

Studies on the effects of sole attrition based on gait analysis

齋藤, 誠二

<https://doi.org/10.15017/459580>

出版情報 : 九州大学, 2006, 博士 (芸術工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

第一章

序論

1.1 靴底の構造と機能

靴は日々の生活のなかで最も身体に外力が作用する箇所に位置し、身体と外部環境とのインターフェイスとしての役割が求められている。また、靴は1日のうちで長い時間身につけるものであり、快適性が求められる。そのため、靴には屈曲性、フィット性、トラクション性能、通気性、衝撃緩衝性、安定性といった多くの機能性が備えられている。このような機能性のほとんどは、ソールつまり靴底に備わった機能となっている。

一般的にソールは異なる素材および機能性をもった三層のソールから構成されている(図1)。最も外側に位置し地面と接するソールはアウトソールと呼ばれている。アウトソールにはトラクション(粘着摩擦)性と呼ばれる靴の滑りを制御するはたらきがある(Kim et al., 2000)。滑りには推進力を減殺するマイナスの効果と着地時の衝撃を緩衝するプラスの効果がある。逆に止まり過ぎは膝や腰に無理な力を加えることになり障害を引き起こす。そのため、アウトソールには状況に応じた最適な滑りが求められている。滑りの程度は、一般的にアウトソールの意匠と素材に起因するといわれている(Gronqvist et al., 1995)。アウトソールの素材は一般的に天然ゴムや合成ゴムとこれらを配合したものおよびポリアミドやウレタンの合成樹脂が用いられている。アウトソールは地面との接触により摩擦が生じるため、ある程度耐久性の強い素材となっている。最近では耐摩耗素材の開発が進み耐久性の高い素材が用いられるようになってきた。しかし、重量や柔軟性の問題から積極的に使用されていない(石塚, 2003)。

三層のソールのなかで最も内側に位置し足底と接する部分はインソールと呼ばれている。インソールには着地時の衝撃を吸収するはたらき(衝撃緩衝性)がある。素材にはエーテル系ポリウレタン製のソルボセインが広く利用されている。この素材は粘弾性を有し縦方向の衝撃を横方向へ立体的に拡散させる特性がある。インソールは靴によって着脱が可能なものもあり、運動の性質によってインソールを使い分けることもできる。さらに、足部の形状に合ったインソールを挿入することで、扁平足や外反母趾および変形性膝関節症などの障害の進行の抑制や痛みの軽減が図られている(Casey et al., 2002; Nigg et al., 2003a; Stacoff et

al., 2000).

アウトソールとインソールの間には最も厚いミッドソールと呼ばれるソールがある。ミッドソールにはインソールと同様に着地時の衝撃を吸収するはたらきと距骨下関節の動きを制御するはたらき(安定性)の2つがある。ミッドソールには一般的に衝撃吸収材としてエチレンと酢酸ビニールの共重合体であるEVA(Ethylene Vinyl Acetate)が用いられている。EVAは発泡EVAとも言われるように小さな気泡を有しており、気泡が生み出す柔軟性によって衝撃を吸収している。一方で、柔らかな素材の場合には加重時の変形が大きいため、安定性にはある程度硬い素材が求められる。そのため、ミッドソールの踵から中足部にかけての内側や外側だけに比較的硬い素材を用いるなどの工夫がなされている(石塚, 2003)。

このように、靴のソールは三層で構成され、それぞれが異なる重要なはたらきを担っている。なかでもミッドソールは円滑な動きの補助と身体の保護のための衝撃緩衝性と安定性が備わっており特に重要な部分とされている。

