

ERATO 前中センシング融合プロジェクト事後評価（予備評価）報告書

【研究総括】 前中 一介（兵庫県立大学大学院工学研究科／教授）

【評価委員】（五十音順）

今仲 行一（技術研究組合NMEMS技術研究機構／理事長）

保坂 寛（東京大学大学院新領域創成科学研究科／教授）

益 一哉（委員長；東京工業大学ソリューション研究機構／教授）

吉田 康一（産業技術総合研究所 健康工学研究部門／研究部門長）

評価の概要

ERATO 前中センシング融合プロジェクトは、高集積化・低消費電力化を進めたセンサデバイスや、センサが取得した信号を安全に処理・伝達できる情報ネットワークを開発し、それらを統合することにより、人体装着型デバイスを用いた人体活動管理システムの基盤技術を創出するものである。具体的には、生体が置かれている環境や生理的反応などを高精度に検出する他種類のセンサデバイスの研究開発を行うとともに、デバイスの電源管理から利用者を解放できるよう、電力供給や低消費電力化に関する研究を行っている。また、センサから得られたデータを解析して生体の状況を把握する手法や、構築したセンサネットワークを通じて安全かつ迅速に得られた情報を伝達する手法の確立を目指す。最終的には、これら技術を統合して、絆創膏型の生体モニタリングデバイスの試作を行い、その有用性を検証することを目指している。

研究開発にあたっては現行の最先端技術をベンチマークとし、例えばシステム全体の消費電力においてはその10分の1、汎用部品の組合せに比べると4桁小となる目標値を掲げ、多数の要素技術の開発を促進した。具体的には、PZT（チタン酸ジルコン酸塩）誘電体薄膜の微細加工技術の確立や、バッチ処理による静電誘導（エレクトレット）およびNdFeB磁性薄膜を用いた振動型発電機の開発など、汎用性のある優れた部品技術を新たに開発した。また融合のための必要技術が、材料とプロセス、信号電圧、ピーク電流、信号帯域の整合であることを示した。

それぞれのデバイスの用途ならびに機能を限定、特化することで、大幅な低消費電力化の可能性を示したことは産業技術として意義が大きい。これらは既存技術の地道な改良と異なる機能デバイスのインテグレーションにより実現した成果であり、実用的確実性も期待できる。今後、医療分野だけでなく、物流・家電などの省エネルギーに貢献するなど、産業的、経済的価値を創出する可能性が十分にあると考えられる。また、研究開発の遂行にあたり、適切なベンチマークを設け、それを上回る性能を目指した手法も効果的であったと評価できる。これらの成果は、前中研究総括のリーダーシップにより得られたものであると評価する。

ただし、得られた融合技術は、現時点ではプロジェクト内のノウハウに留まる段階である。残り1年の研究期間を含む今後の研究活動において、必要に応じ他機関の協力も得て、広く活用できるよう普遍的、汎用的な形で整理されることを期待したい。

以上から、本プロジェクトが優れた研究水準を示したことを認め、戦略目標「安全・安心な社会を実現するための先進的統合センシング技術の創出」に資する十分な成果が得られると判断する。

1. 研究プロジェクトの設定・運営

1-1. プロジェクトの全体構想

本プロジェクトの基本構想は、小型軽量、超低消費電力の絆創膏状、貼り付け型生体モニタリングデバイスを開発し、その有用性を検証するというものである。

明確な目標を立てることにより、MEMS をはじめとする要素技術開発を推進している。具体的には、現行の最先端技術と目されるベルギーIMEC の Human++ システムを研究開発のベンチマークとし、消費電力においてその 10 分の 1、汎用部品の組合せに比べると 4 桁小の 10 μ W という、挑戦的な目標値を掲げている。

全体構想に基づき、従来の課題であった長期間メンテフリーを実現すべく、超低消費電力のセンサ、処理回路、無線伝送技術、ストレスフリーの実装方法などを新たに企図し、総合性能が最大となるように各要素技術の最適化を行っている。製造プロセス、信号電圧、ピーク電流、平均消費電力、帯域、S/N 等をすり合せ、加工からソフトウェアまで、詳細に仕様を定めている。またセンサやマイクロ発電など、まずは複数の候補を選出し、徐々に目的に最適な方式を絞り込んでいく手法も的確で、納得性のある運営が行われている。

