

Corrective saccade の空間および時間的特性

—視標位置の影響—(図6, 表1)

山本文昭 (富山医科薬科大学医学部眼科)

Characteristics of Corrective Saccade

—Effect of Target Position—

Fumiaki Yamamoto

Department of Ophthalmology, Faculty of Medicine, Toyama Medical and Pharmaceutical University

要 約

undershoot の initial saccade 後に続く corrective saccade について、衝動性眼球運動誘導視標の位置を変化させた場合に、空間および時間的にどのような性質を示すかを、正常被験者11名の右眼を実験対象として調べた。総計2585の視標呈示に対して、523の corrective saccade (20.2%) がなされ、視標位置の偏心度が増すにつれて、corrective saccade の発生頻度および initial saccadic latency は増加した。一方、initial saccade 終了時点から、corrective saccade 開始までの intersaccadic duration は、initial saccadic latency よりも短く、視標偏心度が増加してもほぼ一定であった。initial saccade と corrective saccade の発生時間における空間および時間的特性の差異は、網膜からの視標位置情報の再入力 initial saccade と違う神経経路に入るか、もしくは再入力なしで corrective saccade が生じるためと推測された。(日眼 91 : 733—739, 1987)

キーワード：修正衝動性眼球運動，潜時，正常者

Abstract

In order to examine the effect of target eccentricity on corrective saccades, the latencies of initial saccades and the intersaccadic durations of saccade responses with corrective saccades to visual targets occurring at 48 positions at the perimeter in 11 normal subjects under monocular vision were measured. As the eccentricity of targets positions increased, corrective saccades increased and initial saccadic latency shortened. Intersaccadic duration did not change as the eccentricity of target positions increased. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 91 : 733—739, 1987)

Key words : Corrective saccade, Latency, Normal subjects

I 緒 言

視覚誘導性衝動性眼球運動(以後 saccade)は、中心窩以外の網膜でとらえた目標を中心窩で固視するとき生じる最も速い眼球運動である¹⁾。通常、saccade は目標までひといきに到達する眼球運動であるが、しば

しば目標に一気に到達できないことがある。そのような場合、最初の衝動性眼球運動(以後 initial saccade)の終了時点からしばらくの時間(intersaccadic duration)をあけて、目標に到達する修正的衝動性眼球運動(以後 corrective saccade)が生じ、最終的に目標は中心窩でとらえられる。

別刷請求先：930-01 富山市杉谷2630 富山医科薬科大学医学部眼科 山本文昭

Reprint requests to: Fumiaki Yamamoto, M.D. Dept. of Ophthalmol., Faculty of Medicine, Toyama Med. and Pharmaceutical Univ.

2630 Sugitani, Toyama-shi 930-01, Japan

(昭和62年2月17日受付) (Accepted February 17, 1987)

前報²⁾⁻⁷⁾において、saccadeのlatencyが種々の実験条件下で変化することを報告した。今回、undershootのinitial saccade後に続いたcorrective saccadeについて、衝動性眼球運動を誘導する視標の位置を変化させた場合、空間および時間的にどのような性質を示すかを調べたので報告する。

II 方 法

1. 実験対象

被験者は正視もしくは軽度近視で視力が1.0以上(矯正視力も含む)の11名の正常人(男性9名、女性2名)で、年齢は22歳から28歳であった。視標呈示は単眼(右眼)になされ、合計11眼に対して実験を行なった。

2. 視標呈示装置および条件

前報²⁾⁻⁸⁾と同様に、衝動性眼球運動を誘導する視標は、マイクロコンピューター(NEC社製)で制御されたゴールドマン型視野計(イナミ社製)により呈示した。被験者の頭部および下顎を、視野計の固定台にしっかりと正確に固定した。測定は単眼で行ない、瞳孔の中心が、視野計の中心にくるように固定台を調節した。呈示視標は、II-1e 視標(1mm², 31.5asb)で、視野計の中心付近の背景輝度が3.15asbになるように調整した。8, 16, 24, 32度の4種類の偏心度で、同心円上に30度間隔で12方向の、合計48の位置に、視標を約8秒間隔でat randomに呈示した²⁾⁸⁾。被験者は、視標呈示2~3秒前の注意ブザー音を聞いてから、視野計の中心を固視し、呈示された視標を見つけたい衝動性眼球運動を行なった。48の位置に呈示された、おのおのの視標に対する合計47回の衝動性眼球運動(右水平方向で偏心度16度の視標はマリオット盲点にはいり、衝動性眼球運動はなされていない)を1sessionとし、各被験者について5sessionずつ行なった。

