

参考文献

- 1) ISO 7933 (2004) Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.
- 2) 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.

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

3. 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)

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 研究員  
上野 哲 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  
安田 彰典 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量の違いが人体生理・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33℃相対湿度50%の人工気候室内に男性被験者8名を曝露する実験を行った。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制された。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。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事が示唆された。

1. はじめに

職業性熱中症が減少しない理由の一つに、暑熱作業時の水分補給量の目安が明確でないことが指摘されている。前報<sup>1)</sup>で著者らは水分補給の有無により人体影響が異なることを報告したが、その結果を受け、今回はPHSモデル（ISO7933）で算出された水分補給の妥当性および暑熱環境における水分補給量の違いが人体に与える影響について検証するため、人工気象室を用いた被験者実験を行った。

2. 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33℃相対湿度50%、WBGT換算で27.6℃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) 被験者側条件について

表1に被験者の身体データを示す。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。

表1 被験者の身体データ

被験者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	BMI(kg/m <sup>2</sup> )	体表面積(m <sup>2</sup> )
A	22	174	57	18.8	1.68
B	20	172	58	19.6	1.68
C	23	178	78	24.6	1.93
D	22	162	57	21.7	1.60
E	21	167	65	23.3	1.72
F	23	174	55	18.2	1.66
G	22	170	57	19.7	1.66
H	22	169	63	22.1	1.72
平均	21.9	170.8	61.3	21.0	1.71
SD	1.0	4.9	7.6	2.3	0.10

なお被験者には、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。

### (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を行い、計6条件とした。

表2 被験者別各条件の摂取水分量(単位:g)

被験者	水0座位	水1座位	水2座位	水0歩行	水1歩行	水2歩行
A		475			640	
B		474			633	
C		557			754	
D	0	456	740	0	613	1000
E		476			640	
F		490			662	
G		475			635	
H		492			662	
平均	0	486.9	740	0	654.9	1000
SD	0	30.4	0	0	43.1	0

### (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室に入室し、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図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。

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。

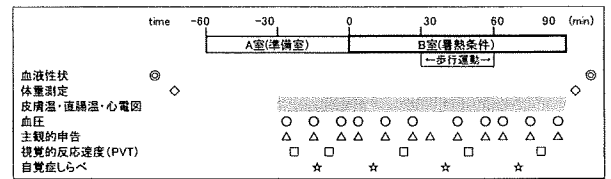


図1 実験スケジュール

### (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。

耳内温はテクノサイエンス社耳用体温ロガーDBTLを用いて測定した。ロガーを外耳道に挿入した上から、実験中はロガーを固定させるために発泡スチロール製のカバーをかけて測定した。

血圧及び心拍数は、HEM-70007アジィ(オムロン社製)を用い、被験者右上腕部にておよそ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。

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

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。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 平均皮膚温

図2-1は歩行時の、図2-2は座位時の、それぞれ被験者8名による平均皮膚温の平均値と標準偏差の経時変動を実験条件別に示す。歩行条件においては、平均皮膚温は前室では34.0℃前後であり、実験室入室後は水1>水0>水2の順で高くなった。

座位条件においては、平均皮膚温は前室では34℃前後であり、実験室入室後は水0>水1>水2の順で高くなった。

水条件および時間の二元配置の分散分析を行った結果、条件、時間に対し有意な主効果を確認したものの、条件と時間の交互作用では有意な主効果は認められなかった。(条件:p<0.01、時間:p<0.01、交互作用:n. s.)

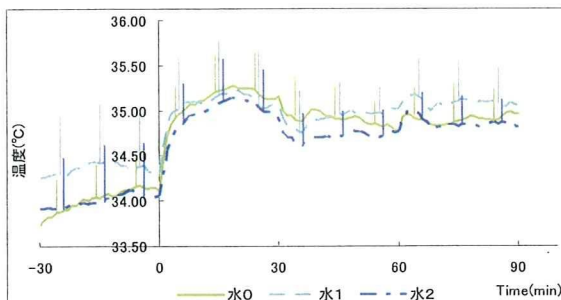


図2-1 平均皮膚温の経時変動 (歩行時)

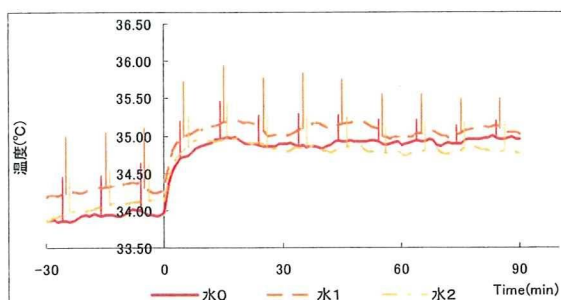


図2-2 平均皮膚温の経時変動 (座位時)

#### (2) 直腸温

図3-1および3-2にB室入室時点を基準とした直腸温変化量の被験者8名の平均値±S. D.を、経時変動で示す。歩行条件時の直腸温はB室入室後最初の30分間程度は、水0水1条件に比べ水2条件ではより低下した。歩行開始後

の30分以降の直腸温は0.4~0.5℃程度上昇したが、水0条件が最も上昇した。歩行停止後の90分以降は低下したが、低下幅は水1水2に比べ水0は小さかった。実験終了時の直腸温は、水2<水1<水0となった。座位条件では条件間で大きな違いは認められなかった。

水条件および時間の二元配置の分散分析を行った結果、条件、時間に対し有意な主効果を確認したものの、条件と時間の交互作用では有意な主効果は認められなかった。(条件:p<0.05、時間:p<0.01、交互作用:n. s.)

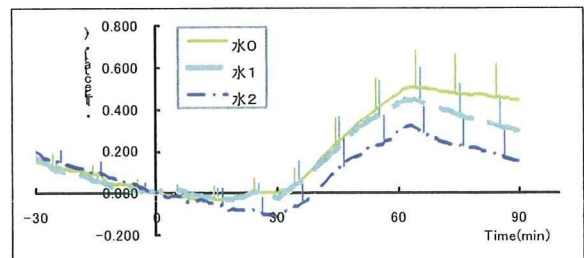


図3-1 直腸温変化量の経時変動 (歩行時)

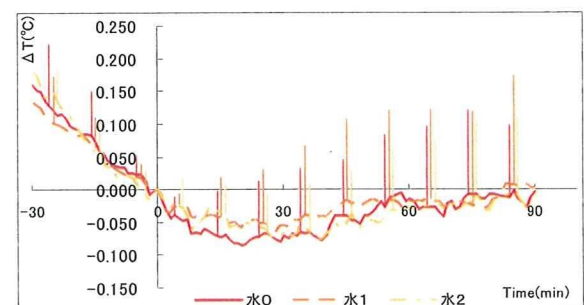


図3-2 直腸温変化量の経時変動 (座位時)

