位置情報から算出した加速度がサッカーを想定した短時間の間欠的運動中の
エネルギー消費量に対する貢献

東野 祐哉¹, 綾部 誠也², 沖田 剛輝¹, 土方 泰知², 森村 和浩³, 石崎 聡之⁴

Contribution of acceleration by location tracking system to energy
expenditure during Soccer -based intermittent exercise

Yuya Higashino¹, Makoto Ayabe², Yoshiki Okita¹, Taichi Hijikata²,
Kazuhiro Morimura³ and Satoshi Ishizaki⁴

¹岡山県立大学大学院情報系工学研究科, 〒719-1197 岡山県総社市窪木111 (*Graduate School of Computer Science and Systems Engineering, Okayama Prefectural University, 111 Kuboki, Soja, Okayama 719-1197, Japan*)

²岡山県立大学情報工学部, 〒719-1197 岡山県総社市窪木111 (*Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Okayama Prefectural University, 111 Kuboki, Soja, Okayama 719-1197, Japan*)

³就実大学教育学部, 〒703-8516 岡山県岡山市中区西川原1-6-1 (*Faculty of Education, Shujitsu University, 1-6-1 Nishigawara, Naka-ku, Okayama-shi, Okayama 703-8516, Japan*)

⁴芝浦工業大学工学部, 〒337-8570 埼玉県さいたま市見沼区深作307 (*Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology, 307 Fukasaku, Minuma-ku, Saitama-shi, Saitama 337-8570, Japan*)

Received: March 20, 2018 / Accepted: July 19, 2018

Abstract The purpose of this study was to examine the contribution of the location-tracking information to the energy expenditure during the soccer-based intermittent sprint run. Twenty-four young healthy men participated in the present investigation (1st experiment: 14 men, 2nd experiment 10 men). In the 1st experiment, the sprint runs were 12 times of the 10 m (SS10), or 6 times of the 20 m (SS20), or 3 times of the 40 m (SS40). In the 2nd experiment, the sprint runs 15 times of the 10 m (SS), or 15 times of the 10 m of the sprint run with change of direction for 90, 135, 180 degrees (CD90, CD135 and CD180). All course of the experiment, the expired gas was analyzed using the portable gas analyzer. The running index including speed, acceleration, distance, were calculated at 15 Hz interval based on the location-tracking information using the portable global positioning system. The intermittent run with the straight sprint run expended significantly larger calorie compared with that without the straight sprint ($p < 0.001$). The intermittent run with the changes of direction expended significantly larger calorie compared with that without the changes of direction ($p < 0.05$). A multiple stepwise regression analysis revealed that body weight, the acceleration and the change of direction were significant determinants of the energy expenditure and accounted for 75% of the total variance. These results indicate that the magnitude of the acceleration is significant predictor for the energy expenditure of the intermittent exercise.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 67(6): 411-421 (2018)

Keywords : tracking, football, metabolic power, metabolic cost, cardiorespiratory

緒 言

サッカーは、世界で人気のあるスポーツのひとつである。サッカーは、競技人口が全世界で2億6500万人に至り¹⁾、4年に一度の世界大会には五輪と同等の207ヶ国が参加する¹⁾。また、サッカーは、トップレベルの競技選手のみならず、若年者や女性での世界大会が開催され、子どもから大人まで幅広い年齢が参加する競技スポーツである。さらには、近年、サッカーがレクリエーション

として中高齢者への健康づくりのための運動に応用されている。Krustrupら^{2,3)}は、サッカーの継続的実施が身体機能の向上、疾病の予防に効果的である可能性を示唆している。このように、サッカーは、プロスポーツから健康づくりの目的まで様々な場面での活躍が期待されており、競技力向上や疾病予防のための身体の応答・適応についての研究が続けられている⁴⁻⁶⁾。

サッカーの競技特性の一つは、ボールを蹴るということであるが、選手一人当たりがボールに直接的にプレー

している時間が1分程度であり, 歩行や走行などの走運動が大半を占めている⁷⁾. 試合中の移動形態は, 試合全体での総移動距離が10,000から11,000 mであり⁸⁻¹⁰⁾, そのうち, 高強度のスプリント走行が占める距離が200-300 m, ジョギングの占める距離が4,000-5,000 mであり, 全体の50%程度の距離がジョギングにも至らない強度での活動である¹⁰⁾. 従って, サッカーは, 試合中の1分間あたりの移動距離が100-150 m程度であり, ジョギングに相当する速度で移動していることになる¹¹⁾. ただし, サッカー試合中の心拍数 (heart rate: HR) は171から205拍/分まで上昇し¹²⁾, 大部分の時間で80%HRmaxに相当することが20歳から75歳の非鍛錬者, マスターアスリート, 糖尿病患者, がん患者を対象とした研究成果で報告されている¹³⁾. また, 間欠的運動時の呼吸循環応答が平均運動強度に必ずしも対応しないことが知られており, 間欠的運動中のHR, 酸素摂取量 (oxygen uptake: $\dot{V}O_2$), 換気量 (ventilation: $\dot{V}E$) が同一運動量の固定負荷運動に比して高くなる¹⁴⁾. それ故, サッカーは, 80%HRmaxを超える高強度運動パフォーマンスをジョギング活動時に回復しながら90分間に渡って繰り返す走運動能力が求められる¹⁵⁾.

これまで, サッカーの実際の試合中の移動形態の特徴や分析方法に関する情報は少なかったが, 近年の科学技術の革新により著しく発展した映像分析や衛星位置情報システム (Global Positioning System) を利用することにより実際の試合中の移動形態が高精度で分析可能になった^{8-10, 16)}. すなわち, 従来の三角測量法¹⁷⁾やカメラでの位置座標を用いた手法¹⁸⁾は, 測定対象者数が限られていたり, 分析に莫大な手間と時間が必要であったため, 実際の試合のデータとしては限定的であった. しかし, 映像分析における自動追尾技術の進展やGPS機器の小型化により, 複数選手を対象に試合全体を通じた連続的な移動形態を客観的に評価できるようになり, 国際サッカー連盟や世界のプロサッカーリーグが主催する公式試合でも利用が国際的に承認されるまでに至った. 日本のプロサッカーリーグ (Jリーグ) も2015年シーズンから公式戦での位置情報分析を利用しており, ホームページなどで出場選手毎の試合中の総移動距離と24 km/h以上の速度で1秒以上走行した回数を発表している. その結果, 興味深いことに, 2015から2017シーズンの3シーズンにおけるJリーグの優勝チームの総移動距離合計の順位は, 18チーム中14位から17位であった. また, 同3チームの24 km/h以上の速度で1秒以上走行した回数は, 18チーム中2位から17位であった¹⁹⁾. これらの結果は, 総移動距離とスプリント走回数がチーム順位に必ずしも関係しないことを示唆している. このようにサッカーの実際の試合中の移動形態の分析は, 近年の技術革新に伴って客観的な評価の環境が整備されており, 新たな

評価指標の開発や身体負担や臨床データとの関連を含めた新たな位置情報の分析方法が期待されている.

