

ウシ脈絡膜の力学的特性

上川床総一郎¹⁾, 所 敬¹⁾, 東 洋²⁾, 今井 祥二³⁾, 石田 明允³⁾¹⁾東京医科歯科大学医学部眼科学教室, ²⁾東京医科歯科大学医用器材研究所化学部門³⁾東京医科歯科大学医用器材研究所電気機器部門

要 約

近視に伴う脈絡膜萎縮の進行には脈絡膜の力学的特性の関与が考えられるが, その部位別の伸展性に関する報告は少ない。そこで, ウシ脈絡膜標本(幅4mm×長さ6mm)を鋸状縁(I), 赤道道前方(II), 赤道道後方(III), の3部位において, それぞれ縦走および輪状方向の2方向に総計48例作成した。そして, 張力と伸びとの関係について張力センサーと直線型ポテンシオメーターを用いて実験を行い, その力学的特性について検討した。その結果, 方向別の比較では, 張力600mgでの伸びは, I~IIIのいずれの部位においても, 縦走方向の方が輪状

方向よりも伸びやすかった($p < 0.05$)。また, 部位間での比較では, I~IIIの各部位において縦走方向の伸びはほぼ一定であった(張力600mgで約1.3mm)が, 輪状方向の伸びは眼球前方から後方に向かうほど伸びにくくなる傾向がみられた。以上のことから, ウシ脈絡膜は縦走方向の方が輪状方向よりも伸びやすい一定の力学的特性を持つと考えられた。(日眼会誌 98:733-737, 1994)

キーワード: 脈絡膜, 張力, 伸び, ウシ眼

Mechanical Characteristics of the Bovine Choroid

Soichiro Kamikawatoko¹⁾, Takashi Tokoro¹⁾, Hiroshi Azuma²⁾,
Shoji Imai³⁾ and Akimasa Ishida³⁾¹⁾Department of Ophthalmology, Tokyo Medical and Dental University, School of Medicine²⁾Division of Medicinal Chemistry, ³⁾Division of Electronic Engineering

Institute for Medical and Dental Engineering, Tokyo Medical and Dental University

Abstract

We studied the mechanical relationship between the tension and the length of stretch of bovine choroids. Longitudinal and circular choroidal strips (4 mm×6 mm) were prepared at 3 different locations (I. ora serrata, II. anterior to the equator, III. posterior to the equator). Using a force transducer and a potentiometer, changes in the tension and the length of stretch were recorded simultaneously. At a tension of 600 mg, longitudinal strips stretched more than circular strips at all 3 locations

($p < 0.05$). Longitudinal strips all stretched to almost the same length (about 1.3 mm), but circular strips stretched less in the order of I, II and III. These results suggest that there are mechanical characteristics in the bovine choroid allowing it to stretch more in the longitudinal direction than in the circular direction. (J Jpn Ophthalmol Soc 98: 733-737, 1994)

Key words: Choroid, Tension, Stretch, Bovine eye

I 緒 言

脈絡膜はどのような力学的特性を有しているのであろうか。脈絡膜は, 解剖学的に強膜と網膜色素上皮層との間を形成する厚さ約0.15~0.20mmの4層から成る層

状構造の膜である。強膜側の外層から, 脈絡上板(lamina supra choroidea), 血管板(lamina vasculosa), 脈絡毛細管板(lamina choroïdo capillaris), そして, 網膜色素上皮と境する基底板(laminabasalıs)から成る。脈絡膜は網膜の黄斑部に相当する部位では特に強膜と固く接

別刷請求先: 113 東京都文京区湯島1-5-45 東京医科歯科大学眼科学教室 上川床総一郎

(平成6年2月10日受付, 平成6年4月12日改訂受理)

Reprint requests to: Soichiro Kamikawatoko M.D. Department of Ophthalmology, Tokyo Medical and Dental University, 1-5-45 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

(Received February 10, 1994 and accepted in revised form April 12, 1994)

着しているが、全般に脈絡板上に沿って疎性の結合組織から成る脈絡外隙 (spatium perichoroideale) を形成している。そして、前端はぶどう膜として毛様体に鋸状縁 (ora serrata) において連続している¹²⁾。

