Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2026-09-10

人の体温調節反応

近藤, 徳彦

(Citation)
神戸大学発達科学部研究紀要,5(2):55-66

(Issue Date)
1998-03

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(JaLCDOI)
https://doi.org/10.24546/81000286

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81000286

KOBE UNIVERSITY

神戸大学発達科学部研究紀要
第5巻第2号　1998

人の体温調節反応

近　藤　徳　彦

Thermoregulatory Responses in Humans

Narihiko Kondo

1．はじめに

人は温度、湿度、光、騒音などの物理的な環境変化に対して、身体の内部環境をある範囲内に維持している．身体の調節機構の一つである体温調節機構は、人の内部環境を維持するには欠くことのできないものである．われわれは日常的には1日に10℃以上の気温の変化を、季節的には30～40℃もの変化を体験する．それにもかかわらず、人の深部体温（体表面の温度を皮膚温というのに対して、直腸温や食道温のようにからだの内部の温度を深部体温という）は常に37℃付近で安定している．これは37℃という深部体温がからだの正常な機能に最も適していることを示している．しかし、深部体温以外の体温は気温に大きく影響されるし、運動を行った時などは安静にしているときより10倍以上の熱を体内で発生する。

このように、気温や発熱量が広範囲に変化しても深部体温がほぼ一定に保たれているのは、体内に優れた体温調節機構が備わっているからにほかならない．特にヒトは体温調節機構として発汗という強力な熱放散機能を備えていることが、他の多くの動物と異なる．本研究では熱放散機構（発汗調節と皮膚血流調節）の中でも主に発汗調節機構の働きを、運動、身体トレーニング、年齢、日内変動などの観点から概説し、人の深部体温がいかに巧みに調節されているのかを、これまで我々の研究室で行ってきた研究内容を中心に述べてみたい。

2．安静時の体温調節反応

人の深部体温は上述のように37℃付近に保たれているが、その値は熱産生量（運動や食事などで変化する）と熱放散量（放射、対流、伝導および蒸発）のバランスによって決定される。ここではこの両要因に分類して説明したい。

2－1．熱産生量

安静時の人の発熱量は約1.2kcal/分であり、100Wの電灯1個程度のものである．しかし、運動を行うと、上述のようにその発熱量は10倍以上に達する場合がある。安静時の発熱量（代謝量）は、食事、一日の時間帯（日内変動）、年齢などに影響される。特に、食後には一時的に熱産生量が増加する（中山，1981）。

神戸大学発達科学部身体行動論講座、人に関する応用生理学研究室

2－2．熱放散量

体内で産生された熱は、身体の内部から体表面に運ばれて、身体外部へ放散される。体重60kgの人の場合、体内で発生した熱が身体からまったく放散されないとすると、計算上、1時間に深部体温が約1.4℃上昇することになる。このことからも、熱放散機構が生体にとっていかに重要であるか理解できる。

体表面に運ばれた熱は、物理的な放射、伝導、対流および汗の蒸発によって体外に放散される。前者3つの経路は体表面の温度（皮膚温）に左右され、これは皮膚への血流量（皮膚血流量）によってコントロールされている。一般にこの熱放散は皮膚温と外気との温度差に依存し、乾性熱放散と呼ばれる。一方、汗は蒸発するときに身体から気化熱を奪い、熱を放散するもので、湿性熱放散と呼ばれている。人はこの二つの熱放散機構により、深部体温をある範囲内に維持している。

2－3．体温調節系の入出力関係

発汗量や皮膚血流量などの身体の熱放散機構には、深部体温と皮膚温が大きな入力となる。横軸に深部体温を、縦軸に発汗量や皮膚血流量をとると、両者の関係は正の相関関係になる。また、この関係は皮膚温が上昇すると、左方へ移動する（Nadel et al., 1971, 図1）．このように熱放散機構には深部体温や皮膚温などの温度入力が重要となるが、発汗量などは精神的に緊張したような状況下（暗算、恐怖、驚きなど）でも増加する（Ogawa, 1975; 小川, 1994）。なお、体温調節機構の中枢は、脳の視床下部に存在し、この中枢で身体の様々な温度変化の情報を統合し、効果器（皮膚血管や汗腺）に命令を送る（中山, 1981）。

汗は持続的に出てくるのではなく、拍動状に拍出される。この波は温熱性発汗の場合に身体のいずれの部位でも同期する。汗の拍出頻度（1分間の波の数）は環境温や平均体温（深部体温と平均皮膚温とをある係数で重みづけした値）と比例関係にあり、高温になるほど頻度は高く、頻度が高ければ発汗量も多くなる。このことからOgawa and Sugenoya（1993）は平均体温と汗の拍出頻度の関係、汗の拍出頻度と発汗量の関係より、発汗活動を中枢機構（前者の関係）と末梢機構（後者の関係）に分離する方法を示した。この方法は発汗反応をより詳細に検討する上で有効である。

ところで、人の深部体温として直腸温、食道温、鼓膜温、腋窩温等が一般に用いられている。日本では従来より腋窩温が多く利用されてきたが、近年、欧米では鼓膜温が深部体温の指標として用いられている（Sato et al., 1996）。これは鼓膜温や食道温が深部の体温をよく反映し、変化も迅速であることに起因し、特に鼓膜温は脳温を反映していると考えられている（永坂, 1997）。鼓膜温の測定に関しては、接触型あるいは鼓膜の放射温を測定する非接触型の鼓膜温計が開発されているが（Sato et al., 1996; Shibasaki et al., 1997d）、被験者の負担を考えると後者の方法が望ましい。しかし、これまでの方法では鼓膜の形状（湾曲している）や放射温センサーの特性から、鼓膜からの放射を直接測定するこ

