

教育セミナー 3
屈折矯正手術に必要な機器

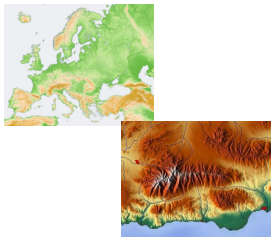
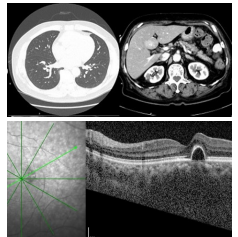
角膜形状解析

加藤直子
南青山アイクリニック

利益相反公表基準：該当なし

1

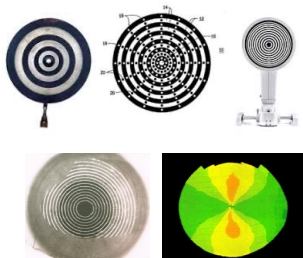
トポグラフィー vs トモグラフィー

- トポグラフィー (Topography; 地形)
 - 
- トモグラフィー (Tomography; 断層影画像法)
 - 

2

角膜トポグラフィー

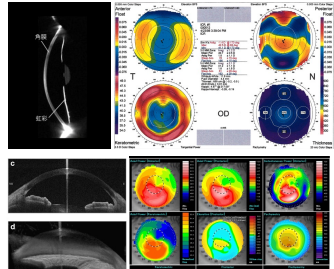
- 角膜前面しか解析できない
- 涙液の影響を受ける
- TMSシリーズ® (Tomey)
- Keratograph® (Nikon)
- EyeSys® (EyeSys Vision) など



3

角膜トモグラフィー

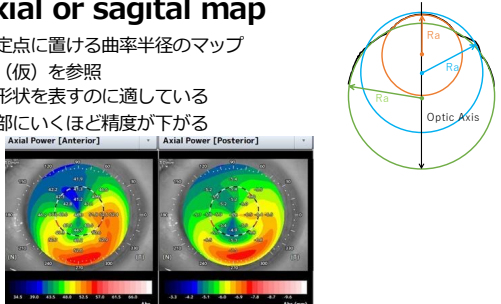
- 断層撮影によって、角膜前後面の状態を計測
- 厚みや実質混濁の情報も得られる
- Orbscan® (Canon)
- Pentacam® (Oculus)
- CASIA® (Tomey) など



4

Axial or sagittal map

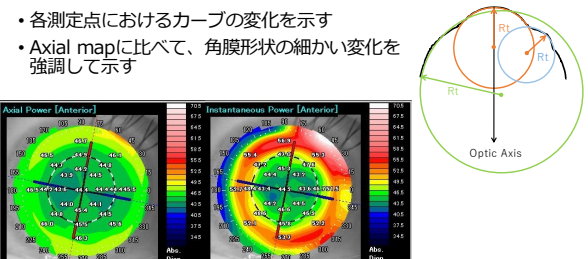
- 角測定点に置ける曲率半径のマップ
- 視軸 (仮) を参照
- 角膜形状を表すのに適している
- 周辺部にいくほど精度が下がる



5

Tangential or Instantaneous map

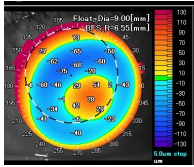
- 各測定点におけるカーブの変化を示す
- Axial mapに比べて、角膜形状の細かい変化を強調して示す



6

Elevation map

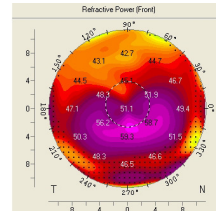
- 高さ情報のマップ
- Best fit sphere (BFS)を設定して、そこからの高低を表示



7

Refractive map

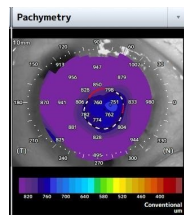
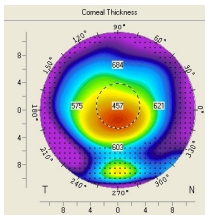
- 角膜のカーブと屈折力 (1.3375) から導き出される角膜屈折力のマップ



