

平成 27 年度 修士論文

長距離ランナーの下肢の動作および
筋活動とランニングエコノミー
との関係

電気通信大学 情報理工学研究科 知能機械工学専攻

岡田研究室

1432017 栗田崇平

目次

1. 緒言	
1.1. 研究背景	・・・ 1
1.2. 先行研究	・・・ 6
1.3. 研究目的	・・・ 15
2. 方法	
2.1. 研究方法	・・・ 16
2.2. 実験方法	・・・ 16
2.3. 計測方法	・・・ 19
2.4. データ処理	・・・ 24
2.5. 統計処理	・・・ 32
3. 結果	
3.1. 年齢, 身体特性, ランニングエコノミーおよびパフォーマンス	・・・ 36
3.2. 長距離ランナーの下肢動作の特徴	・・・ 37
3.3. 長距離ランナーの下肢筋活動の特徴	・・・ 49
3.4. 下肢の動作および筋活動とランニングエコノミーとの関係	・・・ 66
4. 考察	
4.1. 得られたランニングエコノミーの妥当性	・・・ 74
4.2. 長距離ランナーの下肢の動作および筋活動の特徴	・・・ 76
4.3. ランニングエコノミーに影響を及ぼすバイオメカニクスの要因	・・・ 82
4.4. トレーニングへの提言	・・・ 90
5. 結言	
5.1. まとめ	・・・ 92
5.2. 今後の課題	・・・ 94
謝辞	・・・ 95
参考文献	・・・ 96
学会発表	・・・ 102

1. 緒言

1.1. 研究背景

1.1.1. 長距離走

長距離走とは、決められた長い距離をどれだけ短い時間で走れるかを競う陸上競技の種目であり、紀元前 5 世紀の古代ギリシャ時代から行われていたことが知られている (Cavanagh,1990)。長距離走ではできるだけ高いスピードを出すことよりもある程度のスピードを維持することが求められる。短距離走等の他の陸上競技の種目では先天的な能力によるところが大きいといわれる絶対スピードがより重視されるが、長距離走では後天的に獲得される持久力や戦術がより強く要求される。したがって、トレーニングによりパフォーマンスを大きく高めることができることも特徴の 1 つである。

日本人にとって、長距離走は重要なスポーツである。1964 年東京から 1992 年バルセロナまでのオリンピック 7 大会 (1980 年モスクワは日本が不参加) において、マラソンでメダル 3 個、入賞 6 個を獲得し、日本はマラソン大国と言われてきた (澤木, 2013)。しかし、その後はケニア人、エチオピア人に代表されるアフリカ系ランナーの台頭もあり、1996 年アトランタから 2012 年ロンドンまでの 5 大会においてメダル 0 個、入賞 3 個と低迷している。さらに、優勝者のタイムと日本人最高順位者のタイムを比較すると、1996 年アトランタ以降ではタイム差が大きく、スピードマラソンへの適応ができていないことから、10000m の走力が重要であると指摘されている (澤木, 2013)。また、澤木 (2013) は 2000 年以降における日本の実業団ランナーの 10000m と大学生の 10000m および高校生の 5000m の記録を比較し、大学生の記録が実業団ランナーに接近し上回っている年もあること、同時に高校生の 5000m 記録も著しく向上していることから、大学生や高校生のトラックの記録が向上しているにもかかわらずマラソンの成績に直結していないことを報告している。このような状況を考えると、日本の長距離界は伸び悩んでいるといえるであろう。

1.1.2. ランニングエコノミー

長距離走では長時間に渡ってエネルギーを生成し続ける必要があり、このエネルギー量は酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) ではほぼ評価できることから、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) についての研究が多くなされてきた (榎本, 2013). $\dot{V}O_{2max}$ と長距離走パフォーマンスとの間には有意な相関関係が示されているが、これは対象の競技レベルが広い場合であり、狭い範囲、特に高い競技レベルのみを対象とした場合にはこの相関関係が有意ではなくなることが報告されている (Conley と Krahenbuhl, 1980).

この狭い範囲の高い競技レベルにおけるパフォーマンスを説明する要因として、ランニングエコノミー (Running Economy : RE) が注目されている (Conley と Krahenbuhl, 1980). RE はある走速度におけるエネルギー消費量の少なさ (走の経済性) を評価する変数であり、 $\dot{V}O_{2max}$ では説明できなかった狭い競技レベルを対象とした場合のパフォーマンスと有意な相関関係があることが報告されている (Conley と Krahenbuhl, 1980). さらに、国際大会にて活躍しているケニアやエチオピアのランナーが優れた RE を獲得していることが明らかにされていることから (榎本ら, 2010 ; Weston ら, 2000), RE を高めるための研究が重要であると考えられる. 凶子 (2005) は、記録が低迷している長距離選手に対してプライオメトリクスを導入した結果、再び記録が向上した 5 つの事例が存在することを報告した. また、Spurrs ら (2003) は、プライオメトリクストレーニングによって RE が改善したことを報告している. これらのことから、RE を高めることは日本の長距離界の伸び悩みを打破するための有効な手段になりうると考えられる.

1.1.3. 長距離走のバイオメカニクス

長距離走パフォーマンスを向上させるために生理学的な研究が特に盛んに行われているが、一方で、体力要素だけではなく技術的な要素を追究するバイオメカニクスの研究も重要であると考えられる. このことは、2012年ロンドンオリンピック男子 10000m におい

でワンツーフイニッシュを果たしたモハメド・ファラーとゲーレン・ラップ，2015年北京世界選手権男子5000mにおいて予選敗退ながらもアフリカ勢に唯一肉薄した日本人選手である大迫傑が所属しているナイキ・オレゴンプロジェクトにてバイオメカニクスが重視されている（1859 Oregon Magazine, 2013）ことから言えよう。

長距離走ではより速いペースを維持して走ることが重要であるが，実際のレースでは走行時間の経過に伴う疲労の蓄積やレースペースの変化などの要因が下肢の動作および筋活動に影響を与え，パフォーマンスを低下させることが経験的に知られており，長距離ランナーの疲労や走速度に関するバイオメカニクスの研究が行われている。しかしながら，これらの多くの研究ではランニング中の1サイクルのみ（阿江ら，1986；榎本ら，2010；HeiseとMartin, 1998；丹治，2014；丹治ら，2015；WilliamsとCavanagh, 1987），もしくは連続しない複数サイクル（榎本ら，1999；Kyröläinenら，1999；Kyröläinenら，2001；Kyröläinenら，2005）が対象とされることが多い。このような手法では分析した区間におけるランナーの特徴を捉えることはできるが，連続するサイクルにおける動作や筋活動の変動や走行時間経過に伴う変化について言及することができず，長時間の循環運動である長距離走の全容を捉えることはできない。

さらに，パフォーマンスレベル間での比較をした研究が少ないことも課題であると考えられる。実際のレースを分析し，パフォーマンスが高かったランナーと低かったランナーとで比較を行った研究はあるが（榎本ら，1999；伊藤ら，1998），この比較では当然ながら走速度が異なっている。ランニングの下肢の動作および筋活動は走速度による影響を強く受けるため，同じ速度において比較を行わなければ得られた結果がパフォーマンスによる差であるのか，単に走速度による差であるのかを区別することができない。走速度の変化に伴う下肢の動作および筋活動の変化を報告している研究も多いが（阿江ら，1986；Kyröläinenら，1999；Kyröläinenら，2001；Kyröläinenら，2005；Liebermanら，2006；Mooreら，2013；Nilssonら，1985），これらの結果では高い走速度を維持するための知見

を提供するに留まっている。榎本ら (2010), 丹治 (2014), 丹治ら (2015), Williams と Cavanagh (1987) は同じ走速度において長距離ランナーの下肢動作を複数の群分けを行って比較しているが, 先述したように 1 サイクルのみの分析である。したがって, 複数サイクルに渡って同じ走速度における長距離ランナーの下肢の動作および筋活動を調査した研究は非常に少なく, 全容を捉えた上でパフォーマンスを向上させるための知見を提供できているとは言い難い。

1.1.4. ランニングエコノミーとバイオメカニクス

RE の注目に伴い, RE に関するバイオメカニクスの研究も盛んに行われている。Halvorsen ら (2011), Santos-Concejero ら (2014), 丹治 (2014), 丹治ら (2015) および Williams と Cavanagh (1987) は, RE に関わる下肢動作を部分的あるいは包括的に調査し, 経済性の高いランナーの特徴を報告している。しかしながら, 下肢動作のみでは, 筋の弾性エネルギーの再利用, 二関節筋によるエネルギーの伝達, アイソメトリックな筋活動, 共収縮による主働筋と拮抗筋の影響を考慮できないため (Frost ら, 2002; 関, 2015), より原因的な要素である下肢筋活動も含めて RE への影響を調査すべきであろう。

下肢筋活動に関する研究として, Kyröläinen ら (2001) は, RE に関わる下肢の動作および筋活動を調査し, 支持期の大腿二頭筋および腓腹筋の活動量が RE と有意な正の相関であったことを示したが, これら以外に RE に関わる変数を見つけれなかったとも報告した。また, Heise ら (2008) と Moore ら (2013) のように, 同様の手法にて RE との関係を調査しているにもかかわらず, 互いに矛盾した結果も報告されていることから, RE に関係するバイオメカニクスの変数, 特に下肢筋活動が明確になっているとは言い難い。

この原因として, 低い走速度において計測されたバイオメカニクスの変数を用いている, 一部の変数のみとの関係を評価しているという点が挙げられる。低い走速度において計測されたバイオメカニクスの変数では, 低い走速度がアスリートランナーのレースペースか

らかけ離れているため、実際のレースにおいて高い RE を獲得するための知見とは成り得ないと考えられる。この背景としては、被験者としてアスリートを集めにくく、高い走速度での実験を行えないことや、一般的に RE はある走速度における $\dot{V}O_2$ として評価される (Conley と Krahenbuh, 1980; Heise ら, 1996; Heise と Martin, 1998; Heise ら, 2008; Moore ら, 2013; Santos-Concejero ら, 2014; Spurrs ら, 2003; Weston ら, 2000; Williams と Cavanagh, 1987) ため、アスリートのレースペースのような無酸素性エネルギーが関与する運動強度でエネルギー消費量を定量するスタンダードな手法が確立されていないことなどが考えられる。

また、RE には様々な要素が関わっていると考えられるため、RE と一部の変数のみとの関係性を評価するだけでは評価が妥当でないと考えられる。多くの研究では下肢動作のみ (榎本ら, 2010; Halvorsen ら, 2011; Heise と Martin, 1998; Santos-Concejero ら, 2014; 丹治, 2014; 丹治ら, 2015; Williams と Cavanagh, 1987), もしくは下肢筋活動のみ (Frost ら, 1997; Heise ら, 1996; Heise ら, 2008; Moore ら, 2013) と RE との関係性を分析することが多く、下肢動作、下肢筋活動、RE を同時に分析していない。さらに、算出された変数と RE との関係性を単回帰分析によって単体で調査することが多く (榎本ら, 2010; Heise ら, 1996; Heise と Martin, 1998; Heise ら, 2008; Kyröläinen ら, 2001; Moore ら, 2013; Santos-Concejero ら, 2014), 包括的に調査されているとは言えない。したがって、走速度や算出している変数の数などを断片的に分析していることが、RE に関係するバイオメカニクスの変数が明らかになっていない理由の 1 つであろう。

1.1.5. 長距離走に関するバイオメカニクスの研究の他分野における意義

現代の長距離走は一般市民にとっても重要なスポーツとなっている。毎年、1月2日から3日にかけて行われる東京箱根間往復大学駅伝競走大会 (箱根駅伝) は、テレビ視聴率が20%近くにもなり、沿道の観衆が十数万人に及ぶと言われる国民的的一大イベントとして認

識されている (渋谷, 2009). また, 現代社会においては高齢化に伴う医療費の増大が大きな問題となっており, 高血圧や糖尿病などの生活習慣病の発症予防や改善のために運動習慣が重要であることが指摘されている (岡本ら, 2010). このような競技に対する人気や健康志向の増加, 手軽さなどの理由から, ジョギングやランニングを行う人が増加しており, 一般市民参加型のマラソン大会が地域や学校の単位などで多く開催されている. このように, 現在のスポーツは競技として競い合うだけでなく, 教育のため, 健康のため, 楽しむためなど多目的であり, 我々の生活の中で様々な役割を果たすようになってきている. しかしながら, 運動を継続できない人が多くいることから (岡本ら, 2010), アスリートランナーのみならずファンランナーにおいても, ジョギングやランニングを続けるためのモチベーションとして体力の増進や記録の向上が必要であると考えられる.

工学分野においても長距離走は重要な役割を果たしていると考えられる. 映画やゲームのようなエンターテインメントにおいて, 登場人物がより人間らしい動作であることは重要であろう. 現在ではロボットの開発も積極的に行われているが, 支えなしに自立して走ることができるヒューマノイドはまだ開発されておらず, 将来的に人間社会にロボットが溶けこむためにはより人間らしい動きをすることが重要である. また, 画像認識によりランニングの特徴点を抽出することで, 危険な場所において警報を鳴らすシステムを開発し, 安全を確保することも可能であると考えられる. このように, 長距離走は, 工学分野においては基礎研究の対象として重要な役割を担っているといえる.

1.2. 先行研究

1.2.1. ランニングエコノミーに関する研究

ランニングエコノミー (Running Economy : RE) とは, ある走速度におけるエネルギー消費量の少なさ (走の経済性) を評価する変数である. Conley と Krahenbuhl (1980) は, 全国的に著名なレースにおいて 19 位以内であった 12 人のランナーを対象に, RE, $\dot{V}O_{2max}$,

10km 走の記録との関係を調査した。この結果、 $\dot{V}O_{2max}$ が 71.7 ± 2.8 [ml/kg/min], 10km 走の記録が 32.1 ± 1.0 [min]と狭い範囲にあり、 $\dot{V}O_{2max}$ と 10km 走の記録とは有意な相関が認められなかった。一方、241, 268, 295 [m/min]における $\dot{V}O_2$ と 10km 走の記録とは、いずれも有意な正の相関が認められた。このことから、よくトレーニングされた経験のあるランナーはみな同様の $\dot{V}O_{2max}$ であるため、RE が 10km 走のパフォーマンスを説明する有意な要素であると結論づけた。ただし、 $\dot{V}O_{2max}$ が重要でない訳ではなく、RE は同程度の高い $\dot{V}O_{2max}$ であるランナーのパフォーマンスだけを説明するとも述べている。

Weston ら (2000) は、同程度のレース記録、体重、年齢、体脂肪、大腿の体積を持つアフリカ人ランナー8名および白人ランナー8名を対象に、16.1 [km/h]の定速および各被験者の 10km 走のレースペースにおける 6 分間走を行わせ、心拍数、呼吸交換比 (Respiratory Exchange Ratio: RER), $\dot{V}O_2$, 換気量を収集した。この結果、アフリカ人ランナーは $\dot{V}O_{2peak}$ が有意に 13 %低い、定速における $\dot{V}O_2$ は有意に 5 %低く経済的であり、 $\dot{V}O_{2peak}$ に対する $\dot{V}O_2$ の割合が有意に高かった。このことから、これらの違いの原因を明確にすることはできないが、エリートアフリカ人ランナーの高いパフォーマンスの説明につながると結論づけた。

Medbø ら (1988) は、超最大下のランニングにおける無酸素性パワーを総酸素借を用いて定量した。この過程で、最大下における運動強度と $\dot{V}O_2$ との直線関係によってエネルギー需要量を外挿しており、この時に得られた回帰直線の傾きが RE を表すと報告した。しかし、この回帰直線を妥当に得るためには異なる運動強度から得られた少なくとも 10 個のサンプルが必要であるため、簡便に回帰直線を求める手法をも提案した。その方法は、2 個のサンプルを用いて回帰直線を求め、切片を 5 [ml/kg/min]で固定するというものである。もし、切片とこれら 2 個のサンプルをそれぞれ通る 2 本の回帰直線の傾きの差が 3 %以上であった場合には、サンプルをもう 1 個増やすべきであると報告している。

これらの研究では、RE を $\dot{V}O_2$ のみから算出しているが、これには問題があることが指摘

されている。Fletcher ら (2009) は、最大下の 3 種類の走速度における $\dot{V}O_2$ と RER を考慮したエネルギー消費とを比較し、 $\dot{V}O_2$ は走速度間における有意差が認められなかったのに対し、RER を考慮したエネルギー消費は走速度の増加に伴い有意に増加したと報告した。エネルギー消費は、エネルギー基質（糖代謝と脂質代謝の比率）によって異なるため、 $\dot{V}O_2$ を用いてエネルギー消費を算出する際には RER を考慮すべきと結論づけている。

丹治 (2014) および丹治ら (2015) は、LT レベルを超える運動強度における RE を評価するために、RER および血中乳酸値を用いて $\dot{V}O_2$ からエネルギー消費を計算した。この結果、エネルギー消費が走速度の 1.05 乗に比例しており、被験者の 5000m シーズン記録とエネルギー消費にも有意な相関が認められたことを報告した。しかしながら、この手法では侵襲的に被験者から血中乳酸を取得する必要がある。

以上のことから、RE を評価するにはある走速度における $\dot{V}O_2$ が利用されることが多いが、エネルギー基質が考慮されていないことが多い。また、アスリートのレースペースのような無酸素性エネルギーが関与する高強度運動にも対応したスタンダードな RE の算出手法は確立されていないのが現状である。

1.2.2. 長距離走のバイオメカニクスに関する研究

阿江ら (1986) は、幅広い走速度におけるランニングを詳細な局面分けを行った上で分析し、遊脚期における膝関節は二峰性の負のパワーを発揮していること、これが走速度の増加に伴い著しく増加することを報告した。これにより、遊脚期前半における膝関節の屈曲時には膝関節伸展筋群が、後半における膝関節の伸展時には膝関節屈曲筋群が力学的エネルギーを吸収することで下腿の過度な回転を抑制して脚の回転を早め、足の接地位置が身体重心に近づきブレーキが小さくなると考察している。

Kyröläinen ら (1999) は、室内のトラックにて幅広い走速度における下肢筋活動と地面反力の変化を調査し、走速度の増加に伴い増加する着地衝撃に耐えるためには、股関節お

よび膝関節の伸展筋群，足関節底屈筋群の大きな活動が必要であり，接地直前および制動局面の脚伸展筋群の大きな活動が不要な重心の落ち込みを防ぐと報告した．また，彼らは走速度の増加に伴い接地前後において外側広筋と大腿二頭筋，腓腹筋と前脛骨筋の共収縮が増加したこと，大腿二頭筋の活動量が増加し活動時間が長くなったこと，地面反力が増加し合成地面反力の向きが水平に近づいたことを報告している．このことから，走速度の増加に伴う最適な方向への大きな力発揮にはハムストリングスの活動が重要であり，支持期初期において増加した膝関節および足関節の剛性が推進局面の大きな張力発揮に貢献していると述べている．

Lieberman ら (2006) は，歩行およびランニングにおける大殿筋の活動を複数の速度に渡って調査し，大殿筋は股関節が屈曲位で活動する筋であること，歩行では活動が小さいもののランニングでは大きいことから，大殿筋の役割はランニング時の大腿を減速させることであると考察した．

Nilsson ら (1985) は，トレッドミル上の歩行およびランニングの速度増加に伴う下肢の動作および筋活動の変化について調査し，様々な結果を報告している．この中で筋の活動時間については，速度増加に伴い外側広筋，腓腹筋外側頭および前脛骨筋の 1 サイクル時間に対する活動時間の割合が増加し，特に前脛骨筋は高い速度において 1 サイクル時間の大半を占めていることを明らかにした．

以上のことから，走速度の増加に伴う下肢の動作および筋活動は明らかになっているが，これらの知見はあくまでも高い走速度で走るためのものであり，パフォーマンスが異なる個人間での比較などをしなければ真にパフォーマンスを向上させるための知見とはなり得ないであろう．また，分析対象のサイクルが阿江ら (1986) は 1 サイクルのみ，Kyröläinen ら (1999) は連続しない複数サイクルであることから，長距離走の全容を捉えた結果であるとは言い難い．

伊藤ら (1998) は，100m のレースを分析し，疾走速度と脚全体（股関節と足関節を結

ぶ線分)の最大角速度との有意な正の相関、膝関節の最大伸展および足関節の最大底屈角速度との有意な負の相関を示した。これにより、膝関節を固定し、脚全体のスイング速度と股関節の伸展角速度との差を小さくし、より重心を前に運ぶこと、足関節を固定し、股関節の力を地面に伝えることが合理的なキック動作であることを報告した。また、疾走速度と脚全体の最大振り戻し角速度には有意な正の相関がみられたことから、振り戻し動作はその後に続く支持期における脚のスイング速度を予め高め、高い疾走速度を得るために股関節筋群によって積極的に行われるべき重要な動作であると述べている。しかし、この研究は榎本ら(1999)と同様に実際のレースを分析しているため、被験者ごとに走速度が異なっている。したがって、得られた結果がパフォーマンスによる差であるのか、単に走速度の違いによる差であるのかを区別することはできない。

1.2.3. ランニングエコノミーおよび下肢動作に関する研究

Williams と Cavanagh (1987) は、RE に影響する要因を最初に包括的に検証した研究者である(榎本, 2013)。彼らは、地面反力、パワー、エネルギー転移量、キネマティクス変数などを説明変数、RE を目的変数とする重回帰分析を行い、決定係数が 54 %であったことを示している。また、経済性の高いランナーの特徴として、接地時に下腿がより後傾し、体幹がより前傾し、離地時の足関節の底屈が小さく、支持期中に膝関節がより屈曲し、支持期中の膝関節中心の前方への最小速度が小さく、手首の軌跡が短く、重心の上下動が小さいことを示している。

Arellano と Kram (2014) は、地面反力を計測できるトレッドミルを開発し、ランニングの様々な動作を制限もしくは補助することによるエネルギーの変化を調査した。この結果、支持期の体重のサポートによって 65-74 %、推進によって 37-42 %、脚のスイングによって 7 %、左右のバランスによって 2 %のエネルギーが消費されることを報告した。

Halvorsen ら (2011) は、重心の上下動およびステップ頻度を意図的に変化させた場合

のエネルギー消費への影響を調査し、 $\dot{V}O_2$ はステップ頻度とは負の相関、重心の上下動とは正の相関であったことを報告した。さらに、 $\dot{V}O_2$ はステップ頻度と重心の上下動との積とは正の相関、重心の高さとは負の相関があったことから、重心変位が RE に影響していると述べている。

Heise と Martin (1998) は、トレッドミル上にて 6 分間走を行かせた際に計測した $\dot{V}O_2$ と、グラウンド上にてトレッドミル上と同程度の速度 ($\pm 3\%$) による計測から算出した脚全体の剛性との関係を調査した。この結果、鉛直方向の剛性と $\dot{V}O_2$ とに負の相関、この剛性によって出力されたパワーと $\dot{V}O_2$ とに正の相関が認められたことから、経済的なランナーは高い剛性を持っていることが明らかになった。

榎本ら (2010) は、ケニア人ランナーと日本人ランナーを対象とし、血液、体格、筋横断面積、トレッドミル上での生理学的変数、走行路でのバイオメカニクスの変数について調査した。この結果、ケニア人ランナーを日本人ランナーと比較すると、生理学的特徴として乳酸閾値や $\dot{V}O_{2max}$ に大きな差はなかったが、RE に優れており高い走速度でのトレッドミル走において主観的運動強度 (Rate of Perceived Exertion : RPE) が低く、楽に走ることができること、体格的特徴として下腿が細長い脚を前後にスイングすることへの影響は小さく、慣性モーメントはむしろ日本人の方が小さかったこと、離地後の脚の前方へのスイング開始あたりで大きな股関節屈曲トルクをタイミングよく発揮していることが明らかになった。このことから、ケニア人ランナーは、脚全体の股関節まわりの慣性モーメントが大きくなる離地直後に大きな股関節屈曲トルクを発揮し、前方へのスイングが始まると下腿を大腿に引き付け脚全体の慣性モーメントを小さくして前方へのスイング速度を効果的に高めていると考察している。

丹治 (2014) および丹治ら (2015) は、LT を超える高強度運動における RE を $\dot{V}O_2$ 、RER および血中乳酸を用いて算出し、これを目的変数、関節角度、関節角速度、地面反力、関節トルクを説明変数とする重回帰分析を行った。この結果、経済性の高いランナーは、足

関節が過度に底屈していない，膝関節の屈曲が大きい，股関節の外旋が小さく接地時に内旋している，股関節伸展トルクを大きく発揮していることが明らかになった．

榎本ら（1999）は，RE には生理学的エネルギーから力学的エネルギーへの変換と力学的エネルギーから有効エネルギーへの変換の 2 つの過程が含まれていることから，純粹に走動作を評価するために RE ではなく走の有効性指数（Effectiveness Index : EI）を使用し，5000m レースの 2000m 地点および 4000m 地点における 1 サイクルを対象に高い EI を持つランナーの特徴を調査した．この結果，EI の高いランナーは，両脚間での力学的エネルギーの伝達が大きく，体幹になされた力学的仕事が小さく，支持期前半における身体重心の低下および減速が小さいことが明らかになった．

この一方で，下肢動作のみでは RE を評価しきれないという報告もある．関（2015）は，ランニング中に生み出された力学的仕事を関節トルクパワーによる方法と力学的エネルギーによる方法とで算出した．この結果，両者によって算出された力学的仕事には有意差が認められ，ほとんどの項目において生理学的変数との有意な相関関係が得られなかったと報告している．彼はこの原因として，剛体リンクモデルによる力学的仕事の算出においては，筋の弾性エネルギーの再利用，二関節筋によるエネルギーの伝達，共収縮による主働筋と拮抗筋とのトルク発揮の相殺を考慮できないことを挙げている．

Frost ら（2002）は，7-16 歳の子供に複数の速度における歩行およびランニングを行わせ， $\dot{V}O_2$ と効率を目的変数，力学的仕事，エネルギー転移量，大腿および下腿に関わる筋の共収縮の程度，ステップ頻度および年齢を説明変数とする重回帰分析を行った．この結果，年齢が最も良い予測因子であり，どの走速度におけるモデルにも共収縮が含まれていたが，効率を説明する際の標準偏回帰係数が $\dot{V}O_2$ を説明する際よりも小さかったこと，幼い子供の方が大きかったことから，関節を安定させる共収縮は年齢による $\dot{V}O_2$ の違いを説明する上で重要な要素であるが効率においては重要ではないこと，不必要な拮抗筋の活動はエネルギーの無駄であることを明らかにした．また，力学的仕事およびエネルギー転移量が説明変

数としてあまり残らなかったこと、年齢間における力学的仕事およびエネルギー転移量に有意差が認められなかったことから、移動運動におけるエネルギー消費は、力学的仕事およびエネルギー転移量では定量できず、弾性エネルギーの貯蔵、拮抗筋の共収縮、アイソメトリックな筋活動が影響していると考察している。さらに、1, 2 番目に高い走速度における $\dot{V}O_2$ とステップ頻度との負の相関を報告し、ある1つの走速度における重回帰分析の説明変数が他の走速度における結果と大きく異なっていたことから、この違いを説明することは難しいと述べている。

以上のことから、RE に影響を及ぼす下肢動作は明らかになりつつあり、現場において動作に関する指導をする際には有効であると考えられる。しかし、下肢動作のみでは考慮できない要因が指摘されていることから、RE への影響を考える上では下肢動作のみではなく下肢筋活動も考慮すべきであろう。

1.2.4. ランニングエコノミーおよび下肢筋活動に関する研究

Kyröläinen ら (2001) は、12-13 種類の幅広い走速度において RE と下肢の動作および筋活動の関係を調査し、支持期の大腿二頭筋および腓腹筋の活動量に RE と有意な正の相関があり、膝関節および足関節筋群の共収縮が関節の剛性を高め、このことが優れた RE に関係している可能性を報告している。しかしながら、これら以外に RE に関わる変数を見つけれなかったとも述べている。

Heise ら (1996) は、トレッドミル上で 10 分間走を行わせ、筋活動の開始時間、活動時間、共収縮時間と RE との関係を調査した。その結果、大腿直筋の遊脚期における活動の開始時間と $\dot{V}O_2$ に有意な正の相関があったこと、有意ではないものの二関節筋である大腿直筋とハムストリングスおよび腓腹筋との共収縮時間と $\dot{V}O_2$ には負の相関があったことから、二関節筋同士の共収縮は同時に複数の関節を固定できるため経済性に貢献する可能性を示唆している。また、彼らは、その後の研究にて支持期の大腿直筋および腓腹筋の共収縮時間

が、 $\dot{V}O_2$ と有意な負の相関であったことも報告し、これらの筋の共収縮が近位から遠位関節への力学的エネルギーの転移に貢献すると考察している (Heise ら, 2008).

一方, Moore ら (2013) は, 複数の走速度において共収縮時間と $\dot{V}O_2$ との関係を Heise ら (2008) と同様の方法にて調査したが, 有意な相関関係が全て正であったことから, 共収縮は RE に悪影響であると述べている.

Frost ら (1997) は, 7-16 歳の子供を対象に歩行およびランニングを行わせ, 年齢により被験者を 3 群に分けることで, エネルギー消費と大腿および下腿に関わる筋の共収縮の変化を調べた. その結果, 最も若い群においてエネルギー消費および共収縮が最も大きい. 共収縮がエネルギー消費の増大につながることを報告した. この一方で, 彼らは共収縮が歩行およびランニングにおいて全く不要というわけではなく, 体重を受け止める局面においては関節の安定に貢献するとも考察している. すなわち, 遊脚期においては体重を支えるような大きな関節の安定は不要であり, 遊脚期の共収縮が余計なエネルギー消費を招いていると考えられる.

