

博士論文

低水温環境下における保温水着着用の

効果に関する検討

—小学校水泳授業への導入に向けて—

平成 18 年度

筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻

若林 齊

寄贈
若林
齊
氏

目次

略語の説明

用語の定義

表のタイトル一覧

図のタイトル一覧

関連論文

I. 序論	1
1. 研究の背景	1
2. 研究の目的	3
II. 先行研究	4
1. 体温および熱収支について	4
2. 水の物理的特性	5
3. 水浸時（水浸安静時・水中運動時）の体温調節応答	6
4. ウエットスーツに関する研究	10
5. 児童の身体特性と体温調節応答	12
6. 小学校水泳授業に関する研究	14
III. 研究の課題，仮説，限界	16
1. 研究の課題	16
2. 研究の仮説	17
3. 研究の限界	18
IV. 水浸安静実験による保温水着の特徴および効果の検証（実験1）	21

1. 目的	21
2. 方法	21
(1) 被験者	21
(2) 実験プロトコール	22
(3) 測定項目	25
(4) 分析	28
(5) 統計処理	32
3. 結果	32
(1) 体温	32
(2) 代謝応答	38
(3) 放熱量	44
(4) 熱遮断能	48
(5) 主観応答	48
4. 考察	53
(1) 体温	53
(2) 代謝応答	53
(3) 放熱量	54
(4) 熱遮断能	54
5. 要約	57
V. 成人被験者を対象とした水中運動時における保温水着着用の効果（実験2）	58
1. 目的	58
2. 方法	58
(1) 被験者	58
(2) 実験プロトコール	59
(3) 測定項目	63

(4) 分析	67
(5) 統計処理	67
3. 結果	68
(1) 運動強度	68
(2) 体温	68
(3) 代謝応答	71
(4) 放熱量	76
(5) 熱遮断能	76
(6) 主観応答	83
4. 考察	87
(1) 体温	87
(2) 代謝応答	88
(3) 放熱量	88
(4) 熱遮断能	89
5. 要約	90
VI. 小学校高学年児童を対象とした水中運動時	
における保温水着着用の効果（実験3）	92
1. 目的	92
2. 方法	93
(1) 被験者	93
(2) 実験プロトコール	93
(3) 測定項目	99
(4) 分析	100
(5) 統計処理	100
3. 結果	101

(1) 運動強度	101
(2) 体温	101
(3) 代謝応答	105
(4) 放熱量	105
(5) 熱遮断能	109
(6) 主観応答	109
4. 考察	113
(1) 体温	113
(2) 代謝応答	115
(3) 放熱量	116
(4) 熱遮断能	116
5. 要約	117
VII. 小学校水泳授業における保温水着着用の効果の検討（実験4）	118
1. 目的	118
2. 方法	118
(1) 被験者	118
(2) 研究スケジュール	119
(3) 保温水着	121
(4) 測定項目	121
(5) 統計処理	123
3. 結果	123
(1) 環境条件	123
(2) 運動強度	124
(3) 退水者数	124
(4) 主観的温度感覚	124

(5) 形成的授業評価	128
(6) 泳力測定	128
(7) 保温水着の評価	128
4. 考察	132
(1) 保温水着の温熱的効果	132
(2) 保温水着の教育的効果	132
(3) 身体特性に応じた保温水着着用の有効性	133
(4) 泳技能への影響	134
(5) コスト面から見た導入への方策	135
5. 要約	136
VIII. 総合討論	137
1. 研究の背景および目的	137
2. 研究課題	137
3. 研究結果	138
(1) 水浸安静実験による保温水着の特徴および効果の検証（課題1）	138
(2) 成人における保温水着の効果の検証（課題2-1）	138
(3) 児童における保温水着の効果の検証（課題2-2）	139
(4) 小学校水泳授業現場における保温水着の 温熱的効果および教育的効果の検討（課題3）	139
4. 討論	140
(1) 保温水着の特徴	140
(2) 低水温環境下での保温水着着用による温熱的効果	141
(3) 成人被験者と児童被験者の保温水着着用による温熱的効果の比較	143
(4) 小学校水泳授業現場における保温水着着用 の温熱的効果および教育的効果	145

(5) 小学校水泳授業現場への保温水着導入の方策	146
(6) 今後の課題	149
IX. 結論	150
謝辞	151
参考文献	152

略語の説明

本研究で用いる主な略語は以下の通りである.

T_w : 水温 (water temperature)

T_{cw} : 震えを発現せずに3時間水浸できる閾値水温 (critical water temperature)

T_a : 気温, 環境温度 (air temperature, ambient temperature)

T_{es} : 食道温 (esophagus temperature)

T_{re} : 直腸温 (rectal temperature)

T_{oral} : 舌下温, 口腔温 (oral temperature)

\bar{T}_{sk} : 平均皮膚温 (mean skin temperature)

\bar{T}_b : 平均体温 (mean body temperature)

\dot{V}_{O_2} : 酸素摂取量 (oxygen uptake)

$\dot{V}_{O_2 \max}$: 最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake)

$\dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$: 最高酸素摂取量 (peak oxygen uptake)

\dot{V}_E : 分時換気量 (minute ventilation)

RER : 呼吸交換比 (respiratory exchange ratio)

\dot{Q}_c : 心拍出量, 肺血流量 (pulmonary blood flow)

SAP : 収縮期血圧 (systolic arterial blood pressure)

DAP : 拡張期血圧 (diastolic arterial blood pressure)

MAP : 平均血圧 (mean arterial blood pressure)

TPR : 総末梢血管抵抗 (total peripheral resistance)

HR : 心拍数 (heart rate)

H_s : 体表面積あたりの放熱量 (heat loss)

M_s : 体表面積あたりの産熱量 (metabolic heat production)

S_s : 体表面積あたりの貯熱量 (heat storage)

C_b : 人体の比熱 (heat capacity of human body)

I_{total} : 総熱遮断能 (total insulation)

I_{tissue} : 身体組織の熱遮断能 (tissue insulation)

I_{suit} : 水着の熱遮断能 (suit insulation)

I_{ss} : 皮膚および皮下組織の熱遮断能 (superficial shell insulation)

TS : 主観的溫度感覚 (thermal sensation)

TC : 温熱的快不快感 (thermal comfort)

SI : 震え強度 (shivering intensity)

%fat : 体脂肪率 (percentage of fat)

MSFT : 平均皮下脂肪厚 (mean skin fold thickness)

BW : 体重 (body weight)

SA : 体表面積 (surface area)

用語の定義

(1) 保温水着

本研究では、厚さ 2.0 mm のネオプレン素材を用いた、ハーフスリーブ・ハーフパンツタイプの水着を保温水着とした。

(2) ウエットスーツ

本研究では、先行研究で多く用いられている厚さ 3.0 から 6.0 mm のネオプレン素材を用いたフルスーツタイプのウエットスーツをウエットスーツとした。

(3) 熱遮断能

本研究では、熱の伝わりにくさをあらわす指標として、身体組織の熱遮断能、水着の熱遮断能および両者を合わせた総熱遮断能を用いた。Rennie et al. (1962) の方法に従って、深部温、皮膚温および呼気ガス測定に基づく産熱量などの生理的データから算出した。詳細は実験 1, 方法に示す。身体組織の熱遮断能は筋組織、脂肪組織、皮膚組織により構成され、運動に伴う血流の増加や血管収縮拡張反応および震えなどの影響を受け変化する。

(4) 形成的授業評価

本研究で使用した形成的授業評価（高橋ら，1994）は、児童が 1 時間の体育授業をどのような観点から捉え、評価するかを分析することを目的としており、意欲・関心、成果、学び方、協力の 4 因子から構成される。詳細は実験 4, 方法に示す。

表のタイトル

- Table 1 Physical characteristics of the subjects
- Table 2 Experimental environment
- Table 3 Physical characteristics of the subjects
- Table 4 Experimental environment
- Table 5 Intensity of water exercise
- Table 6 Cardiovascular responses during rest in air, immersion and water exercise
- Table 7 Physical characteristics of the subjects
- Table 8 Experimental environment
- Table 9 Cardiovascular responses during rest in air, immersion and water exercise
- Table 10 Physical characteristics of the subjects
- Table 11 Experimental environment
- Table 12 Exercise intensity at each swimming classes
- Table 13 Relationships between children's formative class evaluation and their thermal sensation at each swimming class

図のタイトル

- Fig. 1 Experimental protocol of experiment 1
- Fig. 2 Thermal swimsuit (TSS: a) and normal swimsuit (NSS: b) used in experiment 1 and 2
- Fig. 3 Scale of subjective shivering intensity
- Fig. 4 Scale of subjective thermal sensation (a) and thermal comfort (b)
- Fig. 5 Changes in esophagus temperature during 60 min immersion
- Fig. 6 Changes in mean skin temperature during 60 min immersion
- Fig. 7 Changes in head temperature during 60 min immersion
- Fig. 8 Changes in chest (a), back (b), upper arm (c) and thigh (d) temperature during 60 min immersion
- Fig. 9 Changes in forearm (a), calf (b), hand (c) and foot (d) temperature during 60 min immersion
- Fig. 10 Changes in oxygen uptake during 60 min immersion
- Fig. 11 Cumulative V_{O_2} during 60 min immersion
- Fig. 12 Changes of subjects' perceived shivering intensity during 60 min immersion
- Fig. 13 Relationship between the average shivering intensity and cumulative V_{O_2} during water immersion
- Fig. 14 Changes in heart rate during 60 min immersion
- Fig. 15 Metabolic heat production, heat storage and heat loss from skin surface during 60 min immersion
- Fig. 16 Tissue insulation, suit insulation and total insulation during 60 min immersion
- Fig. 17 Changes in thermal sensation during 60 min immersion
- Fig. 18 Changes in thermal comfort during 60 min immersion
- Fig. 19 Experimental protocol of experiment 2

- Fig. 20 Scheme of the underwater cycle-ergometer
- Fig. 21 Scale of subjective thermal sensation (a) and thermal comfort (b)
- Fig. 22 Changes in esophagus temperature during 30 min water exercise
- Fig. 23 Changes in mean skin temperature during 30 min water exercise
- Fig. 24 Relationships between subjects' %fat and ΔT_{es} during water exercise
- Fig. 25 Relationships between subjects' mean skin fold thickness and ΔT_{es} during water exercise
- Fig. 26 Metabolic heat production, heat storage and heat loss from skin surface during 30 min water exercise
- Fig. 27 Tissue insulation, suit insulation and total insulation during 30 min water exercise
- Fig. 28 Relationship between subjects' %fat and tissue insulation during low intensity water exercise with NSS
- Fig. 29 Relationship between subjects' mean skin fold thickness and tissue insulation during low intensity water exercise with NSS
- Fig. 30 Relationship between subjects' %fat and I_{suit} / I_{total} during moderate intensity water exercise with TSS
- Fig. 31 Relationship between subjects' mean skin fold thickness and I_{suit} / I_{total} during moderate intensity water exercise with TSS
- Fig. 32 Changes in thermal sensation during 30 min water exercise
- Fig. 33 Changes in thermal comfort during 30 min water exercise
- Fig. 34 Experimental protocol of experiment 3
- Fig. 35 Thermal swimsuit (TSS) for children used in experiment 3
- Fig. 36 Changes in rectal temperature during 30 min water exercise
- Fig. 37 Changes in mean skin temperature during 30 min water exercise
- Fig. 38 Relationship between subjects' %fat and ΔT_{re} during water exercise

- Fig. 39 Relationship between subjects' %fat and $\Delta \bar{T}_b$ during water exercise
- Fig. 40 Metabolic heat production, heat storage and heat loss from skin surface during 30 min water exercise
- Fig. 41 Tissue insulation, suit insulation and total insulation during 30 min water exercise
- Fig. 42 Relationship between subjects' %fat and I_{tissue} during water exercise with NSS
- Fig. 43 Changes in thermal sensation during 30 min water exercise
- Fig. 44 Changes in thermal comfort during 30 min water exercise
- Fig. 45 Questionnaire about children's formative class evaluation, thermal sensation and assessment of thermal swimsuit
- Fig. 46 Children's thermal sensation at each swimming class
- Fig. 47 Children's formative class evaluation at each swimming class
- Fig. 48 Time for 25 m crawl stroke and swimming distance measured at pre-test and post-test

関連論文

本論文は、以下に示した関連論文に、未発表の実験結果を加えてまとめられたものである。

1. Wakabayashi H, Hanai A, Yokoyama S and Nomura T: Thermal insulation and body temperature wearing a thermal swimsuit during water immersion, *Journal of Physiological Anthropology* 25(5): 331-338, 2006. (実験 1)
2. Wakabayashi H, Kaneda K, Hanai A, Yokoyama S and Nomura T: Insulation and body temperature changes by wearing a thermal swimsuit during low to moderate intensity water exercise. In: Vilas-Boas JP, Alves F and Marques A (Eds.), *Biomechanics and Medicine in Swimming X*. Portuguese Journal of Sport Sciences 6 (Supl. 2), Porto, pp.179-182, 2006. (実験 2)
3. Wakabayashi H, Kaneda K, Okura M and Nomura T: Insulation and body temperature of prepubescent children wearing a thermal swimsuit during moderate intensity water exercise, *Journal of Physiological Anthropology* 26(2), 2007 (実験 3)
4. 若林斉, 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児童の保温水着着用の有効性: 寒冷感および形成的授業評価への影響を中心に, *体育学研究* 52(2), 2007 (実験 4)
5. Wakabayashi H, Hanai A, Kaneda K, Yokoyama S and Nomura T: Effects of thermal swimsuit on thermoregulatory responses during light to moderate intensity exercise at cool water environment. In: Holmer I, Kuklane K and Gao C (Eds.) *Environmental Ergonomics XI*, Ystad, Sweden, pp.546-549, 2005
6. Wakabayashi H, Sugano A and Nomura T: The effects of thermal swimsuit on thermoregulatory responses during water exercise. In: Chatard JC (Ed), *Biomechanics and Medicine in Swimming IX*, pp.523-528, 2003

I. 序論

1. 研究の背景

水の熱伝導率は空気の約 25 倍あることから、低水温環境では陸上での同一温度環境に比べて皮膚表面から水への熱放散が大きい。また、水中での運動により対流熱伝達率が高まるため、低水温環境で運動を行うことで水浸安静時に比べて身体からの放熱量は著しく増加することが報告されている (Nadel et al., 1974)。身体における熱産生は体重に、身体と環境間の熱交換は体表面積に強く影響されるため、体表面積/体重比が熱出納に大きく影響することが知られている (井上, 2002)。したがって、成人よりも体表面積/体重比が大きい子供の方が低水温環境下で熱放散が促進されやすい。また、子供は特に体幹部での皮下脂肪厚が成人に比べて薄いため (Martin and Ward, 1996)、脂肪組織による熱遮断能も低く、体温を低下させやすい。Sloan and Keatinge (1973) は 8 歳から 19 歳の男女を対象に 20.3°C の水温で 30 m·min⁻¹ のペースで水泳を行わせた際の舌下温変化を測定し、舌下温の低下率 (°C·min⁻¹) が皮下脂肪厚と体表面積/体重比に強く影響されることを報告している。このような水の特性と体表面積/体重比の関係から、低水温環境下における小学校水泳授業では、子供の体温が低下しやすく、水泳授業の効率的な実施が困難と考えられる。また、低水温に対する寒冷感は心理的な緊張を引き起こし、水泳嫌いの原因のひとつと考えられている (文部科学省, 2004)。

成人を対象に低水温環境における運動時の深部温の変化や代謝応答について検討した研究で、Nadel et al. (1974) は水温 26°C 環境において 40% 最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake: $\dot{V}_{O_2 \max}$) 程度 (心拍数 100-115 bpm) の水泳を行った際に深部温が低下し、70% $\dot{V}_{O_2 \max}$ 程度 (心拍数 125-145 bpm) では深部温が維持されることを報告している。同様に低水温環境においても中強度から高強度の水中運動時には産熱が促進され深部温が維持されると報告されている (Toner et al., 1985; McMurray and Horvath, 1979)。ここで、小学校児童の水泳授業における運動強度は、黒川ら (1991) や上田ら (1992) によると平均心拍数が 120 bpm 前後と報告されており、これは黒川 (1988) の示した推定式

によると $53\% \dot{V}_{O_2 \max}$ 程度にあたる。また、甲斐ら (1987) によると小学校水泳授業では、説明、待機、移動といった非活動的時間が 50%以上を占める授業形態の実態にあり、授業を通しての運動強度は $41.7\% \dot{V}_{O_2 \max}$ 、心拍数 129bpm であった。これらのことから、小学校水泳授業の運動強度および授業形態は成人よりも体温を低下させやすい子供にとっては深部温を維持するのに十分でないと考えられる。しかし、子供を対象とした低水温環境下における運動時の深部温の変化や代謝応答についての検討はきわめて少なく (Sloan and Keatinge, 1973; Nomura, 1983)、小学校水泳授業時の深部温変化についての知見は十分に得られていない。

学校水泳授業を行う際の至適環境条件を判定する目安として、累積温度方式が広く用いられており、気温と水温の和が 50°C 以上であることが望ましいとされている (日本水泳連盟, 1994)。累積温度方式により判定した場合、地域によっては 6 月の水泳可能日数が 50%未満と低い値を示す報告もあり (長谷川ら, 1984; 吉田, 1987)、環境条件によって授業実施が制限されてしまう現状にある。小学校学習指導要領 (文部省, 1998) に示される体育の授業時数が年間 90 時間へと削減された中で、水泳授業もまた授業時間数の確保が困難な状況にある。水泳指導の手引 (文部省, 1993) によると、各学年において水泳授業を年間 10 時間程度実施する必要性が示されているが、雨天等の影響で 10 時間の単元計画の約半数の 6 時間しか実施できなかった例も報告されている (渡邊ら, 2004)。

このように小学校水泳授業では、児童の身体特性、水温環境、運動強度などの要因により、児童の深部温が低下しやすい条件 (身体特性、水温環境、運動強度) にあり、水泳授業を効率的に実施するには、体温低下を防止する対策をとり、授業時間数を確保することが必要と考えられる。

これまでに、長谷川ら (1984) により、ビニールを利用した簡易式の上屋根を設置した温室プールが提案されており、水温と室温を高く維持することで、水泳授業を実施可能な日数を確保できることが報告されている。屋内プールの建設やボイラーなどの温調器の設置よりははるかに低コストであるものの、小学校のプールなどで普及させるには

依然としてコストによる制限が大きいと考えられる。そこで、より簡便で、低コストであり、環境条件や個人の目的、身体特性に応じて利用可能な保温対策として、小学校水泳授業における保温水着の着用が提案された。

低水温環境下の水泳授業時の保温水着着用は、児童の深部温低下や寒冷感を抑えて、授業への参加意欲を高めるとともに、授業時間数の確保を図り、結果として、児童の水泳技能学習に対して大きな役割を果たすのではないかと考えられる。しかしながら、保温水着着用時の深部温変化等の生理的応答や保温水着を水泳授業に活用することの意義については未だ検討されていない。

2. 研究の目的

本研究では、小学校水泳授業への保温水着導入の可能性を検討するため、低水温環境下における保温水着着用が深部温変化等の生理的応答に与える影響を明らかにし、また、実際の小学校水泳授業における調査から、保温水着着用の有用性について検討することを目的とした。

上記の目的を達成するため、成人および児童を被験者として、水浸安静時および水中運動時における保温水着の着用が、体温変化や産熱応答、熱遮断能などにおよぼす温熱的效果を検証し、また、小学校水泳授業における保温水着着用の実践研究により、主観的温度感覚などへの温熱的效果や、学習意欲などの授業評価への教育的効果について調査を行った。

II. 先行研究

1. 体温および熱収支について

身体は 37°C 程度の深部をそれよりも低温の末梢組織からなる外殻層で取り囲んだ二重構造と考えることができ、身体深部から皮膚に向かって段階的に温度が低くなる。外殻部は断熱層を形成して体熱を保持し、深部温を一定の温度範囲に維持する働きをしている。暑熱環境下では深部の領域が広くなり、断熱層が薄くなるため熱放散が促進される。逆に、寒冷環境下では深部の領域が狭くなり、断熱層を厚くすることで熱放散を抑えている（中山, 1981）。

平均体温（mean body temperature: \bar{T}_b ）は深部と外殻部の占める体積の割合に応じて深部温と平均皮膚温に係数を乗じて算出され、全身を平均した体温を表す。前述のように深部と外殻部の割合が環境によって変化するため、暑熱環境では 4 : 1、寒冷環境では 2 : 1 や 3 : 2 の係数が用いられる（Gagge and Nishi, 1977; 中山, 1981; 荻原, 1999）。平均皮膚温（mean skin temperature: \bar{T}_{sk} ）は、全身の多数箇所皮膚温を測定し、各個の測定点が代表する体表面積の全体表面積に対する割合に基づき算出される（日本生理人類学会計測研究部編, 1996）。

寒冷暴露時の皮膚温および皮膚血流については、頭部、体幹部では皮膚温の低下度が少なく、四肢遠位部ほど大きい。これは、四肢の長軸に沿って血管収縮神経の緊張度に差があるためと報告されている（Carlson and Hsieh, 1965; 中山, 1981）。四肢の動脈は、それぞれ 2 本の伴行静脈が密接して伴走しており、それらの動静脈間で熱交換が起きるような構造になっている（Bazett et al., 1948）。寒冷暴露時には、皮下の静脈は収縮し、還流血液は深層部に移行してこの伴行静脈の血液量が増える。この四肢遠位部で冷却された血液が動脈血を冷やすため、動脈血は末梢へいくほど冷たく、静脈血は体幹部に近づくほど温かい（中山, 1981）。それゆえ、寒冷暴露時に四肢遠位部ほど低い皮膚温を示す。

体温は身体からの熱産生（metabolic heat production: M ）と熱放散（heat loss: H ）のバ

ランスにより熱平衡を保っている。さらに、熱放散には伝導 (conduction: K), 対流 (convection: C), 放射 (radiation: R), 蒸発 (evaporation: E) による熱伝達経路が存在し、以下の体熱平衡式で表される (Gagge and Nishi, 1977; 中山, 1981; 荻原, 1999)。

$$M = H = E \pm K \pm C \pm R$$

水中では皮膚表面からの蒸発と放射による熱伝達が存在しないため (中山, 1981; 甲斐, 1988), 体熱平衡式は簡略化され以下の式で表される。

$$M = H = \pm K \pm C$$

ここで、暑熱暴露や寒冷暴露された際には熱産生と熱放散が平衡を保てず、暑熱暴露時には体温上昇しつつ貯熱され、寒冷暴露時には体温低下をきたすことになる。この体温の変化として表れた熱量を貯熱量 (heat storage: S) といい、体温が上昇する場合を正の貯熱、体温が低下する場合を負の貯熱と呼ぶ (中山, 1981; Winslow and Herrington, 1974)。貯熱量を導入すると体熱平衡式は以下のように示される。

$$M = H \pm S$$

人体において、貯熱量を算出するには、平均体温の変化に人体の比熱 (heat capacity of human body: C_b) と体重 (body weight: BW) を乗じることにより求められる。

$$S = \Delta \bar{T}_b \cdot C_b \cdot BW$$

熱遮断能 (熱抵抗) の単位は、熱量 1kcal が物体の単位面積 (1m^2) を通り、単位時間 (1h) 内に通過する時、その両面に単位温度差 (1°C) を生じるときの値を $1^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kcal}^{-1}$ とすることができる (中山, 1981)。

人体の総熱遮断能 (total insulation: I_{total}) を求める際には、深部温 (core temperature: T_{core}) と環境温度 (ambient temperature: T_a) の温度勾配および身体表面からの単位面積・時間あたりの放熱量 (heat loss from skin surface: H_s) から以下の式により算出される。

$$I_{\text{total}} = (T_{\text{core}} - T_a) / H_s$$

2. 水の物理的特性

水の熱伝導率 ($5.86 \cdot 10^{-4} \text{kJ} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; $1.4 \cdot 10^{-4} \text{kcal} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) は空気 (約 $0.230 \cdot 10^{-4}$)

$\text{kJ}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$; $0.055\cdot 10^{-4} \text{ kcal}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) の約 23~25 倍であり、水は熱を伝えやすい物質である。また、水の比熱 ($4.184 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$; $1.0 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) は空気 ($0.004 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$; $0.001 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) の約 1000 倍であり、温度変化のしにくい物質である。人体の熱伝導率は血流を考慮しない状態で約 $2.09\cdot 10^{-4} \text{ kJ}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ($0.50\cdot 10^{-4} \text{ kcal}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$)、比熱は $3.48 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ($0.83 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) である (Ruoti et al., 1997)。このような水中環境では空気中に比べて身体から熱が奪われやすい。中立温度も空気中では $20\text{-}29\text{°C}$ であるのに対し、($20\text{-}27\text{°C}$: Smith and Hanna, 1975; $27\text{-}29\text{°C}$: Andersen, 1973) 水中では $30\text{-}34\text{°C}$ と ($30\text{-}34\text{°C}$: Rennie et al., 1962; Smith and Hanna, 1975; $33.5\text{-}34\text{°C}$: 中山, 1981; 34°C : Sagawa et al., 1988) 高い温度を示し、また、その温度幅も狭い。その他に、空気中での熱放散には、伝導、対流、放射、蒸発による熱伝達経路が存在するが、水中での熱放散の特徴は、皮膚表面からの蒸発と放射による熱伝達が存在しないことである (中山, 1981; 甲斐, 1988)。厳密には非水浸部位や水面付近では蒸発や放射による熱伝達が起こり、蒸発に伴う熱放散は水 1g あたり 2.43 kJ (580 cal) であり、人体の比熱を $3.48 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ ($0.83 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) とすると 100g の水の蒸発により 70kg の体重のヒトの平均体温を 1°C 下げることになる (中山, 1981)。

3. 水浸時（水浸安静時・水中運動時）の体温調節応答

(1) 水浸安静時の体温調節応答

水の熱伝導率は空気の約 25 倍であり、 $28\text{-}30\text{°C}$ の水温で短時間の水浸でさえ寒冷ストレスとなり、震えなどの体温調節応答を引き起こすと報告されている (McArdle et al., 1976; Rennie et al., 1962)。

Rennie et al. (1962) は、震えを起こさずに安静状態で 3 時間水浸できる最低の水温を "critical water temperature (T_{cw})" と定義し、海女を含む韓国人とアメリカ人の男女について検討している。その結果、 T_{cw} は、体脂肪率が 16%未満 (平均皮脂厚 4 mm 未満) のアメリカ人男女被験者については $33\text{-}34\text{°C}$ 、韓国人男性被験者 (平均皮脂厚 1.46 mm) で $31\text{-}33\text{°C}$ 、韓国人女性被験者 (2.31 mm) で $30\text{-}31\text{°C}$ 、平均皮脂厚が 5 mm 以上のアメ

リカ人被験者と韓国人の海女(2.24 mm)については 30°C 以下であった。この結果から、特別体脂肪率の高い者や寒冷順化している者を除いては、30-34°C という水温でさえ寒冷ストレスとなり、震えによる体温調節応答を引き起こすことが示された。また、身体組織の熱遮断能 (tissue insulation: I_{tissue}) の増加が見られたことから、30-33°C の水温でも皮膚血管収縮が起こるには十分であると報告している。

Rennie et al. (1971) は、 T_{cw} 測定のための水浸安静実験のデータから、水温の低下に伴い I_{tissue} が増加し、 T_{cw} において最高値を示すことを報告している。同時に、 T_{cw} において前腕部皮膚血流量がほとんど 0 に近く、四肢における血流量が陸上安静時の 40% 近くまで減少しており、 I_{tissue} が皮膚血流量を反映することを示している。さらに、 T_{cw} 以下では震えの発現により I_{tissue} が低下することを報告している。加えて、四肢における局所的な I_{tissue} を皮膚表面からの放熱量測定および針電極を用いた筋肉および皮下組織の温度測定により求め、全身の I_{tissue} の増加が局所の I_{tissue} の増加を反映することを確認している。また、Park et al. (1984) は T_{cw} (28-32°C) において 3 時間の水浸安静を行い、皮下脂肪厚と I_{tissue} の間に正の相関関係が見られたことを報告している。また、脂肪組織の熱遮断能の物性値と I_{tissue} の結果から、安静時における I_{tissue} のうち 75% 程度を筋組織による熱遮断能が占めることを明らかにしている。Sagawa et al. (1988) も同様に T_{cw} (31.2°C) において皮膚血管収縮が最大となるため I_{tissue} が最高値を示し、 T_{cw} 以下 (28.8°C) では震えの発現により I_{tissue} が低下し、 T_{cw} 以上 (34°C, 36°C) では皮膚血管収縮が抑えられることにより I_{tissue} が低下すると報告している。

Veicsteinas et al. (1982) は、水浸安静時において、大腿部皮膚表面からの放熱量測定および針電極による皮下脂肪組織の温度測定から、皮膚から皮下組織にかけての熱遮断能 (superficial shell insulation: I_{ss}) を算出した。 T_{cw} 以下で I_{ss} がプラトーに達し最高値を示すが、 T_{cw} を超えると I_{ss} が小さくなる結果が示され、これは皮膚血流量の増加によるものと報告している。また、 I_{ss} および I_{total} と皮下組織の厚さとの間に相関関係が見られ、皮下組織が厚いほど高い熱遮断能を示した。

Keatinge (1960) は、成人男性を対象に水温 15°C で 30 分間の水浸安静を行い、被験

者の皮下脂肪厚と直腸温 (rectal temperature: T_{re}) の低下度に有意な相関関係が見られ、皮下脂肪厚の薄い被験者ほど深部温を低下させやすいことを報告している。また、水浸 10 分後以降において、皮下脂肪厚の薄い被験者の代謝が亢進したのに対し、皮下脂肪厚の厚い被験者に代謝の亢進が見られなかったことを報告している。

McArdle et al. (1984) は、大学生の男女について、水温 20, 24, 28°C で 60 分間の水浸を行い、水浸安静時の T_{re} および酸素摂取量 (oxygen uptake: \dot{V}_{O_2}) の経時的变化を示している。男性被験者について、体脂肪率の高い群 (22%以上) では全条件で T_{re} の低下は 0.3°C 以内に抑えられ、 \dot{V}_{O_2} は水浸前の値から変化しなかった。平均的な体脂肪率 (15-18%) の群では、全条件で水浸 10-20 分後までは T_{re} が水浸前の値に保たれ、その後徐々に低下し水温 20°C 条件で 1.1°C、水温 24, 28°C 条件では 0.5°C 低下した。 \dot{V}_{O_2} については水温 20°C 条件のみ徐々に増加し、水浸終了時で水浸前の約 2 倍である 600 ml·min⁻¹ を示した。体脂肪率の低い群 (12%以下) では、全条件で水浸 10 分後までは水浸前の T_{re} を維持したが、その後水浸終了時までには水温 20, 24, 28°C 各条件で、1.6°C, 1.3°C, 1.0°C 低下した。また、 \dot{V}_{O_2} はそれぞれ、1070 ml·min⁻¹, 710 ml·min⁻¹, 390 ml·min⁻¹ まで増加した。女性被験者について、平均的な体脂肪率 (24-27%) の群では、水浸終了時の T_{re} が水温 20, 24°C 条件で約 1.2°C, 28°C 条件で約 1.0°C 低下した。また、 \dot{V}_{O_2} はそれぞれ、580 ml·min⁻¹, 460 ml·min⁻¹, 450 ml·min⁻¹ まで増加した。体脂肪率の低い群 (22%以下) では、 T_{re} が水浸終了時までには 20, 24, 28°C 各条件で、1.6°C, 1.2°C, 0.9°C 低下した。また、 \dot{V}_{O_2} はそれぞれ、590 ml·min⁻¹, 470 ml·min⁻¹, 390 ml·min⁻¹ まで増加した。同等の体脂肪率の男女で比較したところ、 \dot{V}_{O_2} には有意差が見られないものの、 T_{re} は女性被験者の方が低値を示したことから、女性で放熱量が高いのは体表面積/体重比が大きいためと報告している。

Craig and Dvorak (1966) は水温 34°C 以下であれば、手指の皮膚温は水温近くまで低下するが、腹部においては水温が低いほど水温と皮膚温との温度勾配が大きくなることを示し、身体表面の温度が不均一であることを報告している。

Hayward et al. (1973) は赤外線サーモグラフィーを用いた研究で、部位による皮膚温

の差を示しており、頸部、胸側部、胸郭上部、鼠蹊部で高い放熱を示したと報告している。また、Hayward and Keatinge (1981)によると、水浸安静時の部位毎の熱遮断能は手部や足部などの末梢部で体幹部の 2-3 倍も高いと言われている。

(2) 水中運動時の体温調節応答

多くの先行研究において、低水温環境での運動が水浸安静時よりも熱放散を増加させることが報告されている (McArdle et al., 1992; Keatinge and Evanse, 1961; Sloan and Keatinge, 1973)。これは、活動筋における血流の増加が身体深部から皮膚までの熱伝達を促進し、 I_{tissue} を低下させたことと (Veicsteinas et al., 1982)、水中での動作に伴う対流の増加が皮膚表面から水への熱放散を増加させたことによると報告されている (Nadel et al., 1974)。一方で、低水温環境であっても、高強度の運動により放熱を上回るほど産熱を十分に増加させれば、深部温を維持できるとの報告もある (McArdle et al., 1992; McArdle et al., 1976; Toner et al., 1985; McMurray and Horvath, 1979)。Nadel et al. (1974) は成人男性を対象に水温 26°C 環境において 40% $\dot{V}_{O_2 \text{ max}}$ 程度 (心拍数 100-115 bpm) の水泳を行った際に深部温が低下し、70% $\dot{V}_{O_2 \text{ max}}$ 程度 (心拍数 125-145 bpm) では深部温が維持されることを報告している。McArdle et al. (1992) は成人男性を対象に水温 28°C 環境において低強度運動時 ($\dot{V}_{O_2} = 0.8 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) には水浸安静時に比べて深部温が低下するが、中強度の運動 ($\dot{V}_{O_2} = 1.3 - 1.7 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) では深部温が維持されることを報告している。

Park et al. (1984) は成人男性を対象に T_{cw} (28-32°C) 環境において 3 時間の水浸安静および 3 段階の運動強度 (1.5, 2, 3 METs) の水中脚腕ペダリング運動を行い、運動強度の増加に伴い I_{tissue} が低下し、3 METs の運動で安静時の約 25% の I_{tissue} を示すことを報告している。この研究では、1.5 METs の運動強度では安静時と同様に T_{re} が 0.7°C 程度低下するが、2.4 METs の運動強度では水浸前と同様の T_{re} を維持できることを報告している。さらに、安静時および各運動強度において、被験者の皮下脂肪厚と I_{total} が正の相関関係にあることを示している。

Sagawa et al. (1988) は、成人男性を対象に 4 段階の水溫 (T_{cw} -2°C, T_{cw} , 34°C, 36°C) において水浸安静時および 3 段階の運動強度 (2, 3, 4 METs) の水中脚運動時の I_{tissue} 測定を行い、どの水溫条件においても安静時に比べて運動時で I_{tissue} が低下し、運動強度の増加に伴いさらに I_{tissue} が低下することを報告した。また、 T_{cw} 以下の水溫において特に四肢部での I_{tissue} が安静時に比べて有意に低下したのに対し、体幹部の I_{tissue} には有意な変化が見られなかったことから、 I_{tissue} の低下は主に四肢部で起こることを報告している。

Pugh and Edholm (1955) は水溫 16°C において水泳運動を行った際に、痩せた被験者では 30 分間で T_{re} が 37°C から 34.5°C まで低下し、それ以上泳ぎ続けることができなかったが、皮下脂肪厚の厚い被験者は T_{re} を低下させずに 60 分以上泳ぎ続けることができた。同様に水溫 19°C および 21.8°C においても皮下脂肪厚の厚い被験者ほど T_{re} を低下させないことを報告している。

Nadel et al. (1974) と Holmer and Bergh (1974) は水溫 18, 26, 34°C において 20 分間の最大下水泳運動を行った際の食道温 (esophagus temperature: T_{es}) の変化を測定し、水溫 18, 26°C においては皮下脂肪厚の薄い被験者ほど T_{es} を低下させ、34°C においては全被験者で T_{es} を上昇させることを報告している。

4. ウエットスーツに関する研究

多くの研究者がウエットスーツの効果について検討しており (Wolff et al., 1985; Cotter and Taylor, 1995; Yeon et al., 1987; Arieli et al., 1997; Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986), 中には低水溫環境下 (14–27°C) においてウエットスーツの保温効果が深部温維持に十分でないとの報告も見られる (Arieli et al., 1997; Shiraki et al., 1986)。しかしながら、ウエットスーツの着用により熱遮断層が付加され、深部温の低下を抑え、水浸時間を延長できることは確かと言える (Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986)。

Kang et al. (1983) は日頃からダイビングを行っている海女を対象に、ウエットスーツ及び普通水着を着用して、夏季 (水溫 22.5°C) と冬季 (水溫 10.0°C) にダイビングを

行い、 T_{re} の比較を行った。その結果、夏季の22.5°Cの水温では、 T_{re} がウエットスーツ着用時では2時間で0.4°Cの低下であったのに対し、普通水着着用時では1時間で35°Cまで(約2.5°C)低下し、ダイビングを継続できなかつたと報告している。また、冬季の10.0°Cの水温では、 T_{re} がウエットスーツ着用時に2時間で0.6°Cの低下であったのに対し、普通水着着用時では30分で35°Cまで(約2.5°C)低下し、ダイビングを継続できなかつたと報告されている。

Shiraki et al. (1986) は男性ダイバーを対象に同様の研究を行い、夏季(水温27°C)と冬季(水温14°C)にダイビングを行い、 T_{re} の測定を行った。その結果、夏季の水温27°C環境において、非着用時では1時間で T_{re} が36.4°Cまで(約1.3°C)低下したのに対し、ウエットスーツ着用時には2時間で37.2°Cまで(約0.3°C)低下し、冬季ウエットスーツ着用時には1.5時間で36.9°Cまで(約0.8°C)の低下であり、夏季の非着用時よりも高い T_{re} を維持することが示された。

ここで、ウエットスーツ着用時の特徴的な体温調節系応答として、 I_{tissue} の低下が報告されている(Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986)。Kang et al. (1983) は水温22.5°Cにおける潜水活動中に、ウエットスーツ着用時に非着用時よりもわずかに低い I_{tissue} を示すことを報告した。Shiraki et al. (1986) も同様に水温27°Cにおける潜水活動中にウエットスーツ着用による I_{tissue} のわずかな低下を報告している。彼らは、この I_{tissue} の低下はウエットスーツ着用による寒冷血管収縮の減弱を反映したものと考察している。

また、Choi et al. (1988) は韓国女性ダイバーを対象にネオプレン製のグローブ着用/非着用時について水温17.3°Cで3時間の水浸安静を行い、体温変化、呼気ガス応答、 I_{total} 、手部および前腕部からの熱流束を比較している。その結果、産熱量は同等であったが、グローブ着用時に T_{re} が0.3°C低値を示し、 I_{total} は16%低値を示した。また、手部および前腕部からの熱流束はいずれもグローブ着用時に高値を示した。Park et al. (1992) は水温13°Cで3時間の水浸安静および2時間の水中運動時において、ウエットスーツに加えてグローブおよびブーツを着用した際に I_{tissue} が低下することを報告している。彼らは手部や足部を低水温環境に対して露出することにより四肢の血管が収縮し、逆に、

グローブやブーツ着用により四肢遠位部の冷点からの温度情報入力が減弱した結果、寒冷血管収縮が抑えられたのではないかと推察している。

Choi et al. (2003) は上記のような環境条件の部位差による体温調節系応答を検証するため、平均皮膚温が同等で全身一様な皮膚温条件と体幹部に比べて四肢部で低い皮膚温条件の2条件を設定し、 T_{cw} および $T_{cw}-3^{\circ}\text{C}$ 水温環境において3時間の水浸安静時の T_{es} 変化、産熱応答、各部位の放熱量および I_{tissue} を比較している。その結果、特に $T_{cw}-3^{\circ}\text{C}$ 水温環境において、 T_{es} 変化に条件間の差は見られなかったが、全身一様な皮膚温条件で身体各部位からの放熱量が大きく、四肢部において低い I_{tissue} を示し、震えに伴う熱産生が高い結果を示した。四肢部に比べて体幹部でより早期により強い震えが発現すると言われており (Tikusis et al., 1991; Bell et al., 1992)、四肢部よりも体幹部で高い皮膚温条件では、体幹部での震えを抑えることにより I_{tissue} の低下を抑え、より効率的に T_{es} の低下を防止できるのではないかと考えられた。

5. 児童の身体特性と体温調節応答

身体からの熱産生は体重に、身体と環境間の熱交換は体表面積に強く影響されるため、体表面積/体重比が熱出納に大きく影響することが知られており (井上, 2002; 井上, 2001)、成人よりも体表面積/体重比が大きい子供の方が低水温環境で熱放散が促進されやすい。日本人の体力標準値 (東京都立大学体力標準値研究会, 2000) に基づいて求めた体表面積/体重比は8歳男子で $0.036 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 、11歳男子で $0.032 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 、成人男性で $0.026 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ であり、子供の方が成人よりも低水温環境で熱放散が促進されやすいことがわかる。また、子供は特に体幹部の皮下脂肪厚が成人に比べて薄いため (Martin and Ward, 1996; Marina et al., 2004; Tanner and Whitehouse, 1975)、脂肪組織による熱遮断能も低く、体温を低下させやすい。

水中環境において子供の体温調節系応答を検討した研究はきわめて少なく、以下に二つの研究を示した (Nomura, 1983; Sloan and Keatinge, 1973)。

Nomura (1983) は10-12歳の男女を対象に18, 22, 26°C の水温で水中自転車エル

ゴメータを用いた漸増負荷運動を行わせ、 T_{re} および呼気ガス応答を測定した。その結果、運動終了時の ΔT_{re} が低水温条件ほど大きく低下し、被験者の皮下脂肪厚と ΔT_{re} との関係が示されている。また、最高酸素摂取量には水温条件間の差が見られなかったが、最大下運動時に 18°C 水温条件で震えに伴う熱産生の影響を受け、他の条件よりも高い \dot{V}_{O_2} を示した。さらに、最大運動時における \dot{V}_{O_2} は条件間に差が見られなかったが、分時換気量 (\dot{V}_E) および一回換気量が 18°C 条件において有意に高い値を示しており、これは皮膚からの寒冷刺激が呼吸中枢を刺激して換気を亢進させたからではないかと推察している。

Sloan and Keatinge (1973) は 8–19 歳の男女を対象に 20.3°C の水温で 30 m·min⁻¹ のペースで水泳を行かせた際の舌下温 (T_{oral}) 変化を測定し、 T_{oral} の低下率 (°C·min⁻¹) が皮下脂肪厚と体表面積/体重比に強く影響されることを報告している。

寒冷気中環境での子供と成人の体温調節系応答を検討した研究を以下に示した (Smolander et al., 1992; Inoue et al., 1996; Wagner et al., 1974; Araki et al., 1980)。

Smolander et al. (1992) は気温 (air temperature: T_a) 5°C の寒冷気中環境で 11–12 歳の子供および 19–34 歳の成人に 30% $\dot{V}_{O_2 \max}$ 程度の運動を行わせ、子供の方が産熱量をより亢進させて、大人と同様の T_{re} を維持することを示している。

Inoue et al. (1996) は、 T_a を 60 分間かけて 28°C から 15°C へと漸減させていく寒冷気中暴露実験で、子供の方が有意に T_{re} を低下させることを報告している。また、子供の方が寒冷暴露前の体表面積あたりの産熱量が有意に大きいため、寒冷暴露時の産熱量の増加率は成人に比べて有意に小さいが、産熱量の絶対値に有意差は見られないと報告している。さらに、子供の方が特に四肢部での皮膚温を低下させており、これは四肢部における強い末梢血管収縮を反映したものと考察している。Inoue et al. (2006) は同様に T_a を 60 分間かけて 30°C から 17°C へと漸減させていく寒冷気中暴露実験を行い、子供と成人における末梢血管収縮の部位差を検討している。その結果、指部では末梢血管収縮が子供で強いため皮膚温が大きく低下し、大腿部では末梢血管収縮は同等であるが、体表面積/体重比が子供で大きいため皮膚温が大きく低下し、体幹部では子供の方が血

