

第三分科会「姿勢制御機構と運動学習」

動的姿勢制御機構と機能特性*

藤原勝夫**

重力以外の外力が作用せず、支持基底面の移動がなく比較的安定した姿勢を保つ機能を静的平衡機能と呼び、重力以外の外力が外乱刺激として加わっている状況下や、スキーをしているときのように身体の移動が伴っている比較的不安定な状況下で、一定の姿勢を保つ機能を動的平衡機能と呼んでいる¹⁾。本論文では、動的平衡機能に関する姿勢制御機構とその機能特性について論じる。外乱刺激としては、身体の一部の運動と身体外部からの力が考えられる。実験的には、前者では上肢運動が、後者では床の移動が数多く取り上げられてきた

姿勢制御機構

森²⁾は、図1のような姿勢制御機構を、反射依存型適応と状況依存型適応に関係する機構に分類した。前者は反射的姿勢制御機構であり、脳幹、小脳、脊髄から構成される。後者は随意的姿勢制御機構であり、前者の機構に大脳皮質、大脳基底核、間脳が加わり、参照入力、誤差の検出、および中枢プログラミングが新たに機能するようになる。大脳皮質で作られた高次中枢プログラムは参照機構に入力されるが、その参照機構として運動参照機構と情緒参照機構が考えられている。それぞれの中核として大脳基底核と間脳が挙げられている。運動参照機構には、予想される運動結果と知覚情報が入力され、実際のそれらとの比較がなされ、中枢プログラムを合目的なものに変えていくものと考えられる。

Schmidt³⁾は、無限に近い運動プログラムと、フィードバック情報を比較するための参照内容をすべて記憶することを前提とした中枢機構の考え方には問題があるとした。これを解決すべく、generalized motor programというものを提案した。それは、抽象化された運動スキーマといわれるものであり、一連の運動のための基本原理を包括する法則を意味し、想起スキーマと認知スキーマからなる。そこでは、運動の結果と知覚情報が予測されると考えられている。

Bernstein⁴⁾は、同様の問題を解決すべく、シナジーという概念を提唱した。これは、切り離すことができない一連の運動の組み合わせを意味しており、反射的姿勢制御機構がこれに対

応していると考えられる。この機構は、上位中枢からある程度独立した自律性をもったサブシステムであると考えられる。大脳皮質などの上位中枢機構は、運動の遂行に適したシナジーを選択したり、洗練したり、形成したりする働きを担うとしている。すなわち、この考え方は、反射的姿勢制御機構が、ある程度の可塑性を有することを仮定している。また、随意運動の制御機構が、この反射的姿勢制御機構をサブシステムとしていることを仮定している。さらに彼は、運動制御が支脈を持ってなされること、すなわち運動指令発動前に感覚情報の持つ意味づけがなされ、さらに運動が実行された後の自己および環境の変化の持つ意味を予測することの必要性を強調した。これが、上述した抽象化された運動スキーマに共通した概念であると考えられる。

上肢運動時の姿勢制御

身体の一部を随意的に運動させるとき、これに伴って全身の平衡が乱れるのを防ぐような姿勢制御が予測的になされる⁵⁾⁶⁾。平衡を乱す要因としては、第一に全身の幾何学的位置関係の崩れによる身体重心位置の変化、第二に、身体の運動部位と支持部位における動的な力の作用・反作用があげられる。これが、姿勢制御系に対する外乱とみなされる。随意運動時の予測的姿勢制御の代表的なものとして、上肢を前方に急速に拳上した場合、その主動筋である肩の三角筋の活動に先行して大腿二頭筋などの姿勢制御に関係する筋(姿勢筋)が活動するという現象が挙げられる。

このような予測的姿勢制御は、感覚刺激があってから発動する反応では対応しきれない急速な外乱刺激に対してなされる。これに反して上肢をゆっくりと拳上した場合には、姿勢筋の先行活動は認められなくなることが確認されている⁵⁾。また、この制御は平衡維持のための合目的な活動であり、体幹部を固定したり⁵⁾、あらかじめ身体重心を後方に移動しておいた場合⁷⁾には姿勢筋の先行活動は生じないことも確認されている。

