

年齢と体温調節機能との関連性

上野 哲

独立行政法人労働者健康安全機構・労働安全衛生総合研究所・人間工学研究グループ

(平成 28 年 4 月 15 日受付)

要旨：現在，地球温暖化とともに労働人口の高齢化が進行している。夏季の気温上昇と高齢者の体温調節能力低下を考慮に入れると，高齢労働者で業務上暑熱障害に罹患する人数が増加する事が予想される。健康な人でも加齢により生理機能は毎年 0～2% 程度減少するとされるが，運動習慣を持つことで生理機能低下を抑えることが可能となる。体温調節機能低下は年齢が要因とならず加齢に付随する有酸素運動能力低下や体脂肪率増加が主要因ということであれば，有酸素運動能力の維持増進で体温調節機能を保持できると思われる。本総説では，最初に暑熱環境と人体間の熱移動及び人の暑熱反応を紹介した。次に，代表的な個人属性が暑熱反応に与える影響に関する知見を紹介した。最後に，年齢と体温調節能力に関する文献をレビューした。結果は，男性高齢者で有酸素運動能力が若年者と同等な場合，深部体温は若年者と同等であり年齢の影響は少ないという報告が多かった。調査した文献から環境にも依存するが男性高齢者は有酸素運動能力を維持することで体温調節機能を保持し暑熱障害リスクを減らす可能性が示唆された。

(日職災医誌, 64 : 308—318, 2016)

キーワード

高齢労働者, 体温調節機能, 個人属性

I. はじめに

今後地球温暖化の進行で夏季屋外環境の暑熱ストレスはさらに高まり，業務上の暑熱障害が増加することが予想されている^{1)~4)}。1880～2012 年の間に平均で 0.85℃ 世界平均地上気温は上昇した。二酸化炭素の排出量が抑制されなければ今世紀終わり頃は 1986～2005 年の地上気温と比べて平均で 2.6～4.8℃ 上昇することが見込まれている⁵⁾。気温上昇に加えて，高齢化により暑熱ストレスに弱いとされる高齢労働者の割合が増えていることが暑熱障害増加の社会的要因となる。高齢労働者の定義はないが，米国経済発展委員会 (CED) では 45 歳以上を高年齢労働者としている⁶⁾。一方，日本の高齢者雇用安定法では 55 歳以上を高年齢労働者としている。全国の 45 歳以上の全就業者数に占める割合は 1969 年に 30% を超えて，2015 年で 51.0% に達し上昇を続けている。また，55 歳以上の就業者の割合は，1975 年に 15% を超えて 2015 年には 29.2% となった⁷⁾。加齢により一般健康人は 30 歳以降 70 歳まで心血管機能，呼吸機能，代謝，筋肉機能が毎年 0～2% 程直線的に減少するとされる。統合的な能力である体温調節機能は 17 個の研究の平均で年間 0.95% 減少するが，その分布は毎年 0～3.4% と広範囲に及ぶ⁸⁾。一方，

35 歳以上のアスリートの最大酸素摂取量の減少率は毎年 0.5% 程度であるという報告があるため⁹⁾，高齢者では体力を保持することで体温調節能力の低下を抑えることが出来ると考えられる。従って，年齢そのものが体温調節能力低下の要因ではなく，最大酸素摂取量の減少，体組成の変化や慢性的な健康障害が主な原因であるとも考えられている¹⁰⁾。

本総説では，体温調節の基礎となる環境と身体間の熱移動，身体の体温調節反応を概説し，次に年齢以外の体温調節反応に影響する身体の要因について解説する。最後に高齢者は若年者と比べて体温調節能力が低下しているのか，有酸素運動能力を維持することによって高齢者が体温調節機能を保つことが出来るか等について最近の知見を紹介する。2 節の暑熱ストレス，3 節の体温調節反応，4，5 節の個人属性の関係を模式的に図 1 に示す。環境の暑熱ストレスに暴露されると人は体温調節反応を起こすが，その反応は個人属性に影響される。体温調節反応が暑熱ストレスに対して十分であれば体温は維持されるが，不足していれば体温は上昇する。(図 1)

II. 環境と身体間の熱移動

人は何もしなくても基礎代謝量に相当する熱エネルギー

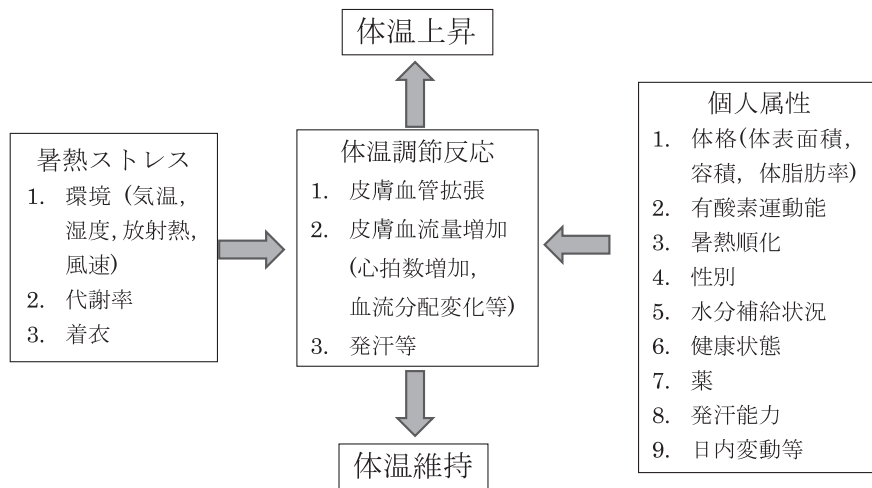


図1 暑熱ストレス、個人属性及び人の体温調節反応との関連

ギーを体内で生産しているため、その分放熱しなければ体温は上がり続ける。体を動かすことにより熱が作り出されれば基礎代謝に上乘せした熱量の放熱が必要となる。暑熱バランスの式は次の式で表せる。

$$S = M - W - (E + R + C + Res) \quad (1)$$

ここで、 M ：代謝率、 W ：仕事率、 Res ：呼吸熱、 S ：蓄熱量、 E ：蒸発潜熱 ($= w \times A_D \times (P(T_{sk}) - P_a) / R_{et_dyn}$ (2)), R ：放射熱 ($= h_r \times f_{cl} \times A_D \times (T_{cl} - T_r)$ (3)), C ：対流熱 ($= f_{cl} \times A_D \times (T_{sk} - T_a) / I_{T_dyn}$ (4)), である。また、 h_r ：放射伝達率、 T_a ：環境温度、 P_a ：環境蒸気圧、 T_{sk} ：平均表面温度、 T_{cl} ：着衣平均表面温度、 T_r ：平均放射温度、 w ：表面の濡れ率、 A_D ：体表面積から規定される値である。 f_{cl} は衣服補正因子であり衣服を着ることで裸体表面積より増えた体表面積の割合を示す。 R_{et_dyn} ($= R_{et_stat} \times CorrR_{et}$)は静止状態の全潜熱抵抗 (R_{et_stat})に風速や動作の影響を考慮するための潜熱抵抗補正因子 ($CorrR_{et}$)を掛けた動的な全潜熱抵抗であり、 I_{T_dyn} ($= I_{T_stat} \times CorrI_T$)は静止状態の全顕熱抵抗 (I_{T_stat})に風速や動作の影響を考慮するため顕熱抵抗補正因子 ($CorrI_T$)を掛けた全顕熱抵抗である。風が吹けば $CorrR_{et}$ と $CorrI_T$ の2つのパラメーターが減少して放熱量が増え、体内の蓄熱量が減少する。衣服の保温性は I_{T_stat} を通して、蒸気透過性は R_{et_stat} を通して身体と環境との熱移動に関係する。汗が蒸発するときの蒸発潜熱 (E) は、体表面温度 (T_{sk}) が高く環境の湿度 (P_a) が低いほど大きい (式 (2))。対流熱 (C) は、体表面温度 (T_{sk}) と環境温度 (T_a) の差によって決まる (式 (4))。蓄熱量 (S) が正の値だと、体の中に熱が蓄積され体温が上昇する。このように暑熱ストレスを表す6つの基本因子 (気温、湿度、放射温度、風速、衣服、代謝熱) は体内の蓄熱量に影響を及ぼすのが理論的な物理式で示される。また、熱移動量は体表面積に比例して大きくなる (式 (2, 3, 4))。以上の式は、皮膚表面から環境への熱移動を表しているが、体の中の熱移動は体温調

