

長時間の疲労困憊運動における循環動態

鍋倉 賢治・山崎 文夫*・白倉 寛**・本間 幸子・池上 晴夫

Changes in hemodynamics during
prolonged exhaustive exerciseYoshiharu NABEKURA, Fumio YAMAZAKI*, Hiroshi SHIRAKURA**,
Sachiko HONMA and Haruo IKEGAMI

This study was undertaken to elucidate changes in hemodynamics during prolonged exhaustive exercise. Six male distance runners performed bicycle ergometer exercises of work load requiring 105% of ventilatory threshold (VT) until they approached to exhaustion, and 95% of VT for 60-min as a control exercise. Heart rate (HR), stroke volume (SV), blood pressure (BP), systolic time intervals and diastolic time (DT) were calculated from electrocardiogram, phonocardiogram, derivative of ear densitogram, impedance cardiogram and finger arterial pressure wave.

1) During the exhaustive exercise, HR, left ventricular ejection time index, systolic time index (QS_2) and QS_2/DT were higher than those during the control exercise, whereas there were no significant differences in SV, BP and pre-ejection period index between two exercise conditions.

2) Individually, it was found the case that SV or BP remarkably declined at 10~15 min before exhaustion.

3) Changes in blood lactate concentration, HR and QS_2/DT were negatively, whereas changes in SV and BP were positively correlated with exhaustive time.

These findings indicated the possibility that myocardial contractility might be depressed during the exhaustive exercise. In addition to this phenomenon, it was suggested that pronounced decline of SV and/or BP, and the like became limited factor for prolonged exercise.

Key words : Prolonged exhaustive exercise, Systolic time intervals, Diastolic time

I. 緒 言

筆者たちは、長時間運動の際に心周期分画や全収縮期 (QS_2) と拡張期 (DT) の比である QS_2/DT は、運動の初期と中期の2時点を breaking point にして増加・減少の方向を変えるなど特異的なパターンで変化することを明らかにし、先報において報告した^{16,18)}。例えば、 QS_2/DT は心拍数 (HR)

の増大に伴って運動初期にピークを、そして運動中期に谷をそれぞれ形成すること、そしてピークから谷までの減少は一回拍出量 (SV) の減少や血圧の低下と関連し、谷から運動終了時までの増加は心筋収縮性の低下と関連する可能性を指摘した¹⁹⁾。

一方長時間運動時には、運動初期に定常状態を維持した HR や SV はやがて増加あるいは減少する現象、いわゆる cardiovascular drift (CVD) の起こることが知られている^{9,14)}。筆者たちは、有

*筑波大学体育科学研究科

**筑波大学体育研究科

酸素能力がCVDの程度に影響することを確認した²⁰⁾。また、 QS_2/DT の谷から運動終了時までの増加も有酸素能力と関連することを明らかにし、有酸素能力の高い者ほど心筋収縮性の低下は軽度であることを示唆した²⁰⁾。

ところで、長時間運動時のHR, SV, 血圧, あるいは心筋収縮性などの変化が有酸素能力と関連があるならば、これらのパラメーターの変化が長時間運動の制限因子になるか否かの点に興味を持たれる。これまで、長時間の激運動によって疲労困憊 (exhaustion) に至った場合の生化学的変化を検討した研究は数多い^{1,7,21,23,26)}が、生理学的研究はまだ十分ではない。MacDougal et al.¹¹⁾は exhaustion に至る直前に SV が著減することを認め、これによって心拍出量 (\dot{Q}) が減少した結果運動を継続できなくなったと考えた。Maher et al.¹²⁾ 及び Tibbits²¹⁾ はラットに長時間運動を行わせた結果、exhaustion 時に心筋収縮性が低下することを見いだした。Douglas et al.⁴⁾, Niemela et al.²²⁾ 及び Seals et al.²⁸⁾ は超長時間運動によって心筋収縮性が低下することを心エコー図によって認めた。

このように、長時間運動中に SV が減少したり、あるいは心筋収縮性が低下したりすれば、これが exhaustion の原因になる可能性が考えられる。そこで本研究では、長時間運動における exhaustion 時の心周期分画, SV 及び血圧の変化を明らかにし、その生理学的意義について検討することを目的とした。

II. 方 法

1) 被検者

長距離走者6名を被検者とした。彼らの身体特性ならびに最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) は表1に示す通りであった。

2) 実験手順

被検者はまず自転車エルゴメーター (Monark 社, 829E型) を用いて漸増的の最大運動負荷テストを行った。すなわち、504kpm/min で3分間運動した後、1分毎に負荷強度を72kpm/min ずつ増加させ、最大に至るまで行わせた。運動中に自動呼気分析器 (MIJNHARDT 社, OXYCON-4) によって呼気を連続測定して $\dot{V}O_{2max}$ を決定し (表1)、また換気量と、酸素及び二酸化炭素の換気当量を指標にして換気性作業閾値における負荷強度 (VTw) を決定した。

その後日を改めて2種の強度で長時間運動負荷テストを行った。すなわち、座位安静時の測定を2分間行った後、ペダル回転数60rpmで105% VTw の自転車運動を exhaustion に至るまで行わせた (以下 exhaustive 運動)。また、対照実験として95% VTw で60分間運動を行わせた (以下対照運動)。いずれの場合にも、運動前、運動5分目、15分目、40分目及び終了後3分以内にそれぞれ肘静脈から採血した。2種の長時間運動の順序はランダムとし、運動間に少なくとも4日以上間隔をおいた。実験中の室温は $24.2 \pm 1.3^\circ\text{C}$ であった。

Table 1 Physical characteristics, maximal oxygen intake ($\dot{V}O_{2max}$), exhaustive time (time) and heart rate (HR) at the end of exercise with 105% of work load at ventilatory threshold in each subject

subject	age (yr)	height (cm)	weight (kg)	$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	time (min)	HR (beats/min)
T. H.	23	167	63.1	62.1	60	185
T. O.	22	164	58.5	62.0	35	187
M. T.	24	180	71.0	58.1	35	186
H. T.	22	164	49.0	60.0	55	180
M. I.	26	176	66.2	56.6	35	178
H. S.	22	166	53.4	69.9	31	190
mean	23	170	60.2	61.5	41	184
SD	1	6	7.5	4.3	11	4

SD : standard deviation.

