

2020年度第2回 日本産業衛生学会 溫熱環境研究会

2020年9月12日（土）13:30～17:30 ウェブ形式（Zoom）

プログラム

13:30～13:35 開会の挨拶

代表世話人 クボタ 勇 加部 勇

13:35～13:40 議事進行の説明

労働安全衛生総合研究所 齊藤 宏之 先生

13:40～14:55 一般口演

座長 岡山大学 伊藤 武彦 先生

演題1 湿度が異なる暑熱環境下での電動ファン付き作業服による核心温上昇抑制効果の検討

○森貴美代、福澤君枝、寶珠山夏子、田中博之、中山雅史、橋本花穂里、日比野浩之、永野千景、井上仁郎、堀江正知

産業医科大学 産業生態科学研究所 産業保健管理学研究室

演題2 湿度が異なる暑熱環境下でのミスト噴霧による核心温上昇抑制効果の検討

○福澤君枝、森貴美代、寶珠山夏子、田中博之、中山雅史、橋本花穂里、日比野浩之、永野千景、井上仁郎、堀江正知

産業医科大学 産業生態科学研究所 産業保健管理学研究室

演題3 電子式 WBGT 測定器の誤差要因ならびに自然湿球温度の推定手法の検討

○齊藤宏之¹⁾、澤田晋一²⁾

1) 労働安全衛生総合研究所、2) 東京福祉大学

14:55～15:00 休憩

15:00～17:20 シンポジウム「マスク着用による熱中症リスク」

座長 産業医科大学 堀江 正知 先生

1. 体温生理の立場 永島 計 先生（早稲田大学）

2. マスク着用の熱平衡理論 佐古井智紀 先生（信州大学）

3. 保護具メーカーの立場 傅田 郁夫 先生（スリーエム・ジャパン）

4. マスク着用の実験結果 川波 祥子 先生（産業医科大学）

17:20～17:30 閉会の辞

代表世話人 クボタ 勇 加部 勇

【世話人】

伊藤武彦（岡山大）、井奈波良一（岐阜大）、川波祥子（産業医大）、齊藤宏之（安衛研）

澤田晋一（東京福祉大）、永野千景（産業医大）、堀江正知（産業医大）、

宮下和久（和歌山県立医大）、森岡郁晴（和歌山県立医大）、加部勇（クボタ）

湿度が異なる暑熱環境下での電動ファン付き作業服 による核心温上昇抑制効果の検討

○森貴美代、福澤君枝、寶珠山夏子、田中博之、中山雅史、橋本花穂里、
日比野浩之、永野千景、井上仁郎、堀江正知
産業医科大学 産業生態科学研究所 産業保健管理学研究室

1. はじめに

暑熱環境下での身体作業時には熱中症の発生が問題となる。熱中症予防を目的として電動ファン付き作業服は広く普及しているが、環境温が皮膚温を上回る作業場所では外気が熱風となって皮膚表面を対流するため、核心温の上昇を抑制する効果が少ないことが推測される。また、日本の気候のように湿度の高い作業場所においては汗が蒸発しにくく、発汗による体温低下作用の減弱も予測される。そこで、WBGT が同程度でも気温と湿度が異なる暑熱環境下において、電動ファン付き作業服による運動時の核心温上昇抑制効果に差異があるかどうかを検討した。

2. 方 法

2019年10月～2020年3月において、健康な成人男性10名を対象に、産業医科大学人工気候室にて WBGT 約 29°C (hot-dry 条件：気温 40°C・相対湿度 30%、または warm-humid 条件：気温 30°C・相対湿度 85%) の条件下で電動ファン付き作業服(KU91710、株空調服製)を風量約 12L/秒で着用した時(冷却群)と着用しなかった時(対照群)とで比較した。対象者は前室(気温 28°C・相対湿度 50%)にて直腸温、食道温、外耳道温、皮膚温(前額部、前胸部、背部)、心拍数といった各種測定センサーを装着の上、5 分間安静後、暑熱条件に移動し、冷却群は暑熱条件での安静開始時に冷却を開始した。15 分の安静後、自転車エルゴメーターにて 4METs の運動を 60 分間おこなった。その他、推定発汗量(実験前後の体重変化量)、自覚的評価(主観的運動強度 RPE、熱快適性)を測定した。

3. 結 果

いずれの環境条件下でも冷却群では対照群よりも、核心温と皮膚温の上昇が抑制された。また、発汗量が少なく、自覚的評価も良好であった。冷却群内の比較では warm-humid 条件の方が、核心温の上昇が抑制された。

4. 考 察

日本の夏季のような気温が皮膚温を超えるような条件下であっても、電動ファン付き作業服を使用することで労働者の核心温の上昇を抑制できると考えられた。ただし、気温が 40°C に達すると熱風の対流による影響によって汗の蒸発の効果が減弱すると考えられた。

湿度が異なる暑熱環境下でのミスト噴霧による核心温上昇抑制効果の検討

○福澤君枝、森貴美代、寶珠山夏子、田中博之、中山雅史、橋本花穂里、

日比野浩之、永野千景、井上仁郎、堀江正知

産業医科大学 産業生態科学研究所 産業保健管理学研究室

1. はじめに

暑熱環境下における熱中症予防対策として、全身または身体の一部分を水に浸することで身体冷却効果が得られたという報告がある。しかし、夏季に高湿度となる日本の作業現場では効果に限界があることが予想される。そこで、同じ WBGT(湿球黒球温度)の環境下でも湿度が異なる条件においては、ミスト噴霧による部分的身体冷却による核心温上昇抑制効果に違いが生じるかどうか検証した。

2. 方 法

健康な成人男性 11 名(平均年齢 22 歳)を対象に、産業医科大学人工気候室において、いずれも WBGT 約 29°C の「hot-dry 条件：気温 40°C・相対湿度 30%」、または「warm-humid 条件：気温 30°C・相対湿度 85%」に設定した実験室内で、4METs の負荷で自転車エルゴメーターによる運動を 60 分間実施させた。直腸温、食道温、外耳道温、皮膚温(前額部、前胸部、背部)、心拍数、推定発汗量(体重差)を測定し、10 分毎に自覚的評価(主観的運動強度 RPE、熱快適性)を確認した。運動開始後 10 分毎に、両手背、後頭部、頸部に 50mL ずつ計 150mL/回、常温のミストを噴霧した「ミスト群」と比較のためにミスト噴霧を行わない「対照群」を設定し、計 4 条件で実施した。

