



Dr.Salmon Newsletter

World News & Views

-Letters from Dr.Salmon, NSU-

Dear readers,

みなさん、こんにちは。

アメリカでは、11月の終わりに感謝祭があり、家族でお祝いをしました。また、フットボールとサッカーシーズンの終盤も楽しみました。今年はデヴィッドベッカムを擁するロサンゼルスギャラクシーがメジャーリーグサッカーで優勝しましたので、私の家族はとても喜んでます。その試合がギャラクシーでベッカムがプレーする最後の試合になりました。



(Center photo: Licensed from Photoworks/Shutterstock.com)

アメリカでは、12月の一番重要なイベントはクリスマスです。クリスマス休暇は家族や子供たちにとって1年で1番楽しみにしている休暇になります。クリスマスには、人々は皆キリストの誕生を思い、親切で寛容になるような気がします。クリスマスツリーがあり、クリスマスミュージックがあふれ、世界の平和を願います。

また、大学では12月に秋学期が終わりますので、12月中旬で大学を卒業する学生もいます。学生は12月卒業か5月卒業かを選択することができます。日本人学生もここで4~5年過ごして、卒業していきます。彼らが去っていくことは本当に寂しいと思います。

先月のニュースレターでは10月に横浜で開催されたIRSJのセミナーでの私の講演内容の前半部分をお届けしました。今月はその後半をお届けします。

今年ももう少しで終わりになりますね。楽しいクリスマスと良いお年を!!

Thomas O. Salmon, OD, PhD, FAAO
Professor, Northeastern State University

Enhance
Program

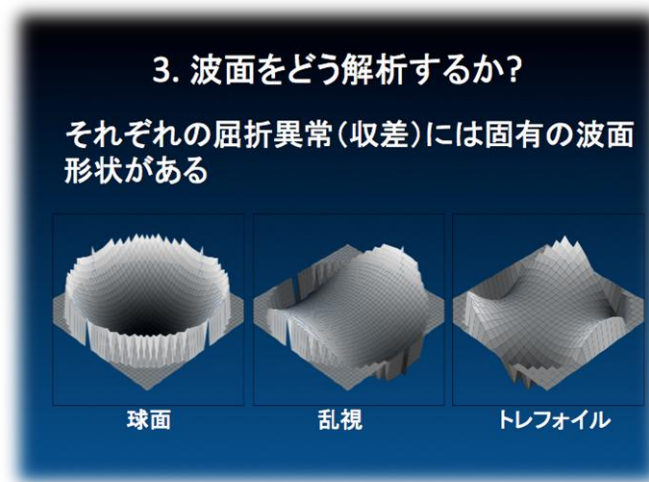
VIA AIR MAIL

International Refractive Society of Japan meeting –Part2--

横浜で開催された北里大学主催の日本国際屈折協会(IRSJ)セミナーの私の講演「波面収差測定と涙液層 -新しい評価方法-」の前半部分を先月ご紹介しましたので、今月はその後半です。

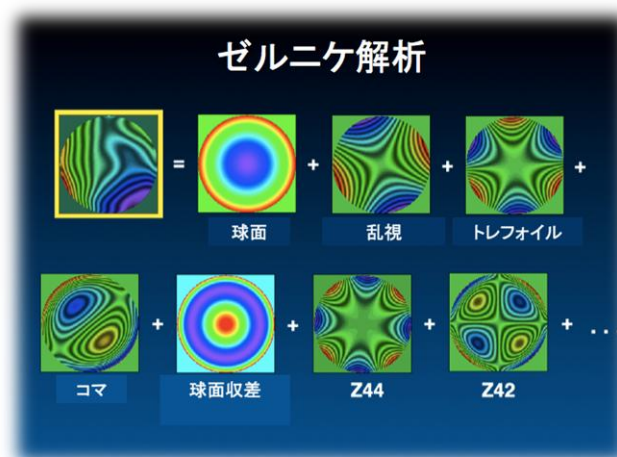
3. 波面をどう解析するか？

波面センサーで眼の波面収差マップを表示させた後、どのようにマップを解釈すればよいのでしょうか？それが何を意味するのでしょうか？マップからどのように屈折異常の状態を知るのでしょうか？

