

石田 誠

豊橋技術科学大学工学部・教授

社会の安全・安心に貢献するユビキタス集積化マイクロセンサの開発

## § 1. 研究実施の概要

本研究は、社会の安全・安心に貢献するユビキタスセンサネットワークにおけるセンサ・マイクロノードの実現を目的として、要素技術となるRF回路集積型スマートセンサ形成プロセスの確立、自立発電システムの開発、ならびに、マイクロセンサノードの応用に関する実証実験を行う。最終的に、マルチモーダルセンサデバイス技術の開発、ならびにユビキタスセンサ・マイクロノードの形成と実証評価を実施する。

豊橋技術科学大学を中心とし、セイコーインスツル、理化学研究所、ならびに産業技術総合研究所から構成されるチームにおいて、**マイクロセンサノード素子の開発と評価、マイクロセンサのマルチモーダル化技術の開発、マイクロセンサノードの応用評価に関する実験**を行った。それぞれ、ワイヤレス・スマート温度センサノードの設計・製作、pH・電気伝導度・温度センサを一体化したマルチモーダルセンサの試作、刺入型マイクロチューブの薬液投与特性評価、神経薬液ブロック実証において成果を得ている。今後、各技術の統合化をより一層進めることで、実証試験が可能なマイクロセンサノードの開発を行なってゆく。

## § 2. 研究実施体制

(1)「豊橋技術科学大学」グループ

①研究分担グループ長：石田 誠(豊橋技術科学大学、教授)

②研究項目

- ・ マイクロセンサノード素子の開発と評価
- ・ マイクロセンサのマルチモーダル化技術の開発

- ・ マイクロセンサノードの応用評価に関する実験

### § 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

#### (1) マイクロセンサノード素子の開発と評価

集積化大容量無線発電機構と RF 集積回路が一体化された完全無線動作が可能なマイクロセンサノード素子の開発を行った。RF 集積回路の研究においては、集積化無線送信器とセンサが一体化されたワイヤレス・スマートセンサを開発した。ワイヤレス・スマートセンサとは、センサで検出された信号を無線によってネットワークへ送信するセンサデバイスである。これまで、試作したチップからの送信が可能であることを報告してきた。本年度は無線発電機構と一体化するために、低消費電力化を目指した送信回路の設計と試作を行った。シミュレーションによると、700 $\mu$ W で送信可能であるという結果がでた。この結果はこれまで開発してきた無線電源回路出力(4mW/10msec) との整合が可能であることを示している。まず本学で試作した送信回路で動作確認し、さらに一般化するために TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company)の 0.25 $\mu$ m Mixed-signal/RF CMOS process 技術で低消費電力化に向けた RF 送信回路の設計と試作を行った。RF 送信回路はパルス幅変調(PWM)方式を用いており、信号変調部、電圧制御オシレーター(VCO)、オンチップアンテナで構成される[図 1]。

