

経皮電気刺激における振動知覚の電極サイズ依存性

梶本 裕之<sup>†</sup> 舘 暲<sup>†</sup>

Electrode size affects frequency discrimination in electro-tactile display

Hiroyuki KAJIMOTO<sup>†</sup> and Susumu TACHI<sup>†</sup>

あらまし 機械振動に対する触覚知覚では、振動子のサイズによって感覚を生じる閾値、及び感覚の質が変化することが知られており、活動する機械受容器の種類の違いによって説明されている。これに対してもう一つの代表的な触覚提示手法である経皮電気刺激では、電極サイズと感覚閾値(すなわち感覚の「量」)の関係に関する報告は多いものの、機械振動の場合のように電極サイズと感覚の「質」との関係に着目した報告は少ない。本論文は、電気刺激における振動感覚の質に関して、同様の刺激面積依存性があるか否か、という問題を扱う。サイズの異なる2種類の電極を用いて周波数弁別実験を行い、弁別能力が電極サイズに依存すること、さらにその依存性が機械刺激の場合と同様に刺激される受容器の種類の違いによって説明できることを示す。

キーワード Meissner 小体, Pacini 小体, 選択刺激, 触覚ディスプレイ, 電気刺激

1. 序 論

触覚における振動知覚には2種類の受容器が関与していることが知られている [10, 19]。第一に 15~120Hz の低周波領域を担当する Meissner 小体, 第二に 45Hz~800Hz の高周波領域を担当する Pacini 小体である (図 1)。これらの受容器は空間的にも明瞭な役割分担があることが知られている。Meissner 小体が皮膚表面から 1mm 程度の浅部に存在し、数 mm の受容野を持つのに対し、Pacini 小体は 2mm 以上の深部に存在し、数 cm の受容野を持つ。

特に Pacini 小体は空間的加算特性と呼ばれる著しい特徴を持つ [10]。これは皮膚表面の振動子の接触面積によって活動閾値が大きく変化するというものである。Pacini 小体が皮膚深部に存在するために皮膚が空間的低周波フィルタとして働き、その結果低周波成分を多く含む大きな振動子でより刺激されやすくなるものと考えられる。

Pacini 小体の空間的加算特性はまず心理物理実験によって明らかとなった。Verrillo は振動子を用いた心理実験で、例えば直径 1mm 以下の針状の振動子では感覚閾値の周波数依存性はほとんど無いのに対して、

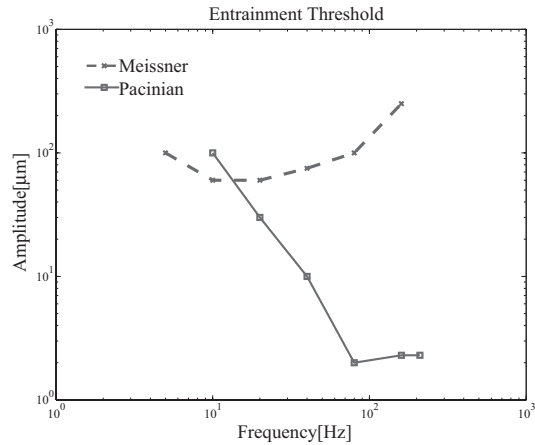


図 1 直径 2mm の振動子による振動に対する Meissner 小体, Pacini 小体の応答特性。横軸は振動の周波数, 縦軸は振動に同期した発火を引き起こす振幅閾値。[5] より再構成

Fig. 1 Entrained threshold of two types of mechanoreceptors, Meissner corpuscle and Pacinian corpuscle. Horizontal axis: vibration frequency. Vertical axis: vibration amplitude. Reconstructed from [5]

直径 5mm 程度の振動子で面接触して振動を与えた場合、200Hz 付近で極端に閾値が低下する現象を見出した (図 2) [20]。当時は受容器と感覚の関係自体が知られていなかったが、この実験結果により「振動子の

<sup>†</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科 文京区本郷 7-3-1  
School of Information Science and Technology, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku

直径に影響されない低周波の振動感覚検出機構と、影響される高周波の機構がある」という二重説 (duplex theory) が提唱され、その後各受容器の応答特性が直接計測されてから Meissner 小体, Pacini 小体に対応付けられた。

Pacini 小体に起因する空間的加算特性には次の二つの工学的意義があると考えられる。

- 感覚の「量」を振動子のサイズによって制御できること。
- 感覚の「質」を振動子のサイズによって制御できること。

第2点目が特に重要である。空間加算特性は Pacini 小体に固有であるため、Meissner 小体の刺激量を変化させずに Pacini 小体の刺激量を制御することが可能である。触覚にとってこの二つの受容器の活動比率が、例えばザラザラ感などの感覚の質を決定する重要な要素であると考えられるため、振動子のサイズによって2種類の受容器の活動比率を制御できる点は、今後の高品位な触覚呈示において重要であると思われる。この議論に基づいた触覚ディスプレイも既に提案されている [3]。

