直立時動揺と疲労

山 本 高 司*

CHANGES IN POSTURAL SWAY RELATED TO FATIGUE

TAKASHI YAMAMOTO

The purpose of the present study is to investigate the influence on postural sway of such condition as fatigue resulting from muscular work. Twelve of the male adults (26.7 ± 6.2 yrs old) of a certain airport ground service company were served as the experimental subjects. The measurement of postural sway has been made by measuring the weight at two points of the supporting platform. The degree of postural sway was calculated by using an electronic computer (HITAC-10). The measurement was carried out before and after the work on each day during the experimental days. The following results were obtained.

On the 1st day with eyes open the ratio of the postural sway after the work to that of before the work ('after'/'before') was 1.25, with eyes closed 1.13, respectively. On the 2nd day with eyes open it was 1.38, with eyes closed 1.53, respectively. On the last day with eyes open it was 1.47, with eyes closed 1.23, respectively. The amount of postural sway after the work was greater as compared with that of before the work. The statistical analysis showed that these difference in postural sway was significant ($P < 0.05-0.001$). The influence of several factors on the changes in postural sway was discussed, together with the experimental results obtained by other authors. In conclusion, these results suggest that balance impairment is mainly due to work-related fatigue.

(J. Physical Fitness Japan 1979, 28 : 18~24)

I. 緒 言

ヒトはその重心高も大きく、床における支持面も小さいので、力学的にきわめて不安定な存在である。したがって、「気をつけ」の姿勢をとり、できるだけ動かずに静止位を保っていても、微細にみれば、絶えず、前後左右に揺れている。この身体の揺れを称して動揺 (postural sway, PS) と言う。この PS の原因を分析してみた場合、心拍動⁹⁾や呼吸運動⁵⁾に起因する部分もあるが、主として、直立姿勢を保つための筋の絶間ざる緊張弛緩⁸⁾¹¹⁾があげられよう。換言すれば、この PS は、主に、筋神経系の調節機能の状態を反映しているものと考えられる。したがって、作業に伴う疲労によって筋神経系の調節機能が減弱し、PS の増大することが予想される。合田¹⁾と山田¹⁾、亀井⁸⁾、Ohnishi¹³⁾ および Sugano & Takeya¹⁵⁾ たちは、

疲労によって PS の増大することを報告している。他方、八木 & 小川¹⁷⁾は、疲労と動揺度との間に一定の関係はなかったと報告している。このように、疲労によって PS は増大するという報告と増大しないという報告があり、一致した結論は得られていない。そこで、本研究では、空港貨物取扱いの現業者を対象として作業前、作業半ばおよび作業後における PS を測定し、疲労と PS との関係について検討した。

なお、直立時動揺を表わすのに文献的には種々の term が使用されているが、本研究では疲労が筋神経系の調節機能におよぼす影響を論じているので、Hellebrandt (Am. J. Physiol. 121, 471, 1938) にならい、postural sway という言葉を用いた。

II. 実験方法

A. 直立時動揺の測定法

* 中京大学体育学部運動生理学教室 Laboratory for Exercise Physiology and Biomechanics, School of Physical Education, Chukyo University, Toyota, Aichi, JAPAN

1. 測定装置

PS の測定装置は、被検者がのる透明なアクリル樹脂板と荷重センサーからなる。アクリル樹脂板は1辺が40cm、厚さ2cm、重量3.8kgの正方形のものである。荷重センサー（LM-100K型、共和電業製）はアクリル樹脂板の底面の4隅に、対角線の中心から21.9cm離れたところにそれぞれ装着された。身体が揺れることにより、4点のセンサーにかかる荷重は変化する。この荷重の変化は歪ゲージを内蔵したセンサーによって電気信号に変換される。今回の測定では、被検者の足元の前方および右側方に装着した2つのセンサーから荷重変動を誘導し、それぞれ前後および左右方

Fig. 1. Sample records of postural sway.
Explanation in text.

