

地球温暖化の健康への影響

— 暑熱環境への適応：体温調節機能の変化 —

紫藤 治（金沢大学医学部生理学第一講座）

摘 要

ヒトは環境温の上昇に対し核心温を維持するよう自律性・行動性の体温調節反応を発現させる。通常、第一選択の調節反応はヒト個人にとって最も負荷が少なく効率の良いものであり、その典型がエアコンディショナーなどの使用による暑熱負荷自体の排除である。しかし、このような行動性体温調節反応は大量のエネルギー消費と熱排出を伴っており、地球環境にとって非常に有害な調節反応となる。暑熱適応により体温調節機構が修飾され、核心温レベルや体温調節反応発現閾値温、臨界温、温熱負荷に対する体温調節反応の強度などが変化する。これら体温調節系の変化は適応を得るために用いた暑熱負荷の方式により全く異った様相を呈する。しかし、いずれの場合でも暑熱適応により耐暑熱性が充進し、また、ヒトが快適と感ずる環境温が上昇し得る。したがって、ヒトが巧く暑熱に適応することができれば、環境温が多少上昇しても健全な生活がおくれるであろうし、多量のエネルギー消費を伴う行動性体温調節反応を抑制することが可能となり、その結果、地球環境の保全にわずかながらでも寄与できることとなる。

キーワード：自律性・行動性体温調節、発汗、体温リズム、運動鍛練

1. はじめに

外部環境の変化に対し、生体はその刺激に対する生理的応答の強度を変えて生体機能を生理的限界内に維持したり（調節性生体）、あるいは生体機能自体を変えて生体に有利な状態を作り出す（従合性生体）。このような生体の変化、すなわち、適応は外部環境の変化が極めて短時間である場合には形成されない。つまり、ある外部環境に対する適応が完成されるには外部刺激が長時間、または頻回に生体に作用する必要がある。さらに、外部刺激の性質が同一であっても、その組み合わせ、強度、時間や頻度、生体に作用する部位などが異なれば、形成された適応は大きく異なった様相を呈する。

環境温の変化に対する温度適応もまた同様である。ヒトなど恒温動物は一般に調節性生体であり、環境温度の変化に対し核心温（重要臓器の温度）を生体機能の維持できる範囲に保つため、体温調節系や循環系などに適応性変化を発現させる。温度刺激が長期にわたると、通常、適応性の体温調節機能変化は労力の少ない経済的なものになる。しかし、他の外的刺激と同様にこれら適応性の変化は与えられた温度刺激の期間や刺激様式によりその様相は著しく異なる。本稿では、今後予想される地球温暖化を考慮し、ヒトの体温調節機能の様々な暑熱負荷に

対する適応性変化につき、関連する最新の動物実験の結果を含めて簡潔に論ずる。

2. 暑熱負荷に対する体温調節反応

暑熱負荷により皮膚温や核心温が上昇すると、動物は行動性および自律性の体温調節反応を惹起し、核心温が生体に危険なレベルにまで達するのを防ぐ。行動性体温調節反応は自律性の反応より効果的かつ経済的であると考えられるが、環境条件により行動性体温調節が常に発現され得るとは限らない。また、なんらかの障害（例えば無汗症）で自律性体温調節機構が障害されると、行動性調節反応の重要性が増し、温熱負荷時により強く発現する。このように両調節機構は相補的な関係にあると言える。さらに、ラットの唾液塗布行動のように、自律性に唾液分泌が促進され、それを体表面に行動性に塗布することで体熱放散を促す場合がある。これは熱放散の維持のため自律性・行動性の両体温調節機構が同時に作動せねばならないことを意味する。いずれにせよ、恒温動物の体温調節機構は常に自律性と行動性の両面から考察する必要がある。

2.1 自律性体温調節反応

核心温が上昇すると、皮膚の血管が拡張し、皮膚血流量が増加する。これに伴い、体深部の熱が血液により皮

表1 暑熱負荷に対する自律性・行動性体温調節反応

物理的要因	自律性調節	行動性調節
非蒸散性熱放散（熱抵抗）	皮膚血流量増加	着衣量の減少 強制対流の増加（扇風機の利用など） 熱伝導の増加 有効熱放散面積の増加（体の伸展）
蒸散性熱放散	発汗 唾液分泌の増加 パンティング	ころがり行動 唾液塗布行動 水浴び
熱産生	代謝量の減少	筋緊張の低下 摂食の抑制（特異動的作用の低下）
環境変化		日陰の選択 人工冷房

膚表面に運ばれ、放射、対流、伝導により外界へ放散される（非蒸散性熱放散）。また、ヒトでは発汗により皮膚表面をぬらし、水の気化熱を利用して皮膚表面から熱を外へ放出する（蒸散性熱放散）。発汗しない動物では唾液などを利用して、呼吸器系（パンティング）やぬらした皮膚表面からの蒸散性熱放散を増加させる。ヒトでは暑熱負荷時に代謝量を調節的に減少させて体内での熱の産性を減らし、核心温の上昇を抑える可能性も示唆されている（第二次化学調節）（表1）。

