

参考資料 1-10 「温熱指標に関する留意事項の整理」

温熱指標の留意事項について、文献調査及び有識者へのヒアリング結果を基に整理を行った。対象とした温熱指標は WBGT および SET* である。以下、各指標について留意事項を示す。

1. WBGT の留意事項

①元々、軍隊における砂漠での熱環境評価に用いられていた指標であり、日本では夏季の日なたや高温作業環境以外では適さない。

②算出式が熱収支に基づいておらず、人の熱ストレスに大きな影響を及ぼす人体側の条件（代謝量、着衣量）が入っていない。持田ほか（2007）¹では、熱収支式より WBGT 式の算出を行っているが、係数は下記の通りであり Yaglou らの係数とは異なっている。なお、熱収支に基づいた WBGT の各係数は、代謝量・着衣量および風速などによって異なる数値を示す変数であり、係数の構造上厳密には定数とはなりえないとしている。

$$WBGT = 0.84T_w + 0.30T_g - 0.08T_a$$

ただし、全天日射量 600W/m²、代謝量 1～4 met、着衣量 0.2～1.0clo、風速 1.0～5.0m/s の範囲における検討の結果。

③自然湿球温度や黒球温度で風速を間接的に評価しているが、パラメーターに直接風速が入っていないため、風速による体感温度の低下を適切に評価していない可能性がある。赤川ほか（2007）²による観測結果では、下図の地点②と④の 14 時以降について、②④の風の違いによる効果があまり反映されていないことを示している。

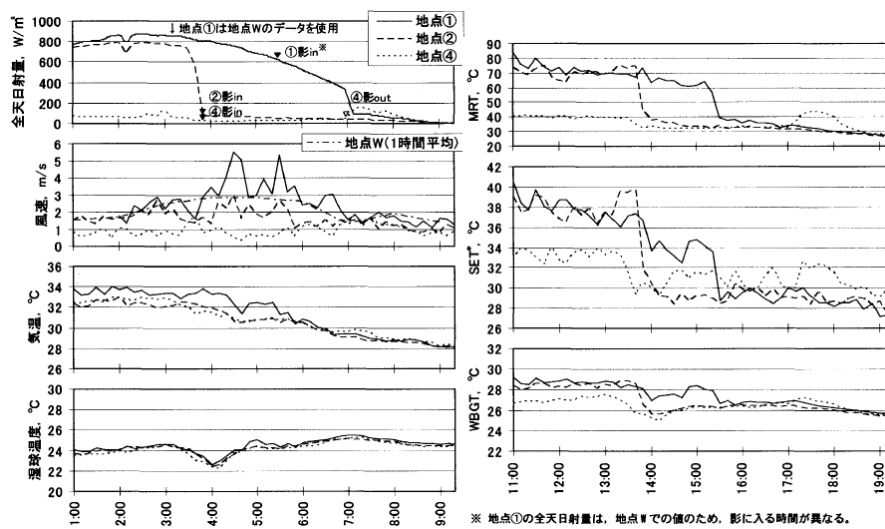


図 1 気象観測結果

¹ 持田 徹，桑原 浩平，佐古井 智紀：WBGT 式の導出と温感工学的分析：屋外用 WBGT 式の特長，空気調和・衛生工学会論文集，128，1-9，2007

² 赤川 宏幸，福味 克幸，久保田 孝幸，竹林 英樹，森山 正和：大規模商業施設屋上庭園における夏季の温熱環境と訪問者の滞留特性に関する研究，日本建築学会環境系論文集，611，67-74，2007

④湿球温度に係る係数が大きく、湿度の感度が高すぎることに留意が必要である。池田ほか(2008)³では、無効発汗を考慮した体温予測モデルと WBGT 基準値における体内温 38°C線を比較しており、低湿度条件において WBGT が危険側の評価となっていることを示している。

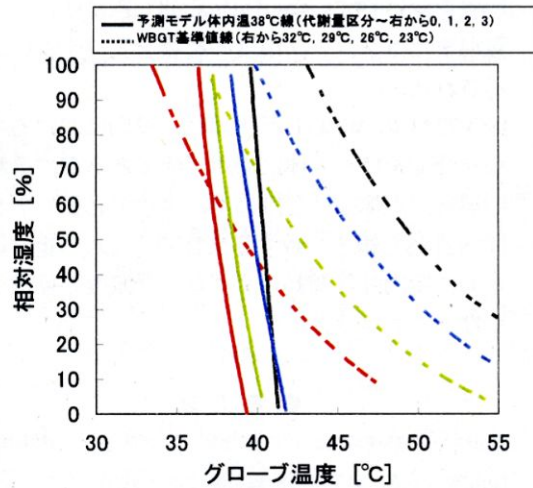


図2 予測モデル体内温 38°C線と WBGT 基準値線の比較 (屋外、800W/m²、2m/s)

