

昭和49年度 日本体育協会スポーツ科学研究報告

No. VIII 環境温・湿度が持久性運動に及ぼす影響

1. 環境温度と持久性運動に関する研究
第5報, 環境温度が長時間運動中の心機能に及ぼす影響について
2. 環境湿度と持久性運動に関する研究
第2報, 運動強度と体温変化について

財団法人 日本体育協会
スポーツ科学委員会

環境温度と持久性運動に関する研究 第5報

環境温度が長時間運動中の心機能に及ぼす影響について

——特に、心機図による左室機能の評価と

心拍出量の関係を中心として——

(財)日本体育協会・スポーツ科学研究所

黒田善雄 鈴木洋児 塚越克己
雨宮輝也 伊藤静夫

はじめに

高温下における全身持久性能力の低下が、心臓・循環系機能の低下に由来するものであることが、これまでの報告で明らかになった。その第一の見解は、30℃前後の中等度高温下で持続的な運動を行なった場合、心拍数が運動中の最大値（この場合 $\dot{V}O_2 \max$ が得られた時の最高心拍数）に近づく時間が早くなることから、心筋自体の能力に限界が来て、その疲労が早められたために、運動持続が不可能になるとするものである。その第二は、40℃を越すような厳しい高温下で持続的運動を行なう場合、皮膚の血流量が著明に増加するのに $\dot{V}O_2$ がわずかに低下する、他方、心拍数の急速な増加も、けして最大値を示さない。皮膚血流量の増加は、心拍出量の配分比が体温調節の為、皮フに大きくなり、活動筋群への流入血液量が減少したことを示す。この為、筋ポンプ作用の効果が低下する、さらに、末梢での皮フ血管拡張が増大するのに伴い血行速度が低下する。これらの結果、静脈還流量が減少し、中心血管及び心臓血液充満度が低下する。この低下は、1回拍出量

の減少をもたらす。結局心拍出量の増加が見込めないのに、その配分比が皮フ血流量に片寄ることで、活動筋群への血流量減少が生じ、酸素不足となり、高心拍数と結びついて、運動が早期に不能になったとするものである。

しかし、高温下で、高心拍数と静脈環流量減少から、効率の悪い心臓ポンプ作用により、心機能自体の能力低下も無視できないかも知れない。したがって上述のように結論づけるにしても、心機能の評価を考慮しなければ、それは不十分なものとなろう。

本研究は、心拍出量と心機図から、種々環境温度下で最大下作業を exhaustion まで行なわせた際の心機能を調べることにより、高温下での作業成績低下の limiting factor をさぐろうとするものである。

方 法

1. 被検者と温度条件

被検者は、良くトレーニングされた長距離走選手5名である。表1は、被検者の形態と $\dot{V}O_2 \max$

を示した。被検者の服装は、ゴム底製ランニングシューズとショートパンツである。設定した環境条件は、人工気候室内で0℃—80%（相対湿度）、10℃—80%，20℃—60%，30℃—60%，40℃—60%の5条件である。

2. 測定項目と測定方法

測定項目は、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)、直腸温 (Tr)、皮フ温（前額 Ts-th, 下腿 Ts-c, 大腿 Ts-th, 胸 Ts-ch）、心拍出量 (\dot{Q})、胸部心電図 (ECG)、心音図 (PCG)、頸動脈波 (CAP)、血圧 (BP)、最大血圧 MaBP、最小血圧 MiBP、平均血圧 MeBP、脈圧 PP)、心拍数 (HR) そして呼吸数 (RF) である。

各種体温の測定は、サーミスター法で行ない、Tr の測定位置は、肛門部より 8 cm の深さとした。HR は胸部誘導心電図法、RF はサーミスター法で行ない、いずれも Bio-Amp を通し、ペン書きオシログラフで記録した。呼吸は、ダグラスバック法で採集し、標準レスピロメーターで較正された乾式ガスメーターで計量した。 $\dot{V}O_2$ を測定するため、呼吸の一部を 10cc 注射筒で採気し、ショランダー微量ガス分析器で分析した。BP の測定は、Riva-Rocci 水銀マノメーターを用い、上膊部加圧により、korotokov 音で判定した。MiBP は、第 4 点及び 5 点を記録したが、黒田等の報告に従い、第 4 点値を採用した。 \dot{Q} の測定は、閉鎖肺バック法式の CO_2 再呼吸法で行ない、1 回ごとの呼吸は、5cc 注射筒で採気し、ショランダー微量ガス分析器で分析した。 CO_2 濃度は、4.7—5.0% CO_2 とした。測定の手順は、Mage と Anderson の方式に準じた。ECG は、

Frank の透導法によるベクトル ECG を記録した。PCG の記録点は KA 5 (5 th intercostal space of left mid-clavicular line) である。その微音マイクロホンは、三栄測器社の加速度形心音マイクロホン MA-250 を用いた。マイクロホンの体表面との接触する開口部は直径 30mm ± 1 mm である。記録は、Bio-Amp を通し、ペン書きオシログラフに行った。心音の周波数波は、I 音及び II 音の onset が明らかに判定できるように Bio-Amp で調整した。第 I 音の onset は、主節第 1 振動（房室弁閉鎖音で、40—150cps の高い振動）の onset とした。第 II 音の onset は、大動脈弁の最初の振動としたが、判定困難な場合には、ECG の T 波の終末の前後で、頸動脈波の切痕部 (dicrotic notch) の直前に示される高く短い振動の onset とした。CAP のピックアップは、微動な空気振動をとらえられる半導体ストレインゲージ、共和電業社の管内圧力変換器、微小圧力用 PG-C 型を用い、Strain-Amp を通し、ペン書きオシログラフに記録した。図 1 は、測定部位と記録である、なお、ECG、CAP、PCG を合せ記録したのが、心機図 (Mechano cardio graphy) と呼称される。

3. 心機図の分析法

図 1 に示してあるのが心機図上の各計測点である。

- ① 左室変容期 (Q-I time) : ECG の Q 波の onset (Q onset) から PCG の第 I 音の onset (IA onset)
- ② 等容収縮期 (ICT) : (PCG の IA onset から II A onset) — 駆出時間

表 1

Subje ct	AGE yrs	HEIGHT cm	WEIGHT kg	BEST RE. 5,000m running min., sec	MAXIMUM OXYGEN UPTAKE				
					$\dot{V}E$ (BTPS) l/min.	$\dot{V}O_2$ l/min.	$\dot{V}O_2/Wt$ ml/ kg, min.	H. R. beats /min.	R. R. cycles /min.
A. M.	20	163.0	54.08	16'27"/2	141.65	3.79	70.04	190.0	68.0
B. S.	20	164.0	52.76	15'33"/0	154.69	3.90	73.90	192.0	67.0
C. W.	21	159.7	53.11	16'08"/0	127.63	3.77	70.95	187.0	56.0
D. K.	21	175.5	62.55	15'34"/0	155.59	4.16	66.54	181.0	63.0

㊦ 駆出時間 (ET) : CAP の立ち上り点 (up-strok UP) から CAP の切痕 (dicrotic notch DN) までの時間

㊧ 全収縮時間 (Q-II time) : Q onset から II A onset までの時間

㊨ 駆出前期 (PEP) : Q-II time から ET を引いた時間

しかし、Q-II time, ET 及び PEP は、先行 HR に影響されるので、Weisseler の式によって、次のように補正される。

$$Q-II \text{ index } (Q-II_i) = 2.1 \times HR + (Q-II \text{ time})$$

$$ET \text{ index } (ET_i) = 1.7 \times HR + ET$$

$$PEP \text{ index } (PEP_i) = 0.4 \times HR + PEP$$

(但し、男子に適応の式)

又、ICT は、M : BP により影響されることから次のように補正される。

$$ICT_i = ICT_i = ICT / MeBP$$

他方、血行動態指数 (hemodynamic index HDMi) が、PEP · ET から算出される。

$$HDMi = PEP / ET$$

4. 心臓の機械的仕事量の算出

Windkessel theory に従えば、心臓の外部になす機械の仕事量は、平均動脈血圧に1回拍出量を積算することで知ることが出来る。つまり、心臓の1周期のなす仕事量 (CaW) = MeBP × 一回拍出量 (SV) = 0.00136gr/cm² × XmmHg × Ycm³ (cc) で表わされる。又、単位分時仕事量 (CaW/M) は、CaW × HR/min で算出される。

5. 実験手順

被検者は、あらかじめ必要な電極等を装着し、気温 25 ± 1℃ に調節された部屋で30分間の座位安静後、人工気候室に入室した。入室後ただちに、モナーク社製自転車エルゴメーターの座席上で15分間の安静を保った。その間、安静時の各測定を13分から15分に実施した。安静状態の姿勢は、図1に示したように、上体を背部のクッションに安

