

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

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いった。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

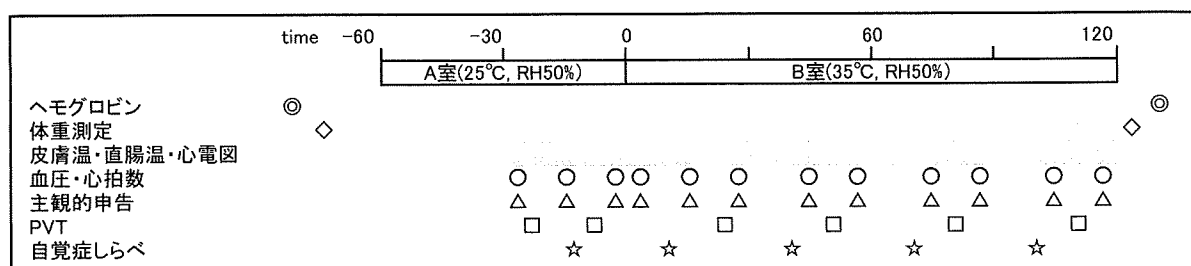


図1 実験スケジュールおよび測定項目

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、前項に示したISO7933モデルより算出された飲水量を摂取した場合(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、

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

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押しボタンを押してその反応時間を測定するものである。

(5) 実験結果および考察

図2~図6に、PVTの測定結果を示す。25°C A室の平均と35°C B室の最初(入室後20分時)と

最後（入室後110分時）のデータを比較した。RRT値とFastest10% RRT値は、C条件では、時間経過に従って成績が悪くなった。一方W条件では、RRT値は35°CB室最初（入室後20分時）に成績が下がったが最後（入室後110分時）には成績は良くなった。Fastest10% RRT値は、W条件下では時間経過にしたがって成績が良くなった。また、RRT値もFastest10% RRT値も25°C A室と35°C B室最初（入室後20分時）はC条件の方が成績が良いが、最後（入室後110分時）はW条件の方が成績が良かった（図2, 3）。

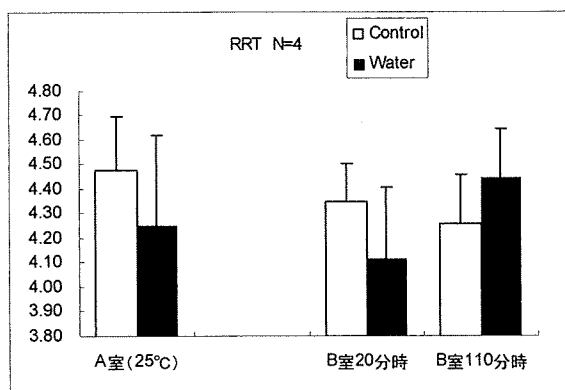


図2 RRTの平均値 (RRT:1/RT (Reaction Time))

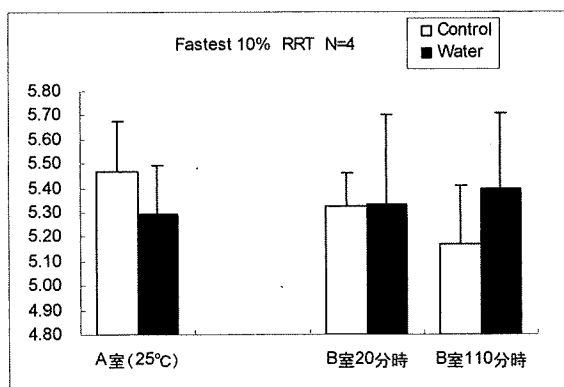


図3 Fastest10%RRTの平均値 (Fastest10%RRT:反応時間が最短のものから10%迄のRRTの平均)

Slowest10% RRT値は、35°C B室最初（入室後20分時）に成績が良くなったが最後（入室後110分時）は悪くなった。C条件の方がW条件より成績が良かった（図4）。

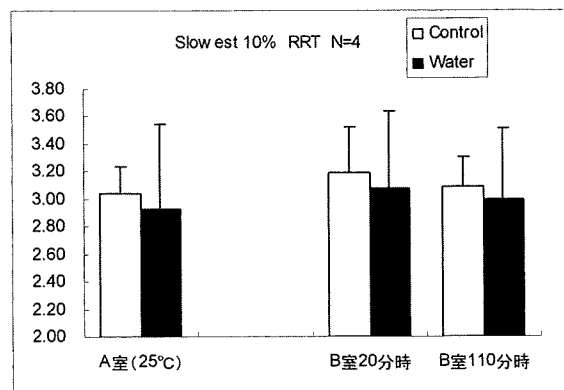


図4 Slowest10%RRTの平均値 (Slowest10%RRT:反応時間が最長のものから10%迄のRRTの平均)

間違い指数Lapseは、4人中1人だけW条件下で大きかった。トータルエラー数には差が認められなかった（図5, 6）。

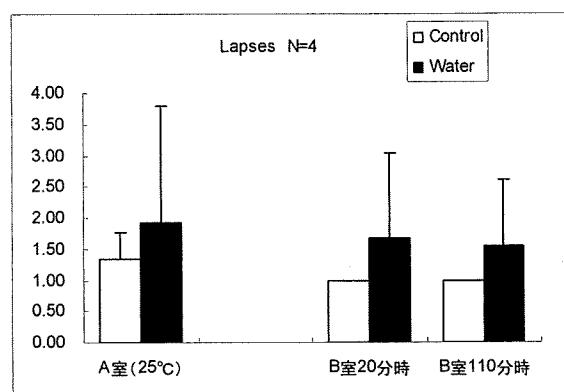


図5 間違い指数Lapseの平均値 (Lapses ; SQR(L) + SQR(L+1), L:RTが500msより大きい回数)

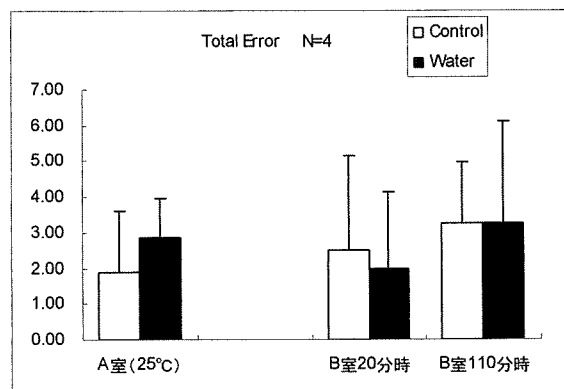


図6 トータルエラー数の平均値

(6) 初年度実験のまとめ

以上、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PVT成績が向上する傾向が観察された。

3. 2年次実験

(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、日本大学の男子学生8名を採用した。表2に被験者の特徴を示す。8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2 被験者の特徴

被験者	身長(cm)	体重(kg)	年齢(歳)
A	174	57	22
B	172	58	20
C	178	78	23
D	162	57	22
E	167	65	21
F	174	55	23
G	170	57	22
H	169	63	22
平均	170.8±4.9	61.3±7.6	21.9±1.0

実験中の被験者の着衣は夏季建設現場作業員をモデルに、半袖Tシャツ・薄手作業服上下・靴下・安全靴・ヘルメット・軍手を着用し、着衣による熱抵抗値は1cloとした。

水分補給条件については、全く水分摂取をしない場合（以下水0条件とする）と、前項に示したISO7933より算出した条件（水1）・ACGIH基準より算出した条件（水2）の3条件とした。

(3) 実験スケジュール

図7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た。その後、あらかじめ準備した着衣を着用し、体重測定を1回目を行なった。以上

