

## 参考資料 1 - 4 「暑熱順化が熱中症に及ぼす影響の整理」

熱環境が身体に及ぼす影響は、同じ熱環境でも人側の暑熱順化の有無で異なる事が知られている。例えば、暑さに慣れていない初夏と夏を経験した晩夏では同じ熱環境でも初夏の方が熱ストレスは大きいことが知られている。ここでは、熱環境と人の熱ストレスを論じる上で、暑熱順化がどの程度影響し得るのか、既往知見を整理した。

### 1. 暑熱順化の種類と定義

暑熱順化は、獲得期間や発汗機能の違いにより短期暑熱順化と長期暑熱順化に分類される。前者は季節の変わり目や運動により起きるものであり、後者は熱帯暑熱環境で生活する人に起きているものである。したがって、日本の夏における熱中症予防を考慮した時、あてはまるのは短期暑熱順化だと考えられる。

### 2. 短期暑熱順化

#### 2.1 原理

短期暑熱順化の原理として考えられているものは4つ挙げられており、発汗機能の変化、汗の成分の変化、皮膚血管拡張の開始条件の変化、循環血液量の増加である。

#### 1) 発汗機能の変化

Lind ら (1963)<sup>1</sup>は、暑熱順化によって同じ強度の運動を行った場合汗を多くかきやすくなるため、深部体温（直腸温）は上昇し難くなることを明らかにしている。

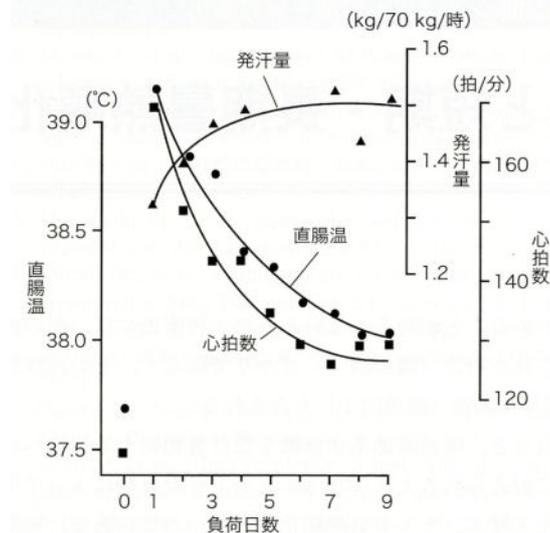


図 1 暑熱順化による直腸温、心拍数、発汗量の変化

<sup>1</sup> Lind AR, BASS DE : Optimal exposure time for development of acclimatization to heat., Fed Proc, 22, 704-708, 1963.

これは主に発汗が開始される深部体温が低下するためだと考えられている。山崎ら (2007)<sup>2</sup>によると、食道温と汗の拍出頻度の関係から、暑熱順化により変化するのは発汗が開始される体温が低くなるのであり、体温と発汗量の傾きは変わらないことが示されている。図2右図では、汗の拍出頻度と胸部発汗量の関係は暑熱順化で変わっておらず、これらより末梢機構（汗腺あたりの発汗能力）は短期間では変化しない事が示されている。

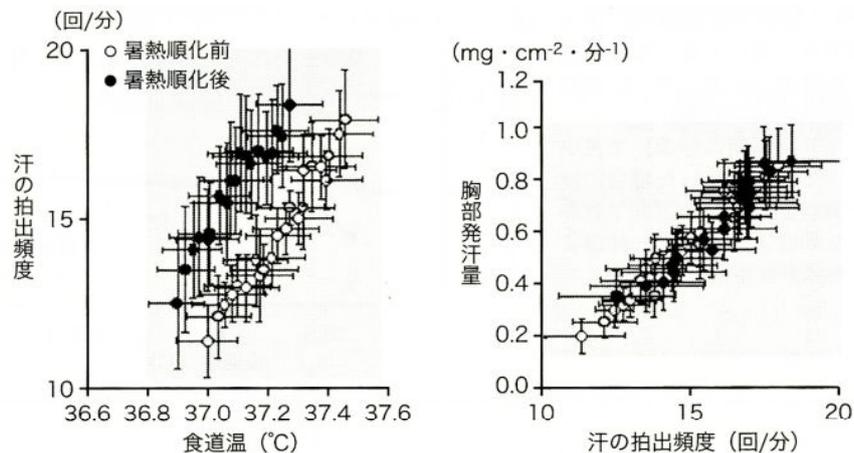


図2 暑熱順化前後における安静暑熱負荷中の食道温と汗の拍出頻度の関係（左図）、および汗の拍出頻度と胸部発汗量の関係（右図）

一方で、暑熱順化によって末梢機構が変化するという報告もある。Inoue ら (1999)<sup>3</sup>の実験では、気温 43°C で 90 分のトレーニングを 8 日間行った結果、単一汗腺あたりの発汗量の増加が確認されている。これには暑熱順化により、発汗漸減が起きにくくなるためだと考えられている。なお、発汗漸減とは、多量の発汗により汗孔部ケラチン環が膨化（皮膚が湿潤）して汗孔が閉鎖される為に、発汗量が低下する現象である。