映像分析やGPSでは, 20-30 Hzでのサンプリング頻度でのデータ収集が可能であるため, 移動距離や一定速度以上での走行回数などの量的評価に留まらず, 瞬間的な移動形態を評価できる. Osgnachら⁹⁾は, 映像分析によりサッカー試合中における加速度の大きさ毎の時間を分析し, $-3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以下が50秒, -3 から $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ が128秒, -2 から $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ が448秒, また, 2 から $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ が133秒, $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上が51秒であったことを報告した. さらに, Bloomfieldら²⁰⁾は, 映像分析を用いて角度ごとでの方向転換の回数を評価し, $0-90^\circ$ の方向転換が609回, $90-180^\circ$ の方向転換が94.5回, $180-270^\circ$ の方向転換が5.6回, $270-360^\circ$ の方向転換が1.7回であったと報告した. このように, サッカーの試合中の移動形態の判別は, 近年の技術革新によって, 1試合あたりの移動距離のみならず, 位置情報の詳細な変動に基づいた瞬時の加速度の分析も可能になり, 今後の技術革新やルール改正による普及も期待される.

さらに, このような位置情報を選手の身体疲労の評価などに応用することができれば, 選手の競技力向上の支援に有用な情報になる. エネルギー消費量 (energy expenditure: EE) は, 競技中の選手の身体負担を定量できる指標であり, パフォーマンスの向上や競技の安全性を確保する上で幅広く利用されている. これまでの研究においては, 二重標識水法により日本人のプロサッカー選手の1日の総EEが3,532 kcal/dayであったこと²¹⁾, また, 実験環境下で得られた $\dot{V}O_2$ とHRの関係式に基づいてサッカーの競技中のHRから推定したEEが練習中やフットサルを含めて500-600 kcalであることが報告されてきた²²⁻²⁴⁾. これらの方法の応用に際しては, 動作に対するEEの個人差が少ないこと, また, 競技中の動作特性が一律であることが前提とされるが, 残念ながら, サッカーの実際の試合中の選手個々の動作は対戦相手や試合展開に依存する. 一方, 位置情報に基づいてEEを推定することができれば, 動作を実測するため, サッカー特有の不規則性に原因するEE推定の限界点を軽減することができる. Osgnachら⁹⁾は, 試合中の選手の映像分析から取得された移動形態から, di Pramperoら²⁵⁾が提案した加速度と減速度によるEEの推定法を用いた1試合のEEが1106 kcal程度であることを報告した. ただし, di Pramperoら²⁵⁾の方法については, 位置情報から得られる加速度・減速度を用いたEE, また, 移動速度を加味して算出するメタボリックパワーについては, ドリブル動作時や方向転換走の条件下での呼気ガス分析法との比較において, その測定誤差が指摘されている. これらの知見は, 位置情報が多人数を対象にサッカーの試合展開などを踏まえた身体負担の評価をリアルタイムに評価

することができる可能性があるものの、位置情報に基づくEE推定アルゴリズムについての検討が必要であることを示している。すなわち、走行中の加速度・減速度とEEの関係についてはさらなる検討が必要であり、平均速度やメタボリックパワーを含めた位置情報から得られる移動形態の指標がEEに対する貢献度を検討する必要がある。

本研究は、サッカー競技中のEEを明らかにするための基礎的研究として、スプリント走距離や方向転換角度が異なる条件下の間欠的運動時のEEに対する加速度の貢献を明らかにすることを目的とした。すなわち、本研究は、サッカーを想定した短距離スプリント走を含む間欠的運動において、加速度がEEの説明要因であるとの仮説を検証するために、走行中の加速度の差を得るための条件として、総距離が同一で単回あたりの距離が異なるスプリント走の間欠的運動条件（実験1）、方向転換角度が異なるスプリント走の間欠的運動条件（実験2）での実験を実施した。

方 法

対象者 本研究の対象者は習慣的に運動を行なっているサッカー経験のある男子大学生（実験1：18から23歳の14名、実験2：18から22歳の10名）であった。全ての対象者には、事前に本研究の目的や実験方法、実験に伴う危険性などについて説明した上で、書面による同意を得た。本研究は、全てのプロトコルをヘルシンキ宣言に従って行い、研究実施前に岡山県立大学倫理委員会の承認を得た（承認番号：16-65）。

実験に先立ち、全対象者の身長、体重、身体組成を測定した。身長は、デジタル身長計（ムラテックKDS株式会社、京都、日本）にて測定した。体重と身体組成はMC-780A（株式会社タニタ、東京、日本）にて測定した。年齢、身長、体重、除脂肪量、体脂肪率、サッカー経験年数は、Table 1に示した。

実験プロトコル 実験1：全ての対象者は、4条件での1,200 mの間欠的運動を用いた運動負荷試験を実施し

た。全ての実験は、屋外の陸上競技用400 mトラックにてランニングシューズを履いて行なった。実験に際して、全ての対象者は、実験前日の激しい運動を禁止され、実験開始前3時間から水を除く飲食を禁止された。

