

## 6軸触覚センサ搭載インソールを用いた 走行時の足裏反力計測

慶應義塾大学 高橋 英俊  
(共同研究者) 同 島崎 健一郎

### Measurement of Ground Reaction Forces in Sprint Running Using Insoles With 6-Axis Tactile Sensors.

by

Hidetoshi Takahashi, Kenichiro Shimazaki  
*Keio university*

#### ABSTRACT

This study aimed to measure and analyze ground reaction force (GRF) using MEMS 6-axis force sensors mounted in the insoles. The force sensors were placed on the thenar, hypothenar, and heel and measured vertical ( $F_z$ ), anterior-posterior ( $F_y$ ), and mediolateral ( $F_x$ ) forces with a sampling frequency of 50 Hz. Measurements were taken in four events: walking, jogging, wind sprint, and sprint, and a 60 m run from a crouching start. The subject had 8 years of track and field experience. Running speed was maximal at sprint, and the stride was maximal at wind sprint. The time between the peak heel reaction force and the peak thenar reaction force confirmed that the center of gravity movement speed during ground contact was maximum at the sprint. During the wind sprint and sprint, the vertical reaction force and forward shear force at the thenar increased, while the outward and propulsive forces at the hypothenar increased. The vertical force at the heel was smaller than that of the other sensors due to the forefoot strike form. During the 60 m run, strong propulsive forces were measured from the hypothenar during the acceleration phase, and the values gradually decreased with time.

On the other hand, the sensor on the thenar outputs a braking force, which gradually increases with acceleration. These research results suggest that the measurement of GRF using MEMS sensors is easier and more location-independent than force plates' measurement. In this method, the trajectory of the leg can be inferred from the difference in sensor output between the thenar and the hypothenar, suggesting that the data can be used to improve the sprinter' s running form.

キーワード

短距離走, MEMS センサ, 地面反力, 歩行, 陸上競技

Keyword

Sprint, MEMS sensor, GRF, Walking, Track and field

## 要 旨

本研究は短距離走の足裏反力測定方法として、靴のインソール内に搭載したMEMS六軸触覚センサによる走行時の足裏反力測定を目的とした。触覚センサはインソールの母指球、小指球、かかとの3か所に配置され、鉛直、前後、左右の3軸方向の力を測定することができる。測定は歩行、ジョギング、快調走、全力疾走の4種目と、クラウチングスタートからの60m走について、陸上競技経験8年の被験者が行った。全力疾走時の足裏反力は、母指球では垂直反力や前方へのせん断力が増大し、小指球では外側へのせん断力や後方へのせん断力の増大が見られた。また前足部から接地する走行フォームにより、かかところにおける反力は母指球と小指球の反力より小さくなった。60m走の測定においては、加速局面で小指球のセンサから後方への強いせん断力が測定され、時間とともにその値は徐々に小さくなった。一方母指球のセンサではブレーキ力が出力され、その値は加速とともに徐々に大きくなった。

## 緒言・まえがき

陸上競技の短距離走の力学的な解析のために、

接地時に地面に加わる地面反力の測定が行われている<sup>1-3)</sup>。測定の多くはフォースプレートをを用い、測定環境は地面の下にフォースプレートを埋め込んだ施設に限られている。一方、フォースプレートに代わる方法として近年開発が進むMEMSセンサによる測定がある<sup>4,5)</sup>。後者においては、靴のインソール内に複数の力センサを埋め込むことで、場所に関わらず、足裏の複数の点における地面反力を容易に測定することができる。これまでに同手法を用いて平地や階段、坂道での歩行や、垂直跳び、サッカーのキック時の足裏反力などが計測されている<sup>6-9)</sup>が、短距離走のような足裏に大きな力のかかる動作の測定は行われていない。

そこで本研究では、MEMS六軸触覚センサによる計測システムを用いて、陸上競技の短距離走における地面反力の測定を行う。歩行やジョギング、スプリントなどの複数の動作における測定値との比較からスプリントに関連する特徴量を抽出し、スプリント時の足裏での現象を力学的な観点から解明し、スプリントパフォーマンス向上に役立てることを目的とする。

