

# 歩行速度と歩容

体育学研究室

小島 武次

表1 被検者の特性

被 検 者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)
T	22	167.0	55.0
S	27	167.0	63.0

人間の身体活動の中で、一般に日常よく行なわれる歩行について、これまで多くの研究者によって数多くの研究が行なわれている (MURRAY (1967), 宮下 (1958))。歩行動作についての分析では、ストロボ法、映画、圧力板、バゾグラム、筋電図などを用いて様々な項目についての研究がなれしてきた。しかし、その多くは水平面上での自由な速度の、いわゆる自由歩行であり、異った歩行速度に対し、その速度を生み出している身体各部の動きについて研究されたものは数少ないようである。

意志的及び積極的な身体の動きをもその研究領域の主な部分としている体育学の分野において、身体を移動させるための主な二つの手段のうちの一つである歩行について、速度の変化のなかで、その動きを把握することは意味のあることと思える。本研究は、水平面上における異った速度での歩行について、下肢の動きを中心に分析、比較を行い、歩行速度と歩容との関係を明らかにしようとしたものである。

## 1. 実験方法

60m/分~120m/分の範囲での歩行動作を、両側面から2台の高速度16mm映画カメラで撮影し、その映画フィルムによって歩行動作の分析を行なった。歩行における支持脚の動きを中心にし、膝、足関節の屈伸、身体重心の軌跡及びそれらの相互関係等を分析項目とした。

### (1) 日時、場所

1975年12月2日、東京大学教養学部陸上競技場にて歩行実験が行なわれた。

### (2) 被検者

東京大学教育学部体育学研究室に属する健康な男子学生2名である。被検者の特性を表1に示す。

### (3) 撮影条件

高速度16mm映画カメラ (フォトソニックス16—1 P

フォトソニックス社製) 2台を用い歩行動作を両側面から同時撮影した。2台のカメラを歩行路と垂直に各20m離し、向い合わせた。レンズの高さは、地上から約1.1mである。撮影コマ数は、進行方向右側のカメラが100コマ毎秒であり、左側のカメラは87~95コマ毎秒である。シャッタースピードは、1/800秒である。画面に3~4歩入るよう、画面の大きさを調整した。

### (4) 歩行条件

歩行速度を60m/分、80m/分、100m/分、120m/分、140m/分の5段階に規定し、遅いものから速いものへと順に行なった。各試行の前に、規定された速度で歩行できるよう、練習を1~2回行なった。歩行は画面の中央に位置する所より、15m手前から画面をはずれて約5~6mの所まで行なわれた。歩行は(水泳帽子)、水泳パンツを着用し、運動靴で行なわれた。

### (5) フィルム分析

フィルム分析は、ナック社製のフィルムモーションアナライザーを用いて各コマ毎に行なった。計測部位は、松井の方式による身体重心算出のための各部位、及び膝、足関節等角度算出のための脚の大転子上端部、外側上顆の下端から約1cm上の部位、外果中央、第一中足骨頭である。特にマークが必要な部位には、幅19mmの白色又は黒色のビニールテープをまきつけたり、約15mm角のビニールテープをはりつけた。

これらの計測部位から膝関節角度、足関節角度、身体重心の位置、身体重心と足関節が地面となす角度等を算出した。身体重心については2台のカメラによる両側面の画

面から合成した。各角度については一画面上で角度を算出した。フィルム速度が2台のカメラで違っている点については、各画面の同一身体部位を用いて補正を行なった。

速度値は計測、又は算出した距離地に基きバイ・アイで距離曲線を求め、それを数値微分することにより求めた。

## 2. 結果

### (1) 歩行分析の一例

右側面から撮影した異った速度の歩行姿勢を図1に示す。左足の踵接地から左足の足先が離地直前、または離地までを図示してある。上から順に歩行速度が大きくなっている。No. 2について歩行中の身体各部位の位置

