

200938009B

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～21年度 総合研究報告書

研究代表者 澤田晋一

平成22（2010）年3月

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～21年度 総合研究報告書

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
分担研究者	上野 哲	労働安全衛生総合研究所 主任研究員
分担研究者	東郷 史治	労働安全衛生総合研究所 研究員
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
研究協力者	安田 彰典	労働安全衛生総合研究所 主任研究員
研究協力者	岡 龍雄	労働安全衛生総合研究所 主任研究員
研究協力者	呂 健	労働安全衛生総合研究所 主任研究員
研究協力者	久永直見	愛知教育大学 教授
研究協力者	山口さち子	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

# 目 次

## I. 総合研究報告

暑熱作業時の必要水分補給量に関する研究-----	1
澤田晋一	

1. 暑熱ストレス別・作業条件別必要水分補給----- 1 5  
モデルの開発と補給量予測（分担研究1）  
上野 哲、澤田晋一ほか
2. 夏期建設業現場労働者の暑熱負担と必要水分----- 5 7  
補給量の評価（分担研究2）  
上野 哲、澤田晋一ほか
3. 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量----- 6 7  
予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証：  
暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が  
温熱生理・心理反応に及ぼす影響（分担研究3）  
榎本ヒカル、澤田晋一ほか
4. 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量----- 7 9  
予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証：  
暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が  
心臓血管系自律神経活動と体水分に及ぼす影響（分担研究4）  
東郷史治、澤田晋一ほか
5. 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量----- 9 7  
予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証：  
暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が  
視覚反応時間（PVT）に及ぼす影響（分担研究5）  
安田彰典、澤田晋一ほか

II. 研究成果の刊行に関する一覧表-----	1 0 9
-------------------------	-------

III. 研究成果の刊行物・別刷-----	1 1 3
-----------------------	-------

# I. 総合研究報告書

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）  
総合研究報告書

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

<研究目的> 種々の暑熱条件別の体水分喪失量に応じた必要水分補給モデルの開発を行い、気象データから夏期屋外作業者の暑熱負担を予測するとともに、モデルの妥当性を実験室実験と現場調査により検証することである。これらの結果をもとに各種暑熱作業条件に応じた必要水分補給量のガイドラインを提案する。

<研究方法> 第1年度は、暑熱環境評価の国際規格ISO7933に採用されている暑熱負担予測モデル(PHS)の改良版(PHSm)を作成した。これを用いて、気象データによる夏期屋外作業時の暑熱負担予測とPHSmモデルの妥当性検証の予備的被験者実験を行った。

第2年度は、現行のPHSモデルを用いて、(1)日本の夏期気象データによる屋外・屋内作業者の暑熱負担の予測、(2)15種類の異なる温熱特性をもつ作業服に対する暑熱条件別の予測最大総水分喪失量の算出、(3)夏期建設作業者の暑熱負担と総水分喪失量の評価、(4)人工環境室での被験者実験による必要水分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証、を行った。

<結果と考察> 第1年度は、PHSmによる暑熱作業条件別必要水分補給量の暫定予測表を作成し、被験者予備実験によりPHSmの妥当性が一部確認された。

第2年度は、(1)日本の夏期の気象データをもとに暑熱ストレス指数であるWBGT値ごとに屋外作業者の暑熱負担と体水分喪失量を予測すると、WBGTが低い時は着用作業服の断熱性が高ければ高いほど予測深部体温が上昇する結果が示されたが、WBGTが高い時は作業服の断熱性が高いほど予測深部体温が低下した。また、透湿性が低い作業服を着用した場合、WBGTが低い時は予測深部体温に変化は見られなかったが、WBGTが高い時は、透湿性が低いほど予測深部体温が上昇する傾向にあった。(2)15種類の異なる温熱特性をもつ作業服に対して、1時間作業におけるWBGT別、代謝率別、暑熱順化有無別の予測最大総水分喪失量を算出し、その結果にもとづき必要水分補給量の暫定予測表を作成した。その結果、水分補給しても体温上昇を防止できない暑熱作業条件の存在が示唆された。(3)夏期建設作業者の水分摂取量は不十分で、より多量な水分摂取の必要性が認められた。最も暑熱ストレスが高かった時間の平均総水分喪失量は、PHSによる予測水分補給量にほぼ一致した。(4)被験者実験によりPHSモデルの妥当性を検証したところ、PHSモデルによる水分補給は無飲水条件に比べ暑熱負担を軽減させた。ただし、PHSモデルによる飲水量では、これより多い米国政府労働衛生専門家会議(ACGIH)が推奨する飲水量に比べて心臓血管系への負担軽減効果が低い場合もあった。また、厚生労働省が平成21年に示した水分摂取量の目安は概ね妥当であると考えられた。

<結論> 改良の余地があるもののPHSモデルは暑熱作業時の暑熱負担予測に有用であり必要水分補給量の目安の一つとなることが示唆された。このPHSを応用して、種々の暑熱条件別、作業強度別、作業服別、暑熱順化の有無別の予測体水分喪失量を算出し、それをもとに必要水分補給量の暫定版ガイドラインを作成した。

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 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8年の旧労働省通達に続いて平成21年に新たに発出された厚生労働省の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、マスコミ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、最近ではむしろ夏期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、Predicted Heat Strain(PHS)という指標を用いて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(ISO7933)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、評価のクライテリア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。

そこで本研究は、各種暑熱作業現場に必要な水分補給のガイドラインを作成することを目的として、PHSから予測される体水分喪失量にもとづいて必要水分補給モデルの開発を行い、モデル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・有用性を評価した。

