

厚生労働科学研究費補助金
労働安全衛生総合研究事業

暑熱作業時の必要水分補給量 に関する研究

平成20年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 澤田晋一

平成21年3月

目 次

I. 総括研究報告

- 暑熱作業時の必要水分補給量に関する研究----- 1
澤田晋一

II. 分担研究報告

1. 暑熱ストレス別・作業条件別必要水分補給----- 7
モデルの開発と補給量予測（分担研究1）
上野 哲、澤田晋一
2. 暑熱環境における体重減少と必要水分補給量----- 16
に関する被験者実験（分担研究2）
榎本ヒカル、東郷史治、澤田晋一

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総括研究報告書

暑熱作業時の必要水分補給量に関する研究

研究代表者 澤田 晋一 労働安全衛生総合研究所 国際情報・研究振興センター長

研究要旨

本研究は、各種暑熱作業現場で適切な水分補給のガイドラインを提案することを目的としており、そのために種々の暑熱条件別、作業強度別、作業時間別、作業服別の必要水分補給指標の開発を行い、指標の妥当性を実験的に検証するとともに、現場でその有効性を評価することからなる。

今年度は、温熱環境の国際規格ISO7933に採用されている暑熱曝露時の暑熱負担を予測する数値指標であるPredicted Heat Strain(PHS)の改良版(PHSm)を開発した。この改良指標を用いて、1時間作業時のWBGT別(18～33℃)、作業強度別(安静65W/m²、低代謝率130W/m²、中代謝率200W/m²、高代謝率260W/m²、極高代謝率300W/m²)の必要水分補給量の予測表の暫定版を作成した。

また本改良指標PHSmを用いて、日本の夏期の気象データからWBGT値による屋外作業者の暑熱ストレスを評価し、暑熱負担(ストレイン)を予測した。透湿性が悪い作業服を着用した場合、多量の発汗と高体温が予測された。熱中症患者が最多であった日の屋外作業では、低代謝率作業でも毎時0.7リットル以上の水分補給が必要であり、中程度代謝率以上の作業では深部体温がISO7933の基準を越えることが予測された。

さらに、改良PHSm指標の妥当性・信頼性を検討するための被験者実験システムを構築し予備実験を行った。気温35℃、相対湿度50%、放射温35℃、風速0.2m/s、安静座位、衣服保温力0.2cloの実験条件で、健康な成人男性4名を2時間暑熱曝露した。この時PHSmで予測される必要水分量は、390ml～430mlであった。この水分量を補給した場合としない場合で暑熱負担を比較すると、水分補給した場合は水分補給しない場合に比べて体重減少が抑制され予測必要水分量はほぼ妥当であること、また水分補給により直腸温および皮膚温は低く抑えられ、主観的申告がより「涼しい、快適な」側になり、視覚反応時間の改善や、心拍回復機能の低下の抑制傾向などが観察された。これより、本研究で開発された改良PHSm指標に基づき必要水分量を補給することで、暑熱曝露時の体水分喪失を防止するとともに心理的・生理的暑熱負担の軽減がある可能性が示唆された。

次年度(第2年次)は、この予備実験結果を踏まえて、さらに実験条件を増やして指標の妥当性・信頼性を検証していくとともに、現場調査によってもこの予測指標の有効性を検討する予定である

分担研究者	
上野 哲	労働安全衛生総合研究所 主任研究員
東郷 史治	労働安全衛生総合研究所 任期付研究員
榎本 ヒカル	労働安全衛生総合研究所 任期付研究員
研究協力者	
Thomas Bernard	南フロリダ大学公衆衛生 大学院 教授
岡 龍雄	労働安全衛生総合研究所 主任研究員
安田 彰典	労働安全衛生総合研究所 主任研究員
呂 健	労働安全衛生総合研究所 主任研究員

A. 研究目的

従来から暑熱作業時には、熱中症の予防対策として水分と塩分の補給をするよう一般に指導が行われており、平成7年の旧労働省通達でも暑熱対策の重要な対策の一つとして明記されている。また近年では暑さ対策として水分補給は、マスコムのキャンペーンの効果もあり一般常識の一つになっている。にもかかわらず、依然として職業性熱中症の発生が絶えないどころか、最近ではむしろ夏季屋外作業を中心として増加傾向にある。現場の発生事例を注意深く調べてみると、当日は暑さのために水分を補給していたにもかかわらず熱中症が発症する例がみられる。以上より、熱中症予防対策として現在求められていることの一つは、種々の暑熱作業形態ごとに必要とされる水分補給量の目安を具体的かつ定量的に提言することである。

現在研究代表者が参画している国際標準化機構の温熱環境作業部会 (TC159/SC5/WG1) では、ISO7933という暑熱負担を予測する定量的暑熱ストレス評価手法の国際規格を提案している。本国

際規格は、作業場の暑熱条件を詳細に定量的に分析する手法を提示しており、気温、湿度、放射温、風速、姿勢、衣服の熱抵抗を測定することにより、当該暑熱条件に曝露した時の体温上昇度や体水分喪失量、暑熱曝露許容時間を予測するものである。人体熱平衡理論にもとづくこの規格は合理的なものでそのアプローチや予測計算アルゴリズムには問題はないと思われるが、評価のクリテリヤや許容基準値には国や地域によってはその妥当性を検証する必要性が残されている。

そこで本研究では、ISO7933の現行国際規格をベースにして、その暑熱負担予測計算プログラムの問題点を検討して必要に応じて改良版を作成する。それにもとづき、実際の屋外暑熱作業現場で想定される種々の暑熱条件下での体水分喪失量を夏期の気象データをもとに算出し、各種作業形態で必要とされる水分補給量の予測モデル(暫定版)を構築する。次に、その予測値の信頼性・妥当性を人工気象室での暑熱曝露被験者実験により検証する。さらに暑熱作業現場でも、そのモデルの妥当性・有効性を検証し、最終的には作業形態別水分補給量ガイドラインを提案することを目的とする。

B. 研究方法

1. 現行の暑熱負担予測PHSモデルの動作特性の検討(分担研究1):

温熱環境の国際規格ISO7933に採用されている暑熱曝露時の暑熱負担を予測する数値モデルであるPredicted Heat Strain (PHS)のコンピュータプログラムを翻訳して、その動作特性を検討するとともに、現行の問題点に改良を加えた。これを、改良版PHS_mとして、以下のデータ解析と実験研究に利用した。

2. 夏期の気象データを用いた総水分喪失量予測(分担研究1):

改良版PHS_mをベースにして、夏期屋外作業時の発汗量や深部体温を予測するために、最近三年間の東京、新潟、愛知、大阪、広島、福岡の1時間ごとの気象データベース(6-9月、2006-2008、45456

件)を用いた。暑熱馴化された平均的な日本人男性の体格(170cm, 65kg)を、PHSmに入力し計算した。気温、風速、水蒸気圧は、気象庁のインターネットサイトからダウンロードし、黒球温度は、国立環境研のインターネットサイトからダウンロードした。暑熱環境のリスクを評価する総合的な指標として、WBGT(湿球黒球温度)を活用するよう厚生労働省から通達が出されているのを受け、ここではWBGTを指標に1時間の作業における総水分喪失量を求めた。作業強度を示す代謝率は、ISO7243(WBGT(湿球黒球温度)指数に基づく作業者の熱ストレスの評価)の代謝区分の最大値に対応させ、安静(65W/m²)、低代謝率(130W/m²)、中程度代謝率(200W/m²)、高代謝率(260W/m²)、極高代謝率(300W/m²)とした。着衣条件は、衣服の断熱性では0.3、0.5、0.7、0.9、1.1 cloの5条件、蒸気の透湿性ではim値で0.25、0.35、0.45の3条件の合計3×5=15条件について計算した。

