

# 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1章  
序論

## 第1章

### 序論

#### 1-1. 序言

近年の夏期最高気温の上昇やヒートアイランド現象などにより、室内と屋外の気温差は年を追うごとに大きくなってきている。室内では、冷房環境下で長時間過ごすことが多くなるために、能動汗腺が冷却効果で機能低下を起こし (Ogawa 1982)、体温調節能が低下することで、身体不調の訴えや、深刻な冷えといった冷房病を引き起こす。さらには室内と屋外の出入り時の体温調節がうまく行なわれず、症状がますます悪化するというような、気候の変化と人工環境の変化の悪循環による弊害は、昨今ますます問題視されている (中井 2003)。

児童に関して、その正常体温は幼児期、小児期を通じて成人より  $0.5^{\circ}\text{C}$  ほど高い (Drinkwater 1979) といわれてきたが、近年では  $35^{\circ}\text{C}$  台の体温を示す児童が増えており、日常生活が不活発なこと、自然環境にさらされず快適な人工環境に居住する時間が長いことなどによる適応能の退行の可能性が指摘されている (朝山 1995)。また、自律神経系の機能が低い子供が増え、1950年代の調査に比べ、体温や血圧の調節能の低い子供は数倍に増えているという (東 1999)。さらに、最近の児童の特徴として、産熱能力も放熱能力も低くなっているとの指摘もある (正木 1999)。なお、『子どものからだと心白書'98』(1998)のこれらの報告に国連・子どもの権利委員会は注目、神経系の発達不全が起こっていることに懸念を表明し、日本政府に対策をするよう勧告が出されている。これらの見解に関連して、Tochihara et al. (1995) は、能動汗腺数を決定するとされ

る乳幼児期の夏期の冷房使用群と未使用群にわけて、6~8歳の児童男女の暑熱耐性を比較しているが、明確な差異は認められなかった。日本では、文部科学省が公立小・中・高校の普通教室の冷房化を2003年度から実施することを決めた。温暖化やヒートアイランド現象などで、梅雨の時期から九月の残暑まで30℃を越す日が続く一方、自動車の排ガスや騒音で窓を開けられない学校も少なくない。また2002年度から始まった学校週五日制により、夏休みの補習など学校を利用する機会も多くなったことなどが理由とされている。しかしながら、体温調節機能や自律神経は子供の時に寒さ、暑さを体験し、汗をかくことで発達するといえ、これは明らかに子供の身体機能の成長への懸念を含む問題であるといえる。

生活中的温熱環境の変化のみならず、現代の多様化した生活スタイルや産業における、生活リズムの乱れや苛酷な労働環境も体温調節機能へ影響をきたし、深刻な健康障害をも引き起こしかねない。暑熱環境の中で重労働を強いられる消防士の体温調節反応への影響はもとより、少しでも負担を軽減するための消防服の評価や改善、工夫などが多く研究されている (Ftaiti et al. 2001、Cadarette et al. 2002 など)。また、Ozaki et al. (2001) は、夜間冷凍倉庫内での労働環境を想定し、午前4時と午後4時における気温-25℃環境下での体温調節反応と手動作業の検討をしている。夜間労働に関する研究は多くあり、生体機能やサーカディアンリズムの昼夜逆転生活への順応性、同期性 (Knauth 1978、万木 1980 など) といったことが解明されてきた。

近年においては、サーカディアンリズムの乱れという研究主題としても発展し、労働(運動)、食事(栄養)、睡眠環境(休養)といった人の基本生活要因から温熱、照明、騒音、気候などの環境要因に関して、また対象も労働者、就学者、高齢者、児童、陸上競技者、海外旅行者と、現代の複雑化する生活環境において健康な生活を維持するうえで意味のある研究の1つである。同時に、急変する生活環境に対する生体の対処やその順応能に与える弊害や影響が、将

来的な観測のもとにも、少なからず出てくるであろうと考えられ、この主題の研究はそれらの危惧への警鐘ともなりえ、絶えず続けられなければならない。

## 1-2. 季節や気象とヒトに関する研究の背景

### 1-2-1. 季節や気象とヒトの関わりと研究的発展

季節や気象が人体の生理現象や疾病に影響を与えることは、古くから知られていたことである。古代ギリシャの時代、医学の元祖といわれるヒポクラテスも、「空気、水、場所について」(小川 1963)の冒頭において“正しい仕方で医学にたずさわろうとする者はまずそれぞれの季節がどのような影響を及ぼすかを考察しなければならない。各季節の間には大きな違いがあると共に、一つの季節のうちにも様々な変化がある。”と記載している。このように古くから人間を季節や気象との関係から客観的に観察、記述して捉えようとする概念があった。

ルネッサンス期以降、徐々に科学的発見や研究が進んだものの、いわゆる気象医学の分野におけるめざましい発展は難しかった。これは科学的アプローチが比較的困難であった季節や気象と医学という複雑な二つの系を結びつける方法論上の問題があったこと、また、医学的探求の主要な関心は、人体の構造・機能の解明と疾病の特異的原因の追求にあって、修飾的因子としての季節、気象条件は二義的にしか扱われなかったためと考えられる(菊地 1980)。

20世紀に入って、この主題についての研究は次第に発展した。アメリカ、イギリス、ドイツ、カナダなどでは、気候風土への適応が直接問題となる戦場が世界中に拡大した第二次世界大戦を契機としてこの研究が一段とさかんとした。その中でも、De Rudder (1952)は気象生物学ないし気象医学の方向性と方法を整理し、この分野の科学的体系化、またその後の進展に大きく貢献したといえる。そして1950年以降には、医学、気象学、生物学、農学などの諸分野が、ひろく生物体及びその機能と環境としての季節、気象との関連を研究する包括

的な学問領域となり Medical Climatology や Human Bioclimatology が体系づけられ、より広い基盤での研究が現在に至るまで続けられている。

今や人間は気象の悪条件を科学的に克服して、極地に生活し、月に着陸し、高山の頂上を極め、空中を飛び、地下に広がり、水中にも住もうとしている。かつて、医学の進歩のめざましい中、季節や気象を含む環境が人間に与える影響の研究はなおざりにされてきた。しかしこの第二義性こそが、現代において、大いに重視されるべき点であるといえる。臨床領域において各種疾病の原因が見出され治療法が確立されても、その疾病に罹患し、発病に赴くその過程に一貫して働くのは、季節や気象条件を含む環境の作用である。また、たとえ自然気象から隔絶された快適な人工環境下に人体がおかれようとも、そこには固有の微気象の影響が働く。さらに一つの生理現象の原因、機序をより直接的に説明できる知識が得られ、それを応用した技術上の進歩がとげられても、常にこれらを修飾する環境の一環としての季節、気象条件の作用が根底に存在し続けるものであることに、季節や気象とヒトに関する研究の大きな意義を見出すことができると考えられる。