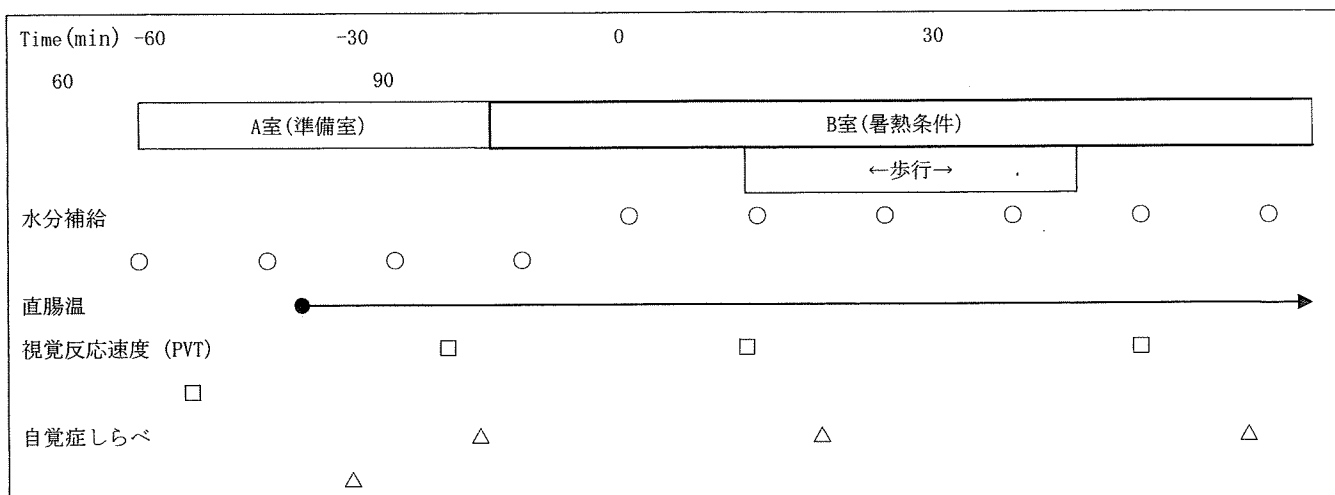


図7 実験スケジュールおよび測定項目

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なった。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行った。30分後、被験者は暑熱環境の人工気候室B室に移動し、90分間滞在した。90分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。

B室内で、座位条件と歩行条件の2条件の運動条件で実験を行った。座位条件では90分間座位、歩行条件では30分の座位の後、30分の歩行、その後30分の座位を実施した。運動条件2種と飲水条件3種の組み合わせで計6条件の比較を行った。

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、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8～9月に実施した。

(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。

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。PVT測定は

座位条件ではB室入室-13分時から計4回、歩行条件時は歩行中を除き計3回測定を行った。また、同時に直腸温・皮膚温・耳内温は1分ごとに専用の器具を使用し1分ごとに計測。心拍数・血圧・脈拍は、簡易測定計を用いて実験開始直後の-27分時とB室入室直後の2分時、歩行終了直後の72分時と-17分時から10分ごとに測定した。

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項目がある。実験ではRT・FRT・SRTのそれぞれの逆数をとったRRT・FRRT・SRRTとerror数、lapseの5項目を使用した。

lapseは次の式で求められる。

$$\text{lapse} = \sqrt{L} + \sqrt{L+1}$$

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段階を、ま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)調査を-13分から4回、歩き条件時は歩行中を除いて3回、PVT測定の直前に行った。

(5) 実験結果および考察

(i) RRT

図8にRRTの成績を示す。グラフは被験者8人のPVT成績の平均を、前室Aでの-13分時の成績との比で示した。基準値より上側が、成績が良いことを示す。

RRTは歩行条件では水1が最も成績が良く、水0でも基準値であるA室の成績を下回ることはなかったが、水2の成績はA室の成績を上回ることはなかった。しかし、座位条件においては水2が最も成績が良く、次いで水0、水1の順に成

績が良かったが、47分時の成績のみ水0の成績は下がっており、A室の成績を下回った。

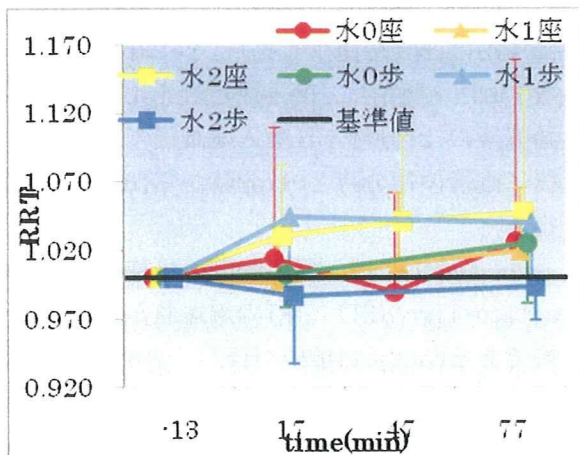


図8 各条件とRRT

(ii) FRRT

図9にFRRTの成績を示す。FRRTはRRTと成績傾向が似ており、歩行条件では水1が最も成績が良く、水0も水2も基準値であるA室の成績を下回ることにはなかった。また、水1と水2の成績は17分時が最も良かったのに対し、水0は77分時が最も成績が良かった。座位条件においては、これもRRTと同じく水2が最も成績が良かったが、FRRTでは水1では17分時に、水0では47分時にどちらも1度だけ、基準値であるA室の成績を下回った。

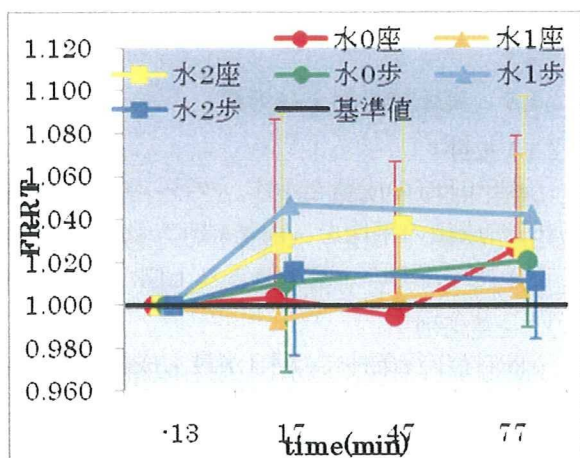


図9 各条件とFRRT

(iii) SRRT

図10にSRRTの成績を示す。SRRTの成績もRRTと似ており、歩行条件では水1が最も成績が良く、次いで水0、水2となっていた。RRTと同じく、水2の成績のみ基準値であるA室の成績を下回っていた。座位条件ではFRRTと同様に、水2が最も成績が良く、水1では17分時に、水0では47分時に、どちらも1度だけ基準値であるA室の成績を下回った。

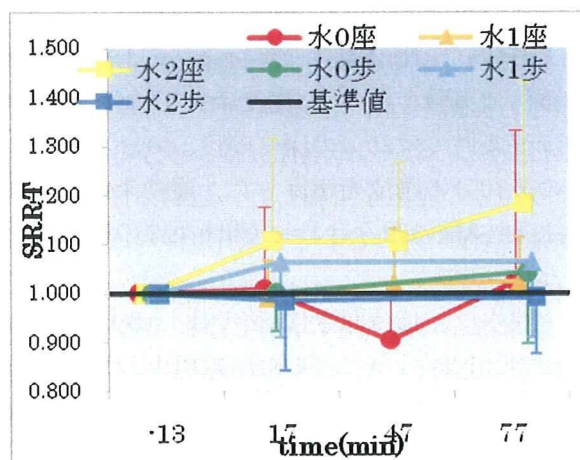


図10 各条件とSRRT

(iv) error数

図11にerror数の成績を示す。error数は、時間ごとにみると-13分時、17分時には水0座が、47分時、77分時には水2座、水1歩の順で成績が良く、-13分時から成績の上下で見るとここでもやはり水1歩、水2座の成績が良い傾向にあった。また、47分時の成績で、座位条件水2のみ成績が下がらなかった。

