ます．眼科の方では機能のひとつに調節があり，それはものを見るときにピント合わせをするわけですし，同時に両眼で輻湊する，で立体視が導かれるというわけなんですけれども，最近いろんな新しい方法が開発されましたので，それを駆使したお話になると思います．どうぞ．

## 2) 調節と輻輳の心理物理学的検索

新潟大学医学部眼科学教室[1]，第一生理学教室[2]（主任：岩田和雄教授[1]）
**高木　峰夫[1]・阿部　春樹[1]**
**戸田　春男[2]・板東　武彦[2]**

## Psychophysical Investigation of Human Accommodation and Convergence

Mino TAKAGI[1], Haruki ABE[1], Haruo TODA[2] and Takehiko BANDO[2]
*Department of Ophthalmology[1] and Physiology[2],*
*Niigata University School of Medicine*
*(Director: Prof. Kazuo Iwata[1])*

The topics on near reflex, which is composed of ocular convergence, lens accommodation and pupillary constriction, are discussed from a standpoint of visual psychophysics. Each of them has its own controller, and linkage between each other is known. First, recent dual-innervation hypothesis of ciliary muscles by sympathetic and parasympathetic nerves was revivied against the hypothesis of single-innervation by later. For example, it is found that the resting state of accommodation is ordinarily proximal to the far point of the eye by 1～1.5 D, not at the far point. Secondly, the contribution of pupillary constriction to the near response is doubtful because of its slow dynamic properties. Thirdly, although ocular convergence has been classified as slow eye movement, it is found that some of convergence containes rapid components, especially when conjugate eye movement is accompanied. Therefore, eye movement redording method with wide dynamic range and high spacial and temporal resolution, such as the magnetic search coil method, should be used. In keeping with rapid progress in this field, the mechanism of near reflex will be resolved still more in the next decade.

Key words: psychophysics, accommodation, convergence, pupillary near reflex
心理物理，焦点調節，輻輳，瞳孔近見反射

Print requests to: Mineo TAKAGI,
Department of Ophthalmology
Niigata University School of Medicine,
1 Asahimachi, Niigata city, 951 JAPAN.

別刷請求先：〒951 新潟市旭町通1番町
新潟大学医学部眼科教室
高木峰夫

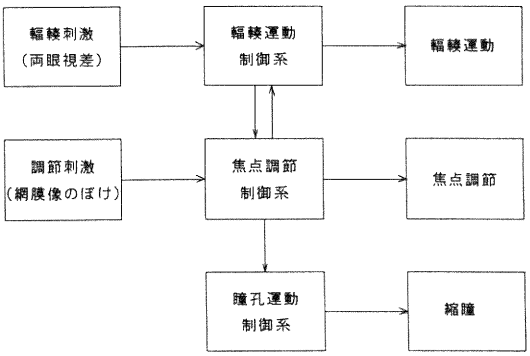
## 1. はじめに

「視覚生理の諸問題」のテーマに当り，三次元的な視覚情報処理，空間認知に重要な近見反応の生理学について，特に人間を対象とした心理物理学的アプローチから最近の興味深い問題点を紹介する．

## 2. 近見反応

――輻輳・調節・縮瞳の三位一体となった反応

視標が近づいて来た時，私たちはそれを明視するために眼の近見反応を起こす．これはピントを合わせるための焦点調節と縮瞳，両眼視差を融像するための輻輳の三つの反応から成る．この反応が起こるためには，まず近見の視覚的情報を脳で処理し，どの程度調節・縮瞳・輻輳を起こすことが必要か脳内で計算し，またその情報を運動指令の情報に変換して実際の反応を遂行させるという，脳の中で高度のプロセスを経ており，この機構を調べるために多くの研究が成されている．




