

Polysilicon Yaw-Rate Sensor

Toshiyuki Tsuchiya

要 旨

多結晶シリコンの3層構造を用いたヨーレートセンサ（振動型ジャイロスコープ）を開発した。このセンサでは膜厚 $2\mu\text{m}$ の振動子マスの上部に電極を形成することでコリオリ力により発生する基板垂直方向の振動を高精度に検出することができる。励振・検出の共振周波数の調整は励振振動を検出する櫛形電極に印加するバイアス電圧を制御することで最適な値に調整した。また、ヨーレート出力のオフセット電圧は振動子の加振電圧振幅を左右の櫛形電極で変化させることで減少させた。このセンサで分解能 1deg/sec を達成した。

キーワード ヨーレートセンサ，多結晶シリコン，薄膜多層構造，周波数調整，オフセット

Abstract

A yaw-rate sensor consisting of three layers of polysilicon thin films has been developed. It has an upper electrode over a resonating mass for accurately detecting the sensing vibration oscillated by the Coriolis force. The resonant frequency of both the driving and sensing vibrations is successfully controlled by the DC bias to the comb electrodes that are used for detecting the driving vibration. The offset of the angular rate output due to the mechanical and electromechanical couplings is decreased by an unbalanced differential oscillation. With this tuning method and the offset reduction, the angular rate was detected. A resolution of 1 deg/sec is achieved.

Keywords Yaw-rate sensor, Polysilicon, Multi-layer structure, Tuning, Offset reduction

1. はじめに

車両運動制御やナビゲーションシステム用に小型で低コストなヨーレートセンサの開発が求められている。近年，半導体微細加工技術を応用して基板表面上に微小な機械構造体を作製する表面マイクロマシニングで上記センサを開発する研究が盛んである¹⁻³⁾。この中で，多結晶シリコン薄膜を構造体として用いるセンサ素子は回路との集積化が可能であることから低コストで高精度なセンサを実現できるとの期待が高い⁴⁾。しかしながら，多結晶シリコン薄膜は通常膜厚が $2\mu\text{m}$ 程度で慣性マスの寸法も $200\sim 500\mu\text{m}$ 角程度であるために検出しなければならない

変位が微小になるという問題がある。

そこでわれわれは振動子の上下の電極で微小な変位による容量変化を高精度に差動検出する手法を用いるため，多結晶シリコンの多層構造を作製するプロセスを開発した。本論文では，このプロセスを用いて試作した3層構造のヨーレートセンサについて報告する。まず，センサの構造と検出原理，作製プロセスについて述べた後に，ヨーレート検出のための回路について，特にヨーレート検出に重要な周波数調整と出力に現れるオフセット電圧の制御の方法について述べる。そして，試作したセンサの特性を明らかにし，最後にこれらについて考察する。

2.3層構造ヨーレートセンサ⁵⁾

2.1 検出原理

ヨーレートセンサの検出はコリオリ力を利用する。ある軸（運動軸）方向に速度 v で運動する物体（質量 m ）が運動軸に対して垂直な軸（回転軸）周りに角速度 Ω で回転すると運動軸，回転軸いずれに対しても垂直な軸（検出軸）に見かけの力が働く。これをコリオリ力 F_C と呼び以下の関係がある。

$$F_C = 2mv\Omega \quad (1)$$

本ヨーレートセンサでは速度はデバイス上のマスの振動によって与えられる。つまり，マスの振動周波数を $\omega_{ref}/2\pi$ ，振幅を A_{ref} とするとマスの変位は

$$x = A_{ref}\sin\omega_{ref}t \quad (2)$$

と表すことができる。 $v = dx/dt$ より

$$F_C = 2mA_{ref}\omega_{ref}\Omega\cos\omega_{ref}t \quad (3)$$

である。このとき検出系（ z 軸）の運動方程式は次のように定義される。

$$\ddot{z}(t) + \frac{\omega_{sens}}{Q_{sens}}\dot{z}(t) + \omega_{sens}^2 z(t) = \frac{F_{COL}}{m}\cos\omega_{ref}t \quad (4)$$

