小児の水晶体不正乱視における高次収差と 視力の関係についての検討

鈴木 理恵¹⁾・阿曾沼早苗¹⁾・好川由利子¹⁾・森本 壮¹⁾・不二門 尚²⁾

¹⁾ 大阪大学大学院医学系研究科感覚器外科学眼科

²⁾ 大阪大学大学院医学系研究科感覚機能形成学教室

To determine the relationship between higher-order aberration and visual acuity in the eye with lenticular astigmatism in children

Rie Suzuki¹⁾, Sanae Asonuma¹⁾, Yuriko Yoshikawa¹⁾,
Takeshi Morimoto¹⁾ and Takashi Fujikado²⁾

¹⁾ Department of Ophthalmology and Visual Science, Osaka University
Hospital Graduate School of Medicine

²⁾ Osaka University Graduate School of Medicine Applied Visual Science

要 約

目的：波面センサー（TOPCON社 KR-9000PW）を用いて、小児の水晶体不正乱視眼の高次収差と視力の関係について検討を行った。

対象と方法：水晶体偏位が瞳孔縁まで達していないMarfan症候群1例2眼と瞳孔中心に混濁のない先天性部分白内障3例4眼を対象とし、波面センサーを用いて、眼球全体のコマ様収差（S3）、球面様収差（S4）、全高次収差（Total）のRMS（root mean square）値を測定した。同様にコントロール群として正常眼33眼のRMS値も測定した。検討1として不正乱視眼と正常対照眼のRMS値の比較を、検討2として不正乱視眼のRMS値と視力の関係について検討を行った。

結果：不正乱視群と正常群のRMS値を比較した結果、不正乱視群の方が正常群よりS3、S4、Totalの全てにおいて有意に高かった（それぞれ $P \leq 0.001$ ）。また、不正乱視群ではRMS値が高いほど視力予後が悪く、不正乱視群のRMS値はS3、S4、Totalの全てにおいて視力と有意な負の相関を示した（S3： $P=0.03$ 、S4： $P=0.003$ 、Total： $P=0.03$ ）。

結論：水晶体異常が瞳孔縁にかからない弱視症例では、弱視訓練による視力の発達が期待されるが、訓練効果が十分に反映されない場合には、水晶体由来の高次収差が視力の発達に影響している可能性が示唆された。

別冊請求先（〒565-0871）大阪府吹田市山田丘2-2

大阪大学医学部付属病院 眼科学教室

Tel. 06 (6879) 3456 Fax. 06 (6879) 3458

E-mail: rie.suzuki@ophthal.med.osaka-u.ac.jp

Key words：高次収差、水晶体不正乱視、弱視、視力、波面センサー

higher-order aberration, lenticular illegal astigmatism, amblyopia, visual acuity,
wavefront analyzer

Abstract

Purpose: To determine the relationship between higher-order aberration and visual acuity in the eye with lenticular astigmatism in children using wavefront analyzer.

Subjects and Methods: Both eyes of a patient of Marfan syndrome with mild subluxation of lens, 4 eyes of three patients with partial cataract with spared papillary area and 33 eyes of 33 healthy subjects were examined. We measured the RMS values of the eye using wavefront analyzer. The higher-order aberrations were compared between eyes with irregular lenticular astigmatism and the normal eyes. The relationship between the RMS value of S3, S4, or total ocular aberration and the visual acuity was examined.

Result: In the irregular astigmatism group the RMS value of S3, S4, and total ocular aberration were significantly higher than that of normal control group ($P \leq 0.001$) and the higher the RMS value, the poorer the visual prognosis was.

Moreover, the visual acuity showed negative correlation with S3, S4, and total ocular aberration (S3: $P=0.03$, S4: $P=0.03$, total ocular aberration: $P=0.03$).

Conclusion: In the case with lenticular abnormality and with spared pupil area, if occlusion therapy is not effective, it is possible that higher-order aberration of lenticular irregular astigmatism influences the development of visual acuity.