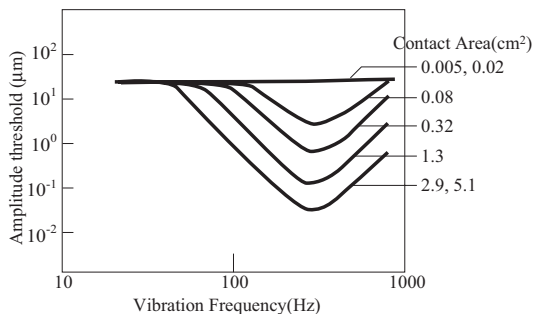


図2 振動感覚閾値の接触子サイズ依存性。[20]より再構成

Fig. 2 Vibratory sensation threshold as a function of contact area of the vibrator. Reconstructed from [20]

機械振動に対し、触覚呈示のもう一つの代表的な手法として経皮電気刺激がある [1, 2, 4, 13-17]。皮膚表面に配置した電極から電流を流し、皮膚下の感覚神経の活動を誘発するというものである。経皮電気刺激は機械的な刺激に比べ、壊れにくく小型化が容易など多くの利点をもつ。

しかし電気刺激に関しては、ある条件下での振動弁別能力に関する研究 [4, 14, 15] や、電極サイズと感覚

閾値(すなわち感覚の「量」)の関係性を明らかにする報告は多いものの、機械振動の場合のように電極サイズと感覚の「質」との関係に着目した報告は少ない。

本論文は、電気刺激における感覚の「質」に関して、同様の刺激面積依存性があるか否か、という問題を扱う。サイズの異なる2種類の電極を用いて周波数弁別実験を行い、弁別能力が電極サイズに依存すること、さらにその依存性が機械刺激の場合と同様に刺激される受容器の種類の違いによって説明できることを示す。

## 2. 実験

### 2.1 システム

図3は電気刺激と機械刺激(上下振動)を同一場所に対して行うことができる刺激装置である。スピーカに取り付けた電極(ステンレス製、直径1.0[mm])により皮膚を電氣的、および機械的に刺激する。スピーカ基部と電極間の距離はフォトリフレクタにより計測可能である。別途フォトリフレクタの出力電圧と移動距離の関係はハイトゲージにより較正されている。電気刺激の刺激回路に関しては以前の報告 [7] で用いたものと同じものを用いた。不閉電極として6.0mmの穴を開けたステンレス板を用いた。

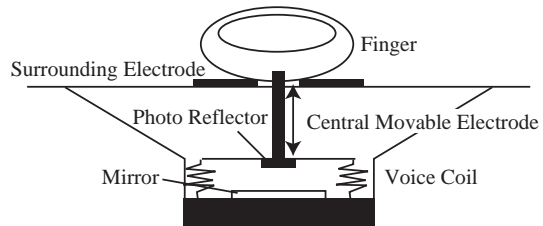
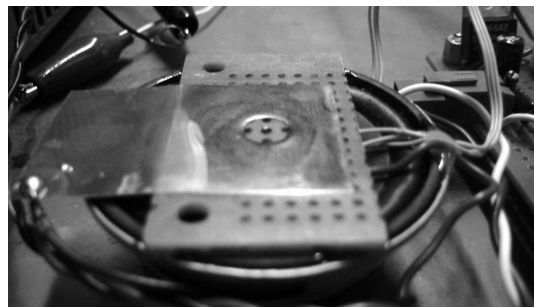


図3 電気刺激と機械刺激(上下振動)を同一場所に対して行うことができる刺激装置

Fig. 3 Mechanical and electrical stimulator to the same location

## 2.2 予備実験：機械的正弦波に対する周波数弁別実験

まず機械的正弦波に対する周波数弁別能力を極限法により測定した。被験者は人差指の腹で電極に触れ、電極を振幅 0.1[mm] で振動させる。標準刺激、及び周波数の異なる比較刺激をそれぞれ 1 秒ずつ、1 秒の休みを挟んで提示し (図 4)、周波数の高低を二件法で解答させる。回答に迷った際の刺激の繰り返しは無制限に認めた。比較刺激の周波数は標準刺激の 0.5 倍、または 2.0 倍から開始し、正しい解答を続ける限り徐々に標準刺激に近づけ、初めて解答を間違えた場所を周波数弁別閾値とする。4 名 (25~35 歳男性 3 名女性 1 名) の被験者に対し周波数 15,30,60,120Hz で上下閾値を 5 回ずつ取得した。

