

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。

## 分担研究 4

### 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

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	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、ACGIHによる飲水量を摂取した場合で得られる心臓血管系の負担軽減効果が認められないこともあることが示唆された。またPHSモデルで算出された飲水量は、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。一方、暑熱環境でのこうした変化を抑制するために、どのくらい水分を補給すればよいかはいまだ明確ではなく、実際に、職業性熱中症は多発している。

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. 2008年度

まずPHSモデルより算出した水分量の摂取が飲水しない場合と比較して有効かどうか暑熱環境下のヒトを対象として検討した。

##### 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35℃相対湿度50% (WBGT30℃) 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. 被検者および飲水量

被検者は、成人男性4名であった。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Tシャツとトランクスを着用した。これらの着衣による熱抵抗値は約0.2cloであった。なお体表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(Water)、の2つの条件を設けた。

### 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120分間滞在した。部屋を移動する場合を除き、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。

Water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。

### 2.1.4. 測定項目

A室およびB室滞在中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60分と後半60分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。

血中ヘモグロビン濃度はB室入室前と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)。

## 2.2. 結果および考察

心電図が記録できた2名のデータについて示す。HF/TOTはB室滞在中後半では前半と比較して両条件ともに減少傾向にあった(図1.1A)。ただしWater条件ではControl条件と比較して1名の被検者(subj. #1)でその減少は顕著に抑制された。Control条件でのLF/HFはB室滞在中後半では前半と比較して増加傾向にあった(図1.1B)。一方、Water条件では減少またはControl条件と比較してその増加が抑制された(図1.1B)。 $\beta$ はB室滞在中後半では前半と比較して両条件ともに増加傾向であったが、Water条件ではControl条件と比較して1名の被検者(subj. #2)でその増加がより抑制された(図1.1C)。

ヘモグロビン濃度はB室退室後では入室前と比較して増加する傾向が認められた(図1.2A)。Water条件ではControl条件と比較してその増加は抑制される傾向にあった(図1.2B)。

水分を摂取しない場合、B室滞在中後半では前半と比較して、HF/TOTは減少傾向、LF/HFは増加傾向、 $\beta$ は増加傾向、ヘモグロビン濃度は増加傾向であったことから、副交感神経活動が減退、交感神経活動が亢進、心拍回復機能が低下、体内水分量が減少したと推測された。一方、飲水はこれらの変化を抑制する作用があるのではないかと考えられた。

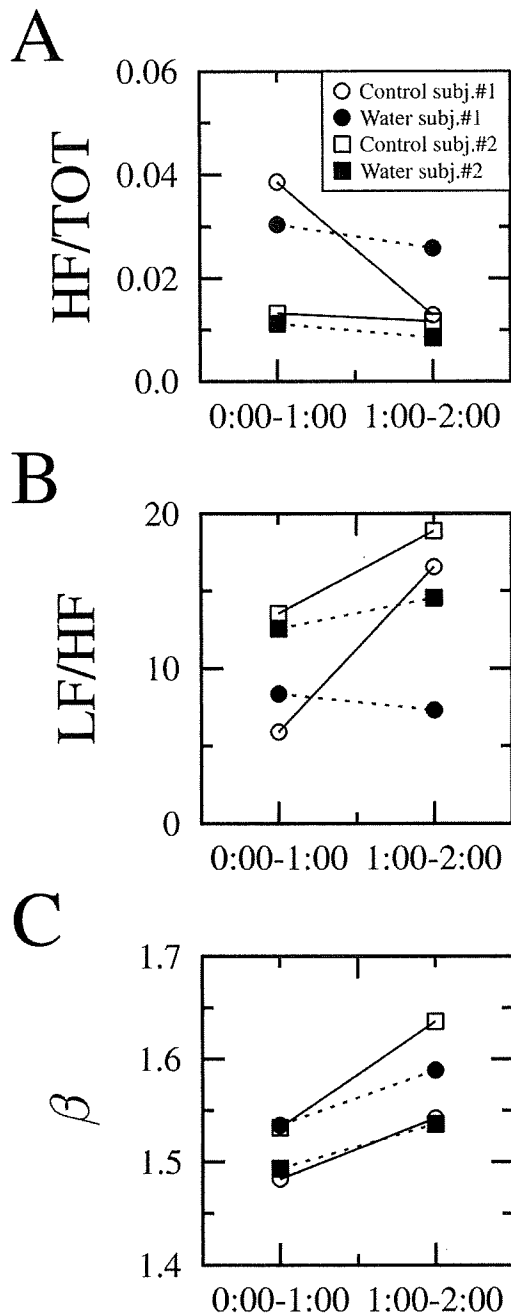


図1.1  
B室(気温35℃相対湿度50%)滞在時前半60分(0:00-1:00)と後半60分(1:00-2:00)におけるRR間隔時系列データから算出した指標。飲水なし(control)、飲水あり(water)条件での2名の被検者のデータ。HF, 高周波(>0.15Hz)帯域; LF, 低周波(0.04-0.15Hz)帯域; TOT, 周期性成分の総パワー;  $\beta$ , フラクタル指数。