3. ISO7243基準値での予測総水分喪失量(分担研究1):

ISO7243のWBGT暑熱ストレス指数の基準値表に対応した条件で、1時間労働および8時間労働したときの総水分喪失量、深部体温を改良版PHSmにより求めた。全計算時間は480分とした。使用した気象データは、前項2で使用したデータのうち、ISO7243の基準値表の条件にあてはまる気象データを選び出して用いた。基準地表の衣服条件は0.6cloなので、その値を用い、日本人男性の平均体格(身長1.7m, 体重65kg)で計算した。代謝量は、各区分での最大値、休憩時(65W/m²)、低代謝率(130W/m²)、中程度代謝率(200W/m²)、高代謝率(260W/m²)を用いた。

4. 熱中症で救急搬送された人が最も多かった日の気象データを基にした屋外作業者の予測総水分喪失量と深部体温(分担研究1):

熱中症で救急搬送された人の数が、各主要都市、各年で最も多い日の気象データは、前項2で用いたデータベースから選び出し用いた。作業量の目安となる代謝量は、休憩時(65W/m²)、低代謝率(130W/m²)、中程度代謝率(200W/m²)、高代謝率

(260W/m²)を用いた。計算対象とした人の体格は、身長170cm、体重65kg、暑熱馴化された人と仮定した。主に建設業従事者で使われている作業予定表に合わせてPHSmで総水分喪失量、深部体温を計算した。熱中症で救急搬送された人の数は、国立環境研究所の熱中症患者速報サイトを参考にした。

5. 暑熱環境における体重減少と必要水分補給量に関する被験者実験(分担研究2):

改良版PHSmデータの妥当性・信頼性を検討するための被験者実験システムを構築し次のような予備実験を行った。

(1) 実験室および設定温湿度

実験は、東京都清瀬市にある、労働安全衛生総合研究所内の人工気候室にて行った。独立して制御可能な連続した2室(A, B)を用い、実験を行った。人工気候室の設定条件は、前室にあたるA室を気温25℃相対湿度50%、暑熱条件として設定したB室を気温35℃相対湿度50%とした。

(2) 被験者条件および設定飲水量

今回は予備実験であることから、被験者は外部から募集せず、労働安全衛生総合研究所の男性職員かつ本研究の分担研究者と研究協力者4名であった。よって、実験目的や内容は熟知し、かつお互い同意の上で行っており、倫理面の問題は無いと考えられる。実験中の被験者の着衣はTシャツおよびトランクスのみとし、着衣による熱抵抗値は0.2clo程度であった。また移動時以外は被験者は椅子に座り安静を保った。

水分補給条件については、全く水分摂取をしない場合と、改良版PHSmデータより算出された飲水量を摂取した場合の2条件とし、この2条件の比較を行った。

(3) 実験スケジュール

人工気候室A室に入室し60分経過後、被験者は暑熱環境のB室に移動し2時間滞在した。

飲水は、15分おきにA室で1回、B室移動後9回の計10回行った。飲水量は算出された量を10分割し(個人別に1回に30ml~50ml、4回目以降は全員40ml)飲水した。水温はあらかじめ室温と同

じにしていた。

一連の実験は、平成21年3月に行われた。時間は午前10時から、午後は2時から行い、被験者は2条件とも同じ時刻に行った。

(4)測定項目

皮膚温および直腸温については、LT-8および付属センサー(ともにグラム社)を用い、皮膚温7点と直腸温を1分ごとに測定した。皮膚温7点よりHardy & DuBoisによる平均皮膚温を算出した。

心電図は双極誘導により導出し、フックリング周波数1000HzでA/D変換の後コンピュータに取り込んだ(WEB-1000、日本光電)。コンピュータプログラムを用いて心電図のR波を検出し、RR間隔を算出した。

血圧及び心拍数は、HEM-70007アジィ(オムロン社製)を用い、被験者右上腕にておよそ15分毎に測定した。

体重測定は、サトルクス社製の体重計を用い、1g単位で測定した。

視覚的反応時間(PVT)を測定するために、米国AMI社製のPVT-192を使用し、5分間計測した。

指先血中ヘモグロビン濃度は近赤外分光画像計測法の原理を用いて非侵襲的に右手中指にて測定した(ASTRIM SU、シスメックス)。

主観的申告として、温冷感(9段階)、温熱的快不快感(4段階)、暑さに関する愁訴(吐き気、めまい、激しい疲労感、耐え難さ、のどのかわき)に関しては4段階で被験者に答えてもらった。

疲労の度合いに関して、自覚症しらべ(日本産業衛生学会産業疲労研究会提案)の調査用紙を用い、30分間隔で被験者に答えてもらった。

C. 研究結果

1. 現行の暑熱負担予測PHSモデルの動作特性の検討(分担研究1)：

現行PHSモデルの動作特性を広範な暑熱曝露条件で検討したところ、作業中に強い暑熱ストレスを受け体温が上昇した場合、長時間の休憩をしても最初の深部体温レベルに戻らないことがあった。そこでこの点を改良し、改良版PHSmでは、長時間休憩の後は最初の体温レベルに戻るよう

にした。これにより現実の暑熱曝露条件に対応した予測モデルがほぼ確立した。なお、この改良版モデルPHSmは、2007年米国政府関係労働衛生専門家会議ACGIHが暑熱許容基準の改訂版を提案した際の委員長を務めた米国南カリフォルニア大学のThomas Bernard教授との共同研究により開発された。

2. 夏期の気象データを用いた総水分喪失量予測(分担研究1)：

改良版(PHSm)をもとに、日本の夏期(6~9月)の気象データからWBGT値による屋外作業者の暑熱ストレスと暑熱負担(ストレイン)を予測した。透湿性が悪い作業服を着用した場合、多量の発汗と高体温が予測された。熱中症患者が最多であった日の屋外作業では、低代謝率作業で毎時0.7リットル以上の給水が必要であり、中程度代謝率以上では深部体温がISO7933の基準を越えることが予想された。

3. 暑熱環境における体重減少と必要水分補給量に関する被験者実験(分担研究2)：

気温35℃、相対湿度50%、放射温35℃、風速0.2m/s、安静座位、衣服保温力0.2cloの実験条件で、健康な成人男性4名を2時間暑熱曝露した。この時PHSmで予測される必要水分量は、390ml~430mlであった。この水分量を補給した場合としない場合で暑熱負担を比較すると、水分補給した場合は水分補給しない場合に比べて体重減少が抑制され予測必要水分量はほぼ妥当であること、また水分補給により直腸温および皮膚温は低く抑えられ、主観的申告がより「涼しい、快適な」側になり、視覚反応時間の改善や、心拍回復機能の低下の抑制傾向などが観察された。これより、本研究で開発された改良PHSモデルに基づき必要水分量を補給することで、暑熱曝露時の体水分喪失を防止するとともに心理的・生理的暑熱負担の軽減が本実験条件の範囲内ではあり得ることが示唆された。

4. 改良PHSモデル(PHSm)による1時間作業時のWBGT別、作業強度別水分補給量(ml)予測(分担研究1)：

以上の結果を踏まえて、この改良モデルPHSmを用いて、1時間作業時のWBGT別(18~33℃)、作業強度別(安静65W/m²、低代謝率130W/m²、中代謝率200W/m²、高代謝率260W/m²、極高代謝率300W/m²)の必要水分補給量の予測表の暫定版を作成した(p15、分担研究1の別表1を参照)。

