

# 水晶体再建術後の光学的高次収差と術式の関係の検討

松本浩一

帝京大学医学部眼科学講座

学位申請論文 指導：溝田 淳 教授

Koichi Matsumoto

Department of Ophthalmology, Teikyo University School of Medicine

## 和文要約

**背景・目的** 白内障術後の屈折や低次収差である乱視成分は眼鏡で矯正が可能であるが、一方、眼鏡では矯正できない眼表面の高次収差が術後の視機能に影響することが、近年、明らかとなってきた。通常の眼内レンズ（IOL）嚢内固定術と比較して、眼内レンズを嚢内に固定できない難治症例に対して行われる IOL 毛様溝縫着術や IOL 強膜内固定術は眼球壁に眼内レンズを固定するため、牽引性に眼球構造にゆがみを生じさせ、より強い乱視や光学的収差を生じさせる可能性がある。本研究では、IOL 挿入患者において、Wavefront technology による光学的収差を測定することにより、各術式間で術後の低次収差と高次収差を比較した。

**対象・方法** 2014年1月～2016年4月に帝京大学医学部付属病院において、水晶体再建術を施行した症例73眼を対象とした。水晶体再建術の術式は水晶体嚢内挿入症例が32眼（PEA+IOL群）、IOL毛様溝縫着症例が19眼（毛様溝縫着術群）、IOL強膜内固定術が22眼（強膜固定術群）であった。波面収差解析装置を用いて、前眼部形状解析を行い、全眼球、角膜、眼内の3か所における低次収差と高次収差の各成分を3種類の術式間で比較した。

**結果** 全眼球および眼内部における低次収差（球面収差、全乱視）と高次収差（3次収差、4次収差、コマ様収差、非点収差、トリフォイル収差、テトラフォイル収差）はPEA+IOL群、毛様溝縫着術群、強膜固定術群の3群間に有意差を認めなかった。角膜における収差の比較では、全高次収差、3次収差、トリフォイル収差において3群間に有意差を認めたが（ $p<0.05$ ）、2群間毎の比較では有意差を認めなかった。

**結論** 水晶体再建術において、難治症例で行われる毛様溝縫着術や強膜内固定術の術式は、通常の IOL 嚢内固定術と比較して、全眼球、眼内部の低次及び高次収差に差がなく、術後の視機能への影響も少ないと考えられた。

**キーワード**：高次収差、水晶体再建術、前眼部形状解析、IOL 強膜固定術、  
IOL 毛様溝縫着術

## 英文要約

**Background:** The refractive and astigmatism errors which are low order aberration after cataract surgery can be corrected with eyeglasses. On the other hand, higher order aberrations on the ocular surface cannot be corrected with eye glasses, and affects the postoperative visual function. Transscleral suture fixation of posterior chamber intraocular lenses (TSF-IOL) and scleral fixation of the IOL (Scleral IOL) are fixed to the ciliary sulcus and scleral wall. Compared with a conventional IOL implantation, these procedures may induce traction and distortion of the ocular structure, possibly causing stronger astigmatism and optical aberration. In this study, we measured optical aberration by a wavefront analyzer and compared low-order and high-order aberrations after surgery among these surgical procedures.

**Methods:** 73 eyes who received cataract surgery at Teikyo University School of Medicine from January 2014 to April 2016 were enrolled in this study. The operation method of the IOL implantation is conventional IOL implantation into the lens capsule in 32 eyes (PEA + IOL group), TSF-IOL implantation in 19 eyes (TSF-IOL group), and scleral IOL implantation in 22 eyes (Scleral IOL group). We measured the ocular surface topography using a wavefront aberration analyzer and compared the lower and higher order aberration in whole eyeball, cornea, and intraocular parts among the three types of operation.

**Results:** There was no significant difference in lower order aberrations (spherical aberration, total astigmatism) and higher order aberrations (third order aberration, fourth order aberration, coma aberration, astigmatism, trifoil aberration, and tetrafoil aberration) among the three types of operation in the whole eyeball and intraocular parts. Regarding corneal part, significant differences were found among the 3 groups in total high order aberration, tertiary aberration, and trifoil aberration; however, there was no difference in these parameters between any two groups selected from the three groups.

**Conclusions:** In cataract surgery, both TSF-IOL and scleral IOL implantations do not affect low- and high-order aberrations compared with conventional IOL implantation, suggesting these surgical procedures do not affect postoperative visual function.

**Keyword:** High-order aberration, Cataract surgery, Wavefront analyzer, Transscleral suture fixation of posterior chamber IOL, Scleral fixation of the IOL

## はじめに

近年、本邦では白内障に対する手術として、水晶体再建術（超音波乳化吸引術と眼内レンズ（以下、IOL）挿入術）が、広く一般的に行われている。白内障手術後の視機能を改善するために、球面収差量を減少させる事を目的とした、非球面 IOL が臨床で使用されている。IOL の光学面を非球面化する事で球面収差の補正量を制御する事が可能となる。非球面 IOL は囊内で中心に固定される場合は球面収差を軽減するが、永田らは非球面 IOL が傾斜（tilt）や偏心（decentration）による偏位を起こすと、球面 IOL よりもむしろ像質が低下する事を報告している<sup>1)</sup>。IOL の傾斜や偏心は、視機能に影響を与える眼球光学に影響をもたらす因子である事が知られており、術後の偏心を減らすことが術後の良好な視機能を獲得するために重要となってくる<sup>2, 3)</sup>。

近年の白内障手術では水晶体囊内の物質を取り除いた後に IOL を囊内に確実に挿入する事で傾斜や偏心を減らすことができるため、これらの IOL の傾斜や偏心による視機能への影響は減少してきている。ほとんどの症例では白内障手術で IOL の囊内挿入が行われているが、チン小帯脆弱例などの、IOL の囊内への挿入が困難な症例に対しては、IOL 毛様溝縫着術や IOL 強膜内固定術が施行される<sup>4~8)</sup>。IOL 囊内固定術は理論的には眼球壁に影響を及ぼさないため、術後の眼球のゆがみ（乱視成分）が増えない。一方、IOL 毛様溝縫着術や IOL 強膜内固定術では、眼球壁に眼内レンズを縫着するために、眼内レンズ縫着・固定部位における眼球壁の牽引により眼球構造にゆがみが生じる可能性がある。低次収差成分である乱視成分は眼鏡による矯正が可能であるが、高次収差によるゆがみは眼鏡による矯正が不可能なため、視機能に影響を及ぼす。したがって、IOL 移植後の高次収差の解析は、術後の視機能の把握と評価に有用であると考えられる。

波面収差解析は術後の視機能の評価に有用であると考えられるが、臨床的には未だ広く

行われておらずその報告も少ない<sup>9~11)</sup>。また、IOL 嚢内固定術と比較して IOL 毛様溝縫着術と IOL 強膜内固定術は術後の低次収差と高次収差が大きくなることが予測されるが、その検討について報告した研究は皆無である。本研究では、実際の IOL 挿入患者において、Wavefront technology による光学的高次収差を測定することにより、各術式による IOL 移植術の眼球高次収差への影響を評価した。

## 対象・方法

### 1. 対象

2014 年 1 月～2016 年 4 月に帝京大学医学部付属病院において、水晶体再建術を施行し、手術後 3 ヶ月以上経過観察が可能であった症例で、波面収差解析装置波面センサー(KR-1W, トプコン社製)を用いて、前眼部形状解析を行うことができた症例 73 眼である。手術の術式は水晶体嚢内固定症例 32 眼(嚢内固定群)、IOL 毛様溝縫着症例 19 眼(毛様溝縫着群)、IOL 強膜内固定 22 眼(強膜内固定群)の計 73 眼であった。平均年齢は 69.7±13.8 歳(平均値±標準偏差値)であった。IOL の種類は水晶体嚢内挿入例、IOL 強膜内固定例では支持部素材が PVDF (polyVinylidene difluoride) であるエタニティーナチュラル NX-70 (参天)を使用し、IOL 毛様溝縫着症例では支持部素材は PMMA (polymethyl methacrylate) である VA70AD (HOYA) を使用した。共に非球面 IOL である。本研究は、帝京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て行った。全ての対象患者において、本研究の目的について説明を行い、検査の前に同意を得てから行った。

### 2. 波面収差解析装置波面センサー

眼球波面収差は、Hartmann-Shack 型波面収差解析装置 (KR-1W, Topcon Co, Tokyo, Japan)

を用いて行った(図1)。KR-1Wの測定範囲および設定値は、以下のとおりである。屈折力測定範囲は球面屈折力：-25D～+22D(0.01D/0.12D/0.25Dステップ表示)，円柱屈折力：0D～±10D(0.01D/0.12D/0.25Dステップ表示)，乱視軸方向：0°～180°(1°/5°ステップ表示)(但し，球面屈折力+円柱屈折力 $\leq$ +22D，または球面屈折力+円柱屈折力 $\geq$ -25D)，測定領域： $\phi$ 8mm(最大)，測定最小瞳孔径： $\phi$ 2mm，角膜曲率測定範囲，角膜曲率半径：5.00mm～10.00mm(0.01mmステップ表示)，角膜屈折力：67.50D～33.75D(0.01D/0.12D/0.25Dステップ表示)(但し，角膜屈折率=1.3375とした時の換算値)，角膜乱視度：0D～±10D(0.01D/0.12D/0.25Dステップ表示)，角膜乱視軸方向：0°～180°(1°/5°ステップ表示)，角膜形状測定領域： $\phi$ 0.8mm～ $\phi$ 9.2mm(但し，角膜曲率半径を8mmとした場合)。

### 3. 波面収差の測定

眼球波面収差の測定時，散瞳した状態では瞳孔径の大きさが波面収差解析の結果に影響を及ぼすため，被験者は無散瞳の自然瞳孔の状態にて，暗所室で測定を行った。瞳孔径4mm内の眼表面形状を測定し，得られた眼球波面収差データは，ゼルニケ多項式に展開し，各収差の合算は二乗平均平方根(root mean square：RMS)で換算した(図2)<sup>12～14</sup>。0次は波面全体の平均値を示し，1次は波面全体の三次元的な傾き，2次は球面度数，乱視度数，乱視軸，3次以降は高次収差で，高次収差の奇数の次数がコマ収差，偶数の次数が球面収差を示す。ゼルニケ多項式の4次まで展開し，各成分を図3に示す収差成分に分類した。すなわち，2次収差は斜乱視成分，球面成分，倒乱視/直乱視成分，3次成分は鉛直トレフォイル成分，鉛直コマ成分，水平コマ成分，水平トレフォイル成分，4次収差は斜めテトラフォイル成分，斜め2次乱視成分，球面収差成分，鉛直/水平2次乱視成分，鉛直/水平テトラフォイル成分に分類した。

