蝸牛基底膜を模擬した fishbone 音響センサの最適検出機構とその実験

東京大学　○ 荒木 章子，日下部 裕一 ，小野 順貴 ，安藤 繁

Optimum Transaction Method of Fishbone Acoustic Sensor
Mimicking Basilar Membrane of Cochlea

○ Shoko Araki, Yuichi Ksakabe , Nobutaka Ono , Shigeru Ando　University of Tokyo

Abstract : We have proposed "fishbone" structure as an equivalent mechanical model of cochlea and realized it by Si micromachining. For its applications, e.g. cochlea implants, it is important to obtain frequency-variant sensitivity and selectivity. In this paper, we show the weighted accumulating scheme of frequency-decomposed vibration of each beam. Then we implement, by virtue of the log-linear property of cochlea, the frequency-variant filters very simply by controling the bias voltages of the fishbone.

1. はじめに

哺乳類の聴覚末梢系にある、蝸牛基底膜は、位置により共振周波数が徐々に変化する共振系が弱い相互作用で連結されている共振系アレイとしてモデル化される。我々は、この蝸牛基底膜を等価な機械系に変換した構造である fishbone 構造 (Fig.1) を提案し、シリコン微細加工で実現してきた [1] [2]。この音響センサの主な特長は、1) 共振現象を利用した高効率のセンシングが可能である、2) センシング時点で周波数分解が可能である、3) ヒトの基底膜の持つフィルタ特性をよく再現している、などである。この特長を生かし、補聴器などへの応用を考える場合には、周波数分解された微少な機械振動を効率よく、さらには、後処理のために有用な形で検出することが必要である。

本稿では、fishbone 構造の加算合成型の振動変換法の原理と基礎実験結果を示し、蝸牛基底膜構造に固有な振動伝播作用と fishbone 構造への適切なバイアス電圧付与によって、センシング段階で任意かつ変更可能な周波数特性をもつ音響センサを実現できることを示す。

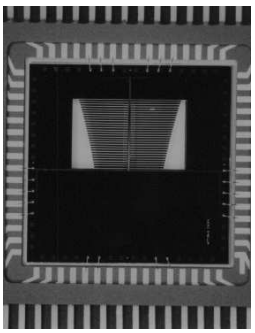


Fig. 1 fishbone 構造。チップ角　10mm, 厚さ約　10μm, 共振ビーム数 29 本。

2. 加算合成型振動検出の原理

振動検出の方法を Fig.2 に示す。各ビームの根本には B のドーピングでピエゾ抵抗が配置されており、各ビームの振動による歪みを電流加算して検出する。

i 番目の共振ビーム上のピエゾ抵抗の値 R_i、歪みによる抵抗変化分 ΔR_i、i 番目のビームのバイアス電圧 V_i とすると演算増幅器の仮想接地点に流れ込む電流 I は

$$I = \sum_{i=1}^{N} \frac{V_i}{R_i + \Delta R_i} \simeq \sum_{i=1}^{N} \frac{V_i}{R_i} - \sum_{i=1}^{N} (\frac{V_i}{R_i})(\frac{\Delta R_i}{R_i}) \quad (1)$$

、帰還抵抗 R_f を用いて出力電圧は

$$V_{out} = -\sum_{i=1}^{N} \frac{R_f V_i}{R_i} + \sum_{i=1}^{N} (\frac{R_f V_i}{R_i})(\frac{\Delta R_i}{R_i}) \quad (2)$$

となる。第 2 項に抵抗の変化分が現れることがわかる。

式 (2) より出力電圧の利得はバイアス電圧に依存するので、バイアス電圧をビーム毎に独立に制御し、各ビームの狭帯域信号を加算し出力することで、センシングの段階で任意のフィルタリングが可能となる。今回の試作では配線の制約上、3 ~ 4 本のビームをブロック化し、

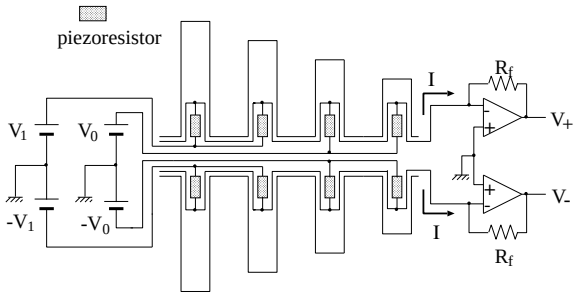


Fig. 2　ピエゾ抵抗による振動検出方式

ブロック毎にバイアス電圧を制御する方式でこれを実現した。

単一のブロックにバイアス電圧を与えた結果を Fig.3 (1) に示す . fishbone 構造によって機械的に周波数分解された振動が , ピエゾ抵抗によって電気信号に変換され出力されている。

3. 対数線形構造を利用した振動成分の最適合成

3.1 複数ブロックにおける和信号の検出と問題点

次に、複数のビームに同時にバイアス電圧を与えた場合の結果を Fig.3 (2) に示す。Fig.3 (1) と比較してみて

わかるように単独の周波数特性の加算和を得ることができていないばかりか振幅が却って減少している。

この理由を考察する。この fishbone 構造では、(1) 共振現象を積極的に利用していること (2) 蝸牛基底膜の構造を模擬していること、ということから (1) 共振点の前後で位相が大きく変化する (2) 振幅は共振点より低周波側は大きく高周波側は小さい、という原理的性質がある。単一周波数による応答の空間分布を Fig.4 に示す。