測定は、5分間の座位安静の後、4条件での主運動をそれぞれ10分30秒間実施した。各試行間には10分間の座位安静を設けた。間欠的運動のプロトコルは、実際のサッカー場面に近づけるため、これまでのサッカーに関する先行研究に基づいて設計された。4つの条件は、スプリント走なし（no straight sprint: NSS）、10 m×12（SS10）、20 m×6（SS20）、40 m×3（SS40）であった。これは、サッカーの戦術的観点でグラウンドの3分割（30-40 m）と同程度の距離であること^{26,27)}、また、実際の試合でのスプリント走時の距離は200-300 m程度¹⁰⁾で、30-40回⁸⁾行われていることからサッカー試合中の一回のスプリント走距離が10-40 mであることを想定し距離を決定した。スプリント走回数は、実際の試合でのスプリント走回数から1分あたりのスプリント走回数を算出し、それを本研究の1試行あたりの運動時間に換算すると3-4回となるため、スプリント走条件で最も距離の長い40 mを基準に1,200 mあたり120 mのスプリント走を各スプリント走条件で行えるように、それぞれのスプリント走回数を10 m×12、20 m×6、40 m×3に決定した。4条件での所要時間は、サッカー選手の一試合の総移動距離が10,000-11,000 m⁸⁻¹⁰⁾であることに基づいて、その距離を1,200 mに換算して10分30秒に統一した。全ての条件において、スプリント走開始時に一旦停止してから急加速を行い、スプリント走終了地点で急減速し完全に停止するように指示した。スプリント走を含む3条件の試行順序は無作為に決定した。なお、各条件開始直前のHR、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 $\dot{V}E$ は、条件間で有意な差がないことを実験後の分析により確認した。

実験2：全ての対象者は、4条件での1,200 mの間欠的運動を用いた運動負荷試験を実施した。全ての実験は、屋外の陸上競技用400 mトラックおよび天然芝のサッカー競技場にてサッカースパイクを履いて行なった。

Table 1. Characteristics subjects.

	Experiment 1 (n = 14)	Experiment 2 (n = 10)
Age (years)	21 ± 1	21 ± 2
Height (cm)	173.3 ± 6.6	170.9 ± 4.6
Body weight (kg)	65.6 ± 9.6	63.2 ± 9.5
Lean body mass (kg)	56.1 ± 6.1	53.3 ± 5.5
Percent fat (%)	13.9 ± 5.0	15.0 ± 5.2
Soccer history (years)	14 ± 3	14 ± 2

Date are shown as mean with standard deviation

測定は、5分間の座位安静の後、4条件での主運動をそれぞれ10分30秒実施した。各試行間には10分間の座位安静を設けた。間欠的運動負荷試験のプロトコルは、実験1と同様に実際のサッカー場面に近づけるため、これまでのサッカーに関する先行研究に基づいて設計された。4つの条件は、直進スプリント走 (straight sprint; SS), 90°の方向転換を含むスプリント走 (change of direction; CD90), 135°の方向転換を含むスプリント走 (CD135), 180°の方向転換を含むスプリント走 (CD180) であった。1回あたりのスプリント走の距離と回数は、10 mとした。実験2は、実験1で得られたスプリント走距離の分割にて10 mスプリント走時にEEが増大することに基づき、10 mスプリント走の中に方向転換を含むことでEEのさらなる増大が起こることを検討するとの観点からスプリント走距離10 mと設定した。また、1回あたりの方向転換の角度と回数は90°, 135°, 180°でそれぞれ15回とした。これは、実際のサッカー試合中の方向転換は、1試合で合計約727回行われており、その中でも0-180°の方向転換が約97%行われていることに基づいて方向転換の角度は、90°, 135°, 180°とした²⁰⁾。4条件での1,200 m走の所要時間は、実験1と同様、10分30秒に統一した。全ての条件において、スプリント走開始時に一旦停止してから急加速を行い、5 mの地点でターンを行い、スプリント走終了地点で急減速し完全に停止するように指示した。方向転換を伴うスプリント走の3条件の試行順序は無作為に決定した。なお、各条件開始直前のHR, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}E$ は、条件間で有意な差がないことを実験後の分析により確認した。

測定項目 移動距離, 走行速度, 加速度, HRはSPI Pro X (GPSPORTS, キャンベラ, オーストラリア) にて測定した。SPI Pro Xは、位置情報をサンプリング頻度15 Hzにて計測するシステムであり、先行研究によって実測値との比較により0-3%程度の誤差範囲で距離を評価可能なことが明らかにされている²⁸⁾。対象者は、実験開始から終了までSPI Pro Xを専用のベストの背中部分に装着した。移動距離は、15 Hzで得られる位置情報の変化量の積算値として1/15秒毎に評価した。走速度は、移動距離を時間で除して1/15秒毎に評価した。加速度は、走速度の変化量を1/15秒毎に算出した。HRは、HR測定胸部ストラップH10 (Polar Electro, ケンペレ, フィンランド) からの信号をSPI Pro XにてBluetoothにて接続し、1/15秒毎に評価した。SPI Pro Xによって得られたデータは、実験終了後にコンピュータに転送し、専用分析ソフトTEAM AMS (GPSPORTS, キャンベラ, オーストラリア) にて分析した。スプリント走区間とジョギング区間の移動形態は、位置情報から得られる走行地点から区分した。平均速度は、スプリント走区間とジョギング区間の両者を含む試行条件全体 (10分30秒間) の平均速度、また、各試行条件内のスプリント走区間の平均速度を算出した。最高速度は、スプリント走区間内の最高速度を算出し、各試行条件内の全スプリント走区間の最高速度の平均値として評価した。直進スプリント走中の加速区間ならびに減速区間の速度と加速度は、最高速度に達するまでを加速区間、最低速度に達するまでを減速区間とした。方向転換を伴うスプリント走条件の加速区間ならびに減速区間の速度と加速度は、方向転換前と方向転換後に分類し、それぞれ最高速度に達するまでを加速区間、

Fig. 1 Experiment protocol

The illustrations show the procedures for experiment 1 (A1 - A4) and experiment 2 (B1 - B4), the dashed line (---) and straight line (—) show the jogging and sprint run, respectively.

A1: Intermittent run without sprint run, A2: Intermittent run with 10 meter of straight sprint run for 12 times, A3: intermittent run with 20 meter of sprint run for 6 times, A4: Intermittent run with 40 meter of sprint run for 3 times, B1: Intermittent run with straight sprint, B2: Intermittent run with change of direction 90 angle, B3: Intermittent run with change of direction 135 angle, B4: Intermittent run with change of direction 180 angle.

