

平成 26 年度～平成 28 年度成果報告書

「エネルギー・環境新技術先導プログラム/  
トリリオンセンサ社会を支える  
高効率MEMS振動発電デバイスの研究」

平成 29 年 2 月

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

(委託先) 技術研究組合 NMEMS 技術研究機構

## 目次

まえがき .....	4
1. 研究開発の成果と達成状況.....	5
(1) 要約 (和文) .....	5
(2) 要約 (英文) .....	6
1.2 本文.....	7
第1章 研究開発の目的.....	7
第2章 研究開発の内容と実施体制 .....	8
2-① 研究開発の内容 .....	8
2-② 研究開発の実施体制 .....	10
第3章 研究開発の成果.....	13
3-① 高密度固体イオンエレクトレットのエナジーハーベスタ応用 .....	13
3-①-(1) 高電荷密度シリコンエレクトレットの形成法の開発 .....	13
3-①-(1)-1 目標.....	13
3-①-(1)-2 高電荷密度シリコンエレクトレット膜に適した振動発電素子の作製.....	13
3-①-(1)-3 高電荷密度シリコンエレクトレットを用いた振動発電素子の発電特性..	16
3-①-(1)-4 まとめ .....	20
3-①-(2) エレクトレット振動発電素子のパッケージ技術と信頼性評価.....	21
3-①-(2)-1 目標.....	21
3-①-(2)-2 振動発電素子の真空中動作における効果検証 .....	21
3-①-(2)-3 真空パッケージの長期信頼性評価.....	23
3-①-(2)-4 まとめ .....	26
3-② 大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエナジーハーベスタ応用 .....	27
3-②-(1) イオン液体のエナジーハーベスタ応用検討.....	27
3-②-(1)-1 イオン液体を用いたエナジーハーベスタの設計指針抽出.....	27
3-②-(1)-2 イオン液体と固体イオンエレクトレットによる電気二重層キャパシタのモデル化.....	27
3-②-(1)-3 イオン液体と固体イオンエレクトレットによる電気二重層キャパシタの設計指針.....	31
3-②-(1)-4 まとめ .....	32
3-②-(2) イオン液体のゲル化検討.....	32
3-②-(2)-1 イオン液体の性質を維持したままゲル化して発電性能の向上.....	32
3-②-(2)-2 ゲル化イオン液体の製作及び諸特性評価.....	33
3-②-(2)-3 発電原理検証実験 .....	35
3-②-(2)-4 まとめ .....	36
3-②-(3) ゲル化イオン液体のイオン固定方法検討 .....	37

3-②-(3)-1	ゲル化イオン液体のイオン固定方法検討・確立.....	37
3-②-(3)-2	ゲルエレクトレットの製作.....	38
3-②-(3)-3	ゲルエレクトレット発電実験検証及びデモンストレーション.....	41
3-②-(3)-4	まとめ.....	44
3-③	高効率エネルギーハーベスタの開発.....	45
3-③-(1)	エネルギーハーベスタの設計.....	45
3-③-(1)-1	目標.....	45
3-③-(1)-2	インパルス型エネルギーハーベスタの設計.....	46
3-③-(1)-3	インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）の設計.....	47
3-③-(1)-4	広帯域型エネルギーハーベスタの設計.....	50
3-③-(1)-5	まとめ.....	53
3-③-(2)	エネルギーハーベスタの製作.....	54
3-③-(2)-1	目標.....	54
3-③-(2)-2	インパルス型エネルギーハーベスタの製作.....	54
3-③-(2)-3	インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）の製作.....	58
3-③-(2)-4	広帯域型エネルギーハーベスタの製作.....	61
3-③-(2)-5	固体イオンエレクトレットとイオン液体の融合デバイスの評価.....	62
3-③-(2)-6	まとめ.....	70
3-④	交通インフラでの振動発電デバイスの導入開発.....	71
3-④-(1)	交通インフラにおけるターゲット振動の調査と活用仮説立案.....	71
3-④-(1)-1	目標.....	71
3-④-(1)-2	各想定インフラでのセンサ端末設置場所での振動環境の調査方法.....	71
3-④-(1)-3	交通インフラでの振動環境および損傷に伴う固有振動の変化.....	74
3-④-(1)-4	道路、鉄道の橋梁、高架、トンネルなどの構造物における交通振動.....	88
3-④-(1)-5	道路面、線路軌道などの土構造近傍における交通振動.....	92
3-④-(1)-6	道路、鉄道の防音壁、側壁、照明設備等の付帯設備における交通振動..	93
3-④-(2)	アプリケーションの仮説立案.....	98
3-④-(3)	まとめ.....	100
3-⑤	オフィス・工場等での環境発電デバイスの導入開発.....	101
3-⑤-(1)	センサネットワーク用の端末の仕様抽出とアプリケーション開発.....	101
3-⑤-(1)-1	各想定環境でのセンサ端末設置場所での振動環境の測定.....	101
3-⑤-(1)-1.1	目標.....	101
3-⑤-(1)-1.2	人体における振動環境の計測.....	101
3-⑤-(1)-1.3	オフィス・工場における振動環境の計測.....	102
3-⑤-(1)-1.4	まとめ.....	102
3-⑤-(1)-2	アプリケーションの仮説立案.....	103

3-⑤-(1)-2.1	目標	103
3-⑤-(1)-2.2	各振動環境にて期待できる発電量	103
3-⑤-(1)-2.3	想定アプリケーション	104
3-⑤-(1)-2.4	まとめ	104
3-⑤-(2)	待機電力の削減に向けたエネルギーハーベスタの活用例の提言	105
3-⑤-(2)-1	目標	105
3-⑤-(2)-2	振動発電による期待される電力削減効果	105
3-⑤-(2)-3	まとめ	105
3-⑤-(3)	実用的なアプリケーションとビジネスモデルの抽出	106
3-⑤-(3)-1	目標	106
3-⑤-(3)-2	実用的なアプリケーションの抽出	106
3-⑤-(3)-3	実用的なビジネスモデルの抽出	108
3-⑤-(3)-4	まとめ	110
3-⑥	標準化の戦略立案	111
3-⑥-(1)	目標	111
3-⑥-(2)	標準化すべき特性測定項目及び抑制測定方法等の抽出	111
3-⑥-(3)	IEC 国際標準化会議および文書審議状況	112
3-⑥-(4)	まとめ	114
3-⑦	プロジェクト推進及び研究支援	115
3-⑦-(1)	技術動向調査の実施	115
3-⑦-(2)	推進委員会、研究会による研究推進	120
3-⑦-(3)	本格研究等の検討	122
3-⑦-(3)-1	総括	122
3-⑦-(3)-2	活動記録の概略	122
1.3	目標に照らした達成状況	124
2.	研究発表・講演、文献、特許等の状況	125
(1)	研究発表・講演	125
(2)	文献	127
(3)	特許等	127

## まえがき

半導体微細加工技術の進歩にともない、かつての大型計算機と同等以上の能力を数ミリ角のチップ内に集積化できる時代になりました。さらに近い将来には、集積回路の3次元化とあいまって、携帯電話の機能を米粒大のチップに集約した超小型無線センサの実現も視野に入りつつあります。しかもエレクトロニクスの生産能力から類推すると、年間1兆個もの無線センサを供給可能です。最近よく耳にする「トリリオンセンサ社会」の議論では、このようなセンサを人類に役立てるさまざまなアプリケーションが考えられています。

さて1兆個というと、地球上の人口で割ると一人あたり年間150個のセンサを使うことに相当します。これを、2,200平方キロメートルの面積に1,300万人が住む東京都でいうと、最初の1年で、1メートルに1個の密度で無線センサを配置することになります。ただし人が住んでいる場所は限られているので、実際にはさらに高密度になるでしょう。距離1メートルの無線通信はClass 3のBluetooth規格に相当しますので、1mWの電力を供給できれば、米粒大のセンサによるネットワークの実現は不可能ではありません。

我々のプロジェクトでは、身の回りの未利用エネルギーのなかでも特にエネルギー密度の高い環境振動から電力を回収する「高効率MEMS振動発電デバイス」の研究開発を実施します。また中期ビジョンとして、東京オリンピックが開催される2020年にむけて、10mW級の振動発電素子を実現していきます。

年吉 洋

## 1. 研究開発の成果と達成状況

### (1) 要約（和文）

本事業は、エネルギー・環境新技術先導プログラムの中で、平成27年3月より平成29年2月までの2年間で実施したものである。

本事業は2020年には年間一兆個のセンサを消費する「トリリオンセンサ社会」を想定して開発したものである。トリリオンセンサ社会においてはセンサ端末には電池や配線による電力供給ではなく自立電源が必須となる。このような社会を想定して、本事業では超高効率な自立電源、特に環境振動で発電するデバイスの開発に取り組んだ。

本事業では、静電エレクトレット型振動発電に着目し、a) 固体イオンを用いたエレクトレットによる高効率発電、および、b) 電極間にイオン液体を導入することによる容量増大による効率向上により、オーダーレベルでの発電効率向上を狙ったものである。

固体イオンエレクトレットにおいては、種々のMEMS構造のエレクトレット発電素子を試作し、目標値である1mW以上の発電に成功した。また、実際に想定されるアプリケーションとして、交通インフラおよびオフィス・工場での振動環境を計測して、実際のアプリケーションマップを作成し、今後のトリリオン社会で飛躍的に市場が伸びていくことを印象づけた。また、振動発電には他の圧電方式や電磁方式等あり、方式によらず広く普及していくための標準化活動も併せて実施した。

本取り組みは、1年目の成果を踏まえ平成27年12月に実施されたステージゲート審査に合格し、2年目を最終年度として取り組み終了時目標を達成したものである。2年間にわたり、月一回の頻度で、研究会を実施し研究開発の進捗状況の共有化及び課題についての取り組みの整合等を密に行った。また、研究推進委員会を年3回程度実施し今後の取り組みの方向性の検討等を実施した。それらを踏まえて、関連機関への情報発信や展示会展示等を実施した。今後は本格研究（IoT推進の横断型技術開発プロジェクト）において、工場やプラントでの自立型センサ端末用の電源として継続して開発していく予定である。

## (2) 要約 (英文)

This report summarizes the R&D activities performed within the framework of the “Energy and Environment New Technology Leadership Program” entrusted by NEDO, Japan over the two-year period from March 2015 to February 2017.

This project was designed to develop the technologies needed for the trillion-sensor era expected to arrive by 2020, a turning point when we begin consuming more than a trillion electronic sensors worldwide in a single year. The most vital elements of the tiny-sensor environment to come are the so-called energy harvesters, autonomous power sources that harness power from the environment without the aid of battery cells or power cables. Among the various types of energy harvesters realized and conceived, our group is developing a vibrational-type harvester with high conversion efficiency.

Specifically, our project focuses on an electret type energy harvester that produces electrical power from mechanical vibration through electrostatic induction. The power conversion efficiency can be further improved by using a) a high-density electret based on solid ions and b) the large electrical capacitance of an ionic liquid inserted between the electrodes.

The most representative outcome of this project is the successful development of a 1-mW-class energy harvester based on solid-ion electrets. We measured environmental vibrations in several work environments selected for potential application of the wireless sensors –traffic infrastructures, offices, industrial factories, etc.– to produce an application roadmap to predict the rising demand of the trillion sensors society in the coming years. We also performed administrative activities for the standardization of energy harvester devices of various types such as electrostatic, piezoelectric, electromagnetic, etc.

This project has been evaluated by the first-year stage-gate organized in December 2016 and will advance to the completion of the task goals by the end of the second year. Team meetings are organized at least once a month over the two-year project period to self-monitor the progress and enhance communication within the group. We also hold executive briefings for the committee members three times a year, along with exhibitions for publicity. Part of the project is being further continued under a full-scale project, “Cross-Technology Research and Development Project for IoT Propulsion,” and the energy-harvesting technologies developed are deployed practically as energy sources for autonomous wireless sensors for an industrial factory and plant.

## 1.2 本文

### 第1章 研究開発の目的

人が年間1兆個のセンサを作って消費するトリリオンセンサの社会、これが実現できると人の生活環境、気温・湿度・気圧等の物理量を取り、人の生活がよりよくなるようにフィードバックをかけるサイバーフィジカルシステム(CPS)を用いた社会が今後ますます加速していく。年間1兆個のセンサを使用する社会では、一人あたり年間100~150個のセンサを消費することになる。おそらくその多くは耐久消費財として使用されるため、面積2200平方キロメートルに1300万人が住む東京都の広さで考えると、最初の1年間で、1m間隔でセンサが敷き詰められることに相当する。距離1mを電波送信するにはBluetoothのクラス3(1mW)程度で十分であるが、実際には制御回路等の消費電力を考慮して、10mWぐらいの発電電力が得られることが望ましい。センサあたり10mWの発電デバイスが同時に1兆個稼働すると、合計では1000万kWとなり、100万kW級の原子力発電所10基分に相当する電力となる。実際には1兆個が同時稼働することはないが、データ通信・解析に必要な電力を併せて考慮すると、トリリオンセンサ社会の消費電力は膨大なものとなる。このように、今後、センサネットワーク端末が米粒サイズに小さくなると、最も大事な要素デバイスは電源となると考えられる。微小センサに電源を配線で引き回すことはあり得なく、また電池を背負わせることも一案ではあるが、電池とセンサのサイズ不整合の問題と頻繁な電池交換は現実的ではない。したがって、センサそのものが発電する自立電源と、メンテナンスフリーの小型・安価なセンサ端末が理想的である。すなわち、自立電源で発電した電力のみでセンシングしてデータを送る機能を米粒サイズで一体化したものが究極のトリリオンセンサとなる。本事業では、次世代トリリオンセンサ社会に必要な超高効率の環境振動型発電素子(再生可能エネルギー)の実現を提案する。本研究開発では、MEMS・マイクロマシン技術の新設計・新材料・新工法を新たに導入することで、直径20mm程度の一円玉サイズの面積で発電効率を従来比2桁以上に飛躍的に高めた10mW級の環境発電素子の設計・製作・評価技術を確認することを目的とする。

## 第2章 研究開発の内容と実施体制

### 2-① 研究開発の内容

環境振動発電素子に関する国際会議報告や他の国プロ課題では、PZT 圧電材料や電磁誘導に基づく試作例が主流であるが、前者は鉛が RoHS 規制を受ける懸念があり、後者はレアメタルである希土類系金属を用いた強力な磁石が必要で、小型パッケージの組み立てが難しい。一方、エレクトレット型の研究開発は我が国が中心となって進められており、その形成方法として、軟X線電離を用いる方法や、コロナ放電による電荷注入が開発されている。ただし、これらの方法は本研究の固体イオンの活性化処理方法と比べて電荷密度が1~2桁小さい。また、半導体マイクロマシニングで形成した微細ギャップ電極には、これらの従来技術は適用できないことから、発電の高効率化は実現できていない。

エレクトレット型環境振動素子の効率を改善するには、①高電荷密度の形成、②電極間ギャップの微細化、③周波数帯域の増大の3点が必要である。従来手法ではこれらへの解決策は見いだされていない。

上記課題に対して新たな技術導入によって、10倍~100倍の発電効率向上を目標とする。具体的な技術開発の取組み実施内容は以下のとおりである。

#### a) 高密度固体イオンエレクトレットのエナジーハーベスタ応用

振動発電素子（エナジーハーベスタ）が振動から回収できる最大電力は、素子の機械パラメータでのみで決定される。また、実際の出力電力は、最大電力に電気機械系相互作用の強さを表すパラメータが決定する効率との積となる。このパラメータは一般には力係数と呼ばれ、エレクトレット素子の場合には、電極の単位長さ当たりの電荷密度が最大の決定要因となる。本研究項目では、シリコン振動子型の効率を最大限に引き上げるために、高密度固体イオンエレクトレット膜の形成に取り組む。さらに帯電電圧の劣化を防止して長期寿命を保証するためのパッケージ技術と、その信頼性を担保するデータを取得し、シリコン振動子を用いた発電素子を実用化するための基礎技術を構築する。

#### b) 大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエナジーハーベスタ応用

イオン液体の電気二重層からなるキャパシタは、実効的な電極間隔が極めて小さい（1ナノメートル程度）にもかかわらず外部の振動に対して短絡することなく極めて安定に利用できるため、エナジーハーベスタの発電効率の飛躍的な改善（従来比2桁以上）が期待される。本項目ではイオン液体の粘性や電位窓の評価、また電気二重層の形成に最適な電圧、電極材質の選定などを行い、イオン液体を用いた大容量可変キャパシタの実用化に向けた基礎技術の確立を検討する。また、本研究グループではイオン液体に少量のポリマーを混ぜることで、電位窓・電気二重層の特性を維持したままゲル化することにすでに成功しており、液体の状態に比べてより広い応用が期待できる。本研究では、ゲル化したイオン液体の弾性体としての性質を評価し、エナジーハーベスタ応用に重要なパラメータを把握して組成等の最適化を実施する。さらに、

イオン自体をゲル内に固定してエレクトレット化する技術の確立と、さらにはゲル中のイオンを長期固定するための高信頼性技術を構築する。

c) 高効率エネルギーハーベスタの開発

上記 a)、b)の成果を受けて、超小型エネルギーハーベスタの設計・製作・評価技術を確立する。設計面では、微小振動から回収できる最大の電力を決める素子の機械パラメータと、エネルギーハーベスタの出力電力を決める効率を理論的に導出し、等価回路に照らし合わせて、出力電力を最大化する設計手法を構築する。製作・評価面では、エネルギーハーベスタの製作プロセスを確立するとともに、電極間ギャップをサブミクロン化して出力電力を拡大する。このために、高アスペクト比シリコン構造を実現するための最新のプロセス装置を導入して微細加工技術の研究開発を実施する。また、固体イオンエレクトレット技術とイオン液体可変キャパシタ技術を電気機械的に結合し、高効率・高出力のエネルギーハーベスタを開発する。

