

することにより逆向きの球面収差が発生し、ダブルレットレンズのように収差を打ち消しあったため、全眼球の高次波面収差の増加が抑制されたと考えられた。

ICL の今後

現在の ICL では乱視が矯正できないため、術後に LASIK など、他の屈折矯正手術との組合せ (Bi-optics) により、よりよい裸眼視力を得る方法や、通常の IOL 手術時あるいは術後の矯正追加・補正に対して piggy bag の代わりに ICL を使用する方法³⁾などの応用の可能性がある。また、乱視矯正も含めた toric ICL の研究も行われている。

ICL は術後の高次波面収差も少なく、高度屈折

異常眼に対する、新世紀の新しい屈折矯正手術として期待される。

文献

- 1) Aizawa, D. et al. : Clinical outcomes of wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis : 6-months follow up. *J. Cataract. Refract. Surg.*, **29** : 1507-1513, 2003.
- 2) The Implantable Contact Lens in Treatment of Myopia Study Group : U. S. food and drug administration clinical trial of the implantable contact lens for moderate to high myopia. *Ophthalmology*, **110** : 255-266, 2003.
- 3) Hsuan, J. D. et al. : Correction of pseudophakic anisometropia with the Staar Collamer implantable contact lens. *J. Cataract. Refract. Surg.*, **28** : 44-49, 2002.

* * *

特集 老視：そのメカニズムと克服にむけて

(神眼 21 : 29 ~ 36, 2004)

老視の治療

清水 公也

北里大学医学部眼科学教室

A Conquest for Presbyopia in Pseudophakia

Kimiya Shimizu

Department of Ophthalmology, Kitasato University School of Medicine, Kanagawa, Japan

要約

白内障手術後の老視の解決法としては、1. 多焦点眼内レンズ (multi focal IOL : 以下多焦点IOL), 2. 調節眼内レンズ (accommodation IOL : 以下調節IOL), 3. 単焦点眼内レンズ (mono focal IOL : 以下単焦点IOL) を用いたモノビジョン法 (monovision) があり、各々の特徴を述べた。また多焦点IOLとモノビジョン法の利点を生かした新しい手法として、多焦点IOLを用いたモノビジョン法 (以下カスタマイズドモノビジョン) について報告した。対象は北里大学病院にて両眼白内障手術を希望した症例から適宜選択した。結果として多焦点IOLや調節IOL挿入例では近方視力が不十分で近用眼鏡を必要とした。また単焦点IOLを用いた通常のモノビジョン法では、遠見及び近見とも0.8以上と良好であったものの両眼視機能が低下していた。カスタマイズドモノビジョン法では、遠見及び近見ともほぼ0.8以上の視力を獲得し、両眼視機能も正常値を維持した。多焦点IOLを用いたカスタマイズドモノビジョン法は若干のコントラスト感度の低下があるものの、遠見及び近見視力のバランスが良く、両眼視機能も良好で白内障手術後における老視の克服に有用な手法と考えられた。

(神眼21 : 29 ~ 36, 2004)

Abstract

Purpose: To examine conquest methods used for presbyopia postoperative cataract surgeries. Multi-focal IOLs, accommodation IOLs, monovision though mono-focal IOL use, and a new technique referred to as, "customized monovision by multi-focal IOLs" are discussed. **Cases:** Patient were selected if they had these types of IOLs implanted in both eyes after cataract surgery in our hospital. **Results:** Almost all patients implanted with multi-focal IOLs or accommodation IOLs needed glasses for near vision. All patients that had monovision from mono-focal IOLs achieved far vision of over 20/25. However in this group, the binocular functional vision was much worse. The patients with customized monovision achieved near and distance vision of over 20/25, and their binocular function remained normal. **Conclusion:** Customized monovision possesses advantages for both multi-focal IOLs and monovision through use of mono-focal IOLs. This method is an excellent way to achieve a conquest of presbyopia in pseudophakia.

(Neuro-ophthalmol Jpn 21: 29 ~ 36, 2004)

Key Words: presbyopia, multi-focal IOL, accommodation IOL, monovision, customized monovision

別刷請求宛先：清水公也 〒228-8555 神奈川県相模原市北里1-15-1 北里大学医学部眼科学教室 / Reprint
Requests to: Kimiya Shimizu, Department of Ophthalmology, Kitasato University School of Medicine, 1-15-1
Kitasato, Sagami-hara, Kanagawa 228-8555, Japan

緒言

加齢による調節力低下が主原因となって、近見困難という視機能低下を発現することが老視(presbyopia)、いわゆる老眼である。調節力低下の原因は加齢に伴うものであるが、大別すると以下のとおりである。

1. 集光組織(水晶体/角膜)の加齢変化
 - ・水晶体の弾力性低下により屈折の可変域が狭小化する
 - ・角膜/水晶体の収差のバランスが悪く、全収差増加により光学性能が低下する
2. 調節機能を仲介する組織の加齢変化
 - ・毛様体筋の機能低下により水晶体の屈折可変性が減少する
 - ・チン小体の減少により毛様体筋の応力の伝達効率が減少する
3. 認識系の加齢変化
 - ・網膜や視細胞など受光機能が低下する
 - ・脳の認識能が低下する

一般に調節力は10歳代の10数Dをピークに加齢と共に減少し、40歳代でほぼ3D程度に低下すると言われている。したがって正視ではこの年代から近見時に不自由を感じ始め、老眼鏡の装用が必要となってくる。また遠視眼では老眼鏡の装用はさらに早期に必要となる。近視では調節力の低下は同様に起こるが、遠点が有限前方のため理論的には-3D程度の近視では、眼鏡を外せば近見用の眼鏡は別途必要ではないこととなる。しかし眼鏡を外した状態では遠見が困難となる。このように老視は主に壮年以降の問題ではあるが、一方、加齢による視機能へのもう1つの大きな問題として白内障の罹患率増加が挙げられる。近年、白内障の手術時期は以前に比較して、より早期に行なわれている傾向がある。すなわち近年では高齢者でも自動車の運転を始め活動的な生活を希望する場合が多く、ま

た手術もより早期に行なうことで良好な術後成績が得られることによる。白内障の薬物療法は現時点で事実上困難であり、根治療法として白内障摘出術+眼内レンズ(以下 IOL)挿入術が一般となっており、生体の老化の直接的な防止である老視自体の治療は困難であっても、白内障手術における IOL の選択などで一定の視力の質(以下 QOL)は得られるのではと考えられる。すなわち健常者の老視を完全に治療する方法はまだ開発されていないが、白内障手術後の偽水晶体眼における老視は様々な工夫をすれば克服することも可能となってきている。筆者が考える白内障手術後の老視克服としての指標は、

1. 裸眼で遠方から近方まで0.8以上の視力が得られること
2. 正常な両眼視機能が維持されること
3. コントラスト感度が維持されることである。

これらを考慮した上で、偽水晶体眼における老視に対する幾つかの手法を試みた。偽水晶体眼における老視の治療法には、1. 多焦点 IOL, 2. 調節 IOL, 3. 単焦点 IOL を用いたモノビジョンが考えられる。また多焦点 IOL とモノビジョンの利点を併せ、新しい手法としてのカスタマイズドモノビジョン法について報告する。

白内障手術後の老視対策を目的とした IOL の選択

白内障手術後の老視の対策としては、前述したように多焦点 IOL, 調節 IOL, 単焦点 IOL でのモノビジョン、カスタマイズドモノビジョンがある。各々に長所及び問題点があるが自験例を元に概要を以下に述べる。

1. 多焦点 IOL

現在、本邦で薬事承認されている折り畳み可能な(foldable)多焦点 IOL は、唯一 AMO 社

製Arrayがある(図1)。本IOLは直径6mmのシリコン製の光学部とPMMA製の支持部から成る3ピースで、光学部は中心部から周辺部に向かって同心円上に遠用・近用が交互に5つのゾーンで構成され、中間距離でも視力が得られるように設計されているが、明所の自然瞳孔径は4mm以上必要となる¹⁻⁶⁾。また遠方視と近方視時で光の分光が起り、網膜には同時に両映像が映るために、分解能すなわちコントラスト感度の低下という問題がある。網膜に同時に映った遠近の像をどのように認知するかということについては、通常、

ヒトの脳では17野より高次中枢において必要な映像を任意に選択し不必要な映像を抑制するという働きがあり⁷⁾、多焦点IOLでも同様な処理がなされているとされている。

当科において両眼に多焦点IOLを挿入した症例の両眼開放視力は、眼前1mまで0.8以上の視力が維持されていたが、眼前30cmでは0.56と低下し(図2a)、約1/3の症例が近用眼鏡を使用している(図3)。また立体視についてTitmus stereo testを用いて検討したところ、全例が正常値(100seconds)を維持していたが、コントラスト感度は全体的に低下していた。

多焦点IOLでは近方視力が一番大きな問題と言われている。すなわち遠方視力が非常に良好な場合でも近用眼鏡を使用する症例は多く、またコントラスト感度については低下が認められる。また光学設計上、瞳孔運動に適応条件がある他、高次中枢の認識系が良好であることが必要のため、一般に若年者の方が高齢者よりも満足度が高い傾向が認められている。

