

フィールドガイド

視覚と眼の光学

Jim Schwiegerling／著
張 吉夫／訳



株式会社 オプトロニクス社

Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics
by Jim Schwiegerling

Originally published by

SPIE
P.O. Box 10
Bellingham, Washington 98227-0010 USA
Phone: +1 360 676 3290
FAX: +1 360 647 1445
Email: books@spie.org
Web: <http://spie.org>

Copyright © 2004 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from SPIE.

Translated and published in Japan by special arrangement with SPIE Press,
1000 20th Street, Bellingham, WA 98225 USA.

Authorized Japanese-language edition

SPIE フィールドガイドシリーズについて

SPIE フィールドガイドシリーズへようこそ。本書は現場の技術者や研究者に向けた新シリーズ「SPIE フィールドガイド」の1冊です。

光の原理や技術に関しては、これまで専門家を対象とする優れた参考書、専門書が数多く出版されています。本シリーズでは、先人の英知に学び、その重要な原理や技術を取り上げて、ラボや現場でもすぐに参照できるわかりやすい実用書として作成しました。机上で使用するにも、持ち運ぶにも便利な参考書兼ハンドブックです。現場の技術者や研究者の実務および作業効率の向上を図るものもあります。シリーズの各書籍とも、光学の基礎原理などの基本的事項から、技術および実用面、さらに参考文献に至るまで、項目別に参考しやすい配列でまとめています。また、共通の統一されたレイアウトと記号を使用し、読者への平易な解説に努めています。

本「SPIE フィールドガイドシリーズ」では、個々一編で主要な光技術一題を取り扱っています。モジュール形式によって、大方の場合、1ページに1つのトピックを置き、そのページの中でそのトピックをほぼカバーできるよう構成しました。そのため、検索も容易で、しかも、図や式を原理的に理解することが可能です。また、巻末には付録として、関連する文献、基本となる公式集、あるいは、本文で言及していない他の方法などについての情報も掲載されており、各分野を完全にカバーするように努めています。但し、最新のトピックは、十全に認知されていないものとして省きました。

「SPIE フィールドガイドシリーズ」はまた常に生きたドキュメントであるよう心がけています。モジュールページ形式の採用により、本文の改訂や増補が容易に行なえることから、新しいテーマや各巻への追加が望ましいと思われるトピックなどについては、ご意見、ご提案などメールにてお寄せ下さい。

(Email: fieldguides@SPIE.org)

John E. Greivenkamp, シリーズ編集者
Optical Science Center
The University of Arizona

The Field Guide Series
フィールドガイド刊行リスト

Field Guide to Geometrical Optics, John E. Greivenkamp (FG01)

Field Guide to Atmospheric Optics, Larry C. Andrews (FG02)

Field Guide to Adaptive Optics, Robert K. Tyson & Benjamin W. Frazier (FG03)

Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics, Jim Schwiegerling (FG04)

Field Guide to Polarization, Edward Collett (FG05)

Field Guide to Optical Lithography, Chris A. Mack (FG06)

Field Guide to Optical Thin Films, Ronald R. Willey (FG07)

Field Guide to Spectroscopy, David W. Ball (FG08)

Field Guide to Infrared Systems, Arnold Daniels (FG09)

Field Guide to Interferometric Optical Testing, Eric P. Goodwin & James C. Wyant (FG10)

Field Guide to Illumination, Angelo V. Arecchi; Tahar Messadi; R. John Koshel (FG11)

Field Guide to Lasers, Rüdiger Paschotta (FG12)

Field Guide to Microscopy, Tomasz S. Tkaczyk (FG13)

Field Guide to Laser Pulse Generation, Rudiger Paschotta (FG14)

Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs, Second Edition, Arnold Daniels (FG15)

Field Guide to Optical Fiber Technology, Rudiger Paschotta (FG16)

Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics

まえがき

視覚光学は、数々の学問の融合によってもたらされた科学分野であり、それは光学技術とバイオロジーが洗練されたイメージングシステムを生み出したことに似ている。ヒトの視覚はあらゆる状況下で広範囲にわたって機能する。そして複雑な視覚情報を素晴らしい速さで処理することができる所以である。ニュートン、マクスウェル、ヤング、ヘルムホルツ、アルバレッツといった光学物理における偉大な先人達が、視覚光学分野の発展にも大きく貢献してきた。本書では、解剖学、生理学、眼の機能などに多くのページを割いた。また、眼球の表面と構造の計測、写真撮影、評価など計測・診断器についても広くそれらの工学的な原理と成り立ちを解説した。さらに、視覚の矯正、加齢による機能の低下、また眼自体の自然治癒力などについてのわれわれの試みについても述べた。

この本の制作にあたり、三人の同僚から多大の援助をいただいた。この場所をお借りしてお礼を申し上げたい。まずJohn Greivenkampには、この本を書く機会を与えてくれたことを、またその良き指導、助言そして友情に感謝したい。次にJoseph Millerには、彼の工学に対する情熱に大いに感化されたことを、またいつも素晴らしいアイディアを聞かせてくれたことに感謝したい。最後にCharlie Campbellには、彼の知恵と知識に対して、またゼルニケ多項式についての私の初步的質問に答えてくれたことに感謝を申し上げたい。

この本を私の素晴らしい妻Diana、私の息子Max、私の娘Marieに捧げます。

Jim Schwiergerling
アリゾナ大学
オプティカルサイエンスセンター

日本語版へのまえがき

視覚の光学、眼についての光学の歴史は非常に長い。これは、人間の外界から得る情報の大きい部分が視覚を通してなされていること、また、このことによって人々の眼と視覚への強い関心が古くからあったためと思われる。この長い歴史の後、視覚と眼の光学は、今日、最新の光学とバイオロジー、医学、心理学、情報処理理論が絡んだ新しい分野を形成しつつある。一方、健康なビジュアルライフは日常生活において常に人々の大きい関心事である。