以上のように, RE に影響する下肢筋活動は調査されてはいるものの, Heise ら (2008) と Moore ら (2013) との結果の矛盾に代表されるように, 明確になっているとは言い難い. また, 実験時の走速度は, Heise ら (1996) が 4.13 [m/s], Heise ら (2008) が 3.04 [m/s], Moore ら (2013) が 9.1-12.0 [km/h], Frost ら (1997) が 1.79-2.73 [m/s] と Kyröläinen ら (2001) の 3.25-6.50 [m/s] を除いて低い. したがって, 幅広い走速度において計測された変数を用いることが必要であり, 下肢筋活動は下肢動作と比較して包括的に解析されていないため, 様々な要因について検討することが求められよう.

これらの先行研究から, 長距離ランナーの特徴を複数サイクルに渡って捉え, かつ同じ走速度において解析することで, 真にパフォーマンスを向上させるための知見を提供できると考えられる. さらに, RE に影響するバイオメカニクスの変数を明らかにするためには, アスリートのレースペースのような高い走速度を含め, 下肢の動作および筋活動から様々

な変数を算出して包括的に解析することが必要であると考えられる.

1.3. 研究目的

本研究の目的は以下の2つである.

1つ目は、長距離ランナーの下肢の動作および筋活動の特徴を明らかにすることである.

2つ目は、下肢の動作および筋活動、REを包括的に解析することにより、長時間走行中の下肢の動作および筋活動がREに及ぼす影響を明らかにすることである.

2. 方法

2.1. 研究方法

鍛錬者と非鍛錬者を対象にトレッドミル上で複数の速度で 4 分間走を行わせ、連続した複数サイクルにおける下肢の 3 次元動作解析および筋電図学的解析、呼気の生理学的解析を行った。また、鍛錬者と非鍛錬者の違い、下肢の動作および筋活動が RE に及ぼす影響について検討した。

日常的に長距離走トレーニングを行っており、月間走行距離が概ね 300 [km]以上の青年男性 12 名 (Trained) および長距離走トレーニングを行っていない青年男性 10 名 (Untrained) の計 22 名を被験者とした。表 2-1 は、被験者の年齢および身体特性を示したものである。被験者には事前に研究の目的、方法、意義、危険性などを説明し、研究参加への同意を得た後に実験を行った。なお、被験者には実験当日の激しい運動や、前日の飲酒は控えるよう指示した。

Table 2-1 Characteristics of the subjects

	Trained (n=12)	Untrained (n=10)
	Mean±SD	Mean±SD
Age [yrs]	21.8±1.9	22.1±1.4
Height [cm]	172.2±4.2	173.2±5.0
Body Mass [kg]	62.0±4.5	63.9±10.0
5000m Season Best Record [min's"]	16'20"1±48"5	—

2.2. 実験方法

2.2.1. 一定負荷走行実験

実験は、トレッドミル上にて 4 分間の一定負荷 (速度) 走行実験を 4-6 セット実施した。

走速度は、Trained には 180, 210, 240, 270, 300, 330 [m/min] の 6 速度を、Untrained には 150, 180, 210, 240 [m/min] の 4 速度を設定した。なお、いずれかの速度が完走できなかった場合には次に高い速度での走行は行わなかったが、Untrained で最も高い速度を完走でき、かつ余裕が見られた場合には、さらに 30 [m/min] 高い速度での走行を行った。また、セット間には 7 分間以上の十分な休息を挟み、走速度の順序はランダムとした。

走行中には、光学式 3 次元モーションキャプチャシステムを用いて下肢動作を計測し、同時に表面筋電図 (Electro MyoGraphy : EMG) により下肢筋活動を得た。また、RE を得るために呼気を採取した。トレッドミル後方にはロータリーエンコーダーを設置し、トレッドミルのベルト速度を計測した。図 2-1 は、実際の実験の様子を示したものである。

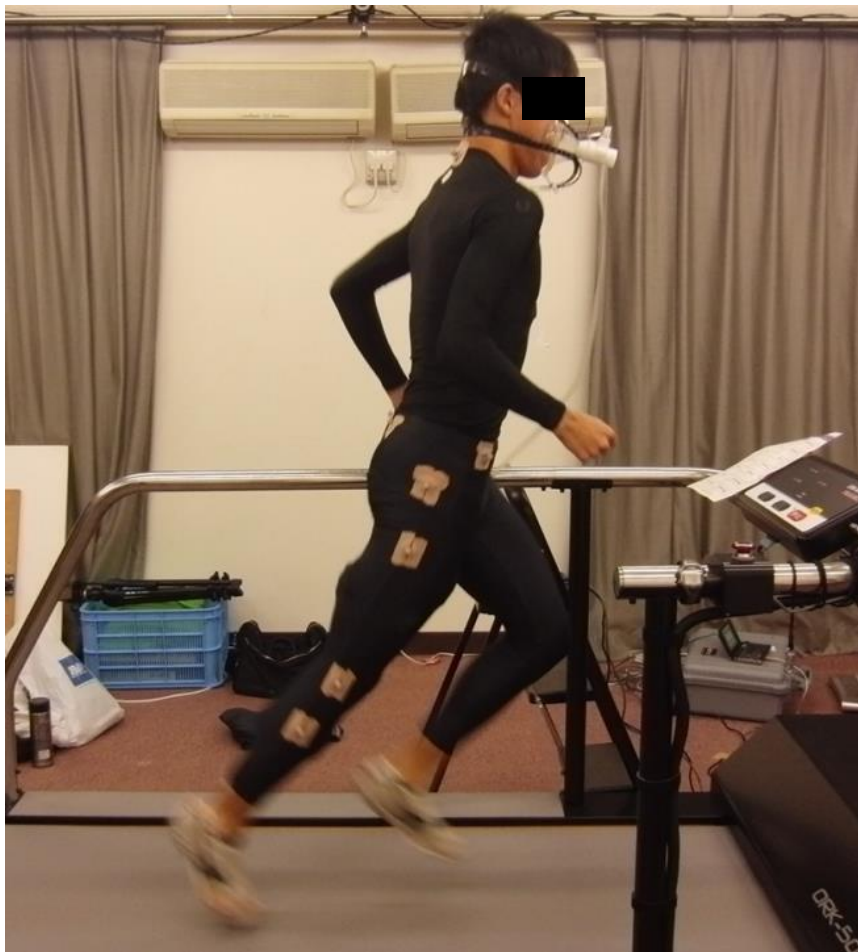


Fig. 2-1 Experimental view

2.2.2. 最大随意収縮

走行実験後、被験者に股関節伸展、膝関節伸展、膝関節屈曲、足関節底屈および足関節背屈の等尺性最大随意収縮 (Isometric Maximal Voluntary Contraction : MVC) を行わせ、EMGにより筋活動を計測した。股関節伸展および膝関節屈曲は腹臥位で股関節180 [deg]、膝関節180 [deg]、足関節90 [deg]の姿勢で、膝関節伸展および足関節背屈は座位で股関節90 [deg]、膝関節90 [deg]、足関節90 [deg]の姿勢で、足関節底屈は立位で股関節180 [deg]、膝関節180 [deg]、足関節90 [deg]の姿勢で行った。図2-2は、MVCにおける被験者の姿勢を示したものである。どの試技においても関節角度が変化しないように検者が徒手により固定した。なお、実験前には被験者に試技内容を確認し、複数回の練習を経てから計測を行った。



Fig. 2-2 Posture of subjects during MVC (upper left: knee extension and ankle dorsiflexion, upper right: ankle plantar flexion, bottom: hip extension and knee flexion)

2.3. 計測方法

2.3.1. 呼吸代謝測定装置

被験者の顔にフェイスマスクを取り付け，図2-3の呼吸代謝測定装置（VO2000，S&ME社製）を用いて走行中の酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）および二酸化炭素排出量（ $\dot{V}CO_2$ ）を3呼吸ごとに収集した．フェイスマスクを取り付ける際には，被験者の呼気がマスクから漏れていないことを確認した．



Fig. 2-3 Respiratory metabolism measurement device

2.3.2. 光学式モーションキャプチャシステム

頸椎点，胸骨上縁，左右大転子，左右大腿骨外側上顆，左右外果，左右踵骨および左右第5中足骨粗面に再帰性反射マーカを貼付し，光学式3次元モーションキャプチャシステム（Optitrack S250e，Natural Point社製）を用いて走行中のマーカの3次元座標を250 [Hz]で計測した．モーションキャプチャシステムは，図2-4の赤外線カメラ10台から構成され，トレッドミルを囲むように配置した．



Fig. 2-4 Infrared camera (Reference: Natural Point Inc.)

2.3.3. 表面筋電図

図2-5のように、下野（2004）を参考にして被験者の右脚の大腿直筋（Rectus Femoris : RF）、外側広筋（Vastus Lateralis : VL）、大殿筋（Gluteus Maximus : GMX）、大腿二頭筋長頭（Biceps Femoris Caput Longum : BF）、半腱様筋（Semitendinosus : ST）、前脛骨筋（Tibialis Anterior : TA）、腓腹筋内側（Gastrocnemius Medialis : GAM）およびヒラメ筋（Soleus : SO）の計8筋に表面電極（ディスプレイ電極）を貼り、その上に図2-6のワイヤレスEMGプローブ（Free EMG, BTS Bioengineering社製）を装着し、走行中およびMVC中の表面筋電図を2000 [Hz]で計測した。計測した筋電位は、EMGワイヤレス電極プローブから無線で図2-7の携帯端末を經由してPCに送信された。

Right lower limb
from right side view

Right lower limb
from back view

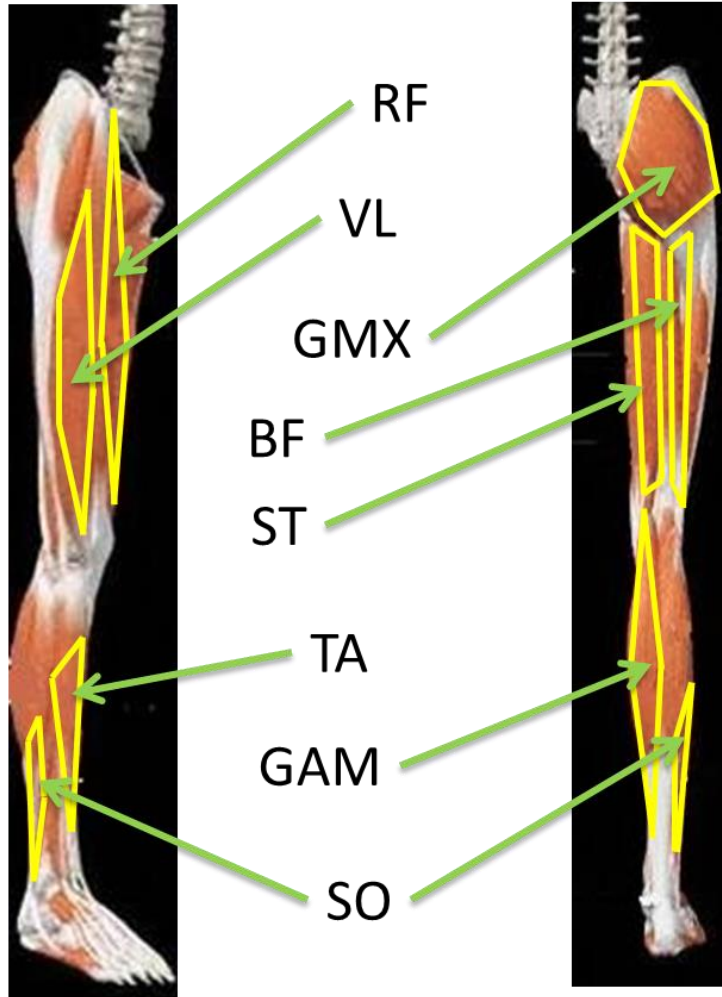


Fig. 2-5 Target muscles (Reference:Information-technology Promotion Agency)



Fig. 2-6 Wireless EMG probe
(Reference: BTS Bioengineering Corp.)



Fig.2-7 Mobile terminal

2.3.4. ロータリーエンコーダー

トレッドミル後方に図2-8のロータリーエンコーダーを設置し、走行中の時々刻々のベルト速度を500 [Hz]で計測した。

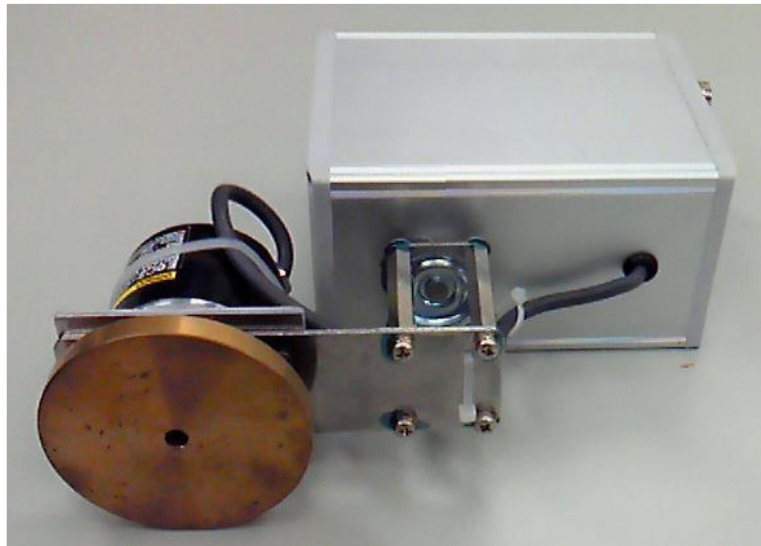


Fig. 2-8 Rotary encoder

2.3.5. 各計測データの同期

各計測機器からのデータの同期には図2-9のパルス発生装置を用い、10秒ごとに自動で同期信号を入力することで計測後に同期が行えるようにした。筋電図には、同期用のプローブを1つ用意し、それに同期信号（矩形波信号）を入力した。ロータリーエンコーダーについては、ベルト速度データと同時に同期信号（矩形波信号）をA/D変換して取り込んだ。モーションキャプチャシステムについては、同期信号の発生と同時に図2-10の赤外線LEDに信号を送り、LEDを点灯させることで同期を行った。



Fig. 2-9 Pulse output device



Fig. 2-10 Infrared LED

2.3.6. 主観的運動強度

走行実験中には、各走行セットの2, 3, 4分経過時に被験者に主観的運動強度 (Rating of Perceived Exertion : RPE) を尋ねた。RPEには小野寺ら (1976) が作成したBorg scale の日本語表示 (表2-2) を用いた。

Table 2-2 Rating scale by Onodera et al. (1976)

	ボルグの英語表記	日本語訳表記(小野寺ら)
20		
19	very very hard	非常にきつい
18		
17	very hard	かなりきつい
16		
15	hard	きつい
14		
13	somewhat hard	ややきつい
12		
11	fairly light	楽である
10		
9	very light	かなり楽である
8		
7	very very light	非常に楽である
6		

2.4. データ処理

2.4.1. ランニングエコノミー

収集した $\dot{V}CO_2$ を $\dot{V}O_2$ で除すことで呼吸交換比 (Respiratory Exchange Ratio : RER) を算出した。 $\dot{V}O_2$ および RER を 5 点移動平均にて平滑化し、2.5-4 分間における平均値を各セットの代表値とした。また、式(1)を用いて各セットの $\dot{V}O_2$ と RER よりエネルギー消費 (Energy Expenditure : EE) を算出した (Kyröläinen ら, 2001)。

$$EE = (5000 \times RER + 16102) \times \frac{\dot{V}O_2}{1000} \dots (1)$$

ここで、EE の単位は[J/kg/min]、RER は無次元、 $\dot{V}O_2$ の単位は[ml/kg/min]である。各被験者の EE の最大値を EEpeak とし、EEpeak の 90 %以下の EE と走速度との回帰直線を算出し、この回帰直線の傾きを RE とした (Medbø ら, 1988)。なお、この回帰直線の切片の値は、安静時の $\dot{V}O_2$ を 5 [ml/kg/min] (Medbø ら, 1988)、RER を 0.82 (坂牧ら, 1996) として式(1)から安静時の EE を算出し、全被験者共通で 100 [J/kg/min]とした (Medbø ら, 1988)。本研究における RE は、各走速度ではなく各被験者について 1 つ算出され、値が小さいほど経済的であることを意味する。

2.4.2. 走行実験時のパフォーマンス

各被験者の走行実験時のパフォーマンスを評価するため、式(2)を用いて Peak Treadmill Speed (PTS) を算出した (Santos-Concejero ら, 2014)。

$$PTS = V_{max} + \frac{T_{last}}{4} \times 30 \dots (2)$$

ここで、PTS の単位は[m/min]であり、 V_{max} は完走した最大走速度 [m/min]を、 T_{last} は最後の試技の走行時間 [min]を表す。

2.4.3. 局面分け

トレッドミルのベルト速度は設定値に達するまで 20 秒ほどの時間を要するため、ベルト速度がそのセットの速度に達しており、かつ EMG が安定して計測できた 30 サイクルを解析区間とした。

得られたマーカーの 3 次元座標およびトレッドミルのベルト速度は、残差分析法により最適遮断周波数を決定した後 (Wells と Winter, 1980)、位相ずれのない 4 次のバターワース型ローパスフィルタにて平滑化した (マーカー3 次元座標の遮断周波数: 12.5-22.5 [Hz],

トレッドミルベルト速度の遮断周波数：20.0-40.0 [Hz]）。マーカーの前後方向の座標にベルト速度の積分値を加算することで、被験者が仮想的に前に進んでいるように変換した。

変換後のマーカー座標から、各サイクルにおける右足の接地（ON）および離地（OFF）の時点屋比久（2015）の方法により自動検出した。さらに、左右の大転子の中点を仮想重心とし、これと右第5中足骨粗面との位置関係から、1サイクル中の特徴点として支持期中点（Mid-Stance：MST）、足部最後点（Rear：RR）、遊脚期中点（Mid-Swing：MSW）および足部最前点（Front：FR）の4点を検出した。なお、MSTは支持期において第5中足骨粗面が重心を後方に通過した時点、RRは第5中足骨粗面が重心から最も後方に位置した時点、MSWは遊脚期において第5中足骨粗面が重心を前方に通過した時点、FRは第5中足骨粗面が重心から最も前方に位置した時点とした。

この4つの特徴点とONおよびOFFを含めた6つの特徴点から、1サイクルを制動局面（Brake：BR）、推進局面（Propulsion：PS）、離地直後局面（After Off：AO）、前方スイング前半局面（Forward Swing - 1st：F1）、前方スイング後半局面（Forward Swing - 2nd：F2）および接地直前局面（Pre On：PO）の6局面に分割した。図2-11は、これらの6つの特徴点および局面を示したものである。

また、ONからOFFまでを支持期（Stance：Stc）、OFFから次のONまでを遊脚期（Swing：Swg）、両足が空中に浮いている局面を空中期（Airborne：AB）とした。

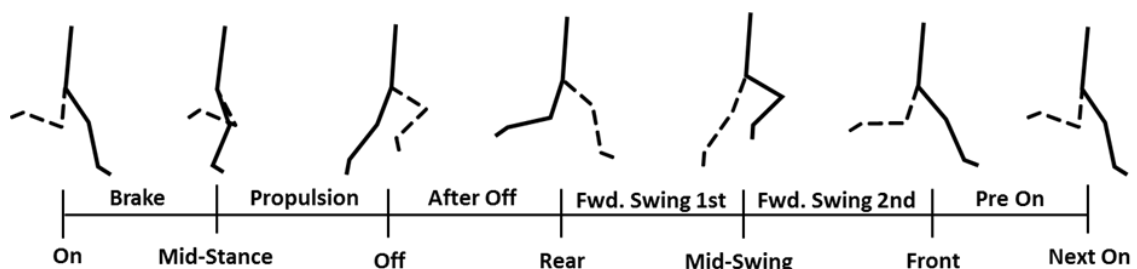


Fig. 2-11 Six event points and phases during 1 cycle

2.4.4. ストライド特性

第5中足骨および仮想重心とした大転子中点の位置から、ステップ長(Step Length:SL), ステップ頻度(Step Frequency:SF), 1サイクル時間に対するBR, PS, AO, F1, F2, POおよびABの時間のパーセンテージ(%BRT, %PST, %AOT, %F1T, %F2T, %POT, %ABT), ステップ長に対する接地距離(Touch Down Distance:%TDD), 離地距離(Take Off Distance:%TOD), 最前部距離(Front Distance:%FRD)および最後部距離(Rear Distance:%RRD)のパーセンテージを算出した。また、重心の上下動(H1, H2, H3, H4)を算出した。図2-12はTDD, TOD, FRDおよびRRDの定義を、図2-13はH1, H2, H3およびH4の定義を示したものである。SLは1サイクル中の重心の水平移動距離の半分, SFは1秒間の歩数とした。%TDD, %TOD, %FRDおよび%RRDはそれぞれON, OFF, FRおよびRRにおける重心と第5中足骨との水平変位をSLで除して100をかけたものとした。H1は重心のONから最下点までの鉛直変位, H2は重心の最下点からOFFまでの鉛直変位, H3は重心のOFFから最高点までの鉛直変位, H4は重心の最高点から次のサイクルのONまでの鉛直変位とした。

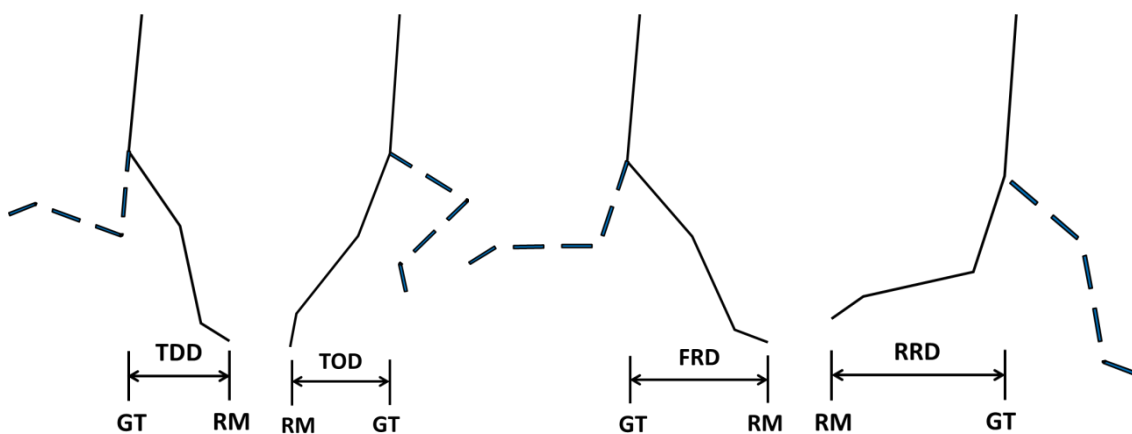


Fig. 2-12 Definition of TDD, TOD, FRD and RRD

(GT: center of Great Trochanter; RM: Right fifth Metatarsal)

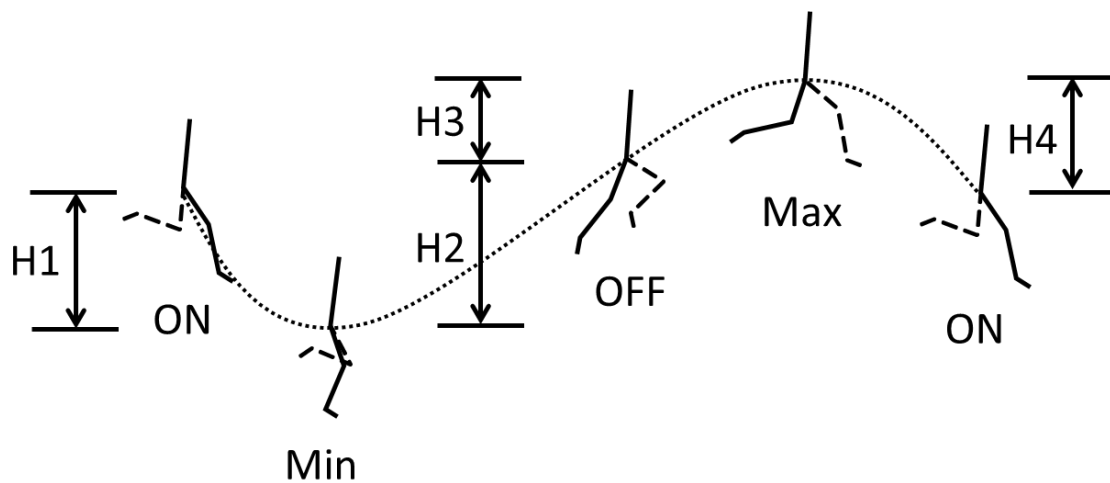


Fig. 2-13 Definition of H1, H2, H3 and H4

2.4.5. 下肢キネマティクス

頸椎点と胸骨上縁との中点，右大転子，右大腿骨外側上顆，右外果，右第 5 中足骨粗面の位置から，下肢 3 関節（股関節，膝関節，足関節）の角度 (θ_h , θ_k , θ_a) を算出した。なお，この関節角度は，矢状面に投影した角度である。また，関節角度を時間で数値微分することにより関節角速度 (ω_h , ω_k , ω_a) を算出した。図 2-14 は，下肢 3 関節の関節角度の定義を示したものである。

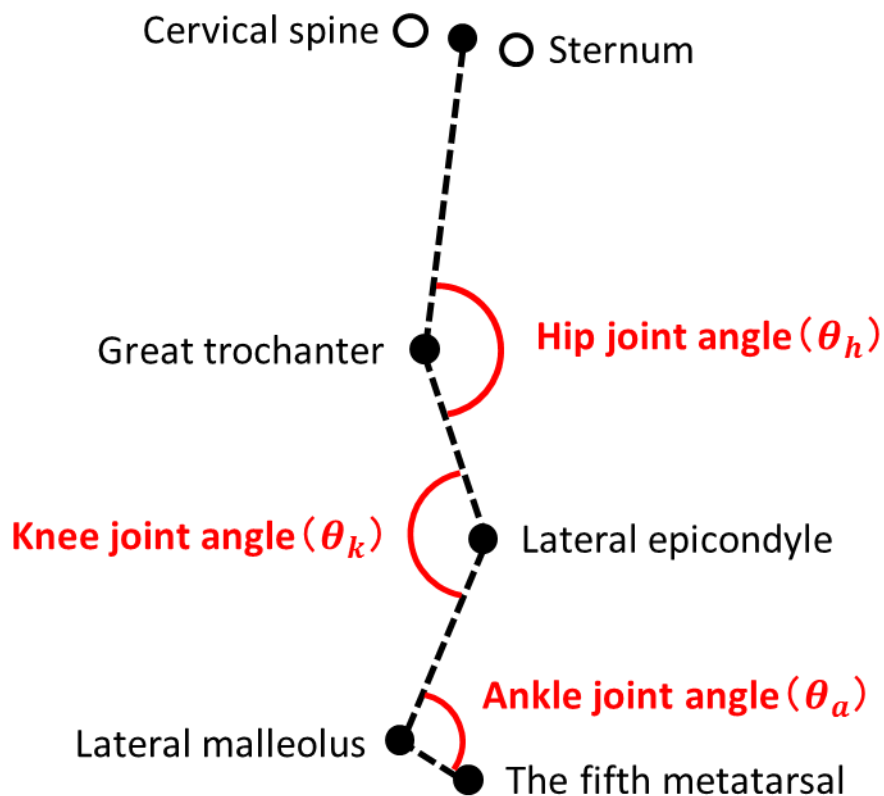


Fig. 2-14 Definition of joint angle in hip, knee and ankle

算出した 1 サイクル中の関節角度および関節角速度から、支持期および遊脚期の最大伸展および最大屈曲、最大底屈および最大背屈を表すピーク値 ($\theta_{h1}, \theta_{h2}, \theta_{h3}, \theta_{k1}, \theta_{k2}, \theta_{k3}, \theta_{k4}, \theta_{a1}, \theta_{a2}, \omega_{h1}, \omega_{h2}, \omega_{h3}, \omega_{h4}, \omega_{k1}, \omega_{k2}, \omega_{k3}, \omega_{k4}, \omega_{a1}, \omega_{a2}$) を検出した。また、関節角度のピーク値の差から関節の動作範囲 (Range of Motion : ROM ; $R_{h1}, R_{h2}, R_{h3}, R_{h4}, R_{k1}, R_{k2}, R_{k3}, R_{k4}, R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}$) を算出した。図 2-15 は、検出した関節角度および関節角速度のピーク値、ROM を示したものである。

