



三次元剛体バネモデルを用いた足部関節のバイオメカニクス解析に関する研究

柿ヶ原, 拓哉

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2015-03-25

(Date of Publication)

2016-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6440号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006440>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 柿ヶ原 拓哉

専 攻 機械工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

三次元剛体バネモデルを用いた足部関節の

バイオメカニクス解析に関する研究

指導教員 安達和彦

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

(氏名：柿ヶ原 拓哉 NO.1)

足部関節は 28 個の骨とそれらを繋ぐ複数の靭帯や軟骨といった軟部組織から成る複合関節であり、全身の荷重を支える働きを持つ。これは見方を変えると足部関節は大きな荷重の加わる複雑な構造物であると言える。そこで本研究では骨を剛体要素、靭帯を引強にのみ抵抗するバネ要素、軟骨を圧縮にのみ抵抗するバネ要素とした足部関節の剛体バネモデルを構築し、様々な姿勢や状態における足部関節の各骨の姿勢と各部に加わる負荷を解析することで、足部関節の姿勢や状態が足部に与える影響について解明することを目的とした。

足部の代表的な変形のひとつである外反母趾は、ハイヒールシューズを履いているとなりやすいとされる。そこで解析はまず平面床面上の静止立位姿勢と踵部の床面を足趾部より 50[mm]高くした踵上げ姿勢について解析した。解析結果より踵上げ姿勢は静止立位姿勢よりも荷重が外側に偏り、リスフラン靭帯に大きな負荷が加わっていた。これは拇趾球荷重よりも小趾球荷重の方が小さい筋力で爪先立ちができるということ、リスフラン靭帯損傷が爪先立ち姿勢において生じやすいことに一致した。また外反母趾は各足趾の間が開くという特徴がある。そこで静止立位姿勢と踵上げ姿勢の各足趾間を比較すると、踵上げ姿勢では第 1 趾と第 2 趾の間こそ開いたものの、他趾間においては逆に閉じていた。本研究はハイヒールシューズを履いた場合と異なり、足部を覆う靴の内壁の要素が存在していない。また外反母趾は窮屈な靴を使用し続けることで生じるとされる。これらのことよりハイヒールシューズによる外反母趾はただ踵を高くしたために発生するのではなく、踵を高くした結果足趾が靴に強く押し付けられることにより変形が強要されることが、発生原因の一つであると考えられる。

続いてアキレス腱に筋力を作用させて爪先立ち姿勢をとらせた場合の筋力に応じた足部関節の姿勢を解析すると、踵が上昇するほど第 5 趾に加わる床反力が減少し、第 3 趾と第 4 趾に加わる床反力が増加することが分かった。足首から各足趾までの距離を考えると第 5 趾は足部において最も短い足趾であるため、踵の高さが高くなると他趾よりも早く地面から離れて浮いてしまう。そのため踵が上昇すると第 5 趾に加わる床反力は減少し、減少した床反力が第 4 趾と第 3 趾に加わるためにこの 2 趾に働く床反力は増加すると考えられる。

足部の代表的な変形には扁平足と呼ばれるものもある。扁平足は足部のアーチ構造が崩壊し土踏まずが地面と接触してしまう変形である。アーチ構造の支持には足底腱膜、長足底靭帯、底側踵舟靭帯の 3 つの腱膜・靭帯の寄与が大きいとされる。そこでこれらの 3 つの腱膜・靭帯をそれぞれないし全部除去したときの足部の姿勢を解析することで扁平足の発生原因について考察した。また扁平足への対処としてしばしばテーピングが用いられる。そこで内側アーチ支持テープを施した場合についても解析を行った。解析の結果、3 つの腱膜・靭帯要素の全てを除去した場合には足部のアーチは低下し、扁平足の兆候を示したものの、3 つの内のいずれかひとつを除去しただけではアーチの低下は生じておらず、扁平足の兆候は見られなかった。このことより足部関節は複数の腱膜・靭帯により支えられているため、いずれかの腱膜・靭帯が損傷などにより機能が低下しても、他の腱膜・靭帯を健全に保つことができれば扁平足の発生は防げると考えられる。ただし底

