急に始まる激運動時の循環反応に及ぼすウォーミング・アップの効果

権 五 晟* 鍋 倉 賢 治* 池 上 晴 夫**

EFFECTS OF WARMING-UP ON CIRCULATORY RESPONSES TO SUDDEN STRENUOUS EXERCISE

OSUNG GWON, YOSHIHARU NABEKURA and HARUO IKEGAMI

Abstract

A study was conducted to elucidate the changes in circulatory responses to sudden strenuous exercise (SSE) using beat-by-beat analysis of heart rate (HR), stroke volume (SV) and blood pressure (BP). The effects of warming-up on these responses were also studied.

Six healthy male students volunteered for the study. A bicycle ergometer was prepared for SSE. The intensity and duration of SSE were 100% $\dot{V}O_{2max}$ and 1 min, respectively. Warming-up of 80% $\dot{V}O_{2max}$ for 5 min followed by SSE. The interval between SSE and warming-up varied from 5 to 30 min. A control experiment was also performed without warming-up.

The main results obtained were as follows:

1) BP decreased in the initial stage of SSE, followed by a steep increase. This temporary drop in BP was prevented by warming-up. This might contribute to the prevention of myocardial ischemia which is occasionally observed in the initial stage of SSE without warming-up.

2) Time constants of HR and SV during SSE were shortened by warming-up with long intervals, while the time constant of BP was shortened when the interval was short.

3) The recovery response of each parameter was accelerated by warming-up, but the effect of warming-up had almost disappeared after a 30 min interval.

These results suggest the following conclusions:

Warming-up accelerates the up-stroke and recovery of circulatory responses to SSE, but these effects of warming-up are strongly influenced by interval time. In particular, the effect of recovery acceleration is almost abolished by a 30 min interval.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1991, 40 : 174~186)

key words : 1) Sudden strenuous exercise, 2) Warming-up, 3) Heart rate, 4) Stroke volume, 5) Blood pressure

I. 結 言

スポーツ場面では安静状態から急に激しい運動 (sudden strenuous exercise, 以下 SSE)へ移行する場合が少なくない。しかし SSE 中及びその回復時の循環反応の詳細に関しては研究報告が少なく、まだ明らかでないことが多い。このような場合の循環反応は変化が急激であるためその詳細を

明らかにするためには、beat-by-beat の測定データに基づく検討が望ましいが、心拍数に関する研究を除けばまだそのような報告はあまりなく、特に血圧や一回拍出量の経時変化に関しては、研究がほとんどなされていない。

事前にウォーミング・アップ(以下 W-up)を行うと、それに引き続いて行われる SSE 時の生理機能の運動適応を加速し、パフォーマンスを高め

*筑波大学体育科学研究科
〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

University of Tsukuba, Doctoral Program in Health and Sports
Science, Tsukuba-city, Ibaraki 305

**筑波大学体育科学系
〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

University of Tsukuba, Institute of Health and Sports Science,
Tsukuba-city, Ibaraki 505

るという報告があるが^{1,2,12,15,19)}, その逆の報告もある^{23,26)}. おそらく W-up と主運動の強度や持続時間あるいはインターバル・タイム (以下インターバル) の違い等によって, W-up の効果が異なるためであろうと考えられる.

また SSE 初期には左室心筋収縮力を示す左心室圧の時間微分値(LVdp/dt)の減少や, 心電図に ST 低下などの心筋虚血像が起こることが知られている^{4,5,7,9,10,16,24)}. このような SSE 時に見られる循環系の異常な反応も W-up によって防止できることが報告されている^{4,5,10,16)}. しかし SSE 時に循環系が上記のような異常反応を起こすメカニズム及びそれに対する W-up による予防効果のメカニズムに関してはまだ明らかでない点が少ない. この点に関しては多くの循環パラメーターを同時に測定して, 多元的に検討する必要がある.

そこで本研究では, SSE によって起こる循環動態の変化を心拍数, 一回拍出量及び血圧の beat-by-beat のデータを指標として明らかにすると同時に, SSE 時の循環反応に対する W-up の効果と, その効果消失の経時変化を明らかにすることを目的とした.

II. 方 法

A. 被験者

健康な男子学生 6 名を用いた. その身体特性を Table 1 に示す.

B. 実験手順

運動は自転車エルゴメーターを用いて行い, ペ

ダルの回転数は 60 rpm とした. 予め漸増負荷法によって測定した $\dot{V}O_2\max$ を基準にして, 100% $\dot{V}O_2\max$ 強度での 1 分間の運動を SSE とし, W-up としては 80% $\dot{V}O_2\max$ 強度の 5 分間運動を用いた. W-up と SSE 間のインターバルは 5 分, 10 分及び 30 分の 3 条件 [以下それぞれ W-up(5), W-up(10)及び W-up(30)] とし, コントロールとして W-up を行わない実験を加えた.

