冬期の漁港等における防風雪施設内の作業効率に関する被験者実験

Sensory Experiments and Indices for Evaluation of Wind/Snow Shelter in Fishing Port during Winter Season

木岡信治¹・山本泰司²・小玉茂義³・小林 圭⁴

Shinji KIOKA, Yasuji YAMAMOTO, Shigeyoshi KODAMA and Kei KOBAYASHI

Working environments at fishery ports and harbors during the winter in cold, windy regions are very severe for workers. Such environments may affect the worker's health, as well as lowering the work efficiency. To examine the necessity of facilities such as the wind and snow shelters, we should quantitatively evaluate in terms of human sensation. We conducted sensory experiments on subjects to examine the practical application of some thermal indices and "work efficiency" under the cold condition. Of five thermal indices studied in this report, the WCI was the most useful index from a practical point of view. We also proposed an estimation method of the work efficiency under cold environment as parameters of the thermal index (WCI) and elapsed time (exposure time)

1. はじめに

積雪寒冷地の冬期における漁港や港湾では、風雪等の厳しい作業環境、さらに高齢化等の要素も加わり過酷な作業環境下にあり(写真-1)、作業効率低下や健康障害、作業の安全性が懸念されている。こうした冬期就労環境を改善するために、現在、北海道の漁港・港湾においては、防風雪施設の整備が行われつつあるが、施設整備による作業環境改善効果の定量的な評価手法が確立されていないのが現状である。このうち、著者等は、まず人体の温熱感覚を表す温熱指標等に基づく温熱環境の評価、ならびに、作業効率(生産性)などの定量的な評価手法の確立が必要と考えている。前者については、今までにも、夏期の暑熱環境や、オフィス等の屋内温熱環境などを評価するための温熱指標が提案されているが(Ishiら、

1993; 深井ら、1992; 木内、2001、など)、低温環境下で系統的に実験し、検討された例は少ない。また、後者に関する研究も、寒冷環境においては皆無といってよい。そこで著者らは、低温室や冬期の野外において被験者実験を実施し、低温環境下での人体の温熱感覚を適切に評価できる温熱指標等を検討してきた(Kiokaら、2006、木岡ら、2007)。加えて、温熱環境が作業能力・効率へ及ぼす影響に関する基礎的な実験を実施した(木岡ら、2007)。

本研究では、引き続き、温熱指標の検討を行うとともに、特に、作業能力・効率に関する被験者実験を様々な作業形態について実施し、暴露時間と温熱指標を用いた実用的な作業効率の推定法を提案した。

2. 被験者実験の方法

実験方法は過去に実施したものとはほぼ同様であるが(Kiokaら、2006、木岡ら、2007)、その要点を述べる。実験は、主に低温室内で実施し、被験者は、既報(木岡ら、2007)より新たに、札幌在住の20代~50代の男女各8名の計16名を追加して実施した。着衣量は既報と同様に、「light」と「heavy」の2ケースであり、「light」は、下着、セーター、ももひき、および上下作業着を着用したもの、「heavy」は、さらに上下防寒服を着用したものである。表-1に示す温熱環境と実験条件のもとで、被験者は実験毎に45~60分間暴露され、図-1に示した温冷感や熱的快適感(Gaggeら、1967)などの温熱心理(主観的温熱感覚)を自己申告した。同時に、温熱環境が作業能力・効率へ及ぼす影響を調べるための被験者実験として、図-2に示すように、主に指先を使う単純な作業を実施し、単位時間当たりの作業量をカウントした。Task A~Cは、数十秒間(A:45秒、B:90秒、C:15秒)作

写真-1 冬期漁港の寒冷環境下での労働風景の例

1	正会員	博(工)	(独法) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 主任研究員	寒
2	正会員	博(工)	(独法) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 上席研究員	寒
1			(独法) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 総括主任研究員	寒
2			(独法) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム 研究員	寒

業して数分休憩するサイクルで45分間繰り返した。他方、Task Dは休憩を含まず、60分間程度（温熱条件により異なる）、持続的に実施し、数分間隔で作業量をカウントした。特に後者は、継続的に行う網外し等の軽作業に近いと考えられる。環境側計測項目は、既報と同様に、気温、風速、グローブ温度（放射温推定）、相対湿度とし、人体側要素である代謝量については、将来的な現場への実用性に配慮し、種々の身体活動に応じた代謝率の一覧表（ASHRAE Handbook, 1993）により推定し、着衣量についても簡易的に衣服重量から推定した（空気調和・衛生工学会編, 1997）。

