

エアロビックダンスにおけるピッチとエネルギー効率の関係について

古木宏子*・奥村真理***・江口和美*・伊藤雅充**・竹宮 隆*

(2004年5月31日受付, 2004年8月24日受理)

Relationship between Step Frequency and Energetic Efficiency during Aerobic Dance

Hiroko FURUKI, Mari OKUMURA, Kazumi EGUCHI,
Masamitsu ITO and Takashi TAKEMIYA

The purpose of this study was to examine whether there is an optimal pace of running in place that minimizes energy consumption, and the changes in the work load with changes in the pace of running in place. The subjects were 6 male college students in the triathlon club. Running in place for 5 min was performed 6 times at intervals of 10 min. Assuming that the stride was zero, running in place was performed at 6 pace rates (130, 140, 150, 160, 170 and 180 steps/min). The measurement parameters were the lift force on the floor, the volume of expired gas, and the distance of movement of the weight center in the vertical direction determined using video images.

The results were summarized as follows.

1. The changes in oxygen intake with increases in the pace were expressed by a negative quadratic function in all subjects, indicating that there was an optimal pace that minimized the energy consumption.

2. The impulse per step significantly decreased with increases in the pace, while the impulse per minute significantly increased with the pace. The external work per minute for lifting of the body in the vertical direction increased up to 130-140 steps/min, and then decreased.

3. The kinetic efficiency peaked at 140 steps/min ($26.3 \pm 6\%$).

These results suggested that increases in the pace of running in place did not always increase the strength of movement.

Key words: optimal pace, aerobic dancing, work load, kinetic efficiency

キーワード: 至適ピッチ, エアロビックダンス, 運動負荷, 機械的効率

I. 緒 言

エアロビックダンスは十分に時間をかけて心臓や肺のはたらきを刺激し, 身体内部に有益な効果を生み出すことのできる運動の種目(エアロビクス)の1つとして1969年にアメリカで誕生し, 日本には

1981年に紹介された。健康・体力づくりを目指すトレーニングの参加者には, 体力水準の低い者や運動経験の乏しい者, 肥満者や中高年者などが多いことから, 運動を長時間持続できるための運動強度設定は重要な要素となる。そのため, エアロビックダ

* 日本体育大学大学院トレーニング科学(竹宮研究室)

** 日本体育大学体育研究所

*** 日本体育大学大学院トレーニング科学(竹宮研究室研究員)

ンスの運動強度に関する研究^{5-7, 22, 24-26, 34, 36, 37})もなされてきた。エアロビックダンスでは狭いスペースで大勢の人が運動を行うことから、その場でステップを踏むことが多く、その場駆け足運動がしばしば用いられる。

一定速度のランニングはピッチとストライドの組み合わせがエネルギー消費量を左右することから、至適ピッチの研究も古くからなされてきた。Seabury et al.³²、Cost et al.⁹)は一定仕事率下の自転車作業時において、エネルギー消費量を最小にするペダル回転数が存在すると報告している。速度が遅いと姿勢保持に要する筋緊張を維持するためのエネルギーロスが増し、速い速度では筋が内部抵抗に対抗して短縮するためのエネルギーロスが増大する。したがってこの2つのエネルギーロスの和が最小となるところに至適ピッチが存在すると考えられている。また、Cavagna et al.^{5, 6}、Kaneko et al.¹⁹)はウォーキング、ランニングの至適ピッチを報告している。至適速度でのウォーキングは、運動エネルギーが最小のときに位置エネルギーが最大に達し、またその逆が繰り返される。この至適速度から離れるほど2つの曲線の位相は一致するようになり、外的仕事量が増し、エネルギー消費量の増加をもたらす。ランニングの仕事量には、重心を動かす外的仕事量以外に重心回りで四肢を動かす内的仕事がある。ピッチが速いと外的仕事量は減少するが、内的仕事量は増加する。ピッチが遅いと逆に内的仕事量は減少するが、外的仕事量は増加する。総仕事量が最小となるピッチはその間に存在し、ヒトが自然に選択するピッチと言われている。さらに、筋張力を身体外力へ変換するときの弾性エネルギーの関与^{3, 21})も考えられている。しかし、エアロビックダンスで行われるその場駆け足運動の至適ピッチの報告は数少なく、それぞれのピッチに対する運動量を力学と生理学の両面から検討した報告は少ない。

