

随意性閉眼と開眼時における眼球運動の定量的解析

—第2報 閉眼から開眼にかけて—

根本 徹, 吉田 寛, 望月 潤一, 向野 和雄, 石川 哲

北里大学医学部眼科学教室

要 約

随意性閉眼と開眼時における眼球運動については、ほとんど詳細な記録分析がなされていない。今回、我々はサーチコイル法を用い、その運動を詳細に記録分析した。明室下では視覚入力による補正の衝動性眼球運動がどの時期に生じているかが判別できなかった。そこで、検査条件を改めて設定し、さらに固視視標を正面、上下左右と変え、随意性閉眼から開眼時の眼球運動を記録したところ、三相の眼球運動から成り立つ動きであることが観察された。第I相は記憶していた視標に向かう衝動性眼球運動と考えられるもの、第II相は記憶していた視標に

向かう、より緩やかな運動と drift であり、さらに、この際異なる5方向の視標に対し、いずれも3度以内に到達していた。最終の第III相は視覚入力による補正の衝動性眼球運動と考えられ視標に達した。その各相のメカニズムおよび発生起源について考察した。(日眼会誌 99: 669—675, 1995)

キーワード: 随意性閉眼, 開眼時眼球運動, 補正衝動性眼球運動, サーチコイル法

Study on Human Eye Movements Induced by Prolonged Eye Closure and Lid Opening

—Report 2. Closing and Opening of Eyelids—

Tetsu Nemoto, Hiroshi Yoshida, Junichi Mochizuki,
Kazuo Mukuno and Satoshi Ishikawa

Department of Ophthalmology, School of Medicine, Kitasato University

Abstract

The eye movement during prolonged eye closure and the following eye opening has not been studied precisely. In the present study we evaluated the eye movement during prolonged eye closure and the following eye opening using a magnetic search coil method. In a bright room, the exact moment of recognizing a visual target during eye opening could not be determined. Therefore, other conditions were used to elucidate the precise relationship between the presence and lack of visual input during eye opening. Eye movement during eye opening was accomplished in three phases. The first phase had rapid movements like visually guided saccades

toward the imaged target. The second phase had slow movements and drift toward the imaged target, and the final eye position was reached within 3 degrees from the target from 5 different gaze directions. The third phase was final visually evoked corrective saccades and the subjects found the target. We discuss the origin of these eye movements. (J Jpn Ophthalmol Soc 99: 669—675, 1995)

Key words: Prolonged eye closure, Eye movements during lid opening, Corrective saccades, Magnetic search coil method

別刷請求先: 228 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 根本 徹
(平成6年9月3日受付, 平成7年2月8日受理)

Reprint requests to: Tetsu Nemoto, M.D. Department of Ophthalmology, School of Medicine, Kitasato University,
1-15-1 Kitasato, Sagami-hara-shi, Kanagawa-ken 228, Japan

(Received September 3, 1994 and accepted in revised form February 8, 1995)

I 緒 言

前報¹⁾で我々は瞬目時(自然瞬目, 随意性瞬目, 反射性瞬目)に生じる眼球運動の方向, 軌跡, 振幅および速度について観察, 分析した. どの瞬目においても眼球は閉眼開始により内下転し, その後, 外上転の方向に移動することが確認された. 瞬目時の眼球運動はいずれも3度以内と小振幅の動きであり, 臨床でみられるベル現象といわれる随意性閉眼の大きな外上転の眼球運動はみられず, これまでの報告²⁾³⁾と一致していた. この随意性閉眼に伴う眼球運動については, これまで簡単に slow tonic elevation とし, 開眼により視標への眼球運動は視覚矯正衝動性眼球運動によると簡単に述べられているだけであり, 開眼時の眼球運動を分析した報告²⁾³⁾はほとんどない. 今回, 我々は随意性閉眼の間移動している眼球が開眼する直前にはどのような位置にあり, 開眼するにはどのような眼球運動を実際にはしており, 視覚情報を得る直前にはどの位置にあるのかを観察した. さらに, 視覚情報が入力されてからどのように補正の衝動性眼球運動が生じ, その結果, 開眼時視標を中心窩で捕え, 視覚情報を最短時間で得ることが出来るかを観察, 解析した.