向の荷重変動として代表させた。荷重センサーからの出力は動歪測定器（DS6-MTH型、新興通信工業製）で増幅し、データレコーダー（DFM-45型、Sony製）で磁気テープに記録した。また、ペン書きオシログラフ（ME-20TR型、日本光電製）を用いて、データの記録状態をモニターした。なお、使用した荷重センサーの固有振動数は53000Hz、応答振動数は9000Hzであった。

2. 動揺度の表わし方

Fig. 1 は上述の動揺測定装置を用いて得られた直立時の動揺曲線である。Channel 1 および 3 は、それぞれ重心の前後および左右方向の揺れによる荷重変動をあらわし、Channel 2 および 4 は、それぞれ Channel 1 および 3 の電子計算機からの再生波形である。

Fig. 2. Schematic illustration for the calculation of postural sway. The upper curve shows the body movement of forward and backward directions, the lower right and left, respectively. Explanation in text.

Fig. 2 は動揺度の算出法を説明するための模式図であり、上段および下段がそれぞれ前後および左右方向への荷重変動をあらわす。動揺度は、動揺曲線の中心線すなわち平均値（零レベル）を示す直線（時間軸でもある）から動揺曲線までの振幅を117msec毎に256個読みとってその絶対値の和を前後および左右方向について求め、その両者の総和をもってした。すなわち、Fig. 2 において、

$$\sum_{k=1}^{256} A_k = 0$$

$$\sum_{k=1}^{256} B_k = 0$$

となるような基線を求め、

$$\sum_{k=1}^{256} |A_k| + \sum_{k=1}^{256} |B_k|$$

の値を個人の動揺度とした。したがって、分析時間は、 $117\text{msec} \times 256 = 29.952$ 秒であった。動揺度は開眼および閉眼のそれぞれについて求めた。これらの計算はすべて電子計算機 (HITAC-10) で行なった。

B. 被検者

被検者は空港貨物取扱い業務に従事する某社の男子作業員12名である。Table 1は被検者の年齢および経験年数を示したものである。

Table 1. Age and business experience of the subjects.

Subject	Age (yrs)	Business experience (yrs)
T. I.	38	9
H. It.	36	6
H. Iw.	23	1
T. M.	25	4
Y. N.	23	3
K. S.	20	1
M. S.	24	4
Y. T.	22	2
T. O.	28	1
T. U.	28	1
Y. U.	18	0.5
E. Y.	35	6
Mean	26.7	3.21
S. D.	6.2	2.56

C. 測定日時

測定は1975年8月20日から同23日の間に行なわれた。

作業時間は、第1日目(8月20日)が14時30分から22時(被検者12名)、第2日目(8月21日)が14時から21時30分(被検者5名)と16時から23時30分(被検者7名)、第3日目(8月22~23日)が20時から翌日の9時(被検者12名)までであった。PSの測定は、原則として各作業の前後に行なったが、場合によっては夕食前および仮眠前にも行なった。測定に要した時間は1人2分以内であった。

D. 測定手順

被検者は、測定の開始に先立って、測定上留意すべき点の教示を受けた。すなわち、測定に当たっては、①履物を脱いで支持台の上で自然な直立姿

勢をとること、②両足は開かないこと、③開眼の場合は正面をみて脇見しないことなどの点を留意させた。最初に、開眼で30数秒間測定し、引続き閉眼で30数秒間測定を行ない、分析時間として開眼閉眼のそれぞれについて少なくとも30秒間確保できるようにした。

III. 実験結果

Fig. 3は、延べ4日間にわたる作業に伴うPSの変化をプロットしたものである。図の左の部分は第1日目におけるPSの推移を示したものである。第1日目の作業時間は14時30分から22時までであったが、動揺度は、開眼の場合、作業時間の経過に伴って増加する傾向にあり、作業前値を100とした場合、夕食前(約16時30分から17時30分の頃)における値は123であり、作業後値は125であった。閉眼の場合は、作業前値100に対して夕食前は116、作業後は113であった。

