

DB

332

2001

HG

博士論文

持久走における筋力・筋パワーからみた
脚筋疲労に関する研究

平成13年度

三本木 温

筑波大学

03006578

寄贈
三本木
温氏

目次

目次

関連論文

表のタイトル一覧

図のタイトル一覧

I. 緒言	1
II. 文献研究	5
1. 持久的運動に伴う骨格筋の変化に関する研究	5
2. 持久的運動に伴う神経・筋機能の変化に関する研究	7
3. 筋疲労のメカニズムに関する研究	10
4. 走運動の特性に関する研究	14
5. 持久走による疲労に関する生理学的, バイオメカニクス 的研究	18
6. 長距離走レースの成績を決定する要因に関する研究	20
7. 筋力・筋パワートレーニングが持久走の成績に及ぼす 影響に関する研究	23
III. 本研究の目的および課題	26
1. 研究目的	26
2. 研究課題	27
IV. 研究の意義, 仮説, 限界および用語の定義	28
1. 研究の意義	28
2. 研究上の仮説	28
3. 研究の限界	28
4. 用語の定義	29

V. マラソンレースにおける走速度の低下と筋力・筋パワーの 低下との関係（実験1：研究課題1，2）	32
1. 緒言	32
2. 方法	33
3. 結果	38
4. 考察	42
5. 要約	49
VI. リバウンドジャンプから見た持久走による脚筋疲労 （実験2：研究課題1，2）	52
1. 緒言	52
2. 方法	53
3. 結果	59
4. 考察	67
5. 要約	71
VII. マラソンレースによる走の経済性，走動作および筋力・ 筋パワーの変化の相互関係（実験3：研究課題2，3）	73
1. 緒言	73
2. 方法	74
3. 結果	76
4. 考察	82
5. 要約	88
VIII. 筋力・筋パワートレーニングが有気的能力およびマラソン レースの成績に及ぼす影響（実験4：研究課題4）	90
1. 緒言	90
2. 方法	91
3. 結果	94
4. 考察	103

5. 要約	110
IX. 討論	112
1. 持久走による脚筋疲労を筋力・筋パワーを基にして評価 することの意義	112
2. 持久走における筋力・筋パワーの役割	118
3. 持久走における筋力・筋パワートレーニングの位置づけ	121
4. 今後検討すべき課題	124
X. 総括	126
1. 研究目的	126
2. 研究課題	126
3. 研究の概要	126
XI. 結論	134

謝辞

参考文献

本論文は、以下に示した論文に未発表の実験結果を加えてまとめられたものである。

三本木温，佐伯徹郎，岡田英孝，高松 薫（1999）リバウンドジャンプから見た持久走による脚筋疲労．バイオメカニクス研究， 3：86-94.

三本木温，佐伯徹郎，山本泰明，鍋倉賢治，高松 薫（2000）マラソンレースにおける走速度の低下と筋力および筋パワーの低下との関係．体育学研究， 45：503-512.

表のタイトル一覧

V. マラソンレースにおける走速度の低下と筋力・筋パワーの低下との関係 (実験1：研究課題1, 2)

Table 5-1 Body weight and muscular strength and power before and after the marathon race.

Table 5-2 Correlation coefficients between average running speed in the marathon race, and muscular strength and power and aerobic ability.

Table 5-3 Subjective fatigue scale in body regions estimated immediately after the marathon race.

VI. リバウンドジャンプから見た持久走による脚筋疲労 (実験2：研究課題1, 2)

Table 6-1 The characteristics of the subjects.

VII. マラソンレースによる走の経済性, 走動作および筋力・筋パワーの変化の相互関係 (実験3：研究課題2, 3)

Table 7-1 Body weight, running economy, running mechanics and muscular strength and power before and after the race.

Table 7-2 Correlation coefficients among relative changes of running economy and running mechanics, and muscular strength and power before and after the race.

Table 7-3 Comparisons in the changes of running economy and running mechanics, and muscular strength and power before and after the race between Keep group and Down group according to the change of running speed in the race.

VII. 筋力・筋パワートレーニングが有気的能力およびマラソンレースの成績に及ぼす影響（実験4：研究課題4）

Table 8-1 Anthropometric characteristics, muscular strength and power, and aerobic abilities before and after the experimental period.

Table 8-2 Body weight, and muscular strength and power before and after the marathon race.

図のタイトル一覧

V. マラソンレースにおける走速度の低下と筋力・筋パワーの低下との関係 (実験1：研究課題1, 2)

Fig. 5-1 Body regions for estimating subjective fatigue scale after the marathon race.

Fig. 5-2 Relative changes of body mass and muscular strength between before and after the marathon race.

VI. リバウンドジャンプから見た持久走による脚筋疲労 (実験2：研究課題1, 2)

Fig. 6-1 Arrangement of the experimental equipments.

Fig. 6-2 The method for computation of joint torque, power and work done by the ankle, knee and hip joints.

Fig. 6-3 The change of running speed during the long distance running.

Fig. 6-4 Changes of body weight, heart rate, blood lactate and RPE during the long distance running.

Fig. 6-5 Changes of jumping height, contact time and 5RJindex of 5RJ during the long distance running.

Fig. 6-6 Changes of absolute work done by ankle, knee and hip joint, and the relative work (the ratio of work done by each joint to total work) in 5RJ during the long distance running.

Fig. 6-7 Relationships between percent change of jumping height, contact time and 5RJindex of 5RJ and percent change of RPE during the long distance running.

Fig. 6-8 Typical examples for relative work done by the ankle, knee and hip joints of 5RJ before and after the long distance running.

VII. マラソンレースによる走の経済性、走動作および筋力・筋パワーの変化の相互関係（実験3：研究課題2，3）

Fig. 7-1 Time courses of $\dot{V}O_2$ during submaximal treadmill running before and after the race.

Fig. 7-2 Relative changes of body weight, running economy and running mechanics, and muscular strength and power before and after the race.

VIII. 筋力・筋パワートレーニングが有気的能力およびマラソンレースの成績に及ぼす影響（実験4：研究課題4）

Fig. 8-1 Relative changes of anthropometric characteristics before and after the experimental period.

Fig. 8-2 Relative changes of muscular strength and power before and after the experimental period

Fig. 8-3 Relative changes of aerobic abilities before and after the experimental period

Fig. 8-4 Average running speed, average running speed of first and second halves, and relative change of running speed.

Fig. 8-5 Relative changes of body weight, and muscular strength and power before and after the marathon race.

I. 緒言

持久的な歩、走運動は、ウォーキング、ジョギングなどとも呼ばれており、ヒトが二足で移動するようになってから最も身近な運動様式となっている。1997年に総理府が行った世論調査（総理府，1997）によると、対象者のうち、最近1年間に余暇活動としてランニング（ジョギング）を行った者は7.7%、ウォーキングを行った者は31.8%にのぼっている。現在では日本国内で多くのマラソン大会が開催され、その数は主なものだけで1997年には1200を越えており（ランナーズ，1997）、多くの参加者を集めている。このように、持久走が多くの人々に受け入れられている理由としては、場所、費用などの制約が比較的少ないこと、運動時間、強度および頻度などを自分でコントロールしやすいことなどが考えられる。しかしこの反面、持久走が原因となって障害を引き起こす者も多く（山下，1990）、その原因としては、誤ったトレーニング法や身体のケア不足などがあるものと推察される。今日ではスポーツは限られた一部の人々だけではなく、「生涯スポーツ」として国民の多くが参加するものとして考える機運が高まっており（日本体育協会，2001）、幅広い競技水準を対象とした持久走競技のトレーニング方法を開発することは、意義のあることと考えられる。

これまでマラソン、トライアスロンあるいは自転車ロードレースなどの持久的競技スポーツの成績は、最大酸素摂取量や無酸素性作業閾値などの有気的能力によって決定されると考えられてきた（Sjödín and Svedenhag, 1985）。これに対して近年、多くの研究において持久的競技成績と脚の筋力や筋パワー（以後「筋力・筋パワー」とする）との間に相関関係が認められ、筋力・筋パワーが持久的競技成績の優劣に影響

する可能性が指摘されている。しかし、その理由については、これまで十分に明らかにされていない。

ところで、持久的運動中においては、外的な負荷強度が一定であっても、体内環境は一定ではなく、体温の上昇（Maron et al., 1977）、筋グリコーゲンの減少（Costill, 1973）、体水分量の減少（Maron et al., 1977）などの変化が、時々刻々と起こっている。この結果、酸素摂取量（Henson et al., 1989）、心拍数（鍋倉ら, 1988）および血中乳酸濃度（Scheen et al., 1981）などが上昇することが知られている。これらは身体の疲労を助長する要因とされており、運動中のエネルギー需要量を増加させたり、不快感や痛みなどを増幅させて運動中止に陥る原因となる。マラソンレースなどの持久的競技では、長時間にわたり発揮し続けることのできるパワーの高さが競技成績を決定するので、各競技運動における特異的な疲労の原因を把握し、それらを克服するためのトレーニングを実施する必要がある。また、健康・体力づくりを目的とした持久的運動を無理なく実施するためには、運動強度だけではなく経時的な身体諸機能の変化も考慮に入れた上で、ねらいに応じた適正な運動負荷を設定する必要がある。

一方、持久的運動は運動中あるいは運動後に筋力・筋パワーの低下を引き起こすこと（Margaria, 1966）、その低下は運動強度の増加や持続時間の延長とともに著しくなること（Sargeant and Dolan, 1987; Ferretti et al., 1987）が知られている。これまでに、長距離走レースのレース後半にかけて疲労とともに走フォームの変化が認められたり（Williams et al., 1991b）、走の経済性が低下する（Nicol et al., 1991c）ことが報告されており、疲労に伴う筋力・筋パワーの低下が持久的な運動の持続に悪影響を及ぼす可能性がある。高松（1992）は、体力トレーニング法を確

立する場合の観点として、エネルギー供給系の種類、運動様式、用いる身体の部位、力とスピードの大きさおよび筋の収縮様式を考慮することの重要性を指摘している。しかし、筋疲労に関する研究においては、どの運動によってどの部位の筋力・筋パワーが低下するのか、といった運動様式の特異性が考慮されることは少ない。運動様式が異なれば主働筋およびその収縮様式も異なるので、持久的運動中の筋力・筋パワーの低下に特異性が存在するものと予想される。歩、走、跳など各種基本運動の特性について検討した研究においては、被験者が疲労していない状態で各種の測定を行う場合が多く、各種運動の特性が経時的にどのように変化するのかについては必ずしも明らかにされていない。さらに歩行、走行においては、主働筋が伸長－短縮という動きを規則的に繰り返す。このような運動は伸長－短縮サイクル（Stretch-shortening cycle, SSC）運動（Komi, 1992）と呼ばれる。SSC運動では、コンセントリック、あるいはエキセントリックな筋収縮のみからなる運動とは異なる性質をもつこと（Thys et al., 1975 ; Cavagna et al., 1977）が知られているが、長時間のSSC運動における疲労に関する研究は少ないことが知られている（Komi, 1992）。

現代社会に生きる日本人は、産業構造の変化、生活のさまざまな面における省力化および交通機関の発達などによって身体活動量が大幅に減少していると言われる。江戸時代においては東海道を旅する人々の平均歩行距離は1日に約40kmであったとされ、現在においてもアフリカの狩猟民族は1日に20km近く徒歩で移動すると言われる（今野, 1983）。これに対して、波多野（1979）の調査によると、バス通勤のサラリーマンでは、1日の歩行距離が約4km、車で通勤するサラリーマンでは約1.5kmであった。20年以上たった今日においてもこのような活動量減少

の傾向はいつそう進んでいるものと推察され、多くの者が運動不足状態にあると考えられる（総理府，1997；厚生省，2000）。したがって、余暇時間を利用して持久走を行う者の目的の多くは、運動不足の解消や健康・体力づくりおよびストレス解消などであると考えられる。また、慢性的な運動不足は、肥満、筋力低下による関節痛および呼吸循環系機能の低下などの運動不足病とも呼ばれる状態を誘発し（大柿，1982），これらと食生活の欧米化とがあいまって、虚血性心疾患，脳血管疾患および糖尿病などの生活習慣病を引き起こす要因の一つとなることが明らかになっている（厚生省，1997）。このために、生活習慣病の一次予防および症状を軽減するための運動療法として持久的運動が推奨されている（ACSM，1995；厚生省，1997）。したがって、健康体力づくり，余暇活動および疾病予防の手段として，各人の特性および目的に応じていつでもどこでも手軽に実施できる持久的運動プログラムを開発することは意義深いと考えられる。

以上のことから，持久走における筋力・筋パワーの低下の特徴，およびそれが持久走遂行に及ぼす影響を明らかにすることは，持久走競技における合理的なトレーニング手段を開発する際にも，また健康・体力づくり，あるいは運動療法としての持久走を安全かつ効果的に行うためにも有用な知見を提供するものと考えられる。

II. 文献研究

1. 持久的運動に伴う骨格筋の変化に関する研究

ヒトの骨格筋は、すばやく大きな力を発揮できるが疲労しやすい速筋線維と、大きな力は発揮できないが疲労しにくい遅筋線維の2種類に大別される。これらの筋線維は数本から数百本ごとに1本の運動神経線維により支配されて同時に活動を行う。これを運動単位という。運動単位には、持久的な力発揮に優れるS型と高い張力を発揮できるFF型、および両者の中間型であるF、FS型の4種類があり、運動を行う時の力、速度、時間などにより、それらが選択的に動員されている (Sale, 1987)。

Walmsley et al. (1978) は、ネコを用いて様々な運動中の腓腹筋の運動単位の活動状態を調べた。その結果、立位ではS型の運動単位のみが活動し、歩行、走行、跳躍と、より大きな力発揮が要求される運動ほど、F型の運動単位が活動するようになることを報告した。Vøllestad and Blom (1985) は、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\text{max}$) の50~100%に相当する運動強度での自転車ペダリング中の筋線維の動員率について、外側広筋から得た標本中の筋グリコーゲンの減少率をもとにして推定している。その結果、1) 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動強度では遅筋線維のほとんどが活動するが、速筋線維はほとんど活動しない、2) 75% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動強度では速筋線維のなかでも疲労耐性の高い筋線維が活動するようになり、3) 100% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動強度ではほぼすべての筋線維が活動すると推定した。これらのことは、ジョギングなどの強度の低い走行中には、遅筋線維が主として動員され、それよりも強度の高い走行中には速筋線維も参画するようになることを示唆するものである。

持久的運動は骨格筋に様々な変化をもたらすことが知られている。Costill et al. (1973) は、9名の男性長距離走者を対象にして30km走後に外側広筋から筋標本を得て、筋組織に含まれるグリコーゲンおよびトリグリセライドが大幅に減少したことを認め、持久的運動においては筋内に貯蔵したエネルギー源が大量に消費されることを示唆した。Saltin and Karlsson (1971) は、30~120% $\dot{V}O_2$ maxの運動強度で疲労困憊にいたるまで自転車ペダリング運動を行わせ、運動前、中、後における大腿四頭筋のグリコーゲン含量を測定した。その結果、75% $\dot{V}O_2$ max強度での90分間の運動が最も筋内のグリコーゲンを枯渇させることを示し、エネルギー源枯渇のパターンは、運動強度によって異なることを示唆した。

また持久的運動は、骨格筋線維の構造に変化を生じさせることが知られている。Hikida et al. (1983) は、マラソンレースを走った10名の男性から採取した腓腹筋標本を観察した結果、筋線維の壊死、ミトコンドリアなど細胞内小器官の細胞外への流出、食細胞の増加などが認められたことを報告した。Appell et al. (1992) は、ラットに1 km/hの速度で1時間のトレッドミル走を行わせ、直後にひらめ筋を摘出して分析した。その結果、平地を走らせた群ではグリコーゲンの枯渇やリソゾームの空胞化などエネルギー源の枯渇に伴う現象が認められ、下り坂を走らせた群では、筋原線維の浮腫やZ線の消失などの筋損傷の形跡が認められたことを報告した。このことは、筋にエキセントリックな負荷がかかるときには、収縮する筋線維1本あたりのストレスが高まり、筋線維の損傷が起こりやすいことを示唆するものと考えられる。また、Nuviala et al. (1992) は、マラソンレースに参加した9名の男性を対象にして、レース後の血清を分析した。その結果、ゴールの24時間後に骨格筋由来の酵素であるクレアチンキナー

ゼの活性が安静時の4倍まで上昇したことを報告した。同様に、Farber et al. (1991) は、競技時間が12時間以上になるトライアスロンレースに参加した19名の男性を対象にして、レース中およびレース後の血清を分析した結果、クレアチンキナーゼと乳酸脱水素酵素の活性がレースの翌日には、レース前の20倍に増加したことを認めた。これは、持久的運動によって骨格筋がダメージを受けた結果、骨格筋内の酵素が血液中に浸出したものと考えられている。これらのことは、持久的運動によって骨格筋が大きなストレスにさらされ、時には損傷を受けることを示唆するものである。

2. 持久的運動に伴う神経・筋機能の変化に関する研究

持久的運動による骨格筋の構造的な変化は、その機能にも影響を及ぼすことが知られている。フィールドテストの結果をみると、Viitasalo and Komi (1982) は、85kmクロスカントリースキーレースの参加者を対象にしてレース前後に筋力を測定した。その結果、アイソメトリックな最大筋力や力発揮速度がレース後に有意に低下したことを示した。Sherman et al. (1984) は、フルマラソン完走後には等速性の膝伸展筋力がレース後に大幅に低下したことを認めた。Chevrolet et al. (1993) も同様に、フルマラソンおよびハーフマラソン走行後に下腿三頭筋のアイソメトリックな筋力を測定し、マラソンレース後に最大筋力が低下したことを報告した。Nicol et al. (1991a) は、9名の持久的競技者にフルマラソンを走らせ、その間10kmおきに反動付き垂直跳び、50cmの高さからのドロップジャンプ、立ち5段跳び、30mスプリント走を行わせた。その結果、マラソンレース後にはレース前に比べて反動付き垂直跳びとドロップジャンプの跳躍高、立5段跳びの跳躍距離、スプリント走の最大速度が有意に低下したことを

認めた。これらのことは、持久的競技により、脚の筋力・筋パワーが大きく低下することを示唆するものである。

一方、ラボラトリーテストにおいても、持久的運動がその後の筋出力に及ぼす影響について検討されている。Margaria et al. (1966) は、持久的な踏み台昇降運動後に、階段昇り走時の最大無氣的パワーが低下することを認めた。Sargeant and Dolan (1987) は、98% $\dot{V}O_2$ maxの運動強度で6分間の自転車ペダリング運動を行わせ、その直後に全力ペダリングによるピークパワーを測定した結果、運動前の70%以下の水準まで低下したことを認めた。Capelli et al. (1993) は、50~80% $\dot{V}O_2$ max強度での自転車ペダリング運動を疲労困憊に至るまで行わせ（持続時間20~40分）、その間に最大努力のペダリング運動を行わせる方法で、最大下の持久的運動がピークパワーに及ぼす影響を検討した結果、ピークパワーが段階的に減少したことを報告した。Sahlin and Seger (1995) は、75% $\dot{V}O_2$ maxの運動強度で平均85分間の自転車ペダリング運動を行わせた後に、アイソメトリックな最大膝伸展運動を行わせた結果、最大筋力は有意に低下し、弛緩時間は有意に延長することを報告した。動物の骨格筋から摘出した単一筋線維においても、持続的収縮後に張力の低下が認められていることから (Fitts and Holloszy, 1978)、持久的運動によって、骨格筋の収縮機構に変化が生じて発揮張力の低下が起こり、その低下の程度は運動強度や持続時間に比例して大きくなるものと示唆される。しかし、これまでの研究では、持久的運動による筋力・筋パワーの低下が、主働筋においてどの部位においても等しく起こるのか否か（問題1）、あるいは運動中にどのようなタイムコースを経て起こるのか（問題2）、などについては十分に検討されていない。

持久的運動後の筋機能の変化については、筋電図からも検討されている。Nicol et al. (1991b) は、7名の被験者にフルマラソンを走らせ、その前後に、アイソメトリックな脚伸展運動を最大および最大下努力で行わせ、その時の外側広筋における筋電図を測定した。そして筋放電量の積分値が、最大筋力発揮時には減少し、最大下レベルでの同一の力発揮時には増加したことを認めた。Takaishi et al. (1994) は、75% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動強度による20分間の自転車ペダリング運動中に、脚筋から筋電図を導出し、単位時間当たりの平均筋放電量が漸増することを認めた。同様の結果はdeVries et al. (1982) によっても報告されている。また、Moritani et al. (1985) は、持続的なアイソメトリック収縮を行わせた時に、筋電図波形の周波数が漸減することを認めた。筋放電の徐波化は筋の疲労に伴う運動単位の動員パターンの変化や神経伝導速度の変化を反映すると考えられるので、このことは同一レベルの力発揮であっても運動単位の動員の状態が経時的に変化していることを意味する。これらのことは、持久的運動による筋機能の変化が、筋の収縮機構だけではなく神経から骨格筋への出力の段階でも起こることを示唆するものである。

SSC運動は、コンセントリックのみの収縮活動に比べて収縮局面に発揮する力が増大する (Cavagna et al., 1977) こと、あるいは機械的効率が高くなる (Thys et al., 1975) ことから、単一の収縮様式からなる運動とは異なる特性をもつことが知られている。このため、持久的なSSC運動における筋疲労には独特の現象がみられることが知られている。Bosco et al. (1986) は、持久的な連続ジャンプ中の地面反力の変化を観察し、疲労とともにジャンプ中の弾性エネルギーの利用度が低下することを示唆した。Nicol et al. (1991a) は、前述のようにマラソンレース後にドロップジャ

ンプ、スプリント走などの最大努力によるSSC運動のパフォーマンス低下を認め、その時の着地（接地）局面の前半、すなわち主働筋がエキセントリックな収縮を行う局面における地面反力の波形が顕著に変化したことを認め、主働筋による着地時の衝撃吸収が十分に行えなくなったことを示唆した。Gollhofer et al. (1987ab) も、特製のそりを用いた上肢によるSSC運動を疲労するまで行わせた結果、踏み切り局面の前半における力の波形が、より急峻に立ち上がり、その直後から急激に減少することを認めた。同時に、主働筋から導出した筋電図の変化から、着地時に筋がすばやく衝撃を受け止めるように活動することができなくなっていたことを示唆した。また、Horita (1996) は、Gollhofer et al. (1987ab) と同様のそり装置を用いて脚によるドロップジャンプを疲労するまで行わせ、その時の関節トルクと関節角度との関係から踏切動作中の瞬時のstiffnessを求めた。その結果、エキセントリック局面におけるstiffnessが著しく低下したことを報告した。これらのことから、持続的なSSC運動においては、運動前半局面において衝撃を吸収して、後半におけるコンセントリック収縮によるパワーを増大させることが困難となるような特有の変化が起こっていることを示唆するものである。

3. 筋疲労のメカニズムに関する研究

これまで述べてきたように、長時間にわたって運動を持続させたり、高強度の運動を行わせると、最大筋力や収縮の効率は低下することが知られている。これは一般に筋疲労と呼ばれている (Edwards, 1981)。随意的な筋収縮は多くの過程を経て発現するために、筋疲労が起こる原因についても多くの可能性が提示されている (Fitts, 1994)。筋疲労の要因は、一

般に中枢性の要因と末梢性の要因とに大別される。中枢性の要因としては、大脳皮質への興奮入力、下位の運動ニューロンへの興奮伝達、運動ニューロンの興奮水準、シナプス結合部位での活動電位伝達などがあげられ、末梢性の要因としては、神経筋接合部での伝達、筋細胞膜の興奮度、筋小胞体の機能などがあげられている (Bigland-Ritchie, 1981)。このように、筋疲労を引き起こす要因は数多いが、筋疲労の原因を考える際には、それを引き起こす運動強度と持続時間を考慮することが重要である。これまでの研究結果から、90% $\dot{V}O_2\text{max}$ 以上の運動強度では乳酸の産生によるアシドーシス、クレアチンリン酸 (CP) の分解による無機リン (Pi) の蓄積、60~90% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動強度では筋グリコーゲンの枯渇、60% $\dot{V}O_2\text{max}$ 以下の運動強度では痛み、脱水、体温上昇、低血糖、血中アンモニア濃度の上昇などによる中枢神経系の抑制が筋疲労の主な原因になると考えられている (Sahlin, 1992 ; 森谷, 1992 ; Sahlin et al., 1988)。

高強度運動においては、そのエネルギーの供給は主としてクレアチンリン酸の分解や無氣的解糖により行われる。Karlsson et al. (1972) は自転車ペダリング運動を用いた研究から、運動強度が高まるにつれて筋内のアデノシン 3 リン酸 (ATP) やCPの含有量が低下すること、特にCP含有量の低下は、100% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の運動後では安静時の25%以下になることを認めた。Fitts and Holloszy (1978) は、カエルの筋を電気刺激して、その張力とATP、CP、乳酸を連続的に測定した結果、張力の低下とCPの減少、乳酸の増加が同期して起こることを認めた。ヒトについても同様に発揮張力と筋のCP濃度とが平行して変化することが認められている (Sahlin and Ren, 1989)。また、ATP、CPの減少に伴うアデノシン 2 リン酸 (ADP) やPiの増加は、筋線維のアクチンフィラメントの活性を低下させる

ことが知られている (Donaldson and Hermansen, 1978) . さらに, 水素イオン (H^+) の増加は解糖系酵素活性の阻害, 筋小胞体におけるカルシウムイオン (Ca^{2+}) 放出の抑制, アクチンフィラメントの活性の低下, 筋細胞膜の興奮性の低下を引き起こして, 筋収縮へ悪影響をもたらすことが知られている (Metzger and Moss, 1990 ; Favero et al., 1997) . したがって, 高強度運動においては, 主としてリン酸化合物の減少やpHの低下と H^+ の増加が, 筋張力の低下をもたらすものと推察される. なお, 高強度運動中に産生されるイノシン 1 リン酸 (IMP) とアンモニア (NH_3) も筋収縮に悪影響をもたらす可能性が示唆されている (Sahlin, 1992) .

運動強度の低い持久的運動においても, 筋のCP濃度の低下と筋力の低下との間に一定の関係が認められている (Sahlin et al., 1997) . しかし, 持久的運動においては, 血中および筋中の乳酸はそれほど増加しないことが知られているので (Karlsson et al., 1972) , 必ずしも代謝物質の蓄積が原因となって筋疲労は起こらないものと考えられる. 持久的運動における筋疲労の原因としては, 血糖や筋グリコーゲンの減少・枯渇が指摘されている. 脳は血糖のみをエネルギー源として利用するので, 血糖値の低下は大脳中枢の興奮性を低下させる可能性がある (Coyle et al., 1986) . また, 筋グリコーゲンの減少は, 筋の興奮収縮連関においてATPを消費して行うあらゆる過程 (T管の脱分極, 筋小胞体による Ca^{2+} の放出と取り込みの機能, クロスブリッジの形成) に影響を及ぼす (Vøllestad et al., 1988 ; Donaldson, 1989) . しかし, Fitts et al. (1982) はラットに長時間の水泳を行わせた後, ひらめ筋, 長指伸筋, 外側広筋表層の3つの筋についてグリコーゲン濃度と収縮特性について分析した結果, すべての筋においてグリコーゲン濃度が減少していたのに対して, 収縮張力の低下は外側広

筋では起こらなかったことを認めた。この結果から、必ずしも収縮張力の低下がグリコーゲンの枯渇によって起きているわけではないことが示唆される。また、持久的運動中には活動筋で NH_3 が産生されるが、それによりミトコンドリアにおける酸化的リン酸化が抑制されることが知られている (MacLaren et al., 1989)。また NH_3 やトリプトファンが血液を通して脳に達して、中枢神経の興奮性を抑制する可能性が指摘されている (Bianchi et al., 1997)。その他、持久的運動中に起こり得る筋疲労の原因としては、発汗に伴う脱水 (森本, 1993)、体温上昇 (Edwards et al., 1972) および持続的な筋収縮によるカリウムイオンの細胞外への流出 (McKenna, 1992; Verburg et al., 1999) などが考えられている。

先に述べたように、持久的運動は主働筋を損傷させることがあり、そのことが筋張力の低下につながる可能性が示唆されている (Fitts, 1994; Horita et al., 1999)。しかし、Belcastro et al. (1988) や Willems et al. (1999) は、筋原線維の損傷が筋張力の低下とは無関係であることを報告しており、収縮要素の損傷が必ずしも筋疲労を引き起こす原因になるわけではないことを示唆している。筋損傷による張力低下の原因として、ミトコンドリア (Gollnick et al., 1990) および筋小胞体 (Lannergren et al., 1990) の変性あるいは細胞外への流出などがあげられているが、現在でも筋損傷それ自体が筋疲労と関係があるのか否かについては、明確にされていない。

前述したように、持続的なSSC運動においては、着地時に衝撃を吸収して後半のコンセントリックな局面での力を増加させる能力が損なわれる可能性がある。また、エキセントリックな筋収縮を繰り返すことによって titinなどで構成される筋骨格構造のコンプライアンスが変化することが知

られており (Horita et al., 1999), このことがSSC運動の特徴である弾性エネルギーの貯蔵と再利用に悪影響を及ぼす可能性がある。一方, Gollhofer et al. (1987b) は, 上肢によるSSC運動を全力で連続100回行わせた時の地面反力と筋電図を測定し, 踏み切り局面の前半における力の波形が, より急峻に立ち上がり, その直後から急激に減少することを認めた。この原因として, 彼らはアシドーシスなどによる筋の収縮力の低下および伸張反射興奮性の増大を示唆している。また, Hortobagyi et al. (1991) は, 50回連続のドロップジャンプを行わせた後に膝蓋腱反射の興奮性が増大したことを報告した。同様に, Hortobagyi et al. (1996) も等速性の足底・背屈運動を疲労するまで行わせた時に, 脊髄反射の興奮性が増大したことを認めている。しかし, Nicol et al. (1996) は, 疲労困憊に至るまでSSC運動を行わせた後, 数日間にわたって伸張反射の興奮性が低下したとしており, 一致した見解が得られていない。伸張反射の有効利用は, SSC運動における筋出力増大のための重要な一つの要因であり, その変動が持久的なSSC運動における筋パワーの低下に影響している可能性がある。伸張反射の興奮性が変化する原因としては, 求心性神経線維内環境のアシドーシス (藤埴, 1979) や筋損傷に伴うブラジキニン, プロスタグランジンなどの増加 (Nicol et al., 1996) があげられている。これらのことは, 筋疲労の原因は運動の強度と持続時間に依存して複雑に変化しており, 特に持久走による筋疲労は, 体内のエネルギー基質の枯渇, 代謝物質の蓄積, イオンバランスの乱れ, および筋損傷とそれに伴う神経機能の変化などが原因となることが多いことを示唆するものである。

4. 走運動の特性に関する研究

各種の身体運動には、用いられる部位、主働筋の収縮様式、発揮される力とスピードなどにそれぞれ特異性が存在する。したがって、持久走による筋出力の低下の特徴を明らかにするためには、まず走運動の特徴を明らかにする必要があると考えられる。

走行中の速度は、1歩で進む距離（ストライド長）と単位時間あたりの歩数（ストライド頻度）により決定される。松尾ら（1981）は、様々な速度における走行中のストライド長とストライド頻度との関係について調べた結果、それらが走速度の増大とともに増加するものの、秒速8m付近を境にしてストライド長は頭打ちになりストライド頻度は急増すること、長距離走者は短距離走者に比べて同一速度ではストライド長が短く、ストライド頻度が多い傾向にあることを報告している。Saito et al. (1974), Cavanagh and Kram (1990) も同様の結果を報告している。これらのことは、比較的低速で行われるジョギングや長距離走においては、主にストライド長を調節することで速度の増減が行われていることを示唆するものである。

走行中に下肢の筋がどのように動員されているのかを検討するために、走行中の筋電図の記録が試みられている。Elliot and Blanksby (1979) は、女性ジョガー15名を対象にして、表面筋電図法を用いて秒速2.5および3.5mでの走行中の筋活動を分析した結果、1)大腿前面部の大腿直筋、中間広筋、外側広筋は、脚の接地とともに放電量が急増して踵の離地時にピークを迎えた後、急速に放電量が減少すること、2)大腿後面の半膜様筋、大腿二頭筋、半腱様筋は、大腿前面の筋群と同様な放電パターンを示すものの、大腿二頭筋、半腱様筋については、脚の離地からスイングにかけても、高い放電量が保たれること、3)下腿部の下腿三頭筋は、接地時に高い放電

量を示し、前脛骨筋は支持期、空中期ともに一貫して放電していることなどを報告した。また、後藤ら（1983）は、走速度の増大に伴って、脚筋の筋放電量が直線的に増大することを認めた。しかし、Ito et al.（1985）は、秒速4～9 mでの走行中に、大臀筋、大腿二頭筋、外側広筋、前脛骨筋、腓腹筋から筋電図を導出し、空中期の筋放電量は速度の増大とともに増加したが、支持期の放電量は変化しなかったとし、接地中の筋の負担度は走速度の増加と無関係であることを示唆した。これらのことは、走行中における下肢筋群の動員パターンは複雑であり、走速度の増減による影響を受ける筋群と受けない筋群とに分かれること、走速度の増加による筋の負担は主に空中期において増大することを示唆するものである。

ヒトが走行中にどれくらいの力を地面から受けているかを調べるために、フォースプレートなどのセンサー上を被験者に走らせて、接地中の力を測定する試みが古くから行われてきた。辻野（1966）は、短距離走者、長距離走者、非鍛練者に100m全力疾走を行わせた時の地面反力を測定し、着地時の衝撃は速度が速くなるほど大きくなることを認めた。また、Munro et al.（1987）は、様々なスピードで走行させた時の地面反力を測定し、接地時間や力の大きさなどを定量した。それによると、秒速3 mでの走行中の接地時間は0.270秒であり、その間垂直方向にかかる力はピーク時で体重の1.57倍、平均では1.40倍であるが、秒速4 mになると、接地時間は0.229秒に短縮され、垂直方向の力はピーク時で1.95倍、平均で1.57倍になるという。このことは、ジョギングや持久走においても、脚部には比較的短時間のうちに大きな力がかかることを示唆するものである。

上述のような走行中の筋活動の結果として、ヒトがどのくらいの力・パワーを身体各部位で発揮しているかは、地面反力と走行中の身体各部位の

座標位置の変化から推定することができる。Winter (1983) は、11名の成人男性を対象にして、平均すると秒速2.72mでのジョギングにおいて発揮される足、膝、腰関節まわりのトルク、パワーを測定した。そして、支持期に力を出すのは主に伸筋群であり、スイング期に力を出すのは屈筋群であること、トータルの正のパワーは全被験者の平均でみると800watt程度であるが、被験者によっては1500wattにのぼることを報告した。阿江ら (1986) は、5名の短距離走者を対象にして平均で2.68~9.59m/sの範囲の走速度で走行させた時の下肢関節まわりで発揮されるトルク、パワーを測定した。その結果、すべての実験速度で、1)足関節まわりの筋群が最も大きなパワーを発揮すること、2)膝関節まわりの筋群は、負のパワーを発揮して着地の衝撃を吸収していること、3)股関節まわりの筋群は、正のパワーを発揮して身体の加速に貢献することなどを認めた。このことは、走行中にはその局面によって活動する筋群やその収縮様式が異なることを示唆するものである。

上述したように、走速度の増加とともに、脚筋の活動は増大し、それに伴い、地面反力および関節で発揮されるモーメント、パワーも増加するが、酸素摂取量からエネルギー消費量を測定する試みも行われている。Margaria (1963) は、2名のエリートランナーをトレッドミル上で時速9~22kmの範囲で走行させた結果、酸素摂取量が走速度に対して直線的に増加することを認めた。山岡 (1971) も同様に各種の走速度で走行させ、走行中の酸素摂取量と走行後の酸素負債量を加えた酸素需要量を求めた。その結果、酸素需要量は走速度に対して指数関数的に増大することを認めた。これらのことは、走速度の増加とともに、身体のエネルギー消費量も増大することを示唆するものである。

5. 持久走による疲労に関する生理学的, バイオメカニクスの研究

前述した持久的運動による神経・筋機能の変化や筋力・筋パワーの低下は, 他の要因と関連しあいながら, 運動中の動作やエネルギーコストなどにも影響を与えると考えられる.

