

# 吸引圧刺激による触覚生成法

牧野 泰才 篠田 裕之\*<sup>1</sup>

A Method to Produce Tactile Sensation Using Suction Pressure

Yasutoshi Makino and Hiroyuki Shinoda\*<sup>1</sup>

**Abstract** – In our previous studies, we have proposed a novel tactile stimulation method named “Suction Pressure Stimulation (SPS).” The method is based on our finding that humans can not discriminate suction from compression when the skin is pulled through a hole with a negative air pressure. This illusion indicates that tactile mechanoreceptors detect not stress nor strain tensor directly but scalar parameters such as strain energy density. In this paper, we clarify optimal conditions for achieving the illusion. Comparing the results of psychophysical experiments with simulation analyses of the SPS, we discuss physical parameters sensed by tactile receptors.

**Keywords** : Tactile Display, Haptic Interface, Suction Pressure Stimulation .

## 1. はじめに

これまで、様々な手法により触感を提示するシステムが提案されている。指先にテクスチャを提示するものに限っても、ピンが垂直あるいは水平方向に変位するもの [1]- [4], 電気刺激を利用したもの [5], 空気圧により薄膜が上下するもの [6], 超音波の放射圧を用いたもの [7] と、その提示方法は多様である。

その中で、我々は吸引圧を利用した触感提示を提案してきた [8]。これは、我々の発見した人間の触錯覚現象を利用した触感提示法である。その錯覚とは「一定口径以下の穴のあいた基板に皮膚を接触させた状態で、穴を通して皮膚を吸引すると、あたかも棒状の物体で押されたかのような触覚が生じる」というものである (図 1)。吸引によって触覚を提示することにより、1) 提示装置と皮膚との接触を密に保ったまま、複数の刺激点間で干渉の少ない触覚提示が可能、2) 皮膚との接触部に可動部が不要、等、他の提示法にはない特長をもった提示装置が実現される。またこの発見は、皮膚表面に与えられた応力の正負を、人間は見分けることが出来ないということを示唆するものであり、触覚受容器の特性を解明する上で興味深い。

この錯覚現象を説明するために、我々は皮膚内部に生じる歪みエネルギー密度分布に着目した。吸引圧刺激と棒状物体の押し込みそれぞれによって生じる、受容器近傍の歪みエネルギー分布を解析し、両者が似通っていることを確認した。この結果より、人間は歪みエネルギー密度というスカラー量を検出しているた

めに、両刺激を見分けることが出来ないのではないかとこの仮説を得た [8]。但しこの触錯覚現象は、吸引口のサイズや吸引の時間パターンに制限があり、ある特定条件下においてのみ発生することが経験的に確認されていた。

本論文は、吸引圧刺激を圧迫刺激の代替として応用するための基礎データを提供することを第一の目的とする。すなわち吸引によって圧覚が生じるための条件を明らかにし、吸引口の直径と、体感される対象物の直径との定量的な関係についても評価する。一方これらのデータは、人間の触覚受容器が検出している力学量を決定する手がかりにもなると期待できる。ここでは皮膚内部の応力や歪みエネルギー密度分布を有限要素法解析し、実験結果に照らし合わせて検討を行なう。表層受容器が検出する 2 種類のスカラー量を仮定することで、圧覚生成の特性をよく説明できることを示す。

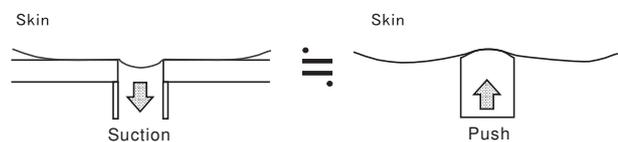


図 1 吸引圧刺激の模式図  
Fig.1 Schematic illustration of the Suction Pressure Stimulation (SPS).

## 2. 吸引圧刺激

吸引圧刺激は、人間の触錯覚現象を利用した触感提示法である。一定口径以下の穴に皮膚を密着させた状態で、皮膚を吸引した場合、あたかも棒状の物体が押し当てられたような感覚が得られる。この触錯覚現象は、人間の触覚受容器が応力や歪みを直接的にベクト

\*1: 東京大学大学院 情報理工学系研究科

\*1: Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

ルあるいはテンソルとして検出してはいないことを示唆するものである。

この触知覚現象の考察において、我々はスカラー量である、歪みエネルギーに着目した。前野らの先行研究 [9] を参考に指先をモデル化し、皮膚内部に生じる歪みエネルギー密度分布を有限要素法により準静的に解析した。解析結果を図 2 に示す。なお、解析時のモデル、境界条件については考察の章で詳述する。(a) が 1.5 mm の吸引口による吸引刺激を、(b) が吸引口と同じ直径を持つ棒状物体の圧迫刺激を模したものである。図 2 より、皮膚内部の 3 次元的な歪みエネルギー密度分布は、両者間で大きく異なることが分かる。吸引刺激では皮膚表層に歪みエネルギーが局在するのに対して、棒状物体の押し込み時には、深部においても歪みエネルギーが発生する。

しかしここで表層触覚受容器の存在する図 2 の点線上 (表皮と真皮の境界部、表面より約 0.7 mm) の歪みエネルギー密度分布に着目すると、両者が非常に似通っていることが発見された (図 3)。

この結果をもとに、触覚受容器がスカラー量である歪みエネルギーを検出しているため、人間は吸引と押し込みとを区別できないのではないかという仮説を立てた。この仮説は、歪みエネルギーに着目して解析を行なった、Dandekar ら [10] の知見とも一致する。彼らは神経発火の測定データと、皮膚内部の歪みエネルギー密度分布を比較することにより、触覚受容器であるメルケル細胞の発火パターンが、その分布によく一致することを示している。

