

原著

皮膚振動覚に及ぼす皮膚温の影響についての検討

田畑良宏、田淵弘晃、秦 朝子、辻井靖子、太田めぐみ、北谷聡史、宮木恵美、松田千恵
 滋賀医科大学医学部看護学科臨床看護学講座

要旨

厳寒の屋外で冷気にさらされ体が冷えてくると、皮膚の感覚が鈍くなる現象を私達は経験している。従って皮膚の感覚は皮膚温の影響を受けているのではないかと推測される。そこで最近開発された皮膚感覚の中で、客観的、定量的に評価できる振動覚計測装置 (CASE II システム) を使用して、30例のボランティアで拇指背側末節部の皮膚温と振動覚閾値の関係を検証した。結果、皮膚温が25～30℃の時に最も振動覚閾値が低くなる至適温度であり、皮膚温が至適温度より高くとも低くとも振動覚閾値は上昇し、両者の間には二次式の関係が認められた。この現象は、神経組織の熱雑音による確率共振の原理に因るものと推測された。皮膚振動覚は加齢と共に低下が認められ、年齢と最小振動覚閾値の間には正の相関関係が認められた。この皮膚温の知覚への影響の原理は、古くから経験的に冷湿布や温湿布として疼痛の制御の一方法として応用されていると考えられた。

キーワード: 皮膚振動覚閾値、皮膚温、熱雑音、確率共振、加齢と知覚

序論

厳寒の冬のように環境温度が著しく低下し手足の温度が低下すると、皮膚の感覚が鈍くなることを私達は経験している。野球の試合でデットボールを受けた時に除痛の目的で冷却スプレーを噴霧したり、打撲などの外傷で疼痛がある時には昔から冷湿布をしたり肩凝りに温湿布を行っている。これらの行為は、血管を拡張して局所血流が増加し過度の生体反応を引き起こした際に冷却で血管収縮を期待し、又加温で血管拡張を引き起こし障害になっている障害産物の吸収、除去を期待した医療であると共に、皮膚温を変化させることで疼痛が寛解されることを期待した行為でもある。

その原理は不明であったが、この経験的な医療行為は昔から私達の皮膚知覚は温度の影響を受けていることを暗黙のうちに知っていた事を暗示しており、何故この様な現象が如何なる機構で発生するかについて実験的に検証した。

研究方法

1) 研究協力者及び倫理的配慮

研究の協力者は滋賀医科大学の学生及び職員を対象とした。倫理的配慮として、研究協力者に、研究の趣旨、計測方法、研究目的以外にはデータを使用せず、研究終了後はデータを破棄することを説明し同意を得た。対象者は、男子15名、女子15名で、右拇指背側末節部に計測した。男子の年齢は21～64歳、平均35.9±17.8歳に対して、女性は22～50歳、平均27.5±8.5歳、全例では21～64歳、31.7±14.4歳であった。

2) 測定装置

非接触型のポータブル赤外線温度計 (PT-S80、

オプティクス株式会社、大津) を使用し、振動覚の計測時の皮膚温を計測した。皮膚振動覚の閾値の計測には、CAS II システム (Computer Aided Sensory Evaluator version4, WR Medical Electronics Co.) を使用した¹⁾。本計測器は最近開発されたコンピューター制御によるステップングアルゴリズムにより、一回の計測で20回の125Hzの振動刺激を加え、被験者にランプで刺激中であることを知らせて、振動を認識できる場合はボタンスイッチを押して合図するシステムである。この計測装置は図1の計測例に示すように振動の振幅を次第に下げていき、収束点の振動を認識できた振幅 (μm) を JND (Just Noticeable