2.2 行動性体温調節反応

動物が暑熱に暴露されると、置かれた環境に応じて様々な行動性体温調節反応を発現させる。ヒトでも日頃経験するように多様な行動が観察される（表1）。着衣を脱ぐことや人工的な風の利用は、体表面からの非蒸散性熱放散を増加させる。発汗が同時に存在すれば、それら行動は蒸散性熱放散量を増加させる手段としても有効となる。身体活動を少なくしたり摂食量を減少させると、体内での熱産生量が減少する。動物では、水浴びをしたり泥中をころげまわって（wallowing）体表面をぬらし、蒸散性熱放散量を増加させる。一方、自分を取りまく暑熱環境自体を変化させるような行動性調節もある。屋外であれば動物は太陽からの輻射熱を避けるために日陰へ移動する。ヒトはエアコンディショナーなどを利用して自分周囲の環境温を積極的に低下させることができる。先述のごとく、一般に行動性体温調節は生体にとって労力を要しない効率的かつ容易な体温調節手段と考えられる。例えば、冷房は手元のリモコンスイッチを押すだけで済み、生体にとって最も負担の少ない行動である。しかし、これら行動は生体以外の莫大なエネルギー消費を伴っており、地球環境にとって最も負荷の重い体温調節機序の一つとなる。

3. 短期暑熱適応

短期の暑熱適応とは夏の暑さに慣れるような適応で、熱帯住民のように生下時より暑熱環境下で生活して得られた適応（長期暑熱適応）とは様相が異なる。短期暑熱適応は暑熱負荷が10日から2週間程度でも十分に得られるので実験的にもよく検討されている。しかし、短期暑熱適応によって誘導される体温調節機構の変化は、用いた暑熱負荷の様式によって全く異なっている。

3.1 連続的な暑熱負荷への適応

ヒトでは厳密な条件設定が困難なため、常に一定の暑熱環境に暴露された場合の体温調節系の適応性変化についての検討は多くない。しかし、動物ではいくつかの報告がある。

(1) 核心温の変化

我々は幾度となく連続的暑熱暴露によるラットの核心温の変化を観察してきた¹⁾²⁾。24℃の環境下で飼育したラットを33℃の暑熱環境に10日間連続的に暴露し、その後、ラットを中性温度域下に置いた。暑熱暴露中、ラットの核心温は大きく上昇する。しかし、核心温の上昇は暑熱暴露を終え、ラットを中性温度域に戻しても継続していた（図1）。Brückほか³⁾も環境温3℃で飼育したモルモットに比べ、28～30℃の温暖環境で飼育したモルモットの体温が高い事を示している。また、Raynaudほか⁴⁾⁵⁾は熱帯地方に10日間以上滞在すると、ヒトの核心温が上昇する可能性を報告している。これら結果は、暑熱環境に常時暴露された動物の核心温は適応性に高温側に移動することを示唆する。

核心温は体内で作られる熱量と体から失われる熱量とのバランスで決定される。非蒸散性熱放散には放射、対流、伝導の3種類があるが、放射による発熱体からの熱移動量は発熱体温度の4乗と周囲壁体温度の4乗との差

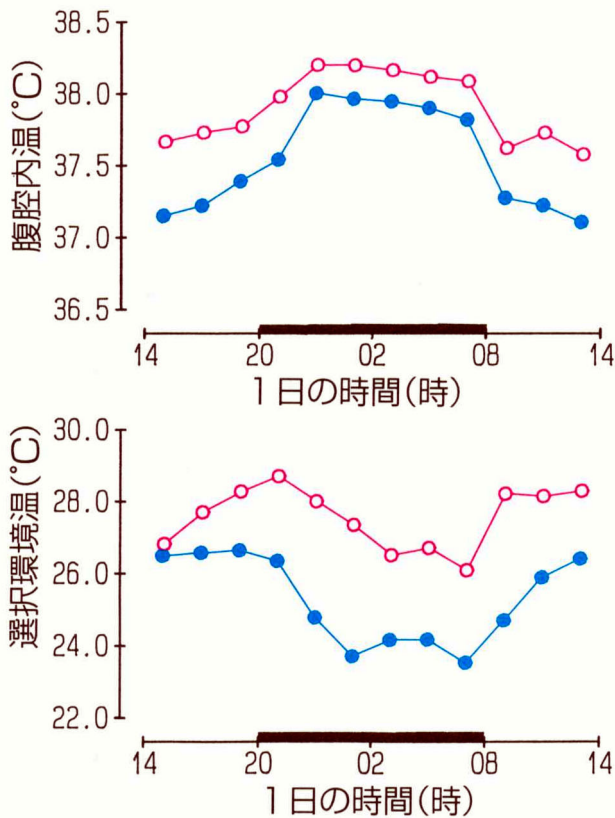


図1 ラットの腹腔内温(上)と選択環境温(下)の日内変化。●と○はそれぞれ非暑熱適応ラットと連続的暑熱負荷に適応したラットの結果。データはそれぞれ7匹のラットの2時間毎の平均。横軸上の黒棒は暗期。ラットの核心温は暗期に高く選択環境温は明期に高い。しかし、暑熱適応ラットの腹腔内温と選択環境温は暗期、明期とも非適応ラットのそれらより高く維持された。

に比例し(温度差に比例と近似できる)、対流、伝導による熱移動量は発熱体温と周囲壁体温の差に比例する。いずれにせよ、発熱体と周囲温度の差が大きければ物理的熱移動量は大きくなる。暑熱環境に暴露された場合、生体は積極的に熱放散を行うが、この時、核心温をより高いレベルに保ち体内と環境との温度差を大きく維持することは、熱放散にとって有利となる。また、環境温が核心温よりも高くなった場合でも、設定した核心温が高いほど環境から体内へ流入する熱量が小さくなり、暑熱負荷の強度は弱められると考えられる。事実、ラットなどでは暑熱暴露時に体内温をある一定の高いレベルに保つことが知られる(hyperthermic plateau)⁶⁾。核心温を高く保つと Q_{10} 効果により代謝量が上昇し、体内での熱産生量が増加してしまう。しかし、後述の暑熱適応による熱産生系の抑制を考慮すれば、連続的に高温環境に暴露され、これに適応した動物の核心温が高く維持されるのは、体温を下げる労力を軽減し、体温調節上経済的かつ合理的であると言える。

