

# Seasonal variation of thermoregulation in a hot environment : Effects of age, sex, and sleep deprivation

藤田, 水穂

<https://doi.org/10.15017/458557>

---

出版情報 : Kyushu Institute of Design, 2003, 博士 (芸術工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

### 第3章

断眠が暑熱環境下における体温調節反応に及ぼす影響とその季節差

## 第3章

### 断眠が暑熱環境下における体温調節反応に及ぼす影響とその季節差

#### 3-1. 序言

現代の生活では不規則な睡眠習慣、夜間勤務や時差地域への急速な移動などによる睡眠の妨害が誰にでも起こりうる。そこで、睡眠が断たれたときの体温調節動態に関していくつかの研究が報告されてきた。これらの研究の多くにおいて、体温調節への1夜程度の断眠の影響は全体として小さいものであると示唆されたが、一様な反応が得られたわけではない。1夜程度の断眠後の深部体温と通常睡眠をとった後の深部体温とを同時間帯で比較したとき、断眠時で高いとするもの (Fiorica et al. 1968)、変わらないとするもの (Knauth et al. 1978、Martin et al. 1984、Sawka et al. 1984、Dewasmes et al. 1992、Savourey et al. 1994)、そして低くなる (Naitoh et al. 1971、Kolka et al. 1988、Opstad et al. 1991、Landis et al. 1998) とする報告がみられている。

また、断眠後の運動に伴う体温調節反応に関する報告がいくつかある。発汗反応、血管拡張反応、またこれらが開始される時間、閾値深部温などが観察されたが、断眠による影響として一定の傾向は明らかにされなかった。Sawka et al. (1984) は、夏期 15 時頃に実施した実験において、発汗開始の閾値温に変化はみられないが、深部温変動に対する発汗量変動の回帰直線の勾配は断眠時に小さくなると報告している。しかし、Dewasmes et al. (1992) は、冬期 11 時頃における実験で、断眠時に発汗開始閾値温は高くなるが、深部温 vs 発汗量の回帰直線勾配には変化はみられなかったと報告している。また、Kolka et al. (1988)

は夏期 15 時前後の実験で、断眠時における前腕血流の増加閾値深部温度は低く、深部温変動に対する勾配も小さくなると報告した。

これらの研究間の異なる結果の理由の一部は、断眠の影響が小さい上に、体温調節反応における個人差は大きく、また様々な要因によって影響を受けやすいということであろう。上記の報告はそれぞれ異なる運動強度や環境温度で行われ、また実施時間、季節も異なった。通常の睡眠をとった場合、暑熱環境下における体温調節反応や反応発現閾値温度は、体温の概日リズムの影響を受け日内変動を示すことが知られている（緑川 1981、Stephenson et al. 1984、Aoki et al. 1995、1997、1998a、1998b、Tayefeh et al. 1998）。また、1 日平均の直腸温は冬期より夏期の方が高く、直腸温の下降期が冬期より夏期により早い時間帯にシフトする（Honma et al. 1992）との報告から、体温調節反応の日内変動は体温概日リズムと季節との影響をも受けて変動する（緑川 1981）。さらには、人の優れた暑さへの適応の能力は、季節による寒暖への順応によってもたらされ、暑熱環境下での体温調節反応を季節的に変化させていることも知られている（緑川 1981、Ihzuka et al. 1986、白石ら 1990、Hori et al. 1993、Inoue et al. 1995）。

そこで本実験では、暑熱環境下における体温調節反応に及ぼす断眠の影響について、季節による差異に着目し、24 時間断眠が安静時下腿温浴中における体温調節反応に及ぼす影響とその季節差について明らかにすることを目的とした。

## 3-2. 方法

## 3-2-1. 被験者

大学生及び大学院生の健常男子 8 名を対象とした。平均年齢 (SD) は、23.2 (2.0) 歳であった。すべての被験者には、本実験の目的、内容、方法が説明され、事前に同意書を得た。

表 2-1 に被験者の身体特性を示す。各項目に季節差は認められなかった。身長はマルチン計測法で、体重は精密体重計 (Mettler ID2, Switzerland) を用いて測定した。皮下脂肪厚は皮下脂肪厚計 (Meikosha Co. Ltd., Japan) を用い、測定部位は背中、胸、腹、上腕、大腿部とした。体脂肪率 (%fat) の測定には、生体インピーダンス法による体脂肪計付デジタル体重計 (TBF-546, Tanita Co, Ltd., Japan) を使用した。体表面積は、6 歳以上の男女に適用できるとされる Fujimoto

表 3-1 被験者の身体的特徴

	Summer		Winter	
	Mean	SD	Mean	SD
Height (cm)	166.4	5.0	166.3	5.0
Weight (kg)	65.1	8.7	64.4	7.9
BSA (m <sup>2</sup> )	1.74	0.12	1.73	0.12
%Fat (%)	22.0	4.1	23.2	4.2
Skinhold Thickness (mm)				
Back	18.1	8.0	17.2	6.8
Upperarm	12.4	4.6	9.8	1.6
Chest	13.8	6.3	7.8	1.7
Abdomen	10.2	5.3	10.0	2.2
Thigh	11.1	3.1	10.6	3.1

ら (1969) の方法に従って以下に示す式より算出された。

$$BSA = \text{Weight}^{0.444} \times \text{Height}^{0.663} \times 0.008883$$

### 3-2-2. 実験条件

実験は、2001年の夏期9月と2002年の冬期3月に、九州芸術工科大学環境適応実験施設にて行われた。被験者には、同一の暑熱実験を2つの睡眠条件（コントロール条件と断眠条件）において、また夏期と冬期それぞれに実施した。なお、各条件間での実験実施順序は、ランダムに行った。

睡眠条件は、通常睡眠後に暑熱実験を行うコントロール条件と24時間の断眠後に暑熱実験を行う断眠条件を設定した。被験者は実験前日午前7時に自宅で起床し日中は日常通りに過ごした後、実験前夜午後11時から睡眠条件に合わせて本学の実験室に滞在した。コントロール条件では、午後11時30分から翌日午前6時30分まで睡眠をとった。断眠条件では、読書や映画鑑賞等、被験者が各々自由に過ごしたが、常に実験者の監視下にあった。コントロール条件において被験者は就寝開始から暑熱実験終了までの飲食が制限されたが、断眠条件においては、暑熱実験開始3時間前までの軽量の飲食が許された。両睡眠条件共に、被験者はTシャツとショートパンツを着用し、実験室は室温27°Cに調整された。

暑熱実験は、環境温度30°C、湿度70%の実験室内において、暑熱負荷として下腿足浴を用いて行われた。下腿温浴は、椅座位安静時において、負担が小さく効果的に深部温を上昇させ体温調節反応を発現させる方法として用いられている（黛ら 1981、Ihzuca et al. 1986、Inoue et al. 1991、Inoue et al. 1995、Tochihara et al. 1995、Shibasaki et al. 1997、Shibasaki et al. 1999）。これらの先行研究を参考に、本実験では、湯温42°Cの浴槽に膝下までを浸す下腿温浴を60分間行わせるものとした。なお、被験者の着衣は、ショートパンツのみとした。

### 3-2-3. 実験手順

すべての実験は午前7時に開始された。被験者は、実験前室（室温 27°C）にて、実験用の衣服に着替え、身長、体重、皮下脂肪厚、体脂肪率を測定された。その後、各測定に用いられるセンサを貼付され、前室には 30 分以上滞在した。直腸温、皮膚温の安定及び発汗していないことが確認された後、暑熱実験室（室温 30°C、相対湿度 70%、気流  $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下）に移動した。10 分間の椅座位安静の後、湯温 42°C の下腿温浴を 60 分間行った。

