

[原 著]

正常歩行における立脚相の時間を説明する変数としての歩行速度と歩行率の比較
—視覚障害者の白杖歩行および晴眼者歩行からの検討—

須 田 勝¹⁾・中 田 英 雄²⁾

正常歩行において歩行速度と歩行率のどちらが立脚時間の長さにより大きな影響を与えているかについて調べるため、晴眼者男子10名(20~30歳)と視覚障害者男子5名(16~20歳)のビデオテープおよび8 mmフィルムに記録された画像をもとに、晴眼者歩行、白杖歩行および被験者全体について歩行速度と立脚時間の関係および歩行率と立脚時間との関係を示す回帰方程式を求め、それぞれの相関の強さについて比較した。その結果、晴眼者歩行、白杖歩行および被験者全体とも歩行率と立脚時間との関係の方が歩行速度と立脚時間の関係よりも相関が高く、また推定値の標準誤差すなわち測定値の回帰曲線に対するばらつきも小さかった。

以上のことより、立脚時間は歩行速度よりも歩行率によってよく説明されていることがわかった。

キーワード：歩行速度 歩行率 立脚時間

I. はじめに

歩行は足が地面に接している立脚相と足が宙に浮いている遊脚相から成り立っている(Fig. 1³⁾)。ゆっくりした速度から速い速度まで歩行速度を変えていくと、1歩行周期における立脚相の時間(以下「立脚時間」という)がどの様な値をとるかについて、Andriacchi, Ogle, and Galante (1977⁴⁾)は速度が増すにつれ立脚時間が減少し、その値は歩行速度の2次関数により最もよく近似できると述べ、さらに、この正常人の歩行速度と立脚相の関係を示す回帰方程式に基づき、膝関節全置換術の手術前後の立脚時間を比較し、正常人の値より小さな値をとることを示している。また、木村・

神谷(1982²⁾)も速度が増すと立脚時間が双曲線を描いて減少すると述べ、その関係を示す回帰方程式を示している。

須田・石滝・藤沼・鈴木・杉浦(1977⁴⁾)も理学療法による歩行の改善度を評価する客観的基準を確立する目的で、正常歩行すなわち、特に神経系、運動器系の疾患を有しないヒトの自然または自由な歩行⁷⁾における速度と立脚時間の関係を検討し、それらの関係を示す回帰方程式を算出した。その結果、速度が増すと立脚時間が双曲線(以下「速さ-時間曲線」と仮称する)を描きながら減少することを確認した。さらに須田・藤沼・鈴木・杉浦(1979⁹⁾)は、この実験結果に基づいて、変形性股関節症と下肢の骨折患者について、ゆっくりした速度からその人の最も速い速度まで歩行させて健側および患側の立脚時間を測定し、正常人の速さ-時間曲線に基づき、歩行速度を基準にしながら患者の立脚時間の長さを分析した。その結果、患側の立脚時間が正常人の立脚時間に比較して小さな値をとることと、本来障害されていない健側の立脚時間も患側の機能レベルに合わせるかのように小さな値をとることを確認した。

このように、正常人の速さ-時間曲線を異常歩行の評価の基準として用いることには、それなりの意義があると思われるが、その曲線が提供する値は正常人の平均的な値であるため定性的な意味では有用であるが、個々の患者の歩行障害の程度や改善度を定量的に評価する基準とするには不十分である。その理由は、被験者の歩き方の特徴、すなわち、歩幅を大きくして

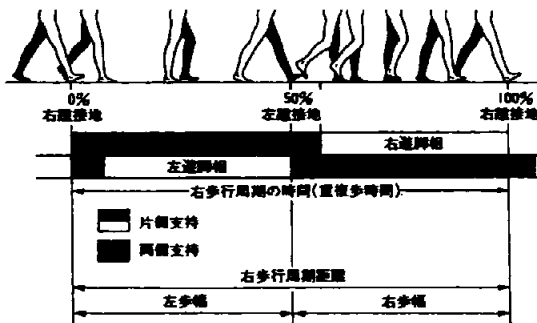


Fig. 1 歩行周期(Murray1967、中村他、基礎運動学第4版、医歯薬出版、1992)