(2) 自律性体温調節機構の変化

5日間以上連続的な暑熱環境に置かれ、これに適応したラットでは尾部皮膚血管拡張時および唾液分泌開始時の核心温が非適応動物に比べ $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 高くなる²⁾⁷⁾。また、ふるえが発現する時の核心温も上昇するようである³⁾。これらは、非蒸散性および蒸散性熱放散反応と熱産生反応の閾値体温が上昇することを示唆しており、核心温の調節域が高温側に移動していることを意味する。したがって、暑熱適応動物で観察される核心温の上昇はこれら熱放散反応と熱産生反応の発現閾値温の移動に伴う調節された結果であると考えられる。

さらに、連続的に暑熱に暴露されたラットでは蒸散性熱放散反応が起こる時の環境温(上臨界温)は 2°C 以上上昇し⁷⁾、熱産生反応が起こる時の環境温(下臨界温)は 3°C 以上も上昇する⁸⁾。すなわち、暑熱適応ラットでは上・下臨界温の間の中性温度域が高温側へ移動する。このような中性温度の上方移動は動物が快適に感ずる環境温が上昇することを示唆する(後述)。

暑熱適応により生体の熱産生は抑制されることが知られる。Cassuto⁹⁾によればハムスターの肝代謝系酵素活性は2日以上連続的暑熱暴露後低下する。また、暑熱適応後、代謝性ホルモンであるサイロキシンの血中レベルは低下し、ノルアドレナリンに対する熱産生反応も減弱する¹⁰⁾¹¹⁾。これら変化は全て、基礎代謝量を低下させるよう働く。また、暑熱適応ラットではノルアドレナリンの大量投与により得られる最大熱産生能も低下し、寒冷に暴露されると核心温を維持できなくなる⁸⁾。体内での熱産生を最小限に保つことは暑熱環境に暴露された際に体温に蓄積される熱量を減少させ、核心温維持に必要な労力(熱放散反応)を軽減するのに役立つ。

暑熱適応により暑熱負荷に対する体温調節反応の強度も変化する。15日間以上の連続的な暑熱暴露に適応したラットを高温環境に置くと、核心温の上昇に対する非蒸散性熱放散反応が亢進する²⁾。また、暑熱適応ラットでは、高温暴露中の代謝量の減少程度が大きく、その減少はより高温の環境温にまで継続する²⁾。これら体温調節反応強度の亢進は耐暑熱性の獲得に重要な意味を有する。

(3) 行動性体温調節機構の変化

温度適応により恒温動物の行動性体温調節機能がいかに変化するか厳密に検討した研究は少ない。近年、我々は温度勾配付きのケージを用いてラットが好む環境温(選択環境温)を観察した¹²⁾。その結果、連続的な暑熱環境に適応したラットでは非適応ラットより高い環境温を選んだ(図1)。また、ヒトの快適温度は冬期に比べ夏期で高くなると言われる(夏期はヒトにとって連続的な暑熱負荷であるかは疑問ではあるが)。高い環境温

は体からの熱放散を減少させ、核心温を高く保つのに都合がよい。したがって、これら選択環境温の変化は、連続的暑熱環境に適応した動物では行動性に核心温を高く維持しようとしていることを示唆しており、先に述べた自律性の体温調節域の上方移動の結果と整合する。

暑熱負荷により摂食行動が抑制され、通常体エネルギーバランスが負になる。これが繰り返されると体内のエネルギー貯蔵、すなわち、体脂肪量が減少する。脂肪は熱伝導率が低く断熱材として格好の素材であり、特に皮下脂肪は熱放散の抑制に重要である。したがって、皮下脂肪の減少は体内部から外界への熱放散を増加させる。また、体脂肪量が著しく減少すると（痩せると）、体重当たりの体表面積が増加し、個体からの熱放散増加の要因となる。

3.2 間欠的な暑熱負荷への適応

一日数時間のみ暑熱環境に暴露する様式で動物を暑熱に適応させると、その体温調節機能の変化は連続的な暑熱環境に適応した場合の変化と全く異なる。特に、暑熱負荷時間帯を一日4～6時間のみある一定時に固定すると、適応した動物の核心温や体温調節機能に特徴的な変化が表れる。

(1) 核心温

Foxほか¹³⁾は12日間以上温浴を繰り返し暑熱適応したヒトの口腔内温は中性温域で平均約0.2℃低下すると報告している。Armstrong and Kenney¹⁴⁾も暑熱下でヒトを運動させる負荷を10日間繰り返すと、中性温域での直腸温が0.2～0.3℃低下することを観察している。また、ラットでは暑熱適応により核心温が低下するとの報告が多い。このように、間欠的な暑熱負荷に適応した動物では暑熱負荷を受けていない時に核心温が低く維持されると思われる。

