

氏 名	高 林 知 也		
学位の種類	博士（保健学）		
学位記番号	甲第31号		
学位授与の日付	2017年3月14日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	Quantifying coordination among the rearfoot, midfoot, and forefoot segments during running ランニング中における後足部、中足部、前足部間の協調性パターンの定量化		
論文審査員	主査	新潟医療福祉大学	教授 久保雅義
	副査	新潟医療福祉大学	教授 江原義弘
	副査	新潟医療福祉大学	准教授 相馬俊雄

論文内容の要旨

近年、幅広い年齢層で健全なライフスタイルを維持するためにランニングの人気の高まってきているが、ランニングによるオーバーユース障害も多く発生している。オーバーユース障害の危険因子には、繰り返しの負荷、床との接触力の大きさ、履物、滑走面、解剖学的要因、トレーニングエラー、既往歴等が挙げられている。そのなかでも、障害発生の原因を考えるうえで、多くの先行研究は後足部と下腿間の運動連鎖に着目して検証している。

一方、足部は後足部だけでなく中足部、前足部の3セグメントに分割することができる。近年、体表マーカー上から後足部、中足部、前足部セグメントの動きを捉えることができる、妥当性と再現性の高い足部モデルが提唱された。我々はこの足部モデルを用いて、ランニング中は後足部、中足部、前足部間にも運動連鎖が生じることを明らかにした。しかしながら、運動連鎖の定量化に用いた相互相関係数は2つの関節角度波形の類似性により運動連鎖の強さを決定する。そのため、どちらのセグメントがより動いているのかを知ることができない。よって、本研究は2つのセグメントの動きの大きさを“協調性”として定量化できる手法を用いて、ランニング中の後足部、中足部、前足部間の協調性パターンを定量化した。

対象者は健常成人男性11名とした。なお、これまでに下肢に整形外科的な疾患がなく、足部の明らかなマルアライメントがない者を対象とした。対象者に右下腿と足部に計15個の反射マーカーを貼付し、対象者はジョギング程度の速度（2.5m/s）でトレッドミル上での後足部接地ランニングを実施した。課題動作は赤外線カメラ11台を含む3次元動作解析装置にて計測された。各被験者に対し、10ストライド分の課題動作が計測された。なお、解析区間である立脚期を100%正規化し、後足部回内ピーク値（立脚期46%）を基準に吸収期と推進期に分類した。

計測された反射マーカー位置に対して、遮断周波数6Hzの2次 zero-lag Butterworth low-pass filterを行った。下腿に対する後足部、後足部に対する中足部、中足部に対する前足部の角度をカルダン角 Xyz（底屈／背屈、回内／回外、外転／内転の順序）にて算出した。算出された関節角度に

対して、modified vector coding technique を用いて coupling angle を算出した。Coupling angle の値は 0 - 360° の範囲で算出された。Circular statistics を用いて、被験者内および被験者間で coupling angle を平均した。平均された coupling angle は anti-phase (2つのセグメントが逆方向に動き、同程度の運動量で動く)、in-phase (2つのセグメントが同方向に動き、同程度の運動量で動く)、proximal-phase (近位セグメントが優位に動く)、distal-phase (遠位セグメントが優位に動く) の4つの協調性パターンに分類され、吸収期と推進期で協調性パターンの割合を算出した。

後足部と中足部間の協調性パターンにおいて、吸収期では in-phase (後足部と中足部が回内し、かつ同等の回内運動量で動く) が96%の割合であり、吸収期の大部分を占めていた。推進期においては、62%の割合で in-phase (後足部と中足部が回外し、かつ同等の回外運動量で動く) が最も占めており、残りは distal-phase (後足部と比較して中足部が優位に回外する) が占めていた。中足部と前足部間の協調性パターンにおいて、吸収期では54%の割合で proximal-phase (前足部と比較して中足部が優位に回内する) が最も占めていた。推進期においても、64%の割合で proximal-phase (前足部と比較して中足部が優位に回外する) が最も占めていた。

本研究は、ランニング中における後足部、中足部、前足部間の協調性パターンを定量化した新たな知見である。運動連鎖を定量化した研究において、これまでランニング中の吸収期は後足部と中足部が回内し、推進期はどちらのセグメントも回外することが明らかにされている。しかし、この先行研究は相互相関係数を用いているため、2つの関節角度波形の類似性のみで運動連鎖を検証しており、2つのセグメントのどちらがより大きく動いているかは知ることができない。本研究より、ランニングの吸収期には後足部と中足部は同程度の運動量で回内し、推進期には後足部と中足部が同程度の運動量で回内する協調性パターンかつ中足部が優位に回内する協調性パターンが占めていることが明らかになった。本研究結果より、多くの先行研究が着目している後足部だけでなく中足部の動きも重要であることが示唆された。また、近年の先行研究で協調性パターンの破綻は障害発生の原因になることが報告されている。したがって、本研究結果は足部変形疾患患者や足部ランニング障害を持った患者と比較できる基礎的データになり得る。