さらに、簡易的ではあるが、現地実験として、2009年1月28～30日、網走港新港地区の-3.5m物揚場にある防風雪施設の内外において、同様な被験者実験を行った。

表-1 主な実験（環境）条件（低温室内）

気温（℃）	-10.5～+10.5
globe温度（℃）	-10～+11
平均風速（m/s）	0～2.4m/s
相対湿度（%）	52～61%
着衣量（clo）	1.9（light）, 2.9（heavy）
代謝率（met）	Task A: 1.2, Task B: 1.6 Task C: 1.0, Task D: 1.2

注）無風・温暖状態でも実施（室温27℃）

図-1 主な温熱心理の主観申告項目

Task A ベグボード試験
厚生労働省の一般職業適性検査としても使用されている。一定時間内に指でベグ（棒）を移動、順次、別の孔に差し込んでいく

Task B 針金通し作業

Task C タッピング試験

一定時間内に第2指でカウンタを叩打

Task D 結び作業

網外しの模擬作業となる結び作業
20cmのビニール紐を結びつけていく

各モデル作業の 作業↔休憩のサイクル

Task A	45分間、作業（第1回のみ15秒間、以降45秒間） → 休憩（105秒）のサイクル
Task B	45分間、作業（第1回のみ30秒間、以降90秒間） → 休憩（90秒）のサイクル
Task C	45分間、作業（15秒間）→ 休憩（90秒）のサイクル
Task D	60分間、休憩を含まず継続的に作業、90秒、180秒、180秒、 以降600秒間隔で作業量を記録

図-2 本実験で実施したモデル作業

被験者は札幌在住の30～50代の男性4名であり、モデル作業としてTask Dのみ実施した。表-2には実験時の主な気象条件を示す。着衣量は、表-1に示す“light”である。なお、表中の“施設外”とは防風雪施設の近傍の岸壁上を表す。また、実験時の天候は曇りであり、体感的にも日射の影響は感じられなかった。

表-2 現地での環境条件

No	実験場所	風速 (m/s)	気温 (℃)
1	施設内	0.08	1.7
2	施設内	0.55	-1.8
3	施設外	2.08	1.4
4	施設外	3.90	3.5
5	施設外	1.95	3.8
6	施設外	0.55	1.9
7	施設外	0.23	1.5

3. 温熱心理に関する実験結果および温熱指標の検討

(1) 温熱指標の定義と適用性を検討した温熱指標

快適性や温冷感等の人間の温熱感覚を左右するのは、人体と環境との間の熱交換の結果である熱収支量である。この熱交換プロセスには、おもに4つの温熱要素（気温、平均放射温度（MRT）、相対湿度、風速）と2つの人間側の要素である代謝量、着衣量が影響していると考えられている。温熱環境を評価するためには、これらの要素を組み合わせてできた変量を温熱指標と呼ぶ。本研究では、5つの温熱指標、①作用温度、②SET*（標準新有効温度、③WCI、④TL；温度負荷量、⑤TSI；温冷感指数、の寒冷環境下における適用性と、最も有効な温熱指標について検討している（木岡ら, 2005；Kiokaら, 2006）。このうち既報では風冷指数WCI（Wind Chill Index）が実用上最も有効であることを示した。WCIとは、人体の皮膚温度を模した表面温度33℃の円筒から奪われる熱量（kcal/m²h）を気温 t_a （℃）と風速 v （m/s）の2つの変数の関数として表したものである。もとは寒冷環境における凍傷予防のために提案された実験的指標で、次式で表される（Sipleら, 1945）。

$$WCI = (10.45 + 10\sqrt{v - v_0})(33 - t_a) \dots\dots\dots (1)$$

(2) 検討した温熱指標の低温環境下での適用性の検討

本実験条件の範囲内では、温熱心理は、同じ寒冷環境下でも、暴露時間が長くなるにつれ、温熱感覚が低下し（より寒く感じる）、いずれ熱平衡状態に達して、一定値に達する傾向のものが多かった。温熱感覚は時間にも依存すると考えられるが、ある程度時間が経過すれば、時間に依存しないと仮定し、本研究では、代表値として、

個々の実験での最終申告値（45分経過時，Task Dでは60分経過時）のものを用いることとした（Kiokaら，2006，木岡ら，2007）．また，前述のような他の温熱環境評価のための温熱指標の適用性は，温熱心理と指標値との相関性で評価されることが多く，さらに温熱心理は温冷感（T.S.V）で代表させることが多い．本研究においても，主に指標値と温冷感の関係について検討してきた．

