

# 博士論文

長距離走選手のコーチングに役立つ簡  
易的指標の検討：ステップ変数やリバ  
ウンドジャンプ指数に着目して

2021年12月

日本体育大学大学院

体育科学研究科 コーチング学専攻

19PDB01 上野弘聖

研究指導教員

杉田正明 教授

博士論文

長距離走選手のコーチングに役立つ簡  
易的指標の検討：ステップ変数やリバ  
ウンドジャンプ指数に着目して

**Consideration of useful simple  
parameters for coaching endurance  
runners: focused on step characteristics  
and jump performance**

2021年12月

日本体育大学大学院

体育科学研究科 コーチング学専攻

19PDB01 上野弘聖

研究指導教員

杉田正明 教授

## 目次

表のタイトル一覧.....	iv
図のタイトル一覧.....	v
<b>第1章 緒言</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景.....	1
1.2 本論文の目的と構成.....	2
1.3 用語の定義.....	3
<b>第2章 文献研究</b> .....	<b>4</b>
2.1 ランニングパフォーマンスとランニングエコノミー.....	4
2.2 ステップ変数と長距離走パフォーマンスとの関係.....	4
2.3 ランニング中の疲労とパフォーマンスへの影響.....	6
2.4 伸長短縮サイクル遂行能力と長距離走パフォーマンスとの関係.....	8
2.5 ステップ変数と伸長短縮サイクル遂行能力の関係.....	9
2.6 ジャンプパフォーマンスのコンディション評価としての活用.....	10
2.7 既存研究の課題.....	11
<b>第3章 長距離走選手における 5000m レース中のステップ変数とレースタイムの関係性     (研究課題1)</b> .....	<b>12</b>
3.1 目的.....	12
3.2 方法.....	12
3.2.1 研究対象者.....	12
3.2.2 データ収集.....	13
3.2.3 データ解析.....	13
3.2.4 統計解析.....	14
3.3 結果.....	14
3.4 考察.....	21
3.5 まとめ.....	22
<b>第4章 長距離走選手における連続リバウンドジャンプパフォーマンスと 5000m レース     中のステップ変数との関係性 (研究課題2)</b> .....	<b>23</b>
4.1 目的.....	23

4.2	方法	23
4.2.1	研究対象者	23
4.2.2	ジャンプパフォーマンス	24
4.2.3	ステップ変数	25
4.2.4	統計解析	26
4.3	結果	26
4.4	考察	33
4.5	まとめ	34
<b>第5章</b>	<b>長距離走選手を対象としたステップ変数とリバウンドジャンプ指数の分析とコーチングへの有用性に関する事例的研究（研究課題3）</b>	<b>36</b>
5.1	目的	36
5.2	方法	36
5.2.1	研究対象者	36
5.2.2	データ収集	39
5.2.3	ジャンプパフォーマンス	39
5.2.4	主観的疲労感	40
5.2.5	走行距離	40
5.2.6	ステップ変数	40
5.3	結果	40
5.3.1.	5000m タイム, ジャンプパフォーマンス, 主観的疲労感, 走行距離の推移	41
5.3.2	個人ごとのジャンプパフォーマンスの推移	43
5.3.3	5000m レース中のステップ変数の推移	50
5.3.4	ジャンプパフォーマンスとステップ変数の推移	61
5.3.5	コーチの所見	66
5.4.	考察	67
5.4.1	ジャンプパフォーマンス	67
5.4.2	5000m タイムトライアル中のステップ変数	67
5.4.3	ジャンプパフォーマンスと5000m タイムトライアル中のステップ変数	68
5.4	まとめ	69
<b>第6章</b>	<b>総合考察</b>	<b>71</b>

6.1	ステップ変数を評価する有用性について.....	71
6.2	リバウンドジャンプ指数を評価する有用性について.....	72
6.3	コーチング現場での応用性について.....	73
6.4	本論文の研究限界.....	74
<b>第7章</b>	<b>結論.....</b>	<b>76</b>
	<b>参考文献.....</b>	<b>78</b>
	<b>研究業績一覧.....</b>	<b>90</b>
	<b>謝辞.....</b>	<b>91</b>

## 表のタイトル一覧

第3章 長距離走選手における5000mレース中のステップ変数とレースタイムの関係性  
(研究課題1)

**Table 3-1.** Mean values of step characteristics in the 5000-m race.

第4章 長距離走選手における連続リバウンドジャンプパフォーマンスと5000mレース  
中のステップ変数との関係性 (研究課題2)

**Table 4-1.** Mean values of jump performance.

第5章 長距離走選手を対象としたステップ変数とリバウンドジャンプ指数の分析と  
コーチングへの有用性に関する事例的研究 (研究課題3)

**Table 5-1.** Physical characteristics and personal best time of 5000-m race of participants.

## 図のタイトル一覧

### 第 3 章 長距離走選手における 5000m レース中のステップ変数とレースタイムの関係性 (研究課題 1)

**Figure 3-1.** Running speed at each lap during the 5000-m race; \*  $P < 0.05$  significantly different from the second lap.

**Figure 3-2.** Step characteristics at each lap during the 5000-m race; \*  $P < 0.05$  significantly different from the second lap.

**Figure 3-3.** The relationship between average step frequency and step length normalized to body height of all laps with 5000-m race time. SF, step frequency; SL, step length; BH, body height.

**Figure 3-4.** The relationships of percent changes in contact time and step length with 5000-m race time. CT, contact time; SL, step length.

### 第 4 章 長距離走選手における連続リバウンドジャンプパフォーマンスと 5000m レース中のステップ変数との関係性 (研究課題 2)

**Figure 4-1.** Running speed at each lap during the 5000-m race. \*,  $P < 0.05$ , significantly different from the second lap.

**Figure 4-2.** Step characteristics at each lap during the 5000-m race. \*,  $P < 0.05$ , significantly different from the second lap.

**Figure 4-3.** Relationship between rebound jump index and average contact time.

**Figure 4-4.** Relationships between rebound jump index and average contact time relative to running speed.

**Figure 4-5.** Correlation coefficients between the rebound jump index and contact time for each lap. The upper graph shows correlation coefficients between the rebound jump index and absolute contact time. The lower graph shows correlation coefficients between the rebound jump index and contact time relative to running speed.

### 第 5 章 長距離走選手を対象としたステップ変数とリバウンドジャンプ指数の分析とコーチングへの有用性に関する事例的研究 (研究課題 3)

**Figure 5-1.** Average values of 5000-m time, RJ index, running distance, CMJ height and subjective fatigue feeling. RJ, rebound jump; CMJ, counter movement jump.

**Figure 5-2.** 5000-m time and RJ index of each runner. RJ, rebound jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-3.** 5000-m time and CMJ height of each runner. CMJ, counter movement jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-4.** RJ index and running distance of each runner. RJ, rebound jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-5.** CMJ height and running distance of each runner. CMJ, counter movement jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-6.** RJ index and subjective fatigue feeling of each runner. RJ, rebound jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-7.** CMJ height and subjective fatigue feeling of each runner. CMJ, counter movement jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-8.** Average step characteristics during 5000-m time trial.

**Figure 5-9.** 5000-m time and step frequency of each runner. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-10.** 5000-m time and step length of each runner. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-11.** 5000-m time and percent change in CT of each runner. CT, contact time; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-12.** 5000-m time and percent change in SF of each runner. SF, step frequency; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-13.** 5000-m time and percent change in SL of each runner. SL, step length; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-14.** Running speed and step characteristics during the 5000-m race of runner A.

**Figure 5-15.** Running speed and step characteristics during the 5000-m race of runner B.

**Figure 5-16.** Running speed and step characteristics during the 5000-m race of runner C.

**Figure 5-17.** Running speed and step characteristics during the 5000-m race of runner D.



**Figure 5-18.** RJ index and average contact time during 5000-m time trial of each runner. RJ, rebound jump. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-19.** Average contact time and running speed at the final lap.

**Figure 5-20.** RJ index and running speed at the final lap of each runner. RJ, rebound jump. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

**Figure 5-21.** RJ index and contact time at the final lap of each runner. RJ, rebound jump. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

# 第1章 緒言

## 1.1 研究背景

昨今、スポーツ科学分野の最先端の知見を長距離走選手の指導やサポートに積極的に取り込み、パフォーマンスの向上を図る取り組みが活発化してきている。その代表例として、2017年に実施されたナイキの **Breaking 2** プロジェクトは、最先端の科学的知見に基づきフルマラソンの2時間切りを目指した。このプロジェクトでは、生理学的分析やバイオメカニクス的分析から最適なレースペースを予測し (Jones et al., 2021)、長距離走選手のパフォーマンスを最大限に引き出すシューズの開発 (Hoogkamer et al., 2018) や栄養学的サポート、コース設計など多方面の科学的サポートを集結させた。そのプロジェクトの結果、非公認の記録ながらエリウド・キプチョゲ選手が2時間26秒のタイムを記録した。さらに、2年後の2019年に行われた **INEOS 1:59 Challenge** において、新たに科学的サポートを集結し再チャレンジした結果、エリウド・キプチョゲ選手が1時間59分40秒のタイムを記録し、人類史上初のマラソン2時間切りを成し遂げた。このような背景から、陸上長距離種目で科学的な知見への関心が高まり、選手個人のパフォーマンス能力を適切に評価し、それを最大限に引き出して強化を行う科学的分析を用いたコーチング法が発達してきている。しかしながら、高度な生理学・バイオメカニクス的な分析を実施するためには、特別な機器や極めて専門的な知見が必要とされるため、**Breaking 2** プロジェクトや **INEOS 1:59 Challenge** で実施された手法を大学や高校の部活動や地域ランニングクラブなどのコーチング現場まで広く一般化することは困難である。したがって、コーチング現場において、簡易的に選手個人のパフォーマンスやコンディションを評価する指標を解明することで、広くコーチング現場で有用な科学的分析法を構築していくことが求められる。

近年、スマートフォンアプリや装着型センサーによって、簡易的なバイオメカニクスの測定が可能となってきた。例えば、装着型の慣性センサーやジャイロセンサーを用いて走行中の加速度および角速度データを計測することで、ランニング中のステップ変数や地面反力データを推定し、傷害リスクが評価できる可能性について報告されている (古川ら, 2017; Kiernan et al., 2018; Reenalda et al., 2016; Vanwanseele et al., 2020; Zrenner et al., 2018)。また、近年のスマートフォンやタブレット端末では、ハイスピード映像の撮影が可能であり、コーチングの現場で活用されている例が報告されている (市原, 2021; 鍵本ら, 2019; 大塚ら, 2020)。例えば、大塚ら (2020) では、高校生を対象としたハードル走の指導にお

いて、タブレット端末を利用しハードリング距離(ハードルを飛び越えた際のステップ長)を分析することで、高い指導効果が得られる可能性について報告している。また、筋パワーや伸長短縮サイクル遂行能力の評価として用いられる垂直跳びや連続リバウンドジャンプなどのジャンプパフォーマンスについても、タブレット端末やスマートフォンを用いることで、ハイスピード動画を撮影し、アプリケーションによって分析することが可能であることが報告されている (Gallardo-Fuentes et al., 2016; Haynes et al., 2019)。このような近年の計測技術の発展により、コーチング現場でも活用できる機器を用いて、ステップ変数やジャンプパフォーマンスの評価を容易に行うことができると推察される。加えて、ステップ変数やジャンプパフォーマンスは、ランニングパフォーマンスの重要な決定要因の一つであるランニングエコノミーに関与する要素である可能性が報告されている (Barens and Kildings, 2015a; Saunders et al., 2004)。これらのことから、長距離走選手のランニング中のステップ変数やジャンプパフォーマンスとパフォーマンスやコンディション状態との関係性に着目することで、トップ選手から一般市民ランナーまで、広くコーチング現場で活用することができる簡易的指標を確立することに寄与すると考えられる。

## 1.2 本論文の目的と構成

本研究は、長距離走選手のステップ変数やジャンプパフォーマンスとレースパフォーマンスやコンディション状態との関係を検討することで、長距離走選手のコーチングに役立つ簡易的指標に関する知見を得ることを目的とした。そこで、この目的を遂行するにあたって、第2章において文献研究から既存研究の課題について記し、以下の3つの研究課題を設定した。第3・4・5章において、以下の研究課題の成果について記す。最後に、第6章において3つの研究課題の結果をもとに総合考察を行い、第7章に本研究の結論を記した。

### 【研究課題1】

長距離走選手における5000mレース中のステップ変数とレースタイムの関係性

### 【研究課題2】

長距離走選手における連続リバウンドジャンプパフォーマンスと5000mレース中のステップ変数との関係性

### 【研究課題3】

長距離走選手を対象としたステップ変数とリバウンドジャンプ指数の分析とコーチングへの有用性に関する事例的研究

#### 1.3 用語の定義

本研究の用語の定義は、以下の通りである。

- 接地時間 (Contact time, CT)

足部が地面に接触している期間の時間を示す。

- 滞空時間 (Flight time, FT)

足部が地面に接触していない期間の時間を示す。

- ステップ (Step)

片側の足の接地から、次の逆側の足の接地までを示す。

- ピッチ (step frequency, SF)

1秒間あたりの歩数を示し、1ステップに要した時間の逆数として算出される。

- ステップ長 (Step length, SL)

最初の接地時の踵から次の接地時の踵までの水平距離。

- 走速度 (Running speed)

ピッチとステップ長の積から算出される値であり、1秒あたりの走行方向の移動距離を示す。

- リバウンドジャンプ指数 (Rebound jump index, RJ index)

リバウンドジャンプ時の跳躍高を接地時間で除した値であり、伸長短縮サイクル遂行能力の指標を示す (Markovic and Mikulic, 2010; Young, 1995; 関子ら, 1993)。

## 第2章 文献研究

### 2.1 ランニングパフォーマンスとランニングエコノミー

ランニングエコノミーは最大下強度で走行中の酸素摂取量と定義され、走の経済性として、どれだけ少ないエネルギー消費で走行することができるかを評価した指標である (Barens and Kildings, 2015a; Daniels, 1985; Saunders et al., 2004). このランニングエコノミーは、5000m や 10000m, マラソンなどの長距離走レースタイムと高い相関関係にあり、高いパフォーマンスレベルの長距離走選手においても、同様に相関関係が認められたと報告されている (Conley and Krahenbuhl, 1980; Morgan et al., 1989; Saunders et al., 2004). また、Jones (1998) は、トップレベルの長距離走選手の最大酸素摂取量やランニングエコノミーを長期間に渡って追跡した。その結果、自己記録が更新された際に、最大酸素摂取量に変化はなかったが、ランニングエコノミーは記録と同様に改善していたことを報告している。さらに、Saltin et al. (1995) は、世界的に極めて高い競技成績を残しているケニア人選手は、他国の選手と最大酸素摂取量や乳酸性作業閾値に違いは認められないが、ランニングエコノミーが特徴的に優れていたことを報告している。これらのことから、ランニングエコノミーがパフォーマンスを決定する重要な要因の1つであると考えられている。

しかしながら、ランニングエコノミーを決定する要因については未だ議論が続いており、その研究分野は多岐に渡る。ランニングエコノミーの大きな特徴の一つとして、心肺機能 (Barens and Kildings, 2015a; Saunders et al., 2004) や深部体温 (Barens and Kildings, 2015a; Saunders et al., 2004), 筋ミトコンドリア量 (Krustrup et al., 2008), 筋線維タイプ (Lundby et al., 2017) などの生理学的要因のみならず、走動作 (Folland et al., 2017; Tartaruga et al., 2012) や筋腱の機械的特徴 (Kubo et al., 2015; Ueno et al., 2018c), 筋・腱・骨の形態学的特徴 (Ueno et al., 2018a; Ueno et al., 2018b; Ueno et al., 2019; Ueno et al., 2021a; Ueno et al., 2021b) などのバイオメカニクスのような要因によってもランニングエコノミーが大きく決定されることである。本研究は、長距離走選手のコーチングにおけるステップ変数とジャンプパフォーマンスの有用性に着目するため、ステップ変数やジャンプパフォーマンスとランニングエコノミーを含むランニングパフォーマンスとの関係性に関する文献を紹介する。

### 2.2 ステップ変数と長距離走パフォーマンスとの関係

ステップ変数とランニングエコノミーとの関係について、多くのラボラトリー研究で検

討がなされている (Folland et al., 2017; Tartaruga et al., 2012; 丹治ら, 2017). Tartaruga et al. (2012) は, ステップ, 運動学, 運動力学, 筋電位変数のバイオメカニクス的特徴の網羅的分析から, 高いピッチと短いステップ長が優れたランニングエコノミーに関与していることを明らかとした. 同様に, Folland et al. (2017) は, 97 名の男女長距離走選手を対象に, ステップ変数や運動学的特徴とランニングエコノミーの関係性を検討した結果, ピッチが高く, 身長で補正したステップ長が短いほどランニングエコノミーが優れている関係性を報告している. このような関係性は, 同一の速度で走行する際に, ピッチを増加させるよりもステップ長を増加させることが, 関節の仕事量を増大させ, エネルギー消費量を高めることに起因していると推察できる (Cavanagh and Williams, 1982; Heiderscheit et al., 2011). このように先行研究の結果は, ピッチが高く, ステップ長が短いほどランニングエコノミーが優れており, 高いランニングパフォーマンスの獲得に有利に働くことを示唆している. しかしながら, Santos-Concero et al. (2014) や Støren et al. (2011) は, 比較的高いパフォーマンスレベルの長距離走選手においては, ピッチやステップ長とランニングエコノミーとの間に有意な相関関係が認められておらず, パフォーマンスレベルの近い同種のグループにおいては, ランニングエコノミーの差を説明する要因にはならないと結論付けた.

接地時間に関しては, ランニングエコノミーとの関係について一致した見解が得られていない. Kyröläinen et al. (2001) や Støren et al. (2011), Tartaruga et al. (2012) は, 接地時間はランニングエコノミーに関与しないことを報告している. 反対に, Santos-Concejero et al. (2014) や Folland et al. (2017) は, 短い接地時間が優れたランニングエコノミーに関与していることを報告している. これらのことから, 接地時間のランニングパフォーマンスへの影響について引き続き検討が必要である.

一般的にランニングエコノミーは, 乳酸性作業閾値よりも遅い最大下強度の速度でランニング中の酸素摂取量を測定することで評価される (Barnes and Kilding, 2015a; 丹治ら, 2017). したがって, 上述したステップ変数とランニングエコノミーとの関係性を報告している先行研究は, 長距離走レース中の走速度よりも遅い走速度条件でのステップ変数とランニングエコノミーとの関係性を検討している. 走速度の増加に伴って, ピッチやステップ長は増大し, 接地時間は短縮する (Brughelli et al., 2011; Nummela et al., 2007; Weyand et al., 2000). したがって, 長距離走レースやレース中の走速度に近い速度でのランニング条件で, ステップ変数とランニングパフォーマンスとの関係性を検討する必要があると考えられる. 実際に Folland et al. (2017) は, ピッチやステップ長がランニングエコノミーに関

与していたが、10000m の競技記録とは同様な関係性は認められなかったことを報告している。さらに、丹治ら (2017) は、ステップ変数とランニングエコノミーの関係性が走速度によって異なることを示しており、とりわけ接地時間は乳酸性作業閾値よりも速い走速度でのみランニングエコノミーと関与していたことを報告している。これらの先行研究の結果は、ステップ変数とランニングパフォーマンスとの関係性を明らかとするために、長距離走レースに相当する走速度でのステップ変数において検討する必要があると考えられる。

いくつかの先行研究において、レース中のステップ変数とレースパフォーマンスとの関係が検討されている。Paavolainen et al. (1999) は、10000m レース中の接地時間が短いほど、走速度が速い相関関係を報告している。同様に Hayes and Caplan (2012) は、800m や 1500m のレースにおいて、接地時間が短いほど走速度が速い相関関係を報告している。加えて、Hasegawa et al. (2007) は、単一のハーフマラソンレースにおいて、接地時間が短いほど、順位が高い相関関係を報告している。これらの先行研究の結果は、短い接地時間で走行することが高いパフォーマンスの発揮に重要であることを示している。さらに、Girard et al. (2013) は、5000m のタイムトライアルにおいて、高いピッチとステップ長の両方が高い走速度に関与していたことを報告している。このことは、高いピッチと短いステップ長がランニングエコノミーに関与していた先行研究の報告 (Folland et al., 2017; Tartaruga et al., 2012; 丹治ら, 2017) と、反する結果を示している。走速度は、ピッチとステップ長の積によって決定される (Brughelli et al., 2011; Weyand et al., 2000)。これらのことを踏まえると、長距離走レースで高い走速度を獲得するためには、ピッチだけではなく、ステップ長も同時に高める必要がある可能性が示唆されている。

### 2.3 ランニング中の疲労とパフォーマンスへの影響

レース中に疲労の影響を最小限に抑えることも、高いレースパフォーマンスの発揮に重要な役割を果たすことが推察される。長距離走種目のレースペースについて調査した先行研究は、レース序盤のオーバーペースは、過度な疲労蓄積に伴うレース終盤でのレースペースの低下のリスクがあるため、一定のレースペースを保つことが高いレースパフォーマンスの発揮に貢献することを報告している (Myrkos et al., 2020; Tucker et al., 2006)。また、Nicol et al. (1991) は、マラソンレース前後に等尺性の膝伸展筋力の測定を実施し、マラソン後の最大筋力と内側広筋や外側広筋の筋活動量が低下していたことを報告している。さ

らに同研究は、等尺性の膝伸展筋持久力の測定において、マラソン後に測定序盤から内側広筋や外側広筋の筋活動量が増加し、測定継続時間が減少したことを報告している。このことは、疲労困憊に至るランニングによって最大努力時の筋活動量が低下することと、同じ筋力を発揮するために高い筋活動が必要となり、エネルギー消費量が増加する可能性が示されている。これらのことから、レース序盤における疲労の蓄積を避けることが、レース全体で高いエネルギー利用効率でのランニングを可能とし、高いレースパフォーマンスの発揮に寄与することが推察される。

5000m や 10000m のレースにおいて、レース序盤に比較し、レース終盤のステップ長が有意に低下していたのに対して、ピッチには有意な変化は認められなかったことが報告されている (Elliot et al., 1981; Nummela et al., 2008)。このことは、同一の速度で走行する際に、ピッチを維持するよりもステップ長を維持することが、関節の仕事量が増大させ、高いエネルギー消費を必要とすることが原因であると推察できる (Cavanagh and Williams, 1982; Heiderscheit et al., 2011)。また、走速度はピッチとステップ長の積によって決定されるため、このようなレース終盤におけるステップ長はレースペースの低下を引き起こすことが予想される。さらに、レースを通した一定のペースでのランニングが高いレースパフォーマンスの発揮に貢献することから (Myrkos et al., 2020; Tucker et al., 2006)、レースを通して高いステップ長を保つことが優れたレースタイムの獲得に重要であると考えられる。しかしながら、レース中のステップ変数の変化とレースパフォーマンスの関係性については明らかにされていない。

長時間のランニング (Rabita et al., 2011; Rabita et al., 2013) や長距離走レース (Bertram et al., 2013; Chan-Roper et al., 2012; Girard et al., 2013; Nummela et al., 2008) において、時間の経過とともに接地時間が延長することが報告されている。これはランニングによって生じた神経筋機能の疲労が原因である可能性が推察される。Nummela et al. (2008) は、5000m のタイムトライアル前後に 20m の短距離走測定を実施し、接地時間の増加している選手ほど下肢筋群 (大腿直筋, 外側広筋, 内側広筋, 大腿二頭筋, 腓腹筋) の Pre-activation が低下している相関関係を報告している。Pre-activation は、伸長短縮サイクルにおいて重要な役割を担っており (Ishikawa and Komi, 2007)、伸長短縮サイクルの機能低下が接地時間の延長を引き起こしている可能性が推察される (伸長短縮サイクルについての詳細は 2.4 に後述する)。これらのことから、接地時間がランニング中の神経筋機能の疲労状態を反映している可能性が推察される。



## 2.4 伸長短縮サイクル遂行能力と長距離走パフォーマンスとの関係

伸長短縮サイクルとは、跳躍の踏切動作や走動作の接地時にみられる、伸長性の力発揮のすぐ直後に短縮性の力発揮が続く運動様式である (Komi, 1984). この運動様式は、接地の直前から筋活動が開始する Pre-activation を行った状態で、外力による伸張性の力発揮を行うことで、筋腱による弾性エネルギーの利用を高める働きがあり、静止状態から収縮性の力発揮を行うよりもより短時間で大きな力を発揮できる特徴を持つ (Komi, 1984; Komi, 2000). そのため、伸長短縮サイクルの遂行能力は、短距離走や跳躍競技などの短時間に大きな力発揮を必要とするダイナミックな競技パフォーマンスに寄与することが報告されている (Dobbs et al., 2015; Kale et al., 2009; Nagahara et al., 2014).

