



女性における熱放散反応特性とそれに及ぼす運動トレーニングの影響

栗原, 智子

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2006-03-25

(Date of Publication)

2012-08-06

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3623

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003623>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

女性における熱放散反応特性とそれに及ぼす運動トレーニングの影響

神戸大学大学院総合人間科学研究科
コミュニケーション科学専攻 人間表現論講座

010F444F

栞原 智子

目次

略号と記号	8
第1章 はじめに	12
第2章 文献研究	14
1. 熱放散反応の概要	14
2. 熱放散反応に及ぼす性周期の影響	16
2.1. 安静時の生体パラメータ	16
2.2. 安静時の熱放散反応	18
2.2.1. 経時変化	18
2.2.2. 体温と熱放散反応の対応関係	19
2.3. 運動時の熱放散反応	19
2.3.1. 経時変化	19
2.3.2. 体温と熱放散反応の対応関係	20
3. 熱放散反応に及ぼす性差の影響	21
3.1. 安静時の生体パラメータ	22
3.2. 安静時の熱放散反応	22
3.2.1. 経時変化	22
3.2.2. 体温と熱放散反応の対応関係	23
3.3. 運動時の熱放散反応	23
3.3.1. 経時変化	23
3.3.2. 体温と熱放散反応の対応関係	24
4. 熱放散反応に及ぼす運動トレーニングの影響	24
4.1. 安静時の生体パラメータ	25
4.2. 男性における運動トレーニングの影響	25
4.2.1. 長期運動トレーニング	25
a. 安静時の熱放散反応	25
b. 運動時の熱放散反応	26
4.2.2. 短期運動トレーニング	27
a. 安静時の熱放散反応	27
b. 運動時の熱放散反応	27
4.3. 女性における運動トレーニングの影響	29
4.3.1. 長期運動トレーニング	29

a.	安静時の熱放散反応	29
b.	運動時の熱放散反応	29
4.3.2.	短期運動トレーニング	29
a.	安静時の熱放散反応	29
b.	運動時の熱放散反応	30
4.4.	脱トレーニング	31
5.	熱放散反応に及ぼすその他の要因	31
5.1.	運動強度	31
5.2.	環境条件	32
5.3.	血漿量および浸透圧	33
5.4.	姿勢	34
5.5.	日内リズム	35
第3章	検討すべき問題および本研究の目的	36
第4章	実験 I 熱放散反応に及ぼす性周期の影響	39
実験 I-1	安静時	39
1.	目的	39
2.	方法	39
2.1.	被験者	39
2.2.	実験条件および手順	39
2.3.	測定項目	40
2.4.	データ分析および統計処理	41
3.	結果	44
4.	考察	46
5.	要約	53
実験 I-2	運動時	54
1.	目的	54
2.	方法	54
2.1.	被験者	54
2.2.	実験条件および手順	54
2.3.	測定項目	55
2.4.	データ分析および統計処理	55
3.	結果	56

4. 考察	58
5. 要約	67
第5章 実験Ⅱ 熱放散反応に及ぼす性差の影響	68
実験Ⅱ-1 安静時	68
1. 目的	68
2. 方法	68
2.1. 被験者	68
2.2. 実験条件および手順	68
2.3. 測定項目	69
2.4. データ分析および統計処理	69
3. 結果	70
4. 考察	74
5. 要約	80
実験Ⅱ-2 運動時	81
1. 目的	81
2. 方法	81
2.1. 被験者	81
2.2. 実験条件および手順	81
2.3. 測定項目	82
2.4. データ分析および統計処理	82
3. 結果	82
4. 考察	86
5. 要約	91
第6章 実験Ⅲ 熱放散反応に及ぼす長期運動トレーニングの影響	92
実験Ⅲ-1 安静時	92
1. 目的	92
2. 方法	92
2.1. 被験者	92
2.2. 実験条件および手順	93
2.3. 測定項目	93
2.4. データ分析および統計処理	94
3. 結果	94

4. 考察	98
5. 要約	105
実験 III-2 一定負荷運動時	106
1. 目的	106
2. 方法	106
2.1. 被験者	106
2.2. 実験条件および手順	106
2.3. 測定項目	107
2.4. データ分析および統計処理	107
3. 結果	108
4. 考察	111
5. 要約	119
実験 III-3 漸増負荷運動時	121
1. 目的	121
2. 方法	121
2.1. 被験者	121
2.2. 実験条件および手順	121
2.3. 測定項目	122
2.4. データ分析および統計処理	122
3. 結果	122
4. 考察	126
5. 要約	130
第7章 実験 IV 熱放散反応に及ぼす短期運動トレーニングの影響	132
1. 目的	132
2. 方法	132
2.1. 被験者	132
2.2. 実験条件および手順	132
2.3. 測定項目	134
2.4. データ分析および統計処理	134
3. 結果	135
4. 考察	139
5. 要約	145

第 8 章	実験 V 熱放散反応に及ぼす運動トレーニングの影響における性差	147
1.	目的	147
2.	方法	147
2.1.	被験者	147
2.2.	実験条件および手順	148
2.3.	測定項目	148
2.4.	データ分析および統計処理	148
3.	結果	149
4.	考察	155
5.	要約	157
第 9 章	総括	158
1.	得られた主な所見	158
2.	結論	159
第 10 章	参考文献	163
	謝辞	175

略号と記号

本研究で用いられる略号と記号は以下の通りである。

AD	: Body surface area (m ²) 体表面積
AD/mass	: Body surface area-to-mass ratio (cm ² /kg) 体表面積/体重
ANP	: Atrial natriuretic peptide 心房性ナトリウム利尿ペプチド
ASG	: Activated sweat glands (glands/cm ²) 活動汗腺数
%BF	: Percentage of body fat (%) 体脂肪率
C	: Control group コントロール群
C1 , C2 , C3	: Control 1, Control 2, and Control 3 コントロール群における 1 , 2 および 3 回目の実験
D1 , D2	: First and second menstrual cycle after the training period 運動トレーニング終了後 , 約 1 および 2 ヶ月目
F	: Mid-follicular phase 卵胞中期
F _{sw}	: Frequency of sweat expulsions per minute (sweat expulsions/min) 汗の拍出頻度
HR	: Heart rate (beats/min) 心拍数
L	: Mid-luteal phase 黄体中期
LDF	: Skin blood flow measured by laser-Doppler flow (mV) レーザードップラー血流計で測定した皮膚血流量
%LDF	: Percentage of resting skin blood flow (%) 安静時皮膚血流量に対する相対値
%LDF _{all}	: Total integrated skin blood flow of measured body sites 皮膚血流反応の経時変化から積分値を求め各部位のデータを合計した値

MAP	: Mean arterial blood pressure (mmHg) 平均血圧
MSF	: Mean skinfold thickness 平均皮下脂肪厚
NO	: Nitric oxide 一酸化窒素
Pre	: Pre training トレーニング前
%RH	: Percentage of relative humidity (%) 相対湿度
SEM	: Standard error of means 標準誤差
SET	: Standard exercise test 標準運動テスト
SGO	: Sweat gland output ($\mu\text{g}/\text{gland}/\text{min}$) 単一汗腺あたりの汗出力
SkBF	: Skin blood flow ($\text{ml}/100\text{ml}/\text{min}$, %) 皮膚血流量
SR	: Sweating rate ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{min}$) 発汗量
SR _{all}	: Total integrated sweating rate of measured body sites 発汗反応の経時変化から積分値を求め各部位のデータを合計した値
T	: Physically trained group 運動トレーニング群
T _b	: Mean body temperature (°C) 平均体温
T _{es}	: Esophageal temperature (°C) 食道温
ΔT_{es}	: Change in esophageal temperature from resting value (°C) 安静時からの食道温の変化量
T _{re}	: Rectal temperature (°C) 直腸温
ΔT_{re}	: Change in rectal temperature from resting value (°C) 安静時からの直腸温の変化量

T_{sk}	: Mean skin temperature (°C) 平均皮膚温
T_{sl}	: Local skin temperature (°C) 局所皮膚温
TWL	: Total weight loss (g/m ² /h) 総体重減少量
T1 , T2 , T3	: First, second, and third menstrual cycle during the training period トレーニング開始後 , 約 1 , 2 および 3 ヶ月目
U	: Physically untrained group 非運動トレーニング群
VIP	: Vasoactive intestinal polypeptide 血管作用性腸管ポリペプチド
$\dot{V}O_2$: Oxygen uptake (ml/kg/min) 酸素摂取量
$\dot{V}O_{2max}$: Maximal oxygen uptake (ml/kg/min) 最大酸素摂取量
$\% \dot{V}O_{2max}$: Percentage of maximal oxygen uptake (%) 最大酸素摂取量に対する相対値

本論文は以下の参考論文（審査中と準備中を含む）を基に構成されている。

- 1 . **Kuwahara T, Inoue Y, Abe M, Sato Y, and Kondo N.** Effects of menstrual cycle and physical training on heat loss responses during dynamic exercise at moderate intensity in a temperate environment. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 288: R1347-R1353, 2005.
- 2 . **Kuwahara T, Inoue Y, Taniguchi M, Ogura Y, Ueda H, and Kondo N.** Effects of physical training on heat loss responses of young women to passive heating in relation to menstrual cycle. *Eur J Appl Physiol* 94: 376-385, 2005.
- 3 . **Kuwahara T, Inoue Y, Hirata M, Shamsuddin AKM, and Kondo N.** Enhanced heat loss responses by short-term endurance training in exercising women. *Physiol Behav* (under review)
- 4 . **Kuwahara T, Inoue Y, and Kondo N.** Sex differences in effects of physical training on heat loss responses during a graded exercise. (in preparation)
- 5 . **Inoue Y, Tanaka Y, Omori K, Kuwahara T, Ogura Y, and Ueda H.** Sex- and menstrual cycle-related differences in sweating and cutaneous blood flow in response to passive heat exposure. *Eur J Appl Physiol* 94: 323-332, 2005.
- 6 . **井上芳光 , 桑原智子 , 小倉幸雄 , 近藤徳彦 .** 女性の体温調節と運動 . *体育の科学* 54: 797-803, 2004.
- 7 . **小倉幸雄 , 桑原智子 , 井上芳光 .** 運動トレーニングが若年女性の熱放散反応に及ぼす影響 . *デサントスポーツ科学* 24: 86-95, 2003.

第1章 はじめに

私たちヒトは体温がわずか 4°C ほど上昇するだけでも正常な生体機能を維持できないが、日常では季節や朝夕の変化に伴い環境温が大きく変化したり、身体活動時のエネルギーが多く熱に変換されたり、常に体温が変動するような条件のもとで生活しなければならない。しかし、ヒトはこのような体内外の温度上昇に対して体温の恒常性を維持するための巧みな生体機能、すなわち熱放散機能（発汗や皮膚血管拡張反応の熱放散反応）を備え持つため、人類は誕生して以来、様々な地域で季節や時間帯が大きく異なるにもかかわらず活動し、繁栄し続けたと言っても過言ではない。

人類は男性と女性から構成され、人類存続のための性の特徴をそれぞれ持っている。その特徴は体型などの形態的なもののみならず、生体機能にも存在している。その中でも両方で大きく異なるのは、女性において思春期後に女性ホルモン分泌の周期的変動に起因する性周期が出現することである。女性の場合、それにより安静時体温は二相性の周期的変化を示すようになり、その変化に一致して、熱放散反応の開始体温閾値も変化する（Stephenson and Kolka 1985）。このように女性の熱放散反応は男性のそれと異なり性周期の影響を受けるといった特徴を持つため、男性での研究結果をそのまま女性に当てはめられないにもかかわらず、今もなお女性の熱放散反応特性に関する理解は男性と比較して乏しい状態である。

近年、産業技術の発展に伴い、ヒトは人工的に快適な環境を作り出す技術を獲得し、その結果、日常生活において熱放散反応を駆使して体外および体内の温度上昇に対処する機会が少なくなっている。ヒトは様々な環境の変化に適応することができる反面、快適な環境に慣れると熱放散機能は負の適応を起し、その反応の低下が危惧される。一方、この産業技術の発展は深刻な地球温暖化の引き

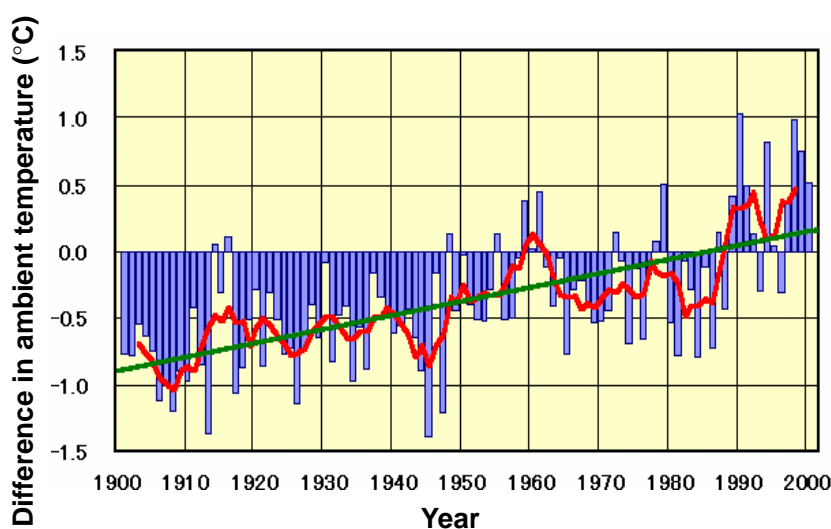


Figure 1. Change in annual mean ambient temperature in Japan (1901-2000). Bar graph indicated the difference in change of annual mean ambient temperature from the mean ambient temperature which is the mean value for 1971-2000. Tracing line shows the change mean for five years. Straight line shows a long-term tendency. Modified the graph in the webpage of Meteorological Agency ‘climate fluctuation monitoring report 2004’. (http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/20th/1_2_2.htm)

金となっており、日本では過去 100 年で気温が 1°C 以上も上昇し、今後さらに速いスピードで気温は上昇すると予想されている（気象庁 2002）(Fig. 1)。

また、運動やスポーツに目を向けると、それらに参加する人口が約 20 年前と比べて急増し、その増加の程度は女性（14.8%増加）が男性（同 4.5%）のそれよりも顕著に大きいと報告されている（文部科学省 2001）(Fig. 2)。地球温暖化やスポーツ参加者の増加は体温上昇の機会を増やすことになり、前述の人工的な快適環境の普及によるヒト本来の熱放散反応の低下とこれらの体温上昇の機会の増加を考え合わせると、今後、過度の体温上昇による熱中症などの危険性の増加が予測される。したがって、その危険な状態を未然に回避するため、高温環境への暴露時や運動時の熱放散反応特性、特に情報の少ない女性の熱放散反応特性についての理解が重要となる。

前述のように産業技術の発展に伴う環境温の上昇や快適環境への慣れによる熱放散反応の低下が予想されることから、安全で快適に日常生活を送るためには、今後はその低下を抑制し、かつ亢進させるような手段を確立する必要がある。男性においては熱放散反応の改善の有効な手段として運動トレーニングが示され、それによって主に熱放散反応の開始体温閾値が低下すると報告されている（Johnson 1998；Armstrong and Maresh 1998）。一方、女性が運動トレーニングを実施した時の特徴として、女性ホルモン分泌変動の変化が示されている（Wallace et al. 1982；Bullen et al. 1984）。そのため、女性の場合には、男性で報告されているような運動トレーニングそれ自体による熱放散反応の変化に、女性ホルモンの分泌変動の変化を介した熱放散反応の変化が加わると予想され、その効果は男性の場合と比較してさらに複雑である可能性が考えられる。

以上のことから、女性の熱放散反応特性を明らかにすることは、女性の生理学的な知見を広めるにとどまらず、女性がより安全で快適な生活を送るための有益な情報を提供できると考えられる。さらに、女性の熱放散反応特性に及ぼす運動トレーニングの影響を検討し、その改善の仕組みを明らかにできれば、前述の熱放散反応の低下や熱中症に対する女性の熱放散反応特性に即した対処策の考案に寄与すると考えられる。

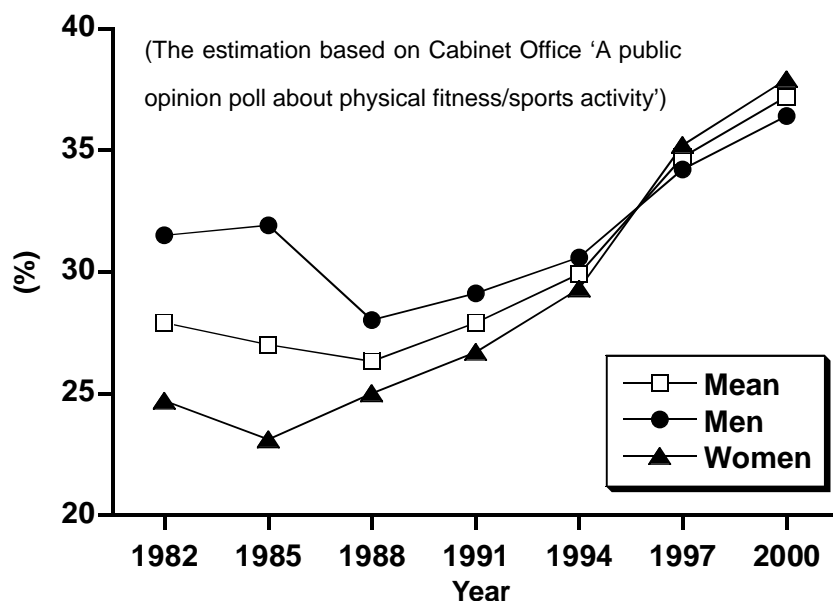


Figure 2. Change in a ratio of a person who participates in physical exercise activity more than one time each week. Modified the graph in the webpage of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Government of Japan. (http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/club/073.htm)

1. 熱放散反応の概要

環境温が上昇したり運動を実施したりすると、ヒトは体温をある範囲内に維持するために発汗や皮膚血管拡張による熱放散量を増大させる。特に、運動時には体内に多量の熱が発生するため、安静温熱負荷時よりも熱放散がさらに重要となる。発汗や皮膚血管拡張による熱放散反応は、主にからの深部や皮膚からの温度情報（温熱性要因）が視床下部の体温調節中枢に入り、その情報が統合処理され体温調節効果器（汗腺および皮膚血管）に命令が送られて引き起こされる（Fig. 3）。また、運動時の熱放散反応は安静時のそれとは異なり、温熱性要因とともに、セントラルコマンド、筋や腱の機械受容器および筋の代謝受容器、動脈圧受容器と心肺圧受容器、浸透圧受容器、精神性刺激などの非温熱性要因が関与し、さらに複雑な反応を示す（Van Beaumont and Bullard 1963；Gisolfi and Wenger 1984；Johnson 1986；Vissing and Hjortso 1996；Yamazaki et al. 1994a, 1996；Takamata et al. 1998；Kondo

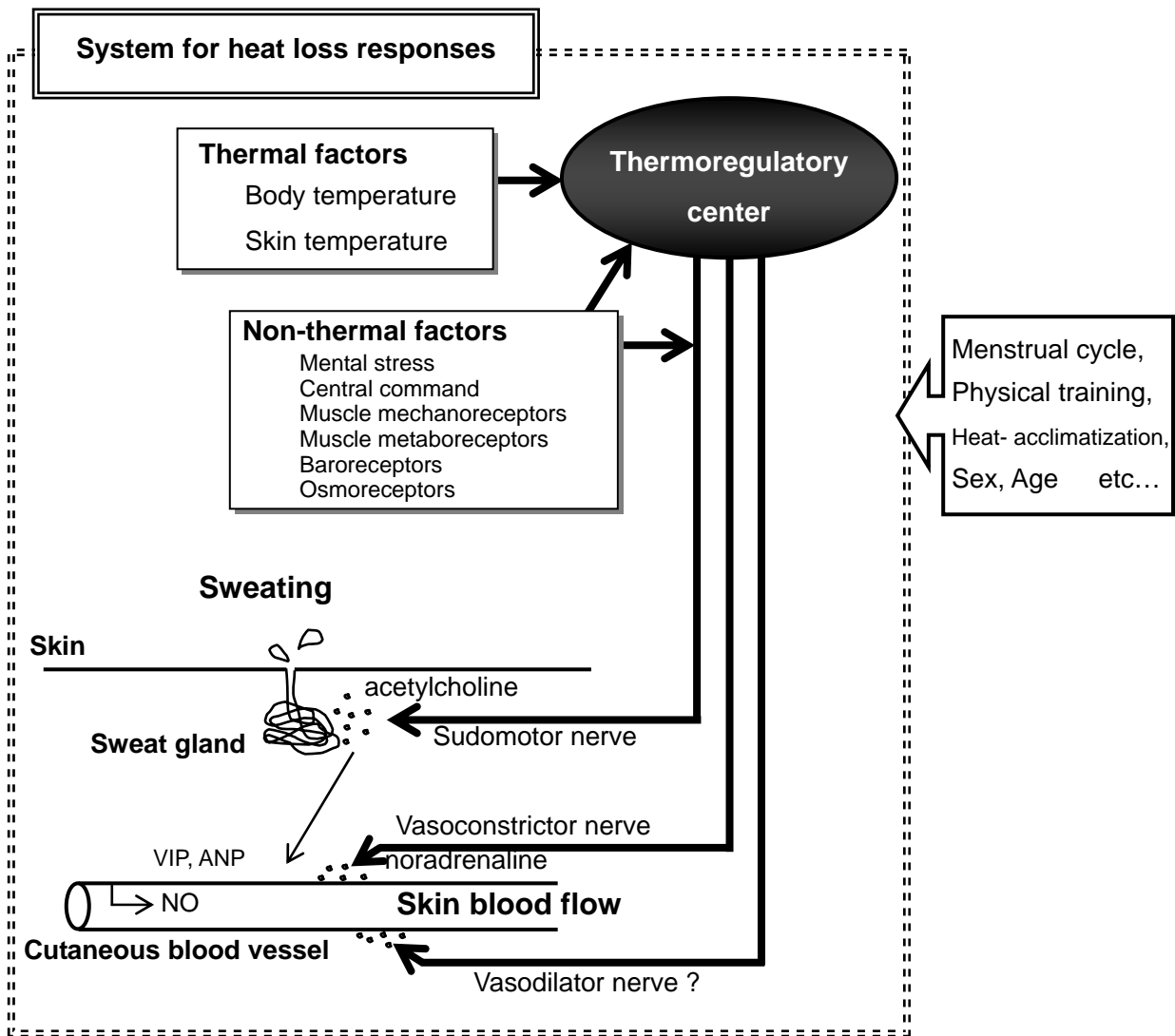


Figure 3. Schematic illustration of system for heat loss responses in human.

et al. 2000, 2001 ; Mack et al. 1995 , 2001 ; Yanagimoto et al. 2002) .

安静温熱負荷時(以下,安静時とする)や運動時における発汗はコリン作動性の発汗神経によって調節されている。その神経終末から放出されるアセチルコリンが,汗腺にある受容体に結合し汗腺の分泌活動を促進する。また,皮膚血流量(SkBF)の増加は,皮膚血管収縮神経の活動の低下と能動的血管拡張システムの亢進によって調節されているが,最大皮膚血管拡張の約90%はこの能動的血管拡張システムに起因することが報告されている(Johnson 1992)。皮膚血管収縮神経はアドレナリン作動性神経であり,この神経終末から放出されるノルアドレナリンが皮膚血管の受容体に結合すると血管が収縮する。一方,能動的血管拡張システムについては,神経伝達物質やその受容体がまだ特定されていない。動物では皮膚血管を拡張させる働きを持つ神経がみつがっているが(小川 1998),ヒトではそのような神経は認められておらず,その存在は明らかではない。汗腺にあるアセチルコリンの受容器をブロックする薬剤を経皮投与すると発汗は起こらないが,その部位付近の血管が拡張する。同様に,薬剤により発汗神経からのアセチルコリンの放出を阻止すると,発汗も血管拡張も起こらない(小川 1998)。これらのことから,発汗神経から放出される血管作用性腸管ペプチド(VIP)や心房性ナトリウム利尿ペプチド(ANP)などの共同伝達物質(Yamashita et al. 1987)および発汗によって汗腺で産生されるブラジキニンが汗腺周囲にある血管を拡張すると考えられている。また,SkBFの増加自体が血管内皮細胞にすり応力を与え,局所性血管拡張物質の一酸化窒素(NO)を放出させることが知られている(Joyner and Dietz 1997)。この能動的血管拡張システムは体温が上昇するような状態での皮膚血管拡張時に関与すると考えられているが(Pergola et al. 1994),近年,体温の上昇が始まる前からすでに能動的血管拡張システムが作動する可能性も示唆されている(Kamijo et al. 2004)。

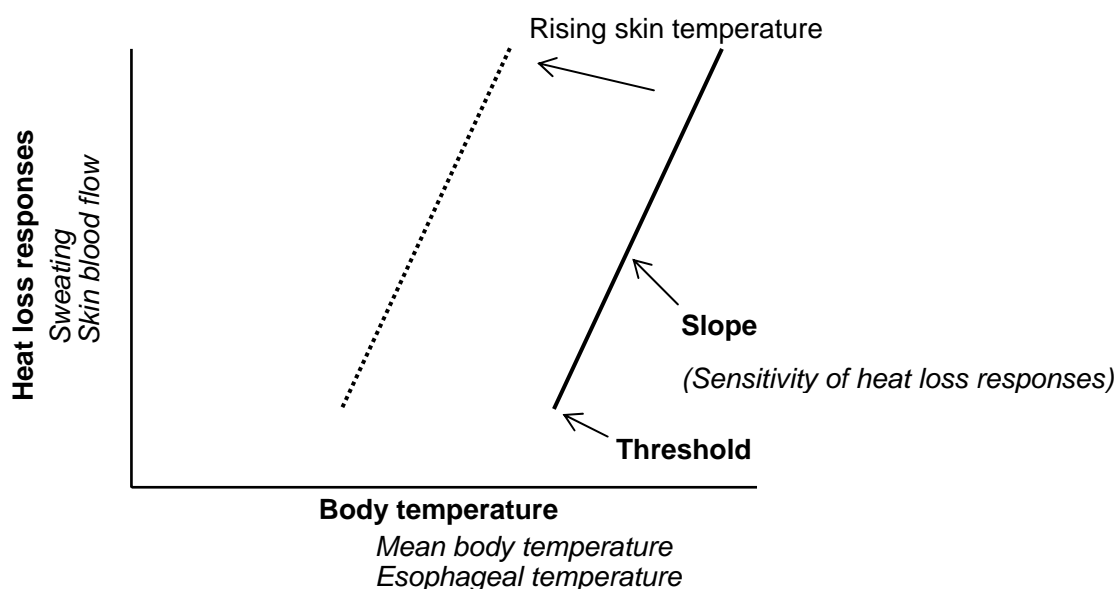


Figure 4. Relationship between body temperature and heat loss responses. The threshold is that temperature above which the effector responses are different from the baseline. The slope is considered as the difference in the effector responses per unit change in body temperature. This relationship is sifted to the left toward by rising skin temperature.

安静時や運動時の発汗および皮膚血管拡張反応は主に体温や皮膚温に依存する変化を示すため、体温を横軸に、各熱放散反応を縦軸にプロットすると両者の関係はほぼ直線になる (Nadel et al. 1971; Wenger et al. 1975) (Fig. 4). 体温調節中枢への温度情報は深部のそれだけでなく皮膚からのそれも関係することから、体温に平均皮膚温 (T_{sk}) を加味した平均体温 (T_b) を横軸にプロットする場合もある。これらの対応関係から発汗および皮膚血管拡張反応の調節を詳しく検討することができ、各熱放散反応が引き起こされる体温は体温調節中枢の活動開始閾値を、また、体温と発汗量 (SR) との間に得られる回帰直線の勾配は発汗反応の全体としての感受性 (発汗反応の感受性) を、同じく、体温と皮膚血管拡張反応との間に得られる回帰直線の勾配は皮膚血管拡張反応の感受性を反映していると考えられている。体温と熱放散反応をプロットした場合、皮膚温が上昇するとこの対応関係は左方にシフトすることが報告されている (Nadel et al. 1971) (Fig. 2)。また、Ogawa and Bullard (1972) は、連続的に発汗反応を記録すると汗は間欠的に皮膚表面に拍出されており、この汗の拍出頻度 (F_{sw}) は発汗神経の活動と同調していることから発汗調節中枢からの発汗命令の強さを表すと報告している。体温に対してこの F_{sw} を、さらに F_{sw} に対して SR をプロットすると各対応関係はほぼ直線となり、それぞれ発汗調節中枢の活動性と末梢機構の活動性を示す。このように発汗反応においては F_{sw} を用いることでより詳細にその機序を知ることが可能となる (Ogawa and Sugeno 1993)。本論文では、体温と SR から得られる発汗反応の感受性と F_{sw} と SR の対応関係から得られる発汗反応の末梢機構の感受性を区別して用いる。

2. 熱放散反応に及ぼす性周期の影響

女性の生殖機能は視床下部、下垂体および卵巢の機能的な連携によって調節される。12-14 歳頃の初経初来から閉経に至るまでおよそ 40 年にわたり、女性は卵巢から分泌される女性ホルモン (プロゲステロンおよびエストロゲン) の分泌変動により卵胞期と黄体期からなる月経周期 (本研究では性周期とする) を持つ (安達 1996) (Fig. 5)。ここでは性周期に伴う生体パラメータの変化と性周期が女性の熱放散反応に及ぼす影響について安静時と運動時に分けて文献を検討していく。

2.1. 安静時の生体パラメータ

安静時の心拍数 (HR) は性周期の影響を受けないという報告 (Hirata et al. 1986) や、黄体期に 10 拍程度増加するという報告 (Pivarnik et al. 1992; 井上ら 2000) があり、一致した結果が得られていない。また、血圧も卵胞早期で最も低いとする報告や、反対にその時期に最も高くなる、または、常に一定である (Minson et al. 2000; Cooke et al. 2002) などと研究ごとにその結果が異なっている (Garlick and Bernauer 1968; Wells 1999)。このように性周期に伴う HR や血圧の変化には一致した報告がみられない。HR や血圧は様々な要因に影響される。例えば、交感神経と副交感神経の拮抗的調節により変動する HR は姿勢や測定時間、血中のホルモンなどで変化するため (山地 1983)、これらの要因の違いが研究ごとでの報告の不一致の原因になっていると考えられる。

正常な性周期を持つ女性の安静時の体温はエストロゲンのみが増加する排卵直前に卵胞早期よりも 0.2°C から 0.3°C 低下し (Stephenson and Kolka 1999; Charkoudian and Johnson 2000), プロゲステロンとエストロゲンの両者が増加する黄体期に卵胞早期よりも 0.3°C から 0.5°C 上昇することが報告されている (Harvey and Crocket 1932; Hirata et al. 1986; Kolka and Stephenson 1989, 1997; Grucza et al. 1993; Hessemer and Brück 1985a, 1985b; Tenaglia et al. 1999; Charkoudian and Johnson 1997, 1999a, 1999b, 2000; Fukuoka et al. 2002) (Fig. 5). 同様の結果はプロゲステロンのみ, もしくは, プロゲステロンとエストロゲンの組み合わせられた経口避妊薬の投与時にも確認されている (Tenaglia et al. 1999; Charkoudian and Johnson 1999a; Houghton et al. 2005). プロゲステロンのみが含まれる経口避妊薬を投与した時は, プロゲステロンとエストロゲンの組み合わせられたものを投与した時よりも食道温 (T_{es}) が有意に高くなる (Stachenfeld et al. 2000). ラットにおいて体温調節中枢である視床下部にプロゲステロンを注入すると直腸温 (T_{re}) が上昇することや (Marrone et al. 1976), ウサギにおいてプロゲステロンを静脈注入すると視床下部での温ニューロン (熱放散反応を促進させる) の活動の低下および冷ニューロン (熱放散反応を抑制および熱産生反応を増加させる) の活動の増加が引き起こされ, T_{re} が 0.6°C 上昇する (Nakayama et al. 1975). また, ヒトにおいてもプロゲステロンおよびエストロゲンが内因性の発熱物質や解熱物質を介さず体温調節中枢に直接作用して体温を変化させる可能性が示唆されている (Brooks-Asplund et al. 2000). これらのことから, 性周期に伴う体温の変化は女性ホルモンが体温調節中枢に直接作用して引き起こされると推察される.

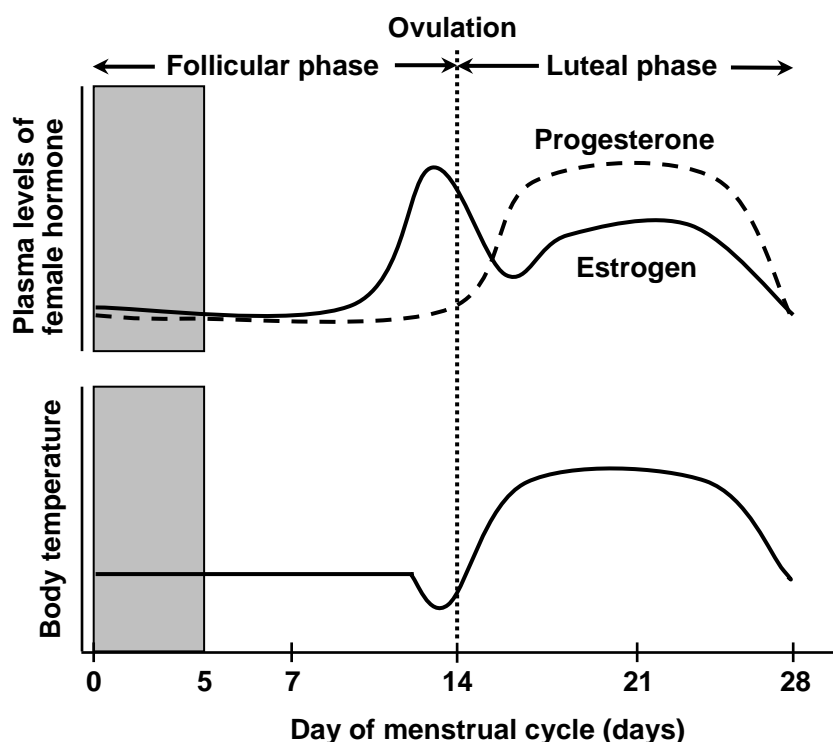


Figure 5. Plasma levels of progesterone and estrogen, and resting body temperature during the menstrual cycle. In this schematic, the menses occur between day 0 and 5.

体温は熱産生量と熱放散量によって決定されるが、黄体期にみられる 0.5°C 程度の体温の上昇は、体重 60kg の女性では 30kcal の蓄熱により成立する。この体温の上昇はおよそ 24 時間から 72 時間かけて達成されるので 1 時間あたり 0.5kcal の熱産生の増加もしくは熱放散の減少で可能となる。Stephenson et al. (1982) は、月経開始日を 1 日目とした性周期の 2, 8, 14, 20 および 26 日目に安静時の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) を測定したところ、測定日による差はみられないことを報告し、性周期に伴う T_{es} の変化は末梢での熱放散量の変化に起因すると示唆している。しかし、上記のように 0.5kcal/h 程度の変化はとても小さいので、それが熱産生量と熱放散量のどちらの変化によるものなのかを決定することは難しい (Charkoudian and Johnson 2000)。

2.2. 安静時の熱放散反応

2.2.1. 経時変化

前述のように、性周期に伴う体温の変動は熱産生量の増大によるものなのか、熱放散量の減少によるものなのかは明らかではないものの、性周期は熱放散反応に影響することが報告されている。Frascarolo et al. (1990) は、環境温 28°C、相対湿度 40% (40%RH) の条件下で 90 分間安静を保持した時の SkBF は卵胞期より黄体期に低値を示すと報告している。一方、Hessemer and Brück (1985a) は、30 分かけて 18°C から 59°C まで環境温を上昇させた際の胸 SR および前腕 SkBF は卵胞期より黄体期に高くなることを示している。さらに、Charkoudian et al. (1999) も水循環スーツを用いて皮膚温を 34°C に保ち、局所的に前腕を 32°C から 42°C の範囲で加温した場合、38-40°C および 40-42°C の皮膚温時に経口避妊薬投与による高ホルモン期の SkBF が低ホルモン期と比較して高くなることを報告している。しかし、Haslag and Hertzman (1965) は、3 時間かけて環境温を 25°C から 45°C まで上昇させ、その後 1 時間 45°C を保った条件での安静時と環境温 43.3°C の条件下で 3 時間安静を保持させた時の身体 4 部位 (頬、胸、前腕および下腿) で平均した SR および前腕 SkBF は、性周期に影響されないと報告している。このように安静時における SR および SkBF の性周期差は負荷条件により異なり、一致した見解が得られていない。

近年、エストロゲンが NO 由来の皮膚血管拡張反応を亢進させることが明らかにされている (Hayashi et al. 1995; Pinto et al. 1997; Gerhardt et al. 2000)。Gerhardt et al. (2000) は、安静時 (ベースライン) および反応性充血 (上腕カフによって前腕の動脈血流を 2 分間阻止し、その解除直後の血管拡張反応) 時の前腕 SkBF と血中エストロゲン濃度 (10-39 pg/ml) の間にそれぞれ高い正の相関関係がみられることを報告している。反応性充血時の血管拡張のほとんどは NO に依存することを考え合わせると (Engelke et al. 1996)、卵胞早期程度のかかなり低いエストロゲンレベルでも NO 由来の皮膚血管拡張反応を亢進させる可能性が考えられる。また、プロゲステロンが NO の産生を低下させることが報告されており (Sarrel 1999)、エストロゲンおよびプロゲステロンの相対的な割合によって NO 依存の血管拡張が影響を受けることが予想される。Houghton et al. (2005) は、局所的に NO 合成酵素阻害物質を経皮投与した場合、受動的加温時の前腕 SkBF は経口避妊薬に含まれるエストロゲンおよびプロゲステロンの相対的な割合の影響を受ける可能性を示唆している。

2.2.2. 体温と熱放散反応の対応関係

安静時の発汗および皮膚血管拡張反応を体温との対応関係から検討すると、性周期に伴う安静時の体温の変動と同様の変化が発汗および皮膚血管拡張開始の体温閾値(以下、発汗開始閾値および皮膚血管拡張閾値とする)にもみられ、黄体期では卵胞期と比較して各熱放散反応の体温閾値が上昇する。そのため、黄体期には同一体温に対する熱放散量が低下する(Kolka and Stephenson 1989; Hessemer and Brück 1985a)。Charkoudian and Johnson (1997)は、女性ホルモンの変動によるこの体温閾値の上昇のメカニズムを明らかにするために、血管収縮神経の活動性の亢進、もしくは、能動的血管拡張システムの活動性の低下のどちらに起因するのかを血管収縮神経終末からの神経伝達物質の放出を遮断するプレチリウムを用いて検討した。その結果、プレチリウム処置部と非処置部でほぼ同等の体温閾値の上昇がみられることを示し、能動的血管拡張システムを介して熱放散反応の体温閾値が上昇すると推察している。

Kolka and Stephenson (1989)は、環境温 50°C (14%RH) の条件下で約3時間安静を保持した時の T_{es} と前腕SRの対応関係から得た発汗反応の感受性は性周期の影響を受けないと報告している。一方、Hessemer and Brück (1985a)は、前述の実験 (18°C から 59°C まで漸増的に環境温を上昇させる)での T_b と胸SRおよび前腕skBFの対応関係は、卵胞期と比較して黄体期にその感受性が增大すると報告しており、熱放散反応の感受性に関しては研究ごとに見解が一致していない。

2.3. 運動時の熱放散反応

2.3.1. 経時変化

Pivarnik et al. (1992)は、若年女性に環境温 22.3°C (60%RH) の条件下で最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2\max}$) の65-70%の自転車運動を60分間行なわせたところ、 T_{re} の増加度、HRおよび自覚的運動強度が卵胞期より黄体期に高くなることを示し、その影響は黄体期にプロゲステロンが上昇しない者にはみられないことから、運動パフォーマンスは女性ホルモンの上昇する黄体期に低下することを示唆している。同様に、Tenaglia et al. (1999)は、原子力、生物および化学薬品に対する防護服を身につけ、環境温 40°C (30%RH) の条件下で15分間の低強度トレッドミル歩行と15分間の安静を交互に行なうような厳しい条件で性周期の影響を検討し、運動の継続時間は卵胞期より黄体期で有意に短くなることを報告している。これらの結果から黄体期の運動パフォーマンスは卵胞期よりも低下する可能性が十分に予想される。

Kolka and Stephenson (1989)は、高温環境 (35°C , 25%RH) 下で $80\% \dot{V}O_{2\max}$ の半仰臥位自転車運動を35分間行なった時の胸SRには性周期による差はみられないと報告している。一方、Hessemer and Brück (1985b)は、冷涼環境 (18°C , 50%RH) 下で $80\% \dot{V}O_{2\max}$ の半仰臥位自転車運動を15分間行なったときの胸SRは卵胞期よりも黄体期で多いことを報告している。反対に、Fukuoka et al. (2002)は、常温環境 (25°C , 55%RH) 下で $150\text{kpm}/\text{min}$ ($10\text{-}15\% \dot{V}O_{2\max}$), $300\text{kpm}/\text{min}$ ($40\text{-}50\% \dot{V}O_{2\max}$) および $450\text{kpm}/\text{min}$ ($40\text{-}60\% \dot{V}O_{2\max}$) の立位自転車運動を別々の日に各30分ずつ行なわせたところ、 150 および $300\text{kpm}/\text{min}$ の運動強度時に胸および前腕SRが卵胞期よりも黄体期に少なく、 $300\text{kpm}/\text{min}$

ではその傾向が特に前腕で顕著であることを報告している。また, Horvath and Drinkwater(1982)は, 3つの環境条件下(28°C, 12.6 torr vp; 35°C, 28 torr vp; 48°C, 8.7 torr vp)で~30% $\dot{V}O_2\text{max}$ のトレッドミル歩行を2時間行なったところ, 28°Cの環境下において運動終了時の前腕血流量および T_{sk} が卵胞期よりも黄体期で低下することを報告している。一方, この性周期による影響は35°Cおよび48°Cの環境下では観察されなかった。このように運動時の環境や運動の条件は異なるものの性周期が運動時のSRに及ぼす影響について一致した見解が得られていない。しかし, Fukuoka et al.(2002)やHorvath and Drinkwater (1982)の結果を考え合わせると, 性周期による熱放散反応の抑制(黄体期における熱放散反応の低下)は常温環境下での中強度運動時でより顕著にみられる可能性が予想される。

Stachenfeld et al. (2000)は, 女性ホルモンが運動時の熱放散反応に及ぼす影響について経口避妊薬を用いて検討している。プロゲステロンのみ, もしくはプロゲステロンとエストロゲンを組み合わせた経口避妊薬を摂取している者と非摂取者に環境温 35°C (30%RH)の条件下で 60% $\dot{V}O_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動を40分間実施させた時, 運動開始後およそ20分までは卵胞期, 黄体期およびプロゲステロンとエストロゲンを組み合わせた経口避妊薬の摂取者には, 前腕SRに群差はみられない。しかし, プロゲステロンのみが含まれる経口避妊薬の摂取者は, これらの3群より低いSRであること, また, 運動終了時には4群間で差はみられなくなることを報告している。このことからプロゲステロンによって汗の分泌動態は影響される可能性が考えられる。

2.3.2. 体温と熱放散反応の対応関係

発汗開始および皮膚血管拡張閾値は様々な条件(実験様式, 環境温, 運動強度など)で検討されている。そのいずれの研究においても卵胞期と比較してプロゲステロンおよびエストロゲンが増加する黄体期に体温閾値が上昇するという結果で一致している(Stephenson and Kolka 1993)。また, エストロゲンのみが増加する卵胞後期にはその体温閾値が低下することが報告されている(Stephenson and Kolka 1999)。以下では, 環境条件, 運動強度および運動時の姿勢の観点から性周期が体温と発汗および皮膚血管拡張反応の対応関係から求めた各熱放散反応の感受性に及ぼす影響について検討する。

35°Cから50°Cの高温-暑熱環境下における60-85% $\dot{V}O_2\text{max}$ 以上の半仰臥位自転車運動では, 性周期や経口避妊薬の摂取にかかわらず, T_{es} と前腕SRおよび前腕SkBFの対応関係における各熱放散反応の感受性には有意な差はみられない(Stephenson and Kolka 1985, 1999; Kolka and Stephenson 1989; Stachenfeld et al. 2000)。25°C前後の常温環境下において, Grucza et al. (1993)とFukuoka et al. (2002)は, ほぼ同じ条件[環境温 25°C (50-55%RH), 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ の立位自転車運動]で T_{re} と胸SRとの対応関係を検討している。Grucza et al. (1993)は, 卵胞期よりも黄体期に発汗反応の感受性が增大すると報告し, 一方で, Fukuoka et al. (2002)は, それに性周期による影響がみられないと報告している。また, 同様の条件で経口避妊薬を用いた場合, 血中女性ホルモン濃度差による感受性の変化はみられない(Grucza et al. 1993; Chang et al. 1998)。このように25°C前後の常温環境下において運動強度が50% $\dot{V}O_2\text{max}$ 程度の立位自転車運動時では, 発汗反応の感受性における性周期の影響に一致した見解が得られていない。20°C以下の冷涼環境下において, Hessemer and Brück (1985b)は, 環境温

18°C (50%RH)の条件下で 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動時における胸SRおよび前腕血流量を、また、Hirata et al. (1986)は、環境温 20°Cの条件下で 40%および 70% $\dot{V}O_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動時における指血流量をそれぞれ測定している。その結果、Hessemer and Brück (1985b)は、 T_b と胸SRおよび前腕血流量の対応関係から得た各熱放散反応の感受性は卵胞期よりも黄体期に増大することを報告している。一方、Hirata et al. (1986)は、いずれの運動強度においても T_{es} と指血流量の対応関係における感受性には性周期による違いはみられないと報告し、見解は一致していない。胸や前腕などの一般体表面とは異なり、指血流量は能動的血管拡張システムによってわずかに調節されているものの (Johnson et al. 1995)、そのほとんどが皮膚血管収縮神経で調節されていることが (Johnson and Proppe 1996)、これらの差異の原因になっているのかもしれない。

T_b もしくは T_{re} とSRの対応関係から求めた発汗反応の感受性に性周期による差がみられたときの運動強度はそれぞれ 80% (Hessemer and Brück 1985b) および 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ (Grucza et al. 1993) であり、同様に、 T_{re} とSkBFの対応関係から求めた皮膚血管拡張反応の感受性に性周期差がみられた運動強度は 80% $\dot{V}O_2\text{max}$ (Hessemer and Brück 1985b) であった。一方、同程度の運動強度 (85%もしくは 50-60% $\dot{V}O_2\text{max}$) を負荷した他の研究 (Kolka and Stephenson 1989; Stephenson and Kolka 1985; Stachenfeld et al. 2000) では、 T_{es} とSRもしくはSkBFの対応関係から求めた各熱放散反応の感受性には性周期による差を報告していない。このように、熱放散反応の感受性の性周期差には運動強度の強弱による規則性は見出せないことから、運動強度の影響は小さい可能性が考えられる。この結果の相違を説明する一つの可能性として、横軸にプロットした体温の違いが考えられる。これらの研究は体温の指標として T_{es} (Kolka and Stephenson 1989; Stephenson and Kolka 1985; Stachenfeld et al. 2000) や T_{re} (Grucza et al. 1993; Fukuoka et al. 2002)、もしくは、体温 (T_{es} もしくは T_{re}) と T_{sk} から算出した T_b (Hessemer and Brück 1985b) が用いられている。 T_{es} は T_{re} や T_b と比較して運動などによる急激な体温の変化に対して速やかに反応を示すものの、 T_{re} や T_b はその反応の変化が遅い (Hessemer and Brück 1985a, 1985b; Tankersley et al. 1992; O'Brien et al. 1998)。そのため、急激に体温が上昇するような運動時の場合には、体温の指標として T_{re} や T_b を用いることは適切でないと考えられる。

以上のように、安静時や運動時のどのような条件においても熱放散反応の体温閾値は卵胞期よりも黄体期に上昇し、また、熱放散反応の感受性に関しては 30°C 以上の高温・暑熱環境下では性周期や経口避妊薬がそれに影響しないという見解で一致しているものの、常温環境以下での条件では性周期の影響を受けない、もしくは卵胞期より黄体期に増加するなど統一した見解は得られていないのが現状である。

3. 熱放散反応に及ぼす性差の影響

思春期を境にして女性ではプロゲステロンやエストロゲンなど、男性ではテストステロンなどの性ホルモン分泌が活発になり、様々な性差が顕著に現れ始める。ここでは、熱放散反応に影響を及ぼす身体特性や安静時の生体パラメータと安静時および運動時の熱放散反応の性差について文献を検討

していく。

3.1. 安静時の生体パラメータ

前述のように、思春期以降において女性と男性で大きく異なることは女性が女性ホルモンの分泌変動に起因する性周期を持つということである。また、性周期にかかわらず、女性は男性よりも高い女性ホルモンレベルを、男性は女性よりも高い男性ホルモンレベルをそれぞれ維持する。

一般に、女性は男性と比較して身長、体重および体表面積が小さく、皮下脂肪厚は高いという身体特性を有している (Fujimoto and Watanabe 1969; 東京都立大学体力標準値研究会 2000)。また、熱放散反応に大きく影響する体力レベル ($\dot{V}O_2\text{max}$) は女性が男性よりも約 20% 低い (Drinkwater 1973)。体重は熱産生量に、体表面積や皮下脂肪厚は身体と環境との熱交換量に、 $\dot{V}O_2\text{max}$ は熱産生量と熱放散反応の両者に影響することから (Byrd et al. 1977; Drinkwater et al. 1976; Gisolfi and Cohen 1979; Buono and Sjöholm 1988)、熱放散反応の性差を検討する場合、これらの身体的な性差について考慮する必要がある。

安静時の HR は男女間で変わらないという報告や (Kobayashi et al. 1980)、女性の HR は男性のそれより高いという報告があり (Wells 1999)、現在のところ一致した見解が得られていない。安静時の体温においても、女性の性周期を考慮していない場合、性差はみられない (Kobayashi et al. 1980)、もしくは、女性が男性よりも高いという報告や (Graham et al. 1989)、女性の性周期を考慮して男性と比較した場合でも性差はみられないと (Avellini et al. 1980; Frye and Kamon 1981)、研究ごとにその結果は異なる。しかし、性差がみられないと報告した Avellini et al (1980) および Frye and Kamon (1981) の研究では、女性の安静時体温に性周期の影響がみられず、正確に性周期を考慮できていたかどうか疑問が残る。いずれにしろ、安静時の HR や体温の性差に関して一致した見解が得られていないのが現状である。

3.2. 安静時の熱放散反応

3.2.1. 経時変化

環境温 38°C (47%RH) での安静時において、男性に女性ホルモンの一つであるエストラジオールを投与すると発汗潜時が長くなり、また、環境温 19.0-23.0°C (46-83%RH) の条件下の下肢温浴 (湯温 43°C) において、男性ホルモンであるテストステロンの投与により発汗潜時が短くなることから (Kawahata 1960)、女性ホルモンは発汗反応を抑制的に、男性ホルモンは促進的に作用することが示唆される。

Bittel and Henane (1975) は、環境温 45°C (34%RH) の条件下で 90 分から 120 分間の安静時に、黄体期の女性は男性と比較して高い T_{re} と T_{sk} にもかかわらず SR が低いと報告している。熱放散反応は環境条件に大きく影響されるが、前述のような厳しい暑熱環境下では、女性は男性と比較して SR が少ないので、耐暑性は男性よりも劣ることが考えられる (Drinkwater 1986; Haymes 1984)。しかし、Haslag and Hertzman (1965) は、25°C から 45°C まで漸増的に環境温を上げていくと、月経期、卵胞

期および黄体期とも女性のSRは男性のそれとは差異がないことを報告しており，前述の先行研究の結果（Drinkwater 1986；Haymes 1984）と一致していない．

3.2.2. 体温と熱放散反応の対応関係

Kobayashi et al. (1980) は，環境温 32°C (40%RH) の条件下で 2 時間の下肢温浴（湯温 42°C）を実施し， T_{re} と SR（胸と背の平均値）の対応関係の性差を検討したところ，発汗開始閾値には性差がみられないものの，発汗反応の感受性は女性が男性よりも有意に小さいことを報告している．しかし，この研究では女性の性周期は考慮されておらず，また，現在のところ安静時に体温と熱放散反応の対応関係を女性の性周期を考慮して検討した研究は見あたらない．前述のように，女性と男性の熱放散反応を比較する場合，体力レベル（ $\dot{V}O_2max$ ）や身体特性などの性差によってより複雑となる．しかし，安静時に熱放散反応の性差を検討することで，体力レベルの性差をいくらかは解消できる可能性が考えられる．そのため，安静時において男女の熱放散反応を検討することはその性差を明らかにする上で有効であると思われる．

安静時における SkBF の性差に関しては，経時変化および体温と熱放散反応の対応関係のいずれの観点からも現在のところ検討されていない．

3.3. 運動時の熱放散反応

3.3.1. 経時変化

Morimoto et al. (1967) は，環境温 43°C (30%RH) の条件下で計 90 分間の安静時およびトレッドミル歩行を行なうと月経期の女性は男性と比較して総体重減少量（TWL）が低く，その差は高温多湿〔環境温 35°C (81%RH)〕のように温熱ストレスが厳しくなるほど大きくなると報告している．

SRは体力レベル（ $\dot{V}O_2max$ ）に比例するので（Byrd et al. 1977；Drinkwater et al. 1976；Gisolfi et al. 1979；Buono and Sjöholm 1988），男女間で報告されたSRの性差は単に体力レベルの差を反映していることが考えられる．一般に女性の $\dot{V}O_2max$ は男性よりも約 20%低いので（Drinkwater 1973），被験者の体力レベルを考慮していない先行研究において女性のTWLが男性よりも低くなることは当然のことなのかもしれない（Morimoto et al. 1967）．このことを裏付けるように， $\dot{V}O_2max$ が同等の男女を比較すると環境温 21°C (50%RH以下) の常温環境下で 76% $\dot{V}O_2max$ のトレッドミル走を行なった時のSRには性差がみられない（Davies 1979）．しかし，環境温 36°C (75%RH) の高温多湿下での運動時では，男女の体力レベルを揃えた場合でも女性のSRは男性よりも顕著に少ないことが報告されている（Avellini et al. 1980；Frye and Kamon 1981）．この男女に環境温 36°C (75%RH) の条件下で 10 日間の暑熱順化を実施すると，SRの性差は更に拡大する（Avellini et al. 1980）．高温多湿下では汗の蒸発が制限されるので，過度の発汗は熱放散に貢献せずに体表面から滴り落ちてしまうため，体液をより多く失うことになる．このような高温多湿下における女性の少ないSRは体液を保持する上で有利であると考えられている（Stephenson and Kolka 1993）．さらに，Avellini et al. (1980) は高温多湿の条件下では体力レベルの同じ男女を比較すると，男性よりも女性の方がHRや T_{re} を低く維持し，耐性時

間は長いことを報告している。前述のように、男女間の体力レベルを合わせるとその差は小さくなり (Davies 1979)、また、高温多湿下において熱放散に貢献することなく無駄に体表面を滴り落ちる汗は男性より女性が少なく効率の良い発汗を行なっていることから、一概に女性の熱放散反応が劣るとはいえないのかもしれない。一方、高温低湿下では、汗のほとんどが蒸発して放熱に貢献するので、SRの多い方が体温を維持する上では有利になると考えられる。しかし、女性が男性よりSRは少ない (Horstman et al. 1982)、SRに性差はない (Frye and Kamon 1981) など、高温低湿下でのSRの性差には一致した見解が得られていない。

女性は無駄に滴る汗が少なく効率のよい発汗を行なうことに関連して、女性は男性と比較して少ないSRの時点から発汗漸減 (多量に発汗が生じたときにSRが徐々に低下する現象) が起こる (Avellini et al. 1980; Araki et al. 1981)。さらに、Frye and Kamon (1981) は、環境温 36°C (75%RH) および環境温 48°C (15%RH) の条件下で 30% $\dot{V}O_{2max}$ のトレッドミル歩行を実施して男女のSRをそれぞれ比較すると、女性では高温多湿下 [環境温 36°C (75%RH)] で暑熱低湿下 [環境温 48°C (15%RH)] よりも有意にSRが少なくなったのに対し、男性では有意な差はみられなかったことから、女性の発汗は無駄な汗が少ない効率のよいものであることを示唆している。

3.3.2. 体温と熱放散反応の対応関係

Roberts et al. (1977) および Nadel et al. (1978) は、環境温 25°C (22%RH) の条件下で 60-70% $\dot{V}O_{2max}$ の半仰臥位自転車運動を 12-15 分間行ない、この時の発汗開始および皮膚血管拡張閾値は女性の性周期を考慮していないものの、女性が男性よりも高いことを報告している。さらに、Nadel et al. (1978) は各熱放散反応の感受性は女性が男性よりも低いことを報告している。女性の性周期を考慮したものでは、環境温 30°C の条件下で 60% $\dot{V}O_{2max}$ の半仰臥位自転車運動を 35 分間行なった際の発汗開始および皮膚血管拡張閾値や各熱放散反応の感受性には卵胞期の女性と男性の間に差はないと報告されている (Kolka et al. 1987)。

以上のように、男性と女性の熱放散反応は性ホルモンとともに体力レベルや順化の程度、身体特性の違いに起因して異なることが推察される。安静時および運動時における熱放散反応の性差を概観すると、女性の性周期は考慮せず、男女の体力レベルは考慮した場合、常温環境下ではSRに性差はみられないものの、高温多湿下のような温熱ストレスが大きい条件では女性のSRは男性よりも低くなることが示される。また、皮膚血管拡張反応の性差については発汗反応ほど十分に検討されていないのが現状である。

4. 熱放散反応に及ぼす運動トレーニングの影響

運動トレーニングを継続すると身体に様々な適応反応が生じる。ここでは、運動トレーニングが熱放散反応に及ぼす影響について、運動トレーニングの期間 (長期および短期) および運動トレーニングの影響の評価法 (安静もしくは運動) の観点から、これまでの文献を女性と男性の場合に区別して

整理する。運動トレーニングに関する先行研究では体温と熱放散反応の対応関係から検討しているものが多いことから、特にその対応関係に焦点を当て、さらに、運動トレーニングを停止することによる影響（脱トレーニング）についてもあわせて検討する。

4.1. 安静時の生体パラメータ

一般に、運動トレーニングを継続すると皮下脂肪厚は減少することが報告されている(田口 1986; 池上 1990)。また、多くのトレーニング実験の結果から $\dot{V}O_{2max}$ は5%から30%ほど増大することが報告されている(金尾 1993)。これまでの報告では、 $\dot{V}O_{2max}$ の増大には50% $\dot{V}O_{2max}$ 以上の運動強度が必要となる(金尾 1993)。

安静時のHRは運動トレーニングの継続によって低下する(宮田 1993)。このHRの低下はトレーニング開始後1週間以内に生じ、1週目以降は有意に変化しないようである〔環境温49°C(20%RH)の条件下で歩行(1.4m/s)を110分間/日を9日間〕(Pandolf et al. 1977)。同様に、安静時の体温も運動トレーニングによって低下し、その低下はトレーニング開始後1週間以内にみられる(Williams et al. 1967; Shvartz et al. 1974; Buono et al. 1998; Patterson et al. 2004)。

運動トレーニングにより男性ホルモンの分泌が増加する(Zakas et al. 1994)。しかし、その増加の程度は女性が男性よりも小さい(Keizer et al. 1989)。さらに女性の場合、運動トレーニングを長期間継続することで性周期に伴う女性ホルモンの分泌変動が小さくなり(Bullen et al. 1984; 桑原ら 2001)、それに伴い体温の変動はみられなくなる(桑原ら 2001)。

4.2. 男性における運動トレーニングの影響

4.2.1. 長期運動トレーニング

a. 安静時の熱放散反応

Kobayashi et al. (1976)は、2時間の暑熱暴露時〔環境温45°C(45-48%RH)〕において、長期間運動トレーニングを継続している運動トレーニング者のSRは非運動トレーニング者のそれと比較して有意に高く、また、汗に含まれる塩分濃度は長期運動トレーニング者のほうが低く効率的に汗が蒸発するため、 T_{re} や T_b の上昇は非運動トレーニング者よりも小さいことを報告している。また、その実験において発汗開始閾値には長期運動トレーニングの影響はみられないものの、長期運動トレーニング者の発汗反応の感受性は非運動トレーニング者のそれよりも有意に高いことが示されている(Kobayashi et al. 1976)。一方、Hori (1977)は、環境温30°C(70%RH)の条件下での90分間の下肢温浴(湯温42°C)において、長期間運動トレーニングを継続している運動トレーニング者のSRは非運動トレーニング者のそれと比較して低いものの、汗に含まれる塩分濃度は長期運動トレーニング者のほうが低いため、 T_{re} の上昇は非運動トレーニング者よりも小さいことを報告している。さらに、Araki et al. (1980)およびMatsushita and Araki (1980)は、環境温30°C(60-70%RH)での下肢温浴(湯温42.3-43°C)を60分間負荷した際、長期運動トレーニング者のSRは非運動トレーニング者のそれとほぼ同等にもかかわらず、平均皮膚温は非運動トレーニング者よりも低いことから、長期運動トレ

ーニング者は効率のよい熱放散を行なっていることを示唆し、 T_{re} の上昇は長期運動トレーニング者が非運動トレーニング者のそれよりも有意に小さいことを示している。また、Bouno and Sjöholm (1988)は、前腕においてピロカルピンの経皮投与により発汗を引き起こすと、長期間トレーニングを継続している運動トレーニング者のSRが非運動トレーニング者のそれよりも有意に多いこと、その大きなSRは活動汗腺数 (ASG) の増加よりも単一汗腺あたりの汗出力 (SGO) の増加に起因することを報告している。このように、長期運動トレーニングによるSRの量的な変化に関しては研究ごとにその結果が異なるものの、発汗反応は主に末梢機構での感受性の亢進により体温調節上で有利な方向に改善されることが示唆される。

長期運動トレーニングが安静時の皮膚血管拡張反応に及ぼす影響を検討したものは少なく、その中でも温熱負荷ではなく薬剤を用いて検討したものしか見あたらない。Boegli et al. (2003)は、ニトロプルシドナトリウム (NO を提供) の経皮投与によって引き起こされる皮膚血管拡張が非運動トレーニング者よりも長期運動トレーニング者で有意に大きいことから、運動トレーニングでは能動的血管拡張システムの中でも特に NO の作用による皮膚血管拡張が亢進することを示唆している。

b. 運動時の熱放散反応

Yamazaki et al. (1994b)は、運動トレーニングを4-10年間継続している運動トレーニング者と運動を行っていない非運動トレーニング者に環境温 25°C (35%RH) の条件下で $35\% \dot{V}O_{2\max}$ の立位自転車運動を30分間負荷し、胸および前腕SRを検討した。その結果、 T_{es} およびSR、 T_b および F_{sw} 、 F_{sw} およびSRの対応関係から、発汗開始閾値は運動トレーニング者と非運動トレーニング者との間に有意な差はみられないものの、胸においてのみ運動トレーニング者の発汗反応の感受性および末梢機構の感受性が非運動トレーニング者のそれよりも有意に大きいことを報告している。また同様に、Yamauchi et al. (1997)は、運動トレーニングを6年以上継続している運動トレーニング者と非運動トレーニング者に環境温 23°C (60%RH) の条件下で80Wの立位自転車運動を30分間負荷して胸および大腿SRを検討し、運動トレーニング者の同一 T_b に対する F_{sw} が非運動トレーニング者のそれより少ないことを示している。これらの結果は、長期トレーニングによるSRの増加は発汗開始閾値の低下や発汗調節中枢の活動性の亢進よりも、発汗反応の末梢機構の活動性の亢進に起因することを示唆する。これらの結果と前述のBouno and Sjöholm (1988)の結果を考え合わせると、長期運動トレーニングによるSRの増加は発汗反応の末梢機構の亢進によるものであることが推察される。

Fritzsche and Coyle (2000)は、長期間運動トレーニングを継続している運動トレーニング者と非運動トレーニング者に環境温 $23-24^{\circ}\text{C}$ (50%RH) の条件下で50%、70%および $90\% \dot{V}O_{2\max}$ の立位自転車運動を各20分間負荷し、前腕皮膚血管拡張反応を検討した。その結果、同じ相対強度で両群を比較した場合、皮膚血管拡張閾値は両群間で有意な差はみられないものの、運動トレーニング者の熱産生量は非運動トレーニング者よりも多いにもかかわらず、SKBFをより増加させることができるので T_{es} は非運動トレーニング者と同レベルに維持できることを報告している。

これらのことから、男性において長期運動トレーニングが熱放散反応を改善することが示唆され、

さらにこの改善は熱放散反応の体温閾値の低下(発汗反応では発汗調節中枢の活動性の亢進)よりも熱放散反応の末梢機構の感受性の亢進に起因することが推察される。

4.2.2. 短期運動トレーニング

a. 安静時の熱放散反応

3ヶ月間の運動トレーニング〔環境温 18-20°C (44-50%RH) の条件下で 25% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動を 30 秒と 110% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動 60 秒間を疲労困憊まで実施〕後に、環境温を 30°C (40%RH) から 45°C (25%RH) に上昇させた際の T_{re} と胸SRから求めた発汗反応の感受性が増大する (Henane et al. 1977)。しかし、この研究では統計処理がなされていなかった。近年、Yamazaki and Hamasaki (2003) は、6 日間の運動トレーニング〔環境温 36°C (50%RH) の条件下で 50% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動を 20 分間 4 セット/日〕後に、水循環スーツを用いて T_{sk} を ~38.5°C に 45 分間維持した際の胸および前腕の発汗開始閾値と前腕および手甲の皮膚血管拡張閾値は有意に低下するものの、各熱放散反応の感受性は運動トレーニングによって変化しないことを報告している。

b. 運動時の熱放散反応

Nadel et al. (1974) は、10 日間の運動トレーニング〔環境温 22°C (20%RH) の条件下で 70-80% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動を 60 分間/日〕前後に、環境温 25°C の条件下で 60-70% $\dot{V}O_{2max}$ の半仰臥位自転車運動を 15 分間行なうと、発汗開始閾値が低下し、 T_{es} と胸SRの対応関係から求めた発汗反応の感受性が増大することを報告している。また、Roberts et al. (1977) は、10 日間の運動トレーニング〔環境温 25°C (20%RH) の条件下で 75% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動を 60 分間/日〕前後に、環境温 25°C の条件下で 60-70% $\dot{V}O_{2max}$ の立位自転車運動を 12-15 分間行なった際の胸SRおよび前腕SkBFの変化を検討した (被験者 8 名のうち 4 名は女性)。発汗反応において前述の研究と同様に発汗開始閾値の低下および発汗反応の感受性の増大を示したが、一方、皮膚血管拡張反応において皮膚血管拡張閾値は低下するものの、その感受性は運動トレーニングによって変化しないことを報告している。しかし、この 2 つの研究は統計による処理がなされていないという欠点があった。近年、統計処理を行なった短期運動トレーニングに関する研究では、18 週間の運動トレーニング〔環境温 18°C (~70%RH) の条件下で 50-80% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動を 60 分間/日〕前後に、環境温 30°C (50%RH) の条件下で 60% $\dot{V}O_{2max}$ の半仰臥位自転車運動を 20 分間行なった際の胸の発汗開始閾値および前腕の皮膚血管拡張閾値は有意に低下するものの、各熱放散反応の感受性は運動トレーニングによって変化しないことが報告されている (Okazaki et al. 2002)。一方、Takeno et al. (2001) は、10 日間の運動トレーニング〔環境温 30°C (50%RH) の条件下で 60% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動を 30 分間 2 セット/日〕前後に、環境温 30°C (50%RH) の条件下で 60% $\dot{V}O_{2max}$ の半仰臥位自転車運動を 30-40 分間行なった際の前腕SkBFに及ぼす影響を検討し、運動トレーニングによって皮膚血管拡張閾値は有意に低下し、その感受性も有意に増大することを報告している。また、Pettersson et al. (2004) は、3 週間の運動トレーニング〔環境温 40°C (60%RH) の条件下で 50% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動を 90 分間/日〕が環境温 39.8°C (60%RH) の条件下で ~30% $\dot{V}O_{2max}$

の半仰臥位自転車運動を 90 分間行なった際の前額，胸，背，前腕および大腿SRに及ぼす影響を検討し，運動トレーニングによって全ての部位の発汗開始閾値は有意に低下し，その感受性は背を除く他の測定部位（前額，胸，前腕および大腿）で有意に増大することを示している．

16 週間の運動トレーニング〔60-80%HRmax の運動を 30-60 分間/日〕による前腕の皮膚血管拡張閾値の低下のメカニズムについて，Thomas et al. (1999) は血管収縮神経を遮断するブレチリウムを用いて検討し，運動トレーニングによる皮膚血管拡張反応の改善は能動的血管拡張システムの亢進に起因することを明らかにしている．

短期トレーニングによる熱放散反応の体温閾値の低下に関連して，Buono et al. (1998) は，7 日間の運動トレーニング〔環境温 35°C (75%RH) の条件下で 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ 程度の自転車運動を 25 分間，4 セット/日〕を行なったとき，安静時とその運動終了時の T_{re} に有意な相関関係があることを示している．また，この研究では熱放散反応の体温閾値を求めているものの，先行研究で報告されている短期運動トレーニングによる体温閾値の低下の程度が安静時 T_{re} の低下の程度とほぼ一致していることから，短期トレーニングによる熱放散反応の体温閾値の低下には，トレーニングに伴う安静時の体温の低下が深く関与していると指摘している (Buono et al. 1998)．

Höfler (1968) は，35 日間の運動トレーニング〔環境温 36.5°C (65%RH) の条件下で 8kpm/secの立位自転車運動を 40 分間，4 回/日〕を実施すると，トレーニング 1 日目と比較して 35 日目のSRは体幹部よりも四肢部でより顕著に増加することを示している．また，Shvartz et al. (1979) も，8 日間の運動トレーニング〔環境温 39.8°C (50%RH) の条件下で 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ の立位自転車運動を 120 分間/日〕前後で，同様の汗の再分布がみられることを報告している．四肢部は体幹部と比較して環境に接する面積が大きいので，四肢部でみられる顕著なSRの増加は汗の蒸発効率を高める合目的な適応反応であると考えられる．しかし，これらの研究では統計による処理はされていないという欠点がある．近年，Cotter et al. (1997) は，6 日間の運動トレーニング〔環境温 39.5°C (59.2%RH) の条件下で耳道温の上昇 (1.4°C) を 70 分間維持させる強度の自転車運動〕によって，運動時 (運動トレーニングと同じ内容) の前額，背，上腕，前腕，手甲，大腿，下腿および足甲SRは効率的な汗の再分布を示さないこと，また，前述のPatterson et al. (2004) も，3 週間の運動トレーニング前後で，運動時 (運動トレーニングと同じ内容) 前額，胸，背，前腕および大腿SRに効率的な汗の再分布が生じないことを報告している．このように，近年の研究ではHöfler (1968) やShvartz et al. (1979) の研究でみられたような効率的な汗の再分布は起こらないと報告されており，今後運動トレーニングによる発汗反応の促進における部位差についてはさらに検討する余地があると考えられる．

短期運動トレーニングの効果が生じるのに必要な期間に関して，Shvartz et al. (1974) は，12 日間の運動トレーニング〔環境温 21.5°C (67.7%RH) の条件下で 85% $\dot{V}O_2\text{max}$ の踏み台昇降運動を 60 分間/日〕を行なうと安静時および運動時 (運動トレーニングと同じ内容) の T_{re} ，皮膚温，SRおよび熱コンダクタンス ($W/m^2/^\circ C$) の低下 (トレーニングの効果) が 4-5 日目で顕著に現れることを報告している．また，Cotter et al. (1997) は 6 日間の運動トレーニングで，Patterson et al. (2004) は，全 16 回の運動トレーニングのうちの 6 回目の運動トレーニング時に発汗開始閾値が有意に低下すること

を報告している。このように短期間の運動トレーニングによる熱放散反応の改善は比較的短期間（1週間以内）で引き起こされることが予想される。

このように、男性において短期運動トレーニングによる熱放散反応の感受性の改善については先行研究の結果が一致しておらず更なる検討が必要であるものの、安静時および運動時のいずれにおいても運動トレーニング開始後、比較的短期間で熱放散反応の体温閾値は低下することが示唆される。また、運動トレーニングによる効率的な汗の再分布については先行研究で一致した見解が得られておらず、その現象の真偽は明らかではない。

4.3. 女性における運動トレーニングの影響

4.3.1. 長期運動トレーニング

a. 安静時の熱放散反応

女性において長期運動トレーニングが体温と熱放散反応の対応関係に及ぼす影響に関しては、現在のところ、環境温 32°C (40%RH) の条件下で2時間の下肢温浴（湯温 42°C）を実施して T_{re} とSR（胸と背の平均値）の対応関係を検討したものしかない（Kobayashi et al. 1980）。Kobayashi et al. (1980) は、長期間運動トレーニングを継続した女性の発汗開始閾値は一般女性のそれより有意な低値を示すが、その感受性には運動トレーニングの影響はみられないことを報告している。この結果は、長期運動トレーニングによる熱放散反応の改善は体温閾値の低下よりも熱放散反応の末梢機構の感受性の亢進に起因するとした男性の結果とは異なる。その相違の原因の一つとして、Kobayashi et al. (1980) の研究では女性の性周期は考慮されていなかったことが考えられる。

b. 運動時の熱放散反応

Araki et al. (1981) は、運動競技を6年以上継続している女性運動トレーニング者と学校の体育以外で特別な運動を行っていない非運動トレーニング者の黄体期に環境温 30°C (60%RH) の条件下で 981 および 483kgm/minの立位自転車運動を2時間負荷した。この時のT_{WL}は女性運動トレーニング者と非運動トレーニング者との間に有意な差はみられないものの、運動終了時の T_{re} は運動トレーニング者が有意な低値を示した。また、汗に含まれる塩素濃度はトレーニング者が有意に低かったことから、汗が効率良く蒸発したため運動時の T_{re} はトレーニング者で低かったことが考えられる。

これらのことから、長期運動トレーニングは安静時および運動時にかかわらず発汗反応を改善することが示めされ、この改善は男性とは異なり発汗開始閾値の低下に起因することが示唆された。しかし、長期運動トレーニングが安静時および運動時のSkBFに及ぼす影響については検討されておらず、また、運動時では体温と熱放散反応の対応関係の観点からの検討がなされていない。

4.3.2. 短期運動トレーニング

a. 安静時の熱放散反応

現在のところ、女性において短期運動トレーニングが安静時の熱放散反応に及ぼす影響について検

討した研究は見あたらない。

b. 運動時の熱放散反応

Nadel et al. (1978) は、4名の女性において10日間の運動トレーニング〔環境温 25°C (22%RH) の条件下で 75% $\dot{V}O_2\text{max}$ の自転車運動を 60 分間/日〕前後に、環境温 25°C の条件下で 60-70% $\dot{V}O_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動を 15 分間行なうと、 T_{es} と SkBF の対応関係から求めた皮膚血管拡張反応の感受性は変化しないものの皮膚血管拡張閾値が低温側へシフトし、同一 T_{es} に対する SkBF が増加することを報告している。この実験において、トレーニング後さらに 10 日間の暑熱順化〔環境温 35°C (80%RH) の条件下で 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ の自転車運動を 60 分間/日〕を実施させると、その閾値はさらに低下することが示されている。また、 T_{es} と SR の対応関係では、トレーニング後に発汗反応の感受性は増大するものの発汗開始閾値には変化がなく、その後の暑熱順化ではその感受性はそのまま閾値の低下のみが認められた。これらの結果から、運動トレーニングや暑熱順化により熱放散反応は改善され同一体温に対する発汗および皮膚血流反応が増大することが示唆される。しかし、この研究では性周期は考慮されておらず、また、統計処理は行なわれていないという問題点が指摘される。