関係を示す(図2。)上から順に頭頂、体幹の中央の胸骨上縁の高さ(胸)、左側大転子上端部(腰関節)、左外側上顆端から約1cm上の部位(膝関節)、外果中央(足関節)、第一中足骨頭(足先)である。身体像は、左足の踵が接地してから、次の踵接地後1コマまで0.1秒毎のものである。身体上部は全体に正弦曲線のような上下動を繰り返しているが、膝関節、足関節、足先と下部に移るにしたがって、その動きは正弦曲線的なものからはずれてくる。足を中心に身体が前方向へ回転を行なっており、身体が足首の真上近くで身体上部は高い位置をとり、足先が離地した直後それらは低い位置をとり、離地後の遊脚期の中程で再び高い位置をとり、次の左踵接地時に位置が低くなっている。つまり、身体上部は踵接地

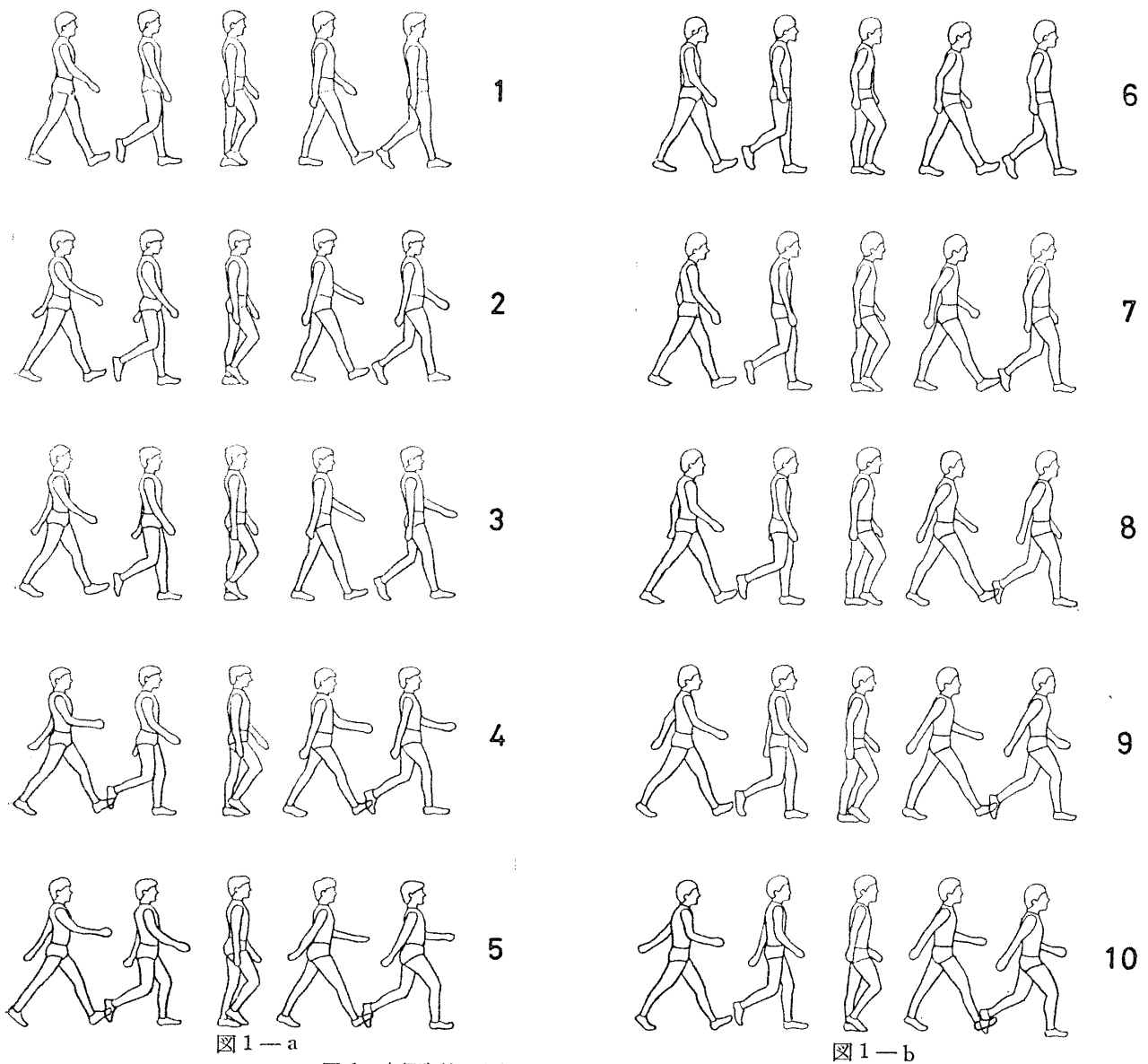


図1 歩行姿勢の変化

- a) Subj. T 1から5へと順に歩行速度が大きくなる。
- b) Subj. S 6から10へと順に歩行速度が大きくなる。

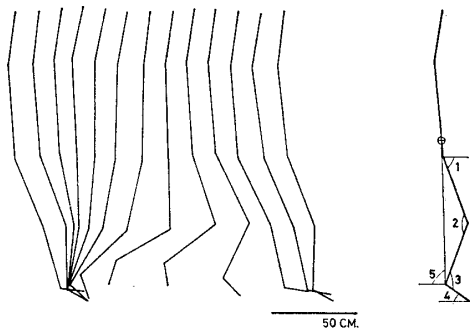


図2 歩行姿勢 左踵接地から次の左踵接地直後まで。右端の図は測定した身体各部の角度を示している。1)腰関節 2)膝関節 3)足関節 4)足と地面がなす角 5)身体重心と地面がなす角