このように本プロジェクトは、研究総括の優れた構想に基づく挑戦的な取組であり、研究活動との有益な相乗効果を生み出していることを高く評価する。

1-2. プロジェクトの枠組みや研究体制、および研究活動の状況

本プロジェクトは、センサグループ、PZT 応用グループ、マイクロパワーグループ、システムグループの4つの研究グループ¹から構成され、いずれも前中研究総括の本務先である兵庫県立大学書写キャンパス（兵庫県姫路市）内の、オープン実験棟およびインキュベーションセンターを研究実施場所として活動している。

プロジェクト運営上の特徴として、前中研究総括は、各グループが完全に独立して研究項目に取り組むのではなく、各グループに属する研究者が有機的に連携しながら、2. に列挙する各研究テーマに取り組むスタイルを採っている。これは、各グループが対象とする技術領域および各研究者の守備範囲が大幅に重なるためであるが、グループ間の垣根を越えた各研究者の連携によって、より良い研究成果の創成だけでなく、幅広い経験蓄積や知見の向上を促し、人と人の融合をも図るという、プロジェクト名に込められた目標を実現するための方策でもある。

センサ、無線、発電、集積回路のそれぞれの分野で有力な若手研究者を集め、明確な目標を設定することにより、各研究者のモチベーションを高めている。また部品仕様を最適化するために、前述のとおりグループ間で技術のすり合せを行い、それにより研究者の視野を広めている。拠点が地方都市であり、近隣での人材確保が難しい中で、最大限の人材確保を行っている点は評価される。さらに、PZT 微細加工技術の予想以上の進展に伴い、途中段階で独立したグループを設置することとし、研究を加速する柔軟なマネジメントが行われている。これらの取り組みは、前中研究総括のリーダーシップによるものと評価できる。

その上で、部品性能を極限まで引き出し新規なものを創出するために、全要素技術に精通したリーダーが研究を運営している。これは、ハイテク町工場の運営形態にも通ずるものであり、技術底辺の浅い新興国には真似の難しい、我が国に適した開発体制の好例であ

¹ プロジェクト開始時には素子グループ、マイクロパワーグループ、回路グループ、ソフトウェアグループの4グループであったが、研究の進展に応じ、2010年度より再編を行い現在に至っている。

る。産業全体の底上げには、小集団が得意分野を活かす分散型の技術革新が適していると考えられ、本プロジェクトは成功例であると評価できる。

2. 研究成果

2-1. 研究テーマ① MEMS センサ

本研究テーマは、多種類のセンサを、最終的には同一基板上で集積することを想定して、最適設計、試作・評価を行うことを目標としている。このうち、振動/ショックセンサの開発においては、難加工性材料である PZT 誘電体薄膜の微細加工技術を確立するという、特筆すべき成果も得られた。

センサの開発において、検出対象に対して複数方式のセンサを試し、それらのうちから徐々にターゲットに向けて絞り込んでいくという姿勢は評価できる。センサとしての目新しさには欠けるとしても、革新的なセンサ創出は現状望み難く、むしろ既存のセンサをどのように小型、薄型に改良していくかという挑戦が本研究の主眼であり、進捗も妥当だと考えられる。

一方、センサ自身の小型化、薄型化といった進化に伴い、温度特性等の負の要因も明らかになってきた。今後は同一ウエハ上に各種のセンサを融合・集積するフェーズに入るが、進展を期待したい。接合技術は保有しているとのことだが、最終的な成果が確実に得られるよう、実際に接合した場合の寄生容量等について、実験による確認が望まれる。また、残り1年の研究期間での目標達成を確実にするためには、各センサの完成度（開発の進捗具合）を明確にし、各センサの許容消費電力等の適切な規定、配分が早期に行われることを期待する。

次に、本研究テーマで進展した基盤技術について述べる。主な成果としては、PZT 微細加工技術の開発、直列型 PZT による発生電圧の増大、直列型 PZT による3軸加速度ほか光・温度・湿度・圧力・振動各センサの実現が挙げられ、新たな技術的な知見を示している。