平成20年度(第1年度)は、

- (1) ISO7933の暑熱負担予測モデルの動作特性を検討し、問題点の発見と改良プログラムPHSmの開発を行った(分担研究1)。
- (2) この改良版プログラムをベースとして、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の暫定版を作成した(分担研究1)。
- (3) 日本の夏期の気象データベースを活用して実際に熱中症が発生した屋外気象条件を推定し、その際の必要水分補給量と暑熱負担のPHSmによる予測を行った(分担研究1)。
- (4) 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、人工環境室で特定の暑熱曝露条件について予備被験者実験を行った。暑熱負担評価のために、直腸温、皮膚温、心拍変動、体重減少量等の温熱生理指標を測定した(分担研究3、4、5)。

平成21年度(第2年度)は、

暑熱負担予測には、第1年度はPHSの改良版

PHSmを用いたが、第2年度はすでに欧米の実験室実験と現場研究により妥当性が確認されている本来のPHSモデルを用いた。それにもとづき、

- (1) 日本の夏期気象データをもとに暑熱ストレス指数であるWBGT値別に屋外および屋内作業者の暑熱負担と総水分喪失量の予測(分担研究1)、
  - (2) 15種類の異なる温熱特性をもつ作業服に対する1時間作業におけるWBGT別、代謝率別、暑熱順化有無別の予測最大総水分喪失量にもとづく必要水分補給量の算出(分担研究1)、
  - (3) 夏期建設業現場労働者の暑熱負担と必要水分補給量の評価(分担研究2)、
  - (4) 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証(分担研究3, 4, 5)、
- を実施した。

## B. 研究方法

### B-1. 平成20年度

#### 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PHSm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PHSm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。暑熱順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/m<sup>2</sup>)、低代謝率(130W/m<sup>2</sup>)、中程度代謝率(200W/m<sup>2</sup>)、高代謝率(260W/m<sup>2</sup>)、極高代謝率(300W/m<sup>2</sup>)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170cm、体重65kg)で計算した。代謝量は、各区分での最大値、休憩時(65W/m<sup>2</sup>)、低代謝率(130W/m<sup>2</sup>)、中程度代謝率(200W/m<sup>2</sup>)、高代謝率(260W/m<sup>2</sup>)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/m<sup>2</sup>)、低代謝率(130W/m<sup>2</sup>)、中程度代謝率(200W/m<sup>2</sup>)、高代謝率(260W/m<sup>2</sup>)を用いた。計算対象とした人の体格は、身長170cm、体重65kg、暑熱順化され

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3, 4, 5):

改良版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環境室にて行った。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。人工環境室の設定条件は、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モデル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

人工環境室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、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。

血圧及び心拍数は、HEM-7000ファジー(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。

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。

## B-2. 平成21年度

### 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—現行の暑熱負担予測PHSmモデルの動作特性の検討(分担研究1):

第1年度には、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、これを改良版PHSmとしてその後のデータ解析と実験研究に利用した。

しかし、第2年度は、暑熱負担予測に現行のPHSモデルを用いた。理由は、PHSモデルにIS09920に示された衣服の顕熱抵抗・潜熱抵抗に及ぼす風と歩行の影響を組み込んだプログラム(PHSm)による予測深部体温は、PHSによる予測値よりも高く、被験者実験の実測データよりも高い予測値を示すことがわかったからである。そこで、第1年度に一部用いていたPHSmモデルからPHSモデルに変更して暑熱負担を再計算した。

## 2. 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－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)：

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4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を用いた。気温、風速、水蒸気圧は、気象庁のホームページからダウンロードし、黒球温度は、国立環境研のホームページからダウンロードした。暑熱順化された平均的な日本人男性の体格(170cm, 65kg)を、PHSに入力し計算した。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)指数を用いて1時間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、IS07243の代謝区分の最大値に対応させ、安静(65W/m<sup>2</sup>)、低代謝率(130W/m<sup>2</sup>)、中程度代謝率(200W/m<sup>2</sup>)、高代謝率(260W/m<sup>2</sup>)、極高代謝率(300W/m<sup>2</sup>)とした。着衣条件は、衣服の断熱性では0.3、0.5、0.7、0.9、1.1clo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。Im値とは、衣服の蒸気の浸透しにくさを表す潜熱抵抗に対する保温性を表す顕熱抵抗の比率を示す。この値が低ければ、蒸気が通りにくい衣服であることを示す。代謝率と合わせると、条件は5×15=75条件となる。

## 3. 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－予測深部体温が38.5℃を超える場合の気象データの分析(分担研究1)：

暑熱順化していない人が中程度代謝作業量で1時間従事したと仮定したときの予測深部体温が38.5℃に達する屋外気象条件を最近4年間(6-9月)の6つの都市における気象データから選び出した(2145件)。これは1つの都市で1年間当たり、約90時間に相当する。この気象データのWBGT値と予測深部体温の関係を解析した。

## 4. 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－衣服の種類による暑熱ストレス(分担研究1)：

中代謝量の作業強度を仮定し、衣服の違いによる予測最大発汗量、予測最大深部体温をPHSモデルで計算した。計算した衣服は、顕熱抵抗(0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1clo) 5種類とim値(0.25, 0.35, 0.45)3種類の合計15種類である。屋外の気象データは、WBGT値が20, 24, 28, 32℃のものを用いた。

