

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500583

研究課題名（和文） 加速度センサによる下肢 - シューズ系の粘弾性特性の評価

研究課題名（英文） Evaluation of viscoelastic property of leg and shoes using accelerometer

研究代表者

丸山 剛生（MARUYAMA TAKEO）

東京工業大学・大学院社会理工学研究科・准教授

研究者番号：90181833

研究成果の概要（和文）：

本研究では、加速度センサを利用して歩行や走行中の着地衝撃および下肢の衝撃加速度動態を計測するシステムを構築した。そして、歩行中の速度と方向変換による下肢動作の変化が足関節の動力学的動態に及ぼす影響と、方向切換動作における走行速度、切換方向、足部姿勢の変化が下肢関節の運動と負荷に及ぼす影響を検討した。また、粘弾性特性の異なるインソールを装着したシューズによる歩行において、足部の安定性、下肢の筋活動状態、着地衝撃および下肢の加速度を測定した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, the measurement system of landing impact and acceleration on the leg during walking and running was developed using accelerometer. Then it was examined that the influence of changing leg motion on kinetics of the ankle joint during walking and turning motion, and the influence of changing running speed, direction of turn and foot position during cutting movement on motion and load of the leg. Also, the stability of foot, muscle activities of the leg, landing impact and acceleration of the leg during walking were measured while wearing shoes that changing viscoelastic property of insole.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学，スポーツ科学

キーワード：スポーツバイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

健康づくりのための運動習慣の重要性(健康日本 21, 2000)が認識され、日常生活における身体活動に対する意識向上により、日常的な散歩や野山での散策を楽しむ人、ジョギングの愛好者が増加している。一方、ランニ

ング動作は小さなジャンプの繰り返しで、着地衝撃や関節への荷重負荷の連続的な積み重ねが障害を引き起こし(山本, 2001)、走り方が不自然であったり、下肢筋力が弱く膝伸展機構を効果的に利用できなかったり、筋柔軟性が低下するとランニングによる障害が

発生しやすくなり(横江, 1983), 健康のために実施していたジョギングがランニング障害(変形性膝関節症, アキレス腱炎, 等)を発症する危険性がある. この障害を予防するためには, 走り方の矯正, 筋力及び筋柔軟性の維持, 適切なシューズの選択, 疲労の軽減などが考えられる.

障害予防のためのスポーツシューズ及び足底板の機能に関する研究は, スポーツメーカーの開発担当者はじめ, 国内・外の研究者によって多く検討されてきている. 特にクッション性, 安定性については, 足部動態変化測定による足部の荷重負荷の評価, 床反力測定によるシューズのクッション性評価, 下肢筋の筋電位測定による筋活動評価, 足首・膝部における加速度計測による着地衝撃の伝達特性の評価などが実施されている. 筆者らも生体の動作適応を考慮したシューズ性能の評価法を検討した. しかし, 生体を対象とした場合, 個別性, 適応性, 非再現性, 冗長性などにより, シューズの機械物理試験のような明確な結果は得られていない.

ランニング障害の原因である下肢に加わる衝撃や荷重負荷の評価については, Lafortune(1991)が下肢における加速度の計測以降, 数多くの研究が実施されている. 足部のアーチ形状, 下肢骨及び関節間組織の粘弾性特性, 筋の振動及び筋活動に伴う関節スティフネスによる衝撃減衰効果と, 生体における加速度計測における体動や皮膚表面取り付け部位の振動の影響, 加速度信号の複雑さ等, 下肢における物理量の高精度測定の困難さから, 評価法を含め明確な結論はない.

一方, 長時間走行中の疲労に伴う下肢の運動学的変量と衝撃加速度の変化(Mizrahi, 2000)や長時間歩行中の筋電位による筋疲労の評価, 歩行リズム, 腰背部加速度の変化を検討した研究(Yoshino, 2004)がある. 筆者は, 反発特性の異なる素材上で連続跳躍運動を行い, 生体指標が素材特性の違いにどう応答するかどうかを検討したが, 素材特性の差が生体の筋調節系の作用によって相殺される結果となった. もし, 長時間運動の疲労による筋調節系の作用が減少した場合には, 外部環境の変化に対する生体反応が顕著に現れることが考えられ, 疲労による動作変化と着地衝撃および下肢-シューズの粘弾性特性を観察することは非常に興味深いものである.