3) 測定及び分析

安静時及び運動中を通じて心電図, 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を連続してデータレコーダー(TEAC社, XR-510)に収録した。各測定項目のピックアップは先報に準じて装着した¹⁹⁾。分析方法は先報と同様とし^{17,19)}, 各現象の波形をマイクロコンピューター(SORD社, M68MX)によって自動分析し⁸⁾, 以下に示すパラメーターを計測・算出した。すなわち, RR間隔, HR, QS₂, DT, 左室駆出時間(LVET), 前駆出期(PEP), QS₂/DT, SV, 平均血圧(MBP)及びWeisslerの補正式³⁴⁾による心周期分画の各補正值(QS₂i, LVETi及びPEPi)である。SVはKubicek法¹⁰⁾によって算出し, 安静値を100とする相対値に換算した。なお, SV算

出の際の血液比抵抗値はヘマトクリット値から求めた⁶⁾。

運動中の測定値については, 30秒目, 1分目及び2分目ではその前後10秒間の値を平均し, 5~30分目では5分毎に, それ以降では10分毎に30秒間の値を平均して求めた。また, exhaustive運動終了時点(exhaustion時)を基準にして, その5分前及び10分前についても同様に求めた。安静値については1分間の値を平均して求めた。

採取した血液から乳酸分析器(YSI社, 23L型)によって血中乳酸値を測定した。また, 遠心分離法によってヘマトクリット値を測定した。

平均値の差の検定にはPaired t-testを行い, $p < 0.05$ をもって有意とし, 相関係数の検定にはt-testを行い, $p < 0.05$ をもって有意とした。

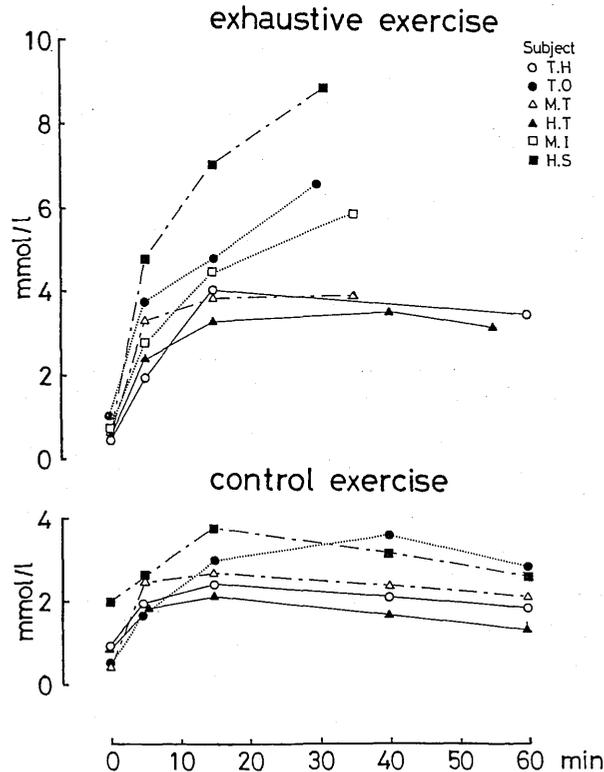


Fig. 1 Time courses of blood lactate concentrations in each subject during rest and two exercise conditions. Exhaustive exercise : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control exercise : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold.

III. 結 果

表 1 に各被検者の exhaustion に至るまでの時間 (exhaustive 時間) 及び exhaustion 時点における HR を示した。exhaustive 時間は最長60分, 最短31分, 平均42分であった。exhaustion 時点の HR は最高190bpm, 最低178bpm, 平均184bpm であった。

図 1 に両運動時の乳酸値の経時変化を被検者毎に示した。exhaustive 運動 (図 1 -上) の場合にはいずれの被検者においても乳酸値は明らかに増加した。被検者 H. S., T. O. 及び M. I. の 3 名では運動終了時まで増加し続けたのに対して, 他の 3 名 (T. H., M. T. 及び H. T.) では運動15分目以降プラトーに達した。対照運動 (図 1 -下) の場合にはいずれの被検者の乳酸値も4mmol/l以下であり,

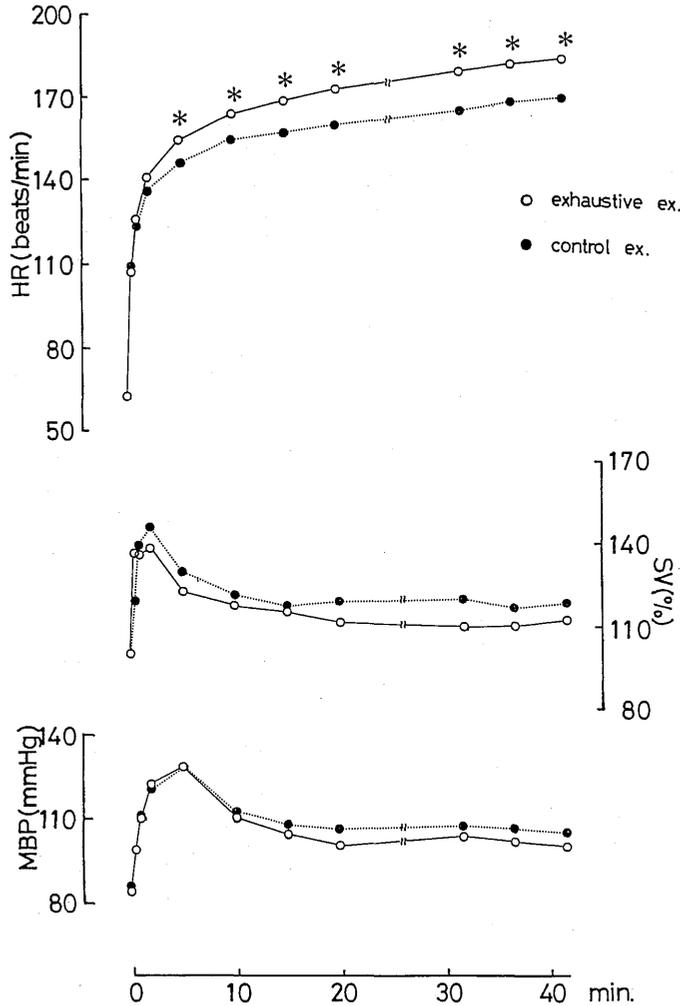


Fig. 2 Time courses of heart rate (HR), stroke volume (SV) and mean blood pressure (MBP) during rest and two exercise conditions. Exhaustive ex. : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control ex. : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold. * : significant differences ($p < 0.05$) between exhaustive ex. and control ex., Values are expressed as means.

