

片大腿切断パラリンピックチャンピオンの  
走速度獲得メカニズムを探る  
– Deterministic Model を用いた網羅的分析 –

産業技術総合研究所 橋 詰 賢

**Mechanism of The Sprint Speed Generation of A Paralympic Champion with  
Unilateral Transfemoral Amputation  
– Exhaustive Analysis by Using The Deterministic Model –**

by

Satoru Hashizume  
*National Institute of  
Advanced Industrial Science and Technology*

ABSTRACT

Athletes with unilateral transfemoral amputation use mechanical prosthetic knee joint and running-specific prosthesis for their affected leg. Previous studies reported that athletes with unilateral transfemoral amputation adopt the specific sprint techniques to obtain the speed due to their asymmetric legs. Adaptation of champion's techniques is known as one of the useful strategies for improvement of performance. The present study, therefore, aimed to examine the Paralympic champion specific technique for obtaining the great sprint speed by using the deterministic model. A Paralympic champion with unilateral transfemoral amputation and corresponding six Japanese athletes were asked to run on runway with their maximal speed. Each mechanical parameter in the deterministic model of the sprint speed was compared between a Paralympic champion and Japanese athletes. As the results, a Paralympic champion exerted the small vertical component of the ground reaction force per body mass, and this induced the short flight time of the intact leg. This resulted in the great sprint speed of a Paralympic champion.

## 要 旨

片大腿切断を有するアスリートは、膝継手と呼ばれる機械式の膝関節および競技用義足を使用する。従って片大腿切断を有するアスリートは健常脚および義足脚という下肢の左右非対称性を有し、特有の走速度獲得メカニズムが報告されている。走速度に代表される競技パフォーマンス改善のための有用な戦略のひとつとして、チャンピオン技術の適用が挙げられる。そこで本研究は **deterministic model** を用いることで、片大腿切断を有するパラリンピックチャンピオンの走速度獲得メカニズムを明らかとすることを目的とした。片大腿切断を有するパラリンピックチャンピオン1名および同日本人アスリート6名を対象とし、最大努力によるスプリント走を行わせた。走速度を決定する **deterministic model** に含まれる各パラメータについてパラリンピックチャンピオンと日本人アスリートの比較を行った。その結果、パラリンピックチャンピオンは健側における身体質量あたりの面反力鉛直成分を抑えることで健側の滞空時間を短くし、高い走速度を獲得していることが明らかとなった。

## 緒 言

片大腿切断を有するアスリートは、片側に生体の脚を有し、反対側は残存した生体部位に加えて欠損した下肢の機能を補うために膝継手および競技用義足を装着して走運動を行う。健常アスリートを対象とした先行研究では、スプリント走における運動学および運動力学パラメータの左右差は小さいと報告されている<sup>1)</sup>。一方、片下腿および片大腿切断を有するアスリートを対象とした研究では、健常アスリートと比較してより顕著な左右差が報告されている<sup>2,3,4)</sup>。また片大腿切断および片下腿切断を有するアスリートは、生体の膝関節の有無という残存する生体機能に明確な違いが

ある。従って、脚の左右非対称性に起因し、大腿切断を有するアスリートの走速度獲得メカニズムは健常アスリートおよび片下腿切断を有するアスリートと異なる可能性がある。しかし健常アスリートおよび片下腿切断を有するアスリートの走速度獲得メカニズムを対象とした研究は多数存在するものの<sup>2,3,4)</sup>、大腿切断を有するアスリートを対象とした研究は非常に少ない<sup>5,6)</sup>。