筆者はスポーツシューズ等の環境要因が生体の動作や動作制御及び適応現象に及ぼす影響に焦点をあて, 着地時の動作制御に関する研究, ランニング中の足関節の運動学的解析, 連続跳躍中の関節スティフネス変化, 足関節の側方安定性に対する筋活動を評価した. また, 生体の動作適応を考慮したシューズ性能の評価法を検討するため, 筋電位測

定による筋活動量評価, 床反力と動作解析による下肢関節スティフネス及び動作パターンの変化を評価した. そこで, シューズ性能の違いが下肢-シューズ系の粘弾性特性に及ぼす影響を検討することは非常に興味深いことである.

2. 研究の目的

本研究では加速度センサを用いた歩行および走行中の着地衝撃, 下肢での衝撃加速度の連続計測を行うシステムを確立し, 下肢-シューズ系の粘弾性特性を評価するため, 次のような解析を行った. なお, センサの取り付け方や体動による振動の影響と信号の解釈には注意を要するので, 加速度センサの取り付け方と評価方法を検討し, 下肢の粘弾性特性のモデル化を行い, 着地衝撃の推定精度を高めることも検討した.

(1) 歩行中の方向変換動作における足関節動態の解析

歩行速度の違いや歩行中の方向変換動作による足関節動態の変化を解析し, 矢状面および水平面における運動学的変量と動力学的変量との関係から足関節における簡易モデルを構築し, また足関節運動に対する足部の運動の影響を検討する.

(2) 方向切換動作における動作様態が下肢関節運動に及ぼす影響の解析

直進する走行から急激に走行方向を変化させる動きすなわち方向切換動作は, スポーツの場面では多く見られ, 膝関節への負荷が大きいことが知られている. 本研究では, 走行中の下肢関節における衝撃伝達特性を検討するため, 方向切換動作時の走速度, 方向切換角度, 足部の着地姿勢を変えた動作様態における下肢三関節の関節角度, 関節間力, 関節モーメントを分析し, 特に方向切換動作が膝関節の運動と負荷に及ぼす影響を検討する.

(3) 粘弾性特性の異なるインソールを装着したシューズによる歩行時の下肢動作の解析

粘弾性特性の異なるシューズを着用して歩行を行った際の下肢動作について, 接地中の衝撃力, 下肢の関節運動と筋活動状態, 足部の安定性と加速度応答に着目して解析した. 本研究ではシューズに装着するインソールの粘弾性特性を変化させることでシューズ底部の特性を変化させた.

3. 研究の方法

(1) 歩行中の方向変換動作における足関節動態の解析

健康な大学院生男性 10 名を対象として,

約 10m の歩行路を裸足による直線歩行と 45 度および 90 度の方向変換動作を実施した。また、各動作について 3 種類の歩行速度（速い 1.7m/s, 中間 1.4m/s, 遅い 1.3m/s）で実施した。赤外線カメラ 10 台による動作解析システムによる三次元座標データと接地中の床反力データから足部および下腿における運動学的変量と関節モーメントを算出した。そして、足部動態および関節モーメントの関係から簡易弾性モデルについて考察した。

(2) 方向切換動作における動作様態が下肢関節運動に及ぼす影響の解析

健康な大学生および大学院生の男性 10 名と女性 6 名の計 16 名を対象として、走行からの方向切換動作を行った。その際に方向切換を行う前の走行の速度 3 種類（速い 3.2m/s, 中間 2.5m/s, 遅い 2.0m/s）、方向切換の角度を 2 種類（45 度, 90 度）、方向切換時に接地する足の爪先の向きを 3 種類（内側, 正面, 外側）と動作の様態を変化させた。赤外線カメラ 10 台による動作解析システムによる三次元座標データと接地中の床反力データから下肢の運動学的変量と関節モーメントを求め、方向切換動作時の下肢の動作変化と下肢関節への負荷を検討した。