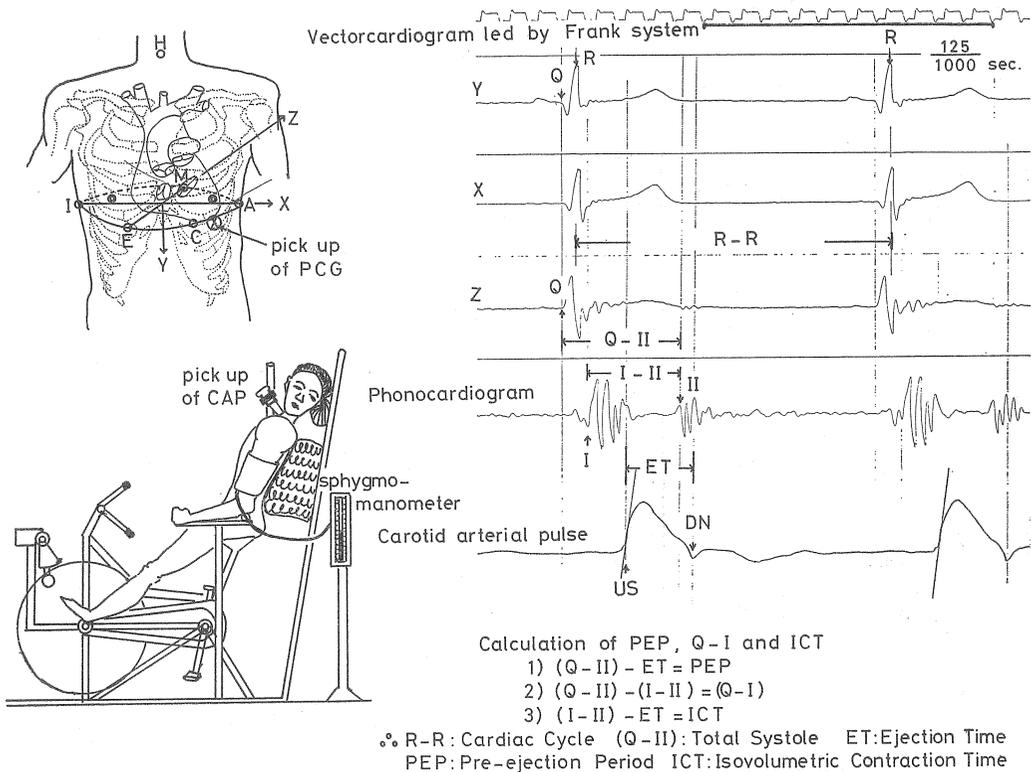


図 1

定し、頸動脈波が都合よく測定できるよう頭部を軽く固定した。

運動の様式は、座位によるペタリングで、負荷は1,080 kpm/分である。これは、20℃環境温下で、65% $\dot{V}O_2$ max 前後に相当する。運動は、Mechanocardiography を記録するため、10分ごとに、10秒から20秒の休息をはさみ、持続不能におち入るまで続けられた。

運動中の各測定時間々隔は、各種体温、HR 及び RF が毎分、呼気の採集が10分ごとに1分間、BP が5分ごととした。 \dot{Q} は、運動開始から、10分、30分、all-out 直前の計3回とした、Mechanocardiography は、10分ごとに記録し、運動後15分間、座位安静状態で測定が続けられた。

結 果

表2は、運動負荷(% $\dot{V}O_2$ max) と作業時間(ExT)を示したものである。ExT は、被検者により最大値を示す温度条件が異なるが、30℃及

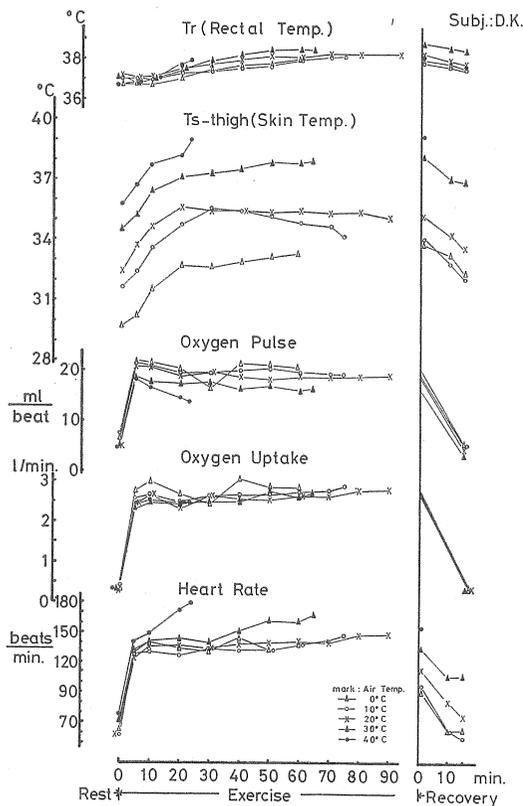


図 2

表 2

Subj.	LOAD OF 1,080kpm/m. (in 20C)		ENDURANCE EXERCISE TIME				
	$\dot{V}O_2$ lev. l/min.	% $\dot{V}O_2$ Max. %	0℃ min.	10℃ min.	20℃ min.	30℃ min.	40℃ min.
A. M.	2.48	65.4	130'	130'	80'	40'	15'
B. S.	2.65	67.9	90'	116'	68'	60'	20'
C. W.	2.46	65.3	84'	80'	90'	64'	18'
D. K.	2.70	64.9	60'	75'	90'	65'	24'

び40℃といった高温下ではいずれも著明な短縮を示した。特に40℃では、被検者A.M.の場合、最大値の11.5%、最もExTが優れているD.K.でも26.7%しか運動が持続できなかった。

図2は、D.K.の運動中及び回復期のTr, Ts-t, $\dot{V}O_2$, HR, PP の逐時変動を示したものである。Tr は、上昇速度に温度条件による差が認められるが、最大値はいずれの場合もほぼ等しい。Ts-t は、初発下降が認められるものの、0℃で低く、温度が高くなるに従い高い水準での逐時変動を示す。HR は、30℃及び40℃の高温で著明に増加し、この場合、定常値を示さない。酸素脈(Oxygen pulse)は、高温下で低く、逐時下降している。

図3は、被検者DKの運動中の心機能の逐時変動を示したものである。全収縮時間(Total Systole)は、高温で短縮し、低温下に比較し、逐時的に差が大きくなる。等容収縮期(Isovolumetric Contraction time)は、高温下でわずかに低い。前収縮期(Pre-ejection Period)及び駆出時間(Ejection time)は、高温下でわずかに短縮する。最大血圧(Maximum Blood Pressure)は、0℃で運動の後半上昇する、又40℃では運動停止時著明に下降する、最小血圧(Minimum Blood Pressure)は、運動初期では温度条件による差は認められないものの、逐時高温条件において下降傾向を示す。1回拍出量(stroke volume, SV)は、運動開始初期に温度条件による差が認められなかったが、高温下で、運動停止時著明に下降する。心拍出量(cardiac output Q)も運動停止時高温下で減少している。

図4及び図5は、被検者4名の逐時変動の平均

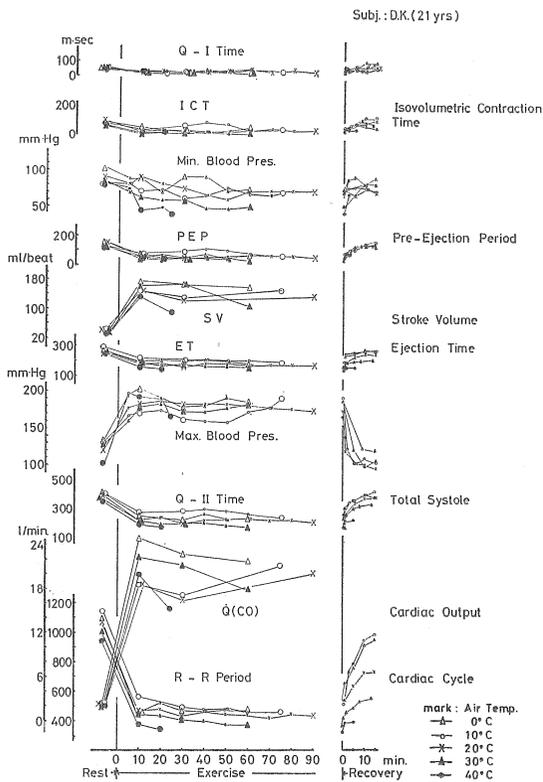


図 3

を示したものである。 $\dot{V}O_2$ は 40°C で運動停止時低下した。HR は高温で高い値を示すものの、 $\dot{V}O_2$ max 時の最大 HR より低いところで運動持続不能が到来している。又、SV と \dot{Q} は、40°C 時、著明に減少して運動が停止した。これらは、被検者 DK の変動傾向をより著明に示しめている。

