

研究成果展開事業
ー研究成果最適展開支援プログラムー
(A-STEP)

戦略テーマ重点タイプ

研究開発テーマ
「I・O・T、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」

テーマ事後評価用資料

令和3年6月11日

目次

1. 研究開発テーマ	1
(1) 研究開発テーマの概要	1
(2) プログラムオフィサー (P0) による公募・選考・研究開発テーマ運営にあたっての方針	1
2. プログラムオフィサー (P0)	4
3. 採択課題	5
4. 研究開発テーマのねらい (目標)	7
5. 研究課題の選考について【参考】	8
6. アドバイザーの構成について	11
7. 研究開発テーマのマネジメントについて	13
(1) P0 の運営方針	13
(2) 研究開発テーマの進捗状況の把握	14
(3) 研究開発テーマの研究開発計画の見直し	18
(4) 中間評価基準と研究開発を継続させた／継続させなかった根拠	18
(5) 課題内・課題間の連携の推進	20
(6) 研究開発課題の評価と評価結果に基づく指導	20
(7) 研究費の配分	22
(8) テーマ中間評価結果を踏まえた対応	22
8. 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	24
8. 1 ジャイロ効果を利用したウェアラブル発電システム	24
(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果	24
(2) 最終目標の達成度	25
8. 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 ..	26
(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果	26
(2) 最終目標の達成度	27
8. 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	28
(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果	28
(2) 最終目標の達成度	28
8. 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 ...	29
(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果	29
(2) 最終目標の達成度	30
9. 総合所見	33

1. 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」（平成 27 年度発足）

（１）研究開発テーマの概要

あらゆるモノがインターネットにつながる IoT を実現するためには、あらゆるモノに電源が必要です。電源配線敷設や充電・電池交換が技術的にあるいはコスト的に困難なケースも少なからずあり、代替となる低コストで普遍的な電源技術の確立は急務となっています。そのような代替電源技術の 1 つが、環境中に存在する光、振動、温度差、電波などの様々なエネルギーを電気エネルギーに変換する、環境発電技術です。

IoT 関連技術のなかでも、近年、技術開発が急速に進んでいるものの 1 つがウェアラブル・デバイスです。ウェアラブル・デバイスは、スポーツ、健康管理、医療、見守り、作業効率化、エンタテインメントなど様々な用途への展開が始まっていますが、充電や電池交換の手間が普及の障害となっています。環境発電技術の活用によってウェアラブル・デバイスの無給電化が実現すれば、上記用途を始め、人間以外（家畜、ペット、野生動物、さらには植物、無生物）へのウェアラブル・デバイス適用などによる、新たな産業の創出が期待されます。

ウェアラブル・デバイス向けの環境発電技術には、発電性能だけでなく、超小型、低コスト、軽量、フレキシブルなどの特性が求められます。さらに、テキスタイルへの実装、洗濯耐久性、生体適合性などが要求される場合もあります。このような多様な要求を満たす環境発電技術の開発成果は、ウェアラブル・デバイス以外の IoT 用途への展開も可能でしょう。サイバーフィジカルシステムを社会実装するうえで、各種センサや通信デバイスの省電力化に伴い、超小型、低コスト、軽量でフレキシブルなどのポテンシャルを有している環境発電技術は重要な基盤技術となることが期待できます。

本研究開発では、ウェアラブル・デバイス向けの超小型、低コスト、軽量、フレキシブルな次世代環境発電技術の実現化技術を創成することにより、新たな産業創出の礎となる技術確立を目指します。

（２）プログラムオフィサー（P0）による公募・選考・研究開発テーマ運営にあたっての方針

①基本方針

本研究開発では、環境発電技術の飛躍的な性能向上に資する研究開発をベースとしつつ、それと同時に、ウェアラブル・デバイスへの適合性を高めた実用的なデバイス化に向けた実用化の基盤となる技術を創成します。そのためには、環境発電技術に関する確固たるシーズを持つ大学などと、実装面での技術・経験に長けたデバイスメーカーとの緊密な協力が必須となります。さらにこれら 2 者に加えて、ウェアラブル・デバイスの活用を検討されている製品製造業者、サービス事業者の参画を得て、要求仕様の提示やフィードバック評価を得ながら、方向性を修正しつつ実用化を見据えた研究開発を推進する研究開発体制を推奨いたします。

課題の実施にあたっては、研究開発チーム間の連携、情報共有を推進します。機密保持には配慮しつつ、課題間で成果などを可能な限り共有し、テーマとしての成果最大化を図ります。必要に応じて採択課題間の協力を要請しますので、対応していただきます。

②大学などの要件と期待される研究内容

核となる環境発電技術の開発を実施する大学などは、環境発電技術に関する確たるシーズを持っていることが必要です。たとえば、JSTの「CREST」・「さきがけ」あるいは、科学研究費補助金などでの研究実績、査読付き論文、特許出願実績などを示してください。このシーズをもとに、飛躍的な発電性能の向上に取り組んでいただきます。さらに、ウェアラブル・デバイスへの適合性向上への取り組みも歓迎いたします。また、発電デバイスと蓄電デバイスの一体化や、電源回路の工夫による発電性能の画期的な向上などの研究も歓迎いたします。デバイスメーカーとの緊密な協力により、研究開発を実施してください。

③デバイスメーカーの要件と期待される研究内容

将来、環境発電技術の製品化を目指すデバイスメーカーは、ウェアラブル・デバイスへの実装技術を有する必要があります。ウェアラブル・デバイスの開発実績は必須ではありませんが、活用可能な自社技術を示してください。研究開発の内容としては、ウェアラブル・デバイスへの適合性を高めるための周辺技術の開発や、大学などが開発した環境発電技術のウェアラブル・デバイスへの実装技術の開発などが想定されます。また、一般に、環境発電デバイスは、外部環境からエネルギーを取り込む機構と、それを電気エネルギーに変換する機構の組み合わせからなりますが、その一部機能を分担して環境発電技術の性能向上に関する研究を行うことも可能です。蓄電デバイスや電源回路についての考え方は前述のとおりです。大学などとの緊密な協力により、研究開発を実施してください。

④製品製造業者、サービス事業者の要件と期待される研究内容

将来、ウェアラブル・デバイスを活用した製品、サービスの提供を目指す事業者は、ウェアラブル・デバイスの適用・活用が可能な、製品あるいはサービスを提供している必要があります。これら製品、サービスに対するユーザーニーズや発電環境に関する知見あるいは調査に基づき、大学など及びデバイスメーカーに対して、研究開発の方向性を示すための要求仕様の提示やフィードバック評価を行うことを期待します。

ウェアラブル・デバイスを活用したサービスとしては、人に対するもの、動物に対するものなど、いろいろと考えられますが、今回の公募においては、特にスポーツを対象とした提案を歓迎します。アスリート向けに特定競技の技量向上を支援するものから、基礎体力の増進やリハビリテーションへの活用など、様々なサービスが考えられます。2020年の東京オリンピック・パラリンピックへの関心の高まりも視野に入れたデモンストレーションなどを実施可能な計画を歓迎します。

⑤研究開発の目標設定

発電量、大きさ、コスト、重さ、フレキシビリティなどについては、一律の基準は設けません。目指すウェアラブル・アプリケーションを示したうえで、それを実現するための研究開発の目標設定をしてください。発電量については、環境中から得られるエネルギー量や実装

しようとする構造などを踏まえて、既存技術に基づく現時点での想定値及び研究開発によって達成しようとする目標値を示してください。機器の消費電力については、製品化の時期には既存技術の10分の1程度になっていると想定しますが、もし、より消費電力を低減できる見通しがあれば、そのような想定にもとづいて目標設定をすることも可能です。目指すウェアラブル・アプリケーションについては、ボタン電池などの既存技術を利用する場合と比較してメリットがあることを示してください。

研究開発の成果は、特定のウェアラブル・アプリケーションに適用されるだけでなく、広く社会的あるいは経済的なインパクトをもたらすことが期待されますので、そのようなビジョンを示してください。

2. プログラムオフィサー (P0)

竹内 敬治 (株式会社 N T T データ経営研究所 社会・環境戦略コンサルティングユニット シニアマネージャー)

3. 採択課題

※「企業責任者」および「研究責任者」の氏名、所属機関（括弧内記載）は課題終了時点。

※下線はプロジェクトリーダー（課題の取りまとめ役）を指す。

課題名	課題概要	企業責任者 ※
		研究責任者 ※
ジャイロ効果を利用したウェアラブル発電システム	人や移動体の振動から電力を生成する発電機を開発し、健康増進や作業補助に利用します。小型軽量の装置で大電力の発電を行うため、高速回転するロータを振動させて、ジャイロ効果により低周波、低加速度の振動から大きな慣性トルクを取り出します。ウェアラブルサイズの装置で 1Hz 程度の振動から、10mW～1W の電力を得ることを目指します。本装置を靴、ベルト、衣服、ザックなどに装着してランプ、携帯電話、生体センサ、微弱無線などを駆動させます。	谷口 博昭 (精技金型株式会社)
		<u>保坂 寛</u> (東京大学)
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	圧電型振動発電素子をセンサとして利用することで、自立動作可能なセンサ素子の開発を行います。特に高い運動エネルギーの供給が可能であり、今後運動機能の計測ニーズが高まると予想されるスポーツシューズへの応用を想定したセンサ機能内蔵振動発電モジュールの開発を行います。軽量・高出力と共に高い柔軟性と耐久性を備えた素子の設計・試作に加え、得られた情報の活用について体系的な検証を行います。	田中 隆 (パナソニック株式会社)
		<u>神野 伊策</u> (神戸大学)

