

テーパー膜上の弾性波動を用いた皮膚感覚ディスプレイ

奈良 高明*¹ 柳田 康幸*¹ 前田 太郎*¹ 舘 暲*¹

A Tactile Display Using Elastic Waves in a Tapered Membrane

Takaaki Nara*¹, Yasuyuki Yanagida*¹, Taro Maeda*¹ and Susumu Tachi*¹

Abstract - In this paper, a tactile display using elastic waves in a 'tapered membrane' (a membrane whose width decreases gradually) is proposed. When an elastic wave is input to the tapered membrane, there exists a boundary between a vibrating area and a non-vibrating area. The boundary is called 'turning point', and the position of the turning point is controlled by the frequency of the wave. It was reported that a surface of a vibrating object with ultrasonic frequency feels smooth by squeeze effect. Thus, in the tapered membrane, the boundary between smooth and frictional areas can be moved by the frequency of the wave. In an experimental device employing a brass plate vibrated by a Langevin ultrasonic vibrator, these basic phenomena are confirmed.

Keywords : Tactile display, Elastic waves, Tapered membrane, Ultrasonic vibration

1. はじめに

触覚は、重量、抵抗感、大まかな物体形状の感覚である深部感覚と、粗さ、摩擦感、細かいテクスチャなどの皮膚感覚とに大別される。本研究の目的は、能動触の際の皮膚感覚を提示するディスプレイの開発である。

皮膚感覚を提示する際、任意の表面粗さをもつ物体を実際に用意しておくことはできない。そこで、ある一つの物体表面形状を瞬時に変形させることで、多様な皮膚感覚を提示することが考えられる。

その一つの実現法として、弾性体上の波動を利用して、表面状態を制御する方法が挙げられる。[1]では、弾性体の超音波振動を用いた摩擦感制御ディスプレイが提案されている。弾性体の板に超音波振動子によって振動を加えると、板上には定常波が形成される。このとき、振動している板に触ると、スクイーズ効果と呼ばれる気体潤滑作用により摩擦感が減少し、あたかもつるつるした板に触っているかのような感覚が得られる、という原理のディスプレイである。

一方[4],[5]では、空間的振幅変調弾性波動を用いた触覚ディスプレイが提案されている。より複雑な表面波形を生成するために、弾性板上に、ラム波の異なるモードを同時に発生させ、振幅変調波を発生させる。このとき、包絡波長および群速度は振動周波数により、連続的かつ自在に制御できるため、板上の形状を瞬時に変形しうる、という利点をもつ。ここにおいては、可聴域周波数でA.M.波の発生が示されているが、超音波

でも同様のA.M.波形が生成されると考えられる。

しかしながら、以上のようなディスプレイでは、弾性波が板上一様に分布してしまい、板上で波動の空間的分布を作り出すのが困難である。このため、振動を加えている間は、常に摩擦の少ない表面しか得られない、という問題点が生じる。定在波を用いた[1]では、振動の腹でも節でも、特に触感の差は感じられない、とのことである。これは、定在波の波長が数cm程度と指の腹よりも大きいため、たとえ定在波の節を触っていても振動部分を触らざるを得ず、低摩擦感を感じてしまうことによる。包絡波長を連続的に変形しうる[4],[5]においては、指の面内において振動振幅の分布を生み出し、摩擦状態の分布を発生しうる可能性はある。しかし、波動を局在化させ、振動のない領域を作り出すことは困難である。つまり、一枚の板上に、高摩擦状態と低摩擦状態とを同時に作り出すことが困難となる。

[2],[3]においては、板に瞬間的に超音波振動を加えることで、指と面との摩擦感が増し、ひっかかり感が提示できるという報告がなされている。これは、触覚提示を1本の指表面に限定することで、振動の時間的変化により摩擦感制御を行う興味深い方法である。しかしながら、やはり、依然として板全体には定在波が形成されていることに変わりはないため、板上に同時に高摩擦領域と低摩擦領域を作り出すことはできない。例えば、多指で板を触れば、板の材質感ほどの指においても同じである。

