

原 著

## 健常者における歩行速度変化に対する 左右膝関節角度の協調性

### Coordination of right-left knee joint angles when varied walking speed in normal person.

小 森 武 陸

**要約**：障害者の最適な歩行練習速度を調べるための基礎的な研究とした。これまで多くの報告では、遅く、普通、早くといった速度で歩行分析しているものが多く、特に自由歩行の速度が効率的といわれている。しかし、左右膝関節角度変化の協調性に着目し最適な歩行速度を調査したものは少ない。よって各歩行速度を段階的に規定することで歩行速度における膝関節角度変化に着目した。被検者は健康な男性7名とした。健常者の歩行速度は30m/分～100m/分の範囲を乱順で行った。分析は歩行周期における遊脚期最大膝屈曲角度、踵接地、踵離地での左右膝関節角度の平均値、標準偏差をスピアマンの順位相関関数を用いた。歩行速度の変化が左右膝関節角度に影響を及ぼす効果を検討した。その結果、踵接地時による右膝屈曲角度の平均角度と左膝関節角度の最大左膝屈曲ならびに踵離地時での標準偏差において有意性が認められた。平均角度増加は、歩行速度の増加に伴い、右の膝関節角度の変位が歩幅を効率的に調整している。左右の膝関節角度の変換可能範囲の違いは利き脚と非利き脚によるものであり、利き脚は調整可能な運動範囲が大きいことが示唆された。角度の標準偏差では、歩行速度向上に伴って、膝関節角度が固定化され、安定した蹴り出が出現する。更に蹴りだし力が安定した振出しに影響しているものを推察された。よって左右膝関節運動の協調性パターンが認められる歩行速度があったことは興味深く、今後効果的な歩行練習を進める上で重要な知見となりうる可能性がある。

**Key Words**：歩行， 協調性， 歩行速度

### はじめに

我が国においては他の先進国の中でも急速に高齢化が進んでおり、2020年には国民全体の4

人に1人が65歳という超高齢者社会を迎えようとしている。高齢者が自立した日常生活を営む上で重要な基本動作に歩行動作がある。そのため歩行動作を適確に把握する事は、高齢者の日常生活動作（Activities of daily living：ADLと略す）や生活の質（Quality of life：以下QOLと略す）の増進、維持を考慮した場合には重要であると考えられる。近年、中高齢者においても健

---

Takenori Komatsu  
大阪河崎リハビリテーション大学  
リハビリテーション学部 理学療法専攻  
E-mail：komatut@kawasakigakuen.ac.jp

健康管理・障害予防が注目されており、中高年齢者の転倒や加齢変化から生じる歩行障害は、ADLを低下させる原因につながると言われている。佐直・中村<sup>1)</sup>は10mの最大歩行速度と生活活動との関係を比較しており、歩行速度の向上に伴いADL AQOLも向上すると報告している。また、藤田<sup>2)</sup>、Shumway et al.<sup>3)</sup>は地域社会に生活している中高年齢者を転倒者・非転倒経験者群に分け比較し、非転倒経験者の歩行能力が高いと述べている。更に、Shumway<sup>4)</sup> 高齢者を対象に歩行距離・歩行速度などと天候や明るさの屋外状況・地形や障害物などの移動環境との関係を検討している。その結果、高齢者の地域社会での活動を妨げている要因は移動環境との関連があることを提示している。このように高齢者の自立を妨げる要因として転倒、骨折が深く関与しており、転倒予防の視点からも歩行能力の重要性を示唆している。よって歩行動作を把握することは、高齢者の自立のみでなく活動的な人生を送るために重要な課題といえる。