またこの結果より、吸引圧刺激では、皮膚変形が表層のみに生じ、深部において生じないことが分かる。これは、吸引圧刺激では皮膚表層の 2 受容器、マイスナー小体とメルケル細胞の 2 種類のみが刺激され、深部に存在するパチニ小体、ルフィニ終末は反応しにくい、ということを示唆するものである。このことから、吸引圧刺激を用いることで、皮膚表層に存在する 2 受容器の触覚特性のより詳細な解明が期待される。

以降では、吸引口径を変化させながら、吸引圧が圧覚として知覚されるための条件を心理物理実験において検討する。それらの結果と、皮膚内部の歪みエネルギー密度分布とを比較することにより、皮膚の受容器が検出している物理量を、より詳細に考察する。

### 3. 吸引圧刺激提示システム

#### 3.1 実験系

図 4 に吸引圧刺激提示システムのブロック図を示す。吸引口内の圧力は、2 つの機構により制御される。1 つはレギュレータであり、もう 1 つは電磁バルブである。レギュレータは図中央に示すボトル内の圧力を周

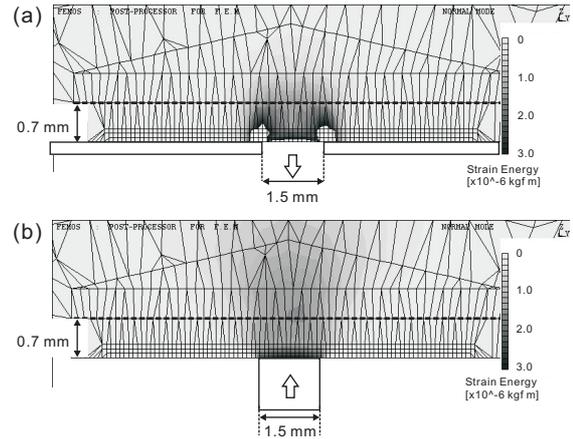


図 2 皮膚内部の歪みエネルギー密度分布: (a) 吸引刺激, (b) 同じ直径の棒状物体の圧迫刺激

Fig.2 Strain energy density distribution by FEM analysis.

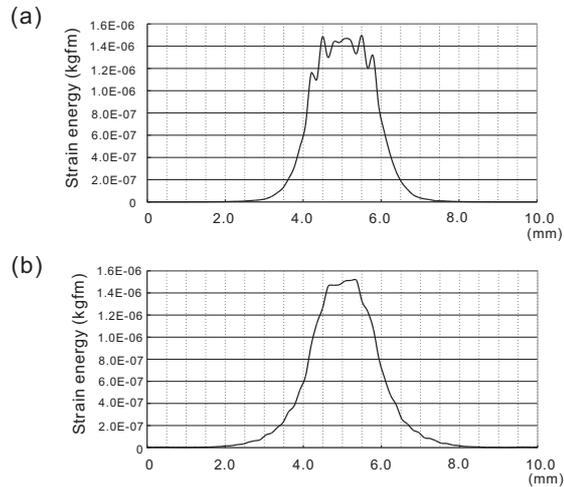


図 3 真皮・表皮境界部での歪みエネルギー密度分布

Fig.3 Strain energy density distribution on the boundary between the dermal and epidermal layers.

波数 10 Hz で制御する。一方電磁バルブは吸引口とボトルとの間の接続を、50 Hz で“オン”と“オフ”の 2 状態で制御する。“オン”状態では吸引口をボトルに接続し、吸引口内の圧力を、レギュレータにより調節されたボトル内の圧力に追従させる。“オフ”状態では吸引口を外気に開放し、吸引口内の圧力を大気と同じにする。レギュレータと電磁バルブはドライバ回路を介し PC により制御される。

今回の実験では、吸引口のサイズによる触感の違いを検証するため、吸引口のサイズを変更しながら実験を行なった。そのため、サイズの異なる吸引口をディスク上に配置し、それを回転させることで吸引口の口径を容易に変更できるシステムとなっている。

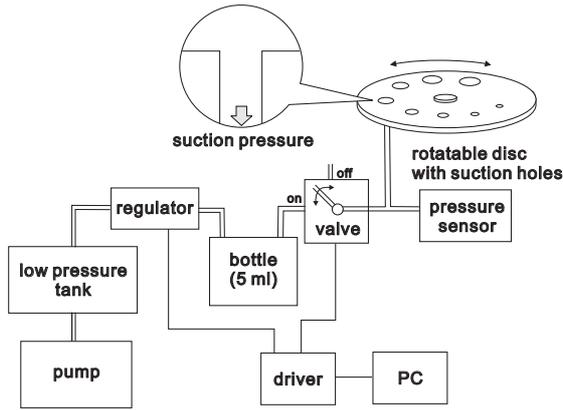


図4 吸引圧刺激提示システムブロック図  
Fig. 4 Block diagram of the SPS system.

### 3.2 吸引圧刺激の時間パターン

4種類の触覚受容器は、与えられた皮膚変形の時間周波数に対して、それぞれ異なる感度を持つ。本論文で扱う吸引圧刺激では、皮膚表層の2種類の受容器のみを選択的に刺激すると考えられる。そのうちの1つのマイスナー小体は40 Hz程度の振動成分に最もよく反応し、メルケル細胞は直流から数 Hzまでの低周波成分に高い感度を持つ。また、40 Hzの振動成分は、直流刺激よりも小さな振幅で知覚されることも知られている [11] [12]。

本論文では、これら2種類の受容特性を考慮し、時間波形の異なる2種類の吸引パターンを用意した。図5に図4中の圧力センサ部で観測した、2種類の吸引圧力波形を示す。横軸は時間経過を示し、縦軸は大気圧との圧力差を表す。以降、これら2つの刺激のうち一方をMr刺激、もう一方をMk刺激と呼ぶ。また図6にそれぞれの波形のパワースペクトルを示す。両刺激とも、直流成分のパワーを0 dBとして表示している。

