

特集 車両制御安全システム用加速度センサの設計*

Accelerometer Design for Vehicle Control Safety System

Mark Harrison

大塚 穰

酒井峰一

Yuzuru OTSUKA

Minekazu SAKAI

In order to reduce traffic accident casualties, sophisticated safety systems have been developed and are continuously being upgraded in today's passenger vehicles. One system showing growth in the global automotive industry is a feature currently available on high-end passenger cars, Vehicle Stability Control (VSC). VSC can control side slipping, an unstable phenomenon which can lead to critical accidents. VSC systems are multi-functional systems that include an acceleration sensor to detect forces applied to the vehicle. Acceleration sensors sometimes referred to as G sensors are indispensable and are one of the key sensors for vehicle safety systems. New safety systems require acceleration sensors with high sensitivity and accuracy. We have achieved these increased requirements by adopting a unique stacked IC structure. This paper discusses the small-sized simple acceleration sensor that uses a stacking structure technology and switched capacitor circuit for VSC systems that we have developed.

Key words : VSC, Acceleration sensor, SOI, Stack structure, Safety system

1. はじめに

自動車の安全システムは、予防安全と衝突安全に大別される。予防安全の代表がVSC (Vehicle Stability Control), ABS (Antilock Braking System) であり、衝突安全の代表がエアバックである。VSCは、今後車両への搭載が拡大すると予想されている。Fig. 1にVSCシステム図を示す。

ある。Fig. 2にイナーシャルセンサを示す。イナーシャルセンサは、車両の角速度を検出するヨーレートセンサと、車両の加速度を検出する加速度センサから構成されている。

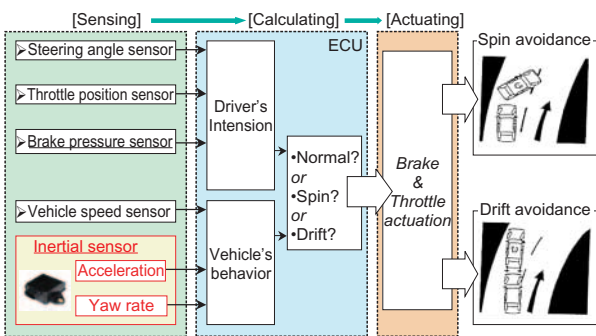


Fig. 1 VSC system concept

VSCシステムは操舵角センサ、ヨーレートセンサ・加速度センサなどの情報をもとに横すべりしような状態を感知し、ブレーキアクチュエータ、スロットルアクチュエータを駆動し自動的に各車輪のブレーキ油圧とエンジン出力を制御する。

このシステムでは、車両が横すべりしような状態を判断する、イナーシャルセンサがキーとなるセンサで



Fig. 2 Inertial sensor

近年MEMS分野において、容量式の加速度センサ¹⁾²⁾やヨーレートセンサ³⁾⁴⁾の研究が盛んである。容量式のセンサは、他のピエゾ抵抗式や圧電式に比べ、高感度、DC検出に優れ、温度特性が良く、セルフテストが容易なためである。VSC用加速度センサは、検出レンジが±1.5G程度であり、小型、高感度で高精度なセンサが要求されている。そこで、SOI⁵⁾やSiとガラスの陽極接合技術⁶⁾、trench refill process⁷⁾を用いた構造体の厚膜化や、熱応力やパッケージ応力の影響を低減するためにアンカ構造を工夫した高精度化が図られている。⁸⁾⁹⁾これに対し我々は、新しいタイプの加速度センサの開発に着手した。Fig. 3に、そのコンセプトを示す。セラミックパッケージに回路チップとセンサチップが積

* Translated and reprinted with permission from SAE 2004-01-1116 © 2004 SAE International