キーワード：足部, vector coding technique, 協調性パターン

論文審査結果の要旨

本論文は、ランニング障害の発生に関わる要因の一つとして、走行中の足部構造間の運動連鎖に注目して計測・解析を行ったものである。

本研究の独創的なポイントは2つある。まず解析対象となる足部構造を従来の前足部・後足部から、前足部・中足部・後足部の三部構成のモデルにしたことである。足部障害の代表ともいえる扁平足ではまさにこの部分のアライメント異常といえるが、その評価は静止立位状態に限られる。よりダイナミックな課題である走行中に中足部の運動をとらえることは、ランニング障害の発生機序の理解に必要不可欠であろう。

もう一点は、測定により捉えた足部構造間の相対的な運動を、2つの運動の方向の一致度をしめす相関関係と、それぞれの運動の大小関係を同時に補足できる新しい方法を使用することで表現したこ

とにある。運動方向の一致度に加え、その運動の大きさが障害発生に関わることは想像に難しくなく、2つを同時に捉える試みは今後のこの領域の解析方法としてより広く用いられるだろう。

この研究で明らかになったことは、歩行中のダイナミックな中足部の動きである。ヒール接地パターンでの走行の場合、吸収期では後足部・中足部が同じ回内運動をしめすが、下腿に対する後足部の回内運動の大きさとほぼ同等に、後足部・中足部間での動きが存在することが示された。吸収期におけるこの特定の協調パターンは観察の96%でみられたが、推進期でのパターンは最も多いもので62%である。中足部と前足部間の協調運動の場合も最もよく観察されるパターンの出現は50%後半から60%前半であり、かならずしも固定されたパターンが発現することではないことも伺える。

本論文でもちいられている「運動連鎖」と「協調運動」は、その定義に明確なものがなく、人により異なるイメージで捉えられる恐れがある。運動連鎖では1つの関節運動の結果が隣接の関節運動を引き起こし、それが次々と伝搬していくという時間軸上でのつながりに視点がおかれていることが多いのだが、「協調運動」という場合は異なる関節間の運動に一定の関係が保たれているという空間でのつながり肝要で、1つの運動が次の運動の「原因」となっているかという因果関係は必ずしも含まれていない。今回観察された足部間運動の性質についてその表現についてはやや工夫が必要かもしれない。

解析結果を表現する方法としてもちいられた modified vector coding technique では、運動の相対的な大きさと方向を捕捉する意味では有用性があるが、その結果のみやすさにはやや直感的でない部分がある。例えば大きさの関係をしめす Proximal Dominant Pattern では近位部が遠位部に対してより大きく動いていることはわかるが、その際の運動方向については実際のグラフを丁寧にみていかなければ理解が難しい。実際には、この後に発表された研究では、その点を改善した新しい方法が提案されている。

実際のランニング障害の発生機序の理解を深めるためには、2つの点について取り組んで行く必要がある。本研究では裸足で計測を行っているが、実際のランニングではシューズ等の履物を使用している。先行研究では履物が足部の協調運動に影響を与えることが示唆されているため、今後はシューズ着用状態での観察結果から考察を進めていくことが望まれる。シューズ着用状態での観察は技術的な点で困難さが予想されるが、より長期的には必要となる研究である。

さらに、本研究ではヒール接地パターンのスロージョギングを課題としているが、走行スピードや個人の好みにより、フットフラットあるいはつま先接地パターンでのジョギング・ランニングも珍しいものではない。これらの接地パターンの違いにより足部構造間の協調運動は大きく影響されることが報告されているため、今後は異なる接地パターンを含めた研究の必要性が考えられる。

今回新しい方法で補足された中足部を中心としてみた協調運動とその変化は、その存在は示されたが、これ自体は本論中にも述べられているように「基礎的な情報」を提供するのみであり、協調運動の違いがどのように障害発生に寄与するかについてはさらに研究を深めていかなければあきらかにできない。例えば、静止時での中足部アラインメント異常である扁平足であってもそこから障害発生までの機序はかならずしも明確ではない。今回の研究から得られた知見を元にある機序について仮説をたて、その仮説にもとづいて障害発生を予測する前向き研究を加えることで、この研究はその意味を増してくるであろう。最終的には障害発生予防や治療の領域で理学療法的な提案ができるように、今後の発展を期待したい。

以上のことから、審査委員会は本論文を博士論文に相応しいと認める。