

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19800029
 研究課題名（和文）身体特性および運動強度を考慮した水中運動時における温熱的快適性の推定手法の開発
 研究課題名（英文）Development of thermal comfort estimation method during water exercise concerning physical characteristics and exercise intensity
 研究代表者
 若林 斉（WAKABAYASHI HITOSHI）
 九州大学・大学院芸術工学研究院・学術研究員
 研究者番号：50452793

研究成果の概要：水泳プールを想定した水温（26～33℃）、気温（21～31℃）条件を実験室において設定し、胸部水位まで水浸した際の温冷感を水温、気温から推定する予測式を求めた。その結果、この環境設定範囲では水温条件がより温冷感に寄与することが示された。また、水泳現場におけるフィールド調査に基づき、環境条件および身体特性と水着条件を考慮した温冷感予測式を求め、予測式に基づき3要因から構成される水泳授業時の温熱的快適範囲を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,320,000	0	1,320,000
2008年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,670,000	405,000	3,075,000

研究分野：環境生理学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：水中環境、水中運動、体温、温冷感、温熱的快適感、フィールド調査

1. 研究開始当初の背景

これまでに、水中環境で温熱的に快適に運動を行うことを目的として研究をおこなってきた中で、環境条件や運動強度、身体特性、着衣条件などが体温変化や温熱的快適性に影響を及ぼす結果が示された。このような複合的な要素をひとつの指標で表すことができれば、水泳授業の実施環境の基準等を示すことができ、水中環境における運動時の快適条件について、環境条件、運動強度、身体特性、着衣条件を複合的に考慮した温熱環境評価基準を開発する必要性は高いと考えられた。

気中環境における温熱環境指標は古くから示されており、気温・湿度・風速・熱放射などの環境条件と代謝量・着衣量などの人体側条件を温熱環境要素として、新有効温度などの温熱環境指数が開発され、それらの温熱環境指標を元に居住空間や作業空間の快適性の評価が行われてきた。一方で、水中環境における温熱環境指標の検討としては、水難事故等を想定した20℃以下の低水温環境における生存可能時間の推定が行われているが、水中での温熱的快適性を評価した研究は見られていない。

スポーツ・健康科学の視点から水泳プール

などにおける水泳・水中運動などの活動の際の温熱環境評価基準を示すには、温熱的快適性の評価が必要と考えられ、本研究テーマとして、水中環境における温熱的快適性の推定手法の開発を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究は、従来検討されなかった水泳プールなどにおける水泳・水中運動などの活動の際に実用可能な温熱環境評価基準として、水中環境における温熱的快適性の推定手法を開発することを目的とした。この推定手法には、水温・気温などの環境要素と運動強度・身体特性・着衣条件などの人体側要素の複合的な作用が考慮される。本研究の目的を達成するため、以下の実験を設定した。

(1) 水浸安静実験

水中運動時における環境条件の主要な要素である水温と気温が温熱的快適性に及ぼす影響について、水浸安静時における生理心理応答から検討し、水温および気温から温熱的快適性を推定した。同時に身体特性の影響を含めた温熱的快適性の推定手法の開発を行った。

(2) 水中運動実験

上記の水浸安静実験により環境条件を中心に温熱的快適性の評価を行ったのに対し、人体側の要素として、身体特性および運動強度を含めた検討を行った。

(3) フィールド調査

実験室環境で行った検討に対して、水中運動現場におけるフィールド調査により温熱環境指標と主観応答および身体特性のデータを多数サンプルし、水中運動時の温熱的快適性評価手法の実用化に向けた検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 水浸安静実験

九州大学芸術工学研究院に設置された水浸実験室において、成人男性 8 名を対象に 60 分間の胸部水位水浸安静実験を行った。水浸部位の体表面積比は 56.5%、非水浸部位が 43.5%であった。環境条件は、水泳プールを想定して、水温 (T_w) 26, 29, 33°C の 3 段階、気温 (T_{air}) 21, 26, 31°C の 3 段階に設定した。湿度は全条件で 50%RH に制御した。

直腸温 (T_{re})、皮膚温 (T_{sk})、酸素摂取量、呼吸交換比、皮膚血流、血圧を測定した。皮膚血流は前腕部においてレーザードップラー血流計により測定し、平均血圧 (MBP) で除して皮膚血管コンダクタンス (CVC) を求めた。酸素摂取量および呼吸交換比から産熱量 (M) を算出した。また、温冷感 (TS) および温熱的快適感 (TC) を測定した。

水浸 60 分後のデータを用いて、相関分析を行った。また、TC および TS を従属変数とし、 T_w 、 T_{air} および身体特性を独立変数として重回帰分析を行った。