図 6 は、運動停止時の各測定値の平均と最大、最小値を各温度条件において比較したものである。作業時間 (ExT) は、10°C で最大値を示し、高温になるに従い著明に減少する。Tr は、いずれの温度下でもほぼ等しい。 $\dot{V}O_2$ は、高温で減少し、 O_2 Rem も下降するが、RQ は高温で上昇する。HR は、高温条件になるに従い著明に増加する。しかし、いずれの温度下でも最大 HR より低い。MaBP は、温度条件の違いによる差は認められない。MaBP は、高温下で低下し、CaW もその時減少する。 \dot{Q} 及び SV は、30°C と 40°C の高温で減少が著明となる。特に 40°C の減少が著明である。A- $\dot{V}O_2D$ は、40°C で非常に高くなる。 O_2

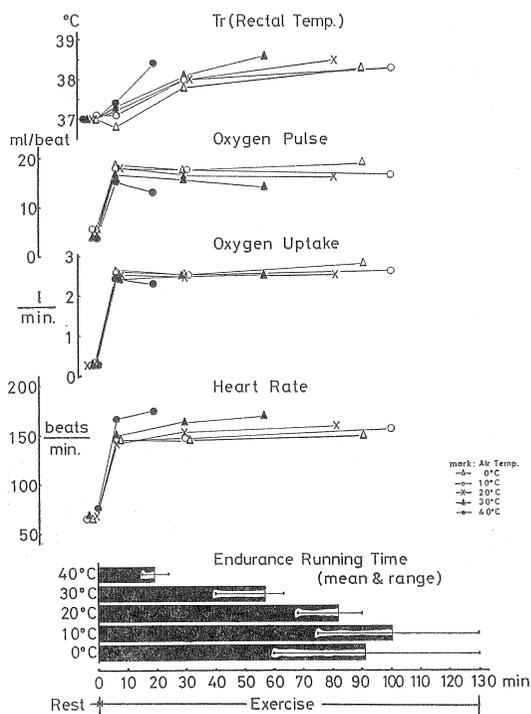


図 4

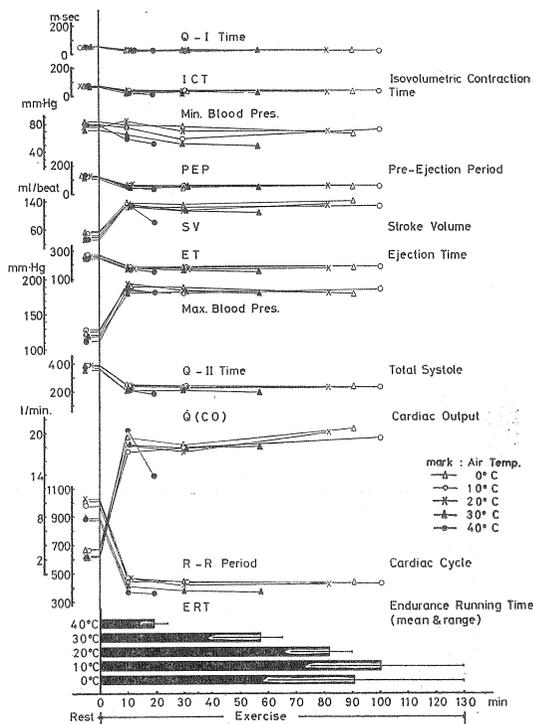


図 5

pul は高温になるに従い低下する。Q-II index は、40℃でやや高いものの、温度条件による差は認められない。ET index は、低温下に比較し、20℃以上の温度で高い。HDM index は、0℃は際わずかに高いが、どの条件下でも著明な差はない。

図7は、SV と心筋収縮力の関係を示したものである。心機図上からすると、心筋収縮力が強化されるにともない ICT index 及び PEP index は小さくなり、ET index は大きくなるから、30℃

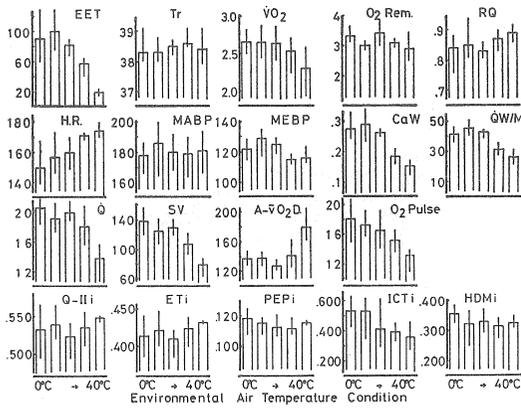


図 6

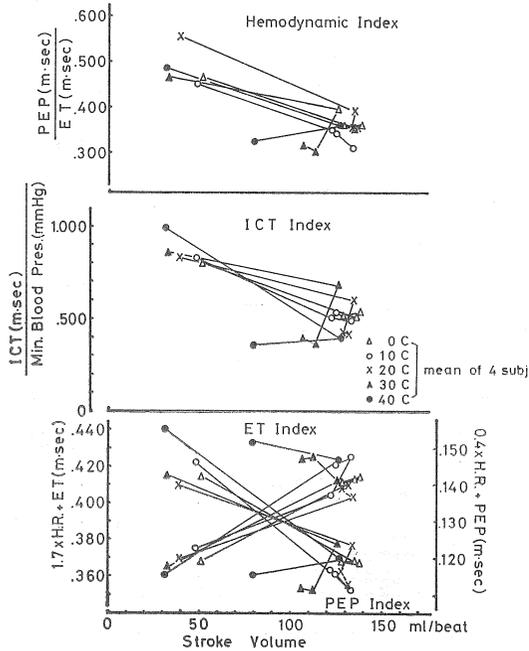


図 7

40℃の高温下では、他の温度に比較し、運動に伴い心筋収縮力は強化されるか、SV に減少する傾向を示した。HDM index は、SV が変動してもほぼ等しい。

図8は、運動中の心機能の各 parameter の逐時変動を4名の平均値で示したものである。HR は、高温になるに従い高い水準を示すが、180拍/分を越すことはない。ICT indexは、高温になるに従い小さくなるが、30℃と40℃の間には、差は認められない、これに対し、SV は高温で減少する、特に、40℃の場合、その減少量は著明である。CaW は、高温下で逐時減少する。

考 察

心機図から計測された ICTi, PEPI, ETi あるいは HDMi から、左室心筋収縮力及び hemodynamics (血行動態)を知ることができる。Reeve 等 (1960) の報告によれば、ICTは、最小血圧が一定であれば、心収縮力と反比例する。Metzger