AMO社製多焦点foldable IOL Arrayの写真

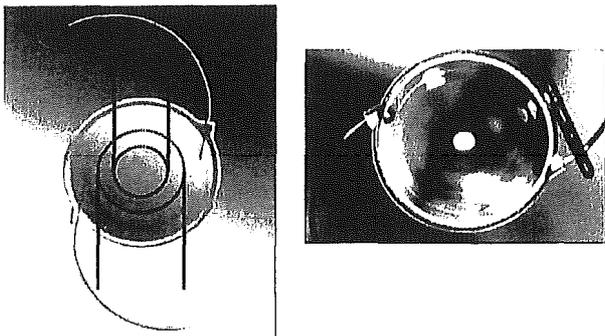


図1 多焦点foldable IOL(3ピースシリコンIOL)AMO社製Array®

2. 調節IOL

調節IOLは米国では治験中であるが⁸⁾、欧

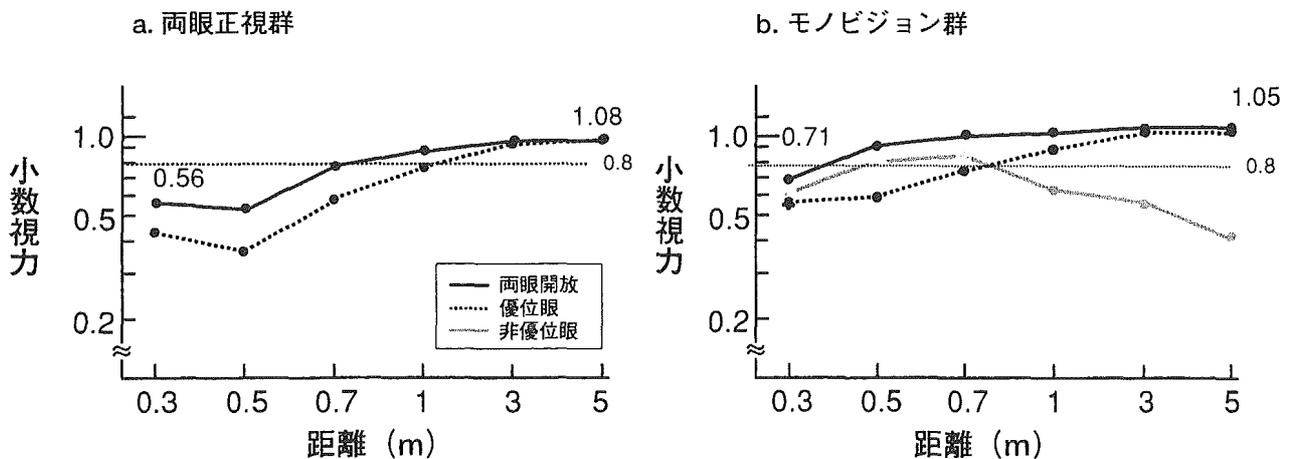


図2 多焦点IOLの全距離視力両眼正視群は、眼前0.7mまでは0.8以上の両眼開放視力が維持されたが、0.3mでは0.56まで低下した(N=44)。一方、カスタマイズドモノビジョンでは、全距離において約0.8の両眼開放視力が維持され、視力の累加も認められた(N=17)。

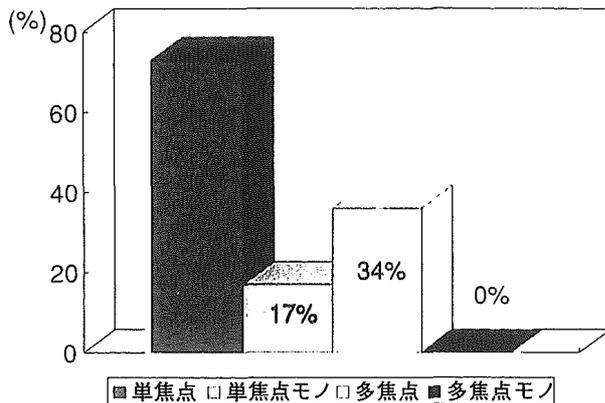


図3 眼鏡使用率：単焦点IOLでの両眼正視群では術後72%の症例が眼鏡を必要とし、モノビジョン群では17%であった。多焦点IOLでの両眼正視群では術後34%の症例が眼鏡を必要とし、カスタマイズドモノビジョンでは0%であった。

州では既にCEマークを取得し販売が許可されている。本邦での薬事承認を取得したIOLは現在のところ未だ1つもない。米国で治験が行なわれているもので有望視されているものとしてはEyeonics社(旧名.C&C社)がある(図4)。光学部(直径4.5mm)や可撓部を含め全てシリコンエラストマーから成るため軽量で可動性が非常に高いと言われている。術後、前囊によって光学部の可動性が制限されないように、通常の白内障手術の場合よりも切囊径をレンズ光学部より大きくする必要がある。本IOLを北里大学の倫理委員会で承認を得た後、患者に対して十分なインフォームドコンセントを行ない、同意が得られた症例を対象に挿入した⁹⁾。両眼に調節IOL挿入した症例の遠方視力は、全例で1.0以上の矯正視力が得られたが、遠方矯正下における近方視力は、約1/4の症例で0.6以上であった(図5)。なお調節時のIOLの動きを捉えようと様々な方法を試みたが困難であった。見かけ上の屈折値の変化は平均0.5Dであった。

Eyeonics社製(旧C&C社)調節IOL AT-45の写真

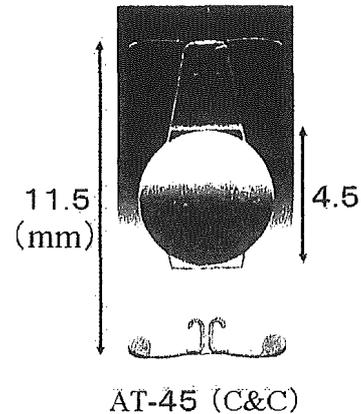


図4 調節IOL Eyeonics社製(旧社名C&C) CrystaLens AT-45[®]

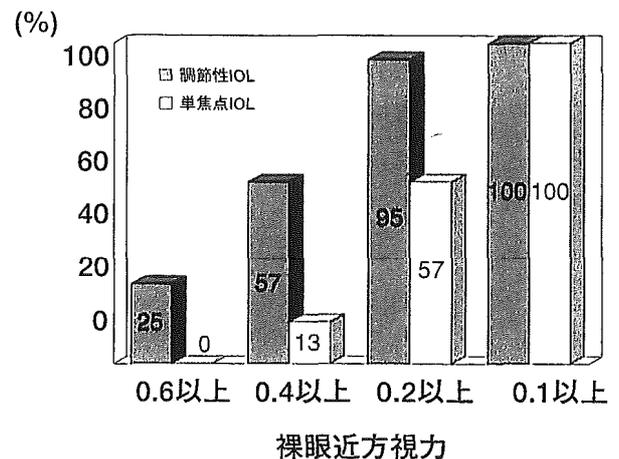


図5 調節IOL挿入例の近方視力：単焦点IOL挿入例(N=16)での裸眼近方視力が0.4以上得られた症例は13%，0.6以上は0%であったのに対し、調節IOL挿入例(N=54)では0.4以上は57%，0.6以上は25%と近方視力の向上を認めた。

調節IOLは若干の調節機能を有するが十分な近方視力は得られず、囊が収縮すると次第にその調節力は少なくなり、最終的には期待されるほどの調節効果は得られないという結論が得られた。なお光学部が小さいため憂慮されたグレアやハローの訴えはなかった。

3. 単焦点IOLを用いたモノビジョン

モノビジョンはコンタクトレンズにおいて

約30年以上の歴史があり、優位眼の屈折を遠方に合わせ、僚眼(劣位眼)を近方に合わせる方法である¹⁰⁻¹¹⁾。つまり遠方視時は優位眼を使用し、近方視時へ移行する過程で眼優位性に変化し、近方視時は劣位眼を使用することを期待している。この機構は多焦点IOLの場合と異なり、外側膝状体もしくは17野と言われている^{12,13)}。モノビジョンでは左右眼に屈折差を設けるため、眼位や両眼視機能への影響が問題となる¹⁴⁻¹⁶⁾。術前には適応の判断も含め、左右の視力が同等になるようにして眼位、両眼視機能、眼優位性、融像幅等について詳細に検討した。矯正視力0.3以下の症例に対する判定は困難であった。

モノビジョンの適応基準の一つに「眼優位性の弱い症例」であることが挙げられる。これまでは大型弱視鏡用の視野闘争スライドを用いて眼優位性の判定(定性)を行ってきたが、さらに眼優位性を定量することを目的とした装置を作成した¹⁷⁾。本装置も視野闘争を利用しており、患者に対して右眼と左眼に同時に縞の格子を見せて、一方の縞のコントラストを徐々に落とし、眼優位性を定量化する

ものである。多くの場合、優位眼のコントラストを60%に落とした時点で劣位眼優位に移行した。つまりコントラスト60%以上の高コントラストで優位眼より劣位眼優位に移行するならば眼優位性が低く、20%までコントラストを落としてもまだ優位眼で見える場合は眼優位性が強いと判断できる。

今回、単焦点IOLを正視となるように両眼へ挿入した場合、眼前1mまでは0.8以上の視力が維持されたが、眼前0.3mでは0.3に低下し近用眼鏡を必要とした(図6a)。しかしモノビジョンでは中間距離で累加効果が認められ、遠方から近方まで0.8以上の視力が獲得された(図6b)。両眼視機能の検討は位置の立体視についてはTitmus stereo test、運動の立体視は三杆法を用いた。位置の立体視は約2/3の症例で正常値を維持した(図7)。しかし運動の立体視は約1/3の症例が正常値(48.1秒以内)を示したのみであった(図8)。単焦点IOLで両眼正視とした場合でも正常値を示す症例は約85%であったことから、この正常値に関しては年齢的な要素も考慮しなければならないと考えられる。コントラスト感度