3. 結 果

9 名の被験者が実験を完遂することができた。直腸温、食道温を 4 群で比較すると、hot-dry 条件でのミスト群で最も上昇していた。皮膚温のうち、前胸部においては他の群に比較し、ミスト群でやや低い傾向を示した。発汗量はいずれの環境条件においても、ミスト噴霧により減少する傾向を認めた。RPE は、いずれの環境条件においても、ミスト群の方がやや高い傾向を示した。

4. 考 察

直腸温、食道温は hot-dry 条件でのミスト群で最も上昇していたのは、ミストにより発汗が抑制された結果、うつ熱状態となっていた可能性がある。なお、WBGT 値が同じでも hot-dry 条件の方で直腸温が高かったのは、身体に当たる風が弱く、湿度よりも環境温による影響を強く受けている可能性があると考える。

前胸部皮膚温がミスト群で低い傾向を示したのは、頸部から流れてきたミストの冷刺激により皮膚血管収縮が生じ皮膚血流が減少した可能性がある。また、皮膚と衣服の間に比較的空間ができやすく対流が生じやすい部位であった影響が考えられる。

いずれの条件においても発汗量がミスト噴霧で抑制されていたのは、発汗漸減現象による脱水軽減効果は多少あるかもしれない。ただし、体温上昇を認めていることから、ミストが汗の代わりとしての役割を果たしていなかったとも考えられる。

RPE がミスト群で高い傾向を示したのは、ミストが汗の代わりとならず核心温が上昇したことと相關していると予測する。ただし、ミスト群の hot-dry/warm-humid 条件間で核心温に差がみられたのにもかかわらず、RPE ではその差がみられないことから、水に濡れたことによる不快感、衣服の張り付き、重量感など、核心温上昇以外の要因も関係しているものと思われる。

5. 結 語

エルゴメーターによる運動では、同じ WBGT 値であっても、高温 (hot-dry 条件) の方が、核心温が上昇した。湿度の違いにかかわらず、ミスト噴霧による核心温上昇抑制効果はみられなかった。

電子式 WBGT 測定器の誤差要因ならびに自然湿球温度の推定手法の検討

○齊藤宏之（労働安全衛生総合研究所），澤田晋一（東京福祉大学）

1. はじめに

WBGT は ISO7243 (JIS Z8504)にて測定方法が規定されているが、自然湿球を湿度センサーに置き換えた電子式 WBGT 計が広く普及しており、2017 年に JIS B7922 として規格化されている。しかしながら測定方法の違いに起因する測定誤差が存在しており、特に日射のある条件下において本来の WBGT 値よりも低めの値を示す。今回、我々は自然湿球温度の推定に際する日射の影響の有無に着目し、実測値を用いて各種の推定式による自然湿球温度の推定を行った。これにより、電子式 WBGT 計にて自然湿球型 WBGT 計同様の測定結果が得られるかどうかの検証を行った。

2. 方 法

(1) 屋外環境（天候：快晴～曇天）において自然湿球型 WBGT 計ならびに電子式 WBGT 計による併行測定を行い、各々における WBGT 値ならびに各測定要素 (T_a , T_g , T_w) の比較を行い、どの要素が WBGT における差に影響を及ぼしているかどうかを確認した。その上で自然湿球温度を自然湿球型の T_a , T_g ならびに電子式の RH を用いて下記の①～③式にて推定し、自然湿球値との比較を行った。なお、③式における風速(v)は 1.0m/s、黒球直径(D)は 50mm、黒球の放射率(ε)は 0.95 とし、Maxima 5.42.2 のニュートン法にて方程式の解を得た。

$$\textcircled{1} T_w = 0.09T_a + 0.0099T_a \times RH - 0.143RH + 5.7 \quad (\text{中井ほか, 1992})$$

$$\textcircled{2} T_w = (T_a + 10) \times \left(\frac{RH}{250} + 0.615 \right) - 10 \quad (\text{中井ほか, 2007})$$

$$\textcircled{3} \quad 4.18v^{0.444}(T_a - T_{nw}) + 10^{-8}[(T_r + 273)^4 - (T_{nw} + 273)^4] - 77.1v^{0.421}[p_{as(T_{nw})} - RH p_{as(T_a)}] = 0$$

$$T_r = \sqrt[4]{(T_a + 273)^4 + \frac{1.1 \times 10^8}{D^{0.4}\varepsilon} v^{0.6}(T_g - T_a) - 273}$$

$$p_{as}(T) = 6.11 \times 10^{(7.5T/(T+237.3))} \quad (\text{Malshaire 1976, ISO7243: 2017})$$

T_a : 乾球温度, T_w : 湿球温度, T_{nw} : 自然湿球温度, T_g : 黒球温度, T_r : 平均放射温度, v : 風速,
 $P_{as(T)}$: 温度 T における水蒸気圧, D : 黒球の直径(mm), ε : 黒球の放射率

(2) 測定器内にて演算可能な簡便な補正式として、 $T_g - T_a$ を用いた補正式の検討を行った。

$$T_{nw} = T_w + a(T_g - T_a)$$

3. 結 果

各測定要素を比較したところ、自然湿球型と電子式における湿球温度の差が WBGT 値に影響を及ぼしている可能性が高いことがわかった。その上で自然湿球温度の推定を①～③の推定式を用いて行った結果、気温と相対湿度による推定式である①, ②では日射のある環境下における誤差が大きく、電子式 WBGT 計における湿球温度もその値に近かった。

一方、自然湿球の熱平衡式に基づく③を用いた自然湿球温度の推定値は、ほぼ実測値に近い値であり、自然湿球温度の推定を良好に行うことが可能であった（図 1）。その結果として、WBGT 値も自然湿球型の値とほぼ一致する結果を得ることができた。

また、簡易的な補正式の検討を行ったところ、 $T_{nw} = T_w + a(T_g - T_a)$ の a の値を実測値に基づいて適切に設定することにより、実用的な範囲で補正可能なことが示された（図 2）。

4. 考 察

日射のある条件下における電子式 WBGT の測定誤差は、主として電子式 WBGT 計において自然湿球の日射の影響を評価できていないことが原因である。この誤差は熱平衡式に基づく自然湿球値の推定により、ほぼ完全に補正されたことから、この測定誤差は測定器のハードウェア自

体に起因する問題ではなく、測定値を演算するソフトウェア（アルゴリズム）に起因している可能性が高いことが示唆された。このことから、現在流通している電子式 WBGT 計においても、適切な自然湿球温度の推定式を選択することによって電子式 WBGT 計の精度を向上させることができると考えられる。

