

ストレスによるサッカード・エラーの増加

福田 秀 樹^{*1}

注視していた光点（固視点）が消え、それと同時に視野の片隅にもう一つ光点（視標）がつくと、それに対する眼球運動（サッカード）の軌跡は直線的である。このような光刺激に誘導された視覚性サッカードの方向は常に視標と同じ方向である。しかしながら、視標を呈示する100ミリ秒前に、音刺激を視標と反対側から呈示すると、音刺激呈示側へ眼が動き視標にサッカードするというエラーが生じた。このようなサッカード・エラーは、視標の呈示時間と視標の明るさが暗くなるdim時間を短くしたストレス負荷条件で生じやすいことが明らかになった。サッカードしている間は視覚入力が抑制される（サッカード抑制）こと、サッカード・エラーに関する知見、そしてわれわれの眼球運動に関するこれまでの研究結果を考え合わせると、サッカード・エラーの研究は労働安全衛生で言われる不安全状態、不安全行動、事故や怪我の予防の対策を講じるための基礎資料として意味があるように考えられた。

キーワード: ストレス, 眼球運動, サッカード, サッカード・エラー, 事故

1 はじめに

われわれの眼の網膜の視覚分解能（視力）は中心窩で最大で、周辺視野では著しく低下していく。このために、視野の片隅の興味をひくものや、新奇なものがあると、中心窩でとらえるために眼球を回転させる必要がある。この眼球の回転運動は、衝動性眼球運動（サッカード）といわれ、非常に速い。その最大角速度は、サッカードの大きさ（振幅）にもよるが、ヒトで600度/秒をこえることもある。

図1は、このサッカードを赤色発光ダイオード（LED）で誘導するための眼球運動課題と誘導されたサッカードを示している。この課題では、被験者に眼前の中央のLED（固視点）を注視させ、この固視点が消えると同時に右斜め上20度のLED（視標）を点け、サッカードを誘導している。このように視覚刺激で誘導しているので視覚性サッカードと呼ぶが、その軌跡は固視点から視標に向かってほとんど直線的に眼が動いている。われわれが知る限り、ほとんどのサッカードはこのように直線的である。しかしながら、サッカードの誘導方法を変えると、必ずしもそうならないことがある。図2は、固視点が消え視標が点くまでに200ミリ秒のギャップがある課題で誘導したサッカードである。この例では、視標呈示から40ミリ秒後に固視点から視標の反対側右15度ほどサッカードし、それから視標（左上20度）へサッカードしている¹⁾。

このような誤った方向へのサッカード（サッカード・エラー）が生じるのは、眼球運動課題を用いサッカードが研究されるようになって以来²⁾、ギャップ・サッカード課題だけであるように思われる。ギャップによって120ミリ秒以下の潜時のサッカードが出現しやすくなる³⁾が、ギャップによって固視点に対する注意が解除されたためと考えられている⁴⁾。上述の視覚性サッカード課題でも視標呈示前に音刺激を呈示するとサッカードの潜時

が短縮し⁵⁾、ギャップ・サッカード課題では視標と反対側から音刺激を呈示するとサッカード・エラーが生じることが報告されている⁶⁾。このようなサッカード・エラーは、実験的には固視点と視標との間のギャップや音刺激によって、健常者でも容易に誘導されるので、必ずしも異常とは言えない。

では、こうしたサッカード・エラーの何が問題なのだろうか。それは、サッカードしている間は、網膜には外界の像が投影されているのにそれが意識されない、サッカード抑制が生じているということである。たとえば、左手から右手に視線を移動させたとき、左手と右手の間に何があったかを正確に言うことができない⁷⁾。したがって、サッカード・エラーがあるときは、ないときよりも外界の視覚情報の入力が抑制される時間が長いという可能性が考えられよう。そして、このようなサッカード抑制は、労働安全衛生上問題となる事故や怪我、そしてヒューマンエラーと何らかの関連性があるようにも考えられる。さらにストレスを負荷されることで、サッカード・エラーは増えるのだろうか。