最低速度に達するまでを減速区間とした。なお、各条件でのスプリント走に関する指標は、条件内のスプリント走について1回目と最終回のスプリント走の間で有意な差が認められなかったため、条件内の全てのスプリント走の平均値として評価した。

メタボリックパワーは、di Pramperoら²⁵⁾の方法によって、重力加速度 (g)、前進方向への加速度 (a_f) から等価勾配 (ES) と等価重量 (EM) を算出し、それをエネルギーコスト (EC) の式に代入し、(フットボールフィールドの場合は $KT=1.29$ を乗算) それに速度 (v) で乗じた値をメタボリックパワーとして採用した。

$$ES = \tan \left(90 - \tan^{-1} \frac{g}{a_f} \right) \quad (1)$$

$$EM = \left(\frac{a_f^2}{g^2} + 1 \right)^{0.5} \quad (2)$$

$$EC = 155.4ES^5 - 30.4ES^4 - 43.3ES^3 + 46.3ES^2 + 19.5ES + 3.6) \\ EM \cdot KT \quad (3)$$

$$\text{メタボリックパワー} = EC \cdot v \quad (4)$$

呼吸ガス分析は、安静時から実験終了まで呼吸ガスを MetaMax 3B (Cortex, ライプツィヒ, ドイツ) を用いて Breath by Breath 法にて分析した。測定項目は、 $\dot{V}O_2$ 、二酸化炭素排出量 (carbon dioxide output: $\dot{V}CO_2$)、 $\dot{V}E$ 、呼吸交換比 (respiratory exchange ratio: RER) であった。MetaMax 3B は、先行研究によって mixing chamber 法との比較により同程度の誤差範囲で呼吸ガスを評価可能なことが明らかにされている²⁹⁾。MetaMax 3B は、機器マニュアルに従って、実験毎に規定のキャリブレーションを実施した。EE は呼吸ガス分析装置から得られた $\dot{V}O_2$ と RER から Weir の式³⁰⁾ を用いて算出した。各ステージの呼吸ガス指標は、安静時分を差し引いた正味の値を算出し、回復期を含む 20 分 30 秒間のデータをステージあたりの数値として評価した (項目/単位/ステージ)。主観的尺度 (rating of perceived exertion: RPE) は、400 m 毎に Borg Scale³¹⁾ を用いて評価した。

統計処理 各項目の測定結果は、平均値 $\pm$ 標準偏差で示した。条件間の数値の比較は、反復測定による一元配置分散分析を用いて有意差検定を行い、ボンフェローニの多重比較を行なった。また、EE を従属変数とし、独立変数をスプリント走の平均速度と最高速度、1 回あたりのスプリント走距離、スプリント走回数、方向転換角度、加速区間と減速区間の加速度、メタボリックパワー、方向転換の有無、体重としたステップワイズ法による重回

帰分析を実施した。全ての統計解析は、SPSS Statistics Version 24.0 (IBM, ニューヨーク, アメリカ合衆国) を使用した。統計学的有意水準は 5% とした。

結 果

Table 2 に実験 1 の GPS から評価された走パフォーマンス計測結果を示した。スプリント走時の平均速度、最高速度、加速度は、SS10 が SS20 と SS40 の間に、また SS20 が SS40 との間に有意な差が認められた ($p < 0.01$)。メタボリックパワーは、NSS とスプリント走有りの 3 条件との間に、また、SS10 と SS40、SS20 と SS40 の間に有意な差が認められた ($p < 0.05$)。Table 3 には、実験 1 の呼吸循環指標の計測結果を示した。全ての項目でスプリント走有りの 3 条件が NSS に比して有意に高値を示した ($p < 0.001$)。スプリント走有り条件内での比較において、SS10 は、EE が有意に高値を示した ($p < 0.05$)。

Table 4 に実験 2 の走パフォーマンス計測結果を示した。スプリント走時の平均速度、最高速度、加速度には、方向転換条件内にて有意な差が認められた ($p < 0.05$)。スプリント走時の平均速度と最高速度は、CD90 が CD135 と CD180 の間に有意な差が認められた ($p < 0.01$)。スプリント走時の加速度は、CD90 が CD135 と CD180 の間に、CD135 が CD180 との間に有意な差を認めた ($p < 0.05$)。メタボリックパワーは方向転換条件内での有意な差が認められなかった。Table 5 に実験 2 の呼吸循環指標の計測結果を示した。全ての項目で、SS と方向転換条件に有意な差が認められた ($p < 0.05$)。方向転換条件内の比較においては、CD180 の EE が CD90 に比して有意に高値を示した ($p < 0.05$)。

Fig. 2 には、直線スプリント走条件の NSS との差 (実験 1)、方向転換条件の SS との差 (実験 2) を示した。SS10 は、 $\dot{V}O_2$ が SS40 に比して有意な差が認められ ($p = 0.045$)、EE が SS20 に比して有意な差が認められた ($p = 0.021$)。SS20 は、 $\dot{V}CO_2$ が SS40 に比して有意な差が認められた ($p = 0.011$)。CD180 は、CD90 と CD135 に比して、 $\dot{V}O_2$ 、EE、 $\dot{V}CO_2$ が有意に大きく ($p < 0.05$)、 $\dot{V}E$ は CD90 に比して有意に大きかった ($p = 0.042$)。

Table 6 に EE を従属変数とする重回帰ステップワイズ分析の結果を示した。その結果、体重、方向転換の有無、スプリント走時の加速区間の加速度、スプリント走平均速度、スプリント走回数、1 回あたりのスプリント走距離、スプリント走時の減速区間の加速度が採択された ($p < 0.001$)。

考 察

本研究は、サッカー競技中の EE を明らかにするための基礎的研究として、間欠的運動時の EE に対する加速度の貢献を明らかにすることを目的とし、加速度が短距

Table 2. Running parameters assessed by Global Positioning System during intermittent straight sprint running

variables	NSS	SS10	SS20	SS40	p-value* (F-value)
Average velocity ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	6.99 ± 0.22	6.86 ± 0.15	6.96 ± 0.22	7.01 ± 0.20	$p = 0.098$ (2.560)
Maximum sprint velocity ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)		17.96 ± 1.22	$23.18 \pm 0.99^{\text{bb}}$	$27.52 \pm 0.99^{\text{bb, cc}}$	$p < 0.001$ (634.611)
Average sprint velocity ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)		9.92 ± 0.68	$13.42 \pm 0.67^{\text{bb}}$	$17.62 \pm 0.58^{\text{bb, cc}}$	$p < 0.001$ (1480.915)
Average sprint acceleration ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		2.47 ± 0.37	$2.09 \pm 0.24^{\text{bb}}$	$1.67 \pm 0.19^{\text{bb, cc}}$	$p < 0.001$ (59.218)
Average sprint deceleration ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		-2.26 ± 0.22	-2.31 ± 0.25	$-1.94 \pm 0.17^{\text{bb, cc}}$	$p < 0.001$ (22.593)
Metabolic power ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	7.71 ± 0.39	$10.02 \pm 2.06^{\text{aa}}$	$9.04 \pm 0.88^{\text{aa}}$	$8.50 \pm 0.52^{\text{aa, b, c}}$	$p = 0.001$ (13.156)

Date are shown as mean with standard deviation

NSS: Intermittent run without sprint run, SS10: Intermittent run with 10 meter of straight sprint run for 12 times, SS20: Intermittent run with 20 meter of sprint run for 6 times, SS40: Intermittent run with 40 meter of sprint run for 3 times.