D. 考察

現行の国際規格ISO7933は、PHSモデルを用いて作業場の暑熱条件と暑熱負担を詳細に定量的に分析する手法を記述した規格である。気温、水蒸気圧、平均放射温、風速、代謝熱産生量、衣服の熱抵抗を測定し、その測定条件で体熱平衡を維持するための必要発汗率を、式(1)の人体熱平衡式において、S=0、K=0として、式(2)、(3)により計算する。

$$S=M-W-K-C-R-E-Cres-Rres \quad (1)$$

ここで、S:人体蓄熱量、M:エネルギー代謝量、W:外部仕事量、M-W:正味の体熱産生量、K:伝導熱伝達量、C:対流熱伝達量、R:放射熱伝達量、E:皮膚からの蒸発熱伝達量、Cres:呼吸性対流熱伝達量、Eres:呼吸性蒸発熱伝達量。

$$Ereq=M-W-C-R-Creq-Ereq \quad (2)$$

$$SWreq=Ereq/rreq \quad (3)$$

ここで、Ereq:体熱平衡を維持するのに必要な蒸発率、SWreq:体熱平衡を維持するのに必要な発汗率、rreq:汗の蒸発効率。

必要発汗率が、作業者の最大発汗率を超えず、水分喪失量も許容限度内にある限りは、暑熱曝露時間を制限することなく8時間作業を遂行できる。必要発汗率が達成できず体熱平衡が維持できないと人体蓄熱量が増加して体内温が上昇する。また体熱平衡が維持されていても水分補給が不十分で水分喪失量が許容限度を超えると脱水のリスクが高まる。このような場合は、体温上昇度と水分喪失量に許容限界値を設定してその限度内で許容曝露限界時間を算出する。本法により、暑熱曝露時の総体水分喪失量を予測できるので、この水分喪失量を相殺するように水分を補給すれば、理論的には脱水を防止で

きるはずである。

本研究ではそのような観点から、必要水分補給量を予測した。この基盤をなすPHSの動作特性を広範な暑熱条件で検討したところ、作業中に強い暑熱ストレスを受け体温が上昇した場合、長時間の休憩をしても最初の深部体温レベルに戻らない場合が認められた。そこで、現行のPHSモデルを、長時間休憩の後は最初の体温レベルに戻るように改良した(改良版PHSm)。これにより現実の暑熱曝露条件に対応した予測モデルが数値計算上は大幅に改良できたといえる。

現行モデルは欧米ではすでに妥当性の検討が行われ、良好な結果を得ている。さらに、米国ACGIHの暑熱許容基準では、WBGT指数による評価をベースとしているが、その基準値を超えた場合の詳細な分析的アプローチとして、PHSモデルの活用を提案している。実際、米国では、WBGT指数にPHSモデルを併用することにより、職場での暑熱障害が大幅に予防できたといわれている(Thomas Bernard 教授からの私信)。このように、現行PHSは暑熱障害予防の分析的定量的手法としてその応用が大いに期待できるが、わが国ではまだその使用が一般的でないし、その妥当性も検討されていなかった。今年度の研究で、現行モデルの問題点を見出し、改良PHSmモデルを作成したことは大きな成果の一つといえる。

またこの改良PHSmモデルを用いて、1時間作業時のWBGT別、作業強度別の必要水分補給量の予測表を暫定版として作成した意義も大きい。ただし、これはあくまで数値計算で得られたモデル分析表であるので、今後は、このPHSmモデルをベースにして、さらに改良を加えていく予定である。

さらに今年度は、改良PHSmモデルの妥当性・信頼性を検討するための被験者実験システムを構築し、予備実験も行った。今回の実験条件では、PHSmで予測した必要水分補給量は良好な結果を示し、かつ水分補給により暑熱負担が軽減する傾向をみとめたことも注目すべき知見であ

る。

本研究の特色の一つとして、研究遂行にあたり重要因子となる作業服・防護服の熱特性(保温性、透湿性、通気性等)を我が国で唯一実用化されている発汗歩行型 μ マムネンで評価して妥当性評価実験 μ ルに定量的に組み込むことがあった。ところが、 μ マムネンと人工環境室が年度前半まで故障したために、現場で実際に着用している作業服・防護服の熱特性を定量的に評価することができなかった。

次年度(第2年次)は、この不備を補うとともに、予備被験者実験結果を踏まえて、さらに実験条件を増やして μ ルの妥当性・信頼性を検証していくとともに、現場調査によってもこの予測 μ ルの有効性を検討する予定である

E. 結論

ISOの暑熱負担予測 μ ル(ISO7933)の改良版(PHSm)を開発した。これに基づいて、日本の夏の気象データからWBGT値による屋外作業者の暑熱負担(ストレイン)を評価したところ、透湿性が悪い作業服を着用した場合、多量の発汗と高体温が予測された。また、熱中症患者が最多であった日の屋外作業では、低代謝率作業でも毎時0.7リットル以上の水分補給が必要であり、中程度代謝率以上の作業では深部体温がISO7933の基準を越えることが予測された。さらに、暑熱ストレス別・作業強度別必要水分補給 μ ルの開発と補給量予測表(暫定版)の作成を行った。人工環境室での被験者予備実験の結果から、特定の暑熱条件では μ ルの妥当性が確認された。今後実際の作業現場に則した様々な暑熱曝露条件に対して、本改良 μ ルの妥当性・有効性を検討する必要がある。

F. 健康危険情報

研究の実施に関連して、研究者、研究協力者、被験者等の健康に危険を及ぼすようなことはなかった。

G. 研究発表

今年度は研究開始初年度であり、研究成果を公表するまでにはいたらなかったが、今年度得られた知見を順次関連学会で発表するとともに論文発表も行う予定である。学会発表は、国内学会として日本産業衛生学会、日本生気象学会、日本生理人類学会を、国際学会としては第13回国際環境人間工学会を予定している。また論文発表については、「Industrial Health」誌と「労働安全衛生研究」誌に投稿予定である。

H. 知的財産権の出願・登録状況

特になし。

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
分担研究報告書

1. 暑熱ストレス別・作業条件別必要水分補給モデルの開発と補給量予測

主任研究者 澤田晋一 労働安全衛生総合研究所 国際情報・研究振興センター長
分担研究者 上野 哲 労働安全衛生総合研究所 主任研究員
研究協力者 Thomas Bernard 南フロリダ大学公衆衛生大学院 教授

研究要旨

温熱環境の国際規格(ISO7933)に採用されている暑熱曝露時の暑熱負担(ストレイン)による身体への影響を予測する数値モデルである Predicted Heat Strain(PHS)の改良版(PHSm)を開発し、日本の夏期(6~9月)の気象データから WBGT 値による屋外作業者の暑熱ストレスと暑熱負担(ストレイン)を予測した。透湿性が悪い作業服を着用した場合、多量の発汗と高体温が予測された。熱中症患者が最多であった日の屋外作業では、低代謝率作業で毎時 0.7 リットル以上の給水が必要であり、中程度代謝率以上では深部体温が ISO7933 の基準を越えることが予想された。

1. はじめに

Predicted Heat Strain(PHS)は、暑熱曝露による身体影響(暑熱負担)を合理的な理論に基づくモデルで数値予測するものである。2001年に Malchaire らによって提唱され、ISOの基準(ISO7933)として2004年に採用された。暑熱曝露限界値を決定する重要な要因である、気温、放射熱(直射日光等)、湿度、衣服、風速、作業強度の6条件を入力すると、総水分喪失量や深部体温等の生体指標が予測できる。PHSは、実験室実験と現場調査で妥当性が確認されている(Malchaire 2002)。曝露限界値は、体重の5%の水分が失われるまでの時間、直腸温度が38度に達するまでの時間の2指標などで示される。本研究の目的は、実際の暑熱作業現場で想定される種々の暑熱条件下での