このような脈絡膜および、その周囲の組織の力学的特性については1960年ごろから検討がなされた。Hibbardら³⁾は、水圧によって眼内圧 (P) を増加させた際の体積 (V) の変化から全眼球の弾性 (E) について $\Delta P/\Delta V = t/\pi \times E/R^4$ (t: 眼球壁の厚み, R: 眼球半径) の関係が成立することを実証し、角膜、強膜前方、そして強膜後方において特性が異なることを報告している。さらに、Wooら⁴⁾は、これらの組織の弾性には非線形の特性があることを示した。Grabelら⁵⁾は、実際に人眼から強膜および脈絡膜標本を作成して張力負荷試験を行い、伸びの量によって変動はあるものの、脈絡膜のヤング率は10.4~10.5 (Pa)、強膜のそれは10.3~10.4 (Pa) であると推定した。本邦においては赤澤ら⁶⁾が箔ひずみゲージを用いて、家兎眼の眼内圧を増加させた際の電気抵抗の変化から強膜の伸展を計測し、後極部強膜の水平および垂直経線方向に伸展性の差があると報告している。

さらに網膜についても、調節時に網膜に及ぶ力学的な影響についても考察がなされている。Enoch⁷⁾は、網膜と脈絡膜は、最大調節時には通常の1.041倍の張力負荷がかかるかと推計し、Hollinsら⁸⁾も、調節時の網膜の伸展について報告している。このように脈絡膜とその周囲の組織には、一定の力学的特性があることが判明してきている。

また、眼内組織の力学的特性と近視化に伴う眼軸延長の機転との関連についての報告は、1980年ごろから発表されている。van Alphen⁹⁾¹⁰⁾は、眼軸延長の機転には、眼内圧と脈絡膜張力の2つの力学的要素の影響が関与していると論じた。彼は、眼内圧の変化が強膜の伸展に大きく影響していると考えた。一方、脈絡膜については、脈絡外隙の圧力が眼内圧よりもネコでは1~2 mmHg¹⁰⁾、サルでは3.7 mmHg¹¹⁾低いことから、脈絡膜は眼内圧の強膜への直接的な影響を緩衝していると論じた。さらに、この緩衝作用のバランスは、脈絡膜と毛様体とがぶどう膜として連続していることから、毛様体筋のトーンスによって影響されると述べている。そして、この緩衝作用のバランスが崩れると、眼圧のために強膜が伸展し、眼軸の正視化機転が乱れて近視化が起こると考えた¹⁰⁾。

近視と眼内圧との関係について吉田ら¹²⁾は、サルの実験近視眼において fluorophotometry を行った。その結果、近視眼においては血液網膜柵の内方透過性 (Pi) の亢進があり、この Pi の値の大きさと硝子体腔長の増加には正の相関 (r=0.77) があるとしている。このことは、近視眼においては眼内圧が正常眼に比べて変化する可能性を示唆している。ヒトの強膜になぜぶどう腫が起こるのか、また、なぜ眼球の前後方向に伸びやすいのかにつ

いては、実証的な検討は未だなされていないが、強膜の後極部の変化については Greene ら¹³⁾¹⁴⁾は、外眼筋、特に上斜筋と下斜筋の強膜附着部の解剖学的位置に注目した。強膜後極部は、この両筋附着部にはさまれる位置にある。そのため、外眼筋収縮時には、この部位付近の強膜では応力集中が生じることを力学的に示し、このことが後極部強膜に特異的な変化をもたらすと考えた。そして、この場合の強膜に眼内圧や温度の影響があると考察している。

このように、近視に伴う脈絡膜萎縮の進行には、脈絡膜の力学的特性の関与が考えられる。しかし、脈絡膜の解剖学的な部位別の伸展性に関する報告は少なく、詳細については知られていない。そこで、我々は脈絡膜の張力と伸びとの関係について実験を行い、その力学的特性について検討した。

