運動中の体温調節反応と心周期分画の変動との関係

山崎 文夫¹⁾ 権 五 晟¹⁾ 曾 根 涼 子¹⁾
鍋 倉 賢 治²⁾ 池 上 晴 夫²⁾

Relationship between thermoregulatory response and changes in cardiac time intervals during exercise

Fumio Yamazaki¹, Osung Gwon¹, Ryoko Sone¹,
Yoshiharu Nabekura² and Haruo Ikegami²

Abstract

This study was conducted to clarify the relationship between skin blood flow and sweating during exercise, and also to determine the relationship between those thermoregulatory responses and changes in cardiac time intervals during exercise. Six healthy males performed bicycle exercise at 40% $\dot{V}O_2$ max for 40-min at an ambient temperature of 28°C (50% RH). Physiological parameters including esophageal temperature (T_{es}), forearm sweating rate ($\dot{m}_{sw}$), forearm skin blood flow (LDF) and cardiac time intervals were measured.

1) T_{es} threshold for initiation of cutaneous vasodilation was higher than that of sweating in each subject.

2) $\dot{m}_{sw}$ increased with T_{es} , while the increase of LDF leveled off at 38.1°C as a breaking point (bp).

3) When T_{es} was between 37.6—38.1°C, total electromechanical systole (QS_2) shortened continuously, but diastolic time (DT) remained constant. When T_{es} was higher than 38.1°C, the rate of shortening of DT was larger than that of QS_2 . The pattern of change of left ventricular ejection time (LVET) was similar to that of QS_2 .

4) The trough was formed in the ratio of QS_2 to DT (QS_2/DT) at the bp. When T_{es} was higher than the bp, the rates of increase were slightly less in the ratio of pre-ejection period to LVET (PEP/LVET) and the ratio of electrical systole to QS_2 (QT/ QS_2).

From these findings, the following conclusions were obtained:

T_{es} threshold of skin blood flow is higher than that of sweating. A bp is formed for skin blood flow but not sweating during exercise in a warm environment. It is suggested that there is an interrelationship between the control of skin blood flow and the change of cardiac function because the specific changes of cardiac interval time are at the bp of LDF.

Key words: sweating, skin blood flow, body temperature, cardiac time interval
(Japan J. Phys. Educ., 37: 351—364, March, 1993.)

キーワード：発汗，皮膚血流，体温，心周期分画

目 的

ヒトは運動に伴う熱産生の急増に対して，主に皮膚血管の拡張機能と発汗機能とを動員して

過度の体温上昇を防ぐ。運動時の体温調節に両放熱機能はいずれも重要な役割を果たすが，これらの動員機序については不明な点が少なくない。山崎ら⁴⁾は中程度の強度の自転車運動中に起こる発汗急増が皮膚血流急増よりも早期に出

1) 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
2) 筑波大学体育科学系
〒305 茨城県つくば市天王台1-1-1

1. Doctoral Program in Health and Sport Sciences, University of Tsukuba. 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-city, Ibaraki (305)
2. Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba. 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-city, Ibaraki (305)

現することを観察し、運動初期における両反応の違いを指摘した。また、暑熱下運動中の皮膚血流は 38℃ 付近の食道温を breaking point (以下 bp と略す) としてレベルオフすることが報告されている^{6,28)}。一方、山崎ら⁴⁰⁾は運動中の発汗は 37.7℃ 前後の直腸温を bp として増加率が低下することを報告した。しかし、これは運動初期の直腸温の応答の遅延に起因した見かけ上の現象であることが判明した⁴¹⁾。

皮膚血流が特定の体温を bp としてレベルオフする現象は、運動中の血圧及び心拍出量の維持と関連した機序によって生じるといわれている²⁷⁻²⁹⁾。すなわち、体温の上昇に伴う皮膚血流の増加は中心血液量を減少させ、心充満圧の低下をもたらすが、これを防ぐために皮膚血流を制限するような反射機構が作動すると推察されている。しかし、このような皮膚血流調節機序と心機能との関係については不明な点が多く、検討の余地が残されている。

この点を解明するためには、皮膚血流と心循環動態を示すパラメーターを同時に測定し、多角的に検討することが望ましいと考えられる。そこで本研究では、運動中の皮膚血流と発汗量を測定して両者の変化パターンを比較検討するとともに、心周期分画も同時に測定して、皮膚血流あるいは発汗反応に上記のような bp が形成されたならば、その時点で心周期分画にいかなる変化が生じるかを観察し、体温調節と心機能との関係についても考察することにした。

方 法

1. 被検者

被検者は健康な男子学生 6 名であり、その身体特性及び予め別の日に自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷法によって測定した最大酸素摂取量 (maximal oxygen consumption; $\dot{V}O_2$ max) を Table 1 に示した。全被検者に実験内容を理解してもらい、参加の同意を得た。

2. 実験及び環境条件

環境制御室の中で、40% $\dot{V}O_2$ max 強度に相当する自転車運動をペダル回転数 60 rpm で 40

Table 1. Physical characteristics and maximal oxygen consumption ($\dot{V}O_{2\max}$) of the subjects.