### 3-2-4. 測定項目

#### 3-2-4-1 直腸温及び皮膚温

直腸及び皮膚温は実験前室から下腿温浴終了まで測定、記録された。

直腸温及び皮膚温の測定方法は、第 2 章と同様であり、詳細は「2-2-4-1. 直腸温及び皮膚温」に述べた。

#### 3-2-4-2 発汗反応

全身総発汗量は、実験前後に精度  $\pm 1\text{g}$  の精密体重計 (Mettler ID2, Switzerland) で測定した体重の減少量から決定された。実験終了後の体重は、汗の乾布後、測定された。

背中及び前腕部局所発汗量は暑熱実験室入室後から下腿温浴終了まで連続的に 1 秒間隔で測定、記録された。発汗量測定方法は、第 2 章と同様であり、詳細は「2-2-4-2. 発汗反応」に述べた。

#### 3-2-4-3 皮膚血管反応

右前腕、背部皮膚血管血流量は暑熱実験室入室後から下腿温浴終了まで連続的

に1秒間隔で測定、記録された。測定方法は第2章と同様であり、詳細は「2-2-4-3 皮膚血管反応」に述べた。

#### 3-2-4-4. 産熱量

産熱量は、27°C前室で5分間および下腿温浴終了前5分間でそれぞれダグラスバックに採取した呼気を用い分析し求めた。採取された呼気は、ガスメーターによる呼気量の測定、ならびに呼気ガス分析器により酸素消費と二酸化炭素排出を計測した。さらに、呼気量にはBTPS実効換気量に補正し、酸素摂取量および二酸化炭素排出量はSTPDにより標準化を行い、体表面積あたりの産熱量を算出した。

#### 3-2-4-5. 主観評価

心理反応として、全身温冷感と温熱的不快感について主観評価を、血圧測定と同時に求めた。各主観評価のスケールを表3-2に示す。全身温冷感には、「非常に寒い：-4」から「非常に暑い：4」までの9段階のカテゴリースケールを使用した。温熱的不快感には、「快適：0」から「非常に不快：3」の4段階のカテゴリースケールを用いた。

#### 3-2-5. 分析方法

データは、平均値と標準偏差で示した。直腸温、平均皮膚温、局所発汗量、皮膚血管血流量、主観申告にのデータについて、分散分析は、季節条件(2水準：夏期、冬期)、睡眠条件(2水準：コントロール、断眠)、時間(5分間隔)を要因とするくり返しのある3元配置分散分析を行なった。温熱中立環境下での安静時直腸温、平均皮膚温、代謝量、血圧、脈拍、および暑熱暴露の結果である全身総発汗量、発汗潜時、発汗開始閾値直腸温、代謝量のデータに関しては、



季節条件 (2 水準：夏期、冬期)、睡眠条件 (2 水準：コントロール、断眠) を要因とする繰り返しのある 2 元配置分散分析を行なった。平均値の多重比較には、分散分析の結果、有意と認められた主効果、交互作用に対して Scheffé の F 手法を用いた。また、直腸温の変化に対する局所発汗量および皮膚血管血流量の関係について、各睡眠条件および季節におけるピアソンの積率相関係数を求め、さらに回帰直線の傾きについて、睡眠条件間および季節間の比較のために、回帰直線の有意差の検定 (スネデカー 1972) を行なった。また、有意水準は  $p < 0.05$  とした。

表 3-2 主観評価スケール

温冷感		
非常に暑い	4	VERY HOT
暑い	3	HOT
暖かい	2	WARM
やや暖かい	1	SLIGHTLY WARM
どちらともいえない	0	NEUTRAL
やや涼しい	-1	SLIGHTLY COOL
涼しい	-2	COOL
寒い	-3	COLD
非常に寒い	-4	VERY COLD
温熱的不快感		
非常に快適	2	VERY COMFORTABLE
やや快適	1	SLIGHTLY COMFORTABLE
どちらともいえない	0	NEUTRAL
やや不快	-1	SLIGHTLY UNCOMFORTABLE
非常に不快	-2	VERY UNCOMFORTABLE

### 3-3. 結果

#### 3-3-1. 温熱中立環境における測定値

表 3-3 に夏期および冬期における睡眠条件ごとの温熱中立環境下での安静時直腸温、平均皮膚温、代謝量、血圧、脈拍を示す。各値は被験者 8 名の平均値および SD である。

分散分析の結果、直腸温、代謝量、血圧、および脈拍において、季節間および睡眠条件間の差異は認められなかった。平均皮膚温には季節の有意な主効果 ( $p<0.05$ ) が認められ、通常睡眠時、断眠時ともに、冬期より夏期のほうが有意に高値を示した。

表 3-3 温熱中立環境における測定値

	Summer		Winter	
	Normal sleep	Sleep deprivation	Normal sleep	Sleep deprivation
$T_{re}$ (°C)	36.59±0.32	36.84±0.40	36.70±0.42	36.69±0.23
$T_{sk}$ (°C) *	33.15±0.26	33.15±0.34	32.81±0.30	32.89±0.37
$M$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	36.54±9.15	36.25±5.76	32.55±8.99	34.89±16.99
$BP_s$ (mmHg)	113.0±9.6	115.5±10.7	114.6±6.0	114.1±8.0
$BP_d$ (mmHg)	69.9±7.2	70.3±3.8	69.0±6.9	72.5±10.5
Pulse ( $beats \cdot min^{-1}$ )	65.1±11.1	64.1±6.2	64.1±11.4	61.6±9.1

Mean ± SD (n = 8)  
\* $p<0.05$

#### 3-3-2. 体温

##### 3-3-2-1. 直腸温

図 3-1 に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、下腿温浴中 60 分間の直腸温変動と下腿温浴開始時からの変化量を示す。各値は被験者 8 名の平均値およ

