

スポーツビジョンに関する神経学的考察

朴 沢 二 郎

Neurological considerations on sports vision

Jiro Hozawa, M.D.

Studies on "sports vision" to understand the relation between the visual acuity and the ability of sports became popular in the field of sports medicine. The results of investigations in the last decade revealed that the difference between the well skilled sports players and the others appeared more clearly in the dynamic visual acuity than that in the static vision.

In this paper, the mechanism of oculomotor system, which has an important effect on the dynamic visual acuity, was discussed based on the author's experimental results on the visual-vestibular interaction. And, it was concluded that the co-ordination of visual-vestibular function was necessary to obtain the exact visual fixation to a moving target.

Key words: sports vision, oculomotor system, dynamic visual acuity, visual-vestibular interaction

I. はじめに——スポーツビジョンに於ける動体視力と眼球運動の意義について

視覚は全感覚系の中で最も大量の情報を外部から入手しており、人の感覚細胞の70%が眼に集中していることから見ても如何にその情報量が多いかを推測することができる。そして、競技スポーツ中においても各選手が周囲の状況判断のための情報収集に、視覚が中心的役割を果たしていることも否めない事実である。

1978年アメリカで、スポーツビジョンの名のもとに、競技力向上のための視機能の研究が提唱されて以来、我が国においても1988年に同研究会が発足し、スポーツ医学の領域で漸くスポーツビジョンの研究が注目されるようになつた（真下¹⁾）。

1982年、Stine²⁾がこれまでの研究結果をまとめた報告によれば、選手および視標が共に静止している時に働く視力、つまり、"静止視力"の個人差は競技力と余り関係が無く、スポーツ選

手と非スポーツ選手の差は、むしろ動く視標（例えば投手の投げるボール）を追跡する視機能（眼球運動や動体視力など）に明らかに現れるという。そして、優れた選手ほど i) 速いスピードで動くボールや選手を明視する動体視力、ii) 視野の周辺で敵味方を認知する周辺知覚、iii) 動くボールの像を網膜の中心窓で適確にとらえながら追跡する眼球運動、iv) 敵味方の前後関係を知覚する深視力、v) 瞬間的に状況をつかむ瞬間視などの能力が高いと報告している。

筆者はこれまで、身体並びに眼の平衡反射という生理学および病態生理学的立場から眼球運動の研究を行って来たが、本来、眼球運動は“動く指標”を確實に網膜の中心窓で捉えて明視するため起こるものであり、その目的に適った眼球運動を円滑に行うために視器と迷路との協応が欠かせない要素となっている事を感じている。今回、競技力向上という観点から、動体視力に欠かせない眼球運動に対し、視器と迷路がどの様に協応的態度をとっているかについて

種々考察を行ったので報告する。

II. 研究の対象

眼球運動は大きく分けて次の5つの系に支配されている。

i) eye position maintenance system

眼球を原位置に固定し、静止した視標を注視する

ii) slow eye movement system

ゆっくりした動きの視標を追跡する滑動性眼球運動 (smooth pursuit eye movement)

iii) fast eye movement system

急に動く視標を素早くとらえる衝動性眼球運動 (saccadic eye movement)

iv) vergence system

遠点から近点に近づいて来る視標を追跡するため左右の眼が互いに中心に寄つて来る、所謂輻輳運動 (convergence)

vi) non optic system

視覚が介入しない迷路性眼球運動 (vestibular eye movement)

さて、これらの系は全てスポーツビジョンに関係するが、今回は、

(1) 頭の上下・左右・前後運動中に起こる眼球運動 (代償性眼球運動)

(2) 動く指標を注視するための衝動性眼球運動と滑動性眼球運動

(3) 頭の回転によって起こる眼球運動 (回転中眼振と回転後眼振)

(4) 右から左へ (又は左から右へ) 動く対象物を正しく認知するための眼球運動 (視運動性眼振と視運動性後眼振)