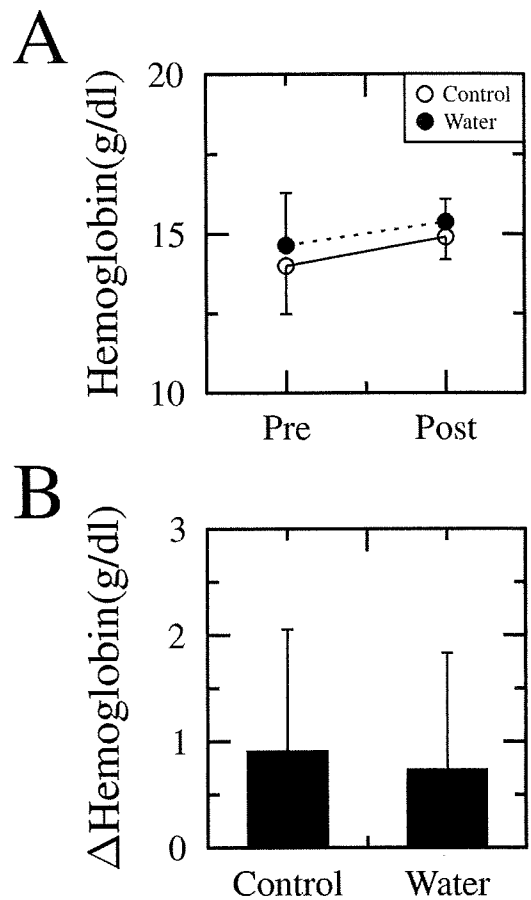


図1.2  
飲水なし(control)、飲水あり(water)条件での35℃室入室前(pre)と退室後(post)の血中ヘモグロビン濃度(A)とその変化量(B)。数値は4名の平均値±標準偏差。

### 3. 2009年度

2008年度の結果をふまえ、PSHモデルより算出した水分量を摂取する場合について、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した場合と比較しながら検討した。

#### 3. 1. 実験 A

##### 3. 1. 1. 方法

###### 3. 1. 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 °C 相対湿度 50% [wet bulb globe temperature (WBGT) 22°C]、暑熱環境として用いたB室を気温33°C相対湿度50% (WBGT27.6°C) 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。

###### 3. 1. 1. 2. 被検者および飲水量

被検者は、若年成人男性8名であった。表1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1.0clo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。

###### 3. 1. 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分間滞在した。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) と同じ時刻から実験を開始した。

###### 3. 1. 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。

### 3.1.1.5. 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。

### 3.1.2. 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2.1、2.2) と  $\beta$  (図2.7、2.8) には有意な時間にもなう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2.4) 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2.6) 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2.9、2.10) 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2.13、2.14) 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2.12) 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2.15、2.16) 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. 2. 実験B

### 3.2.1. 方法

#### 3.2.1.1. 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% (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。

#### 3.2.1.2. 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。

### 3.2.1.3. 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分間滞在した。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。

### 3.2.1.4. 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)。

### 3.2.1.5. 統計解析

Control、Water1、Water2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。

### 3.2.2. 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2.17、2.18)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2.18)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2.23)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2.24)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2.19、2.20)とLF/HF(図2.21、2.22)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2.25)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2.27-2.42)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。

#### 4. 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、暑熱環境下で飲水をしなかった場合には、副交感神経活動が減退、交感神経活動が亢進、心拍回復機能が低下、体内水分量が減少したことが推測されたが、PHSモデルで算出された量を飲水した場合、これらの変化を抑制する作用があるのではないかと考えられた。ただし、ACGIHによる飲水量を摂取した場合に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、またその効果は、PHSモデルで算出された飲水量を摂取した場合よりも大きい場合が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。