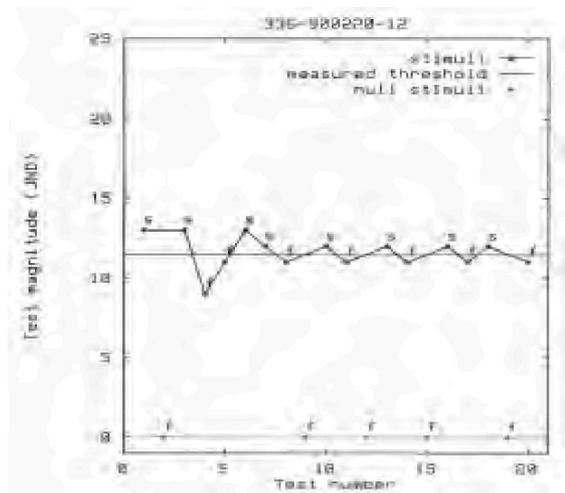


図1 振動覚の検査結果の1例
 20回の刺激中に5回の偽信号を混入し、高いJNDから次第に低いJNDに移りながら収束するJNDを求めている。

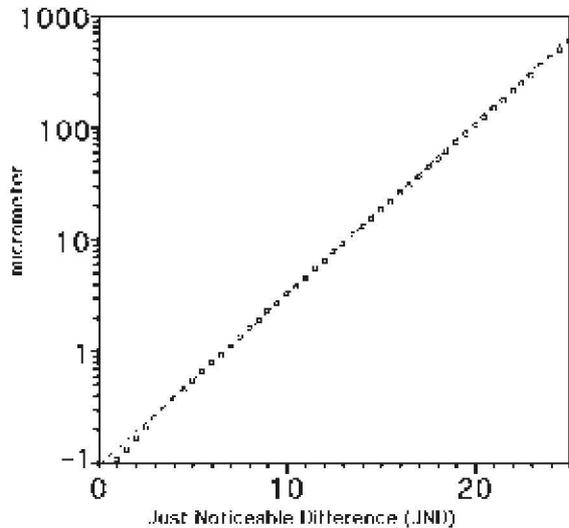


図2 振幅と JND の関係
対数表示した振幅と JND の間には直線関係にある。

Difference) として振動覚閾値と定義している。JND と振幅の関係は図 2 に示すように対数関係になっている。計測中にデータの信頼性を検証するために 20 回の計測の間に 5 回の全く振動を加えない偽信号を発して、被検者が正しく認知しているかも含めてデータの信頼性を確認するシステムとなっている。

3) 計測方法

振動覚は図 3 のように右拇指の背側末節部に振動子が水平に当たるように置き、テコの原理で振動子を一定の圧で押しつけ、圧は約 $30\text{g}/\text{cm}^2$ と一定になるように調節されている。コンピュータ制御の CASE システムによる測定は、被検者が周囲の雑音により振動の認知に集中できない可能性を排