管拡張傾向にあるものの、子供の体表面積/体重比が大きく、皮下脂肪厚も薄いため、成人と同様の皮膚温を示したと報告している。

Wagner et al. (1974) は $T_a=16-17^{\circ}\text{C}$ の寒冷気中環境で 10-13 歳の子供および 19-29 歳の成人の体温調節応答を比較し、子供は成人に比べて体表面積あたりの代謝率を大きく亢進させて、 T_{re} を上昇させるのに対し、成人は T_{re} を維持する結果を示している。また、子供は成人に比べて末梢血管収縮が強く、前腕部および指尖部の血流量を減らして、四肢部の皮膚温を低下させることにより効率的に放熱を抑えていると報告している。

Araki et al. (1980) は $T_a=20^{\circ}\text{C}$ の寒冷気中環境で 11 歳の子供および 20 歳の成人の体温調節応答を比較し、子供は成人に比べて産熱量の増加は小さいが、末梢血管収縮を強く起こすことで成人よりも皮膚温を低下させることにより放熱を抑え、成人と同様に T_{re} を維持していると報告している。

6. 小学校水泳授業に関する研究

水泳授業時の環境条件について調べたところ、厚生労働省の通知「遊泳用プールの衛生基準」(厚生労働省, 2001) では遊泳用プールの水温は 22°C 以上とすることが定められているが、文部科学省の示す「学校環境衛生の基準」(文部科学省, 2002) および「学校保健法施行規則」(文部科学省, 2005) には水温の下限については定められていない。水泳指導の手引(二訂版)(文部科学省, 2004) では、水温 22°C 未満ではあまり学習効果が期待できず、 23°C 以上であることが望ましく、上級者や高学年であっても 22°C 以上の水温が適当としている。教育現場では、学校水泳授業を行う際の至適環境条件を判定する目安として、累積温度方式が広く用いられており、気温に水温を加えた温度が 50°C 以上であることが望ましいとしている(日本水泳連盟, 1994)。これは日本赤十字社の示した一般遊泳時の最低水温 23°C と気温との関係および厚生労働省の通知「遊泳用プールの衛生基準」(厚生労働省, 2001) に定められる最低水温 22°C に基づいて経験則から導かれた方式である(柴田, 1981)。しかしながら、累積温度方式は経験則に基づいて用いられ、客観的な評価は行われていない。また、 24°C 以下の低水温での対策

が示されていないことや寒さに対する適性の個人差などの問題が指摘されている（黒川, 2004）。累積温度方式により判定した場合、地域によっては6月の水泳可能日数が50%未満と低い値を示す報告もあり（長谷川, 1984; 吉田, 1987）、授業数が制限されてしまう現状にある。

小学校学習指導要領（文部省, 1998）に示される体育の授業時数が年間90時間へと削減された中で、水泳授業もまた授業時間数の確保が困難な状況にある。水泳指導の手引（改訂版）（文部省, 1993）によると、各学年において水泳授業を年間10時間程度実施する必要性が示されているが、雨天等の影響で10時間の単元計画の約半数の6時間しか実施できなかった例もある（渡邊, 2004）。

水中運動時の体温調節応答に関する先行研究で示したように、低水温環境での運動は安静時よりも熱放散を増加させるため、低強度の水中運動時には深部温が低下しやすいことが報告されている（McArdle et al., 1992; Keatinge and Evanse, 1961; Sloan and Keatinge, 1973）。一方で、低水温環境であっても、高強度の運動により放熱を上回るほど産熱を十分に増加させれば、深部温を維持できるとの報告もある（McArdle et al., 1992; McArdle et al., 1976; Toner et al., 1985; McMurray and Horvath, 1979）。ここで、小学校児童の水泳授業における運動強度は、黒川ら（1991）や上田ら（1992）によると平均心拍数が120 bpm前後と報告されており、これは黒川（1988）の示した推定式によると53% $\dot{V}_{O_2 \max}$ 程度にあたる。また、甲斐ら（1987）によると小学校水泳授業では、説明、待機、移動といった非活動的時間が50%以上を占める授業形態にあり、授業を通しての運動強度は41.7% $\dot{V}_{O_2 \max}$ 、心拍数129 bpmであった。これらのことから、水泳授業の運動強度および授業形態は成人よりも体温を奪われやすい児童にとっては深部温を維持するのに十分なものとは言いがたい。

III. 研究の課題，仮説，限界

1. 研究の課題

保温水着の着用を小学校水泳授業へ導入するにあたって，実験室における客観的データおよび授業現場における調査による裏づけが必要であり，前述の先行研究から以下の問題点が挙げられた．

- 1) 水中における保温効果について，ウエットスーツに関する研究は多数あるが，四肢遠位部を露出した形状の保温水着に関する研究は少なく，保温水着着用時特有の生理的応答についてその特徴が明らかになっていない．
- 2) 成人被験者を対象に保温水着を着用して低水温環境下で運動を行った時の生理的応答は検討されていない．また，被験者の身体特性と深部温変化および身体組織の熱遮断能との関係については多くの報告があるが，身体特性に応じた保温効果の違いについてはウエットスーツに関する研究においても検討されていない．
- 3) 低水温環境下での水中運動時における子供の生理的応答について検討した研究はきわめて少なく，水泳授業時の児童の体温変化についての検討もなされていない．水泳授業時を想定した水温環境下において，普通水着着用時および保温水着着用時の体温変化について比較検討する必要がある．
- 4) 小学校水泳授業において保温水着着用を導入するにあたり，着用による主観的温度感覚などへの温熱的效果に加えて，授業評価，泳技能習得などへの教育的効果について検討する必要がある．

そこで本研究では以下の研究課題を設定した．

【研究課題 1】

保温水着の特徴の検証を, 成人被験者を対象とした水浸安静実験によりウエットスーツ等の先行研究との比較から明らかにする。(実験 1)

【研究課題 2】

1) 成人における保温水着の効果の検証 (実験 2)

小学校水泳授業を想定した環境条件および運動強度において, 成人を被験者として, 保温水着着用時の生理的応答の客観的データから, 保温水着着用の効果を検証する。また, 被験者の身体特性に応じた保温水着着用の有効性を検証する。

2) 児童における保温水着の効果の検証 (実験 3)

小学校水泳授業を想定した環境条件および運動強度において, 児童を被験者として, 保温水着着用時の生理的応答の客観的データから, 保温水着着用の効果を検証する。また, 被験者の身体特性に応じた保温水着着用の有効性を検証する。

【研究課題 3】

小学校水泳授業における保温水着着用による, 主観的溫度感覚などへの温熱的效果や, 形式的授業評価, 泳技能習得などへの教育的効果を授業現場における調査から検証する (実験 4)

2. 研究の仮説

前述の研究課題を究明するために, 以下の仮説を設定した。

1) ウエットスーツより露出部位の多い保温水着はウエットスーツに比べて裸体時に近い生理応答を示す。

2) 成人被験者および児童について, 低水温環境下での水中運動時に保温水着を着用す

ることにより, 深部温の低下および寒冷感が抑えられる.

3) 成人および児童について, 体脂肪率の低い被験者ほど普通水着着用時に身体組織の熱遮断能が小さく, 深部温を低下させやすいが, 保温水着を着用することにより深部温低下を抑えることができ, 保温水着着用の有効性が高い.

4) 児童は成人よりも低水温環境における深部温低下が著しく, 保温水着着用の有効性が高い.

5) 小学校水泳授業において保温水着を着用することで, 寒冷感が抑えられ, 児童の形式的授業評価が高められる.

3. 研究の限界

本研究で得られた結果は一般化できるものを目指しているが, いくつかの研究上の限界が存在するため, 明記する.

1) 用語の定義による限界

本研究で用いた保温水着は厚さ 2.0 mm のネオプレン素材を用いた, ハーフスリーブ・ハーフパンツタイプであり, 一般的に用いられている保温水着の範囲を大きく逸脱してはいないが, 形状や素材の違いなどから他の保温水着とは異なる影響を及ぼすことも考えられる. 本研究で, このような保温水着を採用したのは, 目的とする着用環境が水温 20°C 以上の低水温環境であり, 水泳授業における使用を目的としていることから, ある程度の保温性を確保しつつ, 水中での運動を妨げない機能性や着脱などの簡便性を有するためである. また, 成人被験者の着用した保温水着がセパレートタイプであったのに対し, 児童被験者ではワンピースタイプであったため, 成人被験者において体幹部周りから水着内への浸水による保温効果への影響があると考えられる.

2) 標本による限界

本研究の被験者は実験 1 から実験 3 では男性のみを対象としており、女性を被験者に含まなかった。本研究から得られた結果を一般化するには女性も対象とすべきであったが、性周期による体温変化への影響を考慮して、女性を被験者に含めなかった。実験 1 から 3 では男性のみを対象としたのに対し、実験 4 の小学校水泳授業現場における検討では、高学年男女児童を対象としており、標本の性別および年齢による結果への影響が含まれたことも考えられる。

実験 4 の群分けについて、保温水着を着用した実験群に対して、普通水着を着用した群をコントロール群とした。実験群とコントロール群において明らかに異なる水着を着用して、同一の水泳授業を行ったため、児童の主観的温度感覚や形成的授業評価に対して、保温水着の温熱的効果だけでなく、着用すること自体の心理的な影響も働いたと考えられる。

3) 実験方法による限界

本研究の実験 1 では 60 分間の水浸安静を行い、実験 2, 3 では 30 分間の水中運動を行った。本研究の設定を超える長時間の水浸条件に対しては経時的変化を考慮して検討する必要がある。また、実験 1 から 3 において、水温、気温などの環境条件および運動強度条件の設定は水泳授業現場を想定したものであったが、条件が限定的であった。さらに、本研究では運動条件として、動作が単純で運動強度を規定しやすいことから、水中自転車エルゴメータを用いた脚ペダリング運動を採用したが、実際の水泳授業現場では水泳運動が中心となるため、上肢の運動も加わり、運動形態そのものが大きく異なる。また、本研究の実験 2, 3 の運動条件は一定強度の連続的な運動としたが、実際の水泳授業では、活動的な時間と非活動的な時間を繰り返す間欠的な運動形態がとられており、実験室におけるデータから得られた知見を水泳授業現場に応用する際には運動条件の違いを考慮する必要がある。

上記のような実験室における実験設定と水泳授業現場との隔たりをふまえて、実験 4

の小学校水泳授業現場での検討を行うことで、保温水着を水泳授業に導入するためのより現場に即した評価を行った。

本研究の実験 1, 2 では成人男性を対象とし、深部温として食道温を測定し、実験 3 では小学校高学年児童を対象とし、直腸温を測定したが、どちらも深部温として同様に検討した。成人と児童の比較の際には、測定部位の違いを考慮し、絶対値による比較は行わなかった。

実験 4 では、小学校水泳授業現場における調査であり、授業実施環境および授業時間を考慮すると、深部温の測定場所および測定時間の確保が困難であったため、深部温の測定を行わなかった。そのため、実験 4 のデータのみから保温水着の深部温維持効果について言及することはできないが、主観的温度感覚により温熱的效果を検討した。また、実験 3 における直腸温変化のデータから水泳授業時の深部温変化をある程度推察できると考えられる。

IV. 水浸安静実験による保温水着の特徴および効果の検証（実験 1）

1. 目的

先行研究に示したように、保温性について検討した研究はウエットスーツを中心に数多く行われている（Wolff et al., 1985; Cotter and Taylor, 1995; Yeon et al., 1987; Arieli et al., 1997; Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986）。しかしながら、ウエットスーツの研究は海女などの職業ダイバーを対象とした研究が多く、設定環境も 20°C 以下の低水温条件が多い。一方で、本研究では児童の水泳学習を目的とした保温水着を対象としており、これまでのウエットスーツの研究とは使用目的が異なる。それゆえ、保温水着の材質や形状も、ある程度の保温性を確保しつつ、運動を妨げない機能性を考慮した、ハーフスリーブ・ハーフパンツタイプとし、厚さも 2.0 mm 程度としている。このため、保温水着の保温性についてあらためて検討する必要がある。特に四肢遠位部を露出した形状はウエットスーツと大きく異なる点であり、全身一様でない条件であるため、保温性を検討するうえで複雑な条件といえる。部位毎に異なる環境条件における体温調節応答を検討した Choi et al. (2003) の研究では、全身の皮膚温が一様な条件に比べて、体幹部で高く四肢部で低い皮膚温の条件において、震えの発現と身体組織の熱遮断能 (I_{tissue}) の低下が抑えられ、産熱量を増加させずに同等の食道温 (T_{es}) を維持すると報告しており、保温水着着用時にも体幹部と四肢部で異なる環境条件となるため、全身一様な条件とは異なる体温調節応答を示す可能性がある。

本研究では、成人男性被験者を対象とした水浸安静実験により、保温水着着用時の体温変化、産熱応答、熱遮断能の変化などから、保温水着の形状を考慮して、保温水着の特徴および効果の検証を行うことを目的とした。

2. 方法

(1) 被験者

被験者は健康な成人男性10名(年齢 24.3 ± 1.4 歳, 身長 173.0 ± 3.7 cm, 体重 66.3 ± 4.2 kg, 体脂肪率 $16.9 \pm 1.8\%$, 平均皮下脂肪厚 8.6 ± 1.7 mm, 体表面積 1.79 ± 0.07 m²)を対象とした(平均±標準偏差)。各被験者の身体的特徴はTable 1に示す通りである。体脂肪率についてはインピーダンス式体組成計(BC-118, タニタ)を用いて測定した。皮下脂肪厚は栄養研式キャリパー(栄養研式; 明興社)を用いて, 上腕三頭筋, 肩甲骨下, 腹部, 上前腸骨棘上, 大腿前面, 下腿内側の6点で測定され, 各被験者の平均皮下脂肪厚を算出した。体表面積(surface area: SA ; m²)はDuBois and DuBois (1916)の式($SA = 0.007184 \cdot BW^{0.425} \cdot H^{0.725}$)に従って身長(height: H ; m)および体重(body weight: BW ; kg)の値から算出した。実験を行うにあたり, 全ての被験者に本研究の目的, 方法, 危険性などを十分に説明し, 参加への同意を得た。なお, 本研究は, 筑波大学体育科学系倫理委員会の承認を得た上で実施した。

(2) 実験プロトコール

本測定は2003年5月から7月に, T大学屋内プールにて実験用水槽(YSD-6000L, 吉田鉄工所, $1.7 \times 2.4 \times 1.4$ m)を用いて行われた。

被験者は実験開始1時間前に屋内プール内の実験室に来て安静にし, 測定環境に慣れるように指示された。まず, 食道温測定用プローブ(YSI700J/44202, 日機装 YSI)をエタノールで消毒後, 鼻腔より食道に挿入した。次に, 体表用サーミスタ(YSI709J/44202, 日機装 YSI)をサージカルテープにより皮膚温計測点に密着させた。また, 呼気ガス測定用マスク及びハートレートモニタ(ACCUREX Plus, POLAR)を装着した。

測定準備ができた被験者はFig.1に示されるプロトコールに従い実験を行った。まず陸上で10分間の座位安静を行い各測定項目の陸上安静値を測定した。続いて実験用水槽に入水し60分間の水浸座位安静を行った。全ての被験者が, 水温 $26, 29^{\circ}\text{C}$ の2段階, 水着が普通水着および保温水着の2条件の合計4回同一のプロトコールで実験を行った。各条件を26NSS (at 26°C with normal swimsuit), 26TSS (at 26°C with thermal swimsuit), 29NSS (at 29°C with normal swimsuit), 29TSS (at 29°C with thermal swimsuit)と略す。

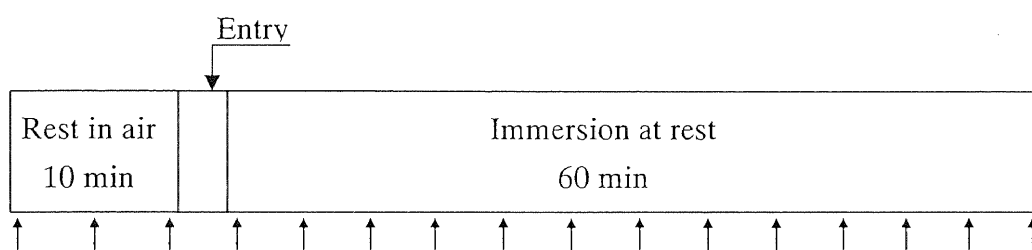
Table 1 Physical characteristics of the subjects

Subject	Age (year)	Height (cm)	Weight (kg)	% Fat (%)	MSFT (mm)	Surface area (m ²)
KJ	23	172.0	70.3	15.2	6.6	1.83
KZ	23	168.9	56.9	17.1	6.0	1.65
WT	25	174.5	69.9	18.3	9.3	1.84
NK	24	167.0	62.7	15.0	8.1	1.70
MW	25	172.0	68.0	18.6	9.4	1.80
SG	27	180.0	68.4	14.7	7.4	1.87
WK	25	176.9	63.3	14.9	10.2	1.78
KN	22	172.3	66.1	19.1	9.9	1.78
HY	24	173.0	68.9	17.4	8.1	1.82
OG	25	173.2	68.3	18.6	11.2	1.82
mean	24.3	173.0	66.3	16.9	8.6	1.79
SD	1.4	3.7	4.2	1.8	1.7	0.07

%Fat: percent of body fat

MSFT: mean skin fold thickness

Surface area = $0.007184 \cdot BW^{0.425} \cdot H^{0.725}$ (DuBois and DuBois, 1916)



Measurement

T_{es} , skin temperatures, \dot{V}_{O_2} , RER , HR

Thermal sensation, thermal comfort, shivering intensity: every 5 min = ↑

Fig. 1 Experimental protocol of experiment 1

なお、陸上安静時の着衣条件は全実験条件において普通水着着用とし、保温水着条件では水浸開始直前に保温水着を着用した。

本研究で用いた保温水着（206776-09, フットマーク）(thermal swimsuit: TSS) および対照とした普通水着（normal swimsuit: NSS）を Fig.2 に示した。保温水着の素材はネオプレン 86%, ナイロン 14%で、生地 thickness は 2mm, 形状はセパレイツタイプで上半身は胸部, 腹部, 背部および上腕部, 頸部を被覆し, 下半身は腰部および大腿部を被覆した。Hardy and DuBois (1938) の体表面積重み付け係数より算出した保温水着の被覆率は全身の約 61%であり, 普通水着は約 5%であった。定常熱流計法（日本工業標準調査会, 1999）により測定した濡れ状態の生地の熱伝導率は $0.183 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ だった。

各実験条件における水温, 室温, 相対湿度を Table 2 に示した。水温, 室温はサーミスタセンサー (YSI700J/44202, 日機装 YSI) により, 相対湿度は湿度変換器 (TA503, Toplas engineering) によって測定され, AD 変換器 (Powerlab/16SP, ADInstruments) を介してパーソナルコンピュータ (iBook, Apple) に取り込まれ 1 秒毎に記録された。水位は被験者の頸部位とし, 水槽内の水約 5500L を実験中 50L/min で循環させた。

測定は体温の日内変動（佐々木ら, 1978; 中山, 1981）を考慮し, 全測定を 15 時から 20 時までの間で, 各被験者が同一の時間帯に行った。各被験者は各実験条件をそれぞれ別の日に行ったが, 水温および水着条件の実験順序はランダムになるように行われた。また, 食事の影響を避けるため, 被験者には測定の 3 時間前までに食事を済ませるよう指示した。

(3) 測定項目

1) 体温

体温は深部温と皮膚温について測定した。本研究では深部温としては食道温 (Esophageal temperature: T_{es}) を測定し, 皮膚温 (Skin temperature: T_{sk}) は前額部 (T_{head}), 胸部 (T_{chest}), 背部 (T_{back}), 上腕部 ($T_{upper\ arm}$), 前腕部 ($T_{forearm}$), 手背部 (T_{hand}), 大腿部 (T_{thigh}), 下腿部 (T_{calf}), 足部 (T_{foot}) の 9 点で測定した。これらの測定値から以下の

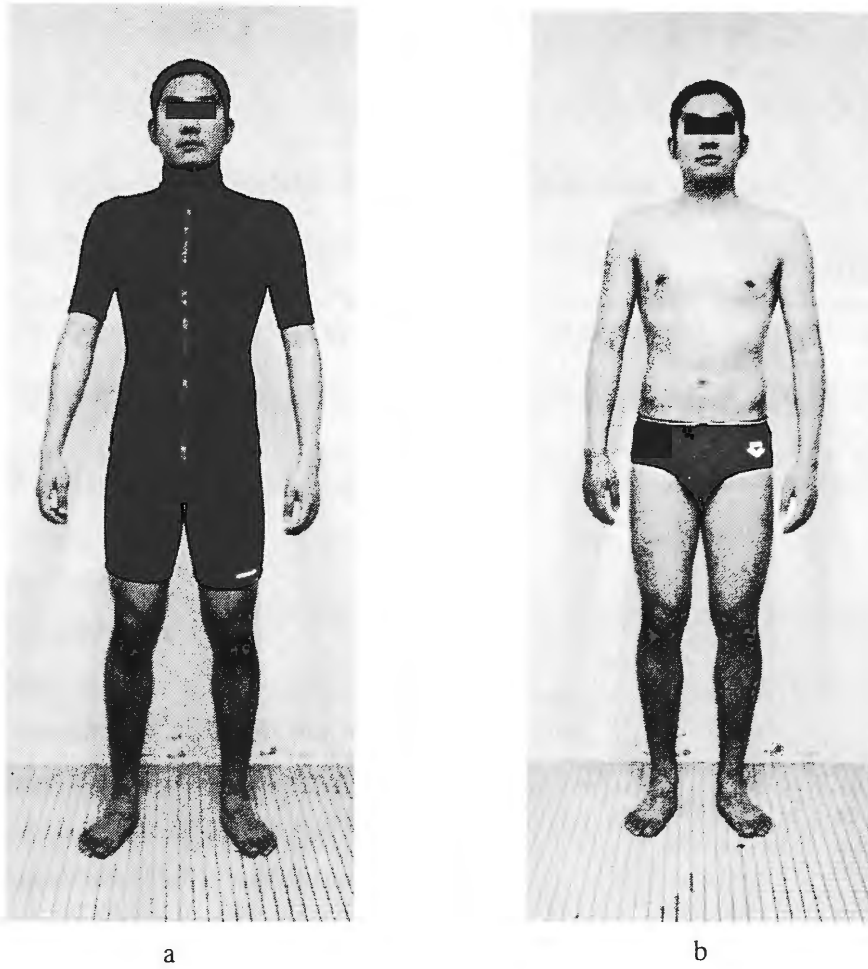


Fig. 2 Thermal swimsuit (TSS: a) and normal swimsuit (NSS: b) used in experiment 1 and 2

Table 2 Experimental environment

	26NSS	26TSS	29NSS	29TSS
T_w (°C)	26.12 (0.05)	26.14 (0.11)	29.06 (0.05)	29.05 (0.05)
T_a (°C)	26.40 (0.33)	26.06 (0.22)	26.42 (0.38)	26.32 (0.35)
%RH (%)	67.17 (4.10)	66.10 (3.20)	64.75 (3.54)	66.11 (3.29)

Values are mean (SD).

T_w : water temperature

T_a : air temperature

26NSS: condition at 26°C with normal swimsuit

26TSS: condition at 26°C with thermal swimsuit

29NSS: condition at 29°C with normal swimsuit

29TSS: condition at 29°C with thermal swimsuit

数式を用いて平均皮膚温 (\bar{T}_{sk}) および平均体温 (\bar{T}_b) を算出した。

$$\bar{T}_{sk} = 0.28 T_{\text{chest}} + 0.28 T_{\text{thigh}} + 0.22 T_{\text{calf}} + 0.14 T_{\text{forearm}} + 0.08 T_{\text{upper arm}} \quad (\text{Toner et al., 1985})$$

$$\bar{T}_b = 0.67 T_{es} + 0.33 \bar{T}_{sk} \quad (\text{Gagge and Nishi, 1977})$$

2) 代謝応答

呼吸ガスは蛇管を通して採取され、自動呼吸ガス分析装置 (AE-280S, ミナト医科学) を用いて、酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}), 呼吸交換比 (RER) を経時的に分析した。震えの指標として主観的震え強度 (Shivering intensity: SI) を被験者に 5 分毎に報告させた。震え強度については Fig.3 に示す「全く震えない」から「かなり震える」までの 4 段階の尺度 (Nielsen and Endrusick, 1990 より改変) を用いた。また、ハートレートモニタ (ACCUREX Plus, POLAR) を用いて心拍数 (heart rate: HR) を経時的に測定した。

3) 主観的応答

主観的溫度感覚 (thermal sensation: TS) および温熱的快不快感 (thermal comfort: TC) を被験者に報告させた。主観的溫度感覚は Fig.4-a に示した「暖かい」から「耐えられない」までの +3 ~ -13 までのスケール (Tanaka et al., 1985 より改変) を使用し、温熱的快不快感は Fig.4-b に示す visual analogue scale を用いて 10 cm の直線で「全く快適」(0) から「全く許容できない」(100) の範囲で回答させた (Nunneley et al., 1982 より改変)。

(4) 分析

1) 体温・代謝応答

体温は、 T_{es} , \bar{T}_{sk} , 各点の皮膚温について、各条件の経時変化を比較した。 T_{es} , \bar{T}_{sk} については、水浸前陸上安静の 10 分間の平均値を陸上安静値とし、陸上安静値からの変化量を経時的に比較した。各点の皮膚温については絶対値を経時的に比較した。

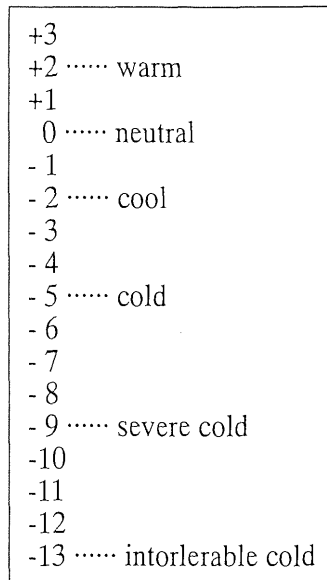
各条件における \dot{V}_{O_2} , 震え強度, HR の経時変化を比較した。また、60 分間の総酸素摂取量について各条件の比較を行った。さらに、水浸 60 分間の平均震え強度と総酸素摂取量の相関分析を行った。

2) 放熱量・熱遮断能

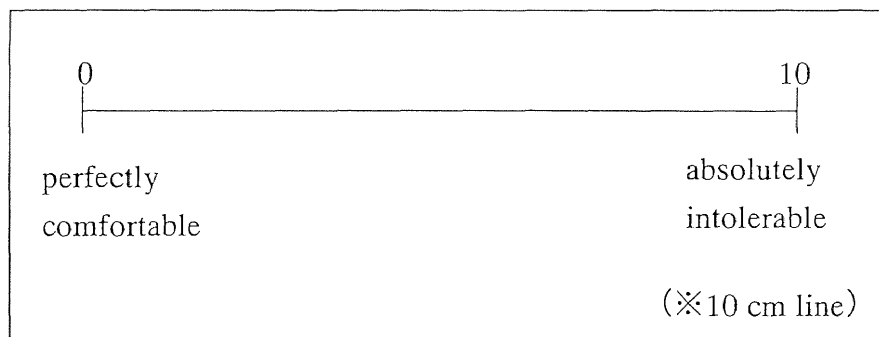
1	Not at all
2	Slightly shivering
3	Moderately shivering
4	Heavily shivering

Fig. 3 Scale of subjective shivering intensity

This scale was modified from Nielsen et al. (1990).



a. Thermal sensation



b. Thermal comfort

Fig. 4 Scale of subjective thermal sensation (a) and thermal comfort (b)

Thermal sensation scale was modified from Tanaka et al. (1985).

Thermal comfort scale was modified from Nunneley et al. (1982).

\dot{V}_{O_2} および RER から中山 (1981) の式に従って水浸 60 分間の産熱量 (M) を算出し、呼吸に伴う放熱量を全産熱量の 8% と仮定して (Rennie et al., 1962), その分を差し引いた体表面積当たりの産熱量 (M_s) を求めた。また、水浸 60 分間の \bar{T}_b の変化および人体の比熱と体重から体表面積当たりの貯熱量 (S_s) を算出した。また、Rennie et al. (1962) の方法に従って、 M_s および S_s から放熱量 (H_s) を算出した。

$$M_s = (M - 0.08M) / SA \quad [W \cdot m^{-2}]$$

M : 産熱量 [W]

$$M = 1.163 \cdot \dot{V}_{O_2} \cdot (3.815 + 1.232RER) \quad (\text{中山, 1981})$$

1.163: $1W = 1.163 \text{ kcal} \cdot h^{-1}$ として単位換算

0.08M: 産熱量のうち呼吸に伴う放熱量

SA: 体表面積 [m^2]

$$SA = 0.007184 \cdot BW^{0.425} \cdot H^{0.725} \quad (\text{DuBois et al., 1916})$$

$$S_s = 1.163 \cdot 0.83 \cdot \Delta \bar{T}_b \cdot BW / SA \quad [W \cdot m^{-2}]$$

1.163: $1W = 1.163 \text{ kcal} \cdot h^{-1}$ として単位換算

0.83: 身体の比熱 [$\text{kcal} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$]

$\Delta \bar{T}_b$: 水浸前から水浸終了時までの低下度 [$^\circ\text{C} \cdot h^{-1}$]

BW: 体重 [kg]

$$H_s = M_s - S_s \quad [W \cdot m^{-2}]$$

産熱量・貯熱量・放熱量について各条件間の比較を行った。

H_s および T_w と T_{es} 間の温度勾配から、Rennie et al. (1962) の方法に従って以下の式により全身の総熱遮断能 (I_{total}) を求めた。

$$I_{total} = (T_{es} - T_w) / H_s \quad [^\circ\text{C} \cdot m^2 \cdot W^{-1}]$$

また、Shiraki et al. (1986) の方法に従って、 H_s および \bar{T}_{sk} と T_{es} 間の温度勾配から以下の数式により身体組織の熱遮断能 (I_{tissue}) を求めた。

$$I_{tissue} = (T_{es} - \bar{T}_{sk}) / H_s \quad [^\circ\text{C} \cdot m^2 \cdot W^{-1}]$$

さらに、保温水着着用時については、Shiraki et al. (1986) の方法に従って、 I_{total} と I_{tissue}

の差から保温水着の熱遮断能 (I_{suit}) を求めた.

$$I_{\text{suit}} = I_{\text{total}} - I_{\text{tissue}} \quad [^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}]$$

なお, NSS 条件においても I_{suit} が算出されるのは T_w よりも \bar{T}_{sk} がわずかに高値を示すことによるもので, これは皮膚表面付近の水の熱遮断能と考えられるが, T_w と \bar{T}_{sk} の温度差がごくわずかであるため, 本研究では分析の際考慮しなかった.

I_{total} , I_{tissue} , I_{suit} について各条件間で比較を行った.

3) 主観応答

各条件の主観的温度感覚 (TS) および温熱的快不快感 (TC) の経時的変化を比較した.

(5) 統計処理

測定データは平均値±標準誤差で示した. 各測定項目の条件間の平均値の比較には, 対応のある二元配置の分散分析を用いた. 交互作用が見られた場合には Bonferoni の多重比較を行い, 交互作用が見られなかった場合には対応のある t 検定により各条件毎に比較を行った. また, 順位尺度データである震え強度, 主観的温度感覚, 温熱的快不快感については, Wilcoxon の符号付き順位検定を行った. 経時的データの比較は 5 分毎の各時点において行った. 水浸 60 分間の総酸素摂取量と平均震え強度との相関分析には Spearman の順位相関を用いた. いずれも有意性は危険率 5%未満で判定した.

3. 結果

(1) 体温

水浸前陸上安静時 10 分間の平均値を基準とした T_{es} の変化量の経時的変化を Fig. 5 に示した. 全条件で, 入水直後に陸上安静値より約 0.1°C 低い値を示した後, 10 分後まではわずかな変化であったが, その後, 水浸終了時まで徐々に低下した. 水温 26°C 環境では, 水浸 20 分後から水浸終了時 (水浸 60 分後) まで TSS 条件で NSS 条件よりも高

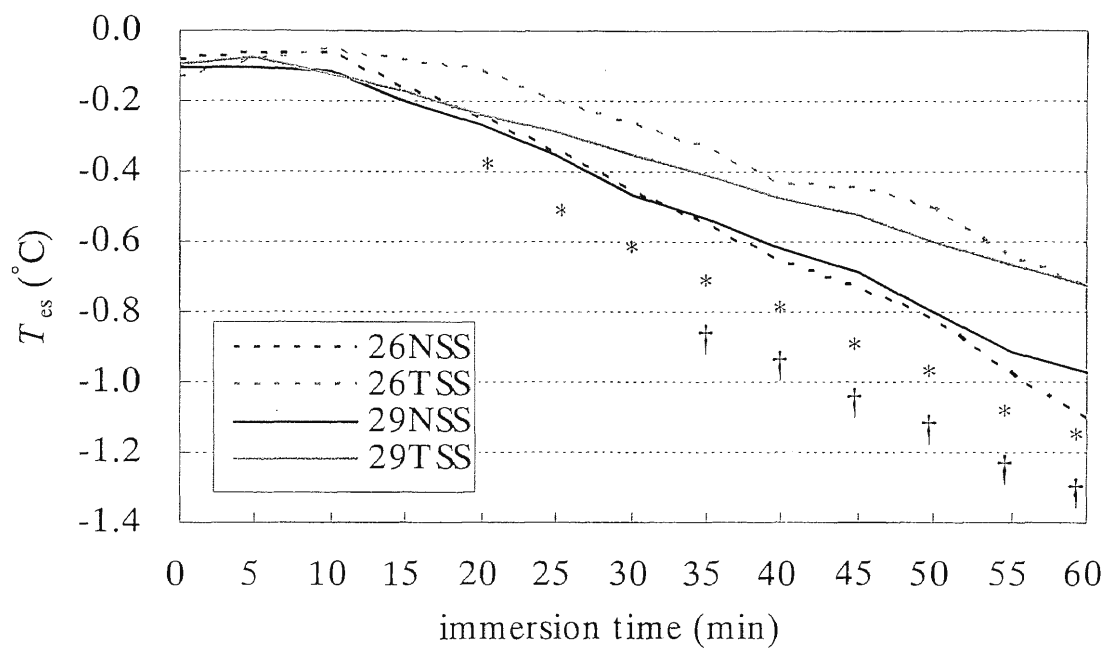


Fig. 5 Changes in esophagus temperature during 60 min immersion

T_{es} : esophagus temperature

* Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$).

† Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$).

い T_{es} を示した ($p < 0.05$). 水温 29°C 環境では, 水浸 35 分後から水浸終了時まで TSS 条件で NSS 条件よりも高い T_{es} を示した ($p < 0.05$). 水浸終了時 (水浸 60 分後) の T_{es} の変化量は, 26NSS で $-1.10 \pm 0.10^{\circ}\text{C}$, 26TSS で $-0.67 \pm 0.09^{\circ}\text{C}$, 29NSS で $-0.94 \pm 0.09^{\circ}\text{C}$, 29TSS で $-0.70 \pm 0.07^{\circ}\text{C}$ であった. 水浸終了時の T_{es} の絶対値は 26NSS で $35.87 \pm 0.10^{\circ}\text{C}$, 26TSS で $36.11 \pm 0.08^{\circ}\text{C}$, 29NSS で $35.81 \pm 0.13^{\circ}\text{C}$, 29TSS で $36.08 \pm 0.04^{\circ}\text{C}$ であった. 26, 29°C 環境とも TSS 条件で有意に高い値を示し ($p < 0.05$), その差はそれぞれ, 0.24°C , 0.27°C であった.

水浸前陸上安静時 10 分間の平均値を基準とした \bar{T}_{sk} の変化量の経時的変化を Fig. 6 に示した. 全条件で, 入水直後から 5 分後にかけて急激に \bar{T}_{sk} が低下し (26NSS: $-5.84 \pm 0.06^{\circ}\text{C}$, 26TSS: $-3.32 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$, 29NSS: $-3.39 \pm 0.11^{\circ}\text{C}$, 29TSS: $-1.71 \pm 0.07^{\circ}\text{C}$), その後水浸終了時 (26NSS: $-6.65 \pm 0.09^{\circ}\text{C}$, 26TSS: $-4.78 \pm 0.11^{\circ}\text{C}$, 29NSS: $-3.91 \pm 0.14^{\circ}\text{C}$, 29TSS: $-2.64 \pm 0.14^{\circ}\text{C}$) まで緩やかに低下した. 水温 26°C 環境, 29°C 環境とも, 水浸 5 分後から水浸終了時まで TSS で NSS よりも高い値を示した ($p < 0.05$). 水浸終了時の \bar{T}_{sk} の絶対値は, 26NSS で $27.09 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$, 26TSS で $28.79 \pm 0.09^{\circ}\text{C}$, 29NSS で $29.65 \pm 0.02^{\circ}\text{C}$, 29TSS で $31.06 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ であった. 26, 29°C 環境とも TSS 条件で有意に高い値を示し ($p < 0.05$), その差はそれぞれ, 1.70°C , 1.41°C であった. また, NSS 条件では水温に近い \bar{T}_{sk} を示した.

前額部皮膚温の経時的変化を Fig. 7 に示した. 前額部は水浸せず空気中に位置する部位であった. 全条件で水浸直後から水浸終了時にかけて徐々に低下を示した. 各条件間に有意差は見られなかった.

胸部, 背部, 上腕部, 大腿部皮膚温の経時的変化を Fig. 8 に示した. これらの部位は TSS 条件において保温水着に被覆される位置にあった. 各皮膚温について, 水温 26, 29°C 環境とも, NSS 条件では水浸 5 分後までに急激に低下し, その後はわずかな低下であったのに対し, TSS 条件では水浸 5 分後まで比較的緩やかに低下し, その後も水浸終了時まで徐々に低下を示した. 各皮膚温について, 水温 26, 29°C 環境とも, 水浸 5 分後から水浸終了時まで, TSS 条件で NSS 条件よりも有意に高い皮膚温を示した ($p <$

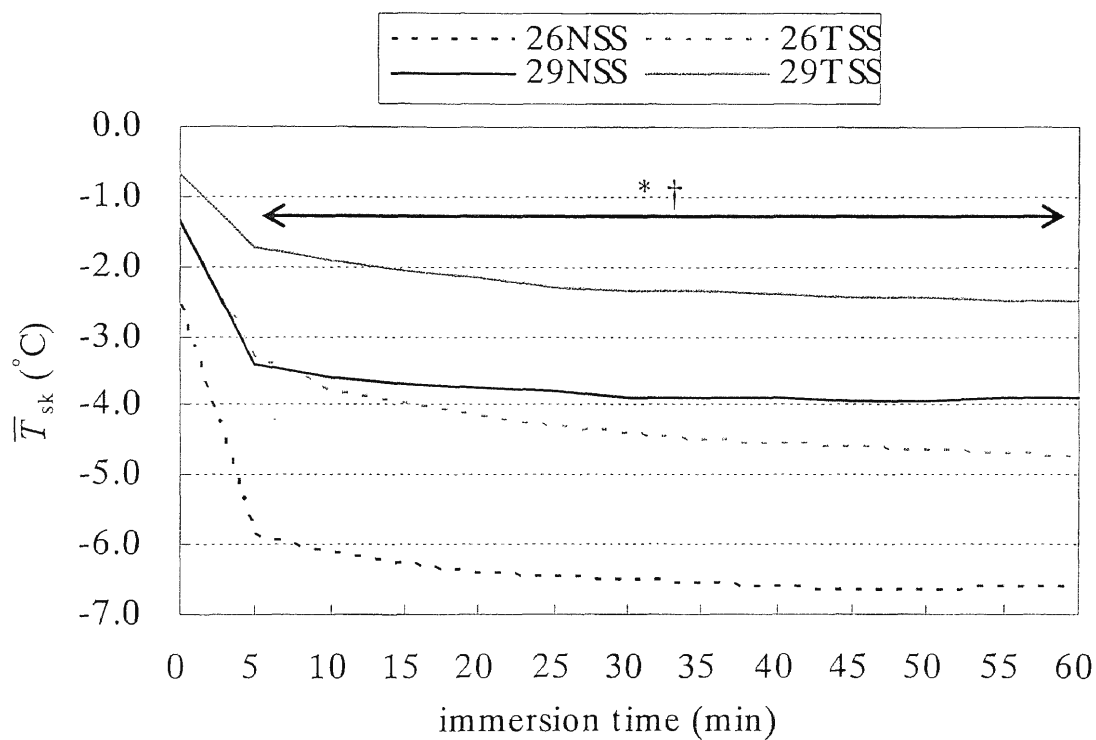


Fig. 6 Changes in mean skin temperature during 60 min immersion

\bar{T}_{sk} : mean skin temperature

* Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$).

† Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$).

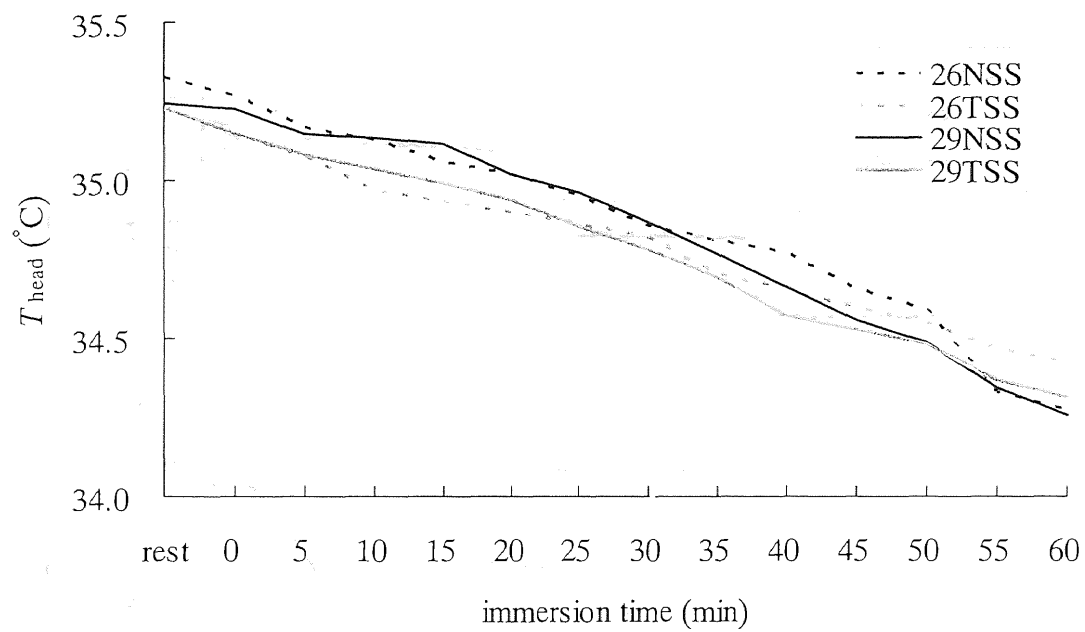


Fig. 7 Changes in head temperature during 60 min immersion

T_{head} : head temperature

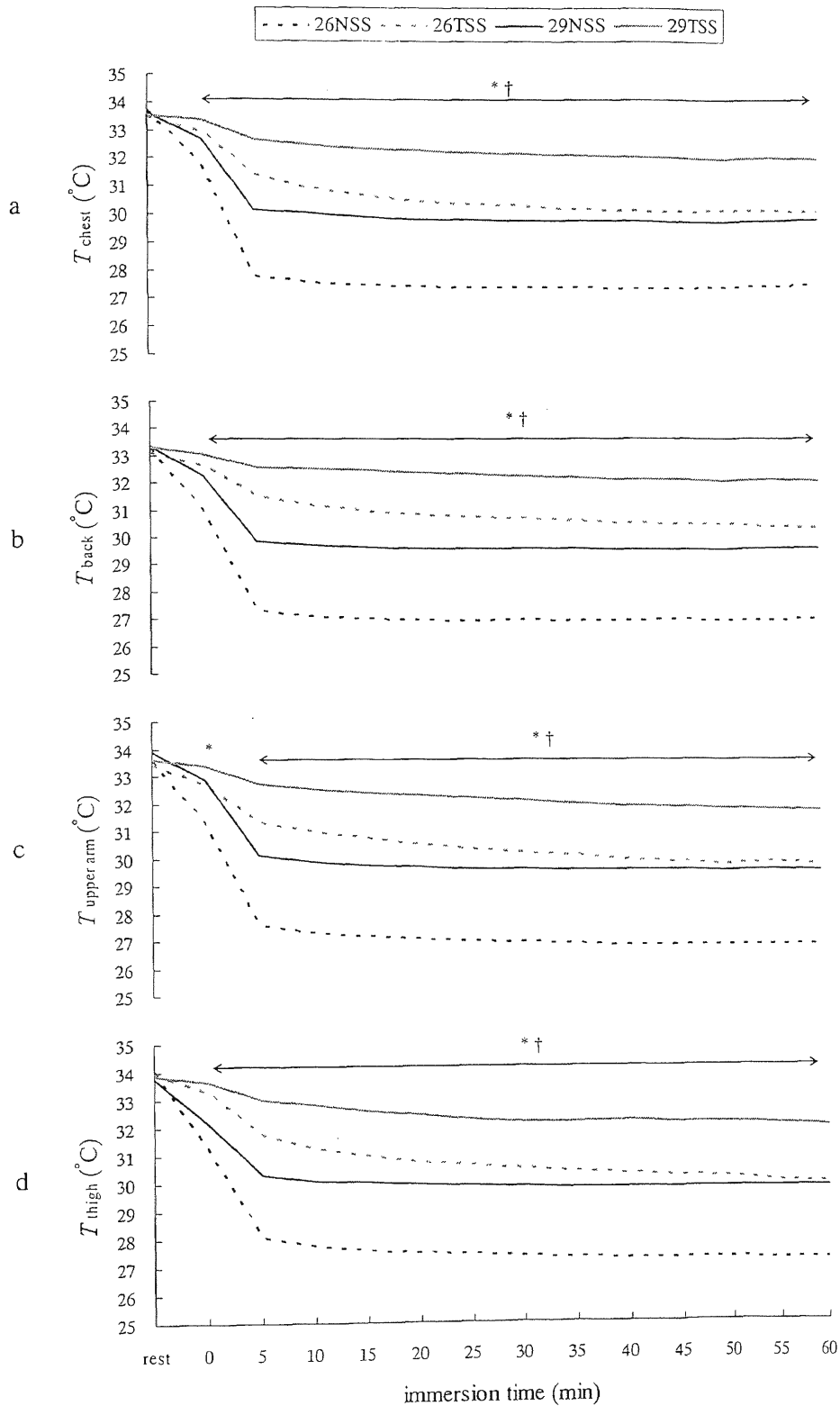


Fig.8 Changes in chest (a), back (b), upper arm (c) and thigh (d) temperature during 60min immersion

T_{chest} : chest temperature, T_{back} : back temperature, $T_{\text{upper arm}}$: upper arm temperature, T_{thigh} : thigh temperature. * Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$).

† Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$).

0.05). 胸部, 上腕部, 大腿部皮膚温については, 水浸終了時に 26TSS 条件と 29NSS 条件で近似した皮膚温を示した. 前述のように 26TSS 条件では皮膚温が水浸後徐々に低下し, 水浸 35 分後 (大腿部については 40 分後) までは 29NSS 条件よりも有意に高い皮膚温を示していたが ($p < 0.05$), 水浸 40 分後 (大腿部については 45 分後) に 29NSS 条件との差がなくなった. 背部皮膚温については, 水浸終了時まで 26TSS 条件で 29NSS 条件よりも有意に高い値を示したものの ($p < 0.05$), 他の部位と同様に 26TSS 条件で徐々に低下し, 29NSS 条件との差は小さくなった.

前腕部, 下腿部, 手背部, 足部皮膚温の経時的変化を Fig.9 に示した. これらの部位は TSS 条件において保温水着に被覆されず水中環境に露出される位置にあった. 各皮膚温について, 全条件で水浸 5 分後までに急激に低下した. その後, 水温 26, 29°C 環境とも, 水着条件間の差は見られず, ほぼ同等の値を示したまま水浸終了時まで徐々に低下した.

(2) 代謝応答

\dot{V}_{O_2} の経時的変化を Fig.10 に示した. 水浸前陸上安静時の 10 分間の平均値を陸上安静値とし, 26NSS で $4.00 \pm 0.08 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, 26TSS で $3.87 \pm 0.16 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, 29NSS で $3.97 \pm 0.12 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, 29TSS で $3.82 \pm 0.13 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ であった. 陸上安静値に条件間の有意差は見られなかった. 各条件で浸水に伴う動作によって浸水直後一時的に \dot{V}_{O_2} の増加が見られたが, アーティファクトとして分析対象から除外した. 水浸 5 分後の時点で, 26NSS 条件で他の条件よりも高い平均値を示し ($4.82 \pm 0.26 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$), 29TSS 条件では陸上安静値と同等の値を示し ($3.88 \pm 0.13 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$), 26TSS ($4.39 \pm 0.14 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) および 29NSS 条件 ($4.39 \pm 0.23 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) ではそのほぼ中間の値を示した. その後 25 分後までこの傾向のままほぼ平行に推移し, 水浸後 10 分, 20 分の時点で 26NSS 条件で 26TSS 条件よりも有意に高い値を示した ($p < 0.05$). 水浸 30 分後からは, 26NSS で徐々に \dot{V}_{O_2} が増加し, 26TSS 条件に比べて 30, 35 分および 45 分から水浸終了時まで有意に高い値を示した ($p < 0.05$). 26TSS および 29NSS 条件では同等

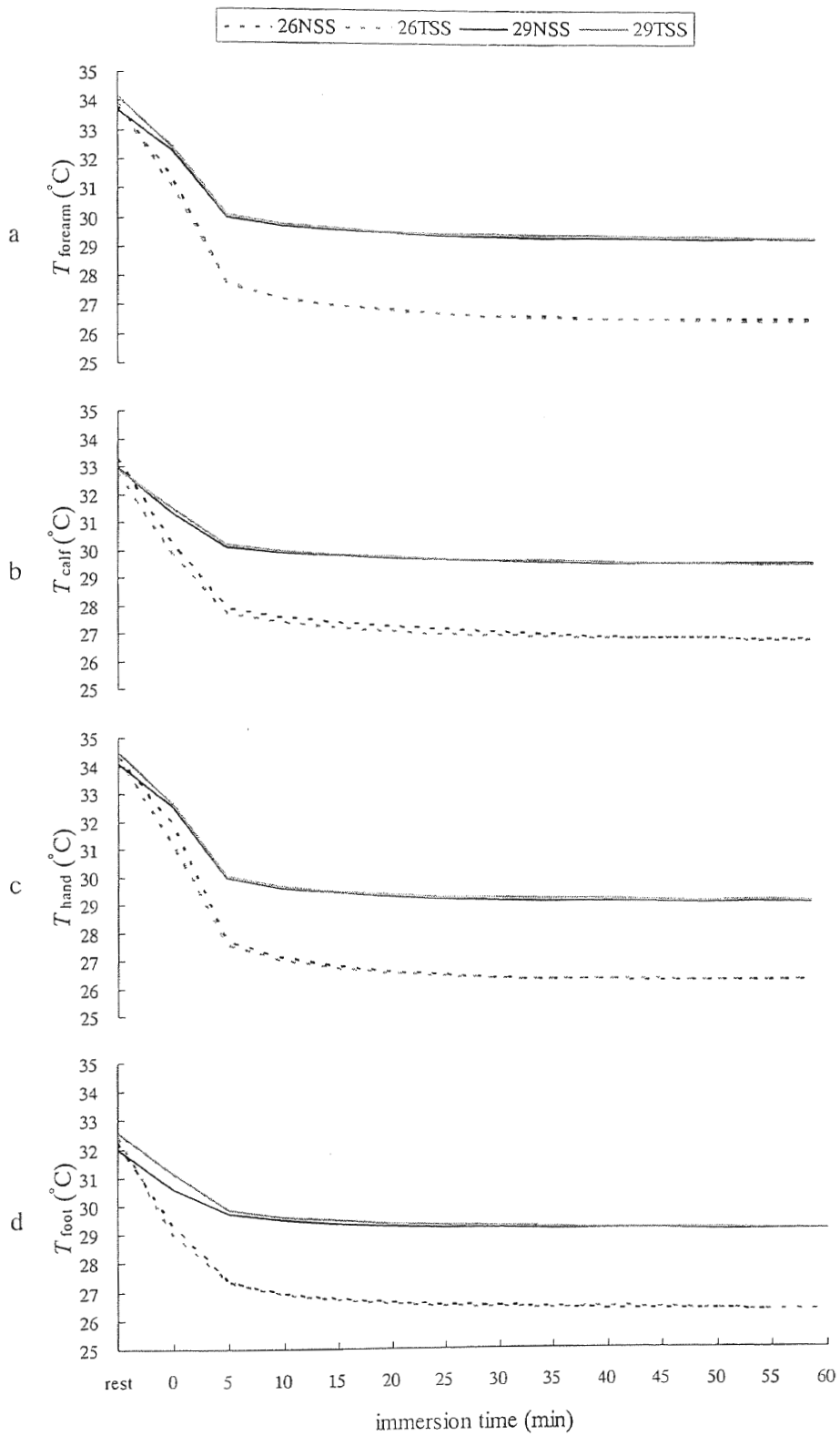


Fig.9 Changes in forearm (a), calf (b), hand (c) and foot (d) temperature during 60 min immersion

T_{forearm} : forearm temperature, T_{calf} : calf temperature, T_{hand} : hand temperature, T_{foot} : foot temperature

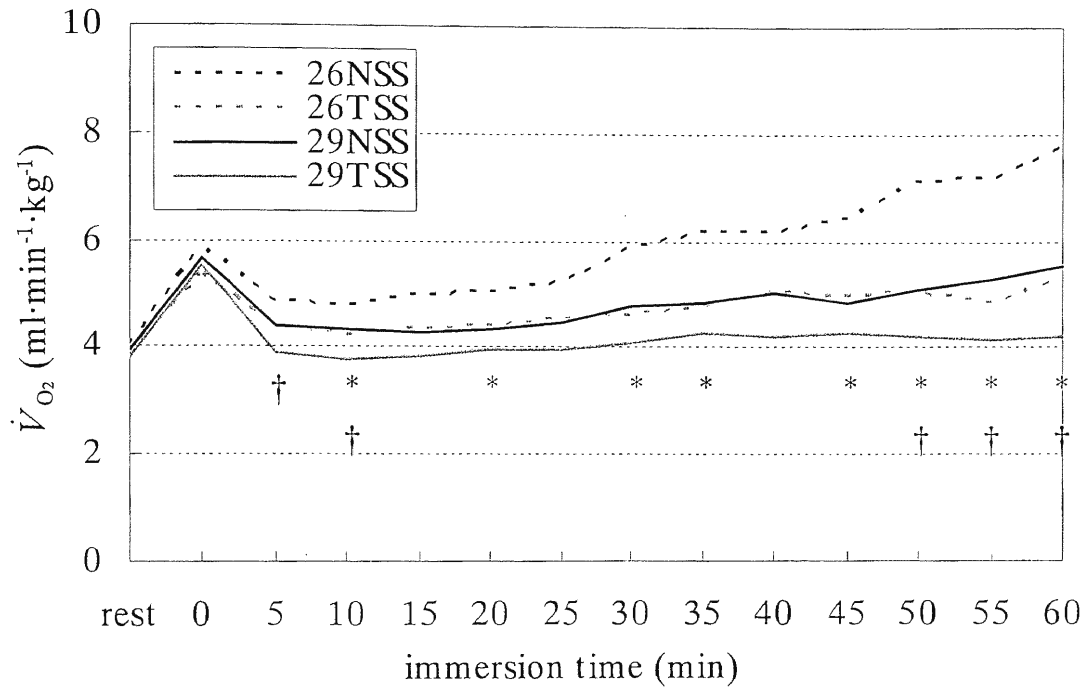


Fig. 10 Changes in oxygen uptake during 60 min immersion

\dot{V}_{O_2} : oxygen uptake

* Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$).

† Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$).

の値を示したまま水浸終了時まで \dot{V}_{O_2} が緩やかに増加した。水浸 50 分後から水浸終了時にかけて 29NSS で 29TSS 条件よりも有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。29TSS 条件では水浸終了時まで陸上安静値から大きな変化は見られなかった。水浸終了時における各条件の \dot{V}_{O_2} は、26NSS で $7.75 \pm 1.10 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、26TSS で $5.25 \pm 0.62 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、29NSS で $5.54 \pm 0.54 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、29TSS で $4.23 \pm 0.42 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ であった。

多くの被験者では 26NSS 条件において水浸中盤から水浸終了時にかけて徐々に \dot{V}_{O_2} の増加が見られ、平均値と同様な経時的変化を示したが、被験者によっては \dot{V}_{O_2} が水浸中盤に増加した後、水浸終了時には増加が抑えられる者も見られた。このような経時的変化の個人差を考慮し、60 分間の総酸素摂取量による条件間の比較も行った。各条件における 60 分間の総酸素摂取量を Fig.11 に示した。60 分間の総酸素摂取量は 26NSS で $350.1 \pm 23.4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、26TSS で $282.4 \pm 15.4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、29NSS で $285.8 \pm 19.1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、29TSS で $246.4 \pm 14.7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ であった。水温 26°C 、 29°C 環境とも NSS 条件で TSS 条件よりも高い総酸素摂取量を示した ($p < 0.05$: 26NSS > 26TSS, 29NSS > 29TSS)。また、同一水着条件では 26°C 環境で 29°C 環境よりも高い総酸素摂取量を示した ($p < 0.05$: 26NSS > 29NSS, 26TSS > 29TSS)。26TSS 条件と 29NSS 条件では差が見られなかった。

震え強度の経時的変化を Fig.12 に示した。水浸前陸上安静時の 10 分間の平均値を陸上安静値とし、全条件で全被験者が 1 (全く震えない) と回答した。水浸直後、各条件で 1 の回答が多かったが、26NSS 条件で他の条件よりもわずかに高い値を示した (26NSS: 1.5 ± 0.2 , 26TSS: 1.2 ± 0.1 , 29NSS: 1.3 ± 0.2 , 29TSS: 1.1 ± 0.1)。その後、26NSS 条件では水浸終了時まで徐々に高い震え強度を示した。29TSS 条件では水浸 25 分後まで全ての被験者が 1 と回答し、30 分後から数名の被験者で 2 (少し震える) の回答が得られ、わずかに平均値が上昇したが、水浸終了時まで全く震えない被験者が 3 名見られた。26TSS, 29NSS 条件では 26NSS, 29TSS 条件のほぼ中間の値を示しながら徐々に震えが増加した。水浸 25 分後までは 26TSS, 29NSS 条件でほぼ同等の震え強度を示したが、30 分後から 29NSS 条件でわずかに高い震え強度を示した。26TSS, 29NSS 条件においても水浸終了時まで全く震えを示さない被験者が 2 名見られた。水温 26°C 環境で

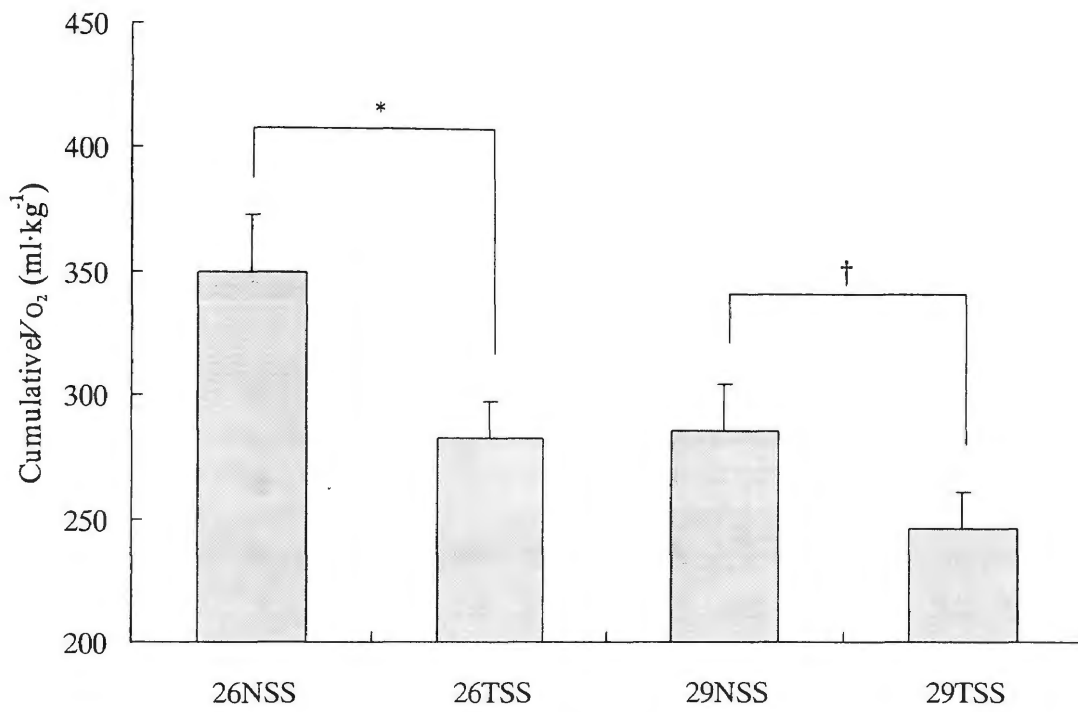


Fig. 11 Cumulative $\dot{V}O_2$ during 60 min immersion

* Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$).

† Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$).

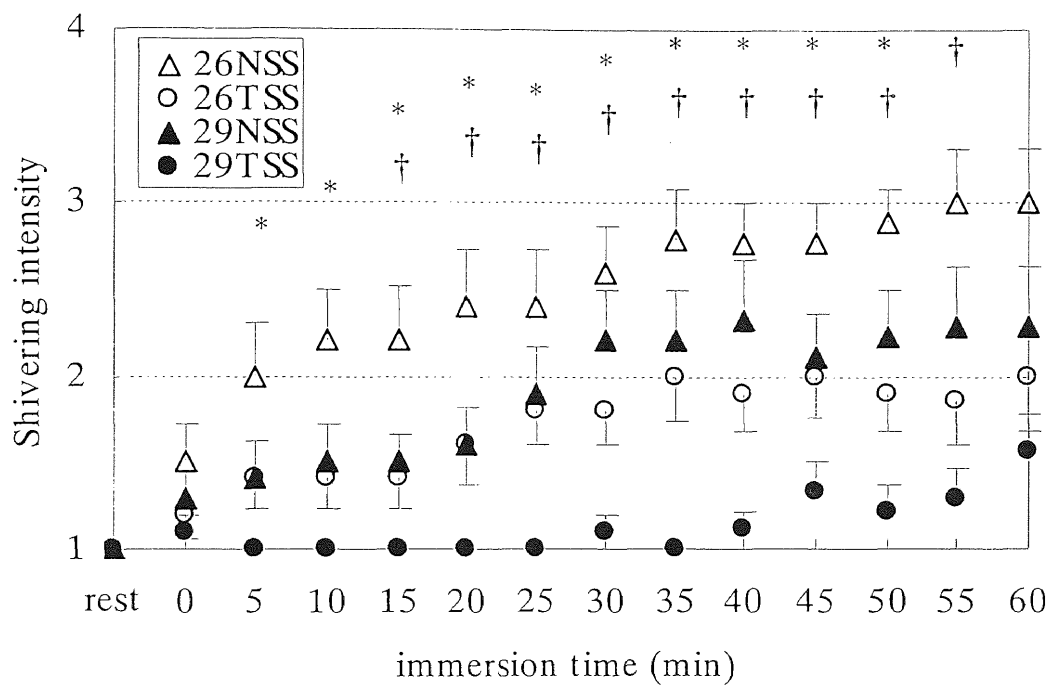


Fig. 12 Changes of subjects' perceived shivering intensity during 60 min immersion

Shivering intensity was subjects' perceived shivering level, which consisted of 4 levels indicated by the following numbers: 1 = no shivering, 2 = slight shivering, 3 = moderate shivering, and 4 = heavy shivering.

* Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$).

† Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$).

は水浸 5 分後から 50 分後まで、水温 29°C 環境では水浸 15 分後から 55 分後まで、TSS 条件で NSS 条件よりも有意に低い震え強度を示した ($p < 0.05$)。水浸終了時の震え強度には、条件間の有意差は認められなかった (26NSS: 3.0 ± 0.3 , 26TSS: 2.0 ± 0.3 , 29NSS: 2.3 ± 0.4 , 29TSS: 1.6 ± 0.2)。また、水浸 60 分間の震え強度の平均値は、26NSS で 2.5 ± 0.2 , 26TSS で 1.7 ± 0.2 , 29NSS で 1.9 ± 0.2 , 29TSS で 1.1 ± 0.0 であった。全実験条件を 60 分間行うことのできた被験者 7 名について、水浸 60 分間の平均の震え強度と総酸素摂取量との関係を Fig. 13 に示した。震え強度と総酸素摂取量に有意な相関関係が見られた ($p < 0.05$, $r = 0.521$)。

心拍数 (HR) の経時的変化を Fig.14 に示した。水浸前陸上安静時の 10 分間の平均値を陸上安静値とし、26NSS で 68.6 ± 2.4 bpm, 26TSS で 65.4 ± 2.2 bpm, 29NSS で 65.2 ± 2.8 bpm, 29TSS で 64.7 ± 2.4 bpm であった。統計的に有意ではないものの、26NSS 条件で他の条件よりも高い HR を示す傾向が見られた。各条件で水浸直後に HR の一過性の低下が見られ、水浸中は陸上安静時よりも低い HR を示した。水浸中の HR は各条件でわずかに増加したが、一様な傾向が見られず、各条件間に有意差は認められなかった。

(3) 放熱量

水浸 60 分間における体表面積あたりの産熱量 (M_s)、貯熱量 (S_s) および放熱量 (H_s) を Fig. 15 に示した。

M_s は 26NSS で 67.50 ± 4.66 W·m⁻², 26TSS で 54.74 ± 3.10 W·m⁻², 29NSS で 54.82 ± 3.84 W·m⁻², 29TSS で 47.56 ± 3.04 W·m⁻² であった。水温 26°C, 29°C 環境とも TSS 条件で NSS 条件よりも低い M_s を示した ($p < 0.05$: 26NSS > 26TSS, 29NSS > 29TSS)。また、同一着衣条件では 26°C 環境で 29°C 環境よりも高い M_s を示した ($p < 0.05$: 26NSS > 29NSS, 26TSS > 29TSS)。26TSS と 29NSS 条件では差が見られなかった。

S_s は 26NSS で -104.92 ± 2.71 W·m⁻², 26TSS で -70.86 ± 1.73 W·m⁻², 29NSS で -68.69 ± 1.85 W·m⁻², 29TSS で -46.45 ± 1.72 W·m⁻² であった。いずれの条件も平均体温が低下したため負の S_s を示した。水温 26°C, 29°C 環境とも TSS 条件で NSS 条件よりも高い S_s を示し

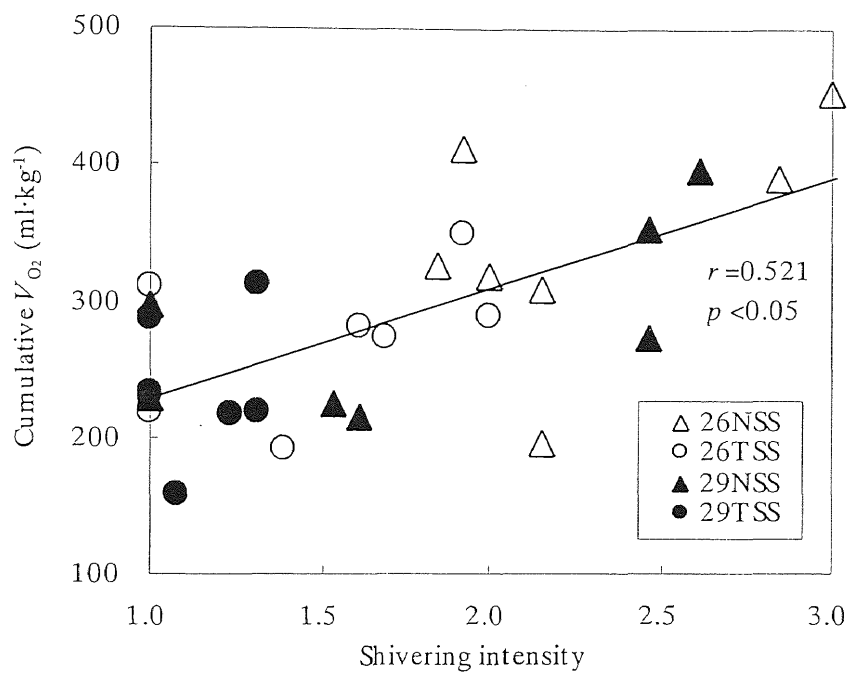


Fig. 13 Relationship between the average shivering intensity and cumulative V_{O_2} during water immersion

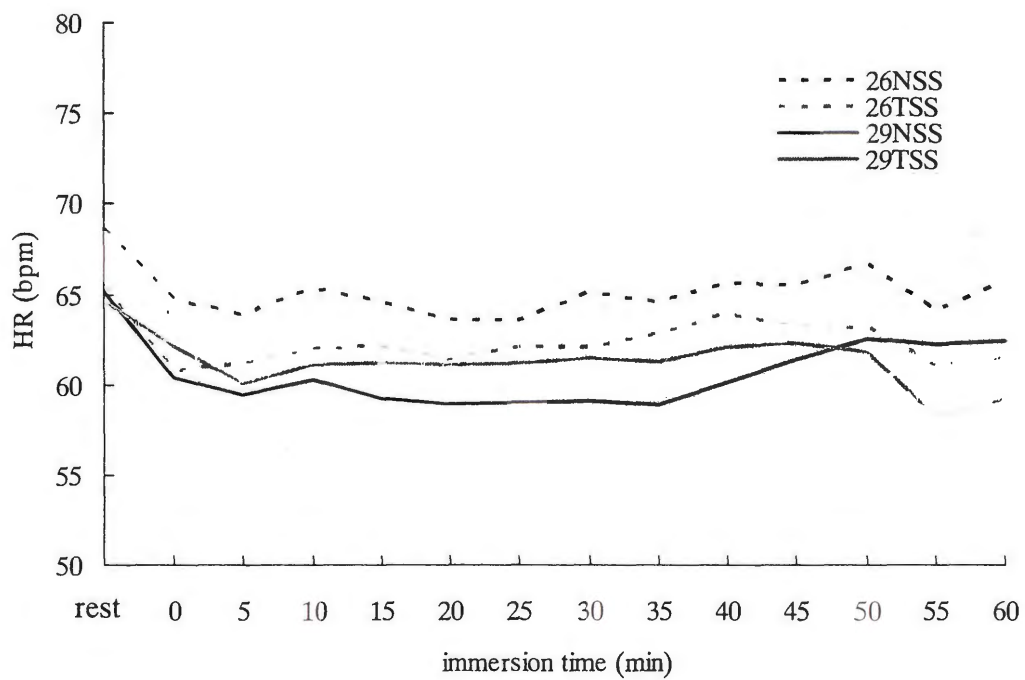


Fig. 14 Change in heart rate during 60 min immersion

HR: heart rate

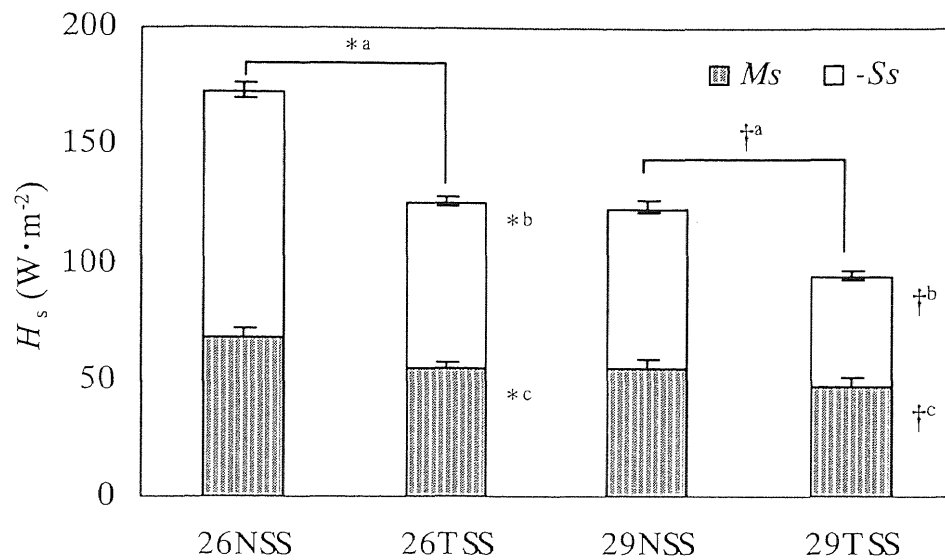


Fig. 15 Metabolic heat production, heat storage and heat loss from skin surface during 60 min immersion

M_s : metabolic heat production from the skin surface

S_s : heat storage from the skin surface

H_s : heat loss from the skin surface

$$H_s = M_s - S_s$$

*^a: Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of H_s .

*^b: Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of $-S_s$.

*^c: Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of M_s .

†^a: Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of H_s .

†^b: Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of $-S_s$.

†^c: Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of M_s .

た ($p < 0.05$: 26NSS < 26TSS, 29NSS < 29TSS). また, 同一着衣条件では 26°C 環境で 29°C 環境よりも低い s_s を示した ($p < 0.05$: 26NSS < 29NSS, 26TSS < 29TSS). 26TSS と 29NSS 条件では差が見られなかった.

H_s は 26NSS で $172.42 \pm 4.36 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 26TSS で $125.60 \pm 2.92 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 29NSS で $123.52 \pm 2.97 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 29TSS で $94.01 \pm 3.17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった. 水温 26°C , 29°C 環境とも TSS 条件で NSS 条件よりも低い H_s を示した ($p < 0.05$: 26NSS > 26TSS, 29NSS > 29TSS). また, 同一着衣条件では 26°C 環境で 29°C 環境よりも高い H_s を示した ($p < 0.05$: 26NSS > 29NSS, 26TSS > 29TSS). 26TSS と 29NSS 条件では差が見られなかった.

(4) 熱遮断能

水浸 60 分間における身体組織の熱遮断能 (I_{tissue}), 水着の熱遮断能 (I_{suit}) および総熱遮断能 (I_{total}) を Fig. 16 に示した.

I_{tissue} は 26NSS で $0.052 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, 26TSS で $0.059 \pm 0.002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, 29NSS で $0.051 \pm 0.002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, 29TSS で $0.055 \pm 0.002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった. 両水温環境で NSS 条件より TSS 条件で有意に高い値を示した ($p < 0.05$).

I_{suit} は 26TSS 条件で $0.021 \pm 0.0002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, 29TSS 条件で $0.021 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった. 26NSS, 29NSS 条件においても I_{suit} が示されたが, これは I_{total} から I_{tissue} を除する計算により生じたもので, 分析対象から除外した.

I_{total} は 26NSS で $0.057 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, 26TSS で $0.081 \pm 0.002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, 29NSS で $0.056 \pm 0.002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, 29TSS で $0.076 \pm 0.003^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった. 水温 26°C , 29°C 環境とも TSS 条件で NSS 条件よりも高い I_{total} を示した ($p < 0.05$: 26NSS < 26TSS, 29NSS < 29TSS).

(5) 主観応答

主観的温度感覚 (TS) の経時的変化を Fig. 17 に示した. 水浸前陸上安静時の 10 分間の平均値を陸上安静値とし, 26NSS で 0.3 ± 0.4 , 26TSS で 0.4 ± 0.2 , 29NSS で 0.4 ± 0.3 , 29TSS で 0.6 ± 0.3 であった. 陸上安静時は寒冷感を感じない熱的中立状態であり, 条件

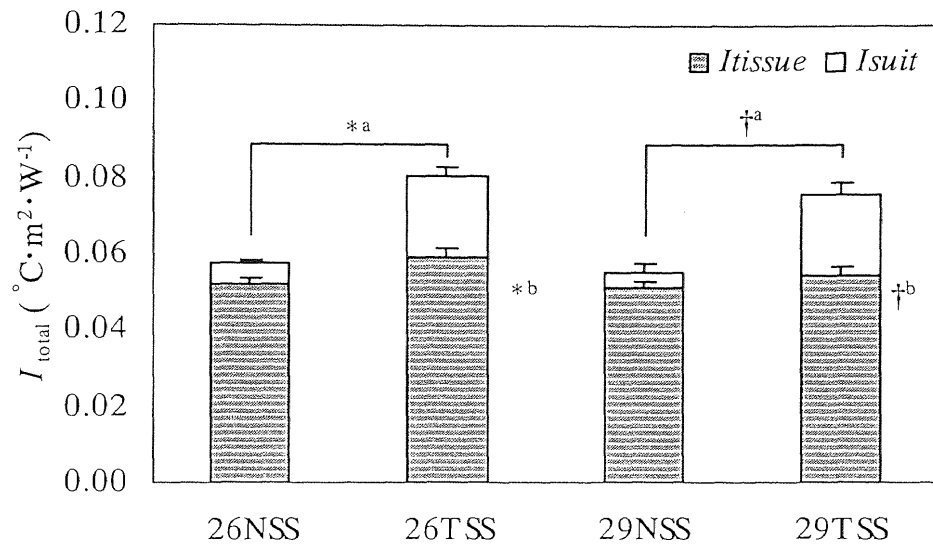


Fig. 16 Tissue insulation, suit insulation and total insulation during 60 min immersion

I_{total} : total insulation, $I_{\text{total}} = (T_{\text{es}} - T_{\text{w}}) / H_{\text{s}}$

I_{tissue} : tissue insulation, $I_{\text{tissue}} = (T_{\text{es}} - \bar{T}_{\text{sk}}) / H_{\text{s}}$

I_{suit} : suit insulation, $I_{\text{suit}} = I_{\text{total}} - I_{\text{tissue}}$

*^a: Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of I_{total} .

*^b: Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of I_{tissue} .

†^a: Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of I_{total} .

†^b: Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of I_{tissue} .

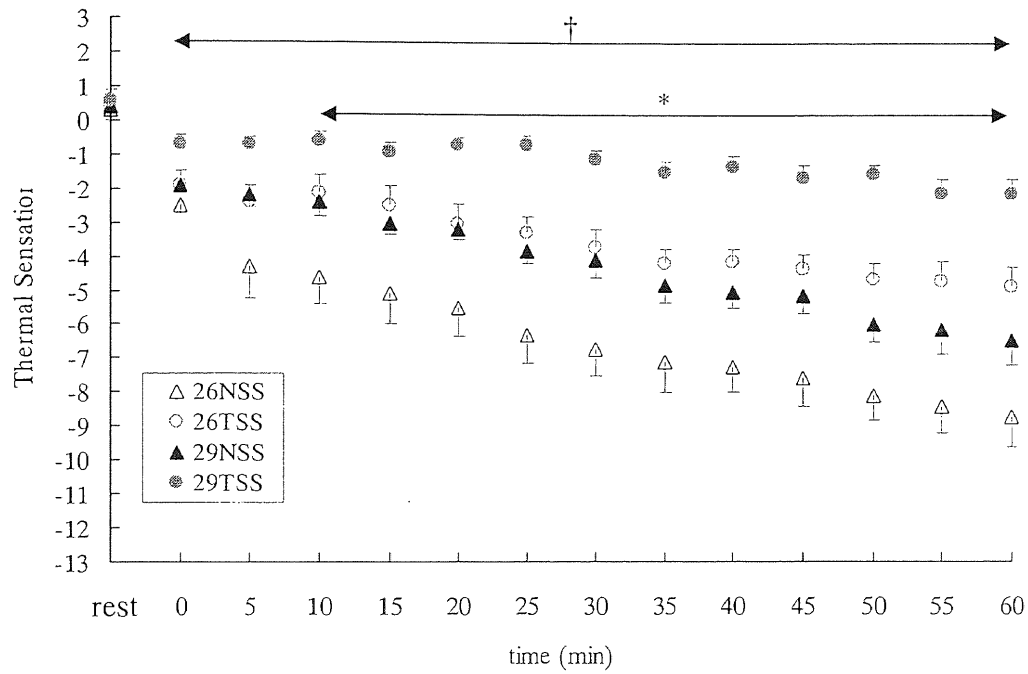


Fig. 17 Changes in thermal sensation during 60 min immersion

Thermal sensation was estimated by the scale, where 0 = “neutral”, -2 = “cool”, -5 = “cold”, -9 = “severe cold” and -13 = “intolerable cold”.

* Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$).

† Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$).

間に有意差は見られなかった。水浸直後、全条件で陸上安静時より低値を示した。26NSS, 26TSS, 29NSS 条件では-2 (冷たい) の回答が多かった (26NSS: -2.5 ± 0.3 , 26TSS: -1.9 ± 0.4 , 29NSS: -1.9 ± 0.2)。29TSS 条件では他の条件よりも熱的中立状態に近い回答が多く (-0.7 ± 0.3)、29NSS 条件に比べて有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。その後、26TSS 条件では徐々に寒冷感が強まり、水浸終了時では平均で -8.7 ± 0.9 (かなり寒い) まで低下した。26TSS, 29NSS 条件では水浸 30 分後までは両条件で同等の寒冷感を示しながら徐々に低下し、その後は 26TSS で 29NSS 条件よりわずかに高い値を示しながら低下した。水浸終了時の寒冷感 は 26TSS で -4.9 ± 0.6 , 29NSS で -6.4 ± 0.8 を示した (-5: 寒い)。29TSS 条件では水浸 25 分後までは水浸直後と同様に熱的中立状態に近い回答を示したが (-0.7 ± 0.2)、その後徐々に低下し、水浸終了時で -2.1 ± 0.5 (冷たい) を示した。水浸時間を通して、26NSS 条件で最も強い寒冷感を示し、29TSS 条件では最も弱い寒冷感を示し、26TSS, 29NSS 条件でその中間となる寒冷感を示した。水温 26°C 環境では水浸 10 分後から終了時まで、水温 29°C 環境では水浸直後から終了時まで、TSS 条件で NSS 条件よりも有意に高い TS を示した ($p < 0.05$)。

温熱的快不快感 (TC) の経時的変化を Fig. 18 に示した。水浸前陸上安静時の 10 分間の平均値を陸上安静値とし、26NSS で 5.6 ± 2.6 , 26TSS で 3.4 ± 1.5 , 29NSS で 5.3 ± 1.8 , 29TSS で 2.7 ± 1.3 であった。陸上安静時は温熱的に快適な状態にあり、条件間に有意差は見られなかった。水浸直後、全条件で陸上安静時より不快との回答が得られた。水浸直後から水浸終了時まで 26NSS 条件で最も高い値を示しながら徐々に不快感が増加した。29TSS 条件では最も低い値を示しながらわずかに不快感が増加した。26TSS, 29NSS 条件ではその中間となる値を示しながら徐々に不快感が増加した。26TSS, 29NSS 条件では水浸直後から水浸終了時までほぼ同様の経時的変化を示した。水浸終了時における TC の値は 26NSS で 62.6 ± 8.4 , 26TSS で 44.1 ± 8.1 , 29NSS で 44.6 ± 5.6 , 29TSS で 18.9 ± 3.7 であった。水温 26°C 環境では水浸直後から終了時まで、水温 29°C 環境では水浸 5 分後から終了時まで、TSS 条件で NSS 条件よりも有意に低い不快感を示した ($p < 0.05$)。

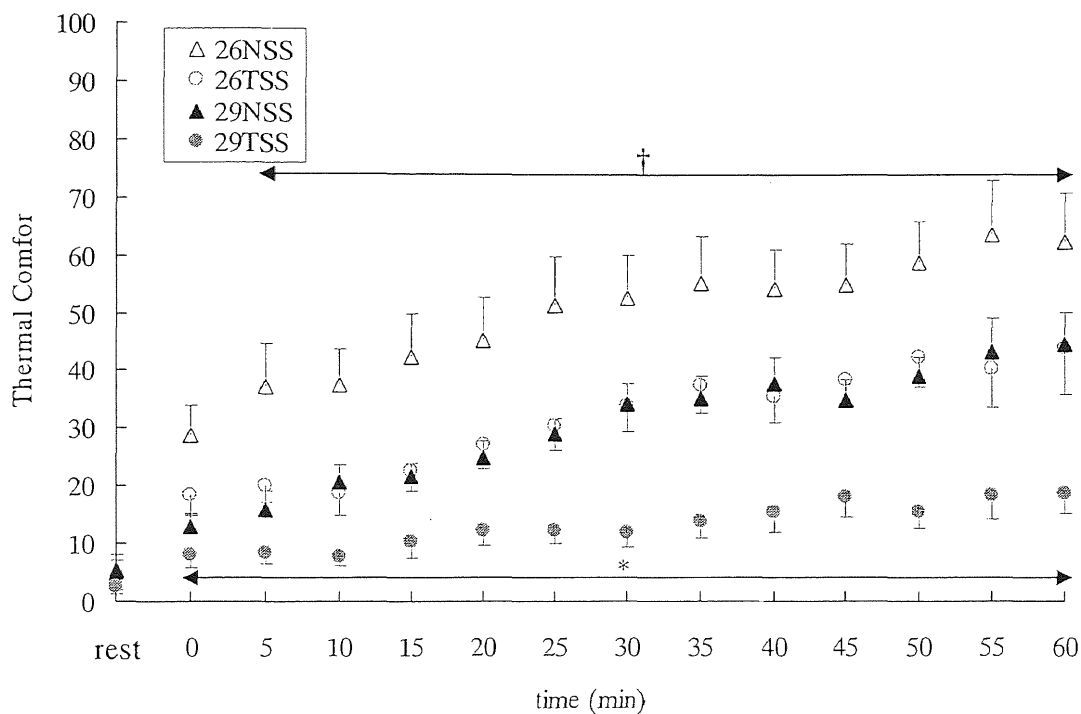


Fig. 18 Change in thermal comfort during 60 min immersion

Thermal comfort was estimated by VAS using 100 mm line marked at the ends, where 0 = “perfectly comfortable” and 100 = “absolutely intolerable”.

* Significant difference between 26NSS and 26TSS condition ($p < 0.05$).

† Significant difference between 29NSS and 29TSS condition ($p < 0.05$).

