

チン小帯の強度、張力測定を試み —水晶体加圧における水晶体支持組織への影響—

坂部 功生, 大木孝太郎, 真智 直子

東京慈恵会医科大学眼科学教室

要 約

チン小帯の張力、強度を測定するため新しく微小圧力計測装置を開発した。この微小圧力計測装置を用い水晶体を直接眼底後極部方向へ垂直に圧迫し、チン小帯断裂および硝子体脱出を来すのに要する圧力を測定することが可能となった。平均約106gの圧力（水銀柱換算で約155mmHg）で成熟白色家兎眼のチン小帯断裂、硝子体脱出が観察され、1mm²当り2.11gの加重が必要であった。走査電子顕微鏡で検討したところ、対照眼で家兎チン小帯は人眼と異なり、毛様体突起より始まり直線的に走行し水晶体赤道部に集中して付着していた。一方、圧迫負荷を加えた眼球のチン小帯は約1/6周の連続した断裂部と円周上の所々に空隙をつくっていた。また、硝子体脱出が起こる際、チン小帯断裂は毛様体側近方で主に発生していた。今回の実験より、家兎チン小帯は弾力性に富み、さらに断裂し硝子体脱出をきたすには正常眼圧の約8倍の圧力が必要であることが示唆された。（日眼会誌 95：1037—1043, 1991）

キーワード：チン小帯、張力、断裂、走査電子顕微鏡

Attempt to the Measurement of the Tension of Zonular Fibers —Influence to the Lens Suspensory Apparatus when the Lens was Vertically Displaced by Pushing Posteriorly—

Isao Sakabe, Kohtaroh Ohki and Naoko Machi

Department of Ophthalmology, Jikei University School of Medicine

Abstract

A new fine pressure gauge was developed to quantitate zonular tension of the albino rabbit eye. This apparatus consists of a plastic rod to press the crystalline lens, transducer, amplifier, and recorder. The diameter of this plastic rod is 8mm. The cornea and the iris of enucleated eyes were removed by excision in the limbus. Afterwards the lens were vertically pressed by the plastic rod of the fine pressure transducer. It was necessary to disrupt a part of zonules by approximately 106g (2.11g/mm²). This result was equivalent to 155mmHg. The morphological changes of the anterior part of eye globe which consists of lens, zonules, and ciliary process were investigated using scanning electron microscopy. In the control eyes, the zonular fibers mostly originated from the superior or lateral ciliary processes and inserted straight into the equatorial region of the lens. In comparison with control eyes, the zonular fibers which were pressed by the plastic rod were almost absent within 1/6 of a circle. This disruption occurred at the region adjacent to the ciliary process, while the region of

別刷請求先：105 港区西新橋3-19-18 東京慈恵会医科大学眼科学教室 坂部 功生
(平成2年12月21日受付, 平成3年3月5日改訂受理)

Reprint requests to: Isao Sakabe, M.D. Department of Ophthalmology, Jikei University School of Medicine.
3-19-18 Nishi-shinbashi, Minato-ku 105, Japan

(Received December 21, 1990 and accepted in revised form March 5, 1991)

the insertion to the lens demonstrated a normal appearance. In the unaffected area zonules were well-preserved morphologically, apart from splits of the bundles of zonules. The present study indicated that zonular fibers could resist a stretching press up to approximately 8 times normal intraocular pressure. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 95 : 1037—1043, 1991)

Key words : Zonule, Tension, Disruption, Scanning electron microscopy

I 緒 言

近年、白内障手術では水晶体嚢内摘出術から嚢外摘出術へと移り変わり、水晶体嚢を可能な限り生理的な形にとどめ、眼内レンズなどを用い視力を回復させるようになってきた。さらに調節機能の再建を求め総合的な視機能の回復をめざす研究も行われている。現在の白内障手術の安全性は水晶体支持組織であるチン小帯、毛様体、硝子体の健全性の上に立脚しており、故に、それら水晶体支持組織の物理的、生化学的、病理組織学的検討は重要な位置を占めている。以上の点から白内障手術の安全性向上と将来の手術術式や眼内レンズの開発には水晶体支持組織の物理的耐性を測定しチン小帯の性格を把握する必要がある。水晶体の支持組織の一部であるチン小帯の病理組織学的検討^{1)~9)}は過去においていくつかなされている一方、チン小帯の強度、張力の測定を試みた報告は我々の調べた限りでは見当たらない。