I. 緒 言

眼球全体の収差は、主として角膜前面、水晶体の収差から構成される。角膜前面の高次収差は、角膜形状解析装置で測定されるが、水晶体に起因する高次収差は波面センサーによる全収差と角膜収差の差と見なす事ができる¹⁾。

収差ゼロの光学系を通る波面を基準とした波面を理想波面といい、収差が存在する場合は理想波面からのずれが生じる。これを波面収差といい、Zernike多項式によって表現される^{2), 3)}。収差は、3次のコマ収差と矢状収差をまとめてコマ様収差 (S3)、4次の収差をまとめて球面様収差 (S4) とされ、RMS (root mean square) 値で表される。

瞳孔領に混濁が影響していない先天性部分白内障 (以下部分白内障) などの小児の水晶体不正乱視眼では、必要に応じて屈折矯正や遮閉訓練などの弱視治療を行うが、視力予後の予測や治療の効果判定、治療の終了時期の決定などの判断に迷うことがある。そこで、今回我々は、波面センサーを用いてこのような小児の水晶体不正乱視眼の高次収差を測定し、高次収差と弱視訓練後の視力の関係について検討を行ったので報告する。

II. 対象及び方法

対象は、大阪大学医学部附属病院眼科弱視斜視外来を受診した患者37例であった。このうち不正乱視群は、Marfan症候群1例2眼と部分白内障3例4眼 (6.2~9.6歳 平均7.6歳) で (表1、左半)、Marfan症候群の症例は水晶体偏位が瞳孔領まで達していない症例、部分白内障の症例は瞳孔中心に混濁のない症例とした。視力は (0.4) ~ (1.2)、屈折値は、球面度数が +2.50 ~ -5.00D (平均 -1.67D)、乱視度数が -1.25 ~ -9.0D (平均 -4.21D) で、弱視治療期間は23~45ヶ月 (治療継続中の症例を含む) であった。また、屈折性弱視、不同視弱視症例の非弱視眼33例33眼を正常群とした。年齢は、4.3~15.9歳 (平均 8.2 ± 4.8 歳) で、視力は (1.0) ~ (1.2)、屈折値は、球面度数が +5.25 ~ -2.5D (平均 +1.54D)、乱視度数が 0 ~ -1.75D (平均 -0.51D) であった。

以上の全対象者に波面センサー (TOPCON社 KR-9000PW) を用いて高次収差の測定を行った。波面センサーはZernikeベクトル解析が導入されており、高次収差が眼球全体のコマ様収差 (S3)、球面様収差 (S4)、全高次収差 (Total) のRMS (root mean square) 値に展開して表されており、今回は、瞳孔径4mmの測定値を採

表1 対象者の矯正視力とRMS値

矯正視力は最終受診時の矯正視力を示している。正常群のRMS値は平均±標準偏差である。

	症例 No	病名	矯正視力	角膜(μm)			眼球全体(μm)		
				S3	S4	Total	S3	S4	Total
正常群 N=33				0.108 ± 0.042	0.013 ± 0.013	0.114 ± 0.041	0.099 ± 0.055	0.047 ± 0.032	0.113 ± 0.062
水晶体 不正乱視群	1	Marfan症候群	RV=($0.9 \times S - 2.5D = C - 9.0D \times 15^\circ$)	0.075	0.014	0.076	0.533	0.216	0.575
			LV=($1.2 \times S - 3.0D = C - 4.75D \times 160^\circ$)	0.092	0.024	0.095	0.149	0.05	0.158
	2	左眼 部分白内障	LV=($0.5 \times S - 0.5D = C - 3.0D \times 30^\circ$)	0.144	0.023	0.146	0.907	0.453	1.014
	3	左眼 部分白内障	LV=($0.4 \times S - 5.0D = C - 4.5D \times 150^\circ$)	0.115	0.06	0.13	0.783	0.494	0.925
	4	両眼 部分白内障	RV=($0.8 \times S + 2.5 = C - 2.75D \times 125^\circ$)	0.158	0.023	0.16	0.717	0.435	0.839
			LV=($0.8 \times S - 1.5D = C - 1.25D \times 10^\circ$)	0.184	0.021	0.185	0.341	0.36	0.496

用した。眼球全体のS3、S4、TotalのRMS値について、検討1として、水晶体不正乱視群と正常群の比較と、検討2として、水晶体不正乱視群と視力の関係について検討を行った。なお、RMS値の正常範囲のスタンダードは、現在確立していないため、今回は「正常群のRMS値±2×標準偏差」を正常範囲と考えて比較検討を行うこととした。統計処理は、Mann-Whitney Rank Sum Test とSpearmanの順位相関係数を用いた。

Ⅲ. 結 果

全対象者のRMS値の一覧を表1に示す。

正常群33眼のRMS値（平均±標準偏差）は、角膜では、S3=0.108±0.042 μm 、S4=0.013±0.013 μm 、Total=0.114±0.041 μm であり、眼球全体では、S3=0.099±0.055 μm 、S4=0.047±0.032 μm 、Total=0.113±0.062 μm であった。水晶体不正乱視症例4例の角膜のRMS値は、表1に示す通りS3、S4、Totalについて正常群とほ