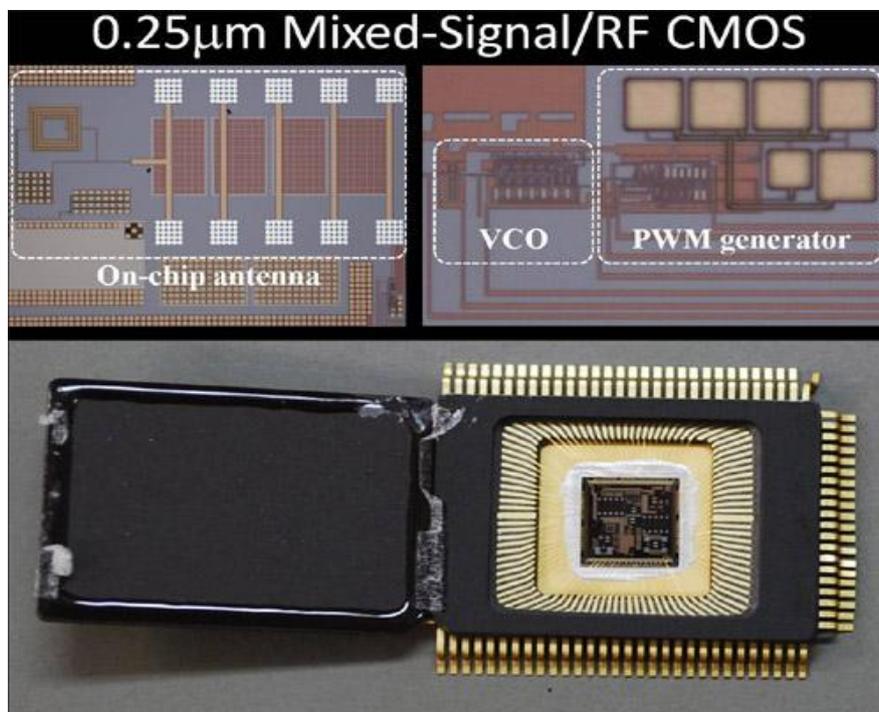


図 1. 試作したチップ

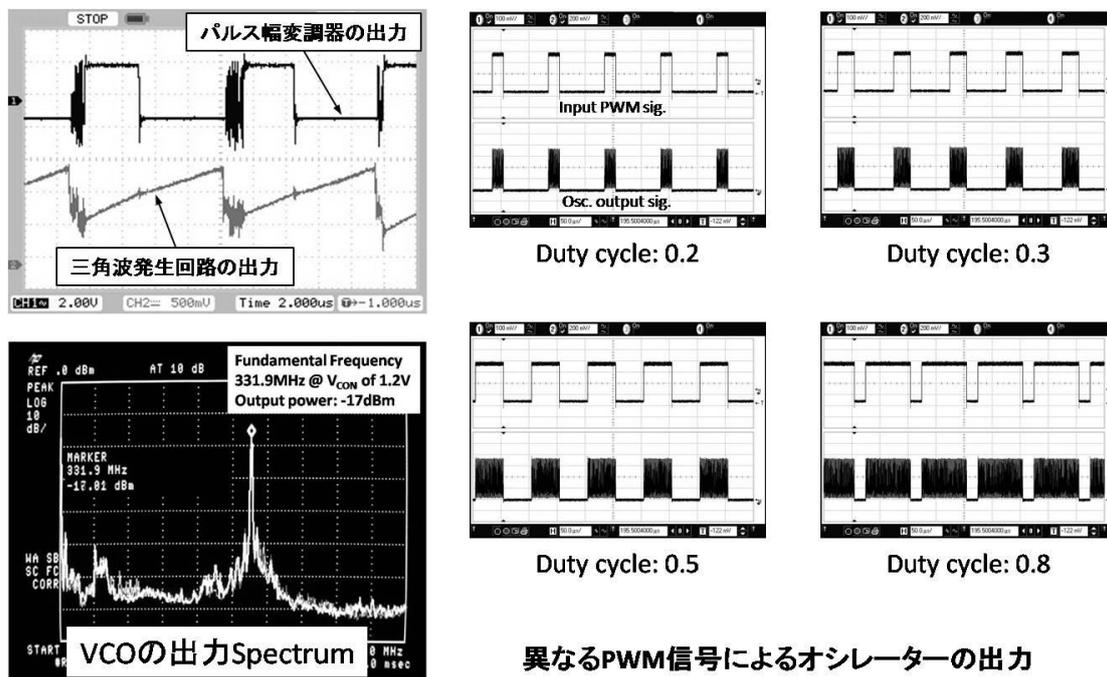


図 2. PWM generator と VCO の出力特性

図 2 は試作したパルス幅変調回路と VCO の出力を示す。この結果より各ブロックの動作が確認できた。電波暗室で行った CMOS 多層配線層を用いたオンチップアンテナの評価を図 3 に示す。本チップは伝送する情報をパルス幅変調し、図 2 に示したように、変調された信号が“High”のときだけ VCO を駆動させ、オンチップアンテナから送信できるので、既存のリングオシレーターを用いた送信器より低消費電力で動作が可能である。今後、製作した素子の評価を詳細に行っていく。