近年、医療においても科学的根拠にもとづく質の高い治療が求められている中、患者に対し満足度の高い治療を実施するには、治療者側の患者に対する共通認識が必要不可欠であるため、客観的な観察が重要となる。Perry et al.<sup>5)</sup> や Safford et al.<sup>6)</sup> も正確かつ効率的な歩行獲得は、運動機能向上にも影響を及ぼし、高齢者や障害者に対して積極的な社会参加を促すと報告している。しかし、臨床で最も一般的に利用されている分析方法は、視認的・ビデオ録画による観察であり、運動指導者の知識的格差により分析能力が異なると木村<sup>7)</sup> やPerry<sup>8)</sup> は疑問視している。なぜなら、この手法は主観的判断の介在が多く、個人の経験知・知識の格差で分析が左右され、治療者間で異なった分析になり、高齢者や障害者に対して健康増進の運動指導に相違が見られる場合もある。従って、より良い運動を指導するためには客観的分析が重要である。

歩行動作は左右下肢の連続した動作であり、左右下肢の協調性が重要であると考えられる。しかし、従来の多くの歩行分析は主に運動学的方法と運動力学的方法で行われている (Murray et al.<sup>9)</sup> ; Inman,<sup>10)</sup> ; 土屋,<sup>11)</sup> ; 広川,<sup>12)</sup> )。これらの報告は、連続歩行の部分的データを扱っているものの、分析対象となっているのは、各関節の関節角度、筋力、角速度、関節モーメント等といった量的な変数である。しかしながら、協調性といった質的分析の試みは散見される程度である。

Haken et al.<sup>13)</sup> は左右の協調性を知る方法としてダイナミカルアプローチを用い、左右の指における相互的な協調性を検討し、個々の四肢運動の協調性が存在することを明らかにした。Amazeen et al.<sup>14)</sup> は端座位での膝関節屈伸運動における個人間協調性の存在を確認している。また Kao et al.<sup>15)</sup> は角度変位における角速度を用い、歩行速度変化において右一側下肢内の股・膝・足関節における協調性は不十分であると述べている。

Sadeghi.<sup>16)</sup> は運動力学的立場から、健常歩行では左右下肢の中で、左右の股・膝関節の動きが異なっているために、股関節・膝関節を変化させる事で歩行周期を調節していると報告している。

更に、多賀<sup>17)・18)</sup> は、運動制御を行う神経系を非線形振動子として捉え、運動部位間のダイナミックな引き込み現象により正常歩行の運動が行われている事を示唆している。また、Danion.<sup>19)</sup> はトレッドミルで歩行速度を変化させて重複歩による変動性を標準偏差を用いて、左右脚の違いを報告している。

以上のように身体における関節運動の協調性を調べるには、これまでいくつかの方法が報告されている。しかし、これらの先行研究では一側下肢内の知見が多く、左右下肢の協調性や段階的な歩行速度に対応する下肢運動に注目した

研究が少ない。私たちが行っている日常歩行は、左右下肢の連続的なリズム運動で規則性が保たれ、変速的で半ば自動化したものと思われる。また解剖学的にも左右の下肢は体幹によって運動部位間を連結しているため、歩行において相互拘束作用が働き、そこには協調性が存在すると思われる。

よって歩行に対する左右下肢における動きの相違は、歩行の効率性を低下させ不安定になると予想される。従って、歩行速度変化において左右下肢の関係性を明確にすることが可能となれば、高齢者のみならず固有のパターンを持つ障害者にも汎用可能であり現在よりもはるかに効率的に適用・指導できるものと考えられる。また、協調性を調べるにあたり運動指導者は歩行時の下肢関節の中で、膝関節の角度変化は他の関節より大きいために、比較的容易に観察する事が可能で臨床的意義が大きい。

歩行は左右下肢の連続した動作であるために左右下肢の協調性が重要となり、本研究では歩行速度の変化に対して左右膝関節角度の協調性をダイナミカルアプローチの観点から検討する事を目的とした。

## 方法

### 被検者

被検者には実験の実施に先立ち本実験の意義と内容に関して十分に説明を行った上で、実験参加の同意を得た。実験に参加したのは骨関節・神経的に既往歴のない健常者男子7名（身長： $171.57 \pm 5.91$ cm、体重 $67.43 \pm 8.87$ kg、年齢 $49.71 \pm 8.83$ 歳）であり、利き脚（ボールを蹴る側）は全員右脚であった。