subject No.	age yr	height cm	weight kg	BSA m ²	$\dot{V}O_{2\max}$ ml/min/kg
1	23	176.1	72.0	1.90	54.9
2	22	171.6	66.3	1.80	55.6
3	21	168.5	67.8	1.79	61.1
4	22	176.3	64.2	1.81	53.6
5	23	179.6	75.0	1.96	56.2
6	23	173.5	68.0	1.83	64.3
mean	22.3	174.3	68.9	1.85	57.6
±SE	0.3	1.5	1.5	0.02	1.6

BSA: body surface area

分間行った。環境条件は室温 28.0±0.3℃、相対湿度 50±5% とした。実験はすべて午前 8～12 時の間に実施した。

3. 実験手順

被検者は上半身裸体でランニング用ショートパンツとトレーニングシューズのみ着用し、前記の条件に設定された環境制御室に入り、座位安静を約 60 分間保持した。その間に次項に示す発汗カプセルや電極等を装着し、次いで自転車エルゴメーター (モナーク社製 829 E 型) 上で安静状態の測定を 3 分間行った後、運動を開始した。

4. 測定及び分析

測定項目は食道温 (esophageal temperature; Tes), 局所発汗量 (local sweat rate; $\dot{m}_{sw}$), 皮膚血流 (laser-Doppler flow; LDF), 心電図, 心音図, 耳朶脈微分波, インピーダンス・カルジオグラフ及び指動脈圧波である。Tes を除く各測定項目はデータレコーダー (TEAC 社製 XR-510) に収録した。Tes 測定には食道温用熱電対を用い、これを口腔から食道内に身長 4 分の 1 の長さを目安として挿入した。熱電対の出力はハイブリッドレコーダー (横河製 3087) で記録すると同時にサンプル間隔 5 sec で A/D 変換し、マイクロコンピュータ (EPSON 製 386 M) に連続的に転送した。 $\dot{m}_{sw}$ は静電容量湿度計 (Vaisala 社製 HMP 113 Y) を用いた換気カプセル法 (カプセルの大きさ: 10.0 cm²) に

よって左前腕屈側部から測定した。LDF の測定にはレーザー血流計(Advance 社製 ALF 21)を使用した。この装置は波長 780 nm の半導体レーザーを用いたもので、プローブの先端出力は約 2 mW である。測定部位は発汗カプセルに隣接した左前腕とし、高さが心臓位になるように台上に腕を載せて測定した。心電図は胸部双極誘導法(CM₅)で、Q 波が明瞭な位置に電極を貼付して記録した。心音図は胸骨左縁第 3—第 4 肋間付近で、第 2 音が明瞭な位置にマイクロフォンを置き、上からゴムバンドで固定して記録した。耳朶脈微分波は光電式ピックアップによって耳朶から導出した脈波を、微分アンプ(日本光電社製 ED-601 G)によって微分して求めた。インピーダンス・カルジオグラフは胸部インピーダンス波形を日本光電社製 AI-600 G を用いて導出し、微分アンプ(日本光電社製 ED-600 G)によってその微分波形を求めた。指動脈圧波は左手中指にカフを巻き、自動血圧計(Ohmeda 製 Finapres 2300)によって測定した。

データレコーダーに収録した湿度計の出力及びレーザー血流計の出力をサンプル間隔 500 msec で A/D 変換し、マイクロコンピュータ(SORD 製 M 343 SX)を用いて 1 分毎の $\dot{m}_{sw}$ と LDF を算出した。心電図、心音図、耳朶脈微分波、インピーダンス・カルジオグラフ及び指動脈圧波については、各波形をサンプル間隔 2 msec で A/D 変換し、これらのデータからマイクロコンピュータ(SORD 製 M 68 MX)を用いて、以下に示すパラメーターを beat-by-beat に自動計測した後、1 分毎の平均値を算出した^{14,24)}。すなわち心拍数(heart rate; HR), 全収縮期(total electromechanical systole; QS₂), 拡張期(diastolic time; DT), 左室駆出時間(left ventricular ejection time; LVET), 前駆出期(pre-ejection period; PEP), 電氣的収縮期(electrical systole; QT), QS₂/DT, PEP/LVET, QT/QS₂, 1 回拍出量(stroke volume; SV), 収縮期血圧(systolic blood pressure; SBP), 平均血圧(mean blood pres-

sure; MBP) 及び拡張期血圧(diastolic blood pressure; DBP) である。SV は Kubicek 法¹⁷⁾によって算出し、安静値を 100 とする相対値に換算した。電圧検出電極にはアルミ箔テープを用い、電流印加電極にはスポット電極を用いた。発汗によってヘマトクリット値が変化すればインピーダンスも変化する可能性がある。しかし一定強度(60%VO₂max)の長時間運動中(環境温:30℃)のヘマトクリット値は運動開始直後を除けばほぼ一定であるため³⁰⁾, 発汗がインピーダンスに及ぼす影響は極めて小さいと考えて本法を使用した。電圧電極間の全インピーダンス(Z₀値)は 1 分毎に記録し、分析に供した。皮膚血管コンダクタンス(skin vascular conductance; SVC)は LDF を MBP で除して算出し³⁷⁾, 皮膚血管抵抗(skin vascular resistance; SVR)は MBP を LDF で除して算出した³⁵⁾。