任意のストライドにおける走速度は、関連する運動学および運動力学パラメータによって完全に決定される。先行研究<sup>7)</sup>で提案された **deterministic model** という手法は、走速度をはじめとするパフォーマンスに影響を及ぼすパラメータの網羅的な解明に広く用いられている。この **deterministic model** は以下のルールに基づくブロックダイアグラムを示す:1) モデルに使用されるすべてのパラメータは物理量である、2) モデルに使用されるすべてのパラメータは次の階層でリンクする複数のパラメータによって完全に決定される。チャンピオンの有する技術の適用は、競技パフォーマンス改善のための有用な戦略のひとつであることが知られている<sup>7)</sup>。従って片大腿切断を有するパラリンピックチャンピオンの走速度獲得メカニズムの解明は、片大腿切断を有するアスリートのパフォーマンス改善に有用な知見が得られると考えられる。そこで本研究では、**deterministic model** を用いることで、片大腿切断を有するパラリンピックチャンピオンの走速度獲得メカニズムを明らかにすることを目的とした。

## 1. 実験方法

### 1. 1 被験者

片大腿切断を有する100m走パラリンピックチャンピオン1名(年齢:32歳,身長:1.80m,身体質量:83.7kg)、および片大腿切断を有する日本人アスリート6名を対象とした(年齢:37±15歳,身長:1.63±0.11m,身体質量:56.5±9.7kg)。実験実

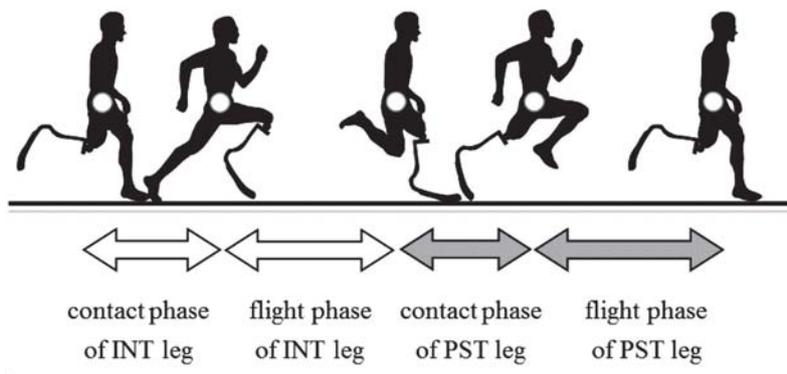


図1 Each phase of one stride for the athletes with unilateral transfemoral amputation

施にあたり、各被験者に対し、実験の目的、方法、注意事項および危険性について口頭で説明を行った後、書面で実験参加の同意を取得した。本研究計画はヘルシンキ宣言に基づき、産業技術総合研究所の人間工学実験委員会の承認を得た。

### 1. 2 データ収集

各被験者の全身および膝継手、競技用義足へ、Halen-hays マーカセットを基本とした80点の反射マーカを貼付した<sup>6)</sup>。データ収集は室内に設置された40mの直線走路で実施した。各被験者は十分なウォーミングアップを行った後、個人の最大努力で走運動を行わせた。その際の反射マーカの3次元位置座標をおよび地面反力データを、光学式モーションキャプチャシステム (VICON MX system, Oxford Metrics Ltd, UK) および同システムと電気的に同期したフォースプレート (P400600-1000PT および P400600-2000PT, AMTI, Watertown, MA, USA) を用い、それぞれ200Hz および2000Hz で取得した。

### 1. 3 データ処理

取得したマーカの3次元位置座標データおよび地面反力データは4次のバターワース型ローパスフィルターを用いてフィルタリングを行った。遮断周波数はそれぞれ20Hz および75Hz とした<sup>6)</sup>。得られたデータから、1ストライドを構成する局

面として、健側および義足側のステップ、ステップを構成する局面として接地期と遊脚期のデータをそれぞれ抽出した (図1)。仙骨に貼付したマーカより1ストライドにおける走速度算出し、さらに走速度を決定する運動学・運動力学パラメータをdeterministic modelに基づき算出した (図2)。先行研究において用いられている走速度のdeterministic modelは健常アスリートを対象としているため、走運動の左右非対称性を無視している。本研究では先行研究のmodelを拡張することで、左右非対称性を考慮可能なmodelを構築した。