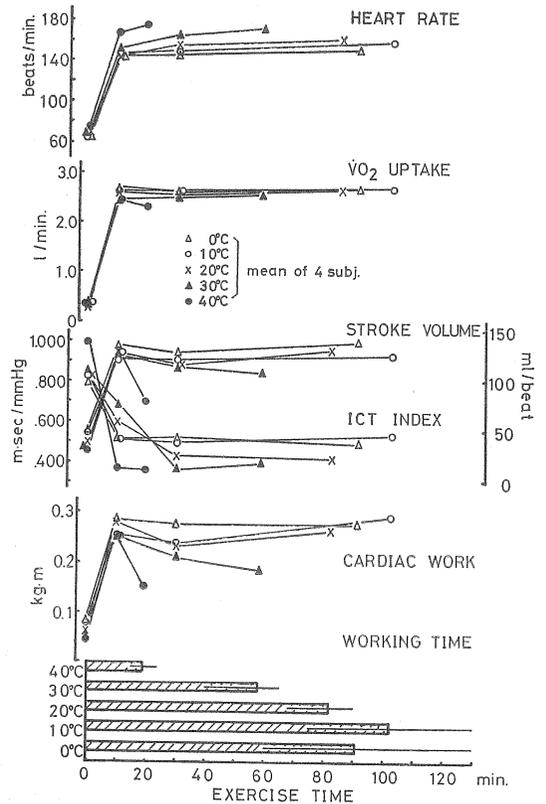


図 8

等(1970年)は、直接法で測定した ICT (true ICT) と ECG, CAP, PCG の同時記録した図(心機図)から計測した心収縮時間の ICT と非常に高い相関関係が認められることを報告している。又、Weissler 等(1968年)、Metzger 等(1970年)の報告から、PEPi もまた心収縮力と負の相関がある。したがって Q-I time の延長を示すような心疾患がなければ PEP と ICT とは高い相関を示すことから、計測上どちらか一方に問題があっても、心収縮を知る手掛りとなる index を得ることは可能である。ET は、HR と反比例し、SV と比例する(沢山, 1971年、Weissler 1968年)。一般的に、ETi が延長すると、高心拍出量状態、短縮すると低心拍量状態と考えられている。Q-I time の意味は、左房圧に関係あるとする見解(Sakamoto 等, 1960年)と、左房圧には関係ないとする見解(Nimura 等, 1968年)とが背後にあり、それ自体の意味づけはまだ不明である。全収縮時間(total systole)は、ET と PEP に 2 分されるが、両者の関係は心収縮力が強化されると PEP が短縮し、ET が延長するという関係があり、通常、total systole 自体は著明な変動を示さない。しかし、inotropic effect が亢進すると、PEP の短縮を認めるのに、ET は延長せず、total systole は短縮する。この状態では、駆出速度(ejection rate)を増すことで、SV の増大をもたらすから、HDMi (PEP/ET) は小さくなる。

これらの報告からすれば、ICTi が小さくなる高温下での運動では、心収縮力の増強が低温に比較し著明になること示すものである。この高温下での心収縮力の増強にもかかわらず、SV は遂時減少する。又、SV が減少するのに、HDMi は小さくなる。このことは、心収縮力の増強に対し、ET が変わらないことであり、inotropic action の亢進か、心充満度の低下を示すものである。SV の著明な減少傾向からすれば、心収縮力が増強しても、左室血液量が減少しているので、ET が延長する物理的な理由はみあたらない。おそらくは、心充満度が低いため、心収縮力を高めることによって心拍出量を確保しようとする生体反応が HDMi を小さくしているものであって、駆出速度の

加速化によるものとするのが妥当であり、高温下における、心機能の亢進を示す結果である。

40℃といった体温より高い温度下であっても、運動停止時の Tr は、他の低い温度下と比較し、異常値を示すことはない。しかし、皮フ温は、高温条件になるに従い著明に高くなる。皮フ血流量は、皮フ温が33℃を越すとこれに比例して増加する。皮フ血液量の増減は、エネルギー代謝にほとんど関与せず、体温調節の働きにより決定づけられる。

動脈系の血流速度(flow degree)は、連続の等式(continuity equation)で考えられる。つまり、動脈系は、大動脈、動脈、小動脈そして毛細管と分岐する。この分岐に従い、血管の径はしだいに小さくなり、管内血圧も下降していく。しかし、分岐した後、血管数が増加することから、総横断面積は、分岐前より大きくなる。各横断面毎に単位時間に移動する液体の量は、(断面積)×(速度)であり、移動する血液量は一定であるのに、横断面積が広くなることから、流速が減ることになる。高温下で、体肢の血流量は著明に増加するが、筋の血流量は温度刺激に影響されないであろうから、この増加は皮フ血流量の増加を示すものであろう。皮フ血流量の増加は、換言すれば、皮フ毛細管の増加でもあり、総横断面積の増大でもあり、動脈系血流の減速を示すものである。したがって、血液が皮下血管系で停滞することは避け難く、還流静脈血液への流量は減少するわけである。

他方、最大血圧は温度による影響を受けないが、最小血圧は高温下で低下する。平均血圧が高温下で低下するから、SV の減少と結びつき、心臓の機械的仕事量は低下する。しかし、高温下で高 HR が記録されるから、この仕事量の低下にもかかわらず、心筋自体にかかる負荷は心収縮力の増大ともかわり、大きくなる。心筋への負荷の増強は、酸素消費量の増加をもたすものである。明らかに、心機能の効率低下を示している。

これらの結果は、高温下で作業成績が著明に減少した原因として、Dill の指摘通り、心筋自体の capacity が、快適度下に比較し、高温では早くに限界に達すると考察できる。しかし、心収縮力

が高温で増強されるから、心筋が疲労困憊におちいったとは、ただちに結論づけられない、しかも HR level は、 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の発現時に示された最高HR まで達していないから心臓には余力があるとも考えられる。むしろ \dot{Q} の減少の方が重要な意味を示す。

高温下で心収縮力が増強されたとしても、その背景には、Frank-Sterling の法則が存在し、動脈系の抵抗を排して血液を拍出するには、ある一定の心筋長が維持されねばならない。心筋長保持は、心充満度により限定されるため、心室への流入血量が減少すれば、左室内圧が上昇しても、血液を拍出できなくなる場合も考えられる。仮に極度な心充満度の低下が生じたにもかかわらず、心収縮を持続すれば、頻脈状態(tachycardia state) となり、運動が出来なくなるばかりか、急性の心臓障害が起る直接原因にもなるであろう。しかし、実際には、頻脈状態になる以前に運動不能が到来している。又、高温下で例えば SV が減少するといっても、40℃ の Exhaustion 時 70 ml/beat 以上で、安静時値の2倍以上であり、心筋長が極度に短縮したとはいえない。心充満度が心収縮力を維持する目的で HR を抑制するとも考えられる。これ故、HR もある程度抑制され、SV も減少するから \dot{Q} は当然のことながら、減少するわけである。この \dot{Q} の減少は、運動を持続する上で決定的な不利を意味する。活動筋への酸素運搬量が減少するからである。

つまり $\dot{V}O_2 \text{ level}$ は、高温になると低下する。とりわけ、40℃ の場合、運動の持続とともに漸時低下する。40℃ 下の exhaustion 時、SV 及び \dot{Q} の著明な減少からすれば、 $\dot{V}O_2$ の低下は、活動筋群への血流量不足を示すものである。なぜなら、筋での酸素消費量は流入する血液量に比例するからであり、又体温調節の為、 \dot{Q} の配分比が皮フに片寄るようになるからである。

では、同一の機械的負荷を与えた運動の作業成績が高温で著明に低下したのは何故であろうか。確かに、筋血流量の減少から、活動筋群への酸素欠乏状態が生じ、筋の酸素負債能を有効に働かしたとしても、筋収縮の持続は不能になると考えられる。だが、もう一方において、心充満度の低下

が、心筋収縮力を維持できなくなったとも考えられる。

つまり、高温下に曝露されると、皮フ温の上昇に従い皮フ血流量が比例的に増加する。この増加は、 \dot{Q} の配分比を変え、結果として、還流静脈血量の減少にともない心臓の充満度を低下させる。末梢での血液要求量は変わらないか、むしろ増加するであろうから、心収縮力を増強して残留血の拍出を促進するとともに、HR を増加させることで、 \dot{Q} を保持しようとする。しかし、心収縮力は、心筋長に比例するであろうから心充満度が低下すると小さくなり、末梢血管抵抗を排しても収縮することができるだけの力はなくなってしまふ。このことは、頻脈状態でないかぎり HR の増加に頼ってもたらず \dot{Q} の増加促進を逆に心充満度が規定することでもある。SV の減少にもかかわらず、Q-II time (total systole) が延長するゆえんである。したがって高温下で、心筋の収縮張力が筋長に対し限界にまで達し、心臓の機能を充分働かすことが出来なくなったことが、運動を早期に exhaustion に導いた原因であるとも考えられる。

しかしながら、本研究結果からすれば心収縮力が高温下で増強され、exhaustion 時も増強傾向は変わらないから、心筋は疲労状態におちいるとは思われぬ。結局、心臓自体は余力がありながら、還流血液量の減少が心充満度を低下させ、 \dot{Q} の減少をもたらすことが高温下で運動持続を早期に不可能にする原因である。これは、 \dot{Q} の配分比の変動によるもので、 \dot{Q} に占める皮フ血流量が増加し、筋血流量が減少したためである。

要 約

1) 約65% $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の運動を自転車エルゴ・ーターで荷した。温度条件は、0℃ から 40℃ の5条件で、運動は exhaustion まで行なわせた。被検者は、良くトレーニングされた長距離走者4名である。

2) 測定項目は、 $\dot{V}O_2$, Tr, Ts-fa, Ts-c, Ts-t, Ts-ch, \dot{Q} , ECG, PCG, CAP, BP, HR そして RF である、Mechanocardiography から、Q-I time, ICT, ET, Q-II time, PEP, HDM index,

