

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11338

研究課題名(和文)片側大腿切断者における歩行時 Loading Rate の評価と関連因子の解明

研究課題名(英文) Factors affecting loading responses during walking in unilateral transfemoral amputees

研究代表者

保原 浩明 (Hobara, Hiroaki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：40510673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の結果、片側大腿切断者(25名)における歩行時の地面反力、外的仕事量、圧力中心軌跡、接地時負荷率といった指標のいずれもが、左右脚で非対称な振る舞いをしていることが明らかとなった。これらは、片側大腿切断者で頻見される腰背部の慢性疼痛・張りや変性関節疾患が生じる原因の一つに、非切断側における着地初期の力学的負荷が関連していることを示唆している。一方、こうした一側肢への過負荷蓄積は、立脚期後半の蹴りだしを高めることで緩和させることができること、そしてそのためにはロボット義足による出力向上が有効であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通じて、片側大腿切断者25名からなる大規模な歩行データを取得することができた。同データは2.0 km/hから5.5 km/hの8段階速度で計測を行っており、個人属性も詳細に記録しているが、こうしたデータセットは非常に珍しく、今後、日本国内における下肢切断者の歩行リハビリテーションの標準値になると考えられる。また、一側肢への過負荷蓄積が二次障害を誘発する可能性を明らかにしたという点から、各個人にあった義足パーツの選定、衝撃緩衝材を利用した義足部品の開発、非切断側への医療ケアといった、臨床的にも重要な知見を創出できたと考えている。

研究成果の概要(英文)：In the present study, unilateral transfemoral amputees (n=25) showed obvious bilaterally asymmetric gait features, especially, the magnitude of ground reaction forces, the external mechanical work, the center of pressure trajectories, and the vertical loading rate at the initial stance. These results are indicative of relevance to the elevated risk of musculoskeletal impairments, such as chronic back pain, and knee osteoarthritis, which is often observed in the unilateral transfemoral amputees. On the other hand, we also found that the elevated impact loading on the intact limb may be mitigated through increased push-off at the late stance on the prosthetic limb. Further, microprocessor control knee joint may be able to a key technology to achieving these preferable adaptations in unilateral transfemoral amputees.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：義足 歩行 バイオメカニクス 非対称性 リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

日本国内では約 6 万人、世界全体では約 700 万人が下肢の切断を余儀なくされており、今後も切断者の人口は増加することが予想されている。下肢を切断した患者の多くは「切断による心理的喪失感」だけでなく、歩行をはじめとした移動能力低下に大きな不安を抱えている (Narang et al., 1984)。事実、下肢切断に伴い、モビリティが低下することは広く知られた事実であり、この傾向は片側大腿切断者で顕著である。片側大腿切断者にとって、歩行機能の再建は単なる移動手段の確保という点だけでなく、QOL を予測する指標にもなりうる (Pell et al., 1993; Wurdenman et al., 2018)。そのため、片側大腿切断者が義足を装着した際の歩容を明らかにすることは、義足歩行の臨床評価を深化させるだけでなく、障害者の社会参加機会創出という観点からも極めて重要な意味を持つ。

片側大腿切断者が快適な歩行を実現するためには、非切断側 (健側) と切断側 (義足側) を望ましくない負荷・刺激から保護することが重要である。その一方、片側大腿切断者の宿命ともいえる左右非対称な歩行は、一側肢への過負荷蓄積を通じて筋骨格系障害の潜在リスクとなることが長年に渡って問題視されてきた。事実、高活動な片側大腿切断者においては、非切断側における腰背部の慢性疼痛・張り (Feldman et al., 2010) や変性関節疾患 (Buckwalter et al., 2004; Lehmann et al., 1993) が報告されており、義足側におけるソケット揺動に由来する断端部皮膚への負担も深刻視されている (Dudek et al., 2005)。こうしたリスクは接地初期における下肢への過負荷と蓄積に起因する可能性が示唆されているが (Aruin, 2000)、「片側大腿切断者における歩行時の力学的負荷と関連のある因子は何か?」という問いは、未だに解かれていない。