ここに， ω_{sens} ， Q_{sens} は検出振動の固有振動数とQ値である。この運動方程式の定常解は次の通りである。

$$z(t) = A_{sens}\cos(\omega_{ref}t - \phi) \quad (5)$$

$$A_{sens} = \frac{2A_{ref}\Omega R_\omega}{\omega_{sens}} \left\{ (1 - R_\omega^2)^2 + \left(\frac{R_\omega}{Q_{sens}} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (6)$$

ただし，

$$\phi = \tan^{-1} \left[\left(Q_{sens} \left(\frac{1}{R_\omega} - R_\omega \right) \right)^{-1} \right], R_\omega = \frac{\omega_{ref}}{\omega_{sens}} \text{ (離調比と呼ぶ)} \quad (7)$$

である。このようにセンサの出力すなわち検出振動の振幅 A_{sens} は離調比 R_ω が1に近づくほど，つまり，励振，検出の固有振動数を近づけるほど大きくなる。

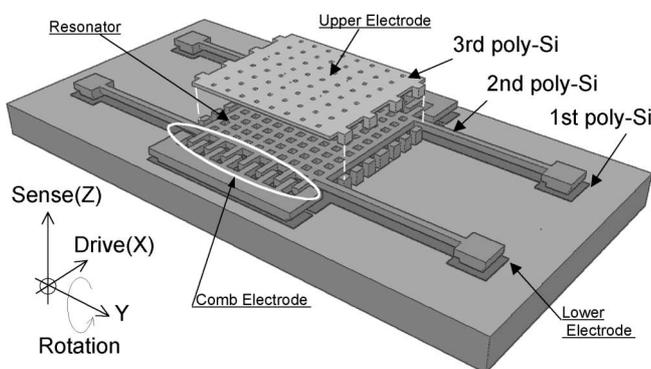


Fig. 1 Three-layer polysilicon yaw-rate sensor.

2.2 センサ構造

多結晶シリコンを構造体として用いる振動型ヨーレートセンサの基本構造をFig. 1に示す。多結晶シリコン薄膜の構造体は振動子の層と上部電極の層の2層積層され，下部電極とともに電極が基板垂直方向に3層形成される。

振動子は楕形電極によって励振され，基板と平行な方向に振動する（以下，励振振動と呼ぶ）。このときビームの長手軸周りに振動子が回転するとコリオリ力によって基板と垂直方向に振動が発生する（以下，検出振動）。この振動振幅を上下の電極で検出する。

本報告で評価したセンサはマスが240 μm 角，支持ビームが長さ300 μm ，幅2 μm である。楕形電極の長さは20 μm で重なりが10 μm ，ギャップが1 μm ，加振電極が片側16組，振動検出電極が片側24組である。

2.3 作製プロセス

本センサの構造は多結晶シリコンの多層構造形成プロセスを用いている⁶⁾。プロセスフローをFig. 2に示す。窒化膜を形成したシリコンウエハ上に基板電極となる多結晶シリコン層（1st poly-Si層）を成膜，パターン形成した後に犠牲層となるプラズマCVD SiO₂膜を成膜し，コンタクトホールを形成する。この上に多結晶シリコン膜を成膜する。この多結晶シリコン膜は内部応力制御のためにジシラン（Si₂H₆）をソースガスとし，520°Cの低温でLPCVDで成膜した非晶質膜を1000°C窒素中アニールにより結晶化

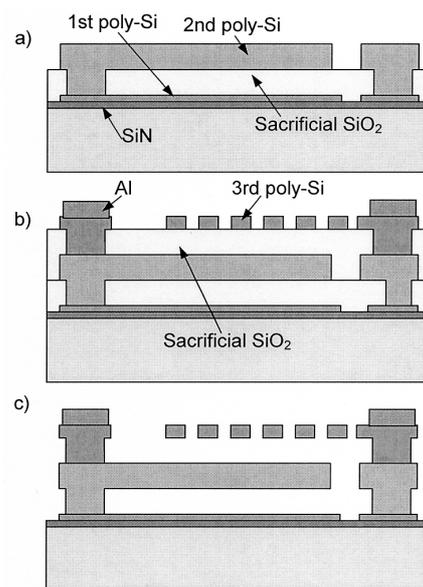


Fig. 2 Process flow of the polysilicon yaw-rate sensor.