また伸長短縮サイクルは、Pre-activation の働きにより筋が短縮した状態で接地を開始することで、腱が担う仕事を増加し、筋の仕事を減少させる働きがあると考えられている (Ishikawa and Komi, 2007). さらに、筋の短縮量が少なく、より等張性の筋収縮に近いほど、筋力発揮に要するエネルギー消費量が削減される (Biewener and Roberts, 2000; Fletcher et al., 2017; Sano et al., 2014). したがって、伸長短縮サイクルは、筋によるエネルギー消費量を削減するため、ランニングエコノミーを改善する働きを有すると考えられる (Barnes and Kilding, 2015a). これらのことから、瞬発的な力発揮よりも持続的な力発揮が求められる長距離走でも、伸長短縮サイクルが重要な働きを有することが示唆されている.

伸長短縮サイクル遂行能力は、ジャンプやホッピング、バウンディング動作などの伸長短縮サイクル運動を用いるプライメトリックトレーニングによって改善されるが (Paavolainen et al., 1999; Ramírez-Campillo et al., 2014), 近年のレビュー研究において、プライオメトリックトレーニングがランニングパフォーマンスも改善することが明らかとなっている (Balsalobre-Fernández et al., 2016; Barnes and Kilding, 2015b; Blagrove et al., 2018; Ramirez-Campillo et al., 2021). 例えば、Ramirez-Campillo et al. (2021) は、11本の先行研究の結果に基づいたメタ解析から、ジャンプ動作を用いたプライメトリックトレーニングが長距離走のタイムトライアルタイムを短縮することを報告している. これらのことから、プライメトリックトレーニングが伸長短縮サイクル遂行能力を改善し、ランニングパフォーマンスを向上させている可能性が推察される.

伸長短縮サイクル遂行能力は、踏切時間や運動様式の異なる様々なジャンプ動作を用いて評価されている (Young, 1995; Young et al., 1999; 関子ら, 1993). とりわけドロップジャ

ンプや連続リバウンドジャンプにおいて、跳躍高を接地時間で除し、ジャンプ指数として伸長短縮サイクル遂行能力が評価されている (Markovic and Mikulic, 2010; Young, 1995; 図子ら, 1993). このジャンプ指数は、短距離選手や跳躍選手などの瞬発的な力発揮能力が求められる競技選手において、他の競技選手に比較し高い値を示している (Tauchi et al., 2008; 図子ら, 1993). さらに、ジャンプ指数が高いほどスプリントパフォーマンス (岩竹, 2017; Nagahara et al., 2014; Kale et al., 2009) や跳躍パフォーマンス (図子ら, 2017; 図子ら, 2020) が優れている相関関係が認められている. このようにジャンプ指数は、伸長短縮サイクル遂行能力の指標として、瞬発的な競技パフォーマンスの重要な決定要因の一つであることが示されている.

さらに、ジャンプ指数がランニングパフォーマンスに関与する可能性が報告されている. 佐伯 (2006) は、男子長距離走選手において、リバウンドジャンプにおけるジャンプ指数 (リバウンドジャンプ指数) が高いほど、ランニングエコノミーが優れている相関関係を報告している. また、佐伯 (2011) は、同様な傾向が女子長距離走選手においても認められることを報告している. 加えて、図子・平田 (2000) は、長距離走選手における縦断的なリバウンドジャンプ測定からリバウンドジャンプ指数と 5000m のレースタイムの良し悪しが対応関係にある傾向を報告している. このように、ジャンプ指数は、瞬発的な競技パフォーマンスのみならず、ランニングパフォーマンスにも関与する可能性が示されている.

## 2.5 ステップ変数と伸長短縮サイクル遂行能力の関係

いくつかの先行研究は、プライメトリックトレーニングがランニング中のステップ変数に影響を及ぼすことを報告している. Paavolain et al. (1999) は、9週間のプライメトリックトレーニングを含む高強度筋力トレーニングを実施したことで、5000m のレースペースでのランニング中に接地時間が短縮したが、ピッチやステップ長は変化しなかったことを報告している. 同様に、Saunders et al. (2006) は、9週間のプライメトリックトレーニングは、最大下強度 (14, 16, 18 km/h) でのランニング中のピッチに影響を及ぼさなかったことを報告している. 一方、Gómez-Molina et al. (2018) は、8週間のプライメトリックトレーニングを実施したところ、最大下強度 (10~16 km/h) でのランニング中の接地時間に変化はなかったが、ピッチが減少し、ステップ長が増加したことを報告している. また、Lockie et al. (2014) は、球技選手において6週間のプライメトリックトレーニングを

実施したところ、10mのスプリント中のステップ長が増加し、ピッチおよび接地時間は変化しなかったことを報告している。さらに、Giovannelli et al. (2017) は12週間の筋力およびプライメトリックトレーニングによって、最大下強度（8, 10, 12 km/h）でのランニング中の接地時間が増加したことを報告している。このようなプライメトリックトレーニングのステップ変数への影響は、伸長短縮サイクル遂行能力が向上したことが要因の一つであると推察できるが、先行研究間において一致した見解が得られていない。

## 2.6 ジャンプパフォーマンスのコンディション評価としての活用

アスリートのコンディション評価として、カウンタームーブメントジャンプの跳躍高の有用性が示されている。Claudino et al. (2017) は、運動前後でのカウンタームーブメントジャンプ跳躍高の推移を調査した論文に基づきメタ解析を行ったところ、カウンタームーブメントジャンプ跳躍高が疲労や超回復の程度を反映する指標である可能性を報告している。また、カウンタームーブメントジャンプ跳躍高は、筋損傷マーカーである血中クレアチンキナーゼ量と相関関係にあることも報告されており、筋損傷の評価にも活用できる可能性が示されている (Del Coso et al., 2017)。実際に、いくつかの実践的な先行研究において、カウンタームーブメントジャンプ跳躍高が球技選手のコンディション状態を反映していると報告している (Aoki et al., 2017; Ferioli et al., 2018; Rowell et al., 2017)。一方、いくつかの同様な手法を用いた先行研究において、カウンタームーブジャンプ跳躍高がコンディション状態を反映しない可能性を報告しており (Buchheit et al., 2010; Gibson et al., 2016; Malone et al., 2015)、コーチング現場での実践的な研究において一致した見解が得られていない。また、これらの先行研究は、サッカーやラグビー、バスケットボールなどのチームスポーツで実施されたものであり、陸上長距離選手を対象とした検証はなされていない。

長時間のランニングを含む繰り返しの伸長短縮サイクル運動は、伸長短縮サイクル遂行能力を低下させることが報告されている (Komi, 2000; Nicol et al., 2006)。この伸長短縮サイクル遂行能力の低下は、接地直前の Pre-activation や接地直後の筋活動が低下することと、筋活動の低下に遅れて地面反力が急激に低下し、接地時間が延長することが特徴的であり、伸長短縮サイクル疲労と呼ばれている (Komi, 2000; Nicol et al., 2006)。実際に、Avela et al. (1999) は、マラソン前後においてリバウンドジャンプを実施したところ、マラソン後に伸長短縮サイクル疲労が認められたことを報告している。また、図子・平田 (2000) は、いくつかの 5000m レースの前にリバウンドドロップジャンプを実施した結果、5000m のレ

ースタイムとリバウンドドロップジャンプ指数の良し悪しが一致する傾向にあったことを報告しており、リバウンドドロップジャンプ指数が神経筋機能や腱組織の状態を反映している可能性について示唆している。これらのことから、リバウンドジャンプを用いることで、長距離走選手のコンディション状態を評価できる可能性が示唆されているが、先行研究が限られており、リバウンドジャンプの有用性についてさらに調査する必要がある。

## 2.7 既存研究の課題

ここまでに示した文献研究から、下記のように長距離走選手のステップ変数やジャンプパフォーマンスに関する研究の問題点を抽出した。

- ①レース中のステップ変数とレースパフォーマンスとの関係性が不明
- ②ジャンプパフォーマンスとステップ変数の関係性が不明
- ③ジャンプパフォーマンスやステップ変数の評価が長距離走選手のコンディション評価に有用であるかが不明

## 第 3 章 長距離走選手における 5000m レース中のステップ変数とレースタイムの関係性 (研究課題 1)

### 3.1 目的

ランニングパフォーマンスの重要な決定要因の一つであるランニングエコノミーは、ステップ変数の影響を受けることが先行研究において報告されている (Barnes and Kilding, 2015a; Saunders et al., 2004). いくつかの先行研究は高いピッチと短いステップ長が優れたランニングエコノミーに関与していたと報告しているが、これらの検討はレースペースよりも遅い速度でランニング中において検討されたものである (Folland et al., 2017; Tartaruga et al., 2012). しかしながら、走速度はピッチとステップ長の積によって決定されるため、最大努力の長距離走レース中にはステップ長も高める必要があると推察される. またレース中には、ランニングによって蓄積された疲労の影響でステップ変数が変化することが報告されている (Bertram et al., 2013; Chan-Roper et al., 2012; Elliot et al., 1981; Girard et al., 2013; Nummela et al., 2008). 例えば、いくつかの先行研究は 5000m や 10000m のレースにおいて、レース序盤に比較しレース終盤のステップ長が有意に低下していたが、ピッチには有意な変化は認められなかったことを報告している (Elliot et al., 1981; Nummela et al., 2008). このことは、同一の速度で走行する際にピッチを維持するよりもステップ長を維持することが、関節の仕事量が増大させ、高いエネルギー消費を必要とすることが原因であると推察できる (Cavanagh and Williams, 1982; Heiderscheit et al., 2011). したがってレースの後半における疲労によるステップ長の減少は、5000m タイムの低下に関与している可能性があると考えられる. これらのことを踏まえると、レース中の走速度と疲労の影響を考慮し、ステップ変数とランニングパフォーマンスとの関係性について検討する必要がある.

そこで本研究は、5000m レース中においてステップ変数とレースタイムとの関係性を横断的に検討することを目的とした. この目的を遂行するにあたって、レースを通した高いピッチとステップ長に加えて、レース前半から後半にかけてのステップ長の変化率が優れた 5000m タイムに関与すると仮説を立てた.

### 3.2 方法

#### 3.2.1 研究対象者

先行研究 (Girard et al., 2013) の結果に基づき、本研究に必要なサンプルサイズを算出した。効果量を 0.70 (接地時間と走速度の相関係数 (Girard et al., 2013)),  $\alpha$ -level を 0.05,  $\beta$ -level を 0.2 (検定力 0.8) と設定した際に、ステップ変数とパフォーマンスの相関関係を検討するのに必要な対象者数は 11 名以上の対象者が必要であることが算出された。

21 名の日本人男子長距離走選手 (年齢:  $19.9 \pm 1.1$  歳, 身長:  $171.2 \pm 5.2$ cm, 体重:  $57.3 \pm 4.9$ kg) が本研究に参加した。対象者は、日常的に長距離走の専門的なトレーニングを積んでおり、定期的に競技大会に出場していた。また、対象者は筋腱の傷害や神経系、呼吸器系の疾患を有していなかった。全ての対象者に対して、口頭および書面にて実験手順に関する説明をし、本研究に参加することに対して書面に同意を得た。なお、本研究は、日本体育大学研究倫理審査委員会の承認を得た上で実施した (承認番号: 019-H193)。

### 3.2.2 データ収集

本研究は、第 273 回日本体育大学長距離競技会 (2019 年 10 月 6 日) ならび第 274 回日本体育大学長距離競技会 (2019 年 11 月 17 日) において実施した。これらの競技会は、レースの順位よりも個人の自己競技記録を更新することを目的とされた競技会である。対象者は、自己競技記録に基づきレースの組み分けをされた。それぞれの対象者は測定日において 1 度のみ 5000m のレースに参加した。360m から 372.5m 地点の走者を撮影するために、1 台のハイスピードカメラ (DMC-FZ300, パナソニック社製) をホームストレートの内側に設置した。カメラは三脚を用いて固定した。長距離走や中距離走のレースにおいてステップ変数を分析した先行研究 (Hasegawa et al., 2007; Hayes and Caplan, 2012) を参照し、フレームレートを 120Hz に設定した。縦横のアスペクト比は 3m のポールを用いて算出した。

### 3.2.3 データ解析

2 周目から 13 周目 (最終周) の各周回において、2 周期 (連続の 4 歩) を解析対象とした。1 周目は、映像内での選手同士の重なりによって、2 周期の足部を明瞭に解析することができなかったため、解析対象から除外した。接地時間ならび滞空時間は、1 フレームを 0.0083 秒とし、フレーム数から算出した。各周における接地時間および滞空時間の

平均変動係数は、それぞれ  $2.6 \pm 0.7\%$  と  $3.4 \pm 1.0\%$  であった。これらの変動係数は、同様な解析方法で実施された先行研究の値よりも低い値であった (Giovannelli et al., 2017)。ピッチは、接地時間と滞空時間の和の逆数として算出した。ステップ長は、2次元4点実長換算法によって、最初の接地時の踵から次の接地時の踵までの距離として解析を行った。なお、2次元実長換算法は、実際の陸上トラック競技において活用されている分析法である (González-Frutos et al., 2019; Ozaki et al., 2019)。それぞれの走行レーンにおいて、走行方向に 12.5m となるように、4点のキャリブレーションポイントを設置しキャリブレーションを行った。各周におけるステップ長の平均変動係数は、 $1.7 \pm 0.4\%$  であった。さらに、ステップ長は、体形の影響を考慮して、身長において補正を行った (Folland et al., 2017; García-Pinillos et al., 2020)。走速度は、ピッチとステップ長の積として算出した。各周回のステップ変数に加えて、前半 (2~7 周目)、後半 (7~12 周目)、全周回 (2~12 周目) の平均値を算出した。最終周 (13 周目) のステップ変数は、ラストスパートとして独立して統計解析に使用した。これらの測定値に加えて、前半から後半にかけての変化率を算出した。ステップ変数は、映像解析ソフト (Frame DIAS V, DKH 社製) を用いて解析した。

### 3.2.4 統計解析

全ての測定値は平均値 $\pm$ 標準偏差として示した。レース中の周回経過に伴うステップ変数の変化を一元配置分散分析によって検定した。事後検定として、周回ごとのステップ変数の差をテューキーの HSD 検定を用いて検定した。なお、一元配置分散分析の効果量として  $\eta^2$  値を算出した。ステップ変数と 5000m タイムとの関係性はピアソンの積率相関係数によって検定した。統計的有意水準は、 $P < 0.05$  とした。全ての統計解析は IBM SPSS ソフトウェア (version 19.0 ; International Business Machines Corp) を用いて実施した。

## 3.3 結果

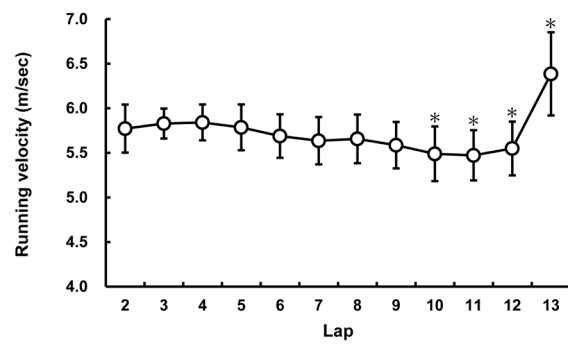
平均 5000m レースタイムは 14 分 52 秒 $\pm$ 27 秒 (13 分 54 秒から 15 分 49 秒) であった。各周回の走速度の変化を Figure 3-1 に示した ( $F = 28.394, P < 0.001$ , and  $\eta^2 = 0.587$ )。

ステップ変数の平均値を Table 3-1 に示した。さらに、各周回のステップ変数の変化を Figure 3-2 に示した (接地時間 :  $F = 12.170, P < 0.001, \eta^2 = 0.378$  ; 滞空時間 :  $F = 1.311, P = 0.220, \eta^2 = 0.062$  ; ピッチ :  $F = 21.685, P < 0.001, \eta^2 = 0.520$  ; ステップ長 :  $F = 10.443, P <$

0.001,  $\eta^2 = 0.343$ ). レース全体の平均ピッチおよび身長で補正したステップ長と 5000m タイムとの間に有意な相関関係が認められた (Figure 3-3).

5000m レース前半においては, 平均ピッチおよび身長で補正したステップ長と 5000m タイムとの間に有意な相関関係が認められた (それぞれ  $r = -0.579, P = 0.006$ ;  $r = -0.488, P = 0.025$ ). 一方, 5000m レース後半においては, 平均接地時間, ピッチ, ステップ長, 身長で補正したステップ長と 5000 m タイムとの間に有意な相関関係が認められた (それぞれ  $r = 0.506, P = 0.019$ ;  $r = -0.615, P = 0.003$ ;  $r = -0.553, P = 0.009$ ;  $r = -0.684, P < 0.001$ ). 最終周においては, ピッチおよび身長で補正したステップ長と 5000m タイムとの間に有意な相関関係が認められた (それぞれ  $r = -0.541, P = 0.011$ ;  $r = -0.506, P = 0.019$ ). さらに, 接地時間とステップ長の変化率と 5000m タイムとの間に有意な相関関係が認められた (Figure 3-4).

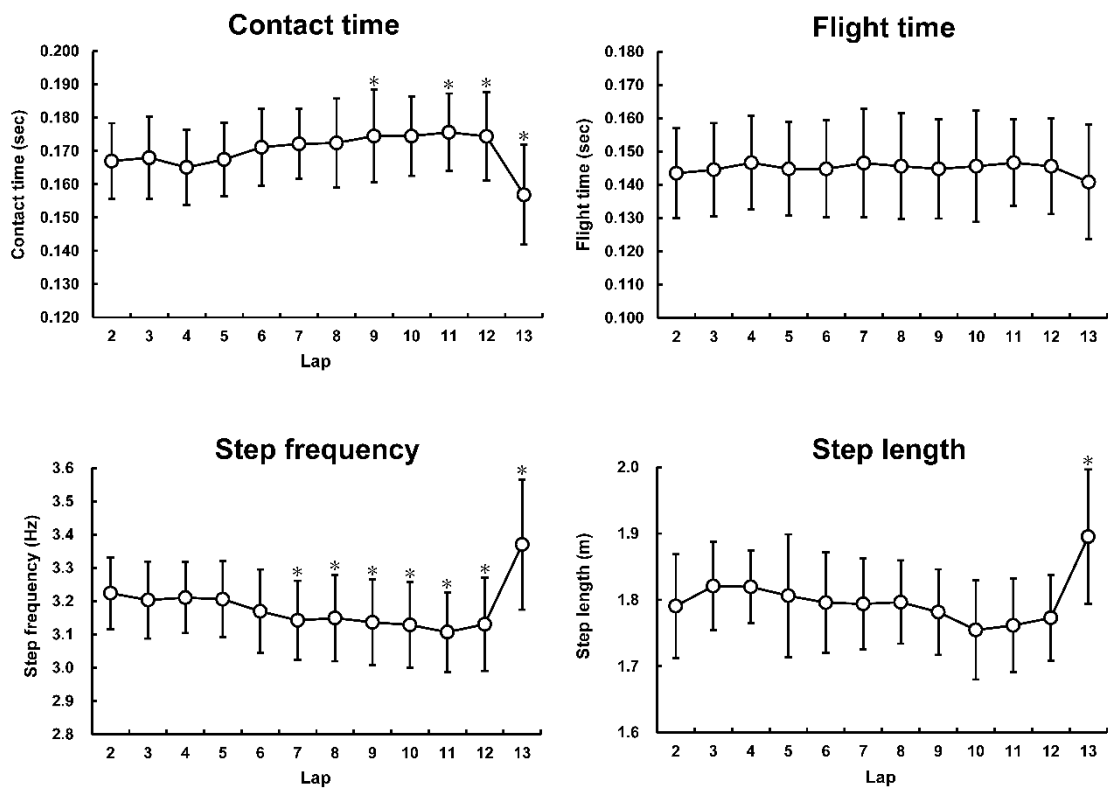




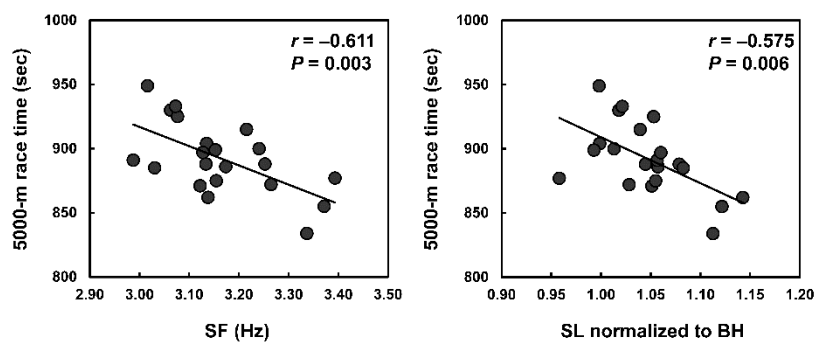
**Table 3-1.** Mean values of step characteristics in the 5000-m race.

	Mean $\pm$ SD	Range
Average of all laps		
CT, sec	0.170 $\pm$ 0.011	0.152 – 0.197
FT, sec	0.145 $\pm$ 0.014	0.112 – 0.179
SF, Hz	3.16 $\pm$ 0.11	2.99 – 3.39
SL, m	1.79 $\pm$ 0.06	1.69 – 1.89
SL normalized to BH	1.05 $\pm$ 0.04	0.96 – 1.14
Average of the first half		
CT, sec	0.168 $\pm$ 0.010	0.150 – 0.193
FT, sec	0.145 $\pm$ 0.014	0.114 – 0.175
SF, Hz	3.19 $\pm$ 0.11	3.04 – 3.42
SL, m	1.80 $\pm$ 0.06	1.68 – 1.92
SL normalized to BH	1.06 $\pm$ 0.05	0.96 – 1.14
Average of the second half		
CT, sec	0.174 $\pm$ 0.012	0.154 – 0.202
FT, sec	0.146 $\pm$ 0.015	0.109 – 0.183
SF, Hz	3.13 $\pm$ 0.12	2.92 – 3.36
SL, m	1.77 $\pm$ 0.06	1.66 – 1.86
SL normalized to BH	1.04 $\pm$ 0.05	0.95 – 1.13
Final lap		
CT, sec	0.158 $\pm$ 0.017	0.133 – 0.198
FT, sec	0.141 $\pm$ 0.018	0.100 – 0.164
SF, Hz	3.37 $\pm$ 0.20	3.04 – 3.81
SL, m	1.90 $\pm$ 0.10	1.69 – 2.11
SL normalized to BH	1.11 $\pm$ 0.06	0.97 – 1.21
Percent change		
CT, %	3.47 $\pm$ 3.75	-3.76 – 10.65
FT, %	0.36 $\pm$ 4.00	-7.48 – 8.95
SF, %	-1.96 $\pm$ 1.63	-4.73 – 0.63
SL, %	-1.70 $\pm$ 2.13	-7.75 – 1.58

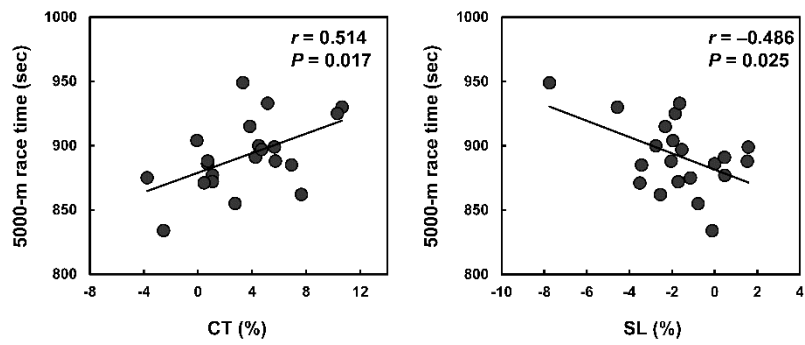
Values are presented as Mean  $\pm$  SD. CT, contact time; FT, flight time; SF, step frequency; SL, step length; BH, body height.