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	『圧電結晶を用いた3次元スプリング構造』により、ウェアラブル・デバイスに適した小型、軽量でかつ柔軟性に優れた振動発電デバイスを実現します。圧電体をスプリング構造にすることで、人の動作に共振する低周波共振に対応しながらも、デバイスサイズの大幅な小型化を図ることが可能となり、その柔軟性により必ずしも共振現象によらない、人の動作による変形を利用した発電をも可能にする革新的な振動発電デバイスを実現します。	井上 憲司 (株式会社Piezo Studio)
		吉川 彰 (東北大学)
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	環境や身体に安全な酵素を利用し、体液に含まれる糖分、乳酸から電力を取り出す“バイオ燃料電池”を開発します。さらに、その出力値をもとに体液中の成分をセンシングする自己駆動型ヘルスケアデバイスの開発を行います。これにより、アスリートの疲労管理や真夏時の熱中症見守りなど、電池交換を不要とし、また、薄くて軽く装着感を感じさせない、ウェアラブルヘルスケアデバイスの実現を目指します。	小出 哲 (株式会社タニタ)
		四反田 功 (東京理科大学)

4. 研究開発テーマのねらい（目標）

IDCによると、2015年第3四半期（本研究開発テーマ開始時）の世界ウェアラブル・デバイス出荷台数は2100万台であったが、5年後の2020年第3四半期には、世界ウェアラブル・デバイス出荷台数は1億2503万台に達し、5年間で約6倍、年平均成長率40%以上と予想を超えて市場が成長した。今後も2桁成長を続ける見通しである。Apple Watchなどにパルスオキシメーターが搭載され、2022年には血糖値センサの搭載が予想されるなど、高機能化が進む一方で、ヒアラブルデバイスの普及も進み、複数のウェアラブル・デバイスを身に着けることに対する心理的抵抗も下がってきている。今後は益々ウェアラブル・デバイスの普及が加速し、電源技術の重要性も高まると予想される。

本研究開発テーマにおいては、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を目指す。広くはIoT全般に活用可能な電源技術の創成により、新産業の創出を狙うものであるが、近未来においては、まずはウェアラブル・デバイスへの展開を想定して目標設定を行った。本研究開発が6年度間実施された後に、事業化に向けた開発期間が必要であり、本格的な市場投入時期は、遅くともテーマ開始の概ね10年後、2025年頃と考えている。2020年代前半には、ウェアラブル・デバイスの機能が飽和状態となる一方で、電子デバイスの低消費電力化が進むことで、電池の充電頻度は低下していくだろう。この時点では、積極的に充電しつつウェアラブル・デバイスを使いこなすアーリーアダプター層への普及は一段落していることが予想される。充電の手間がなくなることがマジョリティ層への普及の動機付けとなるこのタイミングにおいて、環境発電技術はウェアラブル・デバイス普及への大きな原動力となろう。

したがって、概ね10年後のウェアラブル・デバイス普及期において、本研究開発の成果が身を結ぶことを期待するところであるが、本研究開発実施期間においても、2020年の東京オリンピック・パラリンピック開催という絶好の露出機会を有効に活用していくことを想定し、公募時の方針でも、特にスポーツを対象とした提案、2020年の東京オリンピック・パラリンピックへの関心の高まりも視野に入れたデモンストレーションなどを実施可能な計画を歓迎すると明記した。新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の影響により、スポーツ関連のアピールは難しくなったが、ヘルスケア、メディカル関連のウェアラブル・デバイスへの適用は加速すると期待される。

ウェアラブル・デバイスには、現時点でも、スポーツをはじめ、健康管理、医療、見守り、作業効率化、エンタテインメントなど様々な用途があり、長期的には、人間拡張（Human Augmentation）の実現に向けて、益々多用途に活用されていくことが予想される。人間拡張のひとつの到達点である2045年のシンギュラリティ（日本では「AIが人知を超える」と誤解されているが、レイ・カーツワイルの主張は「生命と機械の融合」）、さらにHuman以外への様々なAugmentationが広がる際にも、電源は必ず必要であり、本研究開発テーマの採択課題の成果活用による産業創出が期待される。

5. 研究課題の選考について【参考】

研究課題の選考にあたっては、研究開発内容や目標、産業創出のインパクトなどを重視するのはもちろんのことであるが、研究開発体制は特に重要と考え、公募にあたり、以下の3者からなる研究開発体制を求めた。

- (1) 環境発電技術に関する確たるシーズを持っている大学等
- (2) ウェアラブル・デバイスへの実装技術を有するデバイスメーカ
- (3) 将来、ウェアラブル・デバイスを活用した製品、サービスの提供を目指す事業者

A-STEP は産学連携プログラムであるため、(1)の大学等と(2)の民間企業がチームを構成することは必須要件である。本研究開発では、さらに、(3)のユーザ企業の参画も応募に必要な条件とした。これは、参画するユーザ企業から、研究開発の方向性を示すための要求仕様の提示やフィードバック評価が得られることが、研究開発の推進においても、また、研究開発後の事業化フェーズにおいても、非常に重要となると考えたからである。

短期間の公募期間内に、テーマに合致した研究課題や推進体制を練り上げることは困難であったと思われるが、13件の応募を得、その中から、アドバイザーの意見も踏まえ、以下に示す4件の課題を採択した。

① ジャイロ効果を利用したウェアラブル発電システム

人や移動体の振動から電力を生成する発電機を開発し、健康増進や作業補助に利用する。小型軽量の装置で大電力の発電を行うため、高速回転するローターを振動させて、ジャイロ効果により低周波、低加速度の振動から大きな慣性トルクを取り出す。ウェアラブルサイズの装置で1Hz程度の振動から、10mW~1Wの電力を得ることを目指す。本装置を靴、ベルト、衣服、ザックなどに装着してランプ、携帯電話、生体センサ、微弱無線などを駆動させる。

ジャイロ効果を利用して角振動（回転振動）入力から発電する方式は、単純往復振動から発電する振動発電方式と比較して、同一体積で100倍以上の発電ポテンシャルがある。人間の運動は回転運動の組み合わせで構成されているため、様々な装着位置でジャイロ発電の適用可能性がある。ジャイロ効果自体は19世紀の物理学であるが、効率的な発電デバイスとして実装するための理論解析・設計や、実用的なデバイスとするための小型化実装技術については、取り組むべき課題も多い。

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

圧電型振動発電素子をセンサとして利用することで、自立動作可能なセンサ素子の開

発を行う。特に高い運動エネルギーの供給が可能であり、今後運動機能の計測ニーズが高まると予想されるスポーツシューズへの応用を想定したセンサ機能内蔵振動発電モジュールの開発を行う。軽量・高出力と共に高い柔軟性と耐久性を備えた素子の設計・試作に加え、得られた情報の活用について体系的な検証を行う。

スポーツシューズに特化し、プロトタイプを開発して実用性検証を行う課題である。単に靴で発電するだけであれば、体重を利用可能な靴は容易に発電できるため、本研究開発で取り組む意味はない。本課題では、市場ニーズとのマッチングも想定し、シューズメーカーを体制に加えて利用者提供までを見据えた取組を行う。研究開発期間は、他の課題よりも短く、4年度間である。本研究開発の採択課題の中では、実装に比重を置いた、最も早期に実用化を目指す取組である。

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

『圧電結晶を用いた3次元スプリング構造』により、ウェアラブル・デバイスに適した小型、軽量でかつ柔軟性に優れた振動発電デバイスを実現する。圧電体をスプリング構造にすることで、人の動作に共振する低周波共振に対応しながらも、デバイスサイズ的大幅な小型化を図ることが可能となり、その柔軟性により必ずしも共振現象によらない、人の動作による変形を利用した発電をも可能にする革新的な振動発電デバイスを実現する。

独創的だが、実用化に向けたハードルは非常に高い、チャレンジングなテーマである。本研究開発テーマの採択課題の中では、基礎研究に比重を置いた取組である。

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

環境や身体に安全な酵素を利用し、体液に含まれる糖分、乳酸から電力を取り出す“バイオ燃料電池”を開発する。さらに、その出力値をもとに体液中の成分をセンシングする自己駆動型ヘルスケアデバイスの開発を行う。これにより、アスリートの疲労管理や真夏時の熱中症見守りなど、電池交換を不要とし、また、薄くて軽く装着感を感じさせない、ウェアラブルヘルスケアデバイスの実現を目指す。

生体に対する安全性が高く、高容量なバイオ燃料電池は、ウェアラブル・デバイス用の電源としては有力な選択肢である。各種酵素、電極材料、印刷型バイオ燃料電池など開発要素が多く、実用的な性能を出すためには基礎研究から実装までの幅広い取組が必要である。

3件の課題採択を予定していたが、アドバイザーとの協議の結果、①②④の3件に加えて、フィージビリティスタディの段階ではあるが、新たな産業の創出につながる可能性のあるチャレンジングなテーマとして③も採択することとした。4件のうち、①と④は、基礎研究～実装まで一貫した取組で成果を目指す課題、②は実装に比重を置いた課