運動開始直後には非温熱性因子が関与すると推察される発汗増加現象が認められたため⁴¹⁾, 温熱性発汗について検討する際には運動 6 分目以降のデータを用いた。発汗閾値 Tes は, Tes- $\dot{m}_{sw}$ 関係の回帰直線式に $\dot{m}_{sw}=0$ を代入して求めた。血管拡張閾値 Tes は, 運動中 LDF が急に増大し始めてからレベルオフするまでのデータを用いて Tes-SVC 関係の回帰直線式を算出し, それに安静時の SVC 値を代入して求めた。

平均値の差の検定には対応のない Student の t-test を行い, $p<0.05$ をもって有意とした。得られた結果は平均値±標準誤差(standard error; SE)で示した。

結 果

Fig. 1 に運動中の Tes, $\dot{m}_{sw}$ 及び LDF の経時変化を被検者 6 名の平均値で示した。安静時に $37.54\pm0.13^{\circ}\text{C}$ であった Tes は, 運動を始めると一旦低下したが 5 分目頃から急激な上昇に転じ, 12 分目以後上昇率が緩やかになり, 運動終了時には $38.34\pm0.07^{\circ}\text{C}$ に達した。 $\dot{m}_{sw}$ には Tes の上昇開始前から増加する傾向が認められた。運動 6 分目から運動終了時までには Tes の変化

Fig. 1. The time courses of esophageal temperature (Tes), local sweat rate ($\dot{m}_{sw}$) and laser-Doppler flow (LDF) during exercise. Values are means $\pm$ SE; $n=6$.

と平行して増加し続けた。LDFは運動初期にはほぼ一定であったが、運動7分目から12分目まで急増し、その後は運動終了時まで極めて緩徐に増加した。

Fig. 2にTesと $\dot{m}_{sw}$ の関係及びTesとLDFの関係を被検者6名の平均値で示した。 $\dot{m}_{sw}$ はTesの上昇に比例して直線的に増加したのに対して、LDFは図中の矢印付近をbpとしてレベルオフした。このような現象は全被検者に認められた。運動開始からbp発生までの時間の平均値 $\pm$ SEは $19'40'' \pm 1'40''$ (15'–25')であり、bpにおけるTesの平均値 $\pm$ SEは $38.13 \pm 0.06^{\circ}\text{C}$ (37.9–38.3 $^{\circ}\text{C}$)であった。Table 2には

発汗閾値とTes- $\dot{m}_{sw}$ 関係の勾配及び血管拡張閾値TesとTes-SVC関係の勾配を被検者毎に示した。いずれの被検者においても発汗閾値Tesは血管拡張閾値Tesよりも低かったが、両平均値間に有意差は認められなかった。

Fig. 3に運動中のHR, SV, SBP, MBP及びDBPの経時変化を被検者6名の平均値で示した (SVについては発汗による電極の湿潤や体動でインピーダンス波形が不良であった3名を除いた残り3名の平均値)。安静時に 71.3 ± 2.2 bpmであったHRは、運動開始から3分目付近まで急増し、以後は時間経過に伴って緩やかに増加し続け、運動終了時には 137.7 ± 5.8

Fig. 2 Relationships between local sweat rate ($\dot{m}_{sw}$) and laser-Doppler flow (LDF) and esophageal temperature (Tes). Values are mean $\pm$ SE; (n=6). The arrow shows the breaking point of LDF.

Table 2. Tes thresholds and slopes of individual liner regression equations for sweating and cutaneous vasodilation.

subject No.	sweating		vasodilation	
	Tes threshold	slope	Tes threshold	slope
1	36.7	0.32	37.3	0.16
2	37.1	0.65	37.4	0.21
3	37.5	0.71	37.9	0.64
4	37.6	0.50	37.9	0.47
5	37.6	0.75	37.9	0.36
6	37.3	0.77	37.7	0.55
mean $\pm$ SE	37.3 $\pm$ 0.1	0.62 $\pm$ 0.07	37.7 $\pm$ 0.1	0.40 $\pm$ 0.07

Tes: esophageal temperature

bpm に達した。SV は運動初期に急増し、5 分目前後にピークを形成した後減少する傾向を示したが、運動 10 分目以降はその減少率が緩やかになった。SBP は運動初期に急上昇し、5 分目前後にピークに至ってから低下する傾向を示したが、その低下率は 10 分目付近を境に減少した。MBP 及び DBP は変化量は小さいが、変化パターンは SBP に類似していた。

Fig. 4 に Tes の変化に対する HR, SV, MBP 及び SVR の関係を示した。図中の矢印は Fig. 2 で認められた bp に相当する点である。bp 付近における各パラメーターの変化をみると、HR は bp よりもやや低い Tes を境に増加率が急増したのに対して、SV には顕著な変化はなくほぼ一様に減少し続けた。MBP は 38°C 付近を境に低下率が減少する傾向を示し、SVR は 37.6°C 以上では MBP と類似した変化パターンを示した。