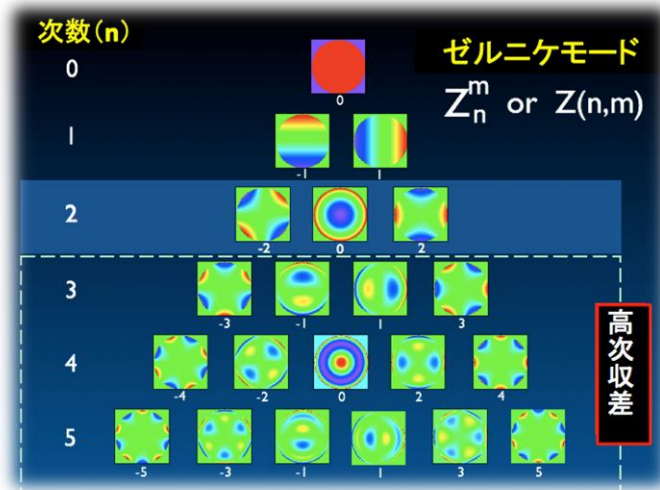


それぞれの収差には特定の波面の歪みのパターンがあります。上の図に例を示します。近視しか無い眼の場合、左のパターンのような歪みになります。乱視のみの場合、真ん中のパターンのようになり、トレフォイルの場合には、右のパターンようになります。

しかし、1種類の収差しか無い眼はほとんどありません。ほとんどはいくつかの収差が混ざり合い、複雑な波面を示します。複雑で不規則な波面の場合、波面をそれぞれ特定することは難しくなります。それらは全て混ざってしまっているからです。



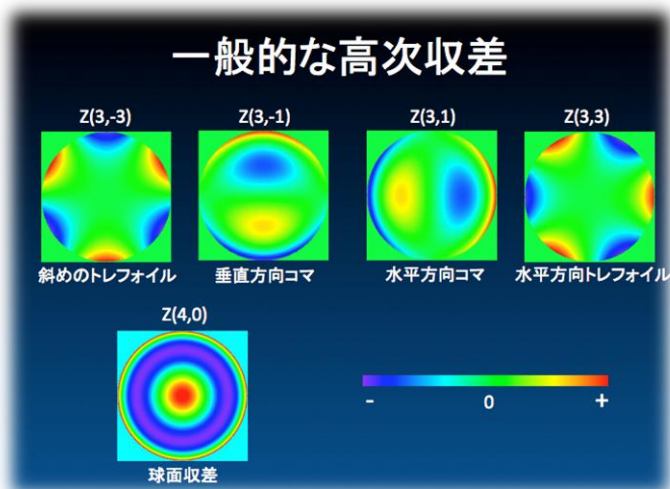
ここで、ゼルニケ解析が役に立ちます。ゼルニケ解析はどんな波面でも数学的に個々の収差成分に分解します。それぞれの収差成分は 1 種類の収差を表すものです。1 種類の収差の波面は特有の歪みになります。上の図の黄色く囲んだ波面マップにゼルニケ解析を適用すると、球面度数、乱視、トレフォイル、コマ、球面収差、その他の収差が含まれていることがわかります。



ゼルニケ解析は、階層化され、数学的に定義された波面形状に基づいています。上の図に示したように、一番上の波面は最も単純なもので、ゼルニケのピラミッドの下の方になると複雑なものになってきます。この階層のそれぞれの列は次数で分かれています。上の図の 0～5 の数字はゼルニケ式の次数を表しています。