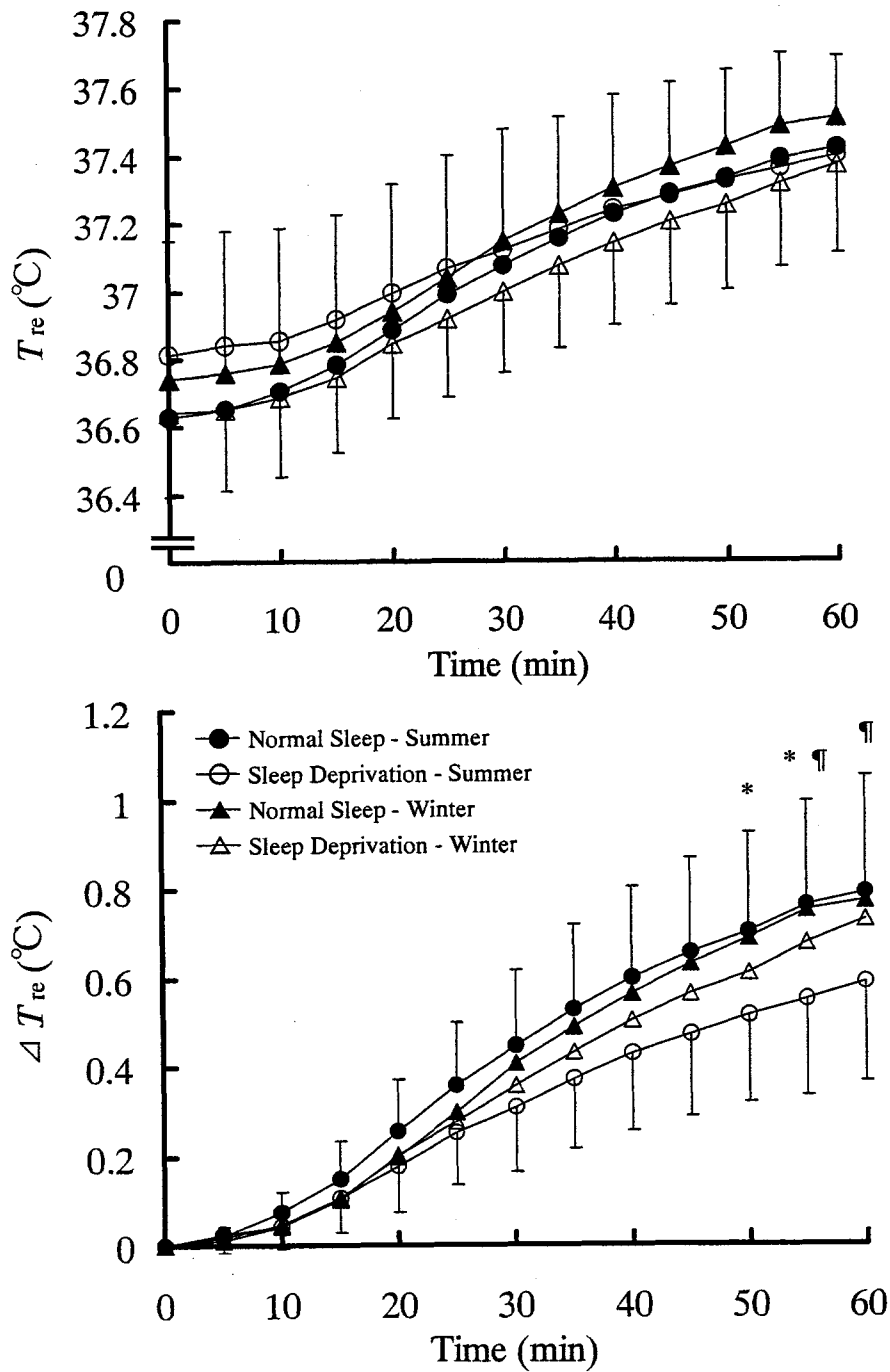


図 3-1 直腸温変動 ( $T_{re}$ ) と下腿温浴開始時からの変化量 ( $\Delta T_{re}$ )

\*;  $p < 0.05$  断眠時と通常睡眠時の有意差

¶;  $p < 0.05$  夏期断眠時と夏期通常睡眠時の有意差

びSDである。

直腸温の分散分析の結果、季節、睡眠条件および時間の交互作用が有意 ( $p<0.01$ ) であった。しかしながら多重比較では季節間および睡眠条件間における差異は認められなかった。

直腸温変化量の分散分析の結果、季節、睡眠条件および時間の交互作用が有意 ( $p<0.01$ ) であった。多重比較の結果、下腿温浴終了前において、夏期の断眠時の上昇度が夏期通常睡眠時より有意に小さかった ( $p<0.05$ )。また、睡眠条件と時間の有意な交互作用 ( $p<0.01$ ) が認められ、夏期、冬期ともに、下腿温浴終了前において、断眠時の直腸温上昇が通常睡眠時より有意に小さくなる ( $p<0.05$ ) ことが認められた。

### 3-3-1-2. 平均皮膚温

図 3-2 に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、下腿温浴中 60 分間の平均皮膚温を示す。各値は被験者 8 名の平均値および SD である。

分散分析の結果、季節、睡眠条件および時間の交互作用が有意 ( $p<0.01$ ) であったが、多重比較では季節間および睡眠条件間における差異は認められなかった。一方、睡眠条件と時間の有意な交互作用 ( $p<0.01$ ) が認められ、夏期、冬期ともに、下腿温浴後半において、断眠時の平均皮膚温が通常睡眠時より有意に高く維持された ( $p<0.05$ )。

### 3-3-2. 発汗反応

#### 3-3-2-1. 全身総発汗量

図 3-3 に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、下腿温浴中 60 分間の全身総発汗量を示す。各値は被験者 8 名の平均値および SD である。分散分析の結果、睡眠条件の有意な主効果 ( $p<0.05$ ) が認められ、夏期、冬期ともに、断眠時の全

身総発汗量は通常睡眠時より有意に少なかった ( $p < 0.05$ ) ことが示された。しかしながら、季節差は認められなかった。

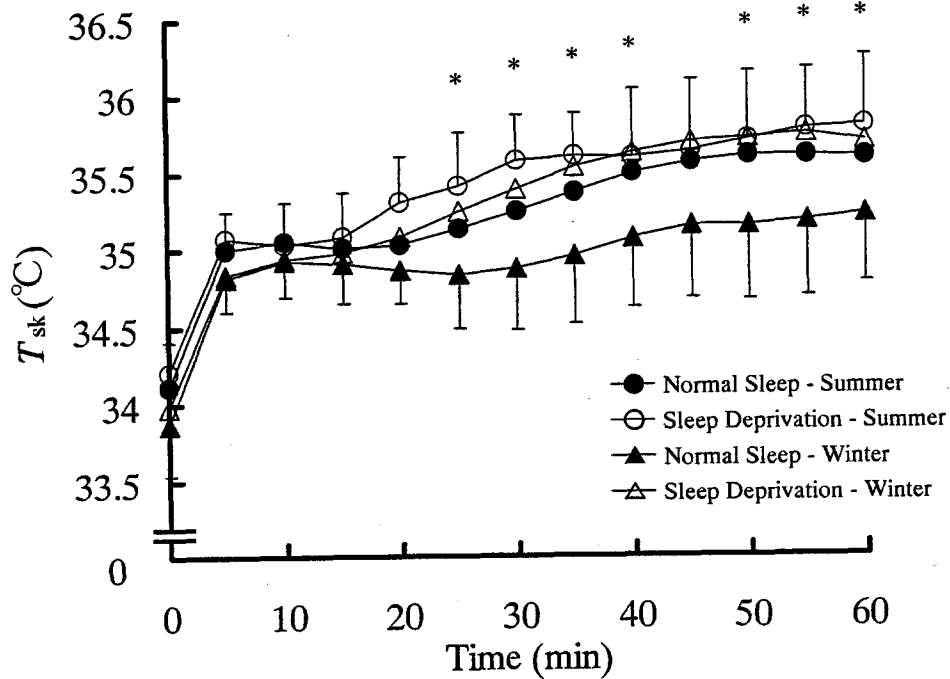


図 3-2 平均皮膚温変動

\*;  $p < 0.05$  断眠時と通常睡眠時の有意差

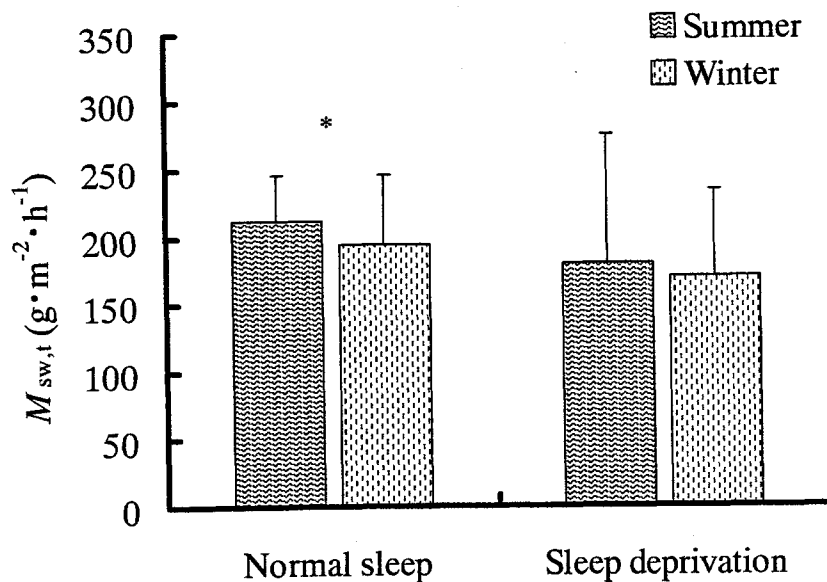


図 3-3 全身総発汗量

\*;  $p < 0.05$  断眠時と通常睡眠時の有意差

3-3-2-2. カプセル換気法による局所発汗量

図3-4に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、下腿温浴中60分間の背および前腕部発汗量を示す。各値は被験者8名の平均値およびSDである。