このような考えをもとに、事故や怪我の予防対策を講じるのに必要な基礎資料として役立てるために、本研究では(1)サッカード、エラーの生じやすい条件を調べ、次に(2)ストレス負荷のサッカード・エラーに対する影響を検討した。

2 方法

1) 被験者

健康な女性7名（平均35.3歳±6.4歳）であった。

2) 眼球運動課題呈示と眼球運動計測システム

サッカードを誘導するために黒色のドーム型眼球運動課題呈示装置を用いた。この装置では中央のLEDを固視点とし、上下左右斜めの8方向の5度、10度、20度、および30度のLEDを視標として使用している。固視点と視標の点灯と消灯するタイミング、視標の位置、そ

*1 作業条件適応研究グループ

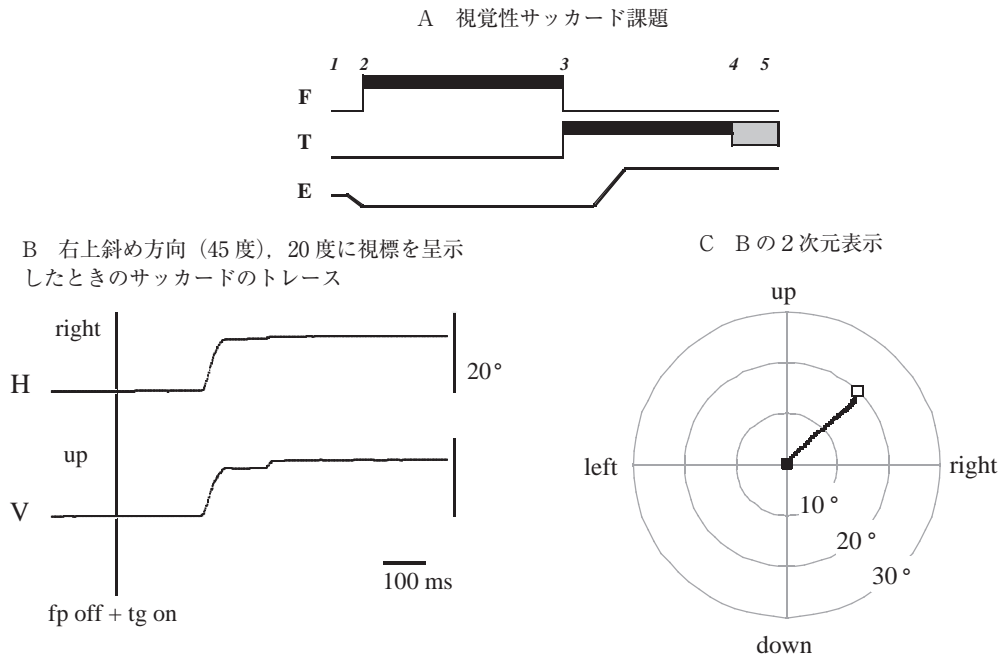


図1 視覚性サッカド課題で誘導されたサッカド。

A: 視覚性サッカド課題. 1, スイッチボタンを押すと課題がスタートする. 2, 固視点が点く. 3, 固視点が消え同時に視標が点く. 4, 視標の明るさが暗くなる (dim). 5, dim になるとできるだけ早くスイッチボタンをはなす. Fは固視点 (fixation point) で, 呈示装置の中央にある. T, 視標. E, 眼球運動. B: 右斜め方向 (45度), 20度に視標を呈示したときのサッカドのトレース. H, 水平方向の眼位, 右へのサッカドを上向きに表示. V, 垂直方向の眼位で, 上へのサッカドを上向きで表示した. サッカドはビデオ式のアイトラッキングシステム (EyeLink II, SR Research Ltd.) で計測した. 時間軸は, 固視点消灯前 200 ミリ秒と後 1,000 ミリ秒. C: Bの2次元表示. 固視点 (■) から視標 (□) への視覚性サッカドの軌跡は直線的であることに注意.