節機能によって行われるため、人の暑熱負担を表現するには個人特性を含めたより多くの影響因子を考慮に入れる必要がある。

III. 暑熱反応

体温調節は、恒常性を保つ調節の中で最も優先度が高い¹¹⁾。それは、体温は生体内で起きる消化等で起きる酵素反応やたんぱく質の構造維持に影響を与え、生命活動維持するには $35 \sim 41^\circ\text{C}$ の間に体温を保つ必要があるからである。最も大きな体温調節は行動性体温調節である。寒い時は暖房をつけたり厚着をしたりし、暑い時は冷房をいれ薄着をする。屋外で日射が強い時は帽子を被ったり日傘をさしたり、日蔭に入ったりする。

暑熱環境下で人の体内で起きる自律的な放熱反応には2つの経路がある。一つは、末梢血管拡張や心拍数増加による皮膚温度上昇によって促進される放熱 (乾性放熱) である。皮膚の毛細血管の動静脈吻合が開くことで、体のコアの部分から送られた温かい動脈血が直接皮膚表面直下の静脈に流れ込み皮膚温度が上昇する。皮膚温上昇で体の表面から環境への対流熱伝達が増加する。もう一つは、発汗時にかいた汗の蒸発時に蒸発潜熱を皮膚から奪うことで促進される放熱 (湿性放熱) である。この2つの放熱経路は互いに独立ではない。皮膚温度上昇があれば皮膚面の飽和蒸気圧増加により環境の蒸気圧との差が大きくなるため汗の蒸発量が増加するのに加えて汗腺からの発汗も促進されるため、皮膚温上昇は二重の意味で湿性放熱に影響を及ぼす。一般的に皮膚血管拡張や心拍数増加による反応で皮膚温度が上昇し次に発汗作用が起きると考えられる。多くの数値温熱モデルではこの考えを取り入れている。

しかし、環境条件によっては、乾性放熱や湿性放熱が有効でなくなる場合がある。環境温度が皮膚温度より高い場合は、対流による体から環境への乾性熱伝導は出来

なくなり、逆に環境から体内に熱が入ってくる。この場合、汗の蒸発による湿性放熱によってしか身体から環境へ熱を運ぶ手段が無くなる。さらに、気温だけでなく湿度も高くなると皮膚表面からは汗が蒸発出来ず汗をかいても皮膚から流れ落ちるだけで、湿性放熱も働かず身体から環境への熱移動は出来なくなる。

汗の蒸発による熱移動を制限する要因には、皮膚からの蒸発する汗の量には環境によって定まる蒸発可能な上限値があること、及び発汗量には個人ごとに上限値があることが挙げられる。上限値は、環境の温度、湿度、風速及び着衣の外的要因で規定される（前節の蒸発潜熱の式）。この最大蒸発量よりも個人の最大発汗量が多いときは、蒸発できなかった汗は皮膚から流れ落ち放熱には役に立たず無効発汗となる。この場合、湿性放熱量は個人の発汗能力よりも環境により規定される。環境により規定される最大蒸発量より個人の最大発汗量が少ない場合は、最大発汗量が熱移動の上限値となるため個人の発汗能力が放熱量を規定する。一般に暑熱環境から受ける熱移動と身体活動により発生する代謝熱の合計が身体の放熱能力（乾性放熱と湿性放熱）を超えるあたりでは発汗量は個人の最大発汗量に達しているとされる¹²⁾。

IV. 暑熱ストレスに影響する個人属性

前節で示した暑熱環境下で体温調節のために自律的に起きる皮膚血管拡張、皮膚血流増加、発汗作用等の生理反応は、暑熱順化の有無、体格（体表面積、体重、体脂肪率等）、有酸素運動能力、性別、年齢等の個人属性により影響を受ける（図1）。年齢が体温調節能力に影響するかどうか検討するには、年齢以外の個人属性の影響を取り除く必要がある。代表的な影響因子を以下で紹介する。

A. 暑熱順化

暑熱順化されると、放熱能力が向上されて高温環境への身体の適応能力が高まる。短期間の暑熱順化は、皮膚血管の拡張による皮膚血流量の増加と発汗中枢の興奮性の向上による¹³⁾発汗量の増加及び発汗潜時の短縮である。汗の塩分濃度も減少する。これに対し長期間の暑熱順化は、発汗潜時が長く、発汗量は少ないが、汗の塩分濃度はさらに少なくなる。体の維持に役立つ水分や塩分の放出を抑え、汗の蒸発効率を高める働きがある。汗は、かく量に比例して放熱量は増えず、汗をかいても蒸発しない無効発汗量が増えるため、長期間の暑熱順化では無効発汗が少なくなるよう発汗量の部位差が少なくなる。他の長期暑熱順化は、血液量や細胞外液量等の体液量が増加及び皮下脂肪層が薄くなることである。脂肪層は熱伝導率が低いいため薄くなることで熱伝導がよくなる。暑さへの慣れは、体の暑熱順化だけでなく精神的な暑さへの慣れ¹⁴⁾もあるとされるため、この場合体は無理をしている場合もあると考えられる。

B. 体格

暑熱環境中での労働時の深部体温に影響を与える因子として体格があげられる。具体的には、体格の中で全身の体表面積（ A_b ）、体表面積体積比（ A_b/M ）が暑熱ストレス応答に影響する因子と考えられる¹⁵⁾。

民俗学的には、寒冷地方に住む人の体格は大きく、体重当たりの体表面積は小さくなるため、熱が逃げにくい体型である（ベルグマンの法則）。一方、熱帯地方では、首、足などの突出部が大きく放熱量を増やす効果があり、やせ形で四肢が細長く、放熱に有利な体型である（アレンの法則）¹⁶⁾。

体表面積は、対流や放射熱による乾性熱移動量や汗の蒸発による湿性熱移動量を決定し、暑熱ストレスの反応に影響を及ぼす（2節（2-4）式）。環境温度が皮膚温度より低ければ、乾性と湿性放熱が促され暑熱ストレスは軽減されるが、逆に環境温度が皮膚温度より高いと、環境から体内への熱移動が促進されることになり暑熱ストレスは増加することになる。そのため、高温環境では肥満型とやせ型の暑熱耐性は近づくという報告があり¹⁷⁾、Havenith¹⁸⁾らも環境によって体表面積が暑熱反応に及ぼす影響は異なるとしている。体格が深部体温や心拍数に与える影響を軍隊の体格を用いて気温35℃、相対湿度50%の環境下での高負荷運動条件で理論計算した研究では、背が低くやせている人が最も深部体温や心拍数が上昇せず、背が高く太っている人の深部体温や心拍数が最も上がりやすいという報告もある¹⁹⁾。