これまで、歩行解析で定量化される下肢全体への力学的負荷は、接地初期における鉛直地面反力の負荷率 (Loading Rate) によって評価されてきた。Loading Rate は、単位時間当たりの地面反力変化率を表し、その値の大小によって障害リスクの高低を解釈することが可能なため、移動運動時の力学的負荷を定量評価する指標として広く知られている。先行研究では下肢切断者の歩行を対象として Loading Rate を評価した研究が散見されるが、いずれの論文も被験者を特定の切断レベルに限定していることや、被験者数が少ないこと、歩行速度範囲が小さいことから、研究の限界が指摘されている (Adamczyk et al., 2017; Russell Esposito et al., 2015)。また、従来の研究では障害特性や義足特性と Loading Rate との関連が明らかにされていないため、臨床現場で即時性の高いリスクアセスメントの提案や義足の機能を改善するために必要な、一般化された知見を提供するには至っていない。

2. 研究の目的

下肢切断後にも活動的なライフスタイルを維持するという世界的な潮流の一方、片側切断者における一側肢への過負荷蓄積は、将来的な筋骨格系障害の潜在リスクになりうるということが長年に渡って深刻視されてきた。そこで本研究では、片側大腿切断者を対象に、歩行時に生じる下肢への力学的負荷である Loading Rate の速度依存性と左右脚差を定量評価し、義肢装具開発・臨床評価へと応用可能な標準データセットの構築に取り組む。データセットの構築に関しては、Loading Rate だけでなく、前後・左右・鉛直地面反力データや時空間指標も解析の対象とする。また本研究では、単なる生体力学手法を用いた片側大腿切断者の歩行解析にとどまらず、多変量解析手法 (階層性・非階層性クラスター分析) を用いて個人特性・障害特性と歩行指標の関連を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究機関全体を通じて、独立歩行を獲得している片側大腿切断者 25 名を対象に実験を行った。下肢切断者の活動度を表す K レベル、K3 から K4 であった。まず、各被験者から障害特性 (性別、年齢、身長、体重、切断レベル、切断歴、切断理由、合併症の有無) や使用している義足等の情報を入念にヒアリングした後、入念な準備運動 (8 分間の歩行練習) を行わせ、フォースプレート内蔵トレッドミル (FTMH-1244WA、テック技販社製) で歩行の計測を行った (図 1: 左)。歩行速度は 2.0 km/h から 5.5 km/h までとし、0.5 km/h ごとに速度を漸増させた。各速度での歩行時間はおおむね 30 秒とし、疲労の影響を排除するために、休憩を設けながら実験を行った。なお、比較対象として性別・年齢・身長・体重が同等の健常成人 25 名の計測も同時に行った。

計測項目はトレッドミルから出力される左右・前後・鉛直地面反力 (それぞれ義足側と非切断側から算出) とした。また、Loading Rate は接地初期 (40% 立脚期まで) における鉛直地面反力の最大時間変化率から算出した。同様に、立脚後期 (60% 立脚期以降) から離床にかけての鉛直地面反力最大時間変化率を Unloading rate と定義し、Loading Rate との関係から、両脚支持期における体重移行戦略を調べた。

加えて、立脚初期 (Collision)、立脚中期 (Midstance)、および立脚後期 (Push-off) で分けて脚全体に作用する外的仕事量を、それぞれ義足側と非切断側から算出した。外的仕事量は電子制御膝継手および機械式膝継手の使用者で二群に分け、歩行速度ごとに横断的に比較した。特に、着地直後の Collision Work の変化を評価した。

4. 研究成果

図1(右)に、地面反力(3分力)の結果を示す。本研究では、片側大腿切断者における過負荷蓄積の速度依存性と左右脚差を定量評価するため、先ず、広範な歩行速度域で地面反力を詳細に記録・評価を行った。その結果、義足側あるいは健常対照群と比較して、地面反力の大きさに関する指標の多くは非切断側で有意に上昇する傾向にあった。また、この傾向は歩行速度が増大しても同様であったことから、片側大腿切断者の非切断側は、広範な速度域で力学的負荷に晒されていることが示唆された。本研究では、片側大腿切断者が様々な側で歩行を行った際の地面反力及び時空間指標を詳細に記載しており、その被験者数からも義肢装具開発並びに臨床リハビリテーションにおける標準データになりうるものであり、その学術的・臨床的意義は極めて大きい。なお、本研究の結果は以下の雑誌にて採択されている(Kobayashi T, Hu M, Amma R, Hisano G, Murata H, Ichimura D, Hobara H. Effects of walking speeds on the magnitude and symmetry of ground reaction forces in individuals with a transfemoral prosthesis. *Journal of Biomechanics*, 130, 110845, 2022)。