8

Pachymetry map

- 厚みのマップ
- 前面と後面の形状がわかる機種で出せる

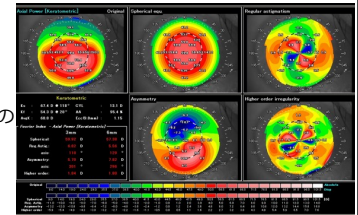
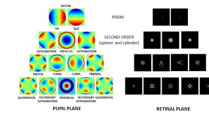


9

Fourier Maps

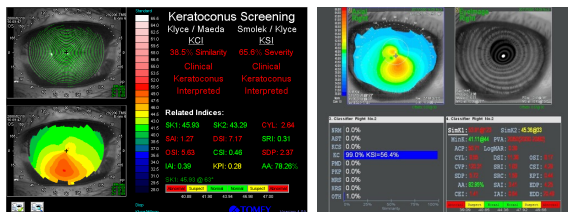
- 角膜形状を
 - 球面成分
 - 正乱視成分
 - 非対称成分
 - 高次不正乱視成分

の4成分に分離し角膜形状の光学特性を分析



10

円錐角膜スクリーニング



11

Take Home Message

- 角膜形状解析には、トポグラフィーとトモグラフィーがある
- 測定の原理を知っているとより良い理解につながる

12

波面収差計

Wavefront Analyzer



北里大学大学院医療研究科視覚情報科学
北里大学医療衛生学部視覚生理学 神谷 和孝

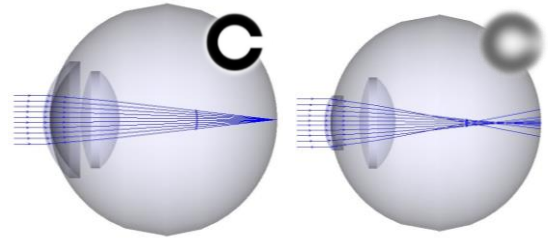
1

収差とは？

レンズを通る光線が一点に集まらず不完全な像ができる

収差小

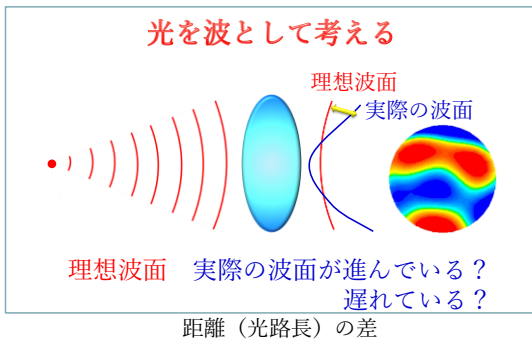
収差大



2

波面収差とは

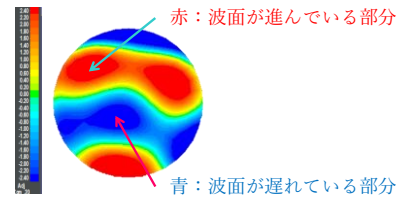
光を波として考える



3

波面収差とは？

Zernike多項式による定量化

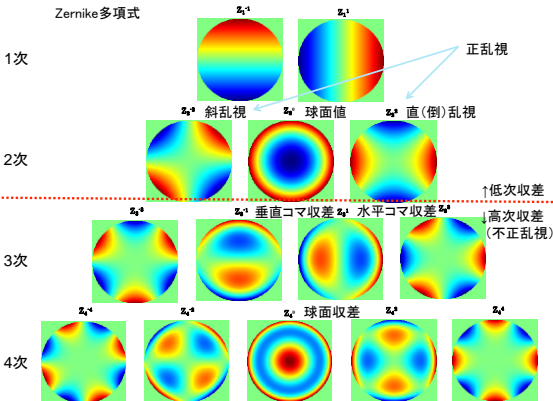


もう少し定量的に表現したい！

Zernike多項式を用いる

4

Zernike多項式

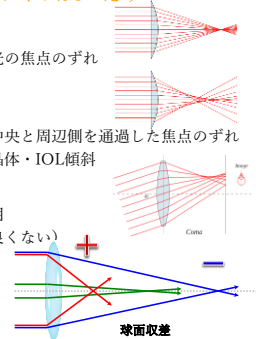


5

高次収差

日常臨床で知っておくのは3つだけ

- 球面収差 (4次収差)
 - レンズ中央と周辺側を通過した光の焦点のずれ
 - 非球面IOLや焦点深度
- コマ収差 (3次収差)
 - 光軸に平行でない光がレンズの中央と周辺側を通過した焦点のずれ
 - 円錐角膜、LASIK偏心照射、水晶体・IOL傾斜
- 全高次収差 (全収差)
 - 高次収差の総和、日常臨床で頻用
