

二軸バランスメータによる動的平衡機能の分析

藤原 勝夫・幸山 彰一・吉野 安之

Analysis of dynamic balance by two-axes-balancemeter

Katsuo FUJIWARA, Shoichi KOYAMA and Yasuyuki YOSHINO

(The College of Liberal Arts, Kanazawa University)

Abstract

A new two-axes-balancemeter beneath which a force plate was setted was developed from the necessity of setting the clear target of postural control. Dynamic balances in ten male university students aged 18 to 19 years were investigated. They were induced to stand on the tilting table of two-axes-balancemeter with open or closed eyes and with closed stance, and required to put back the tilting table from inclined position to horizontal position as soon as possible once inclination commenced. An angle of inclination limit of tilting table was setted at 5 degrees and the distance between two axes that was arranged in parallel was decreased by 0.5cm from 3.0cm to 1.0cm. Trial time was 70 seconds and data for 10-70 seconds were analysed. Analysis items were the number and time that the tilting table contacted with the force plate and the mean speed of the fluctuation of the center of foot pressure (CFP) picked up by the force plate. The results were summarized as follows:

1) For all subjects, it is only in 1.0cm axes distance that the tilting table inclined and inevitably contacted with the force plate in open and closed eyes. Accordingly, This distance was appropriate for investigating the righting postural control from unbalanced positions.

2) The correlation coefficients of the mean speed of the CFP fluctuation were 0.811 between 2.0cm and 1.5cm axes distance in open eyes and above 0.6 among 2.5-1.0cm axes distances in close eyes. Accordingly, it was deemed that the reproducibility of dynamic balance measured using the two-axes-balancemeter was relatively high.

3) The mean value of contact time was about 0.4 second in 1.0cm axes distance. This result suggested that reaction factors were contained in the control to put back the tilting table to horizontal position. Contact times in each subject distributed for about 0.05-1.5 seconds. This result suggested that the balance was controlled anticipatively on occasion and the perception of contact of tilting table or the postural control were sometimes late.

I 緒 言

立位姿勢の保持機構はヒト特有のものであり、立位での平衡機能はヒトの運動調節において支配的機序をなすものであると考えられる^{2),7),8)}。そのような観点で、平衡機能の評価のために、安静立位での身体動揺の大きさ^{17),21)}や、バランスメータ（一軸を中心に床が傾くもの）上での立位姿勢の平衡維持時間等が測定されている^{20),21)}。

安静立位での身体動揺は目標とする姿勢からの偏倚とそれからの立ち直りという動的現象とみなされているが⁵⁾、実際には偏倚と立ち直りの相を明確に区分することは困難であるように思われる。安静立位を椅座位をはさんで繰り返し保持した場合に、試行ごとに足圧中心動揺の中心位置（いわゆる重心動揺の中心位置）が大きく変わることからみて⁴⁾、目標とする姿勢（身体各部位の相互関係及び支持基底面内における重心位置）は、ある範囲内で変化しているものと推察される。身体動揺にも、そのような要素がおそらく含まれているものと推察される。

バランスメータ上での平衡維持時間の測定では、再現性が極めて低いことが平衡機能の評価にとって問題となる^{1),3),11),21)}。一軸のバランスメータでは、床を水平に保つことが一瞬にすぎず、多くは平衡を失った状態にあると考えられる。すなわち、床を水平に保つことは極めてむずかしく、制御目標としては不適当であると考えられる。このようなことが関係して、再現性が低いという問題が生じたものと考えられる。

これらの問題を解決するためには、平衡機能の評価に適した姿勢制御の明確な目標値を設定することが肝要と考えられる。そこで、平行な位置に二軸を有するバランスメータを新たに開発することにした。本研究は、二軸バランスメータを用いて動的平衡機能を分析し、測定法を確立することを目的とする。