II 方 法

1. 対 象

対象は, 眼科的に異常のない眼科医および視能訓練士から成る正常者9名(男性3名, 女性6名, 年齢21~40歳, 平均年齢28.1±5.7歳(平均値±標準偏差))である. 十分なインフォームドコンセントを得た後, 眼球運動の検査はすべて被験者の右眼を用いた(表1).

2. 測定方法

点眼麻酔の後, スカラー社製スクレラルサーチコイルを被験者の右眼に装着した. 次に, 眼瞼の動きを記録するため被験者の左眼の上眉毛部上部と下眼瞼部に眼電位図の皿電極を付けた. 被験者は電磁誘導式眼位測定装置(MEL-442型, 演算子工業社製)の中に入って椅子に座った. 眼球運動によって生じる電位差をアンプで増幅し, 垂直成分と水平成分に分離した. 眼球および眼瞼の動きを日本光電社製 Nystagmograph を通して日本光電

表1 対 象

被験者番号	年齢	性別
1	28	女性
2	24	女性
3	23	女性
4	29	男性
5	28	女性
6	33	男性
7	27	女性
8	21	女性
9	40	男性

社製レクテグラフ熱書記録器 Pen Oscillogram で記録した.

3. 検査条件

検査条件 a) 明室下で被験者の正面眼前1.4 m に置かれた視標(視角0.6度の黒丸)を固視させ, 通常の随意性の閉開眼を命じた. この場合, 開眼中のどの段階で視標を捕えたか, すなわち, いつ視覚入力を得られたかが明らかではなかった. そこで, 次の検査条件を設定した.

検査条件 b) 視覚入力の変換を行うため, 明室下で上記の a) と同じ固視視標を呈示し, 固視させた後に随意性の閉眼を命じた. そのまま暗室下とし視覚情報を除去した. 約10秒間閉眼の後, 暗室下で合成音の合図とともに開眼させ, 随意性閉眼直前に明室下で固視していた視標があると思われる位置をみつめるように命じ, 約10秒後に再び明室下に変え, 視覚情報が入力される直前の眼位と, それに続く補正眼球運動を記録した(図1).

検査条件 c) 上述の b) と同じ条件で固視点を上下および右左に各10度ずつ変え, 眼球運動を記録した.

III 結 果

検査条件 a) 随意性に閉眼している間の最大移動眼位をプロットしてみると, 閉眼ごとにややばらつきはあるものの, 外上転位にあり, 外転方向5度, 上転方向15度前後に位置していた(図2). 随意性閉眼時の最大移動眼位と開眼直前の眼位を垂直成分と水平成分に分けて検討すると, 最大移動眼位はその角度に被験者間で差はあるものの, どの被験者でも外上転位にあり, 開眼直前にはやや下降および内転し, 正中位に近づいていた. 代表的な被験者1の随意性閉眼中の眼位変化を図3Aに示す. 被験者4の閉眼による眼球運動は, これまでにもよく述べられている inverted Bell's phenomenon と呼ばれる

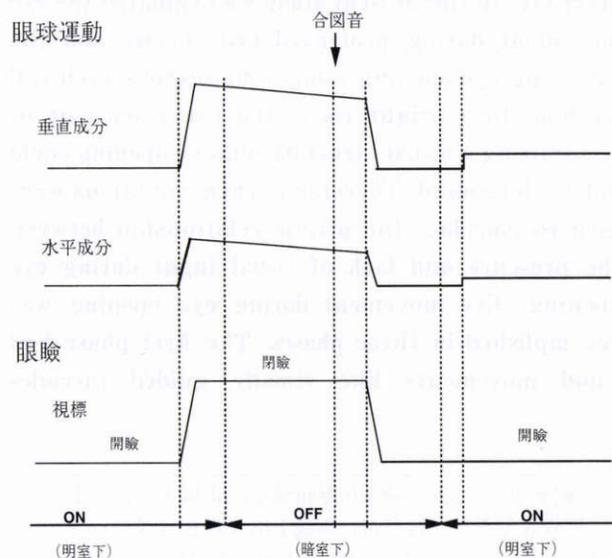


図1 検査条件 b).

合図音とともに被験者は暗黒下で開眼する.

