ヒトの視運動性眼振に対する視運動訓練効果と機構の検討

水田 啓介・久世 文也・青木 光広・中村 好克
海田 健宏・小塩 勝博・早川 和喜・小川 晴子
宮崎 哲郎・浅野幸一郎・宮田 英雄

Studies on Optokinetic Training

Keisuke Mizuta, Bunya Kuze, Mitsuhiro Aoki, Yoshikatsu Nakamura
Takehiro Kaida, Katsuhiko Ojio, Kazuki Hayakawa, Haruko Ogawa
Tetsuro Miyazaki, Kouichiro Asano, Hideo Miyata

Department of Otorhinolaryngology, Gifu University School of Medicine

We investigated the mechanism by which repetitive optic stimulation affects optokinetic responses. Eleven persons, physically healthy, took part in this study. The subjects were stimulated optokinetically to the right. The angular velocity of the Ohm type drum was 50 deg/sec, and the duration of the stimulation was 30 seconds. This stimulation was successively applied 5 times a day over a period of 3 weeks. Optokinetic nystagmus (OKN) was recorded with electronystagmography and analyzed with a computer. Before and during this trial, we did 2 tests every week. First, the drum was rotated with an angular acceleration of 2 deg/sec², and optokinetic adaptation limit (OAL) was estimated. Next, the drum was rotated with an equal velocity of 40, 60 and 80 deg/sec. The initial rapid rise (IR), the maximum steady state slow phase velocity (SS) and the time constant of optokinetic afternystagmus (TC) were calculated. These items were evaluated with stimulation towards the right only in 5 subjects and with stimulation towards both the right and the left in 6 subjects.

Optokinetic training produced the following results: OAL increased significantly on stimulation towards the right, but did not increase on stimulation towards the left. SS increased significantly at a velocity of 60 and 80 deg/sec in both directions. IR increased significantly on stimulation towards the right, and increased slightly on stimulation towards the left. TC decreased on stimulation towards the right. We conclude that the increase of the slow phase velocity of OKN was due mainly to the enhanced function of the pursuit system, but other factors also had a role in training effects.

Key words: optokinetic training, pursuit, optokinetic adaptation limit, optokinetic afternystagmus

はじめに

時田¹⁾は“眼のよい”運動選手の視運動性眼振(OKN)は、視運動刺激に対する眼の適応の限界の向上がみられるのを観察している。また、視運動訓練の効果について、Miyoshi et al²⁾は視運動性眼振の増加を、Pfaltz と Kato³⁾は OKN 緩徐相速度の増加を、戸村⁴⁾は視運動性眼振の眼の適応の限界の上昇を報告している。しかし、視運動訓練による視運動性眼振の向上がどのような機序でおこるのかは明らかではない。今回、視運動性眼振を構成する2つの機構、すなわち追従機構と速度蓄積機構の両機構への訓練の影響を検討した。

被験者と方法

1. 被験者

被験者はめまい・平衡障害の既往がない健康成人11名(男8名,女3名,23歳から35歳)である。被験者全員に本試験の内容を説明し,同意を得た。

2. 方法

視運動訓練には内面に12本の線条が付してある直径1.5 m, 高さ2 m の Ohm 型大円筒を用いた。被験者を円筒の中央の椅子に座らせ,頭部を固定し,等角速度 50°/sec, 30秒間,右回転のみの視運動刺激を1日5回,3週間連日与えた。視運動訓練時は被験者に線条を1本1本数えるように追従するように指示した。

視運動性眼振は訓練前と訓練1週後,2週後,3週後に評価した。評価時の視運動刺激は2つの方法を用いた。第1は訓練に用いた Ohm 型大円筒を 2°/sec² の等角加速度で60秒間回転刺激した。第2は同じ大円筒を 40°, 60°, 80°/sec の等角速度で30秒間回転刺激した。得られた眼振は電気眼振計に記録するとともに,データ・レコーダに記録し,コンピュータ(NEC PC9801)を用いて岐大眼振解析プログラムで分析し,眼振緩徐相速度を計算した。

11名の被験者のうち5名(被験者 No. 1~5)は上記した第1と第2の2つの視運動刺激で訓練方向の右回転のみ,6名(被験者 No. 6~11)は右・左の両回転について評価した。

