JUL. 1979

RIIS-RR-27-3

UDC 614.821 : 614.8-026 : 69.026.1

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-27-3

階段・通路の安全性に関する研究
(第2報)
―階段昇降動作の基礎的性状―

永　田　久　雄
木　下　鈞　一

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

階段・通路の安全性に関する研究（第2報）

—階段昇降動作の基礎的性状—

永田久雄
木下鈞一

Accident Prevension on Walkways and Stairways (Second Report)

—Experimental Study of Human Motion on Stairs—

by Hisao NAGATA
Kinichi KINOSHITA

According to the first report about the statistical research on stair accidents, many stair accidents are occuring at every stairway, and rapid descent on stairs or wearing high heels is reported to cause many stair accidents.

Human motion is itself the two leg motion which is dynamically unstable, therefore stair accidents are liable to occur at any stairs. Stair accidents are supposed to occur by one of these slipping, stumbling and miss-footing. It would be necessary to investigate these fundamental factors by the way of human motion study in order to decrease the inevitable stair accidents. In this report the following values accordingly were derived from human motion studies. Force values applied to the tread by the foot, and the foot angle just in contact with the tread were measured as to slipping. The short distance between the edge of the step and the tip of a shoe as to stumbling (defined as the G value). The foot contact length to shoe length as to miss-footing (defined as the Lf value).

The experimental stairs which may be varied by changing the combination of tread and rise, and the force plate by which three dimentional force values applied to the floor can be measured, were planned and turned out. In this experiments four settings of combinations of tread and rise were used, and two females and four males were chosen as experimental variable conditions. Especially for females the experiments of different footwears were carried out so as to find out the sharp differences between the high heel and the low heel. Stride time, contact time, force values, the Lf values, foot angles were obtained through the experiments.

Judging from these results, safe walking is closely related to the dimensions of stairs and walking velocity. It would be best to step within the limited safe speed on the alloted treads. Subjects wearing high heels, in descent, can not rotate their ankles enough to soften the footing on the tread. Many stairs are chiefly planned to climb up with ease. But dimentions of safe stairs should be decided with due consideration to descent motions.

1. 緒　　言

階段災害は，工場，事務所等ばかりでなく，日常，通行する駅などでも多く起っている。注目を受ける大型災害と比較して，階段での災害件数が多く報告されているにもかかわらず，災害防止のための決定的な対策がなされないのは，人間の歩行それ自体が直立2足歩行という力学的に不安定な挙動をするために，最少限度の災害は避けられないことであり，防止不可能な災害として片付けられがちになっているからのように思われる。

階段災害は，滑り，つまずき，踏み外しのいずれかによって起っていると考えられる。多くの階段災害を防止するには，前報[1]で行った統計的な分析ばかりでなく階段昇降動作の基礎的性状を人間工学的に調べて，これらの災害要因をいくらかでも明らかにして，階段災害を防止するための基礎資料を得る必要がある。

そこで，本研究では階段歩行動作の基礎的性状を調べて，歩行災害の根本的原因を知り，階段災害防止の糸口を見つけることを目的とした。階段昇降動作の分析を行うばかりでなく，特に，滑り，つまずき，踏み外しなどの災害要因と密接に関係しているデーターを得るようにした。これらの災害要因の分析にあたっては，特に次のような計測を行った。

（1）　階段昇降時の床反力および靴裏接地*1角度

（2）　靴先端部あるいは後端部と踏面先端部との最短通過距離

（3）　踏面での靴裏接地割合

ここで定義し使用している言葉は，のちほど列記し説明する。第1項は，ほとんど降りる時に起っている滑りによる階段災害に関したデーターであり，水平力，作用点位置，足が接地する時の角度などを求めている。第2項は，つまずきによる階段災害に関したデーターである。つまずき易さを，この最短通過距離によって評価しようと試みている。第3項は，階段での踏み外しによる階段災害に関したデーターである。昇るときは，靴裏が踏面に充分に接地していないと，足関節部に大きなモーメントがかかり，下腿部筋肉では耐えることができなくなり転倒したりすると考えられる。降りるときは，充分な長さ接地していないと，非常に不安定になる。

次に，本報で定義し使用した言葉を下記にそれぞれ説明する。

歩行軌跡：靴先端，後端部に埋め込んだ豆球による光点の動きを写真撮影した時にできる光の軌跡を示している。(Fig. 8, Photo. 3, Photo. 4 を参照せよ。)

靴裏接地角度（A_f値）：降りる時に，靴先端が踏面に接地する瞬間での踏面と靴裏とのなす角度である。(Fig. 8, Photo. 3 を参照せよ。)

最短通過距離（G_1値，G_2値）：歩行軌跡と踏面先端部との最短通過距離である。G_1 値は，靴が踏面から離れて最初に通過する踏面先端部との最短通過距離である。G_2 値は，その次の段の踏面先端部との最短通過距離である。(Fig. 8 を参照せよ。)

靴裏接地割合（L_f 値）：靴長に対して靴裏が踏面に接地している長さの割合である。(Fig. 8 を参照せよ。)

ストライド時間（T_s）：片側の足が接地してから，その足が次の踏段に接地するまでの1周期を意味している。

2. 実験装置

装置は，実験用階段，床反力計とデーター収録機器から成っている。以下に項目別に述べる。

2.1 実験用階段

実験用階段の写真を Photo. 1 に示す。種々の階段寸法の組み合わせができるようになっており，蹴上

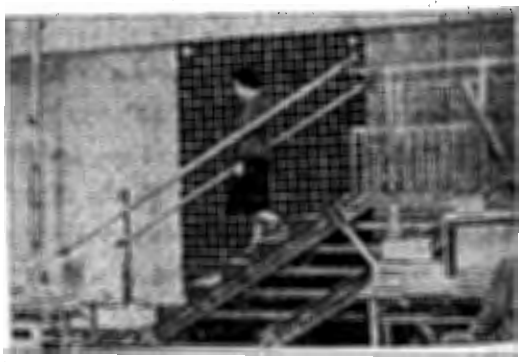


Photo. 1　Experimental stairs
実験用階段

*1　接地いう言葉は，元来地面と接触している状態のときに使われるが，本報では踏面と靴裏とが接触しているときもこの接地という言葉を使用している。

（けあげ）が 12～33cm，有効踏面が 15～35cm の範囲まで設定が可能である。ここで蹴上とは，踏段と踏段との高さを意味している。実験用階段の踊場の下に据付けてある電動ジャッキ（最大力 2ton）によって階段部全体を上下させて，蹴上を変えることができる。踏面寸法は，踏面台を横方向へ滑らせることによって所要の実験寸法を得ることができる。床仕上材は，適宜取り替えが可能であるが，今回は白色系アスタイルのみを貼り付け使用した。階段すべり止め用具（ノンスリップ）は使用していない。

2.2 床反力計

本研究で使用した床反力計は，3つの荷重測定器から構成されている。この歪ゲージ式の床反力計によって垂直方向，水平2方向の荷重値を測定できる。以下に，形状，歪ゲージの結線方法および較正方法について項目別に述べる。

2.2.1 形　　状

床反力計は実験用階段の中段に設置した。**Fig.1** に示すように，一辺が 55cm の正三角形状の盤があり，その盤は枠組を介して荷重計によって支持されている。荷重計の形状は，**Fig.2** のように丈が 55 mm であり，上部の首の部分で垂直力による歪を測定しており，荷重計の下部で水平力による歪を測定している。荷重計の設計にあっては，丈を極力低くすることに留意した。これは，床反力計を踏板に組み入れた時に，実験用階段の蹴上をなるべく低く設定できるようにするためである。今回の実験のために多くの荷重計を試作したが，出力値に履歴現象がみられないようにするためには，単純な形状であり，且つ，荷重計上下部の盤との取り付けは，接合部での摩擦によって，荷重の伝達が阻害されるのを防ぐために，自由端でなくなるべく固定端となるように接合するのがよいことがわかった。

2.2.2 結線方法

ゲージの結線は，垂直方向が2ゲージ法であり，水平方向は各荷重計のゲージを連続して結線しているので，見掛けは3つの荷重計がひとつの荷重計のようになっている。**Fig.3** に結線方法を示す。水平は，進行方向と横方向についてそれぞれ別々に結線している。垂直方向は，各荷重計ごとに結線している。垂直方向ゲージの結線は，2ゲージ法であるが，ダミーゲージは，荷重計と同種の金属面に貼付してゲージの温度補償用として利用している。

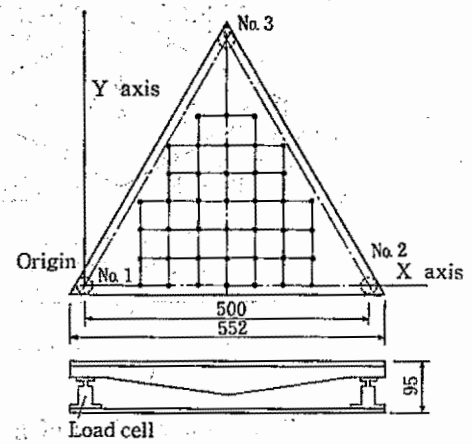


Fig.1 Plan of a force plate., showing positions of load cells and exact points for the precision test of locating
床反力計の形状ー荷重計の位置と位置判定精度検査点

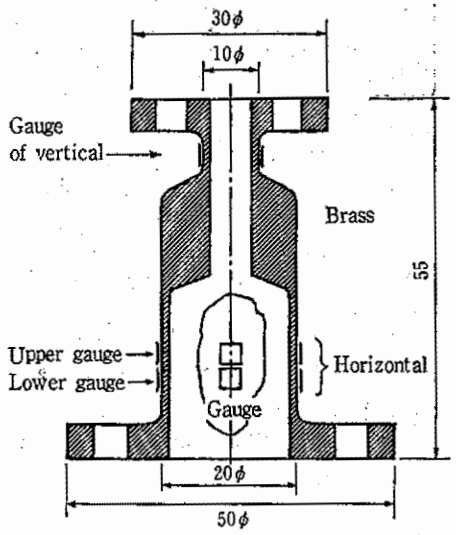


Fig.2 Section of a load cell and position of strain gauges
ロードセル断面とストレインゲージの位置

2.2.3 較正方法

較正は，**Photo.2** に示す装置によって行った。較正台上で床反力計を 30 度ごとに回転させて較正台に固定することができるようになっている。水平方向力は，Photo.2 の写真上部に見られるハンドルを回転させることによって床反力計中心部に力が掛かるようになっている。床反力計中心部にある板は，厚さ 10 mm であるが，これは実際に取り付ける床材の厚さを考慮

