—原 著—

ウサギ水晶体線維微細構造発育の走査電子顕微鏡的研究

堀田 一樹

日本医科大学眼科学教室

Scanning electron microscopic study of the development of crystalline lens fiber

Kazuki Hotta

Department of Ophthalmology, Nippon Medical School

To elucidate the 3-dimensional structural development of the albino rabbit lens fiber, and to study how cataracts affect these fibers, the lenses from rabbits 1, 2, 4, and 8 weeks old, and from 8 week old rabbits with cataracts caused by naphthalene were examined with a scanning electron microscope.

The results were:

1) Normal rabbit:

The ratio of the length of the anterior suture line to the diameter of the lens gradually rose from 1 to 4 weeks and then reached a plateau. The ratio of the length of the posterior suture line was constant from the first week on.

Fibers were wider in lenses from older rabbits, except for those in the middle of the suture line.

Ball-and-socket junctions were common on the anterior side and were concentrated in the area of the paraanterior suture line of lenses from older animals.

The lateral large processes were only noted near the anterior suture line, and in extended direction from its end.

The likelihood of finding edge processes, especially in the area of middle anterior and posterior sections, rose with age.

2) Rabbit exposed to Naphthalene:

The rate of increase of the length of the anterior suture line and the diameter of the lens were both low, but their ratio did not differ from that of a normal rabbit's lens. On the contrary, the growth rate of the posterior suture line was much greater than that of the diameter.

The peculiarity of distribution of edge processes and width found in normal lens fibers was not found in naphthalene-affected fibers.

Key words: scanning electron microscope, rabbit lens fiber, suture line, naphthalene cataract, lens fiber processes

緒 言

水晶体線維の構造については、光学顕微鏡、透過型電子顕微鏡、走査型電子顕微鏡により詳細な研究が行われ、その形態学的特徴が明らかにされ

Correspondence to Kazuki Hotta, Department of Ophthalmology, Nippon Medical School Hospital, 1-1-5 Sendagi, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

Fig. 1 Names of lens fiber processes

てきた¹⁻⁶⁾。松戸¹⁾や、Harding ら³⁾によれば、棘突起 (ball and socket junctions)、稜突起 (edge processes)、側方突起 (lateral large processes) などの微細突起構造が認められたという (Fig. 1)。しかし、それぞれの水晶体内における役割についてはいまだ不明な点が多く、その発達過程や病変における機能と形態の変化についてはいまだ想像の域を脱していない。

また、成熟ウサギの水晶体を用い、皮質や核の各層について突起の形状や発達過程について走査型電子顕微鏡により観察し各突起の役割を推測した報告をいくつか認めるが^{1,3,7,8)}、水晶体線維そのものと同様、加齢にともなう成長を考慮した報告は殆どない。

また、ヒト水晶体には前極に Y 字、後極に逆 Y 字型の縫合線を認めるが、ウサギ水晶体には前極に垂直な | 型、後極に水平な一型の縫合線を認める⁹⁾。つまりヒトでは極から放射状に 3 本、ウサギでは 2 本の縫合線を前後の極で直交するように有

しているとも考えられる。未熟な水晶体線維は縫合線に達しないが、成熟水晶体線維は両極縫合線に達する。一極の縫合線の極寄中心に発した線維は他極の縫合線の末端に終り、一極の縫合線の末端に発した線維は他極の極寄中心に終わる。水晶体線維を細胞レベルでの同一世代線維として論ずるには一線維を前極から後極まで連続して観察することが望ましいが、このような立体構造を有するため、光学顕微鏡や透過型電子顕微鏡による検査では限界がある。

そこで今回、著者はこのような立体構造を考慮しながら週齢ごとにウサギの水晶体線維の微細構造を走査型電子顕微鏡を用いて観察した。また、水晶体の病的状態を観察する目的で、特にナフタレン白内障を惹起したウサギを用い、同様の手法により観察し興味ある知見を得たのでここに報告する。