* p-value (F-value) shows the results one-way ANOVA by the general linear model. ^{aa}Significant difference compared with NSS (^{aa} $p < 0.01$), ^bSignificant difference compared with SS10 (^b $p < 0.05$, ^{bb} $p < 0.01$), ^cSignificant difference compared with SS20 (^c $p < 0.05$, ^{cc} $p < 0.01$).

Table 3. Physiological response during intermittent straight sprint running.

variables	NSS	SS10	SS20	SS40	p-value* (F-value)
$\dot{V}\text{O}_2$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.69 ± 0.11	$0.91 \pm 0.12^{\text{aa}}$	$0.88 \pm 0.13^{\text{aa}}$	$0.88 \pm 0.12^{\text{aa}}$	$p < 0.001$ (119.416)
$\dot{V}\text{CO}_2$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.62 ± 0.11	$0.79 \pm 0.14^{\text{aa}}$	$0.78 \pm 0.12^{\text{aa}}$	$0.83 \pm 0.13^{\text{aa, c}}$	$p < 0.001$ (81.823)
$\dot{V}\text{E}$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	17.9 ± 3.4	$23.6 \pm 4.1^{\text{aa}}$	$23.8 \pm 4.3^{\text{aa}}$	$24.9 \pm 3.8^{\text{aa}}$	$p < 0.001$ (78.566)
EE ($\text{kcal} \cdot \text{stage}^{-1}$)	68.83 ± 11.0	$90.80 \pm 12.9^{\text{aa}}$	$87.74 \pm 12.5^{\text{aa, b}}$	$88.24 \pm 12.1^{\text{aa}}$	$p < 0.001$ (134.766)
HR ($\text{beat} \cdot \text{min}^{-1}$)	105 ± 14	$123 \pm 17^{\text{aa}}$	$123 \pm 16^{\text{aa}}$	$121 \pm 14^{\text{aa}}$	$p < 0.001$ (42.442)
RPE	9 ± 2	$12 \pm 2^{\text{aa}}$	$12 \pm 1^{\text{aa}}$	$13 \pm 2^{\text{aa}}$	$p < 0.001$ (24.510)

Date are shown as mean with standard deviation.

NSS: Intermittent run without sprint run, SS10: Intermittent run with 10 meter of straight sprint run for 12 times, SS20: Intermittent run with 20 meter of sprint run for 6 times, SS40: Intermittent run with 40 meter of sprint run for 3 times.

$\dot{V}\text{O}_2$: Oxygen uptake, $\dot{V}\text{CO}_2$: Carbon dioxide output, $\dot{V}\text{E}$: Ventilation, EE: Energy expenditure, HR: Heart rate, RPE: Rating of perceived exertion.

* p-value (F-value) shows the results one-way ANOVA by the general linear model. ^{aa}Significant difference compared with NSS (^{aa} $p < 0.01$), ^bSignificant difference compared with SS10 (^b $p < 0.05$), ^cSignificant difference compared with SS20 (^c $p < 0.05$).

離スプリント走を含む間欠的運動中のEEの説明要因であるとの仮説を検証した。その結果、EEは、スプリント走無し条件に比してスプリント走有り条件で増加し、さらに、直線スプリント走に比して方向転換を含むスプリ

ント走条件にて更なる増加を認めた。加速度は、EEと同様に、直線スプリント走、方向転換を含むスプリント走の順に大きくなった。さらに、重回帰分析の結果においても、加速度と方向転換の有無がEEの説明因子とし

Table 4. Running parameters assessed by Global Positioning System during intermittent sprint running with change of direction.

variables	SS	CD90	CD135	CD180	p-value* (F-value)
Average velocity ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	6.86 ± 0.21	7.11 ± 0.11^a	7.08 ± 0.15	7.04 ± 0.17	$P = 0.001$ (6.813)
Maximum sprint velocity ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	18.51 ± 1.09	13.79 ± 0.74^{aa}	$12.87 \pm 0.69^{aa, bb}$	$13.13 \pm 0.55^{aa, bb}$	$P < 0.001$ (395.701)
Average sprint velocity ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	10.32 ± 0.64	8.69 ± 0.53^{aa}	$7.88 \pm 0.59^{aa, bb}$	$7.78 \pm 0.48^{aa, bb}$	$P < 0.001$ (114.032)
Average sprint acceleration ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	2.80 ± 0.49	2.30 ± 0.32^{aa}	2.57 ± 0.41^b	$2.94 \pm 0.41^{bb, cc}$	$P < 0.001$ (28.214)
Average sprint deceleration ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	-2.49 ± 0.22	-1.88 ± 0.15^{aa}	-2.42 ± 0.24^{bb}	$-3.01 \pm 0.22^{aa, bb, cc}$	$P < 0.001$ (103.411)
Metabolic power ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	11.21 ± 3.79	13.00 ± 3.38	13.81 ± 4.00^{aa}	13.15 ± 3.34^a	$P = 0.001$ (7.084)

Date are shown as mean with standard deviation.

SS: Intermittent run with straight sprint. CD90: Intermittent run with change of direction 90 angle. CD135: Intermittent run with change of direction 135 angle. CD180: Intermittent run with change of direction 180 angle.

*p-value (F-value) shows the results one-way ANOVA by the general linear model. ^{a, aa}Significant difference compared with SS (^a $p < 0.05$, ^{aa} $p < 0.01$), ^{b, bb}Significant difference compared with CD90 (^b $p < 0.05$, ^{bb} $p < 0.01$), ^{cc}Significant difference compared with CD135 (^{cc} $p < 0.01$).