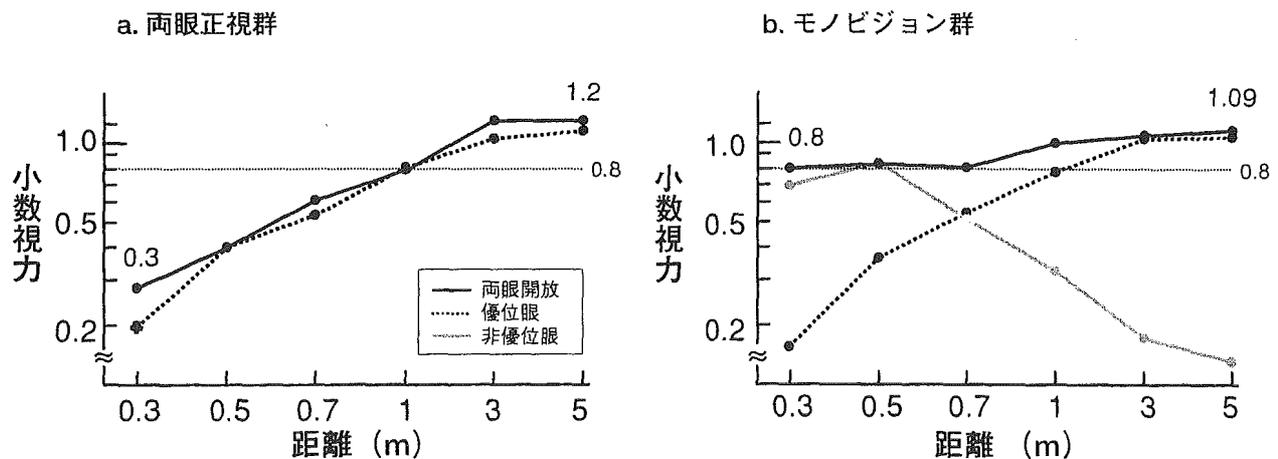


図6 単焦点IOLの全距離視力：両眼正視群は、眼前1.0mまでは0.8以上の両眼開放視力が維持されたが、0.3mでは0.3まで低下した(N=19)。一方、モノビジョン群では、全距離において0.8以上の両眼開放視力が得られ、中間距離(0.7・1.0m)では、視力の累加が認められた(N=39)。

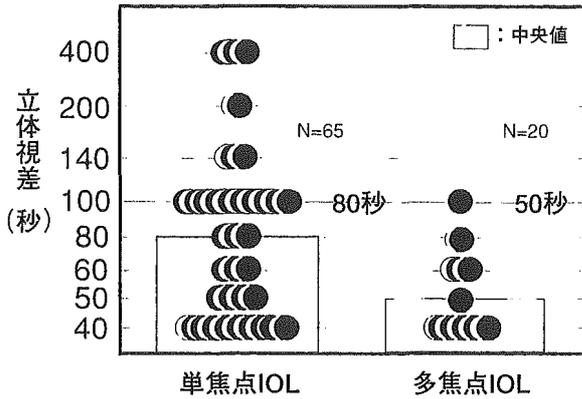


図7 モノビジョンの近方立体視機能：●は各症例の値，□は中央値を示す。単焦点IOLモノビジョンは中央値80secであった。カスタマイズドモノビジョンは中央値50secであり，全例正常値(100sec)以内を示した。

a. 両眼正視群 (N=14) b. モノビジョン群 (N=39)

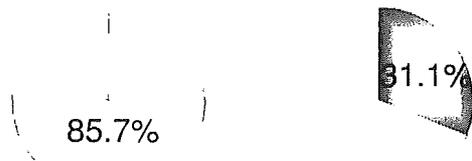


図8 単焦点IOLの遠方立体視機能：両眼正視群では正常値(48.1sec)以内の症例が85.7%であったのに対し，モノビジョン群では31.1%と有意に低かった(P<0.01: χ^2 検定)。

は低～中空間周波数領域で両眼加算を認めた^{21, 22)}。さらに両眼視機能を維持した群と低下した群で比較すると，維持した群では屈折差が約2D以内であり，低下した群は2.5D以上であったと報告されている¹⁴⁾。つまり両眼視機能の維持は屈折差の影響が大きいと考えられる。またモノビジョンを施行した約71%の症例に満足が得られている。

単焦点IOLによるモノビジョンの問題点は，近方視力と両眼視機能の同時維持である。良好な近方視力を得るためには2.5D以上の

屈折差をつけることが不可欠であるが，両眼視機能を考えるならば2.0D以下の屈折差にする必要がある。つまり左右眼の屈折差を1.5D以内に抑え，全距離において0.8以上の裸眼視力を獲得し，両眼視機能，コントラスト感度ともに正常値を維持し，高い満足が得られる方法が必要となる。

4. 多焦点IOLを用いたカスタマイズドモノビジョン

多焦点IOLの遠近の有効度数差は約2Dと考えられ，理論上は優位眼の屈折を0Dとした場合，劣位眼は0～約-2Dまでの間で両眼視することが可能となる。そして劣位眼の屈折を1D加減することにより，-1～-3Dまで明視可能となると考えられる。つまり両眼開放下で3Dの付加と同様の効果が得られ，左右の屈折差を1D程度に抑えることが可能となり，近方視力の向上と両眼視機能の維持が期待できる。このような理論に基づき，多焦点IOLを用いたモノビジョンが「カスタマイズドモノビジョン」法である。従来のモノビジョンの適応基準に加え，多焦点IOLの構造から明所での自然瞳孔径4mm以上の症例が適応となる。

当科でのカスタマイズドモノビジョンでは，中間距離で累加効果が認められ，遠方1.08，近方0.76とほぼ全距離に良好な視力が得られた(図2b)。また位置の立体視は全症例が正常値を維持した(図9)。コントラスト感度は低下したが，これまでのところ重篤な不満は出ていない。しかし個人によって満足度は異なるため，今後は適応について十分な検討が必要である。

考察

前述した4つの手法を比較すると，カスタマイズドモノビジョンは全距離視力，両眼視機能で老視の克服に優れた方法と考えられ

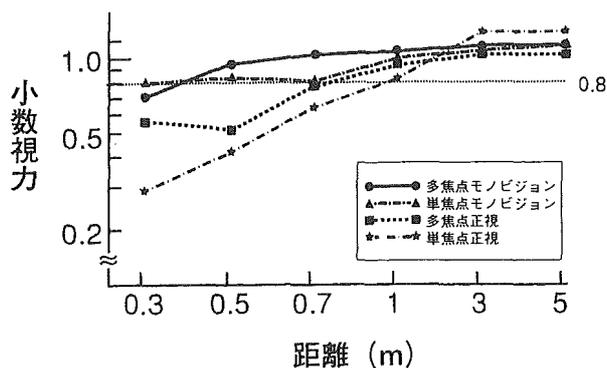


図9 カスタマイズドモノビジョンでの位置の立体視：全症例が正常値を維持した。

る。しかし現在の問題点として、屈折型多焦点IOLの機能が瞳孔径に依存することと、コントラスト感度の低下を引き起こすことが挙げられる。回折型多焦点IOLは構造上、瞳孔径に影響を受けないので、コントラスト感度の低下がない光学設計が実現されれば、临床上、有用である可能性が高いと考えられる。

2001年の日本の総人口は約1億2500万人であり、老視人口はそのうちの約46%と言われている。また老視人口の約74%が何らかの不自由さから眼鏡を使用し、その約43%は遠近の累進多焦点眼鏡を使用していると推測されている。老視とは近方の見えにくさによって自覚される調節力の減衰であり、調節を司る要素には1. 毛様筋, 2. チン小体, 3. 水晶体がある。Strenkら¹⁸⁾はMRIを用いた検討で、調節力減衰の主な原因は水晶体の硬化であると報告している。Saundersら¹⁹⁾はヒトの屈折変化は20代までは近視化へ、また30代以降は遠視化の方向へ移行すると報告している。またBrownら²⁰⁾は加齢に伴って水晶体の厚みや曲率が増加し、屈折率の分布に変化が生じると報告している。加齢に伴う水晶体の変化による収差の増加も老視に影響すると考えられるが、収差増加の原因は水晶体起因によるものだけであるかは明確ではない。伊藤ら²¹⁾は健常眼の眼球光学系全体と角膜収差

を年代別に検討し、加齢による角膜の収差変動は僅かであるが、眼球光学系全体の収差の増加は明らかであると報告している。またArtalら²²⁾は年代による収差特性をより明瞭に評価することを目的として、補償因子[compensation factor=1-(眼球収差/角膜収差)]を定義している。これらの報告によれば伊藤らが46.2歳、Artalらが45歳を境に収差特性に変化が生ずることになり、臨床的に老視出現時期と一致する変化であった。このように今後は白内障手術においても、加齢による水晶体の変化を考慮する必要があると考えられる。なお近年、中～強度近視を対象とした屈折矯正手術においては、術後のQOVを高めることを目的として高次収差を低減するためのWave-front guided refractive surgeryが既に行なわれている。