一方で熱平衡式を用いた補正式は複雑であり、測定器内で処理することは困難が予想されることから、電子式 WBGT で演算可能な簡便な補正式の検討を行ったところ、 $T_g - T_a$ を用いた補正式にて十分実用的な補正が可能であることが示唆された。WBGT 指数による熱中症対策を進める上において電子式 WBGT 計の精度向上は急務であることから、測定器メーカーによる精度向上が求められるとともに、今回得られた知見をもとに JIS B7922 の改定を検討する必要があると考えられる。

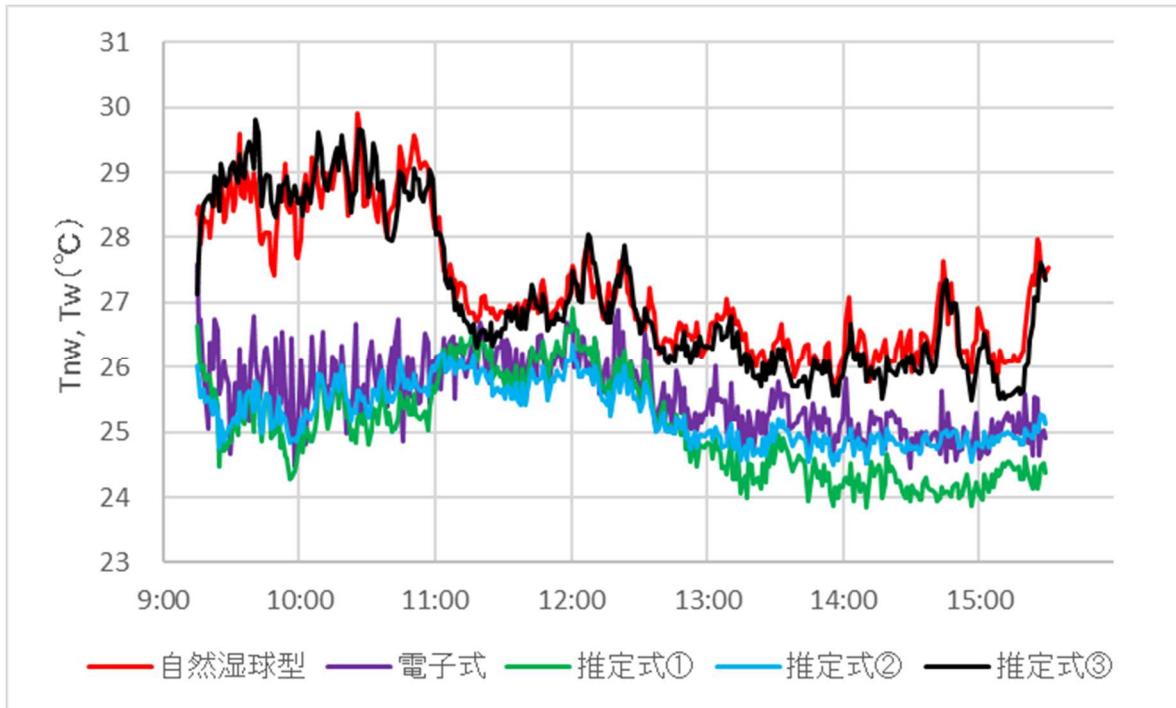


図1: 自然湿球型・電子式における湿球温度と、各推定式による自然湿球推定値

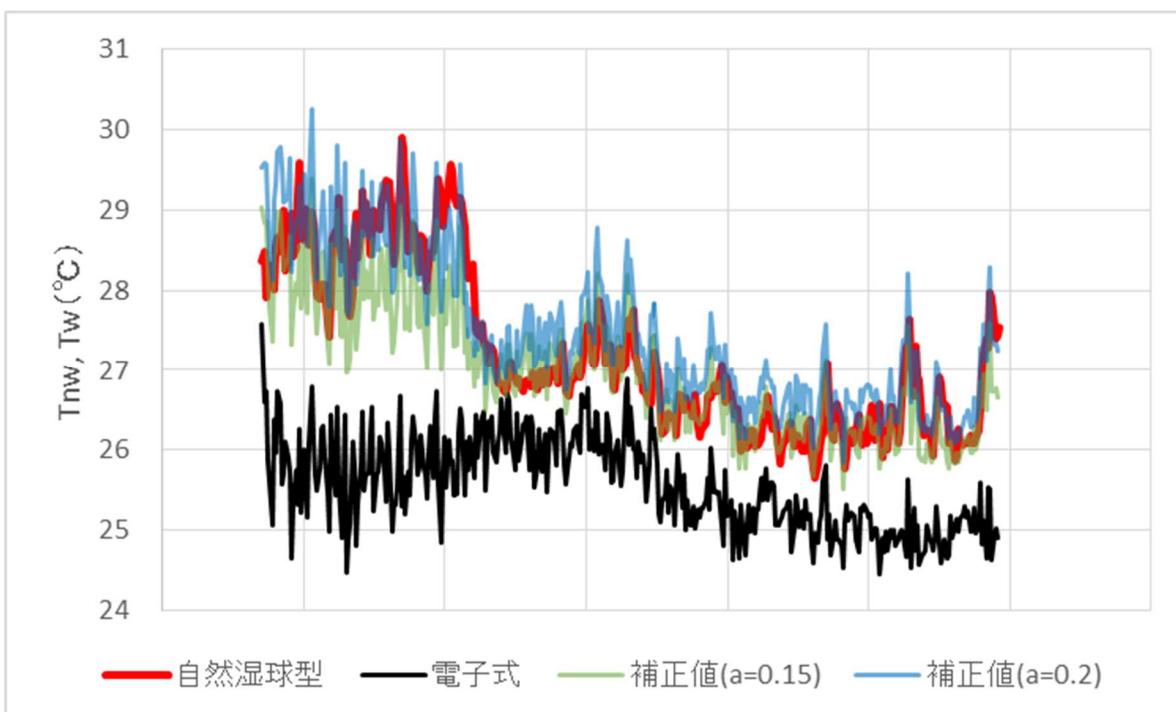


図2: $T_g - T_a$ による簡易換算式を用いた自然湿球温度補正值

体温生理学の立場からみたマスク熱中症の真偽

—理論的シミュレーションと実験的考察—

○永島 計、加藤一聖、増田雄太（早稲田大学 体温・体液研究室）

1. はじめに

公共の場所においてマスク着用は、ほぼ常識になりつつある。一方、この夏の猛暑は、マスク着用による温熱的な不快感を増強し、現在では“マスク熱中症”という言葉さえ生まれている。本来の熱中症の分類から言うと、熱中症の初期は主に脱水症を起点とする循環不全や電解質異常の症状、重症になると体温上昇のそのものによる臓器障害や血液の凝固異常が現れる。しかし、マスクをすることによって、これらの生理学、病態生理学的な変化が生じる明らかなエビデンスは提示されていない。また、マスクをすることによってなぜ温熱的な不快感が生じるのかも明確ではない。