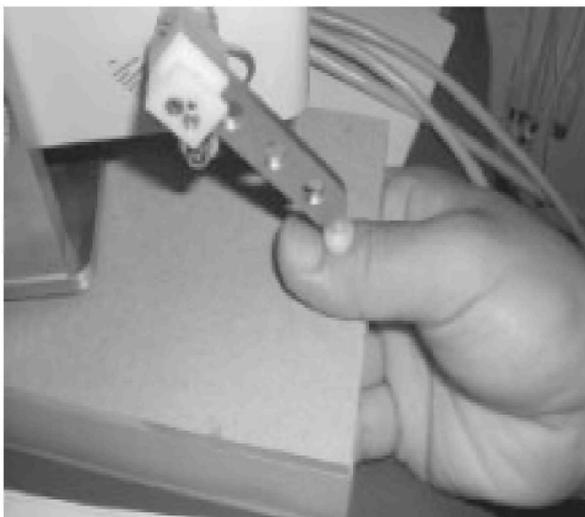


図3 振動覚の測定方法
水平に設置した測定装置から延びた振動子のアームの先端を拇指末節部に自重で乗せている。

除するために簡易防音室で計測を行っている。測定は 9 月中に実施し、室温はエアコンディショナーにより 25°C に制御されている。実際の計測時の室温は最低 22.8°C 、最高 26.6°C 、平均 $24.92 \pm 0.91^\circ\text{C}$ であった。皮膚温は冷水又は温水に手関節より末梢を漬けて冷却又は加温して皮膚温を変化させた。約 2～3 分を要する検査期間中にも皮膚温は変化するので、非接触型の赤外線温度計で測定開始時と終了時に計測し、その平均値を計測時の皮膚温と定義した。振動覚の計測は先ず冷却も加温もしない自然な皮膚温で計測し、次いで自然な皮膚温より低い温度で 2 点、更に自然な皮膚温より高い温度で 2 点、合計 5 点の異なった皮膚温での振動覚閾値の計測を行った。

結果

1) 皮膚温と振動覚閾値

皮膚温を X 軸に、振動覚閾値を Y 軸にプロットすると、全例ですべて凹型の分布を示した。カーブフィッティングにより皮膚温と振動覚閾値の関係を最小自乗法で最も誤差が小さくなるように関係式を求めた。二次式でフィッティングするのが最も誤差が少ないことが判明したので、全例二次式でフィッティングした。図 4 に全計測例の皮膚温と振動覚閾値の関係を示した。最小の振動覚閾値を示す至適皮膚温は個人差が認められるが、 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ の範囲にあった。男性群と女性群に分けて皮膚温と振動覚閾値の関係を示すと、図 5 の如く男性は至適皮膚温及び最小閾値共に幅広い分布を示すのに対して、女性は至適皮膚温及び最小閾値共に類似の傾向がみられた。

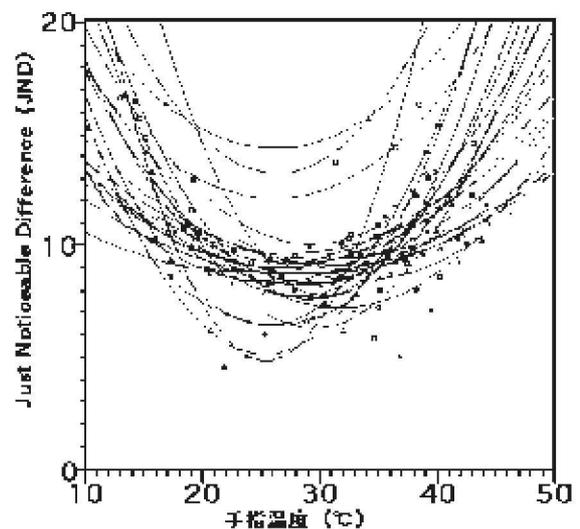


図4 皮膚温と振動覚閾値 JND の関係
全例の結果を示す。両者の間には二次式で示される関係が認められた。

に最小振動覚閾値は増加し、特に男性において著明であり、女性においては有意な関連性が認められなかった。

考察

1) 信号と雑音の関係

通信分野などでは、雑音 (Noise:N) の存在は信号 (Signal:S) の認識にたいして障害になるため、可及的に信号に対する雑音の比 (S/N比) を高めようと努力されてきた。しかし20年程前より、生体の神経組織のように閾値を有する非線形系システムでは、微弱な入力信号に対する応答がノイズによって増強されるという確率共振 (Stochastic Resonance:SR) の原理が知られるようになった。この原理に注目した実験研究によって、生物の感覚神経細胞にノイズを付加することで閾値以下の入力信号の検出力を高めることが報告されている^{2), 3)}。

つまり神経細胞は閾値型の入出力特性を有し、閾値以下の微小な入力信号は認識できないが、ランダムな幅広い周波数帯域の極少量のノイズを信号に同時付加した場合、膜電位が閾値を超える瞬時の確率は入力信号の強弱を反映することができると考えられる。

