

# 高齢労働者の暑熱負担軽減に関する研究†

時澤 健\*1

高齢労働者の暑熱負担を軽減することを目的に、若年者群と高齢者群の体温調節反応の比較（実験1）、および実用的な身体冷却方法の効果検証（実験2）を行った。実験1において、高齢者群10名および若年者群10名を対象に、WBGT27.0°C、28.5°C、30.0°C、および31.5°Cにおいて1時間の軽作業を行った。WBGT27.0~30.0°Cにおいては深部体温（直腸温）の反応に群間の差は認められなかったが、WBGT31.5°Cにおいて高齢者群は若年者群より深部体温は有意に高くなった。実験2において、高齢者群8名および若年者群8名を対象に、WBGT31.5°Cにおいて1時間の軽作業を行った。その際、電動ファン付ジャケットのファンを稼働しない試行（CON）、ファンを稼働する試行（DRY）、浸潤したインナーを着用しファンを稼働する試行（WET）をランダムに行った。両群ともに深部体温の上昇および全身発汗量はCON、DRY、WETの順で有意に小さくなった。高齢労働者の熱中症予防対策として、軽作業のWBGT基準値を1°C下げること、および電動ファン付き作業服着用時にインナーを浸潤させる身体冷却が有効であることが示唆された。

キーワード: 熱中症, 深部体温, 発汗量, 蒸散性熱放散。

## 1. はじめに

加齢とともに暑熱環境における体温調節反応は減弱する。すなわち、発汗と皮膚血流による熱放散反応が抑制される。結果的に深部体温の上昇につながり、熱中症リスクが高まる<sup>1)</sup>。先行研究によってそれらの定性的な特徴は明らかにされてきたものの、高齢労働者はどの程度のリスクを有しているかという定量的な研究は行われていない。

WBGT（湿球黒球温度）は、作業現場における暑熱環境の基準として用いられ、その値に応じた熱中症予防対策を実施することが求められている<sup>2)</sup>。作業で用いる衣服によっては補正值が適用され、WBGTが基準値より低い場合でも対策を講じることとなる。もし高齢労働者のリスクが定量化されれば、着衣補正值と同じように年齢補正值が適用され、高齢労働者はWBGTが基準値より低い場合でも対策を実施することとなり、リスクを低減させることができる。

WBGT基準値を超えるような酷暑環境の場合、身体冷却によって体温（特に深部体温）が上がらないように対策を講じる必要がある。現在、実際に用いられている身体冷却方法としては、保冷剤を用いたクールベストや電動ファン付き作業服が挙げられる。しかし皮膚表面の温度を下げることで温熱的不快感を和らげる効果が主であり、熱中症予防としての効果は小さい<sup>3)</sup>。一方、冷水がベスト内を循環する機器の使用は、深部体温の上昇を抑えるなど効果は大きいものの<sup>4,5)</sup>、製品として高額であること及び作業が大きく制限されるデメリットがある。そこで、実用的かつ効果的な身体冷却方法として、電動ファン付き作業服を利用し、着用するインナーを予め水

に浸潤させ蒸散性熱放散を亢進させる方法を考案した。これは高齢労働者の発汗量が少なくなることを補う方法として着想したが、若年者にも有効な新しい身体冷却方法になる可能性がある。

本研究では、1) 4段階のWBGTにおける若年者と高齢者の暑熱負担の比較評価、および2) 電動ファン付き作業服のインナーを浸潤させることによる暑熱負担軽減効果の解明を目的とした。

## 2. WBGTと暑熱負担（実験1）

### 1) 方法

高齢者群10名（66±4歳）および若年者群10名（28±4歳）を対象に、4段階の暑熱環境で下肢および上肢運動を行った際の体温調節反応を比較した。各群の体格（身長、体重、体脂肪率）において、群間の差は認められず（高齢者群 167.2±5.8 cm, 63.5±9.5 kg, 17.6±6.4%；若年者群 167.5±3.4 cm, 63.2±7.2 kg, 18.7±4.4%）、最高酸素摂取量は高齢者群より若年者群の方で有意に高値を示した（サイクリング 37.6±6.3 vs 27.9±2.6 ml/kg/min；アームクラッキング 22.3±3.3 vs 18.7±3.6 ml/kg/min, p<0.05）。