II 方 法

1. 二軸バランスメータについて

二軸バランスメータの略図は図1に示した。二軸バランスメータは、傾斜板（大きさ30×40×1 cm、重さ3 kg）の表面の延長上に軸を有し、二軸間の距離並びに傾斜板の最大傾斜角を任意に変えることができ、傾斜角を検出する回転型ポテンシオメータ（緑測器、CP-3M）と足圧中心動揺を検出する床反力計（パテラ、S110）を装備している。ポテンシオメータの回転軸の位置は、傾斜板の軸と一致させた。傾斜板の軸の距離は、手動でスライドさせて調節できるようになっている。また、最大傾斜角は、ストッパーの位置を変えることによって定めた。そして、傾斜板の両端に取り

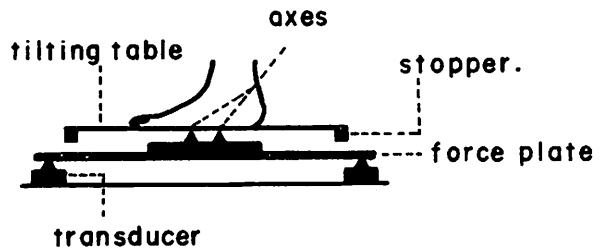


Figure 1 Schematic drawing of the two-axes-balancemeter beneath which a force plate was setted.

付けたストッパーの底面が、床反力計上の床面に接触した場合（接地と表現する）に、スイッチング回路がONになるようにした。したがって、二軸バランスメータ上で立位姿勢を保持した場合に得られる信号は、足圧中心動揺、傾斜板の傾斜角の変動、傾斜板の接地と離地を示すものである。得られた信号の1例を図2に示した。これは、二軸の距離を1cmとし、軸に対して被検者の前後方向を直交させ、閉眼で閉足位にて立位を保持した場合のものである。

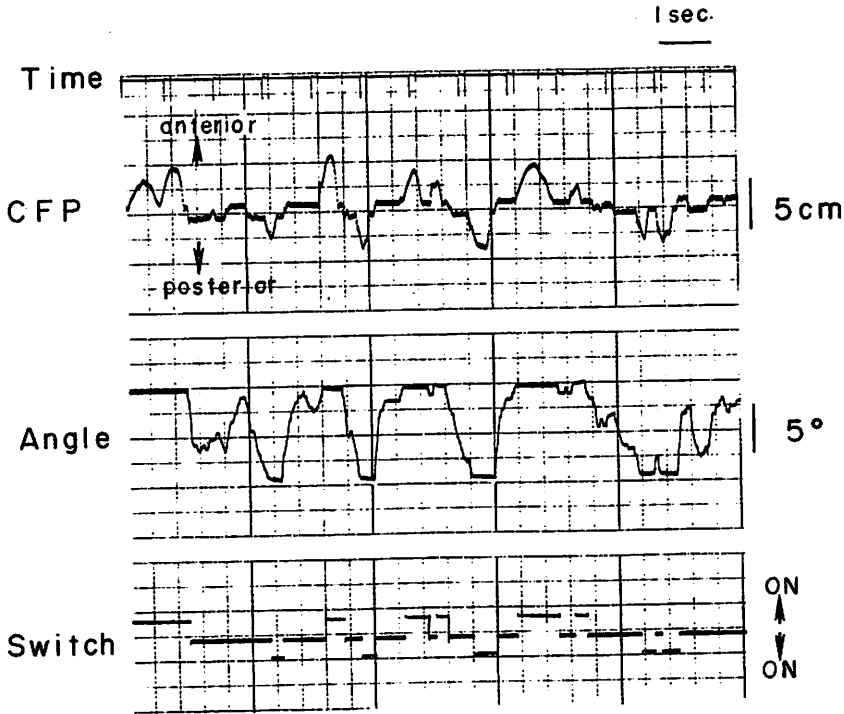


Figure 2 Typical records of the fluctuation of the center of foot pressure (CFP), the inclinational angle of tilting table (Angle) and the contact signal to force plate (Switch).