C. 肥満

肥満は熱中症の危険因子の1つとされる。米軍の若年兵士の腕立て伏せと踏み台昇降の運動テストに合格した過体脂肪群（BMI>25かつ体脂肪率>30%）とコントロール群（BMI≤25又は体脂肪率≤30%で運動テストは受けていない群）を比較した疫学データでは、90日間の訓練で暑熱障害を発症した割合は前者が1.57%、後者が0.43%で過体脂肪群がコントロール群の3.66倍多かった²⁰⁾。過体脂肪群は、運動テストに合格した人に限られ、コントロール群では運動テストによる選択がなかったことを考慮に入れると肥満の暑熱障害危険度はさらに高いと考えられる。

脂肪のため体重が重くなると、動作時に多くのエネルギーが必要となるため代謝熱が増え体内での産熱量が増える。一方、脂肪がつくと皮膚は伸びるので体表面積は増えるが、体型が丸くなるため単位体重当たりの体表面積が小さくなり環境との熱交換量が少なくなる。汗腺数は年齢とともに変化しないが、皮下脂肪により皮膚が伸ばされることで表面の活動汗腺密度が減少することもあり発汗による放熱能力が低下する²¹⁾。以上のように産熱が増え放熱が減ることで体内の蓄熱が増える。また、脂肪の比熱は2.51J/gで、他の組織の平均値3.65J/gよりも低い²²⁾ので、脂肪の比率が高い肥満者では同じ熱量に対す

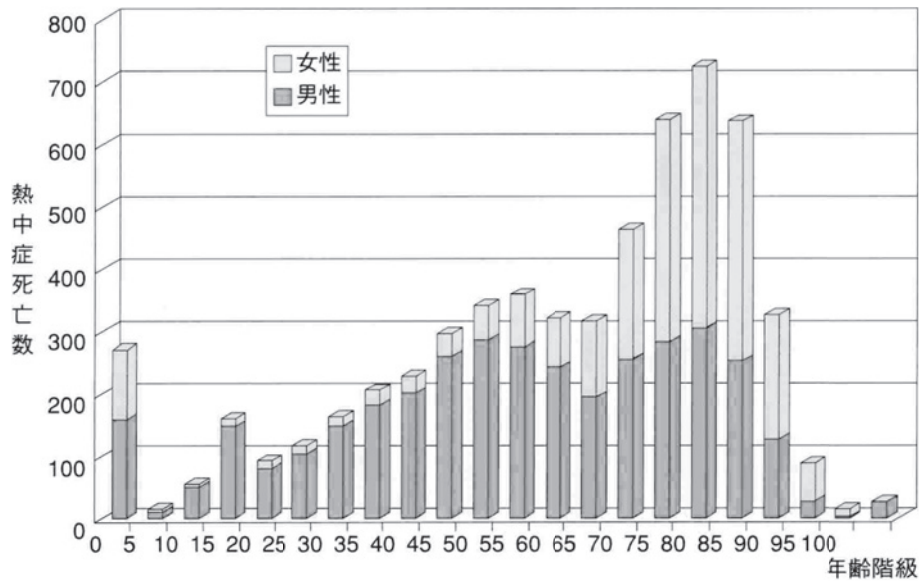


図2 1968～2006年の性別・年齢階級別累積熱中症死亡者数（厚生労働省人口動態統計）³⁰⁾

る体温上昇度が高い。その上、脂肪の熱伝導率は筋肉に比べて小さく約半分（1mmの深さ当たり $0.0048\text{m}^2 \cdot \text{C} / \text{W}$ ）²³⁾であるので断熱作用があり、伝達熱量は減る。ただし、皮膚血流量が増加すれば血流による熱移動が多くなるため脂肪の断熱効果は減少する。

肥満の人では、重い体を動かす筋肉に必要な血液と皮下脂肪で広がった皮膚に見合う血流を供給するため心臓への負担が増え心拍数が増す²⁴⁾。肥満者では心肺能力は落ちており、通常より心肺機能が要求される暑熱ストレス時はストレスレベルが平均的な人より高くなる²⁵⁾。

D. 有酸素運動能力（最大酸素摂取量）

最大酸素摂取量は、生活習慣にも依存するが年齢と共に減少する。8～82歳の日本人（男性209人、女性262人）を対象として最大酸素摂取量を測定した研究では、男性では平均で20歳くらいまでが最も高く、その後最高値と比べて、4%（25～30歳）、10%（35～40歳）、19%（45～50歳）、31%（55～60歳）、50%（65歳以上）減少する。女性では10歳までが高く、その後最高値と比べて8%（15～20歳）、17%（25～30歳）、26%（35～40歳）、35%（45～50歳）、44%（55～60歳）、55%（65歳以上）減少する²⁶⁾。

暑熱応答では、皮膚表面からの放熱を促進するために心拍数が増加し皮膚血流量が増える。運動時には活動筋肉への血流と放熱のための皮膚血流が競合するが、有酸素運動能力が高ければ高いほど、皮膚血流量を持続できるため暑熱に対する耐性は高く体温上昇を抑えることが出来る。Gardnerらは、1.5マイルを走るのにかかった時間で被験者を4等分して最も遅い群と最も速い群を比較した。前者は後者の3倍の暑熱障害リスクがあることを示した²⁷⁾。Lu²⁸⁾らの研究によると、個人属性で深部体温上昇に寄与する最大酸素摂取量/体重の割合は約50%で、

体表面積/体重が約30%、体脂肪率が約20%としている。Selkirk²⁹⁾らは、2種類の有酸素運動能力（高と低）と2種類の体脂肪率（高と低）の組み合わせ（4群）を対象に、気温40℃相対湿度30%の環境で防護服を着てトレッドミルを使った運動での限界時間を比較した。体脂肪率が低く有酸素運動能力が高い群で有意に限界時間が長いことを示した。一方、Havenith¹⁹⁾らは、最大酸素摂取量と深部体温との関連は環境によるとしている。深部体温は体内の蓄熱量により決まるが、蓄熱量は産熱量と放熱量の差である。産熱量と放熱量のバランスがとれている間は最大酸素摂取量と深部体温との関連は無い。通常、放熱量は最大酸素摂取量と正の相関があるとされるが、高温高湿度環境だと環境により決まる放熱量の上限が低いいため有酸素運動能力が高くても放熱量は増えない。一方産熱量は最大酸素摂取量の増加で増加するので、その結果最大酸素摂取量が大きい人で深部体温が上昇することになる。

V. 加齢が体温調節能力に及ぼす影響

図2に、厚生労働省人口動態統計による1968～2006年までの日本全国の年代別累積熱中症死亡数を示す³⁰⁾。（図2）10代後半はスポーツによる熱中症が多くなり、60代では定年による減少が見られるがほぼ年齢が高くなるにつれて、一貫して熱中症死亡者数が増加している。高齢者では、暑熱ストレスに対する皮膚血流の応答が悪いこと³¹⁾や、発汗開始時の深部体温閾値が上昇していること³²⁾、有酸素運動能力（最大酸素摂取量）が減少していること²⁶⁾、慢性的な病気を抱えており数多くの薬を飲んでいる可能性がある事³³⁾等により体温調節能力が低下していると考えられる。一方で、有酸素トレーニングを行っている中年男性の場合、体温調節能力は若年者と同等か

勝っているという報告もある³⁴⁾³⁵⁾。従って高齢者における体温調節能力の低下は、加齢のみの影響が主要な要因であるか、その他の暑熱順化、肥満、体格、有酸素能力等の加齢以外の要因が主要なものを判別することは重要な問題である。もし加齢以外の要因が主要であるならば、それを改善することが高齢者の熱中症対策として考えられる。