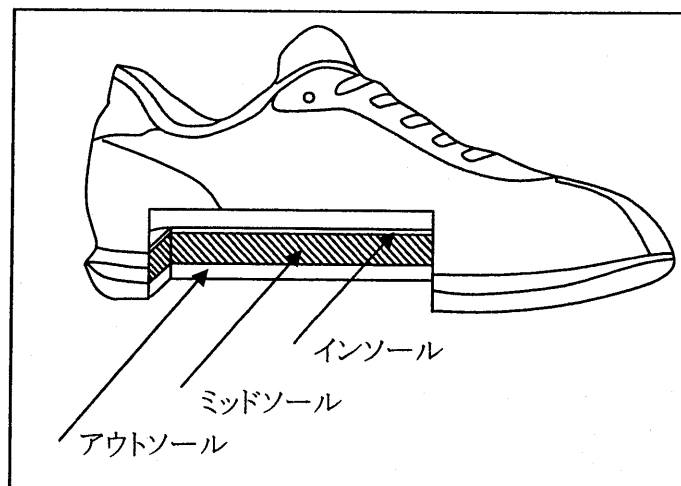


図1 靴のソールの構造

1.2 靴の衝撃緩衝性と安定性

衝撃緩衝性とは着地の際に発生する衝撃を吸収する機能である(Lake et al., 2000). 歩行や走行において立脚期中に地面から受ける地面反力は, 着地直後に生じる鋭い波形と, それに続いて生じる緩やかな波形からなる. 初期の波形は, 着地後の 50ms 以内の短い時間に生じ, その衝撃の強さは, 歩行では体重の 0.5 から 1.25 倍(Simon et al., 1981), ランニングにおいては2から3倍になるといわれている(Cook et al., 1985a; Miller et al., 1990). また, 跳躍運動を含めると体重の 2 から 10 倍ともいわれている(Cavanagh et al., 1980; Mcclay et al., 1994). このような波形は, 足が地面と衝突することで生じることから受動的衝撃とよばれている. 一方, 受動的衝撃の後の波形は能動的衝撃と呼ばれ, 人間が能動的に発揮する脚筋力によって生じた身体の動きに対する反作用であり, 推進力を生み出す力の波形である. 靴の衝撃緩衝性は受動的衝撃を緩衝するための機能であり, ミッドソールの粘性がその役割を担っている. しかし, ミッドソールの粘性が強いと能動的衝撃までも緩衝するため推進力を抑制することになる. 推進力の抑制は運動中のエネルギーコストまでも増加させるため(Gottschall et al., 2003; Nigg et al., 2003b), ミッドソールは粘性だけでなく弾性の要素を併せ持ち, 受動的衝撃を大きくさせず能動的衝撃に影響を与えないものが望ましいとされている.

靴の安定性とは足部が地面に接地している間の距骨下関節(図 2)の過剰な動きを抑制するはたらきである(Lake et al., 2000). このはたらきを担っているのは, 靴のアップパー(足の甲を覆う部分), ヒールカウンター(踵を覆う硬い素材でできた部分)およびミッドソールである. 距骨下関節は距腿関節とともに下肢の下端で支持性と運動性を担っている(高嶋ら, 2003). これらの関節は全体重を受けて運動を前額方向と矢状方向とに分散し, 歩行の平衡に大きく関与している(Lafortune et al., 1994). 距骨下関節は骨構造上および強靱な靭帯に覆われているため非常に安定しており容易に脱臼をすることはない. しかし, 急激な停止や方向転換を繰り返すようなスポーツの場面においては過度なストレスが加わり損傷する(Garrick et al., 1977; Konradsen et al., 1991; Stacoff et al., 1993). また, 距骨下関節を形

成する踵骨は脛骨に対して内側に位置していること、および荷重線と踵骨-床接触点がずれている(図3)ことにより距骨下関節の動きは下腿の回旋を生じさせる(Kirsten, 2005)。そのため、距骨下関節の運動軸が足底面の傾斜などによって変化すれば、下腿の動きまで影響され円滑な歩行の妨げとなってしまう。従って、靴の安定性は距骨下関節における傷害を予防するとともに、円滑な歩行を促すための機能とされている。

このように、靴には様々な機能が備えられ人々の快適な生活を支えている。特に、衝撃緩衝性と安定性は、円滑な動きの発揮と身体の保護のために重要な機能とされている。一方、これらの機能が及ぶ身体には靴の衝撃緩衝性と同様に着地時の衝撃を吸収するはたらきが備わっており、靴の衝撃緩衝性とともに関節から身体を保護する役割を担っている。