## 2) 汗の成分の変化

1) で述べたように発汗量の増加により深部体温の上昇を防ぐことができるが、発汗量を増大させる事は身体には欠かせない Na<sup>+</sup>などのミネラルを損失させることに繋がる。Buono (2007) 4の実験では、暑熱順化によって汗における Na<sup>+</sup>濃度が低下していることが示されており、これにより多量発汗時にも塩分の損失を軽減する事が出来ると考えられる。なお、順化後の汗 Na<sup>+</sup>濃度の低下は汗腺での Na<sup>+</sup>の再吸収が増加するためと考えられている。

<sup>2</sup> 山崎文夫、生田智也、曾根涼子：汗の拍出頻度よりみた短期暑熱順化による発汗機能の変化、産業医大誌、29:431-438、2007

<sup>3</sup> Y. Inoue, George Havenith, W. Larry Kenney, Joseph L. Loomis, Elsworth R. Buskirk: 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.

<sup>4</sup> Michael J. Buono, Kimberly D. Ball, and Fred W. Kolkhorst : Sodium ion concentration vs. sweat rate relationship in humans., J Appl Physiol, 103, 990-994, 2007

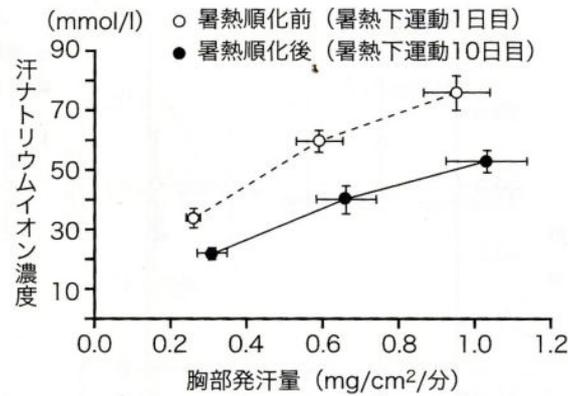


図3 暑熱順化前後における胸部発汗量と汗 Na<sup>+</sup>濃度の関係

### 3) 皮膚血管拡張の開始条件の変化

暑熱順化によって、有毛部の皮膚血管拡張が開始される深部体温閾値が低下する。皮膚血管を拡張させて皮膚の温度を上げることで、皮膚から多くの熱を放出する事が出来る。

### 4) 循環血液量の増加

循環血液量は、運動トレーニングによって約 10%増加するとされている。循環血液量の増加は、最大酸素摂取量の増加に繋がり、持久性運動パフォーマンスを向上させ、暑さに対する耐性を高める。Sawka MN, et al (2000)<sup>5</sup>の実験によると、トレーニングの初期(約2週間)には血漿量が増加するのみだが、2～3週間後から赤血球も増加することが報告されている。また、運動をしない安静暑熱暴露を1日2時間、8日間行った場合にも血漿量の増加は生じるが、運動トレーニングを加えた場合の方が増加は2.4倍大きいとの結果が得られている。

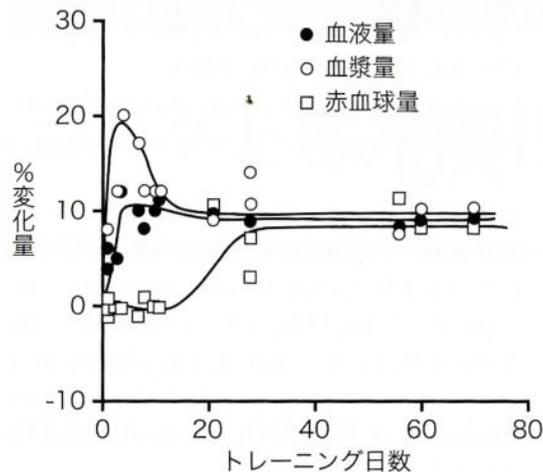


図4 運動トレーニング日数の経過に伴う血液量、血漿量および赤血球量の変化

<sup>5</sup> Sawka MN, Convertino VA, Eichner ER, Schnieder SM, Young AJ: Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stresses, and trauma/sickness. Med Sci Sports Exerc, 32: 332-348, 2000.