総水分喪失量を計算し、各種作業形態で補給されるべき水分量を求めることである。そのために、本研究では、現行の PHS の欠点を補った改良 PHS (PHSm)を開発し計算に用いた。それに基づいて第1に、最近3年間における日本の夏の気象データを用いて、水分喪失量と深部体温を求めた。第2に、ISO7243の基準値での総水分喪失量を求めた。第3に熱中症で救急搬送された人が最も多かった日を選び、屋外作業での水分喪失量等を予測した。さらに1時間あたりの予測される総水分喪失量表を作成した。

2. 研究内容

A. 夏期の気象データを用いた総水分喪失量予測

1) 研究方法

夏期屋外作業時の発汗量や深部体温を予測するために、最近三年間の東京(大手町)、新潟(新潟)、愛知(名古屋)、大阪(大阪)、広島(広島)、福岡(福岡)の1時間ごとの気象データベース(6-9月、2006-2008、45456件)を用いた。暑熱馴化された平均的な日本人男性の体格(170cm, 65kg)を、PHSmに入力し計算した。気温、風速、水蒸気圧は、気象庁のインターネットサイトからダウンロードし、黒球温度は、国立環境研のインターネットサイトからダウンロードした。暑熱環境のリスクを評価する総合的な指標として、WBGT(湿球黒球温度)を活用するよう厚生労働省から通達が出されているのを受け、ここではWBGTを指標に1時間の作業における総水分喪失量を求めた。作業強度を示す代謝率は、ISO7243(WBGT(湿球黒球温度)指数に基づく作業者の熱ストレスの評価)の代謝区分の最大値に対応させ、安静(65W/m²)、低代謝率(130W/m²)、中程度代謝率(200W/m²)、高代謝率(260W/m²)、極高代謝率(300W/m²)とした。着衣条件は、衣服の断熱性では0.3、0.5、0.7、0.9、1.1 cloの5条件(表1)、蒸気の透湿性ではim値で0.25、0.35、0.45の3条件の合計3×5=15条件について計算した。

表1. clo値に対応する衣服の組み合わせ例

衣服の断熱性	典型的な衣服の組み合わせ
0.3 clo	女性用パンツ、Tシャツ、半ズボン、短ソックス、サンダル
0.5 clo	男性用パンツ、半袖シャツ、薄手のズボン、薄手のソックス、シューズ
0.7 clo	男性用パンツ、ポイラースーツ、ソックス、シューズ
0.9 clo	男性用パンツ、シャツ、ス*ボン、ソックス、シューズ、スモック
1.1 clo	半ズボンの半袖の下着、シャツ、ズボン、ポイラースーツ、ソックス、シューズ

2) 結果および考察

表2. 計算に用いた気象データ

WBGT値	左記のWBGT値に相当する気象データ数
25°C(24.95-25.05°C)	529
26°C(25.95-26.05°C)	448
27°C(26.95-27.05°C)	213
28°C(27.95-28.05°C)	170
29°C(28.95-29.05°C)	155
30°C(29.95-30.05°C)	147
31°C(30.95-31.05°C)	101
32°C(31.95-32.05°C)	116
33°C(32.95-33.05°C)	53

最初に、各日時、場所の1時間ごとの気象データからWBGT値を計算した。25°Cから1°C毎に34°Cまで、それぞれのWBGT値に対応する気象データを45456件のデータベースから選び出した(表2)。25°Cの場合、24.95°Cから25.05°Cまでの気象データを抽出し、計算に用いた。WBGT値に対応する気象データ数を表2に示した。これらの気象条件が1時間継続した場合、予想される作業中の体水分喪失量、深部体温を示す(図1-1~6)。0.7cloで0.25、0.35、0.45のim値を示す衣服を着て作業したときに、安静時から低代謝、中代謝、高代謝、極高代謝と代謝量が増加すると、1時間の総水分喪失量が増加した。各代謝率に対して、WBGTの増加とともに、総水分喪失量は同じ傾きで直線的に増加した(図1-1,3,5)。Im値が0.25と低く蒸気の透湿性が悪い衣服の場合は、総水分喪失量が多く、極高代謝率で30°C、高代謝率で31°Cを超えると、PHSで設定している最高発汗率に達し、総水分喪失量の増加傾向が減った。水分喪失量の上昇が減った時点から、深部体温上昇が始まった(図1-1, 1-2)。これは、汗の蒸発による身体の冷却効果が限界に達したため、深

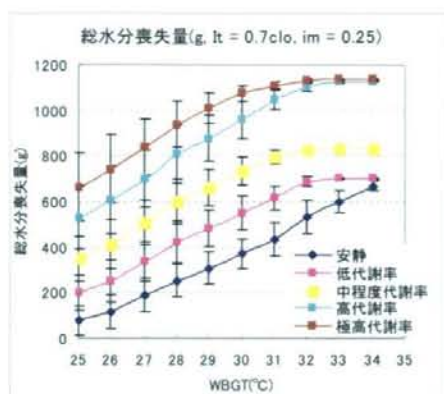


図 1-1 総水分喪失量 (It = 0.7clo, im=0.25)

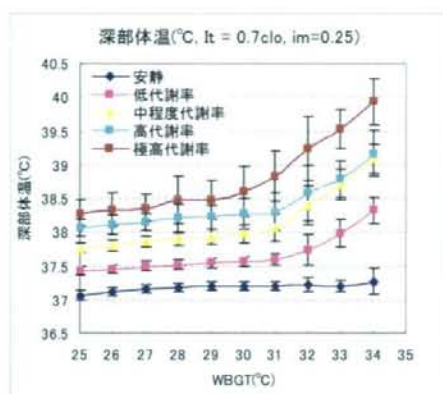


図 1-2 深部体温 (It = 0.7clo, im=0.25)

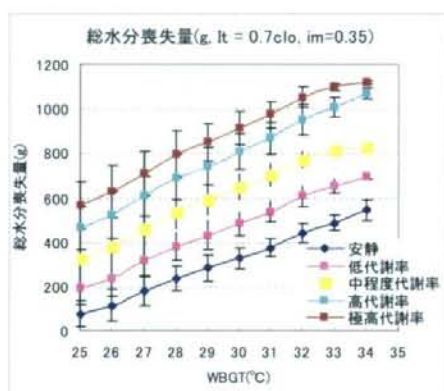


図 1-3 総水分喪失量 (It = 0.7clo, im=0.35)

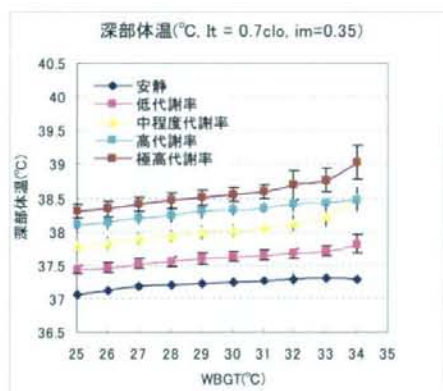


図 1-4 深部体温 (It = 0.7clo, im=0.35)

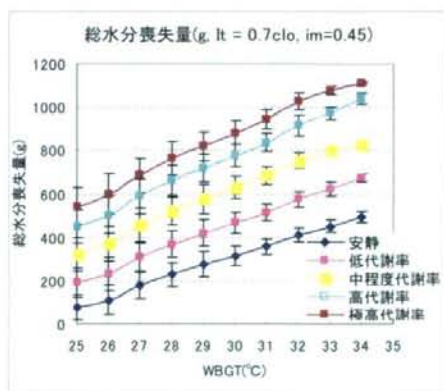


図 1-5 総水分喪失量 (It = 0.7clo, im=0.45)

