

IEEE MEMS 2018 の論文から見える集積化センサの将来

田中秀治

東北大学

大学院工学研究科ロボティクス専攻
マイクロシステム融合研究開発センター



1. はじめに

IEEE MEMS 国際会議 (今後もそのように呼ばれるかはわからないが) は, MEMS 分野のフラッグシップ国際会議である。2018 年 1 月 22~24 日に英国・アイルランド島・ベルファストで開催された今年の会議から 2 つの論文を選び, 集積化コンボセンサの実現に向けた研究開発を紹介する。合わせて, 多軸慣性センサに対応できる主要な MEMS プロセスを説明し, そのようなプロセス技術を保有することの重要性と強みについて理解を深めて頂くことを狙っている。なお, 以下の著者の記事を合わせて読んで頂くと, より理解が進むと思われる。

MEMS はもうかる「IEEE MEMS 2016」学会報告, 日経テクノロジーオンライン, 2016 年 1 月 28 日, <http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/news/16/012800356/>
MEMS センサー、集積化手法に新潮流, 日経テクノロジーオンライン, 2015 年 6 月 29 日, <http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/NEWS/20150629/425362/>

2. MEMS 慣性センサと同一プロセスで作るローレンツ力磁気センサ

コンボセンサは複数の MEMS センサを組み合わせた小形モジュールであり, 通常, 3 軸加速度センサ, 3 軸ジャイロスコープ, および 3 軸磁気センサの 3 つのセンサ, あるいはそれらのうち 2 つを組み合わせている。2014 年, STMicroelectronics は $4 \times 4 \text{ mm}^2$, Bosch Sensortec は $3 \times 4.5 \text{ mm}^2$, InvenSense は $3 \times 3 \text{ mm}^2$ のフットプリントの 9 軸コンボセンサを発売していた。2016 年には, それぞれ $3.5 \times 3 \text{ mm}^2$, $3 \times 2.5 \text{ mm}^2$, $3 \times 3 \text{ mm}^2$ となっている (図 1)。InvenSense のコンボセンサは, 加速度センサとジャイロスコープがキャビティ SOI (silicon on insulator) プロセスによって同一ダイの上に形成され, それに ASIC ダイが AlGe 共晶接合されて真空封止された集積化構造を使っているものの (図 2), 磁気センサは他社製の別のダイとしている。他の 2 つのメーカーも, 磁気センサはモジュールレベルで他のセンサと組み合わせられている。