そこで、本研究はその場駆け足運動におけるエネルギー消費量が減少する至適ピッチの存在を確認するとともに、その場駆け足運動のランニングピッチを変化させたときの運動量の変化を力学的及び生理学的な側面から調べることを目的とした。

II. 方 法

A. 被験者

被験者はN大学トライアスロン部に所属する男性6名であり、年齢、身長及び体重はそれぞれ19.6±0.8歳、172.8±2.3cm及び64.8±3.3kgであった。被験者へはあらかじめ実験の目的、方法及び実験に伴う危険性などの説明を十分に行い、同意書に署名した後、実験に参加させた。

B. 実験プロトコル

各被験者は圧力盤の上で5分間(定常状態を作るため)のその場駆け足運動を6セット行った。ストライドはゼロと仮定し、ステップ頻度のみをセットごとに変化させた。各セット別のステップ頻度は毎分130, 140, 150, 160, 170, 180の6種類とし、負荷した頻度の順はランダムとした。1セット5分間の運動後は被験者の心拍数が安静に回復するまで安静座位の状態を保ち、次のセットを開始した。

C. 分析項目及び方法

実験を実施した実験室の室温は22°C、湿度は60%であった。すべての試技動作は被験者の側方9m高さ1.3mに設置のカメラ(Hyper HAD COLOR VIDEO Digital CAMERA, Sony)を用い、30 fpsで連続撮影した。また、動作の撮影と同時に床反力を圧力盤(9287b, Kistler Instruments AG, Switzerland)、各テンポの酸素摂取量をテレメトリ式呼吸代謝システム(K4b², COSMED)で測定した。酸素摂取量を測定したK4b²は、酸素・二酸化炭素アナライザで内部温度を自動調節し、気圧・湿度センサと合わせて環境の変化に応じて校正を行った。本実験では標準混合ガス(CO₂ 5.00%, O₂ 16%)にて校正ガスキャリブレーションを行った後にPCのソフトウェアにより自動的にGas calibration及びRoom air calibrationを行った。ガスサンプリングはプレスバイプレス方式にて採取・計測及び記録をした。分析時に映像と床反力を同期できるように、カメラと圧力盤はビデオカウンター(PH-1540, DKH)を介し、そのスタートスイッチによりビデオカウンターと床反力測定が同時進行するように設置した。

・呼気ガス分析

酸素摂取量は被験者それぞれのピッチごとに算出した。AT以下強度の運動では \dot{V}_{O_2} は約3分で安定するという先行研究^{2, 35})から、各ピッチの酸素摂取

量は5分間のその場駆け足運動中の最後2分間の平均値を各被験者の酸素摂取量とした。さらにその値を標準化するために体重(kg)当たりの値とした。

・画像分析

体重を鉛直方向へ持ち上げるときの仕事量を求めるために画像分析を行った。仕事量は身体重心の鉛直方向の移動距離から外的仕事量を算出した。VTR画像上の身体部分点(外中足骨・外果・膝・大転子・肩峰突起・耳珠点・頭頂部・肘・手首)及び校正マークをビデオ動作解析ソフト(WINanalyze, Automatic Motion Analysis Version1.4, Mikromak, Germany)を用いて60 Hzで1コマごとにデジタイズし、得られた身体部分点の2次元座標と校正マークをもとに実長換算した。デジタイズに基づいた実長の正確性を図るために、同じデータのデジタイズを5回行い、実長換算値の最大及び最小値を切り捨て、残りの3値の平均値を本データの実長換算値とした。実長換算した値は5点移動平均法を用いて10 Hzのローパスフィルターをかけ平滑化した。身体重心については、阿江¹⁾の身体部分係数を用いて算出した。

・力のパラメータ

床反力は5分間の試技中の動作が安定した最後の1分間を測定している(120~180歩)。圧力盤からの出力信号は増幅(9865e, Kistlar Instruments AG, Switzerland), AD変換(PowerLob 16 ch, Ad-instrument, Australia)され、サンプリング周波数1,000 HzでPC(Power Macintosh G3, Apple Computer, Cupertino, CA, USA)へ記録した。1歩当たりの力積はそれぞれの被験者の1分間の力積を平均して算出した。平均値を算出する際左右10歩の最小と最大値を切り捨て、110~170歩のサンプル数とした。なお、ランニング中の床反力及び力積の再現性を確認するためにデータ数が一番多い130 steps/minにおける力積170歩の変動係数を算出した。各被験者の変動係数は21.4~7.3であった。力積値はそれぞれの体重で除し、体重当たりの値として表した。

