

体幹への疑似的な身体特性条件付与により導かれる歩行不安定性

埼玉県立大学大学院 保健医療福祉学研究科 博士論文

指導教員 金村尚彦 金野倫子 小栢進也

2023 年 3 月 1891005 藤野 努

## 【研究背景】

安定した移動能力を維持することは、高齢者がより良い生活を送るための基礎であり、移動能力の変化は機能低下に先行しリハビリテーションの対象となりうるため重要である。また、安全で効率的な歩行は、自立した生活を送るための重要な要素である。歩行能力は生存率、認知機能低下、転倒、生活の質の予測因子であり、健康状態を幅広く表す指標でもあるため、健康寿命の延長に大きく影響すると考えられている。歩行能力を維持し転倒や転倒の結果として生じる障害を予防することは社会として重要な課題である。

高齢者の転倒の多くは歩行中に発生するため、転倒を予防するためには歩行能力の低下つまり歩行不安定性とその加齢変化の理解が重要である。高齢の転倒者の特徴として、非転倒者と比較して、短い歩幅、変動性の大きい歩調、遅い歩行速度といった特徴を示し、歩行速度低下だけではなく歩行不安定性が転倒につながることが示唆されている。

しかし、転倒と結びつく歩行不安定性の要因が多様かつ相互に関連し、多くの高転倒リスク者は単独ではなく複数の因子を有しているため、現在まで歩行不安定性に対しての明確な因果関係を構築するまでには至っていない。この問題によって、歩行不安定性の改善をめざすリハビリテーションにおいて介入対象を明確化できておらず、複合的な介入とならざるをえないため、要因との関係性を明確化することは個別最適化をめざすリハビリテーションにおける重要な未解決課題であると考えている。

本論文では実験的アプローチを採用し、高齢者に生じる身体特性変化を導く条件付与によって、歩行不安定性と身体的特性変化の関係性を明らかにする。本論文では特に体幹の身体特性変化に依存した歩行不安定性がどのような側面に現れるのかを解明することを目的とした。

## 【研究目的】

本研究では、加齢によって生じる①体幹の相対的な質量増加や脊柱の変形による体幹の質量位置の変位による COM 安定化要求の増加や、②脊柱の運動範囲減少およびスティフネスの増大を模した2つの体幹への条件付与を作成し、疑似的な身体特性変化が歩行不安定性に及ぼす影響を与えるかを調査した。

研究1では体幹質量と質量中心位置を変更することでCOMの安定化への要求を増やし、体幹における機械的な内部摂動を増加させることが、歩行安定性の複数の側面に影響を及ぼすのかを検討した。具体的には①ステップパラメータ (Step length: SL, Step width: SW, Step width variability: SWV) およびCOMと足部位置の関係性によって評価される機械的な安定性指標 (MOS)、②力学的な運動量の相殺関係からなる安定性 (WBAM)、③非線形解析による局所的な動的安定性 (LyE) からなる3つの領域の指標にどのような影

響を及ぼし、安定性が変化するのかを明らかにすることを目的として実施した。今回設定した条件は比較的軽度の内部摂動を増加させる条件であり、健康成人男性を対象としたことから、機械的には安定した歩行に適応が可能であることが予測されるため、機械的な側面である MOS や、WBAM といった歩行安定性指標には影響を与えず、より鋭敏な指標である局所的な動的安定性に影響を与えると仮説を立てた。

研究 2 では体幹の運動拘束が足部軌道を制御する運動学的シナジーとその構成に与える影響を明らかにすることを目的として実施した。ここでは、足部軌道および運動学的シナジーは体幹拘束の影響を受けず、高齢者で報告されたシナジーの構成要素である分散成分が体幹拘束によって上昇すると仮説を立てた。

本研究の結果は、体幹の動きにくさという受動的な要素の変化を疑似的に再現することが歩行安定性をどの様に変化させるのかを明らかにすることで、歩行不安定性を改善するための介入対象を明確化するための一助となることが期待される。

### 【研究 1：体幹への質量付加と付加位置の後方化による歩行安定性への影響】

#### <方法>

対象は歩行に影響のある既往歴の無い健康成人男性 8 名(平均±標準偏差：年齢 23.1 ± 3.1 歳，身長 171.1 ± 4.2 cm，体重 65.3 ± 5.6 kg)とした。ウェイトベストにより、体幹への質量付加条件を以下の 2 種類作成した。①前後ポケットにそれぞれ体重の 5%の重りを挿入した状態 (Even Load: EL)，②後ろポケットのみに体重の 10%の重りを挿入した状態 (Posterior Load: PL) を設定した。参加者は、トレッドミル上を 2 つの質量付加条件 (EL 条件と PL 条件) とウェイトベストから重りを取り除いた無付加条件 (No load, 以下 NL) の計 3 条件で歩行した。データ計測は三次元動作解析装置 VICON Nexux ver2.3, とトレッドミルに内蔵された左右 2 枚の床反力計を使用した。本研究では以下の解析項目を採用した。SL, SW 等のステップパラメータ, COM の位置と速度によって記述される XCOM, 足部位置と XCOM との関係性から算出される MOS, 全身のセグメント角運動量の和として表現される WBAM, 非線形解析による局所的な動的安定性指標の LyE であった。