(3) 粘弾性特性の異なるインソールを装着したシューズによる歩行時の下肢動作の解析

健康な大学生および大学院生の男性 14 名を対象として、異なる粘弾性特性（低反発素材 A>B>C の条件順に低い）を持った 3 種類のインソールと通常のもの（0 条件）を装着した試験用シューズを着用した状態で約 10m の歩行を行った。赤外線カメラ 10 台による動作解析システムによる三次元座標データと接地中の床反力データから下肢の運動を解析した。また、右下肢の筋（前脛骨筋, 外側腓腹筋, 大腿直筋, 大腿二頭筋, 外側広筋）の筋電位と下腿の脛骨部における加速度を計測した。これらの結果から、接地中の衝撃力, 下肢の関節運動と筋活動状態, 足部の安定性と加速度応答に対するインソールの粘弾性特性の違いによる影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 歩行中の方向変換動作における足関節動態の解析

歩行中の方向変換動作における足関節と足部の運動に着目し、足関節の水平面における関節運動と関節モーメントから簡易弾性モデルを構築した。また、足部の運動が足関節運動に及ぼす影響を確認した。

結果は以下のように要約された。

- ・速い歩行速度における足関節の内外転角度

と外転モーメントが他の歩行速度より有意な影響を受けることが示唆された。

- ・方向変換動作は、直線歩行に比較して有意に外転方向への角度変化が小さくなり、内転角度と内/外転モーメントが大きくなった。

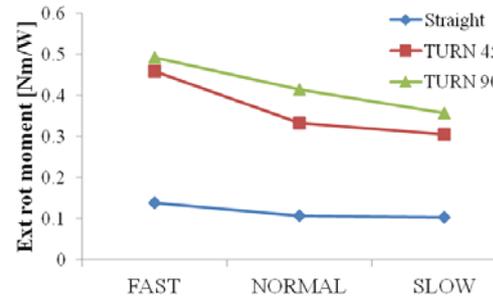


図 1 各試技における足関節外転モーメント最大値

・水平面における足関節動態を受動的なバネ系による簡易弾性モデルによって近似化した。

- ・方向変換動作においては、足関節運動に対して足部の回内/回外運動が影響することが考えられた。

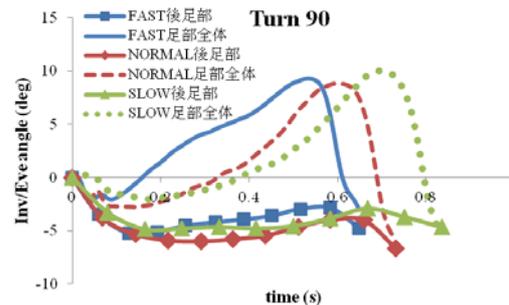


図 2 90 度方向変換動作における足関節および足部の回内/回外角度変化

以上のことから、歩行中および方向変換動作における足関節動態を考察する場合には、歩行速度や方向変換角度などの動作様態の要因や足部の捻じれ運動の影響を考慮する必要があることが示唆された。また、足関節動態を受動的なバネ系の特性で表現することはできるが、足部の接地状態に依存することが示唆された。

(2) 方向切換動作における動作様態が下肢関節運動に及ぼす影響の解析

走行からの方向切換動作において、方向切換動作前の走行速度, 方向切換の角度, 方向切換時の接地足の置き方の動作様態の変化が下肢関節運動および膝関節負荷に及ぼす影響を解析した。

結果は以下のように要約された。

- ・速い走行速度の条件は他の条件に比べて、下肢三関節の関節間力最大値と膝関節内転モーメント最大値が有意に大きかった。また、速いおよび中間の速度条件は遅い条件に比べて、膝関節外旋モーメント最大値が有意に大きかった。

- ・90度切換条件は45度条件に比べて、足関節と膝関節の前後方向の関節間力と足関節回内モーメント最大値が有意に大きかった。

- ・爪先の向きを外側にした条件は他の条件に比べて、膝関節内旋モーメント最大値が有意に小さくなったが、膝関節外転モーメントは大きくなる傾向が見られた。また、爪先を内側にした条件は外側条件に比べて足関節回内モーメント最大値が有意に大きくなった。