また、本発電デバイスが実現できた際の想定アプリケーションについて、道路・鉄道等の交通インフラ応用、また、オフィス・工場等の省エネ・快適技術等の面で、発電素子の要求仕様に関して実用上の観点から意見交換を行うことで、学術的な新規性だけでなく、産業的インパクトの高いセンサネットワークへの実用展開を推進する。具体的な開発内容は以下のとおりである。

d) 交通インフラでの振動発電デバイスの導入開発

道路・鉄道・港湾空港などの交通インフラにおいて無線センサネットワークを構築しインフラモニタリングを行うことで、これら設備の健全性を把握することは安心安全の向上や設備の維持管理の効率化に有用である。既存の無線センサでは主に太陽光発電による給電が行われているが、悪天候や夜間の途絶や、トンネル等では利用できない等の設置場所の制約問題があり、安定的な電源確保が課題となっている。とくに振動発電デバイスによって、終日安定した稼働と設置場所の制約問題の解決が期待されている。本研究項目では、交通インフラモニタリングにおいて期待される発電仕様を策定し、想定アプリケーションと応用先へのビジネスモデルの構築を検討する。

e) オフィス・工場等での環境発電デバイスの導入開発

オフィス・工場での人体情報センシングと周辺環境の情報センシングは、省エネや快適性改善、健康維持にとって重要な知見をもたらす。とくに健康モニタリングでは、脈拍・血圧・脈波・体温・血糖値などの様々な情報を常時監視することで、疾病の予防に役立てられる。また、体温と周囲の温湿度をモニタすることで、快適性を維持しながら人体近くのみ空調制御を行うなど、快適性と省エネの同時実現が期待できる。同様のシステムは、空調にかぎらず照明制御や、製造ラインの最適空間の形成にも応用可能である。とくにこれらのセンサのウェアラブル化を考慮すると、①小型で薄いこと、②どこにで

も設置できること、③非常に安価であることに加えて、④無線データ送信のための発電・蓄電素子の小型化と低コスト化が重要な課題となる。

また、空調装置には非稼働時にも総電力量の 5%程度の待機電力が発生しており、省エネの足かせとなっている。オフィスや工場等の各設備の振動エネルギーから待機電力を供給することは、画期的な省エネ技術に繋がるものと考えられる。

本開発テーマでは、オフィスや工場等での人およびその周囲の振動の状況を把握することで、センサ端末の仕様や振動による期待される電力量を抽出し、想定アプリケーションと応用先へのビジネスモデルの構築を検討する。

#### f) 標準化の戦略立案

振動型エネルギーハーベスタには電磁方式、圧電方式、ポリマーエレクトレット方式などが検討されており、一部は産業化されている。広く普及していくためには、振動発電に関する標準化が重要である。本研究では、桁違いの効率改善と周波数依存性の低減を図ったエネルギーハーベスタの特性評価に対応するために、特性測定項目と特性測定方法を抽出し、各々国際標準化の可能性と必要性を評価した上で、標準化提案内容に反映することを検討する。また、その後のアプリケーション開発に合わせて標準化項目を精査し、必要に応じて追加・見直しを実施する。

また、上記の技術的な検討と並行して、年に 2 回開催される IEC の国際標準化会議に出席して関連提案の情報収集を行い、参加各国との意見交換を通じて将来の技術標準提案に対する協力を要請する。

## 2-② 研究開発の実施体制

本研究開発は、国立大学法人静岡大学、株式会社鷺宮製作所、ダイキン工業株式会社、マイクロマシンセンターで構成する技術研究組合 NMEMS 技術研究機構高効率 MEH 研究所、および再委託先として東京大学生産技術研究所との共同研究体制で進めた。各研究機関では、a) 固体イオンエレクトレットの形成とエネルギーハーベスタ応用、b) イオン液体エネルギーハーベスタ応用、c) エネルギーハーベスタの設計、試作および評価の 3 つの項目でデバイス設計、試作、評価のサイクルを回して取り組んだ。また、d) 交通インフラでの振動発電の導入開発、e) オフィス・工場等での環境発電デバイスの導入開発に対しての 2 つの項目では実際の環境での振動データを取得して発電デバイスの設計にフィードバックした。また、振動発電デバイスのターゲットアプリケーションを明確にし、開発効率を向上していくために、有識者を研究会に呼び多くの意見収集を行った。有識者としては、1) 振動発電デバイスの開発の先駆者である、東京大学鈴木雄二教授、オムロン株式会社、2) イオン液体の材料関係では電力中央研究所、3) 振動発電のエネルギーマネジメントの観点で NHK 放送技研、そして、4) 鉄道での振動発電デバイスの応用の観点で JR 東日本にからのアドバイスを得た。 図 2.②-(1)に実施体制図を示す。

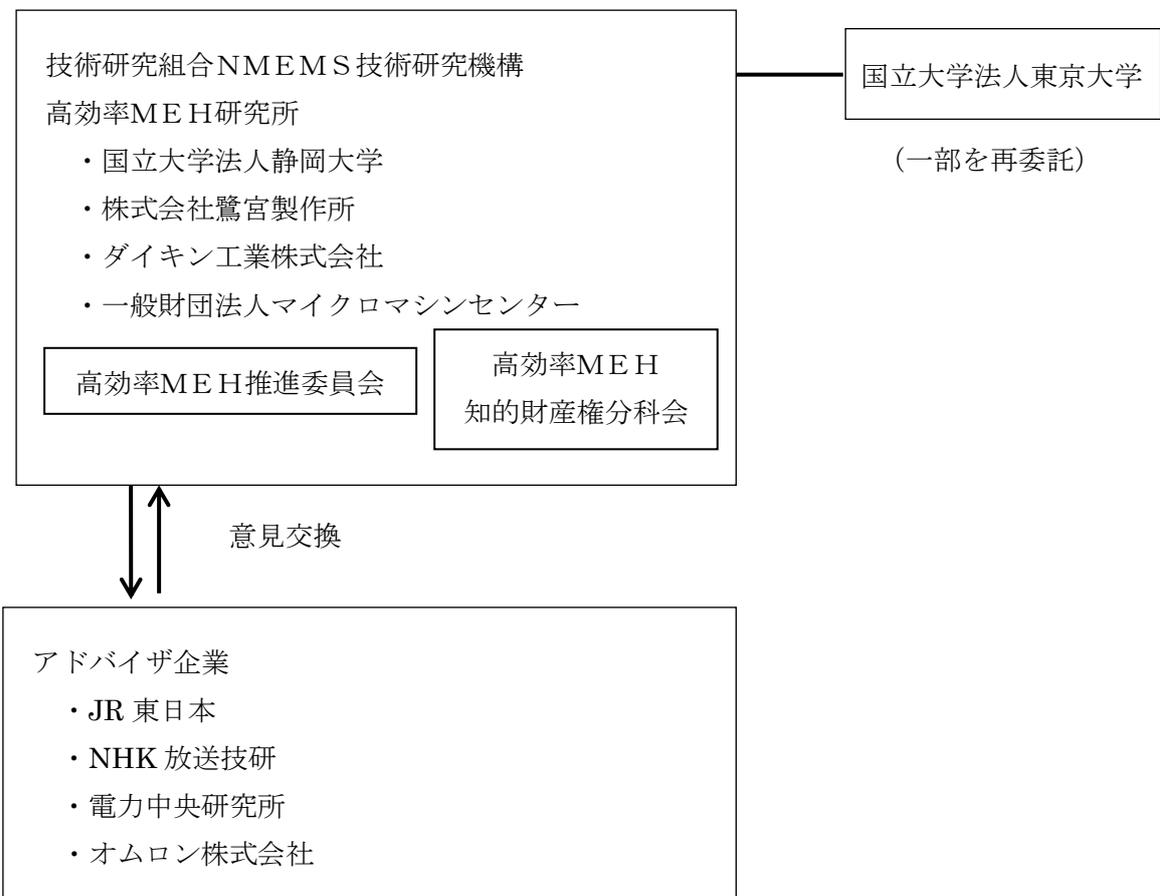


図 2-②-(1) 研究実施体制図

研究を効果的に進めるための高効率 MEH 研究会は、高効率 MEH 研究所所長である年吉研究開発責任者の下、研究員をメンバとして実施した。

また、共同研究機関の知財方針等の整合を実施すべく高効率 MEH 知的財産分科会を設置した。その委員構成を表 2-②-(1)に示す。

主に、本先導研究以降の取組みについて検討する高効率 MEH 推進委員会は、本研究開発提案時のプロジェクトマネージャーである東京大学藤田博之研究員を委員長とした。その委員構成を表 2-②-(2)に示す。

表 2-②-(1) 高効率 MEH 知的財産分科会における委員構成

氏名	所属・役職
年吉 洋	委員長 国立大学法人 東京大学 生産技術研究所・教授
橋口 原	委員 国立大学法人 静岡大学 電子工学研究所 橋口研究室・教授
三屋 裕幸	委員 株式会社鷺宮製作所 R&Dセンター・主事
橋本 哲	委員 ダイキン工業株式会社 テクノロジー・イノベーションセンター テクノロジー・イノベーション戦略室 新分野探索担当課長
安宅 学	委員 国立大学法人 東京大学 生産技術研究所 助手
阿出川 俊一	委員 技術研究組合NMEMS技術研究機構・研究交流部担当部長

表 2-②-(2) 高効率 MEH 推進委員会における登録委員

氏名	所属・役職
藤田 博之	委員長 国立大学法人 東京大学 生産技術研究所 マイクナノメカトロニクス国際研究センター・教授、センター長
年吉 洋	委員 国立大学法人 東京大学 生産技術研究所・教授
橋口 原	委員 国立大学法人 静岡大学 電子工学研究所 橋口研究室・教授
石川 琢郎	委員 株式会社鷺宮製作所 R&Dセンター 第一開発室・室長
橋本 哲	委員 ダイキン工業株式会社 テクノロジー・イノベーションセンター テクノロジー・イノベーション戦略室 新分野探索担当課長
青柳 桂一	委員 一般財団法人マイクロマシンセンター 専務理事
今仲 行一	委員 技術研究組合NMEMS技術研究機構 理事長

## 第3章 研究開発の成果

### 3-① 高密度固体イオンエレクトレットのエネルギーハーベスタ応用

#### 3-①-(1) 高電荷密度シリコンエレクトレットの形成法の開発

国立大学法人静岡大学、株式会社鷺宮製作所

##### 3-①-(1)-1 目標

振動発電素子は、機械の振動エネルギーを電気エネルギーに変換するための素子である。発電電力は機械の振動エネルギーの大きさで決まり、素子の電気パラメータは変換効率のみに寄与する。その変換効率を支配している最も重要なパラメータは力係数であり、機械の振動速度と発生電流間の比例係数として定義される。振動エネルギーを大きくして発電電力を大きくするには振動質量を重くすることが必要であるが、効率を下げることなく大きな質量を搭載するためには、力係数を増大させる必要があることが理論的に示される。力係数は単位長さあたりの電荷量というディメンジョンを持ち、ここに高密度で電荷を固定する必要性が示される。従来の静電型 MEMS 素子は、大きくても  $10^{-5}$ (Coulomb/m)程度であるが、本研究では  $5 \times 10^{-4}$ (Coulomb/m)以上の力係数と、それを実現するための 400V 以上の帯電を目標とする。

##### 3-①-(1)-2 高電荷密度シリコンエレクトレット膜に適した振動発電素子の作製

力係数は帯電電圧の大きさと電極間のギャップや面積に依存したパラメータであるが、狭いギャップ間に高い電圧の帯電を行う場合の問題点として、電極間で発生する pull-in による不安定性があげられる。これは高い電圧ではその静電力により電極どうしが引き付けあって張り付いてしまう現象である。この現象を回避しながら高い電荷密度のエレクトレットを実現するためには、電極間方向には非常に硬い構造としながら、振動方向には動きやすい構造にしなければならない。そのため本研究では、高電荷密度シリコンエレクトレット膜に適した振動発電素子の構造として多極型とカンチレバー型を試作して実験を行うことにした。

###### a) 多極型振動発電素子

図 3-①-(1)-2.1 に作製した多極型振動発電素子とその模式図を示す。多極型は櫛歯形状を有する可動部と固定部があり、突き出した電極部の間の静電容量が変化することで発電する。

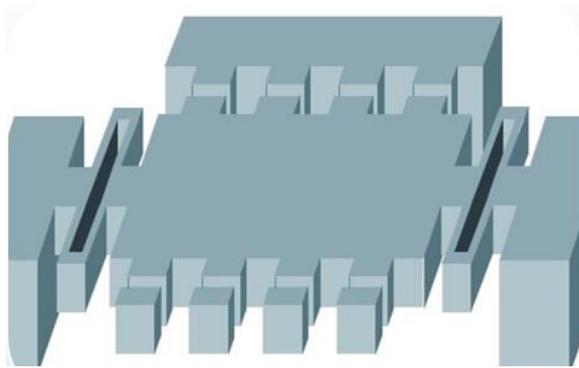


図 3-①-(1)-2.1 多極型振動発電素子の模式図

力係数の理論値は(1)式で表される。

$$\text{力係数} = \frac{2\pi}{L} \cdot \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2} E \quad \dots (1)$$

ここで $L$ は電極間周期、 $C_{\max}$ と $C_{\min}$ は可動部と固定部電極間の静電容量の最大値と最小値、 $E$ は帯電電圧であり、この式を用いて力係数の設計を行った。実際に設計した多極型振動発電素子の平面図を図 3-①-(1)-2.2 に示す。右の挿入図は櫛歯電極の寸法である。図に示したとおり、電極間ギャップは $5\mu\text{m}$ 、櫛歯の幅は $10\mu\text{m}$ である。また櫛歯の周期は $40\mu\text{m}$ であり全部で 6184 対の櫛歯構造が設けられている。

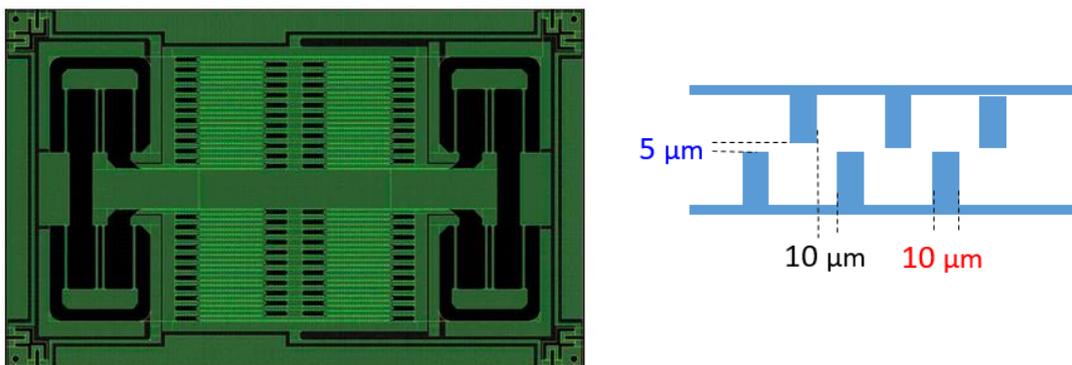


図 3-①-(1)-2.2 設計した多極型振動発電素子の平面図 (左)、櫛歯電極の寸法(右)

### ＜試作素子＞

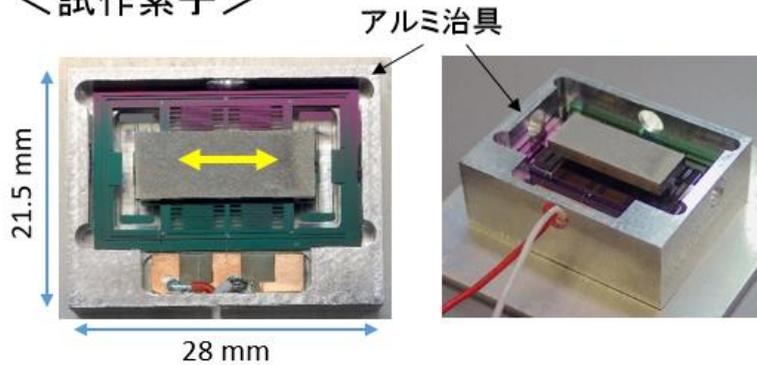


図 3-①-(1)-2.3 作製した多極型振動発電素子の外観写真

図 3-①-(1)-2.3 に作製した多極型振動発電素子の外観写真を示す。SOI 基板を用いて作製した振動発電素子上にタングステンの錘がエポキシ系接着材で取り付けてある。そのとき発生する収縮応力の影響を低減するため、デバイスの四隅にはひずみ緩衝用のバネ構造を設けた。またパッケージは NC 加工機によりアルミニウムブロックを削ることにより作製した。

#### b) カンチレバー型振動発電素子

カンチレバー型振動発電素子の模式図を図 3-①-(1)-2.4 に示す。カンチレバーの先端部に楕歯型電極が設けられ、面外方向に振動して発電する。その力係数は線形動作領域では式 (2) で表される。

$$\text{力係数} = \frac{2n\varepsilon_0 X_0}{d} E \quad \dots (2)$$

ここで  $n$  は楕歯電極対、 $\varepsilon_0$  は真空の誘電率、 $X_0$  は楕歯電極の重なり長さ、 $d$  は楕歯電極間ギャップである。

SOI 基板を用いて実際に作製したカンチレバー型振動発電素子の外観写真を図 3-①-5 に示す。楕歯数を大きくするため、カンチレバー先端部はフィッシュボーン構造とし、その横骨にあたる部分に 1283 対の楕歯電極を作製している。また多極型振動発電子同様、構造の角にひずみ緩衝用のバネ構造を設けた。大きさは 2cm 角で、楕歯間ギャップは 14 $\mu\text{m}$  のものを作製した。

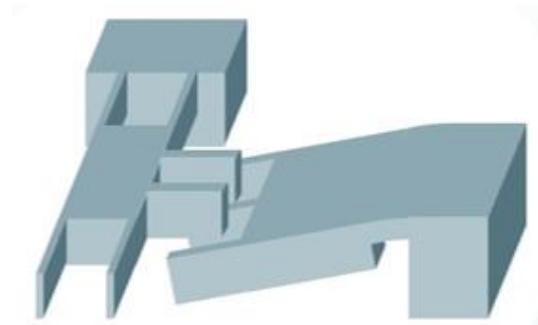


図 3-①-(1)-2.4 カンチレバー型振動発電素子

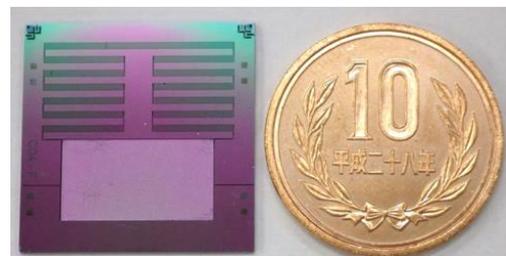


図 3-①-(1)-2.5  
作製したカンチレバー型振動発電素子

### 3-①-(1)-3 高電荷密度シリコンエレクトレットを用いた振動発電素子の発電特性

#### a) 多極型振動発電素子

錘を 8g、共振周波数を約 60Hz に設計した振動発電素子を作製した。この振動発電素子の発生短絡電流と振動子速度を同時に測定した結果を図 3-①-(1)-3.1 に示す。振動速度の実効値が 13.2mm/s のとき、2.64 $\mu$ A の電流を発生している。これより力係数は  $2.0 \times 10^{-4}$ (C/m) と計算される。なおレーザードップラー振動計で測定した Q 値は 54 であった。