### 1. 4 統計処理

Kolmogorov-Smirnov テストを用い、各パラメータの正規性の確認を行った。各パラメータにおけるパラリンピックチャンピオンおよび日本人アスリートの差の検定には、一標本のt検定を用いた。有意水準は $P < 0.05$ とした。

## 2. 実験結果

Deterministic modelに基づき算出した運動学および運動力学パラメータを表1に示す。分析対象としたストライドにおいて、日本人アスリート ( $5.68 \pm 0.24\text{m/s}$ ) と比較して、パラリンピックチャンピオン ( $7.29\text{m/s}$ ) の走速度は有意に高かった。ストライドあたりの身体移動距離は日本人アスリート ( $2.91 \pm 0.08\text{m}$ ) と比較してパラリンピッ

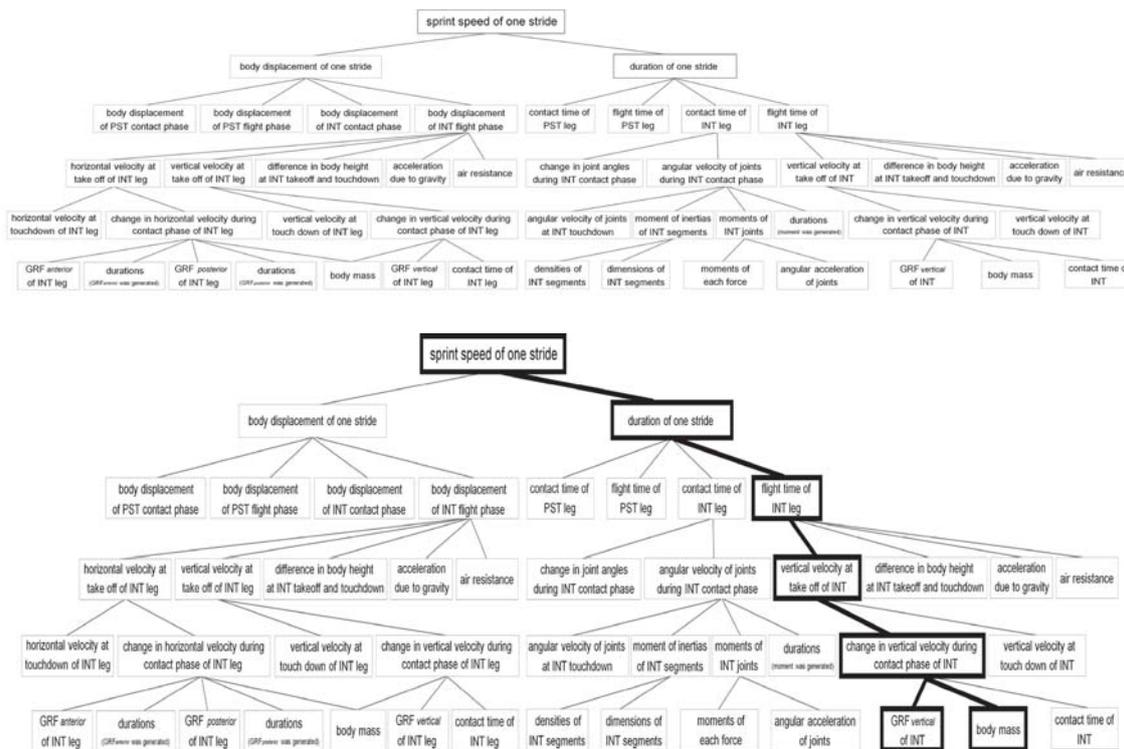


図2 Deterministic model of the sprint speed of the athletes with unilateral transfemoral amputation  
The parameters with thick line are the kinetic and kinematic parameters which mainly influence on the running speed

クチャンピオン (3.17m) が有意に長かった一方、要した時間は日本人アスリート (0.51 ± 0.03s) と比較してパラリンピックチャンピオン (0.43s) で有意に短かった。