本書の原著である *Visual and Ophthalmic Optics* (視覚と眼の光学) は、このような眼についての新しいサイエンスとエンジニアリングの複合領域で必要とされる基礎的な事項をフィールドガイドシリーズの様式に従って系統的でありながらコンパクトにまとめている点で、今までになかったユニークな眼と視覚の入門書となっている。そのような意味で、本書は、また眼科医療、眼鏡技術の現場や研究開発などの分野に携わる人達にとって、さらに眼鏡を使う一般の人達にとって、身近でハンディーな参考書としても活用していただけるものと思っている。

なお、目次、本文、図、索引を通して、和、英の両単語を併記するよう努めた。これによって、本書を視覚と眼に関する和英、英和の両用辞書としても活用していただければ幸いである。

張 吉夫

目次

変数と記号の説明	Glossary	x
眼の働き		
眼球	Ocular Function	1
角膜	Eyeball	1
網膜	Cornea	2
視細胞（光受容体）	Retina	3
網膜のランドマーク（座標）	Photoreceptors	4
眼球構成要素の光学的性質	Retinal Landmarks	5
調節	Properties of Ocular Components	6
瞳（ひとみ）の大きさと暗順応	Accommodation	7
透過と反射	Pupil Size and Dark Adaptation	8
眼球の軸	Transmission and Reflectance	9
スタイルズークロフォード効果	Axes of the Eye	10
明順応視感度曲線 $V(\lambda)$ と暗順応視感度曲線 $V'(\lambda)$	Stiles-Crawford Effect	11
	Photopic $V(\lambda)$ and Scotopic $V'(\lambda)$ Response	12
眼球の動き	Eye Movements	13
バージェンス	Vergence	14
近軸模型眼	Paraxial Schematic Eye	15
アリゾナ眼モデル	Arizona Eye Model	16
収差	Aberrations	17
視力	Visual Acuity	19
視力と視力表	Visual Acuity and Eye Charts	20
コントラスト感度関数（CSF）	Contrast Sensitivity Function (CSF)	21
正視と非正視（屈折異常）	Emmetropia and Ametropia	23
遠点と近点	Far and Near Points	24
老視	Presbyopia	25
眼の屈折異常の矯正		
眼鏡：単焦点ビジョン	Correction of Ocular Errors	26
眼鏡レンズ	Spectacles: Single Vision	26
レンズメーター	Spectacle Lenses	27
球面屈折異常と円筒面屈折異常	Lensmeter	28
	Spherical and Cylindrical Refractive Error	29
プリズム異常	Prismatic Error	30
乱視分解	Astigmatic Decomposition	31
特殊な検眼用レンズ	Special Ophthalmic Lenses	32
可変プリズムと可変レンズ	Variable Prisms and Lenses	33
コンタクトレンズ	Contact Lenses	34
ラジアスコープ	Radiuscope	35

目次（つづき）

眼鏡レンズとコンタクトレンズの材料

眼鏡レンズとコンタクトレンズの材料	Spectacle and Contact Lens Materials	36
屈折異常の外科的矯正	Surgical Correction of Refractive Error	37
白内障手術	Cataract Surgery	38

眼の診断・検査器と眼の計測法

Ophthalmic Instrumentation and Metrology 39

プルキンエ像	Purkinje Images	39
蛍光造影法	Fluorescein Imaging	40
インドシアニングリーン造影法	Indocyanine Green Imaging	41
ケラトメトリー（角膜曲率測定）	Keratometry	42
角膜トポグラフィー（角膜形状解析法）	Corneal Topography	43
角膜トポグラフィー：軸屈折力	Corneal Topography: Axial Power	44
角膜トポグラフィー：局所屈折力	Corneal Topography: Instantaneous Power	45
眼前部造影法	Anterior Segment Imaging	46
波面センシング：シャック・ハルトマン センシング	Wavefront Sensing: Shack-Hartmann Sensing	47
波面センシング：ツェルニング収差計測	Wavefront Sensing: Tscherning Aberrometry	48
波面センシング：網膜光線追跡	Wavefront Sensing: Retinal Raytracing	49
波面センシング：空間分解レフラクトメトリー	Wavefront Sensing: Spatially Resolved Refractometry	50
波面センシング：波面再生	Wavefront Sensing: Reconstruction	51
ゼルニケ多項式：波面センシングの基準	Zernike Polynomials: Wavefront Sensing Standard	53
ゼルニケ多項式：直角座標	Zernike Polynomials: Cartesian Coordinates	54
ゼルニケ多項式：有用な公式	Zernike Polynomials: Useful Formulas	55
眼底検査法	Ophthalmoscopy	57
網膜造影法	Retinal Imaging	58
視野と周辺視野測定	Field of View and Perimetry	59
網膜検影法	Retinoscopy	60
オートレフラクト計測	Autorefraction	61
バーダルオプトメータとマクスウェル視	Badal Optometer and Maxwellian View	62
よく使われる眼科用レーザー	Common Ophthalmic Lasers	63
眼の安全基準：レーザー光源	Eye Safety: Laser Sources	64
眼の安全基準：非レーザー光源	Eye Safety: Non-laser Sources	65

目次 (つづき)

色	Color	66
測光 (光計測)	Photometry	66
測色 (色計測) : RGB および CIE XYZ システム	Colorimetry: RGB and CIE XYZ Systems	67
測色 (色計測) : 色度図	Colorimetry: Chromaticity Diagram	68
測色 (色計測) : 原色と色領域	Colorimetry: Primaries and Gamut	69
測色 (色計測) : CIELUV 色空間	Colorimetry: CIELUV Color Space	70
測色 (色計測) : CIELAB 色空間	Colorimetry: CIELAB Color Space	71
色順応	Chromatic Adaptation	72
L, M, S 錐体準拠表色	L, M, and S Cone Fundamentals	73
附録	Appendices	74
非球面と非点収差面 (乱視面)	Aspheric and Astigmatic Surfaces	74
微分幾何学	Differential Geometry	75
三角関数の恒等式	Trigonometric Identities	76
CIE 明順応視感度曲線 $V(\lambda)$ と 暗順応視感度曲線 $V'(\lambda)$	CIE Photopic $V(\lambda)$ and Scotopic $V'(\lambda)$ Response	77
1931 2°等色関数	1931 CIE 2° Color Matching Functions	78
1964 10°等色関数	1964 CIE 10° Color Matching Functions	80
Stockman and Sharpe 2°錐体準拠表色	Stockman & Sharpe 2° Cone Fundamentals	82
インコヒーレント網膜障害関数	Incoherent Retinal Hazard Functions	85
ゼルニケ多項式: 極座標でのテーブル	Zernike Polynomials: Table in Polar Coordinates	87
ゼルニケ多項式: 直角座標でのテーブル	Zernike Polynomials: Table in Cartesian Coordinates	88
公式集	Equation Summary	89
参考文献	Bibliography	101
索引	Index	107

