

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

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

木岡信治¹・渥美洋一²・山本泰司³・増田 亨⁴

Shinji KIOKA, Youichi ATUMI, Yasuji YAMAMOTO and Toru MASUDA

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. There were no differences between sexes regarding the thermal responses. Of five thermal indices studied in this report, the WCI was the most useful index from a practical point of view. We also clarified influences of thermal environment and elapsed time (exposure time) on the work efficiency.

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、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、図-1のような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、費用対効果につながる便益の定量的な評価方法は確立されていないのが現状である。このため、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定量評価手法の確立が必要と考えている。今までも、幾つかの温熱指標が提案され、オフィスを初めとする温熱環境評価の試みがあるが(Ishi ら, 1993; 深井ら, 1992; 木内ら, 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。そこで著者らは、低温室や冬期の野外を利用した低温環境下での温熱感覚に関する被験者実験を過去に実施してきた(木岡ら, 2005; Kioka ら, 2006)。

本研究では、過去の実験に引き続き、被験者実験を行い、寒冷環境下における温熱心理(温熱感覚)を定量的に評価できる温熱指標について検討した。さらに、温熱心理などの主観的感覺量のみならず、温熱環境が作業能力へ及ぼす影響に関する基礎的な実験と検討を行った。

2. 本研究で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た。これらの温熱指標の概要と本研究でのそれらの計算過程・方法については過去に紹介した(木岡ら, 2005; Kioka ら, 2006)が、このうち主な温熱指標と思われるものについて、今一度紹介しておく。

まず、SET* (Standard Effective Temperature) とは、人体の深部層と皮膚層の2層モデルにより表現した熱平衡方程式に基づく体感指標である。Gagge ら(1971)によって開発され、ASHRAE (米国暖房冷凍空調学会)で標準的体感温度として採用されている。簡略的には、SET*とは実在環境を、湿度50%、風速0.1 m/s、代謝量1 met および実質着衣量0.6 cloとした標準環境に換算したときの気温に相当し、これを体感温度



図-1 防風雪施設の例(北海道古平町 古平漁港)

- | | | | | |
|-------|------|-----------|---------|----------------|
| 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 |
| 2 正会員 | | (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 |
| 3 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 |
| 4 | | 北海道開発局 | 農業水産部 | 水産課 |

と考えている。次に、風冷指数 WCI (Wind Chill Index) とは、人体の皮膚温度を模した表面温度 33°C の円筒から奪われる熱量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$) を気温 $t_a (^{\circ}\text{C})$ と風速 $v (\text{m/s})$ 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)。

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

3. 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 (木岡ら, 2005; Kioka ら, 2006), その要点を述べる。実験は、主に低温観測室で実施し、札幌市在住の20代~50代の各年代、男女各4名の合計8名を被験者とした。着衣量は過去と同様に、「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。動作は、椅子座で「安静」と「軽作業」の2ケース実施した。軽作業は、座位にて魚を模したペットボトル (500 g) を左右に移動させるというものである。主な実験条件を表-1に示す。温熱環境条件は、気温 -10°C ~ $+10^{\circ}\text{C}$ の範囲で行い (1 ケースのみ、無風・室温 27°C 、着衣 [light] の温暖状態で実施)、風速は、大型扇風機を用い、3 ケースの風速を発生させた ($0.66 \sim 2.31 \text{ m/s}$)。被験者は実験毎に45分間暴露され、温冷感や熱的快適感などの温熱心理反応を15分間隔で自己申告した。被験者は室内で60分間程度の休息をとり次の実験に備えた。また、野外実験として、2日間にわたり、北海道古平町の古平漁港においても同様な実験を実施したが、急遽、2名の女性被験者の欠員が生じた事、また気象が比較的温暖だった等の諸事情から、このデータは参考程度として扱った。

環境側計測項目は、気温、風速、グローブ温度、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)。また、心理反応の指標 (主観申告) は被験者自ら15分間隔で記入してもらった。図-2に示すように、主な心理反応としては、温冷感と熱的快