まずこれらの反応が起こるためには，ものが近い・遠いということを判断するための視覚情報が必要である．近くであることを認識するための視覚要素としては，①網膜像のぼけ，② 両眼視差の変化，③ 像の大きさの変化，④ パースペクティヴな変化，⑤ 収差の変化などが挙げられる．そしてこれらが引き金となって近見反応のコマンドが導かれるが，図に示すように，焦点調節系は主として網膜像のぼけを，輻輳運動系は主として両眼視差の変化を手がかりとして制御されていると考えられている．そして，調節のみ・輻輳のみを単独で起こすことができることから，両者はそれぞれ独立した制御系をもち，そしてお互いに AC/A ないし CA/C なる連関があることが知られている．瞳孔の制御については知見が少ないが，調節制御系と強く連関しているという考えが主流である。そして調節ないし輻輳それぞれを誘発する方法として，調節の場合には視差の変化を与えず網膜像の変化のみを与えるような Badal 光学系による調節刺激が，輻輳の場合には視差の変化のみを与えるような輻輳刺激が用いられる．これら近見反応のメカニズム解明のアプローチとしては，(1) 近見反応制御系についてこれをブラックボックスと見立てて，人間に対して与えた刺激と得られた反応の入出力関係から制御系の特性を研究する心理物理的，生体工学的なアプローチ，(2) 動物実験により実際の脳のニューロンレベルでの研究を行う神経生理学的アプローチ，(3) 臨床例からのアプローチ，(4) 調節・瞳孔・輻輳の応答の測定法に関する研究，などがあり，ここでは主として(1)(3)(4) を中心に，最近の知見や問題点を述べる．

## 3. 調　　節

――安静位：副交感と交感の平衡状態？

調節は毛様筋の収縮により水晶体の厚みを増し焦点を近方に移動させる反射であるが，潜時は約 300 msec と長いのに対して立ち上がりの速度は比較的速い．かつて，Helmholz による副交感神経単独支配説が長く信じられていた．この考えによれば，無調節刺激の状態では，毛様筋は弛緩し焦点は遠点にある．ところが近年，暗闇や視標のない enpty field などの無調節刺激状態において眼の焦点は遠点ではなく約 1～1.5 D の位置を見ていることが明らかになり，これは調節安静位[1] と呼ばれている．日常的な例を挙げれば，夜になり暗闇になると近くに比べて遠くがよく見えなくなる夜間近視[2]，また雲のない空を見つめていて小さな飛行機が見えない，などの empty field myopia[3] などがその実例である．Toates[4] は，調節安静位は交感神経と副交感神経の平衡状態を示していると唱えている．興味深い点は，この調節安静位が調節刺激を与えることにより容易に変化し，また影響を後にしばらく残すことである[5]．このような調節負荷による安静位の変化は残効 afer-effect，調節順応と呼ばれる．報告者によって大きな違いがあるが，2分以内の調節刺激であればこの after-effect は数分続き，2分以上の刺激で5～45分持続するとされている．このような調節の安静位とその順応は，いままで捉えられなかった種々の調節の異常を表現する点で近年特に注目される現象である．

## 4. 瞳孔近見反射

――寄与が疑われるほど非常に遅い系

瞳孔近見反射は1619年に Scheiner らにより記載されたが，この制御機構についての知見は比較的少ない．その原因は，調節や輻輳と異なり縮瞳のみを単独で誘発することが困難なこと，本来瞳孔径は動揺が大きいこと，手ごろな測定装置に乏しいことなどが考えられる．これまでの報告では瞳孔の応答は主に調節に伴うという意見が大勢だが，これに反する意見もある．

臨床的にも瞳孔の近見反応を定量的に記載する方法はほとんど確立されていない．そこで私たちは瞳孔の正弦波応答を調節の応答と同時記録し，その動的特性と臨床応用の可能性を検討した[6]．正常人10名を対象に正弦波状の調節刺激（5D，周期 2～15秒，4回繰り返し）を与え，被検者の調節の応答を赤外線オプトメーターで計測し，また瞳孔の大きさを赤外線カメラによる前眼部画像の画像処理で計測した．その結果，周波数応答としての解析では，ゲインの周波数特性は調節も瞳孔も同様だったが，位相については全周波数で瞳孔が調節に対して20～30° 有意に遅れていた．瞳孔の応答の大きさについては非常に大きな個人差が見られたが，位相に関してはばらつきが比較的少なく，瞳孔の動的特性の有用な記載法の一つになると思われる．