#### 1-2-2. 日本における温熱生理学から気候適応研究への歴史

日本における温熱生理学研究の開拓者は久野寧である。久野は発汗の生理について詳しい研究を行なったが、それは発汗だけではなく必然的に暑熱気候への適応の問題に繋がり発展していった。一方、久野の研究に刺激を受け、正路倫之助が人体の寒さへの適応に関心を持ち、当時、満州の極寒の中、緒方維弘とともに研究をした。かくして第2次世界大戦後、日本においてさかんとなった共同研究の気運の中、久野を中心として“季節変動に伴う生理的反応”に関する研究班は長くわが国の生理学者、衛生学者の共同によって存続して、ひろくかつ深くこの研究が推進された（吉村 1977）。

季節変動に関わる研究の発展には、日本のおかれた立地条件が大きく関係していたと考えられる。日本はアジア大陸の東岸に沿って、南北に長くのびた島国である。したがって大陸から下ってくる冷たい気団と大洋から上がってくる気団が常に相衝突して、気候の激変を生ずるのみならず、南北に長くのびる島国であるために、1年にわたり亜寒帯に近い気候と亜熱帯に近い気候が、動植物やヒトの生活に影響を与えることになるのである。したがって、暑さ寒さの生理的影響に関する研究も大いに発展し、気候生理として体系づけられた学問がまとめられ、世界に向け発表されることとなったのである (Kuno 1956、Yoshimura et al. 1960、Itoh et al. 1972)。1965年、国際生物学事業計画 IBP が発足し、わが国の気候生理の研究や体力医学の研究は、さらに、“ヒトの適応能”の研究として世界的規模において拡大されて、地球上における生物生産の問題との関連において研究されることとなり、日本の従来 of 気候生理の研究はこれに大きい推進力を与える結果となった (吉村 1977)。これらの研究は、久野一門を始めとして、全国の大学において気候の生理衛生に関心を寄せる諸学者がこの共同研究に参加し、あるいは独自の立場でその研究を発展させ、世界を日本がリードしてきたといえる。



### 1-3. 体温調節の季節変動

ヒトはその優れた体温調節能によって、生活環境温度の広い範囲の変動に対しても体温の恒常性を維持することができる。これは人類が、その長い進化の過程で遭遇した環境温度の多様な変化に対して本来備わっている体温調節能が適応的に増進、変化、あるいは修飾されその結果、高度の調節能力を得るに至ったゆえであると考えられる。寒暑に対する適応には、長年月多数世代を経て遺伝形質の変化にまで至ったもの、出生－生長－老化に伴う一世代を単位として消長するもの、1年を周期とする夏冬の季節変化、さらに短期間の生活環境温度の変化に応じるものなどの多様な型が含まれる。いずれにしても、現在ある適応の状態は決して固定されたものではなく常に流動的で、新たな環境に対しては新たな適応が成り立ち、過ぎ去った環境に対しては脱適応が行なわれている。ヒトが今後予想される複雑な環境変化の中で健康に生存し続けるためには、その環境適応能を積極的に開発することが求められる。

気候変化に対する適応とは、体温調節機能の体制が変化して、新しい気候中においても容易にヒトを快適状態におくように変化されていくことを意味する(吉村 1977)。以下では暑熱環境下での産熱過程と放熱過程における適応現象について、特に放熱反応にみられる季節性の変動を詳しく述べていく。

#### 1-3-1. 産熱過程にあらわれる適応現象

暑熱環境では日常の行動量を減らし、代謝を抑えて産熱量を少なくするような行動性調節が行なわれるが、安静時代謝そのものが暑熱適応によって低下するかどうかは問題である。この点に関しての有力な報告に基礎代謝(BMR)の季節変動がある。カナダ人では個人のBMRは年間を通じて変わらない

(Yoshimura et al. 1966)が、図1-1に示すように日本人での測定では夏期に低く、冬期は高い季節変動が認められた(緒方 1973)。ただしこの変動は食生活によって著しく影響されることがその後明らかにされ、近年のように日本人の糖質食が減り脂肪摂取が増すにつれてその年間変動は消失しつつあるという。この説明として吉村(1977)は、甲状腺機能は夏低く、冬高い季節変動を示し基礎代謝はこれに関係するが、一方高脂質食は甲状腺機能を亢進する作用があるためにこのような食生活では夏期にみられるべき甲状腺機能低下、さらにそれによる基礎代謝の低下が隠蔽され認められなくなったとした。高温環境飼育のネズミで高糖食をさせると基礎代謝の低下がみられる(吉村 1969)。緒方(1973)は夏期に基礎代謝の低下するのはこの季節には高糖質食に傾くことが原因であり、高脂質食生活で基礎代謝の季節変動が減少するのは夏期の代謝低下が抑制されることに起因するという。いずれにしても高糖質食は暑熱に適応するには有利であると考えられている。しかし、暑熱に対する代謝低下反応は食質の関係から論じられることが多く、この条件を離れて果たしてヒトで生理的適応現象として暑熱下での代謝低下があるかどうかはまだ確かめられていない。図1-2に示すとおり、基礎代謝と居住地域の気温との間には逆相関的關係がみられることが報告されている(Hori et al. 1977)。高温地域で基礎代謝の低いことは体熱平衡の上で有利であるが、この關係が真の生理的適応か、あるいは上述した食質その他の条件の差によるのかどうかなお検討を要する問題である。