図4に示す通り，3次収差と4次収差の全高次収差は，それぞれ各高次収差成分の二乗

平均平方根 RMS として計算した。すなわち 3 次収差は、鉛直トレフォイル成分、鉛直コマ成分、水平コマ成分、水平トレフォイル成分からなる 4 種類の高次収差成分の二乗平均平方根 RMS として計算し、4 次収差は、斜めテトラフォイル成分、斜め 2 次乱視成分、球面収差成分、鉛直/水平 2 次乱視成分、鉛直/水平テトラフォイル成分からなる 5 種類の高次収差成分の二乗平均平方根 RMS として計算した。

また、ゼルニケベクトル項の全コマ、全 2 次乱視、全トレフォイル、全テトラフォイルを次のように計算をした（図 4）。3 次収差の鉛直コマ成分と水平コマ成分の二乗平均平方根 RMS を全コマ収差とし、4 次収差の斜め 2 次乱視成分と沿道/水平 2 次収差成分の二乗平均平方根 RMS を全 2 次乱視収差とした。また 3 次収差の沿道トレフォイルと水平トレフォイルの二乗平均平方根 RMS を全トレフォイル収差とし、4 次収差の斜めテトラフォイルと鉛直/水平テトラフォイル成分の二乗平均平方根 RMS を全テトラフォイル収差として計算した。

#### 4. 統計解析

2 群間の平均値の比較は two-tailed unpaired Student' s t-test を用い、3 群間の平均値の比較は 1 元配置分析を用い、3 群間の中の 2 群間の比較には Scheffe の多重比較法 (Scheffe' s multiple comparison test) を用いた。欠損値が存在する場合には、補完はせず、データから除外した。P < 0.05 を統計学的な有意水準とした。統計解析は SAS System software version 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA) およびエクセル統計 2012 年度版 (BellCurve, 東京) を使用した。

## 5. 手術方法

嚢内固定術に関しては一般的に行われてる超音波乳化吸引術を施行した。毛様溝縫着術は 9-0 縫合糸 (PC-9 ; アルコン) をダブルカウヒッチ法にて結索した後に 2 時と 8 時に作成した 1.5 mm 幅の正方形な強膜半層フラップに ab interno 法にて毛様溝に縫着する方法で施行した。強膜内固定術は 2 時と 8 時の強膜に T 字マーカ―を使用し切開部位をマーキングし、それに沿ってフェザーナイフを用いて T 字の強膜半層切開を行い強膜半層トンネルを作成する簡便な T-fixation technique で施行した。前述の各術式ともに 11 時方向から 2.4 mm スリットナイフで角膜切開を行い IOL をインジェクターにて挿入した。

## 結果

図 5 に球面収差の 3 群間の比較を示す。全眼球 (嚢内固定群 :  $0.06 \pm 0.05$ , 毛様溝縫着群 :  $-0.07 \pm 0.05$ , 強膜内固定群 :  $0.09 \pm 0.09$ ,  $p=0.1910$ ), 角膜 (嚢内固定群 :  $0.05 \pm 0.04$ , 毛様溝縫着群 :  $0.09 \pm 0.11$ , 強膜内固定群 :  $0.01 \pm 0.07$ ,  $p=0.4232$ ), 内部 (嚢内固定群 :  $0.01 \pm 0.06$ , 毛様溝縫着群 :  $-0.01 \pm 0.14$ , 強膜内固定群 :  $0.08 \pm 0.06$ ,  $p=0.0676$ ) のいずれにおいても, 3 群間に有意差は認められなかった。

図 6 に全乱視の 3 群間の比較を示す。全眼球 (嚢内固定群 :  $-1.13 \pm 0.80$ , 毛様溝縫着群 :  $-2.14 \pm 1.62$ , 強膜内固定群 :  $-3.44 \pm 3.87$ ,  $p=0.1910$ ) および角膜 (嚢内固定群 :  $-1.00 \pm 0.54$ , 毛様溝縫着群 :  $-2.81 \pm 1.76$ , 強膜内固定群 :  $-2.65 \pm 2.48$ ,  $p=0.1910$ ) の全乱視は嚢内固定群よりも IOL 毛様溝縫着群および IOL 強膜内固定群の方が強い傾向があるが, 統計学的には 3 群間の間に有意差がなかった。内部の全乱視においても 3 群間に有意差は見られなかった (嚢内固定群 :  $-0.97 \pm 0.94$ , 毛様溝縫着群 :  $-1.23 \pm 0.70$ , 強

膜内固定群 :  $-1.87 \pm 1.37$ ,  $p=0.8419$ ).

図 7 に全高次収差の 3 群間の比較を示す. 3 群間の比較では全眼球 (囊内固定群 :  $0.25 \pm 0.18$ , 毛様溝縫着群 :  $0.23 \pm 0.11$ , 強膜内固定群 :  $0.43 \pm 0.30$ ,  $p=0.7137$ ), 内部 (囊内固定群 :  $0.21 \pm 0.19$ , IOL 毛様溝縫着群 :  $0.32 \pm 0.39$ , 強膜内固定群 :  $0.37 \pm 0.27$ ,  $p=0.8276$ ) では有意差がないが, 角膜 (囊内固定群 :  $0.21 \pm 0.07$ , 毛様溝縫着群 :  $0.35 \pm 0.40$ , 強膜内固定群 :  $0.28 \pm 0.07$ ,  $p=0.0154$ ) において有意差が認められた. 角膜における 2 群間の比較では, いずれの群間においても有意差は認められなかった (すべて  $p>0.05$ ).

図 8 に 3 次収差の 3 群間の比較を示す. 3 群間の比較では全眼球 (囊内固定群 :  $0.21 \pm 0.15$ , 毛様溝縫着群 :  $0.19 \pm 0.11$ , 強膜内固定群 :  $0.39 \pm 0.30$ ,  $p=0.6084$ ), 内部 (囊内固定群 :  $0.17 \pm 0.15$ , 毛様溝縫着群 :  $0.29 \pm 0.36$ , 強膜内固定群 :  $0.33 \pm 0.28$ ,  $p=0.8249$ ) では有意差がないが, 角膜 (囊内固定群 :  $0.18 \pm 0.07$ , IOL 毛様溝縫着群 :  $0.32 \pm 0.36$ , IOL 強膜内固定群 :  $0.25 \pm 0.08$ ,  $p=0.0188$ ) において有意差が認められた. 角膜における 2 群間の比較では, いずれの群間においても有意差は認められなかった (すべて  $p>0.05$ ).

図 9 に 4 次収差の 3 群間の比較を示す. 全眼球 (囊内固定群 :  $0.12 \pm 0.10$ , 毛様溝縫着群 :  $0.11 \pm 0.04$ , 強膜内固定群 :  $0.15 \pm 0.08$ ,  $p=0.9734$ ), 角膜 (囊内固定群 :  $0.10 \pm 0.04$ , 毛様溝縫着群 :  $0.15 \pm 0.19$ , 強膜内固定群 :  $0.12 \pm 0.04$ ,  $p=0.3207$ ), 内部 (囊内固定群 :  $0.12 \pm 0.12$ , 毛様溝縫着群 :  $0.13 \pm 0.18$ , 強膜内固定群 :  $0.15 \pm 0.07$ ,  $p=0.9089$ ) のいずれにおいても, 3 群間に有意差は認められなかった.

図 10 にコマ収差の 3 群間の比較を示す. 全眼球 (囊内固定群 :  $0.12 \pm 0.11$ , 毛様溝縫着群 :  $0.13 \pm 0.10$ , 強膜内固定群 :  $0.27 \pm 0.32$ ,  $p=0.7706$ ), 角膜 (囊内固定群 :  $0.09 \pm 0.06$ , 毛様溝縫着群 :  $0.24 \pm 0.35$ , 強膜内固定群 :  $0.16 \pm 0.09$ ,  $p=0.3421$ ), 内部 (囊内固定群 :  $0.12 \pm 0.11$ , 毛様溝縫着群 :  $0.26 \pm 0.36$ , 強膜内固定群 :  $0.26 \pm 0.28$ ,  $p=0.7051$ ) のいずれにおいても, 3 群間に有意差は認められなかった.

図 11 に非点収差の 3 群間の比較を示す。全眼球（囊内固定群：0.06 ± 0.07，毛様溝縫着群：0.05 ± 0.04，強膜内固定群：0.06 ± 0.04， $p=0.7874$ ），角膜（囊内固定群：0.05 ± 0.03，毛様溝縫着群：0.07 ± 0.08，強膜内固定群：0.05 ± 0.03， $p=0.2795$ ），内部（囊内固定群：0.07 ± 0.08，毛様溝縫着群：0.04 ± 0.03，強膜内固定群：0.07 ± 0.04， $p=0.7405$ ）のいずれにおいても，3 群間に有意差は認められなかった。

図 12 にトリフォイル収差の 3 群間の比較を示す。3 群間の比較では全眼球（囊内固定群：0.16 ± 0.12，毛様溝縫着群：0.13 ± 0.09，強膜内固定群：0.23 ± 0.15， $p=0.5500$ ），内部（囊内固定群：0.11 ± 0.12，毛様溝縫着群：0.10 ± 0.06，強膜内固定群：0.15 ± 0.14， $p=0.6815$ ）では有意差がないが，角膜（囊内固定群：0.14 ± 0.07，毛様溝縫着群：0.17 ± 0.15，強膜内固定群：0.18 ± 0.07， $p=0.0066$ ）において有意差が認められた。角膜における 2 群間の比較では，いずれの群間においても有意差は認められなかった（すべて  $p>0.05$ ）。

図 13 にテトラフォイル収差の 3 群間の比較を示す。全眼球（囊内固定群：0.07 ± 0.09，毛様溝縫着群：0.03 ± 0.01，強膜内固定群：0.08 ± 0.05， $p=0.8291$ ），角膜（囊内固定群：0.05 ± 0.03，毛様溝縫着群：0.09 ± 0.13，強膜内固定群：0.08 ± 0.05， $p=0.5341$ ），内部（囊内固定群：0.08 ± 0.10，毛様溝縫着群：0.19 ± 0.14，強膜内固定群：0.09 ± 0.06， $p=0.6262$ ）のいずれにおいても，3 群間に有意差は認められなかった。

## 考察

本研究結果から，全眼球および眼内部における低次収差と高次収差（3 次収差，4 次収差，コマ収差，非点収差，トリフォイル収差，テトラフォイル収差）は囊内固定群よりも毛様溝縫着群，強膜内固定群の方が高い傾向があるパラメーターを認めるものの，いずれの収差のパラメーターにおいても 3 群間に統計学的な有意差を認めなかった。この結果は，難治症例で行われる毛様溝縫着術や強膜内固定術は，一般的な白内障手術である IOL 囊内固

定術と比較して、低次収差（乱視成分）及び高次収差に差がないことを示しており、縫着あるいは強膜に固定する術式が、眼球のゆがみに影響しないことを示唆している。

白内障手術後の視機能を良好にするために大事なものは、合併症の軽減である。視機能に影響する因子として重要なものは IOL の偏位（傾斜，偏心）である。IOL の偏位が収差に及ぼす影響に関する過去の報告から、IOL の偏心量に比例して高次収差（コマ収差）が増加することにより、網膜像が劣化し、視機能が低下する事が分かっている<sup>1~3)</sup>。