これらの値は、各被験者の各走速度における 30 サイクルの平均値を各セットの代表値とした。

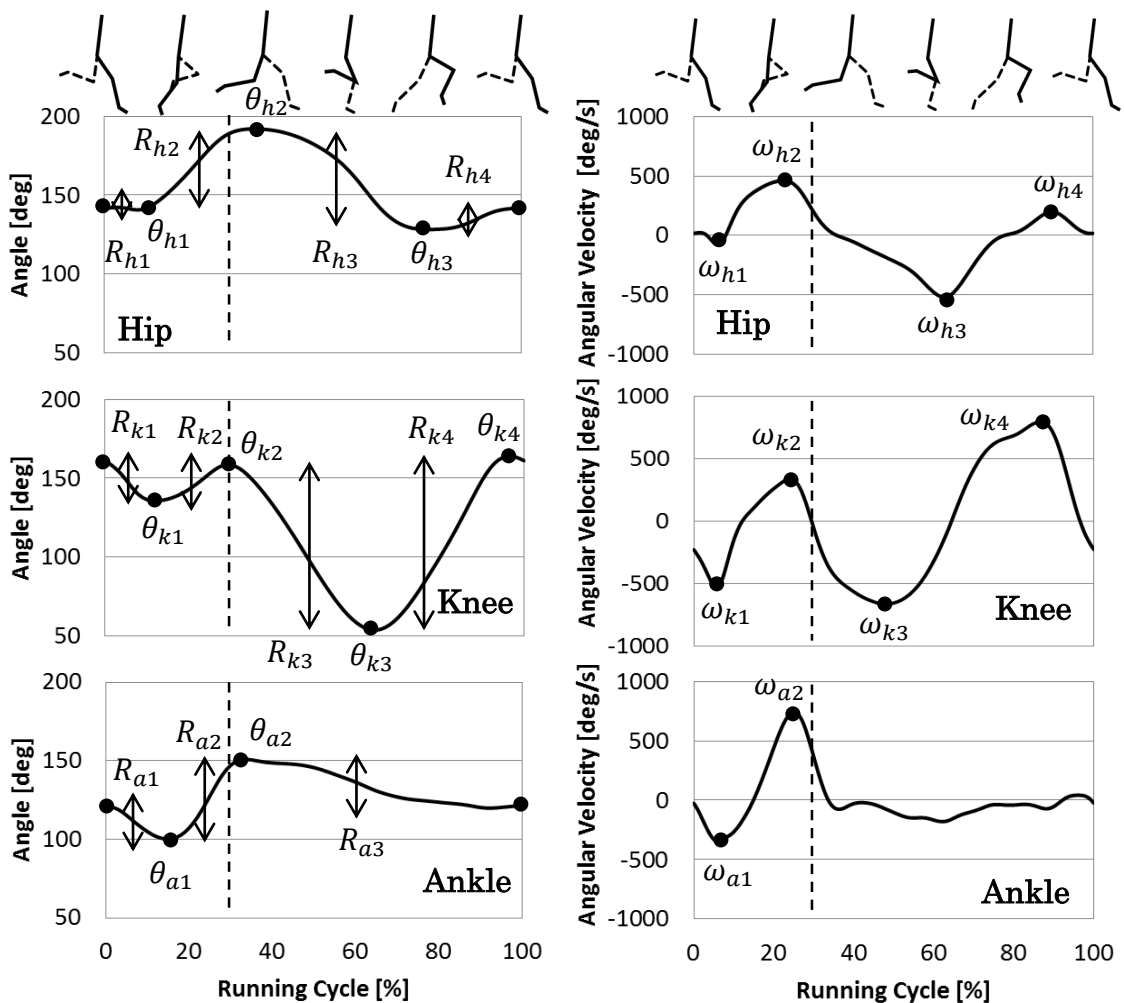


Fig. 2-15 Definition of local maximum and minimum in joint angle and joint angular velocity, and range of motion (arrow: ROM, dotted line: OFF)

2.4.6. 筋活動

得られた筋電図に通過帯域 15~500 [Hz]のバターワース型バンドパスフィルタをかけ、平均電圧を引くことによってバイアスを取り除き、全波整流した。全波整流後の振幅値の二乗平均平方根 (Root Mean Square : RMS) を各局面について算出し、筋活動量 (RMS 振幅) を評価した。また、全波整流後の波形を遮断周波数 10 [Hz]のローパスフィルタに通し、包絡線を算出した。得られた RMS 振幅および包絡線は MVC における包絡線のピーク値を 100 %として正規化を行った。

走行中の包絡線ピーク値の 15 %を閾値とし、閾値を包絡線が上回った時点を筋活動の開始 (Onset : On), 下回った時点を筋活動の終了 (Offset : Off) として (Steele と Brown, 1999) 筋活動のタイミングを評価した。これらは、ON に対するタイミングの差を 1 サイクル時間で正規化し、0 %が ON となるようにした。また、On から Off までの時間を筋の活動時間 (Duration : Drt) とし、Drt が 50 [ms]に満たないバーストは不活動とみなした (Steele と Brown, 1999)。なお、各筋の包絡線の典型的なパターンから 1 サイクル中の On のタイミングおよびバーストの数を限定し、限定数以上のバーストが検出される場合は Drt が最大のものをバーストとして検出した。表 2-3 は、限定した各筋の On のタイミングおよびバーストの数を示したものである。さらに、複数筋の共通の Drt をそれらの筋の共収縮時間 (Cocontraction time : Cocon) とした。各局面ごとに Cocon を求め、各局面時間に対するパーセンテージ (%共収縮時間) を算出した。このペアは、下肢 3 関節の伸展筋群および屈曲筋群から 1 筋ずつ選択した 1 対 1 の 9 組 (RF-GMX, RF-BF, RF-ST, RF-GAM, VL-BF, VL-ST, VL-GAM, TA-GAM, TA-SO) と、関節毎に全ての伸展筋群対全ての屈曲筋群を選択した 3 組 (Hip : RF - (GMX·BF·ST), Knee : (RF·VL)-(BF·ST·GAM), Ankle : TA-(GAM·SO)) の計 12 組とした。

これらの値は、各被験者の各走速度における 30 サイクルの平均値を各セットの代表値とした。

Table 2-3 Detection range of On and detection number of burst

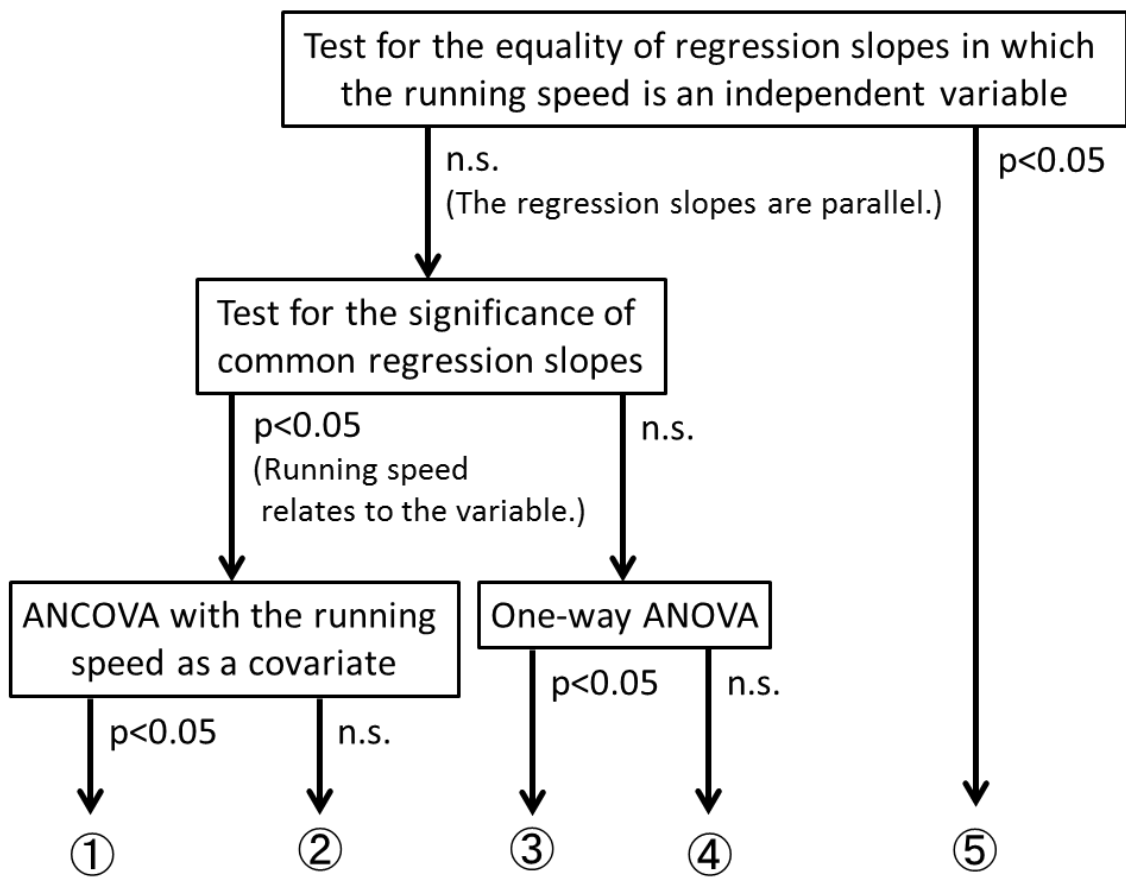
	RF	VL	GMX	BF
On 1st [%]	-30~0	-30~0	-40~0	-60~-10
On 2nd [%]	20~60	—	—	-10~20
Burst Number	2	1	1	2
	ST	TA	GAM	SO
On 1st [%]	-60~-10	-90~-40	-40~20	-30~20
On 2nd [%]	-10~20	-40~0	—	—
Burst Number	2	2	1	1

2.5. 統計処理

Trained と Untrained の年齢，身体特性，RE および PTS の差を検討するため，独立 2 群の t 検定を行った。

トレーニングが下肢の動作および筋活動に及ぼす影響について検討するため，走速度を走行中の下肢の動作および筋活動に強い影響を持つ要因としてとらえ，走速度を共変量，トレーニングの有無（Trained，Untrained）を要因とする共分散分析（Analysis of Covariance : ANCOVA）を行った。図 2-16 は，ANCOVA の手順および結果の解釈を示したものである。ANCOVA を行うには，(1) 走速度が説明変数，検定対象の変数が目的変数である回帰直線の傾きが両群で等しい（平行である）こと，(2) 回帰直線の傾きが有意であることという 2 つの前提条件が存在する。したがって，ANCOVA を行う前に(1)および(2)の検定を行い，条件を満たした変数のみに ANCOVA を行った。(1)を満たしたが(2)を満たさなかった変数にはトレーニングの有無（Trained，Untrained）を要因とする一元配置分散分析（One-Way Analysis of Variance : ANOVA）を行った。トレーニングが下肢の動作および筋活動に及ぼす影響についての検定の結果は，図中の①~⑤のいずれかに該当する。

- ①走速度の影響が両群において等しく，走速度の大きさに関わらず群間差が有意である.
- ②走速度の影響が両群において等しく，走速度の大きさに関わらず群間差が有意ではない.
- ③走速度の影響を受けず，群間差が有意である.
- ④走速度の影響を受けず，群間差が有意ではない.
- ⑤走速度の影響が両群で異なり，群間差が走速度に依存する（どの走速度で比較するかにより結果が異なる）.



	Effect of running speed on the variable is:	Difference between Trained and Untrained is:	Mark of Significance
①	significant	significant	* p<0.05
②	significant	not significant	
③	not significant	significant	** p<0.05
④	not significant	not significant	
⑤	different between the groups	dependent on the speed	† p<0.05

Fig. 2-16 Flowchart and interpretation of results in ANCOVA (岡田, 2000 を一部改変)

また、下肢の動作および筋活動に及ぼす走速度の影響を検討するため、走速度を要因とするANOVAをTrained, Untrainedそれぞれについて行った。Trainedにおいて走速度間の差が有意であった場合にはT, Untrainedにおいて走速度間の差が有意であった場合にはUを有意差 ($p < 0.05$) の記号とした。

さらに、REに影響を及ぼす下肢の動作および筋活動の変数を明らかにするため、REを目的変数、REとの単相関が有意であるバイオメカニクスの変数を説明変数とするステップワイズ重回帰分析を行った。説明変数には、TrainedおよびUntrainedの全走速度における値を対象とし、各被験者において走速度と対象の変数との単相関が有意であった場合には、走速度による影響をANCOVAと同様の手法を用いて調整(210 [m/min]時の値に調整)した上で投入した。図2-17は、調整前後の走速度とバイオメカニクスの変数との関係例を示したものである。

なお、いずれの場合も危険率5%未満を有意水準とした。

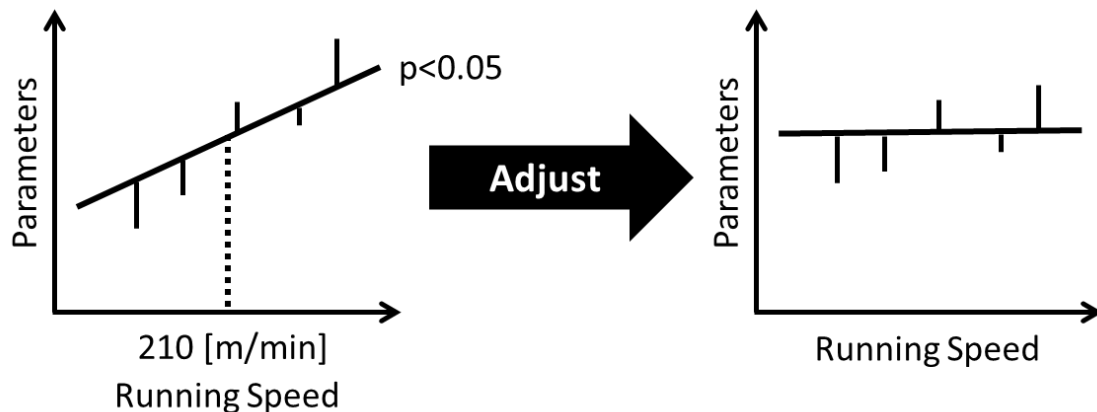


Fig. 2-17 Relationship between running speed and biomechanical variable before and after adjustment

3. 結果

3.1. 年齢, 身体特性, ランニングエコノミーおよびパフォーマンス

Trained と Untrained の年齢および身体特性には有意差が認められなかった. 一方, PTS は Trained が 321.6 ± 11.5 [m/min], Untrained が 232.7 ± 29.8 [m/min]であり, Trained の方が有意に大きかった ($p < 0.001$). また, RE はそれぞれ 3.9 ± 0.2 [J/kg/m]および 4.5 ± 0.5 [J/kg/m]であり, Trained の方が有意に経済的であった ($p < 0.01$). 図 3-1 は, RE と PTS との関係を示したものである. 両者には有意な負の相関が認められた ($r = -0.73$, $p < 0.01$). 以上のことから, Trained と Untrained との間には年齢および身体特性に差はないが, 実験当日のパフォーマンスと走の経済性には差があり, パフォーマンスが高いランナーほど経済性に優れていることが示された. 一方, Trained の各被験者の RE と PTS および RE と 5000m 記録との相関は有意ではなかった (図 3-2).

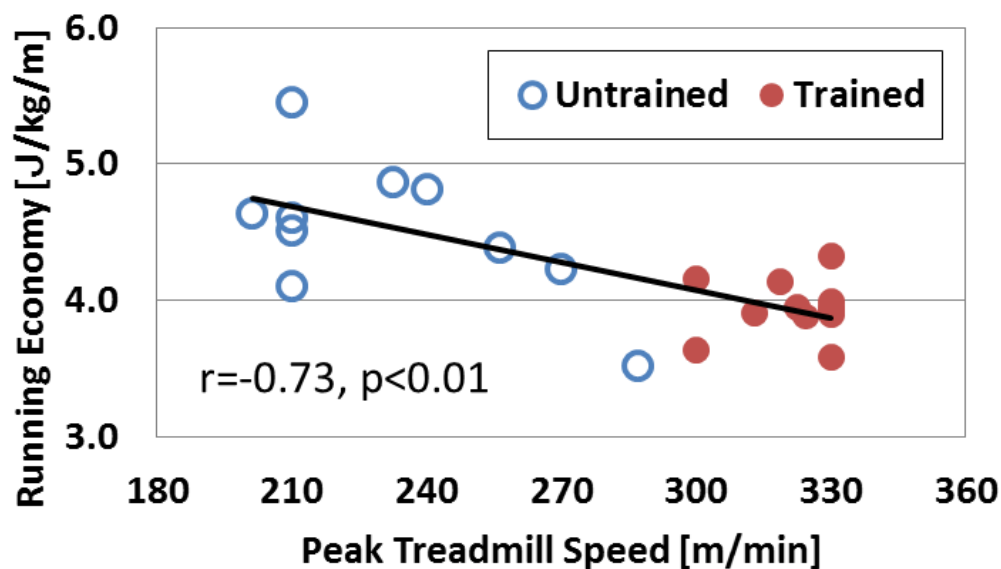


Fig. 3-1 Relationship between RE and PTS

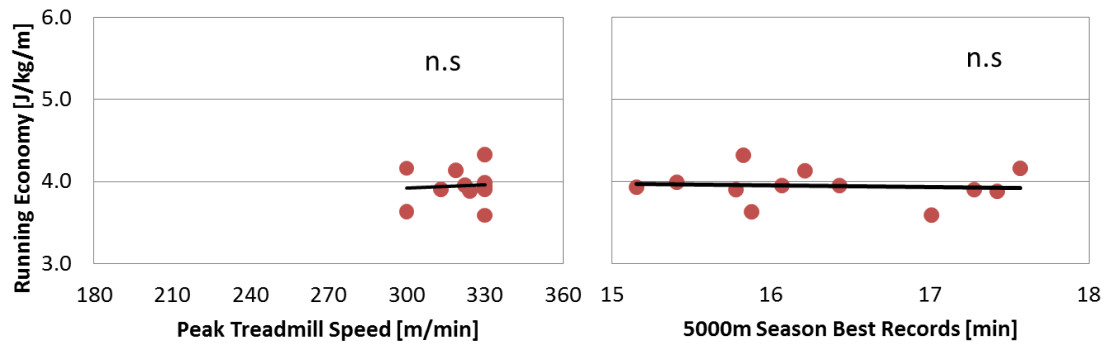


Fig. 3-2 Relationships between RE and PTS (left), RE and 5000m record (right)
for Trained

3.2. 長距離ランナーの下肢動作の特徴

3.2.1. ストライド特性

図3-3は走速度の増加に伴うSLおよびSFの変化を示したものである。SLおよびSFは、両群ともに走速度の増加に伴い有意に増加していたが、群間差は認められなかった。このことから、同じ速度におけるステップ長およびステップ頻度の選択にはトレーニングによる影響はないと考えられる。

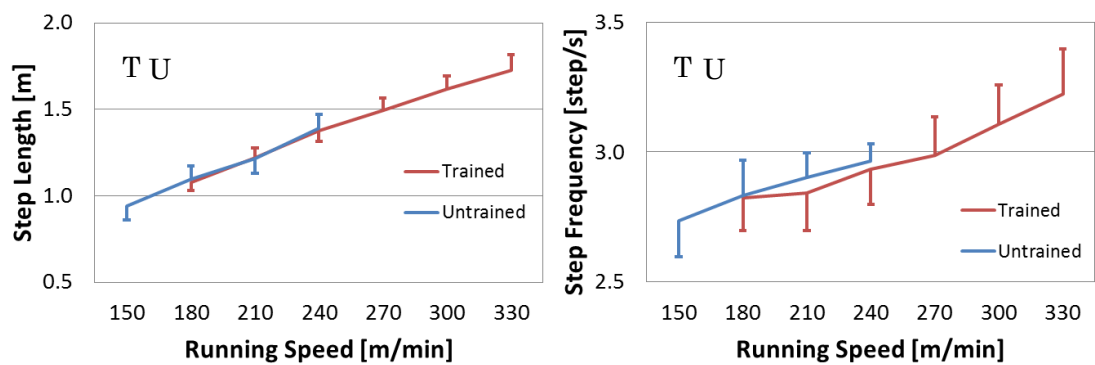


Fig. 3-3 Changes in SL and SF with increasing running speeds

図 3-4 および図 3-5 は走速度の増加に伴う局面時間のパーセンテージ (%BRT, %PST, %AOT, %F1T, %F2T, %POT) の変化を示したものである。%BRT および%F2T は走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に小さかった。%F1T および%POT は走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。%PST は ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、両群ともに走速度の増加に伴い有意に減少していたが、Trained の方が減少の度合いが大きかった。%AOT は、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、Untrained のみ走速度の増加に伴い有意に増加していた。図 3-4 の上部のスティックピクチャから分かるように、BR では着地動作、PS ではキック動作、AO ではキック後の脚のフォロースルー動作、F1 では大腿の振出動作、F2 では下腿の振出動作、PO では大腿および下腿の振り戻し動作が行われている。

以上のことから、Trained では、走速度の大きさに関わらず着地時のブレーキおよび下腿の振出の時間が短く、大腿の前方スイングおよび大腿、下腿の振り戻しの時間が長いといえる。また、走速度の増加に伴うキック動作時間の減少の度合いが Untrained よりも大きい傾向にあった。一方、Untrained では、走速度の増加に伴いフォロースルー時間が長くなる傾向にあった。

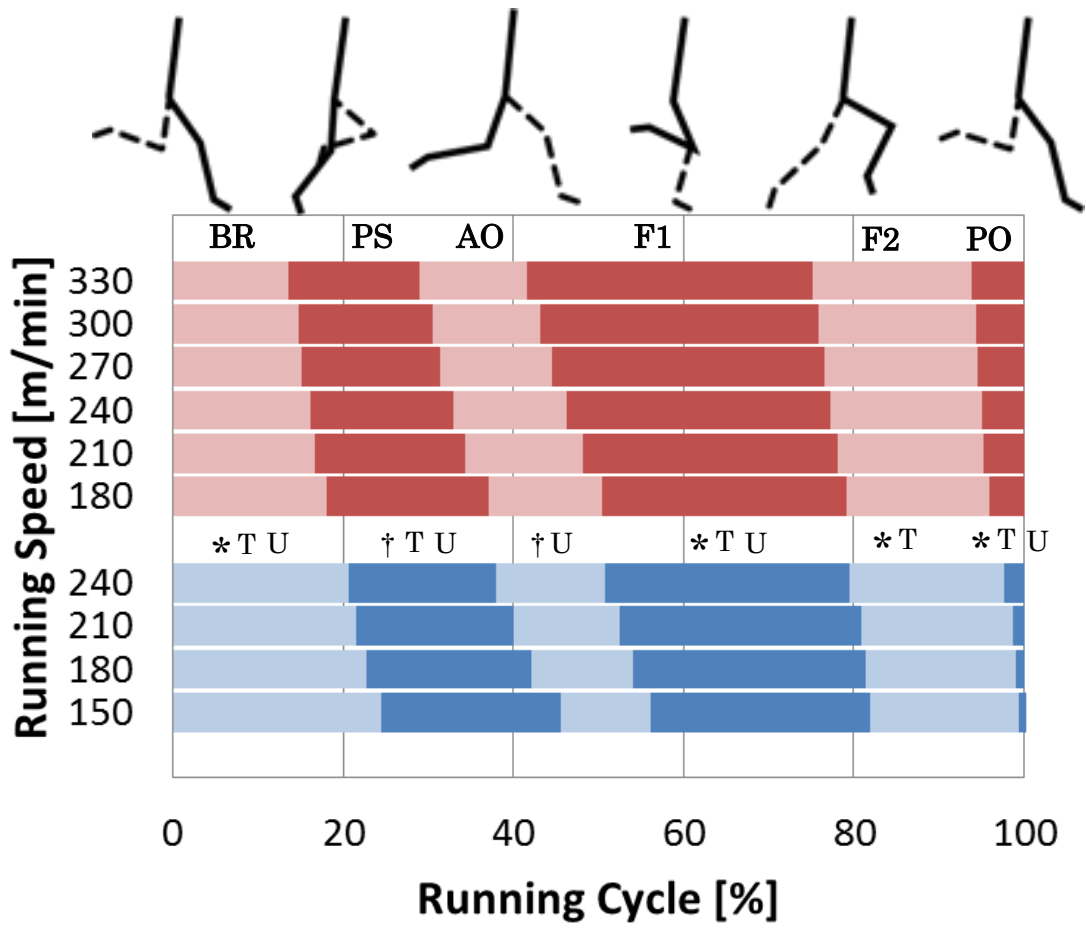


Fig. 3-4 Changes in percent phase time during 1 cycle with increasing running speeds

(red: Trained, blue: Untrained)

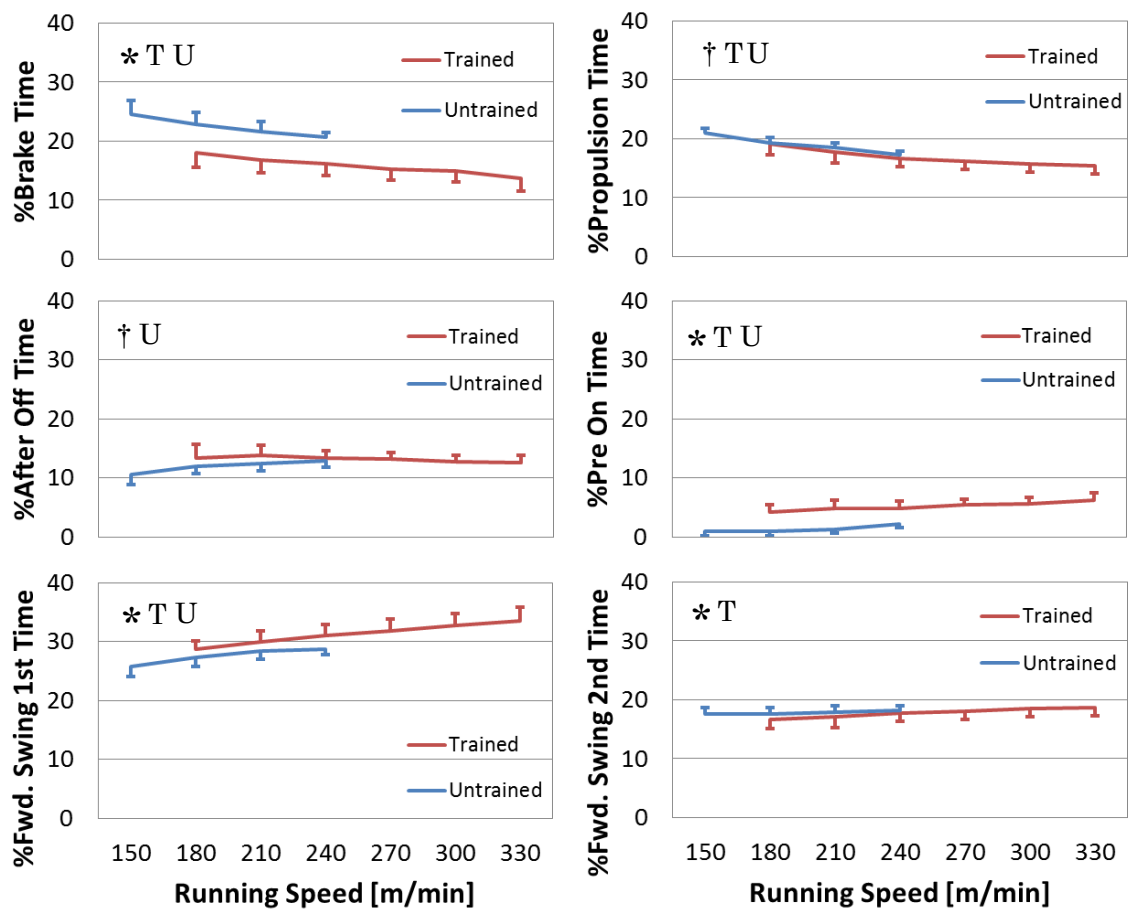


Fig. 3-5 Changes in percent phase time with increasing running speeds

図 3-6 は、走速度の増加に伴うステップ長の内訳 (%TDD, %TOD, %FRD, %RRD) の変化を示したものである。%TDD は、走速度の大きさに関わらず **Trained** が **Untrained** に比べて有意に小さかった。%TOD および %FRD は、ANCOVA にて交互作用が認められ、両群ともに走速度の増加に伴い有意に減少していたが、**Untrained** の方が減少の度合いが大きかった。%RRD は、両群ともに走速度の増加に伴い有意に減少していたが、群間差は有意ではなかった。

以上のことから、**Trained** では、走速度の大きさに関わらずブレーキの距離が小さいことが明らかになった。また、走速度の増加に伴い離地時および最後点時の足部が仮想重心と

した大転子中点に近づくが，Untrained に比べてこれらの変化が小さいことが明らかになった。

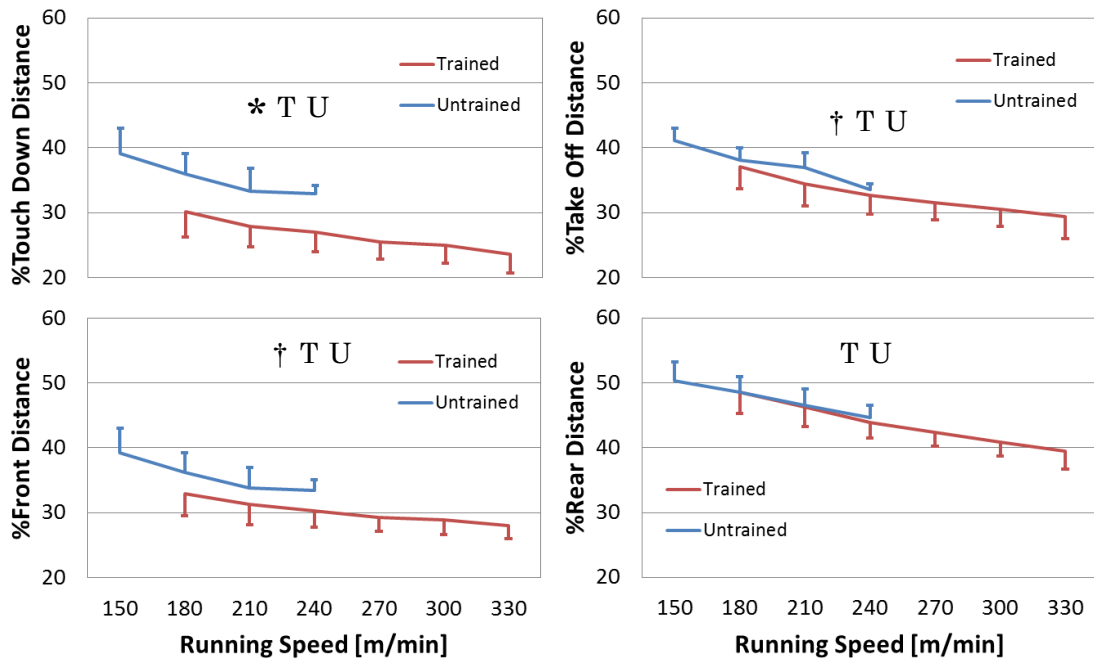


Fig. 3-6 Changes in percent components of step length with increasing running speeds