一方、ノイズ強度が膜電位に届かないほど小さすぎたり、あるいは入力信号の強弱とは無関係に閾値を超えるほど大きすぎたりした場合、出力信号の信号対雑音比 (S/N比) が低下することが予想され、出力 S/N比を最大にするための最適なノイズ強度が存在し、出力 S/N比とノイズ強度の関係を示す曲線は最適ノイズ強度で S/N比が最大値を示す釣鐘型の曲線になり、至適なノイズ強度が存在し、ノイズが弱すぎても強すぎても効果は期待できず、これが共振 (Resonance) の由来でもある。

この現象が生体内でも起こっており、雑音が必ずしも障害ではなく適当な雑音の存在は生体にとり利益になると考えられる報告がみられる。

生体の知覚機能において確率共振の原理が作用している可能性について、音覚においては閾値以下の雑音の混入は、本来、認識し得ない閾値以下の音声信号を認識し得る作用を有することを私達も確認している^{4), 5)}。下澤楯夫等によるとコオロギの腹部後端の尾葉には太さ1~10 μm、長さ30~1500 μmの毛が突出した感覚細胞を有している。この毛が気流などで傾くなどして機械的歪み加わると中枢神経系へインパルスが送られ、捕食動物が接近する際の微細な気流の変化を検知している⁶⁾。この際には、神経組織の熱雑音を利用し、より鋭敏な検出を可能にしている⁷⁾と報告している。知覚機能だけでなく運動機能においても機能

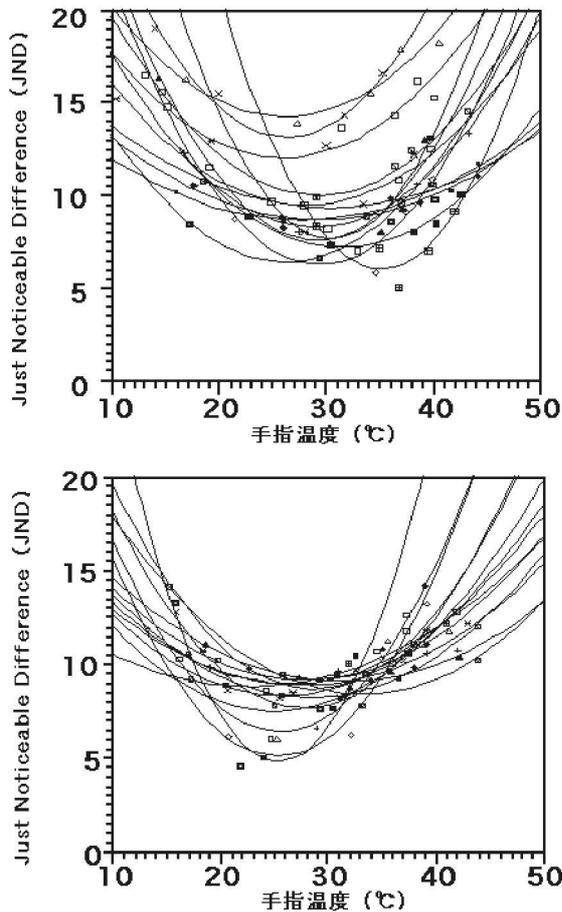


図5 性別で分けた皮膚温と振動覚閾値 JND の関係
上段に男性群、下段に女性群を示す。

2) 振動覚閾値と年齢

図5より最小振動覚閾値には個人差があることが明白であるが、如何なる要因が最小振動覚閾値に影響しているかを検討するために年齢と最小振動覚閾値の関係を図6に示した。図6から加齢と共に