Fig. 3の中央部分は、第2日目におけるPSの推移を示したものである。第2日目の作業時間は、A班(N=5)が14時から21時30分であり、B班(N=7)が16時から23時30分であり、夕食時間はA班が16時から1時間、B班が18時から1時間であった。第2日目においても第1日目と同様に作業の経過に伴い、動揺度の増加する傾向がみられた。すなわち、開眼においては、作業前値を100とした場合、夕食時には121であり、作業後には138であった。閉眼においても同様に作業前値を100とした場合、夕食時は130、作業後は153であった。

Fig. 3の右の部分は、第3日目におけるPSの推移をプロットしたものである。第3日目は22時から翌日の9時までの夜勤であり、その間に3時45分から3時間の仮眠時間があった。PSの推移は、これまでと同様に、やはり作業時間の経過に伴い、増加する傾向にあった。すなわち、作業前値を100とすると、開眼の場合、仮眠時には125であり、作業後には147であった。閉眼の場合は、作業前値100に対して仮眠時には101、作業後には123であった。

Table 2は作業前と作業後における平均値、標準偏差およびt検定の結果を開眼、閉眼別に示したものである。第1日目においては、作業前後間

Fig. 3. Changes in postural sway with the passage of time. Open circles mean the values with eyes open, and closed with eyes closed, respectively. Square symbols and vertical lines show averages and standard deviations respectively.

Table 2. Comparison of the amounts of postural sway between before and after the work.

Date	State of eyes	Before work Mean $\pm$ S.D.	After work Mean $\pm$ S.D.	df	t	p
Aug. 20	open	11274.8 $\pm$ 1995.8 (N=4)	14053.0 $\pm$ 3673.6 (N=12)	14	1.398	
	closed	15244.2 $\pm$ 4628.5 (N=5)	17259.5 $\pm$ 6098.0 (N=12)	15	0.624	
Aug. 21	open	10183.9 $\pm$ 3272.7 (N=12)	14008.3 $\pm$ 4012.1 (N=12)	22	2.445	<0.05
	closed	12728.1 $\pm$ 5313.9 (N=12)	19451.9 $\pm$ 630.4 (N=12)	22	2.705	<0.05
Aug 22-23	open	8847.1 $\pm$ 1693.4 (N=12)	12985.8 $\pm$ 3464.2 (N=12)	22	3.560	<0.01
	closed	15142.3 $\pm$ 4558.6 (N=12)	18692.4 $\pm$ 11298.1 (N=12)	22	0.966	
Total	open	9766.8 $\pm$ 2674.0 (N=28)	13682.3 $\pm$ 3756.0 (N=36)	62	4.598	<0.001
	closed	14160.9 $\pm$ 5042.6 (N=29)	18467.9 $\pm$ 8307.8 (N=36)	63	2.414	<0.05

に有意差は認められなかった。第1日目の作業前値は4～5名の被検者のものである。したがって、Nが比較的少数のため作業前後間の平均値の差が有意なものに至らなかったものと考えられる。第2日目においては、開眼および閉眼のいずれの条件下においても作業前後間に有意差が認められた。第3日目においては、開眼の場合のみ作

業前後間に有意差が認められた。全期間を含めて作業前後の平均値の差を開眼および閉眼別にt検定したところ、いずれの場合でも0.1～5%の危険率で有意差が認められた。

IV. 考 察

作業に伴うPSの増加を論ずる場合、まず、PS

が何に起因するかを明らかにしておく必要がある。PS の原因については過去に幾人かの研究者によって論じられている。Hinsdale⁵⁾ は PS と呼吸との関係について言及しており、Henderson³⁾ は心拍動によって体が動くことを報告している。このように、PS には呼吸循環器系に起因する成分が含まれている。しかし、PS の主な原因は亀井⁸⁾ および森¹¹⁾ の指摘するように、直立姿勢を維持するための抗重力筋における連続的な張力調節にあると考えられる。