Fig. 5 に運動中の QS_2 , DT, PEP 及び LVET の経時変化を被検者 6 名の平均値で示した (PEP 及び LVET は耳朶脈の微分波形が不良であった 1 名を除き 5 名の平均値)。 QS_2 及び DT は運動を始めると 2, 3 分目まで急激に短縮した。運動 3 分目までを比較すると、 QS_2 では運動中の全短縮の 53% がこの期間に起こったが、DT の 3 分目までの短縮は全短縮の 82% であり、 QS_2 よりも DT の方が急速な短縮を示した。その後 QS_2 は運動終了時まで緩やかに短縮し続けたのに対して、DT は運動の中頃までほぼ一定値を保ち、その後運動終了時まで軽度

Fig. 3. The time courses of HR ($n=6$), SV ($n=3$), SBP ($n=6$), MBP ($n=6$) and DBP ($n=6$) during exercise. HR: heart rate, SV: stroke volume, SBP: systolic blood pressure, MBP: mean blood pressure, DBP: diastolic blood pressure

に再び短縮した。PEPは運動3分目まで急激に短縮し、それ以降はほぼ一定値を保った。LVETは運動開始直後に一旦安静値よりも延長したが、以後運動終了時まで緩やかに短縮した。

Fig. 6にTesの変化に対する QS_2 , DT, PEP及びLVETの関係を示した。図中の矢印はFig. 2で認められたbpに相当する点である。 QS_2 は38.1℃付近まで軽度に短縮したが、DTはbp付近まではほぼ一定値を保った。その後両者の勾配は急になり、その傾向はDTの方が顕著であった。PEPは38.0–38.1℃付近まではほぼ一定であったが、以後は軽度に短縮する傾向

を示した。LVETは38.0–38.1℃付近まで緩やかに短縮し、その後短縮率が幾分大きくなった。

Fig. 7にTesの変化に対する QS_2/DT , PEP/LVET及びQT/ QS_2 の関係を示した。図中の矢印はFig. 2で認められたbpに相当する点である。 QS_2/DT は運動初期に急増してから緩やかに減少し、bp付近で再び増大に転じた。PEP/LVETは運動初期に急激に減少した後、Tesの上昇に伴って増大したが、bp付近以降はやや増加率が低下する傾向を示した。QT/ QS_2 にもbp付近を境に増加率が低下する傾向が認められた($n=5$:運動中T波終了点が不明瞭に

Fig. 4. HR ($n=6$), SV ($n=3$), MBP ($n=6$) and SVR ($n=6$) which are plotted against Tes. HR: heart rate, SV: stroke volume, MBP: mean blood pressure, SVR: skin vascular resistance show the breaking point of LDF (See Fig. 2).

なった1名を除く)。

考 察

1. 運動中の皮膚血流と発汗の比較

運動中の皮膚血流変化と発汗反応にみられた相違点の1つは、いずれの被検者においても皮

膚血管拡張閾値 Tes が発汗閾値 Tes よりも高かったことである (Table 2). Johnson and Park¹⁵⁾は前腕の皮膚血管拡張閾値 Tes と発汗閾値 Tes に及ぼす姿勢と運動の影響について検討し、血管拡張閾値 Tes は仰臥位時よりも立位時に高く、また安静時よりも運動時に高かつ

Fig. 5. The time courses of QS_2 ($\square$: $n=6$), DT ($\times$: $n=6$), PEP ($\blacksquare$: $n=5$) and LVET ($\triangle$: $n=5$) during exercise. QS_2 : total electromechanical systole, DT: diastolic time, PEP: pre-ejection period, LVET: left ventricular ejection time

たが、発汗閾値 T_{es} は姿勢と運動の影響を受けなかったと報告している。また、Taylor et al.³⁷⁾ は、仰臥位自転車運動中の前腕の血管拡張閾値 T_{es} は運動強度が 125 W 以上であれば強度が強いほど高かったが、発汗閾値 T_{es} は運動強度と無関係であったと報告している。このように発汗閾値 T_{es} は諸条件の影響を受けにくく安定しているのに対して、血管拡張閾値 T_{es} は諸条件の影響を受けて変動しやすいようである。一般に自転車運動を始めると運動刺激によって前腕血管に収縮の起こることが知られている¹⁶⁾。したがって今回の場合も運動刺激によって前腕血管が収縮し、これが体温上昇による血管拡張と相殺的に作用して血管拡張開始が遅れたものと考えられる。一方、運動時の発汗反応は運動に関係した非温熱性要因によって影響されるといわれているから³¹⁾、非温熱性要因の関与が発汗反応と皮膚血流とで異なっているために両閾値 T_{es} に差が生じた可能性も否定でき