年齢と体温調節能力に関する文献調査の結果の一覧を表1に示す。年齢のみの効果を検証するため、年齢以外の影響要因と考えられる被験者の最大酸素摂取量、体格、体脂肪率を比較する群で合わせる方法と、多くの被験者を測定して統計を用いて各要因を補正する方法がなされている。^{36)~39)}の文献は最大酸素摂取量では調整をしていない文献である。^{40)~46)48)~56)}の文献は最大酸素摂取量及び他の要因で被験者を調整してあり、⁴⁷⁾の文献が多くの被験者を測定して統計手法を用いて年齢以外の要因を評価している。最大酸素摂取量及びその他の指標で被験者を調整して群間比較を行った文献(17件)において、年齢が深部体温や発汗量や皮膚血流量全てと関連がないとする文献は4件あった。深部体温に違いがあるとする文献(3/16)、発汗量に違いが見られるという文献(7/17)、皮膚血流量に違いがあるとする文献(6/11)であった。ここで、分母の16、17、11件はそれぞれの生理指標(深部体温、発汗量、皮膚血流量)を測定した文献の数である。結果の相違は、比較した被験者の性別、数や年齢の違い、暑熱実験環境条件、実験時の運動強度や継続時間の違い及び生理指標の測定方法の違い等によると考えられる。被験者に対しての環境暑熱ストレスが低く運動強度や時間が短ければ、皮膚血流量の違いは認められても深部体温の違いまでは認められないことも考えられる。年齢により深部体温に有意差が認められた3件中、女性の高齢者と若年者を比較した文献が2件⁴⁰⁾⁴³⁾、50~54歳と55~70歳の男性高齢者2群で20代の若年男性よりも深部体温の上昇幅が大きかった文献が1件であった⁵⁵⁾。男性に限ると、有酸素運動能力が若年者と同等な高齢者で深部体温が若年者よりも高くなったという文献は検索した14件中1件であった。13件の文献では男性の場合年齢は深部体温に関しては影響要因とはならず、有酸素運動能を示す最大酸素摂取量や体脂肪率等が主要な要因となることを示している。ただし、皮膚血流量や発汗量は有酸素運動能力で調整しても年齢差を埋めることは出来ないという文献は半分程度あった。暑熱暴露時間が長くなるほど又は環境の暑熱ストレスの強度が強くなるほど年齢差が現れたという報告があるため³²⁾³⁴⁾、長時間労働や暑熱ストレスが高い環境においては高齢者における皮膚血流量や発汗量の低下が深部体温の上昇となって現れる可能性も考えられる。もし年齢が体温調節能力に影響するとすれば何歳からかという点については、Laroseらの実験では⁵⁴⁾⁵⁵⁾40歳以上で蓄熱量は上昇し50歳以上⁵⁵⁾

では直腸温度も上昇している。また、最大酸素摂取量や体格(体表面積、体表面積/体重比、体脂肪率)等で被験者の調整をしたときは、50代や60代までは若年と高齢者で暑熱生理指標に有意差がないという研究成果もある⁴⁴⁾⁴⁴⁾。高齢者で有酸素運動能力を維持している人と低下している人を比較した文献⁴⁴⁾⁴⁸⁾⁵⁶⁾では、いずれも最大酸素摂取量が若年者と変わらない高齢者では深部体温の有意差は無かったが、年齢に応じて最大酸素摂取量が減少している高齢者では有意に深部体温が上昇し、体温調節能力の低下を示唆した。

また、以下に特徴的な文献を詳しく紹介する。

Lind³⁶⁾らは、有酸素運動能力の調整をしなくて炭鉱労働者若年者(平均27歳、6人)、中年者(平均47歳、6人)を対象に45分ジョギングと45分休憩を繰り返し行う被験者実験をしたところ、高温環境下の深部体温は中年者が高く、運動後の前腕部血流量は中年者で有意に多かった。また、運動中の発汗量は若年者が多かったが休憩中は高齢者で多いという結果であった。発汗量は運動中では若年者で多く、運動後の休憩時では高齢者で多くなるという結果は、最近の他の文献とも一致していた⁵³⁾。高齢労働者では休憩を多く入れることが効果的であることを示唆している。

最大酸素摂取量と体脂肪率や体格を調整した若年者と高齢者間で発汗量には有意な差が認められたが、食道温度⁴⁴⁾や直腸温度⁴⁶⁾の差とはならないという報告もあった。Hoらは、暑熱時における血液の皮膚表面への分配を調べ、内臓や腎臓から皮膚へ回される血液は若年者で大きく高齢者では少ないことが示された。最大酸素摂取量が高くても高齢者では血流の皮膚への配分量は少なかった⁴⁸⁾。Tankersleyらは⁴⁴⁾、運動習慣がある60代の人と平均的な60代の人と若年者の3群間でトレッドミルを使った運動負荷を行った場合、運動習慣ある60代と若年者では前腕の皮膚血流量や胸部の発汗量には有意差が無かった。若年者と60代の運動習慣がある群では体温調節能力に差が無いことが示唆された。

女性高齢者についてはAnderson⁴⁰⁾らが実験を行った。平均最大酸素摂取量、体脂肪率、体表面積が同じである平均年齢25歳と56歳の女性各8人を対象に最大酸素摂取量35~40%の運動をトレッドミルで2時間被験者実験を行った。その結果、高年齢被験者の平均直腸温度が有意に高く、発汗量が少なかった。また、Kenney⁴³⁾らも、8人の女性高齢アスリートと同等の最大酸素摂取量及び体格を持つ8人の若年女性を対象に高温環境下で被験者実験を行った。その結果、運動負荷後の直腸温度は高齢者で有意に高かった。高年齢女性被験者は閉経によるホルモンの影響も考えられるため、年齢が体温調節能力に与える影響は、男性と女性で異なる可能性も十分に考えられる。