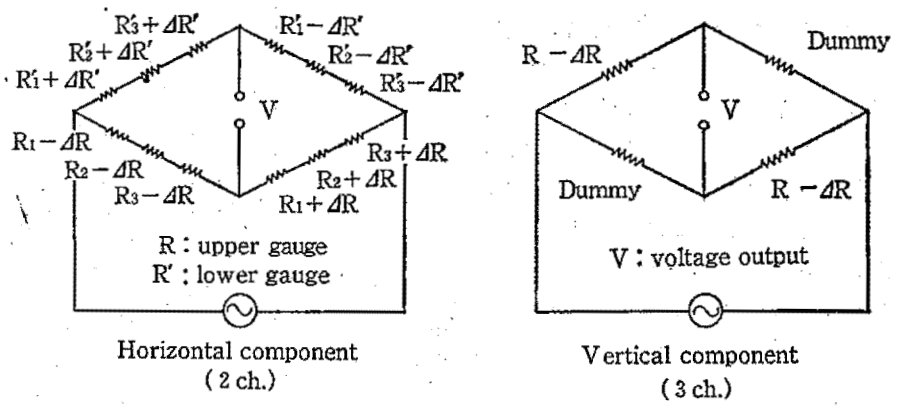


Fig. 3　Connections of gauges. Numbers refer to each load cell.
ゲージの結線（番号は各荷重計を示している）

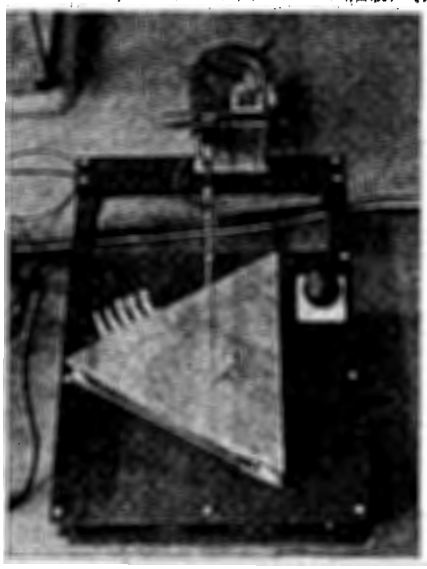


Photo. 2　Force plate and instruments for calibration
床反力計と較正装置

して決定した。垂直方向については，3.60 kg の鉄球およびプレート（10 kg/枚）を使って行い，荷重と歪量の間に直線関係が得られることを確認した。作用点位置は，各荷重計からの垂直反力値を使い次式によって算定した。

$$x=\frac{50\cdot W_2+25\cdot W_3}{W_1+W_2+W_3}\text{(cm)}$$

$$y=\frac{25\sqrt{3}\cdot W_3}{W_1+W_2+W_3}\text{(cm)}$$

但し，ここで原点は，Fig. 1 に示してある。W_1, W_2, W_3 は各荷重計での垂直方向力である。床反力計の位置判定精度を調べるために，3.60 kg の鉄球を床板上の 41 個の点に置き，それぞれの位置での荷重出力値から位置計算を行った。その時に，鉄球が盤上を移動するのを防ぐために小さな特別の受皿を製作し使用した。算定値と実測値の間には，平均 2 mm 程度の誤差がみとめられた。この程度の誤差ならば今回の実験には支障ないと判断した。

水平方向反力の較正にあたっては，水平方向荷重による垂直方向反力がどの程度でるかも調べた。この垂直方向反力値（We_1, We_2, We_3）を理論的に算定すると次式のようになる。

$$We_1=\frac{M}{l}\cdot\cos(\theta-30°)\quad\text{(kg)}$$

$$We_2=-\frac{M}{l}\cdot\cos(\theta+30°)\quad\text{(kg)}$$

$$We_3=-\frac{M}{l}\cdot\sin\theta\quad\text{(kg)}$$

但し，小文字の数字は Fig. 1 に図示した荷重計の番号を意味している。Mは水平荷重と水平反力のなすモーメント（kg・cm），θは Fig. 1 に図示された x 軸に対する作用力の方位角であり，左回りを正としている。l は，x 軸から荷重計 No. 3 の中心部までの長さ（cm）である。**Fig.4** に説明図を示した。一例として **Fig.5** に荷重計 No. 1 での水平荷重と We_1 の実測値の関係および較正曲線を図示した。ほぼ，理論式と同じ傾向を示している。各荷重計からの出力部には，cut-off 周波数 50 Hz で 12 dB/oct 減衰のローパスフィルターを接続して雑音等を除くことにした。

2.3　データー収録機器

Fig.6 にデーター収録方法を図示した。入力信号は，床反力計 5 ch，踏面に取り付けた 2 組の歩行速度

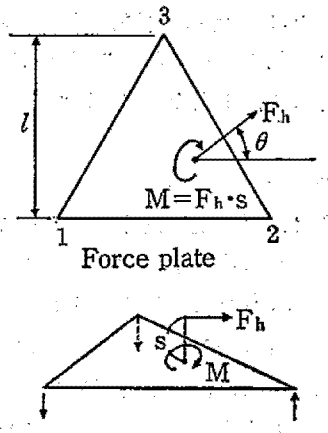


Fig.4 Diagram of vertical force induced by horizontal forces
水平荷重によって誘引される垂直反力の説明図

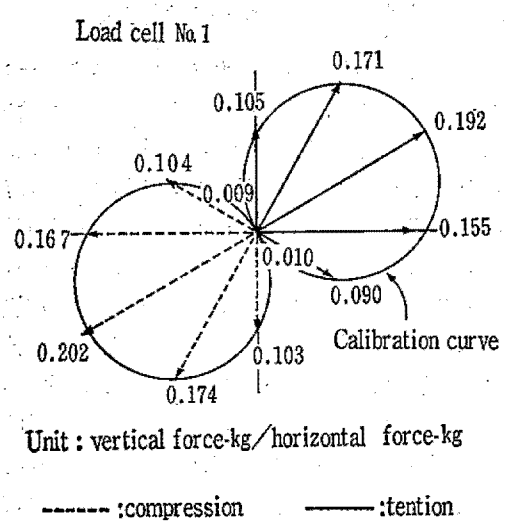


Fig.5 Example ; the degree of vertical components induced by horizontal forces, arrows indicate pulling directions.
水平荷重による垂直反力

計測用光電管（径 10φ）2 ch，電子計算機制御用光電管（25φ）2 ch から成立っている。被験者が階段を昇降し始めると，制御信号からの合図で電子計算機が起動し，データーを 500 個/秒でサンプリングし，ディスクパックを介して計算処理して，結果を実時間で磁気テープに収録する。収録状況はテレビモニターに表示させると同時に，適宜，キーボードから CPU（中央処理装置）に命令を与えて，収録・計算処理した床反力値を $X \cdot Y$ レコーダーに描かせることができる。

昇降時の動作は，電動で作動させることのできる 16 mm シネ撮影機，35 mm 写真機によって撮影したあとに，フィルムを写真解析装置にかけて投影画像の

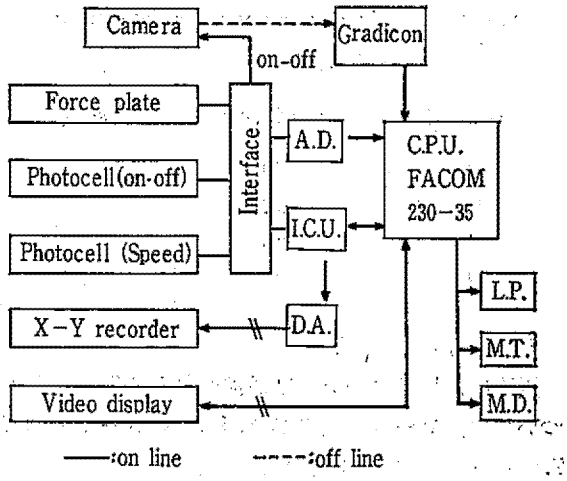


Fig.6 Block diagram of data recording
データー収録ブロックダイアグラム

定められた点を数値化してMTに収録した。フィルム上の画像は，写真解析装置の投影面に 16 mm フィルムの場合で，36 倍に，35 mm フィルムの場合で，20 倍に拡大して必要な点を 0.1 mm 単位まで写真解析装置によって読み取った。

3. 実験方法

実験は，男子と女子に分けて行った。男子の場合のみ，階段昇降時の床反力および関節角度の測定および算定を行っている。以下に，実験条件，撮影方法，床反力測定方法とデーター処理方法について述べる。

3.1 実験条件

被験者，履物，階段寸法，昇降速度について以下に述べる。

3.1 被験者

被験者は，男子4名，女子2名である。身長，体重，年令，靴のサイズについて **Table 1** に表わした。被験者は，それぞれアルファベット記号で表わしている。

Table 1 List of subjects
被験者リスト

Sex	Female		Male			
Subject	I	J	N	O	P	Q
Age	23	22	28	28	22	19
Stature (cm)	152	154	169	160	169	165
Weight (kg)	49	49	60	50	71	58
Size of shoes (cm)	23.5	22	26	24	26	24

Table 2 Stair dimensions for experiments
階段用実験寸法

Symbol	Tread (cm)	Rise (cm)
D_1	30	15
D_2	28	17
D_3	25	20
D_4	22	23

3.1.2 履　　物

履物は，男子については通常の靴を使用し，女子については，ヒールの高さが 2.5cm のローヒールと，7.0cm のハイヒールを使用した。

3.1.3 実験階段寸法

設定寸法は4組である。本報では，各寸法の組み合わせを便宜上 D_1, D_2, D_3, D_4 と記号化して使用している。**Table 2** に各記号と寸法との関係を明記した。前報[1]の調査結果から階段寸法 D_3 は，一般的によく使われている。階段寸法 D_1, D_2 は，いわゆる快適階段寸法と言われているものである。階段寸法 D_4 は，余り使用しない値であるが，敢えて実験的な差異をみるために実験寸法として取り入れた。

3.1.4 昇降速度

各被験者は，メトロノームの音を基準にして遅速歩行から早足歩行までの種々の速さについて昇降を行った。メトロノームを使用したのは，参考となるリズム音なしに言葉のみによって歩行速度を細かく指示するのが困難であったためである。