そこで本論文では、弾性波動を面上で局在化させ、高摩擦領域と低摩擦領域を同時に作り出しうる方法を提案する。我々が用いるのは、テーパー膜、すなわち、幅

*1: 東京大学大学院 工学系研究科

*1: Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

が連続的に減少していく膜上の波動である。テーパ膜上の波動は、本論文で示すように次の2点の性質を有する：

- 面上で波動が局在化できる→低摩擦領域を局在化できる
- 波動局在化領域の広さを、駆動周波数により自在に制御できる→低摩擦領域の広さが自在に変化できる

このようにして、一枚の平面上に、高摩擦領域と低摩擦領域を同時に作り出し、かつその領域を自在に制御できるディスプレイを本論文で提案する。まず2節でテーパ膜上の波動の性質を詳しく論じ、摩擦感制御法の原理を述べる。3節でこの原理を確かめるべく行った基礎実験を示した上で、試作した触覚ディスプレイについて述べる。

2. テーパ膜上の弾性波動

2.1 テーパ膜方程式の導出

図1のように、幅が連続的に減少する膜をテーパ膜と呼ぶ。膜の長さ方向を X 軸、幅方向を Y 軸とし、膜と垂直方向に Z 軸をとる。膜幅を $W(X)$ で表わし、 $Y = W(X)$ において膜は固定されているものとする。膜の張力を T 、密度を ρ で表す。

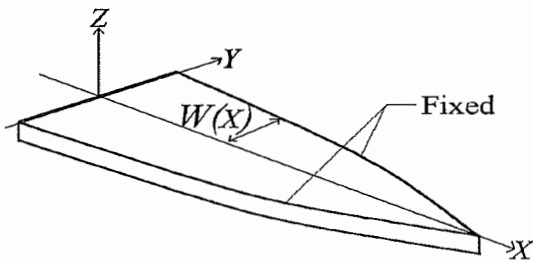


図1 テーパ膜
Fig.1 Tapered membrane

波動の Z 軸方向の変位を v とするとき、 v の従う波動方程式、および境界条件は以下の通りである。

$$\text{波動方程式: } \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \right) v. \quad (1)$$

$$\text{ただし } V = \sqrt{\frac{T}{\rho}}.$$

$$\text{境界条件: } v(X, Y) = 0 \text{ at } Y = \pm W(X). \quad (2)$$

さて、ここでテーパ導波管の解析 [6] を参考に、

$$x = X \quad (3)$$

$$y = \frac{Y}{W(X)} \quad (4)$$

なる曲線座標 (x, y) を導入する。このとき、膜幅の変化が十分緩やかならば、すなわち $|W'(x)| \ll 1$ ならば、 (x, y) は直交曲線座標となる [6]。この (x, y) 座標系を用いると、波動方程式 (1)、および境界条件 (2) は、

$$\text{波動方程式: } \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{W^2(x)} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) v. \quad (5)$$

$$\text{境界条件: } v(x, y) = 0 \text{ at } y = \pm 1. \quad (6)$$

と書き直せる。

このように直交曲線座標 (x, y) を導入すると、境界条件が (6) のように x に依存しなくなるため、(5) を満たす解として、次のような変数分離型の解

$$v(x, y) = f(x) \cos \frac{\pi y}{2} e^{-j\omega t} \quad (7)$$

が仮定できる。ここで $f(x)$ が x 軸に沿う波動の振幅を表しており、今求めたい関数となっている。(7) を波動方程式 (5) に代入すれば、 $f(x)$ に関する方程式

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \left(\left(\frac{\omega}{V} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2W(x)} \right)^2 \right) f(x) = 0 \quad (8)$$

が得られる。この方程式 (8) を、以下ではテーパ膜方程式と呼ぶことにする。

2.2 テーパ膜方程式と Schrödinger 方程式との対比

さてここで、テーパ膜方程式 (8) と、量子力学における時間を含まない Schrödinger 方程式：

$$\frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V(x)) \phi(x) = 0. \quad (9)$$

との類似性に着目する。両式を比較すると、Schrödinger 方程式における粒子の確率振幅 ϕ は、テーパ膜方程式における波動の実際の振幅 $f(x)$ に対応させることができる。次に、Schrödinger 方程式における粒子のもつ全エネルギー E は、テーパ膜方程式における第二項 $\left(\frac{\omega}{V} \right)^2$ に対応させられる。これは弾性波動が、駆動周波数の自乗に比例したエネルギーをもっている、と考えれば妥当である。

この対比を進めると、Schrödinger 方程式において定義されている”場のポテンシャルエネルギー $V(x)$ ” という概念が、テーパ膜上の弾性波動においても

$$V(x) = \left(\frac{\pi}{2W(x)} \right)^2 \quad (10)$$

という表式で導入できることがわかる。すなわち、テーパ膜上の弾性波動には、(10) で表わされるよう

な”膜幅から決まるポテンシャル”が定義できるわけである。このポテンシャルは波動の通りにくさを表わし、その値は膜幅の自乗に逆比例する。つまり、膜幅が狭いほどポテンシャルは高まり、弾性波動は通りにくいわけである。