## 1. 実験

### 1.1 被験者

被験者は陸上短距離種目（100m, 200m）を専門とする短距離選手（年齢23歳，身長170.3cm, 体重68.4kg，陸上競技歴8年）である。なお本研究は慶應義塾大学理工学部・理工学研究科生命倫理委員会の承認を受けて実施した（承認番号：2022-086, 2023-053）。

### 1.2 使用するセンサ

本研究で使用したシューズ（NIKE Zoom Fly4, NIKE）とMEMS六軸触覚センサ搭載インソール（Touchence社）の写真を図1に，インソールに搭



図1 (a) 使用したシューズ (b) MEMS六軸触覚センサ搭載インソール (c) 実験の様子

載されたセンサの位置と軸の定義を図2に示した。インソールには母指球・小指球・かかとの3か所にMEMS六軸触覚センサが，中心部には3軸加速度・ジャイロセンサが配置してある。MEMS六軸触覚センサは鉛直・前後・左右方向のせん断力 ( $F_z, F_y, F_x$ ) 及びモーメントを計測し，出力値は母指球・小指球・かかとの順で1, 2, 3と表記

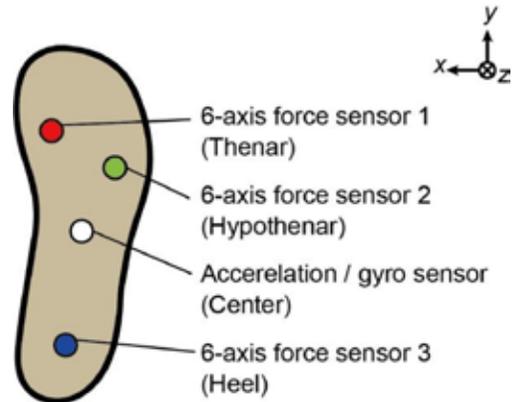


図2 センサ位置と軸方向の定義

する（小指球での鉛直の反力は $F_z2$ ）。なおデータはBluetoothを介して専用アプリをインストールしたAndroid端末に50Hzの周波数で送信される。測定前，靴を履いた状態でのキャリブレーションがアプリ上で行われた。測定時Android端末の通信と走行動作に支障がないように，Android端末は着用したタイトのポケットにしまい実験を行った（図1(c)）。測定後データはサーバにアップロードされ，PCに再度データをダウンロードし，出力データのうち3軸方向の力 ( $F_z, F_y, F_x$ ) について解析を行った。

### 1.3 測定方法

#### 1.3.1 歩行・ジョギング・快調走・全力疾走の測定

十分にウォーミングアップを行った後，センサシューズを履いて上記の4つの項目の動作について測定を行った。快調走は，動作としては短距離走と同様だが，努力度を85%程度に抑えた走行形態で，全力疾走は努力度100%で行った。また歩行以外の3つの走行については30mの助走区間を設け，十分に加速した後の後半30mの走行データを解析対象とした。後半30m間の通過時間計測のため，赤外線によるタイム測定装置（FASTRun-R, yy factory）を用いて計測を行った。また動作を撮

影するために、カメラによる測定全体の撮影と、GoProによる測定区間30mの中心の10m (40-50m地点)の定点撮影を行った。

### 1. 3. 2 スタートブロックからの60m走の測定

スタートブロックからの60m走について計測を行った。被験者はスタート時、右足は後方、左足は前方に準備し、スタート時のブロックを蹴るときを0歩目、次に踏み出す右足を1歩目として解析を行った。タイムの測定、カメラによる撮影も1. 3. 1同様にを行った。

## 2. 実験結果

### 2. 1. 1 歩行・ジョギング・快調走・全力疾走の測定結果

各動作における左右一歩分の $F_z$ ,  $F_y$ ,  $F_x$ の出力値の比較を図3~5に、各動作の平均速度、平均ストライド、その他測定値を表1にまとめた。平均速度は歩行が最小でジョギング、快調走、全力疾走の順で増加している。また平均ストライドは快調走で最大となった。