既にコンボセンサは, モジュールレベルで極め

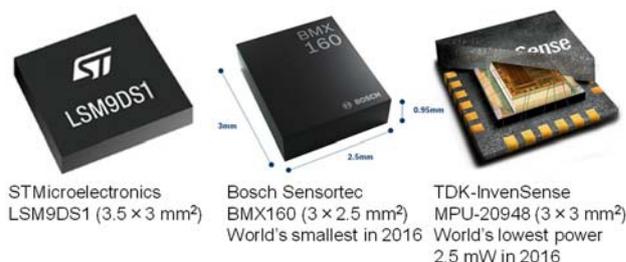


図 1 9 軸コンボセンサ (2016 年)
画像は各社のウェブサイトから引用。

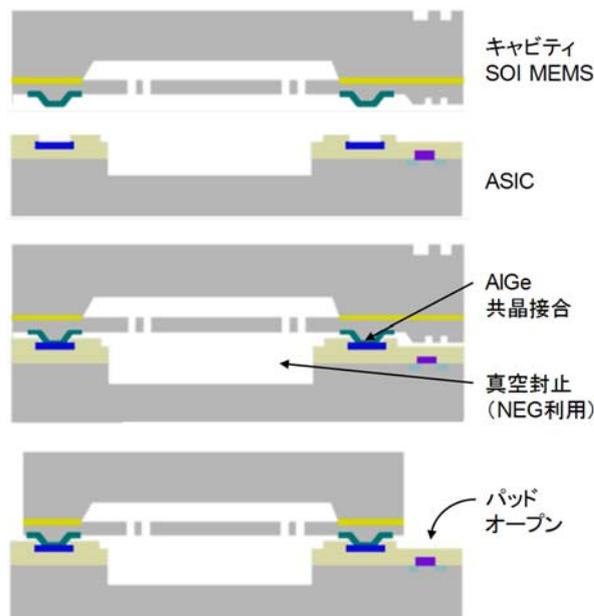


図 2 TDK-InvenSense のキャビティ SOI 集積化 MEMS プロセス

創業者の名前をとって“Nasiri Process”と呼ばれることがある。InvenSense のホワイトペーパーから引用し, 著者が改変。

て高密度に集積化されている。そこには加速度センサとジャイロのウェハレベル集積化, ウェハレベル接合による MEMS-LSI 集積化, TSV (through silicon via) による省スペース化などが当たり前のように適用されている。さらなる小形化と低コスト化に繋がる方向は, 全てのセンサのウェハレベル集積化, 言い換えれば, 残された 3 軸磁気センサを他の MEMS 慣性センサと同一ウェハに同時に

作製することである。

慣性センサと同じプロセスで同時に作られるローレンツ力磁気センサについて、これまでの論文では、3軸の測定を行うのに、3つの共振子を用いるか、あるいは1つの共振子を時分割で用いるか、どちらかの方式が報告されていた。今回、IEEE MEMS 2018 でミラノ工科大学とSTMicroelectronicsから発表されたローレンツ力磁気センサは、1つの共振子で同時に3軸測定できる (Cristiano R. Marra *et al.*, 100 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 0.5 mm² MONOLITHIC, MULTI-LOOP LOW-POWER 3-AXIS MEMS MAGNETOMETER, pp. 101-104)。

ところで、STMicroelectronicsは、3軸ジャイロスコープも1つの共振子で実現している。その原理や構造はここでは説明しないが、それが可能になる理由の1つはMEMSプロセスにある。STMicroelectronicsのMEMSプロセスは、ThELMA (Thick Epitaxial Layer for Micro-gyroscopes and Accelerometers) と呼ばれる (図3)。その最大の特徴は構造体に厚いエピポリSiを用いることであるが、それゆえに構造体の下にドーパドポリSiの配線を配置でき、しかもSiO₂犠牲層をエピポリSiの成膜前にパターンニングしておけるため、伝統的なSOIプロセスと比べて設計自由度が高く、面外変

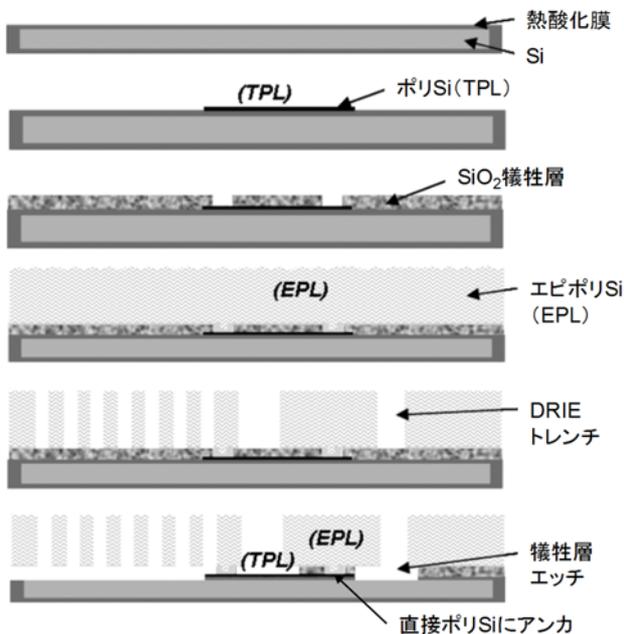


図3 STMicroelectronicsのエピポリSi MEMSプロセス“ThELMA”

厚いエピポリSiの下にドーパドポリSiの配線層を形成できる。また、SiO₂犠牲層をエピポリSiの成膜前にパターンニングでき、構造体をポリSiや基板に直接アンカリングできる。Giacomo Langfelder *et al.*, IEEE Sensor Journal, 11, 4 (2011) pp. 1069-1077 から引用し、著者が改変。

