

調節と老視：最近の研究動向

鶴飼 一彦

北里大学 医学部

〒228 相模原市北里 1-15-1

1. はじめに

金沢における視覚学会での講演(1995)は教育講演であるが、調節関係についての教科書的な解説はすでに本誌に「講義」として記したり、その内容を項目だけ取り出すと次のようになる。

視力とその測定：視力、視力の測定、視力の異常。

眼球光学系：幾何光学の基礎、眼球的光学、眼の屈折状態。

調節：調節、調節のメカニズムと神経支配、調節の異常。

屈折異常とその矯正：正視、遠視、近視、乱視、不同視・不等像視。

屈折・調節・視力の検査法：一般的な屈折検査の流れ、他覚的屈折検査（角膜屈折検査、シャイナーの原理、検影法、レフラクトメーター）、自覚的屈折検査と視力検査、調節検査。

眼鏡とコンタクトレンズ：眼鏡処方、コンタクトレンズ、眼内レンズ。

ここに記された内容は、教科書のゆえさほど書き改める必要はなさそうである。また、筆者は、すでに調節機構の最近の研究動向について次のような内容の解説記事を書いている。

調節機構の機能的解析²⁾

基礎：調節の光学。

調節の静特性。

調節の動特性。

調節制御系のモデル。

調節の準静的特性。

最近の研究。

調節のメカニズム：最近の研究動向³⁾

静特性と安静位。

準静的特性。

神経支配、特に交感神経。

屈折異常の定義を考える。

動特性。

調節順応。

調節の揺らぎ。

内容については、すでに古くなってしまった感もあるが、調節の分野でのトピックスについては项目的には網羅されていると思われる。最近では英文学会誌でも review 論文が掲載されることも多くなり、調節安静位や調節順応については多数の論文を引用したすぐれた解説がある^{4,5)}。この分野の最新の知見がまとめられており参考にされたい。

さて、調節の仕組みについて、以上の項目からすっぱり抜け落ちてしまっている項目がある。多くの研究者からは、19世紀、あるいは遅くとも20世紀前半には決着がついてしまっていると見なされている分野である。この分野で、最近、従来の常識をまったくくつがえしてしまうような説を主張している人物がいる。もちろんデータも持っている。ただ、最近ほとんど同じ内容で多数の論文を出し続けているが、追従者はまだいない。本年(1995)のARVOで、この人物を中心にしたSIG (Special Interest Group)の会合が開かれ、活発な討論が行なわれた。その場では、従来の常識から大きくは外れていないが、しかし、新しい内容を持ついくつかの説を主張する研究者も同時に紹介された。以下に、発表者とそのタイトルを記しておく、さらに次節でこの分野「調節の力学的メカニズム」の研究の動向を紹介したいと思う。

SIG-9 "Mechanism of accommodation and presbyopia"

P. L. Kaufman: Overview of present theories.

- J. Koretz: New geometric model of accommodation and presbyopia.
- L. Z. Bito: Presbyopia: Loss of tissue elasticity.
- R. S. Wilson: Cilio-zonular compression theory for accommodation.
- D. J. Coleman: Diaphragm in the suspension model of accommodation.
- R. A. Schachar: The equatorial zonular tension theory for understanding accommodation and presbyopia.

2. 調節と老視の力学

2.1 古典

調節はレンズ（水晶体）によって行なわれている（Thomas Young (1801)⁶⁾）という説に疑問を持つ人はいない。レンズのどのような変化によって焦点位置がえられるであろうか。カメラのようにレンズが前にでると近くにピントがあう。もちろんレンズの表面の曲率が変われば

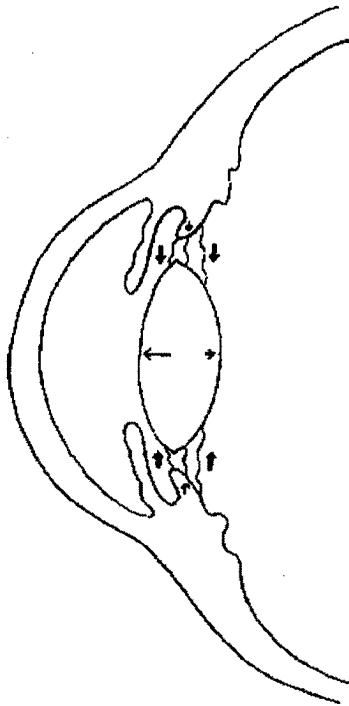


図1 Helmholtzによる調節のメカニズム。リング状の筋である毛様筋が緊張するとリングは小さくなり内側に向かう。水晶体を保持しているzonuleが緩む。その結果、水晶体は自己の弾性により膨らみ、レンズは厚くなり近方にピントが合う。