運動の途中でピークに達し、以降若干減少する傾向を示した。

図2に両運動におけるHR, SV 及び MBP の経時変化を6名の平均値で示した。平均値は運動20分目までと、exhaustionの10分前、5分前及びexhaustion時について算出し、対照運動時の値もexhaustive運動と同一時点について求めた。HRはいずれの運動の場合でも2分目前後までに急増し、

その後は漸増した。5分目以降のHRはexhaustive運動時の方が有意に高くなり、その差は運動終了時には約15bpmに達した。SVは運動2分目まで増大した後急減し、15分目以降はほぼ一定値を維持する傾向を示した。SVを両運動時と比較すると全体的にexhaustive運動時の方が対照運動時より小さかったが有意な差ではなかった。MBPは運動5分目まで上昇した後、20分目まで低下し、以

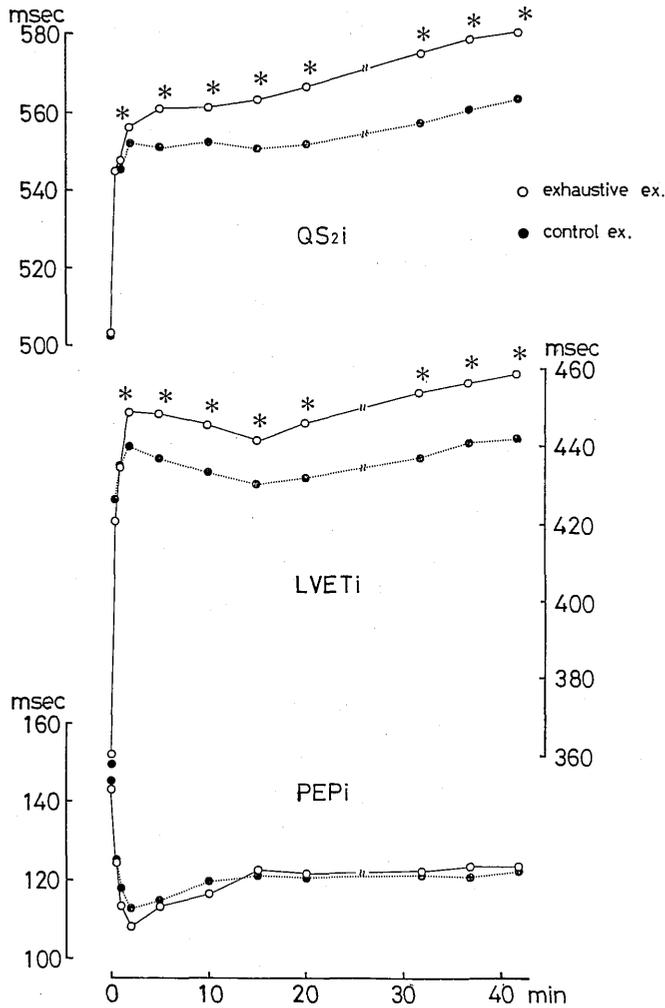


Fig. 3 Time courses of QS_{2i}, LVET_i and PEP_i during rest and two exercise conditions. QS_{2i} : total electromechanical systole index, LVET_i : left ventricular ejection time index, PEP_i : pre-ejection period index. Exhaustive ex. : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control ex. : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold. * : significant differences (p < 0.05) between exhaustive ex. and control ex., Values are expressed as means.

後ほぼ一定値を保った。両運動時の MBP を対比してみると 5 分目までは差がなく、それ以降は exhaustive 運動時の方が若干低かったが有意差でなかった。

図 3 に QS_2i , $LVETi$ 及び $PEPi$ の経時変化を 6 名の平均値で示した。 QS_2i は両運動時ともに運動初期の 2 分間で急増し、5～15 分目の間はほぼ一定値を保ち、その後再び増大した。exhaustive 運動時の QS_2i と対照運動時のそれを比べると 2 分目以降前者が有意に大きく、その差は漸増し運動終了時には 20 msec 近くになった。 $LVETi$ は QS_2i と同様に最初の 2 分間で激増し、15 分目まで一旦減少した後、運動終了時まで再び増加した。このため $LVETi$ は 2 分目にピークを、そして 15 分目に谷をそれぞれ形成した。2 分目以降の $LVETi$ は対照運動時より exhaustive 運動時の方が有意に大きく、その差は QS_2i にみられた差とほぼ一致した。 $PEPi$ は運動開始後急減し、2 分目を境にして増加に転じて谷を作り、15 分目以後はほぼ一定値を維持し、運動条件間で差がなかった。

図 4 に QS_2/DT と HR の関係を 6 名の平均値で示した。 QS_2/DT は両運動時ともに HR の増加に伴って増大し、HR が 140 bpm 前後の時(両運動とも 2 分目)を境にして減少に転じ、ピークを形成した。ピーク時点の QS_2/DT は exhaustive 運動時の方が高く、以後 HR の増加に伴って両運動時の値がほぼ平行して減少した。その後 exhaustive 運動においては HR が約 170 bpm の時(20 分目)を境に、また対照運動においては約 160 bpm の時(20 分目)を境にして増加に転じ、それぞれ谷を形成した。それ以降の QS_2/DT は exhaustive 運動時の方が大きく、その間の両者の値は HR に対してほぼ同一直線上に乗った。

図 5-1 及び 2 に exhaustive 運動時の乳酸上昇が軽度であった 3 名の被検者の内、HR, SV 及び MBP の経時変化が対照的であった 2 名(M. T. 及び H. T.) についてそれぞれ提示した。被検者 M. T. の HR は対照運動時に比し exhaustive 運動時に著増し、両運動時の HR の差は運動 2 分以降漸増し、exhaustion 時(35 分目)には 30 bpm 近く

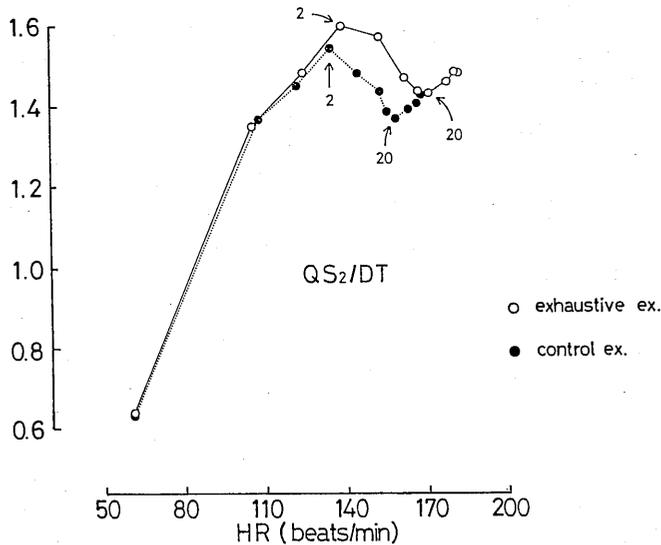


Fig. 4 Relationship between HR and QS_2/DT during rest and two exercise conditions. HR : heart rate, QS_2/DT : the ratio of total electromechanical systole to diastolic time. Exhaustive ex. : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control ex. : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold. Values are expressed as means. The numeral symbols attached to the plots show elapsed time in minute from the beginning of exercise.