 - 大きいほど視機能低下 (基本は良くない)



6

高次収差の扱い方

各成分の係数は煩雑で理解しにくい

- 理想波面からのずれを定量化
 - 合算する上で二乗平均平方根(RMS; μm)
- 収差量は瞳孔径に依存
 - 瞳孔径4mmと6mmでは1.5×1.5=2.25倍
 - 4mmで全高次収差0.30~0.35 μm以下が正常
 - 0.3 μm (4mm) ≒ 球面 0.5D 相当
- 角膜収差と眼球収差
 - 内部収差 (ほぼ水晶体) ≒ 眼球収差 - 角膜収差
 - 角膜由来か? 水晶体由来か? 同定可能

$$RMS = \sqrt{\sum_{n,m} (C_n^m)^2}$$



4 mm (昼間)



6 mm (夜間)

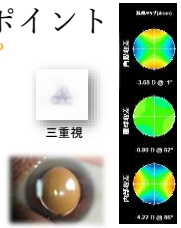


7

臨床応用におけるポイント

使うべきタイミングは?

- 白内障手術前後
 - 手術適応 (特に高付加価値IOL) の判断
 - トーリックIOL・ICL軸ずれ評価
 - IOLの偏心・傾斜
- 角膜形状異常
 - LASIK後・軽度円錐角膜
 - 幼少時外傷や重症ドライアイでも生じる
 - 原因不明が意外と多い!



三重視

原因不明となる微細な患者さんの見え方不良を可視化

視力低下著明な症例では有用性低い

8

再現性は?

一定のばらつきあり

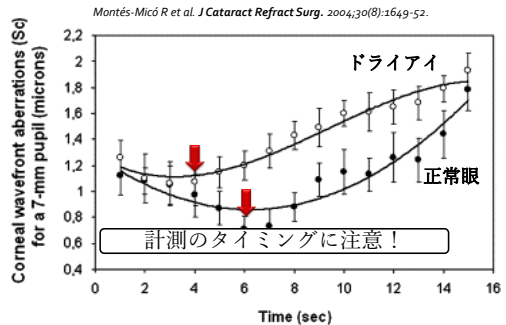
著者	測定方法/原理	年齢	n	測定項目	95% 信頼限界
Alberto López-Miguel et al. JCRS, 2013	KR-1W, Topcon Hartmann-Shack / Placido disc, 6.0 mm	29.0 (20-48)	75	Total ocular HOA Total corneal HOA Total internal HOA	± 0.07 μm ± 0.05 μm ± 0.08 μm
Alberto López-Miguel et al. AJO, 2012	Zywave, Bausch & Lomb Hartmann-Shack 6.0 mm	32.2 (20-55)	30	Total ocular HOA	± 0.08 μm