PZT 薄膜の微細化は、機械量センサ小型化の本命技術であり、低消費電力振動センサを始め各種センサに応用できるため、健康分野だけでなく、物流、建築、家電などにも利用できると思われる（ただし、今回製作されたセンサは作り易さが優先されているため、医学的ニーズに応えるか否かは、更なる検証が必要と思われる）。本プロジェクトで開発された高感度構造とその微細加工技術は、独創的かつ有用であり、その波及効果は大きいと評価できる。アクチュエータとしての利用も有望である。

pn 接合の技術は、光センサ、太陽電池、温度センサ、脈波センサに応用できるものである。応用性の広い製造技術を開発し、それらを用いて多種のセンサの実現の見通しを得たことについても、達成度、今後への期待共に高い。

センサ革新の事業的な影響力は大きく、これら応用の広い基盤技術を開発し、実際にいくつかの応用を実証したことは、MEMS の新たな発展を起こすものと期待される。

また派生的に得られた成果として、ナノニードルと、結晶異方性 RIE の物性は興味深く、今後の進展も期待できる。

2-2. 研究テーマ② マイクロ発電

本研究テーマは、貼り付け型生体モニタリングデバイス用の自立電源の構築を目指すものであり、具体的には研究テーマ③で試算された、貼り付け型デバイス動作に必要な平均

電力である $10\mu\text{W}$ の電力を、環境発電技術により得ることを目標としている。

新たな発電機構造とデバイス製造方法を考案しており、アイデアは斬新である。ポテンシャルの高い研究として、その貢献は大きい。また、環境発電は使用環境によって最適方式が変わり得るため、複数の発電方式を同時検討した点も評価できる。技術の見通しに応じて行われた方針転換も適切である。

評価時点の発電量は微小であり、目標達成の見込みは薄い。しかし、絆創膏型センサシステムを MEMS 発電で稼働することができれば、実用性の有無に関わらずインパクトは大きい。残る研究期間では、デバイスの改良だけでなく、充電時間を長く確保するなど、使用方法の工夫について重点的に検討が行われることを期待する。

4 インチウエハ上のバッチ処理によるエレクトレット型および NdFeB 磁性薄膜を用いた振動型発電機の開発は特筆すべき成果で、新しい加工技術として価値が高い。

エレクトレット型の発電体で、エレクトレット材料を 3 次元加工せず、フラット型の方式を見出した成果は大きい。なお、バネの強さと静電ギャップ、発電量にはトレードオフがあり、サイズを規定すれば自ずと最大発電量が決まるものと思われ、早急に設計指針を明確にされることが望まれる。また、電磁誘導型振動発電の検討も続いているが、最終成果に向けてはエレクトレット型に絞り込んでもよいのではないかと期待される。

設計においては、電圧を大幅増大させる磁極、電極構造を考案しており、MEMS 発電の研究の参考になると思われる。環境発電の研究は近年世界中で活発に行われているが、本プロジェクトの成果は其中でトップレベルにある。

マイクロ発電は、MEMS 技術の応用として産業界から注目されており、健康、物流、家電の管理など、様々な産業分野での応用が期待される。本研究の共通基盤技術としての有用性は大きく、使用目的やコストといった課題はあるが、本プロジェクト成果が事業化に至る可能性も十分にあり得る。

ただし、最終形センサの消費電力が $10\mu\text{W}$ で十分であるかという点については、常に検証しながらプロジェクトを推進していただきたい。特に、一段と大電力が必要になれば、方式変更や、複数個使いなどの検討が必要となり、最終的なセンササイズが変わる可能性もあるため、プロジェクト全体への大きな影響が避けられず早期の検証が望ましい。また逆に、消費電力 $10\mu\text{W}$ での駆動が確認できれば、ボタン電池でも十分な実用耐用年数を満たすと思われる。その場合はマイクロ発電を省くことも可能となり、センサーネットワークビジネスに大きなインパクトを与えることも期待される。

2-3. 研究テーマ③ 集積回路

本研究テーマでは、貼り付け型生体モニタリングデバイス用の集積回路システムの構成を最終目標として、各種センサの信号処理と変調、無線通信を実施可能な集積化システムのための極超低消費電力型のアナログ・デジタル混載集積回路を開発している。