## 5. 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－屋内作業と屋外作業(分担研究1)：

屋内作業は、屋外作業と比較して太陽からの放射熱は低く抑えられるが、風がないため暑熱負担が高いことが予想される。そのため、WBGT値30℃以上を示す気象データを対象に屋外作業と屋内作業の暑熱負担を比較した。屋内作業では、黒球温度は乾球温度と等しいと見なし、風速を0とした。中代謝率の作業強度で3種類の衣服(im=0.35, Icl=0.3clo; im=0.35, Icl=0.5clo; im=0.35, Icl=0.7clo)を着用した条件で計算した。

## 6. 夏期建設業現場労働者の暑熱負担と必要水分補給量の評価(分担研究2)：

耐震補強工事に従事する建設業労働者を対象に、平成21年8月中旬の3日間にわたり、延べ23人の環境測定、生理学的測定、尿分析、アンケート調査を行った。環境測定は、定点観測では屋内と屋外にWBGT計を置き1分ごとに連続記

録をした。作業者のヘルメットにも携帯記録型 WBGT計を取り付け、作業者近傍の暑熱環境を2分ごとに連続記録した。生理学的測定は、作業中の心拍数、活動度は各被験者に携帯型心電計を取り付け1分ごとに測定した。体重は、休憩時間毎に測定した。水分は、蒸留水入り500mlのペットボトルを体重測定毎に数本供給し、供給した水のみを摂取するように依頼した。次の体重測定時に供給したペットボトルを回収して、摂取した量を計測した。体重測定の前に毎回採尿を行い、排尿直後の尿温度(深部体温)、尿量、尿比重計測を行った。

#### 7. 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証:暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が温熱生理・心理反応に及ぼす影響(分担研究3):

PHS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以下の実験を行った。

##### (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環境室にて行った。独立して制御可能な連続した2室を用い、実験を行った。人工環境室の設定条件は、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33℃相対湿度50%、WBGT換算で27.6℃とした。

##### (2) 被験者側条件について

被験者は健康で標準的な体格の男子大学生8名で、実験中は夏期の建設作業現場服一式(Tシャツ、トランクス、長袖上衣、長ズボン下衣、軍手、軍足、安全靴、ヘルメット)を着用した。これら着衣による熱抵抗値は1.0clo程度であった。

##### (3) 設定飲水量について

水分補給条件については、PHSモデルより算出した本実験条件下における予測体重減少量と同量の水分を摂取する「水1」条件、米国政府産業衛生専門家会議(ACGIH)から出された水

分摂取に関するガイドラインに基づいた水分量を摂取する「水2」条件、無飲水の「水0」条件の3条件それぞれにおいて、座位または30分間のトレッドミル歩行(4.5km/h)を行い、計6条件とした。

なお、「水2」条件の水量を決定するにあたり、ACGIHのガイドライン(ACGIH TLVsR, 2007)にある「20分毎に少量(コップ1杯程度)の冷たく、口当たりのいい水(またはほかの水分補充用飲料)を飲むことを推奨する。」を参考にし、歩行条件時の「水2」条件の水分量を1000gとし、同歩行条件時の「水1」条件の水分量の平均値が約654g、座位条件時の「水1」条件の水分量の平均値が約486gであったことから、それらの比より座位条件時の「水2」条件の水分量を740gとした。

##### (4) 実験スケジュール

実験室入室前に直腸温センサーの装着を行い、その後準備したトランクスを着用し体重測定を1回目を行った。以上を済ませた後A室入室し、指先血中ヘモグロビン濃度の1回目の測定と皮膚温および心電図測定準備を行い、30分経過後から体温、皮膚温および心電図の測定を開始し、以後血圧、脈拍数、主観的申告、視覚的反応時間(PVT)、自覚症しらべの測定を行った。30分後、被験者は暑熱環境のB室に移動し90分間滞在した。90分経過後、すみやかに2回目の指先血中ヘモグロビン濃度測定と体重測定を1回目と同じ着衣状態で行った。

飲水は、10分おきにA室で1回、B室移動後9回の計10回行った。毎回の飲水量は算出された量を10分割し飲水した。水温は室温と同じで、国産の軟水ミネラルウォーターを使用した。

一連の実験は、平成21年8~10月に行われ、各被験者とも6条件を同じ時刻に行った。

##### (5) 測定項目

皮膚温および直腸温については、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。耳内温は耳用体温ロガーを用いて測定した。血

圧及び心拍数は、被験者右手首にておよそ15分毎に測定した。体重測定は、1g単位まで測定できる体重計で測定した。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で非侵襲的に右手中指にて測定した。主観的評価として、温冷感、温熱的快不快感、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)を申告させた。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。

8. 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証: 暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が心臓血管系自律神経活動と体水分に及ぼす影響(分担研究4):

#### 8-1. 実験A

(1) 実験室および設定温湿度

(2) 被験者および飲水量

(3) 実験スケジュール

以上は、前述の分担研究3に同じであった。

(4) 測定項目

A室およびB室滞在時の心電図を双極誘導により導出しRR間隔を算出した。このRR間隔時系列データを粗視化スペクトル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帯域、低周波帯域に分類し、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(LF/HF)として算出した。フラクタル成分については、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( $-\beta$ )を直線回帰によって算出した。

#### 8-2. 実験B

(1) 実験室および設定温湿度

実験Aと同じであった。

(2) 被験者条件および設定飲水量について

被験者は、若年成人男性4名である以外は実験Aと同じであった。

(3) 実験スケジュール

被験者は指定されたTシャツとトランクスを着用してから人工環境室A室に入室し、その後心電図測定の準備をした。A室に入室してから30分後に心電図の測定を開始した。さらに30分経過した時点で被験者はB室(暑熱環境)に移動し、その後90分滞在した。B室入室後30-60分の間、トレッドミル上を歩行(4.5km/h)してもらった。その他の時間帯では被験者は座位で安静を維持した。B室退室後被験者は再びA室に移動し、実験を終了した。