3. 記録装置および条件

electro-oculogram (EOG)法をもちいて、水平および垂直性眼球運動を単眼記録した。電極および増幅装置は、銀-塩化銀電極およびニスタモグラフ用アンプ(日本光電社製)を使用した。EOG増幅の電気的条件は、時定数3秒およびhigh cut filter 20Hzとした。アンプで増幅したアナログEOGデータを、データ処理装置(日本光電社製)でデジタル変換し、マイクロコンピューターのプロピイディスクに記憶させた。データ処理装置の設定は、2ch記録(水平および垂直EOG)で、クロックタイムおよびアドレスを、それぞれ2msecおよび512binとした。

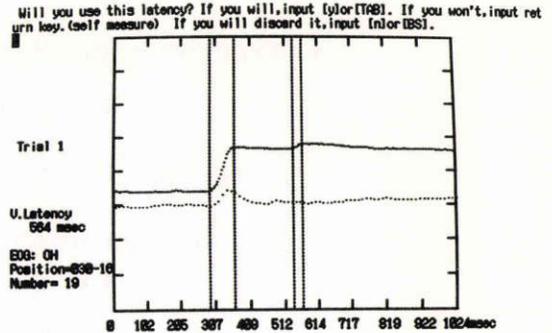


図1 ディスプレイ上での衝動性眼球運動測定。衝動性眼球運動(水平および垂直性EOGをそれぞれ、画面上で密および粗なドットで表示)のinitial saccade開始時点(左から1番目の縦点線のところ)および終了時点(2番目)を決定し、次にcorrective saccade開始(3番目)および終了時点(4番目)を決定。initial saccadeの終了時点(2番目)とcorrective saccadeの開始時点(3番目)までの間をintersaccadic duration。

4. EOGデータの解析

解析は、マイクロコンピューターをもちいて、すべてオフラインで行なった。プログラムは、N88-BASIC (MS-DOS下)で作成し、コンパイルして使用した。解析の手順は、①ひとつのsessionにおけるEOG波形から、おのおのの視標位置に対する、undershoot後に続く修正的衝動性眼球運動(corrective saccade)を含む衝動性眼球運動の、最初の衝動性眼球運動(initial saccade)の視標呈示からの潜時(initial saccadic latency)およびinitial saccade終了時点からcorrective saccadeが生じるまでの時間(intersaccadic duration)を測定した(図1)。また、もし、EOG波形パターンが異常(視標の誤認、アーチファクト混入およびcorrective saccadeの複数混入)ならば、エラーとしてコンピューターに入力した(プログラム名、ANAL20)。②すべてのsessionのデータからおのおのの視標位置ごとにファイル作成し、平均値および標準偏差を計算(ANAL27, TK004)。③すべてのsessionのデータから複数の視標位置についてまとめたファイルを作成し、平均値および標準偏差を計算(ANAL28, TK104)。④データをコンピューターグラフィックで視覚的に表示(ANAL25, ANAL26)という順番で行なった。

5. 衝動性眼球運動の開始および終了時点決定(ANAL20)