・運動効率の算出

運動効率の算出は先行研究¹⁸⁾を基に、運動中の酸素消費量を運動に要したエネルギー消費量とし、外的仕事量を運動に要したエネルギー消費量で除することにより算出した(機械的仕事量(外的仕事量)/

エネルギー消費量(運動時酸素摂取量))。効率を算出する際の分母となる消費エネルギーは安静レベルも含めた全酸素摂取量から算出したため、gross efficiencyとして表した。酸素摂取量と機械的仕事量から効率を求める方法について、運動中の酸素摂取量を運動に要したエネルギー消費量とする方法は長年用いられてきた。運動が酸化過程の最大下定常状態下であれば、運動時の酸素摂取量を採取することによって全運動に要した酸素摂取量を入力エネルギーとして扱うことができる。この場合、体内において酸素1 lの酸化では、5 kcalのエネルギーが放出されるというエネルギー等価が用いられる。本実験においてもこの方法を用いて、運動中のエネルギー消費量を算出した。効率を求める際の分母となる消費エネルギーをどのような酸素摂取量から求めるかによって様々な評価法が報告されている¹⁸⁾。本実験では、与えられたピッチに対して効率がどのように変化するのかを検討するため、最も古典的な算出gross efficiencyを求める方法を採用した。

D. 統計処理

統計解析には統計解析ソフトSPSSを用いた。測定の結果は全て平均値±標準偏差で表した。その場駆け足運動における力積及び外的仕事量のピッチ間の有意差検定では一元配置の分散分析(ANOVA)を用い、有意性が認められたものにはTukeyの方法による多重比較を行った。危険率5%未満を有意差のあるものとした。また、酸素摂取量と運動効率の測定結果は、2次関数的変化を表していることを確認するために、酸素摂取量の結果では最小値を示した170 steps/minとの有意差、運動効率の結果では最大値を示した140 steps/minとの有意差を対応のあるt検定を用いて行った。いずれも危険率5%未満を有意差のあるものとした。

III. 結 果

最初に、各ピッチにおける $\dot{V}O_2$ の変化を図1で示した。各ピッチにおける $\dot{V}O_2$ は170 steps/minを最小値(28.1±3.8 ml/min/kg)に持つ、負の2次関数的な変化を示した。150(28.4±3.5 ml/min/kg), 160(38.3±3.3 ml/min/kg), 170 steps/minの $\dot{V}O_2$ 値はほとんどステージ間の差が認められなかったため、150~170 steps/minで低値を示したといえる。負の2次関数的な変化を確認するために最小値

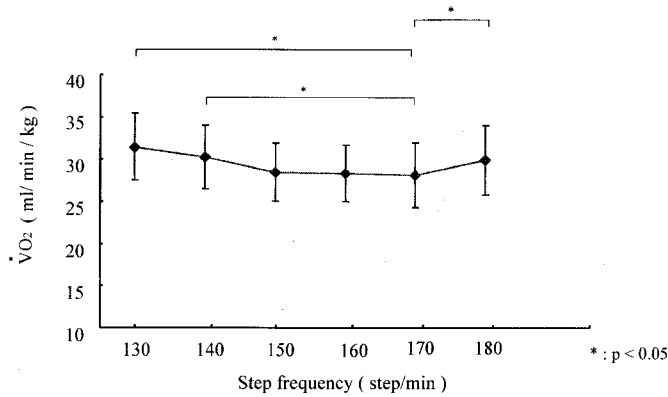


Fig. 1. Changes in oxygen intake with increases in the pace were expressed by a negative quadratic function in all subjects, indicating that there was an optimal pace that minimized the energy consumption.

Data are given as mean and standard deviation ($N=6$). Statistic analysis was significant between 170 steps/min and other running pace.

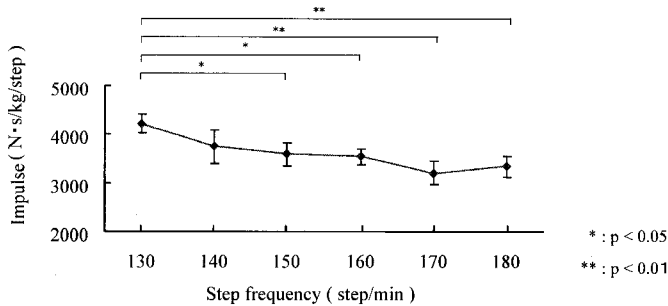


Fig. 2. Changes in impulse per step with increases in the pace.