WBGT27.0°C（室温 30.0°C・相対湿度 65%）、28.5°C（室温 32.5°C・相対湿度 60%）、30.0°C（室温 35.0°C・相対湿度 55%）、そして31.5°C（室温 37.0°C・相対湿度 50%）に設定された人工環境室において、サイクリングおよびアームクラッキング運動（手でペダルを回す）をそれぞれ15分間交互に休憩をはさんで2回繰り返す、計1時間の運動を行った。運動強度は熱代謝量が低～中程度となる200 W/m<sup>2</sup>（サイクリング運動）および130 W/m<sup>2</sup>（アームクラッキング運動）の負荷とした。

深部体温の指標として、直腸温をサーミスタプローブを用いて測定した。胸、前腕、大腿、および下腿の皮膚温をサーミスタプローブを用いて測定した。局所発汗の指標として前額、胸、前腕、および大腿の発汗率を、換

† 本報の一部は、Tokizawa (2023) Front Physiol, Vol.14, 1122504.の記述の一部を翻訳修正し、まとめ直したものである。

\*1 労働安全衛生総合研究所人間工学研究グループ  
連絡先: 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾 6-21-1  
労働安全衛生総合研究所 人間工学研究グループ 時澤 健  
E-mail: tokizawa@h.jniosh.johas.go.jp

気式カプセルを用いて測定した。レーザードップラー皮膚血流計にて、前額および胸の皮膚血流量を測定した。また全身発汗の指標として運動前後の体重減少率を算出した。心拍数および血圧を、心電計および電子血圧計にて測定した。また、心理的な暑熱負担の指標として、温度感覚、温熱的快適感、疲労感、および口渇感を、Visual Analog Scale (10 cmの線に感覚の程度をチェック)にて評価した。統計解析として、三要因(群, WBGT, および時間)の分散分析を行い、同一時間の試行間の検定には Bonferroni の多重比較を行った。

インフォームドコンセントは実験開始前に口頭および書面で実施した上で同意を得た。本研究は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の研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。

## 2) 結果

図1に直腸温の反応を示した。WBGT31.5°Cにおいて、高齢者群は若年者群と比べて有意に高値を示した ( $p<0.05$ )。WBGTと直腸温の最高値を図2にプロットした。傾きは高齢者群の方で有意に大きく ( $p<0.05$ )、WBGTが高くなるにつれ直腸温の群間差は大きくなった。

図3に体重変化率を示した。全身発汗量の指標となる体重変化率は、WBGT31.5°Cにおいて高齢者群と比べて若年者群の方で有意に高値を示した ( $p<0.05$ )。局所発汗量においては、胸部、前腕部、および大腿部において、WBGT31.5°Cにおいて若年者群の方で有意に高値を示し ( $p<0.05$ )、前額部では群間に差は認められなかった。

皮膚血流および心拍数は、両群ともに WBGT に比例して上昇し、群間の差は認められなかった。平均血圧は運動による変化および群間の差は認められなかった。温度感覚は両群ともに WBGT に比例して上昇した。温熱的快適感は若年者群で WBGT に比例して低下したが、高齢者群では比例して低下しなかった。

## 3) 考察

4段階のWBGTにおける暑熱負担を高齢者群と若年者群で比較すると、WBGTが高くなるほど深部体温の群間差が大きくなる反応が見られた(図2)。WBGTと深部体温の回帰式を求めると、WBGTが1°C上がると深部体温は高齢者群で0.1°C、若年者群で0.05°C上がる傾きとなった。本研究の結果から、軽作業のWBGT基準値を超える31.5°Cで1時間作業を行った場合、高齢者群ではISO12894<sup>6)</sup>で定める深部体温の上限値38.0°Cに達する。同じ条件で、若年者群では37.6°Cにとどまる。したがって、高齢者群を若年者群と同程度にするためには、WBGTを2°C下げる必要があるが、上限値を下回る程度に抑えるのであれば1°C下げることが想定される。

