

[別紙1]

## 論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 澤田晋一

### 1 はじめに

近年、食品低温流通機構の発展により、冷凍・冷蔵倉庫作業や生鮮食料品の加工・包装・流通産業に代表されるように、年間を通して常時厳しい寒冷ストレスに曝される人工寒冷作業環境が増加している。その寒冷曝露形態は、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、作業者本人の気づかないうちに凍傷に被災したり、さまざまな健康問題が発生している。

そこで本研究は、休憩をはさんで局所性および全身性に断続的に寒冷曝露を繰り返した時に誘発される耐寒反応と生体負担の特徴と問題点を明らかにするために、局所冷却実験と全身冷却実験を実施した。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明らかにすることを目的とした。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明らかにすること、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明らかにすることを目的とした。

得られた知見にもとづいて、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防寒対策を講じたり作業-休憩スケジュールを設定することの信頼性と問題点を考察した。

## II 対象と方法

### 1. 局所冷却実験

健康な若年成人男性 6 名 (平均年齢  $22.5 \pm 0.8$  歳) を対象に、繰り返し手指冷水浸漬実験を、夏季 (8 月~9 月上旬) に実施した。実験時の着衣は、Tシャツ、ショートパンツ、靴下に統一し、測定時刻は、午前 10 時から 12 時の間とした。被験者は、午前 10 時に人工気象室に入り、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、左示指を  $10^{\circ}\text{C}$  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 分間の休憩をはさんで 6 回繰り返した。冷水浸漬時の室温は、 $30^{\circ}\text{C}$ 、 $25^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$  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。測定項目は、CIVD 反応の評価のために冷水浸漬指の掌側皮膚温、深部体温の指標として舌下温、主観的反応として冷水浸漬指の寒冷痛と温冷感および全身温冷感と快不快感であった。

### 2. 全身冷却実験

健康な若年成人男性 10 名 (平均年齢  $23.3 \pm 1.3$  歳) を対象に、8 月から 10 月上旬に、ショートパンツのみの着衣条件で、室温  $30^{\circ}\text{C}$  (相対湿度 50%) の温暖室に 7 回、室温  $10^{\circ}\text{C}$  (相対湿度 50%) の寒冷室に 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)。また、 $10^{\circ}\text{C}$  の寒冷実験のコントロールとして、 $28^{\circ}\text{C}$  の温暖暴露実験を、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 (対照実験)。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、精神作業として暗算 (一桁の数字の 10 個加算を 10 回) を、手指作業としてタッピング (右第 2 指で 10 秒間) を最大努力で行わせた。測定項目は、深部体温の指標として直腸温と鼓膜温を、体表面温の指標として Hardy & Dubois の 12 点法による平均皮膚温と手指皮膚温を測定した。自律性体温調節反応の指標として代謝熱産生量と寒冷ふるえ自覚感、行動性体温調節反応の指標として温熱追求行動性 (室温上昇、厚着、温かい飲物の希望の強さ)、循環系負担の指標として血圧と心拍数、主観的負担の指標として温熱的快不快感と全身温冷感などを測定した。

## III 結果

### 1. 局所冷却実験

(1) 舌下温が維持される室温条件 ( $25^{\circ}\text{C}$ 、 $30^{\circ}\text{C}$ ) では、手指を繰り返し冷水浸漬しても、CIVD 反応からみた凍傷抵抗反応は減弱せず高い水準で安定していた。休憩時の浸漬手指の皮膚温回復も有意な遅延を示さなかった。

(2) 舌下温が低下する室温条件（20℃）では、手指の繰り返し冷水浸漬は、凍傷抵抗反応を有意に減弱させた。休憩時における浸漬手指の皮膚温の回復も有意に遅延し続けた。

(3) 冷水浸漬時の手指の寒冷痛は冷水浸漬を繰り返すことで漸減し、かつ浸漬後の休憩時には完全に消失した。冷水浸漬時の手指の寒冷感覚も冷水浸漬を繰り返すことで漸減し、かつ浸漬後の休憩時には完全に消失して、温暖感覚あるいは温熱中立感覚が生じた。これらの手指の主観感覚には室温間で差がなかった。