3. 検討事項

1) 視運動訓練効果についての検討

①等角加速度刺激(2°/sec²)での視運動性眼振の眼の適応の限界(optokinetic adaptation limit, OAL)。円筒速度に比べて3°/sec までの追

従の遅れは正常範囲とし⁵⁾,追従し得た最大の円筒速度とした。

②等角速度刺激(40°, 60°, 80°/sec)時での最高定常状態の眼振緩徐相速度(steady-state of slow phase velocity, SS)。最高定常状態に達した始めの5打の平均を求めた。

2) 視運動性眼振向上の機構についての検討

①等角速度刺激時の OKN 第1打の緩徐相速度(initial rapid rise, IR)。これは, OKN の追従機構を検討するためである。

②等角速度刺激後の視運動性後眼振(optokinetic afternystagmus, OKAN)の緩徐相速度の時定数(time constant, TC)。指数関数 $Y = Ae^{-t/\tau}$ に近似させて求めた(τ が時定数を表す)。これは, OKN の速度蓄積機構を検討するためである。

結 果

1. 視運動訓練効果について

1) OAL について

代表例として被験者1の訓練前と訓練3週後の等角加速度刺激(2°/sec²)時の円筒速度と眼の線条追従(OKN 緩徐相速度)の関係を図1に示す。前述した方法で OAL を計算し,訓練3週後で OAL の上昇が認められた。同様に求めて全被験者の訓練による OAL の変化を図2に示す。訓練と同方向(右回転)では,11名の OAL の平均値は訓練3週後では訓練前と比べて t 検定で1%の危険率で有意差を認めた。しかし,訓練と反対方向(左回転)では,6名(被験者 No. 6~11)の OAL の平均値は訓練前後で有意差を認めなかった。これは,両方向回転を評価した例と1方向回転のみ評価した例と個体差による影響も考えられるため,1方向回転評価群5名(被験者 No. 1~5)と両方向回転評価群6名(被験者 No. 6~11)を訓練に用いたのと同方向(右回転)の訓練成績を検討した(図3)。訓練前に高い OAL を示した被験者 No. 4 と No. 6 を除いた9名で OAL の上昇がみられ,両群ともに訓練前と比べて訓練3週後の平均値の上昇は類似していた。

以上から,視運動訓練により OAL は訓練方向と同側では上昇したが,反対側では上昇は示さなかった。

2) SS について

図4に40°, 60°, 80°/sec の各等角円筒速度刺激時での SS の訓練前後の平均値を示した。訓練

図1 等角加速度 ($2^{\circ}/\text{sec}^2$) による訓練前後の OAL の変化 (被験者 No. 1)
各プロットは円筒速度と線条追従 (OKN 緩徐相速度) の関係を示している。実線は $y=x$ を示す。

図2 OAL の訓練による変化 (1)

等角加速度 $2^{\circ}/\text{sec}^2$ 刺激での結果である。○は円筒右回転, ●は円筒左回転での成績を示している。訓練3週後で右回転は危険率1%で有意な上昇を認めるが, 左回転では有意な差は認めない。

図3 OAL の訓練による変化 (2) —1 方向回転評価群と両方向回転評価群の成績—
1 方向のみ評価した群の平均 (●) と両方向を評価した群の平均 (○) の訓練前後の変化は差は少なく類似している。

図4 各刺激速度での訓練による SS の変化

40°/sec, 60°/sec, 80°/sec の刺激速度で訓練前後で SS は有意差を認める。

図5 SS の訓練による変化 (1)

刺激速度 60°/sec での SS の変化を示す。右回転 (○), 左回転 (●) とも訓練 3 週後で有意な上昇を認める。

図6 SS の訓練による変化 (2) — 1 方向回転評価群と両方向回転評価群の成績 —
1 方向のみ評価した群の平均 (●) と両方向を評価した群の平均 (○) の
訓練前後の変化の差は少ない。