変数と記号の説明

A	調節	Accommodation
A	A 定数	A -constant
a^*	CIELAB 色空間での色座標 Color coordinate in CIELAB space	
$A(\lambda)$	無水晶体症ならびに小児網膜障害重み関数 Aphakic & infant retinal hazard function	
$A(\theta)$	斜め入射乱視 (斜め入射非点収差)	Oblique astigmatism
ACD	前房深度	Anterior chamber depth
AK	乱視矯正角膜切除術	Astigmatic keratotomy
ARMD	加齢黄斑変性症	Age-related macular degeneration
ArF	フッ化アルゴン (レーザー)	Argon fluoride
Axis	乱視軸角度	Cylinder axis
B	RGB 空間内での青チャンネル	Blue channel in RGB space
b^*	CIELAB 色空間での色座標 Color coordinate in CIELAB space	
$B(\lambda)$	青光網膜障害重み関数	Blue light retinal hazard function
$\bar{b}(\lambda)$	CIE RGB 空間での等色関数 Color matching function in CIE RGB space	
BD	基底下方	Base down
BI	基底内方	Base in
BO	基底外方	Base out
BU	基底上方	Base up
C_A, C_B, C_C	レーザー露光計算での定数 Constants for laser exposure calculations	
C_{uv}^*, C_{ab}^*	彩度, 色度	Chroma
cd	カンデラ単位	Units of candelas
CIE	国際照明委員会	Commission Internationale de l'Eclairage
CK	伝導性角膜形成術	Conductive keratoplasty
CMF	等色関数	Color matching function
CSF	コントラスト感度関数	Contrast sensitivity function
Cyl	乱視度数 (円柱面度数)	Cylinder power
D	ディオプター単位 (1/m 単位)	Units of diopters (inverse meters)
D	瞳孔直径	Pupil diameter
d	距離	Distance
$d\phi$	屈折力の誤差	Power error
D65	6500°K 基準白色光源	6500°K reference white light source
E	第1基本形式の成分 Component of the first fundamental form	
E_V	照度	Illuminance
F	第1基本形式の成分 Component of the first fundamental form	
f	焦点距離	Focal length
f_0	空間周波数	Spatial frequency

変数と記号の説明（つづき）

FOV	視野	Field of view
G	RGB空間内の緑チャンネル	Green channel in RGB Space
G	第1基本形式の成分	Component of the first fundamental form
$\bar{g}(\lambda)$	CIE RGB空間での等色関数	Color matching function in CIE RGB space
H	平均曲率	Mean curvature
h_{ab}, h_{uv}	色相	Hue
HDTV	高精細度テレビジョン	High-definition television
I_v	光度	Luminous intensity
ICG	インドシアニングリーン	Indocyanine green
IOL	眼内レンズ	Intraocular lens
J0	水平方向に軸を持つ円筒レンズ	Horizontal crossed cylinder
J45	45°方向に軸を持つ円筒レンズ	Oblique crossed cylinder
JCC	ジャクソン・クロスシリンドー	Jackson crossed cylinder
K	円錐定数	Conic constant
K	K値	Keratometry values
K	ガウス曲率	Gaussian curvature
L	輝度（ルミナンス）	Luminance
L	軸長	Axial length
L	第2基本形式の成分	Component of the second fundamental form
L^*, L_v, L_λ	輝度（ルミナンス）	Luminance
$L(\lambda)$	長波長錐体準拠表色	Long-wavelength cone fundamental
LA	LogMAR視力	LogMAR acuity
LASEK	レーザー上皮角膜形成術	Laser epithelial keratomileusis
LASIK	レーザー原位置上皮角膜形成術	Laser in situ keratomileusis
LOS	照準線	Line of sight
LCA	縦方向色収差	Longitudinal chromatic aberration
lm	ルーメンの単位記号	Units of lumens
LSA	縦方向球面収差	Longitudinal spherical aberration
LTK	レーザー熱角膜移植術	Laser thermal keratoplasty
lux	照度の lumens/m ² の単位	Units of lumens/m ²
M	球面等価屈折度	Spherical equivalent power
M	第2基本形式の成分	Component of the second fundamental form
$M(\lambda)$	中波長錐体準拠表色	Middle-wavelength cone fundamental
MPE	最大許容露光量	Maximum permissible exposure
N	第2基本形式の成分	Component of the second fundamental form
n, n'	屈折率	Index of refraction
n_k	角膜曲率計測用屈折率	Keratometric index of refraction