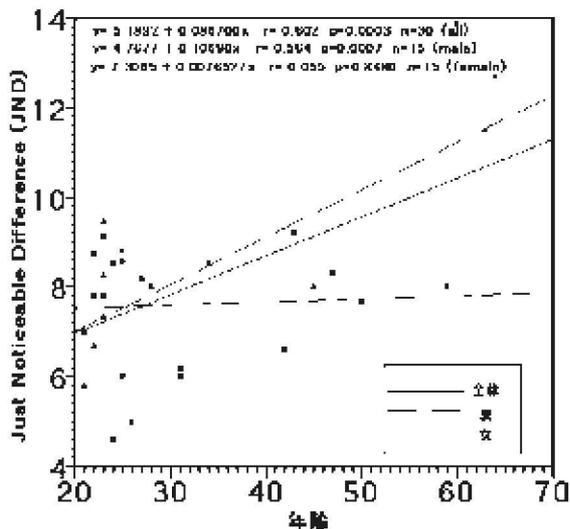


図6 年齢と振動覚閾値 JND の関係
全例及びその性別毎の関係を示す。

的確率共振 (Functional SR: FSR) として、加齢や脊髄疾患で低下した運動機能を神経系に雑音を付加することで機能改善が期待できることも報告されている⁷⁾。

2) 温度と雑音

金属等の電流の抵抗体は、抵抗体の電子の不規則な熱振動により雑音を発している、低い周波数の領域では $1/f$ 雑音を、高い周波数領域では白色雑音を示している。神経線維は電気信号の伝達組織 (電線) であり、電流の抵抗体と同じように電流の抵抗要因であると共に熱雑音を発していることが推測される。武者利光はアフリカマイマイの神経線維で、発せられる熱雑音による神経のインパルスの周波数解析を行い、電流の抵抗体と同じ周波数分布を示す熱雑音の存在を報告している⁸⁾。熱雑音は当然、温度が高くなると雑音の強度は上がり温度が低くなると強度は下がり、 -273°C で電子の動きが止まり雑音は消失する。私達は、料理が冷えると不味くなり又極端に熱い料理も味が判らず、料理を味わうには最適な温度が存在することを経験的に知っている。この現象は、神経組織の熱雑音の影響を受けた確率共振の影響ではないかと推測し、私達は口腔内温度を変化させ甘味と旨味に対する口腔内温度の影響について既に検討し、約 30°C で甘味及び旨味共に最も閾値が低下していることを明らかにした^{9)、10)}。この研究から、私達は、生体機能は多くの臓器において神経組織の熱雑音による確率共振の原理により温度の影響を受けている可能性があるかと推測した。昔から打ち身や肩凝り等では冷湿布や温湿布をすることで苦痛を緩解する治療法を実践している。従って疼痛も閾値が最も低い皮膚や組織の温度があり、それよりも低くとも高くとも閾値は上昇し疼痛を感じ難くなると考えられる。

研究の趣旨からは痛覚に対する皮膚温の影響を検討するのが、目的に合っていると考えられる。しかし鎮痛剤の効果の客観的な検証等では、痛みを定量的に数値データで評価する方法として温覚を利用している。これは温覚は 45°C を超えると疼痛として認識されるという原理により、加温して疼痛を感じる温度をもって痛みを表す数値指標として疼痛の程度が評価されてきた。従ってこの評価法で疼痛を指標として皮膚温変化の確率共振の現象を検証することは適切でないと考えられ、他の皮膚感覚を指標とする必要がある。皮膚知覚には痛覚の他に、温覚、冷覚、触覚や振動覚がある。最近、糖尿病性神経障害を評価する目的で振動覚を振幅の強さで評価し、偽信号も混入し被検者の信憑性までを考慮した振動覚の定量的計測が可能ない計測器が開発された。この計測器を使用する機会を得ることが出来たので、拇指の振動覚に対する皮膚温の影響について検討を行った。

