

博 士 論 文

運動時の発汗調節における  
中枢機構と末梢機構の関与

筑波大学大学院 体育科学研究科

山 崎 文 夫

①

(博士論文)

運動時の発汗調節における  
中枢機構と末梢機構の関与

筑波大学大学院 体育科学研究科

山崎 文夫

(平成3年度編入学)

指導教官

池上 晴夫

## 目次

### 略語と記号

|                        |    |
|------------------------|----|
| I 章 . 緒言               | 1  |
| II 章 . 文献研究            | 3  |
| 1. 汗の拍出特性              | 3  |
| 2. 運動時の発汗反応            | 5  |
| (1) 運動開始時の発汗           | 5  |
| (2) 運動中の発汗             | 7  |
| (3) 運動終了後の発汗           | 10 |
| 3. 発汗機能に及ぼす運動トレーニングの影響 | 11 |
| (1) 運動負荷中の発汗について       | 11 |
| (2) 安静温熱負荷中の発汗について     | 12 |
| III 章 . 研究の目的および       |    |
| 研究課題                   | 14 |
| IV 章 . 非定常状態における       |    |
| 運動時の直腸温と発汗量            |    |
| の関係 (実験 I)             | 16 |
| 1. 目的                  | 16 |
| 2. 方法                  | 17 |

|       |    |
|-------|----|
| 3. 結果 | 20 |
| 4. 考察 | 33 |
| 5. 要約 | 37 |

## V 章. 非定常状態における

### 運動時の食道温と発汗量

#### の関係 (実験 II)

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1. 目的               | 39 |
| 2. 方法               | 39 |
| 3. 結果               | 41 |
| 4. 考察               | 49 |
| (1) 運動中の深部体温と発汗量の関係 | 49 |
| (2) 運動初期の発汗量の変化     | 52 |
| 5. 要約               | 53 |

## VI 章. 食道温と発汗量の関係

### からみた運動強度と発汗反

#### 応の関係 (実験 III)

|       |    |
|-------|----|
| 1. 目的 | 55 |
| 2. 方法 | 55 |
| 3. 結果 | 57 |
| 4. 考察 | 68 |
| 5. 要約 | 76 |

## VII 章. 運動中の発汗波記録法

|             |    |
|-------------|----|
| の改善 (実験 IV) | 78 |
| 1. 目的       | 78 |
| 2. 方法       | 78 |
| 3. 試行       | 81 |
| 4. 要約       | 84 |

VIII 章. 食道温と発汗量の関係  
からみた運動時と回復時の  
発汗反応の比較 (実験 V)

|       |     |
|-------|-----|
|       | 86  |
| 1. 目的 | 86  |
| 2. 方法 | 87  |
| 3. 結果 | 89  |
| 4. 考察 | 95  |
| 5. 要約 | 100 |

IX 章. 正弦波状運動負荷に  
対する体温と発汗量の応  
答 (実験 VI)

|       |     |
|-------|-----|
|       | 102 |
| 1. 目的 | 102 |
| 2. 方法 | 103 |
| 3. 結果 | 108 |
| 4. 考察 | 113 |
| 5. 要約 | 118 |

|   |     |
|---|-----|
| X 章 . 運動鍛錬が一定運動<br>負荷時の発汗反応に及ぼ<br>す影響 (実験 VII)        | 120 |
| 1. 目的   | 120 |
| 2. 方法   | 120 |
| 3. 結果   | 123 |
| 4. 考察   | 128 |
| 5. 要約   | 135 |
| X I 章 . 運動鍛錬が正弦波状<br>運動負荷に対する発汗応答<br>に及ぼす影響 (実験 VIII) | 137 |
| 1. 目的   | 137 |
| 2. 方法   | 138 |
| 3. 結果   | 141 |
| 4. 考察   | 148 |
| 5. 要約   | 152 |
| X II 章 . 総括   | 154 |
| X III 章 . 結論  | 161 |
| 謝辞  | 162 |
| 参考文献  | 163 |

## 略語と記号

本研究で用いる主要な略語と記号は以下の通りである。

- $d\bar{T}_{sk}/dt$  : rate of change in mean skin temperature ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )  
平均皮膚温の変化率
- $F_{sw}$  : frequency of sweat expulsion (sweat expulsions/min)  
汗の拍出頻度
- HR : heart rate (beats/min)  
心拍数
- $\dot{m}_{sw}$  : local sweat rate ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ )  
局所発汗量
- $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$  : chest sweat rate ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ )  
胸部発汗量
- $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$  : forearm sweat rate ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ )  
前腕部発汗量
- $\dot{m}_{sw}(\text{palm})$  : palmar sweat rate ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ )  
手掌部発汗量
- RH : relative humidity (%)  
相対湿度

- $T_{arm}$  : forearm skin temperature ( $^{\circ}C$ )  
前腕部皮膚温
- $\bar{T}_b$  : mean body temperature ( $^{\circ}C$ )  
平均体温
- $\bar{T}_{be}$  : mean body temperature ( $^{\circ}C$ )  
食道温と平均皮膚温から算出した平均体温
- $\bar{T}_{br}$  : mean body temperature ( $^{\circ}C$ )  
直腸温と平均皮膚温から算出した平均体温
- $T_{es}$  : esophageal temperature ( $^{\circ}C$ )  
食道温
- $T_{N_2}$  : nitrogen gas temperature ( $^{\circ}C$ )  
窒素ガス温度
- $T_{re}$  : rectal temperature ( $^{\circ}C$ )  
直腸温
- $\bar{T}_{sk}$  : mean skin temperature ( $^{\circ}C$ )  
平均皮膚温
- $\dot{V}O_{2max}$  : maximal oxygen consumption (l/min, ml/min/kg)  
最大酸素摂取量



この論文は次の原著論文に、未発表の実験結果を加えてまとめられている。

1. 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。  
山崎 文夫, 近藤 徳彦, 池上 晴夫, 日生氣誌, 28, 95-106, 1991.
2. 運動時の体温, 前腕発汗量及び前腕皮膚血流の関係. 山崎 文夫,  
曾根 涼子, 池上 晴夫, 日生氣誌, 29, 49-55, 1992.
3. An improved method for measurement of sweat expulsions  
during profuse sweating. Yamazaki, F., Sone, R., Fujii, N.,  
Homma, S. and Ikegami, H., Jpn. J. Physiol., 42, 991-996,  
1992.
4. 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,  
権 五晟, 曾根 涼子, 鍋倉 賢治, 池上 晴夫, 体育学研究, 37,  
351-364, 1993.
5. A comparison of sweating responses during exercise and  
recovery in terms of sweating rate and body temperature.  
Yamazaki, F., Sone, R., Fujii, N. and Ikegami, H., Int.  
J. Biometeorol., 1993. (in press)

## I 章 . 緒 言

身体運動に伴う熱産生は体温を上昇させるが、過度の上昇は運動のパフォーマンスを低下させ、時には生体にとって危険なこともある。しかし、実際には体温調節反応が発動され、体温上昇が極端にならないようにコントロールされている。すなわち、筋活動によって生じた熱は血流によって身体中枢部に運ばれ、その結果深部体温が上昇すると皮膚血流量が増加し、皮膚温を上昇させ、輻射、対流、伝導などの物理的機序により体外に放散される。さらに体表面に分布する汗腺から汗が分泌され、蒸発による熱放散が起こる。これらの熱放散機構は環境条件の影響を受け、低温環境下では輻射、対流、伝導による熱放散が主役を演じるが、気温が30℃を超えるような高温環境下では蒸発による熱放散が促進されるため、体温調節には発汗が特に重要な因子となる(Hardy and DuBois, 1937a ; Hardy and Soderstrom, 1938 ; Nielsen, 1938)。

運動時の発汗調節系には深部体温が最も重要な入力因子となる(Robinson, 1949)。運動時の深部体温は運動強度に比例して上昇し、中程度の運動ならば運動開始後数10分で定常状態に達する(Nielsen, 1938)。深部体温が安定している条件下では、深部体温と発汗量の関係は直線的になることが多くの研究で認められている(Benzinger, 1969 ; Nadel et al., 1971a ; Nadel et al., 1971b ; Nielsen and Nielsen, 1965 ; Robinson, 1949)。一方、深部体温が変化しつつある非定常状態では、深部体温と発汗量の関係が直線的であるとする報告(Chappuis et al., 1976 ; Johnson and Park, 1981)とそうでないとする報告(Tam et al., 1978 ; 近藤ら, 1988)とがあり、一致した見解が得られていない。さらに

非定常状態における両者の関係が運動強度の違いによって異なるか否かについても明らかでない。身体運動は生体に対して温熱負荷として作用する一方で、様々な非温熱性の影響(例えば、精神的興奮、筋感覚刺激、運動中枢活動の高進など)をもたらす。したがって運動時の発汗調節には深部体温や皮膚温のような温熱性要因だけでなく、運動に関係した非温熱性要因が関与し、発汗量を変化させることが予測される。

発汗量の調節には発汗中枢機構と末梢機構(すなわち汗腺)の二つが関与している。小川(1986)によれば、汗の拍出頻度を平均体温に対してプロットして得られる回帰直線は発汗中枢機構の反応性を表し、発汗量を汗の拍出頻度に対してプロットして得られる回帰直線は中枢性発汗衝撃に対する末梢機構の反応性を示すとされている。したがってこの方法を用いれば、発汗量が増加した場合にそれが中枢機構の反応性の変化によるのか、それとも末梢機構の反応性の変化によるのかを明らかにすることが可能であると考えられる。

実際のスポーツ場面においては体温調節反応は必ずしも定常的であるとは限らず、むしろ時間とともに変化することが多い。したがって、定常状態における発汗調節だけでなく、非定常状態におけるそれを研究することは体育科学にとって意義のあることであると考えられる。そこで本研究では、運動時の発汗調節について、汗の拍出頻度の特性をもとにして中枢機構と末梢機構の両面から詳細に検討することにした。

## II 章 . 文 献 研 究

### 1 . 汗 の 拍 出 特 性

汗は汗腺から皮膚表面に持続的に流出するのではなく、拍動状に噴出する(Albert and Palmes,1951 ; Nakayama and Takagi,1959 ; Bullard, 1962 ; Custance,1962)(図1参照)。そして、その拍出は一般体表面ではどこでも同期して起こることが認められている(Albert and Palmes, 1951 ; Takagi et al.,1966 ; Van Beaumont,1969)。Ogawa and Bullard(1972)は汗の同期性拍出が皮膚神経ブロックによって消失することから、体温調節中枢機構に由来する発汗神経衝撃を反映するものであることを示した。近年、microneurography法を用いた皮膚交感神経活動の記録によって、個々の汗の拍出波に対応する発汗神経性のバーストが認められ、汗の拍出頻度と発汗中枢活動との関係が直接的に検証された(Sugenoya et al.,1990)。また、汗の拍出頻度は深部体温や平均体温と直線関係にあり(Sugenoya and Ogawa,1985)、発汗量とも高い相関を示す(Ogawa and Bullard,1971)。小川(1986)によると、汗の拍出頻度を平均体温に対してプロットして得られる回帰直線の勾配の変化は発汗中枢機構の感受性の変化を示し、その位置の移動は発汗中枢機構の活動性の変化を表すとされている。一方、発汗量を汗の拍出頻度に対してプロットして得られる回帰直線の勾配の変化は、中枢性発汗衝撃に対する末梢機能の感受性の変化を示し、その位置の移動は末梢機能の活動性の変化とみなされている。したがって、この方法を用いれば発汗反応を中枢と末梢の二つの要因に分けて検討することが可能である。つまり、発汗反

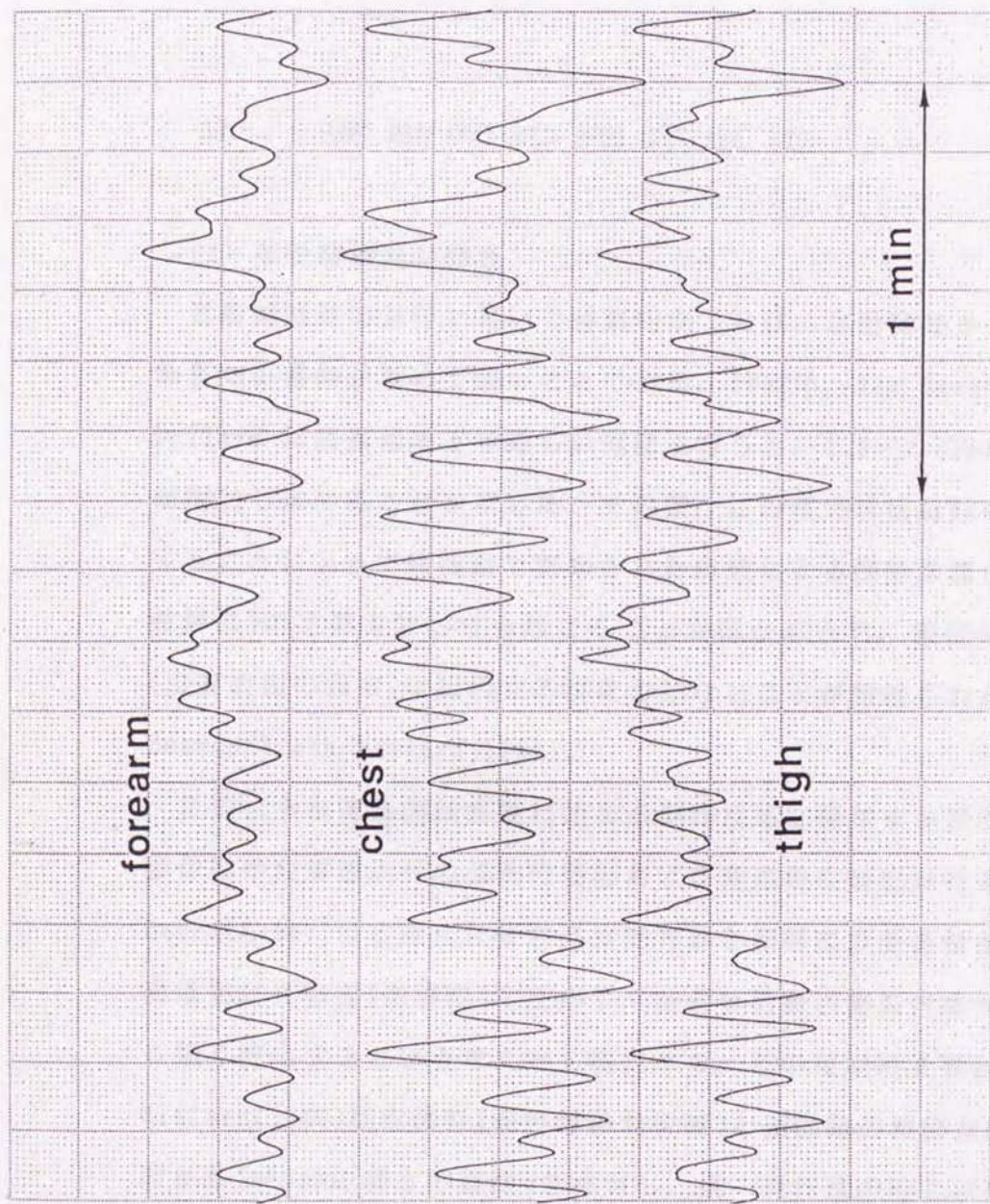


Fig.1. An example of the recorded traces of sweat expulsions during exercise (360kpm/min) under ambient temperature of 30°C.

応に変化があった場合、それは発汗中枢機構の感受性ないし活動性の変化によるのか、それとも末梢機能の感受性ないし活動性の変化によるのかを鑑別することができる。

## 2. 運動時の発汗反応

### (1) 運動開始時の発汗

運動開始時の発汗において特異的なことは、運動開始から発汗反応開始までの潜時が極めて短いことである。1963年、Van Beaumont and Bullard は高温環境下で激しい運動を行うと、1.5~2.0秒以内に発汗量が増加し始めることを示した。その後、この反応は活動肢の血行を阻止することによって筋活動で温められた血液による深部体温(直腸温および鼓膜温)の上昇を防いでも起こることが確かめられ、深部体温や皮膚温(皮膚表面の温度)に起因する現象ではないことが報告された(Van Beaumont and Bullard, 1966)。

このような運動開始直後に始まる発汗反応に関与する要因として、深部体温や皮膚温以外の温熱性要因および非温熱性要因が考えられる。Bazett(1951)は皮膚には表在温度受容器と深部温度受容器が存在し、前者は主に外部温(環境温)に反応し、後者は活動筋等の内部からの熱により強く反応するという考え方を発表した。この可能性を検討するため、Nielsen(1969)は安静時(安静温熱負荷時)と運動時の深部皮膚温(皮膚表面から1~6mmの深さの温度)を測定し、同一発汗量の時には両条件の深部皮膚温が等しいと報告した。運動を開始すると筋温や静脈血温が急上昇することから、その他の温熱性要因として筋温と静脈温の関与が考えら

れる(Gisolphi and Robinson,1970 ; Meyer et al.,1962 ; Robinson et al.,1965 ; Saltin and Hermansen,1966 ; Saltin et al.,1968 ; Stolwijk and Hardy,1966)。しかし, Nielsen and Nielsen(1965b)はジアテルミーによる加温実験を行った結果, 安静時の直腸温と運動時のそれとを同程度にすると両者の発汗量は同じであることを報告した。また, 腕運動と脚運動における発汗量を比較し, 同代謝量では腕運動時の方が筋温が高いと考えられるのに, 発汗量は脚運動時と同じであった(Nielsen,1968)。さらに, Nielsen(1969)は運動時の発汗量が産熱量によく相関し, 筋温には無関係であることを報告した。Saltin et al.(1970)も運動中の発汗量の変化が筋温の変化に対応しないことを観察している。運動時の発汗反応に筋温や静脈温が影響しないとは断定できないが, 現在までのところ, 筋内や静脈内に温度受容器が存在する確証は得られていない。

運動開始時の発汗に関与する非温熱性要因の一つとして, Asmussen and Nielsen(1947)は筋運動が筋や関節の機械受容器を介して発汗に影響する可能性があることを示した。これに対してRobinson(1962)は四肢の受動的運動をさせた場合に, 発汗量が代謝量あるいは温熱性変化に見合う量以上には変化しないことを報告した。

また, 筋活動に関与する運動中枢からの下行性神経活動(central motor command)が, 体温調節中枢(視床下部)に関与していることも考えられる(Robinson,1949 ; Van Beaumont and Bullard,1966 ; 大西,1991)。これに関して, Kitzing and Bleichert(1965)は, 神経筋接合部をクラレで部分的に遮断した被検者に, 遮断前と同程度の仕事量をするように努めさせた。そして, 遮断後の方が運動中枢の活動は高まっていると考えられるのに運動中の食道温の変化は運動強度に比例していると報告し

た。しかしこの場合、発汗量の変化に対して運動中枢活動が関与するかどうかは明らかでない。大西(1991)はクラーレによって局所の筋を麻痺させたり、緊張性振動反射(tonic vibration reflex)を用いることによって一定強度の運動努力を増減させると、それに対応して発汗量が増減することを認め、運動時の発汗活動にcentral motor commandが関与していることを示唆した。

発汗反応が運動開始時に迅速に起こる場合には、運動開始に伴う精神興奮が関与する可能性も考えられる(Nakayama,1969 ; Ogawa,1975)。宮側ら(1985)は運動負荷急変に対する発汗反応を検討し、負荷急増時に手掌部の発汗(精神性発汗)の一過性の増加と共に、一般体表面での発汗も速やかに起こることを報告した。

また、Stolwijk and Nadel(1973)は運動開始後18秒以内であれば発汗量の増加と心電図R-R間隔の短縮がよく似た関係にあることから、運動開始時の発汗量増加には部分的に交感神経活動の増大や副交感神経活動の減少が関与していることを報告した。

以上のように運動開始時の発汗にはまだ特定できないいくつかの要因が関与している可能性があると考えられる。

## (2) 運動中の発汗

運動時の深部体温は運動強度に比例して上昇し(Nielsen,1938)、強度が極端に高くない限り運動開始後数10分で定常状態に達する。したがって、運動中の発汗は深部体温が定常に達した場合と、それが変化している非定常状態の場合の二つに分けて検討することが可能である。

1949年、Robinsonは定常状態における運動時の深部体温(直腸温)と発汗量の間に関係があることを報告した。さらに、Benzinger(1969)は



安静時と運動時の発汗量が視床下部温の指標である鼓膜温と密接に関係することを示した。すなわち、安静時(安静温熱負荷時)にも、いろいろな運動の場合にも、鼓膜温と発汗量の関係は同一直線上に位置し、かつ皮膚温が33°C以下になるとそれが鼓膜温-発汗量の関係に影響することを認めた。しかし、その後33°C以上の皮膚温も発汗量に影響することが示されている(Nadel et al.,1971a ; Nadel et al.,1971b ; Stolwijk and Hardy,1966 ; Van Beaumont and Bullard,1965)。Nadel et al.(1971a)は定常状態での発汗量は平均皮膚温が33°C以上であっても、また運動時であっても安静時であっても、深部体温(食道温)と平均皮膚温を従属変数として表すことができ、平均皮膚温の上昇は食道温-発汗量関係の勾配を左方へ平行移動させることを認めた。一方で大西ら(1986a)は定常状態における運動時と安静時の発汗反応を比較した結果、いずれの場合にも平均体温( $=0.9 \times \text{鼓膜温} + 0.1 \times \text{平均皮膚温}$ )-発汗量関係は直線的になるが、運動時には安静時よりも同一体温における発汗量が多いことを報告した。Nielsen and Nielsen(1965a)は運動強度(540~1440kpm/min)と環境温(5~37.5°C)を種々に組み合わせることによって、直腸温、食道温、鼓膜温および平均皮膚温と発汗量との関係を検討した。その結果、同一環境下で運動強度を変化させると、発汗量は深部体温の上昇に伴って変化し、運動強度を一定にして環境温を上昇させると、発汗量も環境温および平均皮膚温の上昇に伴って増加することを示した。

Johnson et al.(1984)は食道温を一定に保った状態(約37.3°C)で、運動時の発汗調節に及ぼす平均皮膚温の影響を検討した。その結果、平均皮膚温の上昇に伴って発汗量は増大するが、平均皮膚温が33°C以上になると発汗量の増加率が低下することを認めた。このような知見から皮膚温のレベルによって発汗反応に及ぼす影響の度合いが異なると考えられる

が、皮膚温に対する発汗中枢の感受性が変化するのか、それとも汗腺への直接的影響が変化するのは明らかではない。

一方、非定常状態においては深部体温と発汗量の関係は直線的であるとする報告(Chappis et al.,1976 ; Johnson and Park,1981 ; Nadel et al.,1971c ; Saltin and Gagge,1971 ; Saltin et al.,1972)と、そうではないとする報告(Tam et al.,1978 ; 近藤ら,1988)がある。Saltin et al.(1972)は種々の環境下(10~40°C)で高強度(90~115%  $\dot{V}O_2$  max)の自転車運動を行った結果、運動開始3分目以降であれば、深部体温(食道温および直腸温)と発汗量は直線関係にあることを報告した。Johnson and Park(1981)は非定常状態における安静時と運動時の食道温-発汗量関係を検討し、平均皮膚温が一定(38.0~38.5°C)であれば両者の関係は直線的になり、安静時と運動時の発汗反応には差がないことを報告した。一方、近藤ら(1987)は非定常状態における安静時と運動時の発汗反応を比較し、いずれの場合にも発汗量は平均体温(=0.8×直腸温+0.2×平均皮膚温)と密接に関係しているが、同一体温で比較すると運動時の方が安静時よりも発汗量が多いことを報告した。Tam et al.(1978)は運動初期には発汗量が深部体温(外耳道温)に比して急増し、両者の関係が曲線的になることから、運動初期の発汗には深部体温以外の因子も関与していると推測した。

このように非定常状態における深部体温-発汗量関係には一致した見解が得られていない。この不一致の背景には、運動強度等の実験条件の違いが関与している可能性も考えられる。Saltin and Gagge(1971)は25%、50%、75%、90%および100%  $\dot{V}O_2$  maxの自転車運動を種々の環境下(10°C、20°C、30°Cおよび40°C)で行った結果、食道温-発汗量関係は運動強度が違っていてもあまり差がないことを示した。また、Chappuis et al.

(1976)は40Wと90Wの自転車運動を50分間ずつ続けた場合、平均体温( $=0.9 \times \text{鼓膜温} + 0.1 \times \text{平均皮膚温}$ )の変化に対する発汗量の増加率は運動強度には関係なく一定であることを報告した。しかし、この研究では40Wと90Wの運動を連続して行っているため、運動強度の違いについて検討するには問題がある。近藤ら(1988)は常温環境下(25°C)における運動時の直腸温-発汗量関係について検討したところ、両者の関係は勾配の異なる2本の直線で区分され、同一直腸温上で比較すると運動強度が強いほど発汗量が多いことを報告した。しかし、運動強度の違いによる発汗反応の差異が発汗中枢の反応性の差によるのか、末梢機構の反応性の差によるのかについては明らかでない。

以上のように、定常状態においても非定常状態においても運動時の発汗調節には不明な点が多く残されている。

### (3) 運動終了後の発汗

最大下運動終了後の発汗量は、深部体温や皮膚温の低下に先行して減少する(Saltin et al., 1970)。Saltin et al., (1970)は健常者に25%、50%および75%  $\dot{V}O_{2\max}$ の強度の最大下自転車運動を休息(30分間)を挟んでそれぞれ30分間ずつ行わせ、運動時および回復時の深部体温-発汗量関係を検討した。その結果、同一深部体温における回復時の発汗量は運動時のそれよりも少なく、そして運動時から回復時にかけて両者の関係は時計方向のループを描くように変化したと報告している。ところがSaltin et al.(1972)は、高強度の自転車運動によって疲労困憊に至った直後の発汗量減少が食道温低下よりも緩やかであることを観察している。

このように運動終了後の深部体温-発汗量関係は運動中のそれとは異なり、さらに最大下運動後と最大運動後の両者の関係も異なるようであ

る。しかしこのような運動時と回復時の発汗反応の相違の原因が中枢機構にあるのか、それとも末梢機構にあるのかは明らかでない。

### 3. 発汗機能に及ぼす運動トレーニングの影響

発汗機能は持久性トレーニングによって変容することが知られている。前述したように運動時の発汗調節と安静時(安静温熱負荷時)のそれとは異なる可能性があるから、トレーニングによる発汗機能の変容を検討する際には運動負荷中の発汗機能を評価しているのか、あるいは安静温熱負荷中の発汗機能を評価しているのかを区別しておく必要がある。

#### (1) 運動負荷中の発汗について

Piwonka et al.(1965)は、高温環境下(環境温:40°C, 相対湿度:25%)で一定強度の運動を行う場合、日頃持久性トレーニングを行っている者は行っていない者に比して運動時の直腸温や心拍数の上昇および発汗量が少ないが、直腸温の上昇に対する発汗量の増加度はトレーニングを行っている者の方が大きいことを報告した。また、環境温が39.8~50°Cの高温環境下(Allan.,1965 ; Nadel et al.,1974 ; Piwonka et al.,1967 ; Shvartz et al.,1972 ; Shvartz et al.,1973 ; Shvartz et al.,1977 ; Shvartz et al.,1979)あるいは環境温が21~22°Cの常温環境下(Choen and Gisolfi,1982 ; Gisolfi,1973 ; Gisolfi and Robinson,1969 ; Strydom and Williams,1969)で持久性トレーニングを行うと、高温環境下における一定強度運動中の深部体温上昇が小さくなり、発汗量

は増大し、さらに深部体温の上昇に対する発汗量の増加度も大きくなる  
ことが認められている。トレーニングによる発汗量の変化に関して  
Shvartz et al.(1979)は、四肢の発汗量の増大が躯幹部のそれより著し  
いことを報告している。

また、常温環境下(環境温:約20~25°C)で一定強度の運動を行う場合、  
高温または常温環境下で持久性トレーニングを行った者は運動時の直腸  
温上昇が小さくなり、発汗量も低下するが(Shvartz et al.,1974 ;  
Shvartz et al.,1977)、深部体温(直腸温あるいは食道温)の上昇に対す  
る発汗量の増加度は大きくなることが認められている(Nadel et al.,  
1974; Roberts et al.,1977 ; Shvartz et al.,1974)。

このように持久性トレーニングを行うと、高温環境および常温環境の  
いずれにおいても運動時の深部体温-発汗量関係からみた発汗反応は増  
大する。この発汗反応の増大は常温環境下でトレーニングを行った場合  
と高温環境下で行った場合とでは異なることが認められている(Nadel  
et al.,1974 ; Roberts et al.,1977)。Nadel et al.(1974)は食道温-  
発汗量関係を用いて、常温環境下(22°C)でトレーニングした場合と高温  
環境下(45°C)でトレーニングした場合(暑熱+トレーニング)の発汗反応  
の違いを検討した。その結果トレーニングだけの場合には食道温-発汗  
量関係の勾配が急になり、暑熱+トレーニングの場合には勾配はトレ  
ニングだけの場合と変わらないが、食道温-発汗量関係はトレーニング  
だけの場合より左方に平行移動することを認めた。この結果はその後の  
研究によっても認められている(Roberts et al.,1977)。

## (2) 安静温熱負荷中の発汗について

小林ら(1976)は、長距離ランナーと非鍛錬者を対象に高温暴露実験(室

温:45°C, 相対湿度:48%)を行い, 長距離ランナーは非鍛錬者と比較すると発汗量は同程度であったが, 直腸温の上昇に対する発汗量の増加度が大きいことを示した。山田ら(1978)は, 温暖な環境下(室温:30°C, 相対湿度:70%)における持久性トレーニングの前後で温熱負荷実験(室温:30°C, 相対湿度:70%の環境下で下肢温浴)を行い, トレーニングによって直腸温の上昇度が減少し, 発汗量は増大することを報告した。そしてその発汗量の増大は躯幹部よりも四肢部で顕著なため, 身体部位による発汗量の差が減少することを認めた。トレーニングによる安静温熱負荷時の発汗量の増大は, 寒冷下(0~7°C)および常温下(22°C)においてトレーニングを行った場合にも認められている(Bittel and Bugnet, 1980 ; 大西ら, 1986b)。

以上のように, 運動トレーニングによって深部体温-発汗量関係からみた運動時および安静時の発汗反応はより顕著になる。しかしこの変化が中枢機構に由来するのか, それとも末梢機構に由来するのかについては一致した見解が得られていない。また, これまで運動時の発汗機能を評価する際には, 一定運動負荷を用いて安静時からの体温上昇度や発汗増加量等が測定されてきた。しかし, 実際のスポーツ活動を考えると, 運動の強度は一定ではなく変動することが多く, また体温調節反応もそれに伴って変化している。したがって運動時の発汗機能を評価する場合には, 運動に対する発汗の過渡的な応答性を指標にして検討することも必要であると考えられるが, 現在までのところこの点に着目して行った研究はなく, 検討する余地が多く残されている。

### III 章 . 研究の目的および研究課題

本研究の目的は運動時の発汗調節における中枢機構と末梢機構の関与を明らかにすることである。そのために、上記の文献研究の結果に基づき、以下の研究課題を設定して8つの実験を行うことにした。

1. 運動中に多量に発汗する場合でも汗の拍出頻度を正確に計測するための方法を工夫する(実験Ⅳ)。
2. 非定常状態における運動時の深部体温と発汗量の関係は、直線的であるか否か、直線的でないとするればその変化は発汗中枢機構の変化によってもたらされるのか、それとも末梢機構の変化によってもたらされるのか、あるいはその両者によるのかを明らかにする(実験ⅠおよびⅡ)。
3. 深部体温と発汗量あるいは平均体温と発汗量の関係からみた運動時の発汗反応は、運動強度の違いによって異なるか否か、異なるとするれば発汗中枢の反応性の差によるのか、それとも末梢機構の反応性の差によるのかを明らかにする(実験ⅠおよびⅢ)。
4. 運動開始直後における発汗急増現象は発汗中枢の活動性の高進によるのか、それとも末梢機構の活動性の高進によるのかを明らかにする(実験Ⅱ)。

5. 深部体温と発汗量あるいは平均体温と発汗量の関係からみた運動時と運動終了後の回復時における発汗反応は異なるか否か, 異なるとすればその原因は中枢機構にあるのか, それとも末梢機構にあるのかを明らかにする(実験V)。

6. 正弦波状運動負荷法を用いて運動時の発汗調節に非温熱性要因が関与するか否かを明らかにする(実験VI)。

7. 深部体温と発汗量あるいは平均体温と発汗量の関係からみた運動時の発汗反応は鍛錬者と非鍛錬者とで異なるか否か, 異なるとすればその原因は中枢機構にあるのか, それとも末梢機構にあるのかを明らかにする(実験VII)。

8. 正弦波状運動負荷に対する発汗の動的応答性は鍛錬者と非鍛錬者とで異なるか否か, 異なるとすればどのように異なるのかを定量的に明らかにする(実験VIII)。



#### IV 章．非定常状態における運動時の 直腸温と発汗量の関係（実験 I）

##### 1．目的

定常状態における運動時の発汗量は深部体温と密接に関係し、両者の関係は直線的になることが報告されている(Chappuis et al.,1976 ; Johnson and Park,1981)。しかし、深部体温や皮膚温が変化しつつある非定常状態での両者の関係については明らかでない点が多い。

Chappuis et al.(1976)は鼓膜温と発汗量の間直線関係は環境温や運動強度の影響を受けないことを報告した。しかし、近藤ら(1988)は3種の強度の自転車運動を行った結果、運動強度が強いほど同一体温における発汗量が多いことを認めた。さらに、近藤らはいずれの強度においても直腸温( $T_{re}$ )—発汗量関係は $37.3^{\circ}\text{C}$ を境に勾配を異にする2本の回帰直線によって表され、 $T_{re}$ が $37.3^{\circ}\text{C}$ 以上になると回帰直線の勾配はそれ以下の $T_{re}$ の勾配より緩やかになることを観察した。このことは $37.3^{\circ}\text{C}$ の $T_{re}$ を breaking pointとして発汗調節系に何らかの変化が起こったことを示唆している。発汗調節には発汗中枢機構と汗腺という末梢機構の二つが関与しているから、このようなbreaking pointの存在は、発汗中枢かあるいは末梢の機能的変化に基づくものであろうが、そのいずれであるかは明らかでない。

そこで本実験では、非定常状態における深部体温と発汗量の関係に breaking pointが存在するか否かを確認し、もしbreaking pointが存在するならば、それは中枢性のものか、末梢性のものか、あるいはその両

者によるのかを明らかにすることを目的とした。さらに、運動強度が発汗中枢の活動性および末梢機能の活動性といかなる関係を有するのかについても検討を加えることにした。

## 2. 方法

### (1) 被検者

被検者は日頃定期的に運動を行っている健康な男子大学生6名であった。その年齢、体重および身長の平均値±標準偏差(SD)は、それぞれ21.2±1.1歳、69.9±2.8kgおよび176.6±7.2cmであった。

### (2) 運動条件および環境条件

環境制御室(精度:室温±0.5°C, 相対湿度±10%, 気流:0.3m/sec以下, 室内容積:4.75m<sup>3</sup>)の中で、自転車運動(モナーク社 829E)を用いて、500kpm/min, 700kpm/minおよび900kpm/minの3種類の運動を、それぞれ別の日に各40分間行った。実験と実験の間には少なくとも1日以上の間隔を挿入した。環境条件はいずれの場合にも室温が25.0±0.3°C, 相対湿度が45±5%であった。

### (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を着用し、まず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40分間保持した。その間に熱電対、発汗カプセル、心電図用電極を装着した。次いで、自転車エルゴメーター上で安静状態の測定

を5分間行った後、(2)項で示した条件で実験を開始した。

#### (4) 測定項目および方法

直腸温( $T_{re}$ )はビニールチューブで補強した熱電対を直腸内に約10cm挿入して測定し、皮膚温は胸部、上腕部、大腿部および下腿部の4ヶ所に熱電対を貼付して測定し、ともにハイブリッドレコーダー(横河電機社 3087)で記録した。さらに、その出力をデジタル信号に変換し、マイクロコンピューター(日本電気社 PC-9801RX)によって連続的に平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ )および平均体温( $\bar{T}_b$ )を算出した。その際、 $\bar{T}_{sk}$ および $\bar{T}_b$ の算出には次式を用いた。

$$\bar{T}_{sk} = 0.3 \times \text{胸部皮膚温} + 0.3 \times \text{上腕部皮膚温} + 0.2 \times \text{大腿部皮膚温} \\ + 0.2 \times \text{下腿部皮膚温} \quad (\text{Ramanathan, 1964})$$

$$\bar{T}_b = 0.8 \times T_{re} + 0.2 \times \bar{T}_{sk} \quad (\text{Hardy and DuBois, 1937b})$$

局所発汗量( $\dot{m}_{sw}$ )は換気カプセル法によって測定した(図2)。測定部位は左前腕屈側中央部とし、汗の拍出頻度( $F_{sw}$ )の同期性を確認するために、右前腕屈側部中央部にも同様の発汗カプセルを装着した。 $\dot{m}_{sw}$ および $F_{sw}$ 測定用のカプセルの断面積は $10.0\text{cm}^2$ であり、これに $2.0\text{l/min}$ の乾燥窒素ガスを流し、それぞれのカプセル内から流出する窒素ガスの湿度を静電容量湿度計(Vaisala社 HMP113YおよびHMT110)を介してペンレコーダーによって連続記録した。また、両湿度計の出力をA/D変換し(サンプル間隔: $0.5\text{sec}$ )、マイクロコンピューター(SORD社 M343SX)を用いて1分毎の $\dot{m}_{sw}$ を算出した。 $F_{sw}$ はペンレコーダーによる発汗波の記録から1分毎に読みとった。心拍数(HR)は、胸部双極誘導( $CM_5$ )による心電図から求めた。また、総発汗量の指標として、体重減少量を実験前後の体重差(精度: $\pm 20\text{g}$ )から算出した。

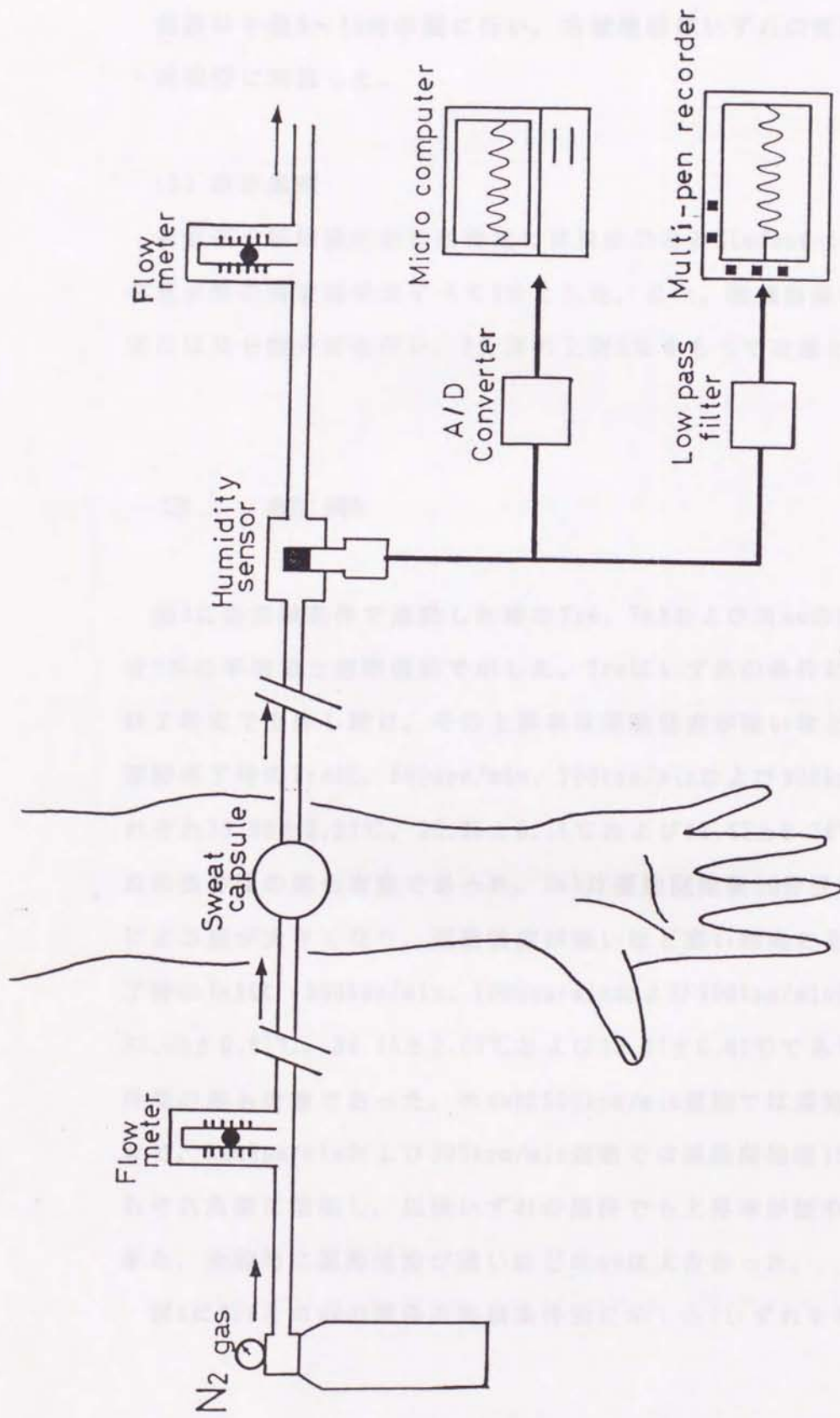


Fig.2. Schematic drawing of the apparatus for measuring local sweat rate.

実験は午前8～12時の間に行い、各被検者はいずれの実験もそれぞれ同一時間帯に実施した。

#### (5) 統計処理

測定値の平均値の有意差検定には対応のあるStudent-t-testを用い、有意水準の判定基準はすべて5%とした。また、回帰直線の勾配の差の検定には共分散分析を行い、F分布の上側5%をもって有意とした。

### 3. 結果

図3に各実験条件で運動した時の $T_{re}$ 、 $\bar{T}_{sk}$ および $\dot{m}_{sw}$ の経時変化を被検者6名の平均値±標準偏差で示した。 $T_{re}$ はいずれの条件においても運動終了時まで上昇し続け、その上昇率は運動強度が強いほど大きかった。運動終了時の $T_{re}$ は、500kpm/min、700kpm/minおよび900kpm/min運動でそれぞれ $38.00 \pm 0.21^\circ\text{C}$ 、 $38.25 \pm 0.15^\circ\text{C}$ および $38.63 \pm 0.26^\circ\text{C}$ であり、いずれの条件間の差も有意であった。 $\bar{T}_{sk}$ は運動開始後10分目以降に運動強度による差が大きくなり、運動強度が強いほど高い傾向にあった。運動終了時の $\bar{T}_{sk}$ は、500kpm/min、700kpm/minおよび900kpm/min運動でそれぞれ $33.49 \pm 0.91^\circ\text{C}$ 、 $34.45 \pm 0.69^\circ\text{C}$ および $35.37 \pm 0.61^\circ\text{C}$ であり、いずれの条件間の差も有意であった。 $\dot{m}_{sw}$ は500kpm/min運動では運動開始後20分目まで、700kpm/minおよび900kpm/min運動では運動開始後15分目まで、それぞれ急激に増加し、以後いずれの条件でも上昇率が緩やかになった。また、全般的に運動強度が強いほど $\dot{m}_{sw}$ は大きかった。

図4に $T_{re}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係を実験条件別に示した(いずれも6名の平均値を

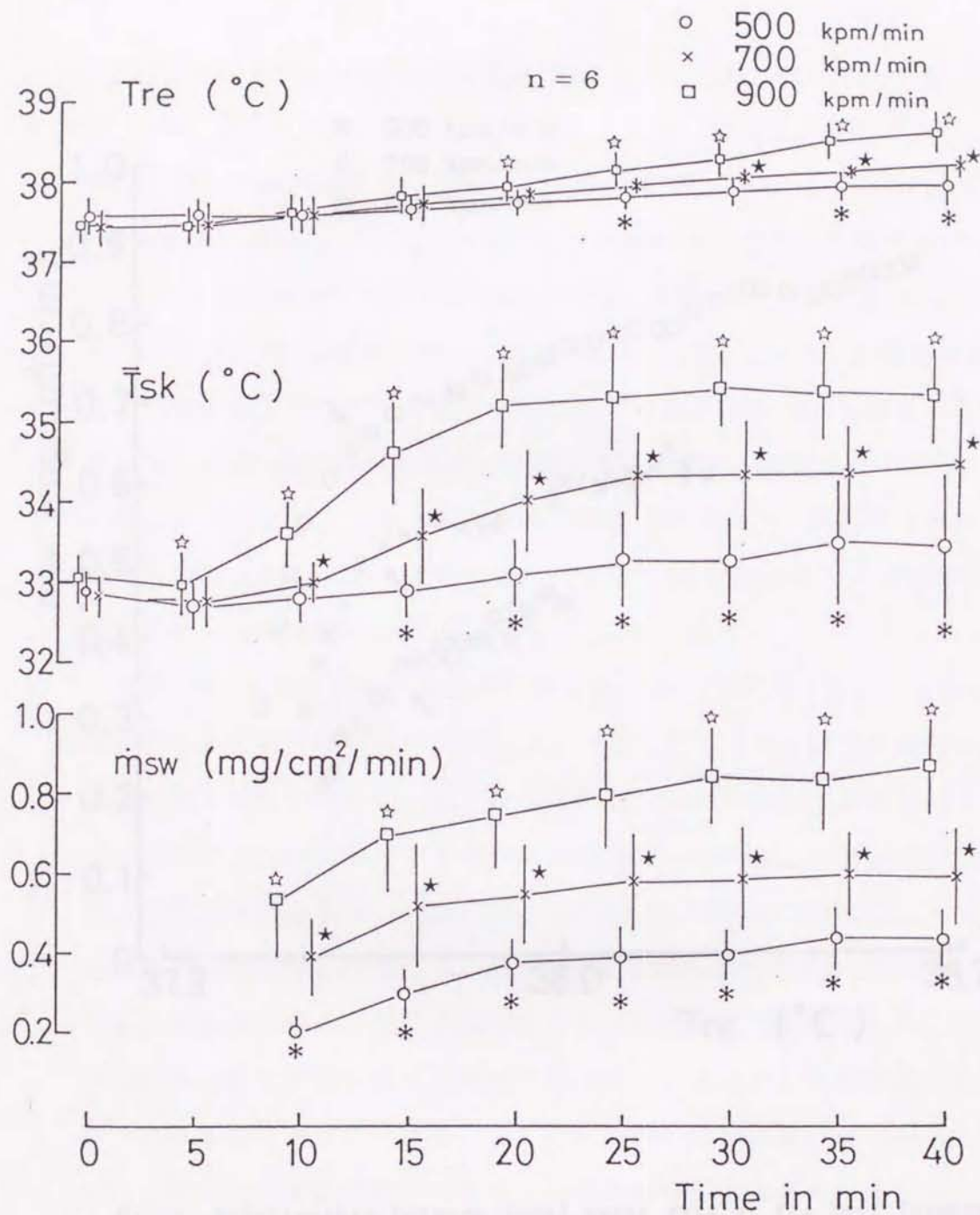


Fig.3. The time courses of rectal temperature ( $T_{re}$ ), mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ) and local sweat rate at the left forearm ( $\dot{m}_{sw}$ ) during exercise under three experimental conditions. Values are expressed as mean  $\pm$  SD.

- \* : significant difference from 700kpm/min ( $p < 0.05$ ).
- ★ : significant difference from 900kpm/min ( $p < 0.05$ ).
- ☆ : significant difference from 500kpm/min ( $p < 0.05$ ).