ぼ同等であったが、眼球全体のRMS値は正常群より大きな値を示した。

図1に、検討1の結果として、水晶体不正乱視群と正常群の眼球全体のRMS値の比較を示す。S3、S4、Totalの全ての収差において、水晶体不正乱視群の方が正常群よりも有意に収差が大きいという結果となった。水晶体不正乱視群中、症例1のMarfan症候群の左眼だけが正常範囲内の数値を示しており、その他の眼は正常範囲を大幅に逸脱するRMS値を示していた。

検討2である、水晶体不正乱視群と視力の関係についての結果を図2に示す。

症例1は、3歳10ヶ月で他院よりMarfan症候群の診断目的にて当院受診となった症例である。散瞳下でのみ、水晶体偏位が確認できる軽度の亜脱臼であった（図2）。初診時視力はRV=($0.4 \times S - 1.0D = C - 6.0D \times 15^\circ$) LV=($0.5 \times S - 0.5D = C - 4.0D \times 170^\circ$)であり、眼鏡装用による弱視治療を開始した。眼鏡は終日常用できており、視力が両眼ともに(0.8)に達したのは、4歳11ヶ月だった。それ以降も眼鏡装用は

続行しているが、視力の変動が大きく、不安定な経過をたどっており、6歳1ヶ月の現在、右眼（0.9）、左眼（1.2）である（図2）。

この症例の高次収差のカラーコードマップを

図3（右眼）、図4（左眼）に示す。両眼とも角膜のカラーコードマップをみると配色がほぼ均一であり、かつ、角膜のRMS値が正常であることから、この高次収差が水晶体由来であるこ

図1 不正乱視群と正常群の眼球全体のRMS値の比較
コマ様収差、球面様収差、全高次収差の全てにおいて、RMS値は不正乱視群の方が正常群よりも有意に大きかった。
*p<0.05；Mann-Whitney Rank Sum Test

図2 症例1 Marfan症候群の前眼部写真と視力の経過
前眼部徹照法写真にて両眼とも下方に水晶体亜脱臼を認める。(上)
初診時3.8歳からの視力の経過である。グラフ内の矢印は眼鏡装用開始時期を示す。(下)

とがわかる。網膜像のシミュレーション像は二重視のようになっており、水晶体不正乱視眼と評価できる。

右眼は水晶体下端の偏位に一致して波面の遅

い部分が認められ、眼球全体のRMS値は $S3=0.533\mu\text{m}$ 、 $S4=0.216\mu\text{m}$ 、 $\text{Total}=0.575\mu\text{m}$ といずれも高値を示している (図1, 図3)。左眼には左右非対称のコマ様収差が認められる

図3 症例1 Marfan症候群、右眼の波面センサーの結果

上方のカラーマップは角膜パワーマップと角膜高次収差を、下方のカラーマップは全眼球高次収差と内部不正乱視を表している。右側のランドルト環は完全矯正時の網膜像のシミュレーションである。カラーコードマップ (Higher Order Aberrations 右下) では非対称のコマ様収差が認められる。

図4 症例1 Marfan症候群、左眼の波面センサーの結果

右眼と同様にカラーコードマップでは非対称のコマ様収差を認めている。

が、眼球全体のRMS値は $S3=0.149\mu\text{m}$ 、 $S4=0.05\mu\text{m}$ 、 $\text{Total}=0.158\mu\text{m}$ であり、正常範囲内の値を示していた（図1、図4）。この症例の水晶体偏位の程度は両眼とも軽度であるが、偏位量がより大きい右眼は、全ての収差が高値であり、視力の推移は不安定で最終視力も（0.9）にとどまっているが、偏位量がより小さい左眼は、RMS値が正常範囲内にあり、視力は不安定な時期もあったが最終的には（1.2）と良好であった（図2）。

部分白内障症例のうち、TotalのRMS値が最も大きかった症例2の左眼の前眼部写真と視力経過を図5に示す。他院より白内障手術の適応診断の目的で当科受診となった症例である。当科初診時は5歳8ヶ月で、視力は $RV=(1.0\times C-0.75D\ Ax155^\circ)$ $LV=(0.3\times S-0.5D)$ であり、瞳孔中心に混濁を認めなかったため弱視訓練の適応と考え、眼鏡装用と右眼の遮閉訓練を行った。眼鏡装用や遮閉訓練がきちんとできていにもかかわらず左眼の視力の向上が得られず、約3年を経過した8歳10ヶ月時の視力は（0.5）にとどまっている。