テーパ膜方程式や Schrödinger 方程式は、より一般的な形として、

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} + k(x)^2 f(x) = 0 \quad (11)$$

と書くことができる。\$k(x)\$ は位置 \$x\$ における空間波数を表わし、(11) は、空間波数が位置によって変化していくような波動が従う方程式を表わす。このような方程式に従う波動は、テーパ導波管における電磁波 [6]、厚みが連続的に変化する層における弾性波動 [7]、あるいは屈折率が断面内で連続的に変化している光伝送路内の光波 [8] など、他物理系においても頻繁に見られるが、一方で、場のポテンシャルという概念は、量子力学以外の系ではあまり見られない。しかしながら、構造から決まるポテンシャルという概念をひとたび導入すると、膜の幾何的構造、具体的には膜幅を、直ちに、波動の通りにくさを表すポテンシャルに読み換えることができる。その結果波動の振る舞いを直感的に理解できるようになり、波動を制御する上での見通しが非常に良くなる。また量子力学で得られている結果をすべてテーパ膜上の波動解析に導入できるという大きな利点も持つことになる。

Schrödinger 方程式とテーパ膜方程式とのアナロジーをまとめておく。(図 2)

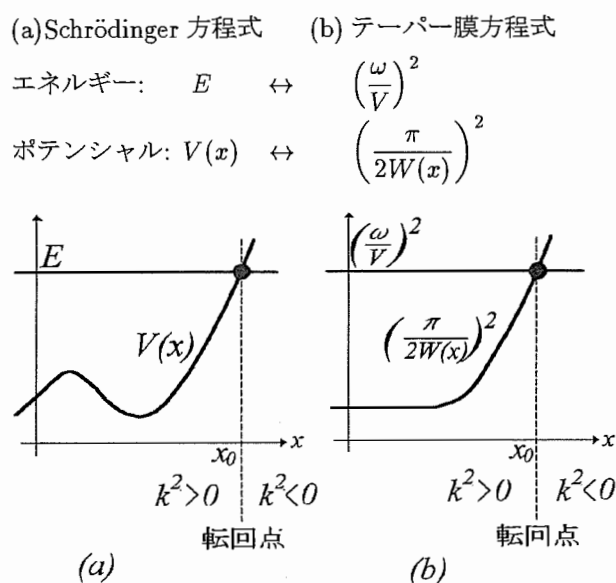


図 2 Schrödinger 方程式とテーパ膜方程式との対比

Fig.2 Analogy between (a)the Schrödinger equation and (b)the tapered membrane equation

2.3 振動領域と減衰領域

以上のアナロジーを、テーパ膜上の波動解析に適用する。(10) 式より、テーパ膜の連続的に減少する膜幅 \$W(x)\$ は、図 2(b) のように、単調に増加するポテンシャルを形成する。

このようなポテンシャル場に、周波数 \$\omega\$ の弾性波動を左から入力する問題は、エネルギー \$\left(\frac{\omega}{V}\right)^2\$ をもつ粒子ビームを、ポテンシャル場に衝突させる、量子力学における 1 次元散乱問題と等価である。

波動が \$x < 0\$ の側から入力するとき、はじめは波動のエネルギーがポテンシャルエネルギーより大きく、

$$k(x)^2 = \left(\frac{\omega}{V}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2W(x_0)}\right)^2 \quad (12)$$

で定義される波数が実数となる。従って、この領域では正弦的に振動する波形が得られる。

ところが、波動のエネルギーがポテンシャルエネルギーに等しくなる点、すなわち次式で決まる \$x_0\$:

$$\left(\frac{\omega}{V}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{2W(x_0)}\right)^2 \quad (13)$$

$$(14)$$

つまり、波動の周波数 \$\omega\$ に対し、膜幅が

$$W(x_0) = \frac{\pi V}{2\omega} \quad (15)$$

となる点 \$x_0\$ を波動が過ぎると、系のエネルギーがポテンシャルエネルギーより小さくなり、波数 (12) は虚数となる。この結果、波動の振幅は指数関数的に減衰する。いわゆる、ポテンシャル障壁に対する波動の”しみだし”である。

このように、テーパ膜波動の振動様式は、波動のエネルギーとポテンシャルエネルギーとの交点位置 \$x_0\$ を境に大きく変化する。この点 \$x_0\$ は転回点と呼ばれる。