階段での歩行速度の表現の仕方には，水平方向速度と垂直方向速度と水平と垂直を合成した速度の3種類が考えられる。ここでは，階段の傾斜に沿って得られる水平，垂直の合成速度で考えている。いまここで，ストライド時間が一定とした場合に，水平，垂直の速度は，階段寸法 D_1, D_2, D_3, D_4 によって大きくかわってくるが，合成された速度にはそれほど変化がない。本報では，便宜上合成された速度の指標としてストライド時間を使用している。ストライド時間が1秒の時に，合成速度は平均 2.34 km/h(2.29～2.41 km/h) になる。

1) 男子の場合

ストライド時間が0.6秒から1.3秒まで約0.1秒間隔にメトロノームで歩行リズムを指示した。0.6 秒 3.9 km/h) 以下となる早足昇降については，安全のため各被験者に言葉で指示を与えた。関節角度を計測するための実験では，遅速，普通，早足の段階に分けて行った。それぞれの昇降回数は3回である。設定された階段実験寸法で，1人の被験者につき 20 回の昇降を行わせた。

2) 女子の場合

女子の場合は，男子より速く昇降することができないために，実験歩行速度を遅くして，ストライド時間が0.7秒から1.6秒までの範囲でメトロノームのリズム音によって歩行させた。0.7秒(約 3.4 km/h) 以下となる速さについては，男子と同様に言葉で指示した。女子の場合のみ歩行速度を3段階にわけて足部のストロボ撮影および歩行軌跡の撮影を行った。男子と同様に1人の被験者につき計20回の昇降を行わせた。

3.2 撮影およびデーター処理方法

撮影位置を **Fig.7** に示す。カメラは，スクリーンボードから 13m 離し，画面を階段の中段に合わせて設置している。靴先端部，後端部に径5mm の豆電球を埋め込み，電池（単 3-1.5 V）を靴踵部に内蔵した。歩行時に点燈しスチール写真機のシャッターを開放状態に保っておいて光軌跡を撮影した。この軌跡から，靴先端あるいは後端部と踏段先端部との最短通過距離（以下 G_1 値，G_2 値と略す），靴接地割合（以下 L_f と略す），そして靴接地角度（以下 A_f と略す）を，写真解析装置によって読み取ったデーターから計算して得た。写真解析装置を使って撮影フィルムの投影像から実長を求めるために，階段背面に設置したスクリーンボード上の2定点を基準にした。この計算過程で撮影距離による補正を行っている。**Fig.8** に各数値の取り方および記号の定義を図示した。

関節角度をみるために，男子被験者の各部（肩峰

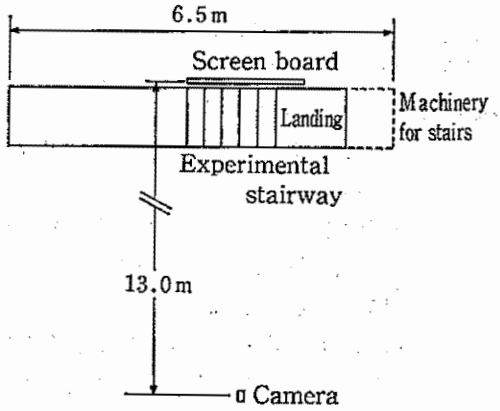
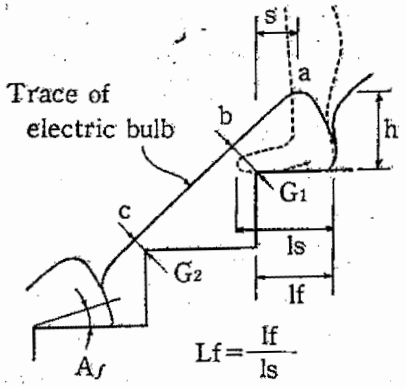


Fig.7 Overview of arrangement of the camera
カメラの設置位置



A_f: foot angle just in contact with the step in descent

G_1, G_2: short distance between the edge of the step and the tip of a shoe

L_f: foot contact length to shoe length

Fig.8 Trace of electric bulb of the heel tip of a shoe and definitions of symbols
靴後端部の光点軌跡と記号の定義

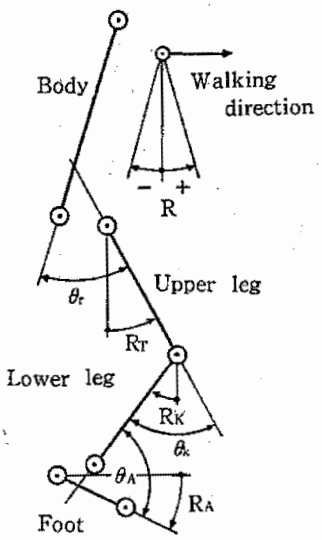


Fig.9 Target position and joint angle
標点位置と関節角度

点，腰部，股関節部，膝関節部，足関節部）に貼り付けられた標点を 16 mm フィルムに連続撮影し，各コマごとに標点位置を写真解析装置によって数値化した。この数値化されたデーターから脚部の関節角度を計算によってもとめた。**Fig.9** に関節角度の取り方と標点位置を図示した。関節角度の取り方は，鉛直線からの回転角 R と各部位間につくられる角度 θ とで表わした。

3.3 床反力測定とデーター処理方法

床反力測定は，男子の実験のみについて行った。これは，予備実験の結果[2,3] 床反力には，男女差を見い出すことができなかったので，女子の場合については除いた。床反力計から得られた反力値は，各被験者の体重で割ってある。水平2方向，垂直方向3点から得られたデーターから，水平成分，垂直成分，合力，水平力と垂直力の比，作用点軌跡，接地時間などを計算した。

4. 実験結果

ストライド時間と足接地時間，床反力値，G_1 値，G_2 値，L_f 値，関節角度についての実験結果について述べるとともに，結果のまとめで履物，歩行速度，階段寸法と昇降動作との関係について述べた。ここで，機械のような動作をせずに多くの不確定な要素によって影響を受けやすい人間の動作を扱っているために，得られた結果には，ばらつきが多くみられた。そのために，概略の傾向や平均値によって比較，推測を行っている。

4.1 ストライド時間と足接地時間

足が踏面に接している時間（T_c）とストライド時間

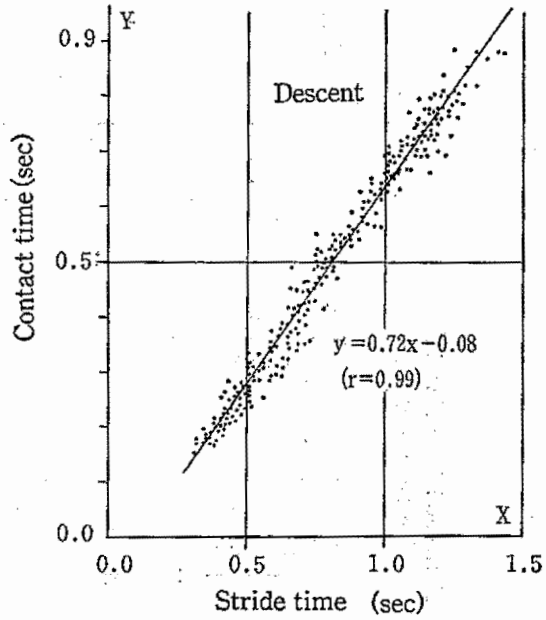


Fig.10 Stride time vs. contact time
ストライド時間と足接地時間

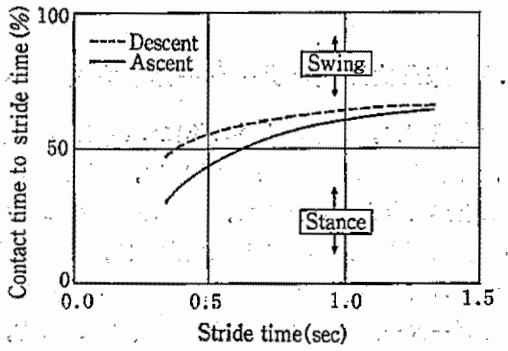


Fig.11 Stride time vs. ratio of swing and stance to stride time
ストライド時間と接地，遊脚期の割合

(T_s) には，非常に良い比例関係がみられる。**Fig.10** に降りる時の時間 T_s と時間 T_c の関係を図示した。

この図中の r は，相関係数を表わしている。時間 T_s と時間 T_c との関係式から接地期と遊脚期の割合と，ストライド時間との関係を **Fig.11** に図示した。ストライド時間に対する足接地期の割合は，縦軸から読み取れる。残った百分率が遊脚期の割合を表わしている。昇る時に比べて降りる時の方が足が接地している割合が多く，遅速歩行になるにつれてほぼ同じ割合になってくる。早足で階段を昇る時は，空中に跳び上がるような状態がつくられることからも，この結果がうなづける。階段寸法の違いによる，時間 T_s に対する時間 T_c の値の差は僅少であった。