この他にも、試行あるいは被験者によっては、姿勢筋の先行活動が認められないことが観察された。それは、両側上肢を前方に急速に拳上する場合のことである。上肢を除いた身体部位の重心の後方移動がない場合、両側上肢の拳上によって、足関節回りの前方回転モーメントが増加し平衡が乱れることになる。それを防ぐための下肢ないし体幹の後方移動が、上肢拳上運動に先行して開始される必要があると考えられる。その姿勢変換型に、顕著な個体差や試行差があることを明らかにした⁸⁾。

* Dynamic Postural Control System and Its Functional Characteristics

** 金沢大学医学部医学科

(〒920-8640 石川県金沢市宝町13-1)

Katsuo Fujiwara, Ph. D: School of Medicine, Faculty of Medicine, Kanazawa University

キーワード: 動的姿勢制御, 予測制御, 外乱刺激

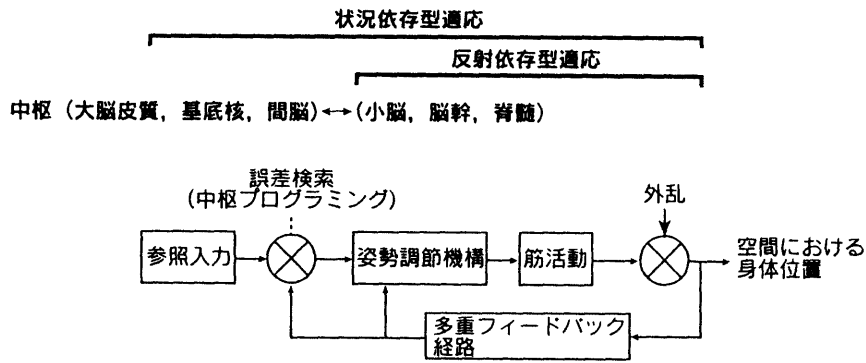


図1 姿勢制御の信号の流れと中枢神経 (森²⁾, 著者改変).

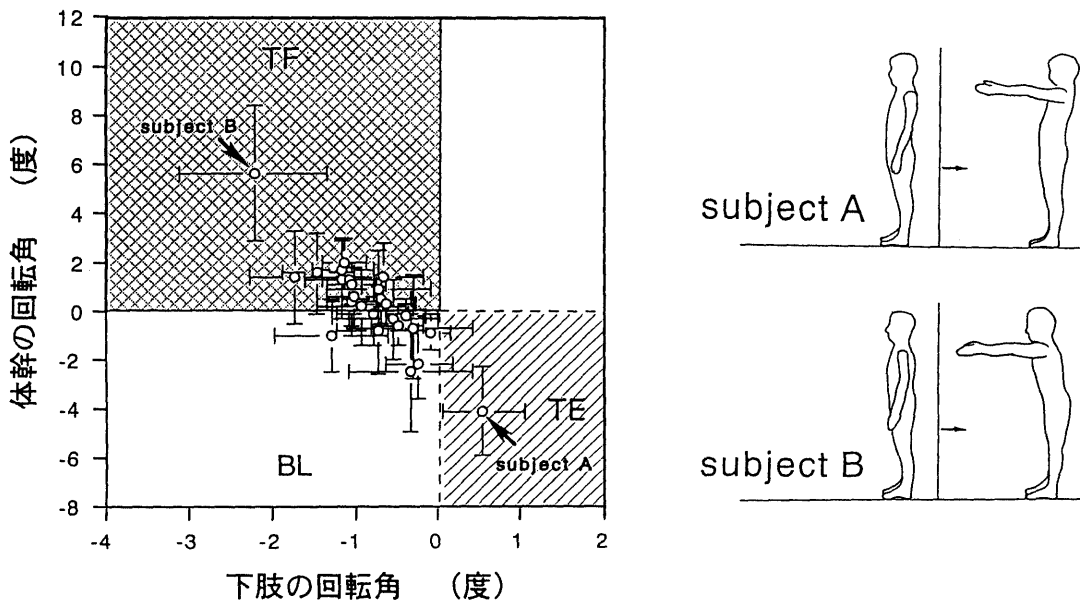


図2 下肢の回転角と体幹の回転角の関係からみた姿勢変換型の分類.

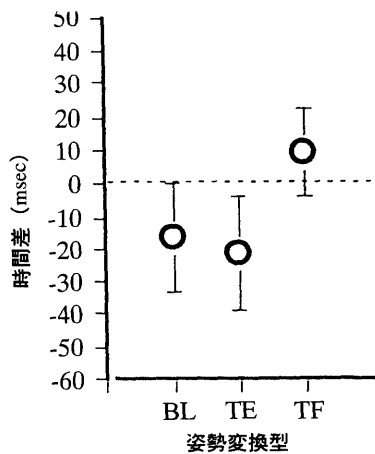


図3 三角筋と大腿二頭筋との活動開始時間差.