## 2.2 発現・消失条件

短期暑熱順化の発現には、大きく分けて以下の3つの要因があるとされている。

- ・環境条件（環境温、放射熱など）
- ・運動条件（強度や持続時間など）
- ・着衣条件（衣類の種類や着衣量など）

これらの条件がすべて揃わずとも暑熱馴化は発現することが確認されている。例えば中村ら（2009）<sup>6</sup>の実験では、日常生活に近い状態（運動トレーニングを含まない）で、約10日間の暑熱暴露（最高気温の期間平均：32.3℃、日平均の期間平均：27.4℃、順化開始日の平均気温は26.5℃）した結果、暑熱順化が発現したことを確認している（被験者：男子大学生5人）。そのため、夏になると一過性の暑熱順化（季節順化）が起こる。

一方で、約9日間（最高気温の期間平均：29.5℃、日平均の期間平均：24.2℃、順化開始日の平均気温は25.0℃）で暑熱順化の消失も見られている。

なお、運動トレーニングによって短期暑熱順化は起こるが、環境温を下げたり顔に送風することで、体温上昇や発汗を抑えると発汗閾値体温の低下も発汗量の増大も起こらないことが指摘されており、このことから短期暑熱順化の成立には、体温上昇、特に脳温の上昇が必要と考えられている。

## 3. 長期暑熱順化

### 3.1 原理

長期暑熱順化は、最大発汗量をも高める短期暑熱馴化と原理が異なる。長期暑熱順化した身体は発汗中枢の活動性が低下し、汗腺の感受性が低下する事で個々の汗腺の最大分泌能力も減退し、結果として最大発汗量も減退する。一方、能動汗腺数は多いため、少ない汗でも濡れる皮膚面積を大きくする事が出来る。また、皮膚血管拡張機能の亢進によって皮膚温を高く保っている。これらにより、非蒸散性熱放射（放射、伝導、対流）と汗の蒸発効率を高めることができ、少量の汗で効率よく熱放散ができる。Matsumoto T, et al. (1997)<sup>7</sup>では、温帯地住民の日本人と熱帯地住民であるタイ人の発汗反応比較により、日本人に比べてタイ人の発汗量が少ない点、皮膚温度が高い点を指摘している。

---

<sup>6</sup> 中村 泰人、岡本 孝美、安浪 夕佳：日常生活で生じる暑熱適応の人工気候室実験による実態把握，日本建築学会環境系論文集，74(636)，115-124，2009

<sup>7</sup> Matsumoto T, et al.: Long-term heat acclimatization in tropical inhabitants. International Symposium on Thermal Physiology Abstracts, p. 69, 1997.

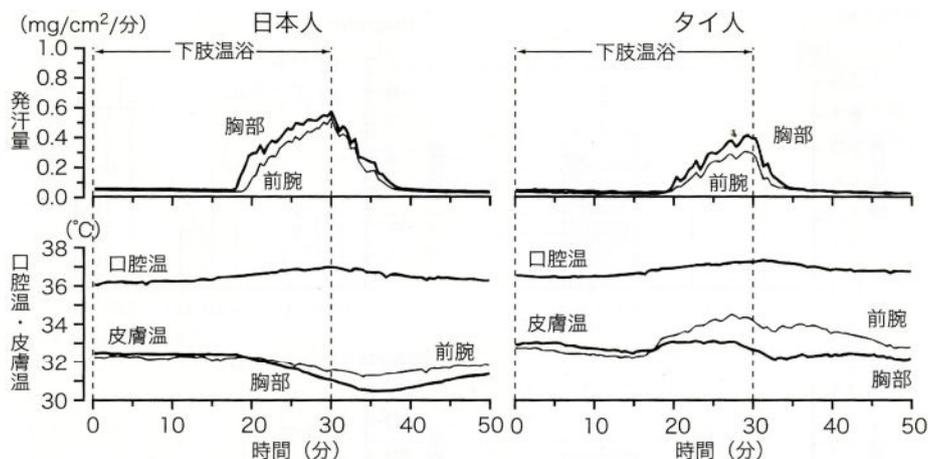


図5 日本人とタイ人の局所発汗量と口腔温、皮膚温の変化  
(下肢温浴時：室温 26.6℃、43℃の循環温水に両下腿を30分浸水)

### 3.2 発現・消失条件

長期暑熱馴化の発現・消失には、遺伝因子と環境因子が考えられている。

#### 1) 遺伝因子

Kuno (1956)<sup>8</sup>は全身の能動汗腺数から民族差を考えた(図7)。タイ人とタイ出生の日本人やフィリピン人とフィリピン出生の日本人を比較したところ能動汗腺数に大きな違いは見られなかった。変わりに、日本人でも出生地によって能動汗腺数に違いが見られた。