Table 5. Physiological response during intermittent sprint running with change of direction.

variables	SS	CD90	CD135	CD180	p-value* (F-value)
$\dot{V}O_2$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.95 ± 0.17	1.01 ± 0.18	1.00 ± 0.17	$1.05 \pm 0.19^{aa, bb, c}$	$P < 0.001$ (12.115)
$\dot{V}CO_2$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.88 ± 0.15	0.94 ± 0.16	0.93 ± 0.15	$0.98 \pm 0.17^{aa, b}$	$P < 0.001$ (11.367)
$\dot{V}E$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	22.7 ± 4.9	25.8 ± 5.8^{aa}	26.4 ± 5.7^{aa}	26.7 ± 6.0^{aa}	$P < 0.001$ (22.475)
EE ($\text{kcal} \cdot \text{stage}^{-1}$)	95.51 ± 16.6	101.18 ± 17.3^a	99.88 ± 16.1	$104.95 \pm 18.0^{aa, b}$	$P < 0.001$ (10.378)
HR ($\text{beat} \cdot \text{min}^{-1}$)	113 ± 10	122 ± 12^{aa}	122 ± 10^{aa}	124 ± 11^{aa}	$P < 0.001$ (28.508)
RPE	11 ± 2	13 ± 1	12 ± 2	12 ± 2^{aa}	$P = 0.032$ (4.929)

Date are shown as mean with standard deviation.

SS: Intermittent run with straight sprint. CD90: Intermittent run with change of direction 90 angle. CD135: Intermittent run with change of direction 135 angle. CD180: Intermittent run with change of direction 180 angle.

$\dot{V}O_2$: Oxygen uptake, $\dot{V}CO_2$: Carbon dioxide output, $\dot{V}E$: Ventilation, EE: Energy expenditure, HR: Heart rate, RPE: Rating of perceived exertion.

*p-value (F-value) shows the results one-way ANOVA by the general linear model. ^{a, aa}Significant difference compared with SS (^a $p < 0.05$, ^{aa} $p < 0.01$), ^{b, bb}Significant difference compared with CD90 (^b $p < 0.05$, ^{bb} $p < 0.01$), ^cSignificant difference compared with CD135 (^c $p < 0.05$).

て採択された。これらの結果は、本研究のオリジナルの知見であり、総移動距離を統一した距離と方向転換角度の異なるスプリント走条件での間欠運動時において、ス

プリント走行時の加速度がEEに貢献することを示唆する。すなわち、位置情報の連続的かつ高頻度の分析に基づく瞬時の加速度・減速度は、スプリント走時のEEの

Fig. 2 Additional physiological response by sprint run (left) and change of direction (right).

The left illustrations show the results of experimental 1. The right illustrations show the results of experimental 2.

$\dot{V}O_2$: Oxygen uptake, $\dot{V}CO_2$: Carbon dioxide output, $\dot{V}E$: Ventilation, EE: Energy expenditure, HR: Heart rate, SS10: Intermittent run with 10 meter of straight sprint run for 12 times, SS20: Intermittent run with 20 meter of sprint run for 6 times, SS40: Intermittent run with 40 meter of sprint run for 3 times, CD90: Intermittent run with change of direction 90 angle, CD135: Intermittent run with change of direction 135 angle, CD180: Intermittent run with change of direction 180 angle.

Significant difference compared with SS10 ($p < 0.05$), †Significant difference compared with SS20 (* $p < 0.05$), §Significant difference compared with CD90 (§ $p < 0.05$, §§ $p < 0.01$), †Significant difference compared with CD135 († $p < 0.05$).

推定精度の向上を介して、サッカーのEEの推定精度向上に寄与すると考えられた。

本研究は、スプリント走を含めた間欠的運動中のHRやRPE、EEなどの身体負担がスプリント走を含まない

条件に比して高値を示すことを確認した。本研究の実験で用いた8条件は全て移動距離が1,200 mに統一され、間欠的運動全体の移動速度の変動が3.6% (114 m/分-119 m/分)であったにも関わらず、EEがスプリント

Table 6. Contribution of running parameters by global positioning system to directly measured energy expenditure.

Dependent variable	Independent variable (Standard slope)		r ² (p-value)
Energy expenditure	Step 1	Body Weight (0.712)	0.500 (p < 0.001)
	Step 2	Body Weight (0.749) + Prevalence of direction change (0.475)	0.724 (p < 0.001)
	Step 3	Body Weight (0.761) + Prevalence of direction change (0.370) + Average acceleration during sprint run (0.205)	0.752 (p < 0.001)
	Step 4	Body Weight (0.775) + Prevalence of direction change (0.498) + Average acceleration during sprint run (0.311) + Average velocity during sprint run (0.244)	0.768 (p < 0.001)
	Step 5	Body Weight (0.800) + Prevalence of direction change (0.308) + Average acceleration during sprint run (0.264) + Average velocity during sprint run (0.983) + Number of sprint run (0.941)	0.802 (p < 0.001)
	Step 6	Body Weight (0.817) + Prevalence of direction change (0.514) + Average acceleration during sprint run (0.236) + Average velocity during sprint run (1.493) + Number of sprint run (0.772) + Distance during sprint run (-0.570)	0.816 (p < 0.001)
	Step 7	Body Weight (0.825) + Prevalence of direction change (0.477) + Average acceleration during sprint run (0.155) + Average velocity during sprint run (1.658) + Number of sprint run (0.960) + Distance during sprint run (-0.575) + Average deceleration during sprint run (-0.140)	0.826 (p < 0.001)

Independent variables: Angle of direction Change, Average acceleration during sprint run, Average deceleration during sprint run, Average velocity during sprint run, Body weight, Distance during sprint run, Maximal velocity during sprint run, Metabolic power, Number of sprint run, Prevalence of direction change.

走により18.91–36.12 kcal (27–41 %) 増加した。同様に Cipryan ら¹⁴⁾ も、運動時間を統一した連続的運動中と間欠的運動中の身体負担を比較し、連続的運動時に比して間欠的運動時にHRや $\dot{V}O_2$ 、RPEが46 % (20–101 %) 高値であることを報告している。また、Kelly ら³²⁾ も運動時間を統一した連続的運動中と間欠的運動中の身体負担を比較し、連続的運動時に比して間欠的運動時にEEが49 % 高値であることを報告した。本研究の結果もこれらの先行研究に一致しており、スプリント走の付加によるEEの増大、また、同一距離のスプリント走を分割することによりさらなるEEの増大、さらに、重回帰分析の結果も加速度がEEの説明変数として貢献している事を確認した。我々の知る限りフィールド実験にて加速度とEEの両者を実測し、間欠的運動中のEEに対する加速度の貢献を示した結果は本研究が初めてである。