研究材料および方法

(1) 正常ウサギ水晶体

対象は日本白色ウサギ、週齢 1 週、2 週、4 週、および 8 週の各 5 羽 10 眼計 40 眼とした。検体は摘出後直ちに水晶体単体とし 2.5% グルタルアルデヒドにて 1 週間一次固定を行い、鉗子にて前極における最表層の線維を前縫合線より後縫合線まで連続して剥離した。さらに 1 週間 2.5% グルタルアルデヒドで固定後、1% オスミウム酸にて 5 分間二次固定を行い、系列エタノールにて脱水を行った。日立 HCP-2 臨界点乾燥装置にて臨界点乾燥後、日立 E 102 イオンスパッター装置にて Pt・Pd 蒸着を施し、日立 S 570 型走査型電子顕微鏡にて観察を行った。

観察は、前縫合線における中心部に発する線維 (A)、以下中心線維、末端部に発する線維 (B)、以下末端線維およびその中間部に発する線維 (C)、以下中間線維の 3 種類に分けそれぞれ前縫合線周囲、前極側中間部、赤道部、後極側中間部、後縫合線周囲の 5 点 (一眼につき 15 点) で行った (Fig. 2)。

(2) ナフタレン白内障ウサギ水晶体

ナフタレン投与群はあらかじめ週齢 6 週の時点

Fig. 2 Examined points
(A) central fiber (B) terminal fiber (C) intermediate fiber

において 20% ナフタレン流動パラフィン溶液を体重 1 kg あたり 2.0 g の割合で、胃カテーテルを用い、経口的に 2 日間連続投与し検眼鏡的に水晶

体の混濁を確認後、8 週齢にて屠殺したもの 5 羽 10 眼を用い同様の手法で観察した。

対照群には前項 (1) 正常ウサギ水晶体における 8 週齢の結果をもってこれに当てた。

結 果

1. 正常ウサギ水晶体

(1) 縫合線

前縫合線、後縫合線とも週齢に伴って延長して行くが、特に前縫合線の直径に占める割合は 4 週齢までに急速にその率を増して一定化した。後縫合線は生後 1 週よりすでに高い比率で変化は少なかった (Table 1, Graph 1)。

(2) 突起の種類

稜突起はすべての週齢、観察点でよく発達していたが棘突起、側方突起は週齢、観察点によりその発達にかなりの差を認めた。

棘突起は各週齢を通じて前極側に良く発達し、加齢とともに分布域は縫合線周囲に集中する傾向があった (Table 2)。

側方突起は縫合線周囲とその延長線上にのみ観察されたが、前縫合線周囲に比べ後縫合線周囲で側方突起の発達は悪かった (Table 3)。

Graph 1 Ratio of suture line length to diameter of lens

The ratio of the anterior suture line to the diameter of the lens gradually rises through 1 to 4 weeks and then reaches the plateau. The ratio of the posterior suture line is constant from the first week.

Table 1 Suture ling length and diameter of lens

age	1 W	2 W	4 W	8 W
(1) anterior suture line (mm)	0.72 ± 0.07	1.38 ± 0.28	2.51 ± 0.26	3.56 ± 0.36
(2) posterior suture line (mm)	1.27 ± 0.14	1.79 ± 0.12	2.18 ± 0.32	3.31 ± 0.22
(3) diameter (mm)	2.36 ± 0.33	3.15 ± 0.20	3.74 ± 0.18	5.36 ± 0.34
(1) / (3)	0.32 ± 0.06	0.44 ± 0.11	0.67 ± 0.08	0.67 ± 0.07
(2) / (3)	0.56 ± 0.06	0.57 ± 0.06	0.59 ± 0.09	0.62 ± 0.03

Table 2 Distribution of ball and socket junction

age	central fiber				intermediate fiber				terminal fiber			
	1 W	2 W	4 W	8 W	1 W	2 W	4 W	8 W	1 W	2 W	4 W	8 W
anterior suture line area	1	0	4	3	1	0	3	2	0	0	1	2
middle anterior area	4	3	0	0	3	2	1	0	3	2	0	3
equator	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
middle posterior area	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
posterior suture line area	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0

0 ; none, 1 ; one, 2 ; less than 5, 3 ; less than 10, 4 ; more than 10 balls were noted in 10 μ m square

Table 3 Distribution of lateral large processes (μ m)

age	central fiber				intermediate fiber				terminal fiber			
	1 W	2 W	4 W	8 W	1 W	2 W	4 W	8 W	1 W	2 W	4 W	8 W
anterior suture line area	15	30	30	40	10	30	30	40	20	250	600	800
posterior suture line area	5	10	15	15	5	5	15	15	—	10	10	15