女性は性周期による体温の変動がおよそ 2 週間ごとに繰り返されるため、Nadel et al. (1978) の 10 日間の運動トレーニングもしくは暑熱順化プログラム(プログラム前後に熱放散反応を評価するテストを行なう)では、各熱放散反応の体温閾値や感受性の変化は運動や暑熱順化の影響なのか性周期による影響なのか判断しづらい。例えば、卵胞期にプログラムを開始して黄体期に終了するような場合、熱放散反応が起こる体温閾値はプログラム前後で有意な変化がみられないかもしれない。逆に、黄体期から始めて卵胞期に終了する場合、実際はプログラム前後での体温閾値はほとんど変化していないにもかかわらず、性周期による影響が運動トレーニングの効果としてあたかも示される可能性が考えられる。このように女性は性周期を持つので、運動トレーニングや暑熱順化の影響を縦断的に検討するためには、運動トレーニング前後のテストは同じ性周期相に実施することが不可欠である。

これまでに、性周期を考慮して短期運動トレーニングの効果を検討した研究は 3 つしか行なわれていない (Fortney and Senay 1979; Araki et al. 1981; Armstrong et al. 2005)。Fortney and Senay (1979) は、活動的ではない女性に排卵日の前後 2 週間、計 4 週間の運動トレーニング (HR が 140 拍/分になるような自転車運動を 90 分間/日) と、その後に同じく排卵日前後 2 週間の計 4 週間の暑熱順化を行ない〔環境温 45°C (30%RH) の条件下で 30% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動を 90 分間/日〕、運動トレーニング前、運動トレーニングおよび暑熱順化期間中の卵胞期と黄体期に環境温 45°C (30%RH) の条件下で 45 分間の 40% $\dot{V}O_2\text{max}$ の立位自転車運動を負荷している。その結果、実験前後の TWL は運動トレーニングや暑熱順化によって有意に変化しないものの、増加する傾向がみられた。しかし、この結果は各期間の卵胞期と黄体期の値を平均して解析しているために、性周期を考慮しているとはいえない。一方、Araki et al. (1981) は、60 日間の運動トレーニング〔屋外 (日本の 7-9 月) で 8km の野外走〕前後の黄体期に環境温 30°C (60%RH) の条件下で 120 分間の 981kgm/min の立位自転車運動を負荷した際、発汗開始潜時が運動トレーニング後に短縮し、発汗量が増加することを報告している。近年、

Armstrong et al. (2005) は、若年女性に性周期の 2 サイクルの運動トレーニング〔屋外(環境温-3.9°C) および屋内(環境温 36-37°C, 33-37%RH)の条件下で 50-85% $\dot{V}O_{2max}$ の運動を 90 分間/日〕を行ない、その前後の卵胞早期に環境温 22.5°C の条件下で 20 分間の 45% $\dot{V}O_{2max}$ の立位自転車運動を負荷した際の発汗開始閾値および発汗反応の感受性が変化しないことを報告している。

このように性周期を考慮して短期運動トレーニングが熱放散反応に及ぼす影響を検討した場合でさえも一様な効果が得られていないのが現状である。運動トレーニングによる熱放散反応の改善には 15-20% 程度の $\dot{V}O_{2max}$ の増加が必要であると報告されているが (Pandolf 1979), Fortney and Senay (1979), Araki et al. (1981) および Armstrong et al. (2005) の研究ではそれぞれ 15.0%, 未測定および 9.4% の増加であった。そのため、運動トレーニングによる $\dot{V}O_{2max}$ の増加の程度の違いに起因して、これまでの研究で一貫した見解が得られていない可能性が考えられる。このようなことから、女性において短期運動トレーニングが熱放散反応に及ぼす影響を検討する場合には、性周期を考慮するとともに 15% 程度の $\dot{V}O_{2max}$ の増加が必要であると考えられる。

4.4. 脱トレーニング

運動トレーニングによって生じた熱放散反応の亢進は運動トレーニングの停止で消失することが男性を対象とした研究から明らかにされている。Williams et al. (1967) は、4 日間の運動トレーニング〔環境温 34°C (89%RH) の条件下で $\dot{V}O_2$ が約 1L となる踏み台昇降を 4-5 時間/日〕の 1, 2 および 3 週間後に再テスト(運動トレーニングと同じ内容)を行なうと、2 週間後では T_{re} の適応反応の消失は 40%, HR と SR では約 80% の消失がみられることを報告している。一方、Pandolf et al. (1977) は、9 日間の運動トレーニング〔環境温 49°C (20%RH) の条件下で 1.34m/s のトレッドミル歩行を 110 分間/日〕の 3, 6, 12 および 18 日後に再テスト(運動トレーニングと同じ内容)を行なうと、18 日後でも T_{re} の適応反応の消失は 18% 以内、HR では 29% 以内であることを報告している。

このように、男性では運動トレーニングを停止するとその適応反応はある程度消失するが、その消失の程度や速さはトレーニングの内容や期間の違いによって異なることが考えられる。一方、女性についてはこのような観点から検討した研究がないため、男性と同様の適応反応の消失がみられるかは明らかではない。

5. 熱放散反応に及ぼすその他の要因

5.1. 運動強度

運動時における体温と熱放散反応の対応関係を検討した研究では、比較的軽いものから疲労困憊に至るような高い運動強度まで、様々なレベルの運動強度が用いられている。運動強度の増加に比例して活動筋での酸素需要は増加し、また、50-60% $\dot{V}O_{2max}$ の運動強度付近からは交感神経活動の亢進や乳酸の産生など、運動強度の変化により様々な生体の変化が引き起こされる(池上 1990)。これらの変化もまた、熱放散反応に影響を及ぼすことが考えられており、運動強度のレベルで体温と熱放散反

応の対応関係は異なる可能性が考えられる。

Taylor et al. (1988) [環境温 21.1°C (50%RH) の条件下で 75W から 200W の仰臥位自転車運動], Montain et al. (1995) [環境温 30°C (50%RH) の条件下で 25%, 45% および 65% $\dot{V}O_{2max}$ のトレッドミル走を各 50 分間], および, Kondo et al. (1998) [環境温 28.3°C (42.6%RH) の条件下で 35%, 50% および 65% $\dot{V}O_{2max}$ の立位自転車運動を各 30 分間] は, 運動強度の増加によって発汗開始閾値は変化しないと報告している。また上記の実験において, Montain et al. (1995) は, 25% から 45% および 65% $\dot{V}O_{2max}$ への運動強度の増加時に上腕での発汗反応の感受性が, また, Kondo et al. (1998) は 35% から 50% および 65% $\dot{V}O_{2max}$ への運動強度の増加時に前額でのその感受性が有意に増加することを報告している。

Taylor et al. (1988) および Kondo et al. (1998) の研究では, 発汗反応とともに皮膚血管拡張反応に及ぼす運動強度の影響も検討している。その結果, Taylor et al. (1988) は, 中等度より高強度運動時に皮膚血管拡張閾値が約 0.8°C 上昇すること, Kondo et al. (1998) は, 前額および胸ではその影響はみられないが, 前腕における皮膚血管拡張閾値が 65% $\dot{V}O_{2max}$ 時に有意に上昇することを報告している。さらに, 皮膚血管拡張反応の感受性に関しては, 35% から 65% $\dot{V}O_{2max}$ の範囲では運動強度の影響を受けないものの (Kondo et al. 1998), 90% $\dot{V}O_{2max}$ のような高強度の運動時ではその感受性は低下することが報告されている (Smolander et al. 1991)。また, Hirata et al. (1983) は, 環境温 20°C (40-60%RH) の条件下で 20%, 35% および 45% $\dot{V}O_{2max}$ の半仰臥位自転車運動を各 60 分間行なった際の T_{es} と手 (動静脈吻合が多く存在するやや特殊な部位であると考えられる) の放射および対流による熱放散量の対応関係から求めたその感受性は, 強度増加に伴い低下することを報告している。

また, Fukuoka et al. (2002) は性周期が T_{re} と胸および前腕 SR の対応関係に及ぼす影響における運動強度の影響を検討するために, 一般女性の卵胞期および黄体期に環境温 25°C (55%RH) の条件下で 150kpm/min (10-15% $\dot{V}O_{2max}$), 300kpm/min (40-50% $\dot{V}O_{2max}$) および 450kpm/min (40-60% $\dot{V}O_{2max}$) の立位自転車運動を別々の日に各 30 分ずつ行なわせた。その結果, いずれの運動強度においても性周期に伴う発汗開始閾値の変化が同様に観察され, さらに, いずれの運動強度においても発汗反応の感受性は性周期に影響されないことを示している。

これらのことから, 運動強度は発汗開始閾値には影響しないもののその感受性を亢進させる可能性が考えられる。また, 高い運動強度になると皮膚血管拡張反応の感受性が低下してその反応は抑制されることが推察される。さらに女性においては, いずれの性周期相においても体温と熱放散反応の対応関係は運動強度の影響を受けないことが考えられる。

5.2. 環境条件

Horvath and Drinkwater (1982) は, 一般女性の月経期および黄体期に 3 つの環境温条件 (28°C, 35°C および 48°C) で 30% $\dot{V}O_{2max}$ のトレッドミル歩行を 50 分間 2 セット実施した。環境温 28°C 下では T_{sk} および前腕血流量は月経期より黄体期に有意な低値を示したが, 環境温 35°C および 48°C 下ではそのような性周期による影響はみられなかった。この結果は, 性周期による影響が常温環境下での比較的

軽い運動時でより顕著にみられることを示唆する。一方、脱水による運動時の T_{re} およびHRの上昇の程度は常温環境下よりも高温環境下で顕著になることが示されている (Buono and Wall 2000)。

これまでに環境温 5°C から 36°C の範囲内であれば運動時の体温の上昇の程度は相対強度にほぼ依存して変化すると報告されているが (Nielsen 1938; 近藤 2002), 熱放散反応に影響する様々な要因 (性周期や脱水の状態など) が変化すると, 前述のようにその法則は変化する。

5.3. 血漿量および浸透圧

血漿量の減少や浸透圧の上昇により発汗や皮膚血管拡張反応が減弱される (Harrison 1985; Nose et al. 1997; Takamata et al. 1997)。急性に血漿量を 8.7%減少させ, 環境温 30°C (40%RH) の条件下で $65\text{-}70\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ の立位自転車運動を 30 分間行なった時のTWLはコントロール時と比較して有意に少なくなった。さらに, T_{es} と胸, 前腕および下腿SRの対応関係において発汗開始閾値には血漿量の違いによる差はみられないものの, 胸および前腕での両者の関係から求めた発汗反応の感受性は有意に低下した (Fortney et al. 1981b)。また, Fortney et al. (1981a) は血漿量を 10%減少させ, 環境温 35°C (30%RH) の条件下で $60\% \dot{V}O_{2\text{max}}$ の仰臥位自転車運動を 30 分間負荷すると, T_{es} と前腕血流量の対応関係から求めた皮膚血管拡張閾値は有意ではないものの上昇する傾向を示し, 一方で, その感受性はコントロールと比較して有意に低下することを報告している。同様に, Nishiyasu et al. (1991) は, 血漿量を 15.9%減少させ, 環境温 35°C の条件下でHRが 120-130 拍/分程度の半仰臥位自転車運動を 60 分間行なわせたところ, 通常血漿量状態時と比較して前腕血流量が低下すること, また, その際の血圧は低血漿量による影響を受けないことを報告している。SRや四肢の血流量の減少は体温調節の上では不利に働くと考えられるが, 体液量の保持もしくは血圧の維持の観点から考えると, 血漿量が減少している時の熱放散反応の低下は体液および循環調節の維持に有利であると推察される。これらのことから, 血漿量が減少した状態において前述の程度の温熱ストレスでは体温の維持よりも体液量や血圧の維持が優先されていると考えられる。

血漿量は主に抗利尿ホルモンとナトリウムの再吸収に働くレニン-アンギオテンシン-アルドステロン系の最終過程で分泌されるアルドステロンによって調節されている (山田 1997)。性周期における女性ホルモンの変動はこれらの体液調節に関与するホルモンの影響しており, レニン (Kaulhausen et al. 1978), アンギオテンシン (Kaulhausen et al. 1978), およびアルドステロン (Gray et al. 1968; Kaulhausen et al. 1978; Stephenson et al. 1989) 濃度は黄体期に高くなると報告されていることから, 卵胞期と比べ黄体期に血漿量は増加することが予想される。しかし, 実際には血漿量はエストロゲンが最大値となる直後の排卵日に最大となり (Turner and Fortney 1984; Fortney et al. 1994), 黄体期に卵胞期と比較して減少する (Turner and Fortney 1984; Stephenson and Kolka 1988, 1993; Stephenson et al. 1989; Stachenfeld et al. 1999a, 1999b, 2001; Calzone et al. 2001)。エストロゲンの一つである 17-エストラジオールはレニン基質の産生を増加させ (Helmer and Griffith 1952), 一方で, プロゲステロンは腎臓でアルドステロンの作用を抑制する (Landau and Lugibihl 1958; Laidlaw et al. 1962)。これらの報告を考え合わせると, 性周期における血漿量の変動を説明できるかもしれない。すなわち, 排

卵日では直前におこるエストロゲンの増加がレニン基質の産生増加を引き起こすために、レニン-アンギオテンシン-アルドステロン系が活性化され、腎臓でのナトリウムと水の再吸収を促進することで血漿量が増大すると考えられる。一方、卵胞期と比較してプロゲステロンが劇的に増加する黄体期では、腎臓でのナトリウム再吸収が抑制されることから、低下した体液の浸透圧を維持するために血漿量が減少すると考えられる。また、黄体期におけるエストロゲンの血中濃度は、排卵直前よりも低いものの卵胞早期および中期よりは高いことから、エストロゲンが血漿量の調節ホルモンを活性化せ始める血中濃度閾値の存在、もしくは、エストロゲンの作用はプロゲステロンに影響されることが考えられる。前述のように、血漿量の減少は心肺圧受容器の反射を介し発汗および皮膚血管拡張反応、特にその感受性を低下させる。皮膚血管拡張反応においては能動的血管拡張システムが抑制され、その結果、皮膚血管拡張反応の感受性が低下すると考えられており (Nagashima et al. 1998)、200ml 程度のわずかな血液量の低下でもその抑制は引き起こされることが報告されている (Nose et al. 1990)。Stephenson and Kolka (1988) は、卵胞期と比較して黄体期に平均で 210ml の血漿量が減少すること、同様に Stachenfeld et al. (1999, 2001) は、黄体期に 200-300ml 程度の血漿量が低下することをそれぞれ報告していることから、熱放散反応の感受性が性周期に伴う血漿量の変化による影響を受けることは十分に考えられる。

体液の浸透圧の上昇により発汗開始および皮膚血管拡張閾値が上昇する (Takamata et al. 1997)。卵胞期と比較して黄体期に浸透圧が低下するものの (Stachenfeld et al. 1999)、熱放散反応の体温閾値は卵胞期より黄体期に上昇することから、性周期に伴う体温閾値の変化に浸透圧の影響は小さいと考えられる。

運動トレーニングによって血漿量は増加することが多くの研究において示されている (Convertino et al. 1980; Mack et al. 1987; Fellmann 1992; Sawka et al. 2000)。Convertino et al. (1980) は、8 日の運動トレーニング [環境温 25°C (60%RH) の条件下で 65% $\dot{V}O_{2max}$ の自転車運動を 120 分間/日] で血漿量が 12.1% (427ml) 増加することを報告している。また、Mack et al. (1987) は、 $\dot{V}O_{2max}$ と血液量の関係を検討し、両者の間に高い正の相関関係が成立することを明らかにしている。血漿量の増加によって T_{es} と SKBF の対応関係は変化しない (Crandall et al. 1999)、また、体温と SR の対応関係ではその感受性が増加したりしなかったりと (Shibasaki et al. 2003)、血漿量の増加によって熱放散反応の感受性が一概に増加するわけではないようである。しかし、運動トレーニング前後に温熱ストレス時の体液の再分布の割合が変化しないのであれば、皮膚に分配される血液量は増加し、熱放散反応の亢進に貢献する可能性は十分に考えられる。

5.4. 姿勢

HR や血圧は半仰臥位姿勢と比較して立位姿勢時に高くなる (春名 1999)。これは血管内の静水圧により立位姿勢時に血液が下肢部に貯留し、それに関連して中心血液量が減少することに起因する。この減少が圧受容器反射を引き起こし、迷走神経活動が低下するとともに交感神経活動が増加するため HR や血圧の上昇が引き起こされる。前述のように体温調節と循環 (血圧および血漿量) 調節の間

には密接な関係があるので、温熱ストレス時の姿勢の違いは発汗および皮膚血管拡張反応の感受性に影響を及ぼす可能性がある。これまでに Johnson and Park (1981) および Kellogg et al. (1991) は、姿勢変化によって心肺圧受容器反射が起こり、仰臥位自転車運動よりも立位自転車運動のときに皮膚血管拡張閾値が上昇し、その感受性は変化しないこと、一方で、発汗開始閾値およびその感受性は姿勢の違いの影響を受けないと報告している (Johnson and Park 1981)。また、Johnson et al. (1974) は、安静時でも運動時でも仰臥位姿勢より立位姿勢で皮膚血管拡張反応の感受性が小さくなることを報告している。

このように姿勢の変化が皮膚血管拡張反応に及ぼす影響に関しては先行研究において一致した結果が得られていないものの、皮膚血管拡張反応は発汗反応よりも姿勢の変化の影響をより受けやすいことが推察される。

5.5. 日内リズム

前述のように女性の体温は性周期に伴う周期的なリズムを持ち、その体温は卵胞期と比べ黄体期に 0.2°C から 0.5°C 高くなる (Kleitman and Ramsaroop 1948; Rothchild and Barnes 1952; Stephenson and Kolka 1985)。さらに、ヒトの体温には日内リズムも存在する (Kleitman and Ramsaroop 1948; Aschoff and Heise 1972; Wenger et al. 1976; Stephenson and Kolka 1985; Aoki et al. 1998)。Stephenson and Kolka (1985) は、性周期および日内リズムが安静時および運動時の T_{es} に及ぼす影響を検討するために、性周期の卵胞期と黄体期のそれぞれに 2 つの異なる時間帯 (4 時と 16 時) において、環境温 35°C (環境水蒸気圧 1.73kPa) の条件下で $60\% \dot{V}O_2\text{max}$ の自転車運動を 30 分間実施した。その結果、安静時の T_{es} は卵胞期の 4 時で 36.76°C 、同 16 時で 37.17°C 、黄体期の 4 時で 37.06°C 、同 16 時で 37.48°C であり、卵胞期の 4 時と黄体期の 16 時を比較すると 0.72°C もの差があった。この差は T_{es} がほぼ定常となった運動 25 分目においてもみられ、同様に、これらの体温の変動は運動時の発汗開始および皮膚血管拡張閾値にも認められた。このことから、女性において熱放散反応を評価するときには、性周期とともに実験を行なう時間帯も考慮する必要があると考えられる (Stephenson and Kolka 1985, 1993)。

第3章 検討すべき問題および本研究の目的

これまでの文献研究より以下の問題点が明らかになった。

1) 熱放散反応に及ぼす性周期の影響

どのような条件においても熱放散反応の体温閾値は卵胞期から黄体期にかけて上昇することが示されている一方 (Stephenson and Kolka 1993), 性周期が熱放散反応の感受性に及ぼす影響に関しては一致した見解が得られていない。特に, 常温環境下での中等度運動時では性周期による影響が顕著にみられる可能性はあるものの検討がなされていない (Horvath and Drinkwater 1982)。また, これまでの先行研究では単一もしくは2ヶ所程度の部位でしか熱放散反応が検討されておらず, 性周期による影響が全身一様にみられるのか明らかではない。

2) 熱放散反応に及ぼす性差の影響

発汗反応は女性ホルモンによって抑制的に, 男性ホルモンによって促進的に影響を受けることが示されているが (Kawahata 1960), これまでの発汗反応の性差に関する研究では女性の性周期はほとんど考慮されておらず, また, 皮膚血管拡張反応に関する研究は少なく, その詳細には不明な点が多く残される。熱放散反応の性差は体力レベルを含む身体特性の違いに影響されることが示唆されることから (Drinkwater 1973), これらの影響が小さくなるような条件設定を行なう必要がある。また, 性差は温熱ストレスが大きくなるほど顕著になる可能性が示唆されていることから (Morimoto et al. 1967), 様々な温熱ストレスのレベルで比較すると性差の程度は異なる可能性が考えられる。さらに, 性差による影響が全身一様にみられるのか明らかではない。

3) 熱放散反応に及ぼす運動トレーニングの影響

女性において長期運動トレーニングは安静時および運動時にかかわらず発汗反応を改善することが示唆された (Kobayashi et al. 1980; Araki et al. 1981)。しかし, 長期運動トレーニングが安静時および運動時の皮膚血管拡張に及ぼす影響については検討されておらず, また, 運動時の体温と熱放散反応の対応関係にどう影響するのかも明らかではない。女性が長期間運動トレーニングを継続した場合の特徴として, 黄体期の女性ホルモン分泌の低下が挙げられる (Wallace et al. 1982; Bullen et al. 1984)。そのため, 女性の場合には運動トレーニングによる熱放散反応への影響は運動トレーニングそれ自体の影響とともに, 女性ホルモンを介した影響も関与すると考えられる。しかし, これまでの先行研究では性周期は考慮されておらず, 熱放散反応の改善に対する運動トレーニングと女性ホルモンの相互関係に関しては明らかではない。また, 長期運動トレーニングによる影響が様々な温熱ストレスのレベルで同様にみられるのかも明らかではない。

女性において短期運動トレーニングが熱放散反応に及ぼす影響について詳細に検討されていないため, 長期運動トレーニングによる影響と同様であるか明らかではない。男性において運動トレーニ

ングの効果がトレーニング開始後1週間以内に顕著にみられること (Patterson et al. 2004) と女性ホルモンが血漿量を減少させたり (Stephenson and Kolka 1988), 熱放散反応を抑制させたり (Stephenson and Kolka 1993) することを考え合わせると, 運動トレーニングを開始するときの女性ホルモンレベルはトレーニング効果に大きく影響する可能性が考えられる。さらに, 女性において短期運動トレーニングの効果はどのような過程で成立しそして消失するのかは明らかではない。

また, 運動トレーニングの効果に性差が存在するか否かについて検討したものはなく, その効果が女性と男性で同じであるか, また, 異なる温熱ストレスのレベルでも同様にみられるかは明らかではない。運動トレーニングが男性ホルモンの分泌を促進することが示されているもののその程度は女性と男性で異なることから (Zakas et al. 1994), 熱放散反応, 特に発汗反応の改善に性差の存在が考えられる。

さらに, これらの運動トレーニングによる影響が全身で同様にみられるのかは明らかではない。

これらの問題点を検討するために次の課題を設定し, 9つの実験を行なった。Fig. 6に本研究の実験構成を示す。

1. 性周期は安静時および常温環境下中等度運動時の熱放散反応にどのように影響するか。

(第4章; 実験 I-1 および実験 I-2)

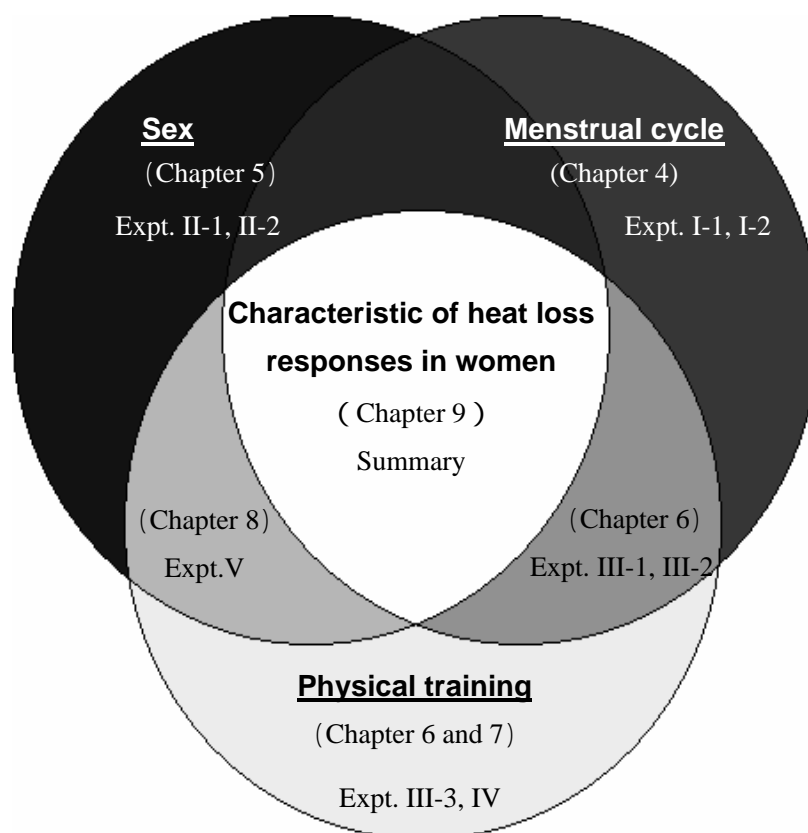


Figure 6. The experimental constitution of doctoral dissertation.

2. 性差は安静時および常温環境下漸増負荷運動時の熱放散反応にどのように影響するか。

(第5章; 実験 II-1 および実験 II-2)

3. 長期運動トレーニングは安静時, 常温環境下中等度運動および常温環境下漸増負荷運動時の熱放散反応にどのように影響するか。

(第6章; 実験 III-1, 実験 III-2 および実験 III-3)

4. 短期運動トレーニングは常温環境下中等度運動時の熱放散反応にどのように影響するか, また, その影響はどのような過程で消失するか。

(第7章; 実験 IV)

5. 運動トレーニングが熱放散反応に及ぼす影響に性差は存在するか。

(第8章; 実験 V)

以上の課題を解決することにより,

1. 性周期および性差は安静時および運動時の熱放散反応にどのように影響するか。

2. 運動トレーニングは上記の反応にどのように影響するか。

を明らかにすることとした。

第4章 実験 I 熱放散反応に及ぼす性周期の影響

実験 I-1 安静時

1. 目的

これまでに性周期による熱放散反応の影響について、身体の多部位を同時に測定して詳細に検討した研究はなく、明らかにされていない。そこで、実験 I-1 の目的は性周期が安静時における熱放散反応の経時変化および体温と熱放散反応の対応関係に及ぼす影響を身体の多部位において検討することとした。

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では健康な若年成人女性 10 名を被験者とし、Table I-1-1 にその身体特性を示した。被験者は少なくとも 3 年以上体育の授業以外で特別な運動を実施していない一般的な女性(非運動トレーニング者)であった。全ての被験者は女性ホルモンが含まれる経口避妊薬等を日頃摂取していなかった。また、被験者には事前に実験の目的、条件、測定内容およびその危険性について説明し、実験参加の同意を得た。さらに、実験当日においても各被験者に身体状況を尋ねるとともに実験内容を口頭で説明し、実験への参加を再度確認した。

2.2. 実験条件および手順

実験開始 3 ヶ月前の月経周期に基づき予想した卵胞中期(月経開始日より 6-9 日目)および黄体中期(月経開始日の 6-9 日前)に下肢温浴実験をそれぞれ実施した。

全ての実験は暑熱順化の影響を避けるために、2 月中旬から 4 月中旬にかけて実施した。また、日内リズムによる影響を最小限にするため、同一被験者は同一時間帯に下肢温浴実験に参加した。さらに、卵胞中期および黄体中期の実験の順序はランダムとし、卵胞中期から開始する者と黄体中期から開始する者との人数が同等になるように設定した。被験者には前日からのアルコールおよびカフェインの摂取、実験当日の強運動および実験の 2 時間前から摂食を禁止した。

被験者は実験室到着後適度な休息を挟み血液を採取された。その後、スポーツブラ、ショ

Table I-1-1. Physical characteristics of subject.

Variables	
Age (yr)	21.0 ± 0.1
Height (cm)	161.1 ± 1.9
Mass (kg)	55.3 ± 1.5
AD (m ²)	1.53 ± 0.02
AD/Mass (cm ² /kg)	279.1 ± 4.0
MSF (mm)	15.9 ± 1.0
%BF (%)	17.6 ± 1.6
$\dot{V}O_2\text{max}$ (ml/kg/min)	40.7 ± 1.4

Values are means ± SEM for 10 young untrained women. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, $\dot{V}O_2\text{max}$: maximal oxygen uptake.

ーツおよびショートパンツのみを着用し、身長、体重および皮下脂肪厚の測定を行ない、直腸温測定用プローブを挿入した。その後、環境温 28°C (45%RH) に設定した人工気象室 (TABAI ESPEC 社製, EZ-101-MCU13) に入り、少なくとも 40 分間の椅座位安静を保った。この間に測定用器具を装着した。安静時のベースラインデータを測定後、人工気象室内の環境温を 30°C (45%RH) に再設定し、被験者に湯温 42°C の下肢温浴 (膝から下を湯に浸す) を 60 分間実施した。

2.3. 測定項目

本実験に先立つ別の日に環境温 20°C (45%RH) に設定した人工気象室内で、Tシャツ、ショーツおよびハーフパンツのみを着用した被験者に対し、4 段階の負荷強度に設定した自転車運動を各 5 分間実施させ、最大下負荷漸増法で最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) を推定した。自転車運動の回転数は 50rpm と定めた。自転車運動中、心拍数 (HR) および酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) を自動ガス分析器 (Morgan社製, AX1595) により Breath by Breath 法で連続的に測定した。各運動強度の終了直前 1 分間の平均 $\dot{V}O_2$ と HR との対応関係から回帰式を求め、最大心拍数を 190 拍/分 (東京都立大学体力標準値研究会 2000) としてその式から $\dot{V}O_{2max}$ を推定した。

下肢温浴実験前に血液サンプルを正中静脈から 5cc 採取し、遠心分離器で血球成分と血漿成分に分けた後、血漿のみを抽出し冷凍保存した。全ての実験終了後、標識抗原を用いた競合阻害法のラジオイムノアッセイ法 (RIA 固相法) により血漿エストロン、エストラジオールおよびプロゲステロン濃度を測定した。

身長および体重 [Mettler-Toledo (Albstadt) GmbH 社製, D-72458 Albstadt: 5g 感度] から下記の推定式より体表面積 (AD) を算出した。

$$AD (m^2) = \text{体重 (kg)}^{0.444} \times \text{身長 (cm)}^{0.663} \times 0.008883 \quad (\text{Fujimoto and Watanabe 1969})$$

6 部位 (肩甲骨下, 脇腹, 上腕後面, 前腕前面, 大腿前面および下腿後面) の皮下脂肪厚を栄研式キャリパーで測定し、それらの平均値 (MSF) を求めた。また、下記の推定式から体密度および体脂肪率を算出した。

$$\text{体密度} = 1.0913 - 0.00116 \times (\text{上腕後部} + \text{肩甲骨下}) \quad (\text{Nagamine and Suzuki 1964})$$

$$\text{体脂肪率 (\%)} = (4.570 / \text{体密度} - 4.142) \times 100 \quad (\text{Brozek et al. 1963})$$

下肢温浴実験において発汗量 (SR), 皮膚血流量 (LDF), 直腸温 (T_{re}), 局所皮膚温 (T_{sl}), 汗の拍出頻度 (F_{sw}), 活動汗腺数 (ASG), 総体重減少量 (TWL), HR および血圧を測定した。

SR および LDF は前額, 胸, 背, 前腕および大腿の 5 部位で連続的に測定した。SR はカプセル換気法で測定し、側面に空気の入出口が 2ヶ所ある断面積 11.94cm² もしくは 7.065cm² (前額用) の円筒形カプセルをコロジオンで測定部位に装着し、一方の入出口からカプセル内に 1.5L/min の乾燥窒素

ガスを流入した。出口から流出する窒素ガスはカプセル内で蒸発した汗の湿度を含むため、その湿度変化を湿度計（Vaisara社製，HMP133Y）で測定し，SRを算出した。LDFはレーザードップラー血流計（Advance社製，ALF21）を用いて測定した。なお，このプローブは前述の発汗量測定用カプセルに隣接する部位にそれぞれ貼付し，皮膚表面の静脈あるいは毛包上に直接置かないよう留意した。LDFおよびSRのデータはデータ集録装置（BIOPAC Systems社製，MP100WS）を介し，パーソナルコンピュータ（Apple社製，Power Macintosh 7600/200）に50Hzで取り込み，いずれも1分間の平均値を計算した。また，発汗反応については胸，背および前腕の湿度変化データに基づき，同期性を確認しながら1分ごとの F_{sw} をカウントした（Inoue et al. 1999）。なお，LDFはベースラインデータを100とし，変化率（%LDF）を算出した。

T_{re} は直腸温用サーミスターセンサーを肛門から8-10cm挿入し， T_{sk} は前額，胸，背，前腕，手甲，大腿および足甲の7部位にサーミスターセンサーを貼付し，温度集録装置（Takara社製，Thermistor Data Logger）を介してパーソナルコンピュータ（EPSON社製 PC-286LS）に15秒ごとに取り込んだ。さらに平均皮膚温（ T_{sk} ）および平均体温（ T_b ）を次式で算出した。

$$T_{sk} (\text{°C}) = \text{前額} \times 0.07 + \text{胸} \times 0.18 + \text{背} \times 0.17 + \text{前腕} \times 0.15 + \text{手甲} \times 0.05 + \text{大腿} \times 0.25 + \text{足甲} \times 0.13$$

$$T_b (\text{°C}) = T_{re} \times 0.8 + T_{sk} \times 0.2$$

ASGはヨウ素デンプン反応（Inoue et al. 1991；Inoue and Shibasaki 1996）を用い，前額，胸，背，前腕および大腿の各発汗カプセルの隣接する部位で下肢温浴開始後50-54分目に測定した。各部位のSRを対応する部位のASGで除して単一汗腺あたりの汗出力（SGO）をそれぞれ算出した。TWLは実験前後の体重減少量から推定した（ $\text{g/m}^2/\text{h}$ ）。

HRは自動ガス分析器（Morgan社製，AX1595）に備え付けの心拍数測定器でモニターした。収縮期血圧および拡張期血圧は自動血圧計（Speidel and Keller KG社製，FRG）で10分ごとに測定し，平均血圧（MAP）を次式で算出した。

$$\text{MAP} (\text{mmHg}) = \text{拡張期血圧} + (\text{収縮期血圧} - \text{拡張期血圧}) / 3$$

$\dot{V}O_2$ は自動ガス分析器（Morgan社製，AX1595）を用いてBreath by Breath法で下肢温浴開始後30-34分目に測定した。

2.4. データ分析および統計処理

本実験と同様の条件〔環境温28°C，30%RH下で下肢温浴（湯温42°C）を50分間〕で測定された食道温（ T_{es} ）と本実験の T_{re} の経時変化を比較するとほぼ同じ変化を示し，かつ変化の程度（およそ0.5°C）も同等であった（Takamata et al. 2001）。また，運動時のSRが急激に増加するときの T_{es} と T_{re} の

変化を比較すると、 T_{es} は T_{re} より急激な上昇反応を示す(近藤 2001)。これらのことから体温と熱放散反応の対応関係を検討する際の指標として、体温が急激に変化する運動時ではその反応をより良く反映する T_{es} を用いる方が妥当であるのに対して(Tankersley et al. 1992; O'Brien et al. 1998)、体温が比較的緩やかな変化を示す下肢温浴時では T_{re} でも体温の指標となることが示唆される(Takamata et al. 2001)。また、本実験のように身体の一部を、直接、湯に浸すような下肢温浴では T_{sk} が大きく変化することから、その影響を加味する必要がある。以上のことから、本研究ではこれ以降、体温と熱放散反応の対応関係を検討する場合、下肢温浴時では体温の指標に T_b を用いることとする。一方、常温環境下中等度運動時において T_{sk} は大きく変化しないこと、また、性周期間や群間で差がみられないことから、後述の常温環境下中等度運動時では体温と熱放散反応の対応関係を検討する際の指標として T_{es} を用いることとする。また、全ての実験の各熱放散反応の分析に関して、各測定部位の平均値(それぞれ平均SRおよび平均%LDFとする)を求め、それを全身での反応として用いた。

下肢温浴時における T_b とSRおよび T_b と%LDFの対応関係から、各熱放散反応の T_b 閾値(それぞれ発汗開始および皮膚血管拡張閾値とする)および感受性を各被験者の性周期と部位ごとに求めた。発汗開始閾値は得られた回帰直線よりSRが急激に増加し始める時点での T_b を、また、皮膚血管拡張閾値は得られた回帰直線より%LDFが100%の時点の T_b を閾値とした。各対応関係における回帰直線はそれぞれの反応が比例的に増加し始めた時点からその増加が終了する時点までのデータより求め、それぞれ発汗および皮膚血管拡張反応の感受性とした。また、発汗反応に関しては T_b と F_{sw} および F_{sw} とSRの対応関係から求めた回帰直線に基づき、 F_{sw} が増加し始める T_b 閾値とそれぞれの回帰直線の勾配を被験者ごとに算出した。文献研究で述べたように、発汗反応の感受性に関しては T_b とSRの対応関係から求めた発汗反応の全体としての感受性(発汗反応の感受性)と、 F_{sw} とSRの対応関係から求めた発汗反応の末梢機構の感受性を区別して用いた。

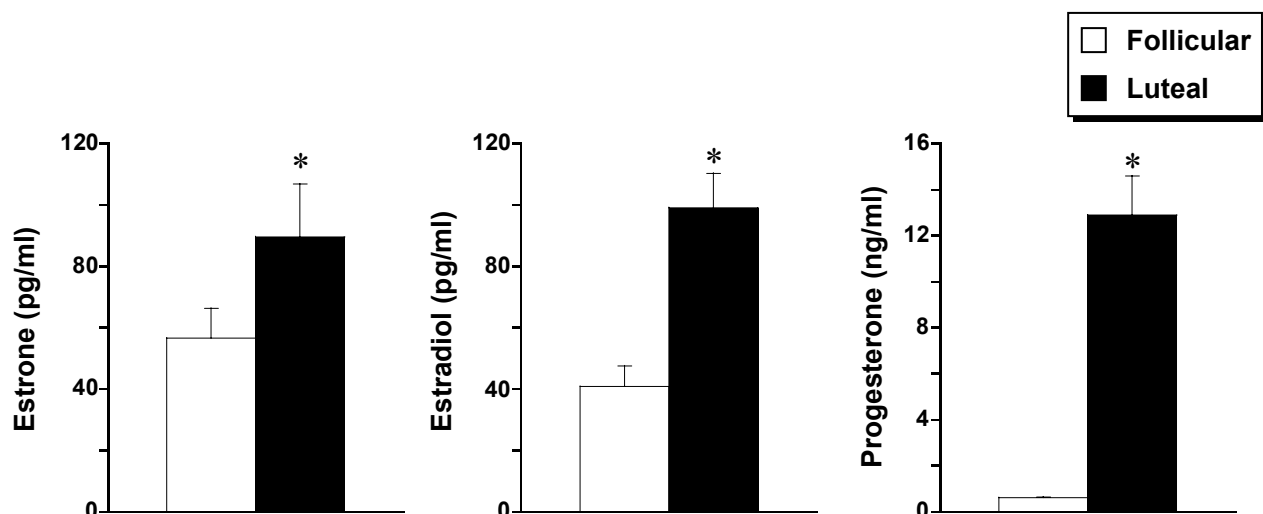


Figure I-1-1. Plasma levels of estrone, estradiol, and progesterone during mid-follicular and mid-luteal phase experiments in untrained women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

全てのデータは平均値±標準誤差（SEM）で示した。身体特性，ASG，SGO，血漿女性ホルモン濃度，各熱放散反応の体温閾値および感受性に及ぼす性周期の影響はpaired-*t* testを用いて検討した。また，SR，%LDF， T_{re} ， T_{sl} ， T_{sk} ，HRおよびMAPなどの各パラメータの経時変化における性周期差の有意差検定は，5分ごとのデータを被験者内計画による繰り返しのある二元配置分散分析を用いて処理した。いずれの検定においても有意水準は $p < 0.05$ に設定した。

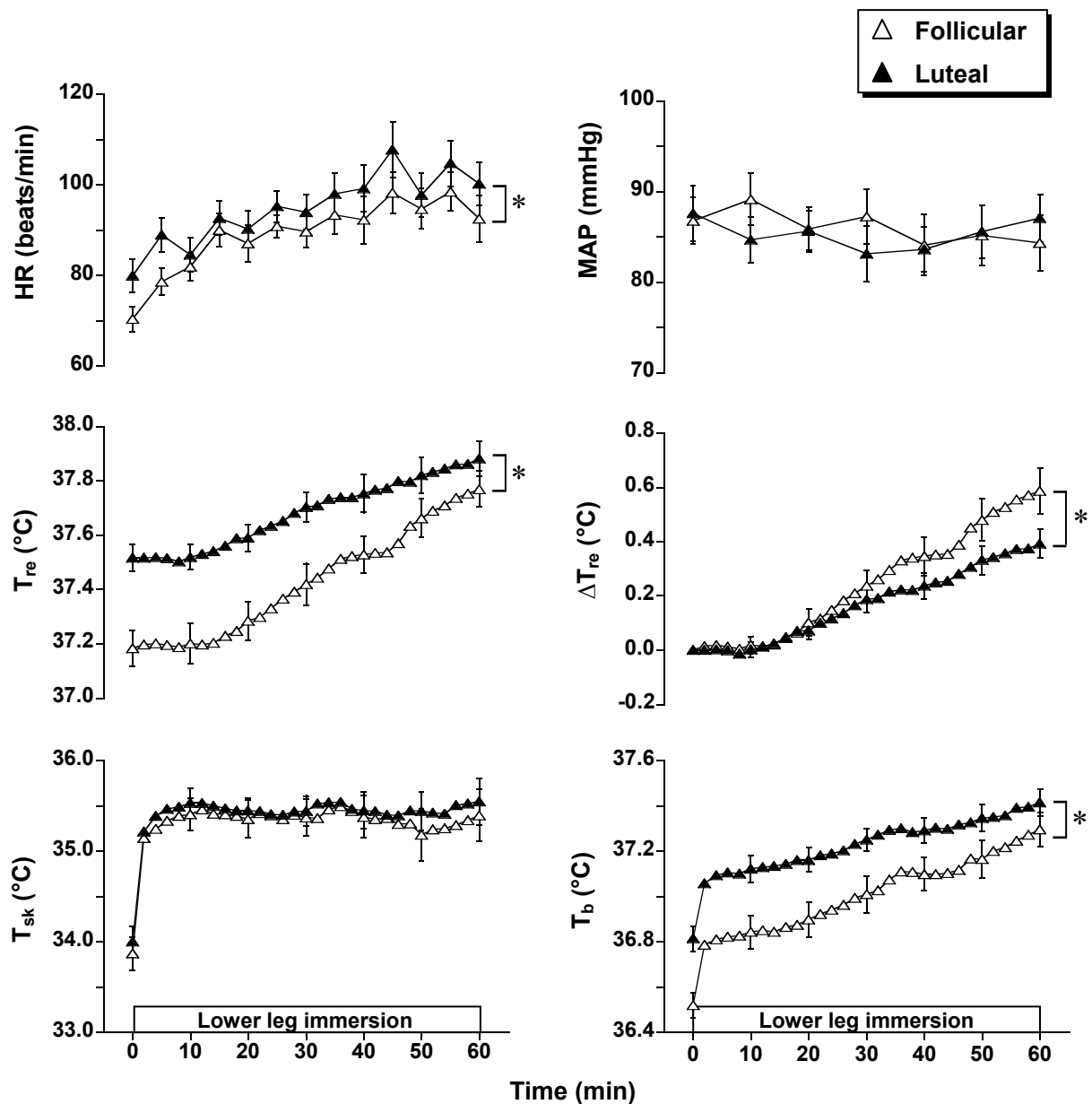


Figure I-1-2. The time courses of heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP), rectal temperature (T_{re}), change in rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature (T_{sk}), and mean body temperature (T_b) during lower leg immersion in mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between mid-follicular and mid-luteal phases of menstrual cycle, $p < 0.05$.

3. 結果

安静時血漿エストロン ,エストラジオールおよびプロゲステロンはいずれも卵胞中期と比較して黄体中期に有意に上昇した (Fig. I-1-1).

HR , T_{re} および T_b は安静時および下肢温浴中とも卵胞中期と比較して黄体中期に有意な高値を示した . また , 卵胞中期の安静時からの T_{re} の変化度 (ΔT_{re}) は黄体中期のそれよりも有意に大きかった . 一方 , MAP , T_{sk} および熱放散反応を測定した部位の T_{sl} には性周期の影響は認められなかった (Fig. I-1-2 および I-1-3). 下肢温浴時の $\dot{V}O_2$ から求めた熱産生量には性周期による影響はみられなかった (卵胞中期および黄体中期それぞれ 53 ± 2 および $49 \pm 3 \text{ W/m}^2$).

下肢温浴時における SR はいずれの部位においても性周期による影響は認められなかった (Fig. I-1-4).

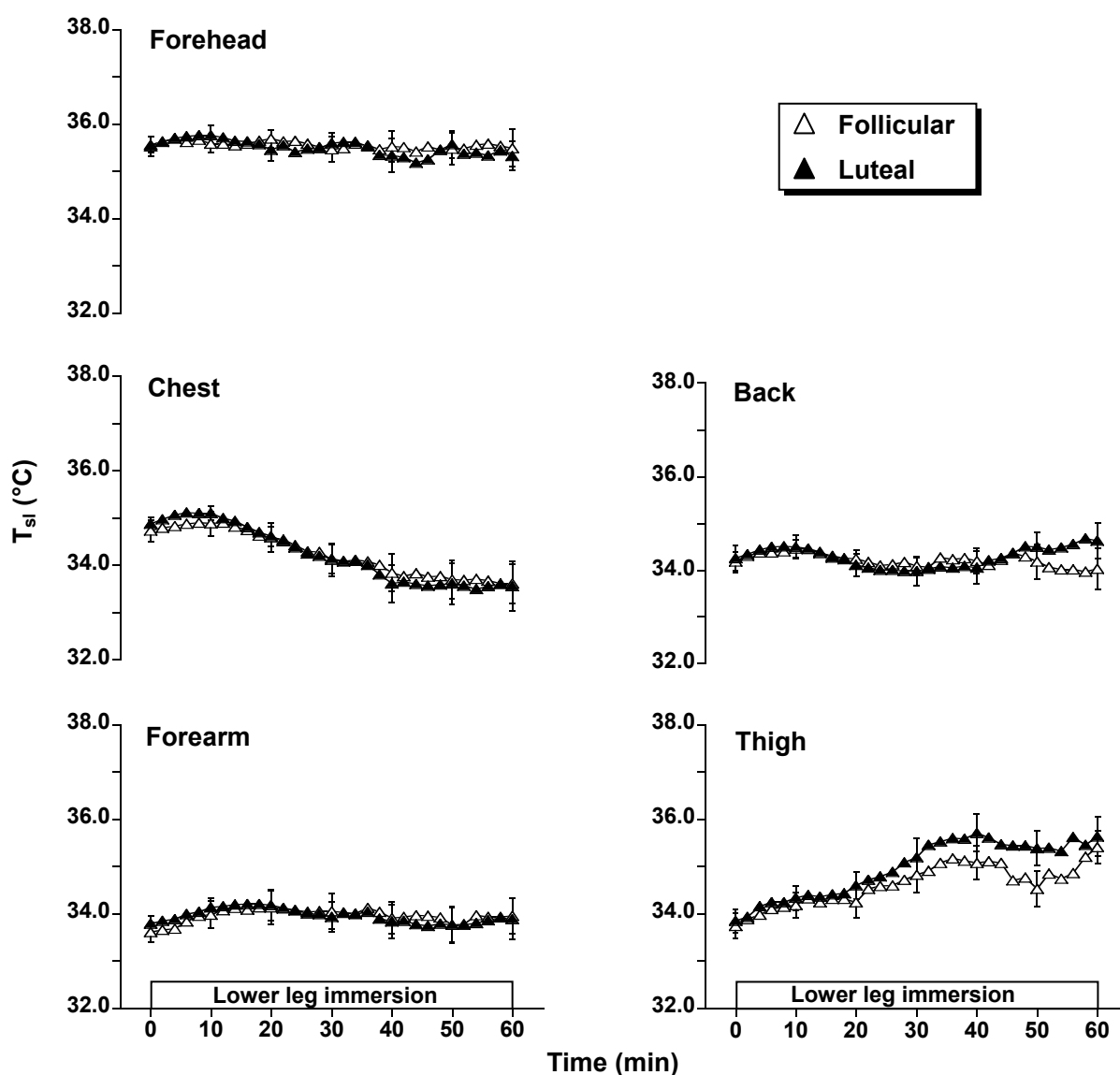


Figure I-1-3. The time courses of local skin temperature (T_{sl}) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh during lower leg immersion in mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means \pm SEM.

発汗開始閾値はいずれの部位においても卵胞中期よりも黄体中期で有意に高くなった。発汗反応の感受性はいずれの部位においても性周期の影響はみられなかった (Fig. I-1-5 および Table I-1-2)。 T_b と F_{sw} の対応関係から得られた回帰直線は黄体中期に卵胞中期よりも右方へシフトし、同一 T_b に対する F_{sw} は卵胞中期と比較して黄体中期で少なくなった (Fig. I-1-6 および Table I-1-3)。 F_{sw} と SR の対応関係から求めた発汗反応の末梢機構の感受性はいずれの部位においても性周期による影響はみられなかった (Fig. I-1-7 および Table I-1-4)。

下肢温浴終了直前の SR, ASG および SGO ともいずれの部位においても性周期の影響はみられなかった (Fig. I-1-8)。また, TWL にも性周期による影響は認められなかった (卵胞中期および黄体中期それぞれ 186 ± 11 および 186 ± 18 g/m²/h)。

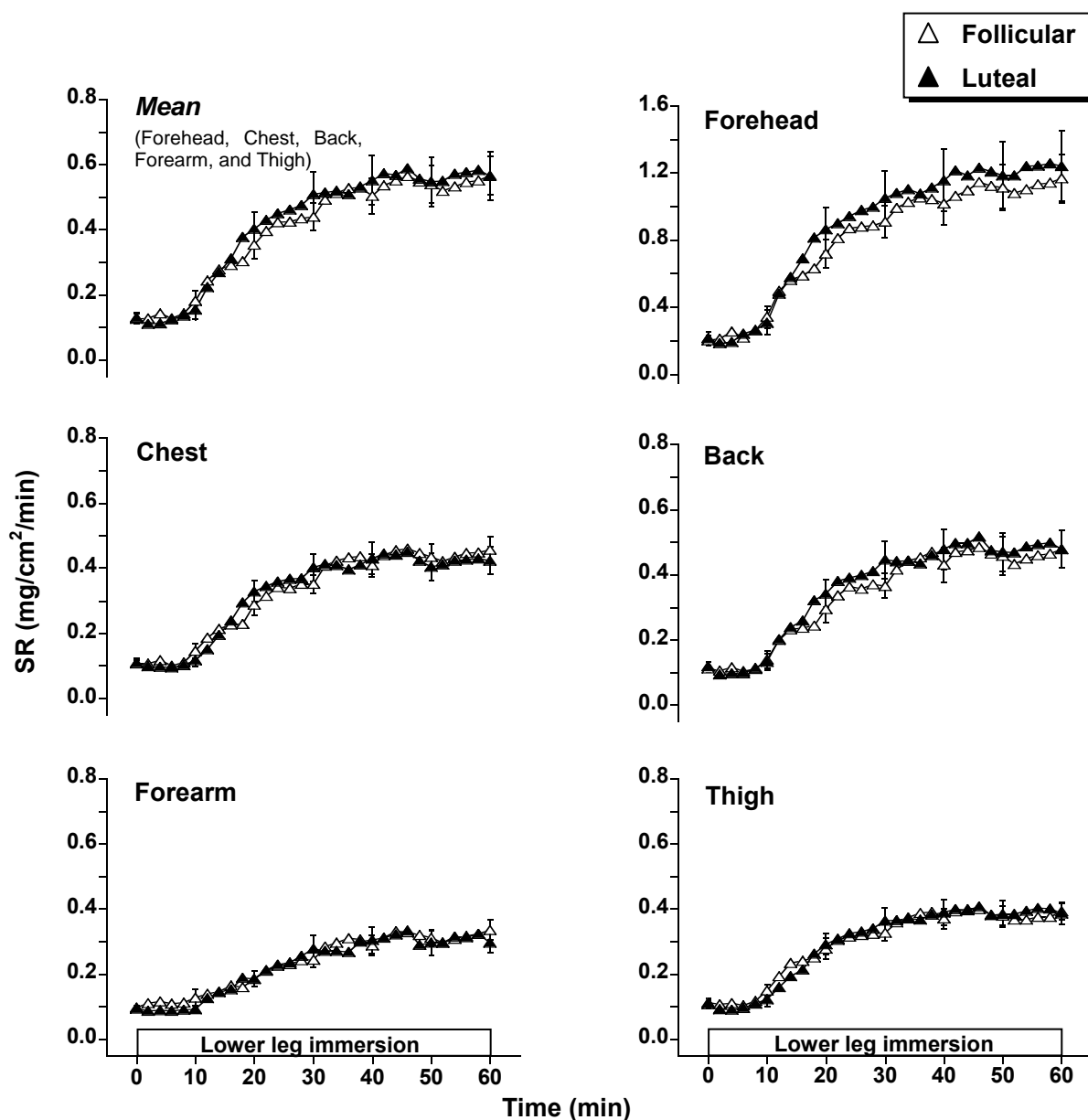


Figure I-1-4. The time courses of sweating rate (SR) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site during lower leg immersion in mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means \pm SEM.

下肢温浴時における平均%LDF, 前額, 胸, 前腕および大腿の%LDF には性周期による影響は認められなかったが, 背の%LDF は卵胞中期と比較して黄体中期で有意な高値を示した (Fig. I-1-9). 皮膚血管拡張閾値はいずれの部位においても卵胞中期よりも黄体中期で有意に高くなった. 皮膚血管拡張反応の感受性は背においてのみ卵胞中期よりも黄体中期で有意に大きくなった (Fig. I-1-10 および Table I-1-5).

4. 考察

実験 I-1 において, SR の経時変化は部位にかかわらず性周期の影響は観察されなかったものの, %LDF のそれは背でのみ性周期による影響がみられ, 卵胞中期より黄体中期で有意に大きくなった. 体温と熱放散反応の対応関係ではいずれの熱放散反応および部位において熱放散反応の体温閾値は卵胞中期と比較して黄体中期に有意に高くなった. また, 背において皮膚血管拡張反応の感受性は卵胞中期より黄体中期に有意に大きくなり, 性周期による影響に身体部位差の存在が示唆された.

本実験において観察された安静時の T_{re} および T_b における性周期の影響は先行研究と一致していた (Stephenson and Kolka 1985, 1993; Stachenfeld et al. 2000). これまでにラットの脳の視床下部にプロゲステロンを注入すると T_{re} が上昇すること (Marrone et al. 1976), また, ウサギにおいて末梢部位にプロゲステロンを投与すると視索前野の温ニューロンの活動は低下し, 冷ニューロンの活動は増加する

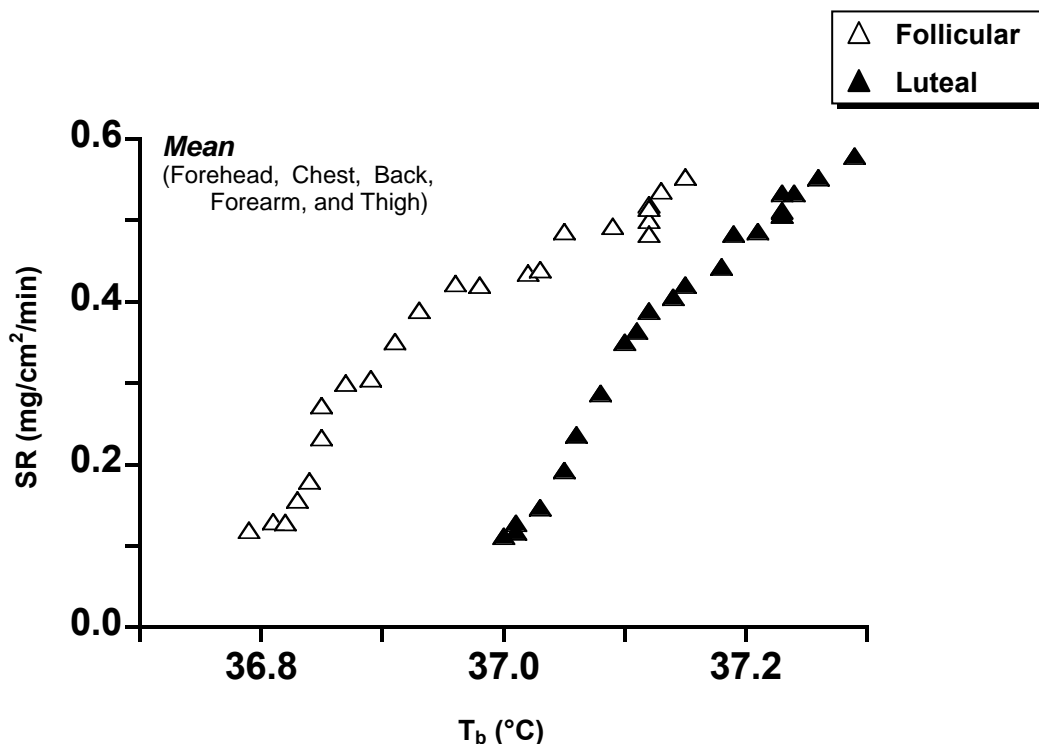


Figure I-1-5. Relationship between mean body temperature (T_b) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 10 young untrained women.

Table I-1-2. The onset of mean body temperature (T_b) for sweating (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and sweating rate at each body site.

	F	L
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)		
Forehead	36.84 \pm 0.07	37.10 \pm 0.06 *
Chest	36.83 \pm 0.08	37.12 \pm 0.06 *
Back	36.85 \pm 0.06	37.11 \pm 0.06 *
Forearm	36.83 \pm 0.08	37.14 \pm 0.06 *
Thigh	36.84 \pm 0.08	37.11 \pm 0.06 *
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	36.83 \pm 0.06	37.10 \pm 0.06 *
Sensitivity ((mg/cm²/min)/$^{\circ}\text{C}$)		
Forehead	2.23 \pm 0.38	3.61 \pm 0.97
Chest	0.94 \pm 0.13	1.24 \pm 0.25
Back	1.02 \pm 0.19	1.42 \pm 0.29
Forearm	0.54 \pm 0.09	1.00 \pm 0.25
Thigh	0.78 \pm 0.51	1.07 \pm 0.72
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	1.06 \pm 0.18	1.65 \pm 0.37

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different from mid-follicular phase, $p < 0.05$.

ことが報告され (Nakayama et al. 1975), 黄体期における体温の上昇は少なくともプロゲステロンの視索前野の温度感受性ニューロンへの直接もしくは間接的な作用と関係していることが示唆されている。ヒトにおいてもプロゲステロンは体温調節中枢へ直接的に (Brooks-Asplund et al. 2000), もしくは発熱性サイトカインやプロスタグランジンなどを介して間接的に作用し, 安静時の体温を 0.3°C から 0.5°C 程度上昇させることが報告されている (Charkoudian and Johnson 2000 ; Stephenson and Kolka 1993)。これらのことから, 本実験においてみられた黄体中期における安静時の体温上昇は血漿プロゲステロン濃度の上昇によって引き起こされたと推察される。

Table I-1-3. The onset of mean body temperature (T_b) for sweating (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and frequency of sweat expulsions.

	F	L
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)	36.70 ± 0.09	36.99 ± 0.08 *
Sensitivity ((sweat expulsions/min)/$^{\circ}\text{C}$)	48.0 ± 8.8	50.1 ± 6.7

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different from mid-follicular phase, $p < 0.05$.

多くの先行研究において安静時のTWL, SRおよびSkBFには性周期による影響はみられないと報告されている (Lehtovirta 1982; Kolka and Stephenson 1989). 本実験では, SRの経時変化はいずれの部位においても性周期の影響は観察されなかった. T_b とSRの対応関係から検討すると, 身体の部位にかかわらず発汗反応の感受性には性周期による影響はみられなかったものの, 発汗開始閾値は卵胞中期と比較して黄体中期に約 0.29°C 上昇した. この発汗開始閾値の上昇は受動的加温時に検討している先行研究の結果と一致している (Kolka and Stephenson 1989; Charkoudian and Johnson 1997). また, 本実験では T_b と F_{sw} の対応関係は卵胞中期と比較して黄体中期に右方シフトし, 一方で, F_{sw} とSRの対応関係から得られた発汗反応の末梢機構の感受性には性周期の影響はみられないことから, 性周期は発汗調節中枢の活動性に影響し, それにより発汗開始閾値は上昇することが推察される. また, 本実

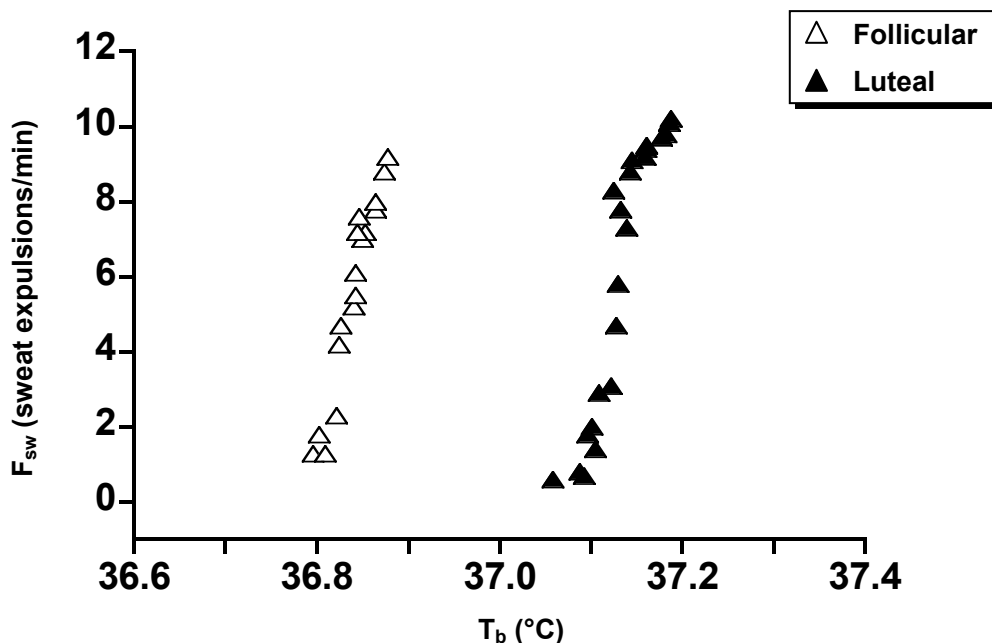


Figure I-1-6. Relationship between mean body temperature (T_b) and frequency of sweat expulsions (F_{sw}) during lower leg immersion in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means for 10 young untrained women.

Table I-1-4. Sensitivity of the relationship between frequency of sweat expulsion and sweating rate at each body site.

	F	L
Sensitivity ((mg/cm²/min)/(sweat expulsions/min))		
Forehead	0.113 ± 0.023	0.112 ± 0.022
Chest	0.051 ± 0.009	0.046 ± 0.007
Back	0.054 ± 0.009	0.053 ± 0.008
Forearm	0.034 ± 0.007	0.035 ± 0.007
Thigh	0.059 ± 0.005	0.036 ± 0.005
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.062 ± 0.011	0.056 ± 0.010

Values are means ± SEM for 10 young untrained women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

験において性周期が発汗反応の末梢機構の活動性に影響しないことに関しては、ASGおよびSGOに性周期の影響がみられなかったことから支持される。

本実験では、先行研究とは異なり性周期が熱放散反応に及ぼす影響を身体の様々な部位において検討した。その結果、全身の平均値でみるといずれの熱放散反応の経時変化やその感受性にも性周期の影響は認められなかったものの、各部位で検討すると背においてのみ経時変化の%LDF およびその反応の感受性は卵胞中期と比較して黄体中期に増加し、性周期の影響に身体部位差の存在が示された。この原因として次のことが考えられる。表面積の大きい背で皮膚血管拡張を増加させることは熱放散

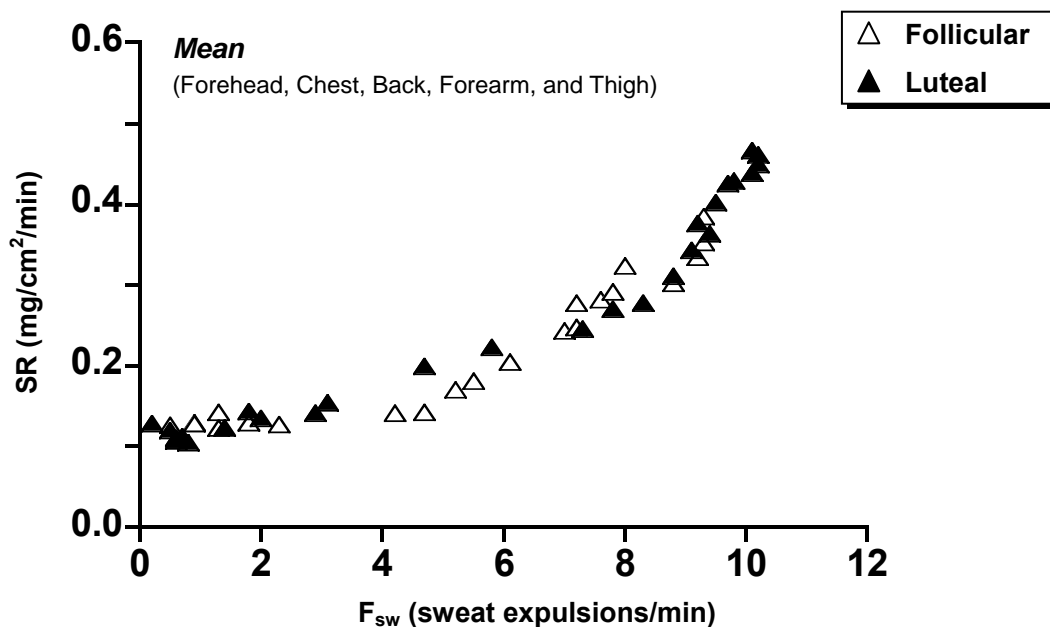


Figure I-1-7. Relationship between frequency of sweat expulsion (F_{sw}) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means for 10 young untrained women.

を効率的に促進すると考えられる。また、仮に四肢で同様の皮膚血管拡張の増加が生じた場合、四肢での血液のプーリングにより中心へ環流する血液量が低下し、血圧低下による熱失神の危険性が高くなると予想される。このようなことから、本実験で観察された性周期が熱放散反応に及ぼす影響における身体部位差は熱放散を効率的に、かつ安全に促進するという生理的意義を持つと考えられる。

皮膚血管拡張反応は血管収縮神経の活動の低下と能動的血管拡張システムによって調節されている (Johnson 1992)。この能動的血管拡張システムとその作用機序は確立されていないものの、それが発汗神経から放出される VIP や ANP などの共同伝達物質と関係していることが報告されている (Kellogg et al. 1999)。このように皮膚血管拡張反応は発汗反応と密接に関係していることから、本実験で観察された皮膚血管拡張反応の部位差は発汗神経由来の血管拡張物質に起因する可能性が推察される。しかし、本実験での背 SR は他の測定部位よりも顕著な高値を示しておらず、また、発汗

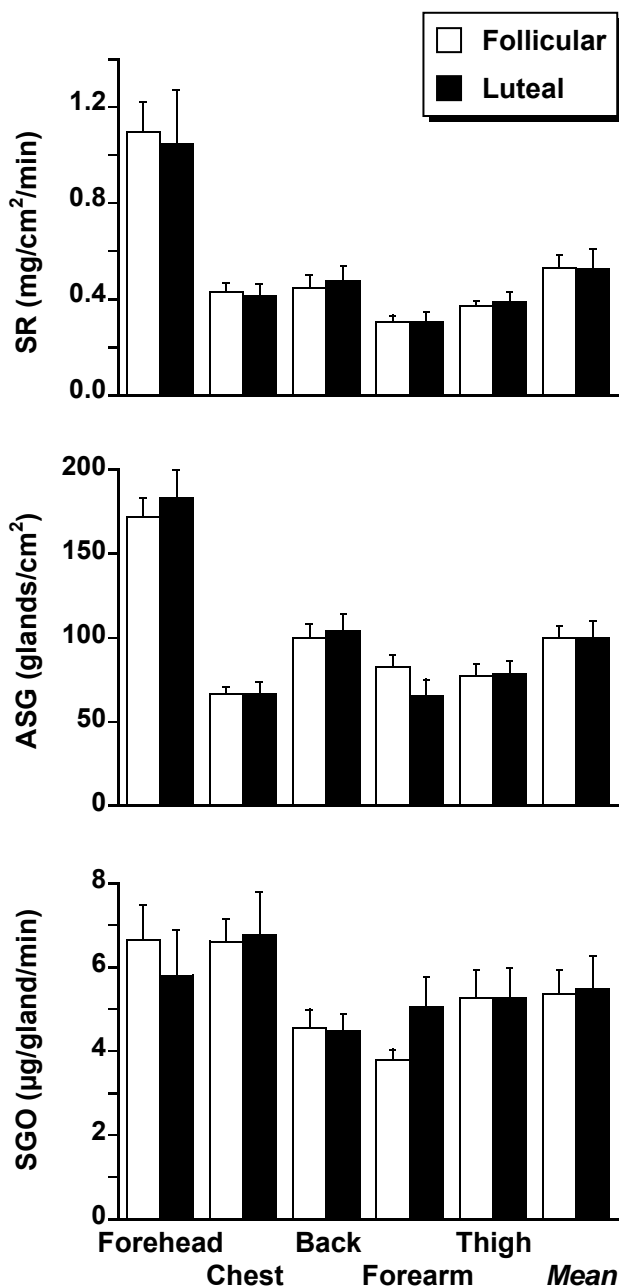


Figure I-1-8. Sweating rate (SR), active sweat glands (ASG), and sweat gland output (SGO) on the forehead, chest, back, forearm, thigh, and mean value of each body site from 50 to 54 min of lower leg immersion in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means \pm SEM.

神経由来の血管拡張物質に対する背の皮膚血管の感受性は前腕や大腿より有意に小さいことから (Shibasaki et al. 1999), 発汗神経由来の血管拡張物質に起因しているとは考えにくい。

Charkoudian et al. (1999) は経口避妊薬を用いて擬似的に卵胞期 (低ホルモン期) と黄体期 (高ホルモン期) を設定し, その際の前腕局所加温時の皮膚血管拡張反応を比較検討すると, T_{sk} が 38°C 以上の場合に低ホルモン期より高ホルモン期で皮膚血流量が増加することを報告している。局所加温時の皮膚血管拡張は主に一酸化窒素 (NO) に依存して引き起こされることと (Kellogg et al. 1999), エストロゲンがNO依存の血管拡張を亢進することから (Gilligan et al. 1994a, 1994b), 本研究においても性周期に伴うエストロゲンの増減が末梢でNOを介して皮膚血管拡張反応に影響した可能性が考え

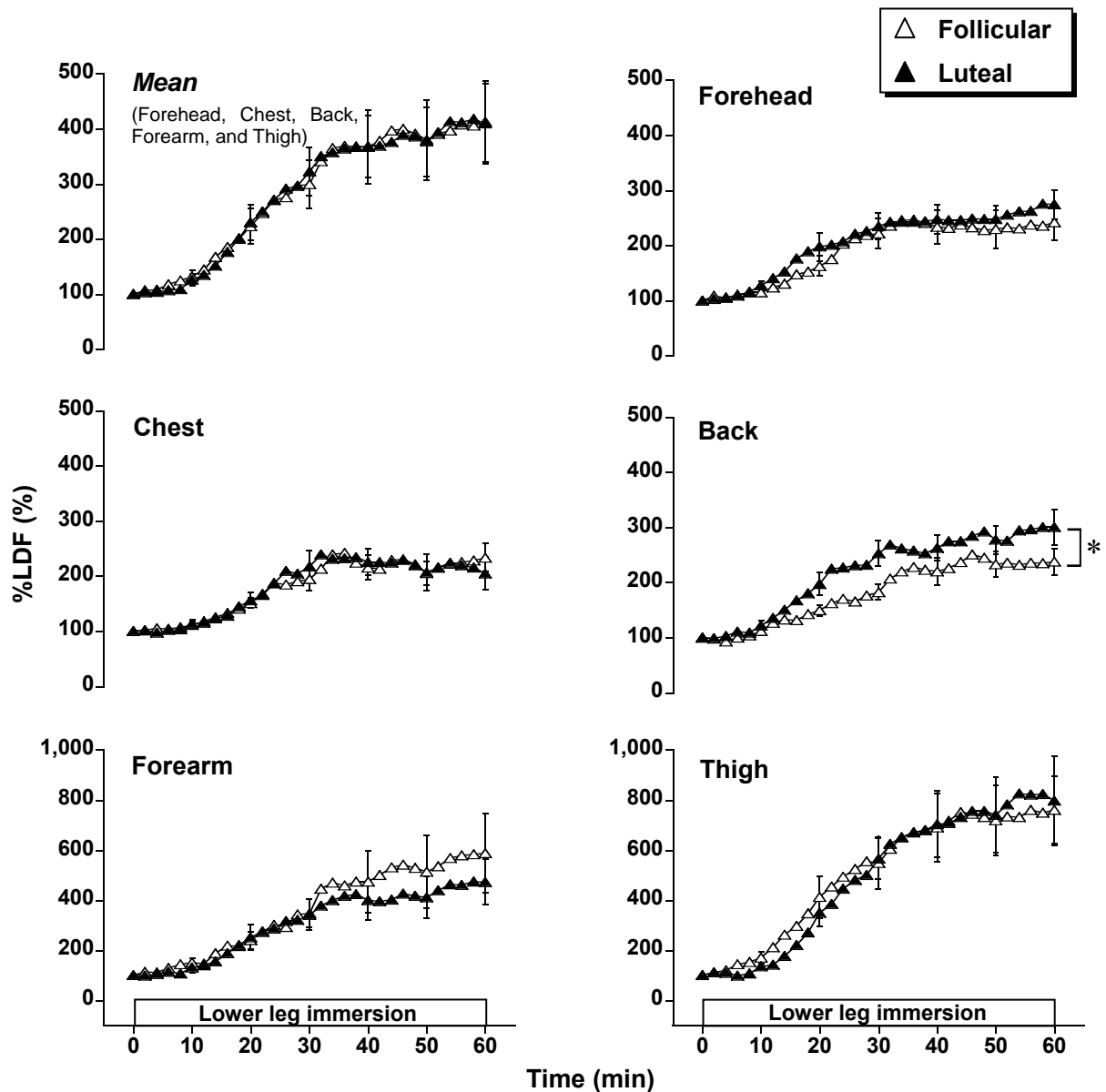


Figure I-1-9. The time courses of skin blood flow (%LDF) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site during lower leg immersion in mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between mid-follicular and mid-luteal phases of menstrual cycle, $p < 0.05$.