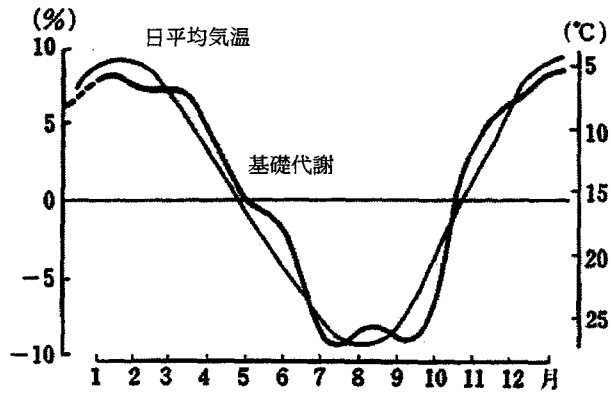


図 1-1 基礎代謝の季節変動

1949～1952年にわたる熊本市居住男女15名の平均（緒方 1973より）

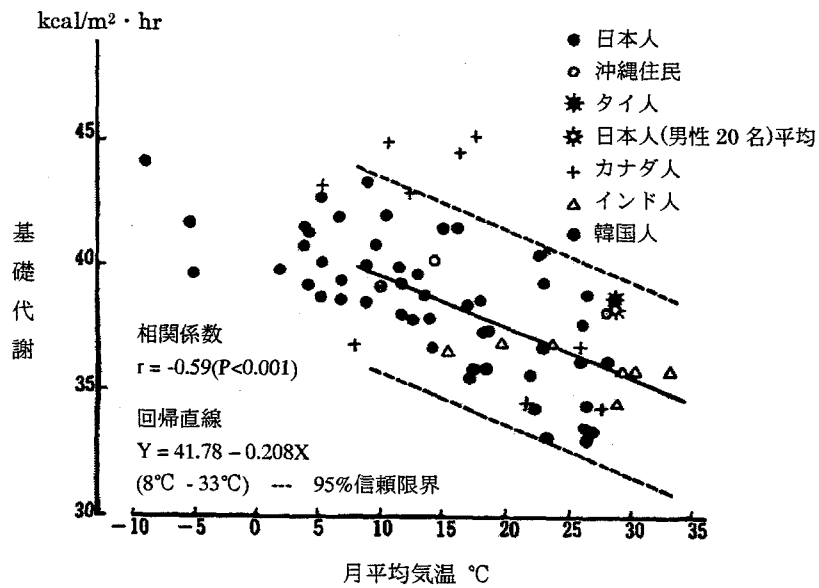


図 1-2 気温と基礎代謝（Hori et al. 1977より）

## 1-3-2. 放熱過程にあらわれる適応現象

## 1-3-2-1. 発汗

発汗は暑熱刺激に対して、汗1 mlが皮膚面上で蒸発すると水の気化熱に相当する0.58kcalの体熱を放散するきわめて有力な放熱手段である。したがって発汗機能の優劣は暑熱下の体温調節と密接に関係し、事実、暑熱や季節に対する適応は発汗機能において最も明らかに認められる。久野（1971）によれば、発汗しやすい性質を“発汗性”と表現し、“発汗性”には末梢汗腺の分泌能力、発汗中枢の興奮性、ならびに発汗器官の微小環境条件（血液性状その他）の要因が含まれ、これを総合した“発汗性”は個人的にもまた環境的および身体的要因（生理的および病的原因）によって変動するものとされている。

人の汗腺は出生時すでに分泌能力を持つが、生後の環境刺激によりなお発達余地がたぶんに残されている。発汗機能に大きく関係する能動汗腺（実際に分泌機能を持つ汗腺）の数は生後もなお増加し、汗腺の能動化は出生に続くおよそ2~3年以内に与えられた発汗刺激の多寡によって決まる。表1-1にみられるように、日本内地の日本人では能動汗腺数は平均約228万であるが、この日本人がタイ国に長く住み着いてもやはり能動汗腺数にはあまり違いはない。し

表1-1 各種民族の全身の能動汗腺数（久野 1956より）

	被験者数	最小	——	最大	平均
アイヌ人	12	106.9万		199.3万	144.3万
ロシア人	6	163.6		213.7	188.6
日本人（内地）	11	178.1		275.6	228.2
日本人（タイ国）	8	149.7		269.2	229.3
中国人（台湾）	11	178.3		341.5	241.5
タイ人	9	174.2		312.1	242.2
フィリッピン人	10	264.2		306.2	280.0
日本人二世 （フィリッピン）	15	258.9		402.6	277.8

かし、フィリピンに生まれた日本人の二世についてみると、能動汗腺の数はフィリピン人と同様になり日本生まれの日本人よりも多い (Kuno 1956)。

暑熱環境は汗腺の能動化以外にまた汗の分泌機序にも暑熱および季節順化性の変化を起こす。千早 (1954) は同一の被験者について、夏 (8月) と冬 (2月) の二つの時期に裸体で 30°Cの室内 (湿度 70%) にて、約 30 分間静止させたのちに被験者の両下脚を 45°Cの湯に浸して、胸部につけたセロファンカプセルより蒸発する水分を 5 分間ずつ集めて秤量する久野法によって、発汗が時間的どのような経過で起こるかを調べた。その結果が図 1-3 である。冬は足を湯につけてから 20 分ほどで発汗が顕著になるにもかかわらず、夏は足を湯につけると同時に著明な発汗反射が現れた。その最高発汗の高さは夏のほうがはるかに高く、足浸漬 60 分間に汗の総量をその発汗前後の体重変化より求めると、冬は 930 gであったのに対し、夏は 1240 gであった。つまり夏の方が非常に汗をかきやすくなっていることが明らかとされた (Kuno 1934)。これは夏期の高温度への適応にもとづくことは、Kuno (1934) によっても指摘されてはいるが、森嶋 (1964) は外気温月平均 5°Cの冬期に、被験者を温度 30°C、湿度 70%の部屋に 3 週間滞在させて、この間 1 週間ごとに上記の千早と同様な発汗試験を行なわせた。その結果、図 1-4 の上部に示したように冬期にまだ高温室に入らない対照期には、図の左上の曲線にみるように発汗反射が顕著に起こるようになるには約 20 分も要するが、高温室に入って滞在 3 週間目になると足を湯に漬けるのと同時に発汗するようになり、またその最高発汗時の汗量も冬期は胸部 5 分間に 60mg 程度のものであったのが、高温室 3 週間目には 140mg 以上になった。従って、前出の Kuno や千早が報告した発汗反射の夏期における亢進は、発汗反射の高温適応の結果であるといえる。その後、Ohara (1972) は夏期と冬期において 100 名を超える被験者に対し、気温 30°C室内で 43°C下腿温浴の一定暑熱刺激を与え、それに対する発汗量を測っている (図 1-5)。その結果、前述の傾向と同様に、夏期には汗量が増加、冬期は逆に減少する季節変動が確認された。

