

## スピントロニクス技術を応用した高感度歪み検知素子を用いたスピンMEMSマイクロホン

Spintronic MEMS Microphone Using Ultrasensitive Spintronic Strain Gauge Sensor Element

藤 慶彦 FUJI Yoshihiko 加治 志織 KAJI Shiori 原 通子 HARA Michiko

近年、スマートフォンや、車載機器、IoT (Internet of Things) デバイス向けに、小型化・大量生産が可能なMEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を用いたセンサーの市場が急速に拡大している。特に、MEMSマイクロホンでは、音声認識の高性能化のために、MEMSセンサーの高感度化に対するニーズが高まっている。

東芝は、高感度なMEMSセンサー実現のために、HDD (ハードディスクドライブ) ヘッドやMRAM (Magnetoresistive RAM) に用いられてきたスピントロニクス技術を応用して、従来用いられてきた金属歪み(ひずみ)ゲージに比べ2,500倍、半導体歪みゲージに比べ100倍以上の高感度な歪み検知感度を持つスピン型歪み検知素子を開発した。また、このスピン型歪み検知素子とMEMS技術を融合したスピンMEMSマイクロホンを試作し、世界で初めて<sup>(注1)</sup>動作実証に成功した。

With the rapid expansion of sensors for electronic equipment including smartphones, in-vehicle electronics, and Internet of Things (IoT) devices, in which microelectromechanical systems (MEMS) technologies are incorporated that make it possible to achieve the miniaturization and mass production of such sensors, demand has been growing for a MEMS microphone with higher sensitivity to enhance the performance of speech recognition.

Toshiba Corporation has developed an ultrasensitive spintronic strain gauge sensor element employing spintronic technologies that have been utilized in hard disk drive (HDD) heads and magnetoresistive random-access memories (MRAMs). The strain sensitivity of this sensor element has been improved to 2 500 times that of a conventional metal strain gauge and more than a hundredfold compared with that of conventional semiconductor strain gauges. We have also developed prototype spintronic MEMS microphones integrating this sensor element with MEMS technologies, and successfully demonstrated their operation for the first time in the world.

### 1. まえがき

近年、スマートフォンや、車載機器、IoTデバイスなどに、小型化かつ大量生産が可能なMEMS技術を用いたセンサー市場が急速に拡大している。特に、急速に浸透したMEMSマイクロホンは、音声認識の高性能化のためにSNR (Signal to Noise Ratio) の向上が進められてきた。しかし、従来の静電容量型MEMSマイクロホンでは、図1(a)に示すように、ダイヤフラム電極とバックプレート電極の間に挟まれた空気を持つ粘性の影響<sup>(2)</sup>で、SNR向上の限界が近づいている。一方、図1(b)に示す歪み検知型MEMSマイクロホンでは、単板ダイヤフラム表面に生ずる歪みを直接歪み検知素子で

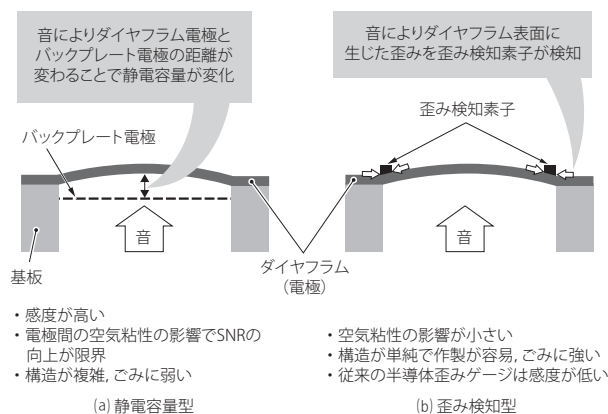


図1. 静電容量型と歪み検知型のMEMSマイクロホンの比較

歪み検知型MEMSマイクロホンではバックプレート電極がないため空気粘性の影響が小さく、SNRの更なる向上が期待できる。

Comparison of capacitive type and strain gauge type MEMS microphones

(注1) 2017年6月にTransducers 2017で発表<sup>(1)</sup>、当社調べ。

検知する原理に基づくため、バックプレートの必要がなく、空気粘性の影響は小さいが、静電容量型に比べると、感度が劣る。このことから、歪み検知型MEMSマイクロホンでより高い感度を実現するために、従来の金属歪みゲージや半導体歪みゲージよりも高い感度を有する歪み検知素子の実現が望まれている。

