
総 説

調節力老化の機序と眼内レンズ挿入眼におけるその修復の可能性

西田 祥藏, 水谷 聡

愛知医科大学眼科学教室

要 約

加齢により老視が明らかな老人性白内障の白内障摘出術後に、今後開発が予想される調節可能な眼内レンズを移植した偽水晶体眼に調節機能を回復出来るかどうかを推測するために、老視の発現、進行に直接関与する毛様体筋、小帯線維、水晶体の加齢に伴う形態的、および機能的变化について文献的に検討した。毛様体筋および水晶体には加齢に伴う形態的变化はかなり見られるが、毛様体筋と小帯線維の加齢に伴う機能低下は水晶体実質や、水晶体嚢の変化ほど著しくない。従って水晶体嚢を確実に保存できる嚢内乳化吸引術が技術的に完成し、水晶体実質に代わりうる適当な粘弾性を持つ物質が実用可能となれば、水晶体嚢にかなりの弾性が見られる60~80歳まではその物質で置換された偽水晶体眼に調節力の回復は期待可能と考えられた。(日眼会誌 96:1071-1078, 1992)

キーワード：偽水晶体眼、調節機能の回復、毛様体筋、小帯線維、水晶体

A Review

Deterioration of Amplitude of the Accommodation with Age and Its Possible Restoration in the Intraocular Lens Implanted Eye

Shozo Nishida and Satoshi Mizutani

Department of Ophthalmology, Aichi Medical University

Abstract

This study aimed to determine whether pseudophakia which have deteriorated amplitude of accommodation with age, i.e., presbyopia and which received implantation of refractively changeable intraocular lenses after cataract extraction are able to regain accommodative function. According surveys on aging in the literature, functional deterioration of the ciliary muscle and the zonular fiber is not so striking compared to the changes of crystalline lens material and capsule. Consequently the artificially pseudophakic eye can be expected to regain accommodative function when the crystalline lens material could be replaced by an appropriately visco-elastic material before 80 years of age when the crystalline lens capsule still retain its elasticity. (*Acta Soc Ophthalmol Jpn* 96:1071-1078, 1992)

Key words: Pseudophakia, Restoration of accommodation, Ciliary muscle, Zonular fiber, Crystalline lens

別刷請求先：480-11 愛知県愛知郡長久手町大字岩作字雁又21 愛知医科大学眼科学教室 西田 祥藏
(平成4年1月31日受付, 平成4年4月1日改訂受理)

Reprint requests to: Shozo Nishida, M.D. Department of Ophthalmology, Aichi Medical University,
21 Karimata, Ōaza Yazako, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi 480-11, Japan
(Received January 31, 1992 and accepted in revised form April 1, 1992)

I 緒 言

近年白内障嚢外摘出術と同時に眼内レンズの嚢内固定法が広く行われる様になったことから、眼内レンズを挿入した偽水晶体眼の調節機能が検討されて、自覚的には偽調節が観察されるが^{1)~8)}、他覚的にはこれまでのところ視覚誘発電位による方法⁹⁾を除いては検出できない⁴⁾⁷⁾状態である。しかし今後の手術器械および手技、眼内レンズの形状および材質の改良と進歩、水晶体の組織学的特性、眼内レンズの生体適合性に対する更に詳細な検討により、将来調節機能を持つ偽水晶体眼が実現可能ではないかとの夢が膨らみつつある様に思われる。

一方白内障手術の対象者の多くは高齢で視機能的には調節(幅)力が低下した老視眼のために、将来調節可能な眼内レンズが技術的に実現しても、毛様体筋を初めとする調節に関する眼内組織に調節機能の回復を期待できるかが重要な問題になると考える。

加齢に伴う調節力の低下は、直接調節に関与する毛様体筋、毛様体小帯機能(小帯線維)、水晶体の3組織のいずれか、あるいはすべての機能低下が関与していることには異論が無いと考える。

著者はこれらの点を考慮して理想的な偽水晶体眼に調節力の回復を期待できるかどうか毛様体筋、小帯線維、水晶体の3組織に関するこれまでに発表された文献を中心に検討を試みた。

II 毛様体筋

毛様体筋は20~30代に特に発達して、60歳までは矢状断面積が増加し、体積を増やし、その後体積の減少が見られる^{9)~11)}。組織学的には20歳以下の若い毛様体筋では少ない結合織が40歳頃から増加し始め、その割合は年齢とともに増加する^{9)~11)}。著者¹²⁾が先に画像処理の手法で検討した結果では特に41歳以上の毛様体筋に結合織の著しい増加が見られ、71歳以上では結合織が筋線維よりも多くなりその割合が逆転した(図1)。

