中枢性平衡障害例での滑動性眼球運動における予測制御

大橋 直樹・水越 鉄理

Examination of the Predictive Mechanism in Smooth Pursuit in Disequilibrium Patients with Central Lesions

Naoki Ohashi and Kanemasa Mizukoshi

(Toyama Medical and Pharmaceutical University)

Previously, we explained the system we developed to examine the predictive function in smooth pursuit and reported that the phase lag is small if the predictive mechanism is functioning normally. We performed the same examination on disequilibrium patients with the central lesions. The qualitative judgment of ETT in these patients was designated as "saccadic pursuit pattern". The results indicated that the phase lag is significantly greater in these patients. This indicates that the predictive mechanism in smooth pursuit is disordered in disequilibrium patients with the central lesions.

Key words: smooth pursuit, phase lag, saccadic pursuit pattern

はじめに

視標運動の周波数が比較的小さい場合には、随意性の滑動性眼球運動が働いて視標を中心窩で捕足するが、視標の運動が速い場合には前庭動眼反射が働いて網膜上で映像が動かないような機構が作動している。すなわち滑動性眼球運動は前庭動眼反射と共に代償性眼球運動に関与している¹⁾。ところで、視標運動の周波数が比較的小さい場合には眼球運動は円滑でありほぼ視標運動に近似した眼球運動が認められる。これは、視標の位置を予測する予測制御機構が正常に機能するからであると言われている。したがって滑動性眼球運動にあつてはこの予測制御機構がとりわけ重要であると言われている²⁾。ところが従来の滑動性眼球運動検査ではどのパラメーターが予測制御機構の正常な働きを代表するかが不明であった。そこで私達は視標運動

の方向が pseudo-random に変化し、方向の変化についての予測が出来にくい視標運動を開発し、正常被験者での検討を行い報告した³⁾。本論文では中枢性平衡障害例での検査を行ったので報告する。

方 法

pseudo-random に視標の方向が変化する視標運動(ランダム正弦波)を開発し、眼球運動の視標運動に対する位相差を算出した。(視標運動の開発、眼球運動の分析については著者により既に報告された別紙を参照されたい⁴⁾⁵⁾)。今回検討した症例は神経耳科学的に中枢性平衡障害と診断された21例であり(表1)、記録紙上での滑動性眼球運動の定性分析はすべての症例で saccadic pattern を示していた。

結 果

正常被験者23人での眼球運動の定量分析では

視標運動の方向の変化が pseudo-random な正弦波部分 (図1 PRE-) と方向の変化が periodic である正弦波部分 (図1 PRE+) との間では視標運動に対する眼球運動の位相差のみに、有意差が視標運動の基本正弦波周波数 1.2 Hz 以上で認められた。そこで本論文では基本周波数 1.2 Hz 以上の位相差について、正常被験者23人から得られた値と中枢性平衡障害21人から得られた値について T 検定を行った。図1に示すように視標運動の方向の変化が periodic であつ predictive な予測制御可能な正弦波部分 (PRE+) でも、視標運動の方向の変化が pseudo-random な予測制御不可能な正弦波部分 (PRE-) での位相差も共に病的症例で

は有意に大きかった。すなわちこれらの中枢性平衡障害例では、滑動性眼球運動機構の予測制御機構が障害されていたと推察された。

考 察

滑動性眼球運動は servomechanism と考えられ、網膜上を横切る target slip の速度 (retinal error velocity, REV) を入力として利用しており、結果として眼球運動速度を視標運動速度に一致するように保持している。そして REV は眼球運動の速度とは一定の傾向にはないが、視標運動の振幅の大小に関わらず眼球運動の加速度と REV が一定の傾向を示した。これらの結果から視標運動が predictive で予測制御が働いている場合には滑動性眼球運動での gain の保持は REV によって生じた眼球運動加速度にある程度依存していると言われている。すなわち positive feedback 機構が neural predictor として機能していると報告されている⁶⁾。この予測制御機構は predictor⁷⁾, a long-term learning process⁸⁾, an internal model⁹⁾ 等と報告者によって様々な名称で呼ばれ、入力系と出力系の間

表 1

症例：小脳脳幹障害	11
脊髄小脳変性症	6
脳血管障害	3
そ の 他	1
合 計	21例

図1 縦軸は位相差を degree で示した。PRE+ は予測制御可能な正弦波部分, PRE- は予測制御ができにくい pseudo-random な正弦波部分を示す。図左は基本周波数 1.2 Hz の、右は 1.4 Hz の位相差を平均±標準偏差で示した。●は正常被験者23人の×は中枢障害例21人の平均値を示す。