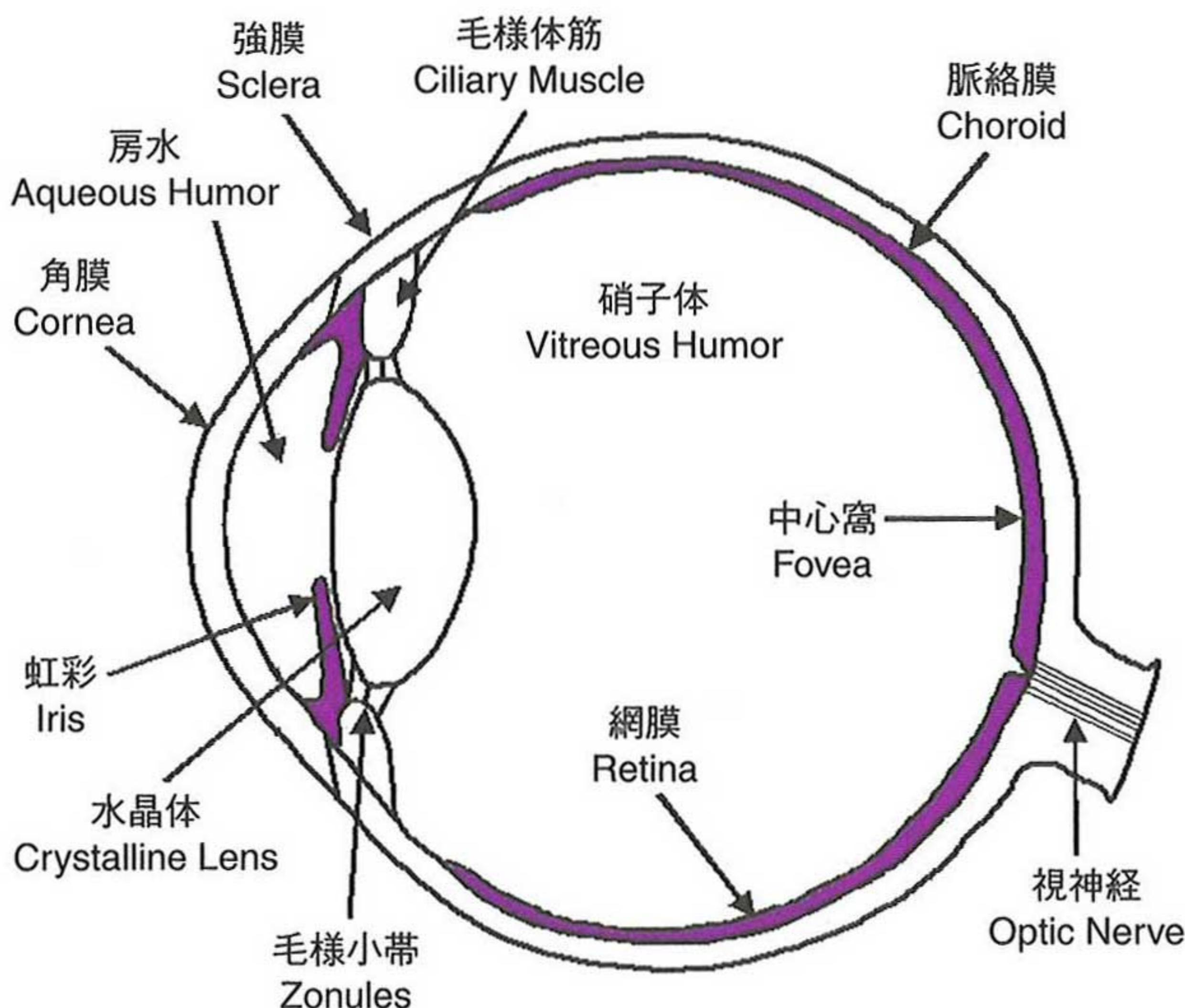
変数と記号の説明（つづき）

OCT	光コヒーレンス断層撮影法	Optical coherence tomography
OD	右眼	Oculus dexter (right eye)
OS	左眼	Oculus sinister (left eye)
OU	両眼	Oculus uterque (both eyes)
P	プリズム屈折力	Prism power
PI-PIV	プルキンエ像	Purkinje images
PAL	累進多焦点（累進焦点加入）レンズ	Progressive addition lens
PD	瞳孔間距離	Interpupillary distance
PIOLs	有水晶体眼内レンズ	Phakic intraocular lenses
PMMA	ポリメチルメタアクリレート	Polymethylmethacrylate
PRK	レーザー屈折矯正角膜切除術	Photorefractive keratectomy
q'	眼の回旋点	Center of rotation of the eye
R	曲率半径	Radius of curvature
R	RGB空間での赤チャンネル	Red channel in RGB space
r	極座標での径方向位置	Radial position in polar coordinates
R_x, R_y	xおよびy座標方向での曲率半径	Radii of curvature along the x and y axes
$R(\lambda)$	熱網膜障害重み関数	Thermal retinal hazard function
$\bar{r}(\lambda)$	CIE RGB空間での等色関数	Color matching function in CIE RGB space
RGP	酸素透過性ハードコンタクトレンズ	Rigid gas permeable
RK	放射状角膜切開術	Radial keratotomy
ROC	曲率半径	Radius of curvature
S	スネレン比	Snellen fraction
$S(\lambda)$	短波長錐体準拠表色	Short-wavelength cone fundamental
SEP	球面等価屈折度	Spherical equivalent power
SF	外科医因子	Surgeon factor
SLO	走査レーザー眼底検査法	Scanning laser ophthalmoscope
SLT	選択的レーザー線維柱帯形成術	Selective laser trabeculoplasty
Sph	球面度数（近遠視度数）	Spherical power
t	厚さ	Thickness
t	露光時間	Exposure time
Td	トローランド単位	Units of troland
U	物体のバージェンス	Object vergence
u^*, u	CIELUV空間での色座標	Color coordinates in CIELUV space
V	像のバージェンス	Image vergence
v^*, v	CIELUV空間での色座標	Color coordinates in CIELUV space
$V(\lambda)$	CIE明視レスポンス	CIE photopic response
$V'(\lambda)$	CIE暗視レスポンス	CIE scotopic response