Variation in distance of lateral large processes from suture line

Table 4 Width of lens fibers (μ m)

central fiber	1 W	2 W	4 W	8 W
anterior suture line area	1.88 ± 0.18	2.02 ± 0.21	2.41 ± 0.37	2.43 ± 0.38
middle anterior area	3.36 ± 0.26	4.00 ± 0.42	4.10 ± 0.27	3.92 ± 0.31
equator	5.31 ± 0.55	5.25 ± 0.26	5.24 ± 0.25	6.07 ± 0.38
middle posterior area	4.47 ± 0.31	3.99 ± 0.47	4.54 ± 0.36	4.65 ± 0.22
posterior suture line area	2.50 ± 0.38	2.51 ± 0.28	2.58 ± 0.30	3.64 ± 0.56
intermediate fiber	1 W	2 W	4 W	8 W
anterior suture line area	1.67 ± 0.21	1.85 ± 0.22	2.39 ± 0.35	2.58 ± 0.15
middle anterior area	3.09 ± 0.48	3.49 ± 0.22	3.62 ± 0.32	3.50 ± 0.45
equator	4.98 ± 0.28	5.03 ± 0.37	5.19 ± 0.32	5.30 ± 0.23
middle posterior area	3.83 ± 0.39	3.61 ± 0.29	3.99 ± 0.36	4.40 ± 0.40
posterior suture line area	2.77 ± 0.33	2.22 ± 0.13	2.23 ± 0.35	2.19 ± 0.24
terminal fiber	1 W	2 W	4 W	8 W
anterior suture line area	1.35 ± 0.18	1.59 ± 0.16	3.40 ± 0.51	3.57 ± 0.52
middle anterior area	2.65 ± 0.28	3.65 ± 0.32	4.52 ± 0.59	5.42 ± 0.64
equator	4.71 ± 0.35	5.12 ± 0.32	5.32 ± 0.38	6.17 ± 0.31
middle posterior area	3.65 ± 0.38	3.82 ± 0.35	4.13 ± 0.42	4.61 ± 0.52
posterior suture line area	2.54 ± 0.18	2.03 ± 0.16	2.17 ± 0.15	2.36 ± 0.29

Graph 2 Width of fibers (μm)

Width of fibers increases in aged rabbit lens except the fibers that reach in the middle of suture line.

Graph 3 Width of fibers (μm)

Central fiber reach the end of anterior suture line and terminal fiber dose that of posterior suture line. Width of lens fiber around the end of suture line rapidly becomes wider than the others.

Table 5 Interval of edge processes (μm)

central fiber	1 W	2 W	4 W	8 W
anterior suture line area	0.97 ± 0.17	0.76 ± 0.03	0.72 ± 0.10	0.82 ± 0.10
middle anterior area	1.03 ± 0.16	0.86 ± 0.08	0.76 ± 0.07	0.69 ± 0.05
equator	2.35 ± 0.40	1.47 ± 0.31	1.34 ± 0.22	0.93 ± 0.13
middle posterior area	1.51 ± 0.19	1.41 ± 0.23	1.18 ± 0.14	0.86 ± 0.10
posterior suture line area	1.27 ± 0.23	1.13 ± 0.18	1.15 ± 0.17	0.93 ± 0.18
intermediate fiber	1 W	2 W	4 W	8 W
anterior suture line area	0.86 ± 0.06	0.80 ± 0.16	0.75 ± 0.08	0.76 ± 0.08
middle anterior area	1.05 ± 0.18	0.87 ± 0.07	0.77 ± 0.07	0.75 ± 0.05
equator	2.47 ± 0.31	1.37 ± 0.19	1.10 ± 0.16	0.99 ± 0.10
middle posterior area	1.62 ± 0.37	1.26 ± 0.28	0.94 ± 0.23	0.84 ± 0.17
posterior suture line area	0.94 ± 0.07	1.03 ± 0.14	1.22 ± 0.23	1.08 ± 0.20
terminal fiber	1 W	2 W	4 W	8 W
anterior suture line area	0.92 ± 0.10	0.84 ± 0.12	0.70 ± 0.09	0.64 ± 0.11
middle anterior area	0.98 ± 0.15	0.81 ± 0.09	0.61 ± 0.06	0.59 ± 0.10
equator	2.18 ± 0.42	1.42 ± 0.24	1.12 ± 0.22	1.06 ± 0.10
middle posterior area	1.65 ± 0.35	1.32 ± 0.16	0.97 ± 0.16	0.93 ± 0.16
posterior suture line area	1.02 ± 0.12	1.11 ± 0.11	1.13 ± 0.30	1.21 ± 0.21

Graph 4 Interval of edge processes (μm)

The likelihood of finding edge processes, especially in the area of middle anterior and posterior sections, rises with age.