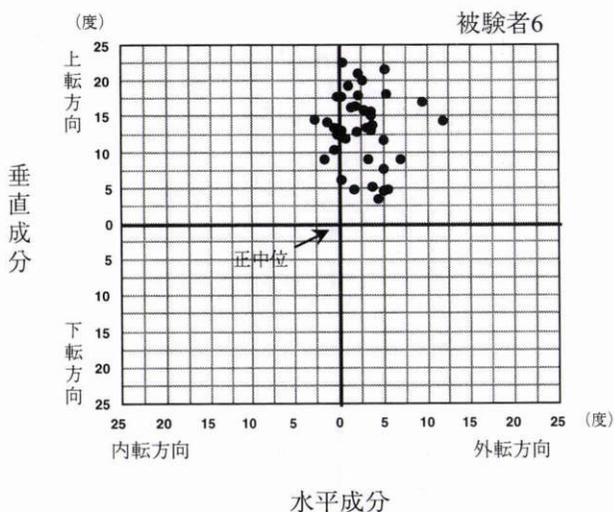


図2 被験者6における随意性閉眼中の最高移動眼位。外転方向5度、上転方向15度前後に位置していた。

タイプで、閉眼中の最大移動眼位は外下転位にあった。ただ、この被験者でも開眼直前には正中位の方へ戻ってきていた(図3B)。図4Aに被験者1におけるこの検査条件での波形を示す。この場合、開眼中のどの段階で

視覚入力を得られたかは明らかではなかった。

検査条件b) 閉眼中に暗室下に変え、視覚情報を除去した条件下の被験者1の波形を示す(図4B)。視覚入力を除去した状態では開眼とともに初期には早い速度をもって下方に移動し(第I相)、そこから緩やかな速度に移行しながら減速する drift の後、安定した眼位を保っていた(第II相)。その後、視標の呈示とともに視覚入力を与えられることにより上向きの補正の衝動性眼球運動が生じ(第III相)、視標を捕えていた。図5に上述の第I相で眼球が移動する最大速度と同一被験者で視覚誘導により第1眼位より5度上方への衝動性眼球運動をさせた時の速度振幅比の比較を示す。被験者2では有意差がみられたが(図5A)、被験者1,3および4では明確な有意差がみられなかった(図5A,B)(対応のないt検定)。また、同一被験者で視覚入力のない状態から視覚入力を与えられた後、生じる補正の衝動性眼球運動(図4B-第III相)と、視覚誘導による衝動性眼球運動の潜時を比較した(対応のないt検定)。視覚入力により生じる補正の衝動性眼球運動の潜時は平均 0.37 ± 0.11 秒であり、視覚誘導による衝動性眼球運動の潜時は平均 0.26 ± 0.04 秒で