Impulse per step significantly decreased with increases in the pace. Data are given as mean and standard deviation ($N=6$). Statistic analysis was used ANOVA.

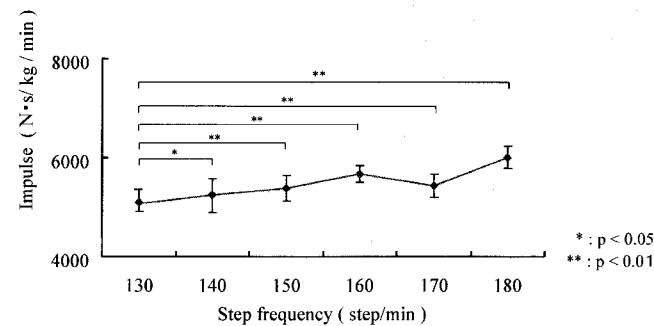


Fig. 3. Changes in impulse per minute with increases in the pace. Impulse per minute significantly increased with increases in the step frequency.

Data are given as mean and standard deviation ($N=6$). Statistic analysis was used ANOVA.

170 steps/min からの有意差を図に示した。ランニングピッチが遅い 130, 140 steps/min とランニングピッチが最も速い 180 steps/min で有意差が認められ、ランニングピッチが速すぎても遅すぎても

$\dot{V}O_2$ は増加する結果となった。

次に、各ピッチにおける 1 歩当たりの力積変化を図 2 で表した。1 歩当たりの力積はピッチの増加に伴って減少した ($4236.5 \pm 151.1 \sim 3227.9 \pm 127.1$

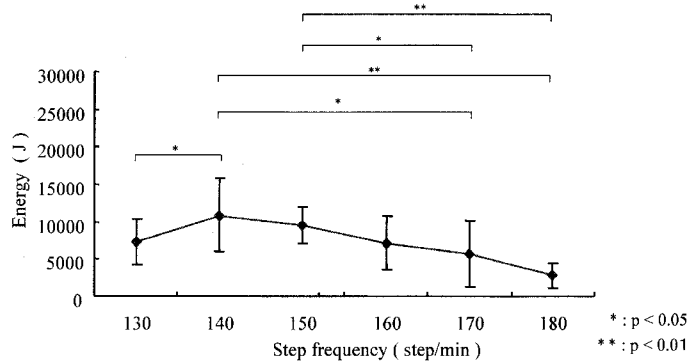


Fig. 4. Changes in external work per minute with increases in the pace.

External work per minute for lifting of the body in the vertical direction increased up to 130-140 steps/min, and then decreased. Data are given as mean and standard deviation ($N=6$). Statistic analysis was used ANOVA.

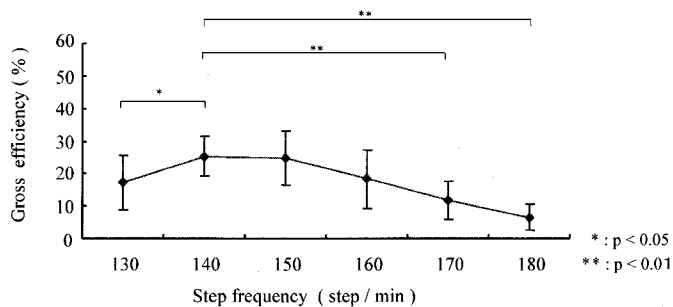


Fig. 5. Changes in gross efficiency with increases in the pace during running in place.

Gross efficiency peaked at 140 steps/min ($26.26 \pm 6\%$). Data are given as mean and standard deviation ($N=6$). Statistic analysis was significant between 140 steps/min and other running pace.

