

低温環境における作業性評価

中島 康博, 前田 大輔, 桑野 晃希, 吉成 哲,
地家 崇規*, 前田 享史*, 横山真太郎*

Evaluation of Dexterity in a Low-Temperature Environment

Yasuhiro NAKAJIMA, Daisuke MAEDA, Kohki KUWANO, Satoshi YOSHINARI,
Takanori CHIKE*, Takahumi MAEDA*, Shintaro YOKOYAMA*

抄 録

低温環境下における作業では、作業者の身体や手指の冷却により作業性が低下し、ミスや重大事故を誘発しやすい。このような作業現場では、効率的な身体保温手段により作業性を維持し、かつストレスを軽減することが求められる。そこで本研究では、低温環境下における作業性を体温、筋電位、パーデュープゲボードにより評価した。5℃に設定された室内に7人の被験者を配置して夏季と冬季に計測を行い、手指巧緻性と体温、筋電位との関係を解析した。さらに、被験者の腹部・足部を局所的に加温した際の手指巧緻性を計測した。その結果、身体局所加温により作業性低下を抑制するとともに、筋機能ならびに皮膚温について低下抑制が確認された。

キーワード：作業性、手指巧緻性、局所加温、低温環境、体温、筋電位

Abstract

Working in low temperature environment causes workability to be decreased because the workers' body and fingers are chilled. The low workability often be cause of an error and lead to a serious accident. An effective warming way to keep the workability and to decrease the stress is needed. This study describes to esitmate and to analyze the workabilty in a low temperature environmet with body temperature, electromyography (EMG), and the Perdue pegboard finger dexterity test. Seven subjects were in a room cooled at the 5℃ temperature and were measured on summer and winter. And the relationship between the finger dexterity, the body temperature and the EMG were analyzed. Moreover, the difference of the finger dexterity was measured when subjects' abdomen and soles were locally heated. The results is that the local heating has suppressed the finger dexterity decreasing, additionally has kepted the muscle function and the skin temperature.

KEY-WORDS : workability, finger dexterity, local warming, body temprerature, electromyography

1. はじめに

農産物や水産物など一次産品の中でも、魚などの生鮮食品を取り扱う加工現場では、食品の鮮度を保つために低温に保った室内で作業を行うことが多い。作業者は、冷温の室内に長時間滞在して、魚さばきなど手指の巧緻性を要求される作業を行う(図1)。作業者は一般に保温性の高い手袋や靴を装着したり、輻射式スポット暖房などを使用したりして防寒に

努めている。それでも、長時間の作業中には手指や足部が冷えるといった作業者の訴えが多く、心身ともに高ストレス状態での作業を強いられている。

巧緻性を要求される作業では、指や手関節など遠位関節を細かく動かして精密な上肢動作を行うが、身体が冷却されると皮膚感覚が鈍くなり、手指の動きが鈍化する。また、防寒のために手袋を何重にもはめることで、手指の感覚や運動が妨げられ、巧緻性が低下する場合もある。これらの要因によ

事業名：経常研究

課題名：低温環境におけるストレスおよび作業性評価技術

* 北海道大学

* Hokkaido University



図1 低温環境下での鮮魚加工作業（室内気温3℃）

り作業性が低下して作業ミスが起こりやすくなり、生産効率が低下し、最悪の場合事故につながる可能性がある。低温環境における作業性を維持向上し、かつストレスを軽減する効果的な暖房・保温方法が求められている。

そこで本研究では、低温環境における作業性を評価するとともに、作業性を維持向上する局所加温・保温方法について検討する。人工気候室により気温5℃の低温環境を再現し、被験者を90分間寒冷暴露したときの手指巧緻性を、パーデュールペグボードを用いて計測する。同時に身体各所の体温及び上肢筋の表面筋電位を計測し、手指巧緻性との関連について解析する。さらに、手指の作業性を妨げない部位として腹部・足底部を局所的に加温したときの手指巧緻性等を計測比較することで、作業性向上に効果的な加温方法を検討する。

