

人間の局部的温度感覚に関する伝熱学的研究

A Study on Human Thermal Sensation from the Heat Transfer Point of View

棚沢一郎*・小沢宏一*

Ichiro TANASAWA and Koichi OZAWA

1. 研究の目的

本研究は、人間の皮膚感覚の一つである温度感覚の特性を伝熱学的に解明することを目的としている。

人間の皮膚や粘膜には、温度を感じると点として、温点と冷点の2種類の感覚点が分布している。これらの点は、素人でも容易に識別できるが、一般に冷点の方が温点より密に分布しており、たとえば手の甲での分布密度は、冷点が7.5個/cm²であるのに対し、温点は0.5個/cm²であるという¹⁾。

ところで、これらの感覚点がどのような条件で作動するかについては、これまでに多くの報告があるにもかかわらず、まだ決定的な答が得られていない。従来の生理学の教科書等では、表皮下にある2種類の温度受容器、すなわち温覚については Ruffini 小体、冷覚については Krause 棍状小体は何らかの温度刺激によって興奮し、それが神経中枢に伝えられるからだという説明がなされていた。しかし最近の研究によれば、上に名前をあげた二つの小体が本当に温度受容器であるかどうかは疑問であり、むしろ自由神経終末がその役目を担っていると考える方が妥当とされている²⁾。

一方、どのような形の温度刺激が受容器の興奮をひき起こすかについても、多くの研究が行われてきており、現在では「温度感覚を起こすための要件は、皮内における温度変化ではなくて、皮膚（または受容器）の温度の絶対値である。」という考え方が広く流布している^{1), 3)}。しかし、著者らの日常的経験はこの考え方に疑問を感じさせる。

本研究は、前報⁴⁾にひき続き、接触非定常熱伝導を利用して、人間の皮膚の局部的温度感覚の刺激閾を測定し、その結果を基に、温度感覚が作動する熱的条件を明らかにしようとしたものである。

2. 実験の方法

皮膚表面に、皮膚とは温度の異なる固体を接触させると、「温かい」とか、「冷たい」という感覚が生ずる。これはいうまでもなく、皮膚-固体間で熱移動が生じ、皮内の温度受容器が刺激されるからである。このとき、同一

温度の物体を接触させても、その熱的物性の違いによって、生ずる温度感覚に強弱の差ができることは日常経験されるところである。たとえば、低温の銅棒と木の棒とを較べた場合、銅の方がずっと「冷たい」感じを与える。これは明らかに銅の熱伝導性が木に較べて大きいからである。著者らが温度感覚測定に利用したのはこの現象にはかならない。

熱伝導性の異なるいろいろな固体材料でつくった丸棒（プローブ）を、皮膚表面とは異なる温度にしておく。この丸棒の一端を被験者の皮膚に接触させ、被験者の感覚反応を調べることによって、その温度感覚の諸特性（たとえば刺激閾、弁別閾など）を知ることができる。さらに皮膚側の熱定数および温度受容器の配置がわかっているならば、人間の温度感覚がどのような熱的条件（温度、温度変化、熱流束など）で作動するかを明らかにすることができるはずである。

図1に測定用プローブ（接触棒）を示す。固体（銅、ビスマス、テフロン）の丸棒（直径3, 5, 10 mm）の周囲に加熱用ニクロム線を巻き、さらにそのまわりを断熱用綿で覆ったものである。3種類の材料を選んだのは、それらの熱的物性値の違いが顕著なためである。すなわち、これらの材料の熱伝導率 k [kcal/m h deg]、温度伝導率 a [m²/h] を列記すると、銅では $k=332$, $a=0.435$ 、ビスマスでは $k=7$, $a=0.021$ 、テフロンでは $k=0.22$, $a=0.0004$ （いずれも室温での値）である。

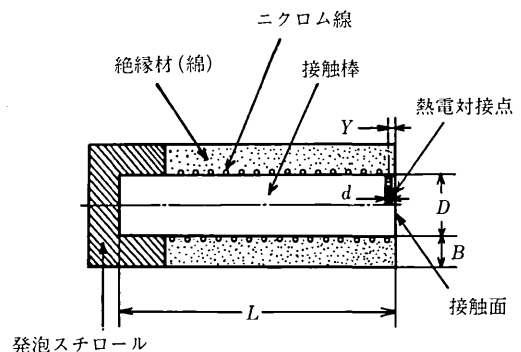


図1：温度感覚測定用プローブ

* 東京大学生産技術研究所 第2部

一方、皮膚の初期表面温度を測定するために、図2の用具をつくった。これは、かまぼこ形の発泡スチロールのブロックの上に、線径80 μ mの銅-コンスタンタン熱電対の接点を接着し、その上に厚さ10 μ m、大きさ10mm \times 10mmの銅箔を貼り付けたものである。これを皮膚表面に押しつけて測定する際、温度差があると、熱移動による皮膚温の変化が生じるので、これを避けるため発泡スチロールのまわりに、加熱用ニクロム線を巻き、これに通電して熱電対接点の温度をできるだけ皮膚温に近づけるようにした。