層されたスタック構造を採用し、小型化を狙った。センサチップはSOIウエハを用いて高感度化を図り、回路チップとパッケージ技術で高精度化を図った。

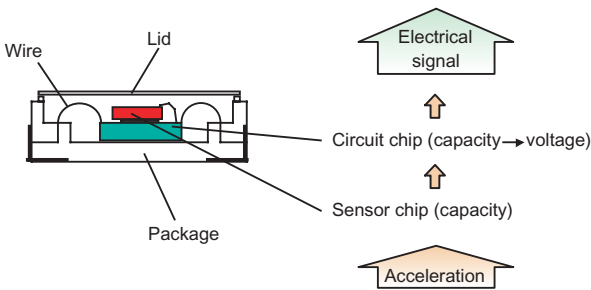


Fig. 3 Concept for acceleration sensor

ヨーレートセンサと加速度センサは、共にクシバ電極を持つ構造体であるため、第1ステップとして、構成が容易な加速度センサの開発に取り組んだ。

開発のポイントは、加速度を検出するセンシングエレメント設計、容量変化を電圧に変換する回路設計、パッケージ設計である。

2. センシングエレメント設計

センシングエレメント開発のポイントは、高感度と高信頼性である。そこで我々は、高感度のために容量電極を厚くでき、かつ、高信頼性のために材料疲労が無い単結晶SiのSOI基板を選択した。加えて、低コストのために汎用のSOIウエハに、バックサイドエッチングプロセスを行ない電極下のキャビティを形成した。Fig. 4に開発したセンシングエレメントの鳥瞰図を示す。可動部は、錘、容量電極電極対の一方の電極となる可動電極、可動部のバネとなる梁から構成されている。可動電極は、錘部の左右に複数形成され、入力された加速度に応じて錘と一緒に変位する。

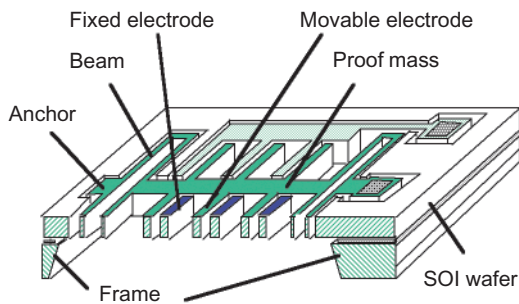


Fig. 4 Sensing element

Fig. 5に、容量変化を検出する電極部SEM (Scanning Electron Microscope) 写真を示す。電極間隔は、 $3\mu\text{m}$ 、電極厚みは $15\mu\text{m}$ 、と単結晶で厚膜化を実現した。単結晶のSiを採用したことで、厚膜化しても電極自身の変形は発生していない。

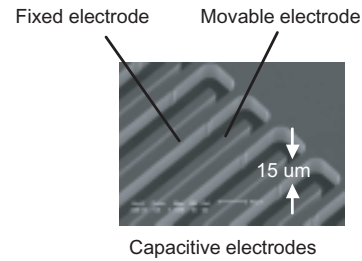
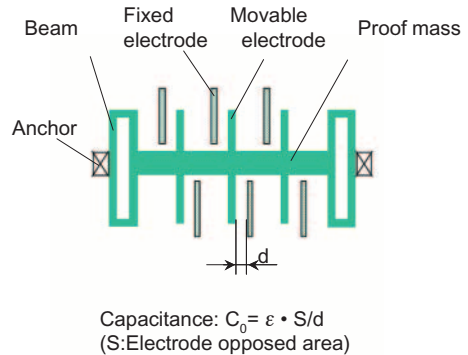


Fig. 5 SEM electrode picture

ここで加速度検出原理をFig. 6を用いて説明する。加速度印加が無い時の、可動電極—固定電極間隔を d 、可動電極—固定電極の電極対向面積を S 、とすると容量 C_0 は $C_0 = \epsilon \cdot S / d$ である。