今回のシンポジウムでは、①マスクをすることによって生じると考えられる体温や呼吸に関わる生理学的变化、温熱感覚にかかる影響をシミュレーションや文献から考察を加える。②次に日経クロステックでの屋外での実験協力での結果、人工気候室での予備実験から得られたデータを提示し、考察を加えていく。最後に、マスク熱中症の本態はなにか、暑熱環境下でのマスクの着用について筆者らの考え方述べたいと考えている。

2. 方 法

①マスクをすることによって生じると考えられる体温や呼吸に関わる生理学的变化、温熱感覚にかかる影響の考察

- i) 水分喪失への影響 マスクをすることによる口渴や飲水行動への影響
- ii) 運動や作業時などの呼吸への影響
- iii) 暑熱環境でのマスク着用による影響
- iv) マスク着用による温熱感覚への影響

についてシミュレーション、文献考察を行う。

②屋外での軽度運動時のマスク着用の影響、人工気候室内での中等度運動時のマスク着用の影響

i) 建設労働者である若年成人男子2名を対象とした。通常の不織布マスクの着用の有無の2試行に分けて10分間の踏み台昇降運動を実施した。運動中の鼓膜温度(T_{ear} ; 非接触式非接触型鼓膜温度計、Vitarate)、顔面および胸部の皮膚温度と顔面(マスク着用時にマスク内部となる部分)、顔面および衣服内胸部の相対湿度(T_{face} , T_{chest} ; RH_{face} ; RH_{chest} ; iButton)を連続測定した。運動開始前、運動開始後5分、運動終了後にアンケートによる主観的感覚(息苦しさ、口渴感、温熱的不快感)を評価した。実験環境は、WBGT温度計で連続測定した。

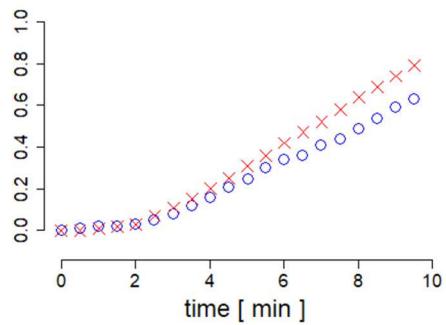
ii) 若年成人男子大学院生2名を対象とした。通常の不織布マスクの着用の有無の2試行行った。人工気候室内を 35°C 、65%RHに維持し、8 km/h 傾斜度3°のトレッドミル走を30分間行なった。この間、直腸温度(T_{rec} 、サーミスタプローブ、NSKThermo)、心拍数、顔面(マスク着用時にマスク内部となる部分)の皮膚温度と顔面の相対湿度(T_{face} , RH_{face} ; iButton)を連続測定した。Visual analogue scale (VAS)による運動前後、運動中の全身の温熱感覚、顔面の温熱感覚、全身の温熱的快不快感、口渴感を評価した。

3. 結 果

①シミュレーション結果 i)安静時の1回換気量は70 kgの男性でおよそ500 ml程度である。1分間に12回程度呼吸をして、これが1日になると、8560 Lとなる。空気中の含水量は

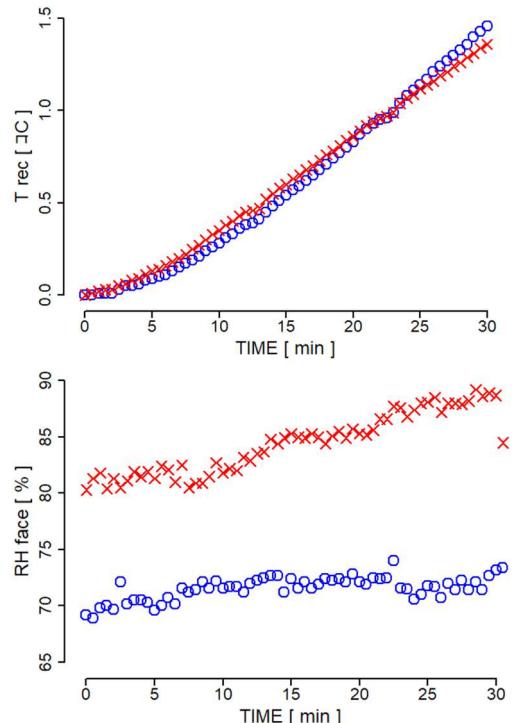
Tetense の式で求められる。この値から、25° C, 60%の環境では1日の水分喪失は約 240 ml となり、不感蒸泄量の一部となる。この一連の不感蒸泄による水分喪失は、気化熱に伴う熱の損失も同時に生じ、140 kcal(基礎代謝の 10%程度)の熱の損失となる。マスクによって、もし吸気湿度が上昇するなら熱の放出の妨げになる可能性はあるといえる。ii)運動時の水分喪失に与える影響 少し息が切れるぐらいのジョギングを 50 分おこなったとする。呼吸の量が 50 L/分に達したとすると 50 分で 2500L の呼吸が行われて、安静時に比較して 61 ml 余分に水分が失われることになる。マスクをして、吸気湿度が上がったところであまり脱水への寄与は少ない。しかし、マスクにより気化熱が生じないとすると、体温は普段より約 0.4° C の上昇を導くことになる。iii)暑熱環境での影響 次に気温 30° C, 湿度 70%の暑熱環境を想定する。この際、マスクなしで運動をすると水分の喪失は安静時に比べて 45 ml の増加となり呼吸による熱の損失も減少、体温上昇しやすくなると言えるが、同時にマスクをして生じる吸気湿度の上昇の影響も少なくなる。マスクをしてもしなくても体温上昇のリスクはそれほど変わらなくなる。

②実験結果 i)



実験当日の WBGT は 30-36 で推移する強い暑熱環境であった。左図青はマスクなし、赤はマスクありの試行の T_{ear} の推移を示す。両試行とも T_{ear} が上昇したが、マスクありの試行で T_{ear} がやや高値であった。 T_{face} は、マスク試行でやや低かったが、 RH_{face} は高値であった。一方、マスク試行で息苦しさや口渴感がつよいことが見られた。温熱的な不快感はマスク試行で高かった。