上述のようなプローブと皮膚表面温度計を用いて、極限法⁹⁾により温度感覚の刺激閾を測定した。その方法はおよそ次の通りである。たとえば温覚の場合、まずプローブの温度を被験者が確実に温かいと感じる温度にしておき、これを以後約3分ごとに約0.3 deg ずつ低くしていきながら、被験者の手の甲の定まった温点に接触させて、被験者が温覚を感じないと申告する温度差を見出す。温覚がなくなったところで、次には逆に温覚が感じられない温度から出発して、プローブの温度を高くしていき、温覚が復活する点を求める。この繰り返しを、ひとつの測定につき3~4回行った。皮膚とプローブの接触時間は約3秒間とした。冷覚についても同様の手順に従った。

3. 測定の結果と考察

被験者は、男性3人(A,B,C)であったが、本報告では主としてそのうちの1人(C)についての測定結果を示す。

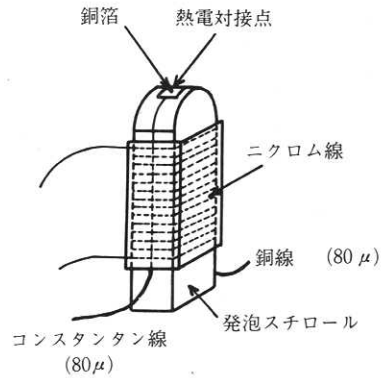


図2：皮膚表面温度測定用具

図3は、被験者Cの手の甲における温点(a)および冷点(b)の分布と、測定点(+印)を示したものである。温点の密度は0.6個/cm²、冷点は8.3個/cm²であった。

3人の被験者についての測定結果として、温覚についても冷覚についても、刺激閾(初期皮膚温とプローブ温度の差)の絶対値は熱伝導性の良いプローブを用いるほど小さくなること、また温覚の場合には初期皮膚温が高いほど、冷覚の場合には初期皮膚温が低いほど、刺激閾の絶対値は小さくなる傾向が得られた。しかし、刺激閾の値自体は、被害者によりかなりの差異がみられた。そこで、測定結果から個人差に起因する変動分を除くため被験者Cについての測定結果を検討の対象とすることにした。