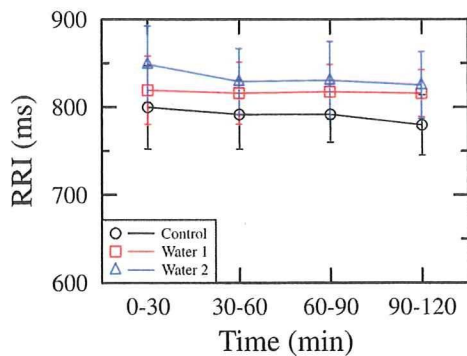


図2.1 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の平均RR間隔 (RRI)。値は平均値±標準誤差。

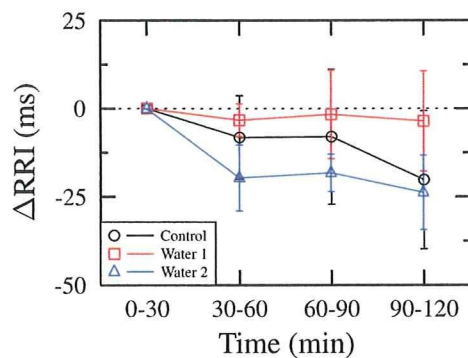


図2.2 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の平均RR間隔変化量。値は平均値±標準誤差。

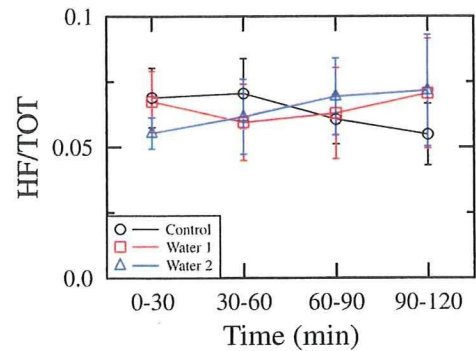


図2.3 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の副交感神経活動指標 (HF/TOT)。値は平均値±標準誤差。HF, 高周波 (>0.15Hz) 帯域のパワー; TOT, 周期性成分の総パワー。

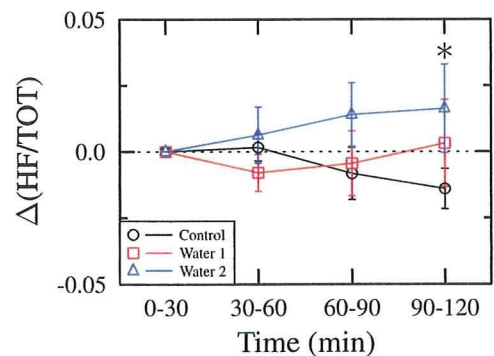


図2.4 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の副交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 (p < 0.05) に異なる。

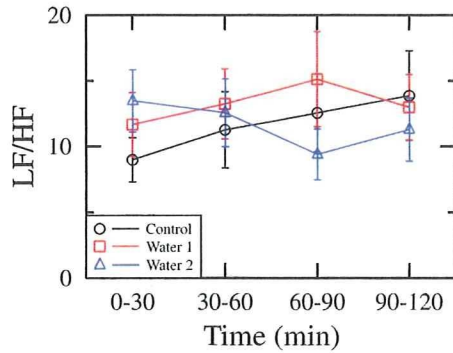


図2.5 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2) でのA室 (気温25°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の交感神経活動指標 (LF/HF)。値は平均値±標準誤差。LF, 低周波 (0.04-0.15Hz) 帯域のパワー。

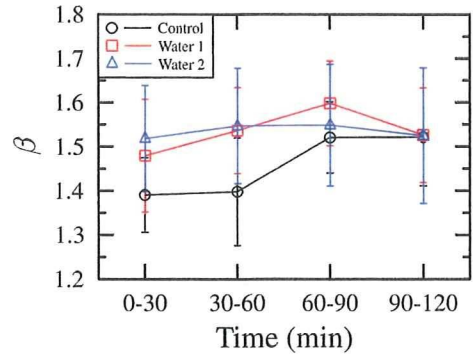


図2.7 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2) でのA室 (気温25°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) のRR間隔時系列データのフラクタル指数 ( $\beta$ )。値は平均値±標準誤差。

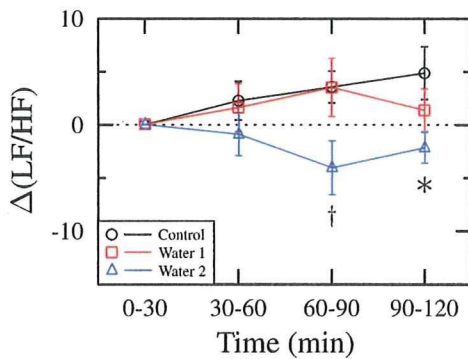


図2.6 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2) でのA室 (気温25°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) の交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。†他の条件と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