し、 POCl_3 気相拡散によりPドーピングした膜を用いた。構造体（2nd poly-Si層）をパターン形成した後に犠牲層と上部電極（3rd poly-Si層）を上記と同様の方法で形成し、最後に電極となるアルミニウム膜をEB蒸着、パターン形成する。最後に犠牲層（プラズマCVD SiO_2 ）をフッ酸によりエッチング除去して多層多結晶シリコンのセンサ構造を得る。

本センサは真空中での動作が必要であるのでメタルキャンパッケージ内に真空封入している。封入時の真空度は約0.1Torrである。センサ特性は下記の検出回路を用い、定回転速度における出力信号を測定している。

3. ヨーレート検出回路

ヨーレート検出回路全体のブロック図をFig. 3に示す。励振、検出各振動の変位はそれぞれ左右の楕円形電極、上下電極と振動子の間の静電容量変化として検出する。励振変位は定振幅発振回路に入力され、出力を加振楕円形電極に印加して共振振動を発生する。検出振動の変位信号は角速度検出回路により角速度信号として出力される。以下に変位検出回路、共振周波数制御、オフセット低減について詳細を述べる。

3.1 変位検出

変位（静電容量変化）の検出はチャージアンプを用いた。励振（X）方向の回路構成をFig. 4に示した。チャージアンプの帰還容量は3pFであるのでアンプの感度は0.33V/pCである。アンプのバイアス電圧 V_{bias} を6Vとすると振動子のX変位に対するアンプの出力は1.72mV/ μm である。このアンプの出力には加振信号のノイズが重畳するので左右の楕円形電極で差動検出することによりノイズを除去している。

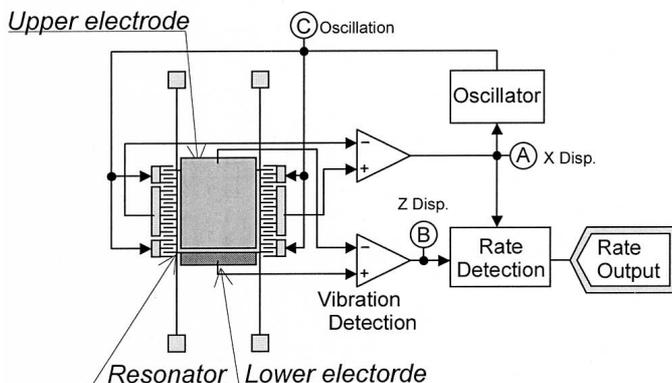


Fig. 3 Schematic diagram of angular rate detection circuit.

検出（Z）方向も同じチャージアンプ、差動検出回路を用いている。スティッキングなどの問題を考慮して V_{bias} を1Vとしている。このとき振動子のZ変位に対するアンプの出力は0.030mV/ μm である。

3.2 共振周波数制御

2.1節で既に述べたように、センサの感度を向上するためには励振（X）、検出（Z）両振動の共振周波数を近づける必要がある。センサの構造はこれを考慮して設計されているが、膜の機械物性値のばらつきや、加工された形状の誤差によって必ずしも設計どおりにはならない。そこで、電氣的に共振周波数を調整する手法が必要であり、静電力を用いて制御する手法が一般的である。われわれは、これを制御用の独立した電極を形成せず、Fig. 3に示したようにチャージアンプのバイアス電圧を制御することによって、Z方向の共振周波数を大きく変化させることとした。

3.3 オフセット低減

本センサの振動子は励振、検出各振動系のばね要素として両端支持梁の2軸方向のたわみ剛性を利用している。このため、両方向の共振周波数を近づけると2つの共振振動が機械的に結合し、励振（X）方向に加振したときにしばしば検出（Z）方向の振動が発生してしまう。これを漏れ振動という、多結晶シリコンセンサのように微小なマスを用いるセンサでは共振周波数を同調あるいはそれに近い状態にすることは不可欠であり、漏れ振動の制御が重要になる。われわれは基板上に形成した楕円形電極が上下の電場の非対称性によって基板垂直方向の力を発生する現象⁷⁾を用いて漏れ振動の制御を試みた。具体的にはFig. 4に示したようにマスの左右に印加する加振信