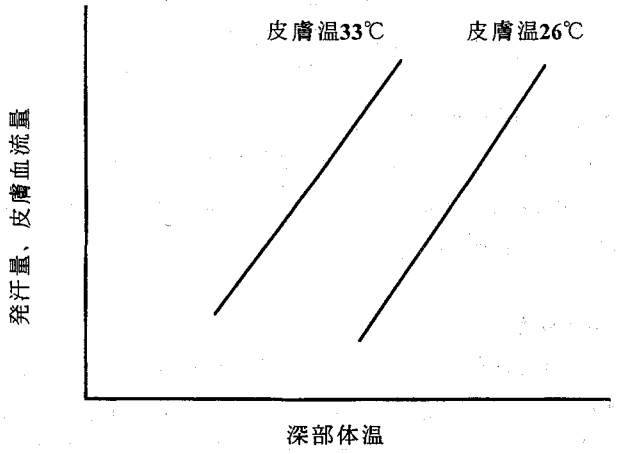

図1　深部体温と熱放散量（皮膚血流量と発汗量）の関係（Nadel et al., 1971のデータをもとに著者が作図）。深部体温と熱放散量との間には、正の相関関係が存在し、両者の間の回帰直線は皮膚温上昇により左方へ移動する。熱放散機構の調節には深部体温と皮膚温が大きな入力となる。

とは難しかった。そこで、Shibasaki et al.（1997c, d）は光ファイバーを用いて、可能な限り鼓膜の近くから放射温を測定する新しい非接触型の鼓膜体温計を開発した。この方法は、最新の光技術を取り入れたもので、今後多くの分野で応用できる可能性があることから、注目に値する新しい方法である。特に、被験者の特性により鼓膜温の測定が困難であった子どもなどに対しては、かなり有効な方法であると考えられる。

3．運動と体温調節反応

安静時と比較して運動時には熱産生量が多くなるので、深部体温をある範囲内に保つためには体温調節機構がより重要となる。運動時の体温調節機構に関する研究はデンマークの研究者Nielsenによって始められ（Nielsen, 1938）、その後多くの所見が報告されている（Nielsen, 1969; Nadel, 1977）。ここでは運動時に対する体温調節反応を、運動開始時と運動中に分けてみていきたい。

3－1．運動開始時

運動を開始すると同時に熱産生量は増加するが、体温調節機構は深部体温の変化を待って駆動する。しかし、体温調節機構の発汗調節と皮膚血流調節ではその反応が異なる。運動開始時には運動に必要な筋肉（活動筋）へ優先的に血液を送らなければならない。そのため、内臓や皮膚の血流量は運動開始時に低下する（西保, 1996; Rowell, 1993）．しばらく運動を継続すると、深部体温が上昇し始め、これに伴って皮膚血流量は増加する。また、発汗もこの深部体温上昇に伴って、体表面全体でみられる。しかし、高温環境下ですでに発汗がみられる場合には、運動を開始すると深部体温や皮膚温が変化していないにも関わらず、数秒の潜時をもって発汗量が急増する（Van Beaumont, 1963）。つまり、2-3.で述べた体温調節機構に重要な入力がない場合でも発汗が起こる。このように深部体温や皮膚温などの温度に関係しない要因を非温熱性要因（深部体温や皮膚温などの温度に関係する要因を温熱性要因）と呼んでおり、運動開始時にはこの要因が発汗反応に影響している。また、運動に伴う精神的興奮が運動開始後、手掌の発汗を急増させる（手掌や足底部の発汗は精神性発汗と言われている。これに反して、一般体表面でみられる発汗を温熱性発汗と呼んでいる）（近藤と山崎, 1997e）。

ところで、発汗に影響する非温熱性要因としては活動筋からの入力（筋や腱の機械的受容器、筋内の化学受容器など）、運動に伴う大脳皮質の活動（セントラルコマンド）、血圧、浸透圧、精神活動などがある（近藤ら, 1987; Kondo et al., 1997d; Yamazaki et al., 1994）。この中の前者二つの要因を検討するため、自分で意識して自転車をこぐ場合（活動筋からと大脳皮質からの入力が関与）と、他人に自転車をこいでもらうような場合（主に活動筋からの入力が関与）で発汗反応を比較すると、自分で自転車をこいだ場合の方が発汗量の増加が大きかった（Kondo et al., 1997d, 図2）。いずれの場合も自転車の負荷はゼロであることから、大きな発汗反応を引き起こすには、大脳皮質の活動が重要であることが推察できる。また、非温熱性要因の大きさが発汗反応にどのように影響するのかを検討するために、発汗がみられるような条件下（環境温35℃、相対湿度50％の環境条件下）で強度の異なるアイソメトリックのハンドグリップ運動（深部体温などの温熱性要因はあまり変化しないが、非温熱性要因が大きく変化するような運動、Crandall et al., 1995）を実施してみた（Tominaga et al., 1997）。その結果、発汗量の増加は運動強度に伴って増加するが、その増加はある一定の運動強度以上になると小さくなる。このことは非温熱性要因の大きさと発汗反応の間には因果関係が存在するが、その関係は一定でない可能性を示している。

一般に人の調節機構には交感神経系が大きく関与している。したがって、交感神経の活動より運動時に関与する生体の調節機構を検討することは重要である。近年、筋や皮膚の交感神経活動を直接記録する方法を用いて、これらに関する多くの所見が得られている（Mitchell and Victor, 1996; 斎藤, 1997; Vissing and Hjorso, 1996）。