4.2 床反力値

昇降による床反力値の差の典型的な例を **Fig.12** に

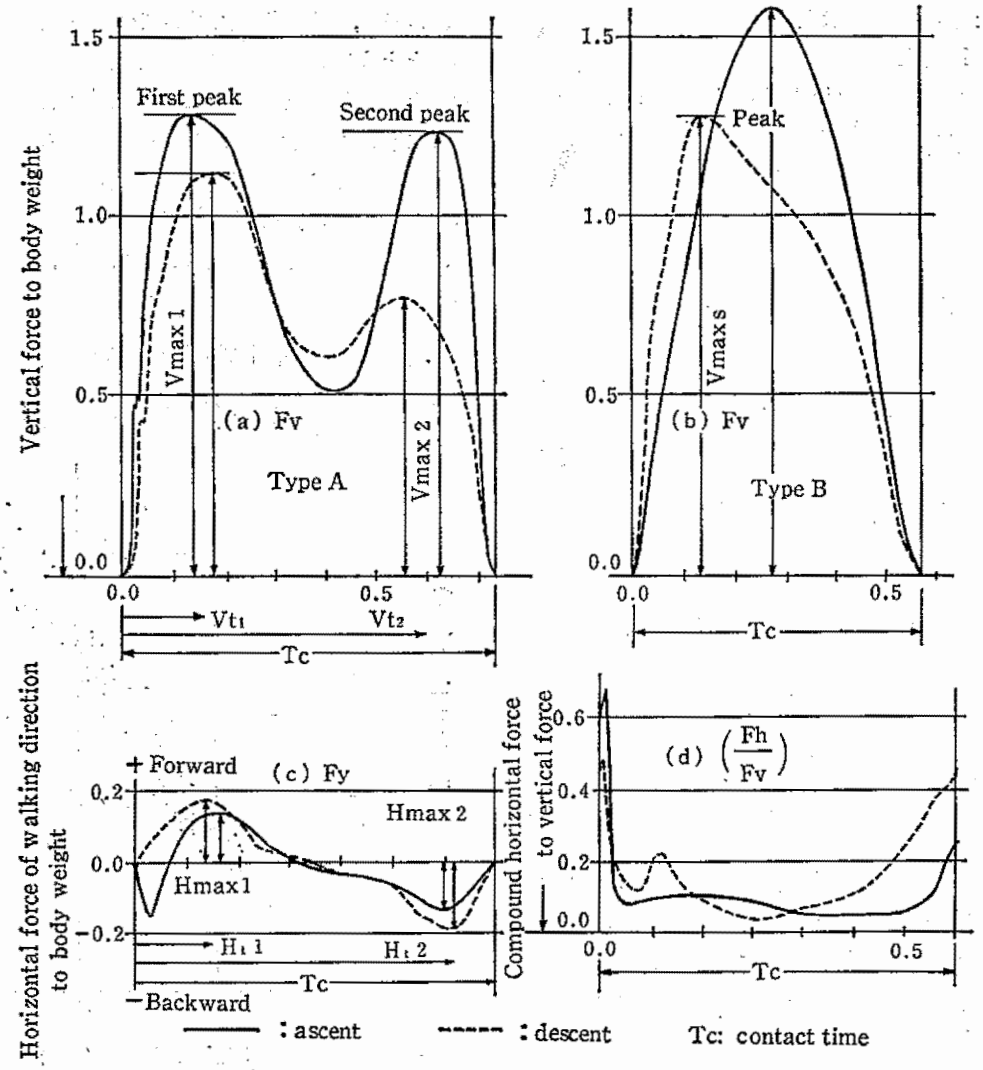


Fig.12 Typical output from force plate and definition of symbols
床反力計からの出力値と記号の定義

図示した。垂直方向反力値（F_v），進行方向の水平反力値（F_h），垂直反力に対する合成水平反力の割合（F_h/F_v）についての時間的な変動を図示してある。ここで，F_hは水平2方向の合力である。垂直反力は，2山型のType A の場合で V_{max1}，V_{max2} とし1山のType B の場合は V_{maxs} としている。最大荷重値（H_{max1}，H_{max2}，V_{max1}，V_{max2}，V_{maxs}）が出力するまでの時間を図中にそれぞれ H_{t1}，H_{t2}，V_{t1}，V_{t2}，V_{ts} と定義し示してある。階段寸法の違いによる床反力値の差は，見られなかったので一括して扱っている。

4.2.1　垂直方向反力値（F_V）

通常昇降の場合に平地歩行と同様に F_V 値は2山型になっている。昇りの時は，第1極大値と第2極大値との差は僅少であるが，降りる時はその差が大きい。早足歩行になるにつれて F_V 値の出力形状は，Fig. 12 で Type A から Type B に移行してくる。昇降時のストライド時間に対する最大垂直力値（V_{max}）の関係を **Fig.13**，14 に図示した。降りる時は，ストライド時間に関係なく，ほぼ一様の分布がみられるが，昇る時では，ストライド時間が0.6秒以下で急激に高い値を示す分布がみられる。足が踏面に接地してから反力 V_{max1}，V_{max2}，V_{maxs} が出力するまでの時間とストライド時間との関係を **Fig.15**，16 に図示した。これらの図で昇りの時の時間 V_{t1}，時間 V_{ts} の相関係数は 0.77，0.82 であるが，降りる時では 0.46，0.52 とばらつきが多い。昇りの時の時間 V_{ts} の近似式から，早足の時の垂直反力値は足接地時間のほぼ中間に現われていると言える。降りる時は，時間 V_{ts} は時間 V_{t1} に近い直線勾配になっていることから，足が接地するとまもなく最大垂直力が現われていると推測される。

4.2.2　水平方向反力値（F_Y）

Fig. 12 のように正弦曲線状の出力波形がみられるが，昇りの時は接地してからすぐに進行方向とは反対方向に水平力が働いてから正弦曲線状の出力波形がみられている。Fig. 13，14 から水平方向の第1極大値（H_{max1}）は，昇降ともにストライド時間が 0.5 秒以下の早足歩行になると増加している。ここで，第2極大値をとらずに第1極大値をとったのは，滑りは足が接地する瞬間に多く起っていること，ならびに第1極大値と第2極大値の大きさがほぼ等しいためである。最大水平方向反力値の平均は，昇りで 0.18（S.D.：0.07），降りで 0.22（S.D.：0.08）である。降りの時のがいくらか大きい。降りる時に足が踏面に接地して

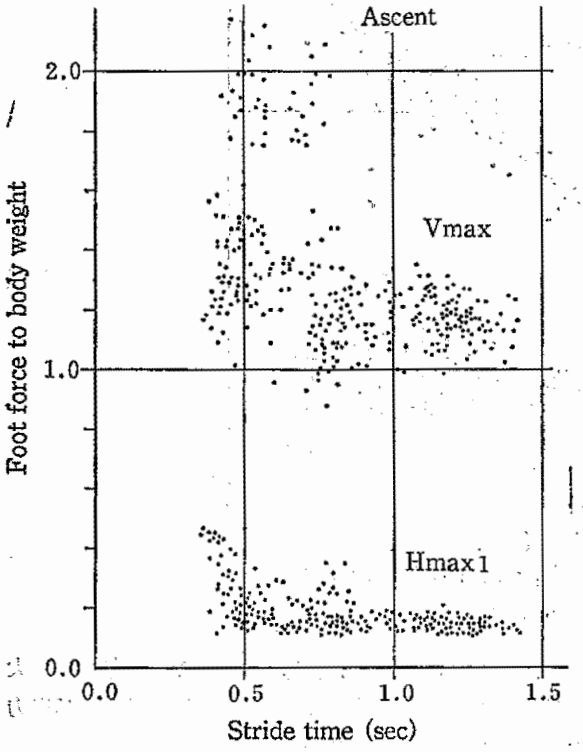


Fig.13　Stride time vs. foot force to body weight in ascent
ストライド時間と足反力，昇る時

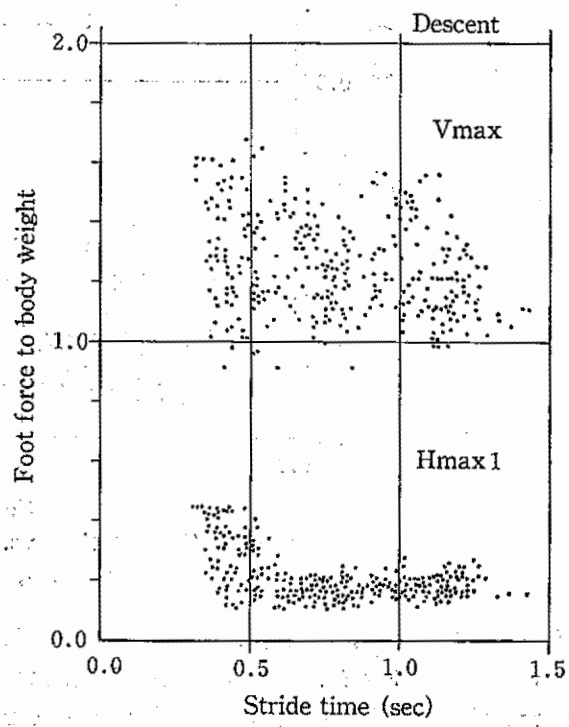


Fig.14　Stride time vs. foot force to body weight in descent
ストライド時間と足反力，降りる時

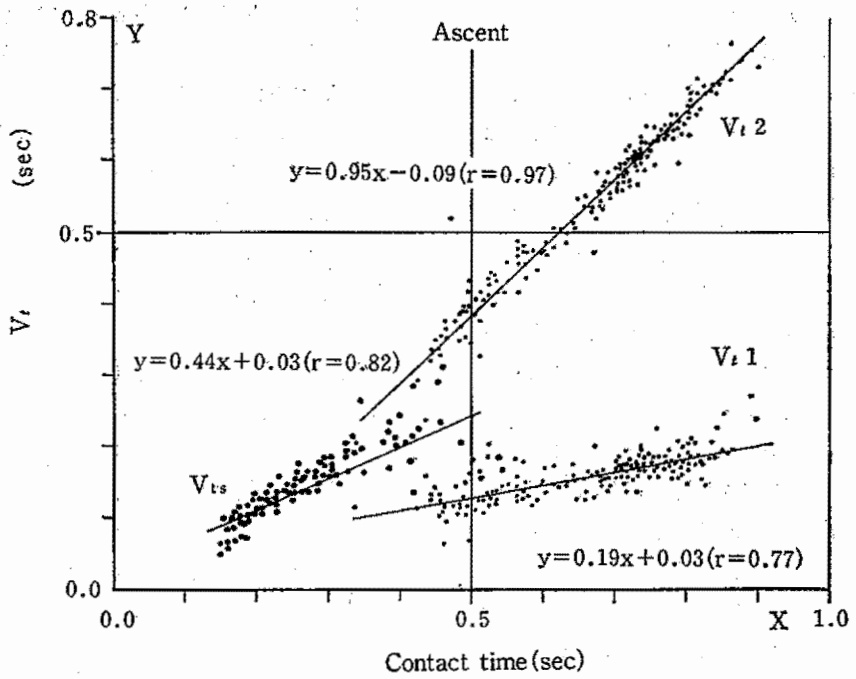


Fig.15 Contact time vs. V_{t1}, V_{t2} and V_{ts} in ascent
接地時間と V_{t1}, V_{t2}, V_{ts}, 昇る時