まず、プローブが皮膚表面に接触した直後の皮膚内の温度変化を差分法によって数値計算し、深さ0.2mmお

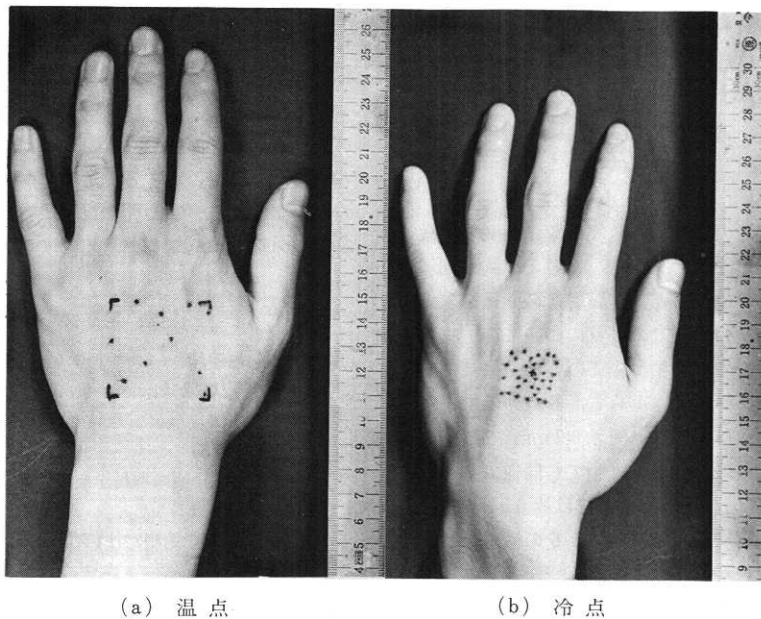


図3：被験者の温度感覚点分布

研究速報

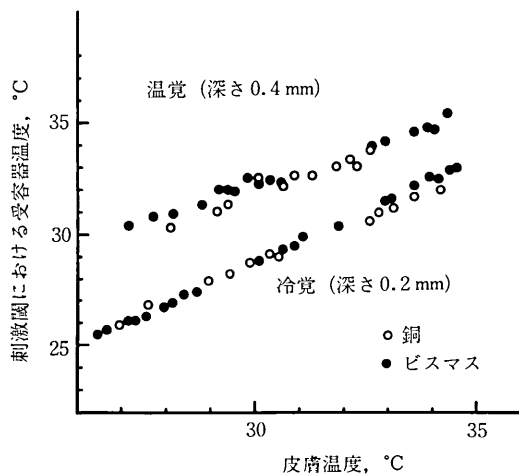


図4：刺激閾における受容器温度

よび0.4mmの位置での刺激閾に対応する温度変化を求めた。前述のように、現在温度受容器そのものが正体不明であり、その位置も明らかでないが、表皮から真皮にかけて存在することは確実であり、また従来いわれてきた冷・温受容器の位置に対応させるという意味もあって0.2mmおよび0.4mmという数値を選んだ。

図4は、プローブ接触後3秒での刺激閾に対応する皮内温度(接触時間内での最高あるいは最低温度)を初期皮膚温に対してプロットしたものである。深さ0.4mmにおける温覚、深さ0.2mmにおける冷覚ともに、プローブ材料にはよらず、ほぼ直線に載る傾向を示している。この傾向は、深さ0.2mmでの温覚、深さ0.4mmでの冷覚について計算しても同じであった。これらの結果から人間の温度受容器の位置に曖昧さがあるにせよ、刺激閾に対応する受容器温度は初期皮膚温度に依存することがわかる。このことは、人間の温度感覚が受容器の温度の絶対値のみによって生じるものではないことを示すものである。

そこで次に、受容器の位置での温度の変化速度が刺激閾と何らかの関係をもつのではないかと考え、刺激閾に対応する温度変化率の最大値と受容温度との関係を求めてみた。図5は深さ0.4mmでの温覚についての、また図6は深さ0.2mmでの冷覚についての整理結果である。両結果とも、プローブ材料にはよらず、各点がほぼ1本の直線に載る傾向を示している。深さ0.2mmでの温覚、深さ0.4mmでの冷覚について計算しても同様であった。温度変化率の最大値は、深さ0.2mmでは約0.04秒、0.4mmでは約0.18秒で現れるので、図5、6の横軸は初期皮膚温度と見なしても差し支えない。

図5および6から、温覚では受容器温度が高いほど、逆に冷覚では受容温度が低いほど感覚が生じるのに要す

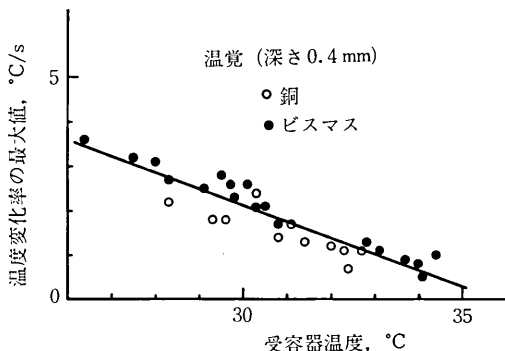


図5：刺激閾における受容器の温度変化率

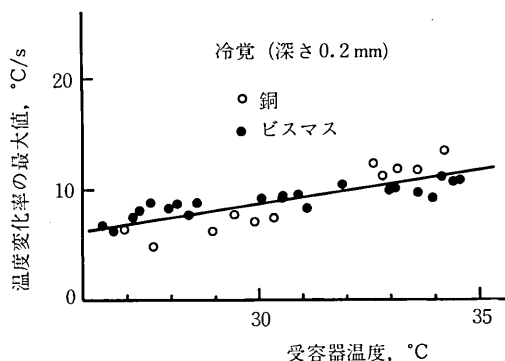


図6：刺激閾における受容器の温度変化率

る温度変化率は小さくなること、すなわち温度変化率の最大値の影響は皮膚温に依存することがわかる。さらに受容温度が十分に高いと温度変化とは無関係に温覚が生じ、また受容器温度が十分に低いと温度変化とは無関係に冷覚が生じることがわかる。このことはいわゆる温度感覚の馴化という日常経験を説明するものである。

4. 結 論

人間の局所的温度感覚は、受容器の温度そのものによるという通説を否定する測定結果が得られた。温度感覚の馴化が起こる温度範囲では、受容器の温度および温度変化率の両者が感覚をひき起こすのに必要であると考えられる。(1979年3月23日受理)

参 考 文 献

- 1) 問田、内園(編)：「新生理学(上)」, 医学書院(1975)。
- 2) 市岡：「皮膚感覚」, 医歯薬出版(1969)。
- 3) 松田、市岡ほか訳：「医科生理学展望(原書第8版)」, 丸善(1978)。
- 4) 棚沢、渡部：日本機械学会講演論文集, No 770-16(1977), 141。
- 5) 田中：「心理学的測定法(第2版)」, 東大出版会(1977)。