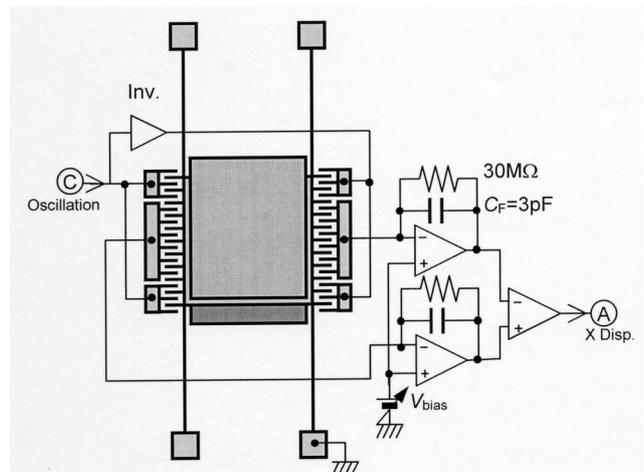


Fig. 4 Schematic diagram of oscillation and detection circuit.

号を故意にアンバランスしている。通常は同一振幅で印加するので左右がバランスしてZ方向の加振力は発生しないが、左右の振幅に差をつけるとZ方向の加振力が発生する。これを、漏れ振動の変位を打ち消すのに用いている。

4. 結果と考察

4.1 試作結果

3層構造多結晶シリコンヨーレートセンサは多層構造プロセスにより作製された。Fig. 5に試作したセンサデバイス全体と基板上電極、振動子構造、上部電極の各多結晶シリコン層が積層したマス部の拡大を示した。上記多層構造プロセスにより、上部電極には平坦で大きな段差もなくマスの振動が自由に行えるような構造になっている。

4.2 振動特性

小振幅時の励振 (X) 振動の共振周波数は検出 (Z) 振動のそれよりも約10%高かった。支持ビームの幅は設計値で $2\mu\text{m}$ 、膜厚が $2.4\mu\text{m}$ であり、設計上は検出振動の共振周波数が高いと予想していた。これは、膜厚方向の内部応力分布によるマスの反りや支持ビームのRIE加工断面が基板側に広い台形形状をしていることなどが原因として考えられる。

励振振動の検出電極へのバイアス電圧で共振周波数が調整できることを確認した。Fig. 6にバイアス電圧と励振、検出両振動の共振周波数の関係をプロ

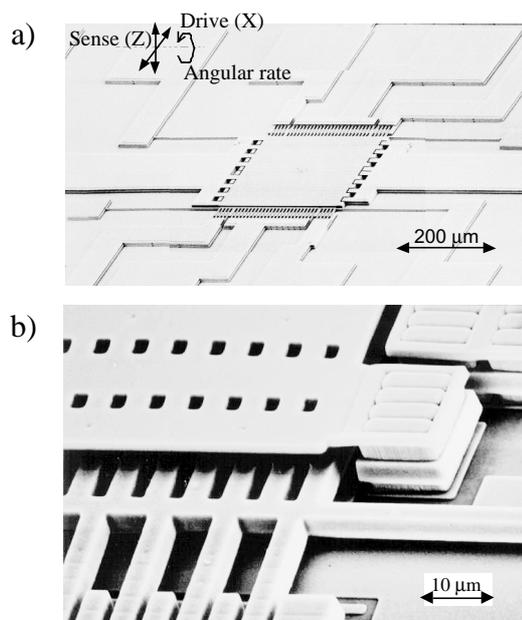


Fig. 5 SEM micrograph of three-layer polysilicon yaw-rate sensor. a) Overview of the resonator. b) Magnified view at the mass.

ットした。バイアス電圧約8Vで共振周波数を一致させることができる。検出振動は予想通りバイアス電圧によって共振周波数が上昇したが、励振振動の共振周波数もバイアス電圧によって変化することが明らかになった。理想的には楕円電極の加振力が振動子の変位に依存しないため楕円電極のバイアス電圧によって共振周波数は変化しないはずであるが、実際には非線形な変位依存性を持つことに起因すると考えている。

本センサの振動子の周波数特性は複雑な特性を示している。これは、両端支持梁型振動子の非線形振動特性に起因する。後述するヨーレート出力特性を測定したバイアス電圧8.7Vにおける共振周波数付近の振動特性をFig. 7に示した。励振振動は非対称な共振特性、すなわち振幅が大きくなるにつれて共振周

