

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—

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

瞬目時に生じる眼球運動については多くの報告があるが、その軌跡について一定の見解はない。我々はサーチコイル法を用いて自然瞬目、随意性瞬目、反射性瞬目における眼瞼と眼球運動を各々記録、分析した。自然瞬目と随意性瞬目は振幅の差はあるが、どちらも初期に内下転方向に移動し、次いで後期には外上転方向に動き第1眼位に戻った。反射性瞬目では、初期には他の瞬目と同様に内下転方向に移動したが、後期は波形の動揺が著明であり、今回は分析が困難であった。各瞬目時に生じる眼球運動を水平成分と垂直成分に分けて速度振幅比で分

析すると明確な有意差が認められず、共通した神経メカニズムを有するのではないかと考えられた。さらに、同一被験者における視覚誘導による衝動性眼球運動と比較を行ったところ、3種類の瞬目時に生じる眼球運動の速度振幅比は有意に低値を示すことから、衝動性眼球運動とは異なった神経支配が考えられた。(日眼会誌 99: 481-486, 1995)

キーワード：瞬目時眼球運動、自然瞬目、随意性瞬目、反射性瞬目、サーチコイル法

Study on Human Eye Movements Induced by Blinks
—Report 1. Three Kinds of Blinking—

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

Department of Ophthalmology, School of Medicine, Kitasato University

Abstract

The eye movement associated with blinking was studied with a magnetic search coil method. Lid movements and eye movements associated with spontaneous blinks, voluntary blinks, and reflex blinks induced by puffs of air or flashes of light were analysed. Eye movements associated with spontaneous blinks and voluntary blinks had initial downward and adducted movements followed by upward and abducted movements of the eyeball. Reflex blinks initially showed the same downward and adducted movements, but upward and abducted movements were not constantly obtained in given subjects. The velocity-amplitude ratio was equal among the three kinds of blinks in both horizontal and vertical movements. The velocity-amplitude

ratio of the eye movements associated with blinks and visually-guided saccadic eye movements was compared. The horizontal and vertical eye movements associated with blinks were slower than those of saccadic eye movements in the same subject. Therefore, the eye movements associated with the blinks may have a different neural mechanism in the brain from that of the saccadic eye movement system. (J Jpn Ophthalmol Soc 99: 481-486, 1995)

Key words: Eye movements associated with blinks, Spontaneous blink, Voluntary blink, Reflex blink, Magnetic search coil method

I 緒 言

瞬目および閉瞼時の眼球運動については、現在に至る

まで多くの報告^{1)~17)}がある。自然瞬目、随意性瞬目、反射性瞬目などの瞬目時にいかなる眼球運動が生じるか、またその方向性、軌跡、振幅、その速度などについて一致

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8月22日受付, 平成6年11月5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 August 22, 1994 and accepted in revised form November 15, 1994)

した見解はまだない。過去の報告では、瞬目時の眼球運動は写真撮影法では上転¹⁾、ハイスピード写真では上転はなく眼球陥凹³⁾、double Purkinje image eye trackerでは下内転⁴⁾、さらに眼球電位図(electrooculography: 以下、EOG)を用いた多くの報告では内上転または外上転^{5)~7)}、visual persistence 法では内下転⁸⁾、角膜反射を用いた方法で上転⁹⁾¹⁰⁾、筋電図では外眼筋の同時収縮などである^{11)~14)}。このように、その結果が異なる理由としては、第1に瞬目を明瞭に分類し分析していない、第2に眼球運動の記録方法の違い、第3に測定条件の違い、さらに被験者の差などではないかと考えられる。サーチコイルを用いた眼球運動の記録は1963年Robinson¹⁸⁾により行われて以後、EOGでみられるアーチファクトの影響を生じない優秀な方法の一つとして研究され¹⁹⁾²⁰⁾、瞬目時に生じる眼球運動の分析にも用いられている^{15)~17)}。しかし、同じサーチコイル法でも自然瞬目、随意性瞬目、反射性瞬目における眼球運動の定量的測定の報告で未だ一致しない面もある。今回、我々はサーチコイル法を用い、3種類の瞬目で生じる眼球運動の分析に興味のある所見を得たので、ここに報告する。

