指先の皮膚感覚の温度依存性とそのモデル

正員 内田 雅文 (青山学院大)

正員 井出 英人 (青山学院大)

The Effect of Skin Temperature on Vibrotactile Sensitivity of Finger and its Model

Masafumi Uchida, Member, Hideto Ide, Member (Aoyamagakuin University)

The vibration problems related to living bodies have so far been studied from the perspectives of engineering, physiology, and psychology. This study shows the relationship between vibratory sensibility and temperature in the living body.

Psychological experiments were carried out by using the vibrometer of an acoustical calibration apparatus in sine, triangular and square waves. The sensibility-threshold measurements were made using 30~700 Hz sine waves, 30~700 Hz triangular and sawtooth waves, or 30~250 Hz square waves. Each of ten subjects was kept seated. The average value of the vibratory levels, varied by ascending and descending steps, was taken as that of the threshold. As the vibrometer in the apparatus used makes a noise at frequencies greater than 250 Hz, it was masked from the subject by presenting him with a different noise.

The threshold curve for square waves was lower by 12.3 dB than that for sine waves at about 30 Hz. The threshold curve of the 26°C sine wave was lower by 10 dB than that of the 58°C sine wave vibration near 200 Hz. At frequency stimulation higher than 120 Hz, as the temperature of the contact point was lowered, the amplitude threshold increased and the frequency at which the threshold curve was at a minimum shifted to a lower frequency.

In addition, a model of the vibratory sensibility system was constructed by electronic circuits.

キーワード：触覚，皮膚感覚モデル，触覚センサ，ニューロンモデル

1. はじめに

人体の機能としての皮膚振動感覚は多面的な要素をもっていて、これを構成している要素もまた非常に多く複雑なものである。通常、神経系の諸機能の解析は、温度が一定もしくは緩慢な変化という条件下で行われ^{(1)~(3)}、急速な温度変化を与えた場合はあまり例をみない。また、恒温動物においては、温度変化がわずかならば脳全体の機能は神経回路網の補償作用によって正常に保たれているものと考えられる。温度感覚のしきい値強度は刺激温度と生理学的零点との差のべき乗に比例することが Stevens⁽⁴⁾ らによって示されている。感覚強度は温度刺激の方法や刺激部位などによっても異なり、温度などを考慮した場合の関係はまだ完全に解明されていない。

本研究は、パイロメータを試作^{(5)~(7)}し、温・冷感覚併用⁽⁸⁾⁽⁹⁾による振動刺激によってどのように振動感覚が変化して知覚されるかを心理物理実験に基づいて調べた。また、これら心理実験と生理実験とから振動感覚系のモデルを製作し検討を行った。

2. 振動エネルギーと指先の振動感覚

人が皮膚で振動を認識するのにどのくらいのエネルギーを必要とするかは、今後の研究においても重要なことである。しかし、その解答を得るには二つのパラメータの性格とその値を知る必要がある。一つは振動と振動感覚強度の関係であり、他は接触子を介して皮膚に振動を与える場合の皮膚の機械的インピーダンス特性である。ここで、ある振動感覚強度を生じる皮膚の振動速度 $V_1(\omega)\sin \omega t$ 、皮膚の機械インピーダンスを $Z_m(\omega)$ とすると、機械的エネルギー $E_m(\omega)$ は、

$$E_m(\omega) = \frac{1}{2} \cdot V_1^2(\omega) \cdot |Z_m(\omega)| \cdots \cdots \cdots (1)$$

となる。ここで、 $Z_m(\omega)$ は接触子を皮膚に付ける力 (F_1)、面積 (S_1)、周囲温度 (T_1) などの関係である。厳密には $Z_m(\omega) = Z_m(\omega, F_1, S_1, T_1, \cdots) \cdots \cdots (2)$ である。

振動振幅については、小畑⁽⁵⁾ が実験式を提案している。振動感覚しきい値の周波数特性は

$$\phi = K \sqrt{\left(1 - \frac{n_1^2}{f^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{n_1^2}{f^2}} \times \sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{n_2^2}\right)^2 + 4h^2 \frac{f^2}{n_2^2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 ϕ ：絶対しきい値の振動振幅(μm)，
 K ：比例定数(μm)， n_1 ：第1次振動感覚変態点(Hz)， n_2 ：第2次振動感覚変態点(Hz)， h ：制動定数