図 3-7 は，走速度の増加に伴う仮想重心とした大転子中点の上下動 (H1, H2, H3, H4) の変化を示したものである。H1 は，走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に小さかった。H3 および H4 は，走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。H2 は，ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ，Trained のみ走速度の増加に伴い有意に減少していた。

以上のことから，Trained では走速度の大きさに関わらず支持期における重心の下降量が小さく，遊脚期の上昇量および下降量が大きいことが明らかになった。また，走速度の増加に伴い支持期の上昇量が Untrained よりも小さくなる傾向があった。

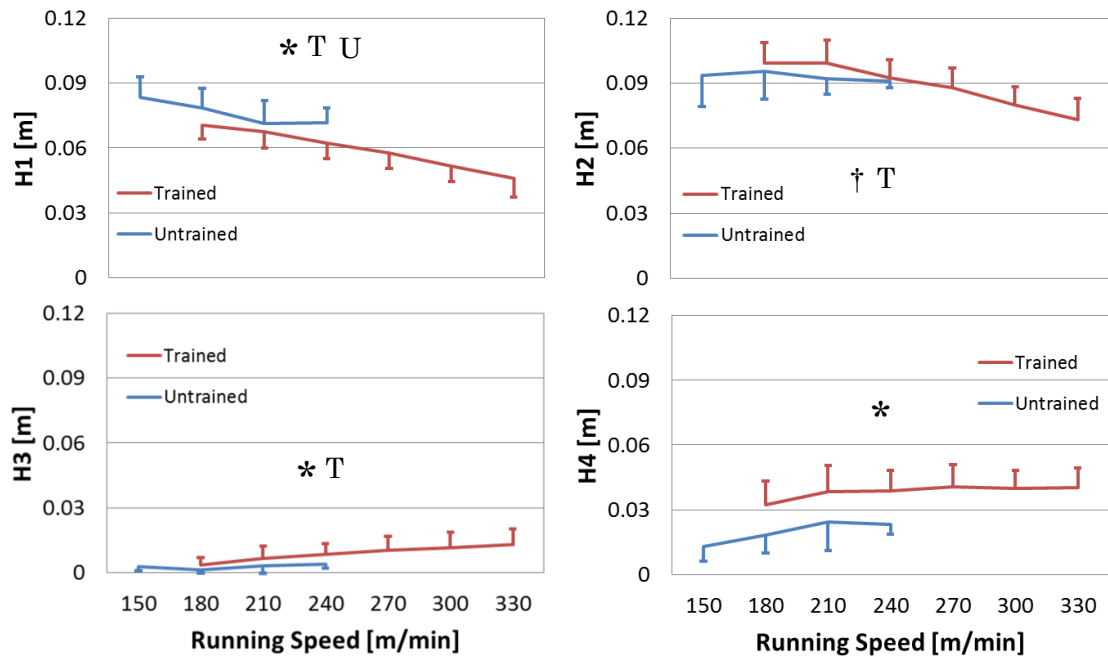


Fig. 3-7 Changes in vertical displacements of COM with increasing running speeds

3.2.2. 下肢の関節角度

図 3-8 は、走速度の増加に伴う 1 サイクル中の下肢 3 関節の関節角度 (θ_h , θ_k , θ_a) の時系列変化を示したものである。

まず、関節角度について結果を述べる。股関節では、走速度の大きさに関わらず θ_{h1} および θ_{h3} は Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。膝関節では、走速度の大きさに関わらず θ_{k1} は Trained が Untrained に比べて有意に小さく、 θ_{k3} は Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。この内、 θ_{k1} には走速度の影響がみられなかった。足関節では、走速度の大きさに関わらず θ_{a1} および θ_{a2} は Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。この内、 θ_{a1} には走速度の影響がみられなかった。図 3-9 は走速度の増加に伴う下肢 3 関節の関節角度 (θ_{h1} , θ_{h3} , θ_{k1} , θ_{k3} , θ_{a1} , θ_{a2}) の変化を示したものである。

以上のことから、股関節について、Trained では、走速度の大きさに関わらず、支持期および遊脚期の最大屈曲角度が大きいことが明らかになった。また、膝関節について、Trained

では、走速度の大きさに関わらず、支持期の最大屈曲角度が大きく、遊脚期の最大屈曲角度が小さいことが明らかになった。また、足関節について、Trained では、走速度の大きさに関わらず、支持期の最大背屈角度が大きく、支持期の最大底屈角度が大きいことが明らかになった。

次に、ROM について結果を述べる。股関節では、走速度の大きさに関わらず R_{h1} は Trained が Untrained に比べて有意に小さく、 R_{h4} は Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。この内、 R_{h1} には走速度の影響がみられなかった。 R_{h2} は、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、Trained のみ走速度の増加に伴い有意に増加していた。 R_{h3} は、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、両群ともに走速度の増加に伴い有意に増加していたが、Trained の方が増加の度合いが小さかった。膝関節では、走速度の大きさに関わらず R_{k2} は Trained が Untrained に比べて有意に小さく、 R_{k4} は Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。足関節では、走速度の大きさに関わらず R_{a3} は Trained が Untrained に比べて有意に小さかった。図 3-10 は走速度の増加に伴う下肢 3 関節の ROM (R_{h1} , R_{h2} , R_{h3} , R_{h4} , R_{k2} , R_{k4} , R_{a3}) の変化を示したものである。

以上のことから、股関節について、Trained では走速度の大きさに関わらず支持期の屈曲動作が小さく、遊脚期の伸展動作が大きいことが明らかになった。また、走速度の増加に伴い支持期の伸展動作が Untrained よりも大きくなる傾向、遊脚期の屈曲動作が Untrained よりも小さくなる傾向があった。また、膝関節について、Trained では走速度の大きさに関わらず支持期の伸展動作が小さく、遊脚期の伸展動作が大きいことが明らかになった。また、足関節について、Trained では走速度の大きさに関わらず遊脚期の背屈動作が小さいことが明らかになった。また、ANCOVA にて群間差もしくは交互作用は認められてはいないが、接地後の重心の下降を示す R_{h1} , R_{k1} , R_{a1} を比較すると、両群ともに R_{h1} よりも R_{k1} および R_{a1} の方が大きいことから、重心の下降には膝関節および足関節が関わりと考えられる。

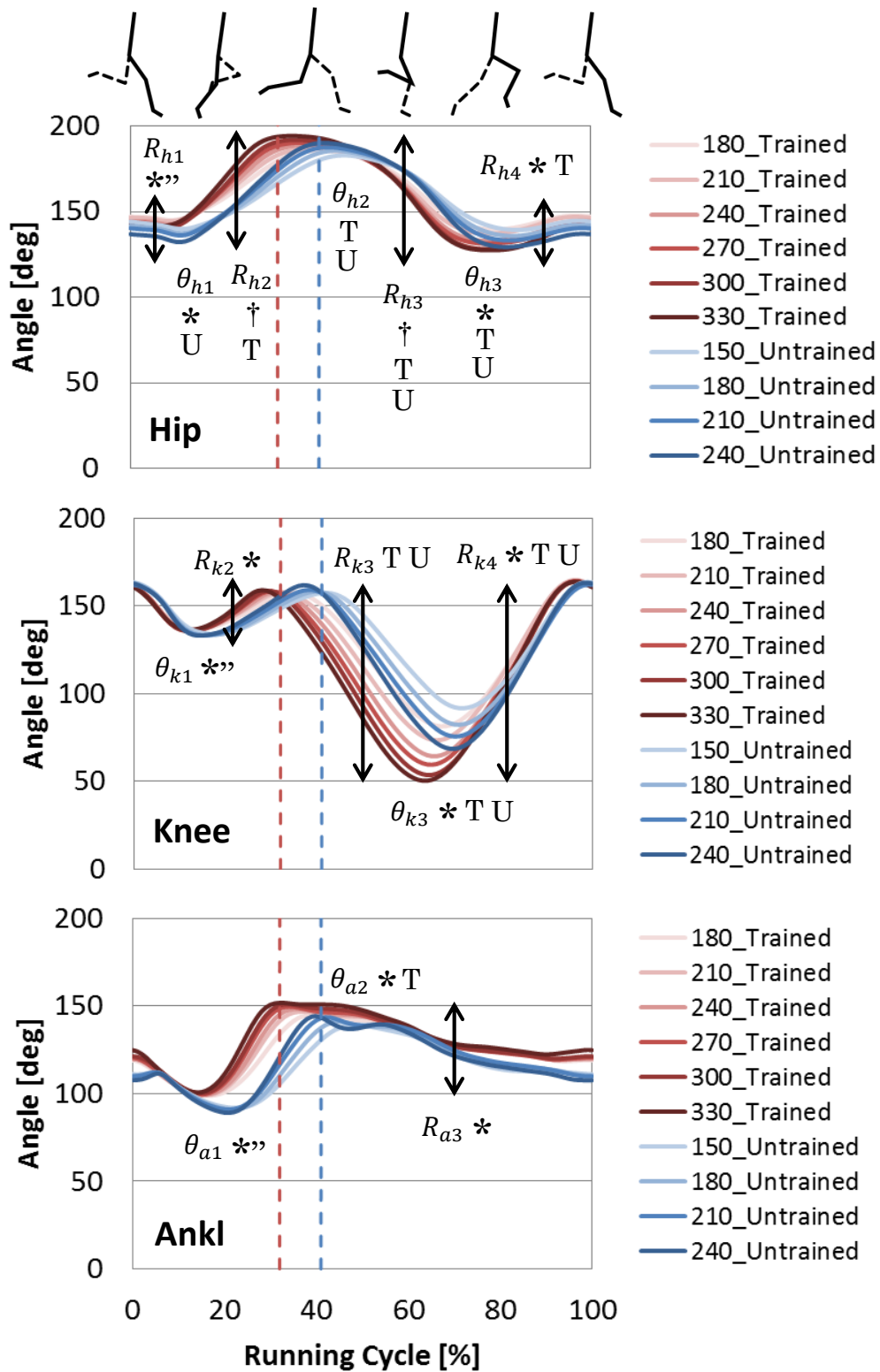


Fig. 3-8 Changes in lower limb joint angles during 1 cycle with increasing running speeds (red dotted line: OFF of Trained, blue dotted line: OFF of Untrained)

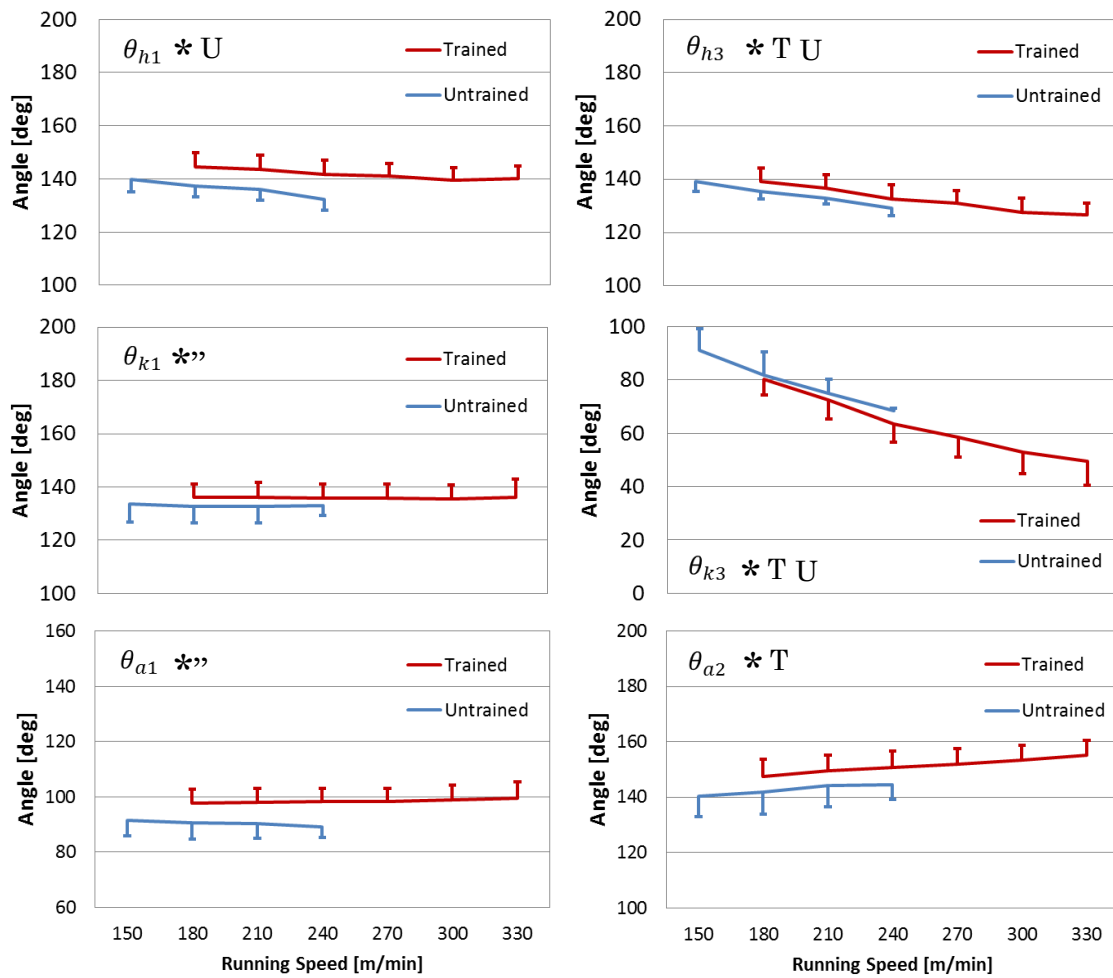


Fig. 3-9 Changes in joint angles with increasing running speeds

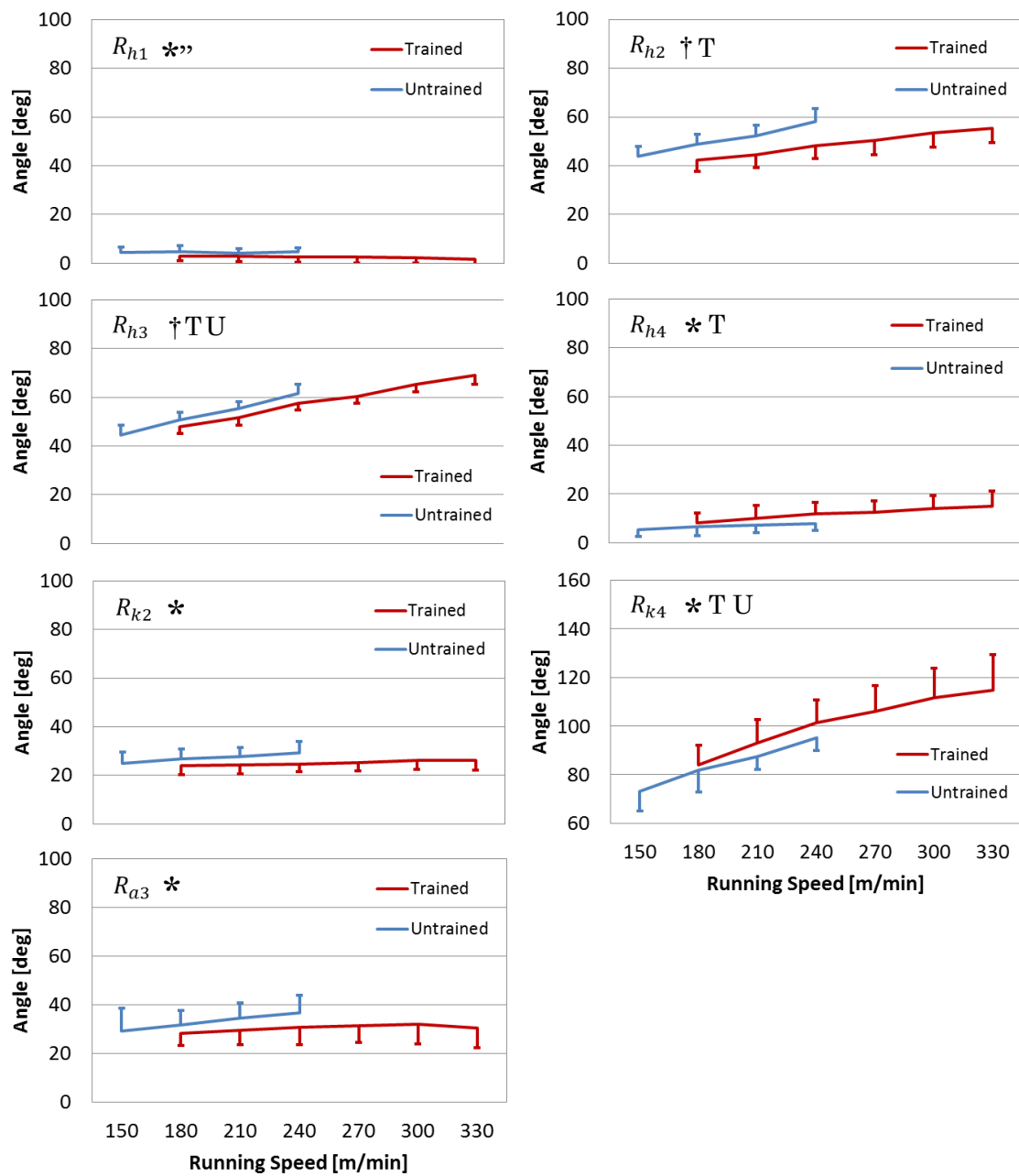


Fig. 3-10 Changes in range of motions (ROM) with increasing running speeds

3.2.3. 下肢の関節角速度

図 3-11 は、走速度の増加に伴う 1 サイクル中の下肢 3 関節の関節角速度 (ω_h , ω_k , ω_a) の時系列変化を示したものである。

股関節では、走速度の大きさに関わらず、 ω_{h2} は Trained が Untrained に比べて有意に小さく、 ω_{h3} は Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。 ω_{h4} は、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、Trained のみ走速度の増加に伴い有意に増加していた。膝関節では、走速度の大きさに関わらず、 ω_{k1} は Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。 ω_{k2} は、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、両群ともに走速度の増加に伴い有意に増加していたが、Trained の方が増加の度合いが大きかった。 ω_{k3} は、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、両群ともに走速度の増加に伴い有意に減少していたが、Trained の方がより減少の度合いが大きかった。足関節では、 ω_{a2} は走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。図 3-12 は、走速度の増加に伴う下肢 3 関節の関節角速度 (ω_{h2} , ω_{h3} , ω_{h4} , ω_{k1} , ω_{k2} , ω_{k3} , ω_{a2}) の変化を示したものである。

以上のことから、股関節について、Trained では走速度の大きさに関わらず、支持期の最大伸展および遊脚期の最大屈曲角速度が小さいことが明らかになった。また、走速度の増加に伴い遊脚期の最大伸展角速度が Untrained よりも大きくなる傾向があった。また、膝関節について、Trained では走速度の大きさに関わらず、支持期の最大屈曲角速度が小さいことが明らかになった。また、走速度の増加に伴い支持期の最大伸展および遊脚期の最大屈曲角速度が Untrained よりも大きくなる傾向があった。また、足関節について、Trained では走速度の大きさに関わらず、支持期の最大底屈角速度が大きいことが明らかになった。

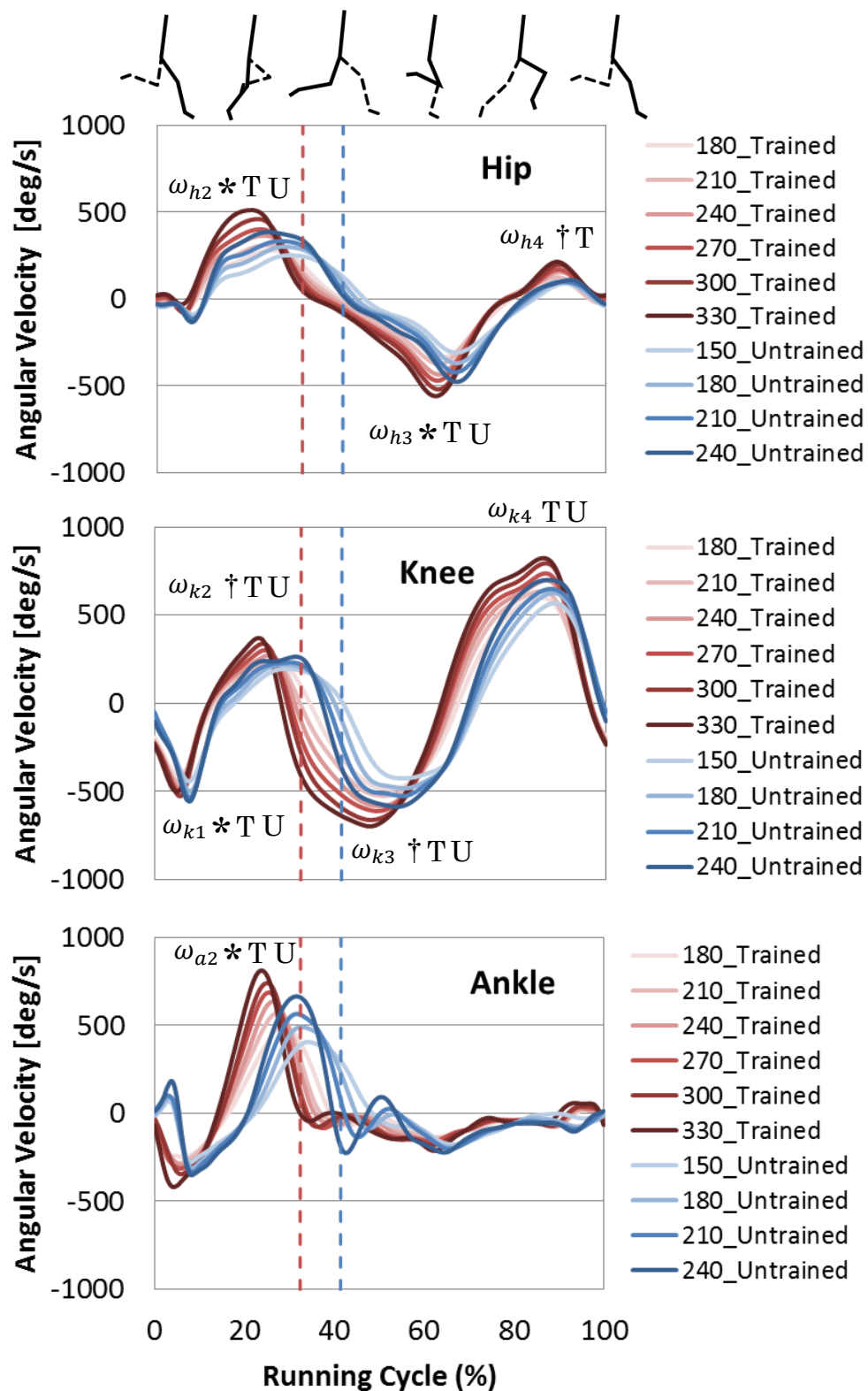


Fig. 3-11 Changes in lower limb joint angular velocities during 1 cycle with increasing running speeds (red dotted line: OFF of Trained, blue dotted line: OFF of Untrained)

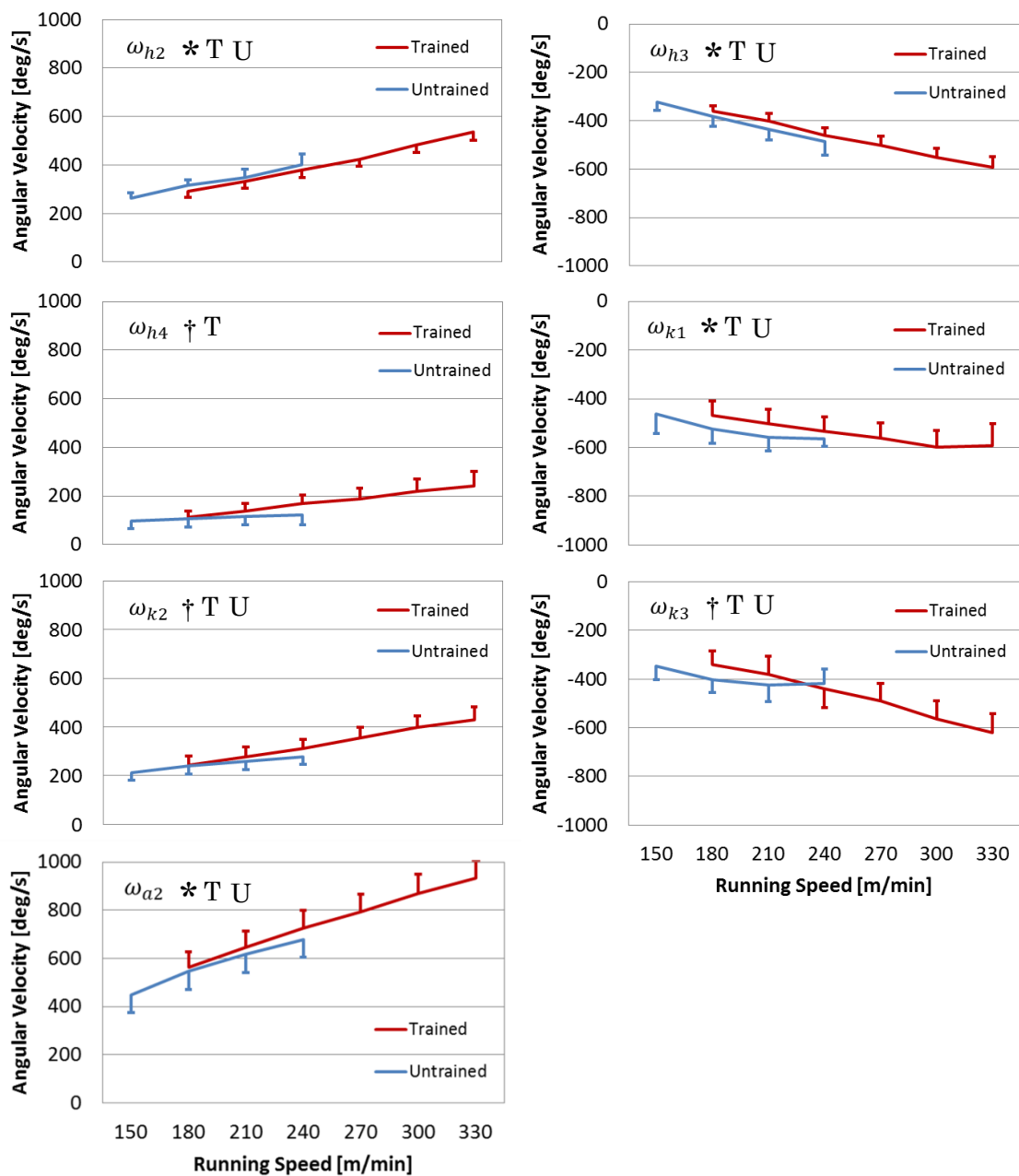


Fig. 3-12 Changes in joint angular velocities with increasing running speeds

3.3. 長距離ランナーの下肢筋活動の特徴

3.3.1. 下肢筋活動のパターン

図 3-13 は、走速度の増加に伴う各筋の包絡線の変化を示したものである。各筋のバース

トのタイミングおよび図の上部に示したスティックピクチャから、RFは接地直後および遊脚期序盤に、VL、GAM、SOは接地直後に、GMXは接地とほぼ同時に、BFおよびSTは支持期中盤および遊脚期終盤に、TAは支持期前半および遊脚期全体に渡って活動が続き接地直前に大きなバーストがあることが確認できた。

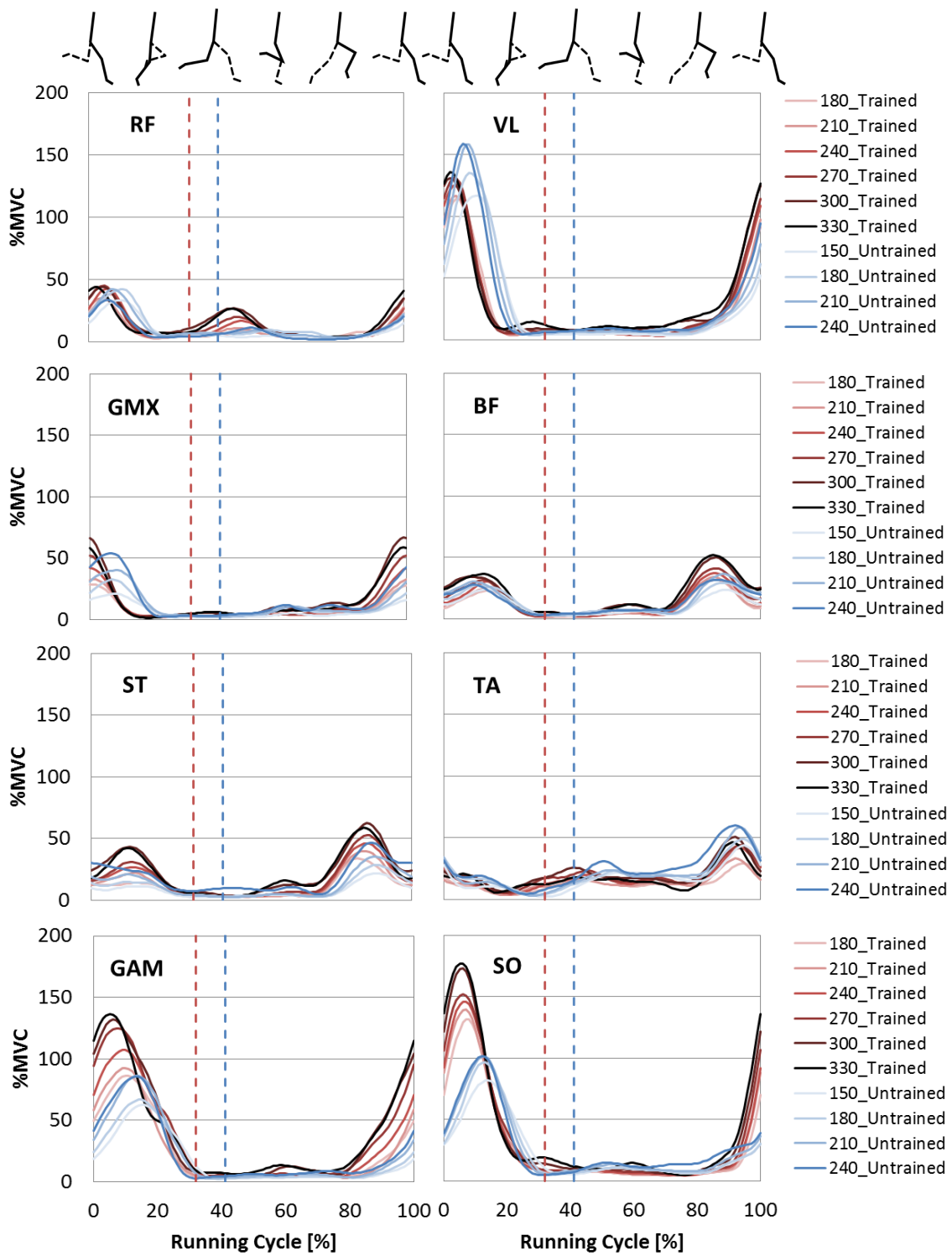


Fig. 3-13 Changes in envelope of each muscle with increasing running speeds

(red dotted line: OFF of Trained, blue dotted line: OFF of Untrained)