結語

多焦点IOLを用いたカスタマイズドモノビジョンでは、遠見及び近見ともほぼ0.8以上の視力を獲得し、両眼視機能も正常値を維持した。カスタマイズドモノビジョン法は遠見及び近見視力のバランスが良く、両眼視機能も良好で白内障手術後における老視の克服に有用な手法と考えられた。

文 献

- 1) 庄司信行, 清水公也: AMO社製ARRAY屈折型シリコン多焦点レンズの使用経験. *IOL*, 8: 156-162, 1994
- 2) Vaquero-Ruano M, Encinas JL, et al: AMO Array multifocal versus monofocal intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 24: 118-123, 1998
- 3) 庄司信行, 清水公也: 屈折型多焦点眼内レンズと瞳孔径. *IOL*, 8: 163-168, 1994
- 4) 清水公也, 庄司信行: 多焦点眼内レンズ. *眼科* 38: 695-702, 1996

- 5) 庄司信行, 清水公也: 屈折型多焦点眼内レンズの術後成績と適応. *臨眼* 53: 259-263, 1999
- 6) Hayashi K, Hayashi H, et al: Correlation between pupillary size and intraocular lens decentration and visual acuity of a zonal-progressive multifocal lens and a monofocal lens. *Ophthalmol* 208: 2011-2017, 2001
- 7) Wilson FAW, Scalaidhe SPO, et al: Dissociation of object, spatial processing domains in primate prefrontal cortex. *Science* 260: 1955-1958, 1993
- 8) Cumming JS, Slade SG, et al: Clinical evaluation of the Model AT-45 silicone accommodating intraocular lens. *Ophthalmol* 108: 2005-2010, 2001
- 9) 嶺井利沙子, 清水公也, 他: 調節性眼内レンズの初期経過. *眼科手術* 17: 79-82, 2004
- 10) Gauthier CA, Holden BA, et al: Interest of presbyopes in contact lens correction and their success with monovision. *Optom Vis Sci* 69: 858-862, 1992
- 11) Jain S, Arora I, et al: Success of monovision in presbyopes: Review of the literature and potential applications to refractive surgery. *Survey Ophthalmol* 40: 491-498, 1996
- 12) 福田 淳, 澤井 元, 他: 外側膝状体の機能分化. *神経進歩* 32: 411-428, 1988
- 13) Howard IP, Roger BJ: Binocular Vision and Stereopsis. *Oxford university press, New York*: 327-348, 1995
- 14) 井上俊洋, 清水公也, 他: 白内障術後のモノビジョンによる満足度. *臨眼* 54: 825-829, 2000
- 15) 清水公也, 嶺井利沙子: モノビジョン. *眼科手術* 16: 481-484, 2003
- 16) 嶺井利沙子, 清水公也, 他: 眼内レンズによるモノビジョン法の視機能評価. *眼科手術* 17, 2004 (投稿中)
- 17) Handa T, Uosato H, et al: The effects of dominant and nondominant eye in binocular rivalry. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44: S2777, 2003
- 18) Strenk SA, Semmlow JL, et al: Age-related change in human ciliary muscle & lens: A magnetic resonance imaging study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 40: 1162-1169, 1999
- 19) Saunders H: Age-dependence of human refractive errors. *Ophthal Physiol Opt* 1: 159-174, 1981
- 20) Brown N: The change in lens curvature with age. *Exp Eye Res* 19: 175-183, 1974
- 21) 伊藤美沙絵, 大野晃司, 他: 健常眼における高次波面収差の定量解析. *臨眼* 57: 1203-1207, 2003
- 22) Artal P, Berrio E, et al: Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age. *J Opt Soc Am A* 19: 137-142, 2002

総説

白内障術後における老視の克服

清水 公也*

目的：各種眼内レンズ（IOL）を用いた白内障手術後の老視の解決法の比較検討。

方法：北里大学病院でインフォームドコンセントが得られ、それぞれ適応基準を満たした症例に対し、両眼の白内障手術時に、1. 多焦点IOL, 2. 調節性IOL, 3. 単焦点IOL monoを用いたモノビジョン法, 4. 多焦点IOLとモノビジョン法の利点を生かした新しい手法としての多焦点IOLを用いたモノビジョン法（カスタマイズドモノビジョン）のIOL, による白内障手術後の老視の解決法を行った。

結果：多焦点IOLや調節性IOL挿入例では近方視力が不十分で近用眼鏡を必要とした。また単焦点IOLを用いたモノビジョン法では、遠見から近見までほとんどの症例で0.8以上の良好な視力を得ることができたが、両眼視機能は低下していた。カスタマイズドモノビジョン法では、遠見から近見までほぼ0.8以上の視力を獲得し、更に両眼視機能も正常値を維持した。

結論：多焦点IOLを用いたカスタマイズドモノビジョン法は遠見および近見視力のバランスがよく、両眼視機能も良好で白内障手術後における老視の克服に有用な手法と考えられた。ただし、各種の方法において、利点・欠点がそれぞれ存在し、症例に応じた手術方法の選択が必要と考えられた。

〈キーワード〉

- ・老視
- ・多焦点眼内レンズ
- ・調節性眼内レンズ
- ・モノビジョン法
- ・カスタマイズドモノビジョン法

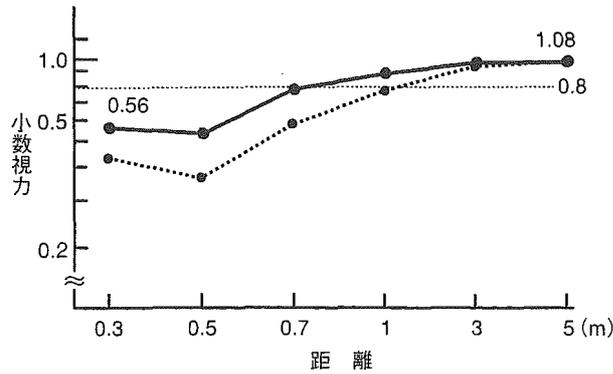
1. 緒言

2001年の日本の総人口は1億2500万人であり、老視人口はそのうちの約46%といわれている。また老視人口の約74%がなんらかの不自由さから眼鏡を使用し、その約43%は遠近の累進多焦点眼鏡を使用していると推測されている。老視とは、近方の見えにくさによ

て自覚される調節力の減衰であり、調節を司る要素には、1. 毛様筋、2. チン小体、3. 水晶体がある。Strenk¹⁾はmagnetic resonance imaging (MRI) を用い、調節力減衰の主な原因は水晶体の硬化であると報告している。Saunders²⁾はヒトの屈折変化は20歳代までは近視化へ、30歳代以降は遠視化の方向へ移行すると報告している。またBrown³⁾は、加齢に伴って水晶体の厚みや曲率が増加し、屈折率の分布に変化が生じると報告している³⁾。これらのため水晶体の遠視化や光の透過率の低下から取差の増加が引き起こされ、

*北里大学医学部眼科学講座
2003年11月17日受付

a: 両眼正視群



b: モノビジョン群

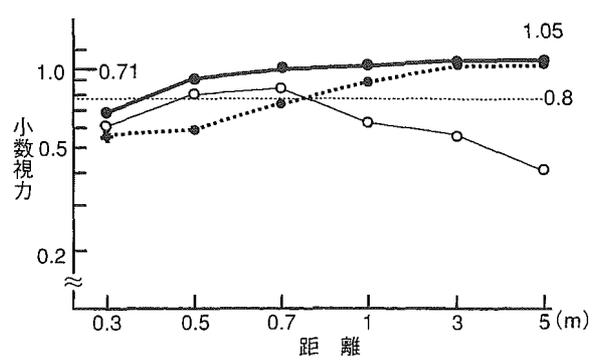


図1 多焦点眼内レンズ (IOL) の全距離視力

多焦点IOLの全距離視力両眼正視群は、眼前0.7mまでは0.8以上の両眼開放視力が維持されたが、0.3mでは0.56まで低下した (N=44)。一方、モノビジョン群 (カスタマイズドモノビジョン) では、全距離において約0.8近い両眼開放視力が維持され、視力の累加も認められた (N=17)。

— : 両眼開放, ... : 優位眼, --- : 非優位眼

老視となると考えられるが、収差の増加の原因が水晶体起因によるものだけであるか否かは明確ではない。伊藤ら⁴⁾は健常眼の眼球光学系全体と角膜収差を年代別に検討し、加齢による角膜の収差変動はわずかであるが、眼球光学系全体の収差の増加は明らかであると報告している。またArtalら⁵⁾は、年代による収差特性をより明瞭に評価することを目的として

$$[\text{補償因子: compensation factor} = 1 - \frac{\text{眼球収差}}{\text{角膜収差}}]$$

を定義している。これらの報告によれば、伊藤らが46.2歳、Artalらが45歳を境に収差特性に変化が生ずることになり、臨床的に老視出現時期と一致する変化であった。

我々の考える老視の克服とは、1) 裸眼で遠方から近方まで0.8以上の視力が得られること、2) 正常な両眼視機能が維持されること、3) コントラスト感度が維持されること、である。これらを考慮した上で、老視に対するいくつかの治療法を施行してきた。収差に対しては近年、wave-front guided refractive surgeryが行われているが、加齢により水晶体の屈折率は変化し、収差も増加するため永久的な治療効果が得られないのが現状である。そこで、偽水晶体眼における老視の治療法には、(1) 多焦点眼内レンズ (以下 IOL)、(2) 調節性IOL、(3) モノビジョン法が考えられる。各々の治療法と結果について考察を加え、これらの方法の欠点・利点を考慮した新しいカスタマイズドモノビジョン法について報告する。

