

局所および全身性の断続的身体冷却により誘発される
耐寒反応と生体負担に関する研究

澤 田 晋 一

謝辞

本研究を学位論文として提出することを受理して下さい、論文完成まで終始御指導と御助言を賜った東京大学医学部公衆衛生学教室の荒記俊一教授（労働省産業医学総合研究所現所長）に心から感謝申し上げます。

また、労働省産業医学総合研究所の山本宗平元所長ならびに櫻井治彦前所長には、本研究を遂行するにあたって、絶えざる御支援をいただいたことに深謝します。

さらに、本研究をまとめるにあたり、東京大学医学部公衆衛生学教室の横山和仁助教授、佐藤元講師、北村文彦助手には度重なる御助言をいただいたこと、ならびに実験の実施にあたって東京大学医学部公衆衛生学教室の学生諸君の多大なる協力を得たことに、この場を借りて御礼申し上げます。

目次

I	緒言	... 1
II	対象と方法	... 6
	1. 局所冷却実験	... 6
	2. 全身冷却実験	... 8
III	結果	... 12
	1. 局所冷却実験	... 12
	2. 全身冷却実験	... 14
IV	考察	... 17
	1. 局所冷却による耐寒反応と主観的負担	... 18
	2. 全身冷却による耐寒反応と生体負担	... 21
	3. 結論	... 31
	文献	... 33
	図表	... 38

Ⅰ 緒 言

寒冷作業といえば、温帯圏にあるわが国では冬季における屋外作業（農林水産業、土木・建設作業、保線・港湾作業、陸海上運輸業、除雪作業など）が代表的なものである。自然の気象条件がもたらすこの昔からの寒冷作業環境に加えて、最近では生鮮食料品や冷凍食品の流通機構の発展により、冷凍・冷蔵倉庫作業のように年間を通して環境温が氷点下に設定された人工的寒冷作業環境も増加している^{48, 94)}。冷凍・冷蔵倉庫作業のような氷点下の厳しい寒冷環境ではないが、生鮮食料品の加工・包装・流通職場には年間を通して、0℃から15℃という職場も少なくない。さらに生鮮食料品販売店では冬季には10℃前後の環境下における作業もみられ、このような環境で働く作業者はかなりの数にのぼる^{17, 88)}。

寒冷作業現場で働く人々の間に、これまでにさまざまな健康問題が報告されている^{33, 41, 53, 58, 71, 74, 76, 86, 87)}。労働省の労働基準法第35条施行規則における業務上疾病の解釈によると、業務上疾病としての寒冷障害は、凍傷・凍死とされているが⁵²⁾、最近の国内外の研究報告をみると、凍傷・凍死のみならず^{6, 68)}寒冷ストレスが直接あるいは間接に引き起こすと考えられる種々の局所性・全身性健康障害が報告されている^{9, 29, 37, 49, 63, 64, 77, 90)}。

寒冷作業現場では寒冷ストレスから作業者を保護するために、現場での経験や判断にもとづいて、作業時には適宜防寒服や防寒靴・手袋などを着用させるなどの防寒対策が講じられているにもかかわらず、作業者の健康問題をかかえる職場が少なくない^{41, 74, 77)}。Tanaka et al⁷⁷⁾は、全国の冷凍・冷蔵倉庫作業者の作業条件と健康問題の実態をアンケート調査によって調べたところ、防寒対策を施している割合は高かったが、腰痛・神経痛や呼吸循環器疾患などの健康問題をかかえる職場も多かった。三浦⁴¹⁾によると、冷凍・冷蔵作業者は風邪をひきやすいという訴えが多く、神経痛、高血圧、気管支炎・喘息、凍傷などに加えて低体温症による欠勤もみられるという。最近われわれが労働者死傷病報告の原票をもとに凍傷による業務上疾病の労災事例を個別に検討したところ、

作業者本人が防寒対策を講じているつもりでいても作業を繰り返すうちに気づかぬうちに凍傷に被災する事例も少なくなかった^{65, 66)}。このように、寒冷作業現場では、現場の経験や判断にもとづいて防寒対策が実施されているところが多いが、寒冷作業者の健康障害の防止に必ずしも有効でない場合があることがわかる。

寒冷作業における寒冷曝露形態は、1日に1度だけ長時間にわたり寒冷に曝露することはほとんどなく、通常は、常温あるいは温暖な休憩室や作業場と寒冷な作業場との間を頻繁に移動したり^{61, 81)}、冷水や低温物体に間欠的に手指末梢部の接触を繰り返す^{5, 66)}というように、休憩・休止をはさんでの全身性および局所性の断続的な繰り返し寒冷曝露を特徴としている。特に冷凍冷蔵倉庫作業では、-30℃前後の氷点下の冷凍庫内と常温の庫外の間の温度差の大きい空間を一日の間に何度も往來する^{81, 82)}。冷凍庫内外の温度差は、わが国では屋外が暑熱となる夏季に特に大となり、その上、夏季は作業者の身体が暑熱順化する状態にあるために、夏季の冷凍庫作業はとりわけ過酷であるという報告もある^{69, 77)}。生鮮食料品の加工・包装・流通職場も、年間を通して常時0℃から15℃という軽度な人工的寒冷作業環境であるが、冷凍倉庫作業と同様に作業場内外の温度差が大となる夏季に作業負担が増大すると考えられる。このように最近のわが国における寒冷作業の特徴として、(1)年間を通して寒冷に曝露される人工寒冷作業環境が多いこと、(2)その寒冷曝露形態は、全身性および局所性の断続的寒冷曝露を特徴とすること、(3)屋外が暑熱となる夏季に特に温度差の大きな寒冷ストレスにさらされること、という三つの点が注目される。

ところで、寒冷ストレスが生体に加わった時には身体を過度の冷却から保護するために局所性あるいは全身性の耐寒反応が誘発される。局所性耐寒反応としては、動静脈吻合の密な手指などの身体末梢部において寒冷血管拡張反応(Cold-induced vasodilatation:以下略してCIVD反応とする)が発現して、身体局所の生体組織を過度の冷却や凍傷から保護する^{34, 92, 93)}。これらの反応強度が個人の局所耐寒性すなわち凍傷抵抗性を決定するとして、吉村らは⁹²⁾0℃の氷冷水に手指を浸漬する局所耐寒試験法を提案した。それを契機にして、局

所耐寒性の民族差⁹³⁾、性差⁷³⁾、職業^{39, 72)}、年齢^{59, 70)}、気圧³¹⁾、局所寒冷順化^{4, 46)}、環境温^{54, 55, 73)}、体熱含量¹⁹⁾、衣服⁷²⁾、季節⁷³⁾などの影響を調べる研究がこれまで国内外で活発に行われてきた。

ところが、前述のように実際の寒冷作業現場でみられるような短期間に休憩・休止を挿んで断続的に冷水浸漬を繰り返した時に CIVD 反応がどのような挙動を示すのかを検討した研究は、これまでのところ見当たらない。休憩をはさんで短期的に冷水浸漬を繰り返すと CIVD 反応が増強するのか、それとも減弱するのか、変わらないのか、それに対して室温はどのような影響を及ぼすのか、などに関してはほとんど知られていない。また、冷水浸漬時には寒冷痛や寒冷感覚などが発生し主観的負担が増大するが⁵⁵⁾、CIVD 反応の測定中に観察されるこのような主観的感覚が、短期的な繰り返し冷水浸漬によって、あるいは冷水浸漬後の休憩時にどのような変動をするのかについてもよく知られていない。前述の寒冷作業現場における凍傷の労災事例のように、寒冷作業を繰り返すことで気づかぬうちに凍傷が発生することが少なくないので、休憩・休止をはさんで断続的に手指冷却を繰り返したときに凍傷抵抗反応としての CIVD 反応がどのような挙動を示し、その時の寒冷痛や温冷感覚がどのように推移するかを調べることは、現場での凍傷発生メカニズムを考察する上でも重要なことである。

一方、全身寒冷曝露に対する全身性の耐寒反応として、人体は寒冷ストレスによる体温低下を打ち消す方向に自律性・行動性体温調節反応を発現させて身体深部の体温低下を防止する⁵⁶⁾。すなわち寒冷曝露時には、行動性体温調節反応として、暖房を入れたり、厚着をしたり、温かい飲物を摂取したりするというような日常的なごくありふれた行動が、身体冷却を打ち消すような方向に発現して、体温の低下を防ぐ。また、自律性体温調節反応としては、皮膚血管を収縮して熱放散を減少させたり、ふるえを発現させて代謝熱産生量を増加させるなど、体内の生理諸機能を動員させて深部体温の低下を防ぐ。体温調節反応の末梢性・中枢性調節機序についてこれまでに膨大な研究の蓄積がある^{25, 44, 45)}にもかかわらず、これらの行動性・自律性体温調節反応が、現場の寒冷作業に

みられるような温暖休憩条件をはさんで断続的寒冷曝露を繰り返すことでどのような挙動を示すかについてはよく知られていない。

寒冷作業現場の寒冷曝露実態を考慮して実際の観点から断続的寒冷曝露の問題を扱った先駆的な労働生理学的研究が、最近いくつか報告されている^{61, 83, 88)}。しかしこれらの研究の二つは^{83, 88)}、冷凍倉庫作業のような氷点下の超低温作業⁸³⁾、あるいは生鮮食料品関連産業のような軽度な低温作業⁸⁸⁾にみられる断続的寒冷曝露の適切な一連続作業時間を検討することを主たる目的としたもので、断続的寒冷曝露によって誘発される耐寒反応あるいは自律性・行動性体温調節反応の特徴とその問題点そのものを明らかにすることを目的としていない。また、これらの研究はいずれも、全身寒気曝露の実験であり、手指などの身体末梢部に対する断続的局所冷却の影響までは検討していない^{61, 83, 88)}。しかし、寒冷作業時には手指などの身体末梢部の過冷却が問題となることが多く^{5, 12, 84)}、前述のように防寒対策を講じていても寒冷作業を繰り返す間に気づかぬうちに凍傷が発生するという労災事例もあるので^{65, 66)}、断続的局所冷却の影響を調べることも重要である。

これまでの研究^{61, 83, 88)}で明らかにされていないその他の問題として、第一に寒冷曝露実験のみを行い常温曝露による対照実験をしていないので、観察された測定値の経時的変化が、断続的寒冷曝露の繰り返しによるのかそれとも単なる実験の繰り返しによるのか区別がつかないこと、第二に深部体温の指標として直腸温を用いているが、耐寒反応あるいは体温調節反応の入出力特性を考察するためには深部体温として鼓膜温の測定が重要であるにもかかわらずその情報が欠落していること、第三に作業負担の指標として手指作業パフォーマンスへの影響を調べているが、精神作業パフォーマンスに対する影響が不明であること、などが挙げられる。

これまでに述べてきた研究の背景をまとめると、次の二点に要約できる。

(1) 実際の寒冷作業における寒冷曝露形態は、常温あるいは温暖な休憩室や作業場と寒冷な作業場との間を頻繁に移動したり、冷水や低温物体に間欠的に手指末梢部の接触を繰り返すというように、休憩・休止をはさんだ全身性および

局所性の断続的寒冷曝露を特徴としている。ところが、このような断続的寒冷曝露を繰り返した時に生ずる局所性および全身性耐寒反応と生体負担の実態や特徴については、これまで十分な解析がなされておらず、不明な点が多く残されている。(2)そのような状況の下で、寒冷作業現場では、現場での経験や主観的判断に依存した防寒対策が必ずしも有効でなく、寒冷曝露を繰り返すことによって作業者本人の気づかないうちに凍傷に被災したり、低体温症のみならず高血圧や気管支炎などの呼吸循環器疾患、腰痛・神経痛などのさまざまな健康問題が発生している。

そこで本研究は、実際の寒冷作業にみられるような休憩をはさんで局所性および全身性に断続的寒冷曝露を繰り返した時に生ずる耐寒反応と生体負担の実態と問題点を探索することを目的として、局所および全身の断続冷却のモデル実験を実施した。すなわち、局所冷却実験では、休憩をはさんで断続的に手指の冷水浸漬を繰り返した時に、局所耐寒反応（凍傷抵抗反応）としての寒冷血管拡張反応（CIVD 反応）、および寒冷痛と寒冷感覚の主観的反応がいかなる挙動を示すのか、さらにこれらの反応に室温がどのような影響を及ぼすのかを調べることを目的とした。また、全身冷却実験では、温暖休憩条件をはさんで全身性に断続的寒気曝露を繰り返した時に全身性耐寒反応として発現する自律性・行動性体温調節反応の特徴を調べることで、および温冷感や快不快感などの主観的負担と血圧などの循環系負担の特徴、さらに手指作業パフォーマンスと精神作業パフォーマンスに対する影響を調べることを目的とした。

以上の局所および全身の断続的冷却実験で得られた知見から、(1)現場での経験や判断による防寒対策が必ずしも有効でなく、寒冷曝露を繰り返すことによって作業者本人の気づかないうちに凍傷に被災したり、高血圧や低体温症などの健康問題が発生している状況の生理学的背景、および、(2)休憩・休止条件をはさんで断続的に寒冷作業を遂行する際に、作業者の知覚や主観的判断に依存して作業－休憩スケジュールを設定したり防寒対策を講じることの信頼性と問題点について、考察した。

Ⅱ 対 象 と 方 法

1. 局所冷却実験

1) 被験者および着衣条件

被験者は健康な若年成人男性 6 名（平均年齢 22.5 ± 0.8 歳）であった。被験者の身体的特徴を表 1-1 に示す。実験時の着衣条件を一定にするために、実験時の着衣は、Tシャツ、ショートパンツ、靴下に統一した。被験者には事前に実験目的と予想される負担を十分に説明して同意を得た。さらに、実験途中でいつでも実験中止できる自由を与えた。なお、本研究は、産業医学総合研究所の倫理委員会の承認も得た。

2) 実験装置

労働省産業医学総合研究所の人工気候室の一室（内法：W3350×H2350×D3020mm）において実験を行った。空調された空気は、被験者の前部の壁面より吹き出され背部の壁面に吸い込まれる。気流は、ほぼ無風（0.1m/sec 以下）に制御されている。

手指の冷水浸漬装置としては、われわれが以前に開発した局所冷水浸漬装置⁵⁵⁾を改良したシステムを用いた。実験装置の概略を図 1-1 に示す。被験者は冷水循環装置から流出する一定温度（精度： $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ）かつ一定流量（7 l/min）の冷水に直接手指を浸漬するので、本装置は吉村らの提案した氷冷水浸漬法⁹²⁾に比べて、冷水温度が自由に設定でき、かつ温度境界層の影響もほとんど無視できるという特長がある。

3) 実験手順と実験期間

実験手順を図 1-2 に示す。実験は日内変動の影響をなくすために午前 10 時から 12 時の間に行われた。被験者は、午前 10 時にあらかじめ設定された一定室温の人工気象室に入り、30 分間安静座位を保ち、その間に電極取り付けを行った。その後同じ姿勢を保持したまま、前述の冷水浸漬装置を用いて、左示指を第 2 節まで 10°C の冷水に 10 分間浸漬する実験を、その前後に室温下での 5

分間の休憩を挿んで6回繰り返した。各冷水浸漬後は、速やかに手指を水槽から取り出して付着した冷水をティッシュペーパーで十分にふき取った。実験中の人工気象室の室温は、30℃、25℃、20℃の3条件（いずれも相対湿度50%）として、同一被験者に日を替えて実施した。以上の断続的繰り返し手指冷水浸漬実験は、夏季（8月～9月上旬）に実施された。なお、被験者には冷水浸漬の実験手順と内容に慣れさせるために、事前に一度冷水浸漬実験を体験させた。

4) 測定および解析項目

凍傷抵抗反応としてのCIVD反応を観察するために、冷水浸漬指の掌側皮膚温を10秒毎に測定した。皮膚温は、サーミスタプローブ（ITP010-12, NIKKISO-YSI）をサージカルテープで軽く固定することにより測定した。舌下温は、同じタイプのサーミスタプローブを用いて、主として休憩時に測定した。測定値は、データロガー（LT-8, Gram Corporation）に記録した後、パーソナルコンピュータ（PC-9821Xa13, NEC）に転送して、データ解析を行った。

主観的反応として冷水浸漬指の寒冷痛と温冷感覚を1分毎に測定した。局所寒冷痛は、5段階のカテゴリー尺度（1:なんともない, 2:やや痛い, 3:痛い, 4:非常に痛い, 5:耐え難いほど痛い）で⁵⁵⁾、局所温冷感覚は7段階のカテゴリー尺度（1:非常に温かい, 2:温かい, 3:やや温かい, 4:どちらともいえない, 5:やや冷たい, 6:冷たい, 7:非常に冷たい）で¹⁶⁾自己評定させた。また、実験開始時と終了時に、全身の温熱的快不快感を、4段階のカテゴリー尺度（1:快適, 2:やや不快, 3:不快, 4:非常に不快）で^{15, 32)}、全身温冷感を9段階のカテゴリー尺度（1:非常に寒い, 2:寒い, 3:涼しい, 4:やや涼しい, 5:どちらともいえない, 6:やや暖かい, 7:暖かい, 8:暑い, 9:非常に暑い）³²⁾を用いて、自己評定させた。凍傷抵抗反応の程度を評価するために、図1-3に示すようにCIVD反応の5つのパラメーター（CIVD反応発現温度(TFR), 発現時間(TTR), 最高反応温度(AT), 反応総面積(MSTA), 浸漬5分から10分までの平均皮膚温(MST5)）を用いた^{55, 59, 92)}。一般に、TTRが小で、TFR、AT、MSTA、MST5が大なほど、凍傷抵抗性が大であると

判定される。また、冷水浸漬指の皮膚温の回復度は、各休憩時の最後の 5 分目の皮膚温の値 (Trec) を用いて評価した。

5) 統計処理

室温と繰り返しの影響の統計的解析には、室温 (3 水準) と冷水浸漬回数 (6 水準) を 2 因子とする対応性のある二元配置の分散分析を用いた。

また各指標の経時変化の有意性の検定には対応性のある一元配置分散分析を用い、単因子の平均値の差の検定には対応性のある t 検定 (主観的応答は、Wilcoxon の符号付順位和検定) を用いた。

2. 全身冷却実験

1) 被験者および着衣条件

被験者は健康な若年成人男性 10 名 (平均年齢 23.3 ± 1.3 歳) であった。被験者の身体的特徴を表 2-1 に示す。実験時の着衣条件を統一するために、被験者はトランクスとショートパンツのみを着用した。被験者には実験前に実験目的と予想される負担を説明し、実験途中での実験中止の自由を前提とする同意を得た。本研究は、産業医学総合研究所の倫理委員会の承認も得た。

2) 実験装置

労働省産業医学総合研究所の人工気候室において実験を行った。人工気候室は A 室 (内法: $W2000 \times H2350 \times D3020\text{mm}$) と B 室 (内法: $W3350 \times H2350 \times 3020\text{mm}$) の 2 室からなり、A 室は温暖曝露室として、B 室は寒冷曝露室または対照実験のための温暖曝露室として使用した。A 室と B 室の間の移動距離は、約 5m であった。A, B 両室ともに、空調された空気は、被験者の前部の壁面より吹き出され背部の壁面に吸い込まれる。気流は、ほぼ無風 (0.1m/sec 以下) に制御されている。