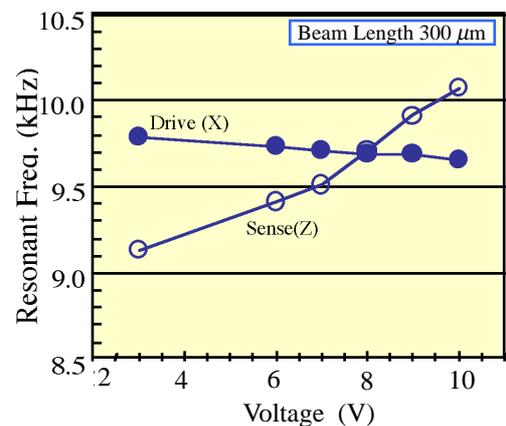


Fig. 6 Resonant frequency of both the driving and the sensing vibration against controlling voltage.

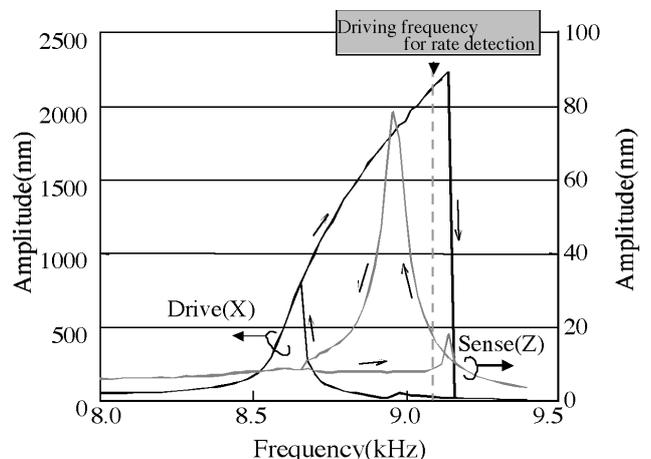


Fig. 7 Frequency response at 8.7 V of frequency controlling voltage.

波数が高くなる傾向を示した。このため、実際は周波数調整において検出振動の共振周波数をFig. 6に示した小振幅での励振振動の共振周波数よりも高めに設定することが望まれる。

Fig. 6の共振特性を見ればわかるように、このバイアス電圧では検出方向の共振周波数は8.94kHzであり、この点で励振振動は1.8 μ mの振幅で加振することができる。ところが、実際に回転検出を試みるとより高い周波数で感度が高くなることがわかった。Fig. 6に示した8.94kHzの共振ピークは励振方向に振動していないときの共振周波数であり、励振方向に大振幅で振動しているときにはピークが現れていないことがわかる。これは、Z方向の振動特性がX方向の大振幅の振動によって変化している、つまり支持ビームの剛性がX方向の大変位によって増加し、Z方向の共振周波数の非線形特性を引き起こしていると考えられる。

4.3 ヨーレート出力

前節で述べた理由によりヨーレート出力の特性はFig. 7に示した9.07kHzの発振周波数で測定している。このときの漏れ振動成分は左右加振電極に加える振幅の調整で低減した。調整前は漏れ振動の振幅は1000 deg/sec相当であったが、20deg/sec以下にすることができた。漏れ振動成分は同期検波によって大半が除去されるが、温度特性や位相誤差によって漏れ振動成分が出力に現れる可能性がある。このような調整による漏れ振動成分は零点ドリフトの抑制に重要である。

定速度回転におけるセンサ出力をFig. 8に示した。分解能は約1deg/secである。センサの感度特性はFig. 9に示した。±20deg/secの範囲で線形な出力が得られた。このセンサの感度は2.2mV/(deg/sec)である。

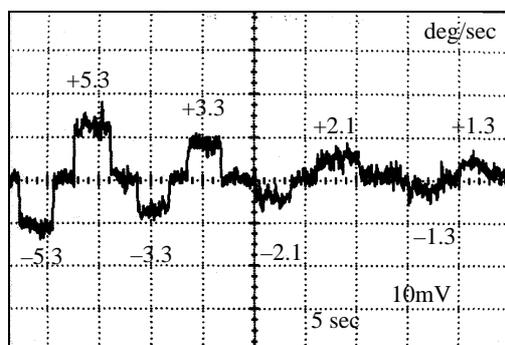


Fig. 8 Angular rate output.