動物の核心温には明確な日内変動があることはよく知られる。最近、この核心温の日内変動パターンが暑熱適応の後、特徴的に変化することが見いだされた¹⁵⁾¹⁶⁾。環境温24℃、12:12時間の明暗周期下で飼育するラットに一日のうち暗期後半の5時間に限り33℃の高温環境に置く負荷を5～28日間繰り返す、その後、ふたたびラットを24℃の環境温度下に戻した。するとこれらラットの核心温は低下したが、その核心温の低下はかつての暑熱暴露時間帯である暗期後半に顕著であった(図2)。同様に暑熱負荷時間帯を暗期の前半に限ると、その後、かつての暑熱暴露時間帯である暗期前半に著明な核心温の下降が起きた。暑熱負荷終了後この特徴的な体温下降が観察される日数は暑熱負荷を行った期間に比例していた¹⁶⁾。さらに、ごく最近ヒトでも同じ現象が起こる可能性が示

唆されている(図3)¹⁷⁾。

短時間のみ暑熱に暴露される場合、初期の核心温レベルがより低い方が核心温が危険なレベルにまで達するまでの時間が長くなり、言い換えれば、暑熱負荷により長く耐えることが可能となる。したがって、間欠的な暑熱暴露に適応した動物の核心温が低く維持されるのは、次に予期される短時間の暑熱負荷に対応する手段として合理的と考えられる。事実、Furuyama and Ohara¹⁸⁾は急性の強い暑熱負荷により長く耐えるラットを継代飼育して、暑熱耐性ラット(FOKラット)を確立したが、継代飼育するにつれラットの核心温は下降していったことを観察している。

(2) 自律性体温調節機構の変化

ヒトでは暑熱適応により皮膚血管拡張反応の閾値が低下し、発汗潜時が短縮し、発汗閾値が低下することが知られる。ラットでも、1日約5時間のみ33℃の高温環境に暴露する負荷を10日間以上間繰り返すと、尾部皮膚血管拡張時の閾値体温が低下する¹⁹⁾。熱産生量反応の閾値についての検討は十分ではないが、これら閾値温の変化は暑熱適応動物の核心温の低下が調節された結果であることを示唆する。

間欠的な暑熱負荷への適応後、臨界温がどう変化するか明確な結果は得られていない。ラットでは上臨界温は変化しない可能性があるが、下臨界温は14日間の間欠的暑熱負荷により上昇するようである⁸⁾。しかし、暑熱刺激と寒冷刺激を繰り返して与えた動物では、上臨界は高温側に移動し、下臨界温は低温側に移動する可能性がある³⁾。間欠的に暑熱に暴露されたラットは暑熱環境と中性環境に繰り返して暴露されたのであるから、上臨界温が高温側に移動し、下臨界温は中性温域で飼育された動物と同じでもよさそうである。今後の検討が待たれる。

ヒトでは暑熱適応により発汗反応が亢進し、暑熱負荷時に多量の発汗が起こるとする報告が多いが、皮膚血流増加の反応はあまり変化しないといわれる¹³⁾。間欠的暑熱暴露に適応したラットでは核心温の上昇に対する非蒸散性熱放散反応は亢進するが、環境温の上昇に対する熱放散反応は逆に減弱する可能性がある¹⁹⁾。しかし、最大の熱放散量は暑熱適応した動物で大きくなる。また、安静時の熱産生量は暑熱適応後低下し、ノルアドレナリンに対する最大熱産生反応も減弱するが、その程度は連続的な暑熱暴露に適応した動物よりも小さい⁸⁾。

先述のごとく、一日のうち一定時間に限り数時間高温環境に置く負荷に適応したラットの核心温と熱産生量はかつての暑熱暴露時間帯に一致して低下する(図2)¹⁵⁾¹⁶⁾。これらラットの尾部皮膚血管拡張と熱産生反応発現時の