実験結果 ii)



左図青はマスクなし、赤はマスクありの試行の T_{rec} の推移を示す。両試行とも T_{rec} が上昇し、その差は認められなかった。心拍数はマスク試行でやや上昇していた。 T_{face} は、試行間の差は認められなかつたが、 RH_{face} は高値であった。

4. 考 察

①シミュレーションの結果では、マスクは通常環境では呼吸による熱放散を妨げる可能性があり、さらに運動時にはこの影響は大きくなると考えられる。しかし、暑熱環境、高湿度環境ではマスクの影響はむしろ小さくなると考えられる。運動や労働は熱中症のリスクであるが、暑熱、高湿度環境においては、マスクはこれを増悪するものではないと予想された。一方、顔面の皮膚温上昇は温熱的な不快感や疲労感を上昇される可能性が予想された。②フィールドおよび人工気候室内の実験においてはマスクの体温、生理学的变化に与える影響は明らかではなかった。しかし、マスクをするとマスク内部の湿度の上昇が顕著であった。この湿度上昇が、マスクによる不快感の原因となる可能性、そのメカニズムは明らかではない。現在、そのメカニズムを明らかにする研究の準備中である。

熱移動の視点にもとづくマスク着用の熱中症リスクに関する考察

○佐古井智紀（信州大学）、澤田晋一（東京福祉大学）

1. はじめに

ヒトは代謝により身体の中で常に熱を作っている。作る熱と等しい熱を体外(周囲環境)へ放散するとき、身体の温度は一定に保たれる。放熱が作る熱を下回ると、身体に熱がたまり体温が上昇する。上回ると、上回った分だけ身体から熱が奪われ体温が低下する。本稿の前半では、人体 - 着衣 - 環境系の視点から、身体の熱交換と体温調節の機構の全体像を紹介したい。

身体の温度を考えるときに、どこで熱が生じ、または奪われるか、場所が重要になることもある。例えば、冬場にカイロを使って屋外で暖を採ろうとするとき、ジャンパーの外にカイロを置くことは稀で、多く場合にジャンパー内にカイロを置く。カイロが出す熱は同じでも、ジャンパー外にカイロを置くとカイロの熱が環境へ逃げるのに対して、ジャンパー内に置くとカイロの熱の多くが身体を温めるのに使われるためである。本稿後半では、身体の中(皮下脂肪(先の例のジャンパーに相当)の中)で呼吸により熱が奪われる場合と、同量の熱が汗の増加により皮膚表面で奪われる場合に、身体の深部温がどの程度変わるかを試算する。

2. 人体-着衣-環境系の熱移動と人体の体温調節

図 1a に、環境の温度が低く汗をほとんどかいていないときの、人体-着衣-環境系における熱移動、そして体温調節機構を、上側を高温、下方向を低温とし、温度差(水頭差)に伴い下へ流れる熱(水)として模式化する。温度の高い方から、人体を深部 T_{cr} 、皮下脂肪、皮膚 T_s に 3 分し、低温の環境 T_o を一番下に、着衣外表面温 T_{cl} を皮膚 T_s と環境 T_o の間に置いている。代謝熱が身体の深部で生じると簡略化し、深部温 T_{cr} の水頭を上げるものとして産熱(水滴)を上から深部へ供給する。温度差(水頭差)に対する熱の移動のし易さが変わるものとして、組織を貫く血流が増えると実質の断熱性が低下する皮下脂肪(皮下脂肪は身体の組織の中で熱伝導性の低い断熱組織と位置付けられる)、および着衣、そして気流によって熱の移動し易さが変わる着衣外表面がある。これらの箇所をバルブにより模式化した。上流の水面は、下流の水面が上がる、あるいはバルブの開度が小さくなると、熱(水)が流れにくくなって上昇する。また、流れる熱(水)が増えた場合にも上昇する。体温調節を、環境温度 T_o や気流、着衣が変った場合でも、バルブの開度と供給水量(ふるえなどの代謝産熱)を変えることで、深部温 T_{cr} の水頭を一定に保つ機構と位置づけ出来る。

図 1b に、代謝熱(供給される水滴)に見合う深部から環境への温度差による放熱が得られない場合の、人体-着衣-環境系における熱移動、そして体温調節機構の概略を示す。図は環境の温度が皮膚温より高い場合を想定して描いた。この条件でも、体深部 T_{cr} へ供給される代謝熱を、皮膚を通じて環境に放出することに変わりはない。皮膚 T_s は体深部 T_{cr} の低温(下)側に位置することとなる。体温調節を、体深部 T_{cr} から皮膚 T_s にむけて熱を流れやすくするために皮膚の温度(T_s の水面)をいかに下げるか、そして同じ T_s であっても、多くの熱を皮膚に流せるよう、皮下脂肪の断熱性を貫く血流によりいかに下げるかを調整する機構と位置づけ出来る。

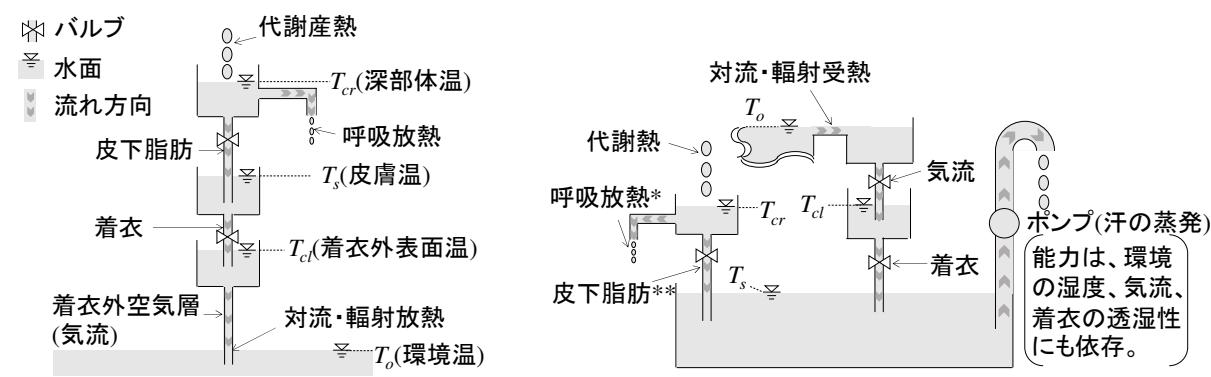


図 1 人体の熱移動と体温調節機構を水頭差と水流で模式化した図

T_s の水面を下げるものが発汗で、温度の低い皮膚 T_s から温度の高い環境 T_o へ熱を汲み上げるヒートポンプの役割を果たす。十分に汗をかける健康な人の場合、ポンプの能力は環境の湿度、着衣の透湿性、風(言い換えると蒸発できるか)に依存する。熱中症リスクを考える上で、これら3要因はもともとの健康状態とともに非常に重要である。