### 測定機器

被検者はトレッドミル（日本光電社製）上で、8段階の速度の歩行を行い、その際の動作を赤

外線反射カメラによって記録した。動作の撮影は毎秒60フレームで行った。実験設備の変更により3名の被検者の撮影には3台のカメラ（VICON170：Oxford社）を、その他の4名の被検者には6台（VICON370：Oxford社）を用いた。撮影時には被検者の下肢の解剖学的ランドマーク上に大転子（密着したスパッツの上から貼付）・膝関節外側裂隙・腓骨外果（皮膚に貼付）に、両面テープを用いて反射マーカー（直径25mm）を貼り付けた（図1）。



図1 反射マーカーの位置と測定事態

### 実験手順

本実験に先立ち、被検者には15～20分程度の練習歩行を行わせた。この時の歩行速度は30m/分から100m/分の範囲で10m/分ごとに漸増させた。その後、30、40、50、60、70、80、90、100m/分の歩行速度を乱順に行わせた。動作の撮影は各歩行速度において動作が十分に安定したと見なされた時点から開始し、そこから10～15重複歩行分を記録した。

### データ処理

撮影された動作の中から、安定して行われた5～11周期の歩行を分析の対象とした。記録されたマーカーの3次元座標はパーソナルコンピュータに保存した。マーカーの座標データはバターワース型ローパスフィルターを用い平滑

化した。この際、Winter et al.<sup>20)</sup> が歩行時のマーカーの揺による影響を抑えるためカットオフ周波数は6 Hzを推奨しており、これを採用した。左右の脚のそれぞれのマーカーの3次元座標を基に、膝関節外側裂隙マーカーから大転子マーカーへむかうベクトルと、膝関節外側裂隙マーカーから腓骨外果マーカーに向かうベクトルを算出し、両ベクトルの成す角度を膝関節角度とした。

歩行中の脚運動の指標として、それぞれの歩

行速度ごとに歩行周期の遊脚中期の推進期における膝最大屈曲角度、踵接地時、踵離地時の膝関節角度を抽出した(図2)。さらに、歩行速度と各膝関節角度の平均値と標準偏差の関係を明らかにするために、スピアマンの順位相関係数の検定を用い、相関係数と有意性を求めた。全ての統計的危険率は $p < 0.05$ とした。分析は市販の統計パッケージ(SPSS, ver10J)によって行った。