IOL 嚢内固定の術式において、IOL 偏位が生じやすい原因としては、①患者側の要因、②手術手技による要因が挙げられる。①患者側の要因としては嚢収縮が起こりやすい網膜色素変性症、閉塞隅角緑内障、チン小帯脆弱が起こりやすい落屑症候群、外傷の既往などがあげられる。②手術手技による要因では後嚢破損、チン小帯断裂などの合併症、前嚢切開の不正確さによる IOL 位置異常があげられる。合併症のない症例で行われる通常の IOL 嚢内固定術は、IOL 偏位が少なく、安定性が期待できる。一方、難治症例で行われる毛様溝縫着術や強膜内固定術においては、眼球構造にゆがみが生じる可能性がある。これらの術式において術後の IOL の偏位や屈折のずれは、術者の手術手技に影響されるところが大きい。特に、眼内レンズ縫着糸が毛様溝に正確に通糸されているかが重要となってくる。毛様溝での通糸部位が正確であればある程 IOL の偏位が少なく、コマ収差が補正されるため、白内障手術後の患者の QOV (quality of vision) の向上に結び付く。

これまでの IOL 縫着における UBM (ultrasound biomicroscopy) を用いた研究では、術中合併症がなく終了した症例においても、Manabe らの報告では 38%<sup>15)</sup>、Steiner らの報告では 33%しか<sup>16)</sup>、正確に IOL の支持部であるハプティクスが毛様溝に縫着されていない事が分かっている。Kumar の報告によれば、強膜内固定術を施行し、平均 24.6±14.3 ヲ月の経過観察をした 46 眼のハプティクスの強膜内固定部位を調べたところ、92.4%はハプティクスが毛様溝に正確に入っており、一方、残りの 7.6%は毛様突起を通過していたが、これ

らの症例でも IOL の傾斜には影響しなかったとしている<sup>17)</sup>。これらの報告から、IOL の固定に関しては、毛様溝縫着術よりも強膜内固定術の方が優れている事がわかる。IOL 縫着では毛様溝縫着後の IOL に 10 度以上の傾斜が生じた頻度は 11.4% から 16.7% とされており<sup>18)</sup>、ハプティクスを毛様溝に二点ともに正確に固定することは先述の通糸位置同様に、手技が難しいと考えられる。Durak らは、IOL 縫着後の IOL 傾斜と偏心についてプルキンエ像を利用して、傾斜が  $6.09^{\circ} \pm 3.09^{\circ}$  で、偏心が  $0.67 \pm 0.43$  mm であったと報告している<sup>15)</sup>、Hayashi らは Scheimpflug video photography を用いて IOL 縫着後の傾斜が  $6.35 \pm 3.09^{\circ}$  で、偏心が  $0.62 \pm 0.31$  mm と報告し、IOL 嚢内固定では傾斜が  $3.18 \pm 1.66^{\circ}$  で、偏心が  $0.29 \pm 0.21$  mm であったと報告している<sup>20)</sup>。強膜内固定の傾斜に関しては、Kumar らが、傾斜は 21 眼 (35%) に見られ、傾斜の角度については IOL と虹彩の角度が水平  $3.2 \pm 2.7$  度、垂直  $2.9 \pm 2.6$  度、残余乱視  $0.53 \pm 0.5D$  と、いずれも軽度であり、術後の成績としては非常に良好であったと報告している<sup>17)</sup>。これらの報告から考えると、術後の IOL 偏位に関しては、毛様溝縫着術よりも強膜内固定術の方が優れていると考えられる。

術後合併症に関しては毛様溝縫着術ではハプティクスが正確に毛様溝に固定されているとその周囲に線維化を生じるが、ハプティクスの 3 分の 2 は、毛様溝よりも後極寄りにあるために、縫着用の糸が単独でぶら下がることが多いとされる<sup>15)</sup>。また、縫着した糸の劣化に伴い、症例によっては片方の固定が外れる事がある。IOL 縫着後の糸が切れる報告では Vote らは術後 4 年で 27.8% が縫着糸が切れて、再手術となったと報告し<sup>21)</sup>、Asadi らは術後 7-10 年で 24% が縫着糸が切れて、再手術となったと報告している<sup>22)</sup>。Luk らは IOL 毛様溝縫着術を受けた症例のうち、1.9% が平均 73 ヶ月の観察期間中に縫着糸が切れて IOL が落下したと報告し<sup>23)</sup>、McAllister らは 6% (5 眼/82 眼) で平均 5 年後に糸が切れたと報告している<sup>24)</sup>。

また縫着時の縫合糸による強膜と結膜の上皮欠損 (erosion) に関しては、結び目を強膜

に直接作成するよりも、予防のために**強膜半層フラップ**を作製して埋没させる方法の方が上皮欠損を起こしにくく、**強膜半層フラップ**下での埋没縫合法は最近の縫合方法の主流とってきている。それでも強膜の糸の結び目周囲の erosion が強膜弁作成例の 17% に 6-18 ヶ月の経過で発生すると報告されている<sup>24)</sup>。Uthoff らは術後 1 年の経過で 624 症例中 17.9% の症例で強膜の erosion が発生したと報告している<sup>25)</sup>。また、近年では Luk らが、3.8% (4 眼/104 眼) に平均 73 ヶ月の観察期間中に糸の結び目の露出が確認されたと報告している<sup>26)</sup>。

強膜内固定時の合併症では、Kumar らは経過観察期間 16.7±10.2 ヶ月の間に、208 眼(185 例)でハプティクス関連の合併症が 9 眼 (4.3%) 見られたと報告している<sup>27)</sup>。まだデータは少ないが、強膜内固定術後の縫合糸に関する合併症やハプティクス関連の合併症の発生率は、毛様溝縫着術と同等もしくは減少していると考えられる。更に、近年 Yamane らの発表した**結膜や強膜を切開する事なく縫合糸を使用せず、そのまま強膜内に先端を焼却し膨隆させたハプティクスを固定する**強膜内固定のダブルニードル法では、さらに縫合糸やハプティクスに関連する術後合併症の軽減が見込めると考えられる<sup>28)</sup>。

また Ganekal らは、IOL 縫着 25 眼と**強膜内固定** 25 眼の術後成績を比較し、その結果、20/40 以上の視力が得られた割合は IOL 縫着眼では 88% で、強膜内固定眼 84% で有意差がなく、術後炎症、眼圧上昇に関する術後合併症は**強膜内固定**の方が有意に少なかったと報告している<sup>29)</sup>。

以上の事から IOL 縫着と新しい術式の強膜内固定の違いでは強膜部位の耐久性に関しては術後 3 年程度の中期成績はほぼ同等ではあるが、早期合併症に関しては**強膜内固定**の方が優れていると考えられる。また光学特性においても偏位が少なく高次収差が少いことが期待され、手技の観点からも、毛様溝縫着術よりも強膜内固定術の方が簡便である。

## 結語

今回の研究結果において、各々の術式で、高次収差に有意差を認めなかった理由としては、いずれの術式においても、IOLの縫着位置が良好であった事が考えられる。IOL強膜内固定術は手技が簡便で、かつ光学特性がIOL毛様溝縫着術と比較して、**遜色ない**ため、嚢内にIOLを固定できない症例における、手術の選択肢としては主流の術式になると考えられる。IOL強膜内固定術は近年報告された術式のため、歴史が浅く、今後の長期経過を見ることで、本術式が再評価されることになると考えられる。我々も、高次収差の観点から、更なる長期結果を分析して、術式の安全性、優位性について、再検討していく予定である。

## 謝辞

直接ご指導を賜りました帝京大学医学部附属病院眼科 溝田淳教授に深謝致します。またデータの収集に関するご協力を頂きました帝京大学医療技術学部 林孝雄教授ならびに視能訓練士の方々に感謝致します。

## 図の説明

図1 前眼部形状解析と解析マップ. Hartmann-Shack 型波面センサー (KR-1W, Topcon Co., Tokyo, Japan) を用いて行った. 眼内から眼外への反射光は通常は平面な波面となり, カラーコードマップで示すと緑で表示される. 反射光が早い (進んでいる) 波面は暖色系で表示され, 遅い波面は寒色系で表示される. 収差がある場合には複雑な波面となる.

図2 ゼルニケ多項式. 眼球波面解析データを, ゼルニケ多項式に展開し, 4次までのデータを解析した. 2次の収差を低次収差, 3次から4次までの高次収差に分類される.

図3 眼球波面解析のゼルニケ多項式のカラーコードマップ展開図から得られた2次収差, 3次収差, 4次収差の説明. 2次の収差は眼鏡による矯正が可能で, 3次以降の収差は眼鏡による矯正が不可能な高次収差である.

図4 ゼルニケ多項式のカラーコードマップ展開図を用いた, 全3次収差, 全4次収差, 全コマ収差, 全2次乱視, 全トレフォイル収差, 全テトラフォイル収差の説明.

図5 球面収差の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較.

図6 全乱視の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較.

図7 全高次収差の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較. NS: not significant (有意差なし).

図8 3次収差の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較. NS: not significant (有意差なし).

図9 4次収差の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較.

図10 コマ様収差の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較.

図11 非点収差の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較.

図12 トリフォイル収差の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較. NS: not significant (有意差なし).

図13 テトラフォイル収差の3群間 (嚢内固定群, 毛様溝縫着群, 強膜内固定群) の比較.