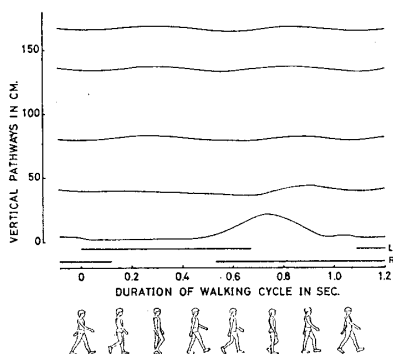


図3 身体各部の上下動 上から頭頂, 胸, 大転子, 膝, 足首の順, 下の2本の直線は, 足が地面に接地している期間を表わす。L・左足, R・右足 縦軸: 地面からの高さ 横軸: 左踵接地後の時間

から次の踵接地までの間に高低各々2回ずつの位置変化を行なっている。これらの身体各部の上下動について軌跡としてみたものを図3に示す。左踵が接地する直前から次の左踵接地の直後までである。最初の左踵接地の時点を横軸に0として表わしてある。以下においても同様に左踵接地を基準とし, 横軸に0として表わす。上から頭頂, 胸, 大転子, 膝関節, 足関節の順である。尚, 下に2本の直線で足の接地時期を示してある。先にも述べた通り, 頭頂, 胸, 大転子は同様な上下動を各2回行なっている。膝関節は接地時に小さな上下動を行い, 遊脚期にやや大きな上下動を行なっている。足関節については, 離地少し前から上昇し始め, 離地直後に最高点に達し, 次の接地直前にわずかな上下動を行なっている。上下動の振幅は頭頂, 胸, 腰関節が各々約4cm, 膝関節が約10cm, 足関節が約10cmである。振幅については, 腰関節以上はほぼ同じであるが, その位相については, 遊脚期において腰関節が頭頂, 胸よりも遅れている。