II 実験方法

1. 対象

対象は、眼科的に異常がない眼科医および視能訓練士から成る9名(男性3名、女性6名、年齢21~40歳、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、眼球運動の記録はすべて被験者の右眼を用いた(表1)。

2. 眼球運動の測定方法

サーチコイル装着時の疼痛をできるだけ軽減するために装着前に0.4%塩酸オキシブプロカイン点眼液(ベノキシール®)を数回点眼し、さらに、2%塩酸リドカインの点眼を加えた。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入れた。次に、眼瞼の動きを記録するため、長径8mm、短径5mmの楕円形のリッドコイル(自作)を被験者の左上眼瞼辺縁部中央に両面テープを用い固定した。被験者が演算子工業社製電磁誘導式眼位測定装置MEL-442型の中に入って椅子にすわり、コイル

の位置が磁場のほぼ中央になるようにし、頭位を固定した。サーチコイルの端子およびリッドコイルの端子からの出力信号をアンプで増幅し、垂直成分と水平成分とに分離した。さらに、日本光電社製nystagmograph(プリアンプRNP-6008、アンプAB-621G)を通し、日本光電社製レクチグラフ熱書記録器pen oscillogram(WT-685G)で記録した(図1)。

3. 検査条件

検査は以下の順で行われた。

1) 自然瞬目(spontaneous blink)

被験者に眼前1.4mに置かれた指標(視角0.6度の黒丸)の固視を命じた。固視中の1分間に15回前後生じる瞬目を自然瞬目とした。

2) 随意性瞬目(voluntary blink)

上記と同様の指標を固視させた後に、合図の音とともに被験者に極力速く随意的に行わせた瞬目を随意性瞬目とした。

3) A. 空気刺激による反射性瞬目(reflex blink by puffs of air)

エアープフにより左眼周囲への気体噴射で反射的に生じる瞬目を反射性瞬目とした。

B. 閃光刺激による反射性瞬目(reflex blink by flash)

網膜電図で用いる刺激装置を用い、眼前60cmのフラッシュライト(40ジュール)で生じる瞬目を反射性瞬目とした。

4. 眼球運動の解析

各瞬目の最大振幅を用いて速度分析を行った。最大振幅は、垂直成分では最下転から最上転の間、水平成分では最内転から最外転の間とした。各瞬目で眼球運動の速度振幅比を求め、対照として同一被験者での視覚誘導による衝動性眼球運動(垂直運動は振幅4度、水平運動は振幅5度)の速度振幅比をとり比較した。