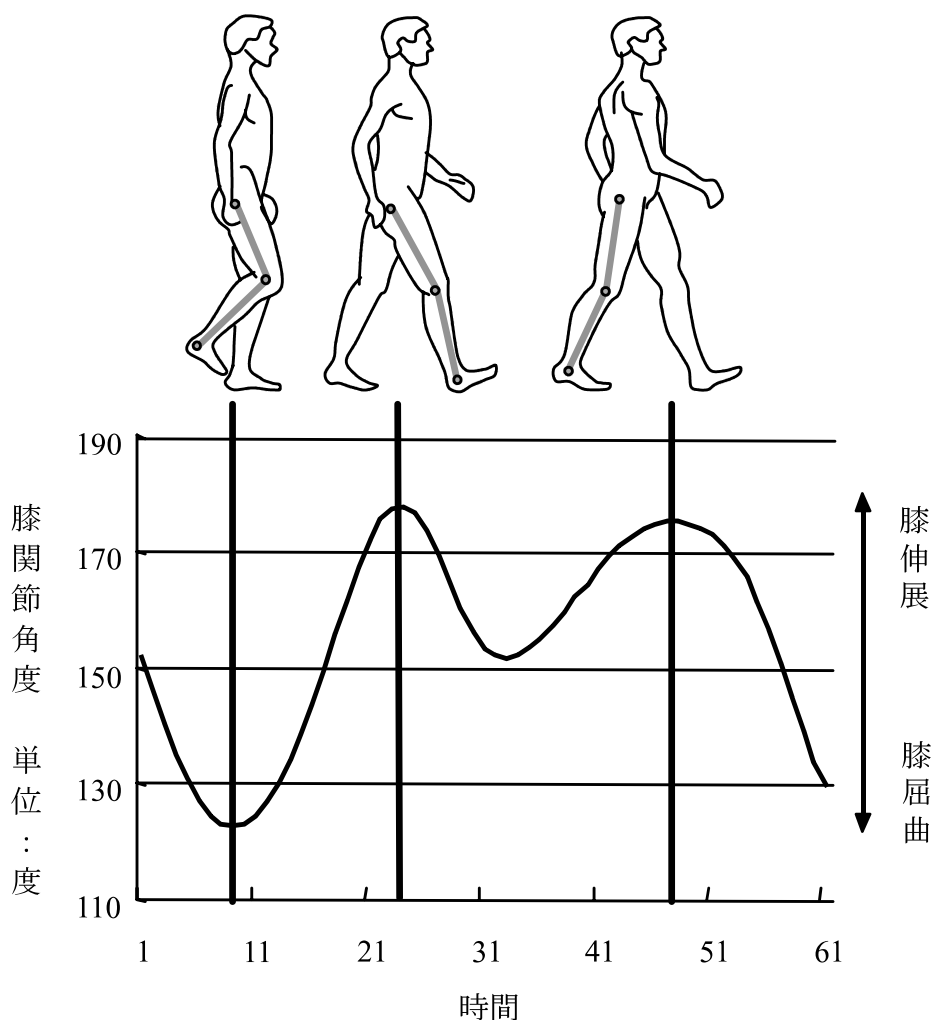


図2 右膝関節角度と歩行周期における遊脚期最大膝屈曲角度、踵接地、踵離地の関係

## 結果

### 1) 被検者7名の分析 (A~G)

#### ①：遊脚期最大膝屈曲角度

図3の上より、左右膝関節の平均角度は歩行速度の向上に伴い増加しているが、直線的な回

帰はしておらず、有意差は認められなかった。図4の上より左膝関節角度の標準偏差において相関係数は  $r = -0.88$  で有意性が認められた ( $p < 0.05$ )。その他において有意性は認められなかった。