次に, 腰関節より上の身体各部の上下動を生み出している下肢の動きについて, 関節角度の変化からみる(図4)。この図の各曲線は上から順に腰, 膝, 足の各関

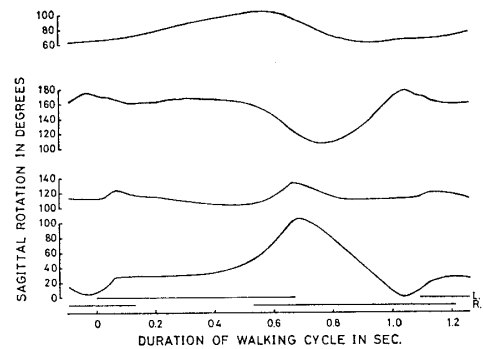


図4 関節角度の変化 上から順に腰関節, 膝関節, 足関節, 足と地面のなす角度 縦軸: 角度 横軸: 時間

節の角度と, 足が地面となす角度である図2の右端の像の1, 2, 3, 4にそれぞれ相当している。腰関節は60°で接地し, その角度を大きくしていき, 接地後約0.34秒で90°の値をとり, 114°まで伸展し, 以後屈曲を行い, 次の接地約0.15秒前から伸展を開始している。膝関節は接地直前に最大伸展位をとり, その後やや屈曲しながら170°で接地し, その時点から約12~3°屈曲を行い, 伸展, 屈曲を行い, 離地後, 0.08秒で最大屈曲を行い, 以後, 次の接地に向い角度を大きくしていく。足関節は107°で接地を行い, 接地後急激に伸展を行い, 以後ゆるやかな屈曲を行う。110°前後で屈曲から伸展に移り, 離地直前まで伸展を行い, 屈曲, 固定, そして次の接地へという経過をとっている。足と地面のなす角度は, 接地後足底が全部地面につくことから, 約30°という一定の値をとり, 以後離地まで伸展を行い屈曲に移り, 次の接地直前に最大に屈曲する。

これらの足の動き及び他の身体部分の動きの総合された結果として身体重心の動きがあるわけであるが, 身体重心の上下動及び足関節を中心とした身体の回転という面から歩行動作をみたものが図5である。上の曲線は合

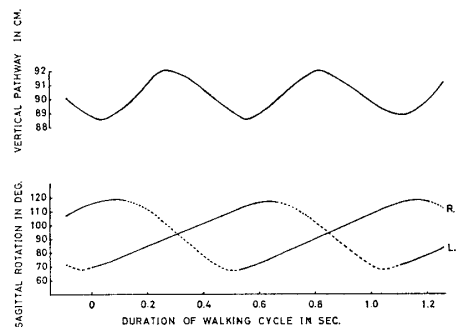


図5 身体重心の上下動, 重心角の変化 縦軸: 地面からの高さ, 重心角 横軸: 時間 重心角(下図)については, 実線は足が接地している期間を示す。R・右足 L・左足

表 2

No.	歩行速度 m/分	周 期 秒	ス ライ ド cm	歩 数 歩/分	片脚(左)支 持 時 間 秒	%	左脚支持 時 期 秒	%
1	68	1.19	133	101	0.43	36	0.75	63
2	81	1.09	148	110	0.41	38	0.67	61
3	88	1.02	147	118	0.38	37	0.61	60
4	112	0.96	180	125	0.38	40	0.58	60
5	127	0.91	196	132	0.37	41	0.54	59
6	67	1.27	136	94	0.44	35	0.74	58
7	77	1.13	149	106	0.41	36	0.70	62
8	95	1.05	168	114	0.40	38	0.62	59
9	114	0.96	182	126	0.37	39	0.57	59
10	121	0.89	184	135	0.34	38	0.52	58

成された身体重心の上下動の軌跡である。下の曲線は、身体重心と左右の足関節を結んだ線が水平面となす角（以下重心角と呼ぶ）であり、図1の右端の5に相当するものである。実線の部分は接地している時期を表わしている。左側は接地時約70°であり、以後ほぼ一定な角速度で前向き回転を行い、約0.26秒後身体重心は足関節の真上を通過している。その後も前方への回転を続け、左足の離地直前に前方への回転が止む。右側については、左側が約112~3°に達したところで踵接地があり、以後左側と同様な動きである。身体重心の上下動との関係を見ると、左右の実線が二重になった、つまり両脚支持の直後身体重心は最低位をとり、支持脚側の重心角度が90°を少し越えた時点で最高位置をとっている。体幹の角度（左右の大転子を直線で結んだところの中点と胸が水平面となす角度）については、踵接地直後前方向へ傾き、支持脚の上へきた直後、後方へ傾いている。その幅は、90.7°~95.2°である。