図-2 主な温熱心理反応の主観申告項目

適感であり、温冷感は「-5: 寒くて耐えられない」から「+3: 暑い」までの9段階尺度を、熱的快適感は「非常に不快」から「非常に快適」までの7段階尺度を設定した (Gagge ら, 1967)。

さらに本年度では、寒さによる作業能力低下に関する基礎的な実験を追加し、タッピング試験 (T.T.K.134c; 竹井機器工業製、およびトラフィックカウンター使用) を主観申告とともに15分間隔で15秒間実施した。方法は、利き手人差し指のみで打叩するとし、その数をカウントした。しかし、T.T.K.134c による試験は、使用がやや難しく、個人内でも大きなバラツキが発生し、本実験目的に馴染まないことが判明したので、途中から、トラフィックカウンターに変更した (男性被験者のケース)。故に、本報告では後者による実験結果について述べた。

4. 温熱心理に関する実験結果および温熱指標の検討

(1) 実験データの処理および整理の方法

指標計算に必要な環境条件については、暴露時間内の平均値を用いた。また、図-3に示すように、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、温熱感覚が低下傾向し (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、最も長い暴露時間である45分経過時のものを用いることとした (Kioka ら, 2006)。また、前述のような他の温熱環境評価に関する文献では、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た。

表-1 主な実験条件

気温 ($^{\circ}\text{C}$)	$-10.1 \sim +10.4$ (1 ケースのみ 27°C)
グローブ温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$-9.96 \sim +10.5$
平均風速 (m/s)	$0.66 \sim 2.31 \text{ m/s}$
相対湿度 (%)	$52.2 \sim 60.5 \%$
着衣量 (clo)	1.9 (light), 2.9 (heavy) [手には軍手とゴム手袋着用]
作業量 (met)	1.0 (椅子座), 1.6 (軽作業)

注) 表中の数値は、各実験ケースの暴露時間内での平均値
指標計算に必要な平均放射温度はグローブ温度、風速より推定

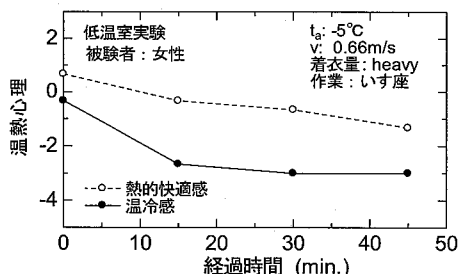


図-3 温熱感覚の経時変化の例 (被験者平均, 低温室実験)

(2) 温熱心理反応と温熱指標値との関係の男女差および低温室・野外の差に関する検討

各実験ケースにおける温熱心理反応および温熱指標値の男女それぞれの被験者平均をとり、温熱心理反応と温熱指標値との関係の男女差(性差)について検討した。図-4には、低温室実験におけるその関係の1例を示し、表-2には共分散分析による有意差の一部の検定結果を示した。同時に回帰直線の平行性の検定、ならびに回帰の有意性の検定を行っているが、それぞれ、「5%有意差なし」および「1%有意」の結果を得ている。表-2から、本実験の場合、検討したすべての温熱指標値と温熱心理(温冷感)との回帰直線について、TSIを除き、有意水準5%で、男女間に有意な差がないという検定結果となり、概ね過去の実験結果(Kiokaら, 2006)と同様となった(過去の結果ではすべての指標につき5%で有意差なし)。

次に、男女間の差はないと仮定されたことから、低温室・野外それぞれについて各実験ケースの温熱心理と指標値の男女含めた全被験者平均をとり、低温室および野外実験結果との差について、上記と同様な方法で調べた。ただし、前述のように野外実験においては、男女同数ではないこと、標本数が少なくなったことで、男女差の検定を行わなかったが、過去の実験結果(Kiokaら, 2006)を勘案して、野外でも男女差はないと仮定し、参考程度にこの試みを行った。その結果、有意水準1%で低温室と野外との実験結果に差はないという結果が得られた。これも過去の実験結果と同様であり、低温室では温熱環境条件を常に一定に制御しているが、野外では、常に変動することを考えると、野外条件では暴露時間内の変動する温熱環境の平均値を採用できる事を示唆している。