レンズの屈折力が変化する。厚みが変わっても同様である。屈折率が変化すれば面白い効果がありそうだが、物質固有の定数である屈折率が短時間に変化するであろうか。実際にはレンズは玉葱のように薄い膜状のものが集まってできている場所により屈折率が異なる。核の部分で屈折率はもっとも高くなっている。したがって屈折率が変わらなくとも、変形により屈折率分布は変化する。動物においては調節の仕組みは種によって大きく異なる。調節時にレンズが前方に移動するという仕組みも比較的多い。人間でどうなっているかを知るためには、人間あるいは少なくとも霊長類での研究が必要である。

人間では次のような仕組みでレンズの形を変えることにより調節を行なうというHelmholtzの説⁷⁾が広く信じられている。まず毛様筋が収縮すると、zonule（チン小帯）がゆるみ、水晶体が弾性で丸みを帯びた形状になり、レンズとしては厚く曲率も小さくなり近くを見、毛様筋が弛緩するとzonuleが引っ張られ、水晶体が薄くなり遠くにピントがあう（図1）。なお、歴史的にはこの説に反対するTscherningの説⁸⁾があった。すでにFinchamは1937年に、両者の説を紹介し、Helmholtzの説に好意的な傍証をいくつか挙げている⁹⁾。

2.2 最近の研究

毛様筋が収縮した時には、毛様筋と水晶体の間にあるzonuleがマスとして水晶体を押し厚くするという説も提案されている。Zonuleは一本の太さは50 μ m程度しかないが、一眼に約50万本あり、総量としては大きな体積を持ち水晶体を中央に向かって押すことが十分可能だという説¹⁰⁾である。また、同様に、緩んだzonuleが水晶体周縁の後部から水晶体を前に押すという説¹¹⁾もある（ただし猿での観察）。

薄いビニールの膜を両手で持ち、中央部に水滴を載せる。手を緩ませて膜を保持する張力を減少してやると水滴は丸くなる。これと同様に水晶体の前面にある膜（anterior hyaloid membrane）の形状に水晶体のかたちは依存して

いて、毛様筋の収縮により膜が緩むと水晶体の曲率が小さくなるという説¹²⁾。もちろん、水晶体は空气中に水平に置かれているわけではないので、前房水や硝子体、水晶体自身の圧の平衡状態とう微妙なバランスを計算しなければならない。さらには、虹彩の存在も考慮しなければならない。

老化による遠視化は、実際には水晶体は老化により厚くなり¹³⁾、蛋白質も増加する（一般的には屈折率も高くなる）が、蛋白のうち水に与えている割合は減少し、屈折率が小さくなり、レンズの効果が弱くなることが原因として考えられる。

一般に、老化による調節力の低下は、老化に伴いレンズの弾性が低下し、厚くなくなることが原因であると考えられている^{14,15)}。水晶

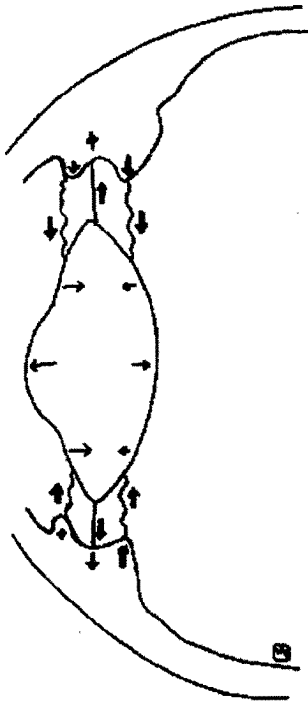


図2 Schacharによる調節のメカニズム。リング状の筋である毛様筋が緊張するとリングは小さくなるが、水晶体の赤道部を支えている zonule が付着している部分の毛様筋のみは外側へ向かう。水晶体を保持している zonule が伸び、水晶体を外側に引っ張る。水晶体は薄くなるが、中心部の表面の曲率のみは小さくなる。その結果、近方にピントが合う。

体の弾性は、水晶体の中身の部分ではなく袋の部分を持つといわれている。さらに、水晶体と zonule の付着部が中央部方向へ移動し、力の作用の方向から考えて、引っ張っても形を変えられなくなるという報告¹⁶⁾がある。また、毛様筋自体の加齢変化を老視の原因と考える報告もある^{17,18)}。