3.3.2. 下肢筋活動量

図 3-14 は、走速度の増加に伴う各筋の局面ごとの筋活動量（RMS 振幅）の変化を示したものである。BF@PO, TA@BR, TA@F1 および TA@F2 は、走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に小さかった。この内、TA@F1 には走速度の影響がみられなかった。GAM@BR, SO@BR, GAM@PO, SO@PO および BF@PS は、走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。図 3-15 は走速度の増加に伴う GAM@BR, GAM@PO, SO@BR および SO@PO の変化を、図 3-16 は走速度の増加に伴う BF@PS, BF@PO, TA@BR, TA@F1 および TA@F2 の変化を示したものである。

以上のことから、Trained では、走速度の大きさに関わらず、接地直前局面の大腿二頭筋、制動局面、前方スイング前半局面および前方スイング後半局面の前脛骨筋の活動量が小さく、制動局面および接地直前局面の腓腹筋、制動局面および接地直前局面のヒラメ筋、推進局面の大腿二頭筋の活動量が大きかった。なお、GMX@F1, SO@AO, SO@F1 および SO@F2 は群間差が認められたが、図 3-4 からランニングサイクルにおいて AO が約 30-45 %, F1 が約 45-75 %, F2 が約 75-95 %であり、図 3-13 の包絡線にこれをあてはめるとバーストがない局面であることが確認できるため、言及しなかった。

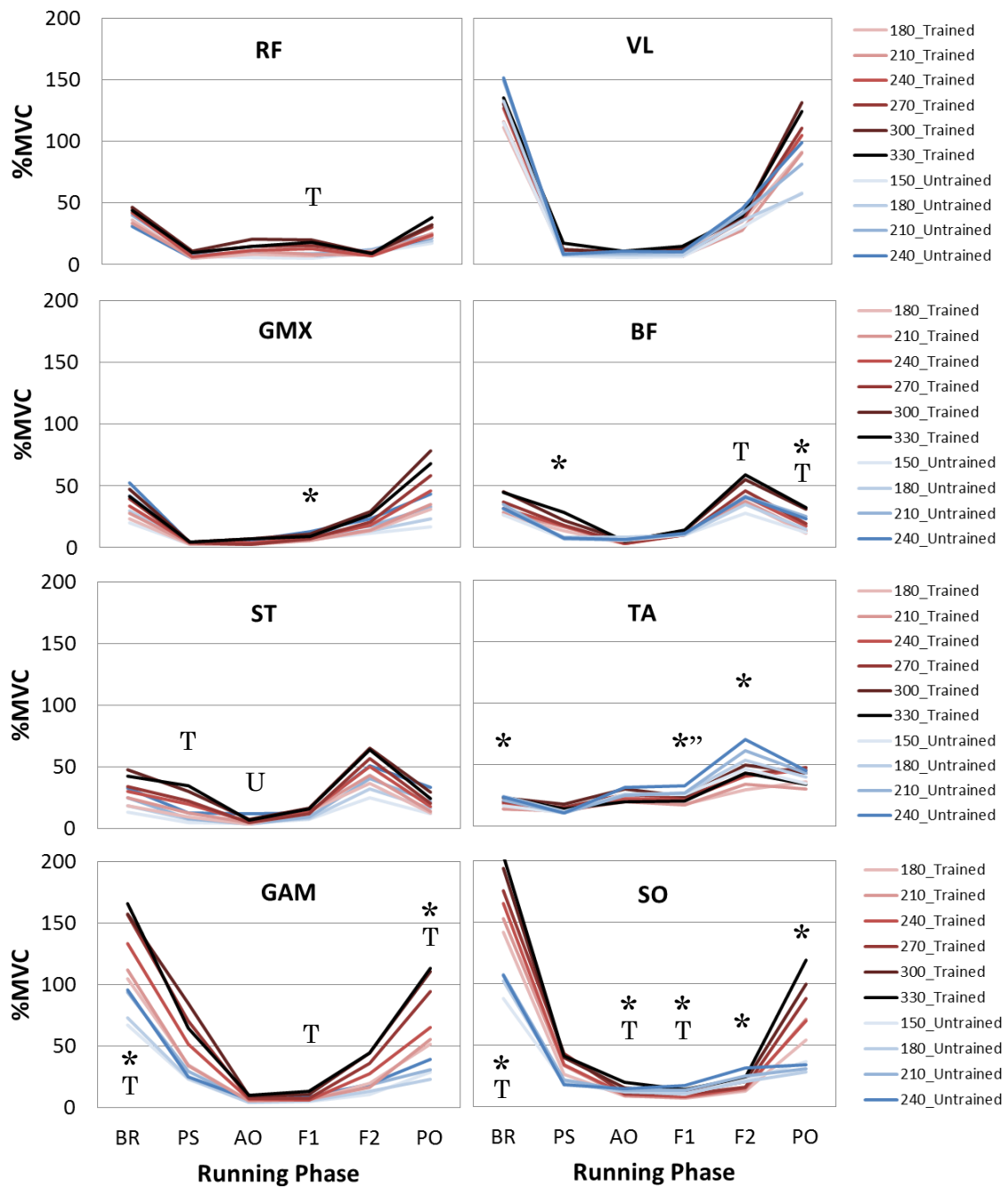


Fig. 3-14 Changes in RMS amplitude of each lower limb muscle

with increasing running speeds (red: Trained, blue: Untrained)

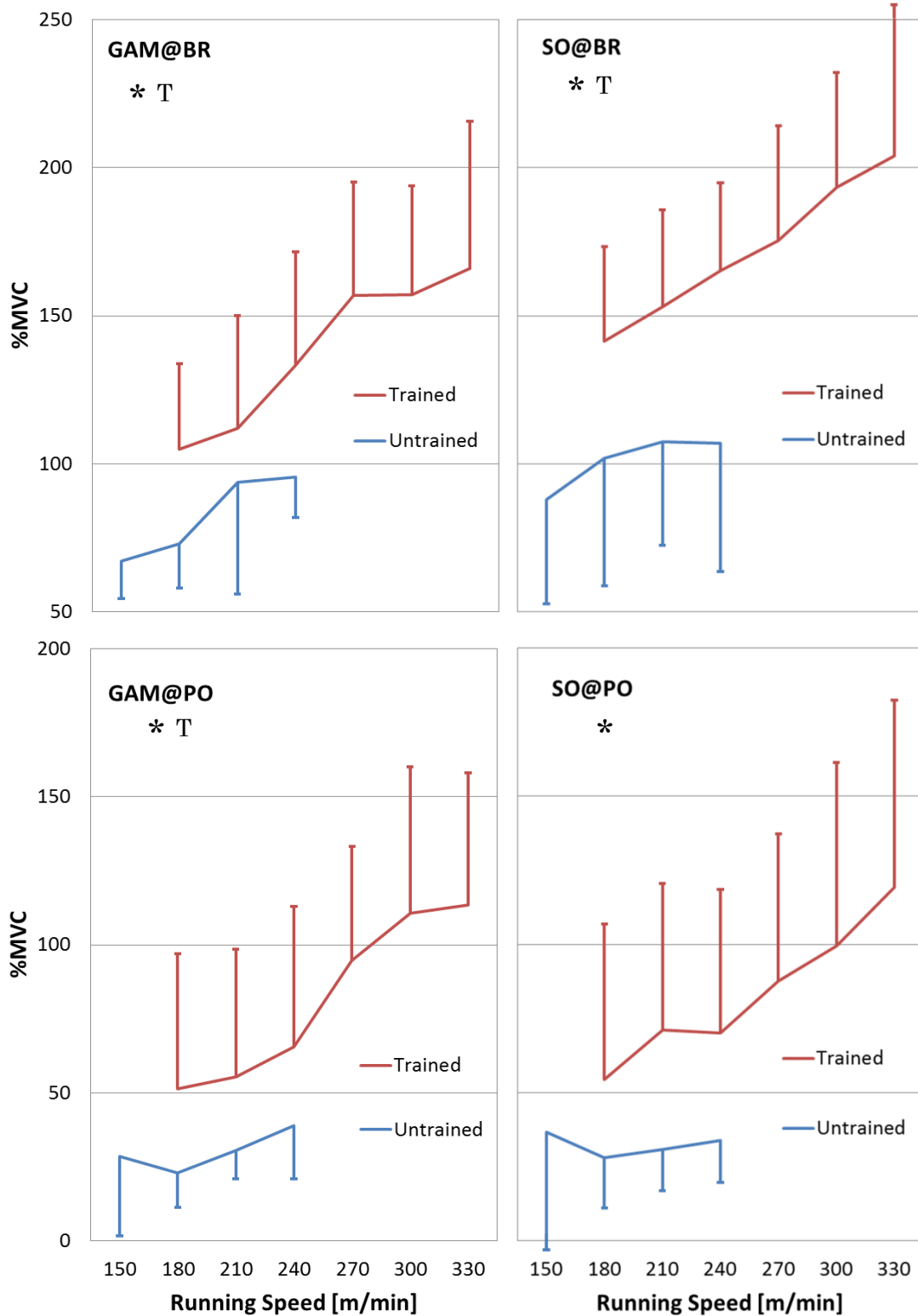


Fig. 3-15 Changes in RMS amplitude of GAM and SO with increasing running speeds

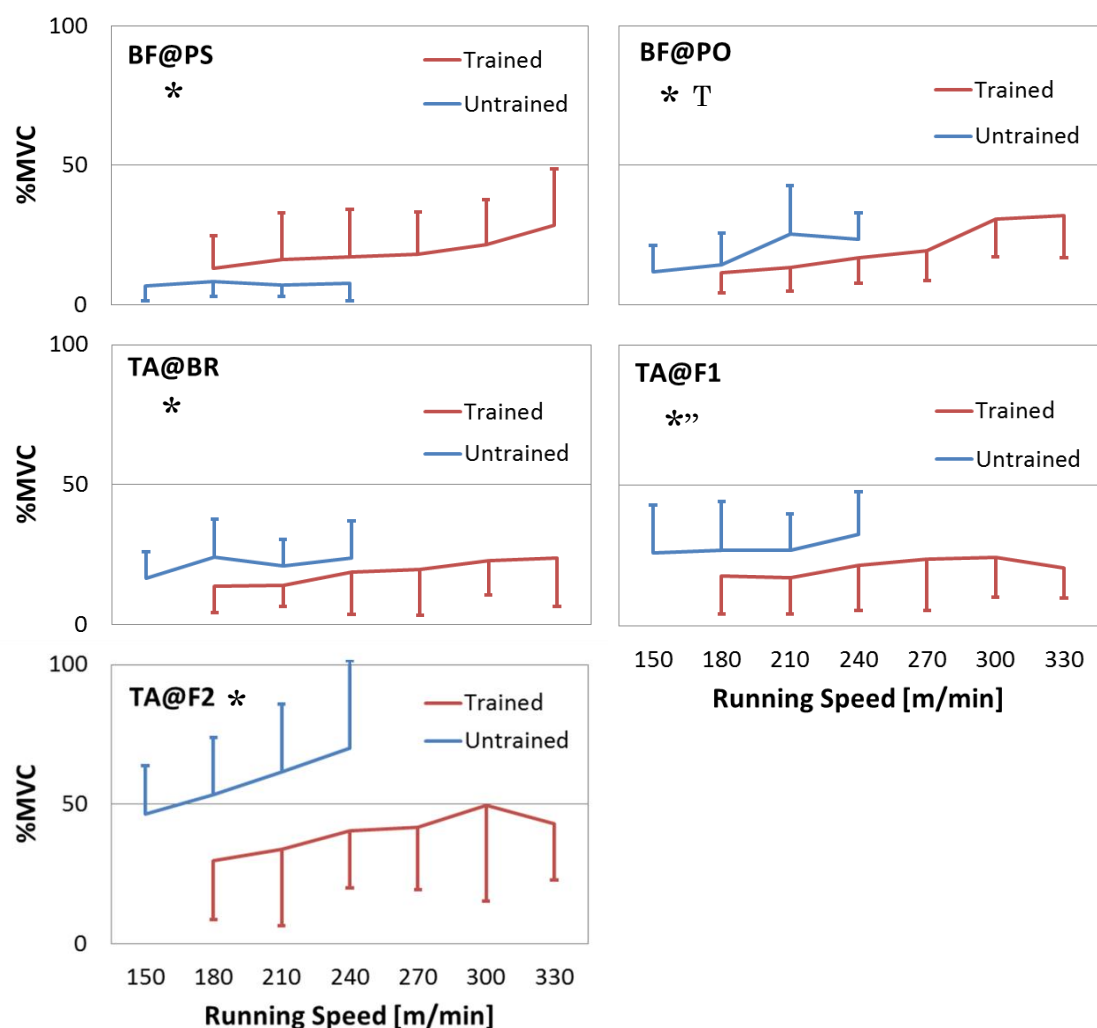


Fig. 3-16 Changes in RMS amplitude of BF and TA with increasing running speeds

3.3.3. 下肢筋活動のタイミングおよび活動時間

図 3-17 は、走速度の増加に伴う各筋の筋活動開始時点 (On), 筋活動終了時点 (Off) および筋活動時間 (Drt) の変化を示したものである。図中の楕円囲みは On, Off に、四角囲みは Drt に有意差か交互作用が認められたことを示している。また、RF, BF, ST および TA は、1 サイクル中のバーストを 2 つ検出しているため、これら 2 つの合計値を DrtS と表記した。RF_Off1, GMX_Off, VL_On, ST_Off1, TA_On1 および GAM_Off は、走速

度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に早かった。この内, RF_Off1, VL_On, ST_Off1, TA_On1 および GAM_Off には走速度の影響がみられなかった。TA_Drt2 は, 走速度の影響を受けずに Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。RF_Drt1, RF_DrtS, GMX_Drt および SO_Drt は, 走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に小さかった。この内, RF_Drt1, GMX_Drt および SO_Drt には走速度の影響がみられなかった。SO_On は, ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ, Trained のみ走速度の増加に伴い早まっていた。図 3-18 は, 走速度の増加に伴う RF_Off1, VL_On, GMX_Off, ST_Off1, TA_On1, GAM_Off および SO_On の変化を, 図 3-19 は, 走速度の増加に伴う RF_Drt1, RF_DrtS, GMX_Drt, TA_Drt2 および SO_Drt の変化を示したものである。

したがって, 筋活動のタイミングについて Trained では, 走速度の大きさに関わらず, 大腿直筋の支持期の活動終了, 外側広筋の活動開始, 大殿筋の活動終了, 半腱様筋の支持期の活動終了, 前脛骨筋の遊脚期の活動開始および腓腹筋の活動終了が早かった。筋の活動時間について Trained では, 支持期および 1 サイクル全体の大腿直筋, 大殿筋およびヒラメ筋の活動時間が短く, 接地前後の前脛骨筋の活動時間が長かった。また, 走速度の増加に伴いヒラメ筋の活動開始が Untrained よりも早くなる傾向であった。

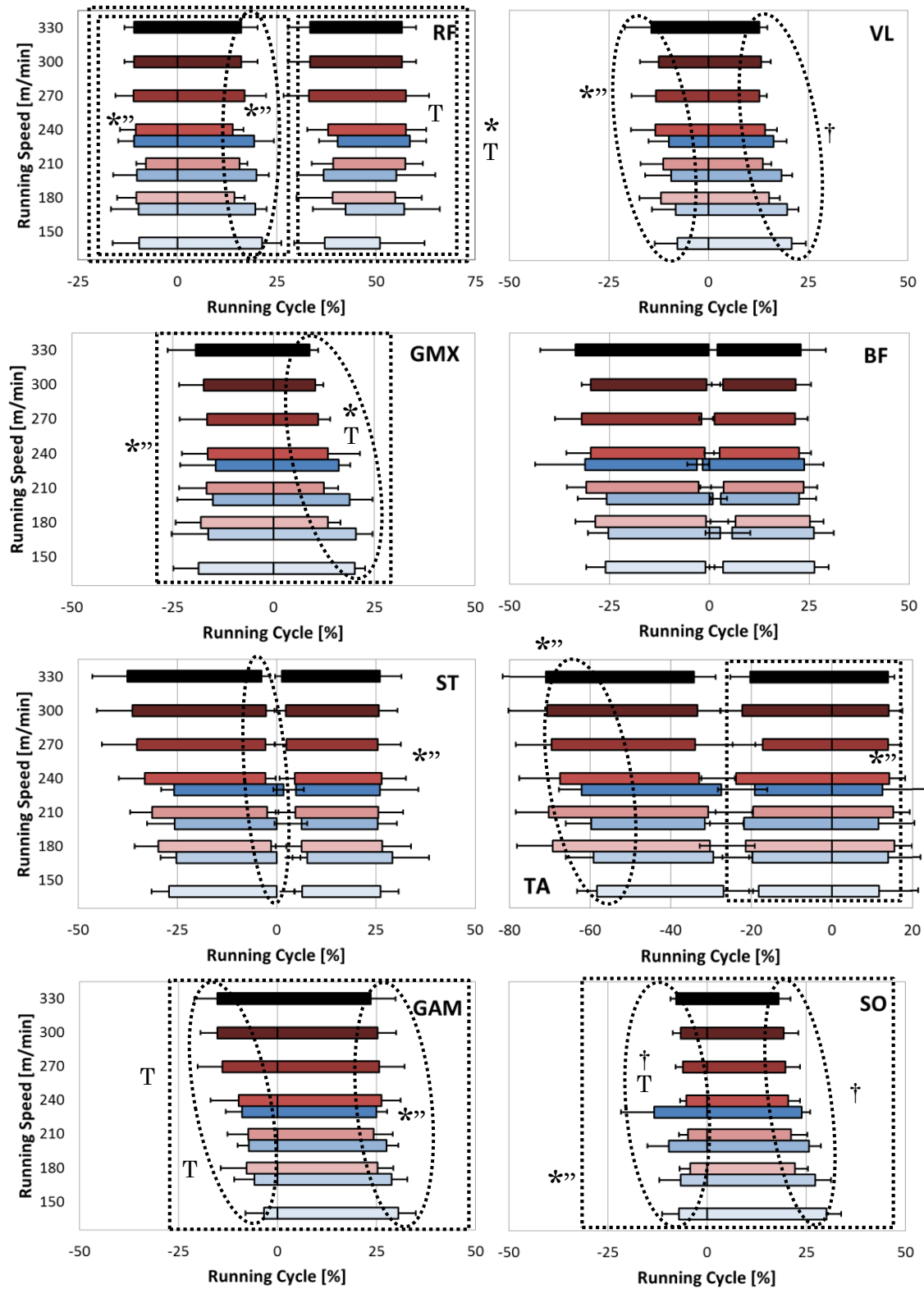


Fig. 3-17 Changes in onset, offset and duration of each muscle with increasing running speeds (red: Trained, blue: Untrained, 0 %:ON)

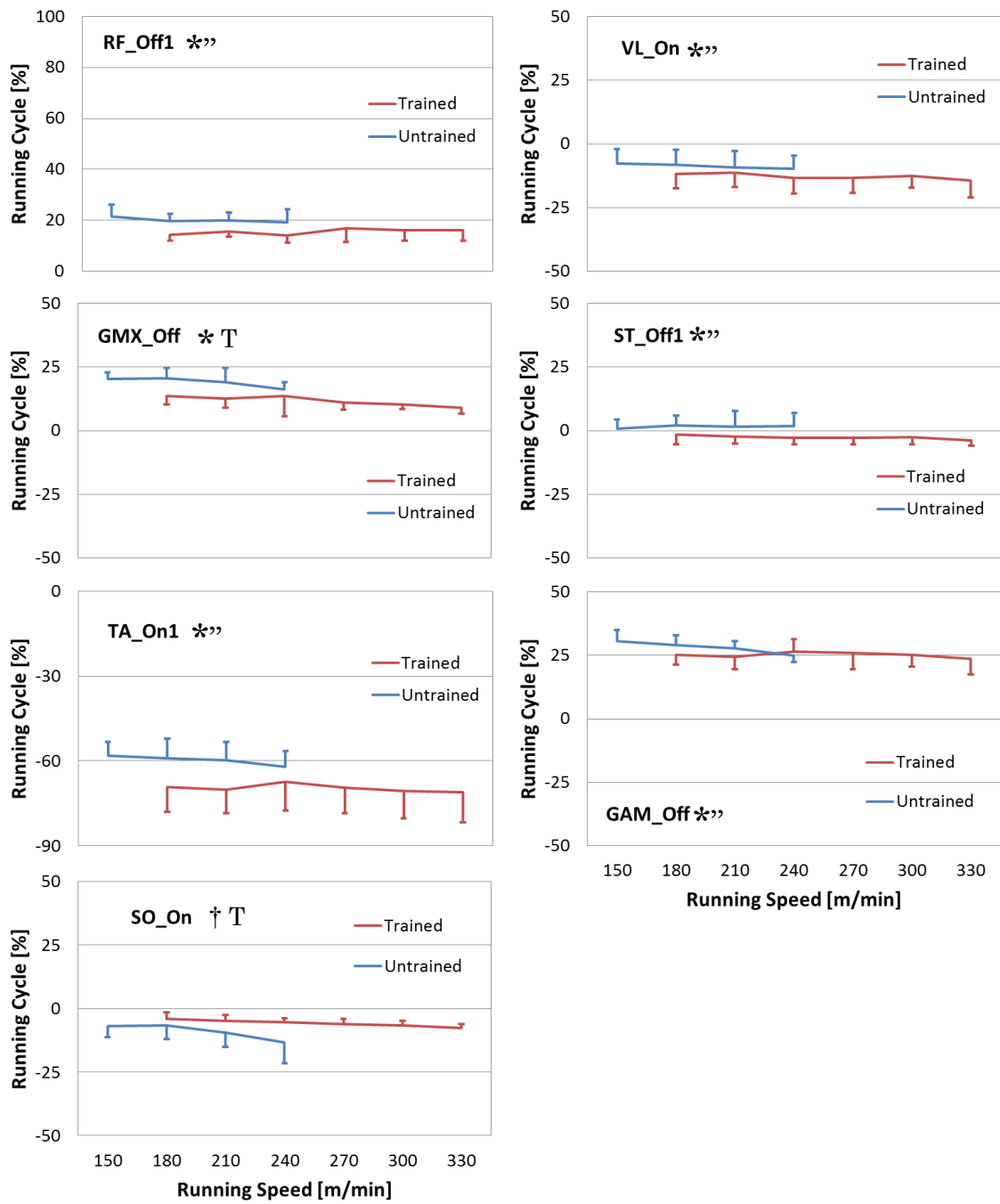


Fig. 3-18 Changes in onset and offset of each muscle with increasing running speeds

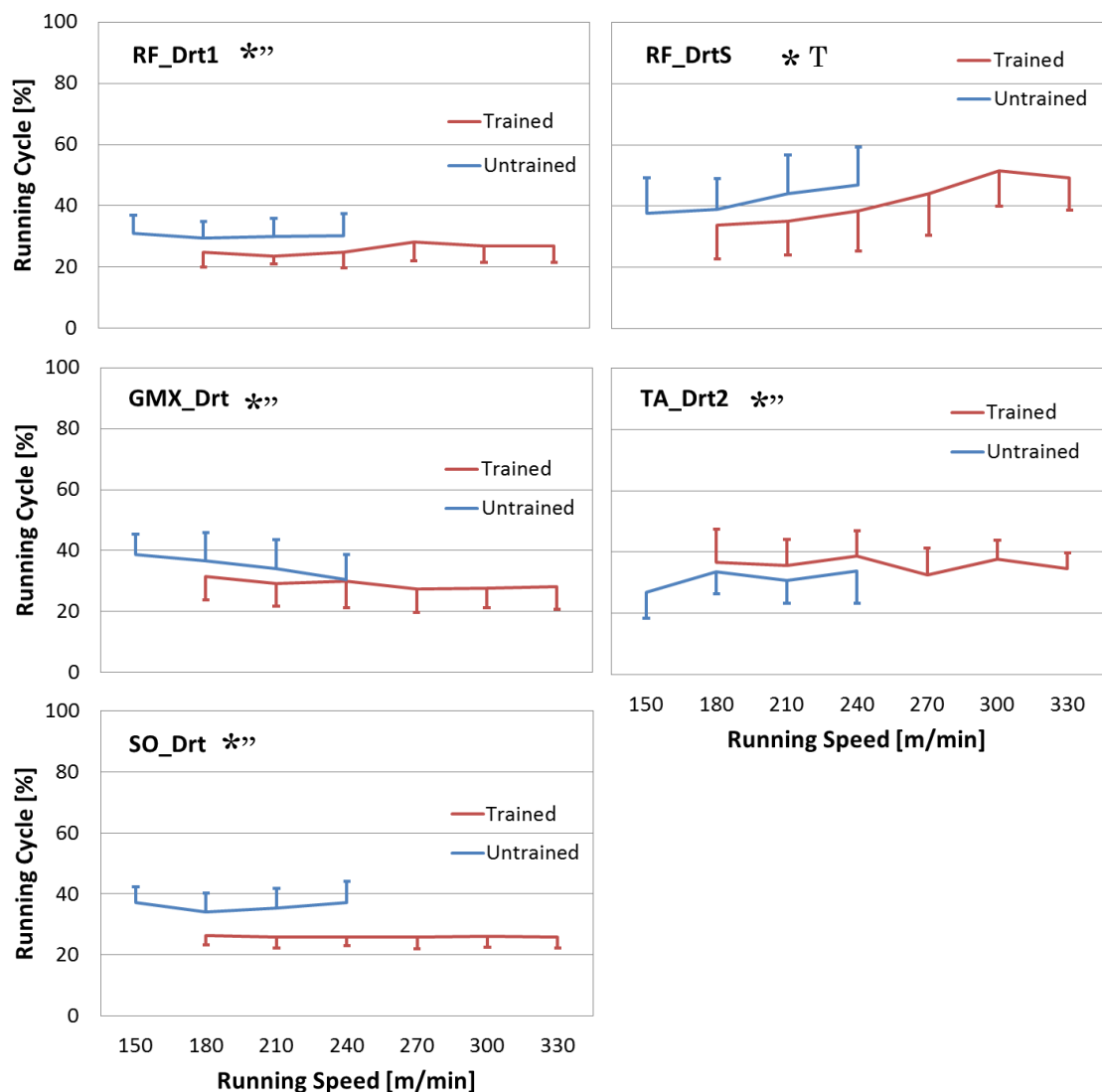


Fig. 3-19 Changes in duration of each muscle with increasing running speeds

3.3.4. 下肢筋の共収縮時間

図 3-20 は、走速度の増加に伴う各ペアの%共収縮時間 (Cocon) の変化を示したものである。なお、Hip は RF - (GMX・BF・ST)の組み合わせ、Knee は(RF・VL)-(BF・ST・GAM)の組み合わせ、Ankle は TA-(GAM・SO)の組み合わせによる%共収縮時間を示している。RF-BF@BR, RF-ST@BR, VL-ST@BR, RF-BF@AO, RF-GMX@F2, RF-BF@F2, RF-ST@F2, RF-GAM@F2, Hip@F2, Ankle@F2, RF-BF@PO, RF-ST@PO, VL-BF@PO, TA-GAM@PO

および RF-GAM@PO は、走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に小さかった。この内、RF-GMX@F2, RF-BF@F2, RF-ST@F2, Hip@F2, Ankle@F2 および RF-ST@PO には、走速度の影響がみられなかった。RF-GAM@BR, TA-GAM@BR, TA-SO@BR および Ankle@BR は、走速度の大きさに関わらず Trained が Untrained に比べて有意に大きかった。この内、TA-GAM@BR, TA-SO@BR および Ankle@BR には、走速度の影響がみられなかった。VL-BF@BR, RF-BF@PS, RF-GAM@PS は、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、Trained のみ走速度の増加に伴い有意に増加していた。TA-SO@F1 は、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無に交互作用が認められ、Untrained のみ走速度の増加に伴い有意に増加していた。図 3-21 は走速度の増加に伴う制動局面の各ペアの%共収縮時間 (RF-BF@BR, RF-ST@BR, RF-GAM@BR, VL-BF@BR, VL-ST@BR, TA-GAM@BR, TA-SO@BR, Ankle@BR) の変化を、図 3-22 は走速度の増加に伴う推進局面、離地直後局面および前方スイング前半局面の各ペアの%共収縮時間 (RF-BF@PS, RF-GAM@PS, RF-BF@AO, TA-SO@F1) の変化を、図 3-23 は走速度の増加に伴う前方スイング後半局面の各ペアの%共収縮時間 (RF-GMX@F2, RF-BF@F2, RF-ST@F2, RF-GAM@F2, Hip@F2, Ankle@F2) の変化を、図 3-24 は走速度の増加に伴う接地直前局面の各ペアの%共収縮時間 (RF-BF@PO, RF-ST@PO, VL-BF@PO, TA-GAM@PO, RF-GAM@PO) の変化を示したものである。