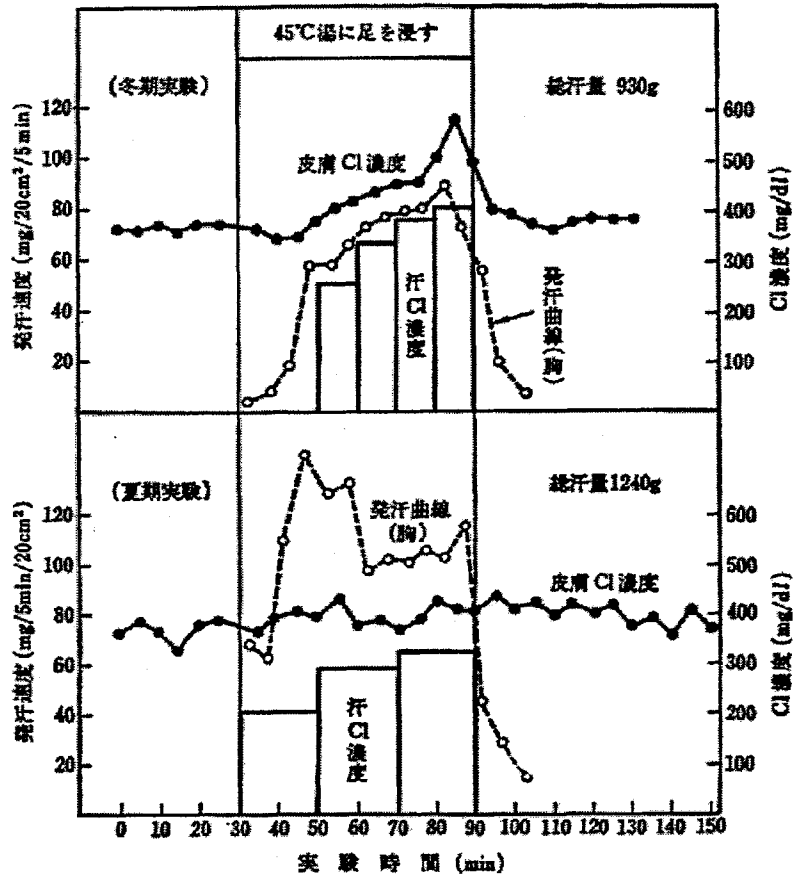


図1-3 夏冬の発汗反射比較 (千早 1954より)

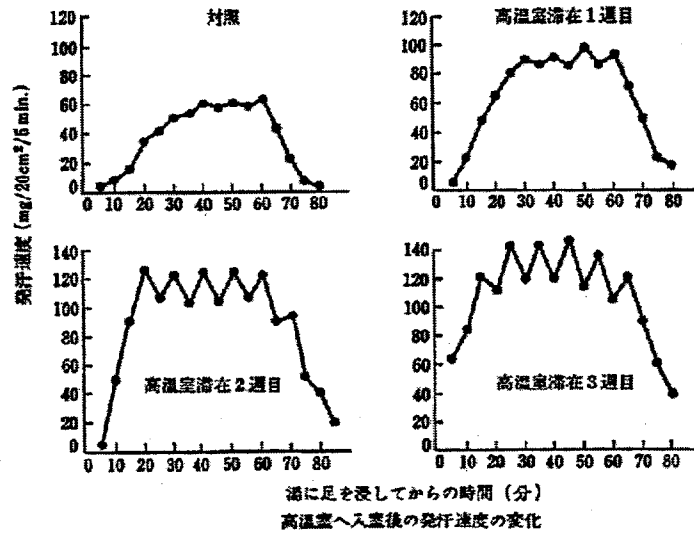


図1-4 高温適応による発汗反射と汗の塩分濃度の変化 (森嶋 1964より)

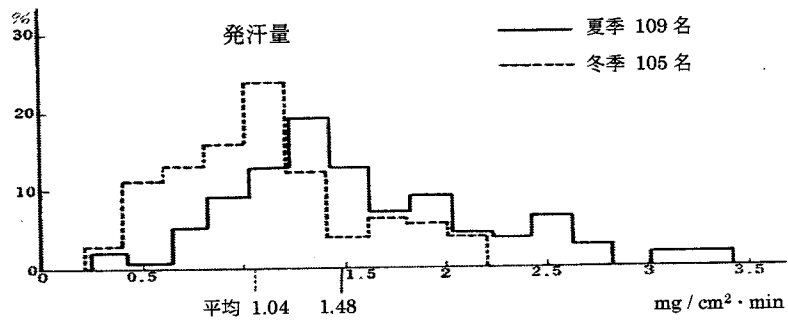


図1-5 発汗量の季節差 (Ohara 1972より)

## 1-3-2-2. 皮膚血管反応

気候変化に伴って皮膚血流が変化して被殻と核心とが生じ (Aschoff 1960、図 1-7)、冬期には身体内部深くに血液循環が限局されて、皮膚面にはほとんど血流のない状態を生じる。そのために皮膚温は低下し身体表面よりの輻射、伝導、対流による放熱はもちろん、発汗も現れにくくなり、放熱能を大いに制限するが、このような身体表面血流の季節変動を求める実験的証拠として緒方 (1973) は次のような実験結果を報告している。図 1-8 に示すように 3 人の被験者について夏 (8 月)、秋 (10 月)、冬 (1 月) の 3 つの時期にわたり深部体温として直腸温を、さらに皮膚表面から 1cm の皮下層と皮膚表面温度を末梢温として、これらの測定を乾球温度 26~27°C、湿球温度 19~20°C の部屋に全裸体で 1 時間安静に仰臥させた状態で行なった。その結果、身体各部の皮膚表面温はいずれも夏より秋冬に低下し、また皮下温も同様に冬に下がっている。また、直腸温はほとんど変化なく、むしろ冬期のほうが夏期より高い傾向さえあった。これは、先に示した図 1-7 の被殻と中心核の関係が夏から冬にかけて変わることを示す。