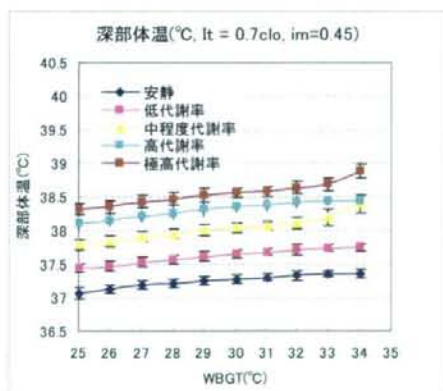


図 1-6 深部体温 (It = 0.7clo, im=0.45)

部体温が上昇したと考えられる。Im 値が 0.35 では、0.25 と比べ総水分喪失量が減った。衣服の透湿性が増したため蒸発による熱の放散が容易になり、発汗量が少なくても対応できるようになったと考えられる。高代謝率、極高代謝率で水分喪失量の増加率が下がることはほとんどなく、深部体温の上昇も起きなくなると考えられる。Im 値が 0.45 になると、さらに水分蒸発量が減り、深部体温も上昇率が低下した。

1 時間の総水分喪失量は、0.7clo、im 値 0.35 の衣服の場合、ISO7243 で定めてある深部体温 38℃の限界範囲内(図 1-4)では、0.7 リットル(低代謝率、WBGT 34℃, 図 1-3)が最大であった。その場合、自由に水分を補給できる環境なら、体重(本研究では 65kg)の 5%の水分喪失量が 1つの限界値と PHS で定めているので、約 4 時間 40 分で水分喪失量の限界に達する。もし、水分を自由に取れない環境の場合は、PHS では約 2 時間 45 分となる。しかし、水分喪失量の許容範囲内であっても、水分摂取で深部体温上昇が抑えられるという知見もあるため、こまめに水分を摂取する必要がある。

暑熱馴化した平均的な日本人男性(170cm, 65kg)の場合、0.7clo の衣服着用で 1 時間連続した低代謝率の作業は WBGT34℃でも深部体温 38℃なので作業可能だと予測された(図 1-4)。中程度代謝率

作業では、WBGT29℃で深部体温 38℃になるため(図 1-4)、WBGT28℃以下での作業が望まれる。これは、ISO7243 の基準(表 4)と合致している。

同じ WBGT 値を示す気象データでも総水分喪失量予測にばらつきがあった。熱中症予防のための水分摂取量の基準となる値は、同じ WBGT 値を示す多くの気象条件から予測される総水分喪失量より大きい必要がある。そのため、総水分喪失量の平均値ではなく、平均+2×(標準偏差)を指標に設定し、設定値より予測総水分喪失量が少ない気象データの割合を求めた(表 3)。中程度代謝率の総水分喪失量においては、WBGT25℃の時、93.2%の気象条件で設定値より総水分喪失量予測が少なかった。WBGT33℃になると、最大発汗量に近づくため、予測総水分喪失量のばらつきが少なくなると予想される。

同じ環境 WBGT 値ではあるが、総水分喪失量が異なる結果となった理由がいくつか考えることが出来る。第一に、本研究では WBGT 値が直接測られた値ではないからである。WBGT は、自然湿球温度、気温、黒球温度を重み付けして足し合わせた値であるが、本研究では自然湿球温度が実測値ではなく計算で求められた値である。気温、湿度、放射温度から求める自然湿球温度の計算式に誤差を含む可能性がある。自然湿

表 3. 総水分喪失量分布(中代謝率)

中代謝率のデータ分布(0.7Clo, im = 0.35)

WBGT	25℃	26℃	27℃	28℃	29℃	30℃	31℃	32℃	33℃	34℃
最大	657.4	702.0	678.6	752.4	790.0	794.5	821.3	834.9	837.2	834.5
最小	227.5	263.7	320.2	395.8	436.2	488.7	589.2	673.0	753.0	819.6
平均値(M)	325.7	377.3	461.3	535.0	589.5	647.1	702.7	772.2	811.8	828.7
標準偏差(Sd)	78.6	86.7	80.5	73.4	69.5	58.9	50.9	37.8	17.7	4.7
M+2*Sd	482.9	550.7	622.4	681.9	728.5	764.9	804.5	847.8	847.2	838.2
M+2*Sdを越える数	36	29	9	7	7	7	2	0	0	0
全気象データ数	528	447	212	169	154	146	100	115	52	15
M+2*Sdを越える割合	6.8%	6.5%	4.2%	4.1%	4.5%	4.8%	2.0%	0.0%	0.0%	0.0%

球温度の評価式を選択する時点でもWBGT値に差が生じる可能性がある。また、WBGT値が暑熱ストレスを総合的に表すための完全な指標ではない可能性がある。仮に実測の自然湿球温度を使ったとしても、風速が1m/sec以下のときは、WBGT値の変動が大きいことが知られている。

B. ISO7243 基準値での予測総水分喪失量

1) 研究方法

ISO7243のWBGT暑熱ストレス指数の基準値表に対応した条件(表4)で、1時間労働および8時間労働したときの総水分喪失

量、深部体温を求めた。全計算時間は480分とした。使用した気象データは、前項Aで使用したデータのうち、表4の条件にあ

表4.暑熱ストレス指標基準値表(ISO7243)

代謝率区分	代謝率M 単位体表面積 (W/m ²)	WBGT基準値	
		熱に感化している人 ℃	熱に感化していない人 ℃
0(安静)	M<=65	33	32
1(低代謝率)	25<M<=130	30	29
2(中程度代謝率)	130<M<=200	28	26
3(高代謝率)	200<M<=280	気流を感じない時 25	気流を感じない時 22
4(極高代謝率)	280<M	23	20

備考: これらの数値は最高直球温度38℃を許容限度として設定されている。

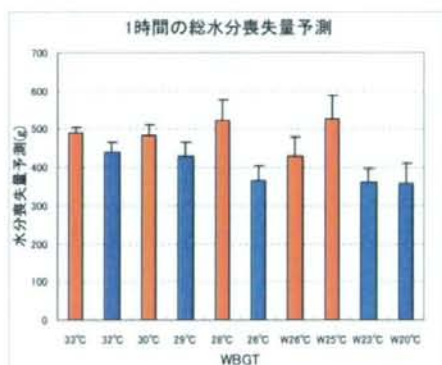


図2-1 総水分喪失量(1時間作業時)

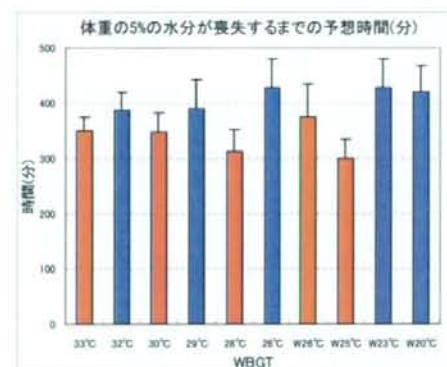


図2-2 体重の5%の水分が喪失する時間

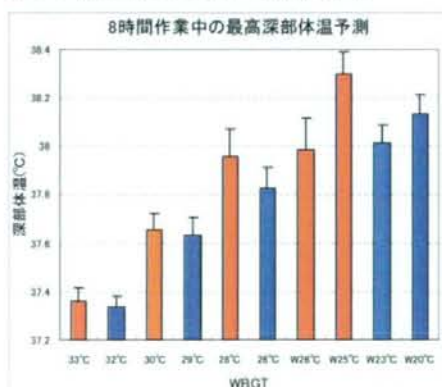


図2-3 最高深部体温(8時間作業時)