3. 呼吸による放熱

呼吸による放熱は、吸気を身体の中で加温、加湿し、環境へ排気することでなされる。環境の温度、湿度が高いほど、加温・加湿量は少なくなるため、呼吸による放熱は少ない。また、呼気量は活動強度に比例することも知られている。ISO-7793 に記される Predicted Heat Strain モデル¹⁾に採用される呼吸放熱式を紹介する。

$$R_{es} = [0.001516M(28.56 + 0.115T_a + 0.641P_a - T_a)] + [0.00127M(59.34 + 0.53T_a - 11.63P_a)] \quad (1)$$

ここに、 R_{es} : 呼吸放熱量 [W/m^2]、 M : 代謝量 [W/m^2]、 T_a : 気温 [$^\circ\text{C}$]、 P_a : 水蒸気圧 [kPa]。

式(1)の右辺の第一角括弧内は温度差による放熱、第二角括弧内は蒸発による放熱である。気温、相対湿度を変数として、全代謝熱に対する呼吸放熱の割合を計算した結果を図2に示す。気温 $25^\circ\text{C} \cdot 50\% \text{RH}$ の条件では全代謝熱の 8%、 $35^\circ\text{C} \cdot 50\% \text{RH}$ で 5% 強である。

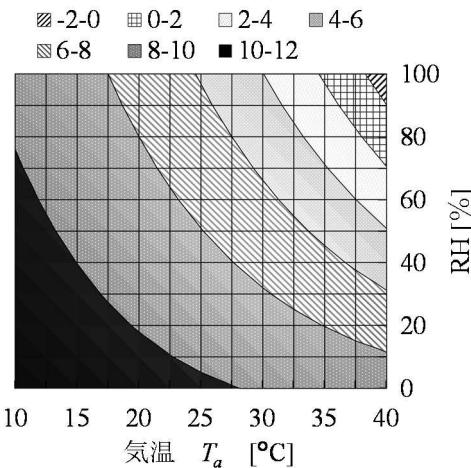


図 2 代謝に対する呼吸放熱の割合 [%]

4. マスク着用による深部温上昇の試算

図1a、1b では呼吸放熱を、 T_{cr} の水面下から直に環境に向かう細い管から滴る水で表した。3. 呼吸による放熱で記したように、呼吸放熱は $32.5^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ で全身の放熱のおおよそ 5%程度と微小であるが、マスク着用により呼吸放熱(図1b の*の流れ)が抑制されると、代謝熱に見合う放熱を実現するうえで、その抑制分だけ深部 T_{cr} から皮膚 T_s へ流れる熱(図1b の**の流れ)が増える。熱中症リスクのない体温調節を問題なく行える条件では、この増分を発汗(ポンプの稼働)を増やして環境へ出し、 T_{cr} の水頭を一定に保つ。ここでは発汗(ポンプ稼働)をそれ以上に増やせない、体温調節の上限条件を想定する。その上で、マスクによる呼吸放熱の抑制分、深部から皮膚へ向かう熱流が増えることが、深部温をどれだけ上昇させるかを試算する。深部温上昇を低く見積もることを意図して、皮膚からの放熱が増えるマスク着用時でも、皮膚からの放熱の少ない非着用時と皮膚温 T_s が同じに維持されたとした。試算モデルの説明を図3に示す。熱の流入出が等しく、どこにも熱がたまらないこのモデルである。試算で得られる ΔT_{cr} は、十分な時間が経過し、深部温が一定に落ちていた後の値である。皮下脂肪の熱抵抗 R_{cs} には Two Node Model²⁾を参照し、皮膚血流(皮下脂肪を貫く血流)量が最大のときの深部・皮膚間の熱抵抗値を設定した。

図4に、マスクの着用による深部温の差 ΔT_{cr} の試算値を示す。呼吸放熱の少ない高温、高湿条件ほど差は小さくなるが、5met($290\text{W}/\text{m}^2$)の活動強度で、マスクにより放熱が 100% 抑制されるケースでは、 $35^\circ\text{C} \cdot 50\% \text{RH}$ でも差は 0.15°C となった。活動強度が小さいほど深部温の差 ΔT_{cr} は小さく、また、マスクによる放熱抑制の少ないケースほど、マスクの着用の深部温への影響は小さい。マスク非着用時にも熱中症リスクのある場合には、熱中症の生じやすい運動中(=活動強度が高い)を対象とすると、マスク着用が 0.1°C 以上の深部温上昇を引き超し得ると試算された。

5. おわりに

人体 - 着衣 - 環境系の全体から体温調節機構をみることを目的として、人体の産熱、環境への放熱と体温調節機構の関係を、水頭差に伴い流れる水の流れと、深部温に対応する水頭を一定に保つための機構に見立てて説明した。発汗は、温度差によって十分な放熱を見込めない条件での熱のポンプアップと見なせること、その能力は十分に汗をかける人でも環境の湿度、着衣の透湿性、風に大きく依存することを紹介した。