**Figure 3-2.** Step characteristics at each lap during the 5000-m race; \*  $P < 0.05$  significantly different from the second lap.



**Figure 3-3.** The relationship between average step frequency and step length normalized to body height of all laps with 5000-m race time. SF, step frequency; SL, step length; BH, body height.



**Figure 3-4.** The relationships of percent changes in contact time and step length with 5000-m race time. CT, contact time; SL, step length.

### 3.4 考察

本研究は、長距離走選手において 5000m レース中のステップ変数（高いピッチと身長で補正したステップ長）とレースパフォーマンスとの関係性を明らかとした。ピッチやステップ長の増加は、走速度を増加させる（Brughelli et al., 2011; Weyand et al., 2000）。したがって本研究の結果は、高いピッチとステップ長は優れたレースパフォーマンスの獲得に有益な特徴であることが示唆された。さらに本研究は、レース後半において長いステップ長が優れた 5000m タイムに関連していたが、レース前半には同様な関係性は認められないことを明らかとした。加えて、小さな前半から後半にかけてのステップ長の変化率が優れたレースタイムに関与することを明らかとした。したがって本研究は、長距離走選手において、レースを通して高いピッチやステップ長を発揮することに加えて、レース後半におけるステップ長の低下を抑えることが優れたレースパフォーマンスの獲得に寄与することを示した。

5000m レースの後半において、高いステップ長が優れた 5000m タイムに関与していた。さらに、レース前半から後半にかけての小さなステップ長の低下も同様に、優れたレースタイムに関与していた。最大努力での長距離走中において、疲労の発生に対して高い筋力発揮を保つことは、優れたレースパフォーマンスの発揮において重要な役割を果たすことが報告されている（Eliot and Ackland, 1981; Nummela et al., 2008）。また、ピッチに比較してステップ長を維持することは、下肢筋群におけるより高い力発揮が必要とされる

（Hamill et al., 1995; Heiderscheit et al., 2011）。さらに、Hanley et al. (2011) は 5000m レースを通して、ピッチやステップ長は減少していたが、関節角度や接地パターンなどに変化はなかったことを報告している。この先行研究の結果は、運動学的な変化よりも各筋群の持久性がピッチやステップ長を維持するために重要な働きを担うことを示唆している。これらの本研究と先行研究の結果から、疲労の発生に伴うステップ長の減少を抑えることができる長距離走選手が、レースにおいてより高いパフォーマンスを発揮することができることが示された。

ステップ長と同様に、5000m レースの前半においては接地時間とレースタイムとの間に有意な相関関係は認められなかったが、5000m レースの後半において、接地時間が短いほどレースタイムが優れている有意な相関関係が認められた。加えて、5000m レース前半から後半にかけての接地時間の増加が小さいほど、レースパフォーマンスが優れている有意な相関関係が認められた。いくつかの先行研究において、接地時間の増加は神経

筋機能の疲労によって引き起こされることが報告されている (Komi, 2000; Nummela et al., 2008). 伸長短縮サイクルによって, 接地に先立ち下肢筋が収縮し (Pre-activation), 伸長性筋活動局面から短縮性筋活動局面へ急速に切り替えることで接地時間は短縮される (Komi, 2000). Nummela et al. (2008) は, 5000m タイムトライアル中に, 接地時間の増加率と下肢筋 (腓腹筋や外側広筋) の Pre-activation の低下率とが相関関係にあることを報告している. つまり, レース中に蓄積された疲労によって下肢筋の Pre-activation が低下することで, 接地時間が延びることが示されている. これらのことから, 接地時間の増加は神経筋機能の疲労を反映しており, 神経筋機能の疲労を抑え, より短い接地時間を維持することが優れたレースパフォーマンスの発揮に貢献することが示唆されている.

### 3.5 まとめ

本研究では, 5000m レースにおいて, ステップ変数とレースタイムの関係性を検討し, 優れたレースパフォーマンスの発揮に関与するステップ変数を明らかにすることを目的とした. 高いピッチおよび身長で補正したステップ長と優れた 5000m タイムとの間に有意な相関関係が認められた. 加えて, レースの前半から後半にかけてステップ長の減少および接地時間の増加が小さいほど, 5000m タイムが優れている有意な相関関係が認められた. これらの結果は, レース全体を通してピッチやステップ長を高めるだけでなく, レース後半にステップ長を低下させないことが, 高いレースパフォーマンスの発揮に貢献することを示唆している.

## 第 4 章 長距離走選手における連続リバウンドジャンプパフォーマンスと 5000m レース中のステップ変数との関係性 (研究課題 2)

### 4.1 目的

伸長短縮サイクル遂行能力は、伸長性の力発揮のすぐ直後に短縮性の力発揮が続く運動様式において、高い力発揮を可能とする作用を持ち (Komi, 1984)、短距離走や跳躍種目などの瞬発的なパフォーマンス能力に関与すると報告されている (Dobbs et al., 2015; Kale et al., 2009; Nagahara et al., 2014)。また、伸長短縮サイクルは、腱での弾性エネルギーの利用を高める働きを持つため、瞬発的な力発揮よりも持久的な力発揮が求められる長距離走でも優れた伸長短縮サイクル遂行能力が重要な働きを有することが示唆されている

(Barnes and Kilding, 2015a)。また、いくつかのトレーニング介入研究から、伸長短縮サイクル運動を用いるプライメトリックトレーニングが、ランニング中のステップ変数に変化を及ぼすことが報告されている (Giovannelli et al., 2017; Gómez-Molina et al., 2018; Paavolain et al. 1999)。しかしながら、これらのトレーニング介入によるランニング中のステップ変数の変化に一致した見解が認められておらず (本論文 2.5 参照)、伸長短縮サイクル遂行能力のランニング中のステップ変数に与える影響は未だ明らかとなっていない。伸長短縮サイクル遂行能力は、リバウンドジャンプのような反動を用いるジャンプ動作によって簡易的に評価される (Young, 1995; Young et al., 1999; 図子ら, 1993)。

そこで本研究は、長距離走選手においてリバウンドジャンプパフォーマンスと 5000m レース中のステップ変数との関係性を横断的に検討することを目的とした。この目的を遂行するにあたって、優れたリバウンドジャンプ指数は 5000m レース中の短い接地時間に  
関与すると仮説を立てた。

### 4.2 方法

#### 4.2.1 研究対象者

先行研究 (Kale et al., 2009) の結果に基づき、本研究に必要なサンプルサイズを算出した。効果量を 0.57 (リバウンドジャンプ跳躍高と 100m 走中のステップ長との相関係数 (Kale et al., 2009))、 $\alpha$ -level を 0.05、 $\beta$ -level を 0.2 (検定力 0.8) と設定した際に、ステップ変数とパフォーマンスの相関関係を検討するのに必要な対象者数は 19 名以上の対象者が必要であることが算出された。



22名の日本人男子長距離走選手（年齢：20.0±1.1歳，身長：171.7±5.7cm，体重：57.5±4.9kg）が本研究に参加した。対象者は，日常的に長距離走の専門的なトレーニングを積んでおり，定期的に競技大会に出場していた。対象者の日常的なトレーニングプログラムには，専門的なプライメトリックトレーニングは含まれていなかった。また，対象者は筋腱の傷害や神経系，呼吸器系の疾患を有していなかった。全ての対象者に対して，口頭および書面にて実験手順に関する説明をし，本研究に参加することに対して書面に同意を得た。なお本研究は，日本体育大学研究倫理審査委員会の承認を得た上で実施した（承認番号：019-H193）。

#### 4.2.2 ジャンプパフォーマンス

伸長短縮サイクル遂行能力を評価するために，ジャンプパフォーマンスの測定としてカウンタームーブメントジャンプおよび連続リバウンドジャンプを各2回実施した。ジャンプ測定を実施する前に，カウンタームーブメントジャンプと連続リバウンドジャンプに慣れるために十分な練習を実施したのちに本測定を行った。カウンタームーブメントジャンプは，立位姿勢から反動動作を用いた垂直跳びとして実施した。着地時には，できるだけ脚を伸ばして着地するように指示した。2回の測定のうち，もっとも高い跳躍高を代表値とした。連続リバウンドジャンプは，6回連続の垂直リバウンドジャンプとして実施した。連続リバウンドジャンプ時に，できるだけ短い接地時間で高く跳躍するように指示をした。また，着地時にはできるだけ脚を伸ばして着地するように指示した。2回の測定のうち，もっとも高いリバウンドジャンプ指数を代表値とした。なお，両ジャンプ測定において，腕振り動作の使用を許可した。

ジャンプテストは，コンタクトマットシステム（Multi Jump Tester 2, PH-1620D, DKH社製）を用いて実施し，滞空時間と接地時間を計測した。跳躍高は，式（4-1）から算出した（Bosco et al., 1987）。

$$\text{Jump height} = \frac{1}{8}gFT^2 \quad (4-1)$$

ここで， $g$ は重力加速度（9.81 m/s<sup>2</sup>）， $FT$ は滞空時間を表している。

加えてリバウンドジャンプにおいて，跳躍高を接地時間で除すことでリバウンドジャンプ指数を算出した。このリバウンドジャンプ指数は，伸長短縮サイクル遂行能力の評価

方法として様々な種目のアスリートにおいて用いられている (Del Coso et al., 2014; Miura et al., 2010; Tauchi et al., 2008; Young, 1995; Young et al., 1999).

#### 4.2.3 ステップ変数

ステップ変数の測定は、5000m のレースにおいて実施した。対象者は、第 273 回日本体育大学長距離競技会 (2019 年 10 月 6 日)、第 274 回日本体育大学長距離競技会 (2019 年 11 月 17 日)、第 282 回日本体育大学長距離競技会 (2020 年 12 月 6 日) のいずれかにおいて 5000m のレースに参加した。それぞれの対象者は、測定日において 1 回の 5000m レースのみの種目に参加していた。レース前に、ランニングを含むウォーミングアップを各自実施した。360m から 372.5m 地点の走者を撮影するために、1 台のハイスピードカメラ (DMC-FZ300, パナソニック社製) をホームストレートの内側に設置した。カメラは、三脚を用いて固定した。長距離走や中距離走のレースにおいてステップ変数を分析した先行研究 (Hasegawa et al., 2007; Hayes and Caplan, 2012) を参照し、フレームレートを 120Hz に設定した。縦横のアスペクト比を 3m のポールを用いて算出した。

2 周目から 13 周目 (最終周) の各周回において、2 周期 (連続の 4 歩) を解析対象とした。1 周目は、映像内での選手同士の重なりによって、2 周期の足部を明瞭に解析することができなかつたため、解析対象から除外した。接地時間ならび滞空時間は、1 フレームを 0.0083 秒とし、フレーム数から算出した。各周における接地時間および滞空時間の平均変動係数は、それぞれ  $2.6 \pm 0.6\%$  と  $3.4 \pm 0.9\%$  であった。これらの変動係数は、同様な解析方法で実施された先行研究の値よりも低い値であった (Giovannelli et al., 2017)。ピッチは、接地時間と滞空時間の和の逆数として算出した。ステップ長は、2 次元 4 点実長換算法によって、最初の接地時の踵から次の接地時の踵までの距離として解析を行った。なお、2 次元実長換算法は、実際の陸上トラック競技において活用されている分析法である (González-Frutos et al., 2019; Ozaki et al., 2019)。それぞれの走行レーンにおいて、走行方向に 12.5m となるように、4 点のキャリブレーションポイントを設置しキャリブレーションを行った。各周におけるステップ長の平均変動係数は、 $1.6 \pm 0.5\%$  であった。走速度は、ピッチとステップ長の積として算出した。さらに対象者間の走速度の違いを考慮するために、各ステップ変数を走速度で除すことで、走速度に対する相対的なステップ変数を算出した。ステップ変数は、映像解析ソフト (Frame DIAS V, DKH 社製) を用いて解析した。

#### 4.2.4 統計解析

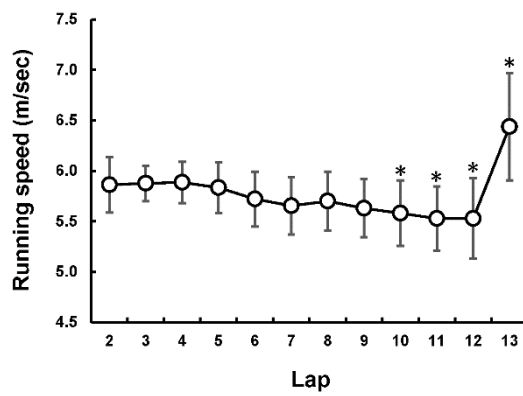
全ての測定値は平均値±標準偏差として示した。レース中の周回経過に伴うステップ変数の変化を、一元配置分散分析によって検定した。事後検定として、周回ごとのステップ変数の差をテューキーの HSD 検定を用いて検定した。なお、一元配置分散分析の効果量として  $\eta^2$  値を算出した。ジャンプパフォーマンスとステップ変数との関係性はピアソンの積率相関係数によって検定した。統計的有意水準は、 $P < 0.05$  とした。全ての統計解析は IBM SPSS ソフトウェア (version 19.0 ; International Business Machines Corp) を用いて実施した。

### 4.3 結果

平均 5000m レースタイムは 14 分 46 秒±31 秒 (13 分 49 秒から 15 分 49 秒) であった。各周回の走速度の変化を Figure 4-1 に示した ( $F = 25.726, P < 0.001$ , and  $\eta^2 = 0.551$ )。

ジャンプ測定の結果を Table 4-1 に示した。また、5000m レース中のステップ変数の推移を Figure 4-2 に示した (接地時間 :  $F = 11.500, P < 0.001, \eta^2 = 0.354$  ; 滞空時間 :  $F = 2.036, P = 0.026, \eta^2 = 0.088$  ; ピッチ :  $F = 24.854, P < 0.001, \eta^2 = 0.542$  ; ステップ長 :  $F = 8.278, P < 0.001, \eta^2 = 0.283$ )。リバウンドジャンプ指数と 5000m レース中の平均接地時間との間に有意な相関関係が認められた (Figure 4-3)。一方、カウンタームーブメントジャンプ跳躍高と 5000m レース中のステップ変数との間に有意な相関関係は認められなかった。接地時間の絶対値と同様に、リバウンドジャンプ指数と走速度に対して相対的な接地時間との間に有意な相関関係が認められた (Figure 4-4)。しかしながら、カウンタームーブメントジャンプ跳躍高と走速度に対して相対的なステップ変数との間に有意な相関関係は認められなかった。

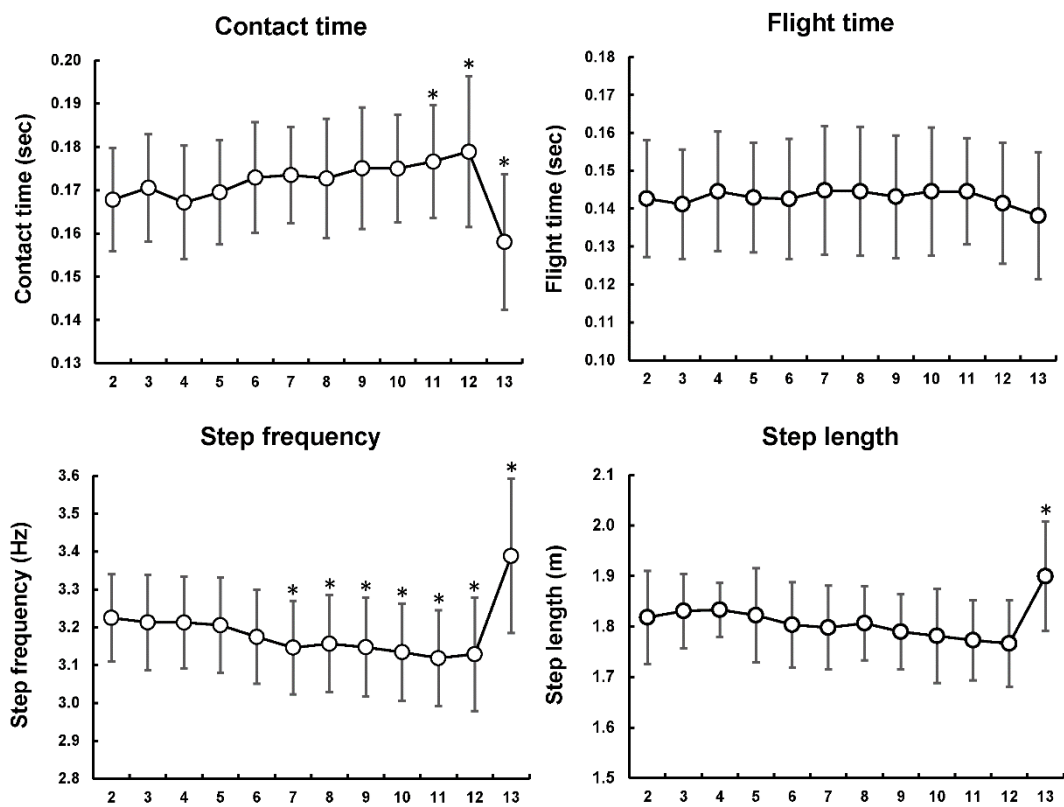
各周回における、リバウンドジャンプ指数と接地時間の相関係数を Figure 4-5 に示した。最終周において、リバウンドジャンプ指数と接地時間との間に最も強い相関関係が認められた。さらに、最終周のみにおいて、リバウンドジャンプ指数と走速度との間に有意な相関関係が認められた ( $r = 0.424, P = 0.049$ )。



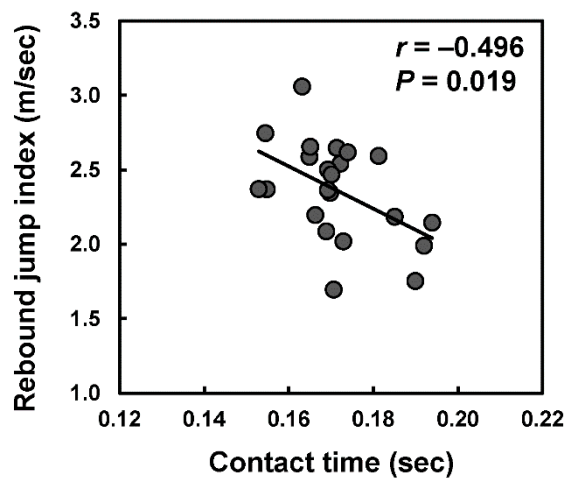
**Figure 4-1.** Running speed at each lap during the 5000-m race. \*,  $P < 0.05$ , significantly different from the second lap.

**Table 4-1.** Mean values of jump performance.

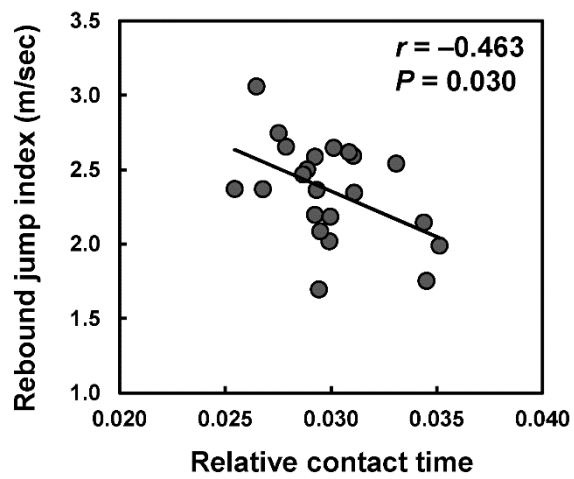
	Mean $\pm$ SD	Range
Rebound jump		
Contact time, sec	0.167 $\pm$ 0.015	0.131 – 0.192
Height, cm	39.20 $\pm$ 4.70	31.86 – 49.86
Index, m/sec	2.36 $\pm$ 0.33	1.69 – 3.06
Counter movement jump		
Height, cm	37.93 $\pm$ 3.33	28.7 – 42.8



**Figure 4-2.** Step characteristics at each lap during the 5000-m race. \*,  $P < 0.05$ , significantly different from the second lap.

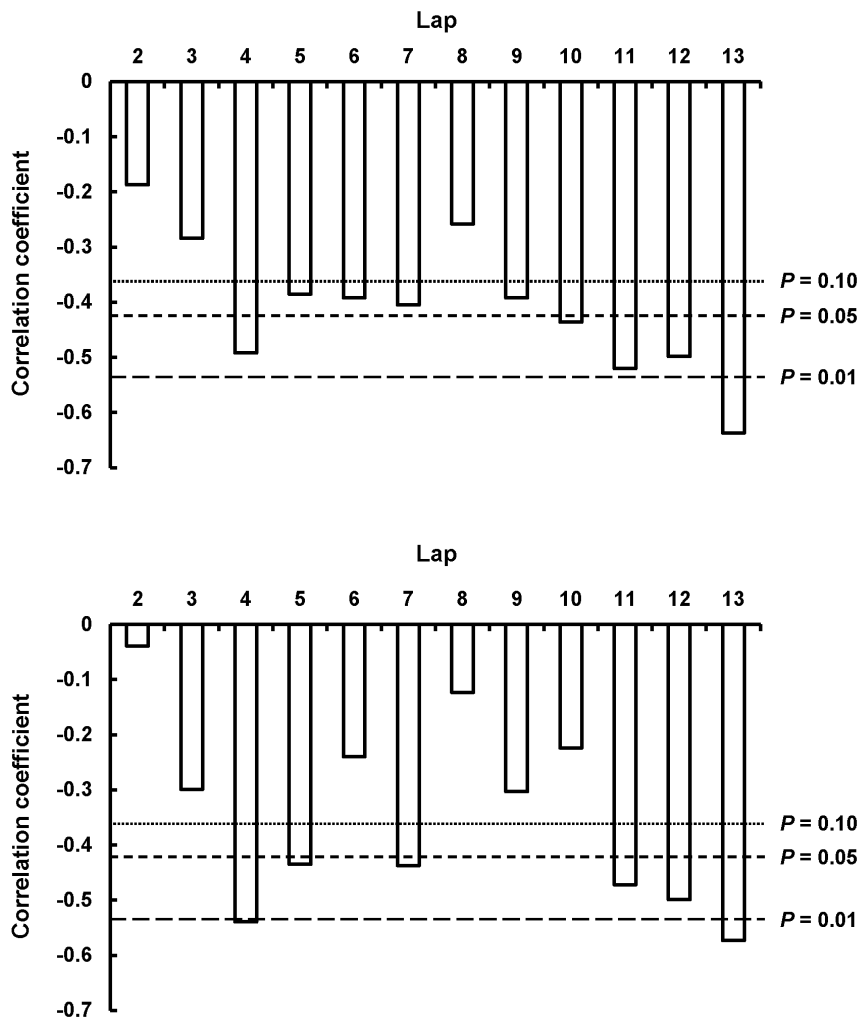


**Figure 4-3.** Relationship between rebound jump index and average contact time.



**Figure 4-4.** Relationships between rebound jump index and average contact time relative to running speed.





**Figure 4-5.** Correlation coefficients between the rebound jump index and contact time for each lap. The upper graph shows correlation coefficients between the rebound jump index and absolute contact time. The lower graph shows correlation coefficients between the rebound jump index and contact time relative to running speed.