調節に最も関係がある輪状線維は20~70歳の間は良く発達していて毛様体筋断面積に占める割合が大きいが、71歳以上ではその割合の減少が見られた¹²⁾(図2)。

筋細胞微細構造の面からは細胞のエネルギー代謝に重要なミトコンドリアの断面積は41歳以上で減少傾向を示し(図3)¹³⁾、その数も同様な傾向を示すが、こ

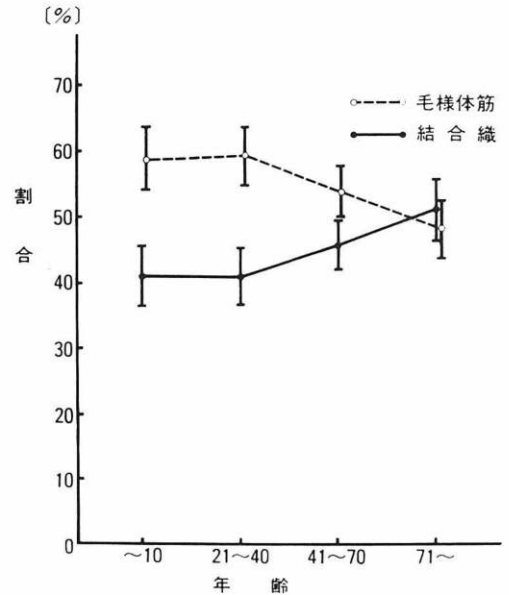


図1 加齢に伴うヒト毛様体筋矢状断面における筋線維と結合織の割合の変化。

41歳以上で筋線維は年齢とともに減少、結合織は増加の傾向が見られる。71歳以上では筋線維と結合織の割合が逆転。

(西田祥蔵；日眼会誌94：93-119, 1990. から)

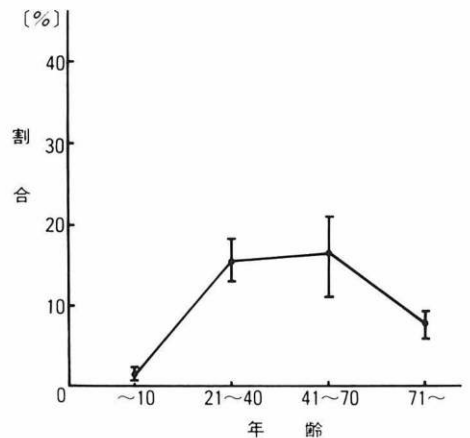


図2 ヒト毛様体筋輪状線維の加齢に伴う変化。

(西田祥蔵；日眼会誌94：93-119, 1990. から)

れらの変化は特に71歳以上の輪状線維に明瞭に見られた¹³⁾(図4, 5)。

以上のごとく41歳以降では毛様体筋は形態的に次第に萎縮傾向を示して機能低下を示唆する所見が見られたが、特に71歳以降にそれが著名であった。

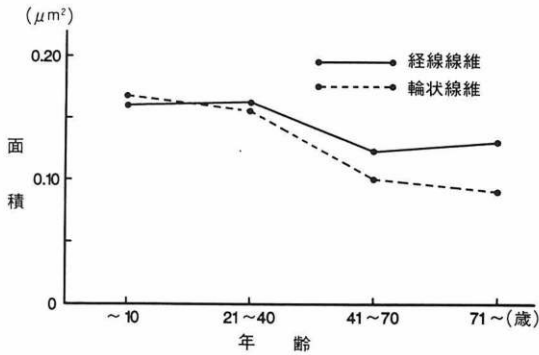


図3 ヒト毛様体筋ミトコンドリア断面積の加齢に伴う変化。
41歳以上で減少傾向が見られる。
(水谷 聡；愛知医大誌19：251-266, 1990, から)

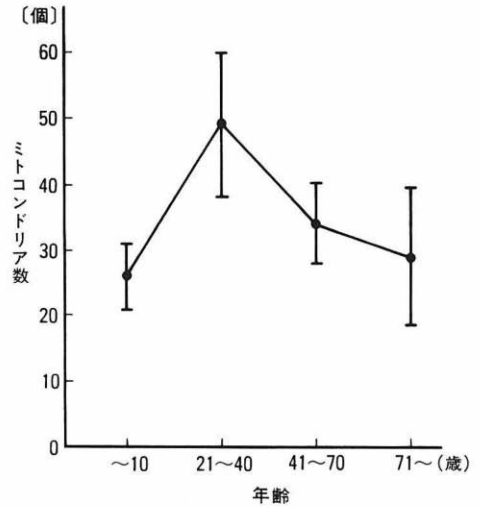


図5 ヒト毛様体筋輪状線維筋細胞内ミトコンドリア数の加齢に伴う変化。
(水谷 聡；愛知医大誌19：251-266, 1990, から)