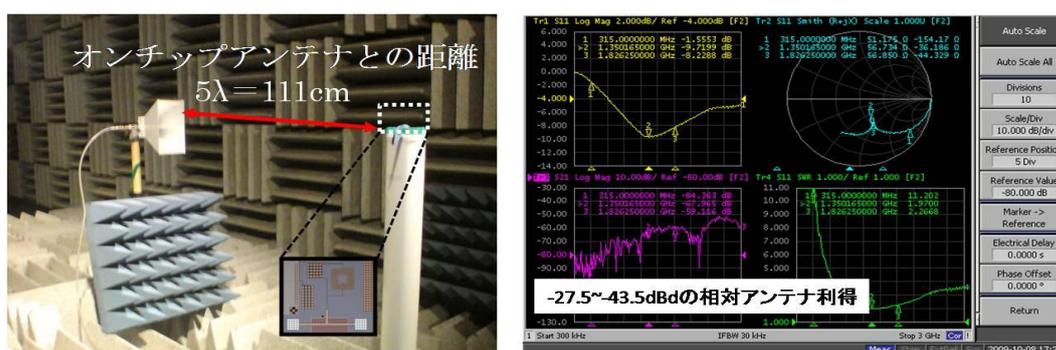


図 3. オンチップアンテナの特性

(2) マイクロセンサのマルチモーダル化技術の開発

マルチモーダル(多機能型)センサは、半導体のシリコン集積回路技術を用い、豊橋技術科学大学にある半導体製作室(固体機能デバイス施設)にて製作したものである。様々な材料を用いて

各種センサを実現できる。昨年度に引き続き、マルチモーダルセンサ (pH センサ、電気伝導度センサ、温度センサを内蔵、図4参照)<sup>1)</sup>を用い、外部無線センサシステムとの組み合わせによる牛の第一胃からの無線計測試験を行った(図5参照)<sup>未発行論文<sup>1)</sup></sup>。本年度は特に、受信機との距離に対する電波強度の計測を行った。図6は、何も遮蔽物がない場合と牛の胃に入れた場合の電波強度を示す。牛の胃に入れた場合、同一距離での遮蔽物がないものに対し約 30dBm の低下がみられた。また、対象物から4m離れた場合、18dBmの低下があることが分かった。従って、生体内からの(特に牛などの肉厚のものからの)無線計測に対しては、48dBm 以上減衰しても受信が可能なシステムとする必要があることが分る。今回製作した無線システムでは、-50dBm ~ -100dBm までの範囲で計測ができ、胃からの無線計測が可能なシステムを構築することができた。