図3の $F_z$ の変化からは、歩行やジョギングでは前足部の反力に対してかかとの反力が大きく、快調走・全力疾走ではかかとの反力は小さくなっていることが分かる。これはかかとから接地して

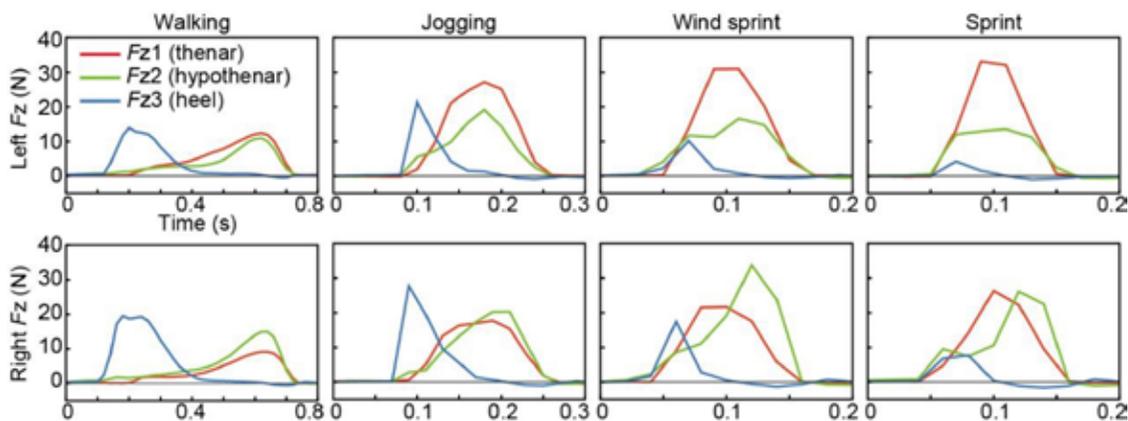


図3 各動作での $F_z$ の出力値の比較

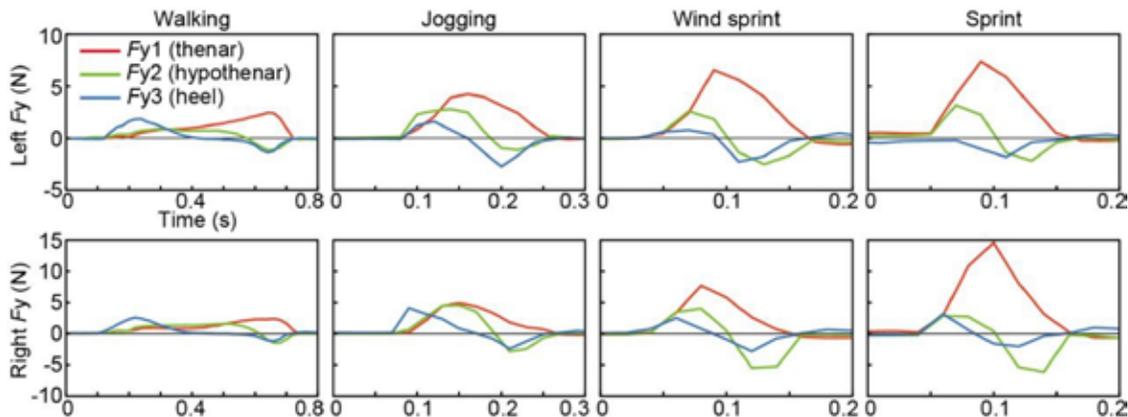


図4 各動作での $F_y$ の出力値の比較

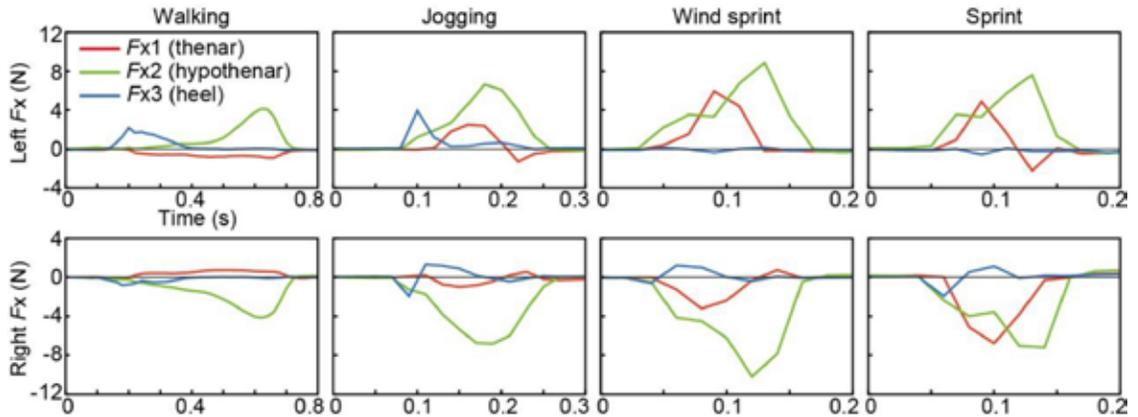


図5 各動作でのFxの出力値の比較

表1 各動作での測定値

	Walking	Jogging	Wind sprint	Sprint
Velocity (m/s)	1.67	5.02	7.64	8.54
Average stride (m)	0.80	1.79	2.14	2.00
Peak to peak (s)				
Left	0.41	0.08	0.038	0.030
Right	0.42	0.085	0.033	0.033
Average max Right Fz1 (N)	9.51	18.51	22.97	23.60
Average max Right Fz3 (N)	18.96	31.08	27.12	12.57
Average max Right Fy1 (N)	2.37	4.27	7.70	11.57
Average min Right Fy2 (N)	-1.35	-2.85	-5.94	-6.55
Average min Right Fx2 (N)	-3.75	-6.36	-10.01	-8.57