(2) 水中運動実験

九州大学芸術工学研究院に設置された水浸実験室において、成人男性 8 名を対象に 60 分間の膝伸展運動を行った。運動負荷には自作した水中膝伸展運動負荷装置 (Fig. 1) を用いて、両脚による膝伸展運動を毎分 25 回の頻度で行った。運動強度は事前に漸増負荷法により測定した最大負荷時の重量の 20% および 40% 重量による 2 段階とした。

環境条件は水温 26, 29°C の 2 段階とし、気温 27°C、湿度 50%RH に制御した。

実験中に水浸安静実験と同様の測定項目を測定した。

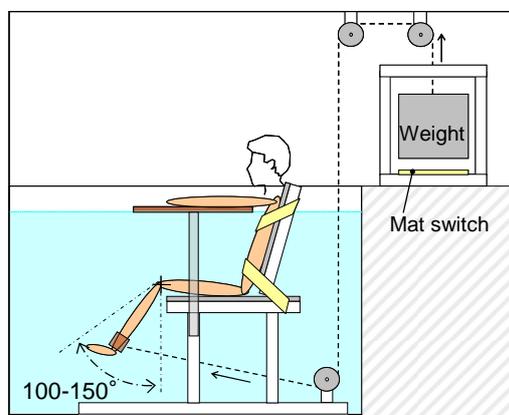


Fig. 1 Scheme of the underwater knee extension exercise device

(3) フィールド調査

筑波大学水泳研究室の野村武男教授と共同で、水中運動教室においてフィールド調査を行った。中高齢者を中心に約 100 名 (延べ 160 名) 分の温冷感申告および身体特性、運動中の心拍数を測定し、教室中の水泳プール環境条件 (水温, 気温, 湿度) を測定した。また、小学校高学年児童 68 名 (延べ 443 名) を対象に 8 回の水泳授業を行い、授業終了時の児童の温冷感および身体特性、水泳プール環境条件 (水温, 気温) のデータを元に温冷感を従属変数とし、環境条件、身体特性、水着条件 (普通水着: NSS または保温水着: TSS) の 3 要因を独立変数として重回帰分析を行い、温冷感予測式を求めた。

4. 研究成果

(1) 水浸安静実験

水浸 60 分後における各指標の相関分析を行い、相関係数を Table 1 に示した。産熱量と環境条件の間には相関関係は見られな

った。前腕部皮膚血流量と気温の間に相関関係が見られたが ($r=0.45$)、水温とは相関が見られなかった。これは、前腕部が非水浸部位であったためと考えられ、水浸部位における皮膚血流応答を測定する必要性が示唆された。一方で、平均血圧は水温と相関関係が見られ ($r=-0.34$)、気温とは相関が見られなかった。CVCは気温 ($r=0.50$) および水温 ($r=0.38$) と相関関係が見られた。また、水浸 60 分後における直腸温と被験者の平均皮下脂肪厚 ($r=0.45$) および体脂肪率 ($r=0.53$) に相関関係が見られた。

Table1 Correlation matrices for thermoregulatory responses and environmental conditions at 60 min immersion

	T_{water}	T_{air}	T_{re}	T_{sk}
T_{re}	0.27	-0.07	-	-
T_{sk}	0.89*	0.51*	0.21	-
M	-0.22	-0.15	0.29	-0.24
LDF	0.28	0.45*	0.03	0.45*
MBP	-0.34*	-0.26	0.17	-0.40*
CVC	0.38*	0.50*	-0.02	0.56*

*: $p < 0.05$

重回帰分析の結果、水温および気温を有意な説明変数とする以下の重回帰式が得られた。皮下脂肪厚や体脂肪率等の身体特性と直腸温変化に相関関係が見られたが、身体特性に関する項目は重回帰式の有意な変数として含まれなかった。

$$TC = 0.32 T_{water} + 0.10 T_{air} - 13.56 \quad (1)$$

$$TS = 0.32 T_{water} + 0.17 T_{air} - 16.17 \quad (2)$$

また、Table 2 に各重回帰式における独立変数の標準化係数および重決定係数 (R_{adj}^2) を示した。TC および TS の重回帰式における標準化係数の結果から、本研究で設定した環境条件の範囲では、水温の方が気温よりも TC および TS への寄与率が高いことが示された。

Table 2 Standardized coefficients of each independent variable

equations	T_{water}	T_{air}	R_{adj}^2
(1) TC	0.66*	0.28*	0.51
(2) TS	0.59*	0.40*	0.52

*: $p < 0.05$

本研究の結果から、水泳プールを想定した水温 26°C から 33°C、気温 21°C から 31°C の範囲では水温条件がより温冷感や温熱的快適感に寄与することが示唆された。