に介在する制御機構の中に存在すると言われている⁶⁾。ところで固視の目的は最終的には視力の維持にあり、滑動性眼球運動の予測能力は結局この点に帰着するとされており、視力の維持は位相を最小にし振幅比を最大にすることによって達成されると報告されている。さらに正弦波の視標運動では良好な視力は 0.7 Hz までは保たれ、この周波数までの位相差は最小に保持される¹⁰⁾。ところで予測制御機構の研究には、予測制御機構が十分に作動できない視標運動を作成しこの時の眼球運動を記録分析することで研究されてきた。従来の報告では unpredictable な視標運動は white noise や band noise が使用された^{7,8)}。しかしこれらの方法では特別な装置が必要でありまた分析方法も複雑になる。そこで比較的手ごろに検査可能であり、かつ分析方法が容易なように、マイコンを応用して視標運動の方向の変化のみがランダムに変化する視標運動を作成した。その結果予測制御機構が十分に機能していることは少なくとも本方法では視標との位相を小さくするような機構が働くことであると結論した³⁾。

ところで今回分析した中枢性平衡障害症例では視標に対する位相差が、正常被験者に比較して有意に大きく、これらの中枢性平衡障害例では予測制御機構が障害されていると推察された。視標に対する位相差が大きいために foveal pursuit が十分に機能せず saccade を発現させる position error の域値が低下し¹¹⁾、catch up saccade が働いて、眼球運動が saccadic pattern を示したものと推察した。さらに位相の遅れは視力の低下につながり、中心窩視の基本的な機能が低下したことを意味する¹⁰⁾と推論した。

ところで滑動性眼球運動では initiation が最初に働き眼球運動を始動させ、ついで maintenance の状態が維持されると言われている。velocity predictor により速度命令が発生され、この速度命令によって視標は fovea の tolerance zone に維持される。そして最終的には retina 上の target slip ではなく fovea に対す

る相対的な position error で連続的に update されると報告されている¹¹⁾。すなわち滑動性眼球運動で十分に予測制御機構が作動しているのは initiation でなく、maintenance に移行してからであり、滑動性眼球運動の特に予測制御機構の研究にはこの点に注意を払う必要がある。つまり視標が運動を開始してからどの時点が maintenance なのかについての詳細な検討が今後の課題である。

ま と め

ETT で眼球運動が saccadic pattern を示した中枢性平衡障害例では眼球運動の位相の遅れが著明であり、予測制御機構の障害が認められた。この予測制御機構の障害のために foveal pursuit が十分に機能せず saccade を発現させる position error の域値が低下した¹¹⁾。そして結果として catch up saccade が働いて、眼球運動が saccadic pattern を示したと結論した。

参考文献

- 1) 篠田義一：眼球運動の生理学・眼球運動の神経学(小松崎篤, 篠田義一, 丸尾敏夫編)。1～147頁, 医学書院, 東京, 1985。
- 2) Becker W : Discussion summary. Progress in Oculomotor Research. (ed by Fucks AF and Becker W). pp 595～599, Elsevier, Amsterdam, 1981。
- 3) Ohashi N, Watanabe Y and Mizukoshi K : Prediction in smooth pursuit. Acta Otolaryngol (Stockh) **103** : 131～136, 1987。
- 4) Ohashi N, Watanabe Y, Mizukoshi K, et al : An application of the microcomputer as a generator of target movements for the eye tracking test (ETT). Computer Methods and Programs in Biomedicine **23** : 243～246, 1986。
- 5) 大橋直樹, 渡辺行雄, 水越鉄理, 他：滑動性眼球運動分析—ランダム正弦波の開発と再現性の検討—。Equilibrium Res **44** : 275～279, 1985。
- 6) Lisberger SG, Evinger C, Johanson GW, et al : Relationship between eye accelerations and retinal image velocity during foveal smooth pursuit in man and monkey. J Neurophysiol **46** : 229～249, 1981。

- 7) Stark L and Vossius G : Predictive control of eye tracking movements. IRE Transactions on Human Factors in Electronics **9** : 52~55, 1962.
- 8) Dollas PJ and Jones RW : Learning behavior of the eye fixation control system. IEEE Transactions on Automatic Control **6** : 218~227, 1963.
- 9) Bahill AT, Iandolo MJ and Troost BT : Smooth pursuit eye movements in response to unpredictable target waveforms. Vision Research **20** : 923~931, 1980.
- 10) Michael JA and Jones GM : Dependence of visual tracking capability upon stimulus predictability. Vision Research **6** : 707~716, 1964.
- 11) Eckmiller R : A model of the neural network controlling foveal pursuit eye movements. Progress in Oculomotor Research (ed by Fucks AF and Becker W). pp 541~550, Elsevier, Amsterdam, 1981.

（別刷請求先：大橋直樹
〒930-01 富山市杉谷2630
富山医科薬科大学医学部耳鼻咽喉科学教室）