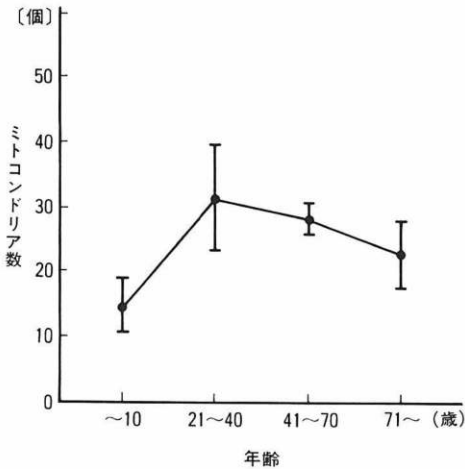


図4 ヒト毛様体筋経線線維筋細胞内ミトコンドリア数の加齢に伴う変化。
(水谷 聡；愛知医大誌19：251-266, 1990, から)

一方機能的には Fisher¹⁴⁾¹⁵⁾によると輪状線維の収縮力は45歳までは一定で毛様体筋輪は最大調節時、半径が0.8 mm 収縮する。毛様体筋の最高収縮力は50歳まで年齢と共に増加して、50歳の毛様体筋の収縮力は30歳のその1.5倍、即ち0.8 g から1.2 g に増加する。

Swegmark¹⁶⁾も毛様体筋の活動による電気抵抗の変化を測定した impedance cyclography から60歳迄毛様体筋の収縮力は年齢の影響を受けないことを明らかにしている。

したがって有水晶体眼で見る限り毛様体筋は形態的には41歳頃から萎縮傾向を示し始め、71歳以上でそ

れが著しくなるが、機能的には収縮力は60歳までは年齢の影響は受けないと考えられる。60歳以上でも結合織の割合が筋線維よりも増加する71歳未満では毛様体筋の調節のための収縮能は可なり保存されていると考えられる。

人工的無水晶体眼、および偽水晶体眼では水晶体が失われたことで毛様体筋に何か変化が起るかどうかにについては、無水晶体眼の毛様体筋は有水晶体眼のそれに比べてその前部が少し扁平化している以外、その内側の結合織線維組織輪のために強く扁平化することが防がれているとの Moses¹⁷⁾の報告以外にはほとんど見られない。

水晶体摘出術および挿入された眼内レンズが毛様体筋にどのような影響を与えるかに付いて検討する目的で著者らは、4~5歳のカニクイザル (cynomolgus monkey) 3頭およびマカカ (Macaca fuscata) 2頭に付いて、3頭の片眼に計画的囊外摘出術後、眼内レンズを挿入して偽水晶体眼とし、内2頭の他眼は対照とした。残り2頭に付いては片眼に水晶体全摘出術を施行して人工的無水晶体眼とし、内1頭の片眼は対照として実験を行った。

術約3か月後に眼球摘出し、眼球前半部の眼内レンズの固定の状態を実体顕微鏡下で確認後、光学顕微鏡、電子顕微鏡で毛様体、および毛様体筋を組織学的に観察し、更にマッソントリクローム染色及びトルイジン

表1 人工的サル無水晶体眼毛様体筋矢状断面積

| | 無水晶体眼(mm ²) | 対 照(mm ²) |
|------|-------------------------|-----------------------|
| No 1 | 1.175±0.13 | 0.854±0.17 |
| No 2 | 0.69±0.04 | |

表2 人工的サル無水晶体眼毛様体筋矢状断面における結合織の割合

| | 無水晶体眼(%) | 対 照(%) |
|------|------------|------------|
| No 1 | 12.24±5.10 | 11.12±4.22 |
| No 2 | 13.89±4.53 | |

結合織の僅かな増加傾向が見られる

表3 人工的サル偽水晶体眼毛様体筋矢状断面積

| | IOL挿入眼(mm ²) | 対 照(mm ²) |
|------|--------------------------|-----------------------|
| No 3 | 0.865±0.18 | 0.840±0.12 |
| No 4 | 0.796±0.10 | 0.752±0.16 |
| No 5 | 0.820±0.16 | |

表4 人工的サル偽水晶体眼毛様体筋矢状断面における結合織の割合

| | IOL挿入眼(%) | 対 照(%) |
|------|------------|------------|
| No 3 | 11.51±4.47 | 11.83±4.21 |
| No 4 | 12.32±3.24 | 12.65±4.39 |
| No 5 | 13.72±3.01 | |