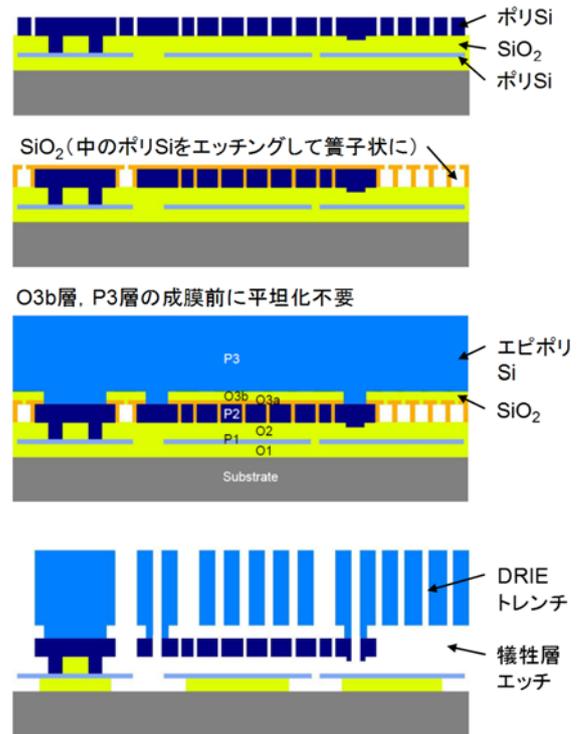


図4 Robert Boschの3層ポリSi MEMSプロセス2層(エピ)ポリSiプロセスと比べて設計自由度の高い構造を実現できる。Johannes Classen *et al.*, Proc. IEEE MEMS 2017, pp. 314-318 から引用し、著者が改変。

位もともなう複雑なセンサを形成しやすい。Robert Boschもやはり構造体にエピポリSiを用いているが、さらに3層のポリSiを用いてより設計自由度の高いMEMSプロセスも有している(図4)。高い設計自由度は、センサ構造体の1点支持や静電容量検出の二重差動化を可能にして、高いバイアス安定性や温度安定性に繋がっている。

話を戻すが、図5にローレンツ力磁気センサの構造を示す。共振子に同心状に巻かれているのが駆動電流を流すコイルであり、磁界によってローレンツ力を発生する。磁界の方向によって、図6に示すように異なるモードで共振するので、その振幅を容量変化として検出して3軸の磁界の大きさを測定する。共振子は中央で1点支持されており、「セオリー通り」の設計がされている。複数点支持のセンサはパッケージストレスの影響を受けやすく、また構造の非対称性は温度特性の悪化やドリフトの原因となるので、できれば避けるべきである。

図5の右下にあるのは駆動電流の周波数(50 kHz)を作るクロック共振子である。ジャイロスコープの設計と同様に、駆動電流とセンスモードの周波数の関係が重要であるため、クロック共振子が同一ダイに形成されている。実質的なダイの大きさ

は 1 mm^2 以下である。発表された性能は、 $200 \mu\text{A}$ の駆動電流で $100 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度と小さなノイズ密度、 5 mT 以上の測定レンジで 0.5% 未満の非線形性、 50 Hz のバンド幅という優れたものである。他軸感度は小さく抑えられている上、再現性に優れるためデジタル的に補正可能であり、共振モードのデカップリングがうまく設計されていることもわかる。なお、発表者の学生さんは Outstanding Student Paper Award に輝いた。

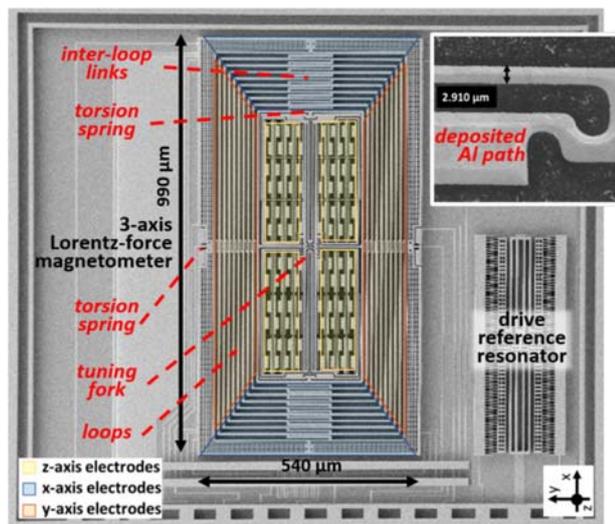


図5 3軸ローレンツ力磁気センサ

STMicroelectronics の ThELMA プロセスによって作製されている。Cristiano R. Marra *et al.*, Proc. IEEE MEMS 2018, pp. 101-104 から引用。