題、③は基礎研究に比重を置いた課題という構成となっている。

6. アドバイザーの構成について

氏名	所属・役職	任期
桑野 博喜	東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻 教授	平成 27 年 10 月～令和 3 年 3 月
佐々木 健	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授	平成 27 年 10 月～令和 3 年 3 月
篠原 真毅	京都大学 生存圏研究所 教授	平成 27 年 10 月～令和 3 年 3 月
前中 一介	兵庫県立大学大学院工学研究科 教授	平成 27 年 10 月～令和 3 年 3 月
森 孝雄	物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 (MANA) ナノマテリアル分野 熱エネルギー変換材料グループ グループリーダー	平成 27 年 10 月～令和 3 年 3 月
山田 由佳	パナソニック株式会社 イノベーション推進本部プロジェクト推進室 (総括担当)	平成 29 年 4 月～令和元年 3 月
吉田 郵司	産業技術総合研究所 ゼロエミッション国際共同研究センター 副研究センター長	平成 27 年 10 月～令和 3 年 3 月

※途中退任の方は退任時点の所属・役職

環境発電分野は対象領域が幅広い。アドバイザーの人選にあたっては、様々な環境発電分野の第一線で活躍する方をお願いするとともに、民間企業において研究開発やマネジメントの経験があり、実用化に向けたアドバイスがいただけるよう考慮した。

東北大学の桑野博喜教授は、「ナノエネルギーシステム創成の研究」の研究代表者を務められるなど、環境発電分野全般に関して、幅広い知見と経験をお持ちの第一人者である。また、民間企業の出身であることから、実用化・事業化に関する見識を有している。

東京大学の佐々木健教授は、メカトロニクスとセンサ技術の応用がご専門で、特に振動発電（圧電発電）に詳しく、人体通信や心拍計測にも取り組まれている。また、民間企業の出身であることから、実用化・事業化に関する見識を有している。

京都大学の篠原真毅教授は、無線電力伝送や電波発電に関して、豊富な知見と経験を

お持ちの第一人者である。また、ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアムを主宰し、民間企業と連携した活動を行っており、実用化・事業化に関する見識を有している。

兵庫県立大学の前中一介教授は、ERATO 前中センシング融合プロジェクトの研究総括・プロジェクトリーダーを務められるなど、環境発電デバイス、ウェアラブル・デバイス開発に関して豊富な知見と経験をお持ちの第一人者である。

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 (MANA) -ナノマテリアル分野 無機ナノ構造ユニット ネットワーク構造物質グループ グループリーダーの森孝雄氏は、熱電材料の研究に関して、幅広い知見と経験をお持ちの第一人者である。また、統合型材料開発・情報基盤部門 情報統合型材料設計分野 伝熱制御材料 G、MANA ナノマテリアル分野 分野コーディネーター、筑波大学客員教授、広島大学客員教授なども勤められ、研究開発マネジメントの経験も豊富である。

産業技術総合研究所イノベーション推進本部 総括企画主幹 (就任当時) の山田由佳氏は、民間企業において、熱電発電実用化に向けたプロジェクトを率いた経験をお持ちで、研究開発マネジメントにも携わり、実用化・事業化に関する見識を有している。なお、同氏は、出向元に帰任され担当業務を変わられたとのことで途中退任となった。

産業技術総合研究所太陽光発電研究センター副研究センター長 (就任当時) の吉田郵司氏は、太陽電池関連の研究開発マネジメントに携わられている他、フレキシブルエネルギーデバイスコンソーシアムを主宰し、民間企業と連携した活動を行っており、実用化・事業化に関する見識を有している。

以上述べたように、アドバイザーの方々は極めて高い研究業績や卓越したマネジメント力を有している。それらの経験を通じてサイトビジットやテーマ推進会議、中間評価において適切な助言、評価をいただいた。

7. 研究開発テーマのマネジメントについて

(1) P0 の運営方針

本研究開発を推進するにあたり、重視したことは、以下の2点である。

①研究開発フェーズに応じた支援

本研究開発が、最長6年度の研究開発期間内において、基礎的研究から実用化研究に移行するものであることから、研究開発のフェーズに対応して適切な支援を行うことを目指した。具体的には、6年度を概ね各2年の3フェーズに分けている。

- (1期) 必要に応じて研究開発方針へのアドバイスを行う。
- (2期) 必要に応じて課題間連携の支援を行う。
- (3期) 必要に応じて実用化検討・体制強化等の支援を行う。

4年度で研究開発を終了する課題もあることから、必ずしも2年間固定というわけではない。1期は、実用化に向けた研究開発方針を明確にする時期と考えており、必要に応じて研究内容や体制変更に関する支援を行う。

1期に課題ごとの研究開発方針を定めた後、2期において、課題間の連携により、テーマとしての成果最大化を図る。テーマ内の各課題や、参画企業は、競合関係にもあるため、基本的には独立した研究開発を行いつつ、可能な範囲での相乗効果発現を目指す。

2期にテーマ全体のフォーメーションを定めた後、3期においては、実用化に向けて、必要に応じて体制強化等の支援を行う。必要に応じて、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企業との連携も進める。

②研究成果の展開に向けた支援

各課題の研究開発は、6年度で終わるものではなく、その後も様々な形で継続していく。実用化研究に向かう方向だけではない。ウェアラブル・デバイス、IoT、環境発電のスコープから外れた先に、新たな研究領域が広がっている可能性もある。本テーマ終了後、各課題がさらに継続的に発展していけるように、本テーマのスコープにこだわらずに、アドバイスを行っていく。

(2) 研究開発テーマの進捗状況の把握

- ① 研究開発テーマ進捗会議（年1回）：P0、アドバイザー、JSTの出席のもと、各チームリーダーからの発表と質疑による進捗状況の把握と評価を実施した。（研究開発担当者は全員参加可能、またチーム間連携推進の役割も持つ）

開催日	開催場所	参加者
平成28年 2月24日	JST 東京本部（サイエンスプラザ） B1 階 大会議室	竹内 P0、アドバイザー：森、佐々木、前中、吉田 全課題のプロジェクトリーダー、共同研究者、 JST 坪田、千野、廣田（草）
平成28年 12月28日	JST 東京本部別館 1 階 ホール	竹内 P0、アドバイザー：森、佐々木、森、山田 全課題のプロジェクトリーダー、共同研究者、 JST 坪田、千野、廣田（草）
平成29年 8月21日	JST 東京本部（サイエンスプラザ） B1 階 大会議室	竹内 P0、アドバイザー：桑野、森、佐々木、前中、吉田 全課題のプロジェクトリーダー、共同研究者、 JST 林部、千野、廣田（草）
平成30年 9月28日	JST 東京本部別館 2 階 A2 会議室	竹内 P0、アドバイザー：桑野、佐々木、前中、森、吉田 全課題のプロジェクトリーダー、共同研究者、 JST 笹月、廣田（勝）、新田、廣田（草）
令和元年 9月11日	JST 東京本部別館 1 階ホール	竹内 P0、アドバイザー：桑野、佐々木、前中、吉田 継続中の課題のプロジェクトリーダー（保坂、井上、四反田）、共同研究者、 JST 廣田（勝）、新田、廣田（草）
令和2年 9月23日	ZOOM オンライン会議	竹内 P0、アドバイザー：桑野、佐々木、篠原、前中、森、吉田 継続中の課題のプロジェクトリーダー（保坂、四反田）、共同研究者、 JST 廣田（勝）、廣田（草）、吉田

② サイトビジット（年１回）：P0、アドバイザー、JST の出席のもと、各チーム個別にそのチームの研究参画機関全員からの進捗状況の把握と評価、研究開発施設・設備視察を実施した。なお、令和２年度は、新型コロナ感染拡大防止のため、サイトビジットに代えてオンライン会議を開催した。

サイトビジット実施状況

開催日	対象課題	開催場所	参加者
平成 28 年 7 月 8 日	四反田 PL 課題 (バイオ燃料電池)	東京理科大学 野田キャンパス 10 号館	課題担当者： 四反田 PL、相川、辻村、森谷 訪問者：竹内 P0、 JST 千野、廣田
平成 28 年 7 月 11 日	保坂 PL 課題 (ジャイロ発電)	東京大学 柏の葉キャンパス駅前サテライト	課題担当者：保坂 PL、池田、森元、 谷口、山下、山岸、浅野、勝越 訪問者：竹内 P0、 JST 千野、廣田
平成 29 年 1 月 30 日	井上 PL 課題 (圧電単結晶スプリング)	東北大学 金属材料研究所	課題担当者：井上 PL、大橋、横田 訪問者：竹内 P0、 佐々木アドバイザー、 JST 廣田
平成 29 年 3 月 8 日	神野 PL 課題 (圧電型振動発電)	神戸大学 工学部	課題担当者：神野 PL、田中、勝村、 今田、勝 訪問者：竹内 P0、森アドバイザー、 前中アドバイザー、JST 廣田
平成 29 年 6 月 1 日	保坂 PL 課題 (ジャイロ発電))	東京大学 柏の葉キャンパス駅前サテライト	課題担当者：保坂 PL、池田、森元、 谷口、山下、山岸、浅野、市ヶ谷、沖 訪問者：竹内 P0、JST 千野、廣田
平成 29 年 6 月 6 日	四反田 PL 課題 (バイオ燃料電池)	東京理科大学 野田キャンパス 10 号館	課題担当者：四反田 PL、相川、森谷、 小出、美川、重森、辻村 訪問者：竹内 P0、JST 廣田
平成 29 年 7 月 14 日	井上 PL 課題 (圧電単結晶スプリング)	東北大学 金属材料研究所	訪問側：竹内 P0、 吉田アドバイザー、 JST 廣田
平成 29 年 7 月 26 日	神野 PL 課題 (圧電型振動)	神戸大学 工学部	課題担当者側：神野 PL、寺田、梅垣、 大西、田中、勝村、今田、小西、勝