2.3 Schachar の主張

Schachar^{19,20)} は、毛様筋は全体としては収縮時に径が小さくなり、zonule は緩むが、水晶体の赤道部を引っ張っている部分だけは、毛様筋が収縮することによって外側に向かい zonule を引っ張る、と主張する（図2）。この説は毛様筋の形状の超音波画像により証明されたとしている。画像の鮮明さに比べて形状の変化は小さく、これを信じるかどうかは彼の説を支持するかどうかの分れ目であろう。赤道部を引っ張られた水晶体は周辺部では薄くなり曲率も増加するが、光学的に重要な中心部ではむしろ表面の曲率は小さくなるので近くにピントがあう（図2）。赤道部を引っ張られた水晶体がどのような形状変化をするかという点では、当然レンズは全体に薄くなると考えてしまうのが常識であるが、これが盲点となっている。よく緑日の屋台で売っている金属光沢の風船の端を引っ張ってみると、表面に写っている自分の顔が小さくなるのが観察できる。ということは凸面鏡が強くなっているということで、曲率は常識とは逆に小さくなっている。水晶体全体での変形は非常にわずか（引っ張れる距離もわずか）であるにもかかわらず効果は大きい。Schachar 本人が ARVO 会場で配った風船の写真を図3に示す。水晶体で同様のことが起こるかどうかが直接証明はないが、ありえないことではない。

また、老視に関しては、水晶体の加齢による成長が水晶体と毛様筋の距離をわずかに縮め、zonule の効果をなくしていると考えられる。若いころから調節力はどんどん減少しているという事実と矛盾しない。この説を信じれば、毛様筋の位置をわずか外側に引っ張ってやれば老視は治ってしまうことになる。他の説では、たとえ

ば水晶体が弾性を回復する必要がある、または、老化した筋肉の回復する必要がある、見込みがないのと対称的である。

3. むすび

果たしてドンキホーテ Schachar は、最終的にはどのような評価を受けるのであろうか？「同じことを繰り返し発言していればそれが真実と認められるようになる、という言葉は必ずしも真実ではない」「真に革命的な主張は、最初は無視され次に反発と迫害を受け、そのあと受け入れられる」という二つの格言のどちらが適用されるであろうか？

ARVO では非常に活発な討論が行なわれた。活発すぎて、残念ながら私はほとんど聞き取れなかった。しかし、MRI や特殊な光学カメラ、超音波画像装置の進歩もあって、筋肉の動きや水晶体の変形が直接見られるようになり、あと一歩でどの説が正しいか、直接目にすることができるのではないか。近い将来教科書が書き換えられるのではという予感を感じた。

さらに、老眼は治らないものというこれまでの考えに対しても新たに疑問が提出されている訳であるから、可能性は小さくとも真剣に受けとめる必要があることはいうまでもない。

文 献

- 1) 鶴飼一彦：視力と調節・屈折。VISION, 3, 149-162, 1991.
- 2) 鶴飼一彦：調節機構の機能的解析。あたらしい眼科, 4, 491-497, 1987.
- 3) 鶴飼一彦：調節のメカニズム：最近の研究動向。Nano Ophthalmology, No. 5, 13-15, 1993.
- 4) M. Rosenfield, K. J. Ciuffreda, G. K. Hung and B. Gilmartin: Tonic accommodation: a review 1. Basic aspects. Ophthalmic and Physiological Optics, 13, 266-284, 1993.
- 5) M. Rosenfield, K. J. Ciuffreda, G. K. Hung and B. Gilmartin: Tonic accommodation: a review 2. Accommodative adaptation and clinical aspects. Ophthalmic and Physiological Optics, 14, 265-277, 1994.
- 6) T. Young: On the mechanism of the eye. Philosophical Transactions of Royal Society of London B, 91, 23-88, 1801.
- 7) H. von Helmholtz: Ueber die Accommodation des Auges. Albrecht von Graefes Archiv fur Klinische Ophthalmologie, 1 (Abt 2), 1-74, 1855.
または H. von Helmholtz: Handbuch der Physiologische Optik. 1866. J. P. C. Southall (ed & trs from 3rd German edition, 1909): Helmholtz treatise on physiological optics, Vol. 1. The Optical Society of America, Rochester, pp 143-172 and 334-415, 1924 (reprinted by Dover, New York, 1962).