持久走における経時的な走動作の変化については, 実際のレースとトレッドミル上での走行とによって検証されている. Elliot and Ackland (1981) は, 男子10000mのレース中の4つの時点において撮影した画像を基にして動作解析を行った. その結果, 疾走速度とストライド長が有意に減少したこと, 接地時に足が身体重心から離れる傾向にあり脚の振り出しが減少する傾向にあったことを認めた. Buckalew et al. (1985) は, 女子マラソンレース中のフォームを撮影し, 20マイルから24マイルにかけてストライド長の減少と走速度の低下が起こったこと, 同時に非支持時間に対する支持時間の比が増加して, いわゆる「つぶれた」動きとなっていたことを報告した. また, Armstrong and Gehlsen (1985) は, 比較的競技力の高い者を対象にして(男子; 2時間24分13秒, 女子; 2時間29分13秒), マラソンレース中の動作を分析した結果, ストライド長は減少傾向にあるものの有意な変化ではなかったことを認めた. しかし, 実際のレースでは疲労とともに走動作に変化のみられるレース後半に走速度も低下するので, 走速度の変化によるものなのか, 疲労によるものなのかについては判別しにくい. Siler and Martin (1991) は, トレッドミル上において10kmのレースペースに相当する速度で疲労困憊に至るまで走行させ, 疲労するにしたがってストライド長, 股関節の動作範囲, および最大膝伸展と屈曲角度などが有意に増大したことを認めて, 動作が大きくなる傾向にあることを示

峻した。また、Williams et al. (1991) は、あらかじめ走速度の変化による kinematics の変化を測定したうえで、持久走中の疲労に伴う変化について検討した結果、レース中には走速度低下の要因を取り除いても疲労にともなってストライド長が減少することを認めた。しかし同時に、彼らはこれらの走動作の変化に個人差が大きいことも指摘しており、走行中の走動作の変化が疲労を直接的に反映したものなのか、走効率を維持するために故意にランナーが動作を変化させているのかを見極めるのは難しいとしている。

また、疲労に伴って一定速度での走行中における酸素摂取量が増加することが報告されている。Thomas et al. (1995) は、14名の女性ランナーに $85 \sim 85\% \dot{V}O_2 \max$ での5km走をトレッドミル上で行わせた結果、走行後半では前半に比べて走の経済性が有意に低下したことを認めた。Glance et al.

(1998) もジョギング愛好者にVT強度での2時間走をトレッドミル上で行わせた結果、走行中の $\dot{V}O_2$ が有意に上昇したことを報告している。この原因としては、持久的運動に伴う換気量 (Thomas et al., 1995)、血中乳酸濃度 (Scheen et al., 1981) および心拍数の増大 (鍋倉ら, 1988)、あるいは肺換気効率の低下 (Manier et al., 1991) などが考えられる、また、前述した走動作の変化もその原因と考えられるが、高強度のトレッドミル走 (Morgan et al., 1990 ; Morgan et al., 1996 ; Candau et al., 1998) およびマラソンレース (Nicol et al., 1991c) の前後における走動作の変化と酸素摂取量の変化との間には明確な関係は認められなかったことが報告されている。

これらのことは、持久走によって筋力・筋パワーのみならず、走動作やエネルギー消費量にも変化が起こることを示唆するものであるが、それらの相互関係や、持久走パフォーマンスに及ぼす影響については十分に明ら

かになっていない（問題3）。

6. 長距離走レースの成績を決定する要因に関する研究

これまで多くの研究者が、長距離走の成績と最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_2\max$ ）、無酸素性作業閾値（AT）、運動の経済性などの有気的能力の指標との関係について検討してきた。これは、長距離走などの持久的競技は、競技時間が長く発揮されるパワーが比較的低いために有気的なエネルギー供給に大きく依存しているためであると考えられる。

$\dot{V}O_2\max$ は、1分間に体内で消費できる酸素の最大量であると定義され（山地，1995）、全身持久力の有力な指標とされている。Costill（1967）は、男子学生17名を対象に $\dot{V}O_2\max$ を測定し、その値と4.7マイルのクロスカンントリーレースの記録との間に有意な負の相関関係を認めた。また、Hagan et al.（1981）は、競技レベルの差が大きいマラソン走者26名を対象として、マラソンレースの記録と $\dot{V}O_2\max$ との間に有意な負の相関関係を認めている。この他にも、 $\dot{V}O_2\max$ と長距離走あるいはマラソンレースの成績との間に相関関係を認めた研究は多い（山地，1992）。しかし、Sjödín and Svedenhag（1981）は、35名のマラソン走者を対象にして、自己最高記録と $\dot{V}O_2\max$ との関係を検討した結果、有意な相関関係が認められたものの、その対象を2時間30分以内の16名にすると、統計的な有意性が認められなくなったことから、等質集団における持久的競技成績の差を $\dot{V}O_2\max$ だけでは説明できないことを示唆した。

ATは、血中乳酸が継続的に上昇することなく行い得る最高の運動強度であると定義されている（山本と宮下，1989）。ATは $\dot{V}O_2\max$ に比べて骨格筋の毛細血管密度や酸化系酵素活性などの末梢部位における有気的代謝

能力を反映していると考えられるので（満園ら，1986），競技成績との関連はその距離や時間が長くなるほど密接になると考えられる（LaFontaine et al., 1981 ; Kumagai et al., 1982）. Tanaka et al. (1981) は，男子長距離走者27名のATと1，2，3マイル走記録との間に $-0.716 \sim -0.896$ の高い相関係数を得ている．これと同様に，Maffulli et al. (1991) は，112名の持久的競技者を用いて800～10000mの平均走速度とATとの関係を検討し，5000m以上の距離ではATと競技成績との関係が密接になることを報告した．

走の経済性は，一般に，最大強度での走行中の酸素摂取量あるいはその $\dot{V}O_2\max$ に対する割合として表される（Morgan et al., 1989）. 走の経済性に影響する要因は，重心の上下動やストライド長，筋線維組成，風，気温など多岐にわたるが（Frederick, 1992）， $\dot{V}O_2\max$ が同じ水準にある長距離走者を比較すると，競技成績の高い走者の方が経済性に優れること，あるいは専門とする競技種目に近い走速度での経済性が相対的に優れる傾向にあることから（Daniels and Daniels, 1992），持久的競技能力の有力な指標として考えられている．Conley and Krahenbuhl (1980) は，10kmレースの記録が30～33分台の男性長距離走者12名を対象にして，10kmレースの記録と走速度250m/minにおける酸素摂取量との間に有意な相関関係が認められたが， $\dot{V}O_2\max$ との間には認められなかったことを報告した．Sjödin and Svedenhag (1985) は，マラソンの記録が2時間12分から2時間30分までの長距離走者12名を対象にして，マラソンの記録と $\% \dot{V}O_2\max$ で表した走の経済性との間に有意な相関関係を認めた．

持久的競技能力と無気的能力との関係については，有気的能力に比べて検討されることが少ない．しかし，最大酸素摂取量を高める要因として筋

力・筋パワーの重要性が一部の研究者によって指摘されている (Noakes, 1988 ; Green and Patla, 1992) . また, 競技の最終局面におけるラストパートや中間局面における揺さぶりなどにおける無気的能力の重要性も指摘されている (沢木と高岡, 1992) . Bulblan et al. (1986) は, 5 マイルのクロスカントリーレースの成績に対して,

Margarita et al. (1966) の方法によって測定した無気的能力が貢献していると報告した. 山崎と青木 (1977) は, $\dot{V}O_2\max$ がほぼ同一水準にある長距離走者 6 名の 5000m 走の成績と最大酸素負債量との間に有意な相関関係を認めた. また, Paavolainen et al. (1999) は, 持久的競技者を対象にして, 5km 走の成績と Rusko (1993) の方法で測定した最大無気的速度との間に有意な相関関係が認められたことを報告した.

一方, 長距離走の成績と筋力・筋パワーとの関係についても検討が加えられている. 江橋ら (1989) は, 実業団に所属するマラソン走者を対象にして等速性最大筋力を測定し, 膝伸展および屈曲の最大筋力とマラソンレースの自己最高記録との間に有意な相関関係を認めた. 高瀬ら (1994) も大学男子長距離走者を対象に等速性の筋力測定を行った結果, エキセントリックな股関節伸展筋力と 5000m 走の記録との間に有意な相関関係を認めた. これと同様の結果は, 伊東と堀川 (1990) , 西山ら (1991) および Houmard et al. (1991) も報告している.

これらのことは, 持久的競技成績は, 有気的能力に依存しているが, それが同一水準にあるときなどは, 無気的能力や筋力・筋パワーもまた無視できない要因となることを示唆するものである.

7. 筋力・筋パワートレーニングが持久走の成績に及ぼす影響に関する研究

一般的には持久的競技のトレーニング手段として、筋力・筋パワートレーニングは補助・補強的トレーニングとして位置づけられ、あまり重視されてこなかったように考えられる。これは、持久的競技は運動時間が長く発揮パワーが比較的低いことから、有気的なエネルギー供給に大きく依存しているため、競技成績の優劣が $\dot{V}O_2\max$ などの有気的エネルギー供給系の指標と強い関係が認められるためであると考えられる。

一方、持久的トレーニングに筋力トレーニングを付加した場合の影響については、非鍛錬者を対象としてこれまで多くの研究者により検討されてきた。Hickson (1980) は、一般健常者を対象にして週5日、10週間にわたって動的筋力トレーニングを行わせた。その結果、脚筋力が増加し、 $\dot{V}O_2\max$ に相当する速度での一定速度トレッドミル走のオールアウト時間が長くなったことを認めた。同様に、Wilmore et al.(1978)は、一般健常者に週3回のサーキット形式の筋力トレーニングを10週間にわたって行わせた。その結果、 $\dot{V}O_2\max$ には変化がなかったが、脚筋力が増加してトレッドミル走でのオールアウト時間が延長したことを報告した。また、軽～中程度の持久的トレーニングを行っている者についても、同様の結果がみられることが報告されている。Hickson et al.(1988) は、ランニング/サイクリングの愛好者を対象にして、週3回、10週間の動的筋力トレーニングを行わせた結果、脚筋力が増加し、トレッドミル走のパフォーマンスも増加したが、10km走の記録は改善しなかったことを報告した。Hunter et al. (1987) も、中程度の持久的トレーニングを積んでいた者を対象にして(週に24～32km走行)、週4回、12週間の動的筋力トレーニングを行わせた

結果、垂直跳びの成績が15%増加し、 $\dot{V}O_2\max$ も増加したことを報告した。

しかし、持久的なトレーニングを積んだ競技者を対象として、筋力・筋パワートレーニングの効果について検討した研究は少ない。筋力トレーニングと持久的トレーニングを同時に行うことによって、持久的能力に悪影響を及ぼす可能性が指摘されており（Nelson et al., 1990 ; Paavolainen et al., 1991），筋力・筋パワートレーニングが持久走の成績にどのような影響を及ぼすかについては十分に明らかにされていない。実践書・指導書における筋力・筋パワートレーニングに関する記述をみると、「中長距離ランナーの筋力トレーニングについての必要性や具体的な方法論は、実は賛否両論がある。世界の一流のコーチのなかには、ウエイトトレーニングによる筋力トレーニングを課している例もあれば、変化に富んだ自然環境を走っていれば特別の筋力トレーニングを実施する必要はないと断言しているコーチもいる」（帖佐と勝亦，1982），「効果的な筋力づくりはラストスパート，力強い腕振り，安定したストライドに役立つ。また，故障の防止にも有効である」（有吉，1987），「走トレーニングでは得ることのできない筋力アップをレジスタンストレーニングによって補うのが効果的である。筋力を高めることでスピード，パワー，さらには筋持久力の向上に役立つ」

（前河，1993），「起伏のある地形で練習すれば，ウエイトトレーニングは必要がない。ウエイトトレーニングの方法を誤れば筋肉のばねと張りをなくしてしまう。腕振り練習などの上半身のウエイトトレーニングは必要がない」（リディヤード，1993），「筋力，筋持久力はランニングペースを維持し，ラストスパートをしたり，アップダウンのあるコースを走破するためにも重要な能力のひとつである」（沢木と高岡，1993），などとされており，ほとんど一致した見解は得られていない。しかし，これらの記

述の内容は、必ずしも学術的な裏づけを伴っているものではない。

ただし、わずかな研究ではあるが、持久的競技者を対象とした筋力・筋パワートレーニングの影響に関して報告されている。Johnston et al.

(1995)は、大学女子長距離ランナーを対象にして10週間の動的筋力トレーニングを行わせた結果、走の経済性が有意に向上したことを報告した。また、筋力トレーニングではないが、Svedenhag (1992)は、11名のマラソンランナーに12週間にわたって通常のトレーニングに加えて登り坂でのバウンディング走を行わせたところ、走の経済性に向上がみられたことを認めた。筋力トレーニングによって持久的競技者の走の経済性が向上する可能性は他の研究者によっても指摘されている（根本ら、1996；Coyle, 1995）。その理由について、Tanaka and Svensen (1998)は、筋力・筋パワートレーニングによって、同じ最大下運動負荷に対して、活動筋線維（運動単位）あたりの力の貢献度が少なくてすむようになるか、活動筋線維（運動単位）の数自体が減少するようになり、その結果として、疲労しやすいType II線維の動員を遅らせるか、減らすことができるためであるとしている。

これらのことは、筋力・筋パワートレーニングによって、絶対的なスピードが向上したり走の経済性が向上するなどして、持久走パフォーマンスが向上する可能性を示唆するものである。しかしこれまでに筋力・筋パワートレーニングが持久走パフォーマンスに及ぼす影響について、筋力・筋パワーや持久的能力の変化と関連づけて検討した研究は見あたらない。また、筋力・筋パワートレーニングが持久走による筋疲労を軽減できるか否かについてもほとんど明らかになっていない（問題4）。

Ⅲ. 本研究の目的および課題

1. 研究目的

文献研究により、筋力・筋パワーからみた持久走による筋疲労に関連して以下の問題点が指摘された。

- ①これまでの研究によって、持久的運動による筋力・筋パワーの低下の実態、そのメカニズムおよびそれらと運動強度や持続時間との関係などについて検討されてきた。しかしそれらの研究においては、どのような運動によってどの部位の筋力・筋パワーが低下するか、などの運動様式の特異性が考慮されることは少ない。また、その運動中における経時的な変化の特徴についても十分に明らかにされていない。（問題1，2）
- ②これまでの研究の多くは、持久走による筋力・筋パワーの低下を筋機能の低下の結果としてとらえることが多く、そのことが持久走の遂行そのものにどのような影響を及ぼすかについて考慮されることはきわめて少ない。身体運動は筋収縮による張力をもとにして発現されるので、疲労にともなう筋力・筋パワーの低下が運動中の身体機能や動作に変化を引き起こし、疲労をさらに亢進させるなどして、運動の持続に悪影響を及ぼす可能性がある。しかし、このことについてはほとんど明らかにされていない。したがって、持久走による筋力・筋パワー低下と持久走成績との関係についてより明らかにするためには、筋力・筋パワーの低下が有気的能力や走動作に対してどのように影響するかを検討する必要がある。（問題3）
- ③筋力・筋パワーを高めるためのトレーニングを行うことが、持久走による筋力・筋パワーの低下や持久走の成績に及ぼす効果については明

らかではない。(問題4)

本研究では、これらの問題点を解決するために、①長時間の持久走による脚筋疲労の特徴を筋力・筋パワーの面から検討すること、②脚筋疲労と持久走による走の経済性、走動作の変化および走パフォーマンスとの関係を検討すること、③筋力・筋パワートレーニングが脚筋疲労や持久走パフォーマンスに及ぼす効果について検討することを目的とした。

2. 研究課題

本研究の目的を達成するために、以下の4つの研究課題を設定した。

研究課題1：長時間の持久走が筋力・筋パワーに及ぼす影響について検討する。(問題1, 2)

研究課題2：長時間の持久走の成績と筋力・筋パワーの低下との関係について検討する。(問題3)

研究課題3：長時間の持久走による筋力・筋パワーの低下と、走の経済性および走動作の変化との関係について検討する。(問題3)

研究課題4：筋力・筋パワーの向上を目的とした補強トレーニングが長時間の持久走後の筋力・筋パワー低下および持久走成績に及ぼす効果について検討する。(問題4)

IV. 研究の意義，仮説，限界および用語の定義

1. 研究の意義

本研究における研究課題を遂行することによって，健康・体力づくりおよび運動療法として極めて有効な手段である持久走中における筋力・筋パワーの低下の実態を明らかにすることができる。これは，持久的競技者および愛好者において障害を防止することに役立つとともに，運動療法としての持久走をより安全に行うための指針作りに役立つ。また，筋力・筋パワーの低下が持久走遂行に及ぼす影響を明らかにすることによって，持久走成績への筋力・筋パワーの貢献のあり方を明らかにすることができる。持久走成績を向上させるための筋力・筋パワートレーニングのあり方をより明確することができる。

2. 研究上の仮説

先に示した研究課題を究明するために，以下の仮説を設定した。

- ①本研究における被験者は，マラソンレースおよび持久走において，各自の能力を十分に発揮していた。
- ②本研究における被験者は，筋力・筋パワーに関する各測定において，各自の能力を十分に発揮していた。
- ③本研究における各種筋力・筋パワーの測定項目は，持久走による身体の疲労が反映されるものである。

3. 研究の限界

本研究には，研究方法および得られた知見の一般化・普遍化に関する限界が存在する。以下に本研究結果の一般化を制限する諸条件について

示した。

①定義に関する限界

本研究を遂行する際の使用の用語の定義を以下の節において示した。本研究はこの定義の範囲内で検討を行い、結論を導き出すものとする。

②対象者による限界

本研究における被験者は、19～35歳の男性で、心身ともに健常であり、少なくとも本研究における実験に参加する6カ月前から定期的に持久走トレーニングを実施していた。したがって、本研究の結果を、19歳未満の若年者と36歳以上の高年齢者、有疾患者あるいは何らかの外科的障害をもつ者、およびきわめて高度に鍛錬された者に適用することには限界がある。

③測定方法の限界

本研究における「持久走」は、運動持続時間が2～5時間の範囲であった。持久的運動による筋力・筋パワーの低下は運動強度と持続時間によって異なることが知られている。したがって、本研究の結果を2時間以内、あるいは5時間以上の持久走および持久的競技に対して適用することには限界がある。また、本研究における筋力・筋パワーに関する測定項目は、握力、アイソメトリックな膝伸展運動、反動付き垂直跳、5回連続リバウンド型跳躍および立5段跳びの5項目であった。したがって、本研究における筋力・筋パワーの低下はこれらの測定項目に関与する筋群の疲労を反映したものであり、それ以外の部位および運動条件による筋力・筋パワーの低下に適用することには限界がある。

4. 用語の定義

本研究を遂行する際に使用する専門的な用語について、それぞれの定義を以下に示した。

①持久走

各種の競技力向上，健康・体力づくりあるいは気晴らしなどを目的とした比較的一定の走速度を維持して行われる長時間の走行とする。

②筋力・筋パワー

骨格筋の収縮によって引き起こされる外的な出力を総称して筋力・筋パワーとする。

③筋疲労

一般に，疲労は身体的または精神的活動が直接の原因となる機能低下の状態と定義されており（朝比奈，1984），そのうち筋疲労はある課題を達成するのに必要な力を筋が発揮できなくなることと定義される（Edwards, 1981）。また，疲労はその様態から急性疲労と慢性疲労に分類されるが，本研究では一回の運動においてその運動中・直後に発生する急性疲労を研究対象とする。

④最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$)

最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) は，1分間に体内で消費される酸素の最大量であり，循環，呼吸および代謝の各機能を包括した全身持久力の指標である（Bassett and Howley, 1997）。本研究におけるすべての $\dot{V}O_2\max$ の測定は，原則として以下のとおり行った：

被験者を斜度0度のトレッドミル上で走行させ，疲労困憊に至るまで1分ごとに走速度を増加させた。走行中には，呼気ガスに関する諸変量と心拍数を連続的に測定した。 $\dot{V}O_2\max$ の出現基準は， $\dot{V}O_2$ が頭打ちとなること，呼吸交換比（RER）が1.1以上となること，心拍数が180bpmとなること，のいずれか2つ以上を満たすことと

した (Taylor et al., 1955 ; Tanaka et al., 1986) .

⑤伸張－短縮サイクル (Stretch-shortening cycle, SSC) 運動

歩行，走行および跳躍などのヒトが自然に行う運動においては，主働筋が伸長－短縮という動きをみせる．このような運動は伸長－短縮サイクル (Stretch-shortening cycle, SSC) 運動 (Komi, 1992) と呼ばれる．SSC運動では，コンセントリックな筋収縮のみからなる運動に比べて，より高い筋パワーを発揮できること (Cavagna et al., 1977 ; Bosco and Komi, 1979) ，機械的効率が高くなること (Thys et al., 1975) などの特徴が認められている．

V. マラソンレースにおける走速度の低下と筋力・筋パワーの低下との関係（実験1：研究課題1，2）

1. 緒言

長距離走においてはそのエネルギー供給が主に有気的に行われるために、その競技成績を決定する要因として一般には最大酸素摂取量などの有気的能力があげられることが多い（Sjödín and Svedenhag, 1985）。しかし、その一方において、長距離走の成績と脚の筋力・筋パワーとの間に有意な相関関係が認められることが報告されている（江橋ら, 1989；西山ら, 1990）。このために、長距離走成績を決定する要因の一つとして筋力・筋パワーがあげられることもあるが、それがどのようなメカニズムで貢献するのかについてはこれまでも明らかにされていない。

マラソンレースをはじめとする長距離走によって、脚伸展筋力（Sherman et al., 1984）、足関節底屈筋力（Chevrolet et al., 1993）およびドロップジャンプの跳躍高（Nicol et al., 1991a）など、脚の筋力・筋パワーが低下することが報告されており、その原因としては、血糖値の低下（Coyle et al., 1986）や体温上昇（Maron et al., 1977）などの主に全身性の要因と、筋グリコーゲンの枯渇（Costill et al., 1973）や筋損傷（Fitts, 1994）などの主働筋における末梢性の要因とが考えられている。また、長距離走中においては疲労に伴って走フォームが変化すること（Buckalew et al., 1985）、走の経済性が低下すること（Nicol et al., 1991b）などが報告されており、その原因の一つとしても脚の筋力・筋パワーの低下が指摘されている。小西ら（1997）は、健常な男性を対象にして、あらかじめ膝伸展筋群を疲労させ、その直後に自由な速度で歩行を行わせたところ、疲労していない時に比べて歩行動作やリズムが変化したこ

とを認めた。このことは、長距離走においても脚の筋力・筋パワーの低下によって走フォームの変化や走の経済性の低下などが起こり、走速度が低下する可能性を示唆するものである。言い換えると、長距離走において優れた成績をあげるためには、高い筋力・筋パワーを有することだけでなく、走行中にそれを高い水準で維持することも重要である可能性を示唆するものである。そこで本研究では、長距離走における筋力・筋パワーの役割を明らかにするための第一段階として、マラソンレースにおける前・後半の走速度の変化とマラソンレース前・後の筋力・筋パワーの変化との関係について検討することを目的とした。

2. 方法

(1) 被験者

被験者として、実験開始前少なくとも6ヶ月間にわたりジョギングを継続している健康な男子学生32名を用いた。彼らの年齢、身長および体重は、順に 22.3 ± 2.5 歳（平均値 \pm 標準偏差）、 169.4 ± 4.9 cm、 61.5 ± 5.5 kgであった。このうち、陸上競技・中長距離競技者として専門的なトレーニングを行っている者は6名、中長距離競技の経験を持ちその後もジョギングを継続している者が5名、それ以外のスポーツ活動を少なくとも1週間に1度行っている者は18名、特にスポーツ活動を行っていない者は3名であった。また、被験者の中で本実験以前にマラソンレースの完走経験を持つ者は19名であった。なお、全ての被験者に実験の内容および危険性について説明し、実験参加の同意を得た。

(2) 測定項目および測定方法

本実験は、茨城県つくば市で1994年（平成6年）11月27日、1995年（平成7年）11月26日および1996年（平成8年）11月24日に開催された「つ

くばマラソン大会」において実施した。各大会当日における会場の気象条件に関する公式記録は残っていないが、会場近隣の土浦市における当日の天候は曇りあるいは晴れ、最低気温は2.7～6.3℃、最高気温は11.2～15.6℃の範囲にあった^{注1)}。

被験者には、まずレースのスタート1時間～30分前に実験室に来室させ、体重、および筋力・筋パワーの指標として、握力、アイソメトリックな膝伸展力、垂直跳び（Counter movement jump, CMJ）と5回連続リバウンド型跳躍（Five-rebound jump, 5RJ）の跳躍高を順に測定した。また、ゴール後にも同様の測定を行った。ゴール地点と測定を行った実験室は約200m離れており、被験者にはゴール後徒歩でなるべく早く実験室へ来るように指示した。全ての被験者がゴール後30分以内に測定を行った。なお、ゴール後には中間点の通過時間とゴール時の記録を被験者に申告させ、それらをもとにしてレース前半と後半の平均走速度を算出した。

握力は左右2回ずつ測定し、それぞれの高い方の記録の平均値を代表値とした。

アイソメトリックな膝伸展力の測定は、右脚について1回行った。被験者を椅子に座らせて胸部をベルトで固定し、外果を通る足関節にステンレスワイヤーのついた革製バンドを取り付けた。測定脚の膝関節角度が90度となるようにワイヤーの長さを調節し、その他端を椅子の脚に固定した。そして、被験者に合図とともにできるだけすばやく全力で3秒間膝伸展方向に力を発揮させ、その時の力をワイヤーの途中に取り付けたストレインゲージ（共和電業社製、LU-100KSB）を用いてサンプリン

注1 日本気象協会発行、茨城県気象月報（1994～1996）より引用

グ頻度 1 kHz で記録した。得られた力-時間曲線をもとにして、最大力および力発揮速度 (Rate of force development, RFD ; Viitasalo et al., 1980) を求めた。RFD の代表値には最大値を用いた。なお、平成 6 年のレースに参加した被験者については、この測定を行わなかった。

CMJ は、被験者に手を腰に当てた姿勢をとらせ、脚の反動動作を用いて全力で上方に跳躍させた。試技は 1 回とし、このときの滞空時間 (Flight time, FT) をマットスイッチ (竹井機器社製, CT-916) を用いて測定し、跳躍高 (Jumping height, JH) を式【 $JH = (1/8) \cdot FT^2 \cdot g$; g , 重力加速度 = 9.81 m/s^2 】により算出した (Asmussen and Bonde-Petersen, 1974)。

5RJ は、被験者に手を腰に当てた姿勢をとらせ、「踏切時間をできるだけ短くして、できるだけ高く連続して 5 回跳ぶ」ように指示して行わせた。試技は 1 回とし、このときの滞空時間と踏切時間をマットスイッチを用いて測定し、跳躍高を上述の式により算出した。また、跳躍高を踏切時間で除して、爆発的な SSC 運動の遂行能力の指標であるリバウンドジャンプ指数 (5RJindex) を求めた (岡子と高松, 1995)。なお、5RJ の各成績の代表値には、1 度の試技における 5 回の連続跳躍のうち、5RJindex の高い順に選択した 3 回の跳躍における平均値を用いた。なお、1 名の被験者がレース後に脚のけいれんを訴えたために、5RJ の測定を行うことができなかった。

一方、マラソンレース後には、上記の測定項目に加えて、身体各部 (腕部, 肩部, 胸+腹部, 背部, 殿部, 大腿前面, 大腿後面, 下腿前面, 下腿後面, 足背部, 足底部 ; 図 5-1) の主観的な疲労度を、小野と宮下 (1976) の提唱する主観的運動強度に関する評価尺度を用いて被験者に判定させた。

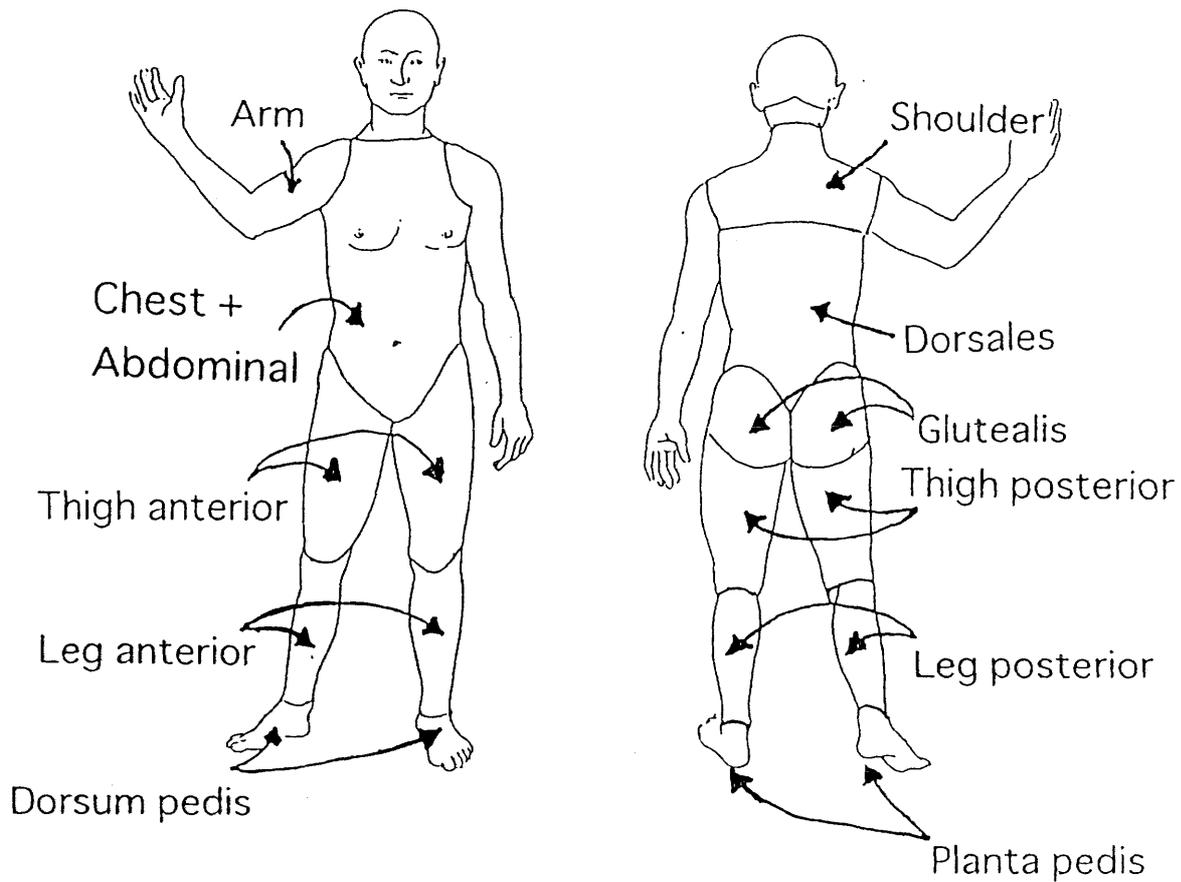


Fig. 3-1 Body regions for estimating subjective fatigue scale after the marathon race.

上述のマラソンレース当日の測定に加えて、本研究の被験者のうち同意の得られた22名の被験者に対して、レースの2週間前からレースの1カ月後までの間に、最大下および最大強度でのトレッドミル走を斜度0度で行わせ、有気的能力の測定を行った。レース後に測定を行った場合には、十分な疲労回復期間をおくように配慮した。最大下強度のトレッドミル走では、被験者に130m/分から260m/分までの2～4種類の走速度で、4分間の休息をはさみながら4分間ずつ走行させた。走行直後に指先から採血し、血中乳酸濃度を乳酸分析器（YSI社製、Model 19）を用いて測定した。そして、血中乳酸濃度2.2mmol/lに相当する走速度である最大定常速度（Maximal steady state；MSS：LaFontaine et al., 1981）を求めた。MSSは先行研究において、持久的運動中に酸素摂取量や心拍数などを一定に保つことのできる運動強度の上限であるとされており、各種の長距離走成績との関係が深いことが報告されている（Costill et al., 1971；LaFontaine et al., 1981）。

最大強度のトレッドミル走では、被験者に150～200m/分から1分ごとに10m/分ずつ速度を漸増させてexhaustionに至るまで走行させた。走行中の酸素摂取量を呼気ガス分析器（Mijnhard社製、Oxycon-4）を用いて測定し、最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2max}$ ）を求めた。

（3）統計処理

レース前・後半の走速度の有意差の検定、およびレース前・後における各測定項目の有意差の検定は、対応のあるt-検定を用いて行った。また、レース前・後における各測定項目の変化の大きさを比較するために、一元配置の分散分析を行ったうえで、LSD法により多重比較を行った。各測定項目間の相関係数は、ピアソンの方法を用いて算出した。統計処理の有意性は危険率5%水準で判定した。

3. 結果

レースの平均記録は3時間55分27秒±51分24秒（平均走速度187.9±42.0m/分，平均値±標準偏差）であり，2時間35分22秒（271.5m/分）～5時間31分36秒（127.2m/分）の範囲にあった．レース前半と後半の走速度は，それぞれ208.6±37.7m/分，177.8±47.4m/分であり，両者間には有意な差が認められた．また，前・後半の走速度の変化率は $-15.3 \pm 14.1\%$ （ $-49.7 \sim 7.8\%$ ）であった．走速度の変化率は式【変化率 = $(\text{後半走速度} - \text{前半走速度}) / \text{前半走速度} \times 100$ 】により算出した．なお，レースの平均走速度が高い者ほどレース前・後半の走速度の変化率の値（負）が小さく，両者間には有意な正の相関関係（ $r=0.516$ ， $n=30$ ）が認められた．

表5-1に，レースの直前と直後に測定した体重および筋力・筋パワーを示した．また図5-2に，各測定項目のレース前・後の変化率を示した．各測定項目の変化率は式【変化率 = $(\text{レース後の値} - \text{レース前の値}) / \text{レース前の値} \times 100$ 】により算出した．レース後には，体重，握力，アイソメトリックな膝伸展運動の最大力とRFD，CMJの跳躍高，および5RJの跳躍高と5RJindexはいずれも有意に低下し，5RJの踏切時間は有意に延長した．また，レース前・後の変化率は，アイソメトリックな膝伸展運動の最大力とRFDおよび5RJの踏切時間と5RJindexが，体重，握力およびCMJの跳躍高に比べて有意に大きい値を示した．

表5-2に，レースの平均走速度と，レース直前に測定した筋力・筋パワーおよびレースとは別の日に測定した有気的能力との相関係数を示した．レースの平均走速度と筋力・筋パワーとの間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった．しかし，レースの平均走速度と $\dot{V}O_2\max$

Table 5-1 Body weight and muscular strength and power before and after the marathon race.

		n		Mean	SD	Difference (t-value)
Body weight	(kg)	31	Before	61.5	5.50	
			After	59.4	5.40	16.17 *
Grip strength	(kg)	32	Before	43.2	4.80	
			After	41.5	4.80	3.34 *
Knee extension						
Max force	(kg/BW)	21	Before	0.80	0.17	
			After	0.57	0.16	5.20 *
.....						
RFD	(kg/s)	21	Before	167.7	83.9	
			After	92.3	33.6	4.04 *
.....						
CMJ						
Jumping height	(m)	32	Before	0.34	0.07	
			After	0.30	0.09	2.80 *
.....						
5RJ						
Jumping height	(m)	31	Before	0.31	0.04	
			After	0.26	0.06	5.07 *
.....						
Contact time	(s)	31	Before	0.197	0.053	
			After	0.255	0.084	5.86 *
.....						
5RJ index	(m/s)	31	Before	1.64	0.46	
			After	1.09	0.39	8.27 *

* : $P < 0.05$

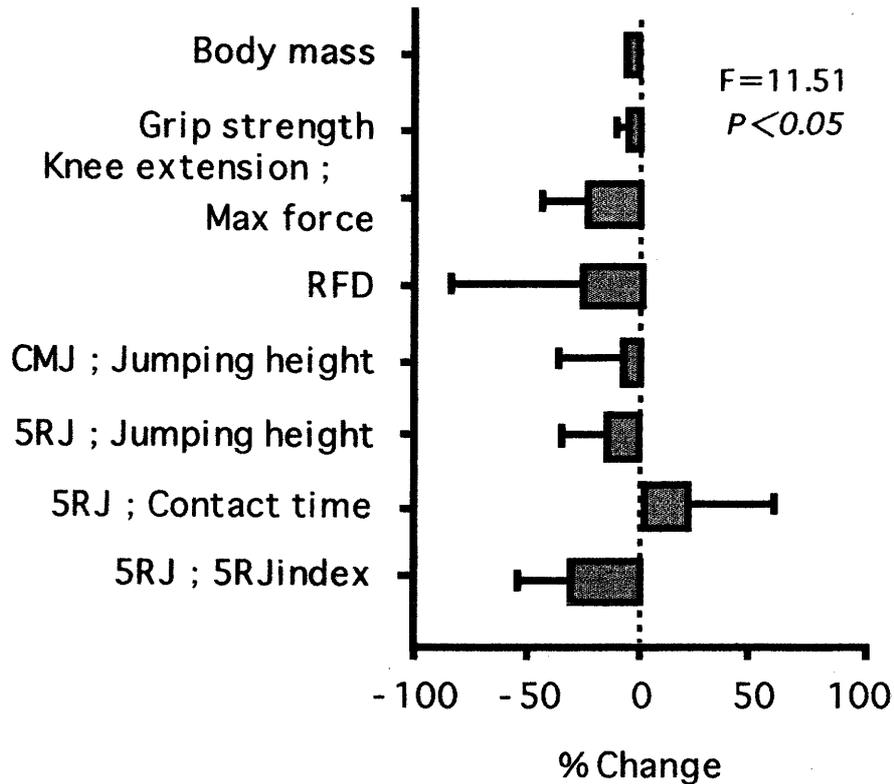


Fig. 5-2 Relative changes of body mass and muscular strength and power between before and after the marathon race.