(4) 測定項目

心電図と血中ヘモグロビン濃度の測定解析法は実験Aと同じであった。

体内水分量(右腕、左腕、右脚、左脚、体幹、細胞内、細胞外、体内全体)はA室入室前とB室退室後にインピーダンス法の原理を用いて非侵襲的に測定した。

9. 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証: 暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が視覚反応時間(PVT)に及ぼす影響(分担研究5):

(1) 実験室および設定温湿度

(2) 被験者および飲水量

(3) 実験スケジュール

以上は、前述の分担研究3に同じであった。

(4) 測定項目

皮膚温、直腸温、体重測定、主観的申告は、前述の分担研究3と同じ方法である。

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

PVTの解析には、反応時間の平均値であるReaction Time(RT)、RTの最短値から10%の平均であるFastest10%RT(FRT)、RTの最長値から10%の平均であるSlowest10%RT(SRT)、error数、lapse(間違いやすさ指数)の5項目を用いた。

## C. 研究結果

### C-1. 平成20年度

#### 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フロリダ大学の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PHSm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/m<sup>2</sup>、低代謝率130W/m<sup>2</sup>、中代謝率200W/m<sup>2</sup>、高代謝率260W/m<sup>2</sup>、極高代謝率300W/m<sup>2</sup>)の必要水分補給量の予測表の暫定版を作成した(平成20年度総括・分担研究報告書を参照)。

### C-2. 平成21年度

#### 1. 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):

WBGTが18℃から34℃までの気象条件が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、先に示した代謝率(5条件)、衣服の頭熱抵抗(5条件)、im値(3条件)毎に計算した。全条件で、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時間の予測総水分喪失量、予測深部体温が上昇した。全代謝率に対して、WBGTの増加とともに、予測総水分喪失量は増加したが、最高発汗率に達した場合は増加が止まった。予測水分喪失量の増加が止まった時点から、予測深部体温の上昇が急になった。暑熱順化無しの場合、予測深部体温の上昇傾向が強まる予測深部体温の温度は、38.5℃付近にあることが予測された。暑熱順化ありの中代謝作業量の場合は、深部体温が38.0℃位で深部体温の増加が強まることが予測された。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、予測深部体温の上昇につながるものと考えられる。従って、このような場合は水分補給を十分にしたとしても、発汗量が飽和に達しているため、水分補給により体温上昇を食い止めることは不可能である。作業量の軽減や中止を行い、直射日光を避け、体を積極的に冷やす方法を取り入れる等の措置が必要と考えられる。水分を摂取していたが、熱中症に因って死亡したという事例が業務上疾病発生事例として報告されているため、暑熱ストレスを避ける工夫もしくは、作業の中断が必要である。なお、暑熱順化している場合は、予測最大発汗量が多いため、暑熱順化していない場合よりも、予測深部体温の上昇が抑えられた。

## 2. 予測深部体温が38.5℃を超える場合の気象データの分析(分担研究1):

気象データのWBGT値と予測深部体温の関係を見ると、WBGTが27℃付近でも、深部体温が危険範囲の38.5℃を超える場合があることが示された。低いWBGT値でも高い深部体温が予想される場合、黒球温度が45℃以上であることが判明した。WBGT値が32-33℃では、80%以上の気象条件で予測深部体温が38.5℃を超えることが予想され、31-32℃で40%近くの気象条件で、30-31℃で8%程38.5℃に達することが予想された。WBGTが30℃以上になると注意が必要であることが推測される。

## 3. 衣服の種類による暑熱ストレス(分担研究1):

中代謝量の作業強度を仮定し、衣服の違いによる予測総水分喪失量、予測最大深部体温をPHSモデルで計算した。計算した衣服は、顕熱抵抗(0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1clo)5種類とim値(0.25, 0.35, 0.45)3種類の合計15種類である。屋外の気象データは、WBGT値が20, 24, 28, 32℃のものを用いた。1時間屋外作業を継続した場合の予測値を見ると、WBGTが20℃のときは、顕熱抵抗が増加するにつれて予測深部体温、予測総水分喪失量が増加した。WBGTが24℃では、衣服の

違いによる予測深部体温、予測総水分喪失量に差が無くなった。WBGTが28℃になると、20℃の時とは逆に顕熱抵抗が大きいと、顕熱抵抗が少ない場合に比べて予測深部体温、予測総水分喪失量が減少した。32℃ではその傾向が大きくなった。これは暑熱ストレスが低いWBGT20℃では衣服の保温効果のため、予測深部体温や予測水分喪失量が増加したと予想されるが、WBGTが高くなると衣服の外界放射熱を防ぐ効果が大きくなり、顕熱抵抗増加で予測深部体温等が減少したと推測される。Im値が小さく蒸気の透過性が悪い衣服を着用した場合は、暑熱ストレスが高いWBGT32℃の場合に深部体温の上昇が大きくなった。これは、環境温度が高い場合は、空気の対流による熱の放散が減り、汗の蒸発による熱の放散の役割が高くなるからと考えられる。従って、日射が強く、暑い日に屋外作業を行う場合には、蒸気の浸透性が高く断熱性も高い服を着用するのが最適であるということが、モデルから予測された。