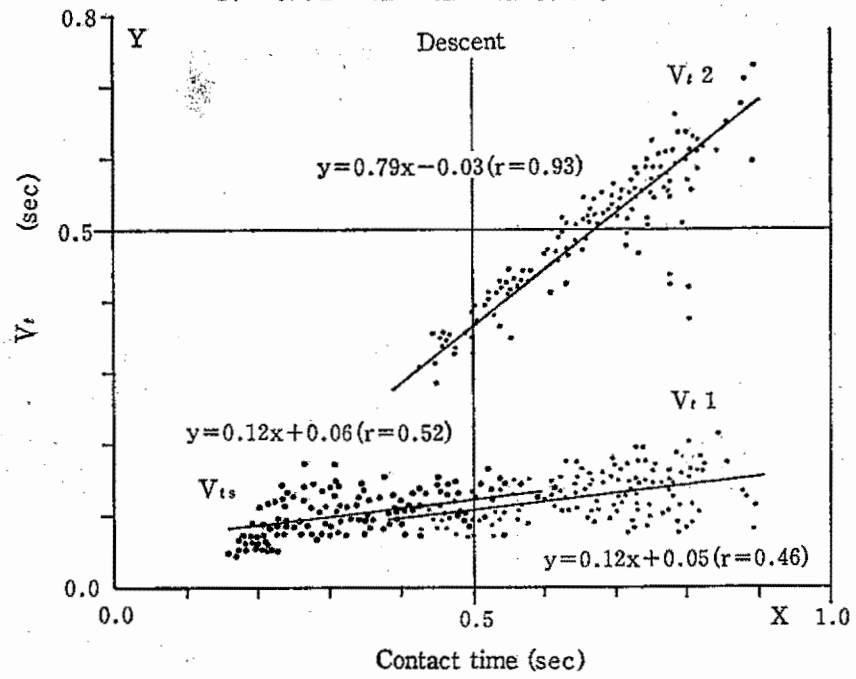


Fig.16 Contact time vs. V_{t1}, V_{t2} and V_{ts} in descent
接地時間と V_{t1}, V_{t2}, V_{ts}, 降りる時

から水平反力 H_{max1}, H_{max2} が出力するまでの時間 (H_{t1}, H_{t2}) とストライド時間との関係を **Fig.17** に図示した。垂直方向反力の場合の極大値が出力するまでの時間 V_{t1}, V_{t2} と比較して，時間 H_{t1}, H_{t2} は同じストライド時間に対していくらか大きな値となることから，一般的に言って，降りる時間は垂直方向の極大値が出力したあとに，直ぐに水平方向の極大値が出力する傾向が多く見られると推測される。

4.2.3　垂直力に対する水平力の割合 (F_h/F_v)

割合 (F_h/F_v) は Fig.12 に図示してあるように，

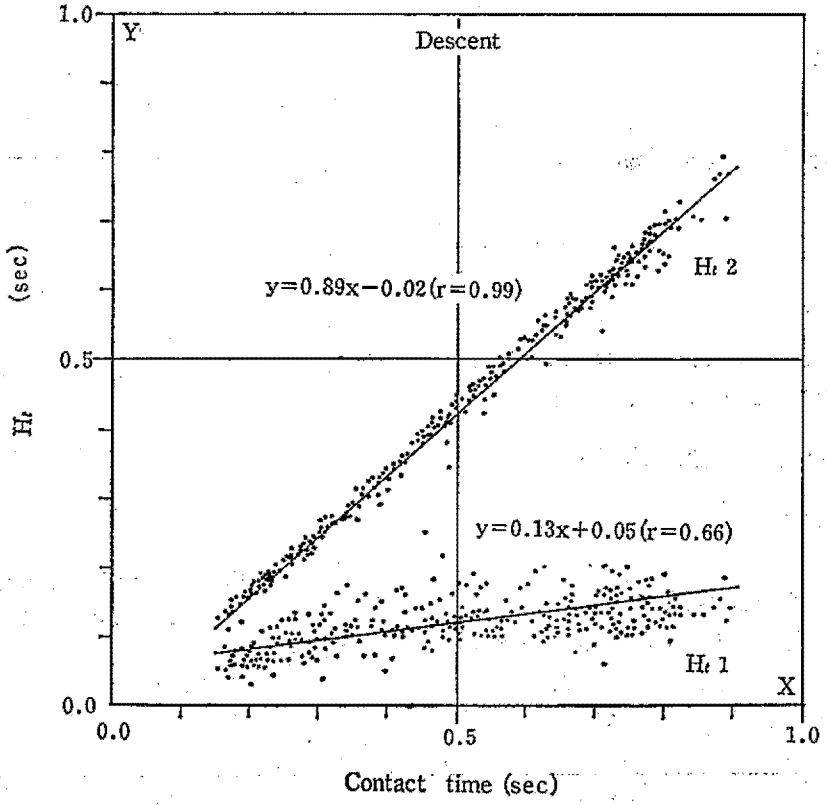


Fig.17 Contact time vs. H_{t1} and H_{t2} in descent
足接地時間と H_{t1}, H_{t2} 値，降りる時

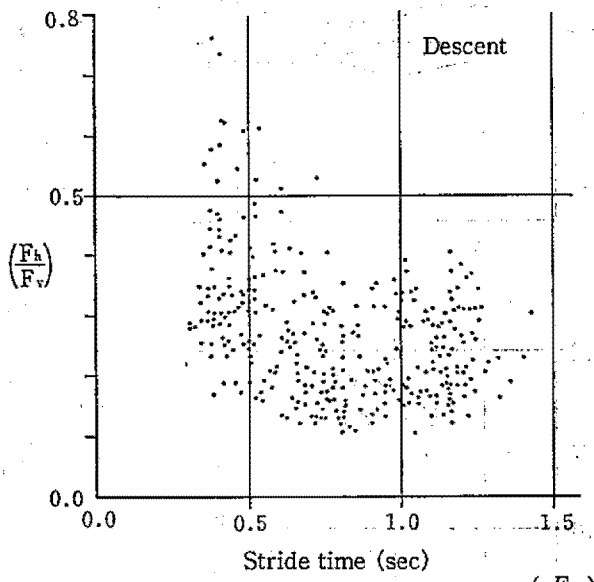


Fig.18 Stride time vs. maximum value of $\left(\frac{F_h}{F_v}\right)$; between H_{t1} and the time at which the ratio of vertical force to body weight becomes more than 0.2.
ストライド時間と $\left(\frac{F_h}{F_v}\right)$ の最大値，但し垂直力が0.2以上になってから H_{t1} までの間

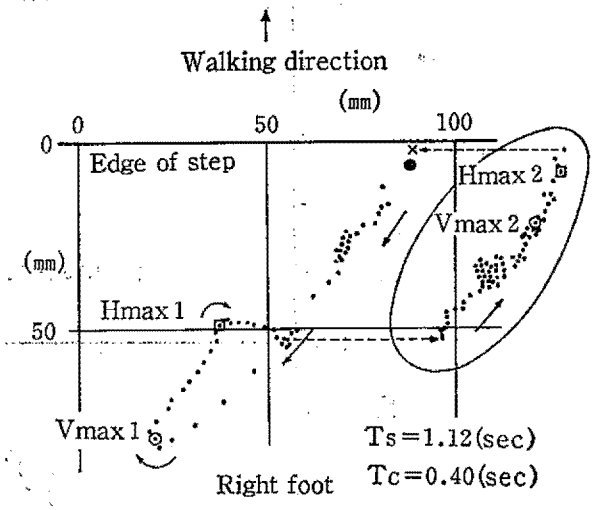
Table 3 Value of (F_h/F_v)
(F_h/F_v) の値

	F_h/F_v	
	Mean	S.D.
D_1	0.32	0.15
D_2	0.26	0.10
D_3	0.23	0.07
D_4	0.24	0.11

接地あるいは，足が離れる時に急激に高い値となる。滑りを評価するのに，足が接地してからどの時期での (F_h/F_v) 率を取ればよいかを決定するのは，非常に難しい。滑りが生じるのは，体重の2割程度の力が靴裏にかかった時から水平力の最初の極大値 H_{max1} が現われるまでの間に起こると仮定して，その間での (F_h/F_v) 率の最大をとった。ストライド時間と最大 (F_h/F_v) 率の間の関係を **Fig.18** に図示した。ストライド時間が0.6秒以下の早足歩行になるにつれて (F_h/F_v) 率が急速に増加している。**Table 3** には，階段寸法による平均 (F_h/F_v) 率を表わした。ばらつきが大きいために，各寸法ごとの比較が充分にできなかった。

4.3 作用点軌跡

通常歩行速度で降りる時に，足が接地してから離れるまでの右足による作用点軌跡を **Fig.19** に示した。ここで，作用点位置を図示する時に，行きと還りを区別するために一部，図を便宜上右横方向にずらしてある。この図から作用力 V_{max1}, H_{max1} が現われるまでの短い間に，踏面先端から 10 cm 以内の範囲で，作用点が大きく移動している。また歩行速度が増すと，進行方向の線上に真すぐに分布するようになった。



● Beginning of foot contact
× End of foot contact

Fig.19 Location of centre of pressure by 1/250 sec. intervals in descent
作用点の軌跡，1/250 秒間隔，降りる時

4.4 最短通過距離（G_1 値，G_2 値）

G_1 値，G_2 値と階段寸法，ストライド時間との関係について述べる。

4.4.1 階段寸法と G_1 値，G_2 値

階段寸法と G_1 値，G_2 値の平均値との関係を **Fig.20** に示した。横軸が各階段寸法記号であり，縦軸が G_1, G_2 値である。**Table 4** に階段寸法別，履物別の G_1, G_2