なお、統計学的検討は比較した群で等分散がみられたものは対応のないt検定を用い、等分散がみられなかったものはWelchのt検定を用い、それぞれ評価した。

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

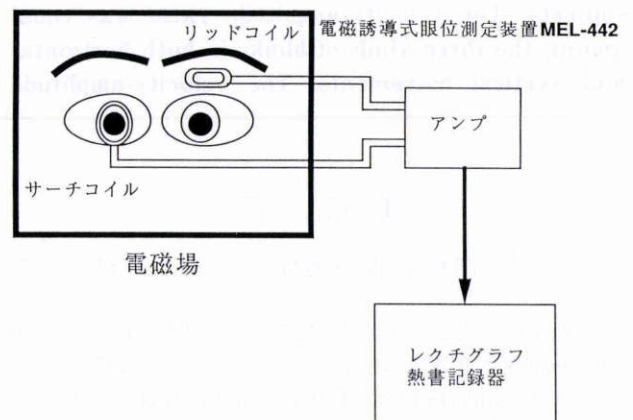


図1 測定方法。

III 結 果

1. 自然瞬目

図2Aに被験者No.6の典型的な自然瞬目の右眼の眼球運動の波形を示す。自然瞬目の頻度は12.5回/分であった。自然瞬目では、その初期に下方および内方に眼球運動を認め、それに続いて上方と外方に眼球運動が起きた。開瞼により眼球は第1眼位に戻った。分析が行われたのは被験者No.1~6である。眼球運動の垂直成分の振幅の平均値および標準偏差は 2.4 ± 1.0 度であり、水平成分のそれは 1.6 ± 0.7 度であった。平均値でみると垂直性眼球運動の方が大きかったが、有意差はなかった。上述の6名について自然瞬目時の最高速度を分析したところ、垂直性眼球運動の下転速度は 53.8 ± 27.0 度/秒であり、上転速度は 52.8 ± 29.3 度/秒であった。水平性眼球運動の内転速度は 45.32 ± 0.5 度/秒であり、外転速度は 46.4 ± 31.3 度/秒であった。これら速度成分は、年齢が28~33歳までの比較的狭い範囲の被験者においてもかなりばらつきがみられ、有意差はなかった。

2. 随意性瞬目

図2Bに被験者No.6の典型的な随意性瞬目の右眼の眼球運動の波形を示す。随意性瞬目でも自然瞬目と同様に初期に下方および内方に眼球運動を認め、それに続いて上方と外方に眼球運動が起き、開瞼により眼球は第1眼位に戻った。自然瞬目と同一の被験者6名の垂直性眼球運動の振幅の平均値および標準偏差は 2.6 ± 1.3 度であり、水平性眼球運動のそれは 1.6 ± 0.9 度であった。平均値でみると垂直性眼球運動の方が大きかったが、有意差はなかった。随意性瞬目時の最高速度を分析したところ、垂直性眼球運動の下転速度は 48.6 ± 27.2 度/秒であり、上転速度は 54.0 ± 22.2 度/秒であった。水平性眼球運動の内転速度は 41.9 ± 13.6 度/秒であり、外転速度は 42.0 ± 10.7 度/秒であった。これら速度成分は、自然瞬目と同様にならばつきがみられ、有意差はなかった。

3. 自然瞬目と随意性瞬目のリサーチ波形

図3に代表的な被験者No.5の自然瞬目と随意性瞬目の右眼のリサーチ波形を示す。実線で結ばれた黒丸同士の時間間隔は0.2秒である。全被験者9名を対象としたが、他の被験者も基本的には同じ傾向を示した。自然

