

氏名（本籍）	あおき さとこ 青木 識子（長野県）
学位の種類	博士（被服環境学）
学位記番号	博甲第50号
学位授与年月日	平成28年3月11日
学位授与の要件	学位規程第5条第1項該当
論文題目	高齢女性の歩行特性並びに靴の履用効果に関する動態力学的研究
論文審査委員	（主査） 教授 田村 照子 教授 米山 雄二 教授 永井 伸夫 教授 長谷 和徳（首都大学東京）

論文内容の要旨

日本は高齢社会を迎え、高齢者の安全で活動的な生活実現のための研究、高齢者の活動を補助するアパレル製品の研究は喫緊の課題である。従来、高齢者の歩行研究は様々な視点から多数行われてきたが、近年では三次元動作解析装置を用いて、時間的・空間的・力学的なパラメータを複合的に分析する動態力学的手法が主流となっている。これらの研究では、スポーツ科学の視点から主として下肢の主要な3関節である股・膝・足関節が対象として取り上げられているが、距腿・足趾など足部の関節についての報告はほとんど見られない。また、履物の履用効果については、若女性を対象としたものが散見されるが、高齢女性を対象とした報告は少ない。

本研究では、高齢者の歩行特性を明らかにするため、距腿関節および足趾関節を含めた下肢関節トルクの分析を試みた。また、高齢女性と若年女性を対象に、両群の歩行特性とそれに及ぼす履物の影響について、三次元動作解析と筋電図解析により複合的に検討することを目的とした。

本論文は6章より構成され、各章の概要は以下のとおりである。

第1章「序論」では、本研究の目的、研究背景および論文の構成について記述した。

第2章「加齢による筋厚・平衡機能の変化についての検討」では、タニタ身長体重計(株式会社タニタ)による身体組成の測定と、汎用超音波画像診断装置プロサウンド SSD-3500(アロカ株式会社)を用いて大腿前面、大腿後面、下腿前面、下腿後面の4か所の筋・脂肪厚の測定を行った。また、重心動揺計(共和電業)による測定値をもとに姿勢安定度評価指数(以下、IPS)を算出し、両群の静止時の平衡機能について検討した。

測定の結果、高齢群の脂肪量は若年群と比較して有意に大きいのに対し筋量は小さく、加

齢により脂肪量が増加し筋量が低下することが示された。特に、高齢群の大腿部の筋厚は小さく、加齢に伴う大腿部筋厚の低下が示された。立位静止時の重心動揺の外形面積は、高齢群の値が若年群を上回り、高齢群で重心動揺が大きいことが示された。次に、被験者に前後・左右の2方向に意識的に重心を動かしてもらったときの2方向の最大重心移動距離を測定し、二つを掛け合わせた値である安定限界面積を算出した。結果として、高齢群の2方向の最大重心移動距離と安定限界面積は若年群と比較し有意に小さくなった。加えて、安定限界面積を立位静止時の重心動揺面積で割った値であるIPSは、高齢群の値が若年群と比較し有意に小さくなった。以上のことから、高齢群の身体全体の筋肉量の低下および大腿部筋厚の低下と、静止時安定性の低下が明らかとなった。

第3章「高齢群と若年群の素足歩行についての三次元動作解析による比較」では、三次元動作解析システム(Motion Analysis 社)と床反力計(有限会社 AMII JAPAN/日本、AMTI 社/米国)を用いて、素足歩行時の動態解析を行い、高齢群と若年群の歩行特性の差について解析した。収録した歩行動作の中から歩行一周分を抜き出して時間により正規化した。解析項目は上下・左右の最大振幅、つま先高と踵部の上下軌跡、下肢関節角度、床反力、関節トルクである。