対照眼とほとんど差はみられない

ブルーで染色後、画像解析 (IBAS 2000, Karl Zeiss, Germany) の手法により毛様体筋の面積、筋と結合織の割合を測定し¹²⁾、対照眼と比較した。

結果としては今回の実験では無水晶体眼では毛様体筋矢状断面積の拡大傾向と結合織の増加傾向を認めたが著しい形態変化は認められず(表1, 2), 偽水晶体眼の毛様体筋は対照とほとんど差が見られなかった(表3, 4)。水晶体摘出術、および眼内レンズ挿入術の毛様体筋に対する影響は形態的にはほとんど認められなかったことは、実験期間が3か月と短かったためか、両眼の毛様体筋が同じ様に常に動眼神経を介して調節刺激を受けているために萎縮が起こらないのか、また自律神経支配を受ける平滑筋は横紋筋と異なり廃用性萎縮に陥り難いかなどについては更に今後の検討が必要と考える。

III 小帯線維

次に毛様体と水晶体との間にあって水晶体に常に一定の張力をかけ、毛様体筋の緊張の変化をそれ自身の張力の変化として水晶体に伝える小帯線維が水晶体赤道部に付着する部位(付着輪)は、水晶体が生涯を通じて成長するために年齢と共に水晶体赤道(赤道)からの距離が増加し、赤道と毛様体の距離は減少するが、小帯線維の付着輪と毛様体間の距離は変わらないこと、及び年齢が高いほど付着輪は中心側へ移動することが Farnsworth ら¹⁸⁾により明らかにされている。

また Fisher¹⁵⁾によっても小帯線維の長さは $0.37 \times 6.91 A \times 10^{-2} m$ (A は年齢) で表される量が年齢と共に増加するために、年齢の増加により毛様体筋の収縮力は増加するが、小帯線維も長さを増すので、小帯線維の弾性係数は15~45歳の間は $3.5 \times 10^{-5} \text{Nm}^{-2}$ で、その弾性は一定であることが報告されている。したがって小帯線維が加齢に伴う調節力の低下に大きく影響しているとは考えがたい。

IV 水晶体

調節作用を営む上で水晶体は厚さを変え、形状を変えて屈折を変化させる最も重要な組織である。

Patnaik¹⁹⁾によると調節の際、水晶体核は皮質に比べて著しい厚さの変化を起し皮質は小帯線維の張力の変化を水晶体囊から水晶体核へ伝えるとともに、調節の程度に応じた核の変形を維持する機能は持っているが、核のような柔軟な弾性は無い。

Fisher²⁰⁾によると水晶体核の弾性は出生後40歳までは Young 係数 (Young's modules) で $1 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ 以下の低い一定の値を示すがその後、年齢と共に急速に増加して70歳には約 $3.5 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ に達する。一方皮質の弾性は出生時には水晶体核よりも低い約 $0.6 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ を示すが、その後50歳まで連続して増加し $4.0 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ に達した後、70歳まで減少傾向を示して水晶体核とほぼ同じ値になり水晶体全体がほぼ均等に硬化する。

水晶体全体の弾性は前後極方向(極方向)と赤道方向では異なり、年齢により変化する。即ち、Fisher²⁰⁾によると出生時の水晶体極方向の弾性は Young 係数で単位平方メートル当たり $0.75 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ 、赤道方向では $0.85 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ でほぼ均等に近い、15歳では極方向 $0.7 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ 、赤道方向 $0.9 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ と極方向に比べて赤道方向の弾性が増加し、その差は30歳で最も大

きくなり、赤道方向の弾性に対する極方向のそれは最小となる。しかしその後は極方向の弾性も増加して、63歳には両方向の弾性が共に $3 \times 10^3 \text{Nm}^{-2}$ と均等になり、同時に弾性の増加による水晶体の硬化が変形能を低下し調節が困難になる。

Brown²¹⁾によると水晶体前面の曲率半径は11~45歳の観察対象者のすべてで調節時かなり減少するが周辺部では年齢により異なり、11歳では僅かに増加し29歳では特にそれが顕著になる。即ち水晶体核が水晶体の厚さの80%を占める11歳では水晶体の弾性が均一で小帯線維付着輪が赤道に近いために、調節により水晶体前面中心部の曲率半径が減少し、水晶体周辺部の曲率半径は僅かに増加するために、水晶体全体が楕円体となり中心部に錐状体の形成 (cone formation) は見られない。29歳眼では調節時水晶体核は厚さを増し、水晶体前面の曲率半径が減少すると同時に、周辺部の曲率半径の増加が最も著名となるために錐状体の形成が最高となる。45歳頃には皮質の増加に伴ない水晶体核が水晶体の厚さに占める割合は66%に減じ、調節の際には水晶体核は厚さを増し、水晶体前面は曲率半径を減ずるが、周辺部の曲率半径は僅かに増加の傾向を示すだけとなるために、錐状体の形成も僅かしか見られなくなり、その後も水晶体は加齢に伴い形態が変わると同時に調節時の水晶体の変形は全体に小さくなる。