3) 実験手順と実験期間

図 2-1 に実験手順を示す。被験者は、実験開始 1 時間前に室温 30°C (相対湿度 50%) の人工気候室 (A 室) に入室した。実験開始前の 1 時間の間に、身体

計測と当日の健康状態の問診を行い、測定電極を取り付けた。その後、室温 10℃（相対湿度 50％）の寒冷室（B 室）に 6 回、室温 30℃（相対湿度 50％）の温暖室（A 室）に 6 回、この順序で交互に 10 分間ずつ滞在させる実験を行った（寒冷実験）。10℃の寒冷実験のコントロールとして、28℃（相対湿度 50％）の温暖曝露実験を、温度以外は同一条件で同じ被験者に日を変えて実施した。すなわち、被験者は 30℃（相対湿度 50％）に設定された A 室と 28℃（相対湿度 50％）に設定された B 室を寒冷実験と同じ手順で往来した（対照実験）。寒冷実験と対照実験の順序は各被験者にランダムに割り当てた。なお、被験者には、これらの一連の実験手順と測定内容に馴れさせるために、最初に寒冷曝露実験と同様の予備実験を事前に 1 回行った。実験は 8 月から 10 月上旬に行われた。

4) 測定項目

(1) 深部体温と体表面温：深部体温の指標として、直腸温と鼓膜温を用いた。

直腸温はサーミスターの直腸温用プローブ (LT-ST08-11, NIKKISO-YSI) を肛門から 10cm 挿入して測定した。鼓膜温は、我々が試作した鼓膜温測定用サーミスタープローブを鼓膜に直接接触させて連続測定した。体表面温の指標として、身体 12 部位の皮膚温をサーミスタープローブ (ITP010-12, NIKKISO-YSI) で測定し、Hardy & Dubois の提案した 12 点法により³⁹⁾、以下の式(1)にしたがって、平均皮膚温 (Ts) を算出した。

$$Ts = 0.07A + 0.14B + 0.05C + 0.07D + 0.13(E+F)/2 + 0.19(G+H)/2 + 0.35(I+J+K+L)/4 \quad (1)$$

A: 額、B: 前腕部、C: 手背部、D: 足背部、E: 下腿腹側部、

F: 下腿背側部、G: 大腿腹側部、H: 大腿背側部、I: 前胸部、J: 腹部、

K: 肩胛骨部、L: 腰部

また、後述のタッピング作業を行う右第 2 指の手背側の皮膚温も、サーミスタープローブ (ITP010-12, NIKKISO-YSI) で測定した。いずれの測定値も、1 分毎にデータロガー (LT-8, Gram Corporation) に記録し、実験後にパーソナルコンピュータ (PC-9821Xa13, NEC) に転送してデータ解析を

行った。

- (2) 全身耐寒反応：自律性体温調節反応の指標として、代謝熱産生反応と寒冷ふるえの自覚感を測定した。代謝熱産生反応は、携帯用呼気代謝モニター (MetaMax, Cortex Biophysik GmbH) を用いて、呼気を連続的にサンプリングすることにより酸素消費量 ($\dot{V}O_2$) と二酸化炭素排泄量 ($\dot{V}CO_2$) を測定し、その結果を、以下の式 (2) に代入することによって単位体表面積 (A_b)¹⁴⁾ 当たりの熱産生量 (W/m^2) として、式 (3) (4) (5) より算出した²⁶⁾。

$$RQ = \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2 \quad (2)$$

$$EE = (0.23RQ + 0.77) \times 5.88 \quad (3)$$

$$M = EE \times \dot{V}O_2 / A_b \quad (4)$$

$$A_b = 0.188 \times Wb^{0.444} \times Hb^{0.663} \quad (5)$$

Wb: 体重 (kg)、Hb: 身長 (m)

寒冷ふるえの自覚感は、5 段階のカテゴリー尺度 (1: なし, 2: 弱い, 3: 中位, 4: 強い, 5: 非常に強い) で自己評定した。また、行動性体温調節反応の指標としては、我々が以前体温調節行動を問診票によって推定する手法を提案し⁵⁷⁾、これを温熱追求行動性の評価法と定義した。この温熱追求行動性の問診票を改変し、体表面加温行動の指標として室温上昇と厚着の希望の強さを、また体内加温行動の指標として温かい飲物の希望の強さを、それぞれ 5 段階のカテゴリー尺度 (1: なし, 2: 弱い, 3: 中位, 4: 強い, 5: 非常に強い) で 1 分毎に自己評定させた。

- (3) 主観的負担：主観的負担の指標として、全身の温熱的快不快感は、Gagge et al.¹⁵⁾ および空調設備基準委員会温冷感小委員会³²⁾の方法を改変した 5 段階のカテゴリー尺度 (1: 快適, 2: やや不快, 3: 不快, 4: 非常に不快, 5: 極度に不快) を用いて、全身温冷感は 9 段階のカテゴリー尺度 (1: 非常に暑い, 2: 暑い, 3: 暖かい, 4: やや暖かい, 5: どちらともいえない, 6: やや涼しい, 7: 涼しい, 8: 寒い, 9: 非常に寒い)³²⁾ を用いて、1 分毎に被験者に自己評定させた。

(4)循環系負担：血圧と心拍数は携帯型自動血圧心拍計(TM-2425, A & D)を用いて 5 分毎に測定した。

(5)作業パフォーマンス：精神作業パフォーマンスの指標として、被験者に 5 分毎に暗算課題を負荷した。すなわち、コンピュータの画面上に 1 桁の数字をランダムに 10 個表示し、その加算を最大努力で行わせ、キーボードから回答させた。これを 1 試行として、10 試行を 1 実験単位とした。1 実験単位の暗算の誤答率と平均計算時間を精神作業パフォーマンスの指標とした。暗算課題の終了後、手指作業パフォーマンスの指標として右第 2 指のタッピング(TAPPING TESTER, TAKEI)を最大努力で 10 秒間行わせた。暗算（一桁の数字の 10 個加算を 10 回）とタッピング（右第 2 指で 10 秒間）を 1 作業単位として、寒冷室滞在全期間と温暖室での最初と最後の滞在期間中に 5 分毎に実施した。

5) データ解析法

実験条件（寒冷実験と対照実験）と寒冷曝露の繰り返しの影響についての統計的解析には、実験条件（2 水準）と寒冷曝露あるいは温暖曝露回数（6 水準）を 2 因子とする対応性のある二元配置分散分析を用いた。

また、各測定指標の経時変化の有意性の検定には対応性のある一元配置分散分析を用い、同一時点での寒冷実験－対照実験間の平均値の差の検定には、対応性のある t 検定（主観的応答は、Wilcoxon の符号付順位和検定）を用いた。

Ⅲ 結 果

1. 局所冷却実験

1) 冷水浸漬時の凍傷抵抗反応

図 1-4 に示すように、室温 20℃、25℃、30℃のいずれの条件下でも、初回の冷水浸漬時には著明な CIVD 反応が観察された。しかし、冷水浸漬を繰り返すにつれて室温間に大きな差異が認められるようになった。すなわち、室温 25℃と 30℃では、繰り返し冷水浸漬によって CIVD 反応強度に著明な変動は認められず、初回の CIVD 反応強度が最終回まで保持された。ところが、室温 20℃では、冷水浸漬を繰り返す毎に CIVD 反応強度は減弱化し、最終回の冷水浸漬時にはほとんど反応が見られなくなった。CIVD 反応強度の 5 つのパラメーターについて二元配置分散分析で比較検討すると、表 1-2 に示すように、室温はすべてのパラメーターに有意な影響を及ぼしていた($P<0.01$)。また、冷水浸漬の繰り返しの影響については、室温 20℃では、繰り返し冷水浸漬により AT 以外のすべての指標で CIVD 反応強度の有意な減弱傾向を示したが($P<0.01$)、室温 30℃と室温 25℃ではすべての指標で繰り返しの有意な影響は認められなかった。

2) 休憩時における冷水浸漬手指皮膚温の回復度

冷水浸漬後の休憩時における皮膚温の回復度も、室温と冷水浸漬の繰り返しの有意な影響を認めた($P<0.01$) (図 1-4; 表 1-2)。初回の冷水浸漬前的手指皮膚温は、室温 20℃ではすでにやや低い水準にあったが、いずれの室温でも 30℃以上の高値を示していた。室温 30℃では、冷水浸漬を繰り返しても休憩時に速やかに 33~34℃近くまで手指皮膚温は回復した。室温 25℃でも 30℃よりやや遅れる傾向が見られたが、繰り返しによる影響は認められず、5 分間の休憩によって皮膚温 30~33℃の範囲にまで回復した。しかし室温 20℃では、冷水浸漬を繰り返すことによって休憩時の浸漬手指の皮膚温回復が有意に遅延し続け、最終回の休憩時には皮膚温 25℃前後までしか回復しなかった($P<0.01$)。

3) 冷水浸漬指の寒冷痛と温冷感覚

図 1-5 に示すように、いずれの室温条件下でも冷水浸漬直後から CIVD 反応発現前までに冷水浸漬指の寒冷痛は最大となったが、CIVD 反応の発現に伴って減少する傾向を示した。この冷水浸漬時の寒冷痛の最大増加幅は、繰り返し冷水浸漬によって有意に減少した($P<0.01$) (図 1-5)。冷水浸漬後の休憩時には、寒冷痛はほとんど完全に消失した。以上の寒冷痛の反応に室温の影響は有意ではなかった。

図 1-6 に示すように、冷水浸漬指の温冷感覚についても、いずれの室温条件下でも冷水浸漬直後から CIVD 反応発現前までに寒冷感覚は最大となったが、CIVD 反応の発現に伴って減少する傾向を示した。この冷水浸漬時の寒冷感覚の程度も、繰り返し冷水浸漬によって有意に減少した($P<0.05$)。また冷水浸漬後の休憩時には、寒冷感覚は完全に消失し、冷たくも温かくもない温度中立感覚あるいは温暖感覚が発生した。以上の温冷感覚の挙動に室温の影響は有意ではなかった。

4) 舌下温と全身快適感・温冷感の変動

実験開始時の舌下温 (mean \pm S. D.) は、室温 30°C で $36.9 \pm 0.23^\circ\text{C}$ 、室温 25°C で $36.9 \pm 0.27^\circ\text{C}$ 、室温 20°C で $36.6 \pm 0.29^\circ\text{C}$ となり、室温 20°C での舌下温が他の室温での舌下温より有意に低かった($P<0.05$)。実験終了後には室温 25°C と 30°C の間に舌下温に有意な変化は認められず、室温 30°C で $36.9 \pm 0.23^\circ\text{C}$ 、室温 25°C で $36.8 \pm 0.27^\circ\text{C}$ であった。室温 20°C では、実験終了時の舌下温は $36.3 \pm 0.29^\circ\text{C}$ まで有意に低下し($P<0.05$)、その値は、他の室温での値より有意に低かった($P<0.01$) (図 1-7)。

実験開始時には、被験者の室温に対する平均申告は、室温 30°C で「暖かくて快適」、室温 25°C で「暖かくも涼しくもなく快適」、室温 20°C で「やや涼しくて快適」であった。90 分後の実験終了時の室温に対する平均申告は、室温 30°C で「暖かくてやや不快」、室温 25°C で「暖かくも涼しくもなく快適」、室温 20°C で「涼しくてやや不快」であった。

2. 全身冷却実験

1) 深部体温の変化

図 2-2 上に示すように、寒冷曝露と温暖曝露を交互に繰り返している間に、鼓膜温は低下し続け、実験開始 60 分以後コントロールに比べて有意に低下し続けた ($P<0.05$, $P<0.01$)。直腸温も低下し続け (図 2-2 下)、実験開始 40 分以後コントロールに比べて有意な低値を示した ($P<0.05$, $P<0.01$)。実験開始時の鼓膜温と直腸温は、それぞれ $37.1\pm0.28^{\circ}\text{C}$ 、 $37.2\pm0.15^{\circ}\text{C}$ であったが、実験終了時には $36.6\pm0.28^{\circ}\text{C}$ 、 $36.5\pm0.32^{\circ}\text{C}$ にまで有意に低下していた ($P<0.01$)。温暖対照実験 (コントロール) における鼓膜温と直腸温は、実験開始時にそれぞれ $37.1\pm0.17^{\circ}\text{C}$ 、 $37.1\pm0.18^{\circ}\text{C}$ 、実験終了時も $37.1\pm0.16^{\circ}\text{C}$ 、 $37.0\pm0.27^{\circ}\text{C}$ とほとんど不変であった。

2) 体表面温の変化

寒冷曝露と温暖曝露を交互に繰り返している間に、体表面の平均皮膚温は、寒冷室で低下し温暖室で上昇することを繰り返しながら有意に漸減する傾向が見られた ($P<0.01$) (図 2-3 上)。対照実験ではそのような傾向は認められなかった。実験開始時の平均皮膚温は、 $33.9\pm0.34^{\circ}\text{C}$ であったが、寒冷曝露の最終回には $27.1\pm1.16^{\circ}\text{C}$ まで低下した。その後温暖室に戻った時にも $32.1\pm0.42^{\circ}\text{C}$ にまでしか回復せず実験開始時に比べて有意な低下を示した ($P<0.01$)。

タッピングを行った右第 2 指の皮膚温も、寒冷室で低下し温暖室で上昇することを繰り返しながら有意に漸減する傾向が見られた ($P<0.01$) (図 2-3 下)。寒冷実験では曝露前に平均 34.6°C であったが、寒冷曝露を繰り返すことにより漸減して、最低値 19.4°C まで達したが、最後の温暖条件では 26.9°C まで回復した。対照実験では、曝露前の 34.2°C から最低値 32.7°C に達した後、最後は 33.7°C となり、実験中は常に高い水準を保った。

3) 自律性体温調節反応の変化

図 2-4 に、体熱産生反応の指標としての寒冷ふるえの自覚感と代謝熱産生量の変動を示す。寒冷ふるえの自覚感は、初回の寒冷曝露から発現し、寒冷曝露

を繰り返す毎に有意に増強したが($P<0.01$)、温暖室に戻る毎に深部体温が低下しているにもかかわらず完全に消失した(図 2-4 下)。代謝熱産生反応は、ふるえの自覚感の発現と対応して寒冷曝露を繰り返す毎に増大し、温暖室では深部体温が低下し続けているにも関わらず寒冷曝露前値に戻る例もみられたが(図 2-4 上)、ほとんど不変の例も多く、対照実験に比べて統計的に有意な増加を認めるにはいたらなかった。

4) 行動性体温調節反応の変化

温熱追求行動性の問診票を用いた自己評価によって行動性体温調節反応の大きさを推定したところ、寒冷曝露時には、体表面加温行動の指標である室温上昇の希望と厚着の希望の強さが体内加温行動の指標としての温かい飲物の希望の強さより大の傾向を示したが、いずれの希望の強さも、寒冷曝露を繰り返すことにより有意に増加し続けた($P<0.01$) (図 2-5)。ところが、温暖室に戻ると、直腸温や鼓膜温などの深部体温が低下し続けているにもかかわらず、これらの身体加温行動のモチベーションは被験者 10 名中 8 名において完全に消失した。

5) 主観的快不快感・温冷感

温熱的不快感の平均申告は、初回の寒冷曝露時には「やや不快」であったが、寒冷曝露を繰り返すことにより有意に増強し、最終回の寒冷曝露時には「不快」と変化した(図 2-6 上)。寒冷感覚も、寒冷室での滞在を繰り返すことにより初回の「やや涼しい」から最終回には「寒い」へと有意に増強した($P<0.01$) (図 2-6 下)。ところが、寒冷曝露後に温暖室に戻ると、深部体温が低下し続けているにもかかわらず、これらの不快感覚と寒冷感覚は速やかに消失して、快適感覚と温暖感覚が生じた(図 2-6 上下)。

6) 循環系負担

最大血圧、最小血圧いずれも、寒冷曝露時に一過性に上昇したが、温暖室に戻ると低下した。しかし、寒冷曝露と温暖曝露を交互に繰り返すことにより温暖休憩室での血圧の低下幅が減少し、寒冷曝露時のみならず温暖休憩時にも経時的に血圧値が有意に増加して循環系の負担が増大する傾向をみとめた

($P < 0.05$)。図 2-7 には、平均血圧の経時変化を示してある。対照実験では血圧の有意な経時的変化は認められなかった。

7) 作業パフォーマンスへの影響

タッピング回数は、温暖休憩条件をはさんでも、寒冷曝露を繰り返すことにより有意に減少し続けた($P < 0.01$)。対照実験ではタッピング回数に有意な経時変化は認められなかった。最後の寒冷曝露終了後の温暖室での測定値も、対照実験に比べて有意に低下しており回復が充分ではなかった($P < 0.01$) (図 2-8)。

暗算の計算時間は、温暖対照実験の方が計算時間が大の傾向を認めたが、寒冷曝露実験との間で有意差を認めなかった (図 2-9 上)。計算の誤答率は、寒冷実験と対照実験の間に差を認めず、有意な経時変化も認められなかった (図 2-9 下)。

IV 考 察

寒冷に対する体温調節反応の研究あるいは温熱生理学的研究には、これまでに膨大な研究の蓄積がある^{25, 44, 45)}。しかし、これらの研究のほとんどは、寒冷の短期急性の単回曝露に対する体温調節反応の特徴とその末梢性・中枢性調節機序を解析したものであったり、長期慢性曝露に対する寒冷順化の成立機序の解明を目的としたものである。したがって、実際の寒冷作業で経験するような半日から1日という短期間に休憩・休止をはさんで寒冷曝露が断続的に繰り返される時に生ずる局所性および全身性耐寒反応と生体負担の実態や特徴については、これまで十分な解析がなされておらず、不明な点が多く残されている。

そこで本研究は、実際の観点から断続的寒冷曝露を繰り返した時に生ずる耐寒反応と生体負担の実態および問題点を探索することを目的として、局所および全身の断続冷却のモデル実験を実施した。実験は、身体が暑熱順化状態にあり寒冷負担が特に大きいと考えられる夏季を中心に（8月から10月上旬まで）行われた。局所冷却のモデルとしては、手指を10℃冷水に10分間浸漬する方法を用いた。その理由は、この冷水浸漬条件が、被験者の負担が少なく凍傷抵抗反応（CIVD反応）の挙動を十分に評価するための必要最低条件であること⁵⁵⁾と、実際の寒冷作業では手指が10℃近くまで冷却されることはよく起こりうること¹²⁾による。また、全身冷却のモデルとしては、10℃の寒気に10分間曝露する方法を用いた。その理由は、冷凍庫作業における1回の平均寒冷曝露時間は5～10分間あるいは10～30分間であることが多いこと⁸¹⁾、また今回の曝露条件（気温10℃、相対湿度50%、気流0.1m/sec以下、衣服の保温力0.1clo、代謝熱産生量60～80W/m²）では、10分という寒冷曝露時間は、ISO²⁷⁾で勧告している1回あたりの寒冷曝露限界時間約18～25分より十分に短く、かつこのレベルの全身冷却は、薄手（例えば1.5clo）の防寒服を着用した場合には氷点下（例えば-20℃）の冷凍庫作業では日常的に起こり得ると考えられたからである。したがって、本研究で採用した局所と全身の寒冷曝露条件