#### 4.4 考察

本研究は、長距離走選手において優れたリバウンドジャンプ指数と 5000m レース中の短い接地時間との間に有意な相関関係が認められることを明らかとした。優れた伸長短縮サイクル遂行能力は、弾性エネルギーの利用を促進することで短い時間でより高い筋力発揮を可能とする (Komi, 1984)。また、リバウンドジャンプ指数は、伸長短縮サイクル遂行能力を反映するジャンプ指標である (Young, 1995; Young et al., 1999)。したがって、本研究の結果は、優れた伸長短縮サイクル遂行能力がレース中の接地時間を短縮することを示唆している。本研究は、トレーニングを積んだ長距離走選手において、伸長短縮サイクル遂行能力と長距離走レース中のステップ変数との関係性を明らかとした初めての研究である。

いくつかの先行研究が、伸長短縮サイクル遂行能力を改善するプライメトリックトレーニングを実施することでランニング中のステップ変数が変化することを報告している (Gómez-Molina et al., 2018; Paavolainen et al., 1999)。Paavolainen et al. (1999) は、9 週間のプライメトリックトレーニングを含む高強度筋力トレーニングを実施したことで、5 回連続のバウンディングジャンプパフォーマンスが改善したとともに、5000m のレースペースに近い速度でのランニング中に接地時間が短縮したことを報告している。一方、Gómez-Molina et al. (2018) は、8 週間のプライメトリックトレーニングを実施したところ、最大強度以下でのランニング中の接地時間に変化はなかったことを報告している。しかしながら、Gómez-Molina et al. (2018) では、10 秒間のリバウンドジャンプや 5 回連続バウンディングジャンプのパフォーマンスも改善が認められていない。したがって、伸長短縮サイクル遂行能力の改善が認められていないため、ランニング中の接地時間にも変化が認められていない可能性が推察される。さらに、Kale et al. (2009) は、短距離選手においてリバウンドジャンプパワーが高いほど、100m 走中の接地時間が長い有意な相関関係が認められたことを報告している。これらのことから、伸長短縮サイクル遂行能力は走速度が異なるランニング様式で異なる役割を有する可能性が推察されるが、長距離走レースにおいては、優れた伸長短縮サイクル遂行能力が接地時間を短縮することが示唆された。

各周回におけるリバウンドジャンプ指数と接地時間との相関関係は、最終周 (4960-4972.5m 区間) において、最も高い相関係数が認められた。加えて、最終周では、先行研究で報告されているように、高い走速度 (ラストスパート) が観察された (de Koning et

al., 2011; Tucker et al., 2006). したがってこれらの結果は、5000m レースのラストスパートにおいて、リバウンドジャンプ指数と接地時間の相関関係が強まることを示唆している。さらに、最終周のみにおいて、リバウンドジャンプ指数が高いほど、走速度が高い有意な相関関係が認められた。短い接地時間は、より高い走速度を獲得するために必要とされる (Nummela et al., 2007; Weyand et al., 2000)。それゆえに、リバウンドジャンプ指数が高い長距離走選手は、ラストスパートにおいて接地時間を短縮することで、高い走速度を獲得している可能性が示唆された。優れたラストスパートパフォーマンスは、長距離走レースにおいて高い順位を獲得するために重要な要素の一つであることが報告されている (de Koning et al., 2011; Yamanaka et al., 2019)。本研究の結果は、優れた伸長短縮サイクル遂行能力が、長距離走レースのラストスパートパフォーマンスを改善することを示唆している。

リバウンドジャンプ指数に対して、カウンタームーブメントジャンプの跳躍高は5000m レース中のステップ変数に関与していなかった。カウンタームーブメントジャンプは、様々な競技現場において、神経筋機能を評価する代表的な手法の一つとして活用されている (Claudino et al., 2017; Del Coso et al., 2014; Miura 167 et al., 2010; Niespodziński et al., 2021; Tauchi et al., 2008)。さらに、カウンタームーブメントジャンプは、下肢関節における反動動作を含むため、下肢筋の伸長短縮サイクル遂行能力の評価にも用いられている (Young, 1995; Young et al., 1999)。しかしながら、リバウンドジャンプなどの跳ねる様式のジャンプは速い伸長短縮サイクル運動 (接地時間が 0.25 秒以下) での伸長短縮サイクル遂行能力を評価する一方、カウンタームーブメントジャンプは遅い伸長短縮サイクル運動 (接地時間が 0.25 秒以上) での伸長短縮サイクル遂行能力を評価することに適していることが報告されている (Markovic and Mikulic, 2010)。また、本研究で計測されたレース中の接地時間は、0.133 秒から 0.227 秒の範囲であったため、5000m レース中の伸長短縮サイクル運動を評価するには、カウンタームーブメントジャンプは適していない可能性が推察される。したがって、長距離走選手において、長距離走レース中のステップ変数を評価するには、カウンタームーブメントジャンプよりもリバウンドジャンプを用いることが適切であることが示唆された。

#### 4.5 まとめ

本研究では、リバウンドジャンプ指数と 5000m レース中のステップ変数との関係性を横断的に検討し、伸長短縮サイクル遂行能力のステップ変数への影響を検討することを目的とした。リバウンドジャンプ指数が高いほど、5000m レース中の平均接地時間が短い有意な相関関係が認められた。加えて、レース最終周のラストスパート時においてのみ、高いリバウンドジャンプ指数と高い走速度との間に有意な相関関係が認められた。また、ラストスパート時において、リバウンドジャンプ指数と接地時間の相関関係が最も強かった。これらの結果から、高い伸長短縮サイクル遂行能力がレース中の接地時間を短縮する可能性を示唆された。また、高い伸長短縮サイクル遂行能力は、特にラストスパート能力に影響を及ぼす可能性が示唆された。

## 第5章 長距離走選手を対象としたステップ変数とリバウンドジャンプ指数の分析とコーチングへの有用性に関する事例的研究（研究課題3）

### 5.1 目的

第3章では、5000m レース中のステップ変数とレースタイムとの関係性を検討し、高いピッチおよびステップ長と、接地時間とステップ長の小さな変化率が5000m タイムに関与することを明らかとした。第4章では、リバウンドジャンプ指数とレース中のステップ変数との関係性を検討し、高いリバウンドジャンプ指数がレース中の短い接地時間に関与することを明らかとした。また、高いリバウンドジャンプ指数は、レース最終週のラストスパート時の走速度と相関関係にあり、リバウンドジャンプ指数とレース最終周における接地時間との間で最も強い相関関係を示した。これらの知見は、ステップ変数やリバウンドジャンプ指数の長距離走選手の評価指標としての有用性を示すものであるが、実際にコーチング現場において、有益な情報をもたらすのかを検討する必要がある。

また、カウンタームーブメントジャンプやリバウンドジャンプは、コンディション評価指標としての可能性が示されている (Claudino et al., 2017; 図子・平田, 2000)。しかしながら、カウンタームーブメントジャンプ跳躍高に関しては、コンディション状態を反映しているか一致した見解が得られていない (本論文 2.6 参照)。また、これらの検討は球技選手のコーチング現場における実践的研究が多い。図子・平田 (2000) は、いくつかの5000m レースの前にリバウンドドロップジャンプを実施した結果、5000m のレースタイムとリバウンドジャンプ指数の推移が類似している傾向にあったことを報告しているが、リバウンドジャンプを用いた研究結果や陸上長距離走選手を対象とした研究結果を報告している研究は非常に限られている。

そこで本研究は、長距離走選手を対象に縦断的にジャンプパフォーマンスの評価と5000m レース中のステップ変数を分析することで、コーチングへの有用性を事例的に検討することを目的とした。

### 5.2 方法

#### 5.2.1 研究対象者

4名の男子大学長距離走選手が本研究に参加した。それぞれの身体特徴は、Table 5-1にまとめた。対象者は、大学の陸上競技部において、日常的に長距離走の専門的なトレーニング

ングを積んでおり、定期的に競技大会に出場していた。対象者の日常的なトレーニングプログラムには、専門的なプライメトリックトレーニングは含まれていなかった。また、対象者は、測定期間中において、筋腱の傷害や神経系、呼吸器系の疾患を有していなかった。全ての対象者に対して、口頭および書面にて実験手順に関する説明をし、本研究に参加することに対して書面に同意を得た。

また、得られた研究結果を対象者のコーチ1名に対してフィードバックを行い、コーチの視点からのデータの有用性についてヒアリングを行った。対象とするコーチは、世界陸上競技選手権大会 10000m への出場経験があり、指導者として出雲全日本大学選抜駅伝競走の入賞の実績を有している。ヒアリングをもとに書き起こした文章をコーチに提出し、内容に相違が無い確認を行い、必要があれば内容の修正を依頼した。本研究は、日本体育大学研究倫理審査委員会の承認を得た上で実施した（承認番号：019-H193）。

**Table 5-1.** Physical characteristics and personal best time of 5000-m race of participants.

Participants	Age, year	Body mass, kg	Body height, cm	Personal best time of 5000-m race, sec
A	19	52.7	167.5	916
B	20	59.3	175.6	829
C	18	55.2	167.0	864
D	18	55.1	168.5	861

### 5.2.2 データ収集

2021年4月21日, 2021年6月19日, 2021年8月25日の計3回5000mのタイムトライアルを実施した。これらの測定時期は, コーチのトレーニング計画に基づき, 4月21日を試合準備期, 6月19日を試合期, 8月25日を鍛錬期と定義した。すべてのタイムトライアルは, 全天候型のタータントラックにおいて実施した。5000mのタイムトライアル実施前に, ジャンプおよび主観的疲労感の測定を実施した。また, 5000mのタイムトライアル中のステップ変数の解析を実施した。

### 5.2.3 ジャンプパフォーマンス

伸長短縮サイクル遂行能力を評価するために, ジャンプパフォーマンスの測定としてカウンタームーブメントジャンプおよび連続リバウンドジャンプを各2回実施した。ジャンプ測定を実施する前に, カウンタームーブメントジャンプと連続リバウンドジャンプに慣れるために十分な練習を実施したのちに本測定を行った。カウンタームーブメントジャンプは, 立位姿勢から反動動作を用いた垂直跳びとして実施した。着地時には, できるだけ脚を伸ばして着地するように指示した。2回の測定のうち, もっとも高い跳躍高を代表値とした。連続リバウンドジャンプは, 6回連続の垂直リバウンドジャンプとして実施した。連続リバウンドジャンプ時に, できるだけ短い接地時間で高く跳躍するように指示をした。また, 着地時にはできるだけ脚を伸ばして着地するように指示した。2回の測定のうち, もっとも高いリバウンドジャンプ指数を代表値とした。なお, 両ジャンプ測定において, 腕振り動作の使用を許可した。

ジャンプテストは, コンタクトマットシステム (Multi Jump Tester 2, PH-1620D, DKH社製) を用いて実施し, 滞空時間と接地時間を計測した。跳躍高は, 式(5-1)から算出した (Bosco et al., 1987)。

$$\text{Jump height} = \frac{1}{8}g\text{FT}^2 \quad (5-1)$$

ここで,  $g$  は重力加速度 ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\text{FT}$  は滞空時間を表している。

加えてリバウンドジャンプにおいて, 跳躍高を接地時間で除すことでリバウンドジャンプ指数を算出した。このリバウンドジャンプ指数は, 伸長短縮サイクル遂行能力の評価方法として様々な種目のアスリートにおいて用いられている (Del Coso et al., 2014; Miura et al., 2010; Tauchi et al., 2008; Young, 1995; Young et al., 1999)。



#### 5.2.4 主観的疲労感

主観的疲労度は、先行研究を参照し、100mmのビジュアルアナログスケール（VAS）を用いて評価した（河村ら，2021；新谷ら，2021；Maruyama et al., 2019）。測定では、全く疲労感が無い状態を0mm、疲労感を強く感じる状態を100mmと定義した。

#### 5.2.5 走行距離

対象者が記録している月間走行距離から、それぞれの測定日の月の1日あたりの平均走行距離を代表値とした。

#### 5.2.6 ステップ変数

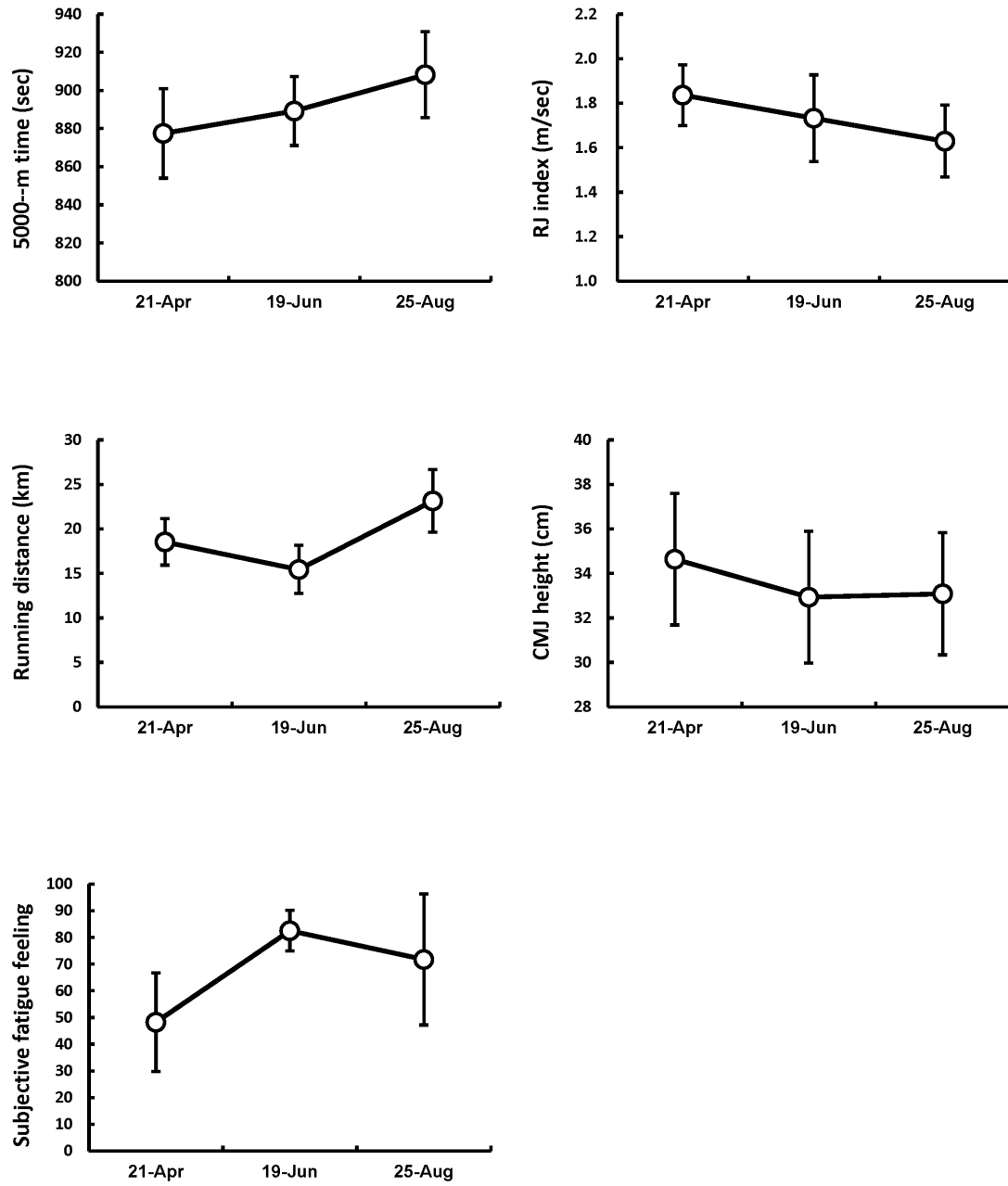
タイムトライアル前に、ランニングを含むウォーミングアップを各自実施した。385mから395m地点の走者を撮影するために、1台のハイスピードカメラ（AX-700, Sony社製）をホームストレートの内側に設置した。カメラは、三脚を用いて固定した。長距離走や中距離走のレースにおいてステップ変数を分析した先行研究（Hasegawa et al., 2007; Hayes and Caplan, 2012）を参照し、フレームレートを120Hzに設定した。縦横のアスペクト比を3mのポールを用いて算出した。

1周目から13周目（最終周）の各周回において、2周期（連続の4歩）を解析対象とした。接地時間ならび滞空時間は、1フレームを0.0083秒とし、フレーム数から算出した。ピッチは、接地時間と滞空時間の和の逆数として算出した。ステップ長は、2次元4点実長換算法によって、最初の接地時の踵から次の接地時の踵までの距離として解析を行った。それぞれの走行レーンにおいて、走行方向に10.0mとなるように、4点のキャリブレーションポイントを設置しキャリブレーションを行った。走速度は、ピッチとステップ長の積として算出した。さらに、各周回のステップ変数に加えて、前半（1～7周目）、後半（7～12周目）、全周回（1～12周目）の平均値を算出した。最終周（13周目）のステップ変数は、ラストスパートとして定義した。これらの測定値に加えて、前半から後半にかけての変化率を算出した。ステップ変数は、映像解析ソフト（Frame DIAS V, DKH社製）を用いて解析した。

### 5.3 結果

### 5.3.1. 5000m タイム, ジャンプパフォーマンス, 主観的疲労感, 走行距離の推移

期間中の測定値の推移を Figure 5-1 にまとめた。1 日の平均走行距離は, 鍛錬期で最も高値を示し, 試合期で低値を示した。5000m タイムは, 試合準備期で最も優れており, 鍛錬期で最も劣っていた。リバウンドジャンプ指数は, 5000m タイムと同様な傾向で, 試合準備期で最も高値を示し, 鍛錬期で最も低値を示した。カウンタームーブメントジャンプ跳躍高は, 試合準備期で最も高値を示し, 試合期と鍛錬期では同程度の値を示した。主観的疲労感は, 試合準備期で最も低値を示し, 試合期で最も高値を示した。



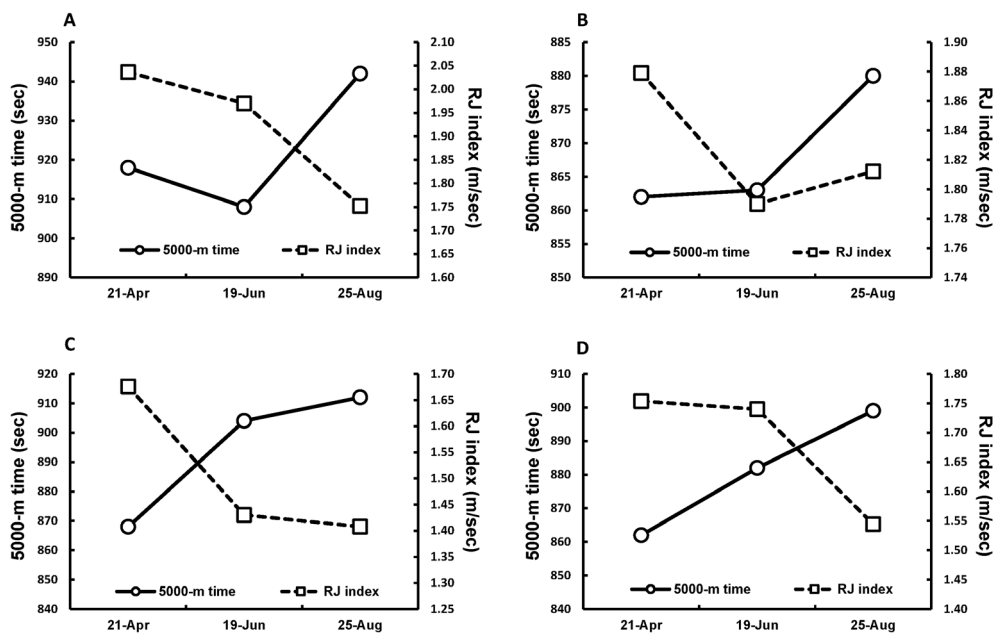
**Figure 5-1.** Average values of 5000-m time, RJ index, running distance, CMJ height and subjective fatigue feeling. RJ, rebound jump; CMJ, counter movement jump.

### 5.3.2 個人ごとのジャンプパフォーマンスの推移

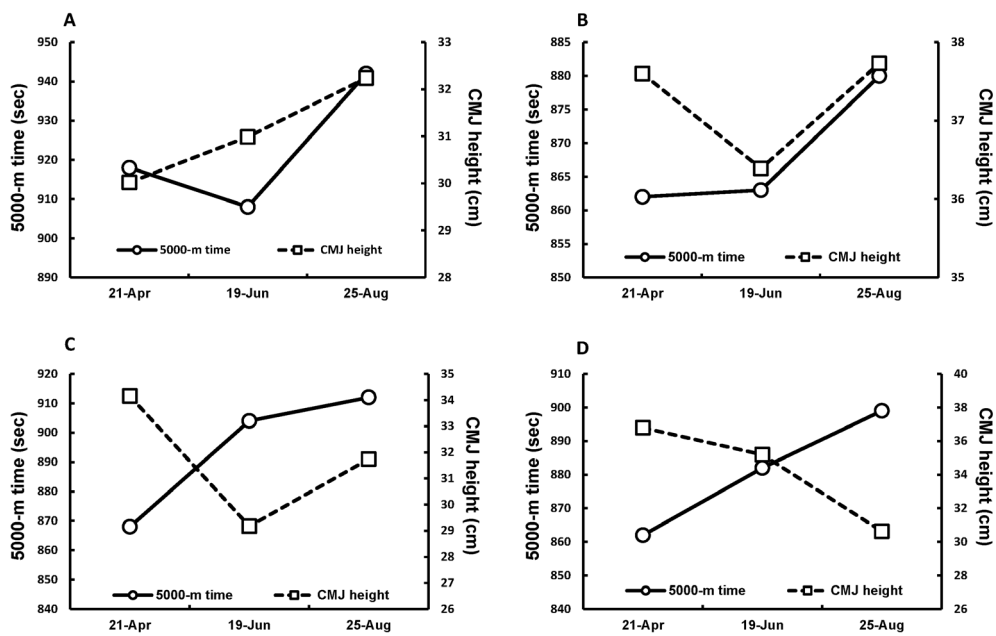
4選手において、リバウンドジャンプ指数が高いほど、5000mタイムが優れている変化パターンを示していた (Figure 5-2)。カウタームーブメントジャンプ跳躍高は、選手 C・Dにおいて、カウタームーブメントジャンプ跳躍高が高いほど、5000mタイムが優れている変化パターンを示していた (Figure 5-3)。一方、選手 A・Bにおいては、カウタームーブメントジャンプ跳躍高と5000mタイムの変化パターンに対応関係が見られないが、カウタームーブメントジャンプ跳躍高が最も高値を示した鍛錬期において、5000mタイムが最も低かった。

4選手ともに、試合準備期に比較し走行距離が最も少ない試合期において、リバウンドジャンプ指数が低値を示している傾向にあった (Figure 5-4)。また、選手 A・Cにおいて、鍛錬期に急激に走行距離が増加しており、リバウンドジャンプ指数も3期間で最も低値を示していた。一方、カウタームーブメントジャンプ跳躍高と走行距離との間には特徴的な対応関係が見られなかった (Figure 5-5)。加えて、選手 A・Cにおいて、急激に走行距離が増加している鍛錬期において、3期間で最も低値を示していなかった。

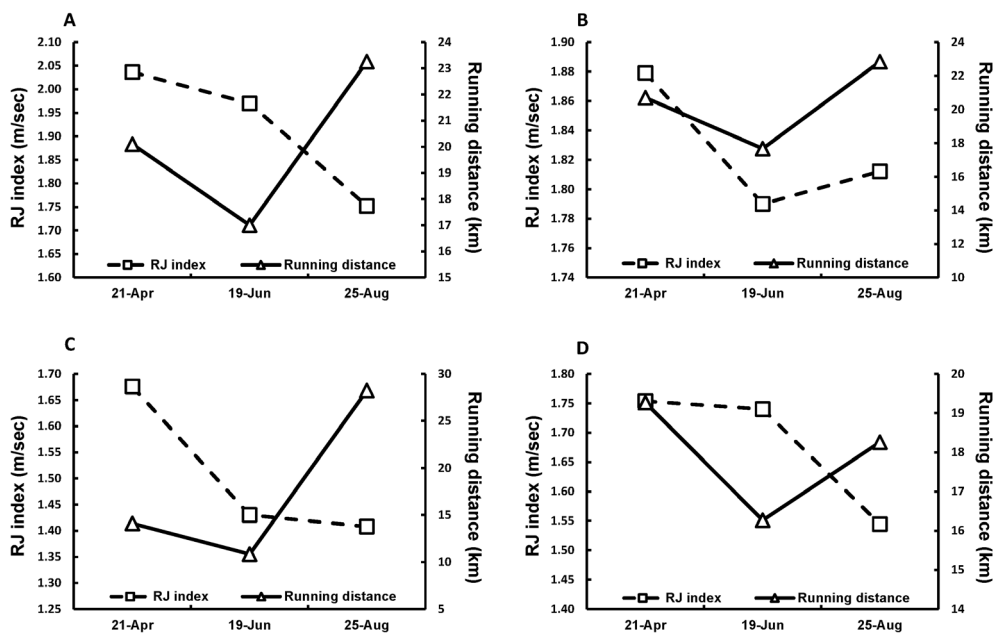
選手 A・B・Cにおいて、主観的疲労感が高いほど、リバウンドジャンプ指数が低くなる傾向が見られた (Figure 5-6)。選手 Dに関しては、鍛錬期において大きく主観的疲労感が低下しているが、リバウンドジャンプ指数も低下していた。一方、選手 B・Cにおいて、同様に主観的疲労感が高いほど、カウタームーブメントジャンプ跳躍高が低くなる傾向が見られたが、選手 Aにおいては、主観的疲労感が高いほどカウタームーブメントジャンプ跳躍高が高くなる傾向が見られた (Figure 5-7)。選手 Dに関しては、鍛錬期において大きく主観的疲労感が低下しているが、カウタームーブメントジャンプ跳躍高も低下していた。



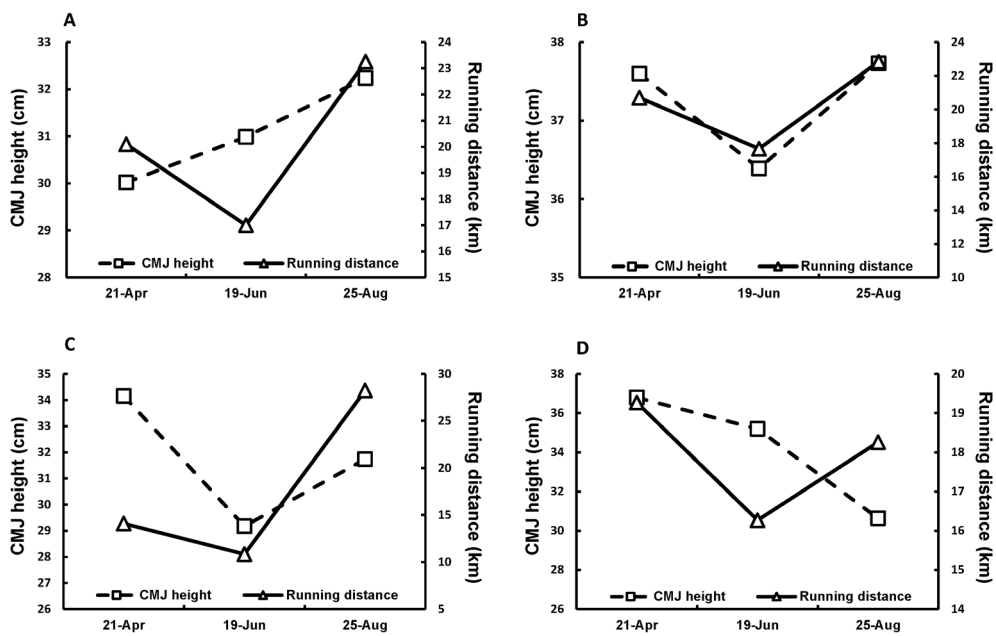
**Figure 5-2.** 5000-m time and RJ index of each runner. RJ, rebound jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.