分散分析の結果、両部位ともに時間の主効果が有意であった ( $p < 0.01$ ) が、季節および睡眠条件に関する交互作用や差異は認められなかった。

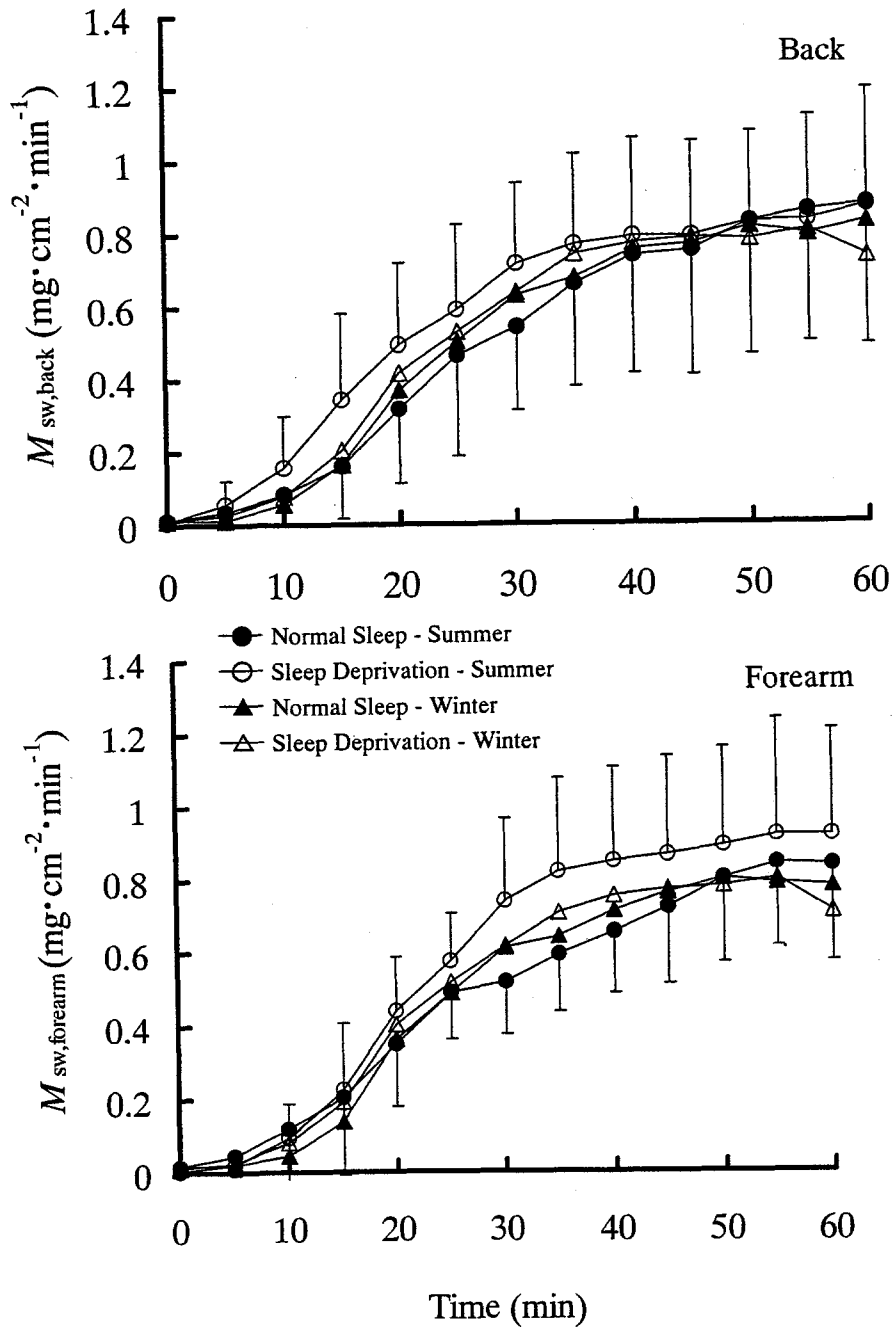


図3-4 背部発汗量および前腕部発汗量

3-3-2-3. 発汗潜時、発汗開始閾値温

図 3-5 に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、背部および前腕部における下腿温浴開始から発汗開始までの時間および発汗開始時の直腸温を示す。各値は被験者 8 名の平均値および SD である。

発汗開始時間の分散分析の結果、背部および前腕部ともに睡眠条件の有意な主効果 ( $p < 0.05$ ) が認められ、夏期、冬期ともに、通常睡眠時より断眠時の方が有意 ( $p < 0.05$ ) に早く発汗が開始された。

発汗開始閾値直腸温の分散分析の結果、背部および前腕部ともに季節間および睡眠条件間に差異は認められなかった。

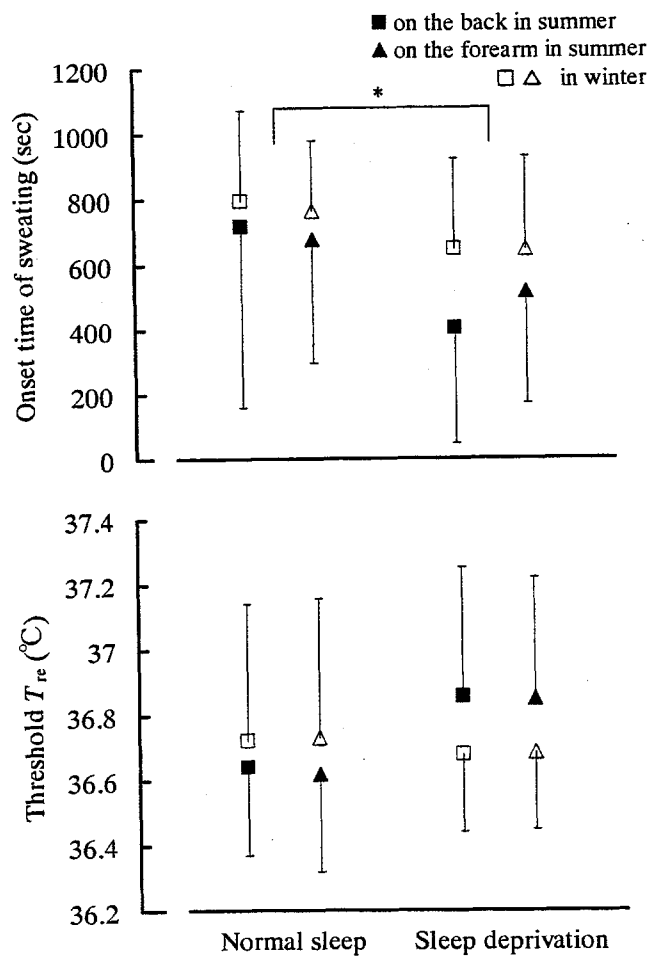


図 3-5 発汗開始時間および発汗開始閾値直腸温

\*;  $p < 0.05$  断眠時と通常睡眠時の有意差

### 3-3-3. 背部および前腕部皮膚血管反応

図 3-6 に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、下腿温浴 60 分間の背部および前腕部における皮膚血管血流量を示す。各値は被験者 8 名の平均値および SD である。