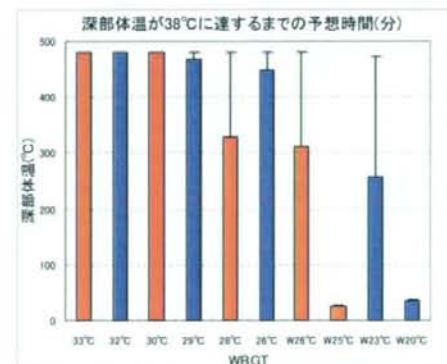


図2-4 深部体温が38°Cまで達する時間
計算作業時間が480分なため最大が480分。

てはまる気象データを選び出して用いた。表4の衣服条件は0.6cloなので、その値を用い、日本人男性の平均体格(身長1.7m、体重65kg)で計算した。代謝量は、各区分での最大値、休憩時(65W/m²)、低代謝率(130W/m²)、中程度代謝率(200W/m²)、高代謝率(260W/m²)を用いた。

2) 研究結果及び考察

総水分喪失量、深部体温の結果を図2・1～4に示す。図2・1～4のオレンジは暑熱馴化している人の基準で、青は暑熱馴化していない人の基準を示している。33℃、32℃は表4の安静時の代謝量、30℃、29℃は低代謝率、28℃、26℃は中代謝率に対応する。図中のW25℃、W26℃、W23℃、W20℃は、気流を感じるときのWBGTに対応する気象データをいれて計算したものである。表4の気流を感じないときのデータは、屋外の気象データにはあてはまる数が少なかったため、計算を行わなかった。

1時間の総水分喪失量は、ほぼ0.4～0.6リットル/時間の水準以下であった(図2・1)。同程度の温度では暑熱馴化していない人の基準値における総水分喪失量が暑熱馴化している人の基準値の場合よりも、1時間の水分喪失量が低かった(図2・1)。従って、水分喪失量の限界基準である体重の5%まで達する時間は、暑熱に馴化していない人の方が長かった(図2・2)。深部体温は、暑熱馴化している方が、発汗量が多いため、体温は下がりやすい。8時間仕事を続けた場合の最終深部体温は、環境のWBGTが低く仕事量が多い方が高く、WBGTが高く仕事量が少ない方が低かった。図2・3でW25℃、W23℃、W20℃では、8時間作業の最高深部体温で38℃を超えた。環境WBGTが低

くても、仕事量が多い場合は熱中症になる可能性があることが示唆された。

C. 熱中症で救急搬送された人が最も多かった日の気象データを基にした屋外作業者の予測総水分喪失量と深部体温

1) 研究方法

熱中症で救急搬送された人の数が、各主要都市、各年で最も多い日の気象データは、Aで用いたデータベースから選び出し用いた。作業量の目安となる代謝量は、休憩時(65W/m²)、低代謝率(130W/m²)、中程度代謝率(200W/m²)、高代謝率(260W/m²)を用いた。計算対象とした人の体格は、身長170cm、体重65kg、暑熱馴化された人と仮定した。主に建設業従事者で使われている作業予定表(表5)に合わせてPHSmで総水分喪失量、深部体温を計算した。熱中症で救急搬送された人の数は、国立環境研究所の熱中症患者速報サイトを参考にした。

表5. 計算に用いた作業予定表

時間	活動	作業量	計算に用いた状況
8:00～10:00	屋外作業	3段階(高、中、低)代謝率	気象データ
10:00～10:30	室内休憩	65W/m ²	25℃(屋内又は木陰)、風(0.3m/sec)
10:30～12:00	屋外作業	3段階(高、中、低)代謝率	気象データ
12:00～13:00	室内休憩	65W/m ²	25℃(屋内又は木陰)、風(0.3m/sec)
13:00～15:00	屋外作業	3段階(高、中、低)代謝率	気象データ
15:00～15:30	室内休憩	65W/m ²	25℃(屋内又は木陰)、風(0.3m/sec)
15:30～17:00	屋外作業	3段階(高、中、低)代謝率	気象データ

2) 研究結果及び考察

2008年に東京で救急搬送された熱中症患者が最も多かった日の気象データを図3に示す。オレンジ色は作業時間を示す(表5)。午前8時の始業時からWBGT30℃を越え、午後3時頃までその暑さが持続していた。同様に黒球温度も、始業午前8時頃から

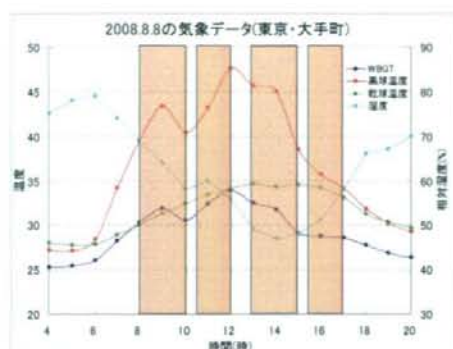


図 3. 熱中症が多かった気象データ (東京、2008年)

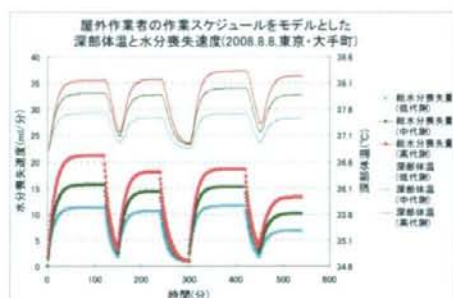


図 4. 図 3 の気象データを用いた総水分喪失量と深部体温予測

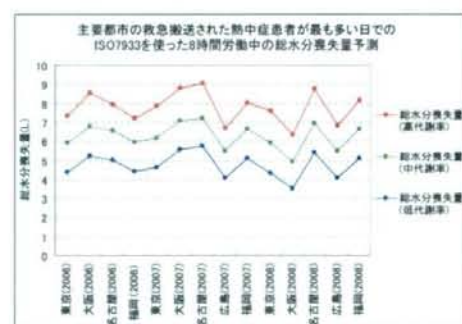


図 5. 各都市の年間熱中症最多発生日における総水分喪失量予測

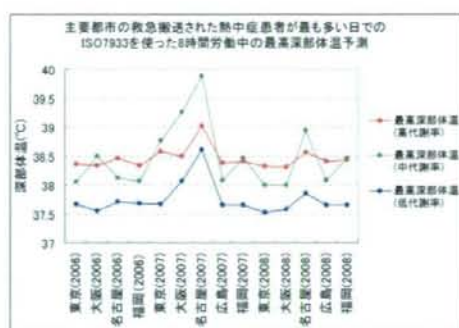


図 6. 各都市の年間熱中症最多発生日における最大深部体温予測

40℃を越え、午後 3 時頃まで続いた。図 3 の気象条件、表 5 の作業予定表の下で、8 時の作業開始時刻を 0 時刻として、各作業強度別に、PHSm で予測した 1 分ごとの水分喪失量と深部体温の変化を図 4 に示す。午前 8:00 から午前 10:00 までの作業中でも、水分喪失速度は作業開始後 1 時間でほぼ最大値の 21.2ml/分に達し、休み時間まで持続した。これは、10:30 から 12:00、13:00 から 15:00、15:30 から 17:00 までの 1 分あたりの水分喪失速度より多かった。中代謝率では、15.6ml/分の総水分喪失速度、低代謝率では、11.3ml/分の総水分喪失速度となった。始業時からすでに、強い暑熱曝露を受けていることが予想される。30 分間の休憩で、総水分喪失速度は始業時のレベルに近づいた。10 分や 20 分の休憩では、体に溜まった熱の放熱が終わらないことが予想される。深部体温は、総水分喪失速度と同様な変化を示した。午後の昼休み後に最高温度に達し、高代謝率作業では、38.3℃に達した。中代謝率作業では 38.0℃、低代謝率作業では 37.5℃の予測値であった。各大都市の 2006～2008 年の熱中症発生が最も