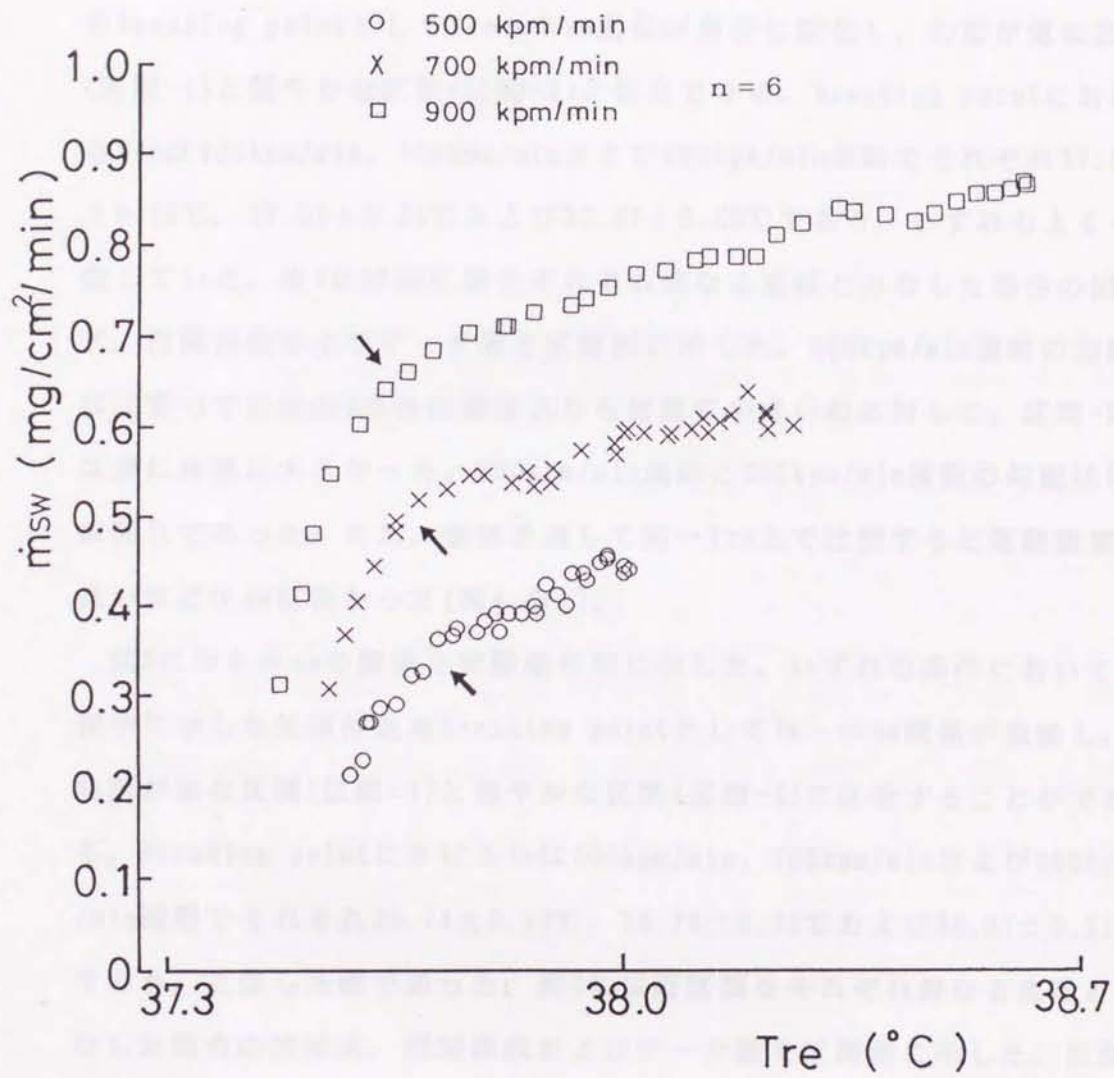


Fig.4. Relationship between local sweat rate at the left forearm ( $\dot{m}_{sw}$ ) and rectal temperature ( $T_{re}$ ) in the mean values of 6 subjects under three experimental conditions.

1分毎にプロットした)。いずれの条件においても図中に示した矢印付近をbreaking pointとして $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係が急激に変化し、勾配が急な区間(区間-1)と緩やかな区間(区間-2)に区分できる。breaking pointにおける $T_{re}$ は500kpm/min, 700kpm/minおよび900kpm/min運動でそれぞれ $37.69 \pm 0.15^{\circ}\text{C}$ ,  $37.65 \pm 0.21^{\circ}\text{C}$ および $37.67 \pm 0.20^{\circ}\text{C}$ であり、いずれもよく一致していた。表1には両区間をそれぞれ異なる直線とみなした場合の回帰式, 相関係数およびデータ数を区間別に示した。500kpm/min運動の勾配は区間-1では他の2条件の場合よりも有意に小さいのに対して, 区間-2では逆に有意に大きかった。700kpm/min運動と900kpm/min運動の勾配はほぼ同じであった。また, 全体を通して同一 $T_{re}$ 上で比較すると運動強度が強いほど $\dot{m}_{sw}$ は多かった(図4,表1)。

図5に $\bar{T}_b$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係を実験条件別に示した。いずれの条件においても図中に示した矢印付近をbreaking pointとして $\bar{T}_b-\dot{m}_{sw}$ 関係が急変し, 勾配が急な区間(区間-1)と緩やかな区間(区間-2)に区分することができる。breaking pointにおける $\bar{T}_b$ は500kpm/min, 700kpm/minおよび900kpm/min運動でそれぞれ $36.74 \pm 0.17^{\circ}\text{C}$ ,  $36.78 \pm 0.25^{\circ}\text{C}$ および $36.87 \pm 0.21^{\circ}\text{C}$ であり, 近似した値であった。表2には両区間をそれぞれ異なる直線とみなした場合の回帰式, 相関係数およびデータ数を区間別に示した。区間-1では運動強度が強いほど勾配が大きい傾向にあるが, 各条件間に有意差は認められなかった。区間-2の勾配は500kpm/min運動, 900kpm/min運動, 700kpm/min運動の順に大きく, いずれの条件間の差も有意であった。また, 同一 $\bar{T}_b$ 上で比較すると運動強度が強いほど $\dot{m}_{sw}$ は多い傾向にあるが,  $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係の場合よりは各運動強度間の差が小さくなり, 特に700kpm/min運動と900kpm/min運動の区間-1では両者の関係が接近していた(図5,表2)。



Table 1. The regression equations( $Y=aX+b$ ) for the relationship between local sweat rate at the left forearm( $\dot{m}_{sw}$ ) and rectal temperature( $T_{re}$ ) in phase-1 and phase-2 under three experimental conditions.

|            | phase-1 |         |          | phase-2 |         |           |
|------------|---------|---------|----------|---------|---------|-----------|
|            | a       | b       | r (n)    | a       | b       | r (n)     |
| 500kpm/min | 0.980   | -36.614 | 0.942(8) | 0.317   | -11.596 | 0.938(23) |
| 700kpm/min | 1.792   | -66.986 | 0.991(6) | 0.180   | -6.265  | 0.928(27) |
| 900kpm/min | 1.965   | -73.372 | 0.971(6) | 0.204   | -7.021  | 0.981(28) |

r:correlation coefficient      n:number of data      \*:p<0.05

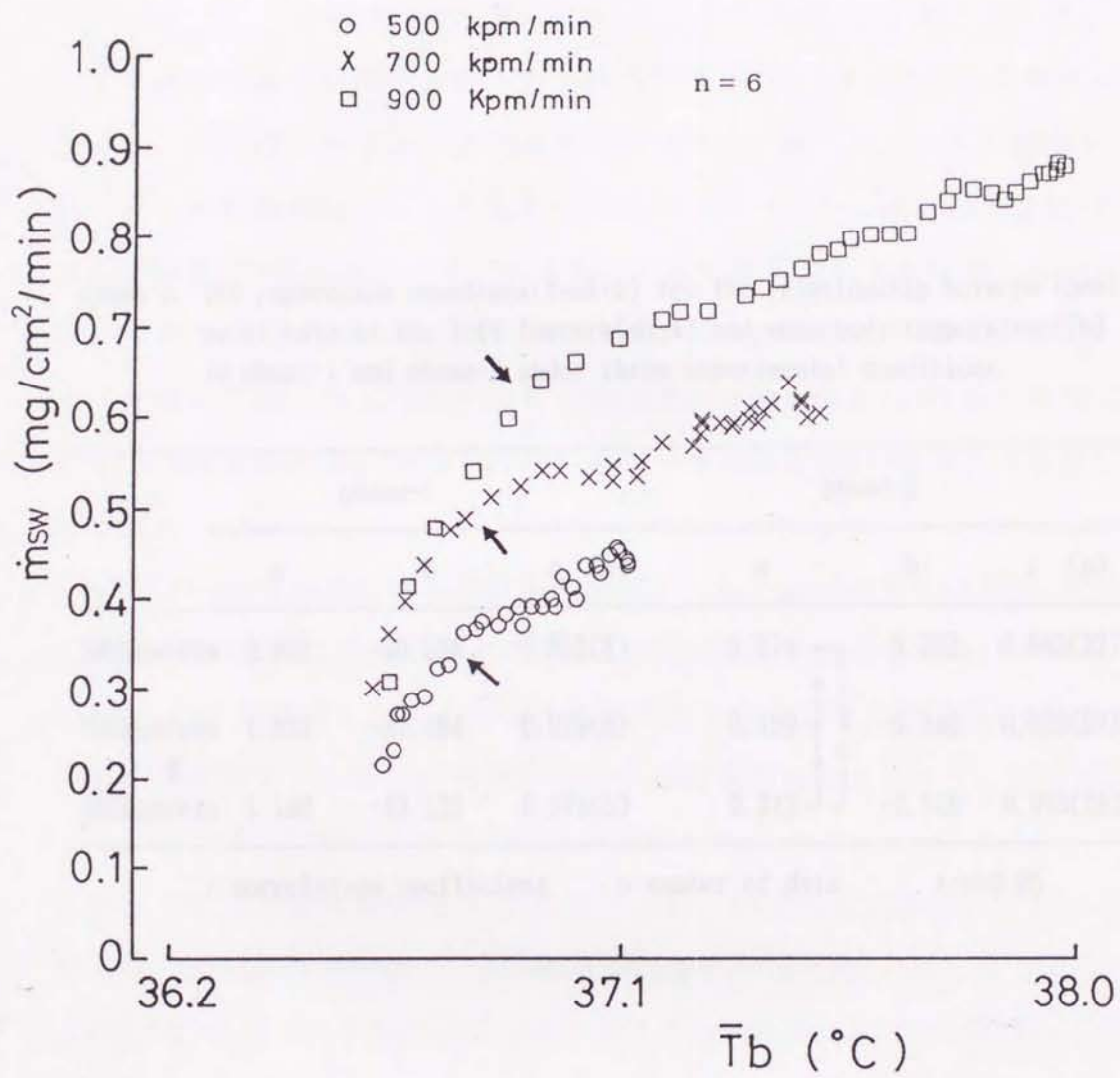


Fig.5. Relationship between local sweat rate at the left forearm ( $\dot{m}_{sw}$ ) and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) in the mean values of 6 subjects under three experimental conditions.

Table 2. The regression equations( $Y=aX+b$ ) for the relationship between local sweat rate at the left forearm( $\dot{m}_{sw}$ ) and mean body temperature( $\bar{T}_b$ ) in phase-1 and phase-2 under three experimental conditions.

|            | phase-1 |         |          | phase-2 |        |           |
|------------|---------|---------|----------|---------|--------|-----------|
|            | a       | b       | r (n)    | a       | b      | r (n)     |
| 500kpm/min | 0.842   | -30.588 | 0.953(8) | 0.274   | -9.702 | 0.942(23) |
| 700kpm/min | 1.032   | -37.464 | 0.979(6) | 0.159   | -5.340 | 0.929(27) |
| 900kpm/min | 1.186   | -43.125 | 0.975(5) | 0.212   | -7.168 | 0.993(29) |

r:correlation coefficient

n:number of data

\*: $p<0.05$

図6に $\bar{T}_b$ と $F_{sw}$ の関係を実験条件別に示した。図中の矢印は図5における矢印が示す $\bar{T}_b$ に相当する点である。表3には $\bar{T}_b$ と $F_{sw}$ の間に得られた回帰式、相関係数およびデータ数を $\bar{T}_b - \dot{m}_{sw}$ 関係(図5)で認められた区間別に示した。両区間のいずれの実験条件においても、両パラメーターの間に有意な正の相関関係が認められた(表3;  $p < 0.05 \sim 0.01$ )。区間-1と区間-2の回帰係数(a)を比較すると、いずれの実験条件においても区間-1の値の方が大きく、3条件の平均値でみると約3.7倍の比であった(表3)。また、全体を通して同一 $\bar{T}_b$ 上で比較すると運動強度が強いほど $F_{sw}$ が多い傾向にあり、各実験条件間の変化パターンは $\bar{T}_b - \dot{m}_{sw}$ 関係(図5)のそれと類似していた。

図7に $F_{sw}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係を実験条件別に示した。図中の矢印は図6における矢印が示す $F_{sw}$ に相当する点である。表4には各実験条件において、 $F_{sw}$ と $\dot{m}_{sw}$ の間に得られた回帰式、相関係数およびデータ数を図4で認められた区間別に示した。両区間のいずれの実験条件においても、両パラメーターの間に有意な正の相関関係が認められた(表4;  $p < 0.05 \sim 0.01$ )。区間-1と区間-2の回帰係数(a)を比較すると、いずれの実験条件においても区間-1の値の方が大きく、3条件の平均値でみると約1.8倍の比であった(表4)。また、いずれの条件においても $F_{sw}$ が大きいほど $\dot{m}_{sw}$ は多く、各条件のデータは全体的にみてほぼ同一直線上に配列された。

図8に $T_{re}$ と $\bar{T}_{sk}$ の関係を実験条件別に示した。図中の矢印は図4における矢印が示す $T_{re}$ に相当する点である。いずれの条件でも $T_{re}$ の上昇に伴って $\bar{T}_{sk}$ も上昇したが、700kpm/min運動と900kpm/min運動では $T_{re}$ が38°C前後を境に勾配が緩やかになった。また、全体を通して同一 $T_{re}$ 上で比較すると運動強度が強いほど $\bar{T}_{sk}$ は高かった。

なお、運動終了時のHRの平均値 $\pm$ SDは、500kpm/min, 700kpm/minおよ

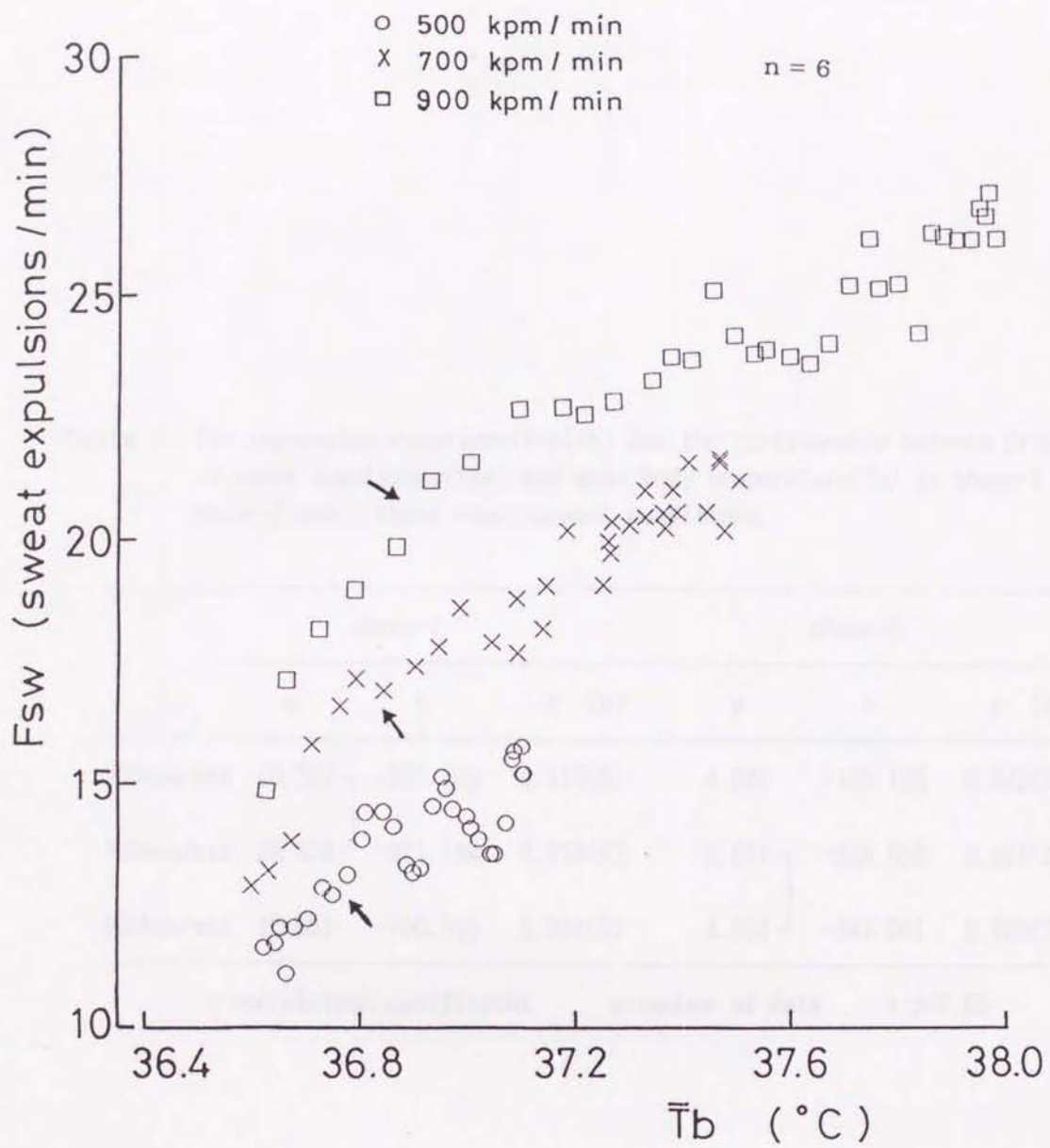


Fig.6. Relationship between frequency of sweat expulsions (Fsw) and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) under three experimental conditions. Each plot means the average values of 6 subjects.

Table 3. The regression equations( $Y=aX+b$ ) for the relationship between frequency of sweat expulsions( $F_{sw}$ ) and mean body temperature( $\bar{T}_b$ ) in phase-1 and phase-2 under three experimental conditions.

|            | phase-1 |          |          | phase-2 |          |           |
|------------|---------|----------|----------|---------|----------|-----------|
|            | a       | b        | r (n)    | a       | b        | r (n)     |
| 500kpm/min | 10.327  | -366.629 | 0.815(8) | 4.042   | -135.128 | 0.542(23) |
| 700kpm/min | 26.876  | -971.194 | 0.978(6) | 6.671   | -228.658 | 0.921(27) |
| 900kpm/min | 19.551  | -700.398 | 0.934(5) | 4.564   | -147.061 | 0.922(29) |

r:correlation coefficient

n:number of data

\*: $p < 0.05$

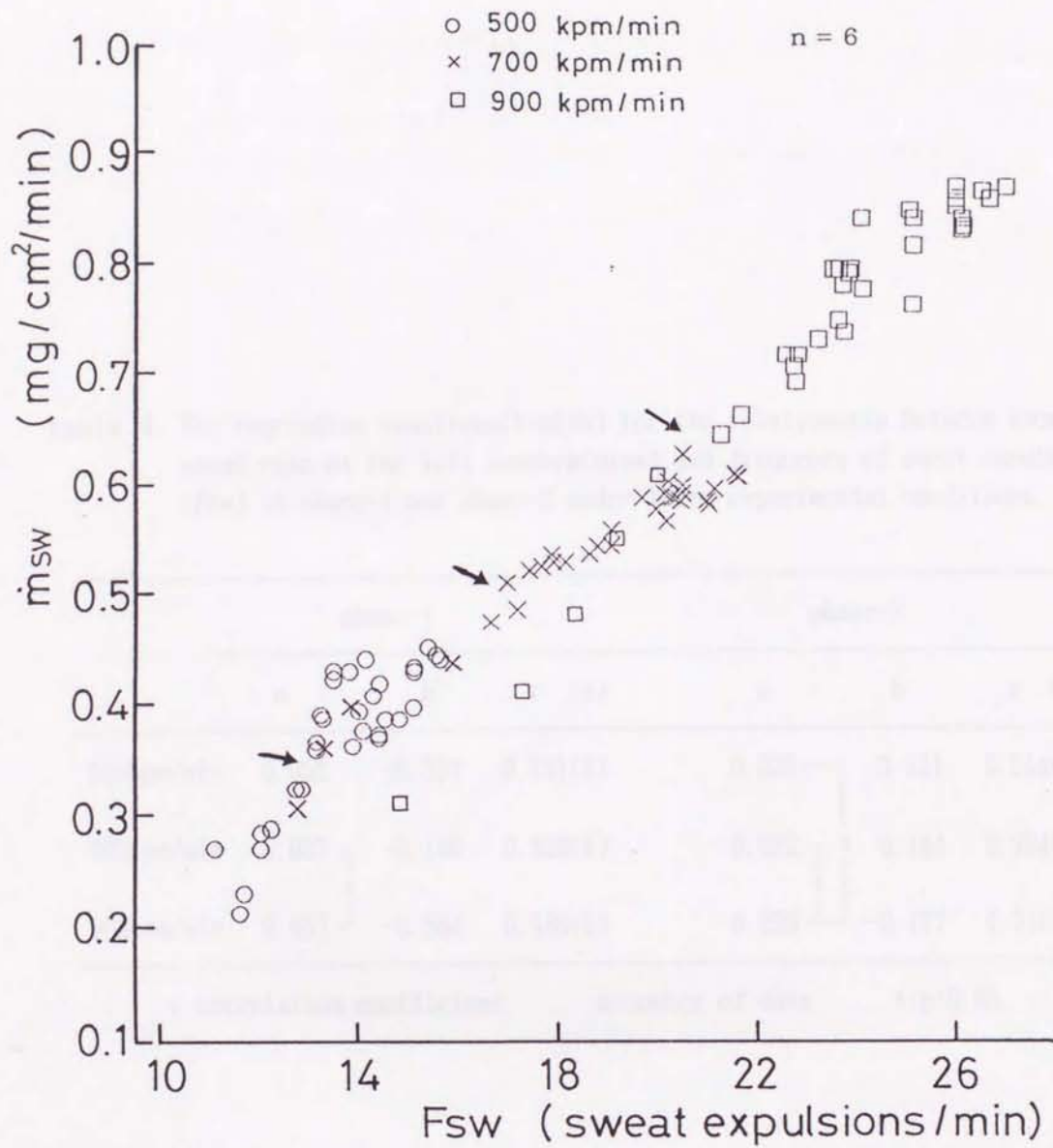


Fig.7. Relationship between local sweat rate at the left forearm ( $\dot{m}_{sw}$ ) and frequency of sweat expulsions (Fsw) under three experimental conditions. Each plot means the average values of 6 subjects.

Table 4. The regression equations( $Y=aX+b$ ) for the relationship between local sweat rate at the left forearm( $\dot{m}_{sw}$ ) and frequency of sweat expulsions ( $F_{sw}$ ) in phase-1 and phase-2 under three experimental conditions.

|            | phase-1 |        |          | phase-2 |        |           |
|------------|---------|--------|----------|---------|--------|-----------|
|            | a       | b      | r (n)    | a       | b      | r (n)     |
| 500kpm/min | 0.052   | -0.357 | 0.751(8) | 0.020   | 0.121  | 0.514(23) |
| 700kpm/min | 0.037   | -0.140 | 0.959(6) | 0.022   | 0.144  | 0.924(27) |
| 900kpm/min | 0.057   | -0.564 | 0.989(5) | 0.039   | -0.177 | 0.915(29) |

r:correlation coefficient

n:number of data

∗:p<0.05



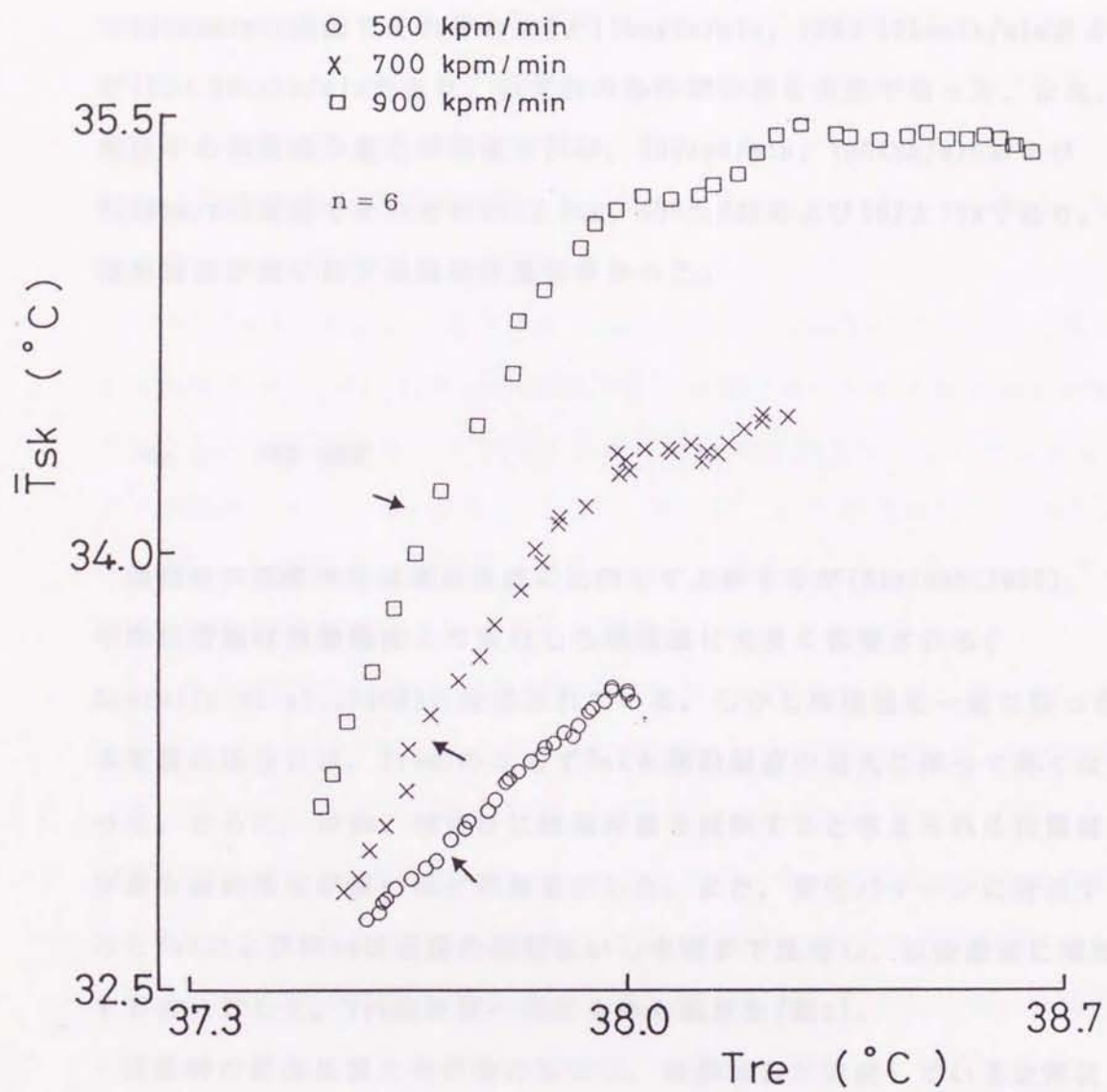


Fig.8. Relationship between mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ) and rectal temperature ( $T_{re}$ ) in the mean values of 6 subjects under three experimental conditions.

び900kpm/min運動でそれぞれ $106 \pm 11$ beats/min,  $126 \pm 12$ beats/minおよび $156 \pm 6$ beats/minであり, いずれの条件間の差も有意であった。また, 実験中の体重減少量の平均値 $\pm$ SDは, 500kpm/min, 700kpm/minおよび900kpm/min運動でそれぞれ $276 \pm 23$ g,  $400 \pm 23$ gおよび $592 \pm 73$ gであり, 運動強度が強いほど体重減少量は多かった。

#### 4. 考察

運動時の深部体温は運動強度に比例して上昇するが(Nielsen, 1938), 平均皮膚温は運動強度よりもむしろ環境温に大きく影響される(Stolwijk et al., 1968)と報告されている。しかし環境温を一定に保った本実験の場合には,  $T_{re}$ のみならず $\bar{T}_{sk}$ も運動強度の増大に伴って高くなった。さらに,  $\dot{m}_{sw}$ , HR並びに総発汗量を反映すると考えられる体重減少量も運動強度が強いほど高値を示した。また, 変化パターンに着目すると $\bar{T}_{sk}$ および $\dot{m}_{sw}$ は運動の初期ないし中頃まで急増し, 以後緩徐に増加するのに対して,  $T_{re}$ はほぼ一様に上昇し続けた(図3)。

運動時の深部体温と発汗量の関係は, 深部体温が安定している定常状態においては直線的になることが多くの研究で認められている(Benzinger, 1969; Nadel et al., 1971a; Nadel et al., 1971b; Nielsen and Nielsen, 1965)。しかし本実験のように深部体温が変化している非定常状態においては両者の関係が直線的であるとする報告(Chappuis et al., 1976; Johnson and Park, 1981; Nadel et al., 1971c)と否定的な報告(Tam et al., 1978; 近藤ら, 1988; Robinson, 1949)とがあり一致した見解が得られていない。前述したように近藤ら

(1988)は非定常状態における直腸温-発汗量関係が勾配の異なる2本の直線で表せるとしている。本実験でも $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係は異なる二つの区間に分けることができ、近藤らの報告と同様の所見を得た。また、同一の $T_{re}$ で比較すると運動強度が強いほど $\dot{m}_{sw}$ も多かった。これらの関係は横軸に $T_b$ をとった場合でもほぼ同様であった。

小川(1986)によると、定常状態においては $T_b-F_{sw}$ 関係は発汗中枢機構の反応性を表し、 $F_{sw}-\dot{m}_{sw}$ 関係は中枢性発汗衝撃に対する末梢機能の反応性を反映する。また、これらの関係は非定常状態においても成立することが認められている(近藤ら,1987)。そこで、この関係を用いて今回みられた二つの区間および運動強度間の発汗反応の違いを、発汗中枢の反応性と末梢機能の反応性の両面から検討してみることにする。

$T_b-F_{sw}$ 関係で得られた回帰直線の勾配は、いずれの条件においても区間-1の方が区間-2よりも大きかった(図6,表3)。これは区間-1の方が区間-2より発汗中枢の感受性が高いことを示唆している。さらに両区間とも運動強度が強いほど $F_{sw}$ は大きかったことから、発汗中枢の活動性は運動強度が強いほど高まるものと考えられる。しかし、回帰直線の勾配(回帰係数:a)は運動強度が強いほど大きいとは限らなかったことから、運動強度が強いほど発汗中枢の感受性が高いとは断定できない。

次に、 $F_{sw}-\dot{m}_{sw}$ 関係で得られた回帰直線についてみると、区間-1の勾配は区間-2の勾配に比していずれの条件においても大きかった(図7,表4)。これは前者の場合の方が後者の場合より汗腺の感受性が高いことを示唆している。しかし、区間-1と区間-2の勾配の違いを3条件の平均値の比で比較すると、 $T_b-F_{sw}$ の場合(約3.7倍)の方が $F_{sw}-\dot{m}_{sw}$ の場合(約1.8倍)より大きい(表3,表4)。このことは両区間の発汗反応の差異は、主として発汗中枢の感受性の違いによることを示唆している。また、全体を通し

て各実験条件でプロットされた点はほぼ同一直線上に配列したことから、汗腺の感受性や活動性は運動強度によってあまり影響されなかったと考えられる(図7)。したがって、運動強度間の発汗反応の差は、主に発汗中枢の活動性の差に起因すると考えられる。

発汗中枢の感受性や活動性に違いをもたらした原因として、皮膚温の差異も検討に値すると考えられる。Johnson et al.(1984)は食道温を一定に保った状態(約37.3°C)で、運動時の発汗量に及ぼす皮膚温の影響を検討した。その結果、発汗量は皮膚温の上昇とともに増大したが、皮膚温が30~33°Cの時の方が34~37°Cの時よりも発汗量の増加率が大きいことを観察した。これは、皮膚温のレベルによって発汗量の増加率に及ぼす影響度が異なることを示していると考えられる。発汗時の皮膚温は、汗の気化熱の影響を受けるため即断することはできないが、区間-2よりも皮膚温の低い区間-1の方が皮膚温に対する発汗中枢の感受性は高かった可能性が考えられる。また、 $T_{re}$ と $\bar{T}_{sk}$ の関係をみた結果では、同一 $T_{re}$ 上で比較すると運動強度が強いほど $\bar{T}_{sk}$ は高かった(図8)。このことから、運動強度間でみられた発汗中枢の活動性の差異には、 $\bar{T}_{sk}$ の違いが関与している可能性があると考えられる。高い皮膚温は皮膚の温度受容器からの求心性入力を増大させ、発汗中枢の活動性を高めるものと推察される。

以上の他に運動時の発汗反応に関与する要因としては、次のものが挙げられている。1).筋あるいは静脈内に存在する温度受容器が関与する(Meyer et al.,1962 ; Robinson et al.,1965 ; Saltin et al.,1968), 2).筋運動が筋や関節の機械受容器を介して発汗に影響する(Asmussen and Nielsen,1947), 3).筋活動に関与する運動中枢からの下行性神経活動(central motor command)が体温調節中枢(視床下部)に影響する(

Robinson,1949), 4).運動に伴う精神興奮が関与する(Nakayama,1969 ; Ogawa,1975a), 5).産熱量の違いが関与する(Nielsen,1969), 6).運動経過に伴う体液性状の変化が発汗量に影響する(Harrison et al.1978 ; Nielsen,1974)などである。

1).に関しては筋温は発汗にあまり関与しないとする報告(Nielsen, 1969 ; Saltin et al.,1970)もあり, また, 現在までのところ筋や静脈内に温度受容器が存在する確証は得られていない。したがって, 運動時の筋温の著明な上昇は, 血流による熱移動を介して深部体温や皮膚温を上昇させ, 間接的に発汗に影響すると考えるのが妥当であろう。2).と3).に関しても否定的な報告もある(Robinson,1962 ; Kitzing and Bleichert,1965)。Robinson(1962)は四肢の受動的運動をさせてみても, 発汗量が代謝量あるいは温度変化に見合う量以上には増加しないことを報告している。また, Kitzing and Bleichert(1965)は, 神経筋接合部をクラーレで部分的に遮断した被検者に遮断前と同程度の仕事量をするように努めさせた結果, 遮断後は運動努力が強まるため運動中枢の活動性は大きくなっていると考えられるのに, 運動中の食道温の変化は運動強度に比例していることから3).に関して否定的な見方をしている。しかしこの場合に発汗量の変化に対して運動中枢活動が関与するか否かは明らかでない。4).に関して精神性発汗は運動開始時にも(Nakayama,1969), また, 運動中に負荷強度を急変させた時でも生じることが報告されている(宮側ら,1985)。したがって今回の場合も, 身体運動に伴って生じた精神的興奮が前腕部の発汗反応に影響した可能性がある。5).に関しては発汗反応に影響した可能性は否定できないが, 産熱量の違いは体温上昇を介して生体に関与するであろうと考えられるから, 産熱量の絶対値よりも産熱速度が関与していたのかもしれない。6).に関して運動中の血漿浸

透圧の変化あるいは $\text{Na}^+$ 濃度の変化が発汗量に影響することが報告されている(Harrison et al.1978 ; Nielsen,1974)。区間-2では血漿浸透圧の増大ないし $\text{Na}^+$ 濃度の上昇が発汗を抑制していた可能性が考えられる。もし関与していたのであれば、これらの要因は汗腺機能よりも中枢機構により大きく影響することが本実験の結果から推察できる。このように非定常状態における運動時の発汗調節には多くの要因が関与している可能性があると考えられる。

運動時には産熱量の急増に伴って中心血液温は急速に変化する。中心血液温が急速に変化する場合、深部体温としての $T_{re}$ の妥当性には問題があると報告もある(Aikäs et al.,1962 ; Nielsen and Nielsen, 1962 ; Shiraki et al.,1986)。したがって今回の実験でbreaking pointがみられた原因として、深部体温の指標として $T_{re}$ を用いたために区間-1では深部体温上昇を過小評価した可能性も考えられるので、この点に関してはさらに検討する必要がある。

## 5. 要約

非定常状態における運動時の深部体温-発汗量関係について明らかにするとともに、運動強度が発汗中枢の活動性および末梢機構の活動性といかなる関係を有するかについても検討した。健康な男子大学生6名に500, 700および900kpm/minの3種類の自転車運動を、環境温が25°C, 相対湿度が45%の環境下で、各40分間行わせ、 $T_{re}$ ,  $\bar{T}_b$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}$ ,  $F_{sw}$ 等を測定した。得られた結果は次の通りである。

- (1) いずれの条件においても、体温と $\dot{m}_{sw}$ の関係の勾配はある特定の

体温( $T_{re}$ では $37.7^{\circ}\text{C}$ 前後、 $\bar{T}_b$ では $36.8^{\circ}\text{C}$ 前後)を境に明らかに変化することが確認された。

(2) 同一体温( $T_{re}, \bar{T}_b$ )における $\dot{m}_{sw}$ は運動強度が強いほど多いことが示された。

(3) 発汗中枢および末梢機能の感受性は、 $\bar{T}_b$ が約 $36.8^{\circ}\text{C}$ 以上になると低下すると判断された。

(4) 同一 $\bar{T}_b$ における $F_{sw}$ は運動強度が強いほど多かったが、同一 $F_{sw}$ における $\dot{m}_{sw}$ は運動強度の違いによる差が明らかでなかった。

以上のことから、運動開始後、 $\bar{T}_b$ が $36.8^{\circ}\text{C}$ に達する時点において、発汗調節系の中核および末梢機構に何らかの変化が起こったことが考えられる。また同一 $T_{re}$ における発汗量は運動強度が強いほど多いが、これは主に発汗中枢の活動性の変化によってもたらされたものと考えられる。

## V 章．非定常状態における運動時の 食道温と発汗量の関係（実験 II）

### 1．目的

実験 I において，非定常状態における運動中の直腸温 ( $T_{re}$ ) と発汗量の関係は特定の体温 (約  $37.7^{\circ}\text{C}$ ) を breaking point として急に変化することを示した (山崎ら, 1991)。また，このような breaking point は， $T_{re}$  と平均皮膚温 ( $\bar{T}_{sk}$ ) から算出した平均体温と汗の拍出頻度 ( $F_{sw}$ ) との関係においても認められた。発汗調節における breaking point の発生機序には種々の要因が影響していると推察されたが，非定常状態における深部体温の指標として  $T_{re}$  を用いた点にも問題があると考えられた。そこで本実験では，中心動脈血温や脳温を反映していると考えられている食道温 ( $T_{es}$ ) を深部体温の指標とした場合にも (Cooper and Kenyon, 1957 ; Shiraki et al., 1986)，breaking point が生じるか否かを検証することにした。また運動初期の発汗急増の機序についても検討を加えた。

### 2．方法

#### (1) 被検者

被検者は健康な男子大学生 6 名であり，日常的に運動トレーニングを行っている人たちであった。その年齢，体重および身長 (範囲) は，それぞれ 22 (21~23) 歳，69 (64~75) kg および 174 (169~180) cm であった。



予め別の日に自転車を用いた漸増運動負荷によって測定した $\dot{V}O_{2max}$ は57.6(53.6~64.3)ml/min/kgであった。

### (2) 運動条件および環境条件

環境制御室の中で、40% $\dot{V}O_{2max}$ 強度に相当する自転車運動をペダル回転数60rpmで40分間行った。環境条件は室温が $28.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が $50 \pm 5\%$ であった。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を着用し、まず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。その間に熱電対と発汗カプセルを装着した。次いで、自転車エルゴメーター(モナーク社 829E)上で安静状態の測定を3分間行った後、(2)項で示した条件で運動を開始した。

### (4) 測定項目および方法

$T_{re}$ 、 $T_{es}$ および皮膚温の測定には熱電対を使用した。熱電対を $T_{re}$ 測定では直腸内に約10cm挿入し、 $T_{es}$ 測定では口より食道内に身長 $\frac{1}{4}$ の長さだけ挿入した。皮膚温は胸部、上腕部、大腿部、下腿部および左前腕部の5ヶ所に熱電対を貼付することによって測定した。熱電対の出力は実験Iと同じ方法で記録し、その記録から左前腕部皮膚温( $T_{arm}$ )と $\bar{T}_{sk}$ (Ramanathan, 1964 ; P.18参照)および次式を用いた平均体温( $\bar{T}_{br}$ 、 $\bar{T}_{be}$ )を1分毎に算出した。

$$\bar{T}_{br} = 0.8 \times T_{re} + 0.2 \times \bar{T}_{sk} \quad (\text{Hardy and DuBois, 1937b})$$

$$\bar{T}_{be} = 0.9 \times T_{es} + 0.1 \times \bar{T}_{sk} \quad (\text{Stolwijk and Hardy, 1966})$$

局所発汗量( $\dot{m}_{sw}$ )の測定部位は左前腕屈側中央部とし、 $F_{sw}$ の同期性を確認するために、右前腕屈側中央部にも同様の発汗カプセルを装着した。 $\dot{m}_{sw}$ および $F_{sw}$ 測定用のカプセルの断面積は $10.0\text{cm}^2$ であり、これに $2.0\text{l/min}$ の乾燥窒素ガスを流した。 $\dot{m}_{sw}$ および $F_{sw}$ の分析方法は実験 I と同様であった(P.18参照)。

#### (5) 統計処理

同項目間の平均値の差の検定には対応のあるStudent-t-testを、異項目間の平均値の差の検定には対応のないStudent-t-testをそれぞれ用いた。有意水準の判定基準はすべて5%とした。得られた結果は平均値±標準誤差(SE)で示した。

### 3. 結果

図9に運動中の $T_{re}$ 、 $T_{es}$ 、 $\bar{T}_{sk}$ および $T_{arm}$ の経時変化を被検者6名の平均値±SEで示した。安静時の $T_{re}$ および $T_{es}$ はそれぞれ $37.64\pm 0.13^\circ\text{C}$ 、 $37.54\pm 0.13^\circ\text{C}$ であり、 $T_{re}$ の方がやや高かった。運動を開始すると $T_{re}$ は6分目までほぼ一定値を示した後上昇したのに対して、 $T_{es}$ は一旦やや低下してから上昇に転じる傾向を示した。両パラメーターの上昇パターンには差異が認められ、 $T_{re}$ は7分目から運動終了までほぼ直線的に上昇したのに対して、 $T_{es}$ は6分目から12分目まで急激に上昇し、以後運動終了まで緩やかに上昇した。 $T_{re}$ では11分目以降、 $T_{es}$ では6分目以降にそれぞれの安静値よりも有意に高い値を示した。運動終了時の $T_{re}$ および $T_{es}$ はそれぞれ $38.30\pm 0.04^\circ\text{C}$ 、 $38.34\pm 0.07^\circ\text{C}$ であり、極めて近似した値であ

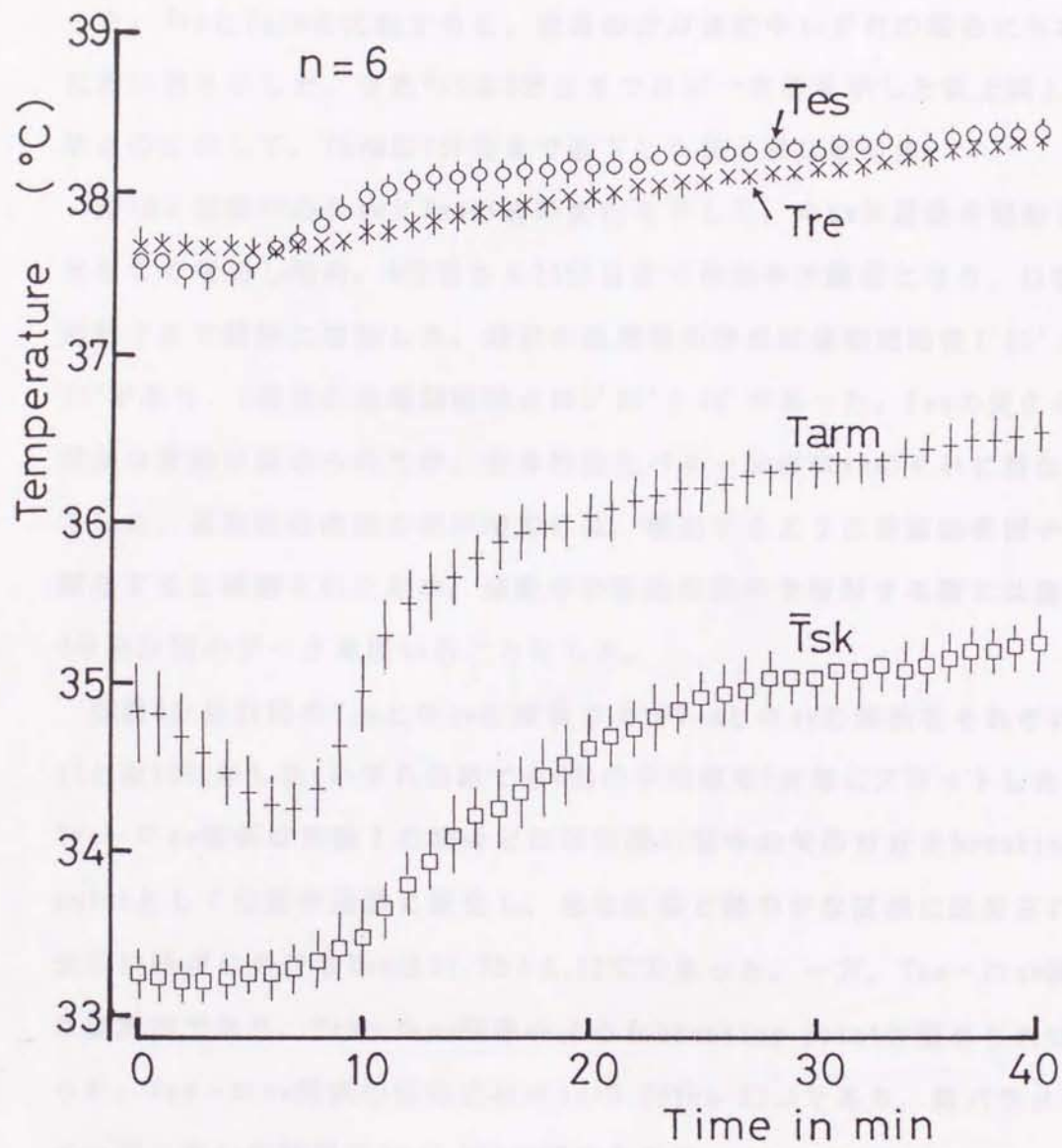


Fig.9. The time courses of rectal temperature (Tre : ×), esophageal temperature (Tes : ○), mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$  : □) and left forearm skin temperature (Tarm : +) during exercise. Values are means  $\pm$  SE of 6 subjects.

