

人工触覚受容器としてのPVDFフィルムトランスデューサによる応力検出特性について  
Study on The Stress Detection Characteristics of PVDF Film Transducers  
as Artificial Mechanoreceptors

正 山田 陽滋 (豊田工業大学) , 正 前野 隆司 (慶応義塾大学) ,  
藤本 勲 , 正 森園 哲也 , 正 梅谷 陽二, (以上豊田工業大学)

Yoji Yamada Toyota Technological Institute 2-12-1, Hisakata, Tempaku, Nagoya, Aichi  
Takashi Maeno Keio University 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama  
Isao Fujimoto, Tetsuya Morizono, Yoji Umetani

Abstract— In this paper, we investigate the detection characteristic of a PVDF film transducer followed by a transducer circuit when stress is applied to the transducer. As a result, it becomes clear that the transducer exhibits a mixed frequency characteristic of stress-rate and stress-acceleration. We discuss this characteristic is potentially useful for fabricating artificial mechanoreceptors.

Key Words: artificial mechanoreceptor, PVDF film, transducer, stress-rate, stress-acceleration

1. はじめに

本研究では、ヒトの触覚機構の実現を目指し、人工皮膚を構築すべくこれに組み込む人工機械受容器の作製について述べる。人工触覚受容器に用いるトランスデューサとして、圧電性に起因する興味深い動特性を持ち、かつ、柔軟性に富むPVDFフィルムトランスデューサ(以降PVDF)とした<sup>1)</sup>。そして、PVDFに応力を加えたときに、それに付加する回路(以降トランスデューサ回路)の出力を調べることで、PVDFの検出特性を詳細に調べた。

2. 人工皮膚の開発プロセス

人工皮膚を開発するプロセスを、Fig.1に示した。人工機械受容器の仕様を決める重要なファクタとして、大きさと周波数特性の問題がある。実験を行うことでS/N比を求めることにより、PVDFの大きさが決定する。

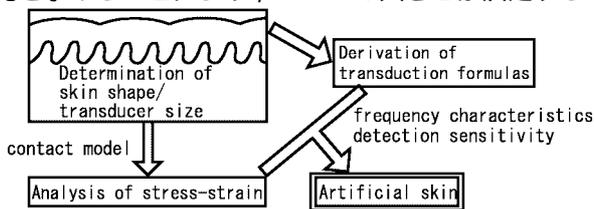


Fig.1 Design process of artificial skin

また、実験を行うことにより、PVDFおよびトランスデューサ回路(あわせて以降PVDF回路)の周波数特性を調査し、その回路モデルを求める。

3. 周波数特性調査実験

PVDF回路の周波数特性を調査するための実験装置をFig.2に示す。

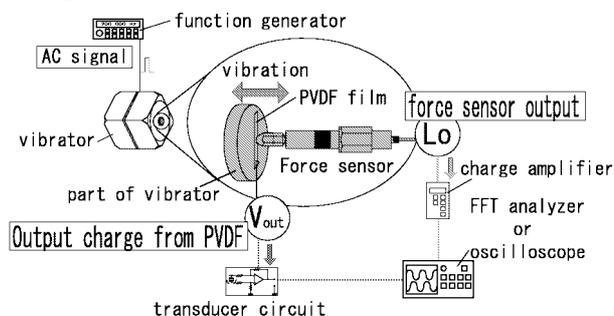


Fig.2 Experimental setup

周波数  $f_{PV}$  (10  $f_{PV}$  4000[Hz]) の範囲でサイン波状に加振器を励振し、PVDFの厚さ方向に応力  $L_o$ (以

降PVDF応力)を加える。この条件にて、同時に力覚センサからの出力を読み取る。PVDFから生じる電荷に対し、トランスデューサ回路の接続によって電流変換、増幅処理して、PVDF回路出力電圧  $V_{out}$  を測定する。 $L_o$ と  $V_{out}$  から  $Gain$  を(1)式で求める。