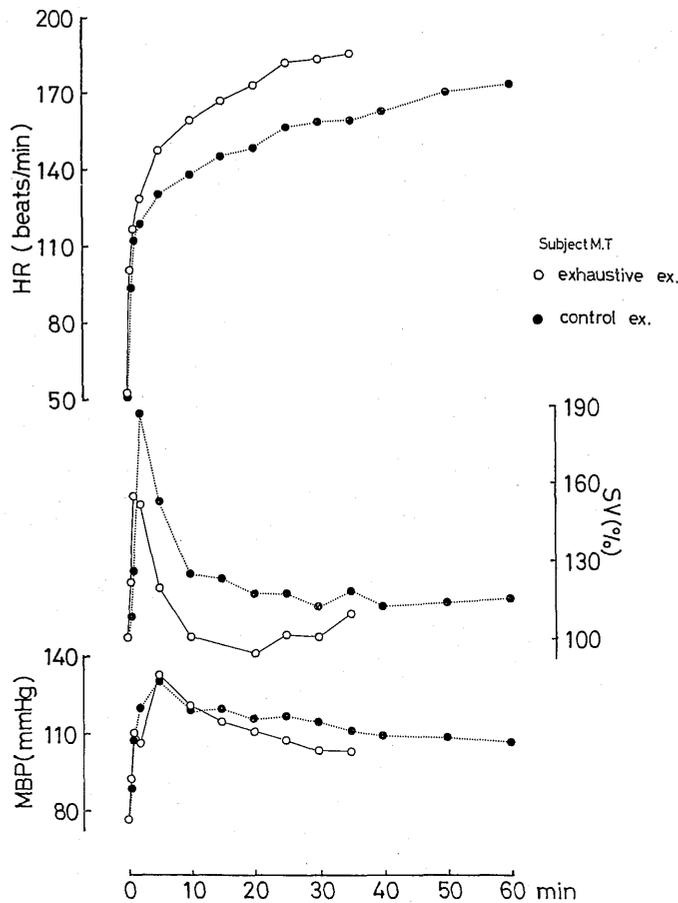


Fig. 5-1 Time courses of heart rate (HR), stroke volume (SV) and mean blood pressure (MBP) in subject M. T. during rest and two exercise conditions. Exhaustive ex. : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control ex. : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold.

に達した(図5-1)。SVは運動1~2分目までに急増した後著減したが、全体的に exhaustive 運動時の方が対照運動時より小さく、exhaustionの15分前から増加に転じた。MBPは両運動時ともに5分目を境にして上昇から低下に転じてピークを形成し、10分目までは両者間に差がなく、以後 exhaustive 運動時の方が低値となった。

被検者 H. T. (図5-2)は55分間で exhaustion に至った例である。この場合には被検者 M. T. の場合に比して、HR、SV及びMBPは変化パターンにも絶対値にも運動条件間の差が小さかった。

HRはいずれの運動時にも運動初期に急増した後微増し、運動15分目以降は exhaustive 運動時の方が僅かに5bpm前後高かった。SVは2分目のピークを境にして緩やかに減少し、HRと同様に全体的に exhaustive 運動時の方が若干大きい傾向にあった。MBPは運動5~10分目において exhaustive 運動時の方が低い傾向を示したが、それ以外の時点においては両運動時でほぼ一致した。

図6に各被検者について exhaustive 運動10分目以降のSV及びMBPを、対照運動の同一時点における値との相対値で示した。SVは被検者 T. H.

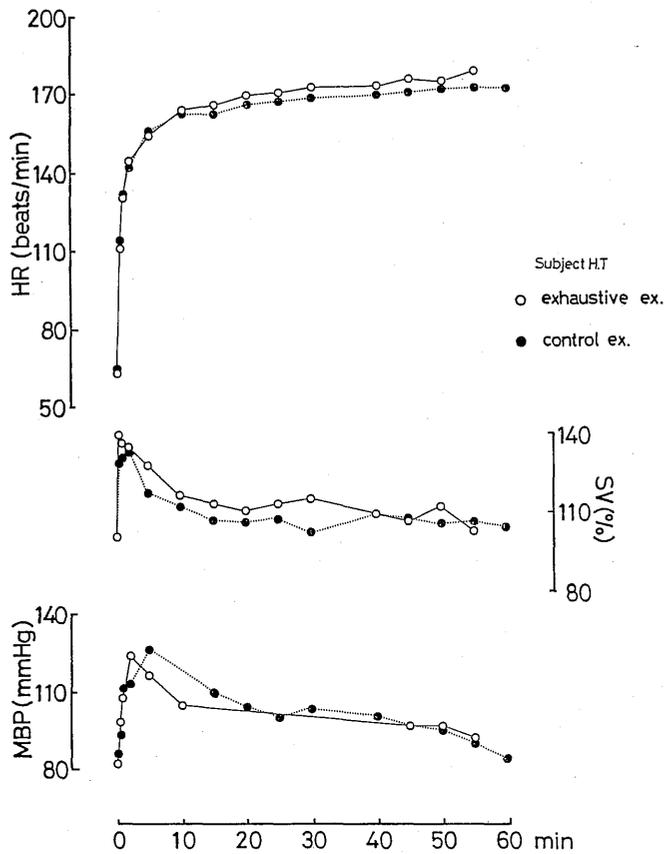


Fig. 5-2 Time courses of heart rate (HR), stroke volume (SV) and mean blood pressure (MBP) in subject H. T. during rest and two exercise conditions. Exhaustive ex. : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control ex. : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold.