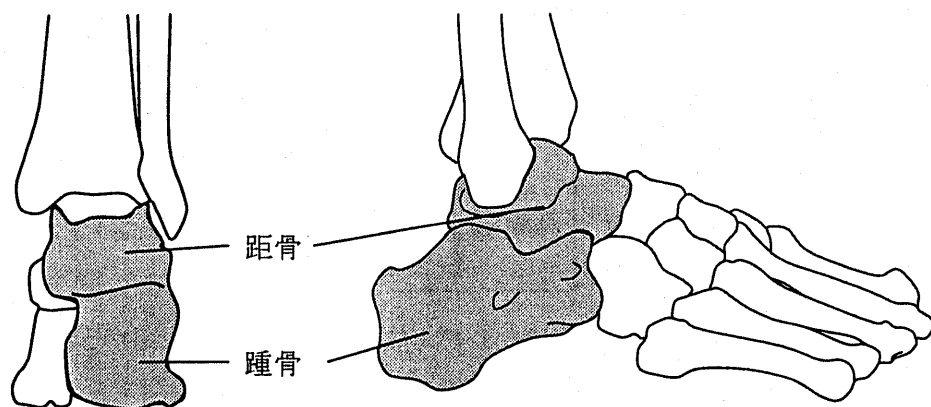


図2 距骨下関節の形成

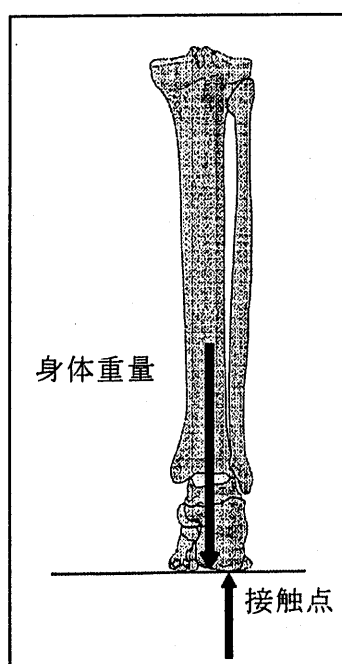


図3 床との接触点と荷重線のアライメント (Kirsten, (2005)より作図)

1.3 生体における衝撃緩衝作用

着地時に足に加わる衝撃は靴の衝撃緩衝性によって軽減されるが、筋肉、脂肪および関節軟骨などの軟部組織や骨の弾性によっても衝撃は緩衝されている。筋による緩衝作用は大きく2つに分類される。1つは関節角度を変化させ下肢の硬さを調節することで衝撃を緩衝するはたらきである(Lafortune et al., 1996a; Lafortune et al., 1996b)。特に膝関節の屈曲が衝撃緩衝の大きな役割を担っており、歩行においては約 20° (Lafortune et al., 1992a)、走行においては約 30° (Williams, 1993)の屈曲が最適な角度であると報告されている。王ら(1998)が行った数値シミュレーションによれば、30cmの高さから飛び降りた際の着地時に足裏にかかる最大衝撃力は、下肢関節の筋肉が関節の動きをコントロールすることによって半分近くに抑えられる。また、膝関節の可動範囲が制限された場合には、制限されていない場合と比べて足裏の衝撃力は58%、足関節では19%、膝関節では11%増加すると報告している。もう1つの筋の緩衝作用は、収縮によって筋自体の硬さを変化させ軟部組織に発生する衝撃を減衰させる作用である(Wakeling et al., 2001a; Wakeling et al., 2002)。着地時の衝撃が最大に達する時間は、歩行では着地後50ms以内、走行で5ms~30msと報告されている(Bobbert et al., 1991; Cavanagh et al., 1980)。従って、この筋の緩衝作用には筋の収縮力だけでなく筋の収縮速度が重要となる(Wakeling et al., 2001b)。筋以外には足部のアーチが衝撃の緩衝に関与している。アーチは内側縦アーチ、外側縦アーチおよび横アーチがあり、なかでも最も大きな内側縦アーチが緩衝に寄与している。アーチは靭帯、筋、足底筋膜および関節包により支持されることで粘弾性特性をもち、この特性によって衝撃を緩衝している(Ker et al., 1987; 高嶋ら, 2002; 高嶋ら, 2003)。このような動的な緩衝作用の他に静的な緩衝作用も生体には含まれている。それは、踵部の組織のはたらきである(Clercq et al., 1994)。人間の踵骨の下には10mmを上回る脂肪層とそれを包む筋結合組織が発達しており(Steinbach et al., 1964)、足自体や下肢部の骨格への直接的な力作用を軽減する上で極めて重要なはたらきを担っている。木下ら(1991)は、踵部に打撃具を落下させ落下具の変位を計測し、踵のエネルギー損失率は70%から80%という