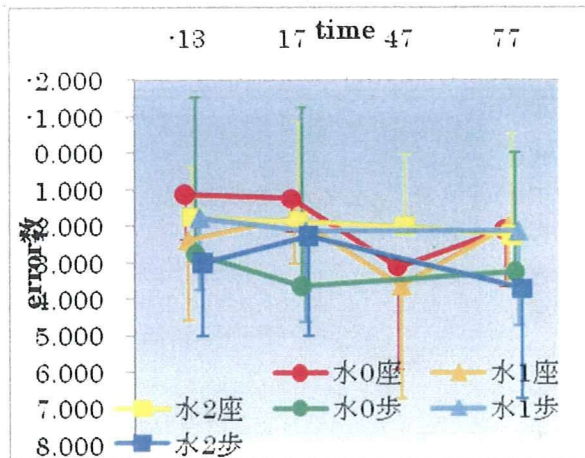


図11 各条件とerror数

(v) lapse

図12にlapse (間違いやすさ指数) の成績を示す。lapseでは、歩行条件では水0が最も良く、次いで水2、水1となった。座位条件では、lapseでも水2が最も成績が良く、次いで水1、水0となった。水0においては47分時の成績が特に悪かった。

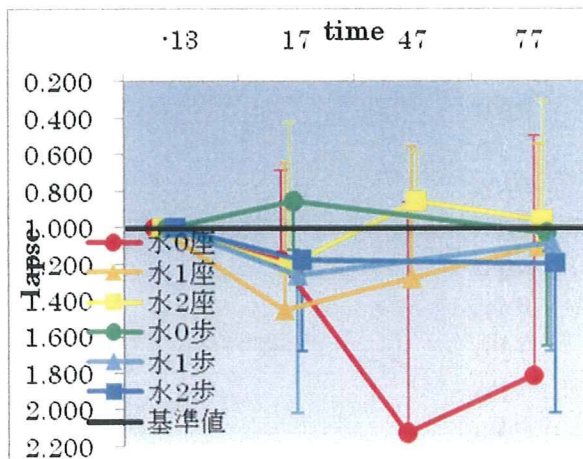


図12 各条件とlapse

(vi) error数・lapsesの運動前後での比較

図13にerror数の運動前後である17分時と77分時の成績を比較したグラフを示す。error数は、歩行条件では水0で成績が良くなり、水2では成績が悪くなったが、水1では成績は悪くならなかった。座位条件では、すべての水条件

で成績が悪くなったのに対し、歩行条件の水2以外では成績が悪くなる傾向は見られなかった。

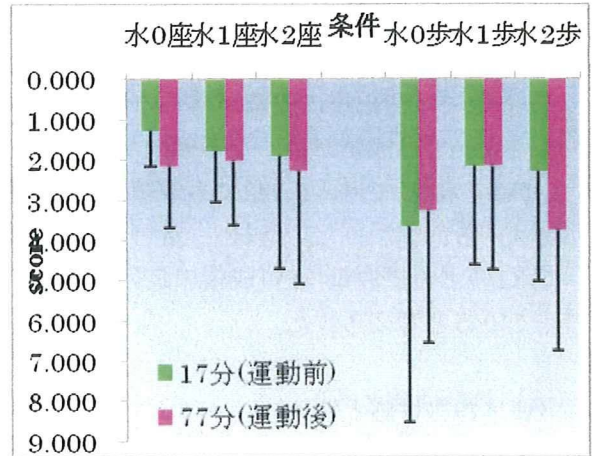


図13 各条件と運動前後のerror数

図14にlapseの運動前後である17分時と77分時の成績を比較したグラフを示す。lapseは、歩行条件では水0で運動後である77分時の成績が17分時の成績より悪くなるのに対し、水1、水2では成績は良くなるのが分かった。座位条件でも同様に、水0では成績が悪くなったが、水1、水2では成績が良くなった。

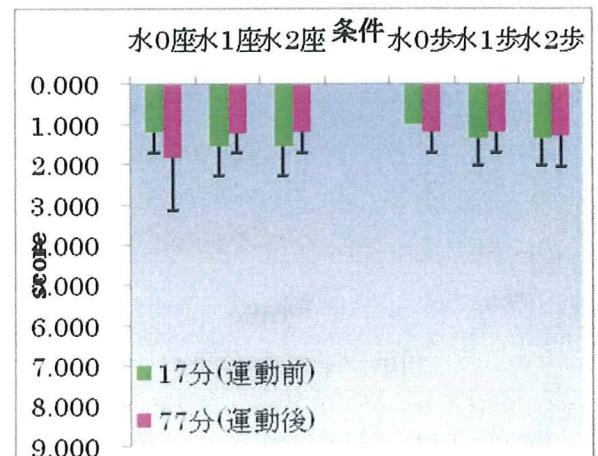


図14 各条件と運動前後のlapse

以上まとめると、RRT成績は座位条件での水2、歩行条件での水1の順に良かった。FRRTでは逆に、歩行条件での水1、座位条件での水2の順に

成績が良かった。すなわち、座位条件には水2の水分摂取量が、歩行条件には水1の水分摂取量がそれぞれ反応時間に良い影響を与えていると考えられた。

error数とlapseの運動前後の成績を見ると、error数では運動後に成績が落ちる傾向が見られ、lapseでは成績が良くなる傾向が見られた。しかし、水1歩ではerror数でも成績が落ちる傾向は見られなかった。つまり、歩行条件において水1の水分摂取量はPVT成績に良い影響を与えていると考えられた。

(vii) ねむけ感とPVT

図15に歩行条件でのねむけ感をグラフに示す。グラフは、PVT成績のerror数・lapseを示すため縦軸の値が小さい方が、成績が良いことを示しており、ねむけ感も縦軸の値が小さい方がねむけ感が下がっていることを示している。

ねむけ感は、水1が最も多く下がっており、水0があまり下がっていなかった。

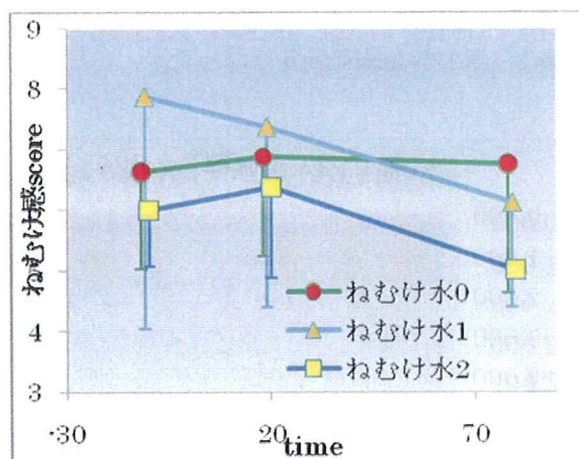


図15 ねむけ感 (歩き)

図16に水0歩のねむけ感とerror数を示す。-13分時から17分にかけては、ねむけ感が上がる傾向にあるのと同様にerror数も上がる傾向にあり、17分時から77分にかけてもねむけ感が下がる傾向にあるのと同様にerror数も少なくなる傾向にあった。水0歩ではねむけ感とer

ror数は連動しているように見られた。

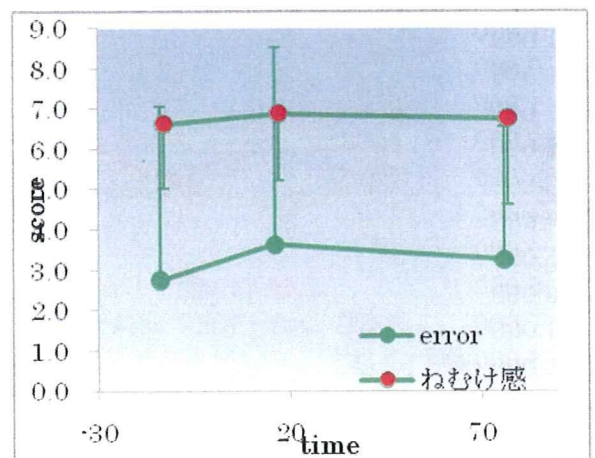


図16 水0歩

図17に水1歩のねむけ感とerror数を示す。ねむけ感は一3分時から77分にかけて下がるのが分かるが、error数は-13分時と77分時を比較するとわずかに増えているが、運動前後である17分時と77分時のみを比較するとerror数は増えていなかった。