まず，各実験ケースにおける温熱心理および温熱指標値の男女それぞれの被験者平均をとり，共分散分析によって，温熱心理と温熱指標値との関係の男女差（性差）について検討した．その結果，既報と同様に，有意水準1％では，男女間に有意な差はないという検定結果となった．男女間に差がないと仮定できたことから，全被験者平均をとり，温熱心理（温冷感）と指標値との関係やその相関性について調べた．図-3には，WCIを例にその関係を示した．また図中には過去の実験結果（Kiokaら，2006，木岡ら，2007）も示した．個々（年毎）の実験での被験者はすべて異なるが，有意な差はなく，データの信頼性が確認できる．また，今回の現地での実験結果も室内でのそれと同様な傾向を示している．次に，過去の実験データを統合し，温熱心理と各指標値との相関性を調べた．表-3には標本相関係数とその有意性の検定を行った結果を示す．なお，Pearsonの相関係数のほか，データのノンパラトメトリック性も考慮して，Speamanの順位相関係数も推定した．温熱心理と温熱指標とはよい相関性があり，本研究で検討したすべての温熱指標は有意水準1％で有意となり，その有効性が伺えた．さらに，本実験の範囲内では温熱心理と温熱指標値との関係は，SET*を除き，概ね直線的で実用的には好ましい関係が得られた．凍傷予防のために提案されたWCIも，比較的温暖な環境も含めて直線性があり，幅広い範囲でその適用性が伺える．

次に，検討した温熱指標のうち最も有効なものについて検討した．再び表-3より，温熱心理との相関性が最も

表-3 各温熱指標と温熱心理（温冷感）との標本相関係数とその検定（過去のデータを含む）

Pearsonの相関					
	SET*	WCI	TL	T0	TSI
R	0.741	-0.849	0.712	0.812	0.870
T	13.969	-20.305	12.812	17.591	22.294
判定	**	**	**	**	**
Speamanの順位相関					
	SET*	WCI	TL	T0	TSI
R	0.688	-0.794	0.675	0.664	0.805
T	11.998	-16.509	11.569	11.246	17.141
判定	**	**	**	**	**

R：標本相関，T：検定統計量 $t_{n-2} (\alpha/2)$ 標本数:162
 * 5% 有意 ** 1% 有意，- なし 1%：2.61，5%：1.98

良いのは，TSIであったが，WCIの相関性もTSIに比べて僅かに劣る程度であり，実用的には，式（1）に示すように入力値が風速と気温のみで計算方法も簡便であるWCIが温熱心理を表すのに十分であると考えられる．この場合，“非常に寒い”という感覚はWCI=900程度で得られる．

以上はすべて既報と同様な結果であった．

図-3 温冷感（T.S.V）と温熱指標値（WCI）との関係および過去の実験結果（Kioka et al., 2006，木岡ら，2007）との比較例（同一温熱環境下での全被験者平均をプロット）

4. 温熱環境が作業能力へ及ぼす影響に関する検討

(1) 概説

現場での作業形態は魚の移動のほか，主に指先を使う魚の網外し等があり，本検討では，この作業が寒さによる影響を受けやすいと考え，前述のようなモデル作業を実施している．また，被験者の手には軍手さらにその上にゴム手袋を着用しているが，これは防風雪施設が整備された漁港での漁業従事者からのヒアリング調査に基づく．実施したモデル作業のうち，Task A～Cは，数十秒のごく短い時間における作業能力や瞬発能力を検査する作業である一方，Task Dは持続性・継続性を有する作業である．現場でいえば，前者は休止を頻繁に挟む間欠的な作業，後者は魚の箱詰めや網外し等の軽作業に近いと考えられる．よって両者は性格が異なるため分けて考える．