<Acceleration not applied>



<Acceleration applied>

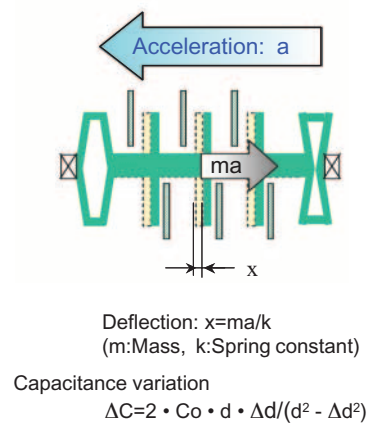


Fig. 6 Operation principle of acceleration sensor

加速度が印加されると、可動部の錘・可動電極に慣性力が作用し梁が変形し、これに伴い可動電極—固定電極間隔が Δd 変位し、可動電極—固定電極間の容量値が $\Delta C = 2C_0 \cdot d \cdot \Delta d / (d^2 - \Delta d^2)$ 変化する。この変化をC/V変換回路で電圧値に変換することで加速度を検出する。すなわち、高感度化するには、 ΔC を大きくすればよい。

しかし、高感度化には、次の課題が発生する。

感度を高めるには、バネ定数 k を小さくする。すなわち、バネを柔らかくするか、容量 C_0 を大きくする必要がある。しかし、これは、バネの復元力 F_k を弱め、電極間に働く静電引力 F_e を強くすることになる。

もし、バネの復元力が静電引力より弱くなると、電極同士がスティッキングし、動作不能になってしまう。更に、容量を増やすために、電極を長くすぎると、電極が変形しやすくなり、同様に、スティッキングが発生する。

そこで、シミュレーションを用いて、最適な構造を設計した。Fig. 7に、解析フローを示す。

エレメントの構造のディメンジョンを設定し、質量、バネ定数といったメカニカル解析と、電極間の容量といった電気的解析を実施し、得られたパラメータを使用し、MATLAB Saberといったツールを用いて、感度を解析した。ここで、感度や周波数特性を忠実に再現するために、MATLABモデルにおいて、クシバ構造のモデルを細分化し、可動電極、マス、固定電極毎にバネマスモデルを追加した。Fig. 8にその概略を示す。更に、スティッキングを再現するためのフローを追加した。

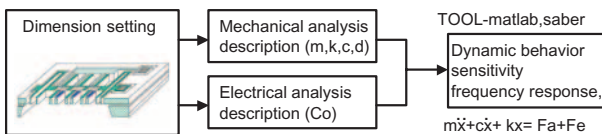


Fig. 7 Analysis flow chart

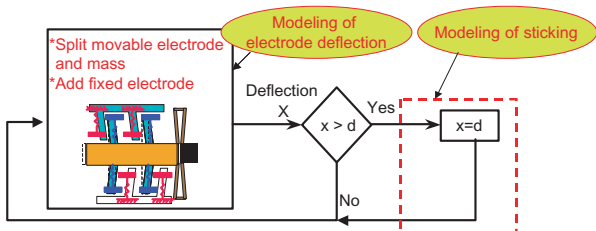


Fig. 8 MATLAB model

これを用いて、電極構造を解析した結果をFig. 9に示す。

電極幅と電極長さをスティッキング以外にチップサイズ、加工技術の制約から、幅 $4\mu\text{m}$ 、長さ $350\mu\text{m}$ に決定した。その結果、容量値は、 0.74pF となった。