3) 皮膚振動覚に対する皮膚温の影響

皮膚温とその温度の時の振動覚の間の関係は図4に示されるように、5点計測しカーブフィッティングした時に、二次曲線でフィッティングすると相関係数 (r) が一番大きくなりフィッティングカーブと最小自乗法で算出した誤差が少なかった。計測30例で全て二次曲線でフィッティングでき、いわゆる釣鐘型の応答であり確率共振である条件に適合し、確率共振の原理が皮膚振動覚にも作用しているとの推測が確認できた。皮膚知覚という機能面からは、恐らく皮膚痛覚に対しても熱雑音を雑音源とする確率共振の原理が作用していると考えられ、昔から実践されている湿布療法はこの推測を支持する事実であるともいえる。閾値が最も低くなる、つまり鋭敏になる皮膚温は 25°C 近辺であり、味覚において一番閾値が低下する口腔内の至適温度の約 30°C に比較すると低温であった。皮膚温と口腔内温の至適温度の差は、振動覚と味覚という異質の知覚に因っているのか、それとも口腔が中枢神経に近い場所にあり、常時深部温に近い温度に曝されていることに因るのかは不明である。皮膚温と環境温は同じではないが、 25°C の環境温は暑くもなく又寒くもない一番快適な温度でもあり、この温度と近似していることは興味深い結果であった。図4からも判るように、個人個人で至適温度と振動覚閾値には差が認められる。そこで年齢の影響を検討し年齢と振動覚閾値の関係を示す図5をみると、加齢と共に閾値は上昇しており高齢になるほど振動覚に低下が生じていることを示している。この結果は、我々の経験とも一致し、加齢と共に客観的に知覚鈍麻の傾向を示している。男性と女性の間での比較では、女性に年齢の影響がみられない。これは女性の被検者が20歳代前半の若い女性に集中して実験群のとりかたに男性と差があるためと推測された。

4) 至適温度の個人差

振動覚が最も鋭敏になる温度にも個人差が認められる。年齢と弱い相関が見られ、加齢と共に至適温度は低下する傾向になる。その原因は不明であるが、加齢と共に新陳代謝は低下し基礎体温も低下するが、この様な基礎体温の低下に伴った振動覚の至適温度の低下とも推測される。従って加齢による生体機能の変化に対応して最大限に機能低下を補っている適応現象とも考えられる。至適温度においても、男性でより相関が高いが女性では相関がみられず、これは被検者群の年齢分布の幅が狭く、偏りがあったためではないかと推測される。

5) 雑音の作用部位

皮膚では触圧覚、痛覚、温覚、冷覚に加え振動を感じる事が出来る。振動覚とは、数十Hzから数百Hzの繰り返し刺激で生ずる感覚と定義され、数十Hzの

低い振動刺激を粗振動感覚と呼んでいる¹¹⁾。振動覚は200Hz前後の振動で一番閾値が低く、これ以上でも以下でも閾値は大きくなる。振動覚は皮膚、皮下組織、深部組織の何れにも感受性があり、振動覚の受容体はパチニー小体であり、粗振動覚はマイスネル小体が受容体となっている。これらの受容体で認知された刺激信号は、受容体を形成する1次ニューロンである脊髄後根神経節細胞として中枢へ情報を伝達し、延髄レベルで2次ニューロンに更に視床レベルで3次ニューロンに情報を伝達し大脳皮質の1次体性感覚野に至っている¹²⁾。人の皮膚振動覚においても確率共振の原理が作用していることが明らかになったが、振動覚が皮膚のマイスナー小体から2次及び3次ニューロンを介して大脳皮質の体性感覚野の何処で熱雑音が作用して、このような確率共振の原理が働いているのかとの疑問が生ずる。皮膚の感覚器も神経線維も中枢神経も何れも神経組織であり、武者利光等は神経線維で熱雑音による自発的なインパルスを観察しているが、感覚器でも信号伝達の末梢ニューロンさらには大脳皮質の中枢神経の何れにおいても熱雑音を発していると考えられ、何処でも確率共振の原理が作用し得ると考えられる。今後、雑音の作用点について何らかの方法で検討すべきと考えられる。