(2) Task A～Cの場合

既報（木岡ら，2007）ではTask C（タッピング試験）の結果について検討した．本検討では，その追加実験を行うとともに，新たにTask A, Bを加えた．まず，図-4に，例としてTask Cの暴露時間とともに単位時間当たりの作業量（打印度数）の推移を示す．暴露時間とともに作業量が低下し，同じ温熱環境でも，時間的依存性が大きい事が推察される．既報と同様，ある環境下において，作業能力 W （本実験では時間当たりの仕事のカウント数）の時間依存性を， $t=0$ で， $W=a$ （初期値）， $t \rightarrow \infty$ のとき， $W \rightarrow 0$ と考えて，次式のような関数で表されると仮定する．

$$W = a \exp(-bt) \dots\dots\dots (2)$$

前述の図-4の実験値にその関数を当てはめた場合の曲

線を示しているが、その他のケース及びTask A, Bについてもおよそこの関数の当てはめが可能であった。式 (2) における b は、実用的には、前述の温熱指標から推定できれば便利である。そこで、図-5に、温熱指標の代表例として WCI と b との関係を示す。なおこれらの結果は被験者平均に基づくものである。バラつきはあるが、 b と温熱指標とは関係があり、寒くなれば、 b が増大し、作業能力が低下する傾向が見て取れる。表-4には、個々のTaskの場合の、 b と温冷感、各温熱指標値との標本相関係数 (Spearmanの順位相関) を示す。それらの相関性はすべて1%で有意であった。さらに、WCI との相関性が比較的高いことも都合の良い結果となっている。また、 b を非負と仮定し、それを温冷感または各指標値を用いて初等関数で近似しようとする、指数形が良い近似を与えた。ただし、図から分かるように、場合により、実際には b は負値 (作業性が向上) となり得るが、実用性と本検討の趣旨を踏まえ、寒冷環境の範囲内で暗に非負と仮定する。また、温熱感覚の場合と同様に、すべてのTaskに対する有意な性差は認められなかった。

次に、作業の初期値 a と温冷感、各温熱指標値との相関性について調べたが、既報と同様に、 a のそれらに対

図-4 暴露時間にもなう作業量 (1/min.) の推移例 (Task C, 女性被験者平均)

図-5 作業能力 W のパラメータ b [$W=a \exp(-bt)$] と温熱指標値 (WCI) との関係例 [task A-C]

表-4 作業能力 W のパラメータ b [$W=a \exp(-bt)$] と温冷感、温熱指標値との標本相関係数 [spearmanの順位相関]

Task	温冷感	SET*	WCI	TL	T0	TSI
A	-0.859	-0.623	0.782	-0.565	-0.646	-0.781
B	-0.853	-0.739	0.789	-0.703	-0.800	-0.826
C	-0.756	-0.582	0.774	-0.537	-0.554	-0.762
D	-0.787	-0.714	0.834	-0.662	-0.805	-0.844

する依存性はないと見なす事ができた。すなわち、 a は暴露直後であれば、その温熱環境にあまり依存せず、後述のように、一つの基準値として扱う事ができる。

(3) Task Dの場合

このTask D, つまり持続的・継続的な作業 (休憩なし) の場合の作業低下のモデルは、前の議論を準用すれば、式 (2) を積分したものと考えることができる。つまりTask A~Cの時間あたりの作業量 (微分量) でいえばそれを累積 (積分) していくイメージである。実験方法としては、単に、カウント可能な単純な作業を持続して行い、決められた時刻に作業量 (累積値) をカウントするものである。図-6には、予想される累積作業量の時間推移の模式図を示し、そのモデルを次式で表されると仮定する。

$$W_c = k[1 - \exp(-bt)] \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式は、 $t \rightarrow \infty$ で $W \rightarrow k$ となって一定値に収束することを示している。式 (3) を時間 t で微分すれば、

$$dW_c / dt = W = bk \exp(-bt) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $bk=a$ とすれば、式 (3) は式 (2) の積分形となっていることが分かる。つまり、 bk は、時間 $t=0$ における曲線の接線であり、前述の作業の初期値に相当するものであり、理想的には、温熱環境に依存しない量と推察される。

まず実験結果の差分 (微分) をとって、前述と同じ方法で整理・解析する。言い換えれば、作業量を累積せずに、いくつかに分割された計測時間間隔内の作業量 (単位時間あたり) をカウントしていく。図-7に、暴露時間にもなう作業量の推移例を示す。同図 (a) は、単位時間あたりの作業量を示している。先と同様に式 (2) を当てはめた場合の式も表示したが、多くの場合にこの式で作業量の低下傾向を表すことができた。逆に、同図 (a) で推定された指数関数を時間に関してそのま

図-6 持続作業における作業量の時間推移のモデル図

図-7 暴露時間にもなう作業量の推移例 (Task D, 女性被験者平均)