C. 測定及び分析

測定項目は心電図 (CM 5 誘導法), インピーダンス・カルジオグラム (三栄測器社製 7746), 耳朶脈微分波及び血圧 (Omeda Finapres beat-by-beat 自動血圧計) であった. 耳朶脈微分波は光電式ピックアップ (日本光電社製) によって耳朶から導いた脈波を, 微分アンプ (日本光電社製, ED-600 型) によって時定数 10 msec で微分して求めた. これらの現象を SSE 開始 4 分前から終了後 10 分目まで連続してデータ・レコーダー (TEAC 社製 XR-510) に収録した. 後刻それを再生し, コンピューター (Sord 社製 M 68-MX) を用い池上たち¹⁴⁾, 及び鍋倉たち²⁰⁾の方法によって心拍数, 一回拍出量, 収縮期血圧, 拡張期血圧, 心拍出量, 及び心拍出量と平均血圧から算出した末梢血管抵抗を beat-by-beat モードで自動計測した.

また各条件間の比較を容易にするため SSE 前 4 分間と回復 3 分目から 10 分目までは 1 分毎に, SSE 中は 5 秒毎に, SSE 終了直後から回復 2 分までは 10 秒毎に, それぞれ 6 名の平均値を求めた. また, SSE 直前値から SSE 中のピーク値までの変化量及び SSE 中のピーク値から回復時の変化量を 1 分毎に求めた. また SSE 開始時の反応の速さ及び終了後の回復の速さを比較するために, Symplex 法¹⁷⁾によって時定数(τ)を求めた. 回復時の時定数の算出においては, 先行研究のレビュー¹⁷⁾により, 各パラメーターの時定数の約 3 倍になる時間 (心拍数と心拍出量においては回復 3 分, 一回拍出量と収縮期血圧においては回復 5 分) までの全データを用いた.

D. 統計処理

各平均値間の有意差検定には Paired-t-test を用い, 有意水準の判定は全て 5 % とした.

Table 1. Physical characteristics of the subjects.

Number of subjects	6
Age (year)	25.8 ± 3.2
Height (cm)	171.1 ± 1.7
Weight (kg)	65.7 ± 5.4
Rest HR (bpm)	80.6 ± 6.6
Rest SBP (mmHg)	128.1 ± 10.8
Rest DBP (mmHg)	67.3 ± 7.0
$\dot{V}O_2\max$ (l/min)	3.3 ± 0.7
$\dot{V}O_2\max$ (ml/kg/min)	50.5 ± 11.0

Fig. 1. Changes of heart rate shown by beat-by-beat mode in three experimental conditions and control. (subject I. S.) (a) : control, (b) : W-up(5), (c) : W-up(10), (d) : W-up(30).

III. 結 果

A. 心拍数

beat-by-beat モードによる測定結果の1例を図1に示した。心拍数はSSE開始とともに急激に増加し始め、SSE終了時点ではピークを示した。SSE終了後は最初の1~2分の急激に減少するフェースと、それ以後の徐々に回復するフェースの二つに分けられる。コントロール実験（以下コントロール）においてはSSE15~24秒目にノッチが生じた。このノッチはW-upを行うと消失する傾向を示し、特にインターバルが短い時には完全に消失し、インターバルが長くなると再び出現した。この現象は6人の全被験者で明らかに認められ、その出現時間及び出現時の心拍数には個人差が少なく、平均値はそれぞれSSE開始後 18.0 ± 3.9 秒及び 124.3 ± 6.9 bpmであった。

6人の平均値を図2に示した。SSE前値、SSEピーク値及び回復時の値はいずれもW-upした方がコントロールより高く、その傾向はインター

Fig. 2. Changes of heart rate in three experimental conditions and control. ● : control, ○ : W-up(5), × : W-up(10), □ : W-up(30), * : significant difference from control ($p < 0.05$), ★ : significant difference from W-up(30) ($p < 0.05$).

Fig. 3. Time constant (τ) of heart rate (a), stroke volume(b), systolic(c), and diastolic blood pressure (d) during SSE and recovery period in three experimental conditions and control. *: significant difference from control ($p < 0.05$), $\star$: significant difference from W-up (30) ($p < 0.05$).

バルが短いほど顕著であった。

時定数をみると(図3, a), まず SSE 時にはコントロールに比して W-up(5)では有意に延長し, 立ち上がりが遅くなった。しかし W-up(10)ではコントロール値に回復し, さらに W-up(30)ではかえって短くなり, コントロール値との間に有意な差が生じた。回復時の時定数は SSE 時のそれより著しく長かったが, W-up によって有意に短縮した。

SSE 時の変化量をみると(図4, a), コントロー

Fig. 4. Changes of Δ HR(a), Δ SV(b), Δ SBP (c) and Δ DBP (d) during SSE and recovery period (point of ten minutes) in three experimental conditions and control. *: significant difference from control ($p < 0.05$), $\star$: significant difference from W-up(5) ($p < 0.05$).