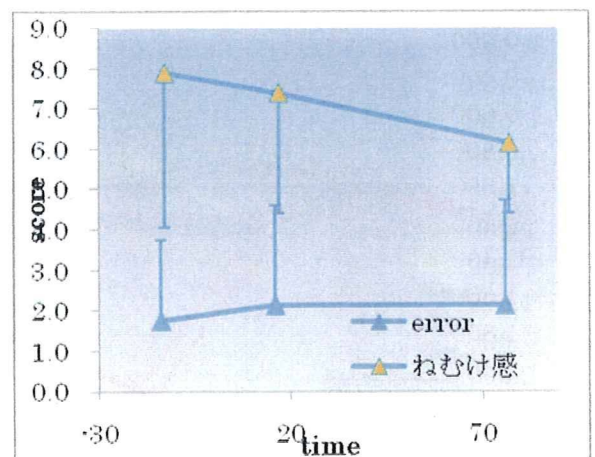


図17 水1歩

図18に歩行条件水2のねむけ感とerror数を示す。-13分時から17分にかけては、ねむけ感上がるが、逆にerror数は減った。17分時から77分にかけてはねむけ感下がるが、逆にerror数は上がった。水0歩とは逆に、水2歩で

はねむけ感とerror数とは逆に動く傾向がみられた。

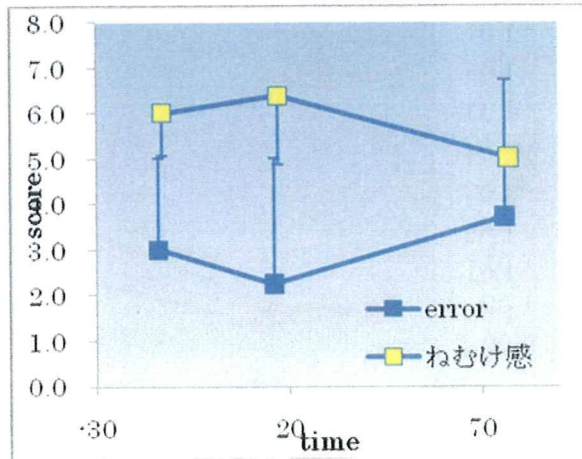


図18 水2歩

図19に歩行条件水0のねむけ感とlapseを示す。-13分時から17分時にねむけ感はあるがlapseは下った。逆に、17分時から77分時にはねむけ感はあるが、lapseは上がった。

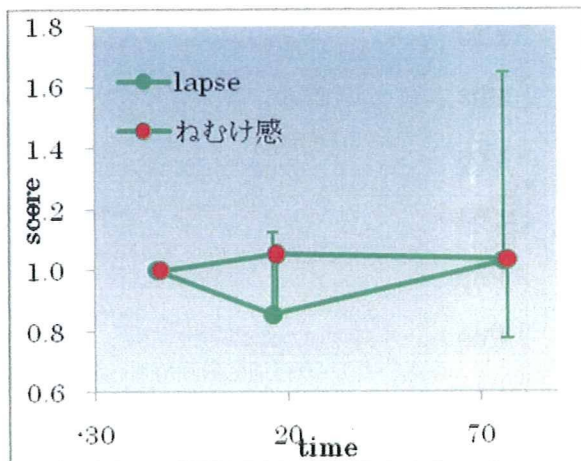


図19 水0歩

図20に歩行条件水1のねむけ感とlapseを示す。-13分時から17分時にかけてはねむけ感はあるが、lapseは逆に下った。しかし、運動前後である17分時から77分時にはねむけ感とlapseの両方ともに下った。

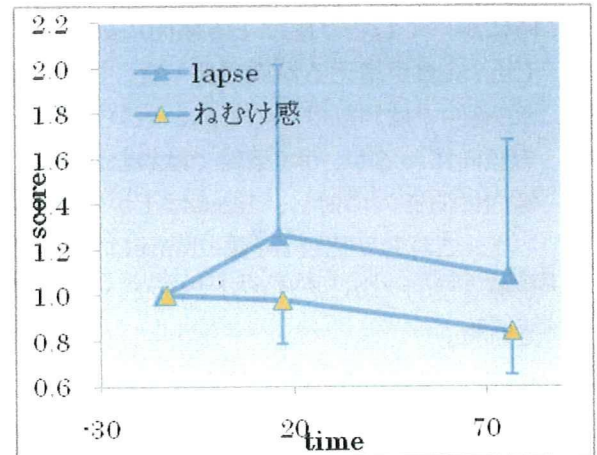


図20 水1歩

図14に歩行条件水2のねむけ感とlapseを示す。-13分時から17分時にかけてはねむけ感と同様にlapseも上がるが、17分時から77分時にはねむけ感はあるが、逆にlapseは上がった。-13分と77分をくらべると、ねむけ感はあるが逆にlapseは上がった。運動前後である17分と77分を比較してもねむけ感とlapseは逆に影響しているようにみえた。

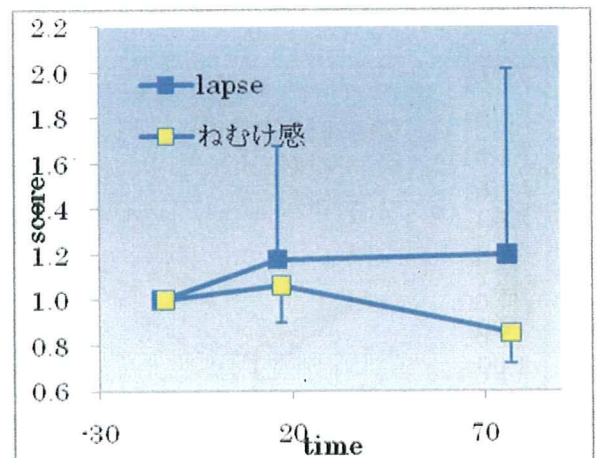


図21 水2歩

以上まとめると、水分摂取量が多くなるにつれねむけ感はある傾向にあった。また、水0・水1条件では17分時から77分時にはねむけ感はある傾向にあり、error数も減る傾向にあった。しかし、水2条件では17分時から77分

時にかけてねむけ感は下る傾向にあるのに対しerror数が増える傾向にあった。また、水1・水2条件ではねむけ感もlapseもどちらも下がる傾向にあるが、水0条件ではねむけ感下る傾向にあるのに対し、lapseは上がる傾向にあった。これらからerror数・lapseはねむけ感に影響を受けるが、それだけではないことが示唆された。

(viii) 直腸温とPVT

図22に歩行条件時の直腸温変化を示す。直腸温は測定結果の中からPVT測定時と同時間の-13分時、17分時、77分時の結果のみを使用している。グラフはPVT成績のグラフと同じように準備室A室での成績である-13分時の成績を基準とした比で示している。また、図19、23、27にはそれぞれ、歩き・水1条件におけるRRT・F RRT・SRRTそれぞれの成績と直腸温との相関図を示す。B室入室後の17分時まではどの水分摂取条件でも直腸温は下がるが、そこから後では摂取水分量が少ないほど上昇度が大きい傾向にあった。