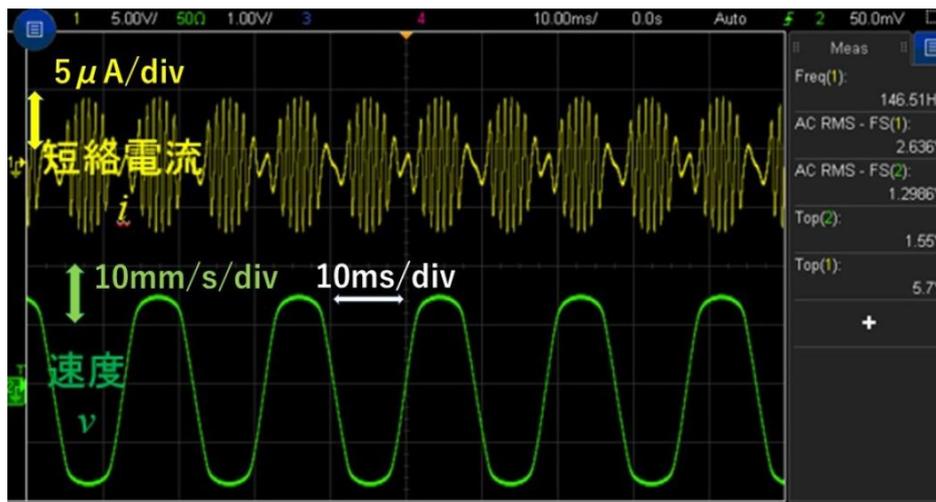


図 3-①-(1)-3.1 多極型振動発電素子の短絡電流と振動速度の同時測定結果

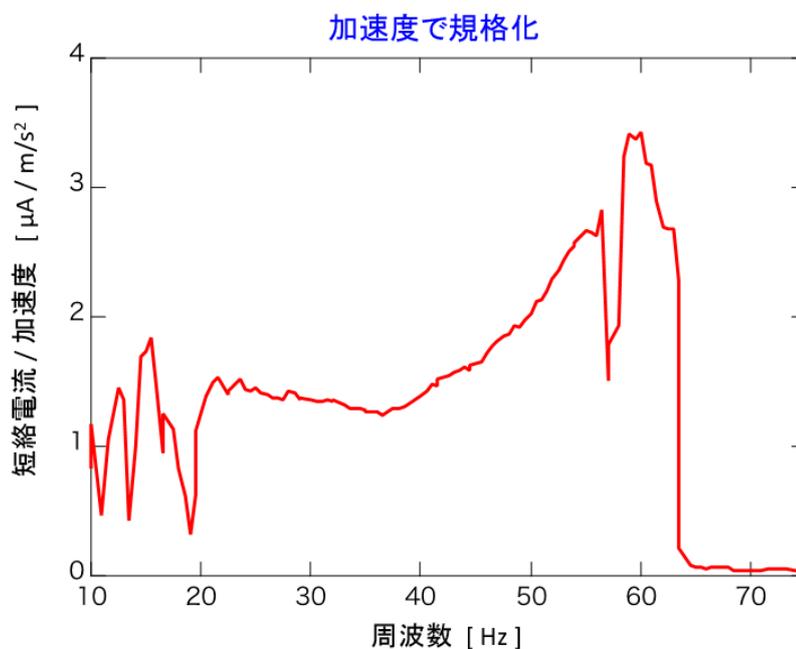


図 3-①-(1)-3.2 発生短絡電流の周波数特性（加速度で規格化）

図 3-①-(1)-3.2 に、発生短絡電流の周波数特性を示す。このデータは励振加速度で規格化したものであり、ほぼ 10Hz 付近から 65Hz 付近の非常に広い周波数にわたって発電していることが分かる。多極型振動発電素子では、Q 値が高いまま低周波数でワイドレンジ応答という環境振動発電に重要な特性を有しているが、これは静電素子特有の非線形効果（ソフトスプリング効果）によるものと考えられる。線形応答で半値幅が 2Hz 程度しかない圧電型や電磁型と比較して、応用面での大きなメリットとなる。なお多極型振動発電素子では、研究期間内に得られた電力は、4g の錘を取り付けた素子で 234 $\mu$ W (@0.3G) であった。

#### b) カンチレバー型振動発電素子

錘が 0.4g、共振周波数 500Hz の素子の励振加速度に対する発生電力のグラフを図 3-①-7 に示す。帯電電圧は 170V、櫛歯間ギャップは 14 $\mu$ m である。錘が軽いにも関わらず、加速度の実効値 1G のとき、ちょうど 1mW の発電量が得られた。理論的には発生電力は加速度の 2 次関数になるが、0.5G 付近より発電量の増加が 2 次特性から外れはじめている。これは振幅が大きくなり、櫛歯電極の重なりが外れ始めたためと考えられる。

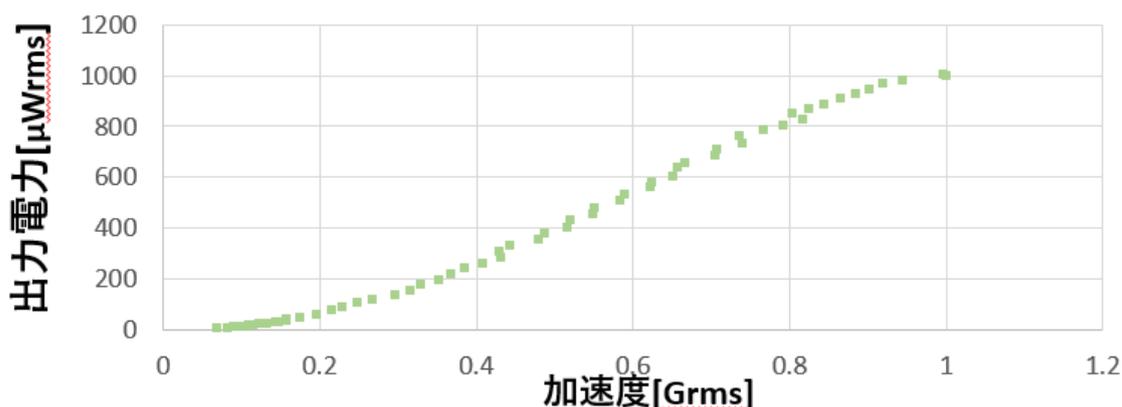


図 3-①-(1)-3.3 カンチレバー型振動発電素子の加速度と発電電力の関係。  
共振周波数：500Hz、錘：0.4g

この素子では、電極間プルインのため 170V までしか帯電できなかったが、接着剤のひずみ緩和対策及びプルイン方向の変形に対する強度を高めた素子では 400V の帯電に成功した。400V 帯電素子と、ベンチマーク試験をした市販素子で最も高性能であった圧電型振動発電素子と比較をするため、実際の高速道路で測定した環境振動波形による充電エネルギーを測定した。図 3-①-(1)-3.4 に入力として用いた NEXCO 西日本の大枝ジャンクションにおける 500 秒間の振動加速度波形を示す。自動車の到来によりインパルス的な振動がランダムに観測される。平均の加速度の実効値は 0.03G 程度であった。この振動波形を加振機に入力し、振動発電デバイスが発生する電流を全波整流回路に通して 44 $\mu$ F のキャパシタンスに充電した電圧とエネルギーを比較した。図 3-①-(1)-3.5 に充電電圧の上昇特性を示す。市販素子で最も高性能だった 15g の錘を搭載した Jule Thief (JT) 社の素子は、500 秒で約

1.54V まで充電した。それに対し、10.8g の錘を搭載したカンチレバー型では 0.92V、多極型振動発電素子では 0.96V であった。ところがカンチレバー型に 14.4g の錘を搭載し、共振周波数を下げたものでは 4.09V であった。これまでのベンチマーク評価で最高性能であった JT 社の圧電型振動発電素子と比べ 7 倍以上の結果が得られた。

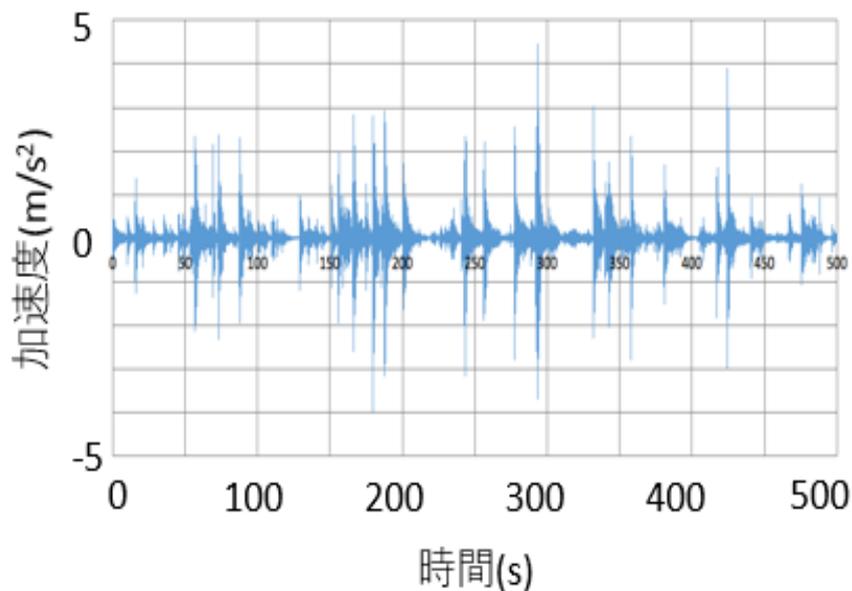


図 3-①-(1)-3.4 高速道路（大枝ジャンクション）で取得した振動波形

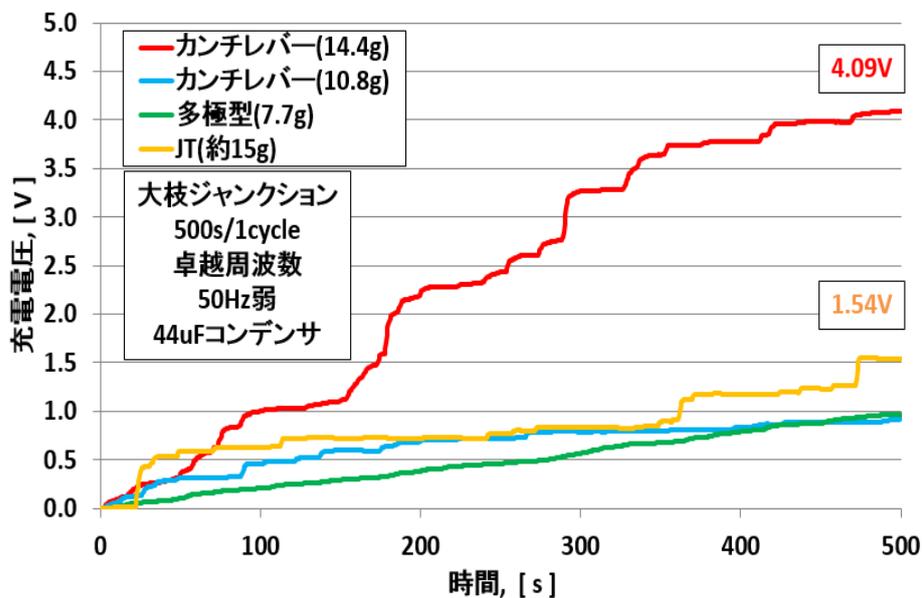


図 3-①-(1)-3.5 44 $\mu$ F のコンデンサーに充電した充電電圧の比較

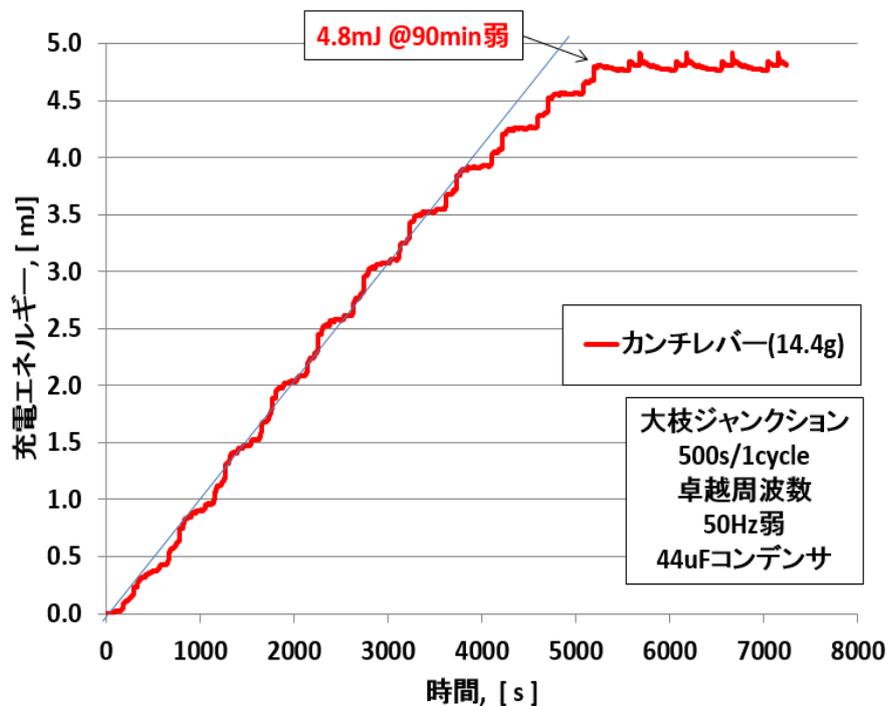


図 3-①-(1)-3.6 カンチレバー型振動発電素子による大枝ジャンクション振動での充電エネルギー 4.8mJ で飽和

また、充電エネルギーで比較すると JT 社製品の約 7.2 倍という、圧倒的に高性能な試験結果となった。さらに充電が飽和するまで実験を続けた結果、図 3-①-(1)-3.6 に示すように約 90 分で 4.8mJ の充電エネルギーが得られた。これは Zigbee 規格の無線モジュールを動作させるのに十分なエネルギーであり、実際の環境振動で実用的な発電量が得られることを実証することができた。なお 400V 帯電素子の力係数は、短絡電流と振動速度の同時測定による実測で 力係数  $5.4 \times 10^{-4}(\text{C/m})$  が得られ、本研究の目標を達成することができた。

### 3-①-(1)-4 まとめ

多極型振動発電素子とカンチレバー型充電発電素子で得られた特性を表 3-①-(1)-4.1 にまとめる。

表 3-①-(1)-4.1 試作した振動発電素子の特性のまとめ。

素子	帯電電圧	力係数	発生電力	特長
多極型 (4g、8g)	130V	$2.0 \times 10^{-4}$ (C/m)	234 $\mu$ W (@0.3Grms)	スーパーワイドレンジ 周波数応答(10Hz~65Hz)
カンチレバー型 (0.4g)	170V	$3.0 \times 10^{-4}$ (C/m)	1mW (@1.0Grms)	高出力発電
カンチレバー型 (14.4g)	400V	$5.4 \times 10^{-4}$ (C/m)	104 $\mu$ W (@0.1Grms)	高効率充電、ソフトニングによる広帯域応答

表に赤字で示すように、カンチレバー型振動発電素子において本研究の目標値をすべてクリアした。そして実際の環境振動発電実験で、Zigbee 規格の無線モジュールを駆動するのに十分なエネルギーが蓄えられることを示した。また多極型では、当初想定していなかった超広帯域の振動発電素子を作製することができた。これらのデータは、世界最高レベルの数値と言える。今後は、試作した振動発電素子のさらなる高性能化を目指すとともに、実用的なアプリケーションを見出していく必要がある。今回得られた結果から、環境振動発電の実用化が見えてきたが、それ以外にも産業機器、自動車タイヤ用発電素子、そしてもっと身近なところでは、新幹線の窓枠に置いただけで携帯機器を充電できる発電素子なども考えられるだろう。また道路への埋め込み、上下水配管など光の当たらない場所での発電なども可能になってきたと考える。本先導研究の成果により、微弱な振動から発電する素子の実用化が、大きく近づいてきたことを実感できるようになった。

### 3-①-(2) エレクトレット振動発電素子のパッケージ技術と信頼性評価

国立大学法人静岡大学、株式会社鷺宮製作所

#### 3-①-(2)-1 目標

非常に小さな振動エネルギーを電気エネルギーに効率よく変換するためには、振動子からのエネルギー散逸を極力小さくする必要がある。エネルギー散逸の指標は、振動の先鋭度（クオリティファクター、Q値）により評価され、その値が大きいほどエネルギー散逸は小さいと言える。MEMS振動子のQ値は、真空中の方が大気中より大きいことが知られており、本研究では振動発電素子の真空パッケージを試みる。そして真空パッケージ状態にて25℃、10年以上の寿命を最終的な目標としている。

#### 3-①-(2)-2 振動発電素子の真空中動作における効果検証

真空中における発電素子の特性を明らかにするため、櫛歯型振動発電素子を作製し、まずQ値と発電エネルギー効率の関係を調査した。振動発電素子のQ値( $Q_T$ )は、振動子のダンピング抵抗( $r_f$ )に関するQ値( $Q_i$ )と負荷抵抗(R)が等価的に機械に及ぼすQ値( $Q_L$ )により式(3)で表される。

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_L} = \frac{r_f}{\omega_0 m} + \frac{RA^2}{\omega_0 m} \quad \dots (3)$$

ここでAは力係数であり、予め測定により求めた。式(3)のように、振動発電素子のQ値の逆数はダンピングによるQ値の逆数と負荷抵抗によるQ値の逆数の和となる。そこで負荷抵抗を接続した場合としない場合のQ値を、大気、低真空、高真空の3つの条件で測定した。その測定結果を表3-①-(2)-2.1に示す。なおQ値の測定は、振動発電素子にインパルス応答を加えることにより、その減衰波形の時定数から求めた。

表 3-①-(2)-2.1 櫛歯型振動発電素子のQ値

Q値まとめ	無負荷 $Q_i$ (実測)	1MΩ負荷 $Q_T$ (実測)	$Q_i$ と $Q_L$ による $Q_T$ (計算)
大気	158	45	45.5
ロータリーポンプ引き (低真空)	296	55	52.5
ターボ分子ポンプ引き (高真空)	3190	64 ≒ $Q_L$	