II 実験方法

1. 標本

標本には、眼球摘出後3時間以内の若いウシ眼を用いた。眼球を剪刀を用いて半割し、硝子体を除去した。さらに、半割断面から、無鉤鑷子とスパーテルを用いて、色素上皮層を除く網膜層を慎重に剝離し、その後、脈絡膜を剪刀と無鉤鑷子を用いて強膜側から分離した。このようにして準備したシート状の組織から、鋸状縁部、赤道部前方、赤道部後方の3部位において、幅4 mm×長さ6 mmの標本切片を作成した。また、標本の長軸方向の違いによって、長軸方向が眼球の前後方向にある縦走標本と赤道方向にある輪状標本の2方向の標本をそれぞれペアで作成した。縦走方向の場合、鋸状縁部での標本は、眼球前方側の端が毛様体後端を約2 mm含むように作成した。赤道部前方での標本は、眼球赤道部から前方に約4 mmの点が長軸の中心となるように作成した。そして、赤道部後方での標本は、同様に眼球赤道部から後方約4 mmの点が長軸の中心となるように作成した。輪状方向の場合、鋸状縁部では幅の約1/3が毛様体後端を含むように作成し、赤道部前方および後方では、それぞれ赤道部から前に約4 mmと後方に約4 mm離れた点を標本の中心とし、長軸方向が赤道部と平行な形に作成した。以上のように3部位で各々方向の計6カ所について、それぞれ8標本 (総計48標本) を作成して実験に用いた。

2. 計測装置

標本の両端を8-0絹糸で結び、0.9%生理的食塩水50 ml (温度34±1.0℃) を満たした試験器内に懸垂した。絹糸の一端を固定した上で、もう一端を張力センサー (UL型、新興通信製) に接続し、増幅器 (6M-52型、三栄測器製) を経て張力を測定した。また、モーターで1分間に1 mm上下移動した時の標本の伸びを直線型ポテンショメーター (LP-20 FB型、緑測器製) で計測した。こ

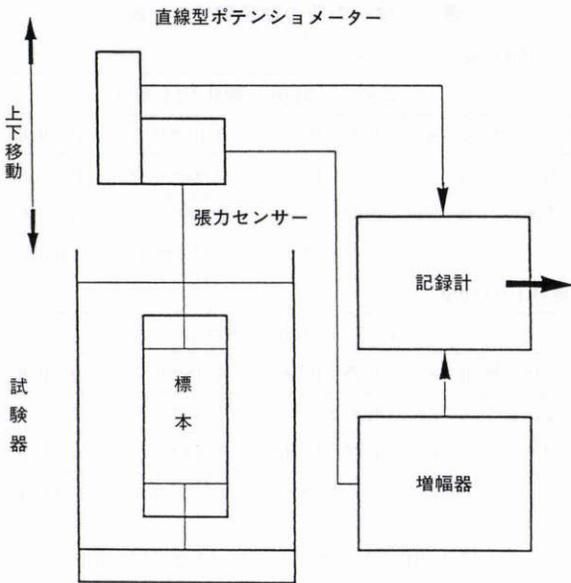


図 1 実験装置の概略図。

の張力と伸びとの変化を、記録計(3078型, 横河電機製)を介して同時に記録した。測定精度は、calibrationの結果、張力は1,000 mg に対し±1.0%, 伸びは1.0 mm に対し±2.0%であった(図1)。

3. 検討項目

このような標本および実験装置を用いて、以下の3つの項目について検討した。

1) ヒステレーシス (hysteresis, 履歴) の比較 (張力の増加時と減少時での比較)

伸びの量を1分間に1 mm の速度で変化させて、0 から約1.5 mm まで伸展させ、その後、同じ速度で元の自然長までもどした際の張力変化について、張力漸増時(0 → 約1,400 mg)と漸減時(約1,400 → 0 mg)について計測した。そして、その計測した特性曲線の違いについて調べた。

2) 張力と伸びとの関係

張力と伸びとの関係について鋸状縁(部位I)、赤道部前方(部位II)そして赤道部後方(部位III)の3つの部位について検討した。

3) 伸びの部位間での比較

張力が600 mg と1,000 mg であった場合の鋸状縁、赤道部前方、赤道部後方の3つの部位での伸びの比較を行った。

III 結 果

1. ヒステレーシスの比較(張力の増加時と減少時での比較)