Mr刺激は急峻な圧力変化により、高周波成分を多く含む波形である。急峻に圧力が減少した後、250 msの間その圧力を維持し、また急峻に大気圧に戻る。高周波成分が多く含まれるため、マイスナー小体(Mr)の方が良く反応すると考えられる。一方Mk刺激は緩やかな圧力変化による刺激である。500 msをかけて圧力が減少した後に、それよりもやや早い時定数で大気へと開放される。Mk刺激では、刺激に含まれる高周波成分がMr刺激よりも少ないため、Mr刺激に比べてメルケル細胞(Mk)の発火が支配的になると期待される。なお、これら刺激の名称は、2種類の受容器のうち、どちらがより強く反応するかという観点に基づいて名付けたものであり、どちらか片方の受容器のみを選択的に刺激する吸引圧パターンということではない。

両刺激の最終的な到達圧力は、システムにより可変

であり、以降の実験においては、被験者ごとに最適な圧力に調節して利用している。なお、バルブから提示部への管路が長い場合には、今回と同じ駆動パターンを用いてバルブを駆動した場合にも、距離の分の時間遅れにより圧力波形が歪むと考えられる。今回はバルブから提示部への管路として、内径0.8 mm、長さ30 cmのチューブを用い実験を行なった。

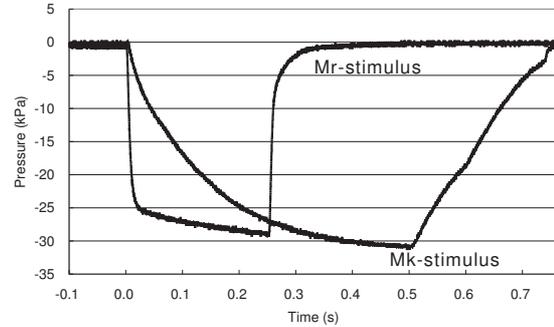


図5 2種類の吸引パターン  
Fig. 5 Two temporal suction pressure patterns.

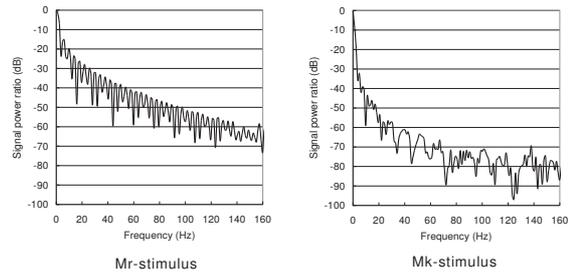


図6 2種類の吸引パターンのパワースペクトル  
Fig. 6 Power spectrums of the two suction pressure patterns.

## 4. 吸引圧刺激による心理物理実験

### 4.1 痛覚閾値

はじめに痛覚を生じさせないための吸引圧を測定した。吸引口の直径を、1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3.0 mmと変化させ、それぞれで痛みが生じる圧力を調べた。男性7名、女性3名の計10名の被験者に対して、Mr刺激を右示指末節の指腹部に提示し、痛みを感じるかどうかを質問し、その閾値を測定した。小さい吸引口から順に、-5 kPaから5 kPa刻みで刺激を提示し、痛みを感じる圧力を閾値とした。使用したポンプの性能上-45 kPaが到達しうる最低圧力であったため、-45 kPaでも痛覚が生じない場合は、-45 kPaをその被験者の閾値とした。

なお、以下の全ての実験において、被験者にヘッドフォンにより白色雑音を聞かせることで、音による手掛かりを除去した状態で実験を行っている。

図7に実験結果を示す．横軸が吸引口の直径を示し，縦軸は痛覚を感じた閾値圧力を示す．各プロットは10名の被験者の閾値の平均であり，エラーバーは分散を示す．吸引口が大きくなるにつれて，痛覚の生じる圧力が高くなるのが分かる．1.4 mmの吸引口では，10人中9人の被験者が-45 kPaの刺激に対しても痛みを知覚しなかった．

以降の実験では，この痛覚閾値のデータをもとに，各被験者で痛覚が生じない圧力に調整した刺激を利用している．

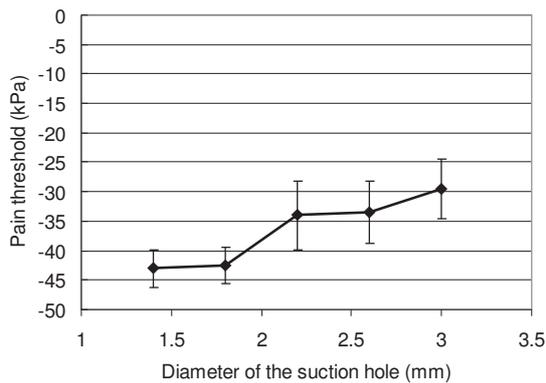


図7 痛覚閾値  
Fig.7 Pain threshold.

#### 4.2 触覚を生成可能な最小の吸引口サイズ

吸引口径がある値より小さくなると，皮膚表面が大きく変形する吸引圧であっても，触覚を生じにくくなる（考えられる理由については，考察で議論する）．ここでは1.5 mm以上の吸引口径において痛覚を生じる-45 kPaに吸引圧最大値を設定し，その吸引圧において触覚が生じなくなる口径を，Mr, Mk各刺激に対して検証した．吸引口は直径0.7 mmから1.3 mmまで0.1 mm刻みに7種類を用意し，8人の被験者（男性7名，女性1名）の右示指末節指腹部に刺激を提示した．刺激提示期間が分かるように刺激開始前にLEDを点灯させ，LED点灯中に-45 kPaの吸引圧刺激を与えた．刺激終了後にLEDを消灯し，点灯期間中に刺激を感じたかどうかを質問した．比較のために，LEDのみを点灯させ吸引圧刺激を提示しないパターンも用意した．刺激のある場合5回と，刺激無しでLEDを点灯させるのみの場合5回の計10回をランダムに提示するものを1セットとし，0.7 mmの吸引口から順に，Mr, Mkの各刺激を1セットずつ提示した．