縦軸に比較刺激周波数の標準刺激に対する比をとった 4 名分のデータを図 5 に示す。図の横軸が標準刺激の周波数、縦軸が比較刺激の周波数である。Descending Series が極限法における下降系列、Ascending Series が上昇系列を表す。閾値が 1.0 に近いほど弁別能力が高いことを示している。全ての周波数において ±20% 程度の周波数弁別能力を示している事がわかる。

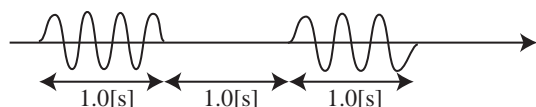


図 4 周波数弁別実験に用いる刺激系列。振幅 0.1[mm]、標準刺激および比較刺激を各 1 秒、1 秒の休みを挟んで提示。

Fig. 4 Series of stimulation for frequency discrimination test. Amplitude is 0.1[mm]. Standard and comparison stimuli are presented 1s, with 1s rest period.

## 2.3 電気刺激における周波数弁別実験

次に同心円電極を用いた電気刺激を行い、刺激パルス周波数に対して同様の弁別実験を行った。

機械的正弦波に対して受容器はその周波数で同期して発火することが知られている [18]。これに対して電気刺激は 1 パルスの刺激で 1 回の神経活動を引き起こすから、電気刺激はそのパルス周波数の振動と知覚され、機械振動と同等の弁別能力を示すと期待される。

中心電極直径 1.0[mm]、不関電極内周 6.0[mm] の電極を用い、陽極性パルス刺激を行った。通常の電気刺激では陰極性のパルスを用いることが多いが、指先に関しては陽極性パルスの方がより明瞭な振動感覚を生じる事が知られているためである [6, 7]。

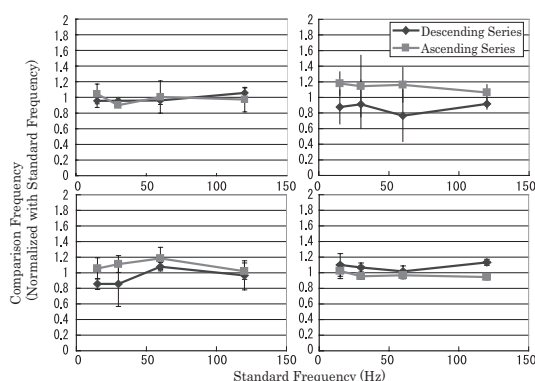


図 5 機械的振動 (正弦波) に対する周波数弁別実験結果。縦軸は比較刺激周波数と標準刺激周波数の比。

Fig. 5 Frequency discrimination of the sine wave mechanical vibration. Vertical axis is normalized with standard frequency.

標準刺激のパルス周波数は 15,30,45,60,120Hz、パルス電流値は約 2.4[mA]、パルス幅 0.2[ms] とした。被験者によって電流閾値に差があり、また発汗によって経時変化を生じるため、電流値は被験者自身が常に PC を介して調整可能とした。つまり被験者は周波数弁別を行い易い最適な電流値で弁別を行った。結果を図 6 に示す。

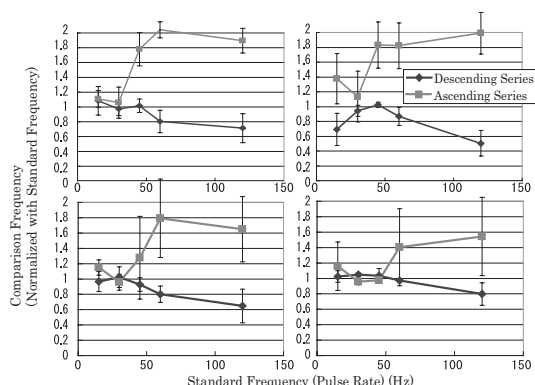


図 6 電気刺激パルスに対する周波数弁別実験結果。

Fig. 6 Frequency discrimination of the electrical pulses.

15,30Hz においては機械刺激と同等の周波数弁別能力を示したが、45Hz から上側弁別閾が急激に 2 に近い値を示した。これは 45Hz のパルスを、90Hz のパルスよりも高いと感じられなかったことを意味する。

この現象を詳しく調べるため、実験手法を極限法から恒常法に切り替えた。標準刺激、及び周波数の異なる

る比較刺激を提示し、周波数の高低を二件法で解答させるのは以前と同様である。比較刺激の周波数を標準刺激の周波数の 0.5 ないし 2.0 倍として、それぞれの比較刺激周波数に対して複数回の試行を行い、比較刺激を、標準刺激よりも高いと回答した率を得た。