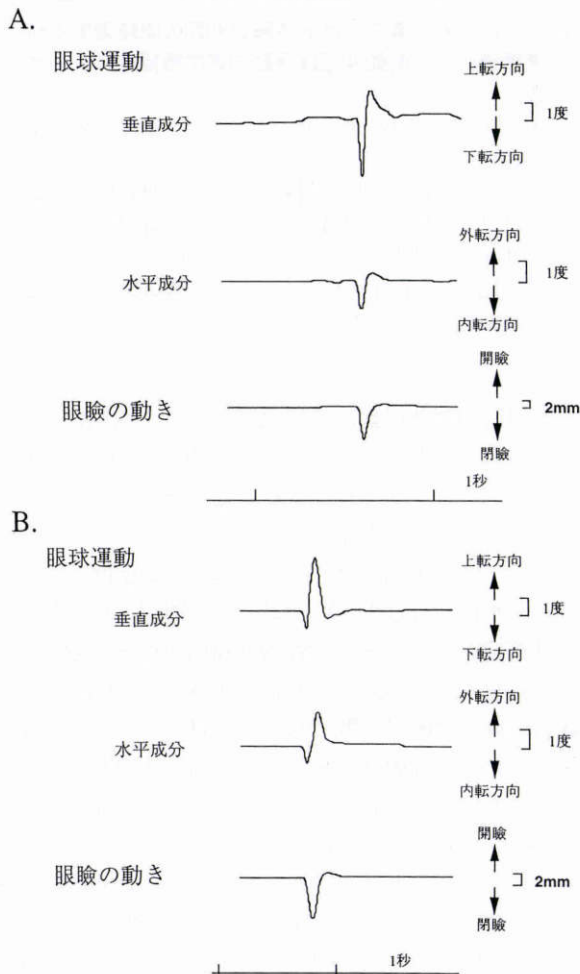


図2 瞬目時の眼球運動。
A：自然瞬目，B：随意性瞬目

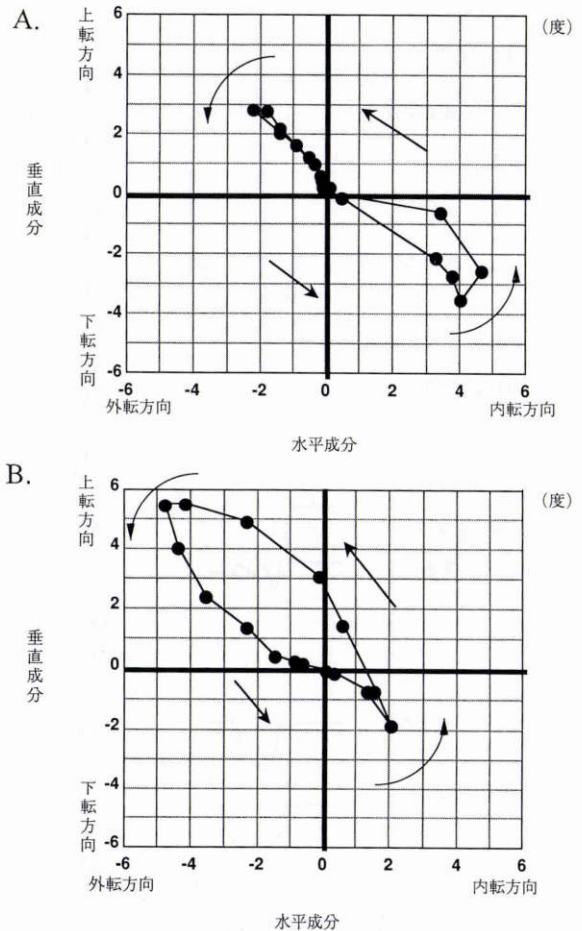


図3 右眼リサーチ波形。
A：自然瞬目，B：随意性瞬目

瞬目時の眼球運動(図3A)は振幅,速度に多少の差はあるが,矢印の示すごとく内下転から外上転,そして第1眼位に戻る傾向を示した.随意性瞬目時の眼球運動(図3B)は基本的には自然瞬目と同じであるが,外上転の運動が大きくなる軌跡がみられた.

4. 反射性瞬目

反射性瞬目として,空気刺激(図4A)と光刺激(図4B)の2つを試みた.全被験者9名を対象としたが,他の被験者も基本的には同じ傾向を示した.図4は代表的な被験者No.9の典型的な波形である.反射性瞬目はどちらの刺激によっても刺激直後に内下転方向に動き,その後外上転方向へ動いた.ただし,この外上転への眼球運動は同一症例でも動揺し,安定した軌跡を得られなかった.

5. 速度分析

図5および図6に同一被験者No.4の自然瞬目,随意性瞬目,反射性瞬目(空気刺激および光刺激)の速度分析の結果を示す.各瞬目の初期にみられた内下転の眼球運動の速度振幅比を垂直成分(図5A)と水平成分(図5B)に分けて分析したところ,垂直成分,水平成分ともに3種類の瞬目間で有意差を示した成分があったものの,平均値では明確な差を呈すほどのものではなかった.多