(3) 線維径

中間部線維では週齢による線維径の変化は比較的少なく、中心線維と末端線維では赤道部付近と前、後縫合線末端付近で週齢による発育が顕著であった（注、前縫合線における中心線維は後縫合線末端に終わっていることに注意されたい）（Table 4, Graph 2, 3）.

(4) 稜突起間隔の分布

稜突起の間隔（1/密度）は加齢にともない密になる傾向があった。特に赤道部、中間部ではその傾向が強く、成長にともない横軸に測定点、縦軸に突起間隔で作成したグラフ上で逆V字型から右上がりのW字型を示すようになった（Table 5, Graph 4）.

2. ナフタレン白内障水晶体

(1) 体重、縫合線

ナフタレン投与による体重の変化には有意差を認めない。直径は有意に減少し水晶体の発育不全がうかがわれる。直径に占める縫合線の割合は、後縫合線において有意に増加している（Table 6）.

(2) 線維径

ナフタレン投与により線維径は赤道部付近で有意に減少する傾向があり、逆に前極付近では増加する傾向が見られるが、各線維間で若干異なる変化を示す（Table 7）.

(3) 稜突起間隔

ナフタレン投与による稜突起間隔の変化は全体として前極側に強く、特に前極中間部付近において間隔の延長が顕著である（Table 8）.

なお、重複を避け、簡潔に記載するため、Graph 5~8, Fig. 3~8, およびすべてのPhotosで示される結果については、次項の考察で述べられる。

Table 6 Suture line ratio against diameter

	control	naphthalene
weight (g)	1,417±93.0	1,430±97.0
diameter (mm)	5.36±0.34	4.78±0.40 ^{*1}
anterior suture line ratio	0.67±0.07	0.69±0.06
posterior suture line ratio	0.62±0.03	0.77±0.06 ^{*2}

^{*1}: p<0.01 t-test, ^{*2}: p<0.001 Cochran-Cox-test

Table 7 Width of lens fibers (μm)

central fiber	control	naphthalene
anterior suture line area	2.43±0.38	2.80±0.25 ^{*1}
middle anterior area	3.92±0.31	3.94±0.33
equator	6.07±0.38	5.66±0.29 ^{*1}
middle posterior area	4.65±0.22	4.86±0.25
posterior suture line area	3.64±0.56	3.43±0.87
intermediate fiber	control	naphthalene
anterior suture line area	2.58±0.15	2.97±0.27 ^{*4}
middle anterior area	3.50±0.45	3.34±0.41
equator	5.30±0.23	4.80±0.15 ^{*2}
middle posterior area	4.40±0.40	4.40±0.38
posterior suture line area	2.19±0.24	2.43±0.38
terminal fiber	control	naphthalene
anterior suture line area	3.57±0.52	3.91±0.35
middle anterior area	5.42±0.64	4.61±0.41 ^{*2}
equator	6.17±0.31	5.43±0.35 ^{*3}
middle posterior area	4.61±0.51	4.13±0.36 ^{*1}
posterior suture line area	2.36±0.29	2.31±0.28

^{*1}: p<0.05 t-test, ^{*2}: p<0.01 t-test, ^{*3}: p<0.001 t-test,

^{*4}: p<0.01 Cochran-Cox-test

Table 8 Interval of edge processes (μm)

central fiber	control	naphthalene
anterior suture line area	0.82±0.10	0.67±0.10 ^{*1}
middle anterior area	0.69±0.05	0.86±0.06 ^{*2}
equator	0.93±0.13	1.02±0.08
middle posterior area	0.86±0.10	0.92±0.18
posterior suture line area	0.93±0.18	0.84±0.07
intermediate fiber	control	naphthalene
anterior suture line area	0.76±0.08	0.78±0.06
middle anterior area	0.75±0.05	0.83±0.06 ^{*1}
equator	0.99±0.10	0.96±0.06
middle posterior area	0.84±0.17	0.98±0.17
posterior suture line area	1.08±0.20	0.95±0.12
terminal fiber	control	naphthalene
anterior suture line area	0.64±0.11	0.84±0.08 ^{*2}
middle anterior area	0.59±0.10	0.86±0.16 ^{*2}
equator	1.06±0.10	0.95±0.08 ^{*3}
middle posterior area	0.93±0.16	0.94±0.16
posterior suture line area	1.21±0.21	0.98±0.11