は、実際の寒冷作業現場で起こっている身体冷却の特徴と生体負担の一端を理解する上で有効なモデルとなると考えられる。

以下に、局所冷却実験と全身冷却実験に分けて実験結果の考察を行う。

1. 局所冷却による耐寒反応と主観的負担

1) CIVD 反応強度に対する繰り返し冷水浸漬と室温の影響

これまでの研究から、CIVD 反応は環境温や体熱含量の影響を強く受け、同じ個人でも環境温が高く体熱含量が大の時は大きく、逆に環境温が低く体熱含量が小の時は小さくなることがわかっている^{19, 55, 73)}。ただし、この知見は 1 回の冷水浸漬試験の結果得られたもので、本実験のように休憩をはさんで繰り返し断続的に冷水浸漬した時には CIVD 反応がどのような挙動を示すのか明らかではなかった。環境温が高く体熱含量が大の時でも、冷水浸漬を断続的に繰り返すことで、短期的に疲労減少が起こり CIVD 反応が減弱するのだろうか？あるいは、環境温が低く体熱含量が小の状態でも冷水浸漬の繰り返しにより短期的に局所寒冷順化現象が起こり CIVD 反応が増強するのだろうか？

本実験では異なる室温 3 条件（20、25、30℃）を設定して、繰り返し冷水浸漬時の CIVD 反応の挙動を比較検討した。実験時の着衣は T シャツ、ショートパンツに靴下という軽装であり、実験中被験者は椅座位安静状態を保持した結果、室温 25℃を「暑くも寒くもなく快適」と申告し、舌下温からみた深部体温の低下もなかった。室温 30℃では「やや暖かくて不快」となり、室温 20℃では深部体温が低下して「やや涼しくてやや不快」と申告した。これより、今回の実験条件では、室温 25℃が温熱中立条件、室温 30℃は軽度な暑熱環境、室温 20℃は軽度な寒冷環境ということが出来る。軽度な寒冷環境は、作業服と作業強度の組み合わせによっては作業環境の至る所に存在しうる。例えば、十分な防寒服を着用しているつもりでもその保温力以上の寒冷ストレスが加われば容易に軽度な寒冷環境下に作業者はおかれることになるし、夏季の冷房環境も薄着で軽作業を行う場合は軽度な寒冷環境になりうる。

このような軽度な寒冷環境では、CIVD 反応は、休憩をはさんでも冷水浸漬を繰り返すことにより確実に減弱することが明らかになった。室温 20℃では、深部体温が低下した結果体熱含量の減少が進行していると考えられるので、CIVD 反応が減弱し続けるということは、当然起こりうることと思われる。一方で、今回の室温 25、30℃のような深部体温が一定に維持される温度中性域以上の温熱条件下では、CIVD 反応強度は今回の 6 回程度の繰り返し冷水浸漬ならほとんど減弱することなく高い水準で安定に保持されることが今回の実験で明らかになったといえよう。

2) 浸漬手指皮膚温の休憩時における回復度

休憩時の皮膚温の回復度も、室温と繰り返し冷水浸漬の影響を強く受けた。CIVD 反応強度と同様に、今回の室温 25℃と 30℃という温度中性域以上では、速やかに浸漬前値に回復する傾向がみられ繰り返し冷水浸漬の影響も有意ではなかったが、室温 20℃では実験中に有意に低下し続けた。CIVD 反応強度は、環境温・体熱含量のみならず浸漬前の皮膚温の影響も強く受けることが指摘されていることから^{43, 55)}、室温 20℃で冷水浸漬を繰り返すことで休憩時にみられた皮膚温の回復の遅れは、その後の冷水浸漬による CIVD 反応強度の減弱に強く関与していると考えられる。

3) 冷水浸漬指の寒冷痛と温冷感覚

冷水浸漬手指の寒冷痛と温冷感覚は、CIVD 反応および休憩時の皮膚温の回復度とは対照的に、室温の影響を受けなかった。すなわち、いずれの室温でも寒冷痛と寒冷感覚は冷水浸漬を繰り返すことにより減弱して休憩時には全く消失した。室温 20℃の軽度な寒冷環境下では、断続的冷水浸漬を繰り返すと凍傷抵抗反応(CIVD 反応)が減弱し休憩時の皮膚温の回復が遅延し続けるにもかかわらず、冷水浸漬時の局所の寒冷痛は減弱し続け、休憩時には寒冷痛と寒冷感覚が全く消失した。米国政府産業衛生専門家会議(ACGIH)¹⁾や日本産業衛生学会³⁰⁾の寒冷作業基準の勧告において、寒冷痛は凍傷の警告サインであると指摘されている。しかし、今回の実験結果によれば、室温 20℃の軽度な寒冷環境下では、CIVD 反応からみた凍傷抵抗反応は断続的冷水浸漬をくりかえすことによって明

らかに減弱し、手指の冷却が進行し凍傷のリスクが高まっていると考えられる。にもかかわらず、寒冷痛と寒冷感覚が減弱し続けたことから、今回のような条件では寒冷痛は凍傷の鋭敏な警告サインとならないことが示唆される。もし寒冷痛を凍傷の危険サインと考えるなら、繰り返し冷水浸漬によって CIVD 反応強度が減弱するにつれて寒冷痛が増強してもいいはずである。

休憩時にも、低室温条件下では冷水浸漬手指の皮膚温の回復が遅延し続けるにもかかわらず手指の寒冷痛と寒冷感覚が全く消失したことは、主観的には手指の冷却の進行を知覚できないことを意味する。このことは、実際の寒冷作業において、作業－休憩のサイクルを作業者の主観的判断に依存して休止・休憩時間を自発的に設定させた場合に、気づかぬうちに手指末梢部の冷却が進行し、凍傷の発症リスクが高まる可能性を強く示唆する。事実、すでに述べたように最近われわれが実施した職業性凍傷の労災事例の検討結果^{65, 66)}では、寒冷作業者が防寒対策を充分とったつもりでも、作業を繰り返すことによって気づかぬうちに凍傷に被災する例が少なくなかった。本研究では、CIVD 反応の減弱を凍傷の発生リスクの指標とみなしただけであり、直接凍傷の発生を実証したものでは無論ないが、得られた知見は間接的に現場の凍傷の労災事例の発生メカニズムに対して生理学的裏付けを与える可能性を示唆する。

4) 凍傷抵抗反応の指標としての CIVD 反応の妥当性

吉村ら⁹²⁾は、前述のように CIVD 反応強度が個人の凍傷抵抗性と密接に関係するとして、局所耐寒試験法を提案した。吉村らの提案した局所耐寒試験法は、0℃の冷水に手指を 30 分間浸漬した時に発現する CIVD 反応の程度を、皮膚温を測定することにより評価するものである。しかしこの方法は、0℃の氷冷水に手指を 30 分間浸漬するという過酷な試験であり、被検者の中には試験中に寒冷痛のために失神する者もいる。我々はすでに吉村原法より負担の少ない試験条件、すなわちより高い水温（例えば 5℃や 10℃）でより短時間（10 分から 15 分）でも凍傷抵抗性を十分に評価できることを示した^{54, 55, 59)}。したがって、今回採用した 10℃の冷水に 10 分間浸漬した時に発現する CIVD 反応強度は、0℃の氷冷水に 30 分間浸漬した時にみられる凍傷抵抗性の程度を充分反映してい

ると考えられる。それでも厳密に考えると今回の冷水浸漬実験で発現した CIVD 反応強度によって、凍傷抵抗性が正しく評価できるかどうかは議論の余地のあることである。しかし、冷水に浸漬した時に CIVD 反応が発現して手指が加温されること自体には、手指の過冷却を防止する、寒冷痛を減弱させる、触覚弁別能を改善する⁵⁰⁾などの意味があると思われる。そこで、本研究では 10℃冷水に 10 分間浸漬した時に発現する CIVD 反応が、凍傷抵抗反応としての指標のみならず、手指の過冷却を防いで、主観的負担を軽減し、手指の巧緻性も改善する有用な生理指標と考えた。

いうまでもなく人間を対象に実験的に凍傷を発生させることは倫理的にも許されないことであり不可能であるので、本実験結果は、業務上凍傷発生事例の発症メカニズムを厳密には証明しているわけではない。しかし、本実験結果が示すように、深部体温が低下するような温度中性域より低い室温条件では、断続的に冷水浸漬を繰り返すと CIVD 反応が減弱し休憩時には手指皮膚温の回復が遅延し続けるにもかかわらず、手指の寒冷痛や温度感覚が凍傷や生体組織の過冷却の危険信号としての役割を果たさないという実験事実は、現場で作業者が気づかないうちに凍傷が発生することに密接な関連があり、それに対する生理学的裏付けを与える可能性を強く示唆する。一方で、温度中性域以上の条件で手指が冷却される場合は、本人の知覚や主観感覚と無関係に冷却を繰り返しても、高いレベルの CIVD 反応の持続が期待でき凍傷の発生リスクが少ないことが示唆される。

2. 全身冷却による耐寒反応と生体負担

全身の断続的寒冷曝露の実験系を用いた研究は、すでにいくつか報告されている^{83, 88)}。しかし、これらの研究はいずれも、研究の着眼点が異なるために、温暖休憩条件をはさんで断続的寒冷曝露を繰り返した時の行動性・自律性体温調節反応の特徴を充分には記述していない。また、これらの研究は、寒冷曝露実験の対照実験を行っていないため^{61, 83, 88)}、経時的に観察された種々の生体反

応の変動が、繰り返し寒冷曝露それ自体によって引き起こされたものかそれとも単に繰り返しによる変化であるか区別が明瞭でなかった。

そこで本研究では、体温調節反応と密接に関連する深部体温の指標として鼓膜温を測定項目に加えて、10℃（相対湿度 50％）の寒冷曝露のコントロールとして、28℃（相対湿度 50％）の温暖対照実験も行った。また、作業パフォーマンスの指標として、タッピングによる手指作業パフォーマンスのみならず精神作業パフォーマンスの指標として、暗算による計算作業を取りあげた。

データ解析の結果、代謝熱産生反応と計算作業パフォーマンス（計算時間と誤答率）以外のすべての測定項目で、寒冷実験と対照実験の間に統計的に有意な経時変化を認めた。したがって、寒冷実験で得られた有意な経時変化の知見は、単なる繰り返しによる影響ではなく、寒冷曝露による繰り返しの影響であると考えられる。

1) 深部体温の変化

本研究によって、温暖な休憩条件をはさんでも断続的に寒冷曝露を繰り返すと、寒冷曝露条件や着衣条件に関係なく直腸温が低下し続ける場合があることが確かめられた。本研究では、トランクスとショートパンツのみの着衣条件（保温力 0.1clo）で、30℃（相対湿度 50％）の温暖休憩条件をはさんで 10℃（相対湿度 50％）の寒気に 10 分間ずつ 6 回計 60 分間曝露した。その結果、平均 37.2℃ から 36.5℃ まで約 0.7℃ の直腸温の低下を認めた。一方、栃原ら⁸³⁾は、防寒服の保温力 2.5clo の着衣条件で、25℃ の休憩条件をはさんで -25℃ の寒気に 5 分ずつ 12 回、10 分ずつ 6 回、20 分ずつ 3 回という 3 種類の寒冷曝露条件の下で計 60 分間曝露した。その結果、直腸温は実験後にはいずれの寒冷曝露条件でも約 0.6℃ の低下を認めている。渡辺ら⁸⁸⁾は、保温力 0.9clo の着衣条件で、25℃ の休憩条件をはさんで交互に 5℃ の寒気に栃原と同じ一連続寒冷曝露条件で計 60 分間曝露した。その結果、直腸温は実験後には 10 分の一連続寒冷曝露の繰り返しでも約 0.57℃ の低下を認めた。Sawada et al⁶¹⁾が最近実施した T シャツとショートパンツの着衣条件で 5℃ と 30℃ の部屋に 15 分ずつ交互に 4 回滞在させる実験でも、約 0.8℃ の直腸温の低下を認めている。

いずれにせよ、温暖条件をはさんでも寒冷曝露を繰り返すことにより直腸温が低下し続けるのは、寒冷曝露の間には含まれた温暖休憩条件が寒冷曝露時に低下した直腸温の回復に充分有効でないことを示す。寒冷曝露後の回復期には直腸温の再低下（after-drop）の現象も認められる⁸⁰⁾。したがって、短時間の温暖休憩条件をはさんで寒冷曝露を繰り返すことは、温暖条件で直腸温の回復が不十分なまま、あるいは after-drop を起こしたまま、次の寒冷曝露によって直腸温がさらに低下するという悪循環を形成すると考えられる。

今回の実験では、直腸温のみならず鼓膜温でも寒冷－温暖曝露の繰り返しにより低下することが新たに明らかになった。直腸温は深部体温の平均的状态値を知るのによい指標であるが、体温調節反応の入出力特性を解析する場合は体温調節中枢である視床下部温を反映するとされる鼓膜温がよい指標となるといわれている^{44, 45)}。そこで次に、鼓膜温を深部体温の指標として、今回の実験で明らかになった自律性・行動性体温調節反応の特徴を考察する。

2) 自律性・行動性体温調節反応の特徴

本研究では、自律性体温調節反応の指標として、寒冷ふるえの自覚感と代謝熱産生反応を観察した。寒冷ふるえの自覚感は、寒冷曝露を繰り返す毎に深部体温の低下に伴って反応が増大した。ところが、温暖室に入るといずれの休憩時でも、深部体温が低下し続けているにもかかわらず完全に消失した（図 2-4）。代謝熱産生反応には個人差が大で、断続的寒冷曝露による有意な影響は統計的には認められなかったが、寒冷ふるえの自覚感と同様な反応パターンを示す例もあった（図 2-4）。寒冷実験の代謝熱産生反応が温暖対照実験に比べて統計的に有意な変化を示さず、個人差も大であった正確な理由は不明であるが、代謝熱産生反応を著明に増加させるには本実験の冷却条件が軽度すぎたこと、あるいは今回の実験は夏季を中心に実施したため、Sawada⁶⁰⁾が最近報告しているように、夏季における代謝熱産生能力の減退があったことのいずれかで説明できるかもしれない。

行動性体温調節反応の指標である温熱追求行動性も、体表面加温行動としての室温上昇の希望にせよ厚着の希望にせよ、また体内加温行動の指標である温

かい飲物の希望も、寒冷曝露時に増加し、かつ寒冷曝露の繰り返す毎に深部体温の低下を打ち消す方向に有意に増大した。ところが、これら一連の体温調節行動のモチベーションは、温暖室に入ると深部体温が低下しているにもかかわらずほとんど完全に消失した。体温調節行動の動機づけとして重要とされる温熱的快不快感¹⁵⁾も、温熱追求行動性と同じく寒冷曝露を繰り返す毎に不快感が増大したが、温暖室では深部体温が低下しているにもかかわらず完全に消失して快適感が発現した。

このように温暖休憩条件をはさんで寒冷曝露を繰り返すと、寒冷曝露時には温熱的不快感と行動性・自律性体温調節反応が深部体温の低下を打ち消す方向に増大するが、温暖休憩時には深部体温が低下しているにもかかわらずこれらの一連の体温調節反応がほとんど完全に消失してしまうことが明らかになった。なぜこのような現象が起こるのであるのか？ そのメカニズムについて次に考察する。

温熱的快適性や行動性・自律性体温調節反応は、体深部と体表面の温度情報、特に視床下部温と皮膚温の情報を統合する形で決定されることが示唆されている^{24, 36)}。この統合様式として、相乗統合と加算統合の二つのモデルが提案されている。

加算統合とは、体温調節反応の大きさ R が

$$R = \alpha (T_{hy} - T_{hy.set}) + \beta (T_s - T_{s.set})$$

T_{hy} : 視床下部温、 T_s : 皮膚温、 $T_{hy.set}$: 視床下部温のセットポイント、

$T_s - T_{s.set}$: 皮膚温のセットポイント、 α β : 視床下部と皮膚の重み係数

であらわされる統合様式である。

相乗統合とは、体温調節反応の大きさ R が

$$R = \alpha (T_{hy} - T_{hy.set}) (T_s - T_{s.set})$$

T_{hy} : 視床下部温、 T_s : 皮膚温、 $T_{hy.set}$: 視床下部温のセットポイント、 $T_s - T_{s.set}$: 皮膚温のセットポイント

であらわされる。

いずれの統合様式も、体温調節反応の強度は、視床下部温のセットポイントから実際の視床下部温がずれる大きさ ($A=T_{hy}-T_{hy\cdot set}$) と皮膚温のセットポイントから実際の皮膚温がずれる大きさ ($B=T_s-T_{s\cdot set}$) によって決まる。加算統合では $A+B$ であるので A あるいは B が 0 でも体温調節反応は起こる。一方、相乗統合では $A\cdot B$ であるので、 A あるいは B が 0 なら他がどんなに大であっても、体温調節反応は発現しないことになる。これまでに加算統合を支持する報告¹⁰⁾と、相乗統合を示唆する報告^{2, 3, 28, 42)}があり、いずれが正しいのかは現在も結論が出ていない。

本研究で得られた知見、すなわち、(1) 寒冷曝露を繰り返すと鼓膜温が低下し続けると同時に平均皮膚温も低下し続ける状況では行動性・自律性体温調節反応は有意に増強し続けた、ところが、(2) 温暖な休憩室に入ると鼓膜温が低下しているにもかかわらず速やかに一連の行動性・自律性体温調節反応が消失した、という実験結果は、ここでは相乗統合による体温調節が発現していることを強く示唆する。

今回の実験値から視床下部温のセットポイントを 37.1°C 、体表面の平均皮膚温のセットポイントを $32.1\sim 33.9^{\circ}\text{C}$ と仮定すると

$$R=\alpha (T_{hy}-37.1) (T_s-32.1\sim 33.9)$$

という実験式が得られる。この式の意味するところは、(1) 視床下部温がセットポイントの 37.1°C から低下すればするほど、平均皮膚温もセットポイント $32.1\sim 33.9^{\circ}\text{C}$ から低下すればするほどそれを打ち消す方向に相乗的に体温調節反応が発現し増強することであり、(2) 視床下部温か平均皮膚温のどちらかがそれぞれのセットポイントに一致していると、他の温度がどれだけ低下しようと体温調節反応は発現しないということである。実際に今回の実験では、寒冷-温暖曝露を繰り返すと温暖室では鼓膜温が 37.1°C から最終的に 36.5°C まで低下し続けたにもかかわらず、平均皮膚温が温暖室では $32.1\sim 33.9^{\circ}\text{C}$ のセットポイントのレベルまで回復した。この時点では、温熱的不快感と行動性・自律性体温調節反応が若干の個人差はあるもののほとんど完全に消失したことは、鼓膜温のセットポイントが約 37°C 、平均皮膚温のセットポイントが約 $32\sim 34^{\circ}\text{C}$ である相乗統合が背景にあると想像できる。体温調節の温度情報統合様式につ