Havenith⁴⁷⁾らは、群間比較では無く多くの被験者を対

表 1 暑熱環境における年齢と深部体温、発汗量、皮膚血流量との関連性を示す文献

年	筆頭著者	被験者	個人属性の調整	環境	運動負荷	主な結果	深部体温	発汗量	皮膚血流量
1970	Lind ³⁶⁾	炭鉱労働者, 6人(♂(平均27歳):Y), 6人(♀(平均47歳):M)	無し	25°C, 31°C, 33°C, 35°C, 36°Cの5条件	50分(歩行)+35分(休)(45分(シヨペリング))+45分(休) ×4回+50分(歩行)	35°C, 36°Cの高温環境でM群の深部体温がY群よりも上昇, 高温環境で運動中の発汗量はY群で多く, 休憩中はM群で多い, 運動後, 高温環境で前腕部の血流量がM群で増加.	+	+	+
1979	Davies ³⁷⁾	9人(♂(平均32歳, 運動家)), 5人(♂(平均60歳, 運動家)), 7人(♀(平均29歳, 運動家)), 4人(♀(平均20歳, 非運動家))	年齢のみ調整, 若年運動家, 非運動家, 高齢運動家, 女性の順に $\dot{V}O_{2max}$ は大きい.	T _a 21°C, T _{wb} 15°C, 風速 2.5 ~ 5.0m/s	トレッドミル 1時間	76%の $\dot{V}O_{2max}$ の運動量に対して, 深部体温や平均表面温度は各4群の全被験者平均で有意差は無し.	-	-	-
1979	Drinkwater ³⁸⁾	38人(♀(12~68歳))	無し(統計分析で $\dot{V}O_{2max}$ との関係を計算)	T _a 28°C, RH 45% T _a 35°C, RH 65% T _a 48°C, RH 10%	トレッドミル 50分(30~35% $\dot{V}O_{2max}$)	特にT _a 35°C, RH 65%において高齢者では発汗量が少なく深部体温上昇, 不十分な発汗機能と有酸素運動能に影響か?	+	+	-
1982	Drinkwater ³⁹⁾	10人(♀(平均58歳):O), 10人(♀(平均38歳):M)	体表面積を調整, $\dot{V}O_{2max}$ は(老年:32ml/kg/min, 若年:47ml/kg/min)	T _a 40°C, RH 40%	網ベットのの上に安楽な姿勢で座る.	深部体温, 表面温度, 心拍数, 発汗量, 発汗潜時等に年齢の影響無し.	-	-	-
1987	Anderson ⁴⁰⁾	8人(♀(平均25歳):Y), 8人(♀(平均56歳):O)	$\dot{V}O_{2max}$ と体脂肪率, 体表面積で調整	T _a 48°C, RH 15%	トレッドミル 2時間(35~40% $\dot{V}O_{2max}$)	運動2時間後直腸温度はO群38.9°C, Y群38.4°Cで有意に高齢者群で高い, 発汗量もO群で有意に低下.	+	+	-
1988	Kenney ⁴¹⁾	6人(♂(平均61歳):♂(2), ♀(4)), 6人(♀(平均25歳):♂(2), ♀(4)), 暑熱非順化:O 暑熱非順化:Y	若年者と高齢者の $\dot{V}O_{2max}$ はほぼ同等	T _a 37°C, RH 60%	エルゴメーター 75分(40% $\dot{V}O_{2max}$)	直腸温度, 表面皮膚温度, 発汗量に有意差は無し, 表面温度に対する皮膚血流量増加率はY群がO群に比べて優位に高い.	-	-	+
1988	Pandolf ⁴²⁾	9人(♂(平均21歳):Y), 9人(♂(平均46歳):M)	体重, 体表面積, 体脂肪率, $\dot{V}O_{2max}$, 体表面積/体重で調整された被験者を選択, 有意差無し	T _a 49°C, RH 20%	トレッドミル 50分(45% $\dot{V}O_{2max}$)×2回, 10日間連続して暑熱順化	深部体温は, 最初の4日間までM群が有意に低く後有意差無し, 発汗量は1, 2と4日目M群で多く後有意差無し, 40代位までは, 暑熱制御機能に衰えはないことを示唆.	-	-	-
1988	Kenney ⁴³⁾	8人(♀(平均56歳):O), 8人(♀(平均25歳):Y)	$\dot{V}O_{2max}$ はO, Y群で34, 37ml/kg/min, 高齢者は運動習慣があり, 若年者は高齢者より運動習慣がなし.	T _a 48°C, RH 5% (HD), T _a 37°C, RH 60% (WH)	トレッドミル 2時間(35~40% $\dot{V}O_{2max}$)	直腸温度では, O群がY群よりもHD, WHの両環境で有意に高い.	+	-	-
1991	Tankersley ⁴⁴⁾	7人(♂(平均29歳):Y), 7人(♂(平均64歳):NO), 6人(♂(平均66歳):HO)	体脂肪率: NOがYより有意に高い, 身長体重はYと有意差無し, Y, NO, HOの $\dot{V}O_{2max}$ はそれぞれ44, 33, 46ml/kg/min.	T _a 30°C, RH 55%	トレッドミル 20分(68% $\dot{V}O_{2max}$)	食道温度は群間で有意差無し, T _{sk} はY群で有意に高い, 胸部発汗量と前腕部皮膚血流量において, YとHO群間に有意差は無いが, YとNO群間には有意差有り.	-	+	+
1991	Buono ⁴⁵⁾	10人(♂(平均72歳):OS), 10人(♂(平均68歳):OT), 10人(♂(平均28歳):YS), 10人(♂(平均27歳):YT)	OS, YSは座作業の仕事を行っている群, OT, YTは, 運動を通常から行っている群, $\dot{V}O_{2max}$ は, YT > YS > OT > OS.	-	最大酸素摂取量とピロカルピンの皮下注入による発汗量測定	発汗量は, YT > OT > YS > OS.	+	+	-
1993	Armstrong ⁴⁶⁾	6人(♂(平均61歳):O), 6人(♂(平均26歳):Y)	$\dot{V}O_{2max}$, 体脂肪率, 身長, 体重, 体表面積は高年齢, 若年群で同等	T _a 28°C, RH 28% (30分), 60分で46°Cまで上昇, 46°C一定(30分)	横向き臥位	暑熱順化の有無に関わらず, 運動90分以後Y群の胸部の発汗量はO群よりも有意に高い, 皮膚血流量は体温上昇に対する増加率がY群で高い.	-	+	+
1995	Havenith ⁴⁷⁾	56人(♂(平均年齢44歳, 20~73歳, 内♂41人, ♀15人) 身体属性は全くランダム)	一群による統計分析	気温(T _a) 35°C, 相対湿度(RH) 80%, 風速0.15m/s	エルゴメーター 60分(60W)	直腸温度の説明因子として $\dot{V}O_{2max}$, 発汗量は習慣的な運動量と体脂肪率, $\dot{V}O_{2max}$ 又は体重が説明因子, 前腕血流量では, $\dot{V}O_{2max}$ と年齢.	-	-	+

+ : 年齢による有意差有り, - : 年齢による有意差無し, 空欄 : 測定無し.

表 1 暑熱環境における年齢と深部体温、発汗量、皮膚血流量との関連性を示す文献(つづき)