^{*1}: p<0.01 t-test, ^{*2}: p<0.001 t-test, ^{*3}: p<0.005 t-test

Graph 5 Lens fiber width of normal 8 weeks rabbit (μm)

The peculiarity of lens fiber width found in normal lens fibers is not obvious in naphthalene-affected fibers.

Graph 6 Lens fiber width of naphthalene 8 weeks rabbit (μm)

Graph 7 Interval of edge processes of normal 8 weeks rabbit (μm)

The peculiarity of distribution of edge processes found in normal lens fibers is not found in naphthalene-affected fibers.

Graph 8 Interval of edge processes of naphthalene 8 weeks rabbit (μm)

考 察

従来のウサギ水晶体の突起構造の報告では、Harding ら³⁾、Willkens ら⁷⁾、松戸¹⁰⁾の報告がある

がこれらはすべて線維層の深さによる分類、あるいは極から赤道部にかけての遠心線上の位置関係による分類のみで、縫合線の発育に伴う各線維間の特異性については考慮されていなかった。また、

唯一、縫合線との位置関係を考慮して観察を行った三浦⁸⁾の報告でも縫合線の発育に伴う変化までは観察されておらず、広範囲に分布する稜突起の発達度についても、漠然とした比較のみで、統計処理による詳細な比較はなされてこなかった。それに対して今回著者は、縫合線との位置関係から水晶体線維を分類し、しかも縫合線の発育に伴う変化を観察して、まったく新しい知見を得ることができた。

1. 正常ウサギ水晶体

(1) 縫合線

水晶体縫合線は水晶体線維走行を規定する基本構造となっているが、その直径に占める割合は成長とともに増加していくことがわかる (Fig. 3)。

縫合線の延長にともない、極の一点に集中することなく水晶体線維はその数を増すことができるが、同時に線維走行の変化をもたらす。すなわち、若齢では縫合線が未発達で短く、水晶体線維は比較的点对称の車軸状線維走行を示すのに対し、加齢にともない縫合線は延長して点对称性は崩れ、縫合線上のどの位置に接続する線維かにより、その走行は特異性を持つようになる (Fig. 3, Photo 1, 2)。

前縫合線中心部に発した線維は直線的に赤道部をまわりこみ、後極側で急激に角度を変えて後縫合線末端に終わり、逆に前縫合線末端に発した線維は急激に角度を変えながら赤道部に達した後極側で直線的に後縫合線中心部に達する (Fig. 4,

Fig. 3 Profile of suture line and lens fibers young lens (left) and adult lens (right)

Young rabbit lens has short suture line and axle-like figure.

Suture line is enlarged and axle like figure disappears in lenses from older animals.

Photo 1 Whole view of anterior side of 2 weeks lens
The suture line is short and each fiber spreads like an axle (normal rabbit lens).
Calibration bar : 1 mm, $\times 30$

Photo 2 Whole view of anterior side of 8 weeks lens
Suture line is enlarged and axle like proportion disappears (normal rabbit lens).
Calibration bar : 1 mm, $\times 20$.

Fig. 4 Patterns of lens fibers in different areas
(left) central fiber (mid.) intermediate
fiber (right) terminal fiber

Photo 3 End of lens suture line of 8 weeks lens
The fibers curve rapidly near the suture
line and go to the equator (normal rab-
bit lens). Calibration bar : 100 μ m, $\times 200$

Photo 3, 4). 前縫合線中間部に発する線維は縫合線に対して垂直に発したあと緩やかに彎曲しながら赤道部に達し、後極側でも同様に彎曲しながら後縫合線に達する。すなわち、経線矢状断面に対するねじれの状態は、前後縫合線末端周囲で極めて強く、また前縫合線中間部に発した線維は赤道部付近を除き、その走行のほとんどが経線矢状断面に対して緩やかなねじれの位置にある。このことは水晶体線維の径および水晶体の形態変化にともなう各線維間のずれに対する突起の種類、密度の分布を評価するときに重要な点であるといえ