	発電)		訪問側：竹内 P0、吉田アドバイザー、JST 廣田
平成 30 年 4 月 17 日	四反田 PL 課題 (バイオ燃料電池)	株式会社タニタ 本社	タニタ：小出、蔦谷、久米川、酒井、鈴木 東京理科大：四反田 理研：美川 アイシンコスモス：重森 訪問者：竹内 P0、桑野アドバイザー、JST 廣田
平成 30 年 5 月 21 日	神野 PL 課題 (圧電型振動発電)	神戸大学 工学部	課題担当者側： 神戸大学：神野、寺田、梅垣、大西 パナソニック：田中、福井、平石 アシックス：勝、森 訪問者：竹内 P0、篠原アドバイザー、JST 新田、廣田
平成 30 年 7 月 20 日	井上 PL 課題 (圧電単結晶スプリング)	東北大学 金属材料研究所	課題担当者：井上 PL、 東北大学 吉川教授、横田准教授、大橋准教授 他 訪問者：竹内 P0、桑野アドバイザー JST 新田、廣田
平成 31 年 1 月 9 日	保坂 PL 課題 (ジャイロ発電)	東京大学 柏の葉キャンパス駅前サテライト	課題担当者： 東京大学 保坂 PL、池田、西村、森元、田島、渡邊 精技金型：谷口、山下、山岸 訪問者：竹内 P0、佐々木アドバイザー、JST 新田、廣田
令和元年 5 月 14 日	四反田 PL 課題 (バイオ燃料電池)	理化学研究所 横浜研究所	課題担当者： 東京理科大：四反田 PL、 理化学研究所 美川、他 訪問者： 竹内 P0、森アドバイザー、吉田アドバイザー、JST 新田、廣田
令和元年 8 月 7 日	井上 PL 課題 (圧電単結晶スプリング)	東北大学 金属材料研究所	課題担当者： 井上 PL、 東北大学 吉川、大橋、横田

			訪問者：竹内 P0、桑野アドバイザー、佐々木アドバイザー、JST 廣田
令和元年 11月7日	保坂 PL 課題 (ジャイロ発電)	東京大学 柏の葉キャンパス駅前サテライト	課題担当者： 東京大学：保坂 PL、池田、西村 精技金型：谷口、山下、山岸 訪問者：竹内 P0、佐々木アドバイザー、前中アドバイザー、JST 新田、廣田
令和2年8 月26日	保坂 PL 課題 (ジャイロ発電)	Skype オンライン会議	課題担当者： 東京大学：保坂 PL、池田、西村、覚張 精技金型：谷口、山下、山岸 セフト研究所：沖 訪問者： 竹内 P0、桑野アドバイザー、佐々木アドバイザー、篠原アドバイザー、前中アドバイザー、森アドバイザー、JST 廣田
令和2年9 月9日	四反田 PL 課題 (バイオ燃料電池)	Zoom オンライン会議	課題担当者： 東京理科大学：四反田 PL、Noya Loew、吉原 タニタ：小出 アイシンコスモス研究所：榎原、重森 筑波大学：辻村 理化学研究所：美川 訪問者： 竹内 P0、桑野アドバイザー、佐々木アドバイザー、前中アドバイザー、森アドバイザー、JST 廣田

③ 開発実施報告書（年1回）：

各年度の開発実施報告書の内容に関して、評価とフィードバックを実施した。

(3) 研究開発テーマの研究開発計画の見直し

採択時に指示を出したほか、年度単位で小規模な見直しを必要に応じて行ってきたが、中間評価時には、踏み込んだ見直しを行った（詳細は（4）に記載した）。

<第1回中間評価>

開催日時：平成29年11月8日（水）13:00～17:50

開催場所：会場：JST 東京本部別館 2階 会議室 E

出席者（敬称略）

プログラムオフィサー： 竹内 敬治

アドバイザー：桑野、佐々木、篠原（ご欠席）

前中、森（ご欠席）、山田、吉田

報告者： 保坂 PL、谷口、神野 PL、田中、井上 PL、吉川、四反田 PL、小出

JST： 金子、林部、新田、 廣田

文部科学省：北村、山田

<第2回中間評価>

開催日時：平成30年12月21日（金）13:00～16:10

開催場所：会場：JST 東京本部別館 4階 会議室 A

出席者（敬称略）

プログラムオフィサー： 竹内 敬治

アドバイザー：桑野、佐々木、篠原

前中、森、山田（ご欠席）、吉田

報告者： 井上 PL、吉川

JST：笹月、廣田（勝）、新田、廣田（草）

(4) 中間評価基準と研究開発を継続させた／継続させなかった根拠

全体計画書に基づく自己申告はマネジメントの指標にはなるが、研究開発そのものの妥当性は、外部的な価値による判断に基づくべきであろう。幾ら当初計画どおりに順調に研究が進展したとしても、外部環境の変化によって、研究そのものの価値がなくなっていれば、研究を継続することは適切な判断とはいえない。

よって、中間評価においては、各課題の成果が、産業創出の核となる技術となるか、イノベーションに資する成果であるか、社会・経済等に対するインパクトを有するか、

という点を、競合技術との比較も含めて重視した。

中間評価及び継続判断にあたっては、各アドバイザーの意見も真摯に受け止め、最善の結果が得られるよう、慎重に判断を行った。勿論、最終判断の責任は P0 に帰すべきものである。

今回の採択課題の中で、中間評価において研究開発の継続可否が議論になった課題は、井上 PL 課題（圧電単結晶スプリング）である。以下に継続可否判断の経緯を記す。

第 1 回中間評価の時点において、予想される発電量、デバイスサイズ、製造コストと、アプリケーション側のニーズとの乖離は大きく、当プログラムに目標として掲げている実用的なデバイス化に研究期間内で到達できる可能性は極めて低い状況であった。また、基礎研究として捉えた場合、シミュレーションの精度、解析も不十分であった。さらに、今後、実用化に向けた研究開発を行う体制も不十分であった。

この課題の継続の可否については、アドバイザーからは、課題の中止が適切という意見がある一方で、継続が望ましいという意見も出された。

現在の計画の目標を達成できたとしても、ハーベスタとしては市場性がなく事業化につながる可能性は低く、本プログラムの趣旨を鑑みれば、研究打ち切りも妥当であるが、即中止をすると、基礎研究としての取組も極めて不十分な状況で、今後の研究に対する展望も描けなくなるため、研究を 1 年間延長し、スプリング単結晶の研究基盤の確立と、独自の形状を生かした用途探索、今後の研究に関するビジョンの作成に重点化することを指示した。

この、研究開発継続の判断は、前述の「(1) P0 の運営方針 ②研究成果の展開に向けた支援」に基づき、本テーマ終了後の継続的發展を見据えたものであった。

翌年の第 2 回中間評価の時点において、基礎研究として一定の成果が示された。具体的には、サファイアを用いたスプリング形状の成長条件を体系化し、シミュレーション結果の解析により発電メカニズムを解明した。また、スプリング単結晶の特性測定と発電の原理検証を行った。さらに、スプリング単結晶の用途探索により、無給電ワイヤレスセンサとしての可能性を見出した。圧電単結晶スプリングをアンテナとして使用し、バックスキッタ通信においてスプリングの温度特性や変形に応じた変調をかけることで、無給電での遠隔センシングに活用できる可能性があり、この技術は、環境発電のスコープからは外れるが、環境発電技術と同様に、無給電で無線センサを駆動できる技術として IoT 社会の実現への寄与が期待されるものであった。

これによって、研究 1 年間延長の目的を達したこと、そして、テーマ中間評価で指摘されたように、取り組みの難易度を考慮すると研究開発を継続しても当プログラムの趣旨に合致する成果を得難いことから、研究開発の打ち切りを判断した。

しかし、直ちに研究開発を打ち切ることへの懸念が指摘されたこと、スプリング構造を生かしたアンテナ+センサという新たな用途の可能性を見出しているが、未だ検証が不十分な状況にあることから、研究打ち切りを1年後とし、残りの研究期間において、アンテナの専門家、デバイス化を担当する企業を体制に加えたうえで、アンテナ+センサの実用性検証を行うことを指示することとした。

(5) 課題内・課題間の連携の推進

課題内の連携については、いずれのグループも、緊密な情報共有や連携が図られており、P0 が支援のために介入する必要性はなかった。

一方、課題間の連携については、テーマ立ち上げ時に「情報共有規約」を締結しているものの、前述のとおり、テーマ内の各課題や参画企業は競合関係にもあるため、自主的な取組には限界がある。そこで、毎回のテーマ推進会議において、連携を促すとともに、具体的な連携のアイデアを P0 から提示するなどの取り組みを行った。

テーマ推進会議における情報共有は、保坂 PL 課題からの圧電靴のスピンオフ（「踝に発電機と LED を内蔵した安全靴」（東京都立産業技術研究センター、平成29年度中小企業の IoT 化支援事業））につながり、靴内蔵や発汗の観点で複数課題の相補性の可能性も示されるなど、有益であった。

(6) 研究開発課題の評価と評価結果に基づく指導

採択時、サイトビジット時、テーマ進捗会議時に指導・助言を行ってきた。また、第1回中間評価時及び第2回中間評価時には、進捗がはかばかしくない1課題について、計画の変更を指示した。