られる．本実験で用いた下肢温浴では，前腕部の T_{sk} は高温期と低温期ともに 34.0°C 程度であり，この低い T_{sk} が前腕部における皮膚血管拡張の性周期に伴う変化を抑制したものと推察される．下肢温浴時の T_{sk} は前額で 35.5°C ，胸で 34.3°C および大腿で 34.8°C であったことから，皮膚血管拡張の程度に性周期の影響がみられなかった前額，胸および大腿にも上記の推察が適用できる．一方，性周期に伴い皮膚血管拡張反応が変化した背の T_{sk} (34.2°C)も 38°C に達していなかった．背と他の部位との相違は， T_{sk} がエストロゲンとNOを介する末梢性の皮膚血管拡張反応に及ぼす影響は身体部位で異なり，その影響の始まる T_{sk} の閾値が他の部位より背で低いことを示唆しているのかもしれない．本実験の結果からそのメカニズムを決定することは困難であるが，黄体中期において女性ホルモンが背の皮膚血管拡張反応の感受性に影響した可能性が示唆される．

T_b と%LDFの対応関係から得られた皮膚血管拡張閾値は発汗開始閾値の変化と同様の変化を示した．Charkoudian and Johnson (1997, 2000) は性周期に伴う黄体期の皮膚血管拡張閾値の上昇がプレチリウム(ノルアドレナリン放出の遮断薬)処置部位と非処置部位において同様に観察されたことから，女性ホルモン(主にプロゲステロン)が体温調節中枢に作用し，それによって能動的血管拡張システムの体温閾値は高温側にシフトすることを示唆している．したがって，本実験における皮膚血管拡張閾値の上昇も女性ホルモン(主にプロゲステロン)が体温調節中枢に作用し，能動的血管拡張システムを介して引き起こされたことが推察される．本実験と先行研究の結果から，発汗および皮膚血管拡張反応とも女性ホルモンが視床下部の体温調節中枢に作用することで，熱放散反応の体温閾値は黄体中期に上昇することが示唆される．

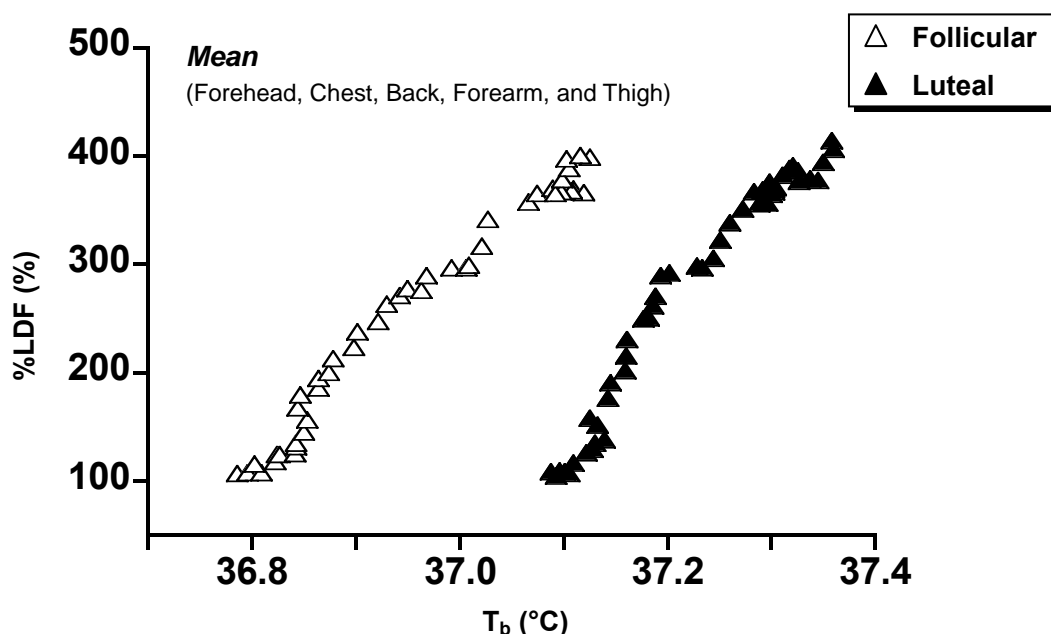


Figure I-1-10. Relationship between mean body temperature (T_b) and skin blood flow (%LDF) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means for 10 young untrained women.

Table I-1-5. The onset of mean body temperature (T_b) for vasodilation (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and skin blood flow at each body site.

	F	L
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)		
Forehead	36.75 \pm 0.08	37.04 \pm 0.07 *
Chest	36.80 \pm 0.07	37.03 \pm 0.09 *
Back	36.79 \pm 0.07	37.04 \pm 0.06 *
Forearm	36.73 \pm 0.08	37.03 \pm 0.08 *
Thigh	36.78 \pm 0.07	37.06 \pm 0.06 *
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	36.77 \pm 0.07	37.04 \pm 0.07 *
Sensitivity ($\%/^{\circ}\text{C}$)		
Forehead	510 \pm 75	888 \pm 224
Chest	675 \pm 147	741 \pm 130
Back	575 \pm 90	943 \pm 129 *
Forearm	1464 \pm 346	1697 \pm 283
Thigh	2486 \pm 441	2705 \pm 529
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	1142 \pm 220	1395 \pm 259

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different from mid-follicular phase, $p < 0.05$.

5. 要約

本実験では女性の熱放散特性を明らかにするため、若年女性 10 名の卵胞中期および黄体中期に環境温 30 $^{\circ}\text{C}$ (45%RH) 下において 60 分間の下肢温浴 (湯温 42 $^{\circ}\text{C}$) を負荷し、性周期が安静時の発汗および皮膚血管拡張反応に及ぼす影響を身体の 5 部位 (前額, 胸, 背, 前腕および大腿) において検討した。

血漿女性ホルモン (エストロン, エストラジオールおよびプロゲステロン) 濃度は卵胞中期より黄体中期で有意に上昇した。安静および下肢温浴時の T_{re} および T_b はいずれも卵胞中期と比較して黄体中期で有意に上昇した。SR にはいずれの部位においても性周期の影響は認められなかった。%LDF は背においてのみ性周期の影響がみられ、卵胞中期よりも黄体中期に有意な高値を示した。また、発汗開始および皮膚血管拡張閾値は卵胞中期より黄体中期で有意に上昇した。さらに、発汗反応の末梢機構の感受性には性周期による影響はみられなかったものの、皮膚血管拡張反応では背においてその感受性が卵胞中期よりも黄体中期で有意に増加した。

以上の結果から、若年女性において安静時における熱放散反応は性周期に影響され、体温閾値が卵胞期よりも黄体期に上昇するとともに、背における皮膚血管拡張反応の感受性も変容することが示唆された。

実験 I-2 運動時

1. 目的

運動時の熱放散反応は非温熱性要因による影響も受けるため(近藤 2002), 実験 I-1 の安静時にみられた熱放散反応の性周期差の結果は運動時のそれと異なる可能性が考えられる。また, 先行研究から常温環境下での中等度運動時では性周期による影響が顕著にみられる可能性が予想されるものの(Fukuoka et al. 2002; Horvath and Drinkwater 1982), これまで明らかにされていない。そこで, 実験 I-2 の目的は性周期が常温環境下中等度運動時における熱放散反応の経時変化および体温と熱放散反応の対応関係に及ぼす影響を明らかにすることとした。

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では健康な若年成人女性 10 名を被験者とし, Table I-2-1 にその身体特性を示した。その他の点は実験 I-1 の 2.1. (P.39) と同様であった。

2.2. 実験条件および手順

実験開始 3 ヶ月前の月経周期に基づき予想した卵胞中期(月経開始日より 6-9 日目)および黄体中期(月経開始日の 6-9 日前)に運動実験をそれぞれ実施した。

被験者 10 名の内 6 名の実験は 4 月上旬から 5 月中旬に, 残りの 4 名の実験は 10 月中旬から 11 月中旬に, いずれも午前 9 時から 12 時もしくは午後 13 時から 16 時の時間帯に実施した。また, 日内リズムによる影響を最小限にするため, 同一被験者は同一時間帯の運動実験に参加した。卵胞中期および黄体中期の実験の順序はランダムとし, 卵胞中期から開始する者と黄体中期から開始する者との人数が同等になるように設定した。実験実施にあたる注意事項は実験 I-1 の 2.2. (P.39) と同様であった。

被験者は実験室到着後適度な休憩を挟み血液を採取された。その後, スポーツブラ, ショーツおよびショートパンツのみを着用し, 食道温測定用プローブを挿入した。体重および身長, 皮下脂肪厚を測定後, 環境温 25°C (45%RH) に設定した前述の(P.40)人工気象室の前室に入室した。発汗量測定用のカプセルを貼付した後に同環境条件の人工気象室に移動し, 半仰臥位姿勢でペダ

Table I-2-1. Physical characteristics of subject.

Variables	
Age (yr)	21.1 ± 0.3
Height (cm)	159.5 ± 1.7
Mass (kg)	52.2 ± 2.3
AD (m²)	1.48 ± 0.03
AD/Mass (cm²/kg)	286.2 ± 6.0
MSF (mm)	15.0 ± 1.6
%BF (%)	17.7 ± 1.4
$\dot{V}O_2$max (ml/kg/min)	36.7 ± 1.1

Values are means ± SEM for 10 young untrained women. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, $\dot{V}O_2$ max: maximal oxygen uptake.

リングができるように設定したリクライニングシートに座り少なくとも 50-60 分間の椅座位安静を維持した。この間に測定用器具を装着した。足を自転車エルゴメーター (COMBI社製, Cardio Exercise cycle SYSTEM-5RH) のペダルにかけた状態で安静時ベースラインデータを測定し、その後、最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) の 50% に相当する強度の半仰臥位自転車運動を 30 分間実施した。

2.3. 測定項目

本実験に先立つ別の日に環境温 20°C (45%RH) に設定した人工気象室内で、実験 I-1 と同様の方法で $\dot{V}O_{2max}$ を推定し (P.40)、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と運動強度の対応関係から、50% $\dot{V}O_{2max}$ に相当する絶対運動強度を決定した。

運動実験前の血漿女性ホルモン (エストロン, エストラジオールおよびプロゲステロン) は実験 I-1 (P.40) と同様の方法を用いて分析した。

身長および体重の測定方法および体表面積 (AD) の算出方法は実験 I-1 と同様とした (P.40)。

7 部位 (肩甲骨下, 胸, 脇腹, 上腕後面, 前腕前面, 大腿前面および下腿後面) の皮下脂肪厚を栄研式キャリパーで測定し、それらの平均値 (MSF) を求めた。また、実験 I-1 (P.40) に示した式を用いて体密度および体脂肪率を算出した。

運動実験において胸, 背, 前腕および大腿の発汗量 (SR), 胸, 背および前腕の皮膚血流量 (LDF), 食道温 (T_{es}), 局所皮膚温 (T_{sl}), 汗の拍出頻度 (F_{sw}), 活動汗腺数 (ASG), 総体重減少量 (TWL), 心拍数 (HR), 血圧および運動終了時の $\dot{V}O_2$ を測定した。また、 T_{es} および T_{sl} を除く測定方法は実験 I-1 (P.40-41) で示したものと同様とした。これ以降に実験 I-1 で示していない項目について説明する。

T_{es} は熱電対 (銅 - コンスタント) を使用した自作の T_{es} 用プローブを鼻孔より食道に身長 の 4 分の 1 の長さまで挿入して測定し、温度収録装置 (Yokogawa社製, DA100) を介してパーソナルコンピュータ (FUJITSU社製, FMV-6650 NU7/L) に 2 秒ごとに取り込んだ。 T_{sl} は前額, 胸, 腹, 背, 前腕, 手甲, 手掌, 大腿, 下腿および足甲の 10 部位にサーミスターセンサーを貼付し、温度収録装置 (Takara社製, K722) を介してパーソナルコンピュータ (EPSON社製, PC-286LS) に 15 秒ごとに取り込んだ。さらに次式を用いて平均皮膚温 (T_{sk}) および平均体温 (T_b) を算出した。

$$T_{sk} (\text{°C}) = \text{前額} \times 0.07 + \text{腹} \times 0.35 + \text{前腕} \times 0.14 + \text{手甲} \times 0.05 + \text{大腿} \times 0.19 + \text{下腿} \times 0.13 + \text{足甲} \times 0.07$$

(Hardy and Dubois 1938)

$$T_b (\text{°C}) = T_{es} \times 0.9 + T_{sk} \times 0.1$$

2.4. データ分析および統計処理

運動時における T_{es} と SR および T_{es} と安静時からの皮膚血流量の変化度 (%LDF) の対応関係における回帰直線の勾配 (熱放散反応の感受性) および発汗開始 T_{es} 閾値 (発汗開始閾値), ならびに皮膚血管拡張 T_{es} 閾値 (皮膚血管拡張閾値) を各被験者の性周期と部位ごとにそれぞれ求めた。発汗開始閾値は汗が出始めた時点での T_{es} を, 皮膚血管拡張閾値は %LDF が急激に増加し始めた時点の T_{es} とした。

各対応関係における回帰直線および T_b と F_{sw} および F_{sw} とSRの対応関係は実験I-1と同様の方法で求めた (P.42).

全てのデータは平均値±標準誤差 (SEM)で示した。身体特性, ASG, 単一汗腺あたりの汗出力 (SGO), 血漿女性ホルモン濃度, 各熱放散反応の閾値および感受性に及ぼす性周期の影響はpaired-*t* testを用いて検討した。また, SR, %LDF, T_{es} , T_{sl} , T_{sk} , HRおよび平均血圧 (MAP) の各パラメータの経時変化における性周期差の有意差検定は, 5分ごとのデータを被験者内計画による繰り返しのある二元配置分散分析を用いて処理した。いずれの検定においても有意水準は $p < 0.05$ に設定した。

3. 結果

安静時血漿エストロン, エストラジオールおよびプロゲステロン濃度はいずれも卵胞中期と比較して黄体中期に有意に上昇した (Fig. I-2-1)。

安静時および運動時のHR, MAP, T_{sk} および背を除く熱放散反応を測定した部位の T_{sl} には性周期の影響は認められなかったが, T_{es} および T_b は卵胞中期よりも黄体中期に有意に高くなった (Fig. I-2-2およびI-2-3)。また, 安静時からの T_{es} の変化度 (ΔT_{es}) は卵胞中期より黄体中期で有意に大きくなったため, 安静時にみられた T_{es} の性周期による差は運動終了時で拡大した (Fig. I-2-2)。さらに, 運動時の背の T_{sl} は卵胞中期より黄体中期で有意な高値を示した (Fig. I-2-3)。運動終了時の VO_2 には性周期の影響は認められなかった (卵胞中期および黄体中期それぞれ 1015 ± 39 および 990 ± 43 ml/min)。

運動時のSRは卵胞中期と比較して黄体中期に有意な低値を示した。また, 発汗開始閾値は卵胞中期よりも黄体中期で有意に高くなった (Fig. I-2-4)。さらに, T_{es} とSRの対応関係から得られた発汗反応の感受性は卵胞中期よりも黄体中期で有意に低くなった。これらの性周期の影響はいずれの部位に

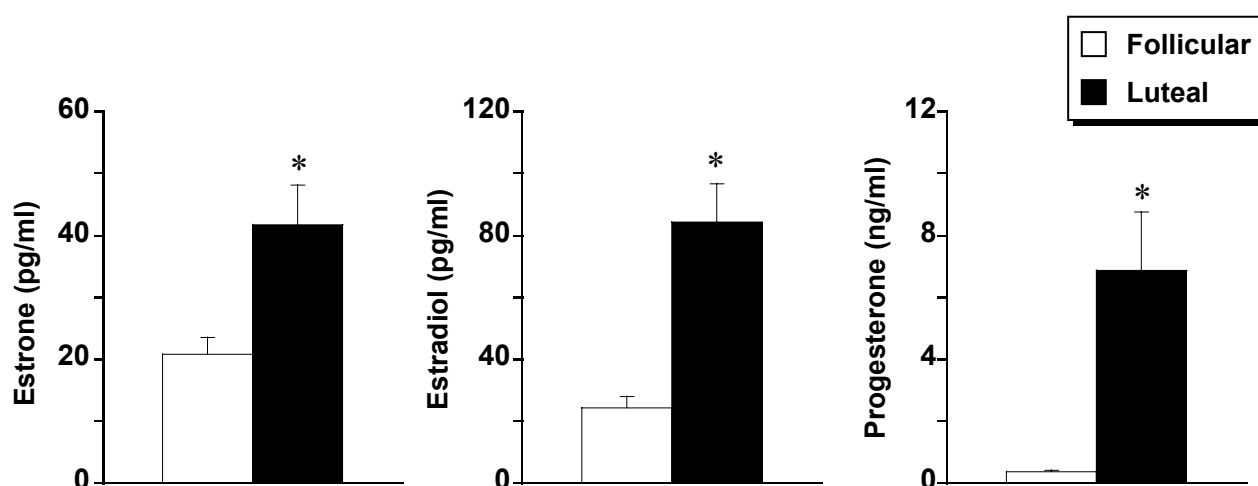


Figure I-2-1. Plasma levels of estrone, estradiol, and progesterone during mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means ± SEM.

* Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

においてもほぼ同様に観察された (Fig. I-2-5 およびTable I-2-2). T_b と F_{sw} の対応関係から得られた回帰直線は黄体中期に卵胞中期よりも右方へシフトし, 同一 T_b に対する F_{sw} は卵胞中期と比較して黄体中期で少なくなった (Fig. I-2-6 およびTable I-2-3). F_{sw} とSRの対応関係から求めた発汗反応の末梢機構の感受性は性周期の影響はみられなかった (Fig. I-2-7 およびTable I-2-4).

運動終了直前のSRは全ての部位において卵胞中期より黄体中期で有意に低くなった. ASGは前腕においてのみ卵胞中期より黄体中期で有意な低値を示し, SGOには性周期の影響はみられなかった

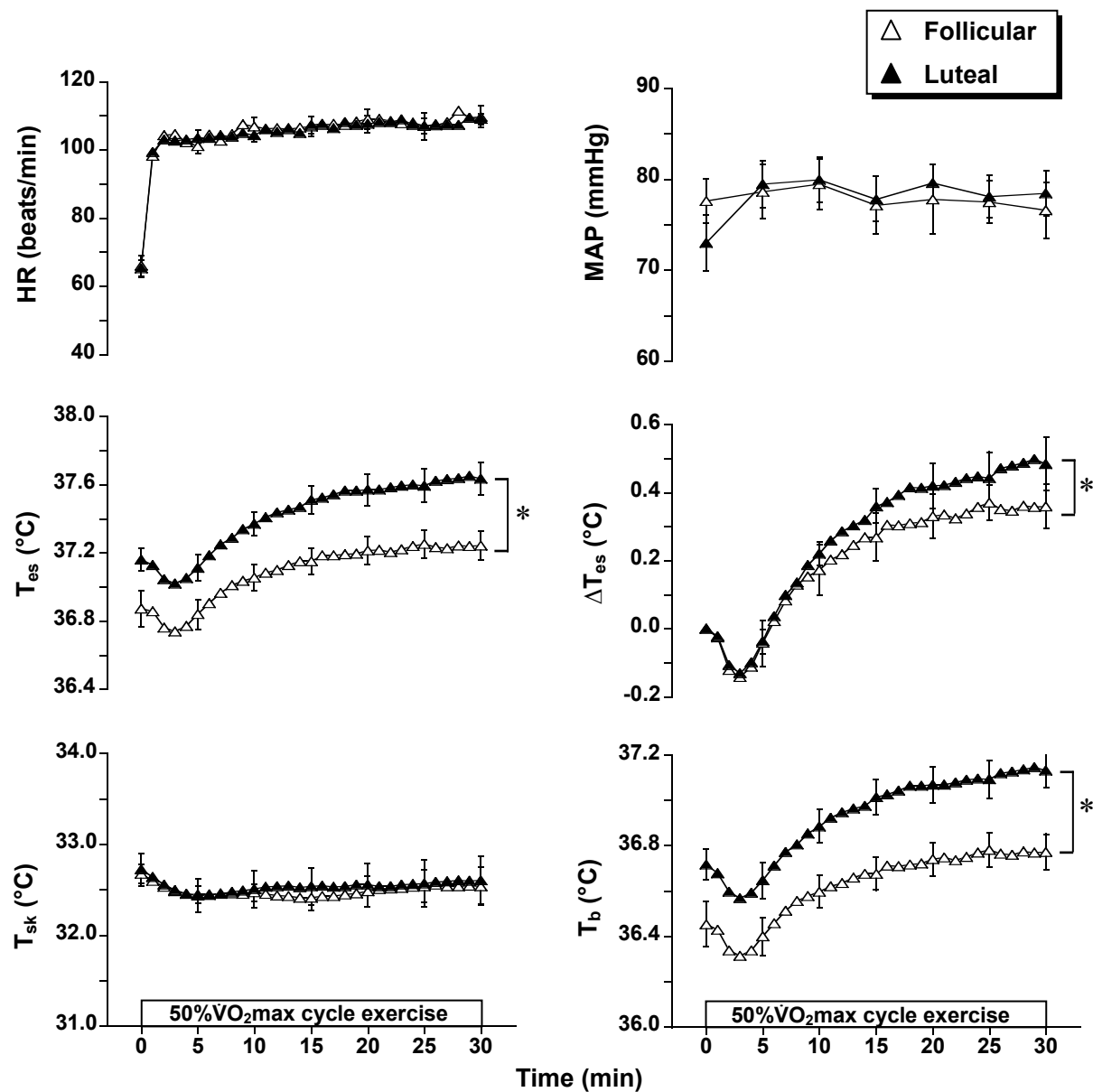


Figure I-2-2. The time courses of heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP), esophageal temperature (T_{es}), change in esophageal temperature (ΔT_{es}), mean skin temperature (T_{sk}), and mean body temperature (T_b) during 50% $\dot{V}O_2$ max cycle exercise in mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between mid-follicular and mid-luteal phases of menstrual cycle, $p < 0.05$.

(Fig. I-2-8). TWLは卵胞中期と比較して黄体中期で有意な低値を示した (卵胞中期および黄体中期それぞれ 263 ± 29 および 240 ± 23 $\text{g/m}^2/\text{h}$).

平均%LDFおよび各部位の%LDFは発汗反応でみられた性周期の影響と同様に卵胞中期よりも黄体中期で有意な低値を示した (Fig. I-2-9). また, 皮膚血管拡張閾値は卵胞中期よりも黄体中期で有意に高くなり, T_{es} と%LDFの対応関係から得られた皮膚血管拡張反応の感受性は卵胞中期よりも黄体中期で有意に低くなった (Fig. I-2-10). これらの性周期の影響はいずれの部位においてもほぼ同様に観察された (Table. I-2-5).

4. 考察

実験 I-2 において, SR および%LDF の経時変化は部位にかかわらず卵胞中期と比較して黄体中期で有意に低下し, 体温の上昇の程度は卵胞中期よりも黄体中期で有意に大きくなり, 生体の負担がこの期で大きくなることが示唆された. 体温と熱放散反応の対応関係からこの性周期に伴う熱放散反応の抑制は発汗開始および皮膚血管拡張閾値が有意に高くなること, また, 両反応の感受性が有意に小さくなることに起因することが示された.

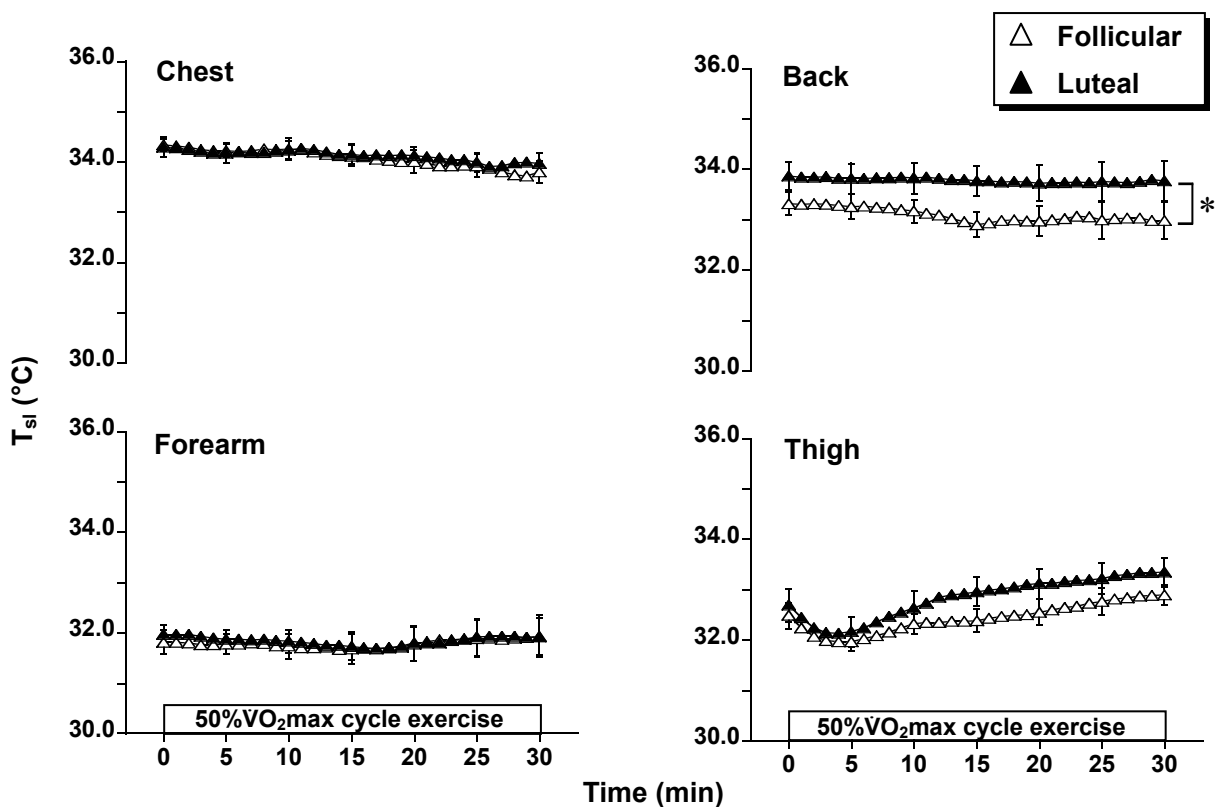


Figure I-2-3. The time courses of local skin temperature (T_{si}) on the chest, back, forearm, and thigh during $50\%VO_2\text{max}$ cycle exercise in mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between mid-follicular and mid-luteal phases of menstrual cycle, $p < 0.05$.

本実験において,SRおよび%LDFの経時変化は部位にかかわらず卵胞中期と比較して黄体中期に有意に低下した.この黄体中期にみられた両熱放散反応の低下について体温と熱放散反応の対応関係から検討すると,発汗開始および皮膚血管拡張閾値は卵胞中期と比較して黄体中期に有意に上昇することが示された.そのためこれらの体温閾値の上昇が黄体中期における熱放散反応の低下の一因であったと推察される.この体温閾値の上昇に関して,性周期が運動時の熱放散反応の閾値に及ぼす影響を検討した先行研究および実験I-1の結果と一致していた(Charkoudian and Johnson 1997, 1999a, 1999b, 2000; Fukuoka et al. 2002; Grucza et al. 1993; Hessemer and Brück 1985a, 1985b; Hirata et al. 1986; Kolka and Stephenson 1989, 1997; Tenaglia et al. 1999).次に,性周期に伴うこれらの閾値の変化の原因を検討してみる.まず,発汗開始および皮膚血管拡張閾値に影響する要因として T_{sk} が考えられている.

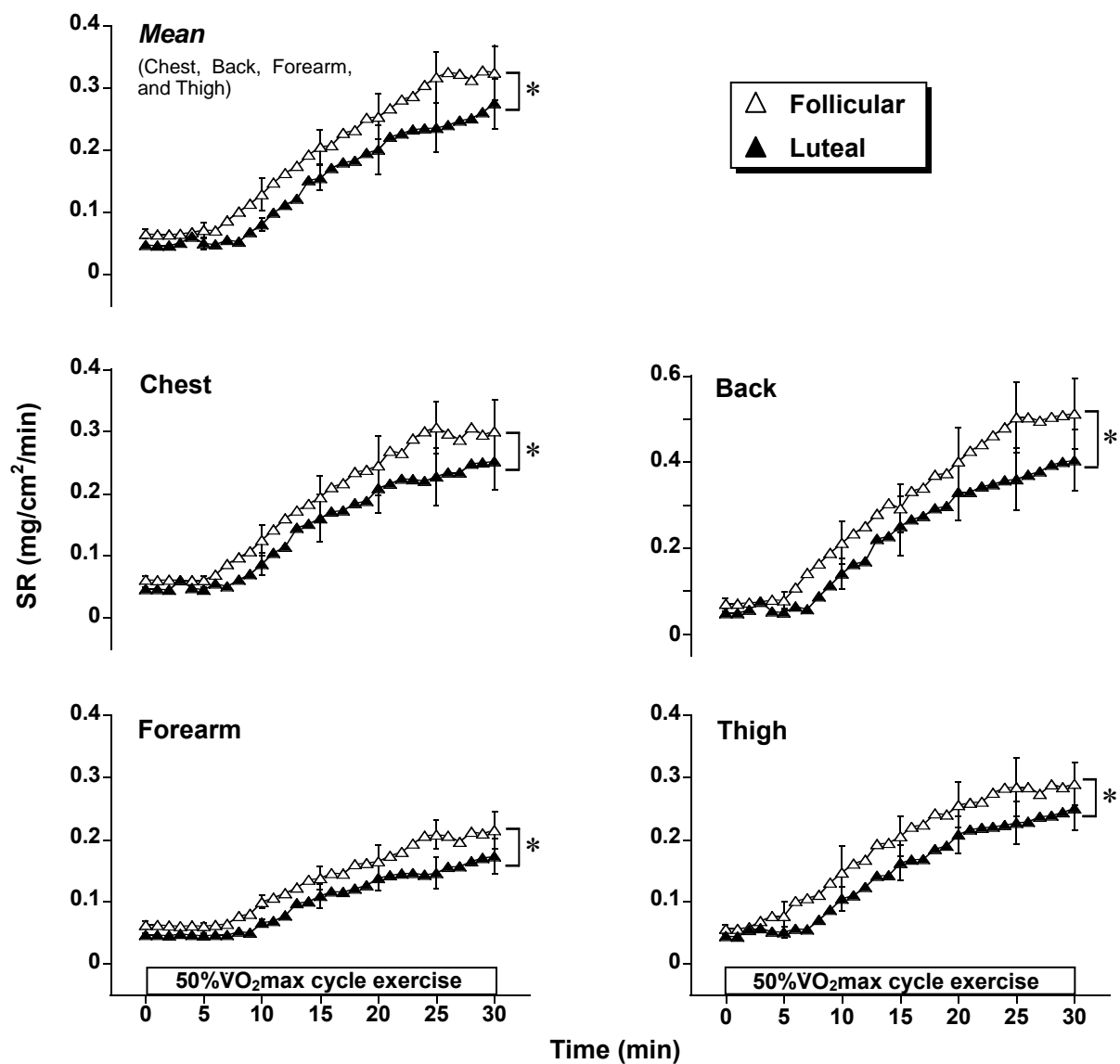


Figure I-2-4. The time courses of sweating rate (SR) on the chest, back, forearm and thigh, and the mean value of each body site during 50% $\dot{V}O_2$ max cycle exercise in mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means \pm SEM.

* Significantly difference between mid-follicular and mid-luteal phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

すなわち、 T_{sk} が高くなると熱放散反応の体温閾値の低下が報告されている (Nadel et al. 1971)。しかし、本実験では T_{sk} に性周期による顕著な影響がみられなかったことから、熱放散反応の体温閾値にみられた性周期の影響に T_{sk} は関与していないことが推察される。これまでにプロゲステロンは体温調節中枢に直接的に (Brooks-Asplund et al. 2000)、もしくは、発熱性サイトカインやプロスタグランジンなどを介して間接的に作用し、安静時の体温を 0.3°C から 0.5°C 程度上昇させることが知られており (Charkoudian and Johnson 2000; Stephenson and Kolka 1993)、性周期に伴う黄体期の熱放散反応の体温閾値上昇にはプロゲステロンの関与が示唆されている (Brooks-Asplund et al. 2000; Charkoudian and Johnson 2000; Stephenson and Kolka 1993)。さらに、Stachenfeld et al. (2000) は、環境温 35°C ($30\% \text{RH}$) 下での $60\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動において卵胞早期、黄体中期、プロゲステロン投与期、および、エストロゲンとプロゲステロン投与期の発汗反応を比較検討し、黄体中期、プロゲステロン投与期、および、エストロゲンとプロゲステロン投与期における発汗開始閾値がエストロゲン投与期よりも高く、また、エストロゲンとプロゲステロン投与期がプロゲステロン投与期よりも低いことを報告している。このことからプロゲステロンが黄体期における発汗開始閾値の上昇に深く関与していることが示唆される。これらのことから、本実験においてみられた、性周期に伴う黄体中期における熱放散反応の体温閾値の上昇はプロゲステロン濃度の上昇によって引き起こされたと推察される。

本実験では、常温環境下における中等度運動時の発汗および皮膚血管拡張反応の感受性が卵胞中期と比較して黄体中期に低下した。この熱放散反応の感受性の低下も黄体中期にみられた熱放散反応の低下の原因となったと推察される。Fukuoka et al. (2002) は、本実験と同様の環境および運動強度の条件で発汗反応の感受性は性周期の影響は受けないと報告している。一方、Grucza et al. (1993) は、

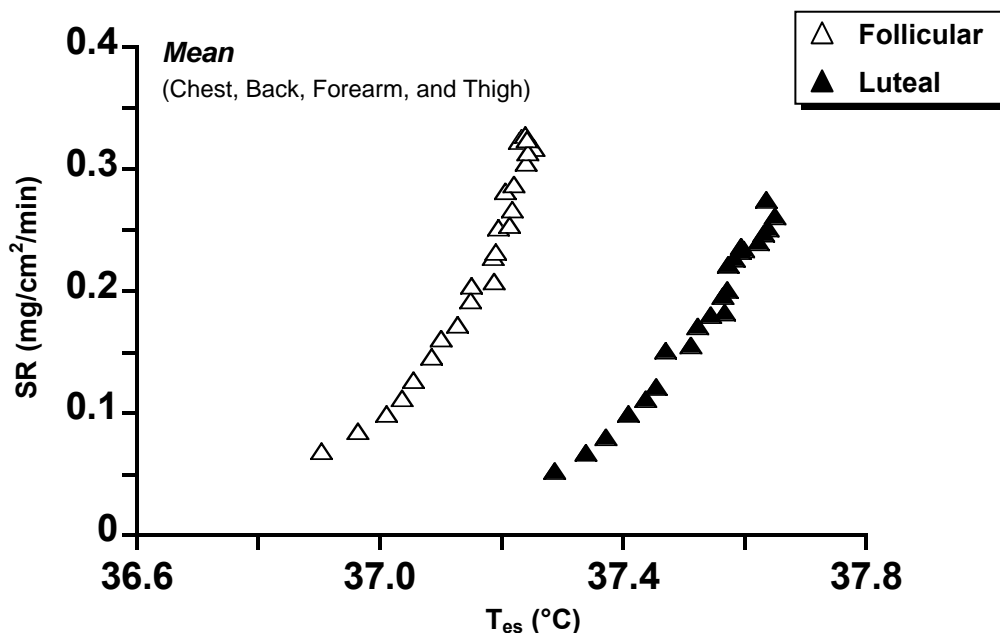


Figure I-2-5. Relationship between esophageal temperature (T_{es}) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (chest, back, forearm, and thigh) during cycling exercise at $50\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means for 10 young untrained women.

Table I-2-2. The onset of esophageal temperature (T_{es}) for sweating (Threshold T_{es}) and sensitivity of the relationships between sweating rate and T_{es} at each body site.

	F	L
Threshold T_{es} ($^{\circ}\text{C}$)		
Chest	37.09 \pm 0.08	37.43 \pm 0.08 *
Back	37.08 \pm 0.12	37.38 \pm 0.09 *
Forearm	37.06 \pm 0.08	37.39 \pm 0.08 *
Thigh	37.02 \pm 0.08	37.36 \pm 0.09 *
Mean (Chest, Back, Forearm, and Thigh)	37.00 \pm 0.07	37.37 \pm 0.08 *
Sensitivity ((mg/cm²/min)/$^{\circ}\text{C}$)		
Chest	0.82 \pm 0.30	0.54 \pm 0.12 *
Back	1.34 \pm 0.16	0.91 \pm 0.19 *
Forearm	0.54 \pm 0.08	0.41 \pm 0.06 *
Thigh	0.72 \pm 0.09	0.59 \pm 0.11
Mean (Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.84 \pm 0.12	0.57 \pm 0.10 *

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

本実験と同様の環境および運動強度の条件で発汗反応の感受性は卵胞期よりも黄体期で増加すると報告している。本実験およびこれらの先行研究における見解の不一致は、おそらく運動姿勢 (Fukuoka et al. 2002 および Grucza et al. 1993 は立位姿勢の自転車運動) や体温の指標 (Fukuoka et al. 2002 および Grucza et al. 1993 は直腸温)、被験者の身体特性などの相違に起因すると考えられる。体温が急激に変化するような運動条件で体温と熱放散反応の対応関係を検討する場合、 T_{es} は直腸温よりも速やかな反応を示すことから、 T_{es} を用いる方が適していると考えられている (Tankersley et al. 1992 ; O'Brien et al. 1998)。そのため、体温の指標に直腸温を用いている先行研究よりも本実験の結果の信頼性はより高いと思われる。

Table I-2-3. The onset of mean body temperature (T_b) for sweating (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and frequency of sweat expulsions.

	F	L
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)	36.48 ± 0.08	$36.88 \pm 0.07^*$
Sensitivity ((sweat expulsions/min)/$^{\circ}\text{C}$)	27.1 ± 2.5	25.6 ± 2.7

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

これまでの報告から、熱放散反応の感受性を変化させる要因として運動強度 (Smolander et al. 1991)、運動トレーニングおよび暑熱順化状態 (Nadel et al. 1978)、および血漿量の減少 (Mack et al. 2001) が考えられている。 $\dot{V}O_{2\max}$ は性周期による影響を受けないと報告されており (Grucza et al. 1993; Lebrun et al. 1995)、本実験では卵胞中期および黄体中期それぞれに同じ絶対運動強度を負荷したことから、運動強度の違いが熱放散反応の感受性に影響したとは考えにくい。また、卵胞中期および黄体中期の実験の間には、2週間から1ヶ月程度の間隔があったが、各被験者は普段どおりの生活を送っており、その間に運動トレーニングもしくは暑熱順化が成されたとも考えにくい。もし、両性周期相

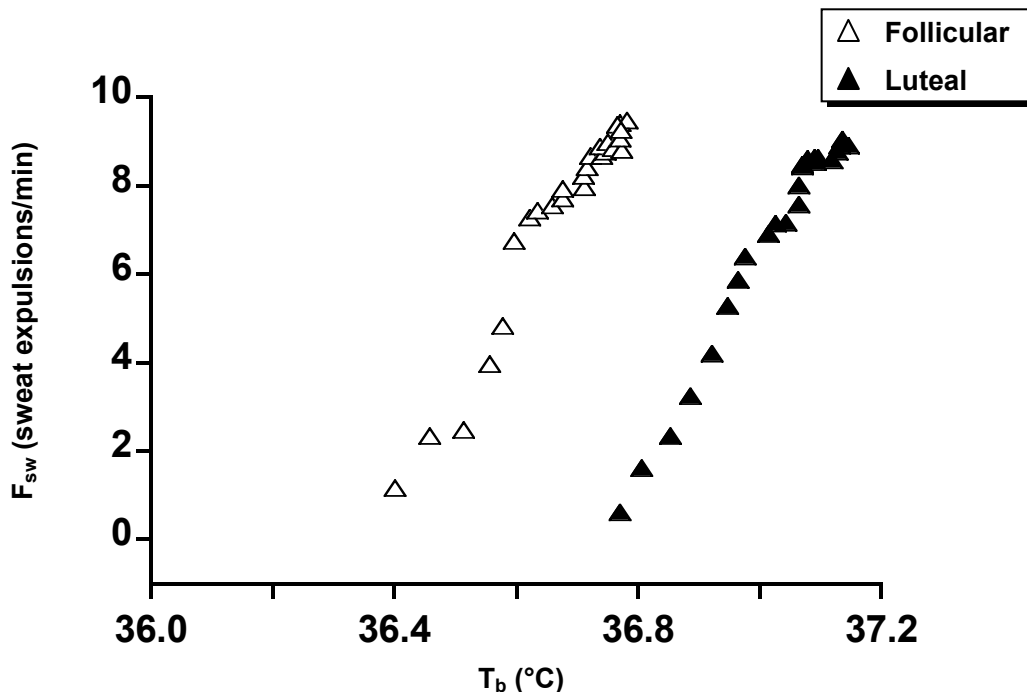


Figure I-2-6. Relationship between mean body temperature (T_b) and frequency of sweat expulsions (F_{sw}) during 50% $\dot{V}O_{2\max}$ cycle exercise in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means for 10 young untrained women.

Table I-2-4. Sensitivity of the relationship between frequency of sweat expulsion and local sweating rate at each body site.

	F	L
Sensitivity ((mg/cm²/min)/(sweat expulsions/min))		
Chest	0.030 ± 0.007	0.024 ± 0.005
Back	0.048 ± 0.010	0.036 ± 0.006
Forearm	0.018 ± 0.004	0.014 ± 0.002
Thigh	0.029 ± 0.005	0.020 ± 0.003
Mean (Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.030 ± 0.005	0.026 ± 0.004

Values are means ± SEM for 10 young untrained women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

において運動時のHRや $\dot{V}O_2$ が異なればこれらの要因が熱放散反応の感受性に影響した可能性は考えられるが、実際には両パラメータには性周期による差は認められていない。また、卵胞中期と黄体中期の実験の順序はランダムとして偏りのないように配慮した。他に熱放散反応の感受性を変化させる可能性のある要因として血漿量の減少が考えられる。血漿量の減少は心肺圧受容器の反射を介し熱放散反応の感受性を低下させることが知られており (Nose et al. 1990 ; Mack et al. 2001) , その抑制は200ml程度のわずかな血液量の低下でも引き起こされると報告されている (Nose et al. 1990) . Stephenson and Kolka (1988) は、黄体期に平均して210mlの血漿量が減少すると報告している。さらにStachenfeld et al. (1999 , 2001) は、内因性および外因性のエストロゲンおよびプロゲステロンの増

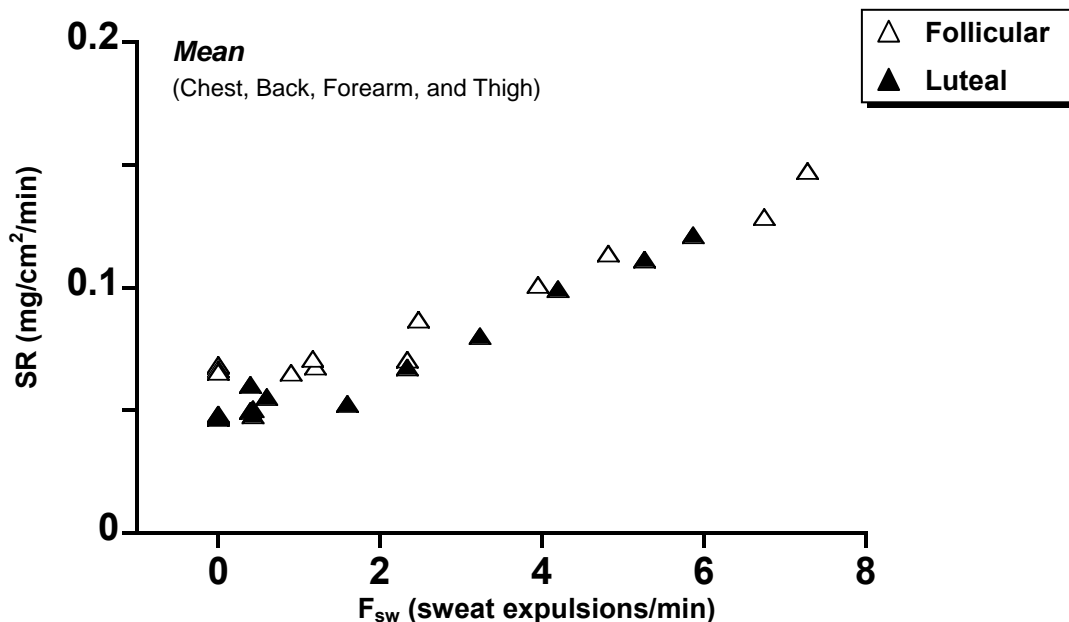


Figure I-2-7. Relationship between frequency of sweat expulsion (F_{sw}) and local sweating rate (SR) of mean value for each body site (chest, back, forearm, and thigh) during 50% $\dot{V}O_2$ max cycle exercise in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means for 10 young untrained women.

加によって血漿量が 200-300ml 減少すると報告している。本実験では被験者の血漿量を測定していないものの、黄体中期における発汗および皮膚血管拡張反応の感受性の低下は性周期に伴う血漿量の減少による心肺圧受容器の反射を介して引き起こされたことが十分に推察される。

本実験の結果は、性周期が熱放散反応の感受性に及ぼす影響を環境温 35°C から 50°C の条件下 and/or 60% から 85% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動時に検討した先行研究の結果とは異なる。すなわち、このような非常に厳しい温熱ストレス条件下では熱放散反応の感受性は性周期による影響を受けないと報告されている (Stephenson and Kolka 1985, 1999; Kolka and Stephenson 1989; Stachenfeld et al. 2000)。Horvath and Drinkwater (1982) は、環境温 28°C の条件下において 30% $\dot{V}O_2\text{max}$ の運動を実施した場合、前腕血流量および T_{sk} が卵胞期よりも黄体期に有意に低下することを報告している。この環境温 28°C でみられた性周期の影響は、環境温 35°C および 48°C で同じ運動を実施した場合にはみられなかった。さらに Crandall (2000) は、圧受容器反射による血管神経活動の調節は体温が上昇すると減弱されると報告

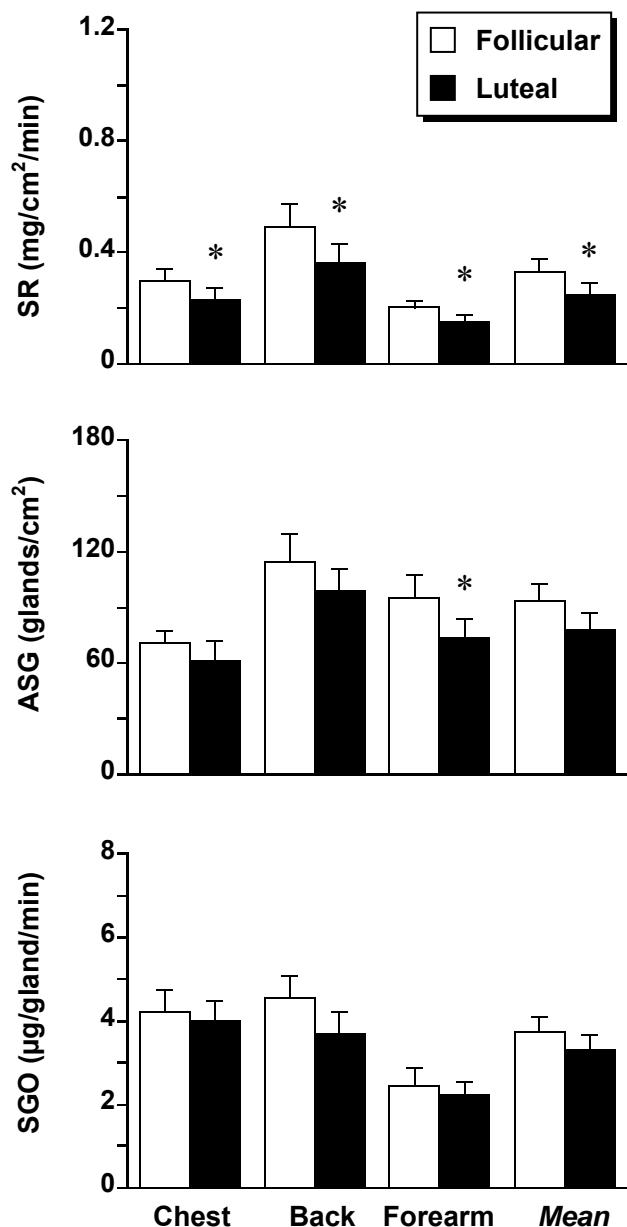


Figure I-2-8. Sweating rate (SR), active sweat glands (ASG), and sweat gland output (SGO) on the chest, back, forearm, and mean value of each body site from 24 to 29 min of 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ cycle exercise in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means \pm SEM. * Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

している。これらの報告から、環境温の上昇や運動強度の増加によって温熱ストレスが大きくなると熱放散反応の感受性に対する圧受容器反射を介した性周期の影響はマスクされるために、本実験と先行研究 (Stephenson and Kolka 1985, 1999; Kolka and Stephenson 1989; Stachenfeld et al. 2000) の結果に相違がみられたと推察される。

T_b と F_{sw} および F_{sw} とSRの対応関係を卵胞中期と黄体中期で比較すると、 T_b と F_{sw} の対応関係において同一 T_b に対する F_{sw} は黄体中期で卵胞中期よりも低値を示した。一方、 F_{sw} とSRから得られた回帰直線の勾配には有意な性周期差は認められなかったことから、発汗調節中枢の活動性が黄体中期に低下し、発汗反応の末梢機構の感受性は性周期でほとんど変化しないことが示唆される。また、SRはASGとSGOの増減によって調節されているが (Takano et al. 1996; Kondo et al. 1998)、本研究においてASGおよびSGOはほとんど性周期による影響が認められないことから、末梢における感受性は性周期によって大きく影響されなかったことが考えられる。したがって、 T_{es} とSRの対応関係でみられた黄体中期の発汗開始閾値の上昇と勾配の低下は、体温調節中枢を介した変化であることが示唆される。

本実験でみられた黄体中期における熱放散反応の感受性の低下は安静時では認められなかった (実験 I-1)。安静時の熱放散反応は、体温や皮膚温などの温熱性要因が主な情報として体温調節中枢へ入力されることで引き起こされるが、運動時のそれは温熱性要因とともに非温熱性要因の入力の関与も

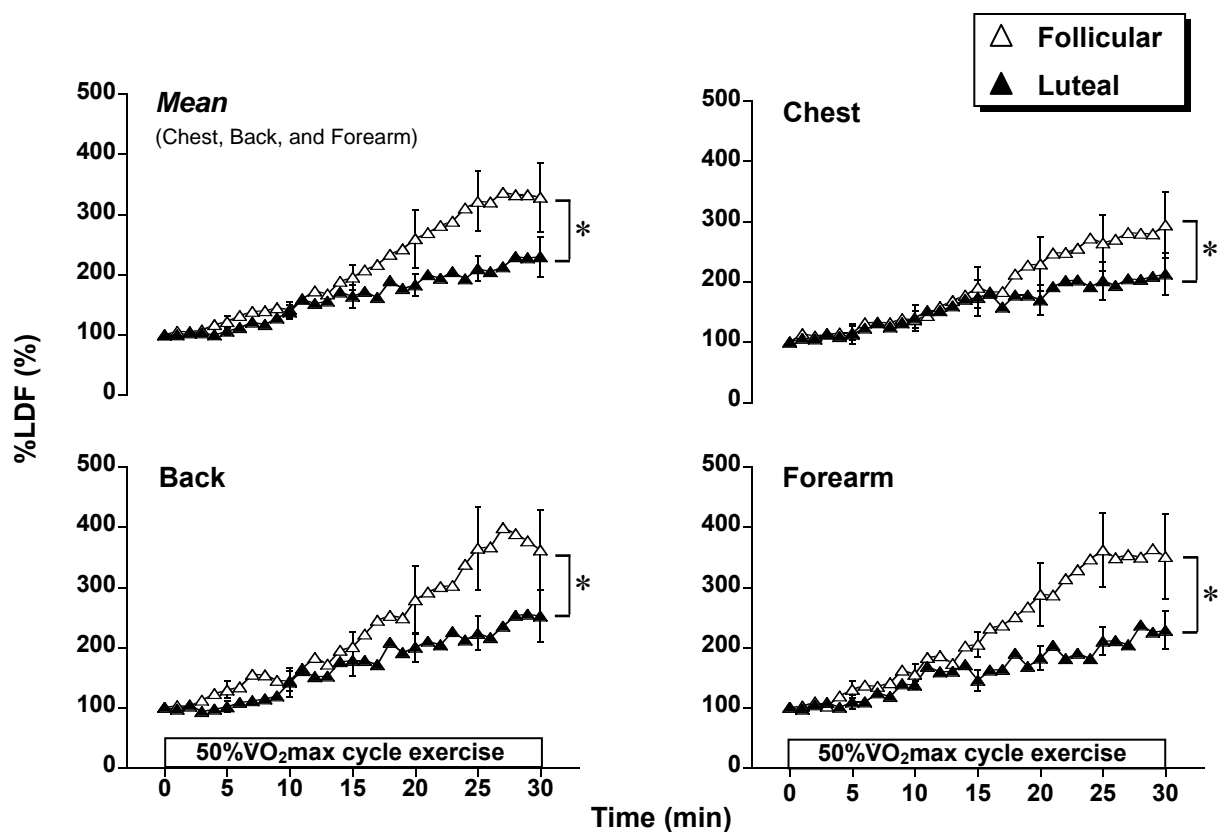


Figure I-2-9. The time courses of skin blood flow (%LDF) on the chest, back, and forearm, and the mean value of each body site during 50% $\dot{V}O_2$ max cycle exercise in mid-follicular and mid-luteal phase experiments in young untrained women. Values are means \pm SEM.

* Significantly difference between mid-follicular and mid-luteal phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

知られている (Van Beaumont and Bullard 1963 ; Gisolfi and Wenger 1984 ; Johnson 1986 ; Vissing and Hjortso 1996 ; Yamazaki et al. 1994a ; Takamata et al. 1998 ; Kondo et al. 2000 , 2001 ; Mack et al. 1995 , 2001 ; Yanagimoto et al. 2002) . また , 運動時には筋への酸素供給のため循環血液量を増加させる必要があるため , 安静時よりも運動時の方が血漿量の減少による影響の程度はより大きくなることが予想される . これらの理由によって本実験と実験 I-1 の結果に相違が生じた可能性が考えられる . さらに , 実験 I-1 において , 性周期の影響が背だけで観察されたのに対して , 本実験では性周期による影響が全身一様に観察された . この結果は , 本実験でみられた性周期による影響が局所的な要因によるものではなく , 中枢的な要因 , すなわち前述の心肺圧受容器反射を介して引き起こされた可能性をさらに支持すると思われる . おそらく , 本実験で観察された黄体中期での全身一様の熱放散反応の低下は血漿量の低下による循環調節上の不利益を代償するために必要な反応であったものと推察され , 運動時においてはこの代償がより大きく影響し , 安静時との結果の違いを生じた可能性が考えられる .

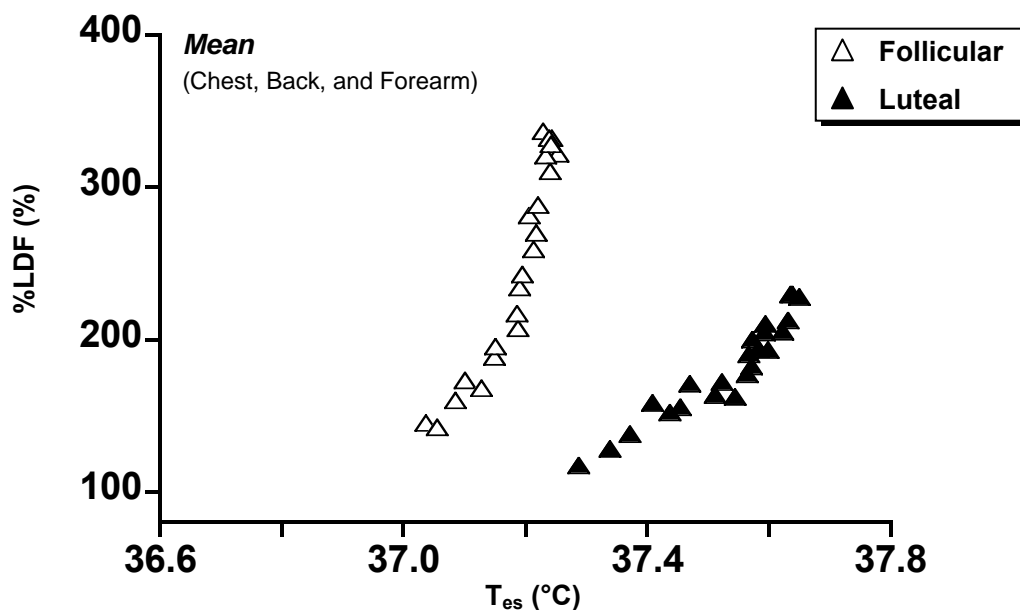


Figure I-2-10. Relationship between esophageal temperature (T_{es}) and skin blood flow (%LDF) of mean value for each body site (chest, back, and forearm) during cycling exercise at $50\% \dot{V}O_2\max$ in mid-follicular and mid-luteal phase experiments. Values are means for 10 young untrained women.

Table I-2-5. The onset of esophageal temperature (T_{es}) for vasodilation (Threshold T_{es}) and sensitivity of the relationships between T_{es} and skin blood flow at each body site.

	F	L
Threshold T_{es} ($^{\circ}\text{C}$)		
Chest	37.07 \pm 0.08	37.42 \pm 0.07 *
Back	37.05 \pm 0.09	37.39 \pm 0.07 *
Forearm	37.08 \pm 0.08	37.42 \pm 0.06 *
Mean (Chest, Back, and Forearm)	37.03 \pm 0.06	37.40 \pm 0.07 *
Sensitivity ($\%/\text{^{\circ}\text{C}}$)		
Chest	748 \pm 220	242 \pm 55 *
Back	1017 \pm 303	417 \pm 68
Forearm	674 \pm 128	325 \pm 51 *
Mean (Chest, Back, and Forearm)	705 \pm 221	238 \pm 49 *

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

5. 要約

本実験では性周期が常温環境下での中等度運動時における発汗および皮膚血管拡張反応に及ぼす影響を検討するため、若年女性 10 名の卵胞中期および黄体中期に環境温 25 $^{\circ}\text{C}$ (45%RH) 下において 50% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の半仰臥位自転車運動を 30 分間実施した。

血漿エストロン、エストラジオールおよびプロゲステロン濃度はいずれも卵胞中期と比較して黄体中期で有意に、また、安静時および運動時の T_{es} も卵胞中期より黄体中期で有意に上昇した。安静時からの T_{es} の上昇の程度は卵胞中期より黄体中期で有意に大きくなったことから、安静時にみられた T_{es} の性周期差は運動終了時でさらに拡大した。運動時における SR (胸、背、前腕および大腿) および %LDF (胸、背および前腕) は卵胞中期と比較して黄体中期で有意に低下した。発汗開始および皮膚血管拡張閾値は卵胞中期よりも黄体期で有意に上昇した。また、各熱放散反応の感受性は卵胞中期より黄体中期で有意に低下した。これらの性周期による影響は身体部位にかかわらず観察された。また、発汗反応の末梢機構の感受性や汗腺活動には性周期による顕著な影響が認められなかった。

以上の結果より、若年女性において常温環境下での中等度運動時の熱放散反応は熱放散反応の体温閾値の上昇および感受性の低下のために減弱され、体温調節の上で不利になることが示唆された。また、その影響は全身一様にみられたことと発汗反応の末梢機構に性周期による影響が認められなかったことから、性周期によるこれらの影響は末梢機構よりも中枢機構を介して生じることが推察される。

実験 II-1 安静時

1. 目的

これまでに性差が安静時の熱放散反応に及ぼす影響について多くの身体部位から詳細に検討されておらず、性差が全身同様にみられるのか明らかにされていない。そこで、実験 II-1 の目的は性差が安静時における熱放散反応の経時変化および体温と熱放散反応の対応関係に及ぼす影響を、女性の性周期を考慮し身体が多部位において検討することとした。

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では実験 I-1 の若年成人女性 10 名と健康な若年男性 6 名を比較検討した。Table II-1-1 にその身体特性を示した。その他は実験 I-1 の 2.1. (P.39) と同様であった。

2.2. 実験条件および手順

実験条件およびその手順は実験 I-1 の 2.2. (P.39-40) と同様とし、女性被験者は卵胞中期および黄体中期の 2 回、男性被験者は 1 回、それぞれ下肢温浴実験を実施した。女性被験者はスポーツブラ、ショーツおよびショートパンツを、男性被験者はショートパンツのみを着用した。また、血漿女性ホルモン濃度を測定するための採血は女性被験者のみ行ない、その結果から希求された性周期相に実験が実施されたかを確認した。実験実施にあたる注意事項は実験 I-1 の 2.2. (P.39) と同様であった。

Table II-1-1. Physical characteristics of each group.

Variables	Women	Men
Age (yr)	21.0 ± 0.1	23.8 ± 1.7
Height (cm)	161.1 ± 1.9	174.6 ± 1.1 *
Mass (kg)	55.3 ± 1.5	73.1 ± 1.9 *
AD (m ²)	1.53 ± 0.02	1.83 ± 0.02 *
AD/Mass (cm ² /kg)	279.1 ± 4.0	251.2 ± 3.6 *
MSF (mm)	15.9 ± 1.0	9.7 ± 1.1 *
%BF (%)	17.6 ± 1.6	12.7 ± 1.4 *
$\dot{V}O_2$ max (ml/kg/min)	40.7 ± 1.4	46.9 ± 4.7

Values are means ± SEM for 10 young untrained women and 6 young untrained men. The women carried out this experiment in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phases. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, $\dot{V}O_2$ max: maximal oxygen uptake.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

2.3. 測定項目

測定項目およびその方法は実験 I-1 の 2.3. (P.40-41) と同様とした。

2.4. データ分析および統計処理

データ分析は実験 I-1 の 2.4. (P.41-43) と同様である。

全てのデータは平均値±標準誤差 (SEM) で示した。身体特性, 活動汗腺数 (ASG), 単一汗腺あたりの汗出力 (SGO), 各熱放散反応の平均体温 (T_b) 閾値 (それぞれ発汗開始閾値および皮膚血管

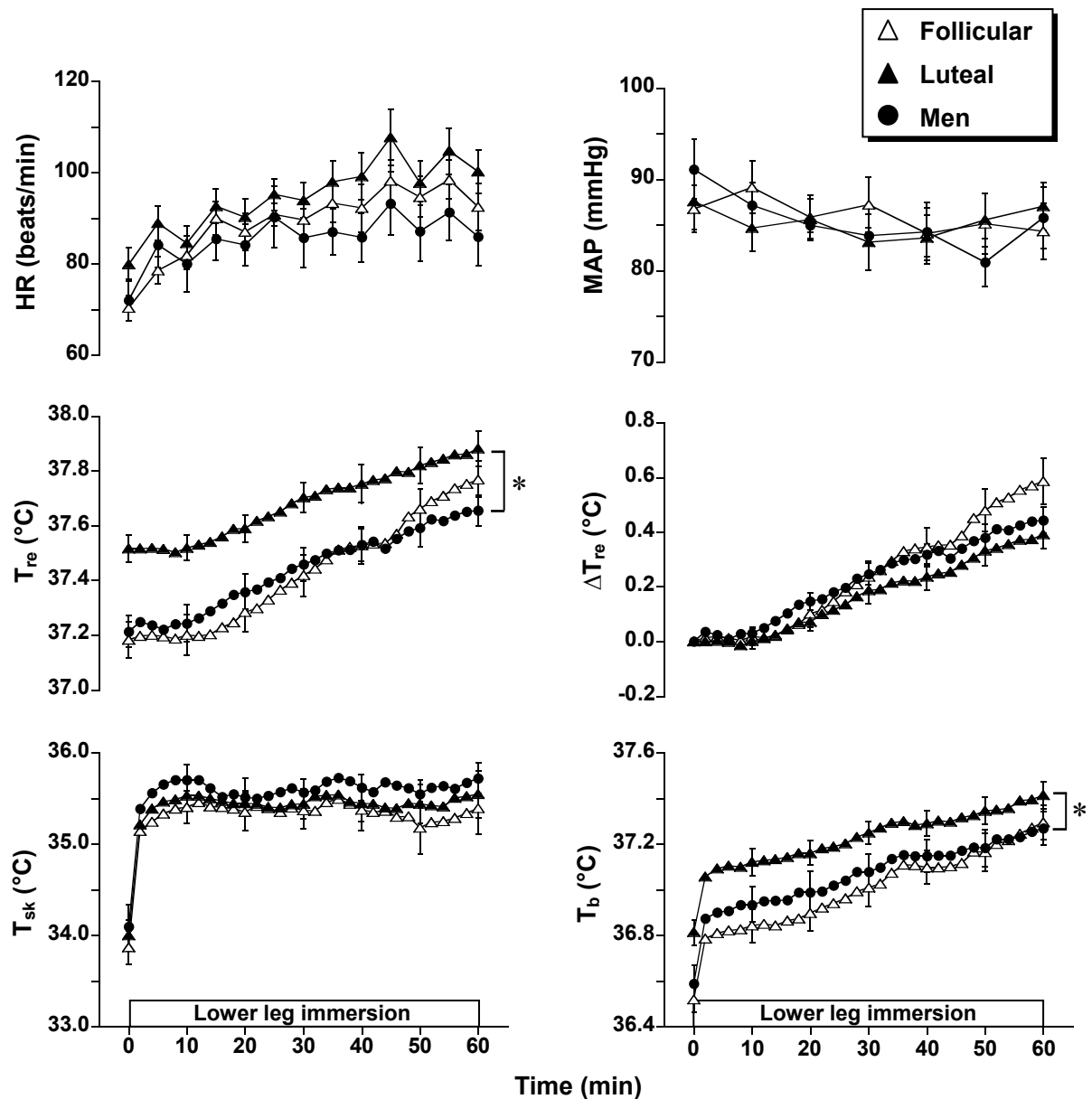


Figure II-1-1. The time courses of heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP), rectal temperature (T_{re}), change in rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature (T_{sk}), and mean body temperature (T_b) during lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

拡張閾値とする)および感受性に及ぼす性差の影響は一元配置の分散分析を用いて検討した。また、発汗量(SR),安静時からの皮膚血流量(LDF)の変化率(%LDF),直腸温(T_{re}),局所皮膚温(T_{sl}),平均皮膚温(T_{sk}),心拍数(HR)および平均血圧(MAP)の各パラメータの経時変化における性差の有意差検定は,5分ごとのデータを被験者間計画による繰り返しのある二元配置分散分析を用いて処理した。いずれの検定においても有意水準は $p < 0.05$ に設定した。

3. 結果

本実験において年齢および最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)には性差は認められなかったが,身長,体重および体表面積は女性が男性よりも有意に低く,体表面積/体重比,平均皮下脂肪厚および体脂肪

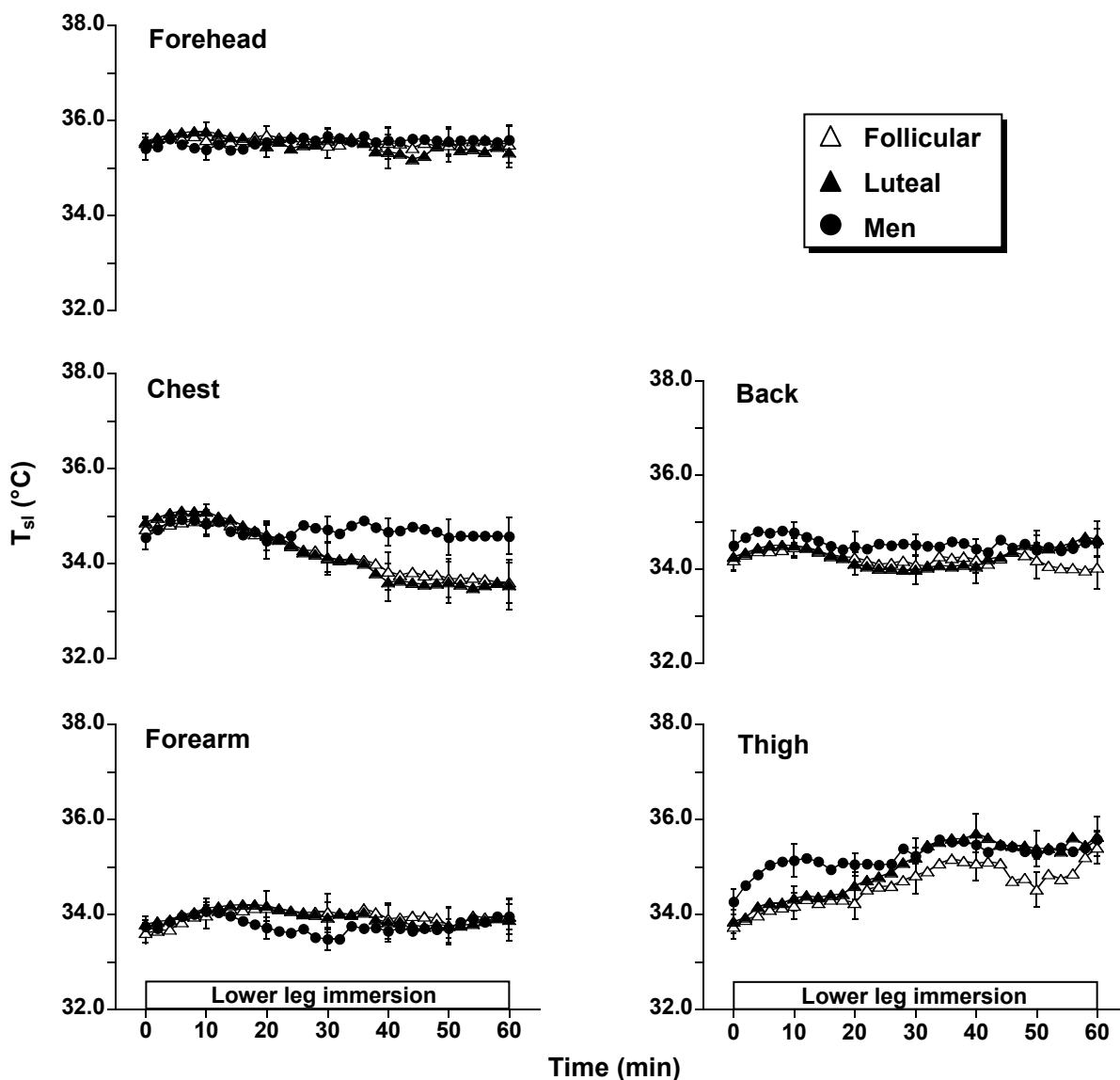


Figure II-1-2. The time courses of local skin temperature (T_{sl}) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh during lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means \pm SEM.

率は女性が男性よりも有意に高かった (Table II-1-1)。また, 女性被験者の実験当日における安静時の血漿女性ホルモン (エストロン, エストラジオールおよびプロゲステロン) 濃度は卵胞中期から黄体中期にかけて有意に上昇した (Fig. I-1-1, P.42)。

黄体中期の安静時において女性の T_{re} および T_b が男性よりも有意な高値を示した。いずれの性周期相においても下肢温浴中ではHR, MAP, 安静時からの T_{re} の変化度 (ΔT_{re}), T_{sk} および T_b に有意な性差はみられなかったが, 黄体中期において女性の T_{re} が男性よりも有意に高かった (Fig. II-1-1)。熱

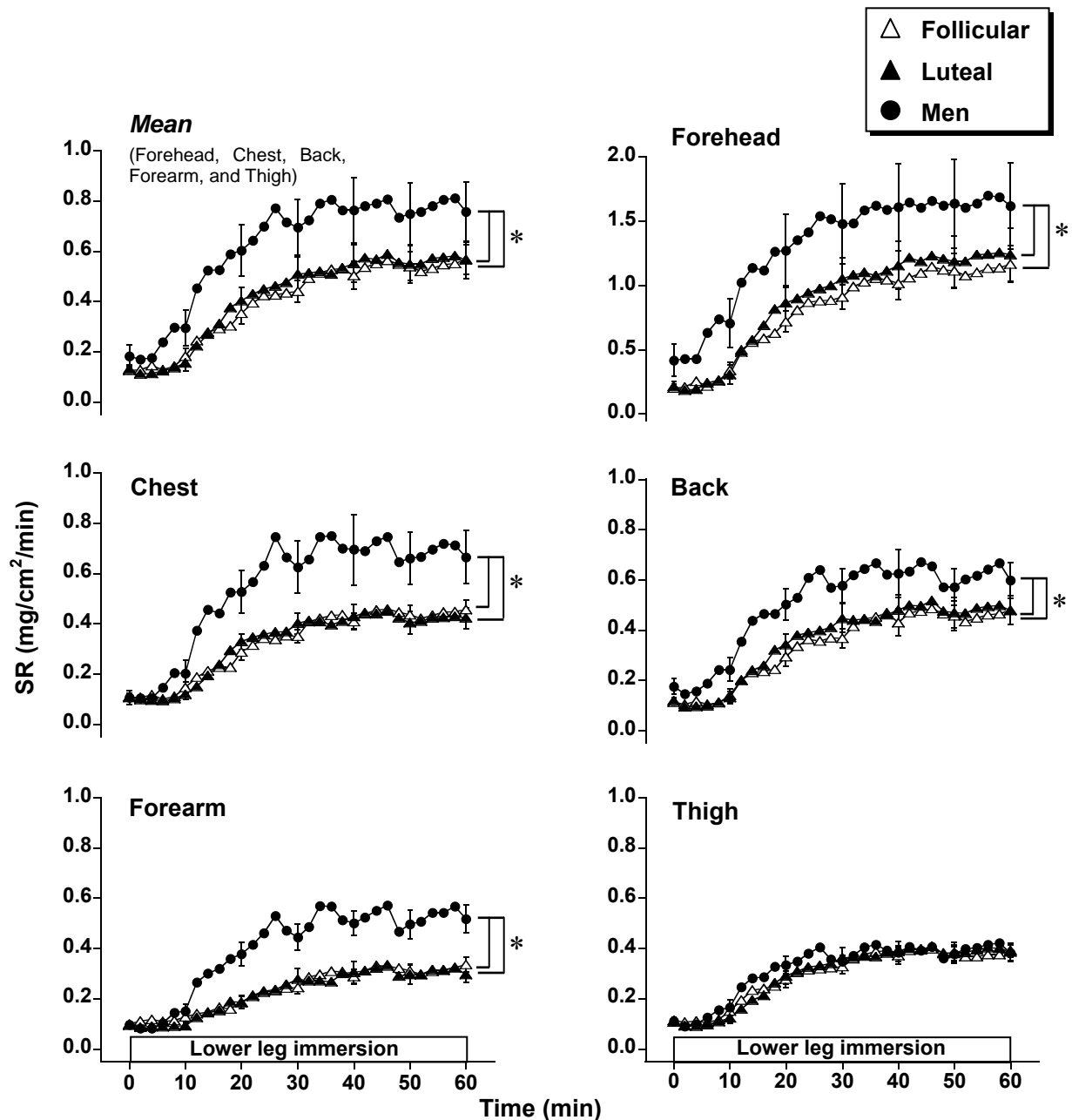


Figure II-1-3. The time courses of sweating rate (SR) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site during lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

放散反応を測定した部位の T_{sk} には性差の影響は認められなかった (Fig. II-1-2). 下肢温浴時の熱産生量は黄体中期で女性が男性よりも有意な低値を示した (女性-卵胞中期, 女性-黄体中期および男性それぞれ 53 ± 2 , 49 ± 3 および 64 ± 3 W/m^2).

下肢温浴時におけるSRは卵胞中期および黄体中期とも平均SR, 前額, 胸および前腕で女性が男性よりも有意に低かった. 一方, 大腿では性差の影響はみられなかった (Fig. II-1-3). 卵胞中期において発汗開始閾値は部位にかかわらず女性と男性の間に有意な差はみられなかったが, 黄体中期ではいずれの部位においても女性が男性よりも有意に高い値を示した. 性周期相にかかわらず発汗反応の感受性は平均SR, 前額, 胸および前腕で女性が男性よりも有意に低い値を示した. (Fig. II-1-4 および Table II-1-2). T_b と汗の拍出頻度 (F_{sw}) の対応関係から得られた回帰直線は女性の卵胞中期と黄体中期の回帰直線のほぼ中間に男性の回帰直線が位置し, 同一 T_b に対する F_{sw} は女性の卵胞中期 > 男性 > 女性の黄体中期の順に多かった (Fig. II-1-5 および Table II-1-3). いずれの性周期相も F_{sw} とSRの対応関係から求めた発汗反応の末梢機構の感受性は平均SR, 胸および前腕で女性が男性よりも有意に小さかった (Fig. II-1-6 および Table II-1-4).

