

# 平衡維持機能に関する研究<sup>i)</sup>, ii)

齋藤次郎, 大川雅司, 河原節雄

## Research & Development on Human Equilibrium Function Measuring Device

by J. Saito M. Ohkawa S. Kawahara

"Human Equilibrium Function Measuring Device" that was developed, consisted, of balancing stage, slant distance amplifier with detector, balancing-servo mechanism and pen-recorder. Using oil-damper with bellows and cutting DC in slant distance were the main features of this device.

A null hypothesis that main factor of human equilibrium function were governed by physical conditions including volume, mass quantity, and center of gravity, were tested by measuring of equilibrium function and physical conditions.

112 Tobisyoku, as high ground level worker, consisted of 5 age-group, were subjected individually.

Finding are as follows: 1) The slant distance wave (integral value or coefficient of variation) is not found to be functions both human physical conditions and age. 2) It is confirmed that human equilibrium function is governed by human feedback mechanism as main factor and physical conditions as sub-factor. 3) By using integral value, human equilibrium function is discriminated. 4) DC cutting technique is effective. 5) Evaluation table of human equilibrium function is organized.

### 1. 緒言

最近の技術革新により生じつつある、新しい質的变化をもたらす新作業職種とは別に、基本的には原始的作業であっても危険度がより高くなりつつある職種がある。この典型例としてわれわれは、建築物の高層化に伴い作業場面がより高くなりつつある、高所作業を選択し、高所作業者の人的能力のうちで重要な要因と思われる平衡維持機能に関する一連の研究を実施した。

### 2. 研究目的

平衡機能に関する方法論的研究には、わが国でも総合研究として「平衡維持機能検査法」<sup>1)</sup>、また各個研究としては、例えば、頭部動揺の加速度成分からのアプローチ<sup>2)</sup>、足踏検査法の開発<sup>3)</sup>、運動視における姿勢の動

揺<sup>4)</sup>、斜面台検査加速度記録法<sup>5)</sup>などがみられ、さらに最近では、ストレインゲージの利用<sup>6)</sup>も考案されている。これらの諸方法に対し、主として現場向に採用されてきたのは不安定抜方式による測定法であるが、いずれも一般に平衡機能研究には多くの隘路があって統一的な学説が形成されていない。

そこで、本研究は、つぎの一連の目的をもって進められた。

1) 実用的利点をもつ不安定抜方式につき、理論上および機構上の致命的欠陥を排除して新たな測定装置を開発する。

2) 平衡維持機能の仮説的機構の吟味、すなわち、a) 平衡維持機能の物理系による支配を仮定し、重心高、質量、体積、重心高と質量のモーメントなどとの関数関係の有無、およびb) 情報処理系としてのフィード

i) 本研究の要旨は第4回日本人間工学会において発表した

ii) 本研究は特別研究調整促進費による「人的能力の評価に関する研究」の一部である。

バック構成との関数関係の有無に関し、実験的に吟味する。なお、仮説a)で用いる4種の指標の測定法につき新たな方式を考案する。

3) 開発装置による、測定指標の吟味、および平衡維持機能レベルの区分を設定する。

### 3. 実施手順

つぎの手順による。

- 1) 開発
  - a) 平衡維持機能測定装置
  - b) 重心高、質量、体積、重心高と質量のモーメントの算出法

ントの算出法

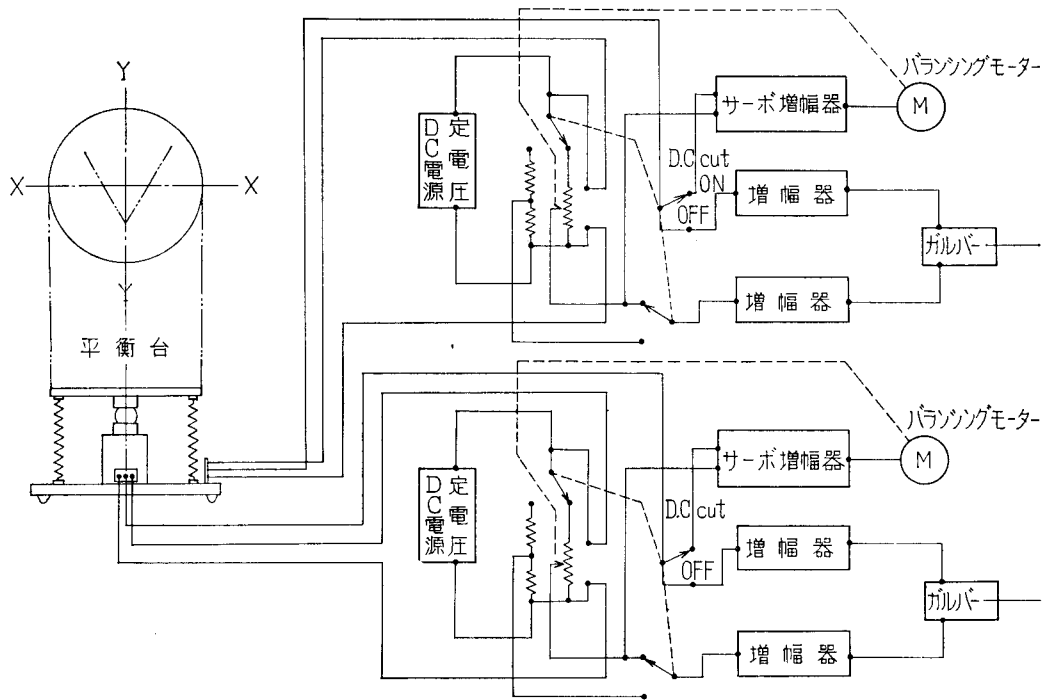
### 2) 測定

- a) 平衡維持機能
- b) 重心高、質量、体積、重心高と質量のモーメントの算出に必要な身体計測
- 3) データ処理
- 4) 評価

### 4. 平衡維持機能測定装置

Fig. 1 のように平衡台、傾斜距離増巾器、平衡サーボ機構、記録計からなる。

Fig. 1 Block diagram of "Human Equilibrium Function Measuring Device"



#### 1) 平衡台

台板は直径500mmの円板であり、板面の円周上での最大傾斜距離は±75mmになる。Fig. 2に平衡台の構造図を示す。

#### 2) 傾斜距離信号発生装置

平衡板の傾斜距離に応じて直線的に可変抵抗器の低抗値が変化する必要がある。そこでFig. 3のように平衡板の最大端から垂直方向に展張した糸の移動量をスプリングによってドラムに巻込み、そのドラムの軸と直線的な低抗変化特性をもつ低抗器の軸とを連結した。傾斜距離増巾器の配線図をFig. 4に示す。なお、被験者の正面側が極座標系で0°方向にあるとき、90°-270°軸をX方向0°

-180°軸をY方向とし、傾斜距離信号は南方向の両端計4ヶ所から誘導する。

#### 3) 平衡サーボ機構

装置の周波数特性はFig. 5のように、増巾の特性をサーボ特性によって相殺し、4c/sまではフラットであるが、それ以下1c/sまでは直線的に減衰させ、1c/s以下の直流分はカットし得る機構とした。この理由は本装置の特徴の項で後述する。Fig. 6に配線図を示す。