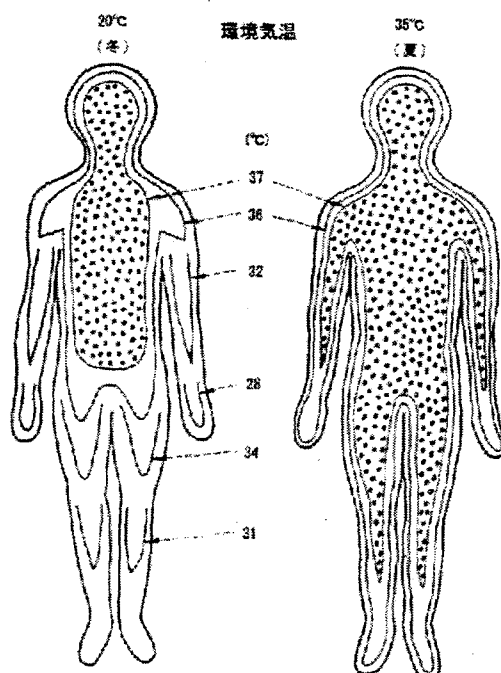


図1-7 冬と夏の体内温度分布の比較 (Aschoff 1960より改変)



このような末梢血流の季節変化は気候にもとづく身体表面の血管の緊張が、四季によって異なる結果である。原島（1953）は血液中の K、Ca 濃度や好酸球、中性白血球、リンパ球等の各項目を、1年を通じ測定し、これについて自律神経緊張にもとづく偏差値を求め、これを総合してその各個人の月別の自律神経緊張変動を調べた。また多数の被験者についての月平均値について、同様な偏差の変動値を求めたところ、図 1-9 を得た。図中の吉矢法とは、これを簡易化した方法による月変動値である。いずれの場合にも、夏期は副交感神経緊張が高まり、冬期には交感神経緊張が高まっている。また、広川ら（1969）は東京都内の研究室に勤務する男女9名について、3ヵ月ごとにその1日全尿中に排泄され

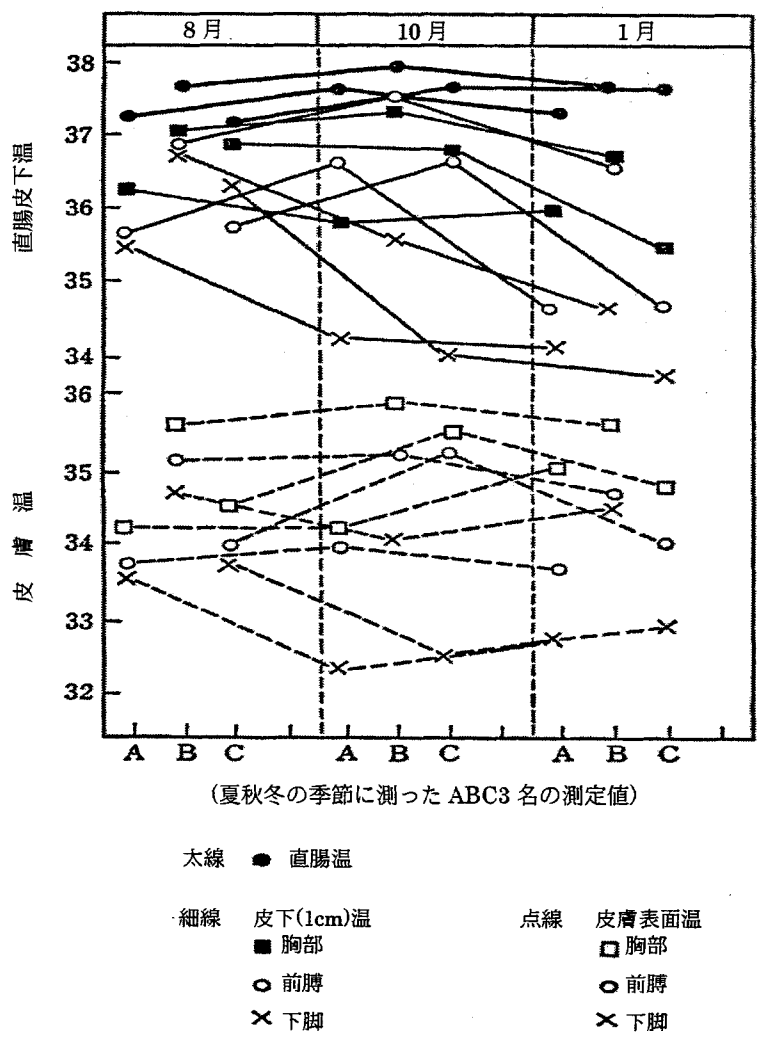


図1-8 皮膚温度勾配の季節変動（緒方 1973より）

るアドレナリン量を測定した。この結果からも冬のアドレナリン分泌が高く、交感神経緊張に傾くという原島らの報告によく一致している。交感神経は皮膚血管緊張を高める血管神経であるから、皮膚血流の季節変動の理由はこのような血管運動交感神経の緊張の変化によるものであり、つまりは気候の変化に自律神経機能や内分泌機能が適応した結果である。

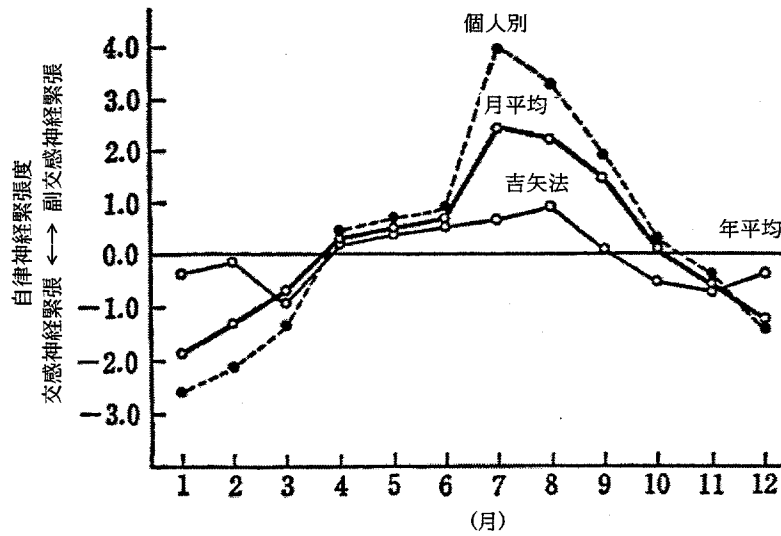


図1-9 自律神経緊張の季節変動 (原島 1953より)