1) 筑波技術短期大学・理学療法学科
2) 筑波大学・心身障害学系

歩く（「ストライド歩行型」と仮称する）か、歩行率すなわち1分間当たりの歩数を多くして歩く（「ピッチ歩行型」と仮称する）かによって、歩行速度に対してとる立脚時間の値が異なり、各被験者間の値にバラツキが出るためである。従って、歩行速度を説明変数として立脚時間を推定する方程式を求めて、それを患者の歩行の定量的な評価に用いることには問題が残る。

そこで本研究では、歩き方の特徴にほとんど影響されずに立脚時間を説明し、広く歩行の評価に応用できる方程式がないものかどうかについて検討することとした。具体的には、歩き方の異なる2種類の歩行すなわち、目の見える人の歩行（晴眼者歩行）と視覚障害者の白杖歩行のデータを用いて、立脚時間、歩行速度および歩行率を測定し、①歩行速度と立脚時間②歩行率と立脚時間のそれぞれの関係を示す回帰方程式、相関の強さを示す r^2 、および回帰方程式に対する推定値の標準誤差を求め、それらを基準にして歩行速度と歩行率のどちらがより大きく立脚時間の決定に関与しているかを検討した。

本研究の目的は、歩き方の異なる歩行様式の例として晴眼者歩行と視覚障害者の白杖歩行をとりあげ、それらのデータを分析することにより、歩行速度と歩行率のどちらがより密接に立脚時間を説明するかについて明らかにすることである。

II. 方法

1. 実験1 —— 晴眼者歩行

1) 対象

被験者は、視覚障害を有しない男子10名で、年齢は20歳～30歳（平均24歳）、身長は167cm～173cm（平均170.0cm）であった。

2) 実験方法

屋内に15mの歩行路を設定し、その上をメトロノームの5種類のリズム（72、88、104、120、138回/分）に合わせて各リズムにつき5回、裸足で歩行させた。それを歩行路から10m離れた位置に固定した8mmカメラで歩行路の中央の10m部分をカメラで追跡しながら36コマ/秒で撮影した。歩行速度を求めるため、歩行路の中央の10m部分の時間を測定した。

3) データ処理

時間因子および歩行率は、8mmフィルムに記録された画像を8mmフィルム用編集機を用いてコマ数から算出した。歩行速度は10m歩行に要した時間より算出した。

2. 実験2 —— 白杖歩行

1) 対象

被験者は、視覚障害以外の機能障害を有しない視力「ゼロ」の男子5名で、年齢は16歳～20歳（平均17.2歳）、身長は159cm～177cm（平均166.4cm）であった。

2) 実験方法

屋内に直線で10mの歩行路を設定し、その上をメトロノームの5種類のリズム（72、88、104、120、138回/分）に合わせて、各リズムにつき3回、裸足で白杖歩行させた。それを歩行路から3m離れた位置に固定したビデオカメラ（Canon CA-100）で歩行路の中央の2m部分を撮影した。歩行速度を求めるため、歩行路の中央の5m部分の時間を測定した。

なお、歩行実験に先立ち、歩行の安全を確保するためと歩行路に慣れさせるため、被験者に対して歩行路の説明を十分行った。また、白杖は被験者が日常使用しているものを用いた。

3) データ処理

時間因子および歩行率は、ビデオテープに記録された画像をモーションアナライザー（BSV-400、NAC製）とグラフペンおよびXYコーディネーター（NAC製）を用い、コンピュータ処理して求めた。歩行速度は5m歩行に要した時間より算出した。