#### 4) 記録計

4系統のペンオシロを用いた。

#### 5) 装置の特徴

この装置は現行の同種の他の装置がもつ、2点の根本

Fig. 2 Schematic diagram of balancing stage

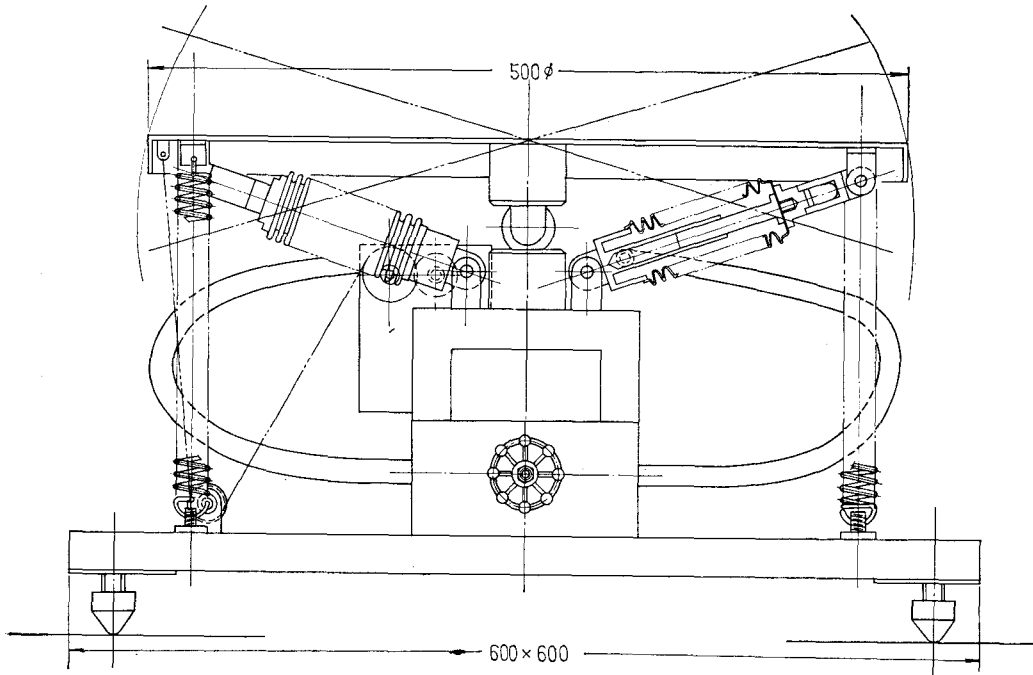


Fig. 3 Mechanism of slant distance detector

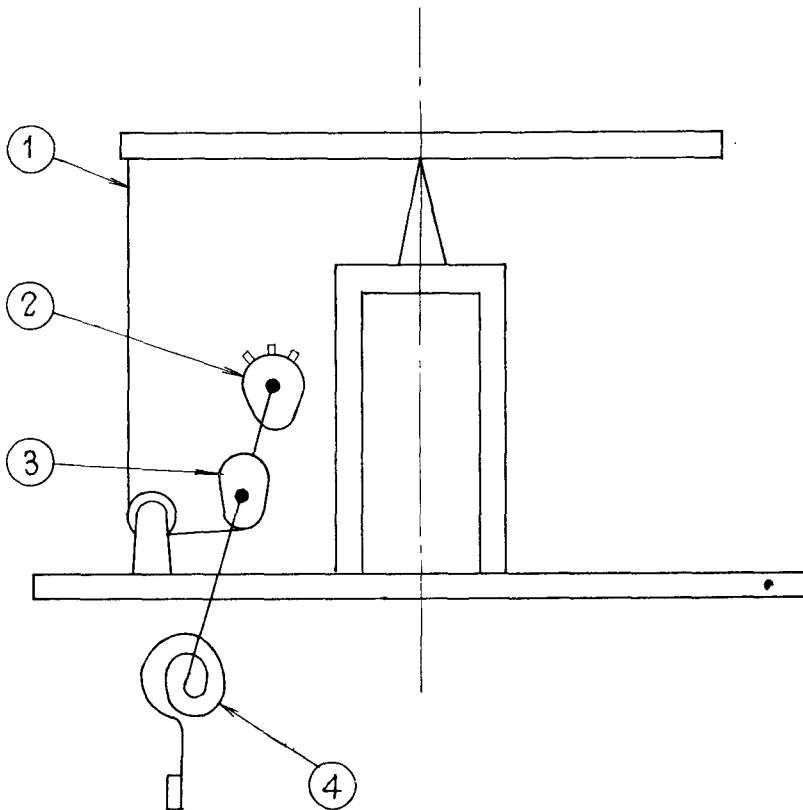


Fig. 4 Wiring diagram of slant distance amplifier

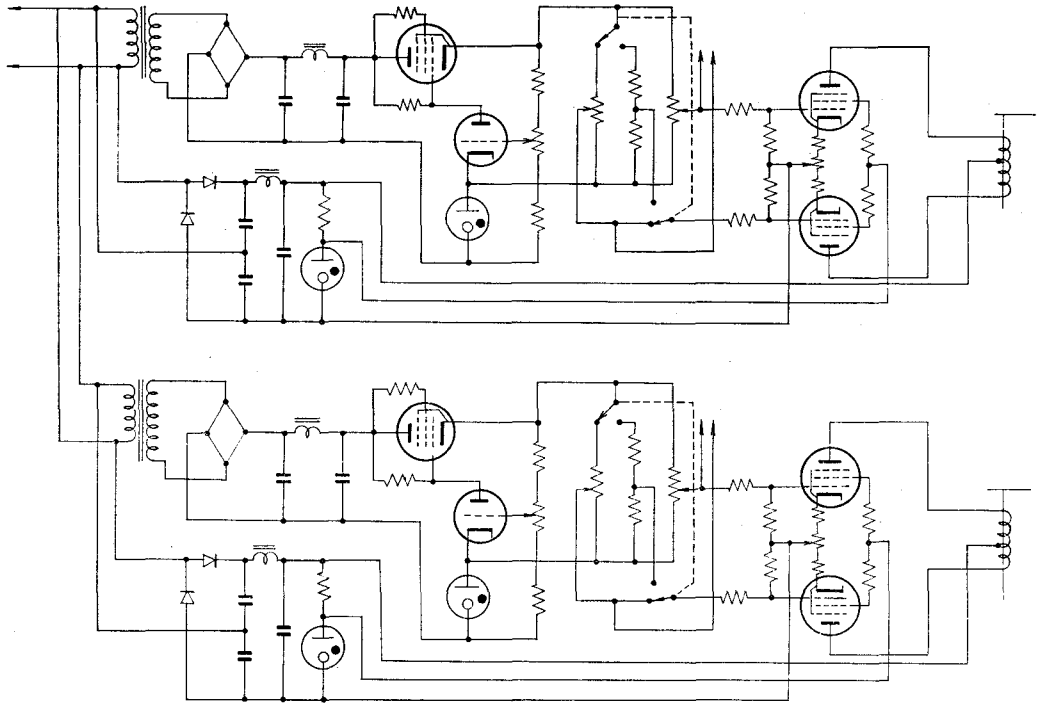
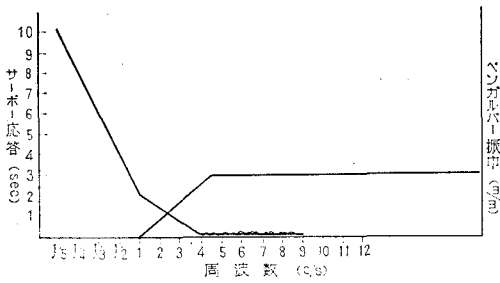


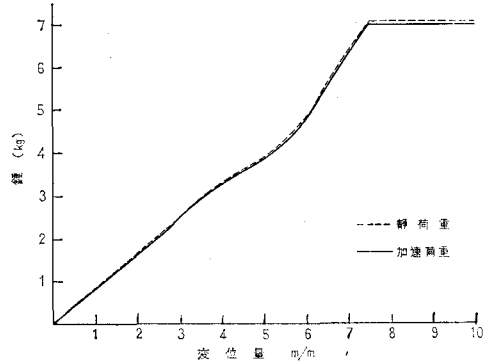
Fig. 5 Resultant frequency characteristics of device



陥をつぎのように排除した。

a) ベローズを用いたオイルダンパーの使用 現行の不安定板式測定装置の多くにみられるスプリング式によると、平衡板の固有振動による過渡現象が発生し、人体のフィードバックの時定数とは無関係な運動、すなわち平衡台の固有振動の振動周期と人体の固有振動の振動周期との間に位相ずれが生ずる。従って記録される波形は不安定レベルそのものを表示することにはならない。そこで過渡現象を除去するために、一定の伸縮運動方向を規定する伸縮ロットを内蔵したオイルダンパーを考案した。なお、オイルダンパーを使用した平衡台の無負荷特性を Fig. 7 に示す。

Fig. 7 No load characteristics of balancing stage



b) 傾斜距離記録における直流分の除去 一般に平衡台からの信号は、傾斜距離による信号(直流的信号)と不安定による信号(交流的信号)の混合である。そこで平衡台がある程度、傾斜したままでも平衡状態の維持が可能な場合、波形をそのまま処理して、例えば積分値を指標に平衡レベルを求めることは、誤差を包含することになる。従って不安定による信号のみを誘導できるように、直流分の除去を可能にした。