そこで今回、東芝は、高感度MEMSセンサーによるマイクロホン実現のため、従来のHDDヘッドやMRAMに用いられているスピントロニクス技術とMEMS技術を融合させた、スピンMEMSセンサーを開発した。

ここでは、高い歪み検知感度を持つスピン型歪み検知素子技術の開発と、スピン型歪み検知素子を用いたスピンMEMSマイクロホンの動作実証結果について述べる。

## 2. スピンMEMSセンサーの基本概念

スピンMEMSセンサーの基本概念を図2に示す。スピンMEMSセンサーは、検知磁性層及び参照磁性層の2層の磁性薄膜と、その間に配置された絶縁体バリア層から構成される磁性積層膜を歪み検知素子として用いる技術である。この磁性積層膜は、外部磁界で磁化の向きが変化する検知磁性層と、磁化の向きが固定された参照磁性層との間で生じる、磁化の相対角度の変化が電気抵抗の変化として現れるMR (Magnetoresistance) 効果によって外部磁界の強さを検知するもので、これまでは、HDDの再生ヘッド素子として用いられてきた。

検知磁性層に歪みによって磁化が変化する磁歪(じわい)材料を用いれば、積層膜を歪み検知素子として機能させることができる<sup>(3), (4)</sup>。次の3章で述べるように、スピン型歪み検知素子は、検知磁性層に用いる材料を工夫することで、従

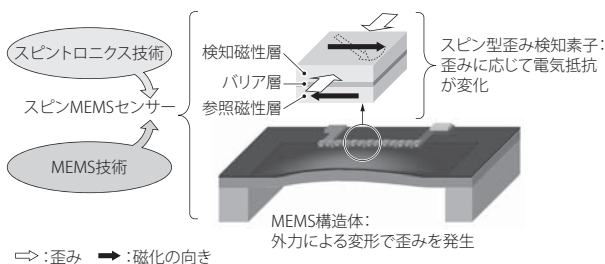


図2. スピンMEMSセンサーの基本概念

スピントロニクス技術とMEMS技術を融合したセンサーである。圧力や、慣性、音などの外力によって変形したMEMS構造体に微小な歪みが生じ、それをスピン型歪み検知素子が高感度に検知する。

Basic concept of spintronic MEMS sensor

来の半導体歪みゲージを大きく超える高い歪み検知感度を実現できる。そのため、図2に示すように、スピン型歪み検知素子をMEMS構造体の上に設置したスピンMEMSセンサーは、圧力や、慣性、音などの外力によって変形したMEMS構造体に生ずる微小な歪みを高感度に検知することが可能になる。

## 3. スピン型歪み検知素子による高歪み検知感度の実証

### 3.1 スピン型歪み検知素子の作製

スピン型歪み検知素子の検知感度を向上するには、歪みに対して磁化が変化しやすい検知磁性層を実現することがキーであり、高い磁歪効果と低い保磁力(磁化が回転する磁界強度)を両立した磁性材料を検知磁性層に用いることが重要である。また、検知磁性層の磁化の回転に対する電気抵抗の変化を大きくするために、MR効果の高いバリア層を用いることも重要である。そこで、高磁歪を有する軟磁性材料として知られるアモルファスFe(鉄)-B(ホウ素)合金<sup>(5)</sup>を検知磁性層として用い、また、高いMR効果を示すことで知られる結晶性酸化マグネシウム(MgO)<sup>(6), (7)</sup>をバリア層として用いたスピン型歪み検知素子を作製した。