2.4 テーパ膜上の振幅分布

以下では、膜幅が

$$W(x) = W_0 - dx, \quad (16)$$

なるテーパ膜を考える。ポテンシャル、局所波数はそれぞれ、

$$V(x) = \left(\frac{\pi}{2(W_0 - dx)}\right)^2 \quad (17)$$

$$k^2(x) = \left(\frac{\omega}{V}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2(W_0 - dx)}\right)^2 \quad (18)$$

となり、\$k(x_0) = 0\$ で定義される転回点は、

$$x_0 = \frac{1}{d} \left(W_0 - \frac{\pi V}{2\omega}\right) \quad (19)$$

となる。

ここで膜幅の変化率は十分小さい, すなわち, d が十分小さいとして, (12) を転回点の周りで

$$k^2(x) = k^2(x_0) + \frac{dk^2(x_0)}{dx}(x - x_0) = -k_0^2(x - x_0), \quad (20)$$

$$\text{ただし } k_0^2 = \frac{4d\omega}{\pi V}, \quad (21)$$

と展開すれば, テーパー膜方程式は

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} - k_0^2(x - x_0)f(x) = 0. \quad (22)$$

となる. この方程式の解析解は, 以下のように Bessel 関数を用いて書ける. [9]

$$f(x) = A \frac{\pi}{\sqrt{3}} \sqrt{x_0 - x} \left(J_{\frac{1}{3}} \left(\frac{2}{3} k_0 (x_0 - x)^{\frac{3}{2}} \right) + J_{-\frac{1}{3}} \left(\frac{2}{3} k_0 (x_0 - x)^{\frac{3}{2}} \right) \right) \quad (x < x_0) \quad (23)$$

$$f(x) = A \sqrt{x - x_0} K_{\frac{1}{3}} \left(\frac{2}{3} k_0 (x - x_0)^{\frac{3}{2}} \right) \quad (x > x_0),$$

ただし, A は入力によって決まる定数である. この振幅分布を図 3 に示す. 図では例として, 材質を真鍮とし, 各定数を以下のように設定した: $\rho = 8.11[\text{g}/\text{cm}^3]$, $T = 5.12 \times 10^{10} [\text{dyne}/\text{cm}^2]$, $W_0 = 3[\text{cm}]$, $d = 0.1$, $f = 19.6[\text{kHz}]$.

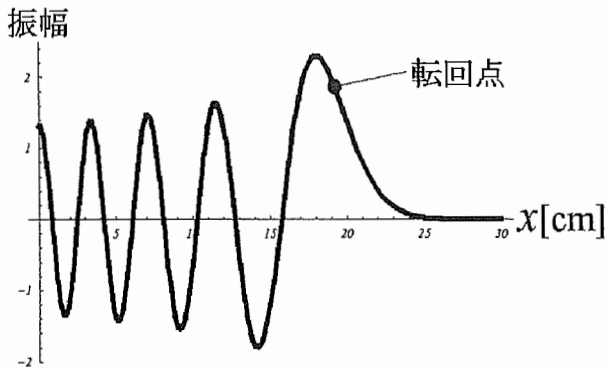


図 3 テーパー膜上の振幅分布. $x = 0$ における入力振幅で規格化している.
Fig. 3 Amplitude distribution in the tapered membrane. The amplitude is normalized by the amplitude input at $x = 0$.

転回点手前では正弦振動的波形であるが, 転回点を超えると指数関数的に減衰してしまうことがわかる. 尚, 図のように, 転回点の直前で振幅が最大となる.

2.5 駆動周波数による転回点位置の制御

転回点の位置は, 駆動周波数 ω に対し, (19) で決まる. 従って, ω を変化させれば転回点位置は制御できることになる.

またこのことは, ポテンシャルエネルギーと全エネルギーの関係からも直感的に理解できる. 転回点は, ポテンシャルエネルギーと全エネルギーを表わす直線との交点である. 従って, テーパー膜から決まる単調増加ポテンシャルに対し, 駆動周波数の自乗に比例する全エネルギーが高いほど, 転回点の位置は, 膜の奥まで届くことになる (図 4).

