

修 士 論 文

着地方法に関わる介入がランニング時の
生理的応答に及ぼす影響

名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科

2018年1月25日

学籍番号 147701 飯田 博之

指導教員 高石 鉄雄

目 次

I 要旨	1
II 序論	3
III 方法	5
1. 屋外（アスファルト舗装道路）走行とトレッドミル走行との比較.....	5
1-1 被験者	5
1-2 運動内容.....	5
1-3 筋放電等の測定	6
1-4 筋放電データ処理.....	6
1-5 歩数の解析（歩調の算出）	7
1-6 移行時間の解析（接地時間の算出）	7
1-7 筋放電の波形のずれの解析	7
1-8 統計処理.....	7
2. トレッドミル走行による機械効率および最大酸素摂取量と競技パフォーマンスとの関係確認 ...	8
2-1 被験者	8
2-2 運動内容.....	8
2-3 ランニングエコノミーテスト	8
2-4 最大酸素摂取量（VO ₂ max）テスト	8
2-5 心拍数の測定.....	9
2-6 足底荷重の測定	9
2-7 5000m 走タイム.....	9
2-8 着地方法に基づく走法の解析	9
2-9 統計処理.....	10
3. フォアフット走法指導前後の走法およびランニングエコノミー比較.....	11
3-1 被験者	11
3-2 運動内容と測定項目	11
3-3 フォアフット走法のランニングフォーム指導方法	12
3-4 酸素摂取量、呼吸換気率、心拍数の測定	12

3-5 筋放電等の測定	12
3-6 筋放電データ処理.....	13
3-7 歩数の解析（歩調の算出）	13
3-8 着地、離地タイミングの解析	13
3-9 着地方法に基づく走法の解析.....	13
3-10 移行時間の解析	13
3-11 主観的運動強度	14
3-12 統計処理.....	15
IV 結果.....	16
1.屋外（アスファルト舗装道路）走行とトレッドミル走行との比較	16
1-1 歩調の比較	16
1-2 踵荷重ピークから拇指球荷重ピークまでの移行時間の比較	16
1-3 筋活動の大きさとタイミングの比較	16
2.トレッドミル走行による機械効率および最大酸素摂取量と競技パフォーマンスとの関係確認 .	19
2-1 VO ₂ max、最大心拍数及び血中乳酸値	19
2-2 ランニングエコノミー（時速 16km）	19
3.フォアフット走法指導前後の走法およびランニングエコノミー比較.....	20
3-1 踵荷重、拇指球荷重、走法、主観的強度	20
3-2 接地時間、着地、離地タイミング	21
3-3 歩調、移行時間、移行時間率.....	21
3-4 時速 18km での 酸素摂取量、呼吸換気率、心拍数、血中乳酸値.....	23
3-5 筋放電.....	24
V 考察.....	26
1.屋外（アスファルト舗装道路）走行とトレッドミル走行との比較	26
2.トレッドミル走行による機械効率および最大酸素摂取量と競技パフォーマンスとの関係確認 .	27
3.フォアフット走法指導前後の走法およびランニングエコノミー比較.....	29
VI 結論	32
謝辞	32
引用文献.....	33

I 要旨

【目的】トライアスロン選手の中には、ランニングの競技成績（タイム順位）が自転車と比べて相対的に劣る選手が散見される。本研究の目的は、その原因と改善方法を探ることである。その手順として、屋外走行をトレッドミル上で再現できるかの検証、次にトレッドミル走行時の代謝応答等による原因の探索、最後に走行時の着地に関わる技術指導（フォアフット走法；つま先から着地する走法の指導）を行うことが、その後の走法および走行時の代謝応答等に及ぼす影響についての評価を行った。

【方法】①被験者 10 名に対し、傾斜角度 0%のアスファルト舗装された道を時速 15km、時速 17.5km、時速 20km の 3 通りで各 300m 走行させた。その後、室内に場所を移し、トレッドミルで同速度で 1 分間走行を行わせた。走行中の踵及び母指球にかかる荷重、前脛骨筋、外側腓腹筋、外側広筋、大腿二頭筋長頭の活動電位を計測した。

②被験者 11 名に対し、傾斜角度 1%のトレッドミルで最大酸素摂取量（VO₂max）テストとランニングエコノミーテストを実施した。前者は漸増法で行い、後者は時速 16km で測定した。

③被験者 10 名に対し、まず始めに被験者本来の走法（着地方法）により、時速 18km で傾斜角度 1%のトレッドミル上で 5 分間走らせ、最後の 2 分間の酸素摂取量等を測定した。休憩後、フォアフット走法の技術指導を行い、同様の方法で酸素摂取量等を測定した。続いて両方の走法について、外側広筋および大腿二頭筋の筋放電並びに歩調等の計測を行った。

【結果】①時速 17.5km で走った時の筋放電の大きさは、アスファルトの iEMG を 1 とした場合のトレッドミルの iEMG は、前脛骨筋では 1.06 ± 0.28 、腓腹筋では 1.03 ± 0.09 、外側広筋では 0.92 ± 0.09 、大腿二頭筋では 1.00 ± 0.16 で、いずれも有意差を認めなかった。筋放電の位相差は、前脛骨筋が $0.7 \pm 4.6\text{ms}$ 、腓腹筋が $-2 \pm 5.4\text{ms}$ 、大腿四頭筋が $-4.5 \pm 6.5\text{ms}$ 、大腿二頭筋が $0.6 \pm 5.8\text{ms}$ で、いずれも有意差を認めなかった。位相補償後の相関係数は前脛骨筋が 0.884 ± 0.082 、腓腹筋が 0.961 ± 0.019 、大腿四頭筋が 0.955 ± 0.032 、大腿二頭筋が 0.914 ± 0.047 でいずれも強い相関が認められた。

②VO₂max は $66.9 \pm 5.1\text{ml/kg/分}$ であった。時速 16km での走行時の酸素摂取量（O₂コスト）は、 $60.2 \pm 2.6\text{ml/kg/分}$ または $226 \pm 10\text{ ml/kg/km}$ であった。VO₂max と 5000m 走タイムは有意な相関が認められなかったが、VO₂max を O₂ コストで除した指数と

5000m 走タイムは有意な相関が認められた。

③被験者全体について、着地方法の介入前と介入後で、時速 18km での走行時の酸素摂取量 (O_2 コスト) は $64.7 \pm 4.6 \text{ ml/kg/分}$ および $63.9 \pm 2.8 \text{ ml/kg/分}$ 、呼吸換気率は 1.00 ± 0.08 および 1.03 ± 0.04 、心拍数は 179 ± 10 拍/分 および 183 ± 8 拍/分、血中乳酸値は $7.7 \pm 2.6 \text{ mmol/l}$ および $10.1 \pm 1.9 \text{ mmol/l}$ で、血中乳酸値については有意差が認められた。接地時間は $206.4 \pm 8.8 \text{ ms}$ および $193.2 \pm 8.6 \text{ ms}$ 、歩調は 192 ± 8 歩/分 および 183 ± 8 歩/分で、いずれも有意差が認められた。大腿二頭筋の筋放電量の介入前から介入後への変化量は、周期全体は 1.09 ± 0.17 倍、着地前後は 1.34 ± 0.32 倍で、後者には有意差が認められた。リアフット走法ランナー (4名) とミッドフット走法ランナー (6名) で介入前後の O_2 コストの変化量はそれぞれ $-4.3 \pm 2.7 \text{ ml/kg/分}$ および $+1.4 \pm 2.9 \text{ ml/kg/分}$ で、両者の間に有意差は認められなかった ($p=0.055$)。

【結論】トレッドミルでも屋外とほぼ同じランニングフォームで走ることができ、屋外での実走行がトレッドミル走によってほぼ再現できた。被験者間で時速 16km での O_2 コストに最大 13.3%の違いが認められた。 $VO_2\text{max}$ を時速 16km での O_2 コストで除した値と 5000m 走のタイムとの間には有意な相関が認められた。フォアフット走法の指導により、時速 18km での走行時の接地時間の短縮、歩調の減少、歩幅の伸長が表れた。リアフット走法ランナーに対するフォアフット走法指導は、同ランナーの走行時の O_2 コストの低下につながる可能性がある。

II 序論

トライアスロン競技において、オリンピックディスタンス（スイム 1.5km、バイク 40km、ラン 10km）やスプリントディスタンス（スイム 0.75km、バイク 20km、ラン 5km）では、第一競技種目である水泳と第二競技種目である自転車までは他の競技者と競り合っているにも関わらず、最後の競技種目であるランニングで他の競技者から大きく遅れる選手がいる。技術がパフォーマンスに大きく影響する水泳に対し、自転車やランニングでは、最大有酸素能力（ $VO_2\max$ ）が競技パフォーマンス（タイム）を決定する大きな要因となる。したがって、最後のランニングで大幅に順位を落とす選手では、自転車終了時点で大きく疲労している、あるいはランニング技術などに問題があり走運動時の機械効率が低いなどが原因として考えられる。中長距離走の場合、ランニング技術の中で最もパフォーマンスに影響を与えるとされるのが着地方法である。これには、踵から着地する「リアフット走法」、踵とつま先を同時に着地する「ミッドフット走法」、つま先から着地し、踵を着地しない「フォアフット走法」の3つがあり、中でもフォアフット走法については、近年、大いに注目されている。

Gruber ら[2013、1]は、フォアフット走法ランナーとリアフット走法ランナーに時速 10.8km、12.6km、14.0km でトレッドミル（屋内走・歩行運動負荷装置）上を走行させ、いずれの速度においても走法による酸素摂取量の違いが認められなかったことを報告している。いっぽう、Ardigo ら[1995、2]は、時速 9~15km の範囲でフォアフット走法とリアフット走法の酸素摂取量に違いが無かったとしながらも、より短距離走のフォームに近いフォアフット走法では、走行速度が上がるにしたがって筋や腱の弾性による効率的なエネルギー発生[3]につながることを示し、長距離を走る場合であっても走行速度が速い場合では、フォアフット走法に移行するのが合理的であるとしている。

リアフット走法は、歩行をそのまま速くしたような運動形態をとるため、ミッドフット走法やフォアフット走法に比べ着地時の衝撃が大きいことが報告されている[4]。このことは、踵を地面に着いたことがブレーキとなり前方への運動エネルギーを低下させることを意味するため、先に述べた自転車順位に比べてランニング順位が劣るトライアスリートでは、フォアフット走法を習得することで走行時の機械効率が改善し、競技成績の向上につながる可能性がある。

本研究の目的は、競技レベルの比較的高い持久走ランナーに対して着地に関わる技術

指導（フォアフット走法の指導）を行うことが、その後の走法および走行時の代謝応答等に及ぼす影響について明らかにすることである。

ところで、ランニングに関わる機械効率を扱った研究は、生理学的小および力学的データに関わる測定方法上の制約からトレッドミルを使って行われることが多く、屋外での実走行がトレッドミル上で再現できるかについては、これまで様々な議論がなされている。Nelsonら[1972, 5]らは、16名の競技ランナーが時速23kmでトレッドミルと地面を走行した際の高速度撮影画像解析から、トレッドミルでは、靴底の着地時間が長い、重心の垂直方向への移動速度が小さい、垂直方向、水平方向への重心の変動域が小さいなど、両者の間に様々な違いが認められたことを報告している。ElliotとBlanksby[1976, 6]は、Nelsonらに比べて若干遅い速度域（時速11.9～17.3km）で同様の計測を行い、トレッドミルでは地面との非接地時間やストライド長の短縮、歩調の増大など、両者の間に違いが確認できたとしている。また、Frishberg[1983, 7]は、5人の大学生短距離選手の屋外およびトレッドミル走行を8.5m/s（時速30.6km）において比較し、トレッドミルでは支持脚の大腿骨は接地時により直立し、支持脚の脛骨は接地時に直立していないなど、姿勢が異なることを報告しており、更に、Niggら[1995, 8]は、トレッドミルに対する被験者の慣れが結果に違いがあるとしながらも、トレッドミル走行ではリアフット走行よりもミッドフット走行に近くなることを報告している。

