のマップは図 5、6 の直乱視パターンのマップに近い。つまり、前面と後面の形状が逆になっている症例である。数値を見ると、強主経線 (Ks) の軸度は、角膜換算屈折力の 177 度に対して後面で 89 度とほぼ直交していることも、これを反映している。乱視度数 (CYL) は、角膜換算屈折力の 1.8D に対して後面は 0.2D であり 1/9 である。

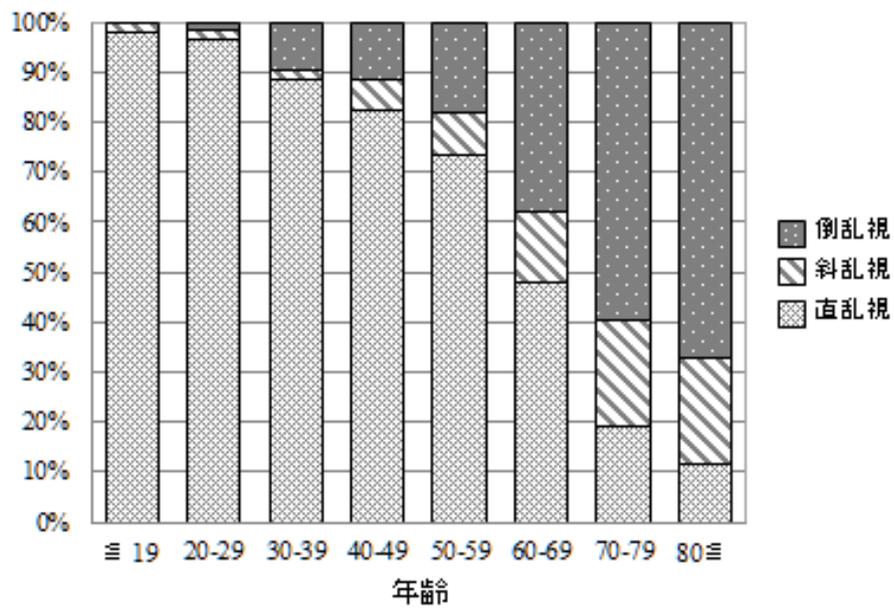


図9 角膜換算屈折力の乱視の年代別割合

若年者はほとんどが直乱視であるが、年齢とともに直乱視が減少し、斜乱視と倒乱視の割合が増加している。

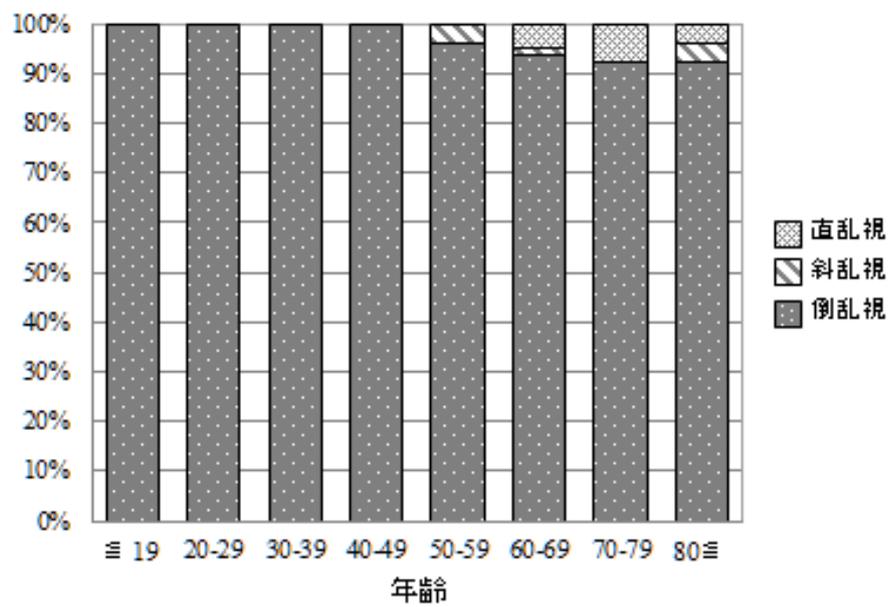


図 10 角膜後面屈折力の乱視の年代別割合

全年代にわたり、ほとんどの症例で倒乱視である。60代以上になると、わずかに直乱視の症例が出現する。

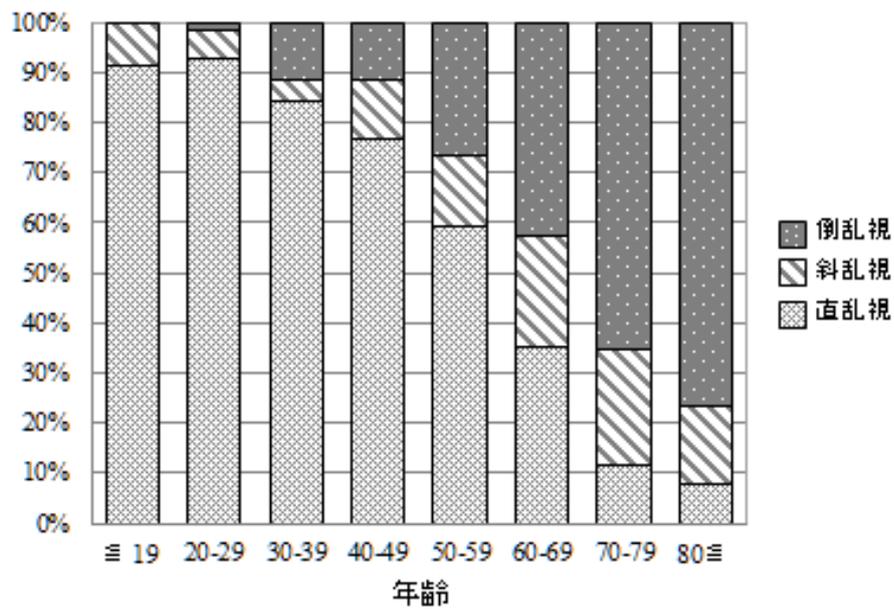


図 11 角膜全屈折力の乱視の年代別割合

図 9 とほぼ同様で、若年者はほとんどが直乱視であるが、年齢とともに直乱視が減少し、斜乱視と倒乱視の割合が増加している。図 9 に比べると、全体的に倒乱視の割合が高いことが分かる。