2. 実験方法及び分析方法

被検者は、金沢大学の男子学生（18～19歳）であり、運動クラブに所属していない10名である。被検者は、二軸バランスメータが固定されていない床反力計上で安静立位を70秒間保持した後、二軸バランスメータ上で軸に対して身体の前後方向を直交させ、開眼と閉眼で70秒間立った。二軸バランスメータの測定では意図的に膝や腰を屈曲した姿勢をとらずに、できるだけ傾斜板を水平に保つように、また傾斜板が傾き接地した場合には、できるだけ速く水平にもどすように、被検者に指示した。また、いずれの測定でも閉足位にて、手は体側に軽くつけるようにさせた。今回は、傾斜板の最大傾斜角を5°とし、軸の距離を順に3.0cm、2.5cm、2.0cm、1.5cm、1.0cmとして測定した。各試行の間には、椅座位による休憩を1分間とった。

分析には測定開始10秒目から1分間のデータを用い、A/D変換の後、安静立位では前後方向の足

圧中心動揺の標準偏差値を、二軸バランスメータの測定では前後方向の足圧中心動揺の平均速度 (mm/S) および傾斜板の接地回数と接地時間を、マイクロコンピュータ (Zilog, Z80) を用いて算出した。足圧中心動揺のサンプリングタイムは50msec であり、分解能は 0.2 mm である。傾斜板の接地・離地の信号のサンプリングタイムは10 msecとした。

なお、統計処理で用いた t 検定の有意水準は 5%とした。

III 結 果

表1に、1分の間に傾斜板が1度も接地しない被検者数を示した。軸の距離が減少するにつれて、接地回数0の被検者数は激減した。開眼では、後方には軸の距離が3.0cmと2.5cmにおい

Table 1 Number of the subjects whose tilting table didn't contact with the force plate at all.

distance (cm)	3.0		2.5		2.0		1.5		1.0	
	f	b	f	b	f	b	f	b	f	b
open eyes	6	10	5	10	5	7	5	3	0	0
closed eyes	4	5	3	3	0	1	0	0	0	0

f:forward inclination, b:backward inclination

て全員が1度も接地せず、前方には軸の距離が3.0~1.5cmにおいて約半数の被検者が1度も接地しなかった。閉眼では、軸の距離が3.0cmでは約半数の者が1度も接地しないが、軸の距離が2.0cm以下では、2.0cmの後方への1名を除いて、他は全て必ず接地した。結局、軸の距離が1.0cmにおいてのみ、開眼・閉眼のいずれでも全員が接地した。

図3に、傾斜板の接地回数の平均値と標準偏差値を示した。開眼での接地回数は、軸の距離が3.0cm~2.0cmにおいてはほとんど変化なく、軸の距離が1.5cmでは有意に多くなり、1.0cmでは急増した。また、軸の距離が3.0cm~2.0cmでは前方の方が後方に比べて接地回数が多い傾向にあるが、1.5cm以下では後の方が前方よりも接地回数が有意に多かった。閉眼での接地回数は、開眼に比べて著しく多く、軸の距離が減少するにつれて急増し、軸の距離が1cmでは、毎秒約1回の割合で前方か後方のいずれかに接地した。閉眼ではいずれの軸の距離においても、前方に比べ後方への接地回数の方が有意に多かった。

図4に、1分間の延べ接地時間の平均値と標準偏差値を示した。軸の距離による接地時間の変化の様相は、接地回数の場合によく類似していた。その他の開眼時と閉眼時の差、前方と後方の差についても、接地回数と同様の傾向を示した。軸の距離が1.0cmにおいては、開眼では前方と後方の接地時間の合計が約9.3秒、閉眼でのそれは約22.7秒であった。

接地1回ごとの時間は、多くの被検者は約0.05~1.5秒の間に分布していた。長い接地時間は軸の距離が大きい場合に多く認められた。軸の距離が1.0cmでの接地時間は、1.0秒以下であった。図5に、1回の接地に要する平均時間について、平均値と標準偏差値を示した。接地時間