分散分析の結果、両部位ともに、睡眠条件と時間の有意な交互作用 ( $p < 0.05$ ) が認められた。多重比較による睡眠条件間の有意な差は認められなかったが、下腿温浴開始から前半において、夏期、冬期ともに、断眠時の血流量は通常睡眠時よりも高くなる傾向がみられた。

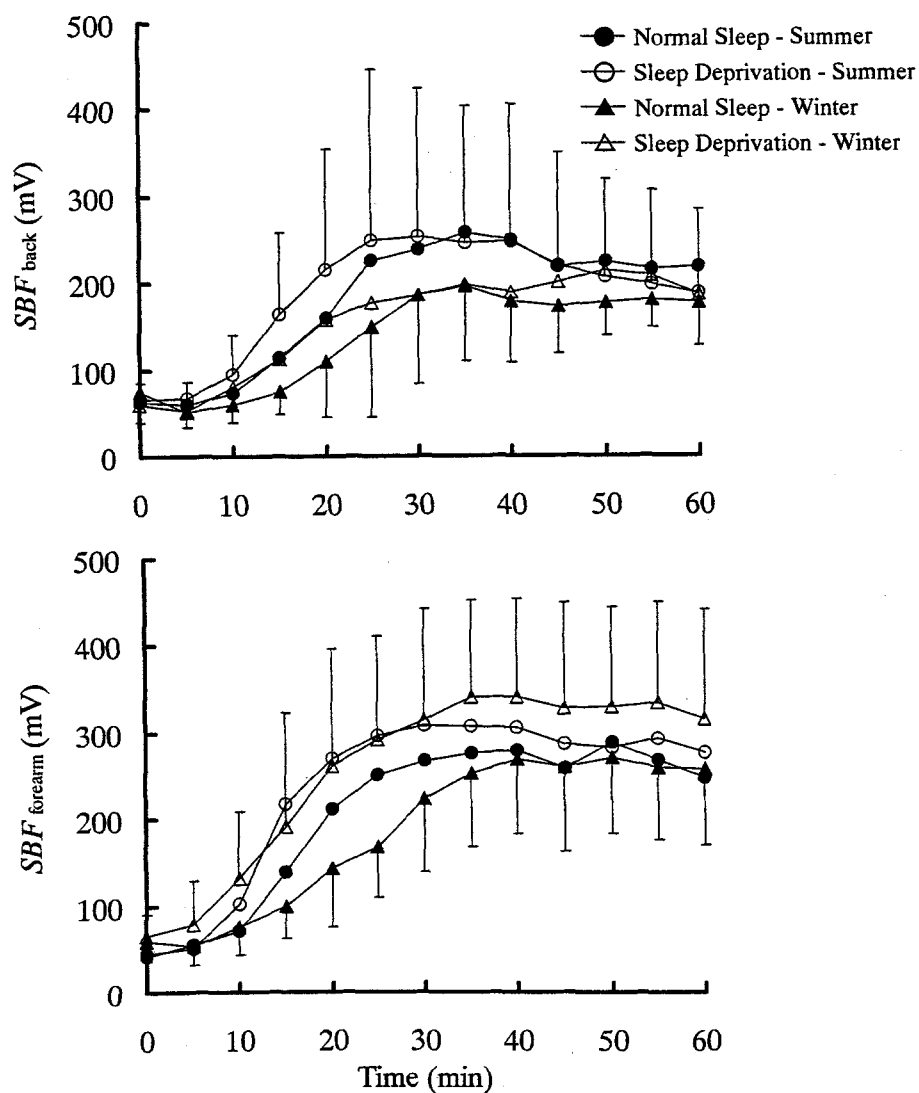


図 3-6 背部および前腕部皮膚血管血流量



### 3-3-4. 産熱量

図 3-7 に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、下腿温浴終了直前の産熱量を示す。各値は被験者 8 名の平均値および SD である。

分散分析の結果、季節間および睡眠条件間に差異は認められなかった。

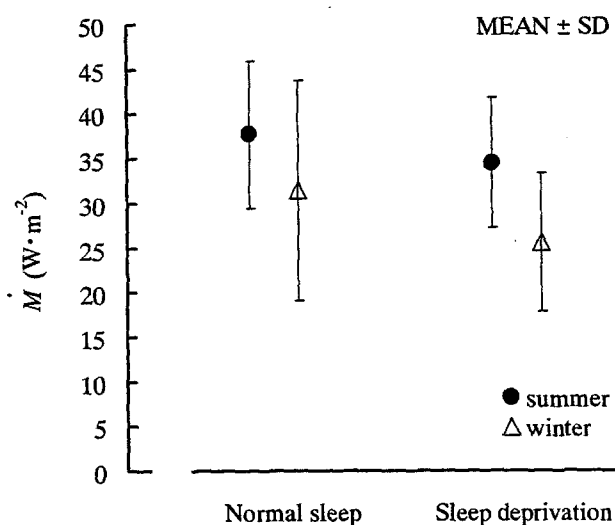


図 3-7 産熱量

### 3-3-5. 主観評価

図 3-8 に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、30°C暑熱室入室から 10 分の安静、その後の下腿温浴 60 分間の全身温冷感および温熱的不快感の申告を示す。各値は被験者 8 名の平均値である。