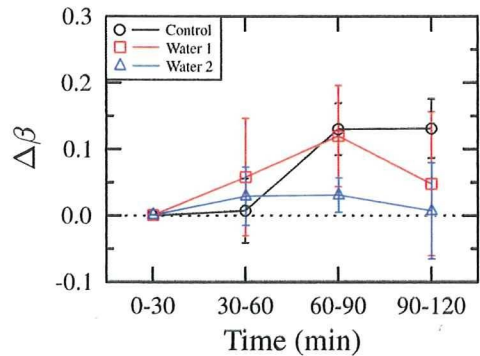


図2.8 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2) でのA室 (気温25°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 30-120分) のフラクタル指数指標変化量。値は平均値±標準誤差。

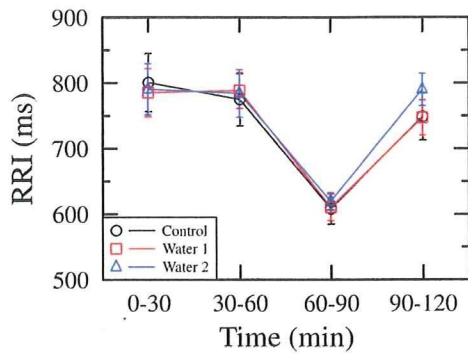


図2.9 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33°C相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の平均RR間隔 (RRI)。値は平均値±標準誤差。すべての条件で60-90分の値はその他の時間帯の値と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

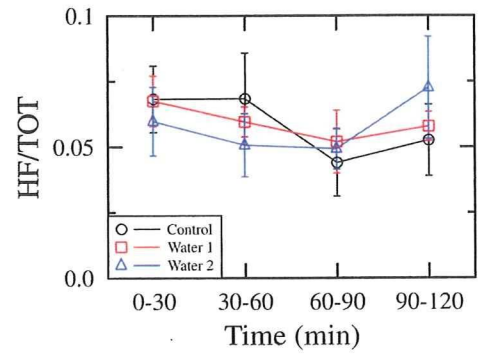


図2.11 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33°C相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の副交感神経活動指標 (HF/TOT)。値は平均値±標準誤差。HF, 高周波 (>0.15 Hz) 帯域のパワー; TOT, 周期性成分の総パワー。

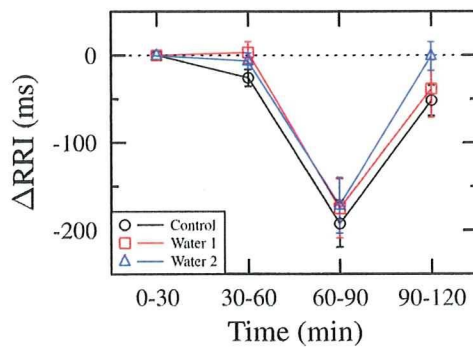


図2.10 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33°C相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の平均RR間隔変化量。値は平均値±標準誤差。すべての条件で60-90分の値はその他の時間帯の値と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

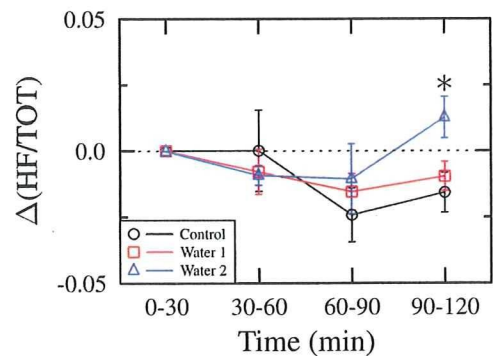


図2.12 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25°C相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33°C相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の副交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

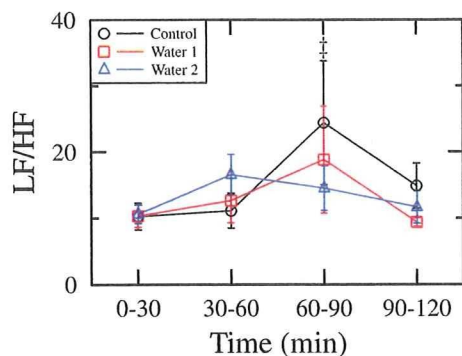


図2.13 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の交感神経活動指標 (LF/HF)。値は平均値±標準誤差。LF, 低周波 (0.04-0.15 Hz) 帯域のパワー。‡ 0-30分と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