#### (3) 耳内温

図4-1および4-2にB室入室時点を基準とした耳内温変化量の被験者8名の平均値±S. D.を経時変動で示す。歩行条件時の耳内温は直腸温と同様の傾向を示し、B室入室後10分後程度から水2<水1<水0となり、歩行時、その後の安静時も差は縮小しなかった。直腸温にくらべると変化は小さかった。座位条件時には水条件による違いはあまり認められなかった。

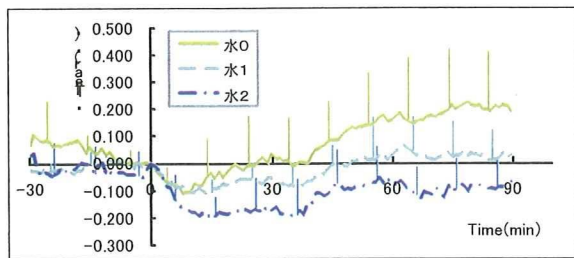


図4-1 耳内温変化量の経時変動 (歩行時)

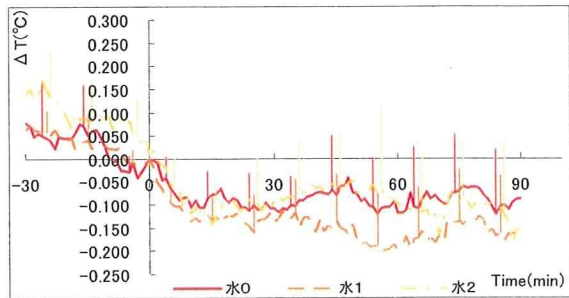


図4-2 耳内温変化量の経時変動 (座位時)

#### (4) 脈拍数

図5-1および5-2に被験者8名による脈拍数の平均値と標準偏差の経時変動を実験条件別に示す。血压同様、歩行条件では前室での-28分、-13分、-3分および実験室での2分、7分、17分、27分、32分、37分、47分、57分、62分、67分、77分、87分に計15回の脈拍数測定を行い、座位条件では上記の時間から32分、62分を除いた計13回の脈拍数測定を行った。

歩行においては、安静時には毎分65~75拍程度、歩行時には約35拍上昇し毎分105拍程度の値であった。座位においては、歩行同様にほとんど同じような推移をしていたが、実験後半に水0の脈拍数が上昇する傾向がみられた。値は毎分65~75拍程度であった。

水条件および時間の二元配置の分散分析を行った結果、条件で有意効果が確認されたものの、時間、条件と時間の交互作用において有意な主効果は認められなかった。(条件:p<0.1、時間:n. s.、交互作用:n. s.)

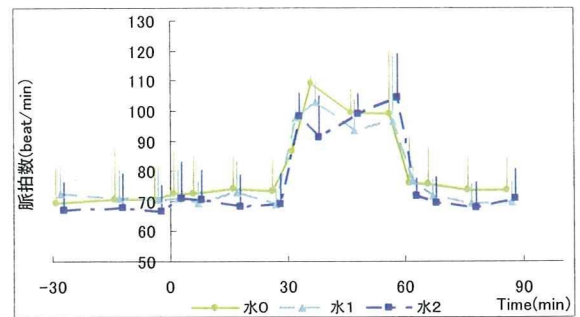


図5-1 脈拍数の経時変動 (歩行時)

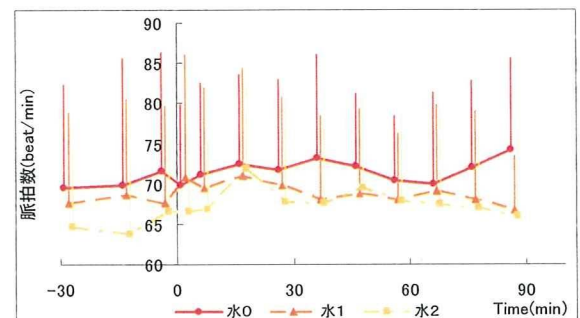


図5-2 脈拍数の経時変動 (座位時)

#### (5) 血压

図6-1および6-2に被験者8名による収縮期血压の平均値と標準偏差の経時変動を実験条件別に示す。歩行条件では前室での-28分、-13分、-3分および実験室での2分、7分、17分、27分、32分、37分、47分、57分、62分、67分、77分、87分に計15回の血压測定を行い、座位条件では上記の時間から32分、62分を除いた計13回の血压測定を行った。

歩行においては、どの条件もほとんど同じような値を推移しているが、水2においては87分の測定において低下する傾向がみられた。安静時には105~120mmHg程度、歩行時には約20mmHg上昇し140mmHg程度の値であった。座位においては、どの条件もほとんど同じような値を推移しており、110~120mmHg程度であった。

水条件および時間の二元配置の分散分析を行った結果、時間に対し有意な主効果を確認したものの、条件、条件と時間の交互作用では有意な主効果は認められなかった。(条件:n. s.、時間:p<0.01、交互作用:n. s.)

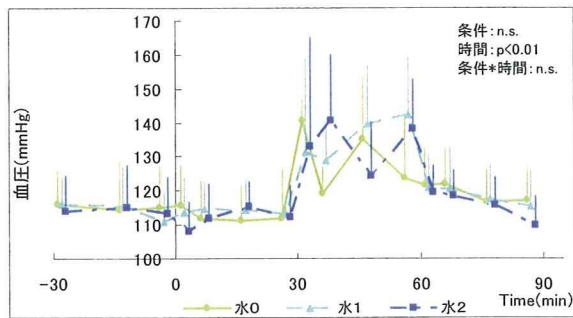


図6-1 収縮期血圧の経時変動（歩行時）

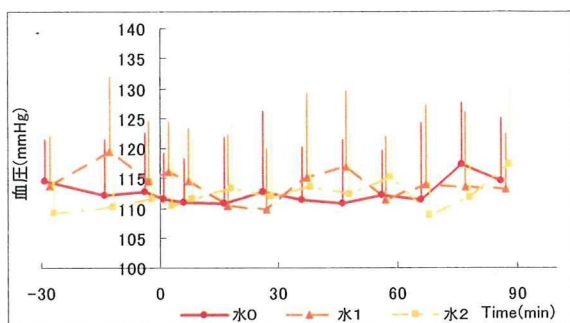


図6-2 収縮期血圧の経時変動（座位時）

(6) 体重減少量

図7に被験者8名の体表面積当たりの体重減少量(実験後の体重から実験前の体重と摂取した水分量を引いたもの)の平均値と標準偏差を実験条件別に示す。座位条件では3条件とも約140g/m<sup>2</sup>、歩行条件では水0は234 g/m<sup>2</sup>、水1と水2は255 g/m<sup>2</sup>であった。分散分析の結果、運動の有無には有意差が認められた(p<0.01)が飲水条件には有意差は認められなかった。