更に、 $K \approx 0.2 \mu\text{m}$ ， $n_1 \approx 210 \text{ Hz}$ ， $n_2 \approx 400 \text{ Hz}$ の値を得ている。また $h^2 = 0.45$ が最も良い近似を与えることが明らかになっている。

いま、 $h^2 = 0.5$ と仮定し、(3)式において多少の誤差を無視するものとすれば次式を得ることができる。

$$\phi = K \cdot \left(1 + \frac{n_1^4}{f^4}\right)^{1/2} \times \left(1 + \frac{f^4}{n_2^4}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

従って、振動速度は

$$V_1(\omega) = \omega \cdot \phi = \omega \cdot K \cdot \left(1 + \frac{n_1^4}{f^4}\right)^{1/2} \times \left(1 + \frac{f^4}{n_2^4}\right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3. 心理物理実験による温・冷感覚併用による振動感覚特性

音響機器校正装置の一つであるパイプロメータを用い、各種の振動波形に対する振動しきい値の相違を測定した。

〈3・1〉 実験装置および校正 パイプロメータを図1に示す。これによって正弦波振動ばかりでなく各種の波形を作ることが可能である。各種波形のうち正弦波で700 Hz，三角波，のこぎり波で500 Hz，方形波で400 Hzまで出力が可能である。しかし正弦波，三角波を除いて他の波形はパイプロメータを通ると波形ひずみを生ずるので微分回路を用いて補正した。実際にはしきい値測定のみを用いるので波形ひずみは無視できる。発信器からの出力をパイプロメータに導き，FM振動計（FM振動計の最高感度は0.01 μmである）によってパイプロメータの振動を測り，パイプロメータの二次側の誘起電圧を振動について校正した。校正曲線を図2に示す。温度制御のための振動部

に2束のコイルを巻き付けた。一方のコイルの束は液体窒素をバルブを制御して浸し，振動部の温度を下げることができる。他方はヒータを取り付けスライダックで温度を制御した。振動部の温度はサーミスタによって測温した。パ

図2 パイプロメータの校正曲線
Fig. 2. Corrected curves of the vibrometer.

図3 パイプロメータの負荷特性
Fig. 3. Load characteristics of the vibrometer.

図1 パイプロメータの構造
Fig. 1. Structure of the vibrometer.

イプロメータの負荷特性を図3に示す。

〈3・2〉 実験方法 しきい値を正弦波に関して周波数30~700 Hz, 三角波, のこぎりの波に関しては30~400 Hzにわたって測定した。また測定温度は-11, 4, 12, 26, 48, 58°Cの6種類の温度を用いた。

被験者は10人であり, 測定時の姿勢は座位状態である。測定座位は人差指の指頭である。しきい値の測定は実験者調整で極限法により, 振動レベルを上昇法, 下降法で変えてその平均値をしきい値とした。本装置においてパイプロメータは250 Hz以上でわずかではあるが音を放射するので, 雑音を被験者に与えてマスクした。経時変化, 感覚強度の順応は測定時間が短いため無視できた。

〈3・3〉 実験結果および考察 各種振動波形によるしきい値を測定した一例を図4に示す。

この結果から正弦波振動に比較して三角波, のこぎり波, 方形波のしきい値が低いことがわかる。なかでも, 方形波は正弦波に比較して80 Hzのとき7.9 dBの差があり, 30 Hzのとき12.3 dBの差が生じた。このことは生理学の立場から直接, 触圧受容器に刺激を与えた場合のインパルス頻度^{(15)~(17)}によっても証明されている。つまり, 急峻な刺激のほうが感覚しきい値が低いことを意味している。正弦波, 三角波, 方形波を用いた場合の振動刺激によるしきい値特性が, 温度とともにどのように変化するかを示したものが図5~図7である。ここで興味あることは, 120 Hz程度までの低周波の振動刺激に対しては, しきい値特性はほとんど温度による影響を受けないが, 120 Hz以上の高い周波数では, 温度が低くなるほど振動しきい値

の値が大きくなることである。

また温度が低くなるほど振幅しきい値が高くなるとともに, しきい値の最小を示す点が, 周波数の低いほうへ移動することがわかった。例えば, 正弦波においては(図5), 温度58°Cの場合では周波数270 Hz付近で振幅しきい値

図5 正弦波の振動振幅しきい値
(被験者10名の平均値)

Fig.5. Threshold values for the amplitude of vibration relation to the sine wave.

図4 各種振動波形による振動しきい値(26°C)
Fig.4. Amplitude threshold values (26°C) for various vibratory waveforms.

