歩行周期中に観測される生体時系列ﾃﾞｰﾀの特徴

日大・医学 ○萩原 礼紀　唐牛　大吾
日大生産工　堀江 良典　勝田 基嗣

【はじめに】

開放系に関して、通常我々が観察し得るデータは“時系列データ”であることが多い。中でも生体から観測されるそれは生体時系列として扱われ、その多くは「指数特性」を示すとされている。本研究では人が移動する際に、最も基本的な移動手段である歩行動作を解析対象とした。動作を解析するにあたってこれまで一般的であった、動作を各運動相にて区分する視覚分類は採用せず、動作加速度ﾃﾞｰﾀによる解析を選択した。これは主観の介入を極力回避し、人間の動作を定量的に評価することを目的としている試みである。今回得られたデータを、修正型最大エントロピー法(Maximum Entropy Caluculation: Memcalc)を用いて解析したところ、特異な動作特性が検出されたので報告する。

【対象】

健康診断にて身体機能に問題がないと判定を受けた健常成人男性20名、女性15名を対象とした。平均年齢27.4±6.3歳、平均身長165.2±12.4cm、平均体重58.1±14.1kgとした。被験者全員に対し、本研究の意義・目的・方法を説明し書面にて同意を得た。

【方法】

被験者に図 1.の携帯型 3 次元加速度計（Activtracer AC301：ACT, GMS 社）を図2.に示すようにJacoby line中央に付属のﾍﾞﾙﾄで固定し、10m の平地歩行路上を自由歩行している際の身体の動作加速度を測定した。得られたデータをAcC3xA.exe(処理ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑ)にて処理し、Microsoft Excel を用いてｸﾞﾗﾌ化し、X 軸を時間、Y 軸を加速度として表示した。得られたデータのうち解析対象としたのは、歩行が定常化する歩行開始 3 歩目以降の 1 歩行周期とした。動作加速度データに運動学的な解釈を加えるにあたって、共通語となる用語が無いために歩行周期における各相を同定し、それに当てはめる形で時間軸上の動作推移と各軸の加速度を解析した。全歩行周期のデータのうち、特徴的な部分と判断された踵接地(Heel Strike:H.S)から足底接地(Foot Flat: F.F)およびF.Fから対側H.Sの2区間を修正型最大エントロピー法(Maximum Entropy Caluculation: Memcalc)を用いて、ﾊﾟﾜｰｽﾍﾟｸﾄﾙ解析を行った。各項目の統計学的検定には、Wilcoxonの符号付順位和検定を用い有意水準を 5%以下とした。統計解析ソフトはSPSS for windows 10.0J を用いた。mean±standard deviation(以下、mean±SD)で表した。