## 4. 屋内作業と屋外作業(分担研究1):

全体的に、屋外作業の暑熱負担が屋内作業よりも高いことが予想された。衣服の違いでは、顕熱抵抗が低い場合、屋外条件で予測深部体温が高温域に広がった。顕熱抵抗が高い場合、予測深部体温の広がりが抑えられた。予測総水分喪失量は、屋外条件では、最高発汗量に達していると推測され、顕熱抵抗の違いで変化がなかった。それに対して、屋内条件では、顕熱抵抗が大きくなると予測深部体温、予測総水分喪失量とも増加した。実際の屋内作業は、暖まった壁からの放射や狭い空間での湿度上昇、工具の装着等で設定した条件(黒球温度=乾球温度、風速=0)よりも暑熱ストレスは高くなる可能性がある。

以上のように、ISO7933の暑熱曝露時の暑熱負担予測数値モデル(PHS)を用い、日本の夏の気象データを対象にWBGT値ごとに総水分喪失量と深部体温を予測すると、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、毎時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PHSによる予測の整合性はほぼ取れていたが、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。暑熱順化されていない場合は、予測深部体温が38.5℃位、暑熱順化されている場合は、予測深部体温が38.0℃位を超えると、ほぼ最大発汗量に達しているため、それ以上は体温上昇が急激に進むと思われる。この条件以上の気象条件は、過去4年間の平均では年間約90時間ほどあると予想され、その時間は適切な水分補給に加え別の暑熱ストレス軽減策が必要である。WBGT値が30℃以下でも、黒球温度が高いときは、深部体温の上昇に導くため、直射日光を避ける等の対策が必要である。断熱性が高い衣服を着用した場合、WBGTが20℃では予測深部体温が上昇する結果が示されたが、WBGTが28℃以上で断熱性が高い服を着用した場合、予測深部体温が低下した。蒸気の透湿性が悪い作業服を着用した場合、WBGTが低い時は、予測深部体温に変化は見られなかったが、WBGTが高い時は、予測深部体温が上昇傾向にあった。屋外の気象条件から屋内の温熱環境を推定し、暑熱負担を予測した結果、屋外の暑熱負担が屋内よりも高かった。最後に日本の夏期の気象データとPHSを基に、推奨されるWBGT別、作業強度別、作業服別水分補給量（総体水分喪失量）を、表1および分担研究1の別表1～30にまとめた。

##### 5. 夏期建設業現場労働者の暑熱負担と必要水分補給量の評価(分担研究2)：

屋外のWBGT温度は30℃を超える場合が多く、被験者が携行したWBGT計の平均値は、28℃付近であった。各1時間半の作業時間で、午前中は体重比0.5%程度、午後前半は体重比1.2%程の減少があった。業務終了時に、始業時の体重の1.5%以上減少(ACGIH-TLV基準)していた人は、23名中6人いた。水分摂取量は、総水分喪失量の約55%(午前中)、35%(午後前半)、75%(午後後

半)であった。作業中は総水分喪失量の80%の水分を摂取することが推奨されているため、現在摂取している水分量の1.5倍以上を補給する必要性が認められた。尿温度は、作業開始時の36.8℃から、上昇し、昼休み休憩で一時減少するが、午後の休憩時には平均で37.4℃を超えた。心拍数は、数分間の平均値が上限の(180-年齢)を超える場合(ACGIH-TLV基準)が23名中4名いた。尿比重、尿浸透圧とも午前と比べて午後は増加傾向にあった。作業中に務めて水分補給を行うことが推奨される。休み時間ごとの主観に関するアンケート調査では、口渇感、温熱感とも午後の休憩時に訴えが強かった。疲労感は、時間が経つにつれて強くなり、業務終了時が最も強かった。聞き取り調査の結果では、作業者の平均睡眠時間が6時間に満たなかった。睡眠不足は熱中症の誘因と考えられるため、睡眠時間の改善が望まれる。自身の熱中症経験が1割弱、作業場で見聞きした割合は83%にも上り、建設作業場の重大な問題の一つであることが明らかになった。

##### 6. 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証：暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が温熱生理・心理反応に及ぼす影響(分担研究3)：

気温33℃相対湿度50%の人工環境室内に男性被験者8名を曝露し、暑熱環境における飲水量の違いが人体生理・心理反応に及ぼす影響を検討した。その結果、無飲水条件に比べ飲水条件では体内温の上昇が抑えられた。また、PHSモデルより算出された予測値と実測値を比較した結果、体内温は予測値より実測値が低く、体重減少量も予測値より実測値が全ての例で少なかった。また、被験者の主観的申告も改善されており、疲労感も減少していた。

以上の結果より、暑熱環境下においてPHSモデルは水分補給の目安のひとつとなりうることが示唆された。

##### 7. 人工環境室での被験者実験による必要水

分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証：暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が心臓血管系自律神経活動と体水分に及ぼす影響(分担研究4)：

暑熱曝露時に座位安静を維持していた場合、水2条件（ACGIH基準）では水0条件（無飲水）と比較して暑熱曝露時に副交感神経活動の減退、交感神経活動の亢進が抑制されたと推測された。また暑熱曝露時に歩行をした場合、水1条件（PHSモデル）および水2条件では水0条件と比較して歩行時の交感神経活動の亢進が抑制され、また歩行後の副交感神経活動の減退が抑制されたと推測された。したがってPHSモデルで算出された飲水量は、暑熱環境での運動時では交感神経活動の亢進を抑制できた可能性があるが、暑熱環境での座位安静時では、ACGIHによる飲水量で観察された交感神経活動の亢進を抑制する効果、あるいは運動・安静によらず観察された副交感神経活動の減退を抑制する効果は得られない可能性があると考えられた。