今回我々は、新たに作成した微小圧力計測装置を用い、白色家兎眼の角膜、虹彩を切除した後、水晶体を直接圧迫し、チン小帯断裂、前部硝子体膜破裂が発生するのに必要な圧力を測定するとともに、走査電子顕微鏡を用いチン小帯の微細変化について観察を試みた。

II 実験方法

1. 実験装置

今回我々が開発した微小圧力計測装置の模式図を示す (Fig. 1)。摘出眼球は固定台の上のせ水平を保つようにした。摘出眼球の水晶体の中心に対し直径8mmのtouch bar (Fig. 2) で垂直に圧迫した (Fig. 3)。水晶体を脱臼させるのに必要な圧力はトランス、アンプを介し、レコーダー (Fig. 4) で記録される。トランスは、ワイヤーストレインゲージ方式で1,000倍の増幅率である。また、測定可能な圧力は1g から1,000g までである。

2. 実験方法

実験動物は成熟白色家兎23匹23眼 (体重2~3kg) を

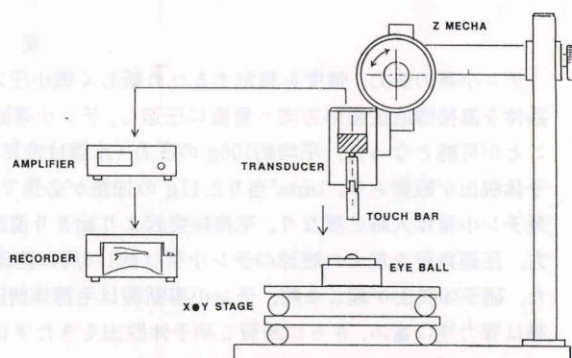


Fig. 1 This is the outline of the fine pressure gauge apparatus. This apparatus consists of a plastic rod to press the crystalline lens which we call "touch bar", transducer, amplifier, and recorder. Lens is pressed by the touch bar (8mm in diameter). And the tension at the time of partial zonular disruptions and vitreous loss is recorded by the recorder.

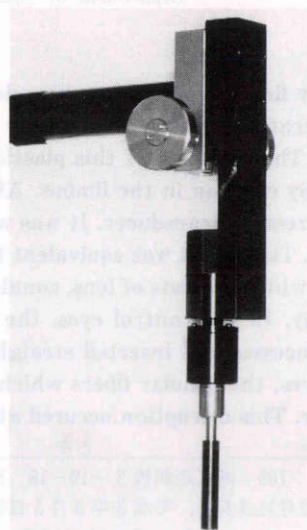


Fig. 2 This figure shows the touch bar and transducer.

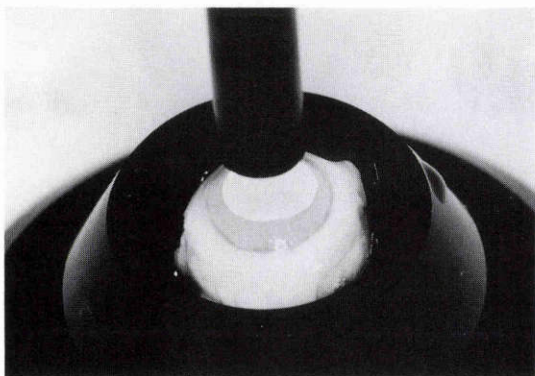


Fig. 3 This is the way to press the lens. The cornea and the iris are removed from enucleated eye. Lens is vertically pressed at the center by the touch bar.

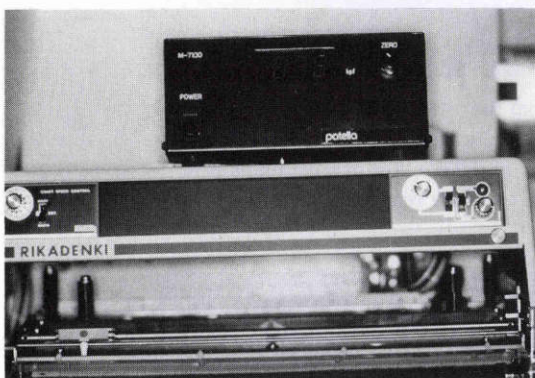


Fig. 4 This figure shows the amplifier and recorder. This apparatus can measure from 1g to 1,000g.