本研究においては、作業前後の動揺度に有意な差がみられた。作業あるいは運動に伴って PS の増加するという報告は過去に幾つかある⁹⁾¹¹⁾⁸⁾¹³⁾¹⁵⁾。Leitenstorfer⁹⁾ は頭部動揺描写器 (Kephalograph; cephalograph) を用い、種々の兵業によって PS の増加することおよび作業に習熟することによって PS の減少することを報告している。合田&山田¹⁾ は、体操の得意な高等女学校生徒に1時間の体操を課し、頭部動揺描写器を用いてその体操前後の PS を比較し、運動後には頭部動揺図の輪郭が大きくなることをみた。亀井⁸⁾ は、同じく頭部動揺描写器を用いて兵業前後の PS を記録し、作業によって PS の増加することを認めた。Ohnishi¹³⁾ は動揺曲線を 0.06~3.8Hz の帯域内で周波数分析し、自転車エルゴメータ作業およびスクワット (squat) によって PS の増加することをみている。Sugano & Takeya¹⁵⁾ は自転車エルゴメータを用いて10分間のペダリングを課し、運動後に PS の増加することを認めている。

他方、八木&小川¹⁷⁾ は、綿紡織業に従事する女子を対象として作業前後の頭部動揺の軌跡の長さおよび頭部動揺図の面積を比較したが、作業前後間に有意な差は認められなかったとしている。彼等¹⁷⁾ はこの結果の原因として練習効果、身長の日内変動、早朝作業前における平衡能の不良をあげている。また、彼等¹⁷⁾ は測定値のばらつきが大きかったことも1つの理由としており、これは、測定時間が15秒間と短かったためであるとしている。確かに作業前後における動揺度を比較する場合、上述の点を考慮する必要がある。

PS と練習効果との関係について調べたものとしては、Benedict et al²⁾ の報告がある。すなわち、Carnegie 財団栄養学研究室所属の Miles¹⁰⁾

は、ataxiometer を用い、8 人の被検者について、1 週間に 6 日の割合で、6 月17日から7月31日までの 36 日間連続して PS を記録した。そして、彼¹⁰⁾ は 1 週間毎の動揺度の平均値の推移を 6 週にわたって求めたところ、574, 506, 486, 482, 489, 506mm であった。その後、6 週間の休暇の後に、9 月13日から同25日までの 2 週間にわたって前と同様に PS を測定したところ、週平均の動揺度は 530, 490mm であった。週平均の動揺度は第 1 週から第 4 週にかけて、漸次、減少傾向を示していることが窺える。第 5 週目および第 6 週目の PS は増加しているが、これは測定が長期間にわたったことおよび休暇が近づいたために身体的緊張が緩んだためとしている。9 月13日から 1 週間の動揺平均値は 530mm であったが、最初の週と比較すると、なお、7.6% の練習効果が残留していたという。また、同じく Miles¹⁰⁾ は、成人男女12名 (男子 3 名、女子 9 名) について、休日を除いて連続21日間、毎日午前 8 時から10時までの間に ataxiometer を用いて頭部動揺を記録した。21日間を 7 日毎に区切って 3 区間の平均値を算出したところ、643, 560 および 528mm となり姿勢の安定度の向上が得られたとしている。八木&小川¹⁷⁾ は紡績工場の女子の作業前後の PS を 2 週間にわたって毎日測定し、第 1 週目と第 2 週目の値を作業前後別に算出したところ、動揺の軌跡の長さにおいては作業前値で 21.8%, 作業後値で 12.2% の練習効果を、また、動揺図の面積においても作業前値および作業後値でそれぞれ 20.9% および 6.8% の練習効果を認め、第 1 週目より第 2 週目の方が動揺度の少なかったことを報告している。本研究においても、比較的作業時刻の類似している第 1 日目と第 2 日目の作業前値および夕食前値のそれぞれについて比較してみると、第 2 日目の PS の方が小さい傾向にあり、多少の練習効果の存在していることが窺われる。しかし、それでもなお作業時間の経過に伴って PS が増加しているので、練習効果よりもっと影響の大きい要因について考察する必要があると考えられる。

第 2 に、身長の日内変動が動揺度にどの程度影響するかが問題である。この点に関して、八木&小川¹⁷⁾ も指摘しているごとく頭部動揺描写器においては若干問題となろうが、本研究においては