T. O.及び H. T.では概して100%を超えたのに対して、他の3名(被検者 M. T., M. I.及び H.S.)では対照運動時の80~90%と低かった。MBPはSVと同様に前者の3名では対照運動時と同等かそれ以上であったが、後者の3名では対照運動時の90%前後であった。被検者 T.H.ではMBPは運動10~30分目の間は110%以上を維持していたが、exhaustionの10分前を境にして90%近くまで急速に低下した。運動中SV及びMBPが対照運動時のそれらを上回った者はexhaustive時間が長く、下回った者は短い傾向にあった。

図7-1及び-2にHRに対する QS_2/DT の関係

を、exhaustive運動時の乳酸上昇が著しかった3名の内、対照的な変化パターンをみせた2名(被検者 T.O.及び H.S.)について示した。被検者 T.O.(図7-1)の場合、 QS_2/DT は両運動時ともにHRが約140bpmの時(両運動とも2分目)にピークを、約170bpmの時(exhaustive運動15分目及び対照運動25分目)に谷をそれぞれ形成し、谷の時点までは両運動時でほぼ等しく変化した。しかし、それ以後の増加はexhaustive運動時の方が対照運動時より軽度であった。

被検者 H.S.(図7-2)の場合、 QS_2/DT は運動2分目のピークまでは両運動時でほぼ一致したが、

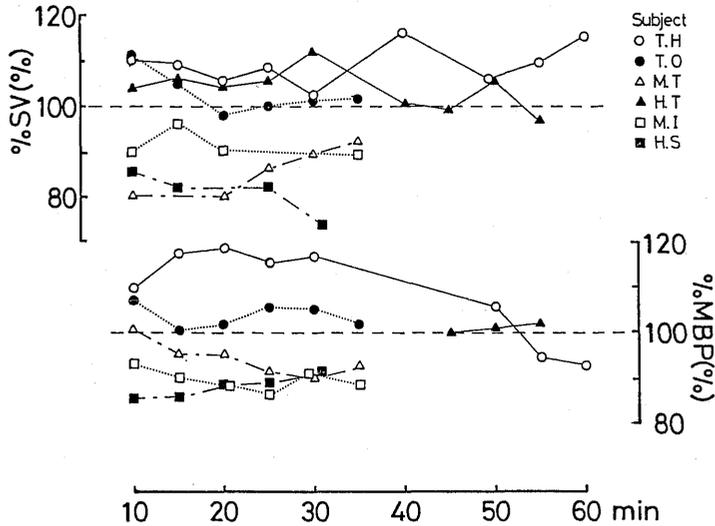


Fig. 6 Time courses of %SV and %MBP in each subject during exhaustive exercise. %SV : the ratio of exhaustive ex. to control ex. in stroke volume, %MBP : the ratio of exhaustive ex. to control ex. in mean blood pressure. Exhaustive ex. : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control ex. : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold.

以後対照運動時では急減し HR が160bpm 強の時 (20分目) に谷を形成したのに対して, exhaustive 運動時では約180bpm の時 (20分目) に谷を形成した。それ以降の増加は両者で大差なかった。

exhaustive 運動における各被検者の exhaustive 時間と、乳酸値, HR, SV, MBP 及び QS_2/DT のそれぞれの変化の関係を図 8 に示した。すなわち, exhaustive 時間との関係において、運動前後の乳酸変化量及び運動10分目以降の HR の変化率にそれぞれ中等度の負の相関関係 ($r = -0.771$ 及び $r = -0.739$, いずれも ns ; not significant) が、運動初期に形成したピーク時点以降の SV の変化率に高い正の相関関係 ($r = 0.822$, $p < 0.05$) が、ピーク時点以降の MBP の変化率に中等度の正の相関関係 ($r = 0.796$, ns) が認められた。また、 QS_2/DT の谷の形成される時点以降の変化率に低い負の相関関係 ($r = -0.427$, ns) を認めた。

IV. 考 察

1) exhaustion 時の循環動態

変化パターンで比較すると exhaustive 運動時の心周期各分画はいずれも対照運動時のそれらとの

間に明らかな相違はないが、絶対値ではいくつかのパラメーターにおいて有意差を認めた。すなわち、 QS_{2i} 及び QS_2/DT は運動 2 分目以降は exhaustive 運動時の方が大きく、同様な差は LVE_{Ti} にも認められた。これに対して、 PEP_{i1} には差は認められなかった。したがって、 QS_{2i} の差及び QS_2/DT の差は LVE_{Ti} の差に由来すると考えられる。一般に、 LVE_{T} の延長は HR の増加³⁴⁾、SV の増大^{13,32,33,34)}、血圧の上昇^{29,32)}及び心筋収縮性の低下^{13,32)}等に起因することが知られている。今回、SV 及び血圧は exhaustive 運動時の方が対照運動時より小さい傾向にあったから、これらは前者の LVE_{Ti} が後者のそれより延長した原因から除外でき、 LVE_{Ti} の延長は SV や血圧以外の要因によるものと考えられる。Rubal et al.²⁷⁾ は左室駆出分画を指標にして運動強度と心筋収縮性の関係を検討し、中等度以上の運動の場合には強度が強くなると心筋収縮性は低下すると報告した。このことから、対照運動時に比し強度が強かった exhaustive 運動時に LVE_{Ti} が延長した原因として、心筋収縮性の低かった可能性が考えられる。

個人について検討すると、被検者 H. T. では HR,

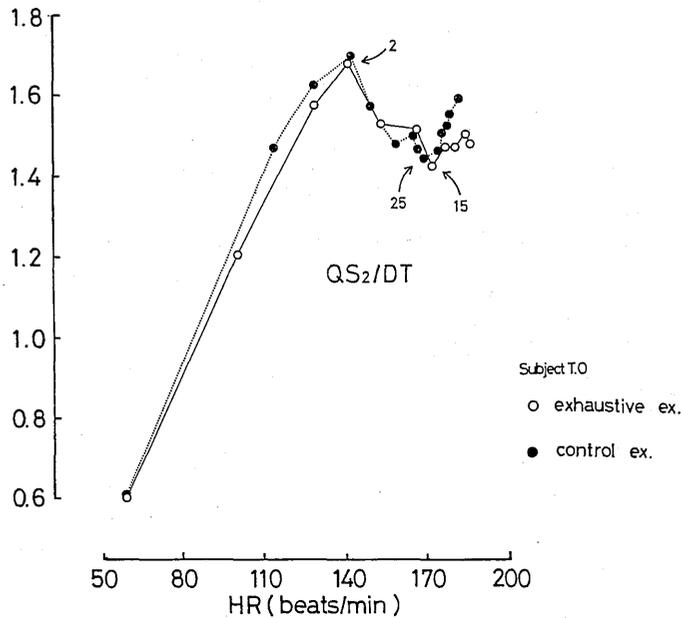


Fig. 7-1 Relationship between HR and QS_2/DT in subject T. O. during rest and two exercise conditions. HR : heart rate, QS_2/DT : the ratio of total electromechanical systole to diastolic time. Exhaustive ex. : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control ex. : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold, The numeral symbols attached to the plots show elapsed time in minute from the beginning of exercise.