前足部へ抜ける歩行動作や、足裏の全面でフラットに接地するジョギング動作では比較のかかとの反力が大きい一方、スプリント動作では前足部で接地する走法に移行するためかかとの反力が減少していると考えられる。また全力疾走ではかかとの反力のピークから前足部のセンサが最大値を示すまでの間隔は短くなっており、速度の増加に伴う走行時の接地時間の短縮や重心移動の速さを示している。さらに快調走・全力疾走において左足は母指球と小指球の反力のピークのタイミングがほぼ同時なのに対し、右足においては母指球がピークに達した0.02-0.04秒後に小指球がピークを迎えている。この左右の波形の差から、走りの左右差（被験者の左足は足裏が左右に傾くことなく接地しているが、右足は母指球から接地し、小指球側で離地しているなど）を観察することができる。表1には左右の足のかかとのFz値がピー

クを示してから母指球のFzがピークを示すまでの時間の平均と、接地時の母指球のFz値の極大値の平均をまとめた。

図4の各センサのFyの変化に着目すると、母指球のセンサからはブレーキ成分のみが、小指球・かかとのセンサからは接地直後に前方へのせん断力（ブレーキ力）、離地直前に後方へのせん断力（推進力）の二峰性の波形が出力されていることがわかる。特に母指球のFy極大値は走速度が上昇するとともに増大し、また小指球の接地後期の極小値の値も減少している（表1）。

図5に示したFxに着目すると、どの動作においても小指球は身体重心から外方向の力を出力しており、その絶対値は歩行動作に比べて他の走行動作で非常に大きくなっている。母指球については、歩行時にはわずかに内側への力が加わっているものの、その他の走行動作においては外方向へ