以上より、暑熱曝露時に歩行をした場合、水2条件では水0条件と比較して、歩行時の心拍回復機能の低下が抑制され、また歩行後の心拍数はより速やかに回復していた。水1条件では水0条件と比較して、歩行時の心拍回復機能の低下が抑制された。また体内水分量の指標の一つである血中ヘモグロビン濃度の増加は抑制されたが、その他の体内水分量の指標には差が認められなかったため、体内水分量の差は大きくないと考えられた。したがってPHSモデルで算出された飲水量は、暑熱環境での運動時では心拍回復機能の低下を抑制できる可能性があるが、ACGIHによる飲水量で観察された運動後の心拍の速やかな回復効果は得られない可能性があると考えられた。

以上をまとめると、ACGIHによる飲水量を摂取した場合では飲水なしの場合と比較して、副交感神経活動の減退の抑制、交感神経活動の亢進の抑制、心拍回復機能の低下の抑制、により

心臓血管系の負担が小さくなる可能性が示唆された。一方、PHSモデルで算出された飲水量を摂取した場合、ACGIHによる飲水量を摂取した場合で得られる抑制効果が認められないこともあることが示唆された。よって、PHSモデルで算出された飲水量は、飲水無しの場合に心臓血管系自律神経活動や体水分量に生じるいくつかの変化を消失させる効果があるが、その効果はACGIHによる飲水量を摂取した場合に得られる効果よりも大きくないと考えられた。したがって、心臓血管系自律神経活動と体水分の観点から、PHSモデルは暑熱環境での水分補給の目安のひとつとなりうる可能性があるものの、さらに改良する余地があると考えられた。

8. 人工環境室での被験者実験による必要水分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証：暑熱環境下歩行時のPHSモデルによる水分補給が視覚反応時間（PVT）に及ぼす影響(分担研究5)：

今回の実験条件下ではPHSより算出した水1条件、ACGIH基準の水2条件ともに水0条件よりPVT成績に良い影響を与えていると考えられた。

しかし、運動条件によりそれぞれの飲水条件がPVT成績におよぼす効果は異なり、座位条件ではちょうど良いと思われるACGIH基準だったが、歩行条件においてはACGIH基準では多すぎると考えられた。また、その影響はPVT成績と直腸温、ねむけ感においてもそれぞれ異なり、どちらの摂取量がより良いということは言い切れないと考えられた。

#### 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。

第1年度には、この現行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、これを改良版PHSmとしてその後のデータ解析と実験研究に利用した。しかし、第2年度は、暑熱負担予測に現行のPHSモデルを用いた。その理由は、すでに述べたようにPHSモデルにISO9920に示された衣服の顕熱抵抗・潜熱抵抗に及ぼす風と歩行の影響を組み込んだプログラム(PHSm)による予測深部体温は、PHSによる予測値よりも高く、被験者実験の実測データよりも高い予測値を示すことがわかったからである。そこで第2年度は、第1年度に用いていたPHSmモデルからPHSモデルに変更して暑熱負担と水分喪失量を再計算した。

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。第1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だったといえる。ただし、PHSmにも前述のように問題があることが判明したので、第2年度は現行のPHSモデルを採用した。第1年度に指摘した現行PHSモデルの問題点は、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に戻らないことであった。しかし、この問題は休憩時に起こるものであって、暑熱曝露時の暑熱負担や体水分喪失量の予測には関係がない。一方、改良版PHSmの場合は、暑熱曝露中の暑熱負担予測に問題があるので、本研究の目的には、PHSmよりPHSのほうが予測モデルとしての適当であると判断した。

第2年度、PHSモデルを活用することで、新たに得られた結果に対して考察を加えると次のようになる。

第一に、日本の夏期の気象データをもとに暑熱ストレス指数であるWBGT値ごとに屋外作業者の暑熱負担と体水分喪失量を予測すると、作業服の断熱性が高いほどWBGTが高い条件では予測深部体温が低下した。一方、作業服の透湿性が低いほどWBGTが高い条件で、予測深部体温が上昇傾向にあった(分担研究1)。この結果は、作業服の顕熱抵抗と潜熱抵抗の大小によって環境暑熱ストレスに対する暑熱負担が逆転



する場合があります。すなわち、潜熱抵抗が大きいと暑熱環境ストレスが増大するにつれて暑熱負担も増悪する一方で、顕熱抵抗が大きいと暑熱環境ストレスが大きい条件では作業服の「断熱性」が大きいためにむしろ暑熱負担が軽減される場合があることを示唆するものである。PHSモデルは、このような状況がどのような作業条件の組み合わせで起こるかを定量的に予測できる可能性が期待できる。

第二に、15種類の異なる温熱特性をもつ作業服に対して、1時間の作業におけるWBGT別、代謝率別、暑熱順化有無別の予測最大総水分喪失量を算出し、その値をもとづいて暑熱条件別の必要水分補給量の推定表を作成した(分担研究1)。その結果、いくら水分補給しても体温上昇を防止できない暑熱作業条件が存在することが示唆された。これは、有効発汗量の限界を示しており、水分補給による暑熱対策の限界を予測する重要な知見である(表1、分担研究1の別表1~30)。

第三に、夏期建設作業者の全水分喪失量に対する水分摂取の割合は、推奨値を満足するものではなく、より多量な水分摂取の必要性が認められた。最も暑熱ストレスが高かった時間の平均総水分喪失量は、PHSによる予測水分補給量にほぼ一致した(分担研究2)。この結果は、実際の作業現場での水分補給がいかに不十分であるかという現実を示すと同時に、PHSによる必要水分補給量の予測の有効性を期待できるものである。