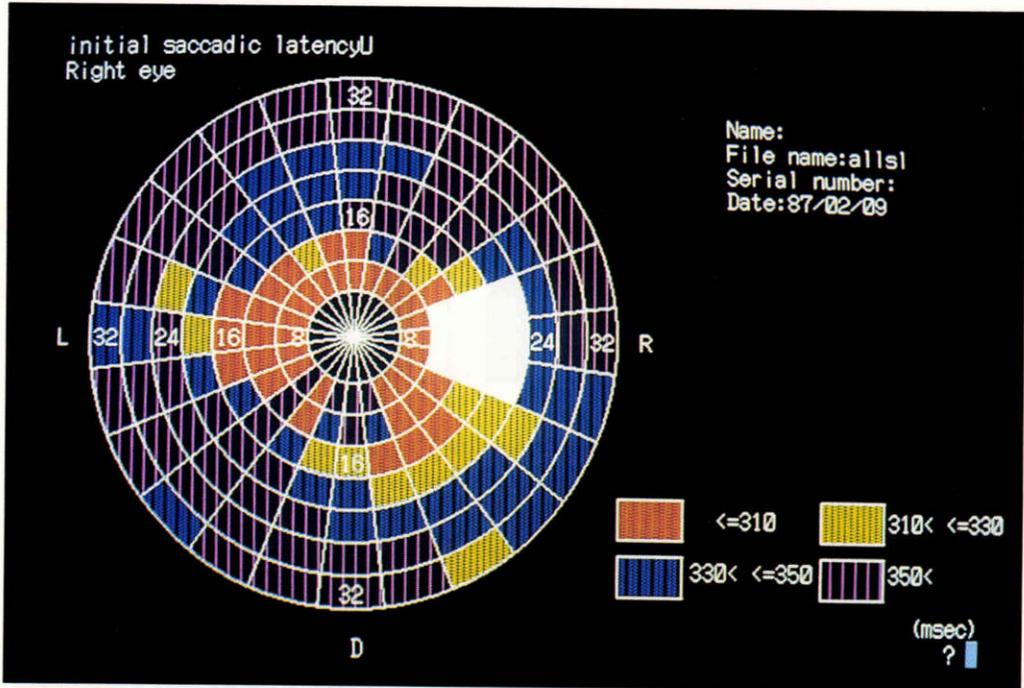


図3 initial saccadic latency の各視標位置における平均値(全被験者)を、短い latency 群から、それぞれ赤茶色、黄色、青色および紫色で色分けをして二次元的表示、各視標位置間の間隙は、隣接した視標位置における latency を平均して色分けを表示、白色部分はマリオット盲点の位置に相当、

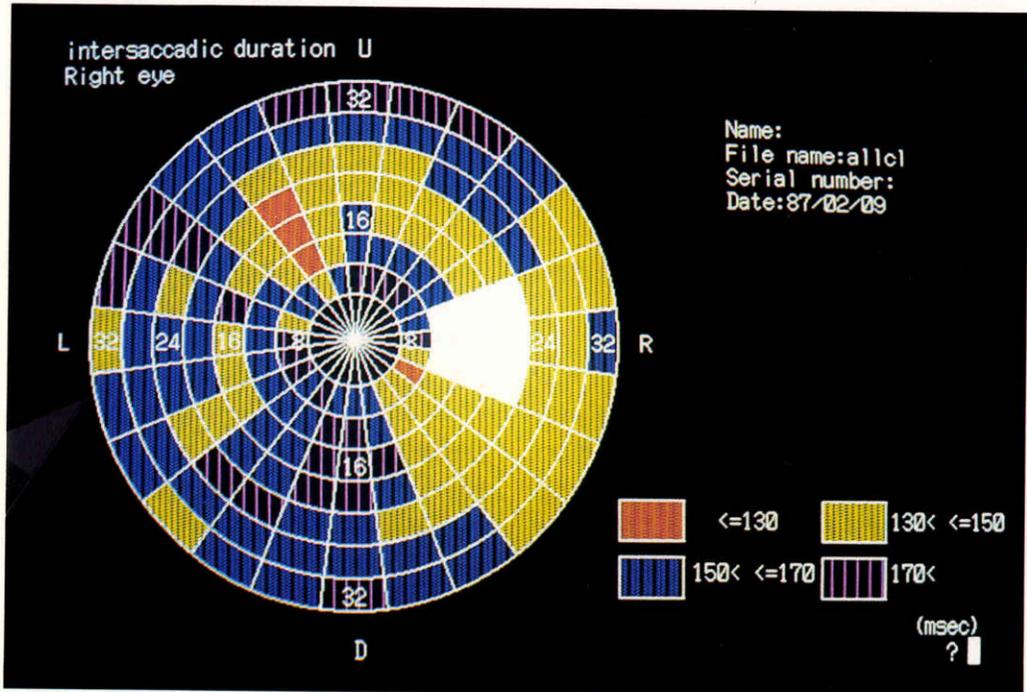


図4 intersaccadic duration の各視標位置における平均値(全被験者)を、短い duration 群から、それぞれ赤茶色、黄色、青色および紫色で色分けをして二次元的表示、各視標位置間の間隙は、隣接した視標位置における duration を平均して色分け表示、白色部分はマリオット盲点の位置に相当、