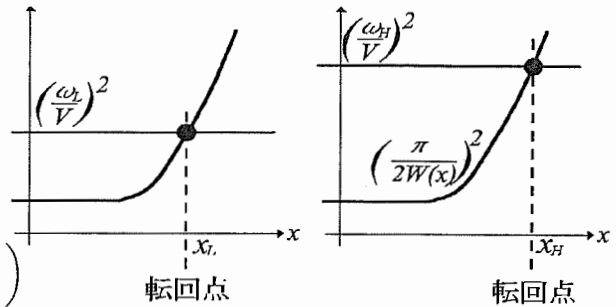


図 4 周波数を ω_L から ω_H に高めると, 転回点が x_L から x_H へと移動する

Fig. 4 The turning point moves from x_L to x_H when the frequency changes from ω_L to ω_H .

(24)

真鍮の薄膜に対し, 駆動周波数を $f=20[\text{kHz}]$, $f=40[\text{kHz}]$ と変化させたときの, 転回点の位置の変化を図 5 に示す.

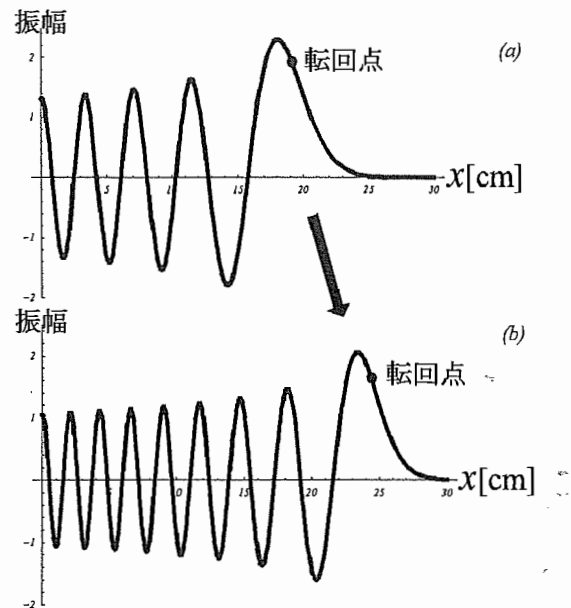


図 5 駆動周波数による転回点位置の制御 (a) $f=20[\text{kHz}]$ (b) $f=40[\text{kHz}]$

Fig. 5 Control of the turning point by the frequency

2.6 テーパー膜波動の性質

以上をまとめると, テーパー膜の幅の広い側に振動を加えたとき, 膜上に発生する波動は次の 2 つの性質を持つ:

性質 1) 波動の入力点から転回点まで、波動の包絡振幅は単調に増加する。そして転回点を越えると、指数関数的に減少する。

性質 2) 転回点の位置は、波動の駆動周波数により制御できる。

2.7 テーパー膜波動を用いた摩擦感制御ディスプレイの原理

超音波領域で振動する弾性板を触ると、スキューズ効果と呼ばれる気体潤滑作用により指と面との摩擦が減少し、あたかもつるつるした表面であるかのように感じられる、という報告がある。[1] この感覚は、ランジュバン型超音波振動子の表面を触るだけでも体験できる。

そこで、以下では超音波周波数の波動をテーパ膜に入力することを考える。テーパ膜波動の性質 1) より、入力部から転回点までは振動が存在するため、この領域を触ると低摩擦感が得られる。一方、転回点よりも奥の領域では、波動が減衰してしまうため、膜のもともとの摩擦感が感じられる。こうして、一枚の平面上で、低摩擦領域と高摩擦領域とが同時に生成されることになる。さらに、テーパ膜波動の性質 2) より、両領域の境界、すなわち転回点の位置は、駆動周波数を変化させれば瞬時かつ連続的に変化できる。一枚の表面上の摩擦分布がリアルタイムで制御できることになるわけである。こうして、テーパ膜に超音波波動を入力することで、低摩擦領域が自在に伸縮できるディスプレイが実現されることになる。

3. 実験

3.1 基礎実験

触覚ディスプレイ作成の前に、前節で見たテーパ膜上の波動の性質を確かめるための基礎実験を行った。現象を高振幅でとらえるために、ゴムの薄膜をボイスコイルにより可聴域周波数で駆動する、図 6 のような実験系を用いた。

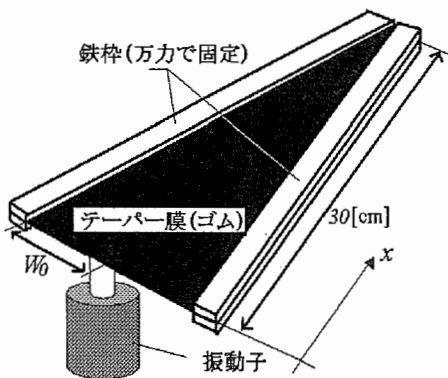


図 6 ゴム膜を用いた基礎実験
Fig. 6 Basic experiment using rubber tapered membrane

鉄板により $W_0 = 3[\text{cm}]$, $d = 0.1$ となるテーパ形状を作り、パイスで固定してエッジの固定境界条件を満たすようにする。ゴムの膜厚は $0.01[\text{mm}]$ であり、曲げ剛さは無視できると見なしてよい。振動子には動電型振動子 (EMIC 小型振動発生器 511-A) を用い、レーザー変位計 (Keyence LC-2440) を用いて振動振幅の計測を行った。