側踵舟靭帯を除去した場合において、足部は足首周りに外旋と外反の兆候を示した。扁平足の中には足部の外旋と外反を伴う外反扁平足もあるため、底側踵舟靭帯の機能低下は外反扁平足の発生に関係すると考えられる。また内側アーチ支持テーブを施した場合について解析を行った結果、内側アーチ支持テーブはアーチの支持には効果があるものの、荷重が外側に偏ってしまった。そこで内側アーチの曲りを補強するテーブを施して第1趾の地面への接触を強めた解析を行うと、第1趾に加わる床反力の増加と外側の足趾に加わる床反力の減少が見られた。このことよりアーチの曲りを補強するテーピングは足部の内外側のバランスを整えるのに効果的であると考えられる。なお、アーチの曲りを補強するテーピングは扁平足への対処としてしばしば用いられるテーピングの手法のひとつである。

またテーブのモデルを構築する手法を応用して、足部の代表的な損傷である外側靭帯損傷についてテーピングによる影響を解析した。外側靭帯は前距腓靭帯(ATFL)、後距腓靭帯(PTFL)、踵腓靭帯(CFL)の3つの靭帯からなり、損傷の際には主にATFLの損傷として表れ、重度になるとCFLの損傷も生じるが、PTFLが損傷することは稀である。また外側靭帯損傷は足首が過度の内旋と内反を生じた際に生じるとされる。そこで解析ではATFLを除去したモデルとATFLとCFLの両方を除去したモデルを構築し、歩行時に足部が強要される姿勢である底屈方向の力を加えた時と、捻挫に関与する内旋方向のトルクを加えた時の足部関節の姿勢変化について解析を行った。解析の結果、底屈時にATFLは伸展しないことが分かった。このことよりATFLにのみ損傷を生じている外側靭帯損傷においては、底屈方向の制御は行わない方が良いと考えられる。また足部が内旋した時はまずATFLのみが伸展し、内旋角度が大きくなるとCFLも伸展することが分かった。これは外側靭帯損傷がまずATFLに生じ、次にCFLに損傷が及ぶことに一致する。外側靭帯損傷の発生には足首の内反も関わっているとされる。しかし足部を内反させただけではATFLに伸展は生じていなかった。しかし内反姿勢において内旋方向のトルクを加えると、内反していない状態と比較して足部の内旋角度とATFLに加わる張力が増加が見られた。このことより内反は過度の内旋を生じやすい姿勢であるため、外側靭帯損傷の発生に関与すると考えられる。またテーピングは足部の過度の底屈や内旋を防ぐ効果があり、外側靭帯損傷の治療だけではなく損傷発生の予防にも効果があることが確認された。しかしテーピングにより特定の靭帯に加わる負荷が増加することも示された。そのためテーピングの施行には十分な注意が必要であると考えられる。

扁平足は靭帯機能や筋力の低下により発生する。そこで足部底側の靭帯の自然長を伸ばし弛緩した状態にすることで扁平足モデルを構築し、健全足との違いを比較することで扁平足による影響の解析を行った。解析の結果、扁平足はアーチが崩れることで第五中足骨底に加わる床反力が増加し、その分荷重が外側に偏ることが確認された。また筋力を作用させ爪先立ち姿勢をとらせた姿勢について解析を行うと、扁平足は健全足よりも踵の上昇が低いことが確認された。扁平足は健全足よりも疲れやすいとされるが、踵の上昇に健全足よりも大きな力が必要となるのは疲れやすい理由のひとつであると考えられる。また底側の靭帯の弛緩の度合いを変えて爪先立ち姿勢の解析

を行うと、靭帯が弛緩するほど踵の上昇が低くなった。このことより扁平足の程度が大きいかほど運動能力は低下すると考えられる。

以上、本研究では足部関節の三次元剛体バネモデルを構築し、静止立位姿勢と踵上げ姿勢での姿勢変化や個々の靭帯の損傷を想定した解析を行い、靭帯・軟骨に作用する負荷を明らかにするとともに、扁平足発生の要因の一端を明らかにした。さらに健全足モデルと静力学的扁平足モデルに対して筋張力を考慮した爪先立ち姿勢の姿勢変化の解析を行い、扁平足による足部関節の運動機能低下の一例を示した。