#### 1-4. 暑熱環境下における体温調節反応の季節変動を修飾する要因

適応がどのような形であられるかは寒暑負荷の強度、期間及びその内容(温度以外のストレスとの組み合わせ)、年齢、性、生活慣習、さらに現在までの適応の経過(遺伝的適応の影響)などの複雑な要因により多様である。本研究では、以下に挙げる修飾因子、年齢(児童と青年)、性(男女差)、断眠に関して、暑熱刺激に対する体温調節能の適応性、季節性変化の具体面、問題点を呈示して述べる。

##### 1-4-1. 年齢の影響

ヒトの体温調節機能が深部体温を一定に保持し、暑熱環境の変動、季節や天候の変化にも柔軟な対応を示すことは明確であるが、体温調節能発達の未完了の児童においては、成人に比して外環境の影響を受けやすいとされている。

深部体温は、幼児期には比較的安定し、日内変動も次第にはっきりしてきて、生後2年以降は成人とほぼ同様のパターンの変動を示すようになる(Mills 1975)。その振幅も、7ヶ月から7歳までは成人より有意に大きく、7歳以降に成人とほぼ等しくなる(阿部ら 1978)。高温環境になると、小児は成人より皮膚温が高くなる。これは皮膚血流量の著しい増加によると考えられ、小児ではこれによる乾性熱放散の増加が重要であるといわれている(Davies 1981、Delamarche et al. 1990)。しかし、外気温が皮膚温より高いときは、成人の約1.5倍の体表面積/体重比になる幼少においては、体内に熱が入りやすいことになる。また、小児に成人と同等の運動をさせると、体重あたりの酸素消費量、熱産生量が成人よりはるかに多い(小川 1996a)。したがって、気温がきわめて高いときや激しい運動では幼小児は体型、体質的に体温調節上不利といえる。

汗腺に関しては前述したとおり、汗腺の能動化は生後およそ2年半で完了し、その数はこの時期に生活した環境に左右され、熱帯地方で出生したものでは寒冷地で生まれたものよりかなり多くなり、その後は汗腺の新生や能動化はない (Kuno 1956)。したがって、幼児では成人と比べて能動汗腺の密度はきわめて高い。実際には、その密度は年齢に関わらず体表面積と逆相関になる (Bar-Or 1980)。ただし、人種によっては暑熱適応に伴って能動汗腺数が増えるともいわれ (Knip 1975)、さらに不能汗腺は分泌活動の安定しない機能の低い汗腺であるともいわれる (Willis et al. 1973)。

幼小児期の発汗量は成人と比べて多いとも、ほぼ等しいとも、また少ないとも報告され、一致した見解がない。幼小児期は汗腺が未成熟で分泌能は低く、年齢と共に発汗能が増大する。一定条件における単一汗腺当たりの発汗量は、8～10歳の小児では成人の約40%と報告されている (Kuwahata 1960, Bar-Or 1980)。その反面、幼小児は汗腺密度が高く、成長すると共に体表面積が広がっても汗腺の数は増さないなのでその密度は低下する。したがって、体表面積あたりの発汗量は両者のバランス如何によって異なってくる。さらに発汗能を調べるに当たって、暑熱負荷や運動負荷の方法やその強度の違い、厳密な条件設定 (性別、児童の年齢、衣服、姿勢など) の困難さに基づく誤差などによって実験結果が様々に異なってくると思われる。Bar-Or (1980, 1989) は、それまでの研究者による報告をまとめ (表 1-3)、運動時の児童と気候についてレビューを発表しているが、上記の理由からあくまで個々の実験における結果としての児童における体温調節の特徴となっているといえるかもしれない。暑さに対する熱放散反応として、体温変動との関連で発汗量の過不足を考察すべきである。乳幼児 (9ヶ月～4.5歳) とその母親とをともに暑さにさらすと、乳幼児のほうが単位面積あたりの発汗量が明らかに多い (しかも汗中塩分濃度が低い) のに関わらず、乳幼児の直腸温のみが上昇し続ける (Tsuzuki-Hayakawa et al. 1995)。また、小児では成人女子と比べ、全身発汗量が多くなる傾向があり、部位による差も

表1-3 思春期前の児童、成人、男女の発汗率の比較 (Bar-Or 1989より)

Reference	Climatic and Exercise Conditions	Sex	Children		Adults		P
			Age	SR	Age	SR	
Kawahata (1960)	45°C, 97% RH Rest	F	9	303	21-26	297	.0001
		M	9	455	21-27	815	
Wager et al. (1972)	49°C, 17% RH 5.6 km·hr <sup>-1</sup>	M	11-14	491	25-30	579	signif.
Drinkwater et al. (1977)	35°C, 65% RH 30% VO <sub>2</sub> max	F	12	155	20.6	180	
Inbar (1978)	43°C, 20% RH 50% VO <sub>2</sub> max	M	8-12	310	20-33	459	.01
Araki et al. (1979)	29°C, 60% RH "heavy" exercise	M	9	320	20	870	.05
Davies (1979)	21°C, 50% RH 50% VO <sub>2</sub> max	M, F	12.9	344	36	575	.01
Rees & Shuster (1981)	Pilocarpine iontophoresis	F	9-10	165	20-35	115	signif.
		M	9-10	185	20-35	280	

認められた (Tochihara et al. 1995)。ただし、次項で述べるとおり、成人女子の汗腺機能が男子よりも劣ることを考慮しなければならない。また、少なくとも激しい運動時には小児の発汗量が少なく、体温が上昇しやすいとの報告が多く (Araki et al. 1979、Bar-Or 1980、Falk et al. 1991a、1991b)、特に小児の最大発汗量は成人より劣る。しかし、気温が著しく高いときや激しい運動でない限り、小児が成人より熱耐性が特に劣るとはいえないとも考えられている。

このような見解の中、さらに体温調節の暑熱適応や季節変動に関する知見について、上述と同様な結果の混乱があるのは自明であろう。夏の季節による順化について、岡安 (1950) の調査では個人差を最小に留めようとする目的から9才児童少年とその28歳の兄で発汗量を比較したところ、冬期から夏期にかけて成人である兄も児童もおおよそ2倍強に増加し、どちらの季節も児童の発汗量が成人の1.5倍であった。一方、白石ら (1990) は同一暑熱安静時における児童の冬期から夏期への総発汗量の増加度は成人よりも小さく、南部 (1979) も児童では季節変動が小さいことを報告している。運動訓練と暑熱暴露の併用によって暑熱適応すると、季節順化と同様の反応がみられ、運動中の心拍数の増加や体温の上昇度が次第に減少し、発汗量が増し、汗の塩分濃度が低下する。思春期前の少年 (11~14歳) とそれ以降の男子とを比較すると、少年では発汗量は

