

歩行練習機器の開発に向けたリハビリテーション学的研究

土田 将之

研究指導教員：菅原 憲一

研究補助指導教員：笹田 哲，中島 啓

I. 序論

高齢者が地域において自立した生活を維持するためには、日常生活活動(activities of daily living：以下，ADL)の維持向上が重要である¹⁾。ADL動作の多くには歩行が関連しているため、歩行能力の向上を図ることは理学療法士に求められる重要な役割である。

一般的に人間の歩行能力は加齢に伴い低下する。歩行能力の低下は歩行安定性の低下と密接な関わりを持っているが、歩行安定性と速度調整能力の関係に着目した速度調整課題は確立されていないため、新たな方法論の提案が必要である。

従来より、歩行安定性を評価・練習するためにトレッドミル装置を用いた研究が多くなされている^{2,3)}。トレッドミル装置は歩行速度の再現性が高い、狭い室内での測定が可能であるなどの様々な長所を有するためである。このようなトレッドミル装置の長所を活かしつつ、トレッドミルのベルト回転速度を変化させ続ける連続した速度制御が可能になれば、歩行者はトレッドミルの速度変化に応じて歩行速度の調整を行う必要が生じる。したがって歩行安定性と歩行速度調整能力の関係性を明らかにするとともに、トレッドミルを用いた新たな歩行練習についての知見が得られるのではないかと考えた。

そこで本研究においては、速度調整課題を効果的に行うための安全かつ簡便な機器として、歩行速度を連続的に変化させることが可能な「変速歩行トレッドミル」を開発し、その効果について歩行安定性との関係から検証することを目的とした研究を行った。

II. 第1研究 速度調整課題が歩行安定性向上に与える影響について

—TUG を評価指標に用いた検討—

1. はじめに

歩行安定性と速度調整能力の関係性について、先行研究の報告が少なく不明な点が多い。まずは速度調整課題が歩行安定性に与える影響を明らかにする必要がある。そこで第1研究として屋内平地条件での速度調整課題を行い、課題実施前後で対象者の歩行安定性に生

じる変化を Timed Up and Go test (以下, TUG) を指標として検証した.

2. 対象と方法

(1) 対象

整形外科系疾患, 神経系疾患のない若年成人 11 名とした.

(2) 方法

課題は 2 種類とし, それぞれ周期的に変化するリズムに合わせて屋内平地歩行を行う速度調整課題と, 一定のリズムに合わせて歩く定速歩行課題とした.

介入課題である速度調整課題は 1 周期を 24 歩とし, 10m 歩行テストから得られた快適歩行速度時の歩行率と同じリズムから歩き始め, 同じく 10m 歩行テストでの最大努力速度時の歩行率と同じリズムになるまで徐々に音の間隔を狭め, その後徐々に音の間隔を広げる周期を 60 回繰り返すものとした.

もう一つの介入課題である定速歩行課題は, 快適歩行速度での歩行率と同じリズムに合わせた歩行を 24 歩×60 回実施することとした.

TUG の計測は介入課題を行う前(pre)・後(post)に行った. データ計測には 3 次元動作解析装置 VICON612 および VICON MX を用いた.

TUG の一連動作における区間設定は, 安静座位姿勢から対象者が立ち上がり, 障害物の座標に到達するまでを往路区間, 障害物座標を通過後, 方向転換し再び障害物座標を通過するまでを方向転換区間, 障害物の座標通過から着座までを着座区間と定義した.

3 次元動作解析装置から得られたマーカー座標データをもとに, TUG 遂行時間(s), 軌跡長(m), 歩行速度(m/sec)の各パラメータを計算した. TUG 計測課題は 3 試行実施した. TUG 課題遂行時の歩行速度は最大努力速度で統一した.

(3) 統計解析

課題要因(速度調整課題・定速歩行課題)および課題実施前後要因(pre・post)において TUG の遂行時間, 軌跡長, 歩行速度の差を検証するため, 独立変数を課題要因と課題実施前後要因, 従属変数をそれぞれ TUG の遂行時間, 軌跡長, 歩行速度とする対応のある 2 要因の分散分析を行った. 分析の結果交互作用が有意であった場合, その後単純主効果の検定を Bonferroni 法にて行った. 有意水準は 5%とした.