膜上の変位の時空間分布を図 7(a) に示す (例として $30[\text{Hz}]$ で駆動した場合)。x 軸は膜上の位置、t 軸は時間軸 1 周期分 ($1/30$ 秒)、縦軸が振幅値である。x = 15 付近を境として $x < 15$ では正弦的に振動しているが、 $x > 15$ では、全時間を通じて膜が振動していないことがわかる。このことは、 $x = 5, 18$ における時間波形 (同図 (b),(c)) を見れば明らかであり、 $x = 15$ 付近に転回点が存在していることを示している。

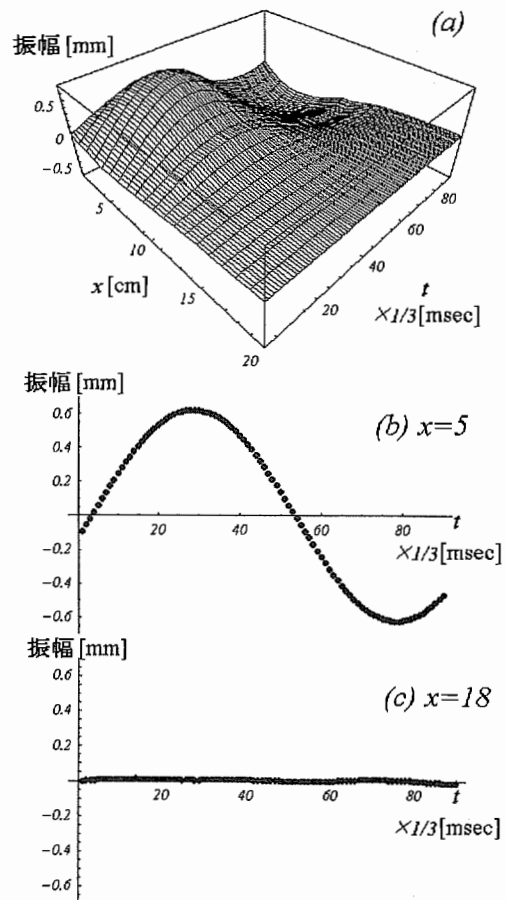


図 7 実験結果 1: (a) 膜上の時空間変位分布 (b) $x = 5$ における時間波形 (c) $x = 18$ における時間波形

$x > 15$ の領域では、全時間を通じてほとんど振動していないことがわかる

Fig. 7 Experimental result 1: (a) Distribution of spatio-temporal displacement in the tapered membrane. (b) Displacement at $x = 5$ (c) Displacement at $x = 18$

In the region, $x > 15$, the wave is attenuated at any time.

また、図 8 に膜上各点における振幅最大値の駆動周波数による変化を示した。駆動周波数は、図 (a) が 30[Hz]、図 (b) が 40[Hz] である。駆動周波数を高めると、入力位置から見てより遠くまで波動が達し、理論通り、転回点の位置が駆動周波数により制御されていることがわかる。

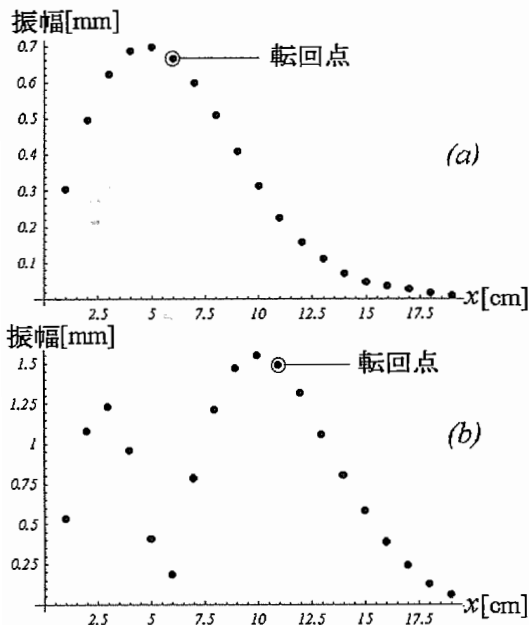


図 8 実験結果 2: 周波数による転回点位置の移動
(a) $f = 30$ [Hz], (b) $f = 40$ [Hz]