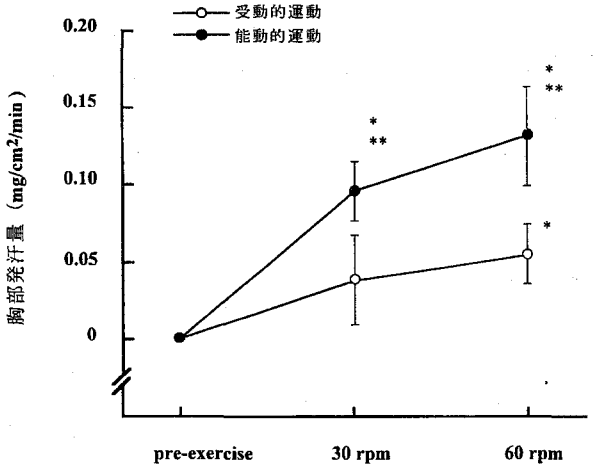

図2　自分で意識しないで自転車をこいだ場合（受動的運動；○）と意識して自転車をこいだ場合（能動的運動；●）の発汗反応（Kondo et al., 1997d）。いずれの回転数においても、●の発汗量増加が大きい。このことは発汗量の顕著な増加には運動を実施するという大脳の活動が大きく関与している可能性を示唆している。＊；pre-exerciseとの、＊＊；○と●との有意差（P<0.05）。

3－2．運動中

深部体温が上昇すると発汗量や皮膚血流量は増し、また、その量は同じ運動でも環境温度が上昇すると増加する（Nielsen, 1969; 近藤ら, 1986）。運動時の発汗調節を明らかにするためには、安静時のそれと比較することが一つの方法である。深部体温と発汗量の関係を、安静状態での温熱負荷（環境温を上昇させたり、下肢を湯に浸したりするような負荷）と運動負荷とで比較すると、その関係の回帰直線は運動時の方が安静時のそれより上方に位置している（近藤ら, 1987）。すなわち、運動時には同じ深部体温で比較すると多くの発汗がみられる。これは運動時の発汗調節が安静時のそれとは異なっていることを示している。また、運動に伴って深部体温が上昇すると、それに伴って発汗も比例して増加する（Nielsen, 1969; Kondo et al., 1997 a, b, c）。しかし、発汗が開始すると、汗の蒸発によって気化熱が奪われ、皮膚の表面の温度が下がり、一時的に発汗量増加が抑えられる（Kondo et al., 1997a）。このことは運動中においても体温調節反応には皮膚表面からの温度入力が影響していることを示している。また、運動強度の増加とともに発汗活動も大きくなるが、これには発汗中枢機構の活動の増加が大きく関与していることが、汗の拍出頻度を分析することにより明らかとなった（山崎, 1991）。

前述のように発汗調節には温熱性要因と非温熱性要因が関与しているが、この両要因は発汗調節に対していつも同程度の影響を及ぼすのであろうか。この疑問を解決するために、Horikawa et al.（1997）は膝から下を43℃の湯に浸し深部体温を上昇させ、深部体温があまり上昇しない時と深部体温がある程度上昇した時にアイソメトリックハンドグリップ運動を実施した。すると、深部体温が上昇するほど運動中の発汗量増加は少なかった。このことは深部体温などの温熱性要因による発汗反応に及ぼす影響が、非温熱性要因が及ぼす影響を上回ったことを示している。この結果から、非温熱性要因は、深部体温などが変化をする前に発汗反応を駆動し、深部体温を一定に保つ働きがあることが推察される。身体の熱容量は大きいことを考えると、深部体温が変化する前に熱放散を増加させるのは、合目的的な調節機構であると考えられる。

多くの人が経験しているように、運動時には多量の発汗がみられる。しかし、いくら多くの発汗でも、それが蒸発し熱放散に有効に作用（有効発汗量）しなければ意味がない。そこで、運動の強さに伴って、総発汗量（例えば、ある運動中の体重減少量）に対する有効発汗量の割合を検討すると、この割合は運動強度によってあまり影響されない（近藤ら, 1989; Kondo et al., 1996a）。また、運動強度を増加させると、胸部などの躯幹部より腕などの末梢部の発汗量増加（Takano et al., 1996）と、前額部での発汗量増加が顕著になる（Kondo et al., 1997c; Takano et al., 1996）。熱放散効率は末

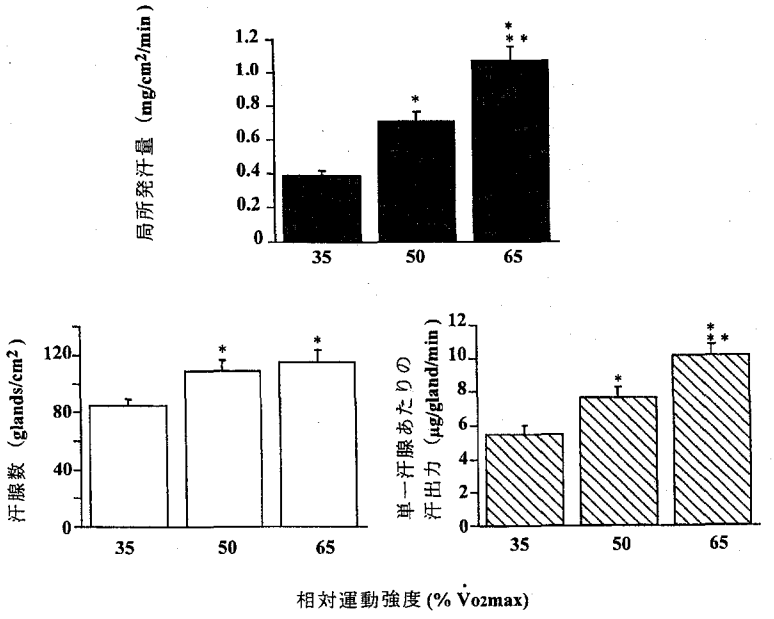

図3　運動強度の変化に伴う発汗量、汗腺数および単一汗腺あたりの汗出力の変化（Kondo et al., 1997cより改変）。運動強度の変化に伴って発汗量も増加するが、その増加にはある運動強度までは汗腺数が関与しているが、それ以上の強度になると単一汗腺あたりの汗出力が主に関与している。＊；35%との、＊＊；50%との有意差（P<0.05）。