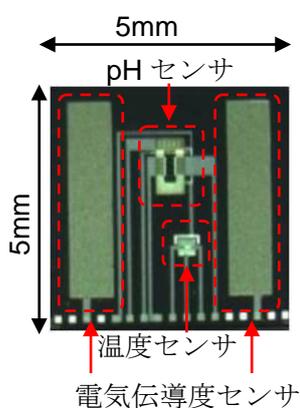


図4 マルチモーダルセンサチップ写真



図5 牛の胃の中からの無線計測風景

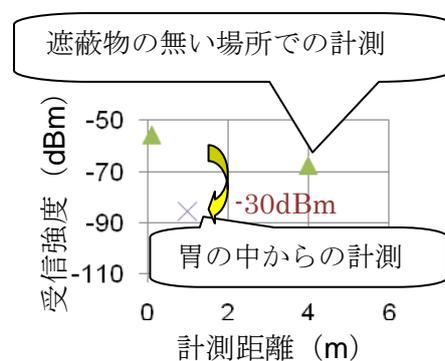


図6 無線センサシステムの受信強度測定結果

### (3) マイクロセンサノードの応用評価に関する実験

本プロジェクトで実現するマイクロセンサノードの新しい応用分野開拓を目指し、フィールド実験を通じて、埋め込みを中心としたノード応用における実証評価を実施した。

(a)プローブ型の局所、多点、圧力センサアレイの製作を行った。n型Si基板上に、基板温度700度、ジシラン(Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)-ジボラン(B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)混合ガス圧力0.6Paの条件でプローブ形成(VLS成長)を行い、直径3μm、長さ30μm、抵抗率1Ω・cmのp型Siプローブを成長させ、基板とプローブの間にpn接合を形成した。プラズマCVD法により各Siプローブの側壁に0.6μm膜厚の酸化膜を堆積し、プローブ先端付近のみをエッチングにより露出した。その後スパッタ法によりアルミニウムを堆積、パターニングしてプローブ先端への配線とした。これでプローブ両端に電極を持ちながら、一端で被測定物に接触できる構造を初めて実現した(図7)。先端直径5μmのタングステンニードルを用いて、単一のSiプローブに圧縮応力を加えながら電流-電圧特性を測定した。プローブ圧縮応力をタングステンニードルにより増やすことで、例えば印加電圧2~4Vにおいて15%のプローブ順方向電流の増加が確認できた(図8)。この変化はプローブの抵抗値がピエゾ抵抗効果によって低下したためと考えられる。今回は垂直力による変化だが、構造を工夫することで剪断力でも変化すると考えている。本成果は6月に米国コロラド州で開催された国際会議 Transducers2009

で口頭発表した。また、会議初日には同論文が4件の“Outstanding paper award”中の1つに選ばれたと発表された。国内では、9月に秋季第70回応用物理学会にて関連の口頭発表を行った。

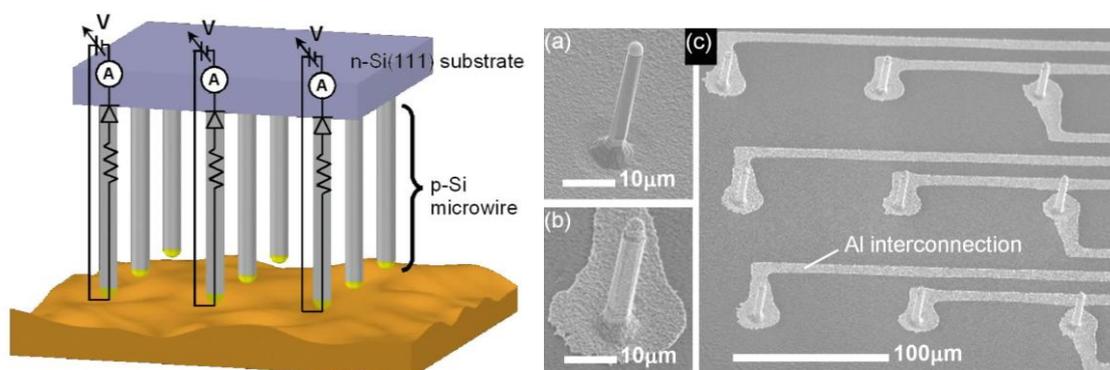


図7. センサデバイスの概念図(左)と電子顕微鏡写真(右)