1. When the differences among mean values of measurements were tested by ANOVA, the value of 5RJ-CT was changed from positive to negative.
2. The results of multiple comparison among measurements were as follows ;
 BM · GS · CMJ < MF · RFD · 5RJ-CT · 5RJindex
 BM · GS < 5RJ-JH
 5RJ-JH < 5RJ-CT · 5RJindex
 # Body mass : BM, Grip strength : GS, Max force of isometric knee extension : MF, Jumping height of 5RJ : 5RJ-JH, Contact time of 5RJ : 5RJ-CT
 # < : P < 0.05

Table 5-2 Correlation coefficients between average running speed in the marathon race, and muscular strength and power and aerobic ability.

	n	Average running speed
Grip strength	32	-0.165
Knee extension	21	
Max force		0.053
RFD		0.096
CMJ	32	
Jumping height		0.012
5RJ	31	
Jumping height		-0.111
Contact time		-0.270
5RJindex		0.214
$\dot{V}O_2\text{max}$	22	0.521 *
MSS	22	0.860 *

1. Maximal steady state ; MSS
2. Muscular strength and power were measured immediately before the marathon race, and $\dot{V}O_2\text{max}$ and MSS were measured on a separate day to the race.
3. * : $P < 0.05$

($r=0.521$, $n=22$) およびMSS ($r=0.860$, $n=22$) との間には、いずれも有意な正の相関関係が認められた。

図5-3に、レース前・後半の走速度の変化率と、レース前・後の筋力・筋パワーに関する測定項目の変化率との関係を示した。走速度の変化率との間に有意な相関関係が認められたのは、5RJの跳躍高の変化率 ($r=0.450$, $n=29$) のみであったが、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力の変化率の相関係数 ($r=0.407$, $n=18$) も比較的高い値であった。なお、走速度の変化率とレースとは別の日に測定した $\dot{V}O_2\max$ ($r=0.233$, $n=21$) およびMSS ($r=0.260$, $n=21$) との間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった。また、5RJの跳躍高の変化率と、 $\dot{V}O_2\max$ ($r=0.179$, $n=21$) およびMSS ($r=0.281$, $n=21$) との間にもいずれも有意な相関関係は認められなかった。

表5-3に、レース直後における身体各部の主観的な疲労度の判定結果を示した。主観的な疲労度は、下腿後面 (16.3 ± 3.1) が最も高い値を示し、次に大腿後面 (16.1 ± 2.8)、大腿前面 (16.0 ± 3.5) の順に高い値を示した。

4. 考察

本研究の被験者におけるマラソンレースの記録は2時間35分22秒－5時間31分36秒の範囲にあり、3回のレースにおいて比較的上位でゴールした者から、制限時間内で完走できた者まで大きなばらつきが認められた。また、レース後半の平均走速度はレース前半に比べて有意に低下し、その平均変化率は $-15.3 \pm 14.1\%$ であった。山地(1983)は、日本国内で行われた著名なマラソンレースにおけるスプリットタイムを調査した結果、対象者の90%以上はレース後半の走速度が前半に比べて10%以上

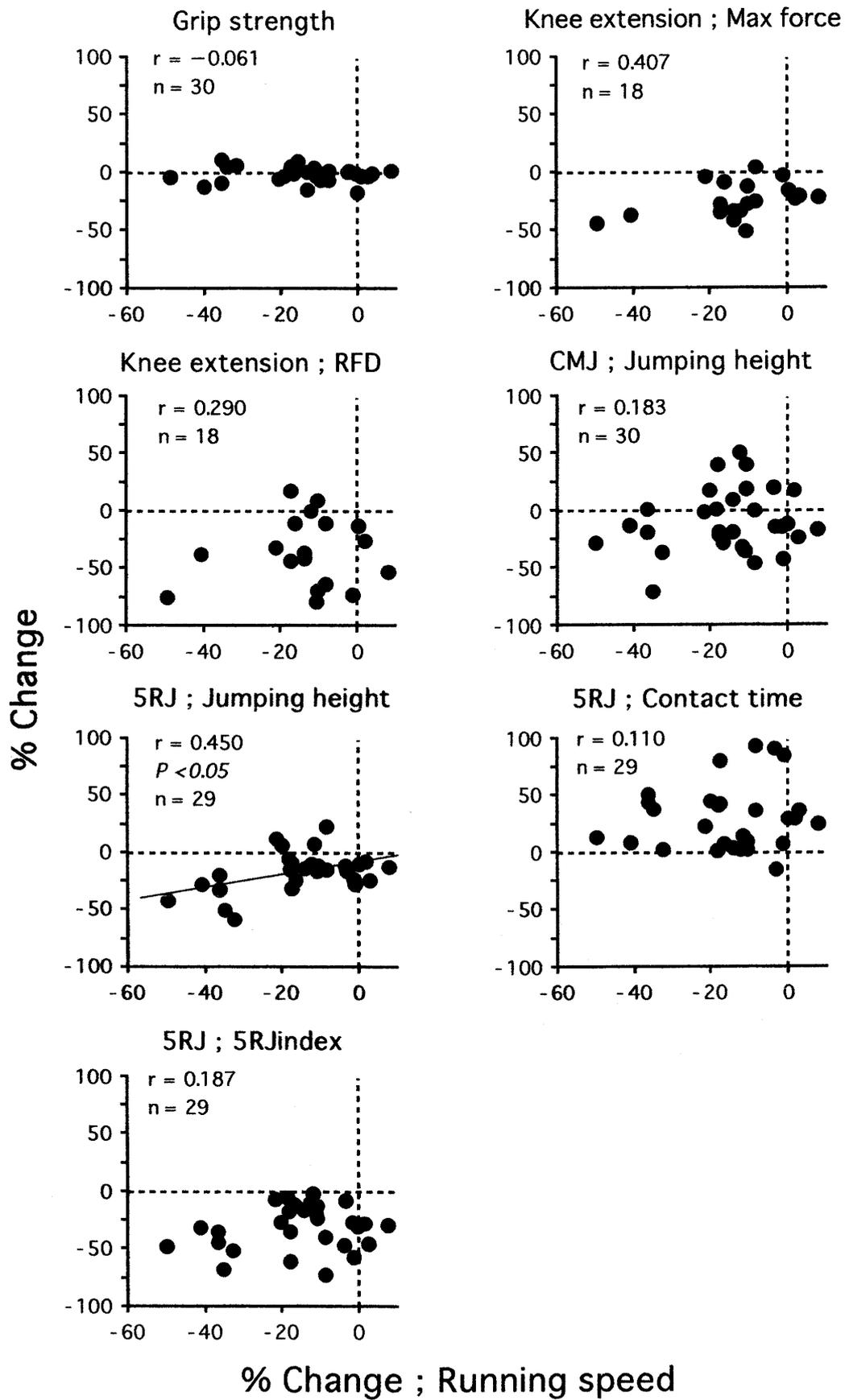


Fig. 5-3 The relationships between relative change in running speed between the first half and the second half in the marathon race, and relative changes in muscular strength and power after the race.

Table 5-3 Subjective fatigue scale in body regions estimated immediately after the marathon race.

Arm	10.3 ± 2.2
Shoulder	13.5 ± 3.7
Chest+Abdominal	10.7 ± 3.1
Dorsales	12.8 ± 3.7
Glutealis	13.1 ± 3.6
Thigh anterior	16.0 ± 3.5
Thigh posterior	16.1 ± 2.8
Leg anterior	13.8 ± 3.1
Leg posterior	16.3 ± 3.1
Dorsum pedis	14.5 ± 3.4
Planta pedis	14.8 ± 3.1

Values show mean±SD

低下する「前半型」であったと報告している。また、著者らが1992～1998年にかけての主要な日本国内のマラソンレース（福岡国際、東京国際、別府大分、びわこ毎日）における完走者のスプリットタイムからレース前・後半の走速度の変化率を求めたところ、10位以内の入賞者の平均値は $-4.0 \pm 2.6\%$ であり、スプリットタイムが判明している完走者264名の平均値は $-7.2 \pm 4.4\%$ であった^{注2)}。これらの変化率に比べて、本研究の被験者のレース後半の変化率が大きかった原因としては、本研究の被験者のマラソンレースの記録がそれほど高くないこと、レース経験が少ないことなどが考えられる。このことは、レースの平均走速度と前・後半の走速度の変化率との間に有意な正の相関関係 ($r=0.516$, $n=30$) が認められ、記録の優れた者ほど後半の走速度の変化率が小さかったことから理解できる。

マラソンレースの成績を決定する要因としては、これまで一般には $\dot{V}O_2\max$ をはじめとする有気的能力があげられてきた (Sjödín et al., 1985)。しかし近年、いくつかの研究によって、長距離走の成績に筋力・筋パワーが影響する可能性が指摘されている (江橋ら, 1989; 西山ら, 1990)。本研究においては、レースの平均走速度と $\dot{V}O_2\max$ およびMSSの間には有意な正の相関関係が認められたのに対して、レース直前に測定した筋力・筋パワーの間には有意な相関関係は認められなかった (表5-2)。このことは、本研究の被験者のような比較的低い競技水準では、レースの平均走速度を高めるためには、先行研究 (LaFontaine et al., 1981; Sjödín et al., 1985) において指摘されているように、有気的能力

注2 ベースボールマガジン社発行「陸上競技マガジン」(1992-1998)において掲載された各マラソンレースの結果とスプリットタイムをもとにして算出した。

に優れることが最も重要であることを示唆するものである。しかし、高い筋力・筋パワーを発揮できる者ほど速筋線維の割合が多いこと (Bosco and Komi, 1979), マラソンランナーをはじめとする持久的競技者はその骨格筋において遅筋線維の割合が多いこと (勝田と和田, 1986), および持久的競技者の筋力・筋パワーは短距離競技者などに比べて低い傾向にあること (中村, 1987) などを考慮すると, 鍛錬された長距離競技者であっても, 長距離走の成績に影響するのは, まず第一に有気的能力の優劣であり (LaFontaine et al, 1981 : Sjödín et al., 1985), それが一 定の水準にあり, しかもその成績が拮抗している場合には, 筋力・筋パ ワーの優劣によって成績が決まる可能性が考えられる。したがって, 各 人の身につけている筋力・筋パワーの水準そのものが長距離走の成績に 及ぼす影響については, 今後さらに検討する必要がある。

一方, マラソンレースをはじめとする長距離走後には脚の筋力・筋パ ワーが低下することが報告されており (Sherman et al., 1984 ; Nicol et al., 1991a ; Chevrolet et al., 1993), これがその成績に影響を及ぼす可 能性も考えられる。本研究では, この可能性を明らかにするために, レー スの直前と直後に握力, アイソメトリックな膝伸展運動の最大力とRFD , CMJの跳躍高, および5RJの跳躍高, 踏切時間, 5RJindexの測定を行っ た。その結果, レース直後には, 5RJの踏切時間は有意に長くなり, また 他の測定項目の成績もレース前に比べて有意に低下することが認められ た (表5-1)。しかし, レース前・後の変化率をみると, レース後には, 脚の筋力・筋パワーが握力に比べて大きく低下すること, および脚の筋 力・筋パワーのなかでは, アイソメトリックな膝伸展運動における最大 力, RFD, および5RJindexがCMJの跳躍高に比べて大きく低下すること が認められた (図5-2)。前者は, 下肢の筋力・筋パワーが上肢に比べて

より大きく低下することを示すものである。このことは、レース後の身体各部の主観的な疲労度が下腿および大腿部において高い傾向にあったことと一致する（表5-3）。この主な原因としては、マラソンレースでの25,000~30,000回に及ぶ着地動作（有吉，1994）によって引き起こされる脚筋のグリコーゲンの枯渇（Costill et al., 1973）や損傷（Fitts, 1994）などによる筋の収縮機能の低下が考えられる。また後者は、アイソメトリックな膝伸展運動におけるRFDの最大値が出現した時間はいずれの被験者も0.4秒以内であること、および5RJの踏切時間はレース前が平均0.194秒、レース後が0.252秒であったのに対して、本研究とほぼ同様の運動条件で行わせたCMJの踏切時間は0.5~0.8秒であること（高松と図子，1988）などを考慮すると、すばやく大きな力を出す運動、あるいはより短時間の伸張-短縮サイクル（Stretch-shortening cycle, SSC）運動ほど、発揮される筋力・筋パワーが大きく低下することを示すものである。すばやく大きな力を発揮するためには、運動単位の動員数とインパルスの発射頻度の両方を増加させることが重要であることから（森谷，1989），脚の筋力・筋パワー低下の原因として、運動神経の興奮水準の低下（Bigland-Ritchie, 1981）や神経筋接合部などにおける興奮伝達の不全（Moritani et al., 1985）などが考えられる。また、SSC運動においては、着地衝撃に伴う伸張反射を有効に活用することが短縮局面において高い筋パワーを発揮するための重要な要因となることから（Gollhofer et al., 1992），レース後に5RJの成績が著しく低下した原因として、筋損傷によってType III, IV求心性神経が刺激され、その結果として伸張反射の感受性が低下していた可能性も考えられる（Nicol et al., 1996）。

上述のような筋力・筋パワーの低下は、長距離走中の走フォームの変化（Buckalew et al., 1985）や走の経済性の低下（Nicol et al., 1991b）

を引き起こすことから、走速度の低下につながる可能性が考えられる。本研究ではこの可能性を明らかにするために、レース前・後に測定した筋力・筋パワーの変化率とレース前・後半の走速度の変化率との関係について検討した。その結果、5RJの跳躍高の変化率と走速度の変化率との間に有意な正の相関関係が認められた ($r=0.450$, $n=29$; 図5-2)。このことは、レース中のSSC運動における脚の筋パワーの低下が、レース後半における走速度の低下と関係のあることを示唆するものである。マラソンレースにおいて自己の能力を最大限に発揮するためには、レースの前半から相対的に速い速度で走り、後半ではその速度の低下を最小限にとどめることが重要である(進藤, 1969)。そのためには、上述の結果をもとにすると、SSC運動による脚の筋パワー発揮をレース後半にかけても高い水準に保つことが重要であると考えられる。その理由としては、走動作と5RJがいずれもSSC運動であること、運動遂行時間が類似していることがあげられる。しかし、これまで走行中のSSC運動による脚の筋パワー発揮の低下と走速度の低下との関係を検討した報告はほとんどなく、その低下の大きさに影響する要因については明らかではない。本研究では、レース前・後の5RJの跳躍高の変化率と $\dot{V}O_{2max}$ ($r=0.179$, $n=21$) およびMSS ($r=0.281$, $n=21$) との間に有意な相関関係は認められなかった。また、レースの直前に測定した5RJの跳躍高、踏切時間および5RJindexとそれらのレース前・後の変化率との間にも有意な相関関係は認められなかった。したがって、有気的能力に優れること、あるいは疲労していない状態での脚の筋パワーの高いことが、レース後半においてSSC運動によるパワー発揮を相対的に高い水準に維持できることには必ずしもつながらないものと考えられる。なお、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力の変化率と走速度の変化率との間にも比較

的高い正の相関関係 ($r=0.407$, $n=18$, 図5-2) が認められた。したがって、長距離走中の走速度の低下を防ぐためには、短時間に発揮される脚の筋力そのものを高い水準で維持することも必要であるかもしれない。

一方、走速度の低下には、脚の筋力・筋パワーの低下以外の要因も関与していることも考えられる。しかし、レース前・後半の走速度の変化率と $\dot{V}O_2\max$ ($r=0.233$, $n=21$) およびMSS ($r=0.260$, $n=21$) との間には、いずれも有意な相関関係は認められなかったので、有気的能力がレース後半の走速度の低下には影響しないものと考えられる。これらのことを考慮すると、長距離走中の脚の筋力・筋パワーの低下と走速度の低下との関係は一義的なものではなく、被験者の有気的能力、脚の筋力・筋パワーなどの特性によっても変化するのかもしれない。また、脚の筋力・筋パワーの低下が直接走速度の低下を招来するのではなく、それが原因となって走動作や走の経済性などが変化し、さらにそれらの複合した結果として、走速度の低下が生じる可能性も推測される。したがって、今後、長距離走者のトレーニング目標とする脚の筋力・筋パワーのあり方をより明確にするためには、長距離走中の脚の筋力・筋パワーの低下と長距離走中の走速度の低下との関係をより多面的に検討することが必要であると考えられる。

5. 要約

本研究では、マラソンレース出場者32名を対象にして、レースの直前と直後に、体重、および筋力・筋パワーの指標として、握力、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力と力発揮速度 (RFD)、垂直跳び (CMJ) の跳躍高、5回連続リバウンド型跳躍 (5RJ) の跳躍高、踏切時間、リバウンドジャンプ指数 (5RJindex) を測定した。そしてそれら

の変化率と、レース前・後半の走速度の変化率との関係について検討した。主な結果は次の通りである。

- ① 被験者のレースの平均記録は3時間55分27秒±51分24秒（2時間35分22秒～5時間31分36秒）であり、レース後半の走速度（ 177.8 ± 47.4 m/分）はレース前半（ 208.6 ± 37.7 m/分）に比べて有意に低下した。
- ② レース後に測定した体重および筋力・筋パワーは、いずれもレース前に比べて有意に低下することが認められた。しかし、アイソメトリックな膝伸展運動および5RJの成績におけるレース前・後の変化率は、体重、握力および垂直跳びの跳躍高よりも有意に大きい値を示した。
- ③ レースの平均走速度と、レースとは別の日に測定した $\dot{V}O_2\max$ および血中乳酸濃度 2.2 mmol/lに相当する走速度である最大定常速度（MSS）との間にはいずれも有意な正の相関関係が認められたが、レース直前に測定した筋力・筋パワーとの間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった。
- ④ レース前・後半の走速度の変化率と、レース前・後に測定した筋力・筋パワーの変化率との関係について検討した結果、走速度の変化率と5RJの跳躍高の変化率との間に有意な正の相関関係が認められた。なお、 $\dot{V}O_2\max$ およびMSSと、レース前・後半の走速度の変化率、およびレース前・後の5RJの跳躍高の変化率との間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった。

上述の結果から、マラソンレースは脚において短時間に発揮される筋力・筋パワー、特に伸張－短縮サイクル運動における筋パワーを大きく低下させるので、それをレース後半にかけて高い水準に保つことが、走

速度を維持させるために重要であることが示唆された。

VI. リバウンドジャンプから見た持久走による脚筋疲労（実験 2：研究課題 1, 2）

1. 緒言

長時間の持久走によって、血糖値の低下 (Coyle et al., 1986), 代謝性アシドーシス (Metzger and Moss, 1990) および代謝産物の蓄積 (Sahlin, 1992) などが生じ、これによってヒトの身体は疲労する。また、持久走後には、脚の筋力・パワーが低下する (Nicol et al., 1991a ; Chevolet et al., 1993) ことが知られており、その原因としては、上述の現象に加えて筋グリコーゲンの枯渇 (Costill et al., 1973) や筋損傷 (Fitts, 1994) など、主働筋そのものに起因する要因が考えられている。しかし、この筋力・パワーの低下、すなわち筋疲労が脚の筋群において一様に起こっているか否かは明らかではない。Och et al. (1977) は、足底屈運動を疲労困憊するまで反復させた時の筋電図から、腓腹筋がひらめ筋に比べて早い段階で疲労することを認めた。また阿江ら (1986) は、走行中の関節トルクパワーの発揮パターンを検討した結果、着地時の衝撃を吸収するのは足底屈筋群と膝関節まわりの筋群であり、前方への推進エネルギーを発生するのは股関節伸展筋群であることを示唆した。これらのことは、持久走によって脚筋の疲労が一様に生じない可能性を示唆するものである。

一方、走運動は、歩・跳運動と同様に、主働筋が伸張された後に短縮する伸張－短縮サイクル (Stretch-shortening cycle, SSC) 運動である (Komi, 1992)。SSC運動はその特徴として、短縮性収縮のみからなる運動に比べて高いパワーを発揮できること (Bosco and Komi, 1979), 機械的効率が高いこと (Thys et al., 1975) などが知られている。また、

Nicol et al.(1991a)は、マラソン走行前後にランナーに30mスプリント走、垂直跳び、ドロップジャンプなどを行わせ、その時の地面反力の波形の変化から、接地時に伸張負荷を受け止めて推進力へと変換する脚筋の機能が低下することを示唆した。これらのことは、持久走による脚筋の疲労は、SSC運動の利点を消失させ、運動効率の低下などをもたらす、全身の疲労をさらに助長する可能性を示唆するものである。事実、長距離走中においては、疲労に伴ってストライドの短縮など走フォームの変化が起こること(Williams et al., 1991)や走の経済性が低下すること(Nicol et al., 1991b)が報告されており、その原因として脚筋の疲労が指摘されている(Nicol et al., 1991a)。しかし、走行中の走フォームや走の経済性は走速度に依存して変化するので、走行中の各パラメータの変化のみから脚筋の疲労の程度を判断することには限界がある。

そこで本研究では、中強度の持久走中に、走行を一時中断して行わせたりバウンドジャンプにおける下肢の筋出力の変化をもとにして、持久走中における脚筋の疲労の程度が部位によって異なるか否かを検討すること、および筋出力の変化と持久走中の心拍数、血中乳酸濃度、主観的運動強度および走速度の変化との関係から、脚筋の疲労と身体全体の疲労との関連性について検討することを目的とした。なお、本研究において実験運動としてリバウンドジャンプを用いたのは、走運動と同様にSSC運動であり、全力で行わせることによって、同一試技条件下で脚筋の疲労を評価できると考えたためである。

2. 方法

(1) 被験者

被験者として、日常的にジョギングを行っている健康な男子学生5名

(Runner群) と規則的な持久的トレーニングを実施していない健康な男子5名 (Non-runner群) を用いた。表6-1に被験者の身体特性を示した。本研究では、全ての被験者に対して事前に実験内容についての説明を行い、実験参加への同意を得た。

(2) 測定項目および測定方法

実験当日、被験者にはウォーミングアップを自由に行わせた後、血中乳酸濃度を測定し、5回連続リバウンド型跳躍 (Five-rebound jumps, 5RJ) を行わせた。その後、1周5.4kmのコースを、事前に最大下強度のトレッドミル走により算出した血中乳酸濃度 2 mmol/l に相当する速度を目標としてRunner群は8周 (43.2km)、Non-runner群は4周 (21.6km) 走行させた。設定した走速度は、Runner群が平均 $3.82 \pm 0.34 \text{ m/s}$ ($63.0 \pm 0.9\% \dot{V}O_2 \text{ max}$)、Non-runner群が平均 $2.56 \pm 0.54 \text{ m/s}$ ($57.3 \pm 6.3\% \dot{V}O_2 \text{ max}$) であった。この運動強度を選定した理由は、持久的運動中において血中乳酸濃度が 2 mmol/l となる強度で無氣的代謝が亢進しはじめること (Mader et al., 1976)、一般人のマラソンレース中の運動強度が 45~60% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ であること (小林, 1990)、および American college of sports medicine (ACSM) が推奨する健常者の持久的運動の強度が 50~75% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ であること (ACSM, 1995) などを考慮した上で、被験者が持久走中において速度を一定に保ち、無理なく最後まで走行できるように配慮したためである。被験者に対しては、走路に記した 1km ごとのマークを手がかりにして、事前に示した速度を保ちながら走行するように指示した。1周終了するごとに、5分間の休息を取らせ、その間に体重、血中乳酸濃度および Borg scale による全身と脚の主観的運動強度を測定し、その後 5RJ を行わせた。

血中乳酸濃度の測定は、各周回の走行 2 分後に指尖から採血して自動

Table 6-1 The characteristics of the subjects.

Subject	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	$\dot{V}O_2$ max (ml/kg/min)	Running speed at 2mM of lactate (m/min)	Marathon Record
Runner group						
HR	25	167.0	55.1	65.7	218.7	2.55'14"
SE	25	169.0	57.6	77.8	249.3	2.49'27"
SM	25	174.0	68.3	65.6	218.7	3.12'18"
TK	24	170.0	62.0	73.4	247.5	2.24'48"
YM	23	168.0	58.8	69.2	227.7	2.48'51"
Mean	24.4	169.6	60.4	70.4	232.4	2.50'07"
SD	0.9	2.7	5.1	5.3	15.1	17'02"
Non-runner group						
CJ	34	175.0	74.6	58.6	181.8	
KY	24	178.0	73.8	54.9	171.0	
LE	31	175.0	59.2	52.3	163.8	
NR	24	179.0	78.1	56.4	153.0	
YS	27	182.0	78.8	46.3	99.0	
Mean	28.0	177.8	72.9	53.7	153.7	
SD	4.4	2.9	8.0	4.7	32.3	

乳酸分析器（YSI社製，Model119）を用いて行った。走行中の心拍数は無線式心拍計（キャノントレーディング社製，バンテージXL）を用いて連続的に記録した。

5RJでは，跳躍高，踏切時間および爆発的なSSC運動の遂行能力の指標であるリバウンドジャンプ指数（5RJindex）を測定した。これらの測定方法については，実験1と同様である。

また本研究では，踏切中の地面反力をフォースプレート（Kistler社製，Type9281A）を用いてサンプリング周波数500Hzで記録し，同時に跳躍動作を高速度VTRカメラ（Nac社製，HSV-400）を用いて毎秒200コマで撮影した（図6-1）。撮影したVTR画像をもとにして，試技開始から終了までの身体上の7つの分析点（つま先，母指球，踵，外果，膝関節中心，大転子，胸骨上縁点）の2次元座標をVTRデジタイザーでプロットした後，Butterworth low-pass digital filterを用いて平滑化を行った（Wells and Winter, 1980）。平滑化した座標データおよび地面反力のデータを用いて，Winter（1979）および阿江ら（1986）の方法に従って，足，膝，股関節の各関節まわりのトルクを算出した（図6-2）。トルクの算出に必要な身体各部分の質量，重心位置，慣性モーメントは，阿江ら（1992）の方法に従って求めた。関節トルクに関節角速度を乗じてパワーを算出し，それを踏切局面にわたって積分することにより正と負の仕事を求め，さらに両者の絶対値の和である絶対仕事を求めた。本研究では，この絶対仕事を各関節まわりの筋群による筋出力の指標として用いた。

5RJは，各試技における5回の跳躍のうち跳躍高が高い順に3つの跳躍動作を分析対象とし，上述の各測定項目の代表値には，それらの平均値を用いた。なお，Runner群における1周目終了時に行わせた5RJの関節仕事については，欠損値があるために除外した。

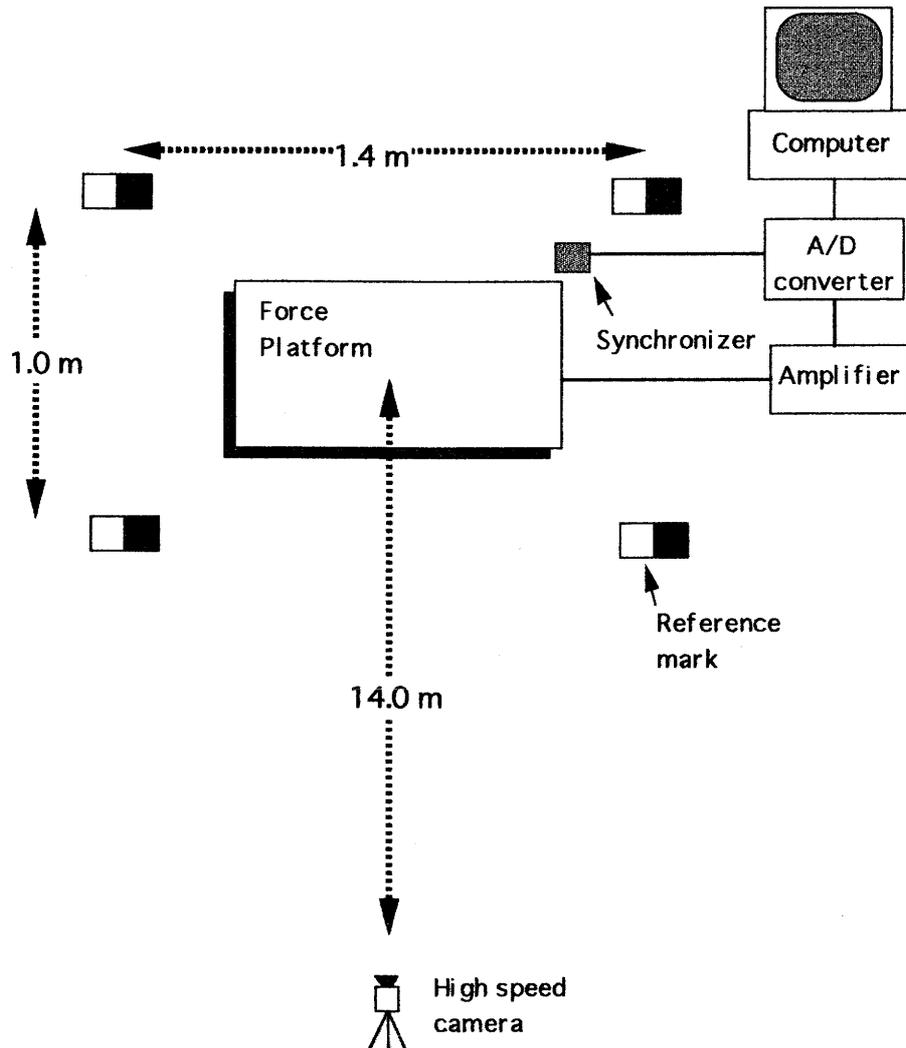
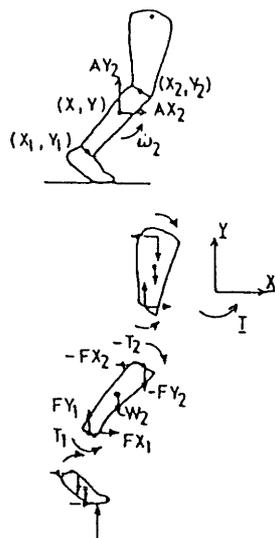


Fig. 6-1 Arrangement of the experimental equipments.



Muscle torque : Knee

$$\begin{aligned}
 FX_2 &= -m_2 AX_2 \cdot FX_1 \\
 FY_2 &= -m_2 AY_2 \cdot FY_1 - W_2 \\
 T_2 &= -I_2 \dot{\omega}_2 \cdot T_1 \\
 &\quad \cdot (X_1 - X) FY_1 - (Y_1 - Y) FX_1 \\
 &\quad - (X_2 - X) FY_2 \cdot (Y_2 - Y) FX_2
 \end{aligned}$$

Muscle power

$$Pm_i = T_i \cdot AV_i$$

AV, joint angular velocity

Muscle work

$$Wm_i = \int_{t_1}^{t_2} Pm_i dt$$

Planar link segment model used to compute joint muscle torques, muscle powers, and muscle works. (X,Y, coordinates of segment endpoints and center of gravity; AX,AY, accelerations of the segment c.g.; $\dot{\omega}$, angular accelerations of the segment; W, segment weight; m, segment mass; FX,FY, joint forces; T, joint torque; I, segment moment of inertia; AV, joint angular velocity; Pm, mechanical muscle power; Wm, mechanical work done by the muscles)

(Ae et al., 1986)

Fig. 6-2 The method for computation of joint torque, power and work done by the ankle, knee and hip joints.

(3) 統計処理

各周回終了ごとに得られた測定値について分散分析を行い、その結果、有意なF値が得られた場合にはLSD法により多重比較を行った。各測定項目間の相関係数は、ピアソンの方法を用いて算出した。統計処理の有意性は危険率5%水準で判定した。

3. 結果

図6-3に持久走中の走速度の変化を示した。走速度は持久走後半にかけて徐々に低下する傾向にあった。Runner群では8周目の走速度はそれ以前の各周回までの走速度に比べて有意に低下したが、Non-runner群ではいずれの周回間にも有意な差は認められなかった。なお、両群ともに最終周までの走速度は設定した走速度よりも若干高い値であった。総走行時間は、Runner群では3時間1分43秒±15分28秒、Non-runner群では2時間18分28秒±27分7秒であった。

図6-4に、持久走中の体重、心拍数、血中乳酸濃度および主観的運動強度の変化を示した。持久走前に比べて、両群ともに体重は周回が進むにつれて有意に減少し、心拍数および主観的運動強度はともに有意に増加したが、血中乳酸濃度には有意な変化は認められなかった。

図6-5に、持久走中に行わせた5RJの跳躍高、踏切時間および5RJindexの変化を示した。両群ともに周回が進むにつれて跳躍高と5RJindexは低下し、踏切時間は延長する傾向にあったが、いずれも有意な変化は認められなかった。

図6-6に、持久走中に行わせた5RJの踏切中の足、膝、股関節における体重当たりの絶対仕事とそれらの総仕事に対する貢献度の変化を示した。Runner群では、周回が進むにつれて、足および膝関節の絶対仕事は持久

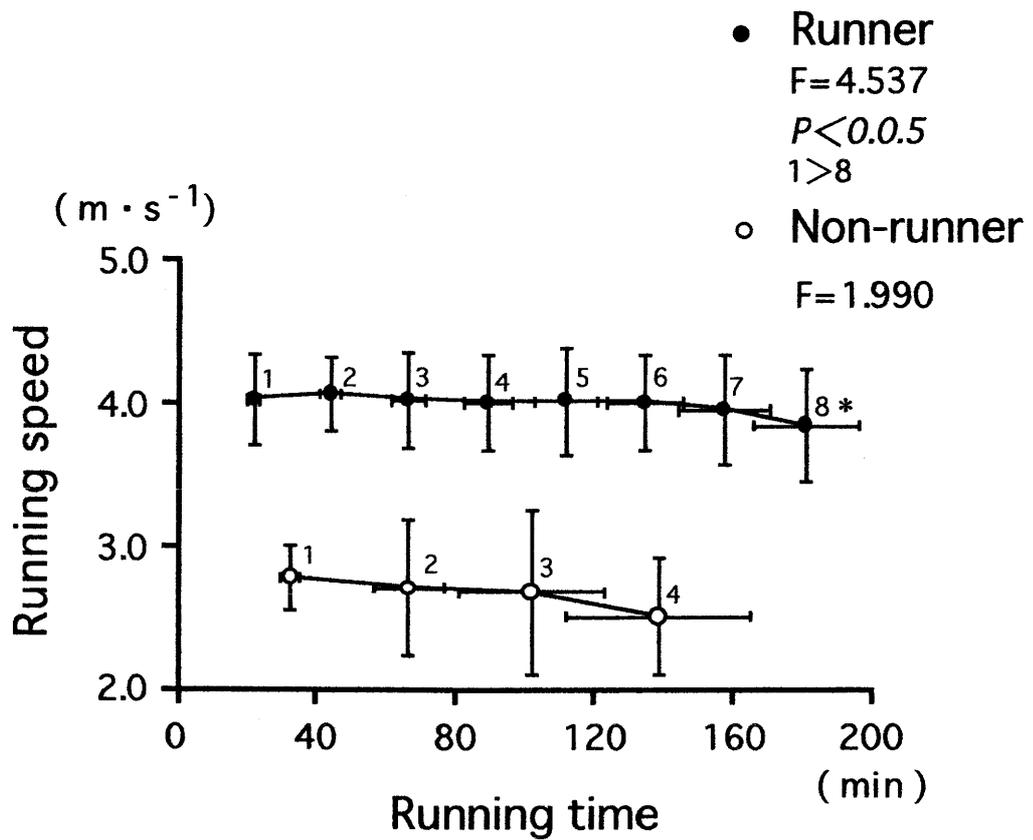


Fig. 6-3 The change of running speed during the long distance running.