ない。

運動初期を除き $\dot{m}_{sw}$ は T_{es} の上昇に比例して直線的に増加した。これは発汗が深部体温と密接に関係して起こることを意味している。これに対して、LDF の増加は $T_{es}=38.1^{\circ}\text{C}$ 付近を境にレベルオフして bp を形成する現象が認められた (Fig. 2)。これは両放熱反応における第 2 の相違点である。皮膚血流におけるこのような現象は Brengelmann et al.⁶⁾ や Nadel et al.²⁸⁾ も観察しており、この現象を Nadel は次のように解釈した²⁷⁻²⁹⁾。すなわち、体温上昇に伴う皮膚血流の増大が中心血液量を減少させるのに加えて、発汗によって血漿量が減少するから、心充満圧は低下し、結局 SV や血圧が低下する。しかし心充満圧や血圧の過度の低下を防ぐために、ある時点から皮膚血管は収縮し、中心循環を維持するように働く。ところがこのような皮膚血管収縮は体温調節にとっては不都合な現象である²⁷⁻²⁹⁾。本研究ではこのような皮膚血流変

Fig. 6. QS_2 ($n=6$), DT ($n=6$), PEP ($n=5$) and LVET ($n=5$) which are plotted against Tes. QS_2 : total electromechanical systole, DT: diastolic time, PEP: pre-ejection period, LVET: left ventricular ejection time, Tes: esophageal temperature. The arrows show the breaking point of LDF (See Fig. 2).

化と中心循環動態との間に何らかの関係があるだろうかという点についてさらに検討してみた。

2. 運動中の皮膚血流調節と中心循環動態との関係

各循環パラメーターの変化を Tes に対応させてみたところ, LDF にみられた bp 付近ないし bp よりもやや低い Tes を境にして HR 増加促進, QS_2 , DT 及び LVET の短縮率増加, QS_2 /DT の急増, PEP/LVET 及び QT/ QS_2 の増加率低下等が認められた (Fig. 4, Fig. 6—7). これらは本研究で得られた主要な所見である。こ

れらの所見は体温調節機能としての皮膚血流と中心循環動態との間に何らかの因果関係があることを示唆している。そこで, 得られた所見や先行研究の結果に基づいて心周期分画の変化要因及び皮膚血流における bp 形成機序について考察してみたい。

HR は運動 3 分目から終了まで時間経過に伴って緩やかに増加し続けた (Fig. 3)。長時間運動中の HR の漸増現象は SV の減少や血圧の低下等の代償作用であると考えられている³³⁾。運動中の QS_2 と DT の応答動態に違いが認められたことは (Fig. 5), HR の増加に伴っ

Fig. 7. QS_2/DT ($n=6$), $PEP/LVET$ ($n=5$) and QT/QS_2 ($n=5$) which are plotted against T_{es} . QS_2/DT : the ratio of total electromechanical systole to diastolic time, $PEP/LVET$: the ratio of pre-ejection period to left ventricular ejection time, QT/QS_2 : the ratio of electrical systole to QS_2 , T_{es} : esophageal temperature. The arrows show the breaking point of LDF (See Fig. 2).

て両者は同率で短縮するのではないことを示している。また両者の比である QS_2/DT は皮膚血流の bp 付近を境に減少から増大に転じた (Fig. 7)。bp に至るまで QS_2/DT が減少したのは、37.6°C から bp 付近まで DT はほぼ一定値を保ったのに対して、 QS_2 は 38.1°C 付近まで緩徐に短縮し続けたためである (Fig. 6)。この QS_2 の緩徐な短縮は、Fig. 6 から判断して主に LVET の変化に依存していると考えられる。一般に LVET は、① HR の上昇³⁹⁾、② SV の減

少^{5,20,39)}、③血圧の低下³⁶⁾、④体温の上昇⁵⁾、⑤心筋収縮力の増強³⁸⁾等によって短縮することが知られている。本研究では⑤の要因についての直接的な証拠はないが①—④についてはいずれも関与している可能性がある。しかし①に関して鍋倉ら²²⁾は、長時間運動中 HR が一定になるように負荷を調節しても QS_2/DT の減少及び増大が観察されたことから、これが HR に依存した変化ではないことを指摘している。

一方、bp 付近以降の QS_2/DT の増大は QS_2

に比して DT の短縮が相対的に大きいためである (Fig. 6). DT は心室の充満と心筋への酸素供給に必要な期間であるから^{4,11,21)}, DT の過度の短縮は心機能維持にとって不都合な現象であり, それが原因で SV の減少あるいは心筋収縮性の低下が起こる可能性があると考えられる. 鍋倉ら^{23,25,26)}は長時間運動中に HR は単調にゆっくり増加し続けるのに対して, QS_2/DT は複雑な変化を示し, 特に運動 15—20 分目頃を境に減少から増加へ変化の方向を変えることを認めた. そしてこの原因について検討した結果, 心筋収縮性の低下の可能性あることを示唆した. 今回の運動は $40\% \dot{V}O_{2max}$ と比較的軽度であったが, 28°C という環境下であったため生体負担はかなり高かったであろうと考えられる. HR が 137.7 ± 5.8 bpm に達したのもそのためであろう. したがって, 鍋倉らの考察を考え合わせると心筋収縮性が bp を境に低下した可能性は否定できない.