用いた。成熟白色家兎をベントバルビタールナトリウム致死量静注にて屠殺後、眼球を摘出した。摘出眼球は手術用顕微鏡を用いて角膜をマイクロ剪刀によって出来るだけ慎重に輪部で360°切除し水晶体を露出させ、また、虹彩も同様に360°根部切除した。眼球はFig. 3に示した眼球固定台に水平に固定して水晶体を後極部網膜方向に向かって上記の微小圧力計測装置で垂直に直接圧迫して、チン小帯断裂、硝子体脱出を起こすのに必要な圧力を測定した。また、計測後実体顕微鏡にて硝子体脱出が起こる際チン小帯断裂の程度、水晶体囊の異常の有無、前部硝子体膜について観察した。なお、水晶体を上方より圧迫する際、同一検者が行い、水晶体の中心に対し極力垂直に圧迫するようにした。

計測後固定液中で摘出眼球を赤道部で半割し、2.0%

グルタルアルデヒド(0.1M リン酸緩衝液 pH 7.4)に24時間浸透固定した。固定液中で実体顕微鏡を用い可能な限り硝子体を除去し毛様体、チン小帯に損傷を与えないように鋸状縁まで強膜を切除した後、さらに同固定液で3日間浸透固定した。固定後同緩衝液で数回水洗しタンニン酸-オスミウムで導電染色した。さらに、エタノール系列で脱水し酢酸イソamil浸透後臨界点乾燥した。試料は炭素-金真空蒸着を経て、JEOL JSM-50A および35型走査電子顕微鏡(日本電子)で観察した。

III 結 果

1. 摘出眼球の水晶体圧迫時の計測値

直径8mmのtouch barによる水晶体圧迫によって、チン小帯断裂、硝子体脱出を来すのに要する圧力は 105.91 ± 17.36 g ($n=23$)で、 1mm^2 当り2.11gの加重が必要であった。また、水銀の比重を13.6とした場合水銀柱に換算すると約155mmHgであった。レコーダーの記録では、徐々に水晶体に加重が加わるに従い波形は上昇し、約106gのピークに達するまで水晶体支持組織の破綻は認められなかった。その後その波形は急激に下降し、水晶体支持組織であるチン小帯が部分断裂し前部硝子体膜が破壊され硝子体が脱出したことが分かる(Fig. 5)。

2. 実体顕微鏡所見

家兎水晶体の直径は平均約9.5mmであった。水晶体

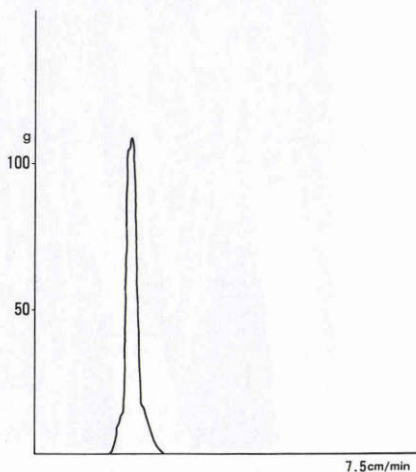


Fig. 5 This is the wave of the recorder. The peak point is 106g. Zonular disruptions and the vitreous loss are caused at this point. This peak point is equivalent to 155mmHg.