った。 $\bar{T}_{sk}$ と $T_{arm}$ を比較すると、後者の方が運動中いずれの場合にも有意に高い値を示した。また $\bar{T}_{sk}$ は8分目までほぼ一定値を示した後上昇し始めたのに対して、 $T_{arm}$ は7分目まで低下した後上昇に転じた。

図10に運動中の $\dot{m}_{sw}$ と $F_{sw}$ の経時変化を示した。 $\dot{m}_{sw}$ は運動を開始してまもなく増加し始め、6分目から11分目まで増加率が顕著となり、以後運動終了まで緩徐に増加した。最初の急増開始時点は運動開始後 $1'00'' \pm 20''$ であり、2番目の急増開始時点は $5'20'' \pm 20''$ であった。 $F_{sw}$ の変化には微細な変動が認められたが、全体的変化パターンは $\dot{m}_{sw}$ のそれに類似していた。運動開始直後の発汗増加には、後述するように非温熱性因子が関与すると推測されたため、運動中の温熱性発汗を検討する際には運動6分目以降のデータを用いることにした。

運動6分目以降の $T_{re}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係および $T_{es}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係をそれぞれ図11と図12に示した(いずれの図でも6名の平均値を1分毎にプロットした)。 $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係は実験Iの場合とほぼ同様に図中の矢印付近をbreaking pointとして勾配が急激に変化し、急な区間と緩やかな区間に区分された。矢印の時点における $T_{re}$ は $37.75 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ であった。一方、 $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ 関係は直線的であり、 $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係のようなbreaking pointは認められなかった。 $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ 関係の回帰式は $\dot{m}_{sw}=0.60T_{es}-22.5$ であり、両パラメータ間に高い相関関係( $r=0.99$ )が認められた。

運動6分目以降の $\bar{T}_{br}$ と $F_{sw}$ の関係および $\bar{T}_{be}$ と $F_{sw}$ の関係をそれぞれ図13と図14に示した。 $\bar{T}_{br}-F_{sw}$ 関係の勾配は図中の矢印( $\bar{T}_{br}:36.92 \pm 0.13^{\circ}\text{C}$ )付近でbreaking pointを示したのに対して、 $\bar{T}_{be}-F_{sw}$ 関係の勾配には明らかなbreaking pointはなくほぼ直線的であった。 $\bar{T}_{be}-F_{sw}$ 関係の回帰式は $F_{sw}=11.05\bar{T}_{be}-399.9$ であり、両パラメータ間に高い相関関係( $r=0.95$ )が認められた。

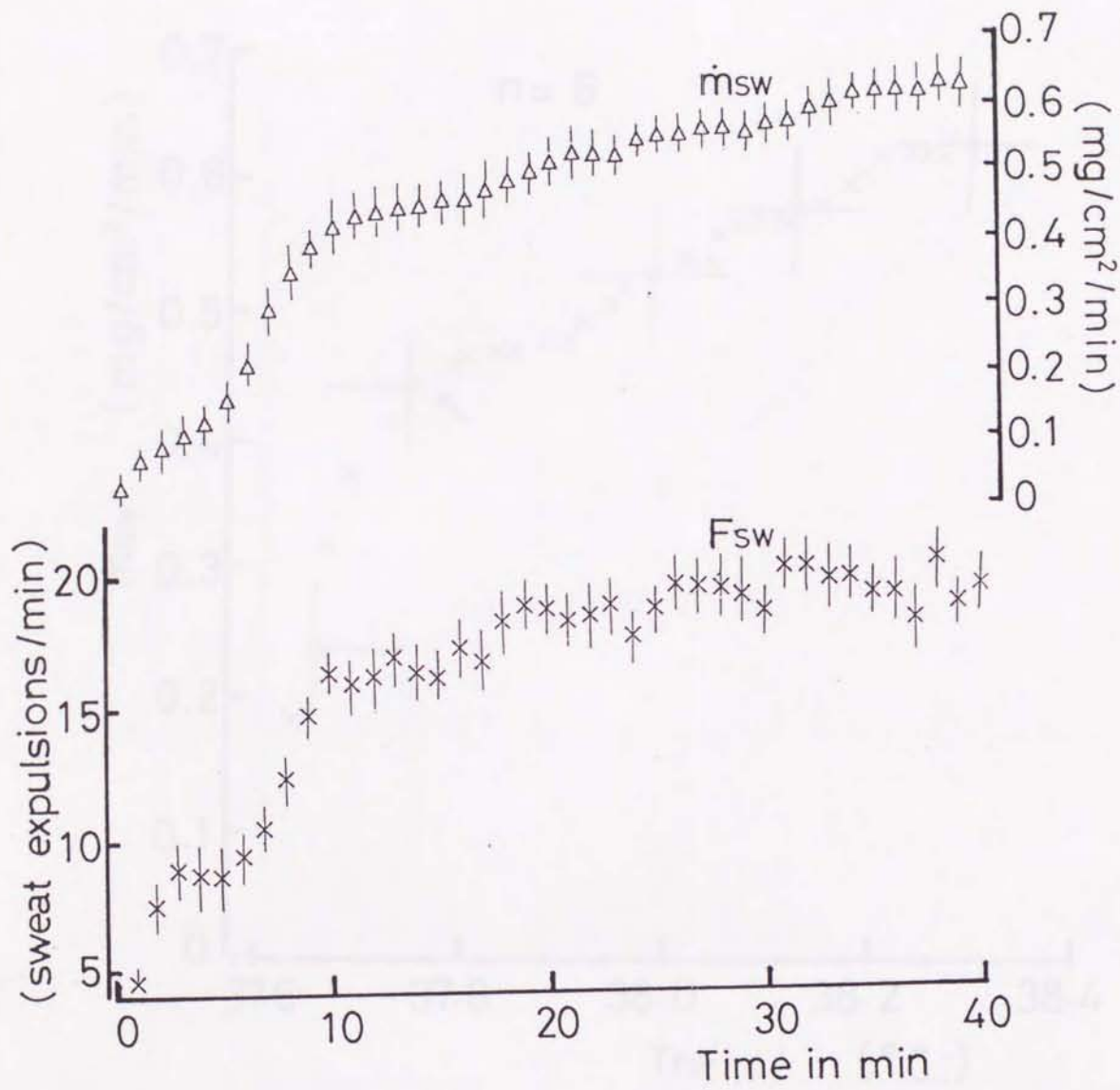


Fig.10. The time courses of local sweat rate ( $\bar{m}_{sw}$  :  $\Delta$ ) and frequency of sweat expulsions (F<sub>sw</sub> :  $\times$ ) during exercise. Values are means  $\pm$  SE of 6 subjects.

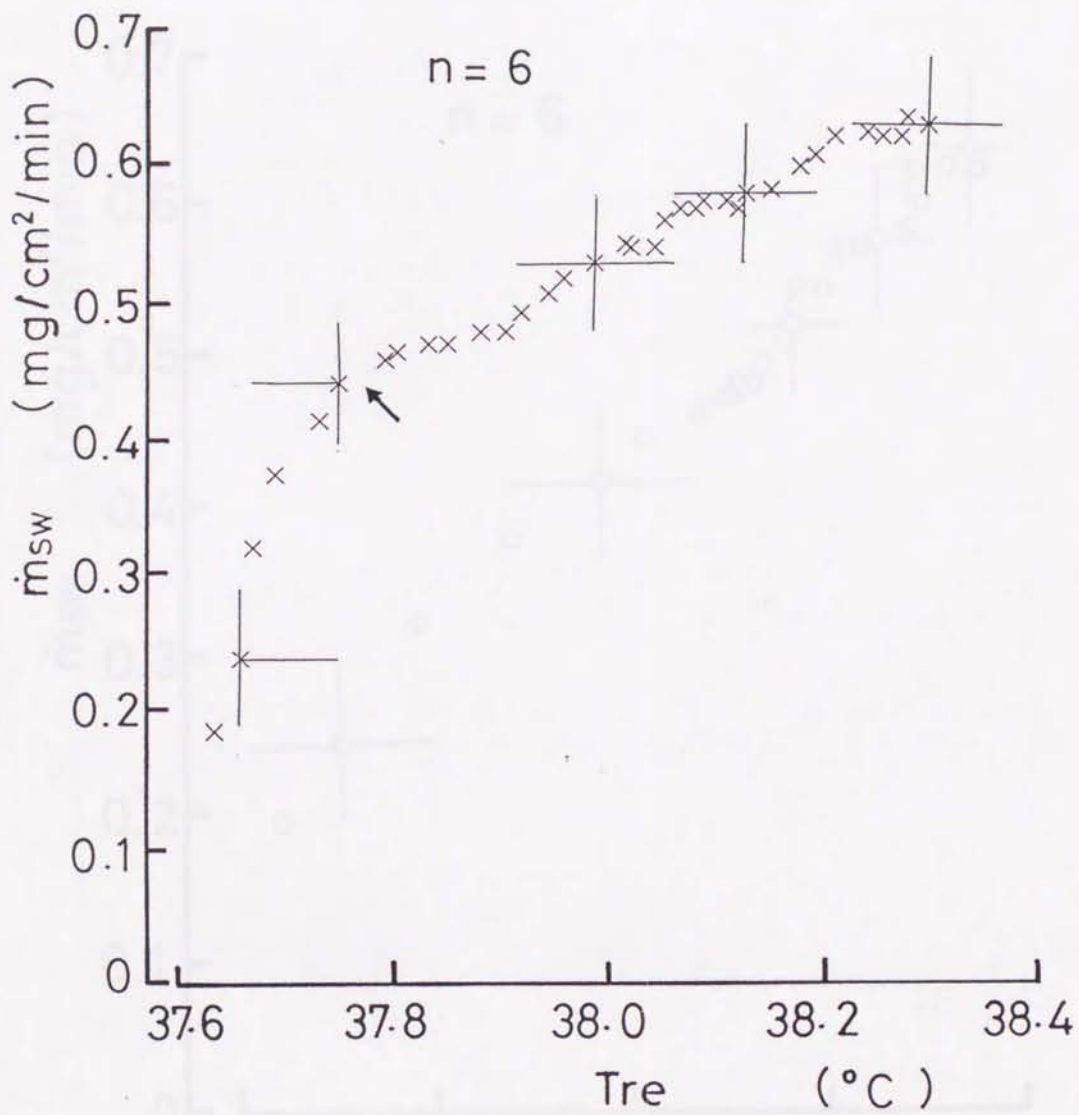


Fig.11. Relationship between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) and rectal temperature ( $T_{re}$ ).

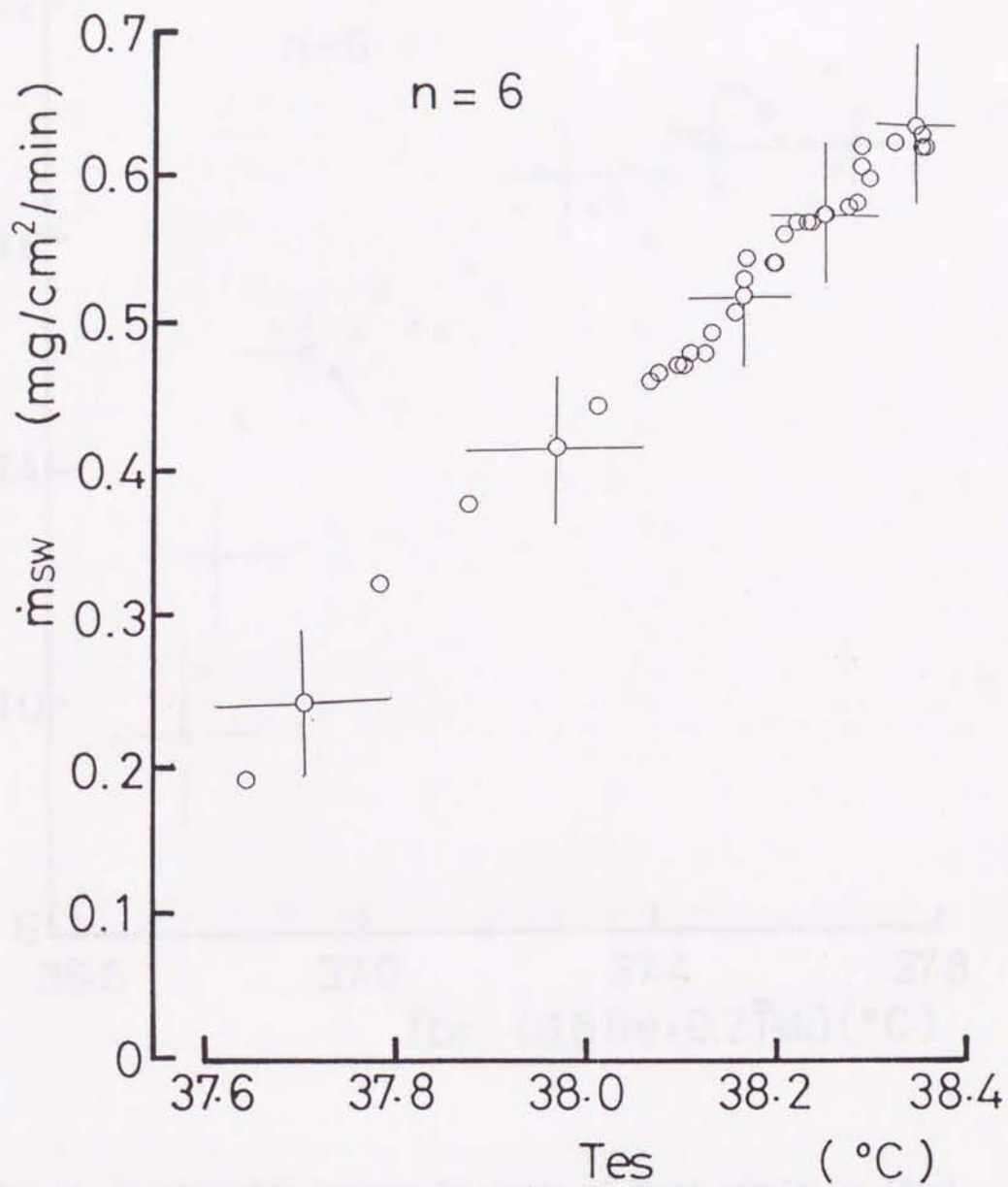


Fig.12. Relationship between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) and esophageal temperature ( $T_{es}$ ).

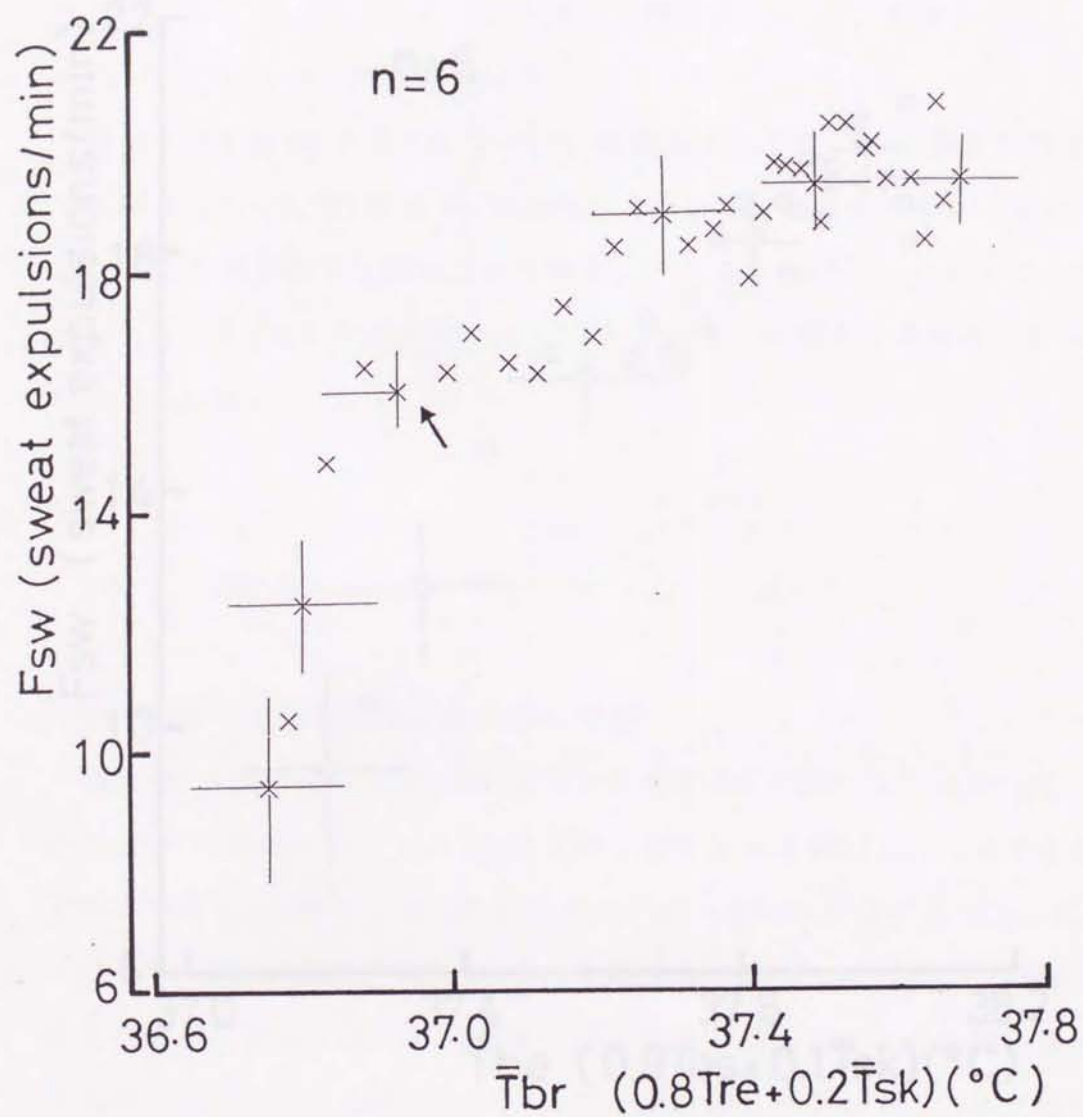


Fig.13. Relationship between frequency of sweat expulsions (Fsw) and mean body temperature ( $\bar{T}_{br} : 0.8\bar{T}_{re} + 0.2\bar{T}_{sk}$ ).



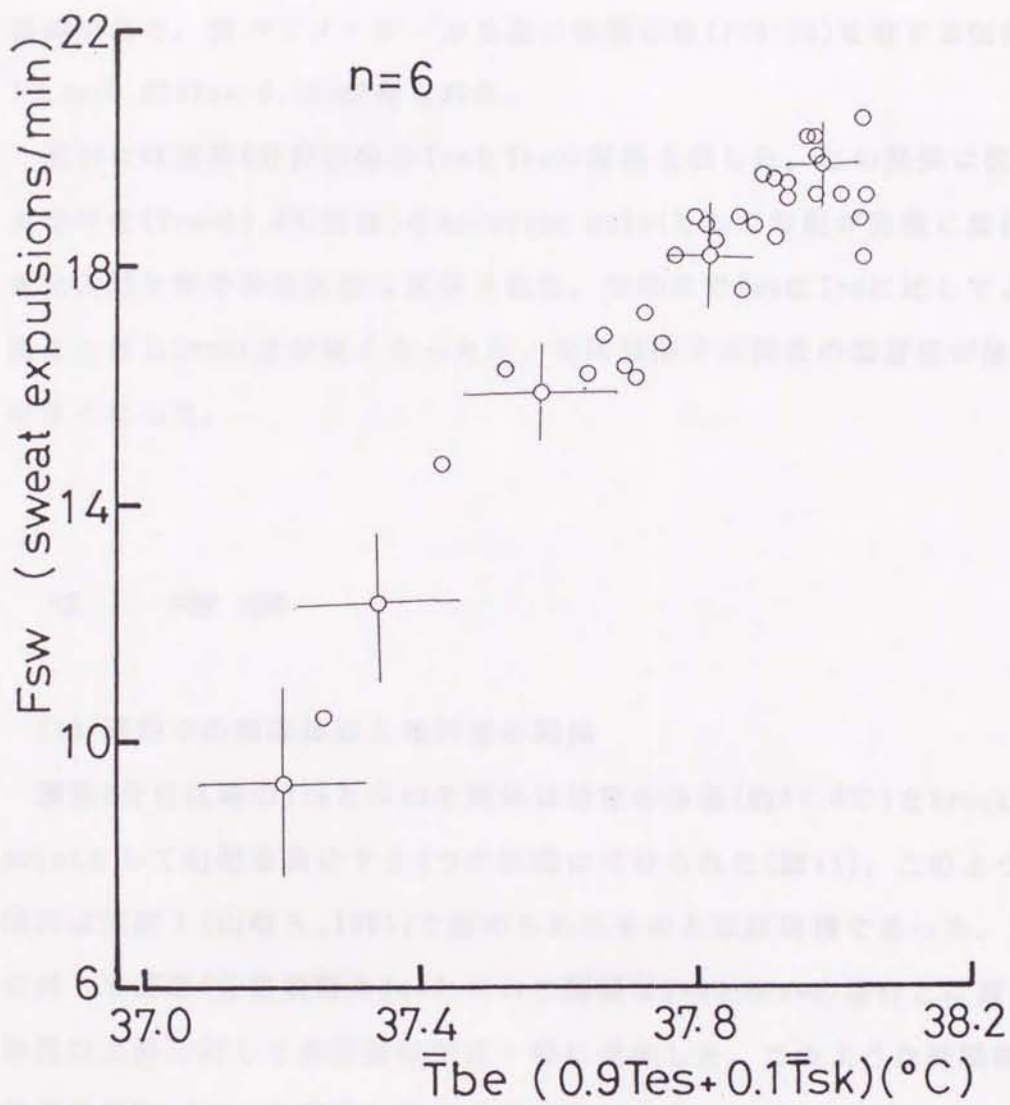


Fig.14. Relationship between frequency of sweat expulsions (Fsw) and mean body temperature ( $\bar{T}_{be} : 0.9\bar{T}_{es} + 0.1\bar{T}_{sk}$ ).

図15には運動6分目以降の $F_{sw}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係を示した。両者の関係は直線的であり、両パラメーターから高い相関係数( $r=0.95$ )を有する回帰式( $\dot{m}_{sw}=0.039F_{sw}-0.18$ )が得られた。

図16には運動6分目以降の $T_{re}$ と $T_{es}$ の関係を示した。この関係は図中の矢印付近( $T_{re}=37.8^{\circ}\text{C}$ 前後)をbreaking pointとして勾配が急激に変化し、急な区間と緩やかな区間に区分された。矢印まで $T_{es}$ は $T_{re}$ に比してより急に上昇し $T_{es}$ の方が高くなったが、矢印以降では両者の温度差が徐々に小さくなった。

#### 4. 考察

##### (1) 運動中の深部体温と発汗量の関係

運動6分目以降の $T_{re}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係は特定の体温(約 $37.8^{\circ}\text{C}$ )をbreaking pointとして勾配を異にする2つの区間に分けられた(図11)。このような関係は実験I(山崎ら,1991)で認められたものとほぼ同様であった。これに対して運動6分目以降の $T_{es}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係は $T_{re}$ と $\dot{m}_{sw}$ の場合とは異なり、体温の上昇に対して発汗量はほぼ一様に増加した。このような両関係の相違には $T_{re}$ と $T_{es}$ の運動に対する応答動態の違いが関与していると推察される。

そこで両パラメーターの経時変化をみたところ、運動開始後3分から12分の間は $T_{es}$ は $T_{re}$ より急速に上昇し、安静値より有意に体温が上昇するまでの時間は前者の方が短かった(図9)。また、 $T_{re}$ と $T_{es}$ との関係をみると、 $37.8^{\circ}\text{C}$ 前後の $T_{re}$ を境に勾配を異にする2つの区間に分画され、その様相は $T_{re}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係のそれに極めて類似していた(図16)。 $T_{es}$ は中

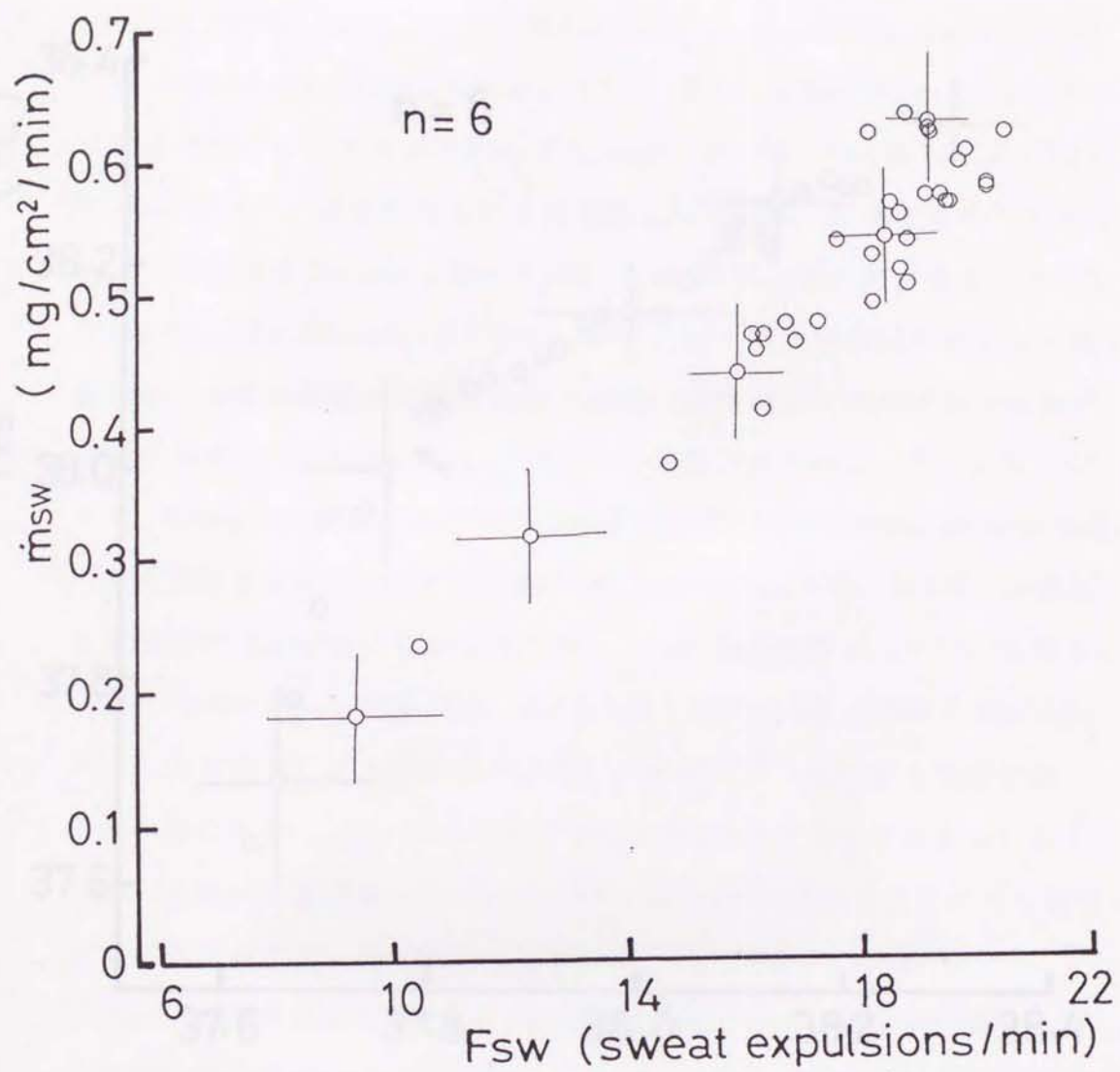


Fig.15. Relationship between local sweat rate ( $\bar{m}_{sw}$ ) and frequency of sweat expulsions (Fsw).

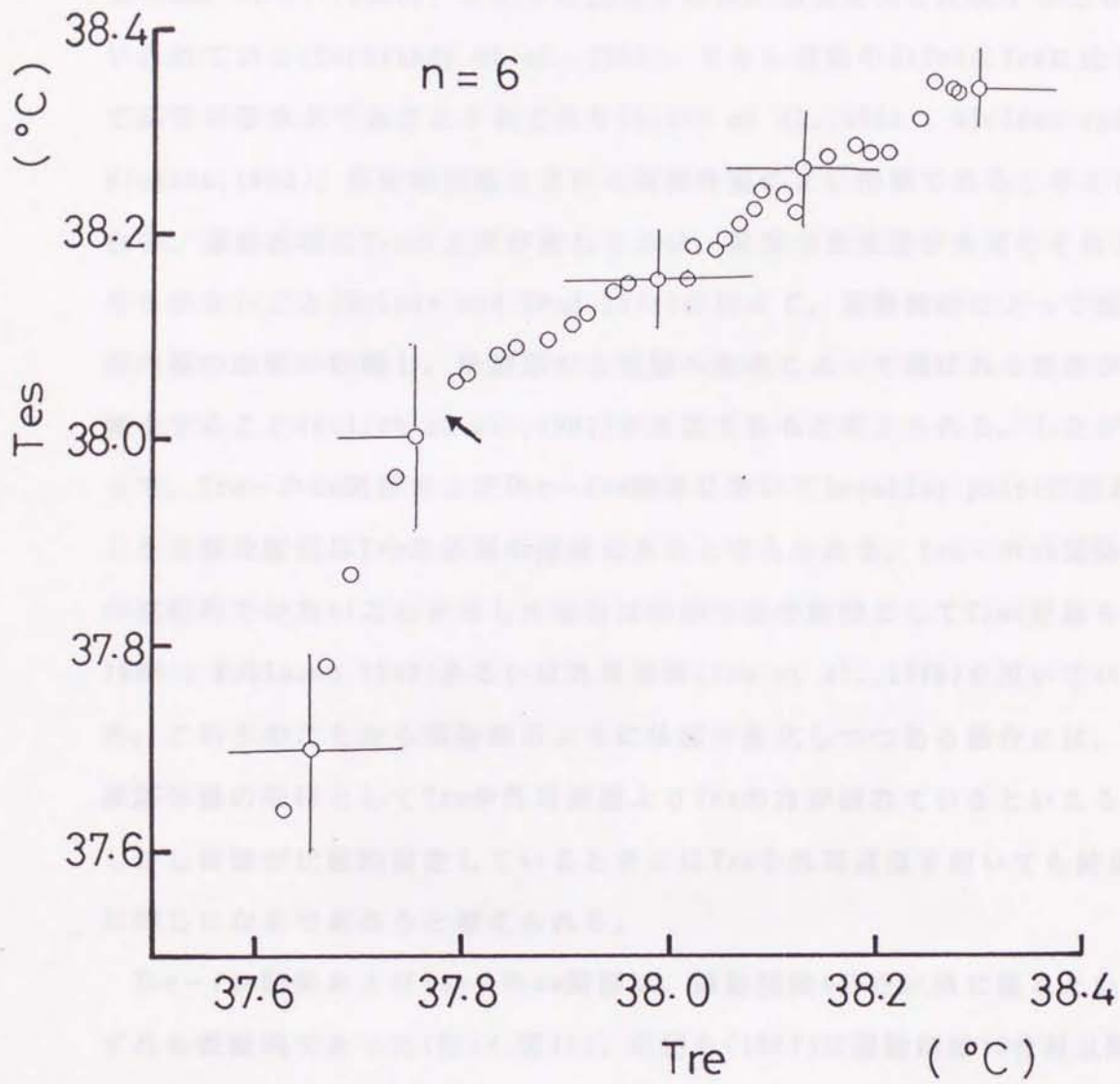


Fig.16. Relationship between esophageal temperature (Tes) and rectal temperature (Tre).

心動脈血温と密接に関係するといわれ(Cooper and Kenyon,1957 ; Shiraki et al.,1986), また中枢温度受容器の温度変化を反映するともいわれている(Gerbrandy et al.,1954)。さらに運動中の $T_{es}$ は $T_{re}$ に比して応答が速やかであるとされており(Aikäs et al.,1962 ; Nielsen and Nielsen,1962), 非定常状態における深部体温のよい指標であると考えられる。運動初期に $T_{re}$ の上昇が遅れるのは, 直腸の血流量が食道のそれよりも少ないこと(Molnar and Read,1974)に加えて, 運動開始によって腹部内臓の血管が収縮し, 活動筋から直腸へ血液によって運ばれる熱量が減少すること(Aulick et al.,1981)が原因であると考えられる。したがって,  $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係および $\bar{T}_{br}-F_{sw}$ 関係においてbreaking pointが出現した主要な原因は $T_{re}$ の応答の遅延にあると考えられる。 $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係が直線的ではないことを示した報告は深部体温の指標として $T_{re}$ (近藤ら, 1988 ; Robinson,1949)あるいは外耳道温(Tam et al.,1978)を用いていた。これらのことから運動時のように体温が変化しつつある場合には, 深部体温の指標として $T_{re}$ や外耳道温より $T_{es}$ の方が優れているといえる。しかし体温が比較的安定しているときには $T_{re}$ や外耳道温を用いても結果は同じになるであろうと考えられる。

$\bar{T}_{be}-F_{sw}$ 関係および $F_{sw}-\dot{m}_{sw}$ 関係は, 運動開始6分目以降に限るといづれも直線的であった(図14,図15)。近藤ら(1987)は運動開始10分目以降のデータを用いて同様の結果を得ている。この所見は両者の直線関係が, 運動開始直後を除けば非定常状態においても成立するという見解(近藤ら, 1987)を支持するものである。

## (2) 運動初期の発汗量の変化

運動中の $\dot{m}_{sw}$ は時間経過に伴って2つの急増区間を形成しながら変化し,

Fswもまた $\dot{m}_{sw}$ とほぼ同様なパターンで変化した(図10)。最初の発汗急増開始時には $T_{es}$ ,  $T_{re}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ および $T_{arm}$ はまだ上昇していないことから、この増加には非温熱性因子が関与している可能性が考えられる。またFswは発汗中枢活動を反映するとされているので(小川,1986),この発汗増加は中枢性機序による現象であろうと推察される。運動開始後6分目以降における $\dot{m}_{sw}$ の増加は $T_{es}$ の上昇に比例していることから(図12),2番目の発汗急増は大部分が温熱性因子によって説明できる。非温熱性因子に関連してStolwijk and Nadel(1973)は、運動初期の一過性の発汗増加には交感神経活動の増大や副交感神経の緊張の低下が関与していると説明している。また、運動開始に伴う精神的興奮が発汗反応に影響するとの報告もなされている(Nakayama,1969 ; Ogawa,1975)。何らかの非温熱性因子が運動開始直後の発汗反応に影響している可能性が考えられるが、如何なる因子なのか、またそれが運動中にも継続して発汗を促進するのか否かについては検討する余地が残されている。

## 5 . 要約

非定常状態における運動時の深部体温と発汗量の関係について再検討するため、男子大学生6名に室温が28°C、相対湿度が50%の環境下で、40% $\dot{V}O_2$ max強度の自転車運動を40分間行わせ、 $T_{re}$ ,  $T_{es}$ ,  $T_{arm}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}$ , Fswを測定した。得られた結果は次の通りである。

- (1) 運動初期において $T_{re}$ は $T_{es}$ よりも緩やかに上昇した。
- (2)  $T_{re}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係の勾配はある体温(breaking point)を境に変化した。が、 $T_{es}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係の勾配は変化しなかった。

(3) 運動開始直後に  $T_{re}$ ,  $T_{es}$ ,  $T_{sk}$  および  $T_{arm}$  はまだ上昇していないにもかかわらず,  $\dot{m}_{sw}$  と  $F_{sw}$  は増加した。

以上のことから,  $T_{re}$  と  $\dot{m}_{sw}$  の関係における breaking point の存在は, 運動初期における  $T_{re}$  の応答の遅れによって生じた見かけ上の現象であると考えられる。また運動開始直後の発汗急増の機序として, 運動に伴って生じる非温熱性因子が発汗中枢活動を高めるためであると考えられる。

## VI章．食道温と発汗量の関係からみた運動強度と発汗反応の関係（実験Ⅲ）

### 1．目的

実験Ⅰにおいて、運動時の発汗中枢活動は同一直腸温( $T_{re}$ )で比較すると運動強度が強いほど高進することが示唆された。実験Ⅱにおいて $T_{re}$ は食道温( $T_{es}$ )よりも運動初期の応答が遅いため、非定常状態における深部体温の指標としては $T_{re}$ よりも $T_{es}$ の方が望ましいと考えられた。したがって実験Ⅰで発汗中枢活動が運動強度によって異なるとしたのは深部体温の指標として $T_{re}$ を用いたための見かけ上の現象であった可能性がある。そこで本実験では、深部体温の指標として $T_{es}$ を用いて実験し、 $T_{re}$ の場合と同様の結果が認められるか否かを検証することにした。

### 2．方法

#### (1) 被検者

被検者は健康な男子学生4名であり、その年齢、体重および身長 of 平均値±標準偏差(SD)、それぞれ $24.8 \pm 1.9$ 歳、 $67.0 \pm 6.2$ kgおよび $174.5 \pm 3.4$ cmであった。

#### (2) 運動条件および環境条件



運動および環境条件は実験 I に準じて行った。すなわち環境制御室の中で、自転車エルゴメーター(津山金属社 Cateye EC-1000)を用いて、500kpm/min, 700kpm/minおよび900kpm/minの3種類の運動を、それぞれ別の日の同一時間帯に各40分間行った。いずれの場合にも室温は $25.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度は $45 \pm 5\%$ であった。

### (3) 実験手順

実験手順は実験 I の場合と同様であった(P.17参照)。

### (4) 測定項目および方法

Tesは口より食道内に挿入した熱電対によって測定し、皮膚温は胸部、上腕部、大腿部および下腿部の4ヶ所に熱電対を貼付することによって測定した。また局所発汗量( $\dot{m}_{sw}$ )測定部の皮膚温(前腕部皮膚温: $T_{arm}$ )を測定するために発汗カプセル内に熱電対を設置した。熱電対の出力は実験 I と同じ方法で記録し、その記録から平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ )および平均体温( $\bar{T}_b = 0.9 \times T_{es} + 0.1 \times \bar{T}_{sk}$ )を算出した(P.18とP.40参照)。

$\dot{m}_{sw}$ の測定部位は右前腕屈側中央部とし、汗の拍出頻度(Fsw)の計測のために、左前腕屈側中央部および左上腕内側部にも発汗カプセルを装着した。 $\dot{m}_{sw}$ 測定用カプセルの断面積は $8.0\text{cm}^2$ であり、これに $2.5\text{l/min}$ の乾燥窒素ガスを流した。Fsw測定用カプセルの断面積は $2.5\text{cm}^2$ であり、これに $2.5 \sim 3.0\text{l/min}$ の乾燥窒素ガスを流した。 $\dot{m}_{sw}$ およびFswの測定方法は実験 I と同様であった(P.18参照)。心拍数(HR)は胸部双極誘導( $\text{CM}_5$ )による心電図から求めた。

### (5) 統計処理

測定値の平均値の有意差検定には対応のあるStudent-t-testを用い、有意水準の判定基準はすべて5%とした。また、回帰直線の勾配の差の検定には共分散分析を行い、F分布の上側5%をもって有意とした。

### 3. 結果

図17に各実験条件で運動した時の $T_{es}$ 、 $\bar{T}_{sk}$ および $\dot{m}_{sw}$ の経時変化を被検者4名の平均値 $\pm$ SDで示した。 $T_{es}$ はいずれの条件においても運動の5分目頃から上昇し始め、運動の初期ないし中頃で比較的急速に上昇し、それ以後運動終了まで緩やかに上昇した。運動終了時の $T_{es}$ は、500kpm/min、700kpm/minおよび900kpm/min運動でそれぞれ $37.59 \pm 0.15^{\circ}\text{C}$ 、 $37.67 \pm 0.17^{\circ}\text{C}$ および $37.91 \pm 0.22^{\circ}\text{C}$ であり、いずれの条件間の差も有意であった。 $\bar{T}_{sk}$ は運動5分目頃に一旦低下するがそれ以後上昇し始め、運動5分目以降に運動強度による差が明らかになり、運動強度が強いほど高くなる傾向を示した。運動終了時の $\bar{T}_{sk}$ は、500kpm/min、700kpm/minおよび900kpm/min運動でそれぞれ $32.97 \pm 0.84^{\circ}\text{C}$ 、 $34.37 \pm 0.64^{\circ}\text{C}$ および $35.02 \pm 0.56^{\circ}\text{C}$ であり、いずれの条件間の差も有意であった。 $\dot{m}_{sw}$ はいずれの条件でも運動開始後15分目前後まで急増し、以後終了時まで緩やかに上昇した。また全般的に運動強度が強いほど $\dot{m}_{sw}$ は多く、500kpm/min、700kpm/minおよび900kpm/min運動の終了時の値はそれぞれ $0.54 \pm 0.12\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ 、 $0.76 \pm 0.20\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ および $0.89 \pm 0.18\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ であり、相互間の差は有意であった。

図18に $T_{es}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係を実験条件別に示した(いずれも4名の平均値を2分毎にプロットした)。いずれの条件においても $\dot{m}_{sw}$ は $T_{es}$ の上昇に伴っ

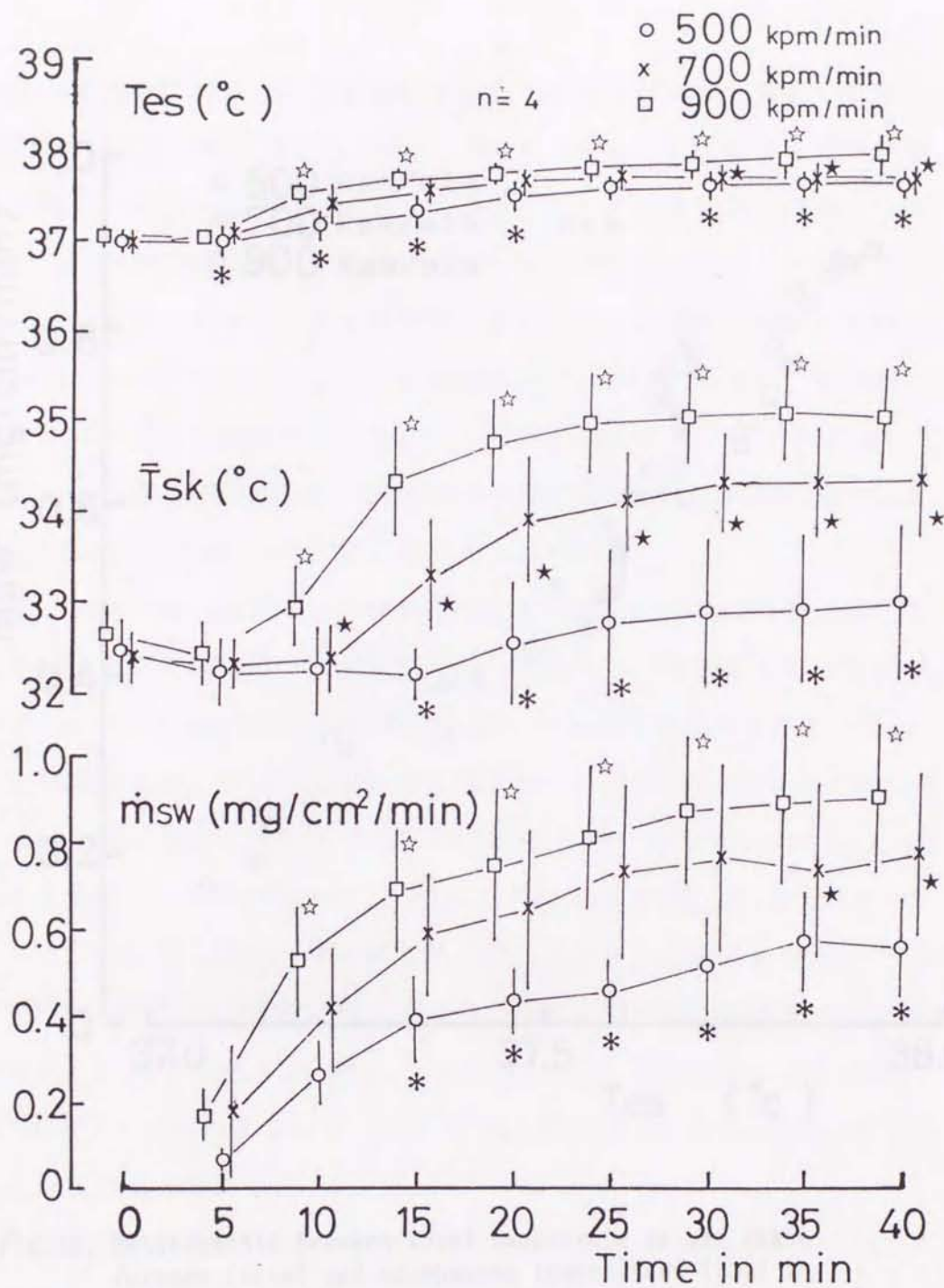


Fig.17. The time courses of esophageal temperature ( $T_{es}$ ), mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ) and local sweat rate at the right forearm ( $\dot{m}_{sw}$ ) during exercise under three experimental conditions. Values are expressed as mean  $\pm$  SD.

\* : significant difference from 700kpm/min ( $p < 0.05$ ).

★ : significant difference from 900kpm/min ( $p < 0.05$ ).

☆ : significant difference from 500kpm/min ( $p < 0.05$ ).

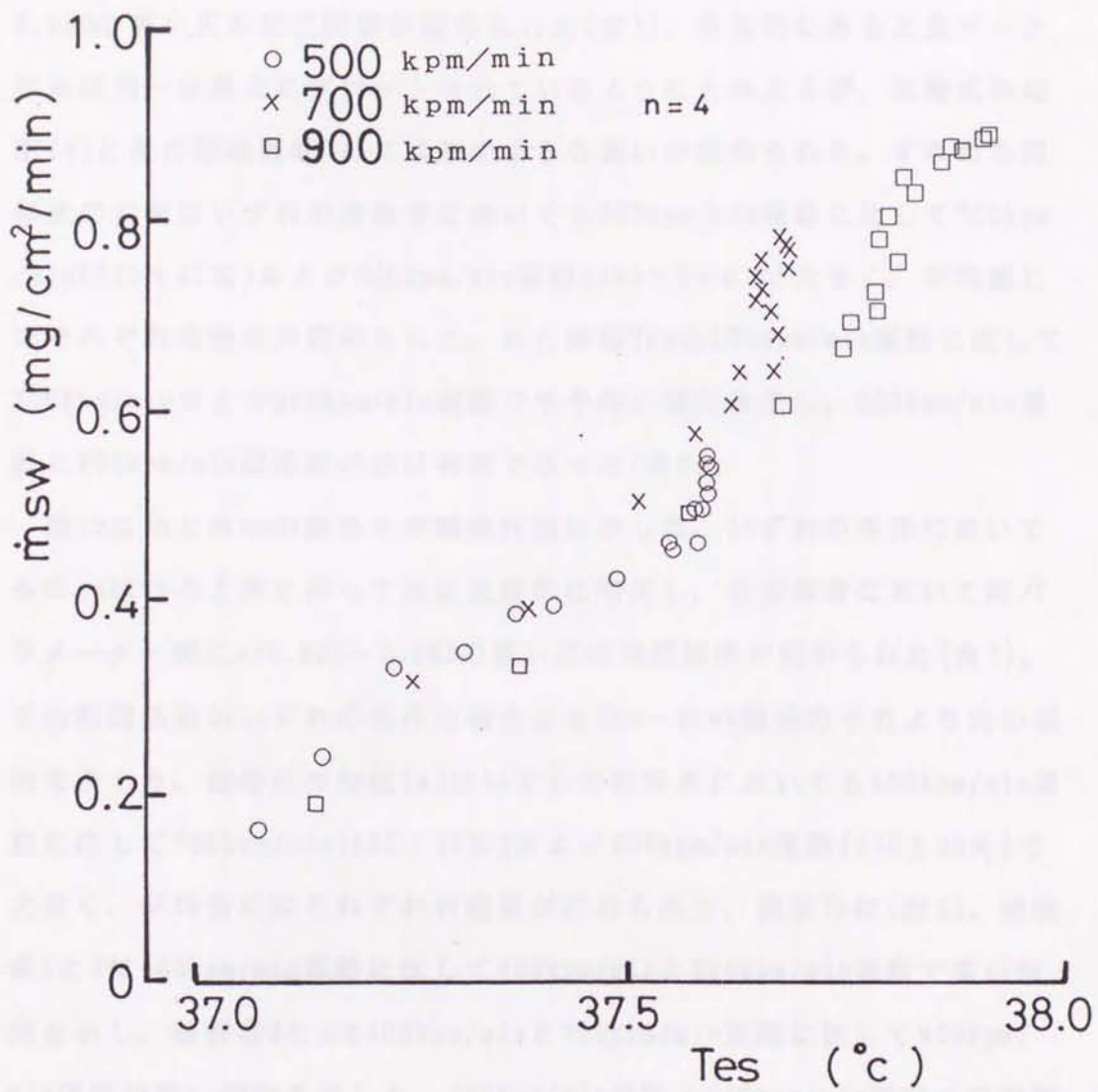


Fig.18. Relationship between local sweat rate at the right forearm ( $\dot{m}_{sw}$ ) and esophageal temperature (Tes) in the mean values of 4 subjects under three experimental conditions.