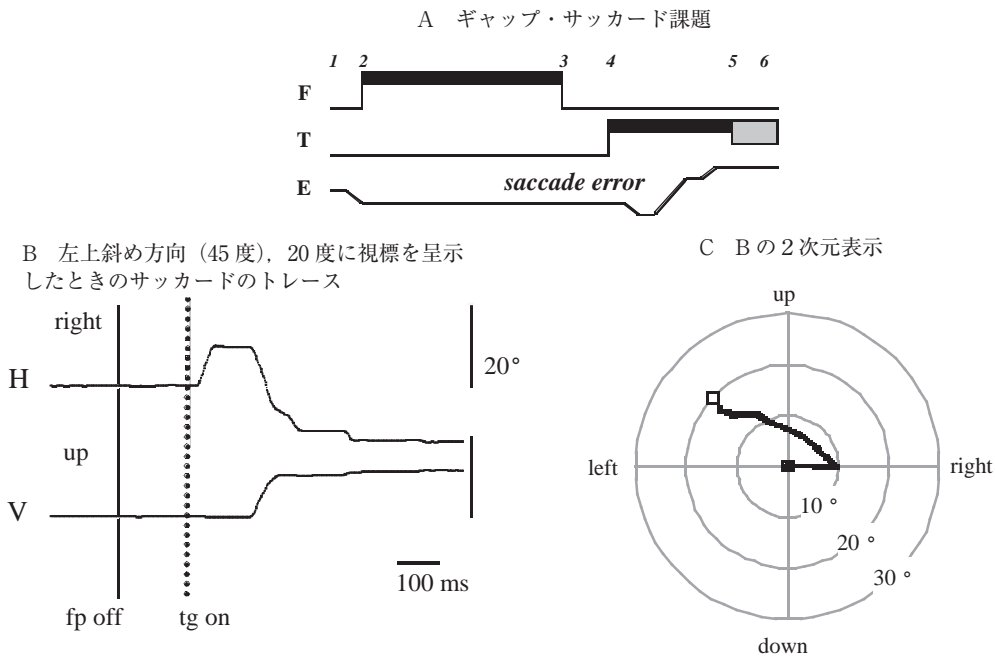


図2 ギャップ・サッカド課題で誘導されたサッカド・エラー。

図中の表示記号, 計測方法等は図1と同じ. A: ギャップ・サッカドを誘導する課題で, 固視点 (F) が消え視標 (T) 呈示までに 200 ミリ秒のギャップがある. B, C: 左上 20度 に視標を呈示したとき, 視標 (□) と反対の右向きに小さく眼が動き, それから視標へサッカドしていることに注意.

して後述する音刺激の呈示側とタイミングは1つのパーソナル・コンピューターで制御されていた.

サッカドは, 水平方向と垂直方向にわけて直流増幅

による眼電図 (DC・EOG) を用いて記録し, 500 Hz サンプリングで AD 変換した. この AD 変換データとサッカドを誘導する課題の内容 (固視点の呈示時間, 視標