作製したスピン型歪み検知素子の膜構造と高分解能TEM(透過電子顕微鏡)写真を、図3に示す<sup>(1)</sup>。磁気特性を評価した結果、26 ppmの高い磁歪効果と、3 Oeの低い保磁力、190%の高いMR効果を確認することができた。これらの良好な磁気特性と高いMR効果は、図3のTEM写真に示すと

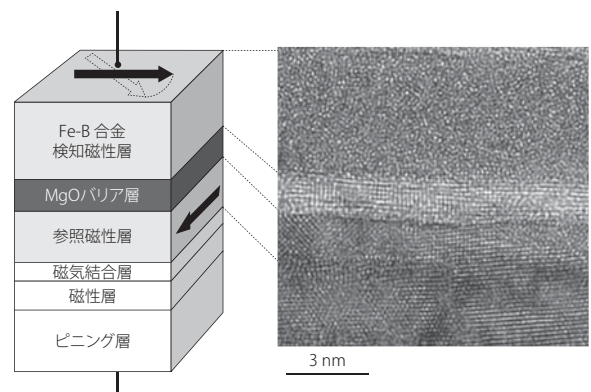


図3. スピン型歪み検知素子の膜構造と高分解能TEM写真

検知磁性層として形成した高磁歪のアモルファスFe-B合金層や、MR効果の高いMgOバリア層で構成されている。

Film structure and high-resolution transmission electron microscopy (TEM) image of spintronic strain gauge sensor element

おり、Fe-B 検知磁性層のアモルファス構造とMgOバリア層の良好な結晶性を両立させることにより得られている。成膜後の熱処理を適切な条件に調整することで、このような微細な膜構造の制御を実現した。

### 3.2 スピン型歪み検知素子の感度評価

作製したスピン型歪み検知素子における、歪み検知感度の評価結果を図4(a)に示す<sup>(1)</sup>。この評価では、スピン型歪み検知素子を形成したシリコン基板を短冊状にカットし、図4(a)中に図示する4点曲げジグで曲げることで、-0.05%の圧縮歪みから+0.05%の引っ張り歪みまでを印加しながら電気抵抗を測定した。-0.01 ~ +0.01%の微小な歪みに対して非常に大きい電気抵抗の変化を確認できた。アモルファスFe-B合金は正の磁歪定数を持つため、図4(a)に示すとおり、磁化は、引っ張り歪みではその方向に向き、圧縮歪みではその方向から反れるように回転する。参照磁性層の磁化は固定されているため、検知磁性層の磁化の向きが変化することで電気抵抗が変化する。歪みに対する電気抵抗の変化量からGF (Gauge factor: 歪み検知感度)を算出した結果、5,072の非常に高い値を確認することができた。この高いGFは、アモルファスFe-B検知磁性層の歪みに対する磁化回転の感度が非常に高いことで得られており、図4(b)に示すとおり、金属歪みゲージの2,500倍、半導体歪みゲージの100倍以上の値である。また、図4(a)より、この高いGFは、圧縮と引っ張りの両方の歪みで実現できている。このような歪み検知特性は、MEMSセンサーに適用する際の機械構造設計やプロセス設計を容易にできる。