## 2. 全身冷却実験

(1) 直腸温や鼓膜温などの深部体温は、温暖休憩条件をはさんでも、寒冷曝露を繰り返している間に有意に低下し続けた。平均皮膚温と手指皮膚温などの体表面温は、寒冷曝露時に低下し温暖休憩時に上昇することを繰り返しながら漸減する傾向を示した。

(2) 自律性体温調節反応の指標としての寒冷ふるえの自覚感は、寒冷曝露を繰り返す毎に有意に増強したが、温暖休憩室では完全に消失した。代謝熱産生反応は、寒冷ふるえの自覚感に対応して、寒冷曝露時に増加し温暖室で減少する例もみられたが、個人差が大きく、統計的に有意な寒冷影響はみられなかった。行動性体温調節反応の指標である室温上昇、厚着、温かい飲物の希望の強さも、寒冷曝露時を繰り返す毎に増強したが、温暖室ではほとんど消失した。

(3) 温熱的不快感と全身寒冷感覚は、寒冷曝露を繰り返す毎に増強したが、温暖室では完全に消失して、快適感覚と温暖感覚が発現した。

(4) 血圧は、寒冷曝露時に上昇し、温暖室で低下したが、寒冷曝露と温暖曝露を交互に繰り返すうちに温暖室での血圧水準も有意に増加し、経時的に循環系の負担が増大する傾向が認められた。

(5) タッピング回数からみた手指作業パフォーマンスは、寒冷曝露初期から著明に低下し続けた。タッピング回数の低下には、手指皮膚温よりも鼓膜温などの深部体温の低下が強く関連していた。暗算からみた精神作業パフォーマンスは、計算時間も誤答率についても、断続的寒冷曝露による有意な影響を認めなかった。

## IV 考察

### 1. 局所冷却による耐寒反応と主観的負担

深部体温が低下するような温度中性域よりやや低い軽度な寒冷環境条件で手指冷却を繰り返すと、CIVD 反応からみた凍傷抵抗反応が減弱し続け、かつ休憩時の皮膚温回復も遅延し続けることが明らかになった。にもかかわらず手指の寒冷痛と寒冷感覚などの主観的負担は冷水浸漬を繰り返す毎に減少し続け、休憩時には完全に消失した。これは、寒冷痛や寒冷感覚などの主観的知覚が、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自覚的徴候として必ずしも信頼できる指標でないことを示唆する。

寒冷作業現場で最近報告されている凍傷の労災事例を分析すると、防寒具を着用していても長時間作業が繰り返されることによって本人の気づかぬうちに発症する例が多かった。本実験結果は、このような作業現場での凍傷発生メカニズムに生理学的裏付けを与え

ると同時に、作業者の知覚や主観的判断に依存しない身体末梢部の防寒対策の必要性を示唆する。

## 2. 全身冷却による耐寒反応と生体負担

温暖休憩条件をはさんでも断続的に寒冷曝露を繰り返すことによって深部体温は低下し続け、循環系負担の増大と手指作業パフォーマンスの低下が見られる場合のあることが明らかになった。また、手指作業パフォーマンスの低下には、深部体温が強い影響を及ぼす可能性が示唆された。

寒冷曝露時には、全身耐寒反応として深部体温低下の進行を打ち消す方向に行動性・自律性体温調節反応が発現し、温熱的不快感や寒冷感覚も増強したが、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一連の体温調節反応と寒冷不快感がほとんど完全に消失し、快適感覚と温暖感覚が発現した。この現象は、体温調節の温度情報統合様式における相乗統合モデルで説明できると考えられた。

温暖休憩条件をはさんで断続的に寒冷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、手指作業能力の減退を警告するための鋭敏な指標になると考えられた。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ことが示唆された。

## 3. 結論

(1) 軽度な寒冷環境下で休憩を挿んで断続的に手指の冷水浸漬を繰り返すと、局所耐寒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ならない。

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、気づかぬうちに深部体温の低下が進行して生体負担が増大したり、身体末梢部の過冷却や凍傷発生のリスクが増大する場合があることを強く示唆する。

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。