

**研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP)**  
**ステージ I : 戦略テーマ重点タイプ**  
**研究開発テーマ「IoT、ウェアラブル・デバイスのための環境発電の  
実現化技術の創成」**  
**事後評価報告書**

**総合評価            A**

**総合所見**

本研究開発テーマは、近い将来の実現が期待される IoT 社会（あらゆるモノがインターネットで繋がる新たなセンサネットワーク社会）において、環境中に設置される各種センサ・通信デバイスに必要な小型自立電源技術に焦点を当てたものである。工場／オフィス／住宅／交通システム／その他のインフラ、さらに人間自身への装着を含め、自然環境中に大量のセンサや通信デバイスが配置され、生み出される膨大な情報（ビッグデータ）がインターネットを通して集積・分析されて、必要なところに配信される新たなネット社会が現実になりつつある。一方で、これらデバイスの電源を如何に確保するかが大きな課題となっている。デバイスの低消費電力化は今後も進展していくと推測されるが、様々な環境中に多数のデバイスを設置することを勘案すると、配線の敷設や電池の充電・交換が不要な「その場にあるエネルギー」を活用する環境発電、特に小型で低コストな環境発電技術が有力な電源候補となり得る。

また、人とインターネットを繋げるウェアラブル・デバイス（例えば、腕時計型、パッチ型、テキスタイル型などの体表面密着型の生体データ計測デバイス）が注目されている。しかしながら、生体情報をセンシングする機能、デバイスとしての使い易さ、顧客ニーズを満足するサービスの提供などの点で未だ十分ではなく、本格的に普及しているとは言い難い。このような状況の下、環境発電技術の飛躍的な発電性能向上と共に、ウェアラブル・デバイスへの適合性を高める「実現化技術の創成」をゴールとする本研究開発テーマの狙いは、ウェアラブル・デバイス市場の創出と拡大の契機となる可能性があり、その意義は高い。

現時点でウェアラブル・デバイスの利用が見込まれる大きな市場は、超高齢化社会を見据えた健康管理、人の見守りなどのヘルスケア分野であるが、その前段階として比較的円滑に普及が進むと考えられるスポーツ分野を初期ターゲットに置いた点、また想定外のコロナ禍の影響で実現困難になったが、東京オリンピック 2020 での露出機会の活用を狙った点は、開発方針が明確で戦略的であった。そのような状況の中で、研究進度と市場性を適宜見直し、研究目標を的確に修正して研究開発テーマを推進した点は評価できる。

採択された 4 つの研究開発課題においては、研究開発テーマ終了時点で確立した技術レベル、目標性能の達成レベルは各々異なる。2 つの研究開発課題では開発技術の特性を評価し、最終ターゲットを見直してウェアラブル・デバイス以外の領域へ展開を図った。これらの点を含め、研究開発テーマ全体としては、今後の産業創出が期待される技術確立（または

その見通しの獲得) のレベルに到達したと判断できる。

具体的には、研究開発課題①「ジャイロ効果を利用したウェアラブル発電システム」(以下、「ジャイロ発電」) では、小型化と身体動作を想定した低周波角振動での発電に対し、目標を超える出力を達成し、ジャイロ発電技術を確立した。当初目標とした空調服用途では二次電池との差別性が低下したため、新たに波力発電への適用による海洋 IoT 分野に展開し、今後の実用化の見通しを得た。

研究開発課題②「スポーツを対象としたウェアラブル圧電型振動発電モジュールの開発」(以下、「振動発電スマートシューズ」) においては、大手シューズメーカーとデバイスメーカーを開発体制に加え、圧電素子と圧力センサを内蔵したスマートシューズのデモサンプルを完成させた。但し同用途については、市場動向を見極める段階に留まった。今後スマートシューズ以外への応用も含め、どのように製品化に繋げるか、そのシナリオの明確化が期待される。