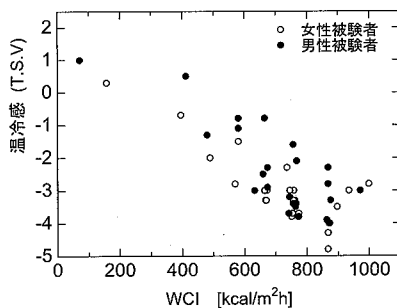


図-4 男女各被験者平均をとった温熱心理反応(温冷感)と温熱指標値(WCI)との関係例(低温室実験)

表-2 共分散分析による水準間(男女)の差の検定(男女各被験者平均について)(低温室実験)

指標	検定統計量 F0		F	判定
SET	1.701	<		—
WCI	3.471	<		—
TL	1.054	<	1% 7.333	—
SI	4.376	><	5% 4.091	*
T0	1.459	<		—

*5% 有意 **1% 有意 — 有意差なし

(3) 検討した温熱指標の低温環境下での適用性の検討

前節から、低温室と野外環境下でのデータの差がないと仮定できたことから、それらを統合し、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-5には、WCIとSET*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)も示した。

両実験での被験者はすべて異なるが、両者に有意な差はなく、データの信頼性を確認した。次に両実験データを統合し、温熱心理と各指標値との相関性について調べた。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てその有意性を調べた。図からも推察されるように、温熱心理と温熱指標とはよい相関性

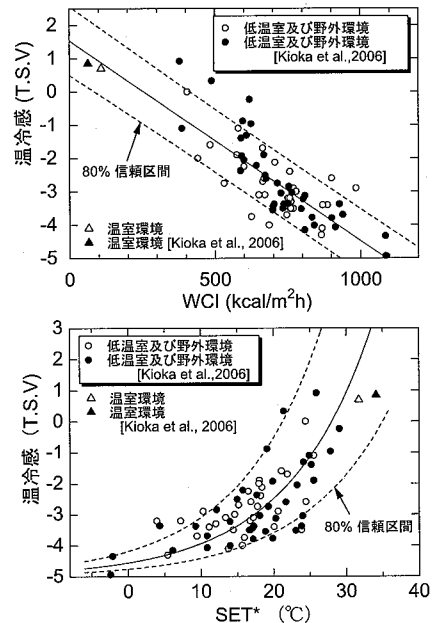


図-5 温冷感と温熱指標値との関係例(WCIおよびSET*)および過去の実験結果(Kioka et al., 2006)との比較例(同一温熱環境下での全被験者平均をプロット)

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(過去のデータと統合)

Pearsonの相関					
	SET	WCI	TL	T0	TSI
R	0.720	0.833	0.676	0.751	0.852
T	8.627	12.485	7.617	9.456	13.501
判定	**	**	**	**	**
Speamanの順位相関					
	SET	WCI	TL	T0	TSI
R	0.678	0.788	0.650	0.589	0.822
T	7.659	10.647	7.106	6.060	12.002
判定	**	**	**	**	**

R: 標本相関, T: 検定統計量 $t_{n-2}(\varepsilon/2)$ 標本数: 71
*5% 有意 **1% 有意, —なし 1%: 2.66, 5%: 2.00