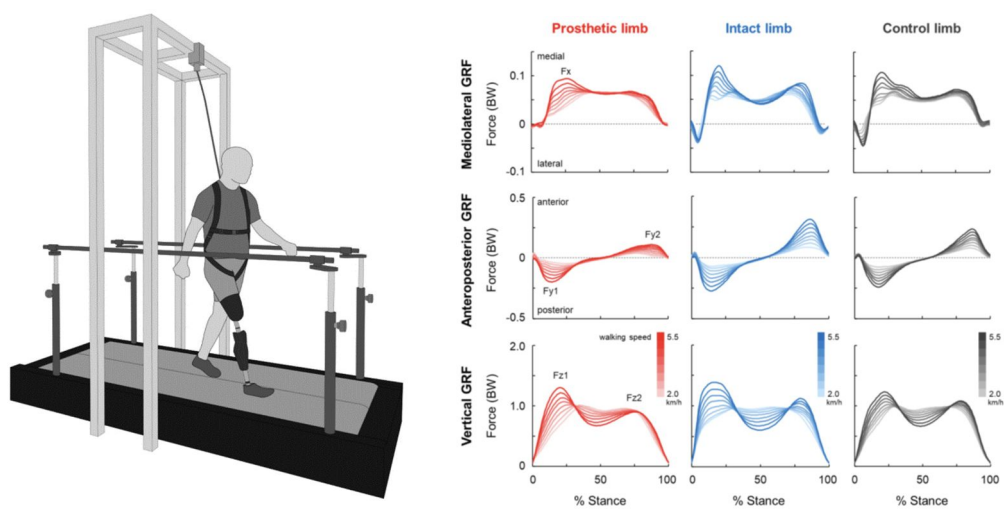


図1. 左：片側大腿切断者(25名)に、フォースプレート内蔵トレッドミルで歩行を行わせた。歩行速度は2.0 km/hから5.5 km/hまでとし、0.5 km/hごとに速度を漸増させた。各速度での歩行時間はおおむね30秒とし、疲労の影響を排除するために、休憩を設けながら実験を行った。右：地面反力(3分力)の平均波形。上から左右成分、前後成分、鉛直成分を表している。赤色、青色そして灰色はそれぞれ義足側(Prosthetic limb)、非切断側(Intact limb)、健常者の片脚(Control limb)を表しており、色の濃淡は歩行速度の違いを表している。

このような非切断側における力学的負荷の高まりは、Loading Rateでも同様であった。2.0 km/hから5.5 km/hまでの全速度域において、非切断側のLoading rateは義足側あるいは対照群の片脚と比べて優位に高値を示した。歩行中のLoading Rateが大きくなる程、下肢における筋骨格障害の潜在的なリスクは増大すると考えられている(Mündermann et al., 2005; Esposito et al., 2015)。そのため、本研究の研究対象であった独立歩行を獲得した片側大腿切断者であっても、その非切断側に慢性的な過負荷蓄積の可能性があることが示唆された。加えて、図2に示したように、非切断側が先導脚であった際のLoading rateは、義足側が後続脚であった際のUnloading Rateに強く影響を受けていることが明らかとなった(図2a)。これは義足が有する機械的特性、特に歩行速度漸増に対して立脚後期の出力が不足することが、非切断側(先導脚)の着地時負荷を高めている可能性を示唆している。事実、非切断側あるいは健常脚が後続脚であった際の義足側Loading Rateは、前述の条件と比べると、非常に低値に抑えられていることが明らかとなった(図2bおよびc)。義足とは異なり、非切断側あるいは健常脚は歩行速度に応じて柔軟に立脚後期の出力を変化させることができるため、反対側が着地した際の負荷を低下させることができるのかもしれない。これらの結果は、1)非切断側の力学的負荷と関連のある因子の一つに、義足側における立脚後期の出力が考えられること、そして2)電子制御膝接手をはじめとしたロボット義足の出力に如何では、この過負荷蓄積を低減できる可能性があること、を示唆している。本研究で得られた、義足側における立脚後期の機能改善が着地衝撃緩衝に有効であるという知見は、その学術的新規性が評価され、以下の雑誌にて採択されている(Amma R, Hisano G, Murata H, Major MJ, Takemura H, Hobara H. Inter-limb weight transfer strategy during walking after unilateral transfemoral amputation. *Scientific Reports*, 11, 4793, 2021)。