## 5. その他の装置

Fig. 6 Wiring diagram of balance servo amplifier

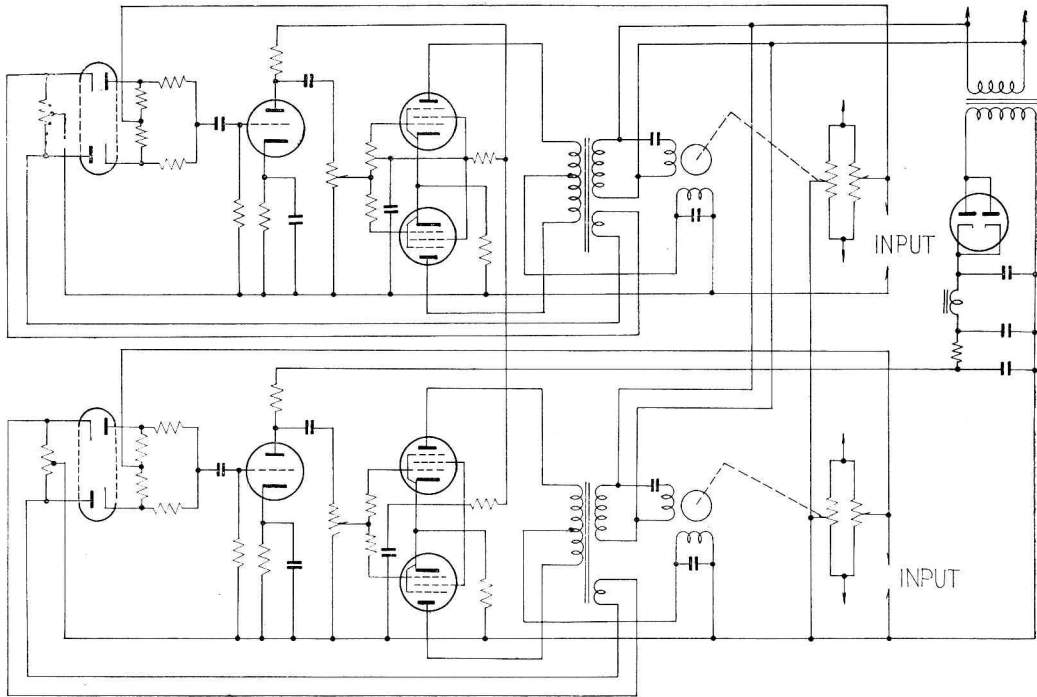


Photo. 1

三次元的な身体計測値を得るために、先に開発した「人間工学用三次元描写装置」<sup>7)</sup>を用いた。これは例えば正面と側面のような直交二方向から、一コマづつもしくは一定時間隔で描写が可能な装置で、描写機、ジャイロ台、支柱、タイマーおよびリレーボックスで構成する。Photo. 1に全景を、Fig. 8に機能的構成を示す。

また後述する波型処理にはカーブトレサを、データ処理にはEDPS (IBM7094, MELCOM1530を使用した。

## 6. 被験者

高所作業者の代表例としてとび職 112 名を任意に抽出した。その年齢構成は 20~24才19名、25~29才30名、30~34才28名、35~39才22名、40~44才13名である。

## 7. 重心高体積質量の算出のための身体計測

1)

Fig. 9 のような身体積模式図を作成し、身体分断による計算に必要な33項目を選択した。使用した測定器別に項目を列挙するとつぎのとおりである。

マルチン式測定器…… 1. 下腿下辺囲, 2 下腿太部囲, 3. 下腿上辺囲, 4. 大腿下辺囲, 5. 大腿上辺囲, 6.

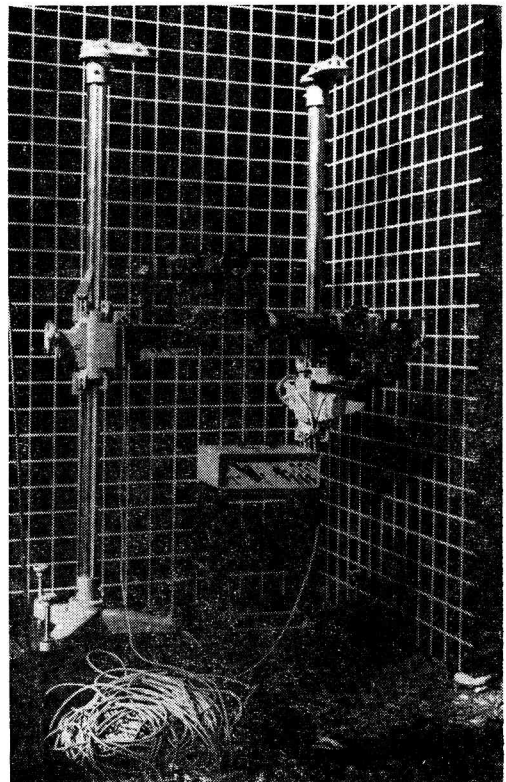


Fig. 8 Block diagram of "3D-Photo-Measuring Device for Human Factors Engineering"

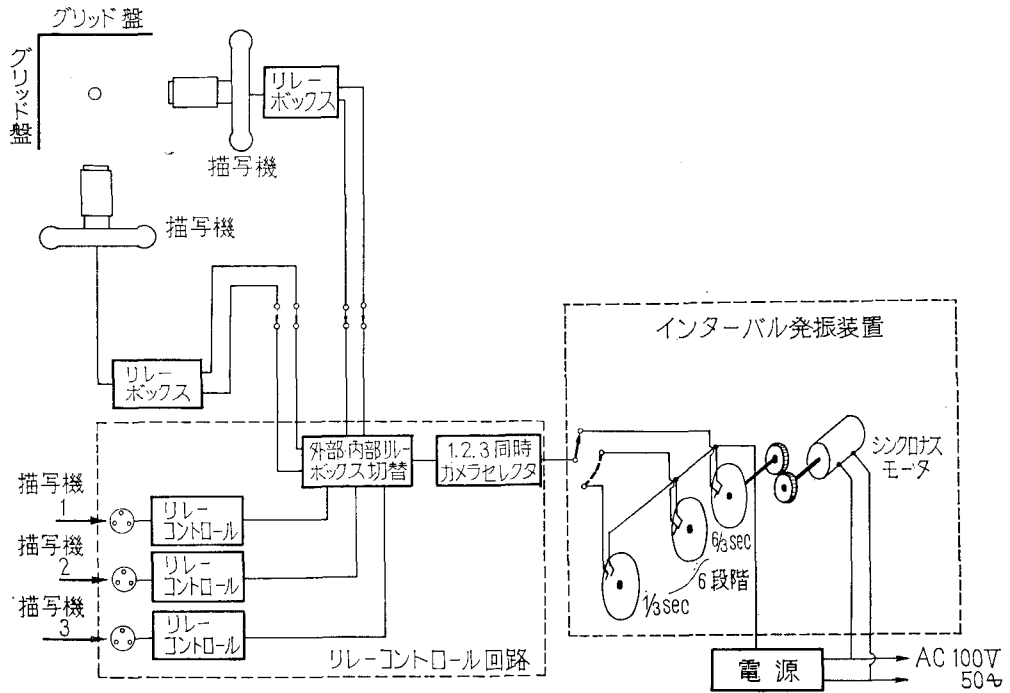
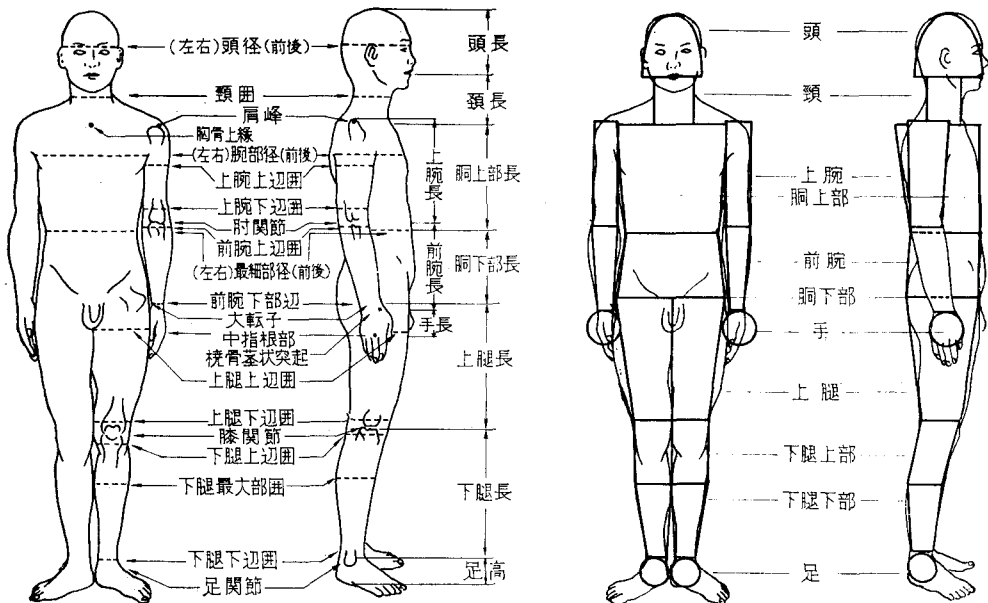


Fig. 9 Model picture of human body



足高, 7. 前腕下辺囲, 8. 前腕上辺囲, 9. 上腕下辺囲, 10. 上腕上辺囲, 11. 頸囲

体重計……12. 体重

水槽, マスリンダ……13. 手部の体積, 14. 足部の体積

人間工学用三次元描写装置……15. 大転子幅, 16. 大転子部位前後径, 17. ウエスト部位左右径, 18. ウェイト部位前後径, 19. 胸部左右径, 20. 胸部前後径, 21. 頭部左右幅, 22. 頭部前後幅, 23. 下腿最大部高, 24. 膝関節部高, 25. 大転子高, 26. ウエスト部位高, 27. 胸骨上縁高, 28. 口点高, 29. 身長, 30. 中指根部高, 31. 撓骨茎状突起高, 32. 肘関節高, 33. 肩高