したがって、制動局面について Trained では、走速度の大きさに関わらず、外側広筋と大腿二頭筋および大腿直筋と腓腹筋とのペアを除いた膝関節まわりの%共収縮時間が短く、足関節まわりの%共収縮時間が長かった。推進局面について Trained では、走速度の増加に伴い膝関節まわりの%共収縮時間が増加する傾向であった。離地直後局面の大腿直筋と大腿二頭筋および前方スイング前半局面の前脛骨筋とヒラメ筋の%共収縮時間については、ANCOVA にて群間差および交互作用が認められているが、両群の平均値が 10 %以下と小さかった。前方スイング後半局面について Trained では、走速度の大きさに関わらず下肢 3

関節まわりの%共収縮時間が短かった。接地直前局面について **Trained** では、走速度の大き
さに関わらず下肢 3 関節まわりの%共収縮時間が短かった。

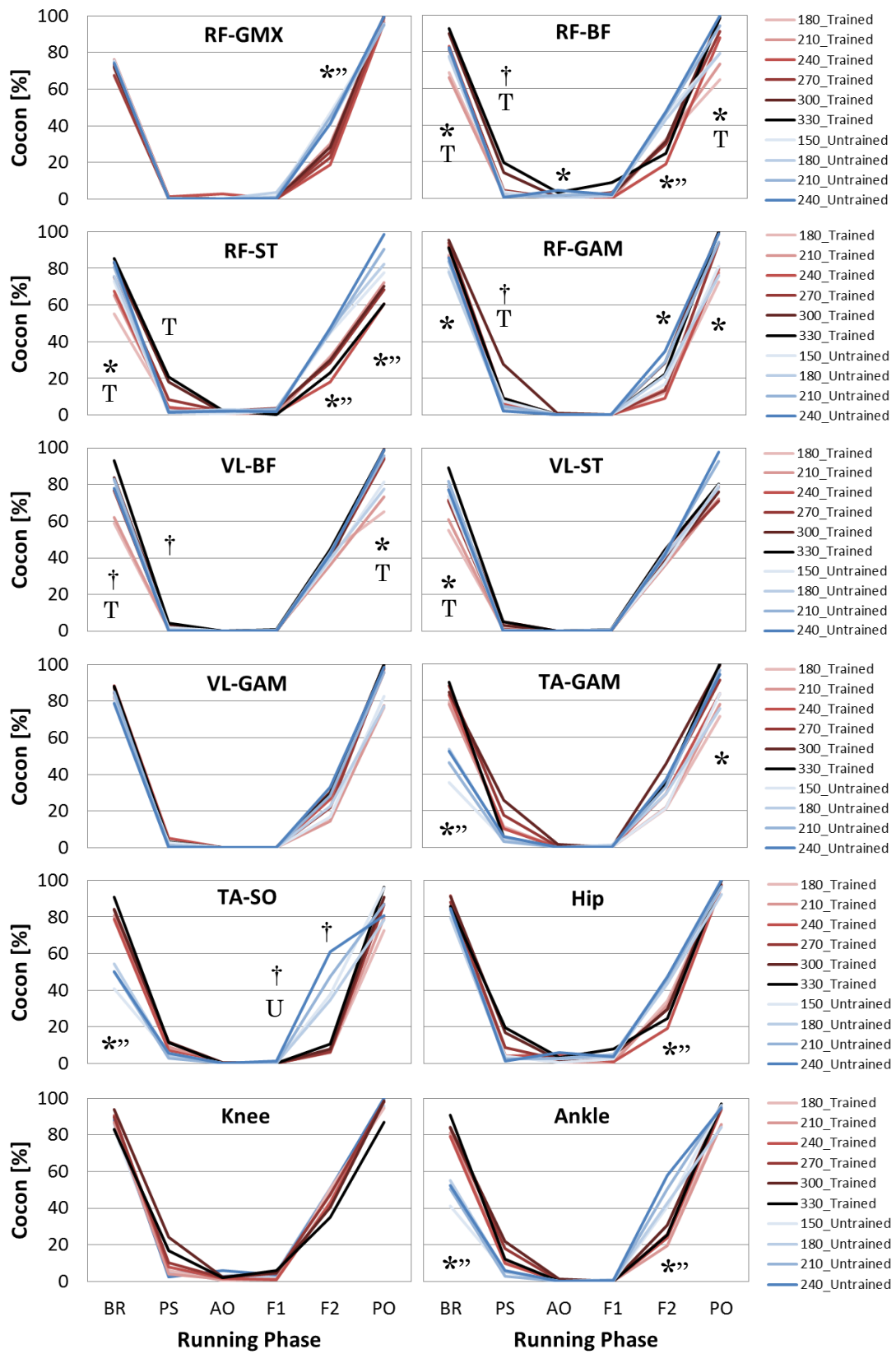


Fig. 3-20 Changes in percent cocontraction time of each pair with increasing running speeds

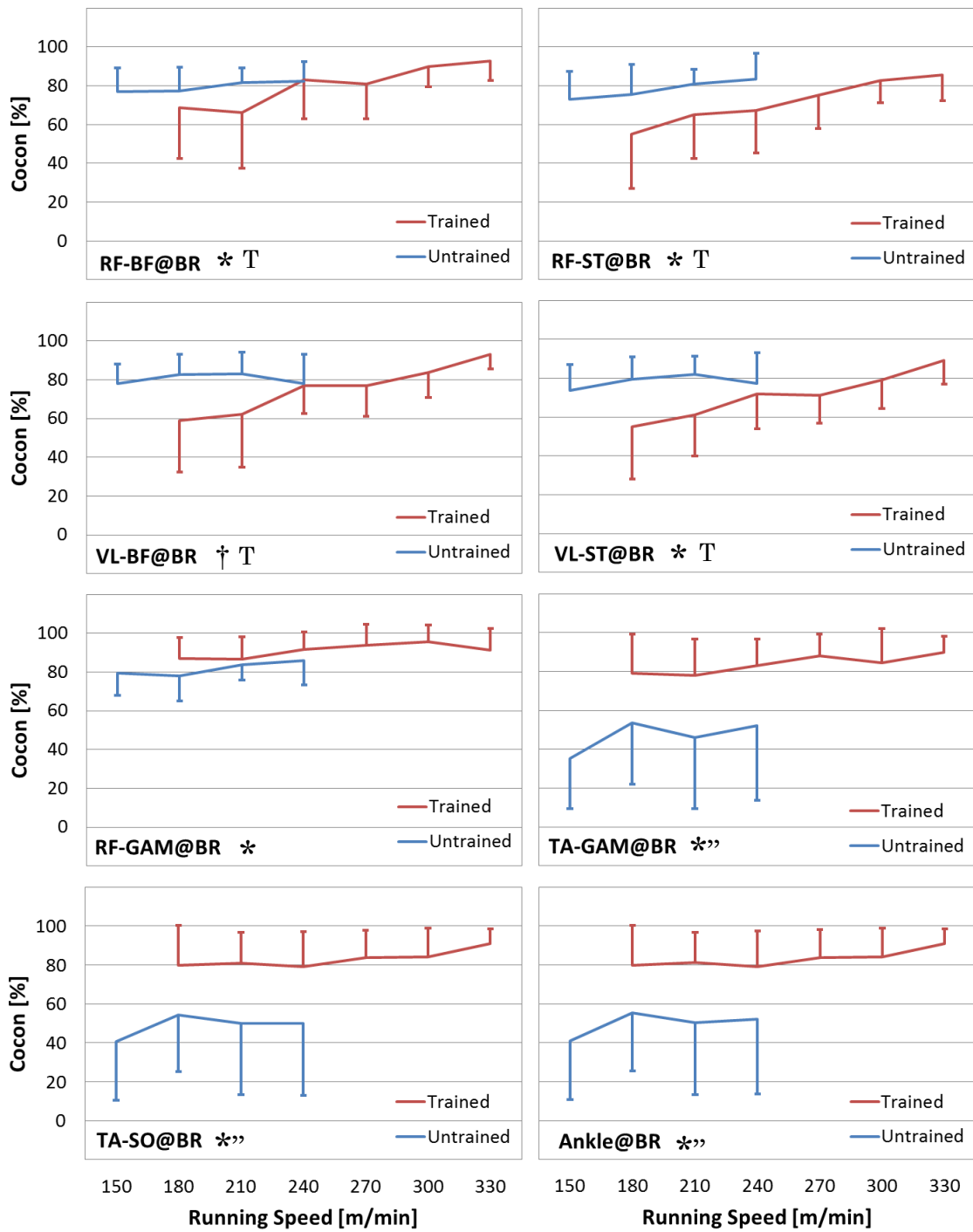


Fig. 3-21 Changes in percent cocontraction time of each pair during brake phase with increasing running speeds

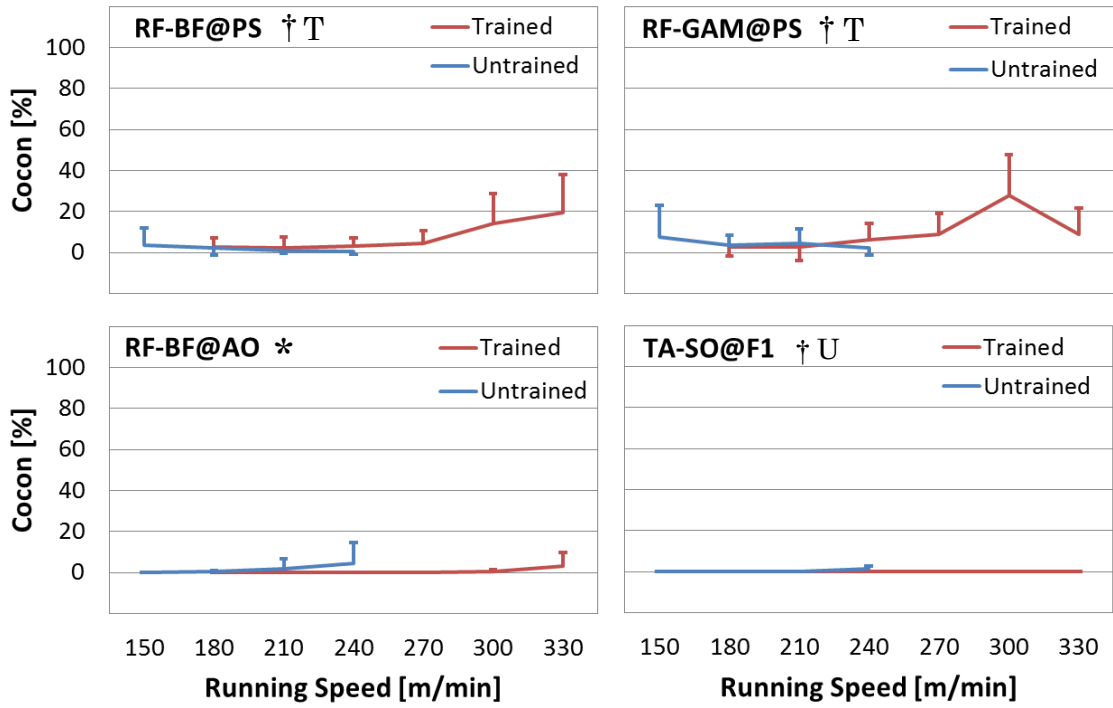


Fig. 3-22 Changes in percent cocontraction time of each pair during propulsion, after off and forward swing 1st phase with increasing running speeds

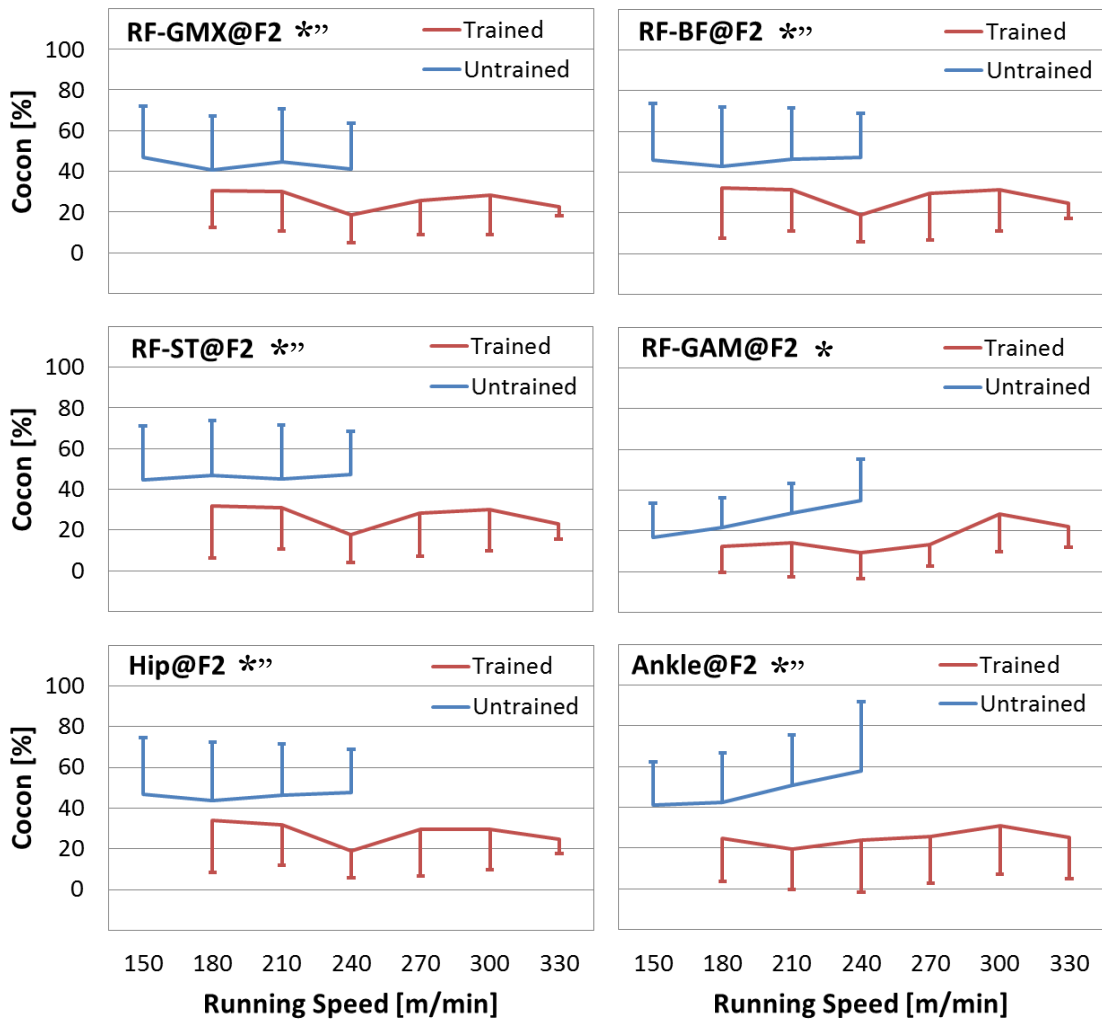


Fig. 3-23 Changes in percent cocontraction time of each pair during forward swing 2nd phase with increasing running speeds

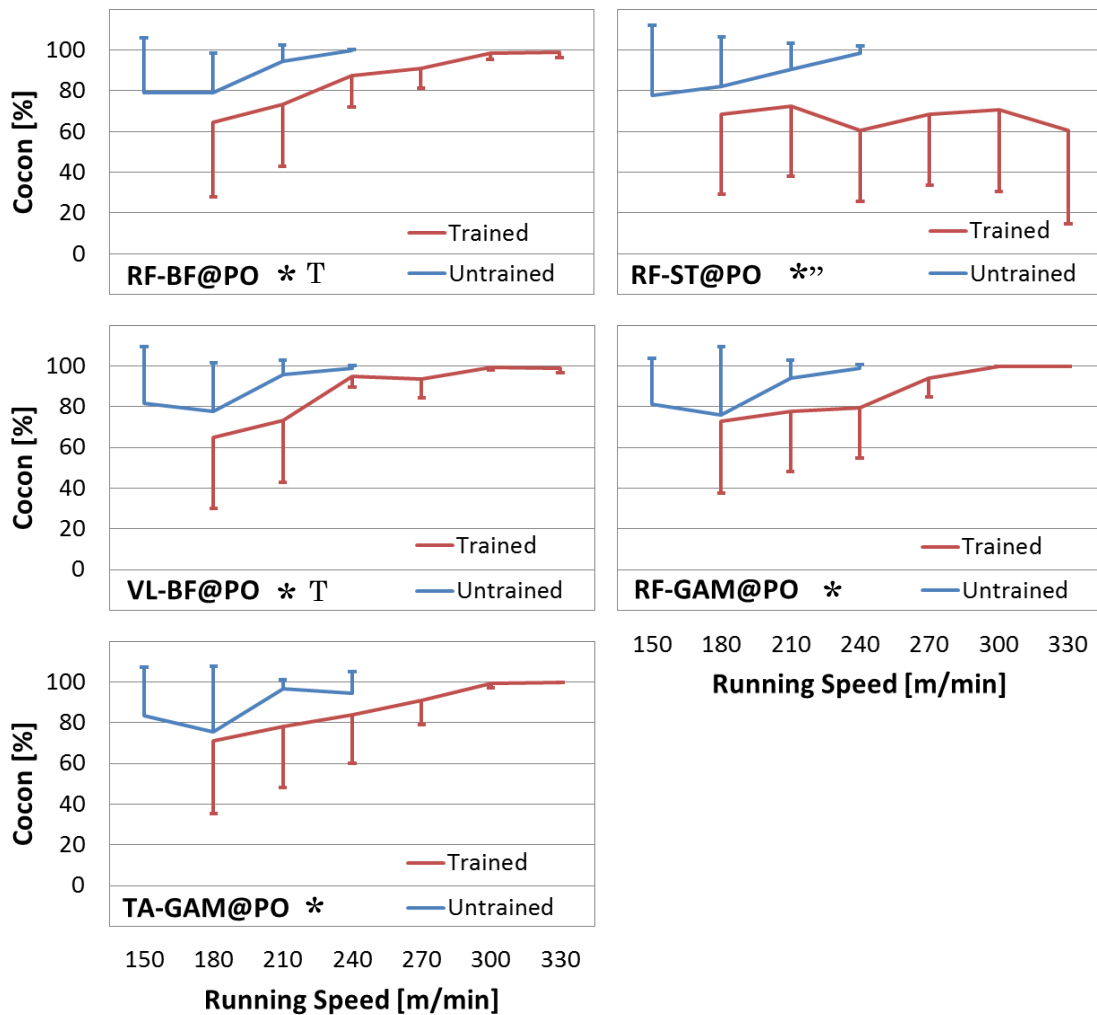


Fig. 3-24 Changes in percent cocontraction time of each pair during pre on phase with increasing running speeds

3.4. 下肢の動作および筋活動とランニングエコノミーとの関係

RE に影響を及ぼす下肢の動作および筋活動の変数を明らかにするため、RE を目的変数、RE との単相関が有意である下肢動作を示す変数および下肢筋活動を示す変数を説明変数とするステップワイズ重回帰分析を行った。さらに、下肢動作が RE に及ぼす影響、下肢筋活動が RE に及ぼす影響を明らかにするため、RE を目的変数、RE との単相関が有意である下肢動作を示す変数および下肢筋活動を示す変数それぞれのみを説明変数とするステッ

プワイズ重回帰分析も行った。

表 3-1 は、RE との単相関が有意であった下肢の動作および筋活動を示す変数を示したものである。筋活動量（RMS 振幅）および%共収縮時間（Cocon）については、各筋のバーストがある局面を確認し、バーストがない局面の変数は対象から除いた。また、筋活動のタイミング（On および Off）は、筋の活動時間（Drt）を説明する要因であるため対象から除いた。RE との単相関が有意であった下肢動作を示す変数は 17 個、下肢筋活動を示す変数は 16 個であった。なお、筋活動を示す変数については、計測時のアーチファクトが大きいことなどが原因で解析できなかったケースがあった。このため、重回帰分析を行う上で必要なサンプル数の条件を満たすために、有効サンプル数が全体の 75 %以下の 5 つの変数（GAM@BR, GAM@PO, BF_Drt2, TA_Drt1, VLGAM@BR）は投入変数から除いた。

Table 3-1 Kinematic and EMG variables that show the significant correlation with RE

Performance Descriptors	SL, %BRT, %PST, %POT, %ABT, %TOD, %RRD, H4
Kinematics	θ_{k2} , θ_{a1} , ω_{h1} , ω_{h3} , ω_{k3} , R_{h1} , R_{h2} , R_{h3} , R_{k2}
RMS Amplitude	VL@BR, TA@BR, SO@BR, BF@F2, ST@F2, SO@PO
Duration of muscle activity	ST_DrtS, SO_Drt
Cocontraction time	RF-GMX@BR, RF-ST@BR, VL-BF@BR, VL-ST@BR, RF-GMX@PO, RF-ST@PO, VL-ST@PO, Hip@PO

表 3-2 は、RE を目的変数、表 3-1 に示された下肢の動作および筋活動を示す変数を説明変数とするステップワイズ重回帰分析の結果を示したものである。重回帰分析の結果、RE の変動の 84.8 %を下肢の動作および筋活動の 6 つの変数により説明することができた。また、VL-ST@BR, RF-ST@BR, RF-GMX@BR, BF@F2, SL, ST_DrtS の順に標準偏回帰

係数が大きかった。標準偏回帰係数が大きいほど RE への影響が大きく、VL-ST@BR, RF-GMX@BR および ST_DrtS は小さいほど、RF-ST@BR, BF@F2 および SL は大きいほど経済的であることが明らかになった。また、図 3-25 はこの下肢の動作および筋活動を示す変数を説明変数とする重回帰分析による標準化残差と RE の予測値との関係を示したものである。相関係数がほぼ 0 であることから、重回帰分析の結果は良好であるといえる。

Table 3-2 Result of multiple regression analysis with RE as objective variable, kinematic and muscle activity parameters as explanatory variables

$R^2 = 84.8$ [%]			
Parameter	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	VIF
VL-ST@BR ***	0.023	0.84	3.7
RF-ST@BR ***	-0.016	-0.63	4.1
RF-GMX@BR ***	0.010	0.28	1.6
BF@F2 ***	-0.007	-0.28	1.6
SL ***	-1.364	-0.28	1.3
ST_DrtS *	0.009	0.18	2.4

*:p<0.05 **:p<0.01 ***:p<0.001

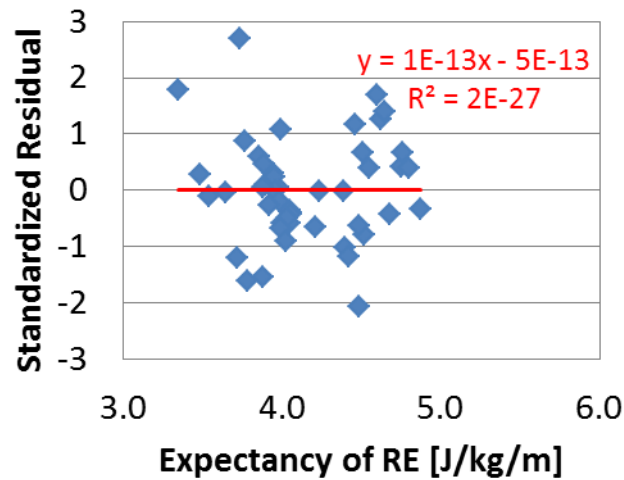


Fig. 3-25 Relationships between standardized residual and expectancy of RE by multiple regression analysis with kinematic and muscle activity parameters as explanatory variables

表 3-3 は、RE を目的変数、表 3-1 に示された下肢動作を示す変数のみを説明変数とするステップワイズ重回帰分析の結果を示したものである。重回帰分析の結果、RE の変動の 38.1 % を下肢動作の 5 つの変数により説明することができた。また、%POT, SL, H4, R_{h3} , ω_{k3} の順に標準偏回帰係数が大きかった。標準偏回帰係数が大きいほど RE への影響が大きくなり、%POT, SL および ω_{k3} は大きいほど、H4 および R_{h3} は小さいほど経済的であることが明らかになった。また、図 3-26 はこの下肢動作を示す変数を説明変数とする重回帰分析による標準化残差と RE の予測値との関係を示したものである。相関係数がほぼ 0 であることから、重回帰分析の結果は良好であるといえる。

Table 3-3 Result of multiple regression analysis with RE as objective variable,
kinematic parameters as explanatory variables

$R^2 = 38.1 [\%]$			
Parameter	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	VIF
%POT ***	-0.112	-0.56	2.5
SL ***	-2.729	-0.49	1.9
H4 *	11.787	0.37	3.6
R_{h3} ***	0.035	0.31	1.3
ω_{k3} *	-0.001	-0.20	1.1

*:p<0.05 **:p<0.01 ***:p<0.001

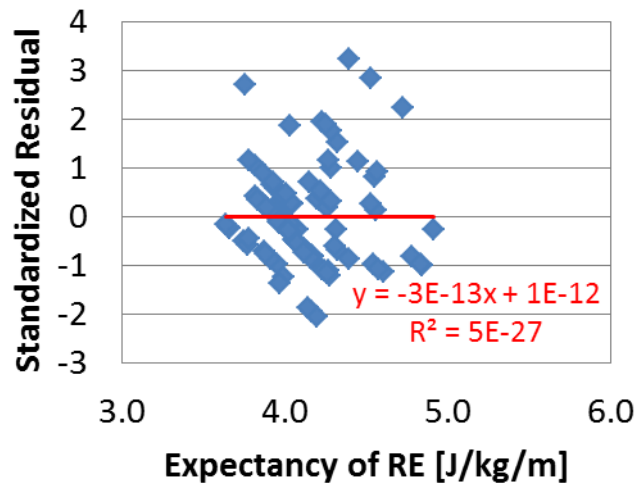


Fig. 3-26 Relationships between standardized residual and expectancy of RE
by multiple regression analysis with kinematic parameters as explanatory variables

表 3-4 は、RE を目的変数、表 3-1 に示された下肢筋活動を示す変数のみを説明変数とす

るステップワイズ重回帰分析の結果を示したものである。重回帰分析の結果、RE の変動の 81.1 % を下肢筋活動の 5 つの変数により説明することができた。また、VL-ST@BR, RF-ST@BR, BF@F2, RF-GMX@BR, SO_Drt の順に標準偏回帰係数が大きかった。標準偏回帰係数が大きいほど RE への影響が大きく、VL-ST@BR, RF-GMX@BR および SO_Drt は小さいほど、RF-ST@BR および BF@F2 は大きいほど経済的であることが明らかになった。また、図 3-27 はこの下肢筋活動を示す変数を説明変数とする重回帰分析による標準化残差と RE の予測値との関係を示したものである。相関係数がほぼ 0 であることから、重回帰分析の結果は良好であるといえる。

図 3-28 は、これらの 3 つの重回帰分析から得られたモデルにおける説明変数の貢献を示したものである。下肢の動作および筋活動を説明変数とするモデルでは、下肢動作を示す変数が SL のみであったのに対し、下肢筋活動を示す変数は 5 つで決定係数は 84.8 % と、下肢動作のみにて重回帰分析を行った Williams と Cavanagh (1987) の 54 % よりも高かった。また、下肢動作を示す変数を説明変数とするモデルの決定係数は 38.1 %、下肢筋活動を示す変数を説明変数とするモデルの決定係数は 81.1 % であった。以上のことから、RE への影響は、下肢動作よりも下肢筋活動の方が大きいといえる。また、モデルに残った説明変数から、特に制動局面における股関節および膝関節まわりの筋の%共収縮時間が重要であることが示唆された。

Table 3-4 Result of multiple regression analysis with RE as objective variable,
muscle activity parameters as explanatory variables

$R^2 = 81.1$ [%]			
Parameter	Partial regression coefficient	Standard partial regression coefficient	VIF
VL-ST@BR ***	0.024	0.90	3.9
RF-ST@BR ***	-0.015	-0.58	3.5
BF@F2 ***	-0.010	-0.37	1.6
RF-GMX@BR *	0.007	0.20	1.6
SO_Drt *	0.010	0.18	1.4

*:p<0.05 **:p<0.01 ***:p<0.001

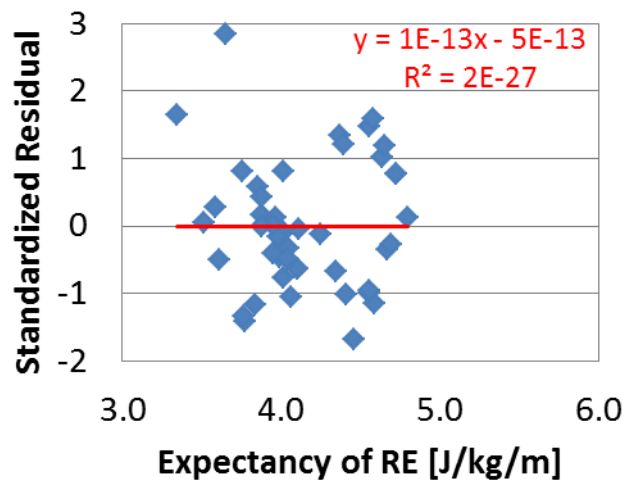


Fig. 3-27 Relationships between standardized residual and expectancy of RE
by multiple regression analysis with muscle activity parameters
as explanatory variables

