

# 老若男女の熱放散反応

井上芳光<sup>1</sup> 桑原智子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>大阪国際大学人間科学部 <sup>2</sup>神戸大学大学院総合人間科学研究科

## はじめに

ヒトが暑熱や運動刺激に曝されると、深部体温の過度な上昇を防ぐために、皮膚血流量や発汗量を増加して乾性および湿性の熱放散量を増大する。これらの熱放散反応は、発育・老化・性周期・性差・運動トレーニング・暑熱順化・日内リズムなどの要因で修飾されることが知られている。ここでは、我々のデータに基づき、子ども・高齢者・女性の熱放散反応特性について解説する。

## 子どもの熱放散反応

我が国には、「子どもは汗っかき」という言い習わしがある。しかし、生理学的に検討してみると、思春期前の子どもは若年成人に比し同一深部体温あたりの発汗量が低く、未発達（未分化）な発汗機能を有する<sup>1)~5)</sup>。この未発達は、多量発汗を要求する条件下ほど顕著になり<sup>1)~2)</sup>、中枢機構より末梢機構の活動性の未発達さに起因することが発汗波頻度の検討から明らかにされている<sup>1)</sup>。さらに、末梢機構の未発達は、活動汗腺数ではなく、未発達な汗腺サイズやコリン感受性に起因することも報告されている<sup>2), 3)</sup>。

子どもは少ない発汗量を代償するために、若年成人に比し頭部や躯幹部の皮膚血管をより拡張することで皮膚血流量を増大し、乾性の熱放散を促進する特性を有している<sup>2), 3), 5)~7)</sup>。このことは、28℃環境下での65%VO<sub>2</sub>max運動時、30℃環境下の40%VO<sub>2</sub>max運動時、25℃環境下での下肢温浴（42℃）実験や28℃から40℃まで漸次上昇する環境条件下で見出されている。なお、子どもの頭部や躯幹部でみられた高い皮膚血流量は、収縮神経のトーンスの低下が大きいこと、発汗開始後に作動する能動的血管拡張システムの感受性が高い

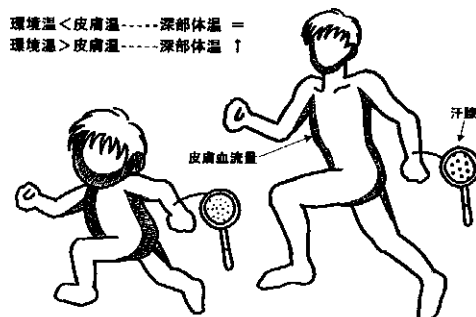


図1 思春期前の子どもの熱放散反応特性  
子どもは未発達な発汗機能（低い発汗量）を頭部や躯幹部の皮膚血流量の増大で代償する熱放散特性を有する。環境温<皮膚温なる環境条件では、この特性と体格特性（大きな体表面積/質量比による熱放散の促進）が相俟って、子どもは深部体温を若年成人とほぼ同等に調節できる。しかし、環境温>皮膚温では、大きな体表面積/質量比による熱獲得の促進と未発達な発汗機能が相俟って、子どもの深部体温は若年成人より大きく上昇する。

ことに起因することが推察されている<sup>6)</sup>。

図1は子どもの熱放散反応特性を模式的に示したものである<sup>7)</sup>。子どもは若年成人より活動汗腺密度は高いが、汗腺のサイズおよび機能が未発達であるために発汗量が少ない。この未発達な発汗機能を代償するために、子どもは頭部や躯幹部の皮膚血流量を増大して暑熱・運動に対処する。環境温が皮膚温より低い場合には、この熱放散反応特性と体格特性（大きな体表面積/質量比）が相俟って熱放散をより促進し、深部体温を若年成人とほぼ同等に調節できる。しかし、環境温が皮膚温より高い条件では、子どもの大きな体表面積/質量比が熱獲得を促進するとともに、未発達な発汗機能が大きく影響し、子どもの深部体温が若年成人より大きく上昇する。発汗量は深部体温や皮膚温で調節されるため、子どものこれらの体温が若年成人より著しく上昇した場合には、「子どもは汗っかき」にみえ