分散分析の結果、両申告ともに、時間の有意な主効果 ( $p < 0.01$ ) が認められたが、その他季節間および睡眠条件間における差異は認められなかった。

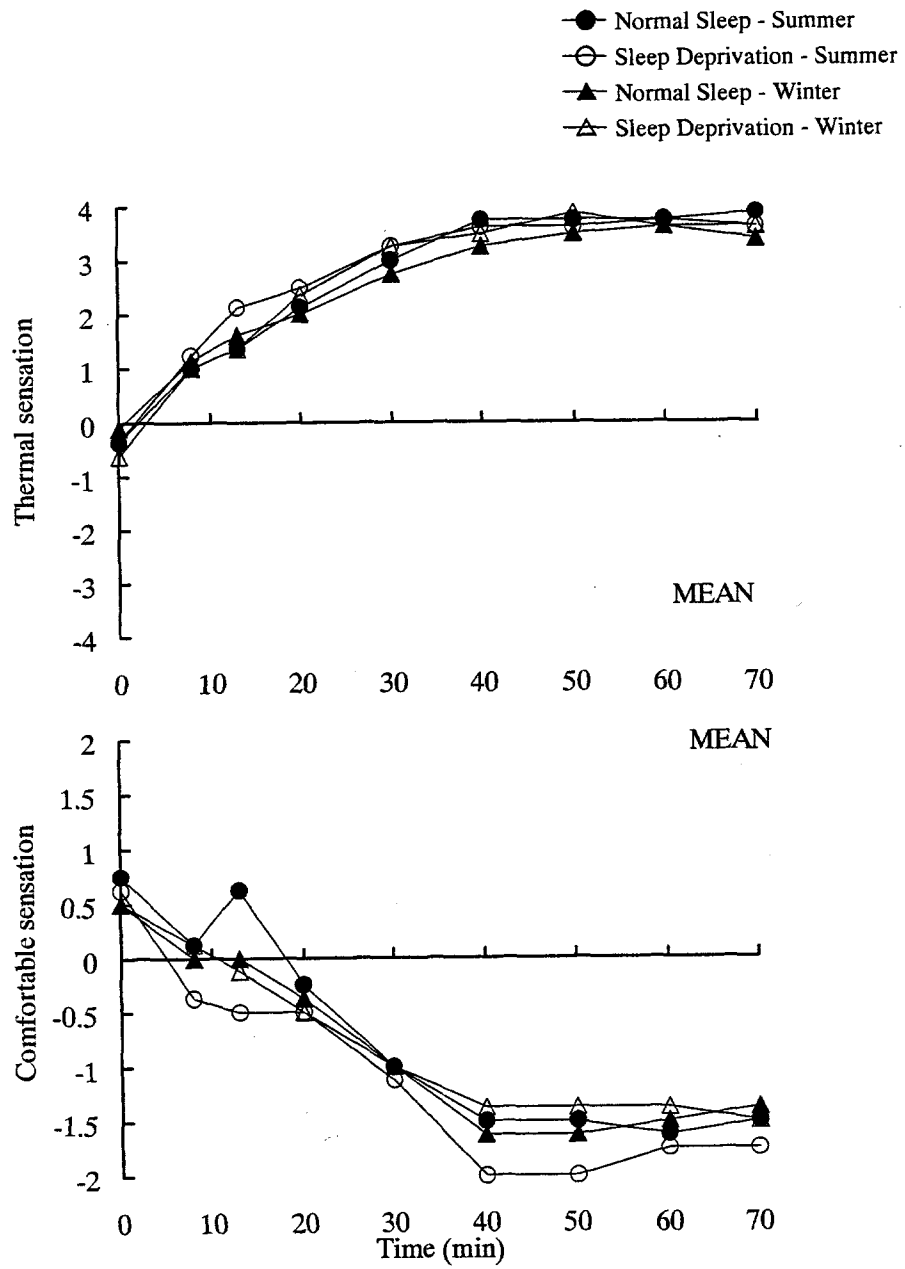


図 3-8 全身温冷感および温熱的不快感申告

### 3-3-6. 相関関係

#### 3-3-6-1. 直腸温変動に対する局所発汗量変動

図3-9に夏期通常睡眠(NS-s)、夏期断眠(SD-s)、冬期通常睡眠(NS-w)、冬期断眠(SD-w)時における、下腿温浴60分間の直腸温変動に対する、背部および前腕部発汗量変動の回帰直線を示す。回帰直線は、直腸温および発汗量の各時間での被験者8名の平均値を用い得られた。

回帰直線の有意差の検定を行った結果、傾きの差では、両部位ともに、通常睡眠時では季節差は認められなかったが、断眠時では夏期の傾きの方が冬期より有意に大きくなった( $p < 0.01$ )。また、冬期では睡眠条件間に差は認められなかったが、夏期では断眠時の傾きの方が通常睡眠時より有意に大きかった( $p < 0.05$ )。

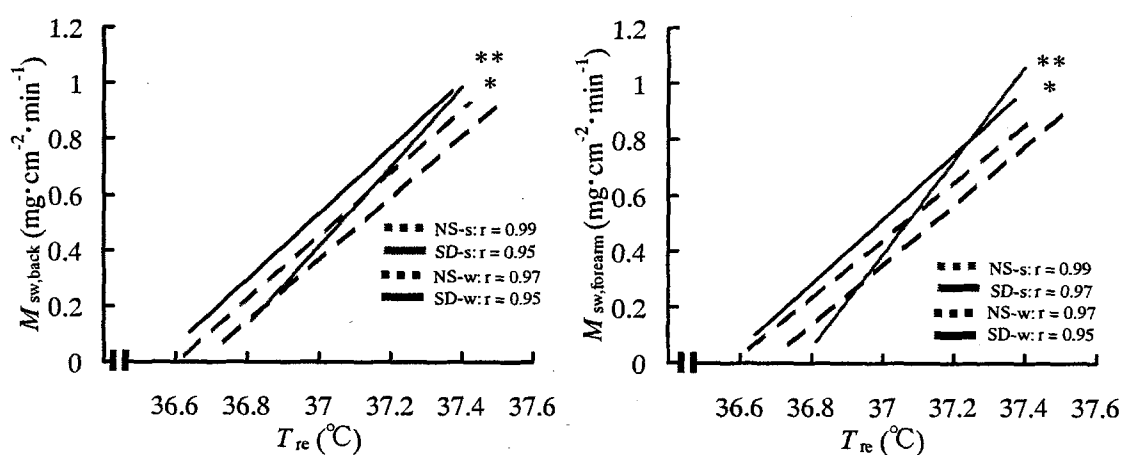


図3-9 直腸温変動に対する背部および前腕部発汗量変動の回帰直線

\*;  $p < 0.05$  夏期断眠時と夏期通常睡眠時の有意差

\*\*;  $p < 0.01$  夏期断眠時と冬期断眠時の有意差

3-3-6-2. 直腸温変動に対する皮膚血管血流量変動

図3-10に夏期および冬期における睡眠条件ごとの、下腿温浴60分間の直腸温変動に対する、背部および前腕部皮膚血管血流量変動の回帰直線を示す。回帰直線は、直腸温および血流量の各時間での被験者8名の平均値を用い得られた。

回帰直線の有意差の検定を行なった結果、傾きの差では、背部血流量においては、両睡眠条件ともに季節差は認められなかった。また、夏期において睡眠条件間に差異は認められなかったが、冬期において断眠時の傾きは通常睡眠時より大きくなる傾向 ( $p < 0.06$ ) を示した。前腕部皮膚血管血流量においては、両睡眠条件ともに季節差は認められなかった。また、夏期、冬期ともに、断眠時の傾きは通常睡眠時より大きくなり、夏期では有意な差 ( $p < 0.05$ ) が認められ、冬期はその傾向 ( $p < 0.06$ ) を示した。