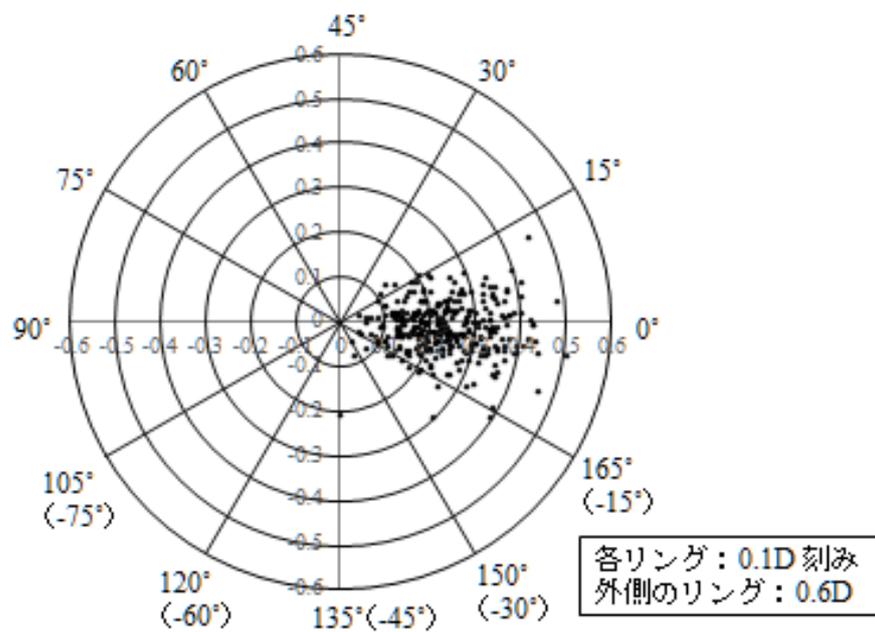


図 12 ベクトル解析：乱視の差（角膜全屈折力－角膜換算屈折力）

角膜換算屈折力と角膜全屈折力の差をベクトル解析し、倍角座標系に示した。ほとんどの症例がグラフの右側、±15度の範囲に収まった。平均ベクトルは0.24Dであった。

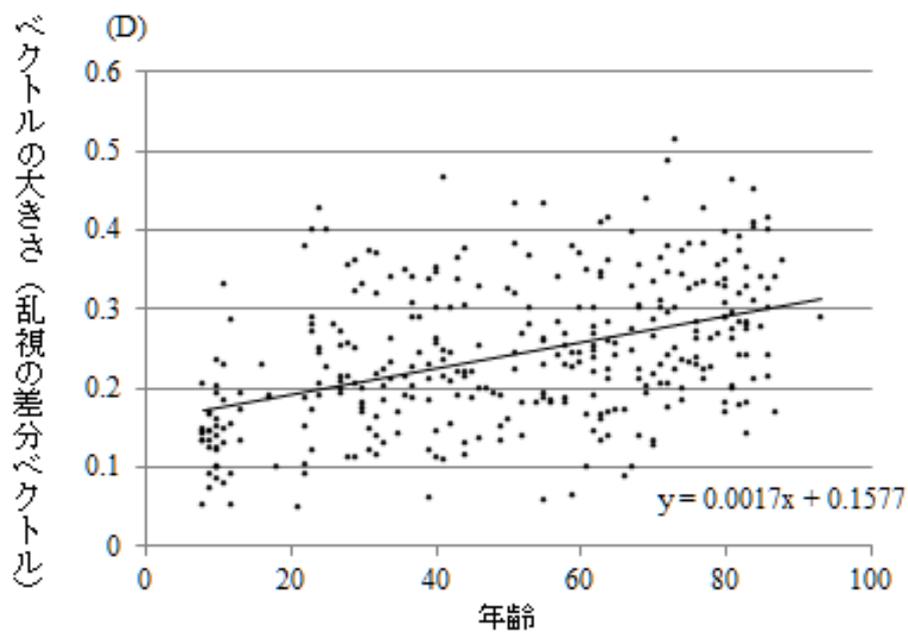


図 13 ベクトル解析で算出された乱視の差と年齢の関係