Fig. 8 Experimental result 2: The movement of the position of the turning point by the change of frequency

3.2 テーパー膜触覚ディスプレイの試作

前節の基礎実験に基づき、テーパー膜波動を用いた摩擦感制御を実証すべく、真鍮のテーパー薄膜に超音波振動を加える図 9 のようなディスプレイを試作した。超音波振動子としては、共振周波数 19.6[kHz] のボルト締めランジュバン型振動子 (日本特殊陶業 D4520PC) を用いた。膜厚は 0.05[mm] であり、テーパー棒は基礎実験器と同様に鉄板で作成した。1.5[mm] の鉄板をバイスで固定することで、固定エッジが実現されている (図では撮影用にバイスを数個外してある)。表面が撓まない程度の十分な張力で膜は張られている。膜形状は基礎実験器と同じである。

定性的な実験結果を述べる。振動を加えない状態では、膜の全表面において、真鍮膜の元来の摩擦を感じる。人さし指の腹を表面に押し付け、手を左右に動かそうとしても、摩擦により指がスティックされ、指腹の肉だけが左右に振られる状態を保つことができる。

ここで振動子を駆動すると、振動子付近、すなわち、テーパー膜の幅の広い側では、明らかに摩擦感の減少

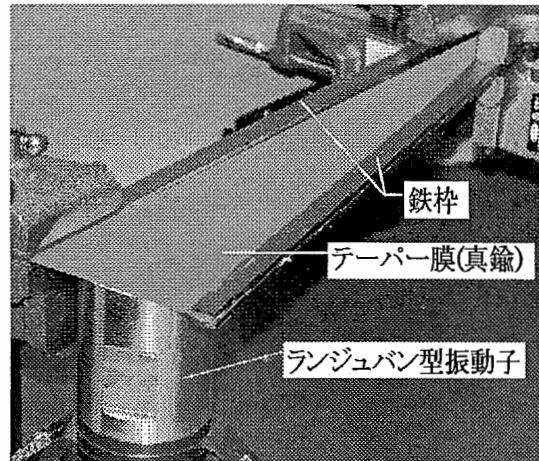


図 9 真鍮テーパー膜による触覚ディスプレイ
Fig. 9 A tactile display using a brass tapered membrane

が感じられる。指の腹を押し付けた状態で手を左右に振ると、指は表面をすべる。ところが、テーパー膜の奥の方、すなわち振動子から遠い部分を触っても、振動を加えていないときと同じ、高摩擦状態となっている。これは波動が減衰してしまう転回点が確実に存在していることを示している。転回点の手前では超音波波動により生じる気体潤滑作用により滑らかな表面が感じられ、波動が減衰する転回点より奥ではもとの真鍮の摩擦が感じられるわけである。

現段階では、低摩擦領域と高摩擦領域との境界が急峻でないため、周波数変化による転回点の移動も、明確に触知できるにはいたっていない。この点を改善するには、(24) および (21) 式に基づき駆動周波数を高めることで、転回点直後の振幅減衰率を大きくすることが必要と考えられる。また、直線的テーパー形状では、(19) に表れる、周波数変動に対する転回点の移動が微小であるという問題点があるので、狭い周波数帯域で大きい転回点移動幅が得られるテーパー形状を考察し、振動振幅、転回点の位置等の定量的評価を今後行う。また、共振周波数の異なる複数の振動子を用いることで広い周波数帯域を利用することも検討している。

4. まとめと展望

本論文では、テーパー膜に振動を加えたとき、波動が膜の先端まで到達せず転回点を超えると減衰する、という性質を用いて、スクイーズ効果により低摩擦と感じられる振動領域と、表面の元来の高摩擦が感じられる非振動領域とを一枚の表面に同時に作り出す方法を提案した。さらに、これらの領域が、波動の駆動周波数により、連続的かつ瞬時に制御できるという性質をテーパー膜はもつことを併せて示した。

さて、以上のように、本論文では、高摩擦領域と低摩擦領域の境界線の制御を中心に考察した。ここでは

振動領域は一様に低摩擦領域、として扱ったわけであるが、この滑らか感を生むスクイーズ力は、振動面の振幅によって決まる [10]。従って、テーパー膜上に振動振幅の分布を形成することができるならば、スクイーズ力分布を指の表面に作り出すことができる。このとき、振動領域は滑らかに感じられるのみならず、滑らかさの度合いを変化させるなど一層繊細な摩擦感が提示できることが期待される。