## 文献

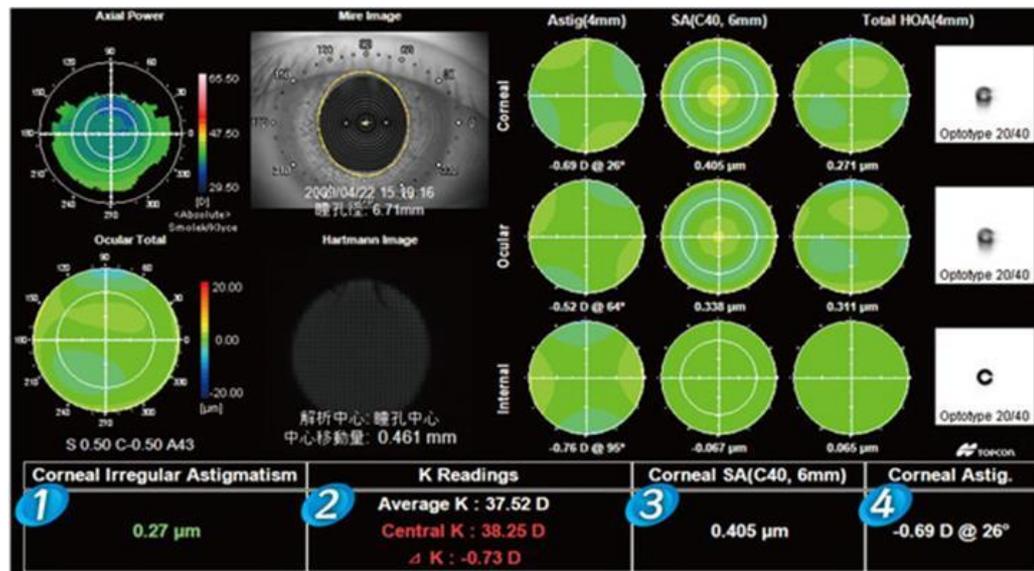
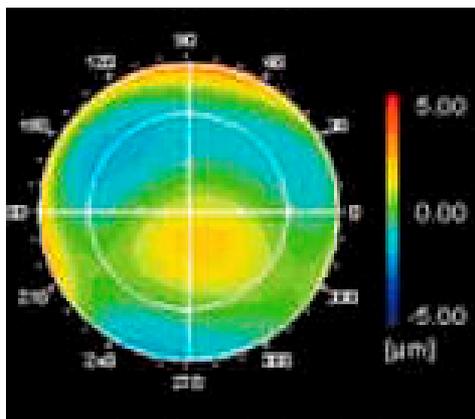
1. Taketani F, Matsuura T, Yukawa E, et al. High-order aberrations with Hydroview H60M and AcrySof MA30BA intraocular lenses: comparative study. *J Cataract Refract Surg.* 2004;30(4):844-8.
2. Hayashi K, Hayashi H, Nakao F, et al. Comparison of decentration and tilt between one piece and three piece polymethyl methacrylate intraocular lenses. *Br J Ophthalmol.* 1998 Apr;82(4):419-22.
3. 吉田伸一郎. 眼内レンズと視機能, 偏位. 眼内レンズを科学する, 56-58, メディカル葵出版, 東京, 2006.
4. Apple DJ, Price FW, Gwin T, et al. Sutured retropupillary posterior chamber intraocular lenses for exchange or secondary implantation. The 12th annual Binkhorst lecture, 1988. *Ophthalmology.* 1989;96(8):1241-7.
5. Gabor SG, Pavlidis MM. Sutureless intrascleral posterior chamber intraocular lens fixation. *J Cataract Refract Surg.* 2007;33(11):1851-4.
6. Ohta T, Toshida H, Murakami A. Simplified and safe method of sutureless intrascleral posterior chamber intraocular lens fixation: Y-fixation technique. *J Cataract Refract Surg.* 2014;40(1):2-7.
7. Malbran ES, Malbran E Jr, Negri I. Lens guide suture for transport and fixation in secondary IOL implantation after intracapsular extraction. *Int Ophthalmol.* 1986;9(2-3):151-60.
8. 木下専, 菅謙治. 後房レンズ毛様溝縫着術-最適穿刺部位の検討. *IOL4*:210-214, 1990
9. Oshika T, Okamoto C, Samejima T, et al. Contrast sensitivity function and ocular higher-order wavefront aberrations in normal human eyes. *Ophthalmology.* 2006;113(10):1807-12.
10. Kasper T, Bühren J, Kohnen T. Visual performance of aspherical and spherical intraocular lenses: intraindividual comparison of visual acuity, contrast sensitivity, and higher-order aberrations. *J Cataract Refract Surg.* 2006;32(12):2022-9.
11. Nanavaty MA, Spalton DJ, Boyce J, et al. Wavefront aberrations, depth of focus, and contrast sensitivity with aspheric and spherical intraocular lenses: fellow-eye study. *J Cataract Refract Surg.* 2009;35(4):663-71.

12. 三橋俊文. 人眼の波面収差測定, 415-420, レーザー研究 Vol. 29 No. 7 Jul. 2001
13. 前田直之, 魚里博, 丸尾敏夫ら. 月刊眼科診療プラクティス 71. 診療に役立つ眼光学, 111-113, (14)文光堂, 東京, 2001
14. 大鹿哲郎. 波面収差解析, 13-15, IOL & RS Vol. 15 No. 1 Mar. 2001
15. Manabe S, Oh H, Amino K, et al. Ultrasound biomicroscopic analysis of posterior chamber intraocular lenses with transscleral sulcus suture. *Ophthalmology*. 2000;107(12):2172-8.
16. Steiner A, Steinhorst UH, Steiner M, et al. Ultrasound biomicroscopy for localization of artificial lens haptics after trans-scleral suture fixation. *Ophthalmologe*. 1997;94(1):41-4.
17. Kumar DA, Agarwal A, Agarwal A, et al. Long-term assessment of tilt of glued intraocular lenses: an optical coherence tomography analysis 5 years after surgery. *Ophthalmology*. 2015;122(1):48-55.
18. Por YM, Lavin MJ. Techniques of intraocular lens suspension in the absence of capsular/zonular support. *Surv Ophthalmol*. 2005;50(5):429-62.
19. Durak A, Oner HF, Koçak N, et al. Tilt and decentration after primary and secondary transsclerally sutured posterior chamber intraocular lens implantation. *J Cataract Refract Surg*. 2001;27(2):227-32.
20. Hayashi K, Hayashi H, Nakao F, et al. Intraocular lens tilt and decentration, anterior chamber depth, and refractive error after trans-scleral suture fixation surgery. *Ophthalmology*. 1999;106(5):878-82.
21. Vote BJ, Tranos P, Bunce C, et al. Long-term outcome of combined pars plana vitrectomy and scleral fixated sutured posterior chamber intraocular lens implantation. *Am J Ophthalmol*. 2006;141(2):308-312.
22. Asadi R, Kheirkhah A. Long-term results of scleral fixation of posterior chamber intraocular lenses in children. *Ophthalmology*. 2008;115(1):67-72.
23. Luk AS, Young AL, Cheng LL. Long-term outcome of scleral-fixated intraocular lens implantation. *Br J Ophthalmol*. 2013;97(10):1308-11.

24. McAllister AS, Hirst LW. Visual outcomes and complications of scleral-fixed posterior chamber intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg.* 2011;37(7):1263-9.
25. Uthoff D, Teichmann KD. Secondary implantation of scleral-fixed intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg.* 1998;24(7):945-50.
26. Luk AS, Young AL, Cheng LL. Long-term outcome of scleral-fixed intraocular lens implantation. *Br J Ophthalmol.* 2013;97(10):1308-11
27. Kumar DA, Agarwal A, Packiyalakshmi S, et al. Complications and visual outcomes after glued foldable intraocular lens implantation in eyes with inadequate capsules. *J Cataract Refract Surg.* 2013;39(8):1211-8.
28. Yamane S, Inoue M, Arakawa A, et al. Sutureless 27-gauge needle-guided intrascleral intraocular lens implantation with lamellar scleral dissection. *Ophthalmology.* 2014;121(1):61-6.
29. Ganekal S, Venkataratnam S, Dorairaj S, et al. Comparative evaluation of suture-assisted and fibrin glue-assisted scleral fixated intraocular lens implantation. *J Refract Surg.* 2012;28(4):249-52.

KR-1W(トプコン)

# 前眼部形状解析装置



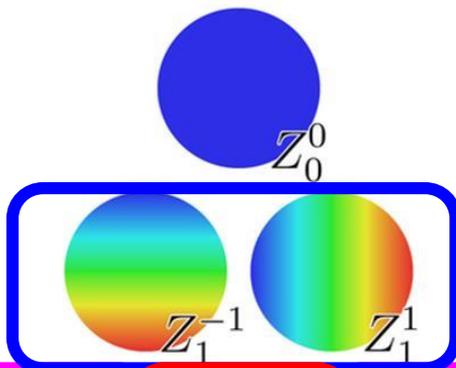
■ 緑 0.3  $\mu\text{m}$ 以下      ■ 緑  $\pm 0.5\text{D}$  以内      ■ 赤 0.1  $\mu\text{m}$ 未満      ■ 赤  $\pm 1.5\text{D}$  範囲外  
■ 黄 0.3  $\mu\text{m}$ 超 0.6  $\mu\text{m}$ 以下      ■ 赤  $\pm 0.5\text{D}$  超  
■ 赤 0.6  $\mu\text{m}$ 超      ※  $\Delta$ K=Average K -Central K