ベクトル解析で算出された角膜換算屈折力と角膜全屈折力の乱視の差は、年齢とともに大きくなる傾向を示した ($r = 0.407$ 、 $P < 0.0001$)。

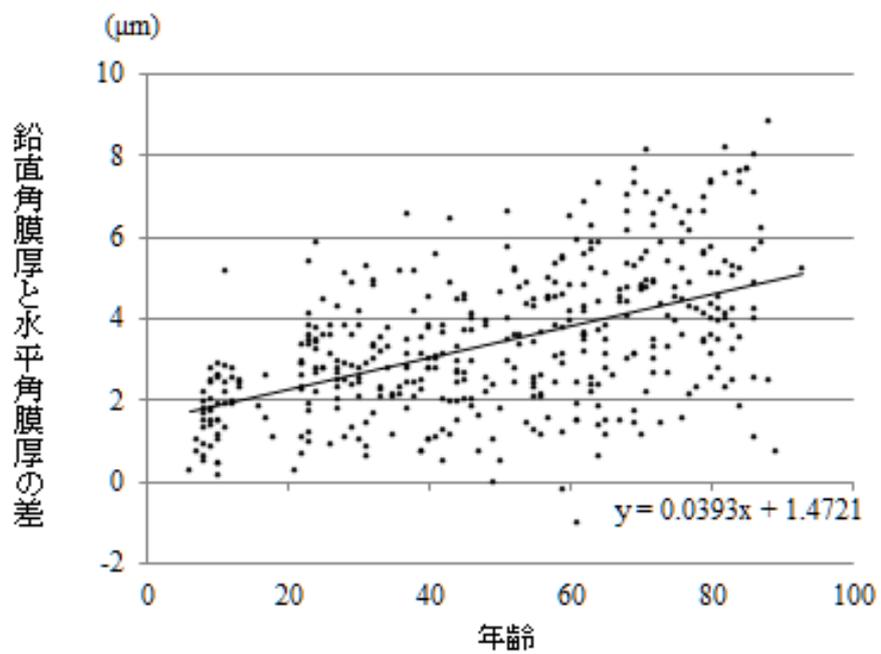


図 14 鉛直角膜厚と水平角膜厚の差と年齢の関係

加齢に伴い鉛直角膜厚と水平角膜厚の差は大きくなる傾向を示した ($r = 0.518$ 、 $P < 0.0001$)。

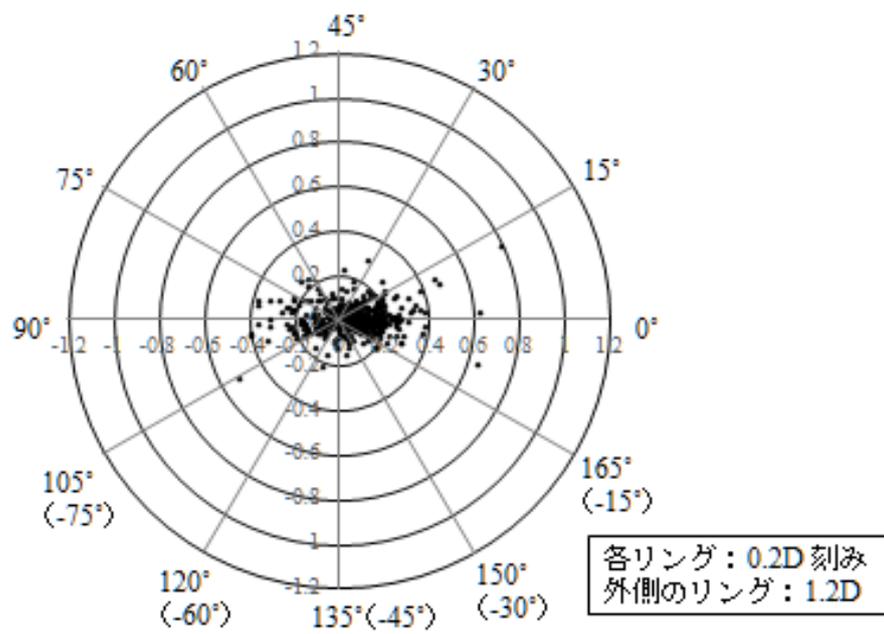


図 15 倍角座標：角膜後面乱視の仮想値