$N \cdot s/kg/step$)。130~150 steps/min までは減少傾向を示し、130 steps/min と 160, 170, 180 steps/min との間には有意差が認められた。

1 分間当たりの力積変化を図 3 で表した。1 分間当たりで表した力積はピッチの増加とともに有意に増加した ($5507.4 \pm 196.4 \sim 5810.2 \pm 228.8 N \cdot s/kg/min$)。力積は 1 歩当たりで表すとピッチ増に伴って減少し、1 分間当たりで表すとピッチ増に伴って増加する相反結果となった。

体重を鉛直方向へ持ち上げるときの 1 分間当たりの仕事量を図 4 で表示した。その外的仕事量は 130~140 steps/min まで有意に増加し ($7270.7 \pm 382.2 \sim 10812.7 \pm 469.3 J$)、その後減少した ($\sim 2759.2 \pm 429.7 J$)。増加後の減少では 140 steps/min と 170, 180 steps/min 及び 150 steps/min と 170, 180 steps/min のステージ間で有意差が認められた。

最後に、各ピッチにおける運動効率を図 5 に表した。各ピッチに対する運動効率は 140 steps/min で最大値 ($26.3 \pm 6\%$) をもつ正の 2 次関数的変化を示した。正の 2 次関数的な変化を確認するために最大値 140 steps/min からの有意差を図に示した。ランニングピッチが最も遅い 130 steps/min とランニングピッチが速い 170, 180 steps/min で有意差が認められ、ランニングピッチが速すぎても遅すぎても運動効率は減少する結果となった。

IV. 考 察

本研究では、その場駆け足運動においてエネルギー消費量が減少する至適ピッチの存在を確認するとともに、その場駆け足運動のランニングピッチを変化させたときの運動量の変化を力学的・生理学的両面から調べることを目的とした。そのためには測定項目を床反力、呼気ガス、ビデオ映像 (身体重心

が鉛直方向へ移動した距離)とし、分析項目を各ピッチの酸素摂取量、床反力からの力積、外的仕事量、運動効率とした。その結果、各ピッチの酸素摂取量は全被験者においてピッチ増に伴い負の2次関数的な変化を示した。この結果から、エネルギー消費量が減少する至適ピッチの存在が確認された。各ピッチにおける1歩当たりの力積はピッチの増加に伴って有意に減少し、1分間当たりで表した力積はピッチ増に伴って有意に増加した。そして、体重を鉛直方向へ持ち上げるときの1分間当たりの外的仕事量も130~140 steps/minまで有意に増加し、その後有意に減少した。力学的エネルギー(機械的仕事量)/生理学的エネルギー(酸素摂取量から算出したエネルギー消費量)で表した、各ピッチに対する運動効率は140 steps/minで最大値を持つ負の2次関数的変化を示した。これらの結果より、その場駆け足運動のランニングピッチの増加が単に運動強度を増すことにはならないことが示唆された。

本研究の結果、持久的能力が高いと思われるトライアスリートにおいて、各ピッチの $\dot{V}O_2$ はピッチ増に伴い、負の2次関数的変化を示した。これにより、その場駆け足運動においてエネルギー消費量の減少を伴う至適ピッチの存在が確認できた。その場駆け足運動のピッチと $\dot{V}O_2$ の変化については沢井³⁰⁾が160 steps/min、伊藤¹⁷⁾が144 steps/minで最小値を示したとの報告がある。本研究では150~170 steps/minの $\dot{V}O_2$ 値ではほとんどステージ間に差がないものの、170 steps/minにおいて最小値が得られた。この結果は先行研究と比べ、より高いstep/minで最小値を得たことになる。この違いの理由の一つには対象者の差異が挙げられよう。本実験で用いたトライアスロン選手は一般健常者に比べて、高い持久的能力を有すると思われる。この高い持久的能力(あるいは有酸素的作業能力)はより高い頻度においてのstep/minで $\dot{V}O_2$ を低くさせていたと思われる。特に本研究において150~170 step/minと幅広い範囲で有意に近似を示していたことは、持久的能力の高い選手における1つの特色とも考えられた。本研究の結果から、ランニングピッチを速くすると酸素摂取量が増加し運動負荷が増すことが予想されたが、150~170 steps/minまでの幅広い範囲での至適ピッチにおいて、酸素摂取

量の減少が明らかとなった。今回の全被験者はアスリートであることから、今後はさらに、一般の被験者を対象とすることが課題となった。

本実験ではその場駆け足運動を圧力盤上で行ったときの床反力を測定した。鉛直方向の床反力は単峰性の力曲線を示し、そのピーク値はどのピッチにおいても体重のおよそ3倍となり、先行研究^{13, 23)}と同様の結果となった。運動量を表すという床反力から算出した力積は、1歩当たりではピッチ増に伴って有意に減少した。しかし、1分間当たりで表した力積値はピッチ増とともに有意に増加を示した。ピッチがゆっくりのランニングでは1歩当たりの立脚期が長いために力積量は大きくなるが、1分間当たりでは歩数が少ないために力積量は小さくなる。すなわち、1歩当たりの力積値は立脚期時間に依存し、1分間当たりの力積値はピッチの速さ(歩数)に依存するということになる。実際の動作に置き換えると、ピッチが速いその場駆け足運動では1歩1歩の力積(運動量)は小さいが1分間のステップの回数を多く踏むことにより仕事量が大きくなる。また、ピッチが遅いその場駆け足運動では、1歩1歩の力積(運動量)は大きい1分間に踏むステップ回数が少ないことから、1分間当たりの力積(運動量)が減少する。