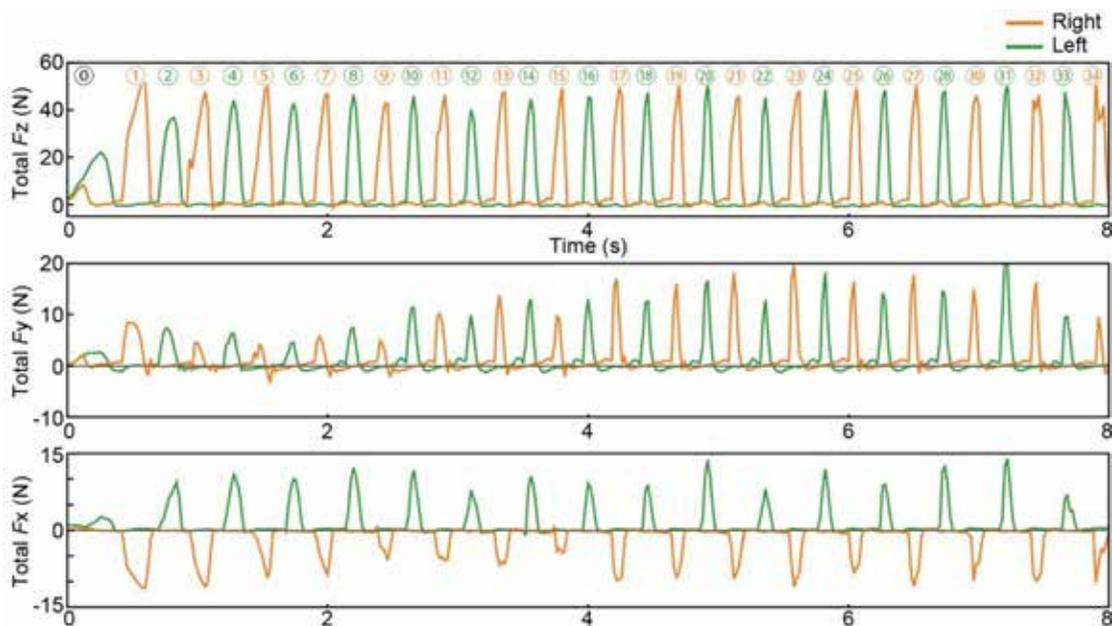


図6 各軸方向のセンサ出力の合計値

表2 前半30mと後半30mの通過タイム

First half 30 m (s)	4.23
Second half 30 m (s)	3.255

力が加えられていた。

2. 1. 2 スタートブロックからの60m走の測定結果

スタートから8秒間の3つのセンサの各軸方向

の出力の合計値を図6に、ビデオとタイムの計測システムから算出した前半30mと後半30mの通過タイムを表2に示した。ブロッククリアランスを0歩目、最初に出る右足を1歩目と定義し、図6内の上部にその歩数を示した。Fzの合計値は1歩目以降、ほぼ一定の値で推移していることが分かる。Fyの合計値はほとんどの時間で正の値(ブレーキ成分)となっており、その値は時間とともに増加し、16歩目以降で安定した値をとって