これらの研究成果を、学会にて報告した (学会発表②, ③, ④)。

(2) 水中運動実験

水温 26°C と 29°C 条件で 20% 最大強度の運動を行った際の直腸温に有意差は見られなかったが、26°C 条件で有意に高い平均血圧を示した。また、29°C 条件で有意に高い温冷感を示した。

水温 26°C 条件において運動強度の違いによる影響を検討したところ、20% および 40% 最大強度で運動を行った際の直腸温の変化に有意差は見られなかったが、40% 最大強度で有意に高い温冷感および温熱的快適性を示した。

これらの研究成果の一部を、学会にて報告した (学会発表①)。また、平成 21 年度に複数の学会にて報告を予定している。

(3) フィールド調査

フィールド調査で得られたデータを元に重回帰分析を行い、水泳中の温冷感 (TS) を水温 (T_w)、水着条件 (Suit)、身体特性 (体表面積/体重: SA/BW) の 3 要因から推定する以下の温冷感予測式を求めた。重決定係数 (R_{adj}^2) は $R_{adj}^2=0.35$ であった。

$$TS = 0.58T_w + 1.21Suit - 126.2SA/BW - 11.3 \quad (3)$$

また、温熱的快適範囲を温冷感における「-0.5」から「+0.5」までと設定し、予測式に基づいて 3 要因から構成される温熱的快適範囲を各水着条件について示した (Fig. 2)。

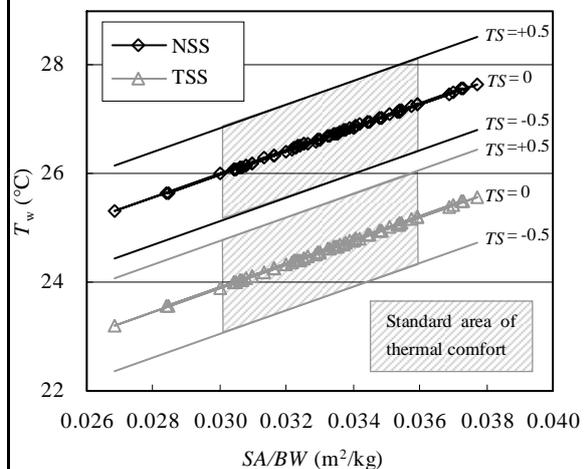


Fig. 2 The relationship between SA/BW and T_w at $TS = -0.5, 0, +0.5$

さらに、温冷感が「0」を示す時を温熱的に中立であり最も快適な条件と考え、各水着条件において、 $TS = 0$ の時に、SA/BW と T_w の関係を示す以下の式 (3-1)、(3-2) が得られた。

$$T_w = 217.3SA/BW + 19.5 \quad (Suit = 0, TS = 0) \quad (3-1)$$

$$T_w = 217.3SA/BW + 17.4 \quad (Suit = 1, TS = 0) \quad (3-2)$$

両式の定数項に 2.1 の差が見られたことから、同一の身体特性であれば、普通水着条件よりも水温が 2.1°C 低くても保温着用により同等の温冷感を示すことが示唆された。

これらの研究成果については、論文発表（雑誌論文②）および学会発表（⑤, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩）にて報告した。また、現在、英文原著論文を投稿中である。

その他に、本研究に関連して、以下の 2 つの研究テーマについて、論文執筆および学会発表を行った。

(4) 不均一環境における体温調節機能

本研究では、水浸安静時における水温および気温の影響を検討する実験を行い、上半身と下半身に不均一な環境条件に曝露された際の生理心理応答を検討した。このような不均一環境に対する生理心理応答に関する理解を深めるため、水中環境においてネオプレンゴム製の保温水着を着用することにより、体幹部と四肢部に不均一な曝露環境を設定し、均一条件との比較を行った。その結果、同等の平均皮膚温で四肢部において低い皮膚温を示す不均一条件で、均一条件に比べて身体組織の熱遮断能が高い値を示した。すなわち、皮膚血管収縮により熱遮断能を高めると考えられる四肢部を露出した形状の保温水着を着用することにより、生体のもつ体温調節機能を活かしながら体温低下を抑えられると考えられた（雑誌論文③, 学会発表⑥, ⑪）。