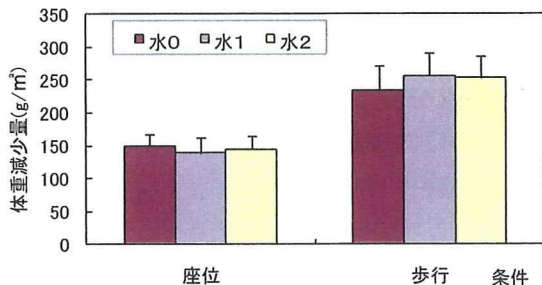


図7 体重減少量

(7) 指先へモグロビン濃度

図8に実験開始前と実験終了直後の血中へ

モグロビン濃度の被験者8名の変化量の平均値と標準偏差を実験条件別に示す。

座位においては、変化量は水0では0.3(g/dl)、水1では-0.7(g/dl)、水2では-0.5(g/dl)であった。また歩行条件においては、水0では-0.3(g/dl)、-0.6(g/dl)、-0.3(g/dl)であった。座位条件でも歩行条件でも、水1が最も大きく減少したが、有意差は認められなかった。

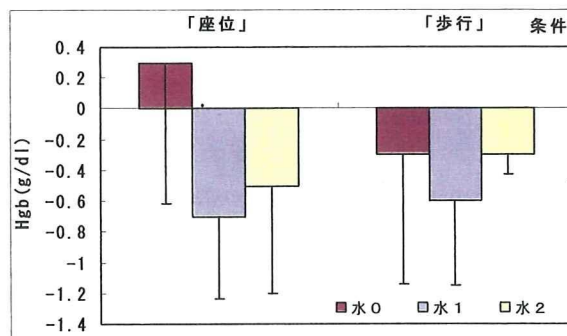


図7 指先へモグロビン変化量

(8) 温冷感申告

図8-1に歩行時の、図8-2に座位時の温冷感の経時変動を示す。歩行時では30~60minの間に温冷感が「暑い」側に移行し歩行終了後の60~90minの間には急激に「涼しい」側に移行し、特に水2条件で顕著であった。また、座位時では水条件による違いはあまりみられなかった。

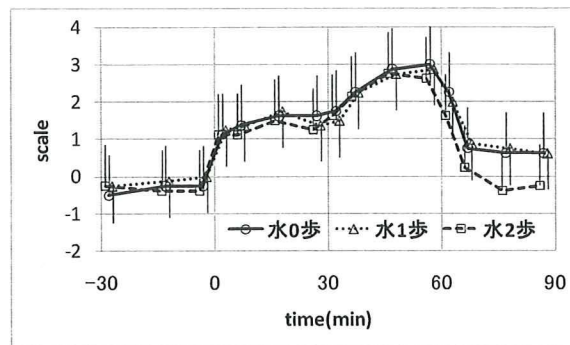


図8-1 温冷感申告の経時変動（歩行時）

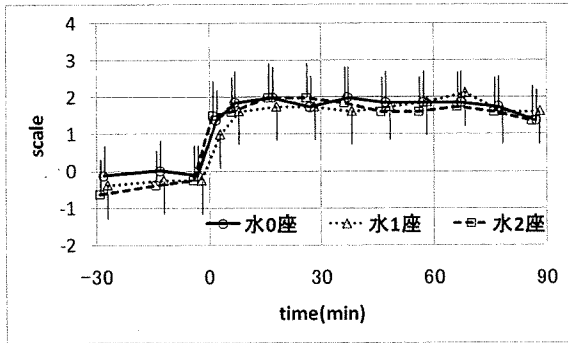


図8-2 温冷感申告の経時変動 (座位時)

(9) 温熱的快適感申告

図9-1には歩行時、図9-2には座位時の温熱的快適感の経時変動を示す。0がもっとも快適という評価になり、負の値が大きくなるほど「不快」側の評価を示している。歩行時に30～60minの間に水1よりも水2の方が「快適」側になったが、座位時ではどの時間帯においても水1の方が水2よりも「快適」側になった。実験終了時には水条件による違いは殆ど認められなかった。

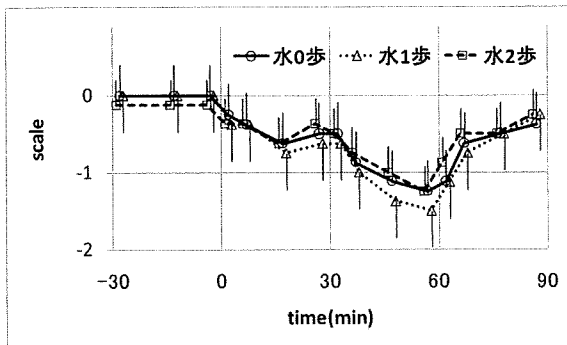


図9-1 快適感申告の経時変動 (歩行時)

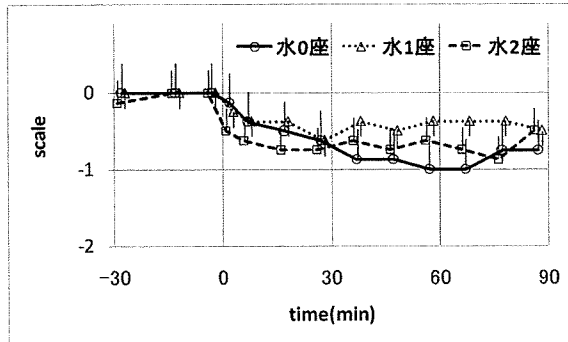


図9-2 快適感申告の経時変動 (座位時)

(10) その他の愁訴

図10-1には歩行時、図10-2には座位時のどのどの渴きの経時変動を図示する。0がどのどの渴きを感じていない状態で値が大きくなるほどどのどの渴きが増す。歩行時・座位時ともに水0に比べ、水1や水2ではどのどの渴き感が大幅に改善していたが、水1と水2の差は小さかった。

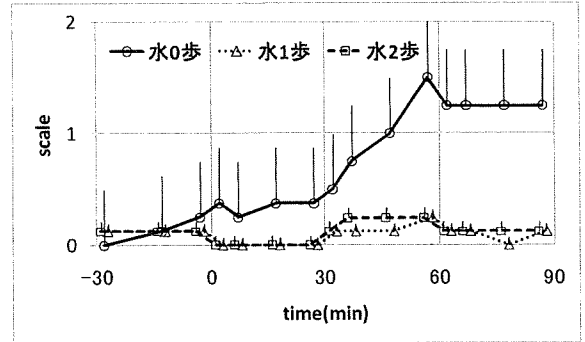


図10-1 のどの渴き感申告の経時変動 (歩行時)

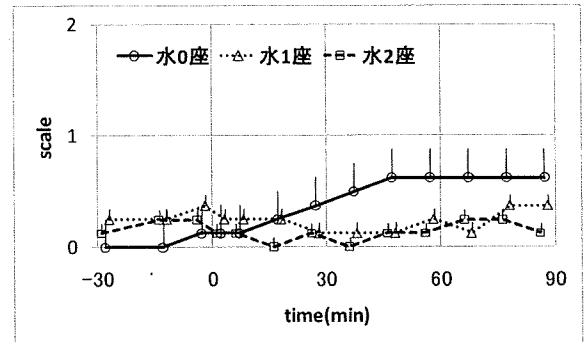


図10-2 のどの渴き感申告の経時変動 (座位時)