実際に最も調節した状態での水晶体曲光度 (dioptr) の加齢に伴う変化、すなわち曲光度変化率 (lens coefficient) は年齢と共に直線的に低下して、61歳までに零となる²²⁾。

Kibbelaar²³⁾、Maisel²⁴⁾によると、水晶体線維には細胞骨格となるアクチンフィラメントと共にビメンチンの存在が確認され、この両者は水晶体皮質に分布し深層皮質や核には見られないことも明らかにされている²⁴⁾。アクチンフィラメントについてはそのエネルギー源となるATPの存在、およびATPは加齢と共に減少することも認められているが、ATPが年齢と共にその活性が低下することはアクチン線維が水晶体線維の形態を維持するばかりでなく、調節時の水晶体の変形にも能動的機能を持つことも否定出来ず、この点更に解明の必要がある²³⁾。そしてアクチンフィラメントが調節に能動的役割を果たしているとするれば、加齢に伴う調節力低下はほとんど水晶体自身の問題として対応することが可能であり、必要であると考える。

水晶体中に大量に分布するグルタチオンについては還元型グルタチオン、酸化型グルタチオンおよびタンパク結合型グルタチオンの3種類のうち、還元型グルタチオンはタンパクSHと共に水晶体内に高濃度に含まれていて水晶体細胞や膜物質の酸化を防ぎ、クリスタリンの立体構造の維持に重要な役割を果たしている。グルタチオン代謝に関与するグルタチオン酸化酵素は15歳で最高値を示し、その後は漸減するが、グルタチオン還元酵素と同S転移酵素は生涯を通じて殆ど一定で、これら3酵素によるグルタチオン代謝は水晶体の防護系を形成している²⁵⁾。しかし還元型グルタチオンは20歳では $3.5 \mu\text{mol/g lens}$ の含量から65歳の透明水晶体では $1.8 \mu\text{mol/g lens}$ に年齢と共に減少が見られる。還元型グルタチオンの減少は水晶体の酸化障害に対する防護能力を低下せしめ、水晶体の膜構造の変化と共にクリスタリンの会合凝集を来す²⁶⁾。

水晶体を構成する蛋白質については水溶性蛋白質の中で分子量が最も大きく重要な成分で、哺乳類水晶体の約50%を占める α クリスタリンが加齢に伴い凝集して高分子量の α クリスタリンを形成し、その量が増加する²⁷⁾。

β クリスタリンは α クリスタリンに次いで分子量の大きい、水晶体蛋白質の重要な成分で水晶体の約33%を占めるが、分子量の異なるいくつかの成分から構成されている。若い眼球の水晶体では分子量の小さい β_L が多く、分子量の大きい β_H は少ないが、加齢に伴いジスルフィド結合 (disulfide bond) を形成して大きい分子量の蛋白質を形成するために β_L は凝集して β_H に変化することから加齢に伴い β_L は減少して、 β_H が増加する²⁷⁾⁽²⁸⁾。またラット水晶体クリスタリンの研究から²⁹⁾ β クリスタリンもジスルフィド結合により加齢に伴う水晶体の硬化にある程度関与することが示唆されている。

低分子量蛋白質分画の大部分を占める γ クリスタリンには分子量24,000の γ_H と、分子量20,000の γ_L の2種類があり、前者 γ_H は高齢者の水晶体に多く、後者 γ_L は若年者の水晶体に多く見られて、年齢の増加とともに減少する³⁰⁾。これは取りも直さず加齢に伴う水晶体核の体積の相対的減少と皮質の増加を生化学的に示している。さらにラット水晶体の γ クリスタリンは加齢に伴いジスルフィド結合を作り、その体積を減ずるために水晶体核の蛋白質は密集して、結果的には水晶体核の硬化を来すことが明らかにされている²⁹⁾。

水晶体の水不溶性蛋白質アルブミノイドは10歳

以下の水晶体では約3%と少ないが、年齢とともに増加して80~90歳になると約40%に達し、アルブミノイドの増加により水晶体は弾性が低下して水晶体の硬化、ひいては老化による調節幅(力)の低下の一因となることを示している³¹⁾。