図6の通り、眼球全体の高次収差のカラーコードマップは非対称をで、コマ様収差（S3）が認められ、眼球全体のRMS値は $S3=0.907\mu\text{m}$ 、 $S4=0.454\mu\text{m}$ 、 $\text{Total}=1.014\mu\text{m}$ といずれも高値を示している（図1）。角膜のカラーコードマ

ップでは配色がほぼ均一であること、角膜のRMS値が正常であることから、この高次収差が水晶体に起因するものであることが確認できる。網膜像のシミュレーション像は、彗星状に尾を引いており、S3が強い眼の典型的な見え方を示している。

他の部分白内障症例（症例3、4）のRMS値は表1の通りである。いずれの症例も、角膜のRMS値は正常範囲内にあるが、眼球全体のRMS値は正常範囲を大きく上回っていることから、全例とも水晶体不正乱群であると解釈できる。水晶体不正乱視の全症例のS3、S4、Totalの高次収差と視力（logMAR）との関係を図7に示す。S3、S4、Totalの全ての高次収差において、収差が大きくなるほど視力は低下しており、有意な負の相関が認められた（S3： $r=-0.841$ 、 $P=0.03$ 、S4： $r=-0.986$ 、 $P=0.003$ 、Total： $r=-0.841$ 、 $P=0.03$ ；Spearmanの順位相関係数）。

IV. 考 按

成人正常者のRMS値については、複数の報告がみられるが^{(3), (4), (5)} 小児の正常眼のRMS値については、Kirwanらによる報告があるのみである。平均年齢6.7歳の小児162例82眼を対象に、ZYWAVE II ABERROMETER (BAUSCH & LOMB, SURREY, UNITED KINGDOM) を用い

図5 症例2 部分白内障、前眼部写真と視力の経過

症例3は前眼部徹照法写真にて瞳孔中心より外れた部分に混濁を認める。

右図に視力の経過を表す。5.8歳から現在まで遮閉訓練を行っている。

カラーコードマップを見ると、混濁箇所が強いマイナスの屈折となっている。

図6 症例2 部分白内障、波面センサーの結果

図7 不正乱視眼のRMS値と視力 (logMAR) の関係

コマ様収差、球面様収差、全高次収差のいずれもlogMAR値と高い負の相関を示した。

コマ様: $r = -0.841$, $P = 0.03$ 球面様: $r = -0.986$, $P = 0.003$ 、全高次収差: $r = -0.841$, $P = 0.03$; Spearmanの順位相関係数

てRMS値を測定した結果、S3が $0.23 \pm 0.12 \mu\text{m}$ 、S4が $0.16 \pm 0.11 \mu\text{m}$ 、Totalが $0.37 \pm 0.13 \mu\text{m}$ であったと述べている⁶⁾。我々の検討における小児正常眼の対象者は、平均年齢が7.6歳で、RMS値はS3が $0.099 \pm 0.055 \mu\text{m}$ 、S4が $0.047 \pm 0.032 \mu\text{m}$ 、Totalが $0.113 \pm 0.062 \mu\text{m}$ であり、Kirwanらの結

果と比較すると今回の数値の方が若干低くSDも小さかった。Kirwanらの用いた装置でのRMS値は瞳孔径が6 mmでの数値であるが、我々の用いた装置では瞳孔径4 mmでの解析も可能であったため、4 mmでの値を採用した。そのため我々の数値の方が低くなったことが理由とし

て挙げられる。また、波面センサーの測定には
 瞼裂の開大や固視の安定など被検者の協力が不
 可欠であるが、Kirwanらの対象者より今回の対
 象者の方が年齢が約1歳ほど高かったことも考
 えられた。

今回、我々が水晶体不正乱視群と正常群との
 比較を行った結果、水晶体不正乱視群のRMS値
 の方が正常群より有意に大きい結果となった。

一方Kirwanらは、斜視弱視眼、不同視弱視眼
 のRMS値と正常な対眼のRMS値を比較したところ、
 両者の間に有意な差はなかったと述べている⁷⁾。
 以上のことから、同じ弱視であっても屈
 折性弱視の場合は、高次収差が弱視の成り立ち
 の一因となっている可能性が示唆された。

RMS値の正常範囲を正常眼の $\pm 2 \times$ 標準偏差
 と考えると、今回の対象者中Marfan症候群症例
 の左眼のみが正常範囲に入り、他の5眼は正常
 範囲外であった。対象者中、RMS値が正常であ
 るこの眼だけが、弱視治療に反応して視力が
 (1.2) まで向上した。このことから、対象眼中、
 屈折異常の程度が大きいにもかかわらずこの眼
 の視力が向上したのは、RMS値が低かったこと
 が影響しているのではないかと推察された。