図6 三角波の振動振幅しきい値
Fig.6. Threshold values for the amplitude of vibration relation to the triangular wave.

図 7 方形波の振動振幅しきい値
Fig. 7. Threshold values for the amplitude of vibration relation to the square wave.

$$\phi = 0.1 \left\{ \left(\frac{210 + T}{f} - \frac{f}{210 + T} \right)^2 + 1 \right\}^{1.17} \times 1.6^{-T}$$

図中の.....は測定値、——は計算値

図 8 振動感覚のしきい値特性(正弦波)
Fig. 8. Threshold characteristics of vibratory sensibility (sine wave).

が最低になるのに対し、温度が -11°C のときには、振幅しきい値が最小になる点は 200 Hz 付近になっている。温度によって感覚が変化することは Carpenter⁽³⁾ によって生理学の面で研究されているが、まだ未知の部分が多い。

次に、温度が変化した場合をも考慮した式を求めることにする。図 5 の実験による特性曲線となるように、(3) 式を基本に消去法により温度のパラメータを含む式にする

$$\phi = K \left\{ \frac{1}{4h^2} \left(\frac{n_1 + T}{f} - \frac{f}{n_1 + T} \right)^2 + 1 \right\}^{1.17} \times A^{-T} \quad (6)$$

(6) 式で $K=0.14\text{ }\mu\text{m}$, $h^2=0.25$, $n_1=210\text{ Hz}$ とすると

$$\phi = 0.14 \left\{ \left(\frac{210 + T}{f} - \frac{1}{210 + T} \right)^2 + 1 \right\}^{1.17} \times A^{-T} \quad (7)$$

になる。

この式は、温度 58°C から -11°C までに n_1 がおよそ 270 Hz から 200 Hz へ変わり、また最小しきい値が $0.075\text{ }\mu\text{m}$ から $0.15\text{ }\mu\text{m}$ まで変化する式になるように A の値を変化させると、 $A=1.61$ のときに最も実測値に近い値になる。

図 8 に実測値と計算値を示す。非常によく一致することがわかる。これにより(7)式の妥当性が証明された。

しかし、(7)式は正弦波のみに当てはまり、三角波、方形波においては 200 Hz まで一致する。この場合、三角波のとき A は 1.72 、方形波で A は 1.85 であった。このことは A が波形に依存することを示す。特に三角波、方形波は高調波を含むためと思われる。今後検討すべき課題である。

4. 振動感覚モデル

神経回路網⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の動作の解明は、生理学的にまだまだ不明な部分が多く、何らかの仮設を取り入れて計算機シミュレーション⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾による解析が試みられている。

本研究では Harmon のニューロンモデル⁽¹⁰⁾を改良し、ハードウェアニューロンを用いて振動感覚モデルを試作し皮膚振動感覚機構の解明を試みた。ニューロンモデルの応用対象として、神経系でも特に皮膚感覚を選んだのは、いまだ皮膚振動感覚が心理現象として研究されているが、生理、工学的にはあまり解明されていないからである。

また皮膚感覚が簡単に振動系、ロボットの手、感覚代行などへの応用として研究が活発になってきており、そのメカニズムを知り更に高度のセンサを作りたい理由もある。

〈4・1〉ニューロンモデル 本研究で扱うニューロンモデルは Harmon のニューロンモデル⁽¹⁰⁾の変形である。これは興奮性入力と抑制性入力を持ち、更に静止しきい値、不応期、疲労、発火などの動きを行うことができる〔図 10(c)〕。

(1) 相互抑制係数の影響 入力にパルス幅 1 ms , 1.2 V のパルスを $0\sim 350\text{ pps}$ まで興奮性入力に加えた。そして相互抑制係数 K を $0\sim 0.25$ まで変化させ、各々に対する入出力パルス頻度を測定した。

(2) 自発放電 生体では、生理学的に知られている自発放電がある。これはシナプスにあるアセチルコリン分

泌のランダム性に基づく神経細胞の発火である。これをモデルで得るために、ニューロンモデルの興奮性入力に3 V_{P-P}の白色雑音を加え、そのときのパルスインバートヒストグラムを測定した。

〈4・2〉 振動受容モデル 生理実験から受容器自身が、周波数しきい値特性をもっていることが明らかになっている。心理実験で得られた振動感覚しきい値曲線は、受容器の伝達特性に関与していると思われる。