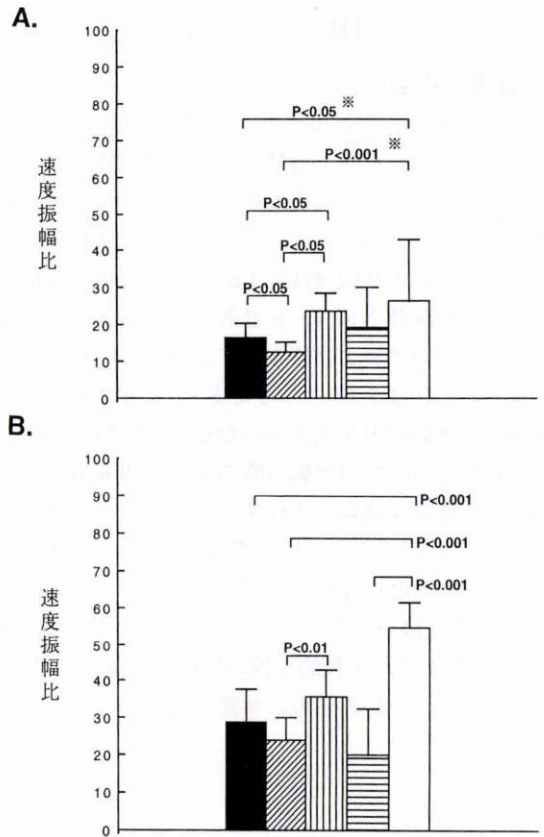


図5 同一被験者における各瞬目初期の眼球運動と視覚誘導による衝動性眼球運動の速度振幅比による比較.

A:垂直成分, B:水平成分. グラフは平均値と標準偏差で示す.

黒コラム:自然瞬目, 斜線コラム:随意性瞬目, 縦線コラム:反射性瞬目(空気刺激), 横線コラム:反射性瞬目(光刺激), 白コラム:衝動性眼球運動

※:比較した群が等分散ではなく, Welchのt検定で有意差がみられたもの

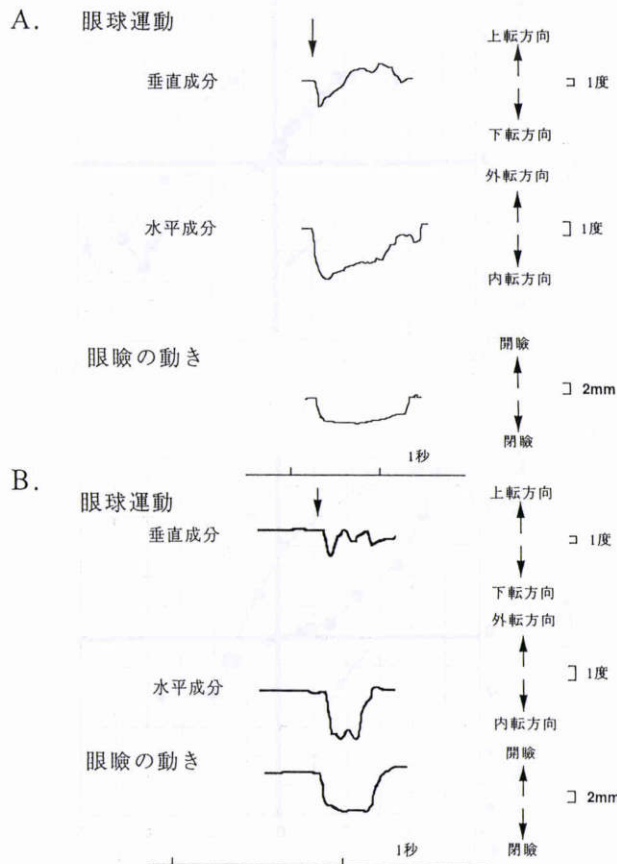


図4 反射性瞬目.

A:空気刺激, B:光刺激. 矢印はいずれも刺激を示す.

くの瞬目時の眼球運動は,視覚誘導による衝動性眼球運動に比べ有意に低値を示した(p<0.001~0.05).図6は後期に生じる外上転の眼球運動の速度振幅比を図5と同様に分析した結果である.反射性瞬目では,上述したように安定した眼球運動が得られず,速度分析はできなかった.垂直成分(図6A)では,自然瞬目と随意性瞬目および視覚誘導による衝動性眼球運動の速度振幅比の間で有意差はなかった.しかし,水平成分(図6B)では自然瞬目と随意性瞬目の間では有意差はなかったが,視覚誘導による衝動性眼球運動と自然瞬目および随意性瞬目との間で有意差がみられた(p<0.001).自然瞬目(図7A)と随意性瞬目(図7B)の両者における初期の内下転方向への眼球運動と後期の外上転方向への眼球運動の速度振幅比を垂直成分と水平成分に分けて比較し示す.自然瞬目の水平成分の内外転で有意差がみられ(p<0.005),随意性瞬目の垂直成分の上下転で有意差がみられた(p<0.05).しかし,いずれも平均値で明確な差を