てほぼ直線的に増加し、全被検者において両パラメーター間に $r=0.843\sim 0.990$ の高い正の相関関係が認められた(表5)。全体的にみると全データがほぼ同一直線上にプロットされているようにも見えるが、回帰式の勾配(a)と発汗開始閾値 $T_{es}$ には次のような違いが認められた。すなわち回帰式の勾配はいずれの被検者においても500kpm/min運動に比して700kpm/min( $159\pm 27\%$ )および900kpm/min運動( $155\pm 32\%$ )で大きく、平均値にはそれぞれ有意差が認められた。また閾値 $T_{es}$ は500kpm/min運動に比して700kpm/minおよび900kpm/min運動でやや高い傾向を示し、500kpm/min運動と900kpm/min運動間の差は有意であった(表6)。

図19に $\bar{T}_b$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係を実験条件別に示した。いずれの条件においても $\dot{m}_{sw}$ は $\bar{T}_b$ の上昇に伴ってほぼ直線的に増加し、全被検者において両パラメーター間に $r=0.905\sim 0.993$ の高い正の相関関係が認められた(表7)。その相関係数はいずれの条件の場合にも $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ 関係のそれより高い傾向を示した。回帰式の勾配(a)はいずれの被検者においても500kpm/min運動に比して700kpm/min( $132\pm 22\%$ )および900kpm/min運動( $126\pm 28\%$ )で大きく、平均値にはそれぞれ有意差が認められた。閾値 $\bar{T}_b$ は(表8)、被検者1と2は500kpm/min運動に比して700kpm/minと900kpm/min運動で高い傾向を示し、被検者3と4は500kpm/minと700kpm/min運動に比して900kpm/min運動で高い傾向を示した。500kpm/min運動と900kpm/min運動の平均値間には有意差が認められた。

図20に $\bar{T}_b$ と $F_{sw}$ の関係を実験条件別に示した。いずれの条件においても $F_{sw}$ は $\bar{T}_b$ の上昇に伴ってほぼ直線的に増加し、全被検者において両パラメーター間に $r=0.615\sim 0.960$ の中程度ないし高い正の相関関係が認められた(表9)。回帰式の勾配(a)を条件間で比較したところ、個人差が大きく一般的傾向は明らかでなかった。また同一 $\bar{T}_b$ に対する900kpm/min運動時

Table 5. The regression equations ( $Y=aX+b$ ) for the relationship between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) and esophageal temperature ( $T_{es}$ ) under the three experimental conditions.

| Subject No. | 500 kpm/min |         |            | 700 kpm/min |         |            | 900 kpm/min |         |            |
|-------------|-------------|---------|------------|-------------|---------|------------|-------------|---------|------------|
|             | a           | b       | r (n)      | a           | b       | r (n)      | a           | b       | r (n)      |
| 1           | 0.540       | -19.748 | 0.959 (17) | 0.828       | -30.525 | 0.964 (18) | 0.599       | -22.003 | 0.990 (19) |
| 2           | 0.390       | -14.390 | 0.916 (17) | 0.797       | -29.781 | 0.971 (18) | 0.785       | -29.307 | 0.982 (18) |
| 3           | 0.719       | -26.295 | 0.915 (18) | 0.997       | -36.535 | 0.921 (19) | 1.059       | -38.907 | 0.911 (19) |
| 4           | 0.847       | -31.211 | 0.975 (18) | 1.183       | -43.578 | 0.912 (19) | 1.348       | -49.906 | 0.843 (18) |
| Mean        | 0.624       | -22.911 |            | 0.951*      | -35.105 |            | 0.948*      | -35.031 |            |
| $\pm$ SD    | 0.174       | 6.383   |            | 0.154       | 5.549   |            | 0.283       | 10.474  |            |

r: correlation coefficient

n: number of data

\*: different from 500 kpm/min ( $p < 0.05$ )

Table 6. Tes thresholds for initiation of sweating under three experimental conditions.

| Subject No. | 500kpm/min | 700kpm/min | 900kpm/min |
|-------------|------------|------------|------------|
| 1           | 36.57      | 36.87      | 36.73      |
| 2           | 36.90      | 37.37      | 37.33      |
| 3           | 36.57      | 36.64      | 36.74      |
| 4           | 36.85      | 36.84      | 37.01      |
| Mean        | 36.72      | 36.93      | 36.95*     |
| ± SD        | 0.15       | 0.27       | 0.25       |

Tes: esophageal temperature

\*: different from 500 kpm/min ( $p < 0.05$ )

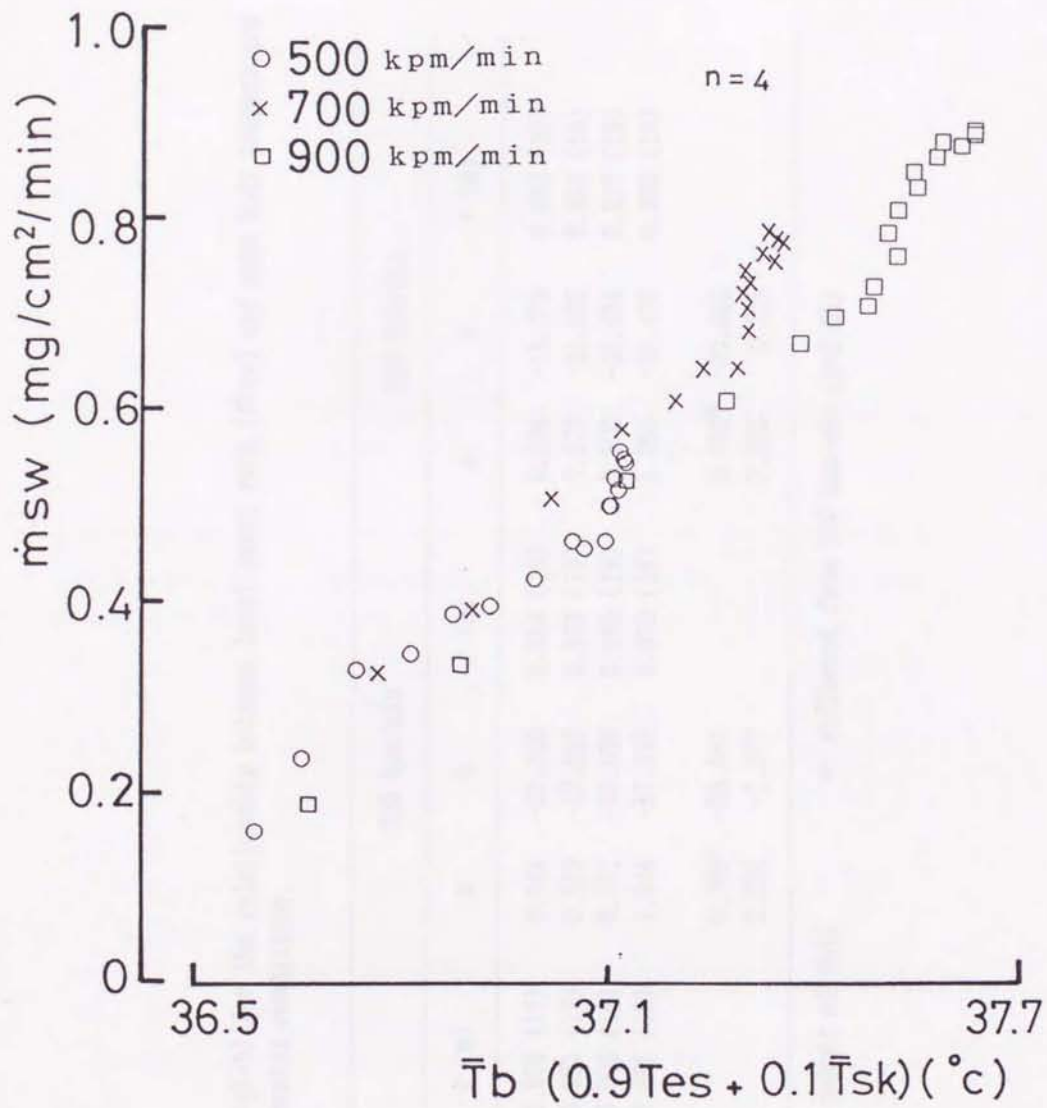


Fig.19. Relationship between local sweat rate at the right forearm ( $\dot{m}_{sw}$ ) and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) in the mean values of 4 subjects under three experimental conditions.



Table 7. The regression equations ( $Y=aX+b$ ) for the relationship between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) under the three experimental conditions.

| Subject No. | 500 kpm/min |         |            | 700 kpm/min |         |            | 900 kpm/min |         |            |
|-------------|-------------|---------|------------|-------------|---------|------------|-------------|---------|------------|
|             | a           | b       | r (n)      | a           | b       | r (n)      | a           | b       | r (n)      |
| 1           | 0.477       | -17.171 | 0.970 (17) | 0.642       | -23.300 | 0.984 (18) | 0.504       | -18.275 | 0.992 (19) |
| 2           | 0.327       | -11.887 | 0.921 (17) | 0.539       | -19.828 | 0.984 (18) | 0.572       | -21.022 | 0.993 (18) |
| 3           | 0.798       | -28.862 | 0.905 (18) | 0.931       | -33.669 | 0.965 (19) | 0.900       | -32.634 | 0.928 (19) |
| 4           | 0.954       | -34.678 | 0.987 (18) | 1.044       | -37.925 | 0.970 (19) | 1.055       | -38.478 | 0.968 (18) |
| Mean        | 0.639       | -23.150 |            | 0.789*      | -28.681 |            | 0.758*      | -27.602 |            |
| $\pm$ SD    | 0.249       | 9.057   |            | 0.206       | -7.377  |            | 0.228       | 8.275   |            |

r: correlation coefficient

n: number of data

\*: different from 500 kpm/min ( $p < 0.05$ )

Table 8.  $\bar{T}_b$  thresholds for initiation of sweating under three experimental conditions.

| Subject No. | 500kpm/min | 700kpm/min | 900kpm/min |
|-------------|------------|------------|------------|
| 1           | 36.00      | 36.29      | 36.26      |
| 2           | 36.35      | 36.79      | 36.75      |
| 3           | 36.17      | 36.16      | 36.26      |
| 4           | 36.35      | 36.33      | 36.47      |
| Mean        | 36.22      | 36.39      | 36.44*     |
| $\pm$ SD    | 0.15       | 0.24       | 0.20       |

$\bar{T}_b$ : mean body temperature

\*: different from 500 kpm/min ( $p < 0.05$ )

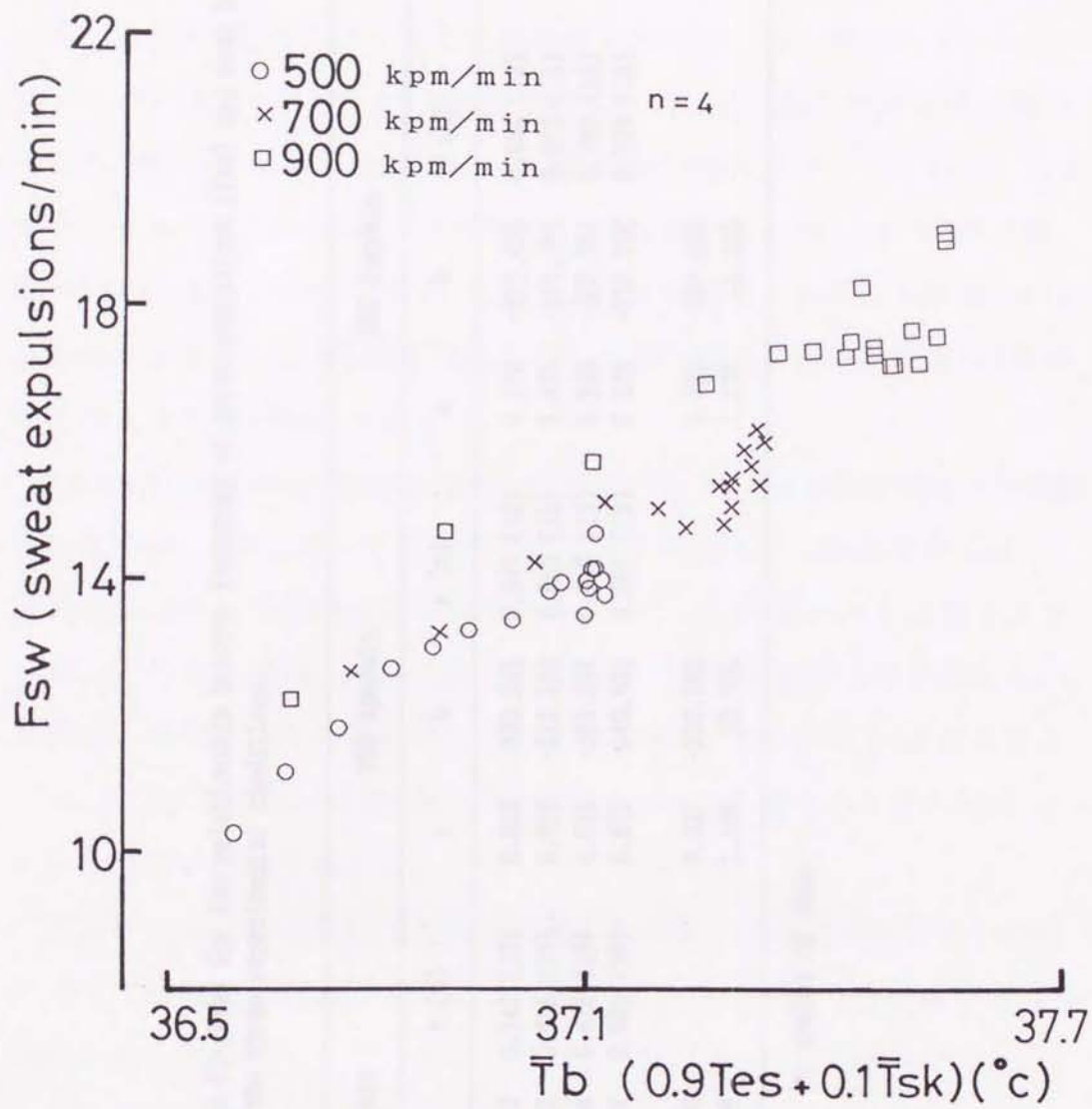


Fig.20. Relationship between frequency of sweat expulsions (Fsw) and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) under three experimental conditions. Each plot means the average values of 4 subjects.

Table 9. The regression equations ( $Y=aX+b$ ) for the relationship between frequency of sweat expulsions ( $F_{sw}$ ) and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) under the three experimental conditions.

| Subject No. | 500 kpm/min |          |            | 700 kpm/min |          |            | 900 kpm/min |          |            |
|-------------|-------------|----------|------------|-------------|----------|------------|-------------|----------|------------|
|             | a           | b        | r (n)      | a           | b        | r (n)      | a           | b        | r (n)      |
| 1           | 5.479       | -186.942 | 0.749 (17) | 8.803       | -309.343 | 0.947 (18) | 6.276       | -213.435 | 0.854 (19) |
| 2           | 2.840       | -92.213  | 0.615 (17) | 6.836       | -242.130 | 0.852 (18) | 3.474       | -115.392 | 0.878 (18) |
| 3           | 6.489       | -227.234 | 0.826 (18) | 4.832       | -165.857 | 0.837 (19) | 5.846       | -202.685 | 0.799 (19) |
| 4           | 11.923      | -426.372 | 0.960 (18) | 6.877       | -240.839 | 0.861 (19) | 6.333       | -219.768 | 0.739 (18) |
| Mean        | 6.683       | -233.190 |            | 6.837       | -239.542 |            | 5.482       | -187.820 |            |
| $\pm$ SD    | 3.306       | 121.828  |            | 1.404       | 50.769   |            | 1.175       | 42.260   |            |

r: correlation coefficient

n: number of data

のFswは他の2条件のそれよりもやや多い傾向を示した。

図21にFswと $\dot{m}_{sw}$ の関係を実験条件別に示した。いずれの条件においても $\dot{m}_{sw}$ はFswの増加に伴ってほぼ直線的に増加し、全被検者において両パラメーター間に $r=0.670\sim 0.963$ の中程度ないし高い正の相関関係が認められた(表10)。回帰式の勾配(a)を条件間で比較したところ、いずれの被検者においても500kpm/min運動に比して700kpm/min( $137\pm 19\%$ )および900kpm/min運動( $145\pm 43\%$ )で大きく、平均値にはそれぞれ有意差が認められた。また同一Fswで比較すると900kpm/min運動時の $\dot{m}_{sw}$ は他の2条件のそれよりも低い傾向を示した。

図22にTesとTarmの関係を実験条件別に示した。Tarmは500kpm/min運動中にはTesの上昇に伴ってわずかに低下する傾向を示したのに対して、700kpm/minおよび900kpm/min運動では $37.5\sim 37.6^{\circ}\text{C}$ 付近から急激に上昇した。その後、900kpm/min運動中のTarmは $37.8^{\circ}\text{C}$ 前後で上昇が抑えられ、最終的には700kpm/min運動時のそれと同程度( $31.7\sim 31.8^{\circ}\text{C}$ )の値に留まった。また900kpm/min運動時のTarmは同一Tesで比較すると他の2条件よりもやや低い傾向を示した。

図23にTesと $\bar{T}_{sk}$ の関係を実験条件別に示した。全体的にみると $\bar{T}_{sk}$ は $37.6^{\circ}\text{C}$ 付近のTesから急上昇し、 $37.8^{\circ}\text{C}$ 付近を境にその上昇が抑制される傾向を示した。

運動終了時のHRの平均値 $\pm$ SDは、500kpm/min、700kpm/minおよび900kpm/min運動でそれぞれ $106\pm 12$ beats/min、 $121\pm 8$ beats/minおよび $138\pm 14$ beats/minであり、いずれの条件間の差も有意であった。

#### 4. 考察

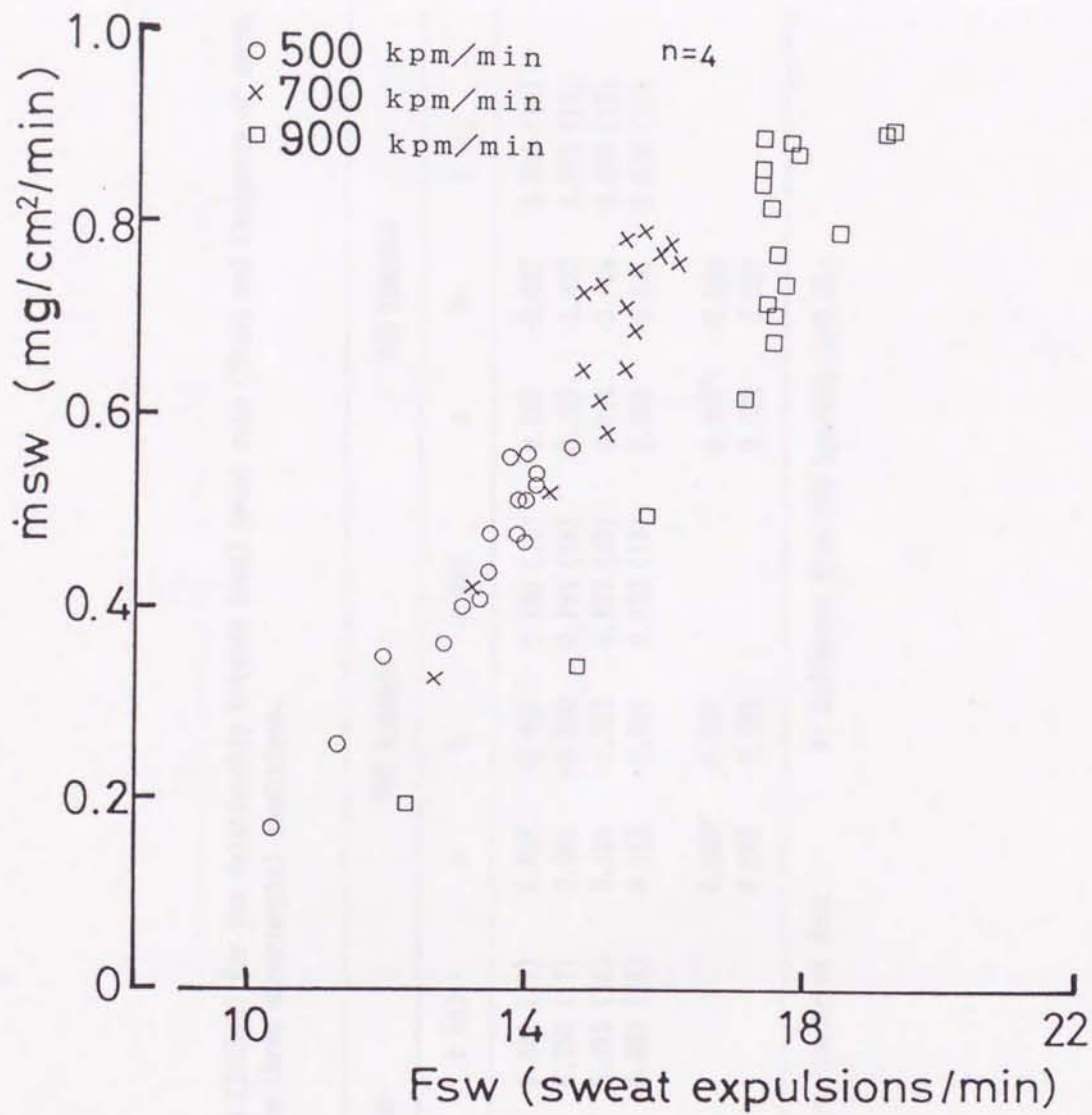


Fig.21. Relationship between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) and frequency of sweat expulsions (Fsw) under three experimental conditions. Each plot means the average values of 4 subjects.

Table 10. The regression equations ( $Y=aX+b$ ) for the relationship between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) and frequency of sweat expulsion ( $F_{sw}$ ) under the three experimental conditions.

| Subject No. | 500 kpm/min |        |            | 700 kpm/min |        |            | 900 kpm/min |        |            |
|-------------|-------------|--------|------------|-------------|--------|------------|-------------|--------|------------|
|             | a           | b      | r (n)      | a           | b      | r (n)      | a           | b      | r (n)      |
| 1           | 0.046       | -0.282 | 0.691 (17) | 0.067       | -0.627 | 0.948 (18) | 0.059       | -0.697 | 0.858 (19) |
| 2           | 0.058       | -0.427 | 0.752 (17) | 0.061       | -0.500 | 0.895 (18) | 0.127       | -1.432 | 0.875 (18) |
| 3           | 0.094       | -0.576 | 0.835 (18) | 0.139       | -1.012 | 0.837 (19) | 0.114       | -0.824 | 0.858 (19) |
| 4           | 0.075       | -0.511 | 0.963 (18) | 0.112       | -0.807 | 0.830 (19) | 0.085       | -0.565 | 0.670 (18) |
| Mean        | 0.068       | -0.449 |            | 0.095*      | -0.737 |            | 0.096*      | -0.880 |            |
| $\pm$ SD    | 0.018       | 0.110  |            | 0.032       | 0.193  |            | 0.026       | 0.332  |            |

r: correlation coefficient

n: number of data

\*: different from 500 kpm/min ( $p < 0.05$ )







一定強度運動中の  $\dot{m}_{sw}$  は  $T_{es}$  の上昇に伴ってほぼ直線的に増大し、いずれの条件においても両者間には高い正の相関関係が認められた(図18, 表5)。そして全体的にみるといずれの条件のデータもほぼ同一直線上にプロットされ、運動強度別の発汗反応の違いは明瞭ではなかった。実験Iにおいて(山崎ら, 1991),  $\dot{m}_{sw}$  は同一直腸温( $T_{re}$ )で比較すると運動強度が強いほど明らかに多かったが、深部体温の指標として  $T_{es}$  を用いた本実験結果ではそのような関係が明らかでなかった。 $T_{re}$  は時間経過に伴ってほぼ直線的に上昇したのに対して(実験I; 山崎ら, 1991),  $T_{es}$  はいずれの条件においても運動の初期ないし中頃で急速に上昇し、以後上昇率が鈍化した(図17)。また実験Iと本実験における  $\dot{m}_{sw}$  の経時変化はいずれの条件でも類似していた。したがって上記の両実験間の結果の相違は運動中の  $T_{re}$  と  $T_{es}$  の応答動態の違いに起因すると考えられる。 $T_{es}$  は急速な体熱変化に対する追従性に優れ、かつ深部体温(脳温)のよい指標になるといわれているのに対して(Shiraki et al., 1986),  $T_{re}$  は運動中の応答が遅い(実験II)。したがって  $T_{re}$  を深部体温の指標とした場合に認められた運動強度による明らかな発汗反応の違いは  $T_{re}$  の応答の遅れによる見かけ上のものと考えられる。 $T_{es}$  の変化に  $\bar{T}_{sk}$  の変化を加味した  $\bar{T}_b$  と  $\dot{m}_{sw}$  との相関が  $T_{es}$  と  $\dot{m}_{sw}$  とのそれよりも高い傾向を示したことは(表5, 表7), 深部体温に加えて平均皮膚温も発汗活動への入力因子の1つであるという見解(Nadel et al., 1971a)を支持すると考えられる。

運動時の  $T_{es} - \dot{m}_{sw}$  関係および  $\bar{T}_b - \dot{m}_{sw}$  関係は全体的には運動強度に関係なくほぼ一本の直線で表されるが、その勾配と発汗開始閾値体温( $T_{es}$  および  $\bar{T}_b$ )には運動強度によって若干の違いが認められた。すなわち、これらの勾配はいずれの被検者でも500kpm/min運動に比して700kpm/minお

よび900kpm/min運動で大きく、平均値にはそれぞれ有意差が認められた(表5,表7)。また閾値体温( $T_{es}$ ,  $\bar{T}_b$ )は500kpm/min運動に比して900kpm/min運動で有意に高かった(表6,表8)。次にこのような運動強度による回帰式の勾配や閾値体温の相違が発汗中枢機構と末梢機構のいずれに由来しているかを $F_{sw}$ を用いて検討してみた。

発汗中枢の反応性を反映する $\bar{T}_b - F_{sw}$ 関係の勾配には個人差が大きく、運動強度との関係は明らかでなかった(表9)。一方、末梢機能の反応性を反映する $F_{sw} - \dot{m}_{sw}$ 関係の勾配はいずれの被検者でも500kpm/min運動に比して700kpm/minおよび900kpm/min運動で大きく、平均値にはそれぞれ有意差が認められた(表10)。したがって、 $T_{es} - \dot{m}_{sw}$ 関係および $\bar{T}_b - \dot{m}_{sw}$ 関係で認められた運動強度による勾配の違いは、主に末梢機能の感受性の違いに起因するものと考えられる。 $F_{sw} - \dot{m}_{sw}$ 関係において900kpm/min運動時の $\dot{m}_{sw}$ は同一 $F_{sw}$ で比較して他の2条件よりもやや低い値を示した。これは900kpm/min運動では他の2条件に比して発汗中枢活動がより高くないと発汗が開始しないことを意味し、同時に900kpm/min運動時の閾値体温( $T_{es}$ ,  $\bar{T}_b$ )が500kpm/min運動時のそれよりも高かった原因が末梢機構にあることを示唆している。700kpm/min運動時の閾値体温( $T_{es}$ ,  $\bar{T}_b$ )と他の2条件のそれとの間に有意差が認められなかったのは、個人差が大きく、標準偏差が大きかったためであろうと考えられる。

発汗神経末端から放出される伝達物質の量や伝達物質に対する汗腺の感受性は汗腺周囲の皮膚温の上昇によって増進することが報告されていることから(MacIntyre et al., 1968 ; Nadel et al., 1971a ; Ogawa, 1970 ; Ogawa and Asayama, 1986), 上記の末梢機構の差異には $T_{arm}$ の違いが関与している可能性が考えられる。 $T_{es} - T_{arm}$ 関係において(図22),  $T_{arm}$ は500kpm/min運動よりも700kpm/minおよび900kpm/min運動で明らか

に高いレベルまで上昇したことから、これが後2条件の場合に末梢の感受性を高進させるように作用したであろうし、さらにTarmを同一Tesで比較すると、900kpm/min運動時は他の2条件よりもやや低い値を示したから、これが900kpm/min運動時の閾値体温を上昇させるように作用したと推察される。700kpm/min運動と900kpm/min運動の間でTes- $\dot{m}_{sw}$ 関係および $\bar{T}_b$ - $\dot{m}_{sw}$ 関係の勾配に差異が生じなかったのは、900kpm/min運動時のTarmが37.8°C付近で上昇が抑えられ、最終的には700kpm/min運動時と900kpm/min運動時のその上昇(31.7~31.8°C)がほぼ等しくなったことによると考えられる。900kpm/min運動中におけるTarmの上昇抑制には主に次の二要因が関与していると推察される。一つは発汗量増加に伴う皮膚表面の冷却作用の増大であり、他は前腕部の皮膚血流量の増加は長時間運動中にTesが38°C前後に達するとレベルオフしてしまうことである(Brengelman et al., 1977 ; Nadel et al., 1979 ; 山崎ら, 1993a)。長時間運動中にみられる皮膚血流量の増加抑制には、放熱機能を犠牲にしても中心血液量を確保しようとする循環の維持機構が作動するためであると推定されている(Brengelman et al., 1977 ; Nadel et al., 1979 ; 山崎, 1993a)。したがって900kpm/min運動のように運動強度が比較的強い場合には、この機構が作動して前腕皮膚血流量の増加が抑制され、ひいてはTarmの上昇抑制が起こったのであろうと推察される。

900kpm/min運動時には同一Tesに対するTarmが他の2条件よりも低い傾向を示したのは、脚運動開始時に生じる前腕血流量の一時的な減少(Johnson and Park, 1982)の程度が900kpm/min運動時にはそれ以下の強度のときよりも顕著であることを示唆している。Taylor et al. (1988)は仰臥位自転車運動中の前腕の皮膚血管拡張閾値Tesは運動強度が125W以上であれば強度が強いほど高くなるが、これ以下の強度では変わらないこと

を報告している。900kpm/min(150W)は125W以上の運動強度であり、他の2条件はそれ以下の強度である。したがって900kpm/min運動では他の2条件よりも皮膚血管拡張開始が遅れ、その結果 $T_{arm}$ の上昇開始も遅れたのであろうと推察される。

上記の運動強度による発汗反応の相違が、前腕部以外の発汗反応にも生じるか否かについては検討の余地がある。運動強度による発汗反応の違いが皮膚温の違いに密接に関係していると仮定すると、全身の皮膚温の変化を反映する $\bar{T}_{sk}$ を観察することによって全身の平均的な発汗反応の違いを推定できると考えられる。 $\bar{T}_{sk}$ を $T_{es}$ に対してプロットしてみると(図23)、運動初期の $\bar{T}_{sk}$ は各条件間でほぼ一致しており、 $T_{es}$ が37.6°C以上になると $\bar{T}_{sk}$ は急に増大する傾向がある。そして900kpm/min運動中の $\bar{T}_{sk}$ は $T_{arm}$ と同様に37.8°C付近の $T_{es}$ を境として上昇が抑制されている。これらの結果から考えると、前腕以外の部位で測定した場合の発汗開始閾値 $T_{es}$ は運動強度による差がないかもしれない。そして $T_{es}$ -発汗量関係勾配については前腕部以外の部位であっても今回得られた結果と類似した傾向を示すであろうと推察される。

## 5. 要約

一定強度運動時の発汗調節が運動強度によって影響されるか否かを明らかにするために、健康な男子大学生4名に500, 700および900kpm/minの3種類の自転車運動を各40分間行わせ、その間に $T_{es}$ ,  $\bar{T}_b$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $T_{arm}$ ,  $\dot{m}_{sw}$ ,  $F_{sw}$ 等を測定し、運動中の $T_{es}$ - $\dot{m}_{sw}$ 関係および $\bar{T}_b$ - $\dot{m}_{sw}$ 関係等を検討した。得られた結果は次の通りである。

(1) 運動強度の違いによる  $T_{es} - \dot{m}_{sw}$  関係の差異は実験 I でみた  $T_{re} - \dot{m}_{sw}$  関係の場合ほど明らかでなかった。

(2) 700kpm/min および 900kpm/min 運動時の  $T_{es} - \dot{m}_{sw}$  関係および  $T_b - \dot{m}_{sw}$  関係の勾配は 500kpm/min 運動時のそれよりもそれぞれ有意に大きかった。

(3) 900kpm/min 運動時の発汗開始閾値体温 ( $T_{es}, T_b$ ) は 500kpm/min 運動時のそれよりも有意に高かった。

(4)  $T_b - F_{sw}$  関係の勾配には運動強度間で一定の傾向は認められなかった。

(5) 700kpm/min および 900kpm/min 運動時の  $F_{sw} - \dot{m}_{sw}$  関係の勾配は 500kpm/min 運動時のそれよりもそれぞれ有意に大きかった。また 900kpm/min 運動時の初期の  $\dot{m}_{sw}$  は同一の  $F_{sw}$  で比較して他の 2 条件よりも少ない傾向を示した。

(6) 前項の  $F_{sw} - \dot{m}_{sw}$  関係で認められた運動強度による違いは発汗測定部の皮膚温の変化に密接に関係していた。

以上のことから、一定強度運動時に運動強度がある程度強くなると (700~900kpm/min の範囲) 深部体温 - 発汗量関係の勾配は増大し、かつ発汗開始閾値体温は上昇するが、これは主に末梢機能の感受性の変化に起因していると考えられる。

## VII章．運動中の発汗波記録法の改善 (実験IV)

### 1．目的

汗は汗腺から皮膚表面に拍動的に排出され、その拍出は身体の各部位で同期することが認められている(Albert and Palmes,1951 ; Takagi et al.,1966 ; Van Beaumont,1969)。そしてその拍出頻度(Fsw)は体温の上昇に伴って直線的に増加する(Sugenoya and Ogawa,1985)。近年、microneurographyを用いた皮膚交感神経活動の記録によって、個々の汗の拍出波に対応する発汗神経性のバーストが認められた(Sugenoya et al.,1990)。これらの報告は、汗の拍出が中枢性発汗神経活動を反映すること、したがってFswの計測によって発汗中枢の活動性が評価できることを示している。さらに、Fswに対する発汗量の変化によって末梢機能の反応性を評価することも可能である。このようにFswは温熱生理学的にも運動生理学的にも極めて重要な指標であるが、多量に発汗する場合には、しばしば発汗波が不明瞭になって、個々の拍出波の同定が困難になる。そこで本実験では比較的多量に発汗する場合でも個々の発汗波を明瞭に記録できるように換気カプセル法を改良することにした。

### 2．方法

換気カプセル法による発汗波の記録は発汗量が増加すると不明瞭にな

る。この主な原因は、汗が多量に出ると蒸発に要する時間が長くなるため、皮膚表面が濡れるようになることであると考えられる。これを避けるために、発汗量が比較的少ない部位(前腕屈側部など)を選んで、小型のカプセルを用い、さらに発汗カプセルへの流入空気の量を増加させる等の工夫をしてみた。様々なサイズのカプセル(皮膚面積(皮膚面積に対するカプセルの容積), 1.1 (1.0), 2.5 (1.1), 5.3 (1.2), 8.0 (1.3), 9.1 cm<sup>2</sup> (1.4 cm))と気流(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 l/min)を組み合わせ、最も適当なカプセルのサイズと気流はそれぞれ2.5 cm<sup>2</sup>と2.0l/minであることが判明した。またカプセル内に流入する窒素ガスの温度( $T_{N_2}$ )を高めることによって、カプセル内の汗の蒸発を促進させる方法について検討してみた(図24)。すなわち、カプセルの流入側のチューブの一部(長さ:9cm)をアルミ製にし、その中に細いニクロム線を封入して、流入ガスの温度を上昇させるようにした。さらにカプセル内面と流出側チューブ内面(カプセル-湿度センサー間の距離:50cm)の結露を防ぐために、この部分をニクロム線を内蔵した断熱材で覆った。カプセル内および湿度センサー部の温度は熱電対で測定した。2系統のニクロム線に供給する電源の電圧は、カプセル内と湿度センサー部の温度が等しくなるように手動で調節した。

$T_{N_2}$ が高すぎると被検者の不快感が増して、これが発汗中枢活動に影響し、さらには $F_{sw}$ に影響する可能性がある。 $T_{N_2}$ を種々に変えて検討したところ、45°C以下では1時間加温し続けても不快を訴える者はいなかった。そこで、 $T_{N_2}$ を常に45°Cに保つことにした。

$F_{sw}$ 計測を困難にする第二の原因は、発汗波に緩やかな変動成分が存在することである。緩やかな変動成分を除去するために、微分アンプ(日本光電社 ED-601G ; 微分時定数:50msec)を用いて発汗波の微分波形を求め





た。

### 3. 試行

上記の方法の効果を検証するために、健康な男性6名(年齢:21~28歳)を対象に実験を行った。

被検者はショートパンツのみを着用し、室温が27°C、相対湿度が35%の環境下で、約40分間座位安静を保持した。その間に3つの円筒形のアクリル製発汗カプセルと5つの熱電対を装着した。発汗波は左前腕屈側部の互いに接近した2ヶ所の皮膚域から連続的に記録し、これらの記録からFswを計測した。Fsw測定用カプセルの断面積は2.5cm<sup>2</sup>であり、これに2.0l/minの乾燥窒素ガスを流した。一方のカプセル内のT<sub>N2</sub>を上記の方法によって45°Cに維持し、他方のカプセル内T<sub>N2</sub>は加温しなかった。局所発汗量(m<sub>sw</sub>)の測定部位は胸部とし、9.1cm<sup>2</sup>の断面積のカプセルに2.5l/minの乾燥窒素ガスを流した。各カプセルから流出するガスの湿度を静電容量湿度計(Vaisala社 HMP133Y)によって連続的に測定し、その出力をペンレコーダーおよびデータレコーダーによって記録した。Fsw測定用の湿度計の出力はローパスフィルタ(NF回路設計ブロック社 FV-664, 遮断周波数:1.00Hz以上)に接続し、ノイズを除去した。

食道温(T<sub>es</sub>)および皮膚温は実験IIと同様に測定し、それぞれの結果から平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ )と平均体温( $\bar{T}_b$ )を算出した(P.18とP.40参照)。

被検者は自転車エルゴメーター(モナーク社 829E)上で5分間安静を保持した後、360kpm/minの強度で5分間の運動を行い、引き続き720kpm/minの強度で30分間運動した。

図25に、実験の結果の1例を示した。加温側のカプセル内 $T_{N2}$ は $45.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ に調節されて一定であったが、非加温側のカプセル内 $T_{N2}$ は局所皮膚温の影響を受けて $27.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ から $31.5 \pm 1.0^\circ\text{C}$ へ上昇した。したがって加温側における飽和水蒸気圧(72mmHg)は、非加温側におけるそれ(32~37mmHg)の約2倍であったことになる。図25-AおよびBはそれぞれ非加温側の発汗波と加温側の発汗波の記録である。非加温側の発汗波の記録は不明瞭であるのに対して、加温側のそれは明瞭であり、加温によって各波の同定がより容易になり、かつ計測されたFswの信頼性や客観性が高まることを示している。非加温側の記録では胸部発汗量が約 $0.8\text{ml}/\text{cm}^2/\text{min}$ を超えるとFsw計測はかなり困難になったが、加温側の記録では発汗量(~ $1.0\text{ml}/\text{cm}^2/\text{min}$ )が増加しても容易にFswを計測できた。図25-Cは加温側で得られた発汗パターンの微分波の記録である。微分することによって緩やかな変動成分が除かれ、Fswの計測がさらに容易になった。しかし、Fsw計測の際には原波形を参照することが必要であると考えられる。

局所の発汗反応は局所皮膚温の影響を受けることが報告されている(MacIntyre et al., 1968 ; Nadel et al., 1971a ; Ogawa, 1970 ; Ogawa and Asayama, 1986)。したがって本法で用いる局所加温が局所発汗反応に影響し、さらにはFswに影響するかもしれない。局所加温による発汗促進は、神経-腺接合部で遊離される神経伝達物質の量の増加と、伝達物質に対する汗分泌細胞の感受性の増大とによって起こるとされている(Ogawa and Asayama, 1986)。つまり局所加温の発汗反応への作用は、中枢機構に対してではなく末梢機構に対して生じると考えられる。したがって、今回行った局所加温によるFswへの影響は完全には否定できないが、その影響は極めて小さかったと推察される。実際に加温測と非加温測におけるFswは同じであり、そのFswは先行研究の結果と同様に $5 \sim 30/\text{min}$ の

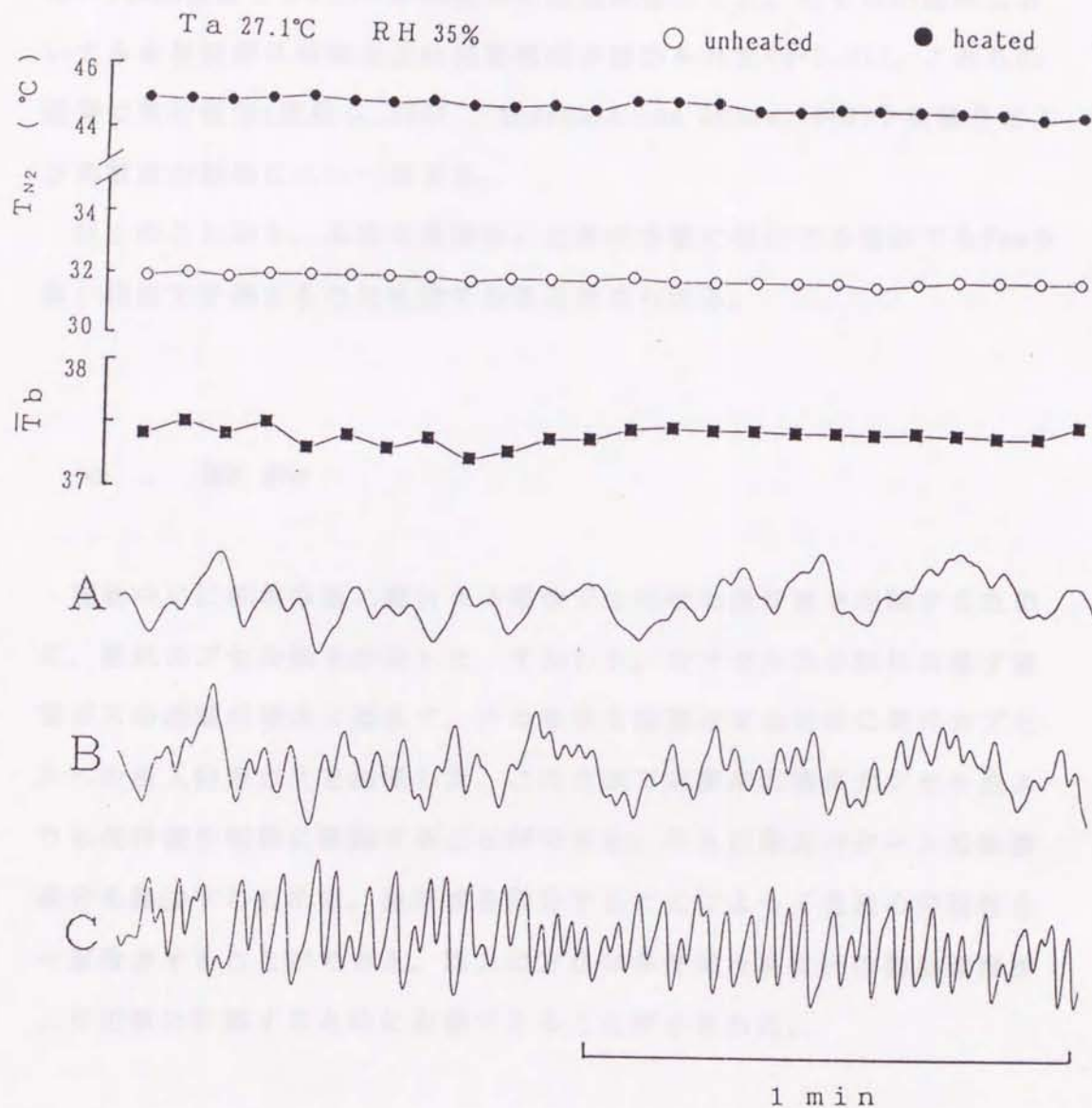


Fig.25. Simultaneous recordings of patterns of sweating under the unheated condition (A) and the heated condition (B) and the derivative of sweat expulsions calculated from record B (C).

$T_{N_2}$ , nitrogen gas temperature within sweat capsule;  
 $\bar{T}_b$ , mean body temperature;  $T_a$ , ambient temperature;  
 RH, relative humidity

範囲内にあった(近藤ら,1987 ; Sugeno and Ogawa,1985)。

図26-A, -B, -Cに, 720kpm/min強度の運動中における $\bar{T}_b - \dot{m}_{sw}$ 関係,  
 $T_b - F_{sw}$ 関係および $F_{sw} - \dot{m}_{sw}$ 関係の典型例を示した。いずれの関係にお  
いても全被検者に有意な正の相関関係が認められた( $p < 0.01$ )。これらの  
結果は先行報告(近藤ら,1987 ; Sugeno and Ogawa,1985)や実験IIおよ  
び実験IIIの結果によく一致する。

以上のことから, 本法は運動時に比較的多量に発汗する場合でも $F_{sw}$ を  
高い精度で計測するのに有効であると考えられる。

#### 4. 要約

運動中に比較的多量に発汗する場合でも明瞭な発汗波を記録するた  
めに, 換気カプセル法を改良した。すなわち, カプセルの小型化と流す窒  
素ガスの流速の増大に加えて, 汗の蒸発を促進させるために発汗カプセ  
ルへの流入窒素ガスを加温した。この方法では従来の換気カプセル法よ  
りも発汗波を明瞭に記録することができた。さらに発汗パターンの徐波  
成分を除去するために, 発汗波を微分することによって各波の弁別性を  
一層改善することができた。以上の方法は多量発汗時に汗の拍出頻度を  
より正確に計測するために有効であることが示された。

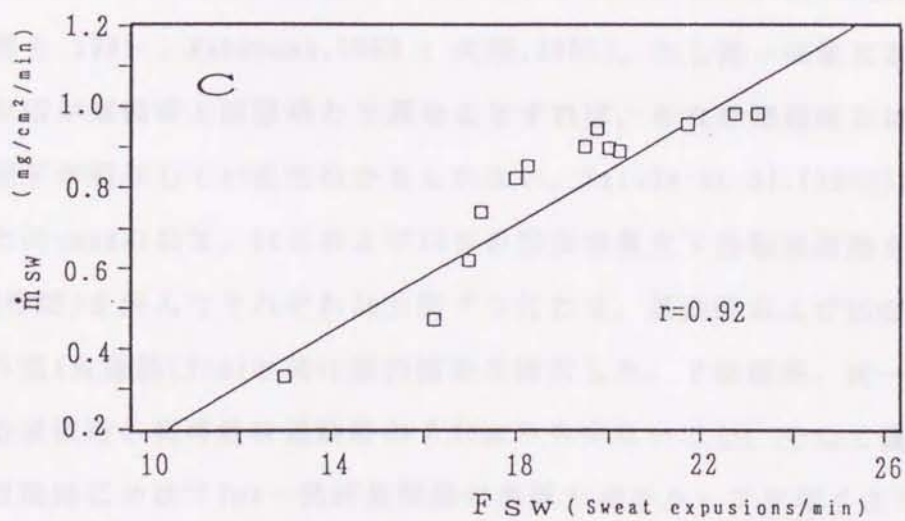
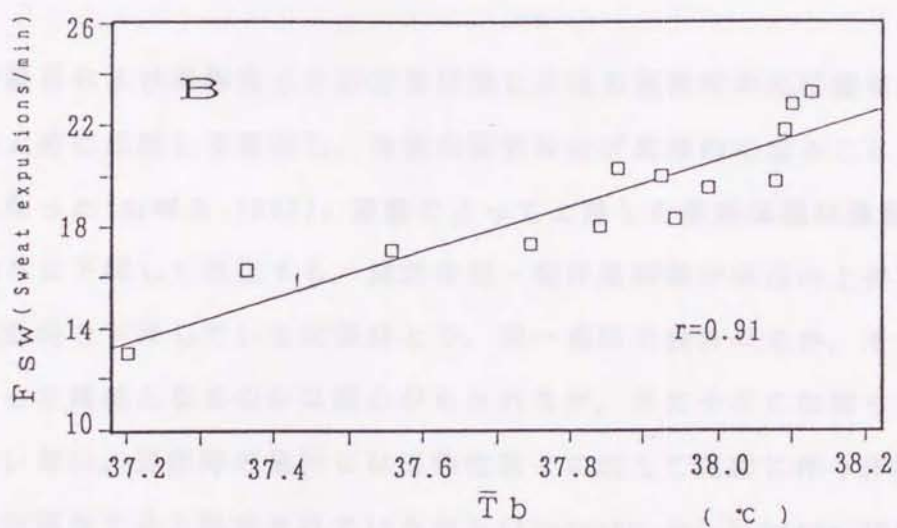
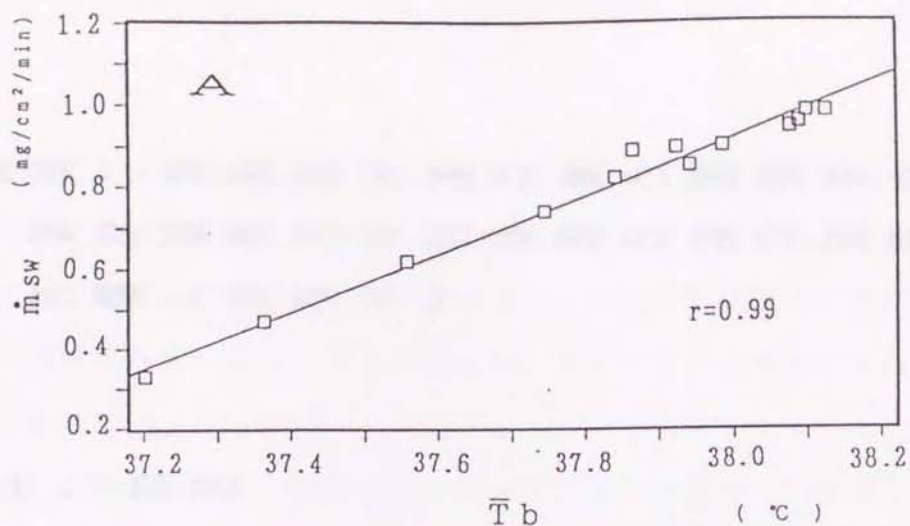


Fig.26. Relationships between  $\dot{m}_{sw}$  and  $\bar{T}_b$  (A),  $F_{sw}$  and  $\bar{T}_b$  (B), and  $\dot{m}_{sw}$  and  $F_{sw}$  (C) during a subject's exercise (720 kpm/min). Each plot represents the average value for every 2 min.