4. 考察

(1) 体温

本研究では、水浸直後に両水温環境においてNSS条件で \bar{T}_{sk} が急激に低下したが、TSS条件では緩やかな低下であった。Kang et al. (1983) や Shiraki et al. (1986) はウエットスーツ着用時と非着用時の体温変化の比較を行い、保温水着と同様にウエットスーツ着用時に緩やかな \bar{T}_{sk} の低下が見られたことを報告している。本研究で用いた保温水着もウエットスーツと同様のネオプレン製であり、被覆部位への浸水を抑えることにより、伝導や対流による熱放散を減少させ、高い \bar{T}_{sk} を維持したと考えられた。 \bar{T}_{sk} の変化とは異なり、 T_{es} は全ての条件において水浸後10分間陸上安静時の値を維持した。McArdle et al. (1984) は水温20, 24, 28°Cにおいて水浸安静を行わせ、いずれの水温条件においても水浸後10-20分間は T_{re} に変化が見られず、その後徐々に低下したことを報告している。これらの結果から、10分間程度の短い水浸では水着条件に関わらず T_{es} が維持されることが示された。水浸10分以降、全ての条件において T_{es} が徐々に低下したが、26°C環境では水浸20分後から、29°C環境では水浸35分後からTSS条件でNSS条件よりも有意に高い T_{es} を示した($p < 0.05$)。この結果から、低水温環境ほど水浸後早期に保温水着による深部温維持効果が見られることが示唆された。しかしながら、両水着条件において、水温26°Cおよび29°C環境による T_{es} 変化への影響が見られなかったが、26°C環境における震えによる産熱量の増加が T_{es} の低下を抑えたと考えられた。

(2) 代謝応答

4条件の水浸安静時における、震え強度と \dot{V}_{O_2} の経時的変化は同様の傾向を示した(Figs. 10, 12)。さらに、水浸安静60分間における総酸素摂取量と平均震え強度には有意な相関関係が認められており($p < 0.05$, Fig. 13)、骨格筋における震え熱産生が代謝性熱産生の増加を引き起こしたと考えられた(Holmer and Bergh, 1974; Nadel et al., 1973; Sagawa et al., 1988; Kang et al., 1983)。本研究では、両水温環境においてTSS条件の \dot{V}_{O_2} および震えレベルがNSS条件よりも低値を示しており、26-29°Cの水温環境での水浸安静

時に保温水着を着用することで、震え熱産生が抑えられることが示唆された。特に 29°C 環境において TSS 着用時に \dot{V}_{O_2} が陸上安静時からほとんど変化せず、熱的中立状態に近い状態にあることが示された。

(3) 放熱量

放熱量 (H_s) は、寒冷ストレスに対する代謝性熱産生と体温変化に伴う貯熱量変化を含めた指標であり、 H_s は人体の熱的な状態をよく反映していると考えられ、多くの先行研究で用いられている (Sagawa et al., 1988; Shiraki et al., 1988; Toner and McArdle, 1996)。本研究では、両水温環境において、TSS 着用時に低い H_s を示し、また、同一水着条件において、29°C 環境で 26°C 環境よりも低い H_s を示した (Fig. 15)。この結果は、TSS 着用により産熱が抑えられたことと、体温の低下を抑えたことを反映しており、TSS 着用により H_s が抑えられることが示された。さらに、26 TSS 条件と 29 NSS 条件で H_s 、 M_s 、 S_s が同様な値を示したことから、両条件における身体の熱的状态は類似した状態にあり、すなわち、26°C 環境で TSS を着用することは、水温にして 3°C 程度上昇したのと同等の効果があると考えられた。

(4) 熱遮断能

本研究で用いた TSS の I_{suit} は、先行研究において求められた水浸安静時のウエットスーツの I_{suit} (Yeon et al., 1987; Iwamoto et al., 1990) よりもかなり低い値を示した。本研究の TSS の I_{suit} が 26, 29°C 環境とも $0.021^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であったのに対し、ウエットスーツの I_{suit} は、16.5°C 環境で水浸安静を行った Yeon et al. (1987) の報告で $0.241^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ 、22.3°C 環境で水浸安静を行った Iwamoto et al. (1990) の報告で $0.121^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった。また、水中運動時にはウエットスーツの開口部からの浸水により安静時よりも I_{suit} が低下するという報告もあるが (Wolff et al., 1985)、水中運動時に求められたウエットスーツの I_{suit} でさえ本研究の水浸安静時における TSS の I_{suit} を上回っている (Yeon et al., 1987; Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986; Arieli et al., 1995)。これらのデータから、本研究で用

いた TSS の I_{suit} は先行研究で示されたウエットスーツの I_{suit} よりもかなり小さいものであることが示された。しかしながら、 I_{suit} の絶対値は水温環境や水浸時間、被験者の性別、計算方法（平均皮膚温の算出式）などによって影響をうけると考えられる。そこで、 I_{total} に占める I_{suit} の割合を求め、本研究の TSS と先行研究のウエットスーツで比較を行った。先行研究のウエットスーツにおいては I_{suit} の割合が I_{total} の 54–69% を示したのに対し（Yeon et al., 1987; Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986; Arieli et al., 1995; Iwamoto et al., 1990）、本研究の TSS は 26°C、29°C 環境で、それぞれわずか 26.5% と 28.2% であった。TSS において低い I_{suit} を示したのは、TSS の生地の高さが 2mm 程度とウエットスーツの 5–6mm に対して薄かったことと、TSS の形状が四肢遠位部を露出した形状であったことが影響したと考えられた。

本研究において、両水温条件で、TSS 着用により付加された熱遮断層が I_{total} を増加させ（Fig. 16）、この I_{total} の増加が H_s を低下させたと考えられた。 I_{tissue} は全条件で同様の値を示したが、両水温環境の TSS 条件において NSS 条件よりもわずかながら有意に高い値を示した（ $p < 0.05$ ）。

Kang et al. (1983) は水温 22.5°C における潜水活動中に、ウエットスーツ着用時に非着用時よりもわずかに低い I_{tissue} を示すことを報告した。Shiraki et al. (1986) も同様に水温 27°C における潜水活動中にウエットスーツ着用による I_{tissue} のわずかな低下を報告している。彼らは、この I_{tissue} の低下はウエットスーツ着用による寒冷血管収縮の減弱を反映したものと考察している。Bonde-Petersen et al. (1992) は、中立水温環境に比べて寒冷水温（15.2°C）環境において、高い血圧と総末梢血管抵抗を示したことを報告しており、同時に、寒冷血管収縮に伴う皮膚血流量の減少を確認している。一方で、本研究では両水温環境において TSS 着用時に NSS 条件よりもわずかに高い I_{tissue} を示す結果が得られ、ウエットスーツの先行研究とは異なる傾向であった。ウエットスーツが全身の大部分を被覆する形状であるのに対して、本研究における TSS が四肢遠位部を露出した形状であることと、生地の高さが薄いことが、上記のような I_{tissue} の変化の相違を示したと考えられた。すなわち、TSS 着用時に露出された四肢遠位部からの温度入力

末梢血管収縮を起こすのに十分であり、予想された末梢血管収縮の減弱が起こらなかったと推察された。

Choi et al. (1988) は、水温 17.3°C 環境で水浸安静時にウエットスーツに加えてグローブを着用した時の熱収支を測定しており、グローブ着用時に非着用時よりも I_{total} が 16% 低下したことを報告している。同様に、Park et al. (1992) は、水温 13°C 環境で水浸安静時および水中運動時に、ウエットスーツに加えてグローブおよびブーツを着用した時に I_{tissue} が低下することを報告している。彼らは手部や足部を低水温環境に露出することにより四肢の血管が収縮し、逆に、グローブやブーツ着用により四肢遠位部の冷点からの温度情報入力が増強した結果、寒冷血管収縮が抑えられたのではないかと推察している。本研究の TSS 着用時にはウエットスーツよりも広く四肢遠位部を露出しており、ウエットスーツの条件と異なり、冷点からの温度情報入力が増強を起こすのに十分であったと考えられた。その結果、TSS 条件で NSS 条件と同程度の I_{tissue} を示したと考えられた。

しかしながら、TSS 着用時に I_{tissue} がわずかに高い値を示したことは上記の血管収縮に伴う熱遮断能の変化のみでは説明がつかない。すなわち、TSS 着用により血管収縮が高まったとは考えにくく、 I_{tissue} に影響を与える他の生理的応答を検討する必要が生じた。 T_{cw} 環境において I_{tissue} が最大値を示すことがよく知られており (Rennie et al., 1962)、骨格筋および皮膚組織における血管収縮が最大になり、皮膚血流に伴う対流性熱放散が最小になると報告されている (Rennie et al., 1971; Veicsteinas et al., 1982)。また、 T_{cw} 以下の水温では震えが発現することにより I_{tissue} が低下するのではないかと報告されている (Sagawa et al., 1988; Choi et al., 2003)。本研究における設定水温 26, 29°C は Sagawa et al. (1988) の報告している裸体時の T_{cw} ($31.2 \pm 0.5^\circ\text{C}$) よりも低い水温であり、TSS 条件に比べて NSS 条件で高い震え強度が確認されている。さらに、四肢部に比べて体幹部でより早期により強い震えが発現すると言われており (Tikušis et al., 1991; Bell et al., 1992)、四肢部よりも体幹部で高い皮膚温状態にある時、震えを抑えることにより I_{tissue} の低下を抑え、より効率的に体温低下を防止できるという報告もある (Choi et al., 2003)。

本研究で用いた体幹部を覆う TSS は震えを効率的に抑え、結果的に NSS 条件よりも高い I_{tissue} を維持したと考えられた。

TSS 着用が I_{tissue} に及ぼす特異的な影響をまとめると、先行研究に示されるウエットスーツ着用時の I_{tissue} が裸体時に比べて低値を示すのに対して、保温水着着用時には I_{tissue} の低下は見られず、震えの軽減に伴い I_{tissue} が普通水着条件よりもわずかに高値を示した。

5. 要約

本研究では成人男性を対象に、水温 26, 29°C で 60 分間の水浸安静実験を行い、保温水着着用時の体温変化、産熱応答および熱遮断能の変化から、保温水着着用の効果および特徴の検証を行うことを目的とした。

本研究の結果から、水浸安静時における保温水着着用による以下の効果および特徴が明らかになった。

- (1) 保温水着条件で普通水着条件に比べて高い皮膚温および深部温を示し、また、震えなどの代謝性熱産生が低値を示した。
- (2) 保温水着の熱遮断能が付加された結果、総熱遮断能が増加し、身体表面からの放熱量が普通水着条件よりも低値を示した。
- (3) 保温水着着用時に普通水着条件よりもわずかに高い身体組織の熱遮断能を示した。この結果は先行研究に示されるウエットスーツ着用時の身体組織の熱遮断能の低下とは異なる応答であった。

V. 成人被験者を対象とした水中運動時における保温水着着用の効果（実験2）

1. 目的

先行研究に示したように、低水温環境での中強度の運動が安静時よりも熱放散を増加させることが報告されている（McArdle et al., 1992; Keatinge and Evanse, 1961; Sloan and Keatinge, 1973）。これは、活動筋における血流の増加が身体深部から皮膚までの熱伝達を促進し、身体組織の熱遮断能 (I_{tissue}) を低下させたことと（Veicsteinas et al., 1982）、水中での動作に伴う対流の増加が皮膚表面から水への熱放散を増加させたことによると報告している（Nadel et al., 1974）。低水温環境で深部温を維持しながら運動するには、運動強度を高くする必要がある（McArdle et al., 1992; McArdle et al., 1976; Toner et al., 1985; McMurray and Horvath, 1979）。しかしながら、小学校水泳授業は運動強度が低く（黒川ら, 1991; 上田ら, 1992; 甲斐ら, 1987）、十分な産熱が確保されるとは考えにくい。そこで、先行研究に示されるような水中運動時の I_{tissue} の低下（Sagawa et al., 1988; Park et al., 1984）を補うために、保温水着を着用することで、身体表面からの放熱を抑え体温を維持できるのではないかと考えられた。

本研究では、水泳授業の下限水温とされる 23°C 環境で（文部科学省, 2004）、低強度から中強度の運動を行った際の、成人被験者の体温変化および熱遮断能の変化から、保温水着着用の効果을明らかにすることを目的とした。また、安静時と同様に運動時においても保温水着特有の効果の特徴を明らかにすることを目的とした。さらに、身体特性の個人差による効果の違いを熱遮断能の指標を用いて検討し、身体特性差に応じた保温水着の有効性について明らかにすることを目的とした。

2. 方法

(1) 被験者

被験者は健康な成人男性 9 名（年齢 25.4 ± 2.1 歳，身長 175.7 ± 4.2 cm，体重 70.6 ± 4.5

kg, 体脂肪率 $19.1 \pm 2.3\%$, 平均皮下脂肪厚 9.5 ± 2.8 mm, 体表面積 $1.86 \pm 0.08\text{m}^2$) を対象とした (平均 \pm 標準偏差). 各被験者の身体的特徴は Table 3 に示す通りである. 体脂肪率についてはインピーダンス式体組成計 (BC-118, タニタ) を用いて測定した. 皮下脂肪厚は栄養研式キャリパー (栄養研式; 明興社) を用いて, 上腕三頭筋, 肩甲骨下, 腹部, 腸骨棘上, 大腿前面, 下腿内側の 6 点で測定され, 各被験者の平均皮下脂肪厚を算出した. 体表面積 (surface area: SA ; m^2) は DuBois and DuBois (1916) の式 ($SA = 0.007184 \cdot BW^{0.425} \cdot H^{0.725}$) に従って身長 (height: H ; m) および体重 (body weight: BW ; kg) の値から算出した. 実験を行うにあたり, 全ての被験者に本研究の目的, 方法, 危険性などを十分に説明し, 参加への同意を得た. なお, 本研究は, 筑波大学体育科学系倫理委員会の承認を得た上で実施した.

(2) 実験プロトコール

本測定は 2005 年 2 月から 3 月および 2005 年 12 月から 2006 年 2 月にかけて, T 大学屋内プールにて温度制御可能な実験用水槽 (YSD-6000L, 吉田鉄工所, $1.7 \times 2.4 \times 1.4\text{m}$) を用いて行われた.

被験者は実験開始 1 時間前に屋内プール内の実験室に来て安静にし, 測定環境に慣れるように指示された. まず, 食道温測定用プローブ (YSI700J/44202, 日機装 YSI) をエタノールで消毒後, 鼻腔より食道に挿入した. 次に, 体表用サーミスタ (YSI709J/44202, 日機装 YSI) をサージカルテープにより皮膚温計測点に密着させた. また, 呼気ガス採取用マスク及びハートレートモニタ (ACCUREX Plus, POLAR), 血圧測定用カフを装着した.

測定準備ができた被験者は Fig. 19 に示されるプロトコールに従い実験を行った. まず陸上で 5 分間の座位安静を行い各測定項目の陸上安静値とした. 続いて実験用水槽に入水し 8 分間の水浸座位安静を行った. その後, 水中自転車エルゴメータ (Fig. 20, YSD 社製) を 50rpm で 30 分間こぎ続けた. 全ての被験者が, 運動強度が低強度 (Low) および中強度 (Moderate) の 2 段階, 水着が普通水着 (NSS) および保温水着 (TSS) の 2

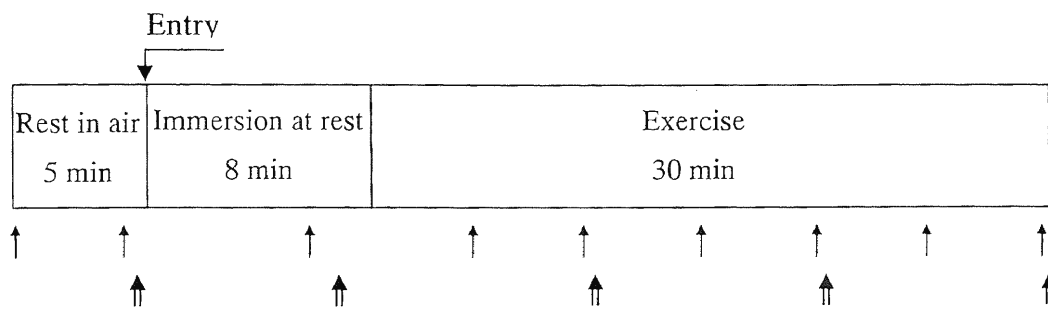
Table 3 Physical characteristics of the subjects

Subject	Age (year)	Height (cm)	Weight (kg)	% Fat (%)	MSFT (mm)	Surface area (m ²)
KJ	25	172.5	69.6	17.7	5.8	1.82
SG	29	180.0	71.9	16.9	8.8	1.91
KN	24	172.0	67.0	23.6	12.1	1.79
JN	23	181.0	79.5	19.9	13.5	2.00
MW	28	172.0	68.9	18.8	8.8	1.81
MS	23	174.3	68.0	17.5	7.8	1.82
WT	27	174.0	68.1	16.8	6.3	1.82
ST	25	182.3	76.3	21.6	12.8	1.97
TK	25	173.0	65.9	19.3	9.3	1.79
mean	25.4	175.7	70.6	19.1	9.5	1.86
SD	2.1	4.2	4.5	2.3	2.8	0.08

%Fat: percent of body fat

MSFT: mean skin fold thickness

Surface area = $0.007184 \cdot BW^{0.425} \cdot H^{0.725}$ (DuBois and DuBois, 1916)



Measurement

T_{es} , skin temperatures, \dot{V}_{O_2} , RER , HR

Blood pressure: every 5 min = ↑

Thermal sensation, thermal comfort, shivering intensity: every 10 min = ⇧

\dot{Q}_c (Rebreathing method) : every 10 min = ⇧

Fig. 19 Experimental protocol of experiment 2

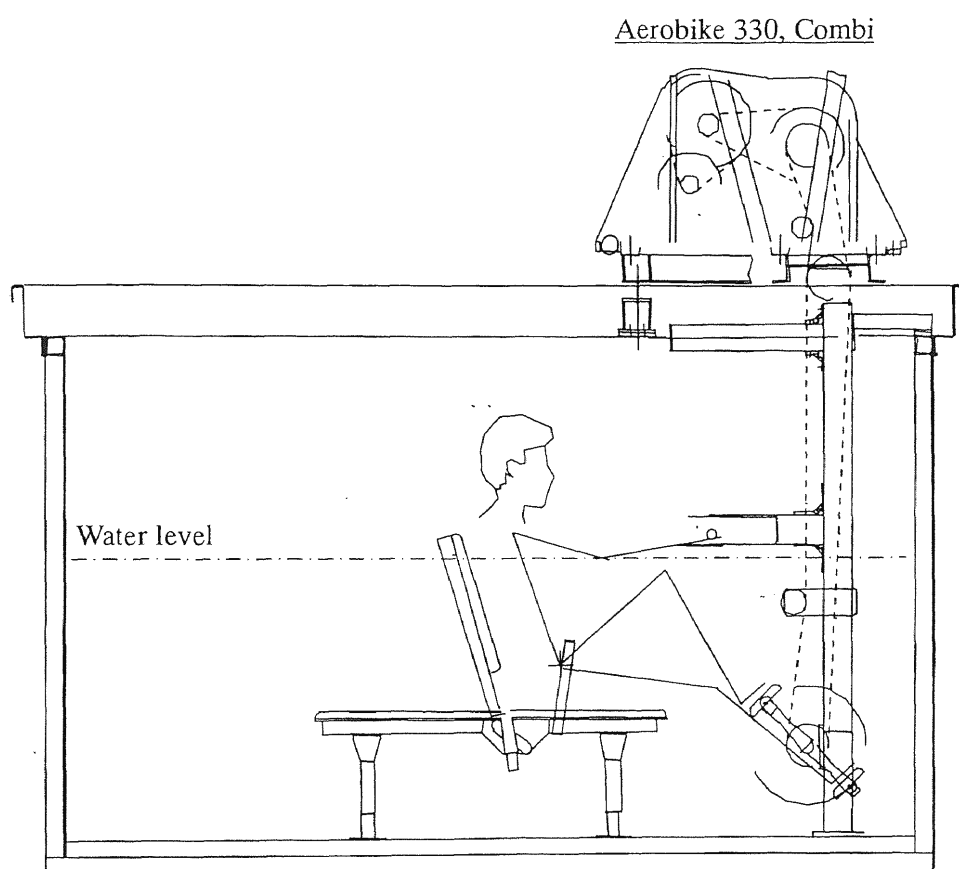


Fig. 20 Scheme of the underwater cycle-ergometer

条件の合計4回同一のプロトコールで実験を行った。各実験条件を Low_NSS, Low_TSS, Moderate_NSS, Moderate_TSS と略す。なお、陸上安静時の着衣条件は全条件において普通水着着用とし、保温水着条件では水浸開始直前に保温水着を着用した。

運動強度については、全被験者で同一絶対強度に設定した。水中エルゴメータを用いた漸増負荷運動により、最高酸素摂取量 ($\dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$) を測定し、各被験者の相対運動強度 ($\% \dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$) を算出した。また、最大心拍数 (HR_{max}) を年齢から推定し ($HR_{\text{max}} = 220 - \text{年齢}$)、各被験者の相対運動強度 ($\% HR_{\text{max}}$) を算出した。

本研究で用いた保温水着 (206776-09, フットマーク) (TSS) および対照とした普通水着 (NSS) は実験1と同様のものを用いた (Fig. 2)。

各実験条件における水温, 室温, 相対湿度を Table 4 に示した。水温, 室温はサーミスタセンサー (YSI700J/44202, 日機装 YSI) により, 相対湿度は湿度変換器 (TA503, Toplas engineering) によって測定され, AD変換器 (Powerlab/16SP, ADInstruments) を介してパーソナルコンピュータ (PowerBookG3, Apple) に取り込まれ1秒毎に記録された。水位は被験者の胸部位とし, 水槽内の水約5000Lを実験中50L/minで循環させた。

測定は体温の日内変動 (佐々木ら, 1978; 中山, 1981) を考慮し, 全測定を15時から20時までの間で, 各被験者が同一の時間帯に行った。各被験者は各実験条件をそれぞれ別の日に行ったが, 運動強度および水着条件の実験順序はランダムになるように行われた。また, 食事の影響を避けるため, 被験者には測定の3時間前までに食事を済ませるよう指示した。

(3) 測定項目

1) 体温

体温は深部温と皮膚温について測定した。本研究では深部温としては食道温 (T_{es}) を測定し, 皮膚温 (Skin temperature: T_{sk}) は前額部 (T_{head}), 胸部 (T_{chest}), 腹部 (T_{abdomen}), 背部 (T_{back}), 上腕部 ($T_{\text{upper arm}}$), 前腕部 (T_{forearm}), 手背部 (T_{hand}), 大腿部 (T_{thigh}), 下腿部 (T_{calf}), 足部 (T_{foot}) の10点で測定した。これらの測定値から以下の数式を用いて

Table 4 Experimental environment

	Low intensity		Moderate intensity	
	NSS	TSS	NSS	TSS
T_w (°C)	23.16 (0.05)	23.12 (0.05)	23.15 (0.06)	23.12 (0.05)
T_a (°C)	23.47 (1.23)	22.90 (0.81)	23.55 (0.67)	23.43 (0.85)
%RH (%)	56.75 (6.47)	56.91 (7.33)	57.03 (6.88)	57.67 (6.87)

Value are mean (SD).

T_w : water temperature

T_a : air temperature

NSS: normal swimsuit

TSS: thermal swimsuit

平均皮膚温 (\bar{T}_{sk}) および平均体温 (\bar{T}_b) を算出した.

$$\bar{T}_{sk} = 0.07T_{head} + 0.35(T_{chest} + T_{abdomen} + T_{back}) / 3 + 0.14(T_{upperarm} + T_{forearm}) / 2 + 0.05T_{hand} + 0.19T_{thigh} + 0.13T_{calf} + 0.07T_{foot} \quad (\text{Hardy and DuBois, 1938 を改変})$$

$$\bar{T}_b = 0.67 T_{es} + 0.33 \bar{T}_{sk} \quad (\text{Gagge and Nishi, 1977})$$

2) 代謝応答

呼気ガスは蛇管を通して採取され、質量分析式呼気ガス分析装置 (WEMS2000; ウエストロン) を用いて、酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}), 呼吸交換比 (RER) を経時的に測定した. 震えの指標として震え強度 (Shivering intensity: SI) を被験者に 10 分毎に報告させた. 震え強度については Fig. 3 に示す「全く震えない」から「かなり震える」までの 4 段階の尺度 (Nielsen and Endrusick, 1990 より改変) を用いた. また, ハートレートモニター (ACCUREX Plus, POLAR) を用いて心拍数を経時的に測定した. 心拍出量 (肺血流量: \dot{Q}_c) をアセチレン再呼吸法 (Bonde-Petersen et al., 1980) により 10 分毎に測定した. 収縮期血圧 (SAP) および拡張期血圧 (DAP) を自動血圧計 (STBP-780B; Colin) により上腕部において 5 分毎に測定した. 平均血圧 (MAP) を以下の式により算出した. また, 総末梢血管抵抗 (TPR) を以下の式により算出し, 末梢血管収縮を検討する際の指標とした.

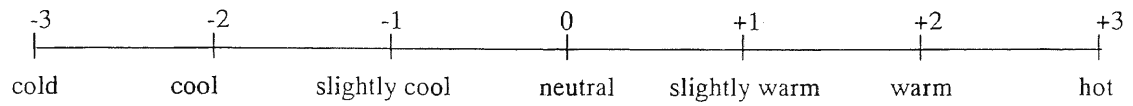
$$MAP = DAP + (SAP - DAP) / 3$$

$$TPR = MAP / \dot{Q}_c$$

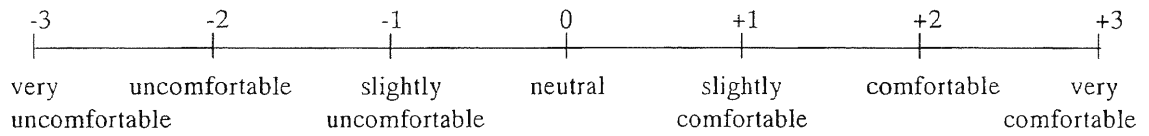
3) 主観的応答

主観的温度感覚 (thermal sensation: TS) および温熱的快不快感 (thermal comfort: TC) を被験者に 10 分毎に報告させた. 主観的温度感覚は Fig. 21-a に示した「暑い」から「寒い」までの +3 ~ -3 までのスケール (Gagge et al., 1967) を使用し, 温熱的快不快感は Fig. 21-b に示した「非常に快適」から「非常に不快」までの +3 ~ -3 までのスケールを使用した.

運動時には主観的運動強度 (rating of perceived exertion: RPE, Borg, 1973; 小野寺, 1976) を 10 分毎に報告させた.



a. Thermal sensation



b. Thermal comfort

Fig. 21 Scale of subjective thermal sensation (a) and thermal comfort (b)

(4) 分析

1) 体温・代謝応答

体温は、 T_{es} 、 \bar{T}_{sk} について、各条件の経時的変化を比較した。 T_{es} の陸上安静値から運動終了時までの変化 (ΔT_{es}) と各被験者の%fat および平均皮下脂肪厚 (mean skin fold thickness: MSFT) との相関関係を分析した。

$\dot{V}O_2$, HR, RPE, \dot{Q}_c , SAP, DAP, MAP, TPR, 震え強度について水浸前陸上安静時, 水浸安静時, 水中運動時の各局面において平均値を算出し, 条件間の比較を行った。

2) 放熱量・熱遮断能

実験1と同様の方法を用いて、産熱量 (M_s)、貯熱量 (S_s) および放熱量 (H_s)、身体組織の熱遮断能 (I_{tissue})、水着の熱遮断能 (I_{suit}) および総熱遮断能 (I_{total}) を算出し、各条件間の比較を行った。

各被験者の%fat および MSFT と I_{tissue} との相関関係を分析した。また、各被験者の%fat および MSFT と I_{total} に占める I_{suit} の割合 (I_{suit}/I_{total}) の相関関係を分析した。各被験者の保温水着の貢献度の指標として I_{suit}/I_{total} を用いた。

3) 主観応答

各条件の主観的温度感覚 (TS) および温熱的快不快感 (TC) の経時的変化を比較した。

(5) 統計処理

測定データは平均値±標準誤差で示した。各測定項目の条件間の平均値の比較には、経時的データについては、対応のある二元配置 (条件×時間) の分散分析を用いた。交互作用が見られた場合には Tukey の多重比較を行い、交互作用が見られなかった場合には対応のある t 検定により各条件毎に比較を行った。また、順位尺度データである RPE, 震え強度, 主観的温度感覚, 温熱的快不快感については、Wilcoxon の符号付き順位検定を行った。経時的データの比較は5分毎の各時点において行った。 M_s , S_s , H_s , I_{tissue} , I_{suit} , I_{total} などの経時的でないデータは一元配置の分散分析を行い、Tukey の多重比較を

行った。陸上安静値から運動終了時までの T_{es} 変化 (ΔT_{es}) と %fat および MSFT との相関分析には Pearson の積率相関係数を用いた。同様に、 I_{tissue} および I_{suit}/I_{total} と %fat および MSFT との相関分析には Pearson の積率相関係数を用いた。いずれも有意性は危険率 5% 未満で判定した。

3. 結果

(1) 運動強度

各条件における運動強度の 30 分間の平均値を Table 5 に示した。 \dot{V}_{O_2} は、低強度運動では、NSS 条件で $11.8 \pm 0.7 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($22.0 \pm 1.2\% \dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$), TSS 条件で $10.7 \pm 0.3 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($20.0 \pm 0.6\% \dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$), 中強度運動では、NSS 条件で $21.7 \pm 1.4 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($40.7 \pm 2.9\% \dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$), TSS 条件で $20.6 \pm 1.5 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($38.6 \pm 3.0\% \dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$) であった。また、HR はそれぞれ、 $80.1 \pm 2.9 \text{ bpm}$ ($41.1 \pm 1.5\% \text{HR}_{\text{max}}$), $79.4 \pm 3.1 \text{ bpm}$ ($40.8 \pm 1.6\% \text{HR}_{\text{max}}$), $101.8 \pm 3.7 \text{ bpm}$ ($52.3 \pm 1.8\% \text{HR}_{\text{max}}$), $102.2 \pm 3.3 \text{ bpm}$ ($52.6 \pm 1.7\% \text{HR}_{\text{max}}$), RPE はそれぞれ、 9.0 ± 0.5 , 8.1 ± 0.3 , 11.2 ± 0.5 , 10.9 ± 0.6 であった。各指標において、中強度条件で低強度条件よりも有意に高い値を示したが ($p < 0.05$), 各運動強度において水着条件間に差は見られなかった。

(2) 体温

T_{es} の経時的変化を Fig. 22 に示した。陸上安静値に条件間の差は見られなかった。全条件で、入水直後に陸上安静時より約 0.1 から 0.15°C 低下したが、水浸安静時はほとんど変化しなかった。低強度運動では、両水着条件で T_{es} が徐々に低下し、運動開始 25 分後から運動終了時 (30 分後) まで TSS で NSS よりも有意に高い T_{es} を示した ($p < 0.05$)。中強度運動では、両水着条件において徐々に T_{es} が上昇し、水着間の差は見られなかった。運動終了時 (運動開始 30 分後) の T_{es} は、Low_NSS で $36.37 \pm 0.15^\circ\text{C}$ ($-0.41 \pm 0.12^\circ\text{C}$), Low_TSS で $36.65 \pm 0.10^\circ\text{C}$ ($-0.19 \pm 0.10^\circ\text{C}$), Moderate_NSS で $37.03 \pm 0.16^\circ\text{C}$ ($+0.14$

Table 5 Intensity of water exercise

	Low intensity		Moderate intensity	
	NSS	TSS	NSS	TSS
\dot{V}_{O_2} (ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	11.78 ± 0.67	10.71 ± 0.35	21.74 ± 1.42†	20.61 ± 1.51†
% \dot{V}_{O_2} peak (%)	22.0 ± 1.2	20.0 ± 0.6	40.7 ± 2.9 †	38.6 ± 3.0 †
HR (bpm)	80.1 ± 2.9	79.4 ± 3.1	101.8 ± 3.7 †	102.2 ± 3.3 †
%HR _{max} (%)	41.1 ± 1.5	40.8 ± 1.6	52.3 ± 1.8 †	52.6 ± 1.7 †
RPE	9.0 ± 0.5	8.1 ± 0.3	11.2 ± 0.5 †	10.9 ± 0.6 †

Values are mean ± SE.

HR_{max} = 220 - age

† Significant difference between low and moderate intensity with the same suit ($p < 0.05$).

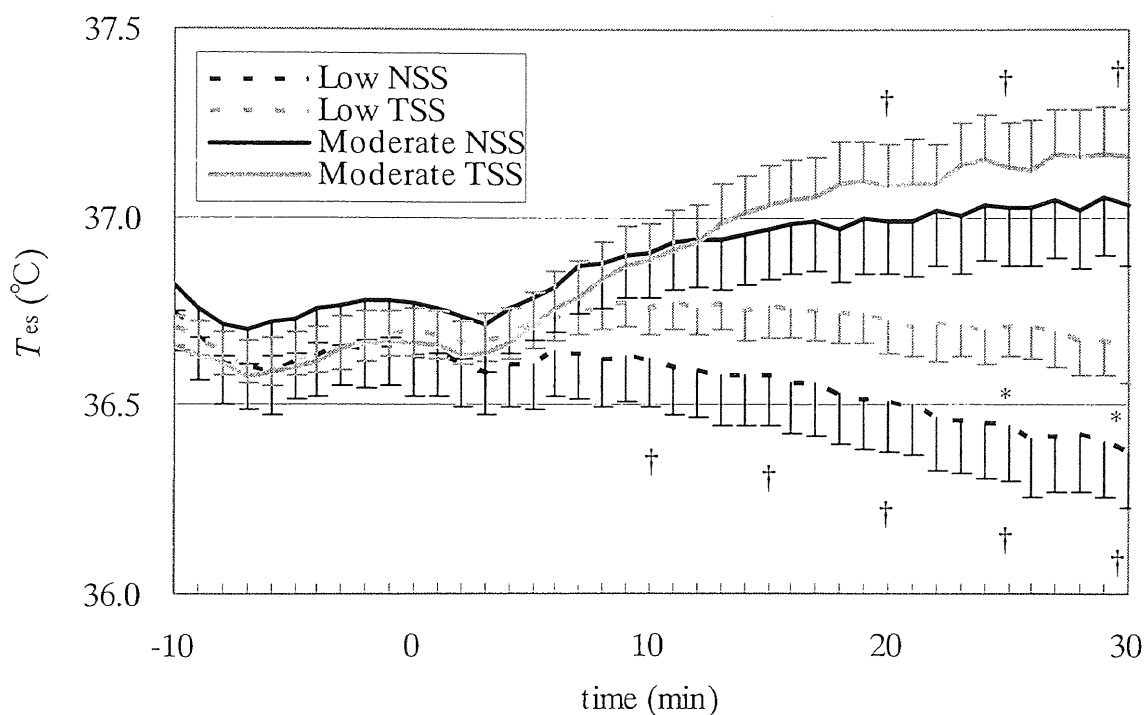


Fig. 22 Changes in esophagus temperature during 30 min water exercise

T_{es} : esophagus temperature

* Significant difference between NSS and TSS condition at the same intensity ($p < 0.05$).

† Significant difference between low and moderate intensity with the same suit ($p < 0.05$).

$\pm 0.12^{\circ}\text{C}$), Moderate_TSS で $37.16 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ ($+0.39 \pm 0.09^{\circ}\text{C}$) であった.

\bar{T}_{sk} の経時的変化を Fig. 23 に示した. 陸上安静値に条件間の差は見られなかった. 全条件で, 入水直後から 5 分後にかけて急激に皮膚温が低下し, 運動開始前まで NSS 条件で大きく低下したのに対し, TSS 条件では比較的緩やかな低下であった (Low_NSS: $-6.53 \pm 0.20^{\circ}\text{C}$, Low_TSS: $-3.70 \pm 0.14^{\circ}\text{C}$, Moderate_NSS: $-6.65 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$, Moderate_TSS: $-4.05 \pm 0.20^{\circ}\text{C}$). 両運動強度とも, 水浸 2 分後から水中運動終了時まで TSS で NSS よりも高い \bar{T}_{sk} を示した ($p < 0.05$). 運動終了時の \bar{T}_{sk} は, Low_NSS で $24.90 \pm 0.08^{\circ}\text{C}$ ($-7.52 \pm 0.21^{\circ}\text{C}$), Low_TSS で $27.05 \pm 0.08^{\circ}\text{C}$ ($-5.06 \pm 0.20^{\circ}\text{C}$), Moderate_NSS で $24.96 \pm 0.06^{\circ}\text{C}$ ($-7.51 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$), Moderate_TSS で $27.41 \pm 0.13^{\circ}\text{C}$ ($-5.05 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$) であった. TSS 着用時のみ, 運動終了時に中強度条件で低強度条件よりもわずかではあるが有意に高い \bar{T}_{sk} を示した.

各被験者の %fat および MSFT と陸上安静時から水中運動終了時までの T_{es} の低下度 (ΔT_{es}) の関係を Fig. 24, 25 に示した. Low_NSS 条件において, ΔT_{es} と %fat および MSFT の間に有意ではないが, 相関の傾向が見られた ($p = 0.07, r = 0.623$; $p = 0.06, r = 0.652$). Low_TSS 条件において, ΔT_{es} と %fat および MSFT の間に有意な正の相関関係が見られた ($p < 0.05, r = 0.723$; $p < 0.05, r = 0.745$). Moderate_NSS 条件において, ΔT_{es} と %fat の間に有意ではないが, 相関の傾向が見られ ($p = 0.09, r = 0.601$), ΔT_{es} と MSFT の間に有意な正の相関関係が見られた ($p < 0.05, r = 0.710$). Moderate_TSS 条件において, ΔT_{es} と %fat および MSFT の間に有意ではないが, 相関の傾向が見られた ($p = 0.15, r = 0.523$; $p = 0.11, r = 0.574$).

(3) 代謝応答

代謝応答の各測定項目について, 陸上安静時, 水浸安静時, 水中運動時の平均値を Table 6 に示した.

陸上安静時において各測定項目に条件間の差は見られなかった.

水浸安静時においては, Moderate_NSS 条件において Moderate_TSS 条件よりも有意に

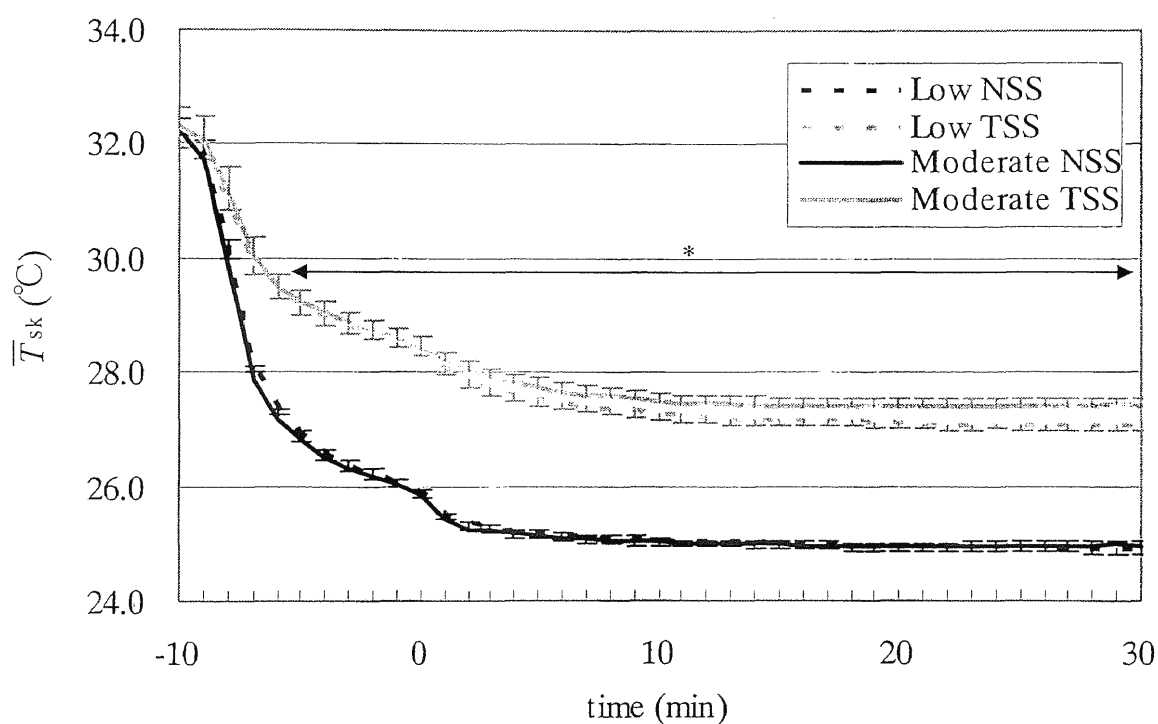


Fig. 23 Changes in mean skin temperature during 30 min water exercise

\bar{T}_{sk} : mean skin temperature

* Significant difference between NSS and TSS condition at the same intensity ($p < 0.05$).