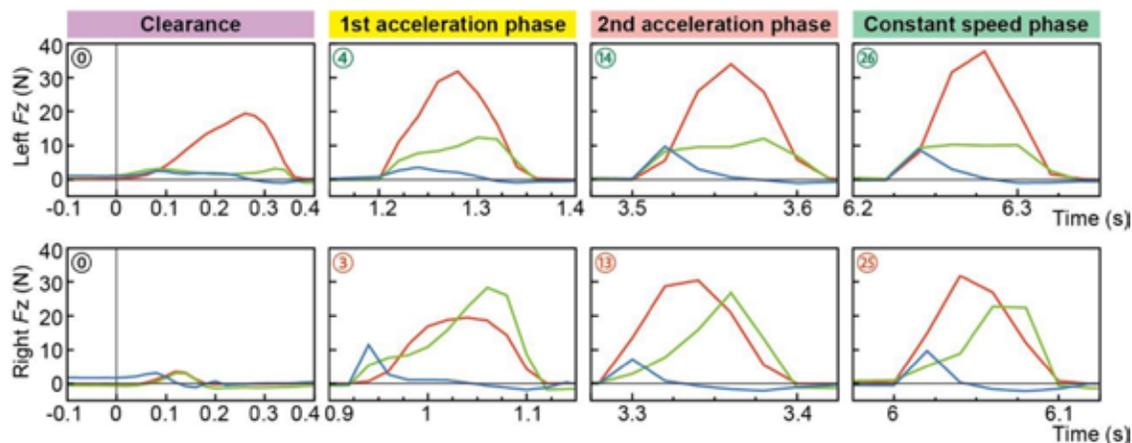


図7 各フェーズにおけるFz

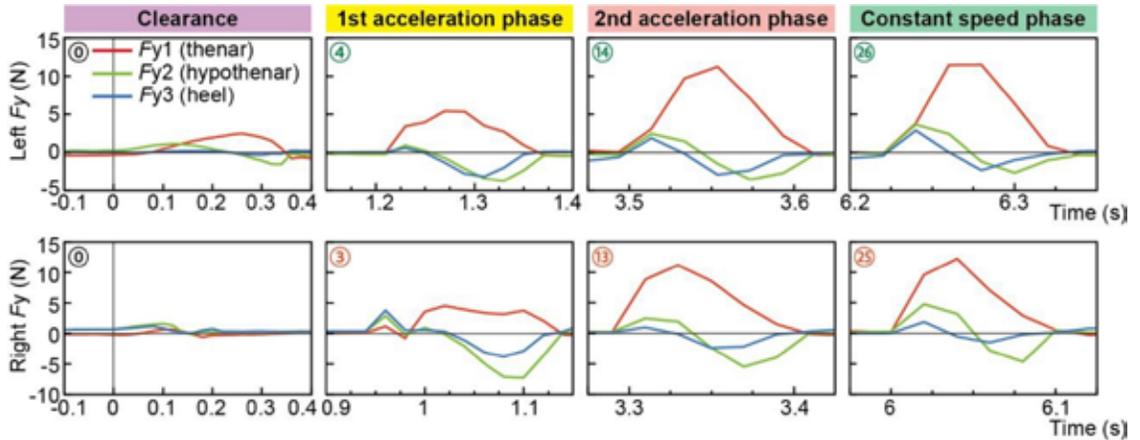


図8 各フェーズにおける  $F_y$

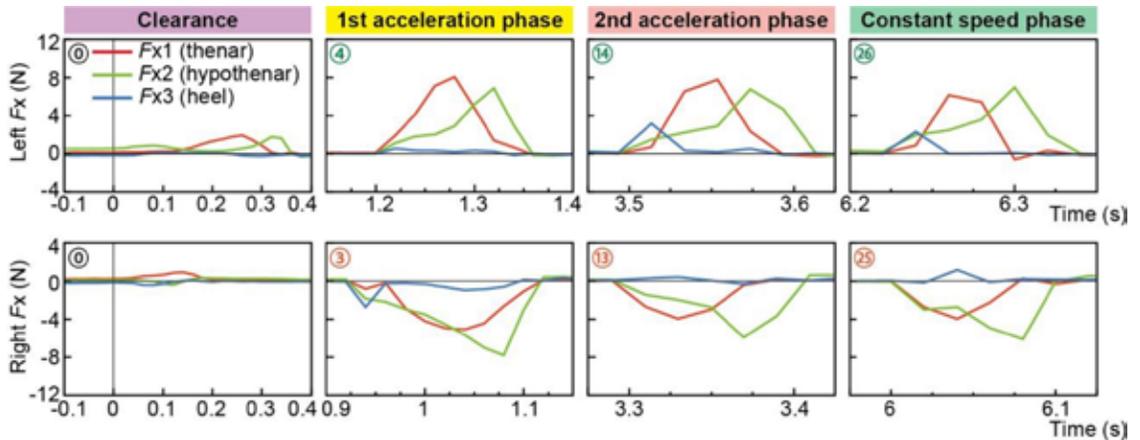


図9 各フェーズにおける  $F_x$

る。  $F_x$  は右足では負の値（右方向）、左足は正の値（左方向）と、外側へ力を加えていたことを示している。

ブロッククリアランス、一次加速、二次加速、中間疾走時のそれぞれにおける各軸方向の1歩分の出力波形を図7～9に示した。なお図左上の数字は歩数を示している。

$F_z$  では、クリアランス時は前足（左足）の母指球での荷重が大きい、その後は図6に示したように大きな変化はなく推移していることが分かる。また左足の接地時間（波形の立ち上がりから立下りまで）は、クリアランス時に0.36秒、4歩

目は0.16秒、14歩目は0.12秒と、加速とともに減少している様子も分かる。さらに、母指球と小指球のそれぞれで反力がピークに達する時間が、右足において大きくずれているのが2. 1. 1同様に観察された。