表1 被験者の身体測定値

年齢(year)	22.4 ± 0.8
身長(cm)	172.2 ± 4.9
体重(kg)	60.6 ± 9.2
体脂肪率(%)	13.6 ± 3.9

表2 衣服の重量とclo値

	重量(kg)	clo 値
長袖 Y シャツ	0.20	0.230
ズボン	0.44	0.180
上着	0.50	0.266
靴下	0.06	0.011
肌着	0.12	0.094
パンツ	0.08	0.047
合計	1.40	0.828

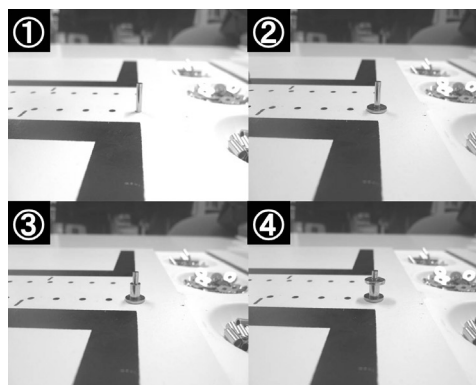


図2 パーデュールペグボード試験
(上、テスト風景、下：アセンブリ試験の工程)

アセンブリ作業では、下図のように、片手でピンを穴に挿し、ワッシャー→カラー→ワッシャーと左右の手を交互に用いて組立作業を行うことをくり返す。ピン立て作業は、ピンを穴に挿すのみの作業をくり返す。

2. 方法

2.1 実験概要

被験者を、室温23℃の前室において30分間座位姿勢で安静にし、その後室温5℃に制御した冷室に移動させ、同じく座位安静状態で90分間の寒冷暴露を行った。

被験者は健康な成年男性7名とした。被験者の年齢、身長、体重、体脂肪率を表1に示す。本実験では、全ての被験者に同一種類の作業着上下、Tシャツ、パンツ、長袖ワイシャツ、靴下を着用させ、着衣量を統一した。着衣の重量とclo値を表2に示す。cloとは衣服の熱抵抗を表す単位で、湿度50%、風速0.1m/s、気温21.2℃の大气中で、椅子に腰かけて安静にしている白人標準男子（産熱量 50kcal/m²h）の被服者が平均皮膚温33℃の快適な状態を継続するのに必要な被服の熱絶縁値が、1 cloである¹⁾。本実験におけるclo値は表2の通り0.828とした。

低温暴露中に、表面皮膚温12点（前額、前腕、手背、手指、背、腹、大腿前部、大腿後部、下腿前部、下腿後部、足背、踵）、核心温（直腸）を、ポータブル型サーミスタ用ロガーにより5秒間隔で測定した。体温は、冷室入室直前を基準値として、その時点からの低下量を算出した。



図3 足部加温装置

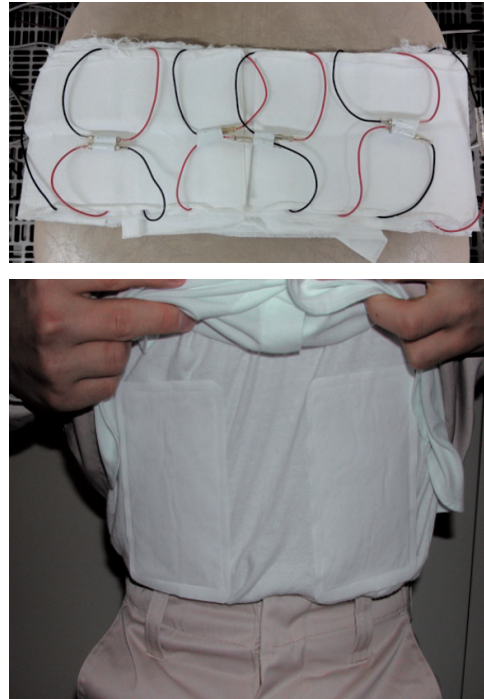


図4 腹部加温装置

パーデューベグボードを用いた手指巧緻性試験を低温暴露直前と90分後にそれぞれ実施した(図2)。パーデューベグボードとは、作業療法に用いる、上肢および手指の巧緻性の試験装置で、30秒間のピン立て作業と1分間の組み立て作業(アセンブリ)1セットにより評価を行う。ピン立て作業は、規定時間内にボード上に空いた穴にピンを立てる本数を計測するもので、右手、左手、両手でのピン立てをそれぞれ1セットずつ行い、その合計をスコアとする。アセンブリとはピン1本、カラー1個とワッシャ2枚の部品を規定の構成に組み立てるもので、組み立てた部品数をスコアとするものである(図2下)。パーデューベグボード試験は、冷室入室直前のスコアを100%として、成績の低下率を算出した。