水晶体は加齢に伴い生化学的にも硬化して調節幅(力)の低下に関与することが明らかにされている。

次に水晶体嚢は生後の水晶体の成長に伴い部位により厚さが変わる。水晶体前嚢(前嚢)の厚さは新生児では小帯線維附着輪を含む赤道部が最も厚く、前極はその1/2、後極はその1/6の厚さしかない。10歳までは年率2~3%の割合で厚さを増すが、その後は水晶体が調節力を全く失った後の高齢になるまで、年率約0.1%の割合で厚さを増す。特に小帯線維附着輪下の前嚢は年率約1%の割合で厚さを増し、60歳以降の調節力がほとんど失われた時期には明らかに小帯線維の附着部の水晶体前嚢が最も厚い部位となり、前極部は小帯線維附着輪下前嚢の約1/2に、後極部はその約1/6の厚さになる³²⁾。水晶体嚢前極部の弾性は小児ではYoung係数で $6 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ 、60歳では $3 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ 、80歳頃には $1.5 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ と年齢と共に低下する。即ち60歳で水晶体嚢の弾性は小児の1/2以下に低下して、水晶体嚢の弾性は年齢と逆相関の関係にあることが明らかにされており³³⁾、水晶体実質の硬化と共に調節時の水晶体の変形能を低下させている。

水晶体は年齢と共に扁平化してそれに伴い水晶体嚢にはエネルギーが蓄積される。水晶体嚢単位面積あたりに蓄積される嚢エネルギーの量と調節力には相関関係が見られ、嚢エネルギーは水晶体の扁平化の程度と赤道より前の部分の体積の大きさにより決まり、水晶体が扁平な程、また赤道より前の部分の体積が小さい程蓄積される嚢エネルギーは増加する。15歳までは水晶体の扁平化により蓄積される嚢エネルギーは増加が著しいが、16歳以後は水晶体の扁平化の速さが遅くなり、18~65歳の間に水晶体の扁平化により蓄積される嚢エネルギーは25%増加するが、60歳眼では水晶体嚢の弾性が小児の1/2以下に低下するためにこの間に実際に蓄積される嚢エネルギーは40%以下に低下し³⁴⁾60歳以上では蓄積される嚢エネルギーはかなり低下して水晶体の変形能を低下させることになる。

以上調節に関する毛様体筋、小帯線維、水晶体の加齢に伴う形態的、機能的および生化学的変化を検討し、加齢に伴う調節力低下発症の機序に付いて考察した結果、1)毛様体筋および小帯線維の加齢に伴う機能

低下は60歳頃までは著しくないが、2)水晶体実質の弾性係数の増加と変形能の低下、3)生化学的に明らかな水晶体蛋白質の硬化、4)水晶体嚢内に蓄積されるエネルギー量の低下による水晶体の機能低下が調節力低下の原因の大部分である事が考えられた。

従って毛様体筋はその萎縮が明らかに見られる70歳頃までは収縮力を保持しており、それ以前の年齢で変形能を持った調節可能な眼内レンズが開発されるか、あるいは水晶体実質を弾性を持った物質で置換することができれば、水晶体嚢は小児の水晶体嚢ほどの弾性はないが、Young係数で60歳で $3 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ 、80歳で $1.5 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ の弾性²⁶⁾を持つのでかなりの調節力の回復が期待できるのではないかと考えられる。

V 眼内レンズの行方

確実な嚢内固定法が可能になっても、現在のポリメチルメタクリレート(PMMA)を素材とした眼内レンズでは調節を回復することはほとんど不可能なことから、嚢内乳化吸引術の技術的改良と³⁵⁾³⁶⁾、それにより残された水晶体嚢に置換物質を注入して調節力を回復することが試みられている。無水晶体に対して調節力を持った眼内レンズ移植の試みは古く、白内障嚢内摘出術が一般化して間もない、まだ水晶体乳化吸引術や計画的白内障嚢外摘出術が実用化されていない1964年Kessler³⁷⁾は牛眼や家兎眼の水晶体実質を吸引し、その後の嚢内にシリコンオイルを注入して23か月間良好な結果を得たことを報告している。

Parelら³⁸⁾、Haefligerら³⁹⁾は家兎眼の水晶体嚢に単極誘導のジアテルミーで1.3mmの小孔を作り、径1.3mmのminutip proveによる嚢内乳化吸引術後、前処置したシリコンポリマーを注入して変形可能な偽水晶体眼の作成を行い、更にヨザル(owl monkey)の水晶体に同様な操作で偽水晶体眼を作りピロカルピンにより調節作用が見られることを確認している。