Photo 4 Center of anterior suture line of 8 weeks lens
Fibers go straight to the equator after launch from suture line (normal rabbit lens). Calibration bar : 100 μ m, $\times 200$

る。

(2) 突起の種類

棘突起の分布はかなり特殊な型を示していた。各週齢を通じて赤道部、後極側には、発現率が極めて低く、若週齢では前極側中間部、加週齢では前縫合線周囲およびその延長線上に高率に観察された (**Fig. 5**)。

このことは縫合線の発育にともない棘突起の分布が縫合線周囲に集中してくることを示している。

一方側方突起の分布は各週齢を通じて前、後縫合線周囲と加週齢の前縫合線の延長線上にのみ認められた (**Fig. 6, Photo 6**)。

これらのことから棘突起および側方突起は何らかの形で縫合線の構造、あるいは機能と関係を持った突起であることが推測される。特に発育にともなう分布域の変化と突起そのものの一対一対応 (ball and socket) の構造 (**Photo 5**) を考えると、棘突起は縫合線周辺の生化学的的特殊性に、

Fig. 5 Distribution of ball and socket junctions (left) young (right) adult

Ball-and-socket junctions are common on the anterior side and concentrated in the area of the para-anterior suture line of lenses from older animals

Fig. 6 Distribution of lateral large processes (left) young (right) adult

The lateral large processes are only noted near the anterior suture line, and in extended direction from its end.

Photo 5 Ball and socket junctions around anterior suture line of 8 weeks lens

Balls and sockets which correspond to each other are recognized (normal rabbit lens). Calibration bar : 4 μm , $\times 7,000$

Photo 6 Lateral large processes around anterior suture line of 4 weeks lens

Lateral large processes is well noted in extended direction from suture line end (normal rabbit lens). Calibration bar : 25 μm , $\times 1,200$

より深く関与していることが示唆される。Gorthy ら¹¹⁾の報告でも縫合線で ion-link fluid transport が活発に行われているとされているが、縫合線の発育に呼応して棘突起が、その分布を縫合線周囲に移動させていることは、単なる構造物としての突起であること以外に、縫合線付近におけるある種の情報伝達に深く関与する突起であることを想

像させる。一方側方突起は、縫合線の未発達な時期にも縫合線周囲の極狭い範囲に分布し、縫合線の発達にともない点対称から線対称へと変化する水晶体線維走行の対称軸に沿った分布を示すようになる。これは調節による水晶体の変形時、非点対称性によって生じた縫合線上にかかる歪みの力

Fig. 7 Pattern of intermediate fiber
Arrow indicate the equator, center of the twist.

に対応する結合力を側方突起がになっていると考えられる。

(3) 線維径

赤道部付近で中間線維の線維径は他の線維に比べて肥大しない傾向にあったが、これは中間線維の走行上、赤道部がねじれの中心にあることと関連があるように思われる (Fig. 7)。しかし、同様に強いねじれの中心にある前、後縫合線末端部付

近の線維が週齢にともない急激にその径を増すことは、単純に赤道部からの相対的な距離が短くなること (縫合線末端部が週齢にともない水晶体の中心部から赤道部へ移動していること) に起因しているものと考えられる。

(4) 稜突起間隔の分布

Willekens ら⁷⁾の報告では稜突起を線維間結合の主要構成要素と推測している。今回の観察では、前、後縫合線付近の稜突起は若齢からすでに高密度に発達していて、加齢による変化が少ないのに対し、赤道部付近では若齢で疎な間隔に存在していたものが、成長にともない急激に密度を増していた。これらのことは稜突起が水晶体線維の進展および成熟の両面において高密度化して行くことを示している。稜突起の存在が水晶体の広範囲におよんでいることと併せ、やはりこの稜突起が水晶体形態維持の基幹をなすものであることが示唆

Photo 7 Edge processes in the area of middle anterior side of 8 weeks lens (low magnification view)
In constant intervals, edge processes are noted (normal rabbit lens). Calibration bar: 7 μm , $\times 4,000$

Photo 8 Edge processes in the area of middle anterior side of 8 weeks lens (high magnification view)
Structure of edge processes seems preventing fiber from sliding (normal rabbit lens). Calibration bar: 2 μm , $\times 13,000$

Fig. 8 Lenticular shape change with accommodation
Lens fiber slides most at the area of middle anterior side.