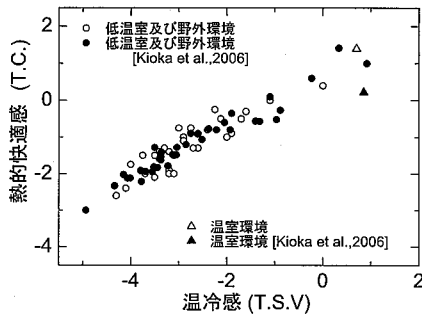


図-6 温冷感と熱的快適感との関係および過去の実験結果 (Kioka et al., 2006) との比較例

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、WCIのように概ね直線的で実用的には好ましい関係が得られた。SET*は同図に示すように、曲線的であり、または 18℃ 付近を境に勾配の異なった直線からなるようにも見え。なお、図中には指数関数による近似曲線を記した。先に紹介したような他の温熱指標の検討例では、他の指標と同様に SET*と温冷感との関係も直線と仮定される場合が多い (例えば、深井ら, 1992; 木内ら, 2001) が、本実験のように比較的低温環境条件も加わると、必ずしも広い範囲にわたって直線とは見せせないものと推察される。一方、もとは凍傷予防のために提案された WCI については、温暖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-2 より、温熱心理との相関性が最も良いのは、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。

最後に、温熱心理反応の一つでもある熱的快適感と温冷感との関係について検討した。図-6 には、過去の実験結果も含んだ温冷感と快適感との関係(低温室および野外、被験者平均)を示す。これらの関係も、上記と同様、男女差および低温室および野外との差、さらに過去のデータとの差は見られなかった。温冷感と快適感とは非常に高い相関があり(1%で高度に有意)、この範囲ではほぼ 1:1 の関係があった。しかし、温冷感が大きくなると(非常に暑い)、快適感の申告値は逆に低下し、幅広い温冷感では、この関係は上に凸をもつ形状と予想される。

5. 温熱環境が作業能力へ及ぼす影響に関する基礎的検討

温熱心理の申告以外にもタッピング試験を実施し、温

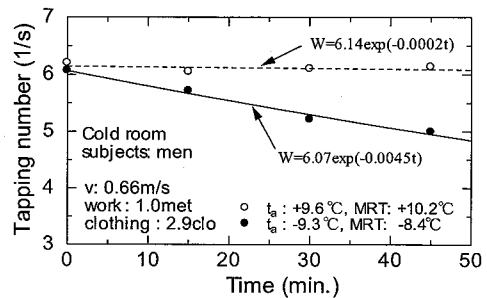


図-7 暴露時間にもなう打印度 (1/s) の推移例 (低温室: 男性被験者平均)

熱環境が作業能力へ及ぼす影響に関して基礎的な検討を行った。現場での作業形態は前述の魚の移動のほか、主に指先を使った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、タッピング試験を実施した。また、手には軍手さらにその上にゴム手袋を着用している。これは防風雪施設が整備された古平漁港での漁業従事者からのヒアリングに基づく。また前述の事情から男性被験者のみの実験データを用いた。

図-7 に、暴露時間にもなう打印度数(継続時間 15 秒で割った 1 秒当たりの度数)の推移例を示す。比較的温暖な状態 (+9.6℃) では、作業(打印度数)の低下はないが、寒い状況 (-9.3℃) では、暴露時間とともに打印度数が低下し、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。今、ある環境下において、作業能力 W (本実験では打印度数) 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。

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

b は、温熱環境に依存し、実用的には温熱指標の関数と仮定できれば便利である。図-7 には例示した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。ここで、図-8(a), (b) には、それぞれ、温熱心理として温冷感 (T.S.V) を、温熱指標として WCI を例として、それらと W のパラメータ (a , 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。これらの図から、バラつきはあるが、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。また、 b 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と、指数形がよい近似を与えた。その相関性は温冷感、各温熱指標値ともに 1% で有意であり、また、人間の心理反応の一つである温冷感が作業能力と最も高い相関性を示すとは限らないことは興味深い。また温暖条件での実験では b が 0 に近く、ある程度温暖になれば b が 0 と見なせる。例えば、既出の温熱指標値と温冷感との関係から、温冷感が 0 となるときを $b=0$ と仮定し、それよ

