

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いく。

2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 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

マイクロセンサノード素子は、集積回路化した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集積化システムである^{1), 4), 5)}。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・スマートセンサの開発を行った。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。本年度、図 1 のように、温度センサ、RF 送信器、オンチップアンテナを一体化したワイヤレス・スマート温度センサの開発を行った。

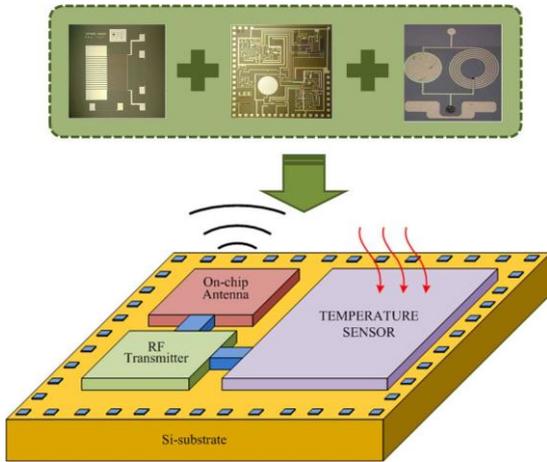


図 1. ワイヤレス・スマート温度センサ
デバイスの概念図

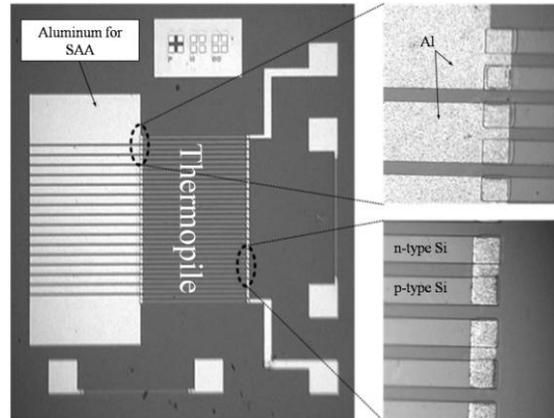


図 2. 駆動電力が不要な熱電型
集積化温度センサ

本デバイスの温度センサ部は、物質内の温度差が起こる際に物質両端に熱起電力(電圧)が発生するゼーベック効果(Seebeck effect)を用いた熱電センサ[図 2]を用いている。この方式は、センサ駆動電源が不必要であるという利点があり、限られた電力で動作するマイクロセンサノードへの一体化に適する。集積化される RF 送信器は、パルス幅変調方式を用いており、パルス幅変調部、パルス幅変調用のリングオシレーター部(中心周波数 300MHz)より構成される。図 3 は設計・製作したワイヤレス・スマート温度センサデバイスのチップ写真である。本チップは伝送する情報をパルス幅変調し、変調された信号の“High”信号のみリングオシレーターを駆動させ、オンチップアンテナから送信するので、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行ってゆく。

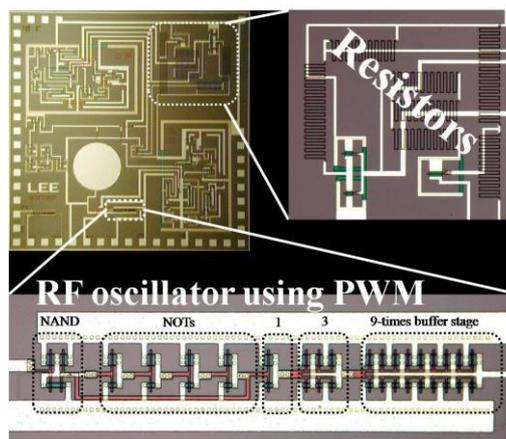


図 3. パルス幅変調送信器

(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²⁾。様々な材料^{3), 7), 9), 12), 14), 16), 17), 18)}を用いて各種センサ^{8), 11), 13), 15)}を実現できる。本年度に開発したセンサは、pH センサ、電気伝導度センサ、温度センサの 3 種類のセンサを、縦 5mm、横 5mm の大きさのチップ上に形成しているのが特徴である。図 4 に製作したチップ写真を示す。このチップを用い、無線センサシステムを外部モジュール回路で形成し、リアルタイムに信号出力ができるようなシステムの構築を行った。

アナログ信号処理回路は、各センサの感度に応じて個々に信号の増幅率を調整できるように、設計している。無線機にはクロスボー社の送受信機を用い、小型なシステムとなるような構成となっている。データ収集用のプログラムは、無線機のデータ送信が連続~1 回/日と幅広い設定が可能となるよう、開発を行った。このシステムを用い、試験的に牛の第一胃にセンサモジュールを入れ、リアルタイムでのデータ収集の有無を確認したところ、無事無線電波を外部で受信でき、電気伝導度などの信号を収集することに成功した。