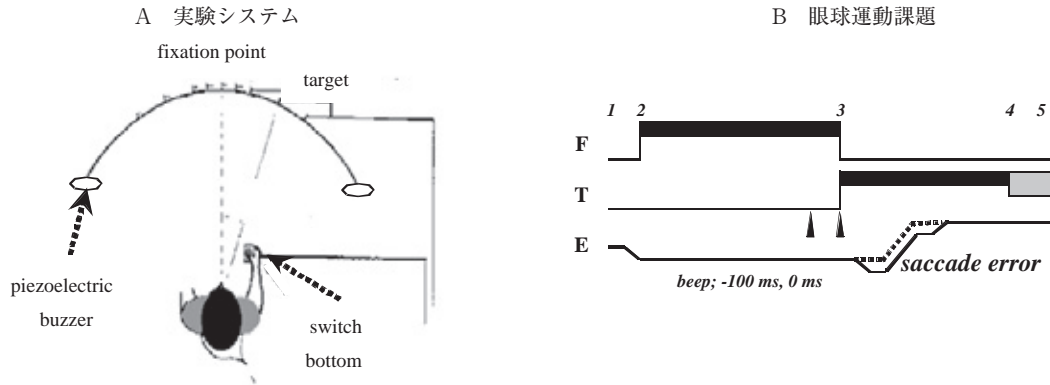


図3 サッカード・エラーを誘導するための実験システムと眼球運動課題。

固視点と視標は赤色発光ダイオード (LED) を使用し、音刺激は圧電素子を用いた。圧電素子は左右 45 度の位置に装着した。実験では、被験者に以下の点を教示し同意を得たうえ行った。①スイッチボタンを押しているときドーム中央の固視点が点灯 (右図の数字 2) するので、それを注視すること、②固視点は 1,500 から 2,000 ミリ秒後に消え、それと同時に視標 (左右 20 度のどちらか) が点灯 (数字 3) するので、すぐに視標をみること、③視標がごくわずかに暗くなる (dim, 数字 4) と、スイッチボタンをはなす (数字 5) こと、④この dim の時間は非常に短い、この間にスイッチボタンをはなすと音がなり、はなすのが遅いと音がならないこと。右図の▲は音刺激呈示のタイミングは、固視点が消え視標が点く 100 ミリ秒前と同時の 2 条件とした。この課題の条件設定によって、視標と反対側へのサッカードが生じた (右図の眼位 (E) では実線で模式的に示した)。

の呈示時間と位置等の情報は、上記の制御用パーソナル・コンピューターに記録した。

3) 視覚性サッカード課題と音刺激呈示のタイミング

視覚性サッカード課題を用い、視標を左右水平方向 20 度に呈示した (図 3)。また、音刺激の呈示位置は左右水平方向 45 度であった。

この課題では、被験者がスイッチボタンを押しているとき固視点と視標と音刺激が呈示され、視標がごくわずかに暗くなるとスイッチボタンをはなすことで終了した。音刺激呈示のタイミングは、①固視点が消える 100 ミリ秒前と②固視点が消えると同時に 2 条件とした。音刺激の呈示側は次の 3 条件であった。すなわち、①視標の同側と②視標の反対側からの呈示、および③視標の同側と反対側からランダムに呈示した 3 条件であった。

4) ストレス負荷

ストレス負荷として、視標呈示時間 (図 3 右の数字 3-4) と視標の dim 時間 (同、数字 4-5) を短くした視覚性サッカード課題を被験者に課した。

視覚性サッカード課題は、前述のように視標が dim になるとスイッチボタンをはなすことで終わるが、この dim は通常 1,000 ミリ秒に設定されており、この間にスイッチボタンをはなすと心地よい音になるように設定されていた。被験者には、視標が dim になると、この音がなるようにできるだけ早くスイッチボタンをはなすこと、音がならない場合は次の試行でできるだけ早くスイッチボタンをはなすように教示した。このようにすることで、被験者は常に dim になるとすぐにスイッチボタンをはなそうとする。また、dim でスイッチボタンをはなすまでの時間 (手の反応時間) は、視標呈示時間が 2,000 ミリ秒から 800 ミリ秒と短くなると長くなるこ

とが、これまでの研究で明らかになっていた (未発表データで、論文作成中)。

以上のスイッチボタンを dim で必ずはなそうとする被験者の行動、そして視標呈示時間と手の反応時間の関係から、視標呈示時間と dim 時間を短くした視覚性サッカード課題を課すことは、ストレス負荷になると考えられ、予備実験を行った。その結果、視標呈示時間を 600 ~ 800 ミリ秒、dim 時間を 500 ミリ秒とした条件をストレス負荷条件とした。