中程度代謝率の場合、WBGT基準値は28°C(暑熱順化者)および26°C(非暑熱順化者)であり、近年このWBGT値に夏季にはほぼ毎日到達する。また本研究に

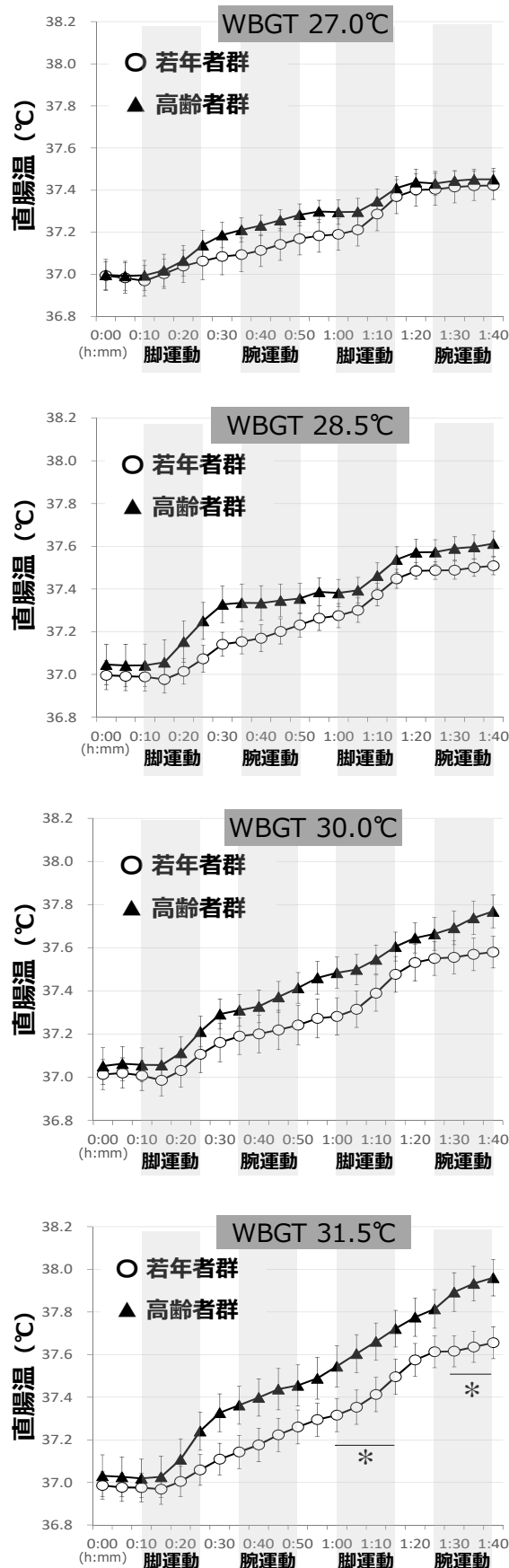


図1. 4段階のWBGTにおける直腸温の変化  
\*  $p<0.05$ , 若年者群 vs. 高齢者群

において、WBGT27.0℃では若年者群と高齢者群の間に有意な深部体温の差は認められなかったことから、中程度代謝率以上の WBGT 基準値には年齢補正值を加える必要はないと考えられる。

体重減少率は WBGT31.5℃において若年者群の方で有意に高値を示した (図3)。局所発汗の反応では、体幹部および上肢・下肢において高齢者群と若年者群の間に差が確認され、前額部においては群間の差は認められなかった。これらの部位による違いは先行研究<sup>7)</sup>と一致する。最も重要な臓器である脳を守るために、発汗反応は末梢から衰えていくと考えられている。結果として、高齢者群では発汗による蒸散性熱放散が弱まり、深部体温が上がりやすくなった可能性が考えられる。