複数回計測し、0.1 μm以上ばらつくなら再計測

9

検査における注意点

①涙液



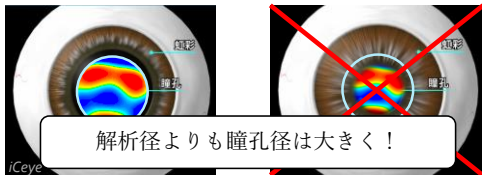
10

検査における注意点

②瞳孔

解析径 < 瞳孔径

解析径 > 瞳孔径



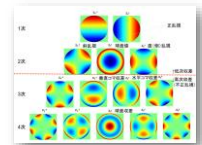
RMS(μm)	S3, S5: コマ収差						S4, S6: 球面収差		全収差
	直径	S3	S4	S5	S6	S3+S5	S4+S6		
4.00 mm	0.236	0.106						0.258	
5.17 mm	0.437	0.256	0.069	0.041	0.443	0.259	0.513		
6.00 mm	0.570	0.574	0.105	0.114	0.580	0.585	0.824		

11

Take Home Message

波面収差計

- 波面収差は光を波と考え、理想波面からのずれを定量化
- 日常臨床では球面収差、コマ収差、全高次収差が重要
- 白内障手術前後や角膜形状異常など微細な光学特性変化を可視化、原因不明の見え方不良など臨床的な応用は少なくない
- 瞳孔径に依存し、角膜収差と眼球収差がある
- 測定時は再現性に注意し、涙液や瞳孔の影響も考慮する



12

教育セミナー 屈折矯正手術に必要な機器 エキシマレーザー

医療法人コスモス会 フジモト眼科
藤本 可芳子

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科 利益相反公表基準：該当なし

近視矯正手術の歴史

1950年	角膜表面両面切開術	日本 佐藤勉教授
1964年	ケラトミレーシス	コロンビア Dr. バラック
1972年	RK (放射状角膜切開術)	ロシア Dr. フィヨドロフ
1975年	エキシマレーザー開発	
1990年	エキシマレーザーの臨床応用開始 (PRK) LASIKの臨床研究開発	アメリカ Dr. バリカリス
1995年	PRKをFDAが認可	
2000年	PRK・LASIKで延べ約150万件以上	
2000年	厚生労働省がエキシマレーザーを認可	
2006年	厚生労働省がLASIKを認可	
2010年	厚生労働省がICLを認可	
2012年	PTKが保険適応となる	日本
2013年	フェムトセカンドレーザーが承認される	

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科 CMC

エキシマレーザーを用いた屈折矯正手術

- ▶ エキシマレーザーは193nmの紫外線波長
- ▶ 角膜表面や実質に照射して組織を蒸散させ、近視や乱視、遠視など屈折異常を矯正する
- ▶ 角膜の変性疾患を治療するPTK
- ▶ フラップを作成しないPRK、LASEK
- ▶ フラップを作成するLASIK

フェムトセカンドレーザーとエキシマを用いたLASIK
フェムトだけで行う SMILE

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科 CMC

エキシマレーザーの照射実例 クールレーザーなので焦げない！




シリコンプレート 毛髪 1本！

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科 CMC

LASIKでフラップを作成する場合

① マイクロケラトーム MK-2000



LASIK手術ビデオ供覧

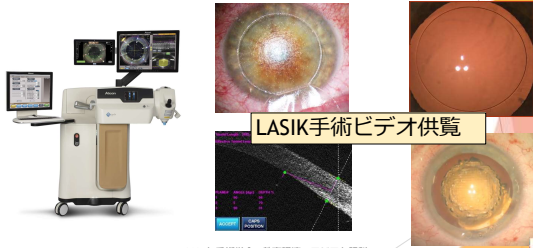
2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科 CMC