ストライドあたりの身体移動距離を決定するパラメータの結果を次に示す。健側のステップあたりの身体移動距離は日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンで短かった一方、義足側のステップあたりの身体移動距離は日本人アスリートよりもパラリンピックチャンピオンが有意に長かった。健側の接地期における身体移動距離に両者の差はなかったが、滞空期における身体移動距離は日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンが有意に短かった。義足側の接地期および滞空期における身体移動距離は、ともに日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンが有意に長かった。

ストライドに要した時間を決定するパラメータの結果を次に示す。健側のステップに要した時間は日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンが短かった一方、義足側のステップに要した時間に差はなかった。健側の接地期に要した時間に両者の間で差はなかったが、健側の滞空期に要した時間はパラリンピックチャンピオンが有意に短かった。義足側の接地および滞空期に要した時間は、両者の間で差がなかった。

健側の接地期に要した時間を決定するパラメータの結果を次に示す。健側の接地期における股関節、膝関節および足関節の角変位は、パラリンピックチャンピオンと日本人アスリートの間でいずれも差がなかった。また健側の接地期における股関節、膝関節および足関節の平均角速度も両者の間で差がなかった。

健側の滞空期に要した時間を決定するパラメータ

表1 Means and SDs of each kinetic and kinematic parameter

	Paralympic champion	Japanese athletes
sprint speed (m/s)	7.29	5.68 ± 0.24
body displacement of one stride (m)	3.17	2.91 ± 0.08
duration of one stride (s)	0.43	0.51 ± 0.03
body displacement of one step of the INT leg (m)	1.22	1.62 ± 0.01
body displacement of one step of the PST leg (m)	1.94	1.29 ± 0.09
body displacement of contact phase of the INT leg (m)	0.79	0.74 ± 0.07
body displacement of flight phase of the INT leg (m)	0.43	0.88 ± 0.09
body displacement of contact phase of the PST leg (m)	1.02	0.71 ± 0.04
body displacement of flight phase of the PST leg (m)	0.92	0.59 ± 0.09
duration of one step of the INT leg (s)	0.16	0.27 ± 0.02
duration of one step of the PST leg (s)	0.28	0.24 ± 0.02
duration of contact phase of the INT leg (s)	0.10	0.12 ± 0.01
duration of flight phase of the INT leg (s)	0.06	0.15 ± 0.02
duration of contact phase of the PST leg (s)	0.15	0.13 ± 0.02
duration of flight phase of the PST leg (s)	0.13	0.11 ± 0.02
vertical velocity at takeoff of the INT leg (m/s)	0.50	0.73 ± 0.14
vertical velocity at touchdown of the INT leg (m/s)	-0.93	-1.78 ± 0.48
difference in body height at takeoff and touchdown of the INT leg (m)	0.02	0.01 ± 0.01
change in vertical velocity during contact phase of the INT leg (m/s)	1.43	2.52 ± 0.51
vertical GRF per body mass of the INT leg (N/kg)	14.3	20.8 ± 3.9
angular displacement of the hip joint during contact phase of the INT leg (rad)	-0.68	-0.82 ± 0.11
angular displacement of the knee joint during contact phase of the INT leg (rad)	-0.14	-0.09 ± 0.08
angular displacement of the ankle joint during contact phase of the INT leg (rad)	-0.39	-0.33 ± 0.07
angular velocity of the hip joint during contact phase of the INT leg (rad/s)	-6.85	-6.82 ± 0.81
angular velocity of the knee joint during contact phase of the INT leg (rad/s)	-1.36	-0.82 ± 0.72
angular velocity of the ankle joint during contact phase of the INT leg (rad/s)	-3.57	-0.74 ± 0.14

タの結果を次に示す。健側離地-義足接地時の身体高の差分は、パラリンピックチャンピオンおよび日本人アスリートの間には差はなかった。一方、健側離地時の身体鉛直速度は、日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンが有意に小さかった。