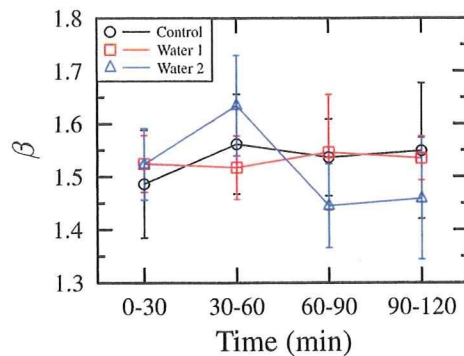


図2.15 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) のRR間隔時系列データのフラクタル指数 ( $\beta$ )。値は平均値±標準誤差。

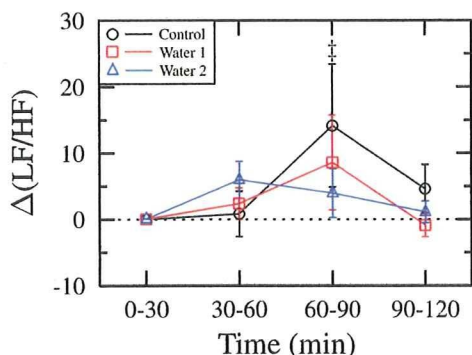


図2.14 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。‡ 0-30分と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

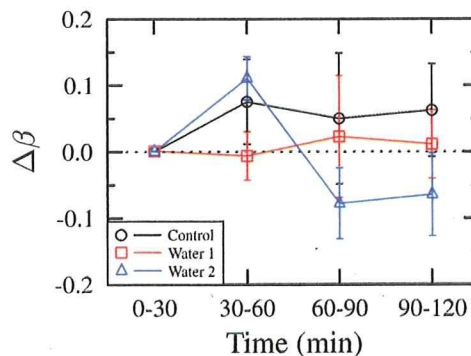


図2.16 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) のフラクタル指数指標変化量。値は平均値±標準誤差。

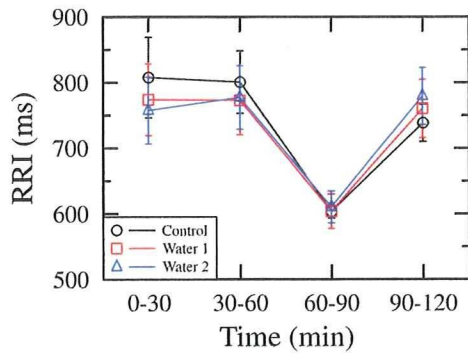


図2.17 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の平均RR間隔 (RRI)。値は平均値±標準誤差。すべての条件で60-90分の値はその他の時間帯の値と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

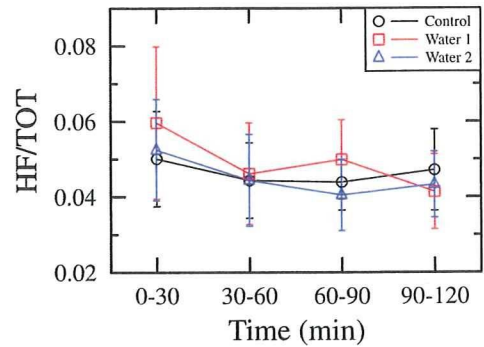


図2.19 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の副交感神経活動指標 (HF/TOT)。値は平均値±標準誤差。HF, 高周波 (>0.15 Hz) 帯域のパワー; TOT, 周期性成分の総パワー。

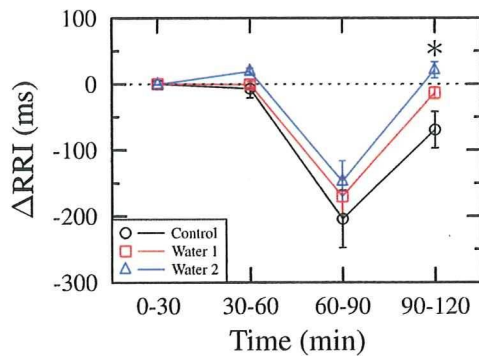


図2.18 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の平均RR間隔変化量。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。すべての条件で60-90分の値はその他の時間帯の値と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

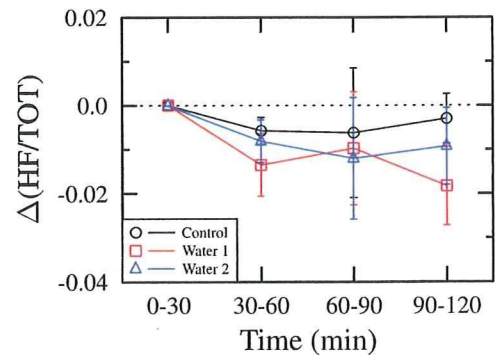


図2.20 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の副交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。