伸びの増加に伴う張力の変化は非線形であり、同一量の伸びに対する張力の大きさは常に伸び増加時(A)の方が伸び減少時(B)よりも大きく、両者が一致しない生体のヒステレーシスが認められた(図2)。

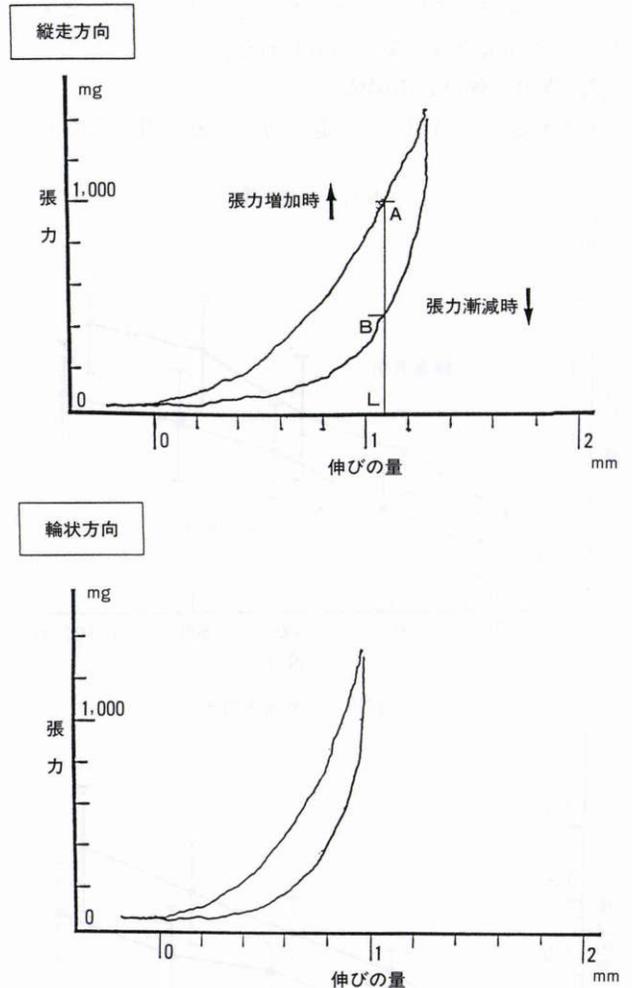


図 2 張力と伸びの量との同時計測例。

同一眼の鋸状縁部の縦走方向標本(図上)および輪状方向標本(図下)の計測例。横軸は伸びの量(mm)、縦軸は張力(mg)を示す。張力の増加時(上向き矢印)と減少時(下向き矢印)とで特性曲線が異なる。

表 1 縦走および輪状方向の hysteresis の比較

同一の伸び量における伸びの増加時と減少時での張力の大きさの変化

	(B/A)×100(%)
縦走方向(n=8)	48±19
輪状方向(n=8)	61±16

A: 伸びの増加時の張力(1,000 mg)

B: 伸びの減少時の張力(Aと同じ伸び量での張力, mg)

* : p<0.05

張力を漸次増加(0~1,400 mg)させて張力1,000 mg (A)に至った時にその伸びの量(L)を記録する。次に、張力を漸次(1,400~0 mg)減少させ、伸びの量が先の量(L)と同じになった時の張力(mg)を(B)とする。この時の、(B/A)×100(%)の値を表1に示す。結果は、縦走方向は48±19(%) (平均値±標準偏差, n=8)、輪状方向は61±16(%) (n=8)であった。両者には対応の