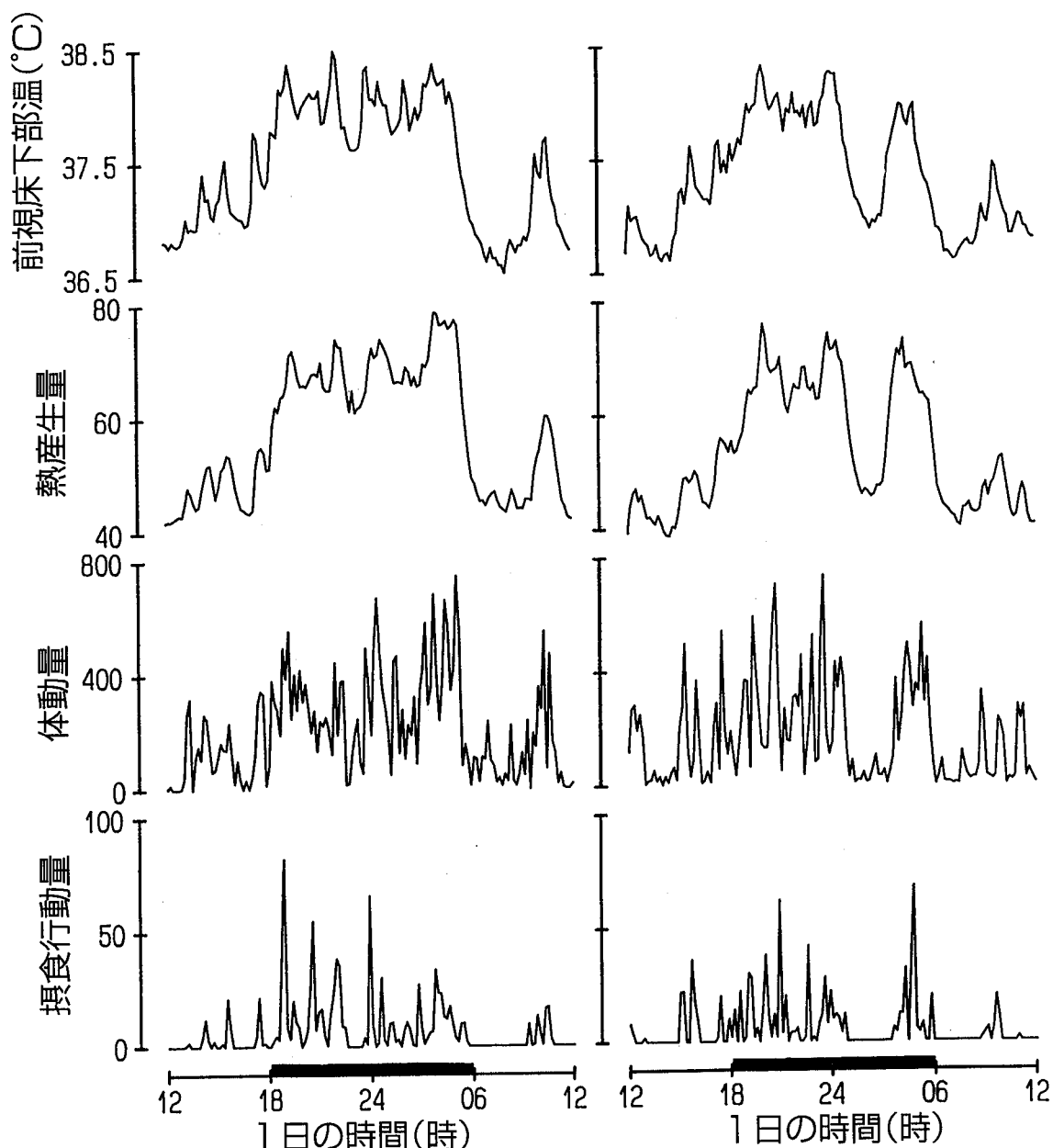


図2 ラットの前視床下部温、熱産生量、体動量、摂食行動量の日内変化。左側は非暑熱適応ラットの結果を、右側は24時から06時まで一定時間帯に暑熱を負荷され、これに適応したラットの結果。データはそれぞれ典型的な1匹のラットの5分毎の平均。横軸上の黒棒は暗期。
ラットの前視床下部温、熱産生量、体動量、摂食行動量には明確な日内変動が観察された。暑熱適応ラットでは24時から06時の間の数時間前視床下部温と熱産生量が大きく低下し、また、自発行動はほとんど見られなくなった。

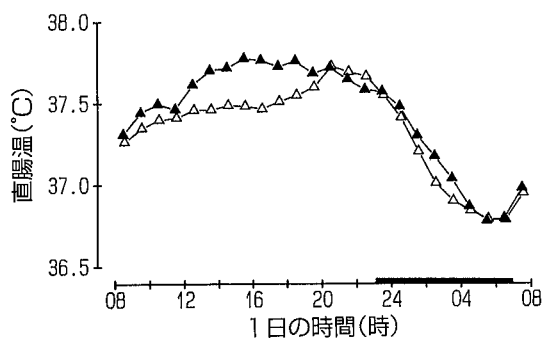


図3 ヒトの直腸温の日内変化。▲と△はそれぞれ非暑熱適応のヒトと14時から18時まで一定時間帯に暑熱を10日間負荷され、これに適応したヒトの結果。データはそれぞれ2例のヒトの1時間毎の平均。23時から07時までが睡眠時間帯。ヒトの核心温は午前から午後にかけてだいに上昇することが知られるが、暑熱適応後、かつて暑熱負荷を受けていた午後の時間帯に核心温はほとんど上昇しなかった。

閾値温を決定すると、両閾値は他の時間帯に比べ、かつての暑熱暴露時間帯で低下している²⁰⁾。また、同様な様式で暑熱適応したヒトの発汗潜時の短縮と発汗閾値の低下もかつての暑熱時間帯に明確に観察される¹⁷⁾。一日一定時間帯に限り暑熱負荷されたラットやヒトでは暑熱暴露時間に対する記憶が成立し、その結果、実際の温熱負荷がないにも拘らず、かつての暑熱暴露時間帯に一致して体温調節反応の閾値が低下し、核心温の下降をもたらすと推察される(図4)。