健側離地時の鉛直速度を決定するパラメータ結

果を次に示す。健側接地時の身体鉛直速度は両者の間に差がなかった一方、健側接地期の身体鉛直速度変化は日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンが有意に小さかった。また健側接地期の身体鉛直速度を決定する身体質量あたりの地面反力鉛直成分は、日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンが有意に小さ

かった。

### 3. 考 察

Deterministic modelによる走速度を決定する運動学および運動力学パラメータについて片大腿切断を有するパラリンピックチャンピオンおよび日本人アスリートの比較を行った結果、得られた主要な知見は以下の通りである。日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンは1) 最大努力における走速度が高いこと、2) ストライドあたりの身体移動距離がわずかに長いこと、3) ストライドに要した時間が短いこと、4) 健側の滞空期に要した時間が短いこと、5) 健側の身体質量あたりの地面反力鉛直成分が小さいことが挙げられる(図2)。

本研究の結果、片大腿切断を有する日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンは1.61m/s高い走速度を獲得していた。走速度はストライドあたりの身体移動距離と要した時間によって完全に決定される。日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンは、ストライドあたりの身体移動距離が0.26m長く、この差分は走速度の違いを33%説明可能である。またストライドに要した時間は、日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンで0.08s短く、この差分は走速度の違いを66%説明可能である。従ってパラリンピックチャンピオンが有する高い走速度は、ストライドに要した時間が短いことで達成されていることが示された。

ストライドに要した時間は、健側および義足側のステップに要した時間、また各ステップに要した時間は、対応する接地期および滞空期に要した時間によって完全に決定される(図2)。本研究の結果、義足側のステップ接地期および滞空期に要した時間については、いずれもパラリンピックチャンピオンと日本人アスリートの間に差はなかった。一方、健側のステップに要した時間は、

日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンで有意に短かった。健側のステップに要した時間を決定するパラメータについては、健側の接地期に要した時間は両者の間に差がなかったものの、滞空期に要した時間はパラリンピックチャンピオンが顕著に短かった。また日本人アスリートにおいて、ステップ、接地期および滞空期に要した時間は健側と義足側でほぼ同程度であったにも関わらず、パラリンピックチャンピオンにおいては義足側と比較して健側でいずれの時間も短かった(表1)。従って、パラリンピックチャンピオンは高い走速度獲得のために左右非対称な時間的方略を用いており、その左右非対称性は、顕著に短い健側の接地期に要した時間に起因することが示された。

健側のステップに要した時間を決定するパラメータである滞空期に要した時間もまた、その他のパラメータによって完全に決定される(図2)。健側の滞空期に要した時間を決定するパラメータのひとつである健側離地-義足接地時の身体高の差分は、パラリンピックチャンピオンと日本人アスリートで同程度であった。一方、健側離地時の身体鉛直速度はパラリンピックチャンピオンにおいて低値であったことから、パラリンピックチャンピオンにおける短い滞空期に要した時間は、主に健側離地時の身体鉛直速度が小さいことに起因すると考えられる。また健側離地時の身体鉛直速度は、健側接地時の身体鉛直速度および接地期における身体鉛直速度変化によって完全に決定される(図2)。健側接地時の身体鉛直速度は両者で同程度であった一方、健側接地期における身体鉛直速度変化は日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンが有意に小さかった。健側の接地期における身体鉛直速度変化を決定するパラメータのひとつである。

健側の接地期に要した時間は両者の間で差はなかった一方、健側の身体質量あたりの地面反力鉛

直成分は、日本人アスリートと比較してパラリンピックチャンピオンで有意に小さい値を示した。健常なアスリート<sup>8)</sup> および下腿切断を有するアスリート<sup>9)</sup> において、高い走速度獲得のためには、大きな身体質量あたりの地面反力鉛直成分を得ることが重要と報告されている。従って、健常なアスリート、下腿切断および大腿切断を有するアスリートという異なる切断レベルにおいて、高い走速度獲得のメカニズムが異なる可能性が示された。これらの結果により、パラリンピックチャンピオンは、健側において小さな身体質量あたりの地面反力鉛直成分を獲得することで、健側の滞空期に要した時間を短縮していることが示された。