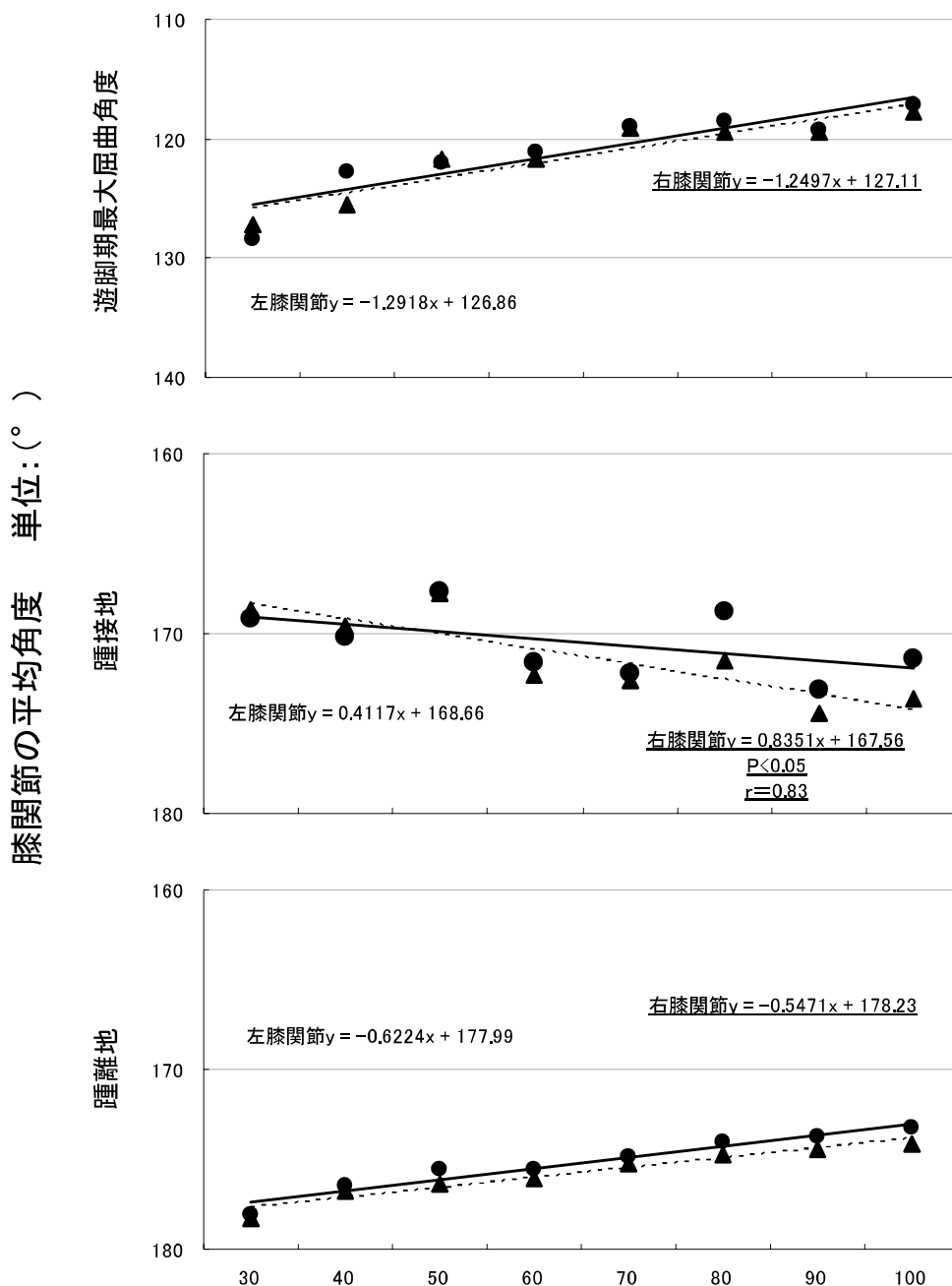


図3 被検者全員の各歩行速度に対する、左右膝関節平均角度を示し、●実践：左膝関節、▲点線：右膝関節。

②：踵接地時期

図3の中より、歩行速度の増加と左膝関節の平均角度において有意性は認められなかったが、右膝関節の平均角度において相関係数は  $r = 0.83$  で有意性が認められた ( $p < 0.05$ )。図4の中より、左右膝関節角度の標準偏差において有意性は認められなかった。

③：踵離地時期

図3の下より、歩行速度の増加と左右膝関節の平均角度において有意性が認められなかった。図4の下より、左膝関節角度の標準偏差において相関係数は  $r = -0.86$  で有意性が認められた ( $p < 0.05$ )。一方、右膝関節角度の標準偏差において有意性が認められなかった。