3. 結果

2 元配置分散分析の結果, TUG の遂行時間ならびに歩行速度に交互作用が認められ, Bonferroni 法による検定を行った結果, 速度調整課題における実施前後での歩行速度において有意な単純主効果が認められた. 遂行時間に有意差は認めなかった. 軌跡長に有意な交互作用は認めなかった.

4. 考察

TUG 遂行時間に課題間で交互作用が認められ、その後の単純主効果検定では、速度調整課題において遂行時間が短縮する強い傾向を示した。また歩行速度においては、課題間で交互作用が認められ、かつその後の単純主効果検定において速度調整課題で有意な向上を認めた。以上の結果から、速度調整課題は、その後の TUG の遂行時間に影響を及ぼすことが明らかとなった。

速度調整課題において TUG の遂行時間が短縮される傾向を示したのは、速度調整課題の連続的な実施により歩行速度が有意に向上したことがその要因と考えられた。TUG は歩行動作を中心に構成されているため、パフォーマンス向上に対する歩行速度の寄与は大きい。

今回の速度調整課題において、対象者は速度調整課題を繰り返すことで歩行率を素早く上げることがを学習し、結果として TUG の歩行速度の向上につながったと考えられた。一方、定速歩行課題においては、快適歩行速度にあわせた一定の歩行率を維持していたため、歩行率と歩行速度の改善効果が得られなかったことが考えられた。

以上のことから、歩行速度を周期的に変化させる速度調整課題が、歩行安定性を向上させることが明らかとなり、その有用性が示唆された。

III. 第 2 研究 定速歩行および変速歩行トレッドミルにおける歩行安定性の比較

—最大リアプロフ指数を用いたカオス解析による評価—

1. はじめに

第 2 研究では、対象者が安全かつ簡便に速度調整課題を行える装置として「変速歩行トレッドミル」を開発し、この装置上での速度調整課題で歩行安定性の指標である最大リアプロフ指数がどのように変化するかを検証し、変速歩行トレッドミルの歩行プログラムとしての有用性を検討することを目的とした。

2. 対象と方法

(1) 対象

対象は整形外科疾患、神経疾患のない若年成人 22 名とした。

(2) 方法

本研究で用いたトレッドミルは、市販のトレッドミルのベルト速度をコンピュータで任意に制御できるように改良したものである。

課題は速度調整課題または定速歩行課題の 2 つとし、対象者をランダムに振り分けた。速度調整課題は最大 4.5km/h から最小 2.0km/h の速度変化を 15 秒周期で繰り返す歩行を 30 分間連続で行うこととした。定速歩行課題は最初の 1.5 分間と最後の 1.5 分間のみ速度調整課題と同様の歩行を行い、中間の 27 分間は 3.3km/h の定速歩行を行うこととした。両課

題における最初と最後の 1.5 分間の速度調整課題は、連続 27 分間の速度調整課題あるいは定速歩行課題の継続が歩行安定性に与える影響を比較検討するために設定した。

また、歩行開始から終了までの全 30 分間において体幹の加速度データの記録を歩行開始後 1.5min, 10min, 20min, 30min の各 1 分間、計 4 回実施し、鉛直、左右、前後の各 3 方向の最大リアプノフ指数を算出し比較検討を行った。

(3) 統計解析

課題要因及び時間経過要因によって最大リアプノフ指数の平均に差があるかを検証するために、独立変数を課題要因と時間経過要因、従属変数を最大リアプノフ指数の平均値とする混合計画の 2 元配置分散分析を行った。分析の結果交互作用が有意であった場合、その後 Bonferroni 法による単純主効果の検定を行った。有意水準は 5%とした。

3. 結果

2 元配置分散分析の結果、歩行時の体幹加速度の最大リアプノフ指数は、鉛直方向において課題要因の主効果及び時間経過要因の主効果、さらに交互作用のそれぞれに有意差が認められた。時間経過要因の各水準における各課題要因の単純主効果の比較検定を行ったところ、10min と 20min の速度調整課題の最大リアプノフ指数が定速歩行課題に比べて有意に高かった。

次に同じく鉛直方向において、各課題要因における時間経過要因の単純主効果の比較検定を行ったところ、定速歩行課題において有意な単純主効果が認められた。各水準における比較検定を行ったところ、1.5min の最大リアプノフ指数に比べ 10min と 20min で有意に低く、また、10min, 20min の最大リアプノフ指数が 30min より有意に低かった。一方、速度調整課題では単純主効果に有意差を認めなかった。