無負荷時に大気中での Q 値は 158 であったが、ロータリーポンプのみで排気している低真空状態では 296 となり、ターボ分子ポンプで排気した高真空状態では 3190 という高い Q 値を示した。次に 1M $\Omega$  の負荷を接続した測定した Q 値はそれぞれ、45、55、64 となった。高真空では、ダンピング抵抗からの寄与が負荷抵抗からの寄与に対して無視できるほど小さいと考えられるため、負荷抵抗による  $Q_L$  はおよそ 64 と計算される。この値を使って、大気中と低真空での Q 値を式(3)を使って計算すると表 3-①-(2)-2.2 のようにそれぞれ 45.5、52.5 となり、1M $\Omega$  負荷の実測値とほぼ一致する。このことから、式の関係が振動発電素子でも成り立つことが確認できた。

表 3-①-(2)-2.2 Q 値と消費エネルギー、エネルギー効率の関係

	QT	消費エネルギー (nJ)	Q から計算される内部抵抗	効率 (パネのエネルギーに対する)
大気	45 (0.70=45/64)	4.03	404k $\Omega$	71%
ロータリー (低真空)	55 (0.86=55/64)	4.91	216k $\Omega$	87%
ターボ (高真空)	64(1)	5.66	20k $\Omega$	$\approx$ 100%

表 3-①-(2)-2.2 に、負荷接続に観測される電圧データから計算した消費エネルギーと振動子のパネが蓄えている弾性エネルギー (5.67nJ) に対する効率を示す。高真空では、ほぼ 100%の機械エネルギーが電気エネルギーに変換されており、大気中、低真空ではそれぞれ 71%、87%となったが、これは高真空での観測された Q 値に対する割合と同じになっている。無負荷時の Q 値から計算される振動発電素子の内部抵抗もまた表 3-①-(2)-2.2 に示してあるが、この抵抗と直列に接続される負荷抵抗 (1M $\Omega$ ) の比から計算されるエネルギー効率も、測定されたエネルギー効率とほぼ一致することが分かった。これらのことより高真空では発電素子のエネルギー効率を 100%にすることが可能であることが分かった。

次に真空度の振動発電素子の Q 値の関係を実験的に調査した。その測定結果を図 3-①-(2)-2.1 に示す。低真空において Q 値は真空度の関数となっているが、高真空では飛躍的に大きくなり、またほぼ一定の値になっている。このことから、およそ  $1 \times 10^{-2}$ Torr より高い真空で真空パッケージを作製すればよいことが分かった。

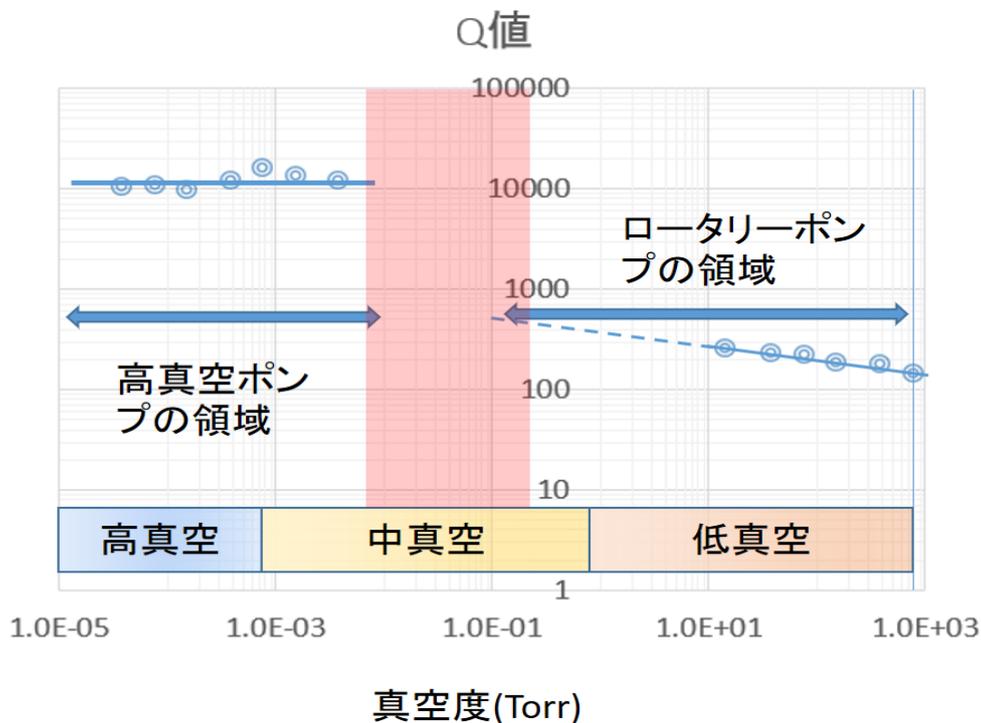


図 3-①-(2)-2.1 真空度と Q 値の関係

### 3-①-(2)-3 真空パッケージの長期信頼性評価

高真空の MEMS パッケージとして、真空管式と蛍光表示管式を外注にて作製した。図 3-①-(2)-3.1 にその外観を示す。左は真空管式で株式会社鬼塚ガラスに外注したもの、右は蛍光表示管式でノリタケ伊勢電子株式会社に外注したものである。どちらもパッケージ内にエレクトレット化した振動発電素子が収められている。これらの素子を 85°C で高温加速試験を行い、定期的に帯電電圧と Q 値の評価を行った。図 3-①-(2)-3.2 に真空管式パッケージの加速試験による帯電電圧の劣化カーブを示す。加速試験時間は約 2 か月半である。帯電の劣化はほぼ指数関数でフィッティングできるため、測定値より初期電圧に対する -1dB 劣化寿命を算出したところ 85°C では約 4.5 年の寿命であることが分かった。また図 3-①-(2)-3.3 は Q 値の変化であり、こちらは加速時間が進むにつれて若干大きくなる結果となった。従って真空度の劣化はほぼ生じていないと判断できる。



図 3-①-(2)-3.1 試作した高真空パッケージ 左：真空管式、右：蛍光表示管式

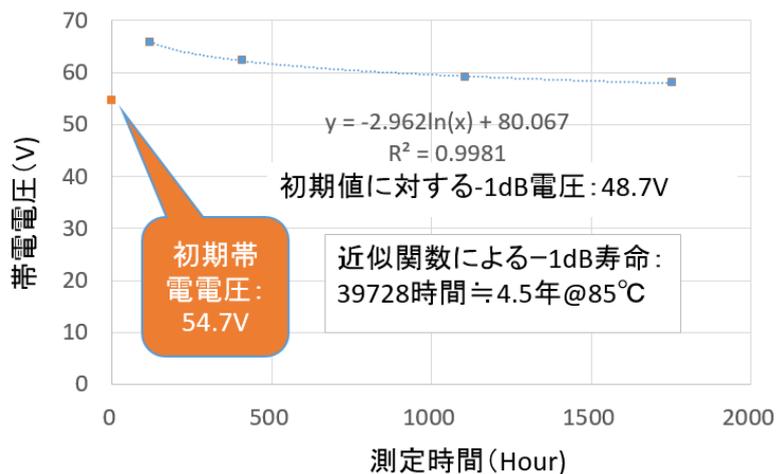


図 3-①-(2)-3.2 真空管式パッケージの加速試験による帯電電圧の推移

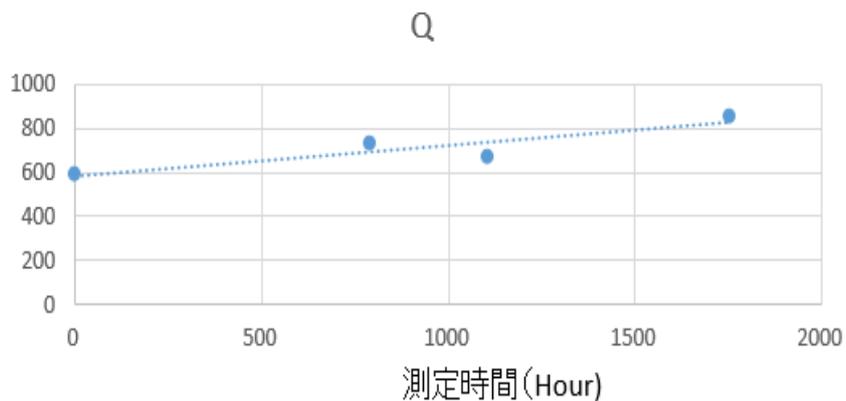


図 3-①-(2)-3.3 真空管式パッケージの加速試験による Q 値の変化

85°Cでの-1dB 劣化寿命を、従来取得している真空プローバー内の加速試験のアレニウスプロット上にプロットするとほぼ一致するデータとなり、これから室温での-1dB 劣化寿命は10年を大きく超える結果となる。これより真空管式パッケージでは、目標である25°C 10年を達成した。

蛍光表示管式パッケージについては、帯電電圧の評価はインパルス応答の初期発生電圧で、真空度は発生電圧の減衰特性から算出して評価を行った。

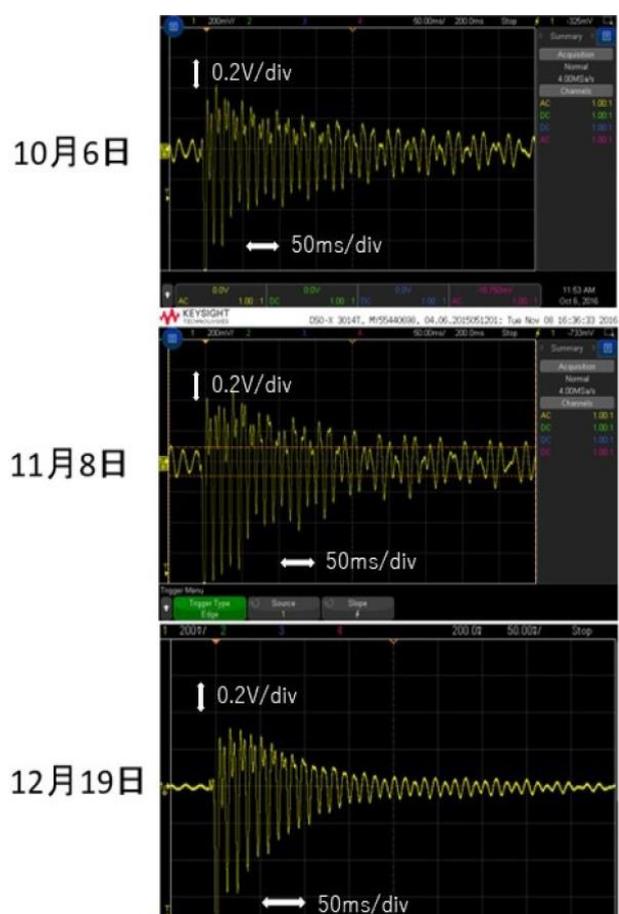


図 3-①-(2)-3.4 蛍光表示管式パッケージのインパルス応答

図 3-①-(2)-3.4 に加速試験による発生電圧のインパルス応答を示す。負荷抵抗は  $1M\Omega$  である。試験開始は10月6日であり、インパルス応答のQ値はおよそ40程度である。約1か月後の11月8日の試験では発生電圧に変化はなく、Q値も37-41の間であるが、12月19日の試験では、発生電圧に変化はないもののQ値は19程度に減少した。このことから蛍光表示管式パッケージでは、真空度が悪くなったと推測できる。通常の蛍光表示管パッケ

ージは、低融点ガラスによるパッケージ接合（450℃、10分）と脱ガス処理（350℃、10分）、さらにはゲッター材活性化によって高气密かつ高真空を実現する。しかしエレクトレット化 MEMS デバイスでは高温処理が不可能であったため、今回は表 3-①-(2)-3.1 に示した低温処理にて製作した。工程の低温化により帯電電圧の損失は防ぐことができたが、樹脂による接合では気密に限界があり徐々に真空度は劣化していったものと思われる。従って蛍光表示管パッケージでは、パッケージ工程の見直しが必要であり、帯電電圧を印加しながら高温処理ができるような設備や低融点ガラスの接合部のみ局所加熱するような設備を導入する必要がある。

表 3-①-(2)-3.1 蛍光表示管式パッケージの加熱工程と仕様の比較

	シール材	パッケージ 接合	脱ガス 処理	ゲッター材	真空度 (Torr)	気密 寿命
一般的な 蛍光表示管	低融点 ガラス	450℃、 10分	350℃、 10分	有り	$7.5 \times 10^{-7}$ 以下	10年 以上
本件試作品 図 3-①-12 右	エポキシ 系樹脂	150℃、 30分	100℃、 20分	活性直後に 劣化	$10^{-3}$ 程度	半年 程度

#### 3-①-(2)-4 まとめ

エレクトレット振動発電素子の真空パッケージ技術の検討を行った。まず振動発電素子に必要な真空度を測定により明らかにした。またその時の発電エネルギーのエネルギー効率について考察した。エレクトレット MEMS 振動発電素子の真空パッケージとしては、真空管式と蛍光表示管式パッケージを試作した。真空管式パッケージでは高温加速試験により、25℃で10年以上の寿命が得られ、本研究の目標値を達成した。しかしながら蛍光表示管式パッケージでは、真空度の劣化がみられ長期信頼性を担保する結果が得られなかった。これは製造工程においてエレクトレットの劣化を避けるため高温工程をできなかったことが原因であり、今回は予算と時間の関係で実施しなかったが、エレクトレット MEMS 専用の装置を開発する必要がある。

### 3-② 大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエネルギーハーベスタ応用

#### 3-②-(1) イオン液体のエネルギーハーベスタ応用検討

株式会社鷺宮製作所

##### 3-②-(1)-1 イオン液体を用いたエネルギーハーベスタの設計指針抽出

イオン液体の電気二重層からなるキャパシタは、実効的な電極間隔が極めて小さい（1 ナノメートル程度）にもかかわらず外部の振動に対して短絡することなく安定に利用できるため、エネルギーハーベスタの発電効率の飛躍的な改善（従来比 2 桁以上）が期待される。また、イオン液体に少量のポリマーを混ぜることで、電位窓・電気二重層キャパシタの特性を維持したままゲル化できることもわかっており、これを利用することで液体の状態に比べてより広い応用が期待できる。

従来はイオン液体と電極の接触界面にできる電気二重層キャパシタを形成させるために、外部から電源を用いて電極に電圧を印加していた。この方法では、エネルギーハーベスタとして有効に使用することができない。そこで、固体イオンエレクトレットを外部電源の代わりとして用い、電気二重層キャパシタの形成を目指した。ただし、固体イオンエレクトレットは金属電極と外部電源の組み合わせとは異なり、あくまでイオンを固定した絶縁物であるため、金属電極のように自由に電子がその内部を動けるわけではない。言い換えると、イオン液体との接触界面などの描像は、金属電極と外部電源の組み合わせの場合と、エレクトレットの場合とでは大きく異なる。

そこで本テーマでは、まず、エレクトレットを用いてイオン液体との界面に電気二重層キャパシタを形成してエネルギーハーベスタとして利用するため、固体イオンエレクトレット、イオン液体、及び（金属）電極をモデル化し、エレクトレットの絶縁膜の厚さ、帯電電圧など重要なパラメータについての設計指針を明らかにした。

##### 3-②-(1)-2 イオン液体と固体イオンエレクトレットによる電気二重層キャパシタのモデル化

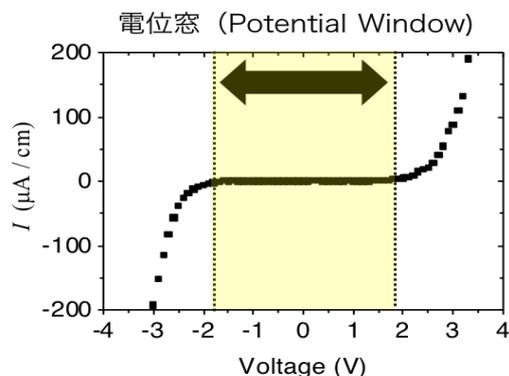


図 3-②-(1)-2.1 イオン液体の電位窓

イオン液体を（金属）電極で挟み込み、電極間に電圧を印加すると、ある電圧範囲では電流は流れない（図 3-②-(1)-2.1）。これは電位窓（Potential window）と呼ばれ、この時に電極とイオン液体の界面に電気二重層キャパシタを形成することが知られている。そこで、これらをモデル化し、エネルギーハーベスタとしての設計指針を明確にする必要がある。また、イオン液体モデルはこの電位窓を表現できるモデルとする必要があった。そもそもイオン液体は、カチオンという有機のプラスイオンとアニオンという有機のマイナスイオンのみで構成され、常温（100℃以下）では液体として存在する。そこで、図 3-②-(1)-2.2 に示すような液体かつ導体とし、さらにここでは、電気二重層ギャップに相当する 1nm の絶縁皮膜で覆われ、その絶縁皮膜の耐電圧は図示するようにどちらの方向も 1V であるとしてモデル化した。これにより、図 3-②-(1)-2.2 で示すような電位窓を持ち、また電極の変位により自由に形を変えることができる液体で、かつイオン伝導の様子も表現できた。

次に、この電極で挟んだイオン液体に電圧を印加した場合を考えた。図 3-②-(1)-2.3 は、電位窓の範囲内の 2V を電極間に印加した様子である。この時、上電極、下電極の絶縁皮膜にはそれぞれ 1V が加わった状態となり、電気二重層キャパシタが形成され、直流電流  $i$  は流れないことがわかる。