(5) 側方注視する際の眼球運動

を研究対象とし、これらの眼球運動が視器と迷路の協応によって、各種スポーツにどの様な効果をもたらすかを考察し、又、眼運動系における訓練効果がどの様に期待出来るかについても併せて考察を行った。

III. 研究結果

1. 頭部の上下運動中の固視機能に対する代償性眼球運動の意義 (バレーボール競技にみる動体視力の考察)

ジャンプ中にセッターがトスを上げたボールを固視し、正確にスパイクするには上に上がったボールを静止した状態で網膜の中心窓に捉える眼球運動が必要である。もし、頭の上下運動に伴ってボールの像も一緒に上下に動搖してスパイカーの眼に映ると仮定した場合、ボール自身の輪郭が鮮明に見えないばかりか、複数のボールの像として縦にずれながら、幾つも重なり合って見え、あたかもシャッターを開放したまま撮影した写真を見るかのように認知される筈である。

さて、眼球には頭位の変化に逆らって眼窓内で原位置を保とうとする生理的反射機構があり、これを代償性眼球運動と呼んでいる。例えば、人間の頭を右又は左へ傾けると、眼球は眼窓内に於いて常に原位置を保とうとし、頭の傾斜方向とは反対の方向に回旋する。図1は筆者³⁾が正常者について此の代償性眼球運動を測定したものであるが、他の報告者の成績同様、頭の傾斜角度に比例して眼球の反対回旋角度も増していることが分かる。このような代償性眼球

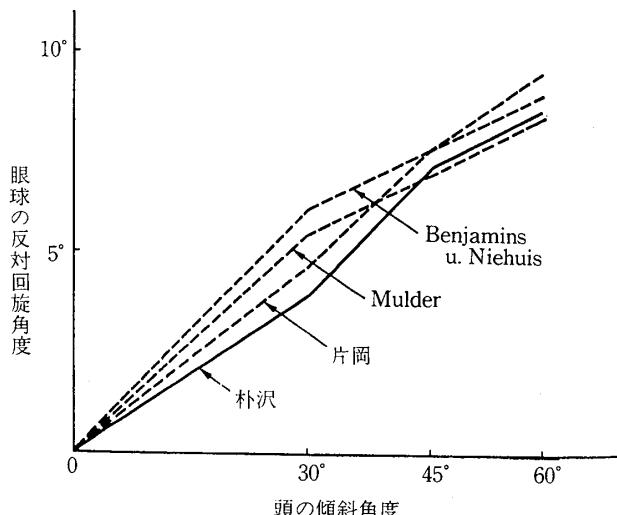


図1 代償性眼球偏位 (正常値)

運動は頭の動きに伴う重力方向の変化や直線加速度を耳石器が感受し、眼筋の緊張度を調節する所謂、迷路性反射によって惹き起こされるものである。そして、傾斜運動のみならず、頭の上下・左右・前後運動に於いても、同様の迷路由来の代償性眼球運動が起こり、これによって視標（対象物）を正しく網膜の中心窓で捉えることができる。

迷路障害者ではこの様な代償性眼球運動が阻害され、特に両側迷路廃絶者では静止している物体はハッキリ見ることが出来るが、頭部に運動が加わる時は対象物が揺れ動いて明視することができない。この様に迷路障害による運動中の固視の破綻は jumbling 現象として一般に知られているが、逆に運動中の固視機能にとって迷路由来の代償性眼球運動が欠かせない要素となっていることを証明する証拠ともなっている。

さて、上述のスパイカーの固視機能であるが、この代償性眼球運動によって支えられ、これがジャンプした際、ボールの位置や動きに対する正確な瞬間判断に役立ち、スwingの際、これに協応する手の動き（クイックか時間差かの判断）と共にスパイカーの優劣に関わる重要な要素になっていると思われる。従ってスポーツビジョンの面から競技力向上を分析するならば、迷路反射に由来する固視機能の訓練と眼・手の協応運動の反復練習が必要と考えられる。