ルに比して W-up を行った場合には減少傾向を示したが, インターバルを長くすると再びコントロール値に近づく傾向を示した。

B. 一回拍出量

beat-by-beat モードによる測定結果の1例を図5に示した。SSE 中から SSE 後にかけて増加する傾向がうかがえるが, 変動が激しい。SSE 開始前には, コントロールでは約 30 ml の範囲で変動しているのに対して W-up の場合には変動幅が大きかった(約 60 ml)。SSE 開始とともに変動幅はさらに増大した。コントロールでは SSE 終

Fig. 5. Changes of stroke volume shown by beat-by-beat mode in three experimental conditions and control. (subject F. N.) (a) : control, (b) : W-up(5), (c) : W-up(10), (d) : W-up(30).

了後も変動幅が大きく、4～5分かけてゆっくり回復したのに対して、W-up した場合には SSE 終了とともに直ちに減少し、変動幅も急減した。その傾向はインターバルが短いほど顕著であった。

6 人の平均値を図 6 に示した。SSE 前の安静値は W-up した方がコントロールより高く、その程度はインターバルが短いほど顕著であったが、いずれも有意差ではなかった。一回拍出量はいずれの条件においても SSE 開始とともに急増し、15～20秒目にはほぼ一定値(約 125 ml)に達し、その後は多少変動したがほぼその一定値を保った。SSE 1 分間の平均値はコントロールで 118.1 ± 20.3 ml であったのに対して W-up(5)では 124.6 ± 21.7 ml, W-up(10)では 126.1 ± 28.0 ml そして W-up(30)では 125.5 ± 27.0 ml を示し、W-up した方が大きかったがいずれも有意差ではなかった。SSE 終了直後はいずれの条件においても一旦急増し、その後 1 分間位は急減した後、リバウンドしてから緩やかに回復した。リバウンドはコントロールにお

Fig. 6. Changes of stroke volume in three experimental conditions and control. ● : control, ○ : W-up(5), × : W-up(10), □ : W-up(30).

いて特に顕著であったが、W-up を行くとその程度が減少する傾向を示し、回復も全体として W-up によって加速された。回復時の一回拍出量はコントロール、W-up(30)、W-up(10)、W-up(5)の順に大きい傾向を示し、これは心拍数がその逆順であるのと対照であった。

時定数をみると(図3, b), SSE 時にはコントロールに対して W-up(10)と W-up(30)の場合に有意に短縮した。回復時には SSE 時より著しく長かったが、W-up によって有意に短縮した。

変化量をみると(図4, b), SSE 時にはコントロールに比して W-up を行った場合には減少傾向を示したが、インターバルを長くすると再びコントロール値に近づき、W-up(30)では逆にコントロールよりも大きい傾向を示した。回復時には(SSE 中の平均値一回復10分目の値)W-up した方がいずれも大きくなった。

C. 収縮期血圧

beat-by-beat モードによる測定結果の1例を

図7に示した。SSE 開始とともに急激に増加しはじめ、SSE 終了時点ではピークを示した。回復期には、一旦急減しリバウンドしてから2～3分の周期で上下に変動しながら回復する様子が認められた。この現象はコントロールと W-up(30)で顕著であったが、W-up(5)と W-up(10)ではそれほど顕著ではなく比較的滑らかで素早い回復を示した。

6人の平均値を図8に示した。いずれの場合にも SSE 開始とともに急増し始めたが、コントロールにおいて5～10秒の間に有意な一時的低下が見られた。この現象は W-up によって消失する傾向を示したが、W-up(30)では再び出現した。SSE 中のピーク値はコントロールに比して、W-up(5)と W-up(10)では高く、W-up(30)では逆に低い傾向を示した。回復時の値はコントロールで最も大きく、W-up した場合にはそれより一般に小さい値を示した。

SSE 時の時定数(図3, c)はコントロールに比

Fig. 7. Changes of systolic and diastolic blood pressure shown by beat-by-beat mode in three experimental conditions and control. (subject F. N.) (a) : control. (b) : W-up(5), (c) : W-up(10), (d) : W-up(30).

Fig. 8. Changes of systolic blood pressure in three experimental conditions and control. ● : control, ○ : W-up (5), × : W-up (10), □ : W-up(30), ★ : significant difference from W-up(30) ($p < 0.05$).

して, W-up(5)では有意に短縮し, 立ち上がりが速くなったことを示した. しかし W-up(10)ではコントロール値に回復し, さらに W-up(30)では逆に有意に長くなった. 回復時の時定数はSSE時のそれより著しく長かったが, W-upによって顕著に短縮した.