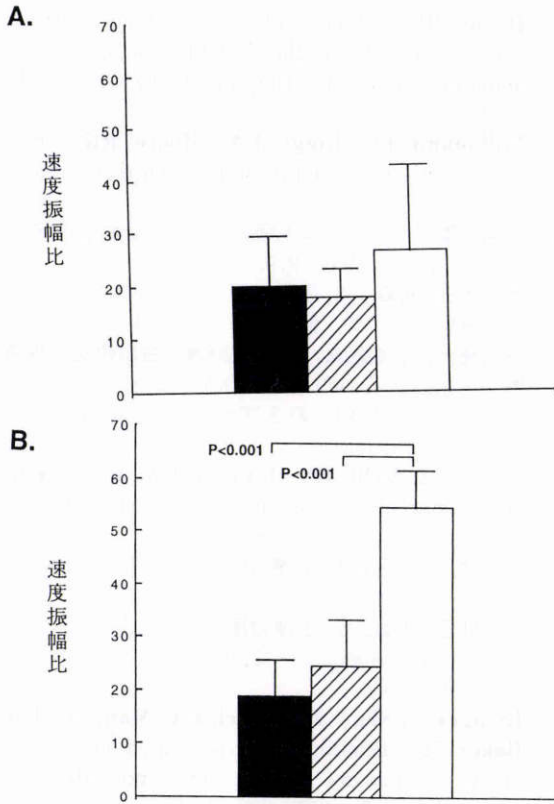


図 6 同一被験者における自然瞬目時と随意性瞬目時の後期の眼球運動と視覚誘導による衝動性眼球運動の速度振幅比による比較。
 A：垂直成分，B：水平部分，グラフは平均値と標準偏差で示す。
 黒コラム：自然瞬目，斜線コラム：随意性瞬目，白コラム：衝動性眼球運動。

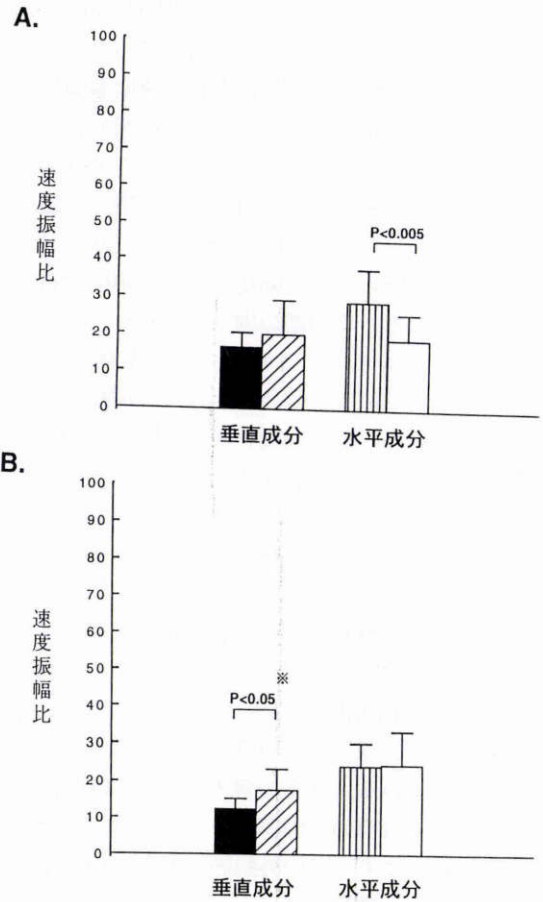


図 7 同一被験者における初期の眼球運動の速度振幅比による比較。
 A. 自然瞬目，B. 随意性瞬目
 黒コラム：下転方向，斜線コラム：上転方向，縦線コラム：内転方向，白コラム：外転方向
 ※：比較した群が等分散ではなく Welch の t 検定で有意差がみられたもの