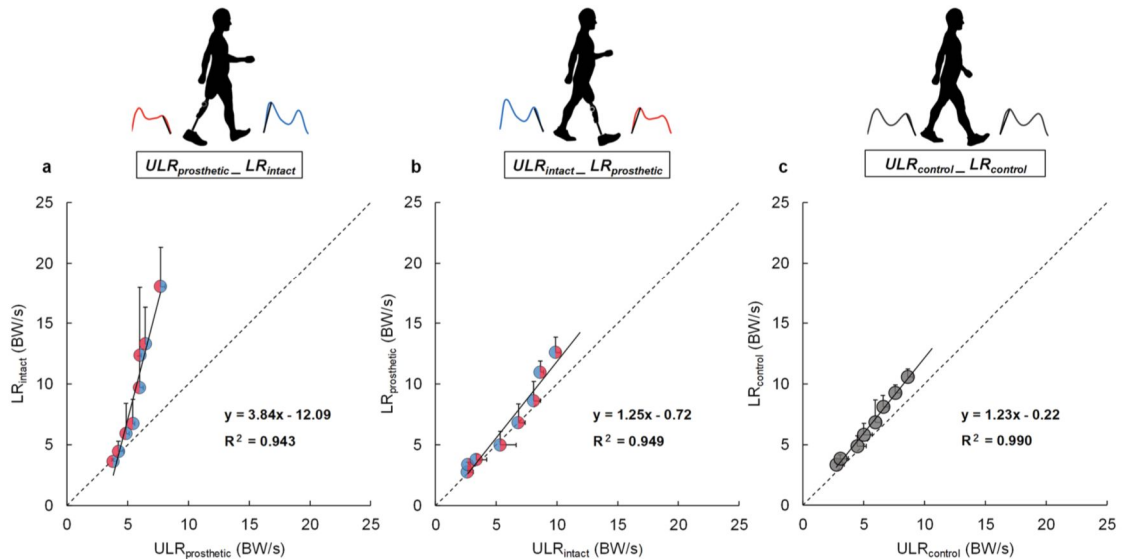


図2．後続脚における Unloading Rate (ULR) と先導脚における Loading Rate (LR) の関係．S それぞれ後続脚が義足側で先導脚が非切断側 (a), 後続脚が非切断側で先導脚が義足側 (b), そして後続脚がと先導脚がともに健常脚 (c) の条件を表している．(a) の条件でのみ, 先導脚の Loading Rate が高値を示している．

最後に, 脚全体に作用する外的仕事を, 立脚初期 (Collision), 立脚中期 (Midstance), および立脚後期 (Push-off) で分けて算出し, 各速度域で義足側と非切断側で比較した．具体的には, 立脚後期にある程度の出力を期待できる電子制御膝継手を使用した義足ユーザ (10 名) と, 受動的な機械式膝継手を使用する義足ユーザ (15 名) の二集団に分け, 立脚初期 (Collision) の外的仕事を比較した．その結果, 電子制御膝継手を使用している集団で, Collision Work の値が低く抑えられていることが明らかとなった (図3右)．この傾向は計測した歩行速度全域で観察されており, 電子制御膝継手の使用が, 非切断側の過負荷蓄積を低減させ, 二次障害等の予防にも有効であることが示唆された．なお, 本研究の結果は以下の雑誌にて採択されている (Pinhey S, Murata H, Hisano G, Ichimura D, Hobara H, Major MJ. Effects of walking speed and prosthetic knee control type on external mechanical work in transfemoral prosthesis user. Journal of Biomechanics, 134, 110984, 2022)．