(3) 行動性体温調節機構の変化

先述と同様の方法で、間欠的な暑熱環境に適応したラットの選択環境温を検討したが、これらラットの選択

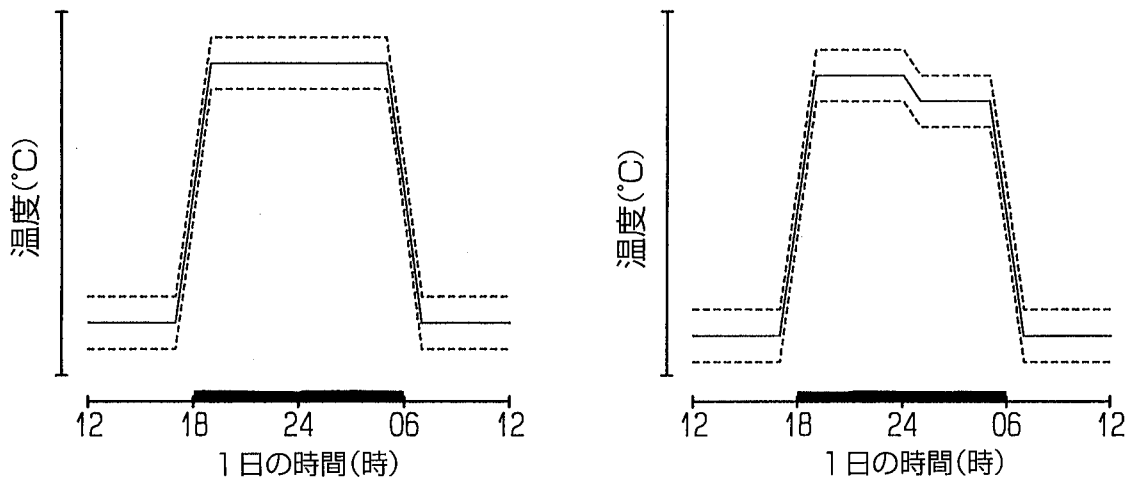


図4 核心温（実線）と熱放散反応および熱産生反応の発現閾値温（破線）の日内変動の模式図。左側は非暑熱適応動物の変化、右側は24時から06時まで一定時間帯に暑熱を負荷され、これに適応した動物の変化。横軸上の黒棒は動物の活動期。熱放散と熱産生の2つの体温調節反応の発現閾値の間が核心温が調節される範囲と考えられる。間欠的暑熱負荷への適応後、体温調節反応発現閾値温と核心温は低下するが、その程度はかつての暑熱負荷時間帯で最も明瞭に観察される。

環境温は非適応ラットのそれと差はなかった。また、ラットの摂食行動や活動量も一日当りで見ると暑熱適応によってさほど影響されなかった²¹⁾。これらの結果は間欠的な暑熱暴露ではラットの行動性体温調節機構は変化しないことを示唆する。

一方、暑熱負荷を一日の一定時間帯に固定すると、これに適応したラットの摂食行動や活動量はかつての暑熱時間帯に一致して低下した（図2）¹⁵⁾²¹⁾。しかし、これら自発行動の変化は核心温の下降がまだ観察される暑熱暴露期間終了後2日目にはすでに消失した。さらに、暑熱適応ラットの選択環境温もかつての暑熱暴露時間帯で変化することなく、ヒトでもかつての暑熱暴露時間帯で快適温が変化する結果は得られていない（パーソナルコミュニケーション）。一日数時間だけの間欠的暑熱負荷により行動性体温調節機能は変化し得るがその程度はあまり強くないものと推察される。

4. 長期暑熱適応

暑熱環境下で生まれ成長した動物の暑熱適応による体温調節機能の変化は、短期間の暑熱適応とは異なる。しかし、実験的に暑熱負荷を連続的あるいは間欠的に厳密にコントロールし、長期の暑熱適応を得ることは容易ではない。したがって、長期暑熱適応による体温調節機構の変化は主に熱帯、亜熱帯地方などの住民と他地方の住民との比較から検討されている。

短期暑熱適応したヒトとは逆に熱帯住民では暑熱負荷時の発汗潜時は延長し、発汗量も減少することが知られる²²⁾。これは、暑熱刺激が繰返し作用することにより非特異的現象である「慣れ」が生じるからであるとされる。

しかし、暑熱負荷時の核心温の上昇の程度は寒帯住民に比し熱帯住民で小さい。これは、熱帯住民は四肢が長く体重当りの体表面積が広いこと、皮脂肪が少なく体内部から皮膚への熱伝導が良いこと、皮膚血流量の増加程度が大きいことなど非蒸散性熱放散量が多いことによる。一般に基礎代謝量も熱帯住民で低いとされるが、熱帯地方住民と温帯・寒帯住民との体形の違いや食生活の違いなどのため、その差を見極めるには注意を要する。

熱帯住民と他帯住民の核心温や体温調節反応の閾値温や臨界温がいかに異なるか、特殊なケースを除き明確な結果はでていないようである。熱帯住民の核心温は寒帯住民のそれと大きな差はないとされる。しかし、発汗の閾値温は熱帯住民で高い可能性があり²²⁾、温暖環境下では核心温が上昇する傾向にあっても不思議ではない。一方、熱帯住民の皮膚温は高く、熱放散量に有利な体形を有するので、中性温度域以下では非蒸散性熱放散量が大きくなり核心温は低下し易くなるのかもしれない。また、温度感覚（環境温の受容）は核心温が同じであれば、皮膚温に強く影響される。熱帯住民の皮膚温は温帯、寒帯住民より高く維持されているため、上・下臨界温や快適に感ずる環境温はたとえ他帯住民と自律性・行動性体温調節機能に差が無くとも、環境温度として表してしまうと他帯住民と異なって見える可能性がある。