3. 分析方法

得られたデータから晴眼者歩行、白杖歩行および晴眼者・白杖歩行全体について、歩行速度と立脚時間の関係を示す散布図（速さ—時間曲線）と歩行率と立脚時間の関係を示す散布図（歩行率—時間曲線）を作成するとともに、それぞれの関係を示す回帰方程式をグラフ作成用アプリケーションソフト（CA-Cricket Graph III）を用いて $Y=aX^b$ で表される累乗方程式を求め、その回帰方程式の r^2 および実測値の回帰方程式に対する推定値の標準誤差の大きさを比較することにより、歩行速度と歩行率のどちらがより厳密に立脚時間を説明するかについて検討する。

III. 結果

1. 歩行速度と歩行率の関係

白杖歩行と晴眼者歩行の、歩行速度と歩行率の関係はFig. 2に示すとおりである。晴眼者歩行と白杖歩行を比較すると、白杖歩行の方が歩行速度に対して歩行率が大きい歩きかたをしている。

中程度の歩行速度1.0～1.3m/secに対応する歩行率の値を晴眼者歩行と白杖歩行について比較すると、晴眼者歩行の平均が107.3±8.4歩/分、白杖歩行の平

Table 1 立脚相の速さ-時間曲線および歩行率-時間曲線の各回帰方程式、 r^2 および推定値の標準誤差 (Se)

	速さ-時間曲線			歩行率-時間曲線		
	回帰方程式	r^2	Se	回帰方程式	r^2	Se
晴眼者歩行 (N=10)	$y_v=0.783x_v^{-0.79}$	0.94	0.09	$y_c=103.325x_c^{-1.07}$	0.99	0.03
白杖歩行 (N=5)	$y_v=0.703x_v^{-0.78}$	0.91	0.06	$y_c=83.698x_c^{-1.02}$	0.98	0.03
全 体 (N=15)	$y_v=0.753x_v^{-0.75}$	0.91	0.07	$y_c=101.770x_c^{-1.06}$	0.99	0.02

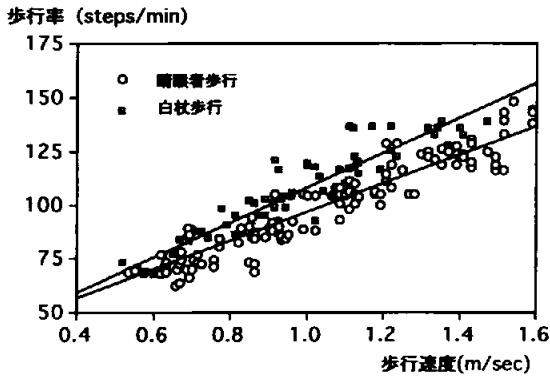


Fig. 2 晴眼者歩行と白杖歩行における歩行速度と歩行率の関係 (晴眼者10名、視覚障害者5名)

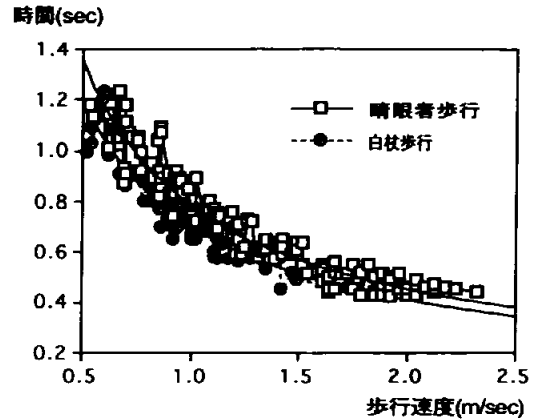


Fig. 3 晴眼者歩行と白杖歩行における歩行速度と立脚時間の関係

均が 119.8 ± 10.1 歩/分、となり、白杖歩行の方が晴眼者歩行より有意に大きい値を示した ($P < 0.01$)。

2. 歩行速度と立脚時間の関係

1) 立脚時間について

晴眼者歩行の10人分と白杖歩行の5人分のデータを歩行速度と立脚時間の関係を示す散布図にし、それに回帰曲線を示したものが Fig. 3 である。回帰曲線で晴眼者歩行と白杖歩行の立脚時間を比較すると、白杖歩行の方が短い値をとることがわかる。すなわち同じ歩行速度で歩いたとすると、白杖歩行の方が晴眼者歩行より立脚時間が短い値をとることを示している。

