

# 表面弾性波共振子を利用した マルチセンサモジュールのための超小型角速度センサの開発

A Development of Ultra-Compact Angular Rate Sensors  
for Multi-Sensor Modules Employing Surface Acoustic Wave Resonators.

H27助自75

代表研究者 原 基 揚 東北大学 大学院工学研究科 ナノメカニクス専攻 准教授  
Motoaki Hara Associate professor, Department of nanomechanics,  
Graduate school of engineering, Tohoku university

Aiming for constructing a multiple sensor bank module using surface acoustic wave (SAW) sensors, a SAW based micro angular rate sensor was newly proposed in this study. Our gyroscope was simply constructed by an oscillator using a single SAW resonator as a frequency reference. It was not integrated with nano-scale scattering pattern or comlocate unidirectional SAW IDTs conventionally used in SAW gyroscopes. Angular rate was acquired from the shift of the oscillation frequency. In this study, it was shown based on a theoretical calculation that gyro effect can be detected from the resonant frequency shift in the conventional SAW resonator with bidirectional wave propagation. We fabricated oscillator chips employing the LiNbO<sub>3</sub> Rayleigh-SAW resonator as a frequency reference and demonstrated the angular rate detection using the fabricated oscillator. As a result, sensitivity of  $7.83 \times 10^{-3} \text{ Hz/deg}\cdot\text{s}^{-1}$  was achieved with 9.7 MHz SAW resonator. The SAW gyroscopes can only acquire the angular rate as the rotation axis was parallel to the SAW propagation direction. In contrast, the output was strongly suppressed when the rotation axis was orthogonal. These trends agreed well with theoretical predictions. This is the first report of the angular rate detection employing a single SAW resonator in the world. This result can provide the strong solutions for the development of ultra-compact gyroscope and implementation of multiple SAW sensor modules.

## 研究目的

近年のトリリオンセンサに代表される次世代の超大規模センサネットワークの構築において、センサデバイスには低価格化への圧力とともに、多元計測への拡張性、苛酷環境での耐久性、無線技術との親和性がより高い次元で求められることとなる。これらの厳しい要求に対して、繊細な機械構造と高度な回路技術とを駆使する従来のMEMS (Micro Electro Mechanical System) センサだけでは、全ての仕

様を満足することは容易ではない。この状況に鑑み、本研究では、表面弾性波共振子を利用したマルチセンサモジュールを提案する。提案するマルチセンサモジュールでは、センサ部として、複数の表面弾性波共振子が用い、該共振子を周波数リファレンスとして発振器を形成する。各々の表面弾性波素子は異なる物理量に感応するように設計され、それらのセンサの測定量は発振周波数の変化量として出力される。出力された信号は局部発信器を用いて低周波帯に一括ダウンコンバートされ後段のデジ

タル回路で処理される。

表面弾性波は固体表面に振動エネルギーが集中して伝搬する波動現象であり、最表面の加速度は $10^6\sim 10^8\text{ m/s}^2$ に達する。そのため、多くの物理量に対して鋭敏な応答を示すことが知られており、この特徴を好適に利用することで、同様の作製プロセスにて、様々なセンサを実現することができる。さらに、センサ構造の統一により、読み出し回路を共通化することが可能となり、使用用途に応じたセンサチップの組み換えが極めて簡便となる。

表面弾性波共振子はすだれ状電極と反射器とを圧電基板上に形成することによって作製され、振動は電極領域のみに限定される。本共振子は微細な自立構造を有するMEMSデバイスと異なり堅牢であり、振動領域を電極パターン内に限定できるため、基板形状が振動モードに影響するセラミック共振子と比し、小型化に好適である。チップの小型化はコスト面だけでなく、耐衝撃性の観点からも魅力的である。さらに、圧電基板と電極材料とを適切に選択することによって、高温高湿な環境にも優れた耐久性を示す。本申請で提案するモジュールでは、該共振子を周波数出力のセンサとして利用する。これによって、SN比の向上が見込まれ、優れた耐ノイズ性も付与される。

表面弾性波共振子は携帯電話のRFフロントエンドにおいて周波数制御素子として広く活用されている。本提案で検討されるセンサはこの表面弾性波素子技術を活かして構築される。図1では、センサの出力をダウンコンバートし、デジタル処理後に汎用のPAN (Personal Area Network) チップを用いてセンサネットワークを構築、測定量を無線にて収集することを想定しているが、RFフロントエンドと一体化し、高周波帯での測定信号(発振器出力)を高周波帯のまま、送受信する新たなアーキテクチャを

指向することも可能である。この新たな方式では、電力を必要とする演算処理を有線での電源接続が可能なコーディネータモジュールにて一括実施することも可能となる。

SAW共振子を利用した高感度センサは磁気センサや化学センサなど、多数方向くされている。しかし、表面弾性波共振子を利用した角速度の検出は、数値的な検証が古くよりなされているものの、デバイスとしての報告例は少ない。一方、センサネットワークの有望な応用先として、ヒューマンセントリックなモーションセンサや社会インフラの構造ヘルスマニタリング等が挙げられることから、角速度センサ(ジャイロセンサ)などに代表される慣性センサへの需要は極めて高い。そこで本案では、表面弾性波共振子を利用したセンサにおいて、最も難易度の高い角速度センサの開発に優先的に取り組み、得られた知見を加速度センサ、圧力センサなど、各種慣性センサに横展開し、実用性の高い無線センサモジュールの構築を目指すことを目的とする。