性周期相にかかわらず下肢温浴終了直前の平均SRおよびSGOは女性が男性よりも有意な低値を示し, また, 平均ASGは女性が男性よりも有意な高値を示した. 各部位においては, 性周期相にかかわらず胸および前腕のSRは女性が男性よりも有意な低値を示し, 背のASGは女性が男性よりも有意な高値を示した. SGOは背および前額においては性周期相にかかわらず, また, 胸および前腕に

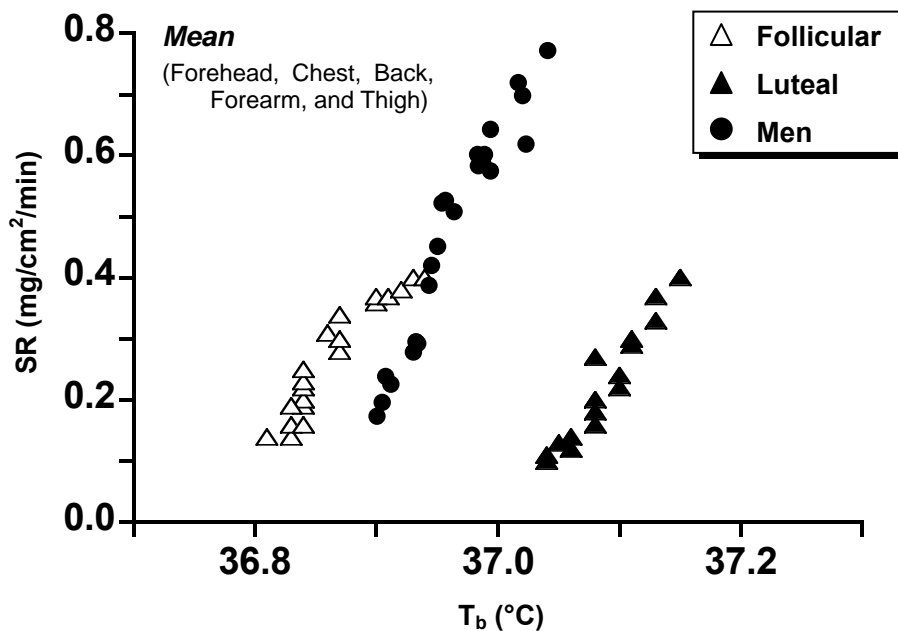


Figure II-1-4. Relationship between mean body temperature (T_b) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means for 10 young untrained women and 6 young untrained men.

Table II-1-2. The onset of mean body temperature (T_b) for sweating (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and sweating rate at each body site.

	Women		Men
	F	L	
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)			
Forehead	36.84 \pm 0.07	37.10 \pm 0.06 ^{†,*}	36.88 \pm 0.08
Chest	36.83 \pm 0.08	37.12 \pm 0.06 ^{†,*}	36.91 \pm 0.07
Back	36.85 \pm 0.06	37.11 \pm 0.06 ^{†,*}	36.91 \pm 0.07
Forearm	36.83 \pm 0.08	37.14 \pm 0.06 ^{†,*}	36.94 \pm 0.07
Thigh	36.84 \pm 0.08	37.11 \pm 0.06 ^{†,*}	36.91 \pm 0.08
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	36.83 \pm 0.06	37.10 \pm 0.06 ^{†,*}	36.89 \pm 0.07
Sensitivity ((mg/cm²/min)/$^{\circ}\text{C}$)			
Forehead	1.88 \pm 0.42 *	2.03 \pm 0.31 *	3.91 \pm 0.88
Chest	0.86 \pm 0.16 *	0.87 \pm 0.15 *	1.86 \pm 0.48
Back	0.90 \pm 0.20	0.95 \pm 0.20	1.76 \pm 0.51
Forearm	0.48 \pm 0.08 *	0.53 \pm 0.09 *	1.47 \pm 0.20
Thigh	0.66 \pm 0.14	0.77 \pm 0.14	0.93 \pm 0.32
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.91 \pm 0.19 *	1.08 \pm 0.15 *	1.76 \pm 0.28

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women and 6 young untrained men.

The women carried out this experiment in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phases.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

[†] Significantly different from mid-follicular phase, $p < 0.05$.

においては卵胞中期のみで女性が男性よりも有意な低値を示した (Fig. II-1-7). 総体重減少量 (TWL) はいずれの性周期相も女性が男性よりも有意に低かった (女性-卵胞中期, 女性-黄体中期および男性それぞれ 186 ± 11 , 186 ± 18 および 253 ± 17 g/m²/h).

性周期相にかかわらず%LDF は大腿で女性が男性よりも有意に高い値を示した. 一方, 平均%LDF およびその他の測定部位では性差の影響は認められなかった (Fig. II-1-8). 皮膚血管拡張閾値は大腿において黄体中期で女性が男性よりも有意な高値を示した. また, 皮膚血管拡張反応の感受性はいずれの性周期相も大腿において女性が男性よりも有意な高値を示した (Fig. II-1-9 および Table II-1-5).

Table II-1-3. The onset of mean body temperature (T_b) for sweating (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and frequency of sweat expulsions.

	Women		Men
	F	L	
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)	36.70 ± 0.09	$36.99 \pm 0.08^{\dagger}$	$36.74 \pm 0.04^*$
Sensitivity ((sweat expulsions/min)/$^{\circ}\text{C}$)	48.0 ± 8.8	50.1 ± 6.7	56.0 ± 3.3

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women and 6 young untrained men. The women carried out this experiment in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phases.

* Significantly different from mid-luteal phase, $p < 0.05$.

\dagger Significantly different from mid-follicular phase, $p < 0.05$.

4. 考察

実験 II-1 において、性周期相にかかわらず SR の経時変化は大腿を除く全ての部位で女性が男性よりも有意に低い値を示し、%LDF では大腿においてのみ女性が男性よりも有意に高い値を示した。このことから性差による影響に身体部位差の存在が示唆された。体温と熱放散反応の関係では卵胞中期では各熱放散反応の体温閾値に有意な性差はみられなかったが、黄体中期では女性が男性より

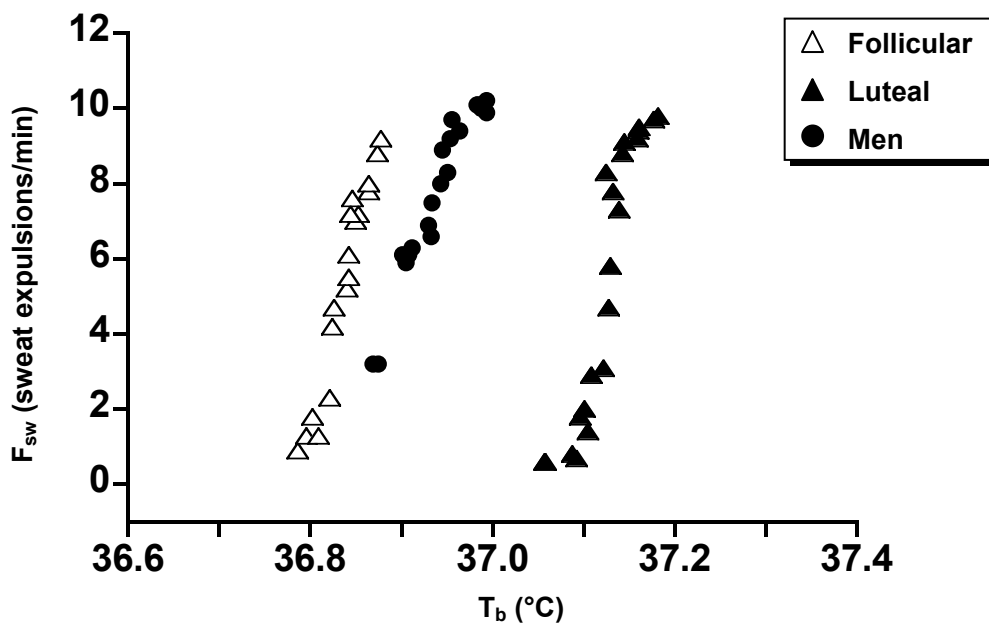


Figure II-1-5. Relationship between mean body temperature (T_b) and frequency of sweat expulsions (F_{sw}) during lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means for 10 young untrained women and 6 young untrained men.

Table II-1-4. Sensitivity of the relationship between frequency of sweat expulsion and sweating rate at each body site.

	Women		Men
	F	L	
Sensitivity ((mg/cm²/min)/(sweat expulsions/min))			
Forehead	0.113 ± 0.023	0.112 ± 0.022	0.157 ± 0.036
Chest	0.051 ± 0.009 *	0.046 ± 0.007 *	0.086 ± 0.014
Back	0.054 ± 0.009	0.053 ± 0.008	0.067 ± 0.008
Forearm	0.034 ± 0.007 *	0.035 ± 0.007 *	0.062 ± 0.008
Thigh	0.059 ± 0.005	0.036 ± 0.005	0.046 ± 0.007
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.062 ± 0.011 *	0.056 ± 0.010 *	0.084 ± 0.015

Values are means ± SEM for 10 young untrained women and 6 young untrained men.

The women carried out this experiment in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

も有意な高値を示した。また，経時変化でみられた熱放散反応の性差は男性と比較して女性の発汗反応の感受性が低いこと，さらに，皮膚血管拡張反応の感受性が高いことにそれぞれ起因することが示唆された。

ヒトの熱放散反応は皮下脂肪厚，体表面積/質量比， $\dot{V}O_{2max}$ などに影響されることが知られてい

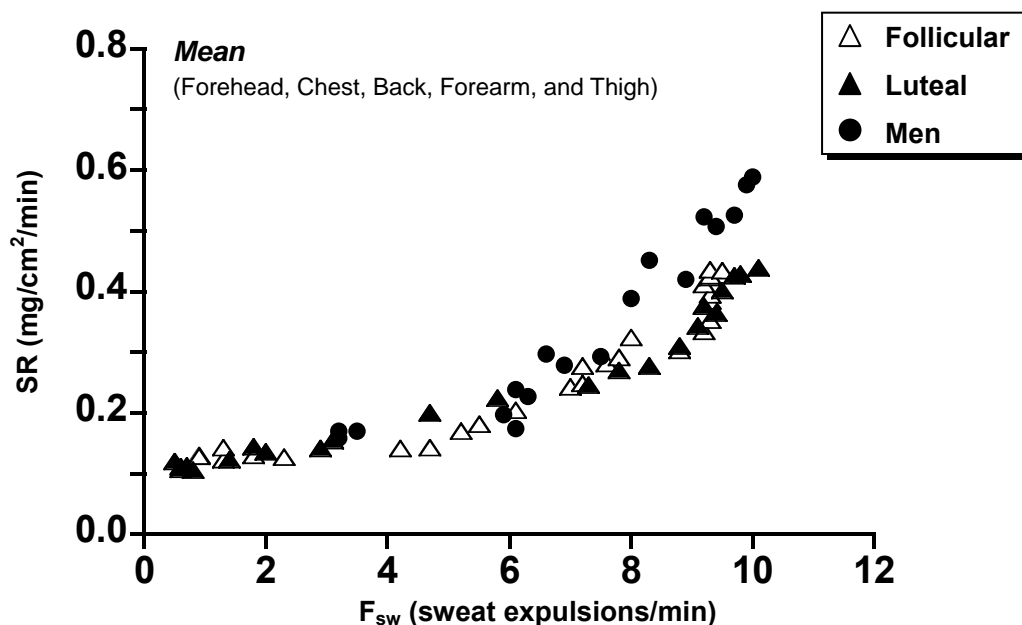


Figure II-1-6. Relationship between frequency of sweat expulsion (F_{sw}) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means for 10 young untrained women and 6 young untrained men.

る(Havenith et al. 1995)。本実験では体表面積/体重比は女性において熱放散に有利な高値を示した。しかし、皮下脂肪厚は女性において熱放散に不利な高値を示した。一方、SRと正の相関を示す $\dot{V}O_2\max$ (Buono and Sjöholm 1988)には性差は認められなかった。したがって、本実験では形態的な性差が存在するものの、体力的な差の影響はほとんどない条件で熱放散反応の性差を検討したと推察される。

下肢温浴時の熱産生量はいずれの性周期相も女性が男性よりも有意に低かったにもかかわらず卵胞中期において女性は男性と同等の T_{re} および T_b の反応を示し、黄体中期では女性のそれらの値は男性のそれよりも有意に高い値を示した。これらの結果から、女性の熱放散反応は性周期相にかかわらず男性のそれよりも劣ることが推察される。この見解を支持するように女性のTWLは男性よりも有意に低い値を示した。この女性においてみられた低いTWLは体力レベルを考慮して運動時の発汗反応

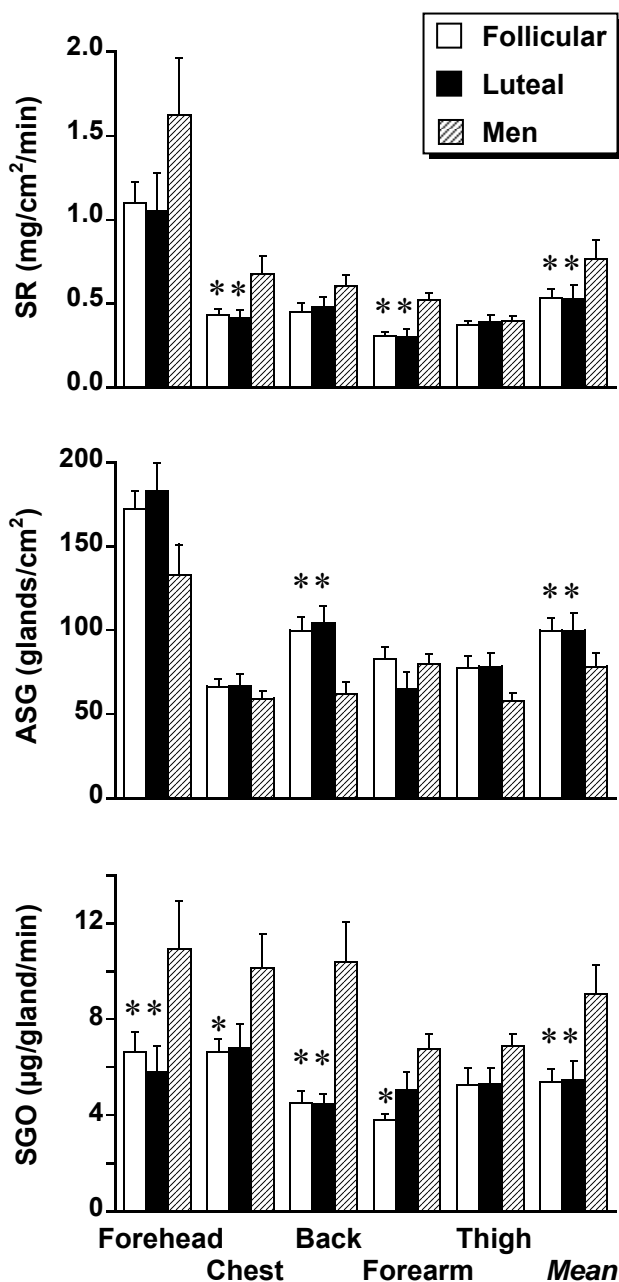


Figure II-1-7. Sweating rate (SR), active sweat glands (ASG), and sweat gland output (SGO) on the forehead, chest, back, forearm, thigh, and mean value of each body site from 50 to 54 min of lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means \pm SEM.

* Significantly different from men, $p < 0.05$.

の性差を検討した先行研究の結果と一致した (Avellini et al. 1980; Frye and Kamon 1981)。また、本実験では発汗および皮膚血管拡張反応を身体の一部で詳細に検討した結果、両熱放散反応の性差の程度は身体で異なることが示唆された。発汗反応では性周期相にかかわらず大腿を除く部位（前額、胸、背および前腕）で女性のSRが男性よりも低くなり、また、皮膚血管拡張反応では大腿を除く部位で女性の%LDFは男性のそれと同等であった。一方、大腿の発汗量は性差がみられず、大腿の皮膚血流量はむしろ女性が男性よりも有意な高値を示した。これらの結果から女性の発汗反応は男性のそれよりも劣るものの、皮膚血管拡張反応は男性と同等もしくは優れていることが推察される。さらに、女性は発汗反応よりも皮膚血管拡張反応に依存した熱放散特性を持ち、その傾向は特

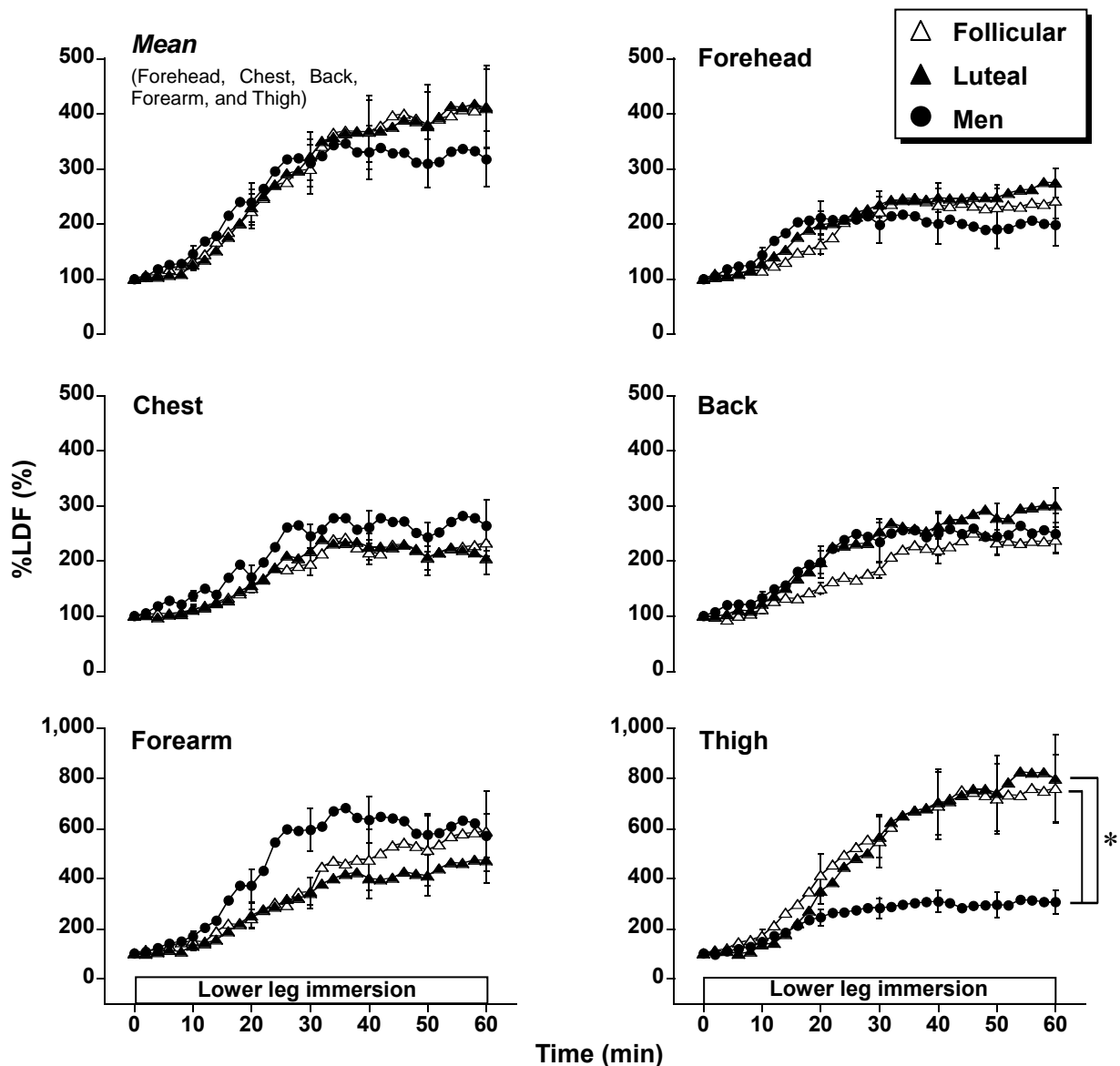


Figure II-1-8. The time courses of skin blood flow (%LDF) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site during lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

に大腿で顕著であることが示唆される。大腿の表面積/質量比は体幹のそれと比較して大きいことを考えると、大腿で熱放散量を増加させることは熱放散の観点から効率的な反応であると指摘できる。SRは T_{sk} に影響されることが知られているが (Ogawa 1970 ; Nadel et al. 1971), 本実験ではSRに性差がみられた部位の T_{sk} に有意な性差はみられなかった。そのため、 T_{sk} が女性の低いSRに関連したとは考えにくい。

本実験において、発汗開始および皮膚血管拡張閾値は卵胞中期の女性と男性の間に有意な性差は観察されなかった。運動時に検討したものであるが、Kolka et al. (1987) も同様に、卵胞早期の女性と男性において発汗開始および皮膚血管拡張閾値には性差がみられないと報告している。一方、黄体中期では熱放散反応の体温閾値に明らかな性差が観察された。これらの結果から、卵胞中期では体温調節中枢の体温閾値は女性と男性で同じであるが、黄体中期では女性の体温閾値が男性よりも高温側にシフトすることが示唆される。第4章で述べたように、女性の場合は黄体中期に女性ホルモン（主にプロゲステロン）濃度の上昇によって体温閾値が上昇することに起因して、黄体中期で性差が生じると推察される。

T_b とSRおよび F_{sw} とSRの対応関係から求めた回帰直線の勾配は性周期相にかかわらず平均SR、前額、胸および前腕で女性が男性よりも有意に小さかった。また、その傾向は背においても同様にみられた。このことから大腿を除く女性の低いSRは発汗反応の末梢機構の感受性が低いことに起因すると考えられる。本実験では女性のSGOはほとんどの測定部位において男性よりも小さかった。SGOは汗腺の大きさやコリン感受性の指標とされていることから (Sato and Sato 1983), 女性は男性より

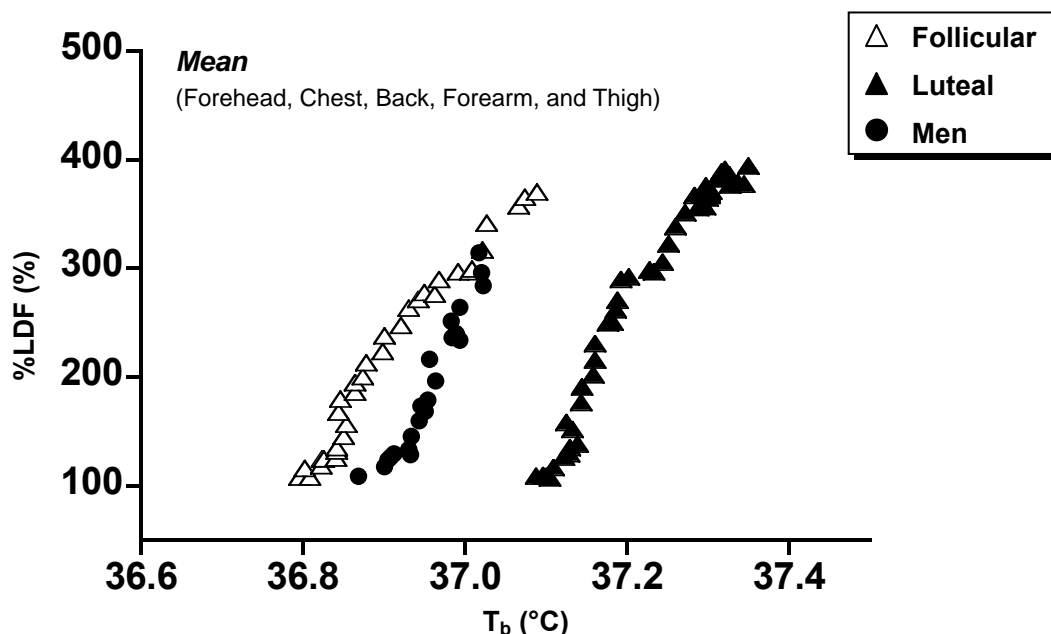


Figure II-1-9. Relationship between mean body temperature (T_b) and skin blood flow (%LDF) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular and mid-luteal phases. Values are means for 10 young untrained women and 6 young untrained men.

Table II-1-5. The onset of mean body temperature (T_b) for vasodilation (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and skin blood flow at each body site.

	Women		Men
	F	L	
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)			
Forehead	36.75 \pm 0.08	37.04 \pm 0.07 [†]	36.84 \pm 0.08
Chest	36.80 \pm 0.07	37.03 \pm 0.09 [†]	36.87 \pm 0.07
Back	36.79 \pm 0.07	37.04 \pm 0.06 [†]	36.84 \pm 0.07
Forearm	36.73 \pm 0.08	37.03 \pm 0.08 [†]	36.86 \pm 0.08
Thigh	36.78 \pm 0.07	37.06 \pm 0.06 ^{†, *}	36.84 \pm 0.08
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	36.77 \pm 0.07	37.04 \pm 0.07 [†]	36.85 \pm 0.08
Sensitivity ($\%/\text{^{\circ}\text{C}}$)			
Forehead	510 \pm 75	888 \pm 224	762 \pm 188
Chest	675 \pm 147	741 \pm 130	1017 \pm 194
Back	575 \pm 90	943 \pm 129 [†]	888 \pm 252
Forearm	1464 \pm 346	1697 \pm 283	2849 \pm 679
Thigh	2486 \pm 441 *	2705 \pm 529 *	956 \pm 198
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	1142 \pm 220	1395 \pm 259	1294 \pm 302

Values are means \pm SEM for 10 young untrained women and 6 young untrained men.

The women carried out this experiment in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phases.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

[†] Significantly different from mid-follicular phase, $p < 0.05$.

も汗腺が小さい、もしくは、汗腺のコリン感受性が低いために男性よりも低いISRとなったと推察される。

本実験では性周期相にかかわらず大腿を除く部位では皮膚血管拡張反応の感受性に性差がみられなかったものの、大腿においては女性の皮膚血管拡張反応の感受性が男性よりも大きかった。そのため、下肢温浴時における皮膚血管拡張反応の感受性の性差の程度は身体部位で異なることが示唆される。一般体表面における皮膚血管拡張反応は血管収縮神経と能動的血管拡張システムによって調節されている。Shastry et al. (1998) や Kellogg et al. (1999) らは、能動的血管拡張システムによる皮膚血管拡張は発汗神経から放出される共同物質 and/or 汗腺からの血管拡張性物質によって引き起こされると報告しており、皮膚血管拡張反応は発汗反応と密接に関係していることが示唆されている (Inoue et al. 1998)。前述のように、女性は男性よりも低い熱産生量にかかわらず大腿でのSRだけが男性と同等の値を示したことから、大腿の発汗反応は他の測定部位 (前額, 胸, 背および前腕) のそれよりも優れていることが示唆される。そのため、男性より大きな大腿の血管拡張反応は能動的血管拡張システム, 特に発汗神経由来の血管拡張に関係ある可能性が推察される。

5. 要約

本実験では性差が安静時の熱放散反応に及ぼす影響を検討するため、若年女性 10 名と若年男性 6 名に対して環境温 30°C (45%RH) 下において 60 分間の下肢温浴 (湯温 42°C) を負荷した。若年女性は性周期の卵胞中期と黄体中期の 2 回実験を実施した。

黄体中期では女性の安静および下肢温浴時の T_{re} が男性より有意に高く、卵胞中期では性差の影響は認められなかった。性周期相にかかわらずSRは大腿を除く前額、胸、背および前腕で女性が男性よりも有意な低値を示した。一方、%LDFは大腿においてのみ女性が男性よりも有意に高く、その他の部位 (前額、胸、背および前腕) では性差の影響はみられなかった。 T_b とSR、 T_b と F_{sw} 、 F_{sw} とSR、および、%LDFと T_b の対応関係より求めた発汗開始および皮膚血管拡張閾値と各熱放散反応の感受性の群差から、男性より劣る女性のSRは発汗反応の末梢機構の感受性が低いことに、男性より高い大腿の%LDFは皮膚血管拡張反応の感受性が高いことにそれぞれ起因することが推察された。また、黄体中期において女性の熱放散反応の体温閾値は男性のそれよりも高く、卵胞中期では男性のそれと同等の値を示した。

以上の結果から、女性は男性と比較して発汗反応が劣っている一方、皮膚血管拡張反応に依存した熱放散特性を持ち、これらの反応は特に大腿で顕著にみられることが示唆された。また、性差は卵胞中期よりも黄体中期で顕著となることが示された。

実験 II-2 運動時

1. 目的

運動時において温熱ストレスが大きくなると熱放散反応に対する性周期の影響は小さくなり、その影響は比較的穏やかな温熱ストレス時に顕著にみられることから (Horvath and Drinkwater 1982), 第4章 実験I-2 では常温環境下での一定負荷中等度運動〔最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) の50%〕を用いて熱放散反応の性差を検討した。一方、運動時の熱放散反応における性差は温熱ストレスの増加に伴い顕著となる可能性が示唆されることから (Morimoto et al. 1967), 運動強度の増加に伴いその性差の程度は大きくなることが予想されるものの、これまでこの点に関しては明らかではない。そこで、実験II-2の目的は50% $\dot{V}O_{2max}$ を中間とした3段階の漸増負荷運動時において性差が熱放散反応およびその調節特性に及ぼす影響を女性の性周期を考慮して検討することとした。

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では健康な若年成人女性10名および若年成人男性9名を被験者とし、その身体特性をTable II-2-1に示した。その他は実験I-1の2.1.(P.39)と同様であった。

2.2. 実験条件および手順

女性被験者は卵胞中期の1回に、男性被験者は任意の日にそれぞれ運動実験を実施した。全ての実験は暑熱順化の影響を避けるために、9月上旬から10月下旬にかけて実施した。実験実施にあたる注意事項は実験I-1の2.2.(P.39)と同様であった。

Table II-2-1. Physical characteristics of each group.

Variables	Women	Men
Age (yr)	21.0 ± 0.2	21.1 ± 0.4
Height (cm)	162.0 ± 1.3	174.2 ± 1.7 *
Mass (kg)	52.0 ± 2.8	64.3 ± 3.4 *
AD (m ²)	1.50 ± 0.04	1.72 ± 0.05 *
AD/Mass (cm ² /kg)	290.4 ± 7.4	270.9 ± 6.9
MSF (mm)	14.8 ± 1.1	9.5 ± 1.7 *
%BF (%)	15.9 ± 2.5	13.3 ± 2.3
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	42.9 ± 1.2	47.2 ± 1.4

Values are means ± SEM for 10 young untrained women and 9 young untrained men. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, $\dot{V}O_{2max}$: maximal oxygen uptake. The women carried out this experiment in mid-follicular phase.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

Table II-2-2. The absolute exercise intensity (W) and absolute exercise intensity per mass (W/kg) of each exercise stage.

		Women	Men
35%$\dot{V}O_2$max	(W)	45.1 ± 3.1	58.8 ± 2.6 *
	(W/kg)	0.87 ± 0.05	0.93 ± 0.06
50%$\dot{V}O_2$max	(W)	73.4 ± 3.8	92.8 ± 3.1 *
	(W/kg)	1.42 ± 0.05	1.47 ± 0.07
65%$\dot{V}O_2$max	(W)	101.6 ± 4.9	126.2 ± 4.3 *
	(W/kg)	1.97 ± 0.06	1.99 ± 0.08

Values are means ± SEM for 10 young untrained women and 9 young untrained men. The women carried out this experiment in mid-follicular phase.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

人工気象室入室までの手順は実験II-1 の 2.2. (P.68) と同様とした。環境温 30°C (45%RH) に設定した人工気象室内で少なくとも 40 分間の椅座位安静を保ち、この間に測定用器具を装着した。安静ベースラインデータを測定後、35%、50%および 65% $\dot{V}O_2$ maxに相当する強度の半仰臥位自転車運動を各 20 分間、連続して計 60 分間実施した。なお、各被験者の $\dot{V}O_2$ maxは別の日に最大下負荷漸増法で推定した。

2.3. 測定項目

測定項目およびその方法は汗の拍出頻度を除き、実験 I-1 の 2.3. (P.40-41) と同様とした。

2.4. データ分析および統計処理

全てのデータは平均値±標準誤差 (SEM) で示した。各パラメータは各運動強度の終了直前 5 分間のデータを平均し、運動強度とその平均値の対応関係で示した。運動強度の増加に伴う平均体温 (T_b) の変化には顕著な性差がみられなかったことから、性差の影響がみられた発汗反応に関して、運動強度と発汗量 (SR) の対応関係における回帰直線の勾配を各被験者の部位ごとに求めた。各パラメータの有意差検定は二元配置の分散分析を用いた。いずれの検定においても有意水準は $p < 0.05$ に設定した。

3. 結果

本実験において年齢、体表面積/体重比、体脂肪率および $\dot{V}O_2$ maxには性差は認められなかったが、身長、体重および体表面積は女性が男性よりも有意に低く、皮下脂肪厚は女性が男性よりも有意に高かった (Table II-2-1)。35%、50%および 65% $\dot{V}O_2$ max時の絶対運動強度 (Watts) はいずれの運動強度においても女性が男性よりも有意に低かったが、体重 1kgあたりの運動強度 (Watts/kg) には有意な性差は認められなかった (Table II-2-2)。

安静時およびいずれの運動強度時において心拍数 (HR), 平均血圧 (MAP), 直腸温 (T_{re}), 安静時からの直腸温の変化度 (ΔT_{re}), 平均皮膚温 (T_{sk}) および T_b に有意な性差は観察されなかった (Fig. II-2-1). また, 胸, 背および大腿の局所皮膚温 (T_{sl}) は安静時およびいずれの運動強度時において有意な性差はみられなかった. 一方, 前額では安静時に, また, 前腕では安静時および $35\% \dot{V}O_{2max}$ 時において女性の T_{sl} は男性のそれよりも有意に低い値を示した (Fig. II-2-2).

平均SRは運動強度の増加に伴い両群とも有意に増加したが, いずれの運動強度時において有意な性差はみられなかった. 平均SRと同様に背および前腕においてもSRには有意な性差はみられなかったが, 大腿では全ての強度で女性が男性よりも低くなる傾向にあった ($p < 0.10$). 一方, 前額では

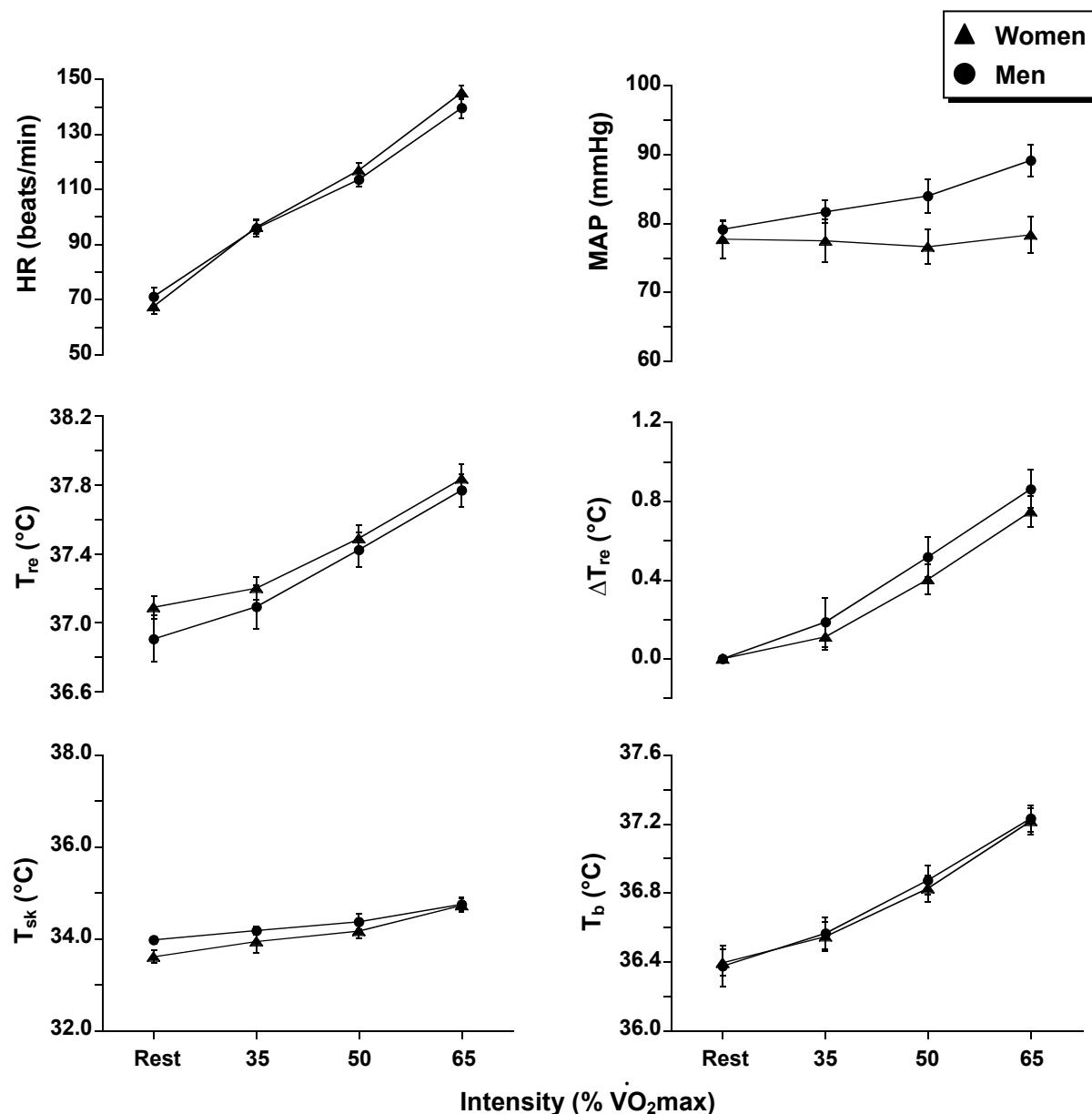


Figure II-2-1. Changes in heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP), rectal temperature (T_{re}), change in rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature (T_{sk}), and mean body temperature (T_b) at rest and each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_{2max}$) in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular phase. Values are means \pm SEM.

35%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時に、また、胸では65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時に女性が男性より有意な低値を示し、それぞれ、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時にその傾向がみられた ($p < 0.10$) (Fig. II-2-3)。運動強度とSRの対応関係における回帰直線の勾配は前額および胸において女性が男性よりも小さくなる傾向がみられた ($p < 0.10$) (Table II-2-3)。

女性の平均活動汗腺数 (ASG) は35%から65% $\dot{V}O_2\text{max}$ まで運動強度の増加に伴い有意に増加したが、男性の平均ASGは35%から50% $\dot{V}O_2\text{max}$ にかけて有意に増加したものの、50%から65% $\dot{V}O_2\text{max}$ にかけては有意な増加はみられなかった。平均ASGはいずれの運動強度時において有意な性差はみられなかった。部位別では、前額のASGは全ての運動強度において女性が男性よりも有意に低い値を示した。一方、背では50%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時に、また、大腿では65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時に女性が男性

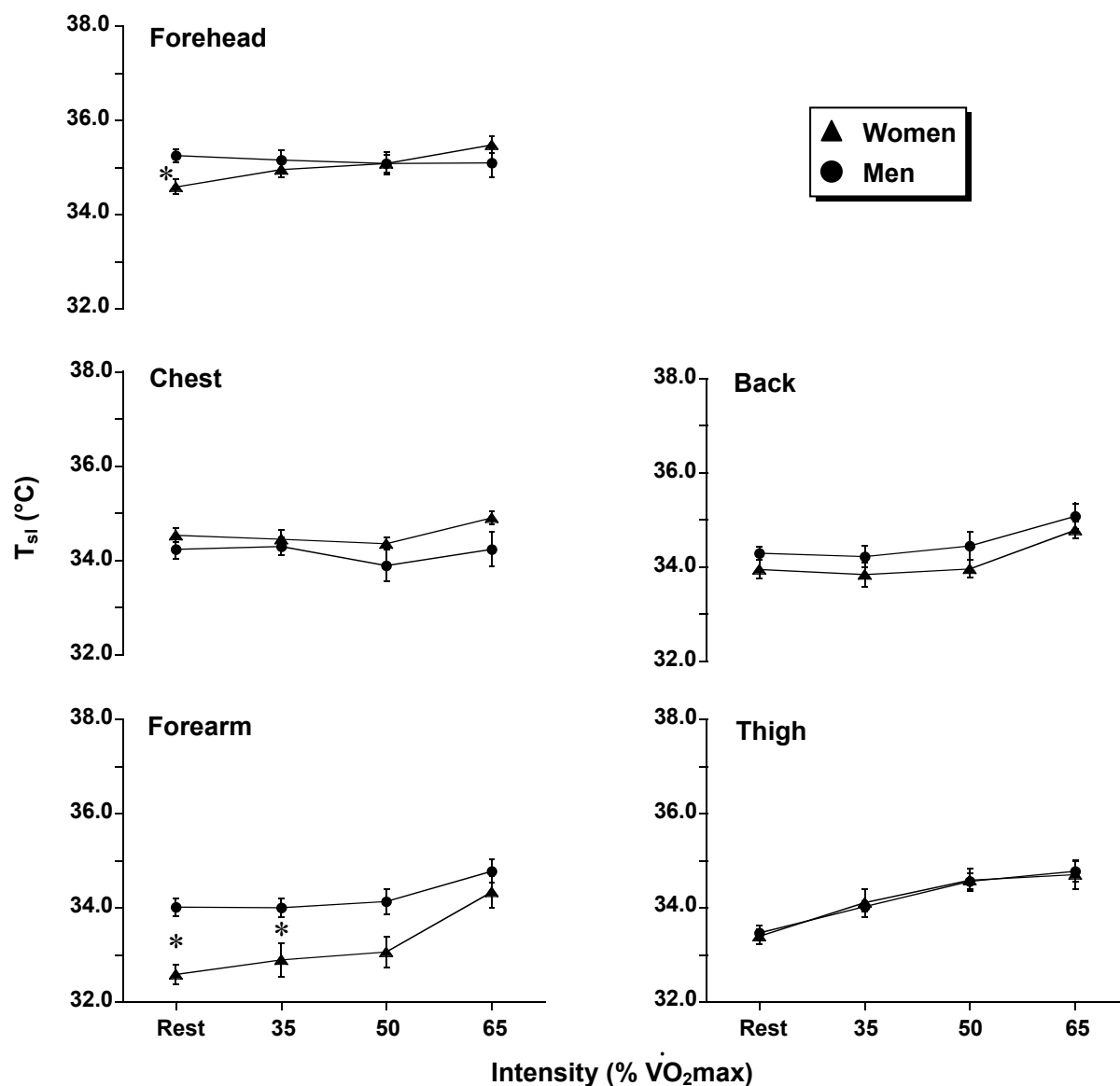


Figure II-2-2. Changes in local skin temperature (T_{sk}) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh at rest and each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular phase. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

よりも有意に高い値を示した。胸および前腕のASGには有意な性差はみられなかった (Fig. II-2-4)。

平均単一汗腺あたりの汗出力 (SGO) は平均SRと同様に運動強度の増加に伴い有意に増加した。平均SGOはいずれの運動強度時において有意な性差はみられなかった。平均SGOと同様に前額、背および前腕では有意な性差はみられなかった。胸では $65\% \dot{V}O_{2max}$ 時に女性が男性よりも有意に低くなり、 $50\% \dot{V}O_{2max}$ 時にその傾向がみられた ($p < 0.10$)。また、大腿では $50\% \dot{V}O_{2max}$ 時に女性が男性よりも有意に低くなり、 35% および $65\% \dot{V}O_{2max}$ 時にその傾向がみられた ($p < 0.10$) (Fig. II-2-5)。

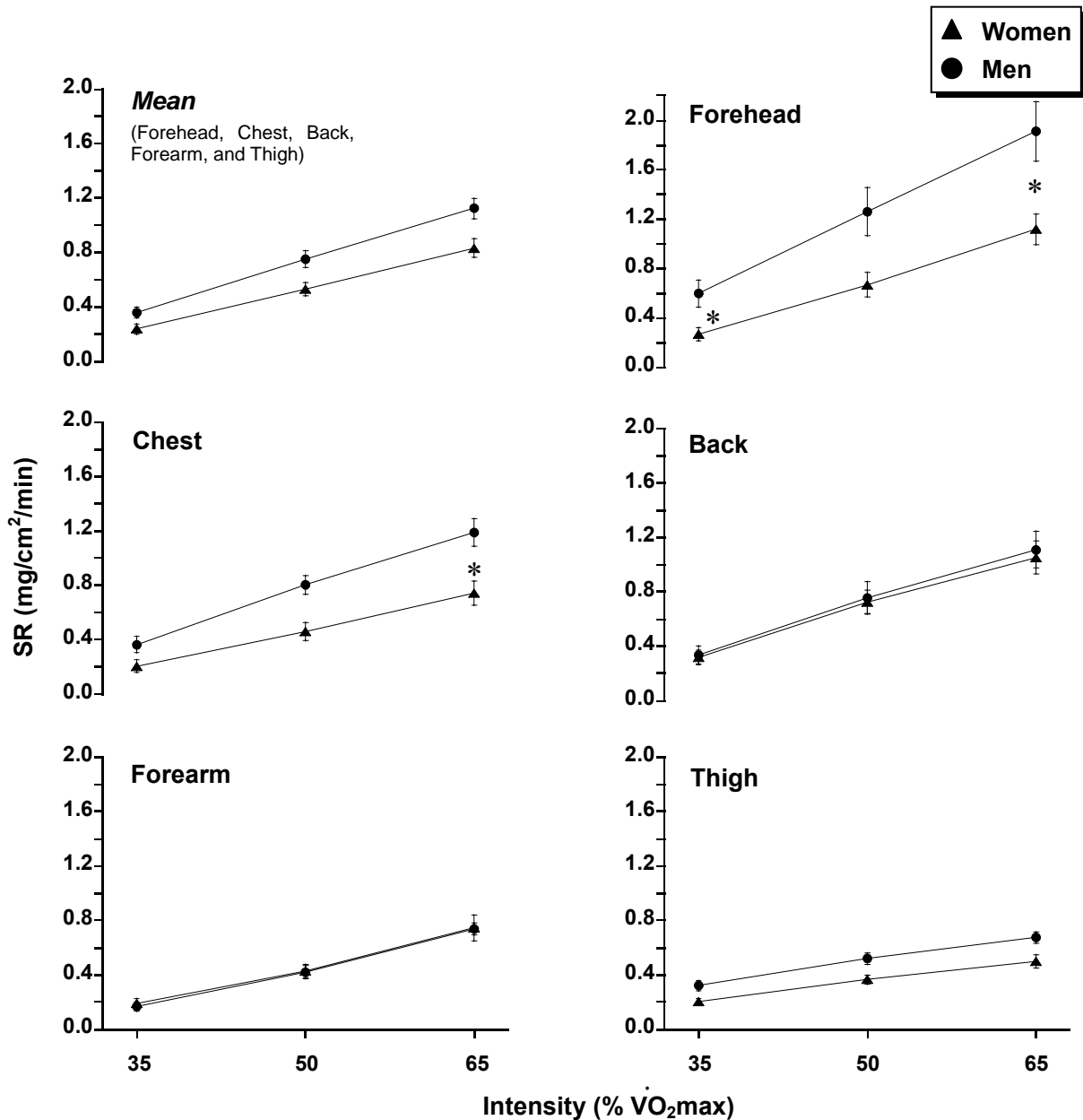


Figure II-2-3. Change in sweating rate (SR) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_{2max}$) in young untrained women and men. The SR increased significantly with the increase in exercise intensity regardless of body site and group. The women carried out this experiment in mid-follicular phase. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

Table II-2-3. The slopes for relationships between relative exercise intensity and sweating rate at each body site.

	Women	Men
Slope ((mg/cm²/min)/W)		
Forehead	0.028 ± 0.003	0.044 ± 0.005
Chest	0.018 ± 0.002	0.028 ± 0.004
Back	0.024 ± 0.004	0.026 ± 0.004
Forearm	0.018 ± 0.002	0.019 ± 0.002
Thigh	0.010 ± 0.001	0.024 ± 0.013
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.020 ± 0.002	0.026 ± 0.003

Values are means ± SEM for 10 young untrained women and 9 young untrained men. The women carried out this experiment in mid-follicular phase.

総体重減少量 (TWL) には有意な性差はみられなかった (女性および男性それぞれ 268 ± 31 および 348 ± 27 g/m²/h)。

両群の皮膚血流量 (%LDF) は平均およびいずれの部位においても運動強度の増加に伴い有意な増加を示し、また、いずれの部位においても有意な性差はみられなかった (Fig. II-2-6)。

4. 考察

実験II-2 において、いずれの運動強度において平均SRおよび平均%LDFとも顕著な性差はみられないものの、部位ごとに検討すると、ある運動強度で前額および胸のSRと運動強度の増大に伴うSR増加の仕方には性差が存在し、女性のSRは男性のそれよりも低いことが示された。また、性差にかかわらず 35%から 50% $\dot{V}O_{2max}$ へのSRの増加はASGとSGOの増加で、50%から 65%へのSRの増加は男性ではSGOのみの増加で、一方、女性ではASGおよびSGOの両者の増加に起因することが示唆され、運動強度の増加に伴うSR増加の調節特性に性差が認められた。さらに、漸増負荷運動時の%LDFには顕著な性差は観察されなかった。

日本人若年女性(21歳)の $\dot{V}O_{2max}$ の平均値は 35.5 ± 4.9 (SD) ml/kg/min, 同男性(21歳)は 47.6 ± 5.6 ml/kg/minと報告されている(東京都立大学体力標準値研究会 2000)。体力レベルは熱放散反応に影響することが報告されているので、本実験では同一体力レベルにおける性差を検討するために、女性と男性の $\dot{V}O_{2max}$ が同等になるように配慮した。そのため、本実験の男性〔 47.2 ± 1.4 (SEM) ml/kg/min〕は一般的な体力レベルであるのに対して、本実験の女性 (42.2 ± 1.1 ml/kg/min) は一般的な女性よりも体力レベルが高い女性であった。また、本研究では男女の体力レベルを揃えたものの身長および体表面積/体重比は女性が有意に低く、また、MSFでは女性が有意な高値を示したことから、本実験の結果に形態的な性差が関与している可能性は否定できない。

本実験において平均SRでは、いずれの運動強度においても有意な性差は観察されなかった。この

ことは、体力レベルを揃えると常温環境下での $76\% \dot{V}O_2\max$ のトレッドミル走時のSRに性差はみられないという先行研究と一致し (Davies 1979), SRは性差にかかわらず、体力レベルに依存して決定される可能性が推察される。しかし、部位ごとに詳細に検討すると前額および胸において性差がみられ、女性のSRは男性のそれよりも低く、この女性の少ないSRは主に男性よりも少ないASG (前額) もしくは低いSGO (胸) に起因することが示された。表面積では男女間で大きな性差がない前額 (Fujimoto and Watanabe 1969) のASGは男性より女性で少ないこと、本実験では全ての部位で有意な差がみられたわけではないものの、全身一様に女性のSGOが男性のそれより低いことから、女

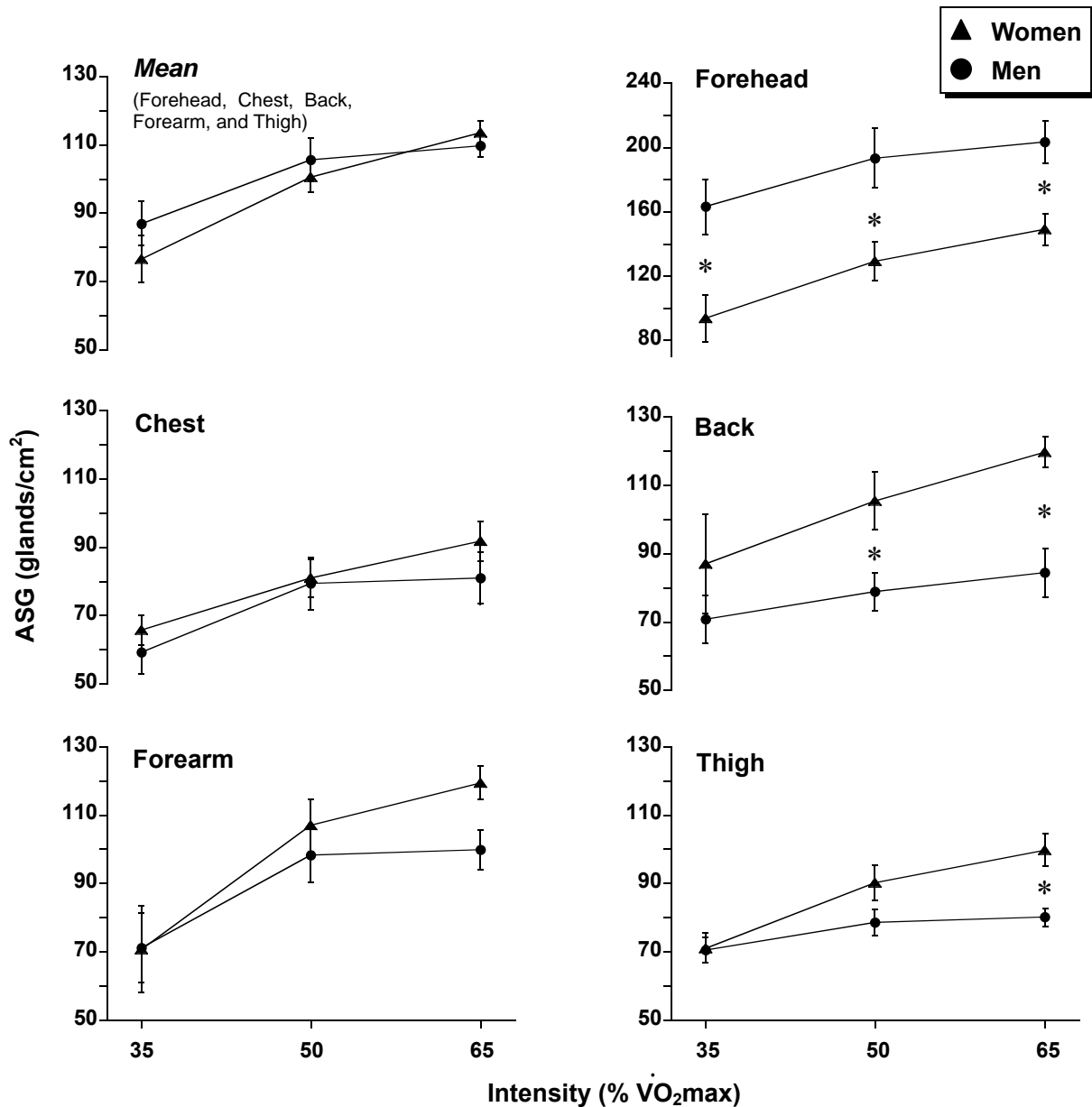


Figure II-2-4. Changes in active sweat glands (ASG) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\max$) in young untrained women and men. Although the ASG increased significantly with the increase in exercise intensity in women, it did not increase significantly from 50% to 65% $\dot{V}O_2\max$ in men. The women carried out this experiment in mid-follicular phase. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

性の発汗反応は男性のそれと比較して劣ることが考えられる。また、環境温 30°Cの条件下で 60% $\dot{V}O_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動を 35 分間行なった際、卵胞期の女性と男性の発汗開始および皮膚血管拡張閾値と各熱放散反応の感受性には性差がみられないこと (Kolka et al. 1987), 性差は女性ホルモン濃度が低い卵胞中期よりも高くなる黄体中期で顕著にみられることから (実験II-1), 本実験の条件で体力レベルが同等の黄体中期の女性と男性を比較すると、本実験の結果よりもより顕著な性差がみられる可能性は考えられる。

運動時の温熱ストレス増加に伴いTWLの性差が顕著になり (Morimoto et al. 1967), 高温多湿の厳

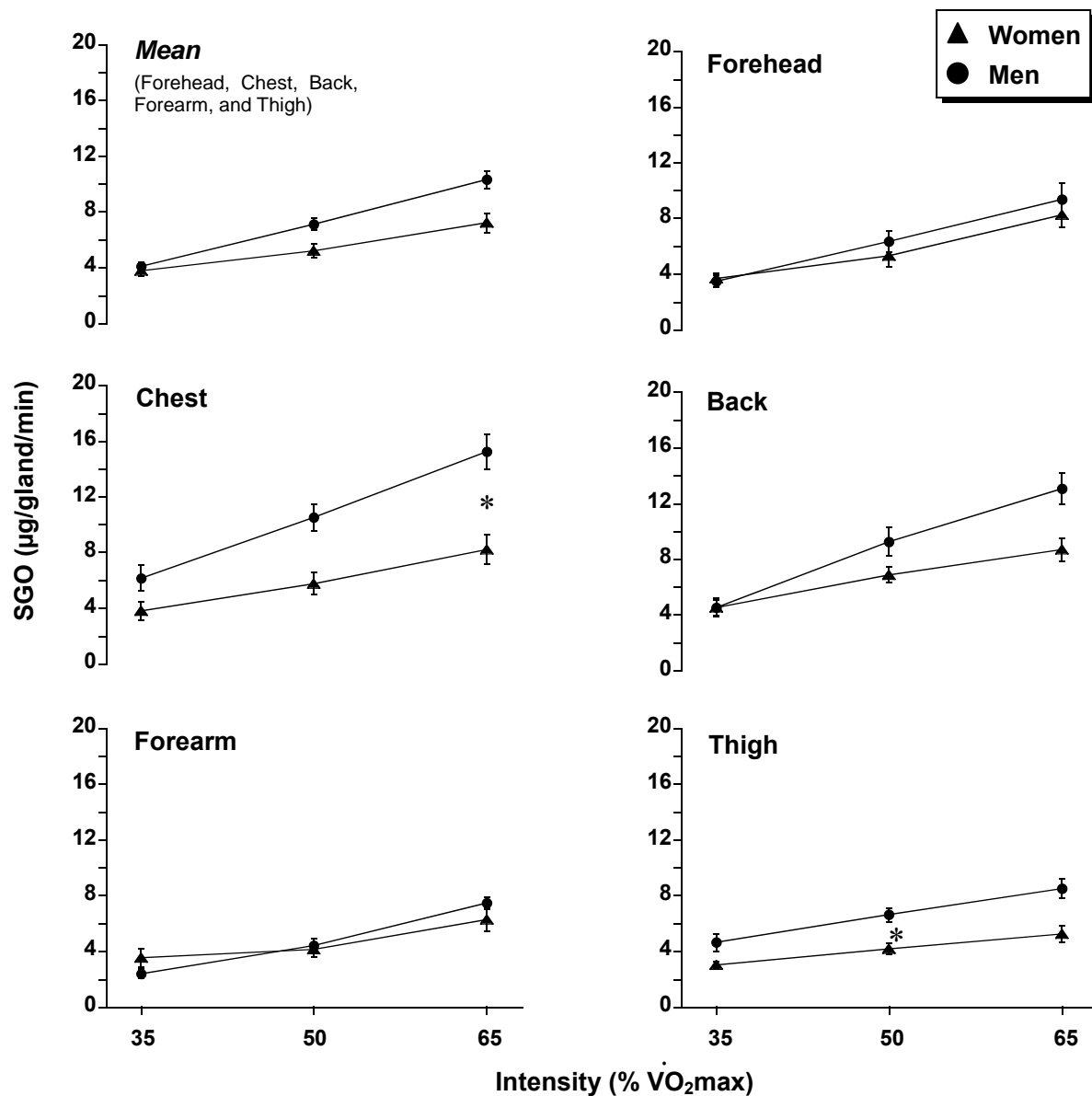


Figure II-2-5. Changes in sweat gland output (SGO) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in young untrained women and men. The SGO increased significantly with the increase in exercise intensity regardless of body site and group. The women carried out this experiment in mid-follicular phase. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between women and men, $p < 0.05$.

しい温熱ストレス下での運動時では、男女の体力レベルを揃えた場合でも女性のSRは男性よりも明らかに少なくなることから (Avellini et al. 1980 ; Frye and Kamon 1981), 本実験では運動時の熱放散反応における性差が運動強度の増加に伴い顕著となることを予想していた。しかし、運動強度と平均SRの対応関係における回帰直線の勾配には有意な性差は観察されず、運動強度の増加に伴う顕著な性差の拡大はみられなかった。これまでの先行研究では女性の性周期は考慮されていないこと (Morimoto et al. 1967 ; Davies 1979 ; Frye and Kamon 1981), また、本実験の条件は環境温 30°C (45%RH) の常温環境であり、かつ多湿条件ではない。したがって、これらの相違が本実験と先行研究における結果の相違を生じさせた可能性が考えられる。一方、部位ごとにもみると、35% $\dot{V}O_2\text{max}$ では女性の前額のSRが、65% $\dot{V}O_2\text{max}$ では女性の前額と胸のSRが男性のそれよりも有意に低い値を示し、これらの部位では女性の運動強度とSRの対応関係における回帰直線の勾配は男性のそれよりも小さくなる傾向が観察された。これらのことから、全身でみた場合、SRに顕著な性差は観察されないものの、部位によっては女性のSRが男性のそれよりも有意に低くなるので、性差の影響は部位ごとに異なる可能性が示唆される。

35%から 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ への平均SRの増加は両群とも平均ASGと平均SGOの増加で、50%から65% $\dot{V}O_2\text{max}$ への平均SR増加は女性が平均ASGと平均SGOの増加で、男性が平均SGOのみの増加で

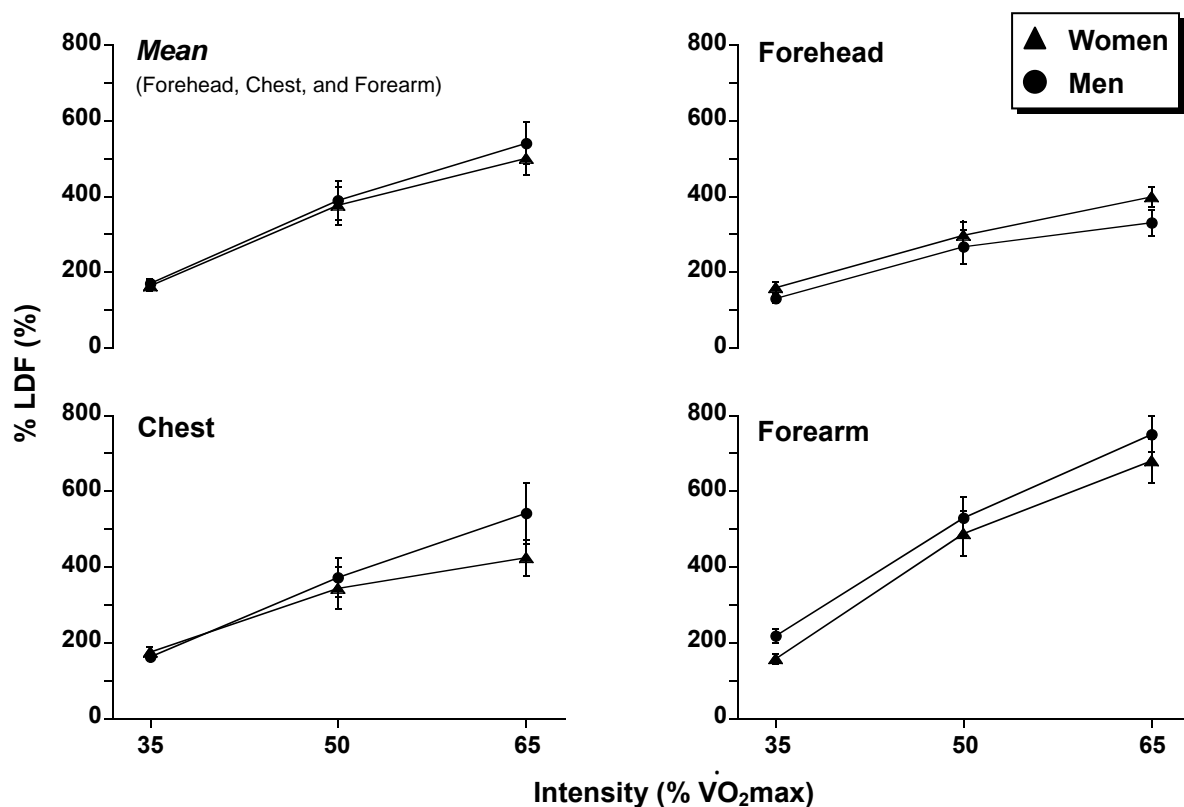


Figure II-2-6. Changes in skin blood flow (%LDF) on the forehead, chest and forearm, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in young untrained women and men. The women carried out this experiment in mid-follicular phase. Values are means \pm SEM.

調節されていることが考えられる。この結果は男性が女性より低い相対運動強度で平均ASGのピーク値に達することを示唆する。同一強度の運動において、汗腺機能の優れた運動トレーニング者のASGのピーク値は非運動トレーニング者より早期に出現することが報告されている (Araki et al. 1978)。この結果から、一般的なヒトにおける汗腺機能は女性が男性より劣っていると推察される。Kawahata (1960) は、男性に女性ホルモンの一つであるエストラジオールを投与すると発汗潜時が長くなり、また、男性ホルモンであるテストステロンの投与により発汗潜時が短くなることから、女性ホルモンは発汗反応を抑制的に、男性ホルモンは促進的に作用することを示唆している。本実験でみられた汗腺機能の性差にはこれらの性ホルモンの影響が考えられるものの、性ホルモンが発汗神経からのアセチルコリンの放出および汗腺にある受容体の感受性のどちらに影響を及ぼしたのかは明らかではない。

本実験において女性の前額、胸および大腿のSRは男性のそれと比較して有意に低い値、もしくはその傾向がみられたが、%LDFには顕著な性差はみられなかった。Kolka et al. (1987) は、環境温30°Cの条件下で60% $\dot{V}O_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動を35分間行なった時の発汗開始および皮膚血管拡張閾値とその感受性は卵胞期の女性と男性の間で有意な差はみられないと報告している。このことから本実験でSRと%LDFに顕著な性差がみられなかったのは卵胞期の女性と男性を比較したことに起因することが推察される。そのため、黄体期の女性と男性を比較した場合、本実験の結果と異なる可能性が考えられる。しかし、実験II-1では性周期にかかわらずSRは大腿を除く全ての部位(前額、胸、背および前腕)で女性が男性よりも有意に低くなることを示した。そのため前述のように性周期相の違いだけでは説明ができないと考えられる。実験II-1と結果が異なった原因の一つとして、本実験と実験II-1における $\dot{V}O_2\text{max}$ の男女差が挙げられる。本実験と実験II-1におけるその差は有意ではないもののそれぞれ4.3 ml/kg/minと5.6 ml/kg/minであり、その差は本実験でやや小さかった。この差が本実験と実験II-1との相違を生じたのかもしれない。また、性差がみられる部位が本実験と実験II-1で異なったことに関してはそのメカニズムは明らかではない。SRに影響を及ぼす T_{sk} は本実験と実験II-1でほぼ同等だったので、下肢温浴(安静)と漸増負荷運動(運動)という実験条件の違いに起因している可能性が考えられる。すなわち、安静時の熱放散反応は体温や皮膚温などの温熱性要因が主な入力となり熱放散反応が生じるが、運動時のそれは温熱性要因とともに非温熱性要因の入力も関与し (Van Beaumont and Bullard 1963; Gisolfi and Wenger 1984; Johnson 1986; Vissing and Hjortso 1996; Yamazaki et al. 1994a; Takamata et al. 1998; Kondo et al. 2000, 2001; Mack et al. 1995, 2001; Yanagimoto et al. 2002), その入力の違いが本実験と実験II-1との差異を引き起こしたのかもしれない。

5. 要約

本実験では性差が常温環境下漸増負荷運動時の熱放散反応に及ぼす影響を検討するため、体力レベルが同等の運動習慣のない若年成人女性 10 名および若年成人男性 9 名に、環境温 30°C (45%RH) 下において 35%、50%および 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の半仰臥位自転車運動を各 20 分、計 60 分間負荷した。女性被験者は性周期の卵胞中期に実験を実施した。

各運動強度終了直前の T_{re} および T_{sk} に有意な性差は認められなかった。平均SRは両群とも運動強度の増加に伴い有意に増加した。平均SRはいずれの強度においても有意な性差はみられなかったものの、前額および胸のSRは女性が男性よりも有意に低い値を示した。運動強度と平均SRの対応関係における回帰直線の勾配に性差はみられなかったが、前額および胸のそれは女性が男性よりも小さい傾向が観察された。女性の平均ASGは 35%から 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ まで運動強度の増加に伴い有意に増加したが、男性の平均ASGは 35%から 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ にかけて有意に増加したものの、50%から 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ には有意な増加はみられなかった。平均SGOは両群とも平均SRと同様に運動強度の増加に伴い有意に増加した。平均ASGおよびSGOはいずれの運動強度時において有意な性差はみられなかったが、部位によっては性差が観察された。%LDFには性差の影響はみられなかった。

以上の結果から、体力レベルが同等の男女においては運動時の平均SR、ASG、SGOおよび%LDFには顕著な性差は認められないものの、部位ごとに検討すると女性の発汗反応は男性のそれよりも劣ることが示された。また、温熱ストレスの増加に伴う顕著な性差の拡大はみられないものの、部位によってはその可能性の存在が示唆された。さらに、運動強度の増大に伴う発汗量の調節特性（活動汗腺数と単一汗腺あたり汗出力の増加のパターン）にも性差の存在が示唆された。

実験 III-1 安静時

1. 目的

第4章 実験 I-1 の結果から、安静時において性周期が女性の熱放散反応に影響することを示した。女性が長期間運動トレーニングを継続したときの特徴として、黄体期の女性ホルモンの分泌低下が挙げられる (Wallace et al. 1982; Bullen et al. 1984)。そのため女性の場合、運動トレーニングによる熱放散反応への影響には運動トレーニングそれ自体の影響とともに、女性ホルモン分泌低下を介した影響も関与することが考えられる。しかし、これまでの研究ではこの観点から検討しておらず、明らかにされていない。そこで、実験 III-1 の目的は女性において長期運動トレーニングが安静時の熱放散反応の経時変化および体温と熱放散反応の対応関係に及ぼす影響について性周期を考慮し身体の多部位において検討することとした。

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では少なくとも3年以上体育の授業以外で特別な運動を実施していない若年成人女性13名 (非運動トレーニング群, 以下 U 群と略す) と大学陸上競技部もしくはソフトボール部に所属し、持久的な運動トレーニングを少なくとも6年以上継続している女性運動トレーニング者11名 (トレーニング群, 以下 T 群と略す) を比較検討した。Table III-1-1 にその身体特性を示した。その他は実験 I-1 の 2.1. (P.39) と同様であった。

Table III-1-1. Physical characteristics of each group.

Variables	U group	T group
Age (yr)	20.6 ± 0.2	20.5 ± 0.3
Height (cm)	160.2 ± 1.7	160.2 ± 1.6
Mass (kg)	54.1 ± 1.4	52.9 ± 1.5
AD (m²)	1.51 ± 0.03	1.49 ± 0.03
AD/Mass (cm²/kg)	280.5 ± 4.1	284.2 ± 3.2
MSF (mm)	15.6 ± 0.9	11.8 ± 0.8 *
%BF (%)	17.2 ± 1.3	14.3 ± 1.0
$\dot{V}O_2$max (ml/kg/min)	39.2 ± 1.1	53.8 ± 2.3 *

Values are means ± SEM for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, $\dot{V}O_2$ max: maximal oxygen uptake.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

2.2. 実験条件および手順

実験条件およびその手順は実験 I-1 の 2.2. (P.39) と同様とし , 各被験者の卵胞中期および黄体中期に下肢温浴実験を実施した .

2.3. 測定項目

測定項目およびその方法は酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) を除いて実験I-1 の 2.3. (P.40-41) と同様とした .

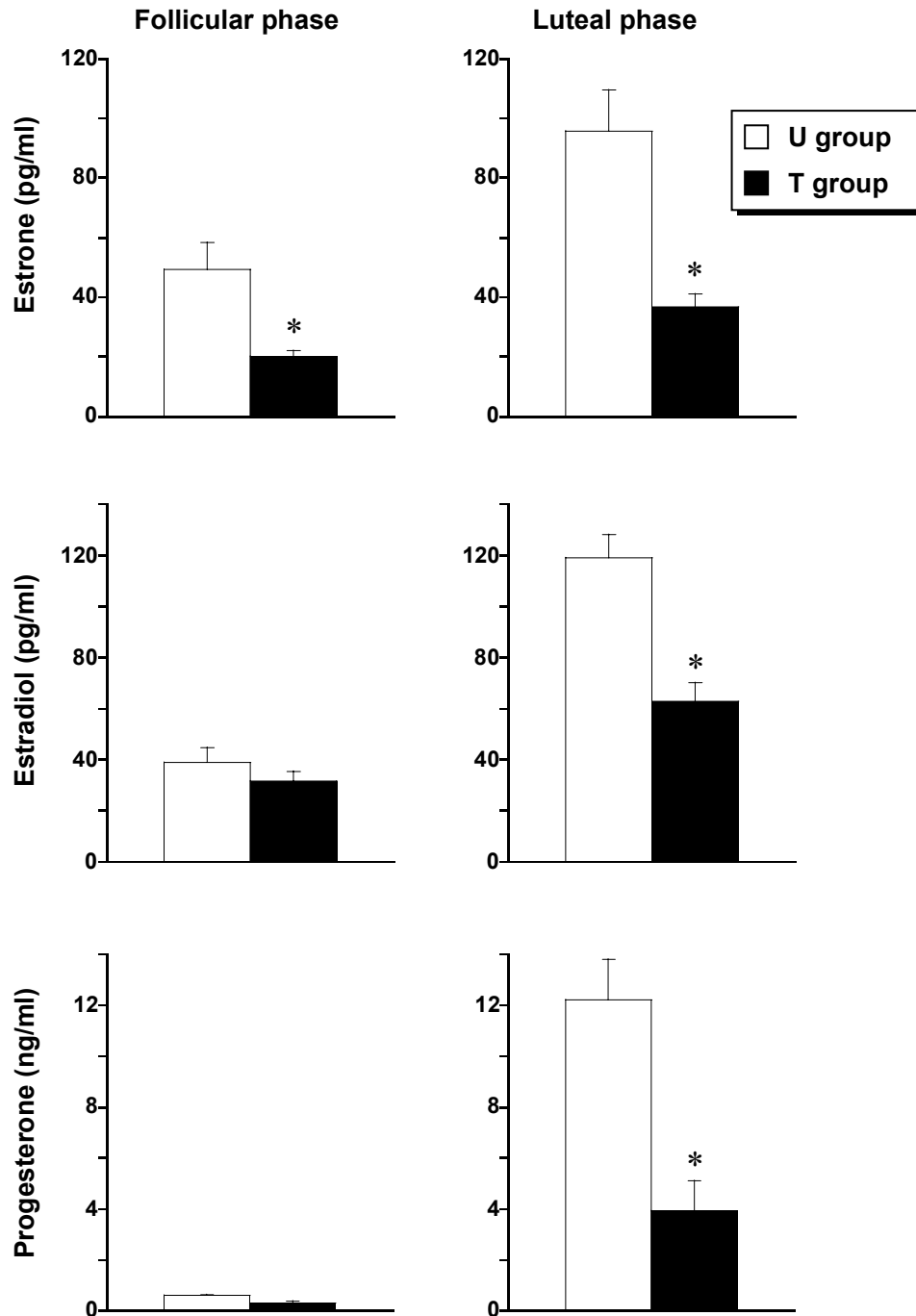


Figure III-1-1. Plasma levels of estrone, estradiol, and progesterone during mid-follicular and mid-luteal phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

2.4. データ分析および統計処理

データ分析は実験 I-1 の 2.4. (P.41-43) と同様であり, 統計処理は実験 II-1 の 2.4. (P.69-70) と同様とした.