この検討でも得られたように，瞳孔の応答の特徴は反応の経過が非常に遅いことである．別な面からも瞳孔の応答の遅さが指摘されている．近見反応の潜時は輻輳 160 msec ・調節 300 msec・縮瞳 430 msec の順であり，瞳孔は最も遅い[7]．また，等速で接近する視標に対しても，条件によって調節が応答を完了してもなお瞳孔は数秒縮瞳し続ける場合がある[8]．このような瞳孔の応答の遅さの原因としては，瞳孔反射の上位中枢での情報処理の遅さや瞳孔筋の動作の遅鈍さが考えられる．

瞳孔反射の主な働きは縮瞳することにより焦点深度を深めることとされている．しかし，焦点深度は瞳孔径が 3 mm 以下になると深まる[9]が，実際的に有為な影響を呈するのは 1.0～1.5 mm 以下の時であり，日常的な 3 mm 内外の縮瞳では現実的にはあまりは有効に働いていないらしい．応答の動特性の面からも上記のように輻輳・調節から大きく遅れて反応する．このような点から瞳孔は近見反応として有意の働きをなしていないとする意見が多い．

## 5. 調節・瞳孔の繰り返し応答の base line の変化

——調節応答の累積効果？

先ほどの調節と瞳孔の正弦波応答[6]を見返してみると，トレースの base line が次第に変化してくるものが少なくない．調節では base line が屈折増加方向へ移動して行く．瞳孔に関しては，base line とまた各正弦波反応の peak 値も縮瞳方向へ次第に変化している．このような，gradual な変化をここではドリフトと呼ぶことにし，これを評価するパラメーターとして各トレースに回帰直線を fit させてみた．回帰直線の傾き（調節 D/cycle，瞳孔 mm/cycle）はドリフトをよく表現しているため，これをドリフトのパラメーターとして10例の被検者の値を解析した．この結果からは，調節刺激が高周波であるほどドリフト量は強くなっている．このようなドリフトの機序はまだ明かでないが，筆者はさきに述べた，安静位の変化が関与しているのではないかと考えている．即ち，調節刺激の後でその残効現象として調節の安静位は屈折増加方向へ，瞳孔の安静位は縮瞳方向へ移動するが，繰り返し刺激による安静位の変化の蓄積効果を表現している可能性がある．調節が高周波ほどドリフト量が多いのは，調節刺激としての質が強いためと思われる．

このドリフトは臨床検査として実用化可能である．自験例では，32歳男性の非常に強固な眼精疲労を訴えている例ではこの調節ドリフトについて有意の増加を示していた[6]．また，いま社会的に問題となっている VDT による眼精疲労の検診でも，VDT 作業時間と調節ドリフトとの間に有意の相関を認めた（未発表）．このようにドリフトは，普通の検査では捉えにくい調節の異常を知ることができると思われる．

## 6. 輻　　輳

——必ずしも“遅い”眼球運動ではない

最初に述べたように輻輳は基本的には両眼視差を手がかりとしてフィードバックで制御されている．そして輻輳の研究は通常は両眼に左右対称な視差の変化を与えて両眼の内転運動を記録する．このような実験系での輻輳運動は概ね指数関数的なカーブを描く遅い運動として考えられている[10]．しかし，実際の日常においてはこのような左右対称の両眼視差を見ることは少なく，水平・垂直の衝動性眼球運動に伴った輻輳運動がほとんどである．この場合，共同性運動と非共同性運動との関係については，Hering の法則が知られている．即ち，共同性運動系と非共同性運動系とはお互いに独立であり，両者が共に起こる眼球運動は両運動系の単純な線形加算であるというものである．実際に古い報告では両者を含む運動の軌跡は輻輳運動と衝動性眼球運動の単純な合成であるよ