変数と記号の説明（つづき）

$V^*(\lambda)$	Stockman & Sharpe 矯正明視レスポンス Stockman & Sharpe corrected photopic response
W	波面誤差 Wavefront error
X	CIE XYZ 空間での三刺激値 Tristimulus value in CIE XYZ space
x	CIE XYZ 空間での色度座標 Chromaticity coordinate in CIE XYZ space
x	直角座標の水平方向座標 Horizontal Cartesian coordinate
$\bar{x}(\lambda)$	CIE XYZ 空間での等色関数 Color matching function in CIE XYZ space
Y	CIE XYZ 空間での三刺激値 Tristimulus value in CIE XYZ space
y	CIE XYZ 空間での色度座標 Chromaticity coordinate in CIE XYZ space
y	直角座標での垂直方向座標 Vertical Cartesian coordinate
$\bar{y}(\lambda)$	CIE XYZ 空間での等色関数 Color matching function in CIE XYZ space
Z	CIE XYZ 空間での三刺激値 Tristimulus value in CIE XYZ space
z	CIE XYZ 空間での色度座標 Chromaticity coordinate in CIE XYZ space
z	直角座標での軸方向座標 Axial Cartesian coordinate
$\bar{z}(\lambda)$	CIE XYZ 空間での等色関数 Color matching function in CIE XYZ space
$Z_n^m(\rho, \theta)$	ゼルニケ多項式 Zernike polynomial
Δ	プリズムディオプターの単位 Units of prism diopters
ΔE	CIELAB ならびに CIEUV 空間での色差 Color difference in CIELAB and CIEUV spaces
$\Delta\lambda$	波長の間隔 Wavelength interval
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	直角座標軸方向での変位 Translation along Cartesian axes
Φ, ϕ	屈折力 Power
Φ_a	軸屈折力 Axial power
Φ_i	局所屈折力 Instantaneous power
Φ_v	光束 Luminous flux
$\Phi(\lambda)$	放射パワー Radiometric power
κ_1, κ_2	主曲率 Principal curvatures
λ	波長 Wavelength
θ	極座標での角度 Angle in polar coordinates
ρ	極座標での規格化半径位置 Normalized radial position in polar coordinates
τ	透過 Transmission

眼球 Eyeball



右眼の上面図（頭頂部より見た）

Top View of Right Eye

角膜 cornea — 眼の最前部にある透明な薄い膜。眼が持っている全屈折力の約2/3を受け持っている。

房水 aqueous humor — 角膜と水晶体との間にある前房中の水に近い液体。

虹彩 iris — 眼の開口絞りとして働く色素性ダイヤフラム。

水晶体 crystalline lens — 注目している物体の遠近に応じて、その形状を変化させることのできる分布屈折率レンズ。眼が持っている屈折力の1/3を受け持っている。