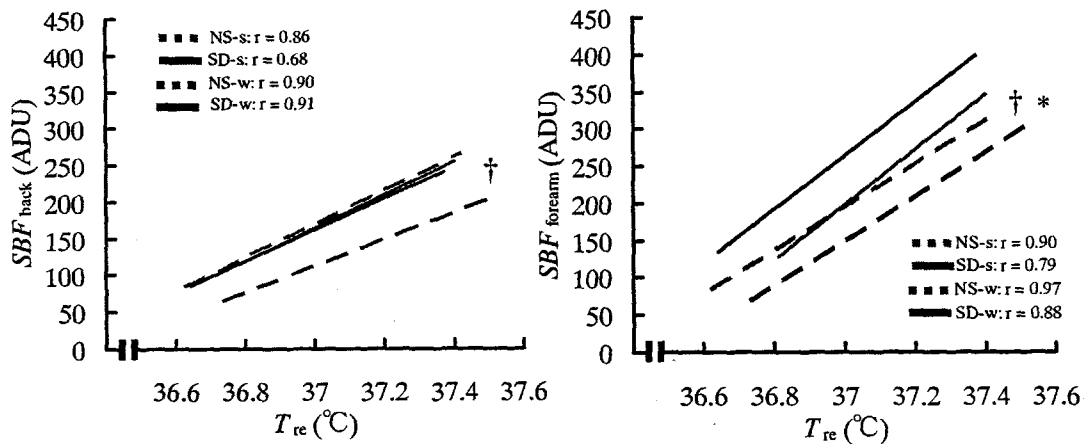


図3-10 直腸温変動に対する、背部、前腕部皮膚血管血流量変動の回帰直線

†;  $p < 0.1$  冬期断眠時と冬期通常睡眠時の有意差

\*;  $p < 0.05$  夏期断眠時と夏期通常睡眠時の有意差

### 3-4. 考察

#### 3-4-1. 温熱中立環境下における断眠の影響

温熱中立環境であると考えられる快適環境温度下において、過去の知見によれば、1夜程度の断眠後の深部温は通常睡眠と変わらない (Knauth et al. 1978、Martin et al. 1984、Sawka et al. 1984、Dewasmes et al. 1992、Savourey et al. 1994) というものから、低くなる (Naitoh et al. 1971、Kolka et al. 1988、Opstad et al. 1991、Landis et al. 1998) というものが多く、全体として深部温は低下傾向にあるといえるかもしれない。気温27°Cの前室にて午前7時過ぎに測定した本研究の結果は、通常睡眠時と24時間断眠時の直腸温に有意な差異は認められなかった (表3-3) ため、この傾向に一致すると考えられた。しかしながら、夏期断眠時の直腸温は通常睡眠よりも0.25°C程高い傾向にあった。Fiorica et al. (1968) は、断眠24時間目の早朝6時において、直腸温は通常睡眠時よりも0.4°C高く、34時間目の午後3時過ぎには程等しくなったことを報告している。このことは、断眠時間や測定時刻の不一致が、上述した先行研究の結果の不一致を説明するかもしれない。

直腸温の概日リズムは、少なくとも温的中性域では、熱産生の増減によるよりはむしろ熱放散が周期的に変化する結果であると報告されている (Aschoff et al. 1973)。また、躯幹部皮膚温は直腸温と同様のリズムを示す一方、四肢部皮膚温は反対のリズムを示し (Kräuchi et al. 1994)、前腕や手指部の皮膚血管血流量は夜間に顕著な増加を示す概日リズムを有し、これが深夜から早朝の直腸温低下に先行する (Smolander et al. 1991) ことから、直腸温の概日リズムは特に四肢部皮膚血管血流量の変化による熱放散の増減が関与していると考えられている。本研究で平均皮膚温は季節の主効果による夏期の高値を示したが (表 3-3)、これは夏期と冬期で皮膚血管収縮緊張が異なる (緑川 1981) ためであると考えら

れた。しかし、断眠による差異は平均皮膚温、四肢部皮膚温ともに認められず、熱放散に断眠の影響を受けなかったことが示唆された。前出の Fiorica et al. (1968) は、断眠時早朝で直腸温が高かったのは、断眠夜の活動レベルが上昇したためであるとした。したがって、熱産生が断眠時の直腸温リズムに関与していることが考えられるが、本実験における産熱量に変化はみとめられず(表3-3)、夏期断眠時の直腸温上昇傾向の熱収支による説明には十分でない。

血圧、脈拍には断眠、季節による有意な差異はみられなかった。断眠の影響に関する過去の知見によれば、全体として血圧に関しては変わらないとするものからやや上昇傾向、心拍数に関しては変化なしからやや減少の傾向(Ohga et al. 1985、神川ら 1992、小林 1998)がある。また、小林(1998)による心拍変動性からの断眠の影響の報告によれば、断眠時は交感神経と副交感神経がバランスを保ったままそれぞれの活動量を減少させていると示唆している。しかしながら、いずれにせよ断眠、季節による影響は小さいものであると考えられた。

#### 3-4-2. 下腿足浴中の体温調節反応における断眠の影響とその季節差

本研究では、室温30°C、湿度70%の環境下での60分間の下腿温浴に伴う体温調節反応の季節変動を通常睡眠後と24時間断眠後の朝8時前後で比較検討した。主な結果として、両季節共に通常睡眠時よりも断眠時において、体温では直腸温上昇度が抑制され(図3-1)、夏期の断眠時直腸温上昇は通常睡眠時よりも有意に小さくなった。また、両季節共に通常睡眠時よりも断眠時において、平均皮膚温は高く維持された(図3-2)。発汗反応では、両季節共に通常睡眠時よりも断眠時において、発汗開始時間は早くなり(図3-5)、全身総発汗量は少なくなった(図3-3)。さらに、皮膚血管血流量は通常睡眠時よりも断眠時の方が高くなったが、季節変動は認められなかった。また、局所発汗量(図3-4)、発汗閾値体温(図3-5)、産熱量(図3-8)、主観申告(図3-9)に関しても、季節および断眠の影響は認め

られなかった。

まず、本実験結果の季節の影響に関して、断眠時における体温調節反応の季節変動はほとんど認められなかった。暑熱暴露の繰り返しや、暑熱下での運動を続けると、負荷開始後すぐに発汗が起こるようになり（発汗閾値体温の低下）、発汗量が増大し、負荷中の体温上昇や心拍数の増加などの生体への負荷が次第に小さくなり、耐性が高くなる短期暑熱順化がおこる（Lind AR et al. 1963）。明瞭な四季が存在する日本では夏期に一過性の暑熱順化がみられ、これは短期暑熱順化の1つの型である考えられており、夏期と冬期に一定の温熱負荷を加えると短期暑熱順化と同様の体温調節反応が得られることが知られている（緑川 1981、Ihzuca et al. 1986、白石ら 1990、Hori et al. 1993、Inoue et al. 1995）。しかしながら、本実験においては、上述のような夏期における発汗潜時の短縮や発汗閾値体温の低下、総発汗量の増大といった暑熱順化による体温調節反応の傾向は通常睡眠時、断眠時ともに小さく、直腸温変化量以外の季節性の差異は認められなかった。その原因のひとつは測定時間の影響によると考えられた。体温調節には日周変動がみられることが知られており、暑熱刺激に対する体温調節反応は体温下降期に鋭敏になるといわれている（Hildebrandt 1974）。反対に、緑川（1981）によれば、朝9時から12時の体温上昇期にはその後の時間帯に比べて暑熱刺激に対する全身総発汗量は小さく、夏期と冬期の差も小さくなる。つまり本研究の実験実施時間帯では、体温調節反応への季節性の影響の出現が小さいと考えられた。

体温調節反応に及ぼす断眠の影響に関して、Sawka et al. (1983)、Kolka et al. (1988)、Dewasmes et al. (1992) による断眠後の運動時の体温調節に関する報告では、平均皮膚温は断眠時と通常睡眠時に差異はなかったとされ、本研究結果の断眠時の増加とは一致しなかった。しかし、Opstad et al. (1991) は同様に運動中であっても断眠時の皮膚温が睡眠時より高くなると報告し、本研究の結果と一致するものであった。また、寒冷暴露による平均皮膚温変動でも断眠時

に高く維持された (Sovourey et al. 1994) との報告もされている。加えて、本研究においては皮膚血流量も断眠時において高い傾向(図3-6)を示したことから、断眠によって乾性の熱放散反応の亢進が生じることが示唆された。