$F_y$  については、加速段階では小指球の後方へのせん断力が大きく、母指球の前方へのブレーキ力は小さいが、加速とともに小指球の推進力成分は減少、母指球のブレーキ力は増大していることが分かる。また小指球のセンサにおいて、右足の波形が左足に対して大きくなっている。走行時に小指球のみで推進力を生み出していると仮定する

と、この被験者は左足より右足で大きな推進力を得ていることになる。

$F_x$  は、加速局面から疾走局面に至るまで外側への力が出力されており、その大きさは歩数によらずほぼ一定であった。

### 3. 考 察

#### 3. 1 歩行・ジョギング・快調走・全力疾走の測定について

本実験では、走速度・走行フォームの違いによる地面反力の変化を測定した。 $F_z$  に関しては走速度の上昇とともに反力にも増加傾向がみられたが、歩行以外のジョギング、快調走、全力疾走の間での変化量は比較的小さかった。増大する原因としては、走速度の上昇とともに足を高い位置から振り下ろす疾走フォームへと変化していくためだと考えられる。特に疾走フォームに関しては、母指球から接地する選手や、フラットに接地して走る選手など一定ではないため、個人差が現れやすいパラメーターだと考えられる。

$F_y$  においては、小指球・かかとの波形の振幅に変化が見られたが、母指球のセンサからはブレーキ成分のみが検出される結果となった。母指球において推進力の成分が検出されない原因として (1) 足裏とセンサの相対位置、(2) 接地中の股関節の外旋動作などが考えられる。前者はセンサの位置や足の形状に起因するため、今後センサの位置と測定結果の関係について検討が必要である。後者については、接地から離地に至るまでに外旋動作が入り、右足は時計回りに、左足は反時計回りにねじられるために、母指球側では前方へ、小指球側では後方へせん断力が発生している可能性がある。こちらに関しても正面から映像から分かる走行フォームとの比較を行う必要がある。

$F_x$  の値は右足と左足とでほぼ左右対称な波形が出力され、特に走行時に外側へ大きな力が検出された。横方向のせん断力の大きさは、身体重心

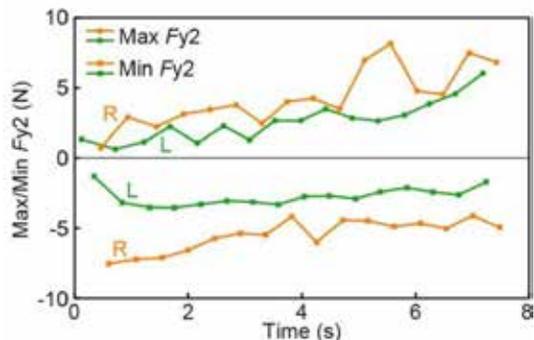


図10 各歩数での $F_y2$ の最大値と最小値

に対する接地位置の左右のずれの大きさに関連があるが<sup>10)</sup>、本実験ではどの動作においても外側への荷重が大きく、身体重心に対して外側に接地していることが示唆された。

#### 3. 2 スタートブロックを用いた60m走の測定結果について

図6の $F_z$ 合計値ではスタートから後半までの有意な変化は見られなかった。一方 $F_y$ においてはスタートから4秒後程度にかけての加速局面でブレーキ力の増加が、左右の足でみられた。図10に全ての歩数での接地時の $F_y2$ の最大値と最小値を示した。各歩数におけるブレーキ力のピーク値は時間とともに上昇し、推進力はスタートから3秒後までは減少し、その後安定した値を取っている。フォースプレートを用いた従来の研究では、スタートから時間とともにGRFの垂直成分は増加し、推進力は減少、ブレーキ力は増加することが知られている<sup>1,2)</sup>。特にスプリントのパフォーマンスには前後方向のせん断力が強く関連し、効率よく後方へ力を加える必要がある<sup>3)</sup>。本実験では、後方への推進力は足裏の小指球で大きく検出される結果となった。3. 1で述べたような外旋動作が母指球のブレーキ力の原因となっている場合、被験者がより大きな推進力を生み出すフォームのためには内旋動作による股関節伸展が