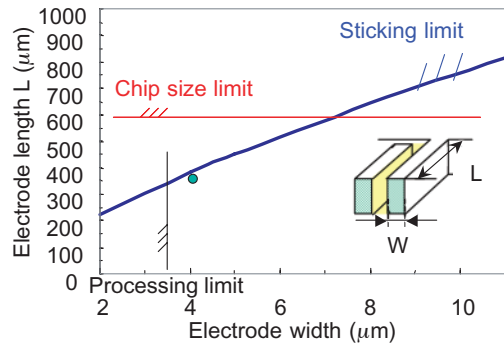


Fig. 9 Electrode structure analysis result

3. 回路設計

回路ブロックをFig. 10に示す。回路ブロックは、C/V変換回路、サンプルホールド、各種調整回路から構成されている。

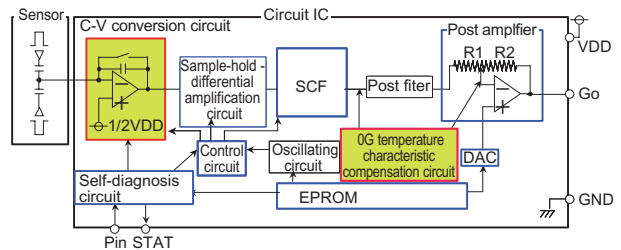


Fig. 10 Circuit block diagram

C/V変換回路には、センサチップの構造上、検出容量のほかにパッドから可動電極・固定電極までの配線と支持基板間やセンサチップと信号処理回路チップに寄生容量が存在するため、検出回路の出力にこれらの寄生容量の影響を受けないことが求められる。また、ノイズを抑えるために初段のC/V変換が望ましい。これらの理由から微小容量検出回路はスイッチドキャパシタ回路を採用した。Fig. 11にスイッチドキャパシタ回路の動作原理を示す。

固定電極1および固定電極2に対し、それぞれ搬送波1と搬送波2を印加する。搬送波1と搬送波2の振幅は 5V であり、 180° の位相差を持つ矩形波である。可動電極には、スイッチドキャパシタ回路のオペアンプ

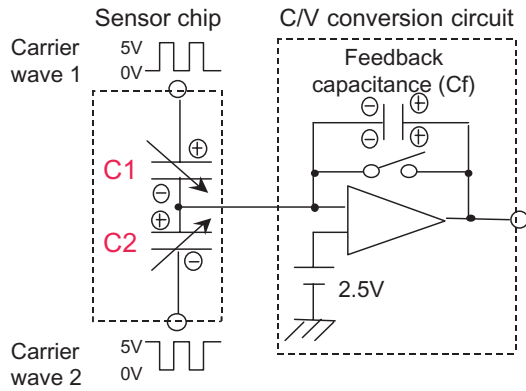


Fig. 11 Micro-capacitance detective circuit

の働きにより2.5Vの電圧がバイアスされ、これにより可動電極と固定電極 1 に形成された容量C1および可動電極と固定電極 2 に形成された容量C2には常に2.5Vの電位差が与えられる。搬送波は、180°の位相差を持っているので、C1およびC2の共通電極である可動電極には、(C1-C2) に比例し、搬送波の振幅に比例した電荷量が蓄積される。(C1-C2) の差動変化は、可動電極の変位によるものであり、加速度に比例している。よってこの電荷量の変化を検出することにより、容量変化=加速度の変化を検出できる。出力は、帰還容量をCfとおくと、 $(C1-C2) \cdot 5V / Cf$ となる。

高精度化のために、0G温度保証回路を内蔵した。温度保証回路は、EPROMで調整される。この保証回路は、後段ゲイン前に導入することで、より高精度化を狙っている。Fig. 12, 13に保証回路有無の0G出力誤差を示す。

また、エレメントの動作をチェックするセルフテスト回路を持ち、フルレンジの20%以上の動作チェックが可能である。

4. パッケージ設計

センサチップと回路チップをパッケージに実装するにあたり、小型化に有利なスタック構造を採用した。Fig. 14に概略図を示す。センサチップと回路チップを積層し、セラミックパッケージと金属のリッドで封止している。このスタック構造の採用により、サイズ5.0×6.7mmの小型な加速度センサを実現した。

前述のように、そもそも容量式Gセンサとは、加速度という力を電極の変位、つまり容量変化に置き換えることにより検出している力学量センサである。従っ

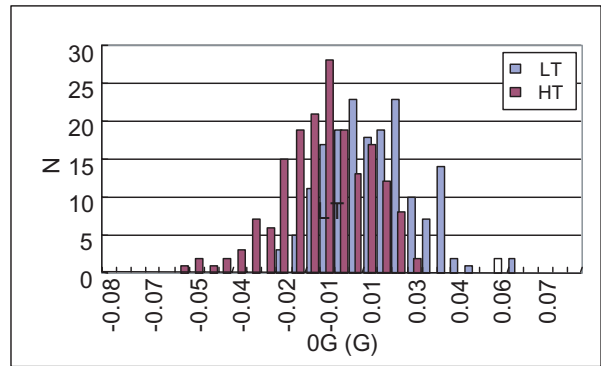


Fig. 12 0G output distribution at -30 and +85 degrees before temperature compensation