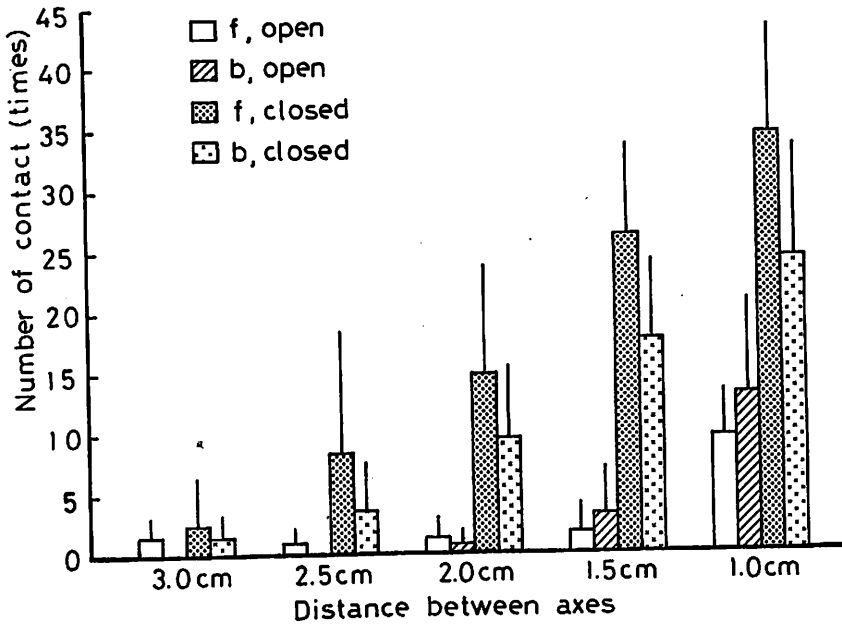


Figure 3 Number that the tilting table of two-axes-balancemeter contacted with the force plate for 60 seconds.

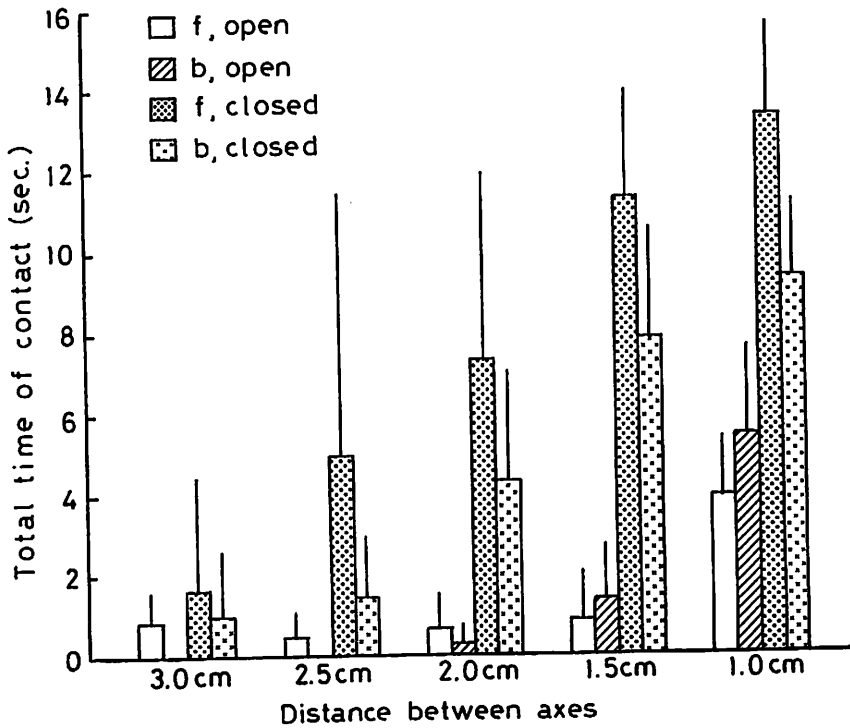


Figure 4 Total time of the contact of tilting table for 60 seconds.