① マイクロケラトームを用いたフラップ作成

- 1 点眼麻酔をします
- 2 角膜に蓋を作ります
- 3 蓋をめくります
- 4 レーザーを照射します
- 5 蓋を戻します
- 6 数分、乾かして終了

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科 CMC

②フェムトセカンド (10^{-15}) レーザーを用いたフラップ作成：約19秒（1秒に数1000発照射）

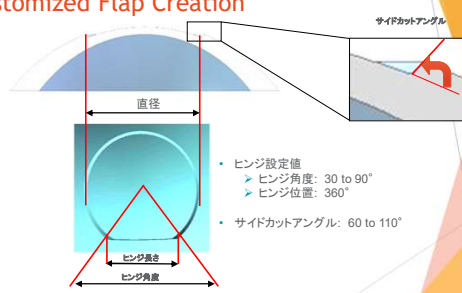


LASIK手術ビデオ供覧

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科

CMC

Customized Flap Creation



- ヒンジ設定値
 - ▶ ヒンジ角度: 30 to 90°
 - ▶ ヒンジ位置: 360°
- サイドカットアングル: 60 to 110°

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科

CMC

角膜フラップを作成しない PTK, PRK, LASEK

- ▶ PTK（治療的表層角膜切除術）は、角膜上皮から実質の一部にエキシマレーザーを照射し、角膜の混濁を除去する手術です。角膜ジストロフィや帯状角膜変性症の治療に用いる
- ▶ PRKは、角膜上皮からポーマン、角膜実質までエキシマレーザーを照射し、近視や乱視など屈折異常を治療する
- ▶ LASEKは、角膜上皮を20%アルコールで除去し、ポーマン膜を露出させ、角膜実質へエキシマレーザーを照射し、近視、乱視など屈折異常を治療する

LASEK手術ビデオ供覧

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科

CMC

レーザー照射の種類

- ▶ スタンダードレーシック
- ▶ 角膜トポグラフィガイドレーシック
- ▶ マルチポイントレーシック
- ▶ ウェーブフロントガイドレーシック

レーザー照射中の眼球追従

- ▶ アイトラッキング

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科

CMC

レーシックやPRK、LASEKが 不適応の場合

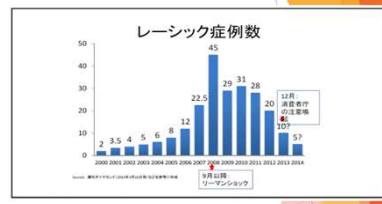
1. 角膜の厚みが薄くて、十分治療できない
2. 円錐角膜
3. ドライアイによる角膜障害がある
4. -6D以上の近視の場合、術後角膜収差が大きくなる

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科

CMC

レーシック国内手術件数

- 2000年： 20,000眼
- 2001年： 34,000眼
- 2002年： 39,000眼
- 2003年： 46,000眼
- 2004年： 59,000眼
- 2005年： 75,000眼
- 2006年： 120,000眼
- 2008年： 450,000眼
- 2016年： 360,000眼
- 現在、約150万眼以上の治療数
- 海外では、4000万眼以上



レーシック症例数

2000年 2001年 2002年 2003年 2004年 2005年 2006年 2007年 2008年 2009年 2010年 2011年 2012年 2013年 2014年 2015年 2016年