ま積分し、もとの作業の累積値と比較した結果を同図(b)に示す。この積分された式は、式(4)となるが、この式も実験値をよく表し、本モデルが妥当であることが分かる。そこで、先のTask A～Cの場合と同じような解析・検討を行うことができる。図-8には、前述の図-5と同様に、Task Dの場合の温熱指標(WCI)と b との関係例、および初期値 $bk (=a)$ との関係例を示す。前述のTask A～Cの場合と同様に、 b と温冷感、各温熱指標値との間に相関性があること(1%有意)、実用性が高いWCIとの相関性が比較的高いこと(既出の表-4)、 b は温熱指標の指数形で表せると仮定できること、性差が認められない事、そして、作業の初期値 $bk (=a)$ と温冷感、各温熱指標値とは無相関であること、等の結果が得られた。また、図-8には、網走港での現地実験結果も示したが、室内実験結果と同様な傾向であった。

図-8 作業能力 W のパラメータ($W=bk\exp(-bt)$)における bk 、 b と温熱指標値(WCI)との関係例 [task D]

(4) 実用的な作業効率の推定法

ある暴露(作業)時間 T における作業効率 η は、式(3)で $t=T$ とし、または式(2)を T まで積分して得られる作業量を、基準(標準環境)となる作業量($bk=a=const.$ と仮定)で除して、次式で表され、結局 b と T のみの関数となる。

$$\eta = k[1 - \exp(-bT)] / \int_0^T b k dt = \frac{1}{bT} [1 - \exp(-bT)] \quad \dots (5)$$

つまり、「時間 T までの作業量」を、「温熱環境に依存しない初期値(単位時間当たり)に T を乗じ、これを標準環境での作業量と仮定した基準量」で除したものと定義した。図-9には、上式を用い、WCIを用いた作業効率の試算例(作業時間が1時間の場合)を示した。なお、図中にはTask A～Cも示したが、仮にそれらの作業が T まで継続できたと仮定している。この場合、Task Dが最も作業の低下率が低いことが推察される。ここで例として、気温-5℃、風速5m/sの場合、施設設備によって風速が1m/sまで低下できたと仮定する[WCI:1057→740]。この場合、作業時間(休憩までの作業継続時間)を1hr.とし、Task Dを参照すれば、作業効率は0.76→0.93とな

図-9 温熱指標を用いた作業効率の試算例 [暴露時間1hr.]

り、約20%効率が上昇すると推定される。

5. おわりに

本研究では、防風雪施設の機能評価を目的とした被験者実験を行った。寒冷環境下での温熱感覚を定量評価できる温熱指標を検討した結果、実用性も加味し、入力値が風速と気温のみで計算方法も簡便なWCIが有効である事が確認された。また、作業能力(時間当たり)は、温熱指標値と暴露時間に大きく依存すること、しかし暴露直後の作業能力は、その温熱環境には依存せず、これを標準環境での基準量と仮定できること、等が分かった。そこで、作業能力を温熱指標と暴露時間をパラメータとした数式で表し、実用的な作業効率の推定法を提案した。

最後に、本実験に際し、(独)労働安全衛生総合研究所国際情報・労働衛生研究振興センター長の澤田晋一博士には、様々な助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 木内 豪 (2001): 屋外空間における温冷感指標に関する研究, 日本気象学会「天気」, 48, No.9, pp. 11-21.
- 木岡信治・渥美洋一・窪内 篤 (2007): 冬期の漁港等における防風雪施設の機能評価を目的とした体感温実験と温熱指標の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1311-1315.
- 空気調和・衛生工学会編 (1997): 快適な温熱環境のメカニズム, 113p.
- 深井一夫・斉藤純司・後藤 滋・伊藤 宏 (1992): 標準新有効温度(SET*)と日本人の温熱感覚に関する実験的研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 48, pp. 21-29.
- ASHRAE (1993): ASHRAE Handbook, Fundamentals, pp.7-8.
- Gagge, A. P., J.A. Stolwijk and J.D. Hardy (1967): Comfort and thermal sensations and associated physiological response at various ambient temperatures, Environmental Reserch. 1, p.1.
- Ishii, A., S. Iwamoto, E. Sakai, T. Katayama and J. Tsutsumi (1993): The effect of humidity reduction on thermal sensations, Proc. 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 6, pp. 115-120.
- Kioka, S., Y. Atumi, A. Kubouchi and Y. Yamamoto (2006): Sensory experiments and indices for thermal sensation/comfort under working environments of a fishery port during winter, Proc. the 13th International Conference on Cold Regions Engineering.
- Siple, P.A. and C.F. Passel (1945): Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures, Proc. American Philosophical Society, 89, No.1, pp. 177-199.