研究開発課題③「3次元圧電単結晶スプリングを用いた振動発電の研究開発」(以下、「3次元圧電スプリング」) では、独自技術であるマイクロ引き下げ法によるスプリング形状の圧電単結晶の作製と発電デバイスへの応用を狙いとした。モデル化合物としてサファイア単結晶のスプリング作製に成功したが、目標とする圧電材料での技術確立は未達となった。中間評価会での目標見直しを経て、スプリング型圧電単結晶の設計と特性評価のシミュレーション技術を深め、スプリング型圧電単結晶の新たな用途展開(アンテナ/無給電センサ)の可能性を見出して、関係企業との共同化を進めた。

研究開発課題④「バイオ燃料電池を搭載したウェアラブルヘルスケアデバイスの創成」(以下、「バイオ燃料電池」) では、体液(汗など)を燃料とするバイオ燃料電池の要素技術、評価技術、実用化技術の開発を目標通り達成した。世界トップレベルの発電性能を実現し、共同する企業において、ヘルスケアデバイスの製品化を目指すレベルに到達した。

また学術における成果では、4つの研究開発課題全体で、査読論文77件(国内/海外:21件/56件)、学会口頭発表245件(178件/67件)を始め、受賞、メディア掲載、展示会出展で研究成果をアピールし、国内外で評価を高めた。一方、知的財産に関しては、中間評価報告書での指摘を踏まえて開発技術の特許出願を強化し、実質的な出願数増(3件から10件)に繋がった。但し、社会実装を最終ゴールに見定める研究開発テーマであることを考慮すると、総合的な知財戦略は問題ないレベルとは言い難く、十分な知的財産領域の確保、グローバルビジネスを意識した海外出願の推進などで課題を残したと考える。今後の知財戦略の強化・推進を期待する。

## 1. 研究開発テーマのねらい(目標)について

本研究開発テーマでは、近い将来のIoT社会におけるウェアラブル・デバイス普及に向けて、必要不可欠な構成要素となる低コストで小型・軽量・フレキシブルな環境発電型電源の実現化技術の創成を目標とし、新たな産業創出に繋がる技術の確立を目指した。

ウェアラブル・デバイス普及において、対象となる最重要分野はヘルスケア市場である。日本では、社会の超高齢化が高スピードで進展しており、65歳以上の高齢化率は2050年には約38%に達すると予測されている。高齢化社会においては医療費・介護費などの社会的経

費の増大が予想され、これら経費の高騰を未然に抑制する取り組みは、喫緊の課題である。そのための施策として、高齢者の健康寿命の延伸が有効であり、Quality of Life の向上と共に、今後対策すべき重要課題となっている。

これに対し、ヘルスケアやメディカル分野を対象にしたウェアラブル・デバイスの普及が、今後ますます加速すると予想される。その際、ウェアラブル・デバイス自体の小型化、装着時の快適化、長時間の安定動作などの高性能化に加え、センシングした生体データのネット接続による転送、AI技術によるデータの解析・診断、さらにその情報を元にした健康管理や健康指導などのサービスビジネスへと展開される可能性が高い。

現在、数社から上市されている二次電池を使用した腕時計型ウェアラブル・デバイスは、血中酸素濃度や心拍数の計測、心電図の記録、睡眠状態のモニタリングなどの機能を有し、約 24 時間の連続使用が可能となっている。毎日の健康状態が使用者に明示され、生活習慣の改善に有用なデバイスとして普及が始まっている。

これらの現状を踏まえ、本研究開発テーマの狙い「ウェアラブル・デバイスのための環境発電の実現化技術の創成」は、ウェアラブル・デバイスの小型化、高性能化、低コスト化に貢献し、同デバイスの普及を促進する意義ある目標であった。一方、今後の周辺デバイスの新たな機能付与、低消費電力化の動向を見据えて、市場において競合する二次電池技術に対する特長を明確にし、その優位性の向上を意識しておくことも必要である。