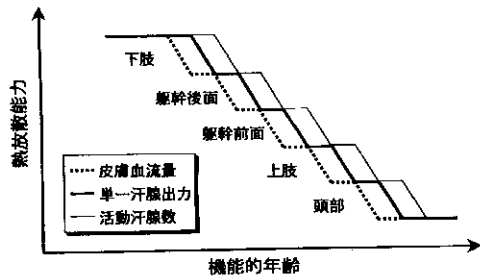


図2 熱放散反応の老化過程  
熱放散反応は、皮膚血流量→単一汗腺あたりの汗出力→活動汗腺数と老化の進行に伴い順次低下し、この一連の低下は下肢→軀幹後面→軀幹前面→上肢→頭部と進行する。

るようになる。また、熱獲得は環境温のみならず輻射熱にも強く影響されるため、輻射熱の大きな夏季の炎天下では子どもの熱獲得がさらに大きくなり、スポーツ活動時の深部体温は子どもが若年成人より上昇する<sup>7)</sup>。

熱放散反応は運動トレーニングにより改善されることが若年成人を対象とした研究で明らかにされている。しかし、思春期前の子どものでは、運動トレーニングに伴う発汗量の増大や汗塩分濃度の低下が若年成人ほど大きく期待できないようである<sup>11), 21), 7)</sup>。

## 高齢者の熱放散反応

老化に伴い発汗・皮膚血流量反応は減弱する。この減弱は両者が密接に関連し、皮膚血流量→単一汗腺あたりの汗出力→活動汗腺数と順次低下することが、横断的・縦断的検討から明らかにされている(図2)<sup>8)~11)</sup>。すなわち、老化に伴う皮膚血管拡張機能の低下が汗腺への酸素供給を制約し、それが汗腺を萎縮させ、ひいては汗腺の不活動化を招来するものと考えられる。なお、高齢者に観察される皮膚血流量の低下は、末梢機序として収縮神経のトーンスの低下が小さいこと、能動的血管拡張システムの感受性が低いこと、皮膚血管が萎縮・蛇行することに起因すると推察されている<sup>12), 13)</sup>。高齢者の低い発汗量は、中枢機構の活動性より末梢機構の活動性の低下に強く関連することが発汗波頻度の検討から推察されている<sup>14)</sup>。この推察は、前述した暑熱・運動実験やメタコリン皮下注入実験での高齢者の低い単一汗腺あたりの汗出力からも

裏づけられている<sup>8)~11), 15), 16)</sup>。そのため、発汗機能の老化は、末梢から中枢へと移行するように思える。

熱放散反応の一連の老化過程は全身同等には生じず、下肢→軀幹後面→軀幹前面→上肢→頭部と進行する(図2)<sup>7), 9)~11)</sup>。なお、高齢者における10年間(65±2歳→75±2歳)の経年的変化を検討した実験で、発汗量の低下が全身に拡大した際には、前額の発汗量が増加した<sup>11)</sup>。この増加は、汗腺それ自体およびその周辺におこる老化を代償するために、発汗中枢からの出力が増大し、未だ老化していなかった頭部の汗腺だけがより積極的に活動したものと解釈される。

この高齢者の低下した皮膚血管拡張機能や発汗機能は体温調節上では不利に作用するが、老化に伴う循環血液量の低下や心臓の機能低下に適応した変化といえるのかもしれない<sup>21), 7)</sup>。また、高齢者の発汗・皮膚血流量反応は、運動開始および暑熱暴露初期の応答が鈍化している<sup>8), 10), 15), 16)</sup>。これは皮膚の温度センサーの鈍化に起因するものと考えられている<sup>21), 7)</sup>。

これらの熱放散反応の老化は運動トレーニングで遅延されることが明らかにされている<sup>21), 7), 16)</sup>。

## 女性の熱放散反応

### (1) 性周期の影響

図3は女性ホルモンと熱放散反応の関連性を模式的に示したものである<sup>17)</sup>。女性は卵巣から分泌される女性ホルモン(プロゲステロンとエストロゲン)の変動で、排卵を境とした卵胞期と黄体期を有する。女性ホルモンは安静時深部体温に影響し、卵胞早期を基準にすると、エストロゲンのみが増加する排卵前(卵胞後期)に0.2-0.3℃低くなり、排卵後のプロゲステロンとエストロゲンが増加する黄体期に0.3-0.5℃高くなる。性周期に伴う安静時深部体温の変化は、暑熱暴露・運動時の発汗開始および皮膚血管拡張の深部体温閾値でも同様に観察される<sup>17)~20)</sup>。すなわち、女性ホルモンの増加が体温調節中枢を直接的に修飾し、プロゲステロンは熱放散反応の始まる深部体温閾値を高い方へ(黄体期)、エストロゲンの増加はその閾値を低い方へ(卵胞後期)、それぞれ変容する(図3の経路①)<sup>17)</sup>。