パーデューベグボード試験と同時に、上腕二頭筋(上腕部)、腕橈骨筋(前腕部)、母指内転筋(手部)の3カ所の筋について等尺性の最大随意収縮を行わせ、その時の表面筋電位を測定した。筋電位は高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform; FFT)により周波数解析を行い、そのときの平均パワー周波数(Mean Power Frequency; MPF)を算出した。一般的にMPFは筋疲労・筋冷却が進むと低下するということが知られており、筋冷却の指標となるとともに、筋活動による運動の精緻さの指標となる。MPFは、冷室入室前を100%として、周波数の低下率を算出した。

2.2 加温部位と計測時期

本実験では、身体への加温が作業性や体温等に及ぼす影響を調べるため、被験者の身体を局所的に加温した。同一被験者に対し、①加温なし、②足底部加温、③腹部加温の3条件

についてそれぞれ実験を行った。足部加温装置を図3に、腹部加温装置を図4に示す。加温装置はペルチェ素子で構成され、人体との接触部が38℃となるように調節して、被験者を低温暴露開始から終了まで加温した。

また、人体の生理的反応の季節差について考慮するため、同一被験者を夏季(7月下旬)、冬季(11月下旬)それぞれについて測定し、結果を比較した。

3. 結果

3.1 作業性試験

冬季と夏季における作業性試験の結果を図5に示す。図は、前室における成績を100%とした場合の成績低下率で表した。

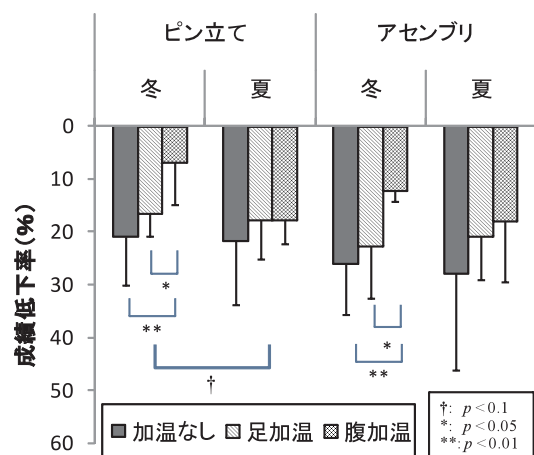