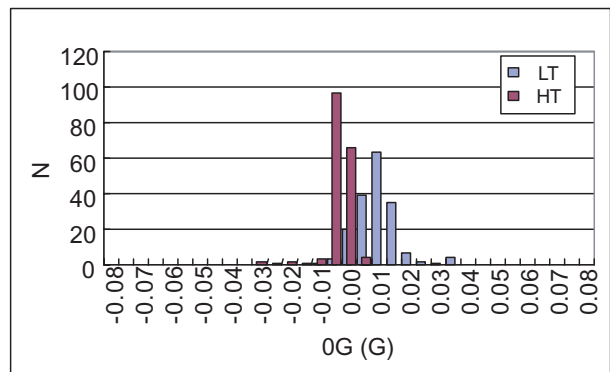


Fig. 13 0G output distribution at -30 and +85 degrees after temperature compensation

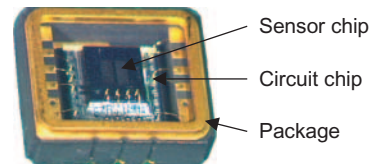


Fig. 14 Stack structure

て、Fig. 15に示すように、温度による何らかの構造的な歪、つまりセンサチップへの熱応力による電極間隔の変化が発生すれば、それはセンサの温度特性となって現れ、精度を悪化させる。今回Fig. 14に示すスタック構造を採用するため、センサチップへの熱応力は、接着剤により、決定される。熱応力の影響を低減させるために、センサチップ下接着剤の低弾性率化を検討した。FEM解析を用いて接着剤の弾性率と出力の関係性を求めた。

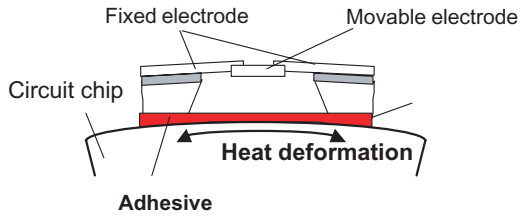


Fig. 15 Heat deflection effect

Fig. 16に示すスタック構造のモデルを用いて、温度を変化させた時のセンシングエレメントの変位を求め、静電容量解析により、容量変化を求めた。

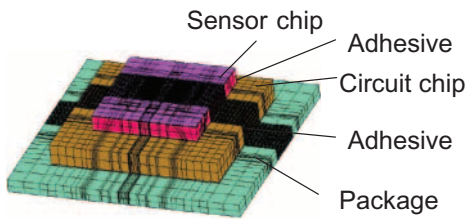


Fig. 16 FEM analysis model

その結果をFig. 17示す。接着剤のヤング率と接着剤の厚みに対する0G出力特性を示している。接着剤のヤング率が小さいほど、接着剤の厚みが薄いほど0G出力は影響を受けないことが分かる。この結果から、ヤング率が100MPa以下の接着剤を採用すればよい。

接着剤の採用にあたっては、スタック構造の加速度に対する伝達関数も考慮し、決定した。

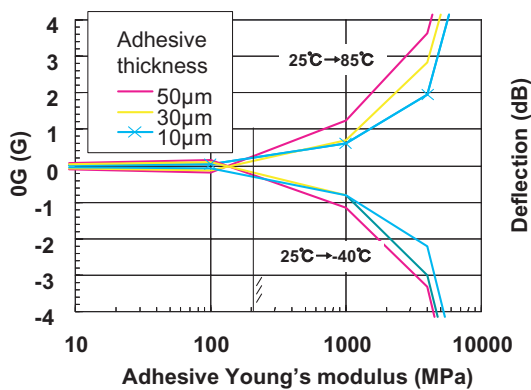


Fig. 17 Adhesive Young's modulus and 0G analysis result

5. 評価結果

開発したVSC用加速度センサの出力特性をFig. 18示す。加振器を用いて±1.5G印加した時の出力を示している。フルスケール範囲内において、非直線性は、1%以内である。