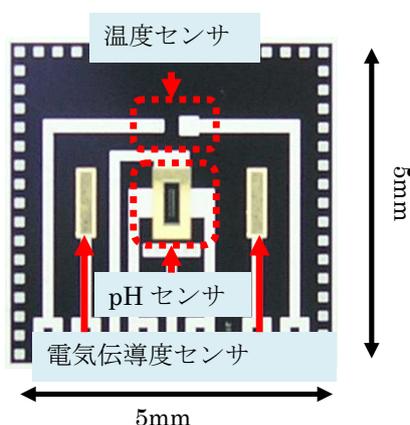


図 4. マルチモーダルセンサ チップ写真

(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) シリコンマイクロプローブ電極アレイを用いて局所網膜電位図 (ERG) の多チャンネル記録を行った。記録試験には 8 チャンネルのプローブデバイス、鯉網膜を用いた。各チャンネルより、局所 ERG 波形を記録できており、これは空間的 (2 次元) な記録試験の可能性を示唆する結果であった。現在は大規模なプローブアレイの製作 (25 チャンネル以上) も進めており、更に今後は多焦点刺激を用いた多入力多出力による網膜の時空間局所応答分布特性の解析を進める。網膜生理実験には、理化学研究所、中京大学グループの協力を得た。

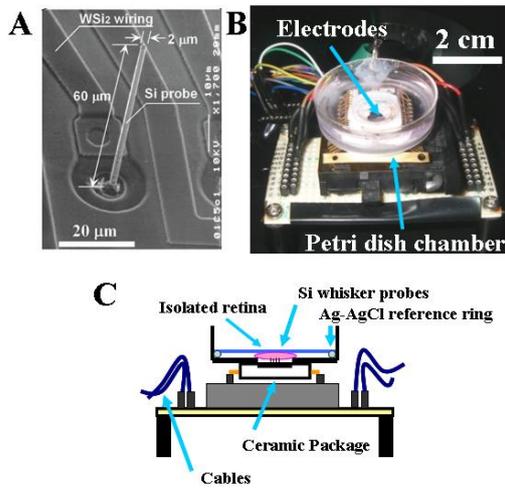


図5 シリコンプローブ電極アレイを実装した記録チャンバ

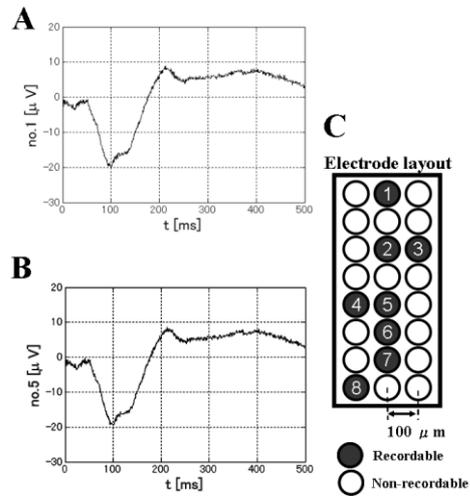


図6 局所網膜電位図のマルチチャンネル記録例

(b) 生体組織内埋め込み型3次元プローブの研究を継続し行った⁶⁾。電気的特性において、材料抵抗率の観点よりプローブ接続界面の特性を調査し、微小信号である細胞電位の記録が可能であること結論付けた。これらの研究成果に関しては、国際会議1件で発表した。また、この製作手法を展開し、プローブアレイ型の局所、多点、埋め込み型の圧力センサプローブアレイの製作に着手しており、現在はP型シリコンのピエゾ効果を用いた圧力検出に成功している。