Q と MeBP から CaW を算出した。

3) 結果は、20℃以下の低温に比較して高温における走行時間が著明に減少し、Tr はいずれの温度条件下でも最高値は変わらない。 $\dot{V}O_2$ は高温下で低下する。HR は高温条件になるに従い増加し、 \dot{Q} とSV は高温で減少する。しかし、HR は最高値に達しない。A- $\dot{V}O_2D$ は高温で高くなる。ICTi は高温で小さくなる。MaBP はいずれの温度下でも著明な差は認められないが、MeBP は高温で下降し、CaW が低下する。しかし、高温下で (Q-II time) index は延長し、HDMI はわずかに小さくなる。

4) 以上の結果から、高温下における運動の exhaustion の早期化は、心筋自体の能力限界あるいは、心臓の機能的限界によるとは言い難い。 \dot{Q} の配分比が変わり、還流血流量が減少したことによる心充満度の低下が、 \dot{Q} の減少をもたらしたため、活動筋群への血流量が減少し、酸素欠乏状態が生じ、筋の収縮持続が不能になったためと考えられる。結局、体温調節の増加した皮フ血流量の多少が決定因子となると考えられる。

文 献

- 1) Blumberger, K. and S. Meiners : Studies of Cardiac Dynamics, A. A. Luisada (ed) Cardiology and Encyclopedia of the Cardiovascular System. Vol. II, Part 4, New York : McGraw-Hill, 372-377, 1959.
- 2) Fardy, P.S. : The influence of physical activity on selected cardiac cycle time components. J. Sport. Med. 11 : 227-233, 1971.
- 3) Franks, B.D. and T.K. Cureton, Jr. : Orthogonal factors of cardiac intervals and their response to stress. Res. Quar. Vol. 39 (3) : 524-532, 1967.
- 4) Frick, M.H., T. Somer and R.O. Elovainio : Effect of Physical Training on Left Ventricular systole. Cardiologia 51 : 33-45, 1967.
- 5) Hanson, J.S., B.S. Tabakin, A.M. Levy and W. Nedde : Long-Term Physical Training and Cardiovascular Dynamics in Middle-Aged Men. Circulation, 38 : 783-799, 1968.
- 6) 黒田善雄, 鈴木洋児, 塚越克己, 雨宮輝也, 伊藤静夫 : 環境温度と持久性運動に関する研究, 第4報, 環境温度が最大下作業中の循環機能に及ぼす影響. 昭和48年度日本体育協会スポーツ科学委員会報告, No. VII, 1-14, 1974.
- 7) 黒田善雄, 田村光子, 豊田 博, 小山秀哉, 水野忠和 : 直接法による運動時の血圧, 特に最小血圧の動向. 東京大学教養学部体育学紀要, 第4号, 47-57, 1967.
- 8) Lombardo, T. A., L. Rose, M. Taeschlor. S. Tuluy and R.J. Bing : The effect of exercise on coronary blood flow, myocardial oxygen consumption and cardiac efficiency in man. Circulation, 7 : 71- 1953.
- 9) Luisada, A.A., D.M. MacCanon, S. Kumar and L. P. Feigen : Changing views on the mechanism of the first and second heart sounds. Am. Heart J. Vol. 88 (4) : 503-514, 1974.
- 10) Luomanmäki, K. and J. Heikkilä : Estimation of the severity of Sortic incompletence from prolongation of the left ventricular ejection time. Acta, med, Scand, 188 : 107-114, 1970.
- 11) Magel, J.R. and K. Anderson : Cardiac output in muscular exercise measured by CO₂ Rebreathing procedure. Ergometry in Cardiology, 147-157, 1967.
- 12) Messer, J.V., R.J. Wagman, H.J. Levine, W.A. Neill, N. Krasnow and R. Gorlin : Patterns of human myocardial oxygen extraction during rest and exercise. J. Clin. Invest, 41 : 725, 1962.
- 13) Metzger, C.C., C.B. Chough, F.W. Krootz and J.J. Leonard : True isovolumic contraction time. Its correlation with two external indexes of ventricular performance. Am. J. Cardial 25 : 434, 1970.
- 14) Nimura Y., H. Matsuo, S. Mochizuki, K. Aoki, O. Wada and H. Abe : Analysis of cardiac cycle of the left side of the heart in cases of left ventricular overloading or damage with the ultrasonic Doppler method. Am. Heart J. 75, 49, 1968.
- 15) 中村芳郎, 堀川宗之, 青崎登, 高橋正人 : Preload Afterload と心機能. 呼吸と循環, 23 (8) : 691-697, 1975.
- 16) Reeves, T.J., L.L. Hefner, W.B. Jones, C. Goghlan, G. Prieto, J. Carroll : Hemodynamic determinate of the rate of change in pressure in left ventricle during isometric contraction. Am. Heart J. 60 : 745-, 1960.
- 17) Regam, T. J., G. Timmis, M. Grey, K. Brinak and H.K. Hellems : Myocardial oxygen consumption during exercise in fasting and lipemic subjects. J. Clin. Invest, 40 : 624-, 1961.
- 18) Sakamoto, J., G. Kaito and H. Ueda : Electrocardiographic and phonocardiographic studies in hypertension. Part II, phonocardiographic study with special reference to the atrial sound and "Q-I" internal. Jap. Heart J. 1 : 213, 1960.
- 19) 梅田徹, 尾本良三, 古田昭一, 町井潔, 松田光生,

- 山口徹 : UCG, 心音図, 頸動脈波曲線による左室等容収縮期, 等容拡張期の計測とその意義。心臓 7 (3) : 325-330, 1975.
- 20) Wallace A.G., J.H. Mitchell, H.S. Skinner and S.J. Sarnoff : Puration of the phase of left ventricular systole. *Circ. Res.* 12 : 61, 1962.
- 21) Weissler A.M., R.G. Perler and W.H. Rochill Jr. : Relationship between left ventricular ejection time, stroke volume, and heart rate in normal individuals and patients with cardiovascular disease. *Am. Heart J.* 62 : 367, 1961.
- 22) Weissler A.M., L.C. Harris and G.D. White : Left ventricular ejection time index in man, *J. Appl. Physiol.* 18 (5) : 919-923, 1963.
- 23) Weissler A.M., W.S. Harris and C.D. Schoefenl : Systolic time internals in heart failure in man. *Circulation* 37 : 149, 1968.
- 24) Weissler, A.M. and C.L. Carrard Jr. : Systolic time intervals in cardiac disease. *Modern Concepts Cardio. Dis.* 40 : 1, 1971.
- 25) Wiley, J.F., B.D. Franks and S. Molvar : Time components of the left ventricle during work. *New Zealand J. of physical education* 2 : 67-74, 1969.
- 26) Wiley, Jack F. : Effects of 10 weeks of endurance training of left ventricular interval : *J. Sports.Med.* 11 : 104-111, 1971.
- 27) William B. J., and G. L. Foster : Peterminants of duration of left ventricular ejection in normal young man. *J. Appl. physiol.* 19 (2), 279-283, 1964.

環境湿度と持久性運動に関する研究

第2報 運動強度と体温変化について

財団法人 日本体育協会・スポーツ科学研究所

黒田 善雄 伊藤 静夫 塚越 克己
雨宮 輝也 鈴木 洋児

目 的

環境条件が運動時の体温調節機構に及ぼす影響に関する研究は古くからみられる。Nielsen⁷⁾の古典的な研究によれば、直腸温の上昇は運動強度に比例し、環境温に対しては広い範囲(5~30℃)にわたって独立である。この知見はその後多くの研究者によって確かめられている¹⁰⁾。

一方、より高温多湿条件下では、運動時の体温調節反応に何んらかの変調をきたし、運動遂行能力の減退を招く。

温熱条件の中でも、湿度に着目し運動時の体温調節に関して研究されたものは、比較的少ない。しかし、わが国の夏季の高温多湿気候を考えると、運動時の体温調節にとって湿度の影響は大きな意義を持つものと考えられる。

このような観点から、我々は環境温度を30℃に保って湿度を種々に変化させた際のPerformance time について調べた(第1報)⁵⁾。その結果、高温になる程 Performance-time は減少する傾向を観察した。

そこで今回我々は、高温下(30℃)での最大下運動中の体温調節機能と運動強度との関係について、検討しようとしたものである。

研究 方 法

1. 被 検 者

被検者には、大学陸上競技部長距離選手5名を選んだ。彼らの身体特性を表1に示した。最大酸素摂取量は平均3.80ℓ/min(67.36ml/kg・min)、

表1 被検者の身体特性

Subj.	Age ,yr	Ht ,cm	Wt ,kg	Surface ,m ²	V̇O ₂ max	
					l/min.	ml/kg. min.
T. K.	20	175.3	60.0	1.75	4.04	67.3
W. G.	19	171.7	56.5	1.68	4.00	65.4
T. H.	18	167.1	58.3	1.67	4.07	69.8
M. T.	18	167.7	51.1	1.58	3.42	67.0
K. W.	20	160.0	51.0	1.53	3.46	67.8