いては、上述のように温熱生理学の基礎研究においても明確な結論の出ていない問題であるが、少なくとも温暖条件をはさんで断続的寒冷曝露を繰り返すような場合の温熱的快適性や行動性・自律性体温調節反応の温度情報統合様式は、相乗統合モデルで説明できるかもしれない。

3) 主観的感覚・自覚的徴候の信頼性と問題点

寒冷作業を遂行する上で、作業限界の目安や基準があることは有用である。近年寒冷作業基準を提案する動きが国内外で高まっており^{1, 27, 30, 62)}、寒冷強度と作業強度、作業服の保温力から、望ましい寒冷曝露限界を予測する試みもある^{20, 21, 22)}。ところが実際の寒冷作業では、顧客の需要に応じて作業量や作業時間が日々あるいは時々刻々変化することが多いので、定型的な作業－休憩スケジュールを設定することは難しい。作業限界の決め方としては、作業中に作業者の生理的負担を連続的にモニターして、危険な状態になったら警報を鳴らして作業を中止するという方法も考えられる。しかし、このような現場での作業者に対する生理的モニタリングは、作業者に対する負担や測定装置のコストを考えると、現状では必ずしも最適な方法とはいえない。実際の現場では、作業中にどのような自覚的徴候が現れたら作業を中止すべきかという作業者の知覚や主観的判断が使えるものならこれほど簡便で実用的なものはない。岡本⁴⁷⁾は、-50℃の寒気に1時間曝露する実験によって一連続寒冷作業時間の規制基準として、寒冷ふるえを自覚した時点をもってするのが合理的とした。米国政府産業衛生専門家会議(ACGIH)¹⁾と日本産業衛生学会³⁰⁾でも、激しいふるえは低体温が進行している徴候であるので作業を中止して暖をとるように勧告している。しかし、これらの目安は一連続作業における曝露限界指標として有用かもしれないが、休憩をはさんで断続的に寒冷曝露した時にも適用できるかどうかは必ずしも明らかではなかった。

本研究では、このような作業者本人の主観的知覚・自覚的徴候が、時には非常に有用で信頼できるが、全く信頼できない場合もあることを明瞭に示唆する知見が得られた。今回の実験のように、温暖休憩条件をはさんで、寒冷曝露を繰り返す毎に、寒冷曝露時には鼓膜温や直腸温などの深部体温の低下に伴っ

て、深部体温の低下を知覚するごとく温熱的不快感、寒冷感覚、温熱追求行動性、寒冷ふるえの自覚感のすべての主観的感覚が増強した（図 2-10、図 2-5）。この時血圧も上昇して、循環系の負担も増大している。このことは、主観的感覚といえども、低体温の進行や生理的負担の増大を予測する鋭敏かつ信頼性の高い指標となることを示唆する。ここで特に重要な点は、寒冷曝露を繰り返す度に前回に比べて主観的負担が増加していることである。前回の寒冷曝露に比べて主観的負担がより増加するという知覚は、深部体温が前よりさらに低下するということに対応している。これは、現場での作業管理のための実用的な指針を提供していると思われる。たとえば、温暖室での休憩をはさんで断続的に寒冷曝露を繰り返したとき、もし寒冷感覚や不快感、寒冷ふるえの自覚感が前回よりも増大したら、それは前回よりさらに深部体温の低下が進んでおり、休憩時の採暖が不十分であることを示唆するのである。したがって、前回の曝露時に比べてふるえや不快感、寒冷感覚が増加するという知覚は、休憩時の採暖が不十分であり深部体温の低下が進行しているか回復が充分ではないので、充分な加温が必要であることを警告する実用的指標になると考えられる。

一方で、本実験結果は、主観的感覚・自覚的徴候が温暖な休憩室ではほとんど信頼できないことも示している。寒冷曝露を繰り返す毎に増強し続けた温熱的不快感や寒冷感覚、寒冷ふるえの自覚感、温暖室に戻ると深部体温が低下しているにもかかわらず全く消失し（図 2-10）、温熱追求行動性からみた体温調節行動のモチベーションもほとんど消失した（図 2-5）。温暖条件では深部体温が充分回復していないのみならず、温暖曝露を繰り返す毎に深部体温が低下し続けるにもかかわらずである。この時、血圧も有意な漸次上昇傾向をみとめ（図 2-7）、循環系の負担が寒冷曝露時のみならず温暖休憩時にも増大していると考えられた。寒冷曝露時に血圧が上昇するのはよく知られた現象である⁸⁵⁾が、本研究では温暖休憩時にも寒冷曝露を繰り返す毎に血圧水準が上昇することが明らかになった。

このように深部体温が低下し循環系負担が増大しているにもかかわらず、温暖な休憩時において寒冷感覚・不快感やふるえ自覚感が完全に消失するととも

に温熱追求行動のモチベーションがほとんど消失して、快適感・温暖感覚が発現することは、作業者の休憩時の行動に悪影響を与える可能性を示唆する。すなわち、作業者が自分自身の主観的快適感や温暖感覚に頼って自主的に作業－休憩スケジュールを設定するような場合に、深部体温が充分回復していないのに短時間の休憩で作業を再開する、それを繰り返すことによって気づかぬうちに深部体温が低下し続けて循環系負担も増大する、という悪循環が形成される危険性がある。このような悪循環が日常的に労働の場で繰り返されることは、寒冷作業者の健康阻害要因になる可能性がある。最初に述べたように、寒冷作業者の健康問題として高血圧症や低体温症の存在が指摘されている⁴¹⁾。風邪をひきやすいという訴えも多いという⁴¹⁾。本実験結果は、寒冷作業者にみられるこのような健康問題の発生の生理学的背景を一部説明しているかもしれない。

ともかく、温暖な休憩室において寒くて不快という主観的負担が消失し快適感覚や温暖感覚が発現していることは、深部体温が回復していることや生体負担が軽くなっていることなどの指標とはなっていないことを、したがって実際の作業管理上主観的感覚・自覚的徴候に頼ることは危険な場合があることを本研究は明瞭に示している。以上のことから、寒冷作業の休憩時や作業後には作業者の快適感や温暖感などの主観的感覚に依存しない十分な加温・防寒対策を講ずるとともに、作業者の知覚や主観的判断に依存しない合理的な寒冷作業管理手法を確立する必要があると考えられる。

4) 作業パフォーマンスへの影響

手指作業パフォーマンスが寒冷曝露によって著しい影響を受けることはよく知られている^{7, 11, 23, 35, 51, 67, 75, 78)}。しかしこれも、一連続寒冷曝露による身体冷却との関連で得られた知見であり、本研究のように温暖条件をはさんで断続的寒冷曝露を繰り返したときのデータはほとんどない⁸³⁾。精神作業パフォーマンスに対する影響を検討した研究も見当たらない。そこで本研究では、手指作業パフォーマンスの指標としてタッピングを用い、精神作業パフォーマンス

スの指標として暗算による計算作業を用いて、断続的寒冷曝露の影響を検討した。

温暖な休憩条件をはさんでも寒冷曝露を繰り返すと、タッピング回数は著明な減少を示した(図 2-8)。温暖対照実験では、温暖条件では有意な経時変化を示さなかったのも、寒冷曝露時のタッピング回数の減少は、タッピング作業の繰り返しによる疲労の影響であるよりも寒冷曝露の繰り返しによる影響であることは明らかである。

寒冷曝露時の手指作業パフォーマンスの減弱については、手指末梢部の皮膚温のみならず深部体温の影響も受けるという報告^{13, 83)}と受けないという報告^{11, 18, 78)}があるが、最近では深部体温の影響は無視出来るという見方が強く、直腸温などの深部体温は被験者の負担を考えると实际的でないので測定する必要はないという指摘もある¹⁸⁾。そこで、本実験で得られた寒冷曝露時の著しいタッピング回数の減少を、手指皮膚温と鼓膜温との関連で見たものが図 2-11 である。手指皮膚温と鼓膜温のいずれの低下に対してもタッピング回数の低下が強く関連しているようにみえる。ただし、鼓膜温の低下とタッピング回数の低下との間には線形の関係があり、鼓膜温の変動はタッピングの変動を 93%以上説明している($R^2=0.9366$) (図 2-11 下)。一方、手指皮膚温の低下は、タッピング回数の低下を 54%しか説明しておらず($R^2=0.5458$)、例えば手指皮膚温が約 23~25℃の範囲でタッピング回数に約 63~50 回のばらつきが認められた(図 2-11 上)。このばらつきは、寒冷曝露実験中に観察されたタッピングの全変動(65~50 回)のほとんどを占めている。このことは、手指皮膚温の値をみているだけでは、寒冷曝露中のタッピングパフォーマンスの低下をほとんど予測できないことを示すとともに、鼓膜温の値によって、タッピングパフォーマンスの低下を 90%以上の説明率で予測できることを示す。このような手指作業パフォーマンスに対する手指皮膚温と深部体温の関係は、温暖休憩条件をはさんで寒冷曝露を繰り返した時に深部体温は低下し続けるが手指皮膚温などの体表面皮膚温は温暖休憩時に回復しながら低下するという特徴に起因するものと考えられる。したがって、一連続寒冷曝露時の手指末梢部と深部体温の低下に対

する手指作業パフォーマンスの影響とは異なる知見が得られても不思議ではない。しかし、本実験のように現場の作業実態に即して温暖休憩条件をはさんで断続的寒冷曝露を繰り返した場合には、現象的には手指皮膚温よりも鼓膜温などの深部体温の水準が手指作業パフォーマンスの低下をよく予測出来ると思われる。したがって、現場での寒冷作業時の手指作業負担を評価する時は、手指皮膚温のみならず深部体温の状態値も考慮すべきである。なお、深部体温の指標としては、作業者に負担となる直腸温や鼓膜温でなくても、より簡便な舌下温で十分に有効であると思われる。

暗算からみた精神作業パフォーマンスについては、タッピングほど著明な寒冷影響は認められなかった。有意差はなかったが、温暖対照実験より寒冷実験のほうが曝露期間中にむしろ計算時間が短縮傾向にあったのは、寒冷刺激が distracter として作用するよりむしろ覚醒水準を高める方向に作用したためかも知れない^{23, 89)}。しかし、寒冷曝露の後半に身体冷却の進行とともに有意差はないが経時的には計算時間も増加傾向にあったことから、寒冷の影響も完全には否定し得ない。ただし、それが深部体温の低下によるのか手指末梢部の冷却の影響によるのかは、今回の実験では判別できない。なぜなら、今回用いた計算課題は暗算した結果を手指を使ってキーボード入力しているので、総計算所要時間には暗算による正味の中枢情報処理時間と計算結果をキーボードに入力する末梢運動出力時間が含まれている。したがって、深部体温（特に脳温に近い鼓膜温）が低下しても手指末梢部皮膚温が低下しても計算時間の増加は起こりうることだからである。

いずれにせよ、この程度の断続的寒冷曝露による身体冷却では、暗算からみた精神作業パフォーマンスよりタッピングからみた手指作業パフォーマンスのほうが著明な影響を受けることが示された。ただし、精神作業は計算作業に限らずさまざまなタイプがあり、注意、記憶、判断、学習などの高次認知機能要素で構成される⁹¹⁾。現在のところ、これらの高次精神活動に対する寒冷の影響の詳細はほとんど明らかになっていない^{23, 58)}。したがって、今回の実験だけで、一般に精神作業が手指作業より寒冷の影響を受けにくいとは結論できな

い。軽度の寒冷曝露や低体温によって記憶機能や弁別機能が減退するという報告^{8, 40, 79)}もあるので、今後は精神作業のさまざまな側面や高次認知機能に対する断続的寒冷曝露の影響を検討する必要がある。

3. 結論

(1) 休憩をはさんで断続的に手指の冷水浸漬を繰り返すと、深部体温が低下する中立温度条件より低い軽度な寒冷環境では、局所耐寒反応（凍傷抵抗反応あるいは寒冷血管拡張反応）の減弱化と休憩時の皮膚温の回復遅延が進行する。この時、冷水浸漬を繰り返す毎に軽減されかつ休憩時に完全に消失する寒冷痛や寒冷感覚などの主観的知覚は、手指末梢部の冷却の進行と凍傷発生リスクの増大を警告する鋭敏な指標にならない。

(2) 温暖休憩条件をはさんでも断続的に全身寒気曝露を繰り返すと、深部体温が低下し続けて循環系負担の増大と手指作業パフォーマンスの低下が起こることがある。この時、寒気曝露を繰り返す毎に増強される温熱的不快感、寒冷感覚、寒冷ふるえ、温熱追求行動性などの主観的感覚は、低体温の進行や循環系負担の増大、手指作業パフォーマンスの減退を警告するための鋭敏な指標になる。しかし、温暖休憩時に発現する温熱的快適感や温暖感覚は、低体温の進行や生体負担の増悪を監視するための信頼できる指標とはならない。

(3) 以上の知見は、寒冷作業を遂行する際に、作業者自身の知覚や主観的判断に依存して、防寒対策を講じたり作業－休憩スケジュールを設定したりすると、気づかぬうちに身体末梢部の過冷却や凍傷発生のリスクが増大したり、深部体温の低下が進行して循環系負担が増大する場合があることを強く示唆する。

(4) また、現場での経験や主観的判断に依存した防寒対策が必ずしも有効でなく、作業者本人が気づかないうちに凍傷に被災したり、低体温症や高血圧などのさまざまな健康障害が発生している現状について、生理学的裏付けを与える可能性を示唆する。

(5)したがって、寒冷作業の休憩時や作業後には作業者の快適感や温暖感などの主観的感覚に依存しない十分な加温・防寒対策を講ずるとともに、作業者の知覚や主観的判断に依存しない合理的な寒冷作業管理手法を確立する必要がある。

文献

- (1) ACGIH (1998) Threshold limit values and biological exposure indices. Cincinnati
- (2) Adair ER (1977) Skin, preoptic, and core temperatures influence behavioral thermoregulation. *J Appl Physiol* 42: 559–564
- (3) Boulant JA, Gonzalez RR (1977) The effect of skin temperature on the hypothalamic control of heat loss and heat production. *Brain Res* 120: 367–372
- (4) Bridgman SA (1991) Peripheral cold acclimatization in Antarctic scuba divers. *Aviat Space Environ Med* 62: 733–738
- (5) Ceron RJ, Radwin RG, Henderson CJ (1995) Hand skin temperature variations for work in moderately cold environments and the effectiveness of periodic rewarming. *Am Ind Hyg Assoc J* 56: 558–567
- (6) Chen F, Li T, Huang H, Holmer I (1991) A field study of cold effects among cold store workers in China. *Arct Med Res* 50: Suppl 6: 99–103
- (7) Clark RE (1961) The limiting hand skin temperature for unaffected manual performance in the cold. *J Appl Psychol* 45(3): 193–194
- (8) Coleshaw SRK, Van Someren RNM, Wolff AH, Davis HM, Keatinge WR (1983) Impaired memory registration and speed of reasoning caused by low body temperature. *J Appl Physiol :Respirat Environ Exercise Physiol* 55(1): 27–31
- (9) Cooke RA (1996) Essential acquired cold urticaria: stimulated only by systemic as well as local cooling. *Occup Med* 46(2): 157–158
- (10) Corbit JD (1973) Voluntary control of hypothalamic temperature. *J Comp Physiol Psychol* 83: 394–411
- (11) Daanen HAM, Wammes LJA, and Vrijkotte TGM (1993) Windchill and dexterity. Report IZF A-7, TNO Institute for Perception, Soesterberg, NL
- (12) Enander A, Ljungberg A-S, Holmer I (1979) Effects of work in cold stores on man. *Scand J Work Environ Health* 5: 195–204
- (13) Enander A (1987) Effects of moderate cold on performance of psychomotor and cognitive tasks. *Ergonomics* 30(10): 1431–1445
- (14) Fujimoto S, Watanabe T, Sakamoto A, Yukawa K, Morimoto K (1968) Studies on the physical surface area of Japanese. Part 18 Calculation formulas in three stages over all age. *Jpn J Hyg* 23: 443–450 (in Japanese)
- (15) Gagge AP, Stolwijk JAJ, Hardy JD (1967) Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environ Res* 1:1–20
- (16) 後藤滋 (1989) 温冷感の尺度構成. 人間-熱環境系(人間-熱環境系編集委員会編): 113–120、日刊工業新聞社、東京
- (17) Griefahn B, Mehnert P, Brode P, Forsthoef A (1997) Working in moderate cold: a possible risk to health. *J Occup Health* 39: 36–44
- (18) Heus R, Daanen HAM, Havenith G (1995) Physiological criteria for functioning of hands in the cold. A review. *Appl Ergonomics* 26(1): 5–13

- (19) Hirai K, Yoshimura H (1968) Studies on effect of heat content on the vascular hunting reaction to cold and the reaction of women divers. *J Physiol Soc Jpn* 30: 12-21
- (20) Holmer I (1984) Required clothing insulation (IREQ) as an analytical index of cold stress. *ASHRAE Trans* 90(1): 1116-1128
- (21) Holmer I (1988) Assessment of cold stress in terms of required clothing insulation -IREQ-. *Int J Ind Ergonomics* 3: 159-166
- (22) Holmer (1991) TLV in cold environments. *Proceedings of first International conference on human- environment systems*: 579-582, Tokyo, Japan
- (23) Holmer I (1994) Cold stress. *Int J Ind Ergonomics* 14: 151-159
- (24) 堀 哲郎 (1981) 体温調節中枢. *温熱生理学(中山昭雄編)*: 253-280, 理工学社、東京
- (25) 入来正躬(編) (1995) 体温調節のしくみ、文光堂、東京
- (26) ISO8996 (1990) *Ergonomics – Determination of metabolic heat production*. International Standards Organization, Geneva
- (27) ISO/TR-11079(1993) *Evaluation of cold environments –Determination of required clothing insulation(IREQ)*. International Standards Organization, Geneva
- (28) Jacobson FH, Squires RF (1970) Thermoregulatory responses of the cat to preoptic and environmental temperatures. *Am J Physiol* 218: 1575-1582
- (29) Kaminski M, Bourguine M, Zins M, Touranchet A, Verger C (1997) Risk factors for Raynaud's phenomenon among workers in poultry slaughterhouses and canning factories. *Int J Epidemiol* 26(2): 371-380
- (30) 寒冷作業の許容基準 (1999) *産衛誌* 41(4): 111-113
- (31) Konda N, Shiraki K, Sagawa S, Ohta Y (1981) Cold-induced vasodilation reaction of skin vessels at 2 ATA. *J UOEH* 3: 207-213
- (32) 空調設備基準委員会温冷感小委員会 (1979) 温冷感に関する調査方法(昭和51年版). *空気調和・衛生工学* 53(8): 67-74
- (33) 黒岩義五郎、岩下宏 (1966) 長期寒冷暴露作業者にみられた Polyneuropathy の 1 症例. *臨床神経* 6(3): 143-147
- (34) Lewis T (1930) Observation upon the reaction of the vessels of the human skin to cold. *Heart* 15: 177-208
- (35) Lockhart JM, Kiess HO, Clegg TJ (1975) Effect of rate and level of lowered finger surface temperature on manual performance. *J Appl Physiol* 40(1): 106-113
- (36) 満洲邦彦 (1995) 人工環境-温熱環境における快適性. 体温調節のしくみ(入来正躬編): 160-177, 文光堂、東京
- (37) Messing K, Saurel-Cubizolles MJ, Bourguine M, Kaminski M (1993) Factors associated with dysmenorrhea among workers in French poultry slaughterhouses and canneries. *J Occup Med* 35(5): 493-500
- (38) Miura T, Kimotsuki K, Tominaga Y, Suzuki Y (1977) Effect of environmental conditions on the cold-induced vasodilation of office workers and forestry workers. *J Science of Labour* 53: 75-81
- (39) Mitchell D, Wyndham CH (1969) Comparison of weighting formulas for calculating