等にした男女間の比較でさえも、その亢進は女性で小さいことが認められている<sup>23)</sup>。この相違は、発汗量が男性ホルモンで促進され、女性ホルモンで抑制されること（図3の経路④）、さらに運動トレーニングに伴う男性ホルモンの亢進が女性では微量であることに起因するものと推察されている<sup>17), 23)</sup>。

## 文 献

- 1) Araki T, Toda Y, Matsushita K et al: Age differences in sweating during muscular exercise. *Jpn J Phys Fitness Sports Med*, 28, 239-248, 1979
- 2) Inoue Y, Shibasaki M, Araki T: Strategy for preventing heat illness in children and the elderly. *Exercise, Nutrition and Environmental Stress*, Edited by Nose H et al, 239-271, Cooper Publishing Group, Traverse City (MI), 2002
- 3) Shibasaki M, Inoue Y, Kondo N et al: Thermoregulatory responses of prepubertal boys and young men during moderate exercise. *Eur J Appl Physiol*, 75, 212-218, 1997
- 4) Shibasaki M, Inoue Y, Kondo N: Mechanisms of underdeveloped sweating in prepubertal boys. *Eur J Appl Physiol*, 76, 340-345, 1997
- 5) Inoue Y, Nakamura S, Yonehiro K et al: Cutaneous vasodilation of prepubertal boys and young men in changing linearly from 28°C to 40°C. in preparation
- 6) Shibasaki M, Inoue Y, Kondo N et al: Relationship between skin blood flow and sweating rate in prepubertal boys and young men. *Acta Physiol Scand*, 167, 105-110, 1999
- 7) Inoue Y, Kuwahara T, Araki T: Maturation- and aging-related changes in heat loss effector function. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci*, 23, 289-294, 2004
- 8) Inoue Y, Nakao M, Araki T et al: Regional differences in the sweating responses of older and younger men. *J Appl Physiol*, 71, 2453-2459, 1991
- 9) Inoue Y: Longitudinal effects of aging on heat-activated sweat density and output in healthy active older men. *Eur J Appl Physiol*, 74, 72-77, 1996
- 10) Inoue Y, Shibasaki M: Regional differences in age-related decrements of the cutaneous vascular and sweating responses to passive heating. *Eur J Appl Physiol*, 74, 78-84, 1996
- 11) Inoue Y, Ueda H: Changes in sweating response with aging in healthy older men: 10-yr follow-up. *Environmental Ergonomics*, 380-383, 2005
- 12) Inoue Y, Shibasaki M, Hirata K et al: Relationship between skin blood flow and sweating rate, and age related regional differences. *Eur J Appl Physiol*, 79, 17-23, 1998
- 13) 井上芳光: 最大皮膚血管コンダクタンスの発育・老化特性. *デサントスポーツ科学*, 19, 254-260, 1998
- 14) Inoue Y, Shibasaki M, Ueda H et al: Mechanisms underlying the age-related decrement in the human sweating response. *Eur J Appl Physiol*, 79, 121-126, 1999
- 15) 井上芳光, 上田博之: 高齢者における運動時の発汗および皮膚血流量反応. *デサントスポーツ科学*, 20, 87-98, 1999
- 16) Inoue Y, Havenith G, Kenney WL et al: 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
- 17) 井上芳光, 桑原智子, 小倉幸雄 その他: 女性の体温調節と運動. *体育の科学*, 54, 797-803, 2004
- 18) 井上芳光: 体温調節システムの適応的变化: 性周期・性差による修飾作用, 体温: 運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因. 平田耕造, 井上芳光, 近藤徳彦 編, 218-227, ナップ出版, 2002
- 19) Inoue Y, Tanaka Y, Omori K et al: 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
- 20) Kuwahara T, Inoue Y, Abe M et al: 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
- 21) Kuwahara T, Inoue Y, Taniguchi M et al:

- 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
- 22) Kuwahara T, Inoue Y, Hirata M et al: Enhanced heat loss responses by short-term endurance training in exercising women. in preparation
- 23) Kuwahara T, Inoue Y, Iseki Y et al: Sex differences in effects of physical training on sweat gland output during a graded exercise. in preparation