3. 結果

本実験において, 年齢, 身長, 体重, 体表面積, 体表面積/体重および体脂肪率にはT群およびU群の間で有意な差は認められなかったが, 平均皮下脂肪厚 (MSF) はT群がU群よりも有意に低く, 最

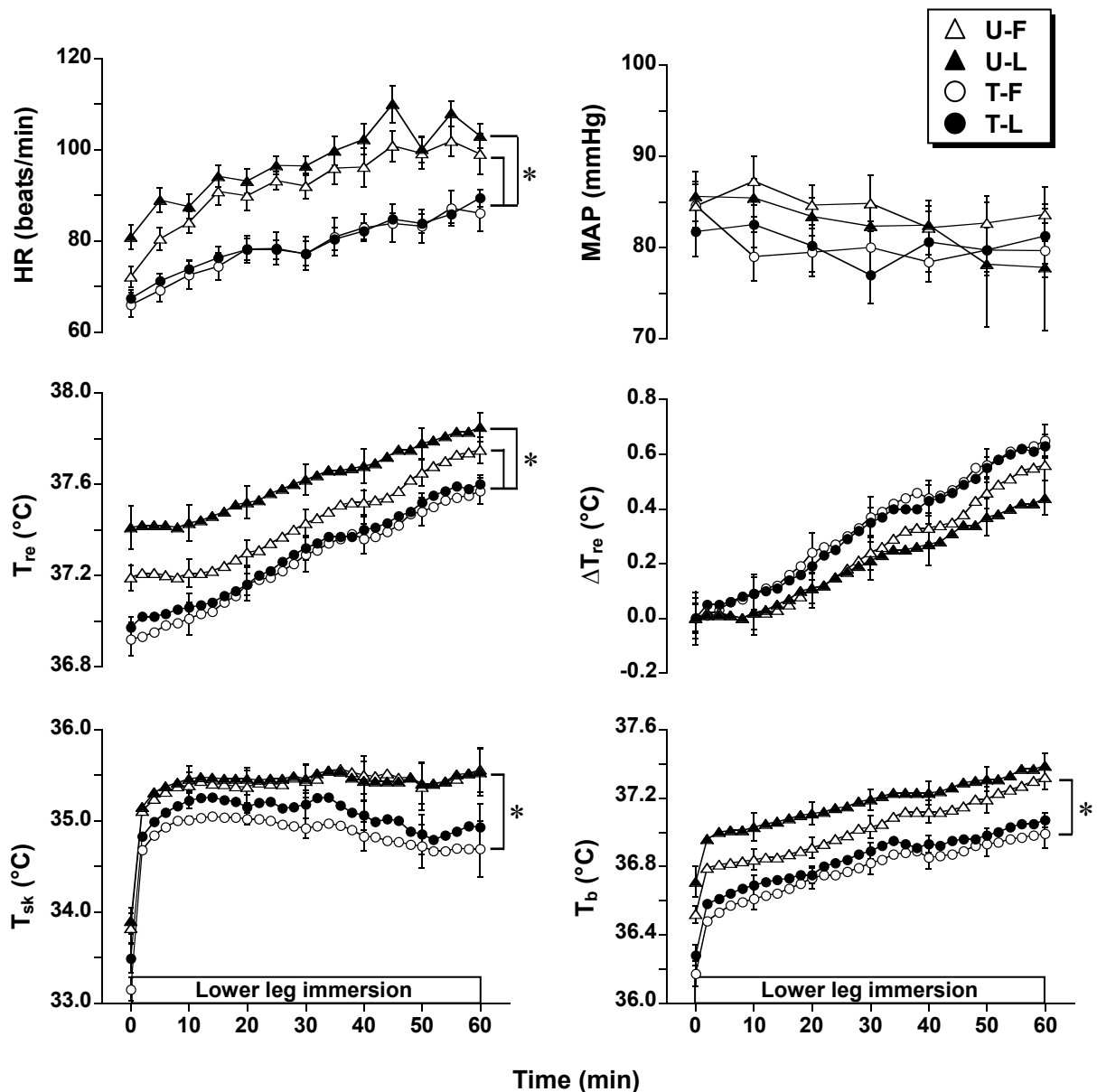


Figure III-1-2. The time courses of heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP), rectal temperature (T_{re}), change in rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature (T_{sk}), and mean body temperature (T_b) during lower leg immersion in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) はT群がU群よりも有意に高い値を示した (Table III-1-1)。

卵胞中期において血漿エストロン濃度はT群がU群より有意な低値を示したが、血漿エストラジオールおよびプロゲステロン濃度には有意な群間差はみられなかった。卵胞中期から黄体中期にかけていずれの女性ホルモン濃度も両群とも有意に増加したが、その増加の程度はT群がU群より小さかったため、黄体中期では全ての女性ホルモン濃度でT群がU群より有意な低値を示した (Fig. III-1-1)。

安静時心拍数 (HR), 直腸温 (T_{re}) および平均体温 (T_b) は性周期相にかかわらずT群がU群より有意な低値を示し、その差は下肢温浴中も同様に認められた。安静時からの T_{re} の変化度 (ΔT_{re}) は性周期相にかかわらずT群がU群より大きい傾向がみられたが ($p < 0.10$), 統計上有意ではなかった。平

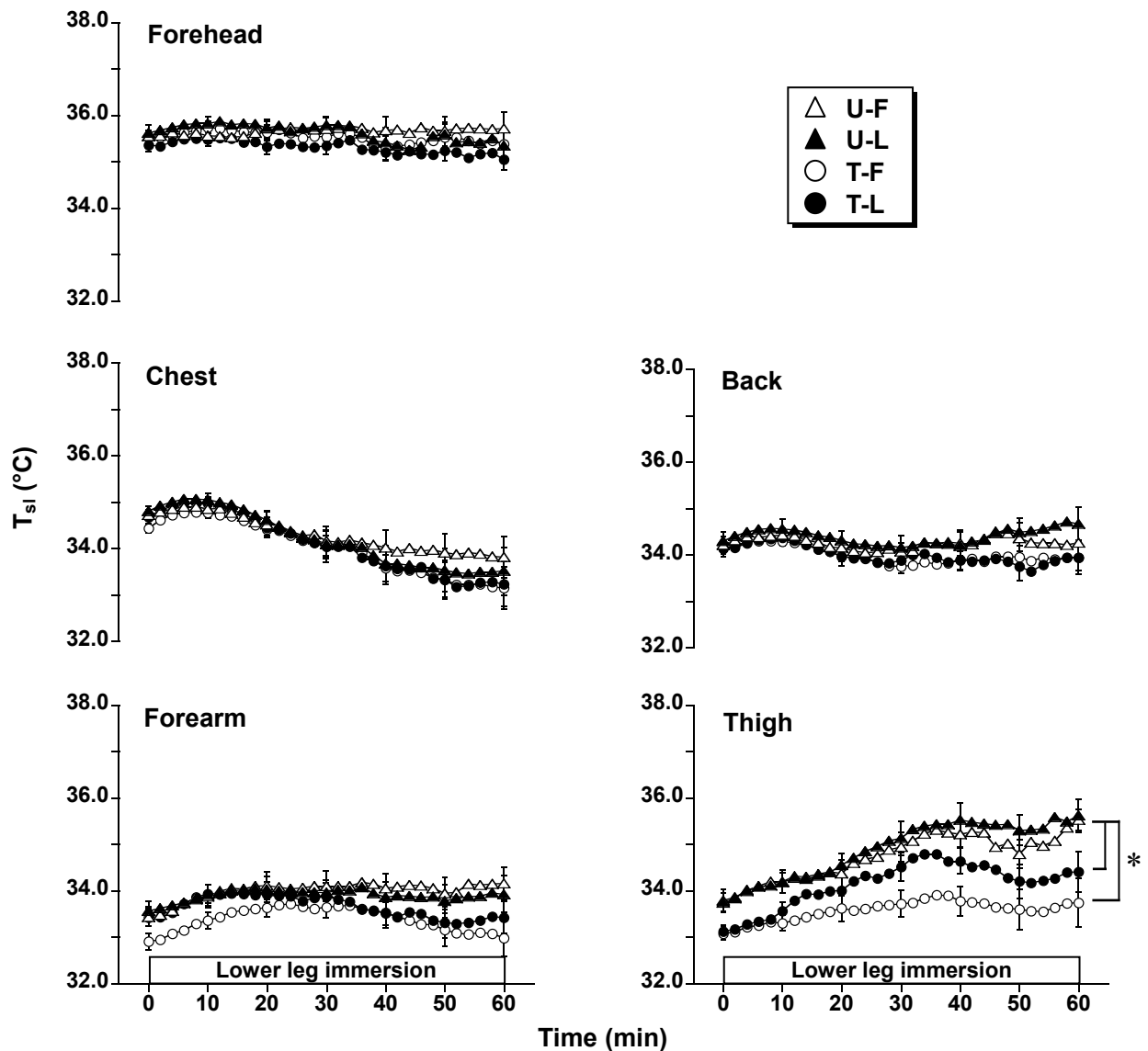


Figure III-1-3. The time courses of local skin temperature (T_{sl}) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh during lower leg immersion in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

均皮膚温 (T_{sk}) は卵胞中期にT群がU群よりも有意に低く、黄体中期にも同様の傾向がみられた ($p < 0.10$)。平均血圧 (MAP) は性周期相にかかわらず有意な群間差は認められなかった。熱放散反応を測定した部位での局所皮膚温 (T_{sl}) は大腿を除いて長期トレーニングの影響はみられなかった。大腿では性周期相にかかわらずT群がU群より有意な低値を示した (Fig. III-1-2 および III-1-3)。

下肢温浴時における平均発汗量 (SR) は性周期相にかかわらず T 群が U 群より有意に高かった。部位ごとにみると黄体中期においてのみ背および前腕で T 群が U 群より有意な高値を示した (Fig. III-1-4)。

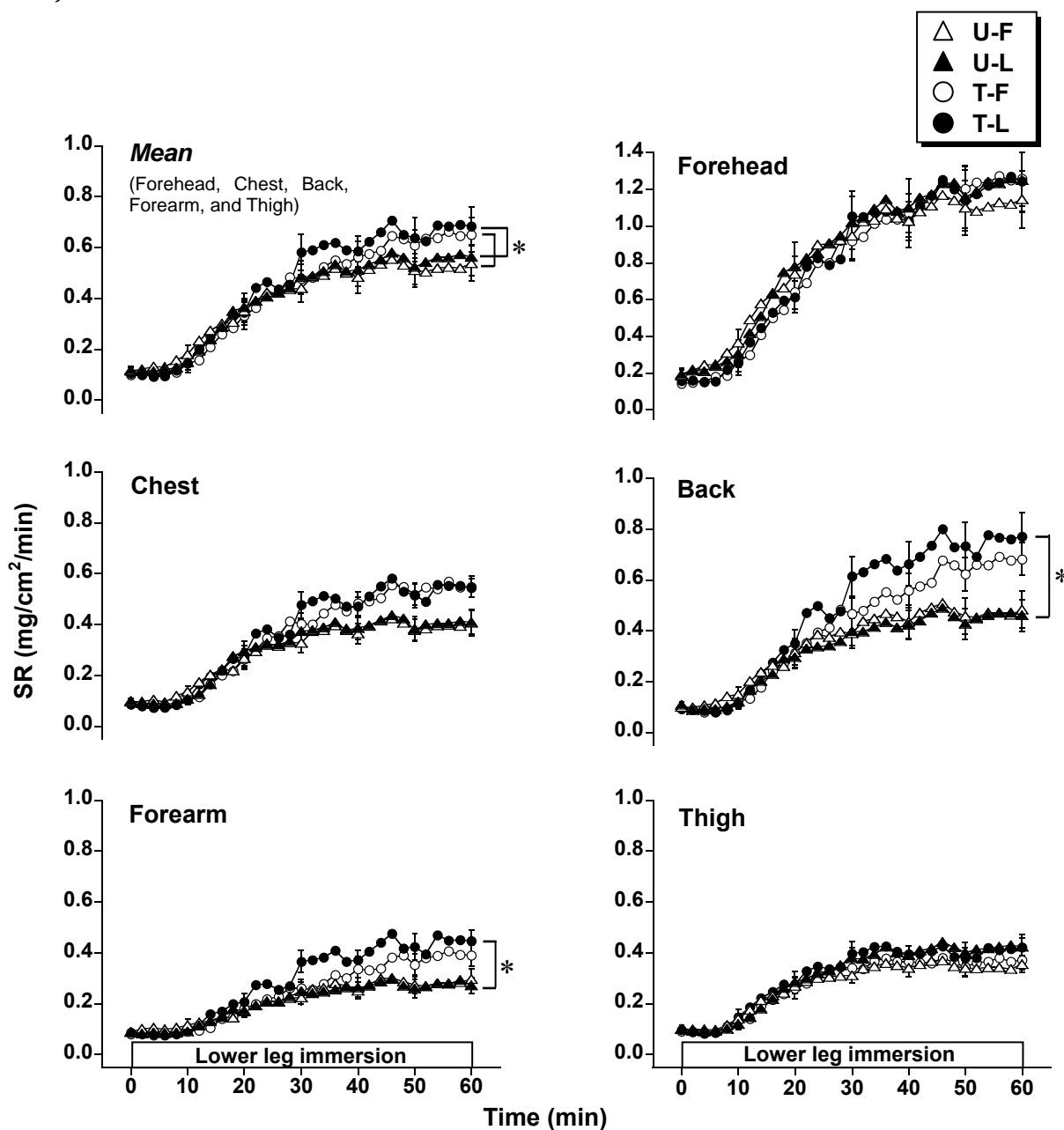


Figure III-1-4. The time courses of sweating rate (SR) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh the mean value of each body site during lower leg immersion in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

発汗開始閾値は性周期相および部位にかかわらず T 群が U 群より有意な低値を示し，発汗反応の感受性には運動トレーニングによる影響はみられなかった (Fig. III-1-5 および Table III-1-2).

T_b と汗の拍出頻度 (F_{sw}) の対応関係から得られた回帰直線は性周期相にかかわらず T 群が U 群の左方に位置してした (Fig. III-1-6 および Table III-1-3). F_{sw} と SR の対応関係から求めた発汗反応の末梢機構の感受性は黄体中期において平均 SR，前額，胸，背および前腕で T 群が U 群よりも有意に大きかった (Fig. III-1-7 および Table III-1-4).

下肢温浴終了直前の SR は卵胞中期および黄体中期とも平均 SR，胸，背および前腕で T 群が U 群より有意に高かった . 活動汗腺数 (ASG) は卵胞中期において前腕で，黄体中期において胸および前腕で T 群が U 群より有意に大きく，単一汗腺あたりの汗出力 (SGO) は黄体中期の背のみで T 群が U 群より有意に大きかった (Fig. III-1-8). 総体重減少量 (TWL) は性周期相にかかわらず T 群が U 群より有意に高かった (T 群および U 群それぞれ卵胞中期 : 244 ± 21 および 187 ± 12 g/m²/h，黄体中期 : 255 ± 24 および 189 ± 15 g/m²/h).

下肢温浴時における皮膚血流量 (%LDF) は平均および各部位とも性周期相にかかわらず群間に有意な差は認められなかった (Fig. III-1-9). 皮膚血管拡張閾値は性周期相および部位にかかわらず T 群が U 群よりも有意な低値を示し， T_b と %LDF の対応関係から得られた皮膚血管拡張反応の感受性は卵胞中期および黄体中期とも有意な群間差はみられなかった . これらの長期トレーニングによる影響はいずれの部位においてもほぼ同様にみられた (Fig. III-1-10 および Table III-1-5).

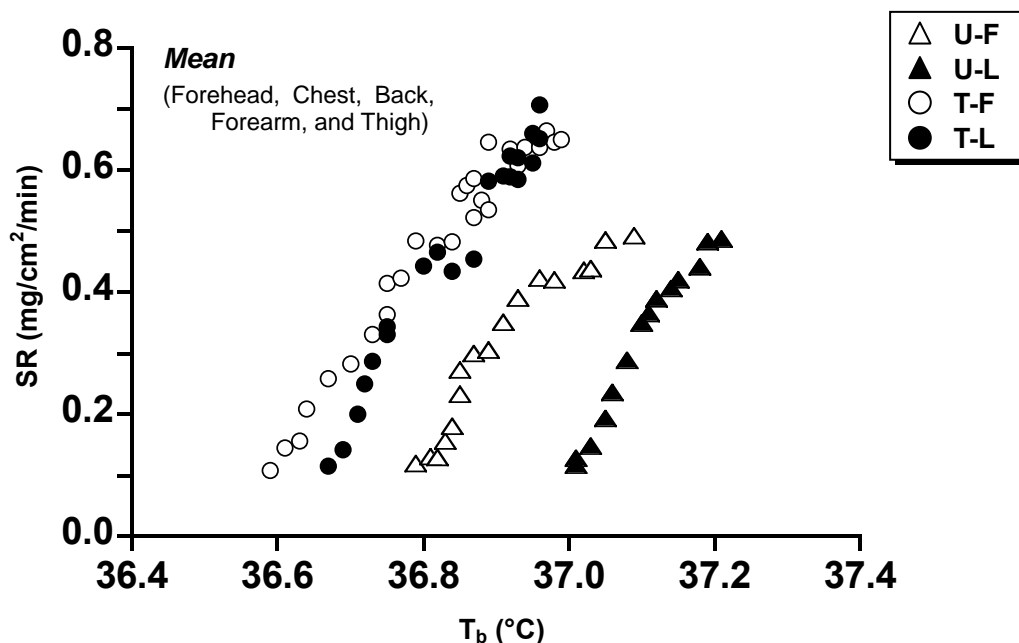


Figure III-1-5. Relationship of mean body temperature (T_b) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women.

Table III-1-2. The onset of mean body temperature (T_b) for sweating (Threshold T_b) and sensitivity of the relationships between sweating rate and T_b at each body site.

	U group		T group	
	F	L	F	L
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)				
Forehead	36.84 \pm 0.06	37.03 \pm 0.08 [†]	36.58 \pm 0.06 *	36.68 \pm 0.07 *
Chest	36.85 \pm 0.07	37.07 \pm 0.07 [†]	36.63 \pm 0.05 *	36.70 \pm 0.06 *
Back	36.83 \pm 0.07	37.06 \pm 0.07 [†]	36.64 \pm 0.05 *	36.70 \pm 0.07 *
Forearm	36.84 \pm 0.07	37.10 \pm 0.07 [†]	36.64 \pm 0.06 *	36.72 \pm 0.06 *
Thigh	36.84 \pm 0.06	37.06 \pm 0.07 [†]	36.59 \pm 0.06 *	36.66 \pm 0.06 *
Mean	36.84 \pm 0.06	37.06 \pm 0.07 [†]	36.62 \pm 0.05 *	36.69 \pm 0.06 *
(Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)				
Sensitivity ((mg/cm²/min)/$^{\circ}\text{C}$)				
Forehead	2.29 \pm 0.46	3.70 \pm 0.83	3.46 \pm 0.55	3.27 \pm 0.98
Chest	1.24 \pm 0.20	1.52 \pm 0.23	1.97 \pm 0.51	1.43 \pm 0.23
Back	1.36 \pm 0.28	2.35 \pm 0.52	1.66 \pm 0.28	1.85 \pm 0.22
Forearm	0.71 \pm 0.11	1.38 \pm 0.50	1.09 \pm 0.22	1.09 \pm 0.16
Thigh	0.83 \pm 0.17	1.28 \pm 0.24	1.14 \pm 0.34	0.99 \pm 0.16
Mean	1.29 \pm 0.24	2.05 \pm 0.46	1.86 \pm 0.38	2.24 \pm 0.35
(Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)				

Values are means \pm SEM for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

[†] Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

4. 考察

実験 III-1 において、性周期相にかかわらず SR は胸、背および前腕で T 群が U 群より有意に大きな値を示した。一方、%LDF では運動トレーニングの影響は認められなかった。体温と各熱放散反応の対応関係ではいずれの性周期相および部位において T 群の熱放散反応の体温閾値が U 群より有意に低く、安静時における発汗反応の末梢機構の活動性は前額、胸、背および前腕で有意に大きくなり、長期運動トレーニングによる影響に身体部位差が存在することが示唆された。

日本人若年女性 (21 歳) の $\dot{V}O_2\text{max}$ の平均値は 35.5 \pm 4.9 (SD) ml/kg/min と報告されており (東京都立大学体力標準値研究会 2000)、本実験の U 群 [42.2 \pm 1.1 (SEM) ml/kg/min] はやや体力レベルが高かった。しかし、本実験の T 群の $\dot{V}O_2\text{max}$ [57.7 \pm 2.3 (SEM) ml/kg/min] は U 群のそれより有意に高い値を示した。そのため、本実験では体力レベルの異なる 2 群を選出できたと考えられる。また、両群とも黄体中期の血漿女性ホルモンが卵胞中期より有意に高くなったので、各被験者はそれぞれ正常な性周期を持ち、さらに、各被験者の卵胞中期と黄体中期を的確に捉えて下肢温浴実験を負荷できたと

Table III-1-3. The onset of mean body temperature (T_b) for sweating (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and frequency of sweat expulsions.

	U group		T group	
	F	L	F	L
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)	36.83 ± 0.07	37.03 ± 0.08 †	36.58 ± 0.05 *	36.61 ± 0.05 *
Sensitivity ((sweat expulsions/min)/$^{\circ}\text{C}$)	30.4 ± 4.6	39.3 ± 4.5	55.9 ± 5.7	48.4 ± 4.2

Values are means \pm SEM for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

† Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

考えられる。そのため、各性周期相における熱放散反応の群差は運動トレーニングの影響を主に反映したものであると言える。

下肢温浴中の T_{re} および T_b は性周期にかかわらずT群がU群より有意に低かった。しかし、TWLでは卵胞および黄体中期ともT群が有意に高く、下肢温浴終了直前のSRでは卵胞および黄体中期とも胸、背および前腕でT群がU群より有意な高値を示した。これらの結果は若年女性において長期運動トレーニングが発汗反応を改善し、その改善の程度に身体部位差が存在することを示す。本実験ではこの発汗反応の改善機序を T_b とSRの対応関係から検討した。その結果、発汗反応の感受性には運動トレ

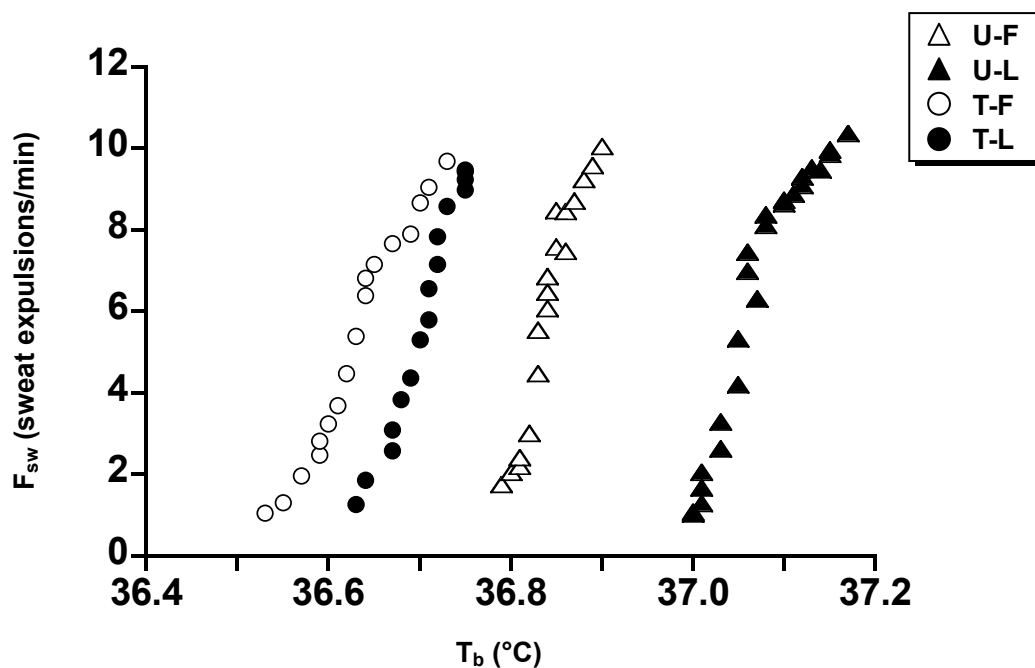


Figure III-1-6. Relationship between mean body temperature (T_b) and frequency of sweat expulsions (F_{sw}) during lower leg immersion in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women.

Table III-1-4. Sensitivity of the relationship between frequency of sweat expulsion and sweating rate at each body site.

	U group		T group	
	F	L	F	L
Sensitivity ((mg/cm²/min)/(sweat expulsions/min))				
Forehead	0.132 ± 0.021	0.114 ± 0.012	0.144 ± 0.020	0.187 ± 0.029 *
Chest	0.058 ± 0.009	0.053 ± 0.006	0.080 ± 0.006	0.091 ± 0.008 *
Back	0.068 ± 0.010	0.060 ± 0.007	0.095 ± 0.011	0.107 ± 0.010 *
Forearm	0.041 ± 0.008	0.033 ± 0.004	0.058 ± 0.008	0.073 ± 0.008 *
Thigh	0.044 ± 0.006	0.044 ± 0.004	0.036 ± 0.002	0.049 ± 0.006
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.069 ± 0.009	0.061 ± 0.005	0.082 ± 0.006	0.102 ± 0.007 *

Values are means ± SEM for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

ーニングによる影響はみられなかったものの、性周期にかかわらずT群はU群と比較して有意に低い発汗開始閾値を示した。この結果からT群とU群におけるSRの差の一因として発汗開始閾値の低下の関与が推察される。さらに詳細に検討するために T_b と F_{sw} (発汗調節中枢の活動性)および F_{sw} とSR(発汗反応の末梢機構の感受性)の対応関係(Ogawa and Sugeno 1993)を両群で比較した。U群と比較

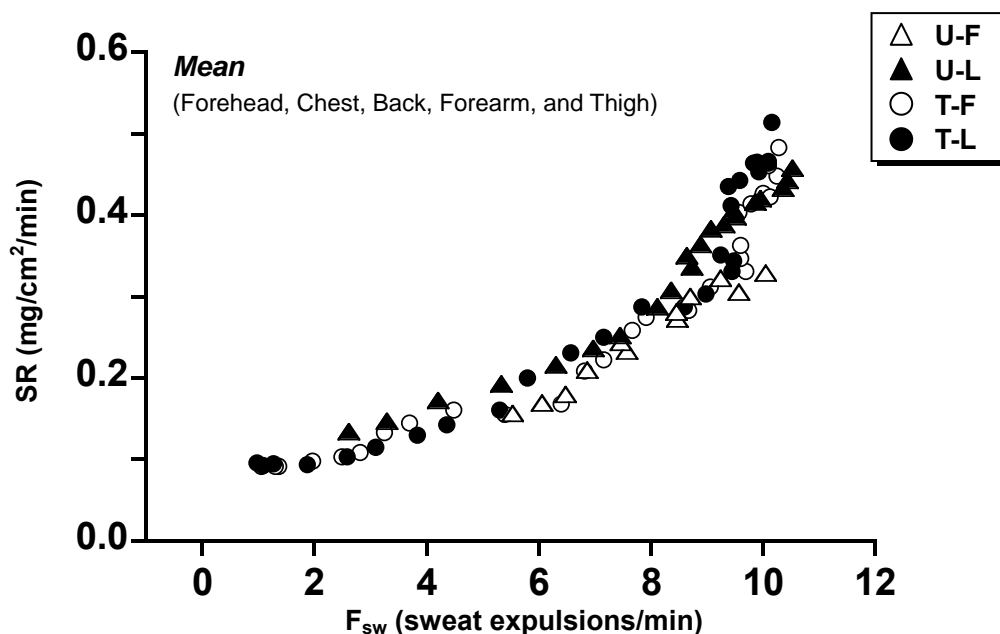


Figure III-1-7. Relationship between frequency of sweat expulsion (F_{sw}) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women.

してT群では同一 T_b に対する F_{sw} が多く、また、 F_{sw} とSRの対応関係における勾配は黄体中期の平均SR、前額、胸、背および前腕で有意に大きく、さらにその傾向が卵胞中期の胸および背でも認められた ($p < 0.10$)。これらの結果から、 T_b とSRの対応関係から分析した場合、長期運動トレーニングによる発汗反応の改善は発汗開始閾値にみられ、同一 T_b 上で比較するとT群のSRが常に多かった。これは T_b と F_{sw} および F_{sw} とSRの対応関係から、若年女性における発汗反応の改善には発汗調節中枢の活動性と末梢機構の感受性の亢進に起因することが示唆された。また、末梢機構の改善の程度には身体部位差が存在し、それが胸、背および前腕におけるSRの群差として反映したことが推察される。Yamazaki et al. (1994b) は、本実験と同様の分析方法 (T_b と F_{sw} および F_{sw} とSRの対応関係) を用いて長期トレ

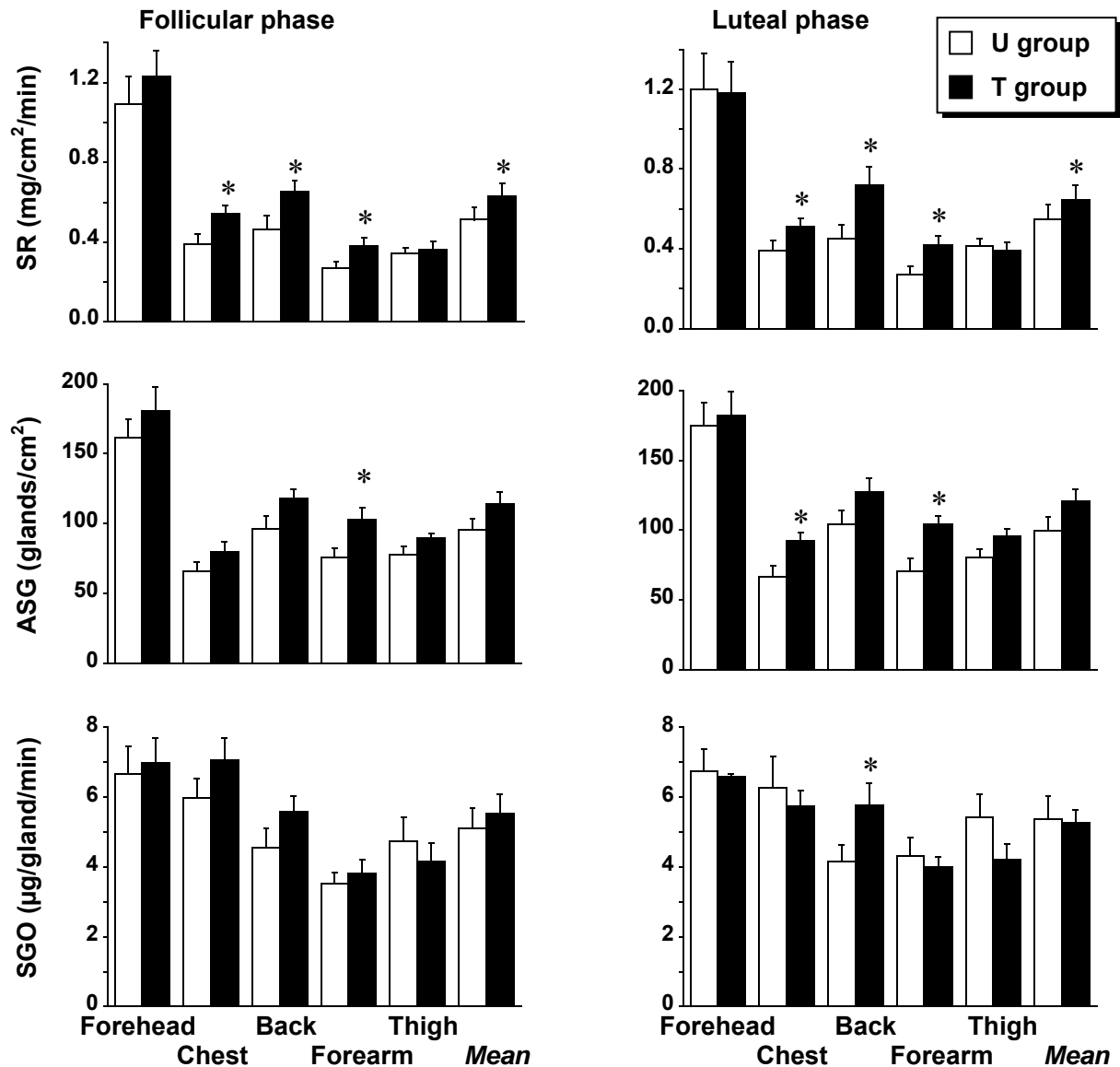


Figure III-1-8. Sweating rate (SR), active sweat glands (ASG), and sweat gland output (SGO) on the forehead, chest back forearm, thigh, and mean value of each body site from 50 to 54 min of lower leg immersion during mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

ニングが男性の立位自転車運動時の発汗反応に及ぼす影響を検討している。その結果、男性においては長期トレーニングにより発汗調節中枢は改善されずに発汗反応の末梢機構の感受性が改善されることを報告している。Yamazaki et al. (1994b)の研究と本実験では運動と安静というように実験条件は異なるものの(Yamazaki et al.は常温環境下での低強度立位自転車運動)、運動トレーニング者と非運動トレーニング者の $\dot{V}O_2\max$ 、実験中における体温の上昇度およびSRにおける群差は本研究のそれと同等であった。そのため、運動トレーニングの影響には性差の存在が考えられる。

末梢機構においてSRはASGとSGOの増減で調節されている(Inoue 1996;Kondo et al. 1998, 2001)。長期間運動トレーニングを継続した男性と一般男性を比較した場合、発汗刺激剤(ピロカルピン)の経皮投与時におけるトレーニング者の大きなSRはASGよりSGOの増大に起因することが報告され

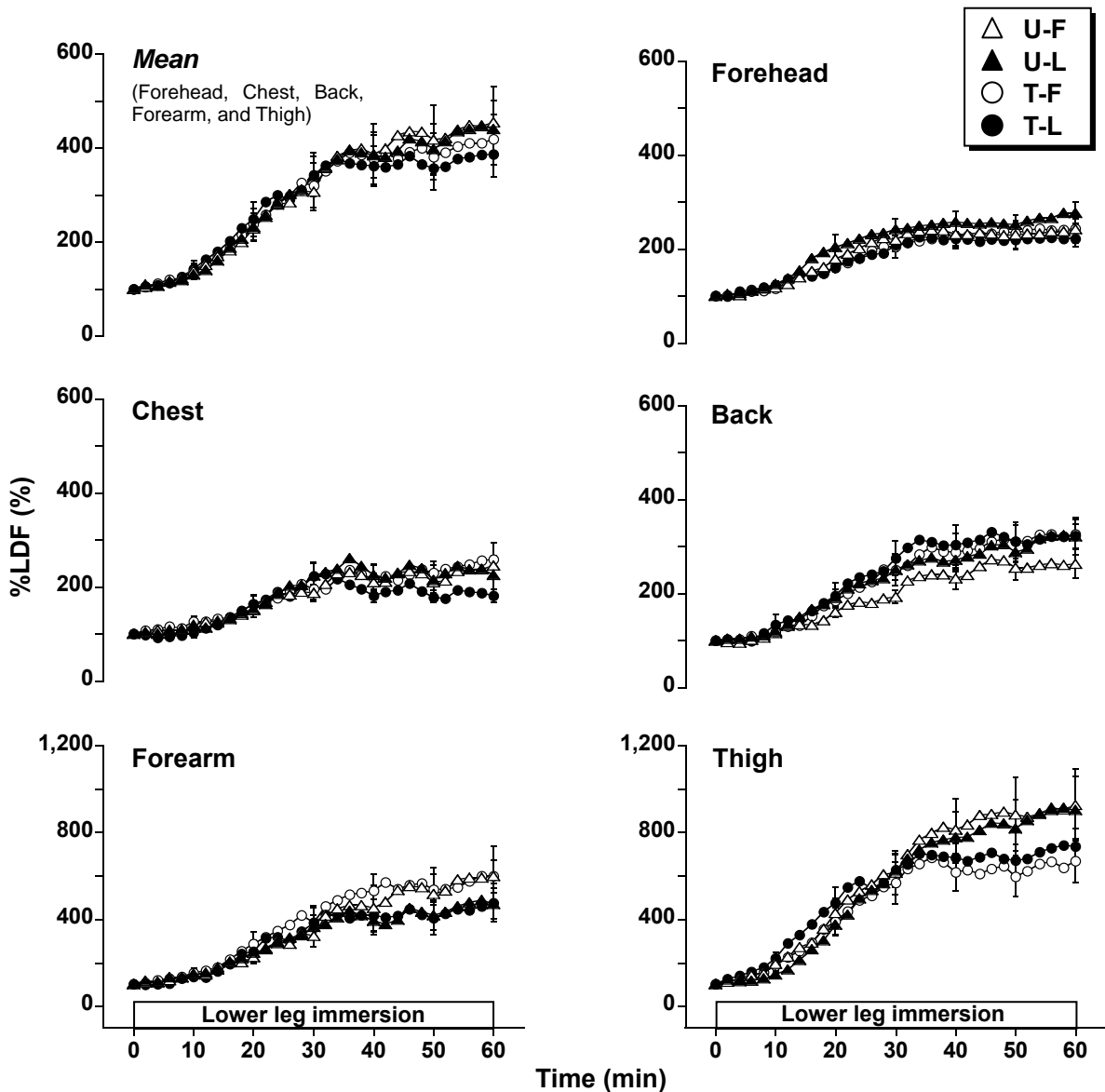


Figure III-1-9. The time courses of skin blood flow (%LDF) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site during lower leg immersion during mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

(Buono and Sjöholm 1988), 男性においては長期運動トレーニングによって汗腺のコリン感受性の亢進 and/or 汗腺肥大が引き起こされる (Sato and Sato 1983). 本実験において, ASG は卵胞中期において前腕で, 黄体中期において胸および前腕で T 群が U 群より有意に大きく, SGO は黄体中期の背でのみ T 群が U 群より有意に大きかったことから, 本実験における T 群の大きな SR は SGO よりも ASG の増加により大きく依存していたことが推察される. また, Buono and Sjöholm (1988) は, 同様の薬剤刺激時における長期女性運動トレーニング者の前腕 ASG および SGO は一般女性に比べて高いことを報告している. このように男性における先行研究の結果と異なることから, 長期運動トレーニングによる汗腺活動の改善に性差が存在すると考えられる. しかし, Kondo et al. (1998) は, 運動強度増加に伴う SR の増大は低強度から中強度運動時では ASG と SGO の増加に依存し, また, 中強度から高強度運動時では SGO のみの増加に依存して対処すると報告している. 本実験では, 比較的少ない SR 時 (すなわち, 最大発汗に至る途中) に ASG を測定している. これらのことを考え合わせると, 本実験よりさらに強い温熱ストレスを与えると先行研究と同様に SGO にも運動トレーニングの影響がみられる可能性はある.

本実験では性周期相および部位にかかわらず %LDF の経時変化に有意な運動トレーニングの影響がみられなかった. また, 皮膚血管拡張反応の感受性には有意な群差はみられなかったものの, 性周期相および部位にかかわらず T 群の皮膚血管拡張閾値は U 群のそれより有意に低いことが示された. したがって, 女性において長期運動トレーニングにより皮膚血管拡張閾値が低下し, その結果, 下肢温浴時の皮膚血管拡張反応の改善は生じると示唆される.

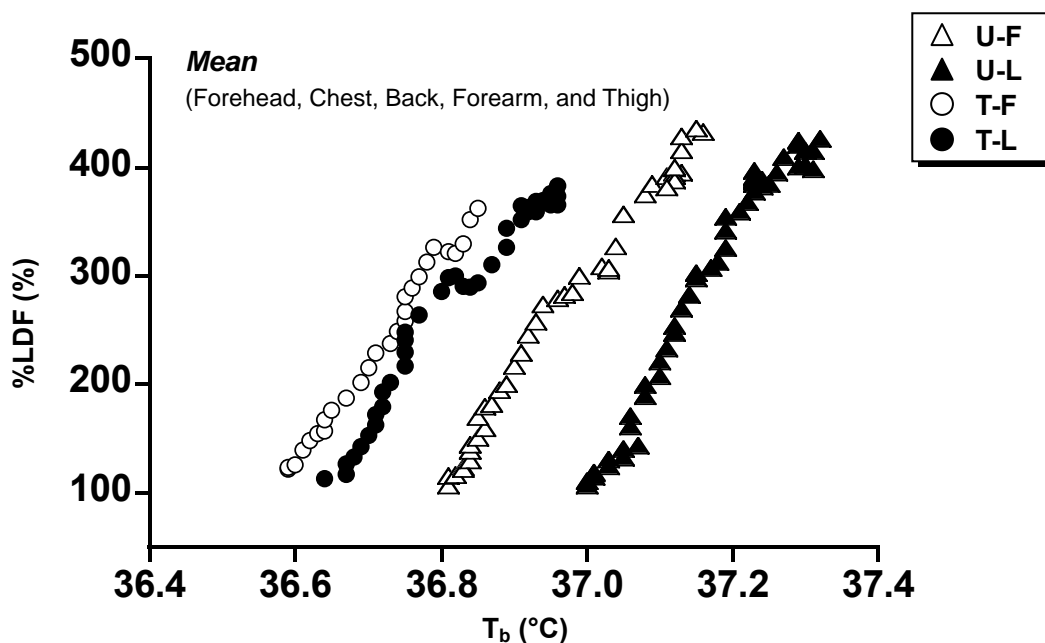


Figure III-1-10. Relationship between mean body temperature (T_b) and skin blood flow (%LDF) of mean value for each body site (forehead, chest, back, forearm, and thigh) during lower leg immersion during mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women.

Table III-1-5. The onset of mean body temperature (T_b) for vasodilation (Threshold T_b) and sensitivity of the relationships between T_b and skin blood flow at each body site.

	U group		T group	
	F	L	F	L
Threshold T_b ($^{\circ}$C)				
Forehead	36.75 \pm 0.06	36.97 \pm 0.08 [†]	36.53 \pm 0.06 *	36.59 \pm 0.07 *
Chest	36.79 \pm 0.06	36.98 \pm 0.09 [†]	36.57 \pm 0.07 *	36.63 \pm 0.06 *
Back	36.83 \pm 0.06	36.97 \pm 0.07 [†]	36.58 \pm 0.06 *	36.64 \pm 0.07 *
Forearm	36.74 \pm 0.06	37.21 \pm 0.16 [†]	36.57 \pm 0.06 *	36.65 \pm 0.08 *
Thigh	36.76 \pm 0.06	36.95 \pm 0.08 [†]	36.53 \pm 0.06 *	36.57 \pm 0.07 *
Mean (Forehead, Chest, Back, and Forearm)	36.77 \pm 0.06	37.02 \pm 0.10 [†]	36.56 \pm 0.07 *	36.62 \pm 0.07 *
Sensitivity (%/$^{\circ}$C)				
Forehead	447 \pm 64	877 \pm 220	553 \pm 118	474 \pm 69
Chest	538 \pm 96	857 \pm 192	521 \pm 120	547 \pm 107
Back	553 \pm 60	882 \pm 111	839 \pm 150	893 \pm 160
Forearm	1186 \pm 266	1826 \pm 282	1386 \pm 266	1507 \pm 347
Thigh	2016 \pm 342	2232 \pm 325	1990 \pm 370	1839 \pm 196
Mean (Forehead, Chest, Back, and Forearm)	948 \pm 166	1335 \pm 226	1058 \pm 205	1052 \pm 176

Values are means \pm SEM for 13 untrained (U) and 11 trained (T) women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

[†] Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

U 群の発汗開始および皮膚血管拡張閾値は卵胞中期と比較して黄体中期に有意に上昇した。一方, T 群においてはそのような性周期に伴う熱放散反応の体温閾値の変化はみられなかった。本実験では, 両群の女性ホルモン濃度は卵胞中期から黄体中期にかけて有意に上昇したものの, その増加の程度は T 群が U 群のそれより顕著に小さかったため, 黄体中期では全ての女性ホルモンは T 群が U 群より有意な低値を示した。第 4 章および先行研究において女性ホルモン濃度, 特にプロゲステロン濃度の上昇によって下肢温浴時の発汗開始および皮膚血管拡張閾値は卵胞中期より黄体中期で上昇することが示唆されている (Brooks et al. 1997; Stachenfeld et al. 2000)。したがって, 長期運動トレーニングによって黄体期における女性ホルモンの分泌が抑制されたことに起因して, T 群では発汗開始および皮膚血管拡張閾値に性周期の影響がみられなかったと推察される。また, 本実験および第 4 章 実験 I-1 で示された血管拡張反応の感受性に対する性周期の影響, すなわち, 一般女性の黄体中期において背の血管拡張反応の感受性は卵胞中期より大きくなるという結果が本実験の T 群にみられなかったことも, T 群の黄体中期における女性ホルモン (主にエストロンおよびエストラジオール) 濃度が低かったことに起因すると考えられる。

発汗開始および皮膚血管拡張閾値の運動トレーニング差は卵胞中期および黄体中期ともに観察さ

れたが、その差は黄体中期でより顕著であった。これは U 群の発汗開始および皮膚血管拡張閾値が卵胞中期と比較して黄体中期に高温側にシフトしたのに対して、前述のように T 群の体温閾値は有意に変化しなかったことに起因すると推察される。プロゲステロンは体温調節中枢を介して発汗開始および皮膚血管拡張閾値を高温側へシフトする作用があるため (Brooks et al. 1997; Stachenfeld et al. 2000), 黄体中期に観察されたプロゲステロンの群差が黄体中期における熱放散反応の体温閾値での大きな群差を生じさせたと考えられる。

本実験の発汗および皮膚血管拡張反応の改善結果から、女性において長期運動トレーニングは安静時の皮膚血管拡張反応より発汗反応をより改善することが推察される。下肢温浴時において女性は男性と比較して発汗よりも皮膚血管拡張反応に依存した熱放散特性を持ち、その傾向は大腿で顕著であること、また、女性の低い発汗量は大腿を除く前額、胸、背および前腕で顕著であることを第 5 章で示した。この結果に基づくと、若年女性の運動トレーニングによる改善は男性より劣っていた発汗反応に、また劣っていた身体部位で顕著にみられることが推察される。

5. 要約

本実験では長期運動トレーニングが安静時の熱放散反応に及ぼす影響について性周期を考慮して検討するために、運動習慣のない一般女子学生 13 名 (非運動トレーニング者, U 群) と持久的な運動トレーニングを 6 年以上継続している女性運動トレーニング者 11 名 (T 群) に対して環境温 30°C (45%RH) 下において 60 分間の下肢温浴 (湯温 42°C) をそれぞれ卵胞中期および黄体中期に負荷した。

女性ホルモンは、両群とも卵胞中期から黄体中期に有意に増加したものの、黄体中期ではすべての女性ホルモンで T 群が U 群よりも有意な低値を示した。安静および下肢温浴中における T_{re} は性周期相にかかわらず T 群が U 群より有意に低かった。前額、胸、背、前腕および大腿の %LDF には運動トレーニングの影響がみられなかったものの、SR は性周期相にかかわらず胸、背および前腕で T 群が U 群より有意に高い値を示した。さらに、 T_b と SR および %LDF の対応関係から運動トレーニングは発汗開始および皮膚血管拡張閾値を低下させ、さらに F_{sw} と SR の対応関係から発汗反応の末梢機構の感受性を増加させることが示唆された。

以上の結果から、長期運動トレーニングにより若年女性において安静時の熱放散反応は改善されることが示された。運動トレーニングによる熱放散反応の体温閾値の低下は卵胞中期より黄体中期で顕著であった。また、熱放散反応の感受性の改善は皮膚血管拡張反応より発汗反応でより顕著にみられ、その改善に身体部位差の存在が示唆された。

実験 III-2 一定負荷運動時

1. 目的

運動時の熱放散反応には非温熱性要因も関与するため（近藤 2002），安静時（実験 III-1）にみられた長期運動トレーニングによる熱放散反応への影響とは異なる可能性が考えられるものの明らかではない．そこで，実験 III-2 の目的は安静時（実験 III-1）にみられた長期運動トレーニングの影響が運動時でも同様にみられるのかを明らかにすることとした．一般女性において常温環境下中等度運動時では黄体中期に熱放散反応の抑制がみられること（実験 I-2），また，長期運動トレーニング者では性周期の影響が顕著にみられないこと（実験 III-1）から，長期運動トレーニングによる熱放散反応の体温閾値の低下と感受性の亢進が卵胞中期より黄体中期でより顕著にみられることが予想される．

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では実験 I-2 の若年成人女性 10 名（非運動トレーニング群，以下 U 群と略す）と大学陸上競技部中長距離種目に所属し，持久的な運動トレーニングを少なくとも 6 年以上継続している女性運動トレーニング者 7 名（運動トレーニング群，以下 T 群と略す）を比較検討した．Table III-2-1 にその身体特性を示した．その他は実験 I-1 の 2.1. (P.39) と同様であった．

2.2. 実験条件および手順

実験条件およびその手順は実験 I-2 の 2.2. (P.54-55) と同様とし，各被験者の卵胞中期および黄体中期に常温環境下中等度自転車運動を実施した．

Table III-2-1. Physical characteristics of each group.

Variables	U group	T group
Age (yr)	21.1 ± 0.3	20.0 ± 0.4
Height (cm)	159.5 ± 1.7	156.0 ± 2.0
Mass (kg)	52.2 ± 2.3	51.2 ± 2.3
AD (m²)	1.48 ± 0.03	1.45 ± 0.04
AD/Mass (cm²/kg)	286.2 ± 6.0	284.7 ± 5.0
MSF (mm)	15.0 ± 1.6	10.6 ± 0.9 *
%BF (%)	17.7 ± 1.4	14.2 ± 1.1
VO₂max (ml/kg/min)	36.7 ± 1.1	49.4 ± 1.4 *

Values are means ± SEM for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, VO₂max: maximal oxygen uptake.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

2.3. 測定項目

測定項目およびその方法は実験 I-2 の 2.3. (P.55) と同様とした .

2.4. データ分析および統計処理

データ分析は実験 I-2 の 2.4. (P.55-56) と , また , 統計処理は実験 II-1 の 2.4. (P.69-70) と同様とした .

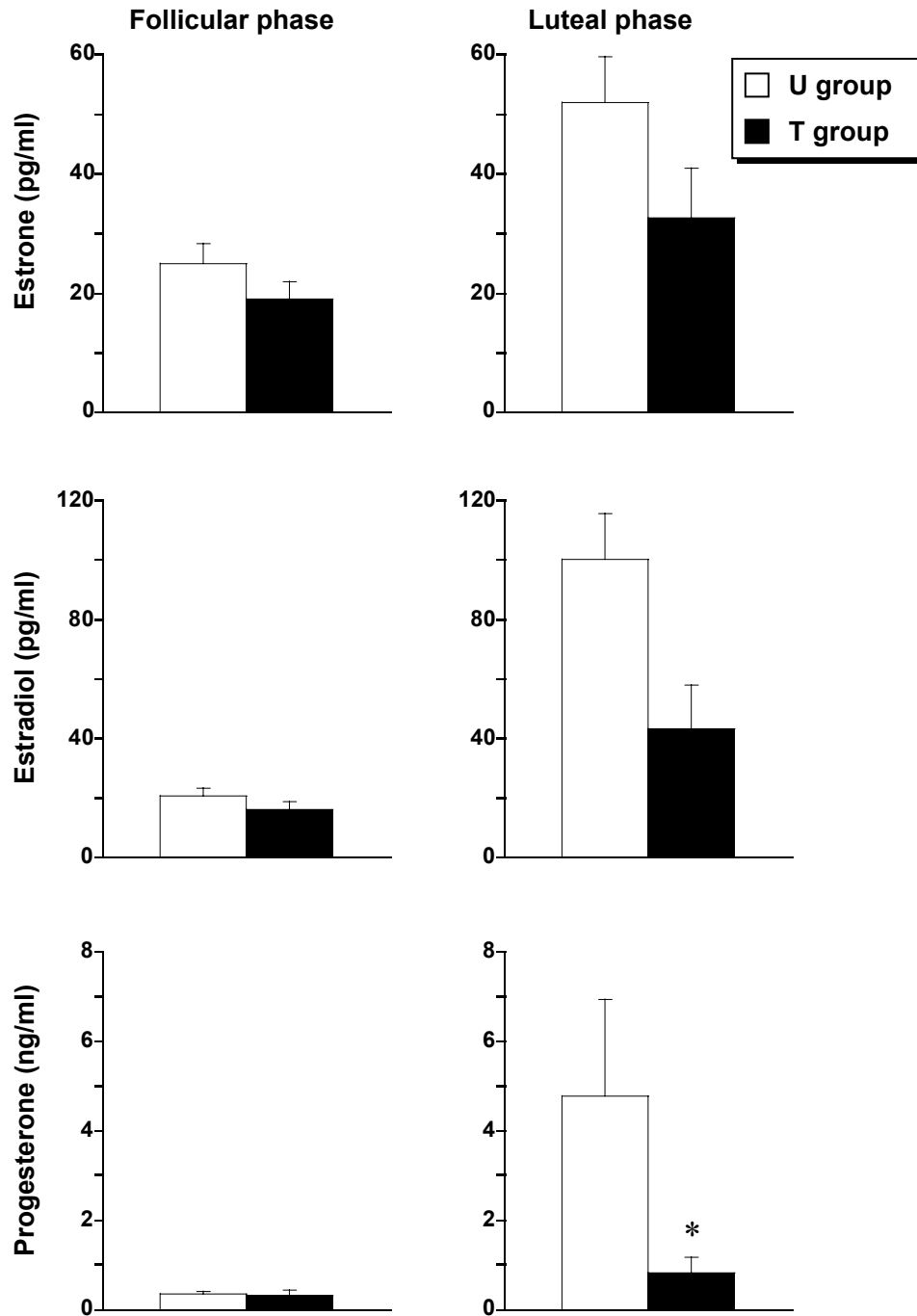


Figure III-2-1. Plasma levels of estrone, estradiol, and progesterone during mid-follicular and mid-luteal phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

3. 結果

本実験において，年齢，身長，体重，体表面積，体表面積/体重比および体脂肪率には両群間で有意な差は認められなかったが，平均皮下脂肪厚 (MSF) はT群がU群よりも有意に低かった。また，最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) はT群がU群よりも有意に高い値を示した (Table III-2-1)。

卵胞中期において血漿女性ホルモン (エストロン，エストラジオールおよびプロゲステロン) 濃度はT群およびU群間で有意な差はみられなかった。一方，黄体中期ではT群の血漿プロゲステロン濃度がU群よりも有意に低く，エストラジオール濃度ではその傾向がみられた ($p < 0.10$) (Fig. III-2-1)。

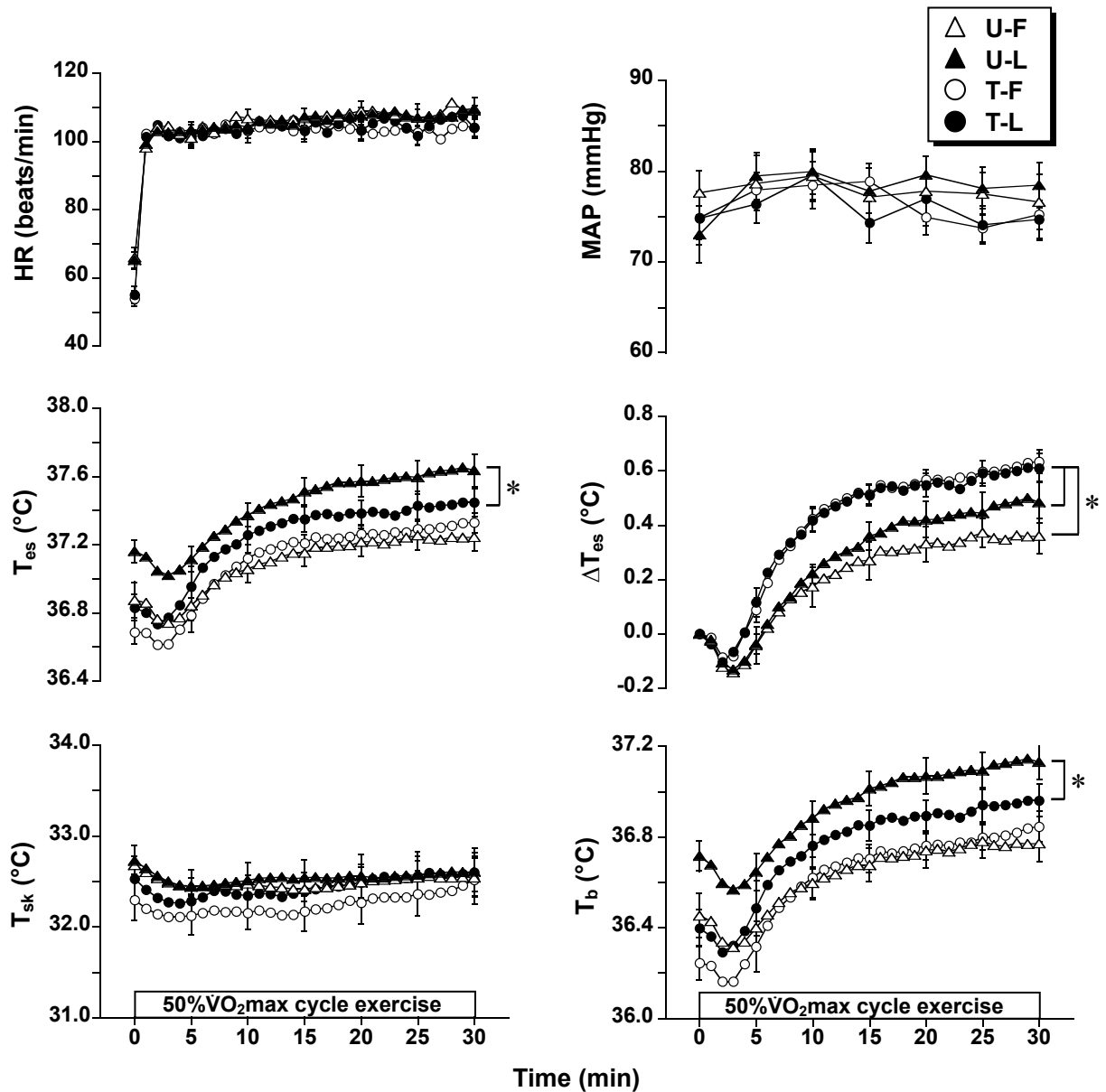


Figure III-2-2. The time courses of heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP), esophageal temperature (T_{es}), change in esophageal temperature (ΔT_{es}), mean skin temperature (T_{sk}), and mean body temperature (T_b) during cycling exercise at $50\% \dot{V}O_{2max}$ in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

安静時心拍数 (HR) は性周期相にかかわらずT群がU群より有意な低値を示した。また、安静時食道温 (T_{es}) および平均体温 (T_b) は黄体中期においてT群がU群よりも有意に低く、その差は運動時にも同様に認められた。一方、安静時平均皮膚温 (T_{sk})、熱放散反応を測定した部位の局所皮膚温 (T_{sl}) および平均血圧 (MAP) には性周期相にかかわらず両群間に有意な差はみられなかった。運動時の T_{es} は卵胞中期では両群間に有意な差は認められなかったものの、黄体中期ではT群がU群よりも有意な低値を示した。安静時からの T_{es} の変化度 (ΔT_{es}) は性周期相にかかわらずT群がU群よりも有意に大きかった。運動時のHR, MAP, T_{sk} および T_{sl} は性周期相にかかわらず両群間に有意な差はみられなかった (Fig. III-2-2 および III-2-3)。運動終了時の酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) は両性周期相ともT群がU群より有意な高値を示した (卵胞中期および黄体中期それぞれU群: 1015 ± 39 および 990 ± 43 ml/min, T群: 1251 ± 56 および 1249 ± 56 ml/min)。

運動時の発汗量 (SR) は部位にかかわらず卵胞中期および黄体中期ともT群がU群より有意に高い値を示した (Fig. III-2-4)。発汗開始閾値は卵胞中期において有意な群間差は認められなかったが、黄体中期ではT群がU群より有意に低かった。 T_{es} とSRの対応関係から得られた発汗反応の感受性は性周期相にかかわらずT群がU群より有意に大きかった。これらの運動トレーニングの影響はいずれの部位においてもほぼ同様に観察された (Fig. III-2-5 および Table III-2-2)。同一 T_b に対する汗の拍出頻度

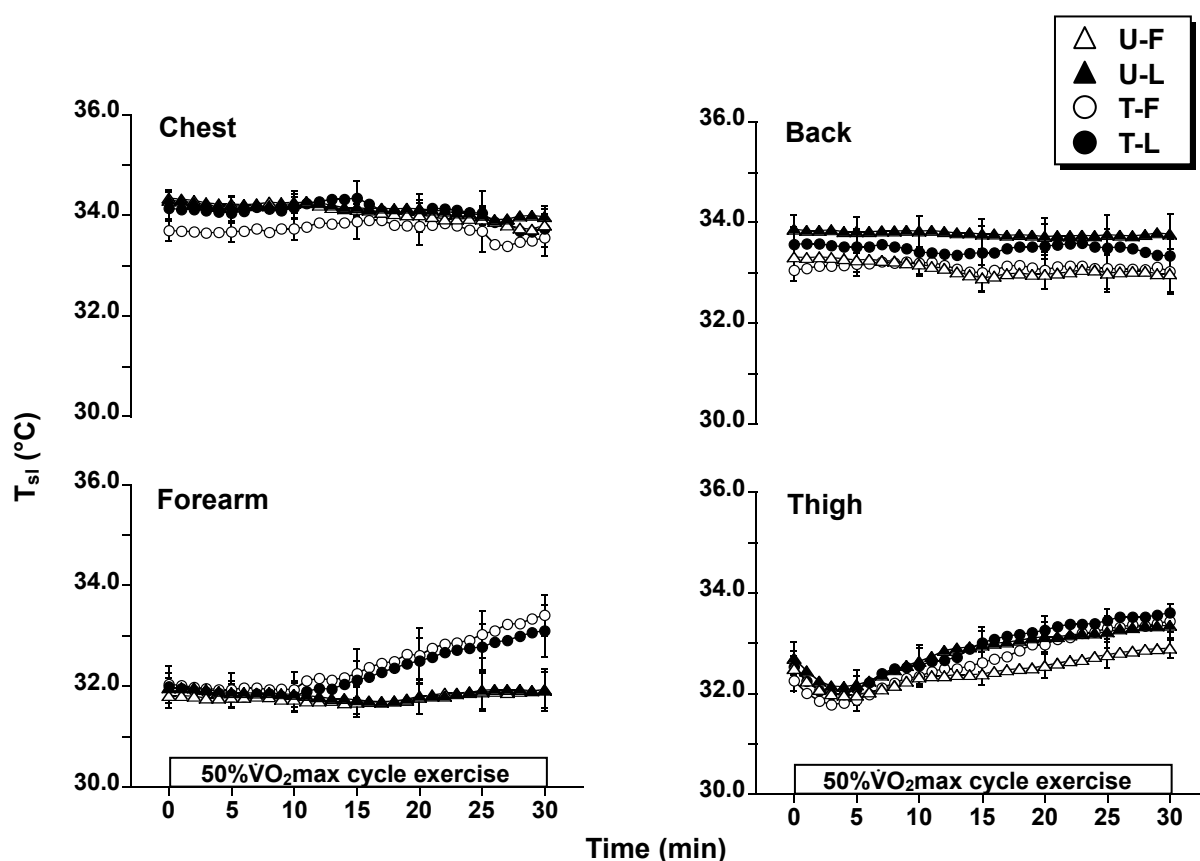


Figure III-2-3. The time courses of local skin temperature (T_{sl}) on the chest, back, forearm, and thigh during cycling exercise at $50\% \dot{V}O_2\max$ in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

(F_{sw}) は卵胞中期で群間差はみられなかったが、黄体中期ではT群がU群より大きくなった (Fig. III-2-6 およびTable III-2-3)。 F_{sw} とSRの対応関係から求めた発汗反応の末梢機構の感受性は卵胞中期および黄体中期においてほぼ全ての部位でT群がU群より有意に大きかった (Fig. III-2-7 およびTable III-2-4)。

T群の運動終了直前のSRは性周期相にかかわらず全ての部位でU群よりも有意な高値を示した。T群の活動汗腺数 (ASG) および単一汗腺あたりの汗出力 (SGO) は各部位の平均値で見ると性周期相にかかわらずU群よりも大きかった。部位ごとのASGでは黄体中期に背および前腕でT群がU群より有意に大きく、また、SGOでは卵胞中期に胸、黄体中期に胸および背でT群がU群より有意に大きかった (Fig. III-2-8)。総体重減少量 (TWL) は性周期相にかかわらずT群がU群より有意に高かった (T

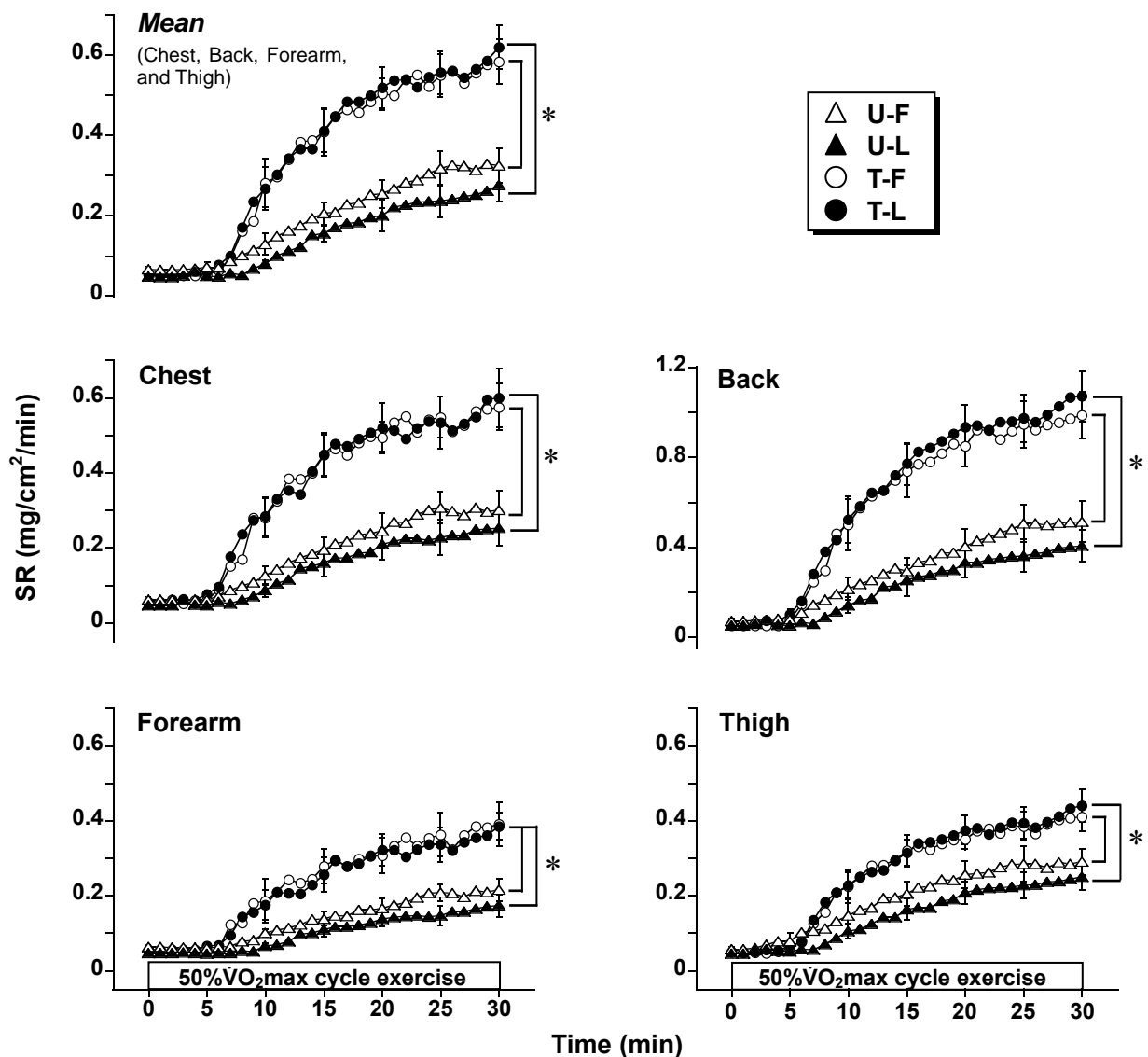


Figure III-2-4. The time courses of sweating rate (SR) on the chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site during cycling exercise at $50\% \dot{V}O_2\max$ in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

群およびU群それぞれ卵胞中期： 343 ± 24 および 263 ± 29 $\text{g/m}^2/\text{h}$ ，黄体中期： 340 ± 26 および 240 ± 23 $\text{g/m}^2/\text{h}$).

皮膚血流量 (%LDF) においても発汗反応でみられた運動トレーニングの影響と同様に性周期相および部位にかかわらずT群がU群よりも有意に高い値を示した (Fig. III-2-9). また，皮膚血管拡張閾値は黄体中期にT群がU群よりも有意な低値を示し， T_{es} と%LDFの対応関係から得られた皮膚血管拡張反応の感受性は黄体中期においてのみT群がU群よりも有意に高くなった．これらの長期トレーニングによる影響はいずれの部位においてもほぼ同様にみられた (Fig. III-2-10 およびTable III-2-5).

T 群において血漿女性ホルモン，循環および体温パラメータのいずれにも U 群でみられるような性周期による影響は認められなかった．

4. 考察

実験 III-2 において，両熱放散反応の経時変化は性周期相にかかわらずいずれの部位においても T 群が U 群よりも有意に大きな値を示した．体温と熱放散反応の対応関係では卵胞中期において両熱放散反応の体温閾値に有意な群差はみられなかったものの，発汗反応の感受性が U 群より T 群で有意に大きくなった．黄体中期において両熱放散反応の体温閾値とも T 群が U 群よりも有意に低い値を示し，各熱放散反応の感受性は T 群が U 群よりも有意に大きかった．また，T 群では U 群においてみられる性周期による影響は認められなかった．

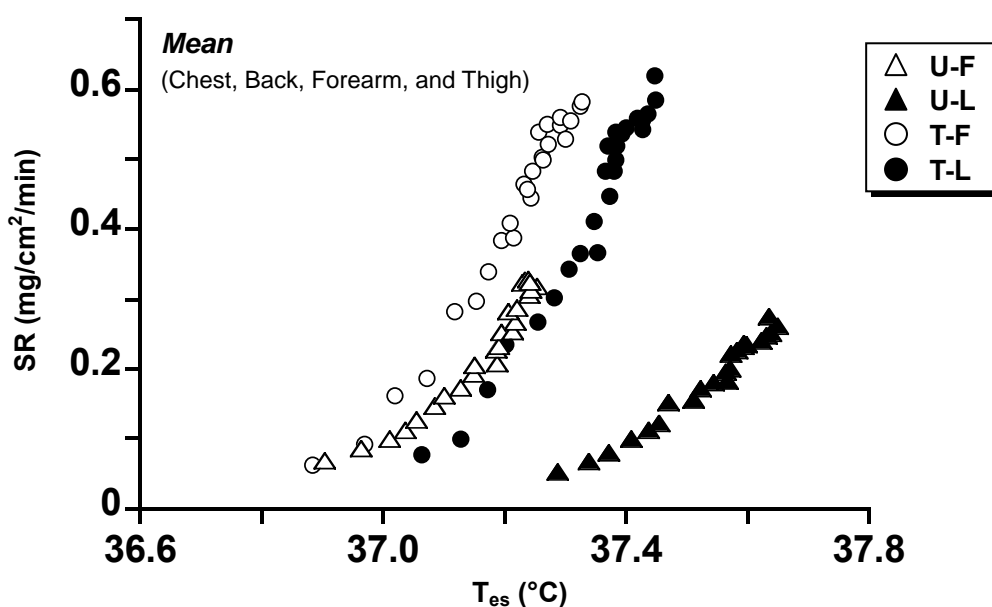


Figure III-2-5. Relationship of esophageal temperature (T_{es}) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (chest, back, forearm, and thigh) during cycling exercise at $50\% \dot{V}O_2\text{max}$ in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women.

Table III-2-2. The onset of esophageal temperature (T_{es}) for sweating (Threshold T_{es}) and sensitivity of the relationships between sweating rate and T_{es} at each body site.

	U group		T group	
	F	L	F	L
Threshold T_{es} ($^{\circ}$C)				
Chest	37.09 \pm 0.08	37.43 \pm 0.08 [†]	37.01 \pm 0.07	37.11 \pm 0.11 *
Back	37.08 \pm 0.12	37.38 \pm 0.09 [†]	36.95 \pm 0.08	36.99 \pm 0.09
Forearm	37.06 \pm 0.08	37.39 \pm 0.08 [†]	37.05 \pm 0.08	37.17 \pm 0.09
Thigh	37.02 \pm 0.08	37.36 \pm 0.09 [†]	36.98 \pm 0.07	37.08 \pm 0.12
Mean (Chest, Back, Forearm, and Thigh)	37.00 \pm 0.07	37.37 \pm 0.08 [†]	36.99 \pm 0.07	37.10 \pm 0.11 *
Sensitivity ((mg/cm²/min)/$^{\circ}$C)				
Chest	0.82 \pm 0.30	0.54 \pm 0.12 [†]	1.34 \pm 0.18 *	1.30 \pm 0.12 *
Back	1.34 \pm 0.16	0.91 \pm 0.19 [†]	2.25 \pm 0.32 *	2.37 \pm 0.28 *
Forearm	0.54 \pm 0.08	0.41 \pm 0.06 [†]	0.85 \pm 0.19	0.82 \pm 0.15 *
Thigh	0.72 \pm 0.09	0.59 \pm 0.11	0.88 \pm 0.08	0.87 \pm 0.04
Mean (Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.84 \pm 0.12	0.57 \pm 0.10 [†]	1.26 \pm 0.15 *	1.14 \pm 0.14 *

Values are means \pm SEM for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

[†] Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

本実験においてT群はU群と比較して有意に高い $\dot{V}O_2\max$ および有意に低いMSFを示した (Table III-2-1)。日本人若年女性 (21 歳) の $\dot{V}O_2\max$ の平均値は 35.5 \pm 4.9 (SD) ml/kg/minと報告されており (東京都立大学体力標準値研究会 2000), 本実験のU群 [36.7 \pm 1.1 (SEM) ml/kg/min] は一般的な体力レベルの女性であったと推察される。また, 日本人女性 (19 歳以上) を対象とした $\dot{V}O_2\max$ による7段階 (3 を普通として 1 : 非常に弱い ~ 7 : 非常に優れている) の体力評価では (山地 1992), U群は3 (普通), T群は5 (非常に良い) であった。このことから, 本実験のT群はU群よりも高い全身持久力を有していたと考えられる。さらに, 皮下脂肪厚は持久的運動トレーニングを継続すると減少するという従来の研究結果と一致し (田口 1986; 池上 1990), T群の皮下脂肪厚はU群のそれより有意な低値を示した。これらのことから本実験におけるU群およびT群の被験者の選出は的確であったと考えられる。

Table III-2-3. The onset of mean body temperature (T_b) for sweating (Threshold T_b) and sensitivity of the relationship between T_b and frequency of sweat expulsions.