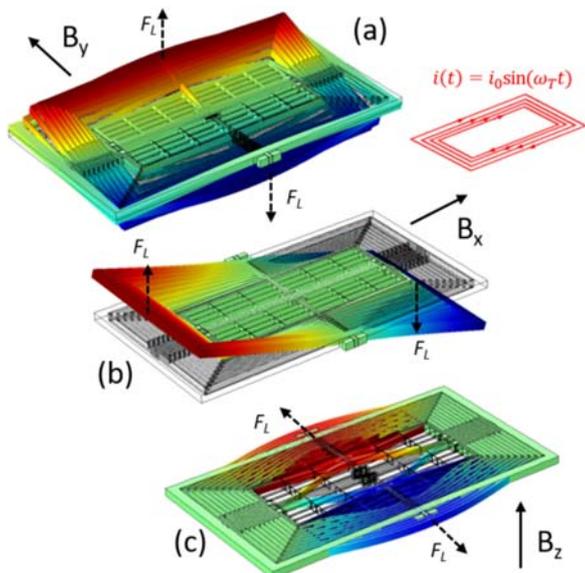


図6 3軸ローレンツ力磁気センサの動作原理
x, y, z の磁界によって共振子が異なるモードで共振する。各モードの共振周波数は約 50 kHz であり、駆動電流の周波数から約 300 Hz オフセットに調整される。Cristiano R. Marra *et al.*, Proc. IEEE MEMS 2018, pp. 101-104 から引用。

3. モードマッチ型ジャイロスコープを搭載するウェハレベル集積化コンボセンサ

上で説明したように、加速度センサとジャイロスコープは、既にウェハレベルで集積化されている。しかし、既存のジャイロスコープはモードミスマッチ型と呼ばれるものである。モードミスマッチとは、ドライブ軸とセンス軸の共振周波数が数%程度ずれていることであり、バンド幅、ドライブ軸とセンス軸のデカップリングなどの点で有利であるが、理論的に感度は低くなる。一方、モードマッチとは、ドライブ軸とセンス軸の共振周波数が一致していることであり、感度は高いものの、スケールファクタの安定性などに難しさがある。ジャイロスコープの高性能化のためモードマッチ型とするのが、現在の研究開発の主流である。

今回、IEEE MEMS 2018 では、ジョージア工科大学からウェハレベル集積化された6軸コンボセンサ(3軸加速度センサ+3軸ジャイロスコープ)が発表されたが(Haoran Wen *et al.*, A HIGH-PERFORMANCE SINGLE-CHIP TIMING AND INERTIAL MEASUREMENT UNIT WITH ROBUST MODE-MATCHED GYROSCOPES, pp. 105-108), モードマッチ型の3軸ジャイロスコープが搭載されている。

図7にそのデバイス構造を示す。ウェハレベルパッケージングされた $4.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$ のダイに、3軸のジャイロスコープ、3軸の加速度センサ、およびクロック共振子が集積化されている。各軸のセンサが独立した構造体となっているが、ジャイロスコープをモードマッチ型にするには、そのような構成となる。単一の共振子でモードマッチ型の2軸または3軸ジャイロスコープを実現することは、軸間のカップリングなどから困難である。

z軸(yaw)ジャイロスコープは、小形化に向けたディスク型BAW(bulk acoustic wave)共振子を使っている。共振周波数が 5.4 MHz と非常に高く、振動外乱に強いことが特長の1つである。この大きさと共振周波数にして、 $0.23 \text{ }^\circ/\text{h}$ のアングラランダムウォーク、 $8.7 \text{ }^\circ/\text{h}$ のバイアス安定性を実現している。x, y軸(roll, pitch)ジャイロスコープは、内側のリングと外側のフレームが逆相で振動し、コリオリ力によってそれらが面外振動する構造で、z軸(yaw)ジャイロスコープとほぼ同じ大きさである。共振周波数が約 700 kHz と高く、優れた振動外乱への不感性を示す。各軸の加速度センサも同様に小さく作られており、それにもなつて共振周波数は十数 kHz と高くなっている。それにもかかわらず、ノイズ密度はz軸で $85 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, x, y軸で $218 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ と良好である。