回復時の変化量(図4, c)は W-up(5)と W-up(10)においてはコントロールより有意に大きかったが, W-up(30)においてはコントロール値に戻った.

D. 拡張期血圧

beat-by-beat モードによる測定結果の1例を図7に示した. SSE 開始とともに収縮期血圧とはほぼ同じような変化パターンで上昇しはじめ, SSE 終了時点ではピークを示した. しかし変動の幅は収縮期血圧の場合より小さかった. SSE 終了直後いずれの条件においても一旦 SSE 前値以下まで急減した後, SSE 前値まで戻る傾向が見られた.

6人の平均値を図9に示した. コントロール, W-up(5)及び W-up(10)は SSE 開始とともに増

Fig. 9. Changes of diastolic blood pressure in three experimental conditions and control. ● : control, ○ : W-up (5), × : W-up (10), □ : W-up(30), ★ : significant difference from control ($p < 0.05$), ★ : significant difference from W-up (30) ($p < 0.05$).

加したが, 5~10秒の間に一時的に減少し, その後再び増加し始め, SSE 終了時点でピークを示した. W-up(30)においては SSE 開始とともに10秒目まで減少した後増加し始め, SSE 終了時点ではピークを示した. SSE ピーク値はコントロールに対して W-up(5)と W-up(10)の場合は高く, 特に W-up(10)の値は有意に高かった. しかし W-up(30)においてはコントロール値よりも低くなる傾向を示した. SSE 終了後はいずれの条件においても素早い回復を示し, 10秒以内に SSE 前値あるいはそれ以下の値まで急減した後 SSE 前値に戻った.

SSE 時の時定数(図3, d)はコントロールに対して W-up(5)は短縮する傾向を示したが, W-up(10)と W-up(30)は逆に延長した. 回復時の時定数は, 拡張期血圧の変化パターンが図8に示したように単純でないため, 算出できなかった.

変化量を見ると(図4, d), SSE 時にはコントロールに対して W-up(5)と W-up(10)は有意に

Fig. 10. Changes of peripheral vascular resistance in three experimental conditions and control. ● : control, ○ : W-up(5), × : W-up(10), □ : W-up(30), ☆ : significant difference from W-up(5) ($p < 0.05$), ※ : significant difference from W-up(10) ($p < 0.05$), ★ : significant difference from W-up(30) ($p < 0.05$).

大きかったが、W-up(30)はコントロール値に戻った。回復時にもW-up(5)とW-up(10)はコントロールより大きかった。

E. 末梢血管抵抗

6人の平均値を図10に示した。SSE開始とともに急減し、5秒目に最低値に達し、以後緩やかに増加する傾向を示した。W-upを行った場合には最初から比較的到低値であったため、SSEによる変化は比較的軽かった。インターバルが長くなるにつれてコントロールの変動パターンに戻る傾向を示した。SSE直前値から判断すると、末梢血管抵抗はW-upによって顕著に低下する。そしてその効果はW-up後30分経過した時点でもまだ半分以上残っている。

IV. 考 察

A. 心拍数

心拍数はSSE開始直後に急激な増加を示した後、一時的にレベリング・オフ状態となり、その後再び上昇した。この現象は従来の研究においても観察されていて、“ノッチ”と呼ばれている^{17, 18)}。このノッチの発生機序として、運動を開始すると副交感神経緊張が低下することによって心拍

数が増加するが、その途中で副交感神経緊張が一時的に増強するため心拍数の上昇が抑制されるのであると言われている^{17, 18)}。本研究において、W-upを行った場合にはこのノッチ現象が消失する傾向を示し、特にW-up(5)～W-up(10)においてはほぼ完全に消失し、W-up(30)では再び出現する兆候を示した。おそらくW-upによって運動開始時に副交感神経緊張が最初からある程度低下していたことによるものと考えられる。SSE直前の心拍水準がW-upした場合の方がコントロールより高く、その程度はインターバルが短いほど顕著であったことはその裏付けになるだろう。

W-upが心拍数の立ち上がりの速さに及ぼす影響はこれまで数多く報告されているが、その結果は一致していない。W-upによって主運動時の心拍数の立ち上がりが加速されたとする研究においては^{1, 2, 12, 15)}、主運動とW-upの間にある程度のインターバルが挿入されていたのに対して、W-upによって立ち上がりが遅くなったとする研究においては^{22, 26)}、インターバルを挟まなかったものが多い。本研究の結果では、立ち上がりの速さの指標である時定数は、インターバルが最も短かったW-up(5)ではコントロールより長かった

のに対して, インターバルが最も長かった W-up (30)ではコントロールより短かった. したがって, SSE 時の心拍数の立ち上がりの加速に及ぼす W-up の効果はインターバルの有無やその長さによって違っていて, インターバルが無い, あるいは短い場合には時定数が長くなり, インターバルがある程度長い場合には時定数が短くなるものと考えられる. 時定数が短くなる原因としては, W-up によって自律神経系を含む循環系の反応性が高まった可能性が挙げられる. インターバルが短い W-up では効果が見られなかったのは, SSE 前値が高かったことに原因があると見られる. しかしこれに関しては今後さらに検討する必要がある.