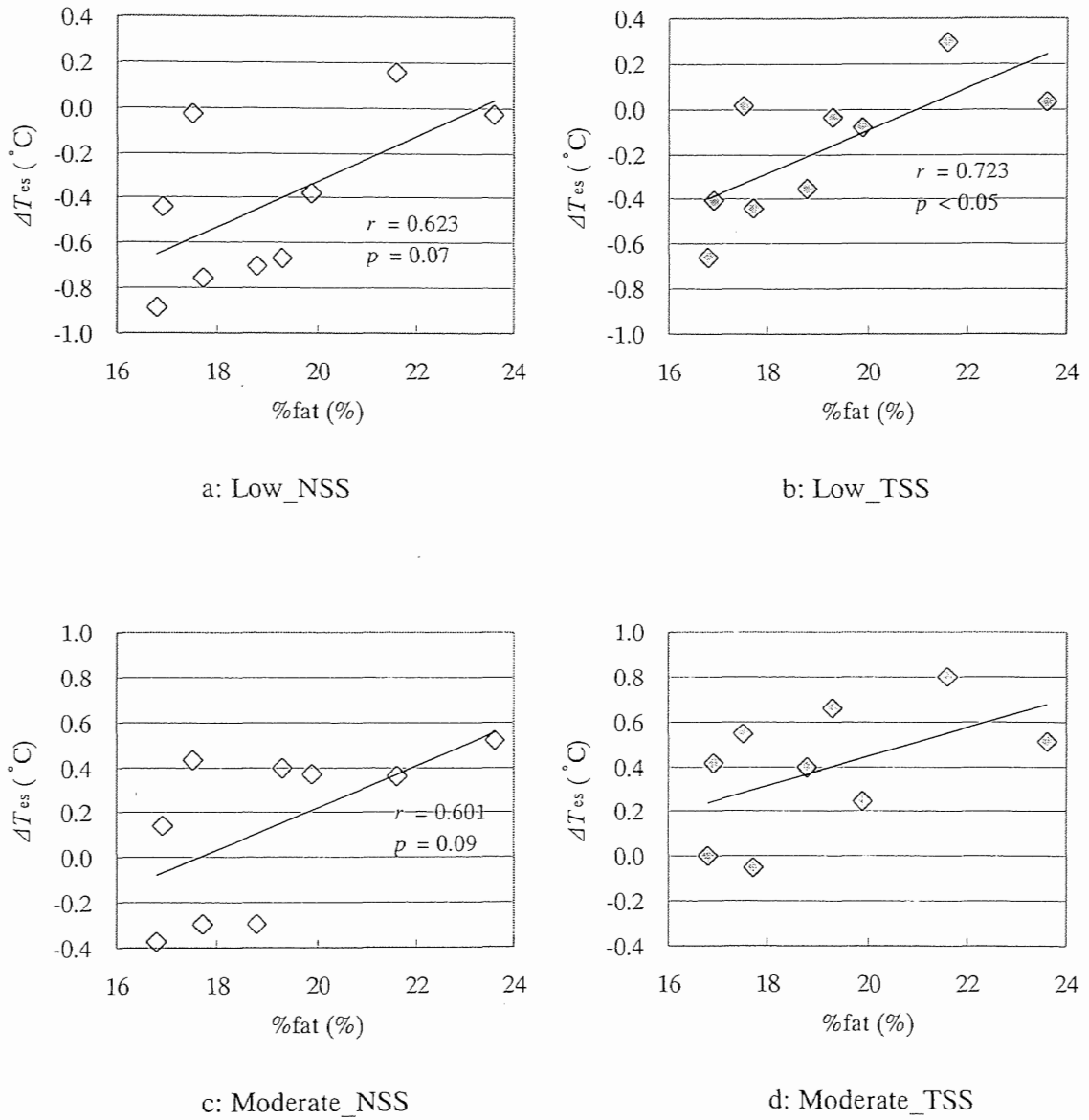
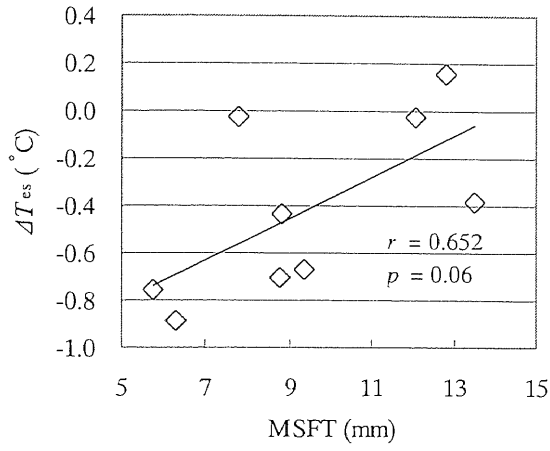
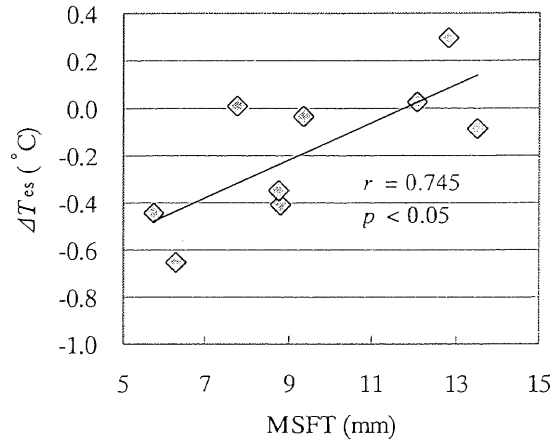


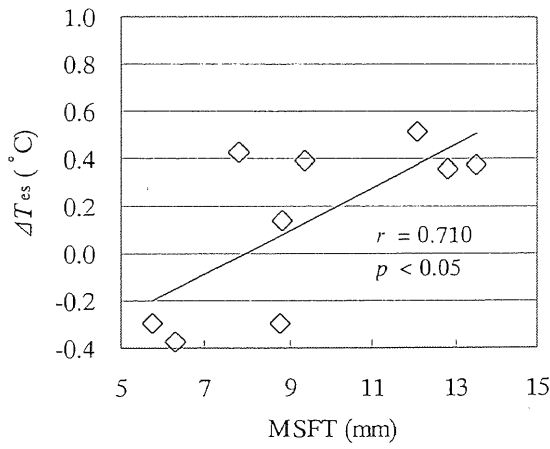
Fig. 24 Relationships between subjects' %fat and ΔT_{es} during water exercise



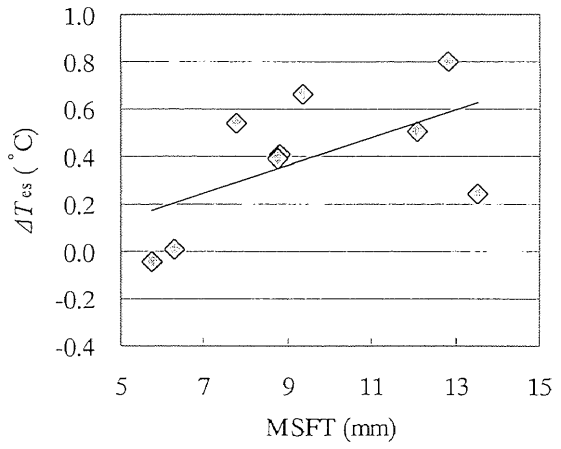
a: Low_NSS



b: Low_TSS



c: Moderate_NSS



d: Moderate_TSS

Fig. 25 Relationships between subjects' mean skin fold thickness and ΔT_{es} during water exercis

Table 6 Cardiovascular responses during rest in air, immersion and water exercise

		Low intensity		Moderate intensity	
		NSS	TSS	NSS	TSS
\dot{V}_{O_2} (ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	rest in air	4.20 ± 0.28	4.28 ± 0.30	4.49 ± 0.19	4.61 ± 0.28
	immersion	6.58 ± 0.46	6.17 ± 0.52	7.19 ± 0.48	6.16 ± 0.37 *
	exercise	11.78 ± 0.67	10.71 ± 0.35	21.74 ± 1.42 †	20.61 ± 1.51 †
% $\dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$ (%)	rest in air	7.9 ± 0.6	8.0 ± 0.6	8.4 ± 0.4	8.6 ± 0.6
	immersion	12.3 ± 0.9	11.5 ± 0.9	13.4 ± 0.9	11.5 ± 0.6
	exercise	22.0 ± 1.2	20.0 ± 0.6	40.7 ± 2.9 †	38.6 ± 3.0 †
\dot{V}_E (l·min ⁻¹)	rest in air	9.8 ± 0.9	9.6 ± 0.8	10.0 ± 0.5	11.2 ± 1.0
	immersion	14.9 ± 1.5	15.0 ± 2.4	16.8 ± 2.4	14.0 ± 0.9
	exercise	21.7 ± 1.0	22.0 ± 0.5	37.3 ± 1.7 †	37.0 ± 1.7 †
HR (bpm)	rest in air	67.6 ± 2.9	65.7 ± 2.5	69.8 ± 4.1	69.5 ± 3.7
	immersion	69.0 ± 2.9	69.0 ± 1.8	71.0 ± 3.1	67.9 ± 3.2
	exercise	80.1 ± 2.9	79.4 ± 3.1	101.8 ± 3.7 †	102.2 ± 3.3 †
RPE	rest in air	6.0 ± 0.0	6.0 ± 0.0	6.0 ± 0.0	6.0 ± 0.0
	immersion	6.1 ± 0.1	6.1 ± 0.1	6.0 ± 0.0	6.0 ± 0.0
	exercise	9.0 ± 0.5	8.1 ± 0.3	11.2 ± 0.5 †	10.9 ± 0.6 †
Q_c (l·min ⁻¹)	rest in air	4.02 ± 0.34	4.17 ± 0.37	4.10 ± 0.30	4.48 ± 0.30
	immersion	5.26 ± 0.37	4.68 ± 0.30	5.06 ± 0.32	5.51 ± 0.84
	exercise	6.45 ± 0.27	6.20 ± 0.51	9.45 ± 0.38 †	9.47 ± 0.6 †
SAP (mmHg)	rest in air	119.9 ± 4.4	122.4 ± 4.2	122.4 ± 4.2	123.4 ± 4.1
	immersion	134.4 ± 4.4	138.4 ± 7.0	136.8 ± 6.0	133.4 ± 5.5
	exercise	137.7 ± 4.6	140.6 ± 6.6	158.1 ± 6.3 †	156.9 ± 5.6 †
DAP (mmHg)	rest in air	63.7 ± 2.5	65.9 ± 1.4	64.8 ± 2.0	68.8 ± 3.0
	immersion	71.2 ± 3.3	75.4 ± 4.1	78.4 ± 3.0	76.8 ± 4.4
	exercise	73.1 ± 2.5	73.2 ± 3.1	73.5 ± 2.4	76.4 ± 2.8
MAP (mmHg)	rest in air	82.4 ± 2.7	84.7 ± 2.2	84.0 ± 2.5	87.0 ± 3.1
	immersion	92.3 ± 3.5	96.4 ± 4.3	97.9 ± 3.8	95.7 ± 4.4
	exercise	94.7 ± 3.0	95.7 ± 3.9	101.7 ± 3.6 †	103.2 ± 3.5 †
TPR (mmHg·min·l ⁻¹)	rest in air	21.6 ± 1.9	22.3 ± 3.1	21.2 ± 1.4	20.1 ± 1.5
	immersion	18.2 ± 1.5	21.2 ± 1.4	19.8 ± 1.1	19.5 ± 2.1
	exercise	15.0 ± 0.7	16.4 ± 1.5	10.8 ± 0.3 †	11.2 ± 0.6 †
Shivering	rest in air	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0
	immersion	2.4 ± 0.4	1.7 ± 0.2	2.2 ± 0.3	1.8 ± 0.3 *
	exercise	2.1 ± 0.3	1.5 ± 0.2 *	1.1 ± 0.1 †	1.0 ± 0.0 †

Values are mean ± SE.

* Significant difference between NSS and TSS condition at the same intensity ($p < 0.05$).

† Significant difference between low and moderate intensity with the same suit ($p < 0.05$).

高い \dot{V}_{O_2} が見られたが ($p < 0.05$), 他の測定項目については条件間の差は見られなかった。

水中運動時においては, 同一水着条件の運動強度で比較すると, \dot{V}_{O_2} , $\% \dot{V}_{O_2 \text{ peak}}$, HR, RPE, \dot{Q}_c , SAP, DAP, MAP が中強度運動で低強度運動よりも有意に高値を示し ($p < 0.05$), TPR は中強度運動で有意に低値を示した ($p < 0.05$)。同一運動強度においては, 各測定項目について, 水着条件間の差は見られなかった。

(4) 放熱量

水中運動 30 分間における体表面積あたりの産熱量 (M_s), 貯熱量 (S_s) および総放熱量 (H_s) を Fig. 26 に示した。

M_s は Low_NSS で $149.8 \pm 8.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Low_TSS で $135.0 \pm 3.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Moderate_NSS で $279.4 \pm 16.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Moderate_TSS で $264.4 \pm 18.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。両運動強度において水着間の差は見られなかった。また, 同一水着条件では中強度条件で低強度条件よりも有意に高い M_s を示した ($p < 0.05$: Moderate_NSS > Low_NSS, Moderate_TSS > Low_TSS)。

S_s は Low_NSS で $-201.9 \pm 6.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Low_TSS で $-131.2 \pm 7.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Moderate_NSS で $-174.8 \pm 7.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Moderate_TSS で $-102.9 \pm 4.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。いずれの条件も平均体温が低下したため負の S_s を示した。両運動強度とも TSS 条件で NSS 条件よりも高い S_s を示した ($p < 0.05$: Low_NSS < Low_TSS, Moderate_NSS < Moderate_TSS)。また, 同一水着条件における運動強度による S_s の差は見られなかった。

H_s は Low_NSS で $351.4 \pm 10.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Low_TSS で $266.3 \pm 8.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Moderate_NSS で $454.2 \pm 16.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, Moderate_TSS で $367.3 \pm 17.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。両運動強度において TSS 条件で NSS 条件よりも低い H_s を示した ($p < 0.05$: Low_NSS > Low_TSS, Moderate_NSS > Moderate_TSS)。また, 同一水着条件では中強度条件で低強度条件よりも高い H_s を示した ($p < 0.05$: Moderate_NSS > Low_NSS, Moderate_TSS > Low_TSS)。

(5) 熱遮断能

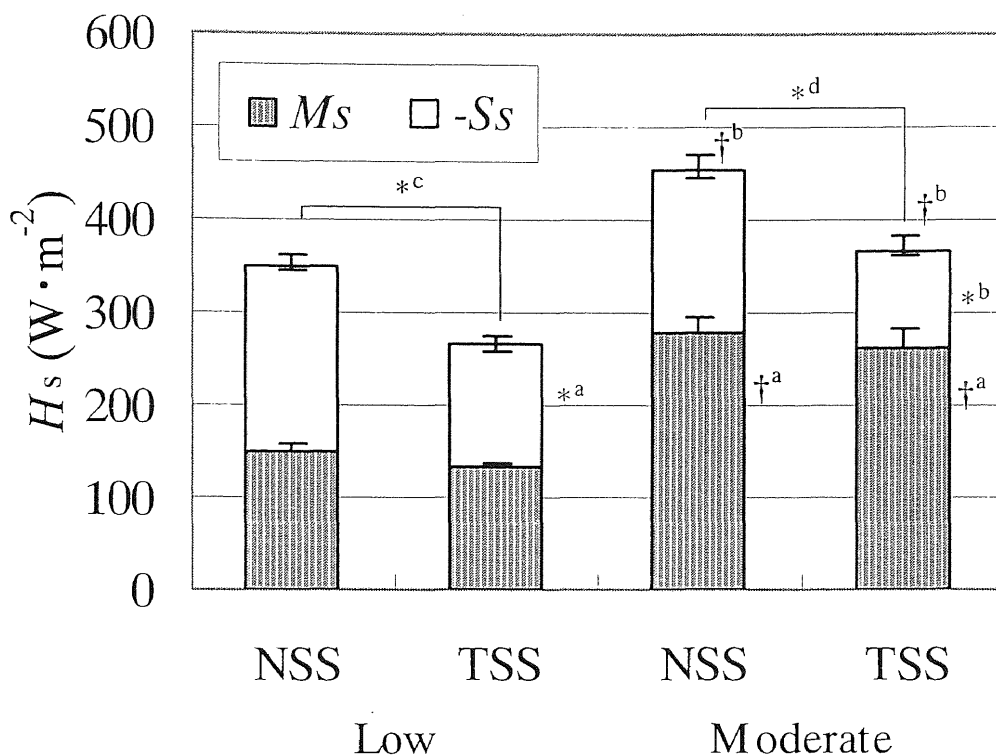


Fig. 26 Metabolic heat production, heat storage and heat loss from skin surface during 30 min water exercise

M_s : metabolic heat production from the skin surface

S_s : heat storage from the skin surface

H_s : heat loss from the skin surface

$$H_s = M_s - S_s$$

*^a: Significant difference between NSS and TSS condition at low intensity ($p < 0.05$) in the mean value of $-S_s$.

*^b: Significant difference between NSS and TSS condition at moderate intensity ($p < 0.05$) in the mean value of $-S_s$.

*^c: Significant difference between NSS and TSS condition at low intensity ($p < 0.05$) in the mean value of H_s .

*^d: Significant difference between NSS and TSS condition at moderate intensity ($p < 0.05$) in the mean value of H_s .

†^a: Significant difference between low and moderate intensity with the same suit ($p < 0.05$) in the mean value of M_s .

†^b: Significant difference between low and moderate intensity with the same suit ($p < 0.05$) in the mean value of H_s .

水中運動 30 分間における身体組織の熱遮断能 (I_{tissue}), 水着の熱遮断能 (I_{suit}) および総熱遮断能 (I_{total}) を Fig. 27 に示した.

I_{tissue} は Low_NSS で $0.033 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, Low_TSS で $0.036 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, Moderate_NSS で $0.027 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, Moderate_TSS で $0.027 \pm 0.002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった. 低強度運動時には, 有意ではないものの TSS 条件で高い I_{tissue} を示す傾向が見られた ($p = 0.053$). 中強度運動時には I_{tissue} に水着条件間の差は見られなかった. また, 両水着条件において, 中強度条件で低強度条件よりも有意に低い値を示した ($p < 0.05$).

I_{suit} は Low_TSS 条件で $0.015 \pm 0.000^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, Moderate_TSS 条件で $0.012 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった. Low_NSS, Moderate_NSS 条件においても水着の熱遮断能が示されたが, これは総熱遮断能から身体組織の熱遮断能を引いて算出する計算により生じたもので, 分析対象から除外した.

I_{total} は Low_NSS で $0.038 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, Low_TSS で $0.051 \pm 0.002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, Moderate_NSS で $0.031 \pm 0.001^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$, Moderate_TSS で $0.039 \pm 0.002^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった. 両運動強度とも TSS 条件で NSS 条件よりも高い I_{total} を示した ($p < 0.05$: Low_NSS < Low_TSS, Moderate_NSS < Moderate_TSS). 両水着条件において, 中強度条件で低強度条件よりも有意に低い値を示した ($p < 0.05$).

Low_NSS 条件における各被験者の I_{tissue} と %fat の関係を Fig. 28 に示した. I_{tissue} と %fat の間に有意ではないが, %fat の高い被験者ほど高い I_{tissue} を示す傾向が見られた ($p = 0.09$, $r = 0.604$).

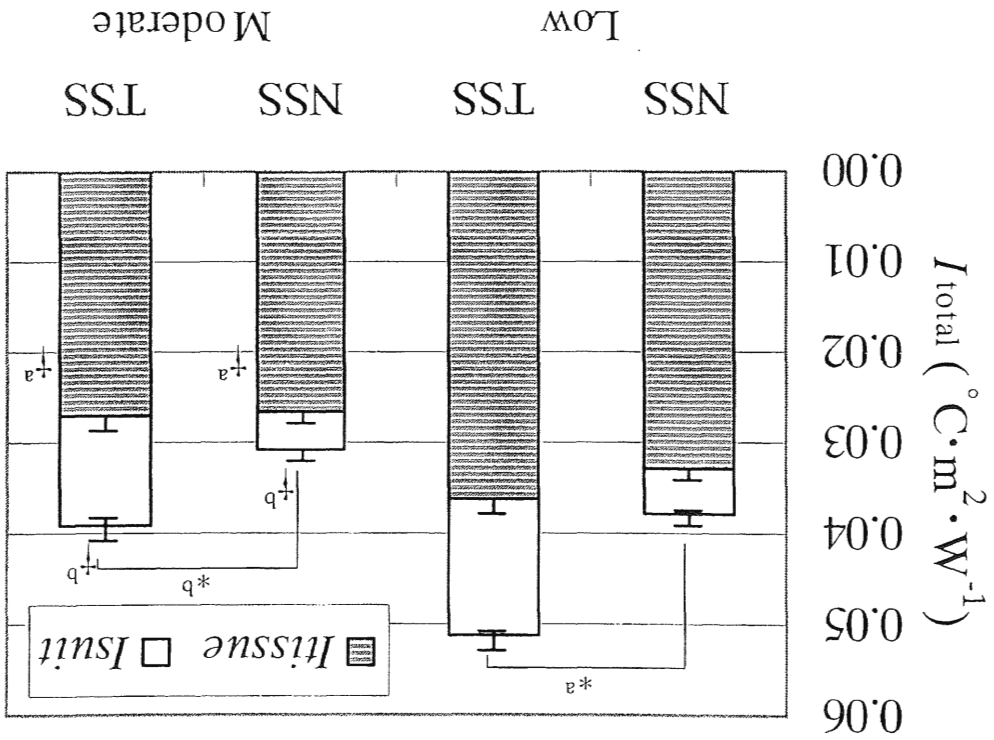
Low_NSS 条件における各被験者の I_{tissue} と平均皮脂厚 (MSFT) の関係を Fig. 29 に示した. I_{tissue} と MSFT の間に有意な正の相関関係が見られた ($p < 0.05$, $r = 0.737$).

Moderate_TSS 条件における各被験者の %fat と I_{total} に占める I_{suit} の割合 ($I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$) の関係を Fig. 30 に示した. %fat と $I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$ の間に有意な負の相関関係が見られた ($p < 0.05$, $r = -0.833$). すなわち, 体脂肪率の低い被験者ほど, 保温水着の総熱遮断能に対する貢献度が高かった.

Moderate_TSS 条件における各被験者の MSFT と I_{total} に占める I_{suit} の割合 ($I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$)

$I_{total}^{total}: total\ insulation, I_{total}^{total} = (T^{es} - T^w) / H_s$
 $I_{tissue}^{tissue}: tissue\ insulation, I_{tissue}^{tissue} = (T^{es} - T^{sk}) / H_s$
 $I_{suit}^{suit}: suit\ insulation, I_{suit}^{suit} = I_{total}^{total} - I_{tissue}^{tissue}$
 *: Significant difference between NSS and TSS condition at low intensity ($p < 0.05$) in the mean value of I_{total} .
 *: Significant difference between NSS and TSS condition at moderate intensity ($p < 0.05$) in the mean value of I_{total} .
 †: Significant difference between low and moderate intensity with the same suit ($p < 0.05$) in the mean value of I_{tissue} .
 †: Significant difference between low and moderate intensity with the same suit ($p < 0.05$) in the mean value of I_{total} .

Fig. 27 Tissue insulation, suit insulation and total insulation during 30 min water exercise



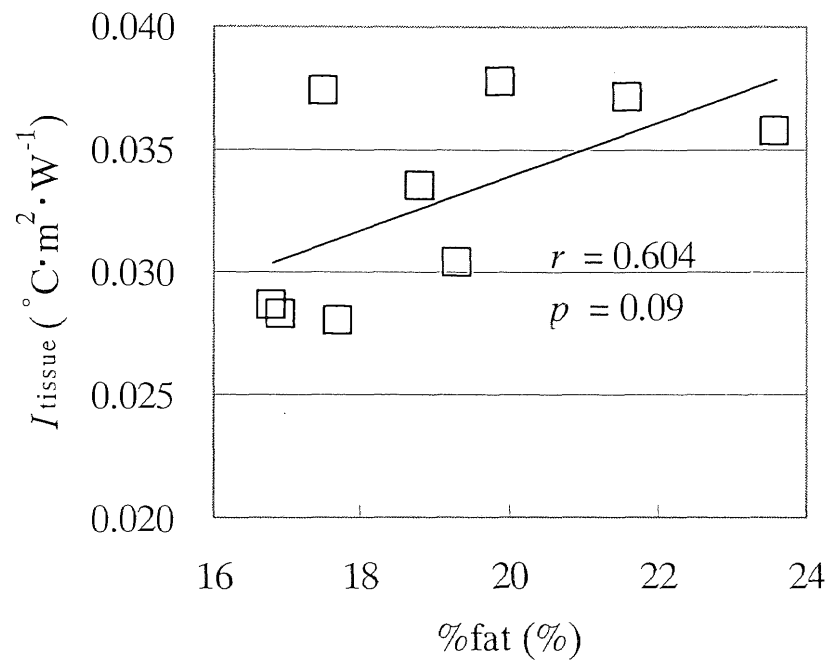


Fig. 28 Relationship between subjects' %fat and tissue insulation during low intensity water exercise with NSS

%fat: percent body fat

I_{tissue} : tissue insulation

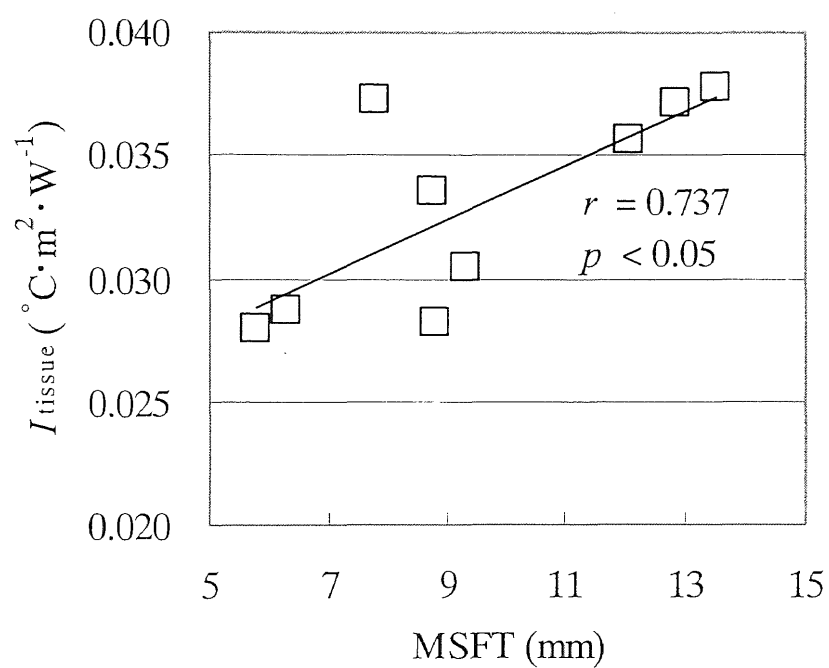


Fig. 29 Relationship between subjects' mean skin fold thickness and tissue insulation during low intensity water exercise with NSS

MSFT: mean skin fold thickness

I_{tissue} : tissue insulation

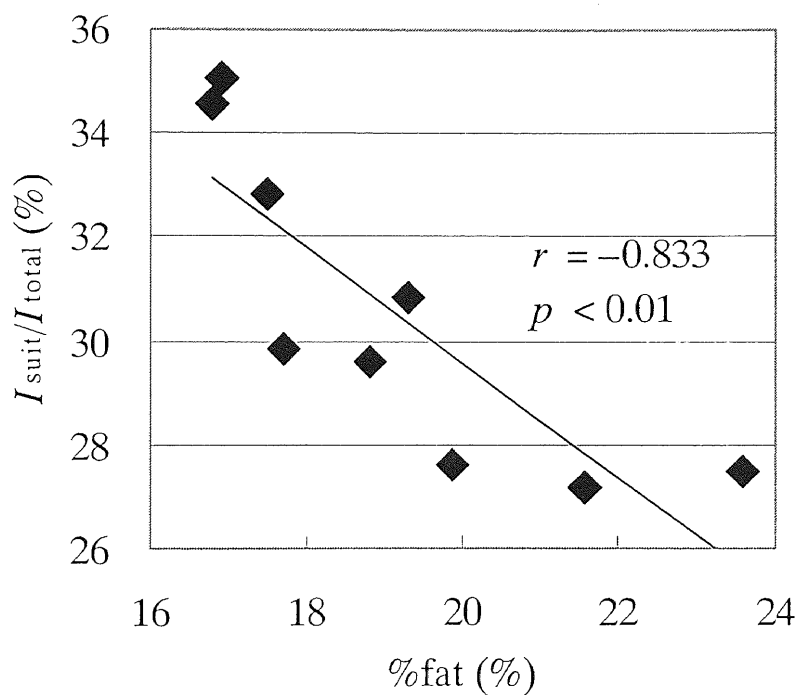


Fig. 30 Relationship between subjects' %fat and $I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$ during moderate intensity water exercise with TSS

%fat: percent body fat

I_{suit} : suit insulation

I_{total} : total insulation

の関係を Fig. 31 に示した. MSFT と $I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$ の間に有意な負の相関関係が見られた ($p < 0.05, r = -0.708$). すなわち, 皮下脂肪厚の薄い被験者ほど, 保温水着の総熱遮断能に対する貢献度が高かった.

(6) 主観応答

主観的温度感覚 (TS) の経時的変化を Fig. 32 に示した. 水浸前陸上安静時では, 寒冷感を感じない熱的中立状態であり, 条件間に有意差は見られなかった. 水浸安静時, 全条件で陸上安静時より低値を示した. NSS 条件では-3 (寒い) の回答が多く, TSS 条件では-2 (冷たい) の回答が多かった (Low_NSS: -2.7 ± 0.2 , Low_TSS: -2.1 ± 0.2 , Moderate_NSS: -2.7 ± 0.2 , Moderate_TSS: -2.0 ± 0.2). Moderate_TSS 条件で Moderate_NSS 条件よりも有意に高い TS を示した ($p < 0.05$). 低強度運動時には, NSS 条件で-2.3~-2.2 を示したのに対し, TSS 条件で-1.8~-1.6 を示し, 運動開始 10 分後から 30 分後にかけて TSS 条件で有意に高い TS を示した ($p < 0.05$). 中強度運動時には, NSS 条件で運動開始 10 分後に-1.4, 20 分後, 30 分後にわずかに高い-0.8 を示したのに対し, TSS 条件では 10 分後に-1.0, 20 分後に 0.0, 30 分後に 0.6 と TS を徐々に増加させ, 20 分後と 30 分後に TSS 条件で有意に高い TS を示した ($p < 0.05$).

温熱的快不快感 (TC) の経時的変化を Fig. 33 に示した. 水浸前陸上安静時では, -1 から+2 の回答が多く, 平均値は「どちらともいえない」から「やや快適」のレベルにあり, 条件間に有意差は見られなかった. 水浸安静時, 全条件で陸上安静時より低値を示し, 両水着条件とも-2 (不快) の回答が多かった (Low_NSS: -2.1 ± 0.1 , Low_TSS: -1.8 ± 0.1 , Moderate_NSS: -2.3 ± 0.2 , Moderate_TSS: -1.6 ± 0.2). Moderate_TSS 条件で Moderate_NSS 条件よりも有意に高い TC を示した ($p < 0.05$). 低強度運動時には, NSS 条件で-1.8~-2.0 を示したのに対し, TSS 条件で-1.2~-1.4 を示し, 運動開始 10 分後および 30 分後において TSS 条件で有意に高い TC を示した ($p < 0.05$). 中強度運動時には, NSS 条件で運動開始 10 分後に-1.4, 20 分後に-0.9, 30 分後に-0.7 と TS を徐々に快適側にシフトさせたのに対し, TSS 条件では 10 分後に-0.8, 20 分後に-0.7, 30 分後に-0.3

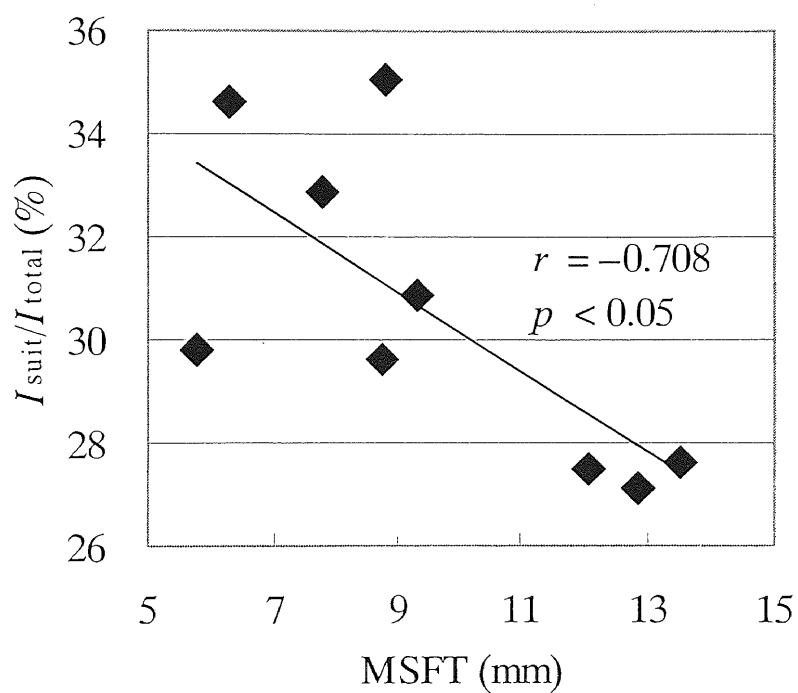


Fig. 31 Relationship between subjects' mean skin fold thickness and $I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$ during moderate intensity water exercise with TSS

MSFT: mean skin fold thickness

I_{suit} : suit insulation

I_{total} : total insulation

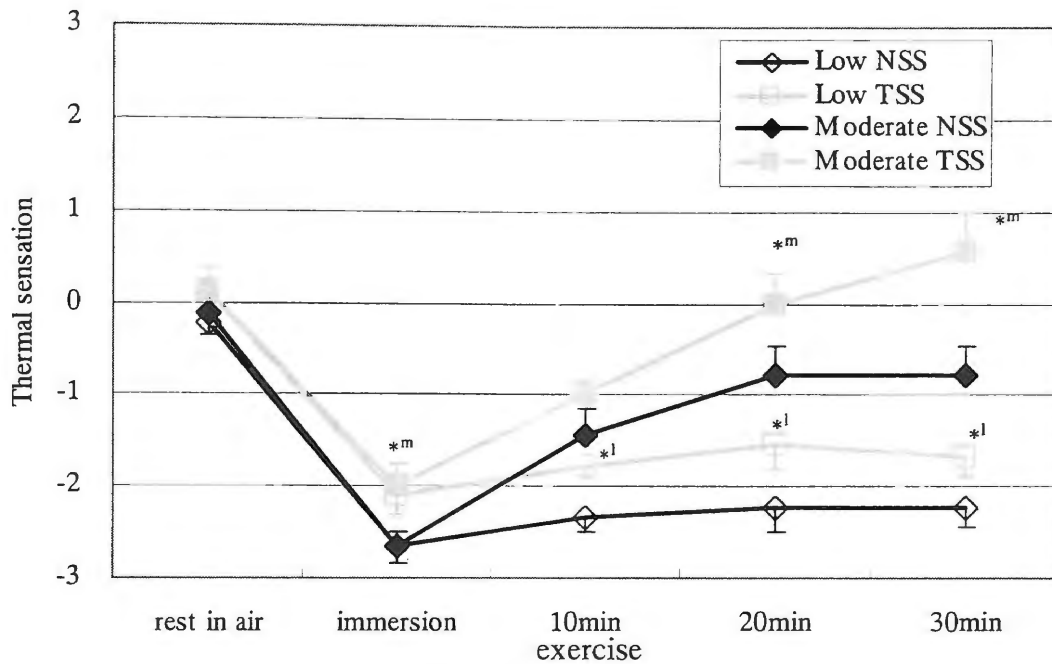


Fig. 32 Changes in thermal sensation during 30 min water exercise

Thermal sensation was estimated by the scale, where -3 = “cold”, -2 = “cool”, -1 = “slightly cool”, 0 = “neutral”, +1 = “slightly warm”, +2 = “warm” and +3 = “hot”.

*^l Significant difference between NSS and TSS condition at low intensity ($p < 0.05$).

*^m Significant difference between NSS and TSS condition at moderate intensity ($p < 0.05$).

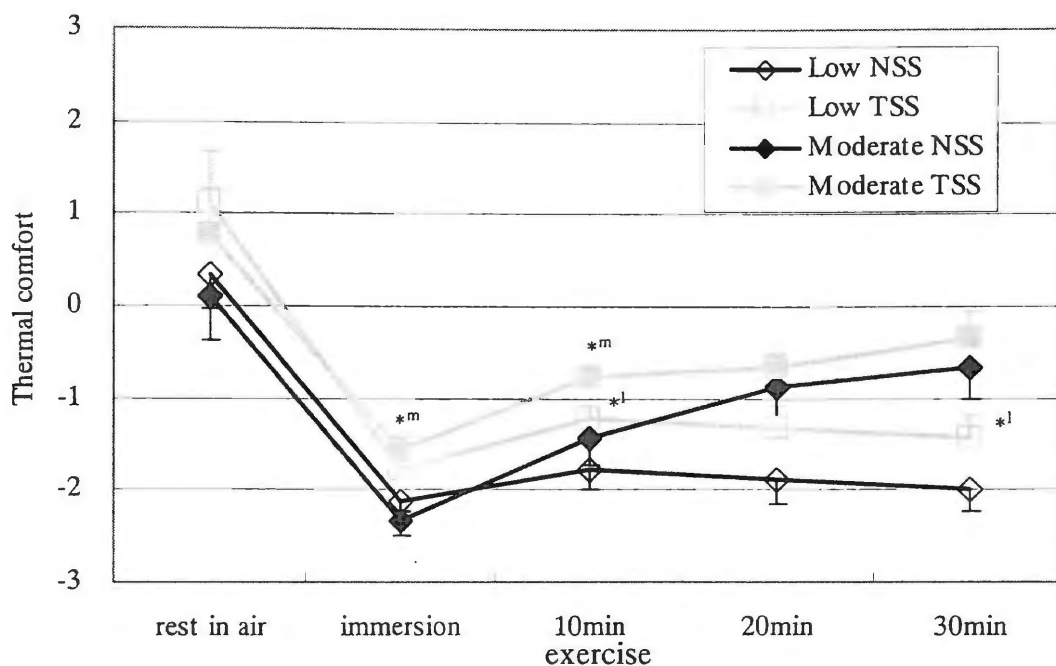


Fig. 33 Changes in thermal comfort during 30 min water exercise

Thermal comfort was estimated by the scale, where -3 = “very uncomfortable”, -2 = “uncomfortable”, -1 = “slightly uncomfortable”, 0 = “neutral”, +1 = “slightly comfortable”, +2 = “comfortable” and +3 = “very comfortable”.

*^l Significant difference between NSS and TSS condition at low intensity ($p < 0.05$).

*^m Significant difference between NSS and TSS condition at moderate intensity ($p < 0.05$).

を示し、運動開始 10 分後のみ TSS 条件で有意に高い TC を示した ($p < 0.05$).

4. 考察

(1) 体温

水温 23°C 環境で行った実験 2 では、入水直後から 5 分後にかけて急激に皮膚温が低下し、運動開始前まで NSS 条件で大きく低下したのに対し、TSS 条件では比較的緩やかな低下であった。これは、実験 1 の水浸安静時やウエットスーツの先行研究 (Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986) と同様に、ネオプレン製の水着が被覆部位への浸水を抑えたことにより、伝導や対流による熱放散を減少させた結果、TSS 条件において高い \bar{T}_{sk} を維持したと考えられた。両運動強度の NSS 条件で、運動開始後に運動開始前よりも 1°C 程度 \bar{T}_{sk} が低下し、TSS 条件でも比較的緩やかであるが、運動開始後に \bar{T}_{sk} が低下した。これは、水中での運動に伴い身体周りの水の流れが大きくなった結果、体表面に存在した温められた層が失われ、伝導や対流による熱放散が大きくなったことによる \bar{T}_{sk} の低下と考えられた。TSS 条件における水中運動終了時を除いて、同一水着条件における運動強度による \bar{T}_{sk} の違いは見られず、水中での \bar{T}_{sk} の変化は運動強度には依存しないと考えられた (Sagawa et al., 1988)。主活動筋部位であった大腿部においても運動強度による皮膚温の違いは見られなかった。

T_{es} は低強度運動では、NSS 条件で運動開始後に低下したが、TSS 条件では低下が抑えられ、ほぼ陸上安静値を維持し、運動開始 25 分後から NSS 条件に比べて有意に高い T_{es} を示した。中強度運動では、両水着条件とも T_{es} が上昇し (NSS: $37.03 \pm 0.16^\circ\text{C}$; TSS: $37.16 \pm 0.12^\circ\text{C}$)、TSS 条件で有意ではないがわずかに高い値を示す傾向が見られた。中強度運動時には深部温を維持するのに十分な産熱が起こっていると考えられた。この結果から、特に低強度運動時における保温水着着用の高い有効性が示された。

個人の身体特性と深部温の変化との関係を検討した結果、Low_TSS 条件で、各被験者の %fat および MSFT と ΔT_{es} の間に有意な正の相関関係が見られた。また、Low_NSS

および Moderate_NSS においても各被験者の %fat および MSFT と ΔT_{es} の間に有意ではないが、相関の傾向が見られた。低水温環境における水中運動時に、体脂肪率の低い被験者ほど深部温が大きく低下することが報告されており (Pugh and Edholm, 1955; Nadel et al., 1974; Holmer and Bergh, 1974), 本研究でも同様に, %fat および MSFT の小さい被験者ほど深部温の低下が大きいことが確認された。このような体脂肪の少ない被験者に対して, 保温水着を着用させることは, 深部温低下を抑えるのに有効と考えられた。

(2) 代謝応答

水浸安静時において, 中強度運動条件のみ NSS 条件で TSS 条件よりも有意に高い \dot{V}_{O_2} を示したが ($p < 0.05$), これは TSS 着用により震えが抑えられた結果と考えられた。低強度運動条件についても, 有意ではないが NSS 条件でわずかに高い \dot{V}_{O_2} を示した。その他の測定項目については水着間の差は見られなかったが, 水浸安静時間が 8 分と短かったため, 深部温の変化に水着間の差が見られなかったことなども影響していると考えられた。

低強度の水中運動時において, 水浸安静時および実験 1 で見られたような, TSS 着用による震えの軽減は見られたものの, \dot{V}_{O_2} に水着間の差は見られなかった。これは, 両水着条件とも運動による \dot{V}_{O_2} の増加に対して, 震えに伴う \dot{V}_{O_2} の増加がわずかであったからと考えられた。中強度運動時においては, 両水着条件で震えの発現がほとんど見られず, \dot{V}_{O_2} にも差が見られなかった。

実験 1 において TSS 着用時の I_{tissue} が NSS 条件と同様の値を示した結果から, 四肢遠位部からの温度入力により TSS 着用時も NSS 着用時と同様に血管収縮が起こることが推察された。本研究において, 水中運動時, 両運動強度において, \dot{Q}_c , MAP , TPR などの循環系応答に水着間の差が見られなかったことから, TSS 着用による血管収縮への影響は小さいと考えられた。

(3) 放熱量

M_s については、運動強度の増加を反映して、両水着条件で中強度運動時に低強度運動時よりも有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。実験1の水浸安静時における検討では、TSS着用により震え熱産生が抑えられた結果、 M_s も有意に低い値を示したが、本研究では、低強度運動時には震え強度に差が見られたものの、運動に伴う産熱の増加が十分に大きかったため、両運動強度における水着間の M_s の差は見られなかった。

S_s については、各運動強度において、TSS着用により \bar{T}_b の低下が抑えられた結果、両運動強度ともTSS条件でNSS条件よりも高い S_s を示した。

H_s については、両水着条件で、中強度運動時に M_s の増加を受けて、低強度運動時よりも有意に高値を示した。また、両運動強度において、TSS着用時に S_s の増加を受けて、NSS条件よりも低い H_s を示した。

(4) 熱遮断能

本研究において、両水着条件において、中強度運動時の I_{tissue} が低強度運動時よりも有意に低い値を示したが ($p < 0.05$)、この結果は先行研究の報告に一致するものであった (Sagawa et al., 1988; Park et al., 1984)。Sagawa et al. (1988) は 28.8–36°C の水温環境において3段階の運動強度で運動を行わせ、運動強度の増加に伴い I_{tissue} が低下したことを報告している。また、Park et al. (1984) も同様に 28–32°C の水温環境において運動強度の増加に伴う I_{tissue} の低下を報告している。彼らは、運動強度の増加に伴い活動筋への血流が増加した結果 I_{tissue} が低下したと考察している。本研究では、中強度運動条件において低強度条件よりも高い \dot{Q}_c が見られ、また低い TPR を示したことから、活動筋における血流の増加が示唆された。これらの結果から、運動強度の増加に伴う血流の増加と I_{tissue} の低下が確認された。しかしながら、 I_{tissue} の低下による放熱の増加は、運動強度の増加に伴う熱産生により十分に補うことが可能であり、本研究においても T_{es} の上昇が見られた。

ウエットスーツ着用時の I_{tissue} について検討した先行研究 (Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986) では、ウエットスーツ着用時に裸体時よりも I_{tissue} が低下することを報告して

いる。彼らはウエットスーツ着用による体表面からの寒冷温度入力への減少が、血管収縮を減弱させ、 I_{tissue} の低下を起こしたと報告している。本研究では、両運動強度において水着条件間の I_{tissue} に差は見られなかったが、これは実験1の水浸安静時における検討でも示したように保温水着の形状により四肢遠位部からの温度入力による血管収縮を起こすのに十分であったからと考えられた。さらに、本研究において、 \dot{Q}_c 、 MAP および TPR に水着間の差が見られなかったことから、両水着条件における血管収縮が同様に起こっており、TSS着用は血流に変化を及ぼさないと考えられた。水浸安静時の実験1では、震えの発現に伴いNSS条件で I_{tissue} の低下が起こった結果、TSS条件でわずかに高い I_{tissue} を示した。本研究の低強度運動時にはNSS条件でわずかに高い震え強度を示したため、有意ではないがNSS条件で低い I_{tissue} を示す傾向が見られた。中強度水中運動時にはほとんど震えが見られず、 I_{tissue} に水着間の差は見られなかった。

水中運動時におけるTSS着用が I_{tissue} に及ぼす特異的な影響をまとめると、先行研究に示されるウエットスーツ着用時の I_{tissue} が裸体時に比べて低値を示すのに対して、保温水着着用時には I_{tissue} の低下は見られず、低強度運動時には震えの軽減に伴い I_{tissue} がわずかに高値を示した。

NSS条件において見られた各被験者のMSFTと I_{tissue} の相関関係から、皮下脂肪厚の薄い被験者ほど身体組織による熱遮断能が低いことが確認され、先行研究における報告に一致した(Hayward and Keatinge, 1981)。この結果から保温水着着用により低い I_{tissue} を補うことは特に皮下脂肪厚の薄い被験者にとって有効であることが示唆された。

Moderate_TSS条件においてMSFTおよび%fatの低い被験者ほど高い I_{suit} / I_{total} を示した結果から、皮下脂肪厚が薄く、体脂肪率の低い被験者ほど、保温水着の総熱遮断能に対する貢献度が高いことが示された。すなわち、被験者の身体特性と I_{suit} / I_{total} の関係から、体脂肪の少ない被験者ほど保温水着着用の有効性が高いといえる。

5. 要約

本研究では、成人男性を対象に、水泳授業時の下限水温とされる水温 23°C 環境下において、低強度から中強度の水中運動を行い、保温水着着用時の体温変化および熱遮断能の変化から、保温水着の保温効果および特徴を明らかにすることを目的とした。また、身体特性の個人差による効果の違いを熱遮断能の指標を用いて検討し、身体特性差に応じた保温水着の有効性について明らかにすることを目的とした。

本研究の結果から、水中運動時における保温水着着用による以下の効果および特徴が明らかになった。

- (1) 保温水着条件で普通水着条件に比べて高い皮膚温および深部温を示し、また、低強度運動時においては震えなどの代謝性熱産生が低値を示した。
- (2) 運動強度の増加に伴い、身体組織の熱遮断能が低下するが、保温水着の熱遮断能を付加することで、総熱遮断能を増加させ、身体表面からの放熱量が低下した。
- (3) 保温水着条件と普通水着条件で、身体組織の熱遮断能に差が見られず、また、心拍出量、平均血圧、総末梢血管抵抗などの循環系応答に差が見られなかった。これらの結果は先行研究に示されるウエットスーツ着用時の身体組織の熱遮断能の低下とは異なる応答であった。
- (4) 普通水着条件において被験者の平均皮脂厚と身体組織の熱遮断能に正の相関関係が見られた。この結果を受けて、保温水着条件において平均皮下脂肪厚および体脂肪率の低い被験者ほど、総熱遮断能に占める水着の熱遮断能の割合が高かったことから、保温水着の総熱遮断能に対する貢献度が高いことが示された。すなわち、体脂肪の少ない被験者ほど保温水着着用の有効性が高いと言えた。

VI. 小学校高学年児童を対象とした水中運動時における保温水着着用の効果（実験 3）

1. 目的

実験 1, 2 により, 成人被験者を対象として, 水浸安静時および水中運動時における保温水着着用時の体温調節系応答の特徴を検討した. その結果, 先行研究に示される, ウエットスーツ着用時の身体組織の熱遮断能 (I_{tissue}) の低下とは異なる応答を示し, 安静時には普通水着条件よりもわずかに高い I_{tissue} を示し, 運動時には差が見られなかった. また, 水泳授業時の下限水温を想定した水温 23°C 環境において, 低強度運動時において保温水着着用によって深部温を維持する効果が確認された. ここで, 小学校水泳授業において保温水着を導入していくには子供を被験者としての検証が必要と考えられた.