回答率を累積正規分布関数でフィッティングし、75%の正答率を得るための比較刺激周波数を得ることが出来る。この比較刺激周波数と標準刺激周波数の差を 75%弁別可能閾値と呼ぶことにする。75%弁別可能閾値が 0 に近いほど、その周波数での弁別能力が高いことを意味する。(なお弁別閾値として用いた 75%という値は感覚閾値計測で多く用いられる値である)

一般に恒常法は極限法と比べ実験には長時間を要するが、特に電気刺激の場合、実験中の発汗を取り除く注意が必要であった。

4名の被験者に対して実験を行った。一つの比較刺激に対する試行回数は10回。標準刺激は15, 30, 45, 60, および75Hzである。実験結果および累積正規分布へのフィッティング結果を図7に示す。なお45, 60, 75では実験回数を減らすために、比較刺激周波数が標準刺激より低い場合を省略し、上側閾値のみ求めている。

実験で得られた75%弁別可能閾値を図8に示す。縦軸は標準刺激周波数で正規化している。15から45Hzまでは75%弁別可能閾値が標準刺激の20%以下であることが分かる。しかし60Hzでは40%、さらに75Hzでは60%と急激に弁別能力が悪化していることが分かる。

2.3.1 考察：Meissner 小体の選択刺激

前節の実験結果は次のようにまとめられる。

- 機械的な振動では常に振動周波数の20%程度の変化を捉えることが出来る
- 電気刺激では45Hz程度までは機械的な振動と同様の弁別能力を示すが、60Hz以上で急激に弁別能力が低下する。

この結果は今回の電気刺激において、Meissner 小体は刺激されたが Pacini 小体が刺激されなかったと仮定して説明することができる。

まず電気刺激として Meissner 小体の方が Pacini 小体よりどれだけ刺激されやすいかを概算する。使用した同心円電極は刺激電極が直径 1mm、不関電極が内径 6mm であるが、簡単のため刺激電極を点電極、不関電極を無限遠であるとし、皮膚内部を等方性の均一

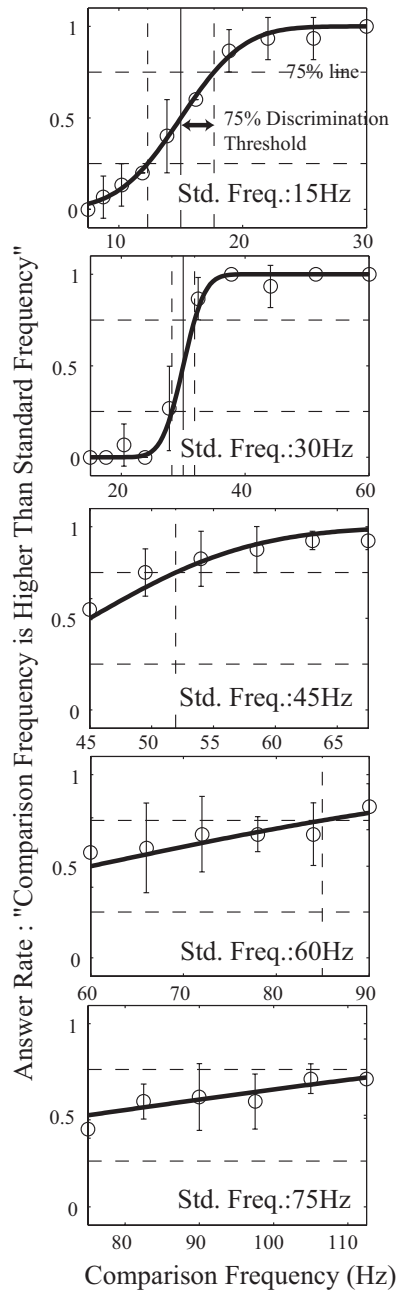


図7 恒常法による電気刺激パルスに対する周波数弁別実験結果。

Fig. 7 Frequency discrimination test of the electrical pulse with the method of constant.

な半無限空間とする(図9)。

電極からの距離  $R$  における電流密度  $i$  が

$$i(R) = \frac{I}{2\pi R^2} \tag{1}$$

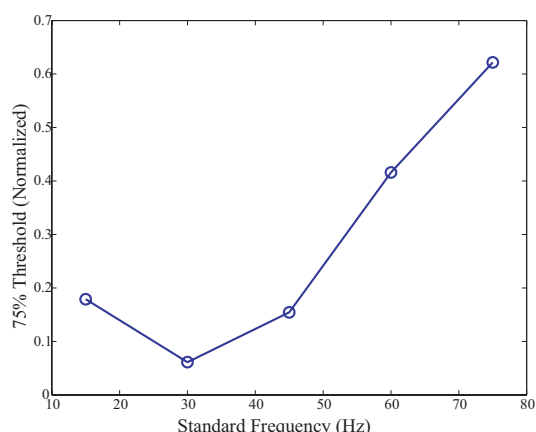


図 8 電気刺激における 75% 弁別可能閾値の変化．60Hz 以上で極端に弁別できなくなっている．

Fig. 8 75 % discrimination threshold is below 20% of the standard frequency when the frequency is 30 or 45Hz. It suddenly rises up at 60Hz.