**Figure 5-3.** 5000-m time and CMJ height of each runner. CMJ, counter movement jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

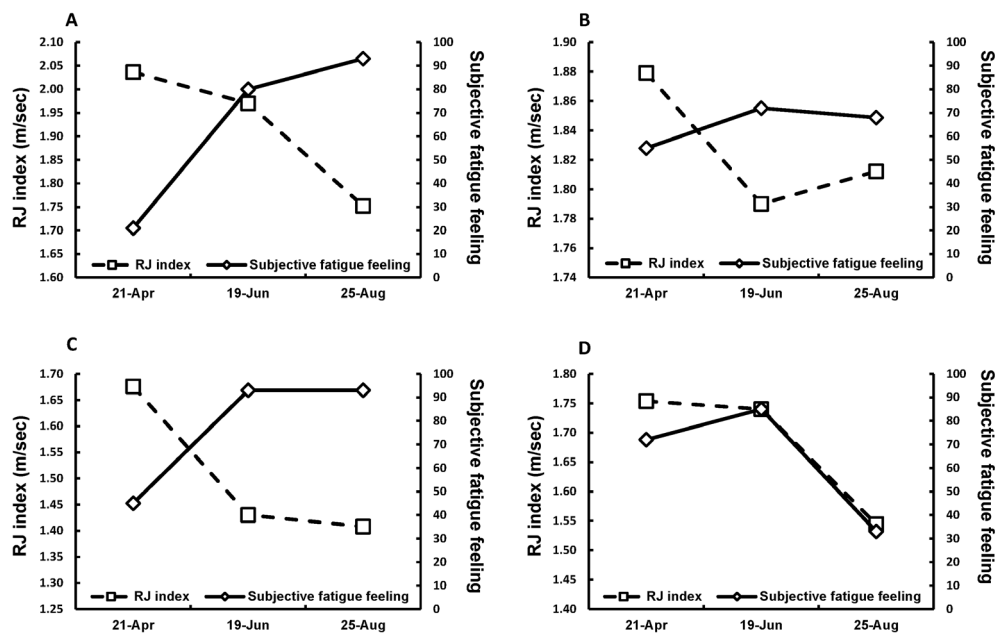


**Figure 5-4.** RJ index and running distance of each runner. RJ, rebound jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

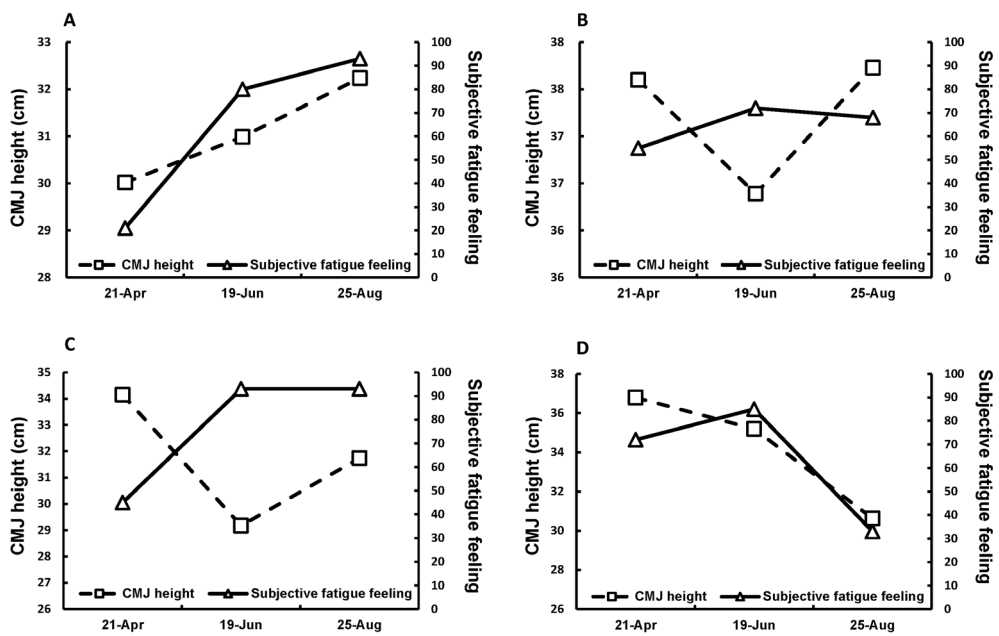


**Figure 5-5.** CMJ height and running distance of each runner. CMJ, counter movement jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.





**Figure 5-6.** RJ index and subjective fatigue feeling of each runner. RJ, rebound jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.



**Figure 5-7.** CMJ height and subjective fatigue feeling of each runner. CMJ, counter movement jump; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

### 5.3.3 5000m レース中のステップ変数の推移

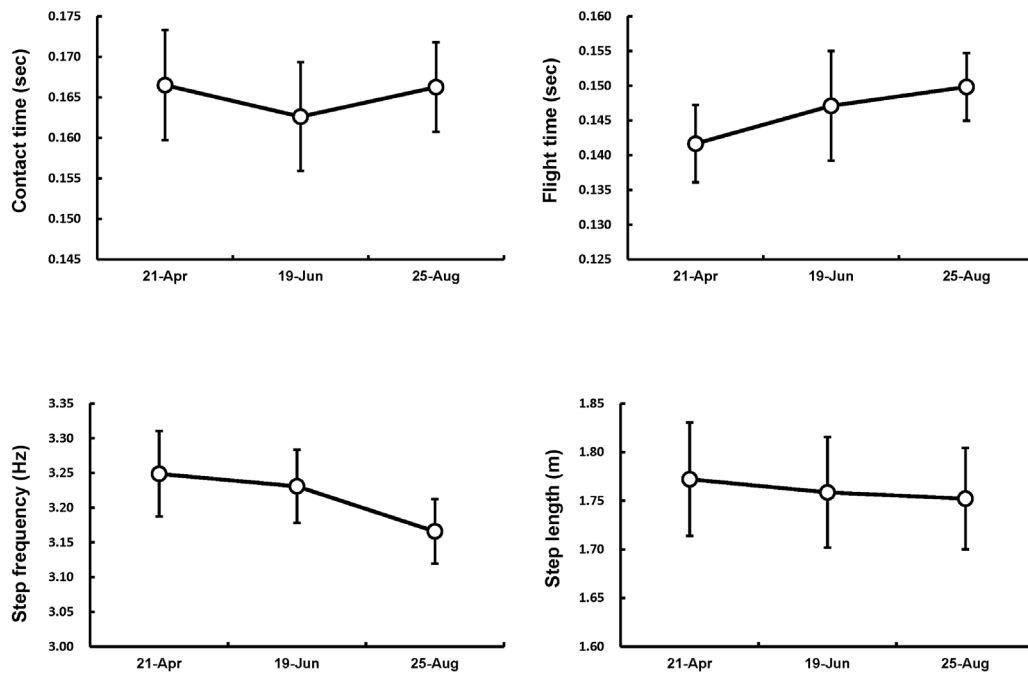
期間中の測定値の推移を Figure 5-8 にまとめた。接地時間は、試合期において最も短い値を示した。滞空時間は、鍛錬期において最も長い値を示した。ピッチおよびステップ長は、鍛錬期において最も低い値を示した。

4 選手において、鍛錬期においてピッチが低下しており、ピッチが低いほど、5000m タイムが低い傾向が見られた (Figure 5-9)。また、選手 B・C・D は、最もピッチが高い測定日において、5000m タイムが最も優れていた。

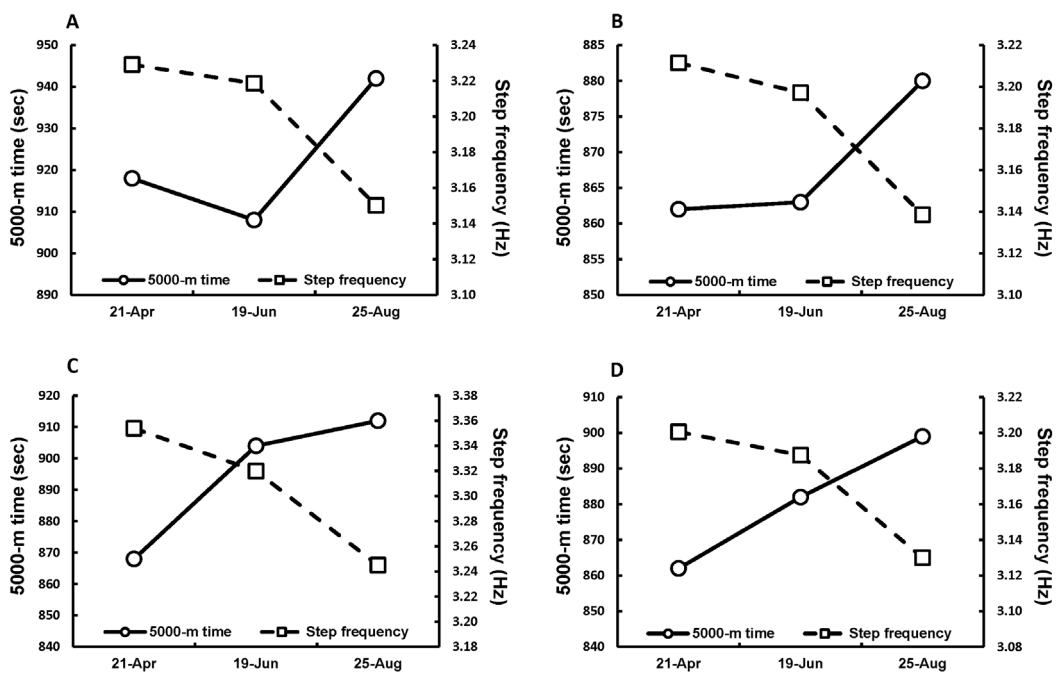
選手 A・B において、鍛錬期においてステップ長が低下しており、ステップ長が低いほど、5000m タイムが低い傾向が見られた (Figure 5-10)。選手 A・B・C は、最もステップ長が高い測定日において、5000m タイムが最も優れていた。

選手 A・B・C において、接地時間の変化率が小さいほど、5000m タイムが優れている傾向が見られた (Figure 5-11)。選手 D においては、最も 5000m タイムが低かった鍛錬期において、最も小さな接地時間の変化率を示していた。

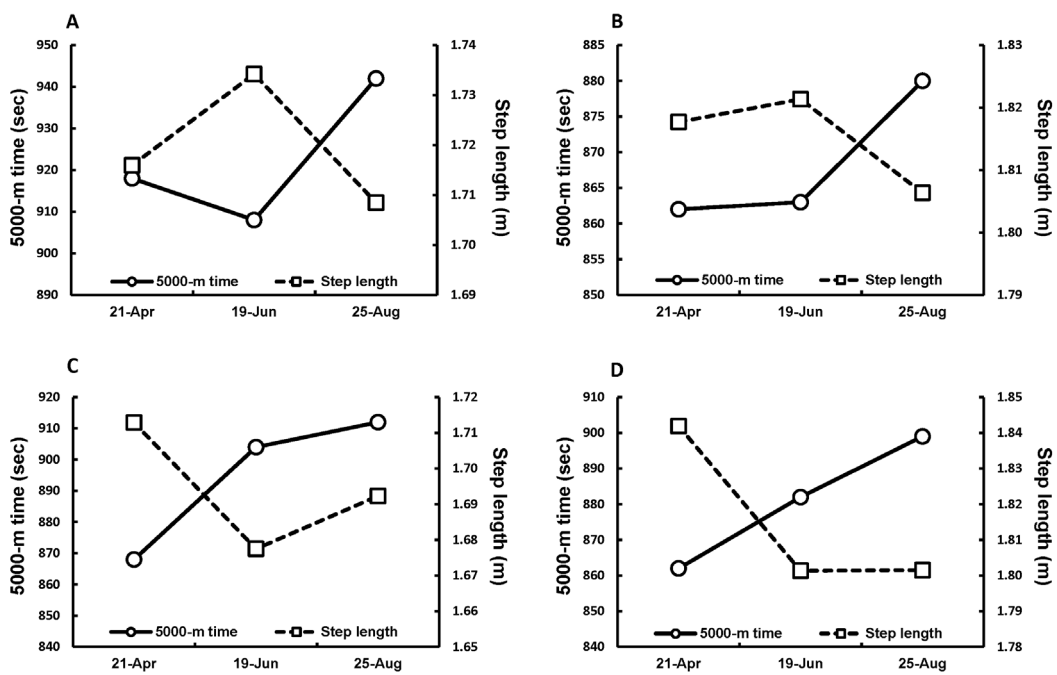
選手 A・C において、ピッチおよびステップ長の変化が抑えられているほど、5000m タイムが優れている傾向が見られた (Figure 5-12, 5-13)。選手 D では、同様な傾向は観察できなかったが、5000m タイムが最も優れている測定日において、ピッチの変化が最も抑えられており、5000m タイムが最も劣っていた測定日において、ステップ長の変化率が最も大きかった。選手 B においては、ピッチの変化率とステップ長の変化率が反対の推移をしている特徴が見られた。また、4 選手の 5000m タイムトライアル中のステップ変数の推移をそれぞれ Figure 5-13, 5-14, 5-15, 5-16 に示した。



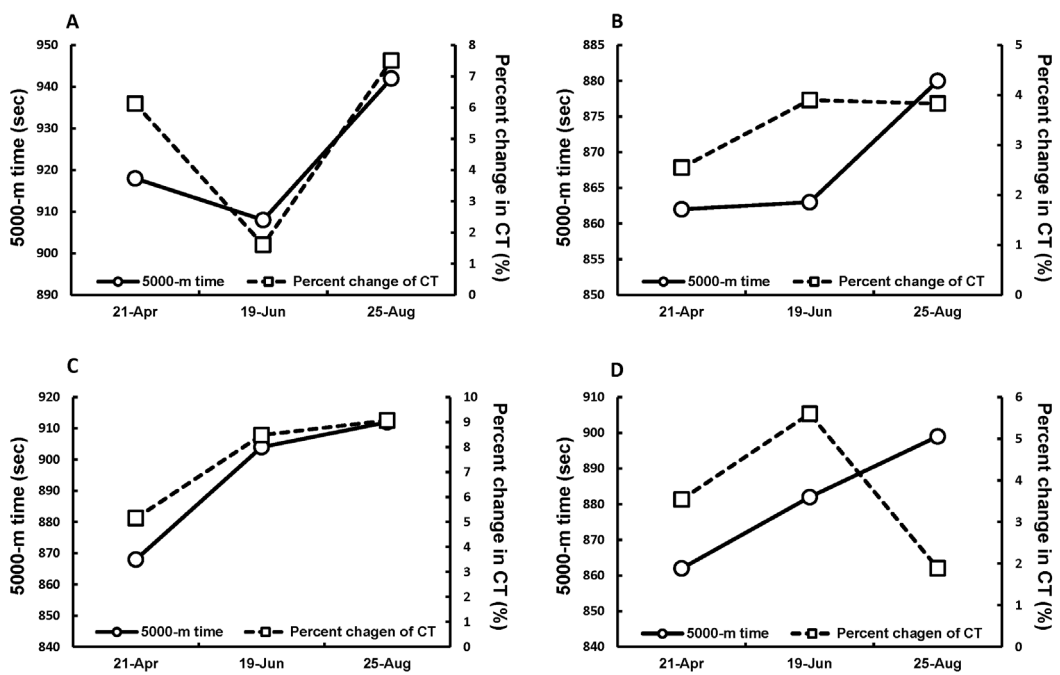
**Figure 5-8.** Average step characteristics during 5000-m time trial.



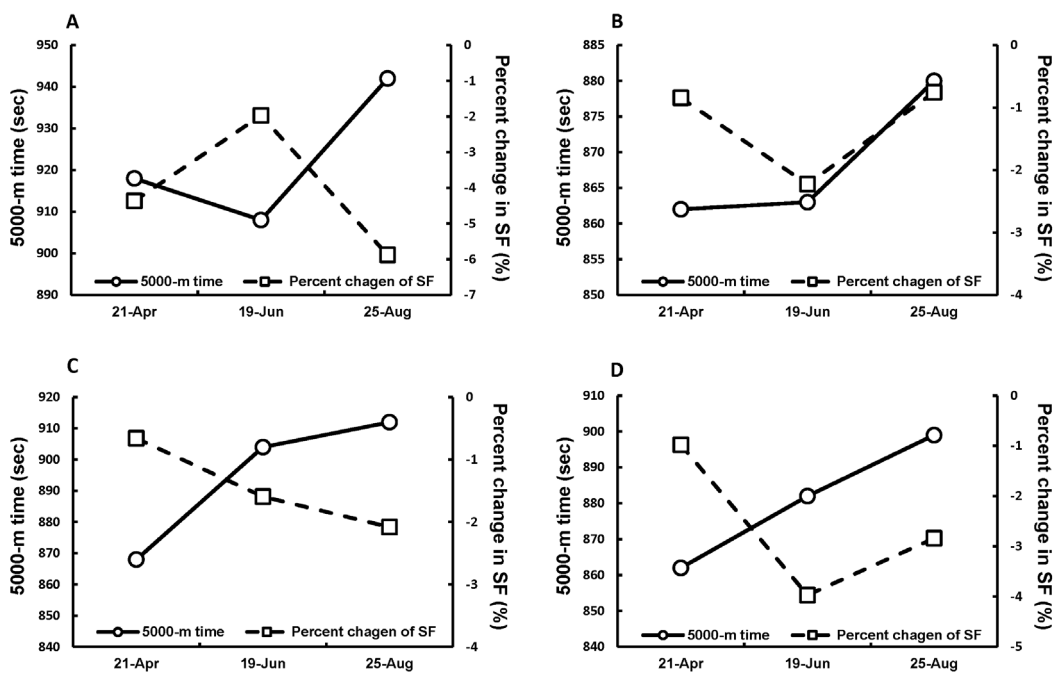
**Figure 5-9.** 5000-m time and step frequency of each runner. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.



**Figure 5-10.** 5000-m time and step length of each runner. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

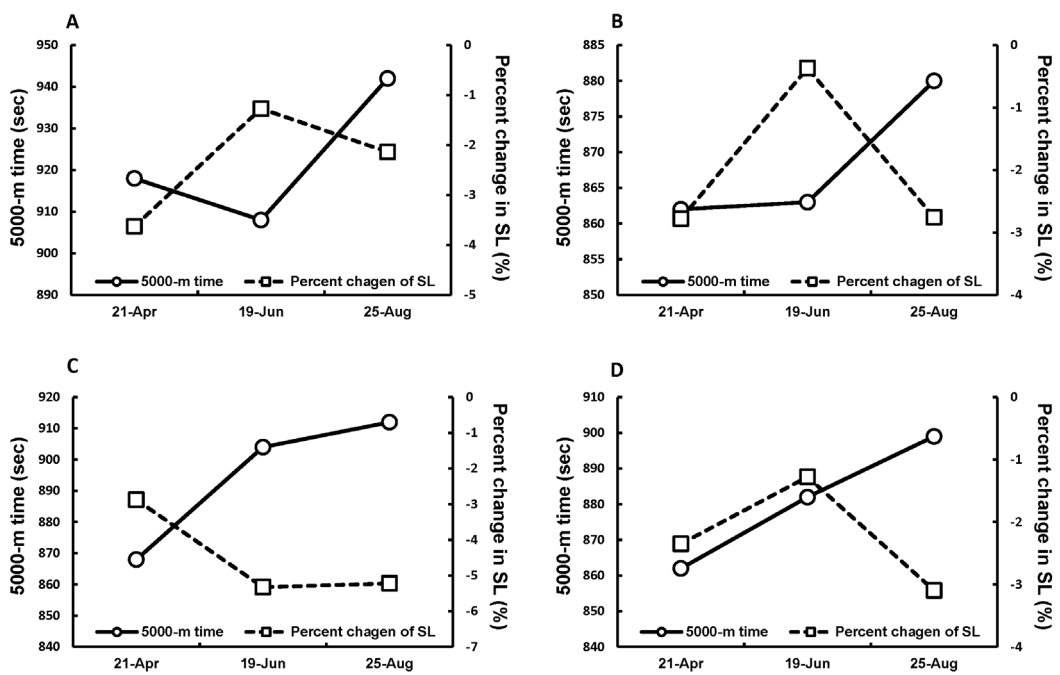


**Figure 5-11.** 5000-m time and present change in CT of each runner. CT, contact time; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.



**Figure 5-12.** 5000-m time and percent change in SF of each runner. SF, step frequency; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.