実際に刺激があった際に刺激を感じると答えた場合，あるいは，刺激が無かった際に刺激を感じないと答えた場合を正解とし，その正答率を結果として用いた．

図8に結果を示す．横軸が吸引口の直径を，縦軸が

正答率を示す．プロットは各刺激に対する8人の正答率の平均値を示し，実線がMk刺激を，点線がMr刺激を表す．なお実験において，刺激が無くLEDのみ点灯している場合に刺激を感じると答えた回答は，全回答中2回であった．結果より明らかなのは，Mr刺激のほうが，Mk刺激よりも知覚されやすいという点である．90%の正答率を十分に知覚されるための閾値として考えた場合，Mr刺激に必要なとされる吸引口の直径は0.8 mm程度であるのに対し，Mk刺激では1.0 mm以上の吸引口が必要となる．

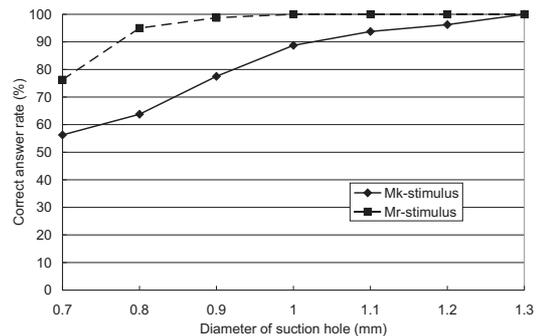


図8 触覚を生じさせる最小の吸引口径についての実験結果

Fig.8 Experimental result on the minimal diameter of the suction hole to induce contact sensation.

#### 4.3 圧覚として知覚される最大の吸引口径

吸引口径が大きくなるに従い，圧覚とは異なり，皮膚表面をつねられたような感覚が生じる．あるいは，実際の皮膚変形のとおり，皮膚が引っ張られているという知覚に変化する．そこで，どの程度のサイズの吸引口まで，吸引圧が圧覚として知覚されるかを検証した．なお以下では，圧覚とは異なるこれらの感覚を「非圧覚感」と呼ぶことにする．

2.0 mmから3.0 mmまで0.1 mm刻みに11種類の直径の異なる吸引口を用意し，非圧覚感を感じるか否かを質問した．非圧覚感の定義は，「垂直方向にピンが押し込まれる場合を想像し，そのときには生じ得ないような知覚を得た場合を非圧覚感」とし，それを元に回答するように指示を出した．具体的には，皮膚が水平方向に変位する感覚や，つねられた感覚，あるいは吸引された感覚などが非圧覚感に対応する．

右示指末節指腹部に対して，Mr, Mkの各刺激を4回ずつ，10名の被験者（男性7名，女性3名）に対して提示した．各刺激の到達圧力は，被験者ごとに調節した値を使用した．一人の被験者の中で，Mr刺激とMk刺激の到達圧力は同じであり，吸引口のサイズによらず一定である．

図9に結果を示す．横軸が吸引口のサイズを，縦軸

が、全回答に対する圧覚として知覚された回答の割合を示す。全体的な傾向としては、Mr 刺激のほうが Mk 刺激よりも非圧覚感が生じにくいことが分かる。また、吸引口の直径が大きくなるにつれて、非圧覚感が増していくという傾向が見て取れる。

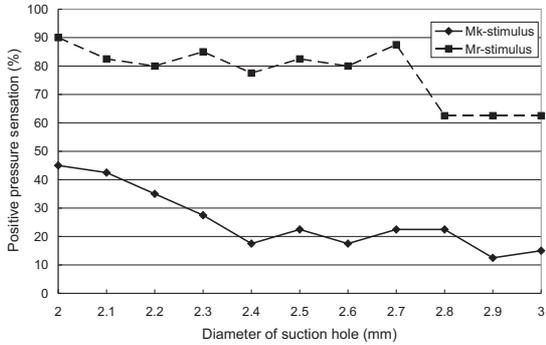


図9 圧覚として知覚される割合  
Fig.9 The ratio of subjects who judged the stimulation as positive pressure.

#### 4.4 吸引口直径と知覚される等価円柱のサイズ

吸引口の直径と、そのとき知覚される等価な円柱の直径との関係を確認する実験を行なった。吸引口としては、直径 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0 mm の 6 種類を用意した。男性 7 名、女性 3 名の 10 名の被験者の右示指に対し、各サイズの吸引口ごとに Mr, Mk 両刺激を 3 回ずつランダムに提示した。そのとき知覚された物体の大きさを、実際の棒を触り比較してもらい、吸引圧刺激により知覚される等価な円柱の直径を検証した。

比較用として用意した実際の棒は、その直径が 0.5, 0.8, 1.1, 1.4, 1.7, 2.0 mm の円柱状の亚克力棒である。各刺激に対して、上記 6 種類の中から最も大きさの似通った 1 つを選んでもらった。吸引圧の最終到達圧力は、痛みを生じずに十分な触感を得ることのできる圧力を被験者ごとに設定した。多くの被験者において、それは -30 kPa 程度であった。

図 10 に実験結果を示す。横軸は吸引圧刺激に用いた吸引口の直径を示し、縦軸は評価された実際の円柱の直径を示す。各プロットは 10 名の回答の平均を表し、実線が Mk 刺激を、点線が Mr 刺激の結果を示す。Mk, Mr 各刺激とも、吸引口の直径と知覚される円柱の直径との間に、単調増加の関係が見られる。特徴的なのは、等価円柱の直径の方が実際の吸引口の直径よりも小さく評価される点である。また、全ての吸引口において、Mk 刺激よりも Mr 刺激の方が大きな物体として評価されている。

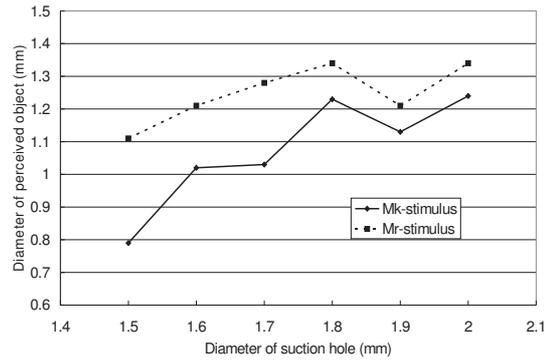


図 10 吸引口直径に対して知覚される等価円柱の直径  
Fig.10 Perceived diameters of the virtual objects by the SPS.