される。

また、稜突起はその解剖学的形態から、線維の軸方向のずれに抗する働きが最も強いものと推測されるが(Photo 7, 8), 調節による形態変化の影響は前極側に強いこと、極部や赤道部よりもむしろ山間部の方が線維軸方向の力を強く受けることなどを考えると加齢の稜突起の間隔(1/密度)がグラフ上、右上がりのW字型を示したこと(中間部の稜突起密度が高いことを意味する)は、その裏付けになるものと思われる(Fig. 8)。

すなわち、成熟による調節機能の発達にともない、線維軸方向のずれを防ぐ目的で稜突起は発達すると考えられる。

2. ナフタレン白内障水晶体

(1) 縫合線

水晶体直径の有意な減少に対して前縫合線直径比は保たれ、後縫合線直径比は増加していることがわかる。しかし、この結果から直ちに後極側の病的変化が前極側よりも強いのかという判断には至れない。むしろ前縫合線の延長が抑制され、後縫合線の発育は保たれたとの見方もできる。実際、対照群とナフタレン投与群との間で後縫合線実測値については有意な差は認められなかった。しかし、直径と、直径に占める縫合線の割合という比率上の変化は、それ自身が原因であれ結果であれ水晶体線維微小構造に何らかの変化がもたらされている可能性を示唆している。

(2) 水晶体線維径

中心線維および中間線維においては前極縫合線周囲において線維径が増加し、赤道部付近におい

Photo 9 Fibers in middle anterior side of 8 weeks lens
Width of lens fibers are regular (normal rabbit lens). Calibration bar: 10 μ m, $\times 2,200$

Photo 10 Cross sections of 8 weeks middle anterior side lens fibers
Honey comb pattern resist vertical sliding of fibers (normal rabbit lens). Calibration bar: 10 μ m, $\times 2,500$

Photo 11 Edge processes of naphthalene affected 8 weeks lens fiber
Abnormally swollen edge processes appeared (naphthalene cataract). Calibration bar: 3 μm , $\times 10,000$

Photo 12 Width of naphthalene affected 8 weeks lens fiber
Some of lens fibers were disordered in width (naphthalene cataract). Calibration bar: 10 μm , $\times 2,500$

ては逆に減少している。また、末端線維では前極中間部付近から赤道部、後極中間部付近にかけて有意に線維径が減少している。一見極性のない無秩序な変化のように見えるが統計処理により一定の傾向がうかがわれる (Graph 5, 6)。すなわち、グラフ上で、各線維間の特徴は多少保たれているものの、コントロール群に比較してナフタレン投与群では赤道部付近の頂点は下がり、逆 V 字型の裾は上昇し、結果として測定点による線維径の差が縮小していることが判る。

(3) 稜突起間隔

ナフタレン投与による稜突起間隔の変化は全体として前極側に強く、特に前極中間部付近において間隔の延長が顕著であったが、中心線維の前極縫合線付近と末端線維の赤道部付近で線維間隔は密になっている。稜突起間隔についても各線維間で若干異なった変化を示しているが、やはり統計処理によってその一定の傾向が顕著になる (Graph 7, 8)。

ここで既に、正常な稜突起の間隔 (1/密度) は加齢にともない密になる傾向があり、特に赤道部、中間部ではその傾向が強く、成長にともないグラフ上で逆 V 字型から右上がりの W 字型を示すようになること、また稜突起は線維の軸方向のずれに抗する働きが最も強いものと推測され、極部や赤道部よりもむしろ中間部の方が線維軸方向の力を強く受けることなどが稜突起の間隔 (1/密度) をグラフ上、右上がりの W 字型とする (中間部の稜突起密度が高いことを意味する) と推測したが、ナフタレン投与による稜突起間隔の変化をグラフ上でみると、まず各線維間での特異性が失われていること、また同一線維内での測定点による差 (右上がりの W 字型) が失われていることが判る。これは特に前極中間部における稜突起密度の減少に負うところが多い。結果として若週齢のものともまったく異なった、単調な稜突起密度分布となっている。