1. * : Numbers (1-8) indicate measurement point after each lap
2. <, > : $P<0.05$

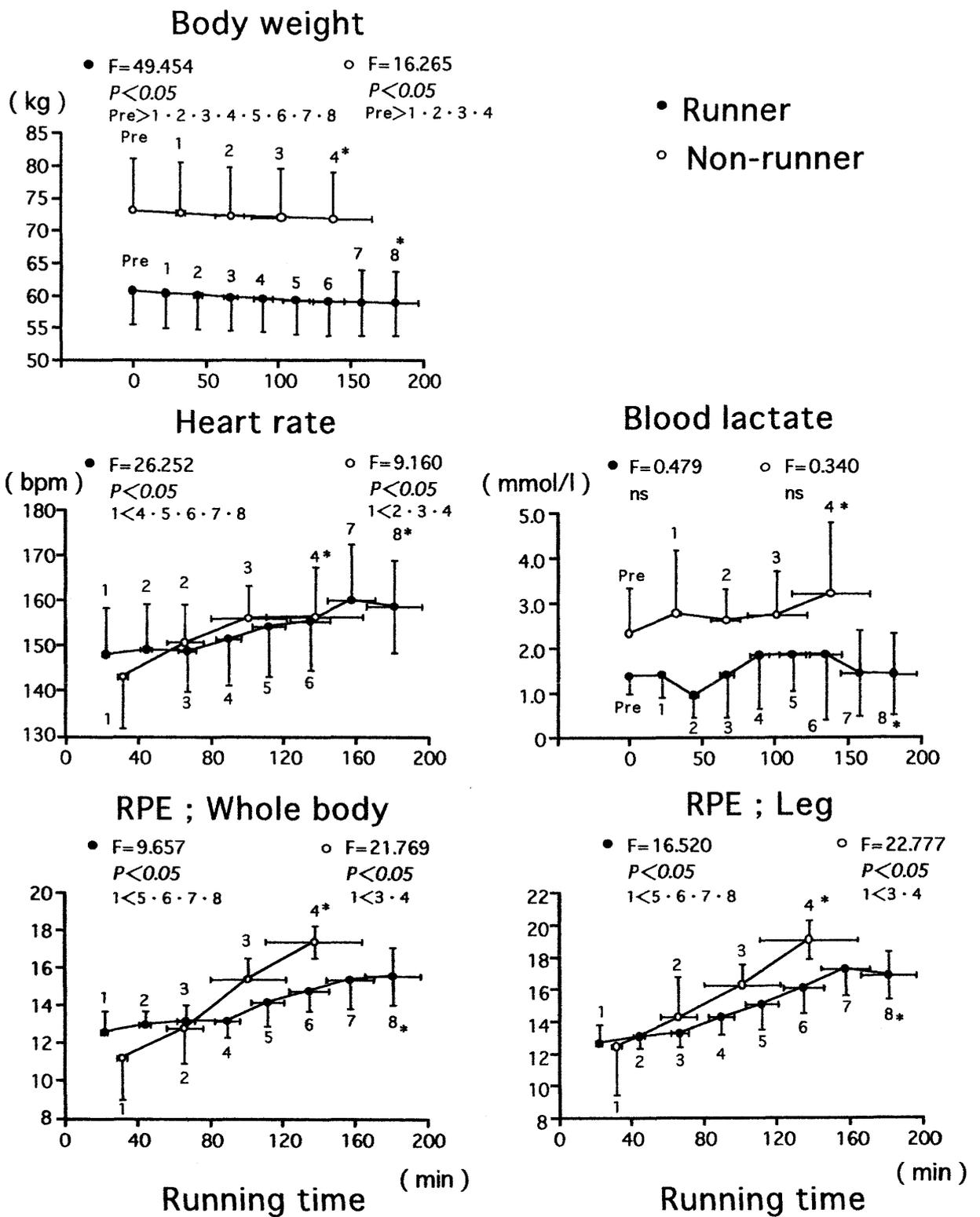


Fig. 6-4 Changes of body weight , heart rate, blood lactate and RPE during the long distance running.

- * : Numbers (1-8) indicate measurement point after each lap
- <, > : $P<0.05$

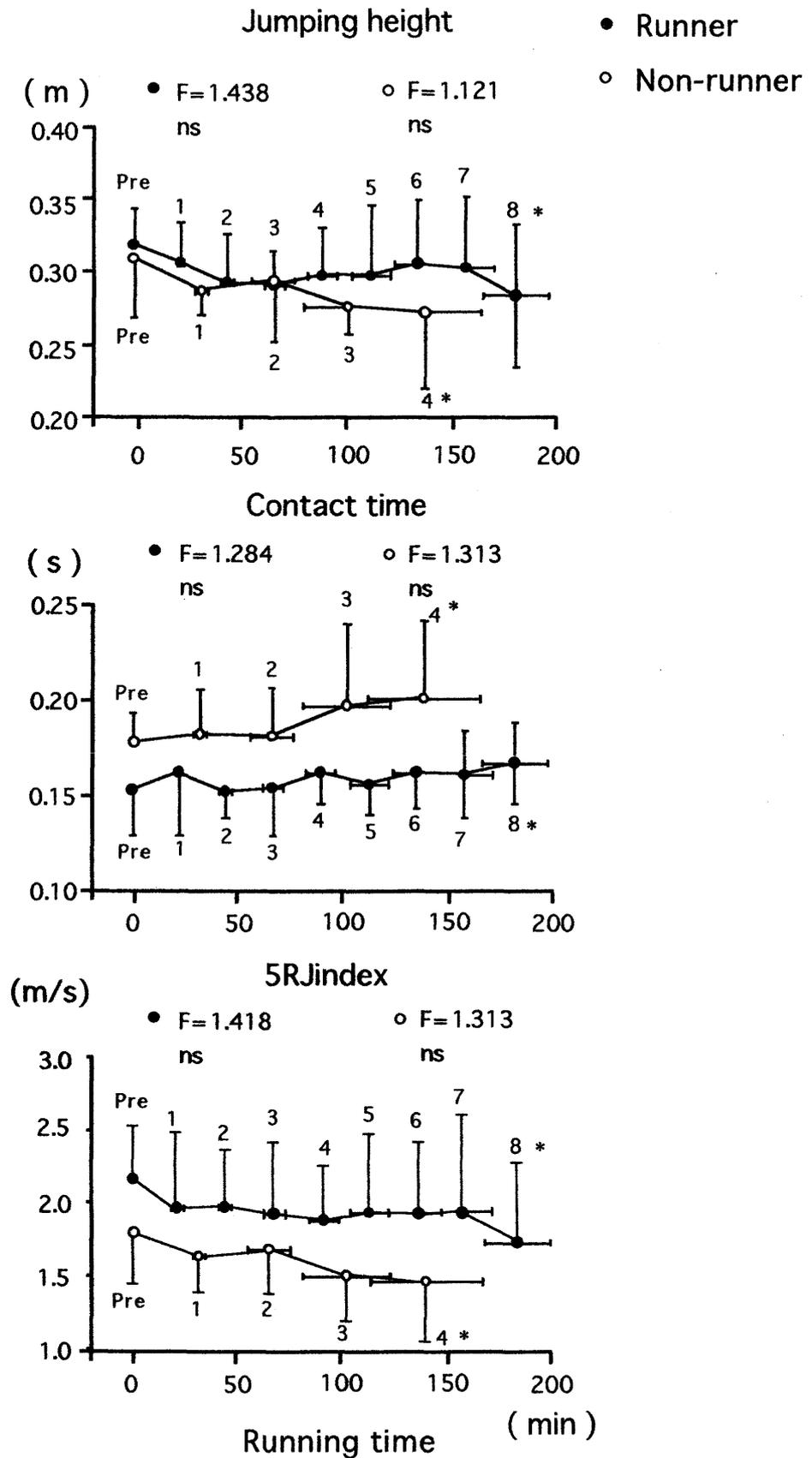


Fig. 6-5 Changes of jumping height, contact time and 5RJindex of 5RJ during the long distance running.

1. * : Numbers (1-8) indicate measurement point after each lap

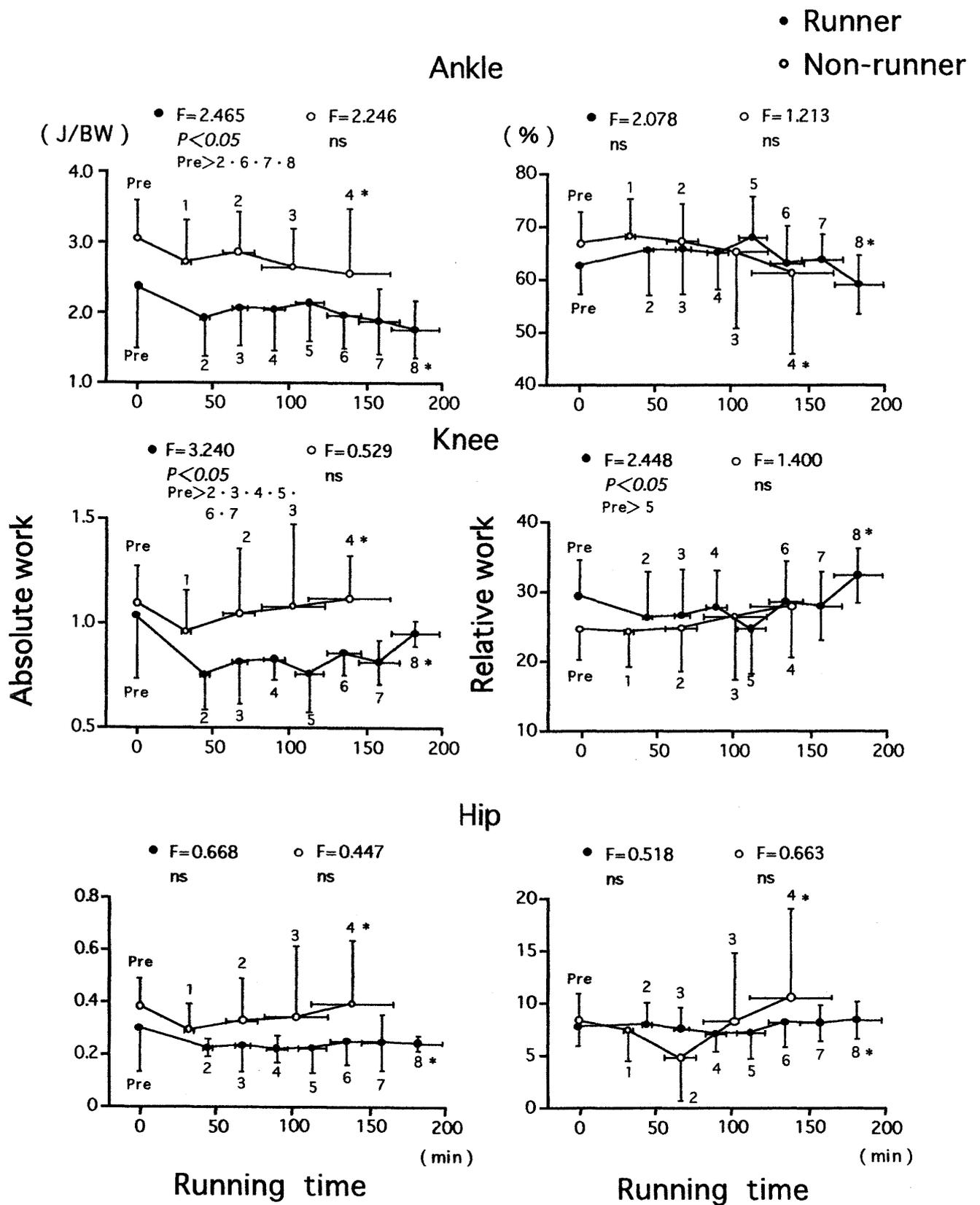


Fig. 6-6 Changes of absolute work done by the ankle, knee and hip joints, and the relative work (the ratio of work done by each joint to total work) in 5RJ during the long distance running.

1. * : Numbers (1-8) indicate measurement point after each lap

2. <, > : *P*<0.05

走前に比べて有意に低下したが，股関節の絶対仕事には有意な変化は認められなかった．また，膝関節の絶対仕事の総仕事に対する貢献度には有意な変化が認められたが，足，股関節には各周回間に有意な変化は認められなかった．一方，Non-runner群では，絶対仕事および総仕事に対する貢献度ともに足関節においては低下し，膝，股関節においては増大する傾向にあったが，いずれも各周回間に有意な変化は認められなかった．

図6-7に，持久走前半と後半の5RJの跳躍高，踏切時間および5RJindexの変化率と，持久走中の主観的運動強度の変化率との関係を示した．なお，変化率の指標として各測定項目の最初の成績（1，2周目の平均値）に対する最後の成績（7，8周目の平均値）の割合を用いた．Runner群では跳躍高および5RJindexと脚の主観的運動強度との間にそれぞれ有意な負の相関関係（順に $r = -0.908$ ， $r = -0.920$ ， $P < 0.05$ ）が認められ，踏切時間と全身の主観的運動強度との間には有意な正の相関関係（ $r = 0.891$ ， $P < 0.05$ ）が認められた．一方，Non-runner群ではいずれの項目間にも有意な相関関係は認められなかった．なお，5RJの成績の変化率と，心拍数および血中乳酸濃度の変化率との間には，両群ともにいずれの項目間にも有意な相関関係は認められなかった．

図6-8に，持久走前・後での5RJにおける踏切動作中の足，膝，股関節の絶対仕事の総仕事に対する貢献度を，Runner群，Non-runner群ともに走速度の低下率が最も大きかった被験者と，最も小さかった被験者について示した．なお，走速度の低下率は，最初の1周に対する最後の1周の走速度の割合から求めた．両群ともに，持久走後半にかけて走速度が比較的大きく低下した被験者は，足関節の仕事が相対的に低下し，股関節の仕事が相対的に増加していた．

● Runner
○ Non-runner

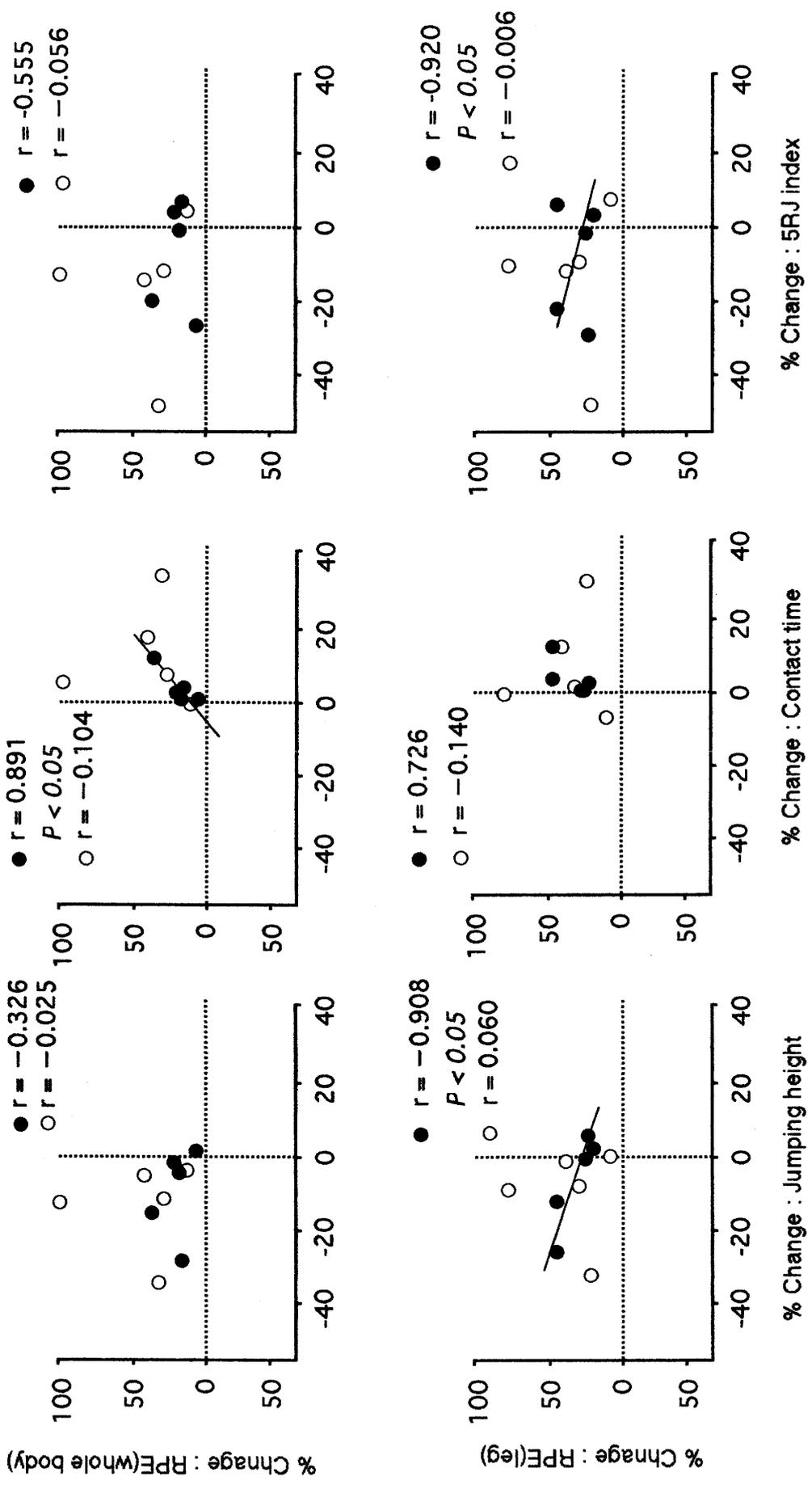
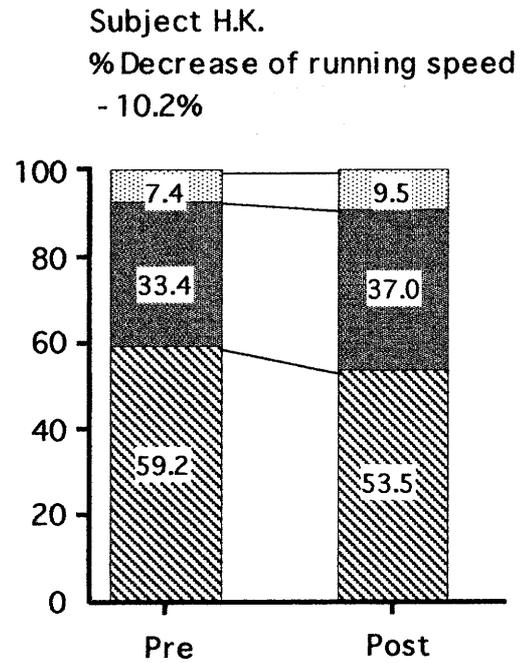
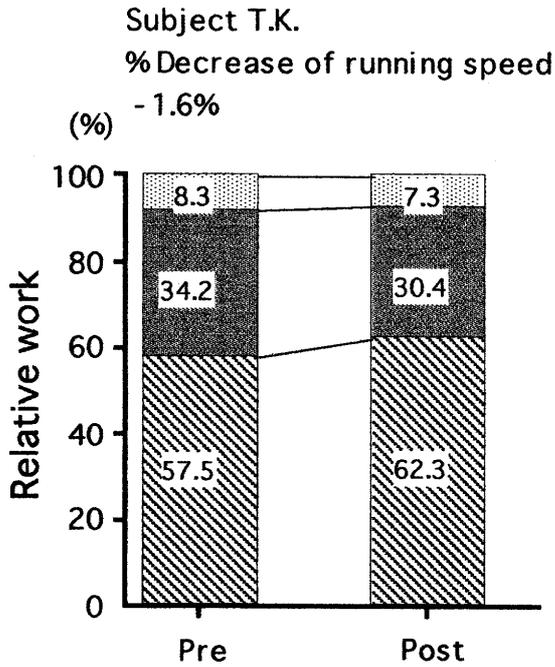


Fig. 6-7 Relationships between percent change of jumping height, contact time and 5RJ index of 5RJ and percent change of RPE during the long distance running.

Runner group



Non-runner group

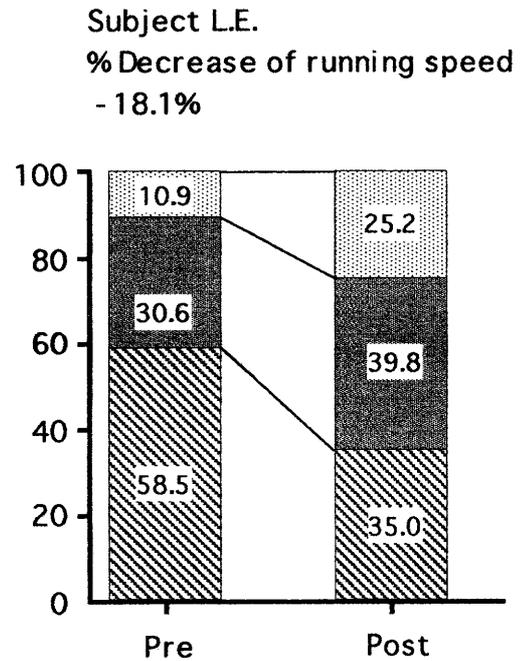
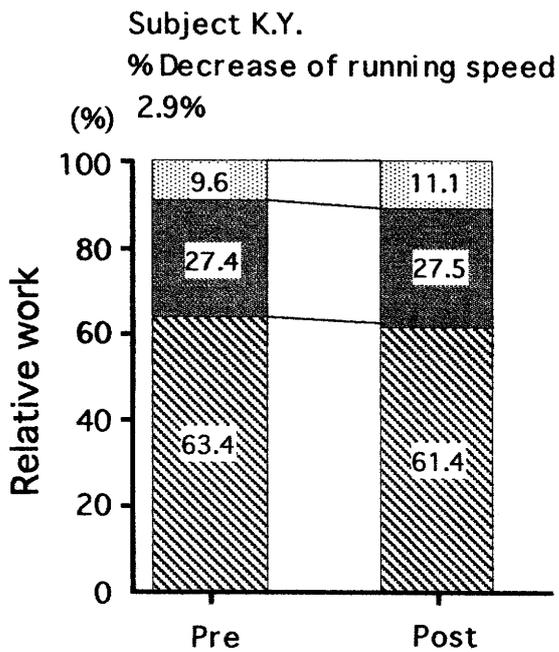


Fig.6-8 Typical examples for relative work done by the ankle, knee and hip joints of 5RJ before and after the long distance running.

4. 考察

本研究では、各被験者を相対的に同じ負荷で走行させるために、血中乳酸濃度が2 mmol/lに相当する走速度を維持しながら走行するように被験者に指示した。走行中の血中乳酸濃度は、Runner群では常に2 mmol/l以下で推移し、Non-runner群では徐々に上昇する傾向にあったが3 mmol/l以内であった(図6-4)。したがって、本研究における持久走は、当初のねらい通り無氣的代謝がそれほど亢進しない、中強度の運動であったと考えられる。しかし、走速度は持久走後半にかけて徐々に低下していたにもかかわらず、両群ともに心拍数および主観的運動強度は増大したこと(図6-4)、および持久走後半にかけて脚の主観的運動強度が全身の主観的運動強度に比べて大きく増加していたこと(図6-4)から、持久走後半にかけて、身体の疲労は徐々に亢進し、脚筋の疲労も著しかったと推察される。

そこで本研究では、脚筋の疲労の程度を持久走中に行わせた5回連続リバウンド型跳躍(5RJ)を用いて検討した。その結果、両群ともに5RJの跳躍高と5RJindexは低下し、踏切時間は延長する傾向にあったが、それらはいずれも持久走前に比べて有意な差は認められなかった(図6-5)。このことは、持久走が脚全体での筋出力にそれほど大きく影響しなかったことを示しており、先行研究(Nicol et al., 1991a)の結果とは異なっている。Nicol et al. (1991a)はマラソン走行後における筋力・パワーの低下を報告しているが、彼らは実際のマラソンレースと同じ条件下で筋力・パワーを測定しており、走速度を血中乳酸濃度2mmol/lに設定した本研究に比べて運動強度が高かったと考えられる。Sargeant and Dolan (1987)やFerretti et al. (1987)は、持久的運動後の筋出力の低下の割合

が、運動強度に比例して大きくなったことを報告している。これらのことを考慮すると、本研究における持久走中の運動強度は、脚の筋出力を大きく低下させるほどの水準には達していなかったことが推察される。

一方、本研究では、持久走中の脚筋の疲労の程度が部位によって異なるか否かを、5RJの踏切中の下肢における関節まわりの絶対仕事を用いて検討した。その結果、Runner群では足関節と膝関節の絶対仕事が、持久走後半において有意に低下し（図6-6）、足関節と膝関節まわりの筋群が顕著に疲労していたことが推察された。阿江ら（1986）は、各種の走速度による走行中の関節トルクパワーを測定し、本研究と比較的走速度がしている3.89 m/sでの走行においては、接地期でのパワーは足関節まわり、次いで膝関節まわりの順に大きかったとしている。したがって、走行中の筋電図を測定した先行研究（後藤ら、1983）の結果も併せて考えると、持久走中には下肢の筋群のなかでも、下腿三頭筋をはじめとする足関節まわりの筋群および大腿四頭筋をはじめとする膝関節伸筋群に大きな負担がかかっていたものと考えられる。しかし、両群ともに持久走後半にかけて足関節の仕事は漸減したのに対して、膝関節の仕事はわずかながら回復する傾向にあった。また、股関節の仕事はほとんど変化しなかった（図6-6）。深代ら（1998）は、20日間のベッドレスト前後に行わせたスクワットジャンプにおいて発揮された関節モーメントとパワーの変化から、脱トレーニングによる筋機能低下の起こり方が、部位と筋量によって異なる可能性を示唆している。すなわち彼らは、筋量の少ない足関節まわりの筋群が比較的筋量の多い大腿四頭筋、大腿二頭筋および大臀筋などに比べて筋機能の低下が大きいことから、その結果として、ジャンプ中のパワー発揮において膝と股関節への依存度が強まっていたと推察している。本研究においても、持久走後半にかけて足関節まわり

の筋群が著しく疲労した結果、5RJにおいて高い筋出力を維持するために、膝関節と股関節まわりの筋群による筋出力に次第に依存するようになった可能性がある。なお、本研究では、絶対仕事およびその総仕事に対する貢献度を筋出力の指標として用いて検討した。今後、筋疲労の起こり方の部位による相違をより詳細に検討するためには、関節仕事を正と負の仕事に分けること、あるいは関節トルク、パワーの発揮パターンを持久走前後で比較することなどが必要であると考えられる。

これまで述べてきたように、平均値でみると、持久走中の心拍数と主観的運動強度は徐々に増加していたのに対して、5RJの成績にはそれほど大きな変化は認められなかった。しかし、被験者ごとに見ると、持久走中の各測定項目が大きく変化した者とそれほど変化しなかった者がいた。そこで、持久走前半と後半の5RJの跳躍高、踏切時間および5RJindexの変化率と、持久走中の主観的運動強度の変化率との関係を検討した。その結果、Runner群では跳躍高および5RJindexと脚の主観的運動強度との間にそれぞれ有意な負の相関関係（順に $r = -0.908$, $r = -0.920$, $P < 0.05$ ）が認められ、踏切時間と全身の主観的運動強度との間には有意な正の相関関係（ $r = 0.891$, $P < 0.05$ ）が認められた（図6-7）。このことは、持久走の後半にかけて主観的運動強度が増加していた被験者ほど、5RJの成績が低下していたことを意味しており、脚全体での筋出力の低下と持久走による全身および脚筋の疲労の亢進が関連している可能性を示唆するものである。主観的運動強度に影響する要因は数多く存在し（Mihevic, 1981）、本研究における持久走後半にかけての主観的運動強度の上昇の原因を明示することはできない。5RJの跳躍高、踏切時間および5RJindexの変化率と、心拍数と血中乳酸濃度の変化率との間に有意な相関関係が認められなかったことから、持久走による5RJの成績の低下に

対する脱水 (Maron et al., 1973) や代謝性アシドーシス (Metzger and Moss, 1990) の影響は少ないものと考えられる。それよりもむしろ、脚の主観的運動強度が全身の主観的運動強度に比べて大きく増加していたことから、筋グリコーゲンの枯渇 (Costill et al., 1973) や筋損傷 (Fitts, 1994) などによる脚筋の疲労が、主観的運動強度の亢進に大きく影響し、同時に5RJの成績を低下させていたものと考えられる。

上述のように、筋出力の低下は主観的運動強度の亢進に現れた疲労の結果であると考えられるが、それとは逆に筋出力の低下が身体の疲労をさらに加速させる可能性も考えられる。本研究において、持久走の最後の1周で走速度の低下が最も大きかった被験者は、5RJの足関節の絶対仕事の総仕事に対する貢献度が最も低下していた (図6-8)。このことは、足関節まわりの筋群の筋出力の低下が持久走の走速度の低下と関係している可能性を示すものと考えられる。先行研究では、長距離走中において走フォームが経時的に変化すること (Williams et al., 1991b)、あるいは走の経済性が低下すること (Nicol et al., 1991b) が報告されており、その原因として走行中の筋出力の低下があげられている (Nicol et al., 1991ab)。このことも考慮すると、局所的な筋疲労による走フォームの乱れや走の経済性の低下、あるいは筋出力の低下によるSSC運動の利点である高い機械的効率 (Thys et al., 1975) の低下、などによって持久走中の疲労が亢進し、結果としてパフォーマンスの低下がもたらされた可能性が考えられる。そのように考えると、持久走中の筋出力の低下を防ぐことが、走速度の低下を防ぎ、しかも快適に走り続けることに貢献する可能性も考えられる。

なお、本研究における持久走はあらかじめ設定した走速度をできるだけ維持することを目標としたものであり、実際のレースとは条件が異な

る。今後、実際のレースでの筋出力の低下とパフォーマンスとの関係を検討することによって、脚筋の疲労が長距離走パフォーマンスに及ぼす影響はより明確になり、市民ランナーも含めた様々なレベルにある長距離走者に有用な知見が得られるものと考えられる。

5. 要約

本研究では、中強度の持久走中に行わせたりバウンドジャンプにおける下肢の筋出力の変化、および持久走中の心拍数、血中乳酸濃度、主観的運動強度などの変化をもとにして、持久走中における脚筋の疲労の様相について検討することを目的とした。この課題を明らかにするために、日常的にジョギングを行っている5名の男性（Runner群）と行っていない5名の男性（Non-runner群）を対象にして、血中乳酸濃度2 mmol/lに相当する強度で、1周5.4kmのコースを5分間の休息をはさんでRunner群は8周（43.2km）、Non-runner群は4周（21.6km）走行させ、休息中に体重、血中乳酸濃度、主観的運動強度、および5回連続りバウンド型跳躍（5RJ）における跳躍高、踏切時間、りバウンドジャンプ指数（5RJindex）および踏切中の足、膝、股関節における絶対仕事を測定した。主な結果は次の通りである。

- ① 持久走中に両群ともに体重は有意に減少し、心拍数および主観的運動強度は有意に増加したが、血中乳酸濃度には有意な変化は認められなかった。
- ② 両群ともに、持久走中に行かせた5RJの跳躍高と5RJindexは低下し、踏切時間は延長する傾向にあったが、いずれも持久走前に比べて有意な差は認められなかった。しかしRunner群では、5RJの踏切局面における足と膝関節の絶対仕事、および膝関節の絶対仕事の

総仕事に対する貢献度は、持久走前に比べて有意に減少した。

- ③ Runner群では、持久走前半と後半における5RJの跳躍高および5RJindexの変化率と脚の主観的運動強度の変化率との間に有意な負の相関関係が認められ、踏切時間の変化率と全身の主観的運動強度の変化率との間に有意な正の相関関係が認められた。一方、Non-runner群では、いずれの項目間にも有意な相関関係は認められなかった。
- ④ 両群ともに、持久走の最初の1周に対する最後の1周の走速度の低下率が最も大きかった者は最も小さかった者と比較して、持久走後における5RJの各関節の絶対仕事の総仕事に対する貢献度が足関節では低下し、股関節では増加していた。

以上の結果から、一定速度を維持することを目標とした中強度の持久走では、1) 平均値で見ると、脚全体での筋出力を大きく低下させないものの、持久走後半にかけて足および膝関節まわりの筋群において疲労が著しく起こること、2) 個人ごとにみると、持久走中の疲労の亢進が脚筋出力の低下と関連があること、特に足関節まわりの筋出力の低下が持久走中の走速度の低下を引き起こす可能性のあることなどが示唆された。

VII. マラソンレースによる走の経済性，走動作および筋力・筋パワーの変化の相互関係（実験3：研究課題2，3）

1. 緒言

実験1，2の結果から，1）マラソンレースをはじめとする長距離走においては，爆発的に発揮される筋力あるいは伸張-短縮サイクル運動において発揮される筋パワーが大きく低下すること．2）これらの筋力・筋パワーの低下が持久走中の走速度の低下や疲労の亢進に関連する可能性のあることが明らかになった．しかし，一般に長距離走は長時間にわたって有気的なエネルギー供給に頼りながら行われるので，筋力・筋パワーの低下が長距離走中の走速度の低下と関係する理由については明らかではない．

ところで，マラソンレースなどの長距離走後には，最大下走行中の酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）が増大することが報告されている（Nicol et al., 1991c；Thomas et al., 1995）．最大下走行中の $\dot{V}O_2$ は走の経済性を示す指標として用いられており（Cavanagh and Kram, 1985），長距離走の成績を決定する要因の一つとされている（Morgan and Craib, 1992）．走行中の $\dot{V}O_2$ の増大，すなわち走の経済性の低下は，一定速度で走行するためのエネルギー需要量の増加を意味するものであり，最大有気的パワーの低下（Dressendorfer, 1991）とあいまって，疲労を亢進させて走速度の低下を引き起こす可能性が考えられる．また，持久走中には疲労とともにストライド長や、膝および股関節角度などが変化すること（Elliott and Ackland, 1981；Williams et al., 1991b）が知られており，これらの走動作の変容が走の経済性の低下をもたらす可能性も指摘されている（Nicol et al., 1991c；Morgan et al.；1990；Morgan et al., 1995）．以上のこと