QS_2/DT の減少から増加へ移行する時点は有酸素能力の高い者程遅れる傾向のあることが報告されている²⁵⁾. このような心周期分画の変化時点と皮膚血流の bp 発生時点に関連があるとすれば, 後者の時点も個人の有酸素能力によって変化する可能性がある. さらに $\dot{V}O_{2max}$ と循環血液量との間には正の相関関係があるといわれているから¹⁹⁾, 循環血液量の違いが心周期分画の変化時点及び bp 発生時点を決定する 1 つの要因であるかもしれない.

PEP/LVET は左室拡張末期容量と負の相関関係があり, 前負荷の指標になるとされている^{2,8)}. したがって体温上昇に伴う PEP/LVET の増加は前負荷が次第に減少したことを示唆している (Fig. 7). また bp 付近以降にその増加率がやや低下する傾向も認められたが, これは皮膚血管収縮による静脈還流の相対的増加が前負荷低下を抑制したことの反映と考えられる. 前負荷低下の抑制は SV の減少を抑制させると考えられるが, 実際には SV はほぼ一様に低下し続けた. これは血圧と SVR の減少の抑制 (後負荷減少の抑制), 血液濃縮及び心筋収縮性の低下

等で説明できると思われる. しかし今回の実験において SV が測定できたのは 3 名に過ぎず, この点に関しては断定はできない. 例数を増やしてさらに検討する必要がある.

QT/QS_2 は bp 付近を境に増加率が低下する傾向が認められた (Fig. 7). 心臓交感神経が緊張すると QT に比して QS_2 の方がより短縮することから, QT と QS_2 の比は心臓交感神経緊張度の指標になると報告されている^{3,9,10)}. この考えに基づけば, 心臓交感神経の緊張度が bp 前後を境に相対的に低下し始めたと判断される. 心臓交感神経の緊張度が低下すれば inotropic 作用が低下し, 心筋収縮性が低下する. これは上記の QS_2/DT の変化に基づく考察と軌を一にする所見である. しかし皮膚血流の相対的減少が皮膚交感神経の緊張によってもたらされたとする, bp を境として心臓と皮膚血管を支配する交感神経の緊張度の変化は対照的である. また, QT は心臓交感神経よりもむしろ迷走神経の影響を強く受けるという報告もあり^{1,7)}, QT/QS_2 の変化を心臓交感神経の緊張度だけで解釈するのは危険かもしれない.

皮膚血流における bp 形成機序の 1 つとして, 運動中の心充満圧の低下に伴って起こる心肺機械受容器を介した皮膚血管収縮の関与が推測される. Mack et al.¹⁸⁾ は仰臥位運動中に高圧系圧反射が作動しない程度の軽い下半身陰圧負荷を加えた結果, 反射性頻脈は起こらず, かつ脈圧の低下はないのに前腕血管抵抗が増大したことから, 前腕皮膚血流の調節には心肺機械受容器を介した圧反射が関与していると推定している. このようなことから bp 形成には低圧系圧反射が関与した可能性が考えられる. それに加えて, 運動中の動脈血圧があるレベル以下に低下したために高圧系圧反射によって皮膚血管収縮が生じたことも考えられる. 今回の結果では, 運動中の SBP 漸減は HR 漸増と対照的であるから (Fig. 3), 高圧系圧反射の関与も否定できない.

運動中に動脈血の O_2 や CO_2 の分圧あるいは pH が変化し, 化学受容器を介する反射によっ

て皮膚血管が収縮したことも検討の必要がある。この説に関して Rowell et al.³⁴⁾は、自転車運動中に低酸素(11—12%)吸入をしても Tes—前腕血流 (forearm blood flow; FBF) 関係に変化がみられなかったことから、皮膚血流は化学受容器反射によって減少することはないと報告している。このようなことから化学受容器の関与は可能性が低いと考えられる。

発汗に伴う脱水によって血漿浸透圧が上昇し、浸透圧受容器からの情報が影響した可能性についても検討がなされた。Fortney et al.¹³⁾は健康な男性を対象にして、高浸透圧状態が自転車運動時の Tes—FBF 関係に及ぼす影響について検討した。その結果、高浸透圧条件では対照条件に比して血管拡張閾値 Tes は有意に高かったが、Tes—FBF 関係の勾配には両条件間に差がなかった。さらに、運動中に濃度の異なる食塩水の静注によって血漿浸透圧を種々に変えてみても、FBF には有意な差異が認められなかった¹²⁾。このようなことから浸透圧の変化は血管拡張閾値 Tes には影響するが、bp 形成の主因ではないと推察される。

以上のことから、運動時の発汗反応は皮膚血流に比して心機能変化の影響を受けにくいと考えられる。一方、心周期分画と皮膚血流は、ほぼ共通の時点(運動開始後約 20 分目で食道温が 38.1℃ 付近の点)を bp としてそれぞれ特異的な変化を示したが、これは心機能が体温調節機能としての皮膚血流変化の影響を受けることを意味するとともに、心機能変化が部分的に皮膚血流調節に影響することを示唆している。その心機能変化としては心筋収縮性の低下の可能性が高いことが考えられる。