健康成人男子 26 名を対象に、光刺激を合図に反応動作として両側上肢を水平前方に急速に挙上した。これを 20 試行課し、後半の 15 試行について分析した。姿勢変換型は、下肢の回転角度 (x) と股関節を軸にした下肢に対する体幹の回転角度 (y) によって評価した。いずれも前方への回転をプラスとし

た。回転の開始時点は上肢挙上開始直前 (100 ~ 200 msec) とし、終了時点は上肢挙上停止時点とした。各被験者の 15 試行の回転角度の平均値と SD を図 2 に示した。この図をもとに、姿勢変換型を象限によって、TF 型 (体幹前屈型, 第 2 象限), BL 型 (後傾型, 第 3 象限), TE 型 (体幹後屈型, 第 4 象限) に分類した。両回転角度の間には高い相関 ($r = -0.889$) が認められ、上肢挙上による前方への不平衡を防ぐために両回転角度の調節が密接に連動しているものと考えられた。また、姿勢変換型には大きな個体差が認められた。

姿勢変換型別に、三角筋に対する大腿二頭筋の活動開始の時間差を図 3 に示した。BL 型と TE 型では、これまでの報告どおり、大腿二頭筋の活動が三角筋に対して先行して開始した。ところが、TF 型では、大腿二頭筋の活動開始が三角筋よりも遅れる傾向があった。すなわち、筋活動順序が姿勢変換型の影響を強く受けていることが明らかになった。以上の結果は、随意運動時の平衡維持機能を学習する場合に、それまでに形成された比較的ステレオタイプの姿勢制御機構 (シナジー) を随意運動に組み入れるための戦略が個人によって異なることを意味していると考えられる。

床移動時の姿勢制御

一過性の床移動を用い、Forssberg & Nashner⁹⁾は、15～10歳の子どもを対象に、支持面と視覚の状況が変化する場合に、それに適した姿勢制御のストラテジー（戦略）を採用できる能力の発達について検討した。床の状況は、前後に水平に移動する場合（Sn）と、足関節の回転角が0°になるように回転を加えながら前後に移動する場合（Ss）とからなる。視覚の状況は、操作を加えない場合（Vn）、閉眼の場合（Vc）、身体動揺に合わせて足関節を軸に視野を回転し視野の動きをなくす場合（Vs）とからなる。いずれの状況でも、試行を2回ずつ課した。安定性は腰の前後の変位で評価された。その基準値は、最前傾と最後傾時の腰の変位である。図4（左）には、Snにおける各種の視覚状況での安定性を示した。視覚状況の違いによ

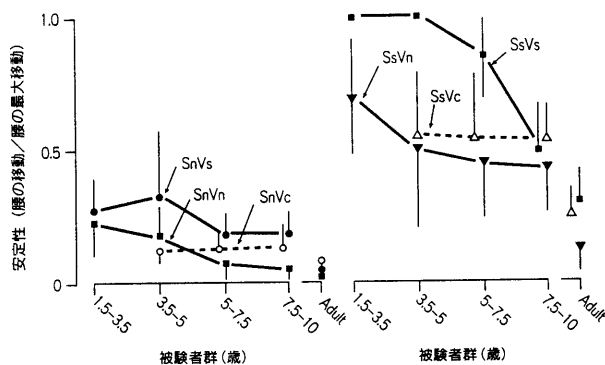


図4 支持面と視覚の状況を変化させた場合の姿勢の安定性 (Forssberg and Nashner⁹⁾)

って安定性に大きな変化が認められず、かついずれの視覚状況でも年齢が進むにつれて安定性が高くなった。ただし、7.5-10歳群においても成人より安定性が低く、かつ個人差も大きかった。図4（右）には、Ssにおける各種の視覚状況での安定性を示した。いずれの視覚状況でもSnに比べて安定性が著しく低かった。なかでもSsVsでの安定性は低く、6.5歳以下ではほとんどの被験者がバランスを失い、5-7.5歳群においても安定性の評価値は限界値である1に近かった。その安定性は7.5歳以上で成人に近くなり、しかも視覚状況間の差は認められなかった。これらの結果は、幼児期には、支持面や足関節回りの筋からの情報が、動的な姿勢制御にとって極めて重要であり、かつその情報が的確なものでない場合には、視覚情報も誤ったものになると、たとえ前庭感覚情報や足関節以外の運動感覚情報が正しいものであっても、姿勢保持が困難になることを物語っていると考えられる。