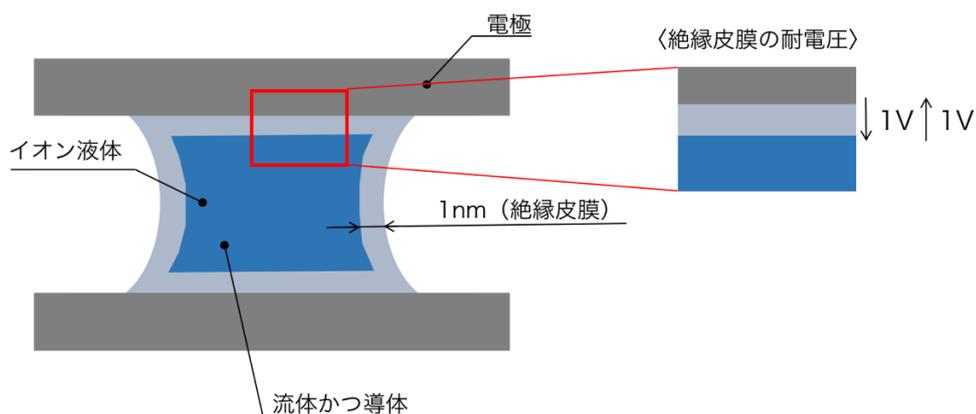


図 3-②-(1)-2.2 イオン液体の電位窓

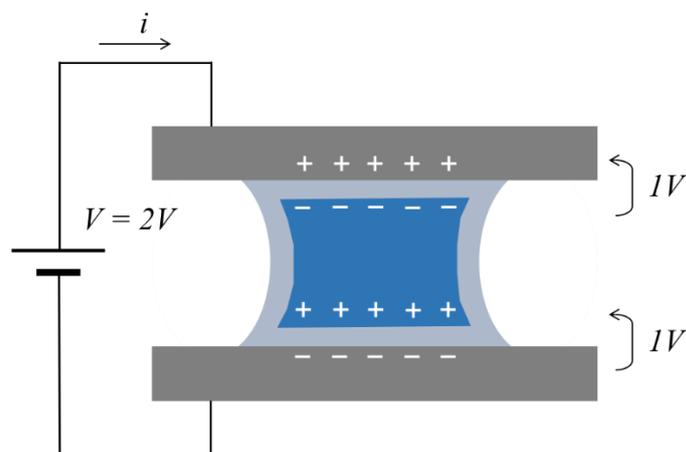


図 3-②-(1)-2.3 イオン液体の電気二重層キャパシタ

次に、仮想的に上電極をイオン液体の絶縁皮膜の 1,000 倍の厚みである  $1 \mu\text{m}$  だけイオン液体から離して、この電極間に 100V 印加した場合を考えた。この時、上電極とのキャパシタンスを  $C_1$ 、下電極とのキャパシタンスを  $C_2$  とすると、接触面積が同じときには、キャパシタンスはギャップの比となり  $C_1 : C_2 = 1 : 10^3$  となる。つまり、上下それぞれイオン液体の絶縁皮膜には 0.1V しかかかっていないことがわかる。これを考慮の上、次に下電極がエレクトレットの場合のエレクトレット帯電電圧とイオン液体（絶縁皮膜）に印加される電圧を考えた。ここで、電極材質は上下ともにハイドープシリコン（以下 Si）とした。

図 3-②-(1)-2.3 に示したのは  $\text{SiO}_2$  膜内に電荷が固定されたエレクトレット電極、イオン液体、そして上下 Si 電極である。ここで、エレクトレット中の固定されたイオンは Si 下

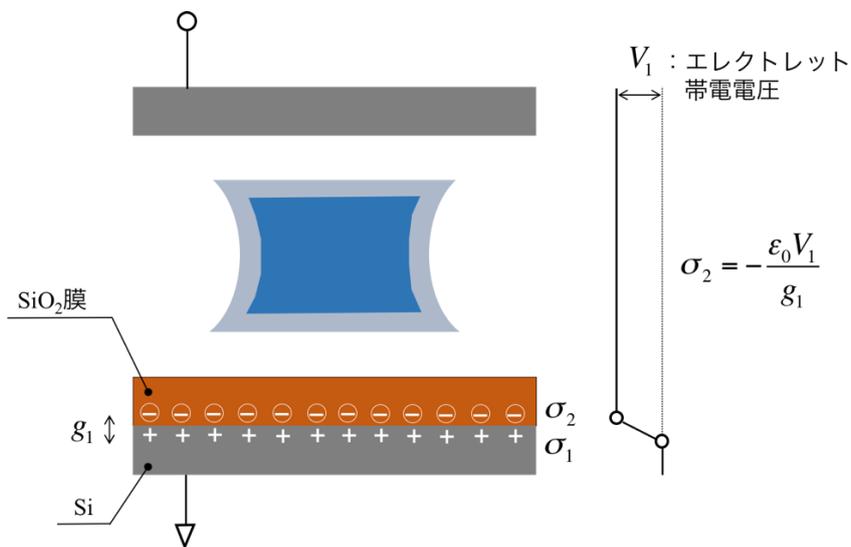


図 3-②-(1)-2.4 固体イオンエレクトレット電極による電圧

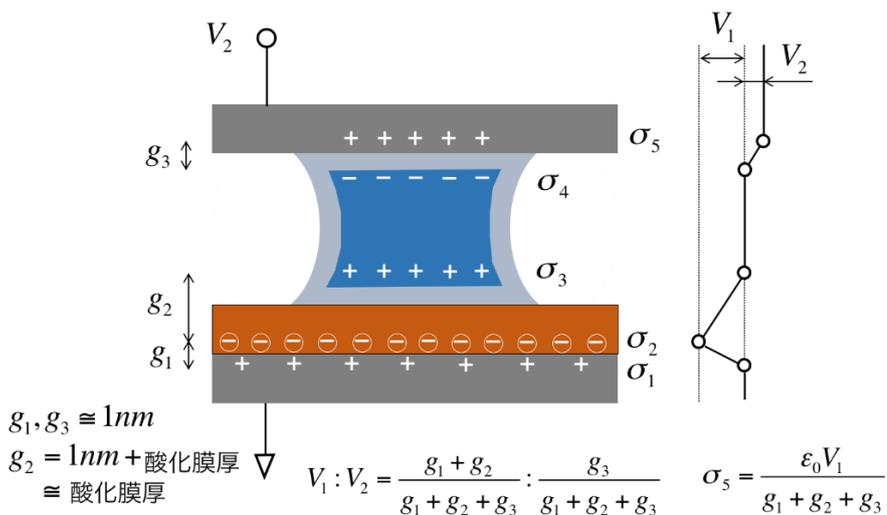


図 3-②-(1)-2.5 固体イオンエレクトレット電極とイオン液体モデル

電極との界面にあると仮定した（この仮定の根拠は、「3-①高密度固体イオンエレクトレットのエナジーハーベスタ応用」のSIMSデータによる）。すると、図に示したようにエレクトレット内のマイナスイオンと、Si 下電極の界面に電気二重層を形成する。この電気二重層のギャップを  $g_1$ 、エレクトレット帯電電圧を  $V_1$  とすると、このときの固体イオンエレクトレットの面電荷密度  $\sigma_2$  は、式（4）と表せる。

$$S_2 = -\frac{e_0 V_1}{g_1} \quad \dots \quad (4)$$

また固体イオンエレクトレットと接している Si 電極には面電荷密度  $\sigma_1$  が同様に界面に現れる。一方、イオン液体、及び Si 上電極が十分に離れているとすると、それらには何も影響がない。なお、図中の右側には、左図のモデルに対応した電位を表しており、帯電電圧  $V_1$  と同じになった。

次に、この固体イオンエレクトレット上にイオン液体、上電極が順に接触している場合、電荷分布は図 3-②-(1)-2.4 のように表すことができる。ここで、上電極に生じる面電荷密度を  $\sigma_5$ 、イオン液体の上電極との接触界面に生じる面電荷密度を  $\sigma_4$ 、下部の固体イオンエレクトレットとの界面に生じる面電荷密度を  $\sigma_3$  とすると、それぞれが接触したことにより、図示した通りに変化する。まず、下部電極、固体イオンエレクトレット、およびそこに接するイオン液体（下部電極側）について考えると、固体イオンエレクトレット内の固定電荷による面電荷密度は図 3-②-(1)-2.3 と同じである。これに対し、固体イオンエレクトレットと接している Si 電極の  $\sigma_1$  は、 $\sigma_2$  よりはやや小さな値となる。これは、下部の固体イオンエレクトレットとの界面に生じる面電荷密度  $\sigma_3$  に比べ、ギャップ  $g_1$  が図に示したように約 1 nm であるのに対して、 $g_2$  はおよそ  $\text{SiO}_2$  膜厚（酸化膜厚）と大きくなるためである。最終的に、上電極には図で示したように、 $\sigma_3$  と同じ  $\sigma_5$  がイオン液体を介することで現れる。この時の上電極の電位を  $V_2$  とし、エレクトレットの帯電電圧  $V_1$  と比較すると、それぞれ電気二重層のギャップのみで表すことができ、式（5）となる。

$$V_1 : V_2 = \frac{g_1 + g_2}{g_1 + g_2 + g_3} : \frac{g_3}{g_1 + g_2 + g_3} \quad \dots \quad (5)$$

ここで、 $\text{SiO}_2$  膜の比誘電率  $\epsilon = \text{約} 4$  を考慮すると、 $V_2$  は上電極に現れた電圧であり、これは固体イオンエレクトレットがない場合、つまり単純に金属電極でイオン液体を挟んだ場合の外部電圧に相当する。

以上をまとめると、イオン液体の電位窓の大きさがわかれば、固体イオンエレクトレットの必要な膜厚、帯電電圧が導出できる。図 3-②-(1)-2.6 には例として、電位窓が 2V、固体イオンエレクトレット膜厚  $g_2$  が 200nm、帯電電圧  $V_1$  が 100V のとき、エレクトレットのない外部から電圧印加した等価モデルとした時のイオン液体の両端にかかる電圧  $V_2$  を

示している。この時の等価モデルにおける両端電圧に相当する電圧は、図 3-②-(1)-2.6 固体イオンエレクトレット電極による電圧は式 (6) で求めることができ、この値が使用するイオン液体の電位窓を超えなければよいことがわかった。

$$\text{両端電圧(V)} = \frac{(\text{導体}) \text{電気二重層ギャップ}(=1\text{nm}) \times \text{帯電電圧 (BT処理電圧)} (V)}{2V} = \frac{100V}{\frac{\text{絶縁膜厚 (酸化膜厚)} (nm)}{200nm} / \frac{\text{絶縁膜 (酸化膜) 比誘電率}}{4}} \dots (6)$$

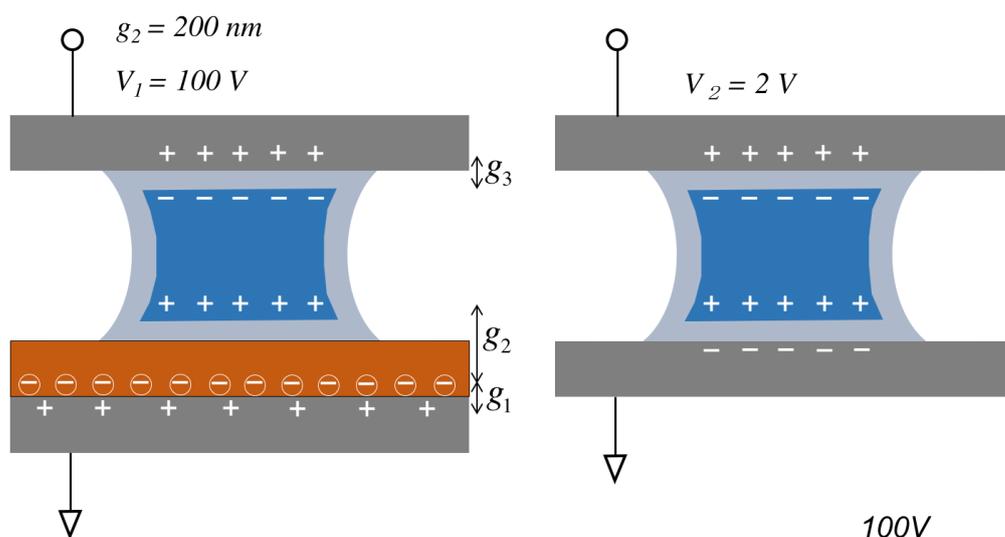


図 3-②-(1)-2.6 固体イオンエレクトレット電極のモデルとで電圧算出の式

### 3-②-(1)-3 イオン液体と固体イオンエレクトレットによる電気二重層キャパシタの設計指針

固体イオンエレクトレットとイオン液体を組み合わせた系をモデル化し、解析した結果、上図 3-②-(1)-2.6 に示したように等価回路モデルを明らかにすることができた。以上から下記のことわかった。

- ・イオン液体に印加される電極間電圧は、固体イオンエレクトレットの固定電荷との距離（ギャップ）、面電荷密度（帯電電圧）により決まる。
- ・固体イオンエレクトレットは他のエレクトレット方式に比べ、固定電荷とのギャップが SiO<sub>2</sub> 膜の厚さ、また、面電荷密度は BT 処理（帯電処理）の印加電圧で決まるため、他の打ち込み型などのエレクトレットと比べ、「コントロール性」が非常に高く、イオン液体の電気二重層キャパシタとの相性が非常に高い。

### 3-②-(1)-4 まとめ

固体イオンエレクトレットを用いることで、イオン液体との界面の電気二重層キャパシタを、外部電源から電圧を印加したのと同じ状態を作り出すことが可能であることがわかった。

### 3-②-(2) イオン液体のゲル化検討

株式会社鷺宮製作所

#### 3-②-(2)-1 イオン液体の性質を維持したままゲル化して発電性能の向上

イオン液体は固体イオンエレクトレットと接触することで、電極との接触界面に電気二重層キャパシタを形成し、その接触面積が変化することで発電する。この設計指針については前項 3-②-(1)で明らかにした。ところが、実際には固体イオンエレクトレットの固定イオンと、イオン液体が電気二重層キャパシタを形成する際に生じる静電引力により、イオン液

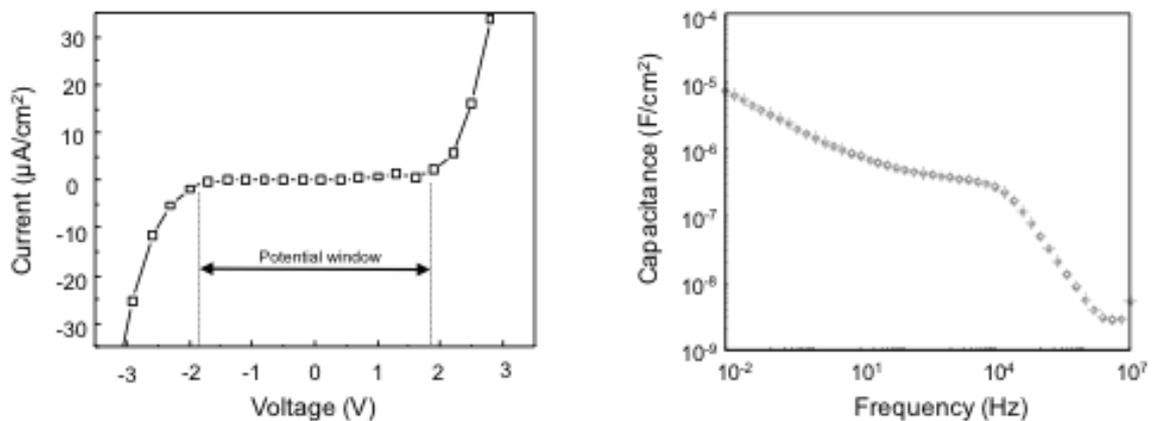


図 3-②-(2)-1.2 ゲル化イオン液体の電位窓とキャパシタンス

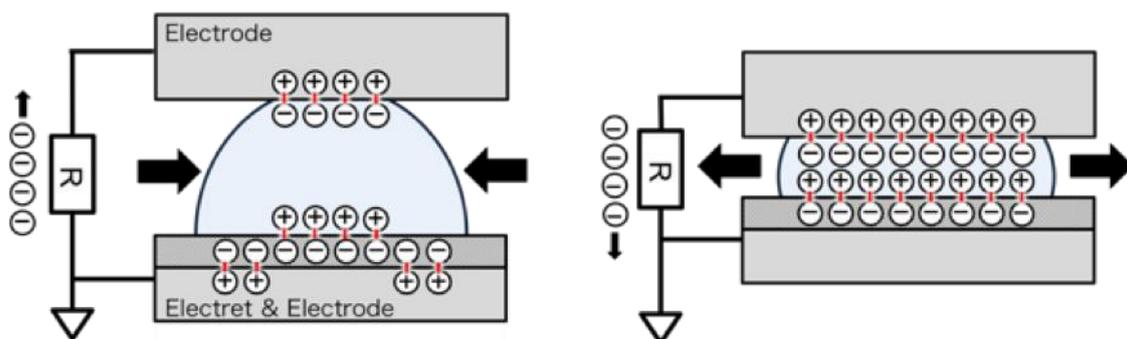


図 3-②-(2)-1.1 ゲル化イオン液体を使った発電のコンセプト

体のイオン自体が電極界面から離れづらくなり、想定しているより発電量を得られない問題があることがわかった。そこで、下図 3-②-(2)-1.1 に示すように、ゲルの機械的な反力を用いてこの静電引力に打ち勝つことを狙う。ここで重要なのは、イオン液体のもつ電位窓、電気二重層の性質を維持したままイオン液体をゲル化しなければならず、これを実現するための新たな手法の構築を目指す。最終的に、ゲル化したイオン液体の弾性を利用することで、イオン液体をそのまま可変キャパシタとして用いた場合に比べ、大きな発電電流が期待できる。

### 3-②-(2)-2 ゲル化イオン液体の製作及び諸特性評価

イオン液体は前述の通り、カチオン（陽イオン）とアニオン（陰イオン）のみからなり、常温では蒸気圧がほとんどゼロの有機液体である。通常はイオン伝導性を示すが、おおよそ  $\pm 1 \sim 3$  V の電位領域（電位窓）においては実質的には電流が流れず、電極とイオン液体の界面に非常に大きな電気容量を持つ電気二重層キャパシタが形成される。図 3-②-(2)-1.1 に本プロジェクトで作製したゲル化イオン液体の特性を示す。図からもわかるように、本ゲル化イオン液体は通常のイオン液体とは異なりポリマーを混ぜたゲル状になっているにも関わらず、一般的なイオン液体と同様に大きな電位窓を持ち、また  $10 \mu\text{F}/\text{cm}^2 \sim 0.2 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  程度（周波数  $0.1 \text{Hz} \sim 1 \text{MHz}$ ）の非常に大きなキャパシタを電極とイオン液体の界面に持つことがわかる。これは、本ゲルが固体化（ゲル化）しているにも関わらず、そのゲル内をカチオンもアニオンも自由に動くことができることを意味しており、このことによりイオン液体と同様の特性を示すと考えられる。

次に、本ゲル化イオン液体の作製方法を図 3-②-(2)-2.1、また本プロジェクトで選定したイオン液体と作製したゲル化イオン液体の外観写真を図 3-②-(2)-2.2 に示す。本ゲルの作製方法は、まず、イオン液体と溶剤に溶かしたポリマー、そして光重合開始剤を混ぜ合わせる。そしてこれをガラス基板に適量を滴下する。すると半球状の形状を保つため、それをホットプレートに乗せて  $100^\circ\text{C}$  に加熱すると、ポリマー中の溶剤のみが揮発する。最後に、UV を照射すると硬化しゲル状のイオン液体が完成する（図 3-②-(2)-2.2）。また、本ゲルでは図に示すようにカチオンが TMPA、アニオンが TFSI というイオン液体を使用した。