## 2. 研究開発テーマのマネジメントについて

P0 は、本研究開発テーマの期間 6 年を 2 年毎に 3 つのフェーズ（第 1 フェーズ：研究開発方針へのアドバイス、第 2 フェーズ：課題間の連携強化、第 3 フェーズ：実用化検討と体制強化）に分ける運営方針の下、各フェーズにおける指導・支援の内容を変えて、研究開発の進度に応じたマネジメントを実施した。特に最終の実用化検討・体制強化フェーズでは、P0 が主宰するエネルギーハーベスティングコンソーシアムの会員を始め、関係企業との連携を積極的に推進させた。また開発技術の適性を見定め、ウェアラブル・デバイス用電源以外への応用についても的確に支援した。

研究開発課題に対しては、定期的な進捗報告会議、サイトビジット、中間評価会の開催、および実施報告書の精査により、進捗状況の把握と評価、研究開発計画の見直しを適切に進めた。また研究の進捗と共に、外部環境による研究価値（産業創出の核となり得るか、イノベーションに資する成果であるか、社会・経済に対するインパクト）に変化が生じた場合は、研究開発課題の目標を見直し、また研究開発課題の継続／非継続を適正に判断した。

特に研究開発課題③「3次元圧電スプリング」については、第 1 回中間評価を踏まえ、研究期間を短縮して基礎研究の位置付けに再設定し、研究成果の創出と新たな用途探索を重点化させた。第 2 回中間評価時に基礎研究としての成果（スプリング単結晶の特性評価と発電原理の検証）と新たな用途の可能性（スプリング形状を活かしたアンテナ／無給電センサ）を確認したことをもって、非継続とした点は妥当であったと判断する。

4 つの研究開発課題において、課題内の連携は何れの課題においても綿密に図られており、特に問題は認められない。課題間の連携については、参画企業における秘密保持に関わる問題があり、必ずしも十分とは言えないが、市場情報の共有など、可能な範囲で連携を進めた。

また中間評価報告書における指摘事項に対応して、知的財産に対する取り組みの強化を図り、実質的な特許出願増に繋げている。

4つの研究開発課題の推進に当たり、サイトビジット、中間評価会などを活用して積極的に各課題に関わり、それぞれの進捗に合わせて的確に支援している。想定外の外部要因（コロナ禍の影響）で、方針変更を余儀なくされた点も見受けられるが、全体的なマネジメントは適切であったと評価できる。

### 3. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立状況

産業創出の核となる技術の確立に関しては、4つの研究開発課題によりその達成度に差異は認められるが、研究開発テーマ全体として、ほぼ目標の成果を達成したと考えられる。具体的な成果の概要は、以下の通りである。

研究開発課題①「ジャイロ発電」では、小型化と共に、身体動作を想定した低周波角振動により、目標を超える出力を達成し、ジャイロ発電技術を高いレベルで完成させた。目標性能に到達したが、当初製品ターゲットとした空調服などでは、1日使用後に充電可能な二次電池に対する差別性が低下したため、新たに波力発電への適用による海洋IoT分野を探索し、実用化の見通しを得た。波力による自立発電を元に、海洋に関わるデータを継続的に取得・発信し、利用価値の高いビッグデータの構成とAI技術による解析で、気象予報、海洋資源探査、防災など、様々な分野への展開が期待される。ウェアラブル・デバイス用途ではないが、小型化・軽量化と高出力のジャイロ発電の特長を活かし、具体的な使用実績を重ねることで、新たな産業創出に貢献する技術となる可能性がある。また今後、発電デバイスとしてのサイズ・形状、使用法などの設計範囲を広げることができれば、海洋IoT分野以外の市場を含め、社会実装へのポテンシャルがいつそう高まると推測する。

研究開発課題②「振動発電スマートシューズ」では、ウェアラブル振動発電デバイスの実用化技術の確立とその検証を目指し、開発した PZT 厚膜素子の振動発電モジュールと圧力センサを内蔵したスマートシューズのデモサンプルを作製した。ランニング状態で有効な発電量と計測データの BLE 通信を実証したが、ターゲットとしたスポーツシューズ用途に対して、圧力センサのコスト・入手性と市場ニーズを見極める段階に留まった。今後産業創出に結び付けるためには、開発技術の完成度を高めると共に、スポーツシューズ以外の市場も含め、そのビジネスモデルの明確化と実用化シナリオの策定を進める必要がある。