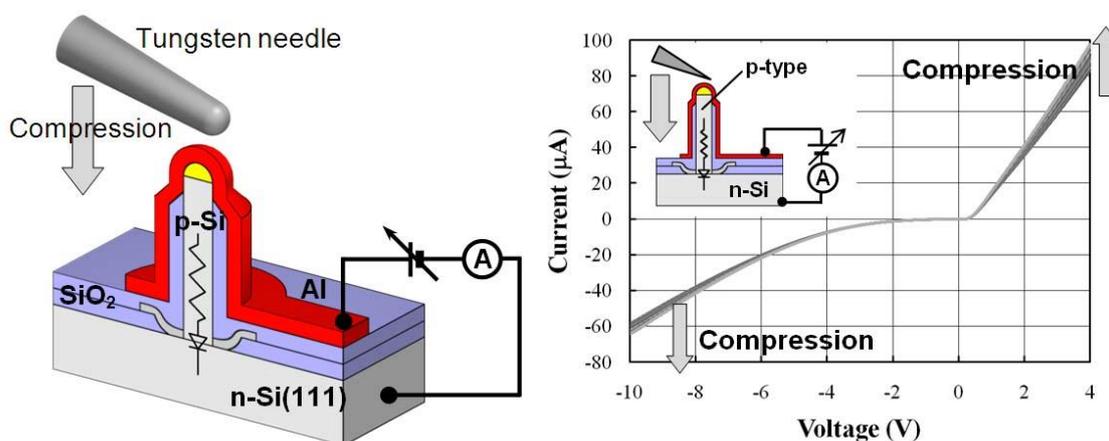


図8. 圧力変化によるシリコンプローブの電流-電圧特性

(b) 刺入型マイクロチューブ電極の製作・評価、細胞外電位計測実証を行った。電気的な神経細胞計測に際し、1) 低侵襲性(微小電極)、2) 高い信号対雑音(S/N)比が電極デバイスの特性として非常に重要である。これらの要求を満たすため、薬液投与用チューブを電気的な神経細胞測定用電極として提案した(図9)。従来マイクロプローブ電極の場合、その先端の微小な金属-溶液接触面積による高インピーダンス特性が課題であったが、チューブ構造を用いることで電極低インピーダンス化を実現した。製作したマイクロチューブ電極(内径  $1.9 - 6.4 \mu\text{m}$ 、長さ  $25 \mu\text{m}$ )に生理食塩水(抵抗率  $14.7 \Omega \text{ cm}$ )を満たすことで、同直径プローブ電極の  $1/10$  倍程度の低インピーダンス値を実現した( $220\text{k}\Omega - 1.55\text{M}\Omega$ ,  $500\text{Hz}$ )。擬似信号( $80 \mu\text{V}_{\text{p-p}}$ ,  $1 \text{ kHz}$ )計測試験においても、入出力比  $100\%$ を実現した(同直径プローブ電極の場合  $20-60\%$ )。

マイクロチューブ電極を用いたラット坐骨神経の誘発電位観測を行った。記録された信号波形が坐骨神経を伝搬してきた結果であることを確認するため、坐骨神経に局所麻酔(lidocaine)薬液を投与における神経電位の消失を確認した。さらに筋電位の強度の相関関係について解析も行った。

ており、これらの結果より、製作したマイクロチューブ電極を介した坐骨神経の活動電位記録を実証した(図10)。本成果も同様に6月に米国コロラド州で開催された国際会議 Transducers2009 で発表した。また、同内容は学術論文で発表した<sup>4)</sup>。本生理実験には、産業技術総合研究所の協力を得た。

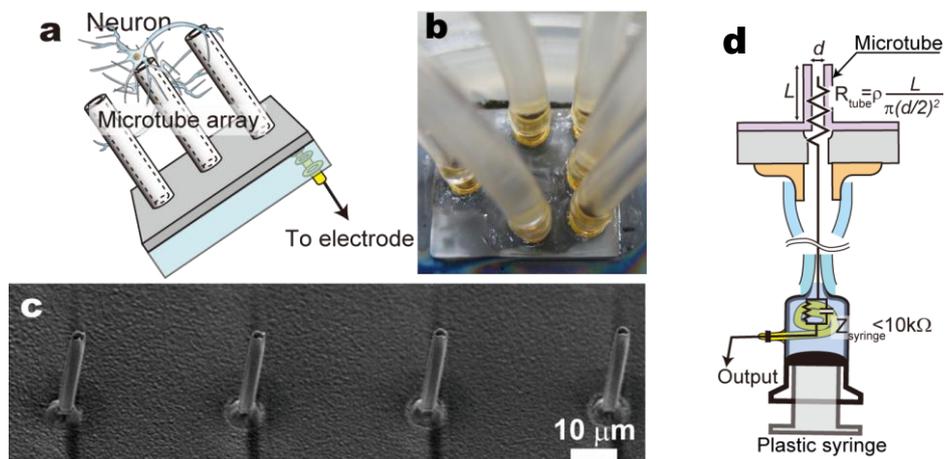


図9. マイクロチューブ神経電極アレイ。(a)概念図、(b)パッケージ概観(デバイス背面)、(c)チューブアレイの電子顕微鏡写真、(d)チューブ電極システムの等価回路。