⑤等 WBGT 値で各項の値が異なる場合における熱ストレスの違いには、様々な議論がある。ワーリ・キャティスワンほか(1994)⁴では、ほぼ同じ WBGT の2条件 (Dry : WBGT32.2°C、40°C_{Ta}、30%RH Wet : WBGT31.8°C、31°C_{Ta}、80%RH) で被験者実験を行っている。その結果、深部体温は変わらないものの、総発汗量および心拍数において、Dry 条件の方が高い値を示す結果を得ている。

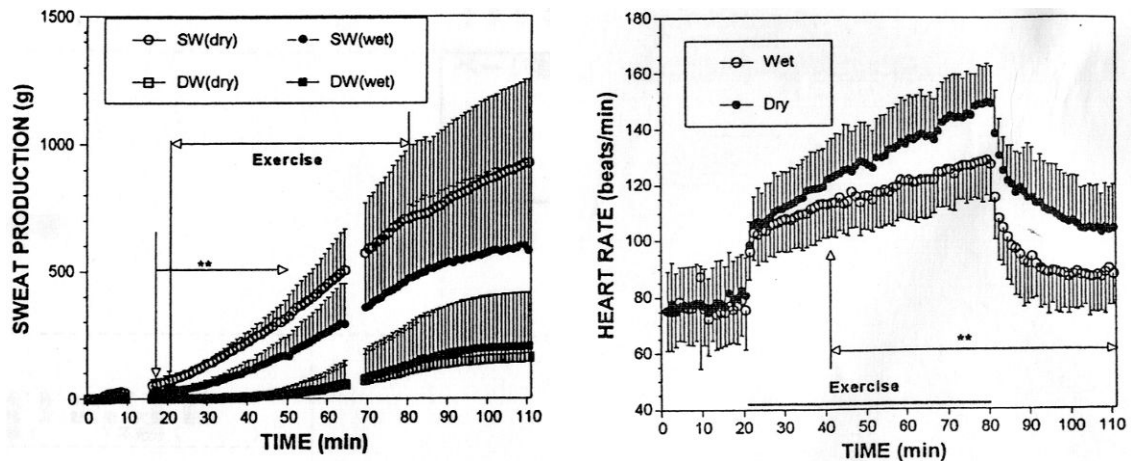


図3 等 WBGT 下における被験者実験結果

³ 池田光毅, 桑原浩平, 窪田英樹, 雨宮智史, 濱田靖弘, 中村真人, 長野克則: 熱中症の予防等暑熱環境評価のための体温予測モデル(第8報)暑熱環境における体内温度と WBGT の関係, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 2, 1185-1188, 2008

⁴ ワーリ・キャティスワン, 大中忠勝, 柘原裕, 李沢康雄, 長尾雅子, 保坂まり子, 山岸里美, 田村奈美: 等 WBGT 環境下における運動時発汗に及ぼす気湿の影響, 日本生理人類学会大会抄録集, 33, 62, 1994

その一方、DAVIES Andrew (2009)⁵では、WBGT27℃となる2条件 (Dry : 39℃Ta、22% RH Wet : 30℃Ta、65%RH) で被験者実験を行い、深部体温および心拍数に顕著な違いがないことを示している。

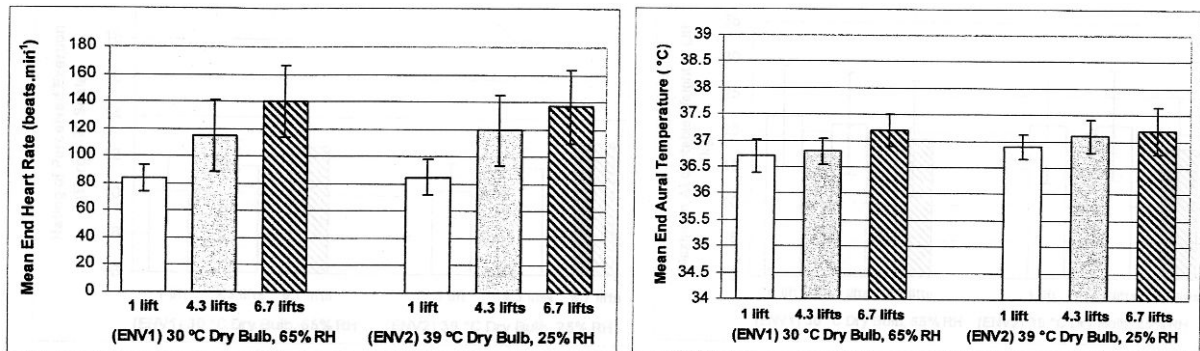


図4 等WBGT下における被験者実験結果

⑥WBGTの定義では、湿球温度には自然湿球温度（強制通風することなく、輻射（放射）熱を防ぐための球部の囲いをしない環境に置かれた濡れガーゼで覆った温度計が示す温度）を用いることとされている。しかし既往研究では、アウグスト乾湿計を用いて自然湿球温度を用いている例もあれば、センサーに濡れガーゼを巻いた自作の湿球温度計を用いている例、湿度センサーにより測定した相対湿度を用いて湿球温度（断熱飽和温度）を算出している例など様々である。このように同じWBGTとして議論している中でも、測定方法や湿球温度の扱いは統一されておらず、今後統一的な手法を検討していくことが求められる。