4.4 考察

ヨーレートセンサの感度は既に述べたように励振と検出の共振周波数を同調あるいはそれに近い状態にすることで向上する。しかし、センサの振動特性からわかるように同調状態では励振振動が不安定になることがわかった。また、センサの応答性はQ値が高くなるほど、また両共振周波数の差が小さくなるほど低下する。このため、実際には今回のセンサを測定した状態のように、ある程度の共振周波数差を設定するのがよい。

今回測定したヨーレートセンサの特性をTable 1にまとめた。センサの感度から計算した共振周波数差は27 Hz (0.3%)であった。車両運動制御に用いるヨーレートセンサの角速度分解能は得られた。

5. まとめ

多結晶シリコン薄膜の3層構造からなるヨーレートセンサ（振動型ジャイロスコープ）を開発した。振動子構造上に設けた第3層多結晶シリコン膜による上部電極を用いた振動検出により差動検出が可能

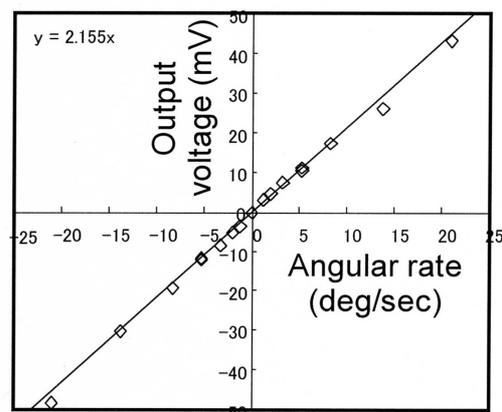


Fig. 9 The output voltage of the yaw-rate sensor against a constant rotation.

Table 1 Device properties of the polysilicon yaw-rate sensor.

Thickness of 2nd polysilicon		2.4 μ m
Mass		200 μ m \times 200 μ m
Beam	Length	300 μ m
	Width	2 μ m
Driving	Frequency	9.07kHz
	Amplitude	2.2 μ m
Δ f (Calculated)		27Hz
Sensitivity	(Capacitance)	19aF/(deg/sec)
	(Output)	2.2mV/(deg/sec)
Angular Rate Resolution		~1deg/sec

になり電氣的ノイズを低減することができた。振動型ジャイロスコープに不可欠な励振，検出振動の共振周波数の制御を楕形電極へのバイアス電圧で実現した。また，漏れ振動成分を左右の楕形電極に印加する加振電圧の振幅をアンバランスにすることで実現した。本ヨーレートセンサの角速度分解能は1deg/secであり，車両運動制御用のセンサとしての応用が期待される。

参考文献

- 1) Tanaka, K., et al. : "A Micromachined Vibrating Gyroscope", Sensors and Actuators, A50(1995), 111-115
- 2) Juneau, T. and Pisano, A. P. : "Micromachined Dual Input Axis Angular Rate Sensor", Tech. Digest of Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, (1996), 299-302, IEEE
- 3) Clark, W. A., et al. : "Surface Micromachined Z-Axis Vibratory Rate Gyroscope", Tech. Digest of Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, (1996), 283-287, IEEE
- 4) Core, T. A., et al. : "Fabrication Technology for an Integrated Surface Micromachined Sensor", Solid State Technol., 36-10(1993), 39-44

- 5) Tsuchiya, T., et al. : "Vibrating Gyroscope Consisting of Three Layers of Polysilicon Thin Films," Sensors and Actuators, A82(2000), 114-119
- 6) Funabashi, H., et al. : "Fabrication Technology of Three Layer Polysilicon Microstructures without CMP for Gyroscope", Tech Digest of Int. Conf. of Solid-State Sensors and Actuators, Sendai, Japan, (1999), 336-339, IEE of Japan
- 7) Tang, W. C., et al. : "Electrostatic Comb Drive Levitation and Control Method", J. Microelectromechanical Syst, 1-4(1992), 170-178

(2001年3月30日原稿受付)

著者紹介



土屋智由 Toshiyuki Tsuchiya
 生年：1968年。
 所属：集積化デバイス研究室。

分野：シリコンマイクロマシニングと応用デバイス。薄膜の機械的特性評価の研究。

学会等：IEEE, 電気学会会員。
 1998年R&D100選受賞。
 2000年電気学会論文発表賞受賞。