図2

収差  
0 球面

-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5

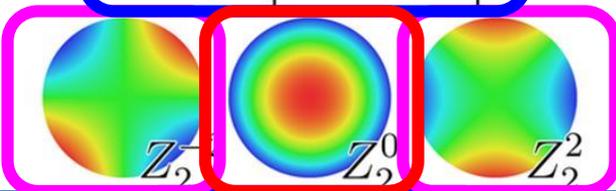
1次



直乱視・倒乱視成分

2次

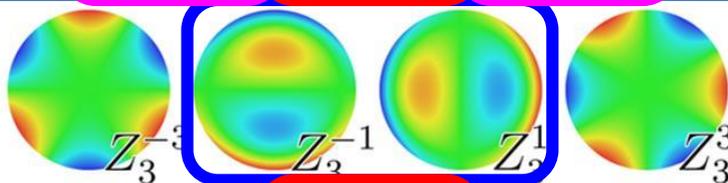
斜乱視成分



球面成分

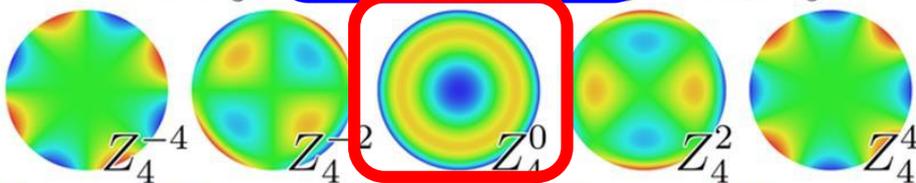
低次収差

3次



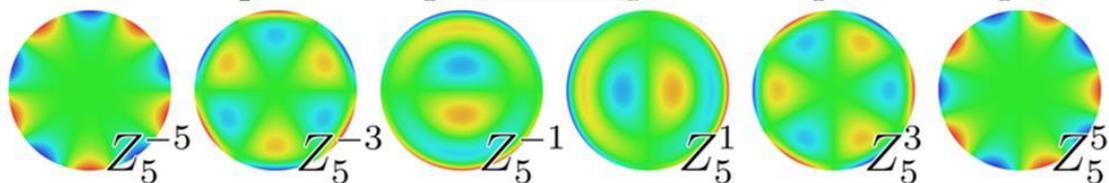
コマ様収差

4次



球面収差

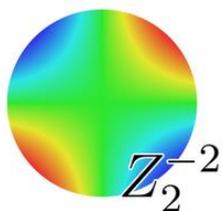
5次



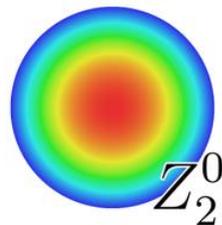
高次収差

図3

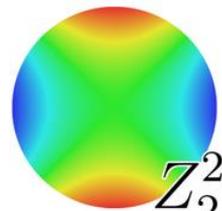
2次収差



(斜)乱視

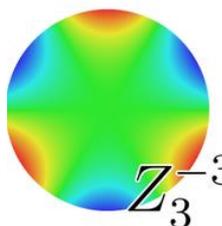


球面

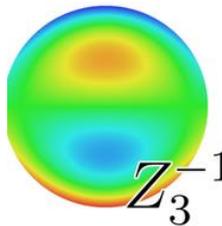


(倒/直)乱視

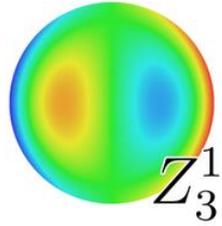
3次収差



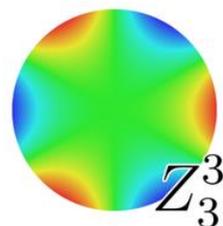
鉛直  
トレフォイル



鉛直コマ

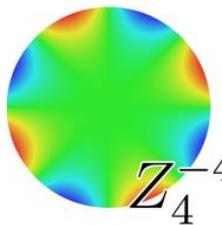


水平コマ

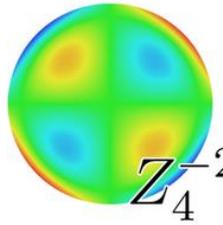


水平  
トレフォイル

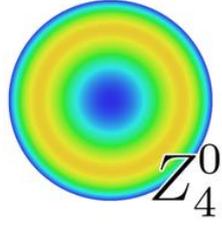
4次収差



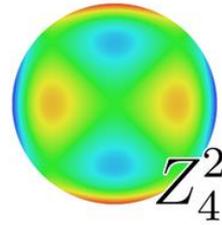
斜め  
テトラフォイル



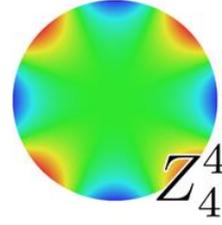
斜め  
2次乱視



球面収差



鉛直/水平  
2次乱視

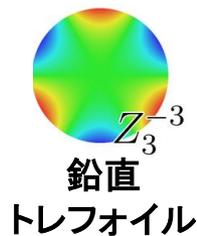


鉛直/水平  
テトラフォイル

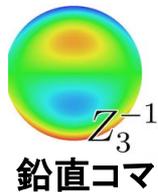
図4

全高次収差

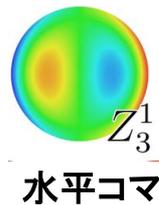
3次収差



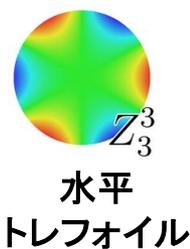
+



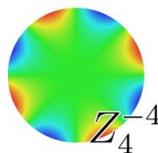
+



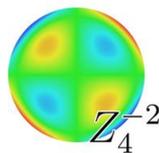
+



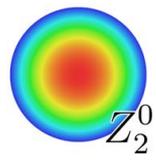
4次収差



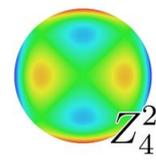
+



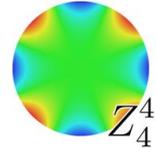
+



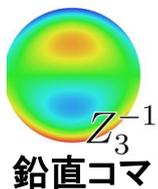
+



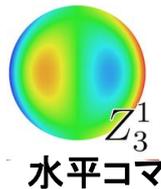
+



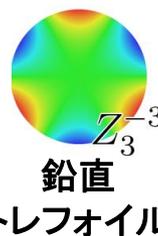
コマ



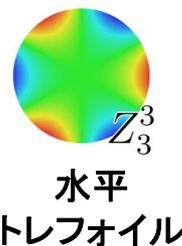
+



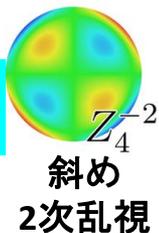
トレフォイル



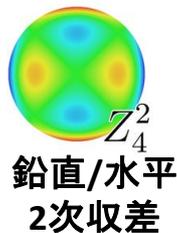
+



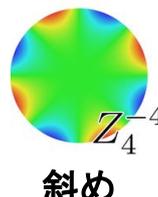
2次乱視



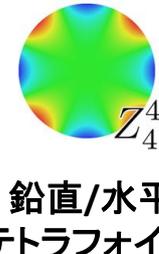
+



テトラ  
フォイル



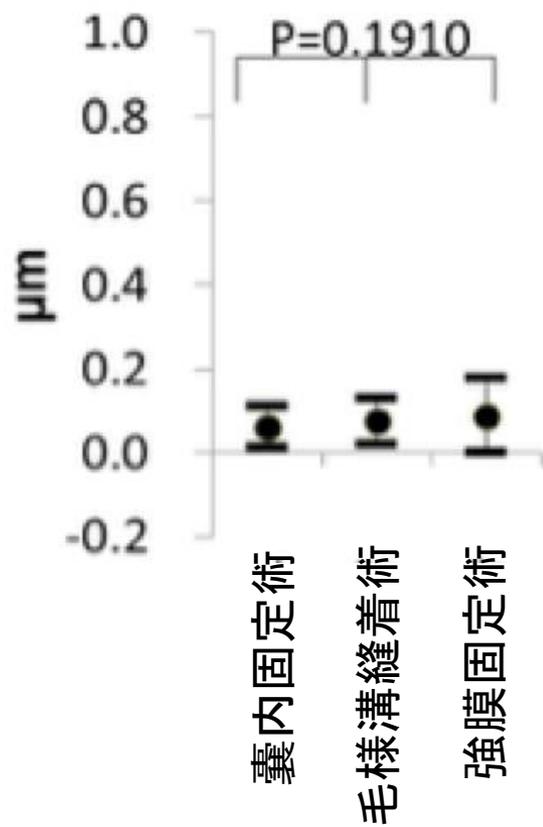
+



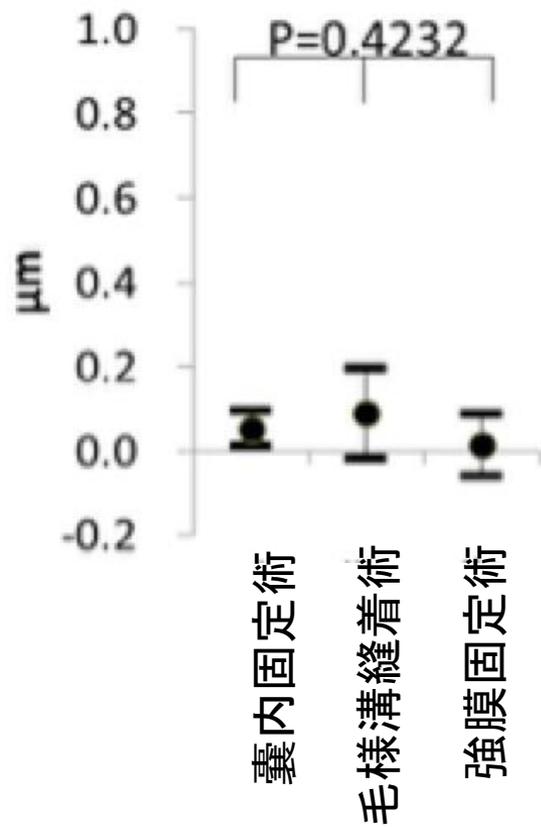
ゼルニケベクトル

图5

### 球面(眼球)



### 球面(角膜)



### 球面(内部)

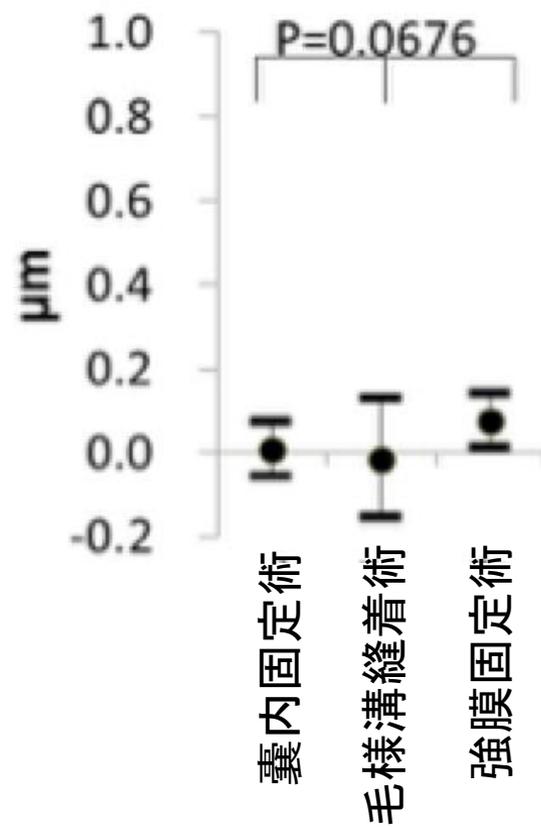
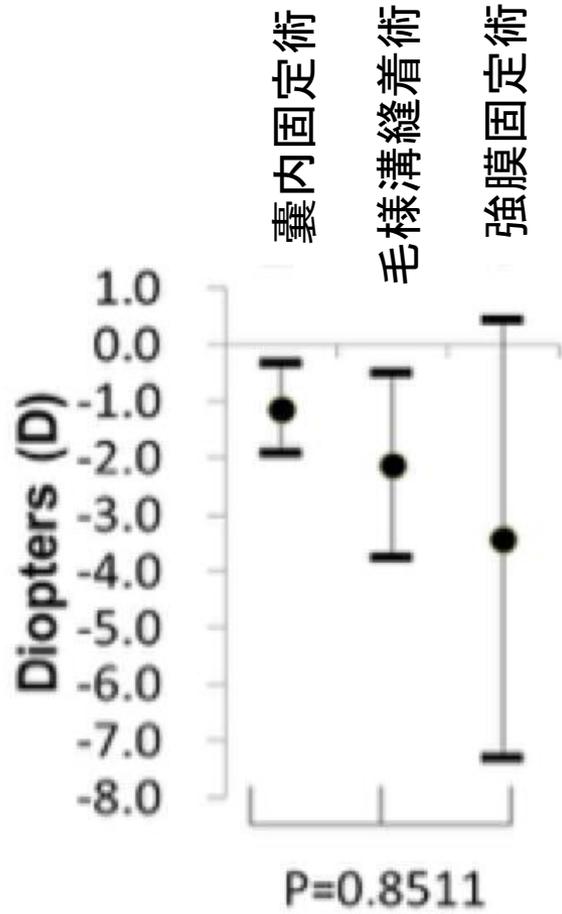
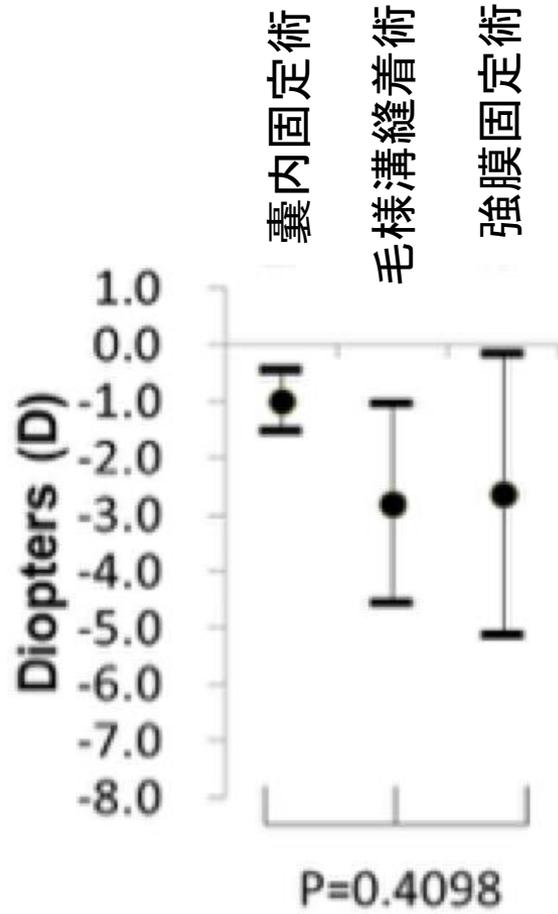