ある差の検定で5%の有意水準で差が認められ、ヒステレーシスの大きさに違いがみられた。

2. 張力と伸びとの関係

鋸状縁部 (図3-I), 赤道部前方 (図3-II) そして赤

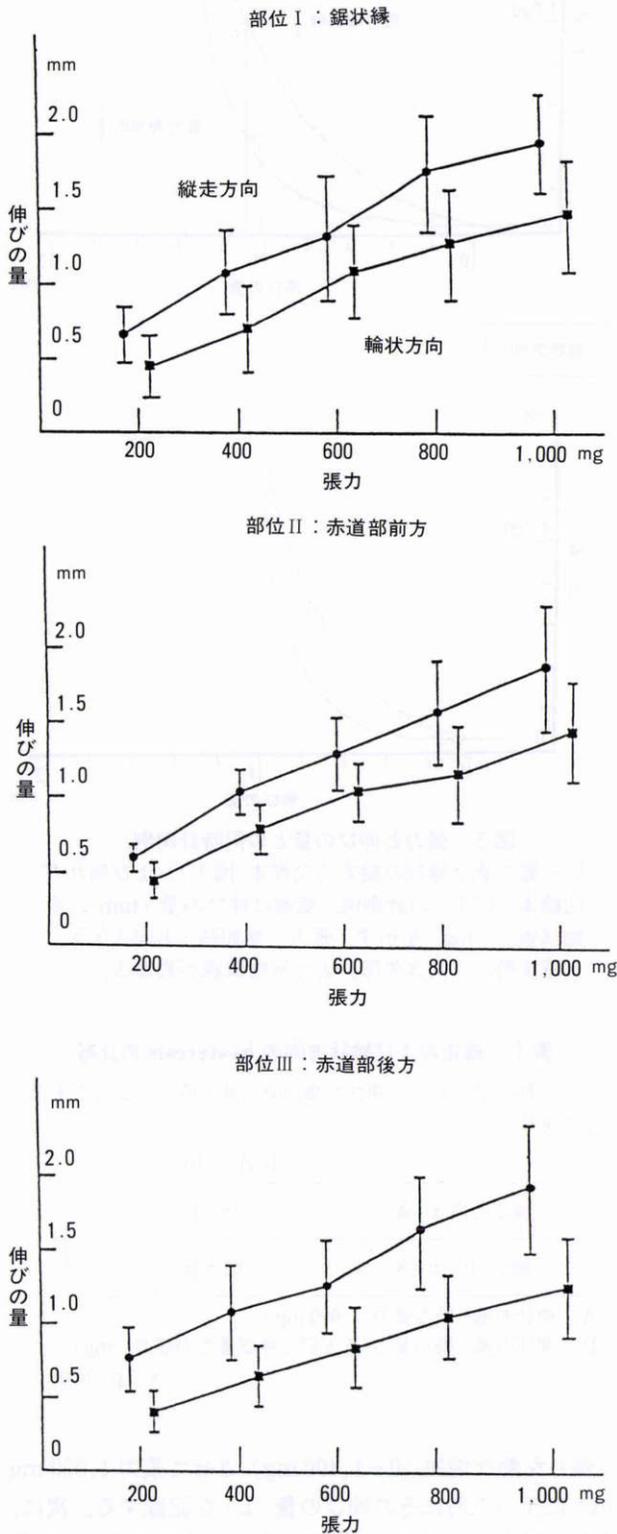


図3 張力と伸びの量との関係。

横軸は張力 (200~1,000 mg), 縦軸は伸びの量 (0~0.2 mm) を示す。I~III のすべての部位において、縦走方向 (グラフ上) の方が輪状方向 (グラフ下) よりも伸びやすい。(各 n=8)

表2 伸びの量の部位間での比較

張力 600 mg			
	縦走方向(mm)	輪状方向(mm)	
鋸状縁(n=8)	1.34±0.35	1.01±0.34	p<0.05
赤道部前方(n=8)	1.32±0.32	0.93±0.26	p<0.05
赤道部後方(n=8)	1.33±0.38	0.88±0.23	p<0.05
標本サイズ: 幅 4 mm×長さ 6 mm			
張力 1,000 mg			
	縦走方向(mm)	輪状方向(mm)	
鋸状縁(n=8)	1.78±0.36	1.48±0.39	p<0.05
赤道部前方(n=8)	1.81±0.45	1.36±0.38	p<0.05
赤道部後方(n=8)	1.77±0.56	1.19±0.30	p<0.05
標本サイズ: 幅 4 mm×長さ 6 mm			