3 週後は訓練前と比べて訓練と同方向 (右回転) では, 円筒速度 40°/sec は t 検定で危険率 5 % で, 60°, 80°/sec は危険率 1 % で有意な差を認めた。訓練と反対方向 (左回転) では円筒速度 40°, 60°/sec は危険率 5 % で, 80°/sec は危険率 1 % で有意な差を認めた。

訓練による SS の訓練方向と同側および反対側刺激での変化について詳しく検討するため, 代表として 60°/sec での成績を示す。60°/sec 刺激での訓練による SS の変化を図 5 に示す。訓練と同方向 (右回転) は, 11 名の SS の平均値は訓練 3 週後は訓練前と比べて t 検定で 1 % の危険率で有意差を認め, 訓練と反対方向 (左回転) は, 6 名 (被験者 No. 6~11) の SS の平均値は訓練 3 週後は訓練前より 5 % の危険率で有意差を認めた。次に, OAL と同様に 1 方向回転評価群 5 名と両方

向回転評価群 6 名の訓練と同方向 (右回転) の訓練成績を検討した (図 6)。被験者 No. 4 以外の 10 名で SS の上昇がみられ, 両群ともに訓練前と比べて訓練 3 週後の平均値の上昇は類似していた。

以上から, 視運動訓練により OKN の緩徐相速度は訓練と同方向だけでなく反対方向においても上昇がみられた。

2. 視運動性眼振向上の機構について

視運動訓練効果がどの機構の機能向上によるかを検討するために, SS を形成する 2 成分である追従機構と速度蓄積機構を評価した。IR には追従機構が関与するといわれ, TC は速度蓄積機構を反映しているといわれている。この両者を検討するためには OKAN が誘発されやすい条件で検討する必要がある。今回の検討では, 等角速度 40°/sec の刺激では被験者によって OKAN が出現

図7 IRの訓練による変化

刺激速度 60°/sec での IR の変化を示す。右回転(○)では訓練3週後で有意差(危険率5%)を認めるが、左回転(●)では有意な差は認めない。

しなかった。60°, 80°/sec では被験者全員で OKAN が誘発された。従って、代表として 60°/sec 刺激で検討した成績を示す。

1) IR について

60°/sec 刺激での IR の訓練による変化を図7に示す。訓練と同方向(右回転)は、11名の IR の平均値は訓練3週後では訓練前と比べて t 検定で5%の危険率で有意差を認めた。訓練と反対方向(左回転)は、6名(被験者 No. 6~11)の IR の平均値は訓練前後で有意差を認めなかった。

以上から、視運動訓練により、IR は訓練と同方向では上昇し、反対方向では上昇はほとんどみられなかった。

2) TC について

60°/sec 刺激での TC の訓練による変化を図8に示す。訓練と同方向(右回転)および訓練と反対方向(左回転)ともに、TC の平均値は訓練3週後は訓練前と有意差を認めなかった。しかし、同方向では TC が減少する傾向を認めた。

考 察

1. 視運動訓練効果について

ヒトにおける視運動性眼振に対する視運動訓練効果については、Miyoshi et al²⁾ は 30°/sec または 60°/sec の等角速度刺激を、15秒間、1方向に1日10回、10日間与え、両方向の視運動眼振数と緩徐相速度が増加したと、Pfaltz と Kato³⁾ は 30°/sec、15秒間の等角速度刺激を1方向に反復(1日10回、10日間以上)与えて OKN 緩徐相速度の増加と OKN の頻度の増加を認めたと報告している。戸村⁴⁾ は 2°/sec²、90秒間の等角加速度刺激を1日に左右2回ずつ(計4回)、3週間与えて

図8 TCの訓練による変化

刺激速度 60°/sec での TC の変化を示す。右回転(○)は訓練3週後で有意な差はないが、訓練により減少する傾向を認める。

OAL の上昇を報告している。

今回の成績では 50°/sec、30秒間、1方向のみ1日5回、3週間の訓練で、Miyoshi et al²⁾ や Pfaltz と Kato³⁾ が報告したように OKN 緩徐相速度の増加と戸村⁴⁾ が示した OAL の上昇を認めた。しかし、どのような訓練条件(加速度刺激か等速度刺激か、刺激速度、1回当たりの訓練時間、1日の訓練回数、訓練期間など)が最も訓練効果が高いかは今後の課題である。