5) 実験条件

実験条件は、(1) ストレス負荷の有無 (2 条件)、(2) 音刺激呈示が視標の①同側と②対側と③同側 + 対側 (ランダム) (3 条件)、(3) 音刺激呈示のタイミングが①固視点が消える 100 ミリ秒前と②固視点が消えると同時に (2 条件) であった。

視標の左方向と右方向の出現頻度はほぼ同じ頻度でランダムに呈示した。試行の回数はいずれも 50 試行であった。条件の実施順序はランダムとした。

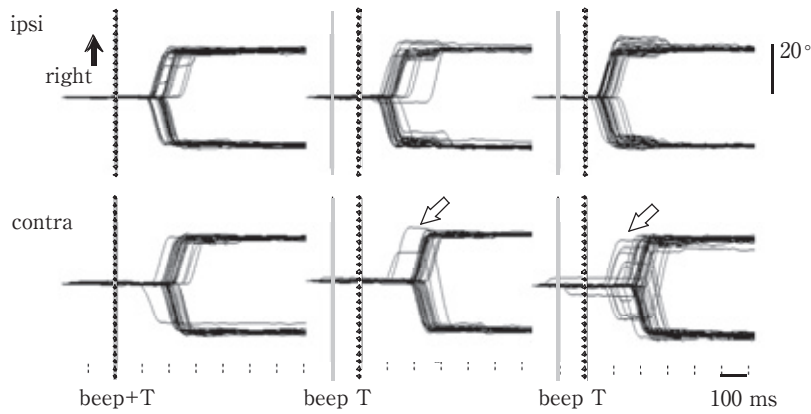
6) サッカード・パラメータ

視標呈示から最初のサッカードまでの時間をサッカード潜時とした。また視標と反対側へサッカードした頻度を算出した。

3 結果と考察

1) 眼球運動のトレース

図 4 は一被験者の結果を例として示したもので、ストレス負荷によってサッカード・エラーが増えたという結果を示している。すなわち、視標が呈示される 100 ミリ秒前に視標の反対側から音刺激を呈示すると、視標と反対側へのサッカードが 50 試行中 2 回出現し (図 4 B)、



A, ストレス負荷無しで音刺激 (beep) と視標 (T) を同時に呈示した条件
 B, ストレス負荷無しで音刺激を視標が点く100ミリ秒前に呈示した条件
 C, ストレス負荷有り音刺激を視標より100ms前に呈示した条件

図4 ストレス負荷によるサッカド・エラーの増加.

サッカド・エラーを矢印で示した. A, B, Cともに, 上段は視標と音刺激を同側 (ipsilateral) から呈示した条件. 下段は反対側 (contralateral) から呈示した条件.

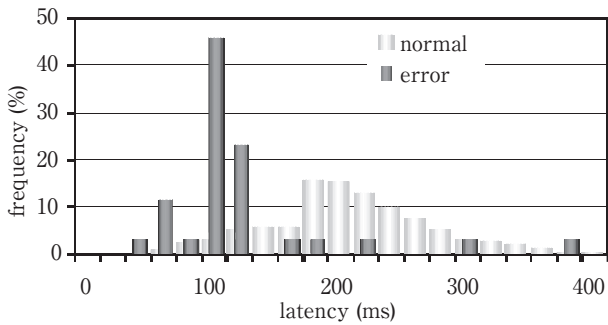


図5 視標への正常なサッカドと視標と反対側へのサッカド・エラーの潜時の度数分布割合.

正常なサッカド数は4,029, サッカド・エラー数123で, 20ミリ秒刻みの度数を百分率で示した.