梢部の方が大きいこと、人の頭部でも選択的能冷却がある（顔面や頭の表面から頭蓋内に流れる血液等で脳内が冷却される機構。動物では認められるが、人においては疑問視されていた。永坂，1997）ことなどから、運動強度の増加に伴うこのような発汗量の再配分は深部体温を一定に保つためには有効な手段であると考えられる。

一般に発汗量は汗腺数と単一汗腺あたりの汗出力の積で表される（Kuno，1956）。前述のように運動の継続や強度の違いによって発汗量は増加するが、発汗量の変化に関与する両要因はどのように変化するのであろうか。これらの変化を運動中や運動強度を変化させた場合で検討すると、いずれにおいても発汗量増加には先ず汗腺数と単一汗腺あたりの汗出力の両要因が、それ以降の発汗量増加には後者の要因が主に関与していることが示された（Kondo et al.，1997b, c，図3）。後述する子どものように汗腺が未発達な場合には、この両要因が発汗反応にどのように影響しているかは興味深いところである。

運動に伴って皮膚血流量が増加することは前述したが、この増加は身体の部位によって異なっている可能性がある（Kondo et al.，1997c）。また、安静にしていて深部体温を上昇させた場合と運動の場合とで比較すると、皮膚血流量が増加し始める深部体温は後者で高い（Kellogg et al.，1991）。これは運動時にはより多くの血流が筋肉に必要であることと関係しており、運動遂行のために身体の血流が効率よく再配分されていることを示している。

4．身体トレーニングと体温調節反応

身体の調節機能はランニングなどの持久性トレーニングによって改善されることが知られいる（Åtrand and Rodahl，1986；猪飼，1973）。日頃のトレーニングは身体内部に多くの熱を発生し、体温調節機構の働きがより刺激され、このことにより、体温調節機構にもトレーニング効果が認められる（Kondo et al.，1995；Kondo et al.，1996b；Nadel et al.，1974）。発汗調節には汗腺機能が重要となるため、Sato and Sato（1983）は人の汗腺を分離して、in vitroでその機能を検討した。その結果、発汗量が多い人の汗腺はそうでない人のそれと比較すると大きく、単一汗腺あたりの汗の分泌能

力も高いことが示された。

一般に、持久性トレーニングや暑熱順化（高温環境下である期間内順化する）を行うと、図1で示した深部体温と熱放散反応との回帰直線は左方へ移動する。すなわち、トレーニングや順化後には同じ深部体温で比較すると発汗量や皮膚血流量が多くなる（Nadel et al., 1974）。このことはトレーニングなどによって熱放散機構が改善されることを示している。この改善は体温調節中枢においても末梢の汗腺においても同様に起こるが、どちらが優先的に改善されるかはトレーニングの種類、順化の期間などによって異なる可能性がある。

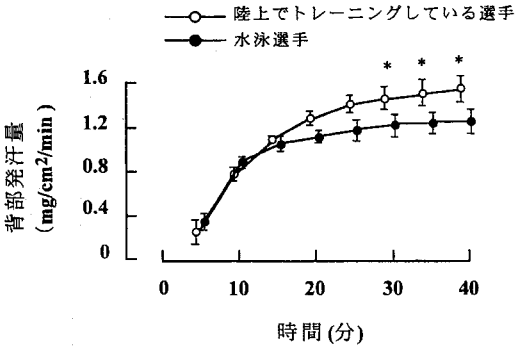

図4　陸上でトレーニングしている選手（○）と水泳選手（●）の運動時の背部発汗量の変化（Kondo et al., 1996b）。水泳選手の発汗量が少ないことより、同じ様な持久性のトレーニングを行っても、トレーニングする環境で発汗反応に及ぼすトレーニング効果が異なる。＊；グループ間の有意差（$P<0.05$）。

一方、同じ持久的なトレーニングでも、水中で行う水泳などと、陸上で行う長距離などのようにトレーニングを行う環境によって、その改善程度が異なる（Kondo et al., 1995; Kondo et al., 1996）。最大酸素摂取量（ある時間内に体内に取り込める酸素の最大値。この値が高いほど持久的能力が優れている）が同じ水泳選手と陸上でトレーニングを行っているサッカー選手、野球選手および長距離選手を、環境温が26℃の環境下で、ある一定負荷の自転車運動を行うと、後者のグループの発汗量が前者のグループのそれより多かった（図4）。このことは水泳選手の発汗能力が劣っていることを示している。一方、このようなトレーニング環境の違いが、もう一つの熱放散機構である皮膚血流反応にどのように影響しているかに関してはこれまで明らかにされていない。トレーニングが熱放散反応に及ぼす影響に関してはまだ不明な点があり、今後の研究に期待したい。

5．年齢と体温調節反応

人の筋力や持久力などの体力は年齢とともに変化することは周知のことで、体力不足などのように多くの人が経験している。熱放散機構も同じように年齢の影響を受ける（Araki et al., 1979; Inoue et al., 1991; 井上ら, 1994; Kenney, 1997; Shibasaki et al., 1997a, b）。