回復時の時定数は W-up によって短縮し, 回復が加速したことを示した. その原因として, 一つは SSE 終了時点の心拍数が, W-up した場合の方が高かったことが関係していると考えられる. しかしその他の原因として, 乳酸消失等回復過程が W-up によって加速されたことも関係しているかもしれない. Hagberg et al.¹³⁾ は, トレーニングにより, 同じ強度の運動を行った後の心拍数の回復が加速されたと報告し, その原因として運動中蓄積される乳酸量及び ATP, PC 系の利用量が減少することによる O_2 dept 及び O_2 deficit の減少を挙げている. 一方後藤¹⁴⁾は, 血中乳酸を増加させるような強い W-up を行うと, 続いて行われる主運動時のピーク乳酸値及び主運動期間中蓄積された乳酸量が有意に減少したと報告している. したがって本研究において W-up によって心拍数の回復が加速された原因にも, SSE 時の乳酸量の減少による O_2 dept 及び O_2 deficit の減少が関係している可能性がある.

B. 一回拍出量

一般に, 一回拍出量は運動強度が中等度以下の場合にはそれに比例して増加するが, それ以上の強度ではプラトーに達し, 強度をより強くしてもそれ以上は増加しなくなると言われている³⁾. 本研究の SSE においては, 一回拍出量は他の循環パラメーターに比べて上昇の時定数が短く, 速くプラトーに達した.

Duncan et al.⁸⁾ はイスを使った実験において, SSE 初期に $LVdp/dt$ と一回拍出量が一時的に低下したと報告している. また Duncan et al.⁷⁾ は SSE 初期の $LVdp/dt$ の減少を W-up によって防止できたと報告しており, Forster et al.¹⁰⁾ も SSE 時に見られた心筋収縮力の指標である左室駆出率 [(拡張末期容量-収縮末期容量)/拡張末期容量, 以下 LVEF] の減少を, W-up によって抑制することができると報告している. したがって W-up によって SSE 時の一回拍出量の低下が防止でき, また立ち上がりの速さが加速される可能性が考えられる. 本研究における一回拍出量の beat-by-beat モードの測定結果では, beat 毎の変動が大きくて, 一時的低下があったかどうかは判断できなかった. また 6 人平均値の絶対値と変化量での比較においても, コントロールと W-up の間に有意差は認められなかった. しかし時定数は, W-up(10)と W-up(30)において, コントロールより有意に短縮した. 時定数が短縮する原因としては, W-up によって静脈還流が促進されたり, 自律神経系を含む循環系の反応性が高まった結果, SSE 初期の $LVdp/dt$ の低下及び SSE 中の LVEF の低下が改善されたことが考えられる. W-up(5) で効果が見られなかったのは, SSE 前値がかなり高かったことが関係していると考えられる.

SSE 終了直後, いずれの条件においても一回拍出量の急増現象が認められた. その原因としては末梢血管抵抗の減少, すなわち後負荷の減少が挙げられる. また心拍数の急減によって拡張期が急増し, 前負荷を増大させることも一因になっている可能性がある. 一方 Forster et al.⁹⁾ は SSE の突然停止が LVEF の著しい増加をもたらしたと報告している. したがって LVEF の増加も関係しているのかもしれない. LVEF が増加した原因は前負荷の増大によって説明できようが, 拡張期の増加により冠血流が改善されて, 心筋収縮力の昂進をもたらした可能性も否定できない. これに関しては今後さらに検討する必要がある.

回復時の時定数は W-up によって著しく短縮した. また変化量も W-up した方がコントロー

ルに比して大きかった。これは W-up によって一回拍出量の回復が加速されたことを意味している。その原因としては、心拍数の場合と同じように、SSE 時の血中乳酸量の減少による O_2 debt 及び O_2 deficit の減少が考えられる。しかし W-up (30)ではコントロールとの間に有意差が認められなかった。後藤¹¹⁾は W-up の血中乳酸蓄積を抑制する効果は、インターバルが短いほど顕著であり、インターバルが長くなると効果がなくなると報告している。したがって本研究においてみられた W-up の回復時の変化量を大きくする効果も、インターバルが長くなると消失するのであろうと考えられる。しかし今回の結果と乳酸との関係については、実際に乳酸を測定して検討することが必要である。