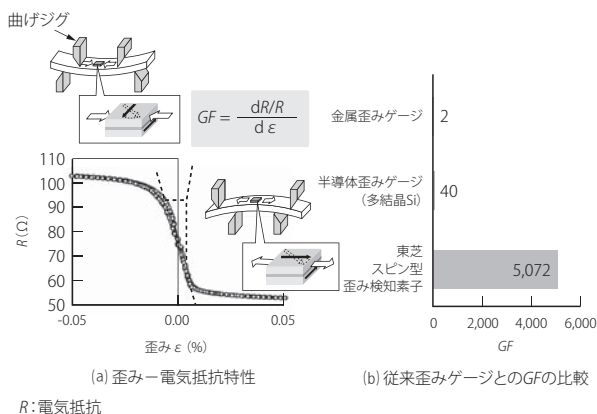


図4. スピン型歪み検知素子のGF

検知磁性層にFe-B合金層を用いることで、従来の金属歪みゲージの2,500倍、半導体歪みゲージの100倍以上の歪み検出感度を実現した。

Gauge factor (GF) of spintronic strain gauge sensor element

## 4. スピン MEMS マイクロホンの動作確認

3章で確認した高感度のスピン型歪み検知素子を、MEMS ダイアフラム上に搭載したスピンMEMSマイクロホンを試作した。作製したスピンMEMSマイクロホンのSEM (走査型電子顕微鏡) 写真を図5に示す<sup>(1)</sup>。MEMSダイアフラムは、Si (シリコン) 基板上にSiN (窒化シリコン) ダイアフラム膜を形成して基板を裏面からエッチングするバルクマイクロマシン技術により形成した。スピン型歪み検知素子は、MEMSダイアフラム上の最も大きい歪みが発生する外縁部に配置してある。スピン型歪み検知素子は、図5に示すように、ダイアフラム上に複数設けて直列接続している。その理由は、N個の素子を直列に接続したアレイ素子は、単一素子と比べてシグナルがN倍、ノイズが $N^{1/2}$ 倍となるため、SNRを $N^{1/2}$ 倍に向上できるためである<sup>(8)</sup>。

### 4.1 マイクロホンの振動特性の評価

今回は、MEMSダイアフラムの残留応力を制御することにより、異なる機械共振周波数を有する二つのスピンMEMSマイクロホン(デバイスA及びデバイスB)を作製した。これらの振動特性をレーザードップラー振動計により調べた結果を図6に示す<sup>(1)</sup>。音圧レベルの微小な圧力変化に対して、MEMSダイアフラムが鼓膜のようにたわんで振動している様子が確認できた(図6(a))。MEMSダイアフラムの機械共振周波数を評価した結果を図6(b), (c)に示す。スピンMEMSマイクロホンでは、MEMSダイアフラムの振動の周波数依存性がフラットな範囲を検出可能な周波数帯域として用いるため、MEMSダイアフラムの機械共振周波数を検出する周