から、長距離走による筋力・筋パワーの低下が、走動作の変化や走の経済性の低下を引き起こし、結果として走速度の低下をもたらしている可能性が考えられる。しかし、このことについては十分に検討されていない。また、長距離走後の筋力・筋パワーの低下、走の経済性および走動作の変化が相互に関連しあって起こっているか否かについても明確にされていない。したがって、これらのことを明らかにすることによって、これまで走の経済性や走動作の変化および筋疲労などから一面的に検討されてきた長距離走による疲労に関して、より統合的な知見が得られる可能性がある。また、なぜ長距離走の成績と筋力・筋パワーとの間に密接な関係（江橋ら，1989）が認められるのかについても明らかにできる可能性がある。そこで本研究では、マラソンレース前・後に測定した最大下走行中の走の経済性と走動作および脚の筋力・筋パワーの成績の変化の相互関係、およびこれらとレース中の走速度の低下との関係について検討することを目的とした。

2. 方法

(1) 被験者

被験者として、1996（平成8年）年11月24日と1997（平成9年）年11月30日に開催された「つくばマラソン大会」に出場した健康な男性13名を用いた。被験者の身長、体重および最大酸素摂取量はそれぞれ 171.1 ± 5.9 cm、 61.7 ± 4.6 kgおよび 63.8 ± 4.6 ml/kg/minであった。被験者に対しては、本実験の内容および危険性についての説明を行い、書面による実験参加への同意を得た。

(2) 測定項目および測定方法

1996年、1997年の大会ともに、レース前の測定は、レースの3日前か

ら前日にかけてのいずれかの1日に行った。被験者にはウォーミングアップを任意に行わせた後、走の経済性および走動作を測定するために、最大下のトレッドミル走行を斜度0度、分速200mで3分間行わせた。走速度を分速200mとした理由は、被験者のこれまでのマラソンレースの記録、有気的能力などから、レース後の疲労した条件であっても最後まで走行できるように配慮したことによる。また、それに続いて脚の筋力・筋パワーを測定するために、アイソメトリックな脚伸展運動、垂直跳び

(Counter movement jump, CMJ), 5回連続リバウンド型跳躍 (Five-rebound jump, 5RJ) をそれぞれ全力で行わせた。そして、これと同じ測定をマラソンレースのゴール後1時間以内にも行わせた。実験室とマラソンレースのゴールは約200m離れており、レースを終えた被験者にはなるべく早く実験室に徒歩で来室させた。なお、被験者に対してマラソンレースのペース配分についての指示は行わなかった。また、被験者は本実験参加以前に、トレッドミル上での最大酸素摂取量の測定などを少なくとも1度以上経験していた。

1) 最大下走行中の走の経済性および走動作

最大下走行中に被験者の呼気ガスを採集し、全自動呼気ガス分析装置 (Mijnhardt社製, Oxycon- γ) を用いて30秒毎に $\dot{V}O_2$ を測定した。走の経済性の指標には、最後の1分間の $\dot{V}O_2$ の平均値を用いた。また、走行中の心拍数をハートレートモニタ (キャノントレーディング社製, Vantage XL) を用いて測定した。

一方、最大下走行中の走動作を被験者の左側方からVTR (パナソニック社製, AG-25C) に60fpsで収録し、得られた画像からストライド頻度とストライド長および支持時間と非支持時間を求めた。ストライド頻度は左足接地から右足接地までの時間の逆数とし、ストライド長は走速度

をストライド頻度で除すことにより求めた。また、支持時間は左脚が接地している時間、非支持時間は左足離地から右足接地に要した時間とした。なお、これらの諸変数の代表値には、走行開始後2～3分の間における連続した3サイクル（1サイクルは左足接地から次の左足接地まで）間の平均値を用いた。

2) 脚の筋力・筋パワー

脚の筋力・筋パワーの指標として、アイソメトリックな膝伸展運動の最大力と力発揮速度（RFD）、CMJの跳躍高および5RJの跳躍高と踏切時間を測定した。これらの測定方法については実験1と同様である。

(3) 統計処理

レース前・後半の走速度の有意差の検定、およびレース前・後における各測定項目の有意差の検定は、対応のあるt-検定を用いて行った。レース前・後に行わせた最大下走行中の $\dot{V}O_2$ の30秒ごとの経時的変化を検討するために、またレース前・後における各測定項目の変化の大きさを比較するために、一元配置の分散分析を行ったうえで、LSD法により多重比較を行った。各測定項目間の相関係数は、ピアソンの方法を用いて算出した。統計処理の有意性は危険率5%水準で判定した。

3. 結果

マラソンレースの記録は平均3時間1分47秒±31分22秒（2時間26分44秒～3時間59分17秒）であった。レース後半の走速度は前半に比べて有意に低下し、その低下率は $-11.6 \pm 16.6\%$ （ $-56.1 \sim +3.9\%$ ）であった。走速度の低下率は式【変化率 = $(\text{後半走速度} - \text{前半走速度}) / \text{前半走速度} \times 100$ 】により算出した。

図7-1に、レース前・後に行わせた最大下走行中の $\dot{V}O_2$ の30秒ごとの経時的変化を示した。本研究では、被験者の負担をできるだけ少なくするために、走速度は1種類とし、走行時間を3分間とした。これは走の経済性を測定するために一般に用いられている走行時間に比べて若干短い。しかし、レース前、レース後ともに走行開始2分目以降の $\dot{V}O_2$ は30秒前の値に対して有意な増加は認められなかった。したがって、3分間走行により $\dot{V}O_2$ は定常状態に達しており、被験者の走の経済性の評価は可能であったと考えられる。

表7-1に、レース前・後における各測定項目の結果を示した。最大下走行中の $\dot{V}O_2$ は、全体としてレース後に増加する傾向にあり（図7-1）、走行中の最後の1分間の平均変化量は $+2.8 \pm 2.2 \text{ ml/kg/min}$ であったが、統計的に有意な変化ではなかった。走動作に関する測定項目では、ストライド頻度は増加し、ストライド長は短縮する傾向が認められ、支持時間は増大し、非支持時間は短縮する傾向が認められたが、有意な差が認められたのは非支持時間のみであった。また、体重、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD、CMJの跳躍高と5RJの跳躍高は有意に低下し、5RJの踏切時間は有意に増大した。

図7-2に、レース前・後における各測定項目の変化率を示した。各測定項目の変化率は式【変化率 = $(\text{レース後の値} - \text{レース前の値}) / \text{レース前の値} \times 100$ 】により算出した。アイソメトリックな膝伸展運動の最大力とRFD、および5RJの踏切時間は、体重、最大下走行中の $\dot{V}O_2$ および走動作に関する測定項目に比べて、それらの変化率が有意に大きかった。

表7-2に、レース前・後における走の経済性、走動作および筋力・筋パワーの各変化率の相互の相関係数を示した。これらの間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった。

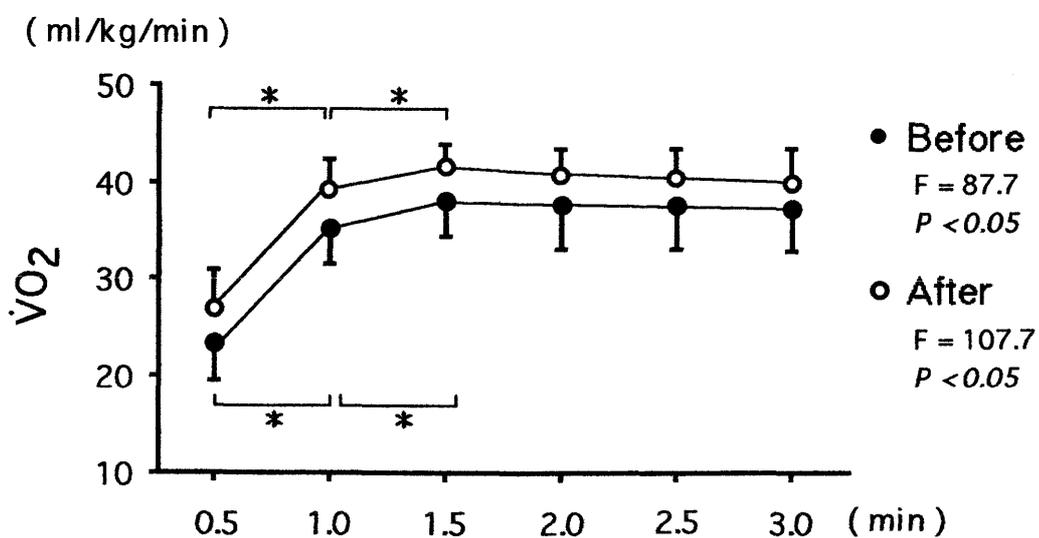


Fig. 7-1 Time courses of $\dot{V}O_2$ during submaximal treadmill running before and after the race.

* : $P < 0.05$

Table 7-1 Body weight, running economy, running mechanics and muscular strength and power before and after the race.

Measurement		n		Mean	SD	Difference (t-value)
Body weight	(kg)	13	Before	61.7	4.59	
			After	59.5	4.61	9.43 *
Sub-maximal running		13				
$\dot{V}O_2$	(ml/kg/min)		Before	38.3	2.8	
			After	40.3	3.5	1.80
Step frequency	(step/s)		Before	2.93	0.11	
			After	3.03	0.13	2.20
Step length	(m)		Before	1.13	0.04	
			After	1.10	0.05	2.20
Support time	(s)		Before	0.248	0.034	
			After	0.253	0.021	0.74
Non-support time	(s)		Before	0.096	0.026	
			After	0.080	0.017	2.30 *
Knee extension		13				
Max force	(kg/BW)		Before	1.004	0.336	
			After	0.700	0.167	4.45 *
RFD	(kg/s)		Before	213.7	63.4	
			After	132.8	43.3	4.45 *
CMJ		12				
Jumping height	(m)		Before	0.412	0.065	
			After	0.382	0.050	2.21 *
5RJ		12				
Jumping height	(m)		Before	0.380	0.029	
			After	0.328	0.058	3.77 *
Contact time	(s)		Before	0.159	0.027	
			After	0.200	0.059	4.09 *

* : $P < 0.05$

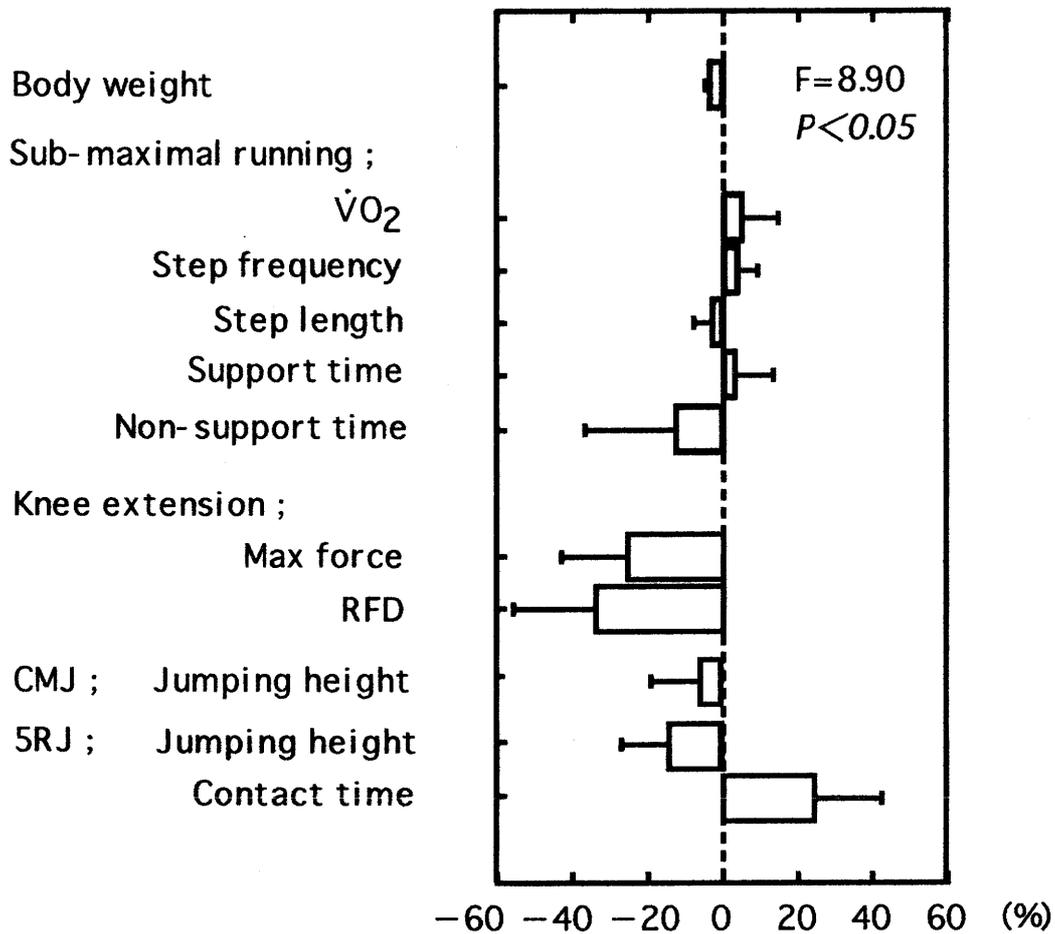


Fig. 7-2 Relative changes of body weight, running economy and running mechanics, and muscular strength and power before and after the race.

1. In order to perform ANOVA on the difference of each mean value, the value of $\dot{V}O_2$, step frequency, support time and 5RJ-CT were changed from positive to negative.

2. The results of multiple comparison among measurements were as follows ;

$BW \cdot \dot{V}O_2 \cdot SF \cdot SL \cdot SUPT \cdot NSUPT < MF \cdot RFD \cdot 5RJ-CT$

$CMJ \cdot 5RJ-JH < MF \cdot RFD$

Body weight : BW, Step frequency : SF, Step length : SL, Support time : SUPT, Non-support time : NSUPT, Max force of isometric knee extension : MF, Rate of force development : RFD, Jumping height of 5RJ : 5RJ-JH, Contact time of 5RJ : 5RJ-CT

< : $P < 0.05$

Table 7-2 Correlation coefficients among relative changes of running economy and running mechanics, and muscular strength and power before and after the race.

	Sub-maximal running			
	$\dot{V}O_2$	Step frequency	Step length	Support time Non-support time
Sub-maximal running				
$\dot{V}O_2$	-0.049	0.050	0.013 -0.017
Knee extension				
Max force	-0.365	0.307	-0.311	0.490 -0.415
RFD	0.018	0.281	-0.289	0.122 -0.196
CMJ Jumping height	-0.197	-0.283	0.267	0.001 0.049
5RJ Jumping height	0.039	-0.044	0.016	0.115 0.183
Contact time	-0.190	-0.063	0.073	-0.063 0.107

本研究では、マラソンレース前・後半の走速度の低下率から、被験者を速度維持群（6名，低下率： $0.44 \pm 2.6\%$ ）と速度低下群（7名，低下率： $-21.8 \pm 16.8\%$ ）との2群に分け，レース前・後における各測定項目の変化率を比較した（表7-3）。速度維持群では，最大下走行中の非支持時間（短縮），アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD（低下），5RJの踏切時間（増大）に有意な変化が認められた。これに対して，速度低下群では最大下走行中の $\dot{V}O_2$ （増加），および筋力・筋パワーに関する全ての測定項目（5RJの踏切時間以外はすべて低下）が有意に変化した。なお，速度維持群と速度低下群との間で，レース前・後の変化率に有意な差が認められたのは，最大下走行中の支持時間とCMJの跳躍高であった。

4. 考察

本研究では，マラソンレース前・後において最大下走行中の走の経済性と走動作および脚の筋力・筋パワーを測定した。

最大下走行中の $\dot{V}O_2$ ，すなわち走の経済性には有意な変化は認められなかったが（表7-1），被験者13名のうち， $\dot{V}O_2$ が増加した者が10名，減少した者が3名であり，その平均変化量は $+2.8 \pm 2.2 \text{ ml/kg}$ であった。

Williams et al. (1991a) は，4週間にわたり10名の男性ランナーの走速度 3.13 m/s での走行中の $\dot{V}O_2$ の変動について検討した結果，同一個人内で約 1.0 ml/kg/min 前後の変動が認められることを報告した。本研究における変化量はこれよりもやや大きく，走の経済性がレースによって何らかの影響を受けた可能性は否定できない。なお，先行研究においては，持久走後に走の経済性が低下するとした報告（Nicol et al., 1991c；Thomas et al., 1995）と，変化しないとした報告（Morgan et al., 1990；

Table 7-3 Comparisons in the changes of running economy and running mechanics, and muscular strength and power before and after the race between Keep group and Down group according to the change of running speed in the race.

Measurement			Before		After		% change
			Mean	SD	Mean	SD	
Sub-maximal running							
V̇O ₂	(ml/kg/min)	Keep	37.6	2.9	38.65	4.4	3.01
		Down	39.5	1.7	41.46	2.3	* 4.95
Step frequency	(step/s)	Keep	2.97	0.01	3.05	0.10	2.92
		Down	2.90	0.11	3.02	0.17	3.98
Step length	(m)	Keep	1.12	0.05	1.09	0.04	-2.64
		Down	1.15	0.04	1.11	0.06	-3.56
Support time	(s)	Keep	0.224	0.025	0.243	0.019	9.10
		Down	0.268	0.029	0.261	0.021	-2.26 §
Non-support time	(s)	Keep	0.112	0.024	0.085	0.016	* -23.50
		Down	0.083	0.021	0.076	0.017	-4.18
Knee extension							
Max force	(kg/BW)	Keep	0.927	0.413	0.639	0.193	* -25.74
		Down	1.070	0.268	0.752	0.133	* -27.11
RFD	(kg/s)	Keep	178.3	56.1	124.3	26.7	* -28.39
		Down	244.1	55.4	140.1	54.9	* -40.28
CMJ							
Jumping height	(m)	Keep	0.376	0.043	0.384	0.035	2.85
		Down	0.438	0.068	0.380	0.062	* -13.11 §
5RJ							
Jumping height	(m)	Keep	0.361	0.023	0.312	0.054	-13.67
		Down	0.393	0.027	0.339	0.062	* -14.04
Contact time	(s)	Keep	0.150	0.019	0.185	0.036	* 23.48
		Down	0.166	0.032	0.211	0.072	* 24.88

1. * : Before vs After ($P < 0.05$)

2. § : Keep vs Down ($P < 0.05$)

Morgan et al., 1996) があり、一致した見解が得られていない。その原因として、実験運動の持続時間と運動強度、被験者のトレッドミルへの習熟度およびサンプルサイズなどが指摘されている (Morgan et al., 1996)。したがって、持久走後の疲労をよりの確に反映するための走の経済性の測定方法について、今後さらに検討する必要がある。

また、最大下走行中の走動作については、レース後にストライド頻度は増加しストライド長は減少する傾向にあり、非支持時間は有意に減少し、支持時間は増加する傾向にあった (図7-2)。これらのことは、走動作が全体として小さくなり、全体として「つぶれた」動き (Williams et al., 1991b) へ変化していたことが示唆するものである。この原因としては、後述する脚筋の疲労などによって、走行中において一歩ごとに着地衝撃を受け止めて前方へ身体を推進させることが困難になり、その結果としてストライド長が減少したことが推察される。また、ストライド長の減少を補償し一定速度を維持するためにストライド頻度を増大させ、その結果として非支持時間が減少したことが推察される。なお、長距離走レースあるいは持久走中の走動作の変化について検討した先行研究 (Elliott and Ackland, 1981 ; Buckalew et al., 1985 ; Siler and Martin, 1991) においても、本研究と同様にストライド長の減少や非支持時間の減少などが認められている。

一方、脚の筋力・筋パワーについては、全ての測定項目においてレース後に有意な低下が認められた (図7-2)。持久走後の筋力・パワーの低下はこれまでも実験1の結果や先行研究 (Nicol et al., 1991a) においても認められており、その原因として、筋グリコーゲンなどのエネルギー源の枯渇 (Costill et al., 1973) やそれに伴う筋小胞体でのカルシウムイオン取込み能の低下 (Fitts et al., 1982)、および筋損傷 (Fitts, 1994)

など、さまざまな要因が考えられる。

上述のように、本研究においてレース後には最大下走行中の走動作および筋力・筋パワーが有意に変化し、走の経済性が低下する傾向が認められた。ところで先行研究 (Nicol et al., 1991) において指摘されているように、これらの変化は独立して起こっているのではなく、それぞれ相互に関連しあっている可能性がある。そこで本研究では、レース前・後での各測定項目の変化率の相互の相関関係について検討した。その結果、いずれの項目間にも有意な相関関係は認められなかった (表7-2)。このことは、レース後の走動作の変化が走の経済性の低下の原因とは必ずしもならないこと、また脚の筋力・筋パワーの低下が走動作の変化の原因とは必ずしもならないことを示唆するものである。

走の経済性に影響する要因は数多く (Morgan et al., 1989 ; Frederick , 1992) , ストライド長などの走動作もそのひとつとしてあげられている (Cavanagh and Williams, 1982) 。しかし、疲労による個人内の走動作の変容が走の経済性に及ぼす影響を検討した研究は少なく (Nicol et al. 1991c ; Morgan et al., 1990 ; Morgan et al., 1995) , しかも、一致した結果は得られていない。Nicol et al. (1991c) および Williams et al. (1991b) は、疲労に伴う走動作の変化には個人差が大きく、一定の傾向がみられないことを報告している。本研究においても、レース前・後の走の経済性と走動作の変化が被験者全員の平均値とは反対方向への変化を示す者も認められた。これらのことを考慮に入れると、長距離走による疲労に伴う走動作の変化は個人差が大きく、しかも多くの場合は走の経済性に影響を及ぼさない範囲内にある変化量であったものと考えられる。

持久走中の走動作の変化について検討した先行研究 (Elliott and Ackland, 1981 ; Buckalew et al., 1985 ; Siler and Martin, 1991) では、

身体の疲労が原因となって走動作の変化を引き起こしている」と推測しているが、Williams et al. (1991a) は、走動作の変化が疲労を直接的に反映したものなのか、あるいは走効率をできるだけ保持するために意図的に変化させているのかは不明であるとしている。後述するように、本研究においても筋力・筋パワーの低下と走動作の変化との間には一定の傾向は認められなかった。また、レース後半の走速度の低下が小さい者ほど、走動作の変化が大きくなる傾向にあったことが認められていることから、走動作の変化が筋疲労を反映していなかった可能性も考えられる。さらに、走行中の筋肉痛や不快感などが走動作を変化させていた可能性も考えられる (Armstrong et al., 1984)。

なお本研究では、走の経済性と走動作の測定を走速度を一定に保ったトレッドミル上で行った。トレッドミル走とグラウンド走では走動作などが異なることが知られている (Nelson et al., 1972)。さらにレース後の測定は、ゴール後に1時間以内の休息時間をはさんで行っており、その間、被験者は走行を中断していた。これらのことが本研究の結果に影響を与えていた可能性も考えられる。したがって、今後マラソンレースによる疲労をさらに明らかにするためには、レース中の走動作や走の経済性などを直接測定することも必要であると考えられる。

一方、上述した各測定項目のレース後の変化は、走行中の被験者の疲労度によって異なる可能性がある。本研究では、実際のマラソンレースを用いており、レース中には各自のそれぞれの実力を発揮するために全力を尽くしていたと考えられるものの、そのレース中のペース配分については被験者が自分自身で決定していた。このために、被験者のレース中のペースの変化やゴール後の疲労度にはある程度のばらつきが生じていた可能性がある。そこで本研究では、各被験者をレース前・後半の走

速度の低下率から、速度維持群（6名，低下率： $0.44 \pm 2.6\%$ ）と速度低下群（7名，低下率： $-21.8 \pm 16.8\%$ ）との2群に分け、各群ごとにレース前・後の最大下走行中の走の経済性と走動作および筋力・筋パワーの変化を比較した（表7-3）。その結果、速度維持群では、最大下走行中の非支持時間（短縮）、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD（低下）、5RJの踏切時間（増大）に有意な変化が認められた。これに対して、速度低下群では、最大下走行中の $\dot{V}O_2$ （増加）および筋力・筋パワーに関する全ての測定項目（5RJの踏切時間以外はすべて低下）に有意な変化が認められた。これらのことは、レース後半の走速度の低下が走の経済性、筋力・筋パワーの低下、走動作の変化などに関係していることを示唆するものである。先行研究（Morgan et al., 1990 ; Nicol et al., 1991 ; Thomas et al., 1995 ; Morgan et al., 1996）においては、走の経済性の変化と持久走中の疲労の亢進との関係については検討されておらず、両者の関係は十分に明らかにはされていないが、走の経済性の低下は、一定速度で走行するためのエネルギー需要量を増加させ、最大有気的パワーの低下（Dressendorfer, 1991）とあいまって、走行中の疲労を亢進させ、走速度の低下を引き起こす可能性がある。また、実験1, 2の結果から示唆されたように、筋力・筋パワーの低下も走行中の疲労の亢進と関係している可能性がある。したがって、優れた長距離走成績をおさめるためには、後半局面における走速度の低下を最小限にとどめることが重要であり、このためには自己の持つ走の経済性と筋力・筋パワーをできる限り維持することが重要であると考えられる。これに対して、速度維持群においては走動作の変化が比較的大きかったことから、身体の疲労に合わせて走動作を変化させることが、走速度の維持に貢献する可能性も考えられる。今後、長距離走による走の経済性や筋力・筋パワー

の低下を抑制するための走技術のトレーニング方法について、より多面的に検討する必要がある。

5. 要約

本研究では、マラソンレース出場者13名を対象にしてレースの3日前から前日にかけてのいずれかの1日とレース直後に、トレッドミルでの3分間の最大下走行中（斜度0度，分速200m）の $\dot{V}O_2$ と走動作（ストライド頻度とストライド長および支持時間と非支持時間），体重，および筋力・筋パワーの指標として握力，アイソメトリックな膝伸展運動における最大力と力発揮速度（RFD），垂直跳び（CMJ）の跳躍高，5回連続リバウンド型跳躍（5RJ）の跳躍高と踏切時間を測定した。主な結果は次の通りである。

- ① マラソンレースの成績は平均3時間1分47秒±31分22秒（2時間26分44秒～3時間59分17秒）であった。レース後半の走速度は前半に比べて有意に低下し，その低下率は $-11.6 \pm 16.6\%$ （ $-56.1 \sim +3.9\%$ ）であった。
- ② レース後に測定した体重および筋力・筋パワーは，いずれもレース前に比べて有意に低下した。
- ③ レース後に行わせた最大下走行中の $\dot{V}O_2$ は13名中10名が増加し，その平均変化量は $2.8 \pm 2.2\text{ml/kg/min}$ であったが，統計的に有意な変化ではなかった。一方，レース後はレース前に比べて，ストライド頻度は増加し，ストライド長は減少する傾向にあった。また，非支持時間は有意に減少し，支持時間は増加する傾向にあった。
- ④ マラソンレース前・後における走の経済性，走動作および筋力・筋パワーの各変化率の相互の相関関係を検討した結果，いずれの項目

間にも有意な相関関係は認められなかった。

- ④ レース前・後半の走速度の低下率から、被験者を速度維持群（6名，低下率： $0.44 \pm 2.6\%$ ）と速度低下群（7名，低下率： $-21.8 \pm 16.8\%$ ）との2群に分け，レース前・後における各測定項目の変化を両群間で比較した。その結果，速度維持群では，最大下走行中の非支持時間（短縮），アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD（低下），5RJの踏切時間（増大）に有意な変化が認められた。これに対して，速度低下群では最大下走行中の $\dot{V}O_2$ （増加），および筋力・筋パワーに関する全ての測定項目（5RJの踏切時間以外はすべて低下）が有意に変化した。

上述の結果から，マラソンレースは脚の筋力・筋パワーを低下させるとともに走動作や走の経済性を変化させる傾向にあるが，これらの変化は必ずしも相互に関連しあって起こるとはいえないことが示唆された。

VIII. 筋力・筋パワートレーニングが有気的能力およびマラソンレースの成績に及ぼす影響（実験4：研究課題4）

1. 緒言

これまでの研究結果から、持久走は脚の筋力・筋パワーを低下させること、および持久走中の走速度の低下と筋力・筋パワーの低下とが関係している可能性のあることなどが明らかになったことから、持久走中の筋力・筋パワーの低下およびそれに伴う走速度の低下を抑制することに対して、筋力・筋パワートレーニングの必要性が考えられる。

一般健常者を対象として、持久的トレーニングに筋力・筋パワートレーニングを付加した場合の効果について検討した研究では、これまでに高強度のトレッドミル走における走行時間の延長（Wilmore et al., 1978）、漸増負荷走行テストにおける最高走速度の増加（Hickson et al., 1988）、最大酸素摂取量の増加（Hunter et al., 1987）などの効果が報告されている。これに対して、筋力・筋パワートレーニングが有気的能力に悪影響を及ぼす可能性についても指摘されている（Nelson et al., 1990；Gorostiaga et al., 1999）。これらのことは、一般健常者に対する筋力・筋パワートレーニングが、その実施方法によっては有気的能力に好・悪両方の影響を及ぼす可能性のあることを示唆するものである。

一方、持久的競技者を対象として筋力・筋パワートレーニングが有気的能力に及ぼす影響について検討した研究は少ないが、Johnston et al.（1995）は、大学女子長距離走者を対象にして10週間の動的筋力トレーニングを行わせた結果、走の経済性が有意に向上したことを報告した。またSvedenhag（1992）は、11名のマラソンランナーに12週間にわたって通常のトレーニングに加えて登り坂でのバウンディング走を行わせた結

果、走の経済性が向上したことを報告した。これらの報告は、筋力・筋パワートレーニングが持久的競技者の有気的能力の改善を通して競技成績の向上に貢献する可能性を示唆するものである。しかし、持久的トレーニングとともに筋力・筋パワートレーニングを行うことによって、筋力・筋パワーや有気的能力がどのように変化するか、そして持久走による筋力・筋パワーの低下と走速度の低下がどのように軽減されるかについては、これまでのところ明らかにされていない。

そこで本研究では、筋疲労の抑制という観点から持久走の成績向上に役立つ筋力・筋パワートレーニング手段を開発するための基礎的資料を得るために、短期間の筋力・筋パワートレーニングがジョギング愛好者の筋力・筋パワー、有気的能力およびマラソンレースの成績に及ぼす影響について検討することを目的とした。

2. 方法

(1) 被験者

被験者として、実験開始前少なくとも6カ月間にわたって持久走トレーニングを継続していた健康な男子学生12名を用いた。被験者を6名ずつ2群に分け、そのうち筋力・筋パワートレーニングを行わせた群を実験群 (Experimental group ; Exp群)、他の6名を対照群 (Control group ; Con群) とした。被験者の年齢、身長および体重は、Exp群が 21.3 ± 1.4 歳 (平均値 \pm 標準偏差)、 175.5 ± 4.2 cm および 61.9 ± 7.3 kg、Con群が 21.2 ± 1.5 歳、 170.7 ± 5.1 cm および 61.8 ± 3.3 kg であった。

(2) 実験期間中のトレーニング

本研究では、Exp群に対して各被験者が通常行っている持久走トレーニングに加えて筋力・筋パワートレーニングを週2回、7週間にわたっ

て行わせた。トレーニング運動は、①シットアップ（無負荷，30回，3セット），②ステップアップ（20kg，30回，3セット），③レッグランジ（15kg，10歩，3セット），④その場ホッピング（無負荷，5回連続，3セット），⑤ジャンピングスクワット（無負荷，10回，3セット），⑥バウンディング（無負荷，5歩，3セット）の6種目であった。なお，レッグランジとジャンピングスクワットは1回のトレーニングにおいていずれか1種目を行った。これらのトレーニング手段を用いた理由としては，1）多くの種目の収縮様式が伸張－短縮型であること，2）力の発揮が力型からスピード型まで多様性をもつこと，3）簡単な器具と狭い場所でも行えることなどがあげられる。なお，補強トレーニング前には徒手体操とストレッチを行わせた。またCon群は，実験期間中に走トレーニングのみを行わせた。被験者には，実験期間中の走トレーニングの内容について記録させ，後日それを提出させたが，検者からトレーニングの内容についての指示は特に行わなかった。7週間のトレーニング期間が終了した1週間後に被験者全員がマラソンレースに参加し，そのうちの10名が完走した。

（3）測定項目及び測定方法

7週間のトレーニング期間の開始前および終了後1週間以内に，全ての被験者を対象にして，形態（体重，体脂肪，中大腿囲，大腿部皮脂高），筋力・筋パワーおよび有気的能力の測定を行った。また，上記の測定が終了した1週間後に，被験者全員がマラソンレースに参加し，そのレース前・後に体重と筋力・筋パワーについて測定した。

体重と体脂肪率はインピーダンス型体内脂肪計（タニタ社製，TBF-102）を用いて測定した。中大腿囲は，被験者に直立姿勢をとらせて両脚に体重を均等にかけた状態で，大転子と膝関節との中央部でメジャーを

用いて測定した。大腿部皮脂厚は被験者に中大腿囲測定時と同様の姿勢を取らせ、大腿前面部についてキャリパーを用いて測定した。なお、大腿囲と大腿部皮脂厚は両脚について測定し、左右の平均値を代表値とした。

脚の筋力・筋パワーの指標として、アイソメトリックな膝伸展運動の最大力と力発揮速度（RFD）、CMJの跳躍高、5RJの跳躍高と踏切時間および立5段跳び（5J）の跳躍距離を測定した。このうち、アイソメトリックな膝伸展運動、CMJおよび5RJの測定方法については実験1と同様である。

5Jの跳躍距離は、最初に被験者に両脚で前方に踏み切らせた後、左右交互に片脚で踏み切って、できるだけ遠くに跳ぶよう指示して行わせた。着地は砂場に向かって両脚で行わせた。踏切位置から着地位置までの距離をメジャーを用いて測定した。

有気的能力の測定は斜度0度のトレッドミル上で行った。被験者にウォーミングアップを任意に行わせた後、最初に走の経済性をみるために200m/分で4分間走行させ、走行中の $\dot{V}O_2$ を全自動呼気ガス分析装置（Mijnhardt社製、Oxycon- γ ）を用いて30秒毎に測定した。走の経済性の指標には、最後の1分間の $\dot{V}O_2$ の平均値を用いた。また、走行中の心拍数をハートレートモニタ（キヤノントレーディング社製、Vantage XL）を用いて測定した。次に3分間の休息の後、200m/分から1分ごとに10m/分ずつ速度を漸増させてexhaustionに至るまで走行させ、最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2max}$ ）を求めた。また、上記の測定とは異なる日に、1周400mの陸上競技場において最大努力での12分間走を行わせ、その走行距離を10m単位で測定した。

一方、マラソンレース前・後の測定では、まずレースのスタート1時

間～30分前に実験室に来室させ、体重、およびアイソメトリックな膝伸展運動の最大力とRFD、CMJの跳躍高、5RJの跳躍高と踏切時間および5Jの跳躍距離を測定した。また、ゴール後にも同様の測定を行った。ゴール地点と測定を行った実験室は約200m離れており、被験者にはゴール後、屋外で5Jを測定した後に徒歩でなるべく早く実験室へ来るように指示した。全ての被験者がゴール後30分以内に測定を終了した。なお、ゴール後には中間点の通過時間とゴール時の記録を被験者に申告させ、それをもとにしてレース前半と後半の平均走速度を算出した。

(4) 統計処理

7週間のトレーニング期間前・後およびマラソンレース前・後の各測定項目の有意差の検定、およびレース前・後半における走速度の有意差の検定は、対応のあるt-検定を用いて行った。各測定項目間の相関係数は、ピアソンの方法を用いて算出した。統計処理の有意性は危険率5%水準で判定した。

3. 結果

(1) トレーニング期間前・後における各測定項目の成績

トレーニング期間中における1週間当りの持久走トレーニングの日数と1回当りの走行距離は、Exp群ではそれぞれ 3.0 ± 1.0 日/週、 9.7 ± 2.8 km/回、Con群では 2.1 ± 0.2 日/週、 9.2 ± 1.7 km/回であり、いずれの項目も両群間に有意な差は認められなかった。なお両群ともに、トレーニングの内容は強度の低い持久走が主体であった。

表8-1に、7週間のトレーニング期間前・後における形態、筋力・筋パワーおよび有気的能力について示した。トレーニング前に比べてトレーニング後に有意に変化した測定項目は、Exp群においては、大腿部皮脂

Table 8-1 Anthropometric characteristics, muscular strength and power, and aerobic abilities before and after the experimental period.