(2) 速度の変化に伴う歩容の変化

各歩行速度、ストライド、歩数、周期、片脚支持、左脚支持の時間を表2に示す。Subj. Tについては60m/分~127m/分、Subj. Sについては67m/分~121m/分の速度の範囲の歩行であった。

以後、異った速度の歩行について比較を行うため、多くの場合、踵接地を基準にし、同側の次の踵接地までの時間を100%で表す。

体幹の角度については歩行速度が大きくなるにつれて、その傾きが小さくなる、つまり前傾している(表3)。

腰関節：踵接地時点での角度は、ほとんど変化がないか、または速度が大きくなるにつれてやや角度が小さくなるようである。最大伸展時の角度は速度が増すにつれ

表 3

No.	上体の傾き (度)	
1	92.8—95.5	2.8
2	90.7—95.2	4.5
3	90.9—94.5	3.6
4	89.5—92.0	2.5
5	88.5—91.6	3.1
6	89.9—93.7	3.8
7	90.1—92.8	2.7
8	89.5—92.8	3.3
9	86.4—89.7	3.3
10	85.0—90.9	5.9

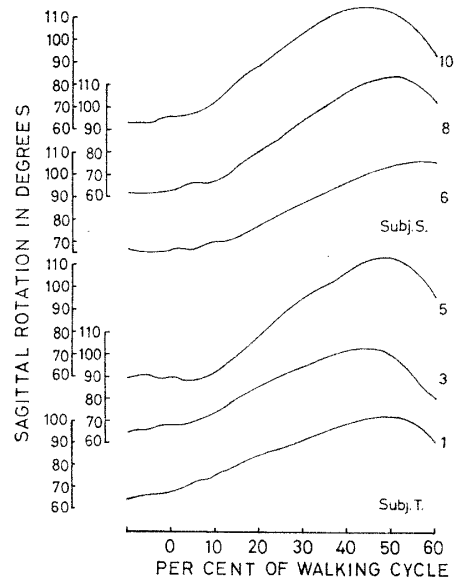


図 6 腰関節角度変化 縦軸：角度 横軸：歩行サイクルを100としたパーセンテージ

て大きくなっている。また、速度が増すにつれ、最大伸展が早期に行なわれる傾向にある(図6)。

膝関節：歩行速度が増すにつれて、接地直前の最大伸

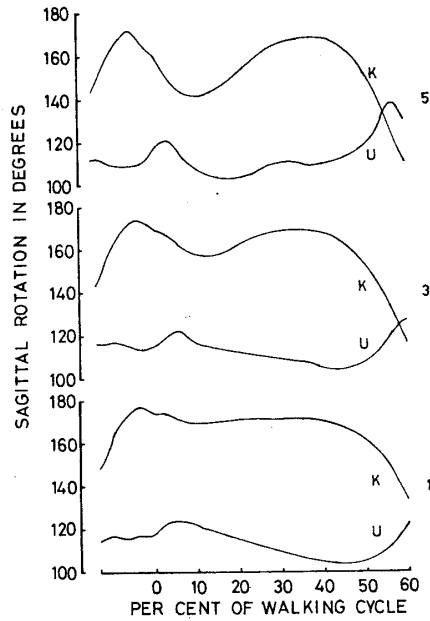


図7 膝関節, 足関節の角度変化 縦軸: 角度  
横軸: 歩行1サイクルを100としたパーセンテージ K: 膝関節 U: 足関節

展時点の角度及び接地時の角度が小さくなる。つまり、膝が曲ったまま接地を行なっている。接地に続く屈曲では、速度が増すにつれ屈曲角度は大きくなる。その後の伸展においては、屈曲角度の大きいもの程、伸展角度も大きく、次の屈曲前の角度は  $170^{\circ} \sim 168.5^{\circ}$  (Subj. T) とほぼ一定の値をとる (図7)。