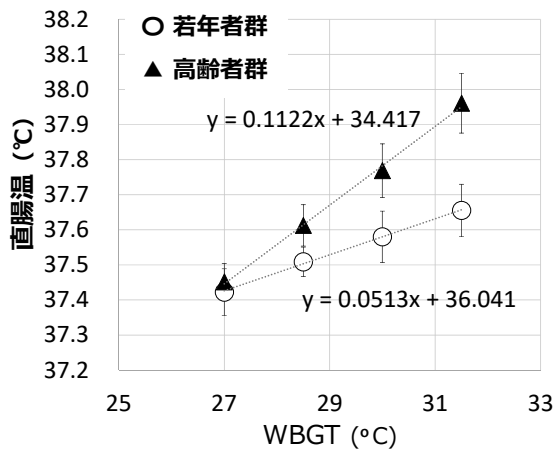


図2. WBGT と直腸温の最高値

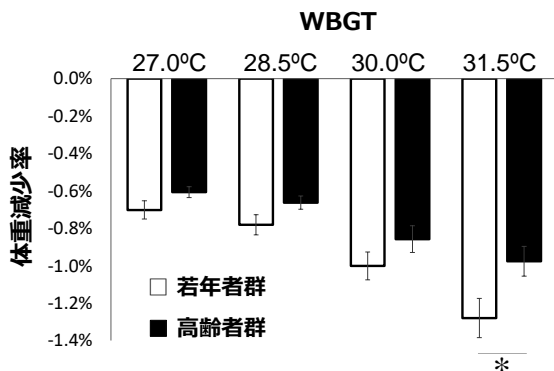


図3. 4段階の WBGT における体重変化率  
\*  $p < 0.05$ , 若年者群 vs. 高齢者群

### 3. 電動ファン付き作業服のインナーを浸潤させる身体冷却の効果 (実験2)

#### 1) 方法

若年者群 8 名 (26±4 歳) および高齢者群 8 名 (67±3 歳) を対象に、37℃ (相対湿度 50%) の環境において 1 時間の歩行運動を行った。運動強度は熱代謝量が 200W/m<sup>2</sup> (低~中代謝率) となる負荷とし、20 分毎に 10 分間の休憩をはさみ、休憩中は座位で自由飲水 (37℃) とした。乾いたインナーを着用し電動ファン付き作業服のファンを稼働しない試行 (CON), 乾いたインナーを着用し電動ファン付き作業服 (長袖) のファンを稼働する試行 (DRY), 濡れたインナーを着用し電動ファン付き作業服のファンを稼働する試行 (WET) をランダムに行った。インナーの浸潤には 350mL の水 (37℃) を用いた。

深部体温の指標として、直腸温をサーミスタプローブを用いて測定した。皮膚温として、胸、背、腹、前腕、上腕、大腿、および下腿のそれぞれの部位にボタン型温度ロガーを用いて測定した。局所発汗の指標として胸、背、前腕、および大腿の発汗率を、換気式カプセルを用いて測定した。全身発汗量を、運動前後の体重および飲水量から算出した。レーザードップラー皮膚血流計にて、胸、背、および前腕の皮膚血流量を測定した。心拍数、血圧、温度感覚、温熱的快適感、疲労感、および口渇感の実験 1 と同様に測定・評価した。統計解析として、三要因 (群, 試行, および時間) の分散分析を行い、同一時間の試行間の検定には Bonferroni の多重比較を行った。インフォームドコンセントは実験開始前に口頭および書面で行った上で同意を得た。本研究は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の研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。

#### 2) 結果

図4に直腸温の反応を示した。両群ともに CON, DRY, WET の順で有意に低くなった ( $p < 0.05$ )。図5に全身発汗量を示した。両群ともに CON, DRY, WET の順で有意に低くなった ( $p < 0.05$ )。休憩中の飲水量に試行間の差は両群ともに認められず、WET では発汗量と飲水量がほぼ同じであり、CON では 0.4kg, DRY では 0.3kg 発汗量の方が飲水量より多くなった。

図6に心拍数を示した。両群ともに CON, DRY, WET の順で有意に低くなり ( $p < 0.05$ )、群間の差は認められなかった。皮膚血流も同様であった。血圧は試行間および群間に差は認められなかった。

図7に温度感覚および温熱的快適感を示した。両群ともに、すべての試行で温度感覚は上昇し温熱的快適感は低下したが、その変化において WET は CON よりも有意に小さく ( $p < 0.05$ )、DRY は後半のみ CON より有意に小さかった ( $p < 0.05$ )。