SV 及び血圧のいずれにも運動条件間で明らかな差異を認めなかった。これに対して、被検者 M. T. では対照運動時に比べて exhaustive 運動時に HR は著しく高く、SV 及び血圧はいずれも低かった。また、exhaustion の15分前に SV は減少から増加に転じた。

一般に、長時間運動中の HR のドリフト (CVD) は SV が減少した結果血圧が低下し、圧反射を介して起こると理解されている⁹⁾。一方 Ekelund et al.⁵⁾ は、長時間運動中に徐々に減少する心容積が exhaustion 時に一転して増加するという現象を半数の対象に認め、この原因を exhaustion 時に交感神経緊張が亢進し血流配分が変わったことに求めた。これらの報告を考え合わせると、被検者 M. T. では exhaustive 運動時に SV が著減し、それによって血圧低下→交感神経緊張の亢進→SV 増大及び HR 増大、の連鎖反応を惹起したのではないかと

と推察できる。被検者 T.H. においても exhaustion の10分前から血圧の著しい低下と SV の増加を認め、長時間運動における exhaustion 時の循環応答パターンの一つとして血圧低下によって交感神経緊張が亢進することが挙げられる。

先報において、長時間運動中に心周期分画と SV 及び血圧とを同時に測定し、それぞれの関係を比較・検討した結果、谷を形成した後の QS_2/DT の増加は心筋収縮性の低下に関連する可能性を指摘した¹⁹⁾。本研究の被検者 T. O. と H. S. では谷を形成した後の QS_2/DT が異なった変化を示した。すなわち、被検者 T. O. では QS_2/DT の増加は exhaustive 運動時の方が対照運動時より軽度であったのに対して、被検者 H.S. では両運動時の増加はほぼ同様であり、増加率に換算すると exhaustive 運動時の方が顕著に高かった。

先報で得られた考えに基づくと、被検者 T. O. と

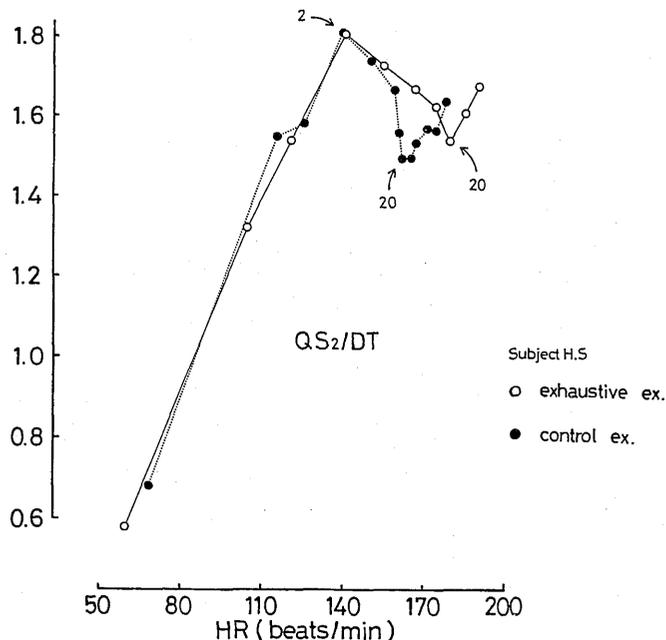


Fig. 7-2 Relationship between HR and QS_2/DT in subject H. S. during rest and two exercise conditions. HR : heart rate, QS_2/DT : the ratio of total electromechanical systole to diastolic time. Exhaustive ex. : prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. Control ex. : prolonged exercise with 95% of work load at ventilatory threshold. The numeral symbols attached to the plots show elapsed time in minute from the beginning of exercise.

H. S.では exhaustive 運動時の心筋収縮性の低下率が異なっていた可能性があり、前者では低下率が軽微であったのに対して、後者では著しかったと推察できる。このような差の生じた原因の1つに乳酸値の差が考えられる。先報で極端なアシドーシスの場合はともかく、適度の乳酸上昇は心筋にとってプラスに作用する可能性を考察した²⁰⁾。乳酸は心筋のエネルギー源になり³⁾、また、乳酸上昇はカテコラミンの分泌を促し¹⁵⁾、正の変力作用を亢進することがその根拠である。Rodrigues et al.²⁵⁾も運動中の乳酸上昇は健全な心筋にとってはマイナスにならないと考えている。本研究で exhaustive 運動終了時の乳酸値は被検者 T. O. (6.6mmol/l) より被検者 H. S. (8.9mmol/l) の方が高かった。また、exhaustive 運動時の乳酸上昇が軽度であった3名の被検者 (T. H., M. T.及び H. T.) でも、 QS_2/DT は被検者 T. O. の場合と類似する所見を呈

した。このことから exhaustion に至るような長時間運動の場合でも乳酸上昇が適度であれば心筋収縮性の低下は軽度には抑えられるが、乳酸上昇が極度であれば低下は著しくなることが示唆される。

2) 循環動態と exhaustion の関係

乳酸値は3名の被検者 (T. O., M. I.及び H. S.) では exhaustive 運動終了時まで漸増し4mmol/l 以上になったのに対して、他の3名 (T. H., M. T. 及び H. T.) では4mmol/l 以下でプラトーに達した。前者の exhaustive 時間は平均で34分であり、後者の平均値 (50分) より短かった。活動筋における乳酸蓄積は心筋で得られるようなプラス作用は少なく、Orok et al.²⁴⁾は乳酸定常の得られる最大強度 ($\equiv VT_w$) を、運動を長時間持続できる上限の強度と考えている。そのため乳酸値が上昇し続けた3名においては乳酸蓄積が exhaustion に至