テーマ中間評価後は、各課題の実用化を意識した取り組みを加速するために、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（EHC）総会での発表、スポーツ・フィットネス産業の専門展示会 Sportec2018 への出展、CEATEC2019 への出展、ET & IoT Technology 2019 展への出展（EHC との共同出展）などを支援した。また、必要に応じてパートナー候補企業の紹介を行った。

各課題への個別の指導内容を以下に記す。

① ジャイロ効果を利用したウェアラブル発電システム

公募時の提案では、靴の踵にジャイロ発電機を内蔵させる計画であったが、商品性に疑問があったことから、採択時の条件として、シューズへの応用に限定せず、スポーツ用品などウェアラブル分野への応用を広く捉えた計画とするよう、計画変更の指示を行

った。それに伴い、研究課題名を「自立発電を用いた健康増進シューズ」から、「ジャイロ発電のウェアラブルデバイスへの適用」に変更するように指示した。

ある程度研究を進めた時点で、発電靴については、ジャイロ方式での商品化が困難との判断になったことを受け、靴修理資材等を扱う企業の代わりに空調服大手をプロジェクト体制に加えるよう指示を出した。

二次電池の技術進歩により、ウェアラブル用途での発電方式の優位性が薄れたのちには、海洋 IoT に取り組む企業を紹介し、海洋 IoT に向けた研究の進展を支援した。

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

進捗状況報告書に、共振周波数を下げるほど発電量が増えるとの記載があり、根拠グラフが掲載されていたが、理論的には別の結論が導ける。そこで、理論上はそういえないとの指摘をし、グラフの問題点も指摘した。結果、開発が誤った方向に向かうことを防止できた。

また、衝撃入力の場合、正弦波加振の場合とは異なって、ばねを非線形にすることによって、理論上、小さなデバイスでも発電量を幾らでも大きくできること、実用上はメリットが大きいことを指摘し、研究を進めるよう進言した。

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

具体的な応用分野が想定されておらず、採択要件に満たない提案ではあったが、発想は独創的であり、アドバイザーからの進言もあったため、他の3件に加えて、フィージビリティスタディレベルの提案として、追加で採択するという判断をした。採択件数が増えたことによって、他の3件の研究に大きな影響が及ばないように、予算額については、大きな傾斜配分を行った。

公募時の提案では、6年後に発電デバイスのプロトタイプができる計画であったが、実用化に向けた研究に向けて、フィージビリティを早期に確認するよう、中間評価までに圧電スプリングの作製及びアプリケーションにかかわる企業の参画を得るよう指示を出した。

第1回中間評価及び第2回中間評価において、研究方針及び体制の変更指示を出した。詳細は、「(4) 中間評価基準と研究開発を継続させた／継続させなかった根拠」に記載した。

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

公募時の提案では、バイオ燃料をカートリッジで供給するタイプのデバイスの開発も

含まれていた。しかし、それは、「環境発電」のテーマの趣旨を逸脱しているため、開発計画から削除し、汗などの体液を直接利用するウェアラブルな「環境発電」デバイスの研究を重点化するように指示した。その指示が、汗中の乳酸による発電で顕著な研究成果を出すことにつながったと思われる。

研究初期のサイトビジットで、モニタリングデバイスの低消費電力化が目標に未達との報告を受けた際には、事業期間内に電子デバイスのさらなる低消費電力化が見込まれるので問題ないとの認識を示し、研究継続を指示した。その後、モニタリングデバイスの消費電力は、予想通り低下し、目標達成に至った。

事業化に向けて、パートナー候補企業を数社紹介し、研究の進展を支援した。

（７）研究費の配分

予算資金及び加速資金の重点配分及び P0 裁量経費の確保と重点配分を実施した。

（８）テーマ中間評価結果を踏まえた対応

井上 PL 課題（圧電単結晶スプリング）については、第 1 回中間評価で、テーマの位置付けを基盤技術の研究に変更して継続の判断をしたが、テーマ中間評価報告書において、「研究課題の現状と難度を勘案し、継続停止の判断があっても良かった」との指摘を受けた。この指摘を踏まえ、第 2 回中間評価で継続停止の判断をするに至った。詳細経緯については、（４）に記載したとおりである。

それ以外の課題、特に最終年度まで研究継続した 2 課題－保坂 PL 課題（ジャイロ発電）と四反田 PL 課題（バイオ燃料電池）－については、テーマ中間評価報告書での指摘を踏まえ、製品化の課題の意識、代替手段に対する優位性と提供価値の明示、ユーザーニーズを踏まえたサービス、ソリューションの検討などの、実用化を意識した取り組みへの指導を行い、必要に応じパートナー候補企業の紹介も行った。

また、特許出願件数が少ない（国内 2 件、海外 1 件）との指摘を踏まえ、各課題に知財戦略の検討と積極的な出願を促した。その結果、事業期間内における出願件数は 10 件（国内 9 件、海外 1 件）となった。さらに、事業期間末において、出願に向け学内審査中の知財もある。なお、各課題の知財戦略において、当面はあえて出願を見送り、市場が顕在化してから出願するという判断を行った知財もある。

なお、アドバイザーへ情報通信関連の技術者を加えるという示唆をいただいたが、P0 自身が、情報通信技術を活用したサービスの構想策定・設計・開発業務に長年携わった経験を持っているため、自身の経験も踏まえて指導を行った。

テーマ中間評価報告書では、プロジェクト全体の特許戦略、特許網構築に関して、JST の体制についても示唆をいただいた。プログラム開始後の対応は難しいが、最近の JST

のプログラムでは、特許関連経費を直接経費に計上することを可能とするなど、知財戦略強化に向けた対応が進みつつある。

新型コロナウイルス感染症の影響とその対応について述べる。影響を受けた課題は、保坂 PL 課題（ジャイロ発電）と四反田 PL 課題（バイオ燃料電池）である。2 課題は、いずれも、既にプロジェクト終盤だったので、主な影響は、実証実験の実施遅延、成果発表機会の損失（東京オリンピック・パラリンピックの実施延期も含む）であった。

保坂 PL 課題については、海洋 IoT を出口として目指すこととなったため、水槽実験を急ぐように指導したが、実証実験スケジュールが遅延した。四反田 PL 課題については、運動中の発汗によるデバイス駆動の実証実験スケジュールが遅延した。また、ほとんどの展示会の開催が見送られ、開催されたものでも来場者は激減した。これらの事態は、各課題の研究開発目標達成には影響しなかったが、課題終了後の事業化に向けた活動に影響を及ぼすこととなった。

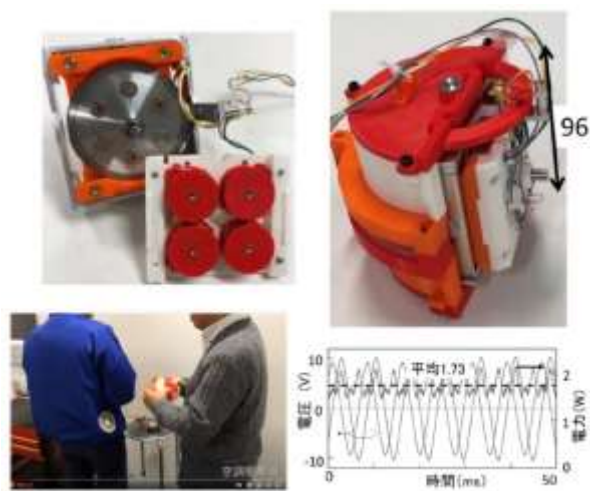
展示会等での成果発表が困難な状況を鑑み、対策として、オンラインでの積極的な情報発信を指導するとともに、P0 が主宰する公開シンポジウムでのオンラインデモ展示の機会を設定した。

8. 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

8. 1 ジャイロ効果を利用したウェアラブル発電システム

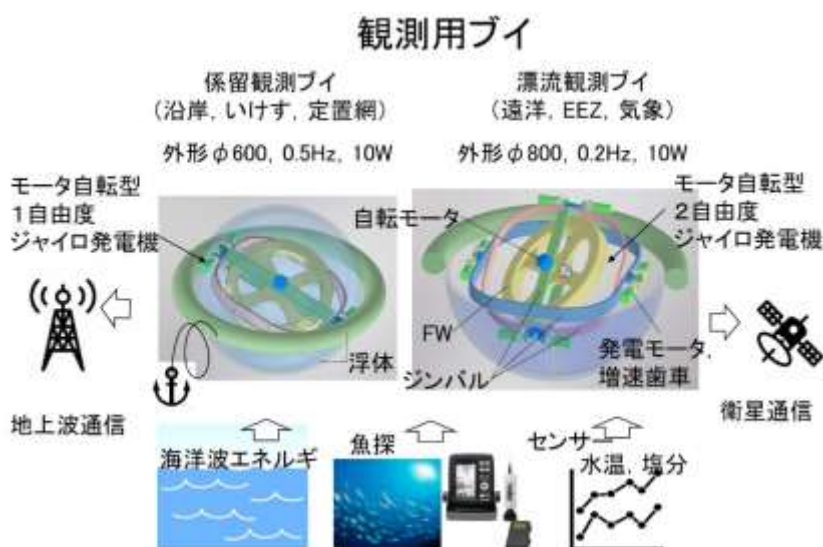
(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

本課題では、低周波のランダムな角振動から発電するジャイロ発電機を開発した。ローターを自転用モーターで回転させる従来型の発電機構の完成度を高めるとともに、ランダム振動で生じる摩擦によってローターの自転が加速する摩擦自転型などの新たな発電機構を考案した。体積 0.85L、入力角振動 1.7Hz、110 度で 1.73W を発電する成果は、ウェアラブルの環境発電システムとしては、他の環境発電技術と比べて桁違いに発電量が大きい画期的なものである。