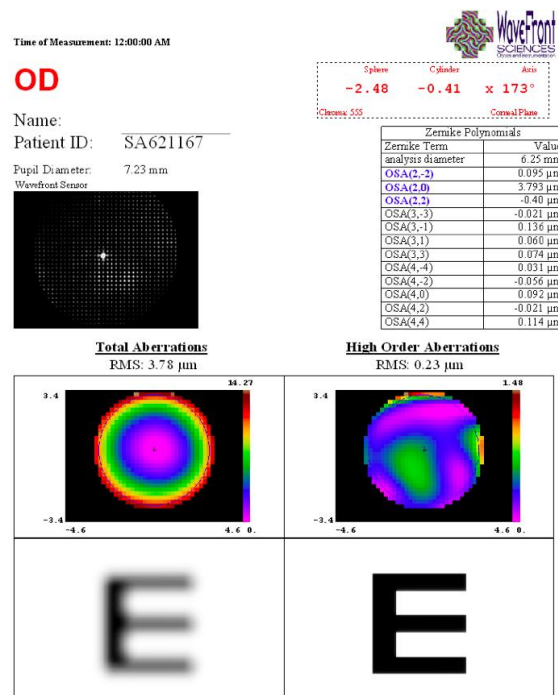
上の図の中では次数が 2 の列を強調してありますが、この列は普段の臨床現場で矯正している収差（球面度数と乱視度数）です。球面度数は列の中央で、乱視は 2 種類に分かれていて、直乱視、倒乱視が右、斜乱視が左側です。破線で囲んである 3 次の列から下の収差が高次収差です。この次数は無限に設定することが出来ますが、ほとんどの眼では、5～6 次より大きな次数の収差はあまり意味の無いものになります。

それぞれの収差は、ゼルニケ式の次数(n)とその次数の列にある収差(m)の 2 つの指数によって決まります。たとえば、一つ一つの収差は Z_n^m や $Z(n,m)$ というように表されます。下の図に一般的な高次収差の例を示します。



下の図は私が使っている COAS という波面センサーで測定した結果です。この結果の中には以下のことが示されています。

- ① 臨床的な屈折データ(球面度数、乱視度数、軸)
- ② 瞳孔径(pupil Diameter)
- ③ 高次収差のゼルニケ係数の表(Zernike Polynomials)
- ④ 全収差の RMS 値
- ⑤ 高次収差の RMS 値
- ⑥ 全収差の波面マップ
- ⑦ 高次収差の波面マップ
- ⑧ 見え方のシミュレーション像、矯正した場合
- ⑨ 見え方のシミュレーション像、矯正してない場合



ゼルニケ係数の単位は μm でプラスの場合とマイナスの場合があります。それぞれの係数は、記号と個々の収差の大きさを示していますが、われわれは組み合わされた収差がどの程度見え方に悪影響を及ぼすのかを知りたいと思うこともあります。「この全ての高次収差が一緒になるとどのくらい見え方が悪いの?」というようにです。組み合わされた収差の大きさを知るのに RMS(root mean square)値が役に立ちます。収差の RMS 値は下に示した式で計算できます。

$$RMS = \sqrt{(Z_1^2 + \dots + Z_n^2)}$$

まず、一つ一つのゼルニケ係数を二乗して、二乗したゼルニケ係数の和を求めます。その和の平方根が組み合わされた収差の RMS です。どんな収差の組み合わせであっても RMS を計算することは出来ます。たとえば、3 次収差だけの RMS とか、全ての高次収差の RMS、低次収差も含む全ての収差、というように様々な組み合わせで RMS を計算することが出来ます。

4. ゼルニケ係数や RMS 値が良いか悪いかをどのように評価するか？

波面のデータを評価するためには、基準となるものと比較する必要があります。波面収差測定は比較的新しい臨床検査ですので、その基準値は最近までありませんでした。波面データの解析に役立つように、私はその基準となる標準的な値を Journal of Cataract and Refractive Surgery の 2006 年 12 月号に発表しました。それには異なる瞳孔径における正常眼のゼルニケ係数、RMS 値の表が含まれています。世界中にある 10 の研究施設で測定した 2,560 眼分のデータを分析した結果に基づいたものです。その記事はこちらのウェブサイトからダウンロードできます。

http://arapaho.nsuok.edu/%7Eesalmon/articles_resources_pdf/Salmon_JCRS_2006.pdf

また、「Normal-eye, Zernike」で検索しても見つけることが出来ます。

Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors

Thomas O. Salmon, OD, PhD, Corina van de Pol, OD, PhD

PURPOSE: To compare aberrometry measurements from multiple sites and compute mean Zernike coefficients and root-mean-square (RMS) values for the entire data pool to serve as a reference set for normal, healthy adult eyes.