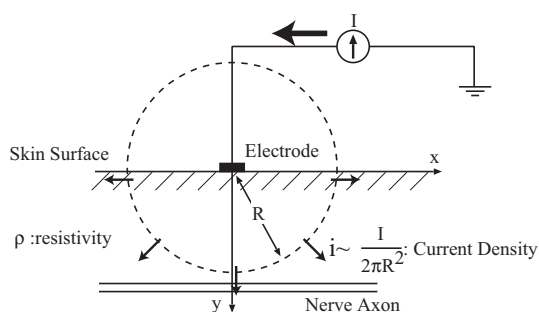


図 9 皮膚表面からの電流刺激．単一点電極の場合．

Fig. 9 Electrical stimulation from skin surface with single point electrode.

で表されることから， $R$  での電位  $\Psi(R)$  は  $\rho$  を抵抗率， $E$  を電場として

$$\Psi(R) = \int_R^{\infty} E dR \quad (2)$$

$$= \int_R^{\infty} i \rho dR \quad (3)$$

$$= \int_R^{\infty} \frac{I}{2\pi R^2} \rho dR \quad (4)$$

$$\propto \frac{1}{R} \quad (5)$$

となり，皮膚表面からの距離  $R$  に反比例する．

電気刺激における神経軸索の刺激し易さの指標として Activating Function という概念が多く使われ，実用性も検証されている [11, 12]．Activating Function は電位の神経軸索に沿った空間 2 階微分である．式 (5)

を  $R$  に関して 2 階微分することにより

$$\text{Activating Function}(R) \propto \frac{1}{R^3} \quad (6)$$

となる（これは神経軸索が  $R$  方向に伸びている場合であるが，それ以外の方向に伸びている場合でもほぼ同様の結論が得られる [7]）．

この結果は，皮膚下 1mm に存在する Meissner 小体と 2mm 以上の深さに存在する Pacini 小体では，点電極を用いた場合に  $2^3 = 8$  倍程度 Meissner 小体の方が刺激されやすいことを意味する．

以上の概算により，今回の実験において Meissner 小体が刺激され，Pacini 小体が刺激されていない状況が充分に考えられることが分る．この事実と今回の実験結果は次のように関連付けられる．

まず図 1 に示したように，15 から 45Hz の低周波領域は機械刺激では Meissner 小体のみが活動する領域である．今回の電気刺激が Meissner 小体を刺激しているために機械刺激と同等の弁別能力を示したと考えられる．

これに対して 70Hz 付近からは，本来機械刺激であれば Pacini 小体も活動を始め，Meissner との活動の比率が振動知覚の手がかりとなる領域である．しかし本刺激では Pacini 小体が活動していないものと推測される．この違いから振動周波数知覚に間違いを生じたものと解釈される．

#### 2.4 大型電極を用いた刺激による仮説検証

前節の考察が正しいとすれば，深部にも到達する刺激によって Pacini 小体をも刺激すれば，周波数弁別能力は向上するはずである．これは電極サイズを極端に大きくすることによって実現できると考えられる．

ここでは図 10 に示す 2 点電極を指の正中神経に沿って配置することで，より確実に深部神経の活動を誘発した．電極は指の第二関節 (MCP 関節) 付近に装着するが，正中神経を正しく刺激出来た場合，指全体に広がる感覚を生じる．なおこのような刺激手法は神経伝導速度 (Nerve Conduction Velocimetry) 検査の分野で広く使われており，神経束中のほとんどの神経が刺激されることが知られている．

小型電極による実験と同様，恒常法によって弁別閾値を測定した．標準刺激周波数としては 60, 75, 90, 110, および 140Hz を用いた．このときの刺激電流値は約 1.2[mA] であった．

結果を図 11 に示す．さらに実験で得られた 75% 弁別可能閾値を，前回の結果とあわせて図 12 に示す．

小型電極による実験で弁別成績が悪化した周波数において、大型電極を用いた実験では劇的な改善が見られた。この結果は先ほどの考察、すなわち小型電極を用いた電気刺激では Meissner 小体のみ刺激されていたとの仮説が検証されたことを意味する。

しかし同時に、図 12 からは、今回の刺激においても、140Hz 以上では極端に弁別能力が落ちていることが分かる。

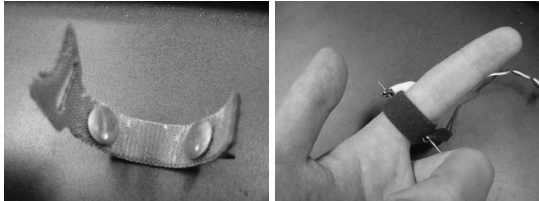


図 10 深部刺激に使用した指電極  
Fig. 10 Large finger electrode for deeper part stimulation.