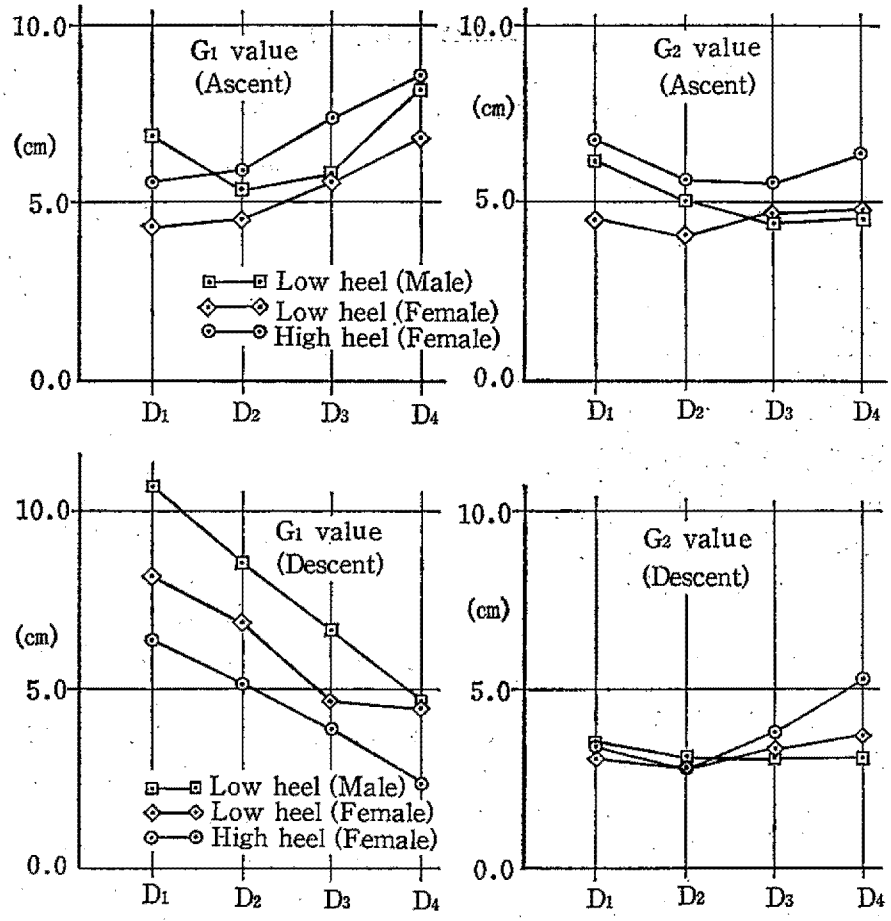


Fig.20 Dimension of stairs vs. G_1 and G_2 value
階段寸法と G_1, G_2 値

Table 4 Value of G_1, G_2 and L_f by dimension of stairs
階段寸法ごとの G_1, G_2 と L_f 値

Direction		Ascent						Descent					
Sex		Male		Female				Male		Female			
Sort of Shoes		Low heel		Low heel		High heel		Low heel		Low heel		High heel	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
G_1 (cm)	D_1	6.9	3.9	4.3	2.0	5.5	1.8	10.6	1.9	8.1	1.2	6.4	1.5
	D_2	5.4	2.1	4.5	2.0	5.9	1.8	8.5	1.7	6.9	1.4	5.1	1.1
	D_3	5.8	2.6	5.5	2.4	7.4	1.8	6.8	1.3	4.7	1.4	3.9	1.4
	D_4	8.0	4.5	6.8	2.4	8.5	2.9	4.8	1.4	4.4	1.7	2.2	0.9
G_2 (cm)	D_1	6.2	1.8	4.6	1.5	6.9	1.7	3.5	1.1	3.2	1.5	3.2	1.5
	D_2	5.1	1.6	4.2	1.3	5.7	1.5	3.1	1.0	2.8	0.8	2.8	1.4
	D_3	4.6	1.4	4.6	1.8	5.5	1.6	3.1	1.0	3.3	1.3	3.8	1.8
	D_4	4.6	2.7	4.7	2.3	6.3	1.8	3.0	1.2	3.7	1.2	5.3	1.8
L_f	D_1	0.79	0.15	1.05	0.11	1.10	0.06	0.75	0.04	0.92	0.06	1.03	0.11
	D_2	0.73	0.11	0.99	0.09	1.03	0.10	0.76	0.05	0.91	0.11	0.92	0.09
	D_3	0.68	0.10	0.91	0.07	0.93	0.12	0.75	0.04	0.82	0.06	0.92	0.05
	D_4	0.66	0.09	0.85	0.07	0.91	0.08	0.72	0.05	0.86	0.04	0.92	0.05

値を一覧表にした。

昇りの場合，一般に階段勾配が急になるほど G_1 値は増加している。また，階段寸法 D_1 を除いて，G_1値はハイヒールの場合に大きな値となっている。G_2 値についても，ハイヒールの場合は他より大きな値となっている。

降りの場合，G_1 値は，階段勾配が急になるにつれて，直線関係をもって減じている。また，G_2 値はハイヒールでの階段寸法 D_4 を除いて，他はほぼ3.5cmで一定である。降りる時の G_1 値が階段寸法と相関があるのは，次のように推察される。Fig. 8 で図示されたa点までの長さ s, h が階段勾配に関係なくほぼ一定で，またその図の bc 間での光点軌跡が直線的に移動していること，更に G_2 値がほぼ一定値をとることから，階段勾配が急になれば，G_1 値は小になり，緩かになれば大となるからである。実際に男子の場合について，上記の条件から数式をつくり，s=13.0cm, h=22.6cm, G_2=3.2cm として計算し G_1 値をもとめてみると，実測値とほぼ等しい値が得られた。

4.4.2 ストライド時間と G_1 値，G_2 値

Fig.21 に男子の場合の昇降時のG_1値，G_2値のストライド時間に対する分布を図示した。昇る時，G_1 値は，ストライド時間が0.8秒以下になるにつれて急速に増大している。この傾向は速く昇ろうとすると，跳びあがるような動作をすることからも首肯できる。昇降とも，G_2 値は，ストライド時間に対してほぼ一様の分布であるが，降りる時のが G_2 値の分散度が小さい。降りる時の G_1 値は，ストライド時間が長くなるにつれて G_1 値は小となる。しかし，この G_1 値の傾向は，勾配が急になる階段寸法 D_4 ではみられず，ストライド時間に対して一様な分布となっている。なお，女子の場合もほぼ男子と同じ傾向を示した。

4.5 靴裏接地割合（L_f 値）

Fig.22 に昇降時の L_f 値の平均値と階段寸法との関係を示した。この図から，降りる時の L_f 値は寸法に関係なくほぼ一定であるが，昇る時は踏面が狭くなるにつれて L_f 値はいくらか減少している。ハイヒールの場合の平均 L_f 値は常に他の履物より大きな値となっている。**Fig.23** は，男子の場合のストライド時間に対する L_f 値の分布図である。降りる時は歩行速度に関係なく，分散の少い一様な分布を示している。女子の場合は昇降による差はみられなかったが，男子の場合と同様に歩行速度に関係なく一様な分布であった。以上から L_f 値は，歩行速度に関係なくほぼ一定値を取る傾向がある。階段寸法によって昇る時は多少

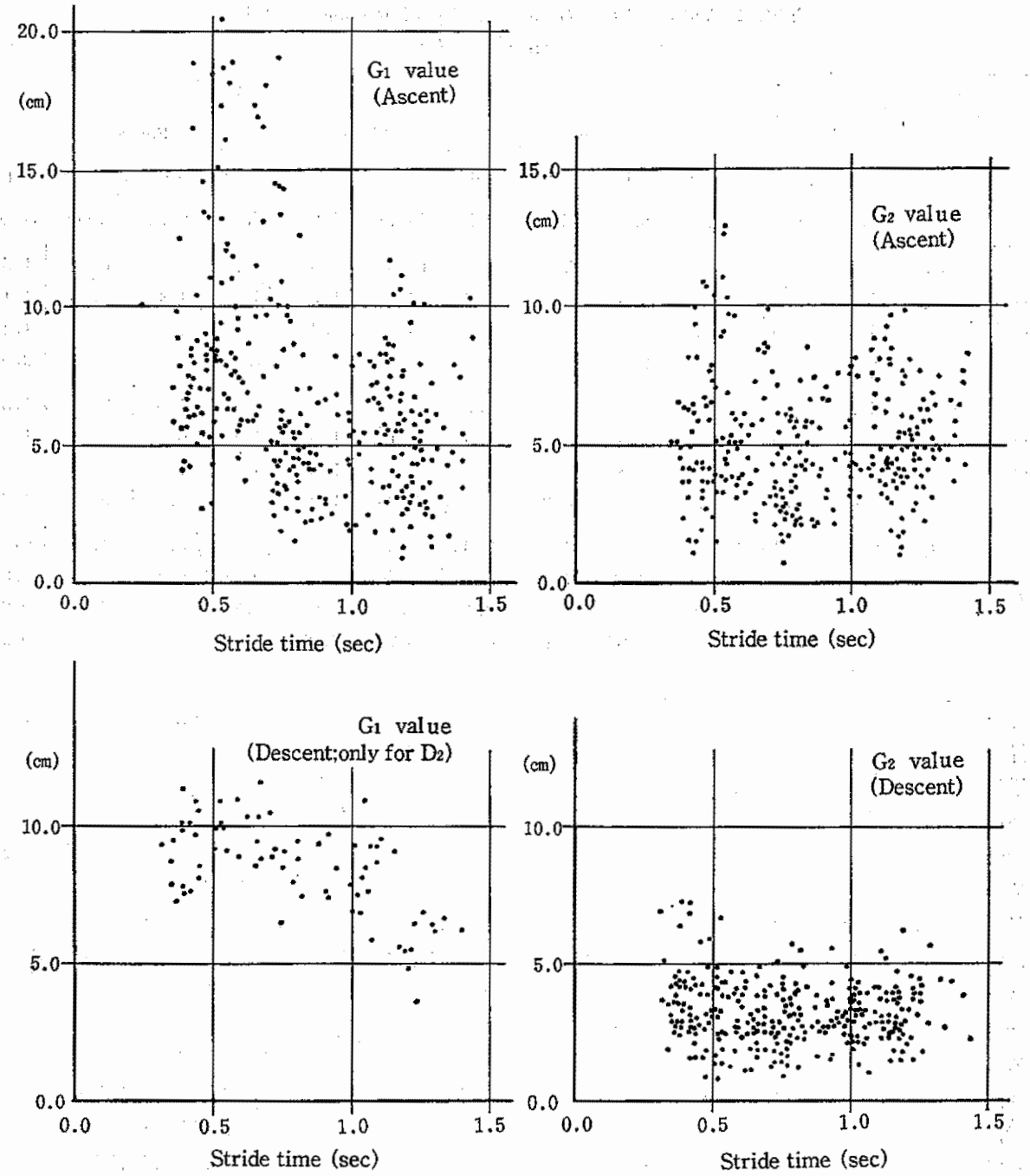


Fig.21　Stride time vs. G_1, G_2 value ; male
ストライド時間と G_1, G_2 値，男子

L_f 値がかわってくるが，降りる時は階段寸法に関係なく一定値を取ると推測される。

4.6　靴裏接地角度（A_f 値）

降りる時に，靴先端が踏面に接地する瞬間での踏面と靴裏との角度を，歩行軌跡を撮影したフィルムから計測した。その結果を **Fig.24**, **Table 5** に示した。