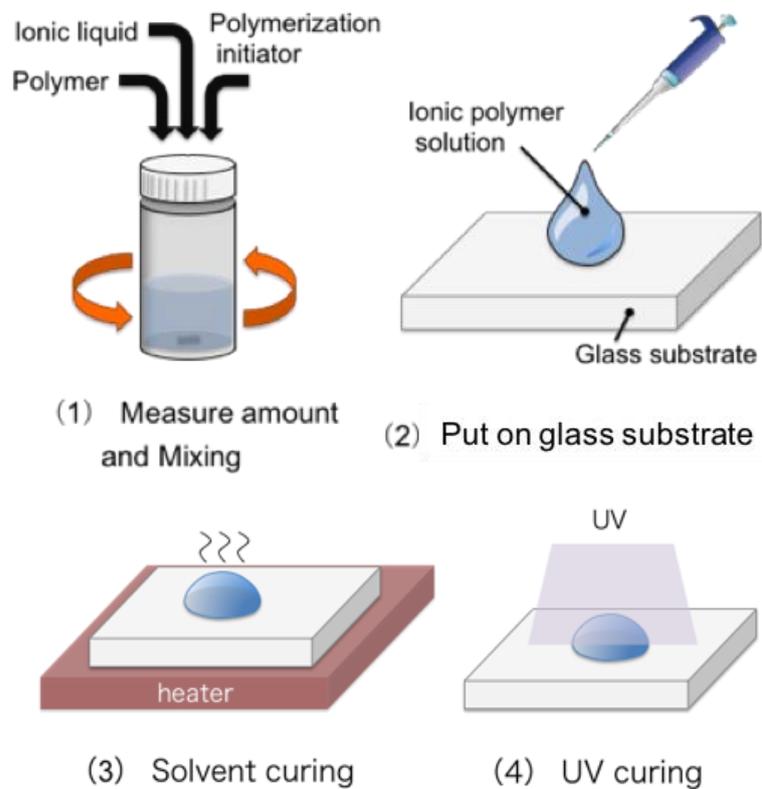


図 3-②-(2)-2.1 ゲル化イオン液体の作製工程

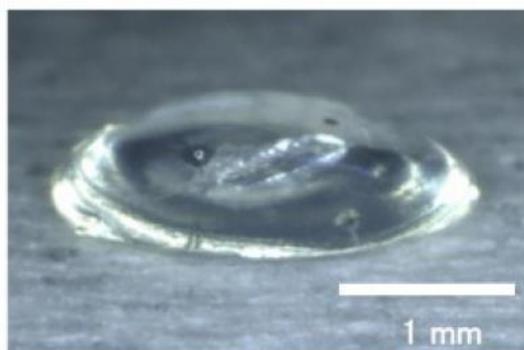
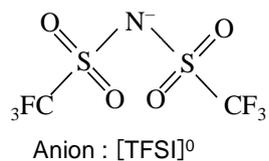
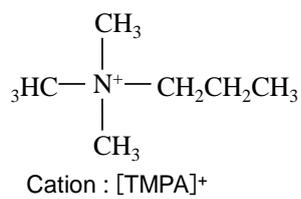


図 3-②-(2)-2.2 使用したイオン液体とゲル化イオン液体外観写真

### 3-②-(2)-3 発電原理検証実験

以上より作製したゲル化イオン液体を用いて、発電の原理検証を行った。ここでは、固体イオンエレクトレットを模擬して外部電源を使用した。図 3-②-(2)-3.1 に実験セットアップを示す。まず、金属電極間に上記で作製したゲル化イオン液体を挟み込んだ。そしてそれぞれの電極に外部電源を図のように接続した。すると上部電極とゲル化イオン液体の界面、また下部電極とゲル化イオン液体の界面にはそれぞれ図示したような電気二重層キャパシタが形成される。このとき、下部電極はファンクションジェネレータからの信号により振動を発生させるシェイカーを機械的に接続した。また負荷抵抗を介して図示するように I-V コンバーターと電氣的に接続した。このとき、I-V コンバーターは図示するように GND と接続してあり、下部電極は負荷抵抗を介して仮想接地された状態となる。これにより、図示したオシロスコープで計測する電圧は、外部電源による電流ではなく、ゲル化イオン液体が下部電極の上下の振動により発生した微小電流であると言える。

図 3-②-(2)-3.2 に本発電実験より得られた結果を示す。ここで、上のグラフは電極間にイオン液体、下のグラフはゲル化イオン液体を挿入した実験結果である。ここでは比較のために、それぞれ接触面積の変化しない下面の面積（イオン液体： $1\text{cm}^2$ 、ゲル化イオン液体： $3.2\text{mm}^2$ ）で規格化した単位面積あたりの電流とした。その結果、イオン液体を使用した時は  $1.9\mu\text{A}\cdot\text{p}\cdot\text{cm}^{-2}$  であったのに対し、ゲル化イオン液体を使用した時は  $22\mu\text{A}\cdot\text{p}\cdot\text{cm}^{-2}$  であり、約 11 倍の電流が増えた。

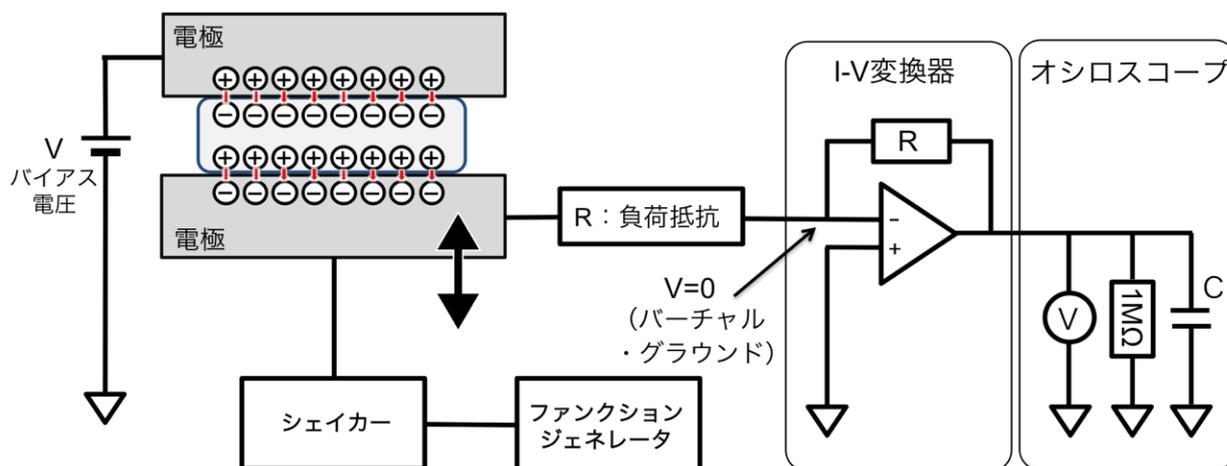
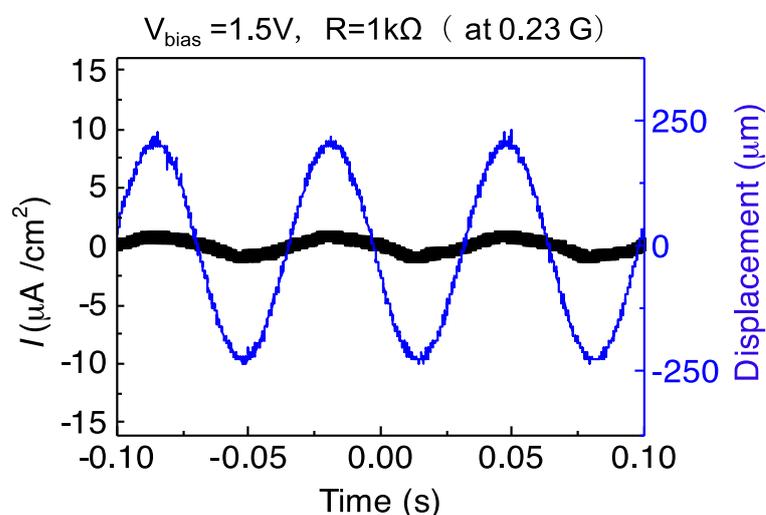
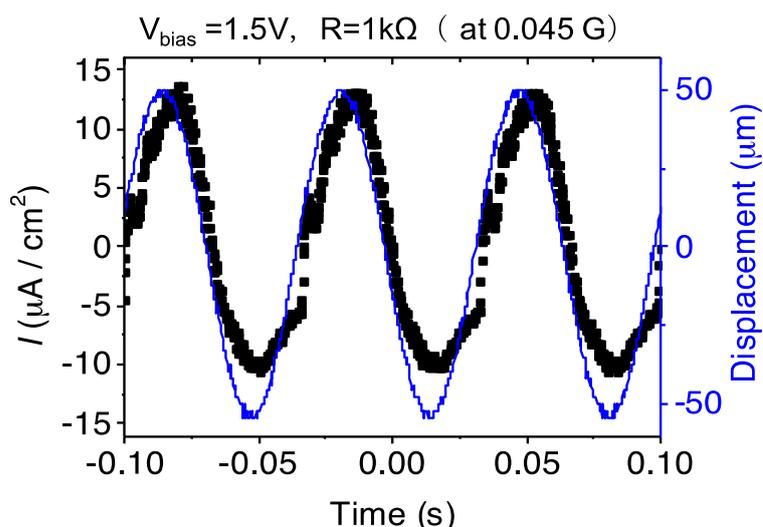


図 3-②-(2)-3.1 発電実験用セットアップ



(a) Output currents of ionic liquid.



(b) Output currents of solidified ionic liquid.

図 3-②-(2)-3.2 イオン液体とゲル化イオン液体の発電実験結果  
(黒線が電流、青線が振動変位を表す)

#### 3-②-(2)-4 まとめ

本研究では、イオン液体のもつ電位窓、電気二重層の性質を維持したゲル化イオン液体を作製に成功した。また、ゲルの弾性を利用することで、イオン液体をそのまま可変キャパシタとして用いた場合に比べ、約 11 倍の単位面積あたりの発電電流を得ることができた。

### 3-②-(3) ゲル化イオン液体のイオン固定方法検討

株式会社鷺宮製作所

#### 3-②-(3)-1 ゲル化イオン液体のイオン固定方法検討・確立

単にイオン液体をポリマーと混合してゲル化すると、今まで 3-②-(2) で見たようにゲル内をカチオン、アニオンはそれぞれ自由に動くことができ、イオン液体だけの時のように振舞うことがわかった。ここで、電極とイオン液体の界面で電気二重層キャパシタを形成した状態で、カチオン、アニオンをそれぞれ表面に固定できれば、それだけでエレクトレットとなり、発電することが期待される。この実現により、摩擦発電のように接触するだけで発電が期待できるが、その原理は従来方法とは異なる全く新しい方法となり得る。

絶縁物内にイオンや電子を固定したエレクトレットの作製方法は、従来から様々な方法が提案されている。ところが、それらは物理的に外部から電子を注入したり、電圧を印加してイオンを移動させたりして、いずれの方法も物理的にそれらを保持している（本プロジェクトの固体イオンエレクトレットも同様である）。ところが、本テーマ内で作製しようとしている、イオンを表面に固定したゲルもエレクトレットであるがイオン液体中のイオンとポリマーの化学結合によりイオンの固定を目指しており、これは他のエレクトレット技術とは全く異なる。つまり、イオンと絶縁物が化学的に結合しているため結合が強固となり、金属電極などが直接エレクトレット表面に接触してもイオンが抜けたりせずに安定したエレクトレットが期待できる。

本発電方法のコンセプトを図 3-②-(3)-1.1 に示す。電極でこのイオン固定したゲル化イオン液体（以下ゲルエレクトレット）を挟み込む。一方の電極（図中下電極）はこのゲルエレクトレットと接触しており、他方の電極（図中上電極）のみでこのゲルエレクトレット表面に接触・剥離を繰り返す。

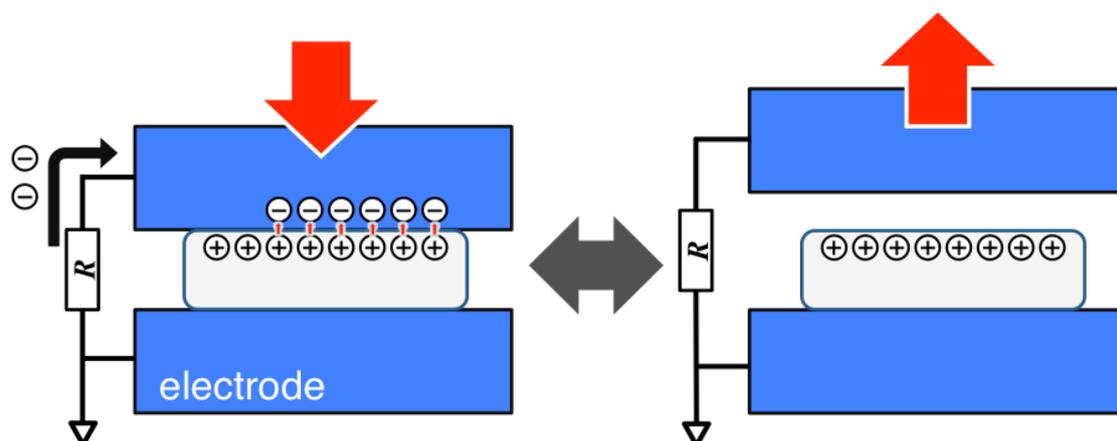


図 3-②-(3)-1.1 イオンを固定したゲル化イオン液体を用いた発電コンセプト

これにより、ゲルエレクトレット表面に固定されたイオンにより、電極に電荷が静電誘導され発電することができる。これは、従来の静電方式とは異なり、エレクトレットと電極の電気的な絶縁を保つことから、機械的な一定のギャップを保つ必要がないため、構造自体が非常に堅牢にでき、またその静電容量はイオン液体の電機二重層キャパシタに由来するため非常に大きな発電量が期待できる。

そこで本プロジェクトでは、まず、ゲルエレクトレットをエネルギーハーベスタとして利用するため、イオン液体、ポリマー、重合開始剤を最適化し、イオンをポリマーに化学的に結合・固定させる技術を開発して、パラメータ等を明らかにした。また、そのゲルエレクトレットを使ってデモンストレーションを行い、エネルギーハーベスタとしての可能性を示した。

### 3-②-(3)-2 ゲルエレクトレットの製作

イオン液体はカチオンとアニオンの組み合わせにより様々な種類があるが、どのイオン液体でもポリマー表面に固定できるわけではない。そこで、ポリマーと化学結合させるために、重合性イオン液体と重合性ポリマーを用いてゲルエレクトレットの製作を行った。特に、カチオンとポリマーに同じ重合性基を持つ組み合わせを用いた。図 3-②-(3)-2.1、図 3-②-(3)-2.2 に本プロジェクトで用いたゲルエレクトレット製作方法を示した。まず、図 3-②-(3)-2.1 に示したように、イオン液体のカチオンには二重結合の官能基、同様に UV 硬化性ポリマーも二重結合官能基を持ったもの、さらに、光重合開始剤をある重量比で混合し攪拌した。この段階では、まだイオン液体のカチオン官能基とポリマーの官能基とは結合しない。この官能基どうしは、図 3-②-(3)-2.1 に示すように、のちに UV 硬化時に結合する。

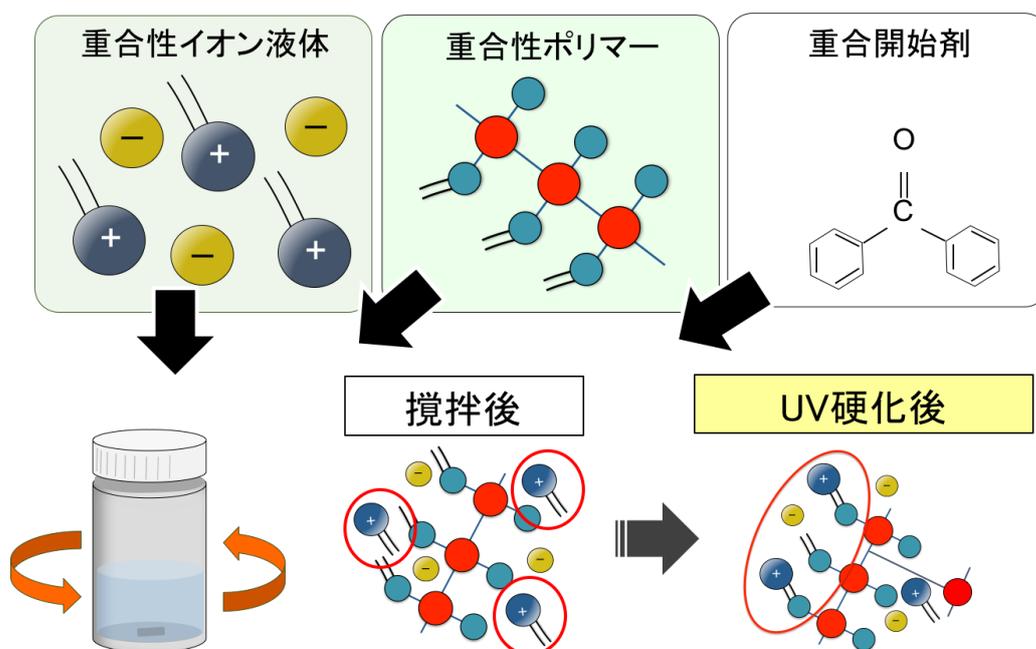


図 3-②-(3)-2.1 イオンを固定したゲル化イオン液体を用いた発電コンセプト

続いて、図 3-②-(3)-2.2 に示すように、ガラス基板に金を蒸着した電極を用意した。ここで、上部電極との電氣的絶縁とともに、最終的なゲルエレクトレットの厚みを決めるために 500 $\mu\text{m}$  の絶縁スペーサを下図に示すように配置し、そこに図 3-②-(3)-2.1 で混合・攪拌した。混合イオン性ポリマー液適量を滴下した。このとき、下図 3-②-(3)-2.2 の写真で示すように、スペーサ高さより滴下した混合液の高さが高くなるような量を滴下することで、上電極と接触することができる。ここで、上電極は UV が透過できるように、ガラス基板上に ITO を蒸着した透明な ITO 電極とした。下図 3-②-(3)-2.2 のようにスペーサを介して上下電極で挟み込み、下の金電極にプラスの電圧、上の ITO 電極を GND に接続した。これに電位窓の範囲内の電圧を外部電源から印加することにより、混合イオン性ポリマー液中のカチオンは下電極表面に、アニオンは上電極表面に電気二重層キャパシタを形成することができる。この状態でポリマーが硬化すると、ゲル表面にイオン（ここではカチオンのみ）を固定したゲルエレクトレットを得ることができる。