- mean skin temperature. *J Appl Physiol* 26(5): 616-622
- (40) 三浦豊彦 (1985) 冬と寒さと健康-気候・気温と健康(上)-. 労働科学研究所出版部、東京
 - (41) 三浦豊彦 (1986) 冷凍・冷蔵作業と健康. *労働の科学* 41(12): 10-15
 - (42) Murgatroyd D, Hardy JD (1970) Central and peripheral temperatures in behavioral thermoregulation of the rat. *Physiological and Behavioral Temperature Regulation* (eds. Hardy JD, Gagge AP, Stolwijk JA): 874-891, Thomas, Springfield
 - (43) Nakamura M (1975) Peripheral cold tolerance. *JIBP SYNTHESIS Volume 3* (eds. Yoshimura H, Kobayashi S): 27-35, University of Tokyo Press, Tokyo
 - (44) 中山照雄(編) (1981) 温熱生理学、理工学社、東京
 - (45) 中山照雄、入来正躬(編) (1987) 新生理科学大系 22-エネルギー代謝・体温調節の生理学-、医学書院、東京
 - (46) Nelms JD, Soper DJ (1962) Cold vasodilatation and cold acclimatization in the hands of British fish filleters. *J Appl Physiol* 17(3): 444-448
 - (47) Okamoto Y (1979) Physiological changes caused by labor in a severe cold environment. *Nichidai-igakuzasshi* 38(1): 11-21 (in Japanese)
 - (48) 冷蔵倉庫業界レポート(1997) 日本冷蔵倉庫協会、東京
 - (49) Pope DP, Croft PR, Pritchard CM, Silman AJ, Macfarlane GJ (1997) Occupational factors related to shoulder pain and disability. *Occup Environ Med* 54: 316-321
 - (50) Province KA, Morton R (1960) Tactile discrimination and skin temperature. *J Appl Physiol* 15: 155-160
 - (51) Riley MW, Cochran DJ (1984) Dexterity performance and reduced ambient temperature. *Hum Factors* 26(2): 207-214
 - (52) 労働省労働基準局補償課編(1997) 新・業務上疾病の範囲と分類、労務行政研究所、東京
 - (53) 斎藤一(1963) 女子の冬季寒冷作業とその影響について. *労働の科学* 18(30): 30-45
 - (54) Sawada S, Yamamoto S (1983) Stability of individual difference of cold-induced vasodilatation response at different room and water temperature and immersion time. *Jpn J Ind Health* 25(2): 116-117
 - (55) Sawada S, Yamamoto S (1984) Applicable conditions for alleviation of subjective and cardiovascular loads in local cold tolerance test. *Industrial Health* 22(3): 163-175
 - (56) 澤田晋一(1994) 寒冷と人体の関係. *労働衛生* 35(12): 20-23
 - (57) Sawada S, Yamamoto S, Haratani T, Nakadate T, Yasukouchi A (1995) Thermal comfort, thermal sensation and associated behavioral and physiological responses in middle-aged workers under indoor moderate thermal condition. *The paths to Productive Aging* (ed. Kumashiro M): 143-149, Taylor & Francis, London
 - (58) 澤田晋一 (1996) 寒冷作業の労働衛生の現状と問題点-寒冷作業基準を中心として-. *産業医学レビュー* 8(4): 193-209
 - (59) Sawada S (1996) Cold-induced vasodilatation response of finger skin blood vessels in older men observed by using a modified local cold tolerance test. *Industrial Health* 34(1): 51-56

- (60) Sawada S (1998) Seasonal characteristics of physiological and subjective thermal loads in Japanese young adult males during acute cold exposure. Problems with cold work (eds. Holmer I, Kuklane K): 161-164, ARBETE OCH HALSA,18, Solna
- (61) Sawada S, Kobayashi T (1998) Thermal comfort, thermal sensation, and associated behavioral and physiological responses during alternately repeated exposure to cold and warm environments. A proceeding of second international conference on Human-Environment system (ICHES'98): 279-282, Yokohama
- (62) 澤田晋一 (1998) 寒冷作業時の身体冷却の諸問題と作業管理対策. 労働衛生 39(11): 8-11
- (63) 澤田晋一 (1998) 寒冷作業の健康問題と作業管理の現状. 安全衛生コンサルタント 48(18): 37-42
- (64) 澤田晋一、荒記俊一 (1998) 寒冷労働の健康問題-作業負担と作業管理に関する最近の知見-. 産業医学ジャーナル 21(5): 96-99
- (65) 澤田晋一 (1998) 防寒服・防寒手袋・作業服. 呼吸用保護具等の性能確保のための試験実施体制の整備に係わる調査検討委員会報告書: 24-28, (社)産業安全技術協会
- (66) 澤田晋一、加藤桂一、久永直見、石井哲也 (1999) わが国の異常温度条件による業務上疾病の最近の動向—凍傷発生事例を中心として—. 日生氣誌 36(3): S57
- (67) Schieffer RE, Kok R, Lewis MI, and Meese GB (1984) Finger skin temperature and manual dexterity: some inter-group differences. Appl Ergonomics 15(2): 135-141
- (68) Sinks T, Toby Mathias TG, Halperin W, Timbrook C, Newman S (1987) Surveillance of work-related cold injuries using workers' compensation claims. J Occup Med 29(6): 504-509
- (69) 塩浦俊雄 (1990) こちら最前線-脱3Kに温度差50°Cの壁-, 日本経済新聞、産業2、12版(9)、8月4日付
- (70) Spurr GB, Hutt BK, Horvath SM (1955) The effects of age on finger temperature responses to local cooling. Am Heart J 50: 551-555
- (71) 高橋英次、若松英吉、加美山茂利、小林悟、渡辺孝男 (1969) 寒冷暴露と腰痛症多発. 日本公衛誌 16(15): 953-959
- (72) Tanaka M (1971) Experimental studies on human reaction to cold -Different Vascular hunting reaction of workers to cold-. Bull Tokyo Med Dent Univ 18: 169-177
- (73) Tanaka M (1971) Experimental studies on human reaction to cold-Differences in the vascular hunting reaction to cold according to sex, season, and environmental temperature-. Bull Tokyo Med Dent Univ 18: 269-280
- (74) 田中正敏、栃原裕、松井住仁、大中忠勝、山崎信也、吉田敬一、八上享司 (1979) 労働衛生学的にみた冷蔵倉庫作業の現状と問題点. 労働科学 55(2): 101-106
- (75) Tanaka M, Tochiara Y, Yamazaki S, Ohnaka T, Yoshida K (1983) Thermal reaction and manual performance during cold exposure while wearing cold-protective clothing. Ergonomics 26(2): 141-149
- (76) 田中正敏 (1992) 物理的因子による健康障害-低温-. 産業医学ジャーナル 15: 39-44
- (77) Tanaka M, Nakamura K, Shimai S, Takahashi H (1993) Work at cold storage. J Therm Biol 18: 647-650
- (78) Teichner WH (1957) Manual dexterity in the cold. J Appl Physiol 11(3): 333-338

- (79) Thomas JR, Ahlers ST, House JF, Schrot J (1989) Repeated exposure to moderate cold impairs matching-to-sample performance. *Aviat Space Environ Med* 60: 1063-1067
- (80) Tochihara Y, Ohnaka T, Tanaka M, Yoshida K (1982) Heart rate and body temperature responses during and after exposure to cold. *J Anthropol Soc Nippon* 90(4): 411-420
- (81) 梶原裕 (1986) 冷凍・冷蔵作業の労働. *労働の科学* 41(12): 16-21
- (82) Tochihara Y, Ohkubo C, Uchiyama I, Komine H, Honda Y, Aoki N, Ishibashi K, Ohno R, Shimozono N, Nakajima H (1990) A survey on work loads of forklift-truck workers in cold storages. *Bull Inst Public Health* 39(2-3): 29-36
- (83) Tochihara Y, Ohnaka T (1995) Effects of repeated exposures to severely cold environments on thermal responses of humans. *Ergonomics* 38(5): 987-995
- (84) Virokannas H (1996) Thermal responses to light, moderate and heavy daily outdoor work in cold weather. *Eur J Appl Physiol* 72: 483-489
- (85) Wagner JA, Horvath SM (1985) Cardiovascular reactions to cold exposures differ with age and gender. *J Appl Physiol* 58(1): 187-192
- (86) 若月俊一 (1963) 農民の「冷え」と「冷え症」. *労働の科学* 18(10): 20-29
- (87) 渡辺明彦 (1981) 寒冷作業の労働衛生 -特に寒冷暴露規制について-. *労働の科学* 36(1): 4-8
- (88) 渡辺明彦 (1995) 軽度な寒冷環境への暴露時間の長さが生理・心理反応に及ぼす影響. *労働科学* 71(3): 101-114
- (89) 渡部真也 (1969) 寒冷の労働に及ぼす影響-主として performance の面から-. *労働衛生工学* 10: 46-51
- (90) Wieslander G, Norback D, Edling C (1996) Local cold exposure of the hands from cryosectioning work in histo-pathological and toxicological laboratories: signs and symptoms of peripheral neuropathy and Raynaud's phenomenon. *Occup Environ Med* 53: 276-280
- (91) 山本宗平 (1994) 労働生理. *産業医活動マニュアル*(高田、野見山編): 132-136、医学書院、東京
- (92) Yoshimura H, Iida T (1950) Studies on the reactivity of skin vessels to extreme cold. Part I. A point test on the resistance against frostbite. *Jpn J Physiol* 1: 147-159
- (93) Yoshimura H, Iida T (1952) Studies on the reactivity of skin vessels to extreme cold. Part II. Factors governing the individual difference of the reactivity, or the resistance against frostbite. *Jpn J Physiol* 2: 177-185
- (94) 全国冷凍工場名簿-冷蔵・製氷・凍結-(1998) 日本冷蔵倉庫協会・日本冷凍事業協会、東京

Table 1-1. Physical characteristics of subjects (n=6)

	Age (year)	Height (m)	Weight (kg)	Ab* (m ²)	Body Fat** (%)
Mean	22. 5	1. 75	66. 6	1. 80	23. 7
SD	0. 8	0. 1	6. 9	0. 09	3. 30

* Body surface area estimated from Fujimoto's equation¹⁴⁾

** Body fat measured by using a body fat meter (AD-6311, A & D)

Table 1-2 Effect of repeated cold-water immersion on five parameters of CIVD response (TFR, TTR, AT, MST5, and MSTA) and the recovery of skin temperature of the immersed finger at the end of each post-immersion rest (Trec) under three ambient temperature conditions: 20, 25, and 30°C

Ambient temperature	CIVD parameter	Repetition of cold-water immersion					
		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
30°C \$	TFR (°C)	4.1±1.62	5.5±1.06	5.5±1.03	4.5±0.83	3.9±1.06	5.4±1.06
	TTR (min)	2.1±0.40	1.8±0.36	1.7±0.38	1.6±0.42	1.9±0.46	2.0±0.62
	AT (°C)	8.5±1.25	7.9±0.66	7.7±0.61	6.9±0.63	6.7±0.98	6.9±0.74
	MST5 (°C)	6.5±1.28	5.8±0.79	5.2±1.03	4.9±0.74	4.4±1.12	5.2±0.75
	MSTA	263±86	298±45	233±60	242±50	202±62	228±55
	Trec (°C)	35.1±0.18	34.9±0.17	34.9±0.19	34.7±0.17	34.6±0.25	33.6±1.16
25°C \$	TFR (°C)	3.0±1.14	5.1±1.03	4.0±1.11	2.5±0.88	4.6±1.40	2.6±0.77
	TTR (min)	2.6±0.44	2.0±0.33	2.0±0.52	2.8±0.76	2.2±0.73	3.1±0.78
	AT (°C)	6.3±1.20	7.8±0.51	5.5±1.11	4.3±1.24	5.5±1.35	5.2±0.98
	MST5 (°C)	4.7±0.99	5.5±0.75	3.9±0.89	3.1±1.04	3.3±1.05	4.1±0.92
	MSTA	214±60	251±42	209±54	123±46	164±60	151±51
	Trec (°C)	34.5±0.21	32.7±1.28	31.1±2.12	30.7±2.38	32.8±0.91	33.3±0.50
20°C \$	TFR (°C)	2.5±0.94	1.8±0.52	1.4±0.32	0.8±0.24	0.8±0.33	0.8±0.48 #
	TTR (min)	2.9±0.55	3.0±0.52	2.9±0.12	4.1±0.45	4.9±0.92	4.7±0.73 #
	AT (°C)	5.5±1.17	2.3±2.41	3.1±0.64	2.7±0.76	1.8±0.50	1.9±0.80
	MST5 (°C)	4.0±0.88	2.9±0.79	2.3±0.52	1.9±0.49	1.4±0.43	1.2±0.48 #
	MSTA	192±46	138±34	87±18	73±65	55±16	53±24 #
	Trec (°C)	31.3±1.33	30.6±1.22	26.3±2.07	27.4±2.26	26.2±2.19	25.6±2.61 #

Values are mean±SE

P<0.01 (Effect of repetition is significant by repeated measures ANOVA)

\$ P<0.01 (Effect of ambient temperature is significant by repeated measures ANOVA)

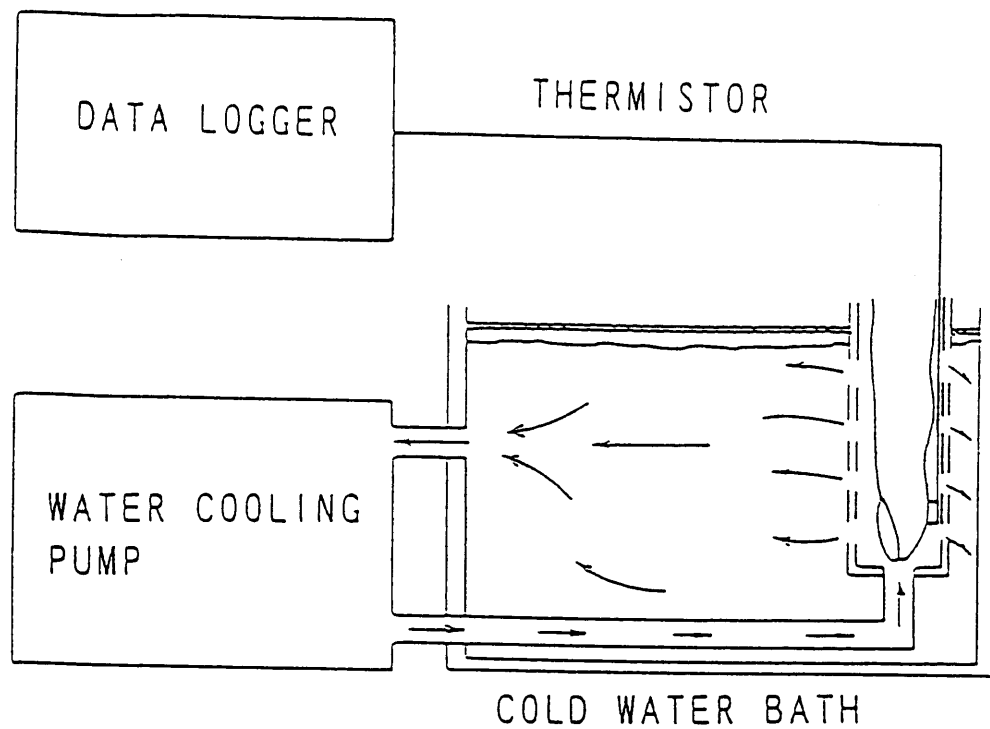


Fig. 1-1 Schematic diagram of the finger cooling method used in the local cooling experiment.

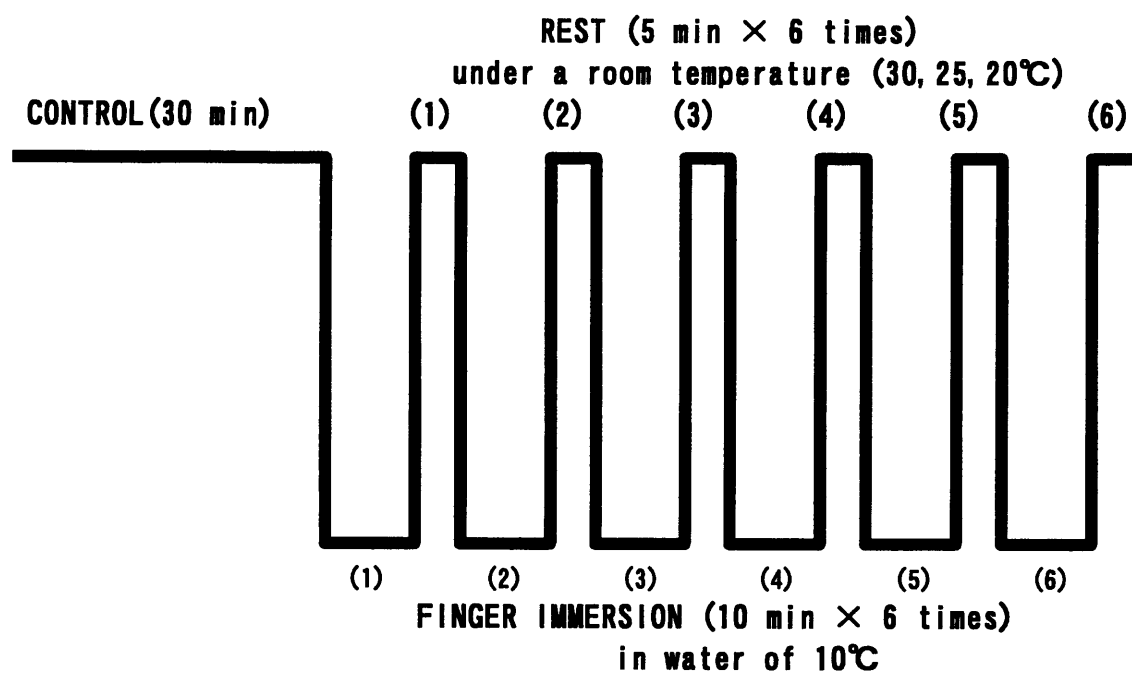


Fig. 1-2 Experimental procedure of repeated finger cooling by cold water immersion used in the local cooling experiment.