$\dot{m}_{sw}$ , local sweat rate at the chest;  $\bar{T}_b$ , mean body temperature;  $F_{sw}$ , frequency of sweat expulsion

## VIII章．食道温と発汗量の関係から みた運動時と回復時の発汗反応の 比較（実験V）

### 1．目的

実験IIおよび実験IIIより非定常状態における運動時の発汗量は深部体温の上昇に比例して増加し、両者の関係はほぼ直線的になることが明らかになった(山崎ら,1992)。運動によって上昇した深部体温は運動終了後は徐々に下降して回復する。深部体温-発汗量関係が体温の上昇している運動時と下降している回復時とで、同一直線で表されるか、それとも異なった直線となるのかは関心がもたれるが、まだ十分には明らかにされていない。運動時の発汗には温熱性因子に加えて運動に伴う非温熱性因子が関与すると推定されているから(Asmussen and Nielsen,1947 ; 宮側ら,1985 ; Nakayama,1969 ; 大西,1991)、もし同一体温における発汗反応が運動時と回復時とで異なるとすれば、それは運動時には非温熱性因子が関与しているためかもしれない。Saltin et al.(1970)は、健常者に $\dot{V}O_2\max$ の25%、50%および75%の強度の最大下自転車運動を、休息(30分間)を挟んでそれぞれ30分間ずつ行わせ、運動時および回復時の深部体温(食道温:Tes)と発汗量の関係を検討した。その結果、同一Tesにおける回復時の発汗量は運動時のそれよりも少ないこと、そして運動時から回復時にかけてTes-発汗量関係は時計方向のループを描くように変化したことを報告している。さらにSaltin et al.(1972)は高強度の自転車運動によって疲労困憊に至った直後の発汗量減少がTes低下よりも緩やか

であることを観察している。このように運動終了後の深部体温-発汗量関係は運動中のそれとは異なるし、また最大下運動後と最大運動後の両者の関係も異なるようである。このような運動時と回復時の発汗反応の相違の原因が発汗中枢機構にあるのか、それとも末梢機構にあるのかは明らかでない。

そこで本実験では、深部体温-発汗量関係が運動時と回復時とで異なるか否かを確認するとともに、両者の発汗反応が異なるとすればそれは中枢機構に由来するのか、あるいは末梢機構に由来するのか、それともその両者によるのかについても検討を加えることにした。

## 2. 方法

### (1) 被検者

健康な男子大学生12名を6名ずつの2グループに分け、2つの実験に割り当てた。実験1の被検者の年齢、体重および身長の平均値(範囲)はそれぞれ25歳(21~28歳)、67kg(63~69kg)および171cm(165~176cm)であり、実験2ではそれぞれ23歳(20~24歳)、70kg(64~75kg)および174cm(167~183cm)であった。

### (2) 運動条件および環境条件

運動には自転車エルゴメーター(モナーク社 829E)を用いた。実験1は最大下運動であり、360kpm/minの運動を5分間行った後、引き続いて720kpm/minの運動を30分間行った。実験2は最大運動であり、まず180kpm/minの運動を5分間行った後、引き続いて2分毎に負荷が180kpm/minずつ漸



増する運動を疲労困憊に至るまで遂行した。環境条件はいずれの実験においても室温が $27.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が $35 \pm 5\%$ であった。

### (3) 実験手順

被検者は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を着用し、前記の環境条件下で約40分間椅座位安静を保持した。その間に発汗カプセルや熱電対等を装着した。次に自転車エルゴメーター上で安静時の測定を5分間行った後、(2)項で示した条件で運動を開始した。運動終了後の回復時の測定はいずれの実験においても20分間行った。

### (4) 測定および分析

Tesおよび皮膚温は実験IIと同様に測定し、それぞれのデータから1分毎の平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ )と平均体温( $\bar{T}_b$ )を算出した(P.18とP.40参照)。

局所発汗量( $\dot{m}_{sw}$ )の測定部位は胸部とし、発汗カプセル(断面積: $9.1\text{cm}^2$ )に $2.5\text{l}/\text{min}$ の乾燥窒素ガスを流した。汗の拍出頻度( $F_{sw}$ )の測定部位は左前腕屈側中央部とし、発汗カプセル(断面積: $2.5\text{cm}^2$ )に $2.0\text{l}/\text{min}$ の乾燥窒素ガスを流した。カプセル下の汗の蒸発を促進し、明瞭な発汗波を記録するために、実験IVで示した要領で $F_{sw}$ 測定用のカプセル内の窒素ガス温度を $45^{\circ}\text{C}$ に調節した(P.79参照 ; Yamazaki et al., 1992)。 $\dot{m}_{sw}$ および $F_{sw}$ の分析方法は実験IVと同様であった(P.81参照)。心拍数(HR)は胸部双極誘導法( $\text{CM}_5$ )による心電図から求めた。

なお、いずれの実験も午前10~12時あるいは午後2~4時の間に実施した。

### (5) 統計処理

測定値の平均値の有意差検定には対応のある Student-t-test を用い、有意水準の判定基準はすべて5%とした。得られた結果はすべて平均値±標準誤差(SE)で示した。

### 3. 結果

図27に実験1と実験2の運動時および回復時の  $T_{es}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}$  および HR の経時変化をそれぞれ6名の平均値±SEで示した。実験2の運動時間は18分から22分の範囲にあり、図には全員のデータが得られた運動18分までの測定値をプロットした。 $T_{es}$ は運動開始直後にわずかに低下してから上昇に転じ、実験1では15分目以後上昇率が低下したが、実験2では運動終了まで直線的に上昇し続けた。運動後の  $T_{es}$  は実験1では回復5分目まで急激に低下し、その後の低下は極めて軽度であったのに対して、実験2では回復2分目まで上昇した後、20分目まで低下し続けた。 $\bar{T}_{sk}$  はいずれの実験でも運動開始直後に一旦低下してから上昇に転じ、運動後は回復2分目(実験1)および5分目(実験2)までそれぞれ上昇した後、いずれの場合も20分目まで緩やかに低下し続けた。 $\dot{m}_{sw}$  はいずれの実験でも運動7分目前後から急増し、実験1では15分目以後増加率が低下したが、実験2では運動終了まで直線的に増加し続けた。運動後の  $\dot{m}_{sw}$  は実験1では回復5分目まで急減し、その後の減少は極めて緩やかであったのに対して、実験2では運動後20分目までほぼ一様に減少し続けた。HRはいずれの実験においても運動強度の増加に対応して速やかに増加し、運動後は回復2~3分目まで急減した後、20分目まで緩やかに減少した。また表11には運動前安静時、運動終了時および実験終了時(回復20分目)における各パラメータ

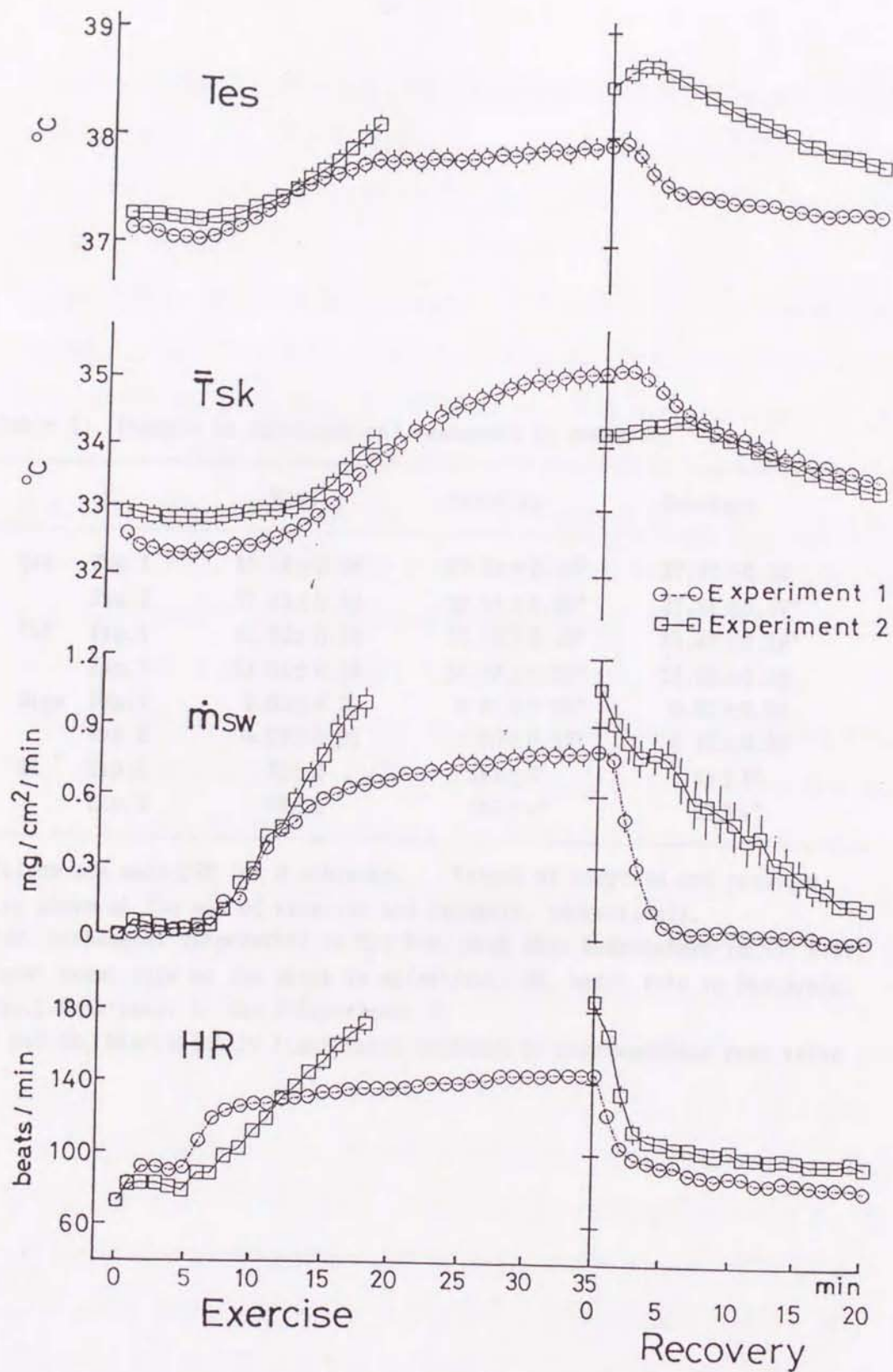


Fig.27. Variations in esophageal temperature ( $T_{es}$ ), mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ), local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) on the chest, and heart rate during exercise and recovery are shown. Values are mean  $\pm$  SE for 6 subjects.

Table 11. Changes in physiological responses to exercise.

|                 |       | Rest       | Exercise    | Recovery    |
|-----------------|-------|------------|-------------|-------------|
| Tes             | Exp.1 | 37.14±0.05 | 37.95±0.10* | 37.37±0.06  |
|                 | Exp.2 | 37.25±0.08 | 38.51±0.08* | 37.84±0.07* |
| T <sub>sk</sub> | Exp.1 | 32.62±0.19 | 35.12±0.19* | 33.47±0.16* |
|                 | Exp.2 | 33.01±0.23 | 34.28±0.32* | 33.29±0.28  |
| m <sub>sw</sub> | Exp.1 | 0.00±0.00  | 0.81±0.08*  | 0.00±0.00   |
|                 | Exp.2 | 0.00±0.00  | 1.05±0.13*  | 0.16±0.06   |
| HR              | Exp.1 | 70±2       | 149±2*      | 84±2*       |
|                 | Exp.2 | 69±2       | 186±4*      | 97±4*       |

Values are mean±SE for 6 subjects. Values of exercise and recovery are shown at the end of exercise and recovery, respectively.

Tes, esophageal temperature in °C; T<sub>sk</sub>, mean skin temperature in °C; m<sub>sw</sub>, local sweat rate on the chest in mg/cm<sup>2</sup>/min; HR, heart rate in beats/min; Exp.1=Experiment 1; Exp.2=Experiment 2.

\* p<0.05, Statistically significant compared to corresponding rest value

一の値を実験条件別に示した。平均値でみると、 $T_{es}$ 、 $\bar{T}_{sk}$ 、 $\dot{m}_{sw}$ およびHRの運動後20分目における回復の程度は、運動による増加度のそれぞれ72%、66%、100%および82%(実験1)と、53%、78%、85%および76%(実験2)であった。

図28は実験1および実験2における $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ 関係と $\bar{T}_b-\dot{m}_{sw}$ 関係を示している。いずれの実験においても同一体温( $T_{es}$ 、 $\bar{T}_b$ )に対する $\dot{m}_{sw}$ は運動時と回復時で明らかに異なり、前者が後者よりも高かった。実験1におけるこれらの関係をみると、運動時の $\dot{m}_{sw}$ は $T_{es}$ ないし $\bar{T}_b$ の上昇に伴ってほぼ直線的に上昇したが、回復時の $\dot{m}_{sw}$ は $T_{es}$ や $\bar{T}_b$ の低下よりも急速に減少した。その結果、いずれも時計方向のループを描くように推移した。これに対して実験2における $\dot{m}_{sw}$ は運動時および回復時のいずれにおいても $T_{es}$ および $\bar{T}_b$ の変化に伴ってほぼ直線的に推移した。

図29は実験1および実験2における $\bar{T}_b-F_{sw}$ 関係と $F_{sw}-\dot{m}_{sw}$ 関係を示している。実験2の場合には運動終了直前から直後にかけて、発汗量が特に多かったために発汗波が不明瞭になり、 $F_{sw}$ 計測が困難になる場合があった。したがって回復1~3分目までのデータは図から除いた。いずれの実験においても同一 $\bar{T}_b$ における $F_{sw}$ は運動時の方が回復時よりも明らかに多かった。実験1では回復時に $\bar{T}_b$ が約37.3°C以下に低下すると $\dot{m}_{sw}$ は減少が緩やかになったのに対して(図28)、 $F_{sw}$ は増加傾向を示す(図29)という点を除いて、いずれの実験においても $\bar{T}_b-F_{sw}$ 関係は $\bar{T}_b-\dot{m}_{sw}$ 関係と類似した変化を示した。一方 $F_{sw}-\dot{m}_{sw}$ 関係をみると、実験1では運動時から回復時にかけてループ状に変化したが、その方向は反時計方向であり、同一 $F_{sw}$ に対する $\dot{m}_{sw}$ は運動時の方が回復時よりも低かった。実験2における $F_{sw}-\dot{m}_{sw}$ 関係は運動時および回復時のいずれも直線的であり、同一 $F_{sw}$ に対する $\dot{m}_{sw}$ は運動時の方が回復時よりもわずかに少ない傾向を示し

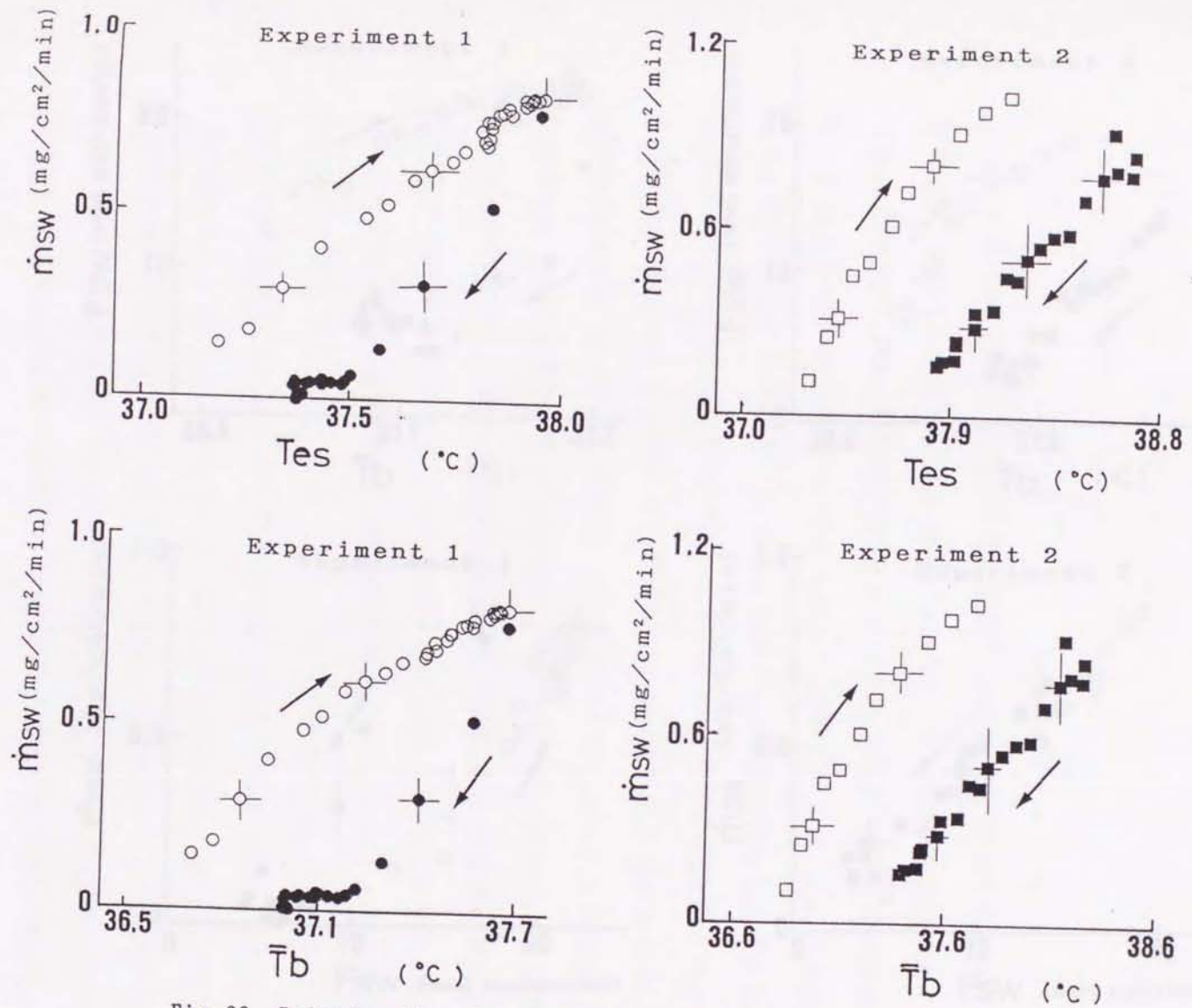


Fig.28. Relationships between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) on the chest and esophageal temperature ( $T_{es}$ ), and between  $\dot{m}_{sw}$  and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) during exercise (open symbols) and recovery (closed symbols) under the two experimental conditions. Arrows indicate the direction of change in each relationship: bars indicate SE.

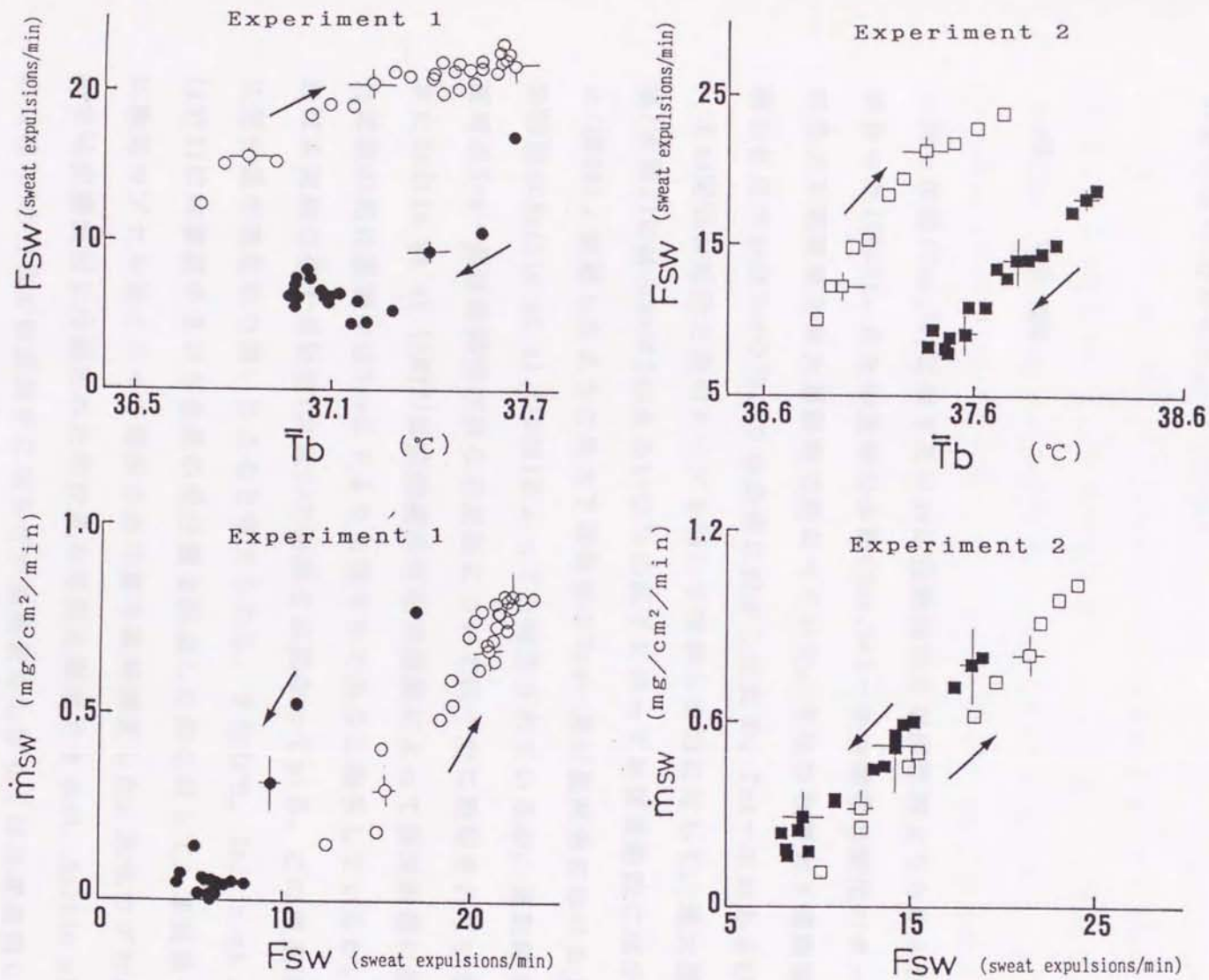


Fig.29. Relationships between frequency of sweat expulsion (Fsw) and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ), and between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) on the chest and Fsw during exercise (open symbols) and recovery (closed symbols) under the two experimental conditions. Arrows indicate the direction of change in each relationship; bars indicate SE.

た。実験2における $F_{sw}-\dot{m}_{sw}$ 関係を個人別にみたところ、同一 $F_{sw}$ に対する $\dot{m}_{sw}$ は運動時の方が回復時よりもやや少ない者(3名)と両者でほぼ同一の者(3名)に分かれた。

#### 4. 考察

同一体温( $T_{es}, \bar{T}_b$ )に対する $\dot{m}_{sw}$ は運動時の方が回復時よりも明らかに多かった(図28)。また回復時の体温( $T_{es}, \bar{T}_b$ )- $\dot{m}_{sw}$ 関係の変化パターンは最大下運動後と最大運動後で異なっていた。すなわち最大下運動後(実験1)には $\dot{m}_{sw}$ は $T_{es}$ や $\bar{T}_b$ よりも急速に減少したため、 $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ および $\bar{T}_b-\dot{m}_{sw}$ 関係は時計方向のループを描いて推移したのに対して、最大運動後(実験2)には $\dot{m}_{sw}$ は $T_{es}$ あるいは $\bar{T}_b$ の低下に伴ってほぼ直線的に減少した(図28)。前述したように最大下運動後の $T_{es}$ -発汗量関係における上記の結果はSaltin et al.(1970)によっても報告されているが、運動時と回復時の $T_{es}$ -発汗量関係が異なる原因については十分に説明されていない。またSaltin et al.(1972)は高強度の自転車運動によって疲労困憊に至った直後の発汗量減少は $T_{es}$ 低下よりも緩やかであると報告しているが、これは本実験の最大運動後(実験2)の結果とは異なっている。この相違は主に発汗量の測定法の違いによると考えられる。すなわち、Saltin et al.(1972)は体重減少量から全身の発汗量を推定したのに対して、本実験では換気カプセル法によって局所の発汗量を直接測定した。換気カプセル法では皮膚表面に分泌された発汗量を忠実に測定できるが、Saltin et al.(1972)の方法では運動中に汗が運動後もしばらくは皮膚表面に残っているため運動中の発汗量は過少に評価され、回復時のそれは過大に



評価されることになる。

次に上記の運動時と回復時の発汗反応の差異が発汗中枢機構に由来しているか否かを $F_{sw}$ を用いて検討してみたい。まず $\bar{T}_b - F_{sw}$ 関係をみると(図29の上図), 同一 $\bar{T}_b$ に対する $F_{sw}$ はいずれの実験においても運動時の方が回復時よりも多かった。すなわち $\bar{T}_b$ が同一である場合に運動時には回復時に比して発汗中枢の活動性が高いことを示している。次に $F_{sw} - \dot{m}_{sw}$ 関係をみると(図29の下図), 同一 $F_{sw}$ に対する $\dot{m}_{sw}$ は運動時の方が回復時よりもわずかに少ないか, あるいは両者でほぼ同程度であった。これは同一の発汗中枢活動に対する末梢機能の活動性が回復時に比して運動時にやや低いか, あるいは両者でほとんど差がないことを示している。したがって, 同一 $\bar{T}_b$ における運動時の $\dot{m}_{sw}$ が回復時のそれよりも多かったのは, 末梢性の原因ではなく, 運動時の発汗中枢活動が顕著に高進したことに起因すると考えられる。

運動初期や運動終了直後のように体温が変化しつつある非定常状態では, 発汗反応は深部体温や皮膚温の絶対値だけでなく, 皮膚温の変化率の影響を受けることが報告されている(Libert et al., 1979 ; Nadel et al., 1971 ; Wurster and McCook, 1969 ; Wyss et al., 1974)。そこで実験1および実験2における $\bar{T}_{sk}$ の変化率( $d\bar{T}_{sk}/dt$ )を求め, これを $\bar{T}_b$ に対してプロットしてみると図30のようになり, 回復時の $d\bar{T}_{sk}/dt$ は運動時のそれより全体的に低いことがわかる。このことから回復時に発汗中枢活動が低かった一因として皮膚温の変化率が低かったことも関与していると推察される。Nadel et al. (1971a)の報告によれば, 大腿部の局所発汗量を $0.1\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ 減少させるためには $d\bar{T}_{sk}/dt$ は $-0.3^\circ\text{C}/\text{min}$ 前後の変化を要するという。本実験における回復時の $d\bar{T}_{sk}/dt$ はいずれの実験でも $-0.2$ 以上であり, この値は大腿部発汗量をせいぜい $0.07\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ 減少

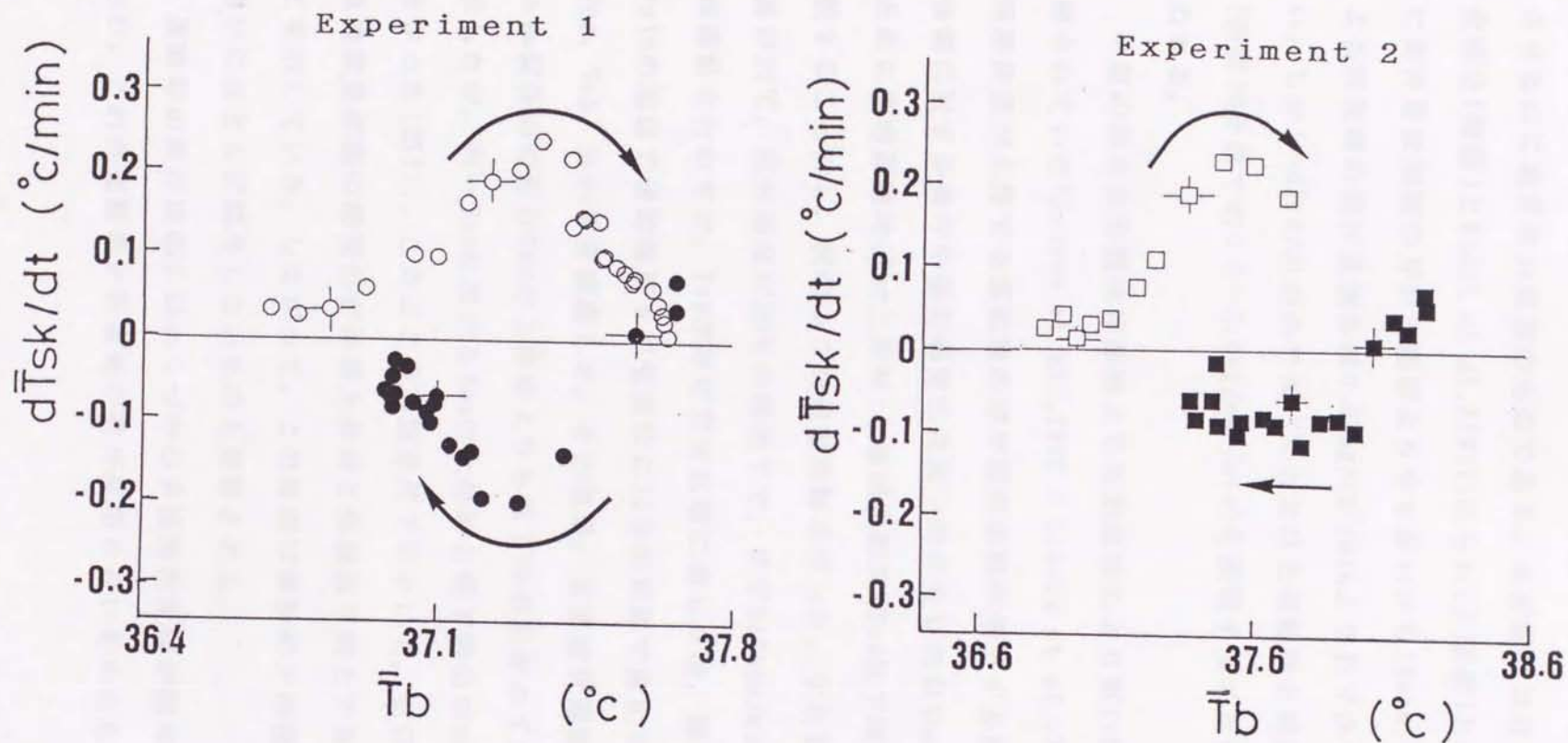


Fig.30. Relationships between rate of change in mean skin temperature ( $d\bar{T}_{sk}/dt$ ) and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) during exercise (open symbols) and recovery (closed symbols) under the two experimental conditions. Arrows indicate the direction of change in each relationship; bars indicate SE.

させるのに過ぎない程度のものである。本実験における局所発汗量の測定部位(胸部)とNadel et al.(1971)のそれ(大腿部)とは異なり、一般的に発汗量は胸部の方が大腿部よりやや多いから(Kuno, 1956),  $-d\bar{T}_{sk}/dt$ による回復時の発汗量減少は $0.07\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ よりわずかに多いかもしれない。しかし $-d\bar{T}_{sk}/dt$ のみで同一 $\bar{T}_b$ における運動時と回復時の $\dot{m}_{sw}$ の差異(回復20分目で約 $0.5\sim 0.6\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ )を説明することは困難なように思われる。

中枢の温度受容器は冷却時よりも加温時により高い感受性を示すと推測されている(Jessen et al., 1972 ; Libert et al., 1982)。したがって深部体温が上昇する運動時の方が深部体温が低下する回復時よりも同一体温に対する発汗中枢の感受性は高いのかもしれない。これを検証するために漸増運動時( $T_{es}$ 上昇時)と漸減運動時( $T_{es}$ 低下時)の発汗反応を比較することにし、次のような追加実験を行った。すなわち、健常者に室温が $30^\circ\text{C}$ 、相対湿度が30%の環境下で、まず $540\text{kpm}/\text{min}$ の一定強度自転車運動を行わせた。 $T_{es}$ がほぼ定常状態に達した後、続いて $180\sim 900\text{kpm}/\text{min}$ の範囲で運動強度を正弦波状に32分の周期で変化させ、その間の $T_{es}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}$ 等を測定した。その結果、正弦波状運動負荷時の $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ 関係の勾配は $T_{es}$ の上昇時よりも低下時の方がわずかに大きい傾向を示したが、同一 $T_{es}$ における $T_{es}$ の上昇時と低下時の $\dot{m}_{sw}$ の差は極めて小さかった(図31)。これはこの実験条件下において、発汗反応からみた中枢温度受容器の感受性が体温上昇時と体温低下時とであまり差がないことを示している。したがって、この要因は運動時と回復時の発汗反応の違いにほとんど関与しないものと推察される。

運動時の発汗反応にはいくつかの非温熱性要因が関与するといわれており、これが運動時と回復時の発汗反応に違いをもたらした可能性が考

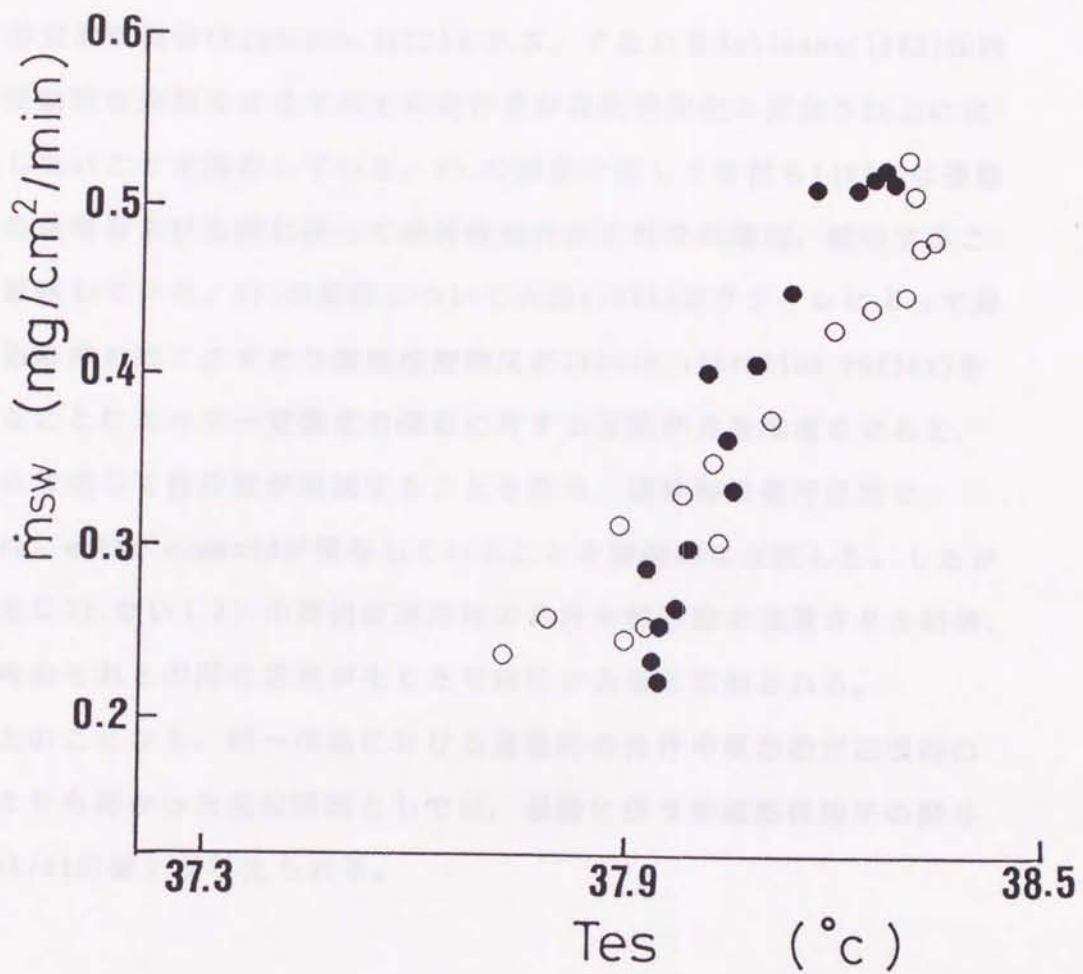


Fig.31. Relationship between local sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) on the forearm and esophageal temperature ( $T_{es}$ ) during sinusoidal exercise with period of 32 min. Open (○) and closed (●) circles denote values during increase and decrease of  $T_{es}$ , respectively.

えられる。その要因として実験 I で考察したように、1).機械受容器からの求心性入力(Asmussen and Nielsen,1947), 2).精神的興奮(Nakayama, 1969 ; Ogawa,1975), 3).運動中枢からの下行性神経活動(central motor command)(大西,1991)等が挙げられる。この中で1).の要因に関しては否定的な報告(Robinson,1962)もある。すなわちRobinson(1962)は四肢の受動的な運動をさせてみても発汗量が温熱性変化に見合う以上には増加しないことを報告している。2).の要因に関して宮側ら(1985)は運動負荷の急増および急減に伴って精神性発汗がそれぞれ増加, 減少することを観察している。3).の要因について大西(1991)はクラーレによって局所の筋麻痺を起こさせたり緊張性振動反射(tonic vibration reflex)を用いることによって一定強度の運動に対する運動努力を増減させると, それに対応して発汗量が増減することを認め, 運動時の発汗活動に central motor command が関与していることを間接的に立証した。したがって主に2).ないし3).の要因が運動時の発汗中枢活動を高進させた結果, 回復時のそれとの間に差異が生じた可能性があると推測される。

以上のことから, 同一体温における運動時の発汗中枢活動が回復時のそれよりも高かった主な原因としては, 運動に伴う非温熱性因子の関与や  $d\bar{T}_{sk}/dt$  の違いが考えられる。

## 5. 要約

深部体温-発汗量関係は運動時と回復時とで異なるのではないかという仮説のもとに, 同一体温における運動時と回復時の発汗反応を比較検討した。健康な男子大学生に室温が27°C, 相対湿度が35%の環境下で,

一定負荷の最大下自転車運動(実験1)と漸増負荷による最大自転車運動(実験2)を行わせ、運動中および回復20分目までの $T_{es}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\bar{T}_b$ ,  $\dot{m}_{sw}$ ,  $F_{sw}$ 等を測定した。得られた結果は次の通りである。

(1) いずれの実験においても同一体温( $T_{es}, \bar{T}_b$ )における $\dot{m}_{sw}$ は運動時の方が回復時よりも明らかに多かった。

(2) いずれの実験においても同一体温における $F_{sw}$ は運動時の方が回復時よりも明らかに多かった。

(3) 同一の $F_{sw}$ における $\dot{m}_{sw}$ は運動時と回復時ではほぼ同等かあるいは前者の場合が後者の場合よりもわずかに少なかった。

以上のことから、同一体温における発汗量は運動時の方が回復時よりも多いが、これは運動時の発汗中枢活動が回復時のそれよりも高進しているためであると考えられ、その原因として主に運動に伴う非温熱性因子や平均皮膚温の変化率の違いが関係していることが示唆された。

## IX章．正弦波状運動負荷に対する体温と発汗量の応答（実験VI）

### 1．目的

運動時の発汗量は深部体温や皮膚温等の温熱性入力が増大に伴って増加するとされている(Stolwijk and Nadel,1973 ; Nadel et al.,1971a)。この考えに基づけば、運動時の発汗は体温上昇より時間的にある程度遅れるかあるいはほとんど同時に起こるものと考えられる。しかし実験IIで示したように運動開始直後の時点では体温が上昇し始める前に発汗が起こることがあり、このような発汗には運動に伴う非温熱性因子が関与すると推定されている(Nakayama,1969 ; Stolwijk and Nadel,1973 ; Van Beaumont and Bullard,1966 ; 山崎ら,1992)。正弦波状運動負荷時には運動強度が常に変化するため、種々の生理機能は運動強度の変化より遅れてこれを正弦波状に追従するという特徴があり、この方法を用いることによって運動に対する生体の応答特性を遅れ時間と振幅によって評価することができる(Fukuoka and Ikegami,1990)。一般に運動に伴う体温の変化は遅いので正弦波状運動時には体温の変化は運動強度の変化よりかなり遅れるものと考えられる。したがって運動時の発汗反応は運動開始直後の時点だけでなく運動強度が変化する場合にも非温熱性因子の影響を受けるとすると、正弦波状運動時には発汗は体温の変化に先行して変化する可能性がある。また体温変化の時定数は大きいので正弦波状運動の周期をある程度以下に短くすると体温は一定値を保つと考えられる。運動中の発汗が運動強度の変化に伴う非温熱性因子と温熱性因子

の両方の影響を受けるとすると、体温が変わらないような正弦波状運動を負荷しても発汗は非温熱性因子の影響を受けて正弦波状に変化するであろうと考えられる。

そこで本実験では、正弦波状運動に対する体温と発汗の応答特性から運動時の発汗反応に対する非温熱性因子の関与を検証することにした。そして運動時の発汗に温熱性因子と非温熱性因子の両方が関与するとすると、正弦波状運動負荷を用いてそれらの因子を分離できるか否かについて検討することにした。

## 2. 方法

### (1) 被検者

被検者は健康な成人男子6名であり、その身体特性および自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷試験によって事前に求めた $\dot{V}O_2\max$ を表12に示した。

### (2) 運動条件および環境条件

正弦波状運動には運動強度をコンピューター(SORD社 M243)で制御できるようにした自転車エルゴメーター(津山金属社 Cateye EC-1000)を用い、運動強度を30W $\sim\dot{V}O_2\max$ の60%(60% $\dot{V}O_2\max$ )の範囲で正弦波状に反復させた。負荷の最低値を30Wにした理由は、本エルゴメーターの機械的特性上の理由からである。30Wは相対強度として平均で $9\pm 2\%$   $\dot{V}O_2\max$ に相当するものであった。したがって正弦波状運動の平均強度は約35%  $\dot{V}O_2\max$ に相当するが、これは常温下における長時間運動中に十分な発汗が起こり、



Table 12. Physical characteristics and maximal oxygen consumption ( $\dot{V}O_{2max}$ ) of the subjects.

| subject No. | age yr | height cm | weight kg | BSA m <sup>2</sup> | $\dot{V}O_{2max}$ ml/min/kg |
|-------------|--------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------|
| 1           | 23     | 166.6     | 63.7      | 1.73               | 52.5                        |
| 2           | 24     | 170.1     | 71.4      | 1.84               | 61.3                        |
| 3           | 23     | 182.5     | 74.6      | 1.97               | 56.3                        |
| 4           | 24     | 179.5     | 80.4      | 2.01               | 51.9                        |
| 5           | 24     | 174.7     | 66.7      | 1.82               | 53.5                        |
| 6           | 20     | 170.8     | 65.2      | 1.78               | 50.3                        |
| mean        | 23     | 174.0     | 70.3      | 1.86               | 54.3                        |
| ± SD        | 1      | 5.5       | 5.8       | 0.10               | 3.6                         |

BSA: body surface area

かつ食道温(Tes)や心拍数(HR)のドリフトを最小限に抑えられる強度である。被検者はまず、30W~60%  $\dot{V}O_2\max$  の中間強度で30分間運動を行い、Tesがほぼ定常状態に達してから、引き続いて正弦波状運動を40分間行った(図32)。ペダルの回転数は常に60rpm、周期は1.3分(80秒)、4分(240秒)および8分(480秒)とし、正弦波状運動はいずれの実験でも増大から開始した。各周期の運動は別の日の同一時間帯に実施し、3つの実験の順序はランダムとした。1.3分から8分までの周期を用いた理由は、1.3分は運動強度が変化しても体温が変化しない周期であり、また最大周期を8分としたのはこれより周期が長いと運動時間が長くなりすぎて、後述する平滑化処理が不十分になるためである。環境条件はいずれの場合にも室温が $25.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度が $35 \pm 5\%$ 、気流が $0.3\text{m/sec}$ 以下であった。

### (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を着用し、まず前記の条件に設定された環境制御室に入り、椅座位安静を約40分間保持した。その間に熱電対、サーミスター、発汗カプセルおよび心電図用電極を装着した。次いで、自転車エルゴメーター上で安静状態の測定を5分間行った後、(2)項で示した条件で実験を開始した。

### (4) 測定項目および方法

測定項目はTes、皮膚温、局所発汗量および心電図である。Tesは口から食道内に挿入したサーミスターによって測定し、皮膚温は胸部、上腕部、大腿部および下腿部の4ヶ所に貼付した熱電対によって測定した。熱電対の出力はハイブリッドレコーダー(横河電機社 3087)で記録するとと

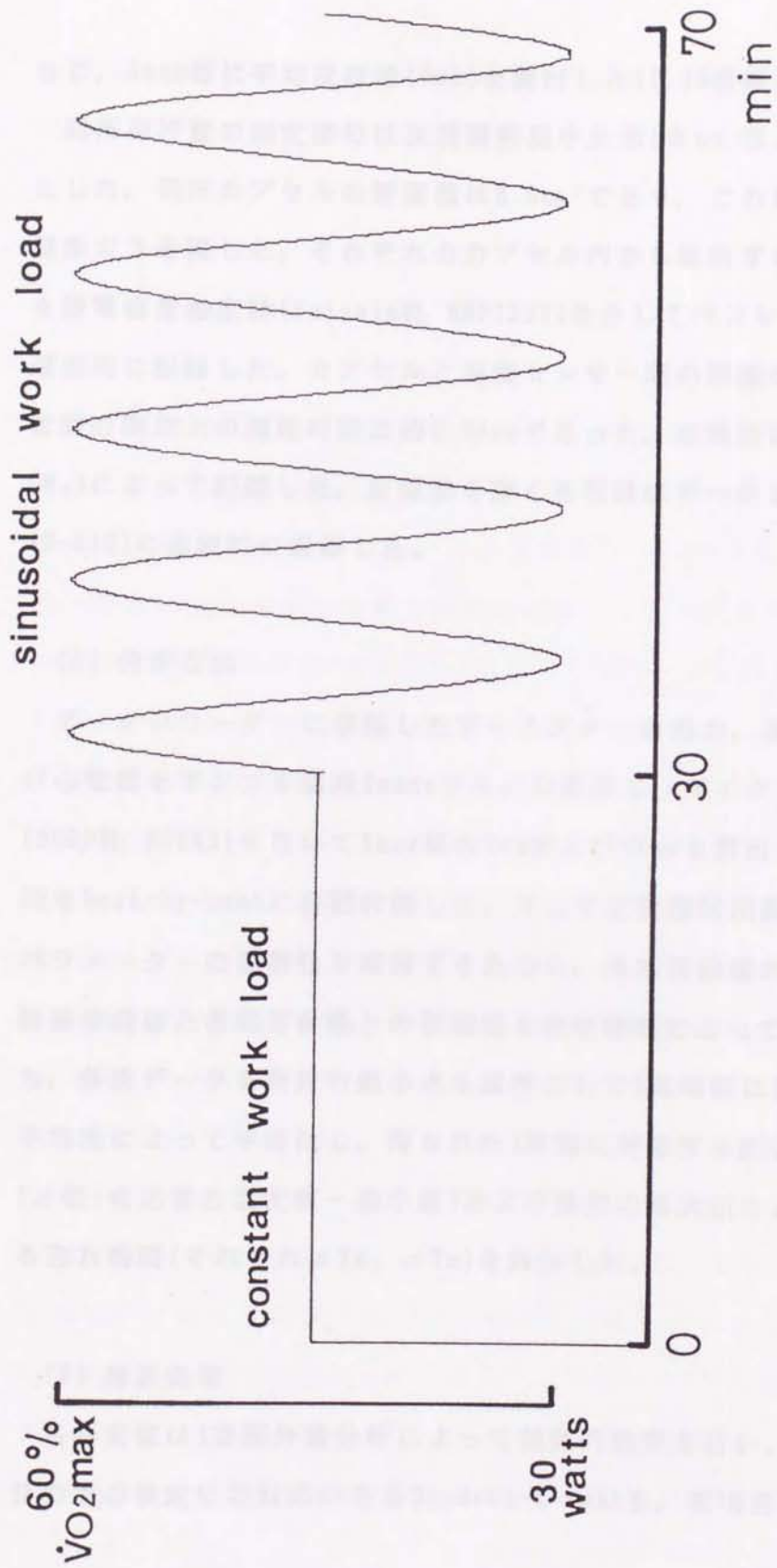


Fig.32. The protocol of sinusoidal exercise.