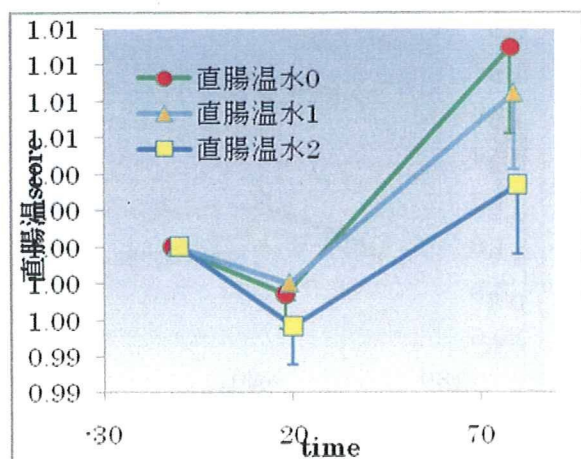


図22 直腸温 (歩き)

図23に歩行条件水0の直腸温とRRT成績を示す。-13分時から17分にかけては、直腸温は下がっているのに対し、RRT成績は上がった。しかし、運動前後である17分時から77分にか

けては、直腸温が上がっているのと同様にRRT成績も上がった。

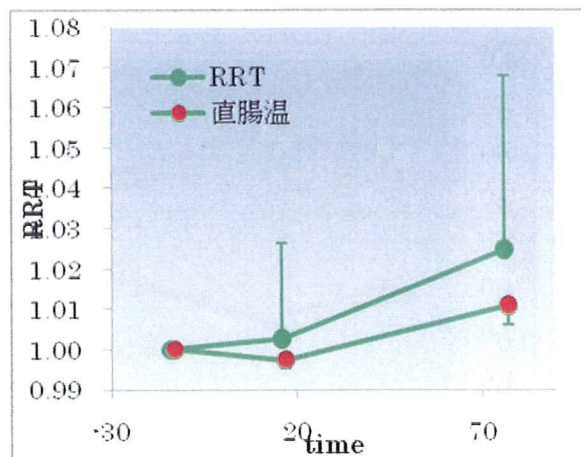


図23 水0歩

図24に歩行条件水1の直腸温とRRT成績を示す。-13分時から17分にかけて直腸温は下がっているのに対し、RRT成績は逆に上がった。17分時から77分にかけては、直腸温は上がっているのに対し、RRT成績は逆に下がった。

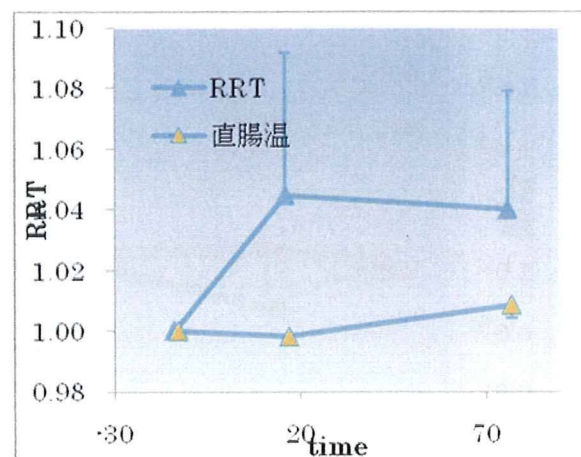


図24 水1歩

図25に歩行条件水2の直腸温とRRT成績を示す。-13分時から17分にかけて直腸温は下がっており、RRT成績も同様に下がった。17分時から77分にかけては、直腸温は上がりRRT成績も同様に上がった。

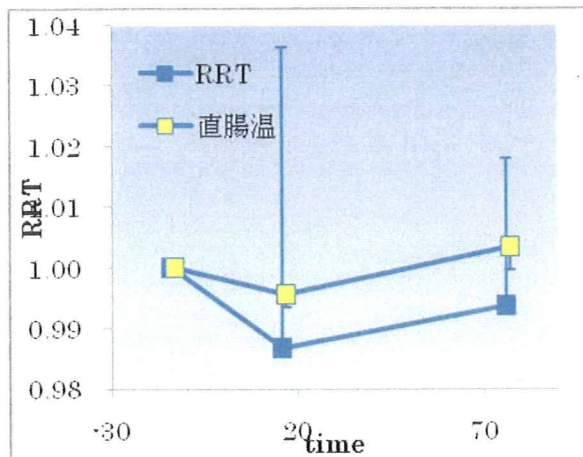


図25 水2歩

図26に縦軸にRRT成績、横軸に直腸温をとってRRT成績と直腸温の相関図を示す。-13分時、17分時、77分時とどの時間を見ても、37°C前後で成績が良くなった。逆に、37°C前後より下がりすぎても上がりすぎてもRRT成績が悪くなる傾向にあることが分かった。

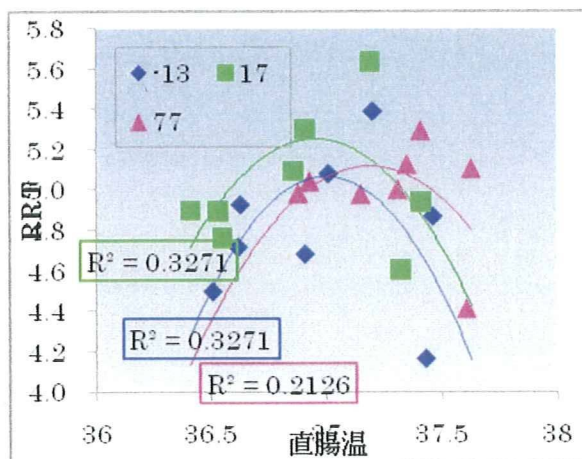


図26 RRT-直腸温

以上まとめると、直腸温は時間経過とともに上がるが、摂取水分量が多い条件ほど上昇度合いは少なくなることが分かった。RRT成績との比較を見てみると、水0・水2条件で運動前後である17分時から77分時にかけて直腸温が上がりRRT成績も良くなる傾向にあることが分かった。しかし、水1条件では直腸温は上がってい

るがPVT成績は悪くなる傾向にあった。RRTと直腸温の相関から直腸温37°C前後でのRRT成績は良い傾向にあるがそれより高すぎても低すぎてもRRT成績が悪くなる傾向にあることが分かった。

(6) 2年次実験のまとめ

以上、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°C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、ISO7933より算出した水1（座：487±30.41g、歩：655±43.09g）とACGIH基準の水2（座：740g、歩：1000g）の2条件の水分摂取量は、運動条件によりそれぞれPVTにおける効果は異なり、座り条件ではちょうど良いと思われるACGIH基準だったが、歩き条件においてはACGIH基準では多すぎる結果となり、暑熱環境下での作業時には、水分摂取を行うことがねむけ感や直腸温の過剰な上昇を抑えることができ、視覚反応速度の低下を抑制する効果があることが分かったが、水分摂取による抑制効果はそれぞれ異なり、過度な水分摂取は視覚反応速度においては逆効果であることがわかった。

4. 総括

1年次の実験では、水を飲んだ場合と飲まない場合を単純に座位条件で比較して水を飲んだほうがわずかにPVT成績が向上することを示した。2年次の実験では、飲む水の量や運動負荷（歩行条件）についても考慮して検討したところ、やはり水を飲んだほうがPVT成績にとって有利であることがわかった。

II. 研究成果の刊行に関する一覧表

報告書

発表者氏名	報告書名	巻号	出版地	出版年	ページ
澤田晋一 上野 哲 東郷史治 榎本ヒカル	暑熱作業時の必要水分補給量に関する研究 厚生労働省科学研究費補助金 労働安全衛生総合研究事業 総括・分担研究報告書	平成20年度	川崎	2009年	1-22
澤田晋一 上野 哲 東郷史治 榎本ヒカル 安田彰典	暑熱作業時の必要水分補給量に関する研究 厚生労働省科学研究費補助金 労働安全衛生総合研究事業 総括・分担研究報告書	平成21年度	川崎	2010年	1-146
澤田晋一 上野 哲 榎本ヒカル 東郷史治 安田彰典 岡 龍雄 呂 健	熱中予防対策の最新動向－暑熱作業時の必要水分補給量に関する研究－ 平成21年度労働安全衛生総合研究講演会 配付資料集 主催 中央労働災害防止協会	平成21年度	東京	2010年	71-133