中程度の歩行速度 $1.0 \sim 1.3$ m/sec において晴眼者歩行と白杖歩行の立脚時間の長さを比較すると、白杖歩行の平均が 0.65 ± 0.05 sec、晴眼者歩行の平均が 0.71 ± 0.06 sec となり、白杖歩行の方が晴眼者歩行よりも有意に短かった ($P < 0.01$)。

2) 回帰方程式、 r^2 および推定値の標準誤差について
晴眼者歩行、白杖歩行および晴眼者・白杖歩行全体

の回帰方程式、 r^2 および推定値の標準誤差は Table 1 に示すとおりである。回帰方程式は歩行速度を x_v 、立脚時間を y_v として、 $y_v = ax_v^b$ の累乗方程式として求めた。

歩行速度と立脚時間との相関の強さを示す r^2 は、晴眼者歩行が0.94、白杖歩行が0.91、晴眼者・白杖歩行全体が0.91で両者の間に高い相関が認められた。また各回帰曲線に対する実測値のバラツキの程度を示す推定値の標準誤差 (Se) の値は、晴眼者歩行が0.09sec、白杖歩行が0.06sec、晴眼者・白杖歩行全体が0.07sec であった。

3. 歩行率と立脚時間の関係

1) 立脚時間について

晴眼者歩行の10人分と白杖歩行の5人分のデータを歩行率と立脚時間の関係を示す散布図にし、それに回帰曲線を示したものが Fig. 4 である。白杖歩行と晴眼者歩行の立脚時間の値と回帰曲線はほとんど重なりあっており、晴眼者歩行と白杖歩行の歩行率からみた

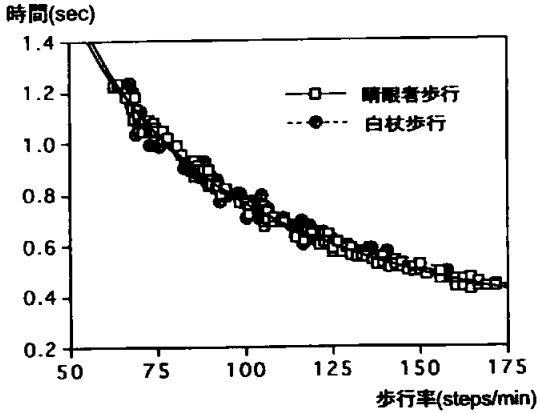


Fig. 4 晴眼者歩行と白杖歩行における歩行率と立脚時間の関係
(晴眼者10名、視覚障害者5名)