もに、5sec毎に平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ )を算出した(P.18参照)。

局所発汗量の測定部位は左前腕屈側中央部( $\dot{m}_{sw}$ )および左手掌中央部とした。発汗カプセルの断面積は $8.0\text{cm}^2$ であり、これに $2.0\text{l/min}$ の乾燥窒素ガスを流した。それぞれのカプセル内から流出する窒素ガスの湿度を静電容量湿度計(Vaisala社 HMP133Y)を介してペンレコーダーによって連続的に記録した。カプセルと湿度センサー間の距離は $50\text{cm}$ であり、両者間の測定上の遅延時間は約 $0.2\text{sec}$ であった。心電図は胸部双極誘導( $\text{CM}_5$ )によって記録した。皮膚温を除く各項目はデータレコーダー(TEAC社 XR-510)に連続的に収録した。

#### (5) 分析方法

データレコーダーに収録したサーミスターの出力、湿度計の出力および心電図をサンプル間隔 $2\text{msec}$ でA/D変換し、マイクロコンピューター(SORD社 M68MX)を用いて1sec毎の $T_{es}$ および $\dot{m}_{sw}$ を算出するとともに、HRをbeat-by-beatに自動計測した。そして正弦波状運動負荷に対する各パラメーターの応答性を検討するために、各応答曲線の振れ幅および運動強度曲線と各応答曲線との位相差を次の要領によって求めた。すなわち、各素データを負荷の最小点を基準にして1周期毎に重ね合わせ、移動平均法によって平滑化し、得られた1周期に対応する応答曲線から振れ幅( $\Delta$ 値:各応答の最大値-最小値)および負荷の最大点および最小点における遅れ時間(それぞれ $\Delta T_z$ ,  $\Delta T_n$ )を算出した。

#### (6) 統計処理

各測定値は1要因分散分析によって統計的処理を行い、同項目間の平均値の差の検定には対応のあるStudent-t-testを、異項目間の平均値の差

の検定には対応のないStudent-t-testをそれぞれ用いた。有意水準の判定基準はすべて5%とした。

### 3. 結果

いずれの実験でも一定強度運動時の $\dot{m}_{sw}$ は $T_{es}$ の上昇に伴って増加し、両者には直線関係が認められた。その平均の回帰式は $\dot{m}_{sw} = 0.469T_{es} - 17.313$  ( $r=0.98$ )であった。一定強度運動時の30分目における $T_{es}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}$ およびHRは実験条件間で有意な差はなく、全実験( $n=18$ )における平均値 $\pm$ 標準偏差(SD)はそれぞれ $37.67 \pm 0.21^{\circ}\text{C}$ ,  $33.22 \pm 0.62^{\circ}\text{C}$ ,  $0.345 \pm 0.094 \text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ および $109 \pm 8 \text{beats}/\text{min}$ であった。

図33に正弦波状運動中(8分周期)の $T_{es}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}$ およびHRの変化の1例を示した。いずれのパラメーターも負荷と同一周期で周期的に変動した。 $\bar{T}_{sk}$ はこの例では時間経過に伴って周期的変動が不明瞭になったが、他の例ではより顕著になる場合もあり、一定した傾向はなかった。

図34は平滑化処理によって求めた1周期の負荷に対する各パラメーターの応答の代表例を示し、このような1周期の負荷に対する応答曲線から求めた各パラメーターの $\Delta$ 値,  $\Delta T_z$ および $\Delta T_n$ を被検者別に表13に示した。各パラメーターの応答をみると(図34), いずれも周期の増大に伴って振幅が大きくなる傾向を示した。1.3分周期における $\dot{m}_{sw}$ とHRは明らかに正弦波状に変化したが,  $T_{es}$ と $\bar{T}_{sk}$ の変化は明らかでなく,  $\Delta T_{es}$ と $\Delta \bar{T}_{sk}$ の平均値 $\pm$ SDはそれぞれ $0.01 \pm 0.00^{\circ}\text{C}$ ,  $0.03 \pm 0.01^{\circ}\text{C}$ と極めて小さかった。

図35に負荷の周期と各パラメーターの $\Delta$ 値との関係を平均値で示した。

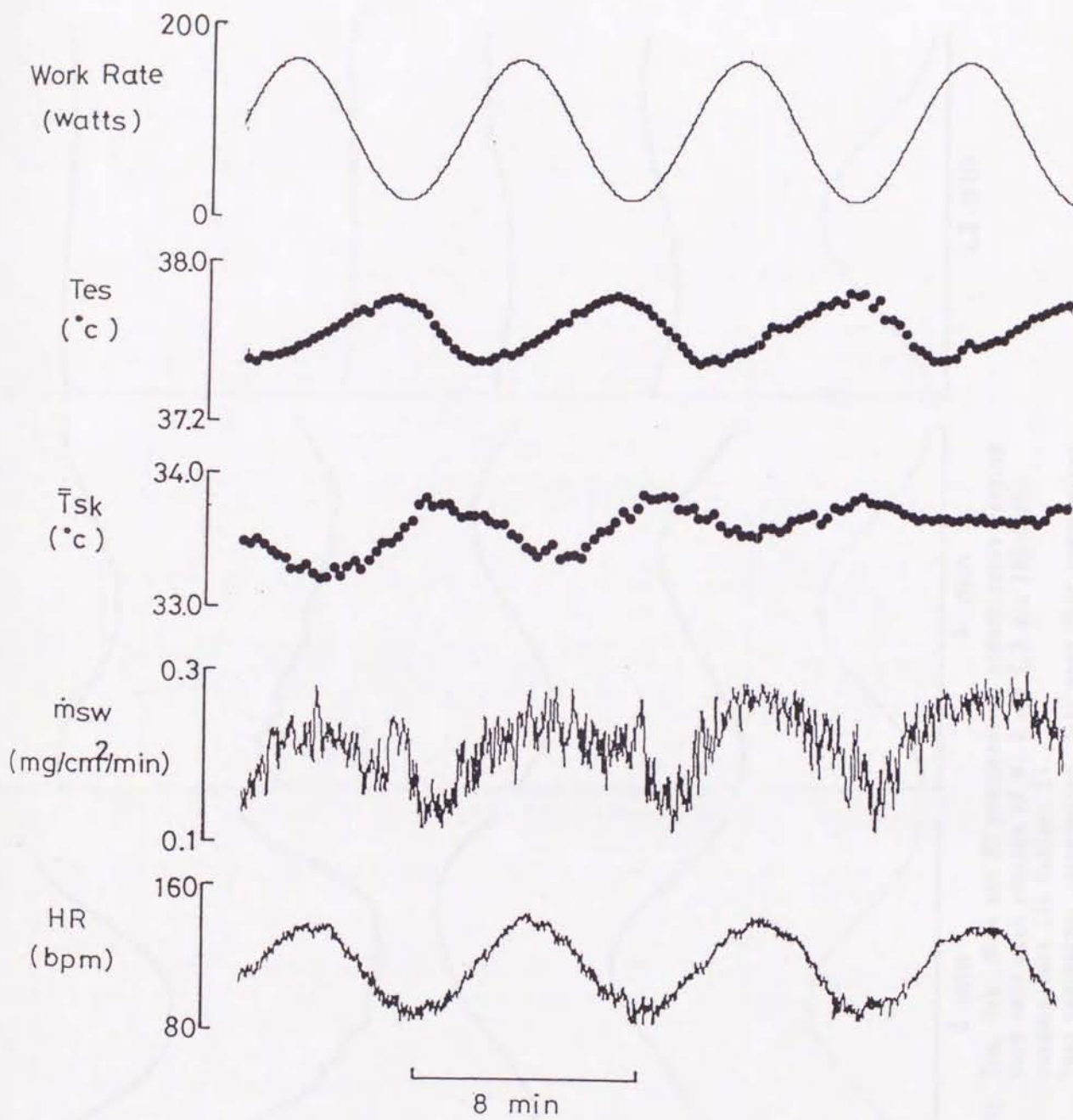


Fig.33. The time courses of esophageal temperature ( $T_{es}$ ), mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ), forearm sweat rate ( $\bar{m}_{sw}$ ) and heart rate (HR) responses to sinusoidally varying work rate with period of 8 min in Subject 6.

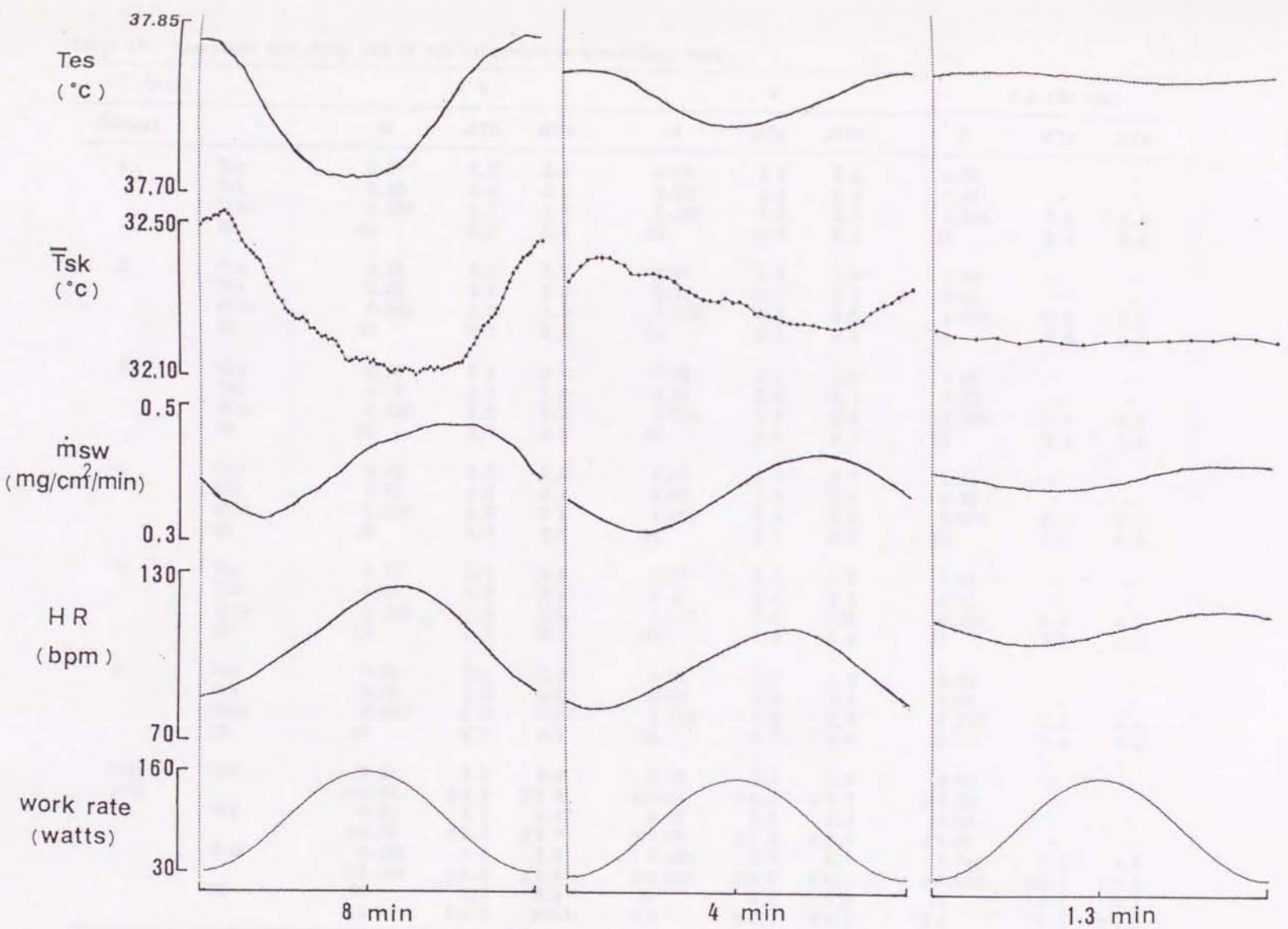


Fig.34. Tes,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}$  and HR responses to sinusoidally varying work rate with periods of 8, 4 and 1.3 min (80 sec), respectively (in Subject 5).  
Tes: esophageal temperature,  $\bar{T}_{sk}$ : mean skin temperature  
 $\dot{m}_{sw}$ : forearm sweat rate, HR: heart rate

Table 13. Magnitude and phase lag of the responses to sinusoidal work.

| T (min)      |                 | 8        |             |             | 4        |             |             | 1.3 (80 sec) |             |             |
|--------------|-----------------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| Subject      |                 | $\Delta$ | $\Delta Tz$ | $\Delta Tn$ | $\Delta$ | $\Delta Tz$ | $\Delta Tn$ | $\Delta$     | $\Delta Tz$ | $\Delta Tn$ |
| 1            | Tes             | 0.21     | 2.9         | 2.5         | 0.05     | 2.3         | 2.0         | 0.01         | -           | -           |
|              | Tsk             | 0.39     | 4.4         | 4.5         | 0.20     | 2.4         | 2.4         | 0.03         | -           | -           |
|              | m <sub>sw</sub> | 0.156    | 1.7         | 1.6         | 0.189    | 0.8         | 0.7         | 0.044        | 0.5         | 0.4         |
|              | HR              | 35       | 0.7         | 0.5         | 29       | 0.6         | 0.4         | 12           | 0.4         | 0.4         |
| 2            | Tes             | 0.15     | 3.1         | 2.7         | 0.04     | 1.8         | 1.4         | 0.00         | -           | -           |
|              | Tsk             | 0.32     | 3.8         | 2.9         | 0.16     | 2.1         | 1.7         | 0.03         | -           | -           |
|              | m <sub>sw</sub> | 0.344    | 1.2         | 1.3         | 0.310    | 0.5         | 0.6         | 0.070        | 0.3         | 0.1         |
|              | HR              | 43       | 0.7         | 0.4         | 34       | 0.5         | 0.4         | 15           | 0.3         | 0.3         |
| 3            | Tes             | 0.16     | 3.4         | 3.6         | 0.05     | 2.1         | 1.9         | 0.01         | -           | -           |
|              | Tsk             | 0.13     | 4.0         | 4.9         | 0.05     | 2.0         | 2.1         | 0.03         | -           | -           |
|              | m <sub>sw</sub> | 0.223    | 1.2         | 0.9         | 0.264    | 0.5         | 0.6         | 0.067        | 0.3         | 0.3         |
|              | HR              | 39       | 0.7         | 0.5         | 30       | 0.5         | 0.4         | 12           | 0.4         | 0.4         |
| 4            | Tes             | 0.26     | 3.3         | 3.0         | 0.08     | 2.3         | 2.2         | 0.01         | -           | -           |
|              | Tsk             | 0.25     | 4.5         | 4.4         | 0.09     | 2.3         | 2.6         | 0.03         | -           | -           |
|              | m <sub>sw</sub> | 0.116    | 2.5         | 2.6         | 0.069    | 0.9         | 0.9         | 0.031        | 0.1         | 0.1         |
|              | HR              | 38       | 0.9         | 0.7         | 34       | 0.7         | 0.5         | 13           | 0.4         | 0.3         |
| 5            | Tes             | 0.12     | 3.7         | 3.8         | 0.07     | 2.2         | 1.9         | 0.01         | -           | -           |
|              | Tsk             | 0.39     | 4.2         | 5.1         | 0.15     | 2.3         | 2.9         | 0.02         | -           | -           |
|              | m <sub>sw</sub> | 0.166    | 1.8         | 1.5         | 0.147    | 0.9         | 0.8         | 0.034        | 0.4         | 0.5         |
|              | HR              | 37       | 0.7         | 0.4         | 30       | 0.6         | 0.4         | 11           | 0.5         | 0.4         |
| 6            | Tes             | 0.30     | 2.5         | 2.4         | 0.07     | 2.1         | 1.9         | 0.02         | -           | -           |
|              | Tsk             | 0.38     | 4.8         | 4.8         | 0.06     | 2.6         | 3.2         | 0.04         | -           | -           |
|              | m <sub>sw</sub> | 0.088    | 0.9         | 1.4         | 0.114    | 0.8         | 0.8         | 0.018        | 0.3         | 0.4         |
|              | HR              | 42       | 0.7         | 0.7         | 30       | 0.7         | 0.6         | 16           | 0.4         | 0.4         |
| MEAN<br>± SD | Tes             | 0.20     | 3.2         | 3.0         | 0.06     | 2.1         | 1.9         | 0.01         | -           | -           |
|              | Tsk             | ±0.06    | ±0.4        | ±0.5        | ±0.01    | ±0.2        | ±0.2        | ±0.00        | -           | -           |
|              | m <sub>sw</sub> | 0.31     | 4.3         | 4.4         | 0.12     | 2.3         | 2.5         | 0.03         | -           | -           |
|              | HR              | ±0.09    | ±0.3        | ±0.7        | ±0.06    | ±0.2        | ±0.5        | ±0.01        | -           | -           |
|              | Tes             | 0.182    | 1.6         | 1.6         | 0.182    | 0.7         | 0.7         | 0.044        | 0.3         | 0.3         |
|              | Tsk             | ±0.084   | ±0.5        | ±0.5        | ±0.083   | ±0.2        | ±0.1        | ±0.019       | ±0.1        | ±0.1        |
|              | m <sub>sw</sub> | 39       | 0.7         | 0.5         | 31       | 0.6         | 0.5         | 13           | 0.4         | 0.4         |
|              | HR              | ±3       | ±0.1        | ±0.1        | ±2       | ±0.1        | ±0.1        | ±2           | ±0.1        | ±0.0        |

$\Delta$ : magnitude of response; Tes and Tsk in °C, m<sub>sw</sub> in mg/cm<sup>2</sup>/min, HR in beats/min,  
 $\Delta Tz$ : phase lag in minute at the zenith of work rate,  $\Delta Tn$ : phase lag in minute at the nadir of work rate,  
 - : The data was immeasurable.



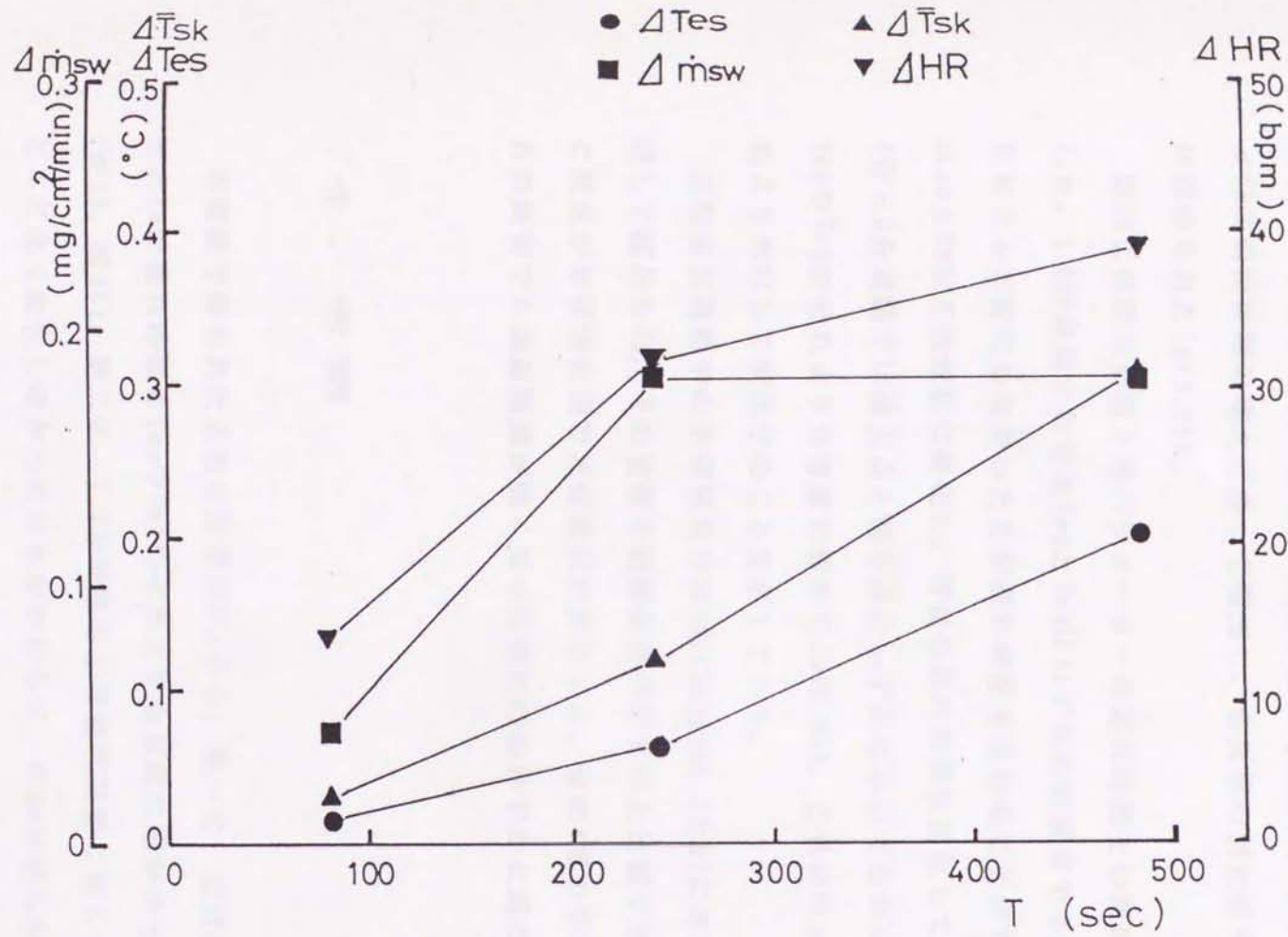


Fig.35. Relationships between magnitude ( $\Delta$ ) of fluctuation of esophageal temperature ( $\bar{T}_{es}$ ), mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ), forearm sweat rate ( $\dot{m}_{sw}$ ) and heart rate (HR) and period ( $T$ ) for mean data of 6 subjects.  
 $\Delta$ : maximum minus minimum of response.

$\Delta T_{es}$ と $\Delta \bar{T}_{sk}$ は負荷周期の増大に伴って加速度的に増加し、両パラメーターとも各周期間に有意差が認められた( $p < 0.05$ )。 $\Delta \dot{m}_{sw}$ は1.3分周期で最も小さく( $p < 0.05$ )、4分と8分周期の値は同程度に大きかった( $p > 0.05$ )。 $\Delta HR$ は負荷周期の増大に伴って増加し、各周期の値にはそれぞれ有意差が認められた( $p < 0.05$ )。

図36に負荷の周期と各パラメーターの遅れ時間との関係を平均値で示した。1.3分周期における $T_{es}$ と $\bar{T}_{sk}$ はいずれの被検者でも正弦波状運動中にほとんど変化しなかったため遅れ時間を求めることができなかったが、 $\dot{m}_{sw}$ とHRは正弦波状に変化し、両者の遅れ時間は近似していた( $p > 0.05$ )。4分と8分周期では最大点と最小点のいずれにおいても $\dot{m}_{sw}$ の遅れ時間は $T_{es}$ や $\bar{T}_{sk}$ のそれよりも有意に短かく( $p < 0.05$ )、これは $\dot{m}_{sw}$ が位相的に体温より先行して変化することを示している。

正弦波状運動中の手掌部発汗は2名(Subject 2と5)においては運動中持続して認められ、その位相を前腕部発汗のそれと比較すると図37のように両者がほぼ同位相で正弦波状に変化した。他の4名の手掌部発汗はいずれの周期でも運動強度が強くなった時にのみわずかに認められた。

#### 4. 考察

本実験で得られた主要な所見は3つある。第一に、正弦波状運動に対する $\dot{m}_{sw}$ の遅れ時間は $T_{es}$ や $\bar{T}_{sk}$ のそれよりも有意に短かかったことである(表13, 図36)。第二に、1.3分周期の正弦波状運動に対して $T_{es}$ と $\bar{T}_{sk}$ はほとんど全く変化しなかったにもかかわらず、 $\dot{m}_{sw}$ は明らかに正弦波状に変化したことである(表13, 図34)。第三に、正弦波状運動に対して手掌部

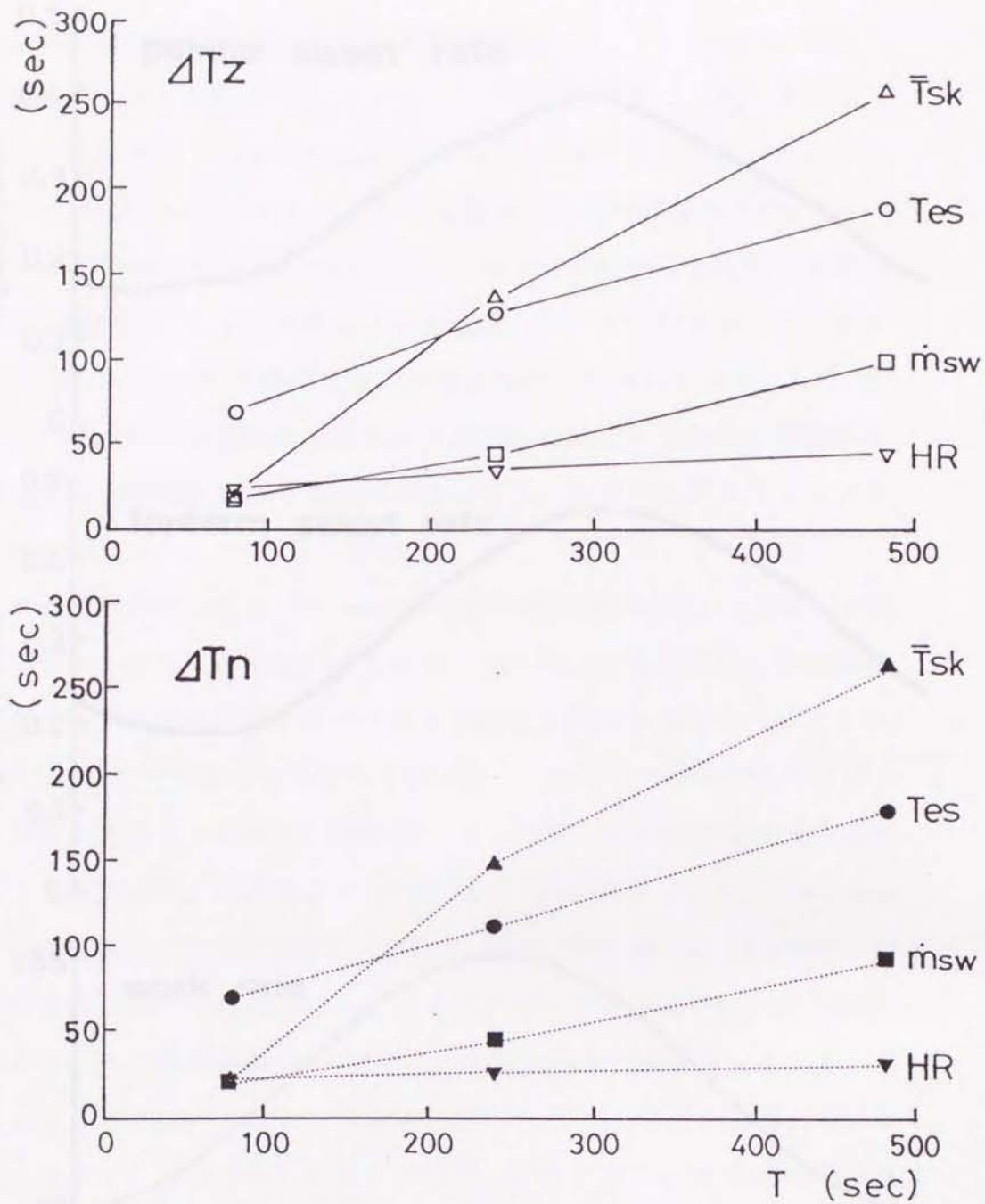


Fig.36. Relationships between phase lags of esophageal temperature ( $T_{es}$ ), mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ), forearm sweat rate ( $\bar{m}_{sw}$ ) and heart rate (HR) and period (T) for mean data of 6 subjects.  
 $\Delta T_z$ : phase lag in second at the zenith of work rate,  
 $\Delta T_n$ : phase lag in second at the nadir of work rate,  
 $\Delta T_z$  and  $\Delta T_n$  on  $T_{es}$  and  $\bar{T}_{sk}$  at period of 80 sec were immeasurable.

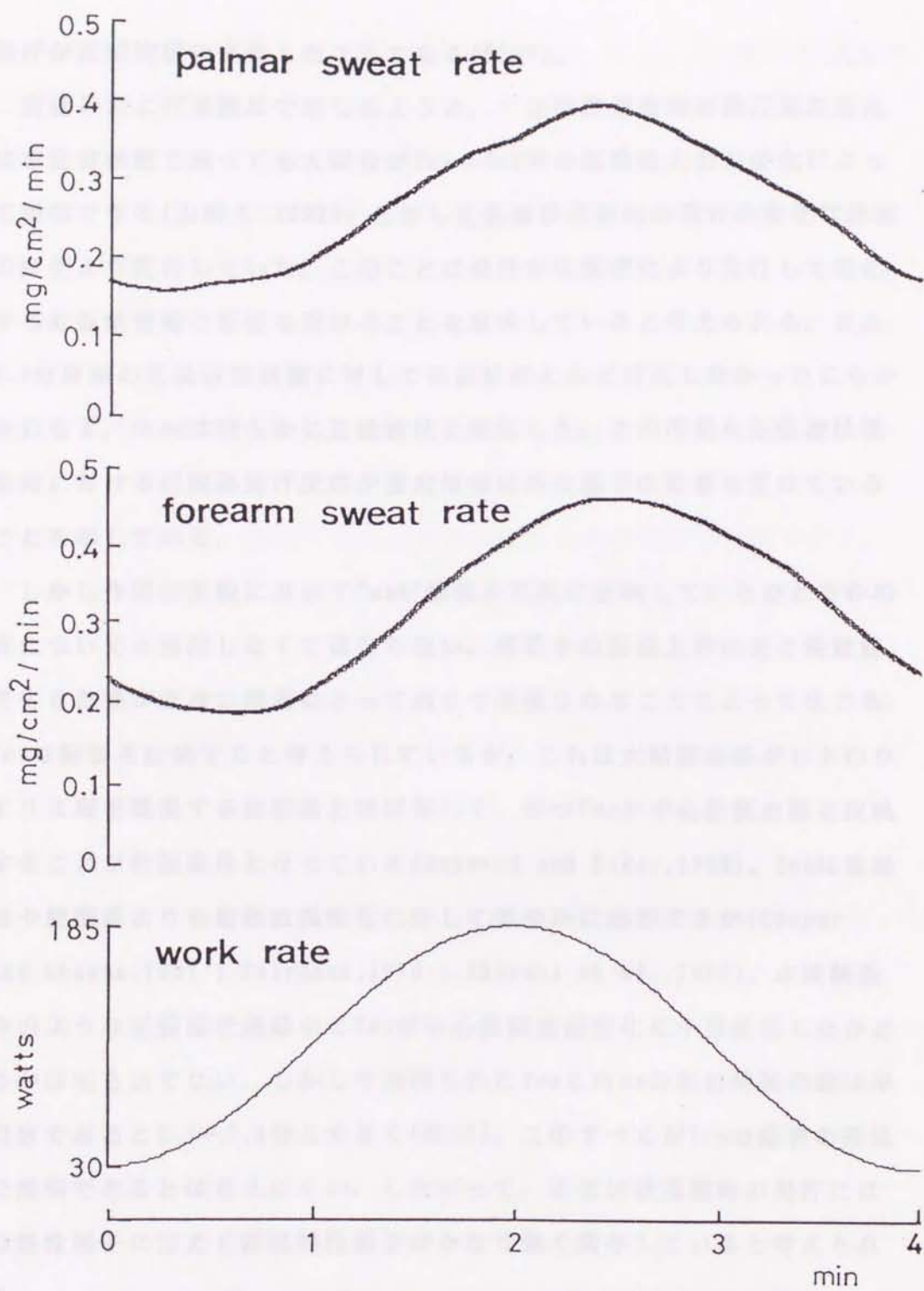


Fig.37. Palmar and forearm sweating responses to sinusoidally varying work rate with period of 4 min in subject 2.

発汗が正弦波状に変化したことである(図37)。

実験Ⅱおよび実験Ⅲで示したように、一定強度運動時の発汗量の変化は非定常状態であっても大部分が $T_{es}$ や $T_{sk}$ 等の温熱性入力の変化によって説明できる(山崎ら,1992)。しかし正弦波状運動時の発汗の変化は体温の変化より先行していた。このことは発汗が体温変化より先行して変化する非温熱情報の影響を受けることを意味していると考えられる。また1.3分周期の正弦波状運動に対して体温はほとんど変化しなかったにもかかわらず、 $\dot{m}_{sw}$ は明らかに正弦波状に変化した。この所見も正弦波状運動時における前腕部発汗反応が温度情報以外の因子の影響を受けていることを示している。

しかし今回の実験において $T_{es}$ が脳温を忠実に反映していたかどうかの点についても検討しなくてはならない。運動中の脳温上昇は主に活動筋で生じた熱が血液の循環によって脳まで運搬されることによって生じる。 $T_{es}$ は脳温を反映すると考えられているが、これは大動脈血温がヒトのウイリス環を貫流する血液温とほぼ等しく、かつ $T_{es}$ が中心動脈血温を反映することが前提条件となっている(Hayward and Baker,1969)。 $T_{es}$ は直腸温や鼓膜温よりも動脈血温変化に対して速やかに応答するが(Cooper and Kenyon,1957 ; Piironen,1970 ; Shiraki et al.,1986)、本実験条件のような正弦波状運動中に $T_{es}$ が中心動脈血温変化に十分追従したかどうかは明らかでない。しかし今回得られた $T_{es}$ と $\dot{m}_{sw}$ の遅れ時間の差は平均値でみると1.2~1.6分と大きく(表13)、このすべてが $T_{es}$ の応答の遅延で説明できるとは考えにくい。したがって、正弦波状運動時の発汗には温熱性因子に加えて非温熱性因子がかなり強く関与していると考えられる。

正弦波状運動中に、精神性発汗と言われている手掌部発汗は前腕部発

汗とほぼ同位相で変化した(図37)。Sakakibara et al.(1989)は手掌部発汗が雑音だけでなく、手の振動によっても増加し、その増加量は雑音と振動の両方を加えた時の方が一方だけの時よりも多いことを示した。またSaito et al.(1990)は掌握運動に対する足底部の皮膚交感神経反応が主に発汗神経活動を示すとした上で、これが上位中枢からの下行性神経活動と末梢の機械受容器からの求心性入力によって影響されることを示唆した。このように手掌部や足底部の発汗は精神的、情動的あるいは感覚的刺激によって生じる(Kuno,1956 ; Sakakibara et al.,1989)。したがって、今回の実験で手掌部発汗が正弦波状に変化したのは、被検者がペダルの回転数を一定にしようとするなどから精神的緊張を生じ、それが運動強度に伴って変化したことを示唆している。また運動強度の変化に伴って筋、腱および皮膚の機械受容器からの求心性入力が増減し、手掌部発汗が変化した可能性も考えられる。そしてこれらの非温熱性因子の変化は時定数の大きい体温より速く起こり、かつ手掌部発汗のみならず前腕部発汗にも影響を与えたために、前腕部発汗応答は体温応答より位相的に前進したのではないかと考えられる。

一定強度運動時のTesと $\dot{m}_{sw}$ の間に高い相関関係が認められたことは、前腕部発汗反応が深部体温に強く依存することを示唆している。その両者の関係の回帰式は平均値でみると $\dot{m}_{sw} = 0.469Tes - 17.313$  ( $r=0.98$ )であった。上記の式に正弦波状運動中に得られた $\Delta Tes$ を代入して $\Delta \dot{m}_{sw}$ (出力)に対する深部体温入力の貢献度(%)を推定すると、1.3分、4分および8分周期でそれぞれ約10%、15%および50%となる。発汗反応に対する皮膚温入力の貢献度は深部体温入力の約10分の1であり(Nadel et al., 1971)、後者よりかなり小さいから、深部体温以外の入力を非温熱性入力とすれば、短い周期(例えば1.3分)の運動における発汗の変化は主に非温

熱性因子によるものであると考えられる。そして周期の延長に伴って $\Delta$ 発汗量に対する非温熱性因子の貢献度(%)は小さくなると推測される。したがって一定強度運動負荷を用いれば主に温熱性の発汗反応を検討することができ、一方短い周期の正弦波状運動負荷を用いれば主に非温熱性の発汗反応を調査することができると考えられる。

以上のことから、正弦波状運動時の一般体表面の発汗反応には温熱性因子に加えて運動強度の変化に伴って生じる非温熱性因子が強く関与すると考えられる。そして、短い周期(例えば80秒)の正弦波状運動負荷を用いれば運動時の一般体表面の発汗に対する非温熱性因子の関与を温熱性因子の関与と分離して検討できると考えられる。

## 5. 要約

正弦波状運動中の発汗反応には温熱性因子に加えて運動強度の変化に伴う非温熱性因子が関与するという仮説を検証するために、正弦波状運動負荷に対する体温と発汗の応答の相互関係を検討した。健康な男子大学生6名に室温が25°C、相対湿度が35%の環境下で、30分間の一定強度自転車運動に続いて1.3~8分周期の正弦波状運動を40分間行わせ、 $T_{es}$ 、 $\bar{T}_{sk}$ 、前腕部および手掌部の発汗量等を連続測定した。得られた主な所見は次の通りである。

(1) 4分および8分周期における正弦波状運動時の前腕部発汗量の位相は $T_{es}$ や $\bar{T}_{sk}$ のそれよりも平均1.2~2.8分先行していた( $P < 0.05$ )。

(2) 正弦波状運動の周期を短くすると(1.3分周期)、 $T_{es}$ や $\bar{T}_{sk}$ はほとんど変化しないにもかかわらず、前腕部および手掌部の発汗量は運動強度

の変化に伴って明らかに正弦波状に変化した。

以上のことから、正弦波状運動時の一般体表面の発汗反応には温熱性因子に加えて運動強度の変化に伴って生じる非温熱性因子が強く関与すると考えられる。そして、短い周期(例えば80秒)の正弦波状運動負荷を用いれば運動時の一般体表面の発汗に対する非温熱性因子の関与を温熱性因子の関与と分離して検討できると考えられる。



## Ⅹ章．運動鍛練が一定運動負荷時の 発汗反応に及ぼす影響（実験Ⅶ）

### 1．目的

一定強度運動時の発汗量は運動トレーニングによって増大することが報告されている。しかしこれが発汗中枢活動の高進によってもたらされるのか、それとも末梢機能の高進によってもたらされるのかについては一致した見解が得られていない。

そこで本実験では、トレーニングが運動時の発汗機能に及ぼす影響を検討するために、鍛練者と非鍛練者の発汗反応を比較するとともに、両者の発汗反応に違いが認められた場合には、それが中枢機構と末梢機構のいずれに起因するのかを汗の拍出頻度特性より検討することにした。

### 2．方法

#### (1) 被検者

被検者は1週間に4日以上、1日に1時間以上の運動トレーニングを4～10年間継続的に行っている男子大学生9名(鍛練者群)と、日常的に運動トレーニングを行っていない健康な男子大学生8名(非鍛練者群)であった。各グループの身体特性および自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷試験によって事前に求めた $\dot{V}O_2\max$ を平均値±標準偏差(SD)で表14に示した。

Table 14. Physical characteristics and maximal oxygen consumption ( $\dot{V}O_{2max}$ ) in each group.

| group              | age<br>yr | height<br>cm | weight<br>kg | BSA<br>m <sup>2</sup> | $\dot{V}O_{2max}$<br>ml/min/kg |
|--------------------|-----------|--------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|
| Trained<br>(n=9)   | 20±1*     | 173±6        | 67±6         | 1.81±0.09             | 59.4±3.6*                      |
| Untrained<br>(n=8) | 24±3      | 169±4        | 64±7         | 1.75±0.10             | 45.7±4.4                       |

BSA, body surface area; n, number of subjects. Values are mean±SD.  
\* P<0.05, Trained vs Untrained.

## (2) 運動条件および環境条件

環境制御室の中で、自転車エルゴメーター(津山金属社 Cateye EC-1000)を用いて、35%  $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度に相当する運動をペダル回転数60rpmで30分間行った。環境条件は室温が $25.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$ 、相対湿度が $35 \pm 5\%$ であった。実験は季節変化に伴う暑熱順化の影響を避けるために冬期(2~3月)の午前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を着用し、まず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40分間保持した。その間に熱電対、サーミスター、発汗カプセルおよび心電図用電極を装着した。次いで、自転車エルゴメーター上で安静状態の測定を5分間行った後、(2)項で示した条件で運動を開始した。

## (4) 測定項目および方法

食道温( $T_{es}$ )はサーミスターによって測定し、皮膚温は胸部、上腕部、大腿部、下腿部および左前腕部の5ヶ所に熱電対を貼付することによって測定した。サーミスターおよび熱電対の出力はハイブリッドレコーダー(横河電機社3087)で記録するとともに、その記録から平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ )および平均体温( $\bar{T}_b$ )を1分毎に算出した(P.18とP.40参照)。

局所発汗量の測定部位は左胸部( $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ )および左前腕屈側中央部( $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ )とし、発汗カプセル(断面積: $2.5\text{cm}^2$ )を装着し、 $2.5\text{l/min}$ の乾燥窒素ガスを流した。汗の拍出頻度( $F_{sw}$ )は胸部と前腕部の発汗波の記録から計測した。発汗量および $F_{sw}$ の分析方法は実験Iと同様で

あった。

#### (5) 統計処理

グループ間の平均値の差の検定には対応のないStudent-t-testを用い、有意水準の判定基準はすべて5%とした。

### 3. 結果

図38に運動中の $T_{es}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ および $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ の経時変化を、グループ別に平均値 $\pm$ SDで示した。表15には安静時および運動30分目の各パラメーターの値をグループ別に示した。安静時および運動30分目の $T_{es}$ は鍛練者群の方が非鍛練者群よりもわずかに低かったが有意差ではなかった。安静時および運動時の $\bar{T}_{sk}$ は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも高かったが有意差ではなかった。運動時の $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも多い傾向を示したのに対して( $P < 0.1$ ),  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ は両グループともほぼ同じであった。安静時および運動30分目のHRは鍛練者群の方が非鍛練者群よりも低く、運動30分目の値には有意差が認められた( $P < 0.05$ )。

図39に運動時の $T_{es}$ と発汗量の間関係をグループ別に平均値で示した。表16には $T_{es}$ -発汗量関係の勾配と発汗開始閾値 $T_{es}$ をグループ別に示した。 $T_{es}$ - $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ 関係の勾配は鍛練者群の方が非鍛練者群より有意に大きかったが( $P < 0.05$ ),  $T_{es}$ - $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ 関係の勾配にはグループ間に有意差は認められなかった。また閾値 $T_{es}$ はいずれの部位の発汗にもグループ間に有意差は認められなかった。

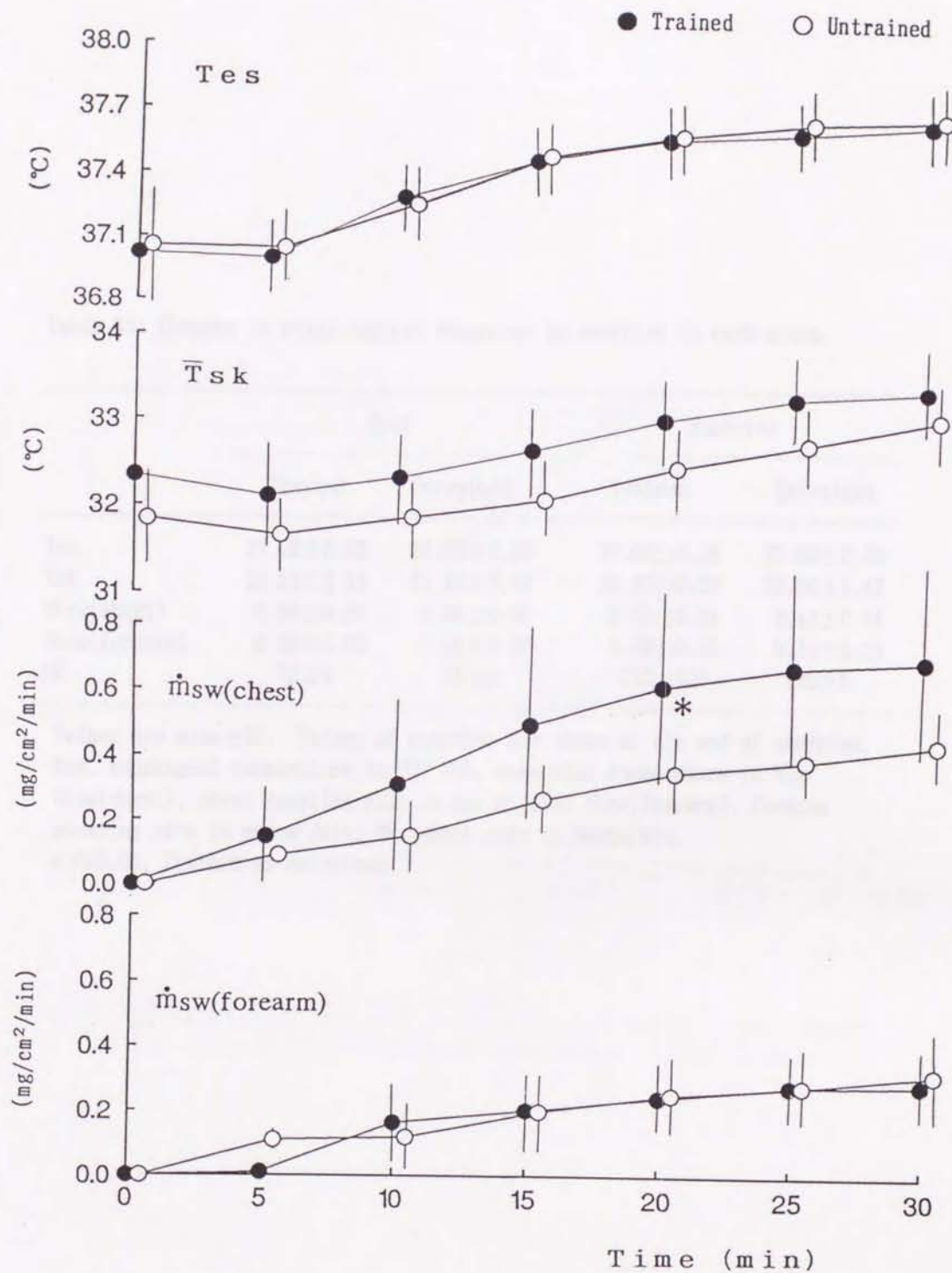


Fig.38. The time courses of esophageal temperature ( $T_{es}$ ), mean skin temperature ( $\bar{T}_{sk}$ ), chest sweating rate ( $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ ) and forearm sweating rate ( $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ ) during constant exercise. Values are mean  $\pm$  SD. \*  $P < 0.05$  Trained vs Untrained.