年	筆頭著者	被験者	個人属性の調整	環境	運動負荷	主な結果	深部体温	発汗量	皮膚血流量
1997	Ho ⁽⁴⁸⁾	6人(♂(平均24歳: YF), 6人(♂(平均24歳: YS), 6人(♂(平均64歳: OF), 6人(♂(平均65歳: OS)	平均最大酸素摂取量は YF, YS, OF, OS でそれぞれ, 61, 43, 42, 28ml/kg/min.	T _a 36°C, RH 20%	エルゴメーター (50分(休)+20分(35% $\dot{V}O_{2max}$)+30分(60% $\dot{V}O_{2max}$))	YF 群の皮膚血流量は、運動負荷が上昇するにつれて他の群より有意に増加。運動時の腎血流や内臓血流の減少量は若年者で大きく、その分皮膚血流量が増加。発汗量は、YF>YS=OF>OS の順。	-	-	+
2004	Inbar ⁽⁴⁹⁾	8人(♂(平均9歳: B), 8人(♂(平均23歳: Y), 8人(♂(平均71歳: O)	平均 $\dot{V}O_{2max}$ は B, Y, O でそれぞれ 51, 54, 26ml/kg/min. B の身長は135cm. 体重29kg.	T _a 41°C, RH 21%	エルゴメーター (20分(50% $\dot{V}O_{2max}$)+7分(休))×3回	発汗量は、Y>O>B の順。高齢者は発汗量に対しての放熱量(=発汗効率)が低い。1°C 体温を上げる熱量は O, Y, B でそれぞれ 4.1, 6.9, 12.3W. 高齢者の体温調節能力は最も低い。	-	+	-
2010	Kenny ⁽⁵⁰⁾	8人(♂(平均22歳: Y), 8人(♂(平均45歳: M)	身長, 体重, 体脂肪率は同等。 $\dot{V}O_{2peak}$ は Y, M で 52, 52ml/kg/min.	3種類の環境 T _a 30, 35, 40°C RH 20%	エルゴメーター 60分(290W)	カロリメトリーでの測定結果、全身の放熱量は Y 群と M 群で有意差無し、 $\dot{V}O_{2peak}$ が同等なら、男性では 50 歳位まで年齢のみの影響が体温調節反応に及ぼす事は無いと予想。	-	-	-
2012	Best ⁽⁵¹⁾	7人(♂(平均26歳: YHT), 7人(♂(平均27歳: YMT), 7人(♂(平均56歳: OHT)	YHT, YMT, OHT の $\dot{V}O_{2max}$ 68, 56, 59 ml/kg/min	T _a 20°C, RH 40% T _a 35°C, RH 40%	エルゴメーター 1時間(70% $\dot{V}O_{2max}$)	深部体温は 3 群間に有意差無し。体温調節能力は、有酸素運動能力が高い人にとっては 60 歳位までは減少なし。	-	-	-
2013	Larose ⁽⁵²⁾	11人(♀(平均24歳: Y), 13人(♀(平均51歳: O)	体表面積は同じ被験者、Y と O の $\dot{V}O_{2max}$ はそれぞれ 37, 34 ml/kg/min	T _a 35°C, RH 20%	エルゴメーター (15分(300W)+15分(休)) ×4回	深部体温、発汗量、皮膚血流量に Y, O 群間の有意差は無し。蓄熱量は、1~3 回目までの運動で Y は O 群よりも有意に大きい。	-	-	-
2013	Larose ⁽⁵³⁾	11人(♂(平均26歳: Y), 11人(♂(平均43歳: M), 11人(♂(平均63歳: O)	$\dot{V}O_{2max}$ は、Y, M, O でそれぞれ 43, 42, 34ml/kg/min.	T _a 35°C, RH 20%	エルゴメーター (15分(400W)+15分(休)) ×4回	蓄熱量は O, M, Y 群の順に大きくなり、運動中の放熱量は Y 群でもっと大きく、次は M 群、O 群の順。	-	-	-
2013	Larose ⁽⁵⁴⁾	18人(♂(平均26歳: Y), 15人(♂(平均42歳: M1), 15人(♂(平均47歳: M2), 21人(♂(平均52歳: O1), 16人(♂(平均61歳: O2)	平均 47, 61 歳と 26 歳の群で体脂肪率に有意差。体表面積、体重、除脂肪体重、 $\dot{V}O_{2peak}$ に有意差なし。 $\dot{V}O_{2peak}$ は若年者から、53, 53, 55, 50, 48ml/kg/min.	T _a 35°C, RH 20%	エルゴメーター (15分(400W)+15分(休)) ×4回	合計 1 時間の運動で 40 歳以上では Y 群と比較して身体への蓄熱量は大きい。運動中の発汗量は Y 群で有意に大きい。40 歳以上で体温調節能力が低下する事が示唆された。ただし、直腸温には有意差なし。	-	+	-
2014	Larose ⁽⁵⁵⁾	12人(♂(平均26歳: Y), 12人(♂(平均42歳: M1), 12人(♂(平均47歳: M2), 12人(♂(平均51歳: O1), 12人(♂(平均61歳: O2)	体脂肪率は M1, M2, O2 で有意に高く、 $\dot{V}O_{2max}$ は、若い方から 45, 42, 41, 43, 38ml/kg/min.	T _a 35°C, RH 60%	エルゴメーター (15分(400W)+15分(休)) ×4回	高湿度の環境では低湿度より体内の蓄熱量は増加。蓄熱量増加は、40 歳以上で有意に若年者より高い。発汗量は年齢差はなく、皮膚血流量は休憩時に高齢者で有意に多い。高湿度環境で、50 歳以上の 2 群で直腸温度が有意に高い。	+	-	+
2015	Stapleton ⁽⁵⁶⁾	10人(♂(平均21歳: Y), 10人(♂(平均48歳, 運動無): MU), 10人(♂(平均49歳, 運動有): MT), 10人(♂(平均65歳: O))	体脂肪率は MU, O で有意に高い。 $\dot{V}O_{2peak}$ は Y, MU, MT, O で 50, 37, 51, 38ml/kg/min.	T _a 40°C, RH 15%	エルゴメーター 30分(300W)+15分(休)+ 30分(400W)+15分(休)+ 30分(500W)+15分(休)	食道と蓄熱量は MU と O で有意に上昇。放熱量は MU と O で有意に減少。全身の発汗率は、MU と O で有意に減少。MT と Y の有意差が無かったことから運動習慣により、中年でも若年者と同様な体温調節能力を維持出来る可能性を示唆。	+	+	-

+ : 年齢による有意差有り, - : 年齢による有意差無し, 空欄 : 測定無し.

象に負荷実験を行い、統計手法を用いて深部体温や蓄熱量、心拍数等の生理指標を独立変数として、最大酸素摂取量、年齢、日常の活動度、体脂肪率、体表面積、体重、体表面積/体重を従属変数として多重解析を行った。被験者は20~73歳の73人で気温35℃、相対湿度80%の環境でエルゴメーターによる低強度負荷試験(60Wで1時間)を行った。その結果、深部体温と蓄熱量は最大酸素摂取量と関連しており年齢との有意な相関は無かった。しかし、心拍数や前腕血流量には年齢と有意な相関があった。また、単位面積当たりの発汗量は、体脂肪率、日常の活動度に依存していた。

最近では、より正確な測定が可能である全身カロリーメトリーを用いた新たな知見が報告されている。Laroseらは週3~4回スポーツを行っている60人の男性被験者(20~30歳(12人)、40~44歳(12人)、45~49歳(12人)、50~54歳(12人)、55~70歳(12人))を対象に15分の400Wエルゴメーターと15分の休憩を交互に4回繰り返して身体内の蓄熱量を測定した⁵⁵⁾。最大酸素摂取量はそれぞれ45、42、41、43、38ml/kg/minであった。気温35℃、相対湿度20%と35℃、60%の2種類の環境で行われた。各年齢とも湿度が高い環境では低い環境の約2倍の蓄熱量が観測された。20代の被験者よりも他の年齢層で有意な身体内の蓄熱量が観測された。50歳以上の2群において、高湿度での運動中及び運動後の直腸温度は有意に増加していた。すでに40代から体温調節能力の低下を示唆するデータが示された。また、Laroseら⁵³⁾は、平均年齢26歳(Y:11人)、43歳(M:11人)、63歳(O:11人)の3群で暑熱実験を行った。群の属性は、Y、M、Oのそれぞれにつき、最大酸素摂取量は43、42、34ml/kg/minで、体脂肪率は、17、23、28%であった。運動時の放熱量は10分後から違いが現れ、Y群で最も大きく、O群が最も少なく、M群がその中間であった。深部体温の有意差は無かった。Stapleton⁵⁶⁾らは、平均年齢21歳(Y:10人)、中年鍛錬者49歳(MT:10人)、中年非鍛錬者48歳(MU:10人)、高齢者65歳(O:10人)を対象に運動強度を次第に強くして(300W、400W、500W)、30分運動と15分休憩を繰り返し行った場合の発汗量、食道温、蓄熱量等を測定した。なお、MT群とY群の最大酸素摂取量の平均値は等しいばかりでなく、他の要因である体重や体表面積も等しい被験者を選んでいる。一方、MU群はY群と比較して最大酸素摂取量が26%減で年齢相当の減少であった。そして、O群はMU群の最大酸素摂取量とほぼ等しい被験者を選択した。結果は、MT群はY群と発汗量、食道温、蓄熱量のいずれにおいても3種類の運動強度全てで有意差はなく、最大酸素摂取量が同じであれば年齢差は影響しないことを示唆した。一方Y群とMU群やO群と比較すると、400W以上の運動強度で、Y群がMU群やO群よりも発汗量が有意に多かった。蓄熱量は、MU群やO群がY群よ