多い日の気象データをもとに、作業を表 5 にそって行ったときの作業時間内総水分喪失量を図 5 に示す。高代謝率で作業を行うと、業務内の総水分喪失量が最高で 9 リットルになり、毎時間当たり 1 リットル以上の水分を補給すると失った水分を補うことが出来る計算となった。中代謝率、低代謝率では、7.1 リットル、5.9 リットルとなり、いずれも高い値を示した。中代謝率の作業強度で計算した場合、2007 年の大阪と名古屋で深部体温は 39℃を超える値となった。中代謝率が高代謝率より大きい値になった(図 6)のは、PHS では最大発汗率が代謝率に依存するので、中代謝率の最高発汗量が高代謝率の最高発汗量より比較的少なくなり、体温を下げる効果が少なかったと考えられる。2007 年の名古屋や大阪の気象データは、環境温度が高いため、発汗以外の空気の対流や熱線による放散がないため、体温放散は発汗以外にはない状況である。そのため発汗量を増やし放熱量を増やすことになるが、中代謝率で発汗量が限界に達したのだと考えられる。中程度代謝率や高代謝率の作業を、熱中症発生が最も多い日の気象条件で行うと、深部体温が 38℃以上となり、推奨される ISO7933 の基準を超える計算になった。

3. まとめ

ISO7933 の暑熱曝露による暑熱負担予測数値モデル(PHS)を改良した PHSm を開発し、日本の夏の気象データを用いて総水分喪失量と深部体温を、WBGT 値を指標として予測した。WBGT 値や作業強度が高くなるほど、総水分喪失量や深部体温が増加した。深部体温 38℃の限界温度での総水分喪

失量は、0.7~0.8 リットルにも達した。暑熱ストレス基準値表の ISO7243 と PHSm による予測の整合性はほぼ取れていたが(別表 1)、WBGT 値が低く、代謝率が高い場合の基準値では、深部体温が 38℃を越える場合も予想された。最も暑い日の気象条件の下での屋外作業では、1 時間に 1 リットルを越える飲水量が必要な場合があることが予想された。

日本の夏の気象データと PHSm を基に、推奨される WBGT 別、作業強度別水分補給量を別表 1 にまとめた。

注：改良 PHS モデル(PHSm)は、サウスフロリダ大学の Thomas Bernard 教授との共同研究で開発されたものである。PHS モデルでは、作業中に強い暑熱ストレスを受け体温が上昇した場合、長時間の休憩後でも最初の深部体温レベルに戻らないことがあった。PHSm では、この点を改良し、長時間休憩の後は最初の体温レベルに戻るようにした。

参考文献

- 1) ISO 7243 (1989) Hot environments – Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)
- 2) ISO 7933 (2004) Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.
- 3) ISO 8996 (2004) Ergonomics of the thermal environment – Determination of metabolic rate.

4) ISO 9920 (2007) Ergonomics of the thermal environment – Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble.

5) Malchaire J et al. (2001) Development and validation of the predicted heat strain model. Ann Occup Hyg 45, 123-135.

6) Malchaire J et al. (2002) Assessment of the risk of heat disorders encountered during work in hot conditions. Int Arch Occup Environ Health 75, 153-162.

別表 1. 改良 PHS モデル(PHSm)による 1 時間作業時の WBGT 別、作業強度別水分補給量 (ml)予測

		代謝率				
		安静 (65W/m ²)	低代謝率 (130W/m ²)	中代謝率 (200W/m ²)	高代謝率 (260W/m ²)	超高代謝率 (300W/m ²)
WBGT	18°C (N=157)	47	54	159	286	354
	19°C (N=207)	49	62	166	293	362
	20°C (N=279)	59	92	215	348	422
	21°C (N=336)	78	122	248	389	476
	22°C (N=455)	89	142	270	405	484
	23°C (N=454)	128	187	318	458	537
	24°C (N=489)	159	222	354	501	585
	25°C (N=529)	199	268	407	563	656
	26°C (N=448)	255	326	472	634	728
	27°C (N=213)	318	392	543	703	792
	28°C (N=170)	352	429	592	784	896
	29°C (N=155)	403	482	644	813	905
	30°C (N=147)	423	505	675	862	967
	31°C (N=101)	457	545	710	907	1015
	32°C (N=116)	528	627	732	969	1091
33°C (N=53)	557	648	720	979	1096	

注) 東京、大阪、名古屋、福岡、広島、新潟の過去 3 年間(2006~2008)の 6-9 月の 1 時間毎の気象データベース(気象庁、国立環境研の webpage)からそれぞれの WBGT 値に対応する気象データ(±0.05°Cの範囲内)を選び出し改良 PHS モデル(PHSm)による水分補給量予測計算に用いた。N は計算に用いた気象データの数を示す。平均的な日本人の成人男性(身長 170cm, 体重 65kg)の人が、断熱性 0.7clo、透湿性 0.35 (im 値)の衣服を着て 1 時間作業を行ったときの総水分喪失量である。十分な水分補給量を表すために、平均値に標準偏差の 2 倍を加えた値を ml 単位で示した。各数値の中で、最大 8.9%の気象条件で提示した総水分喪失量を超える水分が喪失している場合があった。赤字の所は、1 時間作業後の直腸温度が ISO7933 の基準 38°C を越えることを示している。背景色が黄色の所は ISO7243 の基準値を示し、青が基準値範囲内、ペーじュは ISO7243 の基準値を超えるところを示している。

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
分担研究報告書

2. 暑熱環境における体重減少と必要水分補給量に関する被験者実験

主任研究者	澤田 晋一	労働安全衛生総合研究所	国際情報・研究振興センター長
分担研究者	榎本 ヒカル	労働安全衛生総合研究所	任期付研究員
	東郷 史治	労働安全衛生総合研究所	任期付研究員
研究協力者	岡 龍雄	労働安全衛生総合研究所	主任研究員
	安田 彰典	労働安全衛生総合研究所	主任研究員
	呂 健	労働安全衛生総合研究所	主任研究員

研究要旨

暑熱環境における飲水の有無が人体生理・心理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、気温35℃相対湿度50%の人工気候室内に男性被験者4名を曝露する実験を行った。その結果、飲水がある場合はない場合に比べ体重減少量は少なくなり、直腸温および皮膚温は低く、主観的申告がより「涼しい、快適な」側になり、PVT成績の向上や、心拍回復機能の低下の抑制などが観察された。

A. はじめに

職業性熱中症は、平成8年および平成17年に行政通達がなされ予防対策の徹底がはかられるようになった。にもかかわらず、夏季屋外作業時を中心に熱中症の発生は多数みられる。この原因の1つに暑熱作業時の水分補給量の目安が明確でないことがあげられている。

そこで、分担研究1で報告したように暑熱負担評価の現行国際規格であるISO7933をベースにして作成された暑熱負担予測プログラム改良版(PHSm)より算出された必要水分補給量予測の妥当性と、水分補給が人体に与える影響について検証するため、人工気候室を用いた被験者実験を行った。

B. 実験方法

(1) 実験室および設定温湿度

実験は、東京都清瀬市にある、労働安全衛生総合研究所内の人工気候室にて行った。独立して制御可能な連続した2室を用い、実験を行った。

人工気候室の設定条件は、前室にあたるA室

を気温25℃相対湿度50%、暑熱条件として設定したB室を気温35℃相対湿度50%とした。どちらの室内も周囲壁面温度は気温と等しく、気流速度は0.2m/sの不感気流であった。

(2) 被験者条件および設定飲水量について
被験者は、労働安全衛生総合研究所の男性職員4名を採用した。表1に被験者の特徴を示す。4名には、実験の趣旨および途中でいつでも取りやめることができる旨を十分説明した後、実験に参加してもらった。