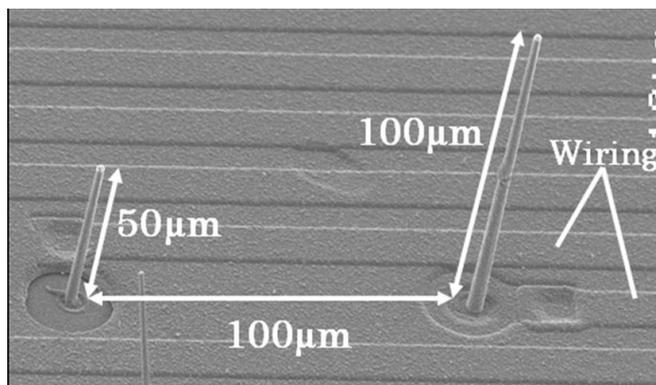


図7 多段階(50、100μm長)プローブの集積化

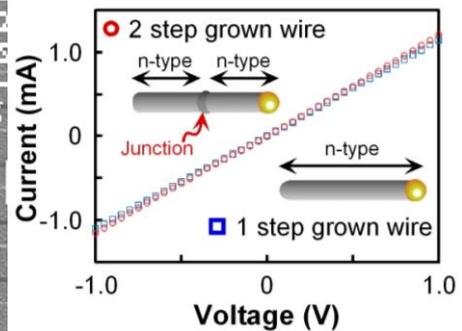


図8 多段階プローブの電氣的比較と検討

(c) 刺入型マクロチューブ¹⁰⁾の薬液投与特性評価、神経薬液ブロック実証を行った。内径2.5~6.4μmの微小なチューブ薬液特性(純水)においては、0.5~1μL/minの流出特性をチューブ内圧数十kPaで実現できることを数値的に求めた。デバイスの実用性を考慮し、チューブを介した麻酔液神経ブロックの実証実験を行った。

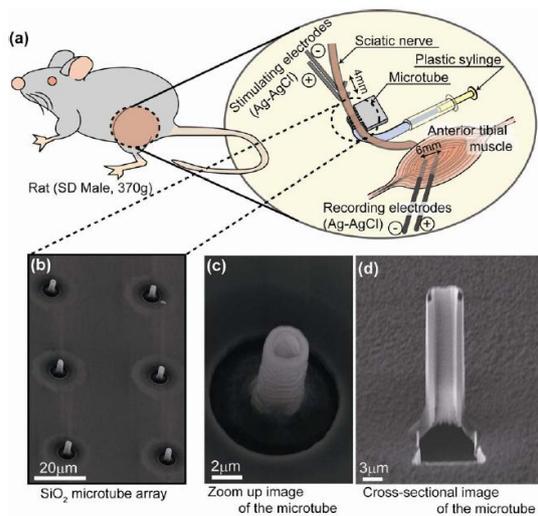


図9 マイクロチューブを介した麻酔液神経ブロックの実証

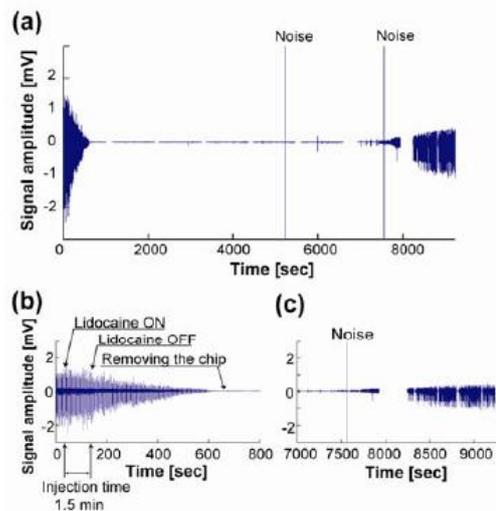


図10 マイクロチューブを用いたラット坐骨神経薬液投与

ラット坐骨神経へリドカリン投与を行い、投与前・後において筋活動の停止を確認している。今回はチップ外部より薬液を搬送したが、将来的には完全無線制御下での、On-chip マイクロポンプを用いた完全埋込み型の薬液投与システムチップが提案出来る。これらの研究成果に関しては、国際会議1件、学術論文1件で発表した。ラット生理実験には、産業技術総合研究所の協力を得た。

3. 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

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

【国内論文誌】

1. W.H. Lee, J.W. Kim, H. Takao, K. Sawada, and M. Ishida: “Neo-Transmitter Using Pulse Width Modulation(PWM) Method for Wireless Smart Sensor”,電気学会 E 部門(センサ・マイクロマシン部門)論文誌, vol.128, No.1, pp.7-11, (2008).