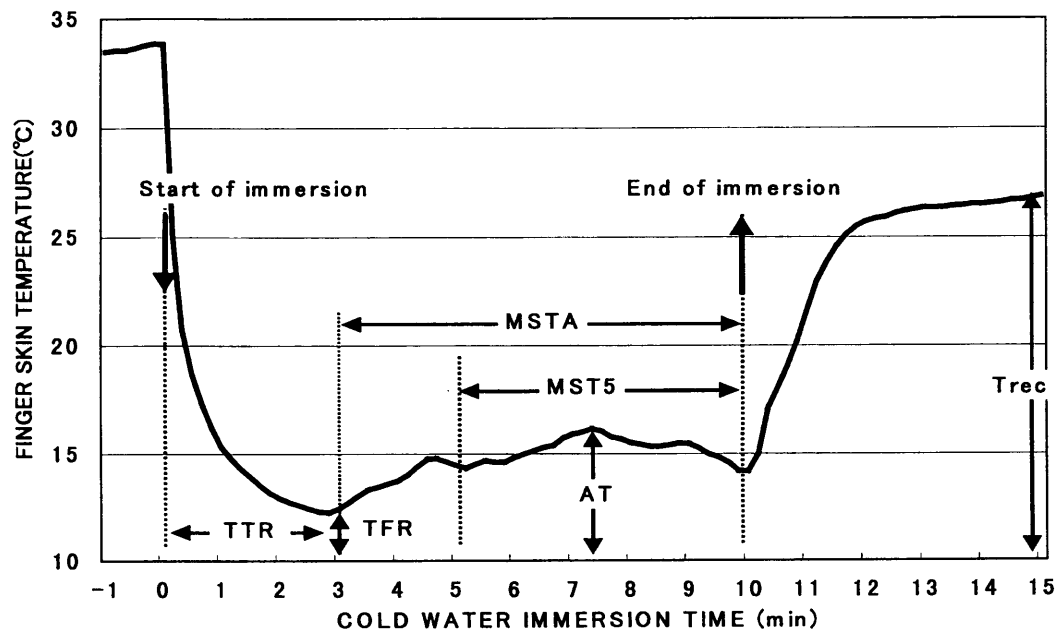


Fig. 1-3 Five parameters for evaluating CIVD reactivity by using a finger skin temperature curve: TFR = Temperature of first rise following the immersion; TTR = Time for first temperature rise following the immersion; MST5 = Mean skin temperature of the finger during the last 5 minutes of immersion; AT = Maximum temperature rise in the CIVD response curve; MSTA = Section area between the temperature curve and base line of 10°C over the period from the onset of temperature rise to the end of immersion. Trec (= finger skin temperature at the end of post-immersion rest) is also included as an index of the rate of recovery of finger skin temperature during the post-immersion rest the in the figure.

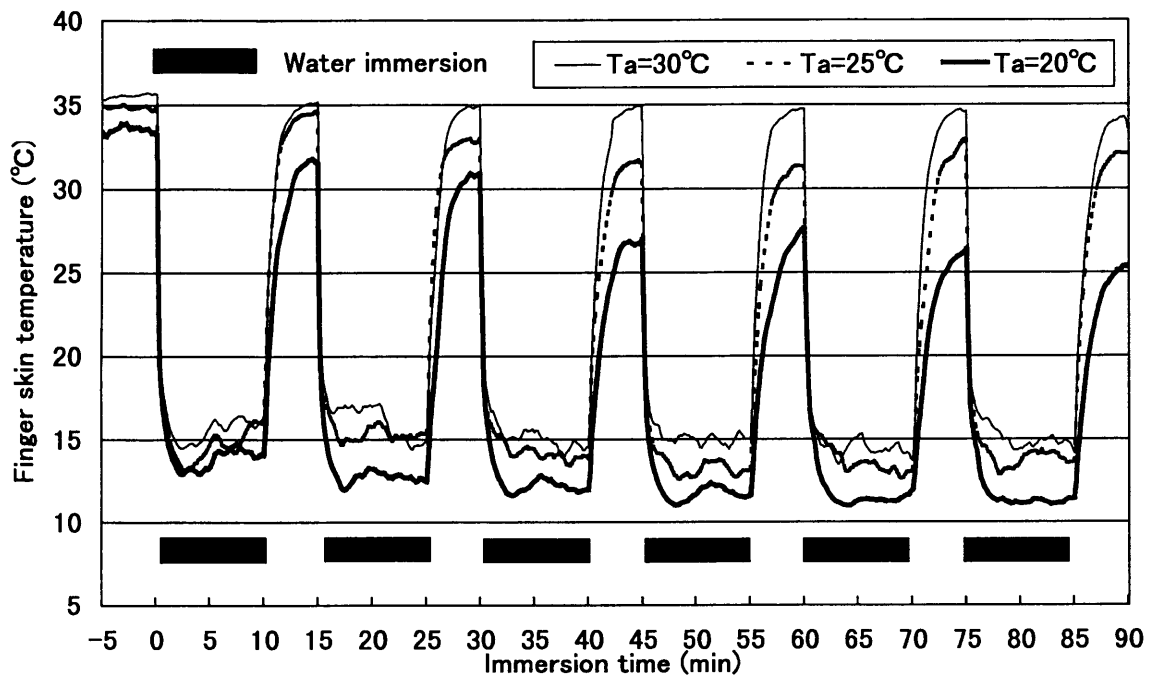


Fig.1-4 CIVD responses during the repeated cold-water immersion under three different room temperature conditions (20°C , 25°C , and 30°C). Each response indicates the mean value from the six subjects.

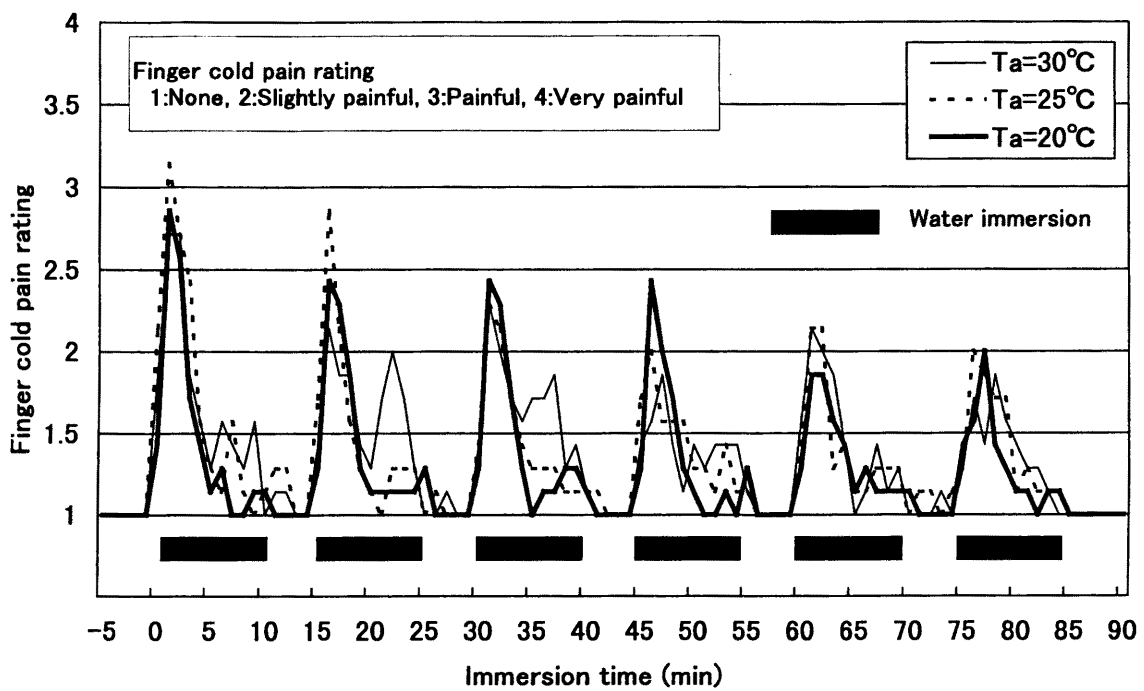


Fig. 1-5 Changes in pain sensation of the immersed finger during repeated cold-water immersion under the three different room temperature conditions (20°C , 25°C , and 30°C). Each response indicates the mean value from the six subjects.

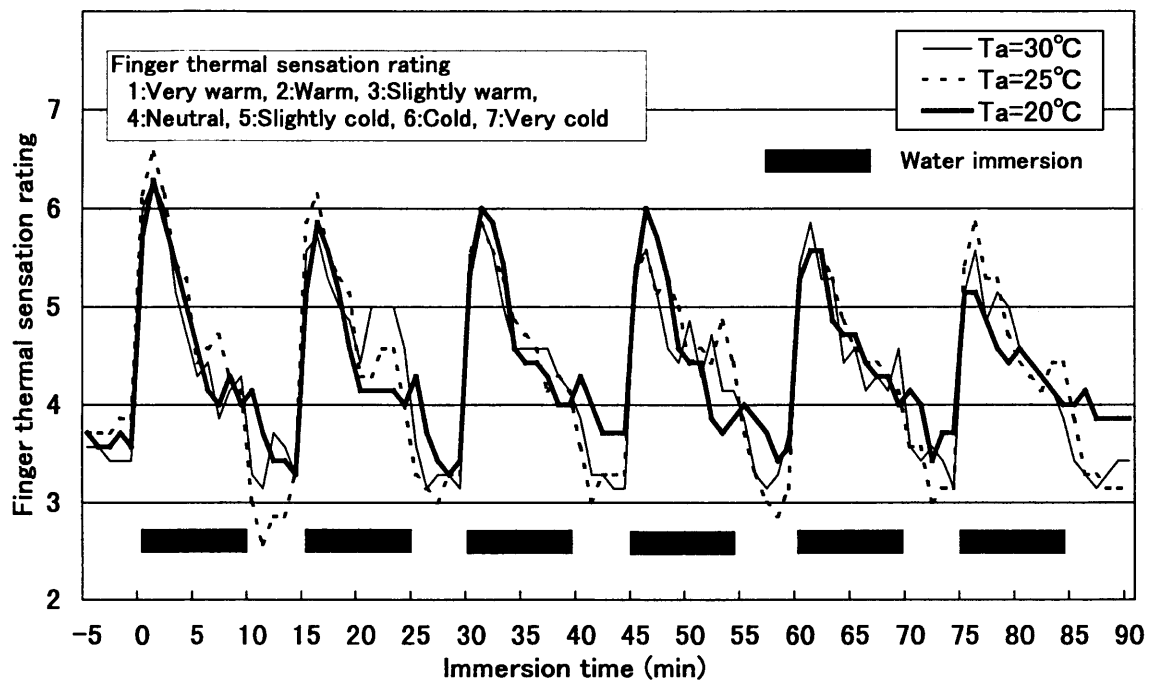


Fig. 1-6 Changes in thermal sensation of the immersed finger during repeated cold-water immersion under the three different room temperature conditions (20°C , 25°C , and 30°C). Each response indicates the mean value from the six subjects.

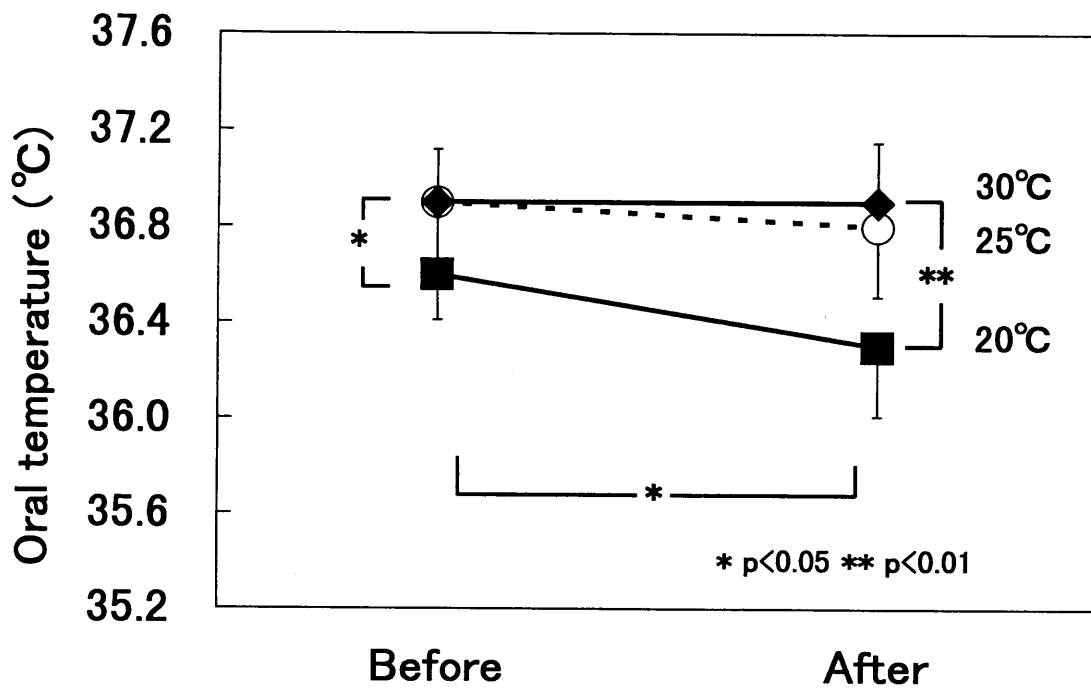


Fig. 1-7 Oral temperature before and after the experiment at the room temperatures of 20°C, 25°C, and 30°C. The figure indicates the mean and SD obtained from the six subjects.

Table 2-1. Physical characteristics of subjects (n=10)

	Age (year)	Height (m)	Weight (kg)	Ab [*] (m ²)	Body Fat ^{**} (%)
Mean	23. 3	1. 72	60. 9	1. 72	22. 0
SD	1. 3	0. 05	6. 2	0. 09	3. 29

* Body surface area estimated from Fujimoto's equation¹⁴⁾

** Body fat measured by using a body fat meter (AD-6311, A & D)

CONTROL EXPERIMENT

PRE-EXPOSURE(60min)

WARM REST (10 min × 6 times) at 30°C

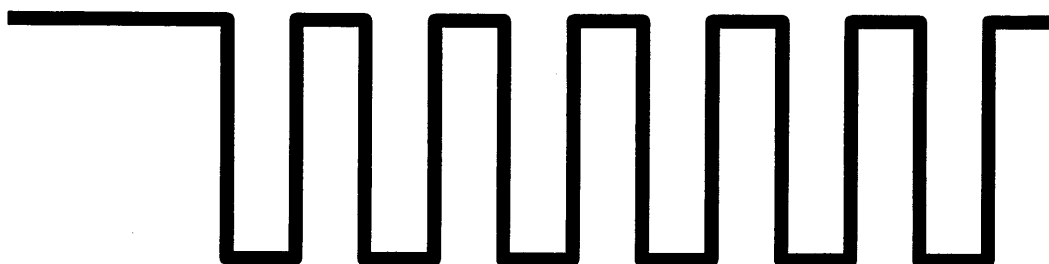


WARM EXPOSURE (10min × 6 times) at 28°C

COLD EXPERIMENT

PRE-EXPOSURE(60min)

WARM REST (10 min × 6 times) at 30°C



COLD EXPOSURE (10min × 6 times) at 10°C

Fig. 2-1 Experimental procedure of repeated whole-body cooling used in the whole-body cooling experiment.

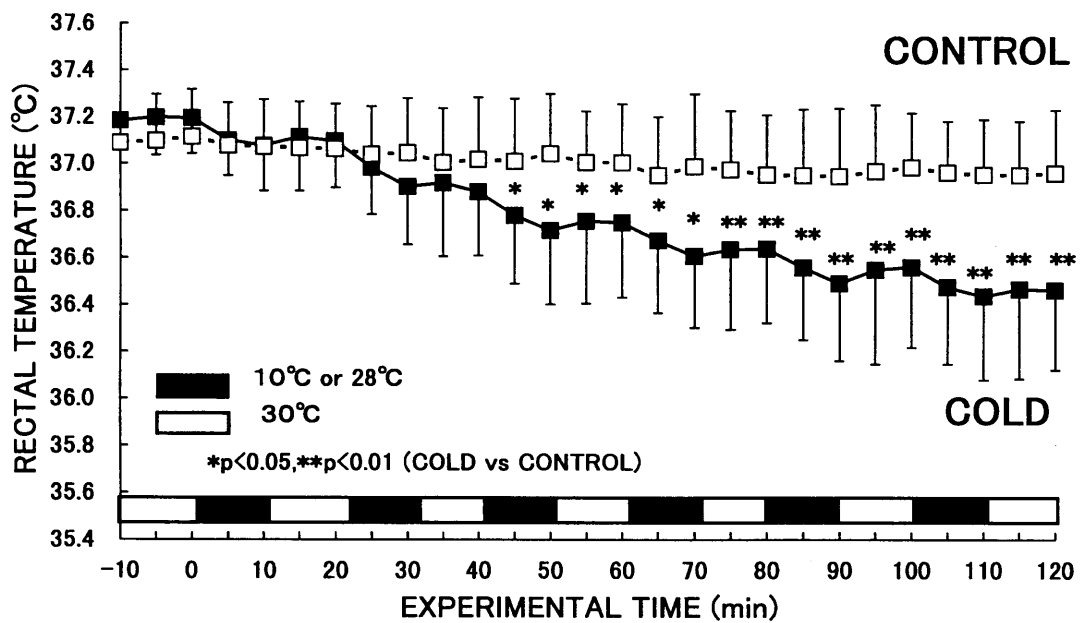
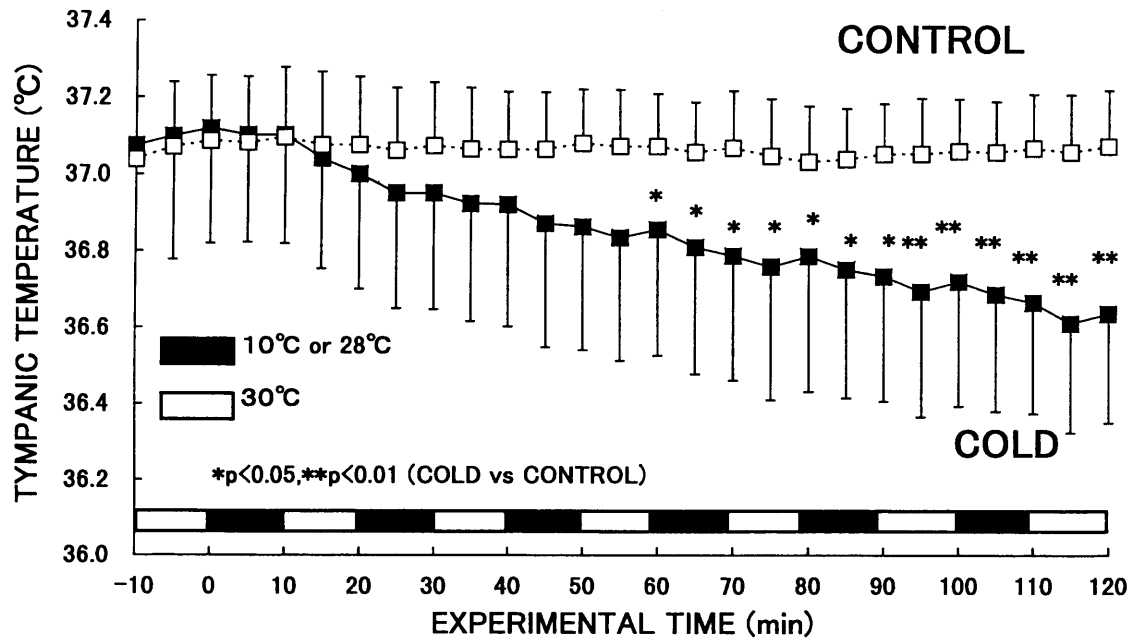


Fig.2-2 Changes in body core temperatures (tympanic and rectal temperatures) during repeated exposures to cold and warm environments. The figure indicates the mean and SD obtained from the ten subjects.