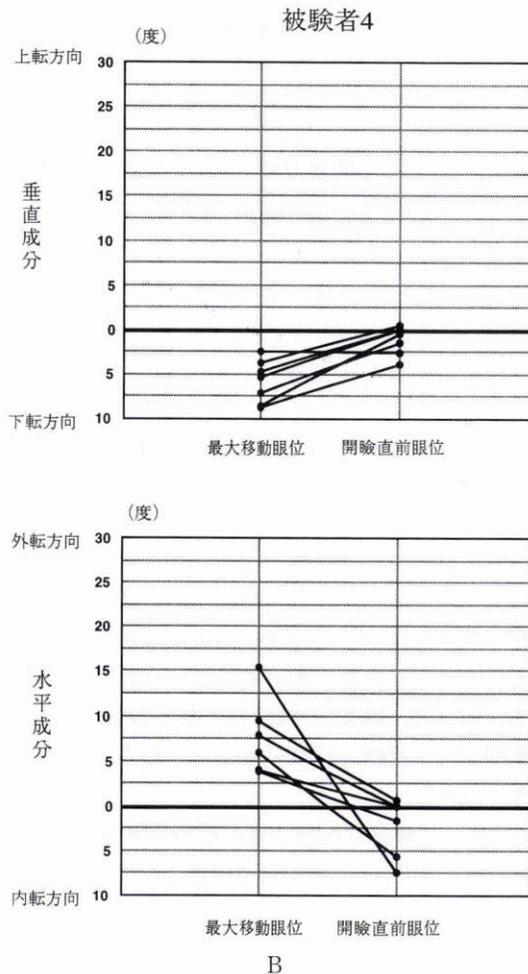
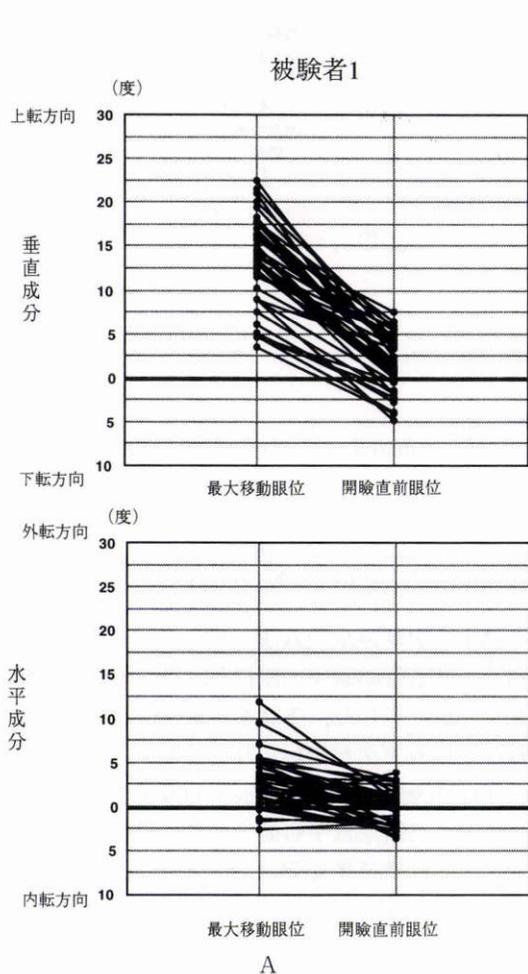


図3 随意性閉眼中の眼位変化。

A に代表的な被験者1, B に被験者4を示す。A では閉眼中の最高移動眼位は外上転位にあり、開眼直前にはやや下降および内転し、正中位に近づいた。B では閉眼中の最高移動眼位は外下転位にあり、開眼直前には正中位に近づいた。