著者は、外乱刺激時の姿勢制御において、外乱刺激とそれによってもたらされる姿勢変化とを予測し調節する機能（予測的姿勢制御）が重要であると考え、比較的予測しやすくしかも粘弾性体の物理的応答特性が明かな床の水平周期振動（以後、床振動とする）を用いて研究を進めてきた。被験者には、振動台に固定した床反力計上で開眼ないし閉眼で、閉足位にて立位姿勢を保持させた。そして、振動台を正弦波状に振幅2.5cmで前後方向に振動した。

床振動時に予測的姿勢制御がなされている証拠であるが、その1つに、0.1 Hzというゆっくりとした振動において、足圧中心動揺の位相が床振動よりも進んでいるということがあげられる¹⁰⁾。一方、0.5 Hz, 1.0 Hz, 1.5 Hzの床振動を負荷したが、

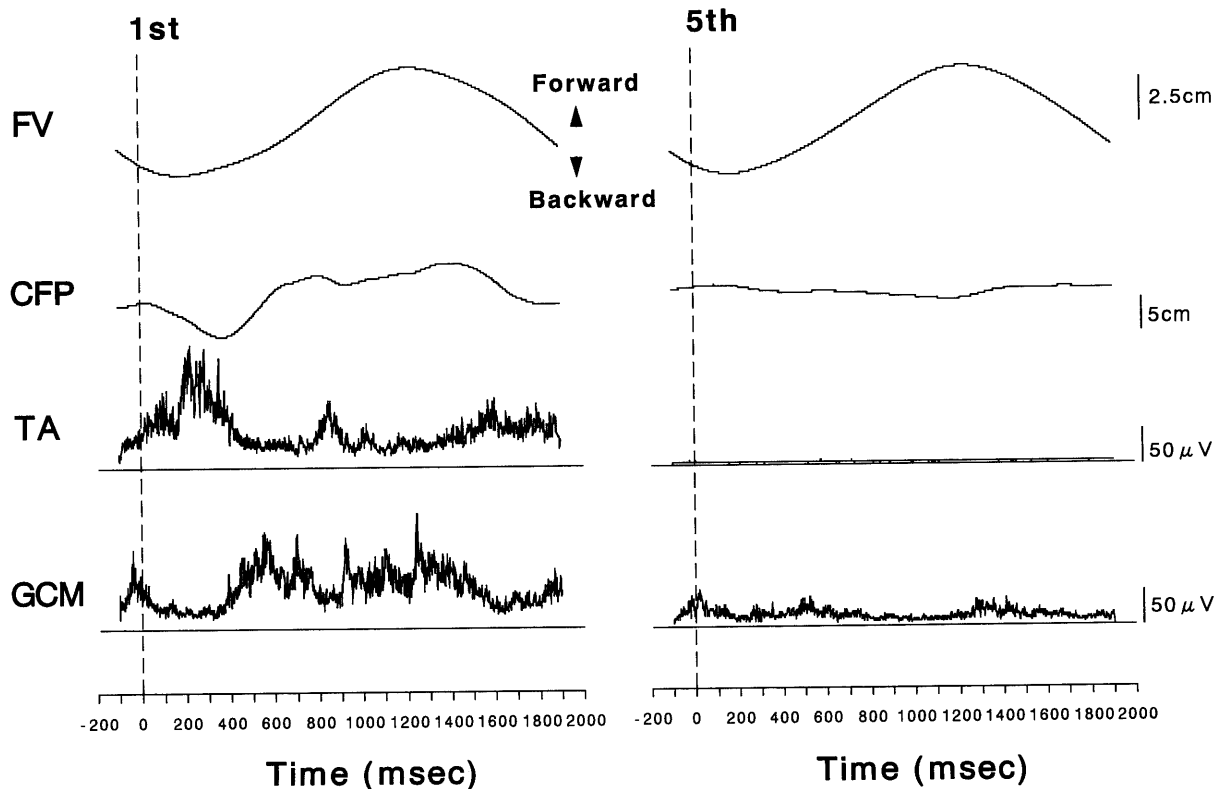


図5 床振動を繰り返した場合の足圧中心動揺と下腿筋の筋電図の変化 (FV：床振動, CFP：足圧中心動揺, TA：前脛骨筋, GCM：腓腹筋)。

いずれも足圧中心動揺の位相は床振動に対して遅れていた¹⁰⁾。ところで剛体における圧中心は床振動と同位相であり、位相遅れという現象は、身体が粘弾性体であることによって生じるものと考えられる。また、0.5 Hzの床振動を繰り返し負荷した場合に、足圧中心動揺の位相遅れが大きくなり90°に近づいた¹¹⁾。