本邦でも西ら⁴⁰⁾は、家兎眼の水晶体前嚢中央部に約2.5~3mmの円形水晶体嚢裂(circular capsulorhexis)を行い水晶体実質を乳化吸引後、氏ら、が考案した前面の径4.5mmの楕円形の光学部を持ったPMMAレンズにより水晶体嚢の開口部を閉鎖して水晶体嚢内にポリアクリルゲルを注入して実験的に良好な結果を得ており、今後の改良で更に良好な結果が得られるものとする。

水晶体嚢内へ置換物質を注入する際の問題点として

水晶体囊に作られた吸引孔の閉鎖の問題が残されており、更に置換物質は最低限度、透明性、安定性、屈折率、比重、細胞毒性などの物性的条件の詳細な検討が必要であると考える。特に細胞毒性に付いて考えると水晶体囊は前囊下には上皮細胞が残されているために、その増殖を抑制できる程度の毒性が必要であり、一方、その毒性により水晶体囊が混濁したり、その弾性が傷害されないことが必要である。また水晶体囊内へ注入する際にその置換物質が前房内へ漏れてもその物質が触れた眼内組織に障害を与えないことも重要である。更に水晶体囊内へ注入された置換物質は水晶体前囊下の上皮細胞がその表面に付着して白濁化⁴¹⁾、透明性を損なわないように親水性も要求されるためこれらの組織生物学的要因も十分に兼ね備えた物質でなければならない。そしてこれらの諸条件を満たせる物質として可能性が最も高いのは無数の誘導体を作れるシリコン系の物質と考える³⁸⁾。

上記の諸条件を満たす物質が使用可能となったとしても、次に水晶体囊へ注入する量や、注入された水晶体囊の形態および変形についても更に詳細な検討が必要と考える。

しかしながら近年の急速に進歩する技術は余り遠くない将来これらの問題点を解決して新しい眼内レンズを挿入した偽水晶体眼に自覚的にも、他覚的にも調節が見られる日が来るものと考えられる。

本論文の一部は第95回日本眼科学会総会白内障シンポジウムで発表した。

文 献

- 1) 杉谷幸彦, 小林敏郎, 鬼頭謙次郎, 他: 眼内レンズ(人工水晶体)挿入眼の偽調節について. 眼紀 30: 326-331, 1976.
- 2) 星 兵仁, 亀ヶ沢アメリカ, 筑田 真, 他: 眼内レンズ挿入眼(偽水晶体眼)の視機能. 眼紀 31: 1409-1419, 1980.
- 3) Nakazawa M, Ohtsuki K: Apparent accommodation in pseudophakic eyes after implantation of posterior chamber intraocular lenses. Am J Ophthalmol 96: 435-438, 1983.
- 4) 渡辺清敬, 河合憲司, 天野 肇, 他: 人工的水晶体挿入眼の偽調節と近距離明視域について. 臨眼 38: 161-164, 1984.
- 5) 江口甲一郎, 多田桂一, 若林憲章, 他: 白内障術後眼内レンズ挿入眼の偽調節と多焦点墨進レンズの応用. 眼紀 38: 2250-2257, 1988.
- 6) 新美勝彦: 偽水晶体眼の偽調節. 眼科 31: 733-737, 1989.
- 7) 岡野正樹, 田所康徳, 長谷部聡, 他: 眼内レンズ挿

入眼における偽調節一他覚的測定を試み. 眼紀 42: 415-420, 1991.