足関節: 踵接地後、足底が地面につく際、急激な伸展が行なわれ、以後屈曲が行なわれる。この屈曲は、足底が地面についていることにより、下腿の前方向への回転によるものである。ほぼ一定の角度 (Subj. T  $104^{\circ}$ , Subj. S  $110^{\circ} \sim 112^{\circ}$ ) の屈曲に達して伸展に向う。速度が増すにつれて、足底が地面についてからの屈曲角速度が増すので、速度が速いもの程伸展時期が早まる (図7)。

膝関節と大腿, 下腿の角度: 膝関節は大腿と下腿によってつくられており、その角度変化は、大腿, 下腿の双方の角度変化の和となっている。踵接地前後の膝関節角度変化は、大腿の角度変化が小さいことから、下腿の角度変化に主によっていることになる (図8)。膝関節が伸展に移る約10%前から下腿の伸展が開始される。接地直前から下腿は前方向への回転を続けているので、膝関節の伸展は大腿の前方向への回転によることになる。

身体重心の上下動: 歩行速度が増すにつれて上下動は大きくなる (表4), (図9)。その上下動の増大は、主に下方向への変動が大きくなることによっている。また、歩行速度が増すにつれて、最高位置, 最低位置の現れる時点が遅れる傾向にある。

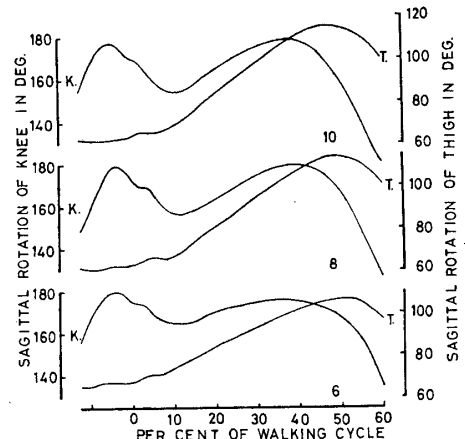


図8 膝関節, 腰関節の角度変化 縦軸: 角度  
横軸: 歩行1サイクルを100としたパーセンテージ K: 膝関節 T: 腰関節

表4

No.	身体重心の上下動(cm)	
1	91.8—88.7	3.1
2	91.8—88.4	3.4
3	92.3—88.5	3.8
4	92.2—87.3	4.9
5	90.1—86.3	5.8
6	90.4—87.5	2.9
7	90.6—86.8	3.8
8	90.3—86.3	4.0
9	90.8—86.3	4.5
10	90.1—87.4	3.6

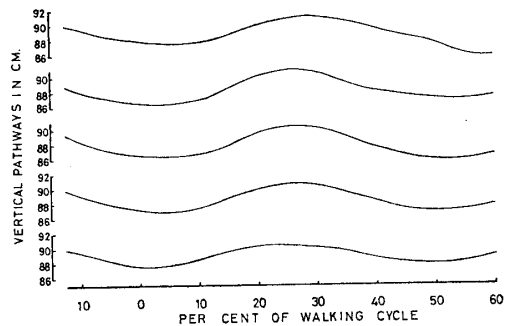


図9 身体重心の上下動 縦軸: 身体重心の地面からの高さ 横軸: 歩行1サイクルを100としたパーセンテージ 上から歩行No. 10, 9, 8, 7, 6

重心角: 歩行速度が増すにつれ、接地時の重心角は小さく、その後の角速度は大きく、身体重心が足関節の真

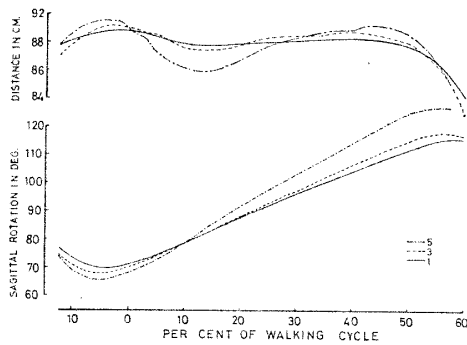


図10 身体重心の角度(下図), 身体重心から足関節までの距離(上図) 縦軸: 距離, 角度 横軸: 歩行1サイクルを100としたパーセンテージ

上にくる時期も早い。また離地時点での角度も大きい(図10)。尚、重心から足関節までの距離についてみると、その変化は、膝関節の角度変化に大きく左右されることがわかる(図10)。歩行速度が増すにつれ、膝関節屈曲時にその変化は大きくなる。