4. 考察

4.1. 得られたランニングエコノミーの妥当性

Trained と Untrained との間には、年齢および身体特性に差はないが実験当日のパフォーマンスおよび経済性には差があり、パフォーマンスが高いランナーほど経済性に優れていることが示された (図 3-1)。

本研究では、ランニングエコノミー (RE) の算出方法として、走速度とエネルギー消費との回帰直線を用いて高強度におけるエネルギー消費を推定する方法 (Medbø ら, 1988) と、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) および呼吸交換比 (RER) を用いてエネルギー基質を考慮する方法 (Fletcher ら, 2009) とを組み合わせた手法を用いた。一般的にランニングエコノミーは、ある一定速度における酸素摂取量として評価されることが多い (Conley と Krahenbuhl, 1980 ; Heise ら, 1996 ; Heise と Martin, 1998 ; Heise ら, 2008 ; Moore ら, 2013 ; Santos-Concejero ら, 2014 ; Spurr ら, 2003 ; Weston ら, 2000 ; Williams と Cavanagh, 1987)。しかし、この手法では無酸素性エネルギーを定量できないため、アスリートのレーススペースのような高い走速度における走動作とランニングエコノミーとの関係进行评估することができない。さらに、酸素摂取量のみから消費エネルギーを算出した場合、生み出されたエネルギーが糖由来であるのか脂質由来であるのかというエネルギー基質によるエネルギー需要量の変化を考慮できないため、実際に消費されているエネルギー量とは差が大きくなることが報告されている (Fletcher ら, 2009)。したがって、簡便な方法であるがゆえに普及しているが、エネルギー消費を定量するためには適切とは言い難い手法であろう。Trained が Untrained よりも有意に経済的であり、RE とパフォーマンスには有意な相関が認められ (図 3-1) 先行研究の結果を支持したことから (Conley と Krahenbuhl, 1980 ; Weston ら, 2000 ; Williams と Cavanagh, 1987)、本研究で得られたランニングエコノミーおよびその算出方法は妥当であったと考えられる。

一方、Trained のみを対象とした場合のランニングエコノミーと実験当日のパフォーマンス

ス (PTS) との関係およびランニングエコノミーと 5000m 記録との関係は有意ではなく、ランニングエコノミーが狭い範囲の競技レベルを対象とした場合のパフォーマンスと有意な相関関係にあるという先行研究の結果とは一致しなかった (Conley と Krahenbuhl, 1980). この主な原因としては、走行中のエネルギー需要量と運動強度との関係が直線的でなく、エネルギー需要量が走速度の 1.05 乗に比例する可能性があることが挙げられる (Hill と Vingren, 2011). 丹治ら (2015) は、ランニングエコノミーを算出する際に呼吸交換比だけでなく血中乳酸値も考慮し、高強度走行におけるランニングエコノミーを算出している. この結果、アスリートのみ狭い競技レベルにおけるパフォーマンスとランニングエコノミーとの有意な相関が認められ、エネルギー需要量が走速度の 1.05 乗に比例していたことを報告している. また、同様の手法にてランニングエコノミーを算出した丹治 (2014) の研究において、被験者の 5000m シーズンベストが 15'16"7±31"8 と本研究よりも高いパフォーマンスを持つにもかかわらず、270 [m/min]におけるランニングエコノミーが 4.4±0.2 [J/kg/m]と本研究よりも悪かったことから、本研究のランニングエコノミーの算出方法は高い走速度における無酸素性エネルギー量を過小評価している可能性がある. そのため、Trained のみにおけるランニングエコノミーとパフォーマンスとの有意な相関関係が認められなかったと考えられる. しかしながら、エネルギー需要量と走速度との関係が 1.05 乗であるという報告に対して、伝統的には直線関係であると考えられており (Hill と Vingren, 2011), 両者の関係については決着がついていない. また、丹治 (2014) および丹治ら (2015) の手法では血中乳酸値を用いるため、実験時に被験者から採血する必要があり、侵襲的である. したがって、現状では高強度走行中のランニングエコノミーを適切に評価するためのスタンダードな手法が確立されているとは言えず、さらなる研究が求められるであろう. これ以外の原因としては、実験当日と 5000m シーズンベストを記録した日の日間変動が挙げられる. パフォーマンスの指標として用いた 5000m 記録は当然ながら実験当日とは別日であるため、心理的、生理学的、環境的な違いが生まれ、ランニングエコノミーと 5000m

記録との有意な相関が得られなかったと考えられる。また、本研究では実験当日のパフォーマンスを算出しているが、**Trained** に関しては実験時の安全性と計測機器の限界を考慮し 330 [m/min] よりも高い強度の試技は行わなかったため、330 [m/min] を完走しかつ余裕がみられた被験者の実験当日のパフォーマンスを評価しきれていない。このことも、ランニングエコノミーと実験当日のパフォーマンスとの有意な相関が得られなかった理由の一つと考えられる。

なお、本研究の被験者について、**Trained** および **Untrained** 全体を対象にした場合には、先述したようにランニングエコノミーとパフォーマンスとの有意な相関が認められている (図 3-1) ため、本研究の結果の妥当性は十分に保たれていると考えられる。

4.2. 長距離ランナーの下肢の動作および筋活動の特徴

1 サイクルを 6 つに分けた局面では、制動局面 (BR) では着地動作、推進局面 (PS) ではキック動作、離地直後局面 (AO) ではフォロースルー動作、前方スイング前半局面 (F1) では大腿の振出動作、前方スイング後半局面 (F2) では下腿の振出動作、接地直前局面 (PO) では大腿および下腿の振り戻し動作が行われていることが示された (図 3-4)。この節では、**Trained** と **Untrained** との間に違いがみられた下肢筋活動を示す変数について、これらの動作ごとに言及していく。ただし、離地直後局面および前方スイング前半局面については、大きなバーストがない筋活動量 (GMX@F1, SO@AO, SO@F1, SO@F2 ; 図 3-14)、平均値が 10 %以下と小さい%共収縮時間 (RF-BF@AO, TA-SO@F1 ; 図 3-22) を除いて **Trained** と **Untrained** との間に違いがみられなかったため、言及しない。

4.2.1. 着地動作

Trained では、**Untrained** よりも仮想重心とした大転子中点の下降量 (H1) が有意に小さかった (図 3-7)。着地動作に関わる筋活動を示す変数では、膝関節筋群の筋活動のタイ

ミング (VL_On) および%共収縮時間 (RF-BF@BR, RF-ST@BR, VL-BF@BR, VL-ST@BR, RF-GAM@BR, RF-BF@PO, RF-ST@PO, VL-BF@PO, RF-GAM@PO) に有意な群間差もしくは交互作用が示された (図 3-18, 図 3-21, 図 3-24). また, 足関節筋群の筋活動量 (TA@BR, GAM@BR, SO@BR, GAM@PO, SO@PO), 筋活動のタイミング (SO_On), 筋の活動時間 (TA_Drt2, SO_Drt) および%共収縮時間 (TA-GAM@BR, TA-SO@BR, Ankle@BR, TA-GAM@PO) に有意な群間差もしくは交互作用が示された (図 3-15, 図 3-16, 図 3-18, 図 3-19, 図 3-21, 図 3-24). 着地動作時の屈曲および背屈を表す下肢 3 関節の動作範囲 (R_{h1} , R_{k1} , R_{a1}) を比較すると, R_{k1} および R_{a1} が大きい (図 3-8) ことから, 膝関節および足関節角度の変化が重心の下降の主要因であると考えられる. 着地動作時の下肢 3 関節はエキセントリックな活動であるため, 股関節および膝関節に貢献する%共収縮時間 (RF-BF@BR, RF-ST@BR, RF-BF@PO, RF-ST@PO) は, 膝関節への貢献が股関節よりも大きいとみなした. また, 接地直前局面では, 主に大腿および下腿の振り戻し動作が行われるが, 着地動作の準備を行う局面でもあるため, 制動局面に大きなバーストがみられる大腿直筋, 外側広筋, 腓腹筋およびヒラメ筋を含む変数 (RF-BF@PO, RF-ST@PO, VL-BF@PO, RF-GAM@PO, GAM@PO, SO@PO, TA-GAM@PO) は, 着地動作に関わるとみなした.

Trained では, 膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@BR, RF-ST@BR, VL-ST@BR, RF-BF@PO, RF-ST@PO, VL-BF@PO, RF-GAM@PO) が小さく (図 3-21, 図 3-24), 足関節底屈筋群の筋活動量 (GAM@BR, SO@BR, GAM@PO, SO@PO) および足関節まわりの%共収縮時間 (TA-GAM@BR, TA-SO@BR, Ankle@BR) が大きかった (図 3-15, 図 3-21). したがって, Trained は, 膝関節を短い共収縮によって固定し, 接地前後の足関節の底屈筋群を大きく活動させ, かつ足関節を長い共収縮によって固定し, 重心の下降を防ぐことで走の有効性 (榎本ら, 1999) を高めていると考えられる. Kyröläinen ら (1999) は, 高い走速度における膝関節および足関節の共収縮の重要性を報告しているが, 本研究

の結果から同じ走速度においてはトレーニングの有無により関節の%共収縮時間が異なることが明らかになった。

一方、RF-GAM@BR は制動局面におけるその他の膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@BR, RF-ST@BR, VL-ST@BR) とは異なり、Trained では有意に大きかった (図 3-21)。RF-GAM@BR は、その他のペアと異なり唯一下肢 3 関節全てに跨るペアであるため、Heise ら (2008) が述べているように近位から遠位へと力学的エネルギーを伝達するためには長い時間が必要である可能性が考えられる。

さらに、VL-BF@BR は、制動局面におけるその他の膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@BR, RF-ST@BR, VL-ST@BR) とは異なり、ANCOVA にて走速度とトレーニングの有無とに交互作用が認められ、Trained のみにて走速度の増加に伴い有意に増加していた (図 3-21)。脚の近い場所に位置しているその他の膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@BR, RF-ST@BR, VL-ST@BR) との違いを明確にすることはできないが、RF が二関節筋であるのに対して VL が単関節筋であること、BF が股関節の外旋筋であるのに対して ST が股関節の内旋筋であることが原因として考えられる。また、両群における走速度の増加に伴うその他の膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@BR, RF-ST@BR, VL-ST@BR) の変化は、VL-BF@BR のそれと類似しているため、制動局面の膝関節まわりの%共収縮時間は低い走速度においては短くすることで余計なエネルギー消費を抑え、高い走速度においては長くすることで走速度の増加に伴う着地衝撃の増加に対して重心の下降を効果的に防いでいる可能性が考えられる。

また、TA-GAM@PO はその他の足関節まわりの%共収縮時間 (TA-GAM@BR, TA-SO@BR, Ankle@BR) とは異なり、Trained では有意に小さかった (図 3-24)。TA-GAM@PO は接地直前局面の%共収縮時間、その他の足関節まわりの%共収縮時間 (TA-GAM@BR, TA-SO@BR, Ankle@BR) は制動局面の%共収縮時間であるため、接地後の体重のサポートには長い共収縮によって足関節を固定する必要があるが、準備段階では体重のサポート

が不要であるため短い共収縮であったと考えられる。

ランニングのような身体運動では筋活動によってエネルギーが消費されるが、接地時の体重の受け止め時には腱に弾性エネルギーが蓄えられ、その直後に再利用されることでエネルギー消費が抑えられると言われている。Komiら(1997)はランニングのような跳躍動作において着地時の筋のエキセントリックな活動によって貯蔵した弾性エネルギーを再利用するためには、エキセントリックな活動の局面から踏切時のコンセントリックな活動の局面までの切り替えの時間が短いことが重要であると報告した。このような筋の振る舞いは、伸張短縮サイクル(Stretch-Shortening Cycle: SSC)と呼ばれる。ヒラメ筋について、Trainedでは制動局面の筋活動量(SO@BR)が大きく筋の活動時間(SO_Drt)が短かった(図3-15, 図3-19)。したがって、Trainedの方が有意に経済的であったことを考慮すると、制動局面においてエキセントリックに活動して弾性エネルギーを貯蔵し、推進局面において素早くコンセントリックに切り替えることで弾性エネルギーを解放し(Komiら, 1997)、経済的に推進している可能性が示唆される。

足関節背屈筋群である前脛骨筋について、Trainedでは制動局面の筋活動量(TA@BR)が小さく(図3-16)、支持期の活動時間(TA_Drt2)が大きかった(図3-19)。着地動作時の足関節においては、重心の下降を防ぐために底屈筋群が大きく活動していた(図3-15)。さらに、体重のサポートのために共収縮によって足関節が長く固定されていた(図3-21)。したがって、Trainedは、足関節背屈筋群の活動量を小さくして底屈筋群の活動を妨げない一方、活動時間を長くして共収縮を長くすることで重心の下降を防いでいると考えられる。

また、Trainedではどの走速度においてもVL_Onが早く(図3-18)、SO_Onが低い走速度では遅く高い走速度では早かった(図3-18)ことから、膝関節は常に、足関節は高い走速度で早く伸展および底屈させることが重要であると考えられる。阿江ら(1978)は予備緊張が等尺性筋収縮により発揮される力や力の立ち上がりの速さなどを調査し、予備緊張が大きくなると発揮張力が大きく、力の立ち上がりが早くなったことを報告している。こ

のメカニズムとして、予備緊張により興奮閾値および収縮速度が高く張力の大きい fast タイプの運動単位がより多く動員されるようになることを挙げ、大きな力やパワーの要求される身体運動では、主動作に移る前に予備緊張によって主働的な部位の神経や筋の活動水準を高めておくことが有効であると結論づけている（阿江ら，1978）．外側広筋（VL）およびヒラメ筋（SO）のバーストは着地動作に関わるものであり、両筋の活動開始が接地前から発生していること、ランニングでは支持期においてランナーの体重を支えるために大きな力が要求されること（Arellano と Kram, 2014）を考慮すると、Trained は外側広筋およびヒラメ筋を早く活動させ、予備緊張によって fast タイプの運動単位を多く動員することで大きな力を発揮し、体重の受け止めを行っていると考えられる．特にヒラメ筋に関しては、Trained は低い走速度においては遅く活動を開始することで余計なエネルギー消費を抑えていたと考えられる．また、走速度が増加すると活動開始が早まっていたが、これは走速度の増加に伴い着地衝撃が増大し、足底の接地位置が前方へと移動して、より大きな底屈トルクが要求されるため、予備緊張を長くすることでこれらに対応していると考えられる．

4.2.2. キック動作

キック動作に関わる筋活動を示す変数では、股関節筋群の筋活動量（BF@PS）および膝関節まわりの%共収縮時間（RF-BF@PS, RF-GAM@PS）に有意な群間差もしくは交互作用が示された（図 3-16, 図 3-22）．キック動作時の伸展を表す股関節および膝関節の動作範囲（ R_{h2} , R_{k2} ）を比較すると、 R_{h2} が R_{k2} よりも大きい（図 3-8）ことから、股関節角度の変化が重心の水平移動距離の主要因であると考えられる．また、キック動作時の下肢 3 関節主働筋はコンセントリックな活動であるため、股関節および膝関節に貢献する%共収縮時間（RF-BF@BR）は、膝関節への貢献が股関節よりも大きいとみなした．

下肢筋活動について、Trained ではどの走速度においても股関節伸展筋群の筋活動量

(BF@PS) が大きく (図 3-16), 走速度の増加に伴い膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@PS, RF-GAM@PS) が Untrained よりも大きくなる傾向がみられた (図 3-22). 下肢動作について, Trained ではどの走速度においても支持期の膝関節の伸展動作範囲 (R_{k2}) が有意に小さかった (図 3-10). したがって, Trained は股関節伸展筋群の筋活動量を大きくすることで大きな股関節伸展トルクを発揮して地面をキックしていると考えられる. このことは Kyröläinen ら (1999) の報告を支持する. また, 低い走速度においては短い共収縮, 高い走速度においては長い共収縮により膝関節を固定することで動作範囲を小さくし, 伊藤ら (1998) が報告している合理的なキック動作を行っていると考えられる.

4.2.3. 下腿の振出動作

下腿の振出動作に関わる筋活動を示す変数では, 膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@F2, RF-ST@F2, RF-GAM@F2) の有意な群間差が示された (図 3-23). Trained では Untrained に比べ, 膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@F2, RF-ST@F2, RF-GAM@F2) が小さかった (図 3-23). このことは, Trained では下腿の振出時に膝関節を固める時間が短いことを示している. 前方スイング後半局面 (F2) では, 大腿の前方へのスイングが止まることで下腿が前方に振り出される. この時, 膝関節屈曲筋群 (ハムストリングス) がエキセントリックに収縮し, 下腿を制御する (阿江ら, 1986). Trained では, 下腿の振出時に膝関節まわりの%共収縮時間 (RF-BF@F2, RF-ST@F2, RF-GAM@F2) が短いことから, ハムストリングスが下腿の振出を抑制することを拮抗筋である膝関節伸展筋群が妨げることなく, 余計なエネルギー消費を抑えていると考えられる. また, このことから, 支持期における関節まわりの筋の共収縮とは対照的に, 遊脚期における脚の動作を効率的に行うには共収縮は有効ではない可能性があると考えられる.

4.3. ランニングエコノミーに影響を及ぼすバイオメカニクスの要因

4.3.1. 重回帰分析

本研究では、ランニングエコノミーを目的変数、下肢の動作および筋活動を説明変数とする重回帰分析を行い、ランニングエコノミーに影響するバイオメカニクスの要因について検討した。重回帰分析の説明変数として、走速度で調整済のバイオメカニクスの変数を投入した。これらを調整せずに **Trained** および **Untrained** に共通した走速度のみを対象とすると、180, 210, 240 [m/min]のみとなり **Trained** のレースペースからかけ離れた走速度における走動作からランニングエコノミーを評価することになってしまう。さらに、Frostら（2002）の報告のように、ある1つの走速度におけるモデルが他の走速度における結果と大きく異なってしまった場合には、この違いを説明することは難しい。したがって、複数の走速度の結果からこれらの関係を明らかにする場合には、本研究のように速度調整済の値を対象とすることが解決策の1つであると考えられる。

また、下肢動作を示す変数を説明変数とする重回帰分析では、対象となる有効サンプル数が全体の44.8%と少なかった。これは、MVCの異常値、アーチファクトの混入、筋活動のタイミング（On, Off）の異常検出があった場合のデータを欠損と扱ったことが原因である。しかし、有効サンプルのみにおいても、ランニングエコノミーと実験当日のパフォーマンスとの相関は有意かつ高かった（ $r=-0.68$, $p<0.01$ ）。また、有効サンプル数は**Trained** では6名分の25個、**Untrained** では8名分の22個であり、大きな偏りはないため、結果の妥当性は十分に保たれるものと考えられる。図4-1は、有効サンプルのみからみたランニングエコノミー（RE）と実験当日のパフォーマンス（PTS）との関係を示したものである。

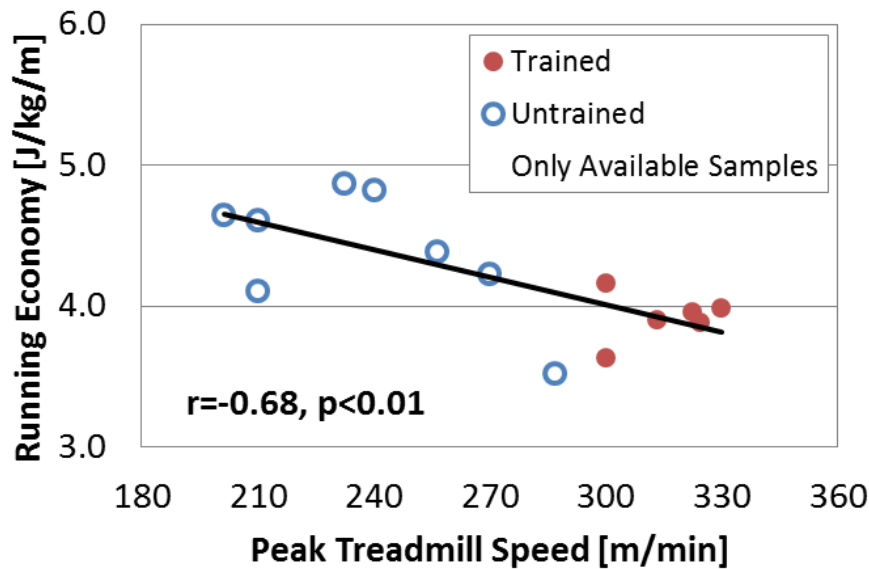


Fig. 4-1 Relationships between RE and PTS in limited samples available for the multiple regression analysis

4.3.2. ランニングエコノミーに影響を及ぼす下肢の動作および筋活動

重回帰分析の結果より、下肢の動作および筋活動の内、ランニングエコノミーには制動局面の外側広筋と半腱様筋の%共収縮時間 (VL-ST@BR)、制動局面の大腿直筋と半腱様筋の%共収縮時間 (RF-ST@BR)、制動局面の大腿直筋と大殿筋の%共収縮時間 (RF-GMX@BR)、前方スイング後半局面の大腿二頭筋の活動量 (BF@F2)、ステップ長 (SL)、半腱様筋の総活動時間 (ST_DrtS) の影響が大きいことが明らかになった (表 3-2)。また、下肢動作のみを説明変数とする重回帰分析および下肢筋活動のみを説明変数とする重回帰分析から、ランニングエコノミーへの影響は下肢動作よりも下肢筋活動の方が大きいことが明らかになった (表 3-3, 表 3-4, 図 3-28)。

Frost ら (2002) および関 (2015) が報告しているように、下肢動作には筋の弾性エネルギーの再利用、二関節筋によるエネルギーの伝達、主働筋と拮抗筋の共収縮によるトルク発揮の相殺、アイソメトリックな筋活動などが直接的には反映されない。したがって、

下肢動作そのものよりも動作を生じさせる原因的な要素である筋活動の方がエネルギー消費を直接反映でき、ランニングエコノミーへの影響が大きいと考えられる。また、特に動作には全く反映されない主動筋および拮抗筋の%共収縮時間が重要な説明変数として多く残ったと考えられる。しかし、本研究の下肢動作を示す変数にはトルク、パワー、力学的エネルギーなどのキネティクス変数、下肢筋活動を示す変数には Frost ら (2002) および関 (2015) が指摘している二関節筋のエネルギー伝達量、弾性エネルギーの貯蔵および再利用、筋の収縮様式を考慮しなかったため、より詳細に下肢の動作と筋活動の影響を比較するのであれば、これらの変数を投入して重回帰分析を行うべきであろう。

制動局面の外側広筋と半腱様筋の%共収縮時間 (VL-ST@BR)、制動局面の大腿直筋と半腱様筋の%共収縮時間 (RF-ST@BR) および制動局面の大腿直筋と大殿筋の%共収縮時間 (RF-GMX@BR) は、それぞれ 1, 2, 3 番目にランニングエコノミーへの影響が強く、VL-ST@BR および RF-GMX@BR は小さいほど、RF-ST@BR は大きいほど経済的であった (表 3-2)。

制動局面の外側広筋と半腱様筋の%共収縮時間は膝関節を、制動局面の大腿直筋と大殿筋の%共収縮時間は股関節を固める共収縮であり、ランニングエコノミーと有意な正の相関がみられた (表 3-2)。また、制動局面の大腿直筋と半腱様筋の%共収縮時間は股関節および膝関節を固める共収縮でありランニングエコノミーと有意な負の相関がみられた (表 3-2)。このことから、経済的なランナーは、一関節のみに作用する%共収縮時間を短く、二関節に作用する%共収縮時間を長くすることで、関節を効果的かつ経済的に安定させていると考えられる。この結果は、制動局面の大腿直筋と半腱様筋の%共収縮時間については Heise ら (2008) と同様であり、制動局面の外側広筋と半腱様筋の%共収縮時間および制動局面の大腿直筋と大殿筋の%共収縮時間については Moore ら (2013) と同様であった。したがって、包括的にランニングエコノミーを調査したことにより、先行研究の矛盾について言及することができたと考えられる。また、重心の下降時における股関節の動作範囲が膝関節

および足関節と比較して小さいことから、股関節は体重の受け止めに関して、膝関節および足関節ほど貢献しないと考えられる。したがって、制動局面の大腿直筋と大殿筋の%共収縮時間は体重の受け止めへの貢献が小さい股関節の共収縮であるという点からも、この共収縮が長いことは余計なエネルギー消費を招くと考えられる。

前方スイング後半局面の大腿二頭筋の活動量 (BF@F2) はランニングエコノミーへの影響が 4 番目に大きく、値が大きいほど経済的であった (表 3-2)。前方スイング後半局面 (F2) では下腿の振出が行われる。大腿二頭筋 (BF) は支持期全般および遊脚期後半で活動しており (図 3-13)、支持期での股関節伸展および遊脚期後半の下腿の振出の制御に貢献していると考えられる。本研究の結果から、経済的なランナーは、前方スイング後半局面の大腿二頭筋を大きく活動させることで、阿江ら (1986) が述べているように下腿の振出の過度な回転を抑制して脚の回転を早め、続く接地時の足の接地位置を身体重心に近づけることでブレーキを減らしていると考えられる。また、下腿の振出動作 (膝関節の伸展) に拮抗作用をもつ大腿二頭筋の活動が大きいほど経済的であったことから、4.2.3. で述べたように共収縮によって関節を固定しながら下腿の振出を制御するのではなく、拮抗筋の作用のみによってこれを行うことで、余計なエネルギー消費を抑えて高い経済性を獲得していると考えられる。このことは、体重の受け止めを伴う支持期では関節の共収縮が経済性に貢献しうるが、脚が前後に大きくスイングする遊脚期では関節の共収縮が経済性を低下させる可能性を示唆している。

ステップ長 (SL) は、ランニングエコノミーへの影響が 5 番目に大きく、値が大きいほど経済的であった (表 3-2)。ステップ長を大きくするためには推進局面の動作の影響が大きいため、経済的なランナーは、脚の伸展筋群の活動により地面を強くキックすることで、ステップ長を大きくしていると考えられる。しかしながら、この結果はステップ頻度が大きいほど経済的であると報告している Frost ら (2002) および Halvorsen ら (2011) とは矛盾する。しかし、ステップ長およびステップ頻度は 1 歩のみを表す変数であるため、多

くの歩数を含むランニング全体について考えた場合には、ステップ頻度が高ければステップ長が高い場合よりも小さなエネルギーがより多くのサイクルに渡って消費されることになる。したがって、ステップ長が高い方が経済的であるという本研究の結果が生じた原因については深く言及できない。

4.3.3. ランニングエコノミーに影響を及ぼす下肢動作

下肢動作のみを説明変数としたランニングエコノミーの重回帰分析の結果から、ランニングエコノミーに影響を及ぼす下肢動作として、%接地直前局面時間 (%POT)、ステップ長 (SL)、仮想重心とした大転子中点の最高点から接地時までの下降量 (H4)、遊脚期の股関節の屈曲動作範囲 (R_{h3})、遊脚期の膝関節の最大屈曲角速度 (ω_{k3}) の影響が大きいことが明らかになった (表 3-3)。

%接地直前局面時間はランニングエコノミーへの影響が最も大きく、値が大きいほど経済的であった (表 3-3)。%接地直前局面時間は遊脚期の股関節の最大伸展角速度 (ω_{h4}) および伸展動作範囲 (R_{h4}) とはともに有意な正の相関がみられ、%接地距離 (%TDD) とは有意な負の相関がみられた。図 4-2 は、180, 210, 240 [m/min]における%接地直前局面時間と遊脚期の股関節の最大伸展角速度、遊脚期の股関節の伸展動作範囲および%接地距離との関係を示したものである。接地直前局面では大腿の振り戻しが行われることから、経済的なランナーは、%接地直前局面時間を長くすることで股関節を速く大きく伸展し、接地時のブレーキを減少させていると考えられる。