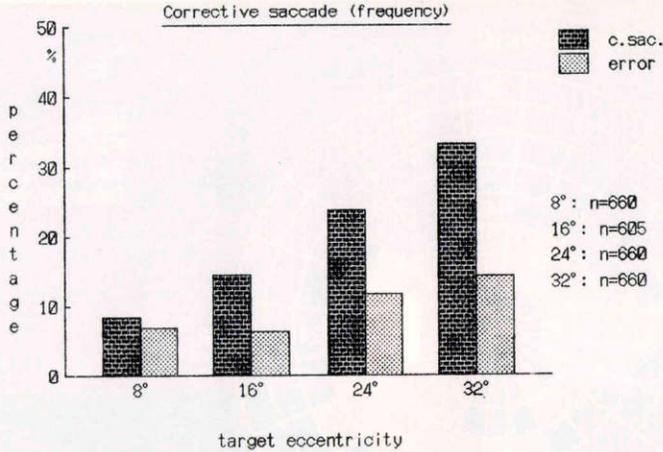


図2 視標偏心度別の corrective saccade 出現頻度(全被験者). ブロック(左側)およびドットパターン棒グラフはそれぞれ, corrective saccade およびエラー出現頻度を示す. n は各偏心度における視標呈示回数(マリオット盲点にはいる右水平方向で偏心度16度の視標は除いた).

EOG を A-D 変換 (bin 幅2msec で2ch 交互変換) して得られたデジタルデータにおいて, 隣接した bin 間の変化量から眼速度をもとめ, 100deg./sec 以上のところ(通常, 衝動性眼球運動の部分に相当)の bin を決定した. 衝動性眼球運動の開始から終了時間までは, 眼球運動方向が逆転しないので, 各 bin 間眼速度の正負符号(ブラウン管面の Y 軸上において, 上および下方向への変化は, それぞれ正および負として計算)は眼球運動終了まで同じである. このことより, 先にもとめた100deg./sec 以上の眼速度 bin のところから, 衝動性眼球運動の開始および終了時点近くの bin まで, 眼速度の符号が変わるか, もしくは眼速度が零になるところの bin を探すようにプログラムし, 衝動性眼球運動の開始および終了時点を決めた.

III 結 果

1. corrective saccade の出現頻度 (図2, 表1)

initial saccade に続く corrective saccade の発生頻度は, 被験者において9.8%の最小値から37.9%の最大値までの幅を示し, 被験者全体では平均20.2% (標準偏差8.5%, 11眼)であった. 図2は被験者全体の corrective saccade の出現頻度を視標偏心度別に棒グラフ(左側のブロックパターン)で表したものであるが, すべての被験者において, 図に示されるごとく視標位置の偏心度が増すにつれて, 視標偏心度 8, 16, 24, 32 度でそれぞれ, corrective saccade の発生頻度は8.6, 14.5, 23.9, 33.3%と増加した. 視標の誤認, アーチ

表1 initial saccadic latency と intersaccadic duration における各偏心度ごとの被験者全体の平均値および標準偏差(n は corrective saccade 数).

		initial saccadic latency	intersaccadic duration	n
視標偏心度	8°	259±75	167±42	57
	16°	325±85	147±39	88
	24°	354±73	151±47	158
	32°	372±76	156±47	220

mean ± S.D. msec

ファクト混入および corrective saccade の複数混入といったエラーの発生頻度は視標偏心度 8, 16, 24, 32度でそれぞれ, 7.0, 6.4, 11.8, 14.4%であった.

2. initial saccadic latency (図3, 表1)

すべての被験者において, initial saccadic latency は視標位置の偏心度が増すにつれて延長した. 図3は initial saccadic latency の各視標位置における平均値(全被験者)を視標位置にあわせて二次元的に表したもので, 短い initial saccadic latency 群から, それぞれ赤茶色, 黄色, 青色および紫色で色分けをしてある. 例えば, 紫色の領域に位置する視標に対する initial saccadic latency は350msec 以上であり, この紫色領域が偏心度の大きい領域に広く分布していることがわかる. 一方, 赤茶色の領域に位置する視標に対する initial saccadic latency は310msec 以下であり, この赤

茶色領域が偏心度の小さい領域に広く分布していることがわかる。このようにして図に示されるごとく視標位置の偏心度が増すにつれて、initial saccadic latency が延長していることが視覚的にわかる。表1には各偏心度ごとの被験者全体の平均値そのものを示した。