## 2) 身体計測値

個人別身体計測値の例を Table—1 に示す。

### 3) 体積, 質量, 重心高計算法

a. 体積V……Fig 9 の模式図のように, 頭部は回転だ円半球体, 頸部は直円錐体, 胴部, 上腕部, 前腕部, 大腿部, 下腿部の各部は載頭錐体またはその組合せとみなし, 身体計測値から付録1の計算式によって得られる部位別の体積に手部和足部の実測値を加えて, 全身の体積を算出した。

b. 質量M……筋質量と骨質量の加算法により次式で算出した。

質量 $M = (\sum V - \text{骨体積}) \times \text{筋密度} + \text{骨質量}$

ただし骨質量値は松島<sup>8)</sup>の日本人骨質量値を被験者の身長比に換算して用いる簡易質量計算法により, 基準身長162.1mmにおける骨質量値を基準値とした。骨密度, 筋密度は松井<sup>9)</sup>の測定値から, それぞれ1.418, 1.076とした。骨体積は次式によった。

骨体積 = 骨質量 / 骨密度

付録2に個人別身体部位別質量計算式を示す。

c. 重心高……人体重心測定法には装置による方法<sup>10)11)</sup>もあるが, 本研究では人体を前項の計算によって得た質量を有する等質の物体とみなし, 付録3に示す計質式により部位別重心高から総合重心高を算出した。

Table—2に体積, 質量, 重心高の例を示す。

## 8 平衡維持機能測定

### 1) 測定条件

被験者には平衡板上で直立姿勢維持をさせる。練習時間は2分づつ計2回。予備実験で試行開始後, 1分以内で初期不安定状態を脱することを認めたので, 記録開始は測定状態開始から1分後とした。平衡板の円周上と記録紙上の振幅比は±75mm/±15mm, またチャートフィードは10mm/secの定速である。

### 2) 実験条件

開眼と閉眼, 傾斜距離記録における直流分の有無のおのおの組合せにより計4条件を設定した。

### 3) データ処理

測定の指標に積分値と変動係数を用いた。記録紙上のデータ処理は, カーブトレーサを用い, 2mm間隔で振幅を読み取らせ, デジタル量に変換(A-D変換)させた。さらにオフラインでEDPS (IBM7074, MELCOM1530)を用い, 体積範囲質, 量範囲, 重心高範囲, 質量×重心高のモーメント範囲の各別に, 各年齢群別と全サンプルの積分値と変動係数に関する平均値と標準偏差を算出した。全サンプルにつき, つぎの資料を示す。

Table-3 質量範囲別の積分値の平均値と標準偏差

Table-4 質量範囲別の変動係数の平均値と標準偏差

Table-5 重心高範囲別の積分値の平均値と標準偏差

Table-6 重心高範囲別の変動係数の平均値と標準偏差

Table-7 体積範囲別の積分値の平均値と標準偏差

Table-8 体積範囲別の変動係数の平均値と標準偏差

Table-9 質量×重心高のモーメント範囲別の積分値の平均値と標準偏差

Table-10 質量×重心高のモーメント範囲別の変動係数の平均値と標準偏差

## 9 考 察

1) 開発した測定装置によれば, 平衡機能解析の変数として用いた体積範囲別間, 質量範囲別間, 重心高範囲別間, 質量×重心高の範囲別間の変動には, 平均値, 標準偏差ともに一定の規則性がない。従って人間の平衡維持機能は, さきに帰無仮説をたてた物理系による支配よりも, フィードバック系による支配が有力であると推定できる。

2) 年齢群間にも一定の規則的変動性を認めない。従って平衡維持機能は, フィードバック機構を主因とし, 体積, 質量, 重心高, 質量×重心高のモーメント, 年齢などを副因とする複合系によって支配されているのであろう。これらの要因のウエイトは, 要因分析によって明らかになる。

3) 測定の指標として用いた積分値と変動係数のうち, 識別性が高いのは積分値である。

4) 傾斜距離記録における直流分の含有条件と除去条件を比較すれば, 積分値を指標とする場合, 後者の方が識別性は高い。このことは現行の不安板方式の測定装置にみられる誤り, すなわち直流的信号と交流的信号の混合記録に対し, われわれが意図した直流分除去の理論的根拠と併せて, 直流分除去条件の有効性が認められる。

5) 開発した装置によれば, 平衡維持機能は, 直流分除去条件における積分値によるのがもっとも有効であ

Table-1 Static anthropometric data (examp.)

年令群 検番		35 ~ 39														
		107	121	6	10	16	24	27	29	31	35	40	42	43	51	72
a.	下腿下辺	19.30	19.80	20.20	18.80	20.30	19.30	22.20	19.20	21.10	21.80	20.10	22.40	20.70	21.00	20.00
b.	下腿最大部	33.90	30.40	31.60	27.80	33.90	30.10	36.80	30.80	35.60	34.40	33.40	37.60	33.60	32.50	34.10
c.	下腿上下辺	31.70	29.20	39.70	27.00	31.80	29.30	34.00	28.70	32.60	30.20	29.20	33.40	32.30	29.00	30.90
d.	下腿上下	38.30	30.90	34.80	29.60	36.30	27.80	48.80	32.70	37.40	34.20	32.40	37.10	35.30	36.40	39.20
e.	下腿上下	51.60	42.90	44.00	40.60	50.00	44.40	53.50	42.10	49.50	49.50	46.00	56.10	48.50	48.70	50.00
f.	大転子巾	33.00	28.10	29.60	28.60	32.10	30.70	33.10	31.10	29.70	31.30	30.00	34.30	32.50	30.10	30.20
g.	大転子部位前後	24.40	17.70	19.10	17.80	21.60	20.00	22.80	19.80	19.00	20.50	17.70	28.10	20.60	23.00	20.10
i.	ウエスト部位左右	28.00	21.70	25.50	22.30	24.90	25.30	27.10	24.10	25.40	25.80	25.40	30.80	26.00	26.00	26.50
j.	ウエスト部位前後	24.70	15.80	18.50	16.20	12.70	19.70	22.40	17.20	19.80	20.40	16.80	27.40	17.10	21.50	20.50
k.	胸部位左右	30.70	25.60	27.80	16.40	30.30	29.10	29.50	29.60	28.50	26.90	27.90	31.80	29.10	28.70	27.70
l.	胸部位前後	21.90	18.10	21.50	19.00	20.10	19.60	20.50	22.60	20.50	21.10	23.40	23.70	20.10	21.80	21.60
m.	頸部前後	35.40	31.20	34.90	31.90	35.50	34.30	36.80	33.70	34.60	35.30	33.20	37.20	34.70	33.60	34.70
n.	頸部左右	15.30	14.40	15.40	15.60	15.50	15.80	14.50	14.80	1.510	15.20	15.40	18.40	15.70	15.60	15.50
o.	頸部前後	18.50	18.30	18.90	17.10	18.50	17.50	18.30	17.80	19.60	18.40	19.40	19.30	16.90	18.50	18.30
p.	前腕下	17.80	14.70	16.90	14.60	15.80	16.50	18.10	16.20	17.40	16.20	15.90	17.10	16.90	34.30	15.80
q.	前腕上下	24.30	24.50	25.60	23.00	26.70	23.80	26.80	25.40	25.20	23.70	24.60	28.70	25.20	25.20	25.30
r.	上腕上下	25.80	21.80	22.40	19.50	24.00	22.40	25.30	22.10	24.10	23.00	21.10	27.90	23.70	27.90	24.30
s.	腕關節	28.30	25.00	26.70	22.00	27.30	25.80	31.20	25.40	25.20	27.20	24.90	32.60	28.10	26.90	28.10
H <sub>1</sub> .	足関節	6.30	7.40	8.10	7.50	6.70	7.40	7.60	7.20	7.20	6.90	7.20	7.30	7.10	6.80	6.80
H <sub>2</sub> .	下腿最大部	28.30	31.70	32.40	28.50	29.00	33.10	31.70	31.50	28.90	32.40	31.20	32.40	32.80	28.40	30.10
H <sub>3</sub> .	膝關節部	43.90	43.50	49.50	43.20	43.20	46.40	43.00	43.80	42.40	46.50	34.40	43.70	45.40	39.50	44.20
H <sub>4</sub> .	大転子部	73.20	81.40	73.30	77.00	70.90	78.40	80.60	35.20	79.10	85.40	78.70	78.80	82.70	75.20	72.90
H <sub>5</sub> .	ウエスト上部	92.00	98.40	105.50	96.70	96.50	101.60	95.20	96.40	96.00	103.00	98.80	104.40	106.80	90.00	89.30
H <sub>6</sub> .	胸骨上縁	128.30	125.50	132.10	124.50	126.00	130.50	129.00	130.00	124.50	135.00	123.20	126.60	134.50	119.40	123.80
H <sub>7</sub> .	胸口	143.40	136.80	144.20	141.30	141.20	145.50	143.80	143.80	137.10	150.40	136.20	140.90	145.20	132.90	137.10
H <sub>8</sub> .	身中	161.10	156.00	170.60	159.30	161.60	164.50	163.20	162.40	156.70	166.70	156.90	161.00	168.60	151.20	157.20
H <sub>9</sub> .	指根部位	70.80	66.60	69.50	66.00	68.70	69.10	70.20	70.80	64.70	73.90	65.60	68.70	71.80	67.20	66.30
H <sub>10</sub> .	中腕骨	80.90	74.20	80.00	74.20	77.80	78.70	78.60	79.50	73.80	83.40	74.60	78.70	72.80	72.20	76.80
H <sub>11</sub> .	肘關節	102.40	99.30	103.50	96.50	99.50	102.10	98.40	102.80	94.80	105.40	96.50	99.30	103.70	92.20	96.80
H <sub>12</sub> .	肩	131.30	125.80	135.50	126.50	126.70	130.80	129.80	130.60	125.60	137.20	12.380	126.30	134.80	119.00	126.00
U.	体	655.00	460.00	550.00	450.00	589.50	565.00	695.00	530.00	580.00	580.00	530.00	750.00	585.50	550.00	590.00
V <sub>1</sub> .	手足部(片)体	780.00	740.00	650.00	670.00	695.00	735.00	808.00	785.00	806.00	762.00	780.00	797.00	645.00	700.00	730.00
V <sub>M</sub> .	手足部(片)体	360.00	370.00	378.00	320.00	309.00	352.00	405.00	398.00	414.00	368.00	405.00	350.00	394.00	330.00	340.00



Table—2 Data on volume, mass quantity and center of gravity (examp.)