歩行一周初期の接地期において、高齢群の股関節トルクは若年群と比較し有意に大きくなり、高齢群は接地時に股関節が屈曲し大きな荷重を受け止めていることが明らかになった。また、同時期の高齢群の足関節角度は若年群と比較し有意に大きく、すなわち足首の関節が伸展していることが示された。このことは、高齢群のすり足歩行を示唆し、この特徴は高齢者のつまずきやすさの要因となると考えられる。次に、重心移動のおこる立脚中期では、高齢群の頭頂・肩先・腸稜に貼付したマーカの左右方向の軌跡が、若年群と比較し有意に外側へ偏り、身体の左右振幅が大きいことが示された。同時期の左右方向の床反力においても、高齢群の反力は外側に大きく偏り、高齢群の体幹の左右振幅の増加を確認した。また、立脚中期の膝関節角度は、高齢群の方が若年群より有意に小さく、高齢群では膝関節が屈曲し柔軟性や可動域が低下していることが明らかとなった。加えて、股関節角度の結果においても、高齢群の角度は若年群より有意に小さく、股関節の屈曲も大きいことが示された。これは、高齢群の上体の前傾が原因と考えられ、膝関節の結果と合わせて、高齢者では股関節が伸展しきれず調節の幅が狭いことが明らかとなった。続く推進期、若年群では膝関節トルクの大らかな上昇が見られるが高齢群ではトルクの上昇が見られず、若年群は膝に力を入れて推進するのに対して高齢群は膝に力が入らず力強い前進になっていないことが示唆された。足関節トルクにおいても、有意差はないものの高齢群の値が小さい傾向を示し、膝関節の結果と合わせて、高齢群の推進力の低下が明らかとなった。加速期では、高齢群の足趾関節トルクのピーク値が、若年群と比較し有意に小さく、高齢群では蹴りだし最後の指先での踏み切り力が小さいことが示された。減速期では、高齢群の足関節角度は若年群と比較し有意に大きく、高齢群では遊脚時に足首の屈曲が小さく、足先が下がった状態にあることが推測された。そこで、つま先と踵に貼付したマーカの上下方向の動きを解析した結果、遊脚相における高齢

群のつま先高と踵の最高到達点は若年群より低く、足首が伸展しているとともに足の位置そのものが有意に上がり切れない歩容特性が明らかとなった。

第4章「高齢群と若年群における靴の履用効果の比較」では、第3章と同様に三次元動作解析装置と床反力計を用いて、両群の靴の履用効果について検討した。試料は、ヒールがなく靴底の形状の異なる3種、すなわち、靴底のフラットな高齢者用シューズ、靴底に丸みのあるスニーカー、靴底が球形のトーニングシューズを選定し、加えてヒールのある履物としては3cmのヒールパンプスを採用した。解析項目は第3章と同様、上下・左右の最大振幅、つま先高と踵部の上下軌跡、下肢関節角度、床反力、関節トルクである。

靴履用の効果として、立脚中期の股関節最大伸展角度が高齢群では増加するのに対して、若年群では減少する傾向が示された。靴を履くことは、つまり靴底の上に立つことであり、ソールの矯正効果により上体の前傾や骨盤角度が変化したと考えられる。両群で靴履用効果の傾向が異なった要因としては、若年群は靴の履用で前方へ重心が移動してもバランスがとれるのに対し、高齢群では姿勢安定度の低下によりバランスを取ろうと上体を後方へそらす傾向があるためと考えられる。また、同時期体幹部に貼付したマーカの左右振幅の軌跡において、若年群では靴を履くことで左右振幅が大幅に増加したが、高齢群では靴履用の効果が見られなかった。若年群では、靴の厚みで歩隔が広がったことが考えられ、一方高齢者では素足でも歩隔が増加することが多くの論文で報告されていることから、靴の厚みの影響を受けないものと考えられる。左右方向の床反力においても、高齢群では靴の効果がほとんど見られないのに対し、若年群では外側方向の反力が増加し、体幹の振幅増加を裏付けるものとなった。推進期では、両群で靴履用時に膝関節トルクが上昇し、靴を履くことは膝関節で発揮される推進力を向上させることが示された。特に、素足時に膝関節トルクの上昇がほとんど見られなかった高齢群で、明瞭なトルクの上昇がみられたことは靴が高齢者の歩行を支援するうえで有効であることを示唆している。

次に、靴の種類による歩容への影響について検討した。スニーカー履用時に、立脚相における高齢群の距腿関節トルクは他の試料と比較し高値を示した。これは、スニーカーの靴底が固くフラットな形状であるという特徴が、重心移動時の足底の負荷を増加させたと予想される。また、パンプス履用時に、加速期における若年群の足趾関節トルクは他の試料と比較し減少し、ヒール靴の履用は指先での踏み切りを妨げることが示された。一方、蹴り出し時の足趾関節トルクがもともと低い高齢群では、靴の履用による影響は見られなかった。さらにパンプス履用時には、両群の遊脚相の足関節伸展角度が増加し、ヒールによる足首の伸展を確認した。特に、すり足によるつまずきが危惧される高齢者には、関節を伸展させるパンプスを用いることは転倒のリスクを高めると考えられる。

第5章「高齢群と若年群の歩行時下肢筋活動に見る歩行特性の比較」では、コードレス筋電計 MQAir(キッセイコムテック株式会社)を用いて、両群の歩行時の下肢筋活動を分析した。測定部位は大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋内側、腓腹筋外側の5部位であり、試料は第4章と共通の高齢者用シューズ、スニーカー、トーニングシューズ、中ヒールパンプ