図6

### 乱視(眼球)



### 乱視(角膜)



### 乱視(内部)

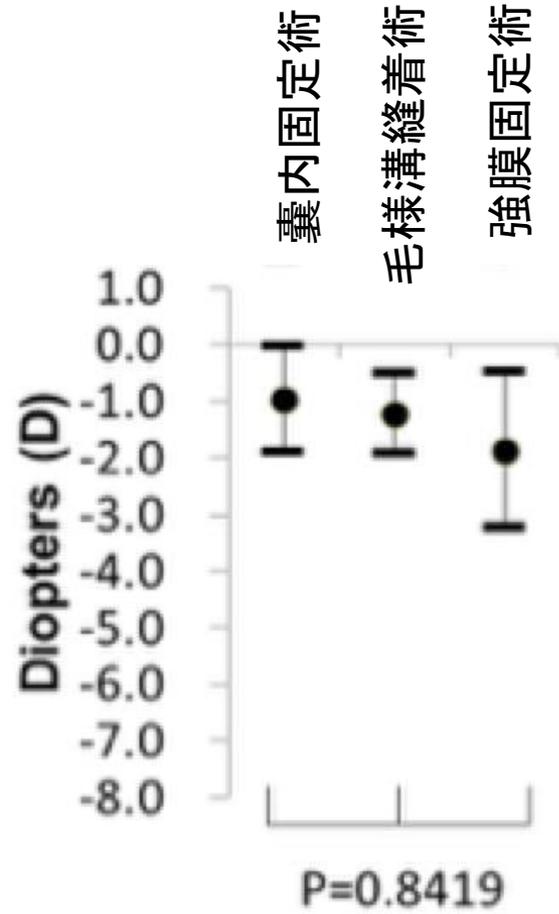
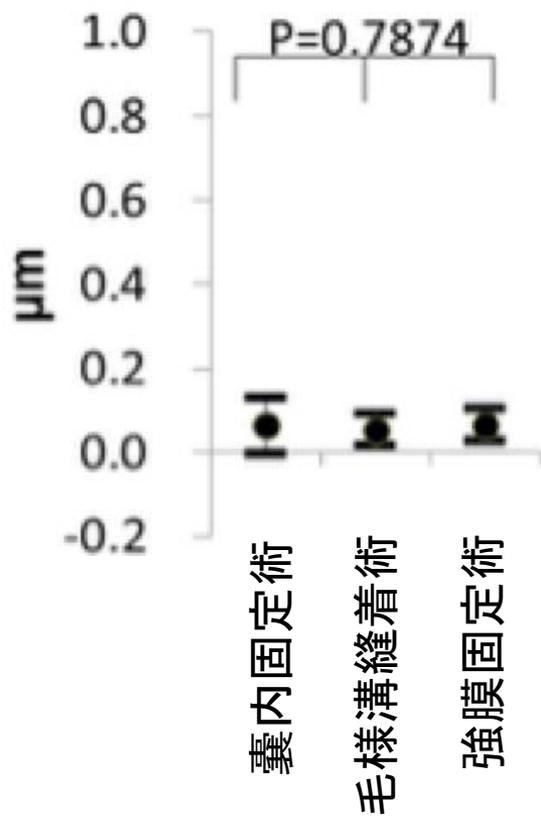
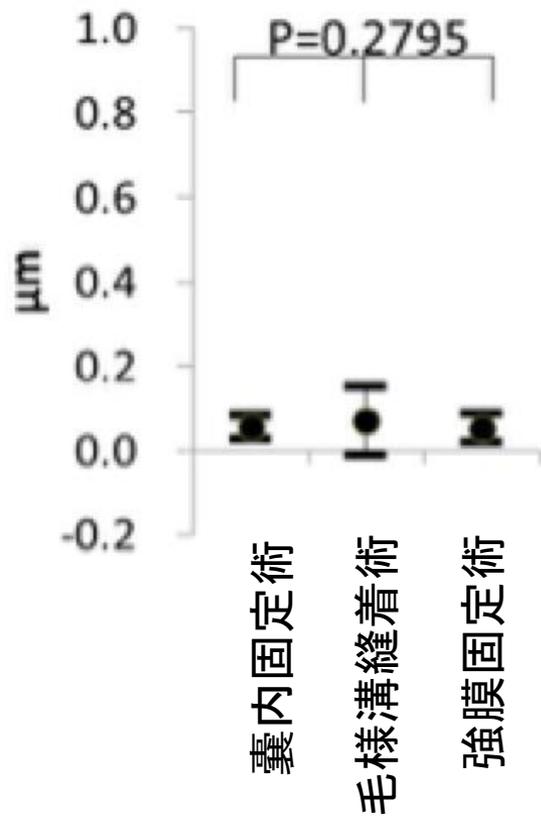


图7

### 非点(眼球)



### 非点(角膜)



### 非点(内部)

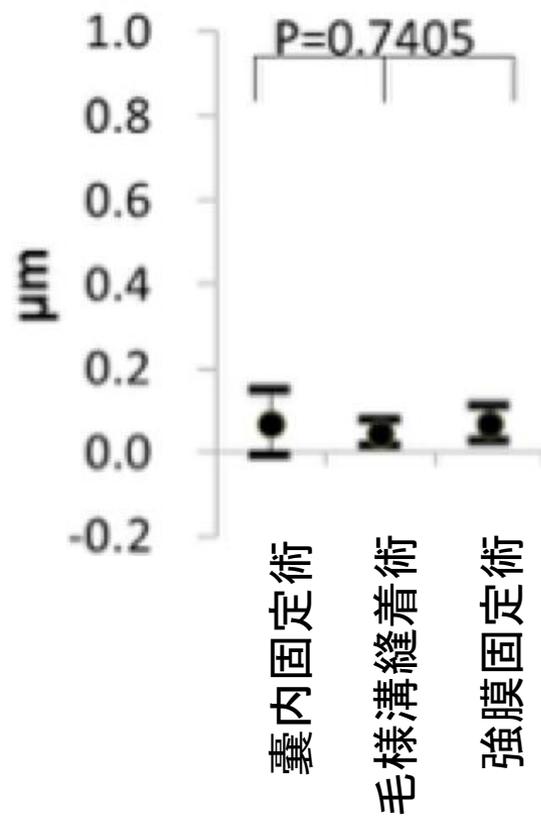
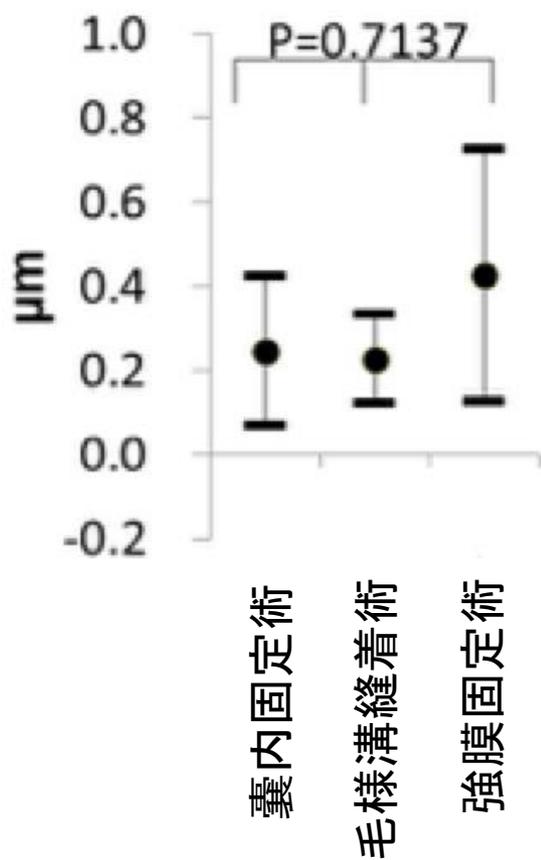
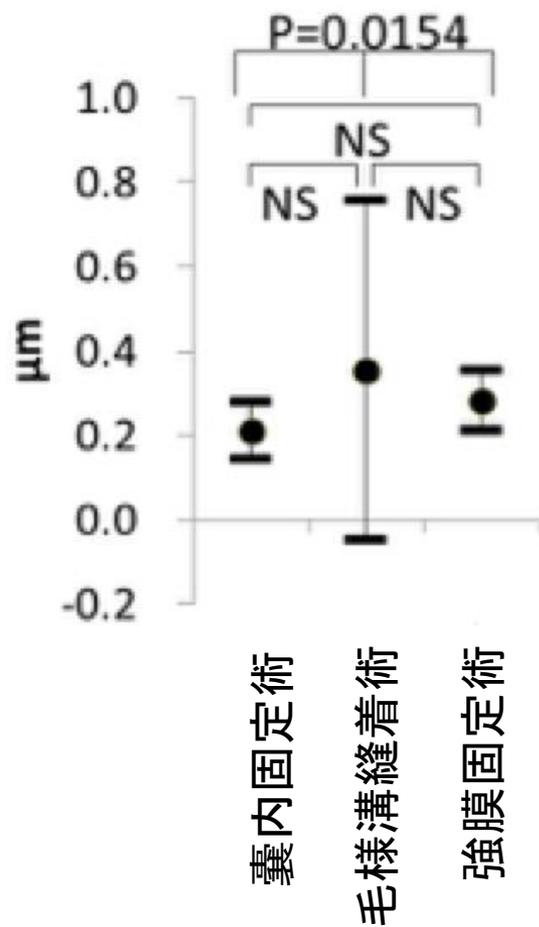