人体装着生体センサに用途を絞ることで、機能の特化と回路構成の単純化を図り、低消費電力化に成功している。特に、従来消費電力の支配部分であったアナログ回路と無線回路での低消費電力化で、著しい成果を得ている。使用側からの要求性能と、技術的に実現可能な目標性能に近いレベルに達しており、設計上は目標をほぼ達成している。

実現性能に基づき、第 1 期（要求性能を満足する回路の製作）から第 2 期（低消費電力化）へと目標を進化させ、着実に問題点を絞り込んだ上で、既に 7 割程度の進捗を達成したことは評価できる。CMOS 試作も的確なプロセス技術を利用していると判断できる。

超低消費電力集積回路の開発においては、センサおよび RF インタフェイスなどのアナログ回路で著しい成果を上げ、またデジタル部では電池残量に応じて動作モードを 3 段階に変えるパワーマネジメント機能を導入し、システム全体の低消費電力制御を行っている。

現状トップの IMEC/Human++ との比較で 10 分の 1 の超低消費電力化を射程内に納め、世界最高水準の実現を間近にしたことは高く評価できる。他のセンサネットワークの研究グループへも、大きなインパクトを与えることが期待される。

アナログ、デジタル、RF を一体化した集積回路技術は、センサネットワークの基本技術であり、この LSI 単独でも十分に実用化を期待できる。また、機能を絞って最適設計を行うことで、従来の加工技術によってもデバイスの消費電力を大幅に削減可能と示したことは、実用上の意義が大きく、CMOS 回路技術における低消費電力化の流れに十分沿っているものであり評価できる。

ただし、定常状態からの逸脱時のみ駆動・データ送信する従来のイベント型センサと比べ、心臓異常等の検知は、リアルタイム性が要求され難易度が高い。この点で集積回路が採用する「時分割・多重化」と矛盾が生じる恐れはないか、今後の実証研究を通じてより明確になることを期待したい。

また、センサの容量変化が pF レベルもの大きさであるとは考えにくいように思われるが、C-V 変換でなく C-f-V 変換が必要とはならないか。その場合は設計変更を要するため、確認を望みたい。

さらにパワーマネジメントに関し、満充電でない状態で検知対象の身体異常が発生するとセンシング不可能になる恐れがあるが、その場合どのように対処するかも明確にして頂くことを希望する。

回路技術に対しては、システム構築や応用側からは常に要求が出続けることが通例であるため、いつの時点でどこまでを回路に組み込むかについては常に検討しつつプロジェクトを推進していただきたい。

2-4. 研究テーマ④ 基板と実装

本研究テーマは、センサや回路のプラットフォームとなる「絆創膏」を形成するための粘着層付き柔軟／伸縮基板、およびその基板上に電気回路を形成するための柔軟電極や柔軟基板内に形成できるセンサ、そして回路やセンサを実装する技術を開発するものである。

柔軟性が高く、曲面に貼り付けることが可能な基板の作成、特に凹凸を用いた部品実装方法はオリジナリティが高い。また、基板の柔軟性を機械量センサに利用する発想も独創的である。

現時点での成果は他グループに比べ少ないが、本テーマにおいては、革新的な技術創出のみ取り上げて評価することは難しく、むしろ実用化への道程が主眼と言える。プロジェクト側がその点を認識した上で、実用化に向けた課題を明確にしたことこそが成果であり、進捗も妥当だと評価する。

柔軟基板は汎用技術として広く応用できるが、本研究でどこまでフレキシブル性にこだわるべきかという点は、今一度検証が望まれる。また、基板に採用している PDMS (Poly-Dimethyl Siloxane) の生体適用性についても精査されたい。

2-5. 研究テーマ⑤ ラージモデルとデータ収集およびデータ処理

本研究テーマは、市販のセンサと LSI で構成したプロトタイプを試作し、実際に体に装着あるいは貼りつけて使用することにより、本プロジェクトが目標としている貼り付け型生体モニタリングシステムのフィージビリティスタディや特有の課題を抽出、検討すると共に、実際に長時間人体に装着し、収集したデータの処理を検討するものである。

具体的な成果としては、100mm×22mm サイズのプロトタイプを製作し、常時装着セン

サの具体的なイメージを明らかにしたことが挙げられる。また、試作機で取得した心電波形により R-R 間隔の変動を 1 か月間取得し、自律神経の活性度を「見える化」している。生体情報を常時計測するツールとして期待でき、他の研究者に基礎データを提供するものと期待される。