年令群 検番		35 ~ 39														
		107	121	6	10	16	24	27	29	31	35	40	42	43	51	72
体積 cm <sup>3</sup>	VA. 下腿部(片)	2,605.88	2,070.37	2,596.86	1,769.81	2,550.44	2,201.24	2,830.51	2,096.93	2,668.16	2,801.41	2,425.41	2,970.68	2,624.63	2,148.21	2,513.98
	VB. 大腿部(片)	4,745.41	4,142.79	2,953.44	3,340.81	4,138.71	3,377.07	6,426.55	4,632.48	5,549.24	5,482.03	4,236.34	6,149.56	5,254.17	5,181.93	4,565.19
	VC. 胸部	31,369.24	15,065.00	25,694.42	17,150.77	25,100.08	23,546.94	24,888.00	19,679.03	18,906.73	22,678.92	19,135.79	32,646.08	23,539.25	21,503.59	23,793.66
	VD. 頸部	1,505.82	875.34	1,172.81	1,360.44	1,524.37	1,404.33	1,594.95	1,247.18	1,200.36	1,527.07	1,140.28	1,574.75	1,025.26	1,213.45	1,274.39
	VE. 頭部	2,670.67	2,725.65	4,107.99	2,524.76	3,110.96	2,765.10	2,768.72	3,129.75	3,141.21	2,430.67	3,324.82	3,741.66	3,259.70	2,804.19	3,026.48
	VF. 前腕部(片)	764.13	783.30	856.25	637.64	796.87	764.33	804.06	815.26	767.04	704.99	725.63	878.05	746.50	975.03	684.09
	VG. 上腕部(片)	1,683.96	1,156.50	1,538.69	1,029.14	1,426.04	1,328.70	2,001.39	1,249.86	1,490.28	1,598.00	1,151.85	1,970.05	1,664.15	1,601.31	1,597.85
	• V. 全身	57,424.52	37,191.91	48,921.71	36,624.91	49,567.53	45,233.05	55,802.69	47,811.15	44,633.10	50,069.00	43,049.33	64,193.17	50,581.11	37,775.97	48,956.73
質量 g	MA. 下腿部(片)	2,876.01	2,297.52	2,870.56	2,004.65	2,816.58	2,442.14	3,118.65	2,328.96	2,941.05	3,088.90	2,679.94	3,268.49	2,899.54	2,379.13	2,775.38
	MB. 大腿部(片)	5,175.75	4,525.12	3,256.70	3,663.70	4,523.15	3,704.89	6,985.56	5,054.80	6,038.76	5,970.77	4,626.17	6,686.57	5,726.42	5,641.16	4,980.14
	MC. 胸部	36,581.34	21,178.96	29,147.46	22,950.12	30,746.22	32,004.84	34,954.71	21,928.59	27,307.12	27,542.85	26,206.42	40,069.94	28,531.22	26,418.51	30,910.85
	MD. 頸部	1,756.02	1,230.59	1,330.42	1,820.47	1,867.27	1,908.76	2,240.08	1,389.75	1,890.19	1,854.59	1,561.61	1,923.86	1,242.69	1,327.36	1,655.58
	ME. 頭部	3,179.82	3,229.28	4,744.43	3,019.39	3,654.52	3,287.88	3,289.30	3,676.26	3,677.75	2,932.22	3,875.69	4,332.01	3,827.86	3,304.67	3,555.26
	MF. 前腕部(片)	837.41	857.56	937.42	701.13	872.61	837.94	830.57	892.54	840.12	774.30	795.58	958.97	819.15	1,063.40	750.91
	MG. 上腕部(片)	1,837.88	1,269.50	1,683.10	1,113.00	1,506.44	1,456.16	2,179.77	1,370.99	1,628.77	1,746.29	1,624.65	2,145.69	1,817.77	1,747.35	1,744.59
	MH. 手部(片)	398.47	408.88	418.50	355.31	343.63	390.10	447.04	439.45	456.27	407.47	446.60	387.71	435.57	365.51	376.68
	MI. 足部(片)	865.89	822.01	727.58	747.23	774.51	818.03	896.37	871.49	893.14	847.45	865.20	884.17	775.67	778.17	811.45
重心高 cm	GA. 下腿部(片)	21.51	20.40	23.15	19.87	20.76	22.16	20.21	20.74	19.96	22.00	20.90	20.70	21.93	17.84	20.63
	GB. 大腿部(片)	16.08	20.99	12.82	18.65	15.30	18.41	20.78	22.43	20.04	21.79	19.11	19.90	20.59	19.56	15.50
	GC. 胸部	26.93	21.89	29.27	23.69	27.02	25.75	23.56	23.31	22.11	24.25	22.72	22.99	25.18	24.02	25.38
	GD. 頸部	7.55	5.65	6.05	8.40	7.60	7.50	7.40	6.90	6.30	7.70	6.50	7.15	5.35	6.75	6.65
	GE. 頭部	6.64	7.20	9.90	6.75	7.65	7.13	7.28	6.98	7.35	6.11	7.76	7.54	8.78	6.86	7.54
	GF. 前腕部(片)	11.85	14.60	13.33	12.78	12.67	13.10	11.16	13.34	11.77	12.36	12.49	12.00	11.81	10.12	11.51
	GG. 下腕部(片)	14.89	13.85	16.93	15.60	14.18	15.02	16.79	14.54	15.57	16.78	14.40	14.20	16.43	13.24	15.30
	GH. 手部(片)	4.41	4.45	4.49	4.24	4.19	4.38	4.59	4.56	4.62	4.45	5.39	4.37	4.55	4.29	4.33
	GI. 足部(片)	5.71	5.61	5.37	5.43	5.49	5.60	5.78	5.72	5.77	5.67	5.71	5.75	5.49	5.51	5.59
	G. 総合重心高	88.79	87.66	93.45	88.82	87.06	93.44	89.86	96.09	85.46	92.86	87.61	89.89	92.67	84.06	86.55