角膜換算屈折力の乱視を元に仮想した角膜後面乱視を倍角座標系に示した。
 倒乱視・直乱視に偏りなく分布した。

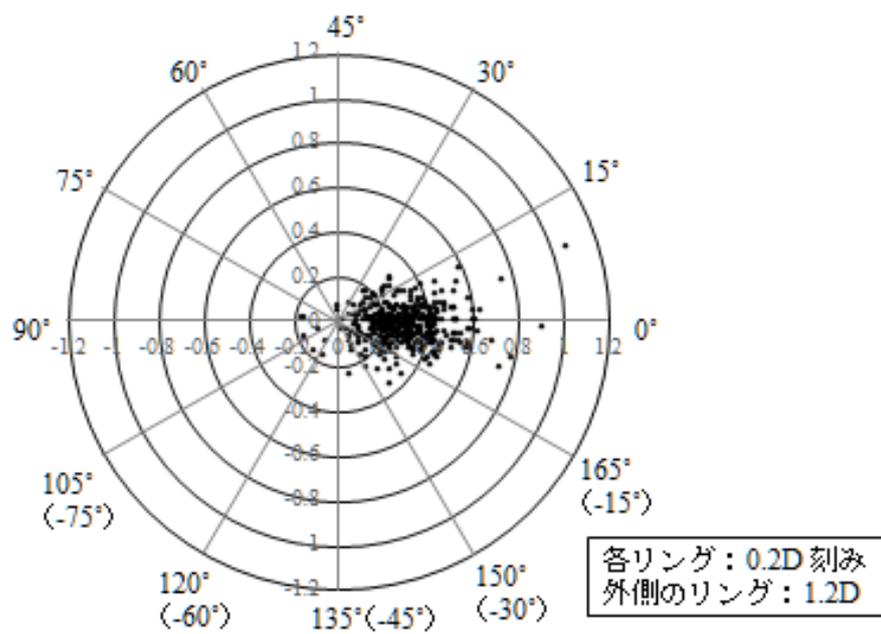


図 16 倍角座標：角膜後面乱視の測定値

器械で測定した角膜後面乱視を倍角座標系に示した。ほとんどの症例が±30度の倒乱視に偏って分布した。

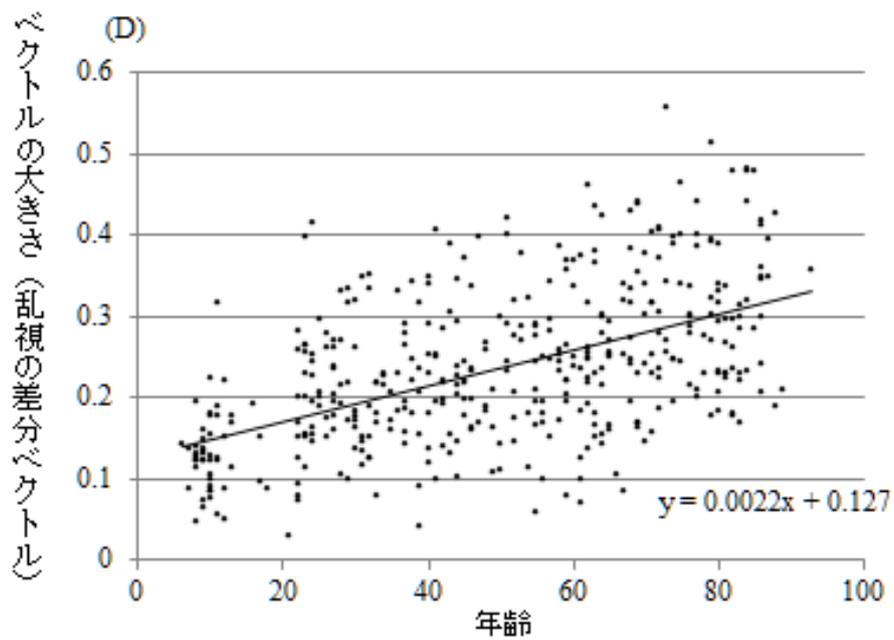


図 17 ベクトル解析で算出された乱視の差と年齢の関係