	U group		T group	
	F	L	F	L
Threshold T_b ($^{\circ}\text{C}$)	36.48 ± 0.08	$36.88 \pm 0.07^{\dagger}$	36.46 ± 0.08	$36.44 \pm 0.16^*$
Sensitivity ((sweat expulsions/min)/$^{\circ}\text{C}$)	27.1 ± 2.5	25.6 ± 2.7	30.0 ± 4.8	25.9 ± 4.4

Values are means \pm SEM for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

\dagger Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

本実験では、3ヶ月間にわたる各被験者の性周期に基づいて予想した卵胞中期および黄体中期に運動実験を実施した。U群において実験当日に採取した血漿女性ホルモン（エストロン、エストラジオールおよびプロゲステロン）濃度は、卵胞中期から黄体中期にかけて有意に増加したことから、希求した性周期相を的確に捉えていたものと考えられる（Fig. III-2-1）。一方、T群では性周期に伴う女性ホルモンの顕著な上昇がみられない者も存在したが、女性ホルモンレベルは検査報告書（エスアールエル社）に記載された正常値の範囲内であり、全ての被験者が規則的な性周期を有していた。また、

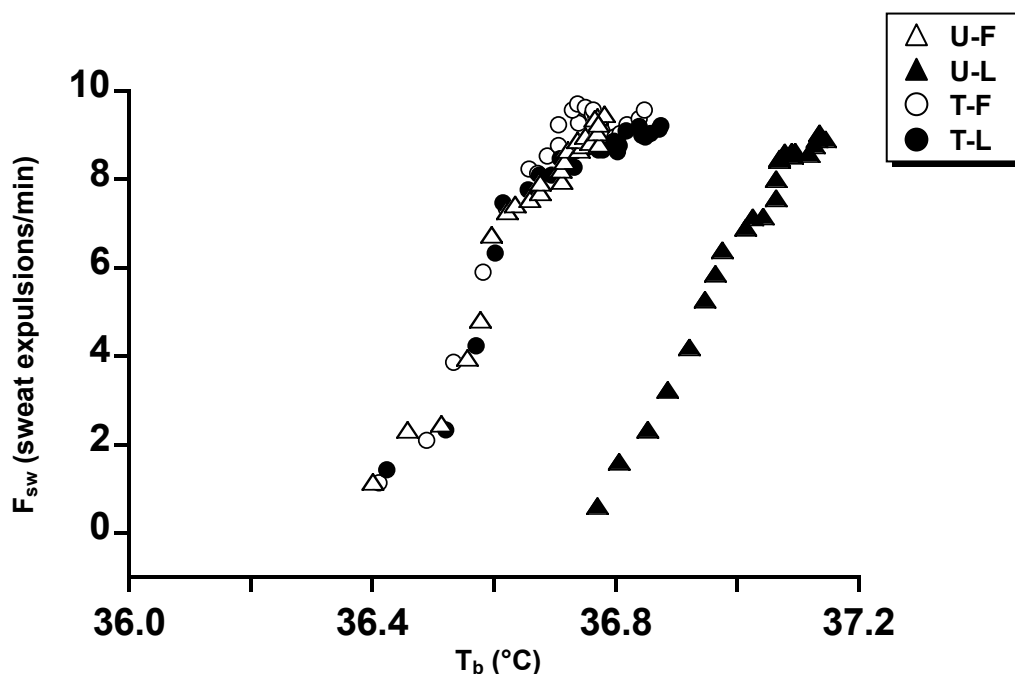


Figure III-2-6. Relationship between mean body temperature (T_b) and frequency of sweat expulsions (F_{sw}) during cycling exercise at $50\% \dot{V}O_2\text{max}$ in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women.

Table III-2-4. Sensitivity of the relationship between frequency of sweat expulsion and sweating rate at each body site.

	U group		T group	
	F	L	F	L
Sensitivity ((mg/cm²/min)/(sweat expulsions/min))				
Chest	0.030 ± 0.007	0.024 ± 0.005	0.062 ± 0.008 *	0.070 ± 0.011 *
Back	0.048 ± 0.010	0.036 ± 0.006	0.103 ± 0.011 *	0.122 ± 0.020 *
Forearm	0.018 ± 0.004	0.014 ± 0.002	0.035 ± 0.006 *	0.043 ± 0.006 *
Thigh	0.029 ± 0.005	0.020 ± 0.003	0.041 ± 0.004	0.049 ± 0.005 *
Mean (Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.030 ± 0.005	0.026 ± 0.004	0.060 ± 0.006 *	0.070 ± 0.008 *

Values are means ± SEM for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

黄体期はほぼ2週間と決まっていることから，T群においては実験後の月経状況により黄体中期を的確に捉えていたことを確認した．このT群における女性ホルモンの小さな分泌変動は運動トレーニングの継続に伴い女性ホルモンの分泌が低下すると報告したBullen et al. (1984)および実験III-1の結果と一致していた．また，卵胞中期では血漿女性ホルモン濃度にU群とT群で群間差はみられなかったが，黄体中期では血漿の女性ホルモン濃度はT群がU群よりも低くなったことから，本実験のT群はU群と比較して女性ホルモンによる生体パラメータへの影響の程度は小さい可能性が考えられる．一方，

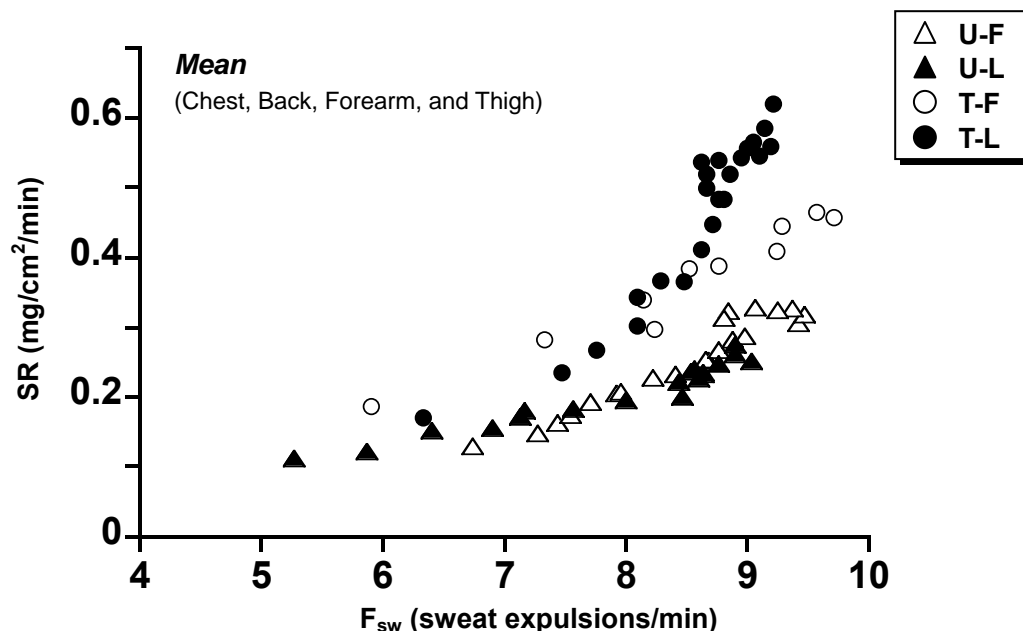


Figure III-2-7. Relationship between frequency of sweat expulsion (F_{sw}) and sweating rate (SR) of mean value for each body site (chest, back, forearm, and thigh) during cycling exercise at 50% $\dot{V}O_{2max}$ in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women.

身長、体重および体表面積の身体特性に有意な群間差がみられなかったことから、これらの形態の違いは本実験における他の生体パラメータに影響を及ぼさなかったと考えられる。さらに、30 分間の運動実験後、そのまま運動を数分継続してもらい、その間に $\dot{V}O_2$ を測定して的確な運動強度が負荷されていたことを確認した。以上のことから、本実験において群間における各反応の差は運動トレーニングの影響を主に反映しているものと考えられる。

本実験において、T群のSRおよび%LDFはいずれの性周期相および部位において、U群より顕著に大きな値を示した (Fig. III-2-3 およびIII-2-9)。本実験では相対強度 (% $\dot{V}O_{2max}$) を用いたので、運動時のT群の $\dot{V}O_2$ はU群より有意に大きかった。運動時の熱放散反応は運動強度や $\dot{V}O_2$ に比例して上昇

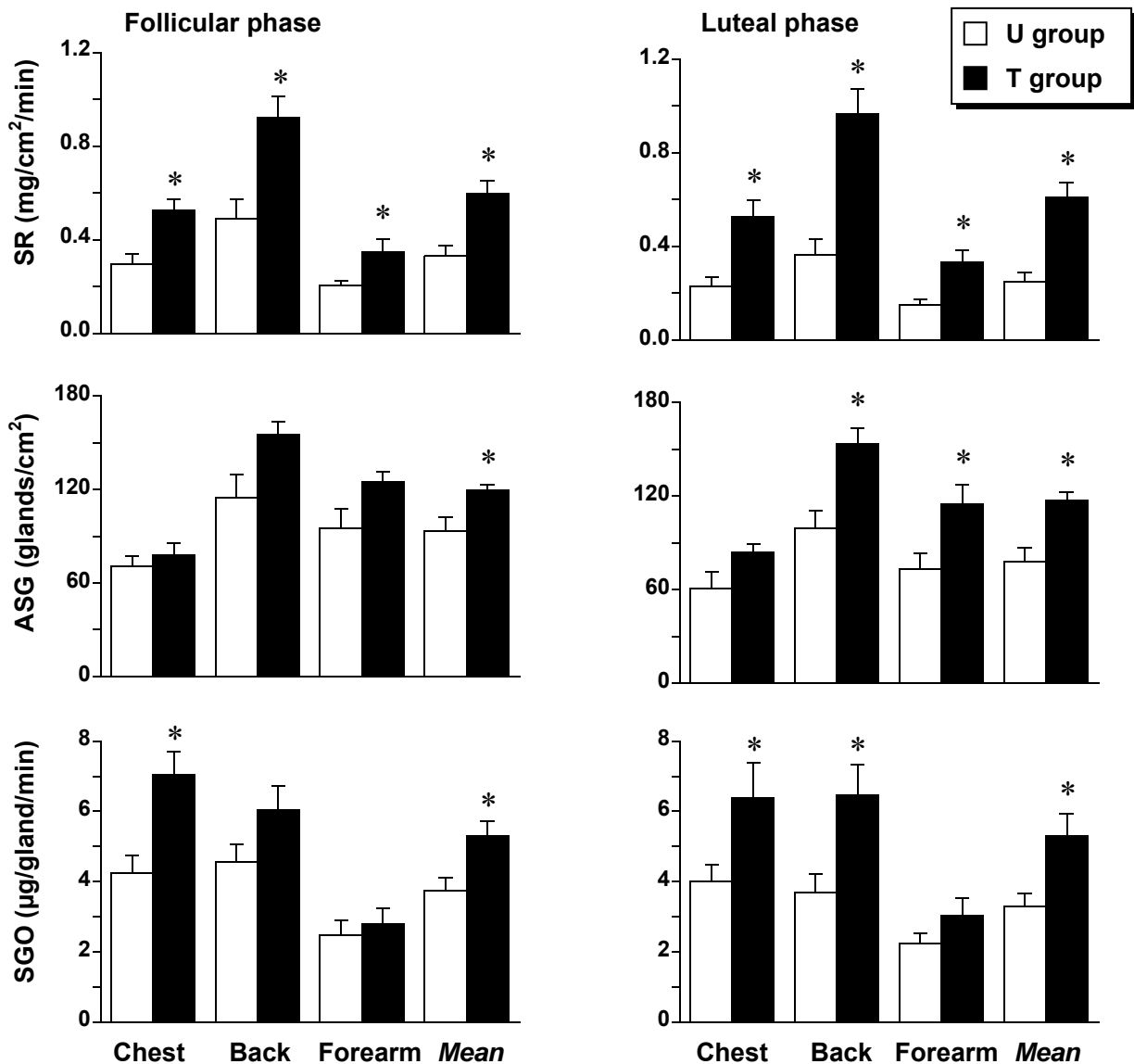


Figure III-2-8. Sweating rate (SR), active sweat glands (ASG), and sweat gland output (SGO) on the chest, back, forearm, and thigh, and mean value of each body site from 24 to 29 min of cycling exercise in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means ± SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

することから (Saltin and Hermansen 1966), 本実験において観察されたT群とU群の差は, 単に運動強度や $\dot{V}O_2$ の差を反映している可能性が考えられる。しかし, 本実験において卵胞および黄体中期における運動強度や $\dot{V}O_2$ の群間差はほぼ同じ程度であったのに対し, SRおよび%LDFの群間差は卵胞中期よりも黄体中期でより大きくなった。また, 高い運動強度や $\dot{V}O_2$ に起因してT群の ΔT_{es} はU群と比較して有意に大きくなった可能性があるが, 黄体中期において両群の T_{es} と発汗および皮膚血管拡張反応の対応関係を比較検討すると, 各熱放散反応の体温閾値はT群が有意に低く, また, その感受性はT群が有意に大きかった。このことから, 単に両群の運動強度や $\dot{V}O_2$ の差, およびそれに関連した ΔT_{es} の差のみがSRおよび%LDFにおける群間差を生じたとは考えにくい。

これまで男性において長期運動トレーニングが運動時の熱放散反応に及ぼす影響を検討した研究では, 同一体温に対するSRや皮膚血流量が増大すると報告されている (Yamazaki et al. 1994b, Armstrong and Maresh 1998, Johnson 1998, Fritzsche and Coyle 2000)。長期トレーニングが皮膚血管拡張反応に及ぼす影響に関する研究は数少なく, その改善のメカニズムについては不明な点が多く残るものの (Fritzsche and Coyle 2000), 長期運動トレーニングによる運動時 (Araki et al. 1978, Yamazaki et al. 1994b) や発汗促進剤 (ピロカルピン) 経皮投与実験 (Buono and Sjöholm 1988) 時の発汗反応の改善はその感受性の増大や汗腺活動の増加などの末梢機構の亢進に起因することが示唆されている。本

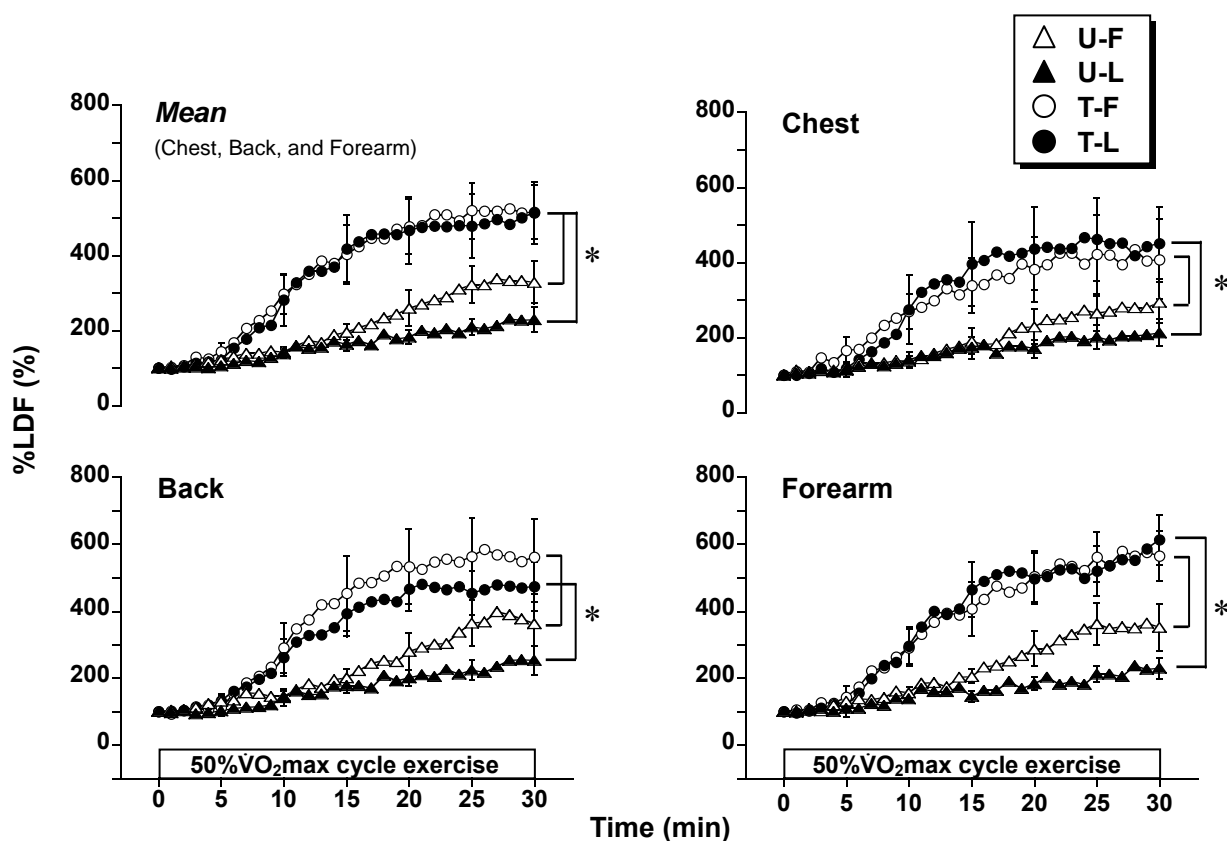


Figure III-2-9. The time courses of skin blood flow (%LDF) on the chest, back, and forearm, and the mean value of each body site during cycling exercise at 50% $\dot{V}O_2$ max in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

実験において、卵胞中期での女性ホルモンにはT群とU群の間に有意な差は認められなかったので、卵胞中期における運動時の熱放散反応の群差は運動トレーニングそれ自体による影響と考えられる。そのため、卵胞中期の結果に基づき、女性における長期トレーニングによる改善のメカニズムについて検討する。

卵胞中期において、発汗開始および皮膚血管拡張閾値には有意な群差は認められなかった。一方、熱放散反応の感受性は発汗反応においてのみT群がU群より有意に高かった。また、発汗反応の末梢機構の感受性はほぼ全ての部位でT群がU群より有意に大きく、さらにASGおよびSGOもT群がU群より有意な高値を示した。このASGおよびSGOの結果は、ピロカルピンを経皮投与したときの発汗反応を女性運動トレーニング者〔 $\dot{V}O_2\text{max}$: 53.4 ± 4.4 (SD) ml/kg/min〕と活動量が少ない女性 (37.4 ± 3.7 ml/kg/min) とで比較し、SR、ASGおよびSGOの全てにおいて運動トレーニング者が高い値であることを報告したBuono and Sjoholm (1988) の結果と一致する。これらのことから、運動時の発汗反応に関しては男性における長期トレーニングによる改善のメカニズムと同様に末梢機構の感受性の亢進によることが示唆される。一方、女性において運動時の皮膚血管拡張反応は長期トレーニングによる影響を受けない可能性が考えられる。これに関連して、女性は男性と比較して発汗よりも皮膚血管拡張に依存した熱放散特性を持つ可能性と(第5章)本実験の結果を考え合わせると、女性において長期運動トレーニングによる熱放散反応の改善が特に発汗反応で顕著であることは、男性よりも劣っていた反応を補強するという都合的な適応反応であると考えられる。

本実験では、T群の熱放散反応の体温閾値が黄体中期においてU群よりも有意に低く、また、T群

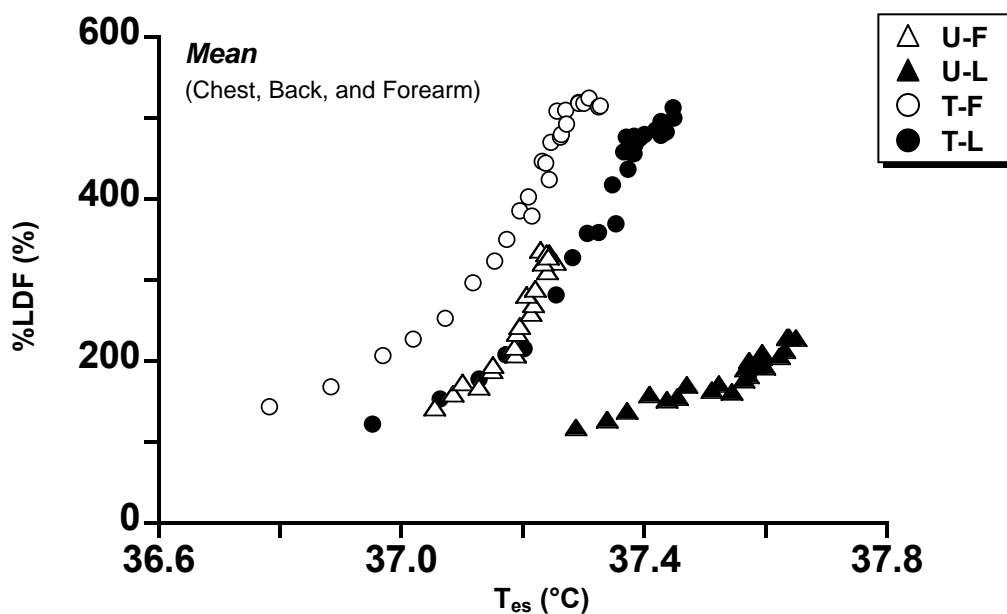


Figure III-2-10. Relationship of esophageal temperature (T_{es}) and skin blood flow (%LDF) of mean value for each body site (chest, back, and forearm) during cycling exercise at $50\% \dot{V}O_2\text{max}$ during mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments. Values are means for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women.

Table III-2-5. The onset of esophageal temperature (T_{es}) for vasodilation (Threshold T_{es}) and sensitivity of the relationships between T_{es} and skin blood flow at each body site.

	U group		T group	
	F	L	F	L
Threshold T_{es} ($^{\circ}$C)				
Chest	37.07 \pm 0.08	37.42 \pm 0.07 [†]	36.98 \pm 0.04	37.13 \pm 0.08 *
Back	37.05 \pm 0.09	37.39 \pm 0.07 [†]	37.06 \pm 0.06	37.13 \pm 0.07 *
Forearm	37.08 \pm 0.08	37.42 \pm 0.06 [†]	37.05 \pm 0.05	37.16 \pm 0.05 *
Mean (Chest, Back, and Forearm)	37.03 \pm 0.06	37.40 \pm 0.07 [†]	37.04 \pm 0.04	37.16 \pm 0.05 *
Sensitivity (%/$^{\circ}$C)				
Chest	748 \pm 220	242 \pm 55 [†]	728 \pm 291	707 \pm 192 *
Back	1017 \pm 303	417 \pm 68	1157 \pm 229	1021 \pm 196 *
Forearm	674 \pm 128	325 \pm 51 [†]	1038 \pm 206	915 \pm 177 *
Mean (Chest, Back, and Forearm)	705 \pm 221	238 \pm 49 [†]	811 \pm 171	650 \pm 161 *

Values are means \pm SEM for 10 untrained (U) and 7 trained (T) women in mid-follicular (F) and mid-luteal (L) phase experiments.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

[†] Significantly different from mid-follicular phase of menstrual cycle, $p < 0.05$.

の熱放散反応の感受性は U 群より有意に大きく，その群差は卵胞中期と比較して黄体中期でより顕著にみられた。第 4 章において常温環境下での中等度運動時の熱放散反応は女性ホルモンによって抑制されることを示した。すなわち，一般女性（U 群）において黄体中期ではプロゲステロン濃度の上昇によって血漿量が減少し（Stephenson and Kolka 1988，Stachenfeld et al. 1999，2001），その減少が心肺圧受容器反射を介して常温環境下での中等度運動時の熱放散反応の感受性を低下させたことが推察されている（実験 I-2）。本実験において，T 群では性周期に伴う顕著なプロゲステロンの変化がみられず，U 群に観察されたような性周期に伴う熱放散反応の低下がみられなかった。これらのことから，長期運動トレーニングの影響が卵胞中期よりも黄体中期で顕著になったのは，運動トレーニングを継続し女性ホルモンの分泌変動が小さくなったことで，黄体中期に女性ホルモンによる影響（抑制）が小さくなったこと，また，女性ホルモン濃度上昇に伴う血漿量の低下による心肺圧受容器を介した感受性の低下がみられなかったことに起因していたと推察される。

血漿量の影響に関連して，運動トレーニングを行なうと血漿量は増加することが報告されており（Convertino et al. 1980，Sawka et al. 2000），本実験においても T 群の血漿量は U 群のそれよりも多いことが十分に予想される。しかし，血漿量の増加は熱放散反応の感受性に対して顕著に影響を及ぼさないことが示唆されている（Fortney et al. 1981a，1981b）。そのため，卵胞中期および黄体中期における T 群の高い熱放散反応の感受性は血漿量の増加を介した変化ではないと示唆される。このことか

らも卵胞中期での T 群の高い発汗反応の感受性は血漿量の増加による心肺圧受容器反射を介した中枢性の亢進ではなく、前述したように末梢機構の感受性の亢進に起因することが考えられる。

本実験において、T群のSRおよび%LDFの経時変化は性周期相にかかわらずU群のそれよりも有意な高値を示した。この結果は長期運動トレーニングの効果は発汗反応に顕著にみられることを示した実験III-1の結果と異なる。本実験ではT群の高い $\dot{V}O_2\max$ に起因して自転車運動時の絶対運動強度はT群がU群より有意に高く、そのため運動終了時の $\dot{V}O_2$ もT群がU群よりも有意な高値を示した。測定はしていないものの、実験III-1では本実験で観察されたような大きな熱産生量の差はみられなかったものと考えられる。おそらくこの熱産生量の差の有無が本実験と実験III-1の違いの一因になったと推察される。また、本実験において長期運動トレーニングによる熱放散反応の体温閾値の低下は黄体中期のみで観察された。一方、実験III-1において、その低下は性周期にかかわらずみられた。実験III-1では安静時の体温も性周期にかかわらずT群のそれがU群より低値を示していた。また、卵胞中期においてさえも女性ホルモン（エストロン）に有意な群間差がみられた。おそらく、体力レベルや女性ホルモンレベルなどの実験間の被験者特性の違いが安静時の体温や熱放散反応の体温閾値の相違に影響したと推察される。さらに、本実験では実験III-1とは異なり黄体中期に熱放散反応の感受性の亢進がみられた。前述のようにT群では安静時や運動時にかかわらず性周期による影響がみられないのに対して、U群では常温環境下中等度運動時の熱放散反応の感受性が卵胞中期と比較して黄体中期に抑制され（実験I-2）、その抑制は安静時ではみられない（実験I-1）。このようにU群での熱放散反応に対する性周期の影響の程度が実験条件（安静vs.運動）で異なり、本実験と実験III-1との違いが生じたと考えられる。

5. 要約

本実験では長期運動トレーニングが常温環境下での中等度運動時の熱放散反応に及ぼす影響について性周期を考慮して検討するために、運動習慣のない一般女子学生10名（非運動トレーニング者、U群）と持続的な運動トレーニングを6年以上継続している女性運動トレーニング者7名（T群）に対して環境温25°C（45%RH）下において50% $\dot{V}O_2\max$ 強度で30分間の半仰臥位自転車運動をそれぞれ卵胞中期および黄体中期に負荷した。

U群のエストロン、エストラジオールおよびプロゲステロンは卵胞中期から黄体中期にかけて有意に増加したが、T群のそれには有意な増加は認められなかった。そのため黄体中期ではT群の女性ホルモンレベルはU群より低かった。卵胞中期において安静時および運動時の T_{es} には群間差がみられないのに対し、黄体中期のそれはT群がU群よりも有意な低値を示した。SR（胸、背、前腕および大腿）および%LDF（胸、背および前腕）は性周期相および身体部位にかかわらずT群がU群より有意な高値を示した。卵胞中期では発汗開始および皮膚血管拡張閾値に群間差が認められず、また、発汗反応の感受性においてのみT群がU群よりも有意に大きかった。黄体中期ではT群の各熱放散反応の体温閾値がU群のそれよりも有意に低く、さらに、いずれの熱放散反応の感受性においてもT群がU群より

も有意な高値を示した。また、U群においてみられる性周期の影響はT群ではみられなかった。

以上の結果から、常温環境下での中等度運動時において長期間運動トレーニングを継続した T 群では U 群においてみられるような黄体中期での熱放散反応の低下がみられず、また、長期運動トレーニングによりその熱放散反応が改善され、この改善は熱放散反応の体温閾値の低下と感受性の亢進に起因することが示唆された。さらに、長期運動トレーニングによる改善は卵胞中期よりも黄体中期により顕著にみられることが示された。また、その改善は皮膚血流反応より発汗反応で顕著にみられた。

実験 III-3 漸増負荷運動時

1. 目的

これまでの実験から長期運動トレーニングが女性の熱放散反応を改善することが明らかになった（実験III-1 およびIII-2）。しかし，女性において熱放散反応に対する長期運動トレーニングの影響が異なる運動強度の運動時でも同様にみられるのかは不明である．そこで，実験III-3 の目的は最大酸素摂取量（ $\dot{V}O_{2max}$ ）の50%を中間とした3段階の漸増負荷運動時において長期運動トレーニングが熱放散反応に及ぼす影響を検討することとした．

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では実験 II-2 の若年成人女性 10 名（非運動トレーニング群；U 群と略す）と大学陸上競技部に所属する女性運動トレーニング者 10 名（運動トレーニング群；T 群と略す）が被験者として実験に参加した．Table III-3-1 にその身体特性を示した．その他は実験 I-1 の 2.1.（P.39）と同様であった．

2.2. 実験条件および手順

実験条件およびその手順は実験 II-2 の 2.2.（P.81-82）と同様とし，各被験者の卵胞中期に常温環境下漸増負荷自転車運動を実施した．

Table III-3-1. Physical characteristics of each group.

Variables	U group	T group
Age (yr)	21.0 ± 0.2	20.4 ± 0.3
Height (cm)	162.0 ± 1.3	160.2 ± 1.8
Mass (kg)	52.0 ± 2.8	54.2 ± 2.2
AD (m²)	1.50 ± 0.04	1.51 ± 0.03
AD/Mass (cm²/kg)	290.4 ± 7.4	280.7 ± 5.8
MSF (mm)	14.8 ± 1.1	14.2 ± 0.8
%BF (%)	15.9 ± 2.5	16.8 ± 1.4
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	42.9 ± 1.2	53.8 ± 1.9 *

Values are means ± SEM for 10 untrained (U) and 10 trained (T) women. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, $\dot{V}O_{2max}$: maximal oxygen uptake.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

Table III-3-2. The absolute exercise intensity (W) and absolute exercise intensity per mass (W/kg) of each exercise stage.

		U group	T group
35%$\dot{V}O_2$max	(W)	45.1 ± 3.1	63.2 ± 3.2 *
	(W/kg)	0.87 ± 0.05	1.17 ± 0.05 *
50%$\dot{V}O_2$max	(W)	73.4 ± 3.8	98.7 ± 4.2 *
	(W/kg)	1.42 ± 0.05	1.82 ± 0.06 *
65%$\dot{V}O_2$max	(W)	101.6 ± 4.9	132.2 ± 4.8 *
	(W/kg)	1.97 ± 0.06	2.45 ± 0.08 *

Values are means ± SEM for 10 untrained (U) and 10 trained (T) women.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

2.3. 測定項目

測定項目およびその方法は実験 II-2 の 2.3. (P.82) と同様とした .

2.4. データ分析および統計処理

データ分析および統計処理は実験 II-2 の 2.4. (P.82) と同様である .

3 . 結果

本実験において、年齢、身長、体重、体表面積、体表面積/体重比、平均皮下脂肪厚 (MSF) および体脂肪率には長期運動トレーニングの影響は認められなかったが、 $\dot{V}O_2$ maxはT群がU群よりも有意に高い値を示した (Table III-3-1). 35%、50%および 65% $\dot{V}O_2$ max時の絶対運動強度 (Watts) はいずれも運動強度においてそれぞれT群がU群より有意に高く、また、体重 1kgあたりの運動強度 (Watts/kg) もいずれの運動強度でT群がU群より有意に高かった (Table III-3-2).

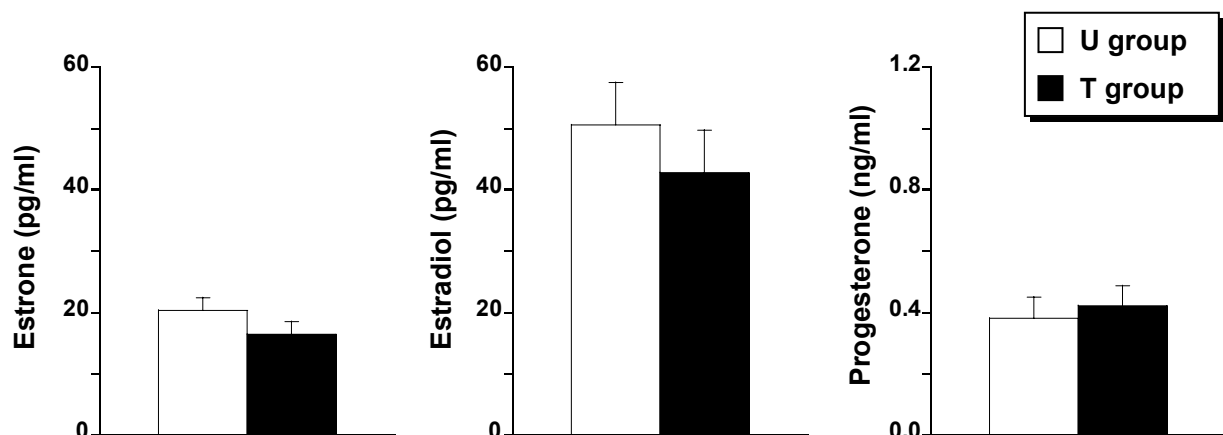


Figure III-3-1. Plasma levels of estrone, estradiol, and progesterone during mid-follicular phase experiment in untrained (U) and trained (T) women. Values are means ± SEM.

安静時血漿女性ホルモン(エストロン, エストラジオールおよびプロゲステロン)濃度はいずれも有意な群間差はみられなかった (Fig. III-3-1).

50% $\dot{V}O_2$ max時の心拍数 (HR) においてT群がU群より有意に低かったことを除き, 安静時およびいずれの運動強度時においてもHR, 平均血圧 (MAP), 直腸温 (T_{re}), 安静時からの T_{re} の上昇度 (ΔT_{re}), 平均皮膚温 (T_{sk}) および平均体温 (T_b) に運動トレーニングの影響はみられなかった (Fig. III-3-2). また, 熱放散反応を測定した部位の局所皮膚温 (T_{sl}) にも有意な群間差は認められなかった (Fig. III-3-3).

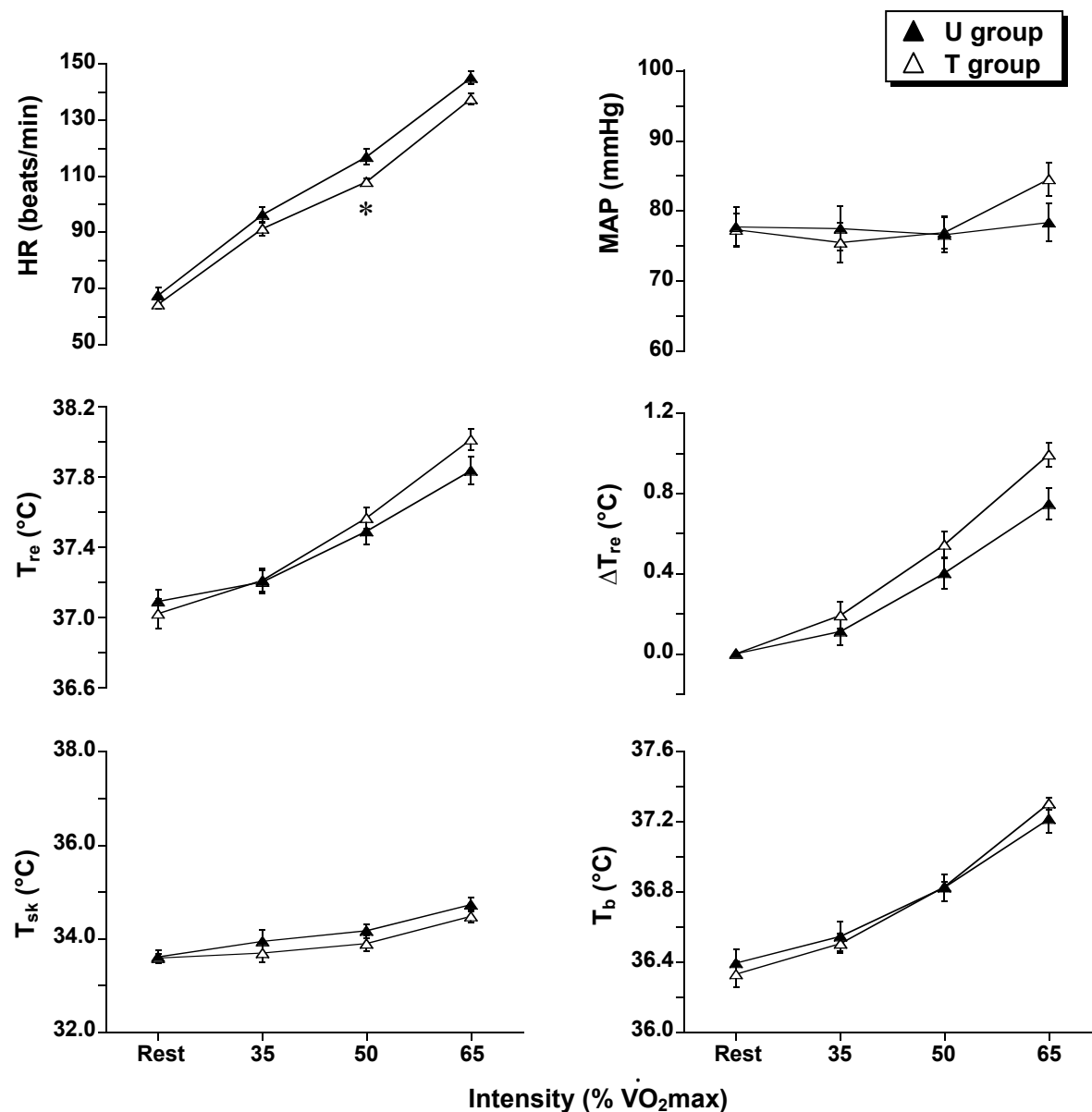


Figure III-3-2. Changes in heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP), rectal temperature (T_{re}), change in rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature (T_{sk}), and mean body temperature (T_b) at rest and each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2$ max) in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

平均発汗量 (SR) は各群ともその程度は異なるものの運動強度の増加に伴い有意に増加した。全ての運動強度においてT群の平均SRはU群のそれより有意に高い値を示した (Fig. III-3-4)。運動強度と平均SRの対応関係における回帰直線の勾配はT群がU群より有意に大きな値を示し (Table III-3-3), 運動トレーニングに伴う平均SRの群差は高強度になるほど顕著にみられた。各部位においても運動強度の増加に伴いSRは有意に増加し, 平均SRでみられた運動トレーニングの影響は背, 前腕および大腿で同様に観察された。また, 前額の $65\% \dot{V}O_{2\max}$ 時に, 胸の 50% および $65\% \dot{V}O_{2\max}$ 時にT群がU群より有意に高い値を示した。しかし, いずれの部位においても運動強度とSRの対応関係における回帰直線の勾配はT群がU群より高いが有意差はみられなかった。

平均活動汗腺数 (ASG) はT群で 35% から $50\% \dot{V}O_{2\max}$ にかけて有意に増加したものの, 50% から

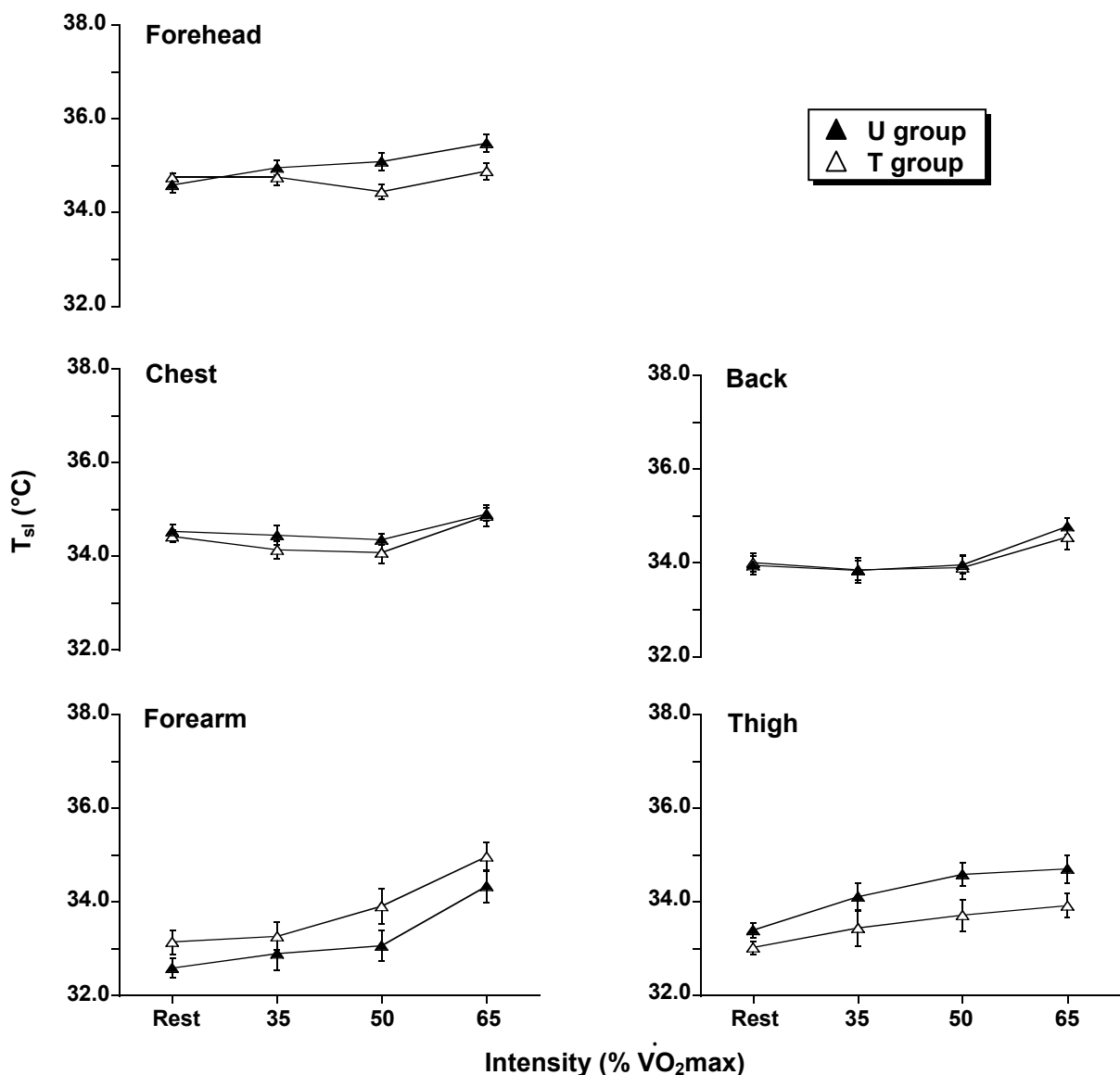


Figure III-3-3. Changes in local skin temperature (T_{sl}) on the chest, back, forearm, and thigh at rest and each exercise intensity (35% , 50% , and $65\% \dot{V}O_{2\max}$) in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

65% $\dot{V}O_2\text{max}$ にかけては有意な増加はみられなかった。一方, U群は35%から65% $\dot{V}O_2\text{max}$ にかけて運動強度の増加に伴い有意に増加し続けた。しかし, いずれの運動強度時においても有意な運動トレーニングの影響はみられなかった。各部位においても平均と同様の変化パターンが観察され, 各運動強度において運動トレーニングの影響はみられなかった (Fig. III-3-5)。

平均単一汗腺あたりの汗出力 (SGO) は各群ともその程度は異なるものの平均SRと同様に運動強度の増加に伴い有意に増加し, 35% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時には運動トレーニングの影響はみられなかったが, 50%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時においてT群がU群よりも有意に高い値を示した。また, この運動トレーニング

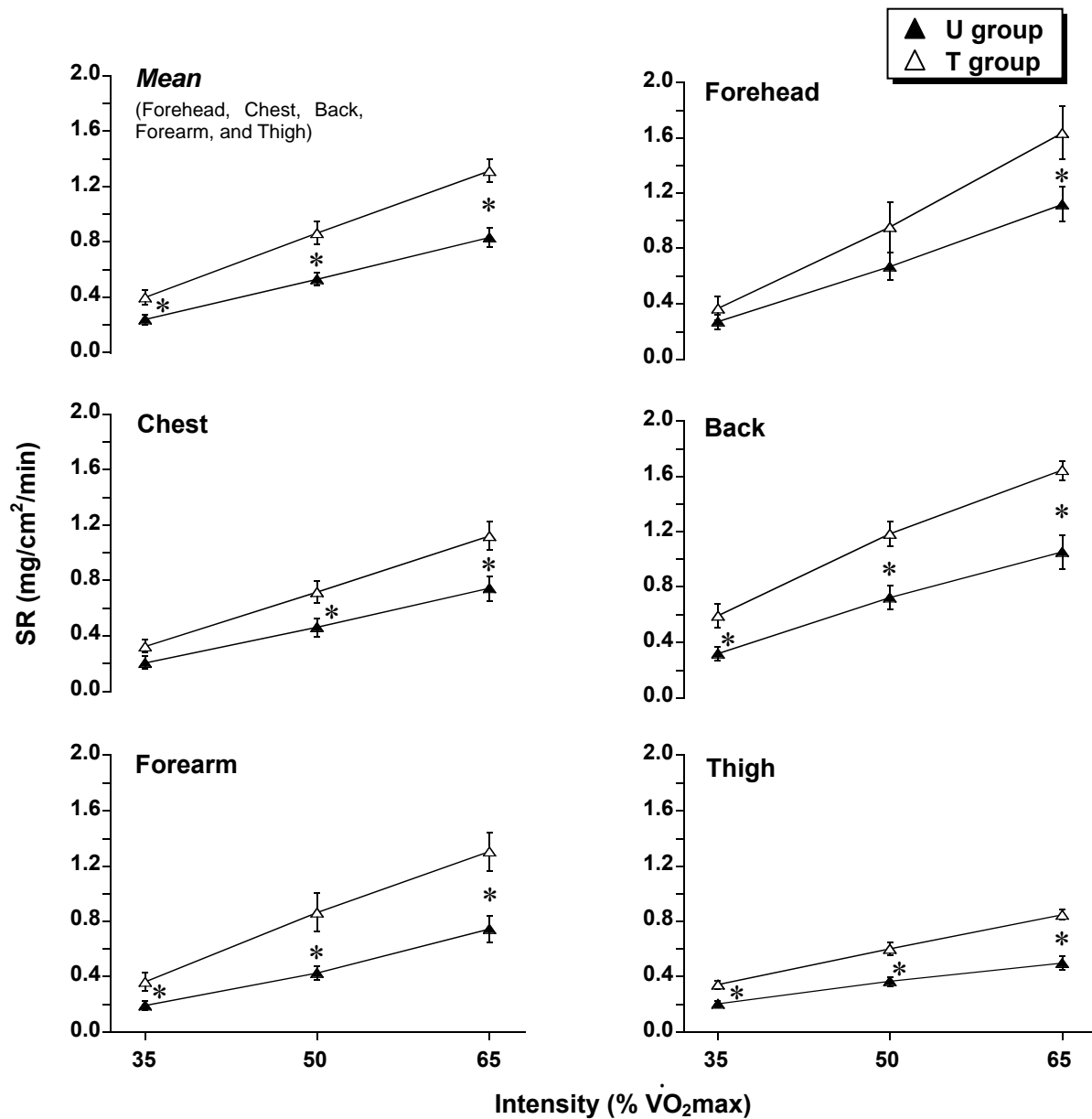


Figure III-3-4. Changes in sweating rate (SR) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in untrained (U) and trained (T) women. The SR increased significantly with the increase in exercise intensity regardless of body site and group. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

Table III-3-3. The slopes for relationships between relative exercise intensity and sweating rate at each body site.

	U group	T group
Slope ((mg/cm²/min)/W)		
Forehead	0.028 ± 0.003	0.042 ± 0.004
Chest	0.018 ± 0.002	0.027 ± 0.003
Back	0.024 ± 0.004	0.035 ± 0.002
Forearm	0.018 ± 0.002	0.031 ± 0.003
Thigh	0.010 ± 0.001	0.017 ± 0.001
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.020 ± 0.002	0.030 ± 0.002 *

Values are means ± SEM for 10 untrained (U) and 10 trained (T) women.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

に伴う平均SGOの群差の程度は高強度になるほど顕著であった。U群において前腕のSGOが35%から50% $\dot{V}O_{2max}$ にかけて有意な増加がみられなかった以外は、各部位のSGOは群および部位にかかわらず強度の増加に伴い有意に増加した。前腕の50%および65% $\dot{V}O_{2max}$ 時に、背および大腿の65% $\dot{V}O_{2max}$ 時にT群がU群より有意な高値を示した (Fig. III-3-6)。総体重減少量 (TWL) はT群がU群より有意に高かった (T群およびU群それぞれ 437 ± 27 および 268 ± 31 g/m²/h)。

皮膚血流量 (%LDF) は両群ともいずれの部位において運動強度の増加に伴い有意な増加を示した。平均%LDF, 前額および胸では運動トレーニングの影響はみられなかったが、前腕では35% $\dot{V}O_{2max}$ 時にT群がU群より有意に高かった (Fig. III-3-7)。

4. 考察

実験III-3において、いずれの運動強度においてSRはT群がU群より有意な高値を示し、その差は運動強度が高くなるほど大きくなった。一方、%LDFには顕著な運動トレーニングの影響は認められなかった。運動強度の増加に伴うSR増加の特性に運動トレーニングによる影響がみられ両群とも35%から50% $\dot{V}O_{2max}$ へのSRの増加はASGとSGOの増加で、また、50%から65%へのSRの増加はT群ではSGOのみの増加で、一方、U群ではASGおよびSGOの両者の増加に起因することが示唆された。

本実験においてU群の $\dot{V}O_{2max}$ は 42.9 ± 1.2 ml/kg/minであった。この値は日本人若年女性 (21歳) の $\dot{V}O_{2max}$ の平均値の 35.5 ± 4.9 (SD) ml/kg/min (東京都立大学体力標準値研究会 2000) より高く、本実験のU群は比較的体力レベルが高い女性であったと推察される。しかし、T群の $\dot{V}O_{2max}$ (53.8 ± 1.9 ml/kg/min) はU群のそれより有意に高い値であった。そのため、本実験ではこれまでの実験と同様に、体力レベルが異なる2群を選出できたことが考えられる。また、女性の熱放散反応は性周期に影響されることを第4章で示した。本実験では実験当日の各血漿女性ホルモン濃度に群間に有意な差がみられず、これらの値はこれまでと同様に検査報告書 (エスアールエル社) に記載された正

常値の範囲内であった。これらのことから、本実験では両群とも卵胞中期を正確に捉え実験を実施できたと言える。

本実験における絶対運動強度（WattsもしくはWatts/kg）はT群の $\dot{V}O_2\text{max}$ がU群より有意に高いことに起因して、いずれの運動強度時でもT群がU群より有意に高くなった。そのため測定していないものの、T群の熱産生量がいずれの運動強度時でも高かった可能性が考えられる。しかし、 T_{re} や ΔT_{re} には有意な群差が認められなかったことから、T群はU群より優れた熱放散能力を有することが示唆される。このことは、T群のSRやTWLがU群より高かったことから推察される。

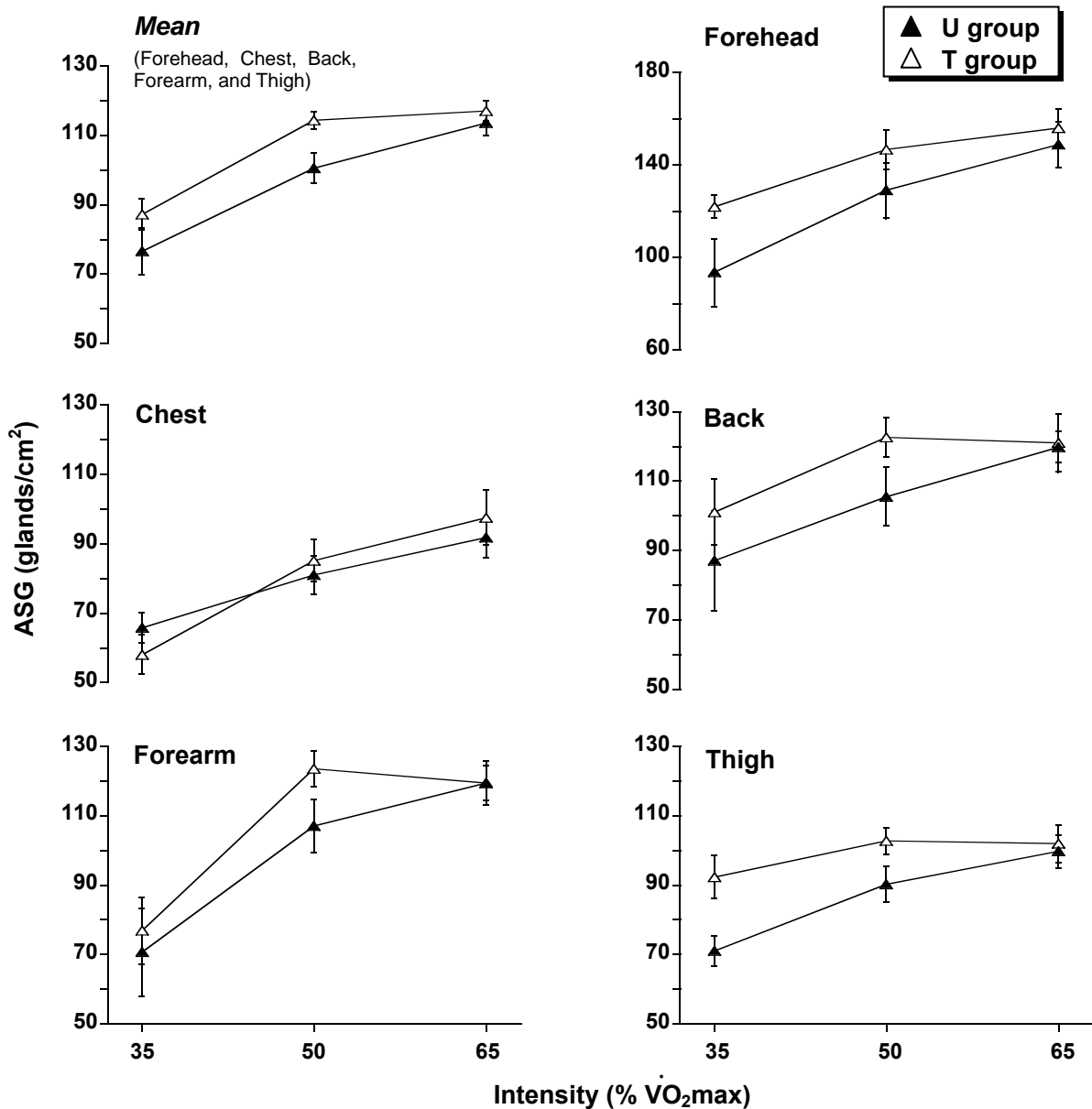


Figure III-3-5. Changes in active sweat glands (ASG) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in untrained (U) and trained (T) women. Although the ASG increased significantly with the increase in exercise intensity in U group, it did not increase significantly from 50% to 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ in T group. Values are means \pm SEM.

運動トレーニングに伴う発汗反応の改善の程度は身体の部位で異なることが報告されている (Inoue et al. 1999). 本研究におけるSRの改善は背, 前腕および大腿で顕著にみられたことから運動トレーニングに伴う発汗反応の亢進に身体部位差が存在することが示唆される. SRは T_{sk} が高くなると局所的に増加することが報告されているが (Ogawa 1970), 本実験ではいずれの部位および運動強度においても T_{sk} に有意な群間差はみられなかったことから, T群の背, 前腕および大腿における大きなSRは T_{sk} の局所的要因に影響されたものではないことが推察される. 実験III-2 では運動トレーニングが発汗反応を亢進し, 卵胞中期におけるその亢進は運動トレーニングそれ自体による末梢機構の活動性の改善に起因することを示唆した. また, 運動強度の増大に伴うSRの増大はASGとSGOの増

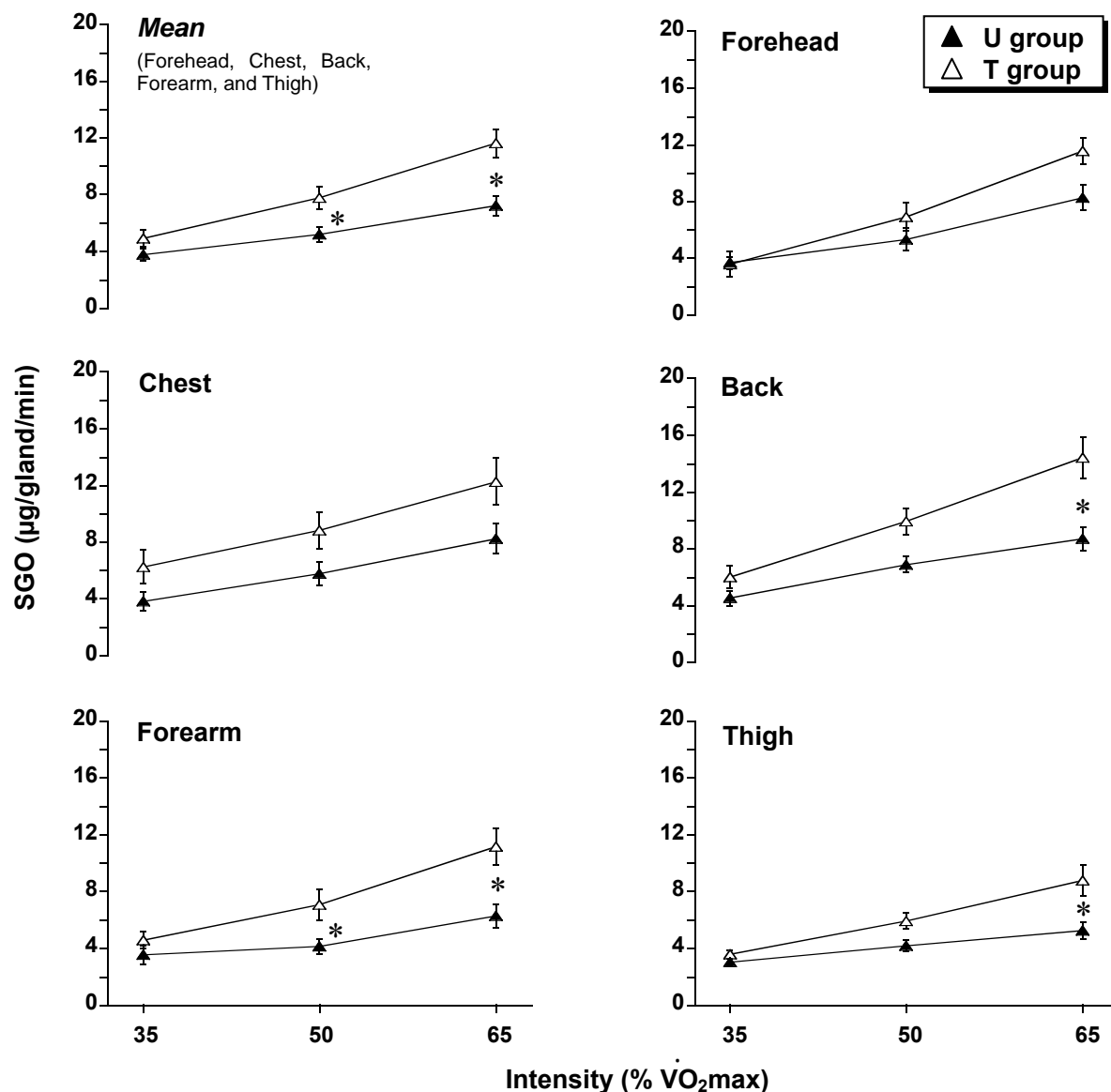


Figure III-3-6. Changes in sweat gland output (SGO) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2$ max) in untrained (U) and trained (T) women. The SGO increased significantly with the increase in exercise intensity regardless of body site and group. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

減で調節されている (Inoue 1996 ; Takano et al. 1996 ; Kondo et al. 1998, 2001) . これらのことから , 次に運動トレーニングが発汗反応の末梢機構の調節に及ぼす影響をASGとSGOの調節特性の観点から考察する .

男性を対象とした実験において 35%から 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ へ強度が増加するときはASGとSGOの増加に , 50%から 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ へ増加するときはSGOのみの増加に起因してSRが増加することが報告されている (Kondo et al. 1998) . 本実験において平均SR , ASGおよびSGOでは , 35%から 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時へのSRの増加はいずれの群でもASGとSGOの増加で , 50%から 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時へのSR増加はU群がASGとSGOの増加で , T群がSGOのみの増加で調節されていた . このT群におけるSRの調節特性は前述のKondo et al. (1998) の結果と一致する . 本実験の結果から , T群では 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ の時点でASGのピーク値に達するのに対して , U群ではピーク値の出現する相対強度がT群のそれよりも高いことが推察される . 汗腺機能の優れた運動トレーニング者のASGのピーク値は非運動トレーニング者より早期に出現することが報告されている (Araki et al. 1978) . この結果に基づくと , 運動トレーニングによって汗腺機能は改善されることが本実験の結果から示唆される . 一方 , T群とU群の絶対運動強度がほぼ同等となるT群の 50% $\dot{V}O_2\text{max}$ (98.7 \pm 4.2 W)時とU群の 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ (101.6 \pm 4.9 W)時の平均SR , ASGおよびSGOを比較するとほぼ同じ値を示した . したがって , 同一相対運動強度時にみられたT群の優れた汗腺機能は高い絶対運動強度に起因して生じた可能性も考えられる .

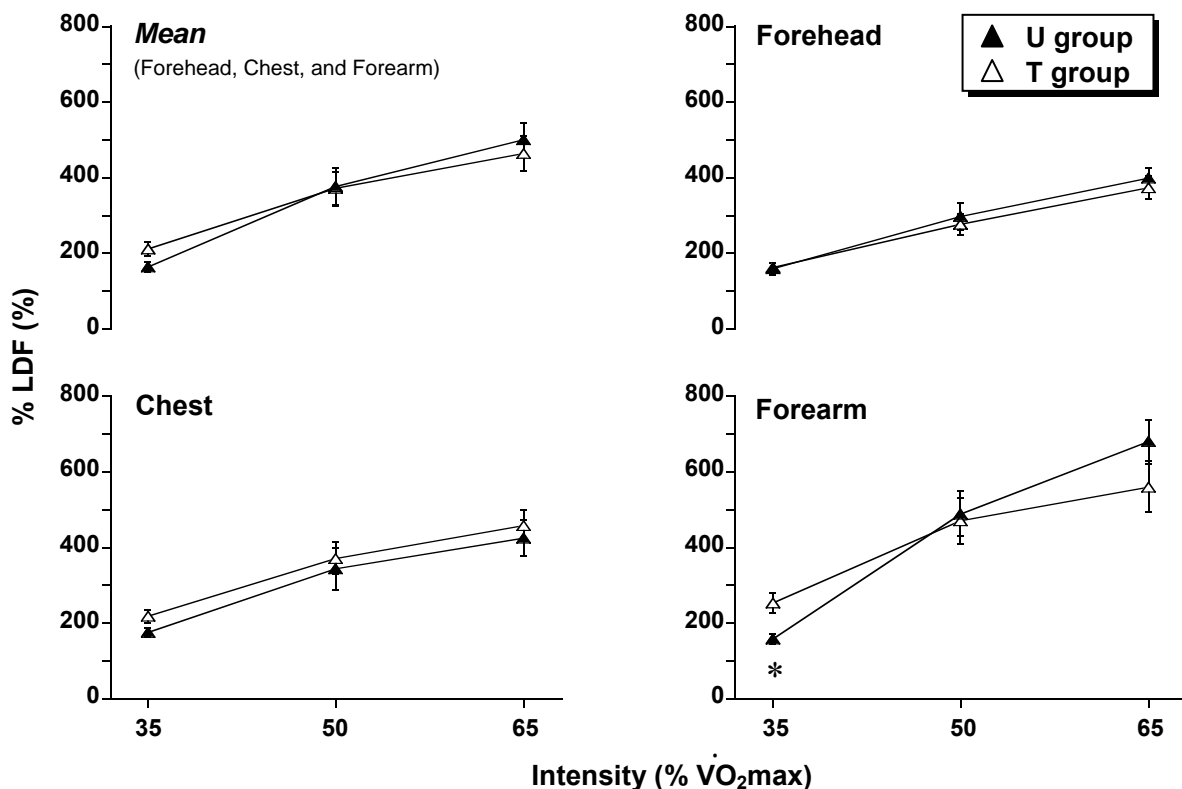


Figure III-3-7. Changes in skin blood flow (%LDF) on the forehead, chest and forearm, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in untrained (U) and trained (T) women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between U and T groups, $p < 0.05$.

上述のように発汗反応は運動トレーニングによって改善されることが示唆されるものの、%LDFにはSRで観察されたような顕著な運動トレーニングの影響はみられなかった。このことから運動トレーニングによる熱放散反応の改善は皮膚血管拡張反応よりも発汗反応で顕著にみられることが示唆される。この見解は実験III-1および-2の結果とも一致した。

長期運動トレーニングによる発汗反応の亢進の程度は身体部位によって異なることが本実験および実験III-1で示された。しかし、SRの顕著な亢進がみられた部位は本実験では背、前腕および大腿、実験III-1では胸、背および前腕と若干異なった。また、実験III-2ではSRを測定した全ての部位において顕著な運動トレーニングの効果がみられた。本実験の結果から、長期運動トレーニングの影響は運動強度の増加に伴って大きくなり、また、その影響がみられる部位も運動強度ごとに異なることから、おそらくこれらの実験間の結果の相違は安静と運動という実験条件、環境温や運動強度、運動強度や運動形態(一定負荷運動と漸増負荷運動)の温熱ストレスレベルの違いに起因することが考えられる。特に本実験と実験III-2の違いに関しては、運動強度が同じである本実験の50% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時と実験III-2のSRを比較するとほぼ全ての部位で実験III-2のSRが本実験のそれよりも約0.2 mg/cm²/min少ないことから、環境温や運動形態の違いの影響が考えられる。また、本実験における皮膚血管拡張反応に関する結果は、卵胞中期でさえもその改善がみられた実験III-2の結果とは異なる。この違いも発汗反応と同様に実験間の条件の違いに起因して生じたと考えられる。いずれにしろ、本章における実験III-1から-3の結果より、長期運動トレーニングによって安静時および運動時の熱放散反応が改善するものの、その改善がみられる部位やその程度は実験を行なう条件や性周期相によって異なることが推察される。

5. 要約

本実験では若年女性において長期運動トレーニングが常温環境下漸増負荷運動時の熱放散反応に及ぼす影響について検討した。運動習慣のない若年成人女性10名(非運動トレーニング群;U群)と持続的なトレーニングを6年以上継続している女性運動トレーニング者10名(運動トレーニング群;T群)に対して卵胞中期に環境温30°C(45%RH)下での35%、50%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動を各20分、計60分間負荷した。

各運動強度における平均SRは各群とも運動強度の増加に伴い有意に増加した。全ての運動強度においてT群がU群より有意に高い値を示した。この運動トレーニングに伴う平均SRの群差は高強度になるほど顕著であった。平均ASGはT群で35%から50% $\dot{V}O_2\text{max}$ にかけて有意に増加したものの、50%から65% $\dot{V}O_2\text{max}$ にかけては有意な増加はみられなかった。一方、U群は35%から65% $\dot{V}O_2\text{max}$ にかけて運動強度の増加に伴い有意に増加した。しかし、いずれの運動強度時においても有意な運動トレーニングの影響はみられなかった。平均SGOは平均SRと同様に運動強度の増加に伴い有意に増加し、35% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時には運動トレーニングの影響はみられなかったが、50%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時においてT群がU群よりも有意に高い値を示した。また、この運動トレーニングに伴う平均SGOの群差の程度

は高強度になるほど顕著であった。皮膚血管拡張反応には顕著な運動トレーニングの影響はみられなかった。

以上の結果から、長期運動トレーニングが運動時の発汗反応を亢進し、その改善は運動強度が高くなるほど顕著となることが示唆された。また、運動トレーニングによる熱放散反応の改善は皮膚血管拡張反応よりも発汗反応で顕著であることが示された。さらに、長期運動トレーニングが運動強度の増大に伴う発汗反応の特性に影響を及ぼすことが示された。

1. 目的

ここまでの実験から性周期や長期運動トレーニングによる熱放散反応への影響は常温環境下中等度運動時でより顕著にみられることが示された(第 4 章および第 6 章)。これまでの研究では、短期運動トレーニングの影響が常温環境下中等度運動時における女性の熱放散反応に及ぼす影響を性周期と運動トレーニングに伴う熱放散反応の改善に有効な最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)の増加レベル(Pandolf 1979)の両者を考慮して検討したものはほとんどなく、この常温環境下中等度運動時における長期運動トレーニング効果が短期運動トレーニングを実施した場合でも同様にみられるかは明らかではない。また、男性において熱放散反応に対する運動トレーニング効果がトレーニング開始後 1 週間以内に顕著にみられること(Patterson et al. 2004)、女性ホルモンが血漿量を減少させたり(Stephenson and Kolka 1988)、熱放散反応を抑制させたりすること(第 4 章)を考え合わせると、運動トレーニング開始時の女性ホルモンレベル(性周期相)によって熱放散反応に対するトレーニング効果は異なる可能性が考えられる。さらに、女性において短期運動トレーニングの効果がどのような過程で成立し、また、消失していくのかは明らかではない。そこで、実験 IV の目的は短期運動トレーニングおよび脱トレーニングが常温環境下中等度運動時の熱放散反応に及ぼす影響を検討することとした。

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では健康な若年成人女性 16 名を被験者とした。被験者は少なくとも 3 年以上体育の授業以外で特別な運動を実施していない一般的な女性(非運動トレーニング者)であった。16 名のうち 11 名が約 3 ヶ月の短期運動トレーニングを実施し、残りの 5 名はコントロール群(C 群)として実験に参加した。各群の身体特性を Table IV-1 に示した。その他は実験 I-1 の 2.1. (P.39)と同様であった。

2.2. 実験条件および手順

運動トレーニング：本実験の全体的なプロトコールを Fig. IV-1 に示す。運動トレーニングに参加した 11 名はさらに 2 つのグループに分けられ、3 名は卵胞中期(F 群)から、残りの 8 名は黄体中期(L 群)からそれぞれ運動トレーニングを開始し、環境温 30°C (45%RH) に設定した人工気象室内において 4 日もしくは 5 日/週の頻度で、心拍数が 140 拍/分(およそ 60% $\dot{V}O_{2max}$)程度の自転車エルゴメータ運動を 60 分間/日、各被験者の性周期 3 サイクルの期間実施した。被験者はこのトレーニング時に自由飲水を許可されていたが、飲水する者はいなかった。また、被験者の都合によりトレーニング実施の時間帯を規定することはできなかった。

標準運動テスト(SET)：短期運動トレーニングによる効果およびその消失過程を評価するために

Table IV-1. Changes in physical characteristics from Pre or C1.

	Group	Pre (C1)	T1	T2	T3 (C2)	D1	D2 (C3)
Age (yr)	F	20.4 ± 0.5					
	L	20.0 ± 0.6					
	C	20.6 ± 1.1					
Height (cm)	F	158.0 ± 2.9					
	L	161.2 ± 0.2					
	C	161.6 ± 1.7					
Mass (kg)	F	56.9 ± 3.0	56.7 ± 2.8	56.1 ± 3.0	56.6 ± 3.1	56.4 ± 3.2	56.2 ± 3.5
	L	56.1 ± 2.5	56.5 ± 2.5	56.3 ± 2.5	57.9 ± 1.8	56.1 ± 2.6	55.6 ± 4.2
	C	54.5 ± 2.7			55.8 ± 3.0		55.9 ± 3.0
AD (m²)	F	1.55 ± 0.03	1.55 ± 0.03	1.54 ± 0.04	1.55 ± 0.04	1.55 ± 0.04	1.54 ± 0.05
	L	1.52 ± 0.05	1.53 ± 0.05	1.52 ± 0.04	1.56 ± 0.03	1.52 ± 0.05	1.50 ± 0.06
	C	1.53 ± 0.04			1.54 ± 0.05		1.54 ± 0.05
AD/Mass (cm²/kg)	F	273.6 ± 7.8	274.1 ± 7.4	275.8 ± 8.3	274.5 ± 8.3	275.1 ± 8.6	275.7 ± 9.4
	L	272.6 ± 4.7	271.5 ± 4.6	272.1 ± 4.6	269.6 ± 3.4	272.2 ± 4.3	271.8 ± 7.7
	C	281.3 ± 6.9			277.8 ± 7.5		277.5 ± 7.6
MSF (mm)	F	19.2 ± 0.8	19.4 ± 0.5	17.5 ± 1.0	16.0 ± 1.3	18.3 ± 0.8	17.5 ± 1.1
	L	20.2 ± 1.4	20.0 ± 1.5	19.7 ± 1.3	19.6 ± 1.6	20.2 ± 1.9	21.4 ± 1.6
	C	14.2 ± 1.6			17.8 ± 1.5		16.1 ± 1.9
%BF (%)	F	20.2 ± 1.4	20.4 ± 1.5	10.0 ± 1.0	16.7 ± 0.7	19.9 ± 1.3	19.1 ± 1.2
	L	20.0 ± 2.3	20.9 ± 1.9	21.6 ± 1.8	21.3 ± 1.6	20.7 ± 1.5	21.2 ± 2.4
	C	14.1 ± 1.3			16.6 ± 2.4		17.1 ± 2.1
VO₂max (ml/kg/min)	F	34.4 ± 4.1	36.8 ± 3.6	37.8 ± 4.0	39.4 ± 4.6 *	34.8 ± 1.9	33.1 ± 1.9
	L	33.1 ± 1.3	36.7 ± 0.7 *	36.4 ± 0.9 *	38.7 ± 0.7 *	35.2 ± 0.5	32.1 ± 1.6
	C	35.1 ± 3.1			35.7 ± 2.3		33.3 ± 1.7

Values are means ± SEM for follicular (F, n=3), luteal (L, n=8), and control (C, n=5) group, respectively. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, VO₂max: maximal oxygen uptake. F and L groups carried out standard exercise test [Pre-training level (Pre), first (T1), second (T2) and third month (T3) of menstrual cycle during training, and first (D1) and second month (D2) of menstrual cycle after training] in each mid-follicular phase and in each mid-luteal phase, respectively. C group was tested at each mid-follicular phase every 2 or 3 months (C1, C2, and C3) without the training.

* Significantly different from Pre, $p < 0.05$.