表1 被験者の特徴

Sub.	Age	Height(cm)	Weight(kg)	BMI(kg/m ²)
A	55	177	65	20.7
B	39	180	78	24.1
C	51	177	77	24.6
D	46	167	75	26.9
Mean	47.8	175.3	73.8	24.1
S.D	6.9	5.7	6.0	2.5

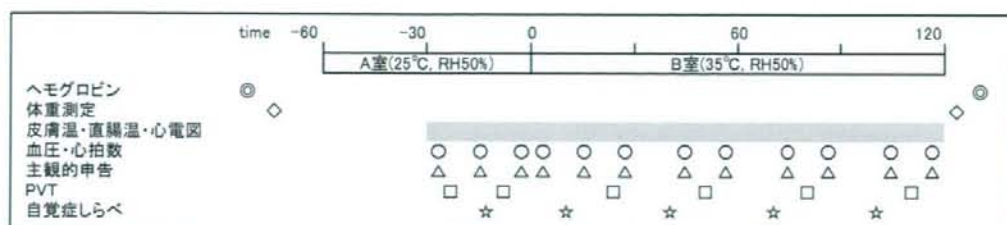


図1 実験スケジュールおよび測定項目

実験中の被験者の着衣はTシャツおよびトランクスのみとし、着衣による熱抵抗値は0.2clo程度であった。また移動時以外は被験者は椅子に座り安静を保った。

水分補給条件については、全く水分摂取をしない場合（以下C条件とする）と、分担研究1で報告した改良版PHSmモデルより算出された必要水分量を摂取した場合（以下W条件とする）の2条件とし、この2条件の比較を行った。

(3) 実験スケジュール

図1に実験スケジュールおよび測定項目を示す。実験室入室前に指先血中ヘモグロビン濃度の1回目の測定と、直腸温センサーの装着をおこなってもらう。その後、あらかじめ準備したトランクスを着用し、体重測定の1回目を行う。以上を済ませた後、人工気候室A室に入室し、皮膚温および心電図を測定する準備を行う。入室後30分経過後から皮膚温および心電図の測定を開始し、以後血圧、心拍数、主観的申告、視覚的反応時間（PVT）、自覚症しらべの測定を表に示したタイミングで行った。30分後、被験者は暑熱環境のB室に移動し、2時間滞在した。2時間経過後はすみやかに皮膚温測定および心電図測定器具をはずし、2回目の体重測定を1回目と同じ着衣状態で行った。その後、指先血中ヘモグロビン濃度の2回目の測定を行った。

飲水は、15分おきにA室で1回、B室移動後9回の計10回行った。飲水量は算出された量を10分割し（個人別に1回に30ml～50ml、4回目以

降は全員40ml）、主観的申告の回答が終わった段階で飲水した。水温はあらかじめ室温と同じにしていた。

また体表面の汗については、実験中は適宜自由にぬぐってもらった。

一連の実験は、平成21年3月に行われた。時間は午前は10時から、午後は2時から行い、被験者は2条件とも同じ時刻に行った。

(4) 測定項目について

皮膚温および直腸温については、LT-8および付属センサー（ともにグラム社）を用い、皮膚温7点と直腸温を1分ごとに測定した。皮膚温7点よりHardy & DuBoisによる平均皮膚温を算出した。

心電図は双極誘導により導出し、サンプリング周波数1000HzでA/D変換の後コンピュータに取り込んだ（WEB-1000、日本光電）。B室滞在時の心電図を双極誘導により導出し、サンプリング周波数1000HzでA/D変換の後コンピュータに取り込んだ（WEB-1000、日本光電）。コンピュータプログラムを用いて心電図のR波を検出し、RR間隔を算出した。B室滞在中の前半1時間と後半1時間のデータについてそれぞれ以下のように解析した。

まずRR間隔時系列データのノイズを除去し平均値を算出した。その後、RR間隔時系列データを平均RR間隔で等しく並べ、直線回帰によってリニアトレンドを取り除き、粗視化スペクトル法（coarse graining spectral analysis; CGSA法）を用いて周期性成分とフラクタル成分

に分離した。算出された周期性成分のスペクトルを高周波(>0.15Hz; HF)帯域、低周波(0.04-0.15Hz; LF)帯域に分類し、それぞれの周波数帯域での積分値(順にHF成分、LF成分)および総パワー(TOT)を算出した。副交感神経活動指標はHF成分/TOT(HF/TOT)、(相対的な)交感神経活動指標はLF成分/HF成分(HF/LF)として算出した。フラクタル成分については、その性質をあらわす指標として、フラクタル成分を周波数(f)-パワーの2次元平面に両対数軸で表示($1/f^{\beta}$ プロット)した際のスペクトルの傾き(- β)を直線回帰によって算出した。 β は変動の複雑さをあらわす指標で、スペクトル指数とよばれる。 β が0で水平な傾きのスペクトルの場合、その変動は平均値まわりに一様分布するいわゆるホワイトノイズである。 β が大きくなるとともにその変動の複雑さは減少する。

血圧及び心拍数は、HEM-70007[®] (オムロン社製)を用い、被験者右上腕にておよそ15分毎に測定した。

体重測定は、ザルトリウス社製の体重計を用い、1g単位で測定した。

視覚的反応時間(PVT)を測定するために、米国AMI社製のPVT-192を使用し、5分間計測した。PVT-192はプラスチック製の21 x 11 x 6cm、658gの四角い箱で、上面のLEDに表示される数字を見た瞬間にプッシュボタンを押してその反応時間を測定するものである。

指先血中ヘモグロビン濃度は近赤外分光画像計測法の原理を用いて非侵襲的に右手中指にて測定した(ASTRIM SU, シスメックス)。

主観的申告として、温冷感(9段階)、温熱的快不快感(4段階)、暑さに関する愁訴(吐き気、めまい、激しい疲労感、耐え難さ、のどのかわき)に関しては4段階で被験者に答えてもらった。

疲労の度合いに関して、自覚症しらべ(日本産業衛生学会産業疲労研究会提案)の調査用紙を用い、30分間隔で被験者に答えてもらった。

C. 実験結果および考察

(1) 体重変化量

図2に、体重の変化量について、被験者A~Dの4名の個別データと、4名の平均値を示す。体重変化量とは、2回目の体重計測値から1回目の体重計測値を除いたものである。C条件では体重変化量は被験者毎に-270gから-330gで平均値±S.D.は310.3±24.7gであった。W条件では個別では+60g~+170gで、平均値±S.D.は100.2±51.0gであった。改良版PHSmモデルより算出された飲水量は被験者毎に異なり390g~430gで平均410.0g、C条件とW条件の差(変化量)は383~447gとなり、平均値は410.5gでこれはモデル算出の飲水量とほぼ等しい値であった。

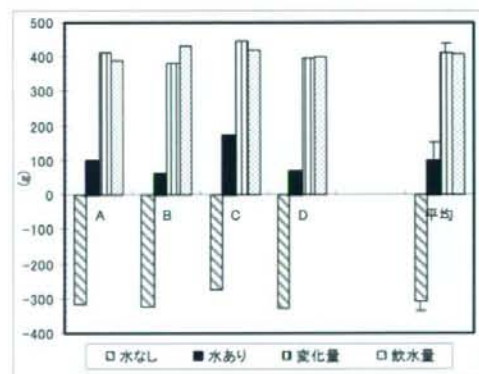


図2 体重変化量および飲水量

(2) 平均皮膚温

図3に、平均皮膚温の被験者4名の平均値とS.D.の平均値を、経時変動で示す。前室Aにおける平均皮膚温は33.5°C程度であり、暑熱条件のB室に移動してからは皮膚温が上昇し、最初の30分で35.8°C程度まで上昇した。その後はW条件、C条件ともに平均皮膚温は徐々に低下し続け、B室入室120分後には35.3°C前後であった。