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
Satoru Ueno, Shin-ichi Sawada, Thomas E. Bernard	Modification to predicted heat strain (PHS) (ISO7933).	John W. Castellani, Thomas L. Endrusick	Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Ergonomics, 2009, Boston, USA CD-ROM	Environmental Ergonomics XII	Boston	2009	1-5
Satoru Ueno, Ronald Long, Skai W. Schwartz, Candi D. Ashley, Shin-ichi Sawada, Thomas E. Bernard	UTILITY OF PREDICTED HEAT STRAIN TO LIMIT SHORT-TERM HEAT STRESS EXPOSURES	John W. Castellani, Thomas L. Endrusick	Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Ergonomics, 2009, Boston, USA CD-ROM	Environmental Ergonomics XII	Boston	2009	6-10
澤田晋一	温熱環境の人間工学－暑熱負担予測指標の計算による暑熱ストレスの解析	日本人間工学会ISO/TC159(人間工学)国内対策委員会編	人間工学ISO/JIS規格便覧2009	日本人間工学会	東京	2009	55-56

澤田晋一	作業温熱条件	日本作業環境測定協会	労働衛生工学とリスク管理	日本作業環境測定協会	東京	2009	54-77
澤田晋一 榎本ヒカル	体温調節と温熱条件	紀田文樹編	新版建築物の環境衛生管理, 上巻	(財)ビル管理教育センター	東京	2009	263-269
澤田晋一	職業性暑熱障害と暑熱許容基準	澤田晋一ほか編	からだと温度の事典	朝倉書店	東京	2010	424-426
澤田晋一	作業温熱条件の労働衛生管理対策	澤田晋一ほか編	からだと温度の事典	朝倉書店、	東京	2010	446-448
澤田晋一	作業温熱ストレスの評価	澤田晋一ほか編	からだと温度の事典	朝倉書店	東京	2010	455-458
澤田晋一	作業温熱ストレスの評価	澤田晋一ほか編	からだと温度の事典	朝倉書店	東京	2010	459-461
澤田晋一	屋外作業温熱条件	澤田晋一ほか編	からだと温度の事典	朝倉書店	東京	2010	465-468

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Togo, F.and M. Takahashi.	Heart rate variability in occupational health – a systematic	Industrial Health	47	589-602	2009
澤田晋一	わが国の職業性熱中症の発生状況と予防対策の最新動向	医学のあゆみ	230(12)	1080-1082	2009
澤田晋一	職場における熱中症予防対策の基礎と実践	労働基準広報	6	24-30	2009
上野 哲 澤田晋一	ISO7933を用いた夏季気象データに基づく暑熱負担予測	日本生気象学会雑誌	46(3)	S46	2009
上野 哲、岡 龍雄、榎本ヒカル、榎原 洋子、澤田晋一、久永 直見	真夏の建設業労働者の環境・生理学的測定値を用いたISO7933による暑熱ストレス予測	産業衛生学雑誌	51巻臨時増刊号	340	2009
榎本ヒカル、澤田晋一、上野哲、岡龍雄	屋外暑熱環境における保冷剤入りベスト着用効果について	産業衛生学雑誌	51巻臨時増刊号	255	2009
上野 哲、岡 龍雄、榎本ヒカル、榎原 洋子、澤田晋一、久永 直見	真夏の建設業労働者の環境・生理学的測定値を用いたISO7933 による暑熱ストレス予測	産業衛生学雑誌	51巻臨時増刊号	340	2009
榎本ヒカル、澤田晋一、東郷史治、安田彰典、岡龍雄、呂健、上野哲	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	14特別号(1)	126-127	2009
榎本ヒカル、澤田晋一、上野哲、岡龍雄、安田彰典	建設作業現場向け保冷剤入りベストの着用効果について	第33回人間-生活環境系シンポジウム報告集		145-146	2009

藤井隆介, 榎本ヒカル, 安田彰典, 岡 龍雄, 上野 哲, 澤田晋一, 池田耕一	暑熱環境下での水分補給の違いが人体反応に及ぼす影響—その1 生理的反応について—	日本生理人類学会第3回研究奨励発表会梗概集		4	2009
桂 正志, 榎本ヒカル, 安田彰典, 岡 龍雄, 上野 哲, 澤田晋一, 池田耕一	暑熱環境下での水分補給の違いが人体反応に及ぼす影響—その2 心理的反応について—	日本生理人類学会第3回研究奨励発表会梗概集		5	2009
中里暢尋, 安田彰典, 榎本ヒカル, 岡 龍雄, 上野 哲, 澤田晋一, 池田耕一	暑熱環境下での水分補給の違いが視覚反応時間に及ぼす影響	日本生理人類学会第3回研究奨励発表会梗概集		11	2009
高橋志生, 榎本ヒカル, 安田彰典, 岡 龍雄, 東郷史治, 上野 哲, 澤田晋一, 佐々木司, 小松泰士	高温環境下での歩行時の水分補給が体液性状および循環機能に及ぼす影響	日本生理人類学会第3回研究奨励発表会梗概集		12	2009
澤田晋一	産業看護に求められる工学的視点 温熱環境の改善と対策	産業看護	2(1)	64-70	2010
澤田晋一	熱中症を防ぐ工夫は?特集-Q & A 肥満	肥満と糖尿病	9(2)	255-227.	2010
澤田晋一	建設現場の事例に学ぶ暑熱リスクと熱中症予防対策	建設労務安全	22(5)	2-11	2010
澤田晋一, 岡龍雄, 安田彰典, 榎本ヒカル, 上野哲, 東郷史治, 小林廉毅	種々の暑熱ストレス条件下での生理的暑熱ストレインと自発的水分補給量の検討	産業衛生学雑誌	52巻臨時増刊号	474	2010
上野哲, 澤田晋一, 岡龍雄, 山口さち子, 大谷勝己, 榎原洋子, 久永直見	夏季の建物耐震工事従事者の脱水状態に関する調査	産業衛生学雑誌	52巻臨時増刊号	475	2010
山口さち子, 上野哲, 澤田晋一, 岡龍雄, 大谷勝己, 榎原洋子, 久永直見	夏季の耐震補強工事作業者の労働と健康に関する聞き取り調査	産業衛生学雑誌	52巻臨時増刊号	520	2010
榎本ヒカル, 澤田晋一, 安田彰典, 岡龍雄, 東郷史治, 上野哲, 池田耕一	PHSモデルによる水分補給が暑熱環境における人体に及ぼす影響	日本生理人類学会誌	15特別号(1)	92-93	2010
榎本ヒカル, 澤田晋一, 安田彰典, 岡龍雄, 東郷史治, 上野哲	暑熱作業環境下での水分補給が人体生理反応に及ぼす影響について	産業衛生学雑誌	52臨時増刊号	474	2010
澤田晋一, 岡龍雄, 安田彰典, 榎本ヒカル, 上野哲, 東郷史治, 小林廉毅	種々の暑熱ストレス条件下での生理的暑熱ストレインと自発的水分補給量の検討	産業衛生学雑誌	52臨時増刊号	474	2010
安田彰典, 澤田晋一, 榎本ヒカル, 岡龍雄, 東郷史治, 上野哲	暑熱作業環境下での水分補給が視覚反応時間(PVT)に及ぼす影響について	産業衛生学雑誌	52臨時増刊号	523	2010
岡龍雄, 榎本ヒカル, 澤田晋一, 安田彰典, 東郷史治, 上野哲	暑熱作業環境下での水分補給が人体心理反応に及ぼす影響について	産業衛生学雑誌	52臨時増刊号	523	2010

III. 研究成果の刊行物・別刷

MODIFICATIONS TO PREDICTED HEAT STRAIN (PHS) (ISO7933)

Satoru Ueno¹, Shin-ichi Sawada¹, Thomas E. Bernard²

¹Japan National Institute of Occupational Safety and Health, Kiyose, Tokyo, Japan

²University of South Florida, Tampa FL, USA

Contact person: uenos@h.jniosh.go.jp

INTRODUCTION

The Predicted Heat Strain (PHS) is a rational model for heat stress exposure assessment. It was proposed by Malchaire et al. (2001) and was adopted by the International Organization for Standardization (ISO) as ISO7933 in 2004. The key predictions of the PHS are rectal temperature (T_{re}) and sweat rate. These predictions were validated for laboratory and field trials as part of the BIOMED II project (Malchaire et al 2002). A time limit for an exposure is provided based on T_{re} reaching 38 °C or a cumulative sweat loss limit that is based on acclimation state and percent of population.