Table—3 Integral value based on mass quantity

直流分の条件	開眼と閉眼	方向	質量の区分(g)	MとS・F SD	45.00～	47.00～	49.00～	51.00～	53.00～	55.00～	57.00～	59.00～	61.00～	63.00～	65.00～	67.00～	69.00～	71.00～	73.00～	75.00～	TOT	
					46.99	48.99	50.99	52.99	54.99	56.99	58.99	60.99	62.99	64.99	66.99	68.99	70.99	72.99	74.99	76.99	AL	
					3	2	6	6	14	15	17	15	8	6	7	6	5	0	1	1	112	
直流分含有	開眼	眼	X	M	8672.00	11047.00	11541.16	10131.00	11799.64	11907.60	12417.35	11626.27	11281.50	11620.67	10706.00	12152.00	12132.00	—	15668.00	13200.00	11649.99	
				S	74.41	3154.00	2104.00	2622.70	2154.86	2276.13	2637.19	2038.28	1635.34	2695.87	1261.79	1471.44	1942.43	—	—	—	—	2314.84
				D	10285.00	11827.00	16340.50	8471.17	12202.79	12020.60	12432.12	12356.07	11005.88	13961.50	12797.64	12562.33	13091.20	—	12231.00	13868.00	—	12373.93
	閉眼	眼	Y	M	1679.43	2225.00	8342.45	2816.76	2909.87	3578.02	3011.92	2072.49	1539.58	2013.07	1491.68	1855.13	2734.38	—	—	—	—	3576.28
				S	10888.67	11906.50	14669.67	13371.67	14114.79	14547.70	15004.82	14179.60	13168.63	14474.83	13750.43	15763.67	13172.40	—	15919.00	17782.00	—	14205.46
				D	88.49	300.49	1671.73	1867.48	2119.47	2076.36	2139.62	1678.62	1574.17	2043.40	1104.40	1728.12	1062.21	—	—	—	—	2050.81
直流分除去	開眼	眼	X	M	1374.33	158.00	2261.00	2531.67	2736.64	2606.27	2641.06	2739.93	3382.25	2573.33	1957.00	2734.83	3156.00	—	4546.00	3279.00	2637.54	
				S	426.87	45.00	426.31	797.72	871.85	886.65	690.67	1146.82	1032.96	1048.39	714.75	1210.95	991.42	—	—	—	—	987.93
				D	1662.00	1261.50	2566.33	1922.67	3038.71	2379.07	2585.82	2481.00	3055.13	2959.00	2451.86	3218.33	2782.80	—	4553.00	4046.00	—	2635.77
	閉眼	眼	Y	M	200.07	644.50	1086.08	900.44	1579.17	741.38	807.41	1162.46	579.86	1023.82	703.69	939.10	809.32	—	—	—	—	1083.57
				S	3098.00	3447.00	3766.90	4452.17	4023.29	3543.53	4117.24	4111.00	4305.00	3619.67	3247.86	3045.83	4201.40	—	5728.00	2588.00	—	3867.21
				D	1367.76	335.00	879.99	1447.41	1563.84	1447.41	1146.99	1401.49	1641.74	1323.18	1000.32	1408.50	1576.19	—	—	—	—	1419.84
閉眼	眼	Y	M	2791.00	2239.50	4528.00	3329.00	4435.64	3559.93	3845.18	3710.73	3190.75	3768.17	4509.00	3395.00	4212.20	—	4062.00	2838.00	—	3790.63	
			S	559.71	623.50	1710.39	1997.78	923.11	1795.49	1302.90	1540.67	1378.69	1190.92	1298.10	1158.53	1484.96	—	—	—	—	1496.97	
			D	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Table—4 Coefficient of variation based on mass quantity

直流分の条件	開眼と閉眼	方向	質量の区分(g)	MとS・F SD	45.00～	47.00～	49.00～	51.00～	53.00～	55.00～	57.00～	59.00～	61.00～	63.00～	65.00～	67.00～	69.00～	71.00～	73.00～	75.00～	TOT	
					46.99	48.99	50.99	52.99	54.99	56.99	58.99	60.99	62.99	64.99	66.99	68.99	70.99	72.99	74.99	76.99	AL	
					3	2	6	6	14	15	17	15	8	6	7	6	5	0	1	1	112	
直流分含有	開眼	眼	X	M	0.68	0.66	0.60	0.75	0.62	0.65	0.59	0.62	0.64	0.62	0.68	0.61	0.59	—	0.45	0.63	0.63	
				S	0.08	1.09	0.08	0.18	0.09	0.09	0.12	0.08	0.05	0.12	0.07	0.07	0.08	—	—	—	—	0.10
				D	0.63	0.59	0.51	0.88	0.58	0.62	0.58	0.59	0.65	0.52	0.57	0.61	0.55	—	0.54	0.55	—	0.60
	閉眼	眼	Y	M	0.08	0.11	0.19	0.27	0.13	0.11	0.11	0.11	0.08	0.09	0.05	0.09	0.07	—	—	—	—	0.15
				S	0.62	0.69	0.51	0.56	0.50	0.53	0.47	0.49	0.55	0.48	0.50	0.43	0.50	—	0.47	0.38	—	0.50
				D	0.64	0.15	0.06	0.07	0.06	0.09	0.09	0.07	0.04	0.09	0.06	0.07	0.08	—	—	—	—	0.09
直流分除去	開眼	眼	X	M	0.44	0.49	0.45	0.56	0.47	0.43	0.52	0.51	0.54	0.48	0.42	0.49	0.41	—	0.42	0.45	0.48	
				S	0.07	0.05	0.10	0.19	0.09	0.09	0.20	0.11	0.04	0.02	0.12	0.06	0.12	—	—	—	—	0.13
				D	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	閉眼	眼	Y	M	1.11	1.26	1.18	0.81	1.10	1.13	1.04	1.26	1.03	1.13	1.22	1.10	1.03	—	1.25	1.15	1.11	
				S	0.09	0.21	0.21	0.35	0.14	0.26	0.17	0.41	0.16	0.13	0.21	0.14	0.17	—	—	—	—	0.26
				D	1.25	1.23	1.19	1.35	1.14	1.12	1.32	1.43	1.27	1.27	1.33	1.48	1.05	—	0.97	1.31	—	1.26
閉眼	眼	Y	M	0.24	0.03	0.28	0.48	0.24	0.20	0.47	0.53	0.15	0.24	0.16	0.30	0.23	—	—	—	—	0.36	
			S	1.60	1.16	1.15	0.95	1.07	1.14	1.09	1.00	1.08	1.11	1.06	1.19	1.01	—	1.11	1.25	—	1.09	
			D	0.12	0.15	0.19	0.12	0.16	0.20	0.21	0.16	0.10	0.12	0.08	0.23	0.18	—	—	—	—	0.18	
閉眼	眼	Y	M	1.63	2.20	1.28	1.20	1.21	1.25	1.31	1.46	1.23	1.27	1.52	1.62	1.31	—	0.81	1.12	1.34		
			S	0.29	0.94	0.20	0.32	0.22	0.26	0.35	0.69	0.16	0.12	0.25	0.38	0.37	—	—	—	—	0.42	
			D	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Table-5 Integral value based on center of of gravity

直流分の条件	開眼と閉眼	方向	質量の区分(cm)		76.00~	78.00~	80.00~	82.00~	84.00~	86.00~	88.00~	90.00~	92.00~	94.00~	96.00~	TOTAL
			MとS	FとD	77.99	79.99	81.99	83.99	85.99	87.99	89.99	91.99	93.99	95.99	97.99	
					1	0	2	1	12	19	30	18	18	10	1	112
直流分含有	開	眼	X	M	10446.00	-	11759.00	11645.00	10637.75	10892.05	1264.771	11630.94	11460.83	11791.55	12278.00	11649.99
				S. D	-	-	733.00	-	2730.91	2353.41	2239.78	1883.74	2207.92	2186.25	-	2314.84
				M	13464.00	-	12926.50	12096.00	13238.92	10963.05	13131.67	12744.00	11474.17	12033.50	10479.00	12373.93
	閉	眼	Y	S. D	-	-	5500.50	-	4505.88	2720.70	4228.23	3302.58	1684.18	2294.66	-	3576.28
				M	11184.00	-	12368.50	15115.00	13678.33	13694.47	14728.17	14177.72	14583.83	14444.70	11552.00	14205.46
				S. D	-	-	787.50	-	2001.72	2300.10	2076.39	1761.04	1781.47	1992.90	-	2050.81
直流分除去	開	眼	X	M	2849.00	-	3025.50	2876.00	1876.75	2893.42	2718.30	2485.39	2810.44	2730.60	1952.00	2637.54
				S. D	-	-	-	-	695.66	936.44	1004.73	1094.17	762.97	1179.46	-	987.93
				M	2645.00	-	1618.50	2711.00	2618.83	2990.21	2918.10	2254.28	2733.50	2315.60	3294.00	2635.77
	閉	眼	Y	S. D	-	-	359.50	-	763.18	1396.90	1136.90	903.58	734.31	1015.66	-	1083.57
				M	3746.00	-	4110.50	3653.00	3982.58	4177.00	3798.63	3448.17	3866.78	4317.10	1825.00	3867.21
				S. D	-	-	1512.50	-	1398.39	1726.76	1094.44	1415.90	1596.32	1072.65	-	1419.84
閉	眼	Y	M	1918.00	-	3355.50	3884.00	3615.00	4389.84	3940.23	3492.17	3538.06	3739.50	3104.00	3790.63	
			S. D	-	-	568.50	-	1830.36	1597.12	1479.90	1034.83	1142.45	1954.21	-	1496.97	
			M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Table-6 Coefficient of variation based on center of gravity