Measurement		Exp group			Con group		
Body weight	(kg)	Pre	61.9	± 7.3	61.8	± 3.3	
		Post	61.9	± 7.7	62.9	± 4.0	
Body fat	(%)	Pre	14.4	± 4.1	14.2	± 3.3	
		Post	14.6	± 3.6	15.6	± 3.7	
Girth of thigh	(cm)	Pre	52.5	± 3.6	53.5	± 1.1	
		Post	52.6	± 4.1	54.7	± 1.8 *	
Skinfold thickness of thigh	(mm)	Pre	6.2	± 2.6	4.9	± 1.1	
		Post	4.5	± 2.6*	4.6	± 0.9	
Isometric knee extension							
Maximal force	(kg/BW)	Pre	0.68	± 0.14	0.68	± 0.16	
		Post	0.70	± 0.13	0.72	± 0.15	
RFD	(kg/s)	Pre	150.2	± 48.0	170.8	± 33.7	
		Post	153.5	± 50.9	171.7	± 29.7	
CMJ							
Jumping height	(m)	Pre	0.392	± 0.05	0.451	± 0.045	
		Post	0.438	± 0.10	0.418	± 0.035*	
5RJ							
Jumping height	(m)	Pre	0.303	± 0.053	0.315	± 0.052	
		Post	0.357	± 0.052	0.322	± 0.028	
Contact time	(s)	Pre	0.165	± 0.015	0.175	± 0.009	
		Post	0.159	± 0.030	0.198	± 0.004	
5J							
Jumping distance	(m)	Pre	11.48	± 0.83	11.50	± 0.49	
		Post	11.67	± 0.09	11.29	± 0.63	
Sub- maximal running							
$\dot{V}O_2$	(ml/kg/min)	Pre	38.98	± 0.88	41.13	± 1.88	
		Post	39.92	± 2.09	42.65	± 3.06	
Blood lactate	(mmol/l)	Pre	1.65	± 0.35	2.49	± 0.66	
		Post	2.29	± 0.84	2.59	± 0.43	
Maximal running							
$\dot{V}O_{2max}$	(ml/kg/min)	Pre	53.29	± 8.19	53.33	± 3.08	
		Post	57.73	± 5.31	57.10	± 3.91 *	
Blood lactate	(mmol/l)	Pre	6.45	± 1.19	7.15	± 0.94	
		Post	7.96	± 0.96	7.33	± 1.44	
Peak running velocity	(m/min)	Pre	294.0	± 23.7	276.7	± 15.4	
		Post	305.0	± 32.5*	278.0	± 82.5	
12- min run	(m)	Pre	2985	± 206	2933	± 155	
		Post	3255	± 321 *	2984	± 277	

1. Values are Mean ± SD

2. * : $P < 0.05$ (Pre vs Post)

厚（減少），最大走行時の最高到達速度（増加）および12分間走の走行距離（増加）であり，Con群においては，中大腿囲（増大），CMJの跳躍高（減少）および $\dot{V}O_2\max$ （増大）であった。

図8-1～3に，トレーニング期間前・後における各測定項目の変化率を示した。各測定項目の変化率には，両群間に有意な差は認められなかったが，大腿部皮脂厚，CMJの跳躍高，5RJの跳躍高および12分間走の走行距離の変化率はExp群がCon群に比べて両群間の差がやや大きい傾向にあった（ $P<0.1$ ）。

（2）マラソンレース前・後における各測定項目の成績

被験者全員が出場したマラソンレースでは，Con群の2名が途中で脱落したために，レース後の測定が実施できなかった。

図8-4に，マラソンレースの平均走速度，レース前・後半の平均走速度とその変化率を示した。マラソンレースの平均記録とレース前・後半の走速度の低下率は，Exp群がそれぞれ3時間45分13秒 \pm 54分18秒， $-9.0\pm 14.7\%$ ，Con群がそれぞれ4時間11分38秒 \pm 14分27秒， $-12.2\pm 5.5\%$ であった。いずれの項目にも両群間に有意な差は認められなかった。

表8-2に，レース前・後における形態，筋力・筋パワーについて示した。レース前に比べてレース後に有意に変化した測定項目は，Exp群においては，体重，アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD，CMJの跳躍高，5RJの跳躍高と踏切時間および5Jの跳躍距離であり（5RJの踏切時間以外は全て減少），Con群においては，体重，アイソメトリックな膝伸展運動におけるRFD，5RJの踏切時間および5Jの跳躍距離であった（5RJの踏切時間以外は全て減少）。

図8-5に，レース前・後の各測定項目の変化率を示した。レース前・後の各測定項目の変化率には，両群間に有意な差は認められなかった。

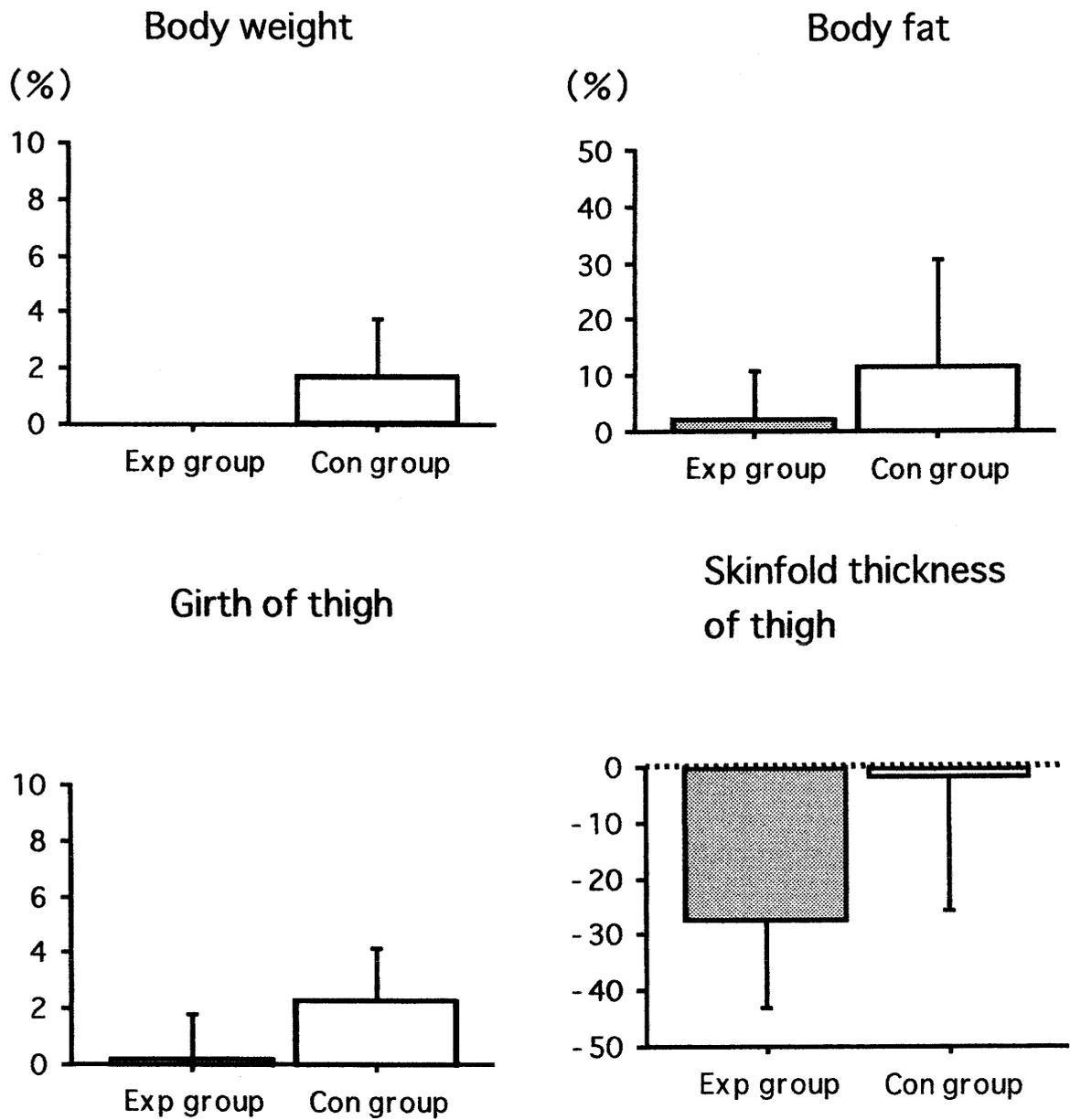


Fig. 8-1 Relative changes of anthropometric characteristics before and after the experimental period.

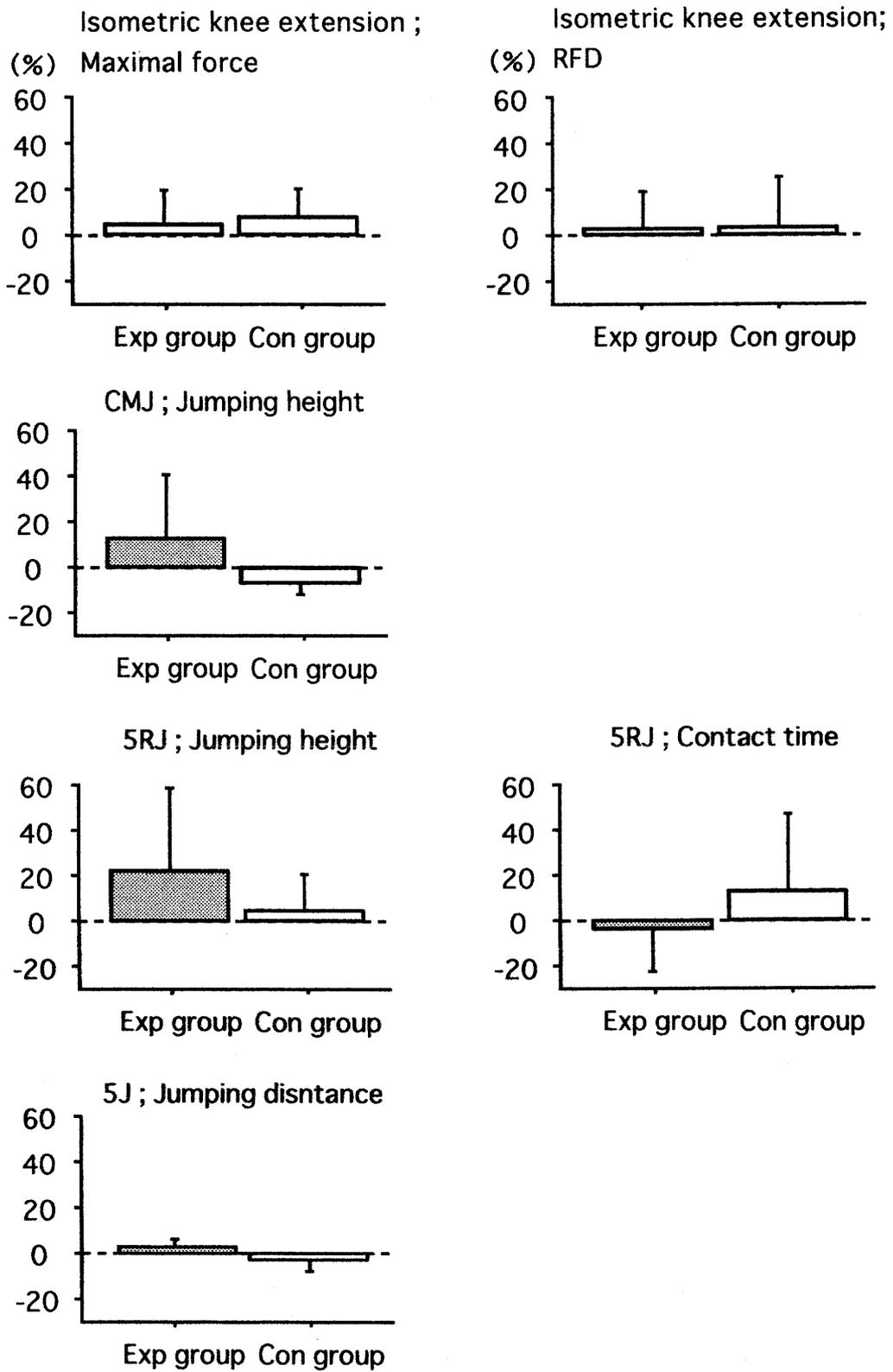
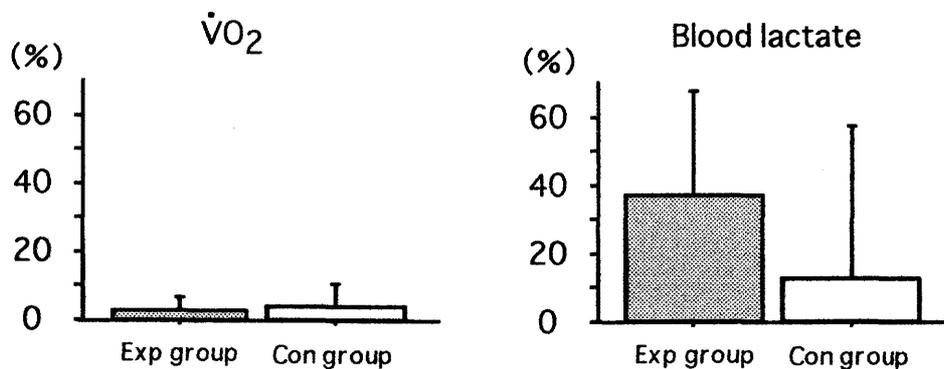
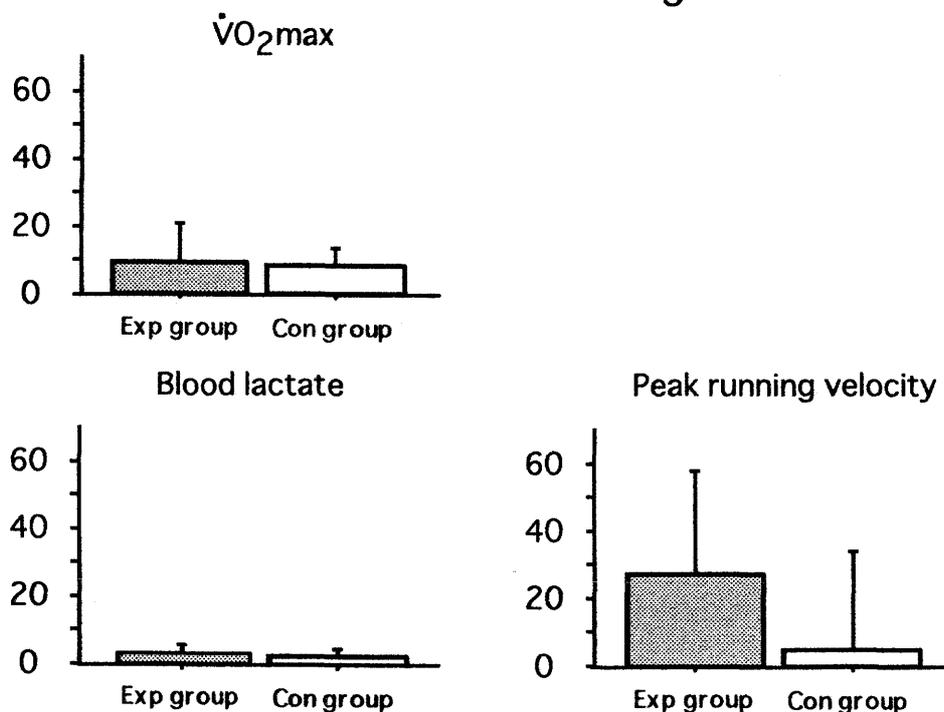


Fig. 8-2 Relative changes of muscular strength and power before and after the experimental period.

Sub-maximal running (200m/min)



Maximal running



12-min run

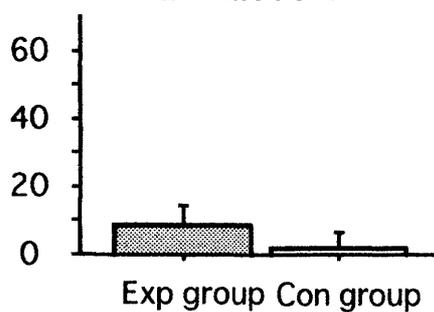


Fig. 8-3 Relative changes of aerobic abilities before and after the experimental period.

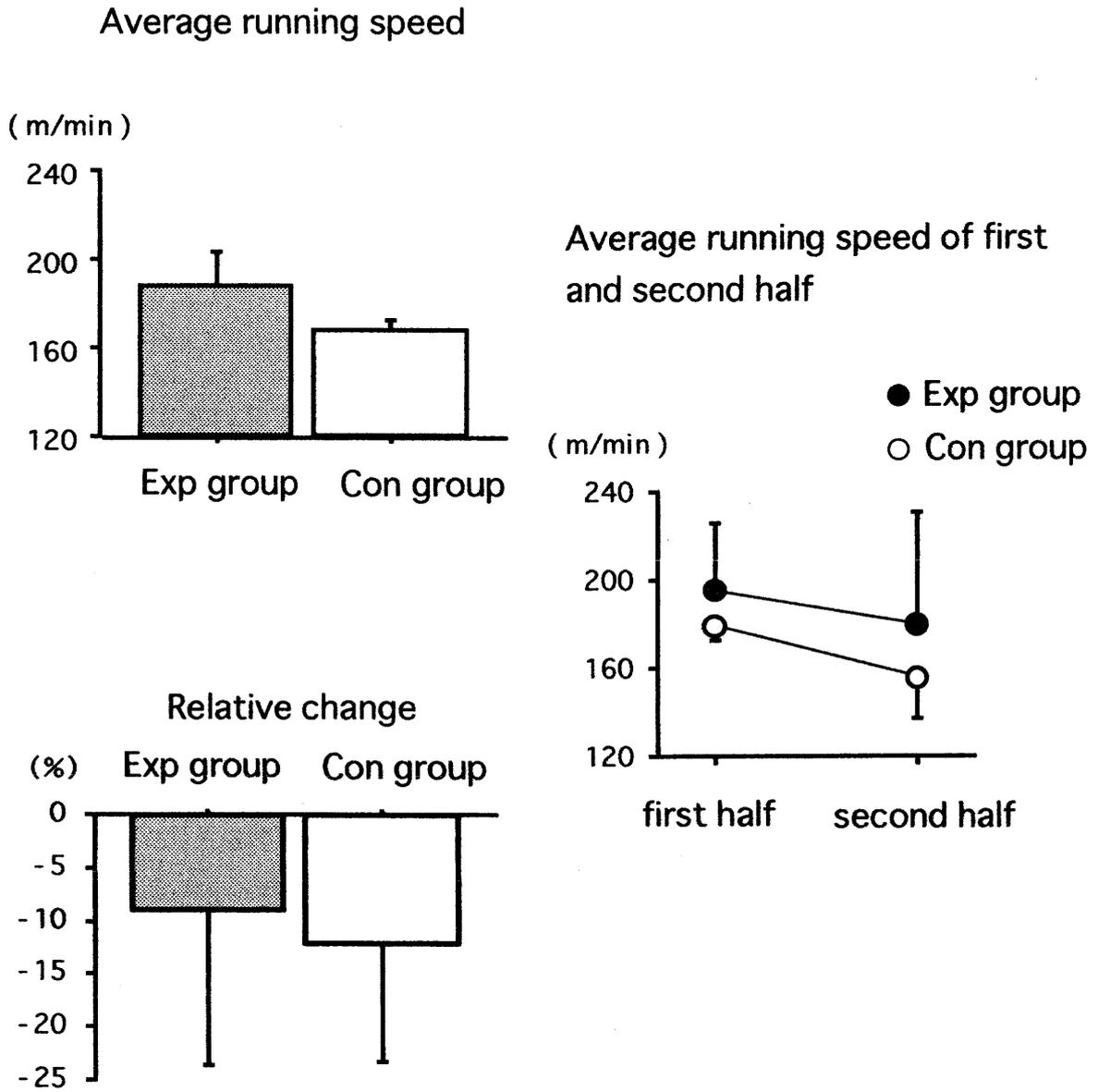


Fig. 8-4 Average running speed, average running speed of first and second halves, and relative change of running speed.

Table 8-2 Body weight, and muscular strength and power before and after the marathon race.

Measurement		Exp group			Con group		
Body weight	(kg)	Before	63.3	± 7.3		64.5	± 3.6
		After	60.7	± 7.1	*	62.4	± 4.0 *
Isometric knee extension							
Maximal force	(kg/BW)	Before	0.659	± 0.09		0.763	± 0.136
		After	0.562	± 0.114	*	0.403	± 0.176
RFD	(kg/s)	Before	159.5	± 30.0		175.6	± 39.1
		After	130.4	± 28.4	*	115.1	± 30.7 *
CMJ							
Jumping height	(m)	Before	0.381	± 0.084		0.405	± 0.052
		After	0.327	± 0.076	*	0.308	± 0.099
5RJ							
Jumping height	(m)	Before	0.320	± 0.054		0.319	± 0.035
		After	0.249	± 0.051	*	0.261	± 0.050
Contact time	(s)	Before	0.166	± 0.037		0.216	± 0.076
		After	0.209	± 0.033	*	0.268	± 0.085 *
5J							
Jumping distance	(m)	Before	11.38	± 0.80		11.42	± 0.63
		After	10.43	± 1.00	*	10.63	± 0.98 *

1. Values are Mean ± SD
2. * : P < 0.05 (Pre vs Post)

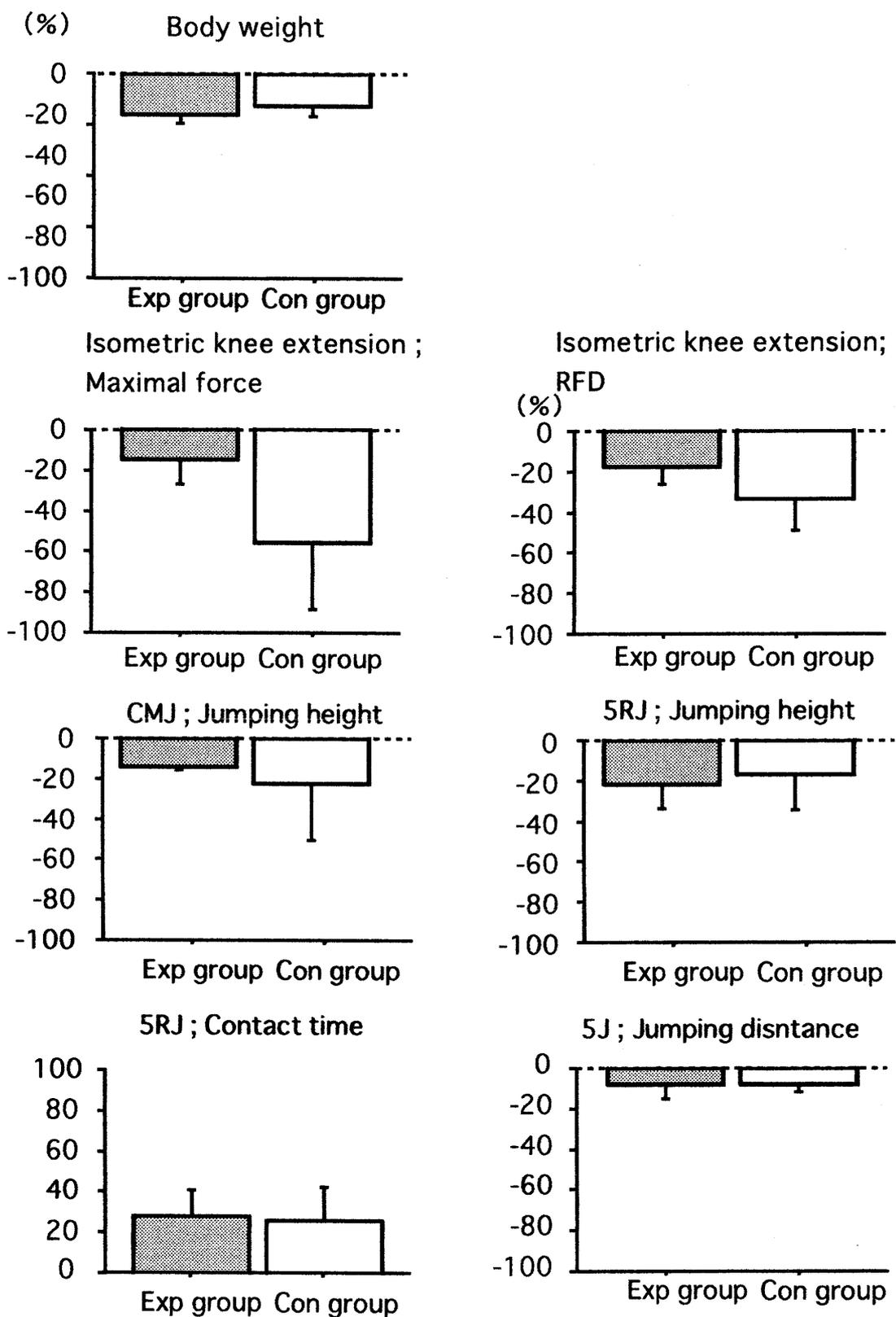


Fig. 8-5 Relative changes of body weight, and muscular strength and power before and after the marathon race.

4. 考察

(1) トレーニング期間前・後における各測定項目の成績

本研究では、日常的に持久走トレーニングを実施している者を対象として、週2回・7週間の筋力・筋パワートレーニングが形態、筋力・筋パワー、有気的能力およびマラソンレースの成績に及ぼす影響について検討した。

形態に関する測定項目については、Exp群、Con群ともに体重、体脂肪率のいずれにも有意な変化は認められなかった(表8-1)。これは被験者の走トレーニングの負荷が運動強度、持続時間ともにそれほど多くなかったこと、実験期間以前から同様の走トレーニングを実施していたことによるものであり、また、筋力・筋パワートレーニングを加えても大きく変わらなかったことを示すものである。しかし、Exp群では大腿部皮脂厚が有意に減少した。これは筋力・筋パワートレーニングによって、脚筋に対して持久走のみでは得られない刺激が加えられたことによるのかもしれない。

筋力・筋パワーに関する測定項目については、Exp群では全ての項目に有意な変化が認められなかったのに対して、Con群ではCMJの跳躍高が有意に減少したことから(表8-1)、持久走トレーニングによって筋力・筋パワーの低下が起こっていた可能性が考えられる。持久的トレーニングを長期間継続することによって、脚の筋力・筋パワーが低下することは経験的に知られている(Costill, 1967, 1986)。Costill(1986)は、その原因として持久的トレーニングが運動単位の数や収縮要素の特性を変化させたのかもしれないと推察している。またOno et al.(1978)は、健康な男性を対象にして18週間にわたって持久走を行わせた結果、垂直

跳びの跳躍高が低下したことを認めた。持久的トレーニングによる筋力・筋パワー低下のメカニズムとしては、筋線維の張力と短縮速度の低下（Fitts, 1996）、運動単位の速筋型から遅筋型への移行（Jansson et al., 1978）、および神経伝導速度、反射潜時、運動単位の興奮性などの神経系の変化（Perot et al., 1991）などが考えられる。しかし、持久的トレーニングによって筋力・筋パワーは変化しないという報告（Hickson, 1980；Hunter et al., 1987）もあり、必ずしも一致した見解が得られているわけではない。したがって、持久的トレーニングが主働筋の筋力・筋パワーに及ぼす影響は、そのトレーニング期間や内容などによって異なるものと考えられる。

一方、Exp群では筋力・筋パワートレーニングを行ったにもかかわらず、筋力・筋パワーの有意な向上は認められなかった。この原因として、トレーニング期間が短かったこと、負荷強度が大きくなかったことなどが考えられる。筋力トレーニングの効果を検討した先行研究の多くは、トレーニング期間が8週間以上、頻度が週3回以上としたものが多い（例えばSale, 1992）。それに対して、本研究における筋力・筋パワートレーニングの頻度と期間はそれぞれ週2回、7週間であり、しかもトレーニングの内容が最大の筋力・筋パワーの発達を引き起こすには十分なものではなかった可能性が考えられる。他の原因として、持久的トレーニングと同時にやったことが考えられる。先行研究においては、持久的トレーニングと筋力・筋パワートレーニングを同時に行うことによって、筋力・筋パワーの増加が抑制されることが報告されている（Hickson, 1980；Hunter et al., 1987；Kraemaer et al., 1995）。その原因として、持久的トレーニングが筋肥大、筋線維の速筋型への移行を促進し、内分泌系や神経系の変化などの筋力トレーニングによる適応を阻害することや、

持久的トレーニングによる筋中のエネルギー基質の枯渇，筋損傷などが考えられる（Leveritt et al., 1999）．したがって，これらのことを考慮すると，本研究において持久的トレーニングと筋力・筋パワートレーニングを同時に行ったことによって，筋力・筋パワーの発達が妨げられた可能性があるが，持久走トレーニングのみを行った場合に起こる筋力・筋パワーの低下を抑制する効果はあったものと考えられる．

有気的能力に関する測定項目については，Exp群では最大走行時の最高到達速度と12分間走の走行距離が有意に増大し，Con群では $\dot{V}O_2\text{max}$ が有意に増加した（表8-1）．また，両群ともに最大下走行時の酸素摂取量と走行直後の血中乳酸濃度には有意な変化は認められなかった．これらのことから，本研究における筋力・筋パワートレーニングは最大強度での有気的パフォーマンスには好影響を及ぼしたが，最大下強度での有気的能力にはそれほど大きな影響を及ぼさなかったことが示唆される．先行研究においては，持久的トレーニングに筋力・筋パワートレーニングを加えることによって，高強度トレッドミル走での持続時間が増加したり（Hickson et al., 1988）， $\dot{V}O_2\text{max}$ が向上すること（Hunter et al., 1987）が報告されている．また，筋力・筋パワートレーニングによって最大強度での有気的パフォーマンスが改善される原因としては，筋中のATP，クレアチンリン酸，グリコーゲンなどのエネルギー基質の貯蔵量の増加（MacDougall et al., 1977）や収縮タンパクの増加（和田，1996）などによって，最大筋力と収縮速度が向上し，その結果として，持久的運動中における収縮力の増強や走行中における筋への相対的負荷の減少が起こる可能性が考えられる（Hunter et al., 1987；Hickson et al., 1988；Paavolainen et al., 1999）．したがって，これらのことを考慮すると，本研究におけるExp群の最大強度での有気的パフォーマンスの改

善には、主として脚筋の収縮力の増強が関与していた可能性が考えられる。しかし、Exp群においては筋力・筋パワーに関する各測定項目にトレーニング前・後で有意な変化は認められなかった。また、Exp群に行わせた筋力・筋パワートレーニングの内容は、最大筋力の向上よりも伸張-短縮サイクル運動における遂行能力の改善をねらいとしていた。したがって、本研究における最大強度での有気的パフォーマンスの改善と脚筋の収縮力の増強との間に密接な因果関係があったか否かは明らかではない。そこで、Exp群を対象にして、トレーニング前・後における筋力・筋パワーの変化と有気的能力の変化との関係を検討した結果、トレーニング前・後でのアイソメトリックな膝伸展運動の最大力における変化率と12分間走の走行距離 ($r = 0.817$, $n = 6$, $P < 0.05$) および最大走行時の最高到達速度 ($r = 0.889$, $n = 6$, $P < 0.05$) における変化率との間に有意な相関関係が認められた。このことは、本研究における筋力・筋パワートレーニングは最大努力による筋力・筋パワーには必ずしも好影響を及ぼさないが、脚筋の収縮機能に好影響を及ぼし、それが最大強度での有気的能力の改善に好影響を及ぼしていた可能性を示唆するものである。

ところで、持久的競技者に対して筋力・筋パワートレーニングを行わせることによって走の経済性が改善されることが報告されている (Svedenhag, 1992 ; Johnston et al., 1995 ; Paavolainen et al., 1999) が、本研究では両群ともに、走の経済性にはトレーニング前・後で有意な変化は認められなかった。この理由としては、本研究の被験者が実験参加以前に強度の高い持久的トレーニングを継続して行ってこなかったことが考えられる。筋力・筋パワートレーニングによって走の経済性に改善を認めた報告 (Svedenhag, 1992 ; Johnston et al., 1995 ; Paavolainen et

al., 1999) においては、被験者はいずれも専門的な持久的トレーニングを継続していたのに対して、 $\dot{V}O_{2max}$ や最高走速度の向上を認めた報告 (Hunter et al., 1987 ; Hickson et al., 1988) においては、被験者は高度な持久的トレーニングを行っていなかった。したがって、これらのことを考慮すると、筋力・筋パワートレーニングを行わせることによって、有気的能力が高い者ではより効率的な運動の遂行が可能になり、有気的能力が低い者では最大強度での持久的運動中により高い筋力・筋パワー発揮が可能になるのかもしれない。

以上のことから、本研究における持久走トレーニングそれ自体は、脚筋の筋力・筋パワーを低下させていた可能性があるが、筋力・筋パワートレーニングを付加することによって筋力・筋パワー低下の抑制と最大強度での有気的パフォーマンスの発達に有効であったことが考えられる。今後、筋力・筋パワートレーニングが有気的能力やパフォーマンスに及ぼす影響をより詳細に明らかにするためには、被験者の有気的能力やスポーツ歴などを考慮するとともに、ねらいとするパフォーマンス運動の運動時間と強度および運動中の筋力・筋パワー発揮特性を考慮に入れた上で、筋力・筋パワートレーニング手段の内容を精選して実施させることが必要であると考えられる。

(2) マラソンレースの成績とレース前・後の筋力・筋パワーの変化

本研究における被験者は、7週間のトレーニング期間が終了した1週間後にマラソンレースに出場し、レース前・後に体重と筋力・パワーについて測定を行った。ただし、Con群の2名は途中で脱落したために、レース後の測定が実施できなかった。

レースの平均走速度とレース前・後半の走速度の低下率は、ともにExp群がCon群に比べて小さい傾向にあったが、両群間に有意な差は認め

られなかった。また、レースの平均走速度とトレーニング期間後に測定した最大下走行後の血中乳酸濃度 ($r = -0.697$, $n = 10$, $P < 0.05$)、最大走行後の $\dot{V}O_2\text{max}$ ($r = 0.688$, $n = 10$, $P < 0.05$)と最高走速度 ($r = 0.910$, $n = 10$, $P < 0.05$)および12分間走の走行距離 ($r = 0.801$, $n = 10$, $P < 0.05$)との間に有意な相関関係が認められ、レース成績には有気的能力が大きく影響していたことが示唆された。前述のように、筋力・筋パワートレーニングにより最大強度での有気的能力が改善された可能性があるため、このことがマラソンレースの成績向上に貢献していた可能性が考えられる。ただし、有気的能力についてはExp群の方がトレーニング前から優れる傾向にあったため、Con群に比べてレースの成績が優れる傾向にあったのは、被験者が元々有していた有気的能力の差が原因であった可能性は否定できない。

また、マラソンレース前・後には、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD、CMJの跳躍高、5RJの跳躍高と踏切時間および5Jの跳躍距離を測定した。その結果、Exp群では全ての項目について有意な変化が認められ(5RJの踏切時間以外は__；表8-2)、Con群ではアイソメトリックな膝伸展運動における体重、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD、5RJの踏切時間および5Jの跳躍距離に有意な変化が認められたが(5RJの踏切時間以外は全て減少；表8-2)、レース前・後の各測定項目の変化率には両群間に有意な差は認められなかった(図8-5)。このことは、マラソンレース後の筋力・筋パワーの低下は両群とも同程度であったことを示しており、本研究における筋力・筋パワートレーニングによってはマラソンレースによる筋力・筋パワーの低下を十分に抑制することはできなかったことを示唆するものである。本研究における実験1、2の結果や先行研究の結果(Nicol et al.,