示すほどのものではなかった。以上のような傾向は他の被験者でも同様であった。

6. サーチコイル法による眼への影響

検査終了後，多少の異物感が残ったが，フルオレスセイン染色でも角膜びらんなど角膜への影響はみられなかった。

IV 考 按

現在，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瞬目時の眼球運動を記録，分析した。サーチコイル法は EOG などで障害となりやすい筋電図の混入や眼瞼の影響などがなく，優れた検査方法の一つと考えられている¹⁹⁾²⁰⁾。その結果，自然瞬目および随意性瞬目に際して閉瞼とともに初期に眼球は内下転方向に動き，次いで外上転方向に動くことが明確に確認された。

サーチコイル法は優れた記録方法であるが，唯一，初期の内下転の眼球運動が眼瞼の移動によるコンタクトレンズ自体のずれか，眼輪筋の圧迫によるコンタクトレンズの動きであるという考えがある。これについてはすでに Collewijn ら¹⁵⁾¹⁹⁾，瀬尾ら¹⁶⁾²¹⁾，Takagi ら¹⁷⁾が確認し

ているように，スリットランプ下でコンタクトレンズのずれのないこと，衝動性眼球運動時にずれのないこと，眼瞼圧迫を除去しても同様の動きが記録されること，両眼同時記録で片眼圧迫しても左右差のないことなどから，ずれについては否定できる。また，外上転は眼瞼がまだ下転しているときに生じており，眼瞼の作用による動きとは考えられない。

このような，サーチコイル法で瞬目時の眼球運動を詳細に記録した報告は次のごとくである。Collewijn ら¹⁵⁾は固視中の随意性瞬目，空気刺激による反射性瞬目について述べ，瞬目時の眼球はまず内下転し，次に外上転したとし，自然瞬目について詳細には述べていない。Takagi ら¹⁷⁾は固視中の随意性瞬目時に同様に内下転から外上転に動くとしている。両者の結果は本研究で得られたものとほぼ一致しているが，自然瞬目の後期相に第 1 眼位を越えわずかではあるが，外上転位を示すことには触れていない。瀬尾ら¹⁶⁾は回旋成分もあわせて測定し，外上転，外旋するとしている。さらに検査法が異なるが，Riggs

ら⁸⁾は visual persistence method と Purkinje image を用いて測定し、内下転の動きを報告している。

今回リサーチ波形を呈示し、さらに速度振幅比を分析することにより、速度振幅比の値は3種類の瞬目間では有意差があまりみられず、ほとんど共通の神経メカニズムが示唆され、さらに自然瞬目と随意性瞬目の眼球運動の速度振幅比の分析から、初期の内下転の速度振幅比と、それに続く外上転の速度振幅比の間にも明確な有意差がないことは、おそらく初期の内下転とそれに続く外上転もほぼ同じ神経メカニズムによることが強く示唆された。同一被験者で速度振幅比を用い、3種類の瞬目の初期の内下転方向への眼球運動と衝動性眼球運動とを比較してみると有意差がみられ、また後期の外上転方向への眼球運動と衝動性眼球運動とでも有意差がみられたことから、瞬目時の眼球運動は衝動性眼球運動とは異なる神経支配が考えられた。すなわち、筋電図を用い瞬目時の外眼筋の活動を検査した報告で、Evinger ら¹¹⁾はウサギにおいて瞬目時に眼球後退がみられ、上・下直筋の同時発火を報告し、Hiraoka¹³⁾はネコにおいて上・下・内直筋、下斜筋の反応を記録し、下直筋の抑制がみられなかったことを報告している。教室の青木¹⁴⁾はヒト外眼筋の筋電図検査で上・下直筋の同時興奮をみており、また、大平¹⁰⁾は瞬目時にはすべての外眼筋に小さな放電がみられるのではないかと推論している。これらのことから、瞬目時には外眼筋の同時興奮が強く示唆され、それによる微妙な神経支配の差による不均衡が今回観察された3度以内の微小な眼球運動を惹起すると考えられた。