図11-1には歩行時、図11-2には座位時の水量評価の経時変動を図示する。水量評価は0がちょうどよい、負の値の時には少なく感じ、正の値は多く評価していることを示す。

水量は、座位時においてどの時間帯にでも水2の方が水分が多く評価されていた。歩行時にも同様の傾向が認められたが、水1と水2の間の差は座位時より小さかった。

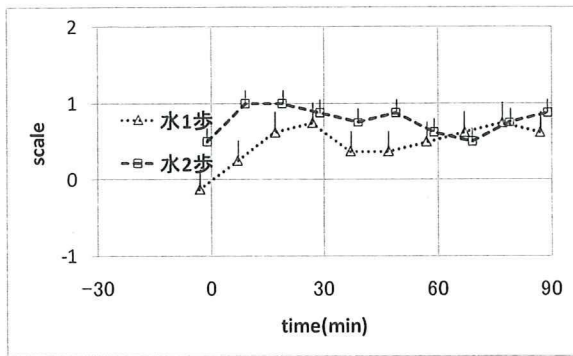


図 1 1 - 1 水量評価の経時変動 (歩行時)

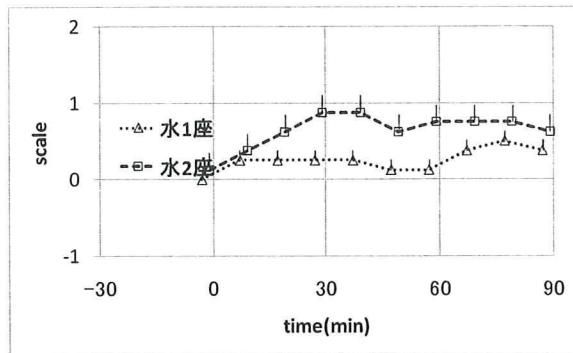


図 1 1 - 2 水量評価の経時変動 (座位時)

(1 1) 自覚症しらべ得点

図 1 2 - 1 には歩行時の、図 1 2 - 2 には座位時における自覚症しらべ得点の変化量(総得点の初期値を0とした場合の変化量)の経時変動を図示する。

自覚症しらべ得点は、歩行時には水0に比べ水1・水2条件で1点以上減少した。座位時では明確な傾向は認められなかったが、実験終了時には水2がもっとも得点が高かった(疲労感が高かった)。水1・水2間を比較すると大きな差は認められなかった。

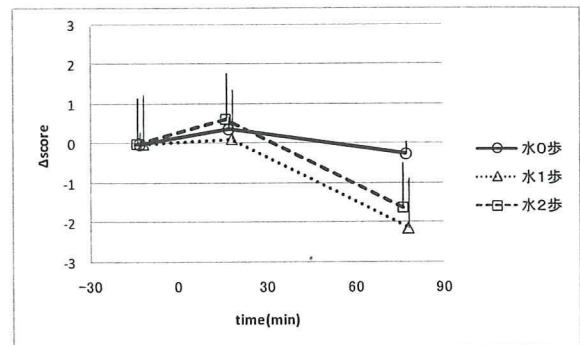


図 1 2 - 1 自覚症しらべ得点変化量 (歩行時)

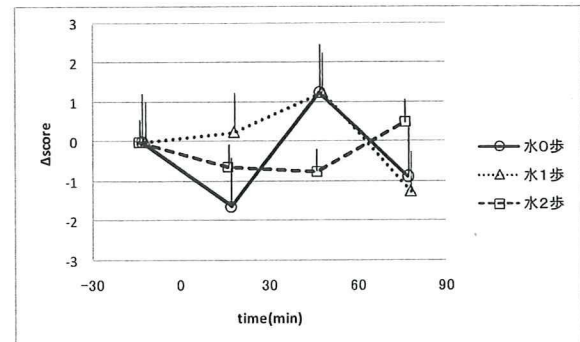


図 1 2 - 2 自覚症しらべ得点変化量 (座位時)

4. PHSモデル予測値と実測値の比較および考察

(1) 平均皮膚温の比較

図 1 3 にPHSモデルより算出される平均皮膚温の予測値と水1の歩行条件時の実測値の相関図を示す。どの時間においても殆ど全員の被験者で実測値が予測値よりも高い結果となった。これは今回の実験で用いた着衣の影響(長袖長ズボンで熱が逃げにくい)であると推察される。

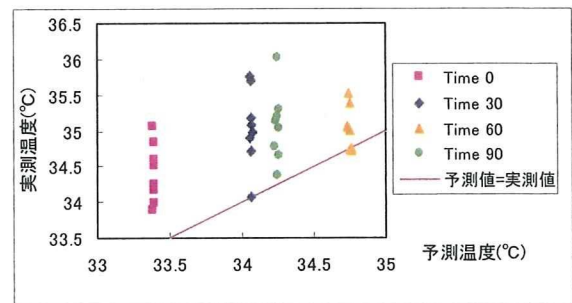


図 1 3 平均皮膚温の実測値と予測値の比較 (水1条件)

(2) 直腸温および耳内温の比較



図14にPHSモデルより算出される体内温の予測値と水1歩行条件時の直腸温実測値の相関図を示す。8名の被験者のうち、5、6名の被験者の直腸温が予測値より低く、2、3名の被験者ではやや高くなった。平均としては予測値より実測値は低くなった。

図15にPHSモデルより算出される体内温の予測値と水1歩行条件時の実測値（直腸温、耳内温）の平均値と標準偏差を時間別に示す。直腸温平均値はどの時間においても予測値より低くなったが、歩行終了時の60分では、直腸温実測値が予測値以上に上昇傾向にあった。その後、予測値より直腸温は低くなった。耳内温は0分時および30分時には予測値とほぼ同じ値となったが、その後は予測値より低い値となった。

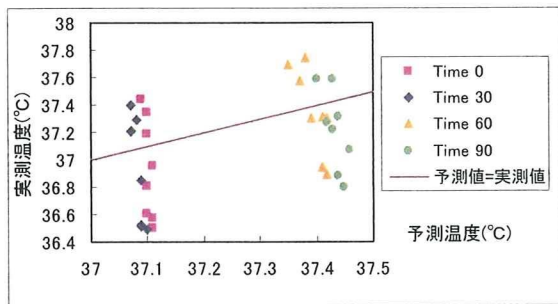


図14 直腸温の実測値と予測値の比較（水1条件）

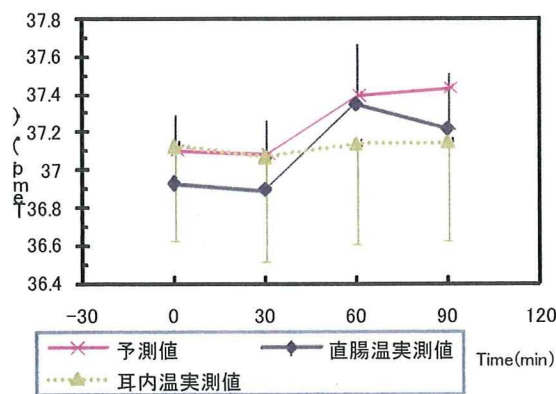


図15 体内温予測値と直腸温および耳内温実測値（平均値+S.D.）

### (3) 体重減少量の比較

図16にPHSモデルより算出される歩行時の体重減少量予測値と実測値の関係を相関で示

す。8例すべてで予測値より実測値の方が少なかった。図15の体内温の結果とも合わせて考えると、PHSモデルによる水分摂取には体温上昇の抑制効果が十分にあると考えられる。