### 3. 考察

本実験における実際の歩行速度は Subj. T が68~127 m/分、その間13, 17, 23, 16m/分ずつ速くなり、Subj. S が67~121m/分で、その間10, 18, 19, 17m/分ずつ速くなっている(表2)。歩行速度は規定通りではなかったが、ほぼ研究目的にかなうものであるで用いることにした。

土屋達(1971)は歩行運動のパターン分析を、歩容パターンをみるために円座標を用いて行なっている。同一被検者に関し、歩行中の下肢関節角度についてのばらつきをみており、踵接地時から足底前面接地時にばらつきが大きいとしている。Gollnic, et al. (1964)は連続した歩行の際の下肢のゴニオグラムについてみているが、一步毎にその形は変化しているようである。Murray (1967)は歩行中の下肢の関節角度変化について、多数の被検者により標準偏差を求めている。Endo, et al. (1969)はフォースプレートを用い歩行の際の床からの反力を求めているが、同一個人の自由歩行においてもその力曲線は歩行毎に異っている。このように、同一個人の時を変えた歩行でも、また一続きの歩行でも、そして異った被検者間でも歩行は一步毎に異っている。本実験においては、各速度について一步行であり、上述のことを考えると、結果に定量的な表現があるが、定性的な面を裏づける意味で用いたと考えたい。

歩行速度、歩幅、歩数等について、小祝(1861)が18

歳~45歳の健康成人を対象にしている。その結果と本実験の結果を比較すると本実験の結果の方が同じ歩時間で歩幅が長い。Subj. T が集団の歩幅が長いグループに属し、Subj. S は、そのグループからはずれる程歩幅が長い。この大股であることは、本実験の被検者の年齢がやや小さいことと、小祝の実験では裸足歩行であったことが関係しているかもしれない。Murray (1967)も歩行の歩幅と歩数についてみているが、本実験の結果は彼の被検者集団のほぼ中央に位置する。しかしながら、歩数が増すと彼の結果に比して歩幅が大きくなる傾向にある。おそらく身長差がその原因となっているであろう。小祝、Murray のものを見る限りでは、本実験の歩行は全般にやや大股であったと考えられる。

**体幹の傾き:** 体幹の傾きは歩行速度が増すにつれて前傾の傾向にあった(表3)。このことは、重心角を大きくすることになる。接地時に体幹が前傾することは、後脚による前方へのけり出しを有利にしていることになる。

**腰、膝関節:** 歩行速度が増すと接地時の腰関節角度が小さくなり、いわゆる膝の上った状態となる。下腿が地面となす角は歩行速度変化に対して接地にあまり変化していない。このことにより、膝関節角度も小さくなっており、膝関節は、踵接地により地面から受ける衝撃をより筋に吸収し易い状態となっている。また、歩行速度の増大により接地後の膝関節の屈曲が増大したが、これは、速度の増大のために足関節を中心とした身体の角運動量が増した(図10)のに対し、それを減じるためである。この屈曲後の伸展に際し、歩行速度が増大するにつれ、その伸展の度合いも大きく且つ急激になる。この際の筋の働きに関しては近藤(1952)、Suzuki(1956)の他多くの研究者達によって研究されている。それによれば、大腿の伸筋群は踵接地直後から働いている。Cavagna et al. (1968)による、伸張されながらの筋収縮はその後の短縮しながらの筋収縮の際にその仕事量を増大させる、及び屈曲から伸展へ移行する時間が短ければ短いほどその効果は大であるという事実を考慮すると、膝関節伸展の際の仕事量は速度が増すにしたがって物理的に増す程、生理学的には増していないと考えられる。