なお、この種の訓練はバレーボールに限らず、他の種目、例えばバスケットボールのジャンプショットやランニングショットの際、ゴールに対する固視機能の向上にも直ちにあてはまり、多方面の競技種目に広く応用されるべき要素と考えられる。

2. 動くボールを固視するための眼球運動

1) 高く上がったボールの固視機能（テニスサーバーによる動体視力の考察）

テニス選手がサーブを行う際の固視機能は一見単純そうに見えるが、実は複雑な要素の組み

合わせから成り立っている。先ず上方にボールを上げた際、ボールの位置や動きを正確に判断するために眼球の動きと頭の動きが起こる。すなわち、極点に達したボールの位置・高さをすばやく認知するために、上方へ向かう急速眼球運動が起こり、同時に此の眼球運動を援助するために頭を上方へ向ける運動が必要である。前者の急速眼球運動には小脳に由来する推尺機能（指標までの距離間隔を推測する機能）が関与する。図 2 は急速眼球運動を記録したものであるが、小脳・脳幹障害者では推尺異常（dysmetria）のため、所謂 over shoot (hypermetry) や

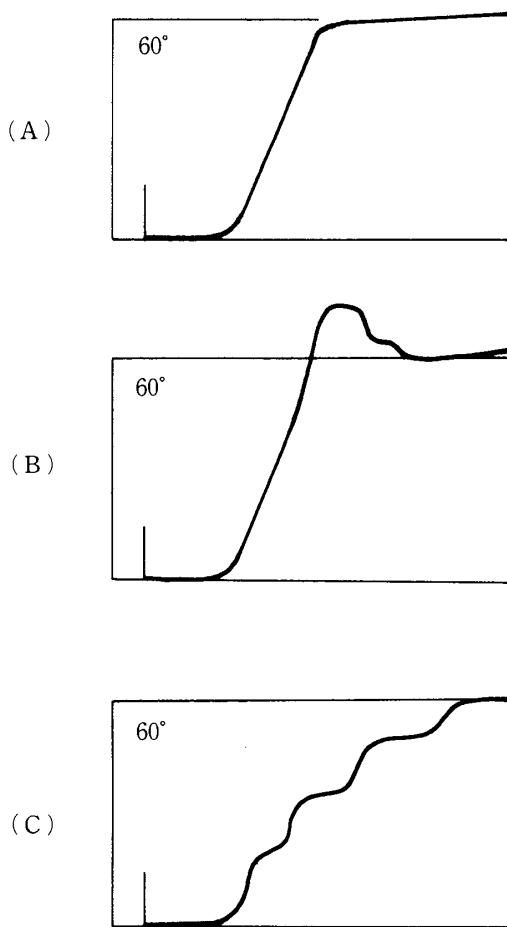


図 2 急速に左から右へ移動する視標を追跡する衝動性眼球運動（眼位 60°）
 A：正常例
 B：hypermetry による
 over shoot (推尺異常例)
 C：hypometria による
 under shoot (推尺異常例)

under shoot (hypometry) 現象が起こり、眼球が指標の動きを追い越したり、逆に指標の動きに達しないという注視機能の障害が起こる。一方、後者の頭の上向運動では頭の動く加速度が垂直半規管を刺激して上方向きの回転中眼振(後述)を惹き起こし、これが急速眼球運動と協応して眼球の固視機能をより効果的なものにし、ボールの極点を正確に瞬間認知することが出来る。

次に落下して来るボールを追跡するには滑動性眼球運動が必要で、同時に両目の輻輳運動によって動いているボールと眼との距離を瞬間に認知することが可能となる(深視力)。そしてボールをどの位置(最も得意とする位置)で打つかは打球点に於ける固視機能と、サーブする手の反応との協応によって始めて可能となり、テニス・サーバーの優劣を決める重要な要素となる。