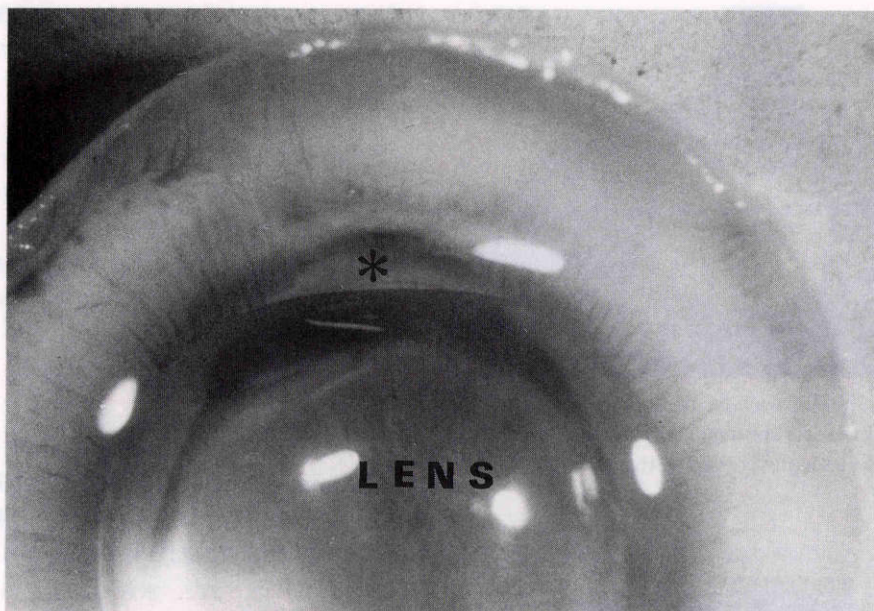


Fig. 6 This photograph shows the view from the vitreous side of the eyeglobe by the stereoscopic-microscope. Lens is vertically displaced by pushing posteriorly. After that the globe is hemi-sectioned in the equator-parallel plane near the ora serrata. And the excess vitreous are carefully removed. Asterisk shows an area free from the zonules.

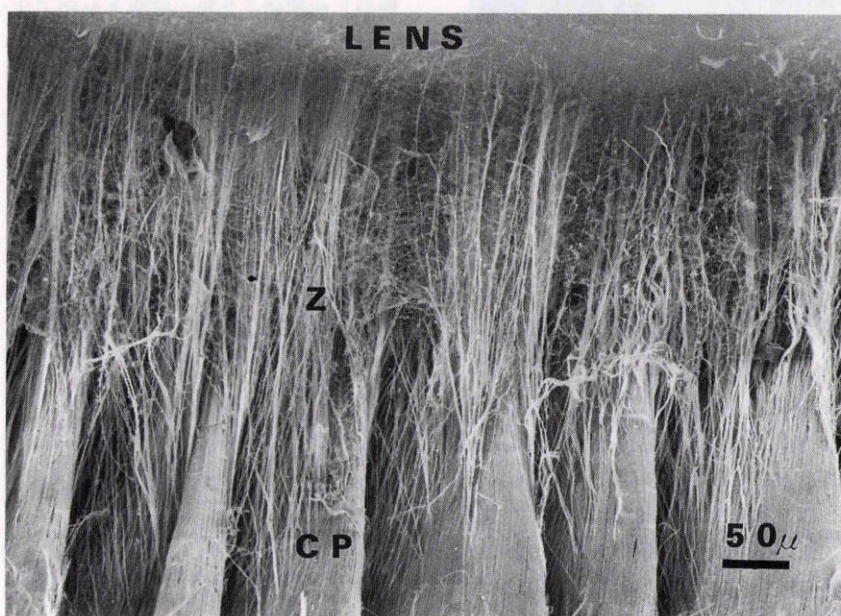


Fig. 7 Scanning electron micrograph shows the zonular pathway from the ciliary body to the lens. The zonular fibers were observed to originate mainly from the superior or lateral ciliary processes. They were arranged in straight bundles between the ciliary body and the lens. And they inserted into the equatorial region of the lens. The details of the insertion of the zonules were not clear. ($\times 70$) Z: zonules, CP: ciliary process