PS の記録に荷重法を用いているので、重心高の差異による荷重の差は無視し得るものと考えられる。

第3に、早朝における平衡能の不良に関し、日高⁹⁾は、早朝においては直立維持能力が比較的無いこと、および猪飼⁷⁾と同様に、午後に至って動揺度が安定することを述べ、実験時刻として午後1時から同5時を採用している。この時刻において動揺度が比較的安定しているとすれば、本研究における作業前値から夕食時までのPSの増加の原因としては、平衡能そのものの日内変動とは別の要因を考慮しなければならないと考えられる。また、第3日目の作業前値の測定時刻が午後8時にもかかわらず、第1日目および第2日目の夕食時の値より小さいことは明らかに平衡能の日内変動以外の要因すなわち疲労の要因の存在することを示唆するものと言えよう。さらに、第3日目の作業前値が第1日目および第2日目の作業後値と比較して大幅に小さいのも、休息による疲労の除去の結果であると考えられ、逆に言えば、疲労の影響が大きいことを窺わせるものである。

第4に、分析時間の問題であるが、八木&小川¹⁷⁾の指摘するごとく、分析時間が短かいと1個の偶発的な動きによっても動揺度の大きくなってしまふことが考えられる。筆者¹⁹⁾は、各研究者によりどの程度の分析時間が採用されているかを調べたことがあるが、短かいもので15秒、長いもので7分20秒であった。しかし、あまり長い分析時間をとってもそれだけで疲労することも考えられ、この分析時間の問題に関しては、さらに検討される必要がある。

疲労によってPSの増加することは、現象論的には認められているが、そのメカニズムについては、あまり論じられていないようである。疲労によるPSの増加の原因としては、先ず第1に、抗重力筋における γ 系を介した筋力調節の不良が考えられる。Shambes¹⁴⁾ は、ヒトの坐骨神経に含まれる γ 運動神経を procaine でブロック (blockade) するとPSの増加することを観察した。さらに、Mori et al¹²⁾ は、4肢駐立姿勢を保つイヌの足部に pontocaine を注入して求心性神経線維をブロックすると、四肢の足底にかかる力曲線に、正常時にはみられない不規則な振

動波の加わることを観察した。この不規則な波形が新たに加わったのは、足趾部からの求心性インパルスが遮断されたため筋力調節に不調を来したためとしている。

第2に、脊髄よりも上位の中枢における筋力調節機序の不調が考えられる。猪飼⁶⁾は、PSの周期には1~2秒のものと60~70秒のものとがあり、後者の大周期のものは脳幹に中枢をおく反射的調節および大脳からの意志的調節に起因していると述べている。山本¹⁸⁾は、反復運動負荷前後のヒトの左側長橈側手根伸筋における随意収縮中の単一神経筋単位の放電間隔 (τ) を調べ、筋疲労によって個々の τ の不規則な変動 (irregular fluctuation, IF) と数個以上の τ にまたがる緩慢な揺れ (slow undulation, SU) とが増加することをみた。時実&津山¹⁶⁾ によれば、IFは脊髄前柱細胞の興奮機序そのものに由来するのに対し、SUは呼吸中枢のほかに大脳皮質やその他の調節機序の興奮単位の変動に依るものであるという。これらの上位中枢における興奮単位の変動はPSの増加をもたらす1つの要因になっているものと考えられる。

V. 要 約

空港貨物取扱業務に従事する某社の男子現業員12名 (26.7 $\pm$ 6.2才) を対象とし、作業前、作業半ば、および作業後における直立時の動揺 (postural sway) を、荷重センサーと支持板からなる動揺測定装置を用いて記録した。測定は第1日目、2日目、3日目と連続して行なわれた。その結果、次の事柄が明らかとなった。

第1日目においては、開眼の場合、作業前値を100とした時に、作業半ばおよび作業後では123, 125であり、閉眼の場合は、順に、100, 116, 113であった。同様にして、第2日目の開眼の場合は、順に、100, 121, 138であり、閉眼の場合は100, 130, 153であった。第3日目の徹夜作業においては、開眼の場合、順に、100, 125, 147であり、閉眼では100, 101, 123であった。したがって、いずれの日においても直立時の動揺は、作業時間の経過と共に増加の傾向を示した。t検定の結果、これらの増加は5~0.1%の危険率で有意であった。