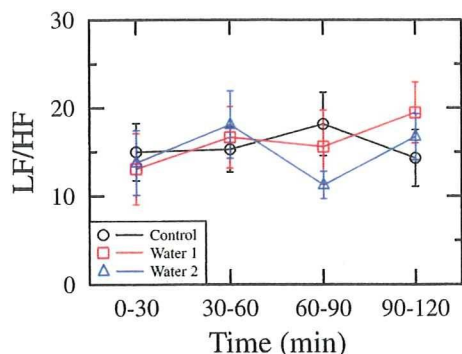


図2.21 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の交感神経活動指標 (LF/HF)。値は平均値±標準誤差。LF, 低周波 (0.04-0.15 Hz) 帯域のパワー。

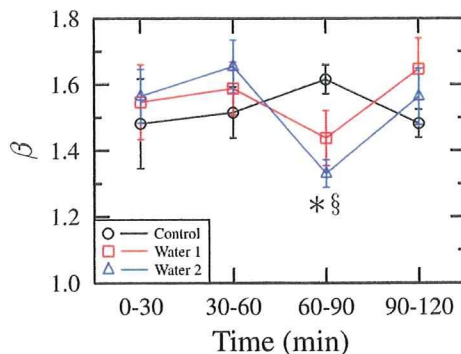


図2.23 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) のRR間隔時系列データのフラクタル指数 ( $\beta$ )。値は平均値±標準誤差。\*Controlと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。§30-60分と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

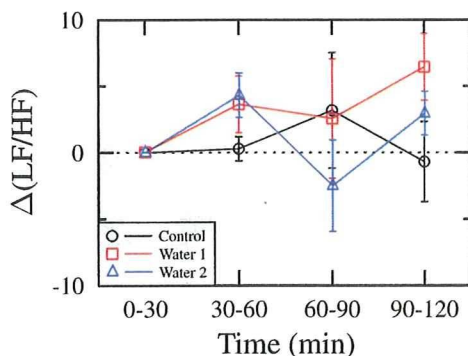


図2.22 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) の交感神経活動指標変化量。値は平均値±標準誤差。

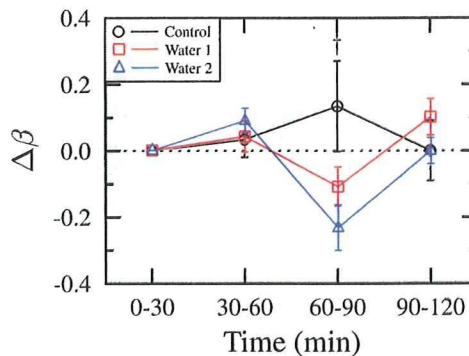


図2.24 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在時 (安静: 0-30分) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在時 (安静30-60分、歩行60-90分、安静90-120分) のフラクタル指数指標変化量。値は平均値±標準誤差。†他の条件と比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

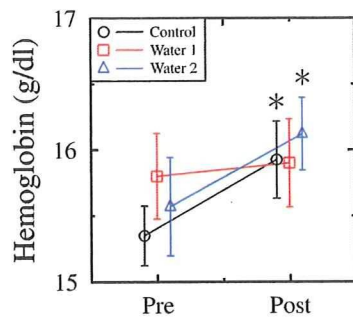


図2.25 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の血中ヘモグロビン濃度。値は平均値±標準誤差。\*Preと比較して有意 ( $p < 0.05$ ) に異なる。

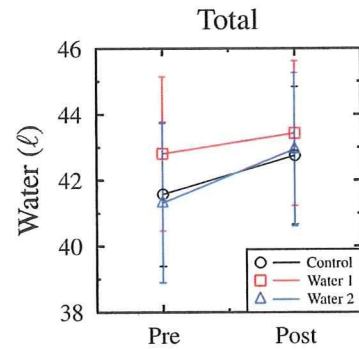


図2.27 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の体内総水分量。値は平均値±標準誤差。

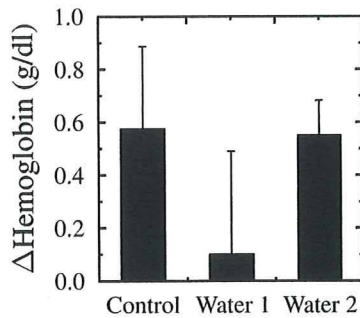


図2.26 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の血中ヘモグロビン濃度変化量。値は平均値±標準誤差。