Important factors in the determination of the time limit include environmental conditions, metabolic demands, and clothing. Since the publication of PHS and ISO7933, the ISO has published a standard for clothing that includes adjustments for insulation and evaporative resistance based on wind speed, walking speed, and walking direction (ISO9920-2007). These adjustments differ from those used in ISO7933. One purpose of the effort reported in this paper was to include the clothing adjustments (called resultant insulation and evaporative resistance in ISO9920) in the PHS model.

A further change in the model was added to better account for recovery. Specifically, there were conditions under which T_{re} would not return to an appropriate baseline. That is, it would remain elevated above the metabolically-driven equilibrium temperature when the environment would allow it to return to the expected baseline. In addition, there were some circumstances in which the T_{re} would find a level below the metabolic equilibrium temperature.

This paper describes two major and one minor modifications to the PHS model and discusses some of the implications of the changes.

METHODS

The first step was to change the PHS methods for estimating the dynamic insulation and evaporative resistance, called resultant values in ISO9920. The methods differed in the way a correction factor was computed to adjust the static value to a dynamic (resultant) value. In ISO7933, the correction factor for evaporative resistance (CF_{re}) was calculated by using the correction factor for total insulation (CF_i) divided by the correction factor for clothing permeability index. In ISO9920, the CF_{re} is based on either the CF_i or a function of wind and walking speeds. For this paper, the CF_{re} was based on CF_i .

We compared the C_{Fi} and C_{Fre} estimated by ISO7933 and ISO9920. Because both air velocity and walking velocity were included in the formula for C_{Fi}, we calculated the independent effects of air velocity and walking velocity to the C_{Fi} and C_{Fre}. Because the formula for C_{Fi} changes for clothing less than 0.6 clo, C_{Fi} and C_{Fre} were compared at 0.3 clo and 1.0 clo.

There were times when the core temperature did not return to the equilibrium level associated with the metabolic rate. While the amount of heat loss needed to reduce the core temperature was computed and factored into the model, this was not sufficient to bring the core temperature all the way down (and sometimes it was too much and the core temperature was reduced below the equilibrium value for the metabolic rate). To account for this discrepancy, two steps were taken. The first was to assess the elevation of the current core temperature above the equilibrium value. If E_{req} was less than zero and there was still a core temperature elevation, the required sweat rate (SW_{req}) was adjusted proportionately to the difference. To fine tune the outcome, E_p and SW_p were set to zero when the equilibrium core temperature was reached.

Finally, as a minor modification, posture adjustments to the available surface area for convection and maximum evaporative cooling were instituted for sitting (0.7) and squatting (0.9). It was assumed that there was no conduction across the surfaces in contact with the body during sitting.

After changing the PHS code to compute C_{Fi} and C_{Fre} by either method, the code was verified using the standard test conditions in ISO7933. Values for final T_{re} , water loss, $D_{lim\ tre}$, $D_{limloss50}$, $D_{limloss95}$ by PHS model (ISO7933) and PHS_m (PHS with the changes). We also calculated $D_{lim\ tre}$ by PHS model and PHS_m using trial conditions used for high heat stress exposure conditions (safe exposure times less than 120 min) for 142 trials (Bernard and Ashley 2009).

An Excel workbook with a VBA macro was used to compute PHS and PHS_m.

RESULTS

The first step in the PHS modification process was to examine the differences between C_{Fi} and C_{Fre} as specified by ISO7933 and ISO9920 as a function of air speed, walking speed, and clothing level. Fig. 1 illustrates the comparison.

C_{Fi} was not substantially different for either method, and decreased with air and walking speed. C_{Fre} by ISO9920 was larger than ISO7933, and the difference increased with either air or walking speed. As a note, the difference in methods for estimating C_{Fre} in ISO9920 was less than 5% over the same conditions.

The outcomes by PHS and PHS_m were compared using the standard test conditions in ISO7933 (Table 1). The calculation time limit was 480min. PHS_m showed higher Final T_{re} than PHS. The temperature difference between PHS and PHS_m increased when the final T_{re} increased. Maximum allowable exposure time for heat storage ($D_{lim\ tre}$) was shorter in PHS_m than PHS. In example 3 and 7, PHS did not have limitation but PHS_m had limitation time of 117 min and 196 min respectively.