ところがここで、テーパー膜上の波動には、2.6 節に示した 2 つの性質に加えさらに、振動領域の振幅分布を作り出すために都合のよい次のような性質がある：

性質 3) 線形弾性膜故、複数の周波数の波動を入力すれば、膜上には各々の波動を重ねあわせた振幅分布が形成される。単一周波数で入力したときは、転回点直前で振幅のピークを迎える。従って、複数周波数を入力すれば、膜上の複数の位置に振幅極大値ができる。

例として図 10 に、8[kHz] で駆動した場合 (図 (a))、45[kHz] で駆動した場合 (図 (b))、およびこれらを同時に入力した場合 (図 (c)) の振幅分布を示す。膜上に複数の振幅極大値が得られることがわかる。

このようなテーパー膜波動の振幅分布の制御性が触覚に与える影響を調べることも今後の課題とする。

参考文献

- [1] 渡辺 敏雄, 福井 茂寿: "超音波振動を用いた触感制御法の研究", 日本機械学会, 第 4 回設計工学システム部門講演会講演論文集, 1994, 130-133
- [2] Toshio Watanabe, Shigehisa Fukui: "A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995, 1134-1139
- [3] 渡辺 敏雄, 福井 茂寿: "瞬間的な超音波振動による触感制御", 計測自動制御学会 第 34 回学術講演会予稿集, 1995, 751-752
- [4] 奈良 高明, 柳田 康幸, 前田 太郎, 館 暉, "弾性波動を用いた皮膚感覚ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol3, No.3, 89-97
- [5] Takaaki Nara, Taro Maeda, Yasuyuki Yanagida, Susumu Tachi "Tactile Display Using Elastic Waves", Proc. IEEE VRAIS '98, 43-50.
- [6] 木原 太郎: 導波管, 現代工学社, 41-47
- [7] L.M.Brekhovskikh: "Waves in Layered Media", Applied Mathematics and Mechanics, Academic Press, 1980
- [8] 川上 彰二郎: 光導波路, 朝倉書店, 75-81
- [9] 寺沢 寛一: 自然科学者のための数学概論 応用編, 岩波書店, 205-235
- [10] E.O.J.Salbu, "Compressible Squeeze Films and Squeeze Bearing", ASME Journal of Basic Engineering, Vol.86, 1964, 355-366

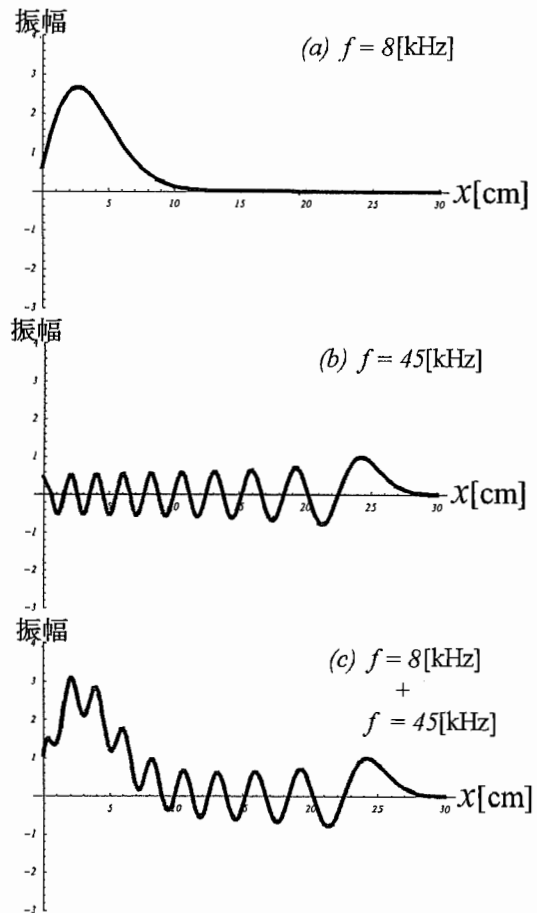


図 10 複数周波数の同時入力
(a) $f = 8$ [kHz] 単独の場合 (b) $f = 45$ [kHz] 単独の場合 (c) $f = 8$ [kHz], $f = 45$ [kHz] 同時入力の場合

Fig. 10 Superposition of waves with several frequencies

(1999 年 1 月 18 日受付)