要 約

運動中の体温調節反応として起こる皮膚血流と発汗の反応パターンの相違及びこれらと心機能の変化との関係について検討するために、健康な成人男子 6 名に環境温 28℃ (湿度 50%) の環境条件下で、40% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の自転車運動を 40 分間行わせ、運動中の食道温(Tes)、前腕

局所発汗量($\dot{m}_{sw}$)、前腕皮膚血流(LDF)、HR、SV、血圧及び心周期分画等を測定した。得られた結果は以下の通りである。

1) いずれの被検者においても血管拡張閾値 Tes は発汗閾値 Tes よりも高値を示した。

2) $\dot{m}_{sw}$ は Tes の上昇に伴って直線的に増大したが、LDF は約 38.1℃ を breaking point (bp) としてレベルオフした。

3) 38.1℃ 付近を境にして HR の増加率は高まったが、SV には明らかな変化はなかった。血圧低下傾向は 38℃ 付近を境に抑制された。

4) 37.6℃ から 38.1℃ 付近まで QS_2 は短縮し続けたのに対して、DT はこの間ほぼ一定値を保った。38.1℃ 以上の体温で DT は QS_2 に比してより短縮した。また LVET の変化パターンは QS_2 のそれに類似していた。

5) bp 付近を境にして、 QS_2/DT は減少から増大に変化し、PEP/LVET と QT/ QS_2 はわずかに増加率が低下した。

以上のことから次のように結論される。暖かい環境下での運動時の皮膚血流と発汗反応の発動パターンは異なり、前者の閾値体温が後者のそれより高く、かつ前者には bp が生じるが後者にはそれが生じない。また、皮膚血流の bp 付近ないし bp よりもやや低い Tes を境にして心周期分画は特徴的な変化を示し、体温調節機能としての皮膚血流調節と心機能変化との間に因果関係のあることが示唆された。

文献 (References)

- 1) Ahnve, S. and Vallin, H. (1982) Influence of heart rate and inhibition of autonomic tone on the QT interval. *Circulation* 65: 435-439.
- 2) Boudoulas, H., Barrington, W., Olson, S.M., and Wooley, C.F. (1985) Effect of acute standing and prolonged upright activity on left ventricular hemodynamics, systolic and diastolic intervals, and QT- QS_2 relationship. *Am. Heart J.* 110: 623-630.
- 3) Boudoulas, H., Geleris, P., Lewis, R.P., and Leier, C.V. (1981) Effect of increased adrenergic activity on the relationship between electrical and mechanical systole. *Circulation* 64: 28-33.