一般に高齢者は暑熱負荷に対して、発汗量や皮膚血流量の低下により、深部体温の維持能力が若年者と比較すると劣ることが報告されている（井上ら, 1994）。また、高齢者の発汗能力の低下は全身で一様でなく、躯幹部より大腿部から生じることが示されている（Inoue et al., 1991）。このように熱放散機能は年齢とともに低下するが、日頃の身体的トレーニングによりその低下が抑えられたり、若年者と同等の能力を有することも知られている（井上ら, 1994; Kenney, 1997）。このことは、日頃の運動習慣がいかに身体の調節機能を維持するには重要であるかを示している。

芝崎ら（1995）は子どもの体温調節特性を文献研究より検討した。その結果、発汗調節に関しては成人と比較すると、1）汗腺の未発達により単一汗腺あたりの汗出力が小さいこと（図5）、2）発汗量は成人と比較して少なく、特に躯幹部においてその量が成人より少ないこと、3）季節や身体および暑熱トレーニングの影響が少ないことなどが、子どもの特徴として考えられる。3）の原因として、1）で述べたように子どもの汗腺はまだ未発達であり、このことがその原因と考えられる。また、子どもと成人の発汗調節の違いが発汗調節中枢機構に起因するのか、汗腺などの末梢の機構に起因するのかを検討してみると（Shibasaki et al., 1997b）、子どもの発汗能力が劣っているのは前者の機構よりむしろ後者の機構が関与していることが明らかになった。

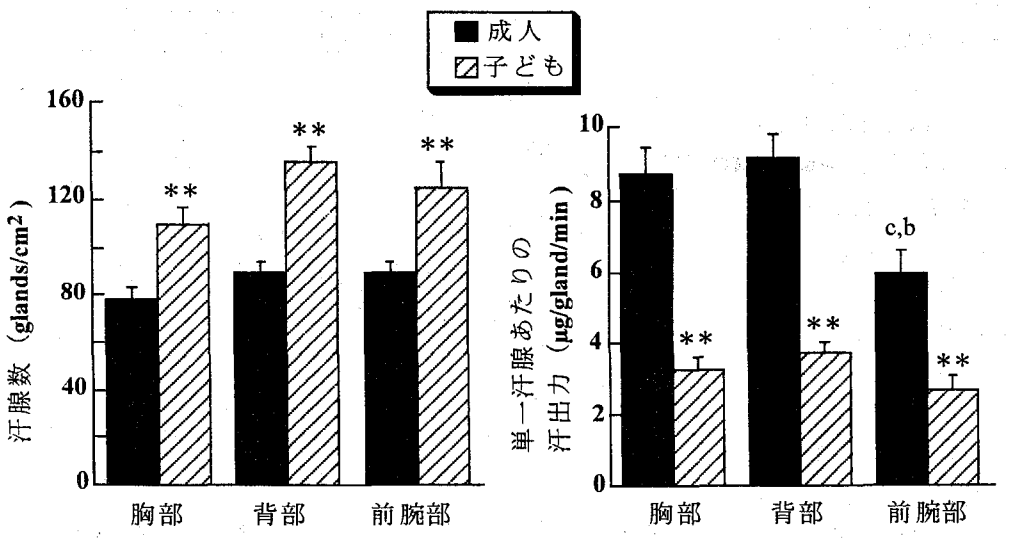

図5　思春期前の子ども（10-11才）と成人（21-25才）の汗腺数と単一汗腺あたりの汗出力の比較（Shibasaki et al., 1997a）。汗腺数は子どもの方が多いが、単一汗腺あたりの汗出力は明らかに小さい。子どもの発汗能力が低い原因は汗腺の未発達に起因していると考えられる。＊＊；成人との有意差（P<0.01）、c, b；胸部および背部との有意差（P<0.05）。

一方、温熱負荷に対する子どもの皮膚血流量は成人より多く、特にその差は胸や背部などの躯幹部でみられる（Shibasaki et al., 1997a）。これらのことから子どもの熱放散機構の特徴として、発汗による湿性熱放散より皮膚血流による乾性熱放散の割合が全熱放散の中で占める割合が高いことが推察される。この特性のため、子どもの場合には発汗が熱放散の唯一の手段となる高温・暑熱環境下では、深部体温をある範囲内に維持する能力が低く、このような環境下での活動時には十分な注意が必要であると考えられる。なお、年齢と体温調節反応に関する研究では井上氏の論文（参考文献以外にも多数ある）を一読していただきたい。

6．日内変動と体温調節反応

人の生理学的パラメータは一日の時間帯で変化する（日内変動, Reilly et al., 1997; Winget et al., 1985）。深部体温は最も代表的な日内変動を示す生体のパラメータであり、その値は朝方に最も低く、夕方に最も高い日内変動を示す。これに関連して、心拍数、血圧、酸素摂取量なども日内変動を示す（塩尻ら, 1993; Winget et al., 1985）。さらに、筋力など運動のパフォーマンスに関係する身体能力も一日の時間帯によって異なる（Winget et al., 1985）。例えば、陸上の長距離種目では夕方に世界記録が達成される場合が多い。一方、時間や光などの外部環境から完全に隔離された条件下では、人の深部体温のリズムは1周期約25時間を示す（Aschoff, 1983）。人は一般生活の中で、太陽光や社会的な接触、摂食時間などの外部環境因子に同調させながら、24時間を1周期としたリズムを維持している。また、人の本来のリズムは25時間周期であることは、生体の調節機構は時間的に遅れる方が適応し易いことを示唆している。実際、西周りと東周りの旅行では前者の方が時差による影響が小さい。このように深部体温は日内変動を示すが、それを調節している体温調節機構は一日の時間帯でどのように変化するのであろうか。