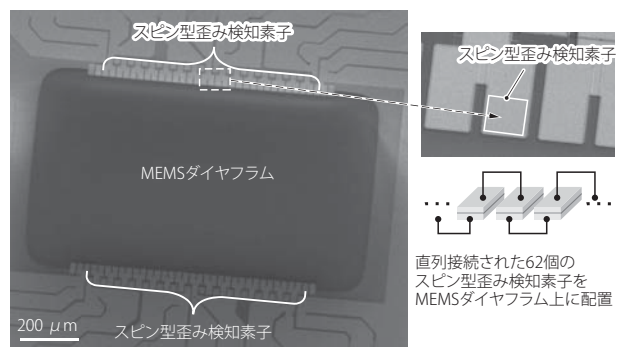


図5. スピンMEMSマイクロホンのSEM写真

バルクマイクロマシン技術で形成したMEMSダイアフラム上に、複数のスピン型歪み検知素子を直列接続することで、SNRを向上している。

Scanning electron microscopy (SEM) image of spintronic MEMS microphone

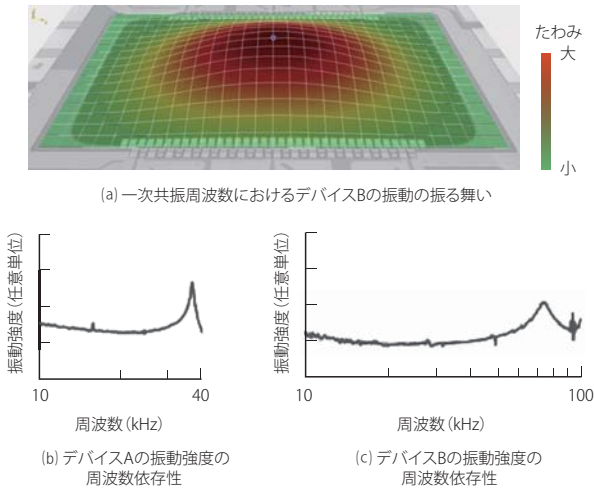


図6. スピンMEMSマイクロホンの振動特性

37 kHzと74 kHzの異なる機械共振周波数を持つMEMSダイヤフラムを用いてスピンMEMSマイクロホンを試作した。これらの共振周波数は、可聴音域である20～20,000 Hzよりも高く設計している。

Results of evaluation of vibration characteristics of prototype spintronic MEMS microphones

波数帯域よりも高く設計する必要がある。デバイスAとデバイスBの機械共振周波数は、図6(b), (c)に示すとおり、それぞれ37 kHz, 74 kHzであり、人の可聴音域である20～20,000 Hzよりも高い値が実現できた。

#### 4.2 マイクロホン特性の評価

作製したスピンMEMSマイクロホンに対し、スピーカーから正弦波の音を印加して出力電圧を測定した結果を図7に示す<sup>(1)</sup>。入力音の条件は、一般的なマイクロホンの性能評価で用いられる音圧94 dB SPL (サウンドプレッシャーレベル) 及び周波数1 kHzとした。デバイスA, デバイスBともに、入力音に対する正弦波の出力電圧を明確に確認できた。入力音に対する出力電圧の変化は、図7に示すとおり、音によりたわんだMEMSダイヤフラム上に生ずる歪みによって、スピン歪み検知素子の電気抵抗が変化することを示しており、世界初のスピンMEMSマイクロホンの動作実証に成功した。

図7で得られた出力電圧(シグナル)とノイズフロアから、スピンMEMSマイクロホンのSNRを求めた結果とMEMSダイヤフラムの機械共振周波数を表1にまとめた<sup>(1)</sup>。デバイスAとデバイスBのSNRは、それぞれ57 dB(A)と45 dB(A)であった。現行製品の静電容量型MEMSマイクロホンのSNRは56～70 dB(A)であることから、今回作製したデバイスAは、製品レベルの高い性能を有することが分かった。今回のスピンMEMSマイクロホンは、最も単純な周辺固定のダイ

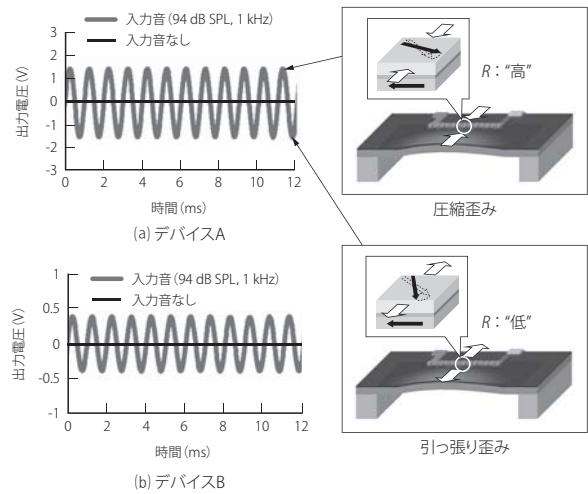


図7. スピンMEMSマイクロホンの入力音に対する出力電圧

正弦波の入力音と同じ正弦波の出力電圧変化が明確に確認されており、世界で初めてスピンMEMSマイクロホンの動作実証に成功した。

Results of evaluation of response of prototype spintronic MEMS microphones to input sound