第四に、人工環境室での被験者実験により必要水分補給量予測モデルとしてのPHSの妥当性の検証を実施したところ、PHSモデルで予測される水分補給を行うことにより無飲水条件に比べ生理的・心理的負担の軽減が認められた。またPHSモデルは暑熱負担を実測値より安全側に予測していた(分担研究3)。ただし、PHSモデルでは、米国政府労働衛生専門家会議(ACGIH)が推奨するPHSよりやや多めの飲水条

件に比べて心臓血管系の負担軽減効果が低い場合があることも示唆された(分担研究4)。この結果は、暑熱曝露時の水分補給の有用性を再確認させるものであったが、水分補給量の目安がPHSモデルより多いACGIH基準のほうが、特に心臓血管系で暑熱負担の軽減効果が大きい傾向を示したことは注目に値する。これは、水分補給はできるだけ多めに行うことがより効果的であることを示唆するものであるが、ACGIHの現行の基準は、暑熱強度や作業強度に応じた定量的な目安となっていない。その点、本研究で提案したPHSモデルによる予測必要水分補給量は18~34℃まで1℃刻みのWBGT指数に対して、身体作業強度は安静から極高代謝率まで5条件、作業服の断熱性は0.3、0.5、0.7、0.9、1.1cloの5条件、透湿性はim値で0.25、0.35、0.45の3条件のすべての組み合わせに対して体水分喪失量に相当する必要水分補給量を示しており、ACGIH基準よりも精密かつ定量的な目安となっている。さらに、前述のように水分補給の限界条件も予測していることは特筆に値する。

ところで、厚生労働省が平成21年に示した水分補給量の目安は、作業強度に応じて0.1~0.2%の食塩水等を20~30分ごとにカップ1~2杯程度となっている。これによると、その最少量は30分にカップ1杯、最多量は20分にカップ2杯である。これに相当する水分補給量を本研究の実験にあてはめると(分担研究3、4、5)、30分間歩行+60分座位条件では、最少量で600ml、最多量で1800mlとなる。一方、90分間座位条件では、最少量で444ml、最多量では1332mlとなる。これをPHSモデルとACGIH基準の水分量と比較すると、30分間歩行+60分座位条件では、それぞれ654.9ml、1000mlであり、90分間座位条件では486.9ml、740mlである。これは、厚生労働省の目安は最少量でPHSモデルよりやや低め、最多量ではACGIH基準より十分多いということを意味する。したがって、作業強度に応じて0.1~0.2%の食塩水等を20~30分ごとにカップ1~2杯程度飲むことが望ましい

とする厚生労働省の平成21年に示した目安は概ね妥当であり、作業強度が大の場合には特に十分な水分補給の指針となっていると考えられる。

### E. 結論

改良の余地があるもののPHSモデルは暑熱作業時の暑熱負担予測に有用であり必要水分補給量の目安の一つとなることが示唆された。このPHSを応用して、種々の暑熱条件別、作業強度別、作業服別の予測体水分喪失量を算出し、それをもとに必要な水分補給量の暫定版ガイドラインを作成した(表1、および分担研究1の別表1~30を参照)。

これは、作業形態に見合った適切な必要水分量を推定するものであるが、作業強度や暑熱条件、作業服条件によっては、水分補給だけでは体温上昇を防止できない場合もありうることも示唆された。今後は、より広範な暑熱条件でPHSモデルにより作成された必要水分補給量の

暫定版ガイドラインの妥当性を検討して、その適用範囲と信頼限界を明らかにしたい。

### 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

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、生活環境学会において、国際学会として第13回国際環境人間工学会で行った。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。(II. 研究成果の刊行に関する一覧表参照：p 109~111)

### H. 知的財産権の出願・登録状況

特になし。

表1 PHSモデルで予測される必要水分補給量の例

		身体作業強度(代謝率)				
		安静 (65W/m <sup>2</sup> )	低代謝率 (130W/m <sup>2</sup> )	中代謝率 (200W/m <sup>2</sup> )	高代謝率 (260W/m <sup>2</sup> )	極高代謝率 (300W/m <sup>2</sup> )
暑熱条件(WBGT指数)	18°C	46 / 46	56 / 55	160 / 157	306 / 284	408 / 352
	19°C	48 / 48	60 / 60	167 / 164	315 / 291	416 / 358
	20°C	61 / 61	95 / 95	224 / 218	390 / 350	503 / 422
	21°C	82 / 81	129 / 127	266 / 254	456 / 394	582 / 480
	22°C	95 / 94	151 / 149	288 / 277	472 / 413	598 / 490
	23°C	135 / 132	198 / 193	345 / 324	549 / 471	690 / 557
	24°C	180 / 175	248 / 241	397 / 375	591 / 517	727 / 597
	25°C	223 / 215	298 / 284	465 / 425	693 / 582	841 / 675
	26°C	285 / 271	366 / 343	542 / 490	774 / 653	923 / 748
	27°C	359 / 336	445 / 411	625 / 563	842 / 722	973 / 808
	28°C	404 / 367	505 / 445	685 / 605	916 / 782	1053 / 885
	29°C	464 / 412	570 / 491	727 / 654	956 / 828	1085 / 923
	30°C	528 / 434	637 / 518	747 / 687	997 / 878	1133 / 985
	31°C	579 / 460	666 / 546	736 / 710	997 / 902	1133 / 1009
32°C	672 / 525	724 / 624	715 / 732	994 / 965	1138 / 1085	
33°C	691 / 554	727 / 644	711 / 719	988 / 977	1135 / 1091	
34°C	712 / 640	699 / 701	709 / 709	985 / 986	1132 / 1130	