#### 2.4.1 考察

前節の実験により、我々の仮説：「小型電極による刺激が二つの振動知覚受容器のうち Meissner 小体のみを刺激するために 60Hz 以上での弁別成績が悪化した」は棄却されなかった。

しかし第 2.3 節および第 2.4 節の実験では、刺激電極のサイズのみならず、位置および電流量も変更している。このため、前節までの結果に対する説明として、我々の仮説以外の可能性を二つ考えることが出来る。

第一に刺激部位や電流値が異なるために、刺激される神経軸索の本数、すなわち刺激の強さが単純に増加して弁別能力を向上させた可能性である。しかしこの可能性はすぐに棄却される。なぜなら純粋な神経発火量の増加のみであれば、あらゆる周波数で弁別能力は一樣に向上するはずであるが、実験結果は明らかにそれだけでは説明できない周波数依存性を示しているからである。

第二に考慮すべきは、大型電極が小型電極とは異なる刺激部位を刺激していたために、刺激部位付近に存在する受容器の種類や密度が異なっていて弁別能力を変化させた可能性である。この可能性を検証するため、大型電極で刺激した部位（指第二関節（MCP 関節）付近）に小型電極を押し当て、第 2.3 節と同様の実験を行った。被験者は第 2.3 節および第 2.4 節で標準的な結果を示した 1 名、標準刺激周波数は 30, 45, 60, 70[Hz] である。必要とする電流量は第 2.3 節と同様

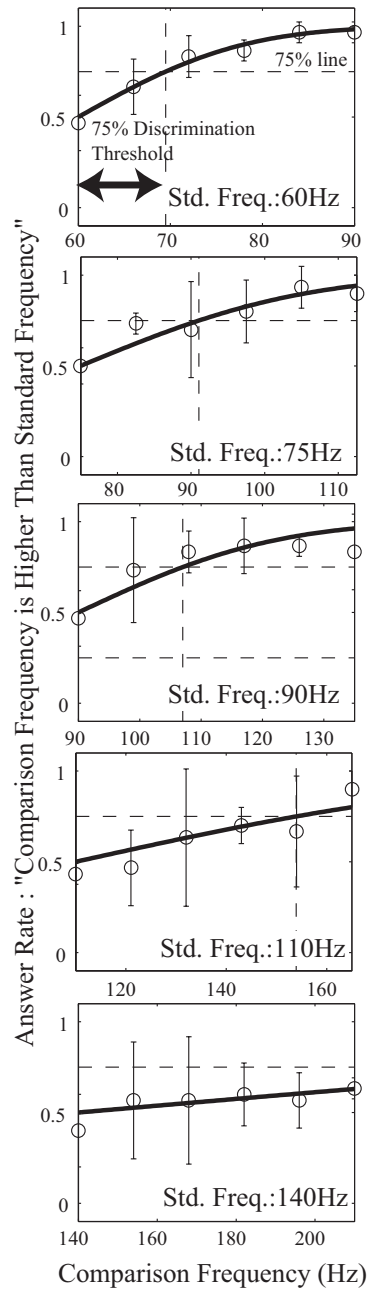


図 11 大型電極による刺激における電気刺激パルスに対する周波数弁別実験結果。  
Fig.11 Frequency discrimination with larger electrodes.

であった。

この結果を図 12 に点線で示す。大型電極を用いた場合に比べ弁別能力が低下していることが分る。また

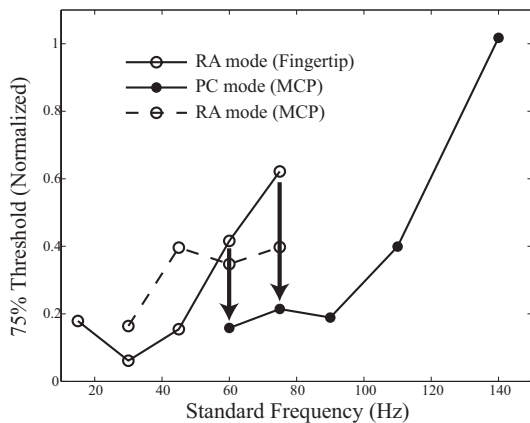


図 12 電極サイズの変更による 75% 弁別可能閾値の変化。小型電極で弁別成績が悪化した周波数において、大型電極で改善が見られた。また大型電極を用いた場合と同じ場所で小型電極を用いた場合には弁別成績は改善しなかった。さらに大型においても、140Hz 以上では極端に弁別能力が落ちていいることが分かる。

Fig. 12 75% discrimination threshold decreases dramatically at 60 through 90 Hz when large electrode was used. However, the threshold is still high at 140Hz or more.