従って競技力向上の面からはこれら一連の固視機能に関与する反射機能の訓練と手の協応を反復練習する必要があると思われる。なお、此の種の訓練はテニスに限らず、他の競技スポーツ、例えば、サッカーの高く上がったボールを正確にヘッディングする技術の訓練や、新体操に於ける手具(リング、ボール)を受ける演技などにも適用され、多方面の競技種目・動作に広く応用さるべき要素であると思われる。

2) 頭と眼の協応運動による側方注視機構 (内野手やゴールキーパーを見る動体視力の考察)

人間の視野には限度があり、頭及び眼を固定したまま、前方を直視した場合に見える範囲は凡そ外側100度、内側60度、上側60度、下側70度とされて居る。もし、これより広い周辺視野を得ようとすれば、側方を注視する際に眼と頭の協応運動が必要となる。

Bizzi⁴⁾はサルを用いた両側迷路の破壊実験で、側方注視の際の眼と頭の協応運動に迷路を中心とする反射系が重要な役割を果たしていることを証明した。この眼と頭の協応運動が正し

く行われることによって、瞬間的動きをする目標に対して眼は視標を行き過ぎてしまうことなく、正確に固視することが出来る。

さて、内野手が右又は左に飛んで来たゴロを固視し、正確に捕球するには上述の頭・眼の協応を円滑にするための反射系の訓練が必要で、これによって得られた飛球に対する瞬間的判断力と、これに呼応する体の反射的動きは反復練習によって獲得されるものである。従って競技力向上の面から、この種の神経機構を呼び覚ます訓練は練習に欠かせないものと考えられる。これは単に内野守備に限らず、他の競技スポーツ、例えは、サッカー、ハンドボール、ホッケーのゴールキーパーの手技などにも広く応用さるべき要素を持つと思われる。

3. 頭部の回転運動中の固視機能(フィギュア・スケーターの回転性迷路反射に対する随意的視性制御機構の考察)

頭を回転する事によって、相反する二つの方向へ交互に律動的に動く眼球運動が起こる。これを眼振(nystagmus)と呼んでいるが、一方向への速い動きを急速相と言い、反対方向へゆっくりした動きを緩徐相と言っている。この眼振には2種類あり、一つは視運動性眼振、他方は迷路性回転性眼振と呼ばれ、それぞれ解発される反射機構が異なっている。前者は頭の回転によって周囲の景色が相対的に反対方向へ移動するよう見え、その視覚入力によって解発される眼振で、この眼振は動く対象物を常に網膜の中心窩で捕らえる為に必要な眼球運動であり、この眼振のお蔭で移動する対象物の像が流れて不鮮明になること無く、ハッキリ認識することが出来る。景色の移動する速度が増すに随って、この眼振も活発に解発され、眼球運動も増加するが、余り景色が速くなり過ぎると、対象物を追跡固視出来なくなってしまう、眼振も開発不良となり景色が流れて鮮明に見えなくなる。このような視運動性眼振が解発されている最中に、急に消灯又は遮眼して視覚入力を遮ると、実際には