成人と同程度に増えるが、心拍数や体温が成人ほど減らず、明らかに適応の程度が低い (Wagner et al. 1972)。もっと若い小児 (8~10 歳) の成績では、成人と同レベルの直腸温、皮膚温、心拍数、発汗量になるまでに、より多くの暑熱暴露と運動を繰り返す必要があり、成人と同レベルの適応に達するまでの経過が遅いといえる (Bar-Or 1980、図 1-10)。

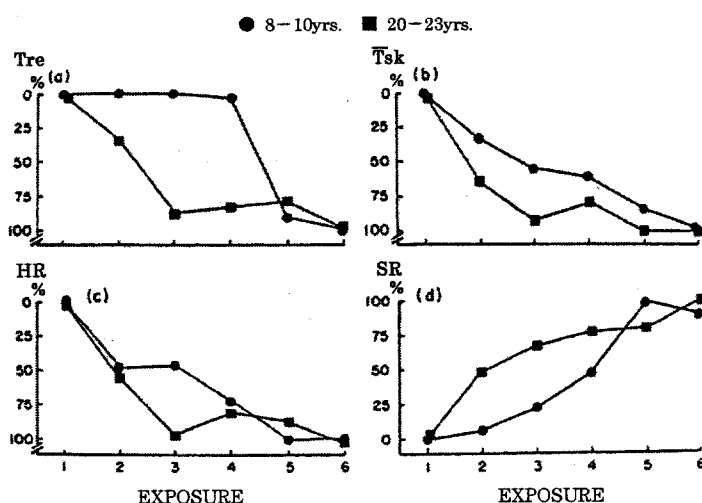


図1-10 直腸温、平均皮膚温、心拍数および発汗量の変化率

43°Cの環境での運動を2週間続けた児童 (n=9) におけるデータ (Bar-Or 1980より)

#### 1-4-1. 性の影響

思春期以降には、男性と女性の体温調節過程の間にはっきりした相違が現れる。体温には個人差が大きく、また女性では性周期による変動が大きく、またそれがサーカディアンリズムにも影響するため、微小な体温の男女差があるとしてもそれを認めるのは、性周期の時期、測定時刻などの取り決めを正確にする必要がある。女子においては排卵後の基礎体温が卵胞期より 0.2~0.4°C上昇し、また排卵日には一般に一時的な低下 (0.2°C以内) がみられる。黄体期の高体温相は黄体ホルモン (プロゲステロン) の体温調節中枢に対する作用によると解

されている。

青壮年期の女性は男子より体表面積あたりの基礎代謝量は約 10%低い。これ性差は除脂肪当たりにするとならずかとなるので、女性では脂肪組織が多いことが大きな原因で、それに女性ホルモンの影響が加わっていると考えられる。基礎代謝量に対する性周期の影響については、一致した見解が得られていない。暑さにさらされたとき、トリ、イヌ、ヤギなどでは熱放散量を増すのみでなく、熱産生量を積極的に下げる機構をもつ。これを二次化学調節と呼ぶが、このような機構がヒトでも女性に限って認められている (Hardy et al. 1940、Dubois et al. 1952、Asayama et al. 1981) すなわち、室温が中性温度域より高くなると、男性では直線的に代謝量が増加するが、女性では 31~32°Cあたりまで平均約 3kcal、10%の低下を示す。

発汗や皮膚血流による熱放散反応の性差は明らかで、女子は男子と比べて、四肢の皮膚血流の増加や温熱性発汗発現の体温閾値が高く、発汗量が少ない (Fox et al. 1969、Cunningham et al. 1978)。安静時に温熱性発汗が始まる平均気温は、男子では約 30°C、女子では約 32°Cといわれ、発汗量の男女差は暑熱負荷が大きいほど著しくなる (Morimoto et al. 1978、図 1-11) この性差の主因は、体熱出納の過程の性差にあるといわれ、女性が男性より代謝量が低いこと、第二次化学

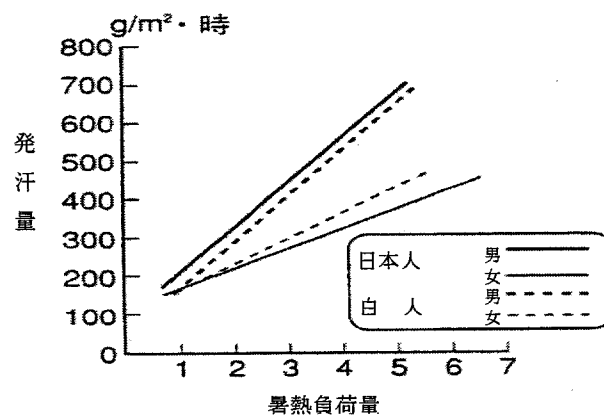


図1-11 発汗量の男女差 (Morimoto et al. 1978より)

調節があること、皮下脂肪層が厚く、高温の環境で断熱効果が大きいことなどによると考えられる。さらに女子では性周期による変動が認められ、黄体期には卵胞期より四肢の皮膚血流量の増加や温熱性発汗の発現の体温閾値が平均0.3~0.5°C上がるが、これは黄体ホルモンが体温調節中枢に働いてその設定温度を高値に移すためといわれている (Bittel et al. 1975、Stephenson et al. 1985) また、汗腺の機能にも性差がみられ、女性は男性より汗腺の分泌能 (最高発汗量) は低く、女子の方が早く体中の汗腺が動員される。また発汗量の割に塩分濃度は高く、つまり女子の汗腺は汗を生産する能力も、汗中の塩分を再吸収する能力も低い (Morimoto et al. 1978、図 1-12)。