スの4種類である。解析は、歩行一周期6期間について、それぞれの期間における筋活動の積分値を求めた。

最初に素足歩行における両群の筋活動について検討した。接地期では、高齢群の大腿直筋の平均筋電図積分値が高値を示したのに対して、若年群では高齢群ほど極端な値の上昇は見られない。第3章の素足歩行の動作分析において、高齢群では、接地期に股関節に大きなトルクがかかることを示したが、これを受けて大腿部の高い筋活動が示されたと考えられる。重心移動の起こる立脚中期では、若年群の腓腹筋の平均筋電図積分値が大きく上昇しているのに対して、高齢群では若年群ほど大きな値の上昇が見られない。足関節底屈筋群である腓腹筋活動の増加は、歩行時の推進力増加と結びつけることが出来る。若年群では関節を柔軟に使うとともに、必要な時に集中して筋力を発揮することによって大きな推進力を生みだしている。これに対し、高齢群では関節の伸展が小さく、推進力も小さく、メリハリが乏しい歩行特性が明らかとなった。

次に靴履用時の歩行について検討した結果、トーニングシューズ履用時に若年群では立脚相3期間の筋電図積分値が増加する傾向が示されたが、これに対して高齢群では減少する傾向が示された。トーニングシューズは靴底が球体で、不安定さを誘発する設計となっているため、若年群ではバランス維持のため筋活動が増加するのに対し、高齢群では靴底の球体の回転を重心移動に利用して推進するため筋活動が低下したと考えられる。

第6章「総括」では、各章で得られた結果をまとめ将来への課題・展望について述べた。

以上、本論文では、高齢群と若年群の歩行特性と、両群の靴の履用効果について、三次元動作解析装置と表面筋電計を用いて複合的に検討した。

その結果、高齢群の素足歩行における特性として、接地時につま先の上がらないすり足歩行であること、上体が前傾し股関節の屈曲が大きく、接地時における股関節への負荷が大きいこと、立脚相で膝関節が屈曲しており、膝に力をかけた推進ができていないこと、立脚相において持続的に高い筋活動が起こること、加速期におけるつま先での踏み切りが小さいこと等を明らかにすることができた。また、靴を履用することの影響としては、両群の立脚相における股関節角度の差が小さくなること、両群で推進期において膝関節で発揮される力が上昇することが明らかとなった。高齢群のみに見られた影響としては、トーニングシューズの履用で大腿部筋活動が減少し上体の推進が補佐される可能性があること、靴底の厚みや硬さが足底の負荷を高めること、ヒールのある靴は足関節を伸展させ踵きのリスクを高めることが明らかとなった。さらに、若年群のみに見られた影響としては、トーニングシューズの履用で立脚相3期間の大腿部筋活動が増加すること、試料の厚みから歩隔が拡大して左右振幅が増加することが明らかになった。

今回、試料の選定には、高齢者が履用し易いことを考慮し、比較的構造が近似した対象が選定されたため、靴の種類による歩行特性の差は傾向にとどまり、これを十分に検証することができなかった。今後は、本研究で得られた結果を基礎として、高齢者の歩行の欠点の補

償に向けた機能的な履物の開発・設計に関する研究が求められる。

論文審査結果の要旨

本論文は、「高齢女性の歩行特性並びに靴の履用効果に関する動態力学的研究」と題するもので、全6章により構成されている。

第一章「序論」では、本研究の目的、研究背景および論文の構成について記述されている。すなわち、高齢社会を迎えた日本では、高齢者の健康寿命の維持・延長が課題であり、高齢者が安全で活動的な生活を送るうえで、転倒、躓きなどを防止する歩行支援用の履物の開発が求められていること、高齢者の歩行研究はスポーツ科学を中心とする多くの分野で取り組まれており、近年では三次元動作解析装置を用いて、時間的・空間的・力学的なパラメータを複合的に分析する手法を用いた動態力学的な研究もみられるが、その多くは男性中心の素足または1種の履物を用いたもので、高齢女性を対象に素足歩行の特性を把握したうえで履物の効果を検討した事例はほとんど見受けられないこと、3次元動作解析に加えて、その動態を筋電図の観点から合わせて検討した事例はないことが指摘されている。これらを背景として本研究では、高齢女性と若年女性を対象に、三次元動作解析と筋電図解析により、両群の歩行特性を把握し、靴の履用効果の世代差について明らかにすることを目的としている。