- 4) Boudoulas, H., Rittgers, S.E., Lewis, R.P., Leier, C.V., and Weissler, A.M. (1979) Changes in diastolic time with various pharmacologic agents: Implication for myocardial perfusion. *Circulation* 60: 164-169.
- 5) Braunwald, E., Sarnoff, S.J., and Stainsby, W.N. (1958) Determinants of duration and mean rate of ventricular ejection. *Circulation Research* 6: 319-325.
- 6) Brengelmann, G.L., Johnson, J.M., Hermansen, L., and Rowell, L.B. (1977) Altered control of skin blood flow during exercise at high internal temperatures. *J. Appl. Physiol.* 43: 790-794.
- 7) Browne, K.F., Zipes, D.P., Heger, J.J., and Prystowsky, E.N. (1982) Influence of the autonomic nervous system on the QT interval in man. *Am. J. Cardiol.* 50: 1099-1103.
- 8) Cokkinos, D.V., DePuey, E.G., Rivas, A.H., de Castro, C.M., Burdine, J.A., Leachman, R.D., and Hall, R.J. (1985) Correlations of systolic time intervals and radionuclide angiography at rest and during exercise. *Am. Heart J.* 109: 104-112.
- 9) De Caprio, L., Ferro, G., Cuomo, S., Volpe, M., Artiaco, D., De Luca, N., and Ricciardelli, B. (1984) QT/QT_c ratio as index of autonomic tone changes. *Am. J. Cardiol.* 53: 818-822.
- 10) De Caprio, L., Papa, M., Acanfora, D., Gallucci, F., Cicatiello, M., Canonico, V., and Rengo, F. (1988) Effects of aging and beta-adrenergic blockade on QT/QT_c changes induced by isometric exercise. *J. Appl. Cardiol.* 3: 101-109.
- 11) Ferro, G., Giunta, A., Maione, S., Carella, G., Genovese, A., and Chiariello, M. (1984) Diastolic time during exercise in normal subjects and in patients with coronary artery disease. *Cardiology* 71: 266-272.
- 12) Fortney, S.M., Vroman, N.B., Beckett, W.S., Permutt, S., and LaFrance, N.D. (1988) Effect of exercise hemoconcentration and hyperosmolality on exercise responses. *J. Appl. Physiol.* 65: 519-524.
- 13) Fortney, S.M., Wenger, C.B., Bove, J.R., and Nadel, E.R. (1984) Effect of hyperosmolality on control of blood flow and sweating. *J. Appl. Physiol.* 57: 1688-1695.
- 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1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) Johnson, J.M. and Park, M.K. (1981) Effect of upright exercise on threshold for cutaneous vasodilation and sweating. *J. Appl. Physiol.* 50: 814-818.
- 16) Johnson, J.M. and Park, M.K. (1982) Effect of heat stress on cutaneous vascular responses to the initiation of exercise. *J. Appl. Physiol.* 53: 744-749.
- 17) Kubicek, W.C., Karnegies, J.N., Patterson, R.P., Witsoe, D.A., and Mattson, R.H. (1966) Development and evaluation of an impedance cardiac output system. *Aerospace Med.* 37: 1208-1212.
- 18) Mack, G., Nose, H., and Nadel, E.R. (1988) Role of cardio-pulmonary baroreflexes during dynamic exercise. *J. Appl. Physiol.* 65: 1827-1832.
- 19) Mack, G.W., Shi, X., Nose, H., Tripathi, A., and Nadel, E.R. (1987) Diminished baroreflex control of forearm vascular resistance in physically fit humans. *J. Appl. Physiol.* 63: 105-110.
- 20) McConahay, D.R., Martin, C.M., and Cheitlin, M. D. (1972) Resting and exercise systolic time intervals. *Circulation* 45: 592-601.
- 21) Meiler, S.E.L., Boudoulas, H., Unverferth, D.V., and Leier, C.V. (1987) Diastolic time in congestive heart failure. *Am. Heart J.* 114: 1192-1198.
- 22) 鍋倉賢治, 権 五晟・永井 純・池上晴夫 (1990) 長時間運動中に起こる心周期分画の変動 (第2報). 体力科学 39: 270-279.
- 23) 鍋倉賢治・西保 岳・本間幸子・池上晴夫 (1990) 長時間運動中に起こる心周期分画の変動 (第3報). 体力科学 39: 350-359.
- 24) 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: 27-37.
- 25) 鍋倉賢治・曾根涼子・藤井宣晴・池上晴夫 (1991) 長時間運動中の心周期分画の変動と有酸素能力との関係. 体育学研究 36: 53-62.
- 26) 鍋倉賢治・山崎文夫・白倉 寛・本間幸子・池上晴夫 (1992) 長時間激運動における心周期分画の変動. 筑波大学体育科学系紀要 15: 151-165.
- 27) Nadel, E.R. (1980) Circulatory and thermal regulations during exercise. *Federation Proc.* 39: 1491-1497.
- 28) Nadel, E.R., Cafarelli, E., Roberts, M.F., and Wenger, C.B. (1979) Circulatory regulation during exercise in different ambient temperatures. *J. Appl. Physiol.* 46: 430-437.
- 29) Nadel, E.R., Fortney, S.M., and Wenger, C.B. (1980) Effect of hydration state on circulatory and thermal regulation. *J. Appl. Physiol.* 49: 715-721.
- 30) Nose, H., Mack, G.W., Shi, X., Morimoto, K., and Nadel, E.R. (1990) Effect of saline infusion during

- exercise on thermal and circulatory regulations. *J. Appl. Physiol.* 69 : 609-616.
- 31) 小川徳雄 (1983) 運動と発汗. *J. J. Sports Sci.* 2 : 432-443.
- 32) 小川徳雄 (1986) 発汗活動に影響する中枢性および末梢性要因. *日本生理誌* 48 : 1-13.
- 33) Rowell, L.B. (1974) Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. *Physiol. Rev.* 54 : 75-159.
- 34) Rowell, L.B., Freund, P.R., and Brengelmann, G. L. (1982) Cutaneous vascular response to exercise and acute hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 53 : 920-924.
- 35) Saito, M., Naito, M., and Mano, T. (1990) Different responses in skin and muscle sympathetic nerve activity to static muscle contraction. *J. Appl. Physiol.* 69 : 2085-2090.
- 36) Shaver, J.A., Kroets, F.W., Leonard, J.J., and Paley, H.W. (1968) The effect of steady-state increases in systemic arterial pressure on the duration of left ventricular ejection time. *J. Clin. Invest.* 47 : 217-230.
- 37) Taylor, W.F., Johnson, J.M., Kosiba, A., and Kwan, C.M. (1988) Graded cutaneous vascular responses to dynamic leg exercise. *J. Appl. Physiol.* 64 : 1803-1809.
- 38) Wallace, A.G., Mitchell, J.H., Skinner, N.S., and Sarnoff, S.J. (1963) Duration of the phases of left ventricular systole. *Circulation Res.* 12 : 611-619.
- 39) Weissler, A.M., Peeler, R.G., and Roehll, M.D. (1961) Relationships between left ventricular ejection time, stroke volume, and heart rate in normal individuals and patients with cardiovascular disease. *Am. Heart J.* 62 : 367-378.
- 40) 山崎文夫・近藤徳彦・池上晴夫 (1991) 運動時の発汗量の変化に対する中枢機構と末梢機構の関与. *日生氣誌* 28 : 95-106.
- 41) 山崎文夫・曾根涼子・池上晴夫 (1992) 運動時の体温, 前腕発汗量及び前腕皮膚血流の関係. *日生氣誌* 29 : 49-55.

(平成4年2月19日受付)