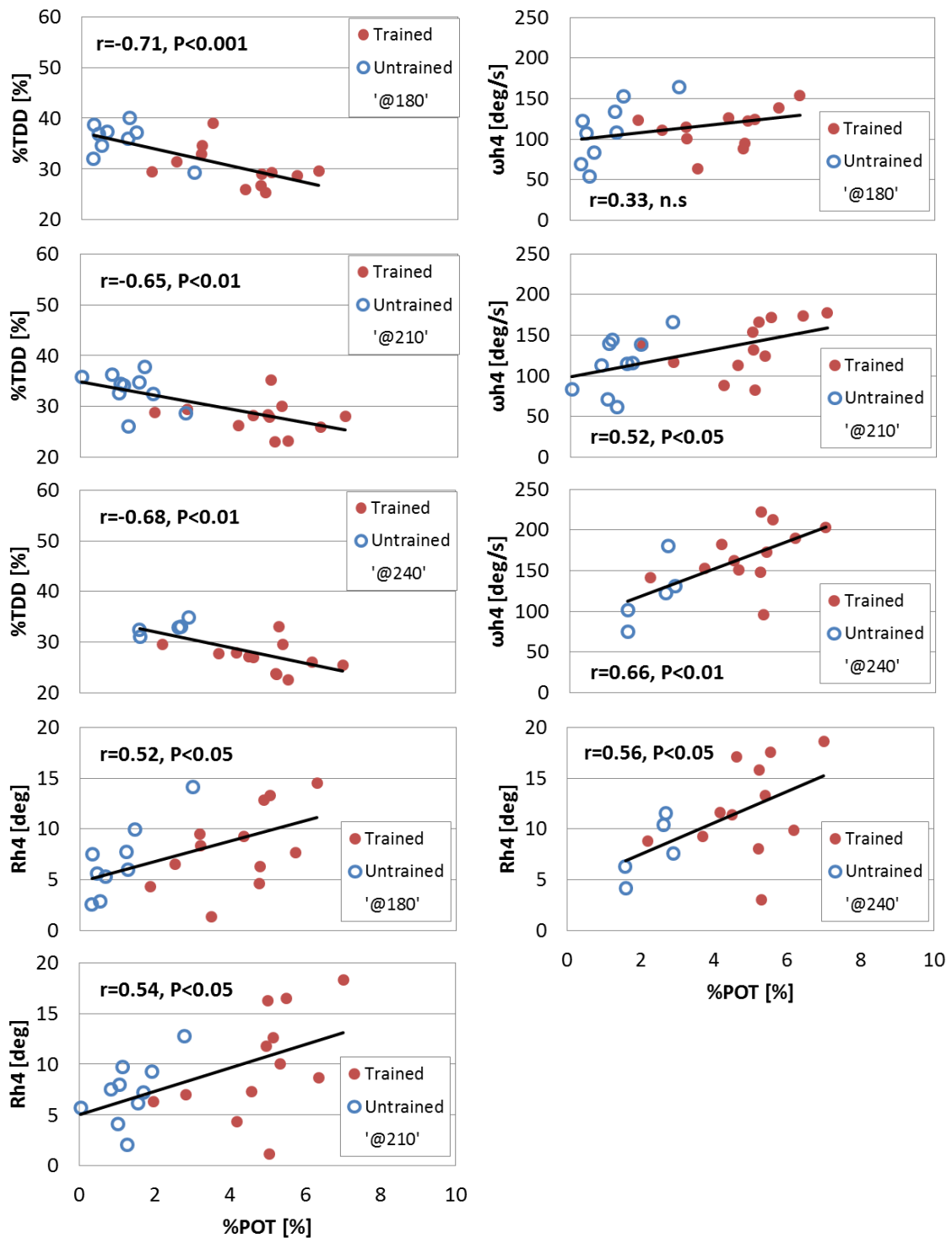


Fig. 4-2 Relationships between %POT and ω_{h4} , R_{h4} , %TDD at 180, 210, 240 [m/min]

重心の最高点から接地時までの下降量は 3 番目にランニングエコノミーへの影響が大きい

く、小さいほど経済的であった（表 3-3）。重心の最高点から接地時までの下降量を小さくするためには接地時の動作の影響が大きいため、経済的なランナーは膝関節をより伸展位（屈曲が小さい姿勢）、足関節をより底屈位（背屈が小さい姿勢）で接地することにより、遊脚期における重心の下降を防いでいると考えられる。また、膝関節をより伸展位、足関節をより底屈位で接地するためには、接地直前の膝関節伸展筋群（大腿直筋、外側広筋など）、足関節底屈筋群（腓腹筋、ヒラメ筋）の活動が重要であると考えられる。

遊脚期の股関節の屈曲動作範囲は、4 番目にランニングエコノミーへの影響が大きく、小さいほど経済的であった（表 3-3）。遊脚期の股関節の屈曲動作範囲は、股関節の遊脚期の最大伸展角度（ θ_{h2} ）と有意な正の相関がみられ、股関節の遊脚期の最大伸展角度は離地直後局面の大腿直筋の活動量（RF@AO）と有意な負の相関がみられた。図 4-3 は、180, 210, 240 [m/min]における股関節の遊脚期の最大伸展角度と遊脚期の股関節の屈曲動作範囲、股関節の遊脚期の最大伸展角度と大腿直筋の活動量との関係を示したものである。以上のことから、経済的なランナーは離地直後局面のフォロースルーを大腿直筋のエキセントリックな活動により小さくし、脚のリカバリーを早めていると考えられる。このことは、Heise ら（1996）および走の有効性を扱った榎本ら（1999）の報告を支持する。

遊脚期の膝関節の最大屈曲角速度は 5 番目にランニングエコノミーへの影響が大きく、大きいほど経済的であった（表 3-3）。遊脚期の膝関節の最大屈曲角速度と同様のタイミングで大腿のスイングが行われている（図 3-11）。したがって、経済的なランナーは、膝関節を速く屈曲して下腿を引きつけ、脚全体の慣性モーメントを減少させることによって大腿をスイングしやすくしていると考えられる。

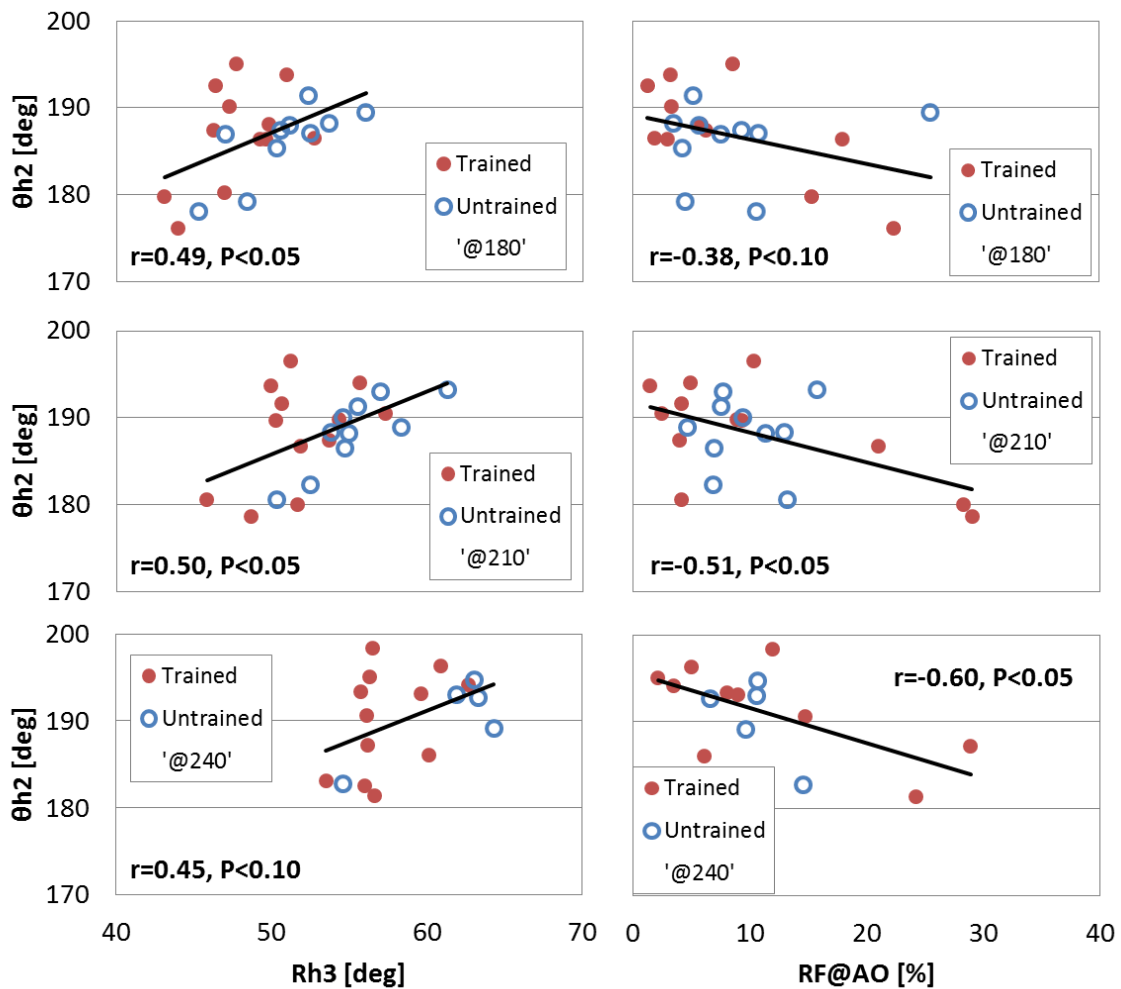


Fig. 4-3 Relationships between θ_{h2} and R_{h3} , RF@AO at 180, 210, 240 [m/min]

4.3.4. ランニングエコノミーに影響を及ぼす下肢筋活動

下肢筋活動のみを説明変数としたランニングエコノミーの重回帰分析の結果から、ランニングエコノミーに影響を及ぼす下肢筋活動として、制動局面の外側広筋と半腱様筋の%共収縮時間 (VL-ST@BR)、制動局面の大腿直筋と半腱様筋の%共収縮時間 (RF-ST@BR)、前方スイング後半局面の大腿二頭筋の活動量 (BF@F2)、制動局面の大腿直筋と大殿筋の%共収縮時間 (RF-GMX@BR)、ヒラメ筋の活動時間 (SO_Drt) の影響が大きいことが明らかになった (表 3-4)。これらの変数は下肢の動作および筋活動を示す変数を説明変数としたモデルにおいて影響が大きい変数と同様であり (表 3-2)、ヒラメ筋の活動時間のみが異

なっていた。

ヒラメ筋の活動時間は、5番目にランニングエコノミーへの影響が大きく、小さいほど経済的であった(表3-4)。ヒラメ筋は接地前後において大きな活動がみられ(図3-13)、体重のサポートに関わる筋であると考えられる。4.1.2で述べたように、弾性エネルギーを再利用するためには、エキセントリックな収縮からコンセントリックな収縮への素早い切り替えが重要である(Komiら, 1997)。よって、経済的なランナーは、接地前後でヒラメ筋を短く活動させることにより、余計なエネルギー消費を抑え、弾性エネルギーを再利用して高い経済性を獲得していると考えられる。

4.4. トレーニングへの提言

長距離ランナーの下肢の動作および筋活動の特徴についての結果から、着地動作において共収縮による膝関節および足関節の固定、ヒラメ筋の弾性エネルギーの再利用、外側広筋およびヒラメ筋の予備緊張が示唆された。また、ランニングエコノミーに影響を及ぼすバイオメカニクスの要因についての結果から、制動局面の共収縮による股関節および膝関節の固定、ヒラメ筋の弾性エネルギーの再利用が示唆された。このことから、伸張短縮サイクル(Stretch Shortening Cycle : SSC)が長距離走パフォーマンスおよびランニングエコノミーを高める上で重要であると考えられる。SSCとは、前述したように短い時間に伸張性筋収縮を力強く行う身体運動であり、SSCを行うことで長距離走パフォーマンスやランニングエコノミーが向上したという報告がある(Pavvolainenら, 1999; Spurrsら, 2003)。SSCを高めるためには、予備緊張による力の立ち上がりの早まり、関節の剛性の増加、エキセントリックな筋収縮からコンセントリックな筋収縮への素早い移行による弾性エネルギーの再利用が重要であることが報告されている(Komiら, 1997; Spurrsら, 2003)。したがって、本研究の結果から示唆された共収縮による下肢3関節の固定、ヒラメ筋の弾性エネルギーの再利用、外側広筋およびヒラメ筋の予備緊張がSSCを高めるという点にお

いても重要であり，これらを改善することにより長距離走パフォーマンスおよびランニングエコノミーを高められると考えられる．これらを改善するためには，力強く地面を蹴る動作を強調したバウンディング，一定の高さから鉛直に落下し同程度の高さに復帰するボックスジャンプなどのようなプライオメトリクストレーニングが有効であると考えられる（Spurrs ら，2003）．図 4-4 は，バウンディングおよびボックスジャンプの例を示したものである．また，学習された運動において，筋活動は事前にプログラム化されたものであるため，着地前後においては意識的に力発揮をする必要はなく（Kyröläinen ら，2005），長距離ランナーの主練習である走行とは別にこのようなトレーニングを行い，無駄のない着地動作を反復して覚えることが有効であろう．

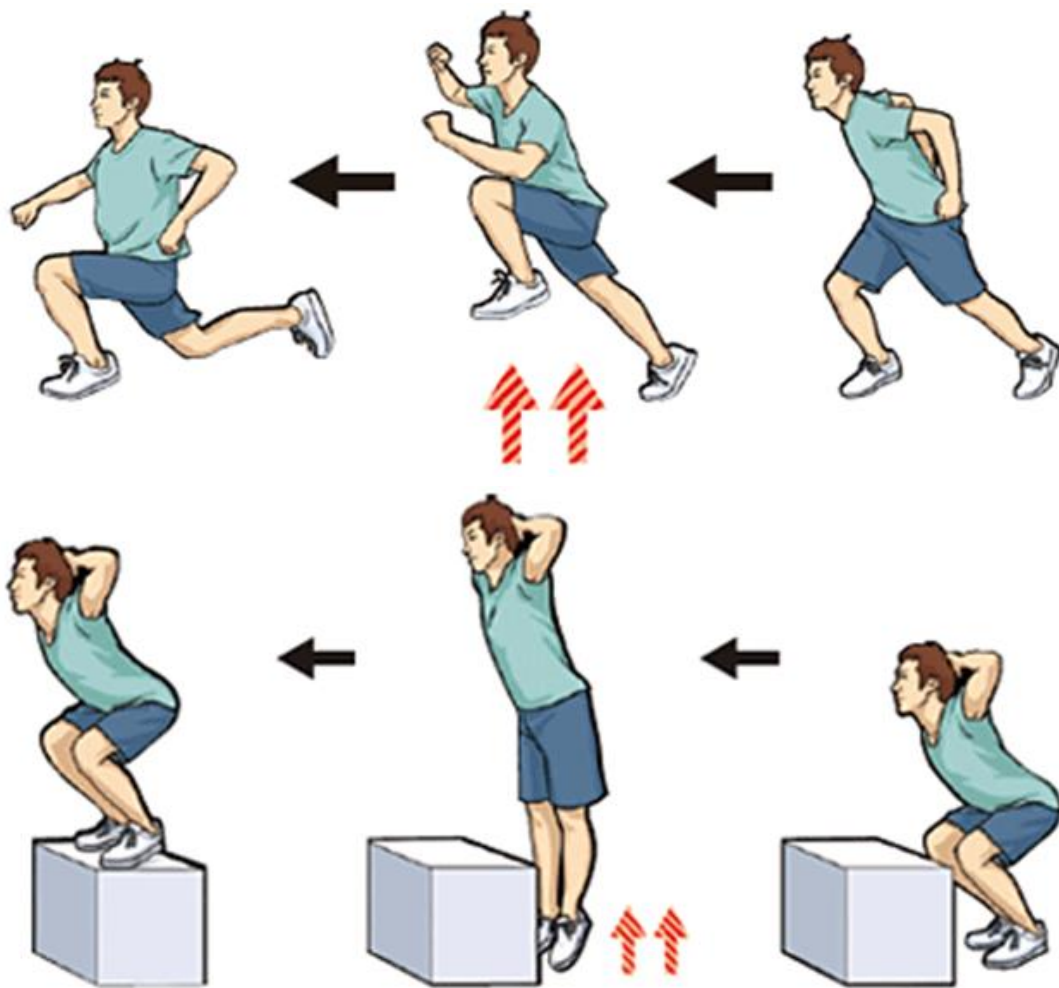


Fig. 4-4 Bounding (upper) and box jump (bottom, Reference: Meiji Corp.)

5. 結言

5.1. まとめ

本研究では、複数の走速度における一定負荷走行実験を行い、長距離ランナーの下肢の動作および筋活動の特徴を連続する複数サイクルに渡り解析した。また、長時間走行中の下肢の動作および筋活動とランニングエコノミーとの関係を包括的に解析した。これらの結果、以下の点が明らかになった。

トレーニングを積んだ長距離ランナーの特徴として、以下の点が挙げられる。

① 着地動作

制動局面の膝関節筋群の%共収縮時間がより短い。また、制動局面の足関節底屈筋群の活動がより大きく、制動局面の足関節筋群の%共収縮時間がより長い。また、ヒラメ筋の活動がより短く大きく、弾性エネルギーの再利用を行っている可能性がある。さらに、外側広筋およびヒラメ筋の活動開始が早く、予備緊張をより早くから行うことで大きな筋張力を発揮して体重の受け止めを行っていると考えられる。

② キック動作

推進局面の大腿二頭筋の活動が大きい。また、推進局面の膝関節筋群の%共収縮時間が走速度の増加に伴いより長くなる。これらから、大腿二頭筋の活動により地面をキックし、低い走速度では短い共収縮、高い走速度では長い共収縮により膝関節を固定して合理的なキック動作を行っていると考えられる。

③ 下腿の振出動作

前方スイング後半局面の膝関節筋群の%共収縮時間が短い。これは、ハムストリングスが下腿の振出を制御することを拮抗筋である膝関節伸展筋群が妨げることなく、余計なエネルギー消費を抑えていると考えられる。

ランニングエコノミーを説明する下肢動作の要因として、以下の点が挙げられる。

- ① %接地直前局面時間が長い。また、これが長いほど股関節伸展が速く大きく、接地距離が小さい。これらは接地時のブレーキの減少に寄与すると考えられる。
- ② ステップ長が大きい。しかしながら、これがランニングエコノミーの改善に貢献する理由については分からない。
- ③ 重心の最高点から接地時までの下降量が小さい。これを小さくするためには膝関節をより伸展位（屈曲が小さい姿勢）、足関節をより底屈位（背屈が小さい姿勢）で接地することが有効であると考えられる。
- ④ 遊脚期の股関節の屈曲動作範囲が小さい。また、これが小さいほど股関節の遊脚期の最大伸展角度が小さく、離地直後局面の大腿直筋の活動量が大きい。これらが離地後の脚のリカバリーを早めていると考えられる。
- ⑤ 遊脚期の膝関節の最大屈曲角速度が大きい。これにより、膝関節を速く屈曲して脚全体の慣性モーメントを減少させることで、大腿をスイングしやすくしていると考えられる。

ランニングエコノミーを説明する下肢筋活動の要因として、以下の点が挙げられる。

- ① 制動局面において一関節のみに作用する筋の%共収縮時間は短く、二関節に作用する筋の%共収縮時間は長い。これにより、効果的かつ経済的に関節を固定していると考えられる。
- ② 前方スイング後半局面の大腿二頭筋の活動が大きい。長距離ランナーの特徴として膝関節筋群の%共収縮時間が短いことを考慮すると、共収縮によって関節を固定しながら下腿の振出を制御するのではなく、拮抗筋の作用のみによってこれを行うことで余計なエネルギー消費を抑えていると考えられる。
- ③ ヒラメ筋の活動時間が短い。このことから、弾性エネルギーを再利用している可能性がある。

これらの特徴および要因から、接地前後の着地動作がパフォーマンスの改善のために重要であることが示唆された。また、ランニングエコノミーへの影響は、下肢動作よりも筋活動の方が大きいことが明らかになった。さらに、支持期では体重を支えるために関節を安定させる共収縮が必要だが、遊脚期では共収縮は有効でない可能性が示唆された。

プライオメトリクストレーニングを行うことで、SSC を高めて長距離走パフォーマンスおよびランニングエコノミーを向上させる可能性が示唆された。

5.2. 今後の課題

制動局面の%共収縮時間が筋のペアによって RE との関わりが異なることの理由、ステップ長が大きいほど経済的であったことの理由を明らかにすることは今後の研究課題といえる。%共収縮時間の関わりの違いが、トルクの次元においても同様であるのか異なるのかシミュレーション等によって調査することでより良い知見を提供できるであろう。また、ステップ長の増加に対する下肢筋活動の関わりを調査することで、ステップ長が大きいほど経済的であった理由を説明できる可能性がある。

さらに、Trained の被験者数を増やし、Trained を 2 群に分け Untrained も含めた計 3 群での下肢の動作および下肢筋活動の比較、ランニングエコノミーとの関係を調査することで Trained がパフォーマンスを改善するためのより確かな知見を提供できるであろう。算出する変数については、下肢動作の変化の原因を示す変数であるキネティクス、二関節筋によるエネルギー伝達量、弾性エネルギーの再利用、筋の収縮様式の定量を行い、ランニングエコノミーに影響する要因をより包括的に詳細に検討する必要がある。

長距離走においては走速度を維持することもレースの記録や勝敗にかかわる重要な要因であるため (榎本, 2003), 疲労による下肢の動作および筋活動の変化を研究する必要もあるだろう。

謝辞

本論文の作成にあたり，適切な助言と時に励ましと共に親身に御指導下さった指導教員である岡田英孝先生に，心より深謝致します。

また，吉川和利先生には統計処理を中心に適切な助言と温かい励ましを頂きました。ここに深い謝意を表します。

電気通信大学陸上競技部，東京外国語大学陸上競技部，電気通信大学安藤研究室，電気通信大学大河原研究室の方々には，研究への協力を快く引き受けて頂きました。厚く御礼申し上げます。

電気通信大学ヒューマンバイオメカニクス研究室（岡田研究室）には，快く実験にご協力頂き，データ処理や解析，本論文の作成等に際して多くの貴重な助言と励ましを頂きました。深い感謝の意を表します。

最後に，私の両親には，多大な経済的援助，温かい見守りと励ましを頂きました。心から感謝します。

参考文献

- 阿江通良, 渋川侃二, 金原勇. (1978). 大きな力やパワーの要求される身体運動の生力学的基礎要因に関する研究 - 予備緊張が瞬発的に発揮し得る等尺性筋収縮による力におよぼす影響 - 体育学研究, 23 (4), 321-331.
- 阿江通良, 宮下憲, 横井孝志, 大木昭一郎, 渋川侃二. (1986). 機械的パワーからみた疾走における下肢筋群の機能および貢献度. 筑波大学体育科学系紀要, 9, 229-239.
- Arellano, C. J., & Kram, R. (2014). Partitioning the metabolic cost of human running: A task-by-task approach. *Integrative and Comparative Biology*, 54(6), 1084-1098.
- Bobbert, M. F., & van Ingen Schenau, G. J. (1988). Coordination in vertical jumping. *Journal of Biomechanics*, 21(3), 249-262.
- Cavanagh, P. R. (1990). The mechanics of distance running: A historical perspective. *Human Kinetics Publishers*, Chapter 1: 1-34.
- Conley, D. L., & Krahenbuhl, G. S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 12(5), 357-360.
- 榎本靖士, 阿江通良, 岡田英孝, 藤井範久. (1999). 力学的エネルギー利用の有効性からみた長距離走の疾走技術. *日本バイオメカニクス学会機関誌*, 3 (1), 12-19.
- 榎本靖士. (2003). 長距離走動作のバイオメカニクスの評価法に関する研究. 筑波大学博士論文
- 榎本靖士, 岡崎和伸, 岡田英孝, 渋谷俊浩, 杉田正明, 高橋英幸, 高松潤二, 前川剛輝, 森丘保典, 横澤俊治. (2010). ケニア人長距離選手の生理学的・バイオメカニクスの特徴の究明～日本人長距離選手の強化方策を探る～.
- 榎本靖士. (2013). 長距離選手のランニングエコノミーに影響を及ぼす体力および技術的

要因の検討. 筑波大学体育学紀要, 36, 137-140.

Fletcher, J. R., Esau, S. P., & MacIntosh, B. R. (2009). Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *Journal of Applied Physiology*, 107(6), 1918-1922.

Frost, G., Dowling, J., Dyson, K., & Bar-Or, O. (1997). Cocontraction in three age groups of children during treadmill locomotion. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 7(3), 179-186.

Frost, G., Bar-Or, O., Dowling, J., & Dyson, K. (2002). Explaining differences in the metabolic cost and efficiency of treadmill locomotion in children. *Journal of Sports Sciences*, 20(6), 451-461.

Halvorsen, K., Eriksson, M., & Gullstrand L. (2011). Acute effects of reducing vertical displacement and step frequency on running economy. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(8), 2065-2070.

Heise, G. D., Morgan, D. W., Hough, H., & Craib, M. (1996). Relationships between running economy and temporal EMG characteristics of bi-articular leg muscles. *International Journal of Sports Medicine*, 17(2), 128-133.

Heise, G. D., & Martin, P. E. (1998). "Leg spring" characteristics and the aerobic demand of running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(5), 750-754.

Heise, G. D., Shinohara, M., & Binks, L. (2008). Biarticular leg muscles and links to running economy. *International Journal of Sports Medicine*, 29(8), 688-691.

Hill, D. W., & Vingren, J. L. (2011). Maximal accumulated oxygen deficit in running and cycling. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 36(6), 831-838.

伊藤章, 市川博啓, 斉藤昌久, 佐川和則, 伊藤道朗, 小林寛道. (1998). 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係. *体育学研究*, 43, 260-273.

Komi, P. V., & Gollhofer, A. (1997). Stretch reflexes can have an important role in force

- enhancement during SSC exercise. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(4), 451-459.
- 栗田崇平. (2014). 長距離走における走速度の変化が下肢の動作および筋活動に及ぼす影響. 電気通信大学卒業論文.
- Kurita, S., & Okada, H. (2014). Changes in lower limb movements and muscle activity of distance runners with increase in running speed. 5th Congress of the Asian Society of Sports Biomechanics.
- 栗田崇平, 岡田英孝. (2015). 走速度の増加に伴う下肢筋活動の変化とランニングエコノミーとの関係. 第36回バイオメカニズム学術講演会.
- Kyröläinen, H., Komi, P. V., & Belli, A. (1999). Changes in muscle activity patterns and kinetics with increasing running speed. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 13(4), 400-406.
- Kyröläinen, H., Belli, A., & Komi, P. V. (2001). Biomechanical factors affecting running economy. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(8), 1330-1337.
- Kyröläinen, H., Avela, J., & Komi, P. V. (2005). Changes in muscle activity with increasing running speed. *Journal of Sports Science*, 23(10), 1101-1109.
- Lieberman, D. E., Raichlen, D. A., Pontzer, H., Bramble, D. M., & Cutright-Smith, E. (2006). The human gluteus maximus and its role in running. *The Journal of Experimental Biology*, 209(11), 2143-2155.
- Medbø, J. I., Mohn, A., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O., & Sejersted, O. M. (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *Journal of Applied Physiology*, 64(1), 50-60.
- Moore, I. S., Jones, A. M., & Dixon, S. J. (2013). Relationship between metabolic cost and muscular coactivation across running speeds. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 17(6), 671-676.

- Nilsson, J., Thorstensson, A., & Halbertsma, J. (1985). Changes in leg movements and muscle activity with speed of locomotion and mode of progression in humans. *Acta Physiologica Scandinavica*, 123(4), 457-475.
- 岡田英孝. (2000). 男性高齢者の移動運動に関するバイオメカニクスの研究. 筑波大学博士論文.
- 岡本佐智子, 山原春子, 江守陽子. (2010). マラソン大会開催地域の自主サークル参加者によるマラソン継続の要因. *日本健康教育学会誌*, 18 (4), 278-288.
- 小野寺孝一, 宮下充正. (1976). 全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性. *体育学研究*, 21 (4), 191-203.
- 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.
- Rosa, M. C., Marques, A., Demain, S., Metcalf, C. D., & Rodrigues, J. (2014). Methodologies to assess muscle co-contraction during gait in people with neurological impairment – a systematic literature review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 24(2), 179-191.
- 坂牧美歌子, 鳥井嘉彦, 井川正治. (1996). 携帯型カロリーメーターの開発時における信頼性の検討. 第20回人間-生活環境系シンポジウム.
- 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.
- 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.

- 澤木啓祐. (2013). 日本長距離界のこれまで・これから. 日本陸上競技学会誌, 11 (1), 90-93.
- 関慶太郎. (2015). 長距離走における技術の評価方法. 第1回ランニングバイオメカニクス研究会.
- 渋谷俊浩. (2009). 日本男子マラソンの現状と課題～中・長期的視点から競技力向上を考える～. 日本陸上競技学会誌, 7 (1), 56-60.
- 下野俊哉. (2004). 表面筋電図マニュアル基礎編.
- Spurrs, R. W., Murphy, A. J., & Watsford, M. L. (2003). The effect of plyometric training on distance running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 89(1), 1-7.
- Steele, J. R., & Brown, J. M. M. (1999). Effects of chronic anterior cruciate ligament deficiency on muscle activation patterns during an abrupt deceleration task. *Clinical Biomechanics*, 14(4), 247-257.
- 丹治史弥. (2014). 様々な運動強度における Running Economy の高いランニングフォームを探る. 上月財団スポーツ研究助成事業.
- 丹治史弥, 関慶太郎, 榎本靖士, 鍋倉賢治. (2015). 高強度走行中の3次元的動作と走の経済性. 第1回ランニングバイオメカニクス研究会.
- Wells, R. P., & Winter, D. A. (1980). Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological and sporting gaits. *Human Locomotion*, 92-93.
- Weston, A. R., Mbambo, Z., & Myburgh, K. H. (2000). Running economy of African and Caucasian distance runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(6), 1130-1134.
- Williams, K. R., & Cavanagh, P. R. (1987). Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *Journal of Applied Physiology*, 63(3),

1236-1245.

屋比久将吾. (2015). 広範囲の走速度に適用可能な接地および離地の検出方法の検討. 電気通信大学卒業論文.

関子浩二. (2003). 記録の低迷している長距離選手に対するプライオメトリックスの導入事例. 第 65 回日本体育学会大会予稿集, 24.

1859 Oregon Magazine. (2013). Nike's Oregon Project.

<https://www.1859oregonmagazine.com/2013-march-april-1859-magazine-portland-oregon-alberto-salazar-nike-oregon-project#12>

学会発表

Kurita, S., & Okada, H. (2014). Changes in lower limb movements and muscle activity of distance runners with increase in running speed. 5th Congress of the Asian Society of Sports Biomechanics.

※Excellent Oral Paper Award 受賞

栗田崇平, 新井駿, 屋比久将悟, 岡田英孝. (2014). トレッドミル上のランニングにおける接地および離地の検出方法の検討. 第35回バイオメカニズム学術講演会.

栗田崇平, 岡田英孝. (2015). 走速度の増加に伴う下肢筋活動の変化とランニングエコノミーとの関係. 第36回バイオメカニズム学術講演会.