結語

- 1) 皮膚振動覚は皮膚温の影響を受け、皮膚温が25～30℃が至適温度であり、この温度で最も振動覚閾値は低く鋭敏である。至適温度より低くとも高くとも閾値は上昇し、皮膚温と振動覚閾値の間には二次式で示される関係が認められた。
- 2) この現象は、神経組織の熱雑音による確率共振の原理によると考えられた。
- 3) 冷湿布及び温湿布はこの原理を利用した、疼痛寛解の治療法であると考えられた。
- 4) 熱雑音が感覚器及び神経線維等の末梢組織で作用しているのか、また中枢レベルで作用しているのかは不明であり、今後検討する課題であると考えられた。

文献

- 1) 東 純一、大石 充、藤尾 慈、今川 英之、竹内 雅和：日本人健康成人における Computer Aided Sensory Evaluator Version Four (CASE-IV) を用いた振動覚閾値の調査糖尿病および末梢神経障害のない健康成人被験者での調査。_臨床検査 51 巻9号:1003-1008、2007
- 2) F. Moss, K. Wiesenfeld: *The benefits of background noise*. Sci. Am. 273(2): 50-53, 1995.

- 3) J. K. Douglass, L. Wilkens, E. Pantazelou, F. Moss: *Noise enhancement of information transfer in crayfish mechanoreceptors by stochastic resonance*. Nature 365: 337-340, 1993.
- 4) 河村 芳里：音の大きさと1/fノイズ負荷が会話文聴取に及ぼす影響、卒業論文、2004
- 5) 河原田 正美：雑音負荷が語音聴取に及ぼす影響について、卒業論文2004
- 6) 下澤楯夫、村上 準：昆虫の神経系は熱雑音をも利用して感度を上げている、電子科学研究、第6巻: 85-89、1998
- 7) 野崎大地、山本義：神経系における確率共振とその生体医用工学的応用、第14回ゆらぎ研究会抄録集、1999
- 8) 武者利光：1/f揺らぎ研究の最近の話題、ゆらぎの科学7、143-164、ゆらぎ研究会編、森北出版、東京、1997
- 9) 園田奈央：口腔内温度の変化に伴う甘味閾値の変化についての実験的検討、2005
- 10) 林 友子：口腔内温度の変化に伴う旨味閾値の変化ならびに味覚閾値に影響する要因の検討、2005
- 11) 坂東武彦、小山省三監訳、バーン・レヴィ生理学、第8章 体性感覚、西村書店、新潟、1996
- 12) 本郷利憲、廣重 力監修、標準生理学、II 体性感覚、医学書院、東京、2002

The Influence of Skin Temperature on Vibration Sense of Skin

Ryoko Tabata, Hiroaki Tabuchi, Tomoko Hata, Yasuko Tsujii, Megumi
Ota, Souji Kitatani, Emi Miyaki, Chie Matsuda

Key Word : Vibration sense threshold, Skin temperature, Thermal noise, Stochastic Resonance, Aging and skin sensation

On exposure to cold environment and lowered skin temperature, humans experienced a dulling of skin sensation. Therefore, we investigated the relationship between skin temperature and vibration perception on the thumb in thirty volunteers by an objective and quantitative computer-aid evaluation method using CASA II system.

The second order relationship between the temperature and vibration sense threshold was recognized and the optimal temperature, which showed the lowest threshold for vibration sense at 25 ~ 30°C . At temperatures lower and higher than the optimal temperature, the threshold increased compared to that at optimal temperature and the vibration sense was decreased. Older volunteers showed a higher threshold for vibration sense than younger volunteers and a linear correlation between age and the most sensitive threshold was recognized.

This phenomenon may originate from Stochastic Resonance in the nervous system in which thermal noise in the nerve system was added to the underlying threshold nervous signal and underlying threshold nervous signal was recognized when the optimal thermal noise level was added. Not only a smaller but also a larger noise level than the optimal level thermal noise adversely affected recognition of nervous signal and therefore the relationship between the temperature and vibration sense threshold showed a second order relation. In pain perception, the same phenomenon may apply. This phenomenon has been used as cold or hot wet pack therapy to control pain sensation.