の各被検者の平均値は、軸の距離が小さくなるにつれて減少する傾向を示し、軸の距離が3.0 cmでは約0.5~0.6秒であり、軸の距離が1.0 cmでは約0.4秒であった。また、その値には、軸の距離が2.5 cmの場合を除いて、開眼と閉眼との間に、および前方と後方との間に有意差が認められなかった。

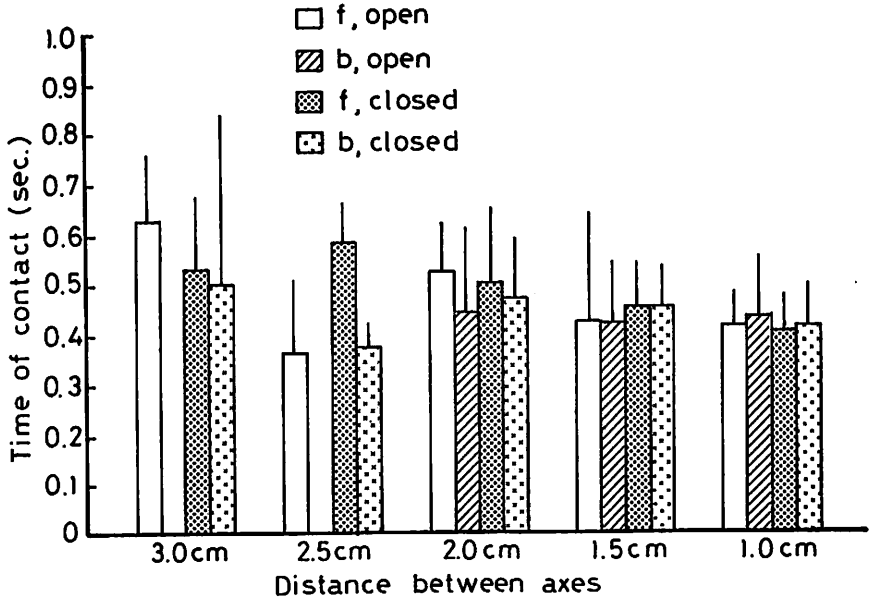


Figure 5 Mean time of the contact of tilting table.

図6に、足圧中心動揺の平均速度の平均値および標準偏差値を示した。開眼時の平均速度については、軸の距離が3.0 cm~2.0 cmの間には有意差がなく、それらの値に比べて1.5 cmと1.0 cmでは有意に大きい値を示した。閉眼時の平均速度については、軸の距離が減少するにつれて有意に増加した。各値間の相関を示したのが、表2である。開眼時には、軸の距離が2.0 cmと1.5 cmの間に有意な

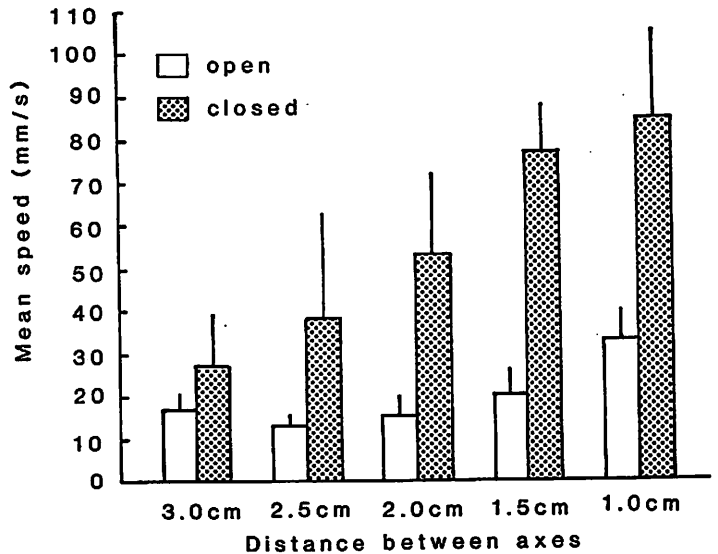


Figure 6 Mean speed of the CFP fluctuation when the subjects maintained a standing posture on the two-axes-balance-meter.