しかし、近年の二次電池の技術進歩により、1 日 1 回の充電が可能な通常利用では発電方式の有用性が薄れた。数日間充電不可能な屋外や電池切れが致命傷となる隔離環境では二次電池に対する優位性があるが、新産業創出のインパクトは大きいとは言えない。

一方、本課題の成果の波力発電への応用は、海洋 IoT という新たな産業創出の核となるものである。大型のジャイロ発電による波力発電の研究は従来も行われていたが、本事業では、ウェアラブル用途を目指し小型軽量化の開発を進めたことで、可搬型の波力発電への展開が可能となった。本課題では、可搬型（重量 20kg）の波力発電ブイにおいて 0.5Hz の振動で発電量 10W の見通しを得た。可搬型波力発電ブイ市場は、いけすや定置網の監視用に最大 360 億円/年（世界）の可能性がある。10W の出力があれば、魚群探査機による



魚の直接観察が可能となり、従来の水温水質センサに比べ魚の観察・探知精度が飛躍的に高まる。気象観測、漁業、資源探査、防災など幅広い用途での新産業・新事業創出が期待される。

（２）最終目標の達成度

（２－１）競合優位性

波力発電用のジャイロ発電機は、海外で洋上発電所としての開発が進められている。しかし従来のジャイロ発電機は増速がなく、1 m以下のサイズでは発電出来ていない。数mのジャイロ発電機の実験例があるが、実用に至っていない。ジャイロ発電では機械的パワーが寸法の 5 乗に比例し、機械電気変換効率が寸法の 3 乗に比例する。このため、これらの発電機では小型化が出来なかったものと考えられる。また、寸法が大きいために試作改良のサイクルが長く、さらに実証実験や保守が高コストなことが実用化の壁と考えられる。本グループの発電機は、各種の歯車と昇圧回路を組み合わせ、さらに小径のモータを複数用いることで機械電気変換効率を高め、小型化を実現している。短期間での開発と実証が可能で、実用化に有利である。

観測ブイ用の電源では、1 次電池、2 次電池、太陽光、気流式波力発電が使用されている。遠洋における気象観測ブイでは、1 次電池が使用される。ブイは漂流型であり、3 か月程度気象観測を行った後は海洋廃棄物となる。本課題の成果を活用すれば太平洋漂流横断時間の 2 年間使用でき、漂着後に回収できる。近海の航路標識ブイには気流式波力発電が使用される。波力により高速の空気流を作り、タービンを回転し、4W を発電する。本課題の発電機では 10W が見込まれる。また、外殻が密封剛体のため浸水による劣化が無い。沿岸の漁業用ブイでは、太陽光と 2 次電池が使用される。現状では 1W 程度の出力でパネルは 1 か月程度ごとの保守が必要である。本課題の発電機では、発電量 10W、浮遊物や汚れの影響がなく定期的な保守が不要である。開発中の技術では、WITT Energy 社は係留索の張力による発電機の構想を発表している。発電量は未公表であるが、後流渦による流体関連振動を用いるため、流れのエネルギーの一部しか利用できず、発電量は小さいと推定される。なお、太陽光と係留索振動はジャイロ発電との併用が可能である。

（２－２）市場性

従来から、海上保安庁による水路調査や太陽光浮標、気象庁によるロボットブイ、世界気象機関(WMO)によるアルゴ計画など、センサと無線による海の監視が行われている。最近は、5G や LPWA など新たな無線インフラの出現により、水産庁によるスマート水産業の提案、沖電気による密漁監視システム（2020 年 6 月発売）、KDDI、ドコモ、はこだ

て未来大による海水の水質監視システムの実証実験など、沿岸部での新たな IoT ビジネスが起こりつつある。河川や用水路への応用も期待できる。

本課題で開発したジャイロ発電機は電動自転車と同等の部品で構成されるため、発電機本体は 10 万円程度で製造可能と予想される。現状の観測ブイは太陽光発電が主体であり、アルミ製の筐体が使われ、浮体のみで数十万円、発電機込みで百万円以上、発電量は数 W である。10W 程度が発電可能なジャイロ方式は、価格競争力を持ちつつ、魚群探知機の駆動をはじめとした新たなアプリケーションを実現するものであり、十分な市場性を有すると考えられる。

(2-3) 企業戦略適合性

本課題の試作機を用いれば、可搬サイズで発電ブイができ、衝撃による故障がなくなり、実証実験も容易になる。製品単価が低いため、事業もスモールスタートができる。波力発電用の大型ジャイロ発電機と比較して、事業化が容易であり、企業戦略に適合している。この事業構想が評価され、実用化開発のための学内競争資金（特定研究成果活用支援事業）を獲得することができた。

8. 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

(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

本課題では、単なる発電シューズの開発でなく、市場ニーズとのマッチングも想定し、シューズメーカを体制に加えて利用者提供までを見据えた研究開発を行った。研究期間が短いこともあり、プロトタイプシューズによる実用性検証を最優先に研究開発を実施した。PZT 厚膜素子により試作した振動発電デバイスをスポーツシューズに内蔵し、通常のランニング状態で 0.7mW 以上の発電量が得られることを実証した。BLE 通信モジュールの駆動に成功し、センサを内蔵したデモシューズ、スマートフォン上のアプリケーションを作製、応用を示し、耐久性も確認した。一方、PZT 薄膜素子については、ステンレス箔上に安定成膜する技術を確認し、目標発電量には至らなかったが、BLE によるデータ通信に成功した。PZT 薄膜および厚膜素子の設計に関して、等価回路モデルをベースに定式化を行い、実デバイスと良好な一致が確認でき、最適な素子構造を決定



する際に判断の根拠となる理論的な指針を確立した。

短期間で完成度の高いプロトタイプシューズを完成させ、ユーザの協力のもとにアプリケーションを創造するモデルケースを示した。この成果が、新産業・新事業の創出に向けた一歩になり、幅広い応用につながることを期待される。



(2) 最終目標の達成度

(2-1) 競合優位性

これまで、国内外におけるスマートシューズの開発例は多いが、実際の実用化については信頼性、コスト、マーケットニーズとの整合性、量産性等の観点からまだ課題が多い。本課題では、単なる発電シューズ開発ではなく、市場ニーズとのマッチングも想定し、シューズ内荷重情報を利用者に提供するデモシューズとして完成させたことは世界初の試みである。

(2-2) 市場性

開発したスマートシューズについては、内蔵センサの入手性やコストなどの問題もあり、現状で十分な市場性を確認できていない。位置検出などのアプリケーション実用化・上市に向けて、小型・低コスト化、安全性、耐久性、安定量産性等の課題にさらに取り組む必要がある。

(2-3) 企業戦略適合性

実用化については市場動向を見極めて対応してく状況である。圧電発電素子について

は、今回得られた技術を基礎としてシューズ以外の応用を含め市場性の高い分野への実用化探索を継続しており、インフラ向けのアプリケーションが候補となっている。

本課題では、複数の大企業が共同で取り組むがゆえに、全企業の企業戦略への共通適合解を見出す点に困難が見受けられた。

8. 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

(1) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

本課題では、今まで類を見ない3次元スプリング（螺旋）形状の圧電単結晶を作製し、発電デバイスとしての応用を図るというチャレンジングな試みを行った。ランガサイト型圧電単結晶 CTGS の性能向上に取り組むとともに、中間評価以降、新たな候補材料として LiNbO_3 を見出し、結晶性を評価するなど、基礎研究としての進展が見られた。新材料により、予想される発電性能は大幅に向上し、発電デバイスとしての発展の可能性が示された。また、圧電単結晶をアンテナとして活用する、アンテナ+センサとしての用途展開の可能性が示された。将来、CTGS 単結晶を利用した 1200 度程度の超高温まで遠隔温度測定が可能なセンシングデバイス開発に結び付く可能性もある。



本課題の実施により、圧電単結晶スプリング研究の礎を築くことができ、ハーベスタ、センサ、アクチュエータ、アンテナなど、多方面への応用可能性が示された。しかしながら、実用性という観点では未だ課題が多く、今後も長期的な取り組みが必要とされる。螺旋形状の価値を見極め、より広い視野での研究を進めることで、新産業及び新事業創出につながる事が期待される。

(2) 最終目標の達成度

(2-1) 競合優位性

螺旋形状の振動発電デバイスの研究事例はあるが、単結晶で作る試みは過去になく、オリジナリティは高い。ただし、振動発電デバイスとしての他方式に対する競合優位性を確認するには至らなかった。

また、プロジェクト終盤において示された、螺旋形状の圧電単結晶のアンテナとしての活用可能性は興味深く、最終年度において技術検証が実施されたが、優位性を示すには至らなかった。

(2-2) 市場性

振動発電デバイスとしての市場性は明確に示されなかったが、衝撃センサーとしての事業化に関心を持つ企業が見出された。具体的には、トリガースイッチ（密封型 IoT センサ（カプセルタイプ）向けの起動スイッチへの展開）や、スマートハンマー（構造物等打診検査用ハンマーへの適用）などの用途である。アンテナ応用も含め、今後、企業との連携による製品構想の具現化が望まれる。

（２－３）企業戦略適合性

最終年度に体制に加わった企業と、事業期間終了後も引き続き実用化に向けた検討が進められる予定である。今後の取り組みのなかで、企業戦略に適合した事業化の方向性が模索されるであろう。