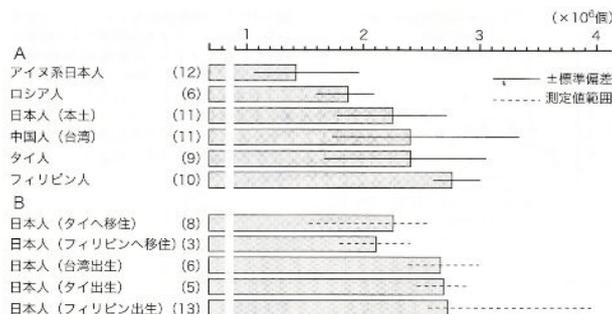


図6 能動汗腺数の民族差

#### 2) 環境因子

熱帯地住民にみられる長期暑熱順化の少なくとも一部は生後に後天的に獲得されたものであり、居住環境を変えることにより長期暑熱順化を獲得や脱順化が生じる可能性があることが指摘されている。Lee JB, et al (2004)<sup>9</sup>によると、日本在居期間が長くなるにつれて、マレーシア人の発汗潜時が短縮、発汗量が増大し、日本人の結果に近づいたことが示されている(図7)。また、

<sup>8</sup> Kuno Y: human Perspiration. Charles C Thomas Publisher, Springfield, Illinois,1956.

<sup>9</sup> Jeong-Beom Lee, Jun-Sang Bae, Mi-Young Lee, Hun-Mo Yang, Young-Ki Min, Ho-Yeon Song, Kwang-Kyune Ko, Jun-Tack Kwon, Takaaki Matsumoto: The change in peripheral sweating mechanisms of the tropical Malaysian who stays in Japan. J Thermal Biology, 29: 743-747,2004.

Bea JS, et al. (2006)<sup>10</sup>の報告では、熱帯地居住期間が長くなるにつれて、日本人の発汗潜時が延長、発汗量が減少し、熱帯地住民の結果に近づいたことが示されている（図8）。

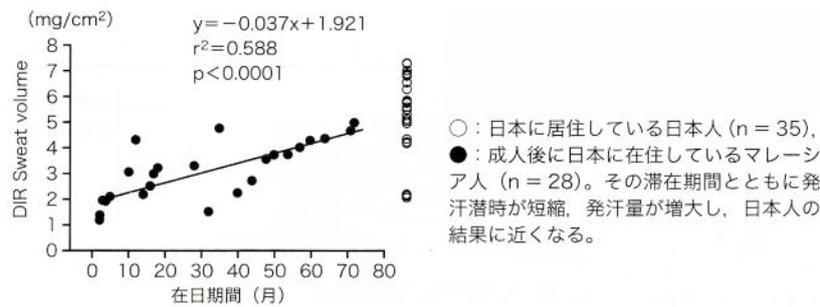


図7 マレーシア人の日本滞在による直接反応性発汗の変化  
(DIR=実験後5分間の直接発汗性反応)

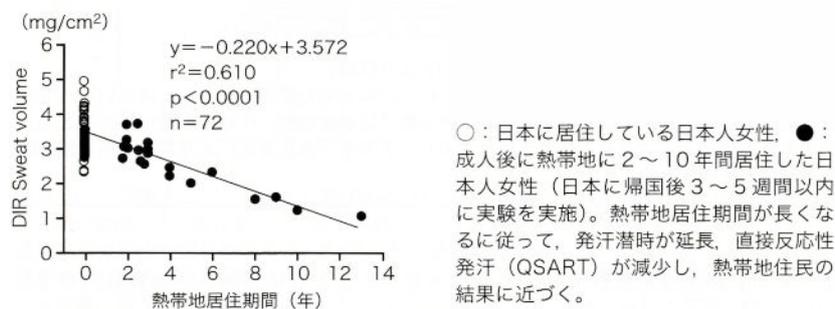


図8 日本人の熱帯地滞在による直接反応性発汗の変化  
(DIR=実験後5分間の直接発汗性反応)

#### 4. まとめ

日本の夏には、連続的な暑熱暴露などにより発汗機能や皮膚血流反応の亢進が促され、短期暑熱順化が起きると考えられる。一方で、その消失も比較的容易に起きうることが指摘されている。

したがって、暑熱順化後では同様の熱環境における人の熱ストレスは低くなると思われるが、熱中症の視点も含めて適応策を検討する上では、安全側の配慮として、暑熱順化が起きていないことを前提とした議論を行うことが妥当であると考えられる。

#### 【参考文献】

井上 芳光、近藤 徳彦：体温Ⅱ－体温調整システムとその応用－，有限会社 ナップ，186-192.207-218，2010

<sup>10</sup> Jun-Sang Bae, Jeong-Beom Lee, Takaaki Matsumoto, Timothy Othman, Young-Ki Min, Hun-Mo Yang: prolonged residence of temperate natives in the tropics a suppression of sweating. Pflugers Arch, 453: 67-72, 2006.