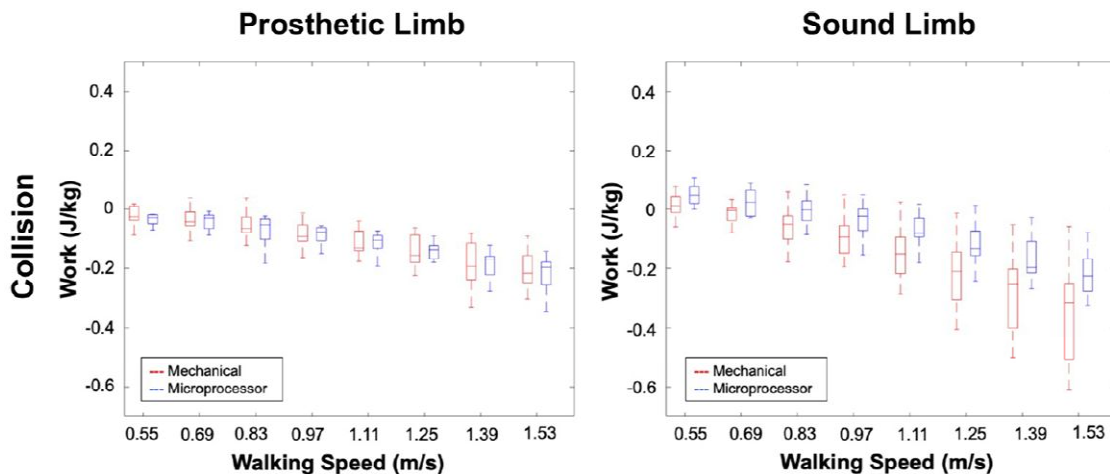


図3．左：片側大腿切断者 (義足側) における立脚初期の外的仕事量．右：片側大腿切断者 (非切断側) における立脚期の外的仕事量．赤が受動機構の義足 (機械式膝継手) を使用する 15 名のデータ, 青が能動機構の義足 (電子制御膝継手) を使用する 10 名のデータ．右図では, 電子制御膝継手を使用している集団で, Collision Work の値が抑えられている (ゼロに近い) ことが読み取れる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Amma R, Hisano G, Murata H, Major MJ, Takemura H, Hobara H	4. 巻 11
2. 論文標題 Inter-limb weight transfer strategy during walking after unilateral transfemoral amputation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4793
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-84357-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Pinhey S, Murata H, Hisano G, Ichimura D, Hobara H, Major MJ	4. 巻 134
2. 論文標題 Effects of walking speed and prosthetic knee control type on external mechanical work in transfemoral prosthesis user	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 110984
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jbiomech.2022.110984	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kobayashi T, Hu M, Amma R, Hisano G, Murata H, Ichimura D, Hobara H	4. 巻 130
2. 論文標題 Effects of walking speeds on the magnitude and symmetry of ground reaction forces in individuals with a transfemoral prosthesis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanics	6. 最初と最後の頁 110845
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jbiomech.2021.110845	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Amma R, Hisano H, Sakata H, Usui F, Takemura H, Hobara H
2. 発表標題 Per-step and cumulative loading rate in unilateral transfemoral amputees at various walking speeds
3. 学会等名 XXIII Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology (ISEK2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Amma R, Kato H, Takemura H, Hobara H
2. 発表標題 Ground reaction forces using a transfemoral prosthetic simulator during treadmill walking
3. 学会等名 REHABWEEK 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Amma R, Sakata H, Hisano G, Hashizume S, Takemura H, Usui F, Hobara H
2. 発表標題 Effects of walking speeds on loading rate in unilateral transfemoral amputees
3. 学会等名 The 17th World Congress of the International Society for Prosthetics and Orthotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Amma R, Hisano H, Sakata H, Usui F, Takemura H, Hobara H
2. 発表標題 Per-step and cumulative loading rate in unilateral transfemoral amputees at various walking speeds
3. 学会等名 XXIII Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology (ISEK2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Pinhey S, Amma R, Murata H, Hisano G, Hobara H, Major, M.J.
2. 発表標題 Effects of walking speed on mechanical work on the body center of mass in transfemoral prosthesis users
3. 学会等名 American Academy of Orthotists & Prosthetists 47th Academy Annual Meeting & Scientific Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ichimura D, Amma R, Murata H, Hisano G, Hobara H
2. 発表標題 Classification of spatiotemporal gait patterns in unilateral transfemoral amputees
3. 学会等名 International Society of Biomechanics XXVIII Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Pinhey S, Amma R, Murata H, Hisano G, Ichimura D, Hobara H, Major, M.J.
2. 発表標題 Effects of Walking Speed on External Mechanical Work on the Body Center of Mass in Transfemoral Prosthesis Users
3. 学会等名 The 18th World Congress of the International Society for Prosthetics and Orthotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Pinhey S, Amma R, Murata H, Hisano G, Ichimura D, Hobara H, Major, M.J.
2. 発表標題 Effects of walking speed on external mechanical work on the body center of mass in transfemoral prosthesis users.
3. 学会等名 The 45th Annual Meeting of the American Society of Biomechanics (ASB2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ichimura D, Hisano G, Murata H, Hobara H
2. 発表標題 Asymmetric center of pressure during walking after unilateral transfemoral amputation
3. 学会等名 The 9th World Congress of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------