このように、長期暑熱適応したヒトの体温調節機能の変化は様々な理由から未だ十分に解明されたとは言えない。今後の系統的、包括的な検討が待たれる。

5. 運動と暑熱適応

運動は大量の熱を産生し体内温を上昇させ、これに対する体温調節反応を引き起こす。したがって、運動は暑熱暴露と同様に生体にとって強い間欠的な温熱負荷となり得る。運動の繰返しに適応したヒト、つまり運動鍛練者の発汗反応は暑熱適応したヒトのそれと類似すると言われ、また、運動鍛練者は非鍛練者に比べ耐暑熱性が優れる事が知られる(交叉適応)。しかし、運動鍛練後の体温調節系の変化と暑熱適応後の体温調節機構の変化は同じであるとは言い難い。Nadelほか²³⁾によると、運動鍛練は中枢からのコマンドに対する発汗反応を亢進させ(末梢効果)、間欠的な暑熱適応は中枢からのコマンドを増すことで発汗量を増加させる(中枢効果)と言う。このような差異は、運動と暑熱暴露では熱負荷の性質が異なるため生じる可能性がある。運動は筋肉などで産生された熱による体内からの直接的温熱負荷であり、暑熱暴露は周囲温が高く体表面からの熱放散量が減少することによる間接的な温熱負荷である。

しかしながら、運動は幾つかの理由から異なる温熱負荷ではないことが確認されている。熱は主に血液により運搬されるが、核心温が上昇すると熱放散の場である皮膚に多くの血流が分配されるようになる。運動時にはエネルギー供給のため仕事筋への血流を増す必要が生じ、皮膚への血流との間に競合が起こる。すなわち、運動時の体温調節機構は体温上昇による温熱刺激のみならず、体温とは無関係の非温熱性因子の影響を受けることになる。また、運動強度が同じであれば極端な高温・低温環境でない限り、核心温の上昇度はほぼ一定であること²⁴⁾

(運動時の核心温上昇が体熱バランスが崩れたことによる受動的なものであるならば、高環境温下では核心温上昇の程度は大きくなり、低温環境下であれば核心温の変化は小さくなるはずである)、運動時の核心温上昇の一部には内因性発熱物質が関与している可能性があること²⁵⁾、運動による核心温上昇と発熱物質による核心温上昇は完全に相加的であること²⁶⁾などから、運動時の体温上昇の一部は発熱のように調節された反応であると考えられる。運動鍛練したヒトでは暑熱適応したヒトと同様に耐暑熱性は亢進するが、両者は同じ機序によると単純には理解しない方がよいであろう。

6. おわりに

動物は環境温の上昇に対し核心温を維持するよう自律性および行動性の体温調節反応を起こす。通常、第一選択の調節反応はその動物にとって最も負荷が少なく効率

の良いもの(経済的なもの)となる。地球の温暖化が進み環境温が上昇すれば当然ヒトも暑熱負荷に対する体温調節反応を起こす。先進国ではエアコンディショナーが普及しており、ヒト個人にとって最もストレスの少ない環境温上昇への対処方法はエアコンディショナーにより暑熱負荷自体を取り除くこと(自分のいる室内空間の温度を快適な温度に設定すること)である。しかし、エアコンディショナーの使用は大量のエネルギー消費と熱排出を伴い、環境温の上昇を助長する。環境温がさらに上昇するとヒトのいる室内温を快適な温度にまで下げるのにさらに大量のエネルギー消費が必要となり、ここに悪循環が生ずる。このように、地球環境にとって現代のヒトの行動性体温調節反応は大変に有害となる。さらに、ヒトが何等かの方法で暑熱負荷自体を取り除く行動性体温調節を取り続けると、ヒトは暑熱に適応することはない。暑熱負荷時に熱放散反応が亢進することもなければ、基礎代謝量の低下や、摂食量の減少に伴う体脂肪量の減少もなく、暑熱負荷に対し脆弱な状態のままとなる。したがって、今後増加すると予想される熱波などの急激で強度の暑熱負荷を屋外で受けた際、ヒトの体温調節機構はこれにうまく対処することはできず、熱中症を起こしやすくなるであろう。

暑熱適応により体温調節機構は修飾され、暑熱暴露に対する熱放散反応や熱産生の反応が変化し、耐暑熱性が亢進する。しかし、本稿で述べたように、これら変化は適応した暑熱負荷の様式およびその質的な差異に強く依存する。例えば、熱帯地方の様にほぼ一日中暑熱環境である場合や砂漠地帯のように暑熱環境と寒冷環境が昼夜で繰り返される場合では、それぞれ適応後の体温調節機能は異なる。しかし、運動鍛練をも含め、繰返し暑熱に暴露され、それに適応すれば、少なくとも耐暑熱性を亢進させることができる。また、暑熱適応によりヒトの快適環境温を上昇させることができれば、多少環境温が上昇しても温熱不快感が強くなることもないであろうし(ラットでは2℃以上も選択環境温が上昇している、図1参照)、たとえ必要に迫られエアコンディショナーを用いるとしても、設定環境温度を高く保つことができるので、エネルギーの消費を抑えることが可能となる。このように、ヒトがいかに巧く暑熱に適応して行けるかが、地球温暖化に際してのヒトの健康維持とさらなる地球環境変化の防止にとって重要な鍵となるであろうし、今後検討されるべき課題の一つとなろう。