回復時の一回拍出量はコントロール、W-up (30)、W-up(10)、W-up(5)の順に大きく、これは心拍数とその逆順であるのと対照であった。心拍数の場合、SSE 前、SSE 時及び回復時ともにコントロールより W-up した場合の方が大きく、その傾向はインターバルが短いほど顕著であったが、SSE 時と回復時の変化量は条件別に差がなかったことから、SSE 時と回復時における条件別の差は SSE 前値の差によるものと考えられる。一方一回拍出量においては、SSE 前は心拍数と同じ傾向であったものの、回復時の変化量が W-up によって有意に大きくなり、またその効果はインターバルが短いほど顕著であった結果、心拍数とは逆の様相を呈したのと考えられる。

C. 血圧及び末梢血管抵抗

SSE 時に収縮期血圧は急増し、拡張期血圧もより軽度ではあるが上昇した。一般にダイナミックな運動時には拡張期血圧はあまり上昇しないとされているが、今回上昇した原因としては強い自転車エルゴメーター運動が isometric 的運動要素を含んでいることが挙げられる²¹⁾。Buckberg et al.⁶⁾は、心筋への酸素供給は拡張期の冠血流量に大きく依存しており、拡張期血圧の低下は冠血流量の減少をもたらすと報告している。つまり拡張期血圧の上昇は心筋への酸素供給の点ではむしろ望ましいので、SSE 時のような心筋酸素不足にな

りやすい運動の場合には、拡張期血圧の上昇は必ずしも不利な条件ではないと考えられる。Barnard et al.⁴⁾は SSE 時に拡張期血圧が低下したと報告しているが、その研究においては SSE 終了直後の値を測定しているので運動中の値としての信頼性が低いと考えられる。本研究においても拡張期血圧は、SSE 終了とともに急減し、10秒前後で安静値に達した。

血圧は SSE 開始とともに増加するが、収縮期血圧も拡張期血圧とともに5~10秒の間で一時的に低下した。このような SSE 初期の血圧低下は Duncan et al.⁸⁾のイヌを使った実験でも認められている。そのメカニズムとしては、SSE 開始時の作業筋の血管拡張に比べて、腹部内臓の血管収縮が遅れることによって起こる一時的なアンバランスが考えられる。末梢血管抵抗が SSE 開始とともに急減し、以後若干増加する傾向を示したのは、この推察を裏付けているのであろう。一方、Vatner et al.²⁵⁾は SSE 初期に冠血流量が一時的に減少することがあるが、これは動脈血圧の初期減少と関係すると報告している。この考え方に従えば、SSE 初期の動脈血圧低下が心筋虚血の指標になりうる可能性がある。

収縮期血圧は SSE 終了とともに一旦急減し、リバウンドしてから、周期2~3分の上下変動をしながら回復する傾向を示したが、W-up を行った場合にはこのリバウンドは消失ないし軽減した。6人の被験者の回復時の一回拍出量と収縮期血圧の beat-by-beat モードの変化を比較してみると、SSE 終了直後収縮期血圧が一時的に急減した部分を除けば両者のパターンがかなり似ている。したがって回復時の収縮期血圧の周期的変動は一回拍出量の影響を受けているのと考えられる。しかし SSE 終了直後の収縮期血圧の一時的な急減現象は末梢血管抵抗の急減によるものと見られる。末梢血管抵抗が急減した原因としては、作業筋の収縮による血管への圧迫が SSE 終了とともに解除されたことが考えられる。拡張期血圧に比して収縮期血圧の回復は遅く、特にコントロールにおいては回復10分目にも SSE 直前値を上回る傾向を示した。収縮期血圧と拡張期血圧はそ

れぞれ心拍出量と末梢血管抵抗により強く影響されると言われている。この点から考えると SSE 終了後の収縮期血圧の回復が遅くなったのは心拍出量の回復が遅かったことによるものであろうと考えられる。実際にコントロールにおいて心拍出量は、回復10分目にも $8.9 \pm 1.6 \text{ L/min}$ を示しており、SSE 前値の $7.2 \pm 1.8 \text{ L/min}$ を上回っている。これに対して末梢血管抵抗は SSE 終了直後さらに急減した後回復に転じたものの、回復10分目まで SSE 直前値を下回った。

SSE 初期に見られた収縮期血圧の一時的低下は、W-up によって消失し、インターバルが長くなると再び出現した。このパターンは心拍数の場合とよく似ているが、血圧低下は心拍数のノッチより時間的に速く起こるので、両者の発生原因は異なるものと考えられる。SSE 時の動脈血圧の初期低下は前述のように心筋虚血性反応を招く可能性がある²⁵⁾。これが事実であるならば今回の結果は、W-up によって血圧の一時的低下を予防し、心筋虚血性反応を予防することが可能であることを示している。W-up によって収縮期血圧の初期低下が防止できた原因としては、W-up によって末梢血管抵抗が既に SSE に適した状態まで低下していたため、SSE 開始による末梢血管抵抗の急減現象が防げたことが挙げられる。以上のような収縮期血圧に見られた W-up 効果は拡張期血圧の初期低下に対しても軽度ながら認められた。