2025年手術学会 教育講演 フジモト眼科

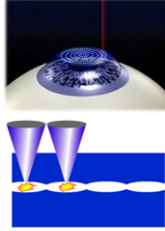
CMC

フェムトセカンドレーザー

名古屋アイクリニック
中村友昭

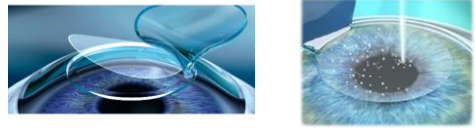
フェムト（1000兆分の1）秒単位の超短パルスが発生する近赤外線レーザー

角膜実質内で光切断した点を連続させて間隙を作る



LASIK

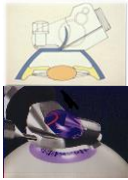
フラップを作って実質をエキシマレーザーで切除



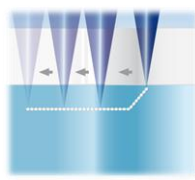
1

2

アナログからデジタルへ



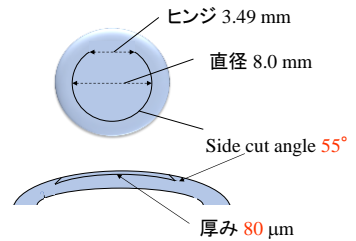
マイクロケラトームによるフラップ作成



フェムトセカンドレーザーによる光切断

3

FSレーザーにより正確にフラップ作成が可能に



当院での標準フラップ設定

4

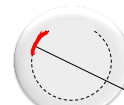
レーザー屈折矯正手術の進化



SMILEとは？

(Small incision femtosecond lenticule extraction)

2023年3月 日本でも承認



最小2mmの切開のみ



小さな傷口から
抜き取る

5

6

2mmしか切らない手術 SMILE

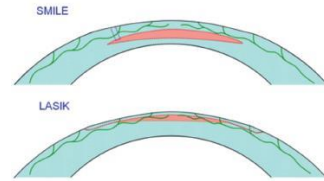
通常のレーシックの10%しか切開しない



- フラップずれが起きない
- 傷口が小さいので、強度が高くなる
- 術後ドライアイになりにくい

Flapless

知覚神経のダメージが少ない



7

8

Dry Eye: SMILE vs LASIK Meta-analysis (3論文)

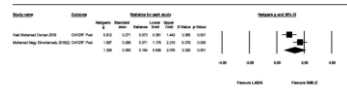
Meta-analysis	Outcome					
	Symptom (OSDI)	BUT	Shimaeer	Tear osmolarity	Corneal sensitivity	Corneal nerve density
Shen Z (2016) N=6	S > L 1M, 3M, 6M	S > L 1M, 3M, 6M	S = L	S = L	N/A	N/A
Cai WT (2017) N=8	S > L 1M, 6M	S > L 1M, 3M	S = L	N/A	S > L 1M, 3M	N/A
Kobashi (2017) N=5	S > L 6M	S > L 6M	S = L	S = L	S > L 1M, 6M	S > L 1M

S: SMILE, L: LASIK, M: month, N/A: A > B: A is favorable over B.

戸田先生提供

Biomechanics meta-analysis

Guo H: BMC Ophthalmol. 2019.



SMILE はFS-LASIK やLASIKより有意に強度が強いが、PRKやLASEKとは同等

9

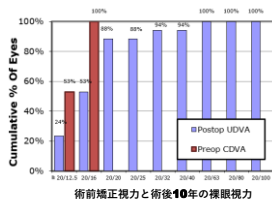
10

名古屋アイクリニック 10年

	裸眼視力	矯正視力
術前	0.08(1.11)	1.8(-0.25)
術後10年	1.2(-0.09)	1.6(-0.22)

小数視力(logMAR)

術後10年において、88%が裸眼視力1.0以上であった。



澤木ら 臨眼2023

11

次世代屈折矯正用 Femtosecond laser

全ての器械は回折矯正、照射中心の矯正機能有り

Company	レーザー名	手術名	角膜診断器械とのリンク	特徴と欠点
Carl Zeiss	VisuMax800	SMILE	○ (IOLMaster)	非常に速い (7-8秒) / メタデータの調整 / データ無効化ツール
J & J	ELITA	SLK (Smooth Incision Lenticule Keratomileusis)	×	LenticuleはBiconvex Capがマッチしやすい / ほとんど調整不要なし
Schwind	ATOS	SmartSight	△ 今は無いが、もうすぐリンク	既に良好な術後成績も有り
Ziemer	Z8	CLEAR (Cornea Lenticule Extraction for Advanced Refractive-Correction)	△ 今は無いが、すぐにGalileiとリンク	1つのレーザーで白内障、屈折矯正、移植の様々な切除などマルチモード / 非常にコンパクトで移動可能

12