直流分の条件	開眼と閉眼	方向	質量の区分(cm)		76.00~	78.00~	80.00~	82.00~	84.00~	86.00~	88.00~	90.00~	92.00~	94.00~	96.00~	TOTAL	
			MとS	FとD	77.99	79.99	81.99	83.99	85.99	87.99	89.99	91.99	93.99	95.99	97.99		
					1	0	2	1	12	19	30	18	18	10	1	112	
直流分含有	開	眼	X	M	0.65	-	0.56	0.59	0.69	0.66	0.59	0.63	0.64	3.63	0.62	0.63	
				S. D	-	-	0.05	-	0.08	0.14	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	-	0.10
				M	0.59	-	0.56	0.60	0.57	0.68	0.57	0.56	0.62	0.61	0.63	0.60	
	閉	眼	Y	S. D	-	-	0.27	-	0.14	0.22	0.10	0.13	0.07	0.11	-	0.15	
				M	0.57	-	0.53	0.47	0.55	0.53	0.48	0.49	0.51	0.48	0.61	0.50	
				S. D	-	-	3.03	-	0.06	0.08	0.10	0.09	0.07	0.09	-	0.09	
直流分除去	開	眼	X	M	0.15	-	0.47	0.48	0.47	0.51	0.49	0.46	0.52	0.43	0.49	0.48	
				S. D	-	-	0.07	-	0.11	0.11	0.10	0.13	0.18	0.10	-	0.13	
				M	0.56	-	1.02	0.92	1.22	0.99	1.13	1.14	1.21	1.01	1.07	1.11	
	閉	眼	Y	S. D	-	-	0.18	-	0.18	0.18	0.19	0.26	0.37	0.24	-	0.26	
				M	1.52	-	1.15	1.16	1.40	1.24	1.19	1.18	1.45	1.24	0.91	1.26	
				S. D	-	-	0.02	-	0.35	0.29	0.20	0.27	0.64	0.21	-	0.36	
閉	眼	Y	M	0.82	-	1.05	0.99	1.16	1.06	1.08	4.11	1.15	1.04	0.79	1.09		
			S. D	-	-	0.12	-	0.21	0.17	0.16	0.15	0.17	0.20	-	0.18		
			M	1.76	-	1.41	1.54	1.34	1.28	1.35	1.33	1.40	1.32	0.79	1.34		
S. D	-	-	03.0	-	0.22	0.33	0.39	0.39	0.34	0.70	0.29	-	0.42				

Table—7 Integral value based on volume

		体積の区分(cm³)		35000 36999	37000 38900	39000 40999	41000 42999	43000 44999	45000 46999	47000 48999	49000 50999	51000 52999	53000 54999	55000 56999	57000 58999	59000 60999	61000 62999	TOTAL	
直流分の条件	開眼と閉眼	方向	MとS、D	1	4	3	7	11	10	25	15	8	8	7	9	2	2	112	
直流分含有	開	眼	X	M	8777.00	10589.00	9825.00	10405.57	11394.64	12812.50	11465.44	12358.07	12604.13	11326.75	11533.43	11561.22	10388.00	14434.00	11649.99
				S、D	—	1999.93	1380.07	2960.33	2043.02	2540.25	2119.94	2177.81	2196.68	2553.63	1441.98	1864.86	409.00	1234.09	2314.84
				M	8552.00	10591.50	17704.67	9617.86	13334.64	12259.50	12087.16	12047.47	13069.38	11690.38	12437.71	12807.44	14470.00	13049.50	12373.93
	閉	眼	Y	S、D	—	2558.01	2735.61	2911.54	6422.64	3867.91	2730.17	2744.48	1869.32	1734.29	2432.93	2465.35	55.95	818.50	3575.28
				M	10765.00	12237.75	13415.33	14597.14	14189.91	14285.00	14406.08	14546.67	14752.25	13688.13	13002.71	14626.22	13805.50	16805.50	14205.46
				S、D	—	1428.88	1107.75	1085.82	2631.64	2198.23	1896.55	2063.00	2529.62	2060.52	1969.98	1408.97	477.49	931.50	2050.81
直流分除去	開	眼	X	M	1958.00	1685.25	1972.00	2443.29	2378.55	2627.90	2699.12	2526.47	2948.25	3380.50	2296.57	2247.00	2807.00	3912.50	2637.54
				S、D	—	634.22	470.47	578.15	848.40	1031.85	984.74	1006.21	783.79	929.16	1090.40	853.82	978.00	633.50	987.93
				M	1636.00	1473.00	2072.33	2882.00	3116.82	2360.50	2679.68	2144.93	3097.38	3062.63	2325.14	2507.00	3745.00	4299.50	265.77
	閉	眼	Y	S、D	—	270.95	221.35	1919.83	1179.85	918.61	828.43	867.34	1335.36	645.91	606.10	816.66	153.00	253.50	1083.57
				M	5024.00	2949.75	3094.67	4403.29	4216.73	4217.90	4079.80	3664.40	3693.50	4231.75	3124.00	2988.56	4895.50	4158.00	3867.21
				S、D	—	1028.27	501.82	1366.37	1580.62	1475.65	1494.17	1430.52	853.00	684.70	1148.50	1007.50	1570.00	1419.84	
閉	眼	Y	M	3535.00	2479.50	2754.00	4700.57	4781.82	3837.40	3613.76	3559.40	3402.25	3621.63	3620.86	3884.11	5878.00	3540.00	3790.63	
			S、D	—	606.71	105.09	2041.23	1461.08	1834.74	1267.80	1542.49	1058.16	823.39	1255.17	1550.08	575.00	612.00	1496.97	

Table—8 Coefficient of variation based on volume

		体積の区分(cm³)		35000 36999	37000 38999	39000 40999	41000 42999	43000 44999	45000 46999	47000 48999	49000 50999	51000 52999	53000 54999	55000 56999	57000 58999	59000 60999	61000 62999	TOTAL	
流分の条件	開眼と閉眼	方向	MとS、D	1	4	3	7	11	10	25	15	8	8	7	9	2	1	112	
直流分含有	開	眼	X	M	0.70	0.64	0.65	0.66	0.69	0.62	3.63	0.59	0.59	0.63	0.65	0.62	0.69	0.54	0.63
				S、D	—	0.11	0.10	0.10	0.15	0.08	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.06	0.01	0.09	0.10
				M	0.57	0.64	0.34	0.71	0.64	0.63	0.60	0.59	0.54	0.62	0.60	0.58	0.52	0.54	0.60
	閉	眼	Y	S、D	—	0.11	0.10	0.22	0.23	0.08	0.12	0.12	8.08	0.07	0.09	0.12	—	0.01	0.15
				M	0.67	0.57	0.49	0.50	0.54	0.55	0.50	0.47	0.48	0.52	0.51	0.46	0.51	0.43	0.50
				S、D	—	0.02	0.04	0.04	0.10	0.12	0.09	0.08	0.08	0.09	0.06	0.08	1.01	0.05	0.09
直流分除去	開	眼	X	M	1.23	1.09	1.20	0.98	1.06	1.14	1.05	1.10	1.19	11.1	0.36	1.12	1.05	1.20	1.11
				S、D	—	0.05	0.27	0.28	0.23	0.14	0.25	0.23	0.22	0.19	1.51	0.19	0.07	0.05	0.26
				M	0.93	1.18	1.34	1.04	1.39	1.25	1.25	1.39	1.25	1.36	1.49	1.28	1.23	1.14	1.26
	閉	眼	Y	S、D	—	0.24	0.22	0.23	0.45	0.21	0.33	0.45	0.22	0.15	0.75	0.34	0.29	0.17	0.36
				M	0.92	1.19	1.16	1.06	1.13	1.16	1.03	1.13	1.25	1.06	2.12	1.12	1.12	1.18	1.09
				S、D	—	0.06	0.27	0.15	0.23	0.19	0.15	0.23	0.22	0.10	0.11	0.23	0.03	0.07	0.18
閉	眼	Y	M	1.26	1.53	1.40	1.09	1.33	1.52	1.31	1.33	1.09	1.35	1.85	1.36	1.27	0.96	1.34	
			S、D	—	0.31	0.22	0.08	0.35	0.60	0.27	0.35	0.18	0.30	0.90	0.31	0.05	0.16	0.42	

Table—9 Integral value based on moment of mass x, center of gravity

		質量×重心高の区分(kg. cm)			3501~ 4000	4001~ 4500	4501~ 5500	5001~ 5500	5501~ 6500	6001~ 6500	6501~ 7000	TOTAL
直流分 の条件	開眼と 閉眼	方向	Mと S. D	F	2	13	24	38	21	9	5	112
直流分含有	開	眼	X	M	8695.00	11155.46	11374.50	12134.55	11452.62	11100.78	13575.00	11649.99
				S. D	81.98	2077.54	2644.98	2341.67	1998.17	1399.97	1601.48	2314.84
				M	10555.00	13004.31	12288.54	11919.45	12311.19	12807.44	13541.40	12373.73
	閉	眼	Y	S. D	2003.00	6699.86	3777.07	2647.51	2064.50	2178.46	1181.11	3576.28
				M	10849.50	13123.85	14465.25	14611.71	14020.95	13990.67	15169.40	14205.41
				S. D	84.47	1878.62	1984.97	2087.71	1849.89	1882.60	1673.76	2050.81
直流分除去	開	眼	X	M	14775.00	17015.08	15620.00	14394.26	14705.14	16140.33	15530.40	15217.24
				S. D	1301.00	4728.99	5244.91	2535.44	1829.89	3388.10	1880.14	3630.00
				M	1453.50	2196.08	2638.31	2686.13	2816.14	2240.11	3849.20	2637.54
	閉	眼	Y	S. D	504.50	725.83	966.17	853.85	1088.56	1091.32	526.29	987.93
				M	1777.50	2076.08	2751.92	2559.39	2940.86	2398.78	3640.40	2635.77
				S. D	141.50	1011.77	1365.59	954.43	823.94	820.48	983.75	1083.57
開	眼	X	M	3657.00	3791.54	4148.00	3925.26	3543.57	3335.00	4676.40	3867.21	
			S. D	1367.00	1064.00	1654.36	1339.32	1358.85	1360.96	1249.83	1419.84	
			M	3094.00	3825.92	4080.00	3587.68	4018.90	2529.78	3641.60	3790.63	
閉	眼	Y	S. D	-	1818.72	1732.04	1145.50	1628.14	1153.02	1530.96	1496.97	