硝子体 vitreous humor — 水晶体と網膜との間の後眼房中を満たしているゼリー状の流動体。

網膜 retina — 眼球の内壁にある光を神経信号に変換する感光性を有する面。

中心窩* (ちゅうしんか) fovea — 網膜の中心部にある像分解能の高い部分。

視神經円板 optic disk — 神経線維と血管が眼球に入ってくる場所。「盲点 (blind spot)」とも呼ばれる。

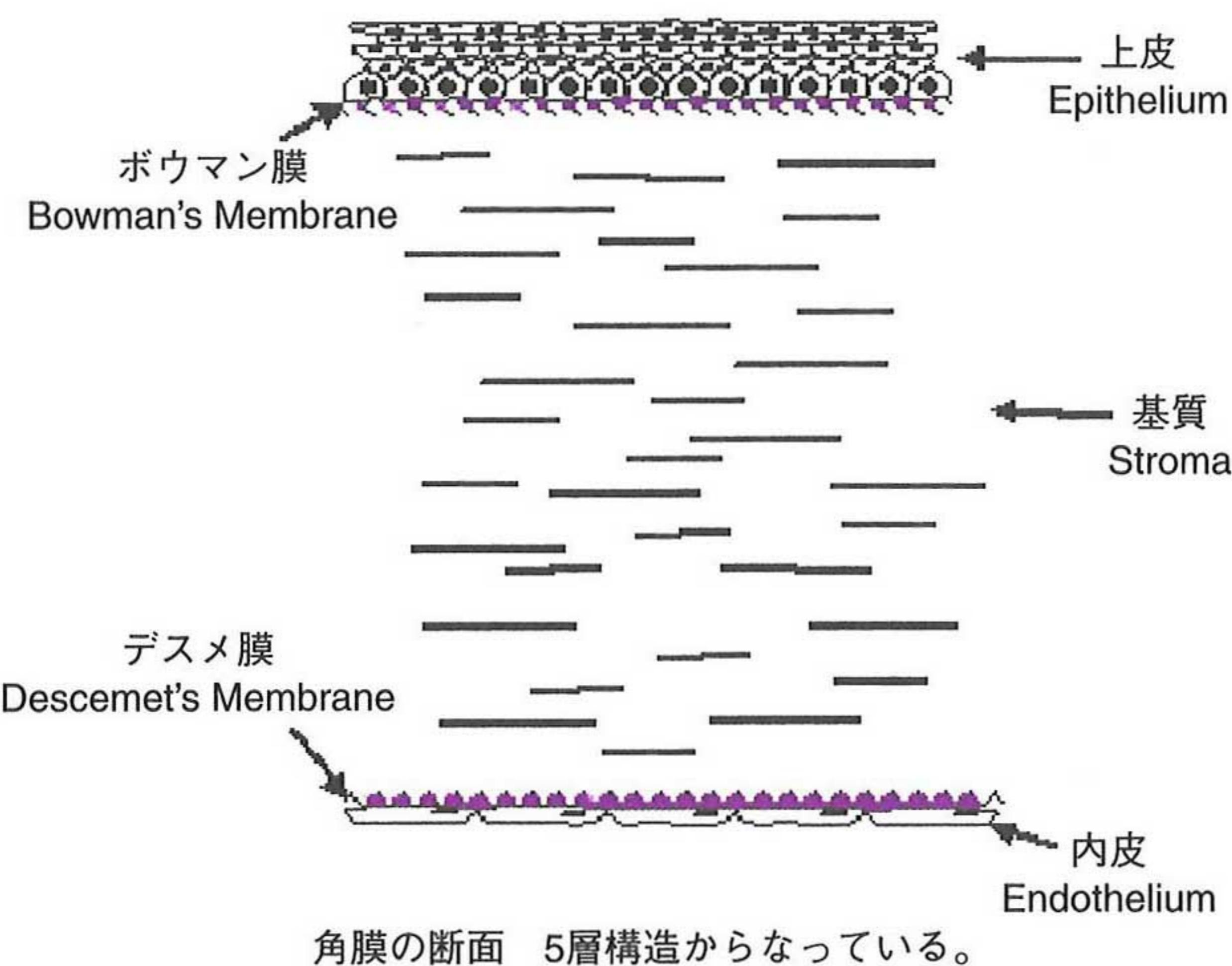
視神經 optic nerve — 網膜から脳へ情報を伝達する神経線維の束。

強膜 sclera — 眼の白い部分。眼球に対して外側保護層の働きをする。

脈絡膜 choroid — 眼球内の迷光を吸収し、網膜を保持する不透明な膜組織。

* 訳注：窩(か)は窪みを意味する。

角膜 Cornea



角膜の断面 5層構造からなっている。

上皮 epithelium – 角膜の最前面には $50 \sim 100\mu\text{m}$ 厚の表面細胞層があり、角膜に異物が入るのを防ぐとともに、酸素を吸収し、その内側にある層に養分を供給している。この細胞層は外傷や手術を受けても速やかに再生する。

ボウマン膜 Bowman's membrane – 約 $12\mu\text{m}$ 厚のコラーゲンの境界層で、上皮とその下にある基質を分けている。

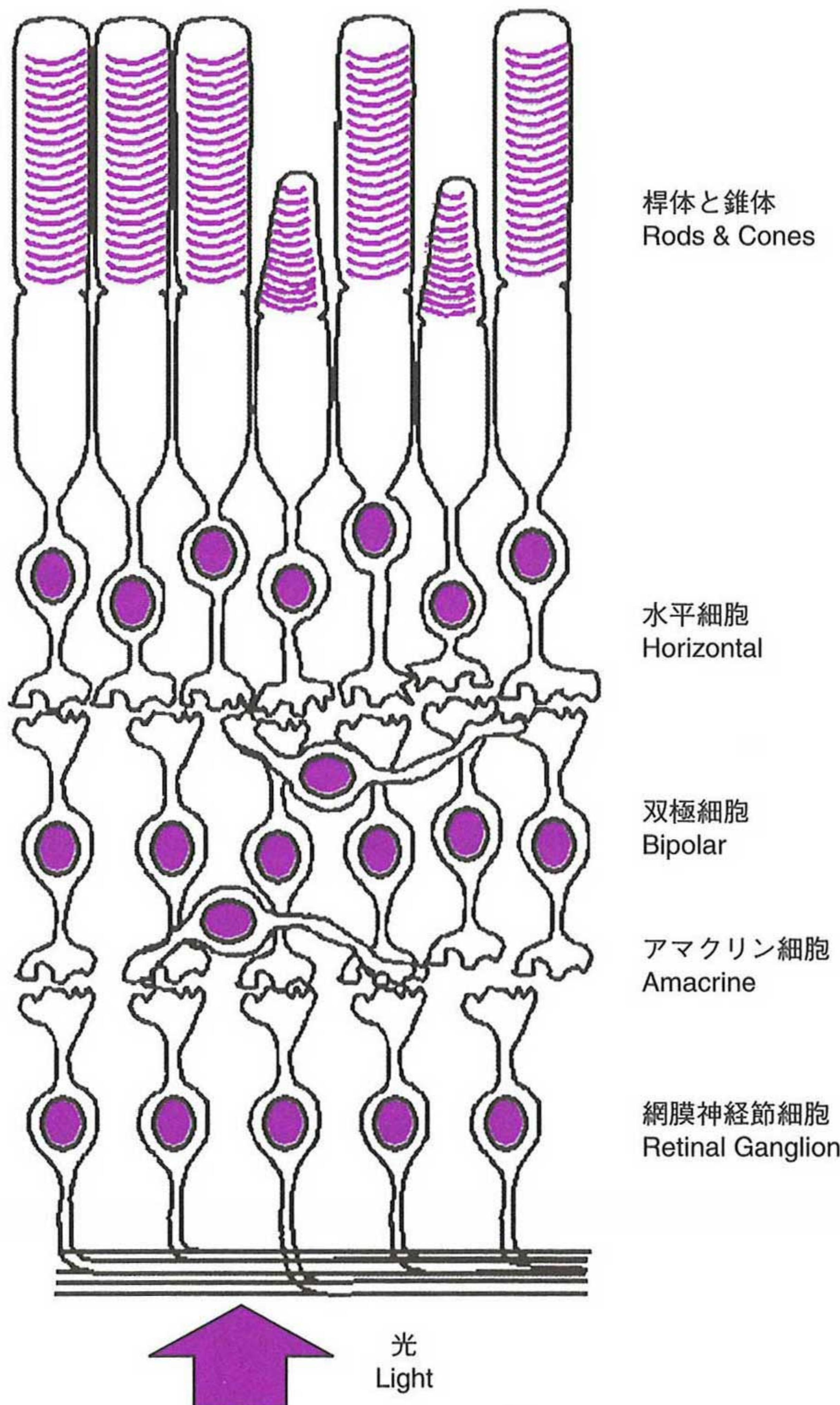
基質 stroma – 角膜内の構成物。主に交差架橋した多くのバンド状のコラーゲンからなる。これらのバンドの配列はある程度規則的で、このことが角膜の透明性を高めるのに寄与している。この基質の厚さは約 $500\mu\text{m}$ である。コラーゲン線維の配列はある程度揃っている。その結果、角膜には複屈折性が存在する。

デスメ膜 Descemet's membrane – 約 4 から $10\mu\text{m}$ 厚のコラーゲンの境界層で、次の内皮と上述の基質とを隔てている。

内皮 endothelium – 角膜の後端部にあって、角膜への栄養補給をコントロールするとともに、角膜からの水を排出して角膜の透明性を保っている厚さ $5\mu\text{m}$ の表面層。上皮細胞とは違って、内皮細胞は再生しない。