断眠による乾性熱放散反応の亢進の機序は明らかではない。また、睡眠の効果と体温調節反応の関係についても不明な点も多いが、睡眠(ノンレム睡眠)による体温調節への作用のひとつは入眠時に放熱して深部体温を下げることであり、もしくは逆に深部温の上昇を防ぐためにノンレム睡眠が出現するという見方がされる(井上 1989)。よって、その睡眠が断られたときには、夜間の深部体温を下げるための熱放散反応が睡眠時より亢進するのかもしれない。本研究の24時間断眠後の温熱中立環境下においては、平均皮膚温は断眠時と通常睡眠時とではほぼ違いはみられなかった(図3-2)。しかしながら、暑熱刺激に対する急激な血行動態の変化への反応性が断眠によって高められたために、下腿温浴中の断眠時平均皮膚温および皮膚血流量が高く維持され熱放散作用が亢進したのかもしれない。

放熱反応における睡眠そのものの影響のほかには、光環境が考えられる。睡眠は光環境と関わりが深く、直接的には眼球から脳への光刺激による覚醒作用の影響や、日長時間の季節変動の影響を受け、間接的には背景にある生体リズムや体温、自律神経への作用を介して光の影響を受ける(小山 1998、大川 1999)。本研究では日長時間は冬期より夏期で長く、また断眠時における実験前夜は数百lxの照度環境下にあったことが、体温調節反応への断眠の影響や季節性として関連があった可能性があったが、詳細に論じるには十分なデータは得られなかった。Aoki et al. (2001a) は、断眠中の異なる照度環境はその後の運動時の皮膚血管コンダクタンスに影響を及ぼさなかったと報告している。しかし、通常睡眠時との比較は明らかではなく、断眠及び季節性の体温調節への影響は光環境要因との関わりが深いと示唆され、さらなる研究には十分考慮されるべきである。



一般に暑熱適応による皮膚血流や発汗反応の亢進は反応発現閾値深部温の低下や深部温との相関勾配によく反映される (Nadel 1974、Roberts 1977)。相関勾配の日内変動を通常睡眠条件で42°C下腿温浴により観察した先行研究によれば、血流反応に関しては、深部体温最低期(朝)における皮膚血管拡張の感受性(相関勾配)がその他の時間帯に対して低下する (Aoki 1998a)。発汗反応に関しては、平均体温と汗の拍出頻度との関係における回帰直線の勾配に日内変動はみとめられていない (Aoki 1997) もの、やはり朝の深部体温最低期における勾配はその他の時間帯と比較して小さい傾向にあった。これは本項最初に述べた、朝には暑熱刺激への体温調節反応が小さく、また季節の影響も出現しにくいということを説明するものである。

また、他の実験においてAoki et al. (2001b) は、通常睡眠条件において深部体温最低期における血管拡張開始の深部体温閾値が低くなるのは能動的血管拡張システムの活動性の低下により、深部体温最低期における血管拡張の感受性(勾配)の低下は、皮膚血管収縮神経の活動性の低下によって生じると示唆している。本研究において、血流反応発現の閾値温度に差異は認められず、一定の傾向もみられなかったが、直腸温変動との勾配は夏期、冬期ともに断眠時が通常睡眠時より大きくなる傾向(図3-11)がみられた。つまりこれには、能動的血管拡張システムの活動性よりも皮膚血管収縮神経の活動性が関与し、皮膚血管収縮神経の抑制によって断眠時の熱放散作用が亢進したと示唆された。

同様の発汗反応の日内変動に関しては、朝の発汗発現閾値温度の低下は主に発汗中枢機構の活動性の低下 (Aoki 1997) であるといわれている。このことより、本研究において発汗発現閾値直腸温に差異がなかった(図3-5)ことは、季節や断眠は発汗中枢機構の活動性にはほとんど影響を及ぼさなかったということを示唆した。朝の発汗反応の感受性(勾配)に関する末梢要因については不明なことが多い。血流量の減少や血管拡張の抑制によって発汗量減少が引き起こされる (Elizond 1973、McCucheon 1998) といった局所性の発汗反応と血流反

応の連動性が知られている。本研究において発汗vs.直腸温の勾配が血流vs.直腸温の勾配と同様に夏期断眠後の朝において大きかった(図3-10)説明の一部には、この連動性の関与も考えられる。

一方で、本研究において通常睡眠群には実験前夜からおよそ9時間の間の水分摂取が禁止され、断眠時より体液量が少なくなっていたことが考えられ、それが本実験の結果に影響を与えていたかもしれない。体液量の減少は熱放散による体温調節を抑制し、体温上昇を招くことが知られている(Morimoto 1990)。従って、通常睡眠条件における熱放散の抑制が起こっていた可能性も考えられ、より厳密な検討には、断眠実験における体温調節反応への脱水およびそれに伴う血漿浸透圧の上昇の影響を考慮する必要があるかもしれない。

全身総発汗量は、両季節ともに通常睡眠時より断眠時において減少し(図3-3)、また発汗開始時間は断眠時の方が短縮した(図3-5)。つまり断眠によって発汗感受性は高くなるものの総発汗量は小さくなった。過去の知見とは、断眠時の発汗量減少は夏期の環境温28°C下での運動によるSawka et al. (1983)の結果と一致するものであるが、Dewasmes et al. (1992)による断眠時の冬期における環境温28°C下での運動による発汗量増大には一致しなかった。睡眠時には体温を下げるために放熱を促進し発汗が促される(井上 1989)。したがって、本研究では、その睡眠が断られたことで、発汗の感受性は高くなり放熱促進の指向性を示すが、発汗反応では抑制が引き起こされた可能性があった。また、本実験における環境温度は皮膚温よりも低い30°Cであり、乾性の熱放散に有利であることに加え、断眠による乾性放熱の亢進が生じたことから、断眠時の全身総発汗量は最小限に留められたと考えられた。

本項の最初に述べたとおり、本実験において断眠時における体温調節反応各々の季節変動は小さいものであったが、夏期の断眠時において通常睡眠時より有意に直腸温上昇が抑制されたように、断眠の影響は明らかに冬期より夏期の方が大きかった。本実験結果の特徴は、断眠による乾性の熱放散反応の亢進

であった。また、これは皮膚血管収縮神経の抑制に起因すると考えられた。1章図1-9に示したとおり、夏期は冬期より交感神経緊張が低く適応している。したがって、本研究において、断眠による皮膚血管収縮神経緊張の抑制は、冬期より夏期にあらわれやすかったものと考えられた。

### 3-4-3. 結論

通常睡眠後および24時間断眠後において、気温30°C環境下で60分間の42°C下腿温浴を行なった結果の要約を表3-4に示す。

表3-4 結果一覧

Measurements	Effect of sleep deprivation	Seasonal effect
$\Delta T_{re}$	↓	S>W
$T_{sk}$	↑	—
$M_{sw, t}$	↓	—
$M_{sw, local}$	—	—
Onset time of sweating	↓	—
Threshold $T_{re}$ for sweating	—	—
$SBF$	↑	—

青年男子の体温調節反応は、断眠による皮膚血管収縮神経の抑制が起因し、乾性の熱放散反応が亢進されたことが示唆された。したがって、断眠時には血流反応による熱放散が体温調節に貢献し、断眠時の全身総発汗量が少なかったにも関わらず、断眠時の直腸温上昇が抑制され、特に夏期において通常睡眠時

より有意に直腸温上昇が小さかった。通常睡眠後、24時間断眠後における青年男子の体温調節の季節変動は、暑熱反応の日内変動の影響により、少なくとも朝の時間帯では小さかったと考えられた。また、断眠後の体温調節反応に関するさらなる研究には、体温調節反応の概日リズムや季節性を考慮すべきであることが明らかになった。