いっぽう、van Ingen Schenau[2001, 9]らは、一定条件下では、風の抵抗を除けばトレッドミルと地面走行のメカニズムは同じであるとしている。またRileyら[2008, 10]は、20人の被験者についてキネマティクス（運動学）とキネティクス（運動力学）の両面から分析し、膝の動き、地面反力のピーク値、関節モーメント、関節軌道が有意に異なるものの、トレッドミルの床面が十分に堅く、ベルトの速度が適切に調整されていれば、地面走行の動きに一般化することが可能であると結論付けている。

以上、トレッドミルを使ったランニング技術等の測定が屋外での実走行をどこまで反映するかは意見の分かれるところである。しかし本研究においても、従来の研究同様、測定方法上の制約からトレッドミルを使用する必要がある。すなわち、本研究では、この測定に妥当性があるかを検討するため、屋外での実走行がトレッドミル走によって再現できるかを確認した後、第一目的である技術指導の効果の有無について検証する。

Ⅲ 方法

本研究では次の3つ、すなわち、1. 屋外（アスファルト舗装道路）走行とトレッドミル走行との比較実験、2. トレッドミル走行による機械効率および最大酸素摂取量と競技パフォーマンスとの関係確認実験、3. フォアフット走法指導前後の走法およびランニングエコノミー比較実験を順に実施した。

実験に先立ち、名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科倫理審査委員会の承認（2017-NCU-NS-49）を得た。

1. 屋外（アスファルト舗装道路）走行とトレッドミル走行との比較

1-1 被験者

トライアスロン競技を行う18歳から29歳までの健康な男子10名を被験者とした（表Ⅲ-1）。被験者には、事前に本研究の目的、実験方法、実験に伴う危険性などについて説明し、実験への参加協力について、書面による同意を得た。

表Ⅲ-1 被験者の身体的特徴

年齢	身長	体重	BMI	脛脛外周
22.4±3.4 歳	169.6±2.4 cm	61.4±5.2kg	21.3±1.6	36.3±1.5 cm

1-2 運動内容

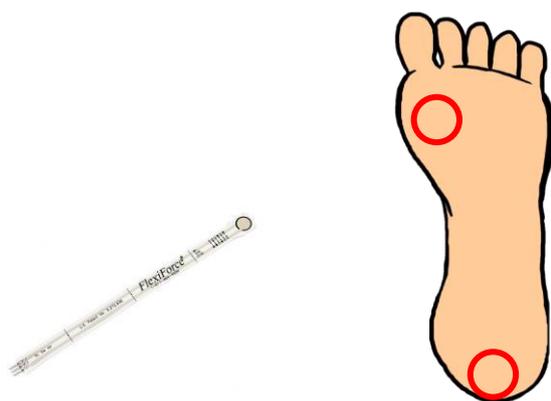
ランニングの特徴（1分間あたりの歩数：歩調、歩幅：ストライド、踵とつま先の着地タイミング、着地荷重、主要な筋の筋活動）を評価するため、1kmのウォーミングアップの後、傾斜角度0%のアスファルト舗装された道（図Ⅲ-1）を時速15km、17.5km、20kmの3通りで各300m走行させた。走行時のペースメーカーは、先導する自転車が行った。その後、室内に場所を移し、測定に使用するトレッドミル（Excite Run 700, TechnogymSpA, Gambettola, Italy）上での走行に習熟させた後、同速度で1分間走行を行わせた。



図Ⅲ-1 アスファルト舗装された走行ルート

1-3 筋放電等の測定

走行中の筋電図と圧力センサーからの電気信号を多用途記録計（DL-2000：S&ME 8-channel）を用いて走行ごとに連続同時記録した。走行中の筋電図は、右脚の前脛骨筋、外側腓腹筋、外側広筋、および大腿二頭筋長頭の筋腹表面に直径 10 mm の Ag/AgCl 電極（ビトロード M-150、日本光電）を装着し、表面筋電図法により測定した。電極中心間距離は 40mm とした。足底着地のタイミングおよび荷重測定には、圧力センサー（FlexiForce A201-25、Tekscan、USA）を使用した。その装着部位は、踵と拇指球直下（図Ⅲ-2）とした。電気信号のサンプリング周波数は、全て 1KHz とした。



図Ⅲ-2 圧力センサーと貼付部位

1-4 筋放電データ処理

得られた筋放電データに対し、デジタルバンドパスフィルターによって 20Hz 以下、400Hz 以上を除去したのち全波整流（絶対値化）を行った。右足踵圧力のピークが得られた座標（時点）を加算平均のためのトリガーポイントとして、右足踵圧力のピークから次のピークまでを 1 周期として 20 周期分を加算平均し、さらに前後 5 ポイント（合

計 11 ポイント) で移動平均したものを各筋の筋活動とした。連続記録されたデータからの 20 周期の切り出しは、アスファルト走行については 300m 走の 200m 地点近辺、トレッドミル走行については 1 分間走の 30 秒経過前後の歩調の安定した部分とした。

1-5 歩数の解析 (歩調の算出)

踵荷重をトリガーとして、1 分間あたりの歩数を、右足踵が着地してから次に着地するまでの間の秒数の逆数の 1/2 に 60 秒を乗じて算出した。

1-6 移行時間の解析 (接地時間の算出)

接地時間に代わる指標として、着地後に踵の荷重がピークに達した時点から、拇指球の荷重がピークに達するまでの時間を算出した。具体的な事例は図 III-3 のとおりである。

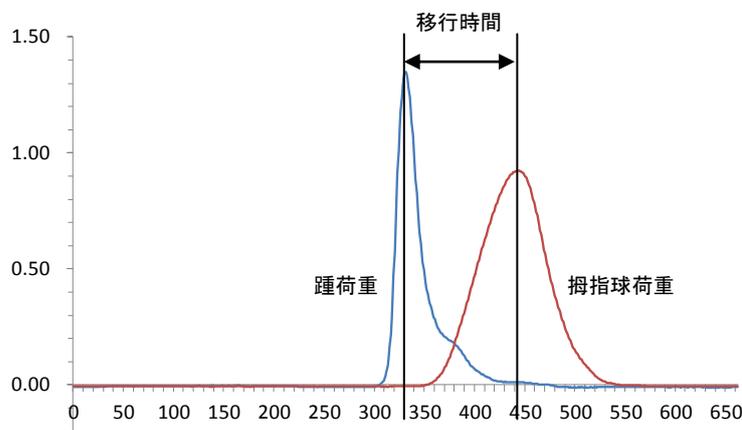


図 III-3 踵及び拇指球にかかる荷重の時間推移と移行時間

横軸は秒数(1/1000 秒)、縦軸は電位 (mV) を表す。電位は荷重の大きさに比例して増加する。

1-7 筋放電の波形のずれの解析

アスファルトとトレッドミルの踵の荷重がピークに達した時点をもとに、波形の位相をずらした場合に最大となる相互相関関数を求め、その時の位相差を筋放電のタイミングのずれとして捉えるとともに、位相補償した相関係数を算出した。

1-8 統計処理

データは図も含め全て平均値±標準偏差 (SD) で表した。エクセル 2007 を使用し、分散が等しくないと仮定した 2 標本による t 検定を行った。

2.トレッドミル走行による機械効率および最大酸素摂取量と競技パフォーマンスとの関係確認

2-1 被験者

大学でトライアスロン部に所属する中～上位レベルの選手、プロ又は一般選手のトップレベルでトライアスロン競技を行う 18 歳から 29 歳までの健康な男子 11 名を被験者とした (表Ⅲ-2)。被験者には、事前に本研究の目的、実験方法、実験に伴う危険性などについて説明し、実験への参加協力について、書面による同意を得た。

表Ⅲ-2 被験者の身体的特徴および 5000 走タイム

年齢	身長	体重	BMI	脛脛外周	5000m 走タイム
22.3±3.4 歳	170.1±2.9 cm	61.5±5.2kg	BMI21.5±1.7	36.2±1.5 cm	17:13±1:05

2-2 運動内容

実験にあたっては、屋外における十分なウォームアップの後、気温 22～25℃の室内においてトレッドミル Technogym treadmill (Excite Run 700, TechnogymSpA, Gambettola, Italy)を用い、傾斜角度を 1%[11]とし、時速 10km、12km、14km、15km、16km、17km、18km、19km、20km と 2 分間ずつ段階的にスピードを上げて走行し、走行不能になった時点で終了した。ただし、時速 16km については、以下に示すランニングエコノミーのテストステージとするため、運動時間を 4 分間とした。

2-3 ランニングエコノミーテスト

時速 16km で 4 分間走行した際の後半 2 分間の酸素摂取量 (ml/kg/分) の平均値を同速度における O₂コストとした。呼気ガスは 30 秒ごとに連続呼気ガスモニター (AR-10、アルコシステム, 日本)を用いて測定した。

2-4 最大酸素摂取量 (VO₂max) テスト

ランニングエコノミーテストと同時に、漸増法 (incremental treadmill test) による VO₂max テストを行った。時速 16km でのランニングエコノミーテスト後も段階的にスピードを上げ続け、走行不能になるまで順次走り続けた時の 30 秒間の酸素摂取量を 1 分間に換算した数値のうち、その最大値を VO₂max とした。停止 1 分後に乳酸測定器 (簡易血中乳酸測定器 ラクテートプロ LT-1710) を用いて血中乳酸測定を行った。

2-5 心拍数の測定

心拍数をガーミン HR モニター（Premium Heart Rate Monitor、Garmin、Swiss）を用いて計測した。心拍数の記録は 1 秒ごとに行った。