图8

### 全高次(眼球)



### 全高次(角膜)



### 全高次(内部)

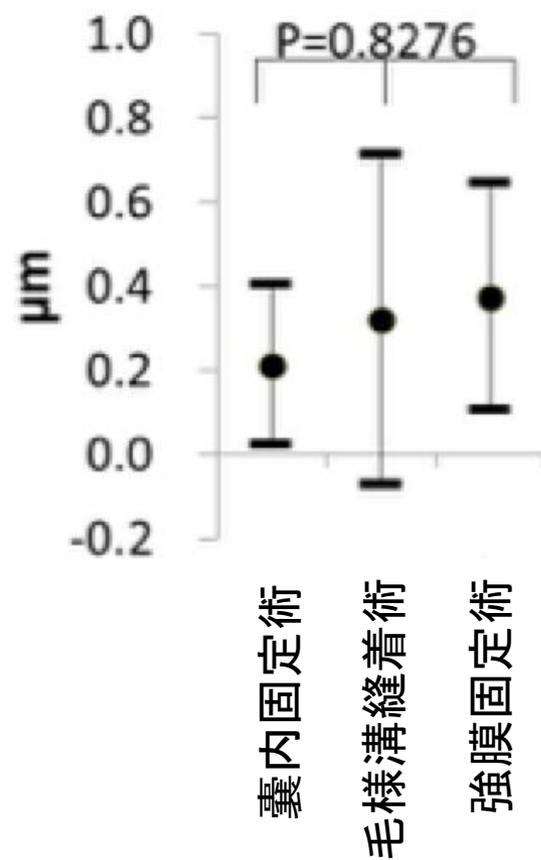
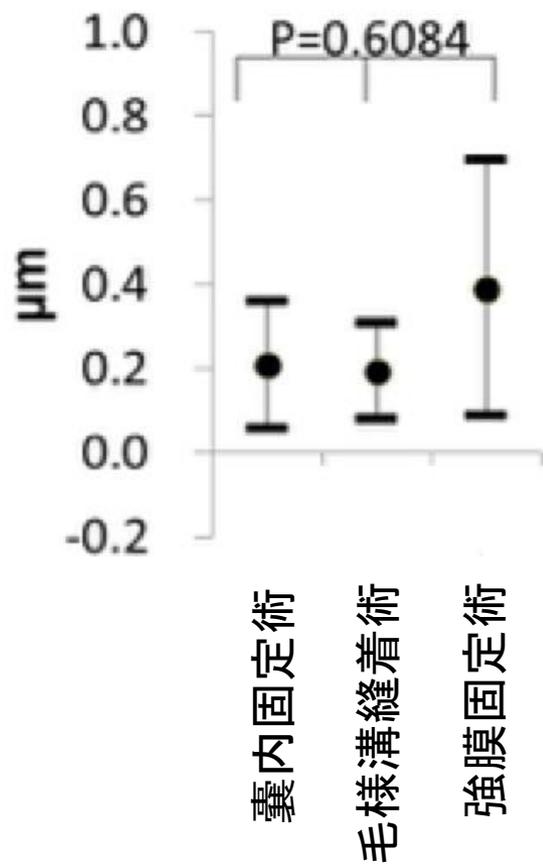
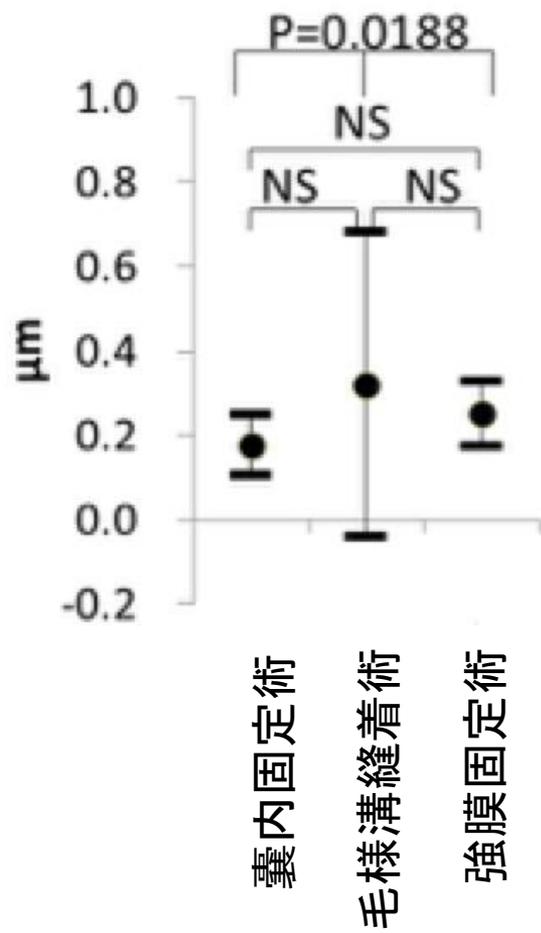


图9

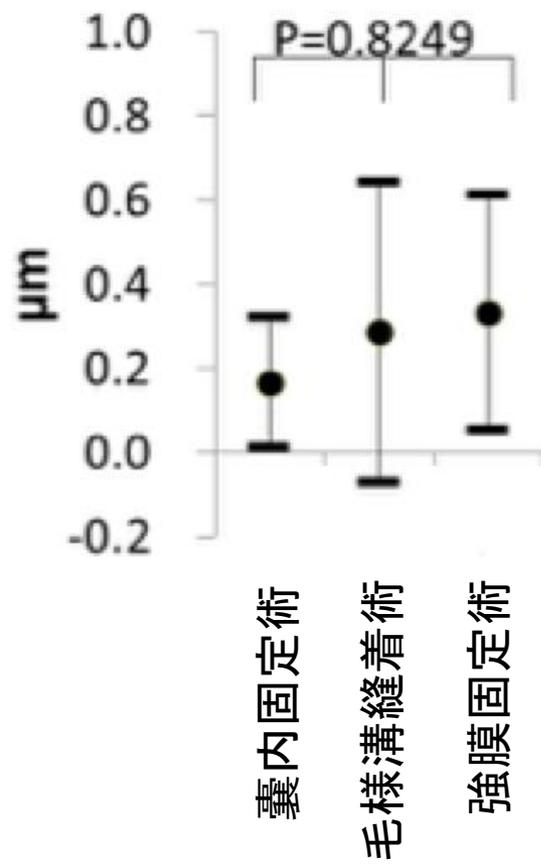
### 3次(眼球)



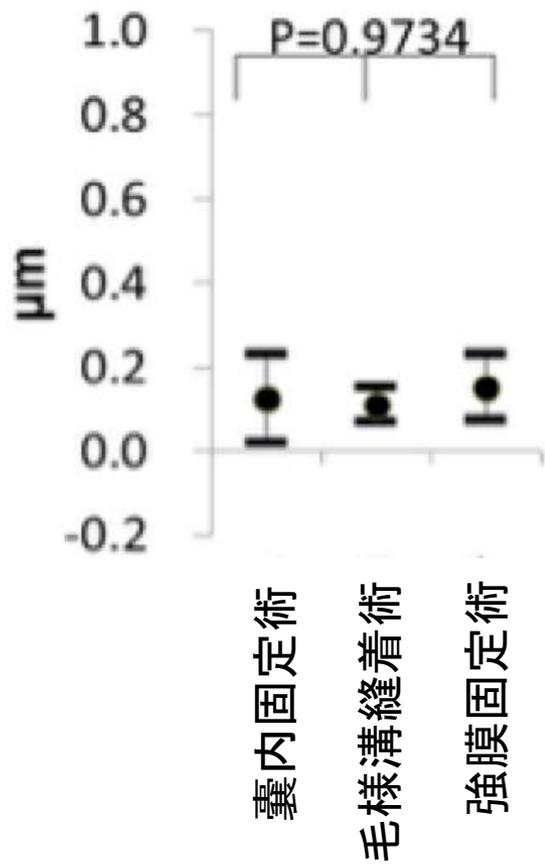
### 3次(角膜)



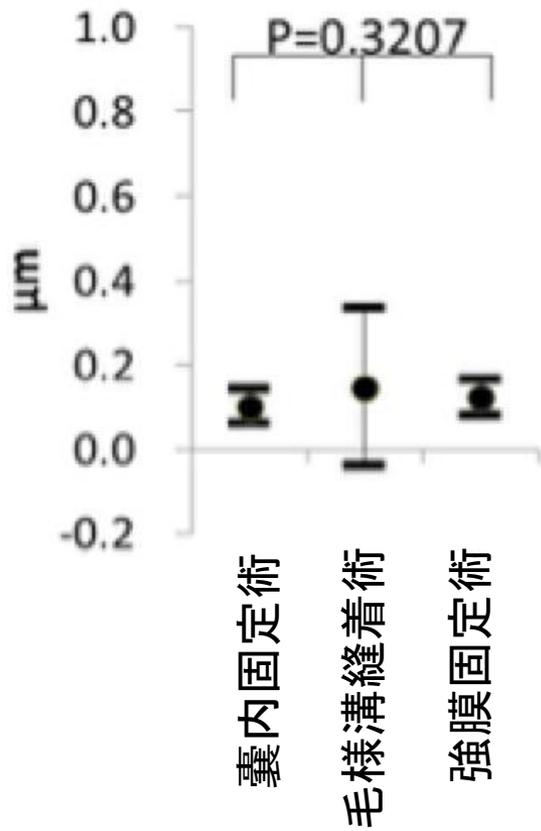
### 3次(内部)