4.07~3.42 l/min(69.8~65.4 ml/min)の範囲にあり、有酸素性作業能はほぼ同一水準にある。

2. 環 境 条 件

「温度湿度調節室」の室温は、いずれの実験においても、30℃に保たれた。湿度条件は相対湿度50, 60, 70, 80%の4条件を設定した。また、生体前面の風速は毎秒0.3~0.6mの範囲で一定に保たれている。なお、温度、湿度は自記温度計、毛髪自記湿度計によって連続記録した。

3. 運 動 条 件

運動は、温度湿度調節室内に設置されたトレッドミルを用いた。運動強度は、個人の最大酸素摂取量のそれぞれ40, 60, 80% V̇O₂ max に相当する走行スピードを設定し、運動時間は30分間までとした。運動強度については、オール・アウト走による最大酸素摂取量の測定と、数種の最大下負荷における走行時の酸素摂取量の測定を行ない、走行スピードと% V̇O₂ max の回帰式を求めることにより、各水準の走行スピードを決定した。なお、運動強度設定に際しての走行時の環境条件は

温度20℃，湿度60%において実施している。

4. 測定項目

測定項目は、心拍数，呼吸数，酸素摂取量，換気量，皮膚温，直腸温及び運動前後の体重である。

心拍数は胸部双極誘導による心電図から，呼吸はマスク内に装着したサーミスターを用いての温度変化による呼吸曲線より求めた。酸素摂取量は，ダグラスバッグ法によって採気し，ショランダー微量ガス分析器を用いて求めた。直腸温並びに皮膚温は，サーミスターを用い，標準温度計によって温度較正をして求めた。平均皮膚温の算出は次式の Ramanathan⁹⁾ の簡易式を採用した。

$$T_s = 0.3 \times (\text{胸部} + \text{上腕}) + 0.2 \times (\text{大腿} + \text{下腿})$$

運動前後の体重は，「台手動ばかり（最小目盛100g）」を用い，全身の汗を拭い全裸で測定した。

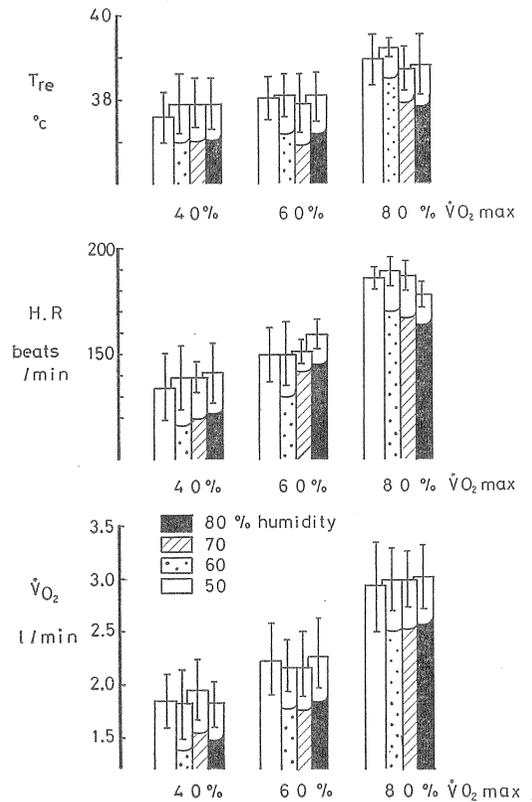
5. 実験手順

被検者は20～30分間の軽いウォーミング・アップを行なった後，裸体になり汗を十分にふき取り体重を測定する。次に，ショートパンツとシューズのみ着用し，電極等を装着して室外安静を15分間とする。その後，温湿度調節室に入室し再び15分間の安静を保った後走行を開始する。走行時間は30分間までとした。走行後は室内において15分間の回復をとり，その後直ちに汗を十分にふき取って，再び体重を測定する。

各測定項目の測定時間については，心拍数，呼吸数は室外安静から室内回復期まで測定中連続記録した。皮膚温，直腸温は1分間ごとにメーターの値を読み取った。採気時間は，安静時は最後5分間，走行時には走行開始より1分間及び4～5分，以後5分ごとに1分間の採気を行なった。

結 果

本実験結果の全体的な傾向を表2，並びに図一1に示した。表2は30分間走行終了時点での心拍数，酸素摂取量，換気量，直腸温，平均皮膚温，体重減についての，全被検者の平均値並びに標準偏差を示したものである。ただし，運動強度80%



図一1 酸素摂取量，心拍数，直腸温と温度並びに運動強度との関係，それぞれの値は走行29～30分時の被検者全員の平均値と標準偏差を示す。

$\dot{V}O_2 \text{ max}$ で80%湿度条件下においては5名中2名が30分間の走行ができなくなり，その時点での値を採用している。

図一1は，直腸温，心拍数，酸素摂取量について，運動強度並びに湿度変化との関係を棒グラフで表わしたものである。

表2，図一1から明らかなように，直腸温，心拍数，酸素摂取量は，運動強度が高くなるにつれて，それぞれ高い値を示している。同じような傾向は，換気量，体重減少量についてもみられる。これに対して，湿度の変化による各パラメータの値には，明確な差異がみられない。平均皮膚温については，運動強度80%，湿度80%の条件下では，37.2℃と他の条件に比べ高い値を示したが，その他は運動強度，湿度変化による明らかな違いはみられていない。

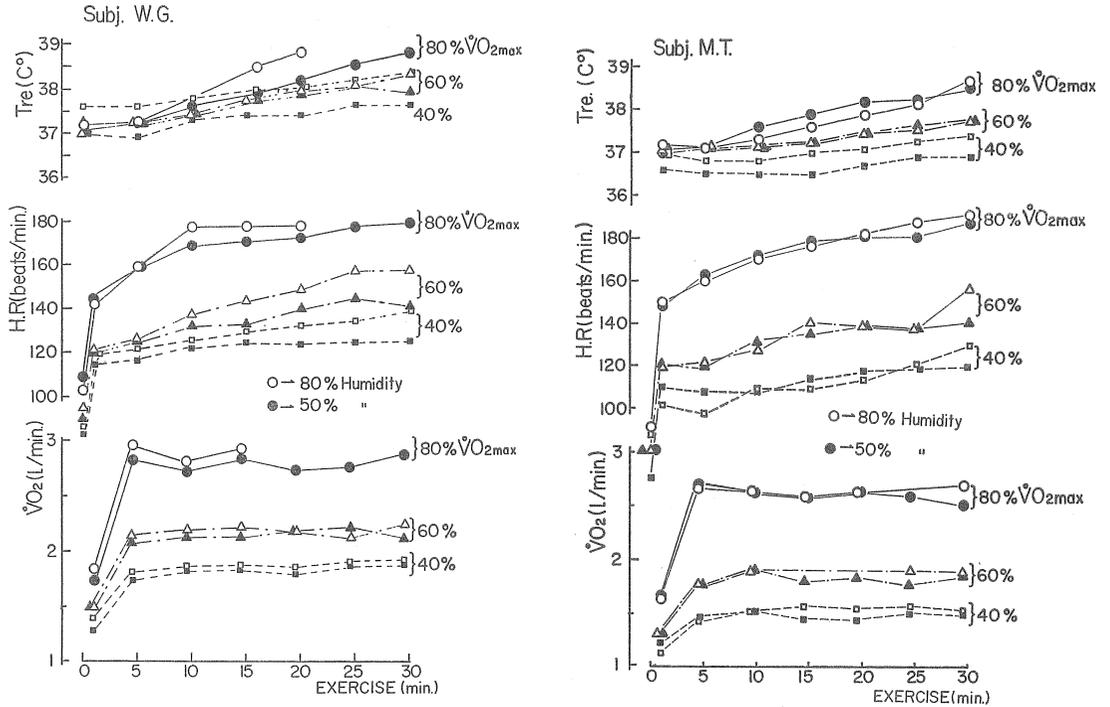
表2 30分間走行終了時の酸素摂取量, 換算量, 心拍数, 直腸温, 平均皮膚温の平均値並びに標準偏差