正の相関を示した。閉眼においては、軸の距離が3.0cmと1.0cm, 2.5cmと1.5cm, 2.0cmと1.5cm, 1.5cmと1.0cmのそれぞれの間に有意な正の相関を示した。

安静立位における足圧中心動揺の標準偏差値は、開眼時 3.50 ± 0.754 mm, 閉眼時 $3.74 + 0.815$ mmであった。また、その最小値と最大値は、開眼時2.21mmと4.72mm, 閉眼時2.91mmと5.46mmであった。足圧中心動揺の安静立位での標準偏差値に対する二軸バランスメータでの平均速度の相関係数は、軸の距離が大きい順に、開眼では-0.141, -0.159, -0.090, -0.111, 0.619であり、閉眼では0.652, 0.295, 0.282, 0.320, 0.638であり、有意な相関は開眼では軸の距離が1.0 cmにおいてのみであり、閉眼ではそれが3.0cmと1.0cmにおいてであった。

Table 2 The correlation coefficients of the mean speed of the CFP fluctuation among different axes distances.

open eyes

	Distance between axes (cm)				
	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
3.0		0.385	0.165	0.177	-0.217
2.5			0.449	0.019	-0.163
2.0				0.811**	0.248
1.5					0.281
1.0					

closed eyes

	Distance between axes (cm)				
	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
3.0		0.427	0.297	0.412	0.673*
2.5			0.613	0.653*	0.367
2.0				0.771**	0.325
1.5					0.638*
1.0					

* p < 0.05 ** p < 0.01

IV 考 察

1. 二軸間の距離の設定について

二軸バランスメータを考案するに到ったのは、明確な目標値を定めることの必要性からであった。本被検者の安静立位での前後方向の足圧中心動揺は、開眼ではその標準偏差値の6倍からして、最小で1.33cm, 最大で2.83cmの範囲に99.7%が分布していることになる。閉眼ではその範囲は最小で1.75cm, 最大で3.28cmである。二軸バランスメータにおいて全足が必ず接地したのは、開眼では軸の距離が1.0cmの場合であり、閉眼では1.5cm以下の場合であった。この結果を安静立位での足圧中心動揺の分布範囲との間には、対応関係があると考えられる。全足が必ず接地する軸の距離が1.0 cmでの足圧中心動揺の平均速度と、安静立位での足圧中心動揺の標準偏差との間に正の有意な相関が認められたことは、このことを示唆していると考えられる。すなわち、二軸バランスメータの二軸の範囲を逸脱する確率の高い者ほど、足圧中心動揺の平均速度が大きくなる傾向がある。日本平衡神経学会では1986年に平衡機能の標準値を示した。それによると、安静立位における足圧中心動揺の前後径の平均値は、開眼では2.14cm, 閉眼で

は2.78cmと報告されている。また、標準偏差値の平均値は、開眼では4.2mm、閉眼では5.1mmであり、本研究で得た値よりは大きい傾向がある。その他の報告でも、これに類似した値が得られている^{7),10),13),14),22)}。これらのことから、軸の距離が1.0cmにおいて、開眼・閉眼のいずれにおいても、成人の大多数の者が、必ず接地するものと推察される。したがって、傾斜板が傾き、平衡が崩れ、それからの立ち直りを検討する場合には、軸の距離を1.0 cmとするのが、適当ではないかと考えられる。