Table 15. Changes in physiological responses to exercise in each group.

|               | Rest       |            | Exercise   |            |
|---------------|------------|------------|------------|------------|
|               | Trained    | Untrained  | Trained    | Untrained  |
| Tes           | 37.02±0.23 | 37.06±0.30 | 37.66±0.18 | 37.69±0.25 |
| Tsk           | 32.34±0.33 | 31.84±0.47 | 33.36±0.25 | 33.04±0.42 |
| m̄sw(chest)   | 0.00±0.00  | 0.00±0.00  | 0.68±0.31  | 0.43±0.14  |
| m̄sw(forearm) | 0.00±0.00  | 0.00±0.00  | 0.28±0.13  | 0.32±0.15  |
| HR            | 72±9       | 75±5       | 110±10*    | 120±6      |

Values are mean±SD. Values of exercise are shown at the end of exercise. Tes, esophageal temperature in °C; Tsk, mean skin temperature in °C; m̄sw(chest), chest sweating rate in mg/cm<sup>2</sup>/min; m̄sw(forearm), forearm sweating rate in mg/cm<sup>2</sup>/min; HR, heart rate in beats/min.

\* P<0.05, Trained vs Untrained.

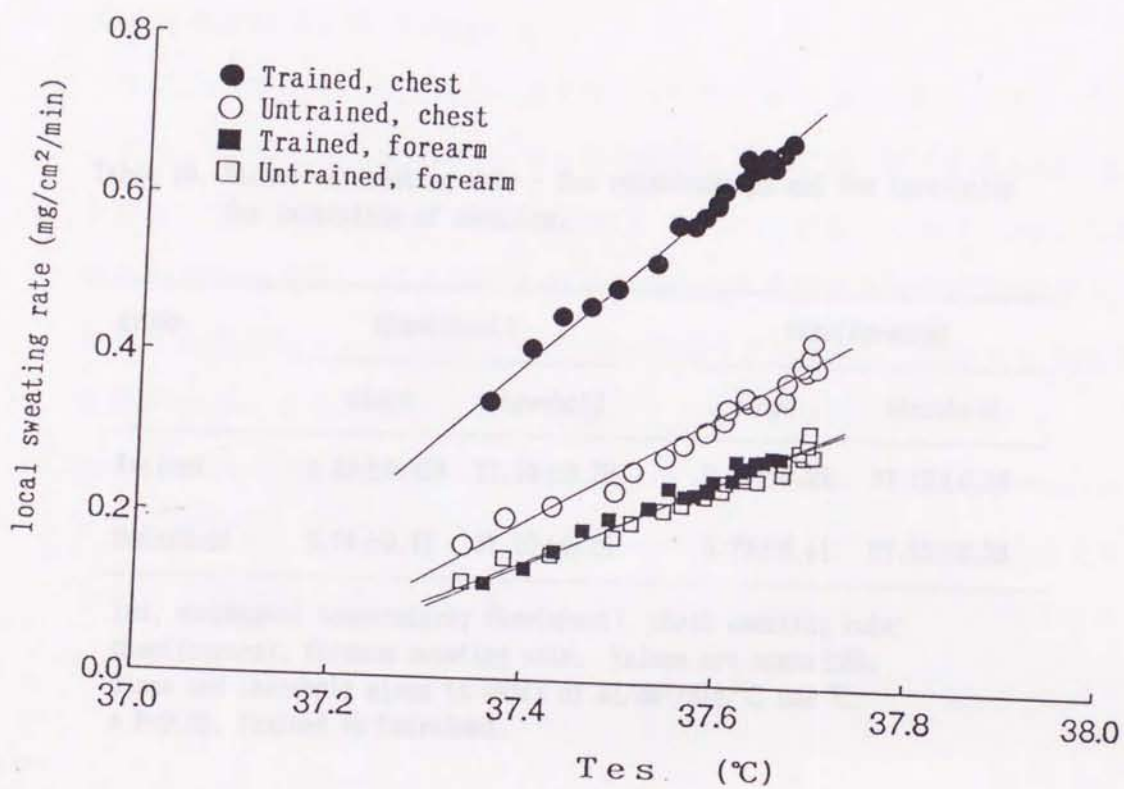


Fig.39. Relationships between local sweating rates on the chest and forearm and esophageal temperature (Tes) in each group.

Table 16. Slopes of sweating rate - Tes relationships and Tes thresholds for initiation of sweating.

| group     | $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ |                  | $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ |                  |
|-----------|------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
|           | slope                        | threshold        | slope                          | threshold        |
| Trained   | $1.22 \pm 0.43^*$            | $37.10 \pm 0.29$ | $0.63 \pm 0.25$                | $37.13 \pm 0.26$ |
| Untrained | $0.74 \pm 0.41$              | $37.10 \pm 0.25$ | $0.73 \pm 0.41$                | $37.23 \pm 0.29$ |

Tes, esophageal temperature;  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ , chest sweating rate;  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ , forearm sweating rate. Values are means  $\pm$  SD.

Slope and threshold given in units of ml/cm<sup>2</sup>/min/°C and °C.

\* P < 0.05, Trained vs Untrained.



図40に運動時の $\bar{T}_b$ と発汗量の関係をグループ別に平均値で示した。表17には $\bar{T}_b$  - 発汗量関係の勾配と発汗開始閾値 $\bar{T}_b$ をグループ別に示した。 $\bar{T}_b$  -  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ 関係の勾配は鍛練者群の方が非鍛練者群より有意に大きかったが( $P < 0.05$ )、 $\bar{T}_b$  -  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ 関係の勾配にはグループ間に有意差は認められなかった。また閾値 $\bar{T}_b$ はいずれの部位の発汗にもグループ間に有意差は認められなかった。

図41には $\bar{T}_b$ と $F_{sw}$ の関係(A)および $F_{sw}$ と発汗量の関係(B)をグループ別に平均値で示した。表18には $\bar{T}_b$  -  $F_{sw}$ 関係および $F_{sw}$  - 発汗量関係の勾配をグループ別に示した。 $\bar{T}_b$  -  $F_{sw}$ 関係の勾配にはグループ間に有意差は認められなかったが、同一 $\bar{T}_b$ における $F_{sw}$ は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも小さい傾向を示した( $P < 0.1$ )。一方、 $F_{sw}$  -  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ 関係の勾配は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも有意に大きかったが( $P < 0.05$ )、 $F_{sw}$  -  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ 関係の勾配には差が認められなかった。また同一 $F_{sw}$ における発汗量は、いずれの部位においても鍛練者群の方が非鍛練者群よりも多い傾向を示し( $P < 0.1$ )、特に $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ においてグループ間の差が顕著であった。

#### 4. 考察

鍛練者群と非鍛練者群の間で $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ および $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ の発汗開始閾値体温( $T_{es}, \bar{T}_b$ )には差がなかったが、体温と $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ の関係の勾配は鍛練者群の方が大きかった(図39, 図40, 表16, 表17)。本実験に参加した鍛練者が長期間トレーニングを継続していたことを考慮すると、これらの所見は長期間のトレーニングによって体温上昇に対する胸部発汗

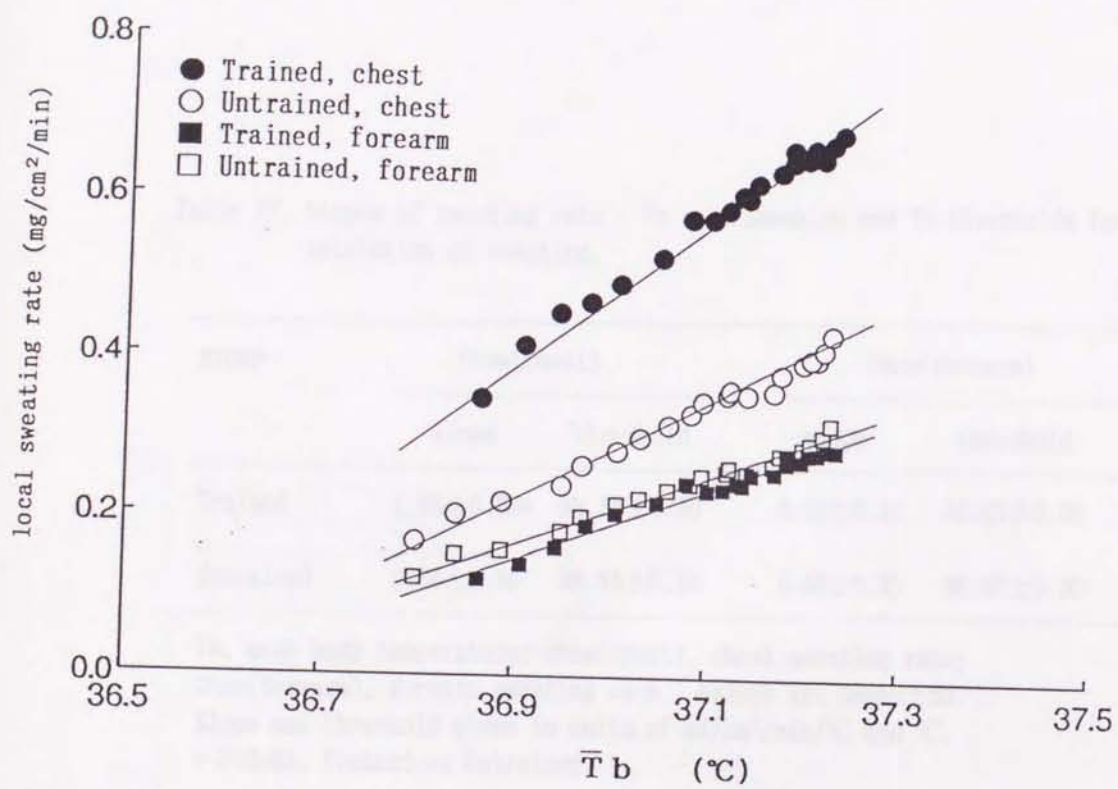


Fig.40. Relationships between local sweating rates on the chest and forearm and mean body temperature ( $\bar{T}_b$ ) in each group.

Table 17. Slopes of sweating rate -  $\bar{T}_b$  relationships and  $\bar{T}_b$  thresholds for initiation of sweating.

| group     | $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ |                  | $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ |                  |
|-----------|------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
|           | slope                        | threshold        | slope                          | threshold        |
| Trained   | $1.05 \pm 0.36^*$            | $36.58 \pm 0.30$ | $0.50 \pm 0.16$                | $36.63 \pm 0.30$ |
| Untrained | $0.64 \pm 0.30$              | $36.55 \pm 0.25$ | $0.48 \pm 0.31$                | $36.58 \pm 0.30$ |

$\bar{T}_b$ , mean body temperature;  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ , chest sweating rate;  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ , forearm sweating rate. Values are means  $\pm$  SD. Slope and threshold given in units of ml/cm<sup>2</sup>/min/°C and °C.

\* P < 0.05, Trained vs Untrained.



Table 18. Slopes of Fsw -  $\bar{T}_b$  relationships and sweating rate - Fsw relationships.

|   | Trained      | Untrained   |
|---|--------------|-------------|
| Fsw- $\bar{T}_b$ slope                    | 12.9±4.6     | 13.5±5.4    |
| $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ -Fsw slope   | 0.052±0.021* | 0.032±0.011 |
| $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ -Fsw slope | 0.024±0.011  | 0.024±0.012 |

Fsw, frequency of sweat expulsions;  $\bar{T}_b$ , mean body temperature;  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ , chest sweating rate;  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ , forearm sweating rate. Values are mean±SD. Fsw- $\bar{T}_b$  and  $\dot{m}_{sw}$ -Fsw slopes given in units of sweat expulsions/°C and ml/cm<sup>2</sup>/min/sweat expulsions.

\* P<0.05, Trained vs Untrained.

機能が高進することを示唆している。また体温と $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ の関係の勾配にはグループ間に差がなかったことから、トレーニングによる発汗高進には部位差があることが示唆される。Nadel et al.(1974)は常温下における持久的トレーニングによって運動時の $T_{es}-\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ 関係の勾配は増大したが、発汗開始閾値 $T_{es}$ は変化しなかったと報告している。本実験結果はNadel et al.の報告と一致していたが、彼らは発汗高進の部位差については検討していない。トレーニングによる発汗高進の部位差に関してShvartz et al.(1979)は、四肢の発汗量の増大が躯幹部のそれより著しいことを報告している。四肢部の発汗量が増大することは、次の点から熱放散に有利に働く。すなわち、四肢部は躯幹部に比して質量に対する表面積が大きいいため、四肢部の発汗量の増大によって放熱効率が高まること、および四肢部の発汗量の増大によって発汗の部位差が小さくなり、皮膚のぬれ面積が増大して放熱効率が高まること(山田ら, 1978)である。しかし本実験では四肢部(前腕部)の発汗よりもむしろ躯幹部(胸部)のそれにおいてグループ間の違いが明らかであった(図38)。

Shvartz et al.の実験と本実験の結果の相違は実験条件の違いによる可能性が考えられる。Shvartz et al.の実験では高温(39.8°C)下で50%  $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の運動を行ったのに対して、本実験では常温(25°C)下で35%  $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の運動を行った。本実験のような軽度の温熱負荷条件では四肢部の発汗量は少なくグループ間に差が生じにくい。強度の温熱負荷条件では四肢部の発汗量は増大してグループ間の差が顕著になるのかもしれない。実際、Shvartz et al.が用いた発汗テストではトレーニング前から四肢部(上腕部)発汗量は躯幹部(胸部)発汗量よりも多かった。

$T_b$ と $F_{sw}$ の関係の勾配はグループ間で差がなかったが、 $F_{sw}$ と $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ の関係の勾配は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも大きかった

(図41,表18)。実験Iで述べたように $\bar{T}_b$ と $F_{sw}$ の関係は発汗中枢機構の反応性を示し、 $F_{sw}$ と発汗量の関係は末梢機構の反応性を示す(小川ら, 1986)。したがって、この所見はグループ間にみられた $\bar{T}_b - \dot{m}_{sw}(\text{chest})$ 関係の勾配の違いが、中枢機構ではなくて末梢機構の差に起因することを示唆している。Buono and Sjöholm(1988)は鍛練者と非鍛練者を対象にピロカルピンイオン導入法を用いて発汗の末梢機能をテストしたところ、前者の方が後者よりもピロカルピンによる発汗増加が顕著であったことから、トレーニングによる発汗増加は末梢機構に原因があると結論した。そしてトレーニングによる末梢機能高進のメカニズムとして、1).汗腺のアセチルコリンに対する感受性の増大、2).汗腺の肥大、3).汗腺周囲のアセチルコリン濃度の増大を挙げている。この他にもトレーニングによる発汗増加が末梢機構によるとする報告がいくつかある(Chen and Elizondo,1974 ; Fox et al.,1964 ; Nadel et al.,1974)。しかし従来の研究では発汗の末梢機能しかテストされなかったため、中枢機構が関与している可能性を否定できなかったが、本実験では長期間トレーニングを続けてきた鍛練者の発汗高進が中枢機構ではなく末梢機構に原因があることを示した。

一方、トレーニングによる発汗量の増加が中枢機構に原因があるとする報告もある(大西ら,1986)。大西ら(1986)は非鍛練者に9日間にわたって22°Cの環境温のもとで90分間の運動トレーニングを行わせた。その結果、安静温熱負荷時の $\bar{T}_b - F_{sw}$ 関係はトレーニング後に左方に移行したのに対して $F_{sw}$ -発汗量関係は変化しなかったことから、冷環境下における短期間のトレーニングによる発汗量の増加には発汗中枢活動の高進が関与すると結論した。本実験では鍛練者群の方が非鍛練者群よりも同一 $\bar{T}_b$ における $F_{sw}$ は少ない傾向を示し、逆に同一 $F_{sw}$ に対する発汗量はいずれ

の部位でも多い傾向を示した(図41)。大西らの実験と本実験で結果が異なった原因として被検者のトレーニング期間が関係している可能性がある。本実験に参加した鍛練者のトレーニング期間は4~10年間であるのに対して、大西らの実験における被検者のそれは9日間であった。このことを考慮すると、短期間のトレーニングでは同一体温における発汗中枢活動は高進するが、長期間のトレーニングでは発汗中枢活動はむしろ低下し、末梢機能の高進によって発汗量が増大するものと考えられる。長期間のトレーニングによって発汗中枢活動が低下するのは、その過程において生体が頻繁に高体温状態に暴露されるため、発汗中枢に慣れ(habituation)が生じることが関係していると推測される。また同一体温におけるFswが異なったという結果は、グループ間で発汗開始閾値体温や $\dot{m}sw(\text{forearm})$ に差がなくても、発汗活動に対する中枢機構と末梢機構の貢献度はグループ間で異なっていたことを示唆している。

以上のことから、長期間トレーニングを続けてきた運動鍛練者は非鍛練者に比して常温下での軽度な運動時の $\dot{m}sw(\text{chest})$ は多いが、 $\dot{m}sw(\text{forearm})$ には違いがない。そして、鍛練者における $\dot{m}sw(\text{chest})$ の増大には末梢機能の感受性の高進が関与していると考えられる。

## 5. 要約

運動鍛練が一定運動負荷時の発汗活動に及ぼす影響を明らかにするために、継続的にトレーニングを行っている男子大学生9名(鍛練者群)とトレーニングを行っていない男子大学生8名(非鍛練者群)に、室温が25°C、相対湿度が35%の環境下で、35% $\dot{V}O_{2\max}$ の自転車運動を30分間行わせ、



$T_{es}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\bar{T}_b$ ,  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ ,  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ ,  $F_{sw}$ 等を測定した。得られた主な所見は次の通りである。

(1) 体温( $T_{es}$ ,  $\bar{T}_b$ ) -  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ 関係の勾配は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも有意に大きかったが( $P < 0.05$ ), 体温 -  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ 関係の勾配はグループ間に差がなかった。

(2)  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ および $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ の発汗開始閾値体温( $T_{es}$ ,  $\bar{T}_b$ )はグループ間に差がなかった。

(3)  $\bar{T}_b - F_{sw}$ 関係の勾配はグループ間に差がなかった。また $F_{sw} - \dot{m}_{sw}(\text{chest})$ 関係の勾配は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも有意に大きかったが( $P < 0.05$ ),  $F_{sw} - \dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ 関係の勾配はグループ間に差がなかった。

以上のことから、長期間トレーニングを続けてきた運動鍛練者は非鍛練者に比して常温下での軽度な運動時の胸部発汗量は多いが、前腕部発汗量には違いがない。そして、鍛練者における胸部発汗量の増大は発汗中枢活動に対する末梢機能の感受性の高進に起因すると考えられる。

## ⅩⅠ章．運動鍛練が正弦波状運動負荷に対する発汗応答に及ぼす影響 (実験Ⅷ)

### 1. 目的

日常生活やスポーツ等における身体活動の強度は常に一定ではなく変化することが多い。しかしながら、従来から運動トレーニングによる運動時の発汗機能を評価する際には一定運動負荷法が用いられており、非定常運動中の発汗機能を定量的に検討した研究はなされていない。非定常運動負荷法の1つである正弦波状運動負荷法は、運動に対する生体の動的応答性を追求する上でいくつかのメリットを備えている。例えば、運動に対する生体の生理的応答を反復重ね合わせることによって雑音成分を除去し、真の応答を見い出すことが容易であるし、応答特性を振幅と位相差という点から求めやすい(Fukuoka and Ikegami, 1990)。したがってトレーニングによって運動に対する発汗の動的応答性が変化するとすれば、正弦波状運動負荷法を用いることによって、その変化の特徴を定量的にとらえることができると考えられる。

実験Ⅵにおいて、正弦波状運動時の一般体表面の発汗には温熱性因子に加えて運動によって生じる非温熱性因子が強く関与することを明らかにした。したがってトレーニングによって正弦波状運動に対する発汗応答が変化するとすると、それは1).発汗中枢への温熱性あるいは非温熱性入力の変化、2).これらの入力に対する発汗中枢の反応性の変化、3).発汗中枢活動に対する末梢機能の反応性の変化のいずれかによってもたらされると考えられる。

そこで本実験では、トレーニングが運動に対する発汗の動的応答性に及ぼす影響を明らかにするために、正弦波状運動負荷に対する発汗応答を鍛練者と非鍛練者の間で比較し、両者の応答に差がみられた場合には、それが上記の要因のいずれによってもたらされるのか検討することを目的とした。

## 2. 方法

### (1) 被検者

被検者は1週間に4日以上、1日に1時間以上の運動トレーニングを4～10年間継続的に行っている男子大学生9名(鍛練者群)と、日常的に運動トレーニングを行っていない健康な男子大学生8名(非鍛練者群)であった。各グループの身体特性および自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷試験によって事前に求めた $\dot{V}O_2\max$ を平均値±標準偏差(SD)で表19に示した。

### (2) 運動条件および環境条件

正弦波状運動には運動強度をコンピューター(SORD社 M243)で制御できるようにした自転車エルゴメーター(津山金属社 Cateye EC-1000)を用い、運動強度を30W～ $\dot{V}O_2\max$ の60%(60% $\dot{V}O_2\max$ )の範囲で正弦波状に反復させた。被検者はまず、30W～60% $\dot{V}O_2\max$ の中間強度で30分間運動を行い、食道温(Tes)がほぼ定常状態に達してから、引き続いて正弦波状運動を28分間行った。正弦波状運動は常に増大から開始した。負荷の最低値を30Wとした理由は、本エルゴメーターの機械的特性上の理由からである。正弦波状運動負荷の振れ幅は相対強度として鍛練者群で $40 \pm 1\% \dot{V}O_2\max$ 、非鍛

Table 19. Physical characteristics and maximal oxygen consumption ( $\dot{V}O_{2max}$ ) in each group.

| group              | age<br>yr | height<br>cm | weight<br>kg | BSA<br>m <sup>2</sup> | $\dot{V}O_{2max}$<br>ml/min/kg |
|--------------------|-----------|--------------|--------------|-----------------------|--------------------------------|
| Trained<br>(n=9)   | 20±1*     | 173±6        | 67±6         | 1.81±0.09             | 59.4±3.6*                      |
| Untrained<br>(n=8) | 24±3      | 169±4        | 67±7         | 1.78±0.14             | 44.5±5.6                       |

BSA, body surface area; n, number of subjects. Values are mean±SD.

\* P<0.05, Trained vs Untrained.

錬者群で $37 \pm 2\% \dot{V}O_2 \max$ に相当し、絶対強度としては鍛錬者群で $142 \pm 15$  W, 非鍛錬者群で $101 \pm 15$  Wであった。ペダルの回転数は常に60rpm, 負荷の周期は4分とした。周期を4分としたのは、これよりも周期が短いと発汗の振幅応答が極端に小さくなり、グループ間の差が明瞭でなくなることや、これよりも周期が長いと運動時間が長くなりすぎて、後述する平滑化処理が不十分になるためである。環境条件は室温が $25.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$ , 相対湿度が $35 \pm 5\%$ , 気流が $0.3\text{m/sec}$ 以下であった。実験は2~3月の午前8~12時の間に実施した。

### (3) 実験手順

実験手順は実験VIの場合と同様であった(P.105参照)。

### (4) 測定項目および方法

測定項目はTes, 平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ ), 局所発汗量および心電図である。Tesおよび $\bar{T}_{sk}$ は実験VIと同じ方法で測定した(P.105参照)。局所発汗量の測定部位は胸部( $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ ), 左前腕屈側部( $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ )および左手掌部( $\dot{m}_{sw}(\text{palm})$ )とした。発汗カプセルの断面積はいずれの部位でも $2.5\text{cm}^2$ であり、これに $2.5\text{l/min}$ の乾燥窒素ガスを流した。それぞれのカプセル内から流出する窒素ガスの湿度を静電容量湿度計(Vaisala社 HMP 133Y)を介してペンレコーダーによって連続記録した。カプセルと湿度センサー間の距離は $50\text{cm}$ であり、両者間の測定上の遅延時間は約 $0.2\text{sec}$ であった。心電図は胸部双極誘導( $\text{CM}_5$ )によって記録した。なお皮膚温を除く各項目はデータレコーダー(TEAC社 XR-510)に連続収録した。

### (5) 分析方法

データレコーダーに収録したサーミスターの出力，湿度計の出力および心電図をサンプル間隔2msecでA/D変換し，コンピューター(SORD社M68MX)を用いて1sec毎の $T_{es}$ および局所発汗量を算出するとともに，心拍数(HR)をbeat-by-beatに自動計測した。そして正弦波状運動に対する各パラメーターの応答性を検討するために各応答曲線の振れ幅および運動強度曲線と各応答曲線との位相差を次の要領によって求めた。すなわち，各生データを負荷の最下点を基準にして1周期毎に重ね合わせ，さらに移動平均法によって平滑化し，得られた1周期に対する応答曲線から振れ幅( $\Delta$ :各応答の最大値-最小値)および遅れ時間(負荷の最大点と最小点における遅れ時間の平均値)をそれぞれ算出した。

#### (6) 統計処理

グループ間の平均値の差の検定には対応のないStudent-t-testを用い，有意水準の判定基準はすべて5%とした。

### 3. 結果

一定強度運動の30分目における $T_{es}$ は鍛練者群で $37.66 \pm 0.18^\circ\text{C}$ ，非鍛練者群で $37.67 \pm 0.26^\circ\text{C}$ ，以下同様に $T_{sk}$ は $33.36 \pm 0.69^\circ\text{C}$ と $33.04 \pm 0.43^\circ\text{C}$ ， $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ は $0.683 \pm 0.311\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ と $0.407 \pm 0.137\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ ， $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ は $0.285 \pm 0.130\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ と $0.299 \pm 0.159\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ ， $\dot{m}_{sw}(\text{palm})$ は $0.301 \pm 0.265\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ と $0.344 \pm 0.263\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$ ，HRは $110 \pm 10\text{beats}/\text{min}$ と $119 \pm 7\text{beats}/\text{min}$ であり， $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ は鍛練者群の方が有意に多かったが( $P < 0.05$ )，他のパラメーターの差は有意でなかつ

た。

図42に平滑化処理によって求めた1周期の負荷に対する各パラメーターの応答の代表例を示した。いずれのパラメーターも位相的に運動負荷よりも遅れてほぼ正弦波状に変化した。発汗の振れ幅をみると、 $\dot{m}_{sw}$ (chest)および $\dot{m}_{sw}$ (forearm)は鍛練者である被検者MIの方が非鍛練者である被検者YAよりも明らかに大きかったが、 $\dot{m}_{sw}$ (palm)は逆に後者の方が大きかった。応答の遅れ時間は、概して $\dot{m}_{sw}$ (palm) < HR <  $\dot{m}_{sw}$ (forearm)  $\div$   $\dot{m}_{sw}$ (chest) <  $T_{es}$  <  $T_{sk}$ の順に短かった。

図43に各パラメーターの振れ幅をグループ別に平均値 $\pm$ SDで示した。 $\Delta T_{es}$ 、 $\Delta T_{sk}$ および $\Delta \dot{m}_{sw}$ (palm)は鍛練者群の方が非鍛練者群よりもやや小さかったが有意差ではなかった。 $\Delta \dot{m}_{sw}$ (chest)と $\Delta \dot{m}_{sw}$ (forearm)は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも有意に大きく( $P < 0.05$ )、平均値で見ると鍛練者群の値は非鍛練者群のそれぞれ2.2倍と1.9倍であった。 $\Delta HR$ は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも大きい傾向が認められた。

図44に各パラメーターの遅れ時間をグループ別に平均値 $\pm$ SDで示した。 $T_{es}$ 、 $T_{sk}$ および $\dot{m}_{sw}$ (palm)の遅れ時間にはグループ間に明らかな差は認められなかったが、 $\dot{m}_{sw}$ (chest)と $\dot{m}_{sw}$ (forearm)の遅れ時間は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも短い傾向を示した( $P = 0.10$ )。HRの遅れ時間は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも有意に短かった( $P < 0.05$ )。

図45に一定強度運動時の30分目における一般体表面の発汗量(basal sweating rate)と正弦波状運動時の $\Delta$ 発汗量との関係を全被検者のデータで示した。 $\dot{m}_{sw}$ (chest)には両者の間に中程度の正の相関関係( $r = 0.61$ )が認められたが、 $\dot{m}_{sw}$ (forearm)には有意な相関関係は認められなかった。

図46に正弦波状運動負荷1W当たりの応答量に補正した各パラメーターの振れ幅をグループ別に平均値 $\pm$ SDで示した。 $\Delta T_{esi}$ と $\Delta T_{ski}$ は鍛練者

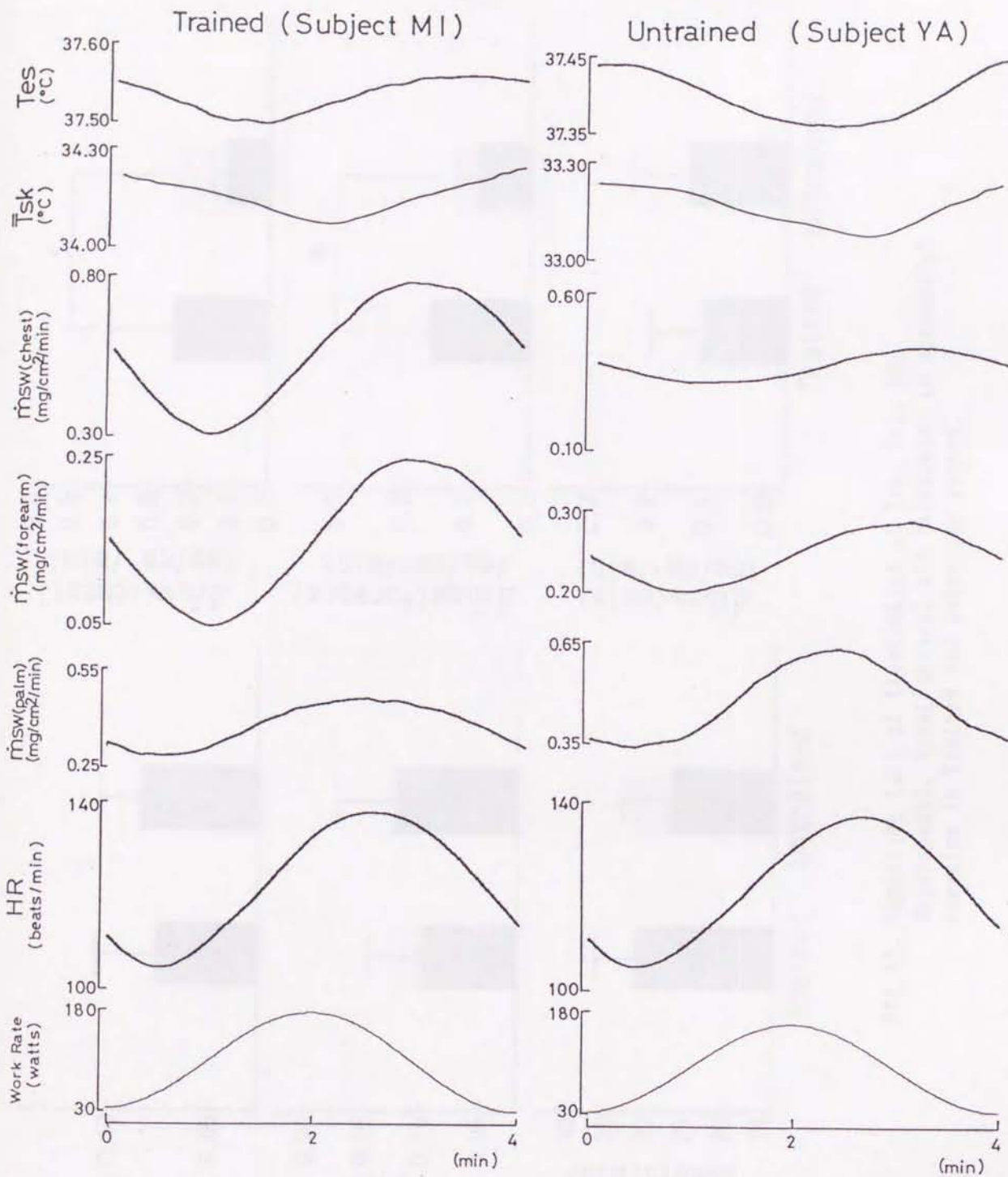


Fig.42.  $T_{es}$ ,  $\bar{T}_{sk}$ ,  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ ,  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$  and HR responses to sinusoidally varying work rate with period of 4 min in Subject MI (Trained group) and Subject YA (Untrained group).  $T_{es}$ : esophageal temperature,  $\bar{T}_{sk}$ : mean skin temperature,  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ : chest sweating rate,  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ : forearm sweating rate,  $\dot{m}_{sw}(\text{palm})$ : palmar sweating rate, HR: heart rate



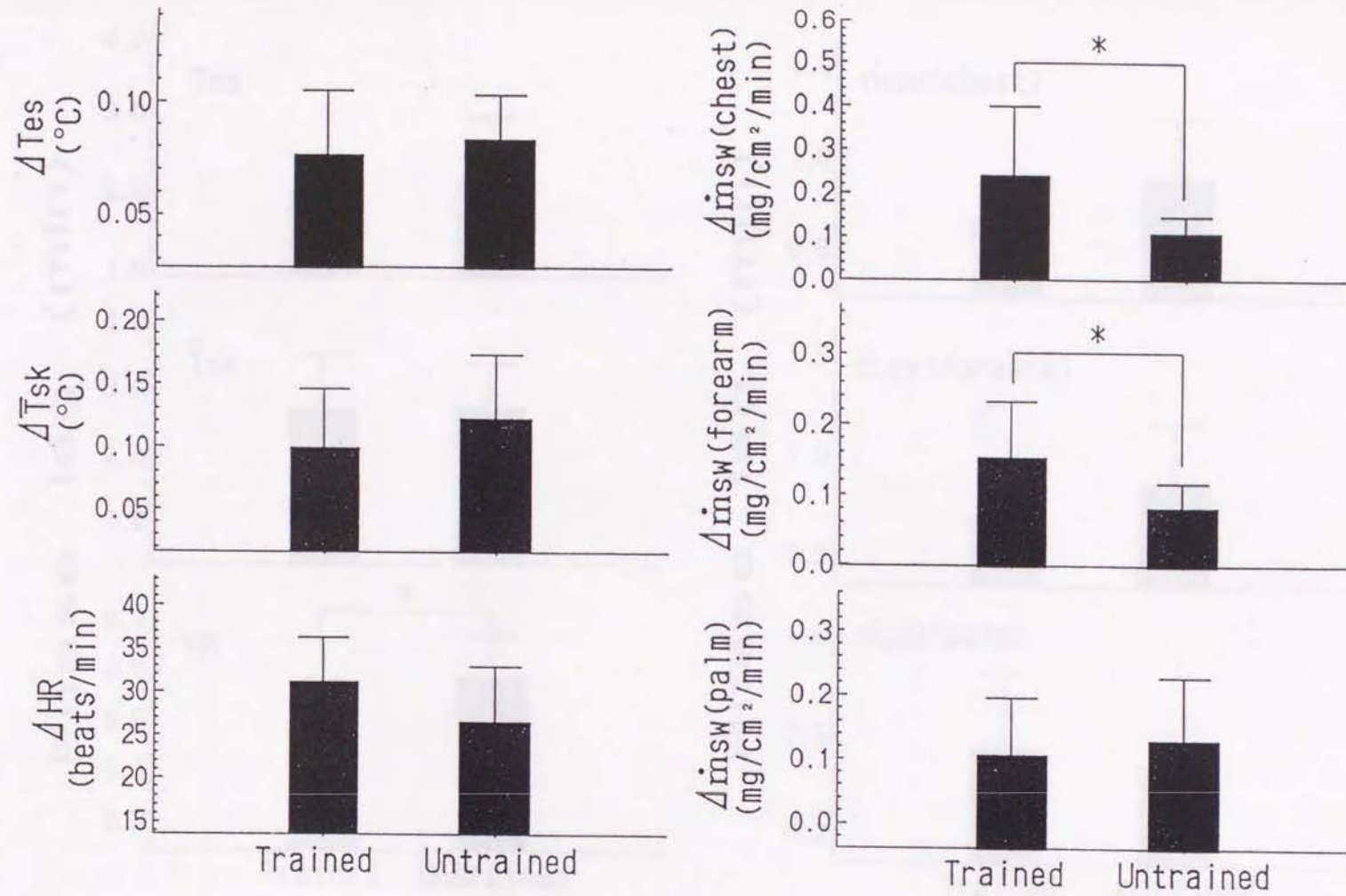


Fig.43. Magnitude ( $\Delta$ ) of fluctuation of  $T_{es}$ ,  $T_{sk}$ , HR,  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ ,  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$  and  $\dot{m}_{sw}(\text{palm})$  to sinusoidal exercise in Trained and Untrained groups.

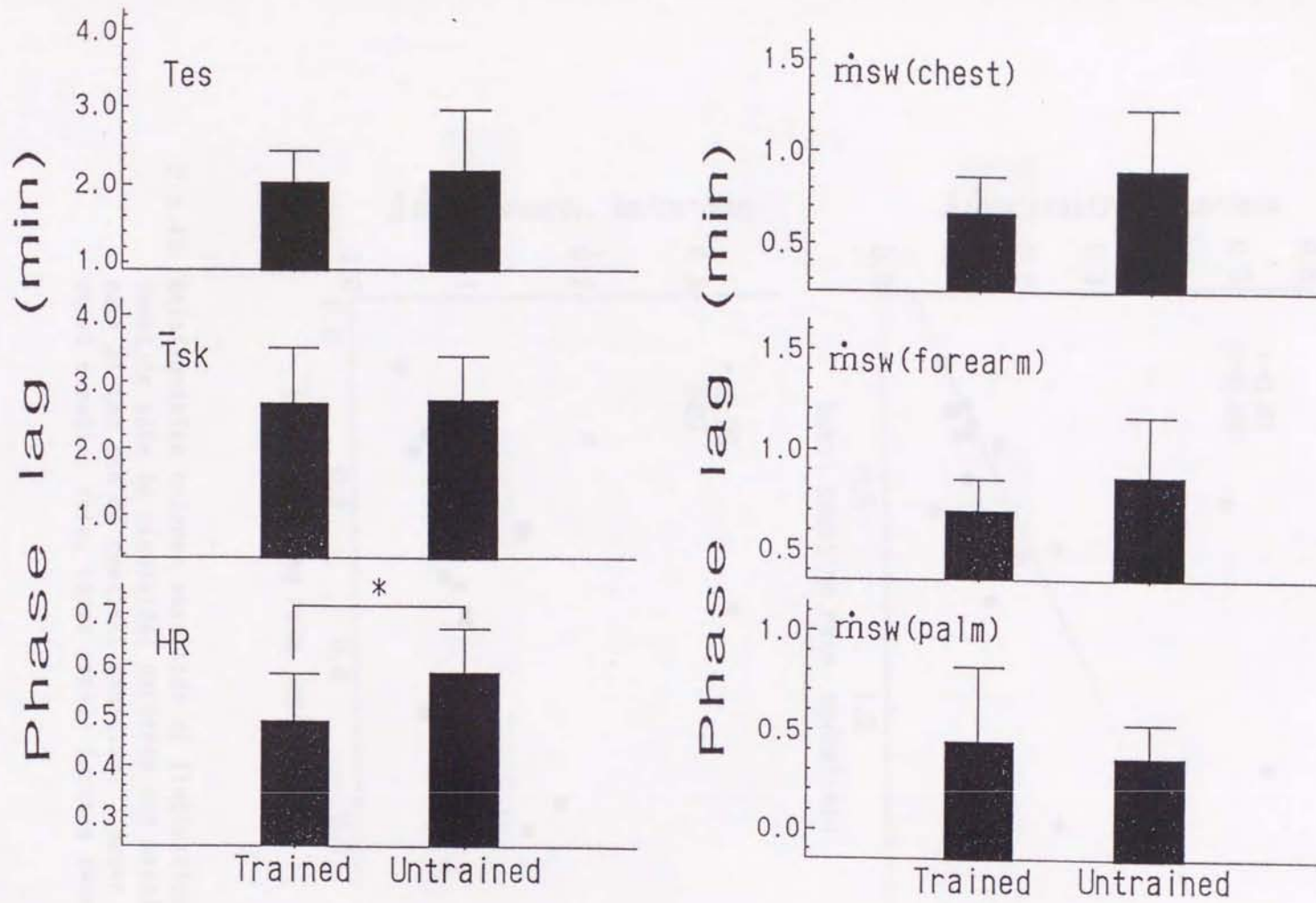


Fig.44. Phase lag of Tes,  $\bar{T}_{sk}$ , HR,  $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ ,  $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$  and  $\dot{m}_{sw}(\text{palm})$  to sinusoidal exercise in Trained and Untrained groups.

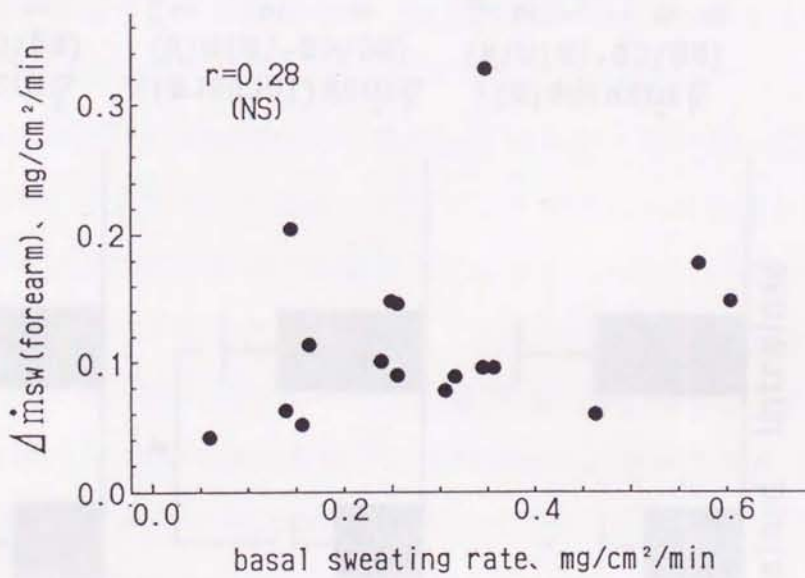
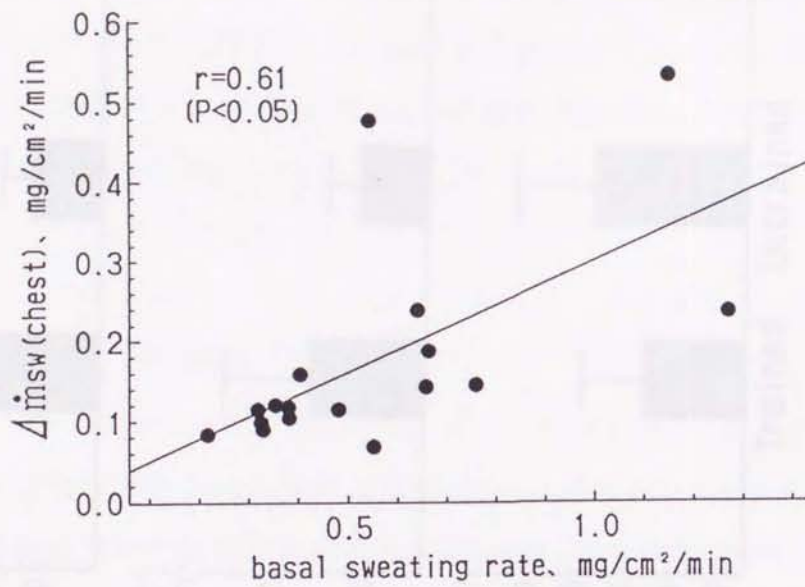


Fig.45. Relationships between magnitude of fluctuation of local sweating rate to sinusoidal exercise and basal sweating rate at the end of constant exercise. upper panel: chest sweating rate, lower panel: forearm sweating rate

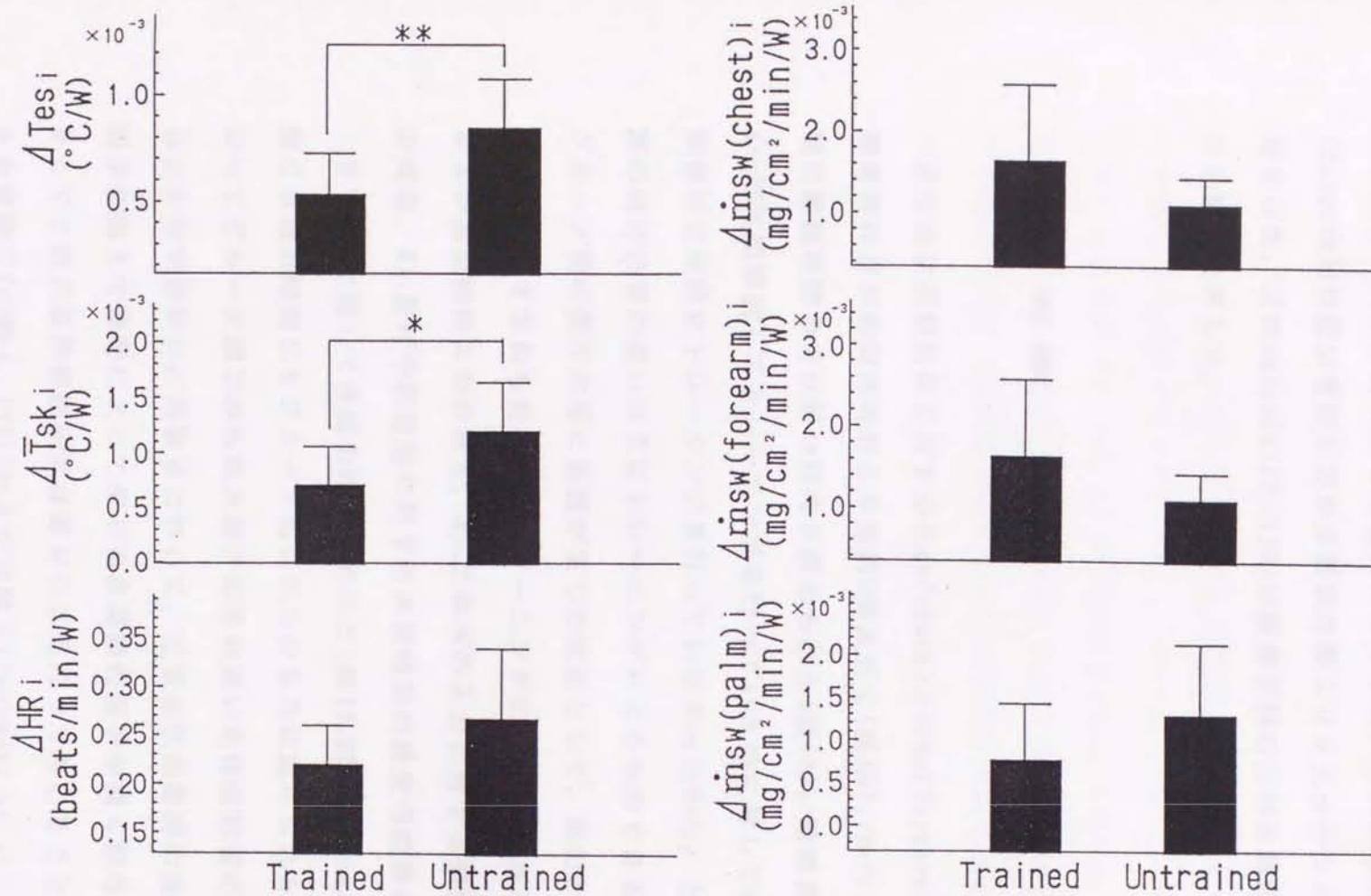


Fig.46. Magnitude of the responses per 1 watt in exercise rate to sinusoidal exercise in Trained and Untrained groups.