2. 多焦点IOL

屈折型多焦点IOLの光学部は、中心から同心円状に遠用・近用の順に五つのゾーンからなり、中間距離でも視力が得られるように設計されているため、我々の自験例では、遠方矯正下で良好な近方視力が得られた群の平均瞳孔径は $4.01 \pm 0.55\text{mm}$ に対して、得られなかった群は $3.05 \pm 0.73\text{mm}$ であった。また、眼鏡なしで良好な遠近裸眼視力の得られた群の90%の症例では、屈折ずれが $\pm 0.75\text{D}$ かつ角膜乱視の絶対値が $\pm 1.75\text{D}$ 未満であった⁶⁻¹¹⁾。また、遠方視と近方視時で光の分光が起こるが、網膜には同時に両映像が映るために分解能の低下という問題が生じる。網膜に同時に映った遠近の像をどのように認知するかということについては、通常、ヒトの脳では17野より高次中枢において必要な映像を任意に選択し不必要な映像を抑制するという働きがあり¹²⁾、多焦点IOLでも同様な処理がなされていると考えられる。今回、両眼に多焦点IOLを挿入した症例の両眼開放視力は、眼前1mまで0.8以上の視力が維持され、眼前30cmでは0.56と低下した (図1a)。約1/3の症例が近用眼鏡を使用している (図2)。位置の立体視についてTitmus stereo testを用いて検討した結果、全例が正常値 (100second) を維持した。しかし、コントラスト感度は全体的に低下していた。

多焦点IOLでは近方視力の低下が一番大きな問題といわれている。実際に遠方視力が非常に良好な場合でも1/3の症例は近用眼鏡を使用し、コントラスト感度については低下が認められる。また以上のことより、

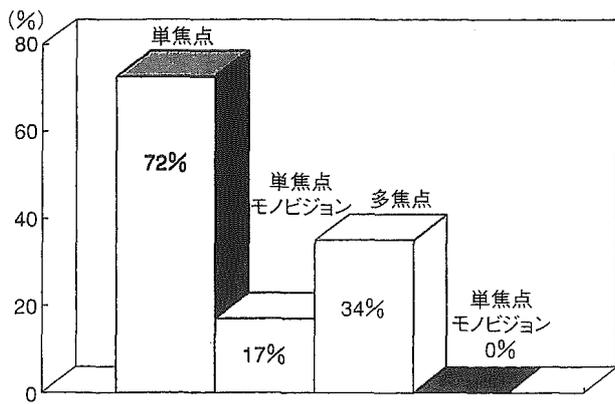


図2 眼鏡使用率

単焦点IOLの両眼正視群では、術後72%の症例が眼鏡を必要とし、モノビジョン群では17%であった。多焦点IOLの両眼正視群では、術後34%の症例が眼鏡を必要とし、モノビジョン群（カスタマイズドモノビジョン）では術後3カ月の短期観察においては0%であった。

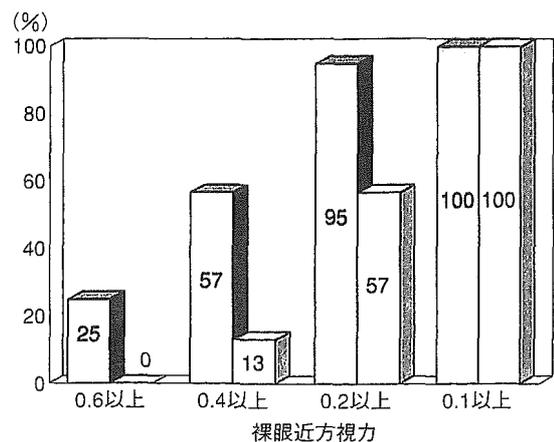


図3 調節性IOL挿入時の近方視力

単焦点IOL (N=16) 挿入時は0.4以上の裸眼近方視力が得られた症例が13%、0.6以上得られた症例は0%であったのに対し、調節性IOL (N=54) 挿入時は0.4以上の裸眼近方視力が得られた症例が57%、0.6以上得られた症例は25%と、近方視力の向上を認めた。

■：調節IOL, □：単焦点IOL

a: 両眼正視群

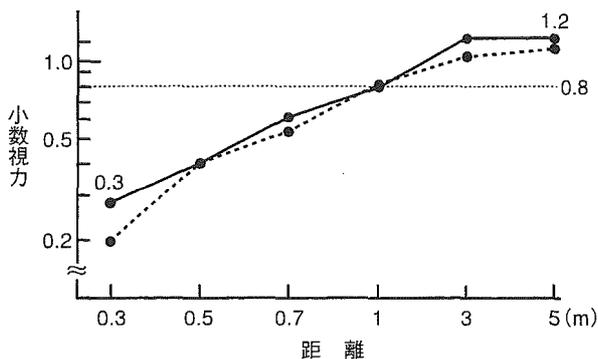
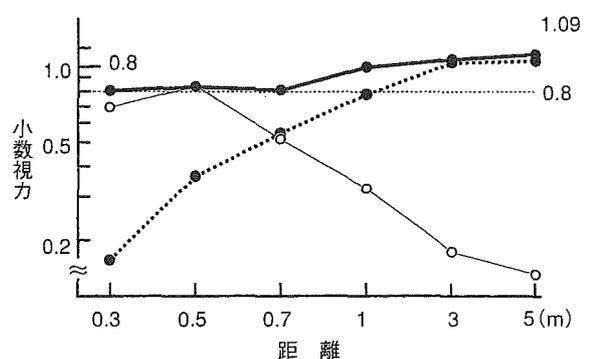


図4 単焦点IOLの全距離視力

両眼正視群 (a) は、眼前1.0mまでは0.8以上の両眼開放視力が維持されたが、0.3mでは0.3まで低下した (N=19)。一方、モノビジョン群 (b) では、全距離において0.8以上の両眼開放視力が得られ、中間距離 (0.7m・1.0m) では視力の累加が認められた (N=39)。

—：両眼開放, ---：優位眼,：非優位眼

b: モノビジョン群



多焦点IOLのよい適応は年齢では60歳代以下で、瞳孔径や矯正精度および角膜乱視に適応条件があることがわかってきた。

3. 調節性IOL

調節性IOLはアメリカで治験中である¹³⁾が、欧州ではすでにCEマークを取得し販売が許可されている。光学部（直径4.5mm）や可撓部を含めすべてシリコーンエラストマーからなるため、軽量で可動性が非常に高い。術後、前囊によって光学部の可動性が制限されないように、通常の白内障手術の場合よりも切囊径をレンズ光学部より大きくする必要がある。本レンズは北里大学の倫理委員会承認を得た後、患者に対して十

分なインフォームドコンセントを行い、同意が得られた症例を対象に挿入した。

両眼に調節性IOLを挿入した症例の遠方視力は、全例で1.0以上の矯正視力が得られたが、遠方矯正下における近方視力は、約3/4の症例で0.6以上であった (図3)。また、近方視時のレンズの動きを捉えるため様々な方法を試みたが、動きを捉えることは困難であった。唯一認められたのは球面度数における見掛け上の屈折値の変化であり、平均は0.5diopter (D)であった。

調節性IOLは若干の調節機能を有するが十分な近方視力は得られず、術後3~6カ月経過後、囊が収縮すると次第にその調節力は少なくなり、最終的には期待されるほどの調節効果は得られないという結論が得られ

た。なお、光学部が小さいために憂慮されたグレアやハローの訴えはなかった。

4. モノビジョン法

モノビジョン法はコンタクトレンズにおいて約30年以上の歴史があり、一眼（優位眼）を遠方に合わせ、僚眼（劣位眼）を近方に合わせる方法である¹⁴⁻¹⁶。つまり遠方視時は優位眼を使用し、近方視時へ移行する過程で眼優位性が変化し、近方視時は劣位眼を使用することを期待している。この機構は多焦点IOLの場合と異なり、外側膝状体もしくは17野といわれている¹⁷⁻¹⁸。

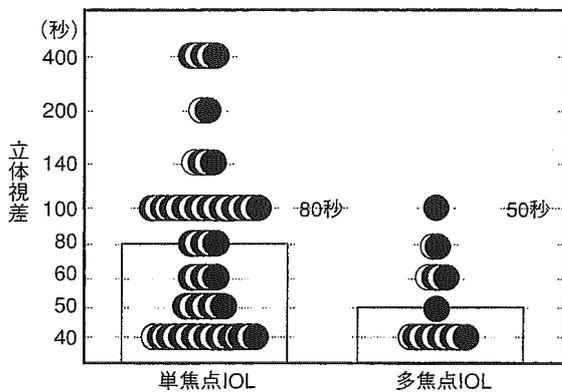


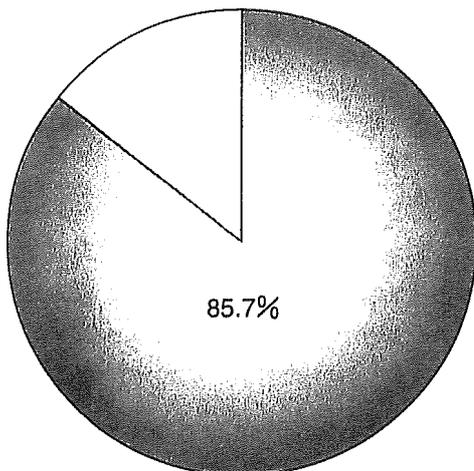
図5 モノビジョン法の近方立体視機能
○は各症例の値、□は中央値を示す。単焦点IOLモノビジョンは中央値80secであった (N=65)。多焦点IOLモノビジョン (カスタマイズドモノビジョン) は中央値50secであり (N=20)、全例正常値 (100sec) 以内を示した (新田ら：第57回日本弱視斜視学会より改変)。