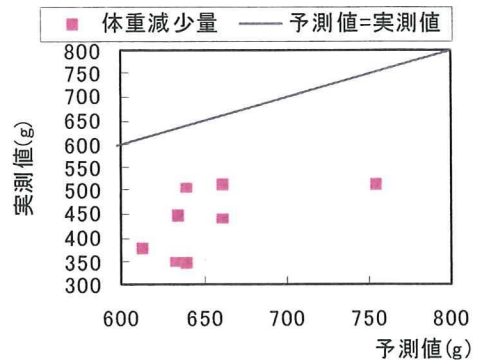


図16 体重減少量予測値と実測値（平均値+S.D.）

### 5. おわりに

気温33℃相対湿度50%の人工気候室内に男性被験者8名をばく露し、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が低下した。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。

文献 1) 榎本ほか、急性暑熱ばく露時の体重減少と必要水分補給量に関するパイロットスタディ、日本生理人類学会誌、Vol. 14特別号(1)、126-127、2009

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

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：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）

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	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
	上野 哲	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
	安田 彰典	労働安全衛生総合研究所	主任研究員

研究要旨

暑熱負担評価の現行国際規格であるISO7933（PHSモデル）をベースにして作成した暑熱負担予測プログラム日本語版により算出した水分補給が人体の負担に及ぼす影響を検討するため、本研究では心臓血管系自律神経活動と体水分に注目し、それらへの影響について検証した。その結果、PHSモデルで算出された飲水量を摂取した場合、全く飲水しない場合に生じる心臓血管系自律神経活動や体水分量に関す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心臓血管系の負担軽減効果よりも大きくないと考えられた。したがって、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、さらに改善しうると考えられた。

1. はじめに

暑熱環境ではヒトは体温を適度な範囲に維持するために汗をかく。そのため、水分を摂取しなければ発汗により体内の水分量が減少し、それに付随してさまざまな変化が生体内に生じる。そのひとつとしてあげられるのは、自律神経活動である。心拍変動を用いて非侵襲的にヒトの自律神経活動を評価したところ、30分の暑熱暴露の後では、副交感神経活動が減退、交感神経活動が亢進した、との報告がある。

そこで本研究では、暑熱負担評価の現行国際規格であるISO7933（PHSモデル）をベースにして作成した暑熱負担予測プログラム日本語版により算出される暑熱環境での水分補給量について、心臓血管系自律神経活動と体水分に生じる変化から検証することとした。

2. 実験A

2.1. 方法

2.1.1. 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2つの人工環境室（A室、B室）にて実施した。2つの人工環境室は隣接し、かつ独立して制御可能であった。

人工環境室内は、前室として用いたA室を気温25℃相対湿度50%[wet bulb globe temperature (WBGT) 22℃]、暑熱環境として用いたB室を気温33℃相対湿度50%（WBGT27.6℃）に維持するよう制御した。どちらの室内も周囲壁面温度は気温と等しく、気流は速度0.2m/s下の不感気流であった。

2.1.2. 被験者および飲水量

被験者は、若年成人男性8名であった。表1に被験者特性を示す。全ての被験者には、実験

の趣旨、危険性、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、同意を得た上で実験に参加してもらった。

実験中、被検者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。これらの着衣による熱抵抗値は約 1.0clo であった。なお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。

実験時の飲水量は、全く水分摂取をしない (Control)、PSHモデルより算出した本実験条件での予測体重減少量と同量の水分を摂取する (Water1)、米国政府産業衛生専門家会議 (ACGIH) によるガイドラインに基づいて算出した水分量を摂取する (Water2)、の3つの条件を設けた (表1)。

表1 被検者特性および水分摂取量

年齢(歳)		22 ± 1
身長(cm)		171 ± 5
体重(kg)		61 ± 8
BMI(kg/m <sup>2</sup> )		21 ± 2
Water1条件摂取量(ml)		
	安静	487 ± 30
	歩行	655 ± 43
Water2条件摂取量(ml)		
	安静	740 ± 0
	歩行	1000 ± 0

値は平均値±標準偏差。

### 2.1.3. 実験スケジュール

被検者は指定された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前準備をした。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検者は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、座位で安静にする(Rest)、トレッドミル上を歩行(4.5km/h)する(Exercise)の2つの条件を設けた。その他の時間帯では被検者は座位で安静を維持した。B室退室後被検者は再びA室に移動し、実験を終了した。

Water1条件およびWater2条件では、A室入室

後30分からB室滞在終了までの間、各被検者および各条件で算出された総飲水量の10%の水を、10分おき計10回摂取した。水温は室温と同じであった。

実験は午前10時、または午後2時から開始した。ただし各被検者では6条件(飲水3条件×運動2条件)とも同じ時刻から実験を開始した。

### 2.1.4. 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、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。A室およびB室滞在中の30分ごとのデータについて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(LF/HF)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( $-\beta$ )を直線回帰によって算出した。 $\beta$ 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。 $\beta$ 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。 $\beta$ が大きくなるとともにその変動の複雑さは減少する。

### 2.1.5. 統計解析

Control、Water1、Water2の間の比較および各時間帯の間の比較には3元配置分散分析を用いた。多重比較にはBonferroni法を用いた。有意水準は5%未満とした。

## 2.2. 結果および考察

B室で歩行をしなかった場合、平均RR間隔(図1、2)と $\beta$ (図7、8)には有意な変化および条件間の差は認められなかった。一方、HF/TOTでは、実験開始後90-120分(B室入室後60-90分)時のA室滞在時からの変化量(図4)は、Control条件( $< 0$ )とWater2条件( $> 0$ )の間で有意( $p < 0.05$ )な差が認められた。またLF/HFでは、A室滞在時からの変化量(図6)が実験開始後60-90分(B室入室後30-60分)ではControl条件およびWater1条件( $> 0$ )とWater2条件( $< 0$ )の間で、90-120分(B室入室後60-90分)時では、Control条件( $> 0$ )とWater2条件( $< 0$ )の間で有意( $p < 0.05$ )な差が認められた。