Fig1.3 次元加速度計

Fig2.加速度計の装着部位

The characteristic of human chronological order date in a walking cycle

Hagiwara Reiki , Karoji Daigo , Horie Yosinori , Katsuta Mototsugu

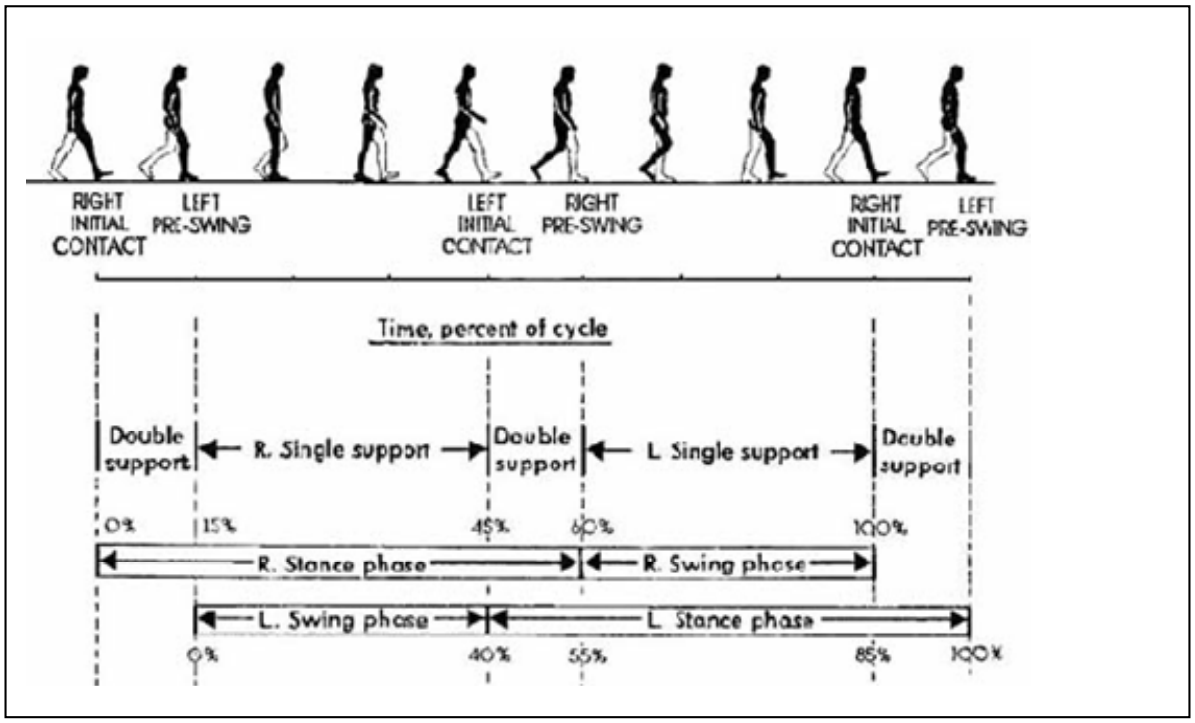

Fig3. 歩行周期の運動学的区分

※1 歩行周期とは（仮に右足を最初に 1 歩踏み出した場合）右足の踵が接地した瞬間から開始され、同側の踵が再接地するまでの動作とされている。

【結果】

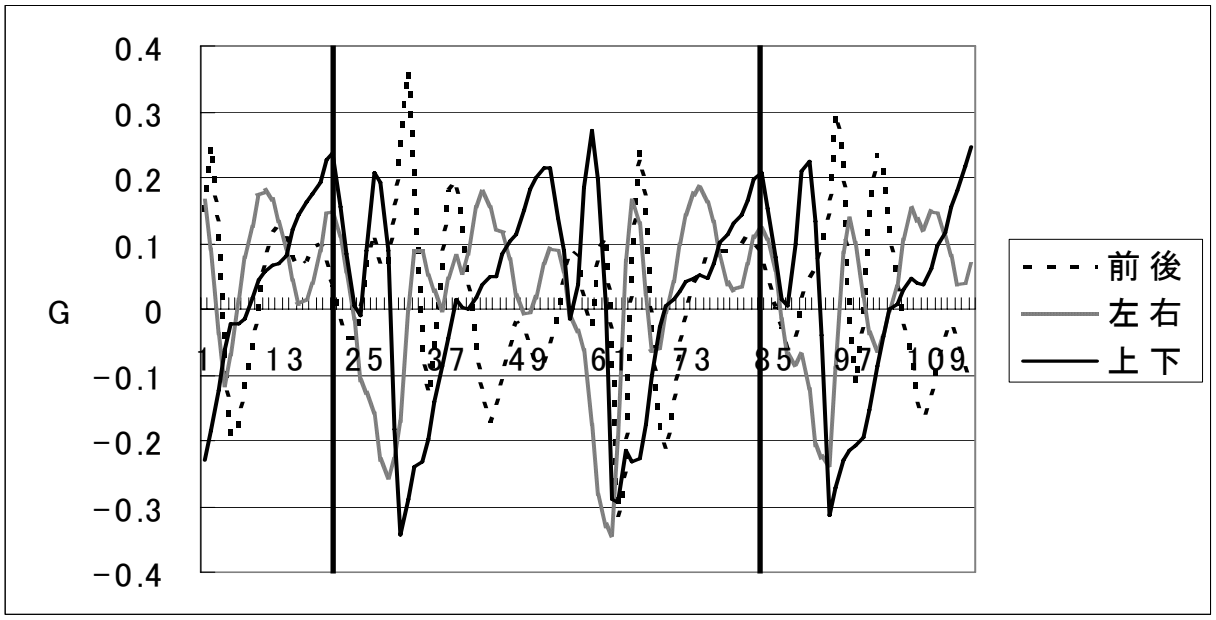

Fig4. 1 歩行周期の 3 軸加速度波形

10mの専用歩行路を自由歩行中に観測された、前後・左右・上下それぞれの加速度である。これらをエクセル上でグラフ化し重ね合わせ“ある 1 歩行周期”を 黒い実線で区切った。縦軸に加速度の大きさ［0.002G］を示し、横軸に時間［0.02sec］を示した。Fig3 と対比すると 1 歩行周期の各加速度波形の推移がわかる。Fig.4 の場合 1 歩行周期は 1.28 秒である。