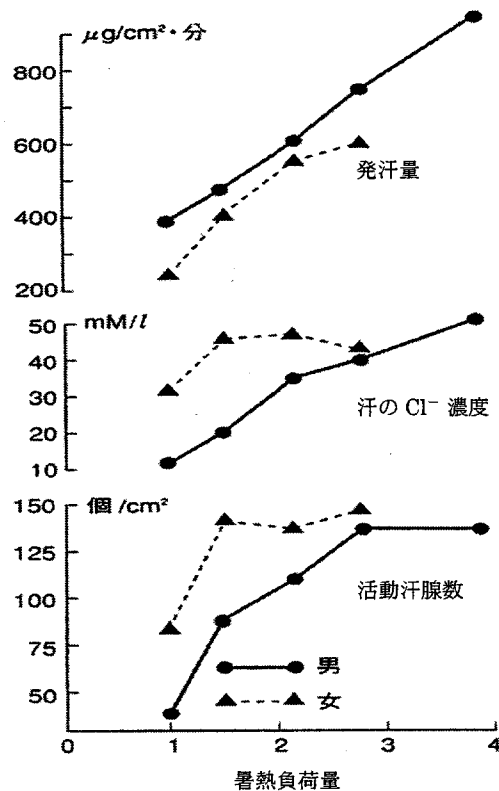


図1-12 汗腺機能の男女差 (Morimoto et al. 1978より)



適応能に関しては、暑熱に適応しても女子は男子より発汗量は少ないが体温には差は生じないと報告されている (Wyndham et al. 1965、Avellini et al. 1980)。局所の反復温浴による汗腺訓練により、男女共に著しい発汗亢進がみられるが、その程度は男子の方が有意に大きく (Ogawa et al. 1989、図 1-13)、また、女性における訓練効果は卵胞期の方が黄体期より大きくなる傾向がある (今村 1993)。しかしながら、女性における季節順化の特徴を男性と比較した報告 (Ogawa et al. 1989) は多いとはいえない。

思春期前の児童における体温調節反応の性差に関する研究はほとんどない。ヒトの形態および機能の発達には、出生時から思春期前までほとんど性差はみられないと考えられている。思春期を境とした、主にホルモン分泌の活発化により、男女間にさまざまな性差が生じ始め、体温調節反応にも性差があらわれるとされている (井上 2002)。

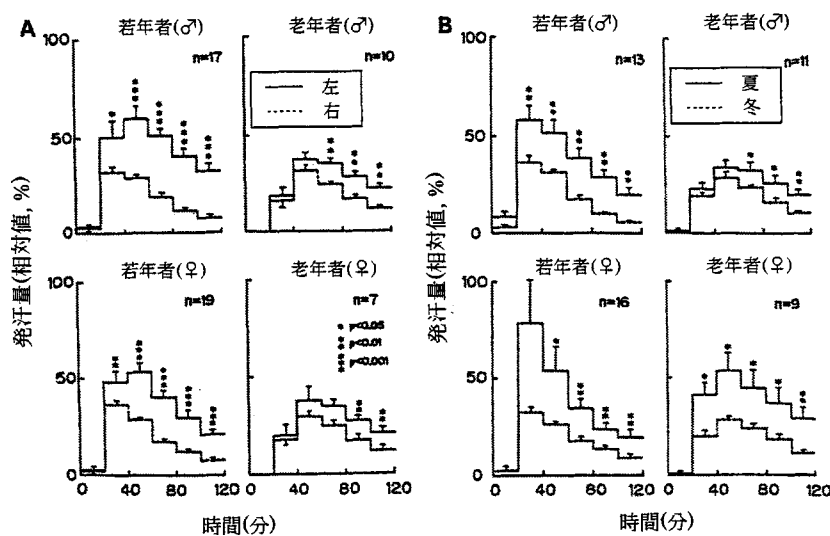


図1-13 男女若年者における汗腺訓練(A)と季節順化(B)による発汗量の変化

(Ogawa et al. 1989より)

## 1-4-3. 断眠の影響

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、睡眠が断ら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ていない。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、発汗量と深部温との勾配は断眠時に小さくなると報告している。一方、Dewasmes et al. (1992) は、冬期 11 時頃における実験で、発汗開始閾値温は高くなるが、発汗量－深部温勾配には変化はみられなかったと報告している。さらに、Kolka et al. (1988) は夏期 15 時前後の実験で、前腕血流の開始閾値温度は低く、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。上記に明らかなどおり、運動強度や環境温度、実施時間がそれぞれの報告によって異なっているが、特に季節条件を設定し、体温調節反応における季節と断眠の影響を検討した研究は行なわれていない。

## 1-5. 本論文の目的

ヒトの体温調節能は年齢、性、栄養その他の生態学的条件によって影響されるが、さらに環境温度や季節への適応の程度によってその能力が大きく左右される。寒暑の明瞭な季節変動がある日本において、体温調節反応の季節順化に関する研究は特に古くから関心が高く、世界に先駆的に行なわれてきた。しかしながら、暑熱負荷や運動負荷の方法やその強度の違い、厳密な条件設定の困難さなどのために、見解の収拾に至っていない点が多い。しかし、近年の測定技術の向上により多岐にわたる厳密な測定が可能になったことで、基本的な体温調節反応の季節変動について体系的に評価し、過去の知見と比較することは、見解を収拾し理解を深める上で意義があると考えられる。また、過去の知見と比較することは、急速に変化し続けてきた人工環境や生活環境が体温調節能および適応能に及ぼす影響や弊害、危惧を見出す可能性にも繋がると思われる。

そこで本研究では、暑熱環境下における体温調節反応の季節変動を青年と児童の年齢差、青年および児童における性差に関して包括的に比較検討することを目的とした。

さらには、現代の生活労働環境を反映した体温調節反応の季節変動に関する研究として、夜間労働者の睡眠と生活活動を季節の点から着目し、成人男子の24時間断眠後の暑熱環境下における体温調節反応の季節変動について検討することを目的とした。

## 1-6. 本論文の構成

本論文の題目は、「暑熱環境下における体温調節反応の季節変動に関する研究—年齢・性・断眠の影響について—」とし、全4章により構成される。各章の内容は次の通りである。

第1章では、本研究の背景と目的について述べ、現在までに行なわれてきた体温調節反応の季節変動に関連する研究の概要を示すとともに、検討されるべき課題について述べた。

第2章「暑熱環境下における体温調節反応の季節変動に及ぼす年齢、性の影響」では、青年男女、児童男女を被験者とし体温調節反応の季節変動に関して包括的な検討を行なった。

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」では、夜間労働を想定し、24時間の断眠がその後の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変動に関して検討した。

第4章では、本研究を総括し、今後の展望を述べた。

尚、第2章は Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Ergonomics. (2000) に掲載された「Seasonal Thermal Responses of Children and Young Adults in a Hot Environment.」を再構成したものである。

第3章は Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science. Vol.22 No.6 (2003) に掲載された「Seasonal Effects of Sleep Deprivation on Thermoregulatory Responses in a Hot Environment.」に基づき再構成したものである。