一般に、直立時動揺の変動をもたらす要因としては種々のものがあげられるが、本研究における動揺の増加の主要な原因としては、作業自体に伴う疲労によって姿勢調節能が一時的に減弱したことが考えられる。

本研究を進めるにあたり、動揺度の算出に関しては労働科学研究所飯田裕康氏から貴重な御助力を得た。また、同大西徳明氏からは動揺測定装置を拝借した。さらに、被検者の諸氏並びに関係各位には御多忙中にもかかわらず便宜を計っていただいた。記して謝意を表する次第である。なお、本研究の1部は労働科学研究所在職中になされたものであり、第45回日本体力医学会関東地方会(1976年4月17日)²⁰⁾において報告した。

(受付 昭和53年9月14日)

文 献

- 1) 合田武城, 山田善三 (1926) : 体育に関する研究, 日本学校衛生, **14**, 35-47.
- 2) Benedict, F.G., Miles, W.R., Roth, P. & Smith, H.M. (1919) : Human vitality and efficiency under prolonged restricted diet. Carnegie Institution of Washington, Pub. No. **280**, Psychological Sections, Washington [Miles 10) から引用]
- 3) Henderson, Y. (1905) : The mass-movements of the circulation as shown by a recoi' curve. Am. J. Physiol. **14**, 287-298.
- 4) 日高虎之助 (1952) : 人体平衡機に関する研究—立位における身体動揺の描記的観察—, 精神経誌, **53**, 401-414.
- 5) Hinsdale, G. (1890) Observations on station with reference to respiration. New York Med. J. **51**, 292 [Miles 10) から引用]
- 6) 猪飼道夫 (1944) 直立姿勢の研究, 第1, 直立時動揺曲線の分析, 日本生理誌, **9**, 197-199.
- 7) 猪飼道夫 (1944) 直立姿勢の研究, 第2, 直立時動揺の計量, 日本生理誌, **9**, 200-203.
- 8) 亀井盛隆 (1931) 人体直立時ノ動揺ニ関スル研究. 軍医誌, 第**218**号, 1219-1242.
- 9) Leitenstorfer (1897) : Das militärische Training auf physiologischer und praktischer Grundlage. Stuttgart. [八木 & 小川 17) から引用]
- 10) Miles, W.R. (1922) : Static equilibrium as a useful test of motor control. J. Indust. Hyg. **3**, 316-331.
- 11) 森 茂美(1972) : 直立の分析. 生体の運動機構とその制御 (真島英信, 猪飼道夫編), 初版, 第5章—Ⅲ, 杏林書院, 東京, 262-277.
- 12) Mori, S., Reynolds, P.J. & Brookhart, J.M. (1970) : Contribution of pedal afferents to postural control in the dog. Am. J. Physiol. **218**, 726-734.
- 13) Ohnishi, N. (1969) : Frequency analysis of body sway in the erect position with special reference to fatigue of the lower limbs. XVI Int. Cong. Occup. Health, Tokyo, 428-430.
- 14) Shambes, G.M. (1969) Influence of the fusimotor system on stance and volitional movement in normal man. Am. J. Phys. Med. **48**, 225-236.
- 15) Sugano, H. & Takeya, T. (1970) : Measurement of body movement and its clinical application. Jap. J. Physiol. **20**, 296-308.
- 16) 時夷利彦, 津山直一 (1956) : 正常筋電図の性質. 筋電図の臨床, 初版, 第3章, 協同書院, 東京, 44-90.
- 17) 八木高次, 小川惟熙 (1938) : Kephalographie 並びにその疲労測定に対する意義について. 労働科学, **15**, 661-698.
- 18) 山本理平(1952) : 随意運動による筋疲労の筋電図学的研究. 国立公衆衛生院研究報告, **2**, 11-13.
- 19) 山本高司 (1977) : 運動と平衡機能. 体育の科学, **27**, 283-288.
- 20) 山本高司, 大西徳明(1976) : 直立姿勢保持時の Body sway の分析法に関する若干の考察. 体力科学, **25**, 107-108.