図5 作業性試験結果

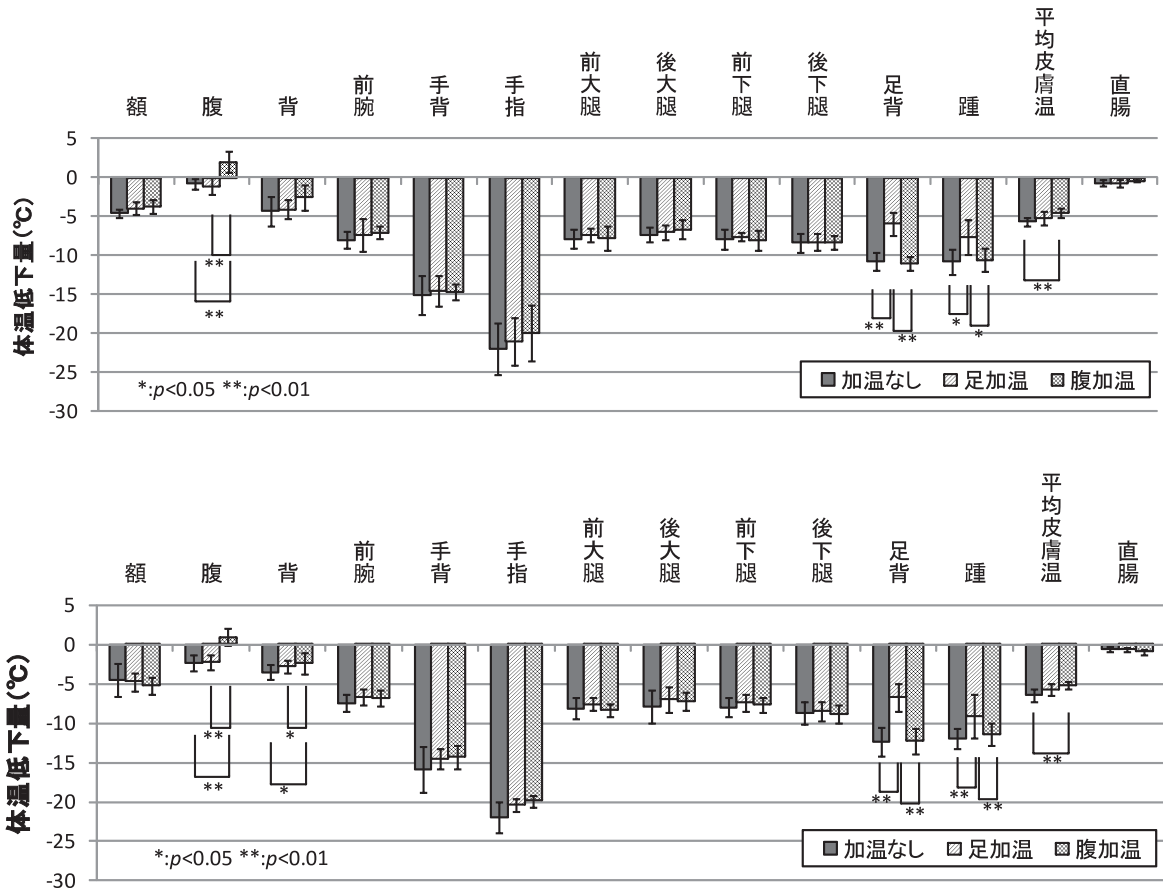


図6 寒冷暴露による体温低下量（上：冬季，下：夏季）

ピン立て作業については、加温なしの場合、冬季・夏季とも21%～22%、アセンブリの場合は26～28%成績が低下した。分散分析およびTukey検定を行った結果、ピン立て作業においては冬季と夏季において成績低下率に有意な差の傾向が見られた。(p<0.1)。冬季において、腹部加温条件が加温なし条件に対して14%の有意な成績向上が (p<0.01)、足部加温条件に対し10%の有意な成績向上が見られた (p<0.05)。

アセンブリについては、腹部加温条件が加温なしに対し14% (p<0.01)、足部加温に対し10% (p<0.05) の成績向上が見られた。夏季については、加温条件による有意差は現れなかった。

3.2 体温

冬季と夏季における、前室時と90分間の寒冷暴露後の体温の変化量を図6に、直腸温の変化量を図7に示す。腹部・足部加温条件では、加温部位付近において、他条件との間に有意な温度上昇が見られた。平均皮膚温においては、腹部加温条件で加温なし条件との間に有意差が見られた。

直腸温については、腹部加温により体温低下抑制が現れると予想されたが、同一季節内において有意差を得られなかった。しかし、図7に示すように、夏季と冬季の比較において、夏季では腹部加温により直腸温が逆に低下する傾向が現れた(0.6° C, p<0.1)。図8に、腹部加温条件における寒冷暴露中の直腸温の時系列変化を示す。冬季においては、直腸温低