ここで、図 3-②-(3)-2.3 で示した実験セットアップにより、ゲル硬化工程中の上下の電極間の電流をソースメジャーユニット (Source Measure Unit : 以下 SMU) を用いてモニタした。これは、カチオン、アニオンのそれぞれのゲル内での動きは電流として計測できるからであり、この電流を計測することで、各電極との表面に電気二重層キャパシタが形成できているかの判断とした。ここでは、図 3-②-(3)-2.3 の電流計測グラフで示したように、上下の電極間には常時電位窓の範囲内の電圧を印加しながら、光源から 3 回に分けて UV 照射を行った。これは、予備実験での電流計測において、複数回の UV 照射により上下電極間の電流量を最小化できることがわかっていたためである。図 3-②-(3)-2.3 の電流計測結果からもわかるように、UV 照射の 2 回目以降は電流の変化もほとんどなく安定していると言える。図 3-②-(3)-2.4 に、本プロジェクトで作製したゲルエレクトレットの外観写真を示す。

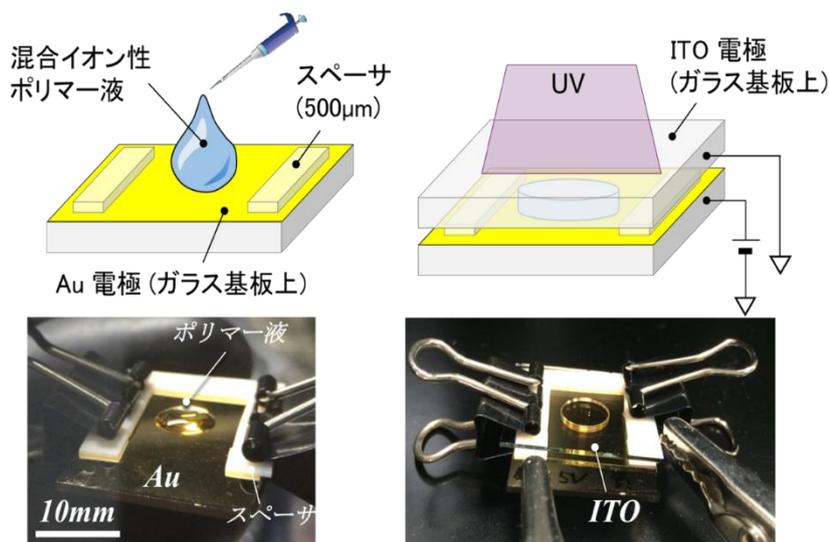


図 3-②-(3)-2.2 ゲルエレクトレット作製時の混合液滴下、UV 硬化プロセス

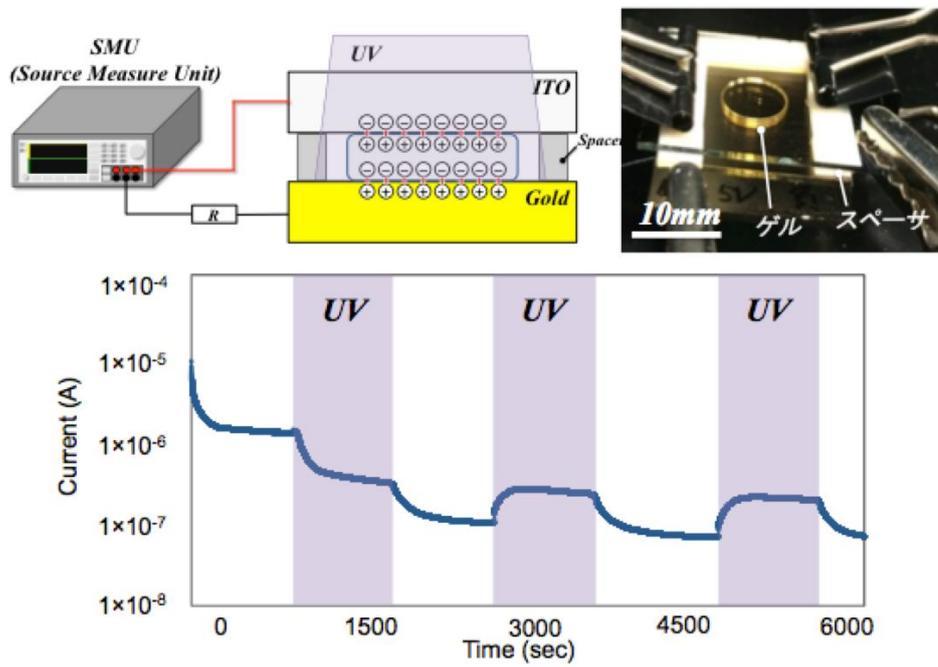


図 3-②-(3)-2.3 ゲル硬化時の電流計セットアップと電流計測結果

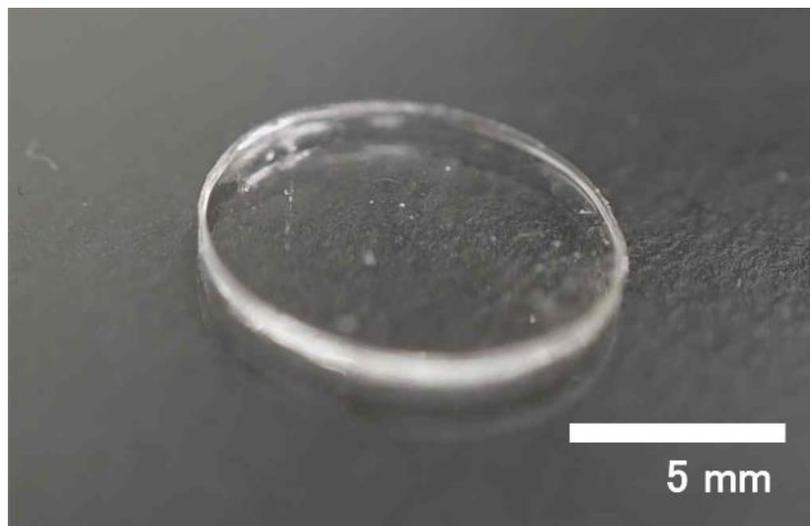


図 3-②-(3)-2.4 ゲルエレクトレット外観写真

ゲルエレクトレットの直径は 10mm 弱であり、厚さはゲル硬化時に使用したスペーサと同じ 500 $\mu\text{m}$  であり、無色透明である。また、本ゲルの荷重と変位を表したグラフを図 3-②-(3)-2.5 に示す。このグラフからも明らかなように、本ゲルの硬さは基材のポリマー硬さとほぼ同じであり、柔軟性を持っていることがわかる。以降、本ゲルエレクトレットを用いて、発電実験検と LED 点灯デモンストレーションを行った。

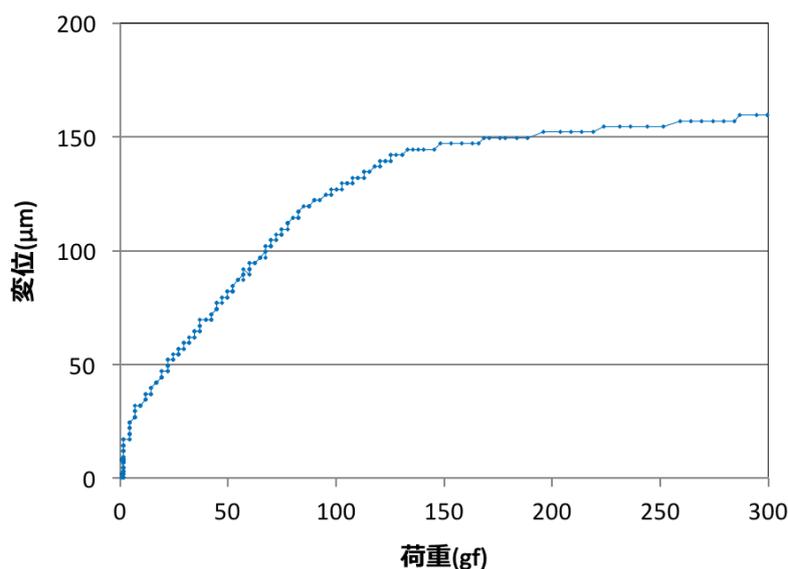


図 3-②-(3)-2.5 ゲルエレクトレットの荷重と変位の関係

### 3-②-(3)-3 ゲルエレクトレット発電実験検証及びデモンストレーション

図 3-②-(3)-3.1 に本プロジェクトにおけるゲルエレクトレット発電用の実験セットアップを示す。下図のように、上下電極とも金電極を用い、また下電極は振動を発生させるシェーカーに接続し、上電極は図示しないが固定端に固定した。また、電圧の計測にはデジタルマルチメータ (Digital multimeter : 以下 DMM) を用いて、負荷抵抗の両端電圧を計測した。

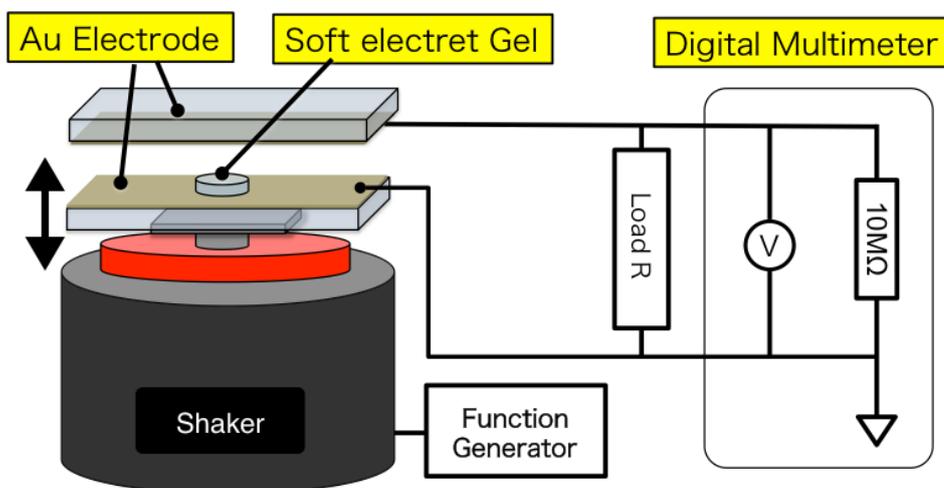


図 3-②-(3)-3.1 ゲルエレクトレット発電実験セットアップ

図 3-②-(3)-3.2,3 に発電実験結果を示す。それぞれの図からも明らかなように、振動開始から約 100 秒後に電流、電圧共に安定しているのがわかる。安定後の電流密度は約  $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$  であり、およそ  $0.7\text{V}$  の電圧であった。ただし、ここでは電流、電圧共にプラス側しか計測できなかった。これは、この段階ではカチオンのみの固定で、アニオンの固定ができていないことに起因すると思われるが、イオン自体を可視化することが困難なこともあり、詳細はわかっていない。ただし、この結果にはマイナス方向の電流がないので、別途整流機能を持ったデバイスを必要としない点でメリットがあるとも考えられる。

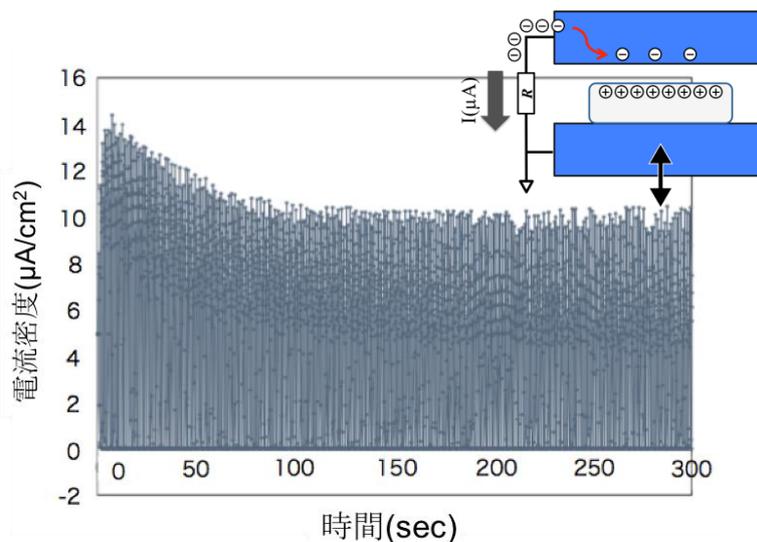


図 3-②-(3)-3.2 ゲルエレクトレット発電電流

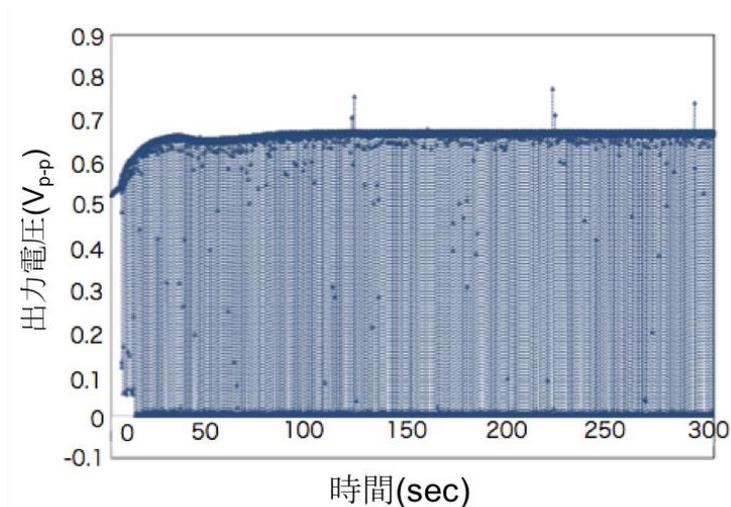


図 3-②-(3)-3.3 ゲルエレクトレット発電電圧

次に、本プロジェクトで開発したゲルエレクトレットを用いて、LED 点灯のデモンストレーションを行った。ここで、本デモンストレーションで用いたゲルエレクトレットの材

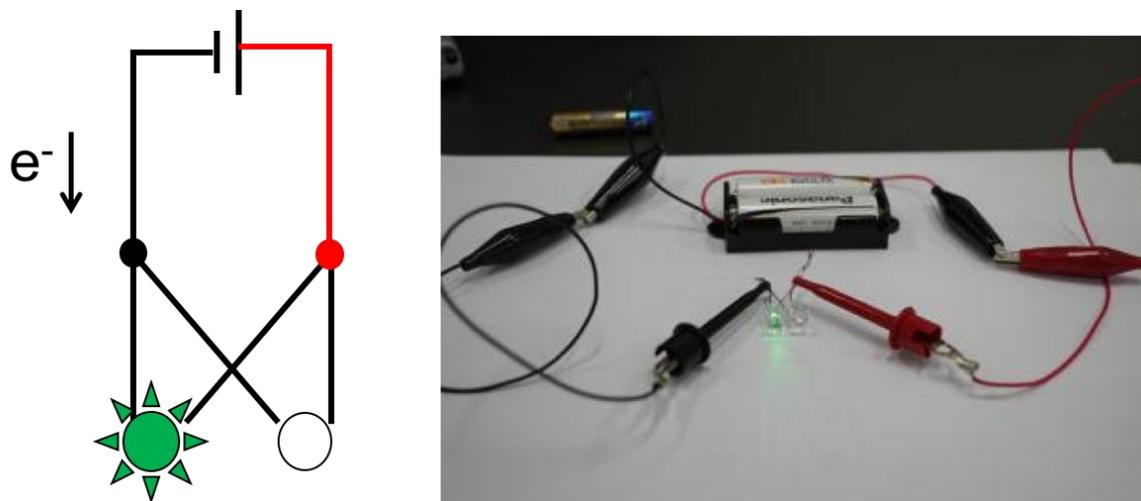


図 3-②-(3)-3.4 デモンストレーション回路の電流の向き確認予備実験

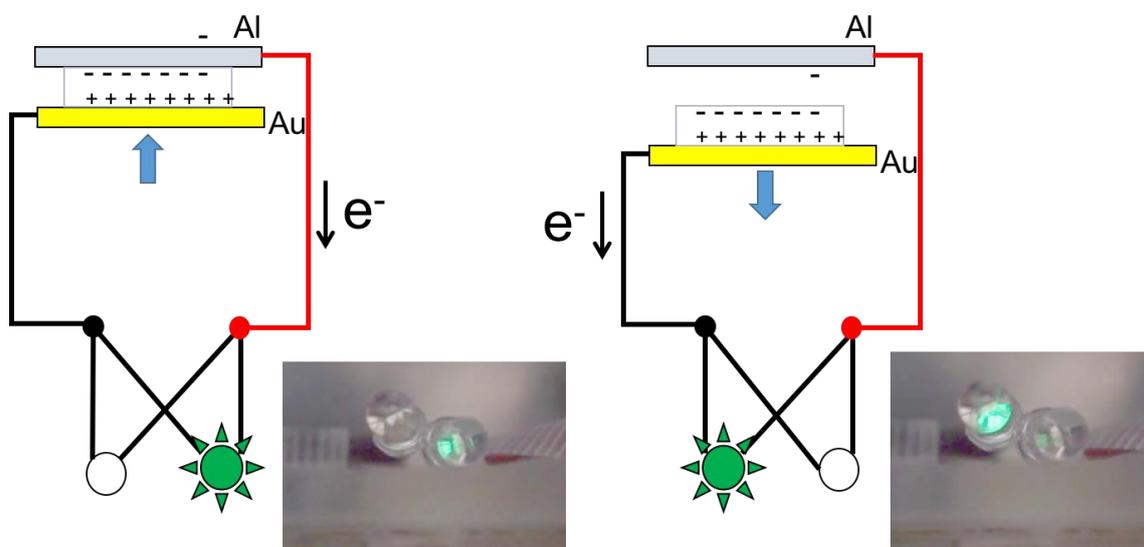


図 3-②-(3)-3.5 デモンストレーション結果

料はカチオンに加え、アニオンにも重合性基を持ったイオン液体を用いた。また、予備実験から、上部電極にアルミを用いることで、上下金電極に比べ大きな電流を得られることがわかっており、本デモンストレーションでは、上電極はアルミ、下電極は金電極とした。また、プラス電流だけでなく、マイナス電流も流れることが確認できた。本テーマは物理現象の解明と、さらなる性能の向上を目指し、別プロジェクトで深く掘り下げることにした。ここでは、そのデモンストレーションとして、それぞれ逆向きに接続した2つのLED電球を用意した。図 3-②-(3)-3.4 では、まずその確認実験として、回路に乾電池をつ