1991a) によって、マラソンレースなどの長距離走レース後に脚の筋力・パワーが低下すること (Sherman et al., 1984), 筋力・パワーの低下がマラソンレース後半の走速度の低下と関連する可能性のあることが明らかにされている。また, Paavolainen et al.(1999)は, 持久的競技者に10kmを全力で走行させた時の走速度, 地面反力, EMGなどを検討した結果, 記録が良い者ほどより短い接地時間で走行を続けることができる傾向にあったことを認め, すぐれた持久走成績をおさめるためには走行中の接地時間を短く保つための筋機能が重要な要因となることを示唆した。そしてこのためには, 骨格筋が乳酸産生による酸性化や代謝産物の蓄積などが起こっている状況下で筋収縮を持続できることが重要であると指摘している。さらに, Behm and St-Pierre, (1998) は, 筋力・筋パワートレーニングによって起こる運動単位の興奮水準とインパルスの発射頻度の増加, 筋線維の収縮力の増強, 末梢での刺激伝導機能の向上および拮抗筋活動の減少などが, 一定負荷での運動中の筋の余裕度を増加させ, 結果として筋疲労を抑制する効果が期待できるとしている。マラソンレースによる筋疲労の原因としては, エネルギー基質の枯渇 (Costill et al., 1973), 筋損傷 (Fitts, 1994), 伸張反射の感受性低下 (Nicol et al., 1994) などが考えられるので, これらの要因が筋力・筋パワートレーニングによって軽減されるのなら, 長距離走レース中の筋疲労が軽減されて, その結果, 走速度の低下が抑制される可能性が考えられる。本研究における筋力・筋パワートレーニングが, このような結果をもたらさなかった原因としては, トレーニングの期間と頻度, 運動種目および強度と量が筋力・筋パワーの発達を引き起こすほど十分ではなかったこと, 筋力・筋パワートレーニングを疲労した条件では実施しなかったことなどが考えられる。今後, 持久走による筋疲労を軽減するための筋力・筋

パワートレーニング手段を開発するためには、トレーニングの内容についてさらに吟味する必要があると考えられる。

5. 要約

本研究では、日常的に持久走トレーニングを実施している者を対象として、週2回・7週間の筋力・筋パワートレーニングが形態、筋力・筋パワー、有気的能力およびマラソンレースの成績に及ぼす影響について検討した。被験者は12名であり、それらを持久走トレーニングのみを行う群（Con群）と持久走トレーニングに筋力・筋パワートレーニングを行う群（Exp群）の2群に分けた。7週間のトレーニング期間前・後に、形態に関する項目として体重、体脂肪率、大腿囲、大腿部皮脂厚、筋力・筋パワーに関する項目としてアイソメトリックな膝伸展運動における最大力と力発揮速度（RFD）、垂直跳び（CMJ）の跳躍高、5回連続リバウンド型跳躍（SRJ）の跳躍高と踏切時間、立5段跳び（5J）の跳躍距離、および有気的能力に関する項目として最大下走行時（200m/分、4分間）での $\dot{V}O_2$ と血中乳酸濃度、最大走行時での $\dot{V}O_{2max}$ と最高到達速度および12分間走の走行距離を測定した。また、トレーニング期間が終了した1週間後に被験者全員にマラソンレースに出場させて、レース前・後に体重と上述の筋力・筋パワーに関する項目を測定した。主な結果は、次の通りである。

- ① 7週間のトレーニング期間後に有意に変化した項目は、Exp群では大腿部皮脂厚（減少）、最大走行時の最高到達速度（増加）および12分間走の走行距離（増加）であり、Con群では大腿囲（増大）、CMJの跳躍高（減少）および最大酸素摂取量（増大）であった。
- ② マラソンレースの平均記録とレース前・後半の走速度の低下率は、

Exp群がそれぞれ3時間45分13秒±54分18秒， $-9.0 \pm 14.7\%$ ，
Con群がそれぞれ4時間11分38秒±14分27秒， $-12.2 \pm 5.5\%$ であつた。いずれの項目にも両群間に有意な差は認められなかった。なお，Con群の2名はレース途中で脱落した。

- ③ マラソンレース後に有意に変化したのは，Exp群では体重，アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD，CMJの跳躍高，5RJの跳躍高と踏切時間および5Jの跳躍距離であり（5RJの踏切時間以外は全て減少），Con群では体重，アイソメトリックな膝伸展運動におけるRFD，5RJの踏切時間および5Jの跳躍距離であった（5RJの踏切時間以外は全て減少）。

- ④ レース前・後における各測定項目の変化率には，両群間に有意な差は認められなかった。

上述の結果から，本研究における筋力・筋パワートレーニングは，持久走トレーニングによって起こる筋力・筋パワーの低下を抑制させるとともに，最大強度での有気的パフォーマンスを改善させる効果があること，またその結果として，マラソンレースの，平均走速度を向上させる可能性のあることが認められたが，マラソンレースによる筋力・筋パワーの低下およびレース後半の走速度の低下を軽減する効果はそれほど大きくないことが示唆された。

IX. 討論

本研究では、①長時間の持久走による脚筋疲労の特徴を筋力・筋パワーの面から検討すること、②脚筋疲労と、持久走による走の経済性と走動作の変化および走パフォーマンスとの関係を検討すること、③筋力・筋パワートレーニングが脚筋疲労や持久走パフォーマンスに及ぼす効果について検討することを目的とした。本章では、1) 持久走による脚筋疲労を筋力・筋パワーを基にして評価することの意義、2) 持久走における筋力・筋パワーの役割、および3) 持久走における筋力・筋パワートレーニングの役割について考察する。

1. 持久走による脚筋疲労を筋力・筋パワーを基にして評価することの意義

本研究では、持久走が筋力・筋パワーに及ぼす影響について検討するために、実験運動としてアイソメトリックな脚伸展運動、CMJおよび5回連続リバウンド型跳躍などを用いた。これらは短時間に大きな力を発揮することが要求される運動課題であり、主として動員される筋線維は速筋線維であるとされる (Walmsley et al., 1978)。これに対して、持久的運動は運動時間が長いこと、必要とされるパワーが比較的低いことから、一般的に遅筋線維が主として動員されると考えられている。このことから、持久走による脚筋疲労を短時間に発揮される筋力・筋パワーから評価することの意義が問われる。

Vøllestad and Blom (1985) および Sale (1987) によると、運動強度が50% $\dot{V}O_2\text{max}$ を超えると酸化系酵素活性の高い速筋線維が活動を始め、

70% $\dot{V}O_2\max$ を超えると、ほぼ全ての筋線維が活動するようになるという。マラソンレース中の運動強度について小林（1990）は、多くの先行研究の結果から持久的競技者では75~85% $\dot{V}O_2\max$ 、一般人の健康マラソンの場合では45~60% $\dot{V}O_2\max$ と推定している。本研究の各実験におけるマラソンレースの平均記録は、実験1では3時間55分27秒±51分24秒、実験3では3時間1分47秒±31分22秒および実験4では被験者全体でみると4時間1分43秒±42分18秒であった。また、実験2における持久走中の運動強度はRunner群では平均63.0±0.9% $\dot{V}O_2\max$ 、Non-runner群では平均57.3±6.3% $\dot{V}O_2\max$ であった。このことから、本研究における被験者は、小林（1990）が対象とした持久的競技者と健康マラソン走者の中間に位置すると考えられるので、レース中の運動強度は55~65% $\dot{V}O_2\max$ であったものと推測される。したがって、本研究における被験者は遅筋線維だけではなく速筋線維も動員しながら運動していたと考えられる。また、持続的な筋収縮中には、疲労に伴い次第に動員される運動単位が増えること（Takaishi et al., 1994）や同一筋群内の運動単位間で筋収縮の交代が起こること（白澤ら, 1998）などが知られている。さらに、Apell（1992）は、下り坂走などによる長時間の伸張性収縮が引き起こす筋損傷は、速筋線維が遅筋線維に比べて起こりやすいとしている。これらのことから、持久走中においても速筋線維がある程度動員され、その構造や機能に悪影響を受けていた可能性があること、そのことが持久走後に認められる筋力・筋パワーの低下に反映されている可能性があることが考えられる。

ところで、Sahlin and Seger（1995）は持久的運動後の筋力の低下を詳細に検討した結果、筋力低下は運動後3分以内に急速に回復するもの

の、その後は徐々に回復するという二相性のパターンを示すことを認めた。本研究における各実験では持久走終了あるいは中断から筋力・筋パワーの測定を開始するまでには少なくとも5分程度を要していた。したがって、本研究において観察された筋力・筋パワーの低下は、急速に回復した後の遅延成分に相当するものと考えられる。このような二相性のパターンを示す原因についてSahlin et al. (1998)は、持久的運動後3分以内の急速な筋力・筋パワーの回復パターンが筋中クレアチンリン酸の回復パターンと類似していたことから、クレアチンリン酸をはじめとするエネルギー基質の減少によるものであり、その後の遅延成分についてはそれ以外の原因によるものであると推定している。このことから、本研究における筋力・筋パワー低下の原因は、エネルギー基質の枯渇ではなく、筋損傷、伸張反射の抑制および興奮収縮連関の機能低下などであるものと考えられる。

一方、持久的運動による筋機能の変化を評価するためには、最大努力による筋力・パワーだけではなく、筋持久力を測ることが必要であるとも考えられる。筋持久力とは「最大下強度の運動を持続する筋の能力」（加賀谷，1994）とされ、これまでの研究から、長距離走者が短距離走者よりも筋持久力に優れる傾向にあること（石井，1981）、トレーニングにより筋持久力は改善可能であること（Kagaya and Ikai, 1970）が認められている。ただし、筋持久力に関する変数は数多く提案されており、測定時間、測定動作、負荷量などが各研究によって異なっているために、各種の筋持久力変数を比較検討することは困難である（山次ら，2000）。これまでに提案されている筋持久力の評価法としては、最大努力による運動を反復させ、その持続時間あるいは反復回数を測定する方法、ある

いは最大下・一定強度の運動を行わせてその持続時間あるいは反復回数を測定する方法が用いられている。このうち、最大努力を反復する方法は最大筋力を発揮するために、速筋線維の関与が大きくなるものと考えられる。また、加賀谷（1994）は真に有気的な筋持久力を評価するためには最大筋力の60%以下の負荷が望ましいとしている。しかし、最大筋力の15%を超えると、血流に障害が起り始める（Bonde-Peterson, 1975）ことから、最大下反復法については運動負荷の選択が困難になることが考えられる。また、発揮張力が低いと測定時間が長くなり被験者の負担が大きくなる。さらに、持久走中の主働筋は、収縮と弛緩を繰り返す、筋への血流は間欠的なものとなるのに対して（加賀谷, 1999）、筋持久力の評価方法として多く用いられるアイソメトリックな筋収縮による筋持久力のテストでは持続的な筋収縮のために血流が制限されることが多いので、走行中とはエネルギー代謝が異なることが予想される。これらのことから、持久走後に従来行われてきた方法により筋持久力の測定を行うことにはいくつかの問題点がある。また、持久走後の最大筋力と筋持久力の低下率には差が認められなかった（Nicol et al., 1991b）という報告があることから、現時点では最大努力による筋力・筋パワーを持久走後の筋疲労に関する総合的指標としてとらえることが望ましいと考えられる。持久走が筋持久力に及ぼす影響については、今後さらに検討する必要がある。

また、走行中の身体各部位の座標位置の変化と地面反力を測定することによって、身体各部位でどのくらいの力・パワーを発揮しているかを推定することができる（Winter, 1983）。この手法を用いて持久走中の筋疲労について直接的に検討することができる可能性があるが、実際に

このことを行った研究は少ない (Sprague and Mann, 1983 ; Enomoto et al., 2001) . これまでの研究で, 持久走中の走動作の変容 (Elliot and Ackland, 1981 ; Siler and Martin, 1991) や接地局面での地面反力の変化 (Pullinen et al., 1999) などが報告されており, これらの変数から算出される関節モーメント・パワーにも持久走による疲労の影響が反映される可能性がある. しかし, 走動作, 地面反力および関節モーメント・パワーは走速度の変化に伴ってその値が変化することが知られている (阿江ら, 1986 ; Munro et al., 1987) . マラソンレースをはじめとする持久走では疲労に伴い走速度が低下することが多いので, 疲労の影響と走速度の変化の影響を識別することが困難になると考えられる. 実際に Williams et al. (1991b) は, あらかじめ走速度の変化による kinematics の変化を測定したうえで, 持久走中の疲労に伴う変化について検討した結果, いくつかの変数について走速度の低下とは独立した疲労による変化を認めたが, 同時に走動作の変化には個人差が大きいことも指摘している. また, 地面反力と撮影画像から関節モーメントを求める測定方法では, その技術的な限界によって, 多数の被験者を同時に測定することが現時点では困難である. また, 本研究で実験運動で用いた 5 回連続リバウンド型跳躍などのような跳躍運動においては, 一方の関節まわりの筋群で発揮された力学的エネルギーが他の関節に流入することが指摘されている (vanIngen Shenau et al., 1985) . このために, 関節モーメントには, 実際にその関節まわりの筋群で発揮した張力以外の要因が関与している可能性がある. したがって, 関節まわりの筋群による出力を関節モーメントにより測定・評価することには一定の限界があると考えられる.

本研究では、筋力・筋パワーの指標として、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力と力発揮速度、垂直跳びと5回連続リバウンド型跳躍の跳躍高を用いた。これらの測定項目を選定した理由は、いずれも脚筋が主働筋であること、アイソメトリックな膝伸展運動については、比較的限定要因が少なく再現性、信頼性に優れた項目であること（Viitasalo et al., 1980）、垂直跳びと5回連続リバウンド型跳躍については走運動と同じSSC運動であること（高松ら, 1988 ; Komi, 1992）、およびいずれの運動も狭い場所において簡便に測定を実施できることなどによる。このうち、5回連続リバウンド型跳躍については、実験1ではマラソンレース後に垂直跳びの成績などに比べて大きく低下する傾向があること、また実験2では、踏切局面における足、膝、股関節において発揮された仕事を測定した結果から、足関節の筋出力が大きく低下すること、および5回連続リバウンド型跳躍の跳躍能力の指標である5Jindexと台高0.3mからのドロップジャンプにおけるリバウンドドロップジャンプ指数（岡子ら, 1995）との間に有意な相関関係が認められた（未発表資料）ことなどから、爆発的なSSC運動の遂行能力の評価指標とすることができると考えられる。ところで、走行中の地面反力を調べた研究（Munro et al., 1987）によると、本研究における持久走の走速度に近い秒速3 mでの走行時における接地時間は0.270秒、垂直方向にかかる力のピークは体重の1.57倍であり、秒速4 mではそれぞれ0.229秒、1.95倍であった。実験2における5回連続リバウンド型跳躍では、踏切時間は平均0.15~0.20秒、最大地面反力は体重の5~8倍の値であった。したがって、5回連続リバウンド型跳躍は、その力の大きさは異なっていたものの、持久走中に脚が行う筋出力と収縮様式および収縮時間に近い条件で

あるものと考えられる。

以上のことから、本研究における実験運動によって評価される筋力・筋パワーは、運動様式、負荷の大きさ、筋力・筋パワーの測定方法について今後解決すべき問題点を含んでいるが、持久走による脚筋疲労をある程度把握できるものと考えられる。

2. 持久走における筋力・筋パワーの役割

本研究では、持久走による脚筋疲労と走パフォーマンスとの関係を検討するために、持久走前・中・後に筋力・筋パワーを測定し、その変化と持久走成績との関係を検討した。その結果、実験1では、マラソンレース前・後半における走速度の変化率とレース前・後に行わせた5RJの跳躍高の変化率との間に有意な正の相関関係が認められた。また実験2では、中強度の持久走中の疲労感の亢進と5RJの成績の変化との間に有意な負の相関関係が認められた。さらに実験3でも、マラソンレース後半の走速度の低下が大きい者ほど、筋力・筋パワーの低下が大きい傾向にあった。これらの結果は、持久走中の筋力・筋パワーの低下が走速度の低下や走行中の疲労の亢進を引き起こしている可能性を示唆するものである。したがって、優れた持久走成績をおさめるためには、走行中に速度をできるだけ低下させないことが重要な条件であるので（進藤，1968），持久走中の筋力・筋パワーの低下を抑制することは、重要なトレーニング目標になると考えられる。しかし、持久走における走速度の変化を筋力・筋パワーの低下などに関連づけて検討した研究は極めて少なく、そのメカニズムについては十分明らかにはされていない。

一つの可能性としては、筋力・筋パワーの低下が走行中の走動作や走

の経済性に悪影響を及ぼす結果として、走行中の疲労を亢進させることが考えられる。本研究における実験3では、マラソンレース後に筋力・筋パワーが有意に低下するとともに走の経済性が低下する傾向にあったこと、ストライド頻度は増加しストライド長は減少する傾向にあり、非支持時間は有意に減少し、支持時間は増加する傾向にあったこと、およびレース後半の走速度の低下が大きい者ほど走の経済性や筋力・筋パワーの低下や走動作の変化が大きい傾向にあったことが認められた。先行研究においても持久走による走の経済性の低下 (Morgan et al., 1990 ; Nicol et al., 1991c ; Thomas et al., 1995) や走動作の変化 (Elliot and Ackland, 1981 ; Armstrong and Gehlsen, 1985 ; Buckalew et al., 1985 ; Siler and Martin, 1991 ; Williams et al., 1991b) が報告されており、その原因として筋力・筋パワーの低下が考えられている。持久走による筋疲労は脚筋群において不均一に起こるために、疲労とともに走動作が非効率的な方向へ変化し、その結果として走の経済性が低下して走行中の疲労を助長する可能性がある (Nicol et al., 1991c) 。しかし実験3において、マラソンレース前・後に行わせた最大下走行中での走動作の変化と走の経済性の変化との間には有意な相関関係が認められなかった。同様のことは、持久走による走動作の変化と走の経済性の変化を同時に測定した研究 (Morgan et al., 1990 ; Nicol et al., 1991c) においても報告されている。これらのことは、筋力・筋パワーの低下、走動作の変化、走の経済性の低下が必ずしも互いに関連しあって起こるわけではないことを示唆するものである。ただし、実験3における走の経済性と走動作の測定は一定速度に保たれたトレッドミル上で行ったこと、マラソンレースとレース後のトレッドミル上での走行とは休息時間をはさんで行った

ことなどが、上述の結果に影響していた可能性も考えられる。

他の一つの可能性としては、筋力・筋パワーの低下が持久走中の走速度の低下に直接的に影響していることが考えられる。走運動は、主働筋が伸長性収縮と短縮性収縮を規則的に繰り返すことから、伸長-短縮サイクル（SSC）運動である（Komi, 1992）。SSC運動では、コンセントリック、あるいはエキセントリックな筋収縮のみからなる運動に比べて、より高い力を発揮できること（Cavagna et al., 1977）、効率が高いこと（Thys et al., 1975）が知られており、これらの特性を生かすことが、持久走中に高い走速度を維持することにつながるものと考えられる。しかし、長時間のSSC運動では、筋疲労に伴ってエキセントリック収縮による筋損傷（Hikida et al., 1983）、それに伴う伸張反射の抑制（Nicol et al., 1996）あるいはstiffnessの低下（Horita et al., 1996）が起こり、これらによって走行中に高い効率が維持できなくなり、結果として筋疲労をさらに助長している可能性が考えられる。Paavolainen et al. (1999) は、持久的競技者に行わせた10km走の成績と走行中の地面反力などとの関係を検討した結果、記録が良い者ほどより短い接地時間で走行を続けることができる傾向にあったことを認めた。このことは、すぐれた持久走成績をおさめるためには走行中の接地時間を短く保つための筋機能が重要な要因となることを示唆するものである。そのためには骨格筋が乳酸産生による酸性化や代謝産物の蓄積などが起こっている状況下で筋収縮を持続できることが重要であると考えられる。持久走中の筋力・筋パワーの発揮は最大下努力で行っているのに対して、本研究における筋力・筋パワーの測定はいずれも全力で行わせたので、持久走中の接地時間とは同列に扱うことは必ずしも妥当ではないが、走行中に筋力・筋パワー

を維持することがSSC運動の特徴である高い効率を維持することに貢献する可能性が考えられる。そのためには、筋収縮に悪影響を及ぼす様々な現象が顕在化している状況においても、高い筋力・筋パワーを発揮し続ける能力が必要とされるであろう。ただし、本研究における実験1では、レース前・後の筋力・筋パワーと有気的能力との間には有意な相関関係は認められなかった。また、レースの前に測定した筋力・筋パワーとそれらのレース前・後の変化率との間にも有意な相関関係は認められなかった。このことは、有気的能力に優れること、あるいは疲労していない状態での脚の筋力・筋パワーの高いことが、レース後半においてSSC運動によるパワー発揮を相対的に高い水準に維持できることには必ずしもつながらないことを示唆するものである。今後、持久走中の筋疲労をよりの確に反映するための筋力・筋パワー測定方法、および筋力・筋パワーの低下の差異に影響を及ぼす要因についてさらに検討する必要がある。

3. 持久走における筋力・筋パワートレーニングの位置づけ

上述したように、筋力・筋パワーの低下が持久走中の走速度の低下を引き起こしている可能性があることから、筋力・筋パワートレーニングによって走速度の低下を抑制できる可能性が考えられる。そこで本研究での実験4では、中等度の持久走トレーニングを実施している者を対象にして7週間の筋力・筋パワートレーニングを行わせた。その結果、トレーニング期間終了後において持久走トレーニングに筋力・筋パワートレーニングを加えた群は、持久走のみを行わせた群で生じた筋力・筋パワーの低下が認められないこと、および最大走行時の最高到達速度や12

分間走の走行距離が有意に増加することが認められた。この結果と同様に、これまでの研究においても筋力・筋パワートレーニングによって $\dot{V}O_2\text{max}$ (Hickson et al., 1980), 漸増負荷テストでの最高走速度 (Hunter et al., 1987), および走の経済性 (Johnston et al., 1995; Paavolainen et al., 1999) が向上することが報告されている。これらのことは、筋力・筋パワートレーニングを行うことによって、筋力・筋パワーを維持し、最大強度での有気的パフォーマンスを高め、持久走成績を向上させる可能性のあることを示唆するものである。

しかしその一方において、実験4における筋力・筋パワートレーニングでは、マラソンレースによる筋力・筋パワーの低下およびレース後半の走速度の低下を軽減する効果はそれほど大きくなかったことが認められた。BehmandSt-Pierr (1998) は、筋力・筋パワートレーニングによって起こる運動単位の興奮水準とインパルスの発射頻度の増加、筋線維の収縮力の増強、末梢での刺激伝導機能の向上および拮抗筋活動の減少などによって筋疲労を抑制する効果が期待できるとしている。本研究における結果は、彼らの指摘とは異なる。本研究ではこの原因を明示することはできないが、トレーニングの期間および負荷の強度、量、頻度が筋力・筋パワーの発達を引き起こすほど十分ではなかったことに加えて、ある水準の筋力・筋パワーを長時間にわたって維持するのに十分ではなかったことが考えられる。

このように考えると、持久走における筋力・筋パワートレーニングは、走行中の走速度を高めることに貢献するものとは別に、筋疲労を軽減し走速度の低下を抑制することに貢献するものを考える必要のあることが分かる。後者は、一般には筋持久力トレーニングとして位置づけられて

いる。

これまで多くの研究者によって、筋力・筋パワーと持久走成績との間に相関関係が認められることが報告されている（菊池，1986；江橋ら，1989；伊東と堀川，1990；西山ら，1990；Houmard et al., 1991；高瀬ら，1992）。しかし，これらの研究においては，筋力・筋パワーが持久走成績に影響する理由について必ずしも明確には示されていない。その原因としては，上述した持久走における筋力・筋パワーのあり方が混在して捉えられていた可能性が考えられる。また，長距離・マラソン競技に関する実践書，指導書の中には，実際に筋力・筋パワートレーニング手段を紹介しているものがみられるが（帖佐・勝亦，1982；有吉，1987；沢木・高岡，1993；前河，1993），その目的は「力強い走り」や「故障防止」などとされており，必ずしも明確にされていない。これは，持久的競技者にとっては，持久的トレーニングが主なトレーニング手段となり，筋力・筋パワートレーニングは二次的な手段としてとらえられることが多いことによるのであろう。

それでは，実際のトレーニングの現場では，筋持久力トレーニングにあたるものは行っていないのであろうか。いわゆる，動的筋力トレーニングを低強度・高回数で行う手段やサーキットトレーニング手段はこれに属するものかもしれない。また，持久走を起伏地，芝生地，砂地などで行ったり，あるいは手に軽い重量物を持って行うのも筋持久力の向上をねらいとして行われているのかもしれない。しかし，これらのトレーニングは体系的に行われているものではない。本研究でも，このことについて言及することはできなかった。今後，持久走中の走速度の低下に関係すると考えられる，筋力・筋パワーの低下の軽減に役立つ筋持久力

のトレーニング法についてさらに検討する必要がある。

4. 今後検討すべき課題

本研究の結果、今後検討すべき課題として次のことがあげられる。

- ①本研究では、実験運動としてアイソメトリックな膝伸展運動、垂直跳び、5回連続リバウンド型跳躍および立5段跳びを用いた。これらの運動の多くは、足および膝関節まわりの筋群に大きい負荷がかかり、股関節まわりの筋群にはそれほど大きい負荷がかかっていない可能性がある。近年、スプリント走の成績と股関節伸展・屈曲筋群の筋力・筋パワーとの関連性が注目されるようになっており、持久走においてもこれらの筋群が多く動員されている可能性も考えられる。このことを考慮して、持久走による脚筋疲労をより適切に評価できる実験運動を考案する必要がある。
- ②本研究では、持久走による脚筋疲労の実態を明らかにするために、持久走（マラソンレース）前・中・後に筋力・筋パワーを測定し、その特徴について検討するとともに、筋力・筋パワーの変化、最大下走行中の走の経済性と走動作の変化および走パフォーマンスとの関係を検討した。これらの測定は、すべて持久走が終了してからか、あるいはいったん中断させて行っており、その時間差や走行する条件の差異が測定結果に影響を及ぼしていた可能性も考えられる。したがって、持久走中の筋力・筋パワーおよび走の経済性と走動作の測定を直接行う必要がある。また、あらかじめ筋疲労を起こした状態で持久走を行わせ、そのことが走の経済性、走動作および走パフォーマンスに及ぼす影響について検討する必要がある。

③本研究の結果から、持久走後半にかけて高い筋力・筋パワーを維持することが走行中の疲労の亢進や走速度の低下を軽減すること、および筋力・筋パワーの向上をねらいとした筋力・筋パワートレーニングが持久走中の走速度の低下を軽減することに必ずしも貢献しないことが示唆された。このことは、持久走成績を決定する要因としての筋持久力の重要性を示唆するものである。したがって、持久走が筋持久力に及ぼす影響について検討する必要がある。また、筋持久力トレーニングが持久走成績、特に持久走中の走速度の変化に及ぼす影響について検討する必要がある。なおその際には、筋持久力の測定方法（運動様式、筋収縮の様式、運動強度など）についても十分吟味する必要がある。

上記の課題を検討することによって、本研究の所期の目的を達成することができるものと考えられる。

X. 総括

1. 研究目的

本研究の目的は、①長時間の持久走による脚筋疲労の特徴を筋力・筋パワーの面から検討すること、②脚筋疲労と持久走による走の経済性、走動作の変化および走パフォーマンスとの関係を検討すること、③筋力・筋パワートレーニングが脚筋疲労や持久走パフォーマンスに及ぼす効果について検討することである。

2. 研究課題

上述の研究目的を達成するために、以下に示す研究課題を設定した。

研究課題 1：長時間の持久走が筋力・筋パワーに及ぼす影響について検討する。

研究課題 2：長時間の持久走の成績と筋力・筋パワーの低下との関係について検討する。

研究課題 3：長時間の持久走による筋力・筋パワーの低下と、走の経済性および走動作の変化との関係について検討する。

研究課題 4：筋力・筋パワーの向上を目的とした補強トレーニングが長時間の持久走後の筋力・筋パワー低下および持久走成績に及ぼす効果について検討する。

3. 研究の概要

(1) マラソンレースにおける走速度の低下と筋力・筋パワーの低下との関係（研究課題 1, 2）

本研究では、マラソンレース出場者32名を対象にして、レースの直前と直後に、体重、および筋力・筋パワーの指標として、握力、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力と力発揮速度（RFD）、垂直跳び（CMJ）の跳躍高、5回連続リバウンド型跳躍（5RJ）の跳躍高、踏切時間、リバウンドジャンプ指数（5RJindex）を測定した。そしてそれらの変化率と、レース前・後半の走速度の変化率との関係について検討した。主な結果は次の通りである。

- ① 被験者のレースの平均記録は3時間55分27秒±51分24秒（2時間35分22秒－5時間31分36秒）であり、レース後半の走速度（ 177.8 ± 47.4 m/分）はレース前半（ 208.6 ± 37.7 m/分）に比べて有意に低下した。
- ② レース後に測定した体重および筋力・筋パワーは、いずれもレース前に比べて有意に低下することが認められた。しかし、アイソメトリックな膝伸展運動および5RJの成績におけるレース前・後の変化率は、体重、握力および垂直跳びの跳躍高よりも有意に大きい値を示した。
- ③ レースの平均走速度と、レースとは別の日に測定した $\dot{V}O_2\max$ および血中乳酸濃度 2.2mmol/l に相当する走速度である最大定常速度（MSS）との間にはいずれも有意な正の相関関係が認められたが、レース直前に測定した筋力・筋パワーとの間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった。
- ④ レース前・後半の走速度の変化率と、レース前・後に測定した筋力・筋パワーの変化率との関係について検討した結果、走速度の変化率と5RJの跳躍高の変化率との間に有意な正の相関関係が認められた。

なお、 $\dot{V}O_2\max$ およびMSSと、レース前・後半の走速度の変化率、およびレース前・後の5RJの跳躍高の変化率との間にはいずれも有意な相関関係は認められなかった。

上述の結果から、マラソンレースは脚において短時間に発揮される筋力・筋パワー、特に伸張－短縮サイクル運動における筋パワーを大きく低下させるので、それをレース後半にかけて高い水準に保つことが、走速度を維持させるために重要であることが示唆された。

(2) リバウンドジャンプから見た持久走による脚筋疲労（研究課題 1, 2)

本研究では、中強度の持久走中に行わせたリバウンドジャンプにおける下肢の筋出力の変化、および持久走中の心拍数、血中乳酸濃度、主観的運動強度などの変化をもとにして、持久走中における脚筋の疲労の様相について検討することを目的とした。この課題を明らかにするために、日常的にジョギングを行っている5名の男性（Runner群）と行っていない5名の男性（Non-runner群）を対象にして、血中乳酸濃度2 mmol/lに相当する強度で、1周5.4kmのコースを5分間の休息をはさんでRunner群は8周（43.2km）、Non-runner群は4周（21.6km）走行させ、休息中に体重、血中乳酸濃度、主観的運動強度、および5回連続リバウンド型跳躍（5RJ）における跳躍高、踏切時間、リバウンドジャンプ指数（5RJindex）および踏切中の足、膝、股関節における絶対仕事を測定した。主な結果は次の通りである。

- ① 持久走中に両群ともに体重は有意に減少し、心拍数および主観的運動強度は有意に増加したが、血中乳酸濃度には有意な変化は認めら

れなかった。

- ② 両群ともに、持久走中に行わせた5RJの跳躍高と5R Jindexは低下し、踏切時間は延長する傾向にあったが、いずれも持久走前に比べて有意な差は認められなかった。しかしRunner群では、5RJの踏切局面における足と膝関節の絶対仕事、および膝関節の絶対仕事の総仕事に対する貢献度は、持久走前に比べて有意に減少した。
- ③ Runner群では、持久走前半と後半における5RJの跳躍高および5R Jindexの変化率と脚の主観的運動強度の変化率との間に有意な負の相関関係が認められ、踏切時間の変化率と全身の主観的運動強度の変化率との間に有意な正の相関関係が認められた。一方、Non-runner群では、いずれの項目間にも有意な相関関係は認められなかった。
- ④ 両群ともに、持久走の最初の1周に対する最後の1周の走速度の低下率が最も大きかった者は最も小さかった者と比較して、持久走後における5RJの各関節の絶対仕事の総仕事に対する貢献度が足関節では低下し、股関節では増加していた。

以上の結果から、一定速度を維持することを目標とした中強度の持久走では、1) 平均値で見ると、脚全体での筋出力を大きく低下させないものの、持久走後半にかけて足および膝関節まわりの筋群において疲労が著しく起こること、2) 個人ごとにみると、持久走中の疲労の亢進が脚筋出力の低下と関連があること、特に足関節まわりの筋出力の低下が持久走中の走速度の低下を引き起こす可能性のあることなどが示唆された。

- (3) マラソンレースによる走の経済性、走動作および筋力・筋パワー

の変化の相互関係（研究課題 2, 3）

本研究では、マラソンレース出場者13名を対象にして レースの3日前から前日にかけてのいずれかの1日とレース直後に、トレッドミルでの3分間の最大下走行中（斜度0度，分速200m）の $\dot{V}O_2$ と走動作（ストライド頻度とストライド長および支持時間と非支持時間），体重，および筋力・筋パワーの指標として握力，アイソメトリックな膝伸展運動における最大力と力発揮速度（RFD），垂直跳び（CMJ）の跳躍高，5回連続リバウンド型跳躍（5RJ）の跳躍高と踏切時間を測定した．主な結果は次の通りである．

- ① マラソンレースの成績は平均3時間1分47秒±31分22秒（2時間26分44秒～3時間59分17秒）であった．レース後半の走速度は前半に比べて有意に低下し，その低下率は $-11.6 \pm 16.6\%$ （ $-56.1 \sim +3.9\%$ ）であった．
- ② レース後に測定した体重および筋力・筋パワーは，いずれもレース前に比べて有意に低下した．
- ③ レース後に行わせた最大下走行中の $\dot{V}O_2$ は13名中10名が増加し，その平均変化量は $2.8 \pm 2.2\text{ml/kg/min}$ であったが，統計的に有意な変化ではなかった．一方，レース後はレース前に比べて，ストライド頻度は増加し，ストライド長は減少する傾向にあった．また，非支持時間は有意に減少し，支持時間は増加する傾向にあった．
- ④ マラソンレース前・後における走の経済性，走動作および筋力・筋パワーの各変化率の相互の相関関係を検討した結果，いずれの項目間にも有意な相関関係は認められなかった．
- ④ レース前・後半の走速度の低下率から，被験者を速度維持群（6名，低下率： $0.44 \pm 2.6\%$ ）と速度低下群（7名，低下率： $-21.8 \pm$

16.8%)との2群に分け、レース前・後における各測定項目の変化を両群間で比較した。その結果、速度維持群では、最大下走行中の非支持時間(短縮)、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD(低下)、5RJの踏切時間(増大)に有意な変化が認められた。これに対して、速度低下群では最大下走行中の $\dot{V}O_2$ (増加)、および筋力・筋パワーに関する全ての測定項目(5RJの踏切時間以外はすべて低下)が有意に変化した。

上述の結果から、マラソンレースは脚の筋力・筋パワーを低下させるとともに走動作や走の経済性を変化させる傾向にあるが、これらの変化は必ずしも相互に関連しあって起こるとはいえないことが示唆された。

(4) 筋力・筋パワートレーニングが有気的能力およびマラソンレースの成績に及ぼす影響(研究課題4)

本研究では、日常的に持久走トレーニングを実施している者を対象として、週2回・7週間の筋力・筋パワートレーニングが形態、筋力・筋パワー、有気的能力およびマラソンレースの成績に及ぼす影響について検討した。被験者は12名であり、それらを持久走トレーニングのみを行う群(Con群)と持久走トレーニングに筋力・筋パワートレーニングを行う群(Exp群)の2群に分けた。7週間のトレーニング期間前・後に、形態に関する項目として体重、体脂肪率、大腿囲、大腿部皮脂厚、筋力・筋パワーに関する項目としてアイソメトリックな膝伸展運動における最大力と力発揮速度(RFD)、垂直跳び(CMJ)の跳躍高、5回連続リバウンド型跳躍(5RJ)の跳躍高と踏切時間、立5段跳び(5J)の跳躍距離、および有気的能力に関する項目として最大下走行時(200m/分、4分間)での $\dot{V}O_2$ と血中乳酸濃度、最大走行時での $\dot{V}O_{2max}$ と最高到達速度および

12分間走の走行距離を測定した。また、トレーニング期間が終了した1週間後に被験者全員にマラソンレースに出場させて、レース前・後に体重と上述の筋力・筋パワーに関する項目を測定した。主な結果は、次の通りである。

- ① 7週間のトレーニング期間後に有意に変化した項目は、Exp群では大腿部皮脂厚（減少）、最大走行時の最高到達速度（増加）および12分間走の走行距離（増加）であり、Con群では大腿囲（増大）、CMJの跳躍高（減少）および最大酸素摂取量（増大）であった。
- ② マラソンレースの平均記録とレース前・後半の走速度の低下率は、Exp群がそれぞれ3時間45分13秒±54分18秒、 $-9.0 \pm 14.7\%$ 、Con群がそれぞれ4時間11分38秒±14分27秒、 $-12.2 \pm 5.5\%$ であった。いずれの項目にも両群間に有意な差は認められなかった。なお、Con群の2名はレース途中で脱落した。
- ③ マラソンレース後に有意に変化したのは、Exp群では体重、アイソメトリックな膝伸展運動における最大力とRFD、CMJの跳躍高、5RJの跳躍高と踏切時間および5Jの跳躍距離であり（5RJの踏切時間以外は全て減少）、Con群では体重、アイソメトリックな膝伸展運動におけるRFD、5RJの踏切時間および5Jの跳躍距離であった（5RJの踏切時間以外は全て減少）。
- ④ レース前・後における各測定項目の変化率には、両群間に有意な差は認められなかった。

上述の結果から、本研究における筋力・筋パワートレーニングは、持久走トレーニングによって起こる筋力・筋パワーの低下を抑制させるとともに、最大強度での有気的パフォーマンスを改善させる効果があること、またその結果として、マラソンレースの平均走速度を向上させる可

能性のあることが認められたが，マラソンレースによる筋力・筋パワーの低下およびレース後半の走速度の低下を軽減する効果はそれほど大きくないことが示唆された。

X I . 結 論

本研究では、長時間の持久走による脚筋疲労の特徴を、とくに筋力・筋パワーの面に着目して検討した結果、以下の知見が認められた。

- ① 持久走後には、特に下腿において短時間に発揮される筋力・筋パワーが低下する。（研究課題 1）
- ② 筋力・筋パワーの低下が著しい者ほど、持久走中の走速度の低下が著しい。（研究課題 2）
- ③ マラソンレース中の走速度の低下が著しい者ほど、走の経済性および筋力・筋パワーが低下する傾向にあるが、それらの相互関係については明らかではない。（研究課題 3）
- ④ 筋力・筋パワートレーニングは、高強度の有気的能力を高めることによって持久走成績を改善する効果があるが、走速度の低下の抑制には必ずしもつながらない。（研究課題 4）

これらの結果は、優れた持久走成績をあげるためには、高い筋力・筋パワーを獲得することが重要であるが、走行中の筋力・筋パワーを維持し走速度の低下を軽減するためには、筋持久力トレーニング法についてさらに検討する必要があることを示唆するものである。

謝 辞

本論文の作成にあたり，終始懇切丁寧な御指導，御校閲を賜りました高松 薫教授に心より感謝の意を表します。高松先生には，遅筆な私を折にふれて親身になって叱咤していただきました。高松研究室に机を置いていた9年間の日々を無駄にすることのないよう，今後も精進したいと思えます。

また，阿江通良教授，尾縣 貢助教授，勝田 茂名誉教授をはじめとする諸先生方には，論文作成全般にわたって多大なる御指導，御助言を賜りました。ここに深く感謝いたします。

さらに，実験および論文作成にあたって貴重な御指導，御助言を頂きました高松研究室の皆様には厚く御礼申し上げます。

藤沢市保健医療センター保健事業課の皆様には，論文執筆にあたって多大なる御迷惑をおかけするとともに，様々な面において御助力，御高配を賜りました。心より感謝いたします。

被験者の皆様には，苦しい実験にもかかわらず参加を快諾していただきました。ここに改めて感謝いたします。

参考文献

阿江通良, 宮下 憲, 横井孝志, 大木昭一郎, 渋谷侃二 (1986) 機械的パワーから見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.