SETTING: Northeastern State University, Tahlequah, Oklahoma, USA.

METHODS: Data were collected from 10 laboratories that measured higher-order aberrations (HOAs) in normal, healthy adult eyes using Shack-Hartmann aberrometry (2560 eyes of 1433 subjects). Signed Zernike coefficients were scaled to pupil diameters of 6.0 mm, 5.0 mm, 4.0 mm, and 3.0 mm and corrected to a common wavelength of 550 nm. The mean signed and absolute Zernike coefficients across data sets were compared. Then, the following were computed: overall mean values for signed and absolute Zernike coefficients; polar Zernike magnitudes and RMS values for coma-like aberrations (Z_3^{-1} and Z_3^{-3} combined); spherical-like aberrations (Z_4^0 and Z_4^2 combined); and 3rd-, 4th-, 5th-, and 6th-order, and higher-order aberrations (orders 3 to 6).

RESULTS: The different data sets showed good agreement for Zernike coefficients values across most higher-order modes, with greater variability for Z_2^0 and Z_3^{-1} . The most prominent modes and their mean absolute values (6.0-mm pupil) were, respectively, Z_1^{-1} and 0.14 μm , Z_4^0 and 0.13 μm , and Z_5^{-1} and 0.11 μm . The mean total higher-order RMS was 0.33 μm .

CONCLUSIONS: There was a general consensus for the magnitude of HOAs expected in normal adult human eyes. At least 90% of the sample had aberrations less than double the mean values reported here. These values can serve as a set of reference norms.

J Cataract Refract Surg 2006; 32:2064–2074 © 2006 ASCRS and ESCRS

Shack-Hartmann aberrometry is the most popular method for measuring monochromatic higher-order aberrations (HOAs) of the eye. It provides objective, accurate,^{1–6} high-resolution data needed for wavefront-guided corrections and helps diagnose eyes with abnormal optics. Differential diagnosis of abnormal optics requires comparison with normative values, which may be known from clinical experience or by referring to published data. At least 6 major articles report Shack-Hartmann measurements for large populations of normal eyes.^{7–14} Our purposes were to (1) compare data from 10 laboratories and (2) compute the mean wavefront statistics that represent the consensus from these laboratories on the aberrations expected for a normal adult eye. Although aberrations may vary as a result of factors such as age, refractive error, and ethnicity, this study was limited to a survey of mean values computed without regard to trends among subgroups.

Aberrometers report the magnitude and sign of each HOA aberration by a string of Zernike coefficients, but

they apply for one pupil size and wavelength only.^{15–17}

When the pupil size changes, those coefficients also change; however, given one set of coefficients, it is possible to mathematically compute their values for other pupil sizes.^{18–20} Most aberrometers measure with infrared light and then mathematically convert the Zernike coefficients to the corresponding values for a wavelength near the middle of the visible spectrum. The Materials and Methods section describes how these factors were addressed.

For most HOAs, positive and negative Zernike coefficients are approximately equally distributed in the population. Thus, on average, most higher-order Zernike coefficients have mean values close to zero. The exceptions are spherical aberration (mode Z_4^0), which usually has a mean positive value, and oblique trefoil (mode Z_3^{-3}), which usually has a mean negative value.^{15,16,21} Both positive and negative aberrations degrade image quality; therefore, when evaluating optical performance, we are primarily interested in their magnitudes without regard to

© 2006 ASCRS and ESCRS
Published by Elsevier Inc.
2064

0886-3350/06/\$ see front matter
doi:10.1016/j.jcrs.2006.07.022

ドライアイ研究における波面収差測定

最後に、波面収差測定をドライアイの評価に応用する方法について述べます。涙液層は眼にとって重要な機能を多く有しています。眼の健康と快適性に重要な栄養分や潤いも涙液が供給しています。また、光学的にも重要な機能を担っています。涙液層は眼の光学面の最前面に位置していて、実際、最も重要な光学面ともいえます。

ドライアイになると涙液層が乱れ、眼光学系も乱れることになります。ドライアイ患者は、ドライアイによる視力不良を訴えることもあります。波面センサーは眼光学系を詳しく測定することが出来ますので、間接的にドライアイを評価することも出来ます。