3. intersaccadic duration (図4, 表1)

すべての被験者において、intersaccadic duration は視標偏心度が増加してもほぼ一定であった。図4は図3と同じ手法で intersaccadic duration の各視標位置における平均値(全被験者)を二次元的に表したもので、短い intersaccadic duration 群から、それぞれ赤茶色、黄色、青色および紫色で色分けしてある。図に示されるごとく、initial saccadic latency と違い、視標位置の偏心度が増しても、intersaccadic duration

の延長傾向を示す色変化がなかった。表1には各偏心度ごとの被験者全体の平均値を示した。

4. initial saccadic latency と intersaccadic duration (図5, 図6)

図5は表1のデータ(各偏心度ごとの被験者全体の平均値)をグラフにしたものある。intersaccadic duration が initial saccadic latency よりも短く、視標位置の偏心度が増加してもほぼ一定であるのに対し、initial saccadic latency は視標偏心度が増すにつれて延長している。図6は initial saccadic latency と intersaccadic duration を方向別に被験者全体の平均値をもとめて比較したものであるが、図に示されるごとく、intersaccadic duration は全方向で initial saccadic latency よりも短かった。

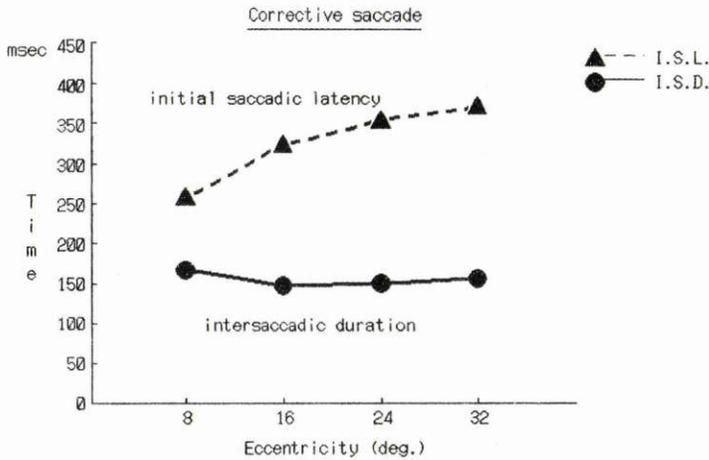


図5 initial saccadic latency (点線) と intersaccadic duration (実線) の偏心度別平均値(全被験者)の折れ線グラフ。

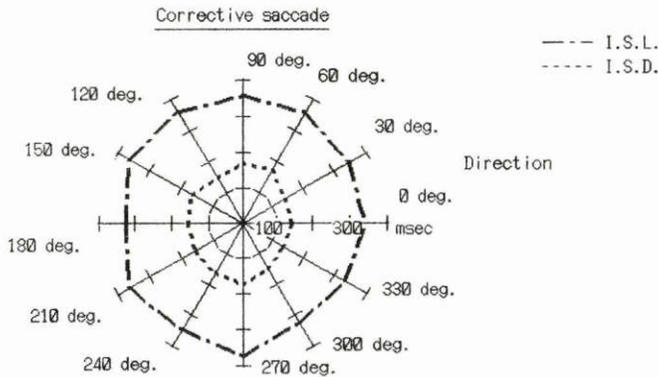


図6 initial saccadic latency (1点鎖線) と intersaccadic duration (点線) の方向別平均値(全被験者)のレーダーチャート折れ線グラフ。グラフ軸と同じ方向のデータをそれぞれの軸上にプロット、1目盛は100msec。

IV 考 按

視覚誘導性衝動性眼球運動(saccade)は通常、目標(視標)までひといきに到達する眼球運動であるが、ひといきで到達できない場合、最初の衝動性眼球運動(initial saccade)の終了時点からしばらくの時間(intersaccadic duration)をあけて、修正的衝動性眼球運動(corrective saccade)が生じて、目標に到達する。Clark⁹⁾は視標位置の偏心度が増すにつれて、このcorrective saccadeの発生頻度が増加することを報告しており、本実験においても同様な結果が得られた。すなわち、本実験で使用した条件において、視標偏心度8, 16, 24, 32度でそれぞれ、発生頻度8.6, 14.5, 23.9, 33.3%と増加した。