% of max VO ₂	Relative humidity %			
	80	70	60	50
heart rate beats/min				
80	186 (± 6)	187 (± 6)	187 (± 8)	186 (± 5)
60	161 (± 5)	152 (± 4)	150 (± 15)	150 (± 10)
40	141 (± 14)	139 (± 7)	139 (± 13)	133 (± 15)
oxygen uptake l/min				
80	3.05 (± 0.32)	2.80 (± 0.27)	3.00 (± 0.35)	2.96 (± 0.44)
60	2.27 (± 0.31)	2.16 (± 0.35)	2.16 (± 0.26)	2.23 (± 0.35)
40	1.88 (± 0.22)	1.95 (± 0.30)	1.83 (± 0.31)	1.84 (± 0.25)
pulmonary ventilation l/min				
80	106.0 (± 12.8)	93.7 (± 10.5)	110.3 (± 20.2)	101.2 (± 16.0)
60	75.3 (± 13.4)	71.7 (± 12.4)	71.3 (± 8.2)	72.0 (± 12.8)
40	63.4 (± 8.5)	62.0 (± 7.0)	62.6 (± 11.1)	59.8 (± 8.4)
rectal temperature °C				
80	38.3 (± 0.3)	39.1 (± 0.5)	38.8 (± 0.8)	38.9 (± 0.2)
60	38.1 (± 0.2)	37.9 (± 0.3)	38.1 (± 0.2)	38.1 (± 0.2)
40	37.9 (± 0.4)	37.8 (± 0.3)	37.9 (± 0.2)	37.6 (± 0.4)
mean skin temperature °C				
80	37.2 (± 0.6)	36.6 (± 0.6)	35.4 (± 0.7)	36.1 (± 0.1)
60	35.6 (± 0.2)	36.3 (± 0.2)	35.8 (± 0.6)	36.1 (± 0.7)
40	35.8 (± 0.5)	36.1 (± 0.3)	35.3 (± 0.4)	35.6 (± 0.3)
weight loss gm/m ² .30 min				
80	433 (± 71)	546 (± 74)	534 (± 120)	498 (± 105)
60	427 (± 129)	377 (± 76)	307 (± 124)	319 (± 150)
40	320 (± 53)	334 (± 160)	256 (± 17)	239 (± 70)

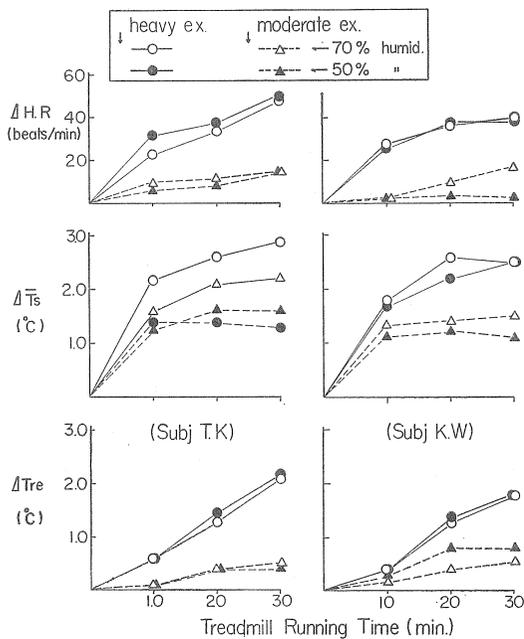
図一2は2名の被検者(W.G., M.T.)が30分間走行した際の直腸温, 心拍数, 酸素摂取量の変化を示したものである。実験条件は, 運動強度40, 60, 80% $\dot{V}O_2$ max の三条件, 湿度80, 50%の二条件のものである。直腸温は運動開始とともに漸増しており, その傾向は運動強度の高い時ほど増加も著しい。心拍数も同様に, 運動強度に見合って漸増し定常状態に達する。

一方, 湿度変化による影響については, 被検者M.T. では直腸温, 心拍数, 酸素摂取量は湿度80%と50%の場合において, ほぼ同一水準を示している。これに対して, 被検者W.G. では, 高湿条件下の方がわずかに各パラメーターとも高い値を示している。特に, 60% $\dot{V}O_2$ max の負荷条件での心拍数, 及び80% $\dot{V}O_2$ max 負荷時での直腸温, 心拍数は, 低湿下に比べ高湿度下の方が明らかに高い値を示している。

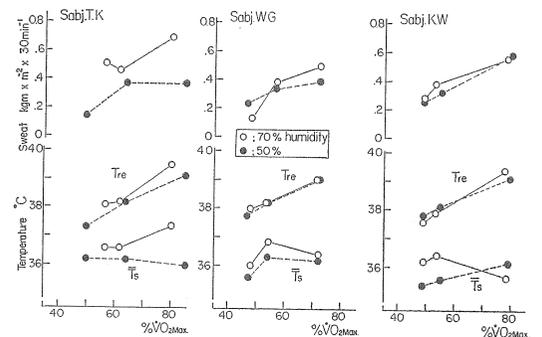
本実験条件下では, 運動中の生体反応は相対的運動強度(% $\dot{V}O_2$ max)に依存しているが, 湿度の変化による明白な影響はみられなかった(表2並びに図一1)。しかしながら, 図一2にもみられるように, 被検者によっては湿度の変化によって各パラメーターがわずかに影響を受けている傾向がうかがわれた。その典型的な例を図一3に示した。これは, 被検者T.K.と被検者K.W.について, 走行中の心拍数, 平均皮膚温, 直腸温の変化を湿度70%と50%, 負荷条件80% $\dot{V}O_2$ maxと50% $\dot{V}O_2$ maxについて表わしたものである。各々の値は走行開始時の値を基準にし, その変化量で示した。両被検者とも, 心拍数, 直腸温は湿度の変化に関わりなく増加しているが, 平均皮膚温では被検者T.K.と被検者K.W.の間に明らかな相違が認められる。すなわち, 被検者K.W.では低負荷時に比べ高負荷時により高い平均皮膚



図一 2 30分間トレッドミル走行中の生理的变化。被検者W. G., 被検者M. T.について、運動強度80%, 60%, 40% $\dot{V}O_2$ max で、相対湿度80%と50%の条件下における生理的变化。



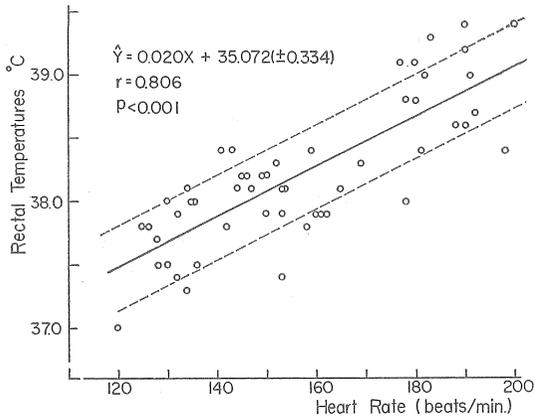
図一 3 30分間走行中の心拍数、直腸温、平均皮膚温の変化。それぞれの値は、走行開始時の値からの変化量で示した。



図一 4 直腸温、平均皮膚温、発汗量と運動強度($\% \dot{V}O_2$ max)との関係

温を示す傾向がみられるものの、温度による影響は著明ではない。これに対して、被検者 T.K. においては高負荷時、低負荷時いずれにおいても湿度の高い場合程、平均皮膚温も高い値を示していた。

図一 4 は、図一 3 において湿度変化による影響がみられた被検者 T. K. と他の被検者 2 名 (W. G., K.W.) とを比較する上で、高湿度下 (70%)



図一五 直腸温と心拍数との関係

と中等湿度下(50%)での運動中の直腸温, 平均皮膚温, 体重減からみた総発汗量と, $\% \dot{V}O_2 \text{ max}$ との関係を表わしたものである。表2, 図一1においてみられたように, 直腸温は環境湿度に関わりなく, 運動強度に依存しているが, この傾向は図一4においても明らかである。しかしながら, 平均皮膚温・総発汗量については, 被検者 T.K. と他の被検者2名との間には明らかな差異が認められる。被検者 W.G. 並びに K.W. では, 総発汗量は運動強度に比例して変化しているが, 湿度変化による影響はみられない。平均皮膚温については, 運動強度及び湿度変化との間には一定傾向がみられていない。これに対して, 被検者 T.K. の平均皮膚温は, 同一運動強度においては湿度の高い場合ほど高い値を示している。また, その傾向は運動強度の強い場合ほど著しい。このことは, 直腸温が運動強度と比例して変化するところから, 高湿度になるほどまた運動強度の高い場合ほど直腸温と平均皮膚温との間の温度勾配も小さくなっている。また, 総発汗量も, 高湿度下の場合により高い値を示している。