左右方向、前後方向における加速度データの 2 元配置分散分析の結果では、課題要因の主効果及び時間経過要因の主効果さらには交互作用のそれぞれに有意差は認めなかった。

4. 考察

定速歩行課題の多重比較検定の結果から、1.5min, 30min(速度調整課題時)の最大リアプノフ指数が 10min, 20min(定速歩行課題時)に比べて有意に高くなり、歩行不安定性が増大する傾向を示した。以上のことから、速度調整課題で行った歩行中の規則的かつ連続的な速度変化刺激は、トレッドミル歩行における鉛直方向の不安定性を有意に増大させることが明らかになった。

最大リアプノフ指数を指標にした先行研究⁴⁾の多くは左右方向の不安定性に着目しており、本研究では異なる結果を得た。これは第一に、本研究の対象者が健常な若年成人であり、先行研究の対象者である脳卒中等の中枢神経疾患患者とは異なる歩行戦略で速度変化に適応した可能性が考えられた。脳卒中患者と健常成人の歩行の違いが、重心の軌跡とい

った従来知られているものだけではなく、歩行安定性の指標である最大リアプノフ指数の値にも反映される可能性が今回の研究から示唆された。第二に、トレッドミルによる歩行は側方および前方への変位は機器の歩行路により物理的に制限されているために、鉛直方向における歩行の制御が中心となることが考えられた。

本研究の速度調整課題における速度変化は規則的なものであり、かつ速度の上限・下限ともに日常生活の歩行で起こる速度変化を考慮して緩やかな設定としていた。しかし、速度調整課題中の最大リアプノフ指数は定速歩行課題に比べその数値は高く、歩行不安定性は有意に増大した。つまり、この規則的かつ連続的に速度が変化する変速歩行トレッドミルを用いた速度調整課題は、比較的安全な課題条件下で歩行不安定性を生じさせることが可能であり、この不安定性に対する連続的な運動学習を行うことで、速度調整能力の向上を促し、歩行安定性の向上を促す可能性があると考えた。

VI. 結論

第1研究では、歩行安定性の指標である TUG の計測値が、速度調整課題を実施した後にどのように変化するかを若年成人を対象として検証した。その結果速度調整課題は、その後の TUG の歩行速度を向上させ、遂行時間に影響を及ぼすことが明らかになった。これは音の間隔が狭まるにつれ歩行率を増大させ、それにより歩行速度を上昇させるという動作を繰り返すことで、その学習効果が TUG の歩行に転移したものであり、速度調整課題が歩行安定性の向上に与える効果が示唆された。

第2研究では、本研究のために開発した変速歩行トレッドミルを用いて、速度調整課題が歩行安定性に与える影響について、最大リアプノフ指数に着目して検証を行った。その結果変速歩行トレッドミル歩行を実施した際の速度変化刺激に対して、歩行不安定性が増大することが明らかとなった。本研究で開発した変速歩行トレッドミルは安全性が確保しやすく、かつ歩行速度の再現性が高いというトレッドミルの特徴に加え、速度調整課題を連続的に実施することが可能である。したがって速度調整課題に着目した有用な歩行練習機器となりえることが示唆された。

以上2つの研究より、速度調整課題は歩行安定性の向上に寄与する可能性が示された。また変速歩行トレッドミルを用いることで、歩行安定性を向上させるための効率的な歩行練習が行える可能性が示唆された。

V. 引用文献

- 1) 地域包括ケア研究会. 地域包括ケア研究会報告書—地域包括ケアシステムの構築における今後の検討のための論点, 厚生労働省平成 24 年度老人保健健康増進等事業, 2013,

p1-32.

- 2) Mehrholz J, Pohl M, Kugler J, et al. The Improvement of Walking Ability Following Stroke. *Dtsch Arztebl Int*, 2018, 115(39), p639-645.
- 3) Madehkhaksar F, Klenk J, Sczuka K, et al. The effects of unexpected mechanical perturbations during treadmill walking on spatiotemporal gait parameters, and the dynamic stability measures by which to quantify postural response. *PLoS One*, 2018, 13, e0195902. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0195902>.
- 4) Reynard F, Vuadens P, Deriaz O, et al. Could local dynamic stability serve as an early predictor of falls in patients with moderate neurological gait disorders? A reliability and comparison study in healthy individuals and in patients with paresis of the lower extremities. *PLoS One*, 2014, 9, e100550. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0100550>.