第二章「加齢による筋厚・平衡機能の変化」では、歩行の前提となる、静止時平衡機能の加齢変化を検討するため、70歳以上の高齢女性10名と若年女性10名を対象に、立位姿勢における平均重心動揺、並びに前後左右に体軸を最大限振れさせ際の安定限界面積から求めた姿勢安定度評価指数(IPS)を算出している。またタニタ身長体重計による身体組成の測定、超音波測定装置を用いて歩行を支える筋活動のもととなる大腿前面、大腿後面、下腿前面、下腿後面の筋厚と皮下脂肪厚の測定を行い、これらに及ぼす加齢の影響が検討されている。結果、加齢による筋厚の低下とIPSの低下が示され、高齢群の平衡機能低下の要因は、前後・左右方向への最大重心移動距離の減少と、それに伴う安定限界面積の減少であることが確認されている。

第三章「素足歩行における三次元動作解析」では、三次元動作解析装置と床反力計を用いて、素足歩行時の動態解析を行い、高齢女性と若年女性の歩行特性の差が捉えられている。解析項目は各計測点の、上下・左右の最大振幅、つま先高と踵部の上下軌跡、下肢関節角度、床反力、関節トルクであり、結果、加齢に伴う体幹部の左右振幅の増加、高齢群の上体前傾と股関節・膝関節の屈曲位、高齢群のすり足歩行と足先の位置の低下、高齢者の接地期における股関節トルクの増大と立脚中期における膝関節トルクの低下、けりだし時の足趾関節の負荷トルクの減少などが観察され、いずれも高齢者の歩行の推進力の低下と躓きやすさの要因と考察されている。

第四章「靴を履用した歩行における三次元動作解析」では、三次元動作解析装置と床反力計を用いて、両群の靴の履用効果について検討されている。対象は、靴底の形状の異なる3種、高齢者用シューズ、スニーカー、トニングシューズと、3cmヒールのパンプスの計4種で、解析項目は第三章と同様、各計測点の上下・左右の最大振幅、つま先高と踵部の上下軌跡、各下肢関節角度、床反力、各関節にかかる関節トルクである。結果として、両群にお

いて靴の履用は推進期の膝関節トルクを上昇させ、膝の推進力が高まること、体幹の左右振幅は若年者が高齢者に近づくこと、立脚相における股関節角度は高齢者が若年層に近づくこと、ヒール靴の履用は足関節を伸展させ高齢者では躓きを誘発すること、等が明らかにされている。

第五章「歩行時下肢筋活動の分析」では、歩行の特徴を筋活動の状況から把握し考察することを目的として、両群の素足歩行と靴履用歩行時の下肢筋活動が、表面筋電計を用いて計測・分析されている。測定部位は大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋内側、腓腹筋外側の5部位であり、試料は第四章と同様、高齢者用シューズ、スニーカー、トーニングシューズ、中ヒールパンプスの4種類である。結果として、高齢群は大腿部・前脛骨筋ともに歩行1周期を通して高い筋活動を示すが、若年群は立脚中期の重心移動時に腓腹筋の筋活動が活発となり、メリハリのある筋活動がなされていることが明らかにされた。一方、歩行時筋活動における靴履用の効果は、両群ともに下腿筋群が顕著に認められ、若年群でより効果的であることが捉えられたが、靴の種類による効果の差は明確ではなく、今後課題が残されている。

第六章「総括」では、各章で得られた結果をまとめ将来への課題・展望について述べられている。

以上、本研究は高齢者の健康寿命延長に資する履物の開発を視野に入れて、高齢女性の歩行特性を明らかにすべく、70歳以上の高齢女性10名と若年女性10名を対象に、まず立位姿勢における重心動揺・姿勢安定度指数と超音波測定装置による下肢の筋厚と脂肪厚の結果から、高齢女性は筋量が減少し、立位保持時の重心動揺が拡大、姿勢の安定度指数が減少することを確認。さらに自然歩行時の前傾姿勢、股関節トルクの高い接地、膝関節での推進トルクの低下、躓き転倒につながる遊脚相における足部・足先の低位置、足趾関節トルクの低下によるつま先のけりだし力の低下、等様々な高齢女性特有の歩行特性を明らかにしている。靴利用の効果は両群ともに膝関節トルクの増加にあること、ヒール靴の履用は足関節の進展を促し、特に高齢者では躓きを誘発しやすいことなどが明らかにされ、これらの特徴が下肢の筋活動と呼応していることも示されている。高齢女性の歩行解析は男性に比較して数少なくさらに靴履用の影響を実証した研究はほとんどないことから、本研究の成果は極めて独創的にして貴重な知見を多く含むものであり、今後の高齢者用履物開発の基盤研究として被服環境学上貢献するところが大きい。よって本論文は博士（被服環境学）の学位論文として十分価値あるものと認められる。なお、公聴会における質疑において、根本的な疑問として出された関節トルクの数値については、本論文で使用した絶対値を使用する先行研究も多く、特段の齟齬のないことが確認されており、本審査委員会の最終判断を変更するものではないことを付記するものである。