モノビジョン法は左右に屈折差をつけるため、眼位や両眼視機能への影響が問題となる¹⁶⁻¹⁹。術前には適応の判断も含め、左右の視力が平等になるようにして眼位、両眼視機能、眼優位性、融像幅などについて詳細に検討した。しかし、術前矯正遠方視力が0.3以下の症例に対する判定は困難であった。

モノビジョン法の適応基準の一つに「眼優位性の弱い症例」であることが挙げられる¹⁹。これまでは大型弱視鏡用の視野闘争スライドを用いて眼優位性の定性を行ってきたが、更に眼優位性を定量することを目的とした装置を作成した²⁰。本装置も視野闘争を利用している。患者に対して右眼と左眼に同時に縞の格子を見せて、一方の縞のコントラストを徐々に落とし、眼優位性を定量化するものである。多くの場合、優位眼のコントラストを60%に落とした時点で劣位眼優位に移行した。つまり、コントラスト60%以上の高コントラストで優位眼より劣位眼優位に移行するならば眼優位性が低く、20%までコントラストを落としてもまだ優位眼で見える場合は眼優位性が強いと判断できる。

今回、単焦点IOLを正視となるように両眼へ挿入した場合、眼前1mまでは0.8以上の視力が維持されたが、眼前0.3mでは0.3に低下し近用眼鏡を必要とした (図4a)。しかし、モノビジョン法では中間距離で累加効果が認められ、遠方から近方まで0.8以上の視力が獲得された (図4b)。両眼視機能については位置の立体視はTitmus stereo test、運動の立体視は三杆法を用い

a. 両眼正視群 (N=14)



b. モノビジョン群 (N=39)

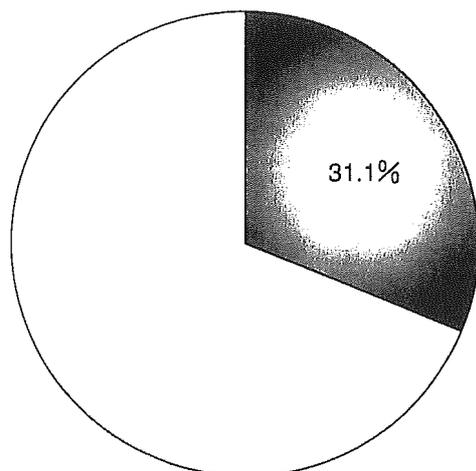


図6 単焦点IOLの遠方立体視機能
両眼正視群では正常値 (48.1sec) 以内の症例が85.7%であったのに対し、モノビジョン群では31.1%と有意に低かった (χ^2 検定 $p < 0.01$)。

て検討した。位置の立体視は約2/3の症例で正常値を維持した(図5)。しかし、運動の立体視は約1/3の症例が正常値(48.1second以内)を示したのみであった(図6)。単焦点IOLで両眼正視とした場合でも正常値を示す症例は約85%であったことから、この正常値に関しては年齢的な要素も考慮しなければならないと考えられる。コントラスト感度は低～中空間周波数領域で両眼加算を認めた¹⁹⁾。更に、両眼視機能を維持した群と低下した群で比較すると、維持した群では屈折差が約2D以内であり、低下した群は2.5D以上であったと報告されている¹⁰⁾。つまり、両眼視機能の維持は屈折差の影響が大きいと考えられる。また、モノビジョン法を施行した約71%の症例に満足が得られている。

単焦点IOLによるモノビジョン法の問題点は、近方視力と両眼視機能の同時維持である。良好な近方視力を得るためには2.5D以上の屈折差をつけることが不可欠であるが、両眼視機能を考えるならば2.0D以下の屈折差にする必要がある。つまり左右眼の屈折差を1.5D以内に抑え、全距離において0.8以上の裸眼視力を獲得し、両眼視機能、コントラスト感度ともに正常値を維持し、高い満足が得られる方法が必要となる。

5. カスタマイズドモノビジョン法

多焦点IOLの遠近の有効度数差は約2Dと考えられ、理論上は優位眼を0に合わせた場合、劣位眼は0～約-2Dまでの間で両眼視することが可能となる。そして劣位眼の屈折を1D加減することにより、-1～-3Dまで明視可能となると考えられる。つまり両眼開放下で3Dの付加と同様の効果が得られ、左右の屈折差を1D程度に抑えることが可能となり、近方視力の向上と両眼視機能の維持が期待できる。このような理論に基づき、多焦点IOLを使用したモノビジョン法が「カスタマイズドモノビジョン法」である。従来のモノビジョン法の適応基準に加え、レンズの構造から明所の自然瞳孔径が4mm以上確保できる症例が適応である。

今回、カスタマイズドモノビジョン法では中間距離で累加効果がみられ、遠方1.08、近方0.76とほぼ全距離に良好な視力が得られた(図1b)。また位置の立体視は全症例が正常値を維持した(図5)。コントラスト感度は低下したが、これまでのところ重篤な不満は出ていない。しかし個人によって満足度は異なるため、

今後は適応について十分な検討が必要である。

6. 結 論

前述した四つの手法を比較すると、カスタマイズドモノビジョン法は全距離視力、両眼視機能で老視の克服に優れた方法と考えられる。しかし現在の問題点として、屈折型多焦点IOLの機能が瞳孔径に依存することと、コントラスト感度の低下を引き起こすことが挙げられる。回折型多焦点IOLは構造上、瞳孔径に影響を受けないので、コントラスト感度の低下がない光学設計が実現されれば、临床上、有用である可能性が高いと考えられる。

■文 献

- 1) Strenk SA, Semmlow JL, Strenk LM, et al: Age-related change in human ciliary muscle and lens: A magnetic resonance imaging study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, **40**:1162-1169, 1999.
- 2) Saunders H: Age-dependence of human refractive errors. *Ophthalm Physiol Opt*, **1**:159-174, 1981.
- 3) Brown N: The change in lens curvature with age. *Exp Eye Res*, **19**:175-183, 1974.
- 4) 伊藤美沙絵, 大野晃司, 清水公也, 他: 健常眼の高次波面収差の定量解析. *臨眼*, **7**:1203-1207, 2003.
- 5) Artal P, Berrio E & Guirao A: Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age. *J Opt Soc Am A*, **19**:137-142, 2002.
- 6) 庄司信行, 清水公也: AMO社製ARRAY屈折型シリコーン多焦点レンズの使用経験. *IOL*, **8**:156-162, 1994.
- 7) Vaquero-Ruano M, Encinas JL, Millan I, et al: AMO Array multifocal versus monofocal intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg*, **24**:118-123, 1998.
- 8) 庄司信行, 清水公也: 屈折型多焦点眼内レンズと瞳孔径. *IOL*, **8**:163-168, 1994.
- 9) 清水公也, 庄司信行: 多焦点眼内レンズ. *眼科*, **38**:695-702, 1996.
- 10) 庄司信行, 清水公也: 屈折型多焦点眼内レンズの術後成績と適応. *臨眼*, **53**:259-263, 1999.
- 11) Hayashi K, Hayashi H, Nakao F, et al: Correlation between papillary size and intraocular lens decentration and visual acuity of a zonal-progressive multifocal lens and a monofocal lens. *Ophthalmology*, **208**:2011-2017, 2001.
- 12) Wilson FAW, Scalaidhe SPO & Goldman-Rakic PS: Dissociation of object, spatial processing domains in primate prefrontal cortex. *Science*, **260**:1955-1958, 1993.

- 13) Cumming JS, Slade SG, Chaet A, et al : Clinical evaluation of the model AT-45 silicone accommodating intraocular lens. *Ophthalmology*, **108** : 2005-2010, 2001.
- 14) Gauthier CA, Holden BA, Grant T & Chong MS : Interest of presbyopes in contact lens correction and their success with monovision. *Optom Vis Sci*, **69** : 858-862, 1992.
- 15) Jain S, Arora I & Azar DT : Success of monovision in presbyopes: Review of the literature and potential applications to refractive surgery. *Survey Ophthalmol*, **40** : 491-498, 1996.
- 16) 井上俊洋, 清水公也, 新井田孝裕, 他 : 白内障術後のモノビジョンによる満足度. *臨眼*, **54** : 825-829, 2000.
- 17) 福田 淳, 澤井 元, 森際克子, 他 : 外側膝状体の機能分化. *神経進歩*, **32** : 411-428, 1988.
- 18) Howard IP & Roger BJ : *Binocular Vision and Stereopsis*. 327-348, Oxford University Press, New York, 1995.
- 19) 新田任里江, 井上俊洋, 新井田孝裕, 他 : モノビジョン法による両眼視機能の検討 (第2報). *眼臨*, **96** : 578-579, 2002.
- 20) Handa T, Uosato H, Mukuno K, et al : The effects of dominant and nondominant eye in binocular rivalry. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, **44** : S2777, 2003.