道部後方 (図3-III) の3部位において張力を200~1,000 mgまで、200 mgごとに5段階に張力負荷を増した場合、各標本の伸びの量は0.5~1.5 mm前後へと増加した。

3部位ともに、縦走標本は輪状標本に比べて同じ張力負荷に対する伸びの量が多く、伸びやすい傾向がみられた (各 p<0.05)。

3. 伸びの部位間での比較

張力が600 mgと1,000 mgの時、鋸状縁、赤道部前方、赤道部後方の3部位間の伸びの量を比較した(表2)。張力600 mgでは、縦走方向では各部位での伸びの量は約1.3 mm前後であり、ほぼ同量であったが、輪状方向での伸びの量は、鋸状縁>赤道部前方>赤道部後方の順に小さくなり、有意差はないものの、眼球の前方から後方に向かうほど伸びにくくなる傾向がみられた(表上段)。張力が1,000 mgでも同様の結果が得られた(表下段)。

IV 考 按

近視と脈絡膜張力についての報告は少ない。脈絡膜張力を変化させるものとして、毛様体筋の収縮がある。調節時の毛様体筋の収縮によって、毛様体から脈絡膜に直接的に伝わる力は、毛様体筋張力の大きさ、毛様体と脈絡膜の連続する鋸状縁の力学的特性、そして眼球内に球状に広がる脈絡膜の部位別の力学的特性などが関与する。毛様体筋の張力については、我々はウシ毛様体筋(幅4 mm×長さ6 mm×厚さ0.5 mm)を用いた等尺性張力実験において、平均320 mg (n=12)の最大発生張力を計測している。このことから、毛様体筋全体としては力学的に無視できない大きさの前方方向への張力が鋸状縁部に発生すると考えられる。また、調節時に鋸状縁部が前方移動することについては、1964年にArakiら¹⁵⁾がネコ眼を用いてエンドスコープによる写真撮影によって、また、鈴木¹⁶⁾はX線撮影法によって実証した。その後、前方移動の量はサルでは0.57 mmであり¹⁸⁾、ヒトで0.4~0.7 mmである¹⁸⁾との報告がなされた(表3)。最近

表3 脈絡膜の伸びの量に関する報告例
(鋸状縁部の縦走方向での比較)

今回の実験結果		
張力(A: mg)	対象	伸びの差*(mm)
600	ウシ	0.28
800	ウシ	0.54
*初期張力を400 mg(B)とした場合の各伸びの差:(A)-(B)		
過去の報告例		
報告者	対象	伸びの量(mm)
Moses ら ¹⁸⁾ (1970)	ヒト	0.4~0.7
Zimmerman ら ¹⁷⁾ (1970)	サル	0.57

では、サル眼にファイバースコープとビデオを用いて、加齢が鋸状縁部の可動性に及ぼす影響について検討され、加齢によって鋸状縁部の可動性が減少することがわかった¹⁹⁾。また、この原因として Tamm ら²⁰⁾は、鋸状縁部の加齢に伴う弾性線維の増加を組織学的に示している。このように調節時には、脈絡膜には鋸状縁を介して前方に向かう相当量の張力が負荷される。さらに、脈絡膜の部位別の力学的特性について検討するために、古嶋らは、ブタ眼を用いた実験で水圧によって眼内圧を増加させた。この時の、強膜を開窓し箔ゲージを貼りつけた電気抵抗の計測から、赤道部付近の脈絡膜は、縦走方向が輪状方向よりも伸展度が大きいことを報告している。今回のウシ眼の張力一伸び実験においても同様の結果が得られ、哺乳類の脈絡膜は縦走方向の方が輪状方向よりも伸びやすいことが示された。このように鋸状縁部の脈絡膜における眼球前方方向への張力は、脈絡膜の物理的性質が一定である場合、力学的に赤道部から後極部の脈絡膜へ伝わると考えられる。そして、これらの力が集中する視神経乳頭あるいは黄斑部の力学的負荷が、近視に伴う脈絡膜萎縮の形成に何らかの影響を及ぼす可能性が考えられる。