2-6 足底荷重の測定

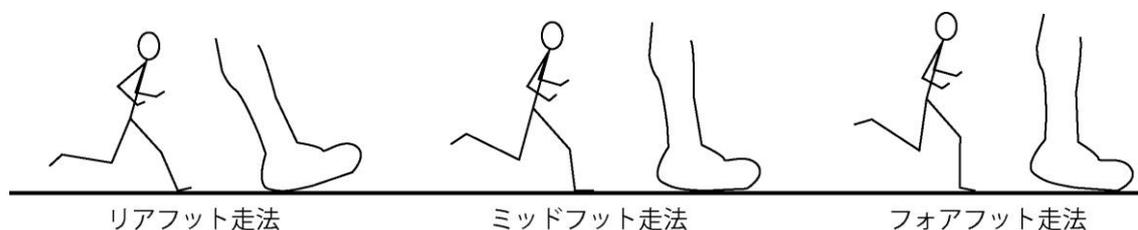
1-3 と同様の方法にて足底荷重の測定を行った。

2-7 5000m 走タイム

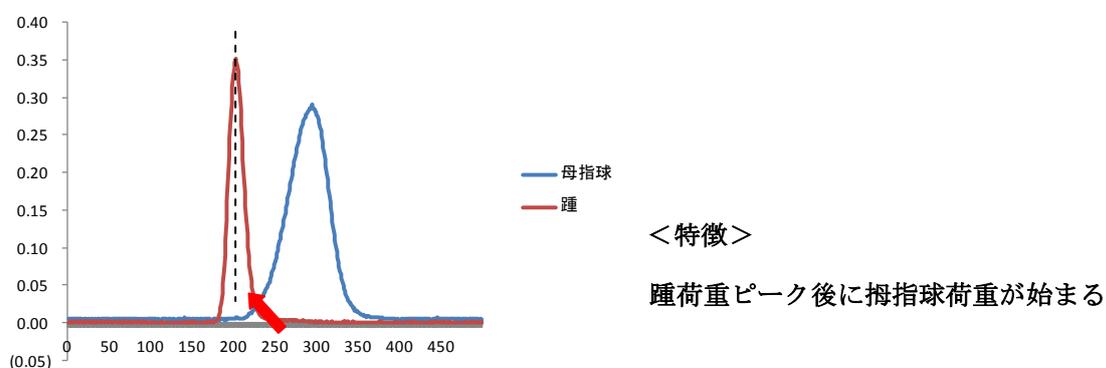
最大酸素摂取量の測定直近 6 か月以内の JTU 認定記録会の記録、もしくは日常練習で実施した 5000m タイムトライアルのベストタイムを 5000m 走のタイムとした。いずれも 400m のタータントラックで測定したものであった。

2-8 着地方法に基づく走法の解析

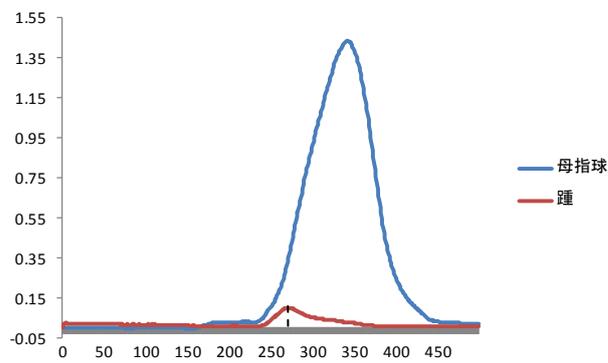
踵荷重と母指球荷重の大きさやタイミングからリアフット走法、ミッドフット走法、フォアフット走法を判別した（図Ⅲ-4）。踵荷重のピーク後に母指球荷重が始まるものをリアフット走法（図Ⅲ-5）、踵荷重が無いか極めて小さいものをフォアフット走法（図Ⅲ-6）、踵荷重のピーク前か同時に母指球荷重が始まるものをミッドフット走法（図Ⅲ-7）と判別した。



図Ⅲ-4 走法



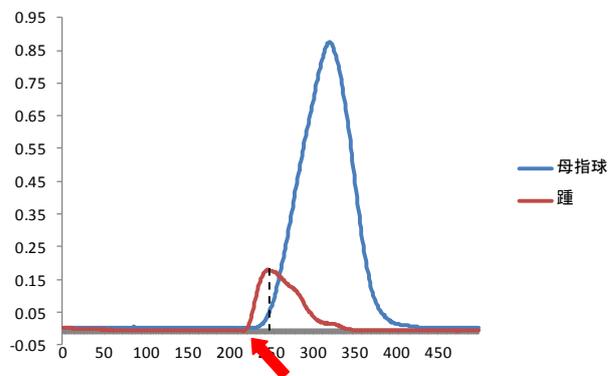
図Ⅲ-5 リアフット走法の荷重



<特徴>

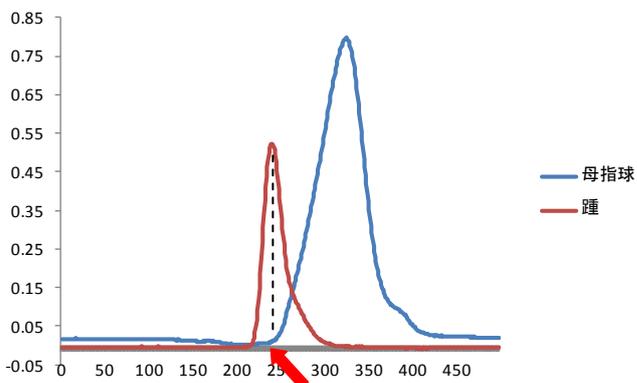
踵荷重が無いか極めて小さい

図Ⅲ-6 フォアフット走法の荷重



<特徴>

踵荷重ピーク前か同時に母指球荷重が始まる。



図Ⅲ-7 ミッドフット走法の荷重(上、下)

2-9 統計処理

データは全て平均値±標準偏差 (SD) で表した。エクセル 2007 を使用し、分散が等しくないと仮定した 2 標本による t 検定を行った。データ間の相関は散布図を描き、さらに最小二乗法により直線回帰を行い、傾きと切片について t 検定を行った。

3.フォアフット走法指導前後の走法およびランニングエコノミー比較

3-1 被験者

大学でトライアスロン部に所属する選手、プロ又は一般選手のトップレベルでトライアスロン競技を行う選手もしくは長距離走の選手で 18 歳から 29 歳までの健康な男子 10 名を被験者とした (表Ⅲ-3)。被験者には、事前に本研究の目的、実験方法、実験に伴う危険性などについて説明し、実験への参加協力について、書面による同意を得た。

表Ⅲ-3 被験者の身体的特徴

年齢	身長	体重	BMI
22.2±3.2 歳	170.6±3.1 cm	62.0±4.4kg	21.3±1.3

3-2 運動内容と測定項目

被験者本来のランニングフォームとフォアフット走法の違いによる生理応答の特徴を把握するため、気温 18~22℃の室内におけるトレッドミル上での走行により、以下の 2 種類の運動、すなわち運動 A (時速 18km における 5 分間走行)、運動 B (時速 18km における 1 分間走行) を行わせた。

A : 時速 18km における 5 分間走行

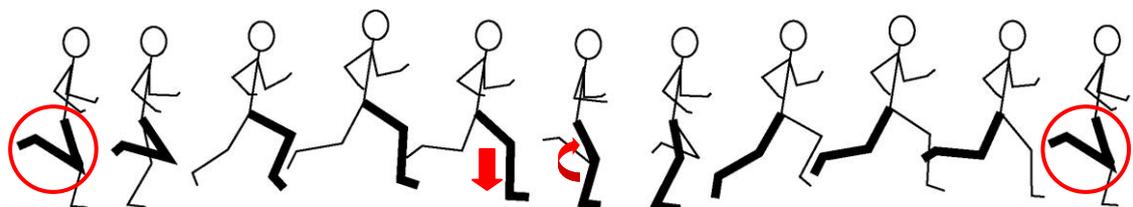
ランニングエコノミー等を算出するため、10 分間のウォーミングアップの後、傾斜角度 1%のトレッドミル(ウェルロード 200E (竹井機器工業株式会社))を時速 10km、14km、18km と 2 分間ずつ段階的にスピードを上げていき、時速 18km で 5 分間の走行を行わせた。この際の走法は、被験者本来のものとした。10 分間の休憩後、フォアフット走法の実技指導を約 30 分間行い、フォアフット走法による時速 18km で 5 分間の走行を同様に行わせた。

B : 時速 18km における 1 分間走行

上記の測定の後、被験者本来のランニングフォームとフォアフット走法のランニングフォームの使い分けが出来ているかを確認するため、傾斜角度 0%のトレッドミル上で時速 18km での走行を各走法について 1 分間行わせた。この間、1-3 と同じ多用途測定装置を使用し、筋放電の大きさやタイミング、接地荷重、歩調を測定した。

3-3 フォアフット走法のランニングフォーム指導方法

被験者に対してフォアフット走法の理論をバイオメカニクスの視点から解説し、トレッドミルで走り方を実演して見せるとともに、被験者をトレッドミルで走らせ、口頭により指導を行った。



図Ⅲ-8 ランニングフォーム指導のポイント

具体的な指導内容は以下の3点である。

- ① 腓腹筋に力を入れ、足関節屈曲を保持した状態で足底前部（拇指球）を地面にたたきつけるように着地する。この時、踵は地面に着けない。
- ② 着地直前からハムストリングス（大腿二頭筋、半膜様筋、半腱様筋）の緊張を意識させ、着地の瞬間、これら筋群の緊張による膝関節の屈曲および臀部筋群の緊張による股関節伸展を行う。
- ③ ①と同時に、着地足側の大腿骨を骨盤で上から押すようにして身体の重心を着地足に乗せる。

具体的なチェック項目は以下の2点である。

- Ⓐ 着地音が「タタン」と聞こえない。（踵と拇指球の着地音が連続しない）
- Ⓑ 離地時に膝が自然に屈曲し、足の裏が高い位置まで上がる。

なお、すでにミッドフット走法を行っている被験者に対しても、上記に示す通り、骨盤の落とし込みと足底前部（拇指球）による着地を意識させ、より大きな地面反力が得られるよう指導を行った。

3-4 酸素摂取量、呼吸換気率、心拍数の測定

上記の運動 A において、30 秒ごとの呼気ガス測定、心拍数測定等を行った。測定には 2-3 と同じ機器を使用した。

3-5 筋放電等の測定

上記の運動 B において、外側広筋、大腿二頭筋長頭の表面筋電図および足底荷重を測定した。各測定方法は 1-3 と同様であった。

3-6 筋放電データ処理

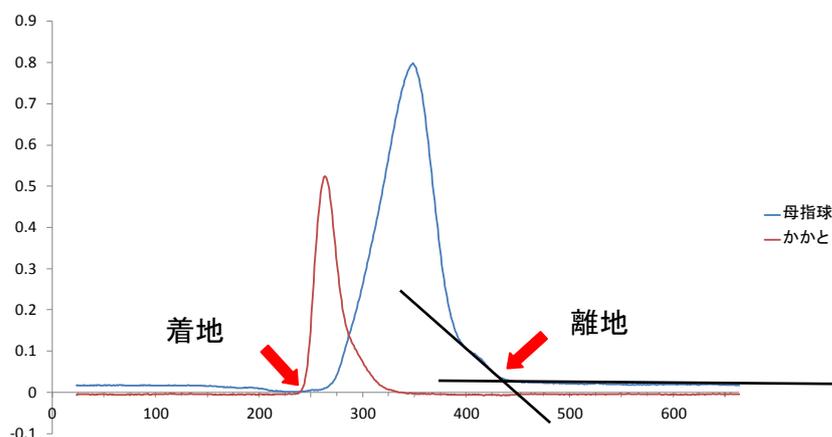
1-4 と同様の方法にて筋放電データ処理を行った。

3-7 歩数の解析（歩調の算出）

拇指球荷重をトリガーとして、1-5 と同様の方法にて歩調を算出した。

3-8 着地、離地タイミングの解析

踵荷重と拇指球荷重の波形から着地タイミングと離地タイミングを判別した（図Ⅲ-9）。着地タイミングはセンサー電圧が急激に上がり始める時点、離地タイミングはセンサー電圧がほぼフラットになる時点とした。特に、離地タイミングが不明確な場合は1周期ごとのデータを確認した。