Table—10 Coefficient variation based on mass x center of gravity

		質量×重心高の区分(kg. cm)			3501~ 4000	4001~ 4500	4501~ 5000	5001~ 5500	5501~ 6000	6001~ 6500	6501~ 7000	TOTAL
直流分 の条件	開眼と 閉眼	方向	Mと S. D	F	2	13	24	38	21	9	5	112
直流分除去	開	眼	X	M	0.73	0.65	0.66	0.60	0.64	0.63	0.58	0.63
				S. D	0.04	0.14	0.10	0.10	0.09	0.07	0.09	0.10
				M	0.58	0.65	0.60	0.60	0.60	0.57	0.54	0.60
	閉	眼	Y	S. D	0.01	0.25	0.17	0.11	0.10	0.10	0.03	0.15
				M	0.63	0.57	0.51	0.49	0.49	0.49	0.49	0.50
				S. D	0.03	0.10	0.07	0.09	0.08	0.07	0.08	0.09
直流分含有	開	眼	X	M	0.49	0.46	0.47	0.51	0.50	0.42	0.43	0.48
				S. D	0.01	0.14	0.10	0.16	0.06	0.12	0.04	0.13
				M	1.14	1.14	1.06	1.10	1.15	1.17	1.05	1.11
	閉	眼	Y	S. D	0.09	0.27	0.22	0.23	0.36	0.20	0.13	0.26
				M	1.12	1.31	1.20	1.24	1.38	1.33	1.14	1.26
				S. D	0.19	0.37	0.24	0.37	0.47	0.28	0.22	0.36
開	眼	X	M	1.06	1.11	1.07	1.10	1.10	1.10	1.07	1.09	
			S. D	0.14	0.17	0.18	0.19	0.16	0.18	0.12	0.18	
			M	1.45	1.49	1.24	1.22	1.47	1.40	1.27	1.34	
閉	眼	Y	S. D	0.25	0.55	0.24	0.31	0.61	0.35	0.37	0.42	

**Table—11** Evaluation table of human equilibrium function (DC cutting condition, integral value, open eyes)

	優	良	可	不可
X方向	0～1650	1651～2600	2601～3600	3601～
Y方向	0～1550	1551～2600	1601～3700	3701～

る。

6) 直流分除去条件における積分値について開眼時と閉眼時と比較すれば、閉眼時は前後方向と左右方向の値がほぼ近似し、開眼時で左右方向よりも前後方向の値が大である。

7) 高所作業者につき、直流分除去条件における閉眼時の積分値を指標とし、標準偏差で分割すれば、表11のように、優(～-1σ)、良(1σ～M)、可(M～+1σ)、可(+1σ～)の4段階に判定できる。

8) 高所作業者につき静的条件下で測定した重心高に関する資料は、手すりや柵などの高さ、あるいは足場上の移動時の動揺値、動揺角、動揺性指数などの算出に有用である。

本研究における図表類は約110枚になる。この報告では大部分を省略してあるので、資料の詳細は別途の報告書(斎藤次郎、大川雅司、河原節雄：平衡維持機能に関する研究報告書、昭和40年6月30日)を参照されたい。

**参考文献**

- 1) 石倉武雄：平衡機能検査法の確立に関する研究、研究報告集録、No. 12, 405—412, '60
- 2) 北原正章：頭部動揺の加速度成分に関する基礎的研究、耳鼻咽喉科臨床52(10), 94—114, '59
- 3) 中川米造、鎌田洋一郎：歩行と足踏検査について、2, 3, 耳鼻咽喉科臨床, 48(3), 6—10, '55
- 4) 桑鶴正子、動く物を見る場合の姿勢の動揺について、久留米医誌, 23(2), 584—595, '60
- 5) 北原正章、佐藤利子：加速度記録図臨床的応用斜面台検査加速度記録法に就て、耳鼻咽喉科臨床, 57(1), 57—63, '64
- 6) 前庭研究の集い：ストレージに就て平衡機能研究分野に於ける応用、'62
- 7) 斎藤次郎、大川雅司、河原節雄：人間工学用三次元描写装置の開発、人間工学会誌, 1(2), 44—49, '65
- 8) 松島伯一：男性日本人骨格の重量に就いて、医学研究, 2巻, '28
- 9) 松井秀治：各種姿勢の重心位置に関する研究(1)、身体各部の簡易質量計算とその質量比による重心位置の合成、体育研究, 2(2), 65—76, '56
- 10) 執行英毅：姿勢の安定性に関する力学的研究、耳鼻咽喉科臨床, 51(3), 907—950, '58
- 11) Swearingen, J.J. : Determination of centers of gravity of man, FAA 62—14, '62

**付 録 1**

**身体部位別体積計算式**

被検者番号 \_\_\_\_\_ 年 令 \_\_\_\_\_

$$\begin{aligned}
 V_A &= V_{A1} + V_{A2} \\
 &= \frac{H_2 - H_1}{12\pi} (b^2 + ab + a^2) + \frac{H_3 - H_2}{12\pi} (b^2 + bc + c^2) = \underline{\hspace{2cm}} \\
 V_B &= \frac{(H_4 - H_3)(e^2 + de + d^2)}{12\pi} = \underline{\hspace{2cm}} \\
 V_C &= \frac{V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + V_{C4}}{2} = \underline{\hspace{2cm}} \\
 V_{C1} &= \frac{\pi(H_5 - H_4)(f^2 + fi + i^2)}{12} = \underline{\hspace{2cm}} \\
 V_{C2} &= \frac{\pi(H_6 - H_5)(k^2 + ik + i^2)}{12} = \underline{\hspace{2cm}} \\
 V_{C3} &= \frac{\pi(H_5 - H_4)(g^2 + gj + j^2)}{12} = \underline{\hspace{2cm}} \\
 V_{C4} &= \frac{\pi(H_6 - H_5)(l^2 + jl + j^2)}{12} = \underline{\hspace{2cm}} \\
 V_D &= \frac{m^2}{4\pi} (H_7 - H_6) = \underline{\hspace{2cm}}
 \end{aligned}$$



$$G_{A1} = H_2 - H_1 - \left\{ \frac{(H_2 - H_1)(b^2 + 2ab + 3a^2)}{4(b^2 + 2ab + a^2)} \right\} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_{A2} = \frac{(H_3 - H_2)(b^2 + 2bc + 3c^2)}{4(b^2 + bc + c^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_B = H_4 - H_3 - \frac{(H_4 - H_3)(e^2 + 2de + 3d^2)}{4(e^2 + de + d^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_C = \frac{G_C' \cdot M_C' + G_C'' \cdot M_C''}{M_C' + M_C''} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_C' = \frac{M_{C1} \cdot G_{C1} + (H_5 - H_4 + G_{C2}) \cdot M_{C2}}{M_{C1} + M_{C2}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_C'' = \frac{M_{C3} \cdot G_{C3} + (H_5 - H_4 + G_{C4}) \cdot M_{C4}}{M_{C3} + M_{C4}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_{C1} = \frac{(H_5 - H_4)(f^2 + 2fi + 3i^2)}{4(f^2 + fi + i^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_{C2} = H_6 - H_5 - \frac{(H_6 - H_5)(k^2 + 2ik + 3i^2)}{4(k^2 + ik + i^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_{C3} = \frac{(H_5 - H_4)(g^2 + 2gj + 3j^2)}{4(g^2 + gj + j^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_{C4} = H_6 - H_5 - \frac{(H_6 - H_5)(l^2 + 2jl + 3j^2)}{4(l^2 + jl + j^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_D = \frac{H_7 - H_6}{2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_E = \frac{3(H_8 - H_7)}{8} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_F = H_{11} - H_{10} - \frac{(H_{11} - H_{10})(q^2 + 2pq + 3p^2)}{4(q^2 + pq + p^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_G = H_{12} - H_{11} - \frac{(H_{12} - H_{11})(s^2 + 2rs + 3r^2)}{4(s^2 + rs + r^2)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_H = \sqrt[3]{\frac{V_H}{4.188}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G_I = \sqrt[3]{\frac{V_I}{4.188}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$G = \frac{2\{M_I \cdot G_I + M_A (H_I + G_A) + M_B (H_8 + G_B)\} + M_C (H_4 + G_C) + M_D (H_6 + G_D) + M_E (H_7 + G_E) + 2\{M_H (H_9 - G_H) + M_F (H_{10} + G_F) + M_G (H_{11} - G_G)\}}{2(M_I + M_A + M_B) + M_C + M_D + M_E + 2(M_H + M_F + M_G)} = \underline{\hspace{2cm}}$$