体重を鉛直方向へ持ち上げるときの1分間当たりの外的仕事量は130~140 steps/minまで有意に増加し、その後有意に減少した。その場駆け足運動の場合、ランニングのピッチが速くなると両脚遊脚期の時間が短くなるために跳躍高が低くなる²⁹⁾。そのために身体重心の移動が少なく外的仕事量は減少する。本実験においても同様の結果を得ている。しかし、四肢を速く動かさなくてはならず内的仕事量は増加する。重心を移動させるエネルギー(外的エネルギー)と四肢を動かすエネルギー(内的エネルギー)とでは、外的エネルギーの方がはるかに大きいことから^{27~29)}、ランニングピッチは比較的速い方が良いと考えられる。しかし、130~140 steps/minまでは1分間当たりの外的仕事量は有意に増加している。これは、跳躍高はほとんど変化せず、歩数だけが増加したと考えられた。この跳躍高が変化しなくなるゆっくりしたピッチでは片脚立脚期の身体重心が最小になったときに脚を曲げた状態で姿勢調節をしようとする時間が増加すると推

察できる。この結果から、速度が遅いと姿勢保持のための筋緊張を保持するためのエネルギーロスが増し、速い速度では筋が内部抵抗に対抗して短縮するためのエネルギーロスが増す形となり、このことは自転車作業時において至適ピッチが存在することと同様のメカニズムが考えられそうである。これは、ランニングピッチが遅すぎるまたは速すぎるときに酸素消費量が増加することの要因と考えることができる。

外的仕事量をエネルギー消費量で除した運動効率は 140 steps/min をピークに負の 2 次関数的変化を示した。歩行の場合と異なり走運動のエネルギー消費量は、スピードの増加に伴って直線的に増加する²²⁾。その直線の勾配は単位走行距離当たりのエネルギー消費量を意味していることから、スピードに関係なく走行の経済性は一定であるということがいえる。しかし、一定の速度で走るときには最も経済的なピッチとストライドが存在する⁷⁾。ヒトが普段何気なく歩いたり、走ったりするときを選択するテンポはエネルギーを最小にしようとするメカニズムが働くことから、だいたい決まっているといわれている。Cavagna et al.^{5, 6)} は機械的出力パワーと効率からウォーキングの至適ピッチを報告している。そのピッチは 1 秒間当たり約 2 歩である。また、Kaneko et al.¹⁹⁾ は効率からランニングの至適ピッチを報告している。そのピッチは 1 秒間当たり約 3 歩である。その場駆け足運動は一般のランニングと異なり進行方向の移動距離がない。そのため、至適ピッチが存在するならばその中間になるのではないかと推測する。本実験結果において、酸素摂取量が減少したピッチは 150~170 steps/min (1 秒当たり 2.5~2.8 歩) となり、運動効率が低い 140~150 steps/min では 1 秒間に 2.3~2.5 歩のピッチとなり、先行研究と比較して、本研究の対象者 (トライアスリート) においては、酸素摂取量及び効率においてランニングに近い至適ピッチ (2.3~2.8 歩/秒) を有していることになる。

本実験の結果、各テンポに対する酸素摂取量と外的仕事量及び力積の変化には相違が見られ、その場駆け足運動のランニングピッチの増加が単に運動強度を増すことにはならないことが示唆された。また、この変化の相違には弾性エネルギーの関与^{4, 14, 15)}があるものと考えられる。この要因には、筋腱複合体

に蓄積された弾性エネルギーが、エネルギー消費とは無関係にバネ的な作用をしていると説明されている³³⁾。最近ではこの筋腱複合体の動きを超音波診断装置でリアルタイムに撮像する研究¹²⁾も現れている。このような至適ピッチが存在する複雑なメカニズムについての検討は今後の課題としたい。さらに、一般の被験者を対象とした実験を行うことで現場に還元できる具体的な結果を導き出すことも重要と考える。