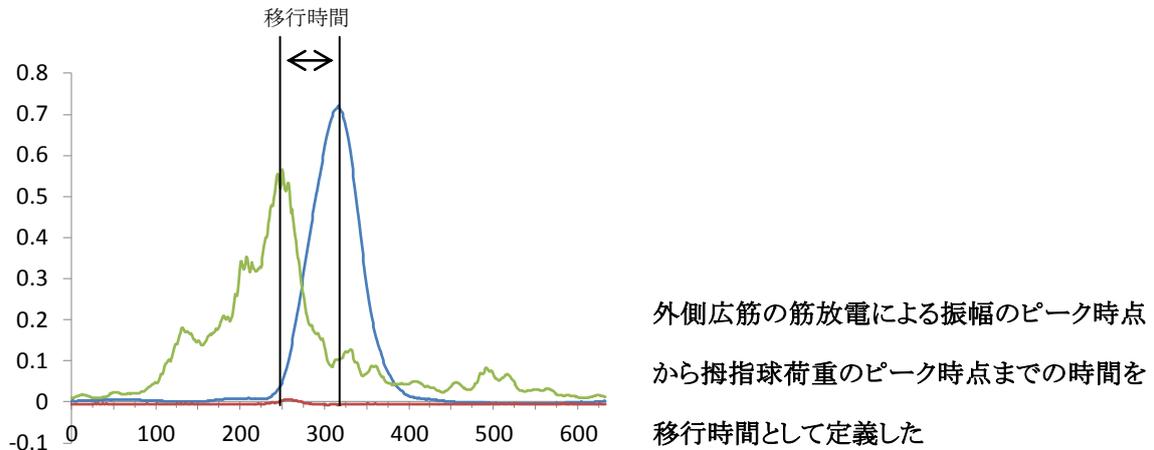
図Ⅲ-9 着地、離地タイミング

3-9 着地方法に基づく走法の解析

2-8 と同様の方法にて着地方法の判別を行った。

3-10 移行時間の解析

接地時間に代わる指標として、着地時に伸長反射として現れる大腿四頭筋の筋放電のピークから拇指球荷重ピークまでの時間を移行時間とした（図Ⅲ-10）。また、1周期に占める移行時間の割合を移行時間率として算出した。



図Ⅲ-10 移行時間の考え方

3-11 主観的運動強度

後日、被験者に主観的運動強度（Rating of Perceived Exertion : RPE）を質問した。RPE には小野寺ら[1976,12]が作成した Borg scale の日本語表示（表Ⅲ-4）を用いた。

表Ⅲ-4 主観的強度（RPE）スケール

	Borg's	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		

3-12 統計処理

データは全て平均値±標準偏差 (SD) で表した。分散が等しくないと仮定した 2 標本による t 検定を行った。あわせて 4 人規模の小標本データに関しては、マン・ホイットニーの U 検定を行った。データ間の相関は散布図を描き、さらに最小二乗法により直線回帰を行い、傾きと切片について t 検定を行った。統計処理には統計処理ソフト ((エクセル、マイクロソフト社、米国) 及び (エクセル統計 2012、社会情報サービス社、日本)) を用いた。

IV 結果

1.屋外（アスファルト舗装道路）走行とトレッドミル走行との比較

1-1 歩調の比較

1 分間の歩数は、アスファルトとトレッドミルともに時速 15km、17.5km、20km の速度上昇につれて増加した。各々の速度においてアスファルトよりもトレッドミルの方が 2 歩から 4 歩多かったが、有意差は認められなかった（図IV-1）。

1-2 踵荷重ピークから拇指球荷重ピークまでの移行時間の比較

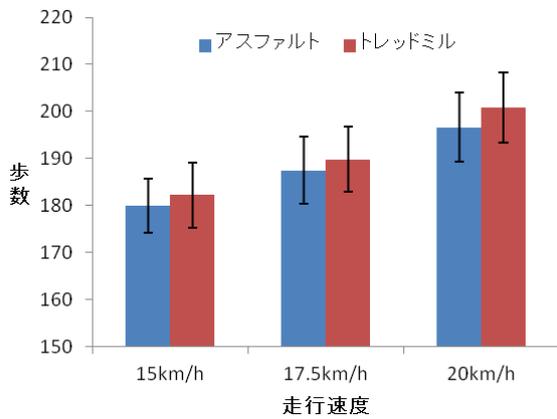
踵荷重ピークから拇指球荷重ピークまでの移行時間は、アスファルトとトレッドミルともに時速 15km、17.5km、20km の速度上昇につれて短くなった。各々の速度においてアスファルトよりもトレッドミルの方が 5ms から 8ms 短かったが、有意差は認められなかった（図IV-2）。

1-3 筋活動の大きさとタイミングの比較

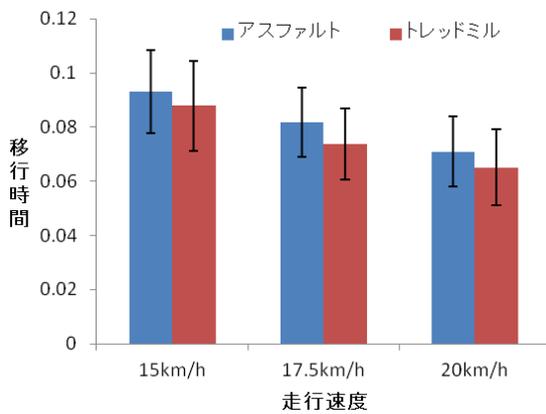
被験者の 5000m 走タイム（表III-2）に最も近い時速 17.5km で走った時の筋活動の大きさを、筋放電の積分値（iEMG）で比較した。アスファルトの iEMG を基準とした場合のトレッドミルの iEMG は、前脛骨筋と腓腹筋では増加し、外側広筋では減少したが、有意差は認められなかった（表IV-1）。

いっぽう、筋放電のタイミングについて、アスファルトを基準とした場合のトレッドミルの位相差は、前脛骨筋、腓腹筋、外側広筋、大腿二頭筋ともに数 ms 程度で、有意差は認められなかった。また、相関係数は腓腹筋と大腿四頭筋が特に強い相関を示した。（表IV-1）。

図IV-3 に被験者 2 名（ミッドフット走法及びフォアフット走法）の前脛骨筋、腓腹筋、外側広筋、大腿二頭筋の筋放電について、アスファルトとトレッドミルを走行した時の比較を示した。図IV-3 の垂線は前方が踵荷重ピークのタイミング、後方が拇指球荷重ピークのタイミングを示している。なお、アスファルトとトレッドミルで移行時間が異なる場合は、踵荷重ピークのタイミングを合わせた。この結果、拇指球荷重ピークがずれた場合は中間に垂線を引いている。



図IV-1 歩調(1分間の歩数)



図IV-2 移行時間

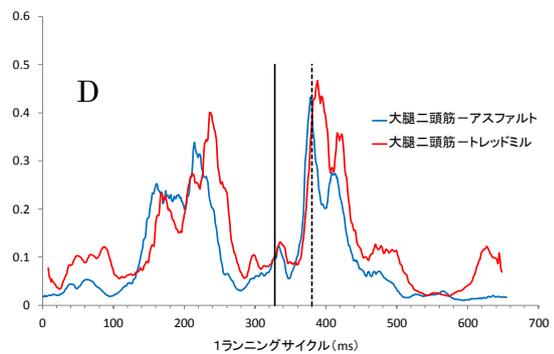
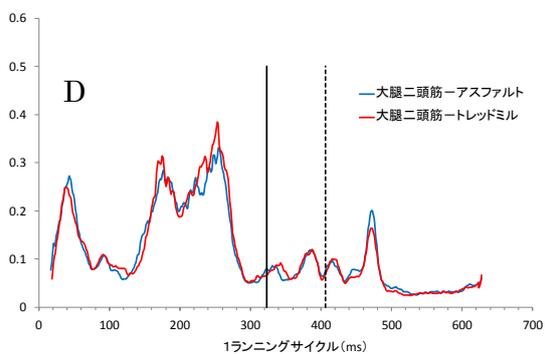
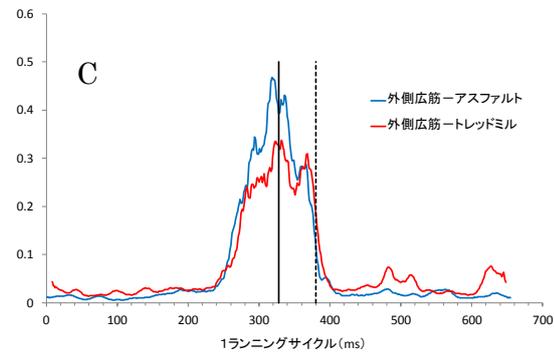
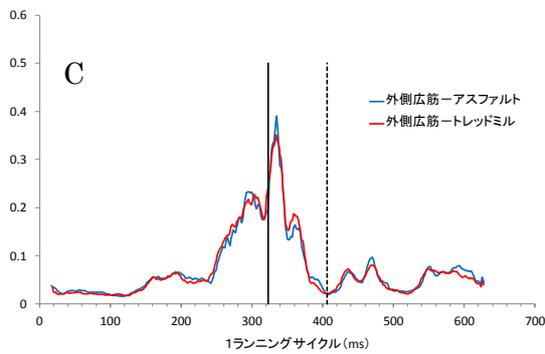
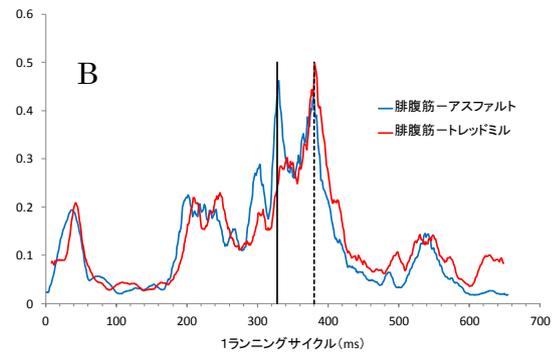
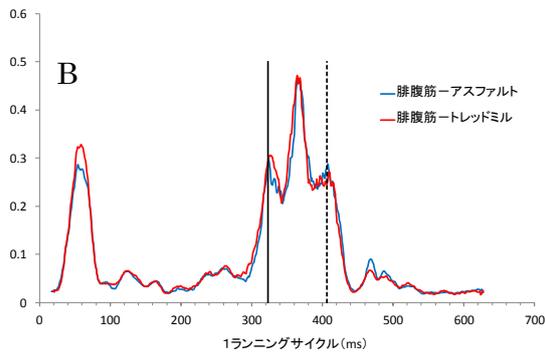
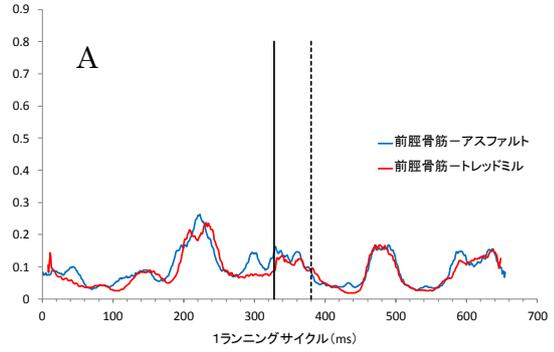
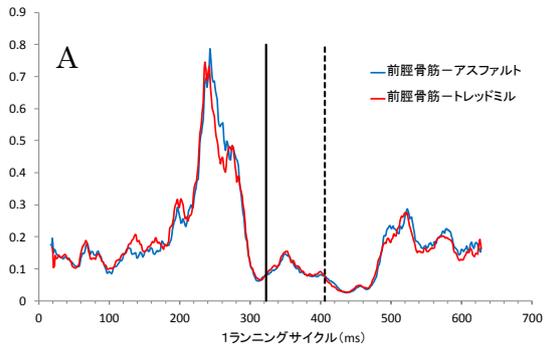
表IV-1 筋放電の積分値とずれの大きさのアスファルト・トレッドミル間比較