**Figure 5-13.** 5000-m time and percent change in SL of each runner. SL, step length; A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

A

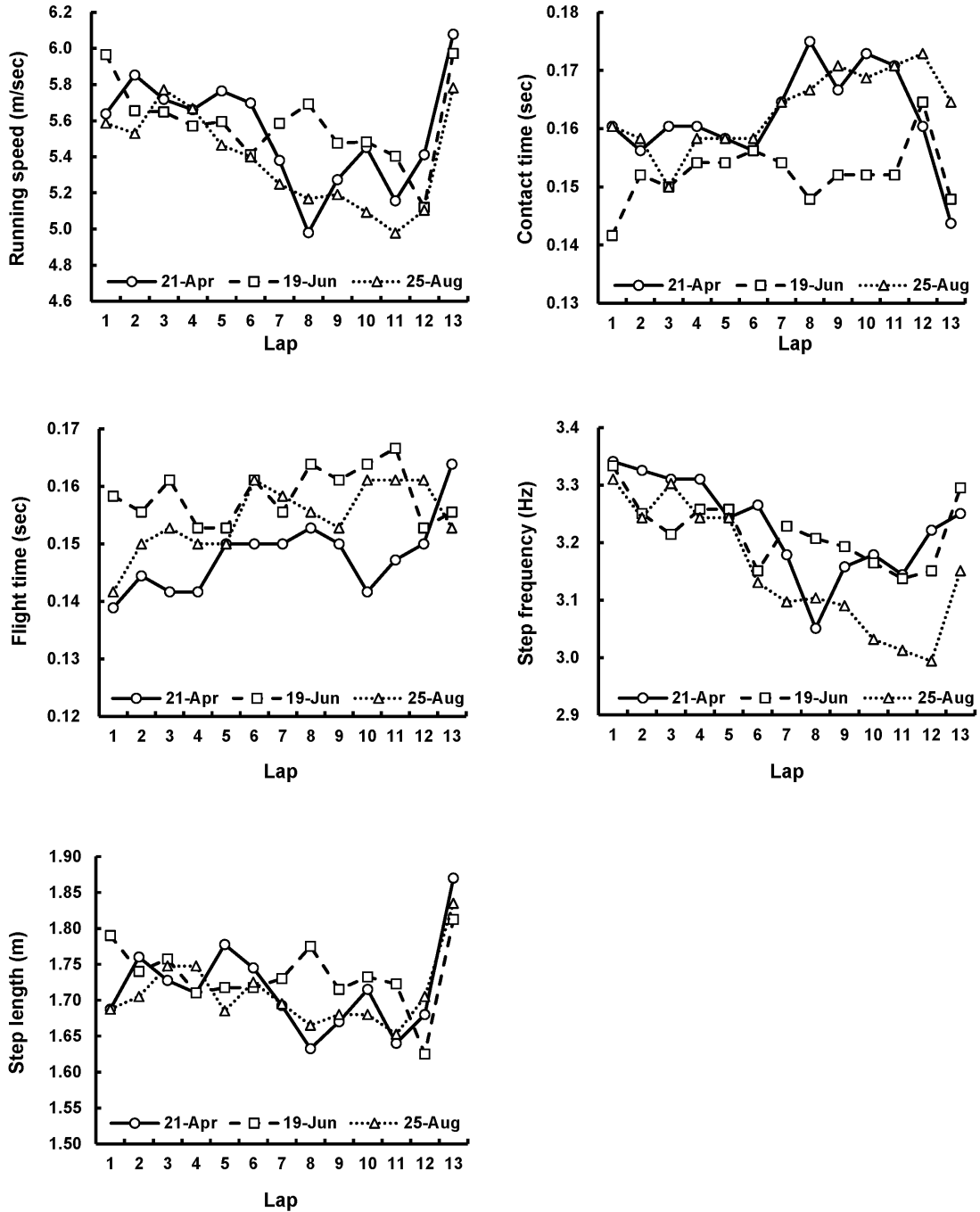


Figure 5-14. Running speed and step characteristics during the 5000-m race of runner A.

B

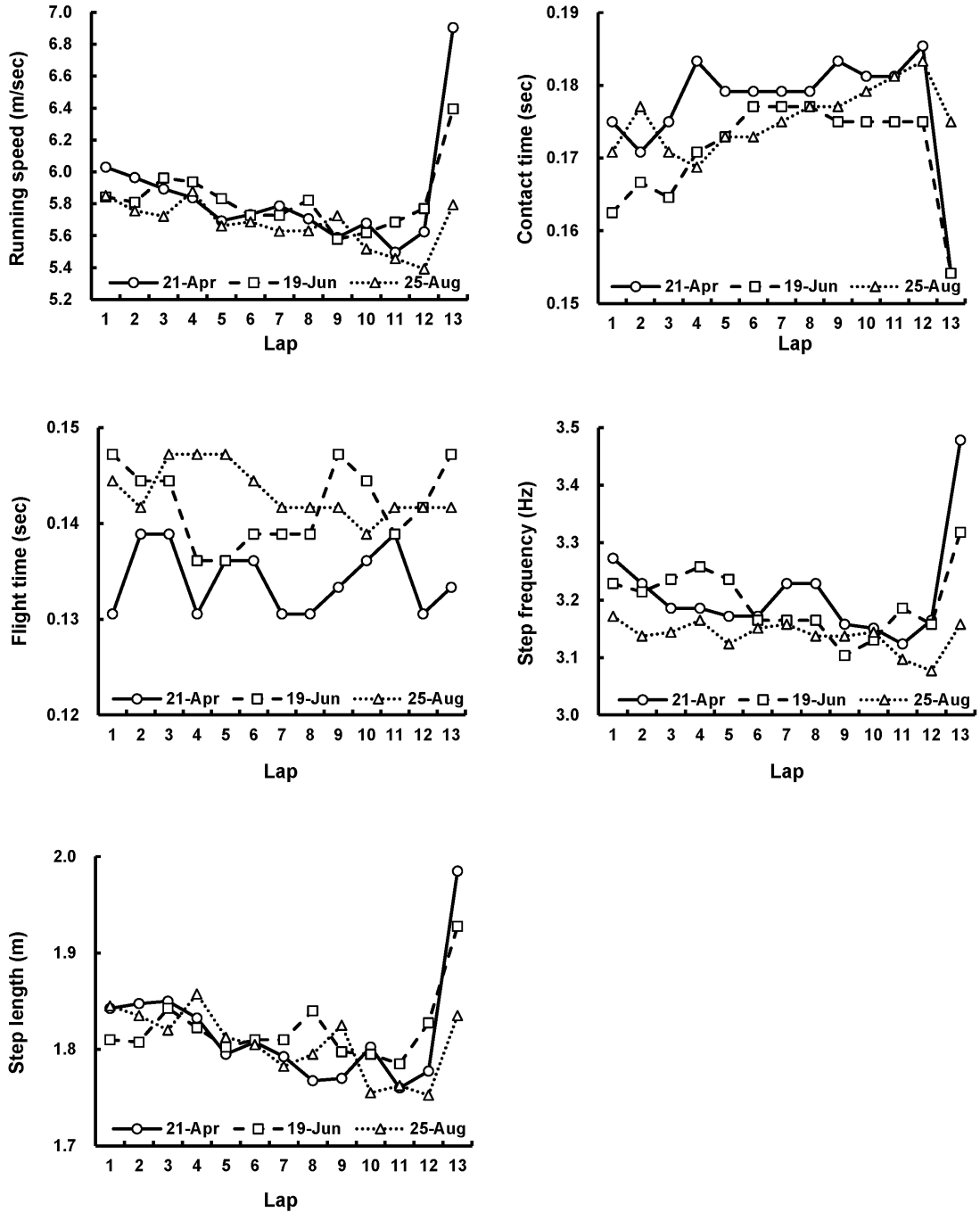


Figure 5-15. Running speed and step characteristics during the 5000-m race of runner B.

C

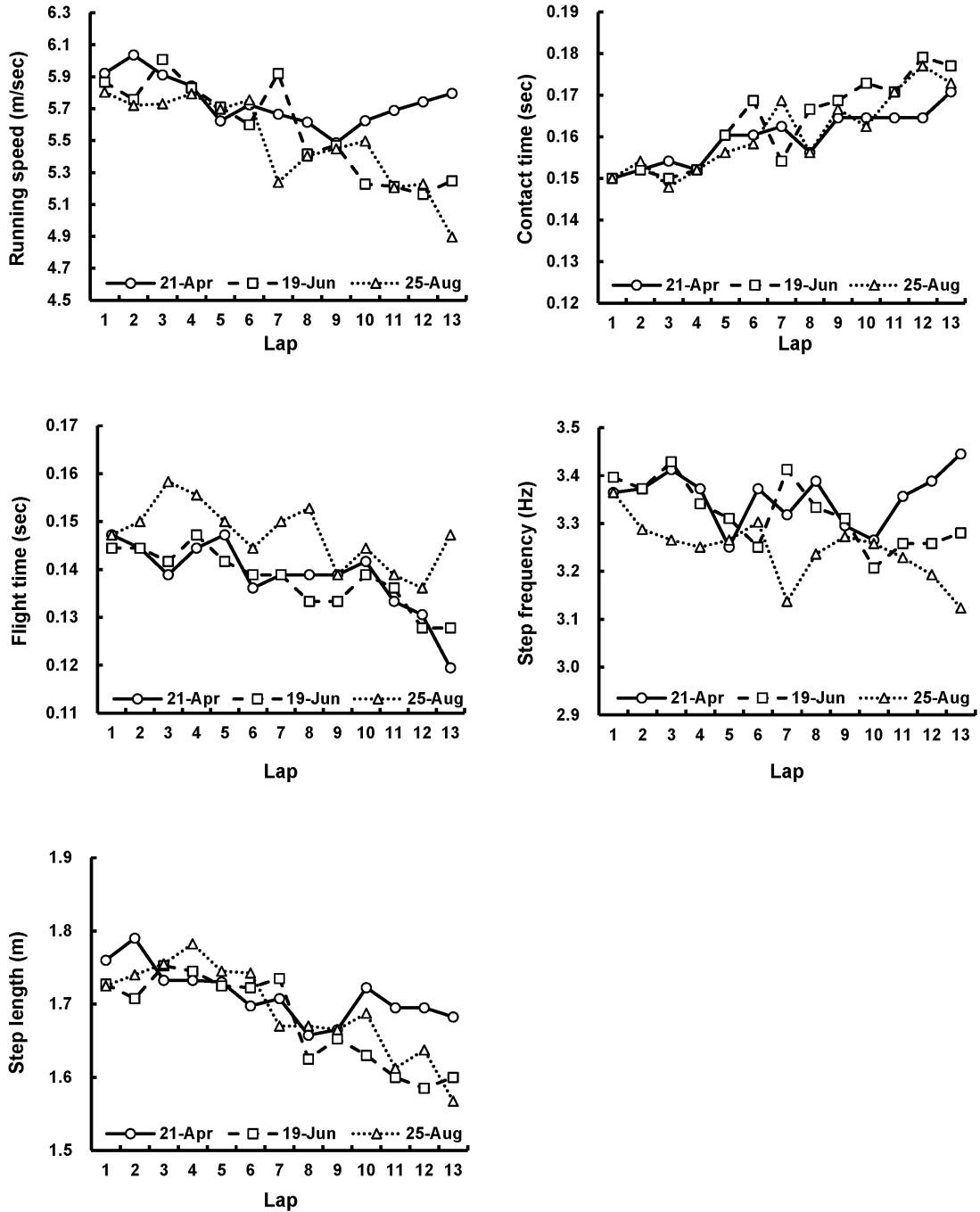


Figure 5-16. Running speed and step characteristics during the 5000-m race of runner C.

D

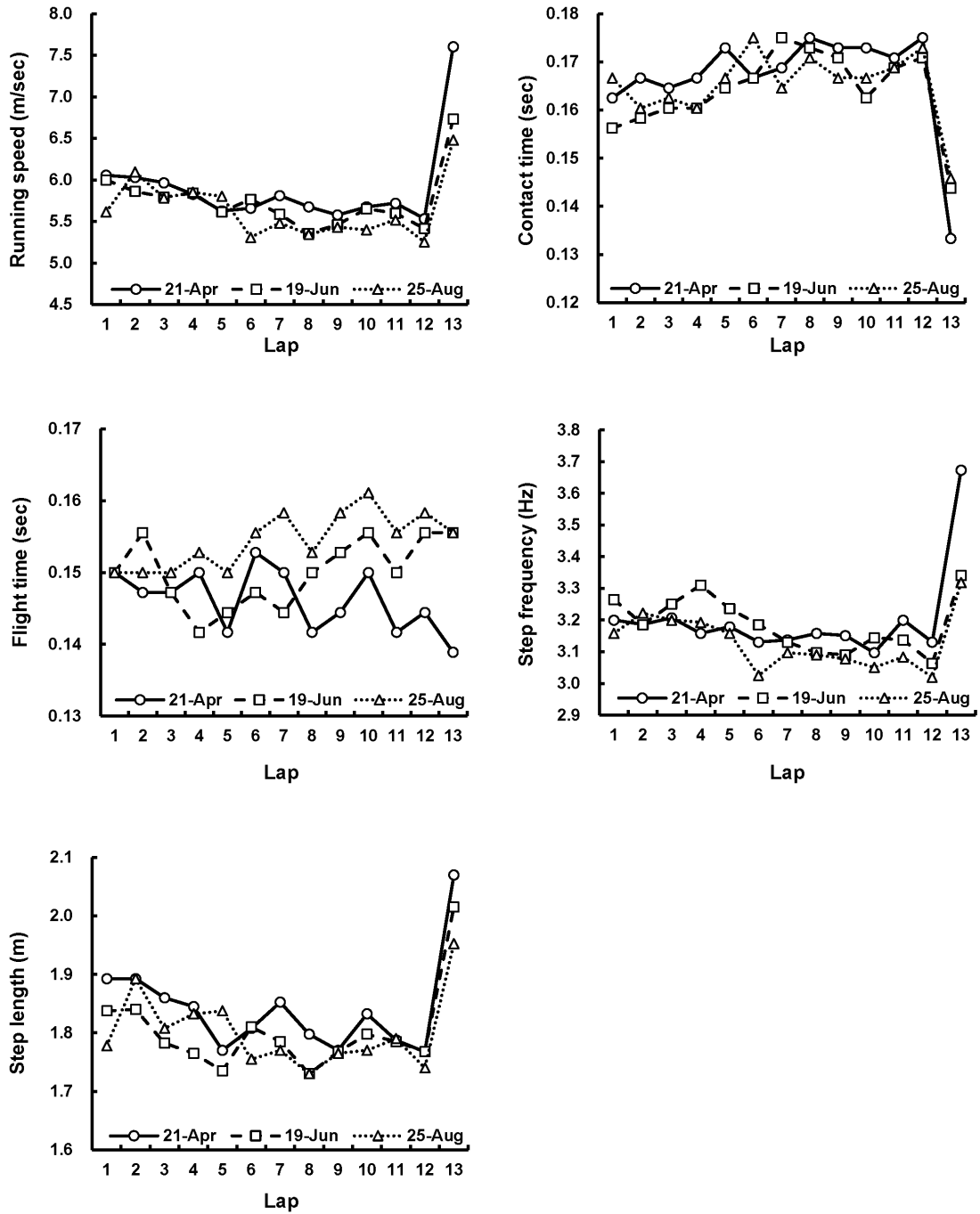
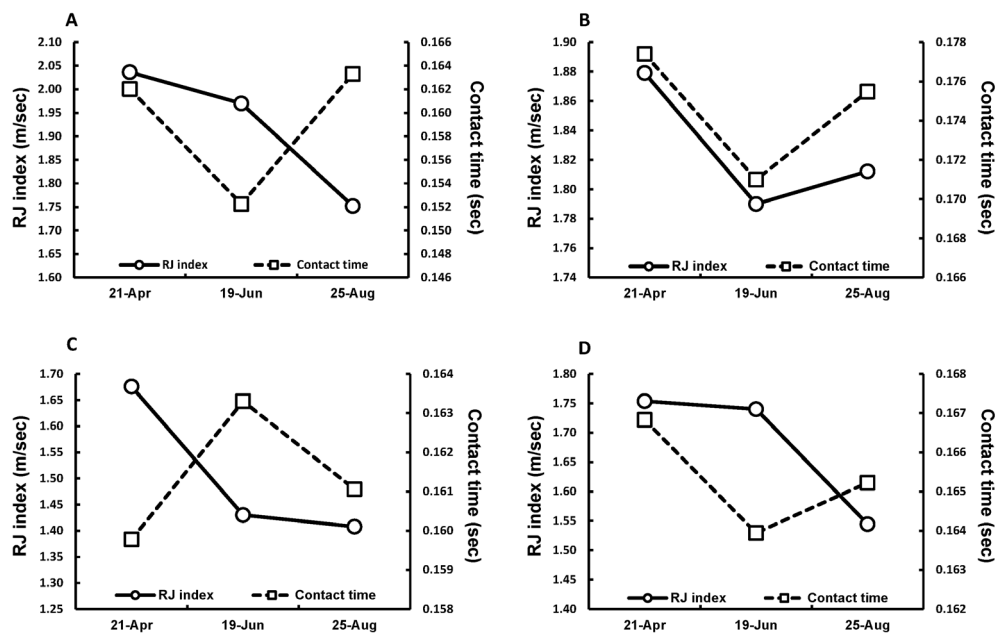


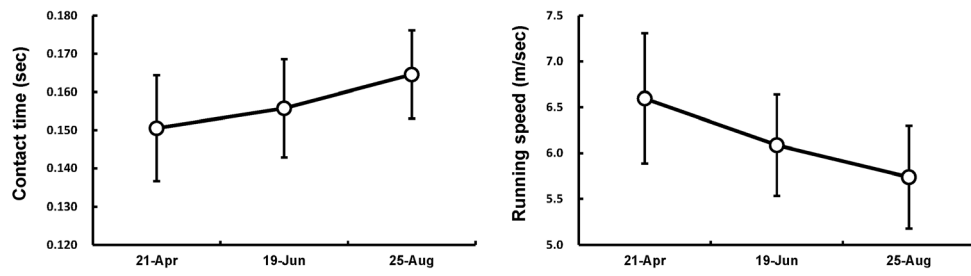
Figure 5-17. Running speed and step characteristics during the 5000-m race of runner D.

#### 5.3.4 ジャンプパフォーマンスとステップ変数の推移

Figure 5-18 にリバウンドジャンプ指数と平均接地時間の推移をまとめた。4 選手において、リバウンドジャンプ指数と平均接地時間の推移に一致した傾向が認められなかった。Figure 5-19 にリバウンドジャンプ指数と最終周における接地時間および走速度の推移をまとめた。選手 A・B・C において、リバウンドジャンプ指数が高いほど最終周の走速度が高い傾向が見られた (Figure 5-20)。4 選手において、試合準備期のリバウンドジャンプ指数が最も高く、最終周における接地時間が最も短かったが、測定期間の推移に特徴的な対応関係は見られなかった (Figure 5-21)。

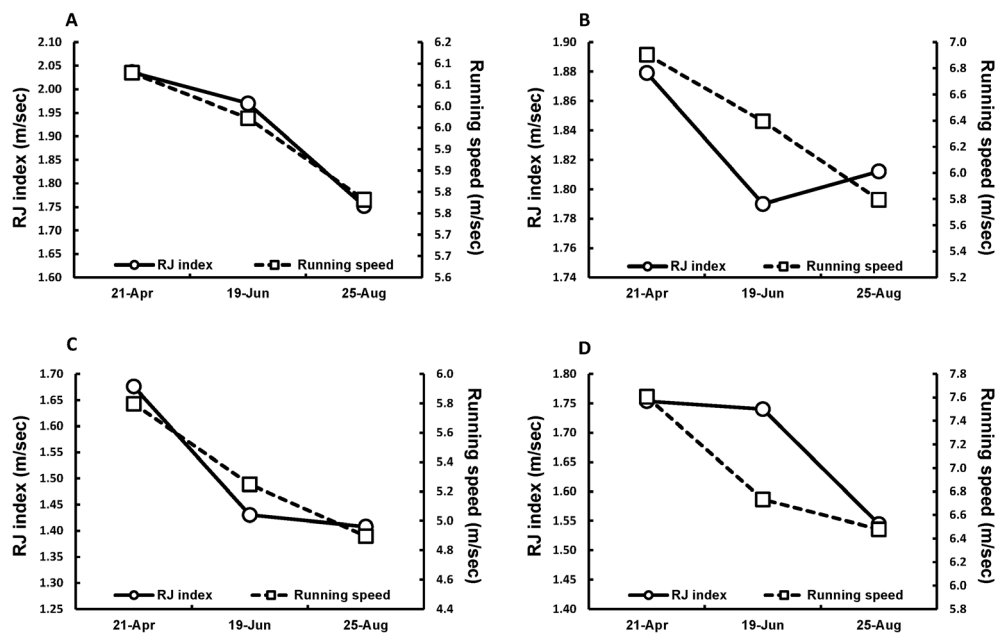


**Figure 5-18.** RJ index and average contact time during 5000-m time trial of each runner. RJ, rebound jump. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

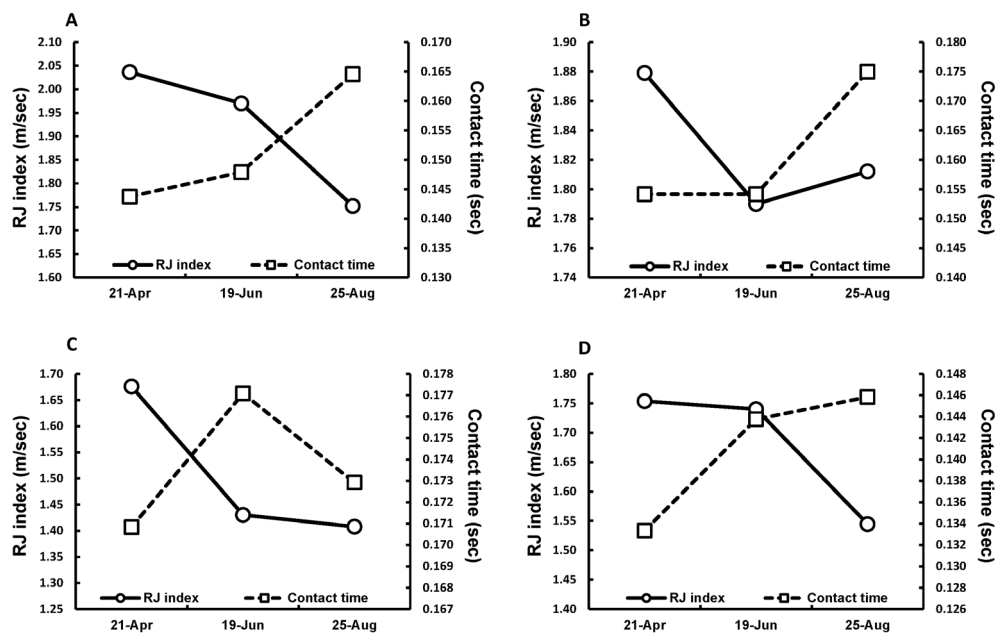


**Figure 5-19.** Average contact time and running speed at the final lap.





**Figure 5-20.** RJ index and running speed at the final lap of each runner. RJ, rebound jump. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.



**Figure 5-21.** RJ index and contact time at the final lap of each runner. RJ, rebound jump. A, runner A; B, runner B; C, runner C; D, runner D.