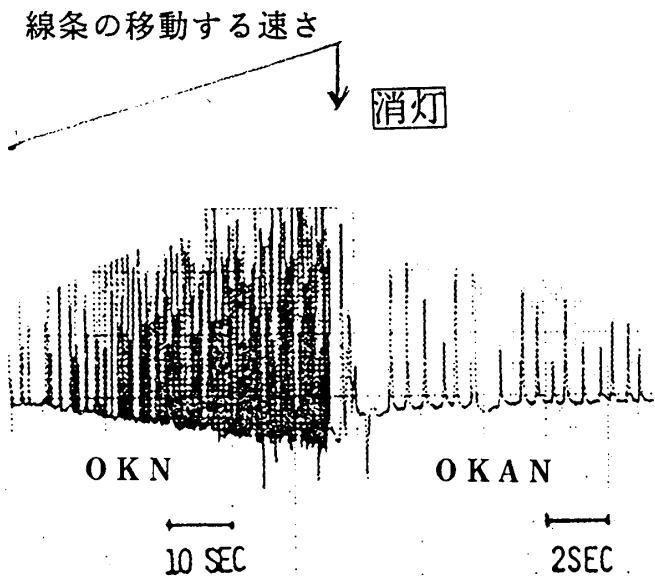


図3 視運動性眼振と視運動性後眼振
 上段：視標（線条）の移動速度
 下段：眼振の速度波形（時定数 0.03 秒）
 線条の速さに一致して速くなっている
 矢印：消灯
 [矢印前] は移動する線条の動きを注視する
 眼球の動き（視運動性眼振 OKN）
 [矢印後] は消灯後、暗所開眼下の眼球の動き
 （視運動性後眼振 OKAN）

対象物の動きが見えないにも関わらず、しばらく同方向へ眼振が持続する。この眼振を視運動性後眼振と言って視運動性眼振と区別している。図3に視運動性眼振と視運動性後眼振を記録したものを示した。

もう一方の迷路性回転性眼振の方は、頭の回転する加速度を水平半規管が感受して、惹き起こす反射で、迷路入力による眼球運動である。筆者⁵⁾は図4(上)の様なエンクロージャーの中に椅子があり、被検者が坐ったまま、エンクロージャーごと回転する装置を試作したが、この装置を回転しても、周りの景色の動きは見えず、視覚の介入しない状態で、被検者に回転刺激を負荷する事が出来る。この装置を使って、被検者を回転すると、被検者は回転中に回転方向へ回転する感覚（回転感）と同時に回転方向へ急速相を持つ眼振が解発される。図4(中)は此の眼振を記録したものである。また、この装置の回

転を急に停止すると、実際は回転椅子が静止しているにも関わらず、今度は被検者に今までとは逆方向へ回転する様な感覚と同時に、回転中眼振と方向が逆向きの急速相を持った眼振が解発される。此を迷路性回転後眼振と言い、回転中眼振と区別して居る。これを図4(下)に示した。

このように頭の回転中は生理学的に発現機構を異にする4種類の眼振が解発されるが、実際に、競技中には否応なく、しばしばこの様な頭の回転動作が加わる局面に遭遇し、その都度、回転感が出現して実技を妨げることになりかねない。

例えば、フィギュア・スケーターのスピiningについて考察すると、未熟な選手は回転感（めまい）のため、演技中、体の平衡を維持出来ない筈である。プレイヤーがこの回転感に打ち勝つて、美しい演技をしようと思えば、このような