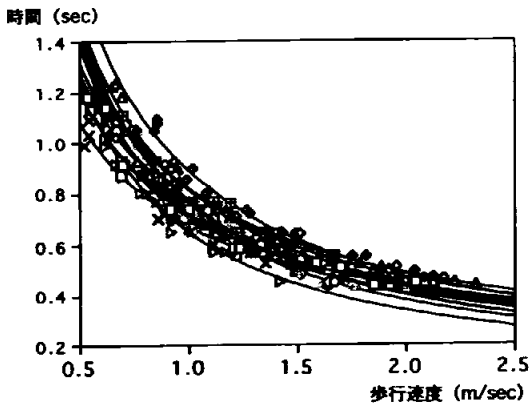


Fig. 5 晴眼者10名の個人別の速さ-時間曲線

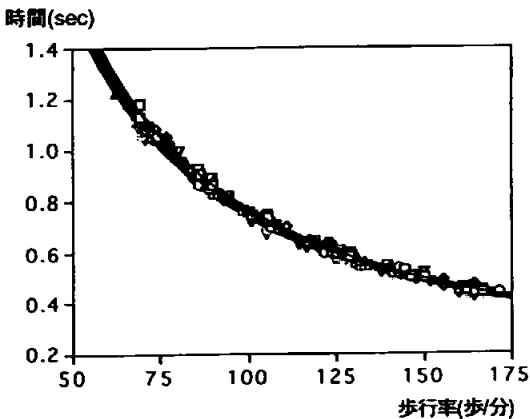


Fig. 6 晴眼者10名の個人別の歩行率-時間曲線

立脚時間には差がないことを示している。

中程度の歩行速度1.0~1.3m/secに対応する歩行率100~130歩/分の範囲における立脚時間の値を比較すると、白杖歩行の平均が0.69±0.05sec、晴眼者歩行の平均が0.67±0.06secとなり、速さ-時間曲線の場合と異なり晴眼者歩行と白杖歩行の立脚時間の値には差が認められなかった。

2) 回帰方程式、 r^2 および推定値の標準誤差について

晴眼者歩行、白杖歩行および晴眼者・白杖歩行全体の回帰方程式、 r^2 および推定値の標準誤差は Table 1 に示すとおりである。回帰方程式は歩行率を x_c 、立脚時間を y_c として、 $y_c = a' \cdot x_c^{b'}$ の累乗方程式として求めた。

歩行率と立脚時間との相関の強さを示す r^2 は、晴眼者歩行が0.99、白杖歩行が0.98、晴眼者・白杖歩行全体が0.99で両者の間に速さ-時間曲線の場合より高い相関が認められた。また各回帰曲線に対する実測値のバラツキの程度を示す推定値の標準誤差 (Se) の値は、晴眼者歩行が0.03sec、白杖歩行が0.03sec、晴眼者・白杖歩行全体が0.02secとなり、速さ-時間曲線の値と比較すると晴眼者歩行では3分の1、白杖歩行では2分の1、晴眼者・白杖歩行全体では約3分の1の値であった。

4. 回帰曲線の存在範囲について

晴眼者10人の個人別の速さ-時間曲線を示したものが Fig. 5 である。また同様個人別の歩行率-時間曲線を示したものが Fig. 6 である。両曲線の存在範囲を図で比較すると、速さ-時間曲線の方が歩行率-時間曲線よりも明らかに広い幅で存在しており、個人差により立脚時間がかかなり異なることを示している。一方、歩行率-時間曲線は非常にせまい範囲内に重なりあうように存在しており、立脚時間に個人差の要素がほとんど入っていないことを示している。また視覚障害者の白杖歩行においても晴眼者のものと同様の結果であった。

IV. 考 察

歩行速度は歩行の種々の現象を比較的よく説明するため、歩行分析の説明変数として広く用いられ、それを基準にして種々の従属変数、たとえば立脚時間、歩行率、歩幅などの値を求め、歩行の改善度を見る指標に使っている。

その基準に用いられる歩行速度は、歩幅と歩行率(歩/分)に依存する。すなわち歩幅を大きくすれば歩行

速度は増し、歩行率を上げれば歩行速度が増す。歩行速度は歩幅、歩行率の二つの要因の相互作用の結果として生み出されるものであるから、歩行者の歩き方の特徴、すなわち、主に歩行率により速度を上げているピッチ歩行型なのか、あるいは主に歩幅を大きくすることにより速度を上げているストライド歩行型なのかにより、立脚時間は同じ速度でも異なってくる。すなわち、一定の速度で歩行した場合の立脚時間を比較すると、ストライド歩行型では長くなり、ピッチ歩行型では短くなる。従って、歩行速度を説明変数とし、立脚時間を従属変数として両者の関係を示す方程式を求め、それに基づいて立脚時間の正常値を推測することには問題が残る。何故なら被験者にはストライド歩行型とピッチ歩行型の両方が混じっているため、得られる回帰方程式は被験者の歩行の型とそれらの割合に影響されるからである。そのため、歩行の仕方の個人差を介入させないで立脚時間をほぼ的確に説明する変数はないのかという点に焦点を絞って検討を行った。