6回のSETをF群はそれぞれ卵胞中期ごとに、L群はそれぞれ黄体中期ごとに実施した〔トレーニング前(Pre)、トレーニング開始後約1ヶ月目(T1)、同2ヶ月目(T2)、同3ヶ月目(T3)、トレーニング終了後約1ヶ月目(D1)および同2ヶ月目(D2)、Fig. IV-1参照〕。測定技術や被験者の体調の問題でL群のT3-D2において数人の被験者のデータを得ることができなかった。C群は同じSETを

2もしくは3ヶ月ごとの卵胞中期に計3回実施した(それぞれC1, C2およびC3)。SETは各被験者の規則的な性周期に基づき決定し,さらに,当日の血漿女性ホルモン濃度により希求された性周期相に的確に行なわれていたことを確認した。また,日内リズムによる影響を最小限にするため,同一被験者は同一時間帯にSETに参加した。全てのSETは初秋から初春(9月下旬から4月初旬)にかけて実施し,季節による暑熱順化の影響がないように配慮した。実験条件およびその手順は,実験I-2の2.2.(P.54-55)と同様であった。

2.3. 測定項目

運動トレーニング: 運動トレーニング中の総体重減少量(TWL)と心拍数(HR)を測定した。HRはハートレートモニター(Polar社製)を用いて1分ごとに記録し,運動中の平均値(平均HR)を求めた。

SET: 測定項目およびその方法は汗の拍出頻度(F_{sw})を除き,実験I-2の2.3.(P.55)と同様とした。L群の2名は食道温(T_{es})の代わりに直腸温(T_{re})を測定し,この2名に関しては下記の熱放散反応の感受性の分析から除外した。

2.4. データ分析および統計処理

皮膚血流量(LDF)はベースラインデータを100%とし,変化率(%LDF)を算出した。また,発汗量(SR)および%LDFはそれぞれベースラインデータを差し引き,各反応開始以降のデータの積分

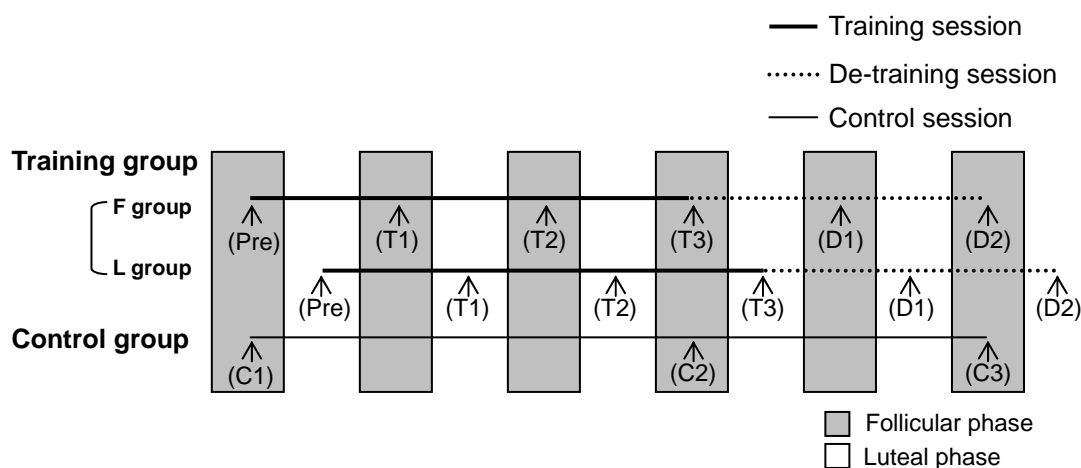


Figure IV-1. Schematic diagram summarizing the experimental protocol and showing the subject assignments. The training group was divided into two subgroups according to whether training was initiated during the follicular or luteal phase of their menstrual cycle [Follicular (F) and Luteal (L) groups, respectively]. The training group underwent endurance training for three complete menstrual cycles and de-training for two complete menstrual cycles. Over the course of the training, the women underwent 6 standard exercise tests (SET; Pre, T1, T2, T3, D1, and D2; arrows (↑) indicate the times of the SETs). The control group did not participate in the training program, but underwent 3 SETs during the midfollicular phase of their cycle at intervals of 2 or 3 months (C1, C2 and C3). Pre, pre-training; T1, T2, and T3, first, second, and third menstrual cycle during the training period; D1 and D2, first and second menstrual cycle after the training period.

Table IV-2. The detail of physical training in each group.

Variables	Group	T1	T2	T3
Day of Training (days)	F	18.3 ± 2.9	12.7 ± 1.5	17.0 ± 1.0
	L	17.3 ± 1.2	15.6 ± 1.3	13.9 ± 0.7 [†]
Average HR (beats/min)	F	141.1 ± 0.6	141.6 ± 2.9	146.4 ± 3.8
	L	143.4 ± 2.2	141.8 ± 2.3	143.2 ± 2.3
TWL (g/m²/h)	F	335 ± 29	346 ± 25	369 ± 26
	L	349 ± 36	346 ± 31	280 ± 42

Values are means ± SEM for follicular (F, n=3) and luteal (L, n=8) group, respectively. HR: heart rate, TWL: total weight loss of training exercise. F and L groups trained for each 3 menstrual cycles; the first (T1), second (T2) and third month (T3) of menstrual cycle during the training. Values are means (SEM).

[†] Significantly different between F and L groups, $p < 0.05$.

値を算出した。これらの積分値の結果はそれぞれ経時変化の結果と一致したので、その積分値を短期運動トレーニングおよび脱トレーニングに伴う量的な変化の指標として用いた。また、SRおよび%LDFの各部位のデータを合計して全身の変化の傾向を把握した（それぞれSR_{all}および%LDF_{all}）。T_{es}と各熱放散反応の対応関係に関する分析は実験I-2の2.4（P.55-56）と同様の方法で行なった。また、F群およびL群においてPreからT3までの各女性ホルモンとSR_{all}のデータからその対応関係を求めた。全てのパラメータは基本的にPreもしくはC1からの変化（Δ）を求め、その値を検討した。

全てのデータは平均値±標準誤差（SEM）で表示した。運動トレーニングによる各パラメータのΔ変化は一元配置の分散分析を用いて検討した。いずれの検定においても有意水準は $p < 0.05$ に設定した。

3. 結果

PreもしくはC1における各群の身体特性にはいずれも有意な群間差はみられなかった（Table IV-1）。F群およびL群の $\dot{V}O_2\max$ を除き、全ての身体特性はトレーニングや季節に伴う顕著な変化は認められなかった。

T2からT3にかけてのトレーニング日数のみL群がF群より有意な低値を示したものの、トレーニング時のTWLおよびトレーニング時の平均HRに有意な群差はみられなかった（Table IV-2）。F群およびL群の $\dot{V}O_2\max$ はトレーニングに伴い有意に増加し、T3におけるPreからの増加度はそれぞれ14.5%および16.9%であった。SETの絶対運動強度はF群およびL群それぞれ21.1%および20.0%有意に増加し、運動実験終了時の $\dot{V}O_2$ はそれぞれ6.8%および9.9%増加した。この $\dot{V}O_2$ の変化はL群においてのみ有意であった。 $\dot{V}O_2\max$ および絶対運動強度の増加はT1でみられ、ほぼその値がT3まで維持した。F群およびL群とも $\dot{V}O_2\max$ 、絶対運動強度および運動実験終了時の $\dot{V}O_2$ はD1でPreのレベルに戻った。

女性ホルモンはいずれの群においてもトレーニングおよび季節による有意な変化はみられなかった。しかし、統計的に有意ではないものの、L群においては女性ホルモンがPreよりもトレーニング期に増加する傾向にあった ($p < 0.10$) (Fig. IV-2)。

安静時のHRおよび T_{es} はF群およびL群ともPreからT1で有意に低下し、トレーニング期間中その低下を維持した。トレーニングに伴うこれらの低下はD1でみられなくなり、Preのレベルに戻った。 T_{re} においても T_{es} と同様の変化が観察された。安静時における平均血圧 (MAP) および平均皮膚温 (T_{sk}) はトレーニングに伴う有意な変化は認められなかった (Fig. IV-3)。SET時におけるF群およびL群のHRはトレーニングに伴う変化はみられなかったが、SET時の T_{es} は安静時と同様の変化を示し、T1からT3の T_{es} はPreと比較して有意な低値を示し、この T_{es} の変化はD1で消失した。また、SET時のMAPおよび T_{sk} はトレーニングに伴う変化はみられなかった。一方、C群には安静およびSET時ともこれらの変化はみられなかった。

F群において SR_{all} はT1およびT2でPreよりも有意に増加したのに対して、L群ではT2でPreより増加する傾向がみられただけであった ($p < 0.10$)。各部位ごとにみると、これらの変化は特に胸および大腿で顕著にみられた。 SR_{all} および各部位におけるトレーニングの影響はD1で消失した。C群において

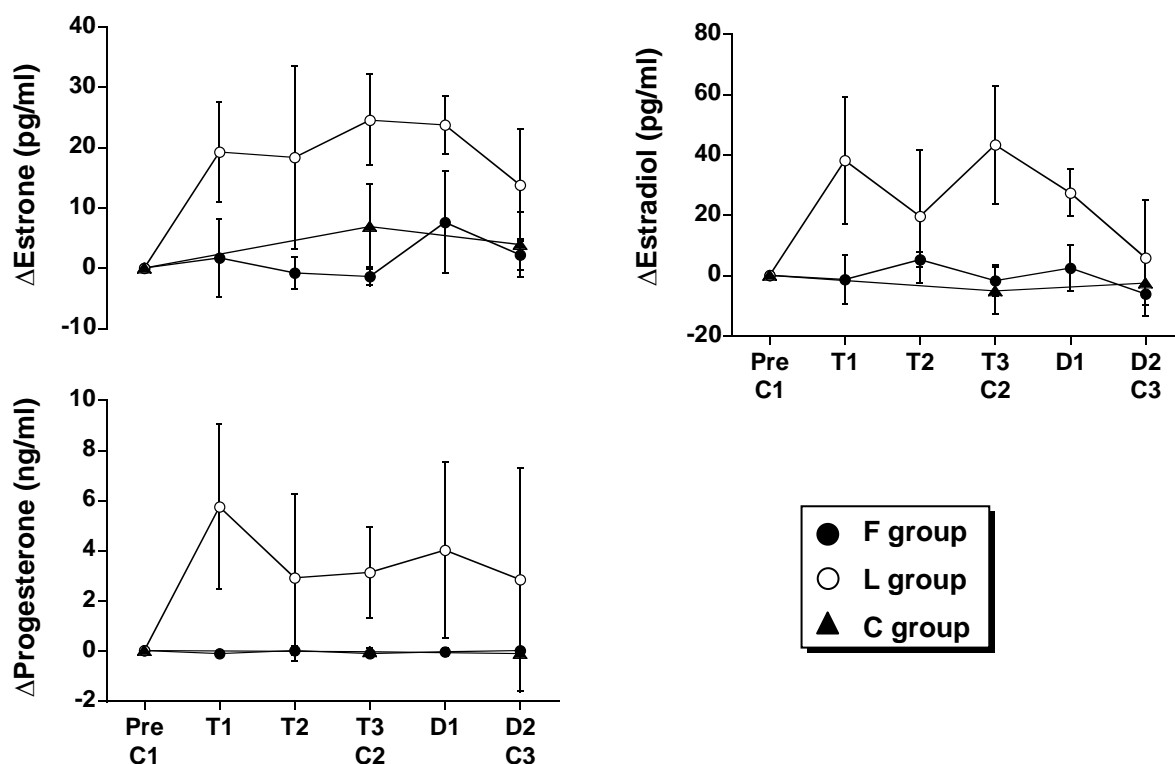


Figure IV-2. Changes in female hormones from Pre or C1. Follicular (F) and luteal (L) groups carried out a standard exercise test [Pre-training level (Pre), first (T1), second (T2) and third month (T3) of menstrual cycle during training, and first (D1) and second month (D2) of menstrual cycle after training] in each mid-follicular phase and in each mid-luteal phase, respectively. Control (C) group performed the standard exercise test at each mid-follicular phase every 2 or 3 months (C1, C2, and C3) without the training. Values are means ± SEM.

SR_{all}, 胸および背のSRがC1と比較してC3で有意に低下した (Fig. IV-4). SET時のTWLはトレーニングに伴う変化はみられなかった.

発汗開始閾値はF群およびL群ともPreからT1で有意に低下し,その後,トレーニング期間中変化せず,D1にPreレベルに戻った (Fig. IV-5). 各部位においてもほぼ同様の低下がみられた (Table IV-3). 発汗反応の感受性においては両群ともトレーニングに伴う一様の変化はみられなかった. C群ではいずれも季節に伴う有意な変化は認められなかった.

%LDF_{all}には両群ともトレーニングに伴う顕著な変化はみられなかった. また, F群およびL群ともD1およびD2でPreよりも有意に低下した. 各部位においてもほぼ同様の変化がみられた. C群では胸の%LDFがC1と比較してC3で有意に低下したことを除き,季節に伴う有意な変化は認められなかった (Fig. IV-6).

発汗反応と同様に,皮膚血管拡張閾値はF群およびL群ともPreからT1で有意に低下し,その後,

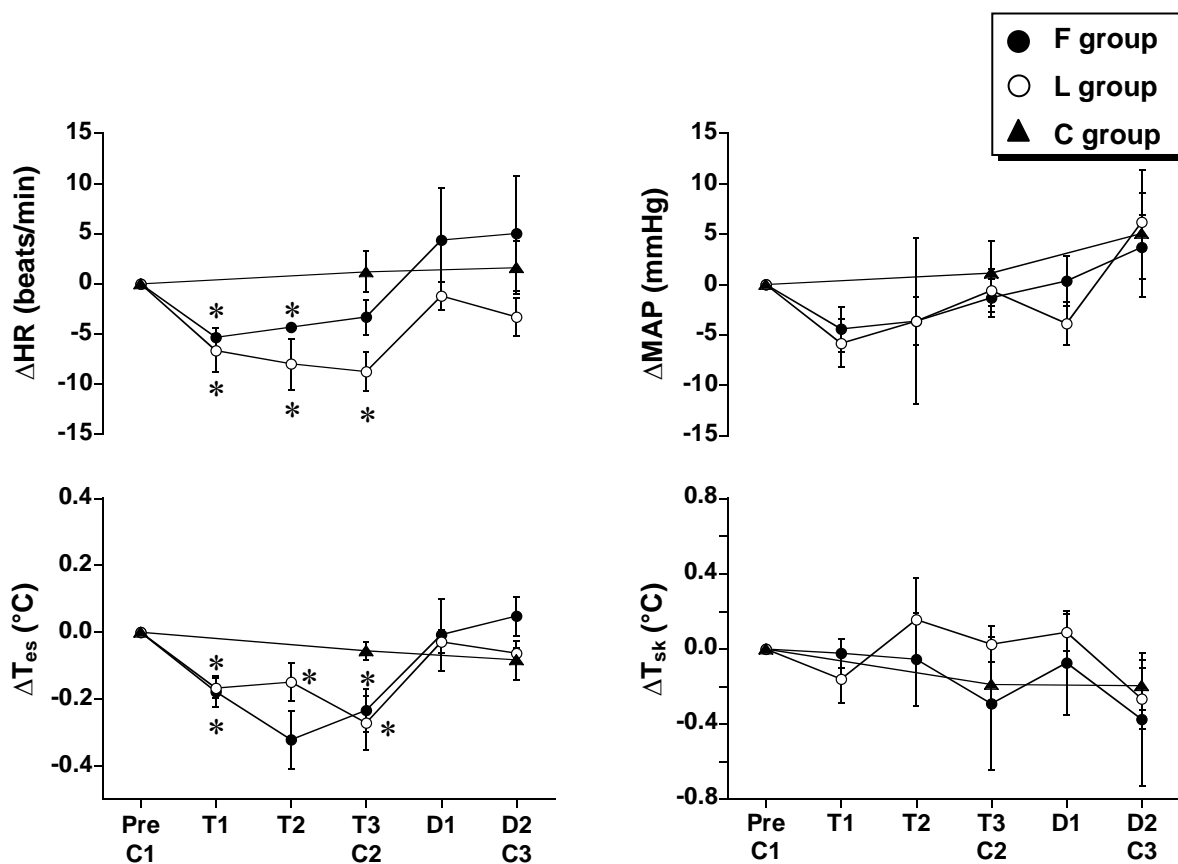


Figure IV-3. Changes in baseline heart rate (ΔHR), mean arterial blood pressure (ΔMAP), esophageal temperature (ΔT_{es}), mean skin temperature (ΔT_{sk}) from Pre or C1. Follicular (F) and luteal (L) groups carried out a standard exercise test [Pre-training level (Pre), first (T1), second (T2) and third month (T3) of menstrual cycle during training, and first (D1) and second month (D2) of menstrual cycle after training] in each mid-follicular phase and in each mid-luteal phase, respectively. Control (C) group performed the standard exercise test at each mid-follicular phase every 2 or 3 months (C1, C2, and C3) without the training. Values are means \pm SEM.

* Significantly different from Pre, $p < 0.05$.

トレーニング期間中変化せず，D1 に Pre レベルに戻った (Fig. IV-7). 各部位においてもほぼ同様の低下がみられた (Table IV-4). 皮膚血管拡張反応の感受性においては両群ともトレーニングに伴う一様の変化はみられなかった. C 群ではいずれも季節に伴う有意な変化は認められなかった.

PreからT3 における各女性ホルモン (エストロン，エストラジオールおよびプロゲステロン) 濃度とSR_{all}の対応関係は，いずれの対応関係においても有意な負の累乗関係を示し (エストロン $r=0.55$ ，エストラジオール $r=0.65$ およびプロゲステロン $r=0.60$)，女性ホルモンが一定のレベルを超えるとSR_{all}は小さくなった (Fig. IV-8).

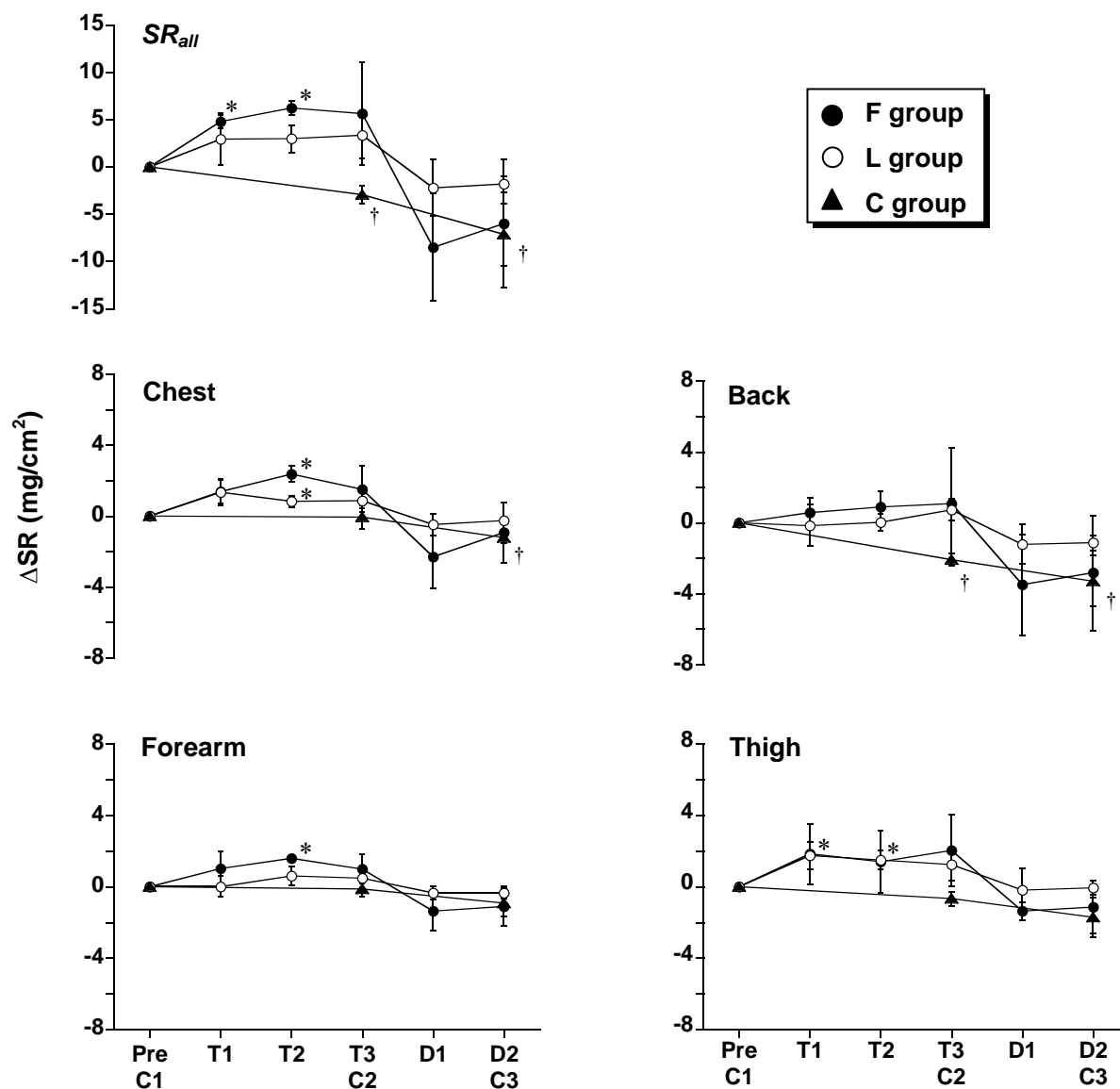


Figure IV-4. Changes in the integrated sweating rate on the chest, back, forearm, thigh, and the total integrated sweating rate of each body site (SR_{all}) during the standard exercise test (SET; see methods for details). Values are the means \pm SEM. Abbreviations are shown as the legend for Fig. IV-1.

* $p < 0.05$ versus Pre.

† $p < 0.05$ versus C1.

4. 考察

実験IVでは、性周期を考慮し、かつ、熱放散反応の改善を引き起こす程度の $\dot{V}O_2\max$ 増加を伴う短期運動トレーニングを行なった場合、女性においても熱放散反応は改善し、それは主に熱放散反応の体温閾値の低下に起因することが明らかになった。また、量的な改善は発汗反応のみにみられ、この改善の程度は黄体中期からトレーニングを開始したL群より卵胞中期から開始したF群でより顕著であることが示された。これらの短期運動トレーニングの効果は運動トレーニング開始後1ヶ月目までに生じ、その効果はトレーニング終了後1ヶ月目までに消失することが示唆された。

日本人若年女性(21歳)の $\dot{V}O_2\max$ の平均値は 35.5 ± 4.9 (SD) ml/kg/minと報告されており(東京都立大学体力標準値研究会 2000)、トレーニング前のF群およびL群〔 34.4 ± 4.1 および 33.1 ± 1.3 (SEM) ml/kg/min〕は一般的な体力レベルの女性であったと推察される。本実験の運動トレーニングによってF群およびL群の $\dot{V}O_2\max$ はそれぞれ有意に増加し、日本人女性(19歳以上)を対象とした $\dot{V}O_2\max$ による7段階(3を普通として1:非常に弱い~7:非常に優れている)の体力評価からみると(山地1992)、トレーニング前の3(普通)から4(良い)に向上した。また、この $\dot{V}O_2\max$ の増加の程度は運動トレーニングによる熱放散反応の改善に必要とされる15%程度の $\dot{V}O_2\max$ の増加(Pandolf 1979)であったことから、本実験では両群に熱放散反応を改善させるのに適切な運動トレーニングを負荷し、SETにおいてみられた変化は運動トレーニングに起因したものと考える。

本実験では両群とも短期運動トレーニングにより熱放散反応の体温閾値が低下した。この結果は男性の結果と一致し(Nadel et al. 1974; Thomas et al. 1999; Okazaki et al. 2002; Yamazaki and Hamasaki

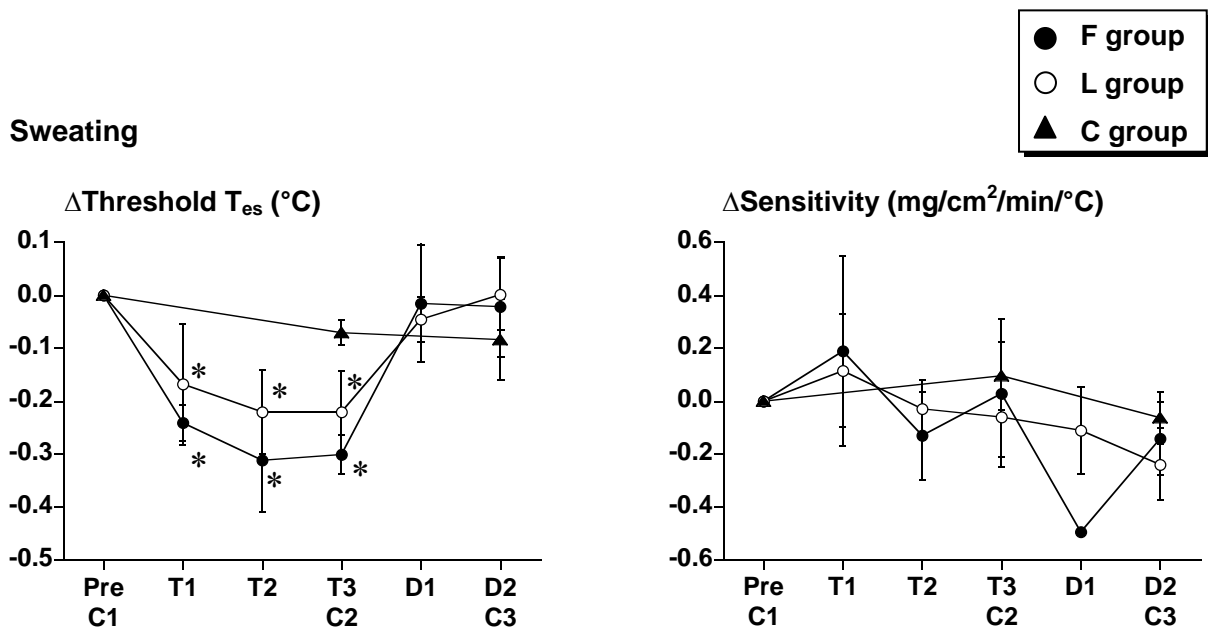


Figure IV-5. Changes in the mean value of threshold T_{es} and sensitivities of sweating for each body site during the SET. T_{es} : esophageal temperature. Abbreviations and conventions are shown as the legend for Fig. IV-1.

* $p < 0.05$ versus Pre.

Table IV-3. Changes in sweating parameters from Pre or C1.

Group		Pre (C1)	T1	T2	T3 (C2)	D1	D2 (C3)
Threshold T_{es} ($^{\circ}$C)							
Chest	F	37.38 \pm 0.13	-0.25 \pm 0.03 *	-0.30 \pm 0.12	-0.31 \pm 0.04 *	0.02 \pm 0.12	-0.05 \pm 0.08
	L	37.58 \pm 0.13	-0.17 \pm 0.12 *	-0.18 \pm 0.09 *	-0.21 \pm 0.10	-0.03 \pm 0.06	0.02 \pm 0.08
	C	37.11 \pm 0.06			0.03 \pm 0.05		-0.05 \pm 0.08
Back	F	37.37 \pm 0.13	-0.24 \pm 0.04 *	-0.30 \pm 0.11	-0.30 \pm 0.04 *	0.01 \pm 0.12	-0.02 \pm 0.10
	L	37.57 \pm 0.13	-0.16 \pm 0.12 *	-0.17 \pm 0.09 *	-0.20 \pm 0.10	0.00 \pm 0.05	0.05
	C	37.11 \pm 0.06			-0.04 \pm 0.04		-0.07 \pm 0.07
Forearm	F	37.38 \pm 0.13	-0.25 \pm 0.03 *	-0.31 \pm 0.11	-0.31 \pm 0.04 *	0.01 \pm 0.12	0.02 \pm 0.13
	L	37.59 \pm 0.13	-0.15 \pm 0.12	-0.18 \pm 0.09 *	-0.28 \pm 0.10	-0.04 \pm 0.05	0.02 \pm 0.08
	C	37.14 \pm 0.07			-0.05 \pm 0.05		-0.09 \pm 0.06
Thigh	F	37.35 \pm 0.10	-0.26 \pm 0.05 *	-0.36 \pm 0.07 *	-0.29 \pm 0.04 *	-0.04 \pm 0.10	-0.01 \pm 0.09
	L	37.54 \pm 0.12	-0.16 \pm 0.12 *	-0.20 \pm 0.08 *	-0.22 \pm 0.09	-0.06 \pm 0.04	0.00 \pm 0.07
	C	37.07 \pm 0.05			-0.07 \pm 0.04		-0.08 \pm 0.09
Sensitivity ((mg/cm²/min)/$^{\circ}$C)							
Chest	F	0.79 \pm 0.22	0.14 \pm 0.33	0.08 \pm 0.10	0.08 \pm 0.27	-0.55 \pm 0.07	-0.11 \pm 0.19
	L	0.74 \pm 0.27	0.35 \pm 0.27	0.20 \pm 0.16	0.23 \pm 0.27	-0.06 \pm 0.19	-0.39 \pm 0.18
	C	0.57 \pm 0.57			0.09 \pm 0.18		0.04 \pm 0.08
Back	F	1.11 \pm 0.44	-0.08 \pm 0.03	-0.22 \pm 0.18	-0.12 \pm 0.49	-0.79 \pm 0.18	-0.38 \pm 0.29
	L	0.88 \pm 0.31	-0.25 \pm 0.26	0.05 \pm 0.12	0.02 \pm 0.15	0.17 \pm 0.21	-0.50
	C	0.93 \pm 0.20			0.08 \pm 0.10		-0.11 \pm 0.16
Forearm	F	0.45 \pm 0.15	0.26 \pm 0.40	0.11 \pm 0.03	0.07 \pm 0.23	-0.34 \pm 0.04	-0.12 \pm 0.08
	L	0.58 \pm 0.19	0.15 \pm 0.20	0.03 \pm 0.10	0.15 \pm 0.16	0.05 \pm 0.10	-0.19 \pm 0.16
	C	0.63 \pm 0.23			0.14 \pm 0.11		-0.06 \pm 0.12
Thigh	F	1.20 \pm 0.21	0.06 \pm 0.15	-0.49 \pm 0.25	-0.28 \pm 0.17	-0.31 \pm 0.27	-0.27 \pm 0.40
	L	1.18 \pm 0.13	0.22 \pm 0.29	-0.23 \pm 0.17	-0.16 \pm 0.15	-0.14 \pm 0.26	-0.43 \pm 0.16
	C	0.80 \pm 0.11			-0.18 \pm 0.24		0.08 \pm 0.17

T_{es} : esophageal temperature. Follicular (F) and luteal (L) groups carried out standard exercise test [Pre-training level (Pre), first (T1), second (T2) and third month (T3) of menstrual cycle during training, and first (D1) and second month (D2) of menstrual cycle after training] in each mid-follicular phase and in each mid-luteal phase, respectively. Control (C) group was tested at each mid-follicular phase every 2 or 3 months (C1, C2, and C3) without the training. Lack of SEM in L group at D2 was because sweating did not increase markedly from baseline in 3 women. Values are means \pm SEM.

* Significantly different from Pre, $p < 0.05$.

2003), 女性においても $\dot{V}O_{2max}$ が大きく増加する短期運動トレーニングによって熱放散反応は改善されると示唆される。熱放散反応の体温閾値の低下は, 主に安静時の体温低下に起因すると報告されており (Patterson et al. 2004), 本実験の体温閾値における結果も安静時の体温の低下と関係している

と推察される。この体温は熱産生量と熱放散量のバランスによって決定される(彼末 2002)。運動トレーニングによって基礎代謝量(熱産生量)は増加する(Lennon et al. 1985; Lawson et al. 1987), もしくは, 変化しない(Poehlman et al. 1986)という報告がある。また, 運動トレーニングによって血液量は増加すること(Convertino et al. 1980; Sawka 2000), 発汗や皮膚血管拡張反応の感受性は血液量と正の相関関係を示すことから(Okazaki et al. 2002), 運動トレーニングによる安静時の体温低下は熱放散量の増加によって引き起こされる可能性が考えられる。一方, Armstrong et al. (2005) は, 若年女性に運動トレーニングを性周期の2サイクルの期間実施し, その前後の卵胞早期における安静時 T_{re} および常温環境下中等度運動時の発汗開始閾値が変化しないことを報告している。本実験とArmstrong et al. (2005)の結果の違いを生じさせた原因の一つとして運動トレーニングの内容の相違が考えられる。また, Armstrong et al. (2005)の研究では約2ヶ月の運動トレーニングによって9.4%の $\dot{V}O_2\max$ の増加しかみられず, この増加の程度は運動トレーニングによる熱放散反応の改善に必要なとされる増加レベルより小さい(Pandolf 1979)。したがって, このことも本実験と先行研究の間の差異を生じさせた一因であると考えられる。

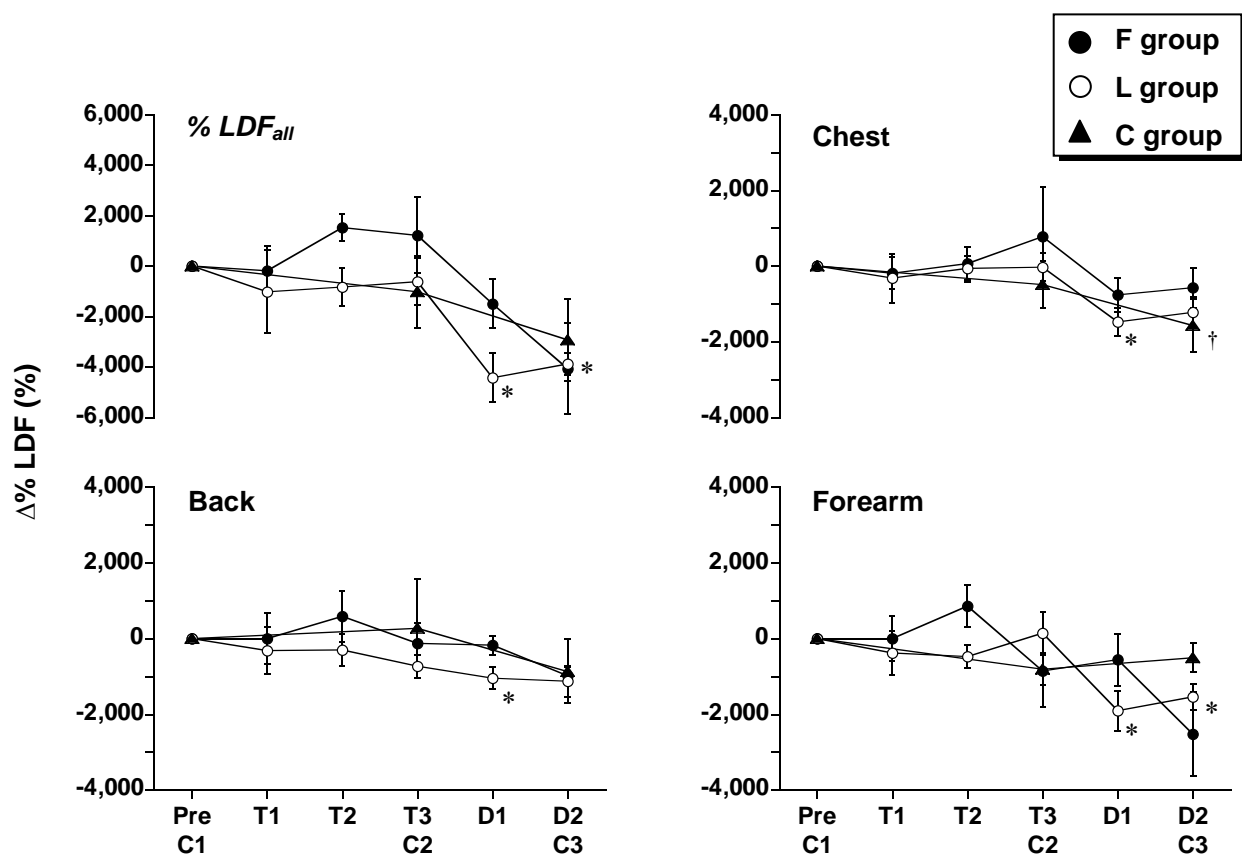


Figure IV-6. Changes in the integrated cutaneous vasodilation (%LDF) on the chest, back, forearm, and total integrated value of each body site (%LDF_{all}) during the standard exercise test (SET; see methods for details). Values are the mean \pm SEM. Abbreviations are shown as the legend for Fig. IV-1.

* $p < 0.05$ versus Pre.

† $p < 0.05$ versus C1.

前述のように、運動トレーニングを行なった2群とも $\dot{V}O_{2max}$ は有意に増加し、それに伴いSETの絶対運動強度も有意に増加した。そのため、本実験で観察された熱放散反応の体温閾値の低下は運動強度の増加に影響された可能性が考えられる。しかし、運動強度の増加は発汗開始閾値には影響を与えず(Taylor et al. 1988; Kondo et al. 1998)、一方、皮膚血管拡張閾値を上昇させる(Taylor et al. 1988; Smolander et al. 1991; Kondo et al. 1998)と報告されている。また、熱放散反応の体温閾値に影響を及ぼすと報告されている T_{sk} もトレーニングに伴う顕著な変化は認められなかった。このことから、本実験の結果に $\dot{V}O_{2max}$ の増加に伴う運動強度の増加や T_{sk} の変化が影響したことは考えにくく、熱放散反応の体温閾値の低下は短期運動トレーニングそれ自体による影響であったことが考えられる。

本実験において熱放散反応の感受性は顕著な変化を示さなかった。男性において短期運動トレーニングによって運動時の発汗反応の感受性は増加する(Nadel et al. 1974; Patterson et al. 2004)、もしくは、変化しない(Okazaki et al. 2002)と見解が一致していない。一方、運動時の皮膚血管拡張反応の感受性は短期のトレーニングで変化しないという一致した見解が得られている(Ho et al. 1997; Thomas et al. 1999; Okazaki et al. 2002)。これらの結果と本実験の結果から、短期トレーニングによる熱放散反応の感受性の変化に関しては男女ともに今後さらに検討する余地が残されるものの、短期運動トレーニングによって発汗開始および皮膚血管拡張閾値は一般に低下することが示唆される。

本実験ではSRで観察されたトレーニングに伴う量的な改善はL群と比較してF群でより顕著にみられた。しかし、本実験の結果は同じ常温環境下での中等度運動時に検討した長期運動トレーニングの

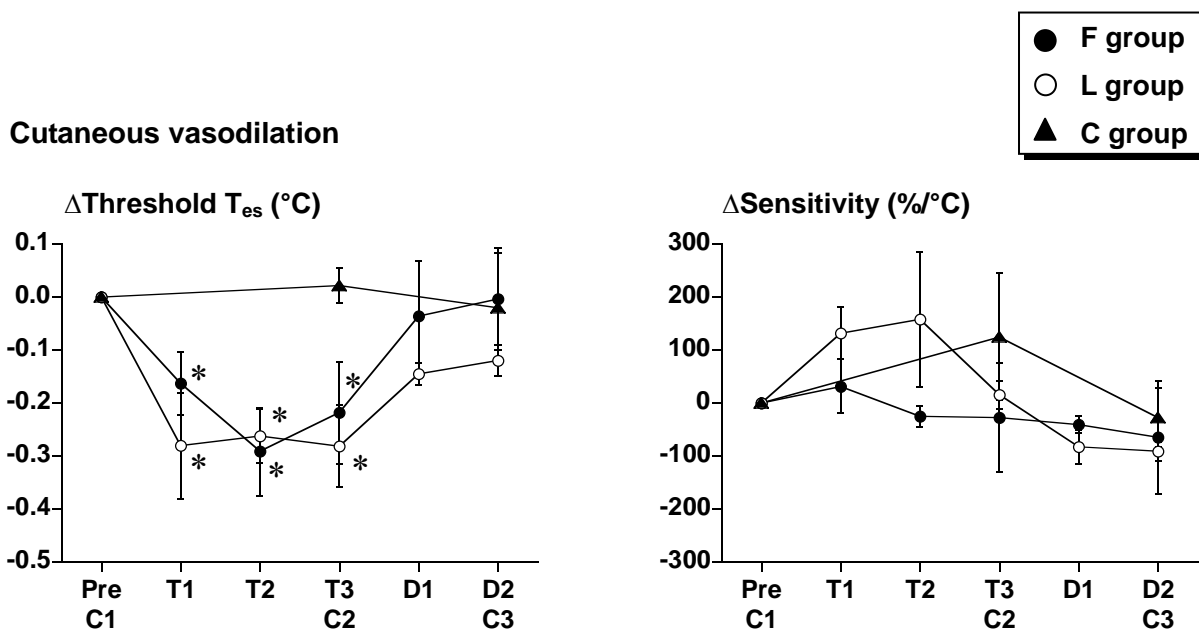


Figure IV-7. Changes in the mean value of threshold T_{es} and sensitivities of cutaneous vasodilation for each body site during the SET. T_{es} : esophageal temperature. Abbreviations and conventions are shown as the legend for Fig. IV-1.

* $p < 0.05$ versus Pre.

Table IV-4. Changes in skin blood flow parameters from Pre or C1.

	Group	Pre (C1)	T1	T2	T3 (C2)	D1	D2 (C3)
Threshold T_{es} ($^{\circ}$C)							
Chest	F	37.25 \pm 0.12	-0.15 \pm 0.08	-0.22 \pm 0.15	-0.17 \pm 0.15	-0.05 \pm 0.11	-0.04 \pm 0.13
	L	37.48 \pm 0.09	-0.34 \pm 0.10 *	-0.29 \pm 0.06 *	-0.27 \pm 0.08 *	0.07 \pm 0.04	-0.18
	C	37.06 \pm 0.16			-0.09 \pm 0.09		-0.22 \pm 0.16
Back	F	37.25 \pm 0.12	-0.15 \pm 0.08	-0.22 \pm 0.14	-0.23 \pm 0.17	-0.05 \pm 0.11	-0.02 \pm 0.12
	L	37.47 \pm 0.09	-0.26 \pm 0.09 *	-0.25 \pm 0.05 *	-0.27 \pm 0.07 *	-0.01 \pm 0.06	-0.11 \pm 0.04
	C	36.97 \pm 0.18			0.02 \pm 0.03		-0.06 \pm 0.11
Forearm	F	37.31 \pm 0.20	-0.21 \pm 0.06 *	-0.38 \pm 0.08 *	-0.27 \pm 0.12	-0.20 \pm 0.00	-0.07 \pm 0.09
	L	37.45 \pm 0.22	-0.29 \pm 0.11	-0.22 \pm 0.06 *	-0.29 \pm 0.06 *	-0.03 \pm 0.05	-0.09 \pm 0.06
	C	36.98 \pm 0.18			-0.06 \pm 0.02		-0.03 \pm 0.09
Sensitivity (%/$^{\circ}$C)							
Chest	F	119 \pm 63	-48 \pm 7	-43 \pm 48	48 \pm 177	-93 \pm 39	431 \pm 33
	L	280 \pm 79	57 \pm 34	186 \pm 89	71 \pm 36		-139
	C	214 \pm 126			31 \pm 86		-77 \pm 94
Back	F	344 \pm 73	59 \pm 62	50 \pm 63	91 \pm 34	104 \pm 37	169 \pm 87
	L	270 \pm 59	237 \pm 47	296 \pm 201	-43 \pm 10	161 \pm 101	-97
	C	278 \pm 100			-211 \pm 275		-77 \pm 129
Forearm	F	458 \pm 133	129 \pm 94	-43 \pm 37	-98 \pm 65	-146 \pm 38	-155 \pm 150
	L	343 \pm 114	138 \pm 82	-6 \pm 63	-90 \pm 23	-145 \pm 28	-181 \pm 15
	C	199 \pm 109			-36 \pm 57		25 \pm 24

T_{es} : esophageal temperature. Follicular (F) and luteal (L) groups carried out a standard exercise test [Pre-training level (Pre), first (T1), second (T2) and third month (T3) of menstrual cycle during training, and first (D1) and second month (D2) of menstrual cycle after training] in each mid-follicular phase and in each mid-luteal phase, respectively. Control (C) group was tested at each mid-follicular phase every 2 or 3 months (C1, C2, and C3) without the training. Lack of data or SEM in L group at D1 and D2 were because cutaneous blood flow did not increase markedly from baseline. Values are means \pm SEM.

* Significantly different from Pre, $p < 0.05$.

影響(実験III-2)とは異なる結果であった。すなわち、実験III-2では長期運動トレーニングによる量的な(経時変化の)改善は卵胞中期と比較して黄体中期により顕著であった。また、実験I-2では女性ホルモンが常温環境下での中等度運動時の熱放散反応を抑制すると報告した。実験III-2の長期間トレーニングを継続した女性の黄体中期における女性ホルモンのレベルは一般女性のそれと比較して有意な低値であったことを考えると、黄体中期では女性ホルモンによる抑制の減弱が熱放散反応の亢進に関与したため、卵胞中期よりも黄体中期にトレーニングの影響は顕著になることが示唆される(実験III-2)。本実験において短期運動トレーニングによる女性ホルモンの分泌抑制は認められなかった。むしろ、L群では統計上有意ではなかったものの増加する傾向がみられた。さらに、 SR_{all} は各

女性ホルモンと負の累乗関係を示した。この結果はトレーニングによるSRの増加の程度は女性ホルモンが一定レベルを超えると減少することを示唆している。したがって、発汗開始閾値はF群およびL群ともトレーニングによって低下するものの、L群では女性ホルモンによる抑制がF群より大きいために、SRの増加の程度はF群よりもL群で小さくなったと考えられる。

本実験では、短期トレーニングによる熱放散反応の改善（特に体温閾値の低下）はトレーニング開始後1ヶ月目（T1）に現れ、脱トレーニングの効果もトレーニング終了後1ヶ月目（D1）に観察された（発汗開始および皮膚血管拡張閾値は、F群およびL群の値を平均するとそれぞれ0.26°Cおよび0.24°C低下した）。男性においては運動トレーニングによる熱放散反応の改善は6日目までに顕著にみられると報告されている（Shvartz et al. 1974；Patterson et al. 2004）。その発汗開始閾値は1週間で0.21°C低下していた（Patterson et al. 2004）。また、そのトレーニングの影響は2週間程度でほぼ消失すると報告されている（Williams et al. 1967）。女性の場合、性周期があるので毎日トレーニング効

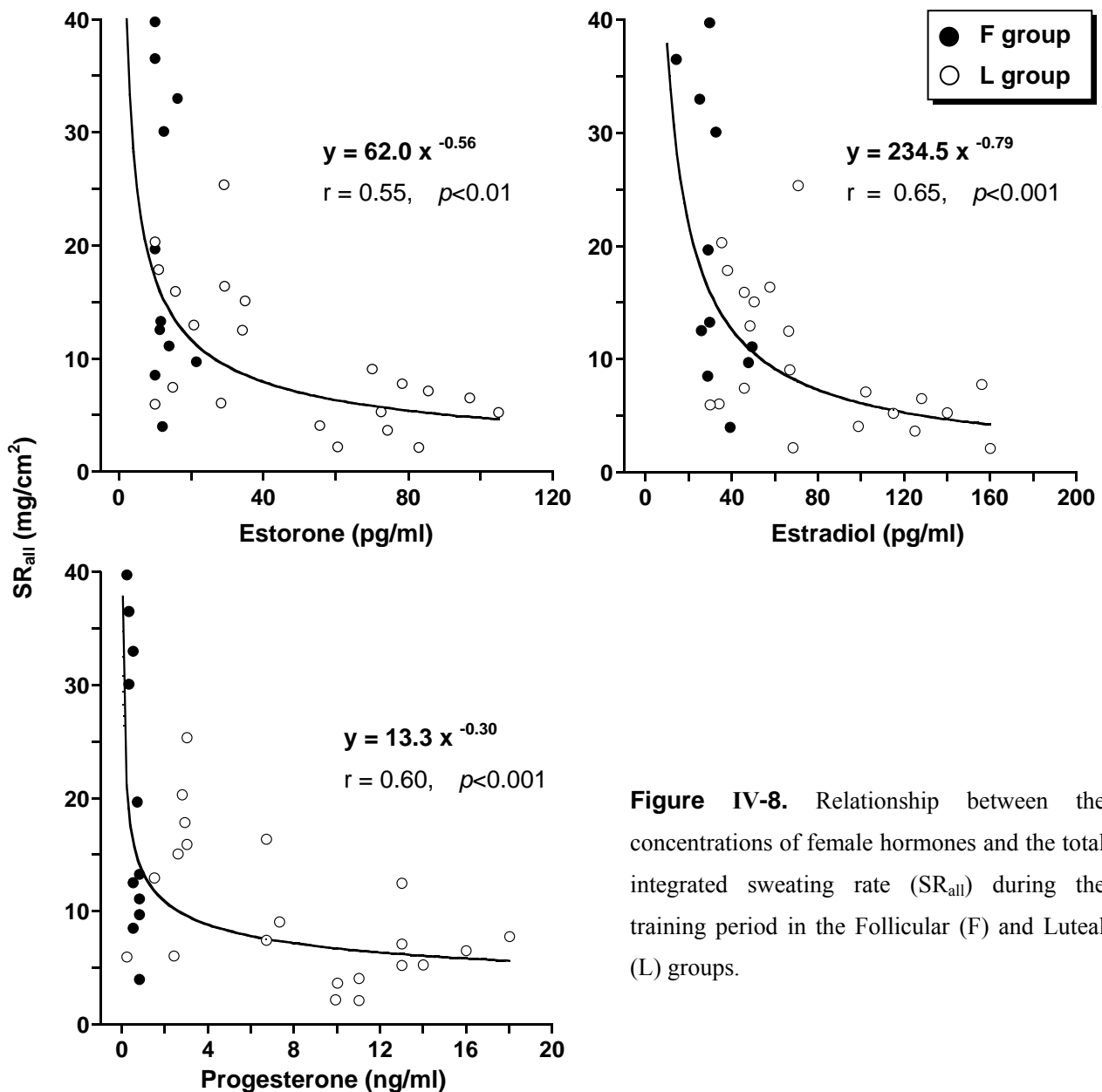


Figure IV-8. Relationship between the concentrations of female hormones and the total integrated sweating rate (SR_{all}) during the training period in the Follicular (F) and Luteal (L) groups.

果を確認することは適当でないかもしれないが、実際には1ヶ月以内でトレーニングおよび脱トレーニングの効果が生じていると考えられる。

これまでに1ヶ月程度の運動トレーニングによるSRの増加は体幹より体積あたりの表面積が大きい四肢部でより顕著にみられると報告されている(Höfler 1968; Shvartz et al. 1979)。これらの研究ではろ紙法を用いて3から4部位のみのSRを測定し、かつ統計処理がなされていないという問題点が指摘されている(Patterson et al. 2004)。本実験ではそのような蒸発性熱放散の効率を高めるSRの再分布は生じず、SRの増加は胸と大腿で顕著であった。この結果は、本実験と同様の測定方法(カプセル換気法)を用いて3週間の運動トレーニングの効果を検討しているPatterson et al. (2004)の結果と一致していた。したがって、Patterson et al. (2004)と本実験の結果から、効率的なSRの再分布は短期トレーニングによって生じないことが示唆される。

本実験において短期運動トレーニングによる皮膚血流量の量的な改善はみられなかった。Roberts et al. (1977)は、10日間の運動トレーニングによって運動時の発汗開始および皮膚血管拡張閾値は低下するものの、熱放散反応の感受性に関しては発汗反応のそれのみが増加すると報告している。この結果から短期トレーニングによる熱放散反応の改善は皮膚血管拡張反応よりも発汗反応で優先して引き起こされる可能性が考えられる。このことに関連して、実験II-1では女性は男性と比較して発汗反応よりも皮膚血管拡張反応に依存して熱を放散することを考え合わせると、男性の反応を基準として劣ると考えられる発汗反応を運動トレーニングにより改善することは合目的反応であると考えられる。

5. 要約

若年女性において熱放散反応の改善に有効な $\dot{V}O_2\max$ 増加レベルを伴った短期運動トレーニングおよび脱トレーニングが常温環境下中等度運動時の熱放散反応に及ぼす影響について検討するために、性周期を考慮して運動習慣のない11名の女性に約3ヶ月間〔3名は卵胞中期から(F群)、8名は黄体中期から(L群)の3性周期サイクル〕の持久性運動トレーニング〔環境温30°C(45%RH)でおよそ60% $\dot{V}O_2\max$ 程度の60分間の自転車運動を週4-5日〕を実施した。トレーニング前(Pre)とトレーニング期間中1性周期ごと(T1, T2およびT3)およびトレーニング終了後の2性周期サイクル(D1およびD2)の計6回、環境温25°C(45%RH)で30分間の50% $\dot{V}O_2\max$ 強度の半仰臥位自転車運動の運動実験(SET)をF群は卵胞中期に、L群は黄体中期にそれぞれ行なった。

トレーニング時の運動負荷には両群間で有意な差はみられず、 $\dot{V}O_2\max$ は両群とも平均して15.7%程度有意に増加した。F群およびL群とも血漿女性ホルモン濃度は運動トレーニングで有意な変化は認められなかった。安静時HR、安静およびSET時の T_{es} はF群およびL群ともT1で有意に低下し、その後、T3までその値を維持した。F群において SR_{all} はT1およびT2でPreから有意に増加したが、L群では有意な変化は認められなかった。一方、%LDF $_{all}$ はF群およびL群とも有意な変化はみられなかった。各熱放散反応の体温閾値は両群ともT1で有意に低下し、その後T3までその値を維持した。各熱放散

反応の感受性は両群ともトレーニングに伴う顕著な変化はみられなかった。これらのトレーニングの影響はD1で消失し、Preレベルに戻った。

以上の結果、女性においてトレーニングを開始した性周期相にかかわらず約3ヶ月の運動トレーニングにより熱放散反応の体温閾値が低下し、熱放散反応は改善されることが示唆された。熱放散反応の量的な改善は発汗反応のみにみられ、この改善は黄体中期からトレーニングを開始したL群より卵胞中期から開始したF群で顕著であることが示された。また、トレーニングの効果（体温閾値の低下）は1ヶ月目までに生じ、トレーニング終了後1ヶ月目までに消失することが示唆された。

第8章 実験 V 熱放散反応に及ぼす運動トレーニングの影響における性差

1. 目的

男性ホルモンは発汗反応を促進すること (Kawahata 1960), 運動トレーニングによって男性ホルモン分泌は増大することが示されているもののその程度は女性と男性で異なること (Zakas et al. 1994) が報告されている。そのため、熱放散反応、特に発汗反応の改善の程度に性差の存在が予想されるが、これまでこの点に関しては明らかではない。第5章および第6章から、性差や長期運動トレーニングの影響は安静時および運動時ともほぼ同様にみられること、また、長期運動トレーニングの影響は温熱ストレスレベルによって異なることが明らかになった。そこで、実験 V の目的は運動による温熱ストレスレベルを段階的に大きくする漸増負荷運動時にみられる長期運動トレーニングの影響の程度に性差が存在するかを検討することとした。

2. 方法

2.1. 被験者

本実験では実験 II-2 の若年成人女性 10 名および若年成人男性 9 名(非運動トレーニング群;U 群, それぞれ女性 U 群および男性 U 群と略す)と大学陸上競技部もしくはそれに相応する持久的な運動クラブに所属する女性運動トレーニング者 10 名および男性トレーニング者 8 名(運動トレーニング群;T 群, 以下女性 T 群および男性 T 群と略す)が被験者として実験に参加した。Table V-1 にその身体特性を示した。その他は実験 I-1 の 2.1. (P.39) と同様であった。

Table V-1. Physical characteristics of each group.

Variables	UF group	TF group	UM group	TM group
Age (yr)	21.0 ± 0.2	20.4 ± 0.3	21.1 ± 0.4	20.3 ± 0.5
Height (cm)	162.0 ± 1.3	160.2 ± 1.8	174.2 ± 1.7	171.2 ± 1.2
Mass (kg)	52.0 ± 2.8	54.2 ± 2.2	64.3 ± 3.4	64.3 ± 2.1
AD (m²)	1.50 ± 0.04	1.52 ± 0.03	1.72 ± 0.05	1.70 ± 0.02
AD/Mass (cm²/kg)	290.4 ± 7.4	280.7 ± 5.8	270.9 ± 6.9	266.4 ± 5.5
MSF (mm)	14.8 ± 1.1	14.2 ± 0.8	9.5 ± 1.7	8.7 ± 1.2
%BF (%)	15.9 ± 2.5	16.8 ± 1.4	13.3 ± 2.3	11.0 ± 1.1
$\dot{V}O_2$max (ml/kg/min)	42.9 ± 1.2	53.8 ± 1.9 *	47.2 ± 1.4	56.6 ± 2.2 *

Values are means ± SEM for 10 untrained (UF) and 10 trained (TF) women, and 9 untrained (UM) and 8 trained (TM) men. AD: body surface area, MSF: mean skinfold thickness, %BF: percentage of body fat, $\dot{V}O_2$ max: maximal oxygen uptake.

* Significantly different between untrained and trained for each sex, $p < 0.05$.

Table V-2. The absolute exercise intensity (W) and absolute exercise intensity per mass (W/kg) of each exercise stage.

		UF group	TF group	UM group	TM group
35%$\dot{V}O_2$max	(W)	45.1 ± 3.1	63.2 ± 3.2 *	58.8 ± 2.6	70.0 ± 0.9 *
	(W/kg)	0.87 ± 0.05	1.17 ± 0.05 *	0.93 ± 0.06	1.10 ± 0.03
50%$\dot{V}O_2$max	(W)	73.4 ± 3.8	98.7 ± 4.2 *	92.8 ± 3.1	114.4 ± 2.5 *
	(W/kg)	1.42 ± 0.05	1.82 ± 0.06 *	1.47 ± 0.07	1.79 ± 0.05 *
65%$\dot{V}O_2$max	(W)	101.6 ± 4.9	132.2 ± 4.8 *	126.2 ± 4.3	154.9 ± 4.2 *
	(W/kg)	1.97 ± 0.06	2.45 ± 0.08 *	1.99 ± 0.08	2.41 ± 0.06 *

Values are means ± SEM for 10 untrained (UF) and 10 trained (TF) women, and 9 untrained (UM) and 8 trained (TM) men.

* Significantly different between untrained and trained for each sex, $p < 0.05$.

2.2. 実験条件および手順

実験条件およびその手順は実験 II-2 の 2.2. (P.81-82) と同様とし、女性被験者に関しては卵胞中期に運動実験を実施した。

2.3. 測定項目

測定項目およびその方法は実験 I-1 の 2.3. (P.40-41) と同様とした。

2.4. データ分析および統計処理

データ分析および統計処理は実験 II-2 の 2.4. (P.82) と同様である。本実験では基本的に、各性における運動トレーニングの影響（女性 U 群 vs. 女性 T 群，男性 U 群 vs. 男性 T 群）を検討し，その運動トレーニングの影響の程度が性別間で異なるかを検討した。

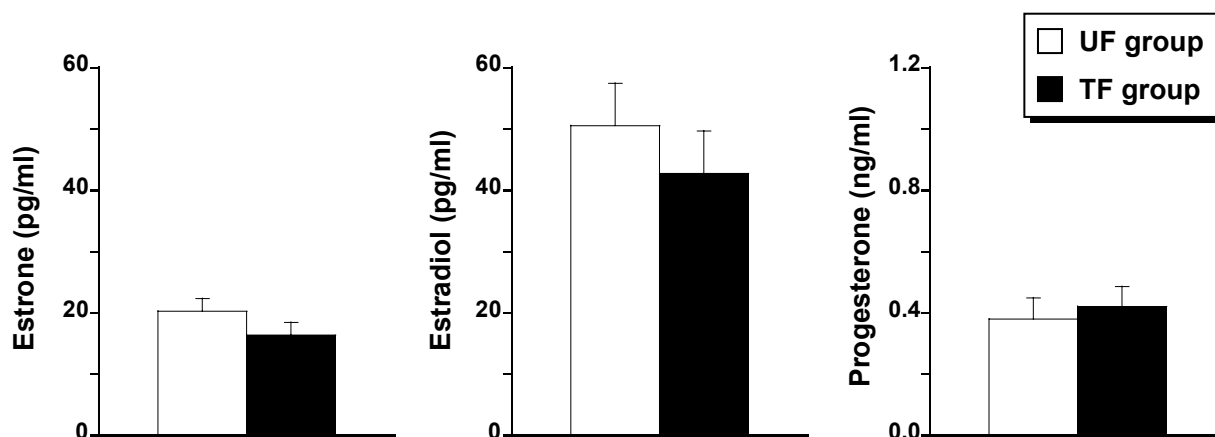


Figure V-1. Plasma levels of estrone, estradiol, and progesterone during mid-follicular phase experiment in untrained (UF) and trained (TF) women. Values are means ± SEM.

3. 結果

本実験において年齢，身長，体重，体表面積および体表面積/体重比，平均皮下脂肪厚および体脂肪率には，いずれの性においても長期運動トレーニングの影響は認められなかったが，最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) は女性T群および男性T群がそれぞれ女性U群および男性U群よりも有意に高い値を示した (Table V-1). 各トレーニングレベルにおいて $\dot{V}O_{2max}$ に有意な性差がみられなかったことから，

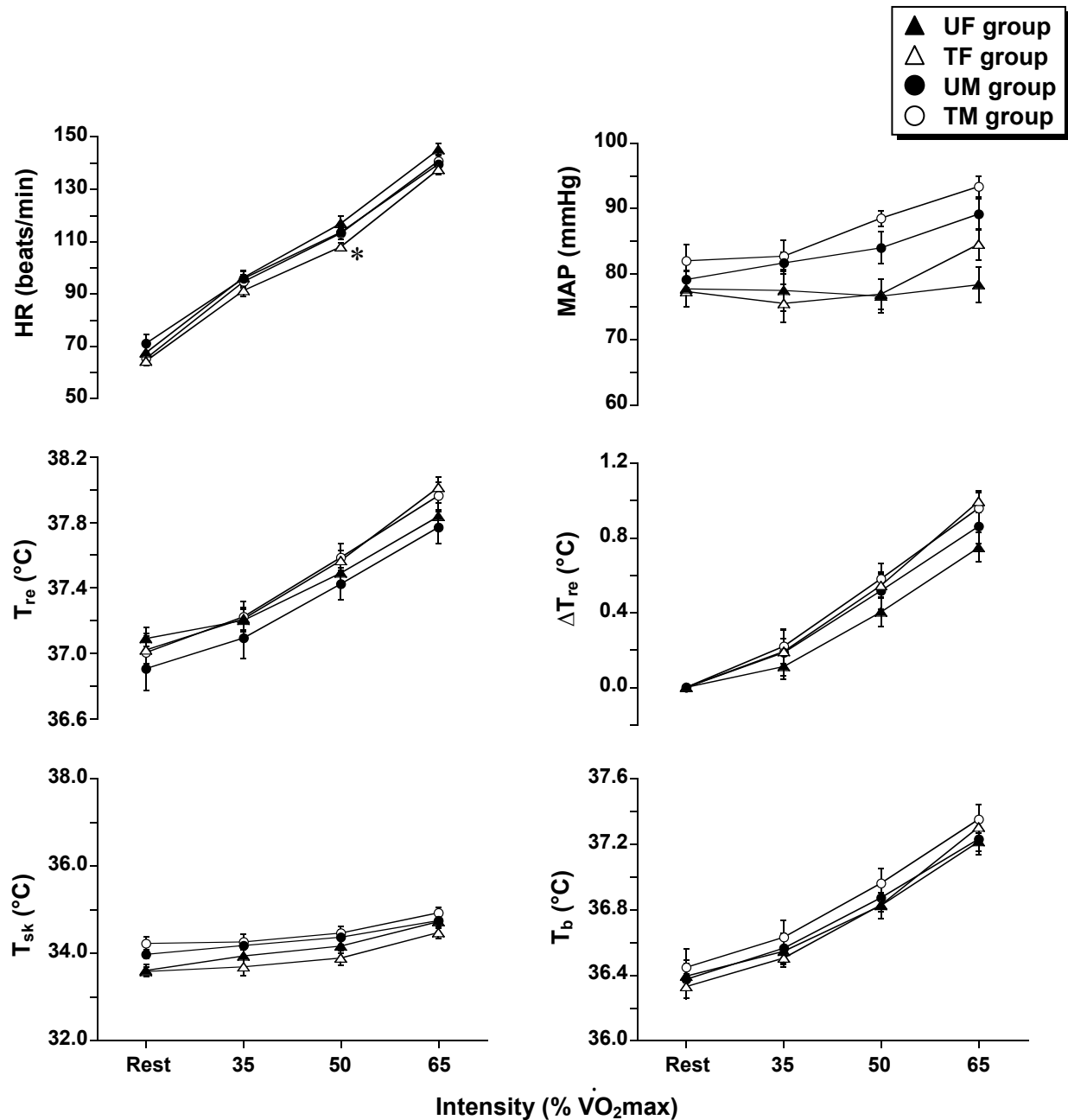


Figure V-2. Changes in heart rate (HR), mean arterial blood pressure (MAP), rectal temperature (T_{re}), change in rectal temperature (ΔT_{re}), mean skin temperature (T_{sk}), and mean body temperature (T_b) at rest and each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_{2max}$) in untrained (UF) and trained (TF) women, and untrained (UM) and trained (TM) men. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between UF and TF groups, $p < 0.05$.

各性での $\dot{V}O_2\text{max}$ の群差（トレーニングの影響）は同等であった。35%、50%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時の絶対運動強度（Watts）はいずれ運動強度においてもそれぞれT群がU群より有意に高く、また、体重1kgあたりの運動強度（Watts/kg）では男性の35% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時を除き、いずれの運動強度においてもT群がU群より有意に高かった（Table V-2）。実験当日における女性T群および女性U群の安静時血漿女性ホルモン（エストロン、エストラジオールおよびプロゲステロン）濃度には有意な群間差はみられなかった（Fig. V-1）。

50% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時の心拍数（HR）において女性T群が女性U群より有意に低かったことを除き、安静時およびいずれの運動強度時におけるHR、平均血圧（MAP）、直腸温（ T_{re} ）、安静時からの T_{re} の上昇度（ ΔT_{re} ）、平均皮膚温（ T_{sk} ）および平均体温（ T_b ）には各性の中で運動トレーニングの影響はみられなかった（Fig. V-2）。また、熱放散反応を測定した部位の局所皮膚温（ T_{sl} ）にも各性の中で有意な

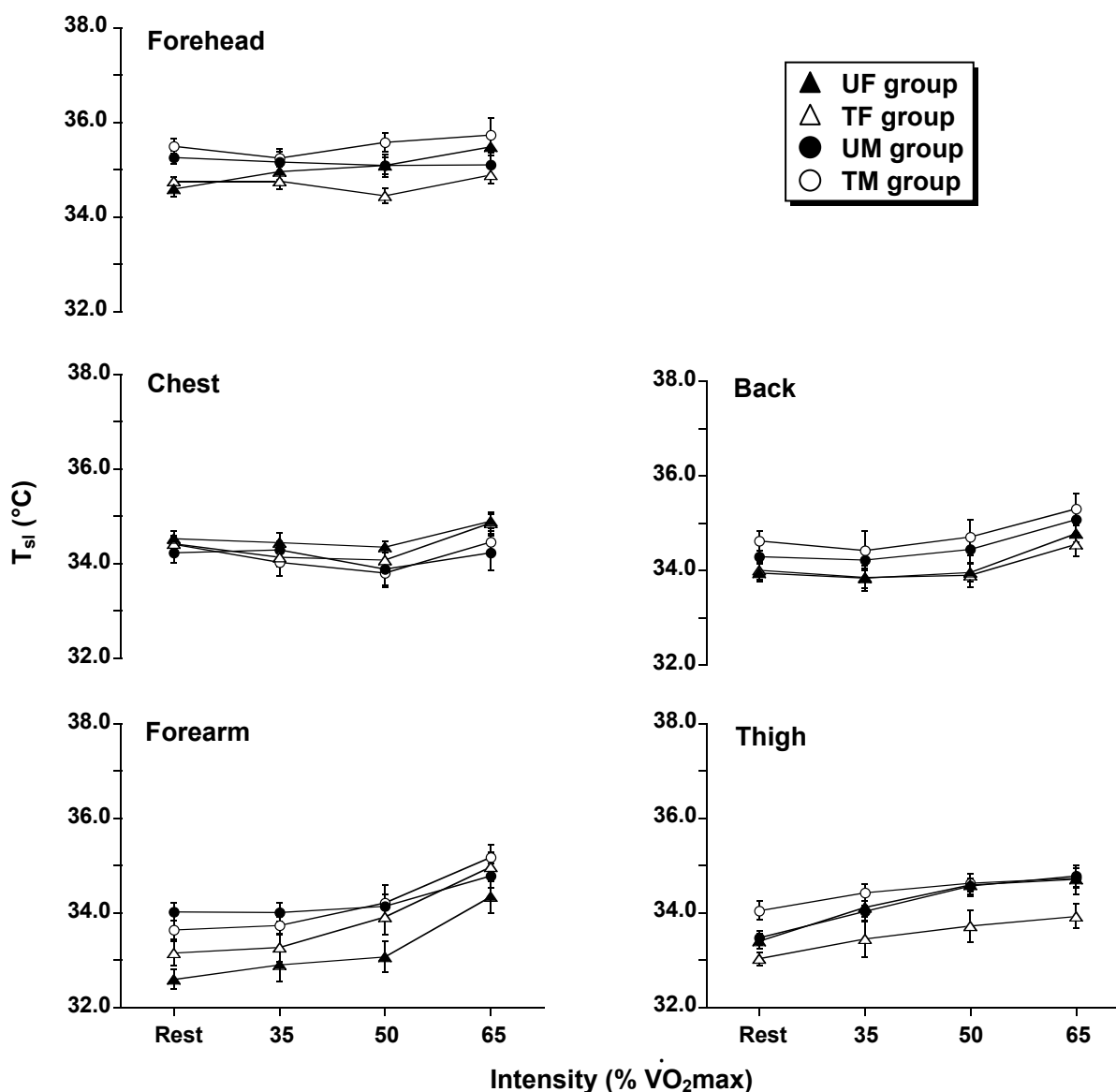


Figure V-3. Changes in local skin temperature (T_{sl}) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh at rest and each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in untrained (UF) and trained (TF) women, and untrained (UM) and trained (TM) men. Values are means \pm SEM.

群間差は認められなかった (Fig. V-3).

平均発汗量 (SR) は各群ともその程度は異なるものの運動強度の増加に伴い有意に増加した . 女性では全ての運動強度において女性T群が女性U群より有意に高い値を示した . 男性では 50%および

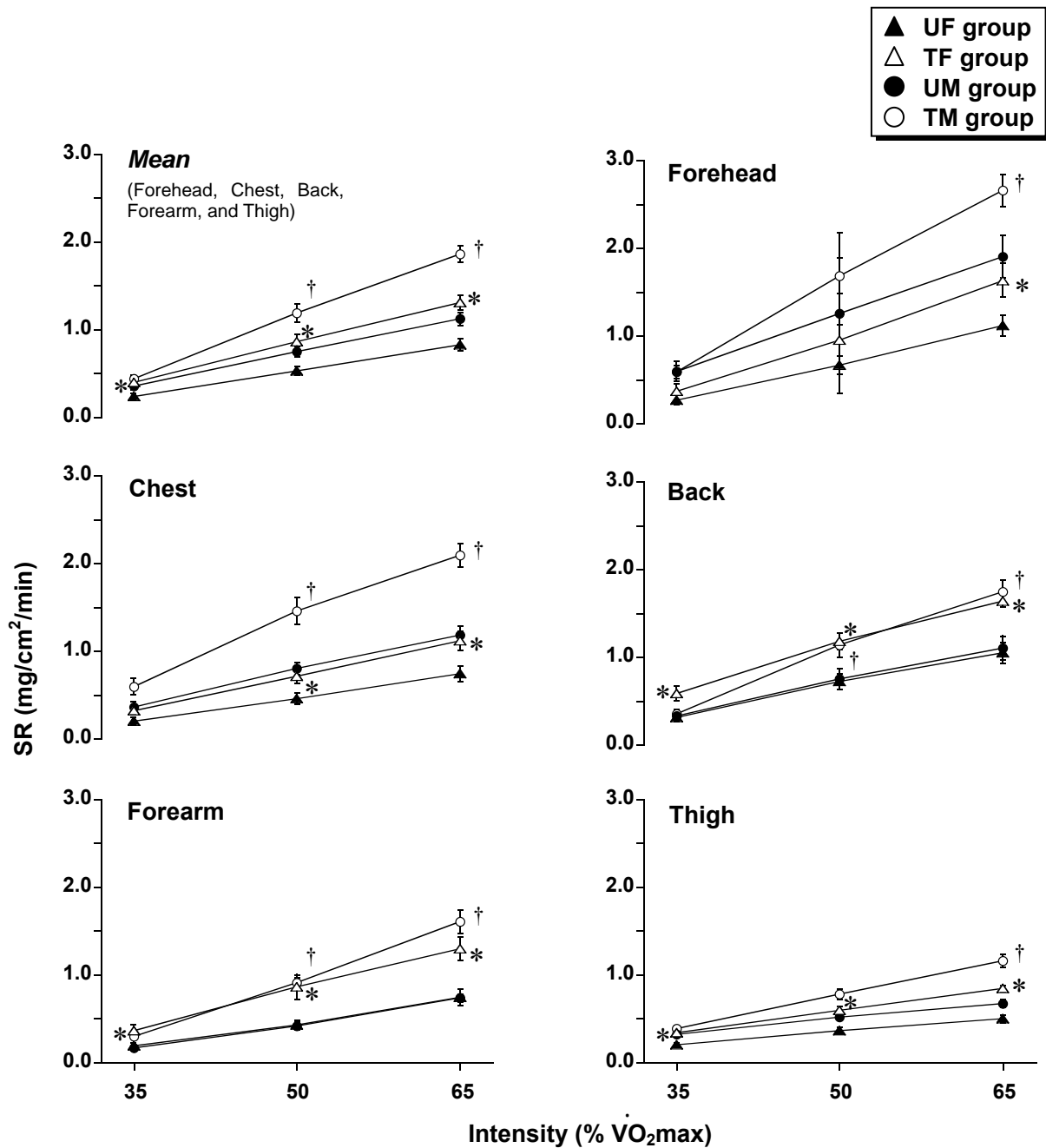


Figure V-4. Changes in sweating rate (SR) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in untrained (UF) and trained (TF) women, and untrained (UM) and trained (TM) men. The SR increased significantly with the increase in exercise intensity regardless of body site and group. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between UF and TF groups, $p < 0.05$.

† Significantly different between UM and TM groups, $p < 0.05$.

Table V-3. The slopes for relationships between relative exercise intensity and sweating rate at each body site.

	UF group	TF group	UM group	TM group
Slope ((mg/cm²/min)/W)				
Forehead	0.028 ± 0.003	0.042 ± 0.004	0.044 ± 0.005	0.080 ± 0.005 * [†]
Chest	0.018 ± 0.002	0.027 ± 0.003	0.028 ± 0.004	0.046 ± 0.002 * [†]
Back	0.024 ± 0.004	0.035 ± 0.002	0.026 ± 0.004	0.048 ± 0.002 *
Forearm	0.018 ± 0.002	0.031 ± 0.003	0.019 ± 0.002	0.120 ± 0.065
Thigh	0.010 ± 0.001	0.017 ± 0.001	0.024 ± 0.013	0.019 ± 0.002
Mean (Forehead, Chest, Back, Forearm, and Thigh)	0.020 ± 0.002	0.030 ± 0.002 *	0.026 ± 0.003	0.047 ± 0.003 * [†]

Values are means ± SEM for 10 untrained (UF) and 10 trained (TF) women and 9 untrained (UM) and 8 trained (TM) men.

* Significantly different between untrained and trained for each sex, $p < 0.05$.

[†] Significantly different between TF and TM groups, $p < 0.05$.

65% $\dot{V}O_2$ max時において男性T群が男性U群より有意に高かった (Fig. V-4). 運動強度と平均SRの対応関係における回帰直線の勾配は男性T群が他の3群よりも、また、女性T群が女性U群よりも有意に大きな値を示した (Table V-3). 各部位においても運動強度の増加に伴いSRは有意に増加し、平均でみられた各性での運動トレーニングの影響は女性において背、前腕および大腿で、男性において胸、背および前腕で同様に観察された。また、女性においては前額の65% $\dot{V}O_2$ max時に、胸の50%および65% $\dot{V}O_2$ max時にT群がU群より有意に高い値を示した。さらに、男性においては前額および大腿においても65% $\dot{V}O_2$ max時にT群がU群より有意に大きいSRを示した。SRの対応関係における回帰直線の勾配は前額、胸および背で男性T群が男性U群より有意に大きかったのに対して、女性では有意なトレーニングの影響はみられなかった。

平均活動汗腺数 (ASG) は女性T群、男性T群および男性U群で35%から50% $\dot{V}O_2$ maxにかけて有意に増加したものの、50%から65% $\dot{V}O_2$ maxにかけては有意な増加はみられなかった。一方、女性U群は35%から65% $\dot{V}O_2$ maxにかけて運動強度の増加に伴い有意に増加し続けた。しかし、いずれの運動強度時においても各性で有意な運動トレーニングの影響はみられなかった。各部位においても平均と同様の変化パターンが観察され、各運動強度において運動トレーニングの影響はみられなかった (Fig. V-5).