氏名	柿ヶ原 拓哉		
論文題目	三次元剛体バネモデルを用いた足関節のバイオメカニクス解析に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	安達 和彦
	副査	教授	白瀬 敬一
	副査	教授	横小路 泰義
	副査	教授	西野 孝

要旨

足関節は28個の骨と靭帯や軟骨といった軟部組織から成る複合関節であり、歩行などの際に全身の荷重を支える働きを持つ。このことより足関節は大きな負荷の加わる複雑な構造物であると言える。そこで本研究では骨を剛体要素、靭帯を引張にのみ抵抗するバネ要素、軟骨を圧縮にのみ抵抗するバネ要素とした足関節の剛体バネモデルを構築し、様々な姿勢や状態における足関節の各骨の姿勢と各部に加わる負荷を解析することで、足関節の姿勢や状態が足部に与える影響について解明することを目的とする。

第1章では本研究の背景、目的および構成について述べ、第2章では足関節の構造について説明した。続いて、第3章では、本研究で用いる足関節の三次元剛体バネモデルについて述べた。

第4章では、構築したモデルを用いて平面床上の静止立位姿勢と踵部の床面を足指部より50[mm]高くした踵上げ姿勢について解析した。足部の代表的な変形のひとつである外反母趾は、ハイヒールシューズを履いていることにより生じやすいとされる。外反母趾は各足趾の間が開くという特徴がある。解析の結果、踵上げ姿勢は第1趾と第2趾の間こそ開いたものの、他趾間においては逆に閉じており、外反母趾の兆候を示していなかった。本研究はハイヒールシューズを履いた場合と異なり、足部を覆う靴の内側の要素が存在していない。また外反母趾はハイヒールシューズの他にも窮屈な靴を使用し続けることで生じるとされる。これらのことよりハイヒールシューズによる外反母趾は、踵を高くした結果、足趾が靴に強く押し付けられることで変形が強要されて発生すると考えられる。続いてアキレス腱に筋力を用いて爪先立ち姿勢をとらせた場合の筋力に応じた足関節の姿勢を解析すると、踵が上昇するほど第5趾に加わる床反力が減少し、第3趾と第4趾に加わる床反力が増加することが分かった。足首から各足趾までの距離を考えると第5趾は足部において最も短い足趾であるため、踵の高さが高くなると他趾よりも早く地面から離れて浮いてしまう。そのため踵が上昇すると第5趾に加わる床反力は減少し、減少した床反力が第4趾と第3趾に加わるためにこの2趾に働く床反力は増加すると考えられる。

第5章では、アーチ構造の支持に大きく寄与する足底腱膜、長足底靭帯、底側踵舟靭帯の3つの靭帯・腱膜に注目し、これら3つの靭帯・腱膜をそれぞれないし全部を除去したときの足部の姿勢を解析した。足部の代表的な変形に扁平足があり、扁平足では足部の前述のアーチ構造が崩壊し、土踏まずが地面と接触する変形である。解析の結果、3つの靭帯・腱膜要素の全てを除去した場合には足部のアーチは低下し、扁平足の兆候を示したものの、3つの内のいずれかひとつを除去しただけではアーチの低下は生じておらず、扁平足の兆候は見られなかった。このことより足関節は複数の靭帯・腱膜により支えられているため、いずれかの靭帯・腱膜が損傷などにより機能が低下しても、他の靭帯・腱膜を健全に保つことができれば扁平足の発生は防げると考えられる。ただし底側踵舟靭帯を除去した場合において、足部は足首周りに外旋と外反の兆候を示した。扁平足の中には足部の外旋と外反を伴う外反扁平足もあるため、底側踵舟靭帯の機能低下は外反扁平足の発生に関係すると考えられる。また扁平足の対処としてしばしばテーピングが用いられることより、内側アーチ支持テープを施した場合についても解析した。その結果、内側アーチ支持テープはアーチの支持には効果があるものの、荷重が外側に偏ってしまった。そこで内側アーチの曲りを補強するテープを施して第1趾の地面への接触を強めると、第1趾に加わる床反力が増加し外側の足趾に加わる床反力が減少した。このことよりアーチの曲りを補強するテーピングは足部の内外側のバランスを整えるのに効果があると考えられる。さらに、テープモデルを構築する手法を応用して、足部の代表的な損傷である外側靭帯損傷についてテーピングによる影響の解析を行った。外側靭帯は前距腓靭帯(ATFL)、後距腓靭帯(PTFL)、踵腓靭帯(CFL)の3つの靭帯からなり、損傷の際には主にATFLの損傷と