## 5. 考察

### 5.1 有限要素法解析

本章では、有限要素法により皮膚内部の歪み、応力分布を解析し、それによって計算される歪みエネルギー密度分布と、心理物理実験結果とを比較することで、触感を決定する主要物理量を検証する。

指末節部の断面モデルを作り解析を行なった(図 11)。モデルは表皮、真皮、皮下組織の 3 層構造を持ち、奥行き方向に十分な厚みを持っている。各組織のヤング率は、前野らの研究 [9] を参考に、それぞれ 136 kPa, 80 kPa, 34 kPa とし、ポアソン比は全ての組織で 0.48 とした。解析時の境界条件は、骨と爪の部分での完全拘束を仮定し、吸引の場合のみ指腹部の吸引口以外の部分の垂直方向変位を拘束した。

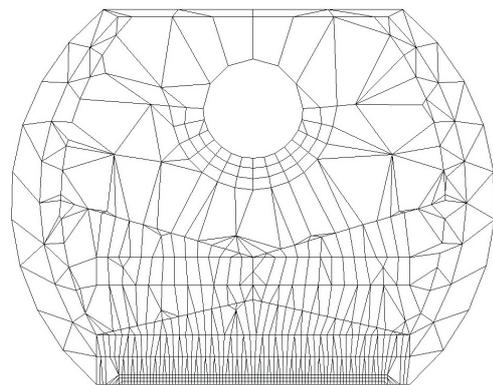


図 11 指末節部の有限要素モデル  
Fig.11 Finger FEM model.

### 5.2 最小の吸引口径

-45 kPa という同じ圧力条件下で、直径の異なる吸引口を用いて刺激を提示した際の皮膚内部の歪みエネルギー密度分布を図 12 に示す。図中上よりそれぞれ 0.7, 1.0, 1.3 mm の吸引口による刺激をシミュレ

ションした結果である．なお結果図において，歪みエネルギーの値が  $3.0 \times 10^{-6} \text{kgf m}$  以上の部分は無色で表示されており，吸引口直上の部分の空白はその領域である．図より明らかなように，吸引口のサイズが小さくなるにつれて，歪みエネルギーは皮膚表層に局在していく．一定口径以下になると，歪みエネルギーが受容器位置で有意には発生しなくなり，刺激が知覚できなくなると考えられる．知覚される最小の吸引口径に関する実験結果は，この考察を裏付けるものである．0.7 mm の吸引口により刺激を提示した場合には，十分な触感を得られない．

一方，45 kPa で 0.7 mm の直径を持つピンを押し当てた場合の歪みエネルギー密度分布を，図 13 に示す．この場合，歪みエネルギーは皮膚の深層にまで到達するため，十分に知覚されると考えられる．

また本実験の結果では，Mr 刺激の方が Mk 刺激より小さな吸引口でも刺激が知覚された．この傾向はマイスナー小体のほうが，メルケル細胞よりも小さな変位に対して感度が高いという先行研究の結果 [12] と一致するものである．これは逆に，Mk 刺激と Mr 刺激がそれぞれメルケル細胞，マイスナー小体を支配的に発火させる圧力波形であったことを示す結果と言える．

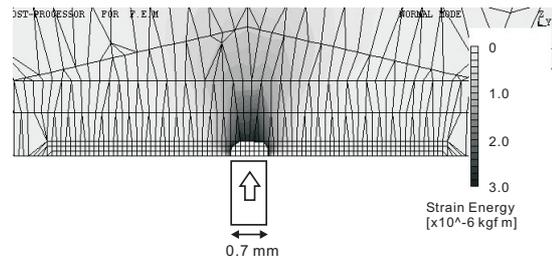


図 13 直径 0.7 mm のピンを押し当てた際の歪みエネルギー密度分布

Fig. 13 Strain energy density distribution by pushing of a pin with the diameter of 0.7 mm

### 5.3 吸引口のサイズと知覚されるサイズの違い

知覚される円柱のサイズは，全ての吸引口において実際の直径よりも小さく評価された．しかし，受容器近傍の歪みエネルギー密度分布を比較すると，両者はほとんど同じであることが確認された．図 14 に 1.5 mm の吸引口による吸引圧刺激と，1.5mm の円柱の押し込みそれぞれによって生じる，受容器近傍の歪みエネルギー密度分布を示す．実線が吸引圧刺激を，破線が押し込みを表す．両者の分布が似通っていることが分かる．

ここで，皮膚表面に平行な直角座標系におけるせん断歪みに着目すると，両者の密度分布が大きく異なることが見出された．図 15 はせん断成分のみを用いて計算した歪みエネルギー密度（以下せん断歪みエネルギー密度，shear strain energy density と呼ぶ）をプロットしたものである．実線が吸引圧刺激を，破線が押し込みを示す．吸引圧刺激では，せん断歪みエネルギー密度が棒状物体の押し込みよりも大きな値をとることが分かる．また特徴的なのは，分布が空間的に局在している点である．各分布のピーク値の幅を求めると，吸引圧刺激では 1.31 mm であるのに対し，押し込み時には 1.60 mm であり，同じ口径の吸引刺激と押し込みを比べると，吸引刺激の場合の方が分布の幅が狭くなっていることがわかる．したがって，せん断歪みエネルギー密度分布の幅が，知覚される物体のサイズを決定しているのであれば，吸引圧刺激では吸引口の直径よりも小さい接触対象が知覚されることになる．