結果を得ており、踵の緩衝作用は一般のジョギングシューズのミッドソールに用いられる EVA よりも優れていたと報告している。そして、このような踵部によるエネルギー損失率は脂肪層の厚みと高い相関関係にあることを示している。

一方、このように衝撃を緩衝するはたらきのある組織は加齢に伴って変化するため、緩衝作用は低下していると考えられる。高齢になると筋力が低下することはこれまでに多くの研究で報告されている (Degens et al., 1998; Gajdosik et al., 1996)。この筋力の低下の主な原因は筋量の減少にあり、筋量の減少は速筋線維と遅筋線維の筋線維の損失や速筋線維の萎縮に依存している (Young et al., 1984; Young et al., 1985)。筋の収縮速度が重要とされる衝撃緩衝作用において、このような速筋線維の損失や萎縮は緩衝作用をも低下させていると推察される。また、筋のはたらきに依存する関節角度の変化による緩衝作用および筋の緊張によって保持される内側縦アーチによる緩衝作用は、筋力低下に伴って低下していると考えられる。さらに、骨による緩衝作用はその張力と弾性に依存しているが、これらとともに 45 歳以降ゆっくりと低下していくと報告されている (Burstein et al., 1976)。Currey ら (1975) は骨の弾力性は 30 歳まで増加するがそれ以降は低下すると報告している。従って、骨による緩衝作用も加齢に伴って低下すると推察される。踵部における緩衝作用は脂肪組織とそれを包む結合組織に依存するが、Kuhns ら (1949) は加齢に伴ってコラーゲン線維の損失と柔軟性結合組織の変性や破壊によって脂肪組織が流出すると報告している。木下ら (1995) は、加齢に伴って緩衝組織が硬化することにより緩衝作用が低下すると報告している。

このように、生体における緩衝作用は靴の衝撃緩衝性と同様に身体に伝わる有害な衝撃を軽減させるために重要な役割を果たしている。一方で、加齢に伴ってその作用は低下するため、高齢者にとっては靴の衝撃緩衝性のはたらきは特に重要であると考えられる。このような靴の衝撃緩衝性とともにも靴の安定性は、運動の補助と障害の予防のために重要な機能とされている。そこで次節では靴の安定性のはたらきが支える下肢の動きについて述べる。

1.4 靴の安定性が支える下肢の動き

靴の安定性が関与する距骨下関節の動きは、下腿の回旋運動と足関節の底背屈と関連がある(Vogelbach et al., 1977). 距骨下関節の回内は下腿の内旋を引き起こす足関節の背屈と足部の外転が組み合わさったものであり、回外は足関節の底屈と足部の内転からなり下腿の外旋を引き起こす(吉川, 1976). 歩行における下肢の動きを図 4 に示す. 歩行において距骨下関節は、 5° から 8° 回外した状態で着地した後、踵離れが開始されるまで回内の動きをする(Nigg et al., 1988). 着地後の回内は前節で述べたように踵骨が脛骨に対して外側に位置しているとともに、身体重量が与える荷重位置に対して踵骨と床の接地点が外側にあることにより生じる回内モーメントによって引き起こされる(図 2). さらに、距骨下関節の回内は荷重の受け継ぎが起こる間に下腿の内旋と膝の内反を引き起こす(Lundberg et al., 1989). 一方、距骨下関節の回外は回外筋である後脛骨筋、ヒラメ筋、長腓骨筋および短腓骨筋の強い緊張力による回外モーメントによって引き起こされ、下腿の外旋と膝の外反を生じさせる(Lundberg et al., 1989). このように、距骨下関節は他の下肢関節の動きに影響している. また、このような下肢の動きは筋肉のはたらきにより抑制され安定した状態が保たれている(Kirsten, 2005).