$$Gain = 20 \log \left| \frac{V_{out}}{L_o} \right| \quad (1)$$

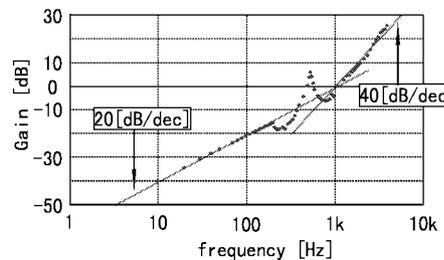


Fig.3 Result of experiment

実験結果を Fig.3に示す。実験結果から、注目すべき2つの特性が現れた。一つ目は、550[Hz]付近に実験装置の機械的な共振と考えられるピークが現れたことである。二つ目は、1000[Hz]付近の周波数を境目に1000[Hz]未満の周波数領域では20[dB/dec]の勾配(以降速度型特性と呼ぶ)を持ち、1000[Hz]以上の周波数領域では40[dB/dec]の勾配(以降加速度型特性と呼ぶ)を持つことが分かった。次節では、この現象を説明づけるPVDF回路の詳細な解析を行うこととする。

4. PVDFの等価回路

実験で行った(1)式の計算と、PVDF回路との関係式を導出する。Fig.4に、解析の対象として提案するPVDF回路モデルを示す。

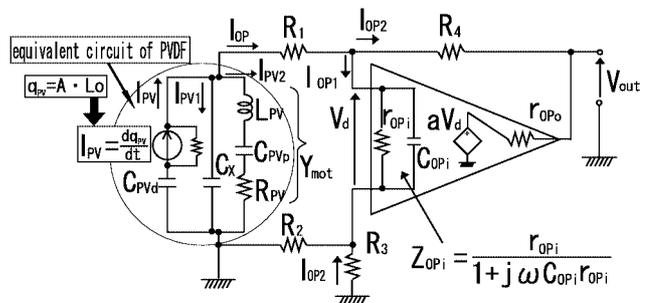


Fig.4 Connection from PVDF and transducer circuit

Fig.4において、円内に示した回路をPVDFの等価回路と仮定する。この中には浮遊容量  $C_x$  を含めている

ことに注意されたい．また，加振応力により，PVDFから発生する電荷を  $q_{PV}$  とし， $q_{PV}$  を時間微分した値  $I_{PV}$  を電流源として表す．

この条件にて実験の計算式  $Gain$  を PVDF 回路の定数に換算した結果を (2) 式に示す．そして， $Gain$  を計算した結果を，Fig.5に示す．

$$Gain = 20\log|Z_1| - 20\log|Z_2| + 20\log|j\omega| - 20\log|Z_3| \quad (2)$$

但し，

$$Z_1 = \{a(R_3 + R_4 + 2r_{OP0}) + r_{OPi}\}Z_{OPi} \quad (3)$$

$$Z_2 = (1 + a)Z_{OPi} + (R_3 + R_4 + r_{OP0}) \quad (4)$$

$$Z_3 = 1 + Z_{in}(j\omega C_X + Y_{mot}) \quad (5)$$

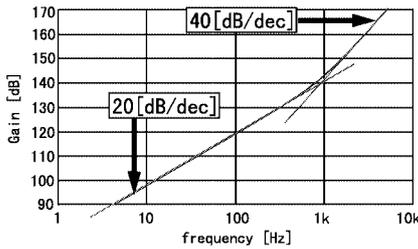


Fig.5 calculation result of Gain

実験結果の特性から，折れ点周波数を求めると，理論的に導出した式と一致している．このことより，トランスデューサ回路の特性に速度型特性および加速度型特性の2つが混在していることが言える．また，計算の結果， $20\log|j\omega|$  の速度特性<sup>2)</sup>に加え， $-20\log|Z_2|$  が加速度特性に影響を及ぼしていることが分かった．ここで， $Z_2$  の成分，つまりトランスデューサ回路のパラメータの変化によって速度型特性から加速度型特性への変化がもたらされることから，PVDF 回路の周波数特性を観測者が調整できることが分かった．

## 5. PVDF 荷重検出に関する実験

本研究では，最終的に PVDF を人工皮膚の指紋の中に埋め込んで，特に滑り振動覚の検出に利用することを考えている．そのさい，指紋上での PVDF に加わる応力は，極めて小さくかつ一瞬であることが予想される．