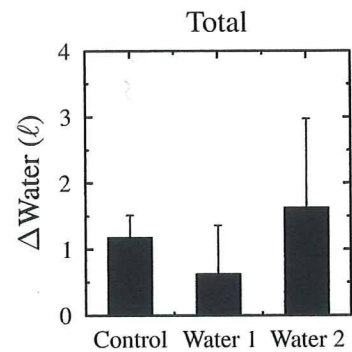


図2.28 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の体内総水分量変化量。値は平均値±標準誤差。

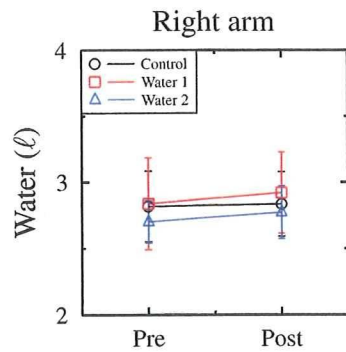


図2.29 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の右腕内水分量。値は平均値±標準誤差。

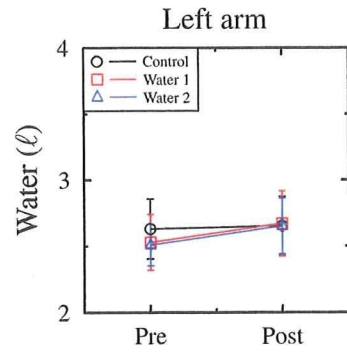


図2.31 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の左腕内水分量。値は平均値±標準誤差。

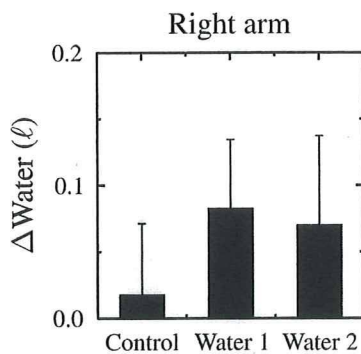


図2.30 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の右腕内水分量変化量。値は平均値±標準誤差。

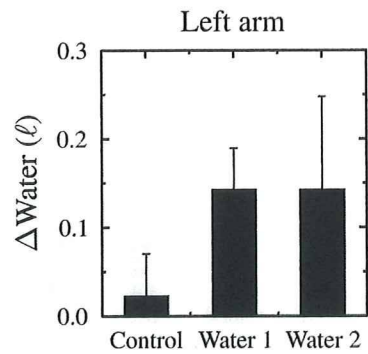


図2.32 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の左腕内水分量変化量。値は平均値±標準誤差。



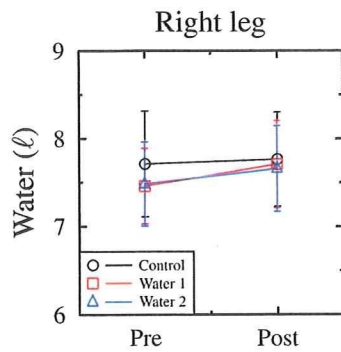


図2.33 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の右脚内水分量。値は平均値±標準誤差。

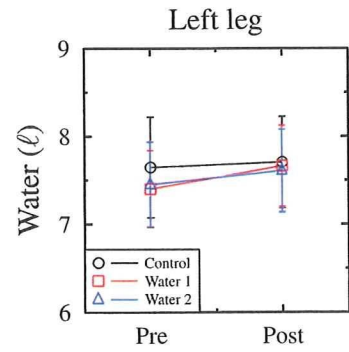


図2.35 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の左脚内水分量。値は平均値±標準誤差。

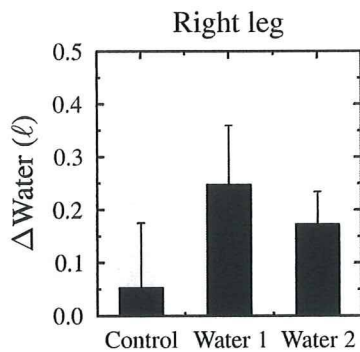


図2.34 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の右脚内水分量変化量。値は平均値±標準誤差。