表1. スピンMEMSマイクロホンの機械共振周波数とSNR

Results of evaluation of resonant frequency and signal-to-noise ratio (SNR) of prototype spintronic MEMS microphones

項目	試料	
	デバイスA	デバイスB
機械共振周波数 (kHz)	37	74
SNR (dB(A))	57	45

ヤフラムを用いて試作したが、より最適なMEMS構造を取り入れることで、更に高いSNRを実現できる可能性がある。

スピンMEMSマイクロホンのような単板ダイヤフラムを用いた歪み検知型マイクロホンは、バックプレートが必要とする静電容量型のマイクロホンに比べて、広帯域化にも有利である<sup>(9)</sup>。今回試作したデバイスBは、74 kHzの高い共振周波数で45 dB(A)のSNRを実現しており、人の耳では聞こえない超音波帯域までを高感度に検出できる。

#### 5. あとがき

高磁歪と低保磁力を両立したアモルファスFe-B合金を検知磁性層として用いることで、金属歪みゲージの2,500倍、半導体歪みゲージの100倍以上のGFを有するスピン型歪み検知素子を実現した。また、スピン型歪み検知素子とMEMS技術を融合したスピンMEMSマイクロホンの動作実証に世界で初めて成功した。



広帯域と高感度の両立が期待されるスピンMEMSマイクロホンは、今後のIoT社会の発展に必要となる産業・車載機器などの状態監視や故障検知への応用が期待される。

この研究のMEMS試作の一部は、文部科学省ナノテクノロジープラットフォームの支援を受け、国立大学法人東北大学ナノテク融合技術支援センター 試作コインランドリで実施されたものである。

## 文 献

- (1) Fuji, Y. et al. "An ultra-sensitive spintronic strain-gauge sensor with gauge factor of 5000 and demonstration of a Spin-MEMS microphone". The 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS 2017). Kaohsiung, Taiwan, 2017-06, IEEE, p.63-66.
- (2) Tan, C. W. et al. A study on the viscous damping effect for diaphragm-based acoustic MEMS applications. J. Micromech. Microeng. 2007, **17**, 11, p.2253-2263.
- (3) Mamin, H.J. et al. High sensitivity spin-valve strain sensor. Appl. Phys. Lett. 1998, **72**, 24, p.3220-3222.
- (4) Löhndorf, M. et al. Highly sensitive strain sensors based on magnetic tunneling junctions. Appl. Phys. Lett. 2002, **81**, 2, p.313-315.
- (5) F. E. Luborsky, F. E. et al. Potential of amorphous alloys for application in magnetic devices. J. Appl. Phys. 1978, **49**, 3, p.1769-1774.
- (6) Yuasa, S. et al. Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions. Nat. Mater. 2004, **3**, 12, p.868-871.
- (7) Djayaprawira, D. D. et al. 230% room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions. Appl. Phys. Lett. 2005, **86**, 9, p.092502.1-092502.3.
- (8) Guerrero, R. et al. Low frequency noise in arrays of magnetic tunnel junctions connected in series and parallel. J. Appl. Phys. 2009, **105**, 11, p.113922-1-113922-5.
- (9) Zhou, Z. et al. "Wide band piezoresistive aero-acoustic microphone". 2011 IEEE/IFIP 19th International Conference on VLSI and System-on-Chip. Kowloon, China, 2011-10, IEEE. 2011, p.214-219.



藤 慶彦 FUJI Yoshihiko

研究開発本部 研究開発センター  
バックエンドデバイス技術ラボラトリー  
日本磁気学会・電気学会会員  
Backend Device Technology Lab.



加治 志織 KAJI Shiori, Ph.D.

研究開発本部 研究開発センター  
バックエンドデバイス技術ラボラトリー  
博士(理学) 日本物理学会会員  
Backend Device Technology Lab.



原 通子 HARA Michiko

研究開発本部 研究開発センター  
バックエンドデバイス技術ラボラトリー  
Backend Device Technology Lab.