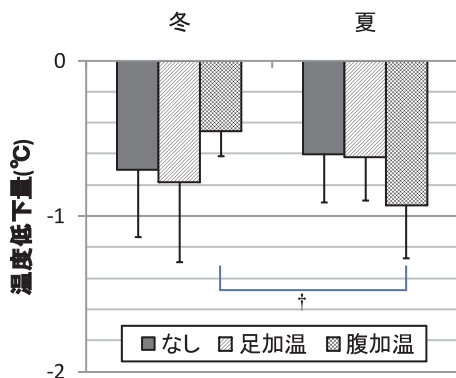


図7 寒冷暴露前後の直腸温低下量

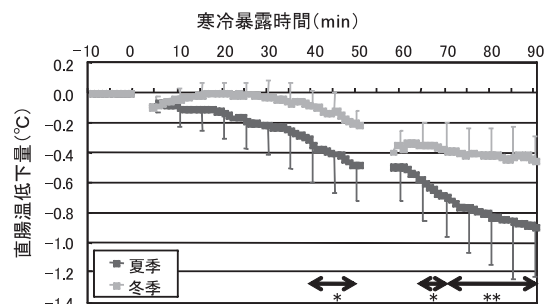


図8 寒冷暴露中の直腸温変化

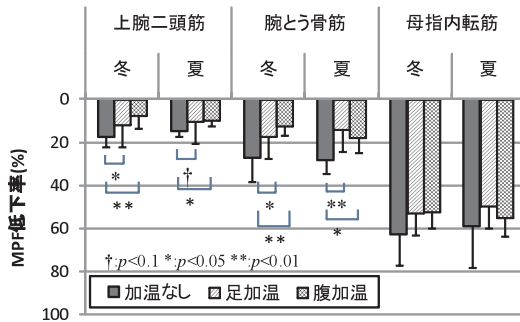


図9 寒冷暴露前後の筋電位MPF低下率

下はおよそ0.4℃にとどまっているが、夏季において温度低下が速く進み、90分後には0.9℃低下して、さらに低下が続く傾向が見られた。

3.3 筋電図

上腕二頭筋、腕橈骨筋および母指内転筋の平均パワー周波数の低下率（MPF低下率）を図9に示す。MPF低下率については、有意な季節差は見られなかった。加温なしの場合では、上腕二頭筋で16%、腕橈骨筋で28%、母指内転筋で61%の筋機能低下が見られた。上腕二頭筋、腕橈骨筋については、腹部加温および足底部加温によりMPF低下は有意に抑制された。夏季における腕橈骨筋のみが足底部加温で抑制効果が大きく（足底部加温時14%低下、腹部加温時18%低下）、他はいずれも腹部加温で効果が高かった。

母指内転筋についてはいずれの条件においてもMPFは大きく低下し、加温条件間、季節間いずれにおいても有意差はなかった。

4. 考察

4.1 体温低下の季節差

実験結果より、夏季における体温低下量が冬季より大きくなる傾向が現れた。これは、人間の環境順応性に由来すると考えられる。生鮮食品加工場や冷凍庫のような作業環境では、季節にかかわらず人体を低温に暴露することになる。しかし、人体には季節順応があり、季節によって耐寒性すなわち外気温に対する反応（血流量、発汗量など）が異なることから、夏季と冬季では適切な加温方法が異なる。

夏季においては、身体は一般に末梢の血管を拡張し血流量を上げ、体内の放熱を促すように反応する。反対に、冬季においては、末梢の血管を収縮し血流量を下げ、放熱を防ぐように反応を変える。

特に手掌や足底は、動脈と静脈が末梢において毛細管を経ずに直接静脈につづく動静脈吻合が数多く存在し、人体のいわゆる「放熱板」として機能する。夏季においては、この動静脈吻合を開きやすくすることで放熱を促し、冬季において

は、閉じやすくして放熱を防ぐ。したがって、夏季における低温環境下においては冬季より放熱が進み、体温は低下しやすくなる^{2,3)}。

夏季腹部加温時の深部温低下は、腹部加温により末梢における放熱が促進され、末梢において冷却された血液が環流する事により起こると考えられる。この結果は、夏季の低温環境作業は、冬季よりもさらに保温に留意する必要があることを示唆する。

4.2 作業性

寒冷暴露のパーデュューベグボード試験結果と筋活動低下について重回帰分析を行った結果、回帰式は次の式で表された。各係数の有意性については、p<0.1以下のものについて記している。

$$[\text{ピン立て作業性低下率}] = 0.316 \times [\text{腕橈骨筋MPF低下率}] + 0.187 \times [\text{母指内転筋MPF低下率}] - 0.036$$