平均単一汗腺あたりの汗出力 (SGO) は各群ともその程度は異なるものの平均SRと同様に運動強度の増加に伴い有意に増加し、35% $\dot{V}O_2$ max時には各性において運動トレーニングの影響はみられなかったが、50%および65% $\dot{V}O_2$ max時において女性T群および男性T群がそれぞれ女性U群および男性U群よりも有意に高い値を示した。また、この運動トレーニングに伴う平均SGOの群差の程度は高強度になるほど顕著であった。さらに、50%および65% $\dot{V}O_2$ max時において女性T群の平均SGOは男性T群のそれよりも有意に低かったことから、運動トレーニングの影響は女性より男性においてより顕著にみられた。女性U群において前腕のSGOが35%から50% $\dot{V}O_2$ maxにかけて有意な増加がみられなか

った以外は，各部位のSGOは群および部位にかかわらず強度の増加に伴い有意に増加した．女性においては前腕で 50%および 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時に，背および大腿で 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時にT群がU群より有意な高値を示した．男性においてはほぼ全部位で平均SGOと同様の運動トレーニングの影響が観察された (Fig. V-6)．総体重減少量 (TWL) は性別にかかわらずT群がU群より有意に高かった (T群およびU群それぞれ女性： 437 ± 27 および 268 ± 31 g/m²/h，男性： 501 ± 39 および 348 ± 27 g/m²/h)．

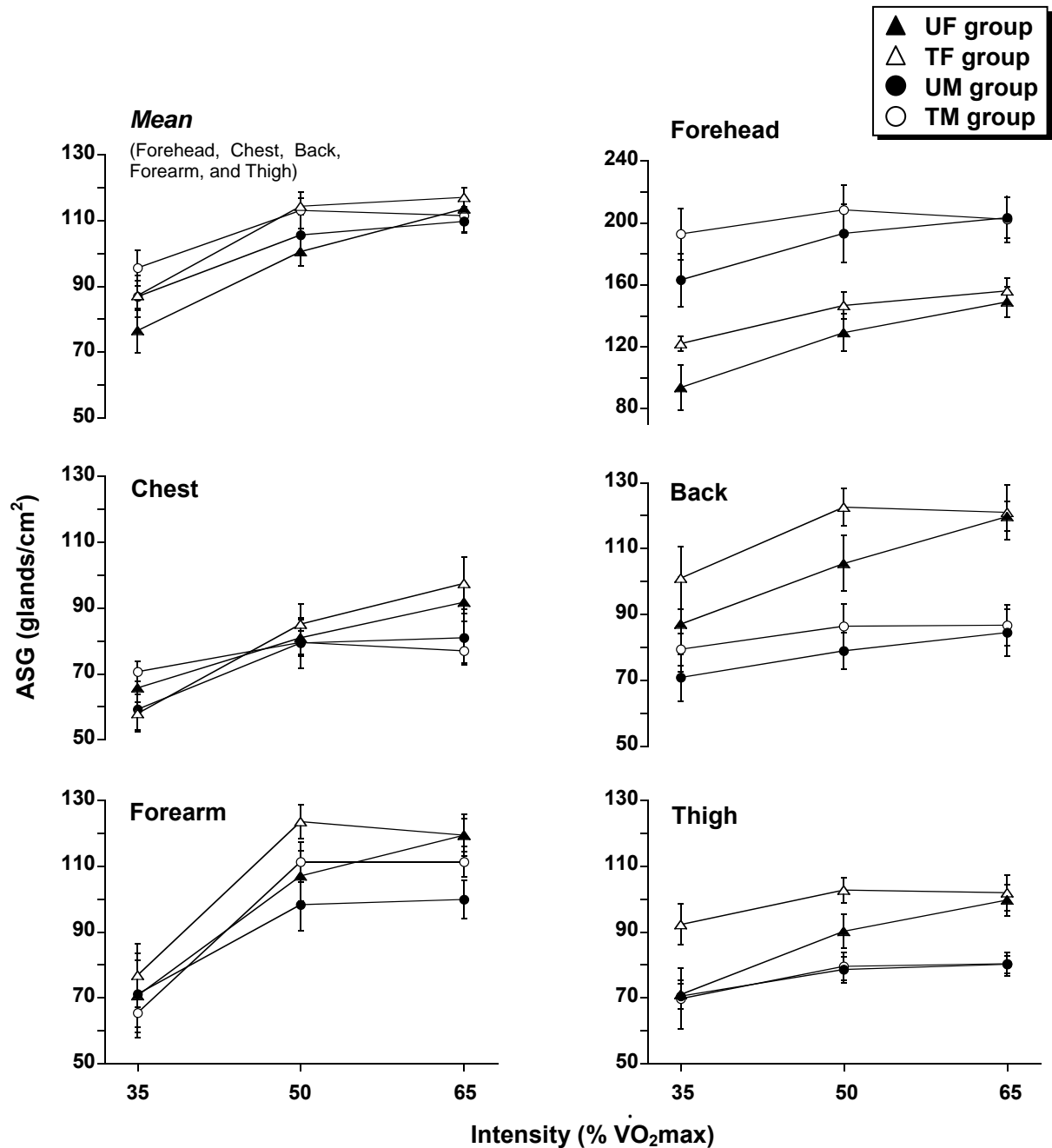


Figure V-5. Changes in active sweat glands (ASG) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\text{max}$) in untrained (UF) and trained (TF) women, and untrained (UM) and trained (TM) men. Although the ASG increased significantly with the increase in exercise intensity in UF group, it did not increase significantly from 50% to 65% $\dot{V}O_2\text{max}$ in other groups. Values are means \pm SEM.

皮膚血流量(%LDF)はいずれの部位においても男性T群で50%から65% $\dot{V}O_2\max$ にかけて有意な増加がみられなかった以外は,他の3群では運動強度の増加に伴い有意な増加を示した.前額および胸では各性とも運動トレーニングの影響はみられなかったが,前腕では35% $\dot{V}O_2\max$ 時に女性T群が女性U群より有意に高く,また,65% $\dot{V}O_2\max$ 時に男性T群が男性U群より有意に低かった(Fig. V-7).

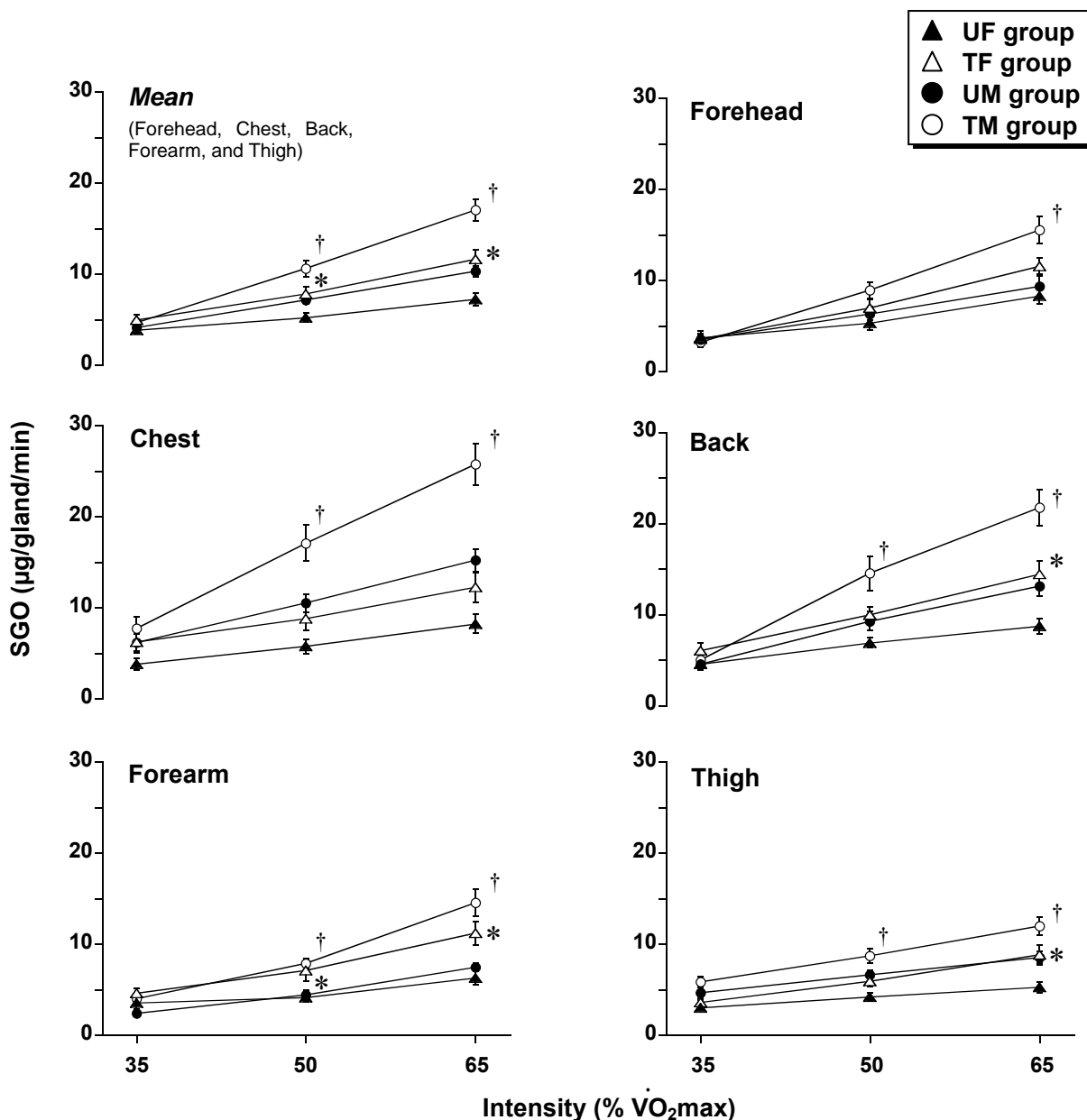


Figure V-6. Changes in sweat gland output (SGO) on the forehead, chest, back, forearm, and thigh, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_2\max$) in untrained (UF) and trained (TF) women, and untrained (UM) and trained (TM) men. The SGO increased significantly with the increase in exercise intensity regardless of body site and group. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between UF and TF groups, $p < 0.05$.

† Significantly different between UM and TM groups, $p < 0.05$.

4. 考察

実験 V では、各性において運動トレーニングは常温環境下での漸増負荷運動時の SR は増加するものの、女性における増加の程度は男性のそれと比較して小さく、その改善の程度に性差の存在が示唆された。また、その性差は運動強度の増大とともに顕著になることが示唆された。さらに、女性において運動トレーニングは運動強度の増大に伴う SR 増加の仕方に影響を与えることが示された。一方、各性の %LDF に顕著な運動トレーニングの影響はみられなかった。

本実験では、T群およびU群の $\dot{V}O_{2max}$ にそれぞれ性差がないように考慮し、各性におけるT群およびU群のその差はほぼ同等になるように配慮した。そのため、本実験でみられた長期運動トレーニングの影響の男女差は長期運動トレーニングの影響の性差を主に反映していると考えられる。

Buono and Sjöholm (1988) は、男女の運動トレーニング者と非運動トレーニング者を対象に発汗刺激剤を用いて発汗反応の相違を検討している。その結果、運動トレーニングに伴うSRの増加は男女とも観察されるものの、その増加の程度には性差がないこと、また、そのSRは $\dot{V}O_{2max}$ に比例して増大することを報告している。本実験でも女性ではすべての運動強度時において、男性では 50%および 65% $\dot{V}O_{2max}$ 時においていずれもT群がU群より有意に高い平均SRを示したことから、性別にかかわらず運動トレーニングがSRを増加させるという先行研究の結果を支持する。しかし、女性T群お

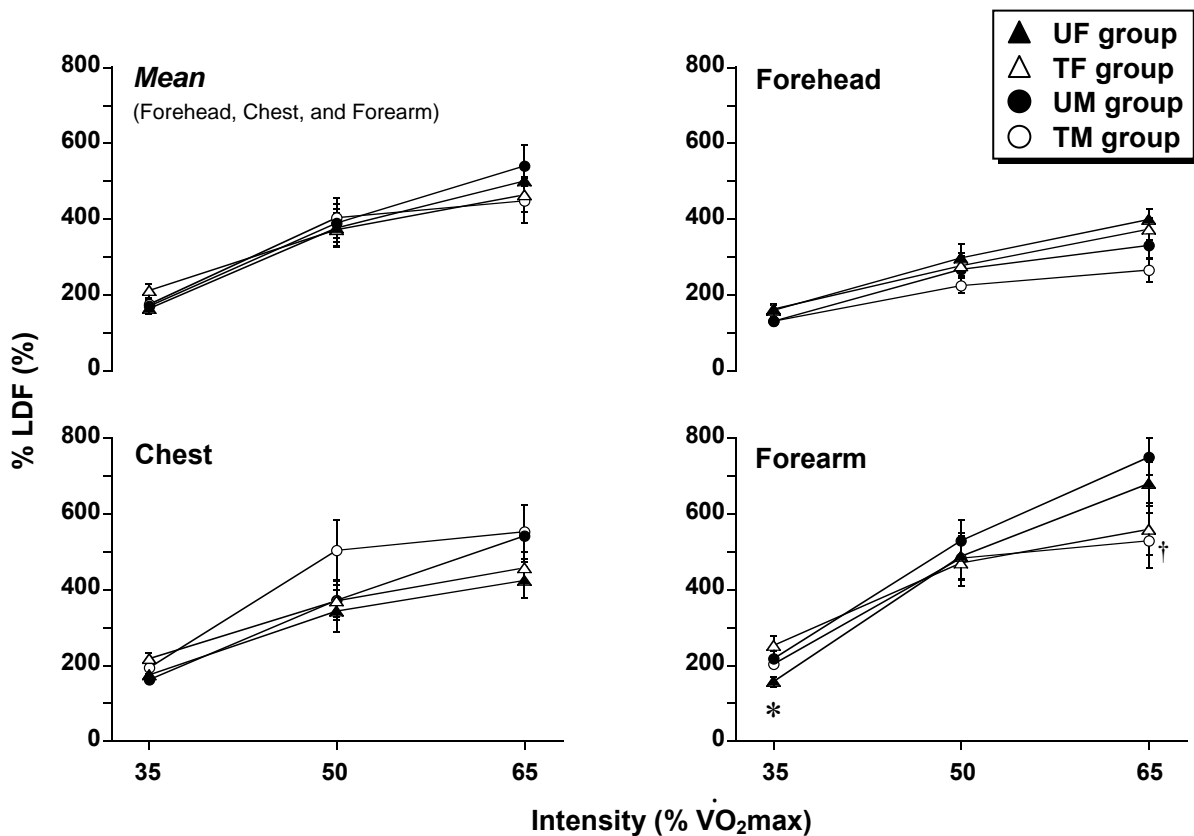


Figure V-7. Changes in skin blood flow (%LDF) on the forehead, chest and forearm, and the mean value of each body site at each exercise intensity (35%, 50%, and 65% $\dot{V}O_{2max}$) in untrained (UF) and trained (TF) women, and untrained (UM) and trained (TM) men. Values are means \pm SEM.

* Significantly different between UF and TF groups, $p < 0.05$.

† Significantly different between UM and TM groups, $p < 0.05$.

よび男性T群の $\dot{V}O_2\text{max}$ に有意な差がないにもかかわらず(すなわち,女性T群は男性T群よりも競技レベルが高い),50%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時でいずれも男性T群が女性T群より有意に高いSRを示した.一方で,女性U群と男性U群のSRでは65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時に男性U群が女性U群より高い傾向がみられたただけであった.また,運動強度と平均SRの対応関係における回帰直線の勾配は男性T群が女性T群よりも有意に大きな値を示したことから,平均SRに及ぼす運動トレーニングの影響は女性よりも男性で大きく,かつ,高強度になるほどそれが顕著であると考えられる. Buono and Sjöholm (1988)の研究でみられたSRが本実験の50% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時以下のSRに相当したことから,本実験の結果とBuono and Sjöholm (1988)の研究結果の相違は,発汗の程度の相違もしくは実験条件(運動vs.薬剤刺激)の相違が影響したものと推察される.

性別にかかわらず65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時において平均SRに観察された運動トレーニングの影響は,平均ASGではなく平均SGOの相違を反映していた. Sato and Sato (1983)は,皮膚から分離した摘出汗腺を用いた実験において,SGOの低い者ほど汗腺のサイズが小さく,また,コリン感受性も低いことを報告している.この結果から,運動トレーニングに伴うSRの増加の程度が女性よりも男性で顕著であったことは,運動トレーニングに伴う汗腺サイズもしくはコリン感受性の変化に性差が存在することを示唆すると考えられる. Kawahata (1960)は性ホルモンの連続的投与実験から,男性ホルモンは発汗の亢進に,女性ホルモンは発汗の抑制に作用することを報告している.また, Araki et al. (1979)は,思春期前の子どもから成人までの運動時の発汗反応を比較検討し,1)総発汗量は思春期を境に増加すること,2)思春期前児童には性差が観察されないこと,3)思春期前児童には運動トレーニングに伴うSRの増加が若年成人ほど期待できないことを報告している.さらに,1)の結果は思春期を境とした男性ホルモンの著しい増大に,2)の結果は思春期前では男性ホルモン濃度に性差がないことに,3)の結果は思春期前児童では運動トレーニングに伴う男性ホルモンの増加がみられないことに,それぞれ起因すると推察している(Araki et al. 1979).3)については3か月間の運動トレーニングが男性ホルモン(テストステロン)濃度に及ぼす影響を10歳から16歳の男子を対象に検討した結果から部分的に裏づけられる(Zakas et al. 1994).また,女性においては男性にみられるような思春期を境とした男性ホルモンの急激な分泌増加はみられないことから,思春期後においては男性より男性ホルモン濃度が顕著に低く,さらに,運動トレーニングによる男性ホルモンの増加も女性では男性より顕著に少ないことが報告されている(Zakas et al. 1994).現在のところ,男性ホルモンが汗腺機能に及ぼす影響,すなわち,男性ホルモンが汗腺肥大を引き起こすのか否か,また,コリン感受性を高めるのか否か,についての直接的な証拠は見当たらないものの,これらの先行研究(Kawahata 1960; Araki et al. 1979; Zakas et al. 1994; Wells 1999)と本実験の結果から,運動トレーニングによりSGOの増加が男性で顕著であったのは,運動トレーニングによる男性ホルモン分泌促進に性差が存在し,それがトレーニングに伴う汗腺肥大もしくはコリン感受性亢進の程度に反映したものと推察される.

運動強度の増大に伴うSRの増大はASGとSGOの増減で調節されている(Inoue 1996; Kondo et al. 1998, 2001).男性を対象とした実験において35%から50% $\dot{V}O_2\text{max}$ へ強度が増加するときはASGと

SGOの増加に、50%から65% $\dot{V}O_2\text{max}$ へ増加するときはSGOのみの増加に起因してSRは増加することが報告されている (Kondo et al. 1998)。本実験において平均SR、ASGおよびSGOでみると、35%から50% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時への平均SRの増加はいずれの群でも平均ASGと平均SGOの増加で、50%から65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時への平均SR増加は女性U群が平均ASGと平均SGOの増加で、その他の3群(男女T群および男性U群)が平均SGOのみの増加で調節されていた。この男女T群および男性U群における平均SRの調節特性は前述のKondo et al. (1998)の結果と一致する。本実験の結果から、男女T群および男性U群では50% $\dot{V}O_2\text{max}$ の時点で平均ASGのピーク値に達するのに対して、女性U群ではピーク値が出現する相対運動強度は他の3群よりも高いことが推察される。汗腺機能の優れた運動トレーニング者のASGのピーク値は非運動トレーニング者より早期に出現することが報告されている (Araki et al. 1978)。この結果から、非運動トレーニング者において汗腺機能は女性(女性U群)が男性(男性U群)より劣っていると考えられる。しかし、女性の劣った汗腺機能は運動トレーニングによって男性と同様の汗腺機能に改善されることが本実験の結果から示唆される。

上述のように発汗反応は運動トレーニングによって改善されることが示唆されるものの、%LDFにはいずれの性においてもSRに観察されたような顕著な運動トレーニングの影響はみられなかった。このことから運動トレーニングによる熱放散反応の改善は皮膚血管拡張反応よりも発汗反応で顕著にみられると示唆される。この見解は第6章の女性における長期運動トレーニングの影響の結果とも一致し、このような傾向は女性だけではなく男性においても同様にみられると推察される。

5. 要約

本実験では長期運動トレーニングが常温環境下漸増負荷運動時の熱放散反応に及ぼす影響において性差が存在するのかを検討した。運動習慣のない若年成人女性10名および若年成人男性9名(非運動トレーニング群; U群, それぞれ女性U群および男性U群と略す)と持久的なトレーニングを6年以上継続している女性運動トレーニング者10名および男性トレーニング者8名(運動トレーニング群; T群, 以下女性T群および男性T群と略す)に対して環境温30°C(45%RH)下において35%、50%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ の半仰臥位自転車運動を各20分、計60分間負荷した。女性被験者は性周期の卵胞中期に実験を実施した。

女性の平均SRは全ての運動強度において女性T群が女性U群より有意に高い値を示した。男性のそれは50%および65% $\dot{V}O_2\text{max}$ 時において男性T群が男性U群より有意に高かった。運動強度と平均SRの対応関係における回帰直線の勾配は男性T群が他の3群よりも、また、女性T群が女性U群よりも有意に大きい値を示した。また、皮膚血管拡張反応にはいずれの性においても運動トレーニングによる顕著な改善は観察されなかった。

以上の結果から、運動トレーニングによって性別にかかわらず発汗反応は改善されるものの、女性における改善の程度は男性のそれと比較して小さく、その改善の程度に性差の存在が示唆された。また、その性差は運動強度の増大とともに顕著になることが示唆された。

第9章 総括

ヒトは暑熱暴露や運動による体温上昇に対して発汗や皮膚血管拡張などの熱放散反応により熱放散量を増加させ、体温をある一定の範囲内に保つ機構を持つ。これらの熱放散反応は体温などの温熱性要因が主に関与する安静温熱負荷時（以下、安静時とする）とそれに加えて温度以外の要因（非温熱性要因）が大きく関与する運動時では異なることが明らかにされている。これらの要因は男性と女性では共通として熱放散反応に影響するが、女性の場合には思春期を境に女性ホルモンの分泌変動に起因した性周期が出現し、これが心拍数や血圧、血漿量など多くの生理的機能の周期的な変化を引き起こす。上記の熱放散反応はこれらの生理的機能に大きく関係することから、女性の熱放散反応は男性と比較してより複雑となると考えられる。また、性周期を含む女性の生理的機能は運動トレーニングの影響を受け、その熱放散反応はさらに複雑さを増すと予想される。しかし、これらの女性の熱放散反応特性に関する研究は男性ほど進んでおらず、不明な点が多く残されている。

そこで、本研究では安静時および運動時における女性の熱放散反応特性およびそれに対する運動トレーニングの影響を明らかにするために、

- 1) 性周期および性差は安静時および運動時の熱放散反応にどのように影響するか。
- 2) 運動トレーニングは上記の反応にどのように影響するか。

の観点から検討することを目的とした。

本研究から得られた主な所見は以下の通りであった。

1. 得られた主な所見

1) 熱放散反応に及ぼす性周期の影響（第4章）

1. 安静時および常温環境下中等度運動時において発汗開始および皮膚血管拡張閾値は卵胞中期と比較して黄体中期に上昇する。
2. 安静時において発汗反応の感受性は性周期の影響を受けないが、背における皮膚血管拡張反応の感受性は卵胞中期より黄体中期に大きくなり、性周期の影響に身体部位差が存在する。
3. 常温環境下中等度運動時において測定した全ての身体部位における熱放散反応の感受性は卵胞中期と比較して黄体中期に低下する。

2) 熱放散反応に及ぼす性差の影響（第5章）

1. 安静時および運動時とも女性の発汗反応は男性のそれと比較して劣り、また、女性の熱放散反応は性周期相にかかわらず男性と比較して発汗反応よりも皮膚血管拡張反応に依存する特性を示す。
2. 安静時の黄体中期では女性の熱放散反応の体温閾値は男性のそれよりも高いものの、卵胞中期ではそれらに性差はみられないことから、熱放散反応の性差は卵胞中期よりも黄体中期でより顕著になる。また、女性の前額、胸および前腕における発汗反応の感受性は性周期相にかかわ

らず男性のそれよりも小さい。

3. 常温環境下漸増負荷運動時にみられた前額と胸での発汗反応の性差（女性の発汗反応が男性のそれよりも劣る）は温熱ストレス（運動強度）の増加に伴い大きくなる可能性がある。また、運動強度の増大に伴う発汗量の調節特性、すなわち、活動汗腺数と単一汗腺あたり汗出力の増加のパターンに性差が存在し、活動汗腺数のピーク値に達する相対運動強度は女性が男性よりも高い。

3) 熱放散反応に及ぼす運動トレーニングの影響（第 6-8 章）

1. 安静温熱負荷および常温環境下中等度運動時において長期（6年以上）および短期（約3ヶ月）の運動トレーニングは性周期相にかかわらず主に熱放散反応の体温閾値を低下させることで若年女性の熱放散反応を改善する。常温環境下中等度運動時では長期運動トレーニングによって測定したほぼ全ての身体部位の熱放散反応の感受性が増加する。
2. 上記の長期運動トレーニングの効果は卵胞中期よりも黄体中期で顕著あり、さらに、その効果はいずれの運動トレーニング期間においても血管拡張反応と比較して発汗反応でより顕著にみられる。
3. 長期運動トレーニングが熱放散反応に及ぼす影響は短期運動トレーニングのそれよりも大きい。このことは長期運動トレーニングにより女性ホルモン分泌が抑制され、それによって女性ホルモンによる熱放散反応の抑制は減弱し、熱放散反応のさらなる亢進を生じると推察される。
4. 常温環境下漸増負荷運動時において発汗反応にみられる運動トレーニングの影響は温熱ストレス（運動強度）の増加に伴い大きくなる。
5. 女性における運動トレーニングによる熱放散反応の改善の程度は男性のそれよりも小さい。また、運動トレーニングによって運動強度の増大に伴う女性の発汗量の調節特性（活動汗腺数と単一汗腺あたり汗出力の増加のパターン）は変化し、活動汗腺数のピーク値に達する相対運動強度は男性のそれと同等になる。

2. 結論

1) 熱放散反応に及ぼす性周期および性差の影響

本研究の結果および先行研究から、安静時や常温環境下中等度運動および漸増負荷運動時における女性の熱放散反応システムをまとめると Fig. 7 のようになる。

二重点線内が一般的な女性ホルモンの分泌周期（性周期）を持つ女性の熱放散反応システムである。熱放散反応に影響を与える経路として、女性ホルモン（プロゲステロンおよびエストロゲン）が体温調節中枢に直接作用する経路（ ）、女性ホルモン（プロゲステロン）の上昇が血漿量の減少を引き起こし、それが心肺圧受容器反射を介して体温調節中枢に作用する経路（ ）、女性ホルモン（エストロゲン）が末梢機構に直接作用し、NO に対する皮膚血管の感受性を亢進させる経路（ ）、およ

び、女性ホルモンが汗腺の活動性に影響を与える経路()が考えられる。

安静時および常温環境下中等度運動時において発汗開始および皮膚血管拡張閾値が卵胞中期より黄体中期に上昇したのは、女性ホルモン(プロゲステロン)が体温調節中枢に直接作用したためであると考えられる(経路)。安静時においてみられた背の皮膚血管拡張反応の亢進は、エストロゲンが直接末梢機構に作用し(経路), NO に対する皮膚血管の感受性を亢進させたことに起因すると推察される。この経路 による作用は全身一様にみられるのではなく身体部位差で異なることが示唆される。一方、このような影響(卵胞中期と比較して黄体中期に皮膚血流量が増加する)

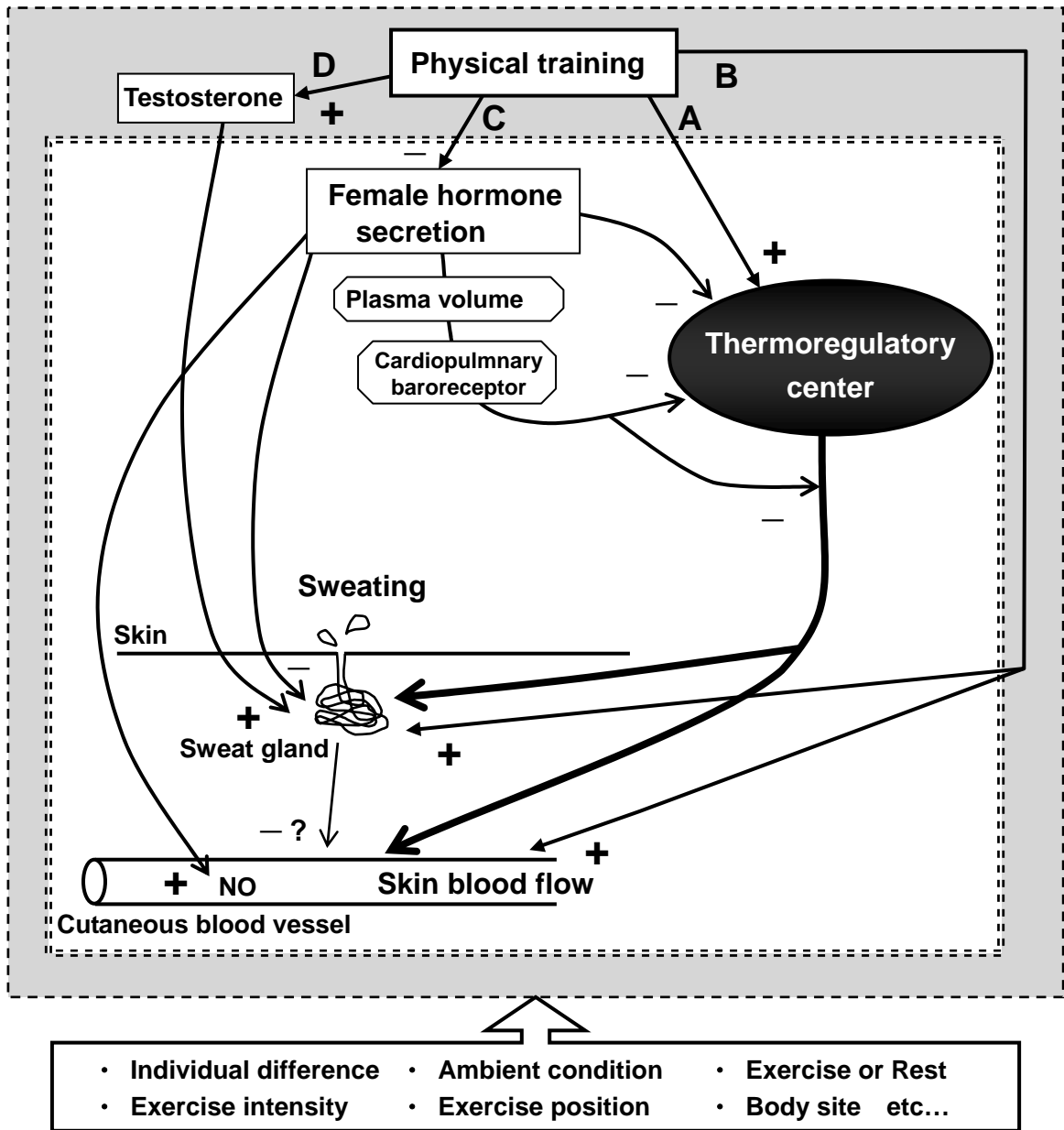


Figure 7. Schematic illustrating of system for heat loss responses during passive heating and exercise in women. Sweating and vasodilation responses are modulated by both the menstrual cycle and physical training. Moreover the heat loss system in women is affected by many factors like individual difference, ambient condition and exercise intensity. + : enhance, - : inhibit.

は常温環境下中等度運動時では観察されなかったことから、運動によって経路 の影響は他の作用（経路 や ）にマスクされた可能性が考えられる。特に、常温環境下中等度運動時では女性ホルモン（プロゲステロン）の上昇による血漿量の減少が心肺圧受容器反射を介して抑制的に大きく作用して、熱放散反応の感受性を低下させたと推察される（経路 ）。安静時よりも運動時の方がより循環血液量の増減の影響は大きくなることが考えられることから、経路 による影響が運動時のみに観察されたと推察される。また、この運動時での熱放散反応に及ぼす性周期の影響に関しては、温熱ストレスの増加に伴い経路 の影響は小さくなり、その影響がみえなくなる。さらに、経路 に関しては安静時および運動時とも汗腺活動に性周期の影響がみられなかったことから、汗腺活動に対する周期的な女性ホルモン分泌変動の影響は比較的小さいことが予想される。

女性の場合、上記のように性周期による女性ホルモン分泌変動の影響（経路 ， ， および ）を受けるものの、男性ではそのような影響を受けないため熱放散反応に性差が生じると推察される。すなわち、体力レベルを揃えて卵胞中期の女性と男性を比較すると顕著な性差はみられないものの、黄体中期では女性ホルモンによる抑制（経路 ， および ）を受けるため、卵胞中期と比較して黄体中期に性差がより顕著となったと推察される。女性ホルモンは汗腺に対して抑制的に作用することから（経路 ）、女性は男性と比較すると常に高い女性ホルモンレベルが維持されるので、女性の汗腺機能はその抑制のために卵胞中期でさえも男性のそれより劣ることが示唆される。また、女性の熱放散反応は男性と比較して発汗反応よりも皮膚血管拡張反応に依存した。これはおそらく、女性ホルモンが発汗反応（汗腺機能）に抑制的な作用を与えることと（経路 ）、NO 依存の皮膚血管拡張反応を促進すること（経路 ）に起因すると考えられる。

2) 熱放散反応に及ぼす運動トレーニングの影響

性周期によるこれらの影響は運動トレーニングの継続によってさらに影響を受け、熱放散反応が促進するような適応反応が生じる。運動トレーニングによる影響は女性ホルモンの影響が小さい卵胞中期と女性ホルモンによる影響が大きい黄体中期では、その程度が異なると考えられる。運動トレーニングによる熱放散反応の影響経路として、体温調節中枢に直接作用する経路（A）、末梢機構に直接作用する経路（B）、女性ホルモンの分泌変動の低下を介して女性ホルモンによる影響を小さくする経路（経路 C-₁、C-₂、C-₃ および C-₄）、および、男性ホルモンの分泌の増加を介して作用する経路（D）が考えられる。

一般女性と長期間運動トレーニングを継続して女性ホルモンの分泌変動が小さくなった女性運動トレーニング者の間で観察された差は卵胞中期では主に経路 A と B に起因し、黄体中期ではこの経路 A と B に加えて経路 および による抑制作用が小さくなったことに起因して（経路 C-₁ および C-₂）、卵胞中期よりも運動トレーニングの影響がより顕著にみられたと推察される。また、熱放散反応の感受性の改善は皮膚血管拡張反応より発汗反応でより顕著であり、さらにその改善には身体部位差が存在した。体温調節中枢のレベルから部位差が発生することは考えにくいこと、このような熱放散特性は性周期相にかかわらず観察されたことから、これらの部位差は経路 B に起因して生じ

たことが考えられる。また、温熱ストレスの増加に伴い経路 A、B および D を介して発汗反応は亢進し、長期運動トレーニングの影響の程度が大きくなったと考えられる。

一方、約 3 ヶ月程度の短期運動トレーニングは黄体中期の女性ホルモン分泌を抑制しなかったため、それに伴う熱放散反応の亢進が起こらず（経路 C-₁、C-₂ および C-₃）、そのため、短期運動トレーニングの影響が長期運動トレーニングの影響よりも小さかったと推察される。短期運動トレーニングによっていずれの性周期相においても熱放散反応の体温閾値が低下し、また、熱放散反応の感受性が変化しなかったことを考え合わせると、本研究での短期運動トレーニングによる影響は主に経路 A に起因して生じたことが示唆される。黄体中期では運動トレーニングをしてもなお女性ホルモンによる抑制が作用したため（経路 C-₁、C-₂ および C-₃）、運動トレーニングの効果が卵胞中期と比較して黄体中期でより小さくなったと考えられる。

運動トレーニングによる発汗反応（汗腺機能）の亢進には男性ホルモンの関与が考えられている（経路 D）。運動トレーニングによる男性ホルモンの増加は女性が男性よりも小さいことから、発汗反応の亢進の程度は女性が男性よりも小さくなったと推察される。

以上のことから、一般的な女性における安静時や運動時（常温環境下一定負荷運動および漸増負荷運動）の熱放散反応は女性ホルモンによる影響を受けるため、卵胞中期と比較して黄体中期に低下し、また、その熱放散反応は性周期相にかかわらず男性より劣ると示された。さらに、女性においても運動トレーニングは熱放散反応の亢進に有用であることが明らかになった。しかし、その影響（効果）は男性のそれよりも小さく、また、女性ホルモン分泌が抑制される場合（長期運動トレーニング）と抑制されない場合（短期運動トレーニング）、および、性周期相で異なり、運動トレーニング効果には女性の特性が存在した。そのため、女性が比較的快適な環境下で運動を行なう場合でも、特に黄体期では熱中症に対して十分に注意する必要性が考えられる。一方、運動トレーニングによる熱放散反応の改善は 1 ヶ月弱の短期間であっても、ある程度みられることから、季節変動や地球温暖化などによる気温上昇の前にあらかじめ運動トレーニングを実施し、熱放散反応を亢進させておくことが熱中症予防に有効であると提案できる。また、このように運動トレーニングはヒト本来の熱放散反応を亢進させるので、そのことにより現在の人工的な快適環境に頼らない生活スタイルを構築でき、地球温暖化に対する抑制効果を得られる可能性がある。

第10章 参考文献

- 安達知子. 月経および月経異常とは. 越野立夫, 武藤芳照, 定本朋子編著. *女性のスポーツ医学* 南江堂. 36-40, 1996.
- Aoki K, Kondo N, Shibasaki M, Takano S, Katsuura T, and Hirata K.** Control of circadian variation in skin blood flow response to heat stress. *Jpn J Physiol* 48: 95-98, 1998.
- Araki T.** The effect of physical training on sweating responses measured during muscular exercises and resting postures in hot environments. *Kobe J Med Sci* 22: 17-33, 1976.
- Araki T, Inoue Y, and Umeno K.** Effects of physical training on thermoregulatory responses to alternate stress of heat and cold. *J Physical Fitness Japan* 29: 75-81, 1980.
- Araki T, Matsushita K, Umeno K, Tsujino A, and Toda Y.** Effect of physical training on exercise-induced sweating in women. *J Appl Physiol* 51: 1526-1532, 1981.
- Araki T, Toda Y, and Tsujino A.** The effects of physical training on the activity of sweat glands during muscular exercise. *Kobe J Med Sci* 24: 165-176, 1978.
- Araki T, Toda Y, Matsushita K, and Tsujino A.** Age differences in sweating during muscular exercise. *J Physical Fitness Japan* 28: 239-248, 1979.
- Armstrong LE and Maresh CM.** Effects of training, environment, and host factors on the sweating response to exercise. *Int J Sports Med* 19: S103-S105, 1998.
- Armstrong LE, Maresh CM, Keith NR, Elliott TA, Vanheest JL, Scheett TP, Stoppani J, Judelson DA, and De Souza MJ.** Heat acclimation and physical training adaptations of young women using different contraceptive hormones. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 288: E868-E875, 2005.
- Aschoff J and Heise A.** Thermal conductance in men: its dependence on time of day and ambient conditions. In: *Advances in Climatic Physiology* Ito S, Ogata K and Yoshimura H(ed). Igaku Shoin, Tokyo, 334-348, 1972.
- Avellini BA, Kamon E, and Krajewski JT.** Physiological responses of physically fit men and women to acclimation to humid heat. *J Appl Physiol* 49: 254-261, 1980.
- Bittel J and Henane R.** Comparison of thermal exchanges in men and women under neutral and hot conditions. *J Physiol* 250: 475-489, 1975.
- Boegli Y, Gremion G, Golay S, Kubli S, Liaudet L, Leyvraz PF, Waeber B, and Feihl F.** Endurance training enhances vasodilation induced by nitric oxide in human skin. *J Invest Dermatol* 121: 1197-1204, 2003.
- Brooks EM, Morgan AL, Pierzga JM, Wladkowski SL, O'gorman JT, Derr JA, and Kenney WL.** Chronic hormone replacement therapy alters thermoregulatory and vasomotor function in postmenopausal women. *J Appl Physiol* 83: 477-484, 1997.
- Brooks-Asplund EM, Cannon JG, and Kenney WL.** Influence of hormone replacement therapy and aspirin

on temperature regulation in postmenopausal women. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 279: R839-R848, 2000.

Brozek J, Grande F, Anderson JT, and Keys A. Densitometric analysis of body composition: revision of some quantitative assumptions. *Ann NY Acad Sci* 110: 113-140, 1963.

Bullen BA, Skrinar GS, Beitins IZ, Carr DB, Reppert SM, Dotson CO, Fencel MD, Gervino EV, and McArthur JW. Endurance training effects on plasma hormonal responsiveness and sex hormone excretion. *J Appl Physiol* 56: 1453-1463, 1984.

Buono MJ and Sjöholm NT. Effects of physical training on peripheral sweat production. *J Appl Physiol* 65: 811-814, 1988.

Buono MJ and Wall AJ. Effect of hypohydration on core temperature during exercise in temperate and hot environments. *Pflügers Arch* 440: 476-480, 2000.

Buono MJ, Heaney JH, and Canine KM. Acclimation to humid heat lowers resting core temperature. *Am J Physiol* 274: R1295-R1299, 1998.

Byrd R, Stewart L, Torranin C, and Berringer OM. Sex differences in response to hypohydration. *J Sports Med* 17: 65-68, 1977.

Calzone WL, Silva C, Keefe DL, and Stachenfeld NS. Progesterone does not alter osmotic regulation of AVP. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 281: R2011-R2020, 2001.

Chang RT, Lambert GP, Moseley PL, Chapler, and Gisolfi CV. Effect of estrogen supplementation on exercise thermoregulation in premenopausal women. *J Appl Physiol* 85: 2082-2088, 1998.

Charkoudian N and Johnson JM. Modification of active cutaneous vasodilation by oral contraceptive hormones. *J Appl Physiol* 83: 2012-2018, 1997.

Charkoudian N and Johnson JM. Altered reflex control of cutaneous circulation by female sex steroids is independent of prostaglandins. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 276: H1634-H1640, 1999a.

Charkoudian N and Johnson JM. Reflex control of cutaneous vasoconstrictor system is reset by exogenous female reproductive hormones. *J Appl Physiol* 87: 381-385, 1999b.

Charkoudian N and Johnson JM. Female reproductive hormones and thermoregulatory control of skin blood flow. *Med Sci Sports Rev* 28: 108-112, 2000.

Charkoudian N, Stephens DP, Pirkle KC, Koshiwa WA, and Johnson JM. Influence of female reproductive hormones on local thermal control of skin blood flow. *J Appl Physiol* 87: 1719-1723, 1999.

Convertino VA, Brock PJ, Keil LC, Bernauer EM, and Greenleaf JE. Exercise training-induced hypervolemia: role of plasma albumin, renin, and vasopressin. *J Appl Physiol* 48: 665-669, 1980.

Cooke WH, Ludwig DA, Hogg PS, Eckberg DL, and Convertino VA. Does the menstrual cycle influence the sensitivity of vagally mediated baroreflexes? *Clin Sci (Lond)* 102: 639-644, 2002.

Cotter JD, Patterson MJ, and Taylor NA. Sweat distribution before and after repeated heat exposure. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 76: 181-186, 1997.

- Crandall CG, Levine BD, and Etzel RA.** Effect of increasing central venous pressure during passive heating on skin blood flow. *J Appl Physiol* 86: 605-610, 1999.
- Crandall CG.** Carotid baroreflex responsiveness in heat-stressed humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 279: H1955-H1962, 2000.
- Davies CTM.** Thermoregulation during exercise in relation to sex and age. *Eur J Appl Physiol* 42: 71-79, 1979.
- Drinkwater BL.** Gender differences in heat tolerance: fact or fiction? In: *Female endurance athletes* Human Kinetics Pub. 113-124, 1986.
- Drinkwater BL.** Physiological responses of women to exercise. *Exerc Sport Sci Rev* 1: 126-154, 1973.
- Drinkwater BL, Denton JE, Kupprat IC, Talag TS, and Horvath SM.** Aerobic power as a factor in women's response to work in hot environments. *J Appl Physiol* 41: 815-821, 1976.
- Engelke KA, Halliwill JR, Proctor DN, Dietz NM, and Joyner MJ.** Contribution of nitric oxide and prostaglandins to reactive hyperemia in human forearm. *J Appl Physiol* 81: 1807-1814, 1996.
- Fellmann N.** Hormonal and plasma volume alterations following endurance exercise. A brief review. *Sports Med* 13: 37-49, 1992.
- Fortney SM, Nadel ER, Wenger CB, and Bove JR.** Effect of acute alterations of blood volume on circulatory performance in humans. *J Appl Physiol* 50: 292-298, 1981a.
- Fortney SM, Nadel ER, Wenger CB, and Bove JR.** Effect of blood volume on sweating rate and body fluids in exercising humans. *J Appl Physiol* 51: 1594-1600, 1981b.
- Fortney SM and Senay LC Jr.** Effect of training and heat acclimation on exercise responses of sedentary females. *J Appl Physiol* 47: 978-984, 1979.
- Fortney SM, Turner C, Steinmann L, Driscoll T, and Alfrey C.** Blood volume response of men and women to bed rest. *J Clin Pharmacol* 34: 434-439, 1994.
- Frascarolo P, Schutz Y, and Jéquier E.** Decreased thermal conductance during the luteal phase of the menstrual cycle in women. *J Appl Physiol* 69: 2029-2033, 1990.
- Fritzsche RG and Coyle EF.** Cutaneous blood flow during exercise is higher in endurance-trained humans. *J Appl Physiol* 88: 738-744, 2000.
- Frye AJ and Kamon E.** Responses to dry heat of men and women with similar aerobic capacities. *J Appl Physiol* 50: 65-70, 1981.
- Fujimoto S and Watanabe T.** Studies on the body surface area of Japanese. *Acta med Nagasaki* 13: 1-13, 1969.
- Fukuoka Y, Kaneko Y, Takita C, Hirakawa M, Kagawa H, and Nakamura Y.** The effects of exercise intensity on thermoregulatory responses to exercise in women. *Physiol Behav* 76: 567-574, 2002.
- Garlick MA and Bernauer EM.** Exercise during the menstrual cycle: variations in physiological baselines. *Res Q* 39: 533-542, 1968.

- Gerhardt U, Hillebrand U, Mehrens T, and Hohage H.** Impact of estradiol blood concentrations on skin capillary Laser Doppler flow in premenopausal women. *Int J Cardiol* 75: 59-64, 2000.
- Gilligan DM, Badar DM, Panza JA, Quyyumi AA, and Cannon RO .** Acute vascular effects of estrogen in postmenopausal women. *Circulation* 90: 786-791, 1994a.
- Gilligan DM, Quyyumi AA, and Cannon RO .** Effects of physiological levels of estrogen on coronary vasomotor function in postmenopausal women. *Circulation* 89: 2545-2551, 1994b.
- Gisolfi CV and Cohen JS.** Relationships among training, heat acclimation, and heat tolerance in men and women: the controversy revisited. *Med Sci Sports* 11: 56-59, 1979.
- Gisolfi CV and Wenger CB.** Temperature regulation during exercise: old concepts, new ideas. *Exerc Sport Sci Rev* 12: 339-372, 1984.
- Graham TE, Viswanathan M, Van Dijk JP, Bonen A, and George JC.** Thermal and metabolic responses to cold by men and by eumenorrheic and amenorrheic women. *J Appl Physiol* 67: 282-290, 1989.
- Gray MJ, Strausfeld KS, Watanabe M, Sims EAH, and Solomon S.** Aldosterone secretory rates in the normal menstrual cycle. *J Clin Endocrinol* 28: 1269-1275, 1968.
- Grucza R, Pekkarinen H, Titov EK, Kononoff A, and Hänninen O.** Influence of the menstrual cycle and oral contraceptives on thermoregulatory responses to exercise in young women. *Eur J Appl Physiol* 67: 279-285, 1993.
- Hardy JD and Dubois EF.** The technic of measuring radiation and convection. *J Nutr* 15: 461-475, 1938.
- Harrison MH.** Effects of thermal stress and exercise on blood volume in humans. *Physiol Rev* 65: 149-209, 1985.
- 春名由一郎.** 姿勢 (重力) / 微小重力環境と運動. 斉藤 満, 加賀谷淳子編著, 循環-運動時の酸素運搬システム調節. NAP. 103-111, 1999.
- Harvey OL and Crocket HE.** Individual differences in temperature changes during the course of the menstrual cycle. *Hum Biol* 4: 453-468, 1932.
- Haslag SWM and Hertzman AB.** Temperature regulation in young women. *J Appl Physiol* 20: 1283-1288, 1965.
- Havenith G, Luttikholt VG, and Vrijlkotte TG.** The relative influence of body characteristics on humid heat stress response. *Eur J Appl Physiol* 70: 270-279, 1995.
- Hayashi T, Yamada K, Esaki T, Kuzuya M, Satake S, Ishikawa T Hidaka H, and Iguchi A.** Estrogen increases endothelial nitric oxide by a receptor-mediated system. *Biochem Biophys Res Commun* 214: 847-885, 1995.
- Haymes EM.** Physiological responses of female athletes to heat stress (review). *Phys Sportsmed* 12: 45-59, 1984.
- Helmer OM and Griffith RS.** The effect of the administration of estrogens on the rennin-substrate (hypertensinogen) content of rat plasma. *Endocrinology* 51: 421-426, 1952.

- Henane R, Flandrois R, and Charbonnier JP.** Increase in sweating sensitivity by endurance conditioning in man. *J Appl Physiol* 43: 822-828, 1977.
- Hessemer V and Brück K.** Influence of menstrual cycle on shivering, skin blood flow, and sweating responses measured at night. *J Appl Physiol* 59: 1902-1910, 1985a.
- Hessemer V and Brück K.** Influence of menstrual cycle on thermoregulatory, metabolic, and heart rate responses to exercise at night. *J Appl Physiol* 59: 1911-1917, 1985b.
- Hirata K, Nagasaka T, Hirai A, Hirashita M, and Takahata T.** Peripheral vascular tone during heat load is modified by exercise intensity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 51: 7-15, 1983.
- Hirata K, Nagasaka T, Hirai A, Hirashita M, Takahata T, and Nunomura T.** Effects of human menstrual cycle on thermoregulatory vasodilation during exercise. *Eur J Appl Physiol* 54: 559-565, 1986.
- Ho CW, Beard JL, Farrell PA, Minson CT, and Kenney WL.** Age, fitness, and regional blood flow during exercise in the heat. *J Appl Physiol* 82: 1126-1135, 1997.
- Höfler W.** Changes in regional distribution of sweating during acclimatization to heat. *J Appl Physiol* 25: 503-506, 1968.
- Hori S.** Changes in physiological reactions to a hot environment induced by climatic change and physical training. *Japan J Trop Med Hyg* 5: 93-104, 1977.
- Horstman DH and Christensen E.** Acclimatization to dry heat: active men vs. active women. *J Appl Physiol* 52: 825-831, 1982.
- Houghton BL, Holowatz LA, and Minson CT.** Influence of progestin bioactivity on cutaneous vascular responses to passive heating. *Med Sci Sports Exerc* 37: 45-51, 2005.
- 池上晴夫.** 運動処方-理論と実践-. 朝倉書店. 1990.
- Inoue Y.** Longitudinal effects of age on heat-activated sweat gland density and output in healthy active older men. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 74: 72-77, 1996.
- Inoue Y, Havenith G, Kenney WL, Loomis JL, and Buskirk ER.** Exercise- and methylcholine- induced sweating responses in older and younger men: effect of heat acclimation and aerobic fitness. *Int J Biometeorol* 42: 210-216, 1999.
- Inoue Y, Nakao M, Araki T, and Murakami H.** Regional differences in the sweating responses of older and younger men. *J Appl Physiol* 71: 2453-2459, 1991.
- Inoue Y and Shibasaki M.** Relational differences in age-related decrements of the cutaneous vascular and sweating responses to passive heating. *Eur J Appl Physiol* 74: 78-84, 1996.
- Inoue Y, Shibasaki M, Hirata K, and Araki T.** Relationship between skin blood flow and sweating rate, and age related regional differences. *Eur J Appl Physiol* 79: 117-23, 1998.
- 井上芳光, 小倉幸雄, 浅見尚子, 上田博之, 石指宏通, 芝崎 学, 近藤徳彦.** 暑熱下における皮膚血流量反応の性周期・性差. *体力科学* 49: 899, 2000.
- Johnson JM.** Nonthermoregulatory control of human skin blood flow. *J Appl Physiol* 61: 1613-1622, 1986.

- Johnson JM.** Exercise and the cutaneous circulation. *Exerc Sport Sci Rev* 20: 59-97, 1992.
- Johnson JM.** Physical training and the control of skin blood flow. *Med Sci Sports Exerc* 30: 382-386, 1998.
- Johnson JM and Park MK.** Effect of upright exercise on threshold for cutaneous vasodilation and sweating. *J Appl Physiol* 50: 814-818, 1981.
- Johnson JM and Proppe DW.** Cardiovascular adjustments to heat stress. In: *Handbook of Physiology. Environmental Physiology* Fregley ML and Blatteis CM(ed). Sect. 4, Environmental Physiology, Vol. 1, Chapt.11, Bethesda MD, Am Physiol Soc. 215-244, 1996.
- Johnson JM, Pérgola PE, Liao FK, Kellogg DL, and Crandall CG.** Skin of the dorsal aspect of human hands and fingers possesses an active vasodilator system. *J Appl Physiol* 78: 948-954, 1995.
- Johnson JM, Rowell LB, and Brengelmann GL.** Modification of the skin blood flow-body temperature relationship by upright exercise. *J Appl Physiol* 37: 880-886, 1974.
- Joyner MJ and Dietz NM.** Nitric oxide and vasodilation in human limbs. *J Appl Physiol* 83: 1785-1796, 1997.
- Kamijo YI, Lee K, and Mack GW.** Active cutaneous vasodilation in resting humans during mild heat stress. *J Appl Physiol* 98: 829-837, 2004.
- 金尾洋治.** 運動と酸素摂取. 勝田 茂編著, *運動生理学20講* 朝倉書店. 67-75, 1993.
- 彼末一之.** 体温調節中枢からみた自律分散型調節システム. 平田耕造, 井上芳光, 近藤徳彦編著, *体温-運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因*- NAP. 6-16, 2002.
- Kaulhausen H, Leyendecker G, Benker G, and Breuer H.** The relationship of the rennin-angiotensin-aldosterone system to plasma gonadotropin, prolactin and ovarian steroid patterns during the menstrual cycle. *Arch Gynaekol* 225: 179-200, 1978.
- Kawahata A.** Sex differences in sweating. In: *Essential Problems in climatic physiology* Ito S, Ogata H and Yoshimura H(ed). Kyoto, Japan: Nankodo Publ. 169-184, 1960.
- Keizer H, Janssen GM, Menheere P, and Kranenburg G.** Changes in basal plasma testosterone, cortisol, and dehydroepiandrosterone sulfate in previously untrained males and females preparing for a marathon. *Int J Sports Med* 10: S139-S145, 1989.
- Kellogg DL Jr, Johnson JM, and Kosiba WA.** Control of internal temperature threshold for active cutaneous vasodilation by dynamic exercise. *J Appl Physiol* 71: 2476-2482, 1991.
- Kellogg DL Jr, Liu Y, Kosiba IF, and O'Donnell D.** Role of nitric oxide in the vascular effects of local warming of the skin in humans. *J Appl Physiol* 86: 1185-1190, 1999.
- 気象庁.** もっと暖かくなった日本. *20世紀の日本の気候* (http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/20th/1_2_2.htm), 2002.
- Kleitman N and Ramsaroop A.** Periodicity in body temperature and heart rate. *Endocrinology* 43: 1-20, 1948.
- Kobayashi Y, Ando Y, Hosoi T, and Takeuchi T.** Thermal adaptation in highly trained athletes in a hot

- environment. *Jap J Phys Educ* 21: 39-54, 1976.
- Kobayashi Y, Ando Y, Okuda N, Takaba S, and Ohara K.** Effects of endurance training on thermoregulation in females. *Med Sci Sports Exerc* 12: 361-364, 1980.
- Kolka MA and Stephenson LA.** Control of sweating during the human menstrual cycle. *Eur J Appl Physiol* 58: 890-895, 1989.
- Kolka MA and Stephenson LA.** Effect of luteal phase elevation in core temperature on forearm blood flow during exercise. *J Appl Physiol* 82: 1079-1083, 1997.
- Kolka MA, Stephenson LA, Rock PB, and Gonzalez RR.** Local sweating and cutaneous blood flow during exercise in hypobaric environments. *J Appl Physiol* 62: 2224-2229, 1987.
- Kondo N, Takano S, Aoki K, Shibasaki M, Tominaga H, and Inoue Y.** Regional differences in the effect of exercise intensity on thermoregulatory sweating and cutaneous vasodilation. *Acta Physiol Scand* 164: 71-78, 1998.
- Kondo N, Tominaga H, Shibasaki M, Aoki K, Okada S, and Nishiyasu T.** Effects of exercise intensity on the sweating responses to a sustained exercise. *J Appl Physiol* 88: 1590-1596, 2000.
- Kondo N.** The control of sweating rate and skin blood flow during exercise. In: *Exercise, Nutrition and Environmental Stress* Nose H, Gisolfi CV, and Iwaizumi K(ed), Copper Publishing Group, LLC. 153-178, 2001.
- 近藤徳彦.** 運動にかかわる要因と熱放散システム. 平田耕造, 井上芳光, 近藤徳彦編著, *体温-運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因*- NAP. 63-88, 2002.
- 桑原智子, 井上芳光, 小倉幸雄, 近藤徳彦.** 運動トレーニングが若年女性の熱放散反応に及ぼす影響. *体力科学* 50: 899, 2001.
- Laidlaw JC, Ruse JL, and Gornall AG.** The influence of estrogen and progesterone on aldosterone excretion. *J Clin Endocrinol* 22: 161-171, 1962.
- Landau RL and Lugibihl K.** Inhibition of the sodium-retaining influence of aldosterone by progesterone. *J Clin Endocrinol* 18: 1237-1245, 1958.
- Lawson S, Webster JD, Pacy PJ, and Garrow JS.** Effect of a 10-week aerobic exercise programme on metabolic rate, body composition and fitness in lean sedentary females. *Br J Clin Pract* 41: 684-688, 1987.
- Lebrun CM, McKenzie DC, Prior JC, and Taunton JE.** Effects of menstrual cycle phase on athletic performance. *Med Sci Sports Exerc* 27: 437-444, 1995.
- Lehtovirta P.** Forearm blood flow in the normal menstrual cycle. *Int J Gynaecol Obstet* 20: 223-226, 1982.
- Lennon D, Nagle F, Stratman F, Shrago E, and Dennis S.** Diet and exercise training effects on resting metabolic rate. *Int J Obes* 9: 39-47, 1985.
- Mack GW, Cordero D, and Peters J.** Baroreceptor modulation of active vasodilation during dynamic exercise in humans. *J Appl Physiol* 90: 1464-1473, 2001.

- Mack G, Nishiyasu T, and Shi X.** Baroreceptor modulation of cutaneous vasodilator and sudomotor responses to thermal stress in humans. *J Physiol* 485: 537-547, 1995.
- Mack GW, Shi X, Nose H, Tripathi A, and Nadel ER.** Diminished baroreflex control of forearm vascular resistance in physically fit humans. *J Appl Physiol* 63: 105-110, 1987.
- Marrone BL, Gentry RT, and Wade GN.** Gonadal hormone and body temperature in rats: effects of estrous cycles, castration and steroid replacement. *Physiol Behav* 17: 419-425, 1976.
- Matsushita K and Araki T.** The effect of physical training on thermoregulatory responses of preadolescent boys to heat and cold. *J Physical Fitness Japan* 29: 69-74, 1980.
- Minson CT, Halliwill JR, Young TM, and Joyner MJ.** Influence of the menstrual cycle on sympathetic activity, baroreflex sensitivity, and vascular transduction in young women. *Circulation* 101: 862-868, 2000.
- 宮田浩文.** 運動と中心循環. 勝田 茂編著, *運動生理学20講* 朝倉書店. 76-81, 1993.
- 文部科学省.** スポーツの実施状況について. *総合型地域スポーツクラブ育成マニュアル* (http://www.mext.go.jp/a_menu/sports/club/073.htm), 2001.
- Montain SJ, Lutzka WA, and Sawka MN.** Control of thermoregulatory sweating is altered by hydration level and exercise intensity. *J Appl Physiol* 79: 1434-1439, 1995.
- Morimoto T, Slabochova Z, Naman RK, and Sargent F.** Sex differences in physiological reactions to thermal stress. *J Appl Physiol* 22: 526-532, 1967.
- Nadel ER, Bullard RW, and Stolwijk JAJ.** Importance of skin temperature in the regulation on sweating. *J Appl Physiol* 31: 80-87, 1971.
- Nadel ER, Pandolf KB, Roberts MF, and Stolwijk JAJ.** Mechanisms of thermal acclimation to exercise and heat. *J Appl Physiol* 37: 515-520, 1974.
- Nadel ER, Roberts MF, and Wenger CB.** Thermoregulatory adaptations to heat and exercise: comparative responses of men and women. In: *Environmental Stress* Folinsbee LJ, Wagner JA, Borgia JB, Drinkwater BL, Gliner JA, and Bedi JD(ed), New York: Academic, 129-138, 1978.
- Nagamine S and Suzuki S.** Anthropometry and body composition of Japanese young men and women. *Human Biol* 36: 8-15, 1969.
- Nagashima K, Nose H, Takamata A, and Morimoto T.** Effect of continuous negative- pressure breathing on skin blood flow during exercise in a hot environment. *J Appl Physiol* 84: 1845-1851, 1998.
- Nakayama T and Suzuki M.** Action of progesterone on preoptic thermosensitive neurones. *Nature Lond* 258: 80, 1975.
- Nielsen M.** Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit. *Scand Arch Physiol* 79: 193-230, 1938.
- Nishiyasu T, Shi X, Mack GW, and Nadel ER.** Effect of hypovolemia on forearm vascular resistance control during exercise in the heat. *J Appl Physiol* 71: 1382-1386, 1991.
- Nose H and Takamata A.** Integrative regulations of body temperature and body fluid in humans exercising in

- a hot environment. *Int J Biometeorol* 40: 42-49, 1997.
- Nose H, Mack GW, Shi X, Morimoto K, and Nadel ER.** Effect of saline infusion during exercise on thermal and circulatory regulations. *J Appl Physiol* 69: 609-616, 1990.
- O'Brien C, Hoyt RW, Buller MJ, Castellani JW, and Young AJ.** Telemetry pill measurement of core temperature in humans during active heating and cooling. *Med Sci Sports Exerc* 30: 468-472, 1998.
- Ogawa T.** Local effect of skin temperature on threshold concentration of sudorific agents. *J Appl Physiol* 28: 18-22, 1970.
- Ogawa T and Bullard RW.** Characteristics of subthreshold sudomotor neural impulses. *J Appl Physiol* 33: 300-305, 1972.
- Ogawa T and Sugeno J.** Pulsatile sweating and sympathetic sudomotor activity. *Jpn J Physiol* 43: 276-289, 1993.
- 小川徳雄.** 汗の常識・非常識. ブルーボックス. 講談社. 1998.
- Okazaki K, Kamijo Y, Takeno Y, Okumoto T, Masuki S, and Nose H.** Effects of exercise training on thermoregulatory responses and blood volume in older men. *J Appl Physiol* 93: 1630-1637, 2002.
- Pandolf KB, Burse RL, and Goldman RF.** Role of physical fitness in heat acclimatisation, decay and reinduction. *Ergonomics* 20: 399-408, 1977.
- Pandolf KB.** Effects of physical training and cardiorespiratory physical fitness on exercise-heat tolerance: recent observations. *Med Sci Sports* 11: 60-65, 1979.
- Patterson MJ, Stocks JM, and Taylor NA.** Humid heat acclimation does not elicit a preferential sweat redistribution toward the limbs. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 286: R512-R518, 2004.
- Pergola PE, Kellogg DL Jr, Johnson JM, and Kosiba WA.** Reflex control of active cutaneous vasodilation by skin temperature in humans. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 266: H1979-H1984, 1994.
- Pinto S, Viridis A, Ghiadoni L, Bernini G, Lombardo M, Petraglia F, Genazzani AR, Taddei S, and Salvetti A.** Endogenous estrogen and acetylcholine-induced vasodilation in normotensive women. *Hypertension* 29: 268-273, 1997.
- Pivarnik JM, Carlos JM, Thomas S, and James RM Jr.** Menstrual cycle phase affects temperature regulation during endurance exercise. *J Appl Physiol* 72: 543-548, 1992.
- Poehlman ET, Tremblay A, Nadeau A, Dussault J, Theriault G, and Bouchard C.** Heredity and changes in hormones and metabolic rates with short-term training. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 250: E711-E717, 1986.
- Roberts MF, Wenger CB, Stolwijk JAJ, and Nadel ER.** Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J Appl Physiol* 43: 133-137, 1977.
- Rothchild I and Barnes AC.** Effects of dosage, and of estrogen, androgen or salicylate administration on degree of body temperature elevation induced by progesterone. *Endocrinology* 50: 485-496, 1952.
- Saltin B and Hermansen L.** Esophageal, rectal, and muscle temperature during exercise. *J Appl Physiol* 21:

1757-1762, 1966.

- Sarrel PM.** The differential effects of oestrogens and progestins on vascular tone. *Hum Reprod Update* 5: 205-209, 1999.
- Sato K and Sato F.** Individual variations in structure and function of human eccrine sweat gland. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 245: R203-R208, 1983.
- Sawka MN, Convertino VA, Eichner ER, Schnieder SM, and Young AJ.** Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stresses, and trauma/sickness. *Med Sci Sports Exerc* 32: 332-348, 2000.
- Shastry S, Dietz NM, Halliwill JR, Reed AS, and Joyner MJ.** Effects of nitric oxide synthase inhibition on cutaneous vasodilation during body heating in humans. *J Appl Physiol* 85: 830-834, 1998.
- Shibasaki M, Inoue Y, Kondo N, Aoki K, and Hirata K.** Relationship between skin blood flow and sweating rate in prepubertal boys and young men. *Acta Physiol Scand* 167: 105-110, 1999.
- Shibasaki M, Kondo N, and Crandall CG.** Non-thermoregulatory modulation of sweating in humans. *Exerc Sport Sci Rev* 31: 34-39, 2003.
- Shvartz E, Bhattacharya A, Sperinde SJ, Brock PJ, Sciaraffa D, and Van Beaumont W.** Sweating responses during heat acclimation and moderate conditioning. *J Appl Physiol* 46: 675-680, 1979.
- Shvartz E, Magazanik A, and Glick Z.** Thermal responses during training in a temperate climate. *J Appl Physiol* 36: 572-576, 1974.
- Smolander J, Saalo J, and Korhonen O.** Effect of work load on cutaneous vascular response to exercise. *J Appl Physiol* 71: 1614-1619, 1991.
- Stachenfeld NS, DiPietro L, Kokoszka CA, Silva C, Keefe DL, and Nadel ER.** Physiological variability of fluid-regulation hormones in young women. *J Appl Physiol* 86: 1092-1096, 1999.
- Stachenfeld NS, Keefe DL, and Palter SF.** Estrogen and progesterone effects on transcapillary fluid dynamics. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 281: R1319-R1329, 2001.
- Stachenfeld NS, Silva C, Keefe DL, Kokoszka CA, and Nadel ER.** Effects of oral contraceptives on body fluid regulation. *J Appl Physiol* 87: 1016-1025, 1999.
- Stachenfeld NS, Silva CS, and Keefe DL.** Estrogen modifies the temperature effects of progesterone. *J Appl Physiol* 88: 1643-1649, 2000.
- Stephenson LA and Kolka MA.** Menstrual cycle phase and time of day alter reference signal controlling arm blood flow and sweating. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 249: R186-R191, 1985.
- Stephenson LA and Kolka MA.** Plasma volume during heat stress and exercise in women. *Eur J Appl Physiol* 57: 373-381, 1988.
- Stephenson LA and Kolka MA.** Thermoregulation in women. *Exerc Sport Sci Rev* 21: 231-262, 1993.
- Stephenson LA and Kolka MA.** Esophageal temperature threshold for sweating decreases before ovulation in premenopausal women. *J Appl Physiol* 86: 22-28, 1999.

- Stephenson LA, Kolka MA, and Gonzalez RR.** Circadian variations in plasma rennin activity, catecholamines and aldosterone during exercise in women. *Eur J Appl Physiol* 58: 756-764, 1989.
- Stephenson LA, Kolka MA, and Wilkerson JE.** Metabolic and thermoregulatory responses to exercise during the human menstrual cycle. *Med Sci Sports Exerc* 14: 270-275, 1982.
- 田口貞善.** エネルギー代謝とトレーニング. 宮村実晴, 矢部京之助編著, *体力トレーニング-運動生理学的基礎と応用* 真興交易医書出版部. 126-150, 1986.
- Takamata A, Nagashima K, Nose H, and Morimoto T.** Osmoregulatory inhibition of thermally induced cutaneous vasodilation in passive heated humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 275: R197-R204, 1997.
- Takamata A, Nagashima K, Nose H, and Morimoto T.** Role of plasma osmolality in the delayed onset of thermal cutaneous vasodilation during exercise in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 275: R286-R290, 1998.
- Takamata A, Yoshida T, Nishida N, and Morimoto T.** Relationship of osmotic inhibition in thermoregulatory responses and sweat sodium concentration in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 280: R623-R629, 2001.
- Takano S, Kondo N, Shibasaki M, Aoki K, Inoue Y, and Iwata A.** The influence of work loads on regional differences in sweating rates. *Jpn J Physiol* 46: 183-186, 1996.
- Takeno Y, Kamiyo YI, and Nose H.** Thermoregulatory and aerobic changes after endurance training in a hypobaric hypoxic and warm environment. *J Appl Physiol* 91: 1520-1528, 2001.
- Tankersely CG, Nicholas WC, Deaver DR, Mikita D, and Kenney WL.** Estrogen replacement in middle-aged women: thermoregulatory responses to exercise in the heat. *J Appl Physiol* 73: 1238-1245, 1992.
- Taylor WF, Johnson JM, Kosiba WA, and Kwan CM.** Graded cutaneous vascular responses to dynamic leg exercise. *J Appl Physiol* 64: 1803-1809, 1988.
- Tenaglia SA, McLellan TM, and Klentrou PP.** Influence of the menstrual cycle and oral contraceptives on tolerance to uncompensable heat stress. *Eur J Appl Physiol* 80: 76-83, 1999.
- Thomas CM, Pierzga JM, and Kenney WL.** Aerobic training and cutaneous vasodilation in young and older men. *J Appl Physiol* 86: 1676-1686, 1999.
- 東京都立大学体力標準値研究会.** 新・日本人の体力標準値 2000. 不昧堂出版. 2000.
- Turner C and Fortney SM.** Plasma volume changes during the menstrual cycle (abstr). *Fed Proc* 43: 718, 1984.
- Van Beaumont W and Bullard RW.** Sweating: Its rapid response to muscular work. *Science* 141: 643-646, 1963.
- Vissing SF and Hjortso EM.** Central motor command activates sympathetic outflow to the cutaneous circulation in humans. *J Physiol* 492: 931-939, 1996.

- Wallace JP, Lovell S, Talano C, Webb ML, and Hodgson JL.** Changes in menstrual function, climacteric syndrome, and serum concentrations of sex hormones in pre- and post-menopausal women following a moderate intensity conditioning program. *Med Sci Sports Exerc* 14: 154, 1982.
- Wells CL.** Women, sport & performance: a physiological perspective. (女性のスポーツ生理学) 宮下充正, 定本朋子, 甲斐美和子, 谷口有子訳, 大修館書店. 125-159, 1999.
- Wenger CB, Roberts MF, Stolwijk JAJ, and Nadel ER.** Forearm blood flow during body temperature transients produced by leg exercise. *J Appl Physiol* 38: 58-63, 1975.
- Wenger CB, Roberts MF, Stolwijk JAJ, and Nadel ER.** Nocturnal lowering of thresholds for sweating and vasodilation. *J Appl Physiol* 41: 15-19, 1976.
- Williams CG, Wyndham CH, and Morrison JF.** Rate of loss of acclimatization in summer and winter. *J Appl Physiol* 22: 21-26, 1967.
- 山田哲雄.** 運動と体液の調節. 池上晴夫編. 身体機能の調節性-運動に対する応答を中心に- 朝倉書店. 162-175, 1997.
- 山地啓司.** 運動処方のための心拍数の科学. 大修館書店. 1983.
- 山地啓司.** $\dot{V}O_2\text{max}$ からみた体力評価. 最大酸素摂取量の科学. 杏林書院. 1992.
- Yamashita Y, Ogawa T, Ohnishi N, Imamura R, and Sugenoja J.** Local effect of vasoactive intestinal polypeptide on human sweat-gland function. *Jpn J Physiol* 37: 929-936, 1987.
- Yamauchi M, Matsumoto T, Ohwatari N, and Kosaka M.** Sweating economy by graded control in well-trained athletes. *Pflügers Arch* 433: 675-678, 1997.
- Yamazaki F and Hamasaki K.** Heat acclimation increases skin vasodilation and sweating but not cardiac baroreflex responses in heat-stressed humans. *J Appl Physiol* 95: 1567-1574, 2003.
- Yamazaki F, Fujii N, Sone R, and Ikegami H.** Mechanisms of potentiation in sweating induced by long-term physical training. *Eur J Appl Physiol* 69: 228-232, 1994.
- Yamazaki F, Fujii N, Sone R, and Ikegami H.** Responses of sweating and body temperature to sinusoidal exercise in physically trained men. *J Appl Physiol* 80: 491-495, 1996.
- Yamazaki F, Sone R, and Ikegami H.** Responses of sweating and body temperature to sinusoidal exercise. *J Appl Physiol* 76: 2541-2545, 1994.
- Yanagimoto S, Aoki K, Horikawa N, Shibasaki M, Inoue Y, Nishiyasu T, and Kondo N.** Sweating response in physically trained men to sustained handgrip exercise in mildly hyperthermic conditions. *Acta Physiol Scand* 174: 31-39, 2002.
- Zakas A, Mandroukas K, Karamouzis M, and Panagiotopoulou G.** Physical training, growth hormone and testosterone levels and blood pressure in prepubertal, pubertal and adolescent boys. *Scand J Med Sci Sports* 4: 113-118, 1994.

謝辞

本研究は、神戸大学 近藤 徳彦 助教授の懇切丁寧なご指導とご助言を賜り行なわれたものであり、ここに心から感謝いたしますとともに、厚く御礼申し上げます。

また、博士論文の作成にあたり、ご高閲を賜り、ご助言およびご激励を賜りました神戸大学 平川 和文 教授、岡田 修一 教授、柳田 泰義 教授ならびに井上 真理 助教授に心から御礼申し上げます。

さらに、実験データ収集に際して、数々の便宜を賜りました奈良県立医科大学 石指 宏通 講師、大阪信愛女学院短期大学 上田 博之 教授ならびに大阪国際大学短期大学部 小倉 幸雄 助教授に深く感謝いたしますとともに、厚く御礼申し上げます。また、統計処理に関してご指導頂きました神戸大学 稲葉 太一 講師、そして、全ての実験の採血をご担当頂きました大阪国際大学健康管理センター看護士 隈部 敬子 さん、医師 平田 まり 教授に改めて厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行に際して、快く積極的に実験に参加し、ご協力頂きました被験者の皆様、実験の労を共にした大阪国際大学 井上研究室の皆様、多くのアドバイスや激励を頂きましたシャムスーディン A.K.M. 氏、柳本 周治 先輩、井上 美穂 先輩をはじめ神戸大学応用生理学研究室の皆様心から感謝し御礼申し上げます。

最後になりましたが、研究を行なう最初の機会を与えて下さり、当初より温かなご指導とご助言を賜りました大阪国際大学 井上 芳光 教授に心から感謝いたしますとともに、厚く御礼申し上げます。