2. で述べたように、深部体温は熱産生量と熱放散量のバランスで決定される。このことは深部体温を決定する2要因にも日内変動が存在することを示している。安静時において、熱放散機構である皮膚血流量は深部体温の日内変動より約4時間先行して変動する（Smolander et al., 1993）。安静にしていて下肢温浴（43℃の湯に膝から下を浸す）を負荷すると深部体温が上昇し、熱放散反応が起こ

る。このような反応を朝（06.00h）、昼（12.00h）、夕方（16.00h）および夜（24.00h）で比較すると、深部体温の変化も発汗量の変化もそれぞれの時間帯であまり変化がない（Aoki et al., 1997a）。深部体温と発汗量の関係よりみた発汗反応は発汗開始閾値が安静時の深部体温の日内変動に依存して変化するのみで、その関係の傾きは日内変動の影響を受けない。一方、皮膚血流量は深部体温との関係において皮膚血流量が増加する深部体温閾値には安静時の深部体温と同様な日内変動が認められるが、その傾きは朝方に小さくなり（Aoki et al., 1998, 図6）、この変化には皮膚の血管収縮神経の活動性の日内変動が関与していることが推察される（Aoki et al., 1997c）。さらにこれらの反応には身体の部位（躯幹部と四肢部）で差が認められない（Aoki et al., 1997b）。このことから、温熱負荷に対する熱放散反応の日内変動は主に体温調節の中枢機構が関与している可能性があり、また、皮膚血流反応は末梢性の要因にも影響されることが考えられる。一方、運動負荷の場合では下肢温浴負荷と同様にそれぞれの反応は安静時の深部体温の日内変動に伴って変動する（Aoki et al., 1995; Stephenson et al., 1984）が、その変化は身体の部位で異なることも示されている（Aoki et al., 1995）。これらのことから、人は様々な温熱負荷に対して深部体温の変化（負荷前の安静時からの変化）をどの時間帯においても一定にしようとする反応が起こると考えられる。

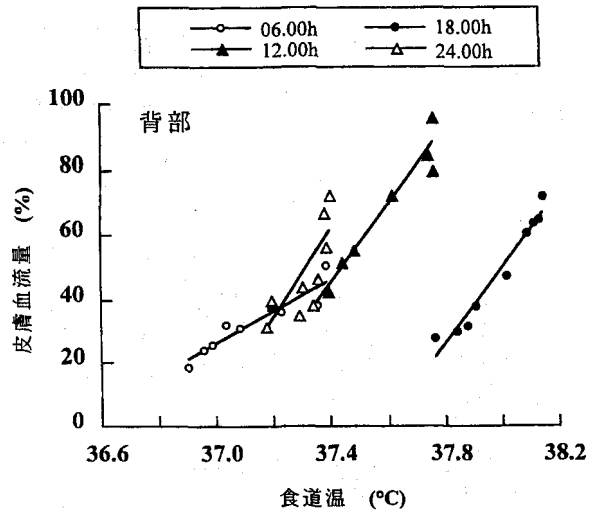

図6　日内変動が深部体温（食道温）と皮膚血流量の関係に及ぼす影響（Aoki et al., 1998）。皮膚血流量が増加し始める深部体温閾値は安静時の深部体温と同様な日内変動を示し、さらには両者の傾きが早朝（06.00h）において小さい。

ところで人の調節機構の日内変動は光によって大きく影響される（Hashimoto et al., 1996; Honda et al., 1995）。光の強さやタイミングなどを考えると、大都市のように夜においても大変明るい環境条件が人の調節機構にどのように影響しているのか、という観点からも大変興味深い研究である。

7．まとめ

以上のように人の体温調節機構は多くの要因の影響を受けるが、今回述べた運動、トレーニング、年齢および日内変動はその中でも人の生活と密接に関連したものである。その要因に対して身体活動を円滑に行うために深部体温をある範囲内に維持しようという調節が起こり、巧みな方法でそれを成し遂げている。身体の調節機構は様々な要因に対して生体の機能を維持するために、多くの調節機構を用いながら適応しているが、ほとんどの生体の調節機構は無意識の内に働いている。トレーニングや年齢のところでも示したように、人の努力によって生体の調節機構は改善され、様々な外界の変化から我々のからだを守ってくれる。

身体の多くの調節機構はそれぞれ単独に働いているのではなく、通常は互いに影響し合っている。例えば、筋温の上昇・下降によって運動時の呼吸・循環応答が変化する（Koga et al., 1997; Shiojiri et al., 1997）。また、精神的ストレスが多くの調節機構に何らかの影響を及ぼすことも知られている。したがって、このような観点から人の調節機構をさらに研究することが、今後ますます重要になろう

と考えられる。

最後にこの論文を終えるに当たり、ここで示したような優れた調節機能を人は有しているが、現代社会のように機械化がかなり進むと人は本来の機能を忘れがちになる。そろそろ、人が本来持っている調節機構に目を向ける時が来ているのではと感じる。

謝辞

本研究の成果を得るあたり、神戸大学教育学部と神戸大学発達科学部において伊藤一生先生（東亜大学教授）と岩田　敦先生（YMCA神戸ウエルネス研究所、神戸大学名誉教授）に多大なご援助を頂いた。ここに感謝の意を表します。また、本論文に述べた内容の多くは以下の大学院生や卒業生の研究から得られたものである。ここに報告するとともに以下の諸氏に感謝いたします。最後にそれぞれの研究において快く被験者を引き受けて下さった関係諸氏にお礼申し上げます。

島名孝次氏（神戸大学教育学研究科修了、ミズノ株式会社研究開発部）、中留　学氏（神戸大学教育学研究科修了、奈良東大寺学園高校教員）、張　可人氏（神戸大学教育学研究科修了、岩井商事）、塩尻智之氏（神戸大学教育学研究科修了、横浜市立大教員）、芝崎　学氏（神戸大学教育学研究科修了、同大学自然科学研究科）、青木　健氏（神戸大学教育学研究科修了、千葉大学自然科学研究科）、高野聖司氏（神戸大学教育学研究科修了、茨城県小学校教員）、富永寛隆氏（神戸大学教育学研究科）および堀川直幹氏（神戸大学総合人間科学研究科）。

参考文献

Aoki K, Shiojiri T, Shibasaki M, Takano S, Kondo N and Iwata A. (1995). The effect of diurnal variation on the regional differences in sweating and skin blood flow during exercise. Eur J Appl Physiol, 71 : 276-280.