図 16 は，実験において同程度のサイズとして知覚された 1.7 mm の吸引圧刺激と，1.0 mm の押し込みとで，せん断歪みエネルギー密度を比較した結果である．図 15 の 1.5 mm 同士の場合と比べ，空間的な広がりを表すピーク間の距離が，吸引で 1.45 mm，押し込みで 1.31 mm と，同程度であることが分かる．

奈良らによって，マイスナー小体がせん断変形に大きな感度を持つという仮説が提唱されている [13]．マイスナー小体により，せん断歪みエネルギーのみが独

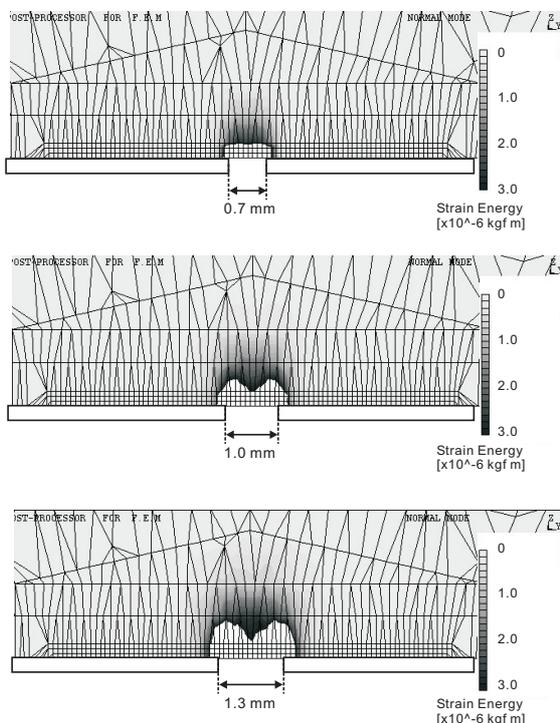


図 12 径の異なる吸引口から同じ圧力で吸引した際の歪みエネルギー密度分布

Fig. 12 Strain energy density distribution by SPS using the different diameters of the suction holes with the same pressure.

立に検出されており，それが対象の口径知覚に強く関わっているとすれば，実験結果が説明できることになる．

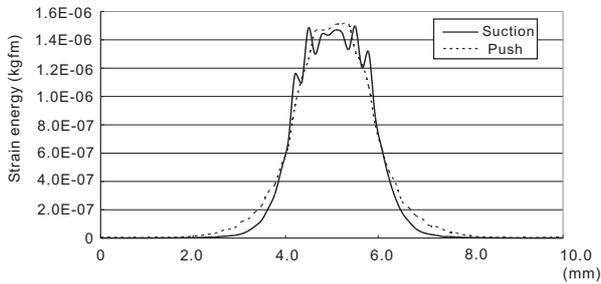


図 14 1.5 mm の吸引口による吸引圧刺激と，1.5 mm の円柱の押し込みによって生じる受容器近傍の歪みエネルギー密度分布

Fig. 14 Strain energy density distribution at the mechanoreceptors depth by suction with 1.5-mm-diameter hole and push with 1.5-mm-diameter cylinder .

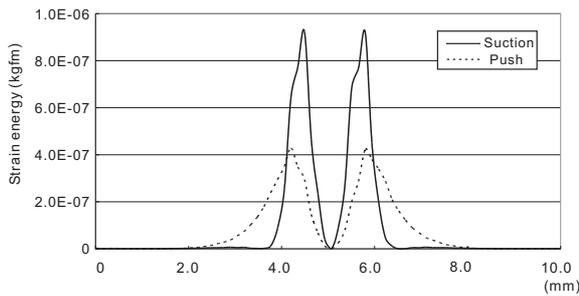


図 15 1.5 mm の吸引口による吸引圧刺激と 1.5 mm の円柱による押し込みとによって生じる受容器近傍のせん断歪みエネルギー密度分布

Fig. 15 Shear strain energy density distribution at the mechanoreceptors depth by suction with 1.5-mm-diameter hole and push with 1.5-mm-diameter cylinder .

#### 5.4 吸引が圧覚として知覚される最大の吸引口サイズ

図 17 に，直径 2.0，2.5，3.0 mm の吸引口による  $-30$  kPa の吸引圧刺激と，同じ直径を持つ棒による 30kPa の押し込みとを解析した結果を示す．図は，受容器近傍における歪みエネルギー密度分布を示したものである．図より，吸引口の直径が大きくなるに従い，両者の分布が異なっていくことが分かる．3.0 mm の吸引圧刺激では，歪みエネルギー密度のピークが明らかに 2 箇所あり，刺激の中心に位置しない．

図 18 には，同じ条件下でのせん断歪みエネルギー密度の分布を示す．円柱の押し込みの場合には，分布の空間的な広がりが変化するだけで，そのピーク値は

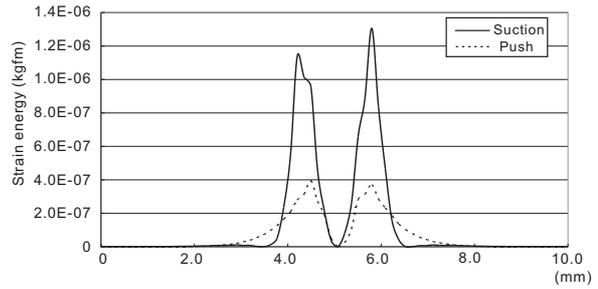


図 16 1.7 mm の吸引口による吸引圧刺激と 1.0 mm の円柱による押し込みとによって生じる受容器近傍のせん断歪みエネルギー密度分布

Fig. 16 Shear strain energy density distribution at the mechanoreceptors depth by suction with 1.7-mm-diameter hole and push with 1.0-mm-diameter cylinder.