この伝達特性は実験結果より

$$F(s) = K \cdot \frac{s}{(1 + T_1 s + T_2 s^2)} \quad (8)$$

ここで、 $K = 8.3 \times 10^{-5}$ 、 $T_1 = 2.8 \times 10^{-7}$ 、 $T_2 = 6.7 \times 10^{-9}$ で与えられた。

この回路をニューロンモデルの入力の一次遅れ回路〔図10(a)〕として挿入し、振動受容器モデルとした。

〈4・3〉 温度応答のシミュレータ Andrew⁽¹¹⁾のニューロンの温度応答シミュレータを一部改良して試作した〔図10(b)〕。この回路は、入力に温度に比例した電圧を加えればニューロンの温度応答が出力される。

〈4・4〉 振動感覚モデルによる実験および結果 図9、図10で示された回路システムで実験を行った。なおNU₁₅では抑制係数を2倍とし、エッジの影響をなくしている。図11に自発放電のインバートヒストグラムを示した(温度26°Cのとき)。

(1) 振動感覚のしきい値 図9のP₃点に正弦波電圧を加え、大脳皮質層NU₃₃を観測した。その結果の一例を図12に示した。また温度変化を加えた場合の結果を図

13に示した。温度変化によってインパルス頻度の出現に変化があることがわかった。26°C(室温)により温度を48°Cに上昇した場合インパルス頻度が100 Hzのとき20 ppsほど増加した。

(2) 周波数差の影響 入力P₁に基準周波数40 Hzを加えた。P₉に100, 250 Hzを入れ、その各々の周波数について測定した。いわゆる周波数差に対するマスキング現象は、刺激周波数の高いほうへ感覚が移行していく。これは各ニューロン層での抑制の影響である。すなわち、振動刺激周波数が高ければその点のパルス発生頻度は多くなる。また温度を上昇させた場合は、インパルス頻度発生に室温時と比較して著しい変化は生じなかった。

(3) 温度変化を考慮した場合 図10(b)の温度変化を与える回路を受容器の前あるいは後に入れた。受容器の後に入れた場合は図12とほとんど同じであった(影響はなかった)。受容器の前に温度変化を加えたときは、図13のようにインパルス頻度に変化が生じた。200 Hzの場合室温(26°C)に比較して48°Cのときはインパルス頻度が多く出現し、4°Cの場合はインパルス頻度が減少した。このモデルから人の皮膚振動感覚の温度変化は受容器部分の変化によって影響を受けることが明らかになった。

〈4・5〉 考 察 振動感覚しきい値については、図5から示されるように高い周波数(250 Hz以上)においてしきい値が上昇しているが、これはニューロン層での情報処理に基づく結果でなく、皮膚受容器の段階で決定されている。モデル実験から低い周波数においては受容野が広がり(影響を受ける感覚ユニット数が増す)、高い周波数

図9 振動感覚モデル
Fig. 9. Vibratory sensibility model.

図 10 振動感覚モデルの各部電子回路
Fig. 10. Various electronic circuits for the vibratory sensibility model.

図 11 モデルからの自発放電測定
Fig. 11. Measurement of spontaneous discharge from the model.

になると受容野は小さくなることがわかった。また各ニューロン層での情報処理過程をみると、振動刺激周期は40~100 Hz までは比較的良好に高次ニューロンへ伝達されているが、高くなると周期性はかなり乱れてくる。

温度の変化による皮膚感覚特性をモデルによって示した

図 12 モデルによる振動感覚特性
(温度変化除く)

Fig. 12. Characteristics of vibratory sensibility for various models.

図 13 モデルによる振動感覚特性 (48°C に温度変化をしたときの NU_{33} 部分のインパルス変化)
Fig. 13. Characteristics of vibratory sensibility for various models.