収縮期血圧の SSE 中のピーク値は、W-up を行っても有意な変化を示さなかった。変化量についても同様であった。しかし時定数は W-up(5)においてコントロールより有意に短縮し、W-up(30)においては逆に有意に延長する傾向が得られた。したがって、W-up はインターバルが短い場合には、SSE 時の収縮期血圧の立ち上がりを加速する効果があるが、インターバルが長くなるとその効果は消失し、さらに長くなると逆の効果を発揮するものと見られる。

拡張期血圧の SSE 中のピーク値は W-up(5)と W-up(10)において有意に高く、変化量も同様であった。心筋酸素供給の不足が問題になる SSE 時には、拡張期血圧がある程度高い方が望ましい

と考えられる。この点からいえば W-up はインターバルが短い方が望ましいといえるかもしれない。しかしこの点に関しては、実際に心筋虚血像を示す被験者を対象にしてさらに検討する必要がある。

回復時の時定数は収縮期血圧において、W-up によって著しい短縮を示した。また変化量も収縮期血圧、拡張期血圧ともに、W-up した方がコントロールより大きかった。これは W-up によって血圧の回復が加速されたことを意味するのである。その原因の一つとして、心拍出量の速い回復が挙げられる。実際に回復時の心拍出量の時定数は、コントロールで $62.0 \pm 4.0 \text{ sec}$ であったのに対して、W-up(5)では $49.6 \pm 10.9 \text{ sec}$ 、W-up(10)では $39.7 \pm 11.9 \text{ sec}$ 、そして W-up(30)では $50.8 \pm 3.0 \text{ sec}$ であり、W-up した方が有意に短かった。W-up(30)の回復時の血圧の変化量はコントロールのそれとほぼ同じであったが、時定数は W-up(10)に比して有意に長かった。すなわち W-up の血圧の回復を加速する効果はインターバルが30分以上になるとほぼ消失するものとみられる。

一方、結果の節で示したように、末梢血管抵抗は W-up によって低下するが、この効果は W-up 後30分経過してもあまり消失しないことが明らかにされた。

V. ま と め

A. SSE 時の心拍数のノッチ現象は W-up によって防止することができた。その原因としては、W-up によって運動開始時に副交感神経緊張が最初からある程度低下していたことが考えられた。

B. 心拍数と一回拍出量の立ち上がりの時定数はインターバルが長い W-up によって短縮されたのに対して、血圧の場合にはインターバルが短い W-up によって短縮した。

C. 一回拍出量は SSE 終了直後に急増した。その原因としては後負荷の減少と前負荷の増大が考えられた。

D. SSE 時には収縮期血圧だけでなく拡張期血圧も上昇した。

E. SSE 初期に、血圧の一時的低下が見られたが、W-up によって、収縮期血圧においては完全に、拡張期血圧においてはある程度弱められた。

このような W-up 効果は心筋虚血性反応の予防効果と関わるものと考えられた。

F. W-up によって、全てのパラメーターにおいて回復時の時定数は短縮し、回復が加速されることを示した。また心拍数を除いては変化量も増大したが、そのような効果は30分のインターバルでほぼ消失した。

以上の所見から、以下のことが結論できる。

A. 激しい運動を急に始めると、各循環パラメーターは急激に変化するが、その変動パターンはパラメーターによって異なり、それぞれ特徴的な像を示す。

B. 事前に W-up を行くと、循環反応の立ち上がりは概して加速される傾向を示すが、インターバルの長さの影響を強く受け、必ずしも常に同一の傾向をとるとは限らない。W-up は特に循環系の回復を加速させるが、このような W-up 効果は、今回の実験条件においては約30分でほぼ消失する。

(受付 平成2年4月2日)