V. 要 約

本研究の目的はその場駆け足運動においてエネルギー消費量が減少する至適ピッチの存在を確認するとともに、その場駆け足運動のランニングピッチを変化させたときの運動量の変化を調べることであった。対象は N 大学トライアスロン部に所属する男性 6 名であった。本実験では 10 分間の休憩をはさみながら 5 分間 (定常状態を作るため) のその場駆け足運動を 6 回繰り返した。ストライドをゼロと仮定して、ピッチのみを変化させた。規定ピッチは 6 種類 (130, 140, 150, 160, 170, 180 steps/min)。測定項目は床反力、呼気ガス、ビデオ映像 (身体重心が鉛直方向へ移動した距離) などである。その結果は以下のように要約できる。

1. 各テンポの酸素摂取量は、全被験者においてテンポ増に伴い、170 steps/min を最小値 (28.1 ± 3.8 ml/min/kg) に持つ負の 2 次関数的な変化を示した。このことから、エネルギー消費量が減少する至適ピッチの存在が確認された。
2. 各テンポにおける 1 歩当たりの力積はテンポ増に伴って有意に減少した ($4236.5 \pm 151.1 \sim 3227.9 \pm 127.1$ N·s/kg/step)。しかし、1 分間当たりで表した力積はテンポ増とともに有意に増加した ($5507.4 \pm 196.4 \sim 5810.2 \pm 228.8$ N·s/kg/min)。そして、体重を鉛直方向へ持ち上げるときの 1 分間当たりの外的仕事量は 130~140 steps/min まで有意に増加し ($7270.7 \pm 382.2 \sim 10812.7 \pm 469.3$ J)、その後有意に減少した ($10812.7 \pm 469.3 \sim 2759.2 \pm 429.7$ J)。
3. 各テンポに対する運動効率は 140 steps/min で最大値 ($26.3 \pm 6\%$) を持つ正の 2 次関数的変化を示した。

以上より、その場駆け足運動のランニングテンポ

の増加が単に運動強度を増すことにはならないことが示唆された。

文 献

- 1) 阿江通良(1996): 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性特性. *Jpn. J. Sports Sci.*, **15**, 155-162.
- 2) Casaburi, R., Barstow, T. J., Robinson, T. and Wasserman, K. (1989): Influence of work rate on ventilatory and gas exchange kinetics. *J. Appl. Physiol.*, **67**, 547-555.
- 3) Cavegna, G. A., Saibene, F. P. and Margaria, R. (1964): Mechanical work in running. *J. Appl. Physiol.*, **19**, 249-252.
- 4) Cavagna, G. A. and Citterio, G. (1974): Effect of stretching on the elastic characteristics and contractile component of the frog striated muscle. *J. Physiol.*, **239**, 1-14.
- 5) Cavagna, G. A. and Franzetti, P. (1986): The determinants of the step frequency in walking in humans. *J. Physiol.*, **373**, 235-242.
- 6) Cavegna, G. A., Willems, P. A., Franzetti, P. and Detrembleur, C. (1991): The two power limits conditioning step frequency in human running. *J. Physiol.*, **437**, 95-108.
- 7) Cavanagh, P. R. and Williams, K. R. (1982): The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **14**, 30-35.
- 8) Claremont, A. D. (1986): The ability of instructors to organize aerobic dance exercise into effective cardiovascular training. *Phys. Sportsmed.*, **14**, 89-100.
- 9) Coast, J. R., Cox, R. H. and Welch, H. G. (1986): Optimal pedaling rate in prolonged bouts of cycle ergometry. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **18**, 225-230.
- 10) Conerly, M. and Smith, J. (1988): Energy cost of low-impact aerobic dance with and without handheld weights. *Abstract. Med. Sci. Sports Exerc.*, **20**(Suppl. 2), 89.
- 11) Foster, C. (1975): Physiological requirements of aerobic dancing. *Res. Quart.*, **46**, 120-122.
- 12) Fukunaga, T., Kubo, K., Kawakami, Y., Fukashiro, S., Kanehisa, H. and Maganaris, C. N. (2001): *In vivo* behavior of human muscle tendon during walking. *Proc. R. Soc. Lond. B*, **268**, 229-233.
- 13) フランシス, P., フランシス, L. (0000): ステップトレーニング. *Health Network*, **70**, 1-4.
- 14) Hill, A. V. (1922): Maximum work and mechanical efficiency of human muscles and their most economical speed. *J. Physiol.*, **56**, 19-41.
- 15) Hill, A. V. (1964): The efficiency of mechanical power development during muscular shortening and its relation to load. *Proc. R. Soc. B*, **159**, 319-324.
- 16) Igbanugo, V. and Gutin, B. (1978): The energy cost of aerobic dancing. *Res. Quart.*, **49**, 308-315.
- 17) 伊藤 章, 淵本隆文, 金子公宥(1984): その場かけ足運動における筋のエネルギー出入力特性. *大阪体育大学紀要*, 9-15.
- 18) 金子公宥(1988): パワーアップの科学, 朝倉書店.
- 19) Kaneko, M., Matsumoto, M., Ito, A. and Fuchimoto, T. (1987): Optimum step frequency in constant speed running. *Bio-mechanics X-B. Human Kinetics Publ.*, pp. 803-805.
- 20) Komi, P. V. and Bosco, C. (1978): Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and woman. *Med. Sci. Sports*, **10**, 261-265.
- 21) Margaria, R., Cerretelli, P., Aghemo, P. and Sassi, G. (1963): Energy cost of running. *J. Appl. Physiol.*, **18**, 367-370.
- 22) Margarita, R. (1968): Positive and negative work performance and their efficiencies in human locomotion. *Int. Z. Angew. Physiol.*, **25**, 339-351.
- 23) Mark, D. R. and Steve, V. (1990): Comparison of impact force in high and low impact aerobic dance movements. *Int. J. Sport Biomechanics*, **6**, 67-77.
- 24) Otto, R. M. (1986): The energy cost of low impact and high impact aerobic dance exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **18**, S23.
- 25) Otto, R. M. (1988): The metabolic cost of multidirectional low impact and high impact aerobic dance. *Abstract. Med. Sci. Sports Exerc.*, **20**(Suppl. 2), 88.
- 26) Rockefeller, K. A. and Burke, E. J. (1979): Psycho-physiological analysis of an aerobic dance programme for women. *British J. Sports Med.*, **13**, 77-80.
- 27) 桜井伸二(1980): 走運動中に身体がもつ機械的エネルギーの変動と走運動中の人体の機械