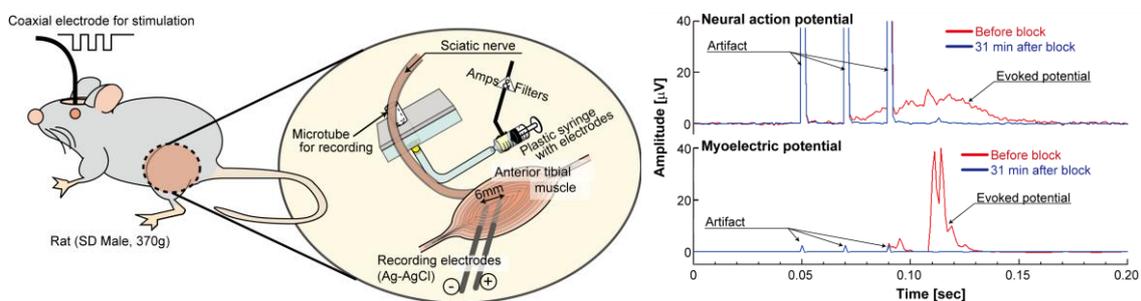


図10. マイクロチューブ電極による坐骨神経誘発活動電位計測。

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ●論文詳細情報

#### 【国内論文誌】

なし

#### 【国際論文誌】

- 1) M.Futagawa, T.Iwasaki, T.Noda, H.Takao, M. Ishida K.Sawada:  
“Miniaturization of Electrical Conductivity Sensors for a Multimodal Smart Microchip”,  
Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, p.04C184, (2009), doi:10.1143/JJAP.48.04C184.
- 2) A. Ikedo, T. Kawashima, T. Kawano, and M. Ishida:  
“Vertically aligned silicon microwire arrays of various lengths by repeated selective  
vapor-liquid-solid growth of n-type silicon”,  
Applied Physics Letters, Volume 95, No.3, 033502, (2009), doi:10.1063/1.3178556
- 3) K. Takei, T. Kawashima, T. Kawano, H. Kaneko, K. Sawada and M. Ishida:  
“Out-of-plane Microtube Arrays for Drug Delivery—Liquid Flow Properties and an Application to  
the Nerve Block Test”, Biomedical Microdevices, Vol.11, No.3, pp.539–545, (2009),  
doi:10.1007/s10544-008-9259-3.
- 4) K. Takei, T. Kawano, T. Kawashima, K. Sawada, H. Kaneko and M. Ishida:  
“Microtube-based Electrode Arrays for Low Invasive Extracellular Recording with a High  
Signal-to-noise Ratio.” Biomedical Microdevices, Vol. 12, No. 1, pp. 1387-2176, (2010)  
doi: 10.1007/s10544-009-9356-y
- 5) T. Kawano, T. Harimoto, A. Ishihara, K. Takei, T. Kawashima, S. Usui and M. Ishida:  
“Electrical Interfacing between Neurons and Electronics via Vertically-integrated Sub-4  
Micron-diameter Silicon Probe Arrays Fabricated by Vapor-liquid-solid Growth.” Biosensors and  
Bioelectronics, Vol. 25, No. 7, pp. 1809-1815, (2010), doi:10.1016/j.bios.2009.12.037
- 6) A. Goryu, A. Ikedo, M. Ishida and T. Kawano:  
“Nanoscale Sharpening Tips of Vapor-liquid-solid Grown Silicon Microwire Arrays.”  
Nanotechnology, Vol. 21, No. 12, 125302, (2010), doi: 10.1088/0957-4484/21/12/125302

#### 【in press.】

- 1) M. Futagawa, T. Iwasaki, Mi. Ishida, K. Kamado, Ma. Ishida and K. Sawada:  
“A Real-Time Monitoring System Using a Multimodal Sensor with an Electrical Conductivity  
Sensor and a Temperature Sensor for Cow Health Control”, Japanese Journal of Applied Physics, in  
press.

### (4-2) 知財出願

- ① 平成21年度特許出願件数(国内 2件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 15件)