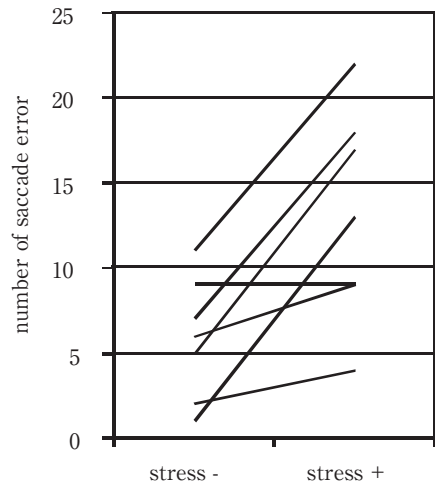


図6 ストレスの有無別のサッカド・エラー数.

こうしたサッカド・エラーは視標呈示時間と dim 時間を短くしたストレス負荷によって一層増加していた (図4C). 他の被験者でも頻度の差はあるものの, ストレス負荷によってサッカド・エラー数は増加していた.

2) 正常なサッカドとサッカド・エラーの潜時

図5は, 視標への正常なサッカドと視標と反対側へのサッカド・エラーの各潜時を度数分布割合で示したものである. 正常なサッカド数は4,029, 一方のサッカド・エラー数が123であった. サッカド数が大きく違うが, 20ミリ秒刻みの度数を百分率で示した結果は, サッカド・エラー潜時は約100ミリ秒, 一方正常なサッカドの潜時は160から180ミリ秒をピークとして120~300ミリ秒の範囲にあった. この結果は, 最初に述べたギャップ・サッカド課題でみられたサッカド・エラーの潜時とほぼ同じであった.

表1 音刺激・視標呈示のタイミング, 位置, ストレス負荷有無別のサッカド・エラー数

音刺激・視標呈示		ストレス負荷	
タイミング	位置	無し	有り
音と視覚刺激を同時	同側	4	2
	対側	1	0
	ランダム	1	2
	合計	6	4
音を視覚刺激に100ミリ秒先行	同側	1	0
	対側	13	41
	ランダム	21	47
	合計	35	88

3) 音刺激・視標呈示のタイミング, 位置, ストレス負荷有無別のサッカド・エラー数

表1は, サッカド・エラーが生じやすい条件を見るために, 音刺激・視標のタイミングと位置, そしてスト

レス負荷別のサッカード・エラー数を示している。この表から、音刺激を視覚刺激と反対側、あるいは同側・反対側をランダムにして100ミリ秒先に呈示し、しかも手の反応時間を制限したストレス負荷条件で、サッカード・エラーが多く生じていることがわかる。

4) 被験者別のストレス負荷のサッカード・エラーへの影響

図6に示したように、サッカード・エラー数に関しては個人差がみられた。しかしながら、ストレス負荷によって、7人中6人でサッカード・エラーの増加がみられ、うち4人でその増加が顕著であった。

以上の結果から、視標と反対側に眼が動いてしまうサッカード・エラーは、①視標（光刺激）に先行する音刺激、②音刺激を視標と対側呈示、③ストレス負荷（課題の設定時間の制限）の3つの条件が整えば、個人差があるものの、だれでも起こりうる可能性があることが示されたように思われる。

サッカード・エラーについての研究は少なく、特に労働安全衛生という分野で皆無であるように思われる。われわれは、眼球運動検査システムの開発と人への適応から始め^{8,9)}、正常被験者のサッカードの発達と加齢にともなう変化^{10,11)}、そして各種の臨床神経疾患患者のサッカードの異常等に関する研究^{12,15)}を行ってきたが、今回のようなサッカード・エラーは観察されなかった。

このサッカード・エラーが起きやすい条件を調べることが事故・怪我の予防対策を講じるうえで重要と思われるのは、サッカード抑制の時間が増えることである。たとえば、大規模なプラントの中央監視室の各種モニターには、様々な情報が整然と表示されている。もし異常が発生すると、警報音が鳴り、警報ランプが点滅する。オペレータは異常の原因を確かめるために、異常を示すモニターを見て対策を講じなければならない。工作機械や建設機械の操作でも同様のことが考えられよう。労働者は、日々の労働で眼をどのくらい動かすのだろうか。警報音と警報ランプとモニターの位置関係、そして警報音（断続音）と警報ランプ（点滅）の時間関係の組み合わせによっては、サッカード・エラーが起き、モニターに表示された情報に気づかない、見落としてしまうこともあるかもしれない。