角膜は直接の血液の補給ルートを持たないので、角膜への栄養補給と老廃物の交換は角膜の表面と裏面を通じてなされる。従って、これら物質輸送機構についての損傷や障害は、角膜の水腫（はれ）や失透を引き起こすことになる。

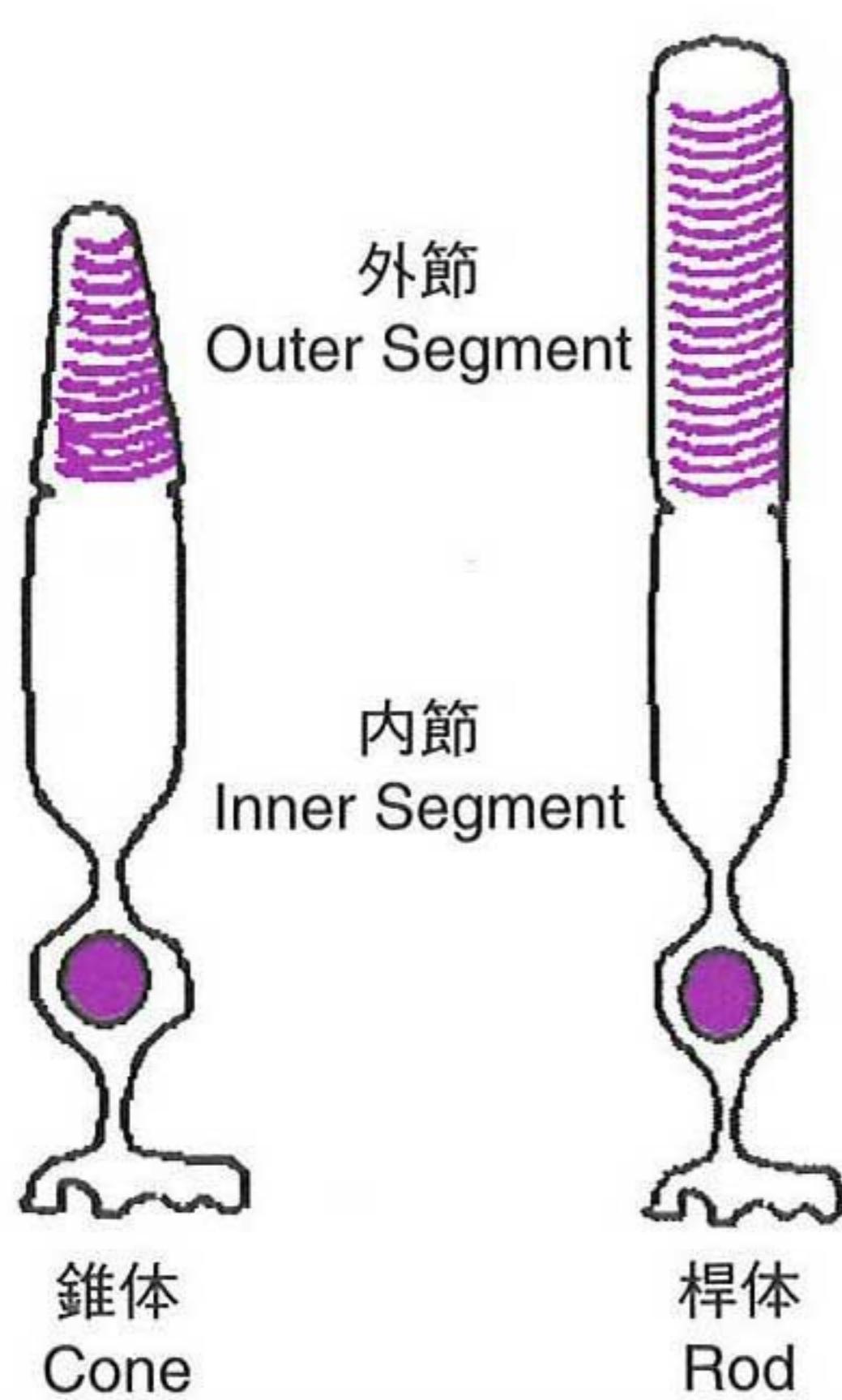
網膜 Retina



光は多重の細胞層を通して**視細胞（光受容体） photoreceptor**に達する。光が視細胞に吸収されると、そこからシグナル^{*}が発せられる。シグナルは**双極細胞 bipolar cells**を通って、**網膜神經節細胞 retinal ganglion cells**に達する。シグナルはそこからさらに脳に送られ、シグナル処理される。**アマクリン細胞 amacrine cells**と**水平細胞 horizontal cells**は近くの細胞との相互のシグナル交換を可能としている。

*訳注：シグナルの実体は電気化学的伝達（次ページ参照）

視細胞（光受容体） Photoreceptors



網膜には、錐体 cone と桿体 rod の二種類の視細胞が存在する。錐体は昼間の視覚を担っており、一方、桿体は暗い所での視覚を担当している。錐体は L, M, S の三つのタイプに分けられる (L は長波長, M は中波長, S は短波長を表している)。これら三種類の錐体は、それぞれ、可視スペクトルの違った部分に反応し、その結果、色を含む視覚が形成される。また、桿体は錐体とは異なったスペクトル感度を持っている。視細胞は光を検知するための特別の細胞であり、細胞核をその中に含む外顆粒層 outer nuclear layer と細胞の機構を包んでいる内節 inner segment, ならびに感光性色素を含む外節 outer segment からなっている。桿体の外節は、ロドプシン分子で満たされた多数の積み重なった小円盤でできている。一方、錐体の外節は、円錐状に巻かれたひと続きの螺旋体ででき正在して、桿体と同じ感光性分子を含んでいる。これら外節は、いずれもフォトンを吸収する。この吸収によって、それらの細胞と神経細胞を通じて脳にまで達する電気化学的伝達が開始される。

錐体 Cones

- 色を含む視覚
- 暗所での感度なし
- 明るい光に反応
- 遅い時間応答
- 大部分は中心窩にある
- 網膜周辺部には少ない
- 高い視力
- 中心窩では錐体ごとに神経細胞