American College of Sports Medicine (1995) ACSM's guidelines for exercise testing and prescription. 5th edition Lea&Febiger, Malvern, Pennsylvania, pp.3-11.

Appell H Soares J and Duare J (1992) Exercise, muscle damage and fatigue. Sports Med, 13, 108-115.

有吉正博 (1987) 長距離・マラソン・駅伝: 技術と練習法. 成美堂出版, 東京, pp.21-34.

有吉正博 (1994) マラソンにおけるスピード, ピッチおよびストライドの変動. 第3回世界陸上競技選手権大会バイオメカニクス研究班(編), 世界一流陸上競技者の技術. ベースボールマガジン社, 東京, pp.112-120.

Armstrong R (1984) Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. Med Sci Sports Exerc, 16, 529-538.

Armstrong L and Gehlsen G (1985) Running mechanics of national class distance runners during a marathon. Track & Field Quart Rev, 85, 37-39.

朝比奈一男 (1984) スポーツ疲労と休養の生理. Jpn J Sports Sci, 3, 925-929.

Asmussen E and Bonde-Petersen F (1974) Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol Scand*, 91, 385-392.

Bassett D Jr and Howley E (1997) Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints. *Med Sci Sports Exerc* 29, 591-603.

Behm D and St-Pierre D (1998) The effects of strength training and disuse on the mechanisms of fatigue. *Sports Med*, 25, 173-189.

Belcastro A, Parkhous W, Dobson G and Gilchrist S (1988) Influence of exercise on cardiac and skeletal muscle myofibrillar proteins. *Mol Cell Biochem*, 83:27-36.

Bianchi G, Grossi G and Bargossi A (1997) May peripheral and central fatigue be correlated? Can we monitor them by means of clinical laboratory tools ? *J Sports Med Phys Fitness*, 37, 194-199.

Bigland-Ritchie B (1981) EMG and fatigue of human voluntary and stimulated contractions. In Peter R and Whelan J (Eds) *Human muscle fatigue (Ciba found symp. 82)*. Pitman Medical, London, pp.130-156.

Bonde-Peterson F, Mork A and Nielsen E (1975) Local muscle blood flow and sustained contraction of human arm and back muscles. *Eur J Appl Physiol*, 34, 43-50.

Bosco C and Komi P (1979) Mechanical characteristics and fiber composition of human leg extensor muscles. *Eur J Appl Physiol*, 41, 275-284.

Bosco C, Tihanyi J, Latteri F, Fekete G, Apor P and Rusko H (1986) The

effect of fatigue on store and re-use of elastic energy in slow and fast types of human skeletal muscle. *Acta Physiol Scand*, 128, 109-117.

Buckalew D, Barlow D, Fisher J and Richards, J (1985) Biomechanical profile of elite women marathoners. *Int J Sports Biomech* 1, 130-147.

Candau R, Belli A, Millet G, Georges D, Barbier B and Rouillon (1998) Energy cost and running mechanics during a treadmill run to voluntary exhaustion in humans. *Eur J Appl Physiol*, 77, 479-485.

Capelli C, Antonutto G, Zamparo P, Giirardis M and di Prampero P (1993) Effects of prolonged cycle ergometer exercise on maximal muscle power and oxygen uptake in humans. *Eur J Appl Physiol*, 66, 189-195.

Cavagna G (1977) Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. *Exercise and Sports Sciences Reviews*, 5, 89-129.

Cavanagh P and Kram R (1985) The efficiency of human movement -a statement of the problem-. *Med Sci Sports Exerc*, 17, 304-308.

Cavanagh P and Kram R (1990) Stride length in distnace runing : velocity, body dimensions, and added mass effcts. In Cavanagh P (ed), *Biomechanics of distance running Human Kinetics, Champaign, Ill*, pp.35-62.

Chevrolet J, Tschopp J, Blanc Y, Rochat T and Junod A (1993) Alterations in inspiratory and leg muscle force and recovery pattern after a marathon. *Med Sci Sports Exerc* 25, 501-507.

Conley D and Krahenbuhl G (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 12, 357-360.

Costill D (1967) The relationship between selected physiological variables and distance running performance. *J Sports Med*, 7, 61-66.

Costill D, Branham G, Effy D and Sparks K (1971) Determinants of marathon running success. *Int Z Angew Physiol* 29, 249-254.

Costill D, Gollnick P, Jansson E, Saltin B and Stein E (1973) Glycogen depletion pattern in human muscle fibers during distance running. *Acta Physiol Scand*, 89, 374-383.

コスティル (Costill D) (1986) インサイドランニング (Inside running) 同文書院, 東京 (Benchmark Press; Inc, New York) .

Coyle E (1995) Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exercise and sports sciences reviews*, 23, 25-63.

Coyle E, Coggan A, Hemmert M and Ivy J (1986) Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J Appl Physiol*, 61, 165-172.

Daniels J and Daniels N (1992) Running economy of elite male and elite female runners. *Med Sci Sports Exerc*, 24, 483-489.

de Vries H, Moritani T, Nagata T and Magnussen K (1982) The relation

between critical power and neuromuscular fatigue as estimated from electromyographic data. *Ergonomics*, 25, 783-791.

Donaldson S and Hermansen L (1978) Differential, direct effects of H^+ on Ca^{2+} activated force of skinned fibers from the soleus, cardiac adductor magnus muscles of rabbits. *Pflugers Arch*, 376, 55-65.

Donaldson S (1989) Mechanisms of excitation-contraction coupling in skinned muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc*, 21, 411-417.

江橋 博, 後藤芳雄, 西嶋洋子, 今泉哲雄 (1989) 一流男子マラソンランナーの最大有酸素パワーと等速性最大筋出力. *体力研究*, 71, 10-24.

Edwards R (1981) Human muscle function and fatigue. In Peter R and Whelan J (eds), *Human muscle fatigue (Ciba found symp. 82)*. Pitman Medical, London, pp.1-18.

Edwards R, Harris R, Hultman H, Kaijser L, Koh D and Nordesjo L (1972) Effect of temperature on muscle energy metabolism and endurance during successive isometric contractions, sustained to fatigue, of the quadriceps muscle in man. *J. Physiol*, 220, 335-352.

Elliott B and Blanksby B (1979) The synchronization of muscle activity and body segment movements during a running style. *Med Sci Sports Exerc*, 11, 322-327.

Elliott B and Ackland T (1981) Biomechanical effects of fatigue on 10,000 meter running technique. *Res Quart Exerc and Sports*, 52, 160-166.

Enomoto Y, Ae M and Fujii N (2001) Kinetic change in the lower limb joints of distance runners with fatigue. XVIIIth ISB Congress Abstract, A711.

Farber H, Schaefer E, Franey, Grimaldi R and Hill N (1991) The endurance triathlon: metabolic changes after each event and during recovery. *Med Sci Sports Exerc*, 23, 959-965.

Ferretti G, Gussoni M, diPrampo P and Cerretelli P (1987) Effects of exercise on maximal instantaneous muscular power of humans. *J Appl Physiol*, 62, 2288-2294.

Fitts R (1994) Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiological Reviews*, 74, 49-94.

Fitts R. and Holloszy J (1978) Effects of fatigue and recovery on contractile properties of frog muscle. *J Appl Physiol*, 45, 899-902.

Fitts R, Courtright J, Kim D and Witsmann F (1982) Muscle fatigue with prolonged exercise: contractile and biochemical alterations. *Am J Physiol* 242, C65-C73.

Fitts R and Widrick J (1996) Muscle mechanics: adaptations with exercise-training. *Exercise and Sport sciences reviews*, 24, 427-73.

Frederick E (1992) Economy of movement and endurance performance. In Shephard J and Astrand P (eds), *Endurance in sport*. Blackwell Scientific publications, Oxford, pp.179-185.

藤墳規明 (1979) カエル筋紡錘感覚神経末端に対する pH の効果. 日本生理学雑誌, 41, 21.

Glance B, McHugh M and Glein G (1998) Effects of a 2-hour run on metabolic economy and lower extremity strength in men and women. The journal of orthopaedic and sports physical therapy, 27, 189-196.

Gollhofer A, Komi P, Miyashita M and Aura O (1987a) Fatigue during stretch-shortening cycle exercises; changes in mechanical performance of human skeletal muscle. Int J Sports Med, 8, 71-78.

Gollhofer A, Komi P, Fujitsuka N and Miyashita M (1987b) Fatigue during stretch-shortening cycle exercises. 2. Changes in neuromuscular activation patterns of human skeletal muscle. Int J Sports Med, 8 (Suppl), 38-47.

Gollhofer A, Strojnik V, Rapp W and Schweizer L (1992) Behavior of tri-ceps surae muscle-tendon complex in different jump conditions. Eur J Appl Physiol 64, 283-291.

Gollnick P, Bertocci L, Kelso T, Witt E and Hodgson D (1990) The effect of high-intensity exercise on the respiratory capacity of skeletal muscle. Pflügers Arch, 415, 407-413.

Gorostiaga E, Izquierdo M, Iturralde P, Riesta M and Ibanez J (1999) Effects of heavy resistance training on maximal and explosive force production, endurance and serum hormones in adolescent handball players. Eur J Appl Physiol, 80, 485-493.

後藤幸弘, 松下健二, 本間聖康, 辻野 昭 (1983) 筋電図による走の分析

一步幅・歩数の変化を中心として。日本バイオメカニクス学会（編），
身体運動の科学IV。杏林書院，東京，pp 15-33.

Green H and Patla A (1992) Maximal aerobic power: neuromuscular and
metabolic considerations. *Med Sci Sports Exerc*, 24, 38-46.

Hagan R, Smith M and Gettman L (1981) Marathon performance in
relation to maximal aerobic power and training indices. *Med Sci Sports
Exerc*, 13, 185-189.

波多野義郎（1979）ヒトは1日何歩あるか。体育の科学, 29, 28-31.

Heise G, Morgan D, Hough H. and Craib M (1996) Relationships between
running economy and temporal EMG characteristics of bi-articular leg
muscle. *Int J Sports Med*, 17, 128-133.

Henson L, Poole D and Whipp B (1989) Fitness as a determinant of
oxygen uptake response to constant-load exercise. *Eur J Appl Physiol*, 59,
21-28.

Hickson R (1980) Interference of strength development by simultaneously
for strength and endurance. *Eur J Appl Physiol*, 45, 244-263.

Hickson R, Dvorak B, Gorostiaga E, Kurowski T and Foster C (1988)
Potential for strength and endurance training to amplify endurance
performance. *J Appl Physiol*, 65, 2285-2290.

Hikida S, Staron R, Hagerman F, Sherman W and Costill D (1983) Muscle
fiber necrosis associated with human marathon runners. *J Neurol Sci*, 59,

185-203.

Horita T Komi P and Kyröläinen H (1996) Stretch shortening cycle fatigue: interactions among joint stiffness, reflex, and muscle mechanical performance in the drop jump. *Eur J Appl Physiol*, 73, 393-403.

Hortobagyi T, Lambert N and Kroll W (1991) Voluntary and reflex responses to fatigue with stretch-shortening exercise. *Can J Sport Sci*, 16, 142-150.

Hortobagyi T, Tracy J and Lambert G (1996) Fatigue effects on muscle excitability. *Int J Sports Med*, 17, 409-414.

Houmard J, Costill D, Mitchell J, Park S and Chenier T (1991) The role of anaerobic ability in middle distance running performance. *Eur J Appl Physiol*, 62, 40-43.

Hunter G, Demment R and Miller D (1987) Development of strength and maximum oxygen uptake during simultaneous training for strength and endurance. *J Sports Med Phys Fitness*, 27, 269-275.

石井喜八・関口 脩 (1990) 筋力トレーニングの原理と方法. 松井秀治 (編), コーチのためのトレーニングの科学. 大修館書店, 東京, pp.293-338.

伊東輝雄・堀川浩之 (1990) 競技成績が異なる長距離選手の動的筋出力特性と競技成績との関係について. *陸上競技研究*, 1, 35-41.

Ito A, Fuchimoto T and Kaneko M (1985) Quantitative analysis of EMG

during various speeds of running. In Winter D (Ed) Biomechanics IX, Human Kinetics Publishers, Champaign, Ill, pp.301-306.

Johnston R, Quinn T, Kertzer R and Vroman N (1995) Improving running economy through strength training. NSCA Journal, 8, 7-13.

Kagaya A and Ikai M (1970) Training effects on muscular endurance with respect to blood flow in males and females of different ages. 体育学研究, 14, 127-134.

加賀谷淳子 (1994) 筋持久力 (体力を捉える, 過去から未来へ) Jpn J Sports Sci, 13, 233-240.

加賀谷淳子 (1999) さまざまな運動に対する循環応答と調節. 斎藤 満・加賀谷淳子 (編著), 循環 (運動時の酸素運搬システム調節). ナップ社, 東京, pp.81-96.

金子公宥 (1992) パワーアップの科学—人体エンジンのパワーと効率—. 朝倉書店, 東京, pp.1-7.

Karlsson J, Nordesjo L, Jorfeldt L and Saltin B (1972) Muscle lactate, ATP, and CP levels during exercise after physical training in man. J Appl Physiol, 33, 199-203.

勝田 茂・和田正信 (1986) 筋線維組成と運動競技特性. デサントスポーツ科学, 7, 34-43.

小林寛道 (1990) 走る科学. 大修館書店, 東京, pp147-164.

菊池邦雄（1986）長距離選手の等速性筋力と競技成績に関する研究．広島大学総合科学部紀要，4，35-41．

Komi P (1992) Stretch-shortening cycle. In Komi P (ed), *Strength and power in sport*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp.169-179.

小西由里子，熊野宏昭，佐藤 明，大森浩明（1997）大腿四頭筋の筋疲労による筋力低下が歩容に及ぼす影響．バイオメカニクス研究，1：30-40．

今野道勝（1983）栄養と運動と健康．朝倉書店，東京，pp.7-21．

厚生省（1997）厚生白書-「健康」と「生活の質」の向上をめざして-（平成9年版）．厚生問題研究会，東京，pp50-73．

厚生省保健医療局（2000）平成10年国民栄養調査結果の概要．栄養日本，43，7-24．

Kraemer W, Patton J and Gordon S (1995) Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *J Appl Physiol*, 78, 976-989.

Kumagai S, Tanaka K, Matsuura Y, Matsuzaka A, Hirakoba K and Asano K (1982) Relationships of the anaerobic threshold with the 5 km, 10 km, and 10 mile races. *Eur J Appl Physiol*, 49, 12-23.

LaFontaine T, Londeree B and Spath W (1981) The maximal steady state versus selected running events. *Med Sci Sports Exerc*, 13, 190-192.

Lannergren J, Westerblad H and Flock B (1990) Transient appearance of

vacuoles in fatigued *Xenopus* muscle fibres. *Acta Physiol Scand*, 140, 437-445.

リディヤード (小松美冬訳) リディヤードのトレーニングバイブル. 大修館書店, 東京, pp.187-194

Leveritt M, Abernethy P, Barry B and Logan P (1999) Concurrent strength and endurance training. *Sport Med*, 28, 413-427.

MacDougall J, Ward G and Sale G, (1977) Biochemical adaptation of human skeletal muscle to heavy resistance training and immobilization. *J Appl Physiol*, 43, 700-703.

前河洋一 (1993) 競技スポーツにおけるレジスタンストレーニングの実際. トレーニング科学研究会 (編), レジスタンストレーニング. 朝倉書店, 東京, pp.83-93.

Maffulli N, Capasso G and Lancia A (1991) Anaerobic threshold and performance in middle and long distance running. *J Sports Med Phys Fitness*, 31, 332-338.

Manier G, Moinard J, Techoueyres P, Varene N and Guenard H (1991) Pulmonary diffusion limitation after prolonged strenuous exercise. *Resp Physiol* 83, 143-154.

Marcinik EJ, Potts J, Schlabach G, Will S, Dawson P and Hurley B (1991) Effects of strength training on lactate threshold and endurance performance. *Med Sci Sports Exerc*, 23, 739-743.

Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P and Sassi G (1963) Energy cost of running. *J Appl Physiol*, 18, 367-370.

Margaria R, Aghemo P and Rovelli E (1966) Measurement of muscular power (anaerobic) in man. *J Appl Physiol*, 21, 1662-1664.

Maron M, Wagner J and Horvath S (1977) Thermoregulatory responses during competitive marathon running. *J Appl Physiol*, 42, 909-914.

Maron, M and Horvath, S (1978) The marathon : A history and review of the literature. *Med Sci Sports Exerc*, 10, 137-150.

松尾彰文・福永哲夫（1981）走運動の外的エネルギー出力からみた短・長距離選手の特性．東京大学教養学部体育学紀要, 15, 47-57.

松尾彰文, 白水昭興, 在田宗悟（1989）長距離選手の形態, 身体組成および筋力と競技成績．トレーニング科学研究会（編）, 競技力向上のスポーツ科学 I . 朝倉書店, 東京, pp.39-48.

McKenna M (1992) The roles of ionic processes in muscular fatigue during intense exercise. *Sports Med*, 13, 134-145.

Metzger J and Moss R (1990) Effects on tension and stiffness due to reduced pH in mammalian fast- and slow-twitch skinned skeletal muscle fibres. *J Physiol*, 428, 737-750.

満園良一, 勝田 茂, 金尾洋治, 田淵健一, 永井 純（1986）中・長距離走者における筋線維組成, 毛細血管, 酸化酵素活性と有酸素的作業能との関係．体力科学, 35, 182-191.

Morgan D, Martin P and Krahenbuhl G (1989) Factors affecting running economy. *Sports Med*, 7, 310-330.

Morgan D, Martin P Baldini F and Krahenbuhl G (1990) Effects of a prolonged maximal run on running economy and running mechanics. *Med Sci Sports Exerc* 22, 834-840.

Morgan D and Craib M (1992) Physiological aspects of running economy. *Med Sci Sports Exerc*, 24, 456-461.

Morgan D, Strohmeyer H, Daniels J and Beaudoin C (1996) Short-term changes in 10 km race pace aerobic demand and gait mechanics following a bout of high-intensity distance running. *Eur J Appl Physiol* 72, 401-409.

森本武利 (1993) 暑熱順化と熱中症. 平成4年度日本体育協会スポーツ科学研究報告, pp.6-19.

森谷敏夫 (1989) 運動単位の増強とインパルスの発射様相. *Jpn J Sports Sci*, 8, 668-676.

森谷敏夫 (1992) 筋肉と疲労. *体育の科学*, 42, 335-341.

Moritani T, Muro M, Kijima A, Gaffney F and Persons D (1985) Electro-mechanical changes during electrically induced and maximal voluntary contractions : surface and intramuscular EMG responses during sustained maximal voluntary contraction. *Exp Neurol*, 88, 484-499.

Moritani T, Oddson L and Thorstensson A (1990) Electromyographic

evidence of selective fatigue during the eccentric phase of stretch / shortening cycles in man. *Eur J Appl Physiol*, 60, 425-429.

Munro C, Miller D and Fuglevand A (1987) Ground reaction forces in running : a reexamination. *J Biomech*, 20, 147-155.

鍋倉賢治, 後藤真二, 永井 純, 池上晴夫 (1988) 一定強度の長時間運動中に起こる心周期分画の変動. *体力科学*, 37, 263-272.

中村好男 (1987) アネロビックパワーからみたスポーツ選手の体力. *Jpn J Sports Sci*, 6, 697-702.

Nelson R, Dillman C and Bickett P (1972) Biomechanics of overground versus treadmill running. *Med Sci Sports Exerc*, 4, 233-240.

Nelson A, Arnal D, Silvester L and Conlee R (1990) Consequences of combining strength and endurance training regimens. *Phys Ther*, 70, 287-294.

根本 勇, 中村夏実, 山川 純, 黒田善雄 (1996) エキセントリック収縮を主としたスクワット運動が陸上中長距離選手の生理学的応答と競技成績とに及ぼす影響. 第47回日本体育学会大会抄録集, p.333.

Nicol C, Komi P and Marconnet P (1991a) Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance (1. Changes in muscle force and stiffness characteristics). *Scand J Med Sci Sports*, 1, 10-17.

Nicol C, Komi P and Marconnet P (1991b) Fatigue effects of marathon running on neuromuscular performance (2. Changes in force,

integrated electromyographic activity and endurance capacity). *Scand J Med Sci Sports*, 1, 18-24.

Nicol C, Komi P and Marconnet P (1991c) Effects of marathon fatigue on running kinematics and economy. *Scand J Med Sci Sports*, 1, 195-204.

Nicol C, Komi P, Horita T and Kyröläinen H (1996) Reduced stretch-reflex sensitivity after exhausting stretch-shortening cycle exercise. *Eur J Appl Physiol*, 72, 401-409.

日本体育協会（2001）21世紀の国民スポーツ振興方策。日本体育協会，pp.9-15.

西山一行，堀川浩之，角田直也（1990）長距離選手における等速性筋出力特性と競技成績との関係。国士館大学体育研究所報，8，27-32.

Noakes T (1988) Implications of exercise testing for prediction of athletics performance; a contemporary perspective. *Med Sci Sports Exerc*, 20, 319-330.

Noakes T (1997) Challenging beliefs : ex Africa semper aliquid novi. *Med Sci Sports Exerc*, 29, 571-590.

Noakes T (2000) Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports*, 10, 123-145.

Nuviala R, Roda L, Gloria M, Boned B and Giner A (1992) Serum enzymes activities at rest and after a marathon race. *J Sports Med Phys Fitness*, 32,

180-186.

大柿哲朗 (1982) 現代生活における運動不足の実態. 青木純一郎, 前嶋孝, 吉田敬義 (編), 日常生活に行かす運動処方. 杏林書院, 東京, pp.17-21.

Ochs R, Smith J and Edgerton V (1977) Fatigue characteristics of human gastrocnemius and soleus muscles. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 17,297-306.

Ono M, Miyasita M, Asami T (1976) Inhibitory effect of long distance running training on the vertical jump and other performances among aged males. In Komi p (ed), *Biomechanics V-B*. University Park Press, Baltimore, pp.94-100.

Paavolainen L, Nummela A and Rusko H (1999) Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5-km running performance. *Med Sci Sports Exerc*, 31, 124-130.

Paavolainen L, Häkkinen K and Rusko H (1999) Effects of explosive type strength training on physical performance characteristics in cross-country skiers. *Eur J Appl Physiol*, 62, 251-255.

Paavolainen L, Häkkinen K, Hamalainen I, Nummela A and Rusko H (1999) Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol*, 86, 1527-1533.

Pullinen T, Kyröläinen H, Avela J and Komi P (1999) Marathon running ; reduction and recovery of neuromuscular performance. XVIIth ISB

Congress Abstract, p.666.

ランナーズ (1997) 1998年全国ランニングガイド. ランナーズ, 東京.

Rusko H, Nummela A and Mero A (1993) A new method for the evaluation of anaerobic running power in athletes. *Eur. J Appl Physiol*, 66, 97-101.

Sahlin K (1992) Metabolic factors in fatigue. *Sports Med* 13, 99-107.

Sahlin K, Tonkonogi M and Soderlund K (1998) Energy supply and muscle fatigue in humans. *Acta Physiol Scand*, 162, 261-266.

Sahlin K and Seger Y (1995) Effects of exercise on the contractile properties of human quadriceps muscle. *Eur J Appl Physiol*, 71, 180-186.

Saito M, Kobayashi K, Miyashita M and Hoshikawa, T (1974) Temporal patterns in running. In Nelson R and Morehouse C (eds) *Biomechanics IV*, University park press, Baltimore, pp.106-111.

Sale D (1987) Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 15, 95-151.

Sale D, Martin J and Moroz D (1992) Hypertrophy without increased isometric strength after weight training. *Eur J Appl Physiol*, 64, 51-55.

Saltin B and Karlsson J (1971) Muscle glycogen utilization during work of different intensities. In Pernov B and Saltin B (eds), *Muscle metabolism during exercise*. Premium press, NewYork, pp.289-299.

Sargeant A and Dolan P (1987) Effect of prior exercise on maximal short-term power output in humans. *J Appl Physiol*, 63, 1475-1480.

沢木啓祐・高岡郁夫 (1993) マラソン. ベースボールマガジン社, 東京, pp.149-154.

Scheen A, Juchmes J and Cession-Fossion A (1981) Critical analysis of the "Anaerobic threshold" during exercise at constant workloads. *Eur J Appl Physiol*, 46, 367-377.

Shephard R (1994) Aerobic fitness and health. *Human Kinetics*, Champaign, Ill, pp.200-202.

Sherman W, Armstrong L, Murray T, Hagerman F, Costill D, Staron R and Ivy J (1984) Effect of a 42.2 km footrace and subsequent rest or exercise on muscular strength and work capacity. *J Appl Physiol*, 57, 1668-1673.

進藤宗洋 (1968) マラソンの研究—第1報—平均スピード, 所要時間 (対数尺度) グラフによる分析. 福岡大学35周年記念論文集体育学編, pp.307-338.

Siler W and Martin P (1991) Changes in running mechanics pattern during a treadmill run to volitional exhaustion : fast versus slower runners. *Int J Sport Biomech*, 7, 12-28.

白澤葉月, 木目良太郎, 田巻弘之, 大金雅子, 倉田 博 (1998) 種々の一定負荷における随意的等尺性収縮中の下腿三頭筋の筋電図パターン. *体育学研究*, 43, 164-175.

Sjödín B and Svedenhag J (1985) Applied physiology of marathon running. *Sports Med*, 2, 83-99.

総理府 (1997) 体力・スポーツに関する世論調査. 食品流通情報センター (編), 余暇レジャー総合統計年報 (98-99年版). 食品流通情報センター, 東京, pp.490-510

Sprague P and Mann R (1983) The effects of muscular fatigue on the kinetics of running. *Res Quart Exerc Sport*, 54, 60-66.

Svedenhag J (1992) Endurance conditioning. In Shephard R and Astrand P (Eds), *Endurance in sport*. Blackwell Scientific publications, Oxford, pp.290-296.

Suslov F (1994) Does a runner need strength?. *Fitness and Sports Review International*, 29, 6-11.

Sutton J (1992) Limitations to maximal oxygen uptake. *Sports Med* 13, 127-133.

Takaishi T, Yasuda Y and Moritani T (1994) Neuromuscular fatigue during prolonged pedalling exercise at different pedalling rates. *Eur J Appl Physiol*, 69, 154-158.

高松 薫 (1992) 体力・運動能力からみたスポーツタレントの発掘法—球技スポーツの場合—. *Jpn J Sports Sci*, 11, 716-724.

高松 薫, 関子浩二, 会田 宏, 吉田 亨 (1988) デプスジャンプにおける台高踏切中の膝曲げ動作の相違が跳躍高および下肢筋にかかる負荷特性

に及ぼす影響. 昭和63年度日本体育協会スポーツ科学研究報告 No. IX プリオメトリック・リアクティブ筋力トレーニングに関する研究-第2報-, pp.46-55.

高松 薫 (1991) パワーアップ型とバルクアップ型の筋力トレーニング. 臨床スポーツ医学, 8, 753-760.

高瀬幸一, 田口正公, 金森勝也 (1992) 長距離選手の股関節筋群の筋力発揮特性と競技成績との関係. 日本バイオメカニクス学会第11回大会論文集, pp.117-121.

高瀬幸一, 田口正公, 金森勝也, 諸富一秋 (1994) 長距離選手における Eccentric・Concectric筋力トレーニングのトレーニング効果と競技成績. トレーニング科学, 6, 33-38.

Tanaka K, Yoshimura T, Sumida S, Mitsuzono R, Tanaka S, Konishi Y, Watanabe H, Yamada T and Maeda K (1986) Transient responses in cardiac function below, at, and above anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol*, 55, 356-361.

Tanaka H and Swensen T (1998) Impact of resistance training on endurance performance. *Sports Med.* 25, 191-200.

Tanaka K, Matsuura Y, Moritani T (1981) A correlational analysis of maximal oxygen uptake and anaerobic threshold as compared with middle and long distance performace. *体力科学*, 30, 94-102.

Taylor H, Buskirk E and Henschel A (1955) Maximal oxygen uptake as an objective measure of respiratory performance. *J Appl Physiol*, 7,

73-80.

Thomas D, Fernhall B, Blanpied P and Stillwell K (1995) Changes in running economy and mechanics during a submaximal 5-km run. *J Strength Cond Res*, 9, 170-175.

Thys H, Cavagna A and Margaria R (1975) The role played by elasticity in an exercise involving movements of small amplitude. *Pflugers Arch*, 354, 281-286.

帖佐寛章・勝亦紘一（1982）中長距離・障害．ベースボールマガジン社，東京，pp.104-109.

辻野 昭（1966）短距離疾走におけるキックについて（走における力の相互作用の分析）．*体育の科学*，16，575-581.

山地啓司（1983）マラソンの科学．大修館書店，東京，pp.87-96.

山下文治（1990）走ることによる障害と予防．小林寛道（編），*走る科学*．大修館書店，東京，pp.210-236.

山次俊介，出村慎一，長澤吉則，中田征克，吉村喜信，松澤甚三郎，豊島慶男（2000）持続性最大握力発揮における静的筋持久力の評価変数の検討．*体育学研究*，45，695-706.

Verburg E Hallen J Sejersted O and Vøllestad N (1999) Loss of potassium from muscle during moderate exercise in humans : a results of insufficient activation of the Na^+ / K^+ pump? *Acta Physiol Scand*, 165, 357-367.

Viitasalo J and Komi P (1982) Effects of prolonged cross-country skiing on neuromuscular performance. In Komi P (Ed), Exercise and sport biology (12), Human Kinetics, Champaign, Ill, pp.191-198.

Viitasalo J, Saukkonen S and Komi P (1980) Reproducibility of measurements of selected neuromuscular performance variables in man. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 20, 487-501.

Vøllestad N and Blom P (1985) Effect of varying exercise intensity on glycogen depletion in human muscle fibers. *Acta Physiol Scand*, 125, 395-405.

和田正信 (1996) トレーニングと骨格筋収縮装置. 山田茂・福永哲夫 (編著), 生化学, 生理学からみた骨格筋に対するトレーニング効果. ナップ社, 東京, pp.100-114.

Walmsley B, Hodgson J and Burke R (1978) Forces produced by medial gastrocnemius and soleus muscles during locomotion in freely moving cats. *J Neurophysiol*, 41, 1203-1216.

Westblad P, Svedenhag J and Rolf C (1996) The validity of isokinetic knee extensor endurance measurements with reference to treadmill running capacity. *Int J Sports Med*, 17, 134-139.

Willems M, Huijing P and Friden J (1999) Swelling of sarcoplasmic reticulum in the periphery of muscle fibers after isometric contraction in rat semimembranosus lateralis muscle. *Acta Physiol Scand*, 165, 347-356.

Williams K and Cavanagh P (1987) Relationship between distance

running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol*, 63, 1236-1245.

Williams T Krahenbuhl G and Morgan D (1991a) Daily variation in running economy of moderately trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 23, 944-948.

Williams K, Snow R and Agruss C. (1991b) Changes in distance running kinematics with fatigue. *Int J Sport Biomechanics*, 7, 138-162.

Wilmore J, Parr R, Girandola R, Ward P, Vodak A, Barstow T, Pipes T, Romero G and Leslie P (1978) Physiological alterations consequent to circuit weight training. *Med Sci Sports*, 10, 79-84.

Winter D (1983) Moments of the force and mechanical power in jogging. *J Biomechanics*, 16, 91-97.
13, 69-75.

山岡誠一 (1971) エネルギー代謝からみた走運動. *体育の科学*, 21, 83-87.

山本義春・宮下充正 (1989) これまでのATとこれからのAT. *体育の科学*, 39, 348-363.

山崎省一・青木純一郎 (1977) 長距離走者の競技記録と無酸素的能力. *体力科学*, 26, 87-95.

関子浩二・高松 薫 (1995) バリスティックな伸張-短縮サイクル運動の遂行能力を決定する要因-筋力および瞬発力に着目して-. *体力科学*, 44,

147-154.

関子浩二・高松 薫（1996）“ばね”を高めるためのトレーニング理論。
トレーニング科学, 8, 7-16.