【国際論文誌】

1. Yuki Maruyama, Kazuaki Sawada, Hidekuni Takao, Makoto Ishida :“A Wide Dynamic Range Photogate-Type Active Pixel Sensor Using a Self-Regulation Principle”,Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47 No. 1, pp. 173-178, (2008).
2. Wang Hoon Lee, John Wan Kim, Hidekuni Takao, Kazuaki Sawada, and Makoto Ishida : “Neo-Transmitter Using Pulse Width Modulation(PWM) Method for Wireless Smart Sensor”,IEEE transactions on Sensors and Micromachines, vol.128, No.1, pp.7-11, (2008).
3. Mikinori Ito, Daisuke Masunaga, Daisuke Akai, Kazuaki Sawada, and Makoto Ishida : “Comparison of the growth behavior of γ -Al₂O₃ thin films grown on Si(111) by molecular beam epitaxy using N₂O and O₂”,Journal of Crystal Growth, Vol. 310, Issue 2, pp. 372-377, (2008).
4. Minoru Sudou, Hidekuni Takao, Kazuaki Sawada, and Makoto Ishida :“A NOVEL RF INDUCED POWER SUPPLY SYSTEM FOR MONOLITHICALLYINTEGRATED UBIQUITOUS MICRO SENSOR NODES”,Sensors & Actuators (A), Vol. 145-146, pp. 343-348, (2008).
5. H Takao, Radhakrishna V., Y Ito, F. Komakine, K. Serge, K. Sawada, M. Ishida : “Low-Noise Fully Differential Amplifiers Using JFET-CMOS Integration Technology for Smart Sensors”,IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Volume 3, Issue 3, pp.274-280, (2008).
6. Kuniharu Takei, Takahiro Kawashima, Takeshi Kawano, Hidekuni Takao, Kazuaki Sawada, and Makoto Ishida :“Integration of out-of-plane silicon dioxide microtubes, silicon microprobes, and on-chip NMOSFETs by selective Vapor-Liquid-Solid growth”,Journal of Micromechanics and Microengineering, 18 035033 (9pp), (2008).
7. Mikinori Ito, Nariya Okada, Masashi Takabe, Mikihiro Otonari, Daisuke Akai, Kazuaki Sawada, and Makoto Ishida : “ High sensitivity ultrasonic sensor for hydrophone applications, using an epitaxial PZT film grown on SrRuO₃/Pt/ γ -Al₂O₃/Si” ,Sensors and Actuators (A), , Vol. 145-146, pp.278-282, (2008).
8. M.S. Kim, H.D. Kim, H.D. Seo, K. Sawada, M. Ishida :“The Effect of Acupuncture at PC-6 on the Electroencephalogram and Electrocardiogram”American Journal of Chinese medicine, Vol. 36, pp. 481-491, (2008).
9. Yiping Guo, Daisuke Akai, Kazuaki Sawada & Makoto Ishida :“The performance of Pt bottom electrode and PZT films deposited on Al₂O₃/Si substrate by using LaNiO₃ film as an adhesion layer”,Solid State Communications, Vol. 145, pp. 413-417, (2008).
10. Kuniharu Takei, Takahiro Kawashima, Kazuaki Sawada, and Makoto Ishida :“Out-of-Plane Micro Tube Arrays for Biomedical Sensors using Vapor-Liquid-Solid Growth Method”,IEEE Sensors Journal, pp.470-475, (2008).
11. S.R. Lee, Y.T. Lee, K. Sawada, H. Takao & M. Ishida :“Development of a disposable glucose biosensor using electroless-plated Au/Ni/Copper low electrical resistance electrodes”,Biosensors and Bioelectronics, Vol. 24, pp.410-414, (2008).

12. S. Woo, H. Hong, S. Kim, H. Kim, J. Kim, H. Jeon, C. Bae, T. Okada, K. Sawada, M. Ishida :“Characteristics of Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors with HfO₂/SiO₂/Si and HfO₂/SiO_xNy/Si Stack Structures Formed by Remote Plasma Technique”Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, pp. 6196-6199, (2008).
13. Kwon, H.-C.; Kwon, D.-H.; Sawada, K.; Kang, S.-W :“The Characteristics of H⁺-Ion-Sensitive Transistor Driving With MOS Hybrid Mode Operation”,IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 29, NO. 10, pp.1138 – 1141, (2008).
14. Md. Shahjahan, K. Sawada, and M. Ishida :“TEM Study of RTD Structure Fabricated with epi-Si/ γ -Al₂O₃ Heterostructure”,Thin Solid Films, online publication 27 August (2008).
15. Seung Ro Lee, Kazuaki Sawada, Hidekuni Takao, and Makoto Ishida : “An enhanced glucose biosensor using charge transfer techniques”, Biosensors and Bioelectronics, Vol. 24, Issue 4, pp.650-656 (2008).
16. Yiping Guo , Daisuke Akai, Kazuaki Sawada, Makoto Ishida and Mingyuan Gu:“Dielectric and tunable properties of highly (110)-oriented (Ba_{0.65}Sr_{0.35})TiO₃ thin films deposited on Pt/LaNiO₃/SiO₂/Si substrates”, Journal of Sol-Gel Science and Technology, DOI: 10.1007/s10971-008-1831-z (2008).
17. E. G. Camargo, K. Ueno, T. Morishita, H. Goto, N. Kuze, K. Sawada & M. Ishida"Performance Improvement of Molecular Beam Epitaxy Grown InSb Photodiodes for Room Temperature Operation", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 11, pp. 8430-8433, (2008).

【Accepted】

Kuniharu Takei, Takeshi Kawano, Takahiro Kawashima, Kazuaki Sawada, Hidekazu Kaneko, Makoto Ishida : “Out-of-plane microtube arrays for drug delivery - Liquid flow properties and an application to the nerve block test -”, Biomedical Microdevices, Accepted (2008).

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 13 件)