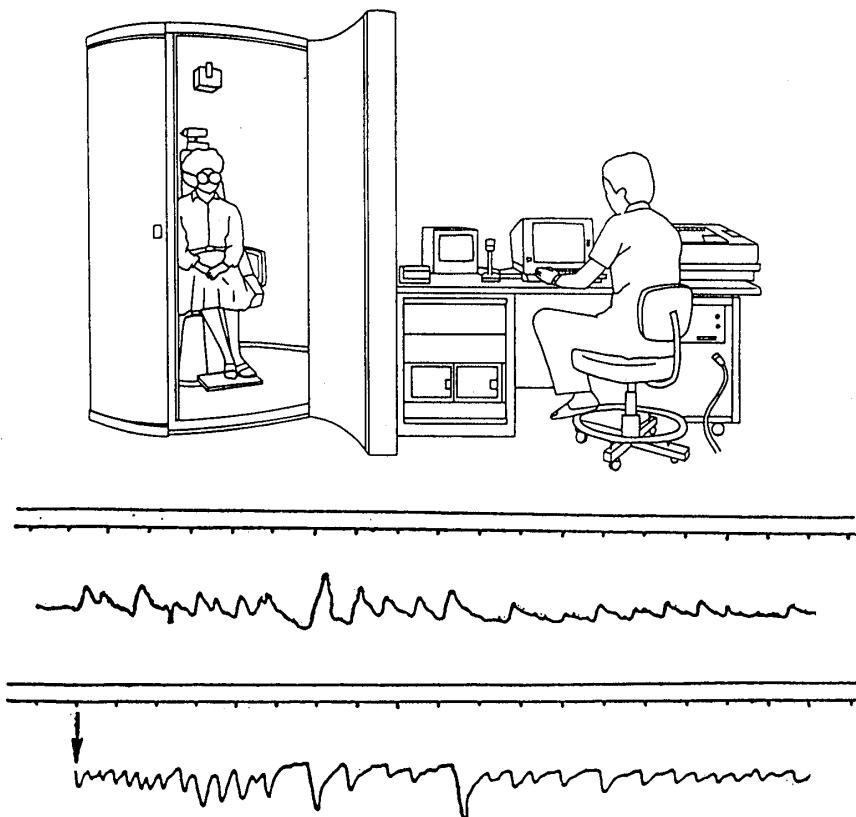


図4 回転中眼振と回転後眼振

上：回転装置
中：回転中眼振（時計方向へ $4^{\circ}/sec^2$ の等加速度回転）
下：回転後眼振（矢印は回転急停止）
両眼振で急速相の方向が逆になることに注意

迷路及び視覚由来の生理的反射を随意的に制御する技術を訓練によって磨く必要がある。

さて、スピンを行うには、先ず出来るだけ速やかに円の中心の方へ入る技術、つまりスピンの入り方が重要で、これによって正しく回転軸を得て、安定した回転動作を行うことが出来る（上野⁶⁾）。これによって回転軸のブレによるコリオリ加速度の発生を防ぎ、素早く回転を所定の速度までもって行く事によって、視運動性眼振の解発を抑え、周辺視野の移動する刺激が介入し難くなる。そして、回転中にプレイヤーが一つの指標を随意的に注視するよう努めれば、図5に示す様に、回転中眼振の解発を抑える視性制御機能（visual suppression: Takemori & Cohen⁷⁾）が小脳片葉から起こる。伊藤⁸⁾は小脳片葉と迷路性眼振反射弓の結合様式

を明らかにし、迷路反応に対する視性制御機序の正当性を裏付けているが、これも正しい演技をするのに必要なスポーツビジョンのポイントになると思われる。次に演技者がスピン動作を打ち切り、最終ポーズに入る時は、このとき発現する回転後眼振によって、逆方向への回転感が起り、静止動作を妨げる筈である。従って此の回転後眼振の発現は出来るだけ短い方が良い。この場合、回転後眼振の短縮は、訓練によって可能である。図6はフィギュア・スケーター やバレリーナが非訓練者に比べて回転後眼振が減少していることを示した筆者ら⁹⁾のデータである。一方、回転後眼振と同時に起こる視運動性後眼振は急速相の方向が回転後眼振の方向と相反するため両眼振が相殺し合って、回転後眼振の発現を抑える効果を持っている。この様



図5 回転中眼振に対する視性制御機能 (visual suppression)

矢印：点灯してエンクロージャー内を明るくした時を示す

但し、エンクロージャーは被検者と一緒に回転するので、回転による視野移動は起こらない
<矢印前> 暗所開眼下で回転中眼振が良く解発される

(時計方向 $3^{\circ}/sec^2$ の等加速度回転)

<矢印後> 明所で被検者にエンクロージャーの内壁の1点を注視させると途端に回転中眼振が抑制される
(時計方向 $3^{\circ}/sec^2$ の等加速度回転)

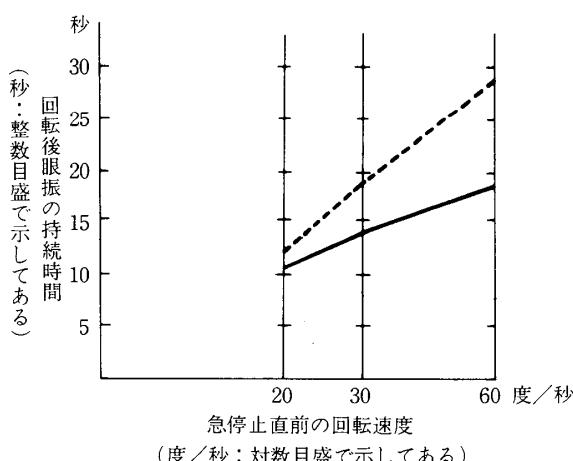


図6 フィギュア・スケーターと普通人の

回転後眼振の比較

(前者では持続時間が短くなっていることに注意)