Aoki K, Kondo N, Shibasaki M, Takano S, Tominaga H and Katsuura T (1997a). Circadian variation of sweating responses to passive heat stress. Acta Physiol Scand, 161: 397-404.

Aoki K, Kondo N and Katsuura T (1997b). The effect of circadian variation on regional difference in vasomotor response to heat stress. Proceedings of Third International Congress on Physiological Anthropology, in press.

Aoki K, Kondo N, Shibasaki M, Takano S, Katsuura T and Hirata K (1997c). Control of circadian variation in skin blood flow response during heat stress. Jpn J Physiol, accepted.

Aoki K, Kondo N, Shibasaki M, Takano S and Katsuura T (1998). Circadian variation in skin blood flow responses to passive heat stress, Physiol & Behav, 63: 1-5.

Araki T, Toda Y, Matsushita K and Tsujino A (1979). Age differences in sweating during muscular exercise. J Phys Fitness Jpn, 28: 239-248.

Ascoff J (1983). Circadian control of body temperature. J Thermal Biology, 8: 143-147.

Atrand P-O and Rodahl K (1986) Textbook of Work Physiology, Physiological bases of exercise, third edition, McGraw-Hill, Inc.

Crandall CG, Musick J, Hatch JP, Kellogg DL Jr and Johnson JM (1995). Cutaneous vascular and sudomotor responses to isometric exercise in humans. J Appl Physiol, 79: 1946-1950.

Hashimoto S, Nakamura K, Honma S, Tokura H and Honma K (1996). Melatonin rhythm is not shifted by lights that suppress nocturnal melatonin in humans under entrainment. Am J Physiol, 270: R1073-R1077.

Honma K, Honma S, Nakamura K, Sasaki M, Endo T and Takahashi T (1995). Differential effects of

bright light and social cues on reentrainment of human circadian rhythms. Am J Physiol, 268: R528-535.

Horikawa N, Tominaga H, Shibasaki M and Kondo N (1997). Effects of non-thermal factors on sweating response is altered by degree of thermal factors (unpublished paper).

猪飼道夫 (1973) 身体運動の生理学, 杏林書院.

Inoue Y, Nakao M, Araki T and Murakami H (1991). Regional differences in the sweating responses of older and younger men. J Appl Physiol, 71: 2453-2459.

井上芳光、上田博之、中尾美喜夫、荒木　勉 (1994). 高齢者の暑熱・寒冷反応に及ぼす体格、有機的体力、日常歩行量・衣服内温度の影響. 日本生気象学雑誌, 31: 189-199.

Kellogg DL Jr, Johnson JM and Kosiba WA (1991). Control of internal temperature threshold for active cutaneous vasodilation by dynamic exercise. J Appl Physiol, 71: 2476-2482.

Kenney WL (1997). Thermoregulation at rest and during exercise in healthy older adults. Exercise and Sport Sciences Reviews, 25: 14-76.

Koga S, Shiojiri T, Kondo N and Barstow TJ (1997). Effect of increased muscle temperature on oxygen uptake kinetics during exercise. J Appl Physiol, 83: 1333-1338.

近藤徳彦, 池上晴夫 (1986). 環境温が持久性運動時の体温調節に及ぼす影響ー個人差に着目してー. 体力科学, 35: 229-240.

近藤徳彦, 西保　岳, 鍋倉賢治, 池上晴夫 (1987). 汗の拍出頻度よりみた安静時と運動時の発汗調節の比較ー非定常状態の場合についてー. 日本生気象学雑誌, 24: 135-144.

近藤徳彦, 池上晴夫, 伊藤一生, 岩田　敦 (1989). 常温環境下における運動時の発汗効率に関する研究ー運動強度の影響についてー, 神戸大学教育学部研究集録, 85: 123-131.

Kondo N, Nishiyasu T and Ikegami H (1995). The sweating responses of athletes trained on land and in water. Jpn J Physiol, 45: 571-581.

Kondo N, Nishiyasu T and Ikegami H (1996a). The influence of exercise intensity on sweating efficiency of the whole body in a mild thermal condition. Ergonomics, 39: 225-231.

Kondo N, Nishiyasu T, Nishiyasu M and Ikegami H (1996b). The regional differences in sweating responses between athletes trained on land and in water. Eur J Appl Physiol, 74: 67-71.

Kondo N, Nakadome M, Zhang KR, Shiojiri T, Shibasaki M, Hirata K and Iwata A (1997a). The effect of change in skin temperature due to evaporative cooling on sweating response during exercise. Int J Biometeorol, 40: 99-102.

Kondo N, Shibasaki M, Tominaga H, Horikawa N, Aoki K and Moriwaki M (1997b). The effect of the density of activated sweat glands and sweat output per gland on change in sweating rare. The 1997 Nagano Symposium on Sports Science Proceedings. Cooper Publishing Group, LLC, in press.