undershoot後に続くcorrective saccadeを含む衝動性眼球運動の、initial saccadeの視標呈示からの潜伏時(initial saccadic latency)を測定した結果、視標位置の偏心度が増すにつれて、initial saccadic latencyは延長した。すなわち、視標偏心度8, 16, 24, 32度でそれぞれ、259, 325, 354, 372msec(それぞれの偏心度間の有意差は $p < 0.001$; $p < 0.01$; $p < 0.05$)であった。視標位置の偏心度が増すにつれて、saccadic latencyが延長することは以前にも報告した²⁾⁵⁾。これに対して、initial saccade終了時点からcorrective saccadeが生じるまでのintersaccadic durationは、視標位置の偏心度が増しても延長傾向は示されなかった。すなわち、本実験で使用した条件において、視標偏心度8, 16, 24, 32度でそれぞれ、167, 147, 151, 156msec(16, 24, 32度の値の間それぞれには有意差はなく、8度と32度の値の間にも有意差はなかった)であった。これらのintersaccadic durationの値は、実験条件に違いがあるものの、他の報告^{10)~12)}とほぼ近似していた。一方、intersaccadic durationとinitial saccadic latencyの間の相関係数を調べた結果、 $r = 0.13$ で相関性は認められなかった。initial saccadic latencyが視標位置の偏心度が増すにつれて、延長することは前報⁵⁾で考察したごとく、跳躍対象の検出閾が関係すると考えられる。すなわち、ヒトの視機能において光覚閾では網膜中心窩でも感度が良好であり、周辺になるにつれて低下するといわれており¹³⁾、saccadeにおける跳躍対象の検出閾においても光覚閾と同様のメカニズムが働いている可能性が示唆されている¹⁴⁾。

次にintersaccadic durationとinitial saccadic

latencyの差の原因のひとつは神経経路の差異による可能性が推測される。動物の神経細胞レベルの研究から、saccadeに関係する活動をする部位として前頭眼野、上丘、後部頭頂葉、後頭葉、視床枕核などがあげられる。たとえば、前頭眼野¹⁵⁾では前頭眼野ニューロンにおける視覚性応答の増強が常にsaccadeに先行して生じる。この増強は視覚空間に特異的であり、saccadeなしで単に光刺激を注意させただけでは生じない。これらのことから、この視覚性応答の増強が視覚誘導性にsaccadeを生じさせるトリガーとなる信号と考えられている。上丘では浅層ニューロン¹⁶⁾がその受容野に与えられた光刺激に向かって視線をむけると、光刺激によって誘起される放電活動の増強反応を示す。この増強反応は眼球運動が開始する200msecないし300msec前から始まる。この現象はサルの注意を引いたことだけでおこるのではなく、注意を引いた視標に向かって視線をむけるという運動と関連しておこると考えられている。上丘の深部ニューロン¹⁷⁾は眼球運動と関連して、眼球運動の開始する50msecないし200msec前から放電を開始して、saccadeの生じる直前に放電頻度はピークに達し、saccadeの開始とともに急速に放電を停止する性質を示す。後部頭頂葉ニューロン¹⁸⁾における視覚誘導性眼球運動と関連した視覚性応答の増強は空間的選択性があり、かつ眼球を動かさずに注意を向けた場合でも生じるので、視覚的注意と関連した現象と考えられている。後頭葉では有線野ニューロン¹⁹⁾が視覚誘導性眼球運動と関連した視覚性応答の増強を示すが、空間的選択性がなく、どんな方向へのsaccadeにでも増強を示す。このようにしてsaccadeは多くの部位と関連している。ヒトにおいてもinitial saccadeは被験者が視標に対して視覚的注意を払うことが必要なことから、後部頭頂葉ニューロンを含む神経回路を経由する可能性が推測される^{4)~7)}。これに対してcorrective saccadeは、被験者が意識的になすことは不可能であり、さらにcorrective saccadeをした時に視標を認知していないことから、corrective saccadeは視覚的注意なしで生じると考えられ、後部頭頂葉ニューロンを含まないような神経回路を経由する可能性が推察される。またinitial saccadeの場合、網膜からの視標位置情報が後頭葉の有線野ニューロンを経由して、後部頭頂葉ニューロン、前頭眼野ニューロンというように処理されていき、眼球運動命令となっていく過程が考えられる。一方、corrective saccadeの場合、initial saccade終了後の網膜