Overcoming for Presbyopia in Pseudophakia

Kimiya Shimizu*

*Department of Ophthalmology, Kitasato University School of Medicine

Summary

Purpose : To examine methods of overcoming presbyopia after cataract surgery. Multifocal intraocular lenses (IOLs), accommodation IOLs, monovision using monofocal IOLs, and a new technique "customized monovision using multifocal IOLs" are discussed.

Case Report : Patients were selected who had had the above IOLs implanted in both eyes after cataract surgery in Kitasato University Hospital.

Results : Most patients implanted with multifocal IOLs or accommodation IOLs needed glasses for near vision. All patients with monovision using monofocal IOLs acquired over 20/25 far vision, though binocular visual function was worse. Patients with customized monovision acquired over 20/25 for near and far vision, and binocular visual function remained normal.

Conclusion : Customized monovision offers advantages over both multifocal IOLs and monovision using monofocal IOLs. This method is excellent for overcoming presbyopia in pseudophakia.

<Key Words>

presbyopia, multifocal intraocular lens, accommodation intraocular lens, monovision, customized monovision

(別刷請求先) 清水公也 〒228-8555 相模原市北里1-15-1 北里大学医学部眼科

II. 眼内レンズの視機能上の役割・利点

はじめに

眼内レンズ (IOL) は水晶体を置換する人工レンズであるが、眼鏡やコンタクトレンズ (CL) と同様の光学レンズである。それぞれのレンズの視機能におけるその役割は多少異なる。本項では、IOLが眼鏡やCLと光学的にどのように相違するのか、その特徴を役割と利点の観点から述べる^{1~3)} (表1)。

1. 矯正比較

眼鏡やCLとIOLの比較検討をするうえで、これらの相違が発生する原因別に分けて考える。

1-1. 手術の有無

眼鏡とCLは非手術的矯正といえるが、IOLはその挿入時に手術を伴う。手術侵襲は以前よりも格段に少なくなっているが皆無ではない。その点、眼鏡やCLは矯正に関して可逆的である。安全性や屈折変化への対応を考えれば、眼鏡、CL、IOLの順となるが、わずらわしさとは相反する。

1-2. 矯正位置

図1に示すように、レンズの矯正位置はそれぞれ異なる。眼鏡は角膜前方12mm (頂間距離と

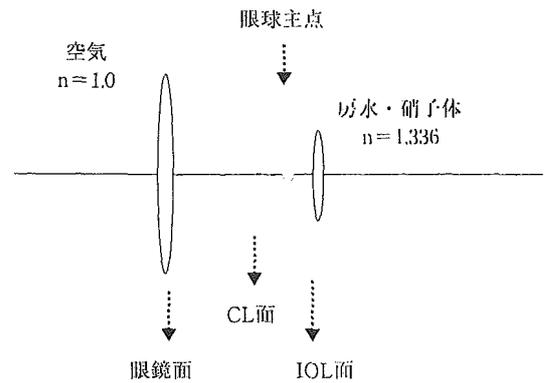


図1 レンズの矯正位置と媒質屈折率の相違

いう)に後頂点がくるように眼外に装用する。そのため屈折矯正のコントロールは最も容易で、精度も高い。CLは角膜前面に位置するため、頂間距離は0となる。涙液レンズやCLによる角膜形状変化 (ハードCL) は矯正精度をむずかしくする。

一方、IOLは本来の水晶体に最も近い位置で矯正される。そのため、従来の無水晶体眼における眼鏡矯正では、その本来の水晶体位置と遠く離れた眼鏡面で矯正するため発生していた問題点 (収差、視野、びっくり箱現象^{注1)}、網膜倍率の変化^{注2)}など)^{1,2)}が解決された。眼鏡のように、矯

表1 無水晶体眼における矯正法の比較

	眼鏡	コンタクトレンズ	眼内レンズ
利点	掛けはずしが手軽 角膜内皮への影響なし 手術不要 拡大効果で視力向上	片眼矯正可能 網膜像の拡大わずか	患者による装着不要 異物感なし 網膜像の拡大ほとんどなし 片眼術後でも可 光学的に最良、自然な見え方
欠点	視野の制限あり 死角ができる 片眼術後は装用不可 物が拡大してみえる 両眼視がむずかしい	装着が面倒 高齢者には不向き 連続装用は問題が多い 角膜内皮への影響あり 紛失しやすい	長期予後が不明 子どもや若年者に不向き 手術を要する



図 2 眼内レンズによる反射像

- 上：眼内レンズ挿入眼（左眼）の Purkinje-Sanson 像は、レンズの傾斜のため角膜反射像と合わせて3つ観察される。
- 下：眼内レンズの光軸方向から観察すると、レンズの反射像と角膜の反射像が1つに重なって観察される。

正するレンズの位置が眼の主点（あるいは瞳孔面）から離れば離れるほど矯正上の光学的問題が顕著となるが、角膜上で矯正する CL（あるいは角膜屈折矯正手術）や瞳孔に近い位置で矯正する IOL では影響は少なくなる。

矯正位置の相違は、レンズの大きさにも影響を与える。眼から最も離れた位置で矯正する眼鏡レンズではその径は最も大きく、またそのレンズ径により有効にみえる範囲（視界）を規制する。

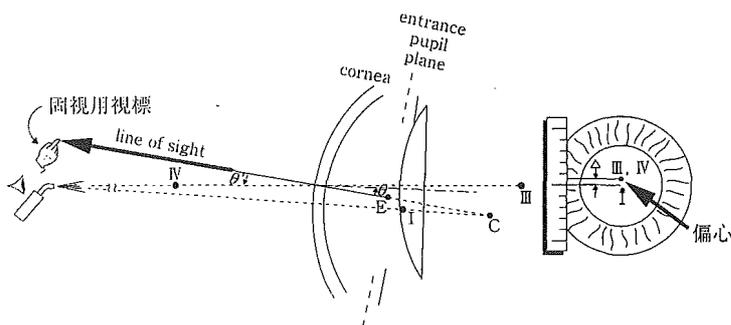
CLは角膜上であり眼の瞳孔に比較的近い位置にあるため、通常の大さき状態のレンズでは視界を制限しないし、開口絞り^{註3)}にもならないが、小径のCLでは有効な視野の制限をうける。IOLもほぼ瞳孔面に近い位置に挿入されるため、レンズ径は最も小さくできる。ただし、瞳孔が散大しレンズ径を上まわると有効視野が制限される。

1-3. 屈折率

眼鏡レンズは空気中で使用される。CLは角膜上で涙液におおわれるが、屈折矯正上は空気中におかれたCLと角膜の合成系を考えてさしつかえない。

一方、IOLは房水や硝子体の眼内媒質中におけるため、空気中での特性とは大きく相違する。このことは20 D程度のIOLも、空気中では60~70 Dもの屈折力を有することとなる。IOLと房水・硝子体屈折率の差が小さくなるため、レンズの反射損失や表面精度^{註4)}は緩和できる（空気中での約1/10程度となる）^{2,3)}。しかし、現在のIOLはその屈折率（1.5~1.6）が水晶体（1.38~1.41）よりもはるかに高いため、薄くてフォルダブルには適するが、レンズの反射損失はきわめて大きい（有水晶体眼に比べて、約20~30倍となる）。このことは逆に、IOLの傾斜や偏心など

図 3 眼内レンズの位置異常（偏心と傾斜）の評価



固視用視標（）を光源位置から移動させて、IOLによる反射像（ⅢおよびⅣ像）が重なる位置を求める。その際、瞳孔中心からIOL反射像までの距離がIOL偏心量（Δ）となる。角膜反射像（Ⅰ像）は、固視用光源と角膜前面の曲率中心（C）を結ぶ線上で角膜表面から約4 mm程度後方（ほぼ曲率半径の半分の距離）に虚像としてできる。角膜反射像（Ⅰ像）は瞳孔中心付近にできるが、わずかに鼻側にずれてあらわれる。Ⅲ像とⅣ像が重なってみえる方向がIOLの光軸で、固視用視標と瞳孔中心を結ぶ方向が照準線（line of sight）であるため、両者のなす角（ θ' ）がIOLの傾斜角である。眼内での真の傾斜角（ θ ）は約 $0.85 \theta'$ である。