	前脛骨筋	腓腹筋	外側広筋	大腿二頭筋
iEMG 比率	1.06±0.28	1.03±0.09	0.92±0.09	1.00±0.16
位相差 (ms)	0.7±4.6ms	-2.0±5.4ms	-4.5±6.5ms	0.6±5.8ms
相関係数	0.884±0.082	0.961±0.019	0.955±0.032	0.914±0.047

iEMG 比率は、トレッドミルの筋放電の積分値(分子)をアスファルトの筋放電の積分値(分母)で除した比率

ミッドフット走法ランナー

フォアフット走法ランナー



図IV-3 筋放電のアスファルトとトレッドミル比較

A 前脛骨筋、B 腓腹筋、C 外側広筋、D 大腿二頭筋

2.トレッドミル走行による機械効率および最大酸素摂取量と競技パフォーマンスとの関係確認

2-1 VO₂max、最大心拍数及び血中乳酸値

VO₂max、最大心拍数、血中乳酸値は表IV-2 のとおりであった。VO₂max と 5000m 走タイムとの間に有意な相関は認められなかった (図IV-4)。

2-2 ランニングエコノミー (時速 16km)

時速 16km での走行時の O₂ コストは表IV-3 のとおりであった。VO₂max を O₂ コストで除した指数と 5000m 走タイムとの間には有意な相関が認められ、指数の値が増えるほど 5000m 走タイムが短くなった (図IV-5)。

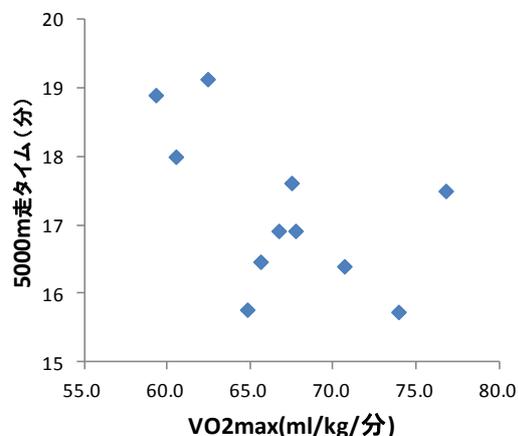
リアフット走法の被験者には O₂ コストが多い者が多かった (図IV-6)。また、5000m 走タイムが 16 分よりも短かったのはフォアフット走法とミッドフット走法の被験者だった (図IV-7)。

表IV-2 VO₂max 測定結果

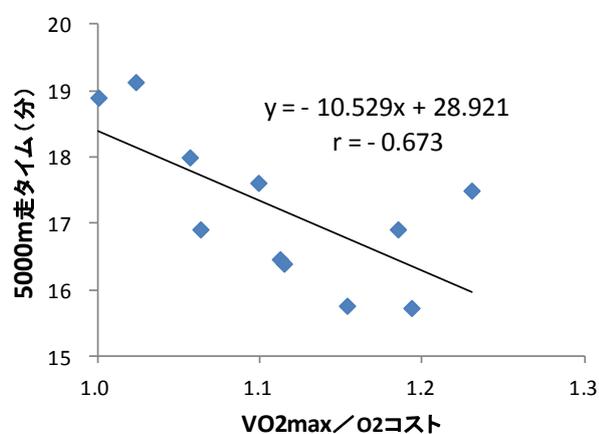
VO ₂ max (ml/分)	VO ₂ max (ml/kg/分)	最大心拍数 (拍/分)	血中乳酸値 (mmol/l)
4,129±572	66.9±5.1	194±6	8.9±1.7

表IV-3 ランニングエコノミー(時速 16km)測定結果

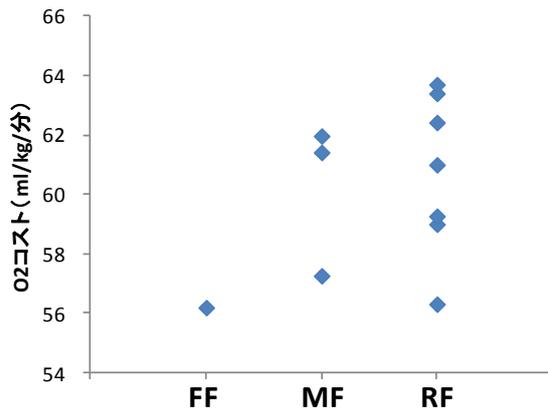
O ₂ コスト (ml/kg/分)	O ₂ コスト (ml/kg/km)	呼吸換気率
60.2±2.6	226±10	0.928±0.033



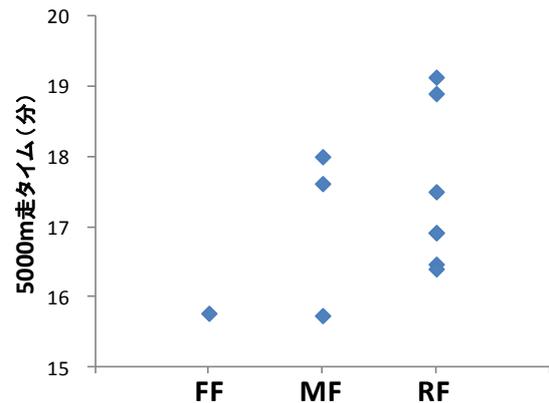
図IV-4.VO₂max と 5000m 走タイムとの相関



図IV-5.VO₂max/O₂コストと 5000m 走タイムとの相関



図IV-6 走法とO₂コストとの関係



図IV-7 走法と5000m走タイムとの関係

FF:フォアフット走法、MF:ミッドフット走法、RF:リアフット走法

3.フォアフット走法指導前後の走法およびランニングエコノミー比較

3-1 踵荷重、拇指球荷重、走法、主観的強度

介入前と介入後で、踵荷重ピークは有意に減少し、フォアフット走法の指導効果が確認できた。拇指球荷重ピークは若干増加したものの有意差を認めなかった。

踵荷重と拇指球荷重のタイミングからフォアフット走法ができたと判定したのは8名、被験者の自己評価で通常と異なるフォームで走れたと回答したのは9名、主観的強度が上がったのは3名、下がったのは4名、変わらなかったのは3名であった(表IV-4)。

表IV-4 踵荷重ピーク、拇指球荷重ピーク、走法、主観的強度、自己評価

被験者 ID	介入前				介入後				自己 評価
	踵荷重 (mV)	拇指球荷重 (mV)	走法 判定	主観的 強度	踵荷重 (mV)	拇指球荷重 (mV)	走法 判定	主観的 強度	
201	0.42	0.29	RF	19	0.04	0.45	FF	15	○
202	0.36	0.44	RF	19	0.36	0.38	RF	19	○
203	0.17	0.59	RF	15	0.01	0.72	FF	13	○
204	0.71	0.94	RF	13	0.06	1.08	FF	19	○
205	0.06	1.03	MF	19	0.02	1.06	FF	15	○
206	0.46	1.70	MF	13	0.06	1.53	FF	13	○
207	0.14	1.55	MF	9	0.00	1.27	FF	13	○
208	0.52	0.80	MF	15	0.12	1.09	FF	19	×
209	1.18	0.86	MF	17	0.10	1.44	FF	17	○
210	0.18	0.87	MF	19	0.19	1.23	MF	17	○
平均	0.42	0.91	—	15.8	0.10	1.02	—	16.0	—
標準偏差	0.32	0.42	—	3.2	0.10	0.37	—	2.4	—

3-2 接地時間、着地、離地タイミング

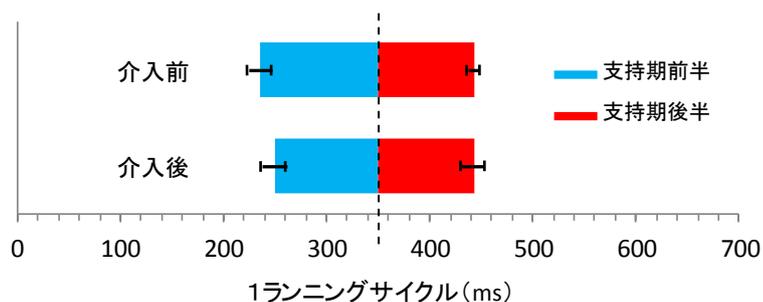
介入前と介入後で、接地時間が有意に短くなった。着地から拇指球ピークまでの支持期前半が有意に短くなり、拇指球ピークから離地までの支持期後半には変化が無かった。

(表IV-5、図IV-8)

表IV-5 着地・離地タイミング、接地時間

	着地時点 (ms)	離地時点 (ms)	接地時間 (ms)
介入前	236.2±10.8	442.6±5.1	206.4±8.8
介入後	249.9±11.6	443.1±11.1	193.2±8.6

拇指球ピーク時点を基準時点 (350ms 時点) とした前後の時点



図IV-8 着地・離地タイミング、接地時間

3-3 歩調、移行時間、移行時間率

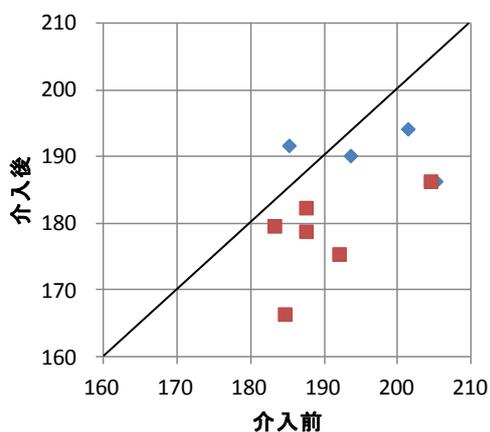
介入前と介入後で、歩調は9歩減り有意差が認められたが、外側広筋の筋放電ピークから拇指球荷重ピークまでの移行時間および1周期に占める移行時間の割合には変化がなかった。

リアフット走法ランナー(4名)とミッドフット走法ランナー(6名)の介入前後の増減量を比較すると、全ての測定項目について有意差を認めなかった(表IV-6、図IV-9~11)。

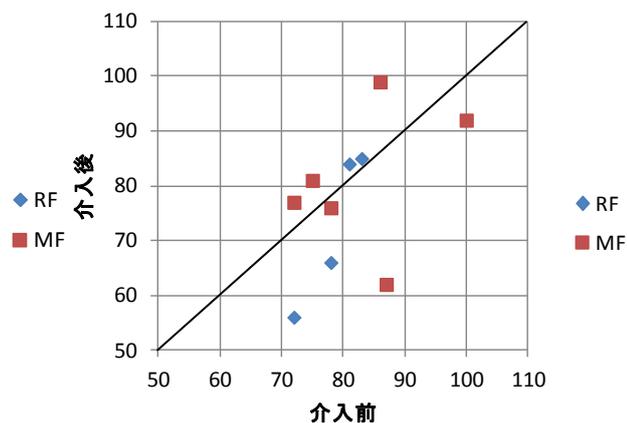
表IV-6 歩調、周期、移行時間、移行時間率

	歩調(歩/分)	周期(ms)	移行時間(ms)	移行時間率
RF+MF(n=10)				
介入前	192±8	625±25	80±10	0.128±0.013
介入後	183±8		79±11	0.121±0.016
RF(n=4)				
介入前	196±6	613±24	76±9	0.123±0.012
介入後	190±3	630±10	76±8	0.121±0.015
MF(n=6)				
介入前	190±7	633±23	83±9	0.131±0.013
介入後	178±6	674±24	81±12	0.120±0.016