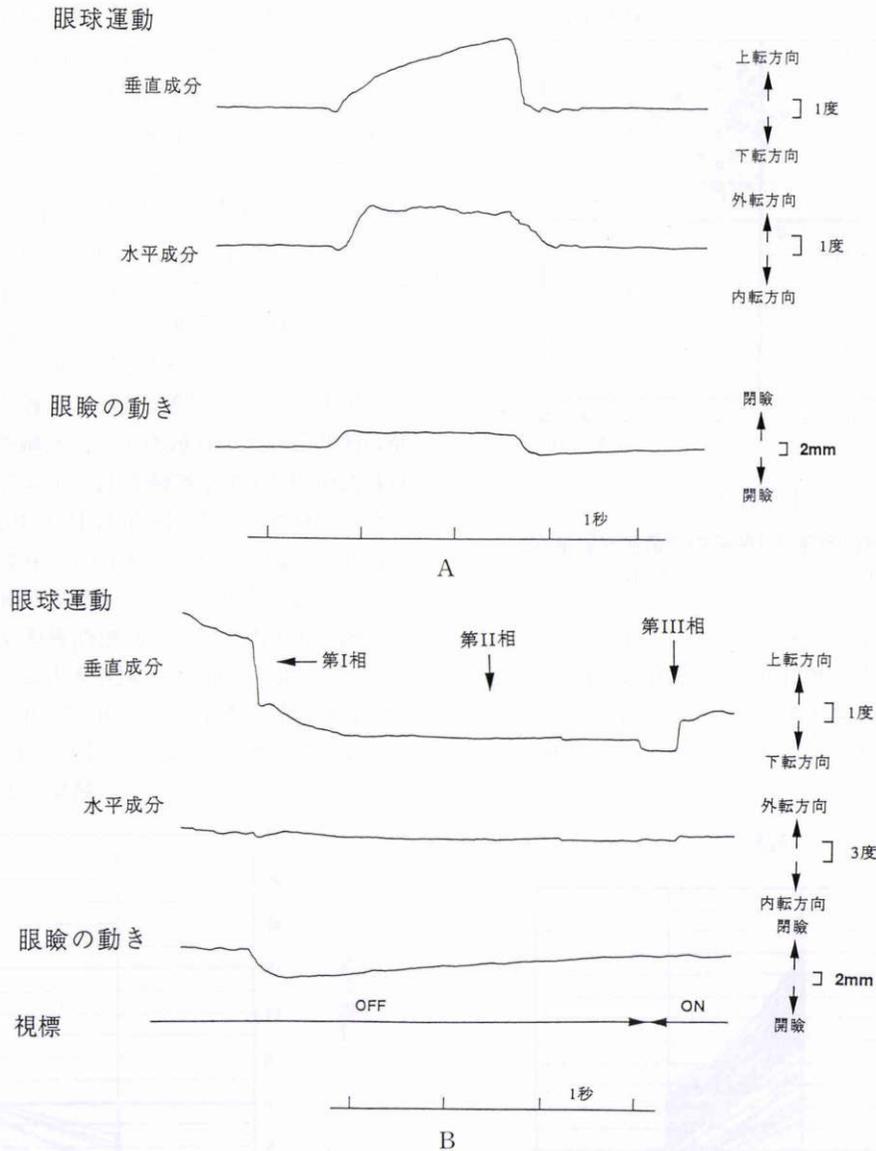


図4 開瞼時の眼球運動.

Aに検査条件a), Bに検査条件b)の結果を示す. 眼瞼の動きは波形では drift しているが, 実際には開瞼後保持されていた.

あった. 有意差 ($p < 0.001$) を持って視覚入力のない状態から視覚入力を与えられた補正の衝動性眼球運動の方が遅かった. 総合すると, 速度振幅比は被験者2でこそ差が大であったものの, 他の被験者では有意差があったとしても僅少で, 第I相すなわち開瞼開始直後の眼球運動は衝動性眼球運動とほぼ一致する性質を持っていたものと考えられた.

検査条件c) 随意性閉瞼の後, 開瞼し視覚入力がない状態で安定した眼位(図4B-第II相)になるが, どの被験者でもその眼位には多少のばらつきがあるものの, 垂直成分, 水平成分ともに閉瞼前の眼位から3度以内とかなり正確な位置で安定した. そこで, 同一被験者で視標の位置を変えてみると, 正面位と同様にすべて3度以内に落ち着いていた(図6). その後, 視覚入力が入ると同時に補正の眼球運動が発生し視標を固視していた.

IV 考 按

最も精密な眼球運動記録法とされているサーチコイル法を用いて随意性閉瞼中の眼位と, その後の開瞼時の眼球運動を記録分析した. これまで瞬目時の眼球運動の観察に様々な検査方法が用いられているが, ハイスピード写真⁴⁾, 角膜反射法⁵⁾⁶⁾, Purkinje image 法⁷⁾などでは閉瞼下の眼球運動の観察は不可能である. 我々は閉瞼から開瞼にかけての眼球運動を記録するためにサーチコイル法を用いたが, 本法にしても長所, 短所があることは第一報^{8)~11)}で述べた.

今回の詳細な分析の結果, 随意性閉瞼中の最高移動眼位は外上転位にあり, これは過去の報告とほぼ一致した⁶⁾. この閉瞼中に眼位はどれも視標のある正中位の方向へほぼ戻ってきていた. その後, 検査条件a)のように