が、各ニューロン部での変化より受容器部分での温度変化が影響することが明らかになった。特に皮膚や脂肪などのコンプライアンスが温度の影響で変化し、同時に振動受容器の特性を変えられると思われる。また、このモデルにより周波数差の影響、振動感覚しきい値特性など生理学実験とも一致することがわかった。

5. む す び

本研究では、各種振動波形による振動振幅しきい値、また、温・冷感覚を併用したときの変化を心理学的実験により示した。接触子の温度が変化したときに次のような傾向で振動振幅しきい値特性が変化した。

(1) 振幅しきい値特性は、120 Hz 程度までの低い周波数の刺激では接触子の温度が変化してもほとんど影響を受けない。

(2) 120 Hz 以上の高い周波数の刺激では、接触子の温度が低くなるほど振幅しきい値が高くなるとともにしきい値曲線が最小になる周波数が低周波数のほうに移動する。

そして、この特性曲線を満たす実験式を

$$\psi = 0.1 \{ (210 + T/f - f/210 + T)^2 + 1 \}^{1.17} \times 1.61^{-T}$$

と求めた。

指先の皮膚振動感覚は接触部の温度が低下するほど、振動振幅しきい値が高くなることがわかった。これは、モデ

ルからも明らかにできた。

皮膚感覚モデルで示した温度応答は、実際のニューロンの特性をよく再現することができた。ここで得られた結果はそのままニューロン全般に当てはまるものではないが、神経回路網の状態安定性の解析や異種刺激の関係、他のニューロンの温度効果と関係ある諸機能の解析にも役立つものと思われる。ロボットの触覚などの情報を伝達する場合の最適刺激条件を見いだすための基礎研究として重要である。

(平成7年1月25日受付, 同7年4月12日再受付)

文 献

- (1) B. G. Green: "The Effect of Skin Temperature on Vibrotactile Sensitivity", *Perception & Psychophysics*, **21-3**, pp. 243-248 (1977)
- (2) D. Ottoson: "the Effects of Temperature on the Isolated Muscle Spindle", *J. Physiol. (London)*, **180**, 636 (1965)
- (3) D. O. Carpenter: "Temperature Effects on Pacemaker Generation, Membrane Potential and Critical Firing Threshold in Aplysia Neurons", *J. Gen. Psychol.*, **50**, 1469 (1967)
- (4) S. S. Stevens: "On the Psychophysical Law", *Psychol. Rev.*, **64**, 153 (1967)
- (5) 小畑: 「指先の振動感覚について」, 電気試験所研報, 570 (昭33)
- (6) H. Ide, et al: "Relation between Vibratory Sensibility and Electric Signal of Living Body", *Med. & Biol. Eng.*, **11**, 603 (1973)
- (7) H. Ide: "Vibrotactile Stimulation by Using Both the Electrical and Mechanical Stimuli", *ibid.*, **14**, 451 (1976)
- (8) 井出: 「皮膚振動感覚の温度依存性」, 信学論(C), **J66-C**, 616 (昭58-8)
- (9) 井出・小畑: 「温・冷覚併用による皮膚振動感覚」, 電気学会・通信学会生体情報合同研資, IM-82-11, 37 (昭58)
- (10) L. D. Harmon: "Studies with Artificial Neurons", *Kybernetik*, **1**, 89 (1961)
- (11) S. F. Andrew, et al.: "A Flexible Neural Analog Using

Integrated Circuits", *IEEE, BME-17*, **3**, 248 (1970)

- (12) 古賀, 他: 「神経回路の構成要素としてのハードウェアニューロンモデル」, 信学論(C), **J63-C**, 1 (昭55-1)
- (13) 萩田, 他: 「痛覚伝導機能の神経回路モデル」, 通信学会医用電子・生体工学研資, MBE 77-44, 9 (昭52)
- (14) 仁木・佐分利: 「シナプスの長期記憶を表現する学習神経モデル」, 信学論(A), **J64-A**, 948 (昭56-11)
- (15) V. B. Mountcastle, et al.: "Cortical Neuronal Mechanisms in Flutter-Vibration Studied in Unanesthetized Monkeys", *J. Neurophysiol.*, **32**, 452 (1969)
- (16) 間野, 他: 「単一神経繊維の生理」, 神経研究の進歩, **26-1**, 248 (昭57)
- (17) 酒田: 「触覚の神経コーディング」, 科学, **40**, 632 (昭45)

内 田 雅 文 (正員) 1964年9月6日生。1990年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了(電気工学専攻)。移動ロボット, ニューラルネットワークなどの研究に従事。現在, 青山学院大学理工学部電気電子工学科助手。工学博士。IEEE, 日本ロボット学会, 神経回路学会会員。

井 出 英 人 (正員) 1970年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了(電気工学専攻)。1985年UCLA応用科学科客員研究員。1986年UCLA脳研究所客員教授。感覚の計測, 感覚代行の研究に従事。青山学院大学理工学部講師, 助教授を経て, 現在, 同教授。工学博士。日本ロボット学会, 電子情報通信学会, 計測自動制御学会会員。