Kondo N, Takano S, Aoki K, Shibasaki M, Tominaga H and Inoue Y (1997c). The effect of exercise intensity on thermoregulatory sweating and cutaneous vasodilation. J Appl Physiol, submitted.

Kondo N, Tominaga H, Shiojiri T, Shibasaki M, Aoki K, Takano S and Koga S (1997d). Sweating responses to passive and active limb movements. J Thermal Biology, 415: 351-356.

近藤徳彦、山崎文夫 (1997e). 運動と発汗調節、池上晴夫編. 身体機能の調節性ー運動に対する応答を中心にー, pp. 148-161, 朝倉書店.

Kuno Y. (1956). Human Perspiration, Illinois: Charles C Thomas, Springfield.

Mitchell JH and Victor RG (1996). Neural control of the cardiovascular system: insights from muscle sympathetic nerve recordings in humans. Med Sci Sports Exerc, 28 Suppl: S60-S69.

Nadel ER, Bullard RW and Stolwijk JAJ (1971). Importance of skin temperature in the regulation of sweat-

ing. J Appl Physiol, 31: 80-87.

Nadel ER, Pandolf KB, Roberts MF and Stolwijk JAJ (1974). Mechanism of thermal acclimation to exercise and heat. J Appl Physiol, 37: 515-520.

Nadel ER (1977). Problems with temperature regulation during exercise. Academic Press, Inc.

永坂鉄夫 (1997). Human Selective Brain Cooling、M Cabanac著. 金沢熱中症研究会。

中山昭雄 (1981). 温熱生理学, 理工学社.

Nielsen M (1938). Die Regulation der Köpertemperature bei Musklarbeit, Scand Arch Physiol. 79: 193-230.

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

西保 岳 (1996). 運動と循環、宮村実晴編. 最新運動生理学ー身体パフォーマンスの科学的基礎, PP. 221-235.

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

Ogawa T and Sugenoya J (1993). Pulsatile sweating and sympathetic sudomotor activity. Jpn J Physiol, 43 : 275-289.

小川徳雄 (1994). 新汗のはなし 汗と暑さの生理学、アドア出版.

Reilly T, Atkinson G and Waterhouse J (1997). Biological Rhythms & Exercise. Oxford Univ. Press.

Rowell LB (1993). Human cardiovascular control. Oxford Univ. Press, Inc.

斎藤 満 (1997). 運動時の交感神経反応. 体育学研究, 42: 59-70.

Sato KT, Kane NL, Soos G, Gisolfi CV, Kondo N and Sato K (1996). Re-examination of tympanic membrance temperature as a core temperature. J Appl Physiol, 80: 1233-1239.

Sato K and Sato F (1983). Individual variations in structure and function of human eccrine sweat gland. Am J Physiol, 245: R203-R208.

芝崎 学, 近藤徳彦, 井上芳光 (1995). 子どもの体温調節特性. 人間科学研究, 3: 20-23.

Shibasaki M, Inoue Y, Kondo N and Iwata A (1997a). Thermoregulation responses of prepubertal boys and young men during moderate exercise. Eur J Appl Physiol, 75: 212-218.

Shibasaki M, Inoue Y and Kondo N (1997b). Mechanisms of underdeveloped sweating responses in prepubertal boys. Eur J Appl Physiol, 76: 340-345.

芝崎 学, 近藤徳彦, 森脇俊道 (1997c). 赤外線透過ファイバーを用いた非接触型鼓膜体温計の開発. 人間工学雑誌, 投稿中.

Shibasaki M, Kondo N, Tominaga H, Aoki K, Hasegawa E, Idota Y and Moriwaki T (1997d). A new method for continuously measuring tympanic temperature using infrared tympanic thermometry with an optical fiber. J Appl Physiol, submitted.

塩尻智之, 島名孝次, 古賀俊策, 近藤徳彦, 岩田 敦 (1993). 中強度自転車運動初期におけるガス交換動態の日内変動. 体力科学, 42: 455-460.

Shiojiri T, Shibasaki M, Aoki K, Kondo N and Koga S (1997). Effects of reduced muscle temperature on the oxygen uptake kinetics at the start of exercise. Acta Physiol Scand, 159: 327-333.

Smolander J, Harma M, Lindqvist A, Kolari O and Laitinen A (1993). Circadian variation in peripheral blood flow in relation to core temperature at rest. Eur J Appl Physiol, 67: 192-196.

Stephenson LA, Wenger CB, O'Donovan BH and Nadel ER (1984). Circadian rhythm in sweating and cutaneous blood flow. Am J Physiol, 246: R321-324.

Takano S, Kondo N, Shibasaki M, Aoki K, Inoue Y and Iwata A (1996). The influence of work load on

regional differences in sweating rates. Jpn J Physiol, 46: 183-186.

Tominaga H, Shibasaki M, Horikawa N, Aoki K and Kondo N (1997). Effect of exercise intensity on sweating response to isometric hand handgrip exercise (unpublished paper).

Van Beaumont W and Bullard RW. (1963). Sweating: its rapid response to muscular work. Science, 141: 643-646.

Vissing SF and Hjorso EM. (1996). Central motor command activates sympathetic outflow to the cutaneous circulation in humans. J Physiol, 492: 931-939.

Winget CM, Deroshia CW and Holley DC (1985). Circadian rhythms and athletic performance. Med Sci Sport Exerc, 17: 498-516.

山崎文夫，近藤徳彦，池上晴夫 (1991). 運動時の発汗量の変化に対する中枢機構と末梢機構の関与. 日本生気象学雑誌, 28: 95-106.

Yamazaki F, Sone R and Ikegami H (1994). Responses of sweating and body temperature to sinusoidal exercise. J Appl Physiol, 76: 2541-2545.