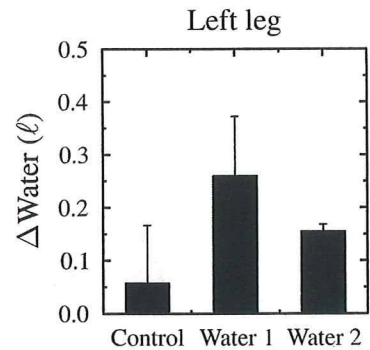


図2.36 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の左脚内水分量変化量。値は平均値±標準誤差。

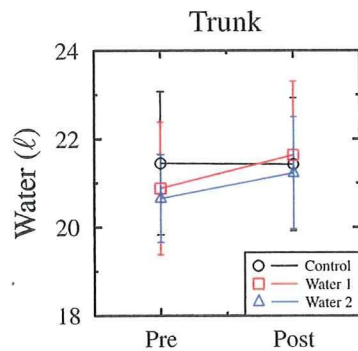


図2.37 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の体幹内水分量。値は平均値±標準誤差。

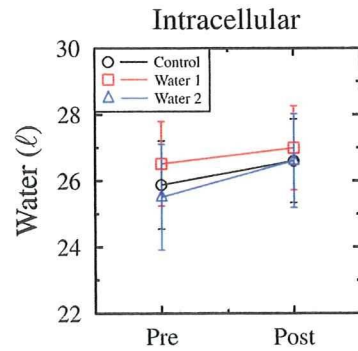


図2.39 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の細胞内総水分量。値は平均値±標準誤差。

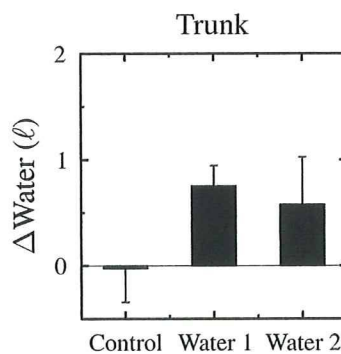


図2.38 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の体幹内水分量変化量。値は平均値±標準誤差。

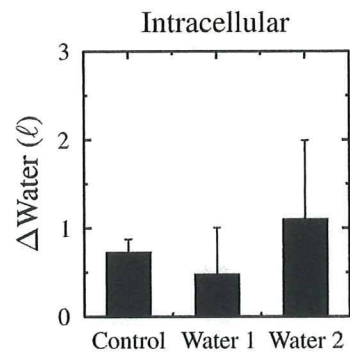


図2.40 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件1 (Water1)、飲水あり条件2 (Water2)でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の細胞内総水分量変化量。値は平均値±標準誤差。

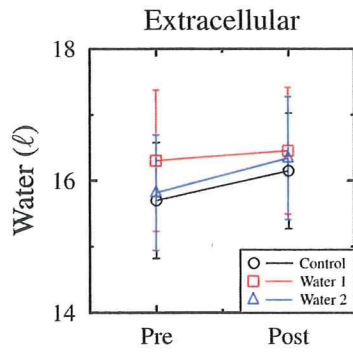


図2.41 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前 (pre) およびB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后 (post) の細胞外総水分量。値は平均値±標準誤差。

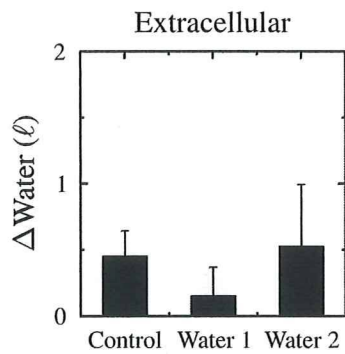


図2.42 飲水なし条件 (Control)、飲水あり条件 1 (Water1)、飲水あり条件 2 (Water2) でのA室 (気温25℃相対湿度50%) 滞在前からのB室 (気温33℃相対湿度50%) 滞在后の細胞外総水分量変化量。値は平均値±標準誤差。

## 分担研究 5

### 5. 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

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
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
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

#### 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視覚反応時間の成績が向上する傾向が観察された。

#### 1. はじめに

熱中症は1968～2007の40年間で6,770件（男性4,063件、女性2,707件）が報告されている。この間、死亡者は少ない年で26件（1982）、多い年では923件（2007）に達している。2006年における熱中症の発生は炎天下での発症が最も多く、その中でも若年層はスポーツ時に、30～50代では労働時に最も多く発症していた。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、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日本語版より算出された必要水分補給量と暑熱環境下での労働による生理的負担について2007年にアメリカ産業保健専門家会議（ACGIH）から出された従来型の水分の取り方に関するガイドラインを基にした水分補給量の2種類の水分摂取条件の適不適と、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。

#### 2. 初年度実験

##### （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。