群の方が非鍛錬者群よりも有意に小さかった。 $\Delta \dot{m}_{sw}(\text{chest})_i$ と $\Delta \dot{m}_{sw}(\text{forearm})_i$ は鍛錬者群の方が非鍛錬者群よりも大きかったが有意差ではなかった。 $\Delta \dot{m}_{sw}(\text{palm})_i$ と $\Delta \text{HR}_i$ は鍛錬者群の方が非鍛錬者群よりも小さい傾向を示した。

#### 4. 考察

正弦波状運動負荷に対する $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ と $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ の振れ幅は鍛錬者群の方が非鍛錬者群よりも約2倍大きく(図43), かつこれらの遅れ時間は鍛錬者群の方が短い傾向が認められた(図44)。鍛錬者群の被検者は4~10年間継続してトレーニングを行っていたのに対して非鍛錬者群の被検者は日常的にトレーニングを行っていなかったから, 上記のグループ間の発汗応答の違いは主にトレーニングによるものであると考えられる。グループ間の発汗応答に差異が生じた原因として, 次の3つの可能性が考えられる。すなわち長期間のトレーニングによる1).発汗中枢への温熱性および非温熱性入力が増大, 2).これらの入力に対する発汗中枢の感受性の高進, 3).発汗中枢活動に対する末梢機能の感受性の高進である。

まず1).に関して体温の応答をみると(図43, 図44),  $T_{es}$ と $T_{sk}$ には振れ幅にも遅れ時間にもグループ間に明らかな差は認められなかった。したがってグループ間にみられた発汗応答の違いを体温応答の差異で説明することはできない。実験VIにおいて, 正弦波状運動時の発汗には温熱性因子に加えて運動によって生じる非温熱性因子が強く関与していること, そしてこの非温熱性因子は体温変化に先行して起こることが考えられた。また実験II(山崎ら, 1992)および実験V(Yamazaki et al., 1993b)におい

て、非温熱性因子は末梢機構よりも中枢機構に影響することを明らかにした。したがって体温変化に先行して変化する非温熱性因子が正弦波状運動時の発汗中枢活動に影響し、その影響が鍛練者の方が非鍛練者よりも大きかったため、前者の発汗の遅れ時間を短くし、その振れ幅を増大させた可能性が考えられる。

その非温熱性因子の1つとして運動強度の変化に伴って生じる精神的興奮が挙げられる(実験VI)。しかし今回の実験では、精神性発汗と言われている  $m_{sw}(palm)$  は振幅応答にも位相応答にもグループ間に明かな差がなかったことから、グループ間の発汗応答の差を精神的要因で説明することは困難であり、これ以外の非温熱性因子の関与が考えられる。近年、大西ら(1991)は運動中枢からの下行性神経活動(*central motor command*)が運動時の発汗活動に関与することを報告した。またVassing et al.(1991)は静的掌握運動中に汗腺を支配する皮膚交感神経の活動が *central motor command* によって影響されることを示唆した。*central motor command* が正弦波状運動時の発汗中枢活動に非温熱性因子の1つとして関与した可能性があるが、本実験でこれを明らかにすることはできない。

次に2).の要因に関して、実験VIIにおいて一定強度運動時の平均体温( $\bar{T}_b$ )と汗の拍出頻度( $F_{sw}$ )の関係の勾配は鍛練者群と非鍛練者群で差が認められなかった。すなわち長期間トレーニングしても運動時の発汗中枢の感受性は変化しないと考えられた。また実験IIIにおいて、運動強度の違いによって  $\bar{T}_b - F_{sw}$  関係の勾配に差は認められなかったが、同一  $\bar{T}_b$  における900kpm/min運動時の  $F_{sw}$  は500および700kpm/min運動時のそれよりも多い傾向を示した。これらの結果は運動強度の変化に伴って生じる非温熱性因子が発汗中枢の感受性を変えずに、その活動性だけを変えることを示唆している。したがって運動強度が変化する正弦波状運動の場合に

も発汗中枢の感受性の高進によってグループ間で発汗応答に差が生じた可能性は低いと考えられる。

3).の要因に関して、実験Ⅶにおいて長期間のトレーニングによる常温下一定強度運動時の発汗量の増大は、末梢機能の感受性の高進によることを明らかにした。他にもトレーニングによる発汗増大が末梢性機序によるとする報告はいくつかある(Buono and Sjoholm,1988 ; Chen and Elizondo,1974 ; Fox et al.,1974 ; Nadel et al.,1974)。したがって正弦波状運動の場合にもこの要因によってグループ間で発汗応答に差異が生じた可能性が考えられる。

これらのことから、鍛錬者群と非鍛錬者群の間で正弦波状運動時の発汗応答が異なった機序を次のように説明することができる。すなわち長期間のトレーニングによって正弦波状運動時の発汗中枢に対する非温熱性因子の関与が大きくなり、かつ発汗中枢活動に対する末梢機能の感受性が高進した結果、発汗の遅れ時間は短くなり、その振れ幅は増大したと考えられる。

ところで一定強度運動時の30分目における $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ は鍛錬者群の方が非鍛錬者群よりも多かったが、 $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ はグループ間に差が認められなかった。一方、正弦波状運動時には $\Delta \dot{m}_{sw}(\text{chest})$ に加えて $\Delta \dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ でも鍛錬者群の方が大きく、一定強度運動時の発汗量と必ずしも対応していなかった。また全被検者のデータから得られた一定強度運動時の30分目における発汗量(basal sweating rate)と正弦波状運動時の $\Delta$ 発汗量の関係をみたところ(図45)、 $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ には中程度の相関関係が認められたが、 $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ には有意な相関関係は認められなかった。これらの結果は正弦波状運動時と一定強度運動時の発汗調節機構は必ずしも同一ではないことを示唆している。トレーニングによる

$m_{sw}(\text{forearm})$ の応答量の増大が正弦波状運動時にだけ認められた原因として、まず運動中の最高体温が正弦波状運動時の方が一定強度運動時よりも高く、より強い温熱負荷が加わったことが考えられる。しかし今回得られた $\Delta T_{es}$ はいずれのグループでも平均で $0.1^{\circ}\text{C}$ 以下、 $\Delta \bar{T}_{sk}$ は $0.15^{\circ}\text{C}$ 以下と小さいから、この原因だけで上記の差異を説明することはできないものと考えられる。第二の原因として実験VIで考察したように、正弦波状運動時の方が一定強度運動時よりも発汗量の変化に対する非温熱性因子の関与が相対的に大きいため、鍛練者群の $\Delta$ 発汗量はいずれの部位でも大きかった可能性が考えられる。同時にこの可能性は長期間トレーニングを続けてきた鍛練者では非鍛練者に比して、温熱性発汗中枢に対する非温熱性因子の関与が大きいという仮説を支持するものであると考えられる。運動時の発汗活動が非温熱性因子によって高進することの生理学的意義は、運動強度の変化に対して体温変化を小さくするために速やかに発汗量を調節することにあると推測される。もし運動時の発汗が時定数の大きい体温によってのみ影響されるとすると、発汗応答は遅くかつ小さくなるから、運動強度変化時の体温変動は非温熱性因子が関与する場合よりもさらに大きくなるものと考えられる。

運動時の深部体温上昇は同一強度の運動であれば $\dot{V}O_{2max}$ の大きい者は小さいが(Shvartz et al., 1977b)、相対強度( $\% \dot{V}O_{2max}$ )が同一であれば、被検者の $\dot{V}O_{2max}$ の大小にかかわらず、ほぼ同程度になることが報告されている(Saltin and Hermansen, 1966)。本実験で用いた正弦波状運動負荷の振れ幅は相対強度( $\% \dot{V}O_{2max}$ )ではグループ間の差は小さかったが、絶対強度(W)では鍛練者群の方が非鍛練者群に比して約40%も大きかった。仮に絶対強度が等しい正弦波状運動を用いたとすると、 $\Delta$ 深部体温は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも小さかったかもしれない。そこで運動負



荷1W当たりの各パラメーターの振れ幅をみたところ(図46),  $\Delta T_{sk}$ は鍛練者群の方が有意に小さくなった。このことは長期間のトレーニングによって絶対強度が等しい正弦波状運動時の体温変動が小さく抑えられることを示唆している。深部体温の変動を小さく抑えるには発汗機能が皮膚血管運動(皮膚温変化)による放熱機能よりも重要であると推測される。なぜならいずれのグループでも一般体表面の発汗の遅れ時間は $\bar{T}_{sk}$ のそれより約2分も短かったからである(図44)。

HRの遅れ時間は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも有意に短かった( $P < 0.05$ )(図44)。運動強度の変化に対して発汗応答や心拍応答が速やかなことは、運動時に身体の内部環境を一定に維持するのに有利であると考えられる。

以上のことから、長期間トレーニングを続けてきた鍛練者は非鍛練者に比して運動に対する発汗の動的応答性に優れ、運動強度の変化に対して体温を一定に維持する傾向が強いと考えられる。このような鍛練者における発汗応答の改善の機序として、トレーニングによって正弦波状運動時の発汗中枢に対する非温熱性因子の関与が増大すること、および末梢機能の感受性が高進することが考えられる。

## 5. 要約

運動トレーニングが運動に対する発汗の動的応答性に及ぼす影響を明らかにするために、正弦波状運動負荷に対する発汗応答を鍛練者と非鍛練者の間で比較検討した。継続的にトレーニングを行っている男子大学生9名(鍛練者群)と日常的なトレーニングを行っていない男子大学生8名

(非鍛練者群)に、室温が25°C、相対湿度が35%の環境下で、30分間の一定強度自転車運動に続いて4分周期の正弦波状運動を28分間行わせ、 $T_{es}$ 、 $\bar{T}_{sk}$ 、 $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ 、 $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ 等を連続測定した。得られた主な所見は次の通りである。

(1) 正弦波状運動時の $T_{es}$ と $\bar{T}_{sk}$ の振れ幅にはグループ間に差がなかったが、 $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ と $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ の振れ幅は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも有意に大きかった( $P < 0.05$ )。運動負荷1W当たりの $T_{es}$ の振れ幅は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも有意に小さかった( $P < 0.01$ )。

(2) 正弦波状運動に対する $T_{es}$ と $\bar{T}_{sk}$ の遅れ時間にはグループ間に差がなかったが、 $\dot{m}_{sw}(\text{chest})$ と $\dot{m}_{sw}(\text{forearm})$ の遅れ時間は鍛練者群の方が非鍛練者群よりも短い傾向を示した( $P = 0.10$ )。

以上のことから、長期間トレーニングを続けてきた鍛練者は、非鍛練者に比して運動に対する発汗の動的応答性に優れ、運動強度の変化に対して体温を一定に維持する傾向が強いと考えられる。鍛練者における発汗応答の改善の機序として、トレーニングによる正弦波状運動時の発汗中枢に対する非温熱性因子の関与の増大、および末梢機能の感受性の高進が関与するものと考えられる。

## ⅩⅡ章．総括

運動時には筋活動によって熱産生は高まり体温が上昇するが、過度の体温上昇は運動パフォーマンスを低下させ、時には生体にとって危険なこともある。発汗は運動時の過度の体温上昇を防ぐのに極めて重要な役割を果たしている。しかし運動時の発汗がどのような機序で調節されているかについては十分には理解されていない。

発汗調節系は中枢機構と末梢機構に分けられる。1分間当たりの発汗波の数、すなわち汗の拍出頻度( $F_{sw}$ )を平均体温( $\bar{T}_b$ )に対してプロットして得られる回帰直線は発汗中枢機構の反応性を表し、発汗量を $F_{sw}$ に対してプロットして得られる回帰直線は中枢性発汗衝撃に対する末梢機構(汗腺機能)の反応性を示すとされている。したがって、これらの指標を用いれば発汗量が増加した場合に、それが発汗中枢機構の変化によるのか、それとも末梢機構の変化によるのかを明らかにすることが可能であると考えられる。そこで本研究では、 $F_{sw}$ の特性に基づいて、運動時の発汗調節における中枢機構と末梢機構の関与を明らかにすることを目的として、一連の実験を行った。

$F_{sw}$ を計測することによって非観血的に発汗中枢活動が推定できるため、 $F_{sw}$ は極めて有用な指標であるが、多量に発汗する場合には、発汗波が不明瞭になり個々の拍出波の同定が困難になることがある。そこで比較的少量に発汗する場合でも個々の発汗波を明瞭に記録できるように換気カプセル法を改良することにした(実験Ⅳ)。まず、カプセル下の汗の蒸発を促進させるために、カプセルの小型化と流す窒素ガスの流速の増大に加えて、発汗カプセルへの流入窒素ガスの加温を行った。その結果、従

来の換気カプセル法よりも発汗波を明瞭に記録することができた。さらに発汗パターンの徐波成分を除去するために、発汗波を微分することによって各波の弁別性を一層改善することができた。これらの方法は多量発汗時でも $F_{sw}$ をより正確に計測するのに有効であることが示された。

運動時の発汗調節系には深部体温が最も重要な入力因子となる。深部体温が安定している定常状態において、深部体温(入力)と発汗量(出力)の関係が直線的であることは一致した見解であるが、深部体温が変化しつつある非定常状態において、両者の間に直線関係があるか否かに関しては一致した見解が得られていない。さらに非定常状態における両者の関係が運動強度の違いによって異なるか否かについても明らかでない。そこで実験Ⅰ～Ⅲにおいて、非定常状態における運動時の深部体温と発汗量( $\dot{m}_{sw}$ )の関係、および運動時の発汗反応と運動強度との関係を明らかにすることにした。

実験Ⅰでは深部体温の指標として直腸温( $T_{re}$ )を用いて、500、700および900kpm/min強度の一定負荷自転車運動時の $T_{re}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係を検討した。その結果、いずれの運動条件においても、 $T_{re}$ と $\dot{m}_{sw}$ の関係の勾配はある体温( $T_{re}$ では $37.7^{\circ}\text{C}$ 前後、 $\bar{T}_b$ では $36.8^{\circ}\text{C}$ 前後)をbreaking pointとして減少することが示された。さらに同一体温( $T_{re}, \bar{T}_b$ )における $\dot{m}_{sw}$ は運動強度が強いほど多いことが示された。しかし実験Ⅰで深部体温の指標として用いた $T_{re}$ は、急速な体熱変化に対して追従性が悪いと指摘されていることから、非定常状態における深部体温の指標としてその妥当性に問題が残された。

そこで実験Ⅱでは、 $T_{re}$ に比して応答が速やかでかつ大動脈血温や脳温を反映するといわれている食道温( $T_{es}$ )を深部体温の指標として用い、非定常状態における運動時の深部体温と $\dot{m}_{sw}$ の関係を再検討した。さらに

実験Ⅲでは、 $T_{es}$ を深部体温の指標として用い、実験Ⅰと同じ運動条件で運動強度と発汗反応の関係を再検討した。

実験Ⅱにおいて、40%  $\dot{V}O_{2max}$ 強度の運動中、 $T_{es}$ は $T_{re}$ に比して急速に上昇し、運動12分目以降にはほぼ定常状態を示したのに対して、 $T_{re}$ は運動40分目まで緩やかに上昇し続けた。その結果、運動時の $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ 関係は、 $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係とは異なってbreaking pointがなく、一本の直線で表された。したがって $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係におけるbreaking pointの存在は、運動初期における $T_{re}$ の応答の遅れによって生じる見かけ上の現象であると考えられた。

実験Ⅲにおいて、運動強度の違いによる $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ 関係の差異は、実験Ⅰでみた $T_{re}-\dot{m}_{sw}$ 関係の場合ほど明らかでなかった。しかし700および900kpm/min運動時の $T_{es}-\dot{m}_{sw}$ 関係の勾配は、500kpm/min運動時のそれよりもいずれも約60%大きかった。また900kpm/min運動時の発汗開始閾値体温( $T_{es}, \bar{T}_b$ )は500kpm/min運動時のそれより有意に高かった。そこで、これらの運動強度間の発汗反応の違いが中枢機構に由来するのか、末梢機構に由来するのかを $F_{sw}$ の特性から検討した結果、主に末梢機能の感受性の変化に起因していることが明らかになった。末梢機能の感受性に影響した主因としては、運動強度の違いによる発汗測定部の局所皮膚温の応答の差異が考えられた。

このように運動時の発汗量は非定常状態であっても深部体温と密接に関係することが確認された。しかし身体運動は生体に対して温熱負荷として作用する一方で、様々な非温熱性の影響(例えば、精神的興奮、筋感覚刺激、運動中枢活動の高進など)をもたらす。したがって運動時の発汗調節にも深部体温や皮膚温のような温熱性因子だけでなく、運動に関係した非温熱性因子が関与することが予測される。実際、運動開始時には

体温が上昇する前に発汗が起こることがあり、このような発汗には非温熱性因子が関与すると推定されている。したがって少なくとも運動開始時の発汗には非温熱性因子が関与する可能性があるが、この発汗が中枢機構に由来しているか否かについては明らかでない。そこで、運動開始直後の発汗増加現象の機序を明らかにするために、男子大学生6名に温暖な環境下(28°C, 50% RH)で自転車運動を行わせた(実験II)。その結果、運動開始直後の時点において、いずれの被検者も発汗( $\dot{m}_{sw}$ )が体温上昇の前に始まり、同時に $F_{sw}$ も $\dot{m}_{sw}$ と同様なパターンで急増した。このことから運動開始直後の発汗増加は運動に伴って生じる非温熱性因子が発汗中枢活動を高めることによると考えられた。しかし運動時の発汗に対する非温熱性因子の関与は、運動開始直後の時点だけに起こる現象なのか、それとも運動中も継続して起こるのかという点は疑問として残された。

この疑問点を明らかにするために、実験Vでは運動によって生じた非温熱性因子の影響が解除されると考えられる安静回復時の発汗反応と運動時のそれとを比較検討した。運動条件としては一定負荷法による最大下自転車運動と漸増負荷法による最大自転車運動を用いた。その結果、いずれの運動条件においても同一体温( $T_{es}$ ,  $T_b$ )における $\dot{m}_{sw}$ は運動時の方が回復時よりも明らかに多かった。また、いずれの運動条件においても同一体温における $F_{sw}$ は運動時の方が回復時よりも明らかに多かったが、同一の $F_{sw}$ における $\dot{m}_{sw}$ は運動時と回復時でほぼ同等かあるいは前者の場合の方が後者の場合よりもわずかに少なかった。これらのことから、同一体温における発汗量は運動時の方が回復時よりも多いが、これは運動時の発汗中枢活動が回復時のそれよりも高進しているためであると考えられた。そしてこの両者の違いには主に運動に伴う非温熱性因子や平均皮膚温の変化率の差異が関係していることが考えられた。このように運

動時の発汗には運動中継続して非温熱性因子が関与することが示された。実験Ⅲにおいて、同一体温における $\dot{m}_{sw}$ に運動強度の違いによって明らかな差がなかったのは、一定強度運動時には体温上昇による発汗増加が著しいため、非温熱性因子による発汗が隠蔽されてしまうためであろうと考えられる。

正弦波状運動負荷時には運動強度が常に変化するため、体温や発汗も正弦波状に変化すると推測される。一般に運動に伴う体温の変化は遅いので正弦波状運動時には体温の変化は運動強度の変化よりかなり遅れるものと考えられる。したがって運動時の発汗反応が非温熱性因子の影響を受けるとすると、正弦波状運動時には発汗は体温の変化に先行して変化する可能性がある。また体温変化の時定数は大きいので、正弦波状運動の周期をある程度以下に短くすると体温は一定値を保つと考えられるが、非温熱性因子と温熱性因子の両方の影響を受ける発汗は前者の影響を受けて正弦波状に変化することが推測される。そこで実験Ⅵでは、運動時の発汗調節に対する非温熱性因子の関与をさらに明らかにするために、正弦波状運動に対する体温と発汗の応答特性を検討した。男子大学生6名を被検者として、25°C、35%RHの環境下で、30分間の一定強度運動に続いて1.3分、4分および8分周期の正弦波状運動を40分間行わせた。その結果、4分および8分周期における正弦波状運動時の $\dot{m}_{sw}$ の位相は $T_{es}$ や平均皮膚温( $\bar{T}_{sk}$ )のそれよりも平均1.2~2.8分先行していた。また正弦波状運動の周期を短くすると(1.3分)、 $T_{es}$ や $\bar{T}_{sk}$ はほとんど変化しないのにもかかわらず、 $\dot{m}_{sw}$ は運動強度の変化に伴って明らかに正弦波状に変化することが示された。これらのことから正弦波状運動中の発汗反応には温熱性因子に加えて運動強度の変化に伴う非温熱性因子が強く関与すると考えられた。そして短い周期(例えば1.3分)の正弦波状運動負荷を用い

れば、運動時の発汗に対する非温熱性因子の関与を温熱性因子の関与と分離して検討できると考えられた。このように運動強度が連続的に変化する場合にも、発汗反応は非温熱性因子によって影響されることが明らかになった。

実験ⅦおよびⅧでは、運動時の発汗反応に及ぼす運動鍛錬の影響を明らかにするために、鍛錬者と非鍛錬者の発汗反応をFswの特性や正弦波状運動負荷法を用いて比較検討した。

まず実験Ⅶでは、定常運動時の発汗反応に及ぼす運動鍛錬の影響を明らかにするために、4～10年間継続的にトレーニングを行っている男子大学生9名(鍛錬者群)と、日頃トレーニングを行っていない男子大学生8名(非鍛錬者群)を被検者として、25°C、35%RHの環境下で、35%  $\dot{V}O_{2max}$ の一定負荷自転車運動を30分間行わせた。その結果、体温( $T_{es}$ ,  $T_b$ )と胸部発汗量の関係の勾配は鍛錬者群の方が非鍛錬者群よりも有意に大きかったが、体温と前腕部発汗量の関係の勾配はグループ間に差がなかった。また発汗開始閾値体温( $T_{es}$ ,  $T_b$ )にはいずれの部位でもグループ間に差がなかった。上記の体温-胸部発汗量関係の勾配の差の原因が中枢機構にあるのか、それとも末梢機構にあるのかをFswの特性より検討したところ、末梢機構に由来することが明らかになった。これらのことから、長期間トレーニングを行うと常温下での軽度な運動時の胸部発汗量は増大するが、前腕部発汗量は変化しないこと、そしてこの増大は発汗中枢活動に対する末梢機能の感受性の高進に起因することが考えられた。また同一 $T_b$ におけるFswは鍛錬者群の方が少ない傾向を示し、長期間のトレーニングによって発汗中枢活動はむしろ低下することが示唆された。これは長期間のトレーニングに伴って、生体が頻繁に高体温状態に暴露されるため、発汗中枢に慣れが生じたことによると推測された。



日常生活やスポーツ等における身体活動の強度は、常に一定ではなく変化することが多い。したがって発汗機能に及ぼす運動鍛錬の影響を検討する場合にも、非定常運動に対する発汗の動的応答性を追求する必要があるが、このような観点から運動時の発汗機能を評価した研究はなされていない。そこで実験Ⅷでは、運動に対する生体の動的応答性をとらえるのに有用である正弦波状運動負荷法を用い、運動鍛錬が運動に対する発汗の動的応答性に及ぼす影響を検討することにした。継続的にトレーニングを行っている男子大学生9名(鍛錬者群)と日常的にトレーニングを行っていない男子大学生8名(非鍛錬者群)を被検者として、4分周期の正弦波状運動に対する体温や発汗の応答をグループ間で比較検討した。その結果、正弦波状運動時の $T_{es}$ と $T_{sk}$ の振れ幅にはグループ間に差がなかったが、これらの振れ幅を運動負荷1W当たりの応答量に補正すると鍛錬者群の方が有意に小さくなった。また、正弦波状運動に対する発汗量の振れ幅は胸部でも前腕部でも鍛錬者群の方が非鍛錬者群より約2倍大きく、かつこれらの遅れ時間は鍛錬者群の方が短い傾向を示した。これらのことから、長期間トレーニングを続けてきた鍛錬者は、非鍛錬者に比して運動に対する発汗の応答が速やかであり、運動強度の変化に対して体温を一定に維持する能力が高いと考えられた。このような鍛錬者における発汗応答の改善の機序として、トレーニングによる運動時の発汗中枢に対する非温熱性因子の関与の増大、および末梢機能の感受性の高進が関与しているものと考えられた。

### ⅩⅢ章．結論

1. 今回提案した方法によって運動中に比較的多量に発汗する場合であっても汗の拍出頻度をより正確に計測できることが示された。
2. 運動時の深部体温と発汗量の関係は非定常状態であってもほぼ直線的である。
3. 運動強度が増大すると運動時の深部体温と発汗量の関係の勾配は増大し、かつ閾値体温は上昇する。これらの変化は主に末梢性機序によってもたらされると考えられる。
4. 運動開始直後には、発汗中枢活動は運動に伴う非温熱性因子によって高進することがある。
5. 深部体温と発汗量の関係からみた運動時の発汗反応は安静回復時のそれよりも大きい。この違いは中枢性機序によってもたらされると考えられる。
6. 正弦波状運動時の発汗反応には温熱性因子に加えて運動強度の変化に伴う非温熱性因子が強く関与している。
7. 運動鍛錬者は非鍛錬者に比して常温下での軽度な運動時の胸部発汗量は多いが、前腕部発汗量には違いがない。鍛錬者における胸部発汗量の増大は末梢機能の感受性の高進に起因している。
8. 運動鍛錬者は非鍛錬者に比して運動に対する発汗の動的応答性に優れ、運動強度の変化に対して体温を一定に維持する傾向が強い。

## 謝 辞

本論文の作成にあたり，終始懇切丁寧な御指導，御校閲を賜りました指導教官，池上晴夫教授に心から感謝いたします。

また，筑波大学体育科学系古藤高良教授ならびに勝田茂教授からも多くの御指導，御助言を賜りました。ここに深く感謝いたします。

池上研究室の諸先輩方からは多くの貴重な御助言を頂き，研究室の大学院生，卒業生，ならびに学生の諸兄には，検者および被検者として実験に協力して頂きました。これら多くの方々から受けた御指導，御助言，御助力に対してここに改めて感謝いたします。

## 参考文献

- Aikäs, E., Karvonen, M. J., Piironen, P. and Ruosteenoja, R. (1962) : Intramuscular, rectal and oesophageal temperature during exercise. *Acta Physiol. Scand.*, 54, 366-370.
- Albert, R. E. and Palmes, E. D. (1951) : Evaporative rate patterns from small skin areas as measured by an infrared gas analyzer. *J. Appl. Physiol.*, 4 : 208-214.
- Allan, J. R. (1965) : The effects of physical training in a temperate and hot climate on the physiological responses to heat stress. *Ergonomics*, 8 : 445-453.
- Asmussen, E. and Nielsen, M. (1947) : The regulation of the body-temperature during work performed with the arms and with the legs. *Acta Physiol. Scand.*, 14 : 373-382.
- Aulick, L. H., Robinson, S. and Tzankoff, S. P. (1981) : Arm and leg intravascular temperatures of men during submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.*, 51 : 1092-1097.
- Barnes, C. and Davies, C. T. M. (1970) : Body temperature in exercise. *J. Physiol. (London)*, 209 : 159-160.
- Bazett, H. C. (1951) : Theory of reflex controls to explain regulation of body temperature at rest and during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 4 : 245-262.
- Benzinger, T. H. (1969) : Heat regulation : homeostasis of central temperature in man. *Physiol. Rev.*, 49 : 671-759.
- Bittel, J. H. M. and Buguet, A. G. C. (1980) : Improved response to heat after moderate physical training in man. *Experimentia*, 36 : 560-561.
- Brengelman, 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.
- Bullard, R. W. (1962) : Continuous recording of sweating rate by resistance hygrometry. *J. Appl. Physiol.*, 17 : 735-737.
- Buono, M. J. and Sjöholm, N. T. (1988) : Effect of physical training on peripheral sweat production. *J. Appl. Physiol.*, 65 : 811-814.

- Chappuis, P., Pittet, P. and Jequier, E. (1976) : Heat storage regulation in exercise during thermal transients. *J. Appl. Physiol.*, 40 : 384-392.
- Chen, W. Y. and Elizondo, R. S. (1974) : Peripheral modification of thermoregulatory function during heat acclimation. *J. Appl. Physiol.*, 37 : 367-373.
- Cohen, J. S. and Gisolfi, C. V. (1982) : Effects of interval training on work-heat tolerance of young women. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 14 : 46-52.
- Cooper, K. E. and Kenyon, J. R. (1957) : A comparison of temperatures measured in the rectum, esophagus and on the surface of the aorta during hypothermia in man. *Brit. J. Surg.*, 44 : 616-619.
- Custance, A. C. (1962) : Cycling of sweat gland activity recorded by a new technique. *J. Appl. Physiol.*, 17 : 741-742.
- Fox, R. H., Goldsmith, R., Hampton, I. F. C. and Lewis, H. E. (1964) : The nature of the increase in sweating capacity produced by heat acclimatization. *J. Physiol.*, 171 : 368-376.
- Fukuoka, Y. and Ikegami, H. (1990) : Respiratory response to sinusoidal work load in humans. *Ann. Physiol. Anthropol.* 9 : 175-183.
- Gerbrandy, J., Snell, E. S. and Cranston, W. J. (1954) : Oral, rectal and esophageal temperatures in relation to central temperatures in man. *Clin. Sci.*, 13 : 615-624.
- Gisolfi, C. and Robinson, S. (1969) : Relations between physical training, acclimatization, and heat tolerance. *J. Appl. Physiol.*, 26 : 530-534.
- Gisolfi, C. and Robinson, S. (1970) : Central and Peripheral stimuli regulating sweating during intermittent work in men. *J. Appl. Physiol.*, 29 : 761-768.
- Hardy, J. D. and DuBois, E. F. (1937a) : Regulation of heat loss from the human body. *Proc. Nat. Acad. Sci. (Wash.)*, 23 : 624-631.
- Hardy, J. D. and DuBois, E. F. (1937b) : Basal metabolism, radiation, convection and vaporization at temperatures of 22 to 35°C. *J. Nutrition.*, 15 : 477-497.

Hardy, J. D. and Soderstrom, G. F. (1938) : Heat loss from the nude body and peripheral blood flow at temperatures of 22°C to 35°C. *J. Nutrition*, 16 : 493-510.

Harrison, M. H., Edwards, R. J. and Fennessy, P. A. (1978) : Intravascular volume and tonicity as factors in the regulation of body temperature. *J. Appl. Physiol.*, 44 : 69-75.

Hayward, J. N. and Baker, M. A. (1969) : A comparative study of the role of the cerebral arterial blood in the regulation of brain temperature in five mammals. *Brain Res.*, 16 : 417-440.

Jessen, C., McLean, J. A., Calvert, D. T. and Findlay, J. D. (1972) : Balanced and unbalanced temperature signals generated in the spinal cord of the ox. *Am. J. Physiol.*, 222 : 1343-1347.

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.

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.

Johnson, J. M., O'Leary, D. S., Taylor, W. F. and Park, M. K. (1984) : Reflex regulation of sweat rate by skin temperature in exercising humans. *J. Appl. Physiol.*, 56 : 1283-1288.

Kitzing, J. and Bleichert, A. (1965) : Neue Ergebnisse über die Arbeits Hyperthermia des Menschen. *Helgoländer Wiss. Meeresuntersuch.*, 14 : 591-596.

小林 義雄, 安藤 好郎, 細井 輝男, 竹内 敏子 (1976) : スポーツ鍛錬者の暑熱適応. *体育学研究*, 21 : 39-54.

近藤 徳彦, 西保 岳, 鍋倉 賢治, 池上 晴夫 (1987) : 汗の拍出頻度よりみた安静時と運動時の発汗調節の比較 - 非定常状態の場合について -. *日生氣誌*, 24 : 135-144.

近藤 徳彦, 西保 岳, 曾根 涼子, 権 五晟, 池上晴夫 (1988) : 運動強度の違いが運動時の発汗調節に及ぼす影響について - 非定常状態の場合 -. *日本体育学会第39回大会号* : 304.

Kuno, Y. (1956) : *Human perspiration*. Thomas, Springfield Ill.

Libert, J. P., Candas, V., Vogt, J. J. and Mairiaux, P. (1979) :

Central and peripheral inputs in sweating regulation during thermal transients. *J. Appl. Physiol.*, 52 : 1147-1152.

Libert, J. P., Candas, V. and Vogt, J. J. (1982) : Effect of rate of change in skin temperature on local sweating rate. *J. Appl. Physiol.*, 47 : 306-311.

MacIntyre, B. A., Bullard, R. W., Banerjee, M. and Elizondo, R. : Mechanism of enhancement of eccrine sweating by localized heating. *J. Appl. Physiol.*, 25 : 255-260.

Meyer, F. R., Robinson, S., Newton, J. L., Tsao, C. H. and Holgersen, L. O. (1962) : The regulation of the sweating response to work in man. *Physiologist*, 5 : 182.

宮側 敏明, 小川 徳雄, 朝山 正巳, 山下 由果 (1985) : 運動負荷急変に対する発汗応答. *日本生理誌.*, 47 : 17-24.

Molnar, G. W. and Read, R. C. (1974) : Studies during open-heart surgery on the special characteristics of rectal temperature. *J. Appl. Physiol.*, 36 : 333-336.

Nadel, E. R., Bullard, R. W. and Stolwijk, J. A. J. (1971a) : Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *J. Appl. Physiol.*, 31 : 80-87.

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.

Nadel, E. R., Mitchell, J. W., Saltin, B. and Stolwijk, J. A. J. (1971b) : Peripheral modifications to the central drive for sweating. *J. Appl. Physiol.*, 31 : 828-833.

Nadel, E. R., Mitchell, J. W. and Stolwijk, J. A. J. (1971c) : Control of local and total sweating during exercise transients. *Int. J. Biometeorol.*, 15 : 201-206.

Nadel, E. R., Pandolf, K. B., Roberts, M. F. and Stolwijk, J. A. J. (1974) : Mechanisms of thermal acclimation to exercise and heat. *J. Appl. Physiol.*, 37 : 515-520.

Nakayama, T. and Takagi, K. (1959) : Minute pattern of human perspiration observed by a continuously recording method. *Jpn. J. Physiol.*, 9 : 359-364.

Nakayama, T. (1969) : A further investigation on the nature of

sweat discharge in man. *Tohoku J. Exp. Med.*, 98 : 265-272.

Nielsen, B. (1966) : Regulation of body temperature and heat dissipation at different levels of energy and heat production in man. *Acta Physiol. Scand.*, 68 : 215-227.

Nielsen, B. (1968) : Thermoregulatory response to arm work, leg work and intermittent leg work. *Acta Physiol. Scand.*, 72 : 25-32.

Nielsen, B. (1969) : Thermoregulation in rest and exercise. *Acta Physiol. Scand. Suppl.*, 323.

Nielsen, B. (1974) : Effects of changes in plasma volume and osmolality on thermoregulation during exercise. *Acta Physiol. Scand.*, 90 : 725-730.

Nielsen, B. and Nielsen, M. (1962) : Body temperature during work at different environmental temperatures. *Acta Physiol. Scand.*, 56 : 120-129.

Nielsen, B. and Nielsen, M. (1965a) : On the regulation of sweat secretion in exercise. *Acta Physiol. Scand.*, 64 : 314-322.

Nielsen, B. and Nielsen, M. (1965b) : Influence of passive and active heating on the temperature regulation of man. *Acta Physiol. Scand.*, 64 : 323-331.

Nielsen, M. (1938) : Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit. *Skand. Arch. Physiol.*, 79 : 193-230.

Ogawa, T. (1970) : Local effect of skin temperature on threshold concentration of sudorific agents. *J. Appl. Physiol.*, 25 : 525-536.

Ogawa, T. (1975) : Thermal influence on palmar sweating and mental influence on generalized sweating in man. *Jpn. J. Physiol.*, 25 : 525-536.

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.

Ogawa, T. and Asayama, M. (1986) : Quantitative analysis of the local effect of skin temperature on sweating. *Jpn. J. Physiol.*, 36 : 417-422.

Ogawa, T. and Bullard, R. W. (1971) : Sudomotor activity with and without generalized sweating. *J. Physiol. (Paris)*, 63 : 371-



373.

Ogawa, T. and Bullard, R. W. (1972) : Characteristics of subthreshold sudomotor neural impulses. *J. Appl. Physiol.*, 33 : 300-305.

大西 範和 (1991) : 運動時の発汗活動に対する運動中枢活動の関与について. *愛知医科大医学会雑誌*, 19 : 593-603.

大西 範和, 小川 徳雄, 朝山 正巳, 加藤 健一 (1986a) : 汗の拍出頻度よりみた運動時の発汗調節の検討. *体力科学*, 35 : 354.

大西 範和, 小川 徳雄, 菅屋 潤壺, 朝山 正巳, 山下 由果 (1986b) : 冷環境下の運動鍛錬に伴う発汗増進機序. *愛知医科大医学会雑誌*, 14 : 663-669.

Piironen, P. (1970) : Sinusoidal signals in the analysis of heat transfer in the body. In : *Physiological and behavioral temperature regulation*. edited by Hardy, J. D., Gagge, A. P. and Stolwijk, J. A. J., Thomas, Springfield Ill. : 358-366.

Piwonka, R. W. and Robinson, S. (1967) : Acclimatization of highly trained men to work in severe heat. *J. Appl. Physiol.*, 22 : 9-12.

Piwonka, R. W., Robinson, S., Gay, V. L. and Manalis, R. S. (1965) : Preacclimatization of men to heat by training. *J. Appl. Physiol.*, 20 : 379-384.

Ramanathan, N. L. (1964) : A new weighting system for mean surface temperature of the human body. *J. Appl. Physiol.*, 19 : 531-533.

Roberts, M. F., Wenger, C. B., Stolwijk, J. A. J. and Nadel, E. R. (1977) : Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J. Appl. Physiol.*, 43 : 133-137.

Robinson, S. (1949) : Physiological adjustments to heat. In : *The physiology of heat regulation and the science of clothing*, chap. 5, Newburgh, L. H. (ed.), Saunders. Philadelphia, : pp.193-231.

Robinson, S. (1962) : The regulation of sweating in exercise. In : *Advances in biology of skin*. Pergamon, New York, 3 : 152-162.

Robinson, S., Meyer, F. R., Newton, J. L., Ts'ao, C. H. and

- Holgersen, L. O. (1965) : Relations between sweating, cutaneous blood flow, and body temperature in work. *J. Appl. Physiol.*, 20 : 575-582.
- Sakakibara, H., Kondo, T., Koike, Y., Miyao, M., Furuta, M., Yamada, S., Sakurai, N. and Ono, Y. (1989) : Combined effects of vibration and noise on palmar sweating in healthy subjects. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 59 : 195-198.
- 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.
- Saltin, B. and Gagge, A. P. (1971) : Sweating and body temperatures during exercise. *Int. J. Biometeorol.*, 15 : 189-194.
- Saltin, B., Gagge, A. P., Bergh, U. and Stolwijk, J. A. J. (1972) : Body temperatures and sweating during exhaustive exercise. *J. Appl. Physiol.*, 32 : 635-643.
- Saltin, B., Gagge, A. P. and Stolwijk, J. A. J. (1968) : Muscle temperature during submaximal exercise in man. *J. Appl. Physiol.*, 25 : 679-688.
- Saltin, B., Gagge, A. P. and Stolwijk, J. A. J. (1970) : Body temperatures and sweating during thermal transients caused by exercise. *J. Appl. Physiol.*, 28 : 318-327.
- Saltin, B. and Hermansen, L. (1966) : Esophageal, rectal, and muscle temperature during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 21 : 1757-1762.
- Shiraki, K., Konda, N. and Sagawa, S. (1986) : Esophageal and tympanic temperature responses to core blood temperature changes during hyperthermia. *J. Appl. Physiol.*, 61 : 98-102.
- Shvartz, E., Benor, D. and Saar, E. (1972) : Acclimatization to severe dry heat by brief exposures to humid heat. *Ergonomics*, 15 : 563-571.
- Shvartz, E., Bhattacharya, A., Sperinde, S. J., Brock, P. J., Sciaraffa, D. and Van Beaumont, W. (1979) : Sweating responses during heat acclimation and moderate conditioning. *J. Appl. Physiol.*, 46 : 675-680.
- Shvartz, E., Glick Z. and Magazanik, A. (1977a) : Responses to temperate, cold, and hot environments and the effect of physical

training. *Aviat. Space Environ. Med.*, 48 : 254-260.

Shvartz, E., Magazanik, A. and Glick, Z. (1974) : Thermal response during training in a temperate climate. *J. Appl. Physiol.*, 36 : 572-577.

Shvartz, E., Saar, E., Meyerstein, N. and Benor, D. (1973) : A comparison of three methods of acclimatization to dry heat. *J. Appl. Physiol.*, 34 : 214-219.

Shvartz, E., Shapiro, Y., Magazanik, A., Meroz, A., Birnfeld, H., Mechtlinger, A. and Shibolet, S. (1977b) : Heat acclimation, physical fitness, and responses to exercise in temperate and hot environments. *J. Appl. Physiol.*, 43 : 678-683.

Stolwijk, J. A. J. and Hardy, J. D. (1966) : Partitioned calorimetric studies of responses of man to thermal transients. *J. Appl. Physiol.*, 21 : 967-977.

Stolwijk, J. A. J. and Nadel, E. R. (1973) : Thermoregulation during positive and negative work exercise. *Fed. Proc.*, 32 : 1607-1613.

Stolwijk, J. A. J., Saltin, B. and Gagge, A. P. (1968) : Physiological factors associated with sweating during exercise. *Aerosp. Med.*, 39 : 1101-1105.

Strydom, N. B. and Williams, C. G. (1969) : Effect of physical conditioning on state of heat acclimatization of Bantu laborers. *J. Appl. Physiol.*, 27 : 262-265.

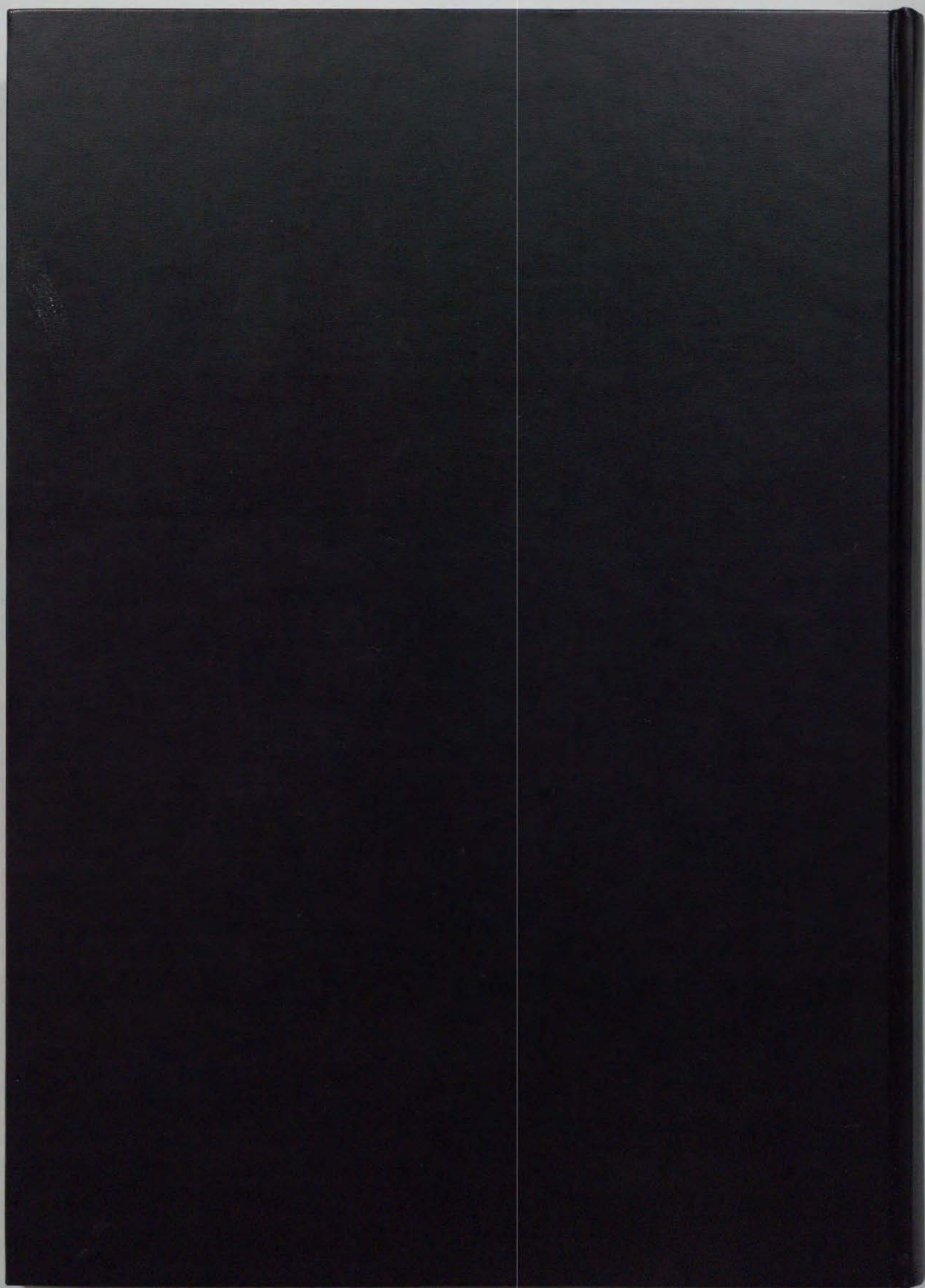
Sugenoya, J., Iwase, S., Mano, T. and Ogawa, T. (1990) : Identification of sudomotor activity in cutaneous sympathetic nerves using sweat expulsions as the effector response. *Eur. J. Appl. Physiol.* 61 : 302-308.

Sugenoya, J. and Ogawa, T. (1985) : Characteristics of central sudomotor mechanism estimated by frequency of sweat expulsions. *Jpn. J. Physiol.*, 35 : 783-794.

Takagi, K., Ogawa, T., Kobayashi, M. and Satoh, T. (1966) : Observations on sweating rate by continuous recording. Human adaptability and its methodology. Japan society for the promotion of sciences. Tokyo, Japan : 130-134.

Tam, H. -S., Darling, R. C., Cheh, H. -Y. and Downey, J. A. (1978) : Sweating response : a means of evaluating the set-point

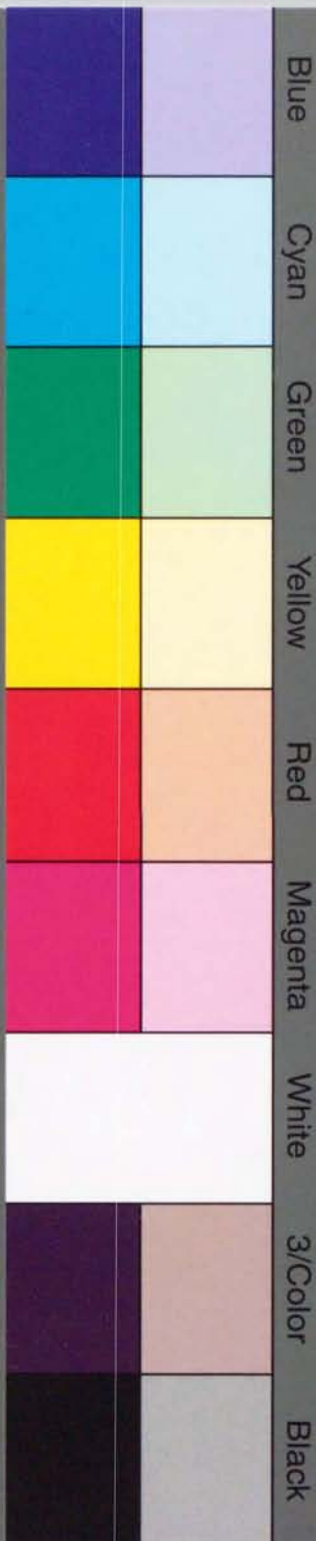
- theory during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 45 : 451-458.
- Taylor, W. F., Johnson, J. M., Kosiba, A. and Kwan, C. M. (1988) : Graded cutaneous vascular responses to dynamic leg exercise. *J. Appl. Physiol.*, 64 : 1803-1809.
- Van Beaumont, W. and Bullard, R. W. (1963) : Sweating : its rapid response to muscular work. *Science*, 141 : 643-646.
- Van Beaumont, W. and Bullard, R. W. (1965) : Sweating : direct influence of skin temperature. *Science*, 147 : 1465-1467.
- Van Beaumont, W. and Bullard, R. W. (1966) : Sweating exercise stimulation during circulatory arrest. *Science*, 152 : 1521-1523.
- Van Beaumont, W. (1969) : The periodicity of sweat expulsion. (Abstract.) *Fed. Proc.*, 28 : 527.
- Wurster, R. D. and McCook, R. D. (1969) : Influence of rate of change in skin temperature on sweating. *J. Appl. Physiol.*, 27 : 237-240.
- 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.
- 山崎 文夫, 権 五晟, 曾根 涼子, 鍋倉 賢治, 池上 晴夫 (1993a) : 運動中の体温調節反応と心周期分画の変動との関係. *体育学研究*. 37 : 351-364.
- Yamazaki, F., Sone, R., Fujii, N., Homma, S. and Ikegami, H. (1992) : An improved method for measurement of sweat expulsions during profuse sweating. *Jpn. J. Physiol.*, 42 : 991-996.
- Yamazaki, F., Sone, R., Fujii, N. and Ikegami, H. (1993b) : A comparison of sweating responses during exercise and recovery in terms of sweating rate and body temperature. *Int. J. Biometeorol.*, (in press).
- 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.
- 山田 敏男, 芦田 輝子, 田中 信雄, 堀 清記 (1978) : 高温環境下の運動訓練の耐熱性に及ぼす影響について. *体力科学*, 27 : 100-108.



inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

**A** 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