Reference

- 1) Andzel, W. D. (1978) : The effects of moderate prior exercise and varied rest intervals upon cardiorespiratory endurance. *J. Sports Med.*, **18**, 245-252.
- 2) Andzel, W. D. and Busuttill, C. (1982) : Metabolic and physiological response of college female to prior exercise, varied rest intervals and strenuous endurance task. *J. Sports Med.*, **22**, 113-119.
- 3) Astrand, P. O. and Rodahl, K. (1986) : Textbook of work physiology, 3rd Ed., New York, McGraw-Hill.
- 4) Barnard, R. J., Gardner, G. W., Diaco, N. V., MacAlpin, R. N. and Kattus, A. A. (1973) : Cardiovascular response to sudden strenuous exercise-HR, BP, and ECG. *J. Appl. physiol.*, **34**(6), 833-837.
- 5) Barnard, R. J., MacAlpin, R. N., Kattus, A. A. and Buckberg, G. D. (1973) : Ischemic response to sudden strenuous exercise in healthy men. *Circulation*, **48**, 936-942.
- 6) Buckberg, G. D., Fixler, D. E., Archie, J. P. and Hoffman, J. I. E. (1972) : Experimental subendocardial ischemia in dogs with normal coronary arteries. *Circulation Res.*, **30**, 67-81.
- 7) Duncan, H. W., Grimditch, G. K. and Barnard, R. J. (1979) : Cardio response to sudden strenuous exercise (abstract). *Med. Sci. Sports*, 11-86.
- 8) Duncan, H. W., Grimditch, G. K., Barnard, R. J., Vinten, Johansen, J. and Buckberg, G. D. (1987) : Cardiovascular response to sudden strenuous exercise. *Basis, Res. Cardiol.*, **82**, 226-232.
- 9) Forster, C., Anholm, J. D., Hellman, C. K., Carpenter, J., Pollock, M. L. and Schmidt, D. H. (1981) : Left ventricular function during sudden strenuous exercise. *Circulation*, **63**, 592-596.
- 10) Forster, C., Dymond, D., Carpenter, J. and Donard, H. (1982) : Effect of warming-up on left ventricular response to sudden strenuous exercise. *J. Appl. Physiol.*, **53**(2), 380-383.
- 11) 後藤真二 (1988) : ウォーミング・アップが運動パフォーマンスおよびエネルギー代謝に及ぼす影響. 筑波大学体育科学研究科博士論文, 24-69.
- 12) Gutin, B., Kruper, J., Lewis, S. and Stewart, K. (1976) : Oxygen consumption in the first stages of strenuous work as a function of prior exercise. *J. Sports Med.*, **16**, 60-65.
- 13) Hagberg, J. M., Hickson, R. C., Ehsani, A. A. and Holloszy, J. O. (1980) : Faster adjustment to and recovery from submaximal exercise in the trained state. *J. Appl. Physiol.*, **48**(2), 218-224.
- 14) 池上晴夫, 西保 岳, 鍋倉賢治, 福岡義之, 権 五晟 (1989) : 心周期分画および一回拍出量の beat-by-beat 自動測定法の開発. 筑波大学体育科学系紀要, **12**, 153-159.
- 15) Inger, F. and Stromme, S. B. (1979) : Effect of active, passive or no warming-up on the physical response to heavy exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **40**, 273-282.
- 16) Jaffe, M. D. and Quinn, N. K. (1980) : Warming-up phenomenon in angina pectoris. *Lancet*, **2**, 8201, 934-936.

- 17) 古賀俊策(1989): 定常運動と非定常運動におけるガス交換動態の beat-by-beat 法による研究. 筑波大学体育科学研究科博士論文, 51-76.
- 18) Linnarsson, D. (1974): Dynamics of pulmonary gas exchange and heart rate changes at start and end of exercise. *Acta. Physiol. Scand. Suppl.*, **415**, 1-68.
- 19) McKenna, M. J., Green, R. A., Shaw, P. F. and Mayer, A. D. (1987): Test of anaerobic power and capacity. *Aust. J. Sci. Med. Sports*, **19**(2), 13-17.
- 20) 鍋倉賢治, 西保 岳, 山田由紀子, 池上晴夫(1989): 耳朶脈微分波による左室駆出時間の測定法に関する研究. *体力科学*, **38**(1), 27-37.
- 21) Radice, M., Alli, C., Avanzini, F., Ditullio, M. and Mariotti, G. (1985): Role of blood pressure response to provocative tests in the prediction of hypertension in adolescents. *Eur. Heart J.*, **6**, 490-496.
- 22) Richard, L. and Michelle, M. (1982): Delayed kinetics of respiratory gas exchange in the transition from prior exercise. *J. Appl. Physiol.*, **52**, 921-929.
- 23) Richard, R. N., Predrick, L. G., Charles, K. J., Kyuhyun, W., Yang, W. and Henry, L. T. (1974): Hemodynamic predictors of myocardial oxygen consumption during static and dynamic exercise. *Circulation*, **50**, 1179-1189.
- 24) Stein, R. A., Berger, H. G. and Zaret, B. L. (1986): The cardiac response to sudden strenuous exercise in the post-myocardial infarction patient receiving beta blockers. *J. Cardiopulm. Rehabil.*, **6**(9), 336-342.
- 25) Vatner, S. F., Higgins, C. B., Franklin, D. and Braunward, E. (1972): Role of tachycardia in mediating the coronary hemodynamic response to severe exercise. *J. Appl. Physiol.*, **32**(3), 380-385.
- 26) Versteeg, P. G. A., Sampurno, S. D., Sipkema, P. and Elzinga, G. (1981): Control of cardiac output in the exercising dogs different types of work load. *Cardiovasc. Res.*, **15**, 151-158.