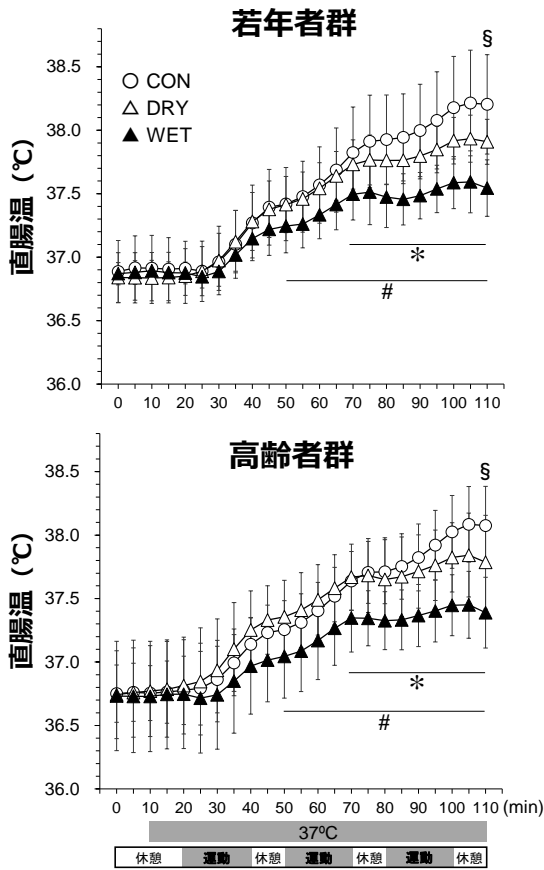


図4. 若年者群および高齢者群における直腸温の変化  
\*  $p < 0.05$ , CON vs. WET, #  $p < 0.05$ , DRY vs. WET  
§  $p < 0.05$ , CON vs. DRY

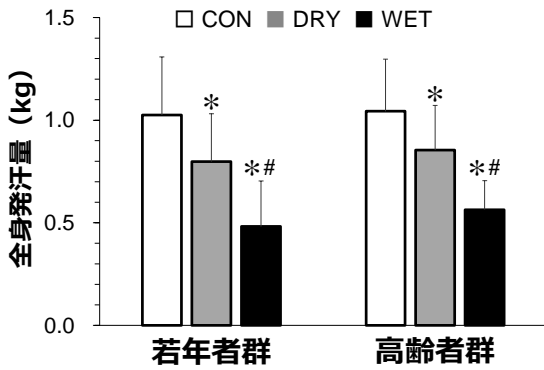


図5. 若年者群および高齢者群における全身発汗量  
\*  $p < 0.05$ , vs. CON, #  $p < 0.05$ , vs. DRY

### 3) 考察

若年者群および高齢者群ともに、乾いたインナーを着用し電動ファン付き作業服のファンを稼働しない CON 試行では、直腸温は 38.0°C に到達した。ファンを稼働した DRY 試行では、直腸温の上昇はやや抑制され、全身発汗量も CON 試行より少なくなった。そして、ファンを稼働しインナーを浸潤させた WET 試行では、直腸温は大きく抑制され 37.5°C 以下になり、全身発汗量は