この図から，接地角度 A_f は階段勾配に密接に関係していることがわかる。ハイヒールの歩行では，角度 A_f が他より低い値となっている。**Photo. 3** は，階段寸法 D_4 の場合で足が踏面に接地するまでの動きをストロボ撮影した例である。この写真でも，接地時の靴裏角度を見ると，ハイヒールとローヒールでは足首の回転および接地角度が異なっているのがわかる。以上

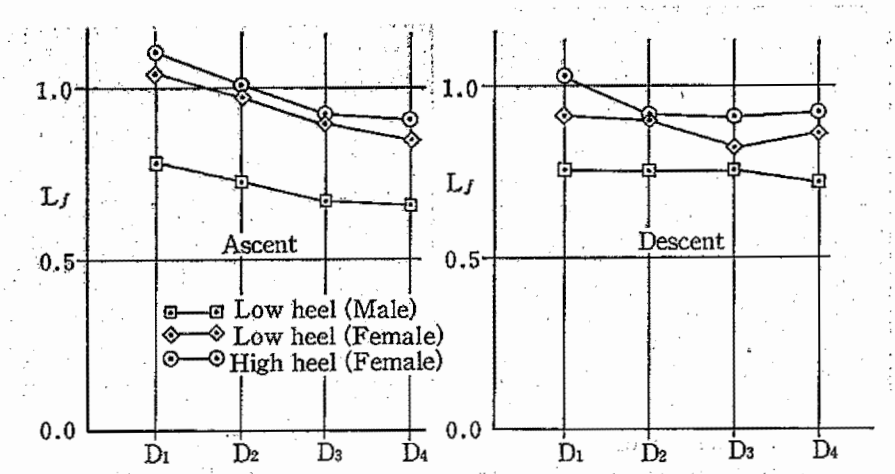


Fig.22 Dimension of stairs vs. average value of L_f
階段寸法と L_f の平均値

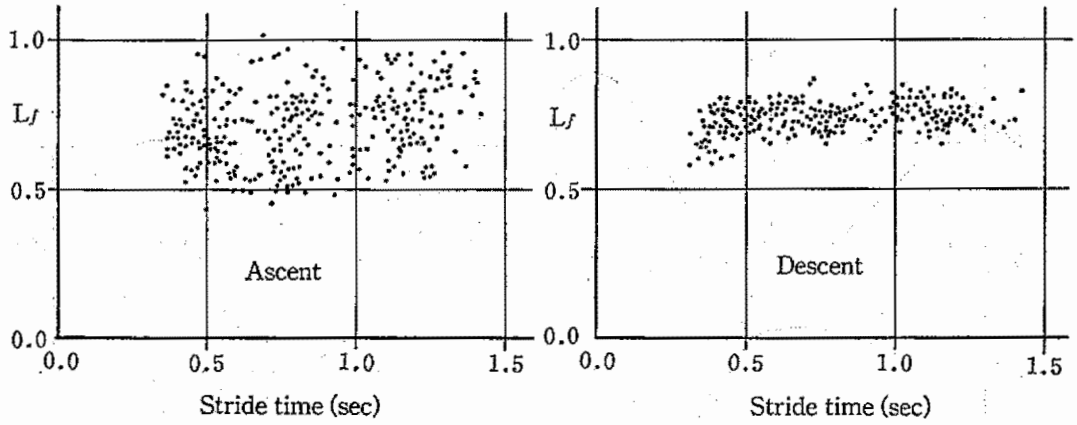


Fig.23 Stride time vs. L_f value ; male
ストライドタイムと L_f 値，男子

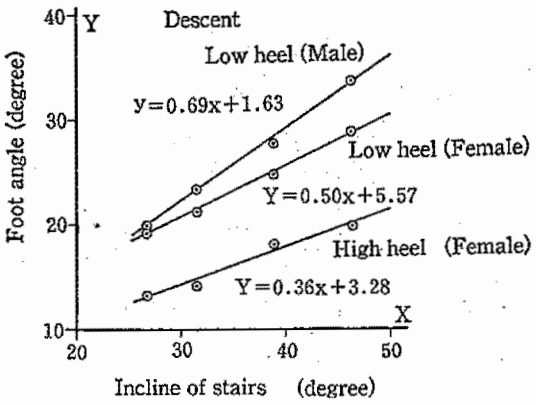
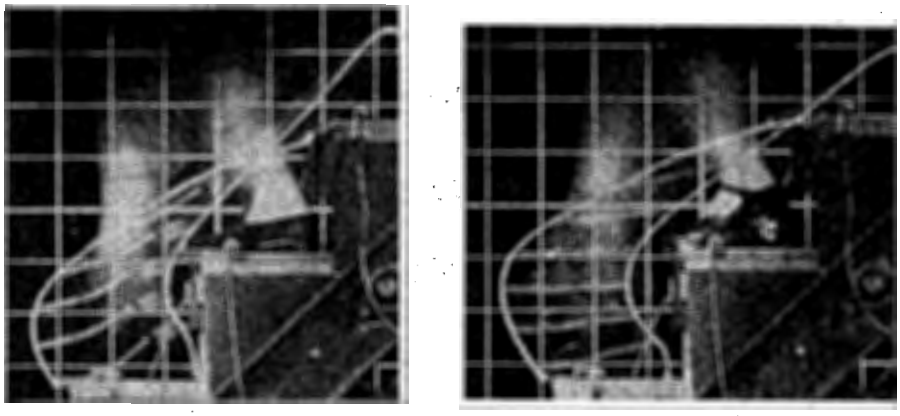


Fig.24 Incline of stairs vs. the foot angle just in contact with the step
階段勾配と接地瞬間の足角度

Table 5 Foot angle just in contact with the step by each incline of stairs
階段勾配と接地瞬間の足角度

Dimension	Incline of stairs	Male		Female			
		Low heel		Low heel		Hi-heel	
	Degree	Degree	S. D.	Degree	S. D.	Degree	S. D.
D_1	26.6	19.9	3.0	19.1	2.1	13.1	2.5
D_2	31.3	23.5	3.0	21.0	2.9	14.2	2.4
D_3	38.7	27.7	2.2	24.8	4.1	18.1	3.0
D_4	46.3	33.8	3.6	28.9	3.1	19.8	2.6



a) Low heel　　b) High heel

Photo. 3 Intermittently flashed photo. of a foot ; dimension D_4
足の断続写真，寸法 D_4

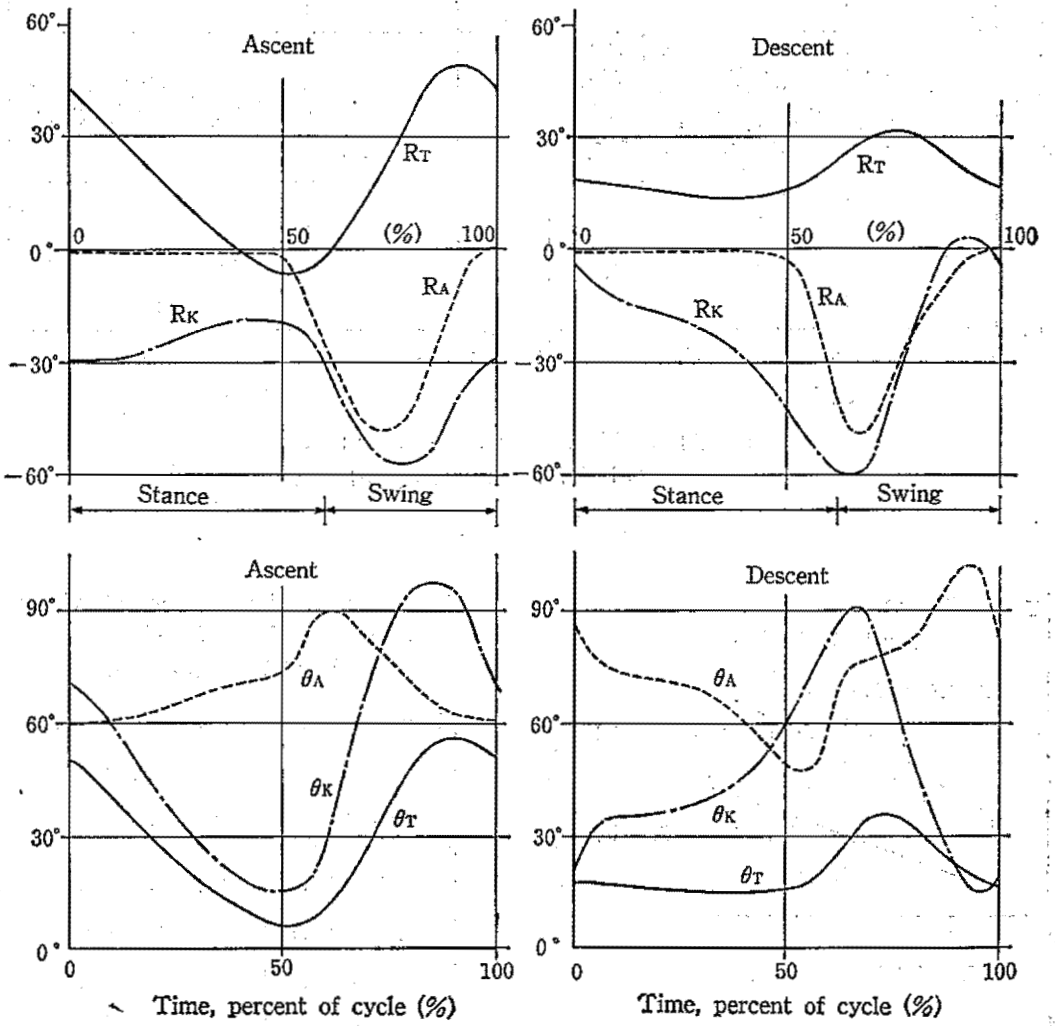


Fig. 25 Percent of cycle vs. joint angle ; dimension D_2
1周期あたりの百分率と関節角度，寸法 D_2

から，ハイヒールでの歩行ではローヒールと比較して足首の回転が少いと推測される。

4.7 関節角度

Fig.25 に関節角度の時間的変化を示した。図の横軸は，1ストライド時間を 100% として表わしている。Fig. 9 に図示した大腿部の鉛直線に対する角度 R_T，下腿部での角度 R_K，足部での角度 R_A の動きをみてみると，昇降によって角度 R_K はまったく異なった傾向を示している。角度 R_T は，昇る時に大きな動きを示すが，降りる時はその振幅が小さい。足部での角度 R_A には，昇降による差はみられない。胴部と大腿部につくられる角度 θ_T，大腿部と下腿部での角度 θ_K，下腿部と足部での角度 θ_A の動きをみてみると，昇りでの角度 θ_K と角度 θ_T は，時間軸に対してほぼ類似した動きを示している。足角度 θ_A は，昇りの時に最初は開がり，のち狭まり接地している。降りの時は，狭まりのち開がり接地している。