先行研究に示した通り, 身体からの熱産生は体重に, 身体と環境間の熱交換は体表面積に強く影響され, 体表面積/体重比が熱出納に大きく影響することが知られている (井上, 2002; 井上, 2001). それゆえ, 成人に比べて体表面積/体重比が大きく, 身体サイズが小さい子供は低水温環境において熱放散が促進されやすい. そのため, 同じ水温 23°C 環境であっても子供を被験者とした場合, 成人に比べて深部温の低下が著しいことが予想され, 保温水着着用の必要性が高いと考えられる. しかしながら, 子供の寒冷環境における生理応答を検討した先行研究はきわめて少なく, Smolander et al. (1992) は, 気温 5°C の寒冷気中環境での運動時に子供は成人に比べて産熱をより亢進させて, 成人と同様の直腸温を維持したと報告している. また, Sloan and Keatinge (1973) は, 8 歳から 19 歳の男女を対象に水温 20.3°C 寒冷水中環境において水泳を行わせた際の舌下温の低下率 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) が皮下脂肪厚と体表面積/体重比に強く影響されることを報告している. 子供の寒冷環境における体温調節系応答について詳細なデータから明らかにする必要がある.

また, 水泳授業時の環境条件についても, 水泳指導の手引(二訂版)(文部科学省, 2004)において下限水温の目安として示されている 22–23°C 以上や, 累積温度方式として広

く用いられている気温と水温の和が 50°C 以上（日本水泳連盟, 1994）など、経験的に示されたものばかりで、子供を被験者としての客観的な検証が行われていない。

そこで、実験3では水温 23°C 環境において小学校高学年児童を被験者とし、小学校水泳授業を想定した運動強度で 30 分間の脚ペダリング運動を行った際の体温変化を測定し、保温水着着用による保温効果を明らかにすることを目的とした。さらに、身体特性の個人差による効果の違いを熱遮断能の指標を用いて検討し、身体特性差に応じた保温水着の有効性について明らかにすることを目的とした。

2. 方法

(1) 被験者

被験者は健康な小学校高学年男子児童 9 名（年齢 11.0 ± 0.7 歳，身長 144.8 ± 6.4 cm，体重 37.2 ± 5.5 kg，体脂肪率 $15.1 \pm 4.9\%$ ，平均皮下脂肪厚 10.3 ± 4.4 mm，体表面積 1.23 ± 0.11 m²）を対象とした（平均±標準偏差）。各被験者の身体的特徴は Table 7 に示す通りである。体脂肪率についてはインピーダンス式体組成計（BC-118; タニタ）を用いて測定した。皮下脂肪厚は栄養研式キャリパー（栄養研式; 明興社）を用いて、上腕三頭筋、肩甲骨下、腹部、上前腸骨棘上、大腿前面、下腿内側の 6 点で測定され、各被験者の平均皮下脂肪厚を算出した。体表面積（surface area: SA ; m²）は DuBois and DuBois (1916) の式 ($SA = 0.007184 \cdot BW^{0.425} \cdot H^{0.725}$) に従って身長（height: H ; m）および体重（body weight: BW ; kg）の値から算出した。被験者に寒冷適応を起こさせるような特別な運動習慣などはなかった。実験を行うにあたり、全ての被験者および保護者に本研究の目的、方法、危険性などを十分に説明し、被験者本人および保護者の参加への同意を得た。なお、本研究は、筑波大学体育科学系倫理委員会の承認を得た上で実施した。

(2) 実験プロトコール

本測定は 2005 年 11 月から 2006 年 2 月にかけて、T 大学屋内プールにて温度制御可

Table 7 Physical characteristics of the subjects

Subject	Age (year)	Height (cm)	Weight (kg)	% Fat (%)	MSFT (mm)	Surface area (m ²)
SG	12	144.0	30.7	7.6	6.1	1.13
OH	12	146.0	39.8	12.4	9.7	1.27
SK	10	143.9	32.1	12.4	7.8	1.15
MR	11	136.6	30.2	13.2	9.5	1.08
YS	11	152.5	41.0	13.3	7.7	1.33
KN	11	153.0	47.1	15.5	12.3	1.42
FJ	11	147.4	37.0	18.0	8.2	1.24
MO	11	146.0	39.6	19.1	10.6	1.27
IW	10	133.8	37.1	24.7	21.2	1.16
mean	11.0	144.8	37.2	15.1	10.3	1.23
SD	0.7	6.4	5.5	4.9	4.4	0.11

%Fat: percent of body fat

MSFT: mean skin fold thickness

Surface area = $0.007184 \cdot BW^{0.425} \cdot H^{0.725}$ (DuBois and DuBois, 1916)

能な実験用水槽（YSD-6000L, 吉田鉄工所, 1.7×2.4×1.4m）を用いて行われた。

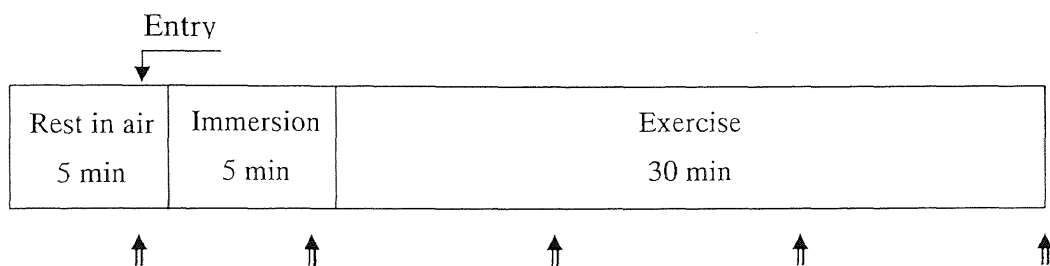
被験者は実験開始1時間前に屋内プール内の実験室に来て安静にし、測定環境に慣れるように指示された。まず、直腸温測定用プローブ（YSI700J/44202, 日機装 YSI）をエタノールで消毒後、肛門より直腸に15cm挿入した。次に、体表用サーミスタ（YSI709J/44202, 日機装 YSI）をサージカルテープにより皮膚温計測点に密着させた。また、呼気ガス採取用マスク及びハートレートモニタ（ACCUREX Plus, POLAR）を装着した。

測定準備ができた被験者は Fig. 34 に示されるプロトコールに従い実験を行った。まず陸上で5分間の座位安静を行い各測定項目の陸上安静値とした。続いて実験用水槽に入水し5分間の水浸座位安静を行った。その後、水中自転車エルゴメータ（Fig. 20, YSD社製）を50 rpmで30分間こぎ続けた。全ての被験者が、運動強度が1段階、水着が普通水着および保温水着の2条件の合計2回同一のプロトコールで実験を行った。各実験条件をNSS（normal swimsuit）、TSS（thermal swimsuit）と略す。なお、陸上安静時の着衣条件は全実験条件において普通水着着用とし、保温水着条件では水浸開始直前に保温水着を着用した。

運動強度については、全被験者で水泳授業時の運動強度を想定した同一絶対強度に設定した。最大心拍数（ HR_{max} ）を年齢から推定し（ $HR_{max} = 220 - \text{年齢}$ ）、各被験者の相対運動強度（ $\% HR_{max}$ ）を算出した。

本研究で用いた保温水着（JCW-24100, ジパソン）（thermal swimsuit: TSS）を Fig. 35 に示した。保温水着はクロロプレン素材の両面にナイロン素材を貼り合わせた厚さ2.0 mmの生地からなり、定常熱流計法（日本工業標準調査会, 1999）により測定した濡れ状態の生地の熱伝導率は $0.198 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ であった。形状はワンピースハーフスリーブタイプで体幹部および上腕部、頸部および大腿部を被覆した。Hardy and DuBois (1938) の体表面積重み付け係数より算出した保温水着の被覆率は全身の約61%であり、普通水着は約5%であった。

各実験条件における水温、室温、相対湿度を Table 8 に示した。水温、室温はサーミ



Measurement

T_{re} , skin temperatures, \dot{V}_{O_2} , RER , HR

Thermal sensation, thermal comfort, shivering intensity: every 10 min = ↑

Fig. 34 Experimental protocol of experiment 3

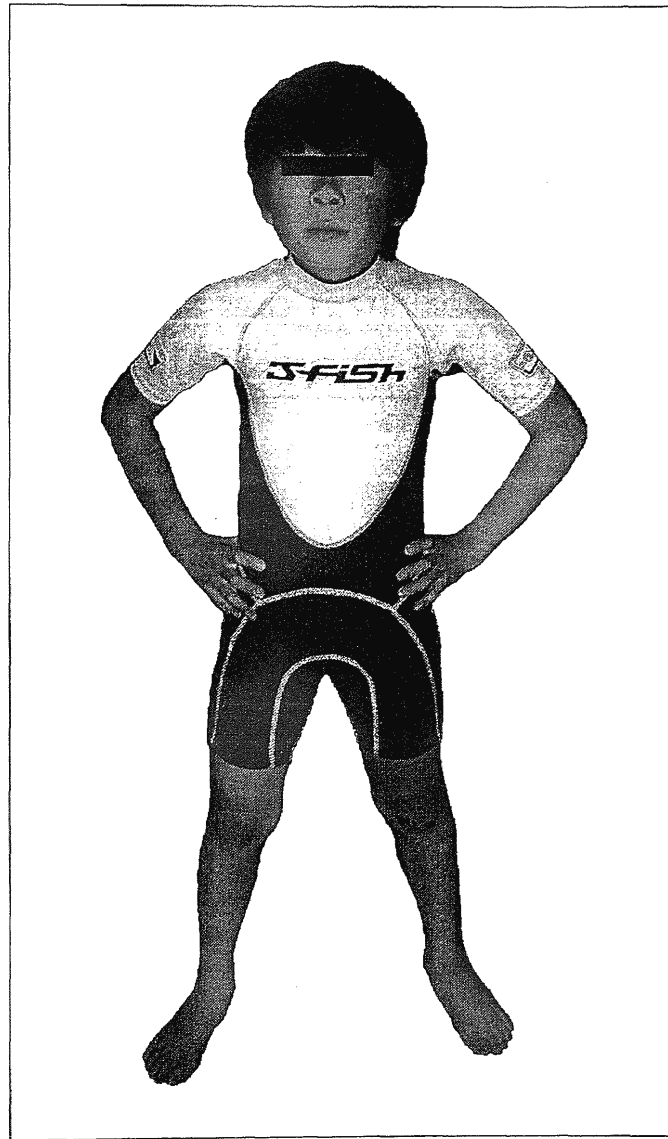


Fig. 35 Thermal swimsuit (TSS) for children used in experiment 3

Table 8 Experimental environment

	NSS	TSS
T_w (°C)	23.01 (0.07)	23.07 (0.06)
T_a (°C)	23.60 (1.57)	24.17 (1.57)
%RH (%)	54.72 (3.71)	55.57 (5.32)

Value are mean (SD).

T_w : water temperature

T_a : air temperature

スタセンサー (YSI700J/44202, 日機装 YSI) により, 相対湿度は湿度変換器 (TA503, Toplas engineering) によって測定され, AD 変換器 (Powerlab/16SP, ADInstruments) を介してパーソナルコンピュータ (PowerBookG3, Apple) に取り込まれ 1 秒毎に記録された。水位は被験者の胸部位とし, 水槽内の水約 5000L を実験中 50L/min で循環させた。

測定は体温の日内変動 (佐々木ら, 1978; 中山, 1981) を考慮し, 全測定を 13 時から 17 時までの間で, 各被験者が同一の時間帯に行った。各被験者は各実験条件をそれぞれ別の日に行ったが, 水着条件の実験順序はランダムになるように行われた。また, 食事の影響を避けるため, 被験者には測定の 3 時間前までに食事を済ませるよう指示した。

(3) 測定項目

1) 体温

体温は深部温と皮膚温について測定した。本研究では深部温としては直腸温 (T_{re}) を測定し, 皮膚温 (Skin temperature: T_{sk}) は前額部 (T_{head}), 胸部 (T_{chest}), 上腕部 ($T_{upper\ arm}$), 前腕部 ($T_{forearm}$), 大腿部 (T_{thigh}), 下腿部 (T_{calf}) の 6 点で測定した。これらの測定値から以下の数式を用いて平均皮膚温 (\bar{T}_{sk}) および平均体温 (\bar{T}_b) を算出した。

$$\bar{T}_{sk} = 0.07T_{head} + 0.35T_{chest} + 0.07T_{upperarm} + 0.12T_{forearm} + 0.19T_{thigh} + 0.20T_{calf}$$

(Hardy and DuBois, 1938 を改変)

$$\bar{T}_b = 0.67 T_{re} + 0.33 \bar{T}_{sk} \quad (\text{Gagge and Nishi, 1977})$$

2) 代謝応答

呼気ガスは蛇管を通して採取され, 質量分析式呼気ガス分析装置 (WEMS2000; ウエストロン) を用いて, 酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}), 呼吸交換比 (RER) を経時的に測定した。震えの指標として震え強度 (Shivering intensity: SI) を被験者に 10 分毎に報告させた。震え強度については Fig.2 に示す「全く震えない」から「かなり震える」までの 4 段階の尺度 (Nielsen and Endrusick, 1990 より改変) を用いた。また, ハートレートモニター (ACCUREX Plus, POLAR) を用いて心拍数を経時的に測定した。

3) 主観的応答

主観的温度感覚 (thermal sensation: TS) および温熱的快不快感 (thermal comfort: TC) を被験者に 10 分毎に報告させた。主観的温度感覚は Fig. 21-a に示した「暑い」から「寒い」までの+3~-3 までのスケール (Gagge et al., 1967) を使用し、温熱的快不快感は Fig. 21-b に示した「非常に快適」から「非常に不快」までの+3~-3 までのスケールを使用した。

運動時には主観的運動強度 (rating of perceived exertion: RPE, Borg, 1973; 小野寺, 1976) を 10 分毎に報告させた。

(4) 分析

1) 体温・代謝応答

体温は、 T_{re} , \bar{T}_{sk} について、各条件の経時的変化を比較した。 T_{re} の陸上安静時から運動終了時までの変化 (ΔT_{re}) および $\Delta \bar{T}_b$ と各被験者の%fat との相関関係を分析した。

\dot{V}_{O_2} , RPE, 震え強度について水浸前陸上安静時, 水浸安静時, 水中運動時の各局面において平均値を算出し、条件間の比較を行った。

2) 放熱量・熱遮断能

実験 1, 2 と同様の方法を用いて、産熱量 (M_s), 貯熱量 (S_s) および放熱量 (H_s), 身体組織の熱遮断能 (I_{tissue}), 水着の熱遮断能 (I_{sui}) および総熱遮断能 (I_{total}) を算出し、各条件間の比較を行った。

各被験者の%fat と I_{tissue} との相関関係を分析した。

3) 主観応答

各条件の主観的温度感覚 (TS) および温熱的快不快感 (TC) の経時的変化を比較した。

(5) 統計処理

測定データは平均値±標準誤差で示した。各測定項目の条件間の平均値の比較には、経時的データについては、対応のある二元配置 (条件×時間) の分散分析を用いた。下

位検定として対応のある t 検定により条件間の比較を行った。また、順位尺度データである RPE、震え強度、主観的温度感覚、温熱的快不快感については、Wilcoxon の符号付き順位検定を行った。経時的データの比較は5分毎の各時点において行った。 M_s , S_s , H_s , I_{tissue} , I_{suit} , I_{total} などの経時的でないデータは対応のある t 検定により比較した。陸上安静値から運動終了時までの T_{re} および \bar{T}_b の変化 (ΔT_{re} , $\Delta \bar{T}_b$) と %fat との相関分析には Pearson の積率相関係数を用いた。同様に、 I_{tissue} と %fat との相関分析には Pearson の積率相関係数を用いた。いずれも有意性は危険率 5%未満で判定した。

3. 結果

(1) 運動強度

各条件における運動強度の 30 分間の平均値を Table 9 に示した。 \dot{V}_{O_2} は、NSS 条件で $27.6 \pm 5.1 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, TSS 条件で $25.5 \pm 4.4 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ であった。また、HR はそれぞれ、 $138.1 \pm 15.6 \text{ bpm}$ ($66.1 \pm 2.5\% \text{HR}_{\text{max}}$), $135.4 \pm 14.9 \text{ bpm}$ ($64.8 \pm 2.3\% \text{HR}_{\text{max}}$), RPE はそれぞれ、 12.0 ± 2.1 , 12.1 ± 1.4 であった。各指標において、水着条件間に差は見られなかった。

(2) 体温

T_{re} の経時的変化を Fig. 36 に示した。陸上安静値に水着条件間の差は見られなかった。両条件で、水浸安静時に入水直後から運動開始前にかけて陸上安静時からほとんど変化しなかった。NSS 条件では運動終了時までわずかに T_{re} が低下したのに対し、TSS 条件ではわずかに上昇し、運動開始 10 分から 15 分にかけて TSS 条件で有意に高い値を示し ($p < 0.05$), 5 分から運動終了時にかけて有意ではないが高い値を示す傾向が見られた ($p < 0.1$)。運動終了時 (運動開始 30 分後) の T_{re} は、NSS 条件で $37.11 \pm 0.21^\circ\text{C}$ ($-0.16 \pm 0.20^\circ\text{C}$), TSS 条件で $37.45 \pm 0.09^\circ\text{C}$ ($+0.07 \pm 0.08^\circ\text{C}$) であった。

\bar{T}_{sk} の経時的変化を Fig. 37 に示した。陸上安静値に水着条件間の差は見られなかった。

Table 9 Cardiovascular responses during rest in air, immersion and water exercise

Swimsuit		NSS		TSS	
		mean	SE	mean	SE
\dot{V}_{O_2} (ml·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	rest in air	4.5	(0.5)	5.0	(0.8)
	immersion	9.2	(0.9)	8.5	(0.8)
	exercise	27.6	(1.7)	25.5	(1.5)
\dot{V}_E (l·min ⁻¹)	rest in air	6.8	(1.0)	6.7	(1.5)
	immersion	10.2	(0.8)	10.0	(1.6)
	exercise	32.4	(1.4)	28.7	(1.3) *
RPE	rest in air	6.0	(0.0)	6.0	(0.0)
	immersion	6.0	(0.0)	6.0	(0.0)
	exercise	12.0	(0.7)	12.1	(0.5)
Shivering	rest in air	1.0	(0.0)	1.0	(0.0)
	immersion	2.4	(0.3)	2.2	(0.3)
	exercise	1.2	(0.1)	1.0	(0.0)
HR (bpm)	rest in air	83.3	(4.3)	84.5	(4.1)
	immersion	84.4	(4.2)	84.0	(3.2)
	exercise	138.1	(5.2)	135.4	(5.0)
$\%HR_{max}$ (%)	exercise	66.1	(2.5)	64.8	(2.3)

Values are mean (SE)

$HR_{max} = 220 - \text{age}$

* Significant difference between NSS and TSS condition ($p < 0.05$).

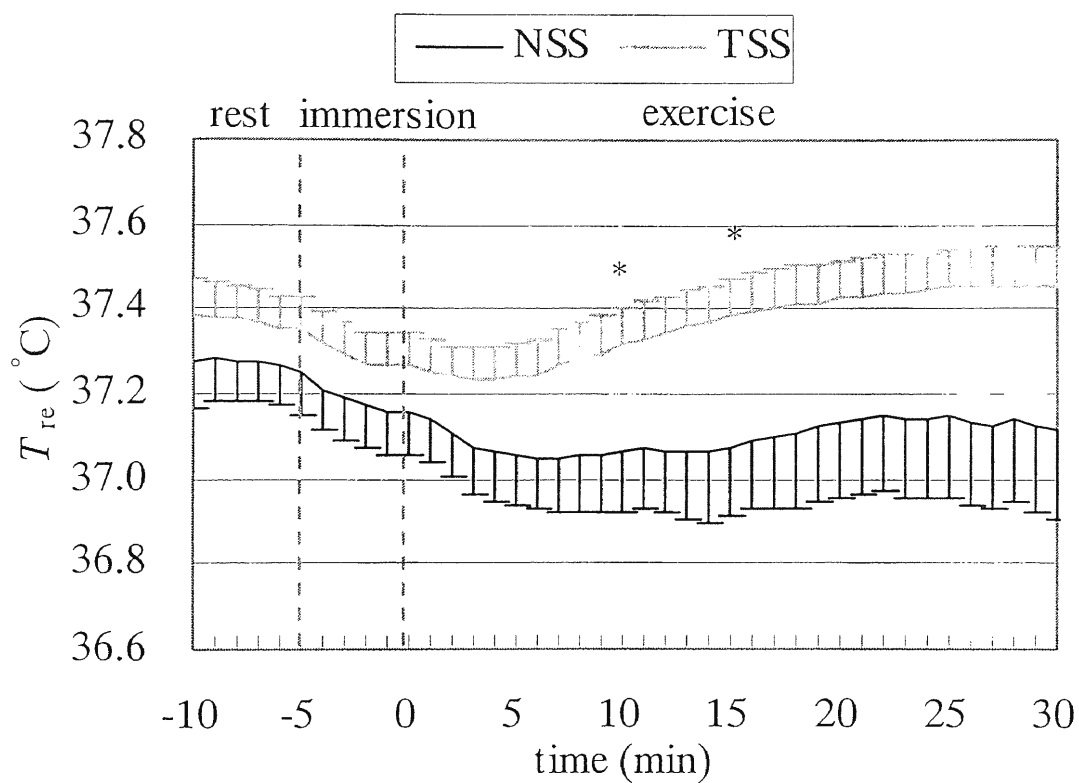


Fig. 36 Changes in rectal temperature during 30 min water exercise

T_{re} : rectal temperature

* Significant difference between NSS and TSS condition ($p < 0.05$).

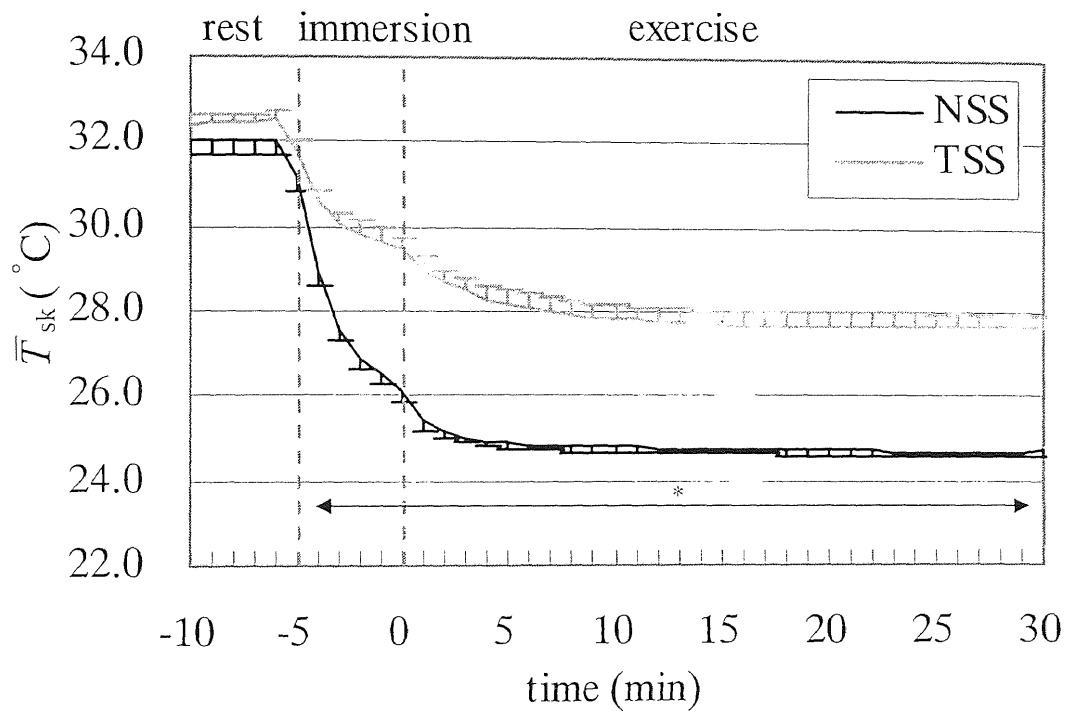


Fig. 37 Changes in mean skin temperature during 30 min water exercise

\bar{T}_{sk} : mean skin temperature

* Significant difference between NSS and TSS condition ($p < 0.05$).

両条件で、入水直後から5分後にかけて急激に皮膚温が低下し、運動開始前までNSS条件で大きく低下したのに対し ($-5.98 \pm 0.37^{\circ}\text{C}$)、TSS条件では比較的緩やかな低下であった ($-2.98 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$)。水浸1分後から水中運動終了時までTSS条件でNSS条件よりも高い \bar{T}_{sk} を示した ($p < 0.05$)。運動終了時の \bar{T}_{sk} は、NSS条件で $24.70 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ ($-7.37 \pm 0.26^{\circ}\text{C}$)、TSS条件で $27.63 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ ($-4.77 \pm 0.22^{\circ}\text{C}$) であった。

各被験者の%fatと陸上安静時から水中運動終了時までの T_{re} の低下度 (ΔT_{re}) の関係を Fig. 38 に示した。NSS条件において、 ΔT_{re} と%fatの間に有意ではないものの、相関の傾向が見られたが ($p = 0.06, r = 0.65$)、TSS条件では関係が見られなかった。また、各被験者の%fatと陸上安静時から水中運動終了時までの \bar{T}_b の低下度 ($\Delta \bar{T}_b$) の関係を Fig. 39 に示した。NSS条件において、 $\Delta \bar{T}_b$ と%fatの間に有意な正の相関関係が見られたが ($p < 0.05, r = 0.71$)、TSS条件では関係が見られなかった。

(3) 代謝応答

代謝応答の各測定項目について、陸上安静時、水浸安静時、水中運動時の平均値を Table 9 に示した。陸上安静時において各測定項目に水着間の差は見られなかった。水浸安静時においても各測定項目に水着間の差は見られなかった。

水中運動時においては、 \dot{V}_E がNSS条件でTSS条件よりも有意に高い値を示した ($p < 0.01$)。 \dot{V}_{O_2} 、HR、RPE、震え強度については、水中運動時に水着条件間の差は見られなかった。震え強度については、ほとんどの被験者が水中運動時、両水着条件で1(全く震えない)の回答であった。

(4) 放熱量

水中運動30分間における体表面積あたりの産熱量 (M_s)、貯熱量 (S_s) および総放熱量 (H_s) を Fig. 40 に示した。

M_s はNSS条件で $279.8 \pm 12.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、TSS条件で $257.7 \pm 11.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。水着条件間の差は見られなかった。

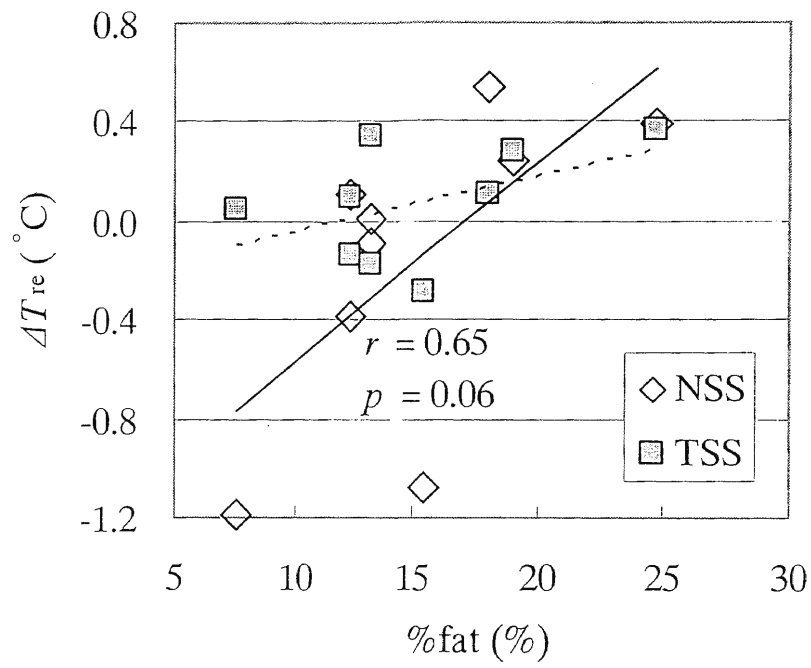


Fig. 38 Relationship between subjects' %fat and ΔT_{re} during water exercise

T_{re} : rectal temperature

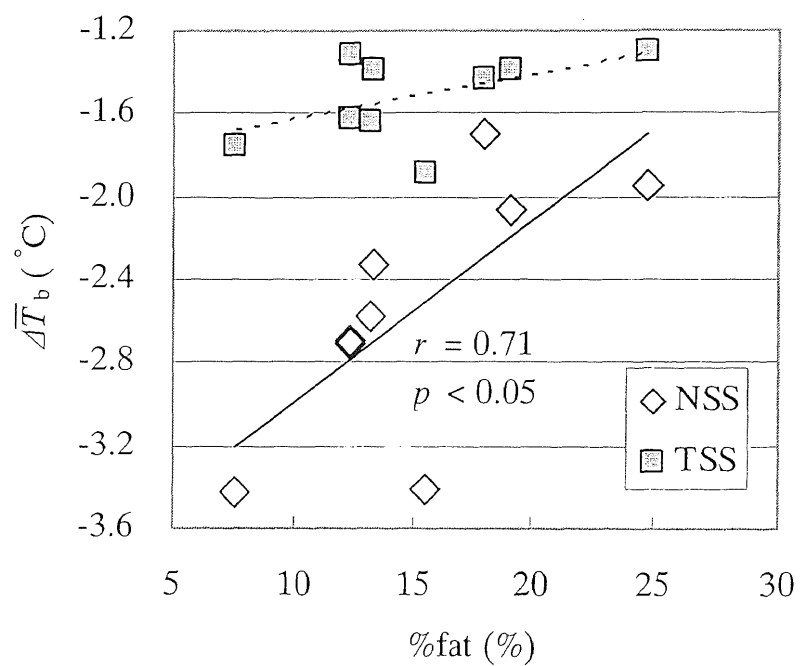


Fig. 39 Relationship between subjects' %fat and $\Delta \bar{T}_b$ during water exercise

\bar{T}_b : mean body temperature

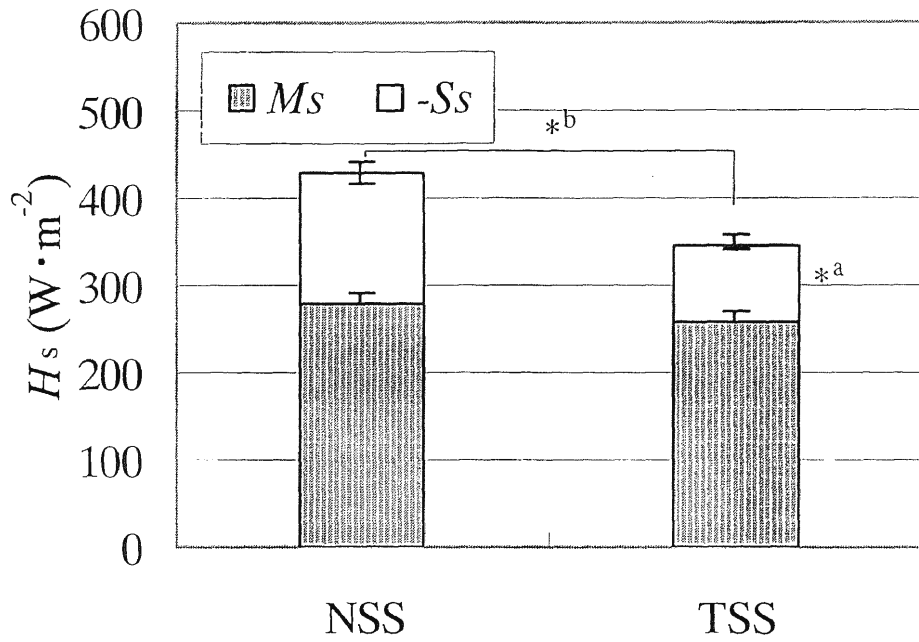


Fig. 40 Metabolic heat production, heat storage and heat loss from skin surface during 30 min water exercise

M_s : metabolic heat production from the skin surface

S_s : heat storage from the skin surface

H_s : heat loss from the skin surface

$$H_s = M_s - S_s$$

*^a: Significant difference between NSS and TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of $-S_s$.

*^b: Significant difference between NSS and TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of H_s .

S_s はNSS条件で $-147.4 \pm 12.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、TSS条件で $-88.8 \pm 4.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。いずれの条件も平均体温が低下したため負の S_s を示した。TSS条件でNSS条件よりも有意に高い S_s を示した ($p < 0.01$)。

H_s はNSS条件で $427.2 \pm 12.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、TSS条件で $346.5 \pm 10.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。TSS条件でNSS条件よりも有意に低い H_s を示した ($p < 0.01$)。

(5) 熱遮断能

水中運動30分間における身体組織の熱遮断能 (I_{tissue})、水着の熱遮断能 (I_{suit}) および総熱遮断能 (I_{total}) を Fig. 41 に示した。

I_{tissue} はNSS条件で $0.029 \pm 0.001^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ 、TSS条件で $0.029 \pm 0.001^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった。水着条件間の差は見られなかった。

I_{suit} はTSS条件で $0.013 \pm 0.000^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった。NSS条件においても水着の熱遮断能が示されたが、これは総熱遮断能から身体組織の熱遮断能を引いて算出する計算により生じたもので、分析対象から除外した。

I_{total} はNSS条件で $0.033 \pm 0.001^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ 、TSS条件で $0.042 \pm 0.001^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ であった。TSS条件でNSS条件よりも高い総熱遮断能を示した ($p < 0.01$)。

NSS条件における各被験者の I_{tissue} と%fatの関係を Fig. 42 に示した。 I_{tissue} と%fatの間に有意な正の相関関係が見られた ($p < 0.05, r = 0.786$)。

(6) 主観応答

主観的温度感覚 (TS) の経時的変化を Fig. 43 に示した。水浸前陸上安静時では、寒冷感を感じない熱的中立状態であり、条件間に有意差は見られなかった。水浸安静時、両条件で陸上安静時より低値を示した。NSS条件では -1.9 ± 0.2 、TSS条件では -1.4 ± 0.3 を示し、条件間の差は見られなかった。水中運動時には、両条件で徐々に高いTSにシフトし、NSS条件で $-0.7 \sim 0.4$ 、TSS条件で $0.1 \sim 1.2$ を示した。運動開始20分後にTSS条件で有意に高いTSを示し ($p < 0.05$)、10分後と30分後には有意ではないがTSS条

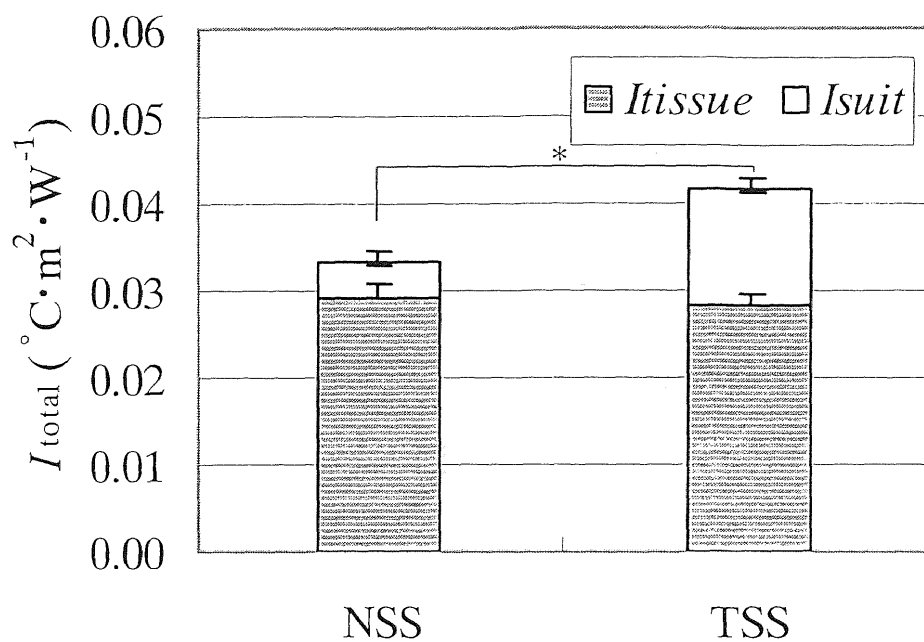


Fig. 41 Tissue insulation, suit insulation and total insulation during 30 min water exercise

I_{total} : total insulation, $I_{\text{total}} = (T_{\text{es}} - T_{\text{w}}) / H_{\text{s}}$

I_{tissue} : tissue insulation, $I_{\text{tissue}} = (T_{\text{es}} - \bar{T}_{\text{sk}}) / H_{\text{s}}$

I_{suit} : suit insulation, $I_{\text{suit}} = I_{\text{total}} - I_{\text{tissue}}$

* Significant difference between NSS and TSS condition ($p < 0.05$) in the mean value of I_{total} .

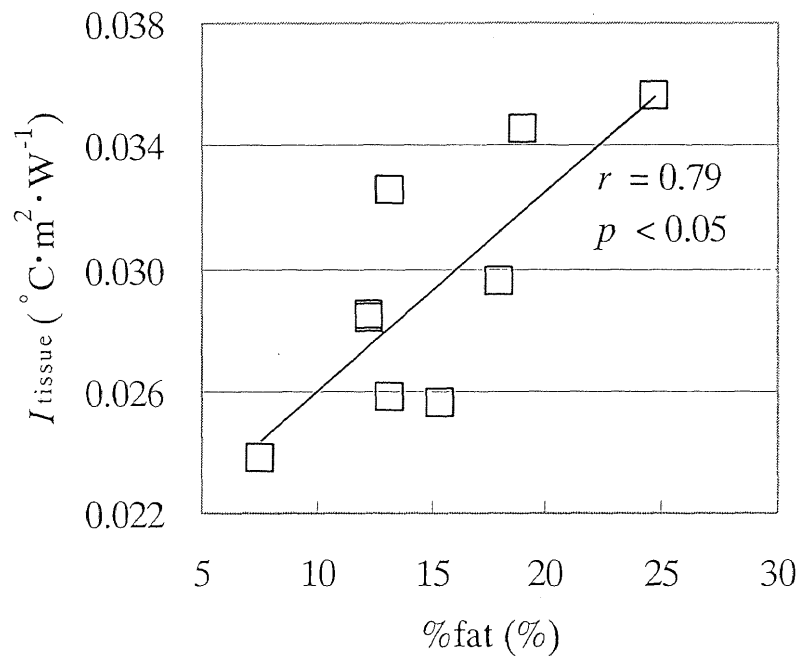


Fig. 42 Relationship between subjects' %fat and I_{tissue} during water exercise with NSS

%fat: percent body fat

I_{tissue} : tissue insulation

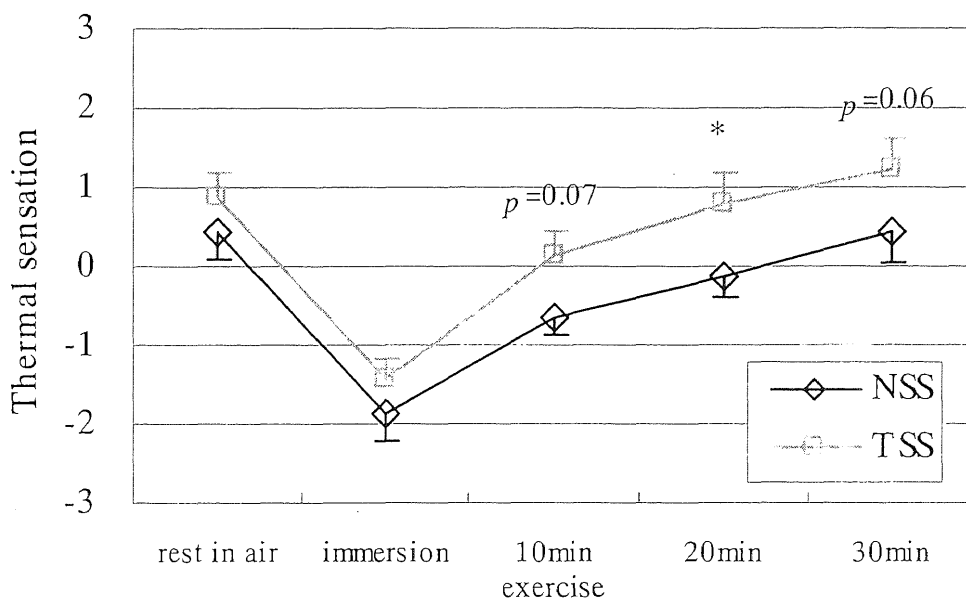


Fig. 43 Changes in thermal sensation during 30 min water exercise

Thermal sensation was estimated by the scale, where -3 = “cold”, -2 = “cool”, -1 = “slightly cool”, 0 = “neutral”, +1 = “slightly warm”, +2 = “warm” and +3 = “hot”.

* Significant difference between NSS and TSS condition ($p < 0.05$).

件で高い傾向を示した ($p = 0.07, p = 0.06$).

温熱的快不快感 (TC) の経時的変化を Fig. 44 に示した. 水浸前陸上安静時では, 両条件とも「どちらともいえない」から「やや快適」のレベルにあり, 条件間に有意差は見られなかった. 水浸安静時, 両条件で陸上安静時より低値を示した. NSS 条件で -1.4 ± 0.3 , TSS 条件で -0.6 ± 0.4 を示し, TSS 条件で NSS 条件よりも有意に高い TC を示した ($p < 0.05$). 水中運動時には, NSS 条件で $-0.4 \sim -0.2$ を示したのに対し, TSS 条件で $0.4 \sim 0.2$ を示し, 両条件とも「どちらともいえない」に近い回答であった. 運動開始 10 分後に有意ではないが TSS 条件で高い TC を示す傾向が見られた ($p = 0.07$).

4. 考察

(1) 体温

小学校高学年児童を対象に水温 23°C 環境で行った実験 3 では, 成人被験者を対象とした実験 2 と同様に, 入水直後から 5 分後にかけて急激に皮膚温が低下し, 運動開始前まで NSS 条件で大きく低下したのに対し, TSS 条件では比較的緩やかな低下であった. これは, 実験 1, 2 やウエットスーツの先行研究 (Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986) と同様に, ネオプレン製の水着が被覆部位への浸水を抑えたことにより, 伝導や対流による熱放散を減少させた結果, TSS 条件において高い \bar{T}_{sk} を維持したと考えられた. NSS 条件で, 運動開始後に運動開始前よりも 1°C 程度 \bar{T}_{sk} が低下し, TSS 条件でも比較的緩やかであるが, 運動開始後に \bar{T}_{sk} が低下した. これは, 水中での運動に伴い身体周りの水の流れが大きくなった結果, 体表面に存在した温められた層が失われ, 伝導や対流による熱放散が大きくなったことによる \bar{T}_{sk} の低下と考えられた.