ないで、電流の向きとどちらの LED 電球が点灯するかを確認した。その結果、図で示したように乾電池を接続すると、片方の LED のみ点灯することが確認できた。また、図示はしないが、乾電池の向きを逆にすると、反対の LED のみが点灯することが確認できた。また、電子は図示したように乾電池を接続した場合、図の向きで動いていると言える。図 3-②-(3)-3.5 にデモンストレーションの結果を示す。図で示したように、ゲルエレクトレットと上電極であるアルミ電極が接触すると右側の LED 電球が、そしてアルミ電極とゲルエレクトレットが離れると左の LED 電球がそれぞれ点灯することが確認できた。また、電子は図 3-②-(3)-3.5 に示した通りに動いたことになる。

ここで、このとき与えた振動は 1 Hz であり、これは当初エネルギーハーベスタとして想定していた振動周波数に比べても明らかに低く、人の歩行や動きから得られる周波数に近い。つまり、これはゲルエレクトレットがこれらの低い周波数でも大きな電流を発生させることができることを意味しており、ウェアラブルデバイスなどへの応用が大いに期待できる結果となった。

#### 3-②-(3)-4 まとめ

本プロジェクトで開発したゲルエレクトレットによって、センサ駆動にも十分使えるほどの電力を発電できる、新しい原理を開発し、LED 点灯のデモンストレーションにも成功した。これは当初想定していたよりも、かなり低い周波数、特に人の動きに由来するような 10Hz 程度の振動に非常に有効である。

### 3-③ 高効率エネルギーハーベスタの開発

#### 3-③-(1) エネルギーハーベスタの設計

株式会社鷲宮製作所、国立大学法人東京大学

##### 3-③-(1)-1 目標

次世代トリリオンセンサ社会に必要な超高効率の環境振動型発電素子の実現を目指す目的で、固体イオンエレクトレットの MEMS 活用を考えている。この固体イオンエレクトレットの特徴のひとつは、MEMS 櫛歯構造を高電圧・均一に帯電できる点であり、このことは、機械エネルギーと電気エネルギーの変換効率の指標である力係数を大きくできることに寄与している。ところが、力係数を大きくすることは出力電力を高める点で有効である一方、エネルギーハーベスタの可動部分に発生する静電力も強くなることも意味している。この静電力に対抗するため、単純に MEMS 構造の弾性力を強くするという方法では、実際の環境で多く存在する微小振動への応答性が悪くなるなどの課題があった。また、MEMS 構造の変形部分のサイズを大きくすることで静電力に対抗する弾性力を得ることもできるが、この方法では素子が大型化し、超小型化という目標が達成できず、コストの増加により将来的な普及が妨げられてしまう懸念があった。したがって、固体イオンエレクトレットの特色である大きな力係数と超小型サイズを両立しつつ、微小振動において出力電力を最大化する設計手法の確立が必要となってきた。さらに、適用する実際の環境振動に目を移すと、その振動波形は多種多様であることがわかる。例えば、工場の機械装置のように一定周波数の振動が持続するような場合がある一方、高速道路の橋梁の振動は、車が通過する際にインパルス状の振動が発生することが明らかになった（研究項目 3-④）。また、人が身につけてヘルスマニタリングなどをするためのウェアラブルセンサを念頭に、人体の様々な場所にセンサをつけて加速度波形を計測したところ、こちらもインパルス状の振動が多く見られた（研究項目 3-⑤）。そこで、従来の振動発電素子は共振を利用して特定周波数の振動に特化した設計が多く見られたのに対し、より多くのアプリケーションを実現するために、インパルス状の振動に特化した発電素子や、周波数特性が広帯域な発電素子も非常に有用であると考えて、それぞれについて設計指針を明らかにすることとした。

本プロジェクトでは、まず、機械エネルギーと電気エネルギーの変換効率が大きくなる場合、つまり力係数が非常に大きい場合に適した MEMS 構造について検討し、その効果について数値シミュレーションで確認した。また、平行して共振型のエネルギーハーベスタ（研究項目 3-①）と、インパルス型や、周波数特性を広帯域にするための設計指針についても検討し明らかにした。

### 3-③-(1)-2 インパルス型エネルギーハーベスタの設計

MEMS 櫛歯構造と固体イオンエレクトレットを組み合わせたもっとも単純な構造を図 3-③-(1)-2.1 に示す。図 3-③-(1)-2.1 のように一般的な MEMS 加工をした後、固体イオンエレクトレット特有の酸化工程、帯電工程を経ると、櫛歯電極のギャップ側壁がエレクトレット化し、櫛歯間に静電力が発生する。すると、可動櫛歯電極が固定櫛歯電極に引込まれ、ばねの弾性力とエレクトレットの静電力がつり合う位置まで変位する。このつり合い状態を図 3-③-(1)-2.2 に示した。ここに外部振動が加わると、このつり合った位置を中心に振動し、静電誘導電流が外部負荷に流れることで発電する。一般的に、ばねの最大変形量は材料の破壊応力から上限が決まる。エレクトレットの静電力により初期位置が移動することによって、振動発電で利用できる振動範囲が小さくなってしまふ点がこの構造の問題点である。

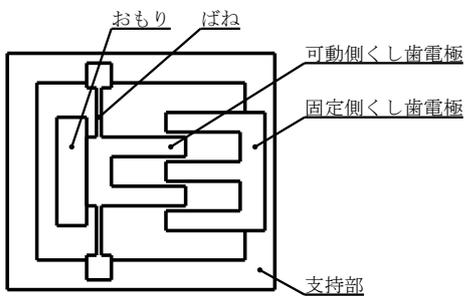


図 3-③-(1)-2.1 単純構造（帯電前）

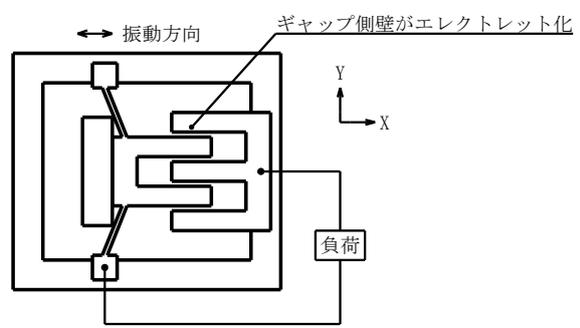


図 3-③-(1)-2.2 単純構造（帯電後）

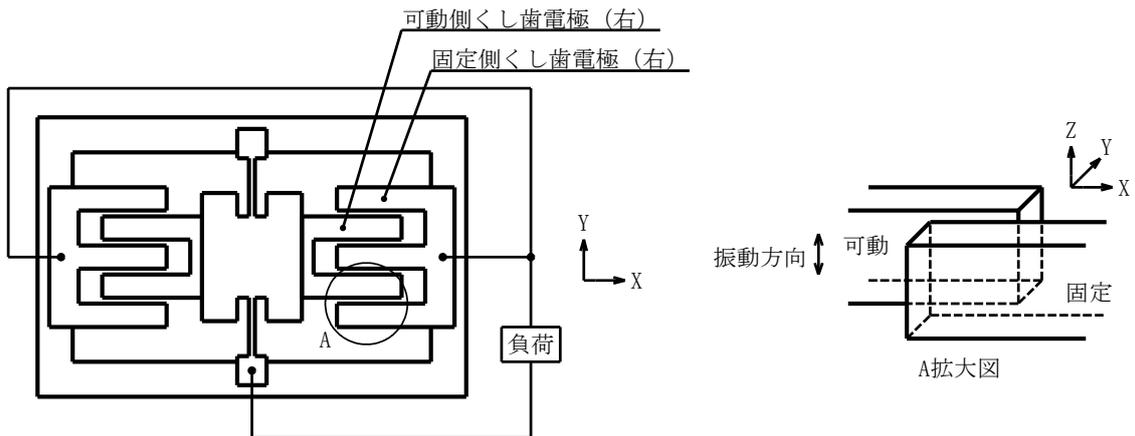


図 3-③-(1)-2.3 インパルス型エネルギーハーベスタ模式図

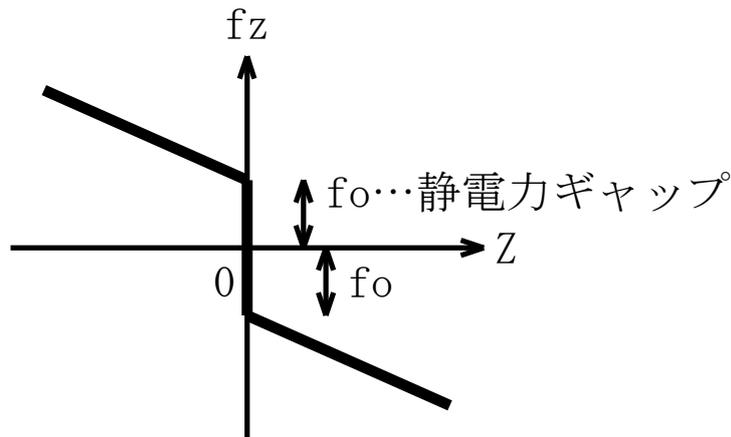


図 3-③-(1)-2.4 インパルス型エナジーハーベスタの荷重特性

そこで考案した構造を図 3-③-(1)-2.3 に示す。水平方向のチップ寸法を極力小さくするため、可動部の振動方向はチップ面に垂直な方向 ( $Z$  軸方向) に設定した。これはバネの形状を板状にすることで実現できる。可動部の位置  $Z=0$  は、ばねの安定位置であり、このとき櫛歯がちょうど重なっているため、静電力の  $Z$  軸方向成分は  $0$  となる。したがって、帯電の前後でつり合いの位置が動くことはない。図 3-③-(1)-2.4 に、可動部に働く荷重特性 (静電力+弾性力) を示す。このグラフが示す通り、この構造は振動原点付近に強い非線形性を持っているため、固有の共振周波数を持たない。また、外部振動が小さすぎる場合、静電力ギャップ ( $f_0$ ) を超えることができず、振動開始できない。したがってこの構造は、一定の周波数で振動する環境振動を共振で拾い上げるといった動作には不向きである。一方、インパルス状の環境振動が印加されると、静電力ギャップを乗り越えて振動が始まり、大きい力係数の効果で速やかに機械振動エネルギーが電気エネルギーに変換される。よって、この構造はインパルス振動に特化したエナジーハーベスタと言える。

### 3-③-(1)-3 インパルス型エナジーハーベスタ (段付き) の設計

インパルス型エナジーハーベスタの構造により、発電素子のサイズを大きくすることなく固体イオンエレクトレットの帯電電圧を強くすることが可能となったが、強くし過ぎると図 3-③-(1)-2.4 で示した静電力ギャップが大きくなり、外部からの加振が弱いと振動を開始できないという課題があった。これを解決すべく考案した構造を図 3-③-(1)-3.1 に示す。また、その時の荷重特性を図 3-③-(1)-3.2 に示す。

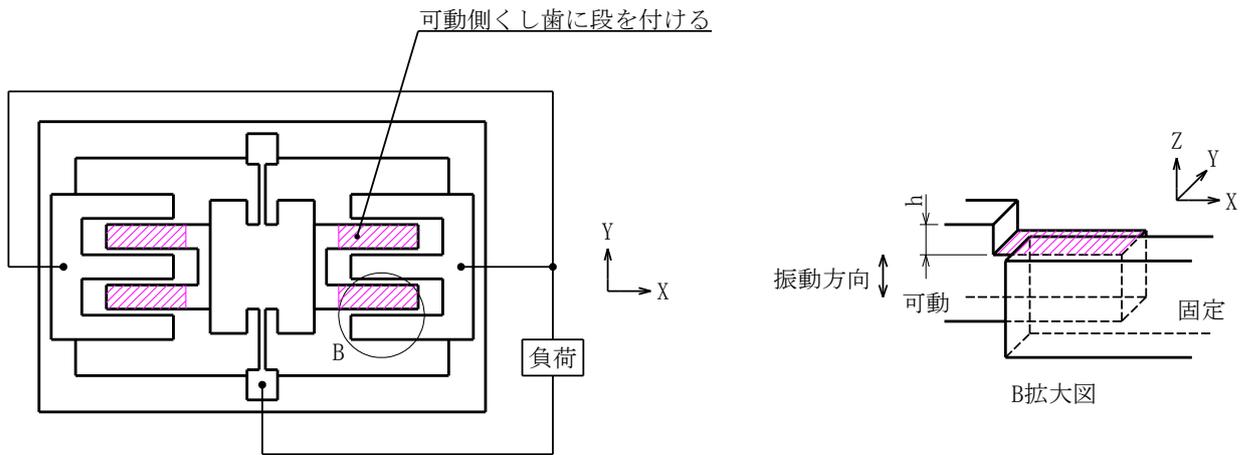


図 3-③-(1)-3.1 インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）模式図

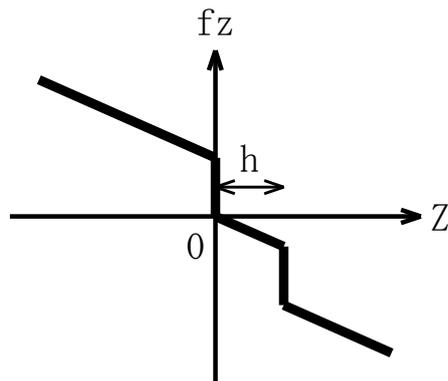
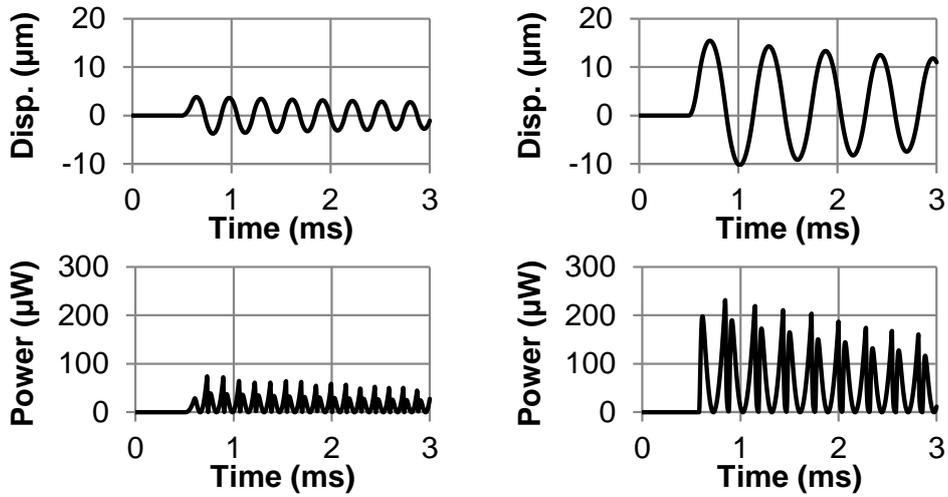
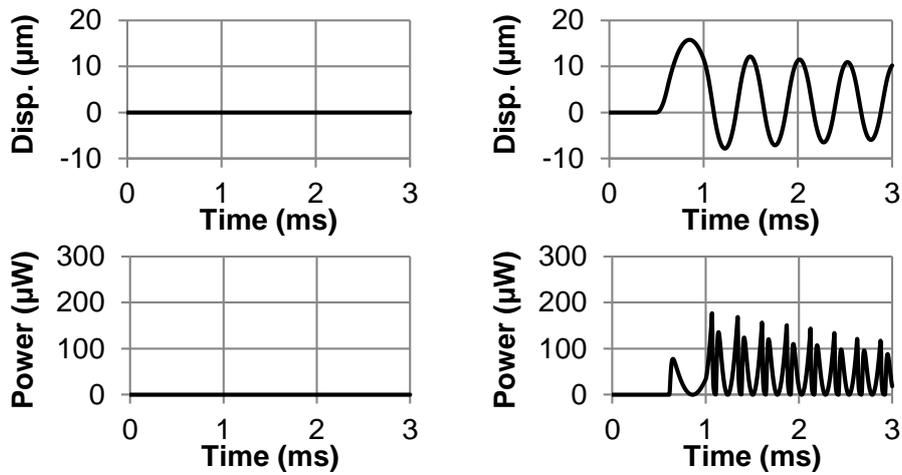


図 3-③-(1)-3.2 インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）の荷重特性

図 3-③-(1)-2.3 に示した可動櫛歯とは異なり、図 3-③-(1)-3.1 に示すように、可動側の櫛歯に深さ  $h$  の段を付けることで、静電力に不感領域を作り出した。この領域では可動部は静電力の影響を受けず、ばねの弾性力のみを感じて動くため、微小振動の入力にも応答して動くことができる。したがって、この領域を利用すれば外部振動により可動部が加速運動できるため、これにより得られた運動エネルギーによって、図 3-③-(1)-2.3 に示す構造と比較してより小さな外部振動でも静電力ギャップを乗り越えることが可能となる。結果として、利用可能な振動の範囲が広がり、機械→電気エネルギー変換効率も上がることが見込まれる。



(a) 段無し (b) 段付き  
 印加したインパルス振動：1600 m/s<sup>2</sup>×0.1 ms



(c) 段無し (d) 段付き  
 印加したインパルス振動：800 m/s<sup>2</sup>×0.5 ms

図 3-③-(1)-3.3 インパルス型エネルギーハーベスタのシミュレーション結果

次に、インパルス状の振動を印加した際の、振動変位と発電出力（瞬時値）のシミュレーション結果を図 3-③-(1)-3.3 に示す。加速度ピーク値が小さいときの段無し構造 (c) では静電力ギャップを乗り越えられず、振動できていない一方で、段付き構造 (d) では不感領域で加速することで静電ギャップを超えることができ、振動するとともに発電出力も得られ

ていることがわかった。

以上により、インパルス振動に特化した形の固体イオンエレクトレットを利用したエネルギーハーベスタのひとつの設計指針が明らかとなった。

### 3-③-(1)-4 広帯域型エネルギーハーベスタの設計

インパルス型エネルギーハーベスタは面外振動タイプであったため、ストッパー機構をMEMSチップのパッケージ側で構成せざるを得ず、その寸法精度への制限が強いために、設計自由度が低いという課題があることがわかった。そこで、この問題を解決するため面内振動タイプの設計を検討した。その模式図を図 3-③-(1)-4.1 に示す。