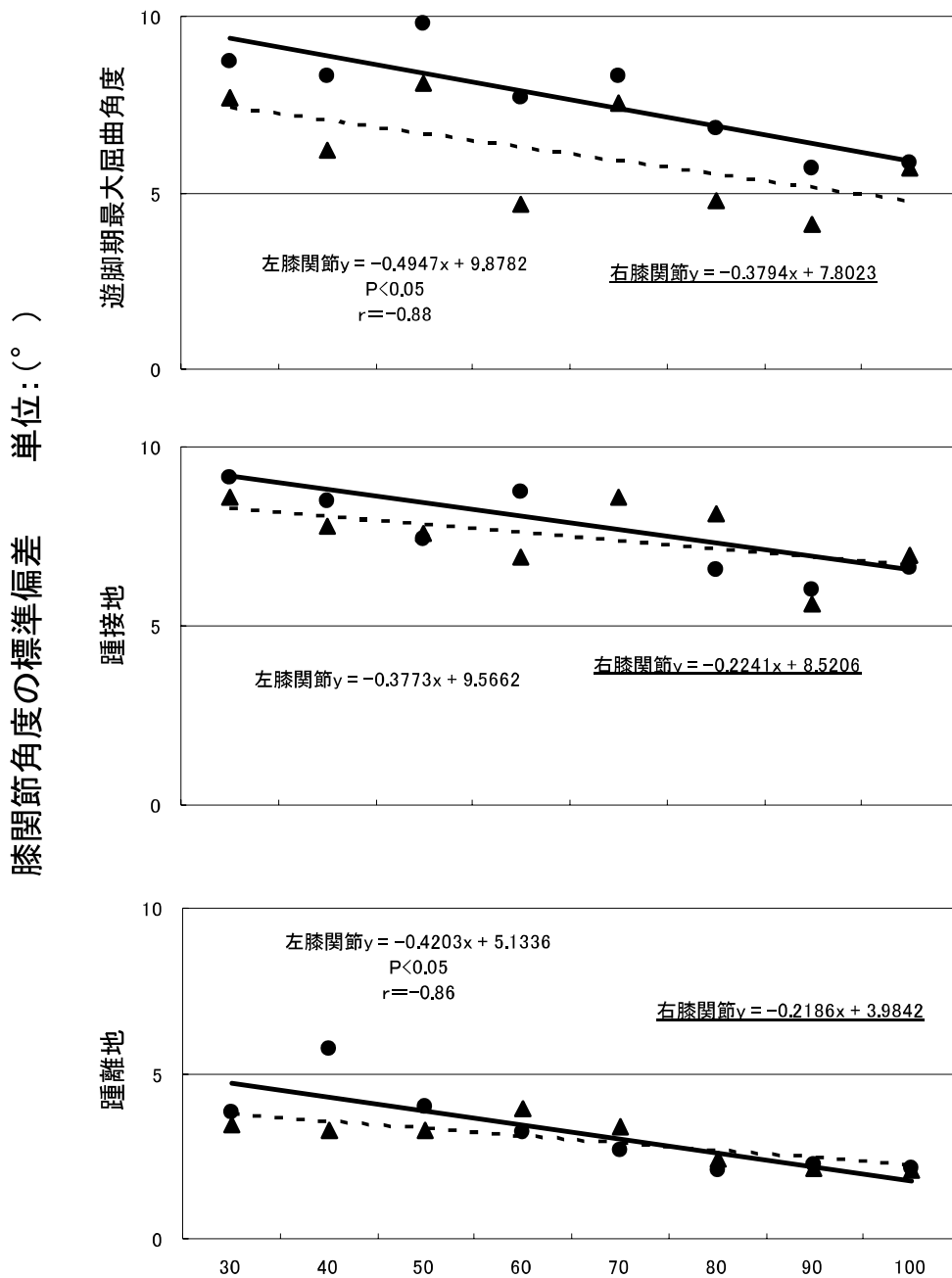


図4 被検者全員の各歩行速度に対する、左右膝関節平均角度を示し、●実践：左膝関節、▲点線：右膝関節。

## 考 察

本研究の結果②において、歩行速度の増加と踵接地期の右膝関節平均角度に有意な関係性が認められた。大道<sup>21)</sup>は歩行動作の力学的諸変量に歩幅が与える影響を調べ、歩行速度向上と歩幅には正の相関があり、歩幅との関連が強いと示唆している。更にOwings et al<sup>22)</sup>はトレッドミル歩行における若者と高齢者の歩行の違いは歩幅によるものであるとも述べている。つまり、歩行速度の増加で安定した歩行を得るためには、両脚もしくは利き脚を使って歩幅を調整する必要があると考えられる。徳田<sup>23)</sup>は速度の違いによる歩行形態を比較し、前方への推進力低下を補償するために股関節・膝関節屈曲角度を大きくして前進力を高めていると述べている。これらのことから、本研究の結果②において、踵接地期の右膝関節平均角度に有意性が認められたのは、歩行速度の増加に伴い安定した歩行を得るために、利き脚である右膝関節角度で歩幅を調整しているものと解釈できる。歩行速度に適応するために歩幅を広げる必要があり、利き脚である右膝関節で最も調整可能であったためと予想された。また、左膝関節平均角度の有意性は認められなかった理由は、非利き脚である左膝関節での歩幅調整よりも、利き脚での蹴りだし力を歩幅に反映させるため、衝撃吸収の役割が必要となり十分な剛性が不可欠であるために、わずかな膝関節屈曲位での動作が重要であると推察できる。