本テーマは要素技術の仕様確認と情報発信に重要な役割を果たし、相応の成果と共に、課題も明確になりつつある。しかし、他のグループで開発した部品を使用するレベルには到達していない。また、製作した信号処理技術は既存技術の応用レベルであり、新規技術を開発し、他のグループへ反映するには至っていない。残りの研究期間では、MEMS 技術によるプロトタイプ完成を視野に入れ、できるだけ多くの要素技術成果を取り込むことが望まれる。

特に、どのようなセンサ情報の組み合わせが健康管理に有効であるのか、ラージモデルによっても依然明確ではない。センサ、回路、発電素子等の仕様決定に重大な影響を及ぼすため、最終形として融合する前に、ラージモデルでこの点を明らかにすることを期待する。

本プロジェクトでは、常時健康管理が実現しない理由を、日常健康管理データの不足による臨床研究の遅滞と、医学知識の不足によるデータ仕様設定の遅滞との悪循環にあるとしている。この問題の解決には、部品技術から社会制度まで大規模な連携が必要であり、従来具体的な進展がなかった。本プロジェクトは、小型のデータ収集機器が悪循環を断ち切るという、もう一つの想定のもとに発足している。ラージモデルは、その妥当性を社会が認知する鍵となる。絆創膏型センサシステムの情報を発信する啓蒙手段として、さらなる活用を期待する。

以上に基づき、改めて研究成果を俯瞰する。まず全体的な活動状況としては、PZT 薄膜やエレクトレット発電膜等のプロセス技術に、先見性とオリジナリティが発揮されている他、センサの小型化、薄型化に大きな成果をもたらしている。

部品レベルでは、満足のいく結果が得られている。全体システムは現時点では目標に未到達であり、「既存の装置の組み合わせでは得られない驚き」は認められないが、課題解決型の研究であることから、想定内の成果としては十分妥当であると判断する。

本プロジェクトは、明確な統合目標設定に基づく各部品の最適化に特徴がある。少人数での活動という量的な不足にもかかわらず、質において MEMS 技術集積化・統合化のトップレベルの拠点を形成できていると判断できる。

他方、何をどのように測定するのか、そのための素子の仕様、必要なエネルギー量等、定量性については常に検証が必要である。各素子への仕様配分など常に明確にしつつプロジェクトを推進していただきたい。常に仕様や目標性能を定量的に見直すことで、各研究テーマにおける最終目標がより明確になり、実用化見通しも得られる。また、他の実現手段との比較も実験結果に頼っている部分があり、原理的な理論限界、すなわち技術のポテンシャルの比較が不十分である。理論研究は現在の陣容では難しいことから、必要に応じて他機関との協力も視野に入れるべきであろう。これらの点を整理した上で、残りの研究期間で目標が達成されることを期待する。アプリケーションに関しては、プロジェクト自身でデータを蓄積して新たな知見を探求するよりも、企業等との連携の構築が早道である点も考慮していただきたい。

次に成果の科学技術的側面については、特筆すべきものとして PZT 微細加工技術の確立、MEMS バッチプロセスによる振動型発電素子の実現、超低消費電力のアナログおよびデジタル集積回路設計などが挙げられる。その結果として、消費電力 $10\mu\text{W}$ でのシステム駆動を射程内とした。これらは、将来シーズとしても大きな意義があると認められる。なお成果の論文発表に関しては、現時点では査読付き論文、特にジャーナルペーパーが少ないように思われる。成果を見る限り加速度的に成果が生み出されているので、今後多くの国際

会議や学術雑誌などで成果が公表されると期待している。インパクトファクターの高い論文への発表も期待したい。インテグレーションは要素技術を集めるだけではできず、「もの」が出来上がる背景には従来の学会ベースの公表となじまない部分も多くあることは理解できるが、「もの」づくりの発信という意味で、広く成果の公表を望む。また、分野が広いからこそ特定の学会などに限定するのではなく、多くの異なる学会も視野に入れての発表を強く期待したい。なお、知財出願は良好に行われており、今後も期待する。