- 的効率. 体育の科学, **30**, 928-932.
- 28) 桜井伸二 (1982): 走る—機械的エネルギー変動からみたその特質. *Jpn. J. Sports Sci.*, **1-4**, 275-290.
- 29) Sakurai, S. and Miyasita, M. (1983): Energetics of running in humans. *Biomechanics VIII-B*, pp. 629-634.
- 30) 沢井史穂 (1990): エアロビックダンスのその場かけ足. *Jpn. J. Sports Sci.*, **9**, 215-221.
- 31) 沢井史穂 (1990): 異なるピッチでのその場かけ足運動中の運動強度. 日本バイオメカニクス学会編, *ジャンプ研究*, pp. 182-187.
- 32) Seabury, J. J., Adams, W. C. and Ramey, M. R. (1977): Influence of pedaling rate and power output on energy expenditure during bicycle ergometry. *Ergonomics*, **20**, 491-498.
- 33) Taylor, C. R. (1977): The energetics of terrestrial locomotion and body size in vertebrates. In: *Scale Effects in Animal Locomotion* (Pedley, T. J. ed.), Academic Press, London.
- 34) Weber, H. (1974): The energy expenditure of aerobic dancing. *Fitness for Living*, **8**, 26-30.
- 35) Whipp, B. J., Makler, M. (1980): Dynamics of pulmonary gas exchange during exercise. In *Pulmonary Gas Exchange* (West, J. B. ed). Vol. 12, Academic Press, New York, pp. 33-96.
- 36) Willford, H. N. (1988): The energy cost of different intensities of high and low-impact aerobic dance. *Abstract Med. Sci. Sports Exerc.*, **20**(Suppl. 2), 88.
- 37) Yoke, M. (1988): The metabolic cost of two differ low impact aerobic dance dance exercise modes. *Abstract Med. Sci. Sports Exerc.*, **20**(Suppl. 2), 88.
- 38) 吉岡伸彦, 仲丸幸子, 津久浦慶郎, 武藤芳照, 宮下充下 (1986): 換気閾値からみたエアロビックダンスの運動強度. *Jpn. J. Sports Sci.*, **5**, 415-420.