B室で歩行をした場合、歩行時の平均RR間隔(図9、10)はその他の時間帯と比較して有意に( $p < 0.05$ )短くなった。また歩行時のLF/HF(図13、14)はControl条件のみA室滞在時から有意( $p < 0.05$ )に増加した。歩行後ではHF/TOTのA室滞在時からの変化量(図12)がControl条件( $< 0$ )とWater2条件( $> 0$ )の間で有意( $p < 0.05$ )な差が認められた。 $\beta$ (図15、16)には有意な変化および条件間の差は認められなかった。

以上より、暑熱環境下で座位安静を維持していた場合、Water2条件ではControl条件と比較して暑熱環境下で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。また暑熱環境下で歩行をした場合、Water1条件およびWater2条件ではControl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。

## 3. 実験B

### 3.1. 方法

#### 3.1.1. 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2つの人工環境室(A室、B室)にて実施した。2つの人工環境室は隣接し、かつ独立して制御可能であった。

人工環境室内は、前室として用いたA室を気温25℃相対湿度50%(WBGT22℃)、暑熱環境として用いたB室を気温33℃相対湿度50%(WBGT27.6℃)に維持するよう制御した。どちらの室内も周囲壁面温度は気温と等しく、気流は速度0.2 m/s以下の不感気流であった。

#### 3.1.2. 被検者条件および設定飲水量について

被検者は、若年成人男性4名であった。表2に被検者特性を示す。全ての被検者には、実験の趣旨、危険性、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、同意を得た上で実験に参加してもらった。

実験中、被検者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。これらの着衣による熱抵抗値は約1.0 cloであった。なお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。

実験時の飲水量は、全く水分摂取をしない(Control)、PSHモデルより算出した本実験条件での予測体重減少量と同量の水分を摂取する(Water1)、米国政府産業衛生専門家会議(ACGIH)によるガイドラインに基づいて算出した水分量を摂取する(Water2)の3つの条件を設けた(表2)。

表2 被検者特性および水分摂取量

年齢(歳)	23 ± 1
身長(cm)	175 ± 7
体重(kg)	68 ± 10
BMI(kg/m <sup>2</sup> )	22 ± 3
Water1条件摂取量(ml)	693 ± 52
Water2条件摂取量(ml)	1000 ± 0

値は平均値±標準偏差。

#### 3.1.3. 実験スケジュール

被検者は指定された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前準備をした。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検者は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検者は座位で安静を維持した。B室退室後被検者は再びA室に移動し、実験を終了した。

Water1条件およびWater2条件では、A室入室後30分からB室滞在終了までの間、各被検者および各条件で算出された総飲水量の10%の水を、10分おきに計10回摂取した。水温は室温と同じであった。

実験は午前10時、または午後2時から開始した。ただし各被検者では3条件（飲水3条件）とも同じ時刻から実験を開始した。

#### 3.1.4. 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、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。A室およびB室滞在中の30分ごとのデータについて実験Aと同様に解析した。

血中ヘモグロビン濃度はA室入室前とB室退室後に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）。

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（In body S20、バイオスペース）。

#### 3.1.5. 統計解析

Control、Water1、Water2の間の比較および各時間帯の間の比較には3元配置または2元配置分散分析を用いた。多重比較にはBonferroni法を用いた。有意水準は5%未満とした。

#### 3.2. 結果および考察

B室で歩行をした場合、歩行時の平均RR間隔（図17、18）はその他の時間帯と比較して有意に（ $p < 0.05$ ）短くなった。また歩行終了後〔実験開始後60-90分（B室入室後30-60分）〕では、

A室滞在時からの変化量（図18）がControl条件（ $< 0$ ）とWater2条件（ $> 0$ ）の間で有意（ $p < 0.05$ ）な差が認められた。歩行時の $\beta$ （図23）はControl条件の方がWater2条件と比較して有意（ $p < 0.05$ ）に大きかった。またA室滞在時からの変化量（図24）では、Control条件（ $> 0$ ）とWater1条件またはWater2条件（ $< 0$ ）の間で有意（ $p < 0.05$ ）な差が認められた。一方、HF/TOT（図19、20）とLF/HF（図21、22）には有意な変化および条件間の差は認められなかった。

B室退室後の血中ヘモグロビン濃度（図25）はControl条件とWater2条件で、A室入室前と比較して有意（ $p < 0.05$ ）に増加した。一方、体内水分量（図27-42）にはいずれも有意な変化および条件間の差は認められなかった。

以上より、暑熱環境下で歩行をした場合、Water2条件ではControl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。Water1条件ではControl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。

#### 3. まとめ

本研究では、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した暑熱負担予測プログラム日本語版により算出される暑熱環境での水分補給量について、心臓血管系自律神経活動と体水分に生じる変化から検証した。その結果、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。以上より、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。

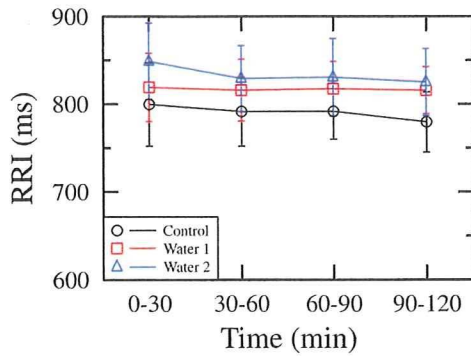


図1 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の平均RR間隔 (RRI)。値は平均値±標準誤差。

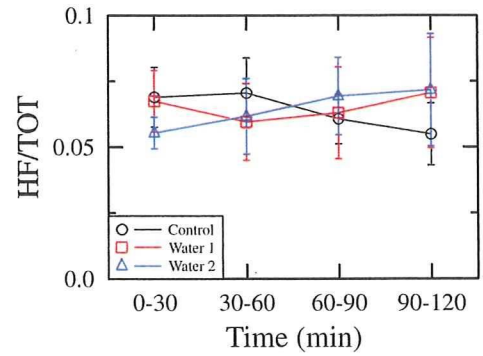


図3 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の副交感神経活動指標 (HF/TOT)。値は平均値±標準誤差。HF, 高周波 (>0.15Hz) 帯域のパワー; TOT, 周期性成分の総パワー。

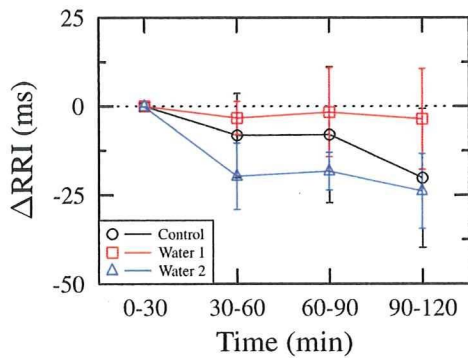


図2 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の平均RR間隔変化量。値は平均値±標準誤差。

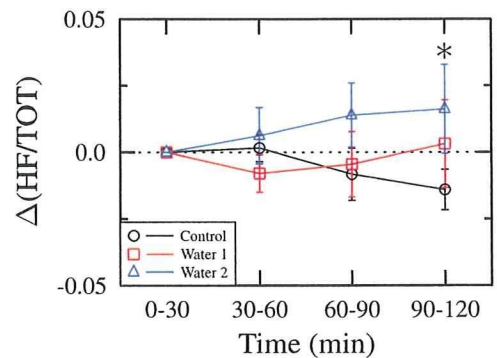


図4 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の副交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