注) PHSモデルで予測される必要水分補給量を暑熱条件(WBGT指数)別、身体作業強度(代謝率)別に計算した。表には暑熱順化した平均的な日本人の成人男性(身長170cm、体重65kg)が、中程度の保温力(0.7clo)で透湿性が高い衣服(表中の右の数値)と低い衣服(表中の左の数値)を着て1時間作業を行ったときの必要水分補給量(ml)の目安を示した。赤色の数字は、その水分量を補給しても1時間作業後の深部体温が38°Cを越えていることを示し、青色の斜体数字は、深部体温が38.5°Cを超えることを示す。これは、いくら水分補給をしてもオーバーヒートを防げない場合があることを示唆する。背景色が黄色の所はWBGT指数による許容基準値を示し、青が基準値範囲内、ベージュは基準値を超えるところを示している。暑熱ストレスの増加、身体作業強度の増加、衣服の透湿性の低下とともに必要水分補給量が増加することがわかる。

## 分担研究1

### 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)予測のための数値モデル Predicted Heat Strain(PHS)を用い、日本の夏期(6~9月)の気象データをもとに WBGT 値ごとに屋外作業者の暑熱負担(ストレイン)を予測した。15種類の異なる温熱特性をもつ作業服を仮定して、WBGT 別、代謝率別の予測総水分喪失量、予測深部体温を求めた。WBGT 値が高く、作業強度が強くなるにつれて、予測総水分喪失量が多く、予測深部体温が高くなった。1時間の作業で、最高で1リットルを超える発汗量が予測された。暑熱馴化していない人が最大発汗量に達した場合、予測深部体温は約 38.5℃に達するが、そのときの予測深部体温の上昇は顕著であった。強度の暑熱環境下では水分摂取だけでは、体温上昇は防ぐことはできないと予想される。1時間の中程度強度の作業で予測深部体温が 38.5℃を超える環境 WBGT 値の割合は、32-33℃で 82%、31-32℃で 38%、30-31℃で 9%程度であった。衣服に関しては、WBGT が 20℃では、衣服の断熱性が高ければ高いほど予測深部体温が上昇する結果が示されたが、WBGT が 28℃以上では逆に衣服の断熱性の増加で予測深部体温が低下した。蒸気の透湿性が悪い作業服を着用した場合、WBGT が低い時は、予測深部体温に変化は見られなかったが、WBGT が高くなると、予測深部体温が上昇傾向にあった。風と日射がない屋内条件と風と日射がある屋外条件での暑熱負担を比較した結果、屋外の暑熱負担が大きいことが示唆された。WBGT 値を用いた暑熱基準である ISO7243 で定められた作業限界基準値を基に計算した予測深部体温は、作業強度が強いほど高くなった。暑熱馴化した人が基準値に従って作業すると、高代謝率作業の場合、30分足らずに予測深部体温が 38℃に達したのに対し、低代謝率の作業では、8時間の継続労働でも可能で、暑熱負担は低かった。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 リットル以上の給水が必要であり、中程度代謝率以上では深部体温が ISO7933 基準の 38℃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を用いて数値予測するも

のである。2001年にMalchaire<sup>1)</sup>らによって提唱され、ISOの基準(ISO7933)<sup>2)</sup>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、1分ごとの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)<sup>3)</sup>。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℃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の目安を立てる事である。それに基づいて第1に、屋外作業を想定し、最近4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、発汗量が最大に達し、予測深部体温が38.5度を超える場合の気象データの分析を行った。第3に、衣服の違いによる予測深部体温を気象データのWBGT<sup>4)</sup>値毎に分析した。第4に、屋外の気象データから屋内の気象データを推測して、屋内の暑熱負担を予測し、屋外の予測値と比較した。第5に、ISO7243(WBGT(湿球黒球温度)指数に基づく作業者の熱ストレス評価)の基準値での予測総水分喪失量と予測深部体温を計算した。第6に、熱中症で救急搬送された人が最も多かった日を選び、屋外作業での予測水分喪失量と予測深部体温を求めた。

第二年次は、暑熱負担予測にPHSモデルを用いた。PHSモデルにISO9920<sup>5)</sup>に示された衣服の顕熱抵抗と潜熱抵抗に及ぼす風と歩行の影響を組み込んだプログラム

(modified PHS)を用いて計算された予測深部体温は、PHSを用いて計算された予測値よりも高く、被験者実験の実測データを正しく予測できないことを国際学会で発表した<sup>6,7)</sup>。そのため、第一年次に予測計算に一部用いていたmodified PHSモデルをPHSモデルに変更して暑熱負担を計算した。

## 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4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、63024件)を用いた。気温、風速、水蒸気圧は、気象庁のホームページからダウンロードし、黒球温度は、国立環境研のホームページからダウンロードした。平均的な日本人男性の体格(170cm, 65kg)を、PHSに入力し計算した。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の代謝区分の最大値に対応させ、安静(65W/m<sup>2</sup>)、低代謝率(130W/m<sup>2</sup>)、中程度代謝率(200W/m<sup>2</sup>)、高代謝率(260W/m<sup>2</sup>)、極高代謝率(300W/m<sup>2</sup>)とした。着衣条件は、衣服の顕熱抵抗(断熱性の指標)では0.3、0.5、0.7、0.9、1.1clo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。