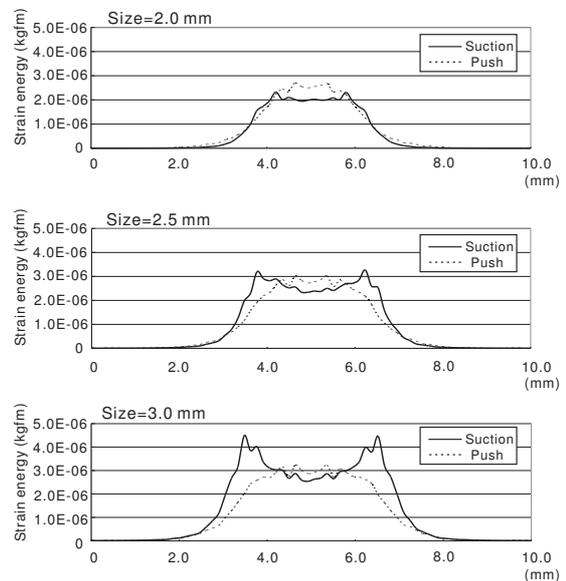


図 17 2.0，2.5，3.0 mm の各吸引口による吸引圧刺激と，同サイズの円柱押し込み時の受容器近傍の歪みエネルギー密度分布

Fig. 17 Strain energy density distribution at the mechanoreceptors depth by suction with 2.0, 2.5 and 3.0 mm-diameter holes and push with the same diameter cylinders.

大きく変化しない．一方，吸引圧刺激の場合には，吸引口が大きくなるに従って，せん断歪みエネルギー密度のピーク値が大きくなるのが分かる．なお，押し込み時のピーク値の幅は，2.0 mm のときに 2.18 mm，2.5 mm では 2.46 mm，3.0 mm のときには 3.04 mm と，やはりよく対象物体の幅と対応することが確認された．

この結果より，吸引口の径が大きくなるにつれて，吸引圧刺激と圧迫刺激とで，受容器深さでの歪みエネルギー密度分布形状の違いが大きくなるのがわかる．

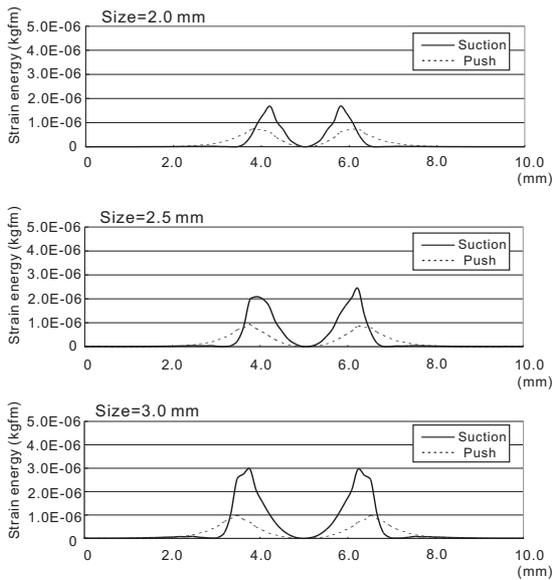


図 18 2.0, 2.5, 3.0 mm の各吸引口による吸引圧刺激と、同サイズの円柱押し込み時の受容器近傍のせん断歪みエネルギー密度分布

Fig. 18 Shear strain energy density distribution at the mechanoreceptors depth by suction with 2.0, 2.5 and 3.0 mm-diameter holes and push with the same diameter cylinders.

実験においても、吸引口が大きくなるにつれて非圧覚感が増えるという傾向が見られたが、その実験結果はこの解析結果の傾向と一致する。

但し、本実験で得られた非圧覚感の知覚には、大きく二つの傾向が見られた。図 9 の実験結果を、その 2 つの傾向ごとに分けて表示したものを、図 19, 20 に示す。両図とも横軸が吸引口の直径を、縦軸が全回答に対して圧覚として知覚された回答の割合を示す。

図 19 の Type A に分類される被験者のグループは、男性 3 名、女性 1 名の 4 名で構成される。吸引口が小さい場合には Mk, Mr 両刺激において非圧覚感を生じず、吸引口が大きくなるにつれて、両方の刺激が共に非圧覚感として知覚されるという傾向がある。

一方、男性 4 名、女性 2 名からなる Type B の被験者は、全てのサイズにおいて Mr 刺激ではほとんど非圧覚感を感じないが、Mk 刺激では高い確率で非圧覚感を感じるという特徴がある (図 20)。

吸引口が大きくなることによる知覚への影響は、Type A の被験者の結果に顕著である。一方、Type B の被験者が多くの Mk 刺激で非圧覚感を感じた理由については、今回の解析結果からでは説明できない。今回の解析は準静的なものであるが、Mk 刺激と Mr 刺激の大きな違いは、その時間周波数成分であるため、過渡的な歪みエネルギー密度分布をも考慮した検証が必要と考えられる。

Type A, B のような知覚傾向の違いがなぜ生じるのか、これらの結果は学習によって変化するのか、等についての詳細な検討は今後に残された課題であるが、メルケル細胞・マイスナー小体という 2 種類の表層受容器出力の利用の仕方に、何らかの個人差があるように思われる。

同様な事例は佐野らによっても報告されている。文献 [14] では、対象の凹凸知覚において 2 つのタイプの回答傾向があったことが述べられており、対象認識にキーとして用いる受容器の違いが、回答の差として現れているのではないかという考察がなされている。

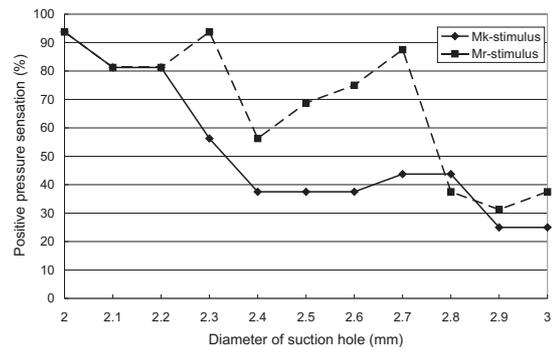


図 19 Type A グループの知覚傾向  
Fig. 19 Perception tendencies of Type A.