検討の方法は歩行様式の異なる晴眼者歩行と視覚障害者の白杖歩行のデータを用い、晴眼者・白杖歩行の歩行速度と立脚時間の関係および歩行率と立脚時間の関係を示す散布図を作成し、それぞれの回帰方程式、 r^2 、推定値の標準誤差を求めて、歩行速度と歩行率のどちらがより密接に立脚時間に関係しているかについて比較した。

今回、晴眼者歩行と視覚障害者の白杖歩行の歩行データを用いた分析を行った理由は、白杖歩行の方が晴眼者歩行に比べて歩行率が大きい歩き方をする⁶⁾ため、白杖歩行をピッチ歩行型の歩行として、また晴眼者歩行をストライド歩行型として位置づけ、これらの二つの異なる歩行様式を用いることにより、なるべく歩行の個人差を大きく含むデータを収集し分析することを目的とし、そのようなデータを用いても、なお個人の歩き方の特徴にほとんど影響されない説明変数があるかどうかを確かめるためである。

その結果、白杖歩行と晴眼者歩行との間に、①中等度の歩行速度で歩いた場合、白杖歩行の方が有意に大きな歩行率をとっている (Fig. 2)、②中等度の歩行速度で歩いた場合、白杖歩行の方が有意に小さな立脚時間をとっている (Fig. 3) という違いがあるのにもかかわらず、歩行率と立脚時間の関係を示す散布図を作成すると晴眼者歩行と白杖歩行の回帰曲線はほとんど重なりあっており、また、その曲線上のバラツキも少なく、累乗方程式で表される一本の曲線により、極めてよく近似されることがわかった (Fig. 4)。

回帰方程式の r^2 について晴眼者・白杖歩行全体の値をみると、速さ-時間曲線の方が0.91、歩行率-時間曲線の方が0.99となり、歩行率の方が歩行速度よりも立脚時間をよりよく説明している。また、回帰曲線に対する実測値のバラツキの程度をみるために推定値の標準誤差を比較してみると、速さ-時間曲線の方が0.07sec、歩行率-時間曲線の方が0.02secとなり、 r^2 と同様に歩行率の方が歩行速度よりも立脚時間をよりよく説明していることがわかる。

回帰曲線の存在範囲についてみると、個人別の速さ-時間曲線および歩行率-時間曲線を描くと、晴眼者歩行、白杖歩行とも前者は個人差によりその曲線の存在する範囲が比較的広い幅を持っているが、後者は個人差がほとんどなく、その曲線は互いに重なり合うように存在し、ほとんど一つの曲線をなすように極めて狭い幅の中におさまっていた。従って歩行率の方が個人差に影響されずに立脚時間をよく説明することがわかった。

結果を要約すると以下のようなになる。白杖歩行の場合、歩行速度から見た立脚時間は晴眼者歩行に比較して小さい値をとるが、歩行率からみた立脚時間の値には両者の間に差が認められなかった。つぎに、相関の高さについてみると晴眼者歩行、白杖歩行とも歩行率と立脚時間との関係の方が歩行速度と立脚時間との関係よりも相関が高く、回帰曲線に対する個人差から来るバラツキも少ないことがわかった。また、歩行速度と立脚時間との関係および歩行率と立脚時間との関係を示す回帰曲線の存在範囲を比較すると、晴眼者歩行、白杖歩行とも歩行率と立脚時間との関係を示す曲線の方がほとんど一つの回帰曲線を描いているかのように極めて狭い幅の中に存在していた。

その結果、晴眼者歩行、視覚障害者の白杖歩行の両者とも歩行の個人差を大きく含んでいるにも関わらず、歩行率は晴眼者、視覚障害者とも個人差にほとんど影響されずに晴眼者歩行および白杖歩行における立脚相の時間を極めて小さなバラツキの範囲内で説明することが分かった。