(5) 温冷感申告の言語差

本研究の成果を将来的に国際的な温冷感予測式や温熱的快適性推定手法として発展させる上で、温冷感や温熱的快適感等の主観申告を得る際の言語による差異が考慮される必要がある。そこで、日本語、韓国語、英語における温冷感に関する各言語の差異や特徴を検討した。主な言語差として、日本語における「暖かい」や「涼しい」といった温冷感に温熱的快適感が含まれるのに対して、英語における「warm」や「cool」は温熱的快適感を含まないことが示された。また、日本語では特に水中環境における温冷感を表現する際に「温かい」や「冷たい」などの表現を用いることも特徴的な点と考えられた。国際的な温熱的快適性推定手法を開発する上で、言語差を考慮する必要性が示唆された（雑誌論文①）。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① Lee JY, Tochihara Y, Wakabayashi H, Stone EA: Warm or slightly hot? Differences in linguistic dimensions describing perceived thermal sensation, *Journal of Physiological Anthropology* 28(1): 37-41, 2009, 査読有り
- ② 若林 斎, 新井清司, 仙石泰雄, 金田晃一, 野村武男: 小学校水泳授業における保温水着着用の基準設定—環境条件および身体特性を考慮して—, *デサントスポーツ科学* 29: 64-70, 2008, 査読有り
- ③ Wakabayashi H, Kaneda K, Sato D, Tochihara Y, Nomura T: Effect of non-uniform skin temperature on thermoregulatory response during water immersion, *European Journal of Applied Physiology*, 104(2), 175-182, 2008, 査読有り

〔学会発表〕（計 11 件）

- ① Wakabayashi H, Kuroki H, Wijayanto T, Lee JY, Tochihara Y: Thermoregulatory responses and femoral muscle activity during knee extension exercise in cold water, *Korea-Japan Joint Symposium on Human-Environment System (HES32)*, Cheju, Korea, 2008.11.30
- ② 若林 斎: 水浸安静時の水温・気温条件が体温調節系応答に及ぼす影響, *日本体力医学会第 63 回大会*, 大分, 2008.9.20
- ③ Wakabayashi H, Tochihara Y: The effect of water and ambient temperature on physiological and subjective response during immersion, *The 9th International Congress of Physiological Anthropology*, Delft, Netherlands, 2008.8.25
- ④ 若林 斎, 柝原裕: 水浸安静時の水温・気温条件が生理・心理応答に及ぼす影響, *日本生理人類学会第 58 回大会*, 大阪, 2008.6.7
- ⑤ Wakabayashi H, Arai S, Sengoku Y, Kaneda K, Sato D, Tochihara Y, Nomura T: Thermal sensation prediction model during elementary school swimming class -Multiple effects of environment, physical characteristics and swimwear condition-, *1st International Scientific Conference of Aquatic Space Activities*, Tsukuba, 2008.3.26
- ⑥ Wakabayashi H, Kaneda K, Sato D, Tochihara Y, Nomura T: Effect of non-uniform skin temperature

distribution on thermoregulatory responses during immersion, 1st International Scientific Conference of Aquatic Space Activities, Tsukuba, 2008.3.27

- ⑦ Wakabayashi H, Arai S, Sengoku Y, Kaneda K, Nomura T, Tochiara Y: Evaluation of thermal sensation during elementary school swimming class-effects of the environment, children's physical characteristics, and swimwear condition-, The 2nd International Symposium on Design of Artificial Environments, Fukuoka, 2007.11.2
- ⑧ 若林 齊, 新井清司, 仙石泰雄, 金田晃一, 野村武男, 柝原裕: 屋外プール環境における小学校児童の温冷感評価, 第31回人間-生活環境系学会大会, 名古屋, 2007.11.24
- ⑨ 若林 齊, 新井清司, 仙石泰雄, 金田晃一, 佐藤大輔, 野村武男, 柝原裕: 小学校水泳授業時の温冷感評価-環境条件, 身体特性および水着条件を考慮して-, 日本生理人類学会第57回大会, 福岡, 2007.10.21
- ⑩ 若林 齊, 新井清司, 仙石泰雄, 金田晃一, 野村武男, 柝原裕: 環境条件・身体特性・水着条件を考慮した小学校水泳授業時の温冷感評価, 第21回運動と体温の研究会, 秋田, 2007.9.13
- ⑪ Wakabayashi H, Kaneda K, Sato D, Tochiara Y, Nomura T: Effect of non-uniform skin temperature on thermoregulatory response during water immersion, XIIth International Conference of Environmental Ergonomics, Piran, Slovenia, 2007.8.22

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若林 齊 (WAKABAYASHI HITOSHI)

九州大学・大学院芸術工学研究院・学術研究員

研究者番号: 50452793

(2) 研究協力者

柝原 裕 (TOCHIHARA YUTAKA)

九州大学・大学院芸術工学研究院・教授

研究者番号: 50095907

野村 武男 (NOMURA TAKEO)

筑波大学・人間総合科学研究科・名誉教授

研究者番号: 80091817