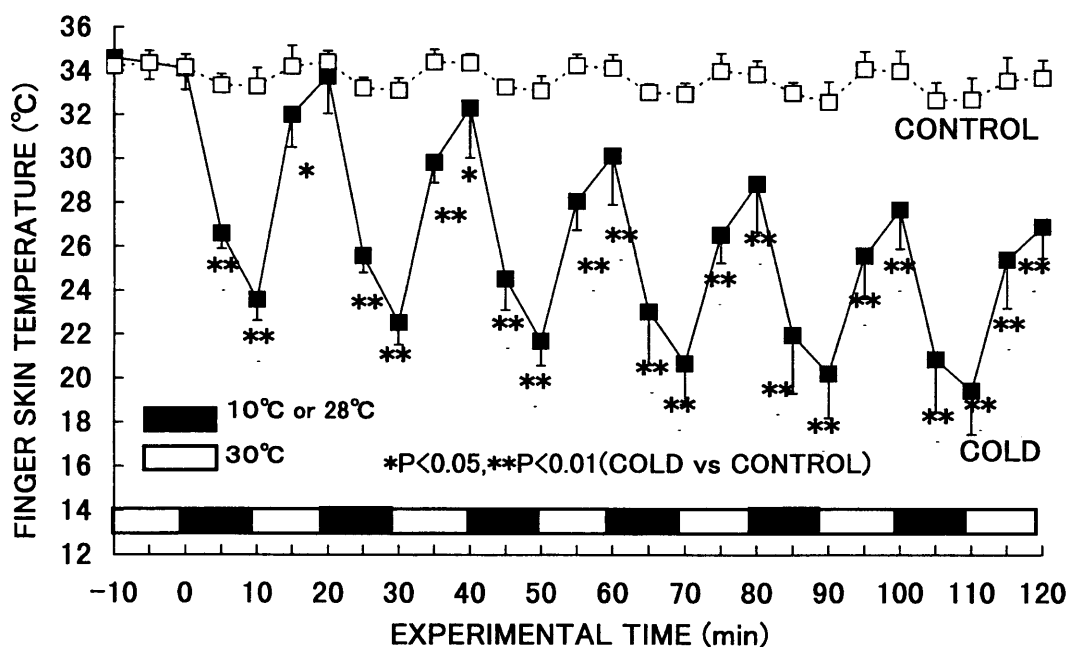
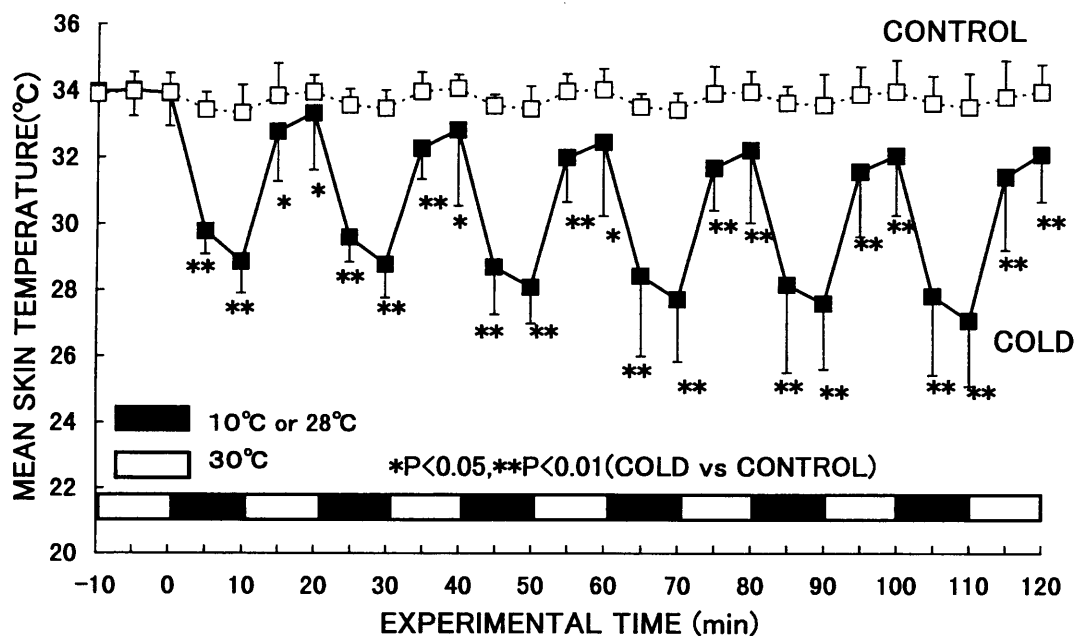


Fig.2-3 Changes in skin surface temperatures (mean skin and finger temperatures) during repeated exposures to cold and warm environments. The figure indicates the mean and SD obtained from the ten subjects.

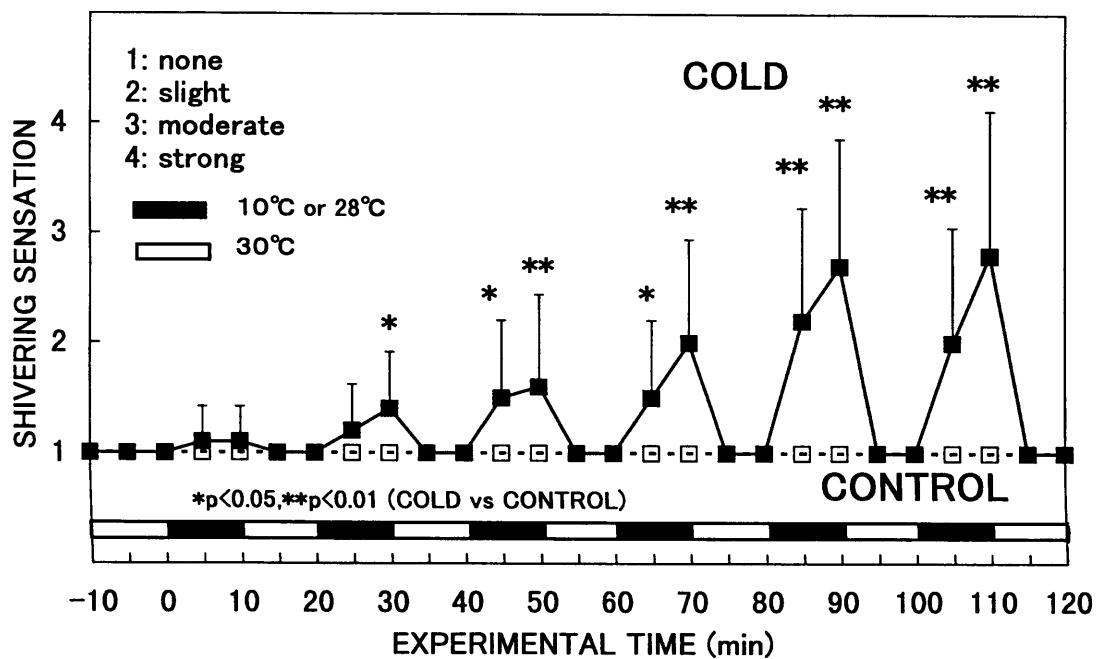
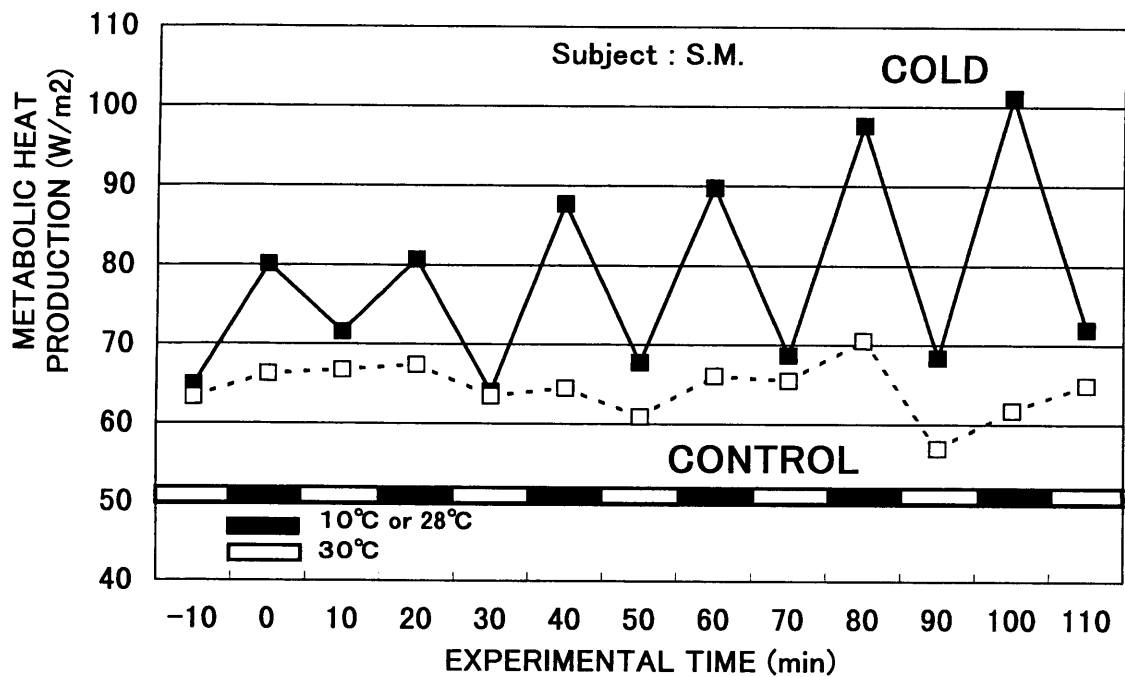


Fig.2-4 Changes in thermoregulatory physiological responses (metabolic heat production and cold-induced shivering sensation) during repeated exposures to cold and warm environments. The upper and lower figure indicates the metabolic response of one subject and the mean and SD from the ten subjects, respectively.

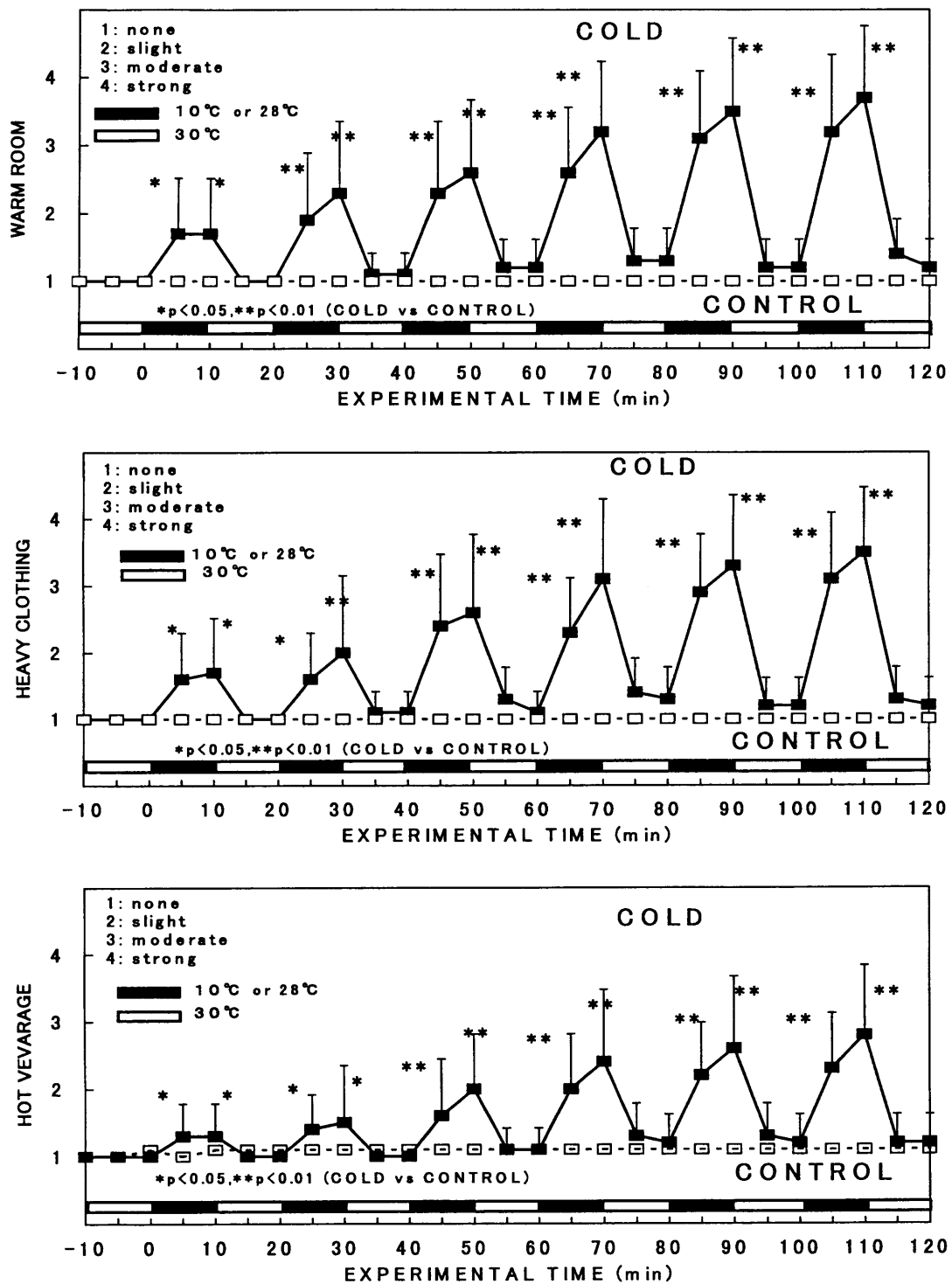


Fig. 2-5 Changes in thermoregulatory behavioral responses (seeking for warm room, heavy clothes, and hot beverage) during repeated exposures to cold and warm environments. The figure indicates the mean and SD obtained from the ten subjects.

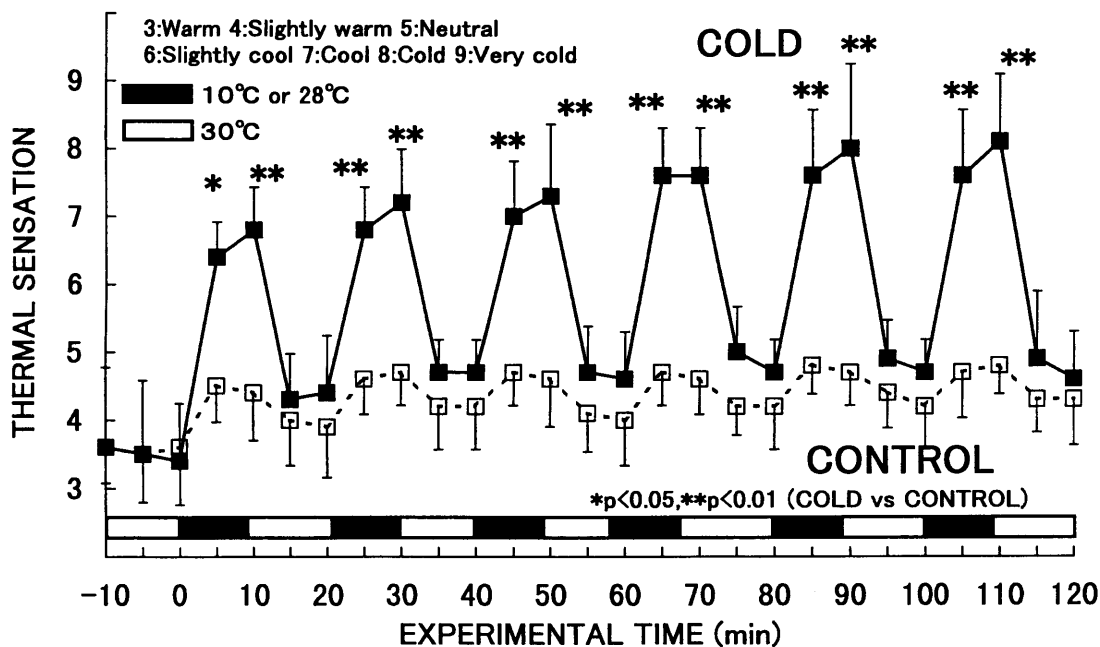
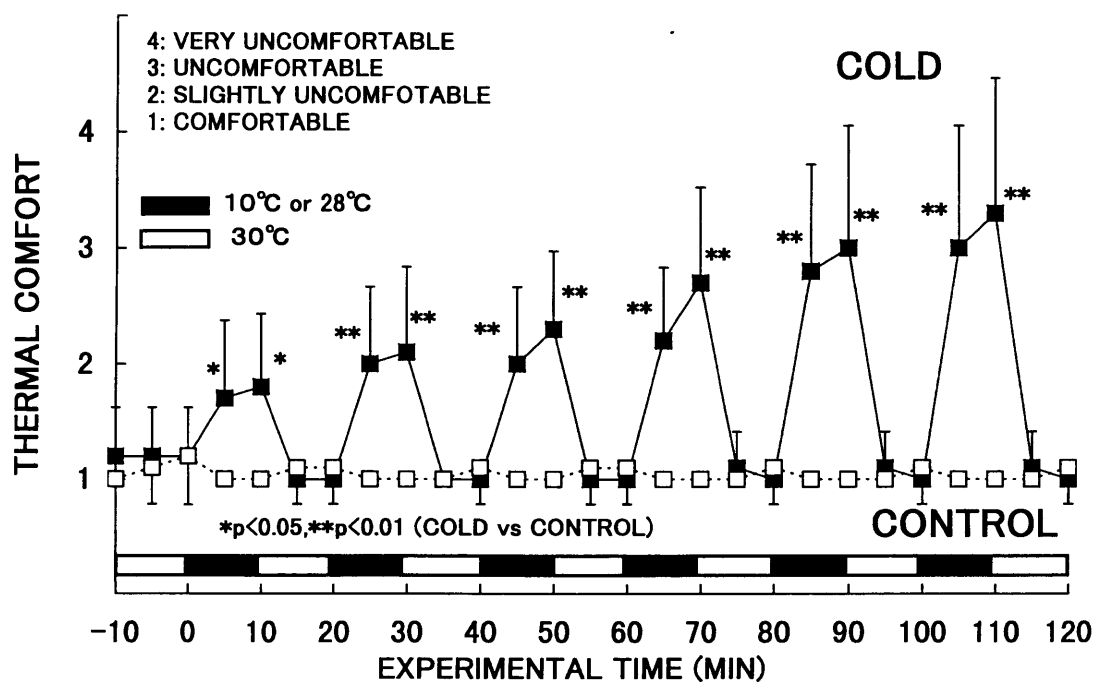


Fig.2-6 Changes in subjective thermal responses (thermal comfort and thermal sensations) during repeated exposures to cold and warm environments. The figure indicates the mean and SD obtained from the ten subjects.