りも1.6倍ほど有意に大きく、食道温は500Wの運動量の時にMU群やO群がY群よりも有意に高かった。Y群がMU群やO群よりも全身の発汗量が多いのは、体温上昇に対する発汗の感度が高いことが影響している。中年以上では最大酸素摂取量は発汗量や深部体温に影響するが、若年においては、最大酸素摂取量は全身の発汗量や直腸温度に影響を与えないというデータもある⁵⁷⁾。

Inoue(2004)⁵⁸⁾らは、老化は皮膚血管の拡張作用低下から始まり、汗腺ごとの発汗量の低下、最後に活動汗腺密度の低下の順に進むとした。老化で中枢神経から汗腺への刺激信号はむしろ多くなる。体の部位ごとの発汗量の減少は、下肢から始まり上体の背側、腹側、上肢そして頭へと進むとした。また、加齢による汗腺ごとの発汗量減少は、運動により抑えられた⁴⁸⁾。活動汗腺密度は年齢によって影響を受けないが、活動汗腺ごとの発汗量では高齢者では少ないことを示す文献もある⁵⁹⁾。

発汗能力があることは必ずしも暑熱ストレスへの耐性が高いとは言えない。高温多湿の環境では、環境によって決まる最大蒸発熱損失量を超えて発汗すると、汗は皮膚から蒸発せずにしたたり落ち、体を冷却することには使われず身体内の水分のリソースを無駄に使うことになる。若年者の発汗能力の高さはむしろ身体にとっては脱水の危険性を高め、暑熱障害となる確率を上昇させる。この場合、発汗能力が低下している方が水分を身体に蓄えることが出来るため有利となる。

VI. まとめ

地球温暖化による気温上昇と高齢労働者の増加で、高齢労働者が暑熱環境で働く機会は増え業務上の暑熱障害は増えると予測される。文献調査の結果、男性では有酸素運動能力が若年者と同等な高齢者では暑熱環境下で運動を行なった場合、深部体温は若年者と同等であるという報告が多かった。ただし、高齢者では被験者実験中は深部体温が有意に上昇しなくても、発汗量や皮膚血流量が有意に低下するという文献もあるため、長時間にわたる労働やより暑熱ストレスが強い環境では深部体温の有意な上昇となって現れる可能性も考えられる。平均的に有酸素能力が低下した高齢者と有酸素運動能力が若年者並である高齢者を比較すると、運動能力を維持した群で深部体温低下や皮膚血流量上昇を示した文献が多かった。環境条件にもより一概に言えないが、高齢者では有酸素運動能力を維持することで体温調節機能を保持し暑熱障害リスクを減らす可能性が示唆された。

利益相反：利益相反基準に該当無し

文献

- 1) Hajat S, O'Connor M, Kosatsky T: Health effects of hot weather: from awareness of risk factors to effective health protection. *Lancet* 375: 856—863, 2010.

- 2) Spector JT, Sheffield PE: Re-evaluating occupational heat stress in a changing climate. *Ann Occup Hyg* 58: 936—942, 2014.
- 3) Holmer I: Climate change and occupational heat stress: methods for assessment. *Glob Health Action* 2010 DOI: 10.3402/gha.v3i0.5719.
- 4) Kjellstrom T, Holmer I, Lemke B: Workplace heat stress, health and productivity—an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change. *Global Health Action* 2: 2009 DOI: 10.3402/gha.v2i0.2047.
- 5) IPCC AR5 WG I SPM Table SPM.2, IPCC 第五次評価報告書. 2013.
- 6) Committee for Economic Development: New opportunities for older workers: A statement on national policy by the Research and Policy Committee of the Committee for Economic Development. 1999.
- 7) 総務省統計局：労働力調査長期時系列データ. 2015. <http://www.stat.go.jp/data/roudou/longtime/03roudou.htm>
- 8) Sehl ME, Yates FE: Kinetics of Human Aging: I. Rates of senescence between ages 30 and 70 years in healthy people. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 56 (5): B198—B208, 2001.
- 9) Bortz WMT, Bortz WM II: How fast do we age? Exercise performance over time as a biomarker. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 51 (5): M223—M225, 1996.
- 10) Pandolf KB: Aging and human heat tolerance. *Exp Aging Res* 23 (1): 69—105, 1997.
- 11) Parsons K: Human thermal environments. Third Edition. Boca Raton, CRC Press, 2014, pp 69.
- 12) Gagnon D, Kenny GP: Exercise-rest cycles do not alter local and whole body heat loss responses. *Am J Physiol Regul Int Comp Physiol* 300 (4): R958—R968, 2011.
- 13) Kuno Y: Human perspiration. Charles C Thomas, editor. Springfield Illinois, Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1956.
- 14) Barwood MJ, Thelwell RC, Tipron MJ: Psychological skills training improves exercise performance in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 40 (2): 387—396, 2008.
- 15) Anderson GS: Human morphology and temperature regulation. *Int J Biometeorol* 43: 99—109, 1999.
- 16) 堀 清記：6.2 暑熱適応, 温熱生理学. 中山昭雄編. 東京, 理工学社, 1981, pp 499.
- 17) Shvartz E, Saar E, Benor D: Physique and heat tolerance in hot-dry and hot-humid environments. *J Appl Physiol* 34 (6): 799—803, 1973.
- 18) Havenith G, Coenen JML, Kistemaker L, Kenney WL: Relevance of individual characteristics for human heat stress response is dependent on exercise intensity and climate type. *Eur J Appl Physiol* 77: 231—241, 1998.
- 19) Yokota M, Bathalon GP, Berglund LG: Assessment of male anthropometric trends and the effects on simulated heat stress responses. *Eur J Appl Physiol* 104: 297—302, 2008.
- 20) Bedno SA, Li Y, Han W, et al: Exertional heat illness among overweight U.S. Army recruits in basic training. *Aviat Space Environ Med* 81 (2): 107—111, 2010.
- 21) Bar-Or O, Lundgren H, Buskirk ER: Distribution of heat-activated sweat glands in obese and lean men and women. *Human Biology* 40: 235—238, 1968.
- 22) Stolwijk JAJ: A mathematical model of physiological temperature regulation in man. New Haven, CT, JB Pierce Laboratory, 1971 (Rep. of NASA contractor CR 1855).
- 23) Veicsteinas AG, Ferretti GT, Rennie DW: Superficial shell insulation in resting and exercising men in cold water. *J Appl Physiol* 52: 1557—1564, 1982.
- 24) Kenney GP: Physiological correlates of heat intolerance. *Sports Medicine* 2: 279—286, 1985.
- 25) Bar-Or O, Lundgren H, Buskirk E: Heat tolerance of exercising obese and lean women. *J Appl Physiol* 26: 403—409, 1969.
- 26) 鈴木政登, 石山育朗, 塩田正俊, 町田勝彦：健康人の性・年齢別最大酸素摂取量 (VO₂max) 基準域及びVO₂max判定指標—反復切断法によるVO₂max基準域の設定—. *体力科学* 52 : 585—598, 2003.
- 27) Gardner JW, Kark JA, Karnei K, et al: Risk factors predicting exertional heat illness in male Marine Corps recruits. *Med Sci Sports Exerc* 28 (8): 939—944, 1996.
- 28) Lu S, Peng H, Gao P: A body characteristic index to evaluate the level of risk of heat strain for a group of workers with a test. *JOSE* 20 (4): 647—659, 2014.
- 29) Selkirk GA, McLellan TM: Influence of aerobic fitness and body fatness on tolerance to uncompensable heat stress. *J Appl Physiol* 91: 2055—2063, 2001.
- 30) 中井誠一：2. 熱中症 1) 高齢者における熱中症の発生実態. *Geriatric Medicine* 46 : 583—587, 2008.
- 31) Kenney WL, Havenith G: Thermal Physiology of the elderly and handicapped. Heat stress and age: skin blood flow and body temperature. *J therm Biol* 18: 341—344, 1993.
- 32) Ellis FP, Exton-Smith AN, Foster KG, Weiner JS: Eccrine sweating and mortality during heat waves in very young and very old persons. *Israel J Med Sci* 12: 815—817, 1976.
- 33) Levine JA: Heat stroke in the aged. *Am J Med* 47: 251—258, 1969.
- 34) Collins KJ, Dore C, Exton-Smith AN, et al: Accidental hypothermia and impaired temperature homeostasis in the elderly. *Br Med J* 1: 353—356, 1977.
- 35) Yousef MK, Dill DB, Vitez TS, et al: Thermoregulatory responses to desert heat: Age, race and sex. *J Gerontol* 39: 406—414, 1984.
- 36) Lind AR, Humphreys PW, Collins KJ, et al: Influence of age and daily duration of exposure on responses of men to work in heat. *J Appl Physiol* 28: 50—56, 1970.
- 37) Davies CTM: Thermoregulation during exercise in relation to sex and age. *Eur J Appl Physiol* 42: 71—79, 1979.
- 38) Drinkwater BL, Horvath SM: Heat tolerance and aging. *Med Sci Sports* 11: 49—55, 1979.
- 39) Drinkwater BL, Bedi JF, Loucks AB, et al: Sweating sensitivity and capacity of women in relation to age. *J Appl Physiol* 53: 671—676, 1982.
- 40) Anderson RK, Kenney WL: Effect of age on heat-activated sweat gland density and flow during exercise in dry heat. *J Appl Physiol* 63: 1089—1094, 1987.
- 41) Kenney WL: Control of heat-induced cutaneous vasodilatation in relation to age. *Eur J Appl Physiol* 57: 120—125, 1988.
- 42) Pandolf KB, Cadarette BS, Sawka MN, et al: Ther-