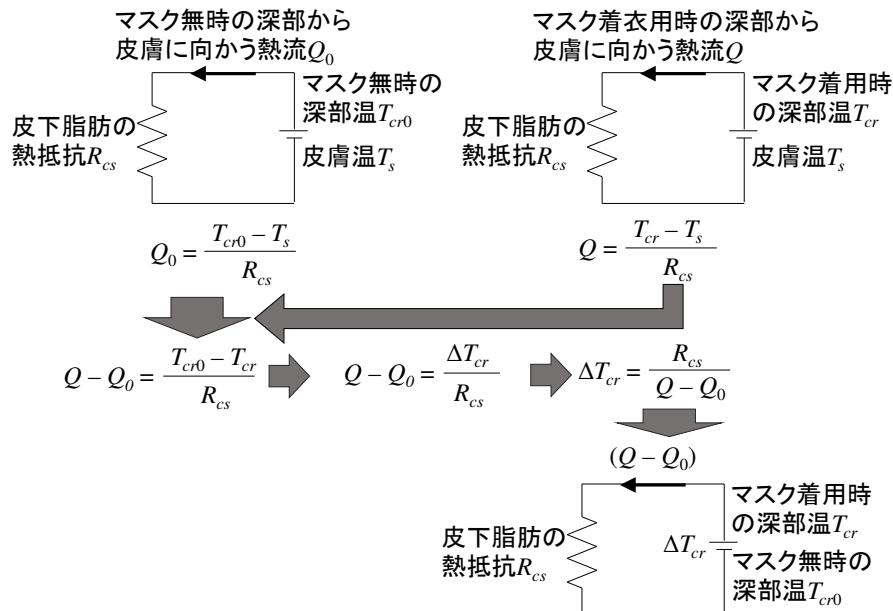


図3 皮膚温が同一とした時のマスク着用による深部温上昇の試算モデル

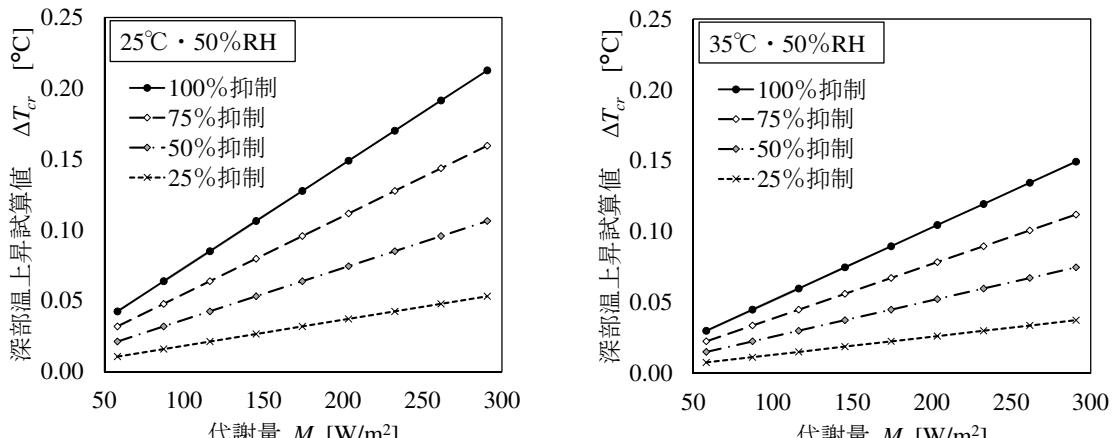


図4 マスクによる放熱の抑制度ごとの深部温上昇試算値

呼吸による放熱は、35°C · 50%RH で全代謝産熱の 5% 強であるが、身体の深部を直接冷やすものである。同じ熱量であっても、皮膚を冷やすことを通じて深部を冷やす汗の蒸発に比べ、身体の深部を冷やす効果は大きい。発汗をこれ以上増やせない体温調節の上限を想定し、マスク着用による深部温上昇を試算した。運動時にマスクの着用が、0.1°C 以上の深部温の上昇をもたらしえる結果となった。

呼吸放熱は代謝熱のおおよそ 5% 前後と小さく、マスク非着用時に熱中症リスクのない条件では、マスク着用によって抑制される放熱は汗を増やして体外へ放出される。マスク着用が熱中症の引き金になることは無い。ただし、マスク非着用時においても熱中症リスクの高い条件では、特に運動時にマスク着用は熱中症の引き金となり得る。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(A)、代表者：森川英明、課題番号 No.20H00288)によったことを付記します。

参考文献

- J Malchaire et al.2001. Development and validation of the predicted heat strain model, The annals of occupational hygiene, Vol.45(2): 123/135.
- AP Gagge et al.1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Trans.92(2B): 709/731.

シンポジウム 3
暑熱リスクと呼吸用保護具

○傳田 郁夫（スリーエム ジャパン株式会社）

1. はじめに

呼吸用保護具は作業環境中の粉じん、溶接ヒューム、ミスト、ガス蒸気などの有害物質の吸入を防ぐ個人用保護具である。給氣式やろ過式などいろいろなタイプがあり、作業環境、作業内容・時間などを考慮して、適切な呼吸用保護具が選択使用される。暑熱環境下でろ過式防じんマスクなどを使用するとその構造や排気抵抗などにより、呼気に排出した水蒸気を再び吸い込んでしまい、熱中症のリスクが上昇するおそれがある。そのため、作業環境に暑熱が加わると、熱中症のリスクを低減させることも必要となる。呼吸保護と暑熱対策としては、電動ファン付き呼吸用保護具や送気マスクなどが選択使用される場合がある。

電動ファン付き呼吸用保護具、ボルテックススクーラーを利用した送気マスクを紹介する。

2. ボルテックススクーラー付き送気マスクについて

給氣式の呼吸用保護具である。送気マスクに送られる圧縮空気を、ボルテックス効果（暖気流と寒気流に分離する）により冷たい空気を送気マスクに送り、マスク内を陽圧による呼吸保護にプラス冷却効果を持たせたものである。圧縮空気をボルテックススクーラーのチューブ中心部へ切線方向にらせん状に回転させ、空気の断熱膨張により、冷たい空気と熱い空気に分離され、冷たい空気をマスク内に供給するもので、作業服内に供給して暑熱対策として使用するものである。

使用するにはコンプレッサーなどによる圧縮空気が必要となる。圧縮空気中にはオイルミストや粉じんなどが混入する場合があるので、ろ過装置などにより呼吸に適した空気品質を維持する必要がある。適切に稼働できるよう定期的なコンプレッサーの保守点検も重要である。また、接続する耐圧ホースにより、活動範囲が制限される。

接続する組み合わせるものとしてはフェイスシールドタイプやフードタイプなどがあり、自動遮光面を取付け溶接作業などでも使用できるものがある。



3. 電動ファン付き呼吸用保護具について

ろ過式の呼吸用保護具である。二次電池などの小型電池を電源として小型の電動ファンを回すことにより強制的に作業環境中の空気をフィルターでろ過し清浄な空気をマスク内に送り込むものである。防じんマスクと同様に国家検定規格合格品が販売されている。

適切な空気量を供給維持できればマスク内は陽圧になり呼吸保護にプラス送風による暑熱対策が見込まれる。腰などに電動ファンを取り付けるため、送気マスクと比べ行動範囲に制限されない。粉じん捕集によるフィルターの目詰りにより供給流量低下した場合は陽圧が維持されなくなり、内部への漏れ込みが発生するためフィルター交換が必要となる。フィルターの目詰りにより供給流量が低下した場合アラームでしらせるものがある。また、二次電池の充電管理が必要となる。