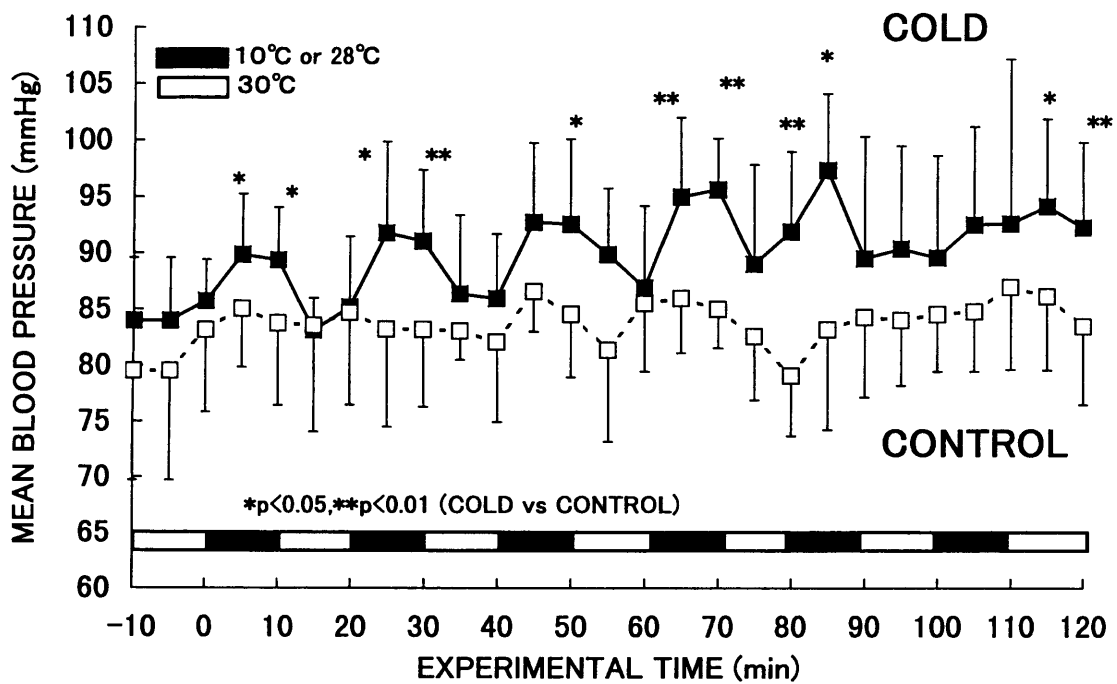


Fig.2-7 Changes in cardiovascular loads (mean blood pressure) during repeated exposures to cold and warm environments. The figure indicates the mean and SD obtained from the ten subjects.

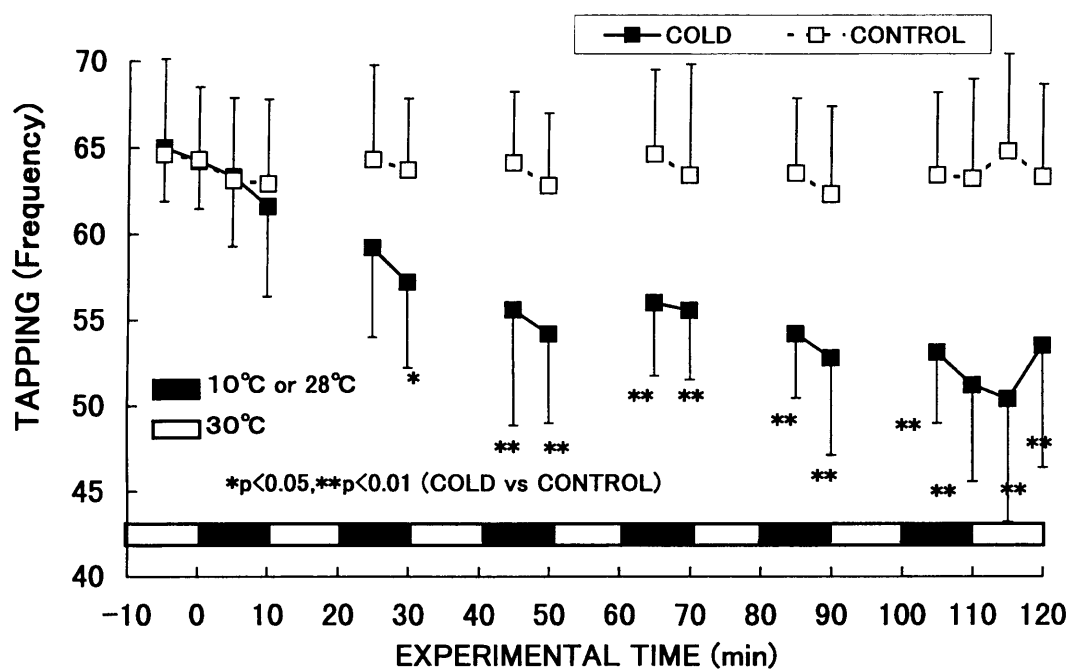


Fig. 2-8 Changes in manual performance (finger tapping) during repeated exposures to cold and warm environments. The figure indicates the mean and SD obtained from the ten subjects.

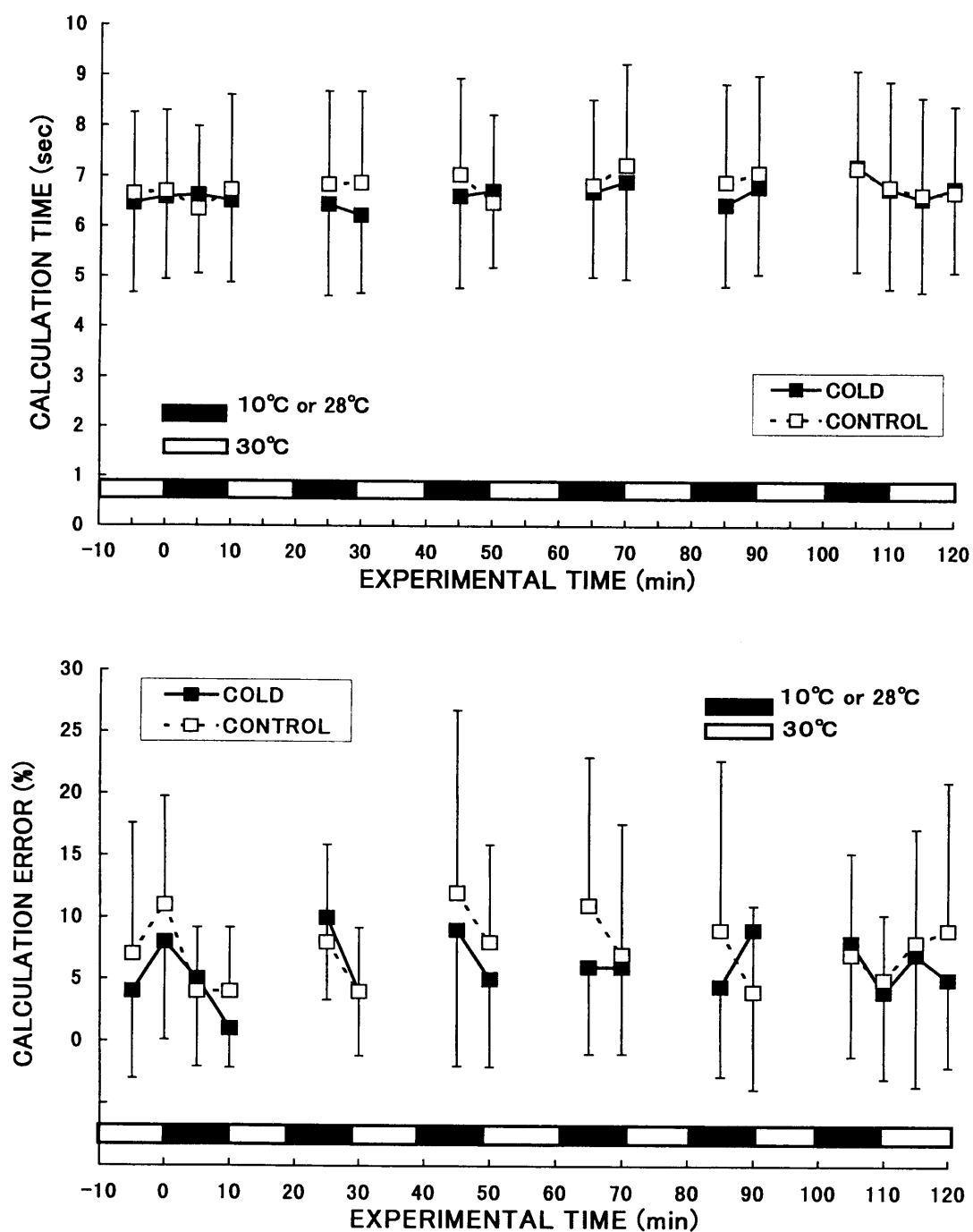


Fig. 2-9 Changes in mental performance (mental arithmetic) during repeated exposures to cold and warm environments. The figure indicates the mean and SD obtained from the ten subjects.

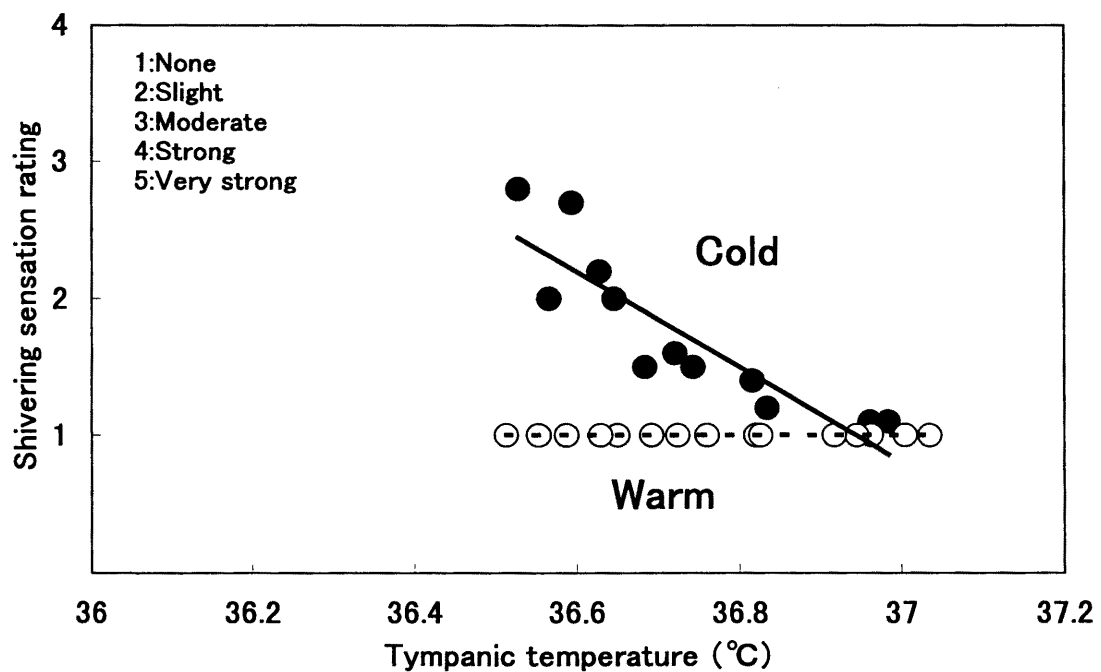
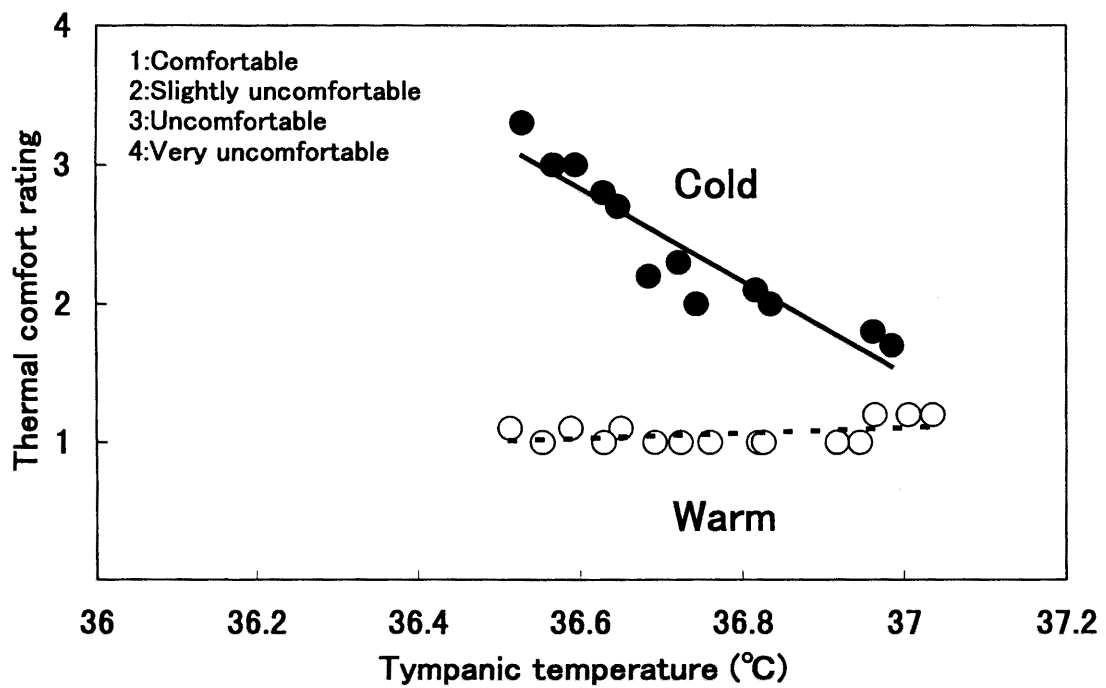


Fig. 2-10 Relationship between tympanic temperature and subjective sensation (thermal discomfort and cold-shivering) during repeated exposures to cold and warm environments. The mean values from the ten subjects are plotted in the figure.

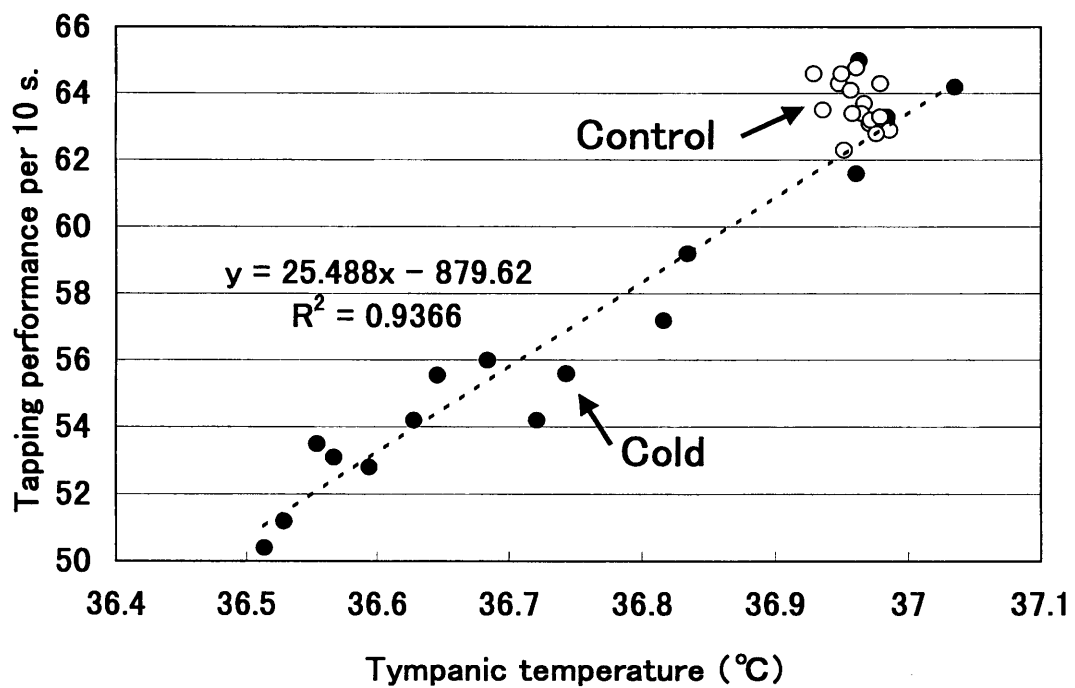
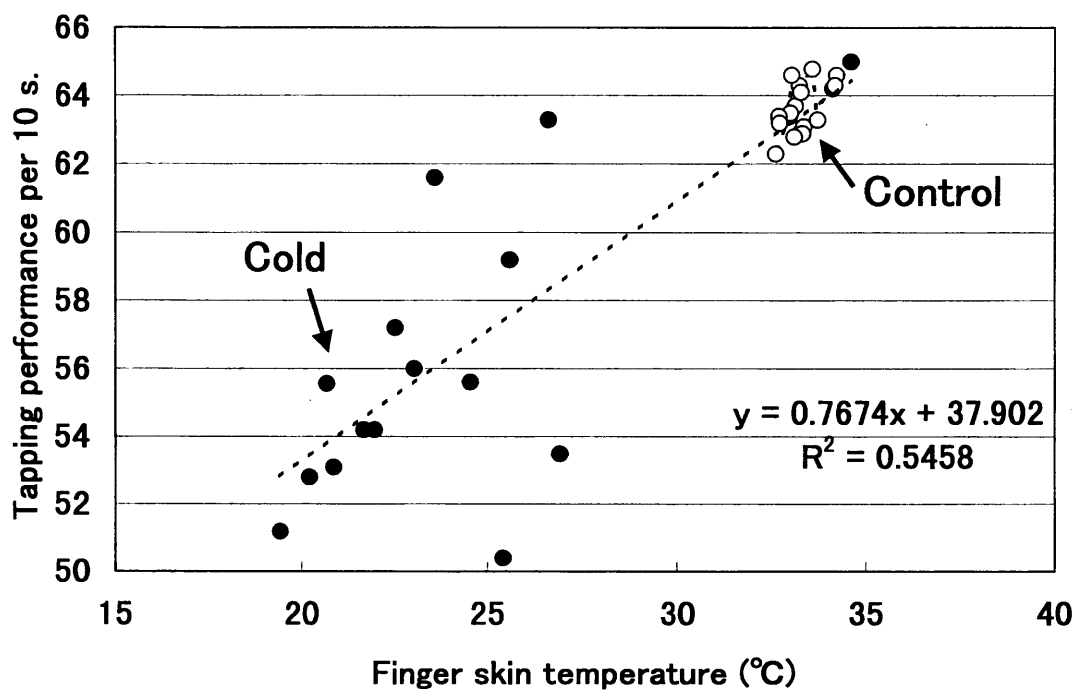


Fig. 2-11 Relationship between tympanic and finger temperatures and finger tapping performance during repeated exposures to cold and warm environments. The mean values from the ten subjects are plotted in the figure.