これらのことは、おそらく機能的変化を伴った

病的水晶体において稜突起密度分布の特異性が欠如することを示すと同時に、正常水晶体における稜突起密度分布の特異性が多分に機能的に重要な役割を示すことの裏付けにもなると考えられる。

結 論

今回著者は縫合線との位置関係によってウサギ水晶体線維を分類し、実際に週齢に従って最浅層の成熟線維を観察し、特に整然と配列する稜突起については、その発達を統計的に処理をした結果以下のような結論に達した。

1) 縫合線は水晶体の発育とともにその直径に対する比を増し、到達する水晶体線維の数の増加を可能とするが、同時に線維間の特異性を惹起すると考えられた。

2) 棘突起は水晶体の発育にともない、その分布域を縫合線周囲に移し、少なくとも側方突起とは異なって、より深い機能的意義を持つ突起であると考えられた。

3) 側方突起は縫合線延長線方向における強い結合力を有した突起であると考えられた。

4) 水晶体経線矢状断面に対するねじれの線維走行は、線維径の拡大を抑制すると考えられた。

5) 稜突起は調節機能の発達にともない線維軸方向のずれを防ぐ目的で広範に発達すると考えられた。

これらの観察から、それぞれ特有の役割を持った突起がその目的に合った位置、時期に発達し分布すると考えられた。独特な走行パターンの発育を示す各線維の特異性とも関連し、発育過程あるいは病的状態における水晶体線維立体構造変化の解析には、縫合線との位置関係および線維走行を考慮した全体像の把握が必要であると考えられた。

そこで、水晶体線維が病的状態においてどのように変化するかを検討するためにナフタレン白内障を用いて観察し、さらに以下の結論を得た。

1) ナフタレン投与により水晶体直径の発育は阻害されると考えられた。直径に占める前縫合線

の割合は変化しないが、後縫合線の割合は増加すると考えられた。

2) ナフタレン投与により水晶体線維径は各線維間の特異性が弱られ、測定点による線維径の差が縮小すると考えられた。

3) 特に正常水晶体線維において存在する稜突起密度分布の特異性はナフタレン投与により著しく欠如すると考えられた。

以上のことから、正常水晶体において存在する各線維間の特異性維持の破綻と、水晶体の病的状態との関連が強く示唆された。

本稿の要旨は第 11 回関東眼科学会 (1994 年 6 月) ならびに第 32 回北日本眼科学会 (1994 年 7 月) においてそれぞれ報告した。

文 献

- 1) 松戸武夫：人眼水晶体線維構造の走査電顕的研究。日眼会誌, 77, 853~871, 1973.
- 2) 田中敬一：水晶体の形態について。解剖誌, 42, 付9, 1967.
- 3) Harding, C.V., Susan, S., and Murphy, H.: Scanning electron microscopy of the adult rabbit lens. Ophthalmic. Res., 8, 443~455, 1976.
- 4) Sakuragawa, M., Kuwabara, T., Kinoshita, J.H., and Fukui, H.N.: Swelling of lens fiber. Exp. Eye. Res., 21, 381~394, 1975.
- 5) 神部純二, 古田效男, 丸尾 馨, 木村 嗣, 中倉博延, 沢 孝一：人眼水晶体核線維構造の走査電顕所見について。眼紀, 28, 635~643, 1977.
- 6) 松浦啓之：レプリカ法による水晶体線維突起様構造の研究。日眼会誌, 73, 253~259, 1977.
- 7) Willekens, B., and Vrensen, G.: The three-dimensional organization of lens fibers in the rabbit. A scanning electron microscopic reinvestigation. Graefes. Archiv. Ophthalmologie, 216, 275~289, 1981.
- 8) 三浦雅博：正常家兎水晶体線維構造の走査電顕的研究。日眼会誌, 93, 1062~1067, 1981.
- 9) Duke-Elder, S.: System of ophthalmology. vol. II. The anatomy of the visual system, p. 322~323, 1976.
- 10) 松戸武夫：各種動物水晶体線維突起構造の走査電顕所見と調節機能について。眼紀, 27, 9~14, 1976.
- 11) Gorthy, W.C., and Anderson, J.W.: Special characteristics of the polar regions of the rat lens; Morphology and phosphatase histochemistry. Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., 19, 1038~1052, 1980.

(受付：1994年10月7日)