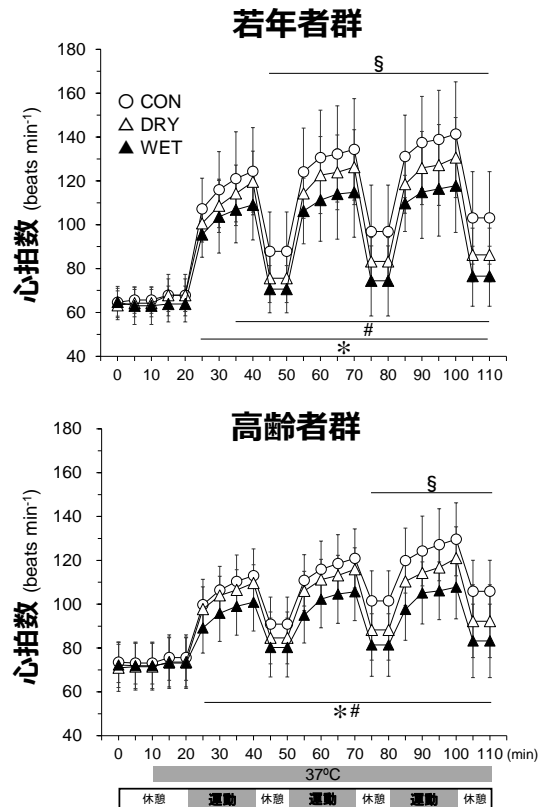


図6. 若年者群および高齢者群における心拍数の変化  
\*  $p < 0.05$ , CON vs. WET, #  $p < 0.05$ , DRY vs. WET  
§  $p < 0.05$ , CON vs. DRY

CON 試行と比べて半分となった。局所発汗の抑制は、胸、背、そして前腕と浸潤させたインナーの部位で確認された。皮膚温が低く保たれたこと、および皮膚の濡れ状態が発汗抑制に関わったと考えられる。また、休憩中の飲水量は自由飲水であったが、全身発汗量と同等になったのは WET 試行のみであり、CON 試行および DRY 試行では全身発汗量の方が上回っていたため、脱水のリスクにつながる可能性がある。すべての項目において、若年者群と高齢者群の間に差は認められなかった。

実験終了時のインナーの水分量は DRY 試行と WET 試行で同等であり、浸潤させた 350mL は概ね乾いたと考えられる。DRY 試行と WET 試行の皮膚温の差は前半に 2°C 程度あったが、実験終了時には 0.5°C ほどになっており、温度感覚もそれを反映していた。休憩中に追加でインナーを浸潤させることで、効果を増大させる可能性がある。

本研究では暑熱環境を室温 37°C および相対湿度 50% に設定したが、これ以上の室温や相対湿度で電動ファン付き作業服とインナーの浸潤による効果が表れるか否かは今後の検討が必要である。電動ファン付き作業服は外気を衣服内に取り込むことから、体温よりも高い外気の場合、体温を上げる作用が働くと考えられる。しかし最