うに記載されている[11]．ところが測定法の進歩により，衝動眼球運動を伴う時と伴わない単独の時とで輻輳運動の動特性は大きく異なり，“速く”なることが解ってきた[12]．

従って，輻輳の動特性を広く研究するには，広い範囲について精度が高く，速い運動を正確に評価できる方法が望まれる．これまでは，rimbus tracker（赤外線を角膜と結膜の境界にあててその反射率の差を利用して測る方法）がよく用いられてきた．この方法は精度は高いが，測定域が狭く校正値と基線がしばしば動揺するという欠点があり，定量的解析には問題がある．現在最もこの目的にふさわしいのはサーチコイル法である[13][14]．この方法は，電磁誘導の原理を応用したもので，交流磁場においたコイルに磁場となす角度に応じた電位が発生することを利用して眼球運動を計るものである．この方法が原理的には優れているにもかかわらず普及しない理由は，眼球に誘導コイルを組み込んだコンタクトレンズ電極を密着させなければならず，それが侵襲があることである．そこで，私たちはシリコンレンズを応用し，より違和感が少なく実用的なコンタクトレンズ電極を考案した[15]．これによれば非常に速い運動，振幅の大きな運動についても高い精度で評価でき，今後これにより輻輳運動の動特性の詳細を研究する予定である．

## 7．“速い”輻輳運動成分

――フィードバック制御に対する modulator の存在

輻輳運動は遅い視差の変化についてはフィードバック制御でよく追従していく．しかし視差の変化が速くなり，輻輳の速度が速いことを要求される場合，通常のフィードバック制御では対応しきれなくなり，その立ち上がりに速い輻輳運動の成分が混入する[16]．これは，本来遅い制御系であるフィードバック系を補償するためにオープンループ制御による成分が加わり，速い視差変化に対応しているものと解される．これは生体工学的なアプローチによる知見だが，では実際に例えばこのような速い輻輳運動に関係した脳の活動というものが存在するのだろうか．

例えばネコにおいては，高次視覚領の一つである外側上シルビウス領が近見反応と深く関わっている．ここに存在する輻輳関連ニューロンは，視標の接近で誘発された輻輳運動の最大速度の直前で非常に強い発火を示しており，輻輳運動の開始との関係は少ない．即ち輻輳運動をコマンドするニューロンではなく，上記のごとく速い輻輳成分と密接に関連し，本来遅い輻輳運動系の動特性の改善に係わる modulator の役割を果たしているニューロンと解釈することができる．このように，近見反応の仕組みをブラックボックスとして入出力の関係から解析するアプローチと，動物を用いて実際の脳のニューロンについて研究するアプローチとここで一致をみた訳である．

## 8．終わりに

心理物理学的また生体工学的なアプローチから見た近見反応について，最近の問題点を紙面の範囲内で述べた．輻輳・調節・縮瞳は三体一体となって反応する一方で，この三者は視覚的手がかりも制御の性格も末梢の効果器も異なり，脳の機構の解明や中枢神経系の診断学として格好の題材を提供している．しかし，近見反応の生理についてはまだまだ未知の部分が多く，視覚の生理学の一分野としてこれからの発展が大いに期待される分野である．