明確な目標値を定める必要があるとした1つの理由に、再現性の問題があった。これについては今回特に検討したわけではないが、開眼では比較的接地する回数が類似している軸の距離が2.0cmと1.5cmの間で、足圧中心動揺の平均速度の相関が0.811と高いことや、閉眼ではほとんどの者が接地する軸の距離2.5cm~1.0cmの間で、足圧中心動揺の平均速度の相関が0.6以上であった。このことから、評価される平衡機能の再現性は、比較的高いのではないかと推察される。再現性については、別の実験を組んで検討するつもりである。

2. 接地時間について

二軸バランスメータにおいて、傾斜板が傾きそして接地した場合に、傾斜板を水平の位置にもどそうとする動作は、一種の反応動作と考えられる。この場合の刺激は、台の傾斜又は接地の機械的刺激(体性感覚刺激)および音刺激が主であり、接地時間に反応動作の様相が反映されるものと考えられる。音刺激に対する全身反応時間(動作開始時間+筋収縮時間)は、約0.3~0.4秒であると報告されている⁹⁾。手の反応動作の場合、筋の自己受容性刺激の方が、聴覚刺激に対するよりも反応時間が若干速いと報告されている^{6),12),19)}。本研究における接地時間の平均値は、軸の距離が1.0cmでは約0.4秒であり、全身反応時間に極めて近い値であり、全身反応に類似した生理的要素が、接地時間に多く反映されているものと推察される。

反応時間については、意識水準の高い状態を示す脳波の速い周期成分が認められるほど、反応時間も短いと報告されている¹⁷⁾。一般に予備信号と刺激との間隔時間が0.3~0.5秒のとき反応時間が最も短く、それ以下では急速に長くなり、それ以上では反応時間は緩やかに長くなるといわれている¹⁹⁾。また、予備信号がランダムに変化する場合には、初めは反応時間が比較的長く、その後しだいに短くなることが報告されている¹⁹⁾。また、刺激の時期が予期される場合には、そうでない場合よりも反応時間は著しく短くなると報告されている^{15),16)}。これは刺激が出現する期待すなわち意識水準に関係する現象であると解される。軸の距離が小さくなるにつれて、傾斜板の接地時間の平均値が短くなるのは、傾斜板が接地する回数が増えることからみて、上記の反応時間の短縮の場合と同じように、刺激が出現する期待(意識水準)が高くなることに関係しているものと考えられる。

接地時間で認められたもう1つの特徴は、分布範囲が約0.05~1.5秒と広いということである。全身反応時間よりも著しく短い場合については、傾斜板が傾斜している時に接地するタイミングを予測し、反応しているものと推察される。測定を開始したばかりの時には、0.1秒に近い接地時間はほとんどなく、時間がたつにつれて、その頻度が多く認められた。このことは、予測の可能性を示唆しているように思われる。塚原¹⁸⁾は、刺激が繰り返し与えら

れてはじめて予測が可能になる現象を、光刺激に対するスイッチング動作でみだしている。短い接地時間は、接地頻度が約1秒に1回となる軸の距離が1.0 cmで多く認められた。予測は刺激が周期的であり、しかもその周期が1.0Hz以上の時に成立しやすいとの報告¹⁸⁾と対応しているように推察される。反応時間よりも著しく長い接地時間については、傾斜板が傾斜し接地したのを知覚することが遅れたか、あるいはそれが知覚されていても、平衡が大きく崩れ、傾斜板を水平の位置にもどすのに多くの時間を要したことを示唆しているように思われる。

V ま と め

1. 開眼・閉眼のいずれにおいても、全被検者の傾斜板が傾き必ず接地するのは、二軸間の距離が1.0cmにおいてだけであり、傾斜板が傾き、身体の平衡が崩れ、それからの立ち直りを検討するには、二軸間の距離を1.0cmとするのが適当であると考えられた。
2. 開眼では接地する回数が類似している軸の距離(2.0cmと1.5cm)での足圧中心動揺の平均速度の相関が0.811と高いことや、閉眼ではほとんどの者が接地する軸の距離3.5cm~1.0の間で、足圧中心動揺の平均速度の相関が0.6以上であり、二軸バランスメータで測定される動的平衡機能の再現性は、比較的高いのではないかと推察された。
3. 接地時間の平均値は、軸の距離が1.0 cmでは0.4秒であり、傾斜板を水平にもどす動作は反応動作の要素を多く含んでいると示唆された。また、各被検者とも約0.05~1.5秒の間に接地時間が分布し、予測制御の可能性や、傾斜板の接地の知覚の遅れおよび姿勢調節の遅れがあることが示唆された。