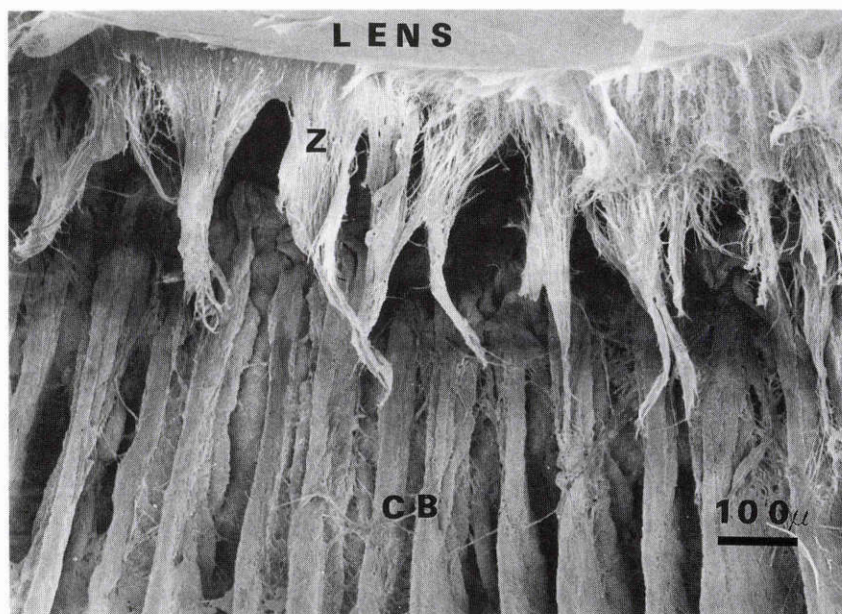


Fig. 8 Scanning electron micrograph of complete disruption of zonular bundles. The complete disruption of the zonular fibers were observed continuously in the region of 1/6 in circle. The zonular disruptions were observed to occur at the region adjacent to the ciliary process. ($\times 40$) Z: zonules, CB: ciliary body

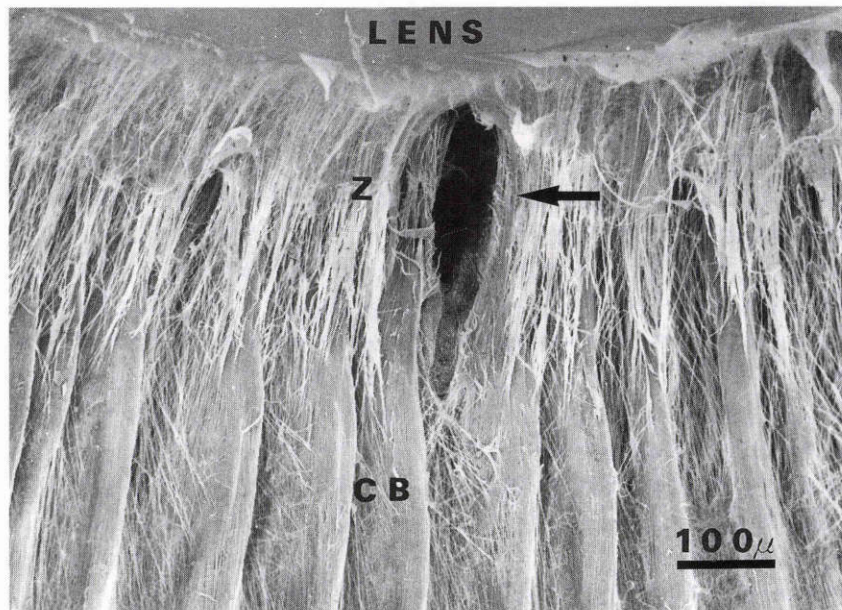


Fig. 9 Scanning electron micrograph of the other side of the continuous disruption. Arrow shows the split of the zonular bundles. Several splits of the zonular bundles were seen in some places. They were caused by the disruption of zonular fibers and the lack of the interconnection of the zonular fibers. ($\times 50$) Z: zonules, CB: ciliary body

圧迫後、チン小帯断裂部位は正常部位と比べ水晶体赤道部と毛様体突起との間が離解していたのが認められた(Fig. 6). 断裂部位の範囲は約1/6周であった. また、圧迫による水晶体嚢への影響は全例認められなかった.

3. 走査電子顕微鏡所見

正常白色家兎眼のチン小帯は毛様体突起間およびその側面よりその表面を被覆しながら始まっていた. さらに、そこから水晶体方向に向かって細束に枝別れた後、比較的直線的に走行し、水晶体赤道部に集中して付着していた(Fig. 7). また、毛様体突起の高さ、幅は不規則であったがその先端は虹彩裏面まで伸びていた. しかしながら、チン小帯が毛様体上皮のいずれの部分から生じるか、また、水晶体付着部について明瞭に知ることはできなかった.

水晶体圧迫によってチン小帯が広範囲に断裂した部位を観察すると、チン小帯は主に毛様体近方で断裂を来すものが多く、断裂したチン小帯は屈曲蛇行し、いくつかの小束に集束する傾向が認められた(Fig. 8). さらに、他の部位でもチン小帯の部分的断裂とチン小帯線維束の離解を生じ、そのため空隙が形成され、チン小帯の著明な走行の乱れが確認された(Fig. 9). しかしながら、チン小帯の部分断裂部位とチン小帯線維束の離解発生部位の位置関係に規則性は認められなかった.