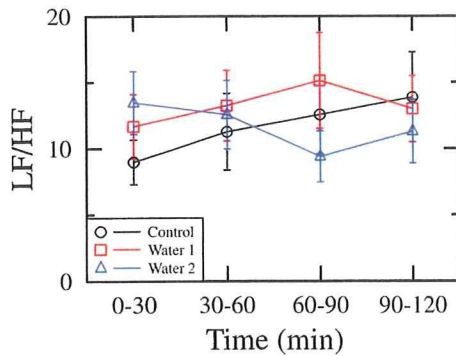


図5 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の交感神経活動指標 (LF/HF)。値は平均値±標準誤差。LF, 低周波 (0.04-0.15Hz) 帯域のパワー。

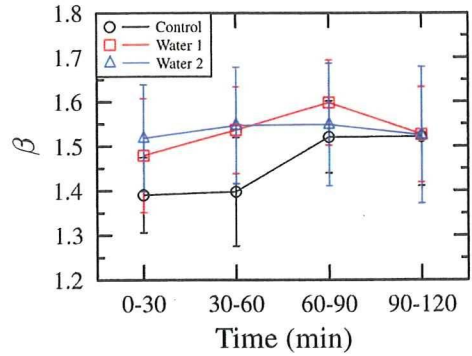


図8 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) のRR間隔時系列データのフラクタル指数 ( $\beta$ )。値は平均値±標準誤差。

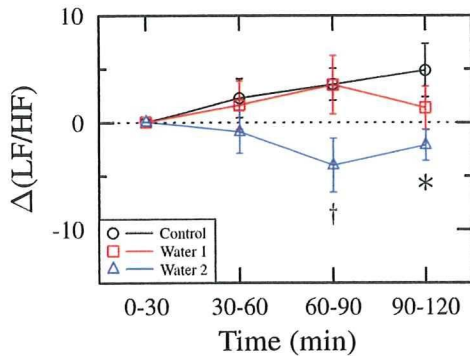


図6 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。  
†他の条件と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

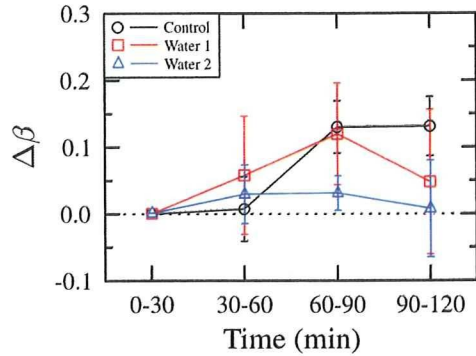


図8 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) のフラクタル指数指標変化量。値は平均値±標準誤差。



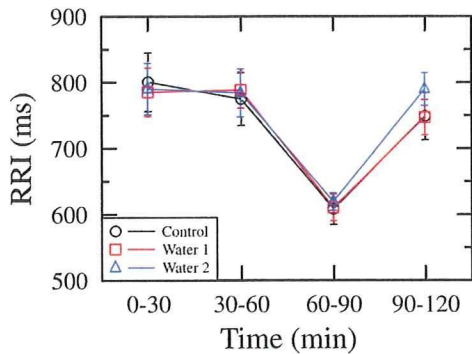


図9 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の平均RR間隔 (RRI)。値は平均値±標準誤差。すべての条件で60-90分の値はその他の時間帯の値と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

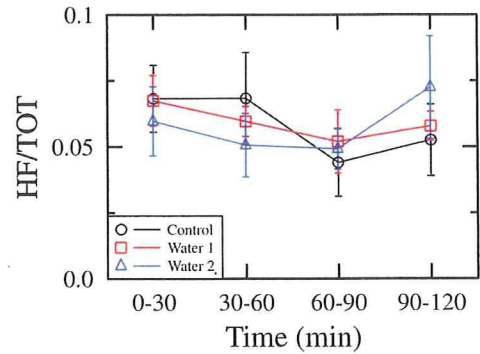


図11 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の副交感神経活動指標 (HF/TOT)。値は平均値±標準誤差。HF, 高周波 (>0.15 Hz) 帯域のパワー; TOT, 周期性成分の総パワー。

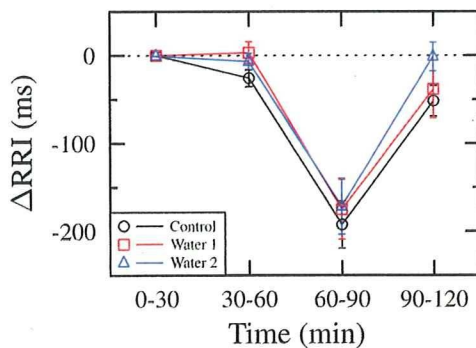


図10 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の平均RR間隔変化量。値は平均値±標準誤差。すべての条件で60-90分の値はその他の時間帯の値と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

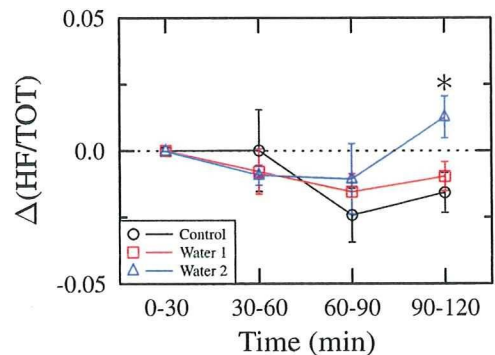


図12 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の副交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

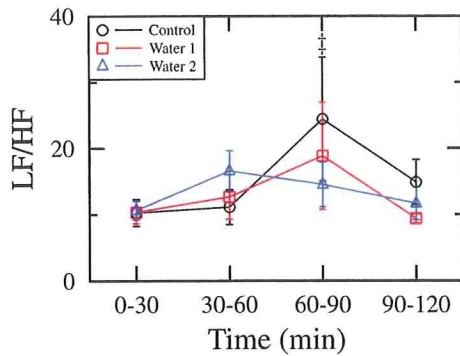


図13 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の交感神経活動指標 (LF/HF)。値は平均値±標準誤差。LF, 低周波 (0.04-0.15 Hz) 帯域のパワー。‡ 0-30分と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

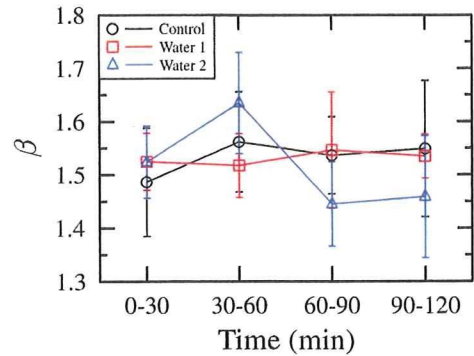


図15 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) のRR間隔時系列データのフラクタル指数 ( $\beta$ )。値は平均値±標準誤差。