最後に、本総説内容はかなり強引な解釈や我田引水的なところがあること、体液バランスについて記述していないこと、順化と馴化をすべて適応という語で統一した

ことなど専門家の先生方にはおしかりを受けることが多々あると思うがお許しを乞いたい。これまで共に研究活動に携わってきた諸氏に感謝しつつ本稿を結ぶ。

文 献

- 1) Shido, O., Y. Yoneda and T. Nagasaka (1989) Changes in body temperature of rats acclimated to heat with different acclimation schedules. *J. Appl. Physiol.*, 67, 2154-2157.
- 2) Shido, O. and T. Nagasaka (1990) Thermoregulatory responses to acute body heating in rats acclimated to continuous heat exposure. *J. Appl. Physiol.*, 68, 59-65.
- 3) Brück, K., W. Wunnenberg, H. Gallmeier and B. Zith (1970) Shift of threshold temperature for shivering and heat polypnea as a mode of thermal adaptation. *Pflügers Arch.*, 321, 159-172.
- 4) Raynaud, J., J. P. Martineaud, O. P. Bhatnagar, H. Viellefond and J. Durand (1976) Body temperature during rest and exercise in residents and sojourners in hot climate. *Int. J. Biometeorol.*, 20, 309-317.
- 5) Raynaud, J., J.P. Martineaud and J. Durand (1980) Upward shifting of the central temperature in adaptation to chronic heat and high altitude. *Proc. Satellite 28th Int. Conger. Physiol. Sci.* pp. 285-287.
- 6) Furuyama, F., K. Ohara and A. Ota (1984) Estimation of rat thermoregulatory ability based on body temperature response to heat. *J. Appl. Physiol.*, 57, 1271-1275.
- 7) Shido, O., S. Sakurada, M. Tanabe and T. Nagasaka (1991) Temperature regulation during acute heat loads in rats after short-term heat exposure. *J. Appl. Physiol.*, 71, 2107-2113.
- 8) Sakurada, S. and O. Shido (1993) Shivering and nonshivering thermogenic responses of rats subjected to different patterns of heat acclimation. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, 71, 576-581.
- 9) Cassuto, Y. (1986) Metabolic adaptations to chronic heat exposure in the golden hamster. *Am. J. Physiol.*, 217, 1147-1151.
- 10) Arieli, A. and A. Chinet (1986) Thyroid status and noradrenaline-induced regulatory thermogenesis in heat-acclimated rats. *Horm. Metab. Res.*, 18, 103-106.
- 11) Cassuto, Y., R. Chayoth and T. Rabi (1970) Thyroid hormone in heat-acclimated hamsters. *Am. J. Physiol.*, 218, 1287-1290.
- 12) Sugimoto, N., O. Shido, S. Sakurada, A. Hirai, Y. Kaneko and T. Nagasaka (1997) How does heat acclimation affect the preferred ambient temperatures of rats? In *Thermal Physiology 1997*, p. 111.
- 13) Fox, R.H., R. Goldsmith, D.J. Kidd and H.E. Lewis (1963) Blood flow and other thermoregulatory changes with acclimatization to heat. *J. Physiol. (Lond)*, 166, 548-562.
- 14) Armstrong, C.G. and W.L. Kenney (1993) Effect of age and acclimation on responses to passive heat exposure. *J. Appl. Physiol.*, 75, 2162-2167.
- 15) Shido, O., S. Sakurada and T. Nagasaka. (1991) Effect of heat acclimation on diurnal changes in body temperature and locomotor activity in rats. *J. Physiol. (Lond)*, 433, 59-71.
- 16) Sakurada, S., O. Shido, N. Sugimoto, K. Fujikake and T. Nagasaka (1994) Changes in hypothalamic temperature of rats after daily exposure to heat at a fixed time. *Pflügers Arch.*, 429, 291-293.
- 17) 紫藤治・杉本直俊・田辺実・永坂鉄夫 (1996) 一日一定時間に限った暑熱暴露による発汗反応の変化。長崎大学熱帯医学研究所共同研究報告集, p. 135.
- 18) Furuyama, F. and K. Ohara (1993) Genetic development of an inbred rat strain with increased resistance adaptation to a hot environment. *Am. J. Physiol.*, 265, R957-R962.
- 19) Shido, O. and T. Nagasaka (1990) Heat loss responses in rats acclimated to heat loaded intermittently. *J. Appl. Physiol.*, 68, 66-70.
- 20) Shido, O., S. Sakurada, S. Sugimoto and T. Nagasaka (1995) Shifts of thermoeffector thresholds in heat-acclimated rats. *J. Physiol. (Lond)*, 483, 491-497.
- 21) Shido, O., S. Sakurada, K. Kohda and T. Nagasaka (1994) Day-night changes of body temperature and feeding activity in heat-acclimated rats. *Physiol. Behav.*, 55, 935-939.
- 22) Matsumoto, T., M. Kosaka, M. Yamauchi, K. Tsuchiya, N. Ohwatari, M. Motomura, K. Otomasu, G.J. Yang, J.M. Lee, U. Boonayathap, C. Praputpitaya and A. Yongsiri (1993) Study on mechanisms of heat acclimatization due to thermal sweating-comparison of heat-tolerance between Japanese and Thai subjects. *Trop. Med.*, 35, 23-34.
- 23) Nadel, E. R., K.B. Pandolf, M.F. Roberts and J.A.J.

- Stolwijk (1974) Mechanism of thermal acclimation to exercise and heat. *J. Appl. Physiol.*, 37, 515-520.
- 24) Nielsen, M. (1938) Die Regulation der Körpertemperatur bei Muskelarbeit. *Skand. Arch. Physiol.*, 79, 193-230.
- 25) Cannon, J.G. and M.J. Kluger (1983) Endogenous pyrogen activity in human plasma after exercise. *Science Wash. DC.* 220, 617-619.
- 25) Tanaka, H., K. Kanosue, M. Yanase and T. Nakayama (1990) Effects of pyrogen administration on temperature regulation in exercising rats. *Am. J. Physiol.*, 258, R842-R847.