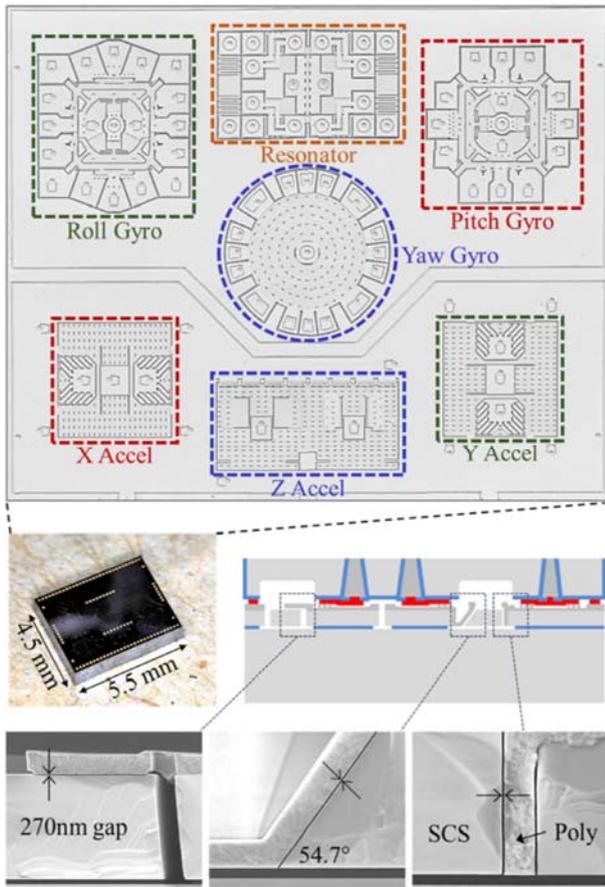


図7 ウェハレベル集積化された6軸コンボセンサ

ジャイロスコープはモードマッチ型である。300 nm 以下と狭い静電ギャップ，および斜め電極がプロセス技術上の特徴である。Haoran Wen *et al.*, Proc. IEEE MEMS 2018, pp. 105-108 から引用。

高い共振周波数，つまり小さな変位でも感度を確保するために，40 μm 厚の構造で静電ギャップは300 nm 以下と狭く作られている。さらに，Si のウェットエッチングによる面内から 54°傾いた斜め構造が，x，y 軸ジャイロスコープではクアドラチャエラー補正電極に用いられている。また，シーソー構造の z 軸加速度センサでは，斜め構造によってシーソーの重心高さがねじり軸に一致するように調整されており，他軸感度が抑えられている。これらの新しい構造は，SOI とポリ Si を組み合わせたプロセスで実現されている。このように，この集積化コンボセンサは，Farrokh Ayazi 教授の研究室で開発されてきた新しい技術の結晶と言える素晴らしい仕上がりになっている。

4. おわりに

ここに紹介したように，ウェハレベル集積化された9軸コンボセンサの技術的可能性は，既に実証されている。これが実用化するかどうかは，主

に経済性にかかっていると云える。より多くの要素をウェハレベル集積化すると，高歩留りの達成がより挑戦的になる。一方で既存の磁気センサは十分に安価である。また，集積化コンボセンサを作りうる実力のあるメーカーが既存の磁気センサも保有していることは，完全 MEMS 化・集積化への動機に少なからず影響するだろう。

このような高度な集積化は，MEMS 技術の最前線の1つである。そこに参戦するには，旧来の SOI MEMS プロセス，あるいは単なるキャビティ SOI MEMS プロセスだけでは力不足である。高度な集積化は当社には関係ないとおっしゃるかもしれない。しかし，MEMS プロセスが時代遅れであれば，集積化コンボセンサまで行かなくても，多軸慣性センサの商品力に明らかな差が出る。そのため，我々は集積化 MEMS プロセスやパッケージングの研究開発を重要視している。短期間で最前線に参戦しようとする中国の動きについては，以下の著者の記事を参考にして欲しい。

欧米 MEMS 企業の牙城崩せ、中国勢が続々切り込む「International Conference on Commercialization of Transducer & MEMS 2017」報告，日経テクノロジーオンライン，2017年10月31日，<http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/feature/15/122200045/103000210/>

また，紙面の都合で取り上げられなかった IEEE MEMS 2018 の論文を，以下の著者の記事に紹介している。

相次ぐ「モード局在化」センサー、安定性が抜群に「IEEE MEMS 2018」報告 (2)，日経 xTECH，2018年2月14日，<http://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/news/18/00068/>