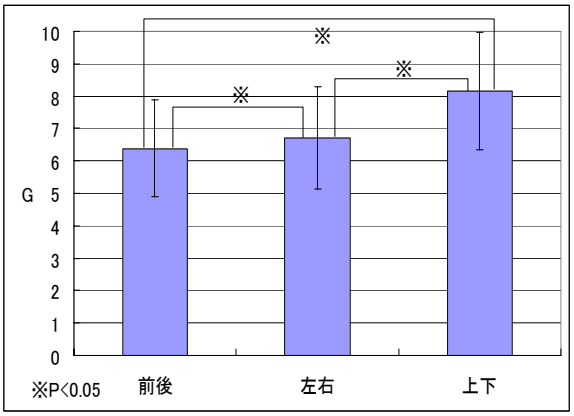

Fig5. 平均化された 1 歩行周期中における積算加速度の比較

それぞれの加速度は前後 6.2G、左右 6.8G、上下 8.1G で 1 歩行周期における合成加速度は 21.3G であった。

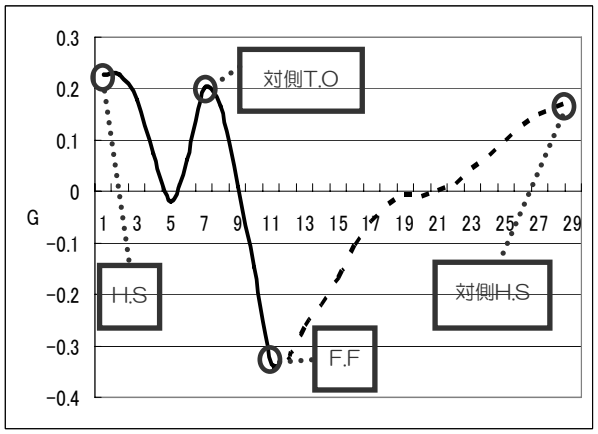

Fig6. H.S～対側 H.S における上下加速度の平均波形

Fig6 は 1 歩行周期波形から切り出したもので、H.S から対側 H.S に至る上下加速度の平均波形を表している。Y 軸に加速度の大きさ［G］を X 軸に時間を示す。時間は 1 目盛が 0.02 秒としﾃﾞｰﾀ長は 0.6 秒である。動作加速度は H.S の瞬間から 0.06 秒間に 0.24G の下降を示し、0.04 秒後に 0.22G の上昇に転じた。これは対側の T.O を反映したと考えられ、動作加速度は H.S 時と同様の位置に復帰している。また対側 T.O から 0.08 秒間に 0.52G の下降を示し F.F に至った。F.F の後は 0.36 秒にわたって対側 H.S まで緩やかな上昇を示した。動作加速度は再び最初の H.S 時とほぼ同位置に復帰した。

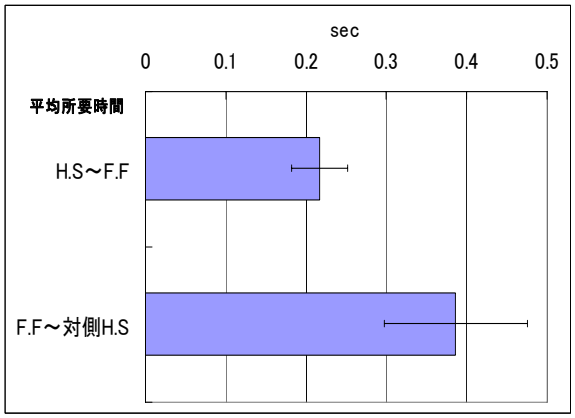

Fig7. H.S～F.F・F.F～対側 H.S の所要時間

Fig7. は H.S から F.F まで（0.21±0.07sec）と、F.F（0.39±0.18sec）から対側 H.S までの平均所要時間と標準偏差を表している。両者を比較すると、H.S から F.F の方が時間のバラつきが少ない。

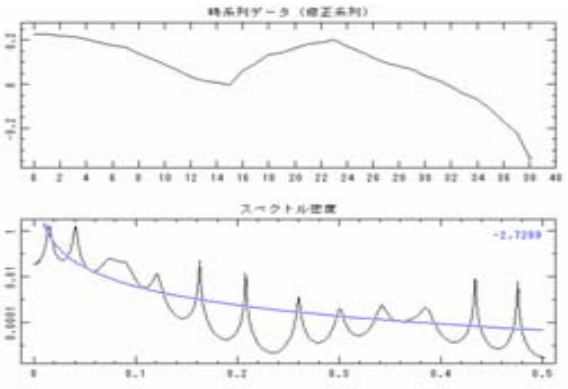

Fig8, H.S～F.F におけるｽﾍﾟｸﾄﾙ波形

Fig8. はスペクトル分析の結果である。スペクトルはべき特性を示し、グラフは両対数表示されている。また 0.5～20Hz の周波数帯でその傾きを求めた。傾きは 2.7 であった。