IV 考 按

チン小帯は水晶体を支持し、かつ毛様体に結合していることにより眼調節機能に関与している重要な組織である. 臨床的な見地から言っても特に白内障手術ではチン小帯は重要な位置を占めている. また、チン小帯の形態学的観察^{1)~9)}、発生学的¹⁰⁾、生化学的分析¹¹⁾、免疫組織学的研究¹²⁾によりチン小帯、さらには、水晶体支持組織について数多くの報告がなされている. しかしながら、チン小帯の光顕的、電顕的観察はチン小帯が近接組織との分離が難しく、組織標本作成の過程で壊れやすいので詳細を調べるのは困難とされている. 本研究は水晶体支持組織の強度、張力というこれらの組織の一つの生理学的性質、さらに圧迫負荷を加えた後の病理学的変化¹³⁾¹⁴⁾を知ることを目的としている. 現在までに眼科領域では強角膜の創傷治癒の際の強度測定¹⁵⁾、また、穿孔性眼外傷の際、穿孔創より形成される増殖膜の収縮力計測¹⁶⁾などの試みはなされているが水晶体支持組織であるチン小帯の張力、強度について

測定を試みた報告は見当たらない. チン小帯の強度、張力を単独に測定するには、後眼杯の除去、さらには硝子体の除去が必要であり同時に水晶体圧迫のみならず水晶体前方掌上の測定値の比較が必要であり最終的にはチン小帯を単独に分離し張力測定を行う必要がある. だが、以上の方法を計画するには手術的な侵襲を無視できず予知しない結果も含まれる可能性もある. そこで今回我々は、チン小帯の張力を測定する第一歩として先述の方法で水晶体を圧迫してチン小帯が断裂するのに要する圧力を測定した. 今回得られた結果では、チン小帯が断裂するのに要する圧力は約106g (2.11g/mm^2), 水銀柱換算で155mmHgであった. これを正常眼圧が20mmHgとした場合、換算すると約8倍に相当する. この値より水晶体を垂直に圧迫した場合、チン小帯および水晶体嚢は弾性に富み、かなりの垂直な圧力に耐えられるものと推測される.

走査電子顕微鏡での検討では、白色家兎でのチン小帯¹⁷⁾は毛様体より比較的直線的に走行しており水晶体赤道部に集中して付着し人眼のように前部、赤道部、後部チン小帯と分類¹⁸⁾することは困難であった. さらに断裂した部位を検討すると、断裂したチン小帯はいくつかの束に集束する傾向を示しており、また、所々に空隙を形成していた. 家兎チン小帯は水晶体に付着する過程で細線維に分かれ密に結合しており、圧迫による垂直方向の力でチン小帯断裂並びに前硝子体膜が破裂すると、硝子体脱出を起こした部位に一致して連続したチン小帯断裂を形成した. さらに、水晶体を直接圧迫した際チン小帯は毛様体側近方で断裂し、その部位に一致した硝子体脱出が引き起こされることが判明した. 硝子体脱出とチン小帯の離解との関係は、チン小帯と硝子体との解剖学的関係を考えると圧迫によるチン小帯の離解に引き続き発生すると考えられる水晶体の傾斜がさらにWieger靱帯の破綻を招き硝子体脱出を引き起こしていると考えられる. また、圧迫による垂直方向の力は全周のチン小帯に負荷されており、硝子体脱出を起こした連続したチン小帯断裂部位以外にも部分的なチン小帯断裂が起きている. その結果として、チン小帯の離解および空隙を所々に形成すると思われる.