考 察

運動中の体温調節機構については, 未だに十分解明されているとは言えない。その中で, 運動時の体温は安静時のそれより一段高い値を示すことは, 良く知られた事実である。この運動時の体温上昇は, 一般に体内の生理過程が促進されるのにより有利に働くからだ(Q₁₀法則)と説明されてい

る。

Nielsen⁷⁾によれば, この運動中の体温上昇は運動強度に依存するものであり, 外気温に対しては広い範囲にわたって独立の関係にある, と述べている。Saltin¹¹⁾らもこの知見に基づき, 運動中の体温は個人の最大有酸素性作業能力を基準にした相対的作業負荷量($\% \dot{V}O_2 \text{ max}$)に依存していると述べている。

Nielsen⁶⁾らの実験では, 外気温は5~30℃の範囲で変化させている。本実験では, 外気温は30℃に固定し, 相対湿度を変化させることにより, その影響をみた。その結果, 運動中の体温(直腸温), 心拍数, 酸素摂取量は相対的運動強度($\% \dot{V}O_2 \text{ max}$)に依存するものであり, 湿度の変化(50%~80%相対湿度)による著明な影響はみられなかった。(図一1を参照)このことは, Nielsen⁷⁾が外気温を変化させて行なった実験結果と類似している。

次に, 心拍数と直腸温の関係についても, 本実験の条件範囲内では直線関係がみられている。図一5は, 本実験中の運動終了時(30分間走行不能の場合にはその時点での)の直腸温と心拍数について, すべての条件下のものをプロットしたものである。直腸温と心拍数は有意な相関関係にあり(相関係数: 0.806, $p < 0.001$), 直腸温 = $0.020 \times$ 心拍数 + 35,072 (± 0.334) の回帰方程式が導かれる。直腸温と心拍数の直線関係については, 多くの報告者が異なる気象条件下において, 直線関係を認めている。Pirnay²⁾は, 乾球温46℃, 湿球温度35℃の条件下での30分間作業($\dot{V}O_2 = 1 \ell$)で0.035の回帰係数をみている。Kamon²⁾らは一定外気温, 36~37℃, 異なる湿度条件下($P_a = 13 \sim 40 \text{ mmHg}$)で, 回帰係数0.029を示している。本実験結果もかなり近い値を示し, 心拍数変化は体温の変動をよく反映しており, 外気温湿度条件に影響を受けないと考えられよう。

一方, 極端な環境条件下での身体運動は, 運動継続不能となる。すでに, 我々は外気温40℃の環境条件下での運動中の心拍出量の減少を観察しており, これは皮膚血流量の増加による心拍出量の配分比の変化, 環流血流量の減少と結びつき, 結局活動筋群への酸素供給不足から作業持続不能に

なることをみている⁴⁾。

温熱条件の内、湿度の上昇も高温になる程、運動中の生体に与える影響は大きくなるだろう。本実験での温度条件30℃においても外気温が皮膚温に接近していることから、体熱放散の大部分は蒸散性冷却に依存していると考えられる。その際、外気の湿度が上昇すれば当然皮膚からの水分蒸発は制限され、体熱放散に不利に働くと思われる。

実際、前回の第一報⁵⁾においても、明らかに湿度の変化が maximal exercise の Pertormane time に影響を与えていた。また桐原³⁾の実験においても、湿度の上昇によってタイプ作業の能率が低下していることが認められている。本実験においても、80% $\dot{V}O_2$ max 負荷時で、相対湿度80%の条件下では、5名中3名の被検者が15~25分で走行不能となっている。

このように、高温下での身体運動時において、湿度の上昇は明らかに作業能の低下をもたらしている。この作業能の低下の機序については、本実験結果からは明白な結論を出すには至らないが、湿度の上昇によって蒸発性冷却による熱放散能の低下が原因していることは、十分考えられよう。

蒸発による熱放散率を知る手掛りとして、皮膚温が考えられる⁷⁾。皮膚は、体内からの熱運搬を生じさせるためにその温度を中心部より低く保つ必要がある。外気温が高くなれば汗の分泌と蒸発によって、皮膚での蒸発性冷却を増進させなければならぬ。図-3、図-4に示された被検者 T.K. は、高湿の場合ほど皮膚温の増加が著しく、また温度勾配 (Tre-Ts) は減少することになる。このことは、蒸発性冷却がそこなわれていることを意味していると推察される。本実験条件、乾球温度30℃相対湿度80%は Winslow¹²⁾ の述べる蒸発調節の上限界に位置するものである。この条件下で5名中3名の被検者が走行不能になったのも、蒸発調節能が適応しきれない結果であると考えられる。

しかし、この上限域においても、個人の発汗能力が大きく関与する。Elchna¹⁾らによれば、高温低湿下での作業を毎日くり返し順化させると、発汗量は増大し、Tsは低下し、温度勾配(Tre-Ts)が増加し、また皮下血流量は低下する。このこと

から、トレーニングによって、蒸発性冷却能を向上させ循環器系への負担を軽減させる可能性のあることを示している。

本実験の被検者は高度に鍛練された競技者であり、蒸発性冷却能にも優れていたのではないだろうか。それ故、30℃の高温下での身体運動において、湿度の変化は生体反応に著明な影響を与えていない。しかし、被検者 T.K. の示すような反応は、実験条件を更に過酷にしたとき、湿度変化が影響してくることを暗示するものであろう。

また体温の定常状態に達するには40~60分必要であるという Niel-sen⁷⁾ の見解を考慮すれば、本実験の運動時間30分は、短かすぎたとも考えられる。高温多湿下での長時間運動に湿度変化がどのように影響するのか今後さらに検討する必要がある。

ま と め

1. 各種の運動強度による最大下運動を行なった際、湿度条件が運動強度と関連して、生体にどのような影響を与えているのかを検討した。
2. 被検者には大学長距離選手5名を選んだ。環境条件は、温度30℃に固定し湿度を50~80%に変化させた。運動強度は、40, 60, 80% $\dot{V}O_2$ max の3条件を設定し、運動時間は30分間とした。
3. 運動終了時の直腸温、心拍数、酸素摂取量は運動強度に比例し、湿度の変化による影響はみられなかった。
4. 被検者によって、湿度条件の相違による生体反応に差のみられる例があった。すなわち、湿度80%、運動強度80% $\dot{V}O_2$ max の条件下で、3名の被検者が30分走行が不能になった。その際の心拍数は直腸温は高湿の場合ほど最高値に到達する時間が早くなっていた。また1名の被検者では、高湿の場合ほど皮膚温の増加が著しく、体内部と皮膚との温度勾配は減少していた。これらのことは、湿度の上昇によって皮膚での蒸散性冷却が制限されていることに起因していると考えられる。

文 献

- 1) Eichna, et al. : Thermal regulation during acclimatization to hot, dry environment, *Am. J. Physiol.* 163 : 585, 1950.
- 2) Kamon, E. and Belding. H.S. : Heart rate and rectal temperature relationships during work in hot humid environments. *J. appl. Physiol.* 31 (3), 472, 1972.
- 3) 桐原 稔見 : 種々の大気条件に於けるタイプライティング作業の実験的研究 (温度及び湿度の身体的精神的機能に及ぼす影響, 第5回報告), *労働科学研究*, 5 (2) 281, 1928.
- 4) 黒田 善雄, 他 : 環境温度と持久性運動に関する研究, 第4報, 環境温度が最大下作業中の循環機能に及ぼす影響, 昭和48年度日本体育協会スポーツ科学研究報告 No. VII.
- 5) 黒田 善雄, 他 : 環境湿度と持久性運動に関する研究, 第1報, 温度の Performanceへの影響について, 昭和48年度日本体育協会スポーツ科学研究報告
- 6) Nielsen. M. : Heat production and body temperature during rest and work. in "Physiological and behavioral temperature regulation", edited by Tomas D. Hardy et al. Charles C. Thomas ct. chapter 14. 205-214. 1970.
- 7) 中山昭雄 : 体温とその調節, 中外医学双書 1970.
- 8) Ramanathan, N.L. : A new weighting system for mean surface temperature of human body. *J. appl. Physiol.* 19. 531, 1964.
- 9) Robinson S. and D.L. Wiegman : Heat and humidity in "Environmental Physiology" edited by N.B. Slonim. the C.V. Mosby company. 1974.
- 10) Saltin. B. and L. Hermansen. Esophageal, rectal, and muscle temperature during exercise. *J. Appl. Physiol.* 21 (6), 1757. 1966.
- 11) Winslow. C.E.A. and L.P. Herrington : 温度と人間一温熱の生理衛生学—北博正, 竹村望共訳, 医歯薬出版 1966.