本研究の結果①③において、左遊脚期の最大膝屈曲角度や踵離地時の標準偏差に有意性が認められた。左遊脚期の最大膝屈曲角度の違いは、一般的に同側の蹴り出しによる推進力が同側の遊脚時に影響したものと推察される。従って、利き脚に比べ、非利き脚での蹴り出しは歩行速度変化に対応するために運動範囲が小さくすることで、踵離地や遊脚期での膝関節角度の標準

偏差にも影響したものと考えられる。今回、筆者が歩行速度向上に伴う左右の膝関節角度変化の特徴を明らかにできたことは、スポーツ傷害者、高齢者に対してより有効な歩行練習の可能性が示唆されたものだともいえる。

しかしながら、今回の結果からは歩行速度の向上と利き脚・非利き脚における左右下肢の関係性の一部が示唆されたに過ぎない。土屋<sup>11)</sup>は男女世代間の自由歩行速度は70m/分が平均速度であり、100m/分はできるだけ速く歩くといった速度である述べている。また田中ら<sup>24)</sup>はエネルギー変換効率から、歩幅と歩調の関係は約70m/分で変化し、これより高速度になると歩調によって歩行速度を維持すると報告している。岡田・才藤<sup>25)</sup>はトレッドミル歩行では、歩行速度向上に伴う歩行動作における左右下肢のばらつきが少なくなり、左右相互に影響をあたえると述べている。よって歩行速度向上に伴う関節角度変化だけでなく、左右下肢の関節運動に最適な歩行速度を調査する必要がある。一方ではDiedrich and Warren<sup>26)</sup>は消費エネルギーの立場から、歩幅、歩調、消費エネルギーの関係は歩行消費エネルギーを最小にするために歩幅・歩調で調整をおこない安定した歩行となることを確認し、歩行速度変化における右下肢内の協調性が示されている。

したがって、左右膝関節角度の協調性が速度によって制御されているものと予測され、この動作の連続性をどのように評価するのか、そのための方法も開発する必要がある。そのためにはまず、歩行速度向上に伴う膝関節角度変化だけではなく、各歩行速度における歩行各相での膝関節角度の標準偏差の変位を考慮した新しい視点の分析による知見が必要となるであろう。

## まとめ

本研究では、スポーツ場面や日常生活場面に

において、最も基本的な動作である歩行に着目した。また先行研究では運動学的などの観点からの報告が多く、特に運動の時間的な一部を分析し、運動要素を解釈している。更に歩行動作における各部位の相互的な作用を扱っている研究でも、1または2周期程度や一側下肢内のものが多く、その妥当性が疑問視されている。

したがって、健常者に対する歩行速度変化による左右下肢の協調性の存在を明らかにする目的で行った。

結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 健常者における歩行速度変化の協調性は、立脚期による踵接地時の右膝屈曲角度の平均角度及び、遊脚期による推進期の最大左膝関節角度と踵離地時での標準偏差において有意性が認められた。

健常者に対する、歩行での各期における左右膝関節角度の平均角度や標準偏差から、歩行速度変化による左右膝関節運動における部分的な協調性が確認された。

今回筆者は、歩行分析を行う際には、量的な分析だけでなく、質的な分析も考慮した総合的な解釈が、更に必要であることを示した。また、障害者への応用も視野に入れ、今後、症例数を増やし左右下肢の協調性出現の容易な環境設定を考えていきたい。