以上のことから、方向切換動作の動作様態が変化すると下肢関節運動および動力学的変数が有意に影響され、膝関節の負担が有意に変化することが示唆された。

(3) 粘弾性特性の異なるインソールを装着したシューズによる歩行時の下肢動作の解析

粘弾性特性の異なるインソールを装着した試験用シューズを着用して歩行を行った際の下肢動作について、接地中の衝撃力、下肢の関節運動と筋活動状態、足部の安定性と加速度応答に着目して解析した。なお、接地中を接地直後から接地期の前半の制動期と接地期後半の推進期に二分して観察した。

結果は以下のように要約された。

- ・接地中の床反力について、制動期はインソール条件で差がなかったが、推進期では低反発なインソール(A, B, C条件)が通常のもの(O条件)と比較して有意に低い結果であった。

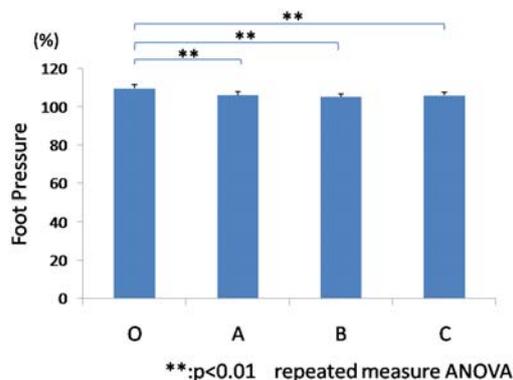


図3 インソール条件ごとの推進期における床反力最大値

- ・筋活動については、制動期では差が見られなかった。推進期では最も低反発なインソール条件(A条件)がO条件に比べて外側腓腹筋の筋活動最大値が有意に大きいことが認められた。

められた。

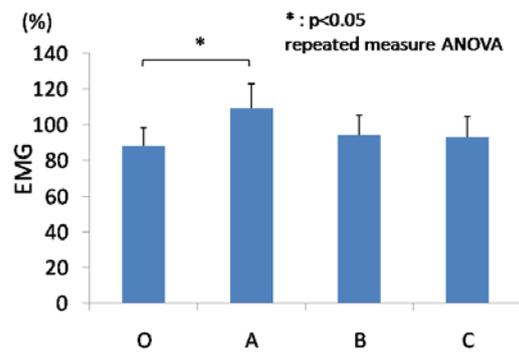


図4 インソール条件ごとの推進期における外側腓腹筋の筋活動量最大値

- ・着地直後の足関節最大外反角度は、最も低反発なインソール条件(A条件)において他の条件の比べて有意に大きな値を示した。

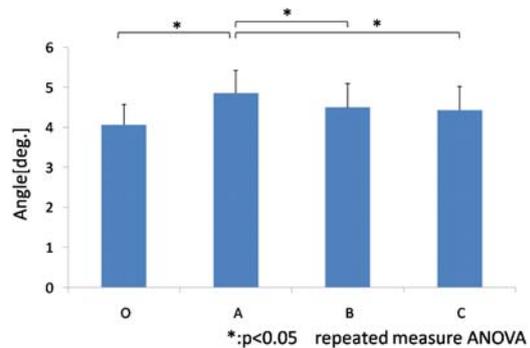


図5 インソール条件ごとの最大外反角度

- ・歩行中に下腿に生じる加速度を分析したところ、加速度波形の変化と足関節外反角度が最大値を示す時間の一致が認められた(図6)。外反角度が最大値を示す直前加速度の積分値(V)を安定性評価指標と定義し、インソール条件ごとに比較したところ、有意な差ではなかったが、足関節最大外反角度と同じような傾向が認められた。