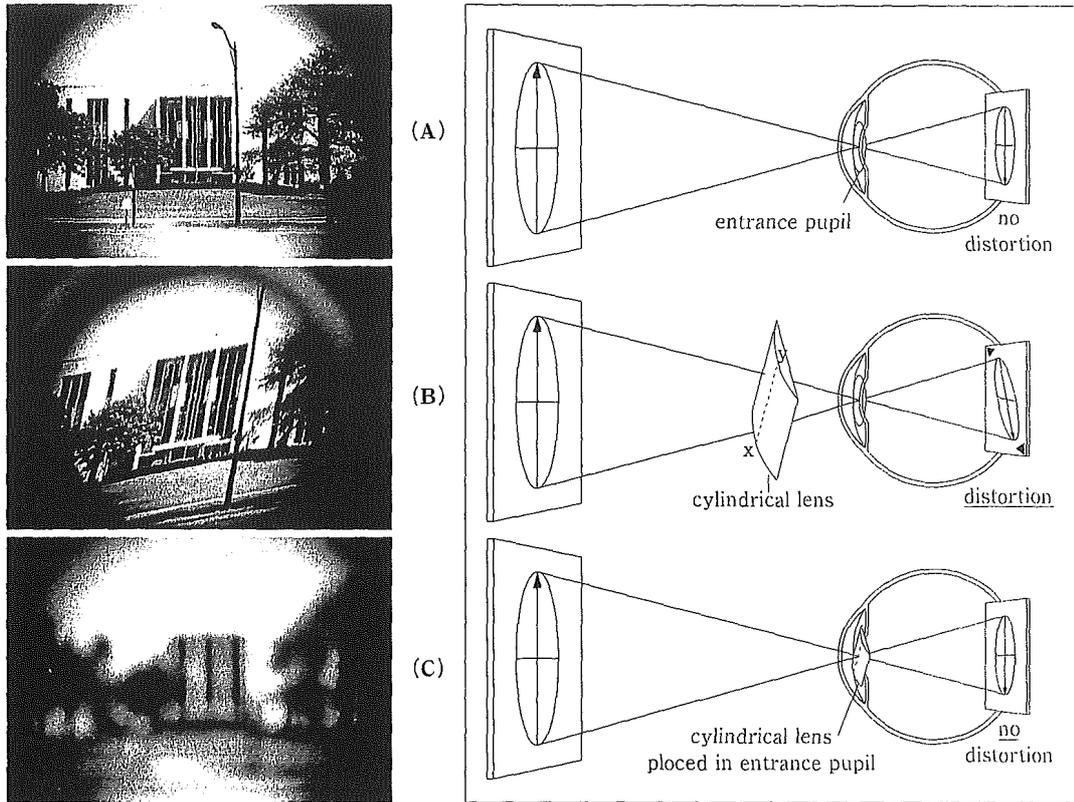


図4 乱視矯正に伴う網膜像の歪み

- A. 球面矯正では、網膜像の歪みは発生しない。
- B. 瞳孔面から離れた位置（眼鏡面）での乱視矯正では、網膜像の歪みを伴う。
- C. 瞳孔面での乱視矯正（IOL など）では、網膜像の歪みは生じない。

の位置異常を、反射像を用いて臨床的に簡便に評価するのに役立っている^{3,4)} (図2・3)。つまり、固視用ペンライトの真うしろから反射像を観察すると、角膜反射像のほかにレンズによる2つの反射像（Purkinje-Sanson像第3および4像）が瞳孔領域内にあらわれているならば、レンズの位置異常はきわめて少ないことが定性的に判定できる。

2. 眼内レンズの利点

IOLは手術を要するが、眼鏡やCLに比較して光学的にすぐれている点は、白内障による視機能低下を改善できる点と、有水晶体眼の眼球光学系に最も近い構成にできる点にある。白内障などの

混濁がなくても、視機能上の屈折矯正や立体視を考えるうえで、IOLは眼鏡やCLに比較してきわめて有利な矯正法である。ただ、現在では単焦点IOLでは本来の眼調節機能が失われるため、多焦点や最近の調節性IOLに期待がもたれている。しかし現実には、従来の偽調節を上まわるほど十分な調節補完機能は得られていない。多焦点レンズの結像特性も、単焦点に比べかなり低下している⁵⁾。

高度の屈折異常を矯正する場合、外見上の見栄えだけでなく、光学的な矯正効果や視機能に及ぼす影響は、IOL、CL（角膜屈折矯正手術）、眼鏡の順で大きくなる。網膜像の倍率変化、不同視、不等像視、視界の制限、乱視矯正の歪みなどの光

学的な問題点も、眼内で矯正する IOL や ICL (implantable contact lens) は、眼の主点位置や瞳孔面に近い位置で矯正するため、その影響は少ない。図4に示すように、乱視矯正に伴う網膜像の歪みは、眼鏡 (B) のように矯正レンズ位置が瞳孔面から離れているほど大きくなり、IOL や ICL のように瞳孔面に近い位置で矯正する場合 (C) は歪みの発生は少ない。大きな乱視をトーリック IOL で矯正する理由である。また、矯正度数による網膜像の大きさ変化は IOL で最も少なく、不同視矯正時の不等像の影響も IOL で最も少なく有利である。

これらの理由から IOL (ICL) は光学的矯正後の視機能上きわめて有利であり、これらレンズの挿入位置精度やパワー予測精度が上がれば、IOL は屈折矯正の有望な選択肢として確立されるものと思われる。

【注1】びっくり箱現象 (jack-in-the-box phenomenon) : 強度の凸レンズではプリズム効果のため、周辺の輪状暗点内に隠れて見えなかった物体が、視線を動かすと急に出現する現象。レンズの度数が強くなるほど輪状暗点の領域は大きくなるため、術後無水晶体眼を眼鏡レンズで矯正する場合に大きな問題となる。

【注2】網膜倍率の変化 : 術後無水晶体眼を眼鏡で矯正すると強度の凸レンズが必要であり、その装用位置が角膜前方 12 mm (入射瞳から約 15 ~ 16 mm) に位置するため、網膜像の拡大が生じる。CL では角膜

上に位置するため (入射瞳より約 3 ~ 4 mm)、網膜像の拡大効果は眼鏡に比してきわめて小さい。

通常の眼鏡レンズ矯正では、およそレンズ 1 D 当たり約 2% の拡大 (凸レンズ)・縮小 (凹レンズ) が生じる。

【注3】開口絞り (aperture stop) : 眼内レンズの直径よりも瞳孔径が大きくなるとはならず、IOL そのものが開口絞りにはならない。絞り (stop) の中で、光量を制約するものを開口絞りをいう。一方、みえる範囲を制約する絞りを視野絞り (field spot) という。

【注4】レンズの反射損失と表面精度 : 眼内でのレンズは房水・硝子体との屈折率差が小さいため、その表面反射率は空気中よりも小さくなり、反射損失は減少する。しかし、高屈折率の IOL では、本来の水晶体の表面での反射率 (0.02% 以下) よりもかえって高くなり、レンズでの表面反射損失 (約 0.6%) は増加する。

また、空気中のレンズに比べ、眼内でのレンズは屈折率差が小さくなるため (約数分の一程度)、レンズの表面精度の影響 (結像特性や収差特性) は空気中よりも大幅に軽減する。

文 献

- 1) 魚里 博 : 眼内レンズ (人工水晶体). 応用物理 54 : 1039-1051, 1985
- 2) 魚里 博 : 偽水晶体眼の光学. 眼科手術 2 : 279-295, 1989
- 3) 魚里 博 : 眼内レンズ (IOL) の光学特性. IOL & RS 16 : 26-32, 2001
- 4) Guyton DL, Uozato H, Wisnicki HJ : Rapid determination of intraocular lens tilt and decentration through the undilated pupil. *Ophthalmology* 97 : 1259-1264, 1990
- 5) 川守田拓志, 魚里 博 : 単焦点と多焦点 IOL における空間周波数特性の比較. 眼科手術 18 : 77-81, 2005

X. 視機能

13. 眼の屈折要素

北里大学大学院医療系研究科視覚情報科学・眼科学 魚里 博

はじめに

眼の光学系はカメラのそれによくたとえられるが、厳密には多くの点で異なっている¹⁻⁴⁾。ヒトの眼球光学系を正しく理解しておくことは、眼科臨床での検査や治療・手術だけでなく人工的な視覚系の構築や臨床検査機器の開発・視覚実験を行う上でもきわめて重要である。眼の光学系の一般的な特性や眼球の参照軸だけでなく、通常のカメラなどの光学系と異なる特殊性についても言及し、各屈折要素の測定についてもふれる¹⁻⁵⁾。

I. 眼球の軸と角度

眼球の参照軸は、眼球光学系の構造を調べたりするだけでなく、斜視や眼位検査などの臨床でもきわめて重要であるが、最近の屈折矯正手術でもその重要性が増してきている。

眼球の軸は、視軸に代表されるような注視方向を規定する軸と、光軸に代表されるような参照軸がある。これ以外に解剖学的な眼軸 geometrical axis と呼ばれるものもある。眼軸は、眼の前極と後極を結ぶ軸で定義され、光学的なものとは意味合いが異なる。ここでは生理光学で使用されている光学的な眼球参照軸や角度について解説する^{1,6-9)}。

1. 眼球の光学的参照軸

古くから生理光学の分野では、視軸、光軸、瞳孔中心線、注視線、照準線などの参照軸が用いられて来ている(図1)。眼球の光学系は、カメラの

ような共軸光学系ではなく、偏心や非共軸、非球面であるため、より複雑な光学系を呈している。そのため、カメラのように光軸だけを規定すればよいのではなく、眼球では黄斑中心窩で固視するための特別な注視方向が重要となる。

非共軸光学系と照準線

レンズやカメラのような通常の光学系では、光軸がきわめて重要であり、組み合わせレンズ系の光学中心を光軸上に合わせる。しかし、眼球光学系は非共軸であり、眼の光軸と視軸の方向は一致していない。これは角膜と水晶体の2つのレンズ系が偏心や傾斜を有するためで、さらに黄斑中心窩が光軸になく、瞳孔中心も視軸上に位置していないためである。このような偏心光学系で最も重要な注視方向は、光軸でも視軸でもなく照準線である。物体空間(検者が観測できる)では、固視点と瞳孔中心(入射瞳中心)を結ぶ直線が照準線であり、射出瞳中心から中心窩を結ぶ直線が像空間(検者側から直接観察できない)での照準線である。物体空間と像空間の照準線は1本の直線ではなく方向の異なった2本の直線で表される。しかし、固視点と中心窩が互いに共役(物体と像の関係)であれば、固視点から瞳孔中心へ向かう光線は確実に中心窩へ達する。