## 引用文献

- 1) 佐直信彦・中村隆一・細川 徹：在宅患者の生活活動と歩行機能の関連. リハビリテーション医学 1991,28:541-547.
- 2) 藤田 博暁 老人の姿勢及び転倒. 理学療法科学 1995,10:141-147.
- 3) Shumway,C.A., Brauer,S. and Woollacott,M Predicting the probability for falls in community dwelling older adults using the Time Up & Go Test. Phys Ther. 2000; 80:896-903.
- 4) Shumway,C.A. Environmental demands associated

- with community mobility in older adults without mobility disabilities. Phys Ther. 2002;82:670-681.
- 5) Perry,J., Garrett,M., Gronley,J.K. and Mulroy,S.J. Classification of walking handicap in the stroke population. Stroke. 1995;26:982-989.
  - 6) Sanford,J., Moreland,J. and Swanson,L.R. Reliability of the Fugl-Meyer assessment for testing motor performance in patients following stroke. Phys Ther. 1993;73:447-454.
  - 7) 木村 貞治 理学療法における動作分析の概要. 理学療法 2002, 19:883-887.
  - 8) Perry,J. Gait Analysis. Slack. 1992; p.1-2
  - 9) Murray,M.P., Drought,A.B. and Kory,R.C. Walking patterns of normal man. J. Bone & Joint Surg. 1964;46:335-360.
  - 10) Inman,V.T. Human locomotion. Canada. Med. Ass. J. 1953;94:1047-1054.
  - 11) 土屋 和夫 (監) 臨床歩行分析入門. 医歯薬出版株式会社 1995;p1-37.
  - 12) 広川 俊二 足底接地の距離・時間因子情報による歩行分析—健常者の歩行特性. 医用電子と生体工学 1986, 24:491-498.
  - 13) Haken,H., Kelso,J.A., and Bunz,H.A Theoretical model of phase transitions in human hand movements. Biol. Cybern. 1985;5:1347-56.
  - 14) Amazeen,P.G., Schmidt,R.C. and Turvey,M.T. Frequency detuning of the phase entrainment dynamics of visually coupled rhythmic movements. Biol. Cybern. 1995;72:511-518.
  - 15) Kao,J.C., Ringenbach,S.D., and Martin,P.E. Gait transitions are not dependent on changes in intralimb coordination variability. J. Mot. Behav. 2003;35: 211-214.
  - 16) Sadeghi,H. Local or global asymmetry in gait of people without impairments. Gait and Posture. 2003;17:197-204.
  - 17) 多賀殿太郎「生体システムのデザイン原理をさぐる—人間の歩行運動から—」数理科学. 1996, 394:5-13.



- 18) 多賀巖太郎「視覚誘導歩行における脳神経系・身体・環境の動的カップリング」システム/制御/情報. 2002, 46:9-14.
- 19) Danion, F. Stride variability in human gait: the effect of stride frequency and stride length. *Gait Posture*. 2003;18:69-77.
- 20) Winter, D.A., Grant, H., and Hobson, A. Measurement and reduction of noise in kinematics of locomotion. *J. Biomechanics*. 1974;7:157-159.
- 21) 大道 等 歩行動作の力学的諸変量に歩幅が与える影響. 国武大紀要 1990, 6:77-83.
- 22) Owings, T.M. and Grabiner, M.D. Variability of step kinematics in young and older adults. *Gait and Posture*. 2004;20:26-29.
- 23) 徳田哲夫 歩行（基礎から臨床まで） 3. 高齢者の歩行. 理・作療法 1986, 20:347-352.
- 24) 田中ひかる・淵本隆文・金子公有 高齢者の歩行運動における振子モデルのエネルギー変換効率. 体力科学 2003, 52:621-630.
- 25) 岡田 誠・才藤 栄一 運動学的、運動力学的因子からみたトレッドミル歩行と平地歩行の比較. 総合リハビリテーション 2004, 32:987-995.
- 26) Diedrich, F.J., and Warren, W.H.Jr. Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 1995;21:183-202.