点線：普通人 (28例平均) の成績
実線：フィギュア・スケーター (8例平均) の成績

にフィギュア選手がスピンを成功させるためには、迷路性反射を随意的に抑止する機能を訓練によって獲得することが重要であるが、筆者ら¹⁰⁾がリスザルを用いて同方向へ回転刺激を1日20回、2週間反復負荷した実験では、眼振の減弱 (response decline) 現象が確実に起こり、効果は反復刺激実験を中止した2週間後まで持続した。しかし、その後、元に回復する傾向が

認められたことから、訓練効果は永続的なもので無く、たゆまぬ練習がこのような効果を持続させるに必要と思われる。又、スピンは多くの選手が反時計方向の回転を採り入れているが、早くから自分の得意な回転方向を決めて、常に同じ方向へ回転する練習を積み重ねることが一方向回転に対する訓練効果を高める重要な要素となっていること (上野⁴⁾) も上述の実験から推測出来る。

IV. まとめ

スポーツビジョン、特に競技力向上には、静止視力よりも動体視力を中心とした視機能の訓練が欠かせない要素となっている。とりわけ、適正な動体視力を得るのに眼球運動は重要な要素を占め、これには視器と迷路および両者の関係 (visual-vestibular interaction) を結ぶのに脳幹・小脳が関与している。

今回、競技スポーツ中に避けることの出来ない頭の上下・左右の動きに対して、視標を固視する機能をどの様にして維持出来るのか？ また、動く視標 (ボールなど) を固視するための眼球運動はどの様な神経学的機構によって営まれて居るのか？ 頭の回転を必要とする競技に於いては生理的反射によって惹き起こされる回

転感をどの様にして随意的に抑制し、競技を続けられるのか？ 様々な問題を、実際の競技を例にとって文献および筆者の実験データを基に考察した。また、競技力向上のために、視機能および眼球運動に関する神経機構を呼び覚ます練習効果の可能性についても付言した。

文 献

- 1) 真下一策：スポーツビジョンとは 臨床スポーツ医学, 12(10), 1101-11003, 1995.
- 2) Stine, C.: Vision and Sports. A review of the literature. J. of American Optometric Association, 53(8), 627-633, 1982.
- 3) 朴沢二郎: Contactlens による眼球偏位の測定 日耳鼻, 59: 1031-1038, 1956.
- 4) Buzzi, E.: Eye-head coordination in monkeys: evidence for centrally patterned organization. Science, 173: 452-454, 1971.
- 5) 朴沢二郎, 角田 幸, 宇佐神正海他: 回転検査に関する研究 東北医誌, 67, 234-266, 1963.
- 6) 上野衣子, 平松純子: フィギュア・スケート, 1-182, 成美堂出版(東京), 1984.
- 7) Takemori, S. and Cohen, B.: Loss of visual suppression of vestibular nystagmus. Brain Research, 72, 213-324, 1974.
- 8) Ito, M., Shida, T. and Yagi, N.: Visual influence on rabbit horizontal vestibulo-ocular reflex presumably effected via the cerebellar flocculus, Brain Res., 65: 170-174, 1974.
- 9) Hozawa, J. and Tsuiki, Y.: Quantitative observation of vestibular reactions in the revolving room. Acta otolaryng. suppl., 179, 96-102, 1963.
- 10) 朴沢二郎, 西山 勉, 宇佐美真一: 一方向反復回転の回転中眼振に及ぼす影響に関する研究 厚生省前庭機能異常調査研究班平成2年度研究報告書, 149-150, 1991.

(平成9年5月30日受付, 平成9年7月8日受理)