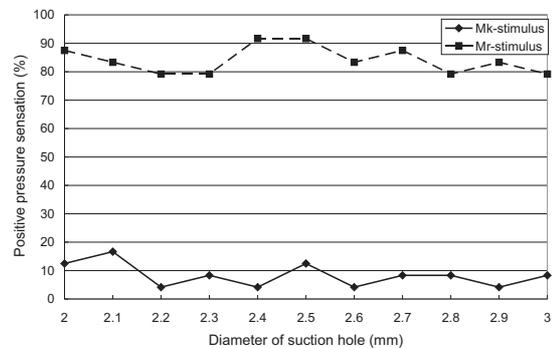


図 20 Type B グループの知覚傾向  
Fig. 20 Perception tendencies of Type B.

## 6. まとめ

本論文では、吸引圧刺激により圧覚を生成するための条件を検証した。吸引口の口径を変えながら、触覚を提示可能な最小の吸引口の直径、及び圧覚として知覚される最大の吸引口の直径を心理物理実験により確認した。また、吸引口径と、その吸引圧刺激によって知覚される仮想円柱の直径との関係を調べた。

それら心理物理実験の結果と、皮膚内部の歪みエネルギー密度分布の解析結果とを比較し、「皮膚の機械受容器は歪みエネルギー密度を検出している」という

仮説の妥当性を検証した。吸引時に知覚される円柱の直径は、吸引口径より小さく感じられるが、この差異は、受容器近傍の歪みエネルギー密度分布をみるだけでは説明できないことがわかった。一方、皮膚表面に対して平行な直交座標系をとり、そのせん断変形成分のみから計算した歪みエネルギー（せん断歪みエネルギー）に着目すると、その分布は、知覚される対象物の直径と吸引口径との差異をよく説明できることがわかった。さらに、せん断歪みエネルギー密度の分布が、実際の棒状物体の接触時に生じるものと大きく異なる場合には、人間にとって非圧覚感として知覚されることも実験的に確かめられた。なお、非圧覚感の知覚実験において、被験者の回答に大きく2つの傾向が見られた。

### 参考文献

- [1] 下条, 石田, 渡辺: “高密度型触覚ディスプレイを用いた触覚情報提示の試み,” 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp.255-256, 2000.
- [2] Y. Ikei, K. Wakamatsu and S. Fukuda: “Image Data Transformation for Tactile Texture Display,” Proc. VRAIS '98, pp.51-58, 1998.
- [3] M. Konyo, S. Tadokoro, T. Takamori, K. Oguro: “Artificial Tactile Feeling Display Using Soft Gel Actuators,” Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3416-3421, April, 2000.
- [4] J. Pasquero and V. Hayward: “STReSS: A Practical Tactile Display System with One Millimeter Spatial Resolution and 700 Hz Refresh Rate,” Proc. of Eurohaptics 2003, 2003.
- [5] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda and S. Tachi: “Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation,” Proc. 1999 ICAT, 1999.
- [6] G. Moy, C. Wagner, R.S. Fearing: “A Compliant Tactile Display for Teletaction,” Proc. IEEE Int Conf. Robotics and Automation, pp. 3409-3415, 2000.
- [7] T. Iwamoto, T. Maeda and H. Shinoda: “Focused Ultrasound for Tactile Feeling Display,” Proc. 2001 ICAT, pp. 121-126, 2001.
- [8] Y. Makino, N. Asamura and H. Shinoda: “Multi Primitive Tactile Display Based on Suction Pressure Control,” Proc. IEEE 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, (Haptic Symposium 2004), pp. 90-96, 2004.
- [9] T. Maeno, K. Kobayashi and N. Yamazaki: “Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors,” Bulletin of JSME International Journal, Vol. 41, No. 1, C, pp. 94-100, 1998.
- [10] K. Dandekar, B.I. Raju and M.A. Srinivasan: “3-D Finite-Element Models of Human and Monkey Fingertips to Investigate the Mechanics of Tactile Sense,” Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 125, pp. 682-691, 2003.
- [11] R.S. Johansson and A.B. Vallbo: “Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand,” Trends in NeuroSciences, Vol. 6 No.1, pp.27-32,

1983.

- [12] S.J. Bolanowski, Jr., G.A. Gescheider, R.T. Verrillo and C.M. Checkosky: “Four Channels Mediate the Mechanical Aspects of Touch,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 84, No. 5, pp.1680-1694, 1988.
- [13] T. Nara and S. Ando: “The Mechanical Property of the Coiled Axon of Meissner Corpuscles for Human Tactile Sensing and its Application to a Biomimetic Tactile Sensor with a Helical Structure,” Proc. of the 11th International Conference on Solid State Sensors and Actuators 2001, pp.1666-1669, 2001.
- [14] 佐野明人, 鈴木壮太郎, 望山洋, 武居直行, 菊植亮, 藤本英雄: “触覚受容器出力に注目した微小凹凸のなぞり知覚メカニズムに関する基礎研究,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005 講演論文集, 1A1-N-108, 2005.

(2005年10月11日受付)

### [著者紹介]

牧野 泰才 (学生会員)



2002年東京大学工学部計数工学科卒業。2004年同大学院情報理工学系研究科修士課程修了。同年同博士課程進学、現在に至る。触覚提示デバイスの開発に関する研究に従事。

篠田 裕之 (正会員)



1988年東京大学工学部物理工学科卒業。90年同大学院計数工学修士、90年より同大学助手、95年博士(工学)。同年より東京農工大学講師、97年より同助教授、99年UC Berkeley 客員研究員、2001年より東京大学情報理工学系研究科助教授。触覚を中心としたセンサシステムとデバイス、触覚ディスプレイ、光・音響計測などの研究と教育に従事。