被験者の体感としては振動感覚を非常に生じにくく、むしろ痛覚の強さで判定してしまうとの意見も得た。45[Hz] から 75[Hz] までほぼ一様の弁別成績であるのがこれが理由と思われる。この実験により、刺激部位の変更自体は弁別能力向上には寄与していないと言え、よって第二の可能性も棄却されたと言える。

以上の考察により、我々の仮説：「指先で小型電極を用いた場合に深部の Pacini 小体が刺激されないことが 60[Hz] 以上の周波数弁別を困難にしている」は検証されたと思われる。

電気刺激の周波数弁別能力が 100Hz 程度までであることは Szeto らによって 1979 年の段階で報告されている [14]。他のいくつかの報告でも 100Hz が電気刺激における周波数弁別の限界として現れている [4, 15]。彼らの実験の動機は電気刺激で提示可能な情報の量を見積もることであり、全ての実験において大型の同心円電極、あるいは指輪電極を用いて深部まで刺激している。今回の小型電極による刺激のような、浅部のみの電気刺激による周波数弁別実験は行われておらず、このため電極サイズによる周波数弁別能力の変化が見出されなかったものと推察される。

電気刺激で 140Hz 以上の周波数で周波数弁別が出来なかったことは、電気刺激と機械刺激の本質的な相

違に起因すると思われる。機械刺激では受容器「そのもの」に機械的に時間周波数選択性があるため、例えば 100Hz 以上の高周波振動で Meissner 小体は活動し難い [9]。しかし電気刺激の場合、刺激されるのは受容器ではなく受容器につながる神経軸索であるため、例えば 200Hz のパルスを入力したとしても、Meissner 小体に繋がる神経軸索は発火してしまうという不自然な状況が容易に生じうる（これはすでに我々の別の研究で神経生理学的に確認されている [8]）。

恐らくこのことが、大型電極を用いた周波数弁別実験において 140Hz 以上の電気刺激で周波数弁別が難しくなった理由の一つと考えられる。140Hz 以上の領域は本来 Pacini 小体のみ活動するべき領域であるが、電気刺激は例えば大型電極を用いた場合も、深部のみの刺激は出来ないからである (表 1)。

表 1 受容器の周波数応答および電気刺激による等価的状況の作成。電気刺激では Pacini 小体のみ活動する状況を作り出すことが出来ない

Table 1 Frequency response of mechanoreceptors and reproductivity of the equivalent receptor activity by electrical stimulation.

Frequency	Meissner	Pacini	電気刺激による等価的状況の作成
15-45Hz		x	小型電極により状況作成可能
45-120Hz			大型電極により状況作成可能
140-800Hz	x		電気刺激では不可能

### 3. 結 論

電気刺激において、電極サイズの変化によって周波数弁別能力が変化することを見出した。この現象は振動感覚を担当する Meissner 小体と Pacini 小体に関して、Pacini 小体が刺激されない / されるという変化によって生じたものと推測され、機械刺激において Verrillo によって見出された Pacini 小体の空間加算特性と類似の現象であるということが出来る。

同時に、140Hz 以上の領域では周波数弁別能力が極端に落ちることを再確認し、その原因が電気刺激では機械刺激と異なり深部に存在する Pacini 小体のみを選択的に刺激できないためであると推測した。

この限界は将来的な触覚呈示装置の開発において、電気刺激の機械刺激に対する大きなデメリットと考えられる。しかし逆に機械的な刺激によって Pacini 小体のみを刺激することは難しくなく、また受容野が広く高密度提示の必要は無いため、今後は Pacini 小体の刺激は機械的刺激に任せ、電気刺激は高密度実装可能という利点を生かして皮膚浅部受容器の刺激に専念