従って、正常歩行すなわち、特に神経系、運動器系の疾患を有しないヒトの自然な歩行 (視覚障害以外の機能障害を有しない視覚障害者の歩行を含む) において立脚時間をより厳密に決定しているものは歩行速度ではなく、歩行率であると考えられる。また、歩行速度と立脚時間との関係を示す速さ-時間曲線が歩き方の個人差により、その曲線がかなり広い幅の範囲に存在する (Fig. 5) のに対し、歩行率と立脚時間との関係を示

す歩行率—時間曲線は個人差の影響がほとんど受けず、非常に狭い範囲に、ほぼ一本の曲線の形で存在している (Fig. 6) ことから、歩行率—時間曲線の方程式は、歩行率から立脚時間の正常値を推定し、歩行障害の程度や改善度を定量的に評価するための基準を提供する有用な方程式になるものと考えられる。

引用文献

- 1) Andriacchi, T. P., Ogle, J. A., and Galante, J. O. (1977): Walking speed as a basis for normal and abnormal gait measurements. *J. Biomechanics*, 10, 261-268.
- 2) 木村 賛・神谷正明 (1982): 速度変化に伴いヒトの歩行がどう変わるか. *バイオメカニズム学会 (編), バイオメカニズム—人間の機能とロボット—*. 東京大学出版会, 69-79.
- 3) 中村隆一・斎藤 宏 (1992): 基礎運動学, 医歯薬出版, 310-313.
- 4) 須田 勝・石滝敏郎・藤沼一美・鈴木忠・杉浦幹雄 (1977): 8 mm 撮影による正常人の歩行分析—歩行スピードと立脚、遊脚、両脚支持期との関連について—. *第12回理学療法士学会誌*, 112-114.
- 5) 須田 勝・藤沼一美・鈴木 忠・杉浦幹雄 (1979): 8 mm 撮影による歩行分析 (第3報) —歩行速度と立脚・遊脚・両脚支持期との関係にもとづく異常歩行の分析—. *臨床理学療法*, 6(1), 125-126.
- 6) 須田 勝・松澤 正・和才嘉昭・中田英雄 (1995): 時間因子, 歩行速度および歩行率からみた視覚障害者の白杖歩行. *第14回関東甲信越ブロック理学療法士学会誌*, 43-44.
- 7) 土屋和夫 (1990): 臨床歩行分析入門, 第1版. 医歯薬出版, 11-21.

The Comparison Between the Walking Speed and the Cadence as a Determinant of the Duration of Stance Phase in Normal Gait : The analysis based upon the data of Sighted and Blind Subjects

Masaru SUDA and Hideo NAKATA

The purpose of this study was to examine which factor mainly determines the duration of stance phase in normal gait, walking speed or cadence. The walking speed, the cadence and the duration of stance phase were measured using a videotape recorder and a 8-mm camera while walking at various speed ranged from slow to fast. The subjects were ten sighted men, aged 20 to 30 years, and five blind men, aged 16 to 20 years. Regression analysis was used to clarify the factor mainly effecting on the duration of stance phase in the gait of the sighted and the blind.

The results were as follows.

- (1) In the relationships between the walking speed and the duration of stance phase, the values of the duration of stance phase in the blind was significantly smaller than in the sighted.
- (2) On the other hand, in the relationships between the cadence and the duration of stance phase, both in the sighted and in the blind, the values of the duration of stance phase were almost the same.
- (3) In ten sighted and five blind subjects, the value of correlation coefficient was larger in the relationships between the cadence and the duration of stance phase ($r^2=0.99$) than in the relationships between the walking speed and the duration of stance phase ($r^2=0.91$).

The results revealed that the cadence mainly determines the duration of stance phase, because the relationships between the cadence and the duration of stance phase was closer than the one between walking speed and the duration of stance phase, both in the sighted and in the blind.

Key Words : walking speed, cadence, duration of stance phase