また、水晶体不正乱視群と視力の関係につい
 ての検討により、S3、S4、Totalの全ての高次
 収差についてRMS値が大きい症例ほど視力が低
 く、有意な負の相関が認められた。今回の対象
 者の場合、S3かあるいはS4のいずれかのRMS値
 が0.20以上になるとlogMAR値が0 (=小数視力
 1.0) に達していなかった。RMS値がどの程度
 以上になると正常視力 (1.0) の獲得が困難とな
 るのか、今後、対象者を増やして、小児正常眼
 のRMS値の正常範囲や平均値についてのさらなる
 検討が望まれる。

以上のように、今回の検討より、RMS値が高
 い水晶体不正乱視群では、RMS値が高ければ高
 いほど弱視治療に反応しにくいことが示唆され
 た。しかし、先天部分白内障のように水晶体に
 混濁がある症例においても、ほとんどの場合、
 眼鏡装用や遮閉訓練といった基本的な弱視治療
 で視力は向上するが、白内障手術を選択するこ
 ともある。白内障手術に関しては、Marfan症候
 群などの両眼性の先天的水晶体偏位による屈折

性弱視の症例において、水晶体偏位が大きいた
 めに視軸から水晶体がずれてしまう、屈折異常
 の適切な矯正が不能である、あるいは、軸性近
 視や網膜剥離の予防を図る場合には、白内障手
 術を考慮する⁸⁾、という報告がある。一方、白
 内障術後の視力は手術を施行しない場合と比較
 して有意な差はなかったという報告や⁹⁾、手術
 の前に弱視治療を行うべきという報告¹⁰⁾ もある。
 水晶体は調節機構に関与しており、水晶体不正
 乱視があっても水晶体を残存させる方が視機能
 に有利に働くため、日常生活での利便性や視覚
 の発達を考慮すると、若年者に対する白内障手
 術は慎重に検討される必要があり、非観血的な
 弱視治療を最優先に行うべきと考える。

水晶体異常が瞳孔嚢にかからない小児は、弱
 視訓練での視力の発達が期待される。しかし、
 今回の検討から不正乱視群ではRMS値が高いほ
 ど視力予後が悪かったことから、弱視訓練がき
 ちんとできているにもかかわらず視力の向上が
 不十分であったり、視力が不安定な場合には、
 水晶体不正乱視による高次収差が影響している
 可能性が考えられる。今後RMS値が、視力予後
 の予測や治療の効果判定、治療の終了時期の決
 定などの判断の目安になりうる可能性が示唆さ
 れた。

参考文献

- 1) 不二門尚：眼科学と波面光学，あたらしい眼
 科24，1413-1418 2007.
- 2) 前田直之：コンタクトレンズと波面センサー，
 あたらしい眼科25，937-944 2008.
- 3) 前田直之，大鹿哲郎，不二門尚（編）：角膜
 トポグラフィーと波面センサー，96-107，メ
 ジカルビュー社，2002.
- 4) Porter J, Guirao A, Cox I, G Williams DR :
 Monochromatic aberrations of the human eye
 in a large population. J. Opt. Soc. Am A Opt
 Image Sci Vis 18(8) : 1893-1803. 2001.
- 5) Fujikado T, Kuroda T, Ninomiya S Maeda
 N, Tano Y, Oshika T, et al : Age-related
 changes in ocular and corneal aberrations :
 Am J Ophthalmol 138(1) : 143-6. 69. 2004.

- 6) Kirwan C, O'Keefe M, Soeldner H : Higher-order aberrations in children : Am J Ophthalmol 141: 67–70. 2006.
 - 7) Kirwan C, O'Keefe M : Higher order aberrations in children with amblyopia : J Pediatr Ophthalmol Strabismus 45 : 92–96. 2008.
 - 8) Romano PE, Kerr NC, Hope GM : Bilateral ametropic functional amblyopia in genetic ectopia lentis. its relation to the amount of subluxation, an indicator for early surgical management. Binocul Vis Strabismus 17 : 235–241. 2002.
 - 9) Travi GM, Schanall BM, Lehman SS, Kelly CJ, Hug D, Hirakawa VN, Calhoun JH : Visual outcome and success of amblyopia treatment in unilateral small posterior lens opacities and lenticonus initially treated nonsurgically : J AAPOS. 9 : 449–454. 2005.
 - 10) Denion E, Dedes V, Bonne M, Labalette P, Berger C, Guilbert F, Bouckehove S, Rouland JF : Importance of occlusion therapy for amblyopia in partial unilateral congenital cataracts that are discovered late. J Fr Ophthalmol. 27 : 1017–24. 2004.
-