健側のステップに要した時間を決定するもうひとつのパラメータである健側の接地期に要した時間もまた、以下のパラメータによって完全に決定される(図2)。健側の接地期における股関節、膝関節および足関節の角変位および平均角速度は、いずれも両者の間で差はなかった。従って接地期における健側の下肢関節運動はパラリンピックチャンピオンと日本人アスリートで類似しているにも関わらず、パラリンピックチャンピオンは身体質量あたりの地面反力鉛直成分を抑える技術を有することが示された。以上の結果より、健側の接地期に要した時間にパラリンピックチャンピオンおよび日本人アスリートの間に差がなかった要因として、接地期における健側下肢関節の角変位および平均角速度が両方で類似していたことが挙げられる。

#### 4. 結 論

本研究では *deterministic model* を用いることで、片大腿切断を有するパラリンピックチャンピオンの走速度獲得メカニズムを明らかにすることであった。*Deterministic model* の構築により、走速度を決定する運動学および運動力学パラメータがブロックダイアグラムとして示され、各パラメー

タについてパラリンピックチャンピオンと日本人アスリートの比較を行った。その結果、パラリンピックチャンピオンは健側の身体質量あたりの地面反力鉛直成分を抑えることで健側の滞空期に要する時間を短縮し、健側のステップに要する時間およびストライドに要する時間が短縮されることで高い走速度を獲得していることが明らかとなった。

#### 謝 辞

本研究の実施にあたり、研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) Korhonen M.T., Suominen H., Vittasalo J.T., Liikavainio T., Alen M., Mero A.A., Variability and symmetry of force platform variables in maximum-speed running in young and older athletes, *J. Appl. Biomech.*, **26**:357-366(2010)
- 2) Grabowski A.M., McGowan C.P., McDermott W.J., Beale M.T., Kram R., Herr H.M., Running-specific prostheses limit ground-force during sprinting, *Biol. let.*, **6**: 201-204(2010)
- 3) McGowan C.P., Grabowski A.M., McDermott W.J., Herr H.M., Kram R., Leg stiffness of sprinters using running-specific prostheses, *J. R. Soc. Interface.*, **9**: 1975-1982(2012)
- 4) Taboga P., Kram R., Grabowski A.M., Maximum-speed curve-running biomechanics of sprinters with and without unilateral leg amputation, *J. Exp. Biol.*, **219**: 851-858(2016)
- 5) Makimoto A., Sano Y., Hashizume S., Murai A., Kobayashi Y., Takemura H., Hobara H., Ground reaction forces during sprinting in unilateral transfemoral amputees, *J. Appl. Biomech.*, **33**:406-409(2017)
- 6) Sano Y., Makimoto A., Hashizume S., Murai A., Kobayashi Y., Takemura H., Hobara H., Leg stiffness during sprinting in transfemoral amputees with running-specific prosthesis, *Gait. Posture.*, **56**: 65-67(2017)
- 7) Hay G.J., Reid J.G., Qualitative analysis, *Anatomy*,

- mechanics, and human motion, 2nd edition, PRENTICE HALL, *Englewood Cliffs*, pp.239-274 (1988)
- 8) Weyand P.G., Sternlight D.B., Bellizzi M.J., Wright S., Faster top running speeds are achieved with greater ground reaction forces not more rapid leg movements, *J. Appl. Physiol.*, **89**: 1991-1999(2000)
- 9) Beck O.N., Taboga P., Grabowski A.M., How do prosthetic stiffness, height and running speed affect the biomechanics of athlete with bilateral transtibial amputation? *J. R. Soc. Interface*, **14**: 20170230 (2017)