脚部の動きをみるために，ストロボ撮影した写真を Photo. 4 に示す。1/10 秒間隔に断続的に撮った動きである。昇りで足が接地している時は，下腿部でなく大腿部に角度変化が多くみられることから，この時点で体重を大腿部の動きによって押し上げていると言える。降りる時で，足が接地している時は，大腿部でなく下腿部に角度変化が多くみられていることから，下腿部で主に体重心を下降させる働きをしていると言える。

以上から，昇降における動作の違いは下腿部と大腿部の動きに特徴が現われていると言える。

4.8 結果のまとめ

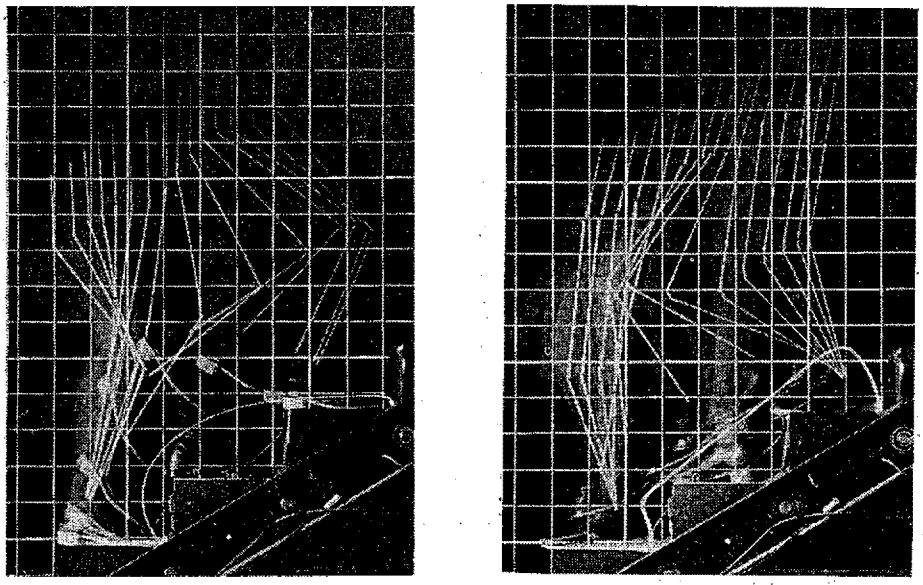
次に，ここでハイヒール，早足歩行および階段寸法と昇降動作について考えてみる。

4.8.1 ハイヒールでの昇降動作について

G_1 値，G_2 値の測定結果から，他の履物と比較して昇る時はつまずいたりすることは少いが，降りる時に踵をひっかけやすい。階段勾配が緩いと Fig. 8 で図示されたc点部で，急だとb点部とc点部で踵を引掛けやすい。降りる時に，足が踏面に接地するまでの間に足回転が充分におこなわれていないことから，爪先から着いて除々に体重を足にかけてゆくことができなくなっている。このために，急いで降りようとしたときには，不安定な履物のために衝撃で靴がよじれ，足を捻挫したりすることが多いと考えられる。L_f 値が昇降ともに他の履物の場合より大であることから，ハイヒール歩行の場合は，踏面を広く使うことがわかる。以上から，ハイヒールによる階段災害は，降りる時につまずきか，踏面に足裏を充分に接地することができなくて起る踏み外しの場合が多いと考えられる。

4.8.2 早足歩行の昇降動作について

(F_h/F_v) 率が滑り度合を示すとすれば，降りる時は速くなるほど，特にストライド時間が 0.7 秒以下とな



a) Ascent　　b) Descent

Photo. 4 Intermittently flashed photo of a leg ; dimension D_2
脚の断続写真，寸法 D_2

る歩行速度（約 3.3 km/h）で，急激に滑りやすくなると言える。昇る時に早足歩行をすると G_1 値，G_2 値が大きくなることから，つまずいたりする可能性は少い。降り時の G_1 値，G_2 値，L_f 値は，遅い歩行の場合と比較して大きな差はみられなかった。

4.8.3 階段寸法について

階段勾配が急になると，昇りの場合，特に危険になるということは，今回の実験データーから述べることはできない。むしろ，G_1 値などは階段勾配が急になるにつれて漸増しており，安全側なのである。降りる場合は，明らかに危険であり G_1 値は，階段勾配が急になるにつれて漸減している。L_f 値は，踏面長さが狭くなるにつれて，昇りでいくらか減少し，降りでほぼ一定値を保っている。このことから，足裏は踏面にある一定の長さで接地しようとするために，特に降りる時に踏面がせまいと当然歩行も制約され歩きずらさが増してくると推察される。

5. 結　　語

歩行速度の変化につれて，歩幅も変ることから，降りる時の安全な踏面寸法は，歩行速度によって決定されてくると言える。そのために，一定の踏面寸法が割振られた階段では，安全な歩行をするための限界歩行速度が存在すると考えられる。「降りる時は，絶対に急がない。」これが階段災害防止のための手近な歩行者側の対策である。今回の実験データーからでは安全な踏面寸法を決定することはできないが，決定に際しては，靴長，靴の種類，歩行速度を考慮すべきである。

いままでに，多くの踏面と蹴上の間の関係式が提案されている。そのなかでも，建築学分野で最も知られているのが，「歩幅は，蹴上が 1cm 増すごとに 2cm の割合で減少する。」という階段寸法設計上，使用されている法則である。確かに，この考え方は，昇る時には妥当であると考えられるが，降りる時には，蹴上が高くなると踏面がせまくなりすぎて非常に不適当である。このことから，昇りを主に考慮した階段設計から，降りる時の安全を考慮した階段設計へと目を向けてゆくべきであろう。

本研究で用いた手法は，主に整形外科学，体育運動学，自動制御工学の面で汎用されている。ここでは，特に安全の面から，滑り，つまずき，踏み外しの災害要因を考慮して動作解析を新しく試みた。ここで得られた基礎資料は，災害防止のための糸口となるばかりでなく，今後の課題である安全な踏面長さの決定，階段すべり止用具，ノンスリップ用すべり試験機の開発などに応用されてゆくことを期待する。

6. 附　　記

実験データーの収録処理は電子計算機システム FACOM 230/35 を使用した。写真解析装置は，大沢商会の GRADICON SYSTEM によった。

（昭 54.2.27 受付）

参考文献

1) 木下，永田，産業安全研究所技術報告，RIIS-TN-75-9 (1976)
2) 木下，永田，“階段・通路の安全性に関する研究（第3報）”，日本建築学会大会梗概集（東海）昭和 51 年 10 月
3) 永田，木下，“階段昇降動作時の歩行解析”，日本人間工学会関東支部，昭和 51 年 12 月
4) 木下，永田，“階段での災害調査結果について”，安全，28 巻，1 号 (1977)
5) K. Kinoshita, H. Nagata, “Statistical research on stair accidents”, Summary of papes on pedestrian behaviour, the Working Group on Pedestriahs Behaviour, No. 1, Jan. (1978)
6) 岩井昂，小住兼弘，“床反力による歩行の力学的研究”，宮城教育大学紀要，7，45 (1972)
7) 河村洋，“人間の正常歩行”，精密機械，40 巻，1 号 (1974)
8) 土屋和夫他，“歩行の解析システム”，バイオメカニズムシンポジュウム論文集，東京大学出版会 (1972)
9) F. C. Harper, “The forces applied to the floor by the foot in walking”, National Building Studies, Research Paper 32, HMSO, London (1967)
10) R. Ward, P. Randall, “Optimum dimensions for domestic stairways: a preliminary study”, Architects Journal Information Library 5, July (1967)

産業安全研究所研究報告　RIIS-RR-27-3

昭和 54 年 6 月 30 日　発行

発行所　労働省産業安全研究所

〒 108　東京都港区芝5丁目35番1号

電話 (03) 453—8441(代)

印刷所　新日本印刷株式会社

UDC 614.821：614.8-026.：69.026.1
階段・通路の安全性に関する研究（第2報）
—階段昇降動作の基礎的性状—
永田久雄・木下鈞一
産業安全研究所研究報告
RIIS-RR-27-3（1979）

階段災害は，滑り，つまずき，踏み誤りのいずれかによって起っていると考えられる。今回の報告書ではこれらの要因と関連のある次の値を実験で得た。床反力値，靴裏接地割合，靴裏接地角度，踏面先端を靴先端・後端が通過する時の最短距離などである。踏面と蹴上との組み合わせを4組，被験者は男子4名，女子2名を実験変数として選んだ。特に，女子については履物の違いによる実験を行なった。

実験結果から判断して，降りる時の安全な歩行は，階段寸法と歩行速度に密接に関連している。ハイヒールを履いた被験者は，降りる時に足首を充分に回転させて接地することができないために，踏面に足が接地する時の衝撃を柔らげることができないように思われる。

（図 25，表 5，写真 4，参 10）

UDC 614.821：614.8-026：69.026.1
Accident Prevention on Walkways and Stairways (Second Report)
-Experimental Study of Human Motion on Stairs-
H. Nagata and K. Kinoshita
Research Report of the Research Institute of Industrial Safety
RIIS-RR-27-3（1979）

Stair accidents are supposed to occur by one of these slipping, stumbling and miss-footing. In this report the following values connected with these factors are derived from human motion studies. Force values, foot contact length, foot angle and the short distance between the edge of the step and the tip of a shoe. Four settings of combinations of tread and rise, two females and four males were chosen as experimental variable conditions. Especially for females the experiments were carried out by different footwears.

Judging from these experimental results, safe walking is closely related to the dimensions of stairs and walking velocity. Subjects wearing high heels, in descent, can not rotate their ankle enough to soften the footing on the tread.

(25 figures, 5 tables, 4 photos, 10 references)