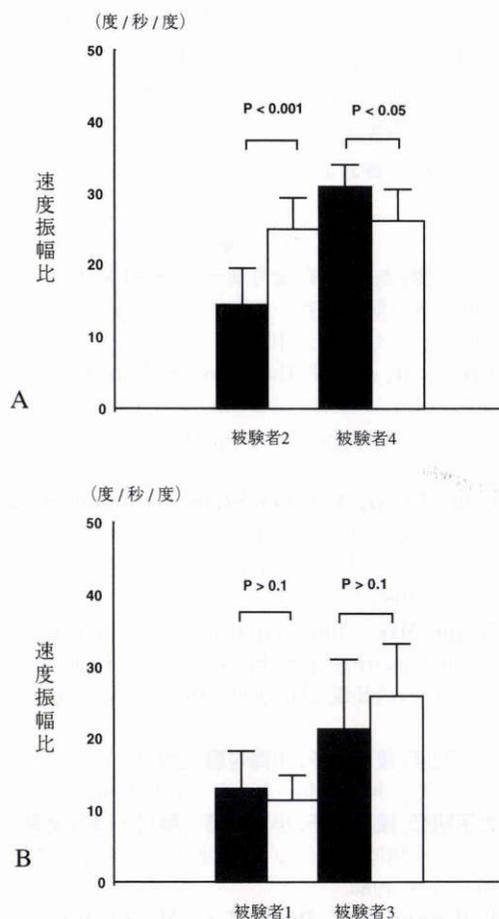


図 5 第 I 相における眼球運動の速度振幅比と同一被験者における視覚誘導による衝動性眼球運動の比較。A に有意差のみられた被験者、B に有意差のみられなかった被験者の結果を示す。黒コラム：開眼時における第 I 相の眼球運動、白コラム：同一被験者における上方 5 度への視覚誘導による衝動性眼球運動

視標を呈示したまま開眼を行わせると、どの段階で視覚入力が得られたかは不明であった。すなわち、どこまでが視覚入力のない状態での眼球運動であり、視覚入力が得られた後どこで補正の衝動性眼球運動が生じているかが区別できなかった。そこで、我々は開眼する際の眼球運動の特性を記録分析するために検査条件 b) のように閉眼中に暗室に変え、視覚入力を除去し開眼後も視覚入力のない状態でどのような眼球運動を行うかを観察分析した。ただし、今回の我々の検査条件では視覚入力は除去して行ったが、平衡覚、聴覚、位置覚、触覚など他の感覚系の除去はしていない。視覚入力を除去した状態では、暗黒下ではあるが、眼球は速度振幅比でみると、衝動性眼球運動にほぼ一致する性質を持って閉眼前に固視していた視標に向かって移動していた (第 I 相)。次に、眼球は緩やかな速度に移行しながら記憶している視標により近づき安定した眼位を示していた (第 II 相)。しかも、この安定した眼位の位置は閉眼前に固視していた視標の位置に関係なく視標から 3 度以内に安定していた。その後、

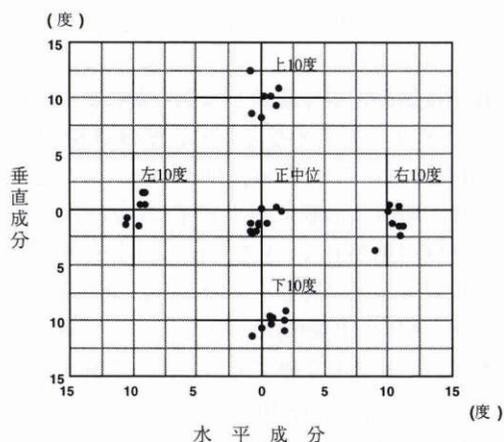


図 6 同一被験者において視標位置を変化させた時に第 II 相で示した安定した眼位の位置。視標の位置を変えてもすべて 3 度以内に落ち着いた。

網膜で視標を捕えることにより視覚による補正の衝動性眼球運動が生じ (第 III 相)、視標を固視した。したがって、実際は開眼時にはこの三相から成り立つ眼球運動で移動していることが考えられた。