する，という使い分けが有効と思われる。

## 文 献

- [1] G. L. Aiello. Multidimensional electrocutaneous stimulation. *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, Vol. 6, No. 1, pp. 95–101, Mar. 1998.
- [2] A. B. Anani, K. Ikeda, and L. M. Korner. Human ability to discriminate various parameters in afferent electrical nerve stimulation with particular reference to prostheses sensory feedback. *Med. Biol. Eng. Compt.*, pp. 363–372, Jul. 1977.
- [3] N. Asamura, N. Yokoyama, and H. Shinoda. A method of selective stimulation to epidermal skin receptors for realistic touch feedback. In *Proc. IEEE VR'99*, pp. 274–281, 1999.
- [4] P. J. Blamey and G. M. Clark. Psychophysical studies relevant to the design of a digital electroactile speech processor. *J. Acoust. Soc. Am*, Vol. 82, pp. 116–125, 1987.
- [5] J. Freeman. A model accounting for effects of vibratory amplitude on responses of cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey. *J. Physiol.*, Vol. 323, pp. 43–64, 1982.
- [6] K. A. Kaczmarek, M. E. Tyler, and P. Bach y Rita. Electroactile haptic display on the fingertips: Preliminary results. In *Proc. 16th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, pp. 940–941, 1994.
- [7] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 舘暲. 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ. 電子情報通信学会誌, Vol. j84-D-II, pp. 120–128, 2001.
- [8] 仲谷正史, 梶本裕之, 鈴木隆文, 舘暲, 満洲邦彦, 國本雅也. 経皮電気刺激提示中における感覚神経活動の解析. 第16回ニューログラム研究会抄録, p. 1, 2003.
- [9] 奈良高明. 触覚情報処理の理論およびその触覚ディスプレイへの応用. 東京大学大学院博士論文, 2000.
- [10] 大山正, 今井省吾, 和気典二. 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書房, 1994.
- [11] F. Rattay. *Electrical Nerve Stimulation*. Springer-Verlag, 1990.
- [12] F. Rattay. Modeling axon membranes for functional electrical stimulation. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 40, No. 12, pp. 1201–1209, Dec. 1993.
- [13] A. Y. J. Szeto. Relationship between pulse rate and pulse width for a constant-intensity level of electrocutaneous stimulation. *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 13, pp. 373–383, 1985.
- [14] A. Y. J. Szeto, J. Lyman, and R. E. Prior. Electrocutaneous pulse rate and pulse width psychometric functions for sensory communications. *Human Factors*, Vol. 21, No. 2, pp. 241–249, 1979.
- [15] A. Y. J. Szeto and F. A. Saunders. Electrocutaneous stimulation for sensory communication in rehabilitation engineering. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 29, No. 4, pp. 300–308, Apr. 1982.
- [16] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya, and M. Abe. Electrocutaneous communication in a guide dog robot(meldog). *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. BME-32, No. 7, pp. 461–469, Jul. 1985.
- [17] 舘暲, 谷江和雄, 阿部稔. 経皮電気刺激の強度感覚に対するパルス高とパルス幅の効果. 医用電子と生体工学, Vol. 15, No. 5, pp. 315–320, Sep. 1977.
- [18] W. H. Talbot, L. D. Smith, H. H. Kornhuber, and V. B. Mountcastle. The sense of flutter-vibration: Comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey hand. *J. Neurophysiol.*, Vol. 31, pp. 301–334, 1967.
- [19] A. B. Vallbo and R. S. Johansson. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiology*, Vol. 3, pp. 3–14, 1984.
- [20] R. T. Verrillo. Effect of contactor area on the vibrotactile threshold. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 35, pp. 1962–1966, 1963.

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)

### 梶本 裕之

平 10 東大・工・計数卒・平 13 同大学院修士課程了。現在同大学・情報理工・システム情報学専攻助手。触覚ディスプレイ, 人工現実感システムなどの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。日本 ME 学会会員。

### 舘 暲 (正員)

昭 43 東大・工・計数卒・昭 48 同大学院博士課程了。工博。同年同大助手。昭 50 通産省工技院機械技研研究員, 主任研究官, 遠隔制御課長, バイオロボティクス課長, マサチューセッツ工科大学 (MIT) 客員研究員を経て, 平 1 東大・先端科学技術研究センター助教授。平 4 同センター教授。平 6 同大学院・工・計数工教授。平 13 同大・情報理工・システム情報学専攻教授。盲導犬ロボット, テレイクジスタンス, 人工現実感などの研究に従事。IEEE/EMBS 学会賞, 通産大臣賞, 国際計測連合 (IMEKO) 特別勲功賞などを授賞。IMEKO ロボティクス会議議長, SICE フェロー, 日本バーチャルリアリティ学会初代会長。



**Abstract** There are mainly two types of stimulation methods in tactile display. One is mechanical vibration, and the other is electrical stimulation. In mechanical tactile stimulation, different contactor size affects vibratory sensation, both in quantity and in quality. This phenomenon is explained by the fact that two types of receptors, Meissner corpuscle and Pacinian corpuscle are responsible for the vibratory sensation, and Pacinian corpuscle is more easily activated by larger contactor. On the contrary, in electro-tactile stimulation (electrocutaneous display), although there are some reports on the relationship between electrode size and magnitude of the sensation, it is unclear that the different electrode size affects sensation quality. We clearly shows this, by using frequency discrimination test.

**Key words** Meissner Corpuscle, Pacinian Corpuscle, Selective Stimulation, Tactile Display, Electrical Stimulation