### 4次(眼球)



### 4次(角膜)



### 4次(内部)

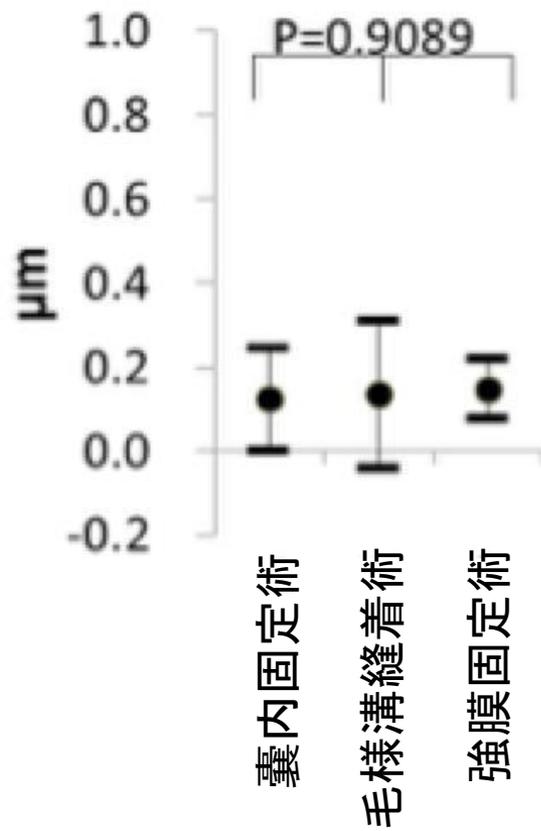
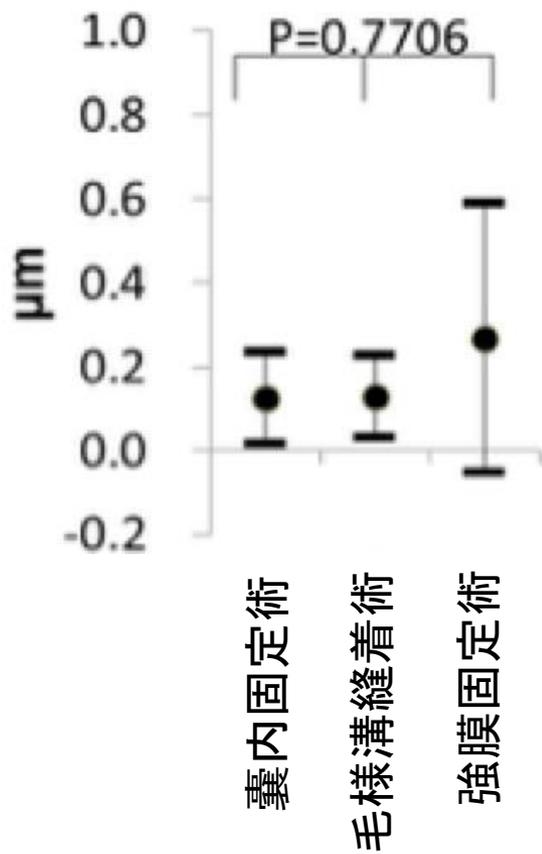
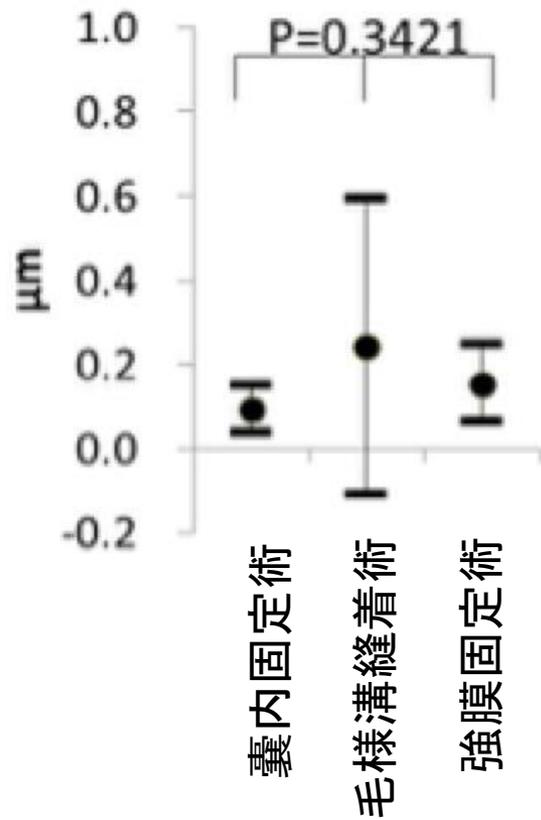


図11

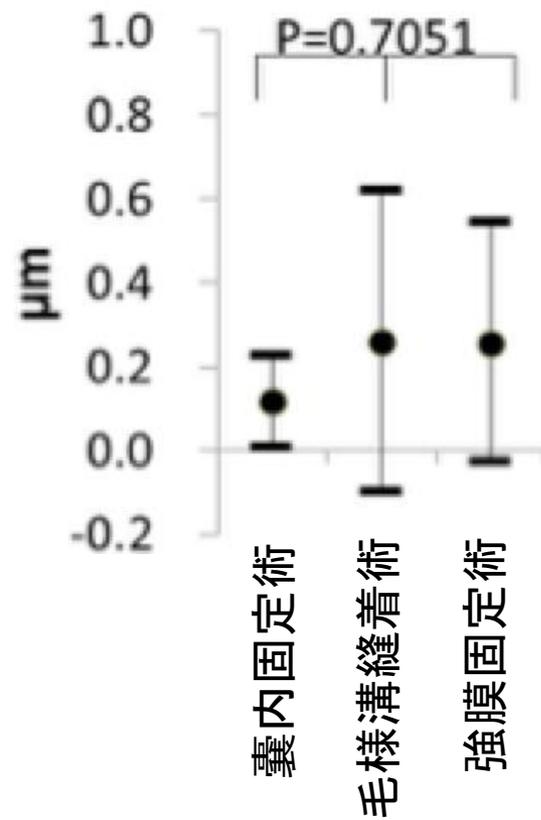
### コマ(眼球)



### コマ(角膜)



### コマ(内部)



トリフォイル(眼球) トリフォイル(角膜) トリフォイル(内部)

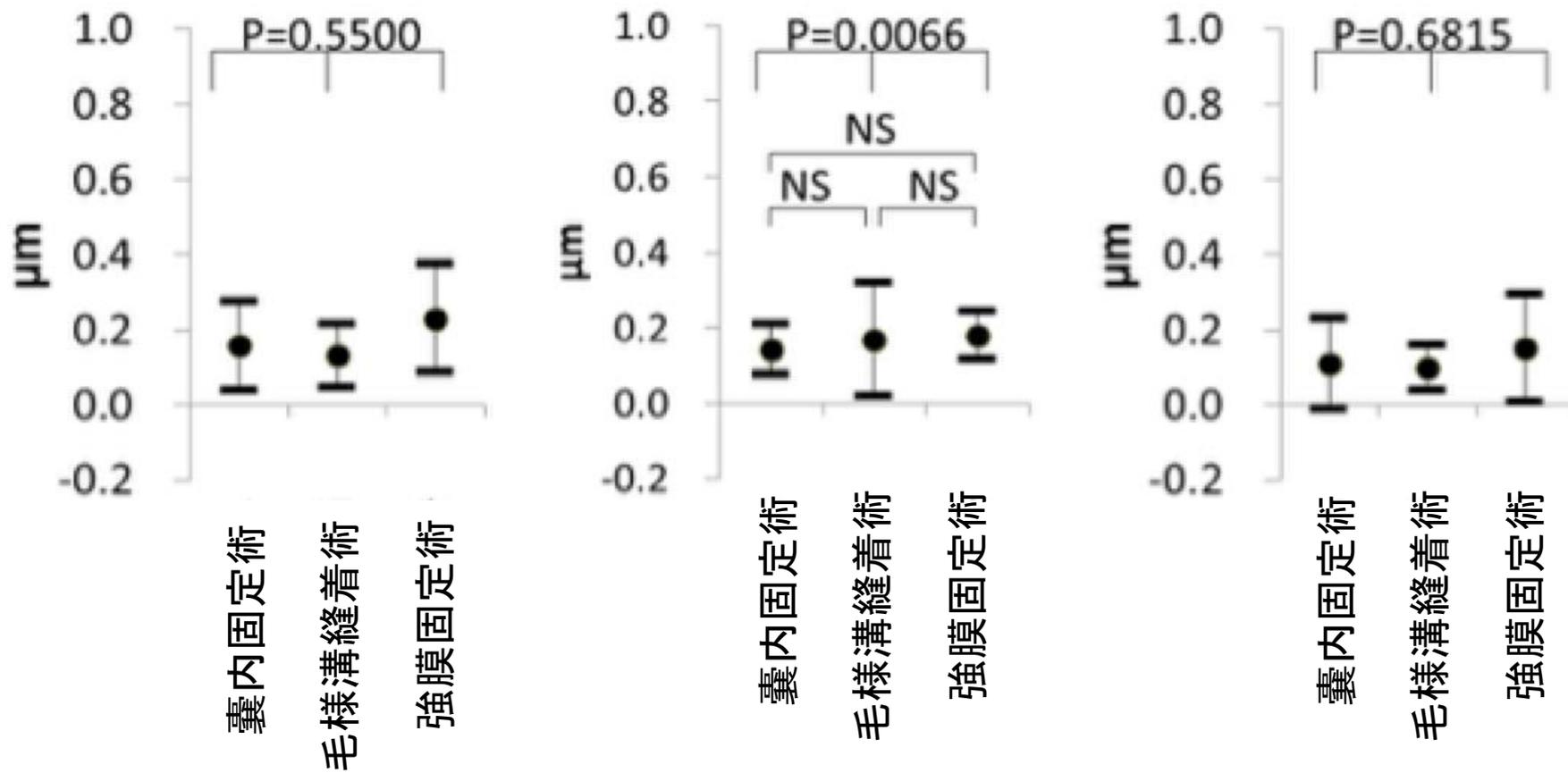
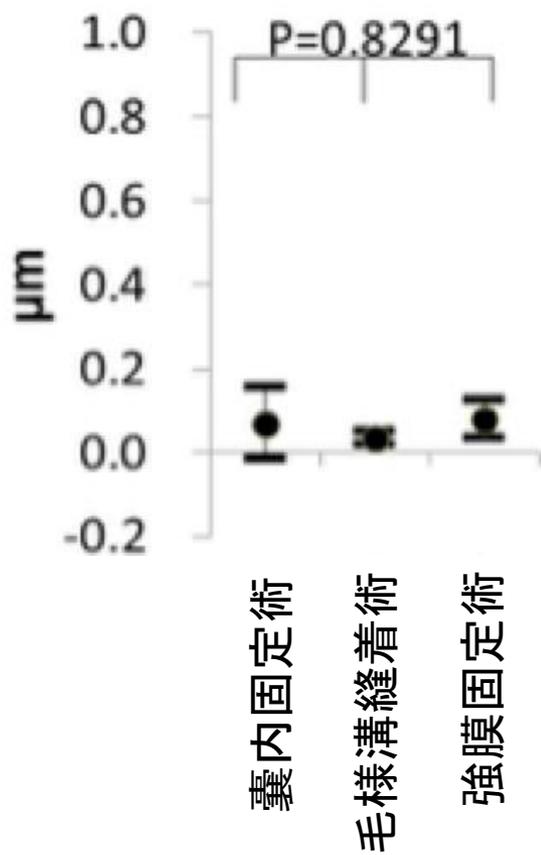
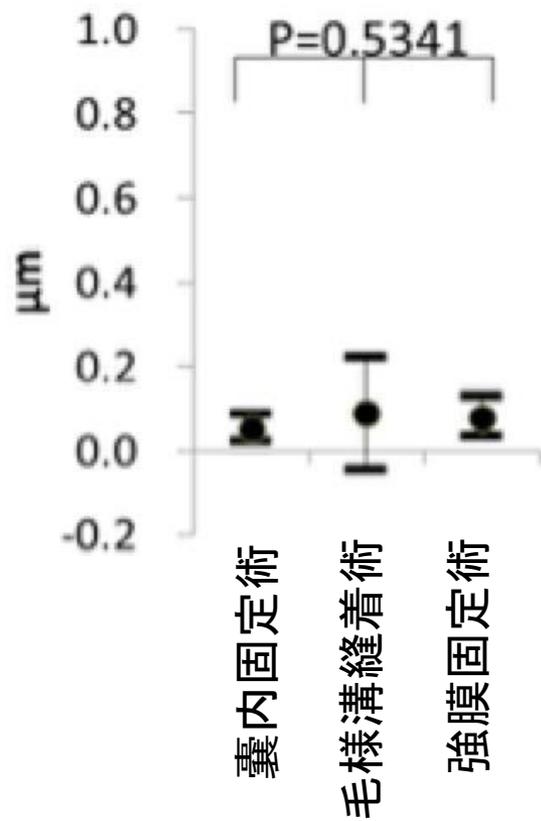


図13

### テトラ(眼球)



### テトラ(角膜)



### テトラ(内部)