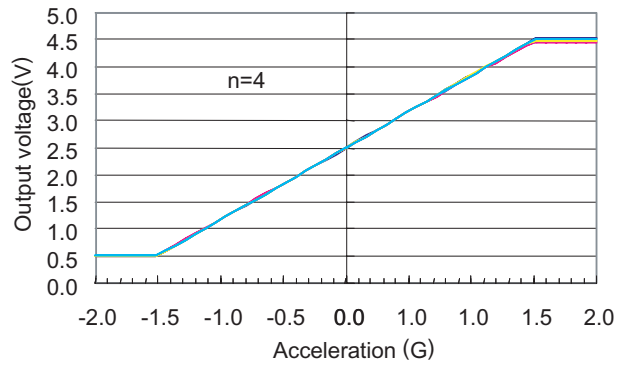


Fig. 18 Output characteristics for the acceleration

センサの温度特性を示す。Fig. 19に0Gの温度特性、Fig. 20が感度の温度特性を示している。スタック構造において、低ヤング率の接着剤を採用したことにより、0.05G以下の精度が得られた。

Fig. 21に作動耐久試験結果を示す。加速度センサを±1G、10Hzで400万回差動させた後も変動はほとんど見られない。

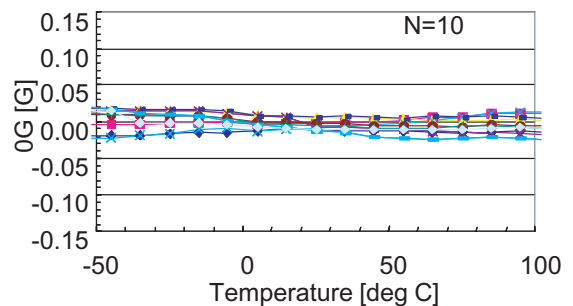
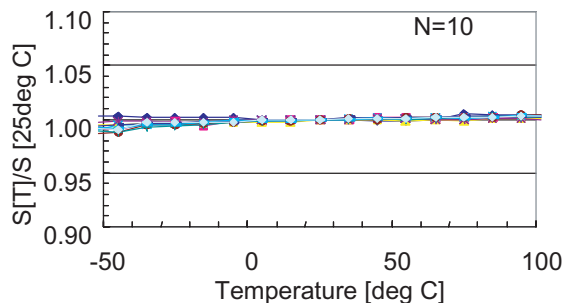


Fig. 19 0G temperature characteristics



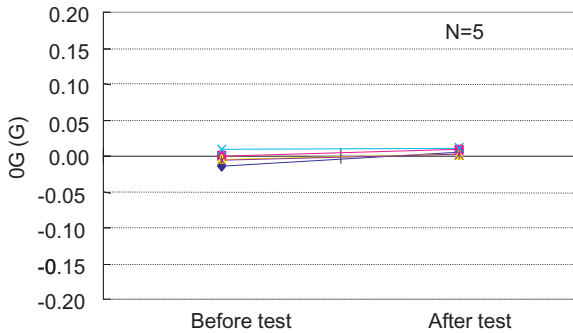


Fig. 21 Durability test result

なお、Table 1に今回開発したVSC用加速度センサのスペックの一例を示す。

最後に、開発した容量式加速度センサを搭載したインナーシャルセンサのプリント基板をFig. 22に示す。

Table 1 VSC acceleration sensor specifications

Absolute maximum ratings

Power supply voltage	-0.3 to + 6V
Storage temperature	-40 to + 85 deg C

Operating conditions

Operating voltage	5 +/- 0.25V
Measuring range	+/- 14.7 m/s ² { +/- 1.5G}
Operating temperature	-30 to + 85 deg C

Electrical characteristics

Sensitivity	4/147 VGS V/(m/s ²) +/- 5% (1.333 V/G +/- 5% @5V)
Offset	1/2 VGS V +/- 0.98 I/(m/s ²) (2.5 V +/- 0.1G @5V)
Cross axis sensitivity	within 5%
Current consumption	within 10 mA
Output random noise	within 20mVp-p
Output impedance	within 20 ohm