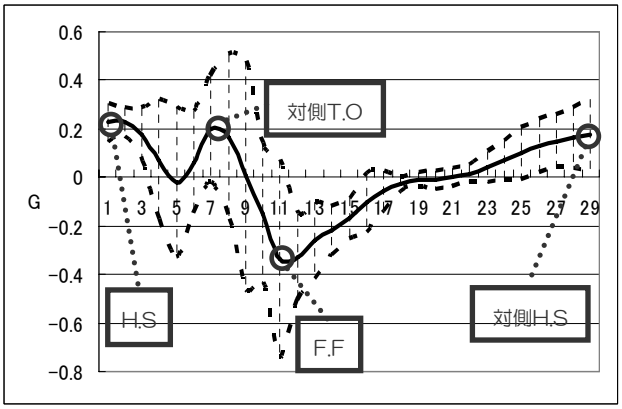

Fig9. H.S～対側 H.S における上下加速度の 2SD 波形

破線で囲まれた範囲がH.Sから対側H.Sまでの上下加速度の2SD波形である。中心部を通る実線はFig5と同じ平均波である。健常者の歩行加速度は、おおよそこの範囲内で収束すると考えられる。

【考察】

歩行動作は身体重心中心を移動させる目的に行われている。歩行の大半は前後・左右方向への移動であり、視覚的には平面上を移動する2次元的な動作として認識されている。しかし加速度波形で捉えると、上下方向の成分が多く含まれていることがわかる。観測された（Fig4）各加速度の成分を比較した結果（Fig5）、1歩行周期の加速度成分は前後29%、左右32%、上下38%であった。これらは人間が重力下の生活環境において、身体重心中心を移動させる際に、“移動抵抗となっている重力を最大限に利用するべく、あえて重力に抗する動きを第1選択している”結果と考えられる。言うまでもなく重力は常に存在し続けており、抵抗となる摩擦を極力減少させるには空中にいる方が都合が良い。ジャンプをすれば必ず着地し、その落下には筋収縮を必要としない。つまり動作における上下動という動きは“片道分がタダ”となる運動方略と言える。その過程で身体を左右に振れば、ジャンプ時の正弦角度と速度による前進が生じ、これを効率良く連続させると周期が生じ“歩行”になる。Fig4の上下加速度に見られる連続したスパイクはこれを表している。”片道がタダ“といっても実際には着地時の衝撃を緩衝するために、下肢筋は通常の筋収縮よりエネルギー消費の高い遠心性収縮をおこなう。抗重力運動は筋収縮によって生じるが、筋力は無限ではなく疲労するためかえって効率が悪い。したがって連続した動作を効率良く行う場合には、筋収縮に依存しない出力の発揮が必要である。それは着地の衝撃を利用した出力の発揮システムであると考えている。またそれは我々の研究において日常生活動作の中に動作波形特性として確認されている。Fig6.7に示すように極短時間の中で観測される。これは、歩行という連続動作の運動制御において、H.SからF.Fまでの相は随意的な制御ではなく、あらかじめプログラムされた自動的・機械的な反応であると考えられた。また運動相区分それぞれのｽﾍﾟｸﾄﾙ分析を実施した結果、機械的な運動特性と目される“べきスペクトル”と判定できる特徴的な波形がH.SからF.Fまでの区間（Fig8）の上下加速度に検出され、解析結果よりMTC（muscle tendon complex）動作であると理解された。この機械的な特性はMTCによって生じ、動作時の運動効率を上げている。歩行の場合、着地の衝撃:反力を利用し、自重を抗重力方向へ変換させる働きである。着地の瞬間に腱を緊張させ、筋収縮のみではなく“筋腱複合体の弾性張力”として発揮するメカニズムである。機械的な特性とは、高次脳の運動制御を受けない反射と同義のものを指す。今回観測された“べき特性”は（Fig6）歩行周期のH・Sから下降を示し、0.09±0.018秒後に0.22±0.06Gの上昇を示した後、再度下降しH.Sから0.15±0.054秒後にF.Fに達する過程である。計算されたスペクトルの傾きは（Fig8）2.7であった。また測定課題が自由歩行にも関わらず、Fig9.に示すようにH.SからF.Fまでの区間時間は被検者間でのばらつきが少なく収束していた点からも、随意的制御の関与の少ない機械的過程であると考えられた。この区間において、H.Sによる固有感覚受容器への刺激入力が起点となり、F.F時に速やかに出力として利用出来る準備をしていると考えられた。

【まとめ】

一般に生体時系列は指数特性を示すことが多いとされているが、観測された歩行動作の過程には、「べき特性」を示す機械的な運動制御の存在が認められた。またこの極めて短時間内に発現し規則的に観測される現象は、反射と同様の作用機序によると考えられ、これは実際の動作の際に、効率の良い身体制御を遂行する生体プログラムが存在するとため考えられた。