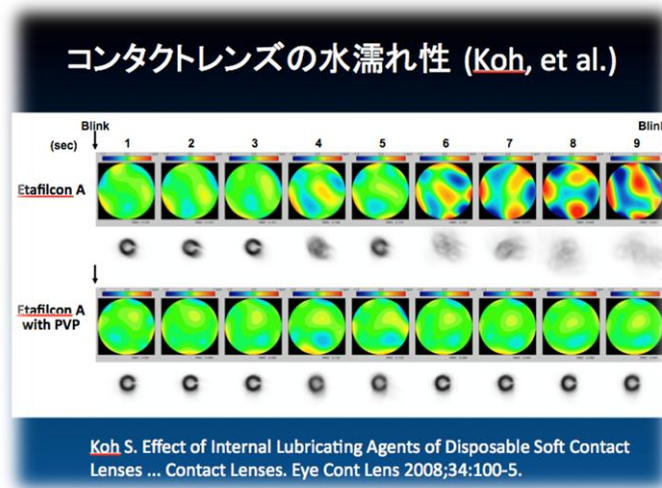
涙液は蒸発や瞬目、他の要素により常に変化していますので、涙液の評価をするためには連続的に測定する必要があります。大阪大学の高先生、前田先生のグループは、波面センサーを連続的に測定することで涙液層の変化を経時的に評価する方法を開発しました。下の表の先生方は、波面センサーをドライアイの研究に使用したパイオニアです。

1994	Liang	眼球の波面測定方法に貢献	JOSAA
1999	Thibos, Hong	涙液層破壊時間の測定	OVS
2006	Koh, Maeda	連続測定（健常眼の涙液層）	IOVS
2008	Koh, Maeda	連続測定（ドライアイ）	IOVS Cornea
2008	Koh, Maeda	コンタクトレンズの水濡れ性	ECL
2009	Burger, Head	人工涙液の評価	CEO



左から、Dr. Liang, Dr. Thibos, Dr. Koh

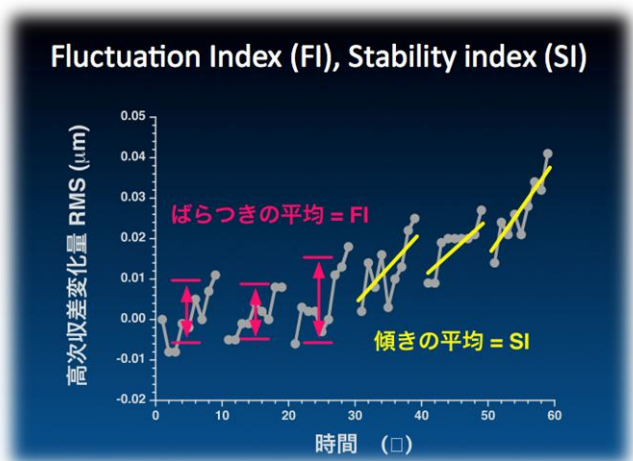
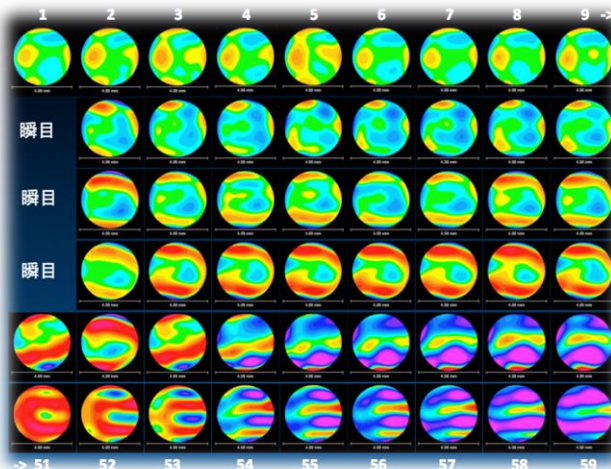
次のスライドは、高先生の論文からお借りした図です。(Effect of Internal Lubricating Agents of Disposable Soft Contact Lenses on Higher-Order Aberrations After Blinking. Eye & Contact Lenses 2008;34:100-105.) 水濡れ性の異なる2種類のコンタクトレンズを装用したときの収差と見え方の変化を経時的に示しています。