- moregulatory responses of middle-aged and young men during dry-heat acclimation. *J Appl Physiol* 65: 65–71, 1988.
- 43) Kenney WL, Anderson RK: Responses of older and younger women to exercise in dry and humid heat without fluid replacement. *Med Sci Sports Exerc* 20: 155–160, 1988.
- 44) Tankersley CG, Smolander J, Kenney WL, Fortney SM: Sweating and skin blood flow during exercise: effects of age and maximal oxygen uptake. *J Appl Physiol* 71: 236–242, 1991.
- 45) Buono MJ, McKenzie BK, Kasch FW: Effects of ageing and physical training on the peripheral sweat production of the human eccrine sweat gland. *Age Ageing* 20: 439–441, 1991.
- 46) Armstrong CG, Kenney WL: Effects of age and acclimation on responses to passive heat exposure. *J Appl Physiol* 75: 2162–2167, 1993.
- 47) Havenith G, Inoue Y, Luttikholt V, Kenney WL: Age predicts cardiovascular, but not thermoregulatory, responses to humid heat stress. *Eur J Appl Physiol* 70: 88–96, 1995.
- 48) Ho CW, Beard JL, Farrell PA, et al: Age, fitness, and regional blood flow during exercise in the heat. *J Appl Physiol* 82: 1126–1135, 1997.
- 49) Inbar O, Morris N, Epstein Y, Gass G: Comparison of thermoregulatory responses to exercise in dry heat among prepubertal boys, young adults and older males. *Exp Physiol* 89: 691–700, 2004.
- 50) Kenny GP, Gagnon D, Dorman LE, et al: Heat balance and cumulative heat storage during exercise performed in the heat in physically active younger and middle-aged men. *Eur J Appl Physiol* 109: 81–92, 2010.
- 51) Best S, Caillaud C, Thompson M: The effect of ageing and fitness on thermoregulatory response to high-intensity exercise. *Scand J Med Sci Sports* 22: e29–e37, 2012.
- 52) Larose J, Wright HE, Sigal RJ, et al: Do older females store more heat than younger females during exercise in the heat? *Med Sci Sports Exerc* 45: 2265–2276, 2013.
- 53) Larose J, Wright HE, Stapleton J, et al: Whole body heat loss is reduced in older males during short bouts of intermittent exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 305: R619–R629, 2013.
- 54) Larose J, Boulay P, Sigal RJ, et al: Age related decrements in heat dissipation during physical activity occur as early as the age of 40. *Plos One* 8: e83148, 2013.
- 55) Larose J, Boulay P, Wright-Beatty HE, et al: Age-related differences in heat loss capacity occur under both dry and humid heat stress conditions. *J Appl Physiol* 117: 69–79, 2014.
- 56) Stapleton JM, Poirier MP, Flouris AD, et al: Aging impairs heat loss, but when does it matter? *J Appl Physiol* 118: 299–309, 2015.
- 57) Kenney WL, Havenith G: Heat stress and age. Skin blood flow and body temperature. *J Thermal Biol* 18: 341–344, 1993.
- 58) Jay O, Bain AR, Deren TM, et al: Large differences in peak oxygen uptake do not independently alter changes in core temperature and sweating during exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 301: R832–R841, 2011.
- 59) 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.
- 60) Kenney WL, Fowler SR: Methylcholine-activated eccrine sweat gland density and output as a function of age. *J Appl Physiol* 65: 1082–1086, 1988.

別刷請求先 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾6-21-1
独立行政法人労働者健康安全機構・労働安全衛生総合研究所
上野 哲

Reprint request:

Satoru Ueno
National Institute of Occupational Safety and Health, Japan
Organization of Occupational Health and Safety, 6-21-1, Nagao, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, 214-8585, Japan

Relationship between Aging and Thermoregulation

Satoru Ueno

Human Engineering Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health,
Japan Organization of Occupational Health and Safety

Today, the working population continues to age and global warming is on the rise. Considering the increasing temperature in summer and the decline in thermoregulatory function of older people, it is expected that there will be an increased prevalence of heat disorders of older people due to work. Even healthy people have a decline in physiological function by 0 to 2% due to aging every year. However, exercise habits enable older workers to mitigate the typical decline in physiological function. If a decline in thermoregulatory function is not caused by aging per se, but mainly from decreased aerobic fitness or increased ratio of body fat, it can be assumed that thermoregulatory function would be preserved by maintaining and promoting physical fitness. This review looked at heat transfer between a hot environment and the human body and the response of an individual to heat exposure. Next, the influence of representative individual attributes to individual thermal response was discussed. Finally, the literature was reviewed to investigate the relationship between aging and thermoregulatory function. The results provided that the deep body temperature of older workers whose aerobic fitness was equal to younger workers was as high as that of younger workers after heat exposure, showing decline from aging. The investigated literature suggested the possibility that older male workers are able to preserve thermoregulatory function and reduce the risk of heat disorders by maintaining aerobic fitness depending on the environment.

(JJOMT, 64: 308—318, 2016)

—Key words—

aged worker, thermoregulatory function, individual characteristics