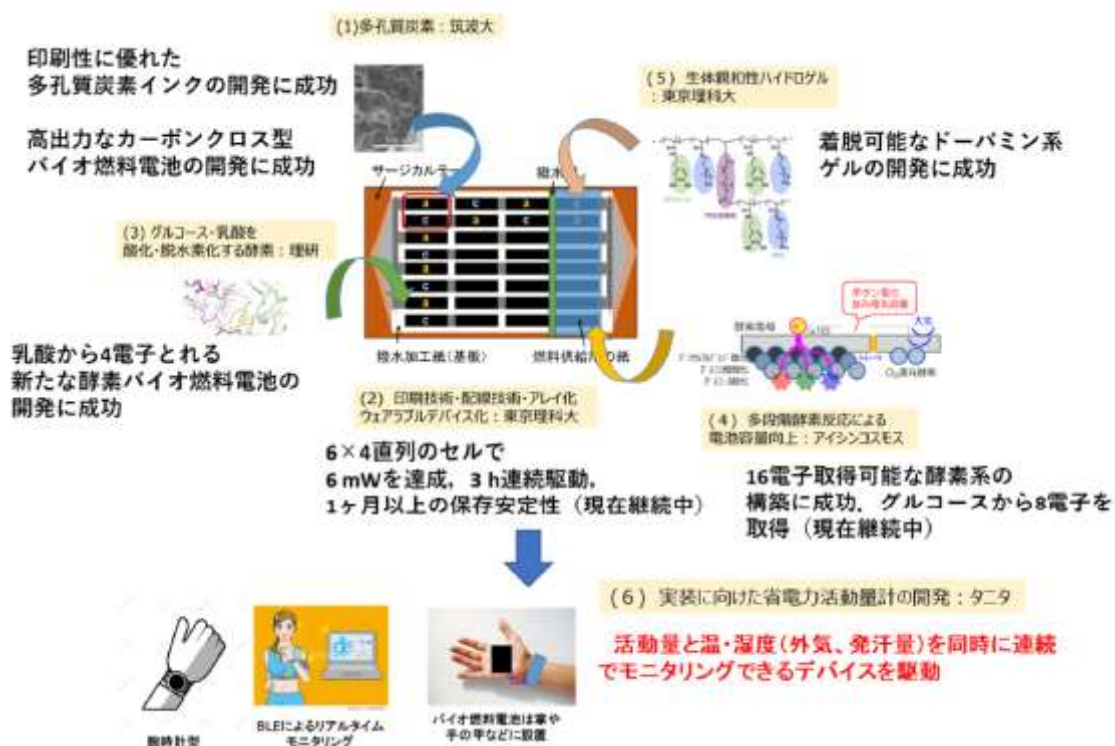
8. 4 バイオ燃料電池を搭載したウェアラブルヘルスケアデバイスの創成

（１）産業創出の核となる技術の確立に資する成果

本課題では、バイオ燃料電池の実用性を高める各種要素技術、評価技術、利用技術の開発を進め、バイオ燃料電池全体としての性能を世界最高レベルに高めた。数多く設定した研究開発目標を達成し、実用化に向けて大きな進展があった。主な成果は、以下のとおりである。

(1) 酵素電極の高出力化と安定性の向上、(2) 印刷性に優れた多孔質炭素インクの開発、(3) インピーダンス法によるバイオ燃料電池の特性評価技術の開発、(4) 生体親和性に優れる着脱可能なドーパミン系ゲルの開発、(5) 新規酵素群の開発および酵素製造コストの低減技術の確立、(6) 多段階酵素系の確立（乳酸から 4 電子、グルコースから 16 電子取得可能な酵素系の構築に成功）(7) 体液中の成分などをセンシングする自己駆動型ヘルスケアデバイスの駆動。

高性能で印刷可能なバイオ燃料電池は、低環境負荷で生体適合性の高い電源技術として、新産業創出の期待が大きい。また、要素技術として開発された酵素群や電極材料なども、それぞれ新事業として展開の可能性がある。ウェアラブルデバイスをはじめとして、様々なバイオ関連産業に活用されうる基盤技術が創出された。



(2) 最終目標の達成度

(2-1) 競合優位性

ヨーロッパでは FP7 の一つであるプロジェクト「BioEnergy」において、ヨーロッパ各国の関連する生物電気化学関連の研究者の連携を強化し、急速にその酵素などの電池部材、そしてウェアラブルを意識したデバイス開発が進んだ (2013-2018)。グルコースなどの糖代謝に関わる新規酵素の開発もあるが、現在においても現実的に活用できるのはグルコースの 2 電子酸化、乳酸の 2 電子酸化に留まり大きな進展はない。本課題では、グルコースの 16 電子酸化、乳酸の 4 電子酸化の多段階酵素系を確立し、グルコースから 8 電子、乳酸から 4 電子の取得に成功した。

アメリカでは UCSD の J. Wang 教授、Utah 大学の Minteer 教授が研究開発の中心であり、ウェアラブルを意識したプロジェクトは継続している。UCSD のグループは、新しいデザインの電池を数多く発表してきているが、本研究プロジェクトで達成した電池性能には届かない。Utah 大のグループは様々な触媒を組み合わせた有機物の完全酸化 (二酸化炭素までの酸化) を目指しているが、現在発表されている系では、反応の進行する電位に問題があり、電池への応用には至らない。本研究プロジェクトにおける酵素開発の戦略は反応の進行する電位の点でも電池応用に適しており有意性は揺らがない。

本課題で開発したバイオ燃料電池は、体液（中に含まれる成分）から発電する電池としては、唯一の発電デバイスである。また、グルコースを燃料とした使い捨ての電池としても、生体適合性、フレキシビリティ、環境負荷、エネルギー密度の点で既存の電池に対する優位性がある。

（２－２）市場性

本課題で開発した技術には、以下に示すように、大きな市場性が見込まれる。

（１） 汗に含まれる乳酸濃度（5 - 20 mM）領域で十分に機能する乳酸酸化酵素の取得

本プロジェクトが開始された 2016 年以降、世界的にヘルスケアデバイスの開発に注目が集まっており、体液中の成分をモニタリングするための安価で大量に取得可能な酵素のニーズは今後高まると予測される。

（２） 16 電子取得できる酵素カスケード反応に用いられる酵素の大量取得

これまでに論文で報告されてきた酵素カスケード反応は、実際には酵素の反応速度が遅く、産業的に役立つものではなかった。本課題で取得された酵素群は、産業的に活用できる酵素反応速度を有する。これは、バイオ燃料電池以外の、酵素を使った物質産生産業にも大いに役立つ。

（３） 酵素サイズに適したマクロ孔・メソ孔を有する多孔質炭素の開発

これまでに開発されてきたバイオ燃料電池の問題点の 1 つとして、使用されている炭素材料がカーボンナノチューブなどに限定されており、コスト面、生体適合性の面から考えてディスポーザブルな電池にするには実用的に大きな課題があった。本課題で開発された MgO 鋳型多孔質炭素材料は酵素ごとに適したサイズの細孔を有する全く新しいタイプの「酵素用炭素材料」であり、学术界だけでなく、産業界からも大きな注目を集めており、今後はバイオセンサ材料など広範的な市場拡大が見込める。

（４） 酵素・メディエータを簡易に固定化できる新たな多孔質炭素インク

現在、新たなバイオセンサ、バイオ燃料電池の開発に各企業から注目が集まっているが、これらのデバイスを開発するには電極表面への酵素とメディエータの固定が課題である。本課題では、電子線グラフト重合による酵素とメディエータの新たな固定化手法を開発した。この手法の特徴としては、任意の酵素もしくはメディエータを、電極表面に滴下するだけで簡易に固定化できる点にある。このインクを市販すれば、バイオデバイス開発に大いに役に立つと期待される。

(5) 印刷を用いたバイオ燃料電池による（模擬）体液を燃料とした自己駆動による無線伝送

電池の用途拡大によって、生体親和性が高く、使い捨ても可能な電池のニーズが医療・環境・ヘルスケア分野で益々高まっている。これまでもアメリカやヨーロッパを中心に高出力なバイオ燃料電池の開発が行われているが、いずれもコスト面や製造面で学術的な領域を出ておらず、産業化には大きな壁があった。本課題で開発された電池は薄膜型ながら、Bluetooth を駆動させて、体液中の情報を無線伝送できる程度に大きな出力を実現できたことから、自己駆動型センシングシステムだけではなく、「使い捨て型電池」として新たな市場性があると期待される。介護向けのデバイスなどへの応用も期待できる。

(6) 体液を電源として活動量・発汗量・乳酸値を測定可能なデバイス

本プロジェクトの成果を活用することで、汗中のイオン種ならびに乳酸・グルコース濃度を連続的に長期間モニタリング可能な熱中症予防を指向した自立駆動型のウェアラブルバイオセンサが構成できる。活動量・発汗量および乳酸濃度の変化は熱中症予防の重要な指標となる。心拍や体温と共に、汗中のこれらの成分をモニタリングすることは、真夏時の健常者（特に、工事現場の労働者や農作業）や、スポーツ時の暑熱環境下における熱中症およびオーバートレーニング等の早期発見・予防につながる。

（２－３）企業戦略適合性

本課題の成果には、数多くの企業が関心を示している。サプライサイドの企業だけでなく、ユーザ企業の関心も強く、早期の事業化が期待できる。

2021 年 4 月 1 日、花王株式会社と東京理科大学との共創プロジェクト「花王 Kirei な未来共創プロジェクト」が東京理科大学 総合研究院に創設され、バイオ燃料電池・バイオセンサに関する研究が共同研究テーマに選定された。