## 概 要

近年のトリリオンセンサに代表される次世代の超大規模センサネットワークの構築において、センサデバイスには低価格化への圧力とともに、多元計測への拡張性、苛酷環境での耐久性、無線技術との親和性がより高い次元で求められることとなる。これらの厳しい要求に対して、繊細な機械構造と高度な回路技術とを駆使する従来のMEMS (Micro Electro Mechanical System) センサだけでは、全ての仕様を満足することは容易ではない。この状況に鑑み、表面弾性波共振子を利用したマルチセンサモジュールを提案する。本モジュールでは、センサ部として、複数の表面弾性波共振子が用い、該共振子を周波数リファレンスとして発

振器を形成する。各々の表面弾性波素子は異なる物理量に感応するように設計され、それらのセンサの測定量は発振周波数の変化量として出力される。出力された信号は局部発信器を用いて低周波帯に一括ダウンコンバートされ後段のデジタル回路で処理される。

表面弾性波は固体表面に振動エネルギーが集中して伝搬する波動現象であり、最表面の加速度は $10^6\sim 10^8\text{ m/s}^2$ に達する。そのため、多くの物理量に対して鋭敏な応答を示すことが知られており、この特徴を好適に利用することで、同様の作製プロセスにて、様々なセンサを実現することができる。さらに、センサ構造の統一により、読み出し回路を共通化することが可能となり、用途に応じたセンサチップの組み換えが極めて簡便となる。

表面弾性波共振子はすだれ状電極と反射器とを圧電基板上に形成することによって作製され、振動は電極領域のみに限定される。本共振子は微細な自立構造を有するMEMSデバイスと異なり堅牢であり、振動領域を電極パターン内に限定できるため、基板形状が振動モードに影響するセラミック共振子と比し、小型化に好適である。チップの小型化はコスト面だけでなく、耐衝撃性の観点からも魅力的である。さらに、圧電基板と電極材料とを適切に選択することによって、高温高湿な環境にも優れた耐久性を示す。本申請で提案するモジュールでは、該共振子を周波数出力のセンサとして利用する。これによって、SN比の向上が見込まれ、優れた耐ノイズ性も付与される。

表面弾性波共振子は携帯電話のRFフロントエンドにおいて周波数制御素子として広く活用されている。本提案で検討されるセンサはこの表面弾性波素子技術を活用して構築される。図1では、センサの出力をダウンコンバートし、デジタル処理後に汎用のPAN(Personal

Area Network)チップを用いてセンサネットワークを構築、測定量を実線にて収集することを想定しているが、RFフロントエンドと一体化し、高周波帯での測定信号(発振器出力)を高周波帯のまま、送受信する新たなアーキテクチャを指向することも可能である。この新たな方式では、電力を必要とする演算処理を有線での電源接続が可能なコーディネータモジュールにて一括実施することも可能となる。

SAW共振子を利用した高感度センサは磁気センサや化学センサなど、多数方向くされている。しかし、表面弾性波共振子を利用した角速度の検出は、数値的な検証が古くよりなされているものの、デバイスとしての報告例は少ない。一方、センサネットワークの有望な応用先として、ヒューマンセントリックなモーションセンサや社会インフラの構造ヘルスマニタリング等が挙げられることから、角速度センサ(ジャイロセンサ)などに代表される慣性センサへの需要は極めて高い。そこで本案では、表面弾性波共振子を利用したセンサにおいて、最も難易度の高い角速度センサの開発に優先的に取り組み、得られた知見を加速度センサ、圧力センサなど、各種慣性センサに横展開し、実用性の高い無線センサモジュールの構築を目指すことを目的とする。

$128^\circ\text{ Y}$ 回転X伝搬 $\text{LiNbO}_3$ 基板の各軸に回転を印加したとき、共振子に誘起される弾性波の波数変化を数値的に計算した。計算はコリオリ力と遠心力の項を追加した運動方程式を用い、振動方程式と境界条件式とを満足するSAW伝搬速度を数値的に推定することによって得られる。演算は市販の数学ソフト(Mathematica)を用いて行った。計算の結果、基板法線方向への回転において、波数に変化を生じないことがわかった。これは、Rayleigh波の振動方向と回転軸とが直行し、コリオリ

力の干渉を得られないためと考えられる。また、SAW伝搬方向まわりの回転でも、応答が抑制された。これは、共振子では双方向にSAWが伝搬するため、コリオリ力の効果が相殺されてしまうためと考えられる。一方、SAW伝搬方向と直交する方向に回転軸を有する場合は、回転印加に対して、明確な応答が得られることが確認された。

この計算を元に、Rayleigh SAW共振子の試作を行った。IDT電極としてAlを使用し、電極の厚み、対数、ピッチ、開口長はそれぞれ、230 nm、30対、400  $\mu\text{m}$ 、300  $\mu\text{m}$ とした。続いて、試作の結果得られた共振子の周波数特性を用いて、発振回路の設計を行った。発振回路は変形コルピッツ回路である。試作の結果、発振器は9.7 MHzにて定常発振に成功した。

試作した発振器は回転テーブルに接続され、スリップリングを介して周波数カウンタに接続される。発振器はパッケージ化されていないため、周辺のノイズを遮断する必要があり、静電シールド内で評価された。また、回転時の旋回動作により、素子が冷却され、発振周波数にドリフトが生じるため、計測時は常にファンを用いて強制冷却を行った。

SAWの伝搬方向に直交する方向に回転を印加したとき、印加角速度に応じて、共振周波数が増加した。また、SAWの伝搬方向に回転が印加したときでは、周波数の変化量が有意に抑制された。これは、シミュレーションで得られた傾向に完全に一致する。

－以下割愛－