また、本研究は、方向転換を伴うスプリントが間欠的運動中のEEをさらに増大させる事を確認した。本研究の実験2においては、方向転換スプリント走によりEEの4.37–9.44 kcal (4.6–9.9 %) の増加を認めた。Oxendale ら³³⁾ は、本研究と同様に、同距離のジョギングやスプリント走のみでの直進運動パターンに比して、方向転換を含めたジョギングとスプリント走での運動パターンのEEが6.8 % 増大したと報告した。さらに、本研究においては、EEの直接測定と同時に高精度の位置情報分析により、方向転換を付加することによるEEの増大の原因

が方向転換に伴う加速度の増大であることを示す結果を得た。すなわち、方向転換を伴うスプリント走を含む間欠的運動時には、EEと加速度の増大が認められ、重回帰分析の結果も方向転換の有無と加速度がEEの説明要因として採択された。これらの結果は、間欠的運動中において、スプリント走や方向転換に伴う加速度の増加がEEの増大に貢献していることを示し、位置情報から得られる加速度がサッカーの試合中のEEの推定指標として有用となる可能性を示唆している。

本研究の結果は、加速度がEEの推定精度の向上に貢献することを示したが、位置情報からのサッカーの競技中のEEを推定するためには未だに多くの課題が山積している。サッカーの競技は、単純な移動として評価できない身体負担であるジャンプ動作やスライディング動作などがある。サッカーにおいては、1試合のうちボールを伴う動作がわずか1分程度であるが、それに伴う付加EEも無視できない。Piras らは³⁴⁾、ドリブル動作が同一速度での走行に比して付加EEを9.6 % 程度増大させることを報告している。そのほか、ジャンプやバック走などのサッカーの特異的な動作は、身体負担を増大することが明らかになっているが³⁵⁾、これらの動作を位置情報のみでは判別することができない。従って、無拘束条件でのサッカーの試合中のEEの定量のためには、映像分析やセンサー技術と連動したサッカーの特異的動作の動作判別アルゴリズムの開発も求められる。

本研究は、加速局面のスプリント走における加速度がEEに果たす貢献度を示している。すなわち、本研究における最高速度の低さは、研究開始前の想定を超えて低値であった。本研究は、これまでのサッカーの試合の分析結果に基づいて10-40 mを直線スプリント走区間として設定し（実験1）、さらに大きな加速度を得るとの期待から単回あたりの移動距離を10 mとした（実験2）。その結果、研究開始前に想定した通りに加速度がスプリント走距離に反比例し、方向転換角度に比例したが、全力スプリント走時の最高速度が実験1が18 km/h程度で実験2が13 km/h程度であり、日常的にサッカーを行う大学生であったことを踏まえると、最高速度に達していたとは考え難い結果となった。特に、実験2においては、10 mのスプリント走区間の中間地点で方向転換を行ったため、実質的に5 mのスプリント走後に減速してその後には再加速する運動になり、スプリント走中の最高速度も実験1に比べて低値となった。さらに、実験2を天然芝で実験を実施したことも最高速度の低下に寄与したと推測される。頻回の短距離スプリント走や方向転換角度の大きなスプリント走が加速度の増大を介してEEに貢献することは移動距離とは独立しており、この点においてはスプリント走距離を延長しても同様と推測されるが、本研究で得られた最高速度の低さを考慮すれば、最高速度に到達するような距離での走行での条件下における加速度がEEに果たす貢献度を確認する必要がある。本研究は、サッカーの試合を想定してスプリント走の距離を10-40 mに設定しており、加速区間の後の最高速度維持区間を含む移動距離での条件下では加速度に由来するエネルギー需要が相対的に少なくなることも想定される。

本研究には、いくつかの限界がある。第一に、本研究は、同一距離での間欠的走行運動においてEEに対するスプリント走時の加速度の貢献度を示した。すなわち、これまでの生理学的知見に基づけば、単位時間あたりのEEが距離（速度）に依存することが明白であり、サッカーの試合全体のEEは、加速度よりも移動距離に依存することは明らかであろう。それ故、加速度の重回帰分析の寄与率も高くなかったが、本研究の結果は、単位時間あたりの距離や平均速度よりも、単位時間あたりのスプリント走時の加速度が継続的な身体負担の評価として有用であり、間接的にサッカーの試合全体の移動距離の予測やEEの推定に応用できると考えている。また、本研究の対象者はサッカー経験のある男子大学生であり、エリートサッカー選手やレクリエーションサッカー愛好家で同様の結果が得られるかは不明である。従って、最大疾走速度の個人差を含んだ対象者の特性に伴う加速度の変化が結果に影響を与えない可能性を否定できない。最後に、疾走速度の変動（加速・減速）がEEに及ぼす影響については今後の課題であり、呼吸循環応答や骨格筋での代

謝基質の変動を含めた研究成果が期待される。

結 語

本研究は、サッカーの競技中のEEを明らかにするための基礎的研究として、総移動距離が同一の条件下にて、全力スプリント走の回数と方向転換角度の増減に基づく加速度の増減がEEに対する貢献を検討した。その結果、間欠的運動にスプリント走を加えることでEEは増加し、スプリント走に方向転換を加えることでEEはさらに増加することを確認した。その要因として、加速度が体重や方向転換の有無に加えてEEに貢献していることを示唆する結果を得た。これらの結果は、総移動距離を統一した距離と方向転換角度の異なるスプリント走条件での間欠的運動時において、スプリント走行時の加速度がEEに貢献することを示唆する。すなわち、位置情報の連続的かつ高頻度の分析は、サッカーのEEの定量的精度改善に有効であると考えられた。無拘束条件でのサッカーの試合中のEEの定量的ためには、映像分析やセンサー技術と連動したサッカーの特異的動作の動作判別アルゴリズムの開発が必要である。