T_{re} は NSS 条件で運動開始後にわずかに低下したが, TSS 条件ではわずかに上昇し, 運動開始 10 分後から 15 分後にかけて NSS 条件に比べて有意に高い T_{re} を示した. NSS 条件における T_{re} の低下もわずかであり, 水温 23°C 環境における中強度の運動時には児童の深部温が維持されるが (Fig. 36), 個人差が大きいことから, 身体特性と深部温の

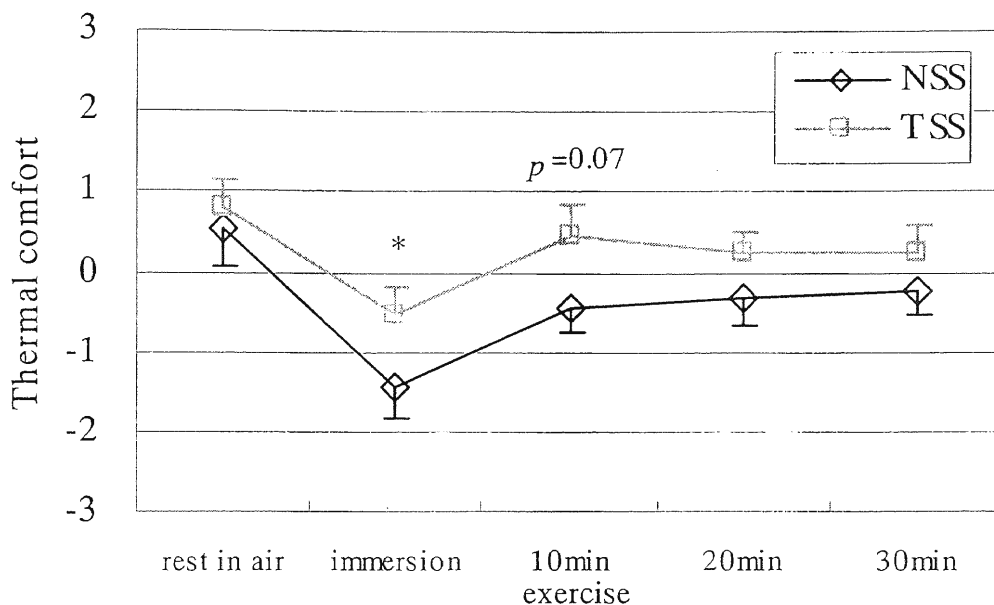


Fig. 44 Changes in thermal comfort during 30 min water exercise

Thermal comfort was estimated by the scale, where -3 = “very uncomfortable”, -2 = “uncomfortable”, -1 = “slightly uncomfortable”, 0 = “neutral”, +1 = “slightly comfortable”, +2 = “comfortable” and +3 = “very comfortable”.

* Significant difference between NSS and TSS condition ($p < 0.05$).

変化との関係を検討する必要があるが示唆された。また、本研究における運動強度は先行研究に示される水泳授業内の水泳時の運動強度に近いものであったが（黒川ら, 1991）、水泳授業では待機、移動といった非活動的時間が 50%以上を占める実態にあり（甲斐ら, 1987）、授業時間を平均すると本研究よりも低い運動強度で行われていると考えられる。本研究の運動条件は連続的運動であったため、水泳授業時の間欠的な運動と直接比較することは難しいが、間欠的な運動条件を設定した場合、非活動時に産熱が低下することが予想され、本研究における深部温の変化よりも低下が見られる可能性もある。今後、より授業現場に即した実験設定において検討を行う必要が考えられた。

個人の身体特性と深部温の変化との関係を検討した結果、%fat の低い児童については NSS 条件では 1°C 以上深部温が低下する者も見られた (Fig. 38)。Holmer and Bergh (1974) は水温 18, 26, 34°C において 20 分間の最大下水泳を行った際の成人被験者の ΔT_{es} と MSFT との関係を検討しており、水温 18, 26°C においては ΔT_{es} と MSFT の間に正の相関関係が見られたが、水温 34°C では全被験者の T_{es} が 0.7°C 程度上昇し、MSFT との関係性が見られなかったことを報告している。本研究でも同様に、NSS 条件では被験者の %fat と ΔT_{re} および $\Delta \bar{T}_b$ との間に正の相関関係の傾向が見られたが、TSS 条件では全被験者で陸上安静時からわずかな ΔT_{re} の変化しか見られなかったため、%fat との関係性が見られなかった。このような %fat の低い児童に対して TSS を着用させることにより深部温が維持されたことから、身体特性差に応じた TSS 着用の有用性が示された。

(2) 代謝応答

成人を対象として行った実験 1 の水浸安静時や実験 2 における低強度運動時 ($\dot{V}_{O_2} = 10-12 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) では、TSS 着用により震え熱産生が抑えられることを示した。本研究では実験 2 の中強度運動時 ($\dot{V}_{O_2} = 20-21 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) と同様に運動強度が比較的高く、NSS 条件においても運動時に震えを示す被験者はわずかであった。そのため、震え熱産生による \dot{V}_{O_2} の亢進は小さく、運動に伴う \dot{V}_{O_2} の増加が大きかったため、水着条件による \dot{V}_{O_2} の差は見られなかったと考えられた。

Nomura (1983) は 10–12 歳の男女を対象に 18, 22, 26°C の水温で漸増負荷運動を行わせた際の換気応答について検討し, \dot{V}_{O_2} は条件間に差が見られなかったが, \dot{V}_E および一回換気量が 18°C 条件において有意に高い値を示しており, これは皮膚からの寒冷刺激が呼吸中枢を刺激して換気を亢進させたからではないかと推察している. 本研究においても同様の傾向が見られ, 水中運動時の \dot{V}_{O_2} に水着条件間の差は見られなかったものの, \dot{V}_E が TSS 着用時に有意に低値を示した. より寒冷刺激の強かった NSS 条件において高い \dot{V}_E が示され, TSS 着用により寒冷刺激が抑えられた結果, 換気の亢進が抑えられた可能性が示唆された.

(3) 放熱量

M_s については, 両水着条件で震え強度および \dot{V}_{O_2} に差が見られなかった結果を受けて, 両水着条件間に差が見られなかった.

S_s については, TSS 着用により \bar{T}_b の低下が抑えられた結果, TSS 条件で NSS 条件よりも高い S_s を示した.

H_s については, TSS 着用時に S_s の増加を受けて, NSS 条件よりも低い H_s を示した.

(4) 熱遮断能

実験 2 の成人を被験者とした検討で見られた結果と同様に, 水着条件間の I_{tissue} の違いは見られなかった. 実験 1, 2 でも示したように保温水着の形状により四肢遠位部からの温度入力が血管収縮に十分であったため, 先行研究 (Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986) に示されるウエットスーツ着用時の I_{tissue} が裸体時に比べて低値を示すのに対して, TSS 着用時には NSS 条件と同様の I_{tissue} を示したと考えられた. また, 実験 2 の中強度運動時と同様に両水着条件でほとんど震えが見られなかったため, 震えに伴う I_{tissue} の低下も起こらず, I_{tissue} に水着間の差は見られなかったと考えられた.

NSS 条件において見られた各被験者の %fat と I_{tissue} の相関関係から, 皮下脂肪厚の薄い被験者ほど身体組織による熱遮断能が低いことが確認された (Hayward and Keatinge,

1981). この結果から保温水着着用により低い I_{tissue} を補うことは特に体脂肪率の低い児童にとって有効であることが示唆された.

5. 要約

本研究では、小学校高学年児童を対象に、水泳授業時の下限水温とされる水温 23°C 環境下において、小学校水泳授業を想定した運動強度で 30 分間の脚ペダリング運動を行い、保温水着着用時の体温変化および熱遮断能の変化から、保温水着の保温効果および特徴を明らかにすることを目的とした。また、身体特性の個人差による効果の違いを熱遮断能の指標を用いて検討し、身体特性差に応じた保温水着の有効性について検討することを目的とした。

本研究の結果から、小学校高学年児童を対象に、水中運動時における保温水着着用による以下の効果および特徴が明らかになった。

- (1) 保温水着条件で普通水着条件に比べて高い皮膚温および深部温を示した。
- (2) 成人被験者と同様に、保温水着条件と普通水着条件で、身体組織の熱遮断能に差が見られなかった。
- (3) 普通水着条件において被験者の体脂肪率と身体組織の熱遮断能に正の相関関係が見られ、痩せた児童ほど保温水着着用の有効性が高いと考えられた。体脂肪率の低い児童に対して保温水着を着用させ、水着の熱遮断層を付加することにより、低い身体組織の熱遮断能を補うことが可能と考えられた。
- (4) 保温水着着用により寒冷感が抑えられた。

VII. 小学校水泳授業における保温水着着用の効果の検討（実験 4）

1. 目的

実験 3 により、小学校高学年児童を被験者として、水泳授業時の下限水温を想定した水温 23°C 環境における運動時に、保温水着（TSS）着用によって深部温の低下および寒冷感を抑える効果が示された。また、特に体脂肪率の低い児童は、普通水着条件では深部温を大きく低下させるが、TSS の着用により他の児童と同様に深部温を維持できたことから、身体特性差に応じた TSS 着用の有用性が示された。しかしながら、実験室での検討では環境条件が一定であることや運動条件が脚ペダリング運動による連続的運動であることなど、実際の水泳授業に即していないという研究の限界が見られた。小学校水泳授業に TSS 着用を導入するためには、実験 3 で得られた生理的応答などの客観的データに加えて、小学校水泳授業現場における実践的研究が必要と考えられた。

小学校水泳授業において TSS を着用することにより、児童の寒冷感を抑え、授業への参加意欲を高めることや、授業時間数の確保を図り、児童の水泳技能学習に対して有効な教具としての役割を果たすのではないかと考えられる。しかしながら、TSS を水泳授業に活用することの意義については未だ検討されていない。

そこで、実験 4 では小学校高学年児童を対象とし、実際的小学校水泳授業において TSS 着用介入を実践し、小学校水泳授業における TSS 着用が児童の主観的溫度感覚に及ぼす温熱的効果および形成的授業評価に及ぼす教育的効果について明らかにすることを目的とした。さらに、屋外プール環境条件による TSS 着用の効果の違いや、個人の身体特性に応じた TSS の活用法について示唆を与えることを目的とした。

2. 方法

(1) 被験者

T 市内小学校 6 年生 62 名を本研究の対象とした。研究の遂行に際して、協力小学校

長および担任教諭に対して書面および口頭にてインフォームドコンセントを行い、了解を得た上で、児童および保護者に対しても研究に関する案内を書面にて行った。なお、本研究は、筑波大学体育科学系倫理委員会の承認を得た上で実施した。研究対象の児童を TSS を着用して授業を行った実験群（32 名；男子 19 名，女子 13 名）と普通の水着を着用して授業を行ったコントロール群（30 名；男子 16 名，女子 14 名）に群分けした。なお、3 回の介入授業において 2 回以上出席した者を本研究の被験者として採用した。

被験者の身体的特性については水泳授業期間中に身長、体重、および皮下脂肪厚の測定を行った。身長 (H) および体重 ($Mass$) から DuBois and DuBois (1916) の式を用いて体表面積 (SA) を推定した ($SA = 0.007184 \cdot Mass^{0.425} \cdot H^{0.725}$)。皮下脂肪厚の測定は上腕三頭筋部 (triceps: TR; mm) および肩甲骨下角部 (scapula: SC; mm) において栄研式キャリパー (Eiyoken-type, 明興社) を用いて測定し、平均皮脂厚 (MSFT) を求めた。また、以下に示した北川ら (1988) の推定式により身体密度 (BD; kg/l) を算出した。

$$BD (\text{男子}) = 1.0685 - 0.00094 (TR + SC)$$

$$BD (\text{女子}) = 1.0642 - 0.00084 (TR + SC)$$

また、算出した身体密度を戸部ら (1997) が開発した年齢を独立変数に含む身体組成算出式に代入し、体脂肪率 (%fat) を求めた。暦年齢 (AGE) は少数第 1 位まで求めて代入した。

$$\begin{aligned} \%fat (\text{男子}) = & (0.9626 + 0.00134 \text{ AGE}) / (0.1696 + 0.00155 \text{ AGE}) / BD \\ & - 0.9 / (0.1696 + 0.00155 \text{ AGE}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%fat (\text{女子}) = & (0.9626 + 0.00134 \text{ AGE}) / (0.1696 + 0.00155 \text{ AGE}) / BD \\ & - 0.9 / (0.1696 + 0.00155 \text{ AGE}) \end{aligned}$$

被験者の身体的特性を Table 10 にまとめた。

(2) 研究スケジュール

本研究における水泳授業は 2005 年 6 月中旬から下旬にかけて行われ、実施した全 5

Table 10 Physical characteristics of the subjects

		Age (year)	Height (cm)	Weight (kg)	MSFT (mm)	%fat (%)	SA (m ²)
experimental (n=32)	mean	11.6	145.3	36.5	8.4	16.6	1.19
	SD	0.3	6.3	4.9	3.1	3.0	0.10
control (n=30)	mean	11.7	144.8	35.5	8.2	16.4	1.17
	SD	0.3	6.0	7.0	2.9	3.2	0.13

MSFT: mean skin fold thickness

%fat: percent body fat

SA: surface area, $SA = 0.007184 \cdot BW^{0.425} \cdot H^{0.725}$ (DuBois and DuBois, 1916)

回の授業のうち、1回目と5回目をそれぞれ Pre, Post とし全児童を対象に泳力測定を行い、2回目から4回目の授業日において TSS 着用の介入を行った。水泳授業時間は70分間でそのうち実技時間は約50分間であった。授業の内容は、準備体操・シャワー10分、入水・水慣れ15分間の後、泳力に合わせた初、中、上級の3グループに分かれて約35分間の泳法指導を中心に行われた。

(3) 保温水着

本研究で使用した保温水着 (JCW-24100, ジパソン) (TSS) は、実験3と同様のもので、クロロプレン素材の両面にナイロン素材を貼り合わせた厚さ 2.0 mm の生地からなり、定常熱流計法 (日本工業標準調査会, 1999) により測定した濡れ状態の生地の熱伝導率は $0.198 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ であった。形状はワンピースハーフスリーブタイプで体幹部および四肢近位部を覆う形状であった (Fig. 35)。TSS の余剰浮力は 0.42 kg であった。サイズは適合身長 130cm から 150cm の 3 サイズ用意し、実験群の児童は事前にサイズ合わせを行い、TSS 着用介入日に毎回同一サイズの水着を着用した。

(4) 測定項目

屋外プールにおける水泳授業実施環境条件として水温、気温、湿度、風速を暑熱環境計 (WBGT-100, 京都電子) を用いて経時的に測定した。

授業の運動強度については毎回の授業終了後に主観的運動強度 (RPE: Borg, 1973; 小野寺, 1976) を測定した。2回目から4回目授業日において、中級グループの7名のみ心拍数 (heart rate: HR) を心拍計 (Accurex Plus, Polar) により経時的に測定した。

毎回の水泳授業において、途中退水者について児童の震えや顔色などの身体的状況と児童の申告に基づいて寒さによるものと判断された人数を調査し、退水者と非退水者の身体特性の比較を行った。また毎回の授業後に、形成的授業評価 (高橋ら, 1994) および主観的溫度感覚 (thermal sensation: TS) を Fig. 45 に示した質問紙により調査した。形成的授業評価は「意欲・関心」(質問番号 1-3), 「成果」(4-6), 「学び方」(7-9), 「協力」(10

形成的授業評価

今日の水泳授業について質問します。

はい いいえ どちらでもない のいずれかに○をつけてください。

1. 楽しかったですか。	はい	いいえ	どちらでもない
2. せいっぱい ぜんりよくをつくして 運動することができましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
3. 今日学習したことは、自分にちょうどあっていましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
4. ふかく心にのこることや かんどうすることがありましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
5. 今までできなかったこと（運動や作戦）が できるようになりましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
6. 「あっ、わかった!」とか「あっ、そうか」と思ったことがありましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
7. じゅぎょうのやくそくを きちんと守ることができましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
8. 自分から進んで 学習することができましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
9. 自分のめあてにむかって 何回も練習できましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
10. 思わずはくしゅしたり「わー!」とかんせいをあげたりすることがありましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
11. 友だちとおたがいに教えたり、助けたりしましたか。	はい	いいえ	どちらでもない
12. 友だちと協力して なかよく学習できましたか。	はい	いいえ	どちらでもない

主観的温度感覚

今日の水泳中の寒さはどうでしたか。あてはまる数字に○をつけてください。

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
寒い	冷たい	やや冷たい	どちらとも 言えない	やや温かい	温かい	暑い

保温水着評価

保温水着を着た人にだけ質問します。あてはまる数字に○をつけてください。

1. 動きやすさはどうでしたか。

1	2	3	4	5	6	7
非常に 動きづらい	かなり	やや	どちらでもない	やや	かなり	非常に 動きやすい

2. 今後、使用したいですか。

1	2	3	4	5	6	7
非常に 使用したくない	かなり	やや	どちらでもない	やや	かなり	非常に 使用したい

Fig. 45 Questionnaires about children's formative class evaluation, thermal sensation and assessment of thermal swimsuit

12) の4つの下位尺度から構成され、児童が1時間の体育授業をどのような観点から捉え、評価したかを分析した。「はい」の回答を3点、「どちらでもない」を2点、「いいえ」を1点として得点化した。各下位尺度について平均得点を求め分析に用いた。実験群についてのみ3回のTSS着用介入後にTSSに対する評価の質問項目に答えさせた (Fig. 45)。ポジティブな回答を7点、ネガティブな回答を1点として得点化した。

Pre および Post において25m クロール泳の泳力測定を行い、25m 完泳できた児童については泳タイムにより、完泳できなかった児童については泳距離により泳技能の評価を行った。上級グループのみ (実験群14名、コントロール群12名) TSS着用介入初日にも泳力測定を行い、Preの非着用時と介入日のTSS着用時で泳タイムの比較を行った。

(5) 統計処理

各回における両群のTSおよび形成的授業評価の平均値の差の検定をMann-WhitneyのU検定を用いて行った。TSと形成的授業評価について、各回において全被験者を対象にSpearmanの相関分析を行った。また、被験者の身体特性とTSについて、1回目の授業日において全被験者を対象にSpearmanの相関分析を行った。退水者と非退水者の身体特性の比較を対応のない t 検定により行った。25m クロール泳については、泳タイムおよび泳距離それぞれについて、二元配置の分散分析 (群×測定時期) を行った。交互作用が認められなかったため、各群のPre-Post間について対応のある t 検定を、各測定時期における両群の比較を対応のない t 検定を用い、平均値の差の検定を行った。また、上級グループの泳タイムのみ各群のPreとTSS着用介入日について対応のある t 検定を、各測定時期における両群の比較を対応のない t 検定を用い、平均値の差の検定を行った。全てのデータを平均値 ± 標準偏差で示し、有意水準を5%とした。

3. 結果

(1) 環境条件

各授業日における環境条件を Table 11 に示した。授業期間中は天候の影響を受けて水温、気温などの環境条件が大きく変化した。2 回目の授業日は水温が 24.5°C と低いが、気温が 28.1°C と比較的高い日であった。3 回目の授業日は水温 24.5°C、気温 24.8°C とともに低く、水温と気温の和が 50°C を下回り、日照も悪い寒冷日であった。一方で、4 回目の授業日は水温 28.0°C、気温 31.4°C とともに高く、日照も良い温暖日であった。

(2) 運動強度

各授業日における RPE および授業時間中の平均の HR を Table 12 に示した。両群の RPE に有意差は見られず、比較的楽であるレベルの 10 から 12 の値を示した。HR は個人差が大きかったが、130 bpm 前後であった。

(3) 退水者数

コントロール群において 2 回目の授業日に 8 名、3 回目の授業日に 5 名の退水者が見られたが、実験群においては 2 回目に 1 名のみであった。その他の授業日においては両群とも退水者は見られなかった。コントロール群における退水者（10 名、2 回目と 3 回目授業日で重複あり）と非退水者（20 名）の身体特性を比較したところ、退水者の MSFT および %fat が 6.9 ± 1.7 mm, $15.9 \pm 1.5\%$ であったのに対し、非退水者で 8.9 ± 3.2 mm, $17.3 \pm 2.4\%$ を示し、有意な差は認められなかったが、退水者がやや低い値を示した ($p=0.08, p<0.1$)。

(4) 主観的溫度感覺

各授業日における TS の推移を Fig. 46 に示した。Pre, Post の授業日においては両群の TS に有意差は見られなかった。2 回目、3 回目の授業日において実験群で有意に高い TS を示したが ($p<0.05$)、4 回目の授業日は両群とも高い TS を示し、有意差は見られなかった。

児童の身体特性と 1 回目授業日における TS の関係を解析したところ、MSFT、%fat および BMI と TS の間に有意な相関関係が見られた ($r = 0.47, p<0.01$; $r = 0.34, p<0.05$; $r = 0.46,$

Table 11 Experimental environment

Class		1st	2nd	3rd	4th	5th
T_w	(°C)	25.6	24.5	24.5	28.0	27.0
T_a	(°C)	26.1	28.1	24.8	31.4	26.7
%RH	(%)	56.5	60.3	70.1	56.5	61.5
wind velocity (m/sec)		1.2	0.7	1.0	1.0	1.2
weather		occasionally fair	occasionally fair	cloudy	fair	occasionally fair

Values are mean.

T_w : water temperature

T_a : air temperature

Table 12 Exercise intensity at each swimming classes

		Class	1st	2nd	3rd	4th	5th
RPE	experimental	mean	10.1	11.6	11.0	9.8	10.1
		SD	2.6	2.3	2.3	2.1	2.8
	control	mean	11.2	12.0	11.5	10.3	10.7
		SD	2.3	1.6	2.7	2.8	2.0
HR	both (n=7)	mean	—	127.9	131.1	134.6	—
		SD	—	13.5	20.0	11.2	—

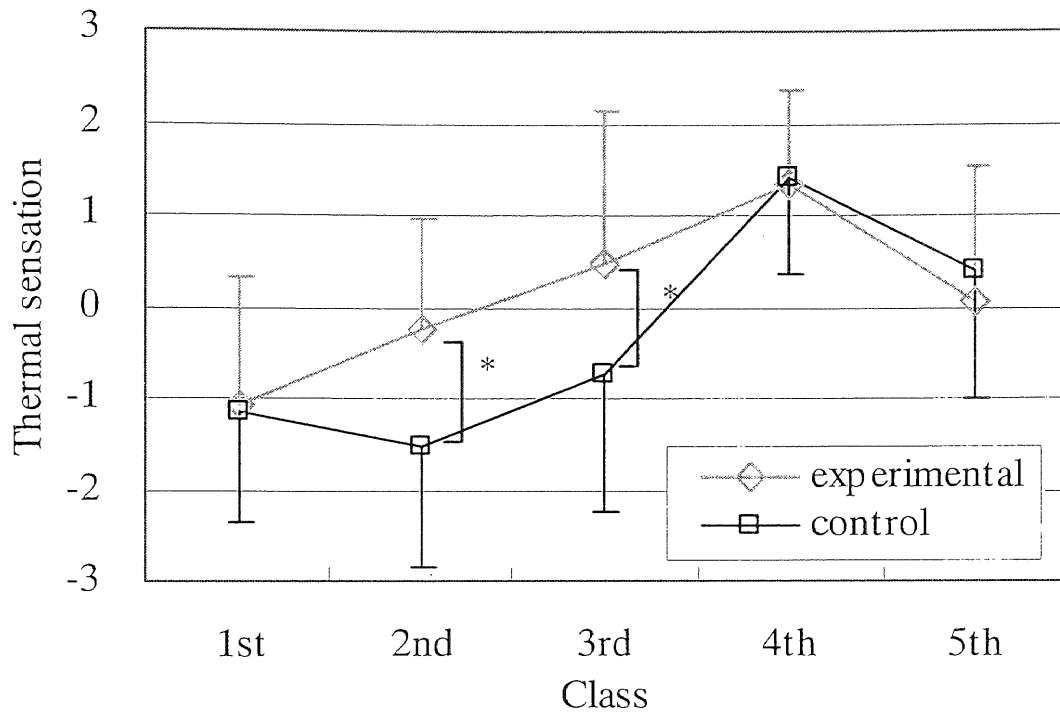


Fig. 46 Children's thermal sensation at each swimming class

Thermal sensation was estimated by the scale, where -3 = "cold", -2 = "cool", -1 = "slightly cool", 0 = "neutral", +1 = "slightly warm", +2 = "warm" and +3 = "hot".

* Significant difference between experimental and control group ($p < 0.05$).

$p < 0.01$). また, SA/Mass と TS の間に有意な負の相関関係が見られた ($r = -0.44, p < 0.01$).

(5) 形成的授業評価

各授業日における形成的授業評価について各項目の平均得点の推移を Fig. 47 に示した. 意欲・関心, 成果, 学び方, 協力の各項目について Pre において両群間に差は見られなかった. 意欲・関心項目について, 3 回目の授業日に実験群でコントロール群よりも有意に高い授業評価を示した ($p < 0.05$). 協力項目について, 有意な差は認められなかったが, 2 回目から 4 回目の授業日において実験群でコントロール群よりもやや高い授業評価を示した ($p = 0.09, 0.09, 0.08$).

両群の全児童について, 各授業日における形成的授業評価の各項目得点と TS との相関係数を Table 13 に示した. 3 回目の授業日における各授業評価得点と TS の間に有意な相関関係が見られた ($p < 0.05$).

(6) 泳力測定

介入前後におけるクロール泳泳力測定の結果を, 25m 完泳できた児童 (実験群 25 名, コントロール群 22 名) は泳タイムにより, 25m 完泳できなかった児童 (実験群 7 名, コントロール群 5 名) については泳距離により評価した (Fig. 48). 泳タイムおよび泳距離について, 両群の変化に交互作用は見られなかった. Pre, Post における両群の泳タイムおよび泳距離間に差は見られなかった. また, 各群における Pre-Post 間にも差は見られなかった.

上級グループのみ TSS 着用介入日にも泳力測定を行ったが, 実験群で TSS 着用時 (Suit) に Pre (非着用時) よりも有意に速い泳タイムを示したのに対し ($p < 0.05$; Pre: 23.1 ± 2.6 sec, Suit: 21.9 ± 1.7 sec), コントロール群では差が見られなかった (Pre: 23.9 ± 1.6 sec, Suit: 23.6 ± 1.8 sec).

(7) 保温水着の評価

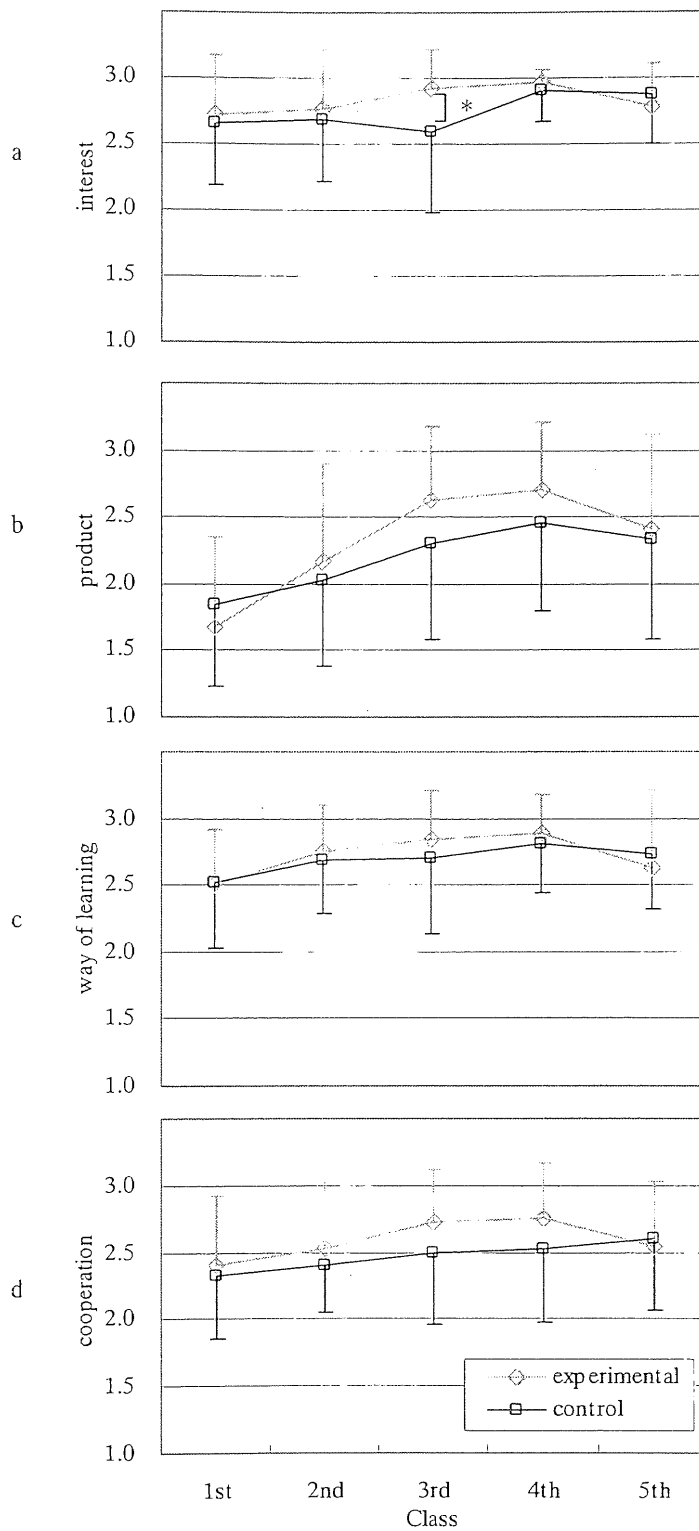


Fig. 47 Children's formative class evaluation at each swimming class

* Significant difference between experimental and control group ($p < 0.05$).

Table 13 Relationships between children's formative class evaluation and their thermal sensation at each swimming class

Class	Thermal sensation				
	1st	2nd	3rd	4th	5th
interest	0.104	0.027	0.505*	-0.024	0.258
product	-0.105	0.203	0.485*	0.032	0.005
way of learning	0.091	0.178	0.399*	0.193	0.065
cooperation	0.030	0.030	0.323*	-0.107	0.040
total	0.013	0.159	0.427*	-0.013	0.053

*Significant correlation between children's formative class evaluation and their thermal sensation ($p < 0.05$).

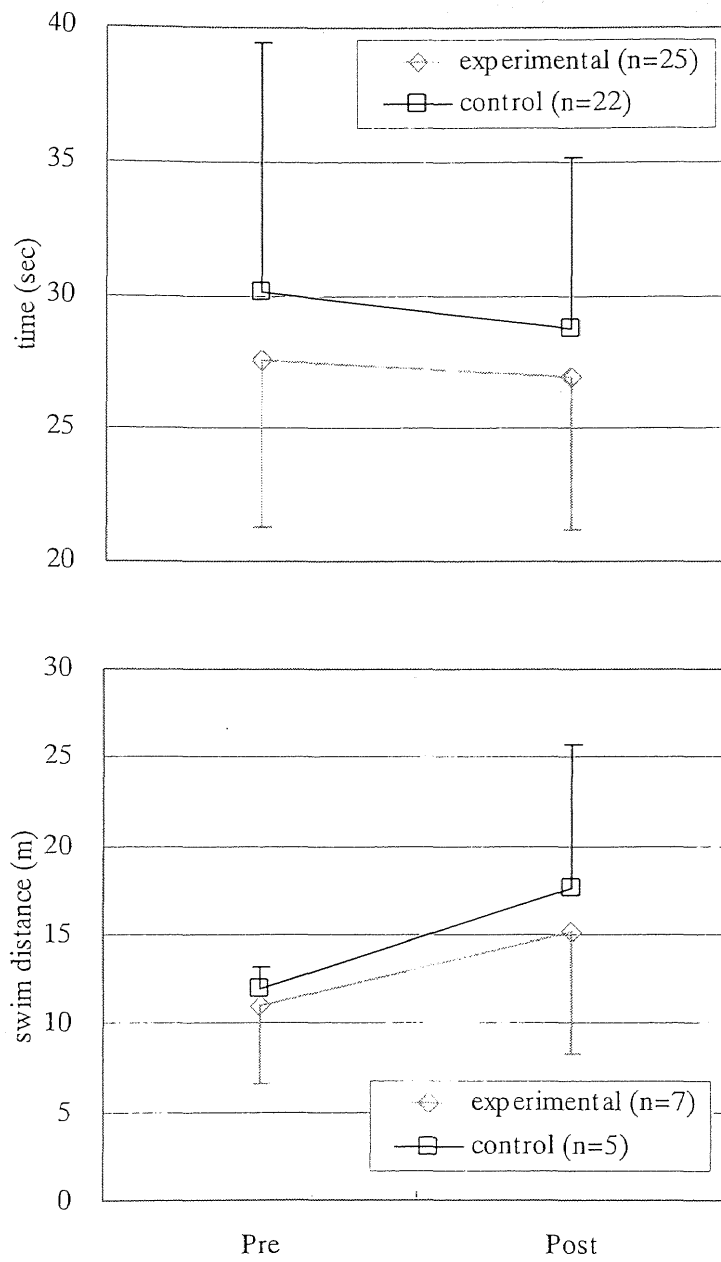


Fig. 48 Time for 25 m crawl stroke and swimming distance measured at pre-test and post-test

Pre: 1st swimming class

Post: 5th swimming class

実験群についてのみ3回のTSS着用介入後にTSSに対する評価をさせたところ、動きやすさの質問に対して7点満点中 4.3 ± 1.5 点、今後使用したいかの問いに対して 5.9 ± 1.2 点を示した。

4. 考察

(1) 保温水着の温熱的効果

本研究では、特に寒冷日であった3回目の授業日に実験群において有意に寒冷感が抑えられ、意欲・関心の授業評価得点がコントロール群よりも有意に高い得点を示した ($p < 0.05$)。また、比較的寒冷日であった2回目の授業日においても有意に寒冷感が抑えられた ($p < 0.05$)。一方で、温暖日であった4回目の授業日においては両群とも高いTSと授業評価得点を示した。以上のことから、児童のTSや授業評価は授業時の環境条件に影響されることが示された。また、寒冷日にはTSS着用により寒冷感を抑える効果が見られ、温暖日にはコントロール群と同様の寒冷感であったことから、寒冷日において特にTSS着用の有効性が高く、温暖日には必要性が低いことが示された。

本研究では体温変化の測定を行っていないが、実験3において、小学校高学年児童を対象に、水温 23°C 環境下で30分間の脚ペダリング運動を行わせた際にTSS着用が深部温低下および寒冷感に及ぼす影響を検討しており、TSS着用により深部温の低下と寒冷感が軽減される結果が示された。同様に本研究の児童についてもTSS着用により寒冷感が軽減されたのは深部温低下が抑えられたためであると考えられた。また、寒冷感に伴う退水者を減らし、高い学習意欲を示した結果から、TSS着用により児童の積極的な授業参加を促せることが示された。

(2) 保温水着の教育的効果

寒冷日であった3回目授業日においてTSと意欲・関心、成果、学び方、協力の各授業評価得点の間に正の相関関係が見られたことから、TSS着用による寒冷感軽減が児童

の授業評価向上につながることを示唆された。

また、協力項目の授業評価得点においても実験群で高い得点を示す傾向 ($p < 0.1$) が見られたが、寒冷感の軽減に伴う学習意欲の向上や退水者の減少により、水泳授業時に他の児童と一緒に水泳学習できたからと考えられた。

本研究における3回目授業日の環境条件は水温と気温の和が 49.3°C と累積温度方式(柴田, 1981)による水泳授業水温基準となる 50°C を下回る条件であった。しかしながら、このような環境条件下においても、TSSの着用により高いTSを維持し、意欲・関心、協力の授業評価得点においても高値を示しており、児童の積極的な授業参加が促された結果から、寒冷時の水泳授業実施を可能にし、授業数を確保するための方策としてのTSSの有用性が示された。また、児童のTSSに対する評価についても、今後使用したいという回答が7点満点中5.9点と高得点を示し、好意的な印象が得られ、動きやすさについては「どちらでもない」に近い回答であり、着用による動作への影響が小さかったと考えられた。

本研究の水泳授業においてRPEが比較的楽であるレベルの10から12を示し、HRは130 bpm前後を示した。これは上田ら(1992)の報告した中級(RPE = 10.4, HR = 121.3 bpm)、上級(RPE = 12.4, HR = 120.5 bpm)グループの水泳授業の強度にほぼ一致した。HRについては本研究で測定した人数が7名と少なく、今後さらに検討する必要がある。

(3) 身体特性に応じた保温水着着用の有効性

本研究の1回目授業日において、被験者の身体特性(MSFT, %fat, BMI, SA/Mass)とTSの間に有意な相関関係が認められた($r = 0.47, r = 0.34, r = 0.46, r = -0.44$)。強い相関関係とはいえないが、学童期の体温調節機能が未熟な段階で、個人差も大きい時期であることを考慮すると、SA/Massの大きい児童やMSFT, %fat, BMIの低い児童ほど寒冷感が高いと考えられた。Sloan and Keatinge (1973)は8歳から19歳の男女を対象に水泳時の舌下温低下率($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)がMSFTやSA/Massと相関関係を示すことを報告しており、Nomura (1983)は10-12歳の男女を対象に水温18, 22, 26°C 環境で漸増負

荷運動を行わせ、皮下脂肪厚の厚い被験者ほど直腸温の低下が小さいことを報告している。また、Toner et al. (1986) は 20°C と 26°C の水温環境で運動を行った際の直腸温の変化と TS に相関関係を報告している。さらに、実験 2 の水温 23°C 環境下における成人被験者を対象とした保温水着着用時の生理応答から、MSFT および %fat の低い被験者ほど身体組織の熱遮断能が低く、深部温が大きく低下する結果が示されており、痩せた被験者ほど TSS 着用の有効性が高いことが示唆された。また、実験 3 の小学校高学年児童を対象とした保温水着着用時の生理応答からも、%fat の低い児童ほど身体組織の熱遮断能が低く、深部温が大きく低下する結果が示されており、%fat の低い児童の TSS 着用の有効性が示唆された。本研究では体温の変化を測定していないが、先行研究や実験 2 の成人を対象としたデータおよび実験 3 の小学校高学年児童を対象としたデータに示されるように、体脂肪率の低い児童ほど体温を低下させ、その結果強い寒冷感を引き起こしたと考えられる。また、退水者の MSFT、%fat が非退水者より低い傾向 ($p=0.08$, $p<0.1$) を示したことから、体脂肪率の低い児童に対して TSS を着用させ、寒冷感を抑えることにより、他の児童と同様に水泳学習を行うことが可能となると考えられる。水泳授業における児童の身体特性の違いによる授業評価および授業参加、ひいては泳技能修得の個人差は無視できない問題と考えられ、個人差を補う水泳学習補助教具としての TSS の有効性が示された。

(4) 泳技能への影響

上級グループについて TSS 着用時と非着用時の 25m クロール泳タイムを比較した結果から、TSS 着用により一過性に泳スピードが向上することが示された。同様の効果がウエットスーツ着用時にも見られており (Chatard et al., 1995; Cordain and Kopriva, 1991), TSS の持つ 0.42 kg の余剰浮力により身体位置が上昇した結果、抵抗を減らすことで一過性に泳スピードが増加したと考えられた。スイミングヘルパーやビート板等の浮力体を使用した初心者指導法も考案されており (日本スイミングコーチ学校編, 1982), TSS の余剰浮力を利用することで、泳技能学習を補助する教具としての有効性も考えられる。

一方で、余剰浮力のない状態で泳技能を獲得することも重要であり、温暖日には TSS を着用せずに水泳学習を行うことが勧められる。小学校学習指導要領解説（文部省，1999）では、水泳授業において泳ぐ楽しさを味わうためには、水遊びなどによる水慣れや、水に浮く・泳ぐなどの経験を十分にすることが大切であると示している。そこで、単元計画の中で、寒冷日が多いと予想される導入期に TSS を着用して水慣れや基本技術の学習を行い、単元後半の温暖日には着用せずに泳ぐ経験を十分にさせるといった活用法も考えられる。

TSS 着用介入前後の泳技能については両群とも Pre から Post にかけて向上が見られず、群間の差も見られなかった。賀川（2006）は体育学習支援研究の現状として、小中学生を対象とした実践では、学習意欲の喚起や練習方法の理解に効果があるものの、技能向上にも寄与したとする研究報告が少ないことを示している。本研究においても同様に対象が小学校児童であったことや、授業回数が少なかったこともあり、泳技能に明確な違いは見出せなかったと考えられた。しかしながら、TSS 着用により学習意欲・関心を高めることができたことや寒冷感に伴う退水者を減らすことができたことから、長期的には泳技能の向上につながる可能性が示唆された。

(5) コスト面から見た導入への方策

本研究で使用した保温水着は一着 9,000 円前後で購入でき、仮に小学校で各サイズ（120 cm から 150 cm の 4 サイズ）40 着ずつ揃えたとして、1,440,000 円必要になり、各学年に 80 名ずつ 6 学年で 480 名の児童で使用した場合、一人当たりの支出が 3,000 円程度となる。ここで、現在市販されている屋外プール用のビニール屋根設置にかかる費用は、一般的な 25 m プールで約 5~6 千万円である（スライダーハウス、日本コムテック）。これらのビニール屋根設置に比べると保温水着のコストが現実的な範囲であることが分かる。とはいえ、児童全員に保温水着を用意することは経済的負担が大きいと考えられるため、まずは保温の必要性の高い体脂肪率の低い児童に着用させる保温水着を小学校で確保することにより、対策をとることが可能と考えられる。

5. 要約

本研究では小学校高学年児童を対象とした実際の水泳授業において、保温水着着用群とコントロール群の比較を行い、保温水着着用が児童の主観的温度感覚に及ぼす温熱的效果および形成的授業評価に及ぼす教育的効果について明らかにすることを目的とした。さらに、屋外プール環境条件による保温水着着用の効果の違いや、個人の身体特性に応じた保温水着の活用法について示唆を与えることを目的とした。

本研究の結果から、小学校水泳授業における保温水着着用による以下の有効性が明らかになった。

- (1) 寒冷日において保温水着着用により寒冷感が抑えられ、意欲・関心の授業評価が高い得点を示した。
- (2) 寒冷感に伴う退水者を減らすことができた結果などから、寒冷時の水泳授業実施を可能にし、児童の水泳学習に対する保温水着着用の有用性が示された。
- (3) 保温水着は体脂肪率の低い児童に対して身体特性の個人差を補う補助教具としての役割を果たし、児童の水泳学習支援に有効であると考えられた。

VIII. 総合討論

1. 研究の背景および目的

水の熱伝導率は空気の約 25 倍であり、低水温環境では陸上での同一温度環境に比べて皮膚表面から水への熱放散が大きい。特に子供は成人よりも体表面積/体重比が大きいため、低水温環境下で熱放散が促進されやすく (Sloan and Keatinge, 1973)、体幹部での皮下脂肪厚が成人に比べて薄いため (Martin and Ward, 1996)、脂肪組織による熱遮断能も低く、深部温を低下させやすい。このような水の特性と子供の身体特性の影響から、低水温環境下における小学校水泳授業では、児童の深部温が低下しやすく、水泳授業実施上の問題点のひとつとして考えられている。また、低水温に対する寒冷感は心理的な緊張を引き起こし、水泳嫌いの原因のひとつと考えられている (文部科学省, 2004)。水泳授業を効率的に実施するには、深部温の低下を防止する対策をとり、授業時間数を確保することが必要と思われる。そこで、環境条件や身体特性に応じて利用可能な保温対策として、小学校水泳授業における保温水着の着用が提案された。

本研究では、小学校水泳授業への保温水着導入の可能性を検討するため、低水温環境下における保温水着着用が深部温変化等の生理的応答に与える影響を明らかにし、また、実際の小学校水泳授業における調査から、保温水着着用の有用性について検討することを目的とした。

2. 研究課題

上記の目的を達成するために、以下の研究課題を設定した。

【研究課題 1】

保温水着の特徴の検証を、成人被験者を対象とした水浸安静実験によりウエットスーツの先行研究との比較から明らかにする。(実験 1)

【研究課題 2】

1) 成人における保温水着の効果の検証 (実験 2)