今日、近視の発生から眼軸延長が起きる機序の解明のために、サルなどを用いた網脈絡膜の生化学あるいは薬理学的な研究が盛んである。しかし、眼軸延長の機序の根本的解明のためには、このような眼の局所的变化についての研究とともに、眼球の力学的特性および調節によって発生する力学的要素の変化についての一層の検討が必要であると思われる。

本研究は文部省科学研究費奨励研究A(課題番号03771210)の補助によって行われた。ここに謝意を表します。

文 献

- Hogan MJ, Alvarado JA, Weddell JE: Choroid. Histology of the Human Eye. Philadelphia, Saunders WB: 320-391, 1971.
- 小川鼎三, 山田英智: 視覚器. 分担解剖学, 改訂11版, 金原出版, 東京, 7-10, 1982.
- Hibbard RR, Lyon CS, Shepherd MD, McBrien ET, McEwen WK: Immediate rigidity of an eye. Exp Eye Res 9: 137-143, 1970.
- Woo SLY, Kobayashi AS, Schlaegel WA, Lawrence C: Nonlinear material properties of intact cornea and sclera. Exp Eye Res 14: 29-39, 1972.
- Grabel WP, van Alphen GWHM: The elasticity of sclera and choroid of the human eye, and its implication on scleral rigidity and accommodation. J Biomech Eng 11: 935-941, 1965.
- 赤澤嘉彦, 氏家 和宣, 所 敬: 箔ストレインゲージ貼り付けによる強膜伸張性の測定. 眼紀 36: 1194-1197, 1985.
- Enoch JM: Effects of substantial accommodation on total retinal area. J Opt Soc Am 63: 899, 1973.
- Hollins M: Does the central human retina stretch during accommodation? Nature 251: 729, 1974.
- van Alphen GWHN: Choroid stress and emmetropization. Vision Res 26: 723-734, 1986.
- van Alphen GWHM: Emmetropia in the primate eye. Ciba Foundation Symposium 155: 115-125, 1990.
- Emi K, Pederson JE, Toris CB: Hydrostatic pressure of the suprachoroidal space. Invest Ophthalmol Vis Sci 30: 233-238, 1989.
- 吉田晃敏, 村上喜三雄, 小島 満: Vitreo-retino ciliary barrier の研究. 5. 正常眼における網膜内方透過性係数及び硝子体内拡散係数の加齢による変化. 日眼会誌 90: 589-594, 1986.
- Greene PR: Mechanical consideration of myopia. In: Grosvenor T, et al (Eds): Refractive Anomalies. Butterworth Heinemann, Stoneham: 287-300, 1991.
- Greene PR, McMahan TA: Scleral creep vs temperature and pressure *in vitro*. Exp Eye Res 29: 527-537, 1979.
- Araki M, Tokoro T, Matsuo C: Movement of the ciliary body associated to accommodation. Acta Ophthalmol 68: 1852-1857, 1964.
- 鈴木 甫: X線造影法による調節に伴う毛様体部動態の観察. 日眼会誌 74: 858-869, 1970.
- Zimmermann A, Rohen JW: Histometrische Untersuchungen über das Ziliarepithel von Primaten bei verschiedenen Kontraktionszuständen des ziliar Muskels. Alb v Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol 179: 294-301, 1970.
- Moses RA: Accommodation. In: Moses RA, et al (Eds): Adler's Physiology of the Eye. CV Mosby, St. Louis, 350-371, 1970.
- Neider MW, Crawford K, Kaufman PL, Bito LZ: *In vivo* videography of the rhesus monkey accommodation apparatus. Arch Ophthalmol 108: 69-74, 1990.
- Tamm E, Lutjen-Drecoll E, Jungkunz W, Rohen JW: Posterior attachment of ciliary muscle in young, accommodating old, presbyopic monkey. Invest Ophthalmol Vis Sci 32: 1678-1692, 1991.