## 参考文献


1) **三輪　隆**：調節安静位．視覚の科学 **13**：20～27，1992．
2) **Leibowitz, H.W. and Owens, D.A.**：Night myopia and the intermediate dark focus of accommodation. J Opt Soc Am **65**：1121～1128，1975．
3) **Westheimer, G.**：Accommodation measurements in empty fields. J Opt Soc Am **47**：714～718，1957．
4) **Toates, F.M.**：Accommodation function of the human eye. Physiol Rev **52**：828～63，1972．
5) **Ebenholtz, S.M.**：Accommodation hysteresis：A precursor for induced myopia？ Invest Ophthalmol Vis Sci **24**：513～515，1983．
6) **Takagi, M., Toda, H., Usui, T. and Abe, H.**：Accommdative and pupilary near reflex to sinusoidal target movement.（投稿中）
7) **O'Neill, W.D.**：Triple-function ocular monitor. J Opt Soc Am **58**：570～573，1968．
8) **村松知幸，奥山文雄，所　敬**：近見反応における調節と瞳孔の関係．日本眼光学学会誌 **6**：75～79，1985．
9) **Charman, W.N. and Whitefoot, H.**：Pupil diameter and depth-of-field of the human eye as measured by laser speckle. Optica acta **24**：1211～1216，1977．
10) **山田徹人，鵜飼一彦，石川　哲**：輻輳・開散ステップ応答の指数関数近似による解析．日眼 **93**：859～864，

1989.

11) **Yabus, A.L.**: Motion of the eye on interchanging fixation points rest in space. Biofizica **2**: 698～702, 1957.

12) **Johnleigh, R. and Zee, D.S.**: The neurology of eye movements. edition 2. F.A.Davis, Philadelphia, 270, 1991.

13) **Robinson, D.A.**: A method of measuring eye movement: using a scleral search coil in a magnetic field. IEEE Trans Bio-Med Electron **10**: 137～145, 1963.

14) **高木峰夫**: サーチコイル法による眼球運動測定. Vision **3**: 67～72, 1991.

15) **高木峰夫, 長谷川茂, 臼井知聡, 阿部春樹, 水谷潤, 土井伸光**: Magnetic Search Coil 法に用いるコンタクトレンズの考案. 眼紀, 43: 814～821, 1992.

16) **Semmlow, J.L., Hung, G.K. and Ciuffreda, K.J.**: Quantitative assessment of disparity vergence components. Invest Ophtalmol Vis Sci **27**: 558～564, 1986.

17) **Takagi, M., Toda, H., Yoshizawa, T., Hara, N., Ando, T., Abe, H. and Bando, T.**: Ocular convergence-related neuronal responses in the lateral suprasylvian area of alert cats. Neuroscience Research, **15**: 229～234, 1992.

**司会** 実際的でかなり面白いお話で. ちょっと確認したいんだけど, VDT の作業で調節にドリフトが起こるとき, まあ万人に共通して起こるのかもしれないけれども, 中には特に, 特別強いドリフトを示すものもあるわけかな. 検査中にありましたか.

**高木** ええ, そうです.

**司会** そういうものと, 疲労度といいますかねえ, なんか関連が深い, ということですか.

**高木** 疲労度を客観的に数字化できませんので, 今回は作業時間ということと相関をとってみたんですけども, 一応去年の解析では作業時間との間に相関がありそうだということです.

**司会** 一般的なことでね. 特別な, そういう反応を示すものがあるわけですね.

**高木** えー, 1例, スライドにも出したんですけども, 近くを見た後, 遠くが非常に見にくいという, 球技なんかをやっていても, 近くに飛んで来たボールは見えるけども, 遠くに飛んでくボールが見えなくなる, という位ひどいと言ってきた人がいまして. それを測りますと, とんでもなくドリフトが強いという症例がありました.

**司会** それは若い人？

**高木** これー, 32才です.

**司会** まあ, 若い方だね. はい, わかりました. どうもありがとうございました.

**司会** えーと, それでは第三席. 大学院の吉澤君です.

私共のところは緑内障をいろいろ研究していますけども, ご存知のように本態性の高血圧という, おそらく脳の中に血圧コントロールセンターがあって, 何かその異常が高血圧を起こしてるんじゃないかという説が有力だと思うんですけども, それと同じように本態性の眼圧上昇つまり緑内障というものがあるんではないかというのが私共の仮説でありまして, それを実証しようと吉澤君がいろいろ努力をしているのでありますが, どうぞ.