必要になると考えられる。またGRF全体に占める前後方向のせん断力の割合Ratio of force (RF)はz軸とy軸の2軸で評価されることが多いが、本実験ではx軸方向も含めた3軸での評価も可能である。Fxにおいては時間による有意な変化は見られなかったため、重心の近くに接地する走法によりFxの値を抑え、RF値を改善する方法などがパフォーマンス向上の方法として考えられる。

#### 4. 結 論

本研究では、MEMS六軸触覚センサを用いた短距離走での地面反力の測定を目的とした。結果として、スプリント時には歩行やジョギング動作に比べて母指球での垂直反力やブレーキ力が増大、小指球での推進力が増大し、小指球では外側へのせん断力が大きくなった。クラウチングスタートからの測定では、フォースプレートの測定で観察されるような前後方向のせん断力の変化は主に小指球のセンサに見られた。一方母指球のセンサではブレーキ力のみが検出されたため、出力データは足に対するセンサの相対位置や走行フォームに依存していると考えられた。以上のように、MEMS六軸触覚センサによる地面反力の測定はフォースプレートに比べ場所に依らない容易な測定を実現した。母指球と小指球のセンサ出力の差から脚の軌道を推測し、理想的な走行フォームへの改善に結びつけられることも示唆された。

#### 謝 辞

本研究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深く御礼申し上げます。また実験にあたりセンサの製作・ご提供を頂きましたタッチエンス社の方々に深く感謝いたします。

#### 文 献

- 1) G. Rabita et al., "Sprint mechanics in world-class athletes: a new insight into the limits of human locomotion," *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **25**, no. 5, pp. 583–594, doi: 10.1111/sms.12389 (2015)
- 2) R. Nagahara, H. Kanehisa, and T. Fukunaga, "Ground reaction force across the transition during sprint acceleration," *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **30**, no. 3, pp. 450–461, doi: 10.1111/sms.13596 (2020)
- 3) P. Samozino et al., "A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running," *Scand. J. Med. Sci. Sports*, **26**, no. 6, pp. 648–658, doi: 10.1111/sms.12490 (2016)
- 4) M. Hori, A. Nakai, and I. Shimoyama, "Three-axis ground reaction force distribution during straight walking," *Sensors (Basel)*, **17**, no. 10, p. 2431, doi: 10.3390/s17102431 (2017)
- 5) A. Nakai, Y. Morishita, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "6-axis force-torque sensor chip composed of 16 piezoresistive beams," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, vol. 2015-, no. February, pp. 730–731, doi: 10.1109/MEMSYS.2015.7051061 (2015)
- 6) 濱田悠嗣 et al., "1P1-F05 サッカーのキックにおける3軸力分布計測," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 1P1-F05\_1-1P1-F05\_4, doi: 10.1299/jsmermd.2015\_1P1-F05\_1 (2015)
- 7) 中井亮仁, 永野顕法, 高橋英俊, 松本潔, and 下山勲, "134 MEMS 3軸力センサを用いた階段昇降時の足裏応力分布計測 (シューズ・サーフェスほか)," シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, pp. 134-1-134-6, doi: 10.1299/jsmeshd.2013\_134-1\_ (2013)
- 8) 中井亮仁 and 下山勲, "C-23 MEMS 3軸センサを用いた歩行・走行時の足裏応力分布計測 (センサ情報によるロコモーション解析)," シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, pp. C-23-1-C-23-5, doi: 10.1299/jsmeshd.2015\_C-23-1\_ (2015)
- 9) 高畑智之, ドゥアシリス, 松本潔, and 下山勲, "垂直跳びの離地時にはたらく力の計測," シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, p. B-27, doi: 10.1299/jsmeshd.2016.B-27 (2016)

10) I. S. McClay and P. R. Cavanagh, "Relationship between foot placement and mediolateral ground reaction forces during running," *Clin. Biomech.*, **9**,

no. 2, pp. 117–123, doi: 10.1016/0268-0033 (94) 90034-5(1994)