氏名	柿ヶ原 拓哉		
----	--------	--	--

して表れ、重度になるとCFLの損傷も生じるが、PTFLが損傷することは稀である。また外側靭帯損傷は足首が過度の内旋と内反を生じた際に生じるとされる。そこで解析ではATFLを除去したモデルとATFLとCFLの両方を除去したモデルを構築し、歩行時に足部が強要される姿勢である底屈方向の力を加えた時と、捻挫に関与する内旋方向のトルクを加えた時の足関節の姿勢変化について解析を行った。その結果、底屈時にATFLは伸展しないことが分かった。このことよりATFLにのみ損傷を生じている外側靭帯損傷においては、底屈方向の制御は行わない方が良く考えられる。また足部が内旋した時はまずATFLのみが伸展し、内旋角度が大きくなるとCFLも伸展することが分かった。これは外側靭帯損傷がまずATFLに生じ、次にCFLに損傷が及ぶことに一致する。外側靭帯損傷の発生には足首の内反も関わっているとされる。しかし足部を内反させただけではATFLに伸展は生じていなかった。しかし内反姿勢において内旋方向のトルクを加えると、内反していない状態と比較して足部の内旋角度とATFLに加わる張力に増加が見られた。このことより内反は過度の内旋を生じやすい姿勢であるため、外側靭帯損傷の発生に関与すると考えられる。またテーピングは足部の過度の内旋を防ぐ効果があり、外側靭帯損傷の治療だけではなく損傷発生の予防にも効果があることが確認された。しかしテーピングにより特定の靭帯に加わる負荷が増加することも示されたため、テーピングの施行には十分な注意が必要であると考えられる。

第6章では、扁平足が靭帯機能や筋力の低下により発生することに着目し、足部底側の靭帯の自然長を伸ばし弛緩した状態にすることで扁平足モデルを構築し、健全足との違いを比較することで扁平足による影響の解析を行った。その結果、扁平足はアーチが崩れることで第五中足骨底に加わる床反力が増加し、その分荷重が外側に偏ることが確認された。また筋力を用いて爪先立ち姿勢をとらせた姿勢について解析を行うと、扁平足は健全足よりも踵の上昇が低いことが確認された。扁平足は健全足よりも疲れやすいとされるが、踵の上昇に健全足よりも大きな力が必要となるのは疲れやすい理由のひとつであると考えられる。また底側の靭帯の弛緩の度合いを変えて爪先立ち姿勢の解析を行うと、靭帯が弛緩するほど踵の上昇が低くなった。このことより扁平足の程度が大きいくほど運動能力は低下すると考えられる。

本研究は足関節を対象とし、足関節の代表的な疾患である外反母趾と扁平足について三次元剛体バネモデルによるバイオメカニクス解析を行い、疾患発生の力学的メカニズムを研究したものである。静止立位姿勢と踵上げ姿勢での姿勢変化や個々の靭帯の損傷を想定した解析の結果、靭帯・軟骨に作用する負荷を明らかにするとともに、扁平足発生の要因の一端を明らかにした。さらに健全足モデルと静力学的扁平足モデルに対して筋張力を考慮した爪先立ち姿勢の姿勢変化の解析を行い、扁平足による足関節の運動機能低下の一例を示した。以上、本研究は、足関節の姿勢や状態が足部に与える影響を解明し、疾患発生の力学的メカニズムについて重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の柿ヶ原拓哉は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。