**足関節、足と地面がなす角:** 足底が地面についた後の足関節伸展の時期は歩行速度が増すにつれ早くなった。これにより、足関節の伸展は上方向への成分をより多く持つことになっている。このことは足先と地面がなす角についてもみることができる。速度が増すにつれ、伸展が開始される時点が35, 33, 27, 24% (Subj. T) と早まっている。

**重心の上下動:** 歩行速度が増すにつれ、垂直方向の振

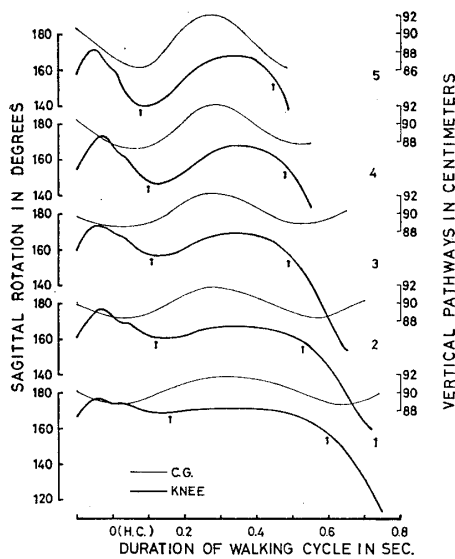


図11 身体重心高と膝関節角度 縦軸：角度、地面からの高さ、横軸：踵接地後の時間 太線：膝関節角度 細線：身体重心高 矢印間は片脚支持（左）を示す

幅が増した。その増加は主に下方向への振幅の増大によっていた。また速度が増すにつれ位相が遅れてきた。これを膝関節角度との関係からみたものが図11である。単なるコンパスが歩くような歩行であれば、踵接地時に重心は最低になる。図11の1などがそれに近い例であろう。図10でみたように重心から足関節までの距離（D）は、膝関節角度（ $\theta$ ）と大きな関係があった。身体重心の高さ（H）は、

$$H = D \times \cos \theta + \text{足関節の高さ}$$

で表わされる。歩行速度が増すにつれ重心が最低位置にくるのが遅れることに関しては、膝関節の屈曲が大きくなり、そのためDが小さくなり、身体の前方向への回転がおいつかない状態と考えられる。

## 4. 結論

歩行速度の変化とその際の歩容の変化の関係について支持脚の動きを中心にして分析を行なった。その結果、速度の増大に伴い身体重心の上下動の増大・位相の遅れ、それをもたらす脚の動き等及び、各関節角度の相互関係等がある程度解明された。

これらの実験は標本数が各速度、2名の被検者について1例ずつであり、歩行の1回毎のばらつきを考慮すると、標本数の増大が望まれる。また本実験はパターン分析に終始しており、動作分析においてより本質的な運動力学的分析にまで進むことが必要であろう。

（指導教官 宮下 充正）

## 引用文献

- Cavagna, G. A., B. Dusman and R. Margaria (1968) Positive Work done by a Previously Stretched Muscle. *J. Appl. Physiol.*, 24, 23—32.
- Endo, B., A. Takahashi, M. Tomita and T. Kimura (1969) Principal Pattern of the Dynamic Change in the Force of Human Foot during Walking. *人類学雑誌*, 77, 1—14.
- Gollnick, D. and P. V. Karpovich (1964) Electrogeniometric Study of Locomotion and of Some Athletic Movements. *Research Quarterly*, 35, 357—369.
- 小祝逸男 (1961) 正常成人の各種歩度歩行および駆足のバゾグラム *日整会誌*, 35, 1—42.
- 近藤四郎 (1952) 歩行の実験的研究 *人類学雑誌*, 62, 121—130.
- 宮下充正 (1965) 歩行研究の概略 *体育の科学* 15, 264—273
- Murray, P. (1967) Gait as a Total Pattern of Movement. *Am. J. Phys. Med.*, 46, 290—333.
- Suzuki, R. (1956) Function of the leg and foot muscle from the viewpoint of the electromyogram.
- 土屋和夫, 松尾功一 (1971) 歩行解析システムと歩行解析, *人間工学*, 7, 137—143.