我々は、異なるコンタクトレンズを装用眼のレンズ表面の濡れ性を評価するために高先生の方法を用いました。ソフトコンタクトレンズを装用した被験者に対して、波面センサーの測定を1秒ごとに60秒間連続で行い、瞬目は10秒に1回させました。それぞれの波面データからRMS値を計算し、以下の手順で解析をしました。

- ・ 横軸を時間(秒)、縦軸をRMS値としたグラフにデータをプロット
- ・ プロットしたデータから、Fluctuation Index (FI: データのばらつきの係数)を算出
- ・ さらに、Stability Index (SI: グラフの傾きの係数)を算出

FIとSI、2つの係数は高先生が論文の中で定義したものです。左下の図は、ソフトコンタクトレンズ装用眼の60秒間の波面の変化の例です。スライドの左上の波面が測定開始直後で、右に向かって10回分の波面になります。最初の瞬目後が2列目になり、その次の瞬目後が3列目という感じで並んでいます。瞬目と瞬目の間にレンズ表面が乾燥し波面が変化していることがわかります。また、瞬目しても完全には涙液の乱れがリカバーされていないため、下の列に行くに従い涙液の乱れが大きくなっていることがわかります。



(前ページ)右上の図は、高先生が定義した 2 つの係数、FI と SI 説明するためのものです。

Fluctuation index (FI)

- ・ それぞれの瞬目インターバル(10 秒間)の間の高次収差の RMS 値の標準偏差を計算する
- ・ 全ての瞬目インターバルで同じように計算する
- ・ 6 つの標準偏差の平均を FI とする
- ・ 60 回分の測定値につき、1 つの FI
- ・ FI は瞬目と瞬目の間の高次収差 RMS 値のばらつきの大きさを表す

Stability index (SI)

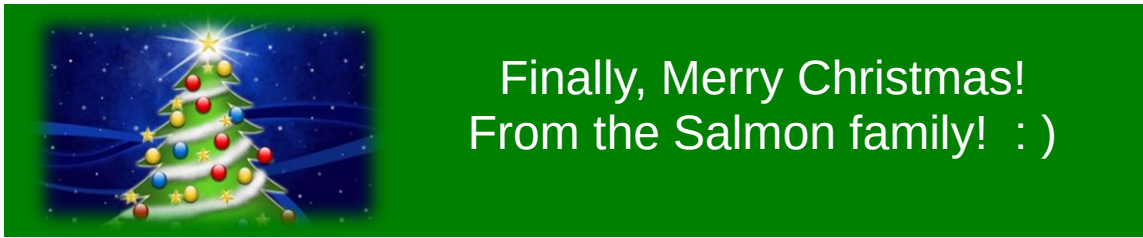
- ・ それぞれの瞬目インターバル(10 秒間)の間の高次収差の RMS 値の傾きを計算する
- ・ 全ての瞬目インターバルで同じように計算する
- ・ 6 つの傾きの平均を FI とする
- ・ 60 回分の測定値につき、1 つの FI
- ・ SI は瞬目と瞬目の間の高次収差 RMS 値の傾きを表す

まとめ

ドライアイの診断に役立つより良い検査が必要です。ドライアイは涙液層を変化させ、眼光学系に影響します。波面センサーによる波面収差の測定は、眼光学系の微妙な変化を経時的に測定することが出来ますので、涙液層に影響を与える状況を研究するのに使われます。今までに、正常な涙液動態、ドライアイ患者の涙液の状態、コンタクトレンズ表面の水濡れ性などの研究が行われてきました。波面収差測定 of 技術を使った臨床応用は他にも多くあります。

私の講演を聞いてくださった方々、このニューズペーパーで読んでくださった方々に感謝したいと思います。最後に、私が働く Northeastern State University (NSU) の日本人留学生(ソーラン節チーム)の写真を 1 枚お見せします。彼らの多くは昨年 12 月に卒業しましたが、私の行った臨床試験などにも協力してくれていました。





(翻譯：小淵輝明)