一方、成果の産業・社会的側面については、我が国の喫緊の課題である超高齢社会のキー技術を具体的に示すことができたと言える。現時点では研究の域を出ないとしても、融合技術の完成からプロトモデルの開発、フィールドテストを経て、今後ビジネスになる可能性は高く期待できる。例えば、会員制の遠隔医療事業への導入や、健康だけでなく、物流、建築、家電の履歴管理など多分野において、常時計測の成果が活かされる可能性がある。具体的には、PZT 加工技術の実現性は高いと思われる。ERATO プロジェクトとしては、極めて実用性の高い成果が得られている。

現段階では統合化技術が産業界で使える形に整理されていないことは認識していただきたい。今後、ノウハウの普遍化ということを強く意識してプロジェクトを推進すると、産業界へのインパクトが生まれると思われる。また、本プロジェクトでは、目標設定は興味あるが、その過程は細部のすり合せによる性能向上が主で、産業を革新するブレークスルー技術は少ないとの批判があるかもしれない。しかし、融合化、集積化により生み出されたデバイスやシステムによって創出されるであろう「新たな驚き」があることも見方のひとつである。要素技術やシステム構築だけではなく、人体信号の測定技術、情報処理技術などの分野へより注力することが望まれる。

3. 総合評価

絆創膏型の生体モニタリングデバイスという具体的な目標を設定し、従来課題であった長期間のメンテナンスフリーを実現すべく、多数の要素技術の開発を促進した。具体的には、特に PZT や薄膜磁石の微細加工において、特筆すべき優れた部品技術を開発している。また融合のための必要技術が、材料とプロセス、信号電圧、ピーク電流、信号帯域の整合であることを示している。

デバイスの用途を限定し、機能を特化することで、汎用部品の組合せに比べ4桁もの低消費電力化の可能性を示したことは、産業技術として意義が大きい。これらは既存技術の地道な改良と異なる機能のインテグレーションにより実現しており、実用的確実性からは、極めて高い成果を生み出している。

研究開発の遂行にあたり、現行世界最先端レベルの無線センシングシステムである IMEC（ベルギー）の Human++ システムをベンチマークとし、それを上回る性能を目指した手法は効果的であり、高く評価できる。

本プロジェクトでは、部品性能を極限まで引き出すには、加工からソフトまで、細部を熟知した少数集団が必要なことを実証した。これは我が国の製造業が得意とし、技術底辺の浅い新興国には真似の難しい開発手法である。本プロジェクトは、産業再生のための人材育成と組織のモデルケースを示した好例である。

これらの成果は、前中研究総括のリーダーシップによるものと判断し、十分な研究マネジメントが行われたことを高く評価する。

プロトタイプが作製されれば、MEMS、センサ、健康産業等への大きなインパクトとなる。プロトタイプを目標に、残り研究期間ならびに他の研究資金の活用を進めることが望まれる。10年から15年後において、医療分野だけでなく、物流・家電などの省エネルギー

一に貢献するなど、産業的、経済的価値を創出する可能性は十分にある。

本プロジェクトの特徴である製品機能の特化が、市場を狭める方向にはたらく一方、特化のための融合技術は汎用的である。ただし現時点では、本プロジェクトの成果は汎用化まで達せず、プロジェクト内のノウハウに留まる段階である。この原因は、理論モデルによる設計値の検証や手法の抽象化よりも、「もの」づくりへの注力を優先したためだと考えられる。今後は、残り1年の研究期間を含めて、必要に応じ他機関の協力も得て普遍化を進め、汎用的な形に整理することを切に期待する。

残りの研究期間では、生体への常時装着や複合センサならではの長を生かし、本システムならではの健康阻害リスクの発見や、新たな診断項目の提案など、ソフト面での新たな価値の創造にも期待する。この点では、企業等との連携構築も有効と考えられる。

また、研究成果の発表に関しては、知財出願は良好である。現時点では査読付き論文が少ないが、成果から判断すると今後より多くの発表が期待できる。分野が広いので特定の学会に限定せず広く成果を発表していただきたい。

以上、全体の研究テーマ設定、運営状況、研究活動およびその成果を総合的に判断し、**ERATO** 前中センシング融合プロジェクトが優れた研究水準を示したことを認め、戦略目標「安全・安心な社会を実現するための先進的統合センシング技術の創出」に資する十分な成果が得られると判断する。

以上