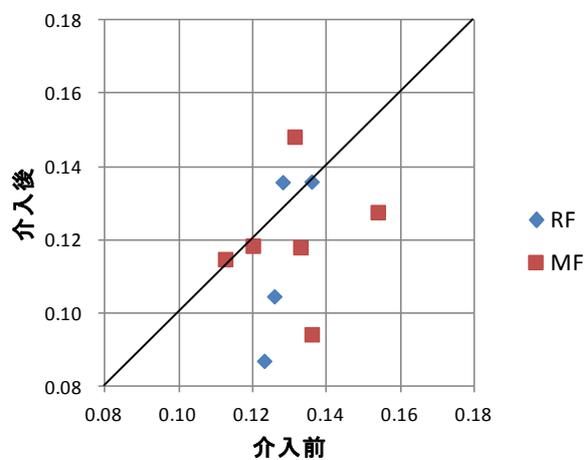
*P<0.05



図IV-9 歩調



図IV-10 移行時間



図IV-11 移行時間率

3-4 時速 18km での 酸素摂取量、呼吸換気率、心拍数、血中乳酸値

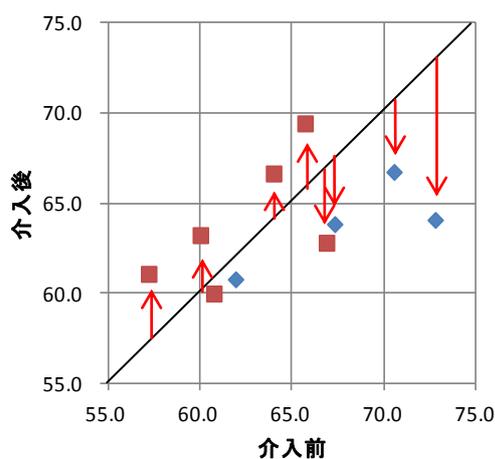
介入前と介入後で、時速 18km での走行時の O₂ コスト、呼吸換気率、心拍数には有意差がなかったが、血中乳酸値は有意な上昇が認められた。

リアフット走法ランナー（4 名）とミッドフット走法ランナー（6 名）の介入前後の増減量を比較すると、全ての測定項目について有意差を認めなかった。O₂ コストについては、リアフット走法ランナーは減少し、ミッドフット走法ランナーは増加したが、両者の増減量については違いが認められなかった（p = 0.055）（表IV-7、図IV-12～15）。

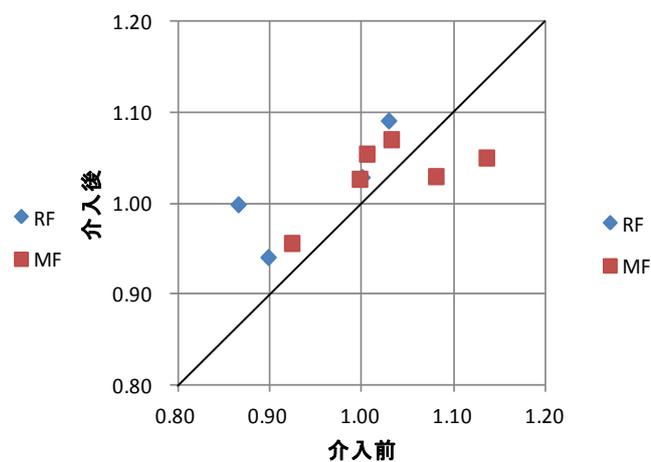
表IV-7 1 分間あたりの O₂ コスト、呼吸換気率、心拍数、血中乳酸値

	O ₂ コスト (ml/kg/分)	呼吸換気率	心拍数 (拍)	乳酸値 (mmol/l)
RF+MF(n=10)				
介入前	64.7±4.6	1.00±0.08	179±10	7.7±2.6
介入後	63.9±2.8	1.03±0.04	183±8	10.1±1.9
RF(n=4)				
介入前	68.1±4.1	0.95±0.07	186±4	7.6±2.1
介入後	63.9±2.1	1.02±0.05	187±3	8.7±2.2
MF(n=6)				
介入前	62.4±3.4	1.03±0.07	174±9	7.7±2.8
介入後	63.9±3.2	1.03±0.03	180±9	10.8±1.3

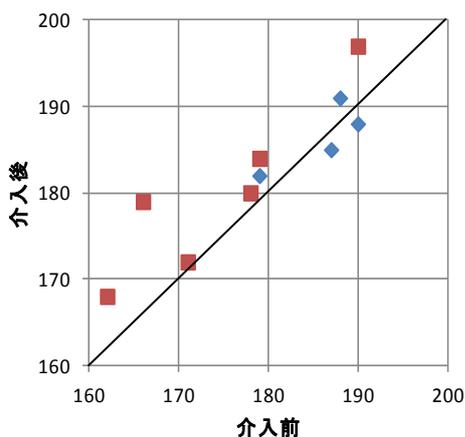
*P<0.05



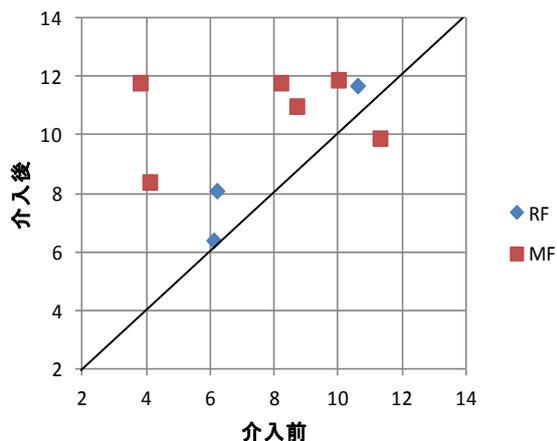
図IV-12 O₂ コスト(時速 18km 走行時)



図IV-13 呼吸換気率



図IV-14 心拍数



図IV-15 血中乳酸値

3-5 筋放電

外側広筋及び大腿二頭筋の表皮筋放電の積分値 (iEMG) について、介入前から介入後への増減率は、着地から次の着地までの周期全体 (1 周期の iEMG を 1 周期の時間で除した 1ms 当たりの iEMG) では有意な差が認められなかった。いっぽう、着地前後 (拇指球ピークの前 150ms と後 50ms の合計 200ms 間の iEMG) では大腿二頭筋 (着地前後) で有意な増加が認められた (表IV-8)。

また、O₂ コスト増減率と iEMG 増減率との相関は、大腿二頭筋 (周期全体) について有意な相関が認められたが、その他の測定項目については有意な相関は認められなかった。(図IV-16~19)

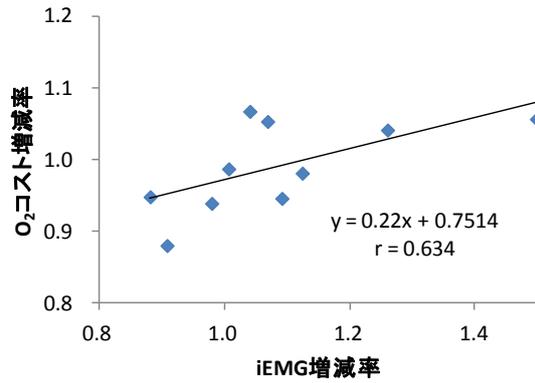
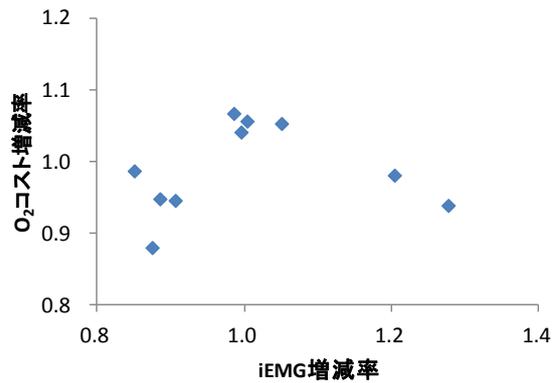
走法指導の後、リアフット走法からフォアフット走法 (左)、およびミッドフット走法からフォアフット走法 (右) へと移行した被験者のうち典型的な変動パターンを示した各 1 名について、A 踵荷重、B 拇指球荷重、C 外側広筋筋放電、D 大腿二頭筋筋放電を示した (図IV-20)。

表IV-8 介入前後の O₂コスト増減率、iEMG 増減率

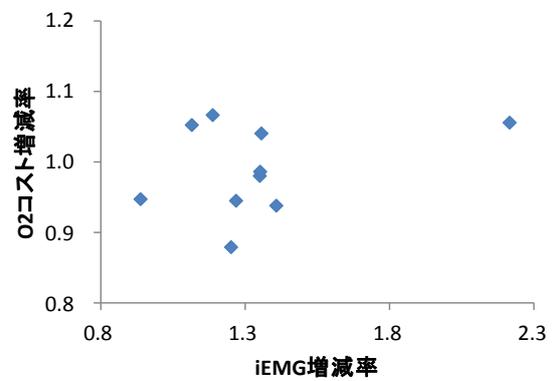
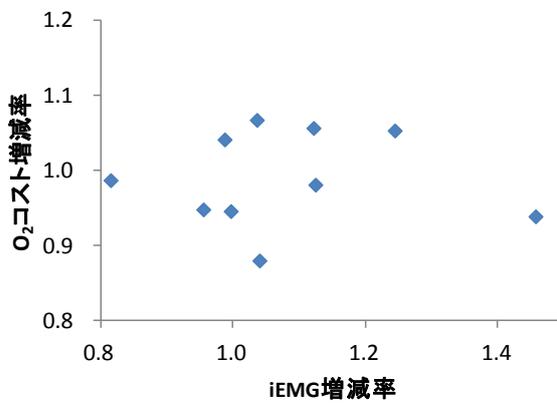
	O ₂ コスト増減率	iEMG 増減率	
		周期全体	着地前後
外側広筋	0.990±0.060	1.003±0.135	1.078±0.167
大腿二頭筋		1.086±0.172	1.343±0.319*

iEMG 増減率=介入後 iEMG / 介入前 iEMG

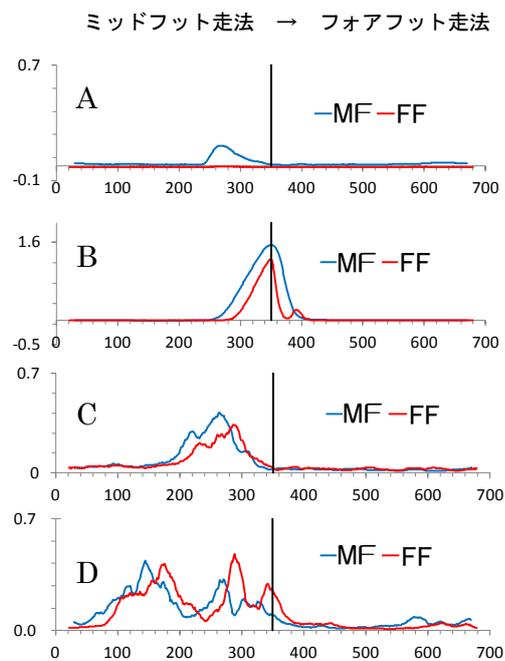
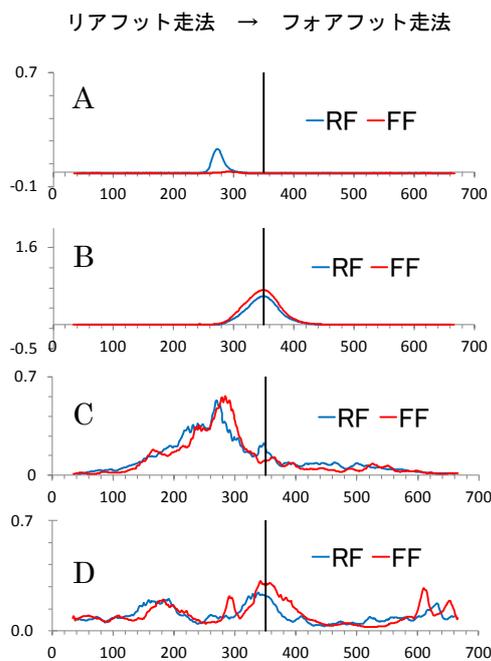
* P<0.05