これによると、1 ブロックが 3 ~ 4 本のビームから構成されていることから、近隣のブロックとは位相が反転していることになり、これを単純に加算したために Fig.3 (2) の振幅の減少が見られたと考えられる。

3.2 振動成分の最適合成

そこで、バイアス電圧の制御による周波数特性可変センサを実現するためには、入力信号の周波数によらない位相補償の簡便な方法を見出だす必要がある。

ここで fishbone の基となっている蝸牛基底膜の構造に立ち返って考える。蝸牛基底膜は、その形状や物理的特性 (質量、バネ、ダンパ) が位置により対数線形に変化する対数線形構造であり、次の性質を持つ [3] 。

性質
着目位置での共振要素の共振周波数における振動振幅の空間分布が，着目位置に依らず相似形を保つ。

すなわち、Fig.4 からも分かるように、対数線形構造においては、周波数が変化しても基底膜を伝播する波の空間的分布形状は変化せず、平行移動するだけである。この性質を利用すると、共振周波数における振動振幅のピーク間隔で共振ビームを配置し、隣あうビームを互いに逆バイアスにすることで位相補償ができる。

今回の試作では、このようなビーム配置をとってはいないが、Fig.4 とここまでの議論より、任意の周波数で位相を補償するには、共振点を含むブロックと高周波側の隣接ブロックでバイアス電圧の位相を逆にすればよい。バイアス電圧の符号をブロック毎に交番させたときの結果を Fig.3 (3) に示す。正しく加算和が検出されており期待する周波数特性が得られている。

バイアス電圧を与えるビームを様々に選んだ時の特性について有限要素法によるシミュレーション結果を Fig.5 に示す．フィルタ特性を制御できている。

4. まとめ

本稿では、fishbone 構造によって入力音響信号を周波数分解し、それを電気信号として検出できること、外部からのバイアス電圧の制御により任意のフィルタ特性が得られることを示した。位相補償のためのビーム間隔の設計など、センシングデバイスしての応用を見据えた fishbone の設計方針の確立が今後の課題である。

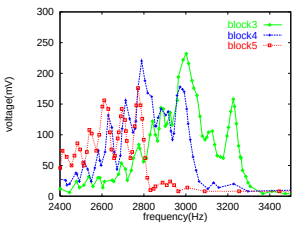
参考文献

1) K.Tanaka et al. “A Novel mechanical cochlea “fishbone” with dual sensor/actuator characteristics,” IEEE/ASME Trans. Mechatronics, pp.79-84, 1998

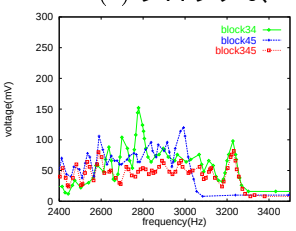
2) Y. Kusakabe et al. “Piezoresistive transduction for fishbone structure and its application to variable spectral sensitivity microphone,” Tech. Digest 16th Sensor Symposium, pp.249-252, 1998

3) 荒木 他. “入力インピーダンスに着目した蝸牛基底膜モデルの解析と応用,” 電気学会センサシステム応用研究会資料, pp.43-48, 1998

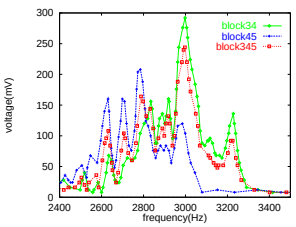
4) 日下部, “フィッシュボーン型聴覚センサと信号処理に関する研究,” 東京大学計数工学専攻修士論文, 1999



(1) ブロック 3、4、5 単独の場合

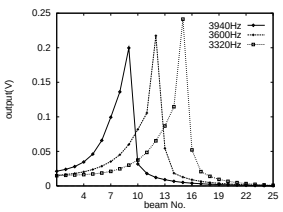


(2) 複数ブロックに電圧を与えた場合

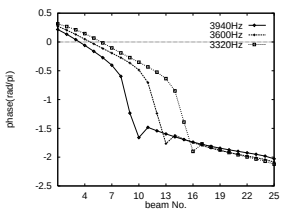


(3) 隣接ブロックに逆バイアスを与えた場合

Fig. 3 バイアスの与えかたと周波数特性

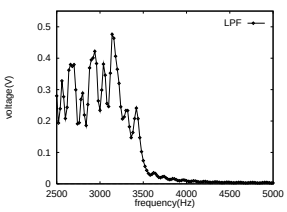


(1) 振幅

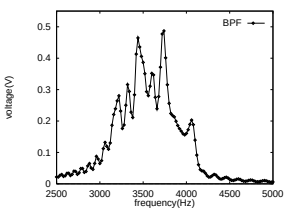


(2) 位相

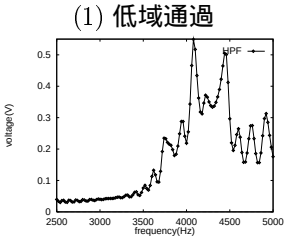
Fig. 4 fishbone 構造上に生じる進行波の空間的分布



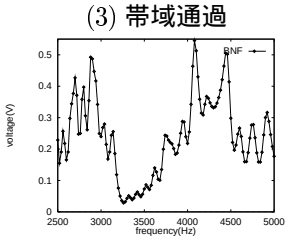
(1) 低域通過



(3) 帯域通過



(2) 高域通過



(4) 帯域阻止

Fig. 5 fishbone のフィルタ特性のシミュレーション結果