### 5.3.5 コーチの所見

リバウンドジャンプ指数は、バネ能力のコンディション状態を反映しているように感じる。試合準備期では、トラックシーズンに向けてスピード練習を積極的に取り入れている時期であり、5000mのレースも1,2本走っている時期であるため、コンディション状態としては良い状態だと考えている。いわゆるバネが溜まっている状態であり、リバウンドジャンプ指数も高い値を示していると考えられる。試合期の測定日である6月19日は、トラックシーズンの1番のターゲットとしている全日本大学駅伝対校選手権大会選考競技会の6日後であり、またそれまでにレースを数本こなしてきているため、試合期中でも疲労が現れる時期である。実際に、対象者の内3名が全日本駅伝予選会に出場していた。このような背景から、走行距離は少なかったが主観的疲労感が高いのではないかと考えられる。バネも試合準備期よりもレースでバネを使っている状態なので試合期に比較し、特に全日本大学駅伝対校選手権大会選考競技会に出場した選手はリバウンドジャンプ指数が低かったと考えられる。選手Aは、日本大学駅伝対校選手権大会選考競技会に出場していなかったためバネの状態も良く、リバウンドジャンプ指数が高かったのではないかと考えられる。鍛錬期は、強化合宿の時期であり、起伏を用いた走り込みがトレーニングの中心になっている時期であり、バネ能力が一番低下している時期である。その影響で、リバウンドジャンプ指数が最も低かったのではないかと考えられる。以上のことから、リバウンドジャンプ指数は、トレーニング状況やコンディション状態に一致したバネの状態を表しているような印象を受けた。しかしながら、このリバウンドジャンプ指数は、6回のリバウンドジャンプで評価されているため、瞬発的なバネ能力を反映しており、どれだけ高いバネ能力を維持できるかという持久的なバネ能力を評価できているかは疑問である。例えば、スプリント能力が良い状態だが、後半失速してしまうような選手がいるが、こういった選手の場合、持久的なバネ能力の指標を分析することも重要だと考える。

ステップ変数の分析では、選手によって異なる傾向が分析できたと感じる。特に、選手Bは、4名の対象者の中で最も自己記録が高く、レースの安定感が非常に高い選手である。選手Bの5000m中のピッチとステップ長の変化率を見てみると、ピッチとステップ長の補完関係が綺麗に観察でき、レースのパフォーマンスを安定させる能力が示されているのではないかと考える。しかしながら、選手ごとに示す特徴が異なったため、より多くのデータを蓄積し、個人の特徴を把握することが必要だと考える。

## 5.4. 考察

### 5.4.1 ジャンプパフォーマンス

本研究では、5000mのレースタイムとリバウンドジャンプ指数の良し悪しが一致する傾向が観察できた。図子・平田（2000）は、リバウンドドロップジャンプ指数と5000mの平均走速度が同様に推移していたことを報告しており、本研究の結果は先行研究の結果と同様な傾向が認められた。また、主観的疲労感が高いほどリバウンドジャンプ指数が低くなる傾向が見られた。さらに、走行距離でも同様に、走行距離が多いほどリバウンドジャンプ指数が低くなる傾向が見られた。走行距離は、トレーニング量の指標とされており（Billat et al., 2001; Stellingwerff, 2012）、日常的なトレーニング量が多いほど、疲労の程度が高くなること推察される。これらのことから、リバウンドジャンプ指数が長距離走選手のコンディション状態を反映している可能性が示された。一方、カウンタームーブメントジャンプ跳躍高においては、選手によってこのような対応関係が見られなかった。

Malone et al. (2015) は、サッカー選手において、トレーニング期間でトレーニング負荷が低下していたが、カウンタームーブメントジャンプ跳躍高は低下していなかったことを報告している。一方、Rowell et al. (2017) は、サッカー選手において、試合中の運動量が多い選手ほど、試合後のカウンタームーブメントジャンプ跳躍高は低下しており、試合の2日後までカウンタームーブメントジャンプ跳躍高が低値を示していたことを報告している。本研究の結果およびこれらの先行研究の報告から、コンディション状態の指標として、どのような場面でカウンタームーブメントジャンプを用いることが有益かについて引き続き検討が必要である。以上のことから、長距離走選手において、カウンタームーブメントジャンプに比較し、リバウンドジャンプ指数がコンディション評価の指標として有用である可能性が推察される。

### 5.4.2 5000m タイムトライアル中のステップ変数

本研究では、5000m タイムとピッチおよびステップ長の良し悪しが一致する傾向が観察できた。研究課題1において、優れた5000m タイムと高いピッチならびステップ長が相関関係にあることを明らかにしており、本研究の結果はそれを支持する結果であった。したがって、選手内の縦断的なレースパフォーマンスの変化に対して、ピッチおよびステップ長の両方が同様に影響を及ぼしている可能性が示唆された。

また、本研究では、5000m タイムと前半から後半にかけての接地時間の変化率の良し悪しが一致する傾向が観察できた。しかしながら、選手個別に見ると、選手 D のみ最も 5000m タイムが低い測定日において、接地時間の変化率が最も小さかった。Figure 5-17 の選手 D におけるレース中の走速度と接地時間の推移を見ると、鍛錬期は、6 週目において走速度が大きく減少しており、接地時間は、5 週目の段階から 2,3,4 週目に比較し高い、水準となっている。本研究では、1 から 6 週目を前半、7 から 12 週目を後半と設定し、変化率を算出している。そのため、選手 D の鍛錬期の接地時間変化率は、比較的速い段階で接地時間の増加が生じていたため、変化率としては低値を示した可能性が推察される。以上のことから、5000m タイムと接地時間の変化率は対応関係にある傾向が見られたが、変化率を算出する際の基準の妥当性について引き続き検証する必要がある。

選手 A・C において、5000m タイムと前半から後半にかけてのピッチおよびステップ長の変化率の良し悪しが一致する傾向が観察できた。一方、選手 D では、5000m タイムが最も優れている測定日において、ピッチの低下が最も小さく、5000m タイムが最も低かった測定日においてステップ長の低下が最も大きかったが、5000m タイムとステップ長およびピッチの変化率との間に対応関係は見られなかった。また、選手 B は、ピッチが低下しているタイムトライアルにおいてはステップ長の低下を抑え、ステップ長が低下しているタイムトライアルにおいてはピッチの低下を抑えている特徴が観察できた。選手 B は、3 つの測定日において最も 5000m タイムの差が小さい選手である。また、コーチからの所見においても、レースにおいて高いパフォーマンスを安定して発揮する安定感の高い選手であること報告されている。したがって、ピッチとステップ長の積から走速度が決定されるが、安定した走速度で走り続けるために、下肢筋群のコンディション状態に合わせてピッチやステップ長の変化を調整する戦略をとっている可能性が考えられる。このように、5000m タイムトライアル中のステップ変数の変化率は、研究課題 1 の結果とは異なる傾向が観察され、個人間におけるピッチとステップ長の調整法が異なる個人差が存在する可能性が示されたことから、レースパフォーマンスとステップ変数の関係性をより縦断的にデータを蓄積し検討する必要がある。

#### 5.4.3 ジャンプパフォーマンスと 5000m タイムトライアル中のステップ変数

研究課題 2 において、優れたリバウンドジャンプ指数と 5000m レース中の短い接地時間との間に相関関係が認められていたが、本研究は、リバウンドジャンプ指数と接地時間の

良し悪しが一致する傾向は観察できなかった。また、研究課題 2 は、リバウンドジャンプ指数と接地時間の相関関係は最終周において最も強くなることを明らかとした。さらに、研究課題 2 において、最終周のみにおいてリバウンドジャンプ指数と走速度との間に相関関係が認められていた。本研究においては、3 選手においてリバウンドジャンプ指数が高いほど、最終周の走速度が速い対応関係が認められた。しかしながら、4 選手において試合準備期のリバウンドジャンプ指数が最も高く、最終周における接地時間が最も短かったが、測定期間の推移に特徴的な対応関係は見られなかった。また、リバウンドジャンプ指数が最も低い選手 C では、3 回のタイムトライアルにおいて、ラストスパート時の走速度の増加の程度がほかの選手に比較し小さいことが観察できる (Figure 5-16)。これらのことから、高いリバウンドジャンプ指数は、ラストスパートの接地時間を短縮し、高い走速度の獲得に貢献する可能性が推察されるが、個人内のリバウンドジャンプ指数の変化は、5000m レース中の平均接地時間の評価に適していない可能性が考えられる。

#### 5.4 まとめ

本研究では、長距離走選手を対象とし、縦断的にジャンプパフォーマンスの評価と 5000m タイムトライアル中のステップ変数を分析することで、コーチングへの有用性を事例的に検討することを目的とした。

4 名の長距離走選手の分析から、以下のような傾向が見られた。

- ①リバウンドジャンプ指数と 5000m タイム、走行距離、主観的疲労感が対応関係にある傾向が見られた。
- ②平均ピッチおよび平均ステップ長の両方と 5000m タイムが対応関係にある傾向が見られた。
- ③タイムトライアル前半から後半にかけての接地時間の変化率と 5000m タイムが対応関係にある傾向が見られた。
- ④タイムトライアル前半から後半にかけてのステップ長およびピッチの変化率は、タイムトライアルごとに選手間で異なる特徴が観察された。
- ⑤高いリバウンドジャンプ指数は、ラストスパートの接地時間を短縮し、高い走速度の獲得に貢献する傾向が見られたが、個人内のリバウンドジャンプ指数の変化は、5000m 中の平均接地時間の変化と対応関係は見られなかった。

これらの結果から、リバウンドジャンプ指数はコンディション評価として、ステップ変数はレース評価としてコーチングに有益な情報をもたらす可能性が示された。今後、より長期的かつ連続的な分析から、コンディション評価やレース評価方法を確立していく必要がある。

## 第6章 総合考察

本研究は、ステップ変数やジャンプパフォーマンスに着目し、コーチングへの有益な評価指標を検討することを目的と設定した。研究課題1では、ステップ変数とレースタイムの関係性、研究課題2ではジャンプパフォーマンスとステップ変数との関係性をそれぞれ横断的に検討してきた。さらに、研究課題3では、研究課題1,2の結果に基づき、実際に長距離走選手を縦断的に評価した事例結果を資料として得た。本章では、これらの研究結果から、ステップ変数やリバウンドジャンプパフォーマンスのコーチングへの有益性について考察する。

### 6.1 ステップ変数を評価する有用性について

これまで先行研究において、ステップ変数とランニングエコノミーとの関係性が検討され、ピッチを高め、ステップ長を低下させることが優れたランニングエコノミーに関与することが報告されてきた (Folland et al., 2017; Tartaruga et al., 2012; 丹治ら, 2017)。しかしながら、第3章の結果から、5000m レース中の高いピッチだけでなく、大きなステップ長も優れたレースタイムに関与していることが明らかとなった。また、同様な傾向が第5章の縦断的な検討においても見られた。さらに、第3章の結果から、レース前半から後半にかけてステップ長の低下および接地時間の増加が小さいほど5000mのレースタイムが優れていることが明らかとなった。

長距離走レース序盤のオーバーペースによる過度な疲労蓄積に伴うレース終盤でのレーススペースの低下を避け、一定のレーススペースを保つことが、高いレースパフォーマンスの発揮に貢献することが報告されている (Tucker et al., 2006; Myrkos et al., 2020)。レース中において、レーススペースの適切さや疲労の程度を定量化することは困難であるが、本研究において5000m レースタイムとの関係性が明らかとなったステップ長や接地時間の変化率に着目することで、長距離走選手の能力に対してレーススペースが適切であったか長距離走レースの評価できる可能性が考えられる。

また、近年のトレーニング研究からステップ変数に影響を及ぼすトレーニング法が明らかとなってきている。Quinn et al. (2019) は、高いピッチを設定したランニングトレーニングを実施することで、通常ランニング時のピッチが向上したことを報告している。また、第2章で述べた通り先行研究間での食い違いが生じているが、Gómez-Molina et al.



(2018) は、プライメトリックトレーニングがランニング中のステップ長を増加させることを報告している。さらに、Esteve-Lanao et al. (2008) は、ウエイトトレーニングやプラメトリックトレーニング、サーキットトレーニングなどの様々な種類の筋力トレーニングを組み合わせて実施することで、長距離走後半でのステップ長の減少を抑える効果が得られたことが報告している。このように、特定のステップ変数を改善するためのトレーニング法が開発されてきており、縦断的にレース中のステップ変数を分析することで、より効果的なトレーニング内容の設定に貢献すると考えられる。今後、ステップ変数の分析とトレーニング介入の包括的な実践研究から、このような長距離走選手の評価法が有用であるかをさらに検討していく必要がある。

## 6.2 リバウンドジャンプ指数を評価する有用性について

第4章では、リバウンドジャンプ指数と5000mレース中のステップ変数との関係性について検討した。その結果、高いリバウンドジャンプ指数と短い接地時間との間に相関関係が認められた。一方、第5章の縦断的な検討においては、3つのタイムトライアルにおいて、リバウンドジャンプ指数の推移と接地時間の推移に一致した傾向が観察されなかった。したがって、リバウンドジャンプ指数と接地時間との関係性については引き続き検討が必要である。しかしながら、第4章において、最終週のラストスパート時において、リバウンドジャンプ指数と接地時間との相関関係が最も強まることを明らかとした。加えて第5章においても、リバウンドジャンプ指数が高いほどラストスパート時の接地時間が短い傾向が見られた。さらに第4章において、高いリバウンドジャンプ指数とラストスパート時の走速度が高い相関関係が認められており、第5章においても同様な傾向が見られた。これらのことから、リバウンドジャンプ指数がラストスパートのパフォーマンス評価に活用できる可能性が考えられる。高いラストスパート能力は、長距離走レースの勝敗に関して重要な要素の一つである (de Koning et al., 2011; Yamanaka et al., 2019)。したがって、特に試合期において、リバウンドジャンプ指数をラストスパート能力の評価として活用できる可能性が期待される。

また、第5章において、リバウンドジャンプ指数の良否が5000mタイムや主観的疲労感、トレーニング量を反映しており、コンディション指標として活用できる可能性を示した。先行研究において、伸長短縮サイクル運動（ホッピング）をランニング前に実施することで、ランニング中のランニングエコノミーが一過性に向上することが報告されている

(楠本ら, 2013). このように, 伸長短縮サイクル運動を長距離走前のウォーミングアップに組み込むことでパフォーマンスの向上も期待できるため, トレーニング前にリバウンドジャンプ測定を実施し, コンディション評価として活用することはコーチング現場での実現可能性が高いと推察できる.

### 6.3 コーチング現場での応用性について

本研究から, ステップ変数やリバウンドジャンプ指数が長距離走選手のコーチングにおいて有用な情報をもたらす指標である可能性が示された. これらのステップ変数やリバウンドジャンプ指数は, コーチング現場において簡易的に測定できる手法が開発されてきている. 例えば, 近年のスマートフォンやタブレット端末は, 高解像度のハイスピード映像の撮影が可能である. 大塚ら (2020) は, 高校生のハードル指導において, タブレット端末を用いたハードリング距離の分析を活用している. この先行研究では, タブレット端末のカメラ機能と専用アプリケーションによる2次元実長換算法で, ステップ長の解析を可能としている. また, ハイスピード映像のコマ数からジャンプ中の接地時間や滞空時間を解析できることを利用し, ジャンプパフォーマンスを解析するアプリケーションが開発されている. そのうちの1つである *My jump 2* は, フォースプレートでの計測と比較し, 跳躍高とジャンプ指数ともに高い精度での解析が可能であると報告されている (Gallardo-Fuentes et al., 2016; Haynes et al., 2019). このように, 専門的で高価なハイスピードカメラやソフトウェアを用いず, スマートフォンやタブレット端末で簡易的にステップ変数やリバウンドジャンプ指数を分析することができる. また, 実際の長距離走レース環境では, 理想的なカメラ位置で撮影ができないことやキャリブレーションができないことが想定されるが, 装着型センサーを用いることで計測が可能である. 近年, 装着型センサーを用いたランニング動作の分析が盛んに行われており, 慣性センサーやジャイロセンサーを用いてランニング中の加速度データを計測することで, ランニング中のステップ変数や地面反力データを推定することが可能とされている (古川ら, 2017; Kiernan et al., 2018; Reenalda et al., 2016; Vanwanseele et al., 2020; Zrenner et al., 2018). このようにステップ変数やリバウンドジャンプ指数は, 比較的安価な機器を用いて簡易的に分析できる実現性が高まってきていることから, トップ選手のみならず, 学校の部活動や地域スポーツクラブ等のコーチング現場においても広く応用できると考えられる. 今後, 実際に簡易的な分析手

法で得たステップ変数やリバウンドジャンプ指数を用いて、長距離走選手を長期的にモニタリングする実践的な研究によって、より実現可能性を高めていくことが求められる。

また、ランニングパフォーマンスは多数の要因によって複合的に決定され、それらの研究分野は多岐にわたる。例えば、ランニングパフォーマンスを大きく決定する要素として最大酸素摂取量やランニングエコノミーが挙げられるが、最大酸素摂取量は肺の肺による酸素の取り込み、心臓による血液運搬、血液における酸素運搬の能力に大きく影響を及ぼされると報告されている (Bassett and Howley, 2000)。また、ランニングエコノミーはより多数の生理学的因子およびバイオメカニクスの因子によって複合的に決定される (Barens and Kildings, 2015a; Daniels, 1985; Saunders et al., 2004)。また第 5 章において、レースごとのピッチやステップ長のタイムトライアル前半から後半にかける変化率の特徴に選手間で個人差があることが観察された。これらのことから、本研究において得られたステップ変数やリバウンドジャンプ指数だけでは、ランニングパフォーマンスやコンディション状態に関与するすべての指標を反映することはできず、より複数の因子との相互関係を包括的に検討し、ステップ変数やリバウンドジャンプ指数の簡易的指標としての意義をより明確化していく必要があると考えられる。以上のことを踏まえ、コーチング現場において、あくまでも一指標としてステップ変数やリバウンドジャンプ指数を活用し、主観的指標やトレーニング状況、血液検査などのより複数の評価指標とともに多角的に長距離走選手をモニタリングしていく必要があることに留意することが大切である。

#### 6.4 本論文の研究限界

本研究は、大学男子長距離走選手を対象に実施した。そのため、女性や他国の長距離走選手においても本研究の結果が適用されるかは不明である。先行研究において、男性と女性の長距離走選手において、ステップ変数の特性が異なることが報告されている

(García-Pinillos et al., 2020)。また、下腿長などの形態的特徴の違いによって、ランニング中のステップ変数の特徴が人種間で異なることが報告されている (Kunimasa et al., 2014; Lucia et al., 2006)。さらに、女性は性ホルモンの影響を受けて腱の弾性能力が変化する可能性について報告されており (Bryant et al., 2008)、伸長短縮サイクル遂行能力も性周期の影響を受けて変動する可能性が推察される。これらのことから、ステップ変数やリバウンドジャンプ指数の評価を一般化していくために、広いパフォーマンスレベルや年齢、女性、他国の長距離走選手を対象に検証する必要がある。また、第 5 章の研究対象者

は4名のみであり、測定も3回のタイムトライアルのみであった。したがって、本研究で得られた知見をそのままコーチング現場で適用するには限界がある。今後、より対象者数やレース数を増やし、実践的な検証を重ねることが求められる。

本研究では、呼気ガス分析によるランニング中の酸素摂取量の測定を実施していない。最大下強度でのランニング中のステップ変数とランニングエコノミーとの関係については、いくつかの先行研究において報告がなされているが (Folland et al., 2017; Tartaruga et al., 2012), レースの前半から後半にかけての接地時間やステップ長の変化率のように、疲労状態におけるステップ変数の変化については考慮できていない。今後、ランニングを長時間継続し、疲労困憊に至るまでのステップ変数の変化と酸素摂取量の変化との関係を検討することで、ステップ変数の変化がランニングエコノミーに与える影響を明らかにする必要がある。また、コンディション状態の指標となる血中クレアチンフォスフォキナーゼ量やコルチゾール量などの血中バイオマーカーを分析していない。リバウンドジャンプ指数とこれらの生理学的パラメーターを用いてコンディション状態との関連性を包括的に検討することで、多角的な長距離走選手のコンディション評価法をさらに検討する必要がある。

## 第7章 結論

本研究の目的は、長距離走選手のステップ変数やジャンプパフォーマンスとレースパフォーマンスやコンディション状態との関係を検討することで、長距離走選手のコーチングに役立つ簡易的指標に関する知見を得ることであった。設定した3つの研究課題から以下の点が示された。

### ①長距離走選手における5000mレース中のステップ変数とレースタイムの関係性（研究課題1）

5000mレース中の平均ピッチと身長で補正したステップ長が大きいほど、5000mレースタイムが優れている有意な相関関係が認められた（それぞれ $r = -0.611, P = 0.003$ ； $r = -0.575, P = 0.006$ ）。また、5000mレースの前半から後半にかけてのステップ長の減少および接地時間の増加が小さいほど、5000mレースタイムが優れている有意な相関関係が認められた（それぞれ $r = 0.514, P = 0.017$ ； $r = -0.486, P = 0.025$ ）。

### ②長距離走選手における連続リバウンドジャンプパフォーマンスと5000mレース中のステップ変数との関係性（研究課題2）

リバウンドジャンプ指数が高いほど、5000mレース中の接地時間が短い有意な相関関係が認められた（ $r = -0.496, P = 0.019$ ）。また、レース最終週のラストスパートにおいて、リバウンドジャンプ指数と接地時間の相関関係が最も強まり、リバウンドジャンプ指数とラストスパートの走速度との間に有意な相関関係が認められた（ $r = 0.424, P = 0.049$ ）。

### ③長距離走選手を対象としたステップ変数とリバウンドジャンプ指数の分析とコーチングへの有用性に関する事例的研究（研究課題3）

リバウンドジャンプ指数と5000mレースタイム、走行距離、主観的疲労感が対応関係にある傾向が見られた。また、研究課題1の結果と同様に、平均ピッチおよび平均ステップ長の両方と5000mレースタイムが対応関係にある傾向が見られた。同じく、前半から後半にかけての接地時間の変化率と5000mレースタイムが対応関係にある傾向が見られた。一方、前半から後半にかけてのステップ長およびピッチの変化率は、タイムトライアルごとに選手間に異なる特徴が観察された。さらに、研究課題2と同様に、高いリバウン

ドジャンプ指数は、ラストスパート時の接地時間を短縮し、高い走速度の獲得に貢献する傾向が見られたが、個人内のリバウンドジャンプ指数の変化は、5000m中の平均接地時間の変化と対応関係は見られなかった。

これらの結果から、レースにおいて平均ピッチやステップ長、前半から後半にかけての接地時間の変化率を評価することで、レースの評価やトレーニングでの課題点を抽出できる可能性が示唆された。また、リバウンドジャンプ指数は、長距離走選手のコンディション状態を反映する指標である可能性が示唆された。加えて、リバウンドジャンプ指数は、レース最終周におけるラストスパートのパフォーマンス能力を評価するために有用である可能性が示唆された。以上のことを踏まえると、長距離走選手のコーチングにおいて、ステップ変数やリバウンドジャンプ指数は、パフォーマンス評価やコンディション評価として有用な簡易的指標であると考えられる。

## 参考文献

- Aoki, M. S., Ronda, L. T., Marcelino, P. R., Drago, G., Carling, C., Bradley, P. S., & Moreira, A. (2017) Monitoring training loads in professional basketball players engaged in a periodized training program. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(2): 348-358.
- Avela, J., Kyröläinen, H., Komi, P. V., & Rama, D. (1999) Reduced reflex sensitivity persists several days after long-lasting stretch-shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, 86(4): 1292-1300.
- Balsalobre-Fernández, C., Santos-Concejero, J., & Grivas, G. V. (2016) Effects of strength training on running economy in highly trained runners: A systematic review with meta-analysis of controlled trials. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(8): 2361–2368.
- Barnes, R. K., & Kilding, E. A. (2015a) Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine Open*, 1(1): 1-8.
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015b) Strategies to improve running economy. *Sports Medicine*, 45(1): 37-56.
- Bassett, D. R., Jr, & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1): 70–84.
- Bertram, J. E., Prebeau-Menezes, L., & Szarko, M. J. (2013) Gait characteristics over the course of a race in recreational marathon competitors. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 84(1): 6-15.
- Biewener, A. A., & Roberts, T. J. (2000) Muscle and tendon contributions to force, work, and elastic energy savings: a comparative perspective. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 28(3): 99-107.
- Billat, V. L., Demarle, A., Slawinski, J., Paiva, M., & Koralsztein, J. P. (2001) Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(12): 2089-2097.
- Blagrove, R. C., Howatson, G., & Hayes, P. R. (2018) Effects of strength training on the physiological determinants of middle- and long-distance running performance: A systematic review. *Sports Medicine*, 48(5): 1117-1149.

- Bosco, C., Montanari, G., Ribacchi, R., Giovenali, P., Latteri, F., Iachelli, G., Faina, M., Colli, R., Dal Monte, A., & La Rosa, M. (1987) Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 56(2): 138-143.
- Brughelli, M., Cronin, J., & Chaouachi, A. (2011) Effects of running velocity on running kinetics and kinematics. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4): 933-939.
- Bryant, A. L., Clark, R. A., Bartold, S., Murphy, A., Bennell, K. L., Hohmann, E., Marshall-Gradisnik, S., Payne, C., & Crossley, K. M. (2008) Effects of estrogen on the mechanical behavior of the human Achilles tendon in vivo. *Journal of Applied Physiology*, 105(4): 1035-1043.
- Buchheit, M., Mendez-Villanueva, A., Quod, M. J., Poulos, N., & Bourdon, P. (2010) Determinants of the variability of heart rate measures during a competitive period in young soccer players. *European Journal of Applied Physiology*, 109(5): 869-878.
- Cavanagh, P. R., & Kram, R. (1989) Stride length in distance running: velocity, body dimensions, and added mass effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 21(4): 467-479.
- Cavanagh, P. R., & Williams, K. R. (1982) The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(1): 30-35.
- Chan-Roper, M., Hunter, I., W Myrer, J., L Eggett, D., & K Seeley, M. (2012) Kinematic changes during a marathon for fast and slow runners. *Journal of Sports Science & Medicine*, 11(1): 77-82.
- Claudino, J. G., Cronin, J., Mezêncio, B., McMaster, D. T., McGuigan, M., Tricoli, V., Amadio, A. C., & Serrão, J. C. (2017) The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(4): 397-402.
- Conley, D. L., & Krahenbuhl, G. S. (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(5): 357-360.
- Daniels J. T. (1985). A physiologist's view of running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17(3): 332-338.
- de Koning, J. J., Foster, C., Bakkum, A., Kloppenburg, S., Thiel, C., Joseph, T., Cohen, J., & Porcari, J. P. (2011) Regulation of pacing strategy during athletic competition. *PloS One*, 6(1): e15863.