桿体 Rods

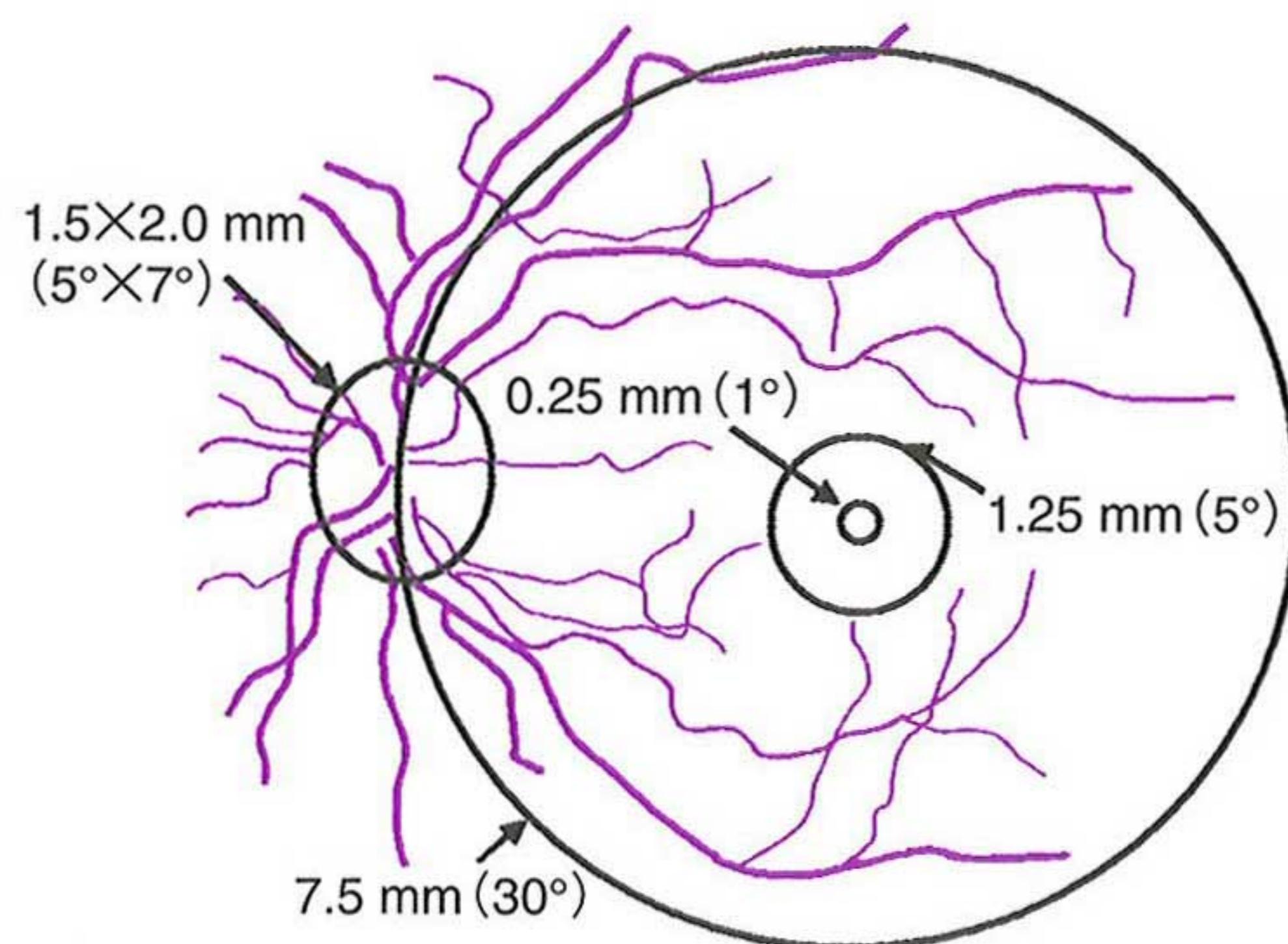
- 単色の視覚
- 暗所で高感度
- 明るい光に対して飽和する
- 速い時間応答
- 大部分は周辺部にある
- 中心窩にはない
- 低い視力
- 一本の神経細胞に多くの桿体がつく

錐体の直径は中心窩では約 $2.5\mu\text{m}$ で、中心窩の外では急速にその直径を増し、周辺部では $10\mu\text{m}$ にもなる。桿体の直径は 18° までの視野角に対しては約 $3\mu\text{m}$ であるが、周辺部にかけてそのサイズが大きくなり、周辺部で $5.5\mu\text{m}$ になる。網膜の中央部 $200\mu\text{m}$ の範囲には桿体は存在しない。網膜上には約 1 億 2,500 万の桿体があり、錐体の総数は 640 万に達する。

網膜のランドマーク（座標）

Retinal Landmarks

眼を覗き込むと、網膜の表面に血管の走っているのが見える。血管は**視神経乳頭 optic nerve head**と呼ばれる楕円形の領域から広がっているように見える。視神経乳頭は眼底の鼻側の端にある。その物理的な大きさは約 $1.5 \times 2.0\text{ mm}$ で、(眼球屈折力の)後側節点から $5^\circ \times 7^\circ$ の広がり角を持っている。血管は直径約 1.5 mm の**中心窩 fovea centralis**として知られる無血管領域の周りに沿ってカーブを描いて広がっている。網膜中心窩の中心には、僅か 0.25 mm の直径を持つ**中心小窩 foveola**と呼ばれる部分がある。下の図は網膜上の血管の配置を、寸法と角度範囲を示す座標（ランドマーク）とともに示したものである。



アムスラーグリッド Amsler gridは、黄斑機能の初期的な問題を簡単に判定するための道具である一辺 5 mm の正方形が、縦20個×横20個並んだ格子できている。この格子を通常の読書位置に保持すると、それは約 20° の視角を与えることになる。この格子の網膜上への投影は下図のように見える。