第 I 相の衝動性眼球運動に相当する眼球運動の起源としては、まず前頭眼野 frontal eye field (以下、FEF) が考えられる。この部位のニューロンでは記憶や予想した視標に向かっての衝動性眼球運動に先立ち放電が認められる。また、暗黒下での自発性衝動性眼球運動でも同様である。すなわち、FEF は記憶していた部位に向かって尾状核→黒質網状部→上丘という経路をもって衝動性眼球運動を起こすことが知られている¹²⁾。このように、FEF は上丘と連合して方向と振幅の一定な衝動性眼球運動を起こすことが判明しており、上述の第 I 相にみられた眼球運動として考えやすい。その他に近年注目されている視床の internal medullary lamina (以下、IML) は、入力系は上行性入力として網膜地図を有し、goal-directed の運動を行う上丘および小脳、さらに視蓋前域、舌下神経前位核、橋網様体、前庭神経核、基底核を有しており、下行性入力系として FEF, supplementary eye field, 下頭頂葉を有している。一方、出力投射を尾状核、FEF, supplementary eye field, 下頭頂葉へ出しているが、衝動性眼球運動を起こす脳幹へは直接は投射していない。このことから、IML は眼位についての efferent copy 情報を与える起源として空間位置覚を正確にする働きがあると想定されている¹³⁾。したがって、第 I 相ではこの efferent copy による衝動性眼球運動により眼球を閉眼前の視標の位置に近づけたとも考えられる。また、これに関与すると考えられる空間に眼を向けた時に反応するニューロンが見出されている¹⁴⁾。Guthrie ら¹⁵⁾が報告したサルの上丘神経切断後の上丘刺激による眼位変換後の stimulation-compensation task でも代償は正確であったということを考えると、外眼筋自己受容器からの feed

backではなく、efferent copyによるという考えが妥当であろう。

第II相は衝動性眼球運動とは明らかに異なり、第I相とは別のメカニズムと考えられ、眼球は緩やかに drift しつつ視標に近づいている。Ohtsuka ら¹⁶⁾¹⁷⁾はヒトの小脳変性症で暗黒下の眼位が不安定にゆれること(正常では1~2度の動揺もない)を見出し、小脳虫部(中枢性)による自己受容系の関与を示唆した。第II相では最終的に安定する眼位は閉眼前に固視していた視標の位置と比べ3度以内とかなり正確であり、同一被験者で指標の位置を上、下、右、左、各10度に変えても同様であったことは、暗黒下での眼球の動揺幅と眼位保持についての報告¹⁸⁾とも一致する。その他にも、ネコで眼位について自己受容器の入力の関与を示した実験もある¹⁹⁾。すなわち、空間での位置を決定するためには網膜上の像の位置と眼窩内における眼球の位置を保持するという両者の働きが必要となる。この後者の情報の獲得には外眼筋における自己受容器の働きによる proprioception の働きの1つである眼球位置感覚 eye position sense によると考えられる。これについては、これまでに2つの網膜(視覚)外情報源 extraretinal signals により惹起されるといわれている。1つは Helmholtz の説(1866)である“outflow”(corollary discharge; efferent copy)説であり、これは中枢からの motor command (effort of will) が外眼筋を動かすというものである。もう1つは Sherrington (1918) が唱えた“inflow”説であり、これは外眼筋の伸張受容器から発生した位置感覚情報が中枢神経にいくというものである²⁰⁾。さらに、Fiorentini ら²¹⁾はネコの三叉神経第一枝を切断することにより同側の眼球が暗黒下で不随意に不安定に動揺することを見出し、眼球の定位置への保持には三叉神経からの入力が必要なことを初めて明らかにし、その他、ヒトでも自己受容器の働きが斜視手術後の past pointing²²⁾および三叉神経麻痺後の past pointing の異常で指摘されている²³⁾。このように、第II相には自己受容器系の働きが推定される。

第III相はこれまでも述べられているように、視覚入力による補正の衝動性眼球運動である²³⁾。その潜時は、視覚誘導の衝動性眼球運動の潜時よりも遅かった。一般に衝動性眼球運動の潜時は、照度、コントラスト、眼球運動の振幅、方向の予想、注意力、大きさなど多くの要素に影響を受けることがいわれている²⁴⁾。今回は振幅が小さいことや方向が予想できないことなどがあり、潜時が遅れたものと考えられる。

今回、我々は特定の検査条件を設定し、開眼時における眼球運動の詳細を初めて観察、分析した。Collewijn ら³⁾も普通の条件下で閉眼から開眼の眼球運動を記録しているが、今回我々の詳細に解析した三相が同様に示されており、実際の生活でもこのような動きを起こしていると考えられる。今後、同様の検査条件下で各種疾患の

眼球運動を観察することで、上述の三相の異常および役割などを明らかに出来るものと期待される。

稿を終えるにあたり、研究の機会を与えて頂いた墨田区保健所所長岩井榮一先生に深謝いたします。また、今回の研究は環境庁水俣病研究費および科学技術庁の備品を用いて行われた。