図IV-16 外側広筋(周期全体)とO₂コストの相関 図IV-17 大腿二頭筋(周期全体)とO₂コストの相関



図IV-18 外側広筋(着地前後)とO₂コストの相関 図IV-19 大腿二頭筋(着地前後)とO₂コストの相関



図IV-20 A 踵荷重、B 拇指球荷重、C 外側広筋筋放電、D 大腿二頭筋筋放電

V 考察

1.屋外（アスファルト舗装道路）走行とトレッドミル走行との比較

先行研究では、屋外走行と比べてトレッドミルでは歩幅が狭くなり、歩数が増えるといった報告がある [5][9][13]。今回の実験においても、図IV-1 に示すとおり 1 分間あたりの歩数が時速 15km 及び時速 17.5km では 2 歩、時速 20km では 4 歩増加したが、有意ではなかった。Smith ら[2016、14]は、実験に使用するトレッドミルの床面の固さによって歩数や歩幅に違いが現れることを報告している。近年、一部の民間フィットネスセンターなどでは、繰り返し負荷による膝や腰、足首などの障害を避けるため、走路に弾力性をもたせたトレッドミルが備えられているところがある。このような装置ではいわばトランポリンのように身体が浮き上がってしまい、その間に走路面（ベルト）が進んで（回って）しまうことから、走行速度あたりの酸素摂取量は通常のトレッドミルに比べて少なくなる。トレッドミル走路の剛性を評価する規格の有無については不明であるが、本研究の実験 1，2 で使用したトレッドミルは適応体重 180kg であり、クッション性がなく剛性の高いタイプであった。したがって、アスファルトと同様とまではいえないが、走行面の固さが歩数や歩幅に影響を与えることはなかったと考えられる。

また、着地足に対して前方への移動がなく、着地後に足が後方に運ばれる（流される）形になるトレッドミル走行では、ランニングフォームが大きく崩れ、後ろに運ばれた足を前に戻すことに時間がかかり、着地時に足を上から路面に置く形になることがある [6][7][15]。このような走行では、リアフット着地からミッドフット着地に近づくため、踵荷重のピーク時から拇指球荷重のピーク時までの移行時間は短くなる。本研究では、図IV-2 に示す通り移行時間の短縮傾向が見られたものの有意差はなく、1 周期の筋放電の積分値 (iEMG) もアスファルト走行とトレッドミル走行でほぼ同等、さらに筋放電の位相差も表IV-1 に示すとおり -4.5ms から +0.7ms と僅か数ミリ秒程度で、波形の類似性を示す相関係数も 0.884 から 0.961 と比較的高い値であった。これらの結果から本研究では、屋外での実走行がトレッドミルでもほぼ再現できるものと判断する。

2.トレッドミル走行による機械効率および最大酸素摂取量と競技パフォーマンスとの関係確認

勝田ら[16]は、ランニングを専門とする競技者では、最大有酸素能力 ($VO_2\max$) と持久走のパフォーマンスとの間に高い相関を持つことを報告している。これに対し、本研究の実験 2 では、トライアスロン競技者の中に他と比べてランニング技術に劣る者があり、勝田らの結果が必ずしも当てはまらないとの仮説のもと、トレッドミルによる最大酸素摂取量測定、およびランニングエコノミーを測定した。その結果、 $VO_2\max$ と 5000m 走タイムには有意な相関が認められなかった (図IV-4)。そこで、 $VO_2\max$ にランニングエコノミーを乗じ (O_2 コストで除し)、5000m 走タイムとの相関を求めたところ、有意な相関が認められた (図IV-5)。このことは、ランニングエコノミーを考慮することで、 $VO_2\max$ から 5000m 走のタイムが予測できることを示唆している。

ランニングに要する O_2 コストは、走行速度が違っても距離当たり、すなわち ml/kg/km の形であらわした場合には同じであることが報告されている[17][18]。さらに、この指標による O_2 コストは、エリートアフリカ人ランナーでは 187 ml/kg/km、エリート欧米人ランナーでは 210 ml/kg/km[14]、日本の一流選手がおおよそ 200 ml/kg/km[18]との報告がある。今回の被験者の時速 16km での O_2 コストは 226 ± 10 ml/kg/km であり、これらと比較すると、今回の被験者は欧米人ランナーと比べても 8% 程度効率が劣ることになる。また本研究では、フォアフット走法の被験者が最も O_2 コストが少なく、 O_2 コストの多い上位 3 名はいずれもリアフット走法であった (図IV-6)。

Daniels と Gilbert[1979、18]は、エリートランナーの競技記録を重回帰分析することによって $VO_2\max$ から様々な距離のランニングの予想タイム換算式を作成した。表 V-1 は、今回の被験者の $VO_2\max$ 、Daniels の予想タイム算出ソフト[20]による 5000m 走の予想タイム、5000m 走のベストタイム、予想タイムとベストタイムとの差、走法を順に示したものである。また図 V-1 は、各被験者の $VO_2\max$ を横軸にとった場合の 5000m 走のベストタイムと Daniels による予想タイム、更に図 V-2 は、各被験者の $VO_2\max$ に対してランニングエコノミーの最も高かった被験者 ID102 のランニングエコノミーを当てはめることで 5000m 走のタイム (補正タイム) を求め、Daniels による予想タイムと比較したものである。表 V-1 にあるように、被験者の 5000m 走のタイムを Daniels による予想タイムと比較すると、被験者 ID102 を除き Daniels による予

想タイムから大きく遅れていた。また、図V-1 では各被験者の 5000m走のタイムは Daniels による予想タイムから大きく離れていたが、被験者 ID102 のランニングエコノミーを使って補正した 5000m走のタイムは Daniels らの予想タイムに近づくとともに 5000m 走の補正タイムと VO₂max との関係は有意な負の相関となり、その回帰直線の傾きは Daniels の予想タイムのそれとほぼ同等で予想タイムから約 30 秒遅い（上方にシフトした）ものとなった。これらの結果は、今回のトライアスロン選手のランニングエコノミーは全般的に低く、ランニング技術が高いと思われるフォアフット走法ランナー並のランニングエコノミーを獲得すれば、Daniels による予想タイムにより近いタイムで 5000m を走れることを示唆している。

表 V-1 被験者の 5000m 走タイムと VO₂max(ml/kg/分)の関係

被験者 ID	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
VO ₂ max	60.5	64.8	66.7	65.6	59.3	73.9	62.4	70.7	67.5	76.8	67.7
予想タイム	16:55	15:57	15:34	15:47	17:13	14:15	16:28	14:46	15:24	13:47	15:22
ベストタイム	18:00	15:46	16:55	16:28	18:54	15:44	19:08	16:24	17:37	17:30	16:55
タイム差	1:05	-0:11	1:21	0:41	1:39	1:29	2:40	1:38	2:13	3:43	1:33
走法	MF	FF	RF	RF	RF	MF	RF	RF	MF	RF	RF

予想タイム：Jack Daniels' VDOT Running Calculator, <http://runsmartproject.com/calculator/>

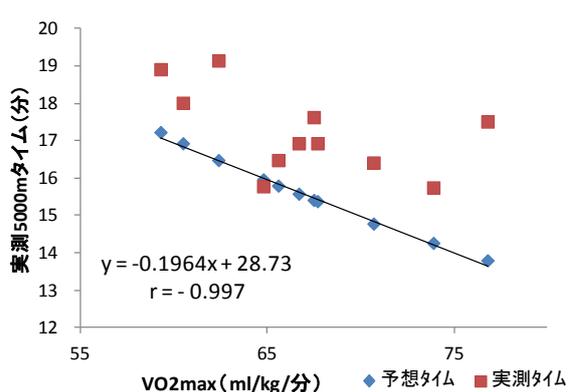


図 V-1 Daniels 予想タイムと実測タイム

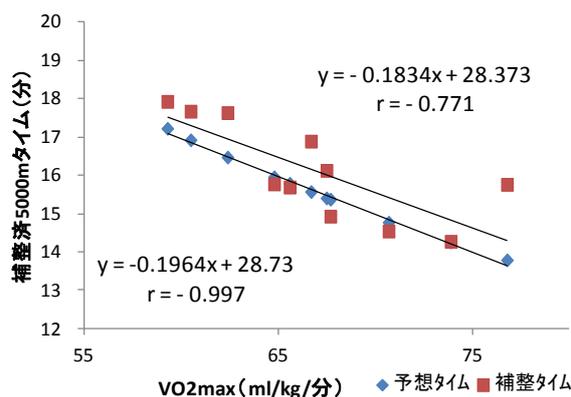


図 V-2 Daniels 予想タイムと補整タイム

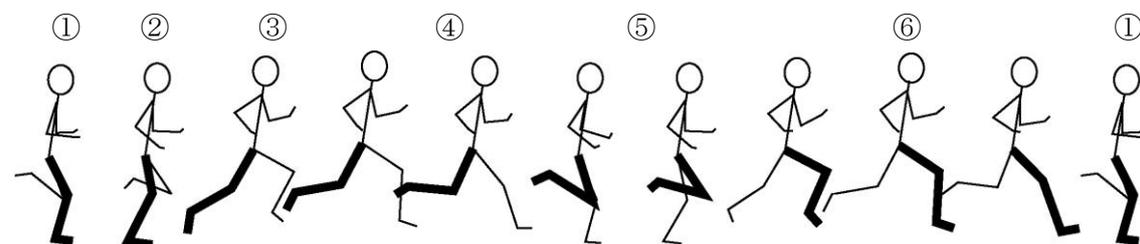
ランニングエコノミーを改善するためには、着地時のブレーキによるエネルギー喪失をできるだけ少なくすることが重要である。その一つの方法として、最終振脚時に膝を