歩行において下肢の動きは身体重心の動きを抑えることでエネルギー消費の抑制に寄与している. 歩行中の身体重心は両足支持期で最も低い位置にあり、片足支持期においては最も高く、最も支持脚側に位置する. この片足支持期における身体重心の上昇は、支持脚の反対側への骨盤傾斜と支持脚における足関節の底屈と膝関節の屈曲によって抑制されている. 両足支持期における身体重心の下降は水平面における骨盤の回旋によって抑制される. この動きは、歩隔の減少を引き起こし左右動の抑制にも寄与している. また、踵離れの際の足関節背屈による身体重心の下降は、踵離れと反対側の脚で起こる膝の伸展および踵接地に伴う脚の延長によって抑制されている. 身体重心の左右動は大腿骨に対する脛骨の外反と身体重量荷重時の膝関節の軽度の内転によって抑制されている. このような動きは、身体重心の動きを制御するためにはたらく筋活動を抑制させることになり、

エネルギー消費の軽減に寄与している(Saunders et al., 1953).

一方,このような歩容は加齢によって変化することが多くの研究により報告されている. 加齢に伴って関節可動域, 脚筋力および平衡機能が低下することが知られているが, これらの現象は歩容に影響する. 高齢者の歩行では歩幅と歩調が減少し, 歩行速度が減少している(Imms et al., 1981; Kaneko et al., 1991). また, 脚筋力と関節可動域の減少は遊脚期における膝屈曲角度と足関節底屈角度の減少(Kaneko et al., 1991; Murrey et al., 1969) および踵接地時の足関節背屈角度の減少(Kaneko et al., 1991)を引き起こしている. さらに, 距骨下関節の可動域も減少し着地時の回外角度と両足支持期および片足支持期における回内角度の減少がみられる(Nigg et al., 1988). このような下肢の動きは不安定な歩行姿勢を生み出し, 身体重心の上下左右動揺を増加させている(淵本ら, 1998). しかし, 高齢者の歩行形態の特徴として挙げられる歩隔の増大や両足支持期の延長は, 身体重心の動揺を抑制させ不安定な歩行を回避している(Geriatrics et al., 1990; Winter et al., 1990; Woollacott et al., 1997).

このように, 靴の安定性が直接関与する距骨下関節の動きは下肢の動きを連動させるため, 靴の安定性は足部に限らず下肢全体の円滑な動きを促すとともに過剰な動きに伴う障害・傷害を回避しているといえる.