- 8) 山本修一, 安達恵美子: 眼内レンズ挿入眼における偽調節一パターン視覚誘発電位による他覚的解析. 日眼会誌 93: 363-368, 1989.
- 9) Stieve R: Über den Bau des menschlichen Ciliarmuskels, seine physiologischen Veränderungen während des Lebens und seine Bedeutung für Akkommodation. Z mikroskop Forsch 55: 3-88, 1949.
- 10) Stieve R: Über den Bau des menschlichen Cilarmuskels, seine Veränderungen während des Lebens und seine Bedeutung für die Akkommodation. Anat Anz 97: 69-74, 1949.
- 11) van der Zypen: Licht-und-elektronenmikroskopische Untersuchungen über die Altersveränderungen am M. ciliaris im menschlichen Auge. Albrecht von Graefes Arch Klin Exp Ophthalmol 179: 332-357, 1970.
- 12) 西田祥藏: 眼の老化, 眼組織の老化と調節. 日眼会誌 94: 93-119, 1990.
- 13) 水谷 聡: ヒト毛様体筋の加齢に関する形態学的研究. 愛知医会誌 19: 251-266, 1991.
- 14) Fisher RF: The force of contraction of the human ciliary muscle during accommodation. J Physiol 270: 51-74, 1977.
- 15) Fisher RF: The ciliary body in accommodation. Trans Ophthalmol Soc U K 105: 208-219, 1986.
- 16) Swegmark G: Studies with impedance cyclophography on human ocular accommodation at different ages. Acta Ophthalmol 47: 1186-1206, 1969.
- 17) Moses RA: The ciliary body in aphakia. Ann Ophthalmol 3: 1112-1115, 1971.
- 18) Farnsworth PN, Shyne SE: Anterior zonular shifts with age. Exp Eye Res 28: 291-297, 1979.
- 19) Patnaik B: A photographic study of accommodative mechanisms: Changes in the lens nucleus during accommodation. Invest Ophthalmol 6: 601-611, 1967.
- 20) Fisher RF: The elastic constants of the human lens. J Physiol 212: 147-180, 1971.
- 21) Brown N: The change in shape and internal form of the lens of the eye on accommodation. Exp Eye Res 15: 441-459, 1973.
- 22) Fisher RF: Presbyopia and the changes with age in the human crystalline lens. J Physiol 228: 765-779, 1973.
- 23) Kibbelaar MA, Ramaekers FCS, Ringens PJ, et al: Is actin in eye lens a possible factor in visual accommodation? Nature 285: 506-508,

- 1980.
- 24) **Maisel H, Ellis M**: Cytoskeletal proteins of the aging human lens. *Curr Eye Res* 3: 369—381, 1984.
- 25) **Rothbun WB, Bovis MG**: Activity of glutathione peroxidase and glutathione reductase in the human lens related of age. *Curr Eye Res* 5: 381—385, 1986.
- 26) 疋田光史: グルタチオンおよびその他の還元物質. 岩田修造 編: 水晶体, その生化学的機構. 東京, メディカル葵出版, 130—144, 1986.
- 27) **Pierscionek B, Augusteyn RC**: Protein distribution patterns in concentric layers from single lenses: Changes with development and ageing. *Curr Eye Res* 7: 11—23, 1988.
- 28) **Bours J, Hockwin O**: Biochemistry of the ageing rat lens. II. Isoelectric focussing of water-soluble crystallins. *Ophthalmic Res* 15: 234—239, 1983.
- 29) **Hum TP, Augusteyn RC**: The nature of disulphide bonds in rat lens proteins. *Curr Eye Res* 9: 1103—1108, 1987.
- 30) **Kabasawa I, Barber GW, Kinoshita JH**: Ageing effects and some properties on the human lens low molecular weight proteins. *Jpn J Ophthalmol* 21: 87—97, 1977.
- 31) 古川圭子, 岩田修造: アルブミノイド. 岩田修造 編: 水晶体, その生化学的機構. 東京, メディカル葵出版, 86, 1986.
- 32) **Fisher RF, Pettet BE**: The postnatal growth of the capsule of the human crystalline lens. *J Anat* 112: 207—214, 1972.
- 33) **Fisher RF**: Elastic constants of the human lens capsule. *J Physiol* 201: 1—19, 1969.
- 34) **Fisher RF**: The significance of the shape of the lens and capsular energy changes in accommodation. *J Physiol* 201: 21—47, 1969.
- 35) **Hara T**: Clinical results of endocapsular phacoemulsification and complete in-the-bag intraocular lens fixation. *J Cataract Refract Surg* 13: 279—286, 1987.
- 36) **Nishi O**: Intercapsular cataract surgery with lens epithelial cell removal Part I: Without capsulorhexis. *J Cataract Refract Surg* 15: 297—300, 1989.
- 37) **Kessler J**: Experiments in refilling the lens. *Arch Ophthalmol* 71: 412—417, 1964.
- 38) **Parel J-M, Gelender H, Trefers WF, et al**: Phaco-Ersatz: Cataract surgery designed to preserve accommodation. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 224: 165—173, 1986.
- 39) **Haefliger E, Parel J-M, Ets-G I, et al**: Accommodation of an endocapsular silicon lens (Phaco-Ersatz) in the nonhuman primate. *Ophthalmology* 94: 471—477, 1987.
- 40) **Nishi O, Skka Y**: Anterior capsule-supported intraocular lens. A new lens for small-incision surgery and for sealing the capsular opening. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 228: 582—588, 1990.
- 41) 筏 義人: 眼科用材料の生体適合化. *眼紀* 42: 1811—1817, 1991.