組み合わせるものとしては、フェイスシールドタイプやフードタイプなどがあり、自動遮光面を取付け溶接作業などでも使用できるものや、防爆本質安全防爆構造対応の製品もある。

4. 冷却効果について

A) ボルテックススクーラー

人頭にフェイスシールドタイプのヘッドギアを装着し、ボルテックススクーラーからの冷気を接続した場合の人頭口元付近の温度を測定した結果、最大冷却時で室温より 20°C程度低くなることが確認された。冷え過ぎる場合は、付属のバルブ調整により暖気排出流量を調整することによりコントロール可能である。

測定方法：人頭にフェイスシールドタイプヘッドギアを装着し、圧縮空気の送気開始から 10 分後に人頭口元付近の温度を測定。

測定条件

接続圧縮空気圧力 : 0.45Mpa

耐圧ホース長さ : 10m

試験室室温 : 23°C

圧縮空気温 : 22°C

バルブは全開（ボルテックススクーラー最大冷却状態）

フェイスシールドタイプヘッドギア内の温度測定結果

ヘッドギア内の温度（人頭の口元付近で測定）	
M-107	M-307
	
1°C	0°C

B) 電動ファン付き呼吸用保護具（送風機能が与える涼しさ）

冷却効果のサーモカメラでの可視化

室温 23°Cで実施し 10 分後、装着なりの顔面表面と PAPR 装着時の表面と比べると 10°C 以上の差が確認できた。

5. 考察

暑熱リスクが高い作業では、ボルテックススクーラー付き送気マスクは初期投資が必要となります。圧縮空気供給源の適正管理と空気の品質・供給量が維持できれば、有効な暑熱対策を兼ねた呼吸用保護具となる。耐圧ホースによる行動範囲制限があるので、作業範囲に合わせたホースの取り回しを考慮し、現場にあわせ設置することにより利用可能となる。使用例としては乾燥工程前の吹付け塗装作業などで採用されている。

また、圧縮空気源が無い、移動範囲が広い作業など送気マスクでは対応できない場合は、電動ファン付き呼吸用保護具が検討される。特に溶接作業では、フェイスシールドタイプヘッドギアに自動遮光面を取付けることにより、頭部、目、呼吸保護に加えて、送風により暑熱対策が見込まれ採用されている。

各種通達のばく露防止対策では、利用可能な呼吸用保護具が限定され選択肢が限られている場合があるため、吸入リスクに加え暑熱環境下では暑熱対策効果が期待できても使用できない場合がある、有害物質の吸入リスクに加えて想定されるその他のリスクも考慮した保護具の選択自由度が必要と思われる。

呼吸用保護具着用による生理的負担の評価

○川波祥子（産業医科大学 産業医実務研修センター）

1. はじめに

粉じん作業時に使用される呼吸用保護具にはさまざまな形状や性能のものがあり、作業内容や取り扱う物質によって選択される。最近では安全性を担保するために、マスク内がファンの送風によって常に陽圧に保たれる、電動ファン付き呼吸用保護具（以下、PAPR）が、石綿除去やトンネル建設工事等の高い防護性が求められる作業において義務づけられている。一方で着用する労働者からは保護具を着用することによる息苦しさ、暑さ、蒸れ等の訴えが良く聞かれるものの、着用感が保護具選択において考慮されることはない。また、これらが単に主観的なものなのか、実際に生理的影響を及ぼすものかについて検討した研究は限られている。

そこで、我々は、産業現場で使用される種類の異なる呼吸用保護具を健常人に装着させ、被験者の生理指標の変化、主観的評価、運動中の呼吸用保護具内の温湿度やガス濃度等を測定し、作業者の生理的負担を検討した。

2. 方 法

対象は 20 歳代の健常男性 8~10 名とし、産業医科大学人工気候室（TBL-15FW5CPX 型、タバニエスペック）において保護具の種類、室温条件（20~35°C）、エルゴメーター負荷条件（40~70% VO_{2max}）を変えながら、数年にわたり被験者群を変えて測定を実施してきた。使用した保護具は、取替式防じんマスク（RL2、RL3）、使い捨て式マスク（DS2、排気弁あり・なし）、PAPR（呼吸連動式、一定風量式、フード型一定風量式）、コントロール（運動負荷試験用マスク）とした。測定した主観的指標は自覚症状（VAS による暑さ・蒸れ感・息苦しさ・不快度・不耐容度の測定）、自覚的運動強度（RPE）、生理的指標は核心温（直腸温または外耳道温）、心拍数、SpO₂、その他保護具内微小環境（O₂、CO₂ 濃度、温湿度）を測定し主観的評価との関係を検討した。

3. 結 果

高温高負荷条件において自覚症状は、使い捨て式マスクが他の取替式や呼吸連動式 PAPR に比べ高かったが、核心温、心拍数、SpO₂ 等の生理的指標は保護具間で有意差を認めなかった。マスク内微小環境は呼吸連動式 PAPR が湿度やガス濃度において良好であった。

常温中等度負荷条件下では、コントロールも含めて測定を実施した。自覚症状は多くの項目で一定風量式 PAPR が低値を示したが、生理的指標はコントロールを含めいずれも保護具間で有意差を認めなかった。保護具内温湿度は、運動開始前半は PAPR が他に比べ良好であるものの、運動後半では PAPR のうち呼吸連動式 PAPR は取替式マスクとの差がなくなり、一定風量式 PAPR のみが良好であった。保護具内のガス濃度は、一定風量式 PAPR では平均 CO₂ 濃度が 1% を超えることはなかったが、取替式と呼吸連動式 PAPR では 2% 程度まで上昇していた。

4. 考 察

数回行った測定は被験者群が異なり、また実験条件が少しずつ異なるため単純に比較はできないが、全体の結果から以下が推測された。すなわち、高温・常温いずれの気温環境においても運動により保護具内の暑さや蒸れの自覚症状が増強し、核心温や心拍数も上昇したが、上昇の程度は保護具の有無（20°C 条件）や種類による差が認められなかつことから、これらの変化は運動そのものによるものであり、保護具の着用が生理的指標の変化に追加的な影響を及ぼしてはいないと考えられた。一方で、暑さや蒸れの自覚症状の程度は保護具内の温湿度の実測結果との関連が示唆され、一定風量式 PAPR のように換気が保たれやすい保護具が自覚症状の改善に有用であると考えられた。一定風量式 PAPR は保護具内ガス濃度も良好に保たれたことから、暑さや蒸れの自覚症状の改善だけでなく、良好な換気は心肺機能への負担を軽減させるためにも重要と考えられた。