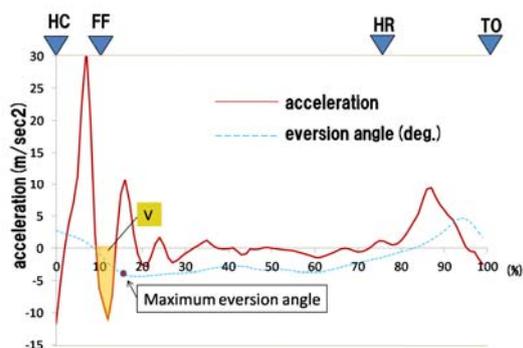


図6 下腿の加速度波形と足関節外反角度変

化

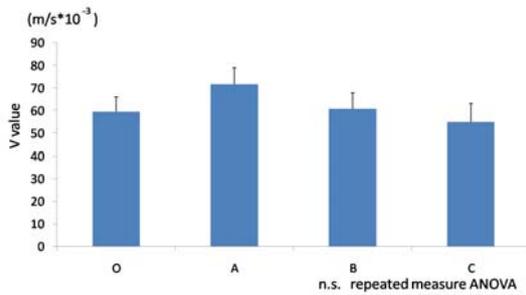


図7 インソール条件ごとの安定性評価指標

以上のことから、低反発素材で作製されたインソールを装着したシューズを着用して歩行した場合、制動期においては差が見られなかったが、推進期においては足部の底屈動作のための筋活動が増加したにも関わらず床反力には変換されにくいことが示唆された。また、着地直後の足関節の運動と下腿部の加速度をあわせて観察したところ、低反発なインソールを装着することにより、足関節の外反運動が大きくなることが観察され、シューズの安定性が減少する傾向が示唆された。さらに加速度波形からシューズの安定性を評価する方法を提案することができた。

(4) 成果の総括

本研究では、歩行と走行における動作様式と下肢の運動および力学的変量との関係を検討し、着地時の衝撃力が下肢関節に及ぼす影響を考察した。また、シューズの粘弾性特性の差異が下肢の筋活動および加速度波形に及ぼす影響も検討した。

走行中の着地衝撃に関する研究は、リハビリテーション医学(鈴木, 中村, 山崎)やスポーツ工学(福岡, 宇治橋)の分野で床反力を用いて古くから(Sanders, 1953)行なわれてきた。床反力は、装置の開発が進み、比較的簡単に精度良く測定できるようになってきたが、床反力波形は着地点における重心による作用力を計測しているため、下肢関節における衝撃を直接評価できない。また、床反力計は固定して利用するため、被験者に対して動作の制約を課し、実験環境が変わってしまう(Beatty, 2004)とも言われる。そのため、床反力だけでなく、加速度センサや足底圧センサを併用した研究が多く見られる。加速度センサは小型・軽量で動きを制約しにくい特徴があるので、Lafortune (1991), Nigg (1986), Derrick (2004)ら多くの研究者が使用している。また、足の動態に関する研究では、静的垂直荷重に対するアーチ形状の変形(土門, 1998), 歩行中の電気式アーチひずみゲージを用いた足内側アーチの変形計測(Kayano, 1986), ランニング前後の足アーチ

の変化(山本, 1991), 裸足歩行中の足部寸法の動的変化の計測(山崎, 1982)や足の有限要素モデルを用いた研究(Jacob, 1996, 浅井, 2005, Oomori, 2002)がある。さらに、足全体の受けるストレスを定量的に評価するため、非接触型ひずみ分布測定手法(西脇, 2003)が提案されている。

しかし、本研究のような動作様式や下肢動作の変化と下肢関節における着地衝撃の影響を検討した研究は少ない。本研究の成果はランニングと足部障害の因果関係の解明、シューズのフィット性やクッション性の評価に関する研究に応用発展できることが期待される。また、本研究の計測システムは長時間分解能で長時間のデータ記録が可能のため、長時間ランニング中の下肢の疲労と着地衝撃との関係の研究への応用発展が期待される。今後のランニング動作の診断などバイオメカニクス, リハビリテーション医学の分野や、スポーツシューズやスポーツサーフェスの開発などのスポーツ工学分野の研究に大きく貢献するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計0件)

(学会発表)(計7件)

木村結貴, 丸山剛生, 歩行中の方向転換における足関節動態, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, 2011年10月31日, 京都大学

佐藤優真, 丸山剛生, 歩行中の足部動態と筋活動によるインソール構造の評価, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, 2011年10月31日, 京都大学

鬼頭正樹, 丸山剛生, カutting動作における様態が膝関節負荷に及ぼす影響, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011, 2011年11月1日, 京都大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸山 剛生 (MARUYAMA TAKEO)

東京工業大学・大学院社会理工学研究科・准教授

研究者番号: 90181833