サッカードの発達と加齢にともなう変化、および臨床神経疾患患者のサッカード異常に関する研究は、彦坂興秀（National Eye Institute, NIH）、寺尾安生、弓削田晃弘（東京大学医・神経内科）、本多和子、野村芳子、瀬川昌也（瀬川小児神経学クリニック）との共同研究である。

参 考 文 献

1) 福田秀樹, 寺尾安生, 弓削田晃弘, 本多和子, 野村芳子, 瀬川昌也. 正常被験者の premature saccade の発現頻度.

第39回日本臨床神経生理学会学術大会, 臨床神経生理学. 2009; 37: 410-411.

2) Wurtz RH, Goldberg ME: Superior colliculus cell response related to eye movement in awake monkeys. *Science* 171 : 82-84, 1971.

3) Fischer B, Boch R. Saccadic eye movements after extremely short reaction times in the monkey. *Brain Res.* 1983 ; 260 : 21-26.

4) Fischer B, Breitmeyer B. Mechanisms of visual attention revealed by saccadic eye movements. *Neuropsychologia.* 1987 ; 25 : 73-83.

5) 渡辺道隆, 福田秀樹, 古川朋靖, 正木義男, 彦坂興秀. 聴覚刺激の視覚誘導性サッカードに及ぼす影響. *Equilibrium Res.*1999 ; 58 : 301-310.

6) Munoz DP; Corneil BD Evidence for interactions between target selection and visual fixation for saccade generation in humans. *Exp Brain Res.* 1995 ; 103 : 168-73.

7) 感覚生理学 Schmidt RF 編 岩村吉晃, 酒田英夫, 佐藤昭夫, 豊田順一, 松浦修四, 小野武年 (訳). 金芳堂 ; 1980.

8) Hikosaka O, Fukuda H, Kato M et al: Deficits in saccadic eye movements in hereditary progressive dystonia with marked diurnal fluctuation. In hereditary progressive dystonia with marked diurnal fluctuation, Segawa M (ed) , p159-177, Parthenon Publishing, Lancs, New York, 1993.

9) 福田秀樹. 行動生理学的手法を用いた眼球運動検査システムの開発. *臨床脳波* . 2006 ; 48 : 131-35.

10) 福田秀樹 : 発達と加齢におけるサッカードの変化. *神経進歩* 40 : 462-470, 1996.

11) 福田秀樹 (2010) 眼球運動の年齢変化. *Clinical Neuroscience* 28, 42-45.

12) Hikosaka O, Fukuda H, Segawa M et al: Voluntary saccades in normal and in dopamine-deficient subjects. In Age-related dopamine-dependent disorders, Segawa M, Nomura Y (eds) , p59-68, Monogr Neural Sci Vol 14, Karger, Basel, 1995.

13) 彦坂興秀 : 大脳基底核疾患の眼球運動. *神経進歩* 40 : 471-484, 1996.

14) Nomura Y, Fukuda H, Terao Y, Hikosaka O, Segawa M. Abnormalities of voluntary saccades in Gilles de la Tourette's syndrome: pathophysiological consideration. *Brain Dev.* 2003 ; 25 : Suppl 1:S48-54.

15) Yugeta A, Terao Y, Fukuda H, Hikosaka O, Yokochi F, Okiyama Ret al. Effects of STN stimulation on the initiation and inhibition of saccade in Parkinson disease. *Neurology* 2010 ; 74 : 743-748. Goodfellow HD, Graydon WF. Photochromatic system of an acid-sensing porphyryrin. *Can. J. Chem. Eng.* 1998 ; 46 : 120-125.

(平成22年9月30日受理)