研究開発課題③「3次元圧電スプリング」では、従来にない新構造の圧電振動発電デバイスの開発を目指し、保有するマイクロ引き下げ法の技術を利用して、スプリング形状の圧電単結晶の実現を目標とした。サファイアを使用し、スプリング状単結晶の作製に成功したが、目標としたランガサイト系を始め、圧電材料での汎用的な技術確立には至っていない。一方、2回の中間評価会での目標見直しを経て、スプリング型圧電単結晶の設計・シミュレーション技術を深めると共に、新たな用途展開（アンテナ／無給電センサ）の可能性を見出した点は評価できる。

研究開発課題④「バイオ燃料電池」では、体液（汗など）を燃料とするバイオ燃料電池の要素技術、評価技術、実用化技術を目標通り確立し、世界トップレベルの発電性能を実現した。具体的にヘルスケアデバイスとして、チームに参画した企業が製品化を検討するレベル

まで到達している。生体情報センシングと情報伝送を兼ねる超薄型のウェアラブル・センサとして展開できれば、産業創出の可能性がいっそう高まる。またチーム内で分担し確立した各要素技術（多孔質炭素材料、各種酵素群、インク・印刷技術など）は、バイオ燃料電池以外でも多くの産業分野で利用が可能と考える。論文投稿、学会発表、特許出願においても、特段の成果が認められた。

上記4つの研究開発課題で開発・確立した技術を元に、今後実用化段階に入る際には、改めて市場価値の評価と合わせ、製品としての耐久性・安全性・生産性（コスト含）の検証が必要である。そのためには、企業との連携がこれまで以上に重要となる。企業と連携し社会実装を進める上では、開発技術の優位性と市場価値（顧客ニーズとのマッチング、さらなる発展性・汎用性）を明示し、技術を高めていくことが重要である。その際には、海外を含めた戦略的な知的財産確保の取り組みを合せて期待したい。

#### 4. その他

環境発電技術に対しては、IoTデバイス、特にウェアラブル・デバイスにおける小型自立電源として大きな期待が寄せられている。一方で、発電能力が未だ十分でないこと、また二次電池との差別性が明確でないケースがあることから、その用途が限定される場合がある。今後デバイスの低消費電力化が進むと共に、使用場面の拡大が期待されるが、同技術の社会実装を加速する上では、その特長を明示し、二次電池に対する優位性付与に着目した研究開発が重要である。

また本研究開発テーマでは、2つの研究開発課題（①「ジャイロ発電」、③「3次元圧電スプリング」）で開発技術の特長を見定め、ウェアラブル・デバイス以外への展開を進めた。同様に他の研究開発課題でも、当初想定された対象製品以外に開発技術を有効に使用できる分野が存在し得ると考える。既に本研究開発テーマ期間内で展示会、エネルギーハーベスティングコンソーシアムでの技術紹介に取り組んできたが、さらに開発技術に対する理解を拡げる上で、技術をアピールする機会（関心を持つ企業との出会い／シーズとニーズの出会い）やその方法を検討し、積極的に周辺分野に踏み出す取り組みを進めてもよい。

一方、研究開発テーマの成果を社会実装に繋げる上で、産業化を担う企業サイドから見れば、開発技術に関する権利化状況が重要なポイントとなる。何を権利化し何をノウハウとして秘匿するか、またその知財権やノウハウをどの組織がどのように社会実装や事業化に活かすかなど、連携する企業と総合的な知財戦略の策定を進めることが必要となる。

今回、中間評価以降で知財戦略強化に向けた取り組みがあり、特許出願数が増加した。今後さらに、海外出願の強化も含め、開発技術の戦略的な権利化を進めて頂きたい。大学で特許出願の環境が十分でないことは理解できるが、環境発電の実現化技術の創成を目標とした本研究開発テーマにおいて、論文投稿、学会発表を行うだけでなく、連携する企業と共に総合的な知財戦略を重視し推進することは重要である。また本件に関し、引き続き JST からのサポートをお願いしたい。

以上