文 献

- 1) 根本 徹, 吉田 寛, 望月潤一, 向野和雄, 石川 哲: 瞬目に伴う眼球運動の定量的分析—第1報. 3種類の瞬目について—. 日眼会誌 99: 481—486, 1995.
- 2) Takagi M, Abe H, Hasegawa S, Usui T: Reconsideration of Bell's phenomenon using a magnetic search coil method. *Doc Ophthalmol* 80: 343—352, 1992.
- 3) Collewijn H, Van der Steen J, Steinman RM: Human eye movements associated with blinks and prolonged eye lid closure. *J Neurophysiol* 54: 11—27, 1985.
- 4) Doane MG: Interaction of eyelids and tears in corneal wetting and the dynamics of the normal human eyeblink. *Am J Ophthalmol* 89: 507—518, 1980.
- 5) 大平明彦, 後藤公子, 小澤哲磨: 瞬目に伴う眼球運動について. *神経眼科* 4: 177—181, 1987.
- 6) 大平明彦, 後藤公子, 小澤哲磨: 瞬目と眼球運動—瞬目に伴う眼球運動について. 第2報—. *神経眼科* 5: 300—305, 1988.
- 7) Volkman FC, Riggs LA, Moore RK: Eyeblinks and visual suppression. *Science* 207: 900—902, 1980.
- 8) Robinson DA: A method of measuring eye movements using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Trans Bio-Med Electron* 10: 137—145, 1963.
- 9) Collewijn H, Van der Mark F, Jansen TC: Precise recording of human eye movements. *Vision Res* 15: 447—450, 1975.
- 10) Cornsweet TN, Crane HD: Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images. *J Opt Soc Amer* 63: 921—928, 1973.
- 11) Schlag J, Merker B, Schlag-Ray M: Comparison of E.O.G. and search coil techniques in long-term measurements of eye position in alert monkey and cat. *Vision Res* 23: 1025—1030, 1983.
- 12) Leigh RJ, Zee DS: *The Neurology of Eye Movement* (ed 2), FA Davis, Philadelphia, 98—101, 1991.
- 13) Leigh RJ, Zee DS: *The Neurology of Eye Movement* (ed 2), FA Davis, Philadelphia, 103—105, 1991.
- 14) Andersen RA, Essick GK, Siegel RM: Encoding of spatial location by posterior parietal neurons. *Science* 230: 456—458, 1985.
- 15) Guthrie BL, Porter JD, Sparks DL: Corollary discharge provides accurate eye position information to the oculomotor system. *Science* 221: 1193

- 1195, 1983.
- 16) **Ohtsuka K, Mukuno K, Sakai H, Ishikawa S**: Instability of eye position in the dark in cerebellar degeneration. *Ophthalmologica* 196: 35—39, 1988.
 - 17) **Ohtsuka K, Mukuno K, Ukai K, Ishikawa S**: The origin of square wave jerks: Conditions of fixation and microsaccades. *Jpn J Ophthalmol* 30: 209—215, 1986.
 - 18) **Becker W, Klein HM**: Accuracy of saccadic eye movements and maintenance of eccentric eye position in the dark. *Vision Res* 13: 1021—1034, 1973.
 - 19) **Lal R, Friedlander MJ**: Gating of retinal transmission by afferent eye position and movement signals. *Science* 243: 93—96, 1989.
 - 20) 石川 哲: 外眼筋自己受容器 (proprioception)一文
献の考察及び新知見一. *日眼会誌* 82: 233—249, 1978.
 - 21) **Fiorentini A, Maffei L**: Instability of the eye in the dark and proprioception. *Nature* 269: 330—331, 1977.
 - 22) **Steinbach MJ, Smith DR**: Spatial localization after strabismus surgery: Evidence for inflow. *Science* 213: 1407—1409, 1981.
 - 23) **Campos EC, Chiesi C, Bolzani R**: Abnormal spatial localization in patients with herpes zoster ophthalmicus. Evidence for the presence of proprioceptive information. *Arch Ophthalmol* 104: 1176—1177, 1986.
 - 24) **Leigh RJ, Zee DS**: *The Neurology of Eye Movement* (ed 2), FA Davis, Philadelphia, 82—84, 1991.
-