- Del Coso, J., González-Millán, C., Salinero, J. J., Abián-Vicén, J., Soriano, L., Garde, S., & Pérez-González, B. (2012) Muscle damage and its relationship with muscle fatigue during a half-iron triathlon. *PloS One*, 7(8): e43280.
- Del Coso, J., Pérez-López, A., Abian-Vicen, J., Salinero, J. J., Lara, B., Valadés, D. (2014) Enhancing physical performance in male volleyball players with a caffeine-containing energy drink. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(6): 1013-1018.
- Dobbs, C. W., Gill, N. D., Smart, D. J., & McGuigan, M. R. (2015) Relationship between vertical and horizontal jump variables and muscular performance in athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(3): 661-671.
- Elliot, B., & Ackland, T. (1981) Biomechanical effects of fatigue on 10,000 meter running technique. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 52(2): 160-166.
- Esteve-Lanao, J., Rhea, M. R., Fleck, S. J., & Lucia, A. (2008) Running-specific, periodized strength training attenuates loss of stride length during intense endurance running. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(4): 1176-1183.
- Feroli, D., Bosio, A., Bilsborough, J. C., La Torre, A., Tornaghi, M., & Rampinini, E. (2018) The preparation period in basketball: Training load and neuromuscular adaptations. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(8): 991-999.
- Fletcher, J. R., & MacIntosh, B. R. (2017) Running economy from a muscle energetics perspective. *Frontiers in Physiology*, 8: 433.
- Folland, J. P., Allen, S. J., Black, M. I., Handsaker, J. C., & Forrester, S. E. (2017). Running technique is an important component of running economy and performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49(7): 1412-1423.
- 古川雄大・水落俊一・杉田正明. (2017) 慣性航法を用いたランニング運動解析機器における妥当性の検証. *科学・技術研究*, 6 (1) : 47-54.
- Gallardo-Fuentes, F., Gallardo-Fuentes, J., Ramírez-Campillo, R., Balsalobre-Fernández, C., Martínez, C., Caniuqueo, A., Cañas, R., Banzer, W., Loturco, I., Nakamura, F. Y., & Izquierdo, M. (2016) Intersession and intrasession reliability and validity of the my jump app for measuring different jump actions in trained male and female athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(7): 2049-2056.

- García-Pinillos, F., Jerez-Mayorga, D., Latorre-Román, P. Á., Ramirez-Campillo, R., Sanz-López, F., & Roche-Seruendo, L. E. (2020) How do amateur endurance runners alter spatiotemporal parameters and step variability as running velocity increases? a sex comparison. *Journal of Human Kinetics*, 72: 39-49.
- Gómez-Molina, J., Ogueta-Alday, A., Camara, J., Stickley, C., García-López, J. (2018) Effect of 8 weeks of concurrent plyometric and running training on spatiotemporal and physiological variables of novice runners. *European Journal of Sport Science*. 18(2): 162-169.
- González-Frutos, P., Veiga, S., Mallo, J., Navarro, E. (2019) Spatiotemporal comparisons between elite and high-level 60 m hurdlers. *Frontiers in Psychology*.10: 2525.
- Gibson, N. E., Boyd, A. J., & Murray, A. M. (2016) Countermovement jump is not affected during final competition preparation periods in elite rugby sevens players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(3): 777-783.
- Giovanelli, N., Taboga, P., Rejc, E., & Lazzer, S. (2017) Effects of strength, explosive and plyometric training on energy cost of running in ultra-endurance athletes. *European Journal of Sport Science*, 17(7): 805-813.
- Girard, O., Millet, G. P., Slawinski, J., Racinais, S., & Micallef, J. P. (2013) Changes in running mechanics and spring-mass behaviour during a 5-km time trial. *International Journal of Sports Medicine*, 34(9): 832-840.
- Hamill, J., Derrick, T. R., & Holt, K.G. (1995) Shock attenuation and stride frequency during running. *Human Movement Science*, 14(1): 45-60.
- Hanley, B., Smith, L.C., Bissas, A. (2011) Kinematic variations due to changes in pace during men's and women's 5 km road running. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 6: 243-252.
- Hasegawa, H., Yamauchi, T., & Kraemer, W. J. (2007) Foot strike patterns of runners at the 15-km point during an elite-level half marathon. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3): 888-893.
- Hayes, P., & Caplan, N. (2012) Foot strike patterns and ground contact times during high-calibre middle-distance races. *Journal of Sports Sciences*, 30(12): 1275-1283.

- Haynes, T., Bishop, C., Antrobus, M., & Brazier, J. (2019) The validity and reliability of the My Jump 2 app for measuring the reactive strength index and drop jump performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 59(2): 253-258.
- Heiderscheit, B. C., Chumanov, E. S., Michalski, M. P., Wille, C. M., & Ryan, M. B. (2011) Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(2): 296-302.
- Hoogkamer, W., Kipp, S., Frank, J. H., Farina, E. M., Luo, G., & Kram, R. (2018) A comparison of the energetic cost of running in marathon racing shoes. *Sports Medicine*, 48(4), 1009-1019.
- 市原英. (2021) 競技現場での簡便な測定を用いた大学女子バレーボール部員における跳躍能力特性の検討. *星槎道都大学研究紀要*, 2 : 57-62.
- shikawa, M., & Komi, P. V. (2007) The role of the stretch reflex in the gastrocnemius muscle during human locomotion at various speeds. *Journal of Applied Physiology*, 103(3): 1030-1036.
- 岩竹淳. (2017) 疾走能力に対するリバウンドジャンプ能力の位置付け. *体育の科学*, 67 (4) : 232-237.
- Jones, A. M., Kirby, B. S., Clark, I. E., Rice, H. M., Fulkerson, E., Wylie, L. J., Wilkerson, D. P., Vanhatalo, A., & Wilkins, B. W. (2021) Physiological demands of running at 2-hour marathon race pace. *Journal of Applied Physiology*, 130(2): 369-379.
- 鍵本真啓・亀井誠生・岡本直輝. 高校・大学陸上競技短距離選手の動作確認のための ICT 活用実態. *京都滋賀体育学研究*, 35 : 13-18
- Kale, M., Aşçi, A., Bayrak, C., & Açıkada, C. (2009) Relationships among jumping performances and sprint parameters during maximum speed phase in sprinters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(8): 2272-2279.
- 河村亜希・Kapoor, M. P., 杉田正明. (2021) 1 ヶ月間の低用量の鉄サプリメント摂取が発汗を伴う運動習慣のある女性における主観的コンディションに及ぼす影響. *トレーニング科学*, 33 (2) : 147-154.
- Kiernan, D., Hawkins, D. A., Manoukian, M., McKallip, M., Oelsner, L., Caskey, C. F., & Coolbaugh, C. L. (2018) Accelerometer-based prediction of running injury in National Collegiate Athletic Association track athletes. *Journal of Biomechanics*, 73: 201-209.

- Komi P. V. (1984) Physiological and biomechanical correlates of muscle function: effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 12, 81-121.
- Komi P. V. (2000) Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics*, 33(10): 1197-1206.
- Krustrup, P., Secher, N. H., Relu, M. U., Hellsten, Y., Söderlund, K., & Bangsbo, J. (2008) Neuromuscular blockade of slow twitch muscle fibres elevates muscle oxygen uptake and energy turnover during submaximal exercise in humans. *The Journal of Physiology*, 586(24): 6037-6048.
- Kubo K, Miyazaki D, Shimoju S, Tsunoda N. (2015) Relationship between elastic properties of tendon structures and performance in long distance runners. *European Journal of Applied Physiology*, 115(8): 1725-1733.
- Kunimasa, Y., Sano, K., Oda, T., Nicol, C., Komi, P. V., Locatelli, E., Ito, A., & Ishikawa, M. (2014) Specific muscle-tendon architecture in elite Kenyan distance runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(4): e269-e274.
- 楠本達也・森寿仁・山本正嘉. (2013) 事前のホッピングエクササイズにより陸上競技長距離走選手の stretch shortening cycle 能力と running economy は改善する. *スポーツパフォーマンス研究*, 5 ; 237-251.
- Kyröläinen, H., Belli, A., & Komi, P. V. (2001) Biomechanical factors affecting running economy. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(8): 1330-1337.
- Lockie, R. G., Murphy, A. J., Callaghan, S. J., Jeffriess, M. D. (2014) Effects of sprint and plyometrics training on field sport acceleration technique. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(7): 1790-1801.
- Lucia, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., Gómez-Gallego, F., San Juan, A. F., Santiago, C., Pérez, M., Chamorro-Viña, C., & Foster, C. (2006) Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31(5): 530-540.
- Lundby, C., Montero, D., Gehrig, S., Andersson Hall, U., Kaiser, P., Boushel, R., Meinild Lundby, A. K., Kirk, N., Valdivieso, P., Flück, M., Secher, N. H., Edin, F., Hein, T., & Madsen, K. (2017)

- Physiological, biochemical, anthropometric, and biomechanical influences on exercise economy in humans. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 27(12), 1627-1637.
- Malone, J. J., Murtagh, C. F., Morgans, R., Burgess, D. J., Morton, J. P., & Drust, B. (2015) Countermovement jump performance is not affected during an in-season training microcycle in elite youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(3): 752-757.
- Markovic, G., Mikulic, P. (2010) Neuro-musculoskeletal and performance adaptations to lower-extremity plyometric training. *Sports Medicine*, 40(10): 859-895.
- Maruyama, T., Mizuno, S., & Goto, K. (2019) Effects of cold water immersion and compression garment use after eccentric exercise on recovery. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 23(1): 48-54.
- Miura, K., Yamamoto, M., Tamaki, H., & Zushi, K. (2010) Determinants of the abilities to jump higher and shorten the contact time in a running 1-legged vertical jump in basketball. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(1): 201-206.
- Morgan, D. W., Baldini, F. D., Martin, P. E., & Kohrt, W. M. (1989) Ten kilometer performance and predicted velocity at VO<sub>2</sub>max among well-trained male runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 21(1): 78-83.
- Myrkos, A., Smilios, I., Kokkinou, E. M., Rousopoulos, E., & Douda, H. (2020) Physiological and race pace characteristics of medium and low-level Athens marathon runners. *Sports*, 8(9): 116.
- Nagahara, R., Naito, H., Miyashiro, K., Morin, J. B., & Zushi, K. (2014) Traditional and ankle-specific vertical jumps as strength-power indicators for maximal sprint acceleration. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 54(6): 691-699.
- Nicol, C., Komi, P.V. and Marconnet, P. (1991) Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance: I. Changes in muscle force and stiffness characteristics. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 1: 10-17.
- Nicol, C., Komi, P.V. & Marconnet, P. (1991) Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance: II. Changes in force, integrated electromyographic activity and endurance capacity. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 1: 18-24.
- Nicol, C., Avela, J., & Komi, P. V. (2006) The stretch-shortening cycle : a model to study naturally occurring neuromuscular fatigue. *Sports Medicine*, 36(11): 977-999.

- Niespodziński, B., Grad, R., Kochanowicz, A., Mieszkowski, J., Marina, M., Zasada, M., & Kochanowicz, K. (2021) The Neuromuscular Characteristics of Gymnasts' Jumps and Landings at Particular Stages of Sports Training. *Journal of Human Kinetics*, 78: 15-28.
- 新谷昂・千葉崇博・泉建史・杉田正明. (2021) 国際試合におけるストレスが日本代表トランポリン競技選手の唾液バイオマーカーとコンディションに及ぼす影響. *トレーニング科学*, 33 (3) : 225-230.
- Nummela, A. T., Heath, K. A., Paavolainen, L. M., Lambert, M. I., St Clair Gibson, A., Rusko, H. K., & Noakes, T. D. (2008) Fatigue during a 5-km running time trial. *International Journal of Sports Medicine*, 29(9): 738-745.
- Nummela, A., Keränen, T., & Mikkelsen, L. O. (2007) Factors related to top running speed and economy. *International Journal of Sports Medicine*, 28(8): 655-661.
- 大塚光雄・伊坂忠夫・長野明紀・栗原俊之・大友智 (2020) 定性的・定量的評価が可能な新しいタブレット端末用アプリケーションを活用した学習効果；ハードル層に着目して. *コーチング学研究*, 32 (1) : 19-31.
- Ozaki, Y., Ueda, T., Fukuda, T., Inai, T., Kido, E., & Narisako, D. (2019) Regulation of stride length during the approach run in the 400-M hurdles. *Journal of Human Kinetics*, 69: 59-67.
- Paavolainen, L., Häkkinen, K., Hämmäläinen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999) Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology*, 86(5): 1527-1533.
- Paavolainen, L., Nummela, A., Rusko, H., & Häkkinen, K. (1999) Neuromuscular characteristics and fatigue during 10 km running. *International Journal of Sports Medicine*, 20(8): 516-521.
- Quinn, T. J., Dempsey, S. L., LaRoche, D. P., Mackenzie, A. M., & Cook, S. B. (2021) Step frequency training improves running economy in well-trained female runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(9): 2511-2517.
- Rabita, G., Couturier, A., Dorel, S., Hausswirth, C., & Le Meur, Y. (2013) Changes in spring-mass behavior and muscle activity during an exhaustive run at  $\dot{V}O_{2max}$ . *Journal of Biomechanics*, 46(12): 2011-2017.
- Rabita, G., Slawinski, J., Girard, O., Bignet, F., & Hausswirth, C. (2011) Spring-mass behavior during exhaustive run at constant velocity in elite triathletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(4): 685-692.

- Ramirez-Campillo, R., Andrade, D. C., García-Pinillos, F., Negra, Y., Boullosa, D., & Moran, J. (2021) Effects of jump training on physical fitness and athletic performance in endurance runners: A meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 39(18): 2030-2050.
- Reenalda, J., Maartens, E., Homan, L., & Buurke, J. (2016) Continuous three dimensional analysis of running mechanics during a marathon by means of inertial magnetic measurement units to objectify changes in running mechanics. *Journal of Biomechanics*, 49(14): 3362-3367.
- Rowell, A. E., Aughey, R. J., Hopkins, W. G., Stewart, A. M., & Cormack, S. J. (2017) Identification of sensitive measures of recovery after external load from football match play. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(7): 969-976.
- 佐伯徹郎. (2006) 長距離走パフォーマンスとエネルギー代謝からみた「効率」との関係—効率の追求とより多くのエネルギー獲得の両立を考える—. *バイオメカニクス研究*. 10 (4) : 253-261.
- 佐伯徹郎. (2011) 大学女子中長距離選手の“バネ能力”と経済性の関係. *陸上競技学会誌*, 9 : 1-5.
- Saltin, B., Larsen, H., Terrados, N., Bangsbo, J., Bak, T., Kim, C.K., Svedenhag, J., & Rolf, C. J. (1995) Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 5(4): 209-221.
- Santos-Concejero, J., Tam, N., Granados, C., Irazusta, J., Bidaurrezaga-Letona, I., Zabala-Lili, J., & Gil, S. M. (2014) Stride angle as a novel indicator of running economy in well-trained runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(7): 1889-1895.
- Santos-Lozano, A., Collado, P. S., Foster, C., Lucia, A., & Garatachea, N. (2014) Influence of sex and level on marathon pacing strategy. Insights from the New York City race. *International Journal of Sports Medicine*, 35(11): 933-938.
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., & Hawley, J. A. (2004) Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine*, 34(7): 465-485.
- Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Peltola, E. M., Cunningham, R. B., Gore, C. J., & Hawley, J. A. (2006) Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4): 947-954.

- Stellingwerf T. (2012) Case study: Nutrition and training periodization in three elite marathon runners. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 22(5): 392-400.
- Støren, Ø., Helgerud, J., & Hoff, J. (2011) Running stride peak forces inversely determine running economy in elite runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1): 117-123.
- 丹治史弥・榎本靖士・鍋倉 賢治 (2017) 中長距離ランナーにおける高強度走行中のステップ変数と走の経済性. *体育学研究*, 62 (2) : 523-534.
- Tartaruga, M. P., Brisswalter, J., Peyré-Tartaruga, L. A., Avila, A. O., Alberton, C. L., Coertjens, M., Cadore, E. L., Tiggemann, C. L., Silva, E. M., & Kruel, L. F. (2012) The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 83(3), 367-375.
- Tauchi, K., Endo, T., Ogata, M., Matsuo, A., Iso, S. (2008) The characteristics of jump ability in elite adolescent athletes and healthy males: the development of countermovement and rebound jump ability. *International Journal of Sport and Health Science*, 6: 78-84.
- Tucker, R., Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2006) An analysis of pacing strategies during men's world-record performances in track athletics. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(3): 233-245.
- Sano, K., Nicol, C., Akiyama, M., Kunimasa, Y., Oda, T., Ito, A., Locatelli, E., Komi, P. V., & Ishikawa, M. (2015) Can measures of muscle-tendon interaction improve our understanding of the superiority of Kenyan endurance runners?. *European Journal of Applied Physiology*, 115(4): 849-859.
- Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Peltola, E. M., Cunningham, R. B., Gore, C. J., & Hawley, J. A. (2006) Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4): 947-954.
- Ueno, H., Suga, T., Takao, K., Tanaka, T., Misaki, J., Miyake, Y., Nagano, A., & Isaka, T. (2018a) Relationship between Achilles tendon length and running performance in well-trained male endurance runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(2): 446-451.
- Ueno, H., Suga, T., Takao, K., Miyake, Y., Terada, M., Nagano, A., & Isaka, T. (2019) The potential relationship between leg bone length and running performance in well-trained endurance runners. *Journal of Human Kinetics*, 70: 165-172.



- Ueno, H., Suga, T., Takao, K., Tanaka, T., Miyake, Y., Kusagawa, Y., Terada, M., Nagano, A., & Isaka, T. (2021a) Association between patellar tendon moment arm and running performance in endurance runners. *Physiological Reports*, 9(15): e14981.
- Ueno, H., Suga, T., Takao, K., Tanaka, T., Misaki, J., Miyake, Y., Nagano, A., & Isaka, T. (2018b) Association between forefoot bone length and performance in male endurance runners. *International Journal of Sports Medicine*, 39(4): 275-281.
- Ueno, H., Suga, T., Takao, K., Tanaka, T., Misaki, J., Miyake, Y., Nagano, A., & Isaka, T. (2018c) Potential relationship between passive plantar flexor stiffness and running performance. *International Journal of Sports Medicine*, 39(3): 204-209.
- Ueno, H., Suga, T., Takao, K., Terada, M., Nagano, A., & Isaka, T. (2021b) Relationship between body segment mass and running performance in well-trained endurance runners. *Journal of Applied Biomechanics*, 1–7. Advance online publication.
- Vanwanseele, B., Op De Beéck, T., Schütte, K., & Davis, J. (2020) Accelerometer based data can provide a better estimate of cumulative load during running compared to GPS based parameters. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2: 575596.
- Weyand, P. G., Sternlight, D. B., Bellizzi, M. J., & Wright, S. (2000) Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *Journal of Applied Physiology*, 89(5): 1991-1999.
- Yamanaka, R., Ohnuma, H., Ando, R., Tanji, F., Ohya, T., Hagiwara, M., & Suzuki, Y. (2019) Sprinting ability as an important indicator of performance in elite long-distance runners. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(1): 141-145.
- Young, W. (1995) Laboratory strength assessment of athletes. *New Studies in Athletics*, 10(1): 89-96.
- Young, W. B., Wilson, G. J., Byrne, C. (1999) A comparison of drop jump training methods: effects on leg extensor strength qualities and jumping performance. *International Journal of Sports Medicine*. 20(5): 295-303.
- Zrenner, M., Gradl, S., Jensen, U., Ullrich, M., & Eskofier, B. M. (2018) Comparison of different algorithms for calculating velocity and stride length in running using inertial measurement units. *Sensors*, 18(12): 4194.

- 関子あまね・荻山靖・関子浩二. (2017) リバウンドジャンプテストを用いた跳躍選手の専門的な下肢筋力・パワーに関する評価. 体力科学. 66 (1) : 79-86.
- 関子あまね・荻山靖・吉田拓矢・木越清信・尾縣貢. (2020) 陸上競技跳躍競技者のリバウンドジャンプにおける下肢筋力・パワー発揮特性の縦断変化. 体育学研究. 65 : 225-236.
- 関子浩二・平田文夫. (1999) 下腿の神経・筋・腱系の状態が長距離走者の競技成績に及ぼす影響.
- 関子浩二・高松薫・古藤高良. (1993) 各種スポーツ選手における下肢の筋力およびパワー発揮に関する特性. 体育学研究. 38 : 265-278.
- Barnes, R. K., & Kilding, E. A. (2015) Running economy: measurement, norms, and determining factors. Sports Medicine Open, 1(1): 1-8.

## 研究業績一覧

本論文は、以下の学術論文および学会発表をもとにまとめられたものである。

### 【学術論文】

Hiromasa, Ueno., Sho, Nakazawa, Yohsuke, Takeuchi., & Masaaki, Sugita. (2021) Relationship between Step Characteristics and Race Performance during 5000-m Race. *Sports*, 9(9): 131.

Hiromasa, Ueno., Shu, Hashimoto., Aki, Kawamura., Sho, Nakazawa., Yohsuke, Takeuchi., Kenji, Takao., Masaaki, Sugita. Relationship between repeated rebound jump performance and step characteristics during a 5000-m race in competitive endurance runners. 査読中.

### 【国際学会発表】

Hiromasa, Ueno., Shun, Hashimoto., Aki, Kawamura., Sho, Nakazawa., Yohsuke, Takeuchi., Kenji, Takao., Masaaki, Sugita. Relationship between repeated rebound jump performance and step characteristics during 5000-m race in endurance runners. 26th Annual Congress of the European College of Sports Science (Web), September, 2021.

### 【国内学会発表】

上野弘聖・中澤翔・竹内洋輔・杉田正明. 5000m レース中のステップ変数と競技記録との関係. 第26回日本バイオメカニクス学会大会 (Web), 2020年9月.

## 謝辞

博士課程入学時から本研究の立案や遂行，本論文の執筆に際して，手厚くご指導を頂いた杉田正明教授に心より御礼申し上げます。また，杉田正明教授には，コーチングに即した研究の視点やその活用について熱くご指導いただき，様々な競技現場でそれらを実践するご機会を頂きました。心より感謝の意を表します。

本論文の審査に際して，副査をお引き受けいただきました阿江通良教授，西山哲成教授をはじめ，日本体育大学体育科学研究科の諸先生方や関係の職員の方々には研究活動や学生生活を支えていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

日本体育大学陸上競技部の皆様には，研究対象者の募集や日本体育大学長距離競技会でのデータ収集にご協力いただきました。厚く御礼申し上げるとともに，より一層のご活躍を祈念しております。

立命館大学陸上競技部の高尾憲司氏には，研究対象者の募集から測定の実施にご協力を賜りました。また，本研究の遂行に際して，陸上競技長距離選手へのコーチングについてご助言頂きました。深く感謝申し上げます。

杉田研究室の橋本峻氏，河村亜希氏，中澤翔氏，後輩の皆様には，本論文の測定に多大なご協力を賜りました。また，競技現場におけるフィールドワークの実施において，測定の手法から競技現場で研究に取り組む姿勢まで，多くのことを学ばせて頂きました。杉田研究室の同輩である竹内洋輔氏とは，互いに励まし合い研究活動に取り組み，また，トップアスリーの競技現場における科学的手法の実践について学ばせて頂きました。皆様に深く感謝申し上げます。

最後に，進学から学生生活まで優しく支えてくれた家族に心より感謝いたします。

2021年12月

上野弘聖