図5には、49歳男子を対象に、閉眼で1分間の0.5 Hzの床振動を5回負荷した場合の、第1試行と第5試行における足圧中心動揺と下腿筋の筋電図とを示した。この図は、50秒間のデータを加算平均したものである。第1試行から第5試行にかけて、足圧中心動揺と下腿筋の活動に顕著な変化が生じた。足圧中心動揺は、振幅が顕著に減少するとともに、床振動に対する大きな位相遅れが認められるように変化した。筋活動は、下腿筋の拮抗筋の大きな活動から、腓腹筋のみの小さな活動に変化した。腓腹筋の比較的大きな活動のピーク数が5個から3個に減少し、第5試行の2個目のピークは床振動の前方移動の中間で認められた。この筋活動は前方の変曲点での大きな外乱を和らげる予測的なものであると考えられる。

一方、5試行の間に足圧中心動揺と下腿筋の活動にほとんど変化が認められない被験者も存在した。このようなデータを参考に、これまで予測的姿勢制御能の適応能の発達、および老化について検討してきた。その結果、男児では6歳から、女児では5歳から顕著な適応能の発達が認められること¹²⁾、高齢者では試行を重ねても姿勢制御能がほとんど変化しない者が約15%存在すること¹³⁾などが、明らかになった。

文 献

- 1) Travis RC: An experimental analysis of dynamic and static equilibrium. *J Exp Psychol* 35: 216-234, 1945.
- 2) 森 茂美: 姿勢と歩行の中樞調節. 伊藤正男, 樽林博太郎 (編), *神経科学レビュー* 6. 医学書院, 1993, pp 86-99.
- 3) Schmidt RF: Motor system. In: Schmidt RF (ed) *Fundamentals of Neurophysiology*. Springer Verlag, New York, 1985, pp 155-200.
- 4) Bernstein N: *The coordination and regulation of movements*. Pergamon Press, Oxford, 1967.
- 5) Belen'kii VY, Gurfinkel VS, *et al.*: Elements of control of voluntary movements. *Biophysics* 12: 135-141, 1967.
- 6) Bouisset S, Zattara M: Anticipatory postural adjustments and dynamic asymmetry of voluntary movements. In: Gurfinkel VS, Ioffe ME, *et al.* (eds) *Stance and Motion*. Plenum Press, New York and London, 1988.
- 7) 藤原勝夫, 外山 寛・他: 急速上肢挙上時の立位姿勢調節に対する身体重心の前後方向の位置と重量負荷の影響. *体力科学*, 40: 355-364, 1991.
- 8) Fujiwara K, Toyama H, *et al.*: Postural movement pattern and muscle action sequence associated with rapid bilateral-arm-raise in standing (in press).
- 9) Forssberg H, Nashner LM: Ontogenetic development of postural control in man: Adaptation to altered support and visual conditions during stance. *Journal of Neuroscience* 2: 545-552, 1982.
- 10) 藤原勝夫, 池上晴夫: 床振動時の立位姿勢の応答特性. *体育学研究* 29: 251-261, 1984.
- 11) 藤原勝夫, 中野綾子・他: 水平床振動を繰り返し負荷した場合の立位姿勢調節の変化. *体力科学* 37: 25-36, 1988.
- 12) Fujiwara K, Toyama H, *et al.*: Development of the adaptability of postural control during floor vibration. In: Brandt T, Paulus W, *et al.* (eds) *Disorders of Posture and Gait*. Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York, 1990, pp 185-189.
- 13) Fujiwara K, Toyama H, *et al.*: Adaptability of postural control during floor vibration in the elderly. In: Taguchi K, Igarashi M, *et al.* (eds) *Vestibular and Neural Front*. Elsevier, Amsterdam, 1994, pp 135-138.