これらの点から見ても、本課題の成果は、企業戦略に適合しているといえる。

9. 総合所見

・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

保坂 PL 課題（ジャイロ発電）では、低周波のランダムな角振動から発電するジャイロ発電機を開発した。研究者による斬新な発電機構の発案と、企業による高精度な実装の連携で、世界に誇れる画期的な成果を得た。ウェアラブル用途では、二次電池との競合があり、産業創出のインパクトは大きくないが、本課題の成果の波力発電への応用は、海洋 IoT という新たな産業創出の核となるものである。ウェアラブル用途を目指し小型軽量化の開発を進めたことで、可搬型の波力発電への展開が可能となった。気象観測、漁業、資源探査、防災など幅広い用途での新産業・新事業創出が期待される。

神野 PL 課題（圧電型振動発電）では、単なる発電シューズの開発でなく、市場ニーズとのマッチングも想定し、シューズメーカを体制に加えて利用者提供までを見据えた研究開発を行った。短期間で完成度の高いプロトタイプシューズを完成させ、ユーザの協力のもとにアプリケーションを創造するモデルケースを示した。事業化のめどをつけるには至らなかったが、新産業・新事業の創出につながる成果を得た。

井上 PL 課題（圧電単結晶スプリング）では、3次元スプリング（螺旋）形状の圧電単結晶を作製し、発電デバイスとしての応用を図るというチャレンジングな試みを行った。本課題の実施により、圧電単結晶スプリングの基礎研究が進展し、ハーベスタ、センサ、アクチュエータ、アンテナなど、多方面への応用可能性が示された。しかしながら、実用性という観点では未だ課題が多く、今後も長期的な取り組みが必要とされる。螺旋形状の価値を見極め、より広い視野での研究を進めることで、新産業及び新事業創出につながる事が期待される。

四反田 PL 課題（バイオ燃料電池）では、バイオ燃料電池の実用性を高める各種要素技術、評価技術、利用技術の開発を進め、バイオ燃料電池全体としての性能を世界最高レベルに高めた。数多く設定した研究開発目標を達成し、実用化に向けて大きな進展があった。性能で印刷可能なバイオ燃料電池は、低環境負荷で生体適合性の高い電源技術として、新産業創出の期待が大きい。また、要素技術として開発された酵素群や電極材料なども、それぞれ新事業として展開の可能性がある。ウェアラブルデバイスをはじめとして、様々なバイオ関連産業に活用されうる基盤技術が創出された。

・研究開発テーマのマネジメントについて

課題選考にあたっては、基礎研究の段階からユーザ企業の参画を求めた点が工夫であった。これは、常に実用化を意識した研究がなされるという点で機能した。

運営方針として、①研究開発フェーズに応じた支援（6年度を1期～3期に分け、研

究の進展に応じて必要な支援を行う)、②研究成果の展開に向けた支援(テーマ終了後の研究の継続的發展に向けた支援を行う)を意識し、研究開発テーマ運営を行った。各課題について、主な指導内容を記す。

保坂 PL 課題(ジャイロ発電)については、採択当初から、出口が課題と認識していた。採択時の条件として、シューズへの応用に限定せず、スポーツ用品などウェアラブル分野への応用を広く捉えた計画とするよう、計画変更の指示を行った。ある程度研究を進めた時点で、発電靴については、ジャイロ方式での商品化が困難との判断になったことを受け、靴修理資材等を扱う企業の代わりに空調服大手をプロジェクト体制に加えるよう指示を出した。二次電池の技術進歩により、ウェアラブル用途での発電方式の優位性が薄れたのちには、海洋 IoT に取り組む企業を紹介し、海洋 IoT に向けた研究の進展を支援した。

神野 PL 課題(圧電型振動発電)については、研究期間が4年度と短期であり、体制もしっかりしていて、プロトタイプシューズ開発という目標が明確だったので、大きな計画変更や体制変更の指導は行わなかった。研究内容に関する細かい指導が中心であった。

井上 PL 課題(圧電単結晶スプリング)については、フィージビリティスタディレベルの提案として、追加で採択するという判断をし、中間評価までに他の課題に追くよう、採択時に計画変更の指示を出した。第1回中間評価において、研究の難易度が高く進捗が芳しくなかったことから、基礎研究と用途探索に重点化するよう計画変更を指示した。第2回中間評価において、基礎研究が進展し、アンテナ用途を新たに見出したことから、アンテナの実用性検証を行うよう計画変更、体制変更を指示し、早期終了の判断を下した。

四反田 PL 課題(バイオ燃料電池)については、採択時に、汗などの体液を直接利用するウェアラブルな「環境発電」デバイスの研究を重点化するよう指示した。参加機関が多く研究体制の複雑なプロジェクトであったが、PLにより適切なマネジメントがなされており、この点では指導の必要はなかった。事業化に向けて、成果発表やパートナー候補企業の紹介などの面で支援を行った。

・本研究開発テーマを設定したことの意義

「4. 研究開発テーマのねらい(目標)」で述べたように、テーマ開始以前と比較して、ウェアラブル・デバイスの市場は予想を超えて拡大しつつある。ウェアラブル・デバイスの電源技術への関心も高まっており、ウェアラブル EXPO では、2021年に「バッテリー・給電技術ゾーン」が新設された。

2020年の東京オリンピック・パラリンピックの開催は延期となったが、テーマ実施期間中に、熱中症対策の重要性が認識されるようになった。また、働き方改革の機運の

高まりや、直近ではコロナ対策のニーズもあり、ウェアラブル・デバイスの活用が、益々進展しつつある。本研究開発テーマの技術へのニーズは、今後、ますます高まっていくことが予想される。本研究開発テーマを設定したことの意義は大きい。

・ 今後への期待や展望

本研究テーマの実施により、産業創出の核となる大きな成果が得られた。ウェアラブルデバイス向けの環境発電技術としては、四反田 PL 課題（バイオ燃料電池）の成果が際立っている。バイオ関連産業への波及も大きい。また、ウェアラブルを離れて IoT 向けの環境発電技術としては、保坂 PL 課題（ジャイロ発電）が海洋 IoT 産業創出につながる成果を出した。いずれも、世界最高レベルの研究成果であり、今後のグローバル展開が期待される。

個別課題についての展望と期待は、以下のとおりである。

保坂 PL 課題（ジャイロ発電）は、電池と太陽光に対してジャイロ発電の利点を出しやすい波力発電ブイの実用化を目指す。企業との連携により、事業化・産業化に向けた取組を進め、我が国の精密加工技術の強みを生かしたグローバル市場への展開を期待する。

神野 PL 課題（圧電型振動発電）は、研究で提示したコンセプトについて十分な市場性を確認できていないため、実用化については市場動向を見極めて対応することとしている。圧電発電素子については、今回得られた技術を基礎としてシューズ以外の応用を含め市場性の高い分野への実用化探索を継続する。またウェアラブル技術についても、今回の研究で検討した少数のセンサによる姿勢を推定する技術を中心に、バッテリーフリーの制約と利点とを活かした応用探索を今後も推進していく予定である。

井上 PL 課題（圧電単結晶スプリング）は、デバイス実用化に向けて参画した企業と共に、スプリング構造を生かしたデバイス実現を目指す。論文等に研究結果を残すとともに、ユーザと議論しながら実用性を想定した設計を進めることを期待する。

四反田 PL 課題（バイオ燃料電池）は、創出した体液（特に発汗中の乳酸）を燃料として駆動する発汗量・活動量計の実用化検証を行い、高出力化、コスト削減、デバイス接合方法などの検証を行うとともに、情報処理および通信回路の低消費電力化も進めて、早期のデバイスの市場投入を目指す。この取り組みと並行して、世界レベルでの技術の優位性を維持し、用途展開の可能性を広げるためにも、基礎的な研究開発を今後も継続して行う必要がある。新規性が高いデバイスであるため、実用化・製品化及びビジネスモデルの確立に向けて、大きなシナリオを描き、企業との連携の下でターゲットを明確にしたさらなる取り組みを進めることを期待する。

・感想、その他

環境発電技術の普及を目指してコンソーシアム活動などを進めていくなかで、思いがけず P0 を拝命することとなった。試行錯誤を重ねた末に、なんとか着地して、産業創出が期待できる成果を得ることができた。近年、ウェアラブル・デバイスの普及は加速しており、電源技術の重要性も高まっている。近い将来に、バイオ燃料電池をはじめとした採択課題の成果が活用されることを楽しみにしている。また、ウェアラブル用途を目指し小型軽量化の開発を進めたことで拓けた、海洋 IoT という新産業の創出も楽しみにしている。今後も各課題の事業化に向けた支援を行っていきたい。

本テーマでは、課題の採択にあたり、それぞれの課題を独立して評価した。全体としてのバランスは考慮したが、もし課題間連携をより積極的に追求するのであれば、採択時点で、将来の連携の形を想定した課題の組み合わせの検討、共通基盤技術としての課題採択、などの判断も有用だったかもしれない。

研究開発テーマのマネジメントについては、課題にもっと介入することも考えられたが、行き過ぎると評価者としての中立性を失うという懸念もあった。P0 ではなく、アドバイザーによるハンズオン支援などの方策もあったかもしれない。

最後に、このような貴重な機会を与えていただいた科学技術研究機構、適時適切なアドバイスをいただいたアドバイザー諸兄、顕著な成果を得るべく研究に邁進した各課題 PL 及び関係者に深く感謝する。

以上