ベクトル解析で算出された角膜後面乱視の仮想値と測定値の差は、加齢とともに大きくなる傾向を示した ($r = 0.533$ 、 $P < 0.0001$)。

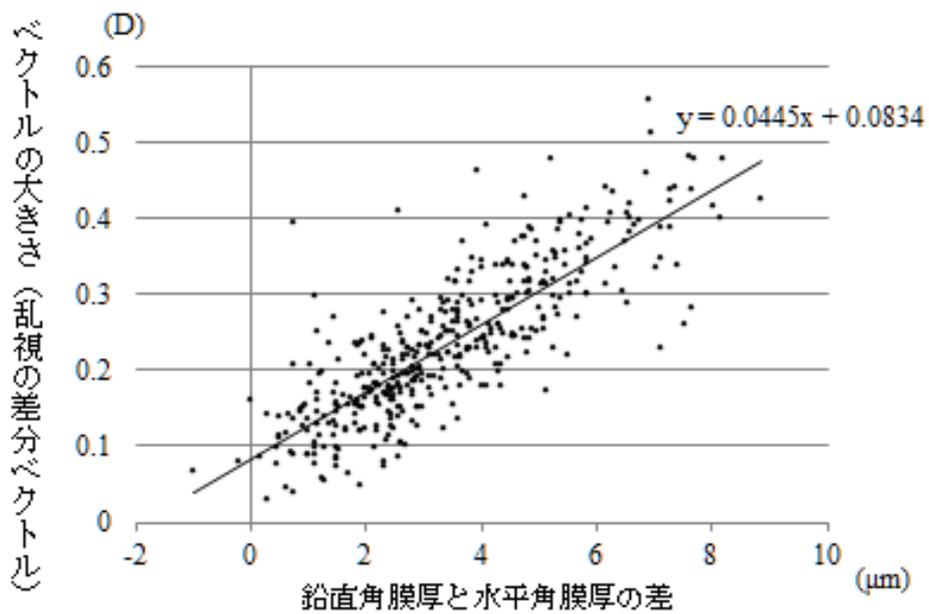


図 18 角膜厚の差とベクトル解析で算出された乱視の差との関係

鉛直角膜厚と水平角膜厚の差が大きくなるにつれて、ベクトル解析で算出された角膜後面乱視の仮想値と測定値の差が大きくなる傾向を示した ($r = 0.533$ 、 $P < 0.0001$)。