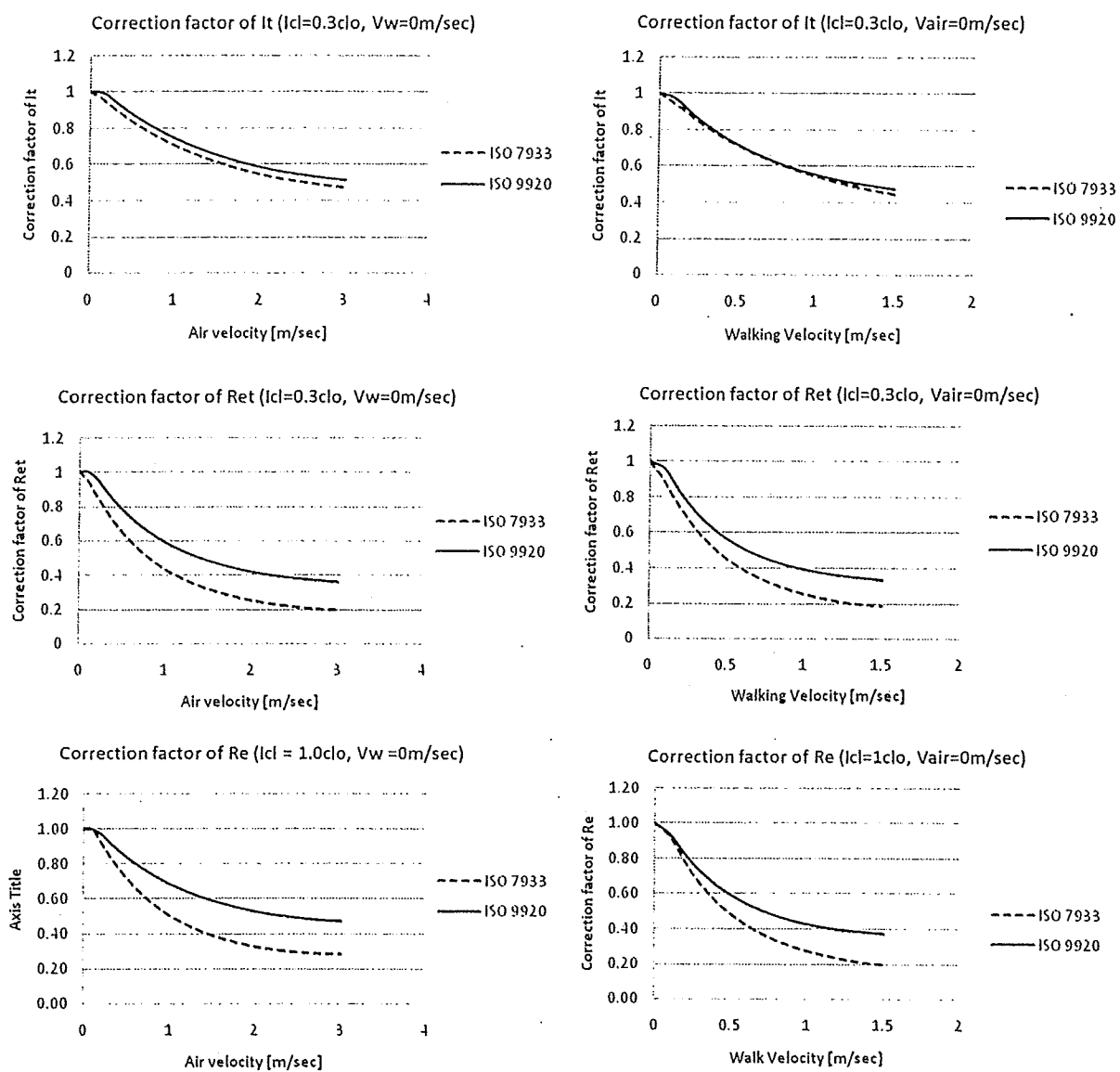


Fig. 1. Correction factors for I_{cl} and R_{et} calculated by ISO7933 and ISO9920.

Table 1. Differences in outcomes for standard test conditions

Parameters	1		2		3		4		5		6		7		8	
Acclimatized	Yes		Yes		Yes		No		No		No		Yes		Yes	
Posture	Standing		Standing		Standing		Standing		Standing		Standing		Standing		Standing	
$t_a(^{\circ}\text{C})$	40		35		30		28		35		34		40		40	
$P_a(\text{kPa})$	2.5		4.0		3.0		3.0		3.0		3.0		3.0		3.0	
$t_r(^{\circ}\text{C})$	40		35		50		58		35		34		40		40	
$v_a(\text{m/s})$	0.3		0.3		0.3		0.3		0.3		0.3		0.3		0.3	
$M(\text{W/m}^2)$	150		150		150		150		206		150		150		150	
$I_{cl}(\text{clo})$	0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		1.0		0.4		0.4	
$\theta(\text{degree})$	0		0		0		0		0		0		0		90	
Walk speed (m/s)	0		0		0		0		0		0		0		1	
Output	PHS	PHSm	PHS	PHSm	PHS	PHSm	PHS	PHSm	PHS	PHSm	PHS	PHSm	PHS	PHSm	PHS	PHSm
Final $t_{re}(^{\circ}\text{C})$	37.5	37.7	39.8	41	37.7	39	41.2	42.5	39.2	41.3	41	42.5	37.5	38.4	37.6	37.6
Water loss(g)	6174	7209	6938	6973	7167	7206	5807	5807	7252	7371	5551	5642	6691	7215	5386	5541
$D_{lim\ tre}(\text{min})$	480	480	74	56	480	117	57	44	69	45	67	54	480	196	480	480
$D_{limloss\ 50}(\text{min})$	439	378	385	382	380	377	466	466	371	360	480	479	406	377	480	480
$D_{limloss\ 95}(\text{min})$	297	257	256	256	258	255	314	314	246	237	317	314	275	255	339	329

To compare the differences of $D_{lim\ tre}$ calculated by PHS and PHS_m, 142 experimental conditions from a previous study were used. $D_{lim\ tre}$ was longer in PHS than in PHS_m (Fig. 2). When the $D_{lim\ tre}$ was below 20 min, PHS and PHS_m were about the same value. As $D_{lim\ tre}$ increased, the difference became larger.

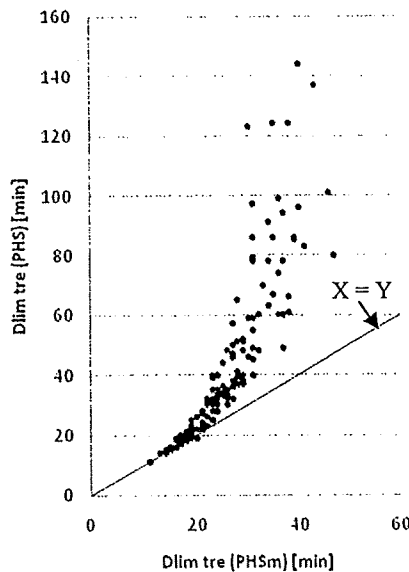


Fig. 2. Differences in predicted time limit by PHS and PHS_m based on experimental trials for short term exposures.

To illustrate the code changes for recovery to the equilibrium core temperature, T_{re} time course for an exposure and recovery by PHS, PHS_m, PHS_{ce} (core equilibrium included in PHS), PHS_{mce} (core equilibrium included in PHS_m) (see Fig. 3). The faster rate of rise was expected for PHS_m. The recovery to different levels from the different levels of rectal temperature without the code adjustment was also expected.

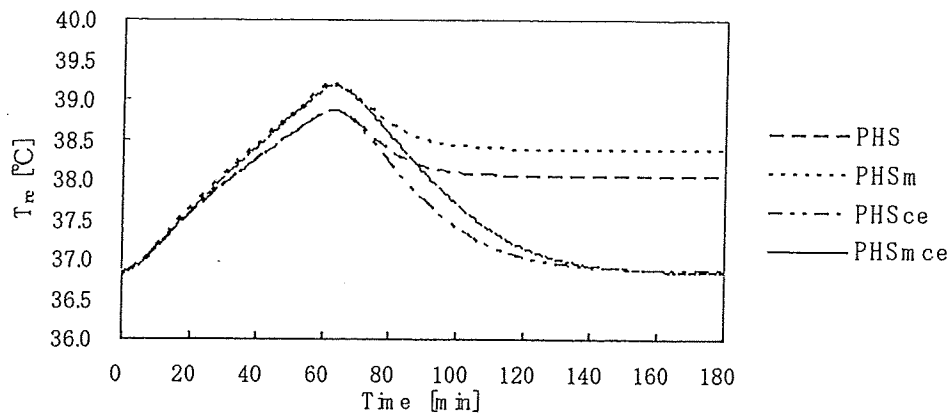


Fig. 3. Recovery of T_{re} calculated by four variations of the PHS model.

CONCLUSIONS

By introducing the dynamic correction factor of clothing insulation and evaporative resistance of ISO9920 (PHS_m) into ISO7933 (PHS), there was little change in the total dynamic (resultant) insulation, but the total dynamic evaporative resistance was higher for PHS_m. Thus the predicted heat strain was greater in PHS_m than PHS. This trend was seen both in the test scenarios published in ISO7933 and from a set of experimental data.

After the elevation of current core temperature above equilibrium temperature was used to adjust predicted sweat rate, T_{re} returned to the equilibrium temperature as intended.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported in part by a grant from the US National Institute for Occupational Safety and Health (1R01 OH03983) and a grant from the Ministry of Health, Labour and Welfare of Japan (H20-Roudou-Ippan-007); and its contents are solely the responsibility of the authors and do not necessarily represent the official views of NIOSH or the CDC.

REFERENCES

- Bernard, TE and CD Ashley (2009) Short-term heat stress exposure limits based on wet bulb globe temperature adjusted for clothing and metabolic rate. *J Occ Env Hyg* (in press)
- ISO 7933 (2004) Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.
- ISO 9920 (2007, corrected 2008) Ergonomics of the thermal environment – Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble.
- Malchaire J et al. (2001) Development and validation of the predicted heat strain model. *Ann Occup Hyg* 45, 123-135.
- 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.