そこで PVDF に，振幅がサイン波の半周期分の山の部分を振幅とする PVDF 応力を加えたときに，どのような PVDF 回路出力電圧が生じるかについて実験を行った．次節の議論から，PVDF 回路の速度型特性と加速度型特性の代表的な周波数についてさらに適用可能性を検討すべく，感度に関する調査を加えることにする．調査する周波数を 100[Hz] および 2000[Hz] とした．Fig.6 に，100[Hz] の PVDF 応力を加えたときの実験結果を示す．

$f_{PV} = 100[Hz]$  に関して，PVDF 回路の S/N 比は，0.51[N] の PVDF 応力に対し，4.0 となった．また， $f_{PV} = 2000[Hz]$  の場合には，S/N 比が，0.48[N] の PVDF 応力に対し， $1.1 \times 10^2$  となり，4 節で求めた曲線と同じ傾向の S/N 比が得られた．次節の人工皮膚に PVDF を挿入した際，PVDF に加わる応力のオーダは  $\frac{1}{10}$  [N] であるとされているため，S/N 比がこれと同様の結果となるため，感度は十分あるといえる．

## 6. 人工皮膚への適用性

本研究では PVDF 回路の作製に並行して，人工皮膚の FEM 解析による設計を行っている<sup>3)</sup>．Fig.7 に人工皮膚に含まれる指紋のモデルを示す．

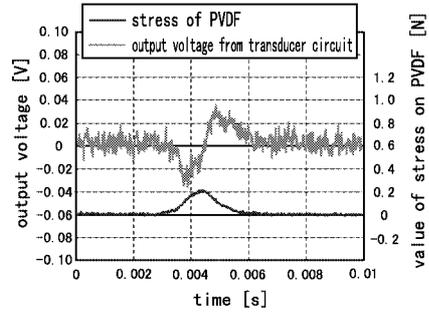


Fig.6 Result of experiment

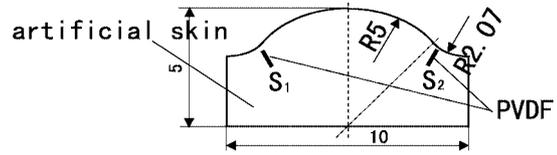


Fig.7 model of fingerprint

このモデルの中で，指紋中の2箇所  $S_1$ ， $S_2$  におけるひずみの差を求めると，それを時間微分した値および2階時間微分した値に初期局所滑りを特徴づける信号パターンが生じることを報告した．そのうち，時間微分した値は 10[Hz] オーダの低周波信号を主成分としていることが分かった．また，指紋のモデルの FEM 解析から，指紋の固有振動数は 7680[Hz] となり，この値は，皮膚表面が，静摩擦覚の中で重要な役割を演ずる初期局所滑りを，物体との間に生じる際の指紋の振動周波数の目安を与えるものと考えられる．

PVDF をこれに適用する場合，4 節までの研究により，速度型特性，加速度型特性を持ちあわせていることから，PVDF に加えられる応力の時間の1階微分および，2階微分の測定が PVDF 回路出力電圧から出力として得られると考える．しかしながら，PVDF 回路にバンドパス特性となるように周波数フィルタ特性を工夫することが望ましい．

## 7. 終わりに

以上本稿では，人工皮膚の開発プロセスを述べ，その中の人工触覚受容器作製開発プロセスにしたがって，PVDF フィルムトランスデューサを用いた素子の周波数特性および感度に関する研究について述べた．その結果，PVDF フィルムトランスデューサが人工触覚受容器のトランスデューサとして利用可能な周波数上の動特性を示すことが結論づけられた．

本研究は科学研究費補助金(基盤(B)(1))12450168)により実施されているものであり，ここに謝意を表します．

## 参考文献

- 1) Yoji Yamada at. al.: Slip phase isolating:impulsive signal generating vibrotactile sensor and its application to real-time object regrip control Robotica,vol.18 ,pp.43-49 2000
- 2) Robert D. Howe at. al.: Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.9, No.2, April 1993
- 3) Daisuke Yamada at. al.: Design of Artificial Finger Skin Having Ridges and Distributed Tactile Sensors, 32th ISR, April 2001