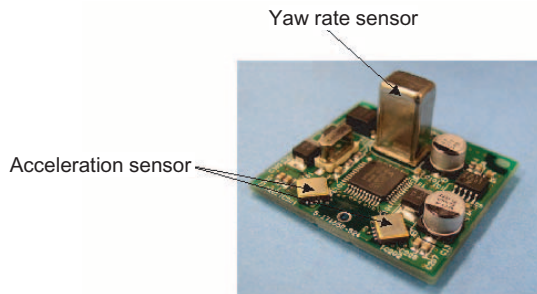


Fig. 22 Inertial sensor printed circuit board

6. 結論

我々は、高感度、かつ高精度のVSC用容量式加速度センサの開発に取り組み、次の結果を得た。

- ① SOIウエハを用いて、電極厚15μmと厚く、単結晶Siの電極を持つ容量式加速度センサを開発した。
- ② センサチップと回路チップを積層化したスタック構造の採用によりサイズ6×6.7mmの小型化を実現した。
- ③ センシングエレメントの高感度化のため、電極の撓みや静電気力による影響を考慮し、センシングエレメントの容量増加と、バネマス系の最適化を実施した。
- ④ 精度化のため、0G温度保証回路を追加し、接着剤の低弾性率化により温度特性の良いセンサを開発した。

以上の取り組みにより、高感度、高精度なVSC用容量式加速度センサを開発した。今後は、この技術をもとに、幅広いセンサの開発を進めていく予定である。

<参考文献>

- 1) M.Offenberg, H.Munzel, D.Schubert, O.Schatz, F.Larmer, E.Muller, B.Maihofer, and J.Marek, "Acceleration Sensor in Surface Micromachining for Airbag Applications with High Signal/Noise Ratio" SAE1996, 960758
- 2) Analog Dialogue, Vol. 33, No. 1, January, 1999 "Dual Axis, Low g, Fully Integrated Accelerometers"
- 3) Seokyu Kim, Byeungleul Lee, Joonyeop Lee, and Kukjin Chun, "A GYROSCOPE ARRAY WITH LINKED-BEAM STRUCTURE", pp30-33, MEMS 2001
- 4) Moorthi Palaniapan, Roger T. Howe and John Yasaitis, " PERFORMANCE COMPARISON OF INTEGRATED Z-AXIS FRAME MICROGYROSCOPES", pp.482-485, MEMS 2003
- 5) JackD.Johnson, Seyed R. Zarabadi, John C. Christenson and Tracy A. Noll, "Single Crystal Silicon Low-G Acceleration Sensor", SAE2002-01-1080
- 6) Junseok Chae, Haluk Kulah, and Khalil Najafi, "A HYBRID SILICON-ON-GLASS LATERAL MICRO-ACCELEROMETER WITH CMOS READOUT CIRCUITRY", pp.623-626, MEMS2002

- 7) Junseok Chae, Haluk Kulah and Khalil Najafi, "AN IN-PLANE HIGH-SENSITIVITY, LOW-NOISE MICRO-G SILICON ACCELEROMETER" O_6_1, pp.466-469, MEMS2003
- 8) Daniel Lapadatu, Soheil Habibi, Bjørge Reppen, Guttorm Salomonsen, Terje Kvisterøy, "DUAL-AXES CAPACITIVE INCLINOMETER /LOW-g Accelerometer FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS", pp.34-37, MEMS 2001
- 9) Jonathan Hammond, Andrew McNeil, Rick August, and Dan Koury, "Inertial Transducer Design For Manufacturability And Performance At MOTOROLA" 1D3.3, TRANSDUCERS '03



<著 者>



Mark Harrison
(マーク ハリソン)
DENSO INTERNATIONAL
AMERICA, INC
Marketing & Engineering Division,
Engineering Group
半導体センサの営業技術に従事



大塚 穰
(おおつか ゆずる)
I C技術2部
イナーシャルセンサ開発に従事



酒井 峰一
(さかい みねかず)
I C技術2部
容量式加速度センサ開発に従事