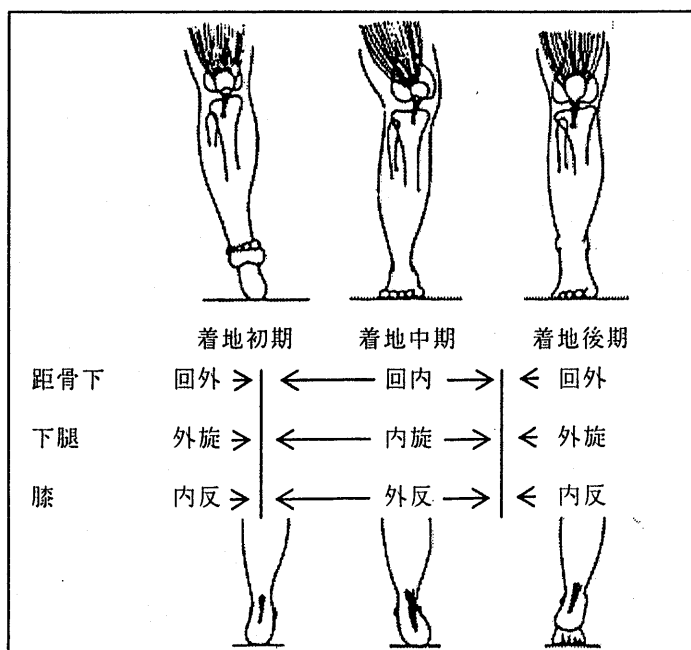


図4 歩行中の下肢の動き (横江, (2001)より作図)

1.5 衝撃緩衝性と安定性の低下の原因と影響

前述したように靴の機能, 特に衝撃緩衝性と安定性は動きを円滑にさせるだけでなく, 障害・傷害を予防するはたらきを担っている. つまり, これらの機能が適切に作用しなければ生体における緩衝作用や下肢の動きに悪影響を与えるだけでなく, 下肢の障害・傷害が引き起こされると考えられる.

靴の衝撃緩衝性が適切に作用しない状況にはミッドソールが硬い, 薄いおよびソール構造の劣化が挙げられる. Clark ら(1983)は硬いミッドソールではランニング中の床反力が増加すると報告している. Nigg ら(2003b)はミッドソールの硬さの違う靴を履いてランニングした際の下肢の筋活動を測定し, 硬いソールでは衝撃緩衝のための筋活動が増加することを示している. Wakeling ら(2002)も硬さの異なるミッドソールに下肢の筋活動が適応すると報告している. さらに, ミッドソールの劣化に関して Cook ら(1985b)は 500 マイルのランニングをした靴の衝撃緩衝性は 55%まで低下することを示した. Verdejo ら(2004)も 500km から 750km のランニングによって EVA を形成するセルに穴が開き衝撃緩衝性が低下すると報告している. このような不適切なミッドソールや劣化による衝撃の増加は, 下肢の負担を増加させている. 繰り返される衝撃は筋収縮力や神経伝達速度を低下させる (Bongiovanni et al., 1990) とともに筋疲労を引き起こし筋による衝撃緩衝作用を低下させている (Voloshin et al., 1998; Mizrahi et al., 2000a; Mizrahi et al., 2000b). スポーツの場面において頻繁に起こる膝の障害 (Collins et al., 1989; McMahon et al., 1987) や疲労骨折 (Beck, 1998; Milgrom et al., 1982; Schaffler et al., 1990) も繰り返される強い衝撃によって引き起こされている.

一方, 靴の安定性が適切に作用しない状況の 1 つとしては, ミッドソールの過度な粘性が挙げられる. 柔らかなミッドソールでは身体重心の加わる部分において物質変形が大きく, 関節の角度変化が増加する (Nigg et al., 1998). また, Perry ら(1992)は, ミッドソールの外側における素材の密度を低くした場合, 歩行中の距骨下関節の回外が促進され回内が抑制されることを示した. このような距骨下関節の動きが繰り返し引き起こされると, アキレス腱や靭帯の傷害が引き起こされる. スポーツで最も頻繁に発生する足関節の捻挫も靴の安定

性の低下が要因とされている(Podzielny et al., 1997; Stacoff et al., 1996). さらに, 粘性の強いミッドソールでは運動中の推進力となる床反力を吸収するとともに, 立脚期における下肢の動きが不安定になることによりエネルギーコストが増加してしまう(Bosco et al., 1979; Nigg et al., 2003b).

このように, 靴の衝撃緩衝性と安定性が適切にはたらかなければ, 身体には強い衝撃や過剰な動きが引き起こされ, 障害・傷害の原因となる. そのため, 両機能を担うミッドソールについては積極的な研究開発が進められてきた. しかし, 靴は使用することによって地面との摩擦が生じるため, ソールの摩耗が引き起こされる. ソールの摩耗は厚さを減少させるだけでなく形状も変化させる. そのため, 衝撃緩衝性と安定性は低下し着地時の衝撃および下肢の動きの増加, さらにはエネルギーコストの増加が引き起こされると考えられる.