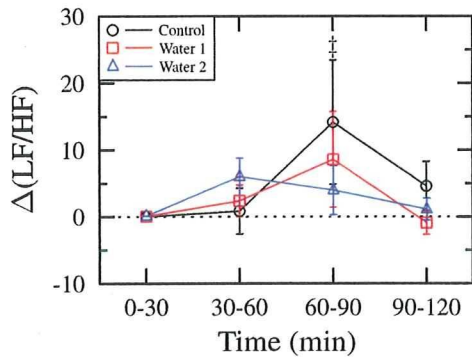


図14 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。‡ 0-30分と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

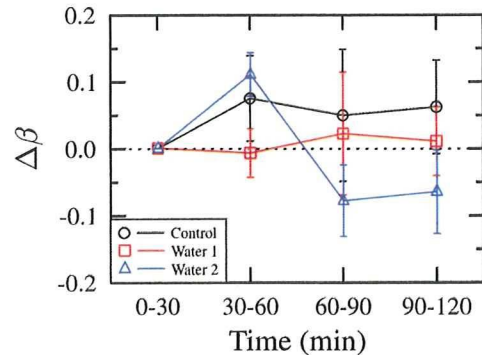


図16 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) のフラクタル指数指標変化量。値は平均値±標準誤差。

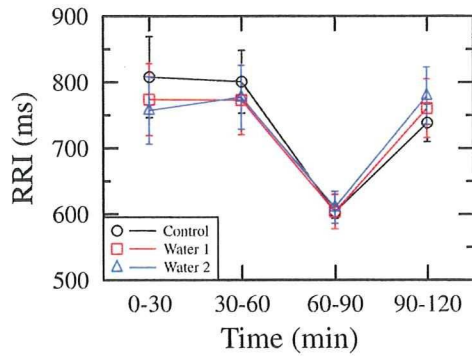


図17 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の平均RR間隔 (RRI)。値は平均値±標準誤差。すべての条件で60-90分の値はその他の時間帯の値と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

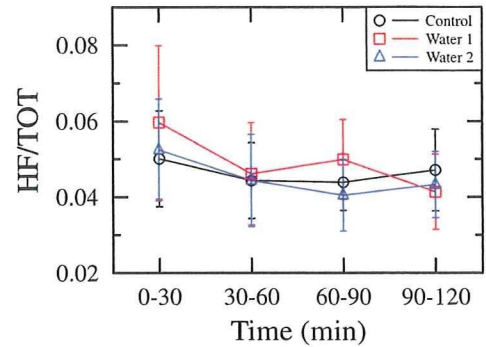


図19 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の副交感神経活動指標 (HF/TOT)。値は平均値±標準誤差。HF, 高周波 (>0.15 Hz) 帯域のパワー; TOT, 周期性成分の総パワー。

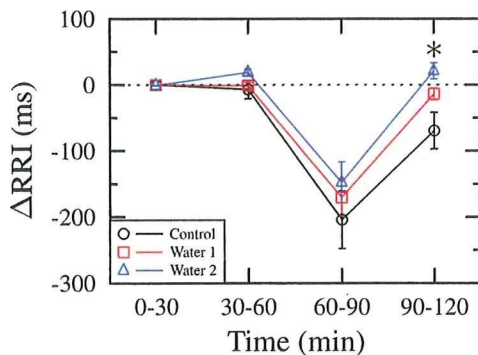


図18 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の平均RR間隔変化量。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。すべての条件で60-90分の値はその他の時間帯の値と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

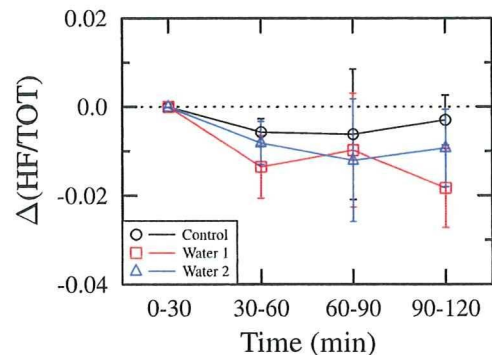


図20 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の副交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。

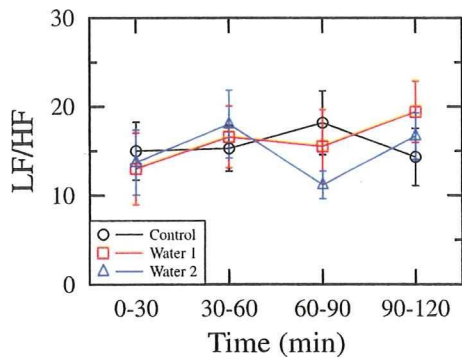


図21 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の交感神経活動指標 (LF/HF)。値は平均値±標準誤差。LF, 低周波 (0.04-0.15 Hz) 帯域のパワー。

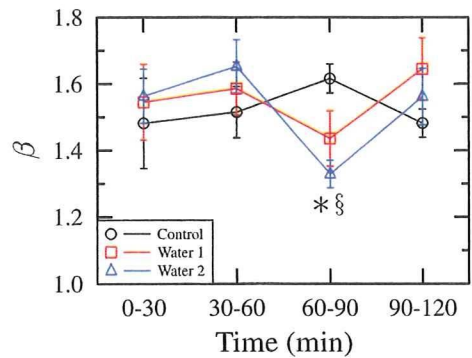


図23 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) のRR間隔時系列データのフラクタル指数 ( $\beta$ )。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。§30-60分と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

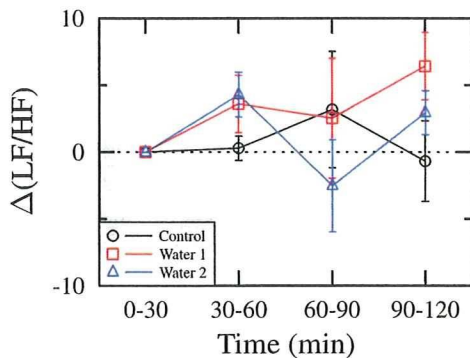


図22 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。

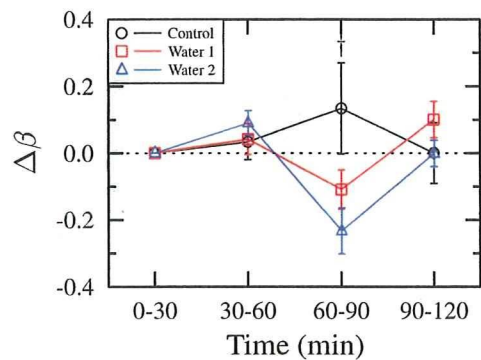


図24 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) のフラクタル指数指標変化量。値は平均値±標準誤差。†他の条件と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。