り暖くなる領域を $b=0$ と仮定することができる。図-8にはその例として、指数形を当てはめた場合の関数形を図中に示している。次に、同図から、作業の初期値 a と温冷感、温熱指標値との相関性はみられず、それらに対する依存性はないと見なす事ができる。すなわち、 a は寒い環境であっても暴露直後であれば、その環境にあまり依存せず、実験直前の温熱環境、つまり標準環境の作業量と考える事ができる。ゆえに、式(2)を、 a で基準化でき、無次元の作業低下率（ある時刻の瞬間値）を定義できる。また、暴露時間 T までの作業能力の全低下率 η は、本作業を T まで継続したと仮定すると、次式に示すように、(2) 式を $0 \sim T$ まで積分し、 aT で割れば良いと考えられる。

$$\eta = \int_0^T a \exp(-bt) dt / \int_0^T a dt = \frac{1}{bT} [1 - \exp(-bT)] \quad \dots\dots\dots (3)$$

例えば、現段階での実験結果及び上記の仮定から、上述のように「非常に寒い」状態である $WCI=900$ 、及び、作業時間が60分程度の作業環境下では、作業能力はおおよそ80%まで低下すると試算される。

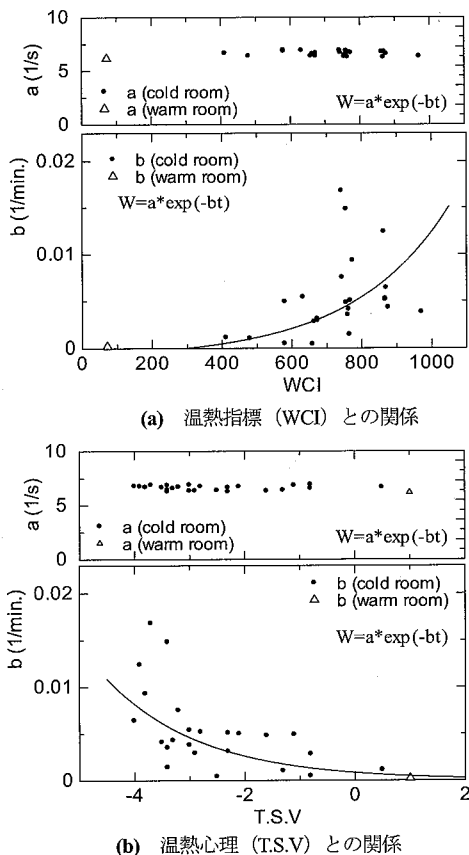


図-8 作業能力 W のパラメータ ($W=a \exp(-bt)$) における a, b と温熱指標、温熱心理との関係例

6. 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い、寒冷環境下における温熱心理（温熱感覚）を定量的に評価できる温熱指標について検討した。本研究で検討したすべての温熱指標の有効性が確認されたが、実用性も加味すると、入力値が風速と気温のみで計算方法も簡便な WCI が温熱心理を表すのに十分であることが確認された。また、タッピング試験を実施し、温熱環境が作業能力へ及ぼす影響に関する基礎的な検討を行った。実用的観点からは、温熱環境を示す温熱指標と暴露時間に応じた作業低下率を定式化できる可能性を確認した。しかし、作業形態や作業の継続時間（暴露時間を含む）など、今後さらに現場に近い条件で実験を行うことが必要であり、引き続き検討を進めたい。

最後に、本実験の実施にあたり、北海道大学大学院工学研究科空間性能講座環境人間工学研究室の横山慎太郎教授、(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(2005): 漁港等の冬季就労環境下における体感温実験とその評価, 寒地土木研究所月報・報告, No. 623, pp. 2-9.
- 空気調和・衛生工学会編(1997): 快適な温熱環境のメカニズム, p. 113.
- 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, Chapter 8, pp. 7-8.
- Gagge, A. P., J.A. Stolwijk and Y. Nishi(1971): An Effective Temperature Scale Based on A Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Transactions, 76, pp. 247-262.
- 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 Internal 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.