(腕橈骨筋：p<0.01, 母指内転筋：p<0.001)

$$[\text{アセンブリ作業性低下率}] = 0.374 \times [\text{母指内転筋MPF低下率}] + 0.0086$$

(母指内転筋：p<0.001)

一方、皮膚温との回帰については、次式で表された。

$$[\text{ピン立て作業性低下率}] = 0.011 \times [\text{手背温度低下量}] - 0.025$$

(手背温：p<0.001)

$$[\text{アセンブリ作業性低下率}] = 0.016 \times [\text{前腕温度低下量}] + 0.007 \times [\text{手背温度低下量}] - 0.005$$

(前腕温：p<0.1, 手背温：p<0.1)

MPFは筋の冷却や疲労によりその周波数が低下する。筋は、筋内にある運動単位（筋あたり数百程度ある）がそれぞれ運動神経と接合し、神経の電気刺激によって単位ごとに活動する。筋線維の中央付近に神経と筋の接合部があり、神経からの電気刺激によって神経筋接合部から末梢に向かって筋線維が電氣的に活動し、筋が収縮する。この時の筋線維の電氣的活動が、いわゆる筋電位である。筋の制御性は、運動単位の刺激の細かさや筋電位が筋を伝導する速度によって決まるが、筋が冷却されると筋電位の伝導速度が低下し、その滑らかさが失われると考えられる。また、伝導速度低下の原因である筋温低下が熱産生を促すためのふるえを誘発することにより、さらに作業性が低下すると考えられる。

ピン立て作業では腕橈骨筋と母指内転筋が、アセンブリ作業では母指内転筋が有意な相関性を示した。この違いについては、作業に要求される巧緻性で説明できる。大まかに言う

と、腕橈骨筋のある前腕は手関節や手指を屈曲伸展する筋が多く存在し、母指内転筋のある手は、手指を細かく動かす筋が存在する（若干の例外がある）。つまり、要求される動作が大きくなるほど前腕の筋による手関節などの制御性が要求され、動作が小さくなるほど手内筋による細かい操作が要求される。

ピン立て作業とアセンブリ作業では、アセンブリ作業の方が組立に要求される細かい作業性を要求されることから、部品の組立時間に含まれる手指作業の比率が増加したと考えられる。計測した筋は、これらの手指作業を直接行う筋ではないが、それぞれ上腕、前腕、手指の部位にある筋のMPF活動つまり冷却度を代表するものとみなせる。

このような傾向は他の作業でも同様と考えられる。魚の処理作業を例に取れば、魚の内臓取りは包丁を大きく動かすことから前腕や上腕等の筋活動が有意となりやすく、骨をピンセットで抜く作業は手指筋の活動がおそらく有意となりやすい。

回帰係数の有意性から見て、筋活動MPFの方がよりよく作業性を説明できる。MPFは筋活動の指標であるから、身体運動をより直接表すため必然的に相関は高くなる。しかし、局所の皮膚温による作業性低下評価も筋活動、作業性との相関性は高く、簡易手法として有用と言える。

5. まとめ

本研究では、低温下の作業における作業性向上とストレス軽減を目指し、低温環境下における手指巧緻性評価と腹部・足部の身体局所加温による手指巧緻性向上の関連性を、パーデューペグボード、体温、筋電位により計測解析により検証した。その結果、身体局所加温により作業性低下を抑制するとともに、筋機能ならびに皮膚温についても有意に低下を抑制する効果が確認された。

引用文献

- 1) ISO9920:2007 温熱環境の人間工学－着衣の断熱性と透湿抵抗の評価
- 2) 石井泉, 中島康博, 前田享史, 横山眞太郎ほか6名: 身体局所加温が低温環境下作業に及ぼす生理心理的影響－第1報 冬季寒冷暴露実験を中心として, 空気調和・衛生工学会北海道支部第45回学術講演論文集, pp.171-174, (2011)
- 3) 地家崇規, 中島康博, 前田享史, 横山眞太郎ほか6名: 身体局所加温が低温環境下作業に及ぼす生理心理的影響－第2報 季節間の比較を中心として, 空気調和・衛生工学会北海道支部第45回学術講演論文集, pp.147-150, (2011)