小学校水泳授業を想定した環境条件および運動強度において、成人を被験者として、保温水着着用時の生理的応答から、保温水着着用の効果を検証する。

2) 児童における保温水着の効果の検証（実験3）

小学校水泳授業を想定した環境条件および運動強度において、児童を被験者として、保温水着着用時の生理的応答から、保温水着着用の効果を検証する。

【研究課題3】

小学校水泳授業における保温水着着用による、主観的温度感覚などへの温熱的效果や、形式的授業評価、泳技能習得などへの教育的効果を水泳授業現場における研究から検証する（実験4）

3. 研究結果

(1) 水浸安静実験による保温水着の特徴および効果の検証（課題1）

課題1では成人男性を対象に、水温26、29℃で60分間の水浸安静実験を行い、保温水着着用時の体温変化、産熱応答および熱遮断能の変化から、保温水着着用の効果および特徴の検証を行うことを目的とした。

課題1の結果から、水浸安静時における保温水着着用により、保温水着の熱遮断能が付加された結果、総熱遮断能が増加し、身体表面からの放熱量が普通水着条件よりも低値を示した。また、保温水着条件で普通水着条件に比べて高い皮膚温および深部温を示し、震えなどの代謝性熱産生が低値を示した。さらに、保温水着着用時に普通水着条件よりもわずかに高い身体組織の熱遮断能を示した。この結果は先行研究に示されるウエットスーツ着用時の身体組織の熱遮断能の低下とは異なる応答であり、保温水着の四肢遠位部を露出した形状に起因する特異的な応答と考えられた。

(2) 成人における保温水着の効果の検証（課題2-1）

課題2-1では、成人男性を対象に、水泳授業時の下限水温とされる水温23℃環境下において、低強度から中強度の水中運動を行い、保温水着着用時の体温変化および熱遮

断能の変化から、保温水着の保温効果および特徴を明らかにすることを目的とした。

課題 2-1 の結果から、水中運動時には運動強度の増加に伴い、身体組織の熱遮断能が低下するが、保温水着の熱遮断能を付加することで、総熱遮断能を増加させ、身体表面からの放熱量が低下することが示された。また、保温水着条件で普通水着条件に比べて高い皮膚温および深部温を示し、低強度運動時には震えなどの代謝性熱産生が低値を示した。保温水着条件と普通水着条件で、身体組織の熱遮断能に差が見られず、また、心拍出量、平均血圧、総末梢血管抵抗などの循環系応答に差が見られなかった。さらに、普通水着条件において被験者の平均皮脂厚と身体組織の熱遮断能に正の相関関係が見られた。この結果を受けて、保温水着条件において平均皮下脂肪厚および体脂肪率の低い被験者ほど、総熱遮断能に占める水着の熱遮断能の割合が高かったことから、保温水着の総熱遮断能に対する貢献度が高いことが示された。すなわち、体脂肪の少ない被験者ほど保温水着着用の有効性が高いと考えられた。

(3) 児童における保温水着の効果の検証（課題 2-2）

課題 2-2 では、小学校高学年児童を対象に、水泳授業時の下限水温とされる水温 23°C 環境下において、小学校水泳授業を想定した運動強度で 30 分間の脚ペダリング運動を行い、保温水着着用時の体温変化および熱遮断能の変化から、保温水着の保温効果および特徴を明らかにすることを目的とした。

課題 2-2 の結果から、小学校高学年児童が水温 23°C 環境下において、脚ペダリング運動を行ったとき、保温水着条件で普通水着条件に比べて高い皮膚温および深部温を示した。また、保温水着条件と普通水着条件で、身体組織の熱遮断能に差が見られなかった。普通水着条件において被験者の体脂肪率と身体組織の熱遮断能に正の相関関係が見られ、体脂肪の少ない児童ほど保温水着着用の有効性が高いと考えられた。

(4) 小学校水泳授業現場における保温水着の温熱的效果および教育的効果の検討（課題 3）

課題 3 では小学校高学年児童を対象とした実際の水泳授業において、保温水着着用群とコントロール群の比較を行い、保温水着着用が児童の主観的温度感覚に及ぼす温熱的効果および形成的授業評価に及ぼす教育的効果について明らかにすることを目的とした。さらに、屋外プール環境条件による保温水着着用の効果の違いや、個人の身体特性に応じた保温水着の活用法について示唆を与えることを目的とした。

課題 3 の結果から、特に寒冷日において保温水着着用により寒冷感が抑えられ、意欲・関心の授業評価が高い得点を示した。また、保温水着着用により寒冷感に伴う退水者を減らすことができた結果などから、寒冷時の水泳授業実施を可能にし、児童の水泳学習に対する保温水着着用の有用性が示された。さらに、保温水着は体脂肪率の低い児童に対して身体特性の個人差を補う補助教具としての役割を果たし、児童の水泳学習支援に有効であると考えられた。

4. 討論

以下に、本研究の結果を中心に保温水着の特徴および温熱的効果や教育的効果を示し、小学校水泳授業への保温水着の導入に向けた示唆をまとめた。

(1) 保温水着の特徴

水中における保温効果について、ウエットスーツ着用時の生理的応答が多くの研究で検討されている (Wolff et al., 1985; Cotter and Taylor, 1995; Yeon et al., 1987; Arieli et al., 1997; Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986)。本研究で用いた保温水着はウエットスーツと同様のネオプレン素材を用いているが、生地が厚みがウエットスーツの 5-6 mm に対し、保温水着が 2 mm であることと、ウエットスーツが頭部、手部、足部のみを露出した形状であるのに対し、保温水着はさらに前腕部と下腿部を露出している点で異なる。先行研究の結果から、ウエットスーツ着用時には身体組織の熱遮断能 (I_{tissue}) が低下することが示されているが、これは、ウエットスーツ着用による寒冷血管収縮の減弱を反映したものと考察されている (Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986)。一方で、本研究で使用した保温水着着用時には、普通水着着用時に比べて I_{tissue} の低下は見られなかった。こ

の結果は、成人および児童被験者、水浸安静時および水中運動時において一貫して示された（実験 1, 2, 3; Fig. 16, 27, 41）。Choi et al. (1988) と Park et al. (1992) は、低水温環境で水浸安静時および水中運動時に、ウエットスーツに加えてグローブおよびブーツを着用した時に I_{tissue} が低下することを報告している。彼らは手部や足部を低水温環境に対して露出することにより四肢の血管が収縮し、逆に、グローブやブーツ着用により四肢遠位部の冷点からの温度情報入力が減弱した結果、寒冷血管収縮が抑えられたのではないかと推察している。本研究では保温水着条件と普通水着条件で同程度の I_{tissue} を示したが、保温水着着用時にはウエットスーツよりも広く四肢遠位部を露出しており、ウエットスーツの条件と異なり、冷点からの温度情報入力が血管収縮を起こすのに十分であったからと考えられた。（実験 1, 2, 3）

児童の皮下脂肪厚の分布（Martin and Ward, 1996; Marina et al., 2004; Tanner and Whitehouse, 1975）から考えても、成人に比べて皮下脂肪厚の薄い体幹部を覆うことは重要と考えられた。また、四肢部に比べて体幹部でより早期により強い震えが発現すると言われており（Tikusis et al., 1991; Bell et al., 1992）、四肢部よりも体幹部における皮膚温が高い状態にある時、震えを抑えることによって I_{tissue} の低下を抑え、より効率的に体温低下を防止できるという報告もある（Choi et al., 2003）。本研究においても水浸安静時および低強度水中運動時において、保温水着着用時に普通水着着用時に比べて震えが軽減される傾向が示された（実験 1, 2; Fig. 12, Table 6）。

保温水着着用時には四肢遠位部からの温度入力により、普通水着着用時と同程度に血管収縮が起こると考えられるため、 I_{tissue} を低下させずに、水着の熱遮断能を付加し、総熱遮断能 (I_{total}) を増加させる点が保温水着の四肢遠位部を露出した形状に起因する特徴と考えられた。

(2) 低水温環境下での保温水着着用による温熱的効果

本研究の実験 1, 2, 3 の結果から、保温水着着用により深部温が維持されることが示された。成人を対象とした水浸安静時における水温 26°C と 29°C 環境との比較から、低

水温環境である 26°C 環境の方が水浸後早期に保温水着による深部温維持効果が見られることが示唆された (実験 1; Fig 5). また, 成人を対象として水温 23°C 環境において行った水中運動時の検討から, 低強度運動時には保温水着着用により普通水着着用時に比べて有意に高い深部温を維持したが, 中強度運動時には両水着条件において深部温が上昇し, 水着間の差は見られず, 低強度運動時ほど保温水着着用の有効性が高いことが示唆された (実験 2; Fig 22). 児童を対象として水温 23°C 環境において行った水中運動時の検討では, 普通水着着用時にはわずかに深部温が低下したのに対し, 保温水着着用時にはわずかに上昇した (実験 3; Fig. 36). 特に児童においては普通水着着用時に深部温変化の個人差が大きかった.

ウエットスーツに関する先行研究においても, 環境条件や実験設定が異なるものの, 本研究の保温水着着用時と同様に深部温が維持される温熱的效果が示されているが (Wolff et al., 1985; Cotter and Taylor, 1995; Yeon et al., 1987; Arieli et al., 1997; Kang et al., 1983; Shiraki et al., 1986), 被験者の身体特性差に応じた着用の有効性に言及したものは見られない. 本研究では, 被験者の身体特性差に応じた保温水着着用の有効性を明らかにするため, 体脂肪率 (%fat) および皮下脂肪厚 (MSFT) などの身体特性と深部温変化および熱遮断能との関係を検討した. その結果, 成人および児童被験者のいずれにおいても深部温の変化に身体特性による個人差が見られたため, (実験 2, 3), 以下に個人の身体特性差に応じた保温水着着用の有効性について検討した.

多くの先行研究にも示されているが, %fat が低い者や MSFT の薄い者, 体表面積/体重比 (SA/Mass) の大きい者ほど, 深部温を低下させやすい (Pugh and Edholm, 1955; Nadel et al., 1974; Sloan and Keatinge, 1973; Holmer and Bergh, 1974; Hayward and Keatinge, 1981). また, 水浸安静時および水中運動時の MSFT と I_{issue} との関係についても先行研究において検討されており, 被験者の MSFT と I_{issue} が正の相関関係にあることが示されている (Park et al., 1984; Veicsteinas et al., 1982). 本研究でも同様に, 普通水着条件において, %fat および MSFT の小さい被験者ほど深部温の低下が大きいことが確認された (実験 2, 3; Fig. 24, 25, 38). また, 各被験者の MSFT および %fat と I_{issue} の相関関係から,

皮下脂肪厚の薄い被験者ほど身体組織による熱遮断能が低いことが確認された(実験2, 3; Fig. 28, 29, 42). このような体脂肪の少ない被験者に対して, 保温水着着用により低い I_{tissue} を補うことは深部温低下を抑えるのに有効であることが示唆された.

さらに, 本研究では保温水着の I_{total} に対する貢献度を表す指標 ($I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$) を用いて身体特性差に応じた保温水着着用の有効性を検討した. 実験2の中強度運動時の保温水着着用時においてMSFTおよび%fatの低い被験者ほど高い $I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$ を示した結果から, 皮下脂肪厚が薄く, 体脂肪率の低い被験者ほど, 保温水着の I_{total} に対する貢献度が高いことが示された. すなわち, 被験者の身体特性と $I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$ の関係から, 体脂肪の少ない被験者ほど保温水着着用の有効性が高いと考えられた(実験2; Fig. 30, 31). また, 実験3において普通水着条件では%fatと直腸温の変化に相関関係がみられ, %fatの低い児童ほど直腸温を大きく低下させたのに対し, 保温水着着用時には全被験者で直腸温の変化がわずかであり, %fatと直腸温の変化に関係が見られなかった. この結果から, %fatの低い児童でも保温水着着用により熱遮断能を補うことで, %fatの高い児童と同程度に深部温を維持できることが示された. 上述の通り, ウェットスーツの先行研究においては, 被験者の身体特性差に応じた着用の有効性に言及したものは見られず, 本研究で得られた知見は身体特性差に応じた保温水着着用の基準を示す上で有益な示唆を与えられると考えられた.

(3) 成人被験者と児童被験者の保温水着着用による温熱的效果の比較

寒冷気中環境における成人と子供の体温調節応答を比較した先行研究では, 子供は成人よりも代謝性熱産生を亢進させて, 深部温を維持するという報告や (Smolander et al., 1992), 子供は四肢部での末梢血管収縮を強く起こし皮膚温を低下させることで放熱を抑えるという報告が見られる (Wagner et al., 1974; Inoue et al., 1996). 寒冷水中環境において成人と子供の比較を行った研究はきわめて少なく, Sloan and Keatinge (1973) が8-19歳の男女を対象に水温 20.3°C 環境で水泳を行わせ, 低年齢の被験者ほど体表面積/体重比が大きく, 舌下温低下率が高いことを示した報告のみである.

本研究では実験2と実験3において成人被験者と小学校高学年児童を対象に同一環境において同様のプロトコールで水中脚ペダリング運動を行わせ、保温水着着用による温熱的効果の検討を行った。成人被験者では低強度および中強度で運動を行ったが、中強度運動条件で児童の運動強度に近い運動強度を示した（実験2, 3; Table 5, 9）。年齢より推定した最大心拍数（ $HR_{max} = 220 - \text{年齢}$ ）に対する相対運動強度は、成人被験者のNSS条件で $52.3 \pm 1.8\%HR_{max}$ 、TSS条件で $52.6 \pm 1.7\%HR_{max}$ 、児童被験者のNSS条件で $66.1 \pm 2.5\%HR_{max}$ 、TSS条件で $64.8 \pm 2.3\%HR_{max}$ であった。児童でわずかに高い運動強度を示したが、運動強度の差を考慮しながら、成人と児童における保温水着着用の温熱的効果の比較を行った。

深部温の変化について、成人被験者では食道温を測定し、児童被験者では直腸温を測定したため、絶対値による比較は行わず、水着条件による変化の違いを比較した。成人被験者ではNSS条件、TSS条件とも深部温が上昇し、水着条件間の差が見られなかったことから（実験2; Fig. 22）、中強度運動時の保温水着着用の必要性は低いと考えられた。一方で、児童被験者では成人に比べて高い運動強度（ $\%HR_{max}$ ）であったにも関わらず、NSS条件では深部温がわずかに低下し、TSS条件ではわずかに上昇し、運動開始10分から15分にNSS条件よりも有意に高い深部温を示した（実験3; Fig. 36）。児童では成人に比べて高い運動強度においてもNSS条件では深部温が低下し、保温水着着用による深部温維持効果が認められたことから、成人に比べて児童の保温水着着用の有効性が高いことが示唆された。

代謝応答について、寒冷気中環境における成人と子供の体温調節系応答を比較した先行研究では、子供は成人よりも代謝性熱産生を亢進させて深部温を維持することが報告されている（Smolander et al., 1992; Wagner et al., 1974）。これは、子供の高い体表面積/体重比に起因する体温調節応答と推察される。本研究において、成人被験者では酸素摂取量、分時換気量などの応答に水着条件間の差は見られなかったことから、寒冷刺激に対する産熱応答は両水着条件で同等であったと考えられた（実験2; Table 6）。これに対し、児童被験者では分時換気量がNSS条件で有意に高い値を示し（ $p < 0.01$ ）、酸素摂取

量は有意ではないもののわずかに NSS 条件で高い値を示した（実験 3; Table 9）。成人被験者では両水着条件で運動の継続に伴い深部温が上昇したため、寒冷刺激に対する産熱の亢進は起こらなかったと考えられ、児童被験者では NSS 条件で深部温がわずかに低下したため、産熱の亢進が起こり、TSS 条件では深部温がわずかに上昇したため、産熱の亢進が抑えられたと考えられた。これらの結果から、児童被験者では保温水着着用による寒冷刺激を抑える温熱的效果が高いと考えられた。成人に比べて児童は高い体表面積/体重比の身体特性を持つため、体表面からの寒冷刺激が産熱応答に強く影響を与えると考えられ、児童の体表面を保温水着で被覆することによる寒冷刺激軽減の効果は高いと推察された。

放熱量については、NSS 条件に対する TSS 条件の相対値を用いて比較した（実験 2, 3; Fig. 26, 40）。成人被験者では TSS 着用時の放熱量が NSS 条件の 80.1%を示し、児童では 81.1%を示した。この結果から、成人と児童において保温水着着用による体表面からの放熱量を抑える効果は同程度と考えられた。また、成人および児童の TSS 条件における総熱遮断能に占める水着の熱遮断能の割合 ($I_{\text{suit}} / I_{\text{total}}$) は、それぞれ 30.6%, 31.8%であった（実験 2, 3; Fig. 27, 41）。成人と児童で使用した保温水着がセパレートタイプとワンピースタイプで異なるが、保温水着着用による熱遮断能への影響は同程度であったと考えられた。

(4) 小学校水泳授業現場における保温水着着用の温熱的效果および教育的効果

小学校水泳授業現場において保温水着着用の効果を検討したところ、寒冷日には保温水着を着用した群において寒冷感が抑えられ、意欲・関心の授業評価得点がコントロール群よりも高い得点を示した。一方で、温暖日には両群とも高い温度感覚と授業評価得点を示した。この結果から、寒冷日において特に保温水着着用の有効性が高く、温暖日には必要性が低いことが示された（実験 4, Fig. 46, 47）。実験 3 において、水温 23°C 環境下での水中運動時に、保温水着着用により児童の深部温低下が抑えられ、寒冷感が軽減される結果が示されており（Fig. 36, 43, 44）、実験 4 においても同様に保温水着着用

群の深部温低下が抑えられたため、寒冷感が軽減されたと考えられた。

寒冷日の環境条件は水温 24.5°C, 気温 24.8°C で累積温度方式(柴田, 1981; 日本水泳連盟, 1994)による目安の 50°C を下回る環境条件であったが, 保温水着着用により高い温度感覚と学習意欲を維持できたことから, 寒冷日における水泳授業実施を可能にし, 授業数を確保できる可能性が示唆された。

実験 4 の 1 回目授業日において, 被験者の身体特性 (MSFT, %fat, BMI, SA/Mass) と主観的溫度感覚の間に有意な相関関係が認められ ($r = 0.47, r = 0.34, r = 0.46, r = -0.44$), SA/Mass の大きい児童や MSFT, %fat, BMI の低い児童ほど寒冷感が高い結果が示された。なかでも, 寒さにより途中退水した児童の MSFT および %fat は, 授業を継続できた児童に比べて低い傾向を示し, 身体特性の個人差が低水温環境下での水泳授業参加への弊害となりうることを示された。先行研究において 8 歳から 19 歳の男女を対象に水泳時の舌下温低下率 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) が MSFT や SA/Mass と相関関係を示すことが報告されており (Sloan and Keatinge 1973), 本研究においても実験 2, 3 において体脂肪の少ない被験者ほど I_{issue} が低く, 深部温を低下させやすいことを示した (実験 2, 3; Fig. 24, 25, 28, 29, 38, 42)。本研究では水泳授業現場において深部温を測定していないが, 体脂肪の少ない児童ほど深部温を低下させた結果, 強い寒冷感を示したと考えられた。このような児童に対して保温水着を着用させることにより, 身体特性差による個人差を補うことができると考えられ, 水泳学習における補助教具としての保温水着の有効性が示された。

(5) 小学校水泳授業現場への保温水着導入の方策

上述の保温水着着用による温熱的効果および教育的効果をもとに, 小学校水泳授業現場への保温水着の導入の方策について検討した。

研究の背景や先行研究にも示したが, 水泳授業時の至適環境条件として, 下限水温を 23°C とすること (文部科学省, 2004) や気温と水温の和が 50°C 以上とする累積温度方式 (日本水泳連盟, 1994; 柴田, 1981) などが経験則に基づいて目安とされている。本研究ではこれらの目安に基づいて実験 2, 3 における水温条件を 23°C に設定した。実験

3の小学校高学年児童を対象とした検討において、普通水着条件でも全被験者の平均値で見れば、直腸温の低下はわずかであり（実験3, Fig. 36）、下限水温を23°Cとする経験則の妥当性が確認された。しかしながら、普通水着条件において身体特性による深部温変化の個人差が大きく、体脂肪の少ない児童に対する保温対策の必要性が示された（実験3, Fig. 38）。このような児童において保温水着条件では深部温の低下が見られなかった結果から、身体特性差に応じた保温対策として、保温水着着用の有効性が示された。実験4の水泳授業現場における検討から、2回目授業日には水温24.5°C、気温28.1°Cで累積温度52.6°Cを示したが、普通水着を着用したコントロール群において8名（出席者の32.0%）の退水者が見られ、3回目授業日には水温24.5°C、気温24.8°Cで累積温度49.3°Cを示し、コントロール群において5名（出席者の19.2%）の退水者が見られた。退水者の身体特性は非退水者に比べて有意ではないものの体脂肪の少ない傾向が示された。この結果から、累積温度方式による50°Cという目安についても身体特性に応じた保温対策の必要性があらためて示された。本研究において、水温と気温の累積温度が50°C前後であったいずれの授業日においても、保温水着着用により寒冷感が抑えられ、学習意欲が高まり、退水者が減少しており、児童の授業参加を促せることが示唆された。従来の下限水温や累積温度方式の目安に併せて、体脂肪の少ない児童に対して保温水着を着用させることで、全児童を対象に寒冷日における水泳授業実施を可能にし、授業数を確保できる可能性が示唆された。以下に本研究の結果から、累積温度50°C前後の環境における身体特性を考慮した保温水着着用の目安を検討した。

本研究の実験4の2回目授業日および3回目授業日における寒さに伴う途中退水者（10名）の身体特性は、MSFTが 6.9 ± 1.7 mm、%fatが $15.0 \pm 2.6\%$ であった。また、退水時の主観的温度感覚は -2.1 ± 1.3 （-2: 冷たい）であった。これらの結果をもとに累積温度50°C前後の環境において、退水者を減らす観点から保温水着着用の目安を検討すると、MSFTが7 mm程度以下、%fatが15%程度以下の身体特性が着用の目安と考えられ、主観的温度感覚において「冷たい」の回答が目安と考えられた。しかしながら、身体特性および温度感覚には個人差が大きく、環境条件や運動強度などの影響を複合的に

受けると考えられるため、身体特性に応じた保温水着着用の基準については今後さらに検討する必要がある。

小学校水泳授業現場において児童の身体特性差に応じて保温水着の着用を行わせる際には、身体特性をより簡便に評価できることが重要と考えられる。本研究では皮下脂肪厚や体脂肪率の測定により身体特性を評価したが、実験4で検討した児童の寒冷感と身体特性の関係において、BMIがMSFTと同程度の相関係数を示し（MSFT: $r = 0.47$, BMI: $r = 0.46$ ）、寒冷感を予測する際の身体特性として十分に使用可能と考えられた。BMIは身長と体重の測定から簡便に算出可能であり、水泳授業現場で用いる身体特性の指標として妥当であると考えられた。ここで、実験4における退水者のBMIは平均で 15.9 ± 1.5 を示しており、上述のMSFT、%fatに代わる保温水着着用の目安として、BMIが16程度以下の身体特性であることが考えられた。

授業内容や環境条件を考慮した単元計画の中での保温水着着用の導入方法について検討すると、寒冷日が多いと予想される単元導入期に保温水着を着用して水慣れや基本技術の学習を行い、単元後半の温暖日には着用せずに泳ぐ経験を十分にさせるといった活用法も考えられる。また、導入期の基本技術の学習では運動強度が低く、運動に伴う産熱による深部温維持効果が小さいと考えられ、保温水着着用の必要性が高いと考えられる。上級者に比べて初級者ほど水泳授業時の運動強度が低いという報告もあり（上田ら、1992）、初級者に対して保温水着を着用させる必要性が高いと考えられた。

日本国内の地域における気候条件を考慮して保温水着の導入を検討すると、長谷川ら（1984）の報告では、北海道における7月の水温は平均で 18.1°C で、気温は 19.5°C であり、累積温度方式に基づく水泳可能日数が0%であったと報告されている。その他の地域の7月における水泳可能日数は、新潟で45.2%、茨城で36.8%、愛知で87.1%、大阪および山口で100%、鹿児島で96.4%と示されている。また、6月の水泳可能日数は、新潟で50.0%、茨城で11.1%、愛知で43.8%、大阪で81.3%、山口で100%、鹿児島で42.9%と示されている。これらの地域差を考慮すると、北海道では6、7月とも保温水着の着用の必要性が非常に高いと考えられ、本州北部でも6、7月には環境条件を考慮しながら

ら、保温水着を着用する必要性が考えられた。また、本州南部や九州においても6月に着用の必要性があると考えられた。

(6) 今後の課題

本研究の結果から、保温水着着用による深部温維持効果が示され、実験1より低水温ほど水浸後早期から効果が見られ、実験2より低強度運動時ほど有効性が高く、実験2、3から体脂肪率の低い者ほど保温の必要性が高いことが示された。また、実験4から、特に寒冷日において保温水着着用の有効性が高く、保温効果のみならず授業評価を高める教育的効果が示された。これらの結果から、環境条件、運動強度、身体特性の違いを考慮した保温水着着用へのある程度の目安が示された。

しかしながら、本研究で検討した環境条件や運動強度は限られた範囲の設定であったため、保温水着着用の基準となる水温や気温に加えて、授業の内容や運動強度、児童の身体特性による個人差などが複合的に関係すると考えられるため、保温水着の実用化には多要因の影響を考慮した基準を示す必要がある。また、実際の水泳授業においては活動的な時間と非活動的な時間を繰り返す授業形態がとられており、間欠的な運動の際の体温変化を検証するための実験設定も必要と考えられる。

IX. 結論

本研究では、小学校水泳授業への保温水着導入を図るため、成人および児童を被験者として、水浸安静時および水中運動時における保温水着着用が、体温変化や産熱応答、熱遮断能などにおよぼす温熱的效果を検証し、また、小学校水泳授業における調査により、主観的温度感覚などへの温熱的效果や、学習意欲などの授業評価への教育的効果について検討した。以下に、本研究の結果から得られた保温水着着用の効果に関する主な知見をまとめた。

- (1) 保温水着着用時には身体組織の熱遮断能は低下せず、普通水着着用時と同様の値を示す（課題 1, 2）。
- (2) 保温水着の熱遮断能を付加し、普通水着着用時に比べて総熱遮断能を増加させることで、体表面からの放熱量が抑えられ、深部温が維持される（課題 1, 2）。
- (3) 体脂肪の少ない者ほど、普通水着着用時に身体組織の熱遮断能が小さく、深部温が低下しやすいため、保温水着着用の必要性が高い（課題 2）。
- (4) 寒冷日の水泳授業時には保温水着着用群でコントロール群に比べて高い温度感覚と学習意欲を示すが、温暖日には両群間に差は見られない（課題 3）。

これらの結果から、低水温環境で行われる小学校水泳授業における保温水着着用による深部温維持や寒冷感の軽減などの温熱的效果に加えて学習意欲向上などの教育的効果が示された。また、寒冷日ほど保温水着の有効性が高く、体脂肪の少ない児童ほど保温水着の必要性が高いことが示された。

謝辞

本博士論文の作成にあたり、研究計画から実験の遂行、論文作成にいたるまで終始懇切丁寧な御指導を賜りました野村武男教授に心から御礼申し上げます。学会等の際には御旧友の先生方をご紹介いただき、先生の人柄の温かさを感じ、研究の励みとなりました。また、ご多忙の中、副査をお引き受けいただきました体育科学専攻・西保岳助教授、武政徹助教授、およびスポーツ医学専攻・金岡恒治講師には、論文を細部にいたるまで御校閲いただき、特に研究に対する客観的な視点の重要性について貴重な御指導・御助言をいただきました。さらに、北海道大学大学院工学研究科・横山真太郎教授、九州大学芸術工学研究院・栃原裕教授には、学会発表の際や共同研究を通して、多くの貴重な御助言をいただきました。つくば市立竹園西小学校・新井清司教諭には、小学校と大学の間立ち、共同研究者としてご協力いただきました。諸先生方に深く感謝の意を表します。

最後に、筑波大学水泳研究室の諸先生方、大学院生の皆さん、および快く実験にご協力いただいた大学院生、小学校児童および保護者の皆さんにあらためて感謝いたします。

今後のさらなる努力を誓い、研究活動に精進してまいります。

参考文献

- Andersen KL (1973) Thermogenetic mechanisms involved in man's fitness to resist cold exposure. In Borg A, Veghte JH eds. The physiology of cold weather survival, NATO Neuilly-Sur-Seine, France, 1-5.
- Araki T, Tsujita J, Matsushita K, Hori S (1980) Thermoregulatory responses of prepubertal boys to heat and cold in relation to physical training. *J Hum Ergol (Tokyo)*. 9(1): 69-80.
- Arieli R, Kerem D, Gonen A, Goldenberg I, Shoshani O, Daskalovic YI, Shupak A (1997) Thermal status of wet-suited divers using closed circuit O₂ apparatus in sea water of 17-18.5 degrees C. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 76(1): 69-74.
- Bazett HC, Love L, Newton M, Eisenberg L, Day R, Foster RII (1948) Temperature changes in blood flowing in arteries and veins in man. *J Appl Physiol* 1: 3-19.
- Bell DG, Tikuisis P, Jacobs I (1992) Relative intensity of muscular contraction during shivering. *J Appl Physiol* 72(6): 2336-2342.
- Bonde-Petersen F, Norsk P, Suzuki Y (1980) A comparison between freon and acetylene rebreathing for measuring cardiac output. *Aviat Space Environ Med* 51(11): 1241-1221.
- Bonde-Petersen F, Schultz-Pedersen L, Dragsted N (1992) Peripheral and central blood flow in man during cold, thermoneutral, and hot water immersion. *Aviat Space Environ Med* 63(5): 346-350.
- Borg G (1973) Perceived exertion: a note on -history- and methods. *Med Sci Sports* 5(2): 90-93.
- Carlson LD, Hsieh AC (1965) Cold, In Edholm OG, Bacharach AL eds. The physiology of human survival, Academic Press, London, 15-51.
- Chatard JC, Senegas X, Selles M, Dreanot P, Geysant A (1995) Wet suit effect: a comparison between competitive swimmers and triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 27(4): 580-586.
- Choi JK, Lee HS, Park YS, Shiraki K (2003) Effect of uniform and non-uniform skin temperature on thermal exchanges in water in humans. *Int J Biometeorol* 47(2): 80-86.

- Choi JK, Park YS, Park YH, Kim JS, Yeon DS, Kang DH, Rennie DW, Hong SK (1988) Effect of wearing gloves on the thermal balance of Korean women wet-suit divers in cold water. *Undersea Biomed Res* 15(3): 155-64.
- Cotter JD, Taylor NAS (1995) Physiological assessment of the RNZAF constant wear immersion suit: laboratory and field trials. *Aviat Space Environ Med* 66(6): 528-536.
- Cordain L, Kopriva R (1991) Wetsuits, body density and swimming performance. *Br J Sports Med* 25(1): 31-33.
- Craig AB JR, Dvorak M (1966) Thermal regulation during water immersion. *J Appl Physiol* 21(5): 1577-1588.
- DuBois D, DuBois EF (1916) Clinical calorimetry. X. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Arch Intern Med* 17: 863-871.
- Gagge AP, Stolwijk JAJ, Hardy JD (1967) Comfort and thermal sensation and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research* 1(1): 1-20.
- Gagge AP, Nishi Y (1977) Heat exchange between human skin surface and thermal environment, In Lee DHK ed. *Handbook of physiology, Reactions to environment agents*, Am Physiol Soc, Bethesda, 69-92.
- Hardy JD, DuBois EF (1938) The technic of measuring radiation and convection. *J Nutr* 15: 461-475.
- 長谷川純三, 吉田章 (1984) 北海道における水泳プール環境条件についての測定報告. *北方科学調査報告: 北方圏の自然と文化の研究* 5: 75-83.
- Hayward JS, Collis ML, Eckerson J (1973) Thermographic evaluation of relative heat loss areas of man during cold water immersion. *Aerosp Med* 44: 708-711.
- Hayward MG, Keatinge WR (1981) Roles of subcutaneous fat and thermoregulatory reflexes in determining ability to stabilize body temperature in water. *J Physiol* 320: 229-251.
- Holmer I, Bergh U (1974) Metabolic and thermal response to swimming in water at varying

- temperatures. *J Appl Physiol* 37(5): 702-705.
- Inoue Y, Nakamura S, Yonehiro K, Kuwahara T, Ueda H, Araki T (2006) Regional differences in peripheral vasoconstriction of prepubertal boys. *Eur J Appl Physiol* 96(4): 397-403.
- Inoue Y, Araki T, Tsujita J (1996) Thermoregulatory responses of prepubertal boys and young men in changing temperature linearly from 28 to 15 degrees C. *Eur J Appl Physiol* 72(3): 204-208.
- 井上芳光 (2001) 年齢と性差. 宮村実晴編 新運動生理学, 真興交易(株)医書出版部, 東京, 281-294.
- 井上芳光 (2002) 体温調節システムの適応的変化 発育と老化による修飾作用. 平田耕造ほか編 体温—運動時の体温調節システムとそれを修飾する要因—, ナップ, 東京, 180-198.
- Iwamoto J, Sagawa S, Tajima F, Miki K, Tanaka H, Shiraki K (1990) Change in insulation of body tissue and wet suits during underwater exercise at various atmospheric pressures. *J Appl Physiol* 68(2): 659-664.
- 賀川昌明 (2006) 体育学習におけるパーソナルコンピュータ利用の展望と課題. *体育学研究* 51(4): 409-419.
- 甲斐美和子 (1988) 水中での体温変化. *Jap J Sports Sci* 7: 505-509.
- 甲斐美和子, 塙亜矢子, 斎藤昇 (1987) 学校体育における水泳. 日本水泳連盟科学技術委員会編, 水泳医学百科, 南江堂, 東京, 10-14.
- Kang DH, Park YS, Park YD, Lee IS, Yeon DS, Lee SH, Hong SY, Rennie DW, Hong SK (1983) Energetics of wet-suit diving in Korean women breath-hold divers. *J Appl Physiol* 54(6): 1702-1707.
- Keatinge WR (1960) The effects of subcutaneous fat and of previous exposure to cold on the body temperature, peripheral blood flow and metabolic rate of men in cold water. *J Physiol London* 153: 166-178.
- Keatinge WR, Evans M (1961) The respiratory and cardiovascular response to immersion in

- cold and warm water. *Q J Exp Physiol Cogn Med Sci* 46: 83-94.
- 厚生労働省 (2001) 遊泳用プールの衛生基準. 厚生労働省健康局長通知 健発第 774 号
- 黒川隆志 (1988) 児童の水泳時心拍数－酸素摂取量関係に及ぼす水温の影響. *デサントスポーツ科学* 9: 158-165.
- 黒川隆志, 崔泰義 (1991) 児童のプールでの自由遊び, 水泳練習及びテストにおける運動強度の比較. *広島大学教育学部紀要第 2 部* 39: 149-157.
- 黒川隆志 (2004) プールの水温とからだ. *からだの不思議* 1(5): 19-24.
- Marina RM, Bouchard C, Bar-Or O (2004) *Growth, Maturation, and Physical Activity* 2nd ed. Human Kinetics, United States of America, 169-177.
- Martin AD, Ward R (1996) Body composition. In: Docherty D ed. *Measurement in pediatric exercise science*, Human Kinetics, British Columbia, Canada, 87-128.
- McArdle WD, Magel JR, Gergley TJ, Spina RJ, Toner MM (1984) Thermal adjustment to cold-water exposure in resting men and women. *J Appl Physiol* 56(6): 1565-1571.
- McArdle WD, Magel JR, Lesmes GR, Pechar GS (1976) Metabolic and cardiovascular adjustment to work in air and water at 18,25, and 33°C. *J Appl Physiol* 40(1): 85-90.
- McArdle WD, Magel JR, Spina RJ, Gergley TJ, Toner MM (1984) Thermal adjustment to cold-water exposure in exercising men and women. *J Appl Physiol* 56(6): 1572-1577.
- McArdle WD, Toner MM, Magel JR, Spina RJ, Pandolf KB (1992) Thermal responses of men and women during cold-water immersion: influence of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol* 65(3): 265-270.
- McMurray RG, Horvath SM (1979) Thermoregulation in swimmers and runners. *J Appl Physiol* 46(6): 1086-1092.
- 文部省 (1993) 学校体育実技指導資料第 4 集 水泳指導の手引 (改訂版), 東洋館出版社, 東京
- 文部省 (1998) 小学校学習指導要領. 大蔵省印刷局, 東京
- 文部科学省 (2002) 「学校環境衛生の基準」の一部改訂について. 文部科学省スポーツ・

- 青少年局長通知 13 文科ス第四一一号
- 文部科学省 (2004) 学校体育実技指導資料第 4 集 水泳指導の手引 (二訂版) . 大阪書籍, 大阪
- 文部科学省 (2005) 学校保健法施行規則 (昭和三十三年六月十三日文部省令第十八号) . 文部科学省令 第二三号
- Nadel ER, Holmer I, Bergh U, Astrand PO, Stolwijk JAJ (1973) Thermoregulatory shivering during exercise. *Life Sci* 13: 938-989.
- Nadel ER, Holmer I, Bergh U, Astrand PO, Stolwijk JAJ (1974) Energy exchanges of swimming man. *J Appl Physiol* 36(4): 465-471.
- 中山昭雄 (1981) 温熱生理学. 理工学社, 東京
- Nielsen R, Endrusick TL (1990) Sensation of temperature and humidity during alternative work / rest and the influence of underwear knit structure. *Ergonomics* 33(2): 221-234.
- 日本工業標準調査会 (1999) JIS A1412-2 : 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第 2 部: 熱流計法 (HFM 法), 付属書 A (規定) 平板比較法, 日本規格協会, pp.17-19.
- 日本生理人類学会計測研究部編 (1996) 人間科学計測ハンドブック. 技報堂出版, 東京, 190-200.
- 日本水泳連盟 (1994) 新水泳指導教本. 大修館書店, 東京, 81-84.
- 日本スイミングコーチ学校 (1982) 水泳コーチテキスト 第 14 巻 ベビースイミングと幼児水泳. 金港堂, 横浜, 163-166.
- Nomura T (1983) Cardio-respiratory response during under water exercise at three different water temperature. *Annals Physiol Anthropol* 2(2): 89-92.
- Nunneley SA, Reader DC, Maldonado RJ (1982) Head-temperature effects on physiology, comfort, and performance during hyperthermia. *Aviat Space Environ Med* 53(7): 623-628.
- 荻原俊男, 垂井清一郎ほか (1999) 生体の調節システム 岩波講座現代医学の基礎 4. 岩波書店, 東京, 33-60.
- 小野寺孝一, 宮下充正 (1976) 全身持久性運動における主観的運動強度と客観的運動強

- 度の対応性－Rating of perceived exertion の観点から－. 体育学研究 21: 191-203.
- Park YS, Kim JS, Choi JK (1992) Increase of heat loss by wearing gloves and boots in wet-suited subjects working in cold water. *Ann Physiol Anthropol* 11(4): 393-400.
- Park YS, Pendergast DR, Rennie DW (1984) Decrease in body insulation with exercise in cool water. *Undersea Biomed Res* 11(2): 159-168.
- Pugh LG, Edholm OG (1955) The physiology of channel swimmers. *Lancet* 269: 761-768.
- Rennie DW, Covino BG, Howell BJ, Song SH, Kang BS, Hong SK (1962) Physical insulation of Korean diving women: *J Appl Physiol* 17(6): 961-966.
- Rennie DW, Di Prampero PE, Caretelli P (1971) Effects of water immersion on cardiac output, heart rate and stroke volume of man at rest and during exercise. *Medicina dello Sport* 24: 223-228.
- Ruoti RG, Morris DM, Cole AJ (1997) *Aquatic rehabilitation*: Lippincott New York.
- Sagawa S, Shiraki K, Yousef MK, Konda N (1988) Water temperature and intensity of exercise in maintenance of thermal equilibrium. *J Appl Physiol* 65(6): 2413-2419.
- 佐々木隆, 千葉喜彦 (1978) 時間生物学. 朝倉書店, 東京, 325-330.
- 柴田義晴 (1981) 水泳の学習指導を発達段階を通してどう進めるか. *学校体育* 34(14): 53-57.
- 清水富弘, 藤島和孝, 大柿哲朗 (1996) 保温水着が女性水泳指導者の体温および血液性に及ぼす影響. *デサントスポーツ科学* 18: 262-269.
- Shiraki K, Sagawa S, Konda N, Park YS, Komatsu T, Hong SK (1986) Energetics of wet-suit diving in Japanese male breath-hold divers. *J Appl Physiol* 61(4): 1475-1480.
- Sloan REG, Keatinge WR (1973) Cooling rates of young people swimming in cold water. *J Appl Physiol* 35(3): 371-375.
- Smith RM, Hanna JM (1975) Skinfolds and resting heat loss in cool air and water: temperature equivalence. *J Appl Physiol* 39: 93-102.
- Smolander J, Bar-Or O, Korhonen O, Ilmarinen J (1992) Thermoregulation during rest and

- exercise in the cold in pre- and early pubescent boys and in young men. *J Appl Physiol* 72(4): 1589-1594.
- 高橋健夫, 長谷川悦示, 刈谷三郎 (1994) 体育授業「形成的授業評価」作成の試み: 子どもの授業評価の構造に着目して. *体育学研究* 39(1): 29-37.
- Tanaka M, Yamazaki S, Ohnaka T, Harimura Y, Tochiyama Y, Matsui J, Yoshida K (1985) Effects of feet cooling on pain, thermal sensation and cardiovascular responses. *J Sports Med Phys Fitness*. 25(1-2): 32-39.
- Tanner JM, Whitehouse RH (1975) Revised standard for triceps and subscapular skinfolds in British children. *Arch Dis Child*. 50(2): 142-145.
- Tikuisis P, Bell DG, Jacobs I (1991) Shivering onset, metabolic response, and convective heat transfer during cold air exposure. *J Appl Physiol* 70(5): 1996-2002.
- 東京都立大学体力標準値研究会編 (2000) 新・日本人の体力標準値. 誠信社, 東京, 21-26, 70-77.
- Toner MM, Drolet LL, Pandolf KB (1986) Perceptual and physiological responses during exercise in cool and cold water. *Percept Mot Skills* 62(1): 211-220.
- Toner MM, McArdle WD (1996) Human thermoregulatory responses to acute cold stress with special reference to water immersion. In Fregly MJ, Blatteis CM eds *Handbook of physiology* Section 4, Environmental Physiology Volume I, Oxford University Press, New York, 379-397.
- Toner MM, Sawka MN, Holden WL, Pandolf KB (1985) Comparison of thermal responses between rest and leg exercise in water. *J Appl Physiol* 59(1): 248-253.
- 上田毅, 黒川隆志, 石川博子 (1992) 小学生の水泳授業における運動強度の指標としての主観的運動強度の有効性. *広島大学教育学部紀要第2部* 40: 163-168.
- Veicsteinas A, Ferretti G, Rennie W (1982) Superficial shell insulation in resting and exercising men in cold water. *J Appl Physiol* 52(6): 1557-1564.
- Wagner JA, Robinson S, Marino RP (1974) Age and temperature regulation of humans in

- neutral and cold environments. *J Appl Physiol* 37(4): 562-565.
- 渡邊義行, 中原裕香, 富樫恭子, 加藤大, 杉浦実憲, 山中一悦 (2004) 小学校教科体育・水泳 (第 3 学年) における泳力別指導効果に関する実践的研究. 岐阜大学教育学部研究報告 教育実践研究 6: 85-92.
- Winslow CEA, Herrington LP (1974) 温度と人間—温熱の生理衛生学—: 北博正, 竹村望訳. 人間と技術社, 東京, 40-41.
- Wolff AH, Coleshaw SR, Newstead CG, Keatinge WR (1985) Heat exchanges in wet suits. *J Appl Physiol* 58(3): 770-777.
- Yeon DS, Park YS, Choi JK, Kim JS, Lee IS, Kang DH, Lee SH, Hong SY, Rennie DW, Hong SK (1987) Changes in thermal insulation during underwater exercise in Korean female wet-suit divers. *J Appl Physiol* 62(3): 1014-1019.
- 吉田章 (1987) 水泳プールの歴史・現状・課題. 日本水泳連盟科学技術委員会編, 水泳医学百科. 南江堂, 東京, 172-176.