2. 視運動性眼振向上の機構について

OKN 緩徐相速度は fast component と slow component から構成されていると考えられている¹¹⁾。fast component は OKN 緩徐相速度の初期急速増加成分を反映し、追従機構が関与していると考えられている。一方、slow component は緩徐増加成分や OKAN 緩徐相速度を反映し、速度蓄積機構が関与していると考えられている。視運動訓練による効果がこれらのどの機構に影響を与えているかについての報告はない。今回、我々はこの点を検討するために、fast component は OKN 緩徐相速度の初期急速増加(IR)により、slow component は OKAN の時定数(TC)で検討した。

IR は訓練と同方向の視運動刺激で増加を認めた。すなわち、視運動訓練により訓練方向への追従機能が向上したと考えられた。OAL が訓練と同方向刺激で上昇がみられたこともこの効果と考えることができる。しかし、OKN 緩徐相速度は訓練方向に増加がより大きかったが、反対方向刺激にも増加はみとめられた。従って、訓練方向と反対方向の追従機能をもある程度向上させること

が考えられた。また、視運動訓練による訓練方向への追従機能の向上以外の効果に関与していると考えられる。

Takemori⁶⁾ や Cohen et al⁷⁾ は猿を用いて視運動刺激を反復し与えることにより、OKAN の TC が減少すると述べている。我々の成績でも OKAN の TC は訓練方向で短縮をみとめた。OKAN の TC は速度蓄積機構を反映しているが、訓練により OKAN の TC が短縮したことが、OKN 緩徐相速度を構成する slow component 成分の減少を示すと考えると訓練する OKN 緩徐相速度の増加を解釈することは難しい。このことから、OKAN の TC の短縮は Takemori⁶⁾ が述べているように habituation としての効果と解釈したい。また、訓練方向と反対方向で認められた OKN 緩徐相速度増加の理由はまだ明確ではないが、速度蓄積機構への影響や視運動刺激に対して注意力が高まるなどの alertness への影響を明らかにする必要があると思われる。

まとめ

ヒトの視運動性眼振に対する視運動訓練効果とその機構を検討した。

1. 健康成人11名に視運動訓練（等角速度 50°/sec, 30秒間の刺激を1方向のみ1日5回, 連日3週間）を施行した。OAL は訓練と同方向の刺激では有意に上昇したが, 反対方向では有意な上昇はみられなかった。SS は両方向で有意に増加した。

2. IR は訓練方向のみで有意な増加を認めた。TC は訓練と同方向刺激で減少する傾向を認めた。このことから、視運動訓練による訓練方向の視運動性眼振の向上は追従機能が向上したためと

考えられた。訓練と反対方向での SS の増加の理由はまだ明確でない。

本論文の要旨は第95回日本耳鼻咽喉科学会総会, 第75回, 第76回東海地方部会連合講演会にて口演した。

文 献

- 1) 時田 喬: 眼振の生理と検査. 金原出版, 東京, 1973
- 2) Miyoshi T, Pfaltz CR, Piffko P: Effect of repetitive stimulation upon optokinetic and vestibular responses. *Acta Otolaryngol* 75: 259-265, 1973
- 3) Pfaltz CR, Kato I: Vestibular habituation. *Arch Otolaryngol* 100: 444-448, 1974
- 4) 戸村義則: 視運動脊髄反射の検討. 耳鼻臨床 77: 196-218, 1984
- 5) 菱田 登: 小脳障害例の視運動性眼振. 耳鼻臨床 47: 910-926, 1954
- 6) Takemori S: The similarities of optokinetic afternystagmus to the vestibular nystagmus. *Ann Otol* 83: 230-238, 1974
- 7) Cohen B, Matsuo V, Raphan T: Quantitative analysis of the velocity characteristics of optokinetic nystagmus and optokinetic afternystagmus. *J Physiol* 270: 321-344, 1977
- 8) Robinson DA: Models. *Neurosci Res Prog Bull* 18: 575-617, 1980

（原稿到着：平成6年6月29日）

別刷請求先：水田啓介

〒500 岐阜市司町40

岐阜大学医学部耳鼻咽喉科学教室