高く上げてから振り下ろすことによって着地時のブレーキ時間を短くすることが考えられる。

ランニング動作を図V-3 とおり①着地、②支持、③離地、④初期振脚、⑤中間振脚、⑥最終振脚の6つの局面で考える。各局面の特徴は以下のとおりである。

- ①着地：進行方向に対して地面からのブレーキを受ける。
- ②支持：進行方向に対して地面を押して加速する。
- ③離地：両脚が空中に浮遊し、地面からの力が加わらなくなり、空気抵抗のみとなる。
- ④初期振脚：両脚が空中に浮いた状態で離地した脚を前方に引戻し始める。
- ⑤中間振脚：反対側の脚が地面に着いた状態(①～③)で離地した脚を前方に引戻す。
- ⑥最終振脚：両脚が空中に浮いた状態で引戻した脚を地面に向けて振り下ろす。

今回の実験では、フォアフット走法を行う被験者が最もランニングエコノミーが高く、かつVO₂maxが相対的に低いにも関わらず5000m走実測タイムが速かった(図IV-6、表V-1)。フォアフット走法は、⑥最終振脚から①着地にかけて脚を素早く真下に振り下ろすことにより、着地時のブレーキがかからないように走ることができるため、リアフット走法ランナーはフォアフット走法を習得することによって、ランニングエコノミーが改善する可能性がある。



図V-3 ランニング動作

3.フォアフット走法指導前後の走法およびランニングエコノミー比較

本研究の実験3では、ランニングフォームの指導直後に即時的効果が表れるかを検証した。指導後にフォアフット走法のバイオメカニクスの理屈を理解し、実行できたか質問したところ、リアフット走法及びミッドフット走法を行う10名のうち8名が指導直後にフォアフット走法で走ることができ、残る2名についても着地方法こそ従前のままであったものの、従来の走法とは異なる走り方ができたと回答した。この指導結果は

データにも表れており、着地から拇指球に体重が乗るまでの時間が短縮され、接地時間が有意に短くなった（図IV-8）。このことは、一過性の指導によってランニングフォームを変えることができたことを意味している。

時速 18km での走行時の O_2 コストは、全体としては、ランニングフォーム指導直後に減ることはなかったが、極端に非効率なランニングフォームの被験者に限定すれば、指導直後において O_2 コストは減少した（表IV-7、図IV-12）。

また、指導前と指導後の O_2 コストの増減を比較した結果、リアフット走法ランナーでは指導後に O_2 コストが減少した。この原因としては、もともとリアフット走法ランナーにはランニングエコノミーの低い者、すなわち踵着地によるエネルギーロスの大きい者が多く含まれ、フォアフット走法への移行がエネルギーロスの軽減、 O_2 コストの低下につながりやすかったことが考えられる。いっぽう、ミッドフット走法ランナーでは、リアフット走法ランナーに比べて着地によるエネルギーロスが少なく、やや姿勢が立ち過ぎていて脚を前に突っ張り気味のリアフット走法ランナーに比べ最初から前傾姿勢が取れており、各種指導内容（図III-8）のうち、①の腓腹筋の意識や足底前部（拇指球）の地面へのたたきつけ、②のハムストリングス（大腿二頭筋、半膜様筋、半腱様筋）の緊張、③の骨盤による大腿骨の押しなど、慣れないフォアフット走法に近づけようと余計な力が入ってしまったのではないかと考えられる。今回、フォアフット走法の指導によって、歩調は指導直後に有意に減少した（表IV-6）。また、トレッドミルのベルトは一定スピードで回っているため、歩調が減少したと言うことは、滞空時間が延びたことを意味する。これは、踵着地が解消されたことでブレーキとなる力が消滅あるいは減少しただけでなく、より強い地面反力を獲得したことを意味する。よって、 O_2 コストが大幅に減少したリアフット走法ランナーでは、歩調を変えることなく実際に屋外を走行した場合には、同程度の酸素摂取量であってもスピードアップにつながる事が予想される。

次に、走法指導前後の筋活動から、リアフット走法とフォアフット走法について考察する。本研究においては、真下に向かって脚を叩きつけるように動かし、積極的に地面反力を取りに行くよう指導すると同時に、着地の瞬間にハムストリングスに力を入れ、膝の屈曲を行うことで地面を後方に押す力、すなわち前方への推進力を作り出すよう指導した。その結果、大腿二頭筋について、ランニングフォーム指導後では、着地前後

200ms の筋放電量は 1.343 ± 0.319 倍となり、指導前のランニングフォームと比較して有意な増加があった(表IV-8)。図IV-20に示すように、もともとリアフット走法であった被験者、ミッドフット走法であった被験者ともに、フォアフット走法では拇指球のピーク値の後に大腿二頭筋の放電量増加が確認される。ランニングにおいて水平方向の力を生み出すには、垂直方向の4倍のエネルギーコストが必要となることが知られており[21]、大腿二頭筋の収縮によって前方への推進力を積極的に生み出すランニング技術を身に付けることは競技パフォーマンスを大きく向上させる可能性がある。比較的競技レベルの高い今回の被験者が最初にこういった筋活動パターンを示さなかったことは、このような筋の使い方が、ただ走っているだけではなかなか身に付かないこと、いっぽう、短時間の指導でその筋肉の使い方がある程度理解できることを示している。従来報告されている着地時のエネルギーロスをなくすこと[22]も身に付けるべきランニング技術であるが、競技レベルの高いアスリートでは、より高いランニング技術の習得が、競技パフォーマンスの向上をもたらすと考えられる。

また、こういった走り方は、瞬間的に地面に力を伝える動作である。したがって、ランニングエコノミーの向上のためには、遅筋だけでなく速筋や中間筋を使うことが不可欠となる。嫌氣的代謝は、速筋を使うランニングフォームであれば、速度に関わりなく亢進する。本実験でも、 O_2 コストが減少するいっぽう、乳酸値が上昇した被験者が4名いた。これは、ランニングフォームを変えたことによって、これまで遅筋を中心に使っていたものが、速筋を使うようになったためと考えられる。血中乳酸値が上がっているにもかかわらず、主観的強度が下がったと答えた被験者が3名、変わらないと答えた被験者が2名いた。このことは、血中乳酸値の上昇が必ずしもパフォーマンスの悪化につながるものではないことを示唆している。今回の実験では5分間という短い走行時間であったが、今後はもっと時間を延ばしたり、筋疲労や血中乳酸値の蓄積による影響を分析することが課題である。

なお、トライアスロン選手はBMIの高い選手が多く、フォアフット走法では体重を支えきれない可能性があること、ヒラメ筋と腓腹筋の発達によって水泳競技で脚が沈むようになる恐れがあること、自転車のペダリングで余分な重量を回さなければならなくなること等から、トライアスロン選手にとってフォアフット走法が最良の走法であるかどうかは、より多角的な研究が必要である。

VI 結論

トレッドミルでも屋外とほぼ同じランニングフォームで走ることができ、屋外での実走行がトレッドミル走によってほぼ再現できた。このことから、トレッドミル走行で運動指導により着地方法に変化があったかをバイオメカニクス研究手法によって検証することは可能である。

被験者間で走行時の O_2 コストに最大 13.3% の違いが認められた。 $VO_2\max$ を走行時の O_2 コストで除した値と 5000m 走タイムとの間には有意な相関が認められた。このことから、ランニングで大幅に順位を落とす選手は、走運動時の機械効率が低いことが大きな原因の一つであることが分かった。

フォアフット走法の指導により、時速 18km での走行時の接地時間の短縮、歩調の減少、歩幅の伸長が表れた。リアフット走法ランナーに対するフォアフット走法指導は、同ランナーのランニング時の O_2 コストの低下につながる可能性がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、ご協力を下さいました被験者の皆さま、ならびに実験場所をご提供いただいた、ベルリオアスリートクラブ様に深く感謝いたします。

また、熱心なご指導を賜りました名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科 高石鉄雄教授に厚くお礼申し上げます。

最後に、長期履修の 4 年間充実した日々を送らせてくださった名古屋市立大学の皆さまに感謝いたします。

引用文献

1. Gruber AH, Umberger BR, Braun B, et al. Economy and rate of carbohydrate oxidation during running with rearfoot and forefoot strike patterns. *J Appl Physiol.* 2013;115:194–201.
2. L.P. Ardigo, C. Lafortuna, A.E. Minetti, P. Mognoni, F. Saibene Metabolic and mechanical aspects of foot landing type, forefoot and rearfoot strike, in human running *Acta Physiol Scand*, 155 (1995), pp. 17-22
3. Ryschon TW, Fowler MD, Wysong RE, Anthony A, Balaban RS. Efficiency of human skeletal muscle in vivo: comparison of isometric, concentric, and eccentric muscle action. *J Appl Physiol.* 1997;83(3):867–74.
4. Kluitenberg B, Bredeweg SW, Zijlstra S, Zijlstra W, Buist I: Comparison of vertical ground reaction forces during overground and treadmill running. A validation study. *BMC Musculoskelet Disord.* 2012, 13: 235-10.1186/1471-2474-13-235
5. Nelson RC, Dillman CJ, Lagasse P, Bicktt P. Biomechanics of overground versus treadmill running. *Med. Sci. Sports* 4:233 - 240, 1972
6. Elliott BC, Blanksby BA. A cinematographic analysis of overground and treadmill running by males and females. *Med Sci Sports.* 1976;8:84–7.
7. Frishberg BA. An analysis of overground and treadmill sprinting. *Med Sci Sports Exerc.* 1983;15(6):478–85.
8. Nigg BM, DeBoer RW, Fischer V. A kinematic comparison of overground and treadmill running. *Med Sci Sports Exerc.* 1995; 27(1):98–105.
9. van Ingen Schenau GJ. Some fundamental aspects of the biomechanics of overground versus treadmill locomotion. *Med Sci Sports Exerc.* 1980;12(4):257–61.
10. Riley PO, Dicharry J, Croce UD, et al. A kinematics and kinetic comparison of overground and treadmill running. *Med Sci Sports Exerc* 2008;40:1093–100.
11. Jones AM, Doust JH. A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *J Sports Sci.* 1996; 14(4):321–7.
12. 小野寺孝一,宮下充正,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.1976;21(4);191-203

13. Wank, V., Frick, U., and Schmidtbleicher, D., 1998, "Kinematics and Electromyography of Lower Limb Muscles in Overground and Treadmill Running," *Int. J. Sports Med.*, 19, pp. 455–461.
14. Smith JA, McKerrow AD, Kohn TA. Metabolic cost of running is greater on a treadmill with a stiffer running platform. *J Sports Sci.* 2016;1–6.
15. Lavanska V, Taylor NF, Schache AG. Familiarization to treadmill running in young unimpaired adults. *Hum Mov Sci.* 2005;24: 544–57.
16. 勝田茂, 宮田浩文, 麻場一徳, 原田健, 永井純, 中長距離選手におけるランニング効率とパフォーマンスとの関係について. *大学体育研究.* 1986; 8:45-52.
17. Fletcher JR, Esau SP, MacIntosh BR. Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J Appl Physiol.* 2009;107(6):1918–22.
18. 江本靖士, 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*,36 137-140,2013
19. J. Daniels and J. Gilbert, *Oxygen Power: Performance Tables for Distance Runners*, 1979
20. Jack Daniels' VDOT Running Calculator, <http://runsmartproject.com/calculator/>
21. Chang YH, Kram R. Metabolic cost of generating horizontal forces during human running. *J Appl Physiol.* 1999;86(5):1657–62.
22. Nummela A, Keränen T, Mikkelsen LO. Factors related to top running speed and economy. *Int J Sports Med.* 2007;28(8):655–61.