1.6 研究の目的

人々の生活のなかで欠かすことのできない靴には様々な機能が備えられ、足元から快適な生活を支えている。特に、ミッドソールがはたらきを担う衝撃緩衝性と安定性は、円滑な動きの発揮と身体の保護のために重要な機能とされている。しかし、靴を使用すれば地面との摩擦を避けることはできず、結果としてソールの摩耗が引き起こされる。この現象は、ソールが担う衝撃緩衝性や安定性の機能を低下させ、これらの機能が支える身体の動きやはたらきを妨げていると考えられる。さらに、身体を保護する機能の低下によって、関節や筋肉をはじめとして下肢のあらゆる部位に障害・傷害が引き起こされると推察される。一方で、人々の身体の動きや機能は年齢によって様々であり、引き起こされる摩耗の形状やそれに対する反応は異なってくることも考えられる。

そこで、本研究では使用によって引き起こされるソールの摩耗形状を明らかにするとともに、靴底の摩耗が靴の衝撃緩衝性と安定性に及ぼす影響を歩行分析から明らかにし、それに対する身体反応について年齢と歩行時間から検討することを目的とした。

1.7 論文の構成

本論文の題目は「歩行分析からみた靴底の摩耗の影響に関する研究」である。本稿は全6章により構成された。

第一章では、本研究の背景について述べた。まず、靴底の構造と機能について触れ、特に靴の摩耗が引き起こされるミッドソールに備わる衝撃緩衝性と安定性の機能について述べた。さらに、これらの機能が寄与する身体における衝撃緩衝作用と下肢の動きについて述べた。最後に、不適切な靴の衝撃緩衝性と安定性が引き起こす現象を、障害・傷害を中心に述べ、靴の摩耗が及ぼし得る影響を推察し本研究の目的を明確に述べた。

第二章「若年者と高齢者における靴の使用と靴底の摩耗特性に関する実態調査」では、生活形態や歩容の異なる若年者と高齢者を対象に靴の摩耗特性を明らかにすることを目的として、靴の摩耗の計測を靴の使用実態や摩耗に対する意識調査と合わせて実施した。

第三章「靴底の摩耗が若年者の歩行中の下肢に与える影響」では、摩耗による衝撃緩衝性および安定性への影響について明らかにすることを目的に、第二章で明らかとされたソールの摩耗に即した靴を履いて歩行した際の下肢における衝撃、筋活動、関節角度および足圧中心軌跡を検討した。

第四章「靴底の摩耗が高齢者の歩行中の下肢に与える影響」では、第三章で明らかとされた摩耗に伴う靴の衝撃緩衝性と安定性の変化が、歩容の異なる高齢者に与える影響を明らかにすることを目的に、第三章と同様の実験を実施し検討を行った。

第五章「靴底の摩耗が長時間歩行中の下肢の安定性と衝撃緩衝性およびエネルギー消費に及ぼす影響」では、第三章で明らかとされた摩耗による下肢の動きの増加が歩行中のエネルギーコストに与える影響について検討した。さらに、摩耗した靴を履いて長時間歩行した際の下肢の動きと衝撃加速度の変化とそれに伴うエネルギーコストの変動の検討を行った。

第六章は、本稿の総括として本研究で得られた研究結果を基に靴底の摩耗が身体に与える影響に関する知見を述べた。また、本研究の問題点を挙げた上で、今後の研究課題と

その研究意義について述べた。

なお、第二章は、靴の医学, Vol.20, No.2 (2006)に掲載された「若年者と高齢者における靴の使用と靴底の摩耗特性に関する実態調査」(齋藤誠二, 村木里志)に基づいている。

また、第三章は、人間工学, Vol.42, No.4 (2006)に掲載された「靴底の摩耗が歩行中の下肢に与える影響」(齋藤誠二, 村木里志)に基づいている。