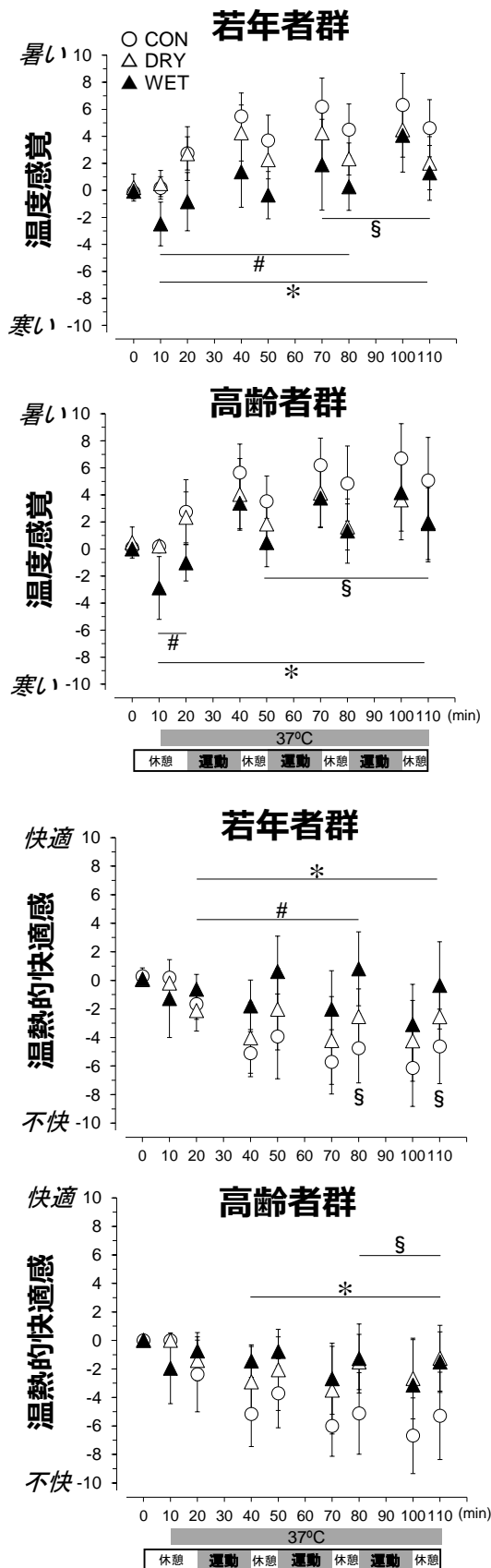


図7. 若年者群および高齢者群における温度感覚および温熱的快適感の変化

\*  $p < 0.05$ , CON vs. WET, #  $p < 0.05$ , DRY vs. WET  
§  $p < 0.05$ , CON vs. DRY

近の研究により、扇風機を用いた際の身体冷却効果は、室温だけでなく相対湿度および発汗量の条件によって有効か無効か、または有害（深部体温を上げる）になる場合もある<sup>8)</sup>。したがって、様々な環境下で電動ファン付き作業服とインナーを浸潤させる身体冷却の効果を検証し、現場で活用される情報を提供することが望まれる。

#### 4. まとめ

暑熱環境における高年齢労働者に対する熱中症予防策として、WBGT基準値の再考と実用的な身体冷却方法を検討した。高齢者群の深部体温は、WBGTが高くなるほど若年者群と比較して大きく上昇した。WBGTが27.0~31.5°Cの範囲において、その上昇の傾きは2倍になった。低代謝率の作業におけるWBGT基準値30°C（暑熱順化者）および29°C（非暑熱順化者）は、高年齢労働者においてそれぞれ1°Cずつ下げることで深部体温の上昇を抑えることにつながる可能性がある。

WBGT基準値を超えた場合の対策として、電動ファン付き作業服のインナーを予め浸潤し蒸散性熱放散を亢進させる効果を検証した。この身体冷却方法により若年者群および高齢者群ともに、WBGT31.5°Cにおける深部体温の上昇と発汗に伴う脱水が抑制された。通常の作業服を想定したコントロール条件よりそれぞれ半減し、乾いたインナーを着用した電動ファン付き作業服の条件よりも有意に抑制された。実用的な身体冷却方法であるが、WBGT31.5°C以上になるような気温や相対湿度の環境においても有効かどうか今後検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) Kenney, W. L., Craighead, D. H., and Alexander, L. M. (2014). Heat waves, aging, and human cardiovascular health. *Med. Sci. Sports Exerc* 46, 1891-1899.
- 2) 厚生労働省労働基準局安全衛生部. STOP! 熱中症 クールワークキャンペーン（職場における熱中症予防対策）. 2023. <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000116133.html>（最終アクセス日 2023年6月27日）
- 3) 時澤健. 熱中症対策の新技术-実用志向と未来志向-. *労働安全衛生研究*. 2017; 10 1: 63-67.
- 4) Inoue D., Nagano C., Tabuchi S., et al. (2023). Partial cooling of the upper body with a water-cooled vest in an environment exceeding body temperature. *J. Occup. Health*. 65, e12396.
- 5) Tokizawa K., Son S. Y., Oka T., Yasuda A. (2020). Effectiveness of a field-type liquid cooling vest for reducing heat strain while wearing protective clothing. *Ind. Health*. 58, 63-71.
- 6) International Organization for Standardization (ISO) 12894. *Ergonomics of the thermal environment* -

Medical supervision of individuals exposed to extreme hot or cold environments. ISO, Geneva, 2001.

- 7) Inoue Y., Nakao M., Araki T., Murakami H. (1991). Regional differences in the sweating responses of older and younger men. *J. Appl. Physiol.* 71, 2453–2459.
- 8) Foster J., Smallcombe J. W., Hodder S., Jay O., Flouris A. D., Havenith G. (2022). Quantifying the impact of heat on human physical work capacity; part II: The observed interaction of air velocity with temperature, humidity, sweat rate, and clothing is not captured by most heat stress indices. *Int. J. Biometeorol.* 66, 507–520.