からの視標位置情報(以後 retinal feedback)が再度、全く同じ経路を通ることは、intersaccadic durationが100msec以上、initial saccadic latencyより短い点から考えにくい。さらに corrective saccadeは retinal feedbackでなく、efferent copyによって生じるとする報告²⁰⁾があり、efferent copyが corrective saccadeを生じさせるのに initial saccadic latencyほどの長い時間は費やされないと推察される。現在のところ、corrective saccadeの生理的および神経機構は、人間において心理物理的実験がわずかになされているのみで、不明な点が多く、今後、動物における神経生理学および心理物理学的実験による解明が必要とされる。

文 献

- 1) **Dodge R, Cline T**: The angle velocity of eye movements. *Psychol Rev* 8: 125-157, 1901.
- 2) 山本文昭, 桶本忠司, 窪田靖夫: 衝動性眼球運動の潜伏期に関する検討-第1報, 正常者について-, 眼紀 35: 1538-1544, 1984.
- 3) 山本文昭, 桶本忠司, 窪田靖夫: 視覚性誘発電位の衝動性眼球運動による増強-実験装置と実験方法について-, 眼紀 36: 286-290, 1985.
- 4) 山本文昭, 桶本忠司, 窪田靖夫: 衝動性眼球運動誘導視標に対する誘発脳波-予告ブザー音の影響-, 日眼 89: 528-534, 1985.
- 5) 山本文昭, 山田成明, 窪田靖夫: 衝動性眼球運動誘導視標に対する誘発脳波-視標位置の影響-, 日眼 89: 1052-1058, 1985.
- 6) 山本文昭, 窪田靖夫: 衝動性眼球運動誘導視標に対する誘発脳波-飲酒による影響-, 日眼 90: 364-372, 1986.
- 7) 山本文昭, 窪田靖夫: 衝動性眼球運動誘導視標に対する誘発脳波-視標刺激エネルギーの影響-, 日眼 90: 1574-1580, 1986.
- 8) 山本文昭, 窪田靖夫: 衝動性眼球運動のコンピュータ解析-装置および方法-, あたらしい眼科 3: 728-730, 1986.
- 9) **Clark B**: The effect of interfixation distance on binocular fixation movements. *J Exp Psychol* 19: 505-512, 1936.
- 10) **Deubel H, Wolf W, Hauske G**: Corrective saccade: Effect of shifting the saccade goal. *Vision Res* 22: 353-364, 1982.
- 11) **Viviani P, Swenson RG**: Saccadic eye movements to peripherally discriminated visual targets. *Journal of experimental psychology: Human Perception and Performance* 8: 113-126, 1982.
- 12) **Hallett PE**: Primary and secondary saccades to goals defined by instructions. *Vision Res* 18: 1279-1296, 1978.
- 13) 田崎京二, 大山 正, 樋渡清二: 視覚情報処理. 朝倉書店, 東京, 1979.
- 14) 三村 治, 乾 敏郎: 視標刺激エネルギー量と saccadic latency(予報). *眼臨* 76: 1212-1217, 1982.
- 15) **Goldberg ME, Bushnell MC**: Behavioral enhancement of visual responses in monkey cerebral cortex. II. Modulation in frontal eye fields specifically related to saccades. *J Neurophysiol* 46: 773-787, 1981.
- 16) **Goldberg ME, Wurtz RH**: Activity of superior colliculus in behaving monkey. II. Effect attention on neuronal responses. *J Neurophysiol* 35: 560-574, 1972.
- 17) **Mohler CW, Wurtz RH**: Organization of monkey superior colliculus intermediate layer cells discharging before eye movements. *J Neurophysiol* 39: 722-744, 1976.
- 18) **Bushnell MC, Goldberg ME, Robinson DL**: Behavioral enhancement of visual responses in monkey cerebral cortex. I. Modulation in posterior parietal cortex related to selective visual attention. *J Neurophysiol* 46: 755-772, 1981.
- 19) **Wurtz RH, Mohler CW**: Enhancement of visual responses in monkey striate cortex and frontal eye field. *J Neurophysiol* 39: 766-772, 1976.
- 20) **Becker W, Jurgens R**: Basic mechanisms of ocular motility, in Lennerstrand G, Bach-y-Rita P, (ed): *Saccadic Reactions to Double-step Stimuli: Evidence for Model Feedback and Continuous Information Uptake*. Pergamon Press, Oxford, 519-524, 1975.