なお、環境省が全国8か所（大手町、練馬、八王子、名古屋、新潟、大阪、広島、福岡）で実施しているWBGTの実測においては、下記の項目を測定している。

- ・乾球温度（気温）（放射遮蔽、強制通風下）
- ・相対湿度（放射遮蔽、強制通風下）
- ・黒球温度（6インチ黒球〔銅製〕の内部の平衡温度を測定）

WBGTの算出に当たっては、上記の乾球温度及び相対湿度と、各測定点最寄りの気象台における気圧の観測値を用いて算出した湿球温度（断熱飽和温度）を用いている。WBGTの算出式は下記のとおりである。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T$$

ここで、T：乾球温度(°C)、T_w：湿球温度(°C)、T_g：黒球温度(°C)

⑦測定時の留意事項としては、乾球温度および湿球温度に通風の有無が影響する点、黒球温度は黒球の直径の影響を受ける点、黒球温度計の応答速度が遅い点に留意が必要である。

⁵ DAVIES Andrew : The Effects of Two Dissimilar Environments with Equivalent Wet Bulb Globe Temperature on Performance of Manual Handling Tasks, 奈良県立医科大学医学部看護学科紀要, 5, 11-18, 2009

2. SET*の留意事項

①SET*の算出に用いる2ノードモデルについて、高代謝時の体温等の予測精度が低いことが指摘されている。南ほか(2008)⁶では、2ノードモデルは高代謝条件(2および3met)において、皮膚温度および深部体温が被験者実験値よりも高い値を取ったことから、運動に伴う代謝産熱の増大に対して蒸発熱損失の評価が小さく見積もられていることを指摘している。さらに、2ノードモデルの発汗モデルに代謝の影響を組み込み、高代謝域における予測精度を向上させている。

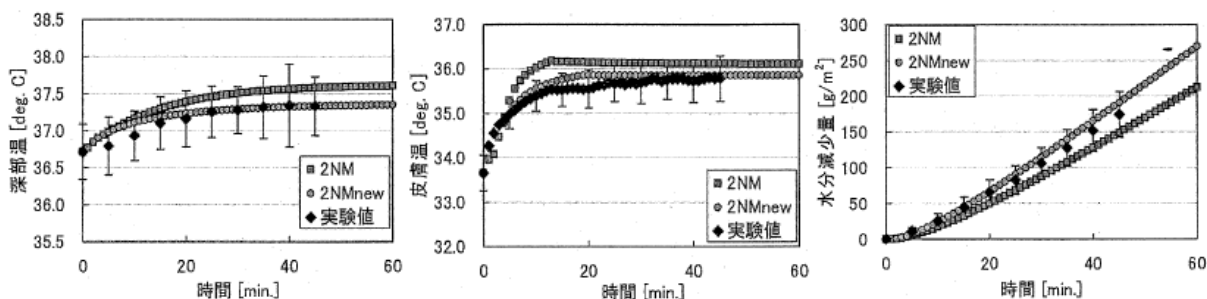


図5 2ノードモデルと被験者実験における生理指標の比較

(気温 35°C、MRT35°C、相対湿度 50%、風速 0.1m/s、代謝量 3.0met、着衣量 0.5clo の場合)

②MRTの与え方、特に日射吸収率に留意が必要であり、MRTの算出条件の異なるSET*の値は比較できない。

実測を想定した場合、MRTは、黒球温度より算出する方法と、短波放射量・長波放射量を測定して算出する方法がある。前者については、人体の日射吸収率を約1とみなすことになる。後者は測定が煩雑になるが、MRT算出時に吸収率の設定が可能である。なお、人体における吸収率は、着衣の色によって0.38~0.76の幅を取ることが報告されている⁷。また、人体を直方体とみなし、方位別の放射の影響について重み付けを与えることも可能である。

③快適性を評価するために考えられた指標であり、熱中症のような危険域での感度があるかは不明。

⁶ 南 百合子, 大岡 龍三, 沢崎 慎祐, 佐古井 智紀, 都築 和代: 2ノードモデルにおける発汗モデルの改良と暑熱環境安全性評価への適用, 日本建築学会環境系論文集, 73(623), 107-114, 2008

⁷ 渡邊 慎一, 堀越 哲美, 富田 明美: 屋外における被験者を用いた着衣時人体の日射吸収率の実測, 日本気象学会雑誌, 47(4), pp.165-173, 2010