利益相反自己申告：申告すべきものはなし

謝 辞

本研究の一部は、岡山県立特別研究費ならびにウエスコ学術振興財団の支援を受けて実施された。

引用文献

- 1) FIFA. FIFA magazine 2007, http://www.fifa.com/mm/document/fifafacts/bcoffsurv/emaga_9384_10704.pdf (閲覧日2017年10月11日)。
- 2) Krstrup P, Nielsen JJ, Krstrup BR, Christensen JF, Pedersen H, Randers MB, Aagaard P, Petersen AM, Nybo L, Bangsbo J. Recreational soccer is an effective health-promoting activity for untrained men. *Br J Sports Med* 43: 825-831, 2009.
- 3) Krstrup P, Helge EW, Hansen PR, Aagaard P, Hagman M, Randers MB, de Sousa M, Mohr M. Effects of recreational football on women's fitness and health: adaptations and mechanisms. *Eur J Appl Physiol* 118: 11-32, 2018.
- 4) Science and soccer developing elite performers. Third Edition. (Williams AM), Routledge, London, England, 2013.
- 5) Sarmento H, Clemente FM, Araújo D, Davids K, McRobert A, Figueiredo A. What performance analysts need to know about research trends in association football (2012-2016): A systematic review. *Sports Med* 48: 799-836, 2017.
- 6) Sarmento H, Anguera MT, Pereira A, Araújo D. Talent identification and development in male football: a

- systematic review. *Sports Med* 48: 907-931, 2018.
- 7) Carling C. Analysis of physical activity profiles when running with the ball in a professional soccer team. *J Sports Sci* 28: 319-326, 2010.
- 8) Chmura P, Andrzejewski M, Konefał M, Mroczek D, Rokita A, Chmura J. Analysis of motor activities of professional soccer players during the 2014 world cup in Brazil. *J Hum Kinet* 56: 187-195, 2017.
- 9) Osgnach C, Poser S, Bernardini R, Rinaldo R, di Prampero PE. Energy cost and metabolic power in elite soccer: A new match analysis approach. *Med Sci Sports Exerc* 42: 170-178, 2010.
- 10) Bradley PS, Sheldon W, Wooster B, Olsen P, Boanas P, Krstrup P. High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. *J Sports Sci* 27: 159-168, 2009.
- 11) Ainsworth BE, Haskell WL, Whitt MC, Irwin ML, Swartz AM, Strath SJ, O'Brien WL, Bassett DR Jr, Schmitz KH, Emplainscourt PO, Jacobs DR Jr, Leon AS. Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities. *Med Sci Sports Exerc* 32: 498-504, 2000.
- 12) Krstrup P, Mohr M, Ellingsgaard H, Bangsbo J. Physical demands during an elite female soccer game: importance of training status. *Med Sci Sports Exerc* 37: 1242-1248, 2005.
- 13) Bangsbo J, Hansen PR, Dvorak J, Krstrup P. Recreational football for disease prevention and treatment in untrained men: a narrative review examining cardiovascular health, lipid profile, body composition, muscle strength and functional capacity. *Br J Sports Med* 49: 568-576, 2015.
- 14) Cipryan L, Tschakert G, Hofmann P. Acute and post-exercise physiological responses to high-intensity interval training in endurance and sprint athletes. *J Sports Sci Med* 16: 219-229, 2017.
- 15) Reilly T, Bangsbo J, Franks A. Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *J Sports Sci* 18: 669-683, 2000.
- 16) Hoppe MW, Baumgart C, Slomka M, Polglaze T, Freiwald J. Variability of metabolic power data in elite soccer players during pre-season matches. *J Hum Kinet* 58: 233-245, 2017.
- 17) 大橋二郎, 鈴木 滋, 大串哲郎, 河合一武: サッカー選手の試合中における移動スピードの変化と分布, サッカー医科学研究会報告書, 7: 36-39, 1987.
- 18) 塩川満久, 沖原 謙, 菅 輝, 野地照樹: サッカーにおける新しいゲーム分析の試み - 3D 画像分析による再現 -, サッカー医科学研究会報告書, 17: 165-170, 1997.
- 19) J.LEAGUE. 成績・データ, <https://www.jleague.jp/stats/2017/> (閲覧日2018年2月7日).
- 20) Bloomfield J, Polman R, O'Donoghue P. Physical demands of different positions in FA Premier League soccer. *J Sports Sci Med* 6: 63-70, 2007.
- 21) Ebine N, Rafamantanantsoa HH, Nayuki Y, Yamanaka K, Tashima K, Ono T, Saitoh S, Jones PJ. Measurement of total energy expenditure by the doubly labelled water method in professional soccer players. *J Sports Sci* 20: 391-397, 2002.
- 22) 秋田信也, 菊池武道, 鍋島和夫: サロンフットボールのエネルギー消費量とボールコンタクトについて, サッカー医科学研究会報告書, 4: 137-141, 1984.
- 23) 杉山允宏, 岡田栄治: スポーツ活動・身体運動の運動強度, 愛媛大学教育学部紀要, 40: 65-76, 1994.
- 24) Beato M, Impellizzeri FM, Coratella G, Schena F. Quantification of energy expenditure of recreational football. *J Sports Sci* 34: 2185-2188, 2016.
- 25) di Prampero PE, Fusi S, Sepulcri L, Morin JB, Belli A, Antonutto G. Sprint running: a new energetic approach. *J Exp Biol* 208: 2809-2816, 2005.
- 26) 日本サッカー協会. Laws of the Game, 日本サッカー協会, 東京都, 32, 2017.
- 27) Lago C. The influence of match location, quality of opposition, and match status on possession strategies in professional association football. *J Sports Sci* 27: 1463-1469, 2009.
- 28) Köklü Y, Aralan Y, Alemdaroğlu U, Duffield R. Accuracy and reliability of SPI Pro X global positioning system devices for measuring movement demands of team sports. *J Sports Med Phys Fitness* 55: 471-477, 2015.
- 29) Meyer T, Georg T, Becker C, Kindermann W. Reliability of gas exchange measurements from two different spirometry systems. *Int J Sports Med* 22: 593-597, 2001.
- 30) Weir JB. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109: 1-9, 1949.
- 31) Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 2: 92-98, 1970.
- 32) Kelly B, King JA, Goerlach J, Nimmo MA. The impact of high-intensity intermittent exercise on resting metabolic rate in healthy males. *Eur J Appl Physiol* 113: 3039-3047, 2013.
- 33) Oxendale CL, Highton J, Twist C. Energy expenditure, metabolic power and high speed activity during linear and multi-directional running. *J Sci Med Sport* 20: 957-961, 2017.
- 34) Piras A, Raffi M, Atmatzidis C, Merni F, Di Michele R. The energy cost of running with the ball in soccer. *Int J Sports Med* 38: 877-882, 2017.
- 35) Zagato AM, Papoti M, Da Silva ASR, Barbieri RA, Campos EZ, Ferreira EC, Loures JP, Chamari K. The hoff circuit test is more specific than an incremental treadmill test to assess endurance with the ball in youth soccer players. *Biol Sport* 33: 263-268, 2016.