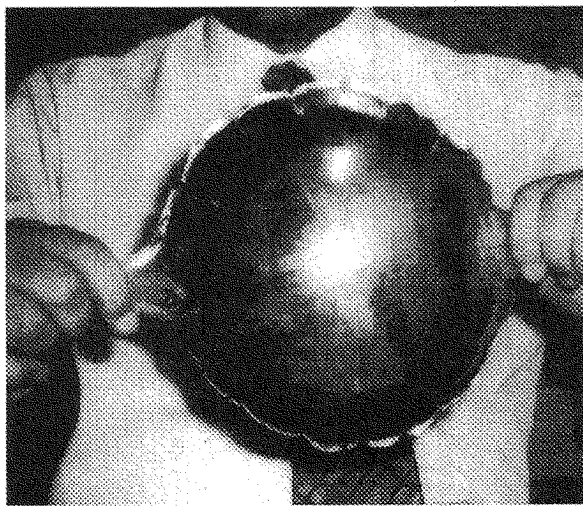


図3 風船。レンズ形状の変化を果たしてシミュレートしているか？

- 8) M. Tscherning: *Optique physiologique*. Paris, 1898. C. Weiland (trs): *Physiological optics, dioptrics of the eye, functions of the retina, ocular movements, and binocular vision*. The Keystone Publishing, Philadelphia, 1900.
- 9) E. F. Fincham: The mechanism of accommodation. *British Journal of Ophthalmology*, 21 (Monograph Supplement 8), 1-80, 1937.
- 10) R. S. Wilson: A new theory of human accommodation: Cilio-zonular compression of the lens equator. *Transactions of the American Ophthalmological Society*, 91, 401-419, 1993.
- 11) M. W. Neider, K. Crawford, P. L. Kaufman and L. Z. Bito: In vivo videography of rhesus monkey accommodative apparatus. Age related loss of ciliary muscle response to central stimulation. *Archives of Ophthalmology*, 108, 69-74, 1990.
- 12) D. J. Coleman: Unified model for accommodation mechanism. *American Journal of Ophthalmology*, 69, 1063-1079, 1970.
- 13) J. F. Koretz, P. L. Kaufman, M. W. Neider and P. A. Goeckner: Accommodation and presbyopia in eye: Aging of anterior segment. *Vision Research*, 29, 1685-1692, 1989.
- 14) R. F. Fisher: Presbyopia and the changes with age in the human crystalline lens. *Journal of Physiology (London)*, 228, 765-779, 1973.
- 15) R. F. Fisher: The force of contraction of the human ciliary muscle during accommodation. *Journal of Physiology (London)*, 270, 51-74, 1977.
- 16) A. P. A. Beers and G. L. van der Heijde: The origin of the elastic properties of the lens matter determined in vivo by continuous ultrasonographic biometry. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 35, 1948, 1994.
- 17) J. F. Koretz and G. H. Handelman: Model of the accommodative mechanism in the human eye. *Vision Research*, 22, 917-927, 1982.
- 18) E. Lutjen-Drecall, E. Tamm and P. L. Kaufman: Age-related loss of morphologic responses to pilocarpine in rhesus monkey ciliary muscle. *Archives of Ophthalmology*, 106, 1591-1598, 1988.
- 19) R. A. Schachar: Cause and treatment of presbyopia with a method for increasing amplitude of accommodation. *Annals of Ophthalmology*, 24, 445-452, 1992.
- 20) R. A. Schachar, T. Huang and X. Huang: Mathematic proof of Schachar's hypothesis of accommodation. *Annals of Ophthalmology*, 25, 5-9, 1993.
- 21) R. A. Schachar, D. P. Cudmore and T. D. Black: Experimental support for schachar's hypothesis of accommodation. *Annals of Ophthalmology*, 25, 404-409, 1993.
- 22) R. A. Schachar, D. P. Cudmore, R. Torti, T. D. Black and T. A. Huang: Physical model demonstrating Schachar's hypothesis of accommodation. *Annals of Ophthalmology*, 26, 4-9, 1994.
- 23) R. A. Schachar: Zonular function: a new hypothesis with clinical implications. *Annals of Ophthalmology*, 26, 36-38, 1994.
- 24) R. A. Schachar and D. P. Cudmore: The effect of gravity on the amplitude of accommodation. *Annals of Ophthalmology*, 26, 65-70, 1994.
- 25) R. A. Schachar, T. D. Black, R. L. Kash, D. P. Cudmore and D. J. Schanzlin: The mechanism of accommodation and presbyopia in the primate. *Annals of Ophthalmology*, 27, 58-67, 1995.
- 26) R. A. Schachar and D. A. Anderson: The mechanism of ciliary muscle function. *Annals of Ophthalmology*, 27, 126-132, 1995.