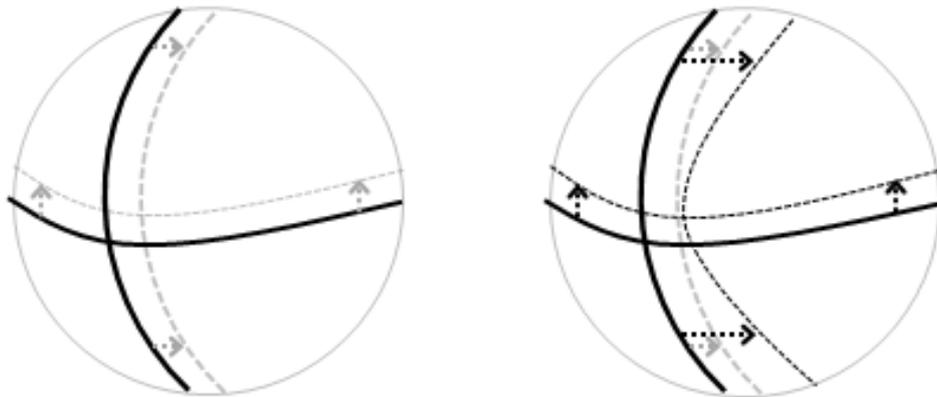


図 19 角膜前面、後面、角膜厚の関係

左図：角膜換算屈折力で推測される角膜

角膜厚（灰色矢印）を一定として使用するため、想定された角膜後面（灰色点線）のカーブは前面（実線）のカーブと相似である。

右図：実際の角膜

実際には角膜厚は一定でなく、鉛直方向で厚い（黒矢印）。実際の後面（黒点線）は鉛直方向において、角膜換算屈折力の計算で推測されたカーブより曲率が強い。

表 1 各年代の症例数と性別

| 年齢 | 症例数 | 性別 (男性 : 女性) |
|-------|-----|--------------|
| ≦ 19 | 46 | 21 : 25 |
| 20-29 | 55 | 34 : 21 |
| 30-39 | 51 | 32 : 19 |
| 40-49 | 51 | 24 : 27 |
| 50-59 | 49 | 25 : 24 |
| 60-69 | 63 | 31 : 32 |
| 70-79 | 52 | 26 : 26 |
| 80 ≦ | 52 | 25 : 27 |
| 計 | 419 | 218 : 201 |

表 2 角膜厚と年齢との相関

| | 平均 ± 標準偏差 | P 値 * (相関係数) |
|-------------------|-----------------|---------------------------------|
| 中心角膜厚 | 530.7 ± 31.5 μm | 0.0386 (<i>r</i> = -0.101) |
| 傍中心角膜厚 | | |
| 上方象限 | 554.6 ± 33.4 μm | 0.5324 |
| 下方象限 | 537.4 ± 31.2 μm | 0.0032 (<i>r</i> = -0.144) |
| 鼻側象限 | 548.9 ± 32.1 μm | 0.0289 (<i>r</i> = -0.107) |
| 耳側象限 | 536.2 ± 31.6 μm | 0.0112 (<i>r</i> = -0.124) |
| 鉛直角膜厚 | 546.0 ± 31.8 μm | 0.0766 |
| 水平角膜厚 | 542.6 ± 31.7 μm | 0.0176 (<i>r</i> = -0.116) |
| 差 (鉛直角膜厚 - 水平角膜厚) | 3.4 ± 1.8 μm | < 0.0001 (<i>r</i> = 0.518) |

* 角膜厚と年齢との相関 (pearson の積率相関係数)

表 3 角膜乱視

角膜換算屈折力の乱視

乱視度数 1.05 ± 0.68 D

平均ベクトル 0.47 D 軸 88 度

角膜後面乱視の仮想値

乱視度数 0.15 ± 0.10 D

平均ベクトル 0.06 D 軸 178 度

角膜後面乱視の測定値

乱視度数 0.31 ± 0.14 D

平均ベクトル 0.29 D 軸 2 度

D: ジオプター