#### <結果>

ステップパラメータに関しては SW においてのみ有意な主効果 ( $F(1,7) = 6.3, p < 0.05$ ) を認め、後検定の結果 NL 条件に対して PL 条件が有意に低値を示した [ $NL(143.8 \pm 24.4\text{mm})$  vs  $PL(161.4 \pm 20.5\text{mm})$ ,  $p < 0.001$ ]。MOS, XCOM においてはいずれの指標においても有意な主効果を認めなかった。

WBAM においては、有意な主効果を認めず(図 8)、時系列的にもすべての条件で同様の変化を示した。

LyE に関して、 $\lambda_s$ において全方向で有意な主効果を認めた。左右方向では、NL, EL に対して PL が有意に高値となった [ $F(1,7) = 5.3, p = 0.0188$ ]。前後方向では有意に EL に対して PL が高値であった [ $F(1,7) = 5.1, p = 0.0223$ ,  $EL(0.89 \pm 0.14)$  vs  $PL(1.35 \pm 0.32)$ ,  $p < 0.01$ ]。垂直方向でも同様に、有意に EL に対して PL が高値であった [ $F(1,7) = 3.8, p$

=0.0485, EL ( $1.02 \pm 0.10$ ) vs PL( $1.36 \pm 0.23$ ),  $p < 0.01$ ].  $\lambda_L$ においては左右方向においてのみ有意な主効果を認め、NL に対して、PL が有意に低値であった [ $F(1,7) = 7.7$ ,  $p = 0.0055$ , NL ( $0.099 \pm 0.005$ ) vs PL( $0.069 \pm 0.022$ ),  $p < 0.05$ ]

#### <考察>

結果として、内部摂動の増加に対応して増加したのは SW および LyE の短期指数である  $\lambda_S$  であった。他の指標、MOS および XCOM, WBAM は内部摂動の増加に対応して有意な変化を示さなかった。これらの結果は  $\lambda_S$  の増加においてのみ仮説を指示したが、ステップパラメータに変化を生じさせないとした仮説とは異なる結果であった。

SW の増加に関しては、COM の状態を維持するためのレバーアームの拡大による制動予備能の確保のためであった可能性がある。COM 位置に変化がなかった場合、SW の拡大により、COP の外側化が生じ、前額面における COM-COP 距離（床反力が COM に作用するレバーアーム）の拡大する。レバーアームの拡大によって、COM に対する床反力による制御が容易になるため、生じる内部摂動に対して準備状態を確保することが可能になっていると考えられる。

本研究では、PL 条件において ML, AP, VT の全方向において  $\lambda_S$  の増加を認めた一方で、EL 条件においては  $\lambda_S$  の増加を認めなかった。これは PL 条件においてのみ体幹の動的な安定性が低下をしたことを示し、体幹における内部摂動の増加に対して一定の摂動までは局所的な動的不安定性を保つメカニズムを有していると解釈できる。

また、 $\lambda_S$  はより体幹における内部摂動の増加に対して鋭敏であったと解釈可能なため、歩行不安性を出現初期から評価することが可能であるといえる。換言すれば、体幹付加による内部摂動の増加のみではステップパラメータ、MOS, WBAM は変化しないため、これらは局所的な動的安定性と比較して頑健なメカニズムで維持されていることを示したともいえる。

### 【研究 2：体幹の運動拘束によって導かれる足部軌道を制御する運動学的シナジーとその構成要素の変化】

#### <方法>

対象は歩行に影響のある整形外科・神経学的疾患の既往歴の無い健常成人 10 名（女性 5 名[年齢:  $25.8 \pm 3.7$  歳; 体重:  $48.2 \pm 1.8$  kg; 身長:  $159.4 \pm 0.9$  cm] , 男性 5 名[年齢:  $24.6 \pm 3.2$  歳; 体重:  $58.2 \pm 3.7$  kg; 身長:  $168.9 \pm 3.5$  cm]) とした。歩行課題は装具による固定条件 (Trunk Constraint : TC) と固定をしない自由歩行条件 (No Constraint : NC) の 2 条件とし、歩行順序は被験者ごとにランダム化して実施した。歩行は床反力計内蔵トレッドミル (Bertec Corporation, ITR5018-11, Columbus, USA) 上で行い、歩行速度は各被験者の至適歩行速度 ( $1.0 \pm 0.1$  m/s) を基準 (100%PWS: Preferred walking speed) とし、60% (60%PWS), 80% (80%PWS), 120% (120%PWS), 140% (140%PWS) の計 5 つの速度条件を先行研究に基づいたプロトコルに則ってランダム化した順序で実施した。データ計測は三次元動作解析装置 VICON Nexux ver2.3, とトレッドミルに内蔵された左右 2 枚の床反力計を使用した。データ解析項目は、足部軌道の評価として、立脚側の足関節中心 (Ankle joint center:

AJC)と遊脚側のAJCの距離(exp AJC<sub>ML</sub>)を採用した。また、歩行周期0-50%および50-100%の区間における1試行まわりの標準偏差のSwing phase全体の平均値(SD exp AJC<sub>ML</sub>)を算出することで足部軌道変動性の指標とした。また、足部軌道を制御する運動学的シナジーをあきらかにするために、Uncontrolled manifold (UCM)解析を実施した。

#### <結果>

全ての歩行速度において、exp AJCML disp, SD exp AJCMLにお有意な差はみられなかった。時系列全体にわたってTC条件のほうが $V_{UCM}$ ,  $V_{ORT}$ ,  $V_{TOT}$ の分散成分はより高値を示す傾向にあった。また、歩行速度においては140%PWS条件のみ体幹拘束条件に依存せず各構成要素が低値を示す傾向にあった。しかし、運動学的シナジーの指標である $\Delta V_z$ は体幹拘束条件に依らず基準値である0.390以上であり協調性を有していた。各指標で統計的に有意な差が生じたのは、 $V_{UCM}$ では100%PWSのlate swingにおいてTC>NC [TC:  $0.56 \pm 0.34$ , NC:  $0.35 \pm 0.21$  ( $\times 10^{-3} \text{ rad}^2$ ),  $p=0.04$ ],  $V_{ORT}$ では80%PWSのlate swingにおいてTC>NC [TC:  $0.56 \pm 0.34$ , NC:  $0.35 \pm 0.21$  ( $\times 10^{-3} \text{ rad}^2$ ),  $p=0.04$ ], 100%PWSのearly swingにおいてTC>NC [TC:  $0.90 \pm 0.11$ , NC:  $0.90 \pm 0.11$  ( $\times 10^{-3} \text{ rad}^2$ ),  $p=0.04$ ],  $V_{TOT}$ では100%PWSのlate swingにおいてTC>NC [TC:  $0.64 \pm 0.38$ , NC:  $0.43 \pm 0.34$  ( $\times 10^{-3} \text{ rad}^2$ ),  $p=0.048$ ]であった。 $\Delta V_z$ ではいずれの速度においても有意な差を認めなかった。

#### <考察>

これらの結果は、体幹拘束によって足部軌道および運動学的シナジー自体は影響を受けないという仮説を支持するものであった。一方で、分散成分は体幹拘束条件で全体的に上昇する傾向を示し、これらは同じUCM解析を使用して高齢者と若年者を比較した先行研究の結果と類似した傾向であり、体幹運動の運動範囲の減少やスティフネスの増加が高齢者において生じると報告された分散成分を上昇させた上で協調性を維持する戦略をとる一要因である可能性を示した。歩行の足部軌道制御において、厳密に能動的な制御と受動的な制御の影響を切り分けることは困難であるが、本研究結果はこれまで能動的な制御戦略が主体とされた運動学的シナジーの戦略変化が身体的な拘束という受動的な変化によって出現する可能性を示している。

#### 【総合考察】

本研究で用いた体幹への条件付与はそれぞれ高齢者や歩行不安定性を生じた対象者においてこれまで報告されてきた指標の変化を一部再現した。これまでの歩行不安定性の研究は指標の有用性や転倒リスクとの関連性が主体であったが、歩行不安定性を生じうる直接の要素は明らかでなかった。歩行不安定性の改善を目指すリハビリテーションにおいて、生じている歩行不安定性の説明可能な原因を明らかにすることは重要な課題であり、本研究結果は体幹の動きにくさの増大という身体特性変化が歩行不安定性を生じさせる一要因である可能性を示した。

高齢者に対する転倒予防を目的とした運動介入において、有効性が示されているものは複合的種類の運動介入であり、最適な運動の種類、頻度、量といった変数は不明である。このような転倒予防に対しての運動介入の種類は多種多様であり、筋力強化やバランス練習、

水中運動、太極拳、有酸素運動などがある。また、体幹に対する介入に限定した際にも、体幹に対する筋力トレーニングやピラティスによる介入が有効である可能性が報告されている。つまり、集団に対する複合的な運動や体幹に対する運動は集団に対する転倒リスクを低減することに有用であることは確かである一方で、リハビリテーションの現場における個人に対しての個別最適な介入の確立には、先述したように、“個人”の転倒リスクの増大につながる歩行不安定性を招く因子を明らかにする必要がある。今回の結果から、体幹の局所的な動的不安定性の増大や足部軌道制御における運動学的シナジーの構成要素の変化といった、歩行不安定性を示す変化は体幹の動きにくさの増大という変化によって導かれる可能性が示された。このことは、個別最適な介入の確立において示唆を与える。具体的には、体幹の局所的な動的不安定性を呈す対象者に対しては、体幹の後弯変形や相対的な質量の増加による慣性モーメントの増大が影響していると考えられるため、脊柱への運動介入による可能な範囲での後弯の是正や減量といったアプローチが有効である可能性がある。また、足部軌道制御の協調性変化という動的不安定性を示す場合には、脊柱の運動性改善が有効である可能性がある。このように、“動きにくさ”という受動的な要素を運動介入によって最適化していくことで、歩行における不安定性の改善を図ることができる可能性がある。