本研究は「筑波大学学内プロジェクト研究」と「ヤシログ健康体力研究所、'86研究奨励金」の援助を受け行った。

引用文献

- 1) Bachman, J.C. (1961) Specificity vs. generality in learning and performing two large muscle motor tasks. *Research Quarterly*, 32: 3-11.
- 2) Brooks, V. B. (1986) *The neural basis of motor control*. Oxford University Press, Oxford.
- 3) DeOreo, K. D. and Wade, M. (1971) Dynamic and static balancing ability of preschool children. *Journal of Motor Behavior*, 3(4): 326-335
- 4) 藤原勝夫, 池上晴夫 (1981) 足圧中心位置と立位姿勢の安定性との関係について. *体育学研究*, 26(2): 137-147.
- 5) 福田 精 (1981) *運動と平衡の反射生理*. 第2版, 医学書院, 東京.
- 6) Higgins, J.R. and Angel, R.N. (1970) Correction on tracking errors without sensory feedback. *J. Exp. Psychol*, 84(3): 412-416
- 7) 平沢彌一郎, 青木賢一 (1976) 日本人の直立能力について. 第2回姿勢シンポジウム論文

- 集 (姿勢研究所), 41-46.
- 8) 猪飼道夫 (1966) 動作学. 藤森聞一 (編), 運動の生理学, 生理学大系Ⅷ, 医学書院, 東京, 717-766.
 - 9) 猪飼道夫, 浅見高明, 芝山彦太郎 (1961) 全身反応時間の研究とその応用, *Olympia*, 2(4) : 18-27.
 - 10) 松岡豊彦 (1977) 起立時身体動揺の定量的解析, 耳鼻臨床, 70 : 1191-1280.
 - 11) 宮下充正 (1980) 子どものからだ. 東大出版会, 東京.
 - 12) Morgan, C. T. (1948) Response. In Boring, E. G., Langfeld, S. and Wold, H.P. (Eds.), *Foundations of Psychology*, J. Wiley, New York. 40-63.
 - 13) Murray, M. D. and Seireg, A. (1975) Normal postural stability and steadiness quantitative assessment. *J. B. J. S.*, 57(A4) : 510-516.
 - 14) 岡部多加志 (1975) 神経内科領域における二次元重心動揺記録装置の臨床的応用. 慶応医学, 51(4) : 265-277.
 - 15) 大山 正 (1985) 反応時間研究の歴史と現状. 人間工学, 21(2) : 57-64.
 - 16) Oyama, T. and Tanabe, N. (1982) Expectancy and choice reaction time as a function of stimulus presentation probability and serial dependency. *Psychologia*, 25 : 131-143.
 - 17) Surwillo, W. W. (1963) The relation of simple response time to brain wave frequency and the effect of age. *Neurophysiol.*, 15 : 105-114.
 - 18) 塚原 進 (1972) 人の動作におけるフィードバックとフィードフォワード. 真島英信, 猪飼道夫 (編), 生体の運動機構とその制御, 杏林書院, 東京, 231-251.
 - 19) Welford, A. T. (1980) Reaction times. Academic press, London.
 - 20) Williams, H. G (1983) Perceptual and Motor development. Prentice, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
 - 21) 山本高司 (1983) 動作の調整能. 杏林書院, 東京.
 - 22) 柳田三洋子 (1986) 小児のめまい平衡障害に関する研究: 第二編健常小児の重心動揺, *Equilibrium Res.*, 45(4) : 332-344