本実験により白色家兎眼の硝子体脱出を引き起こすのに必要と思われる値を推定したが、チン小帯ならびに水晶体支持組織は動物種差など様々な条件により異なり、チン小帯の起始部、走行にも差があると言われている. 今後さらに検討を加え対象動物による種

差¹⁸⁾¹⁹⁾, 試料作成方法, 観察方法の違いをふまえ, 水晶体—チン小帯—毛様体系に直接外力がかかるような実験系を作製し, 水晶体支持組織特にチン小帯の生理学的性格を検討したいと思われる。また, 病理学的検討では走査電子顕微鏡での試料作成上の操作, 浸透固定, エタノール系列による脱水, 臨界点乾燥による水晶体, 強膜, 残存硝子体の縮小, 残存した前部硝子体を剝離する時チン小帯に損傷を与えるなどのことも無視できないと思われる。今回の方法で白色家兎眼の水晶体支持組織に加圧を加えチン小帯を断裂させ硝子体脱出を引き起こすのに要する圧力を測定することは可能であったが, 今後チン小帯個々の張力をどこまで反映しているかについてはさらに検討が必要である。

稿を終えるにあたりご指導並びにご校閲頂いた北原健二教授に深謝し, また, ご指導を頂いた東京慈恵会医科大学眼科学教室佐野雄太先生並びに付属研究室形態研究部関係者各位に感謝致します。なお, 本論文の一部は第94回日本眼科学会総会にて発表した。

文 献

- 1) **Jakobiec FA**: Ocular Anatomy, Embryology and Tetatology. Philadelphia, Harper & Row 331—352, 1982.
- 2) 星 兵仁: 人眼チン小帯の形態学的研究, 第1報, 眼紀 29: 1893—1904, 1978.
- 3) 星 兵仁, 根本龍司, 一迫 浄, 他: 人眼チン小帯の形態学的研究, 第2報, 眼紀 32: 532—540, 1981.
- 4) 西田祥蔵: 人眼およびサル眼の毛様体小帯の走査型電子顕微鏡による研究, 日眼会誌 83: 1284—1294, 1979.
- 5) 西田祥蔵: サル眼毛様体小帯の走査型電子顕微鏡による研究, 日眼会誌 84: 1561—1573, 1980.
- 6) 西田祥蔵: サル眼毛様体上皮および毛様体小帯の電子顕微鏡的研究, 日眼会誌 85: 1317—1329, 1981.
- 7) 西田祥蔵: サル眼毛様体小帯線維と毛様体上皮の結合に関する走査型電子顕微鏡的研究, 日眼会誌 86: 1066—1070, 1982.
- 8) 星 兵仁, 三宅謙作: 白内障手術に関するチン氏帯の局所解剖, 眼科手術 1: 105—112, 1988.
- 9) **Streeten BW, Licari PA**: The zonules and the elastic microfibrillar system in the ciliary body. Invest Ophthalmol Vis Sci 24: 667—681, 1983.
- 10) 船橋正員, 岩瀬愛子, 直原修一, 他: チン氏帯三次元構造の形成に関する発生学的研究, 日眼会誌 88: 1183—1192, 1984.
- 11) **Streeten BW, Swann DA, Licari PA, et al**: The protein composition of the ocular zonules. Invest Ophthalmol Vis Sci 24: 119—123, 1983.
- 12) **Streeten BW, Licari PA, Marucci AA, et al**: Immunohistochemical comparison of ocular zonules and microfibrils of elastic tissue. Invest Ophthalmol Vis Sci 21: 130—135, 1981.
- 13) 浜井保名, 高橋茂樹, 柳田 泰, 他: 白内障手術と水晶体後面の変化, 眼紀 29: 906—910, 1978.
- 14) **Streeten BW, Pulaski JP**: Posterior zonular and lens extraction. Arch Ophthalmol 96: 132—138, 1978.
- 15) **Gliedman ML, Karlson KE**: Wound healing and wound strength of sutured limbal wounds. Am J Ophthalmol 39: 859—866, 1955.
- 16) **Kirmani M, Ryan SJ**: In vivo measurement of contractile force of transvitreal membranes formed after penetrating ocular injury. Arch Ophthalmol 103: 107—110, 1985.
- 17) **Goldfischer S, Coltoff-Schiller B, Goldfischer M**: Microfibrils, elastic anchoring components of the extracellular matrix, are associated with fibronectin in the zonule of Zinn and aorta. Tissue & Cell 17: 441—450, 1985.
- 18) **Hasson HA**: Scanning electron microscopy of the zonular fibers in the rat eye. Z Zellforsch 107: 199—209, 1970.
- 19) **Farnsworth PN, Burke P**: Three-dimensional architecture of the suspensory apparatus of the lens of the rhesus monkey. Exp Eye Res 25: 563—576, 1977.