現在までサーチコイル法を含め様々な検査方法を用いた瞬目に伴う眼球運動分析の結果がいろいろと異なる理由として、第1に自然瞬目、随意性瞬目、反射性瞬目、さらに持続閉眼などを必ずしも明瞭に区別せず検査分析している点、第2に測定条件の差(固視下、固視点位置、暗黒非固視下、閉眼の制御)、第3に記録方法による差(サーチコイル法および visual persistence method と Purkinje image)、第4に被験者による差などがあげられる。今回我々は、瞬目を自然瞬目、随意性瞬目、反射性瞬目と3種類の瞬目に分けて詳細な検討を行い、測定条件として固視点を正面に置き、9名の十分説明された眼科医および視能訓練士を対象としたので協力性に富み、分析に耐え得る結果が得られたものと考えられる。

稿を終えるにあたり、研究の機会を与えて頂いた墨田区向島保健所所長岩井榮一先生に深謝致します。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備品(眼位測定装置など)を用いて行われた。

文 献

- 1) Miles WR: Elevation of the eye-balls on winking. *J Exp Psychol* 14: 311—332, 1931.
- 2) Ginsborg BL, Maurice DM: Involuntary movement of the eye during fixation and blinking. *Brit J Ophthalmol* 43: 435—437, 1959.
- 3) 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.
- 4) Volkman FC, Riggs LA, Moore RK: Eyeblinks and visual suppression. *Science* 207: 900—902, 1980.
- 5) 平岡満里: ヒトのベル現象の生理学的研究. *日眼会誌* 83: 2184—2190, 1979.
- 6) 天神光充, 松崎 浩, 平岡満里: 眼瞼運動にともなう眼球運動について. *日眼会誌* 86: 501—509, 1982.
- 7) 沖山亮一, 石合純夫, 小田嶋奈津, 古川哲雄, 塚腰廣: 正常成人の Bell 現象—XY レコーダーを用いた眼電位図 (EOG) の2次元表示—. *臨床神経学* 28: 517—524, 1988.
- 8) Riggs LA, Kelly JP, Manning KA, Moore RK: Blink-related eye movements. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 28: 334—342, 1987.
- 9) 大平明彦, 後藤公子, 小澤哲彦: 瞬目に伴う眼球運動について. *神経眼科* 4: 177—181, 1987.
- 10) 大平明彦, 後藤公子, 小澤哲彦: 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.
- 11) Evinger C, Shaw MD, Peck CK, Manning KA, Baker R: Blinking and associated eye movements in humans, guinea pigs, and rabbits. *J Neurophysiol* 52: 323—339, 1984.
- 12) Cornsweet TN, Crane HD: Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images. *J Opt Soc Am* 63: 921—928, 1973.
- 13) Hiraoka M: Is there any reciprocal response on the reflex blink and associating ocular movement? *Neuro-ophthalmol Jpn* 3: 460, 1986.
- 14) 青木 繁: 眼球運動の臨床筋電図学的研究. 第2報. 4直筋同時記録による正常者および末梢性病変の分析. *日眼会誌* 88: 1107—1117, 1984.
- 15) Collewijn H, van der Steen J, Steinman RM: Human eye movements associated with blinks and prolonged eyelid closure. *J Neurophysiol* 54: 11—27, 1985.
- 16) 瀬尾 徹, 池田利夫, 雲井建雄: 閉眼時に於ける眼球運動の記録—サーチコイル法による—. *Equilibrium Res* 49: 185—191, 1990.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) Collewijn H, van der Mark F, Jansen TC: Precise recording of human eye movements. *Vision Res* 15: 447—450, 1975.
- 20) Schlag J, Merker B, Schlag-Ray M: Comparison of EOG and search coil techniques in long-term measurements of eye position in alert monkey and cat. *Vision Res* 23: 1025—1030, 1983.
- 21) 瀬尾 徹, 池田利夫, 町塚博文, 森 裕司, 雲井建雄: 垂直方向の saccade の検討. *Equilibrium Res* 48: 50, 1989.