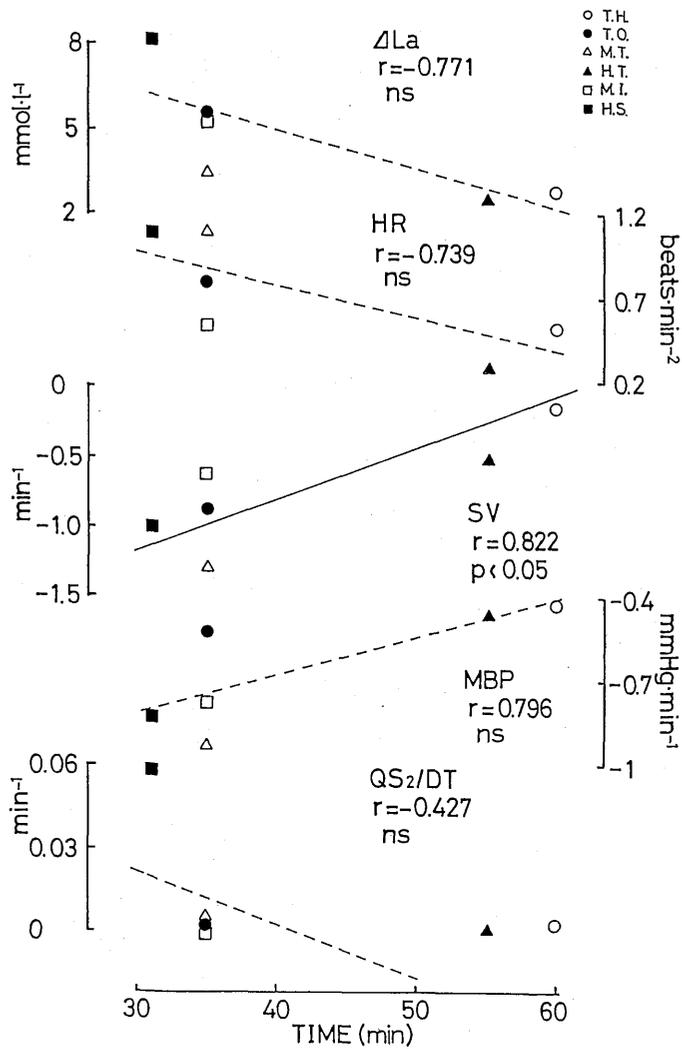


Fig. 8 Relationships among changes in La, HR, SV, MBP, QS_2/DT , and exhaustive time (TIME) during prolonged exercise with 105% of work load at ventilatory threshold. ΔLa : change in blood lactate concentration between pre-and post-exercise, HR : changing rate in heart from 10th minute of exercise to end of exercise, SV : changing rate in stroke volume from crest to end of exercise, MBP : changing rate in mean blood pressure from crest to end of exercise, QS_2/DT : changing rate in the ratio of total electromechanical systole to diastolic time from trough to end of exercise, r : correlation coefficients, p : statistically significant level for correlation, ns : not statistically significant.

った一因と考えられる。しかし、乳酸上昇が軽度であった3名も exhaustion に至ったのであるから、この場合の制限因子は乳酸以外の要因であろうと考えられる。

前述したように exhaustion 前に SV が著減した者や、血圧が著しく低下した者がいた。そこでこれらのパラメーターの変化率と exhaustive 時間との関係を検討した結果、HR の増加、SV の減少、そして血圧の低下が急速であるほど exhaustive 時間は短い傾向にあることが判明した。

MacDougell et al.¹¹⁾ は長時間運動時に皮膚血管における血液貯留量が増えるにつれて中心血液量が減少し、その結果 SV が著減し \dot{Q} を維持できなくなると考え、SV 減少が長時間運動の制限因子になると報告した。一方鈴木³⁰⁾ は血圧調節の面からこの現象が運動制限因子になると説明している。すなわち、血管張力が著しく高まって、交感神経系による昇圧調節が不能になり、血管内還流圧が低下するため exhaustion に至ると考えた。

本研究で exhaustive 運動時の乳酸上昇が軽度であった被検者 H.T. と M.T. を比較すると、運動を55分間継続できた前者では SV 及び血圧は対照運動時のそれらと差がなかったのに対して、35分間で exhaustion に至った後者ではいずれも顕著に低下した。また、運動を最も長く継続できた被検者 T.H. では SV と血圧は対照運動時のレベルより高値を維持する傾向にあったが、この場合でも exhaustion の10分前から血圧は急速に低下した。したがって、乳酸上昇が軽度であっても SV 減少あるいは血圧低下が著しい場合には、これらが長時間運動の制限因子となると考えられる。

長時間の激運動によって心筋収縮性は低下することが、最近の心エコー図法による研究によって明らかにされた^{4,22,28)}。今回、 QS_2/DT の変化率が大きいほど exhaustive 時間は短くなる傾向がみられた。また、前述のように心筋収縮性は exhaustive 運動中全般的に対照運動時よりも低下していた可能性がある。さらに、被検者 H.S. では exhaustive 運動時に心筋収縮性の低下が著しかったことが示唆された。心筋収縮性の低下は \dot{Q} を減少させ運動制限因子になり得る。したがって、この被検者の場合に心筋収縮性の急速な低下が exhaustion に至った一因である可能性もある。しかし、この現象は一例だけに認められたものであり、一般的な結論を導くためには今後なお検討する必要がある。

以上のように、運動中の SV や血圧の減少及び心筋収縮性の低下などが長時間運動の制限因子になるものと考えられた。また、長時間運動中の SV の減少は心筋収縮性の低下の影響以外に体温上昇による皮膚血流量の増大によってももたらされる^{9,14)} から、長時間運動時の exhaustion には体温調節も密接に関与すると予想される。この他にもエネルギー源、精神的要因などが exhaustion に関与する可能性は強く、運動制限因子を解明するためには多方面からの検討が必要であると思われる。

V. 要 約

長時間運動における exhaustion 時の循環動態を明らかにするために、6名の長距離走者に105%VTw で exhaustion に至るまで自転車運動を行わせた。対照として95%VTw で60分間の自転車運動を行わせた。運動中、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を連続記録し、これらから HR、SV、MBP 及び心周期分画を計測した。得られた主な結果は以下の通りである。

1) 平均値で見ると、HR、SV 及び MBP の変化パターンに exhaustive 運動時と対照運動時の間で差異を認めなかった。また、心周期分画及び QS_2/DT の変化パターンもそれぞれ両条件間で極めて類似していた。

2) HR、LVETi、 QS_2i 及び QS_2/DT はいずれも exhaustive 運動時で高かったのに対して、PEPi は運動条件間で差が認められなかった。

3) 個人についてみると、exhaustion の10~15分前に SV 減少や MBP 低下が著しくなる例が認められた。

4) exhaustive 時間との相関関係を検討した結果、運動前後の乳酸変化量、運動10分目以降の HR の変化率及び谷を形成した時点以降の QS_2/DT の変化率にそれぞれ負の相関関係が、また、運動初期に形成したピーク時点以降の SV の変化率及び MBP の変化率にそれぞれ正の相関関係が認められた。

以上のことから、長時間運動によって exhaustion に至る場合にも QS_2/DT は先報で明らかにした特異的な変化を示すといえる。また、心筋収縮性は exhaustive 運動時に低下する可能性が考えられ、これと合わせて SV の著減、血圧の著しい低下などが長時間運動の制限因子となることが示唆された。

しかし、制限因子は単一ではなくより多くの例について多角的に検討する必要がある。

文 献

- 1) Broberg S and Sahlin K (1988) : Hyperamoniemia during prolonged exercise—an effect of glycogen depletion?— J Appl Physiol 65 : 2475–2477.
- 2) Cobb LA and Johnson WP (1963) : Hemodynamic relationships of anaerobic metabolism and plasma free fatty acids during prolonged, strenuous exercise in trained and untrained subjects. J Clin Invest 42 : 800-810.
- 3) Conn EE and Stumpf PK (田宮 信雄, 八木 達彦 訳) (1978) : 生化学. 東京化学同人, 東京, pp. 264–302.
- 4) Douglas PS, O'Toole ML, Hiller WDB, Hackney K and Reichel N (1987) : Cardiac fatigue after prolonged exercise. Circulation 76 : 1206–1213.
- 5) Ekelund LG, Holmgren A and Ovenfors CO (1967) : Heart volume during prolonged exercise in the supine and sitting position. Acta Physiol Scand 70 : 88–98.
- 6) Geddes LA and Da Costa CP (1973) : The specific resistance of canine blood at body temperature. IEEE Trans Bio-Med Eng 20 : 51–53.
- 7) Hargreaves M, Costill DL, Fink WJ, King DS and Fielding RA (1987) : Effect of pre-exercise carbohydrate feedings on endurance cycling performance. Med Sci Sports Exerc 19 : 33–36.
- 8) 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.
- 9) Johnson JM (1987) : Central and peripheral adjustments to long-term exercise in humans. Can J Spt Sci 12 (suppl. 1) : 84–88.
- 10) Kubicek WC, Karnegis JN, Patterson RP, Witsoe DA and Mattson RH (1966) : Development and evaluation of an impedance cardiac output system. Aerospace Med 37 : 1208–1212.
- 11) MacDougall JD, Reddan WG, Layton CR and Dempsey JA (1974) : Effects of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise. J Appl Physiol 36 : 538–544.
- 12) Maher JT, Goodman AL, Francesconi R, Bowers WD, Hartley LH and Angelakos ET (1972) : Responses of rat myocardium to exhaustive exercise. Am J Physiol 222 : 207–212.
- 13) McConahay DR, Martin CM and Cheitlin MD (1972) : Resting and exercise systolic time intervals. Circulation 45 : 592–601.
- 14) Mole PA and Coulson RL (1985) : Energetics of myocardial function. Med Sci Sports Exerc 17 : 538–545.
- 15) 村岡 功 (1989) : 運動と内分泌, (編) 石河利寛, 杉浦 正輝「運動生理学」, 建帛社, 東京, pp. 183–218.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) Namiot Z and Gorski J (1988) : Regulation of glycogen metabolism in rat respiratory muscles during exercise. Eur J Appl Physiol 58 : 120–124.
- 22) Niemela KO, Palatsi IJ, Ikaheimo MJ, Takunen JT and Vuori JJ (1984) : Evidence of impaired left ventricular performance after an uninterrupted competitive 24 hour run. Circulation 70 : 350–356.
- 23) Okano G, Takeda H, Morita I, Katoh M, Mu Z and Miyake S (1988) : Effect of pre-exercise fructose ingestion on endurance performance in fed men. Med Sci Sports Exerc 20 : 105–109.
- 24) Orok CJ, Hughson RL, Green HJ and Thomson JA (1989) : Blood lactate responses in incremental exercise as predictors of constant load performance. Eur J Appl Physiol 59 : 262–267.
- 25) Rodrigues EA, Maddahi J, Brown H, Pantaleo N, Freeman M, Koerner S, Waxman A and Berman D (1989) : Responses of left and right ventricular ejection fractions to aerobic and anaerobic phases of upright and supine exercise in normal subjects. Am Heart J 118 : 319–

- 324.
- 26) Roland V Jr, Hagberg JM, Vaughan TE, Lau BWC, Seals DR Ehsani AA (1988) : Endogenous digoxin-like immunoreactivity in blood is increased during prolonged strenuous exercise. *Life Sci* 42 : 103-110.
- 27) Rubal BJ, Moody JM, Damore S, Bunker SR and Diaz NM (1986) : Left ventricular performance of the athletic heart during upright exercise : a heart rate-controlled study. *Med Sci Sports Exerc* 18 : 134-140.
- 28) Seals DR, Rogers MA, Hagberg JM, Yamamoto C, Cryer PE and Ehsani AA (1988) : Left ventricular dysfunction after prolonged strenuous exercise in healthy subjects. *Am J Cardiol* 61 : 875-879.
- 29) Shaver JA, Kroets FW, Leonard JJ and Paley HW (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.
- 30) 鈴木洋児(1990) : 長時間運動に適応する心臓血管系応答の調節トリガーとその破綻. *体育学研究* 34 : 145-147.
- 31) Tibbits GF (1985) : Regulation of myocardial contractility in exhaustive exercise. *Med Sci Sports Exerc* 17 : 529-537.
- 32) Wallace AG, Mitchell JH, Skinner NS and Sarnoff SJ (1963) : Duration of the phases of left ventricular systole. *Circulation Res* 12 : 611-619.
- 33) Weissler AM, Peeler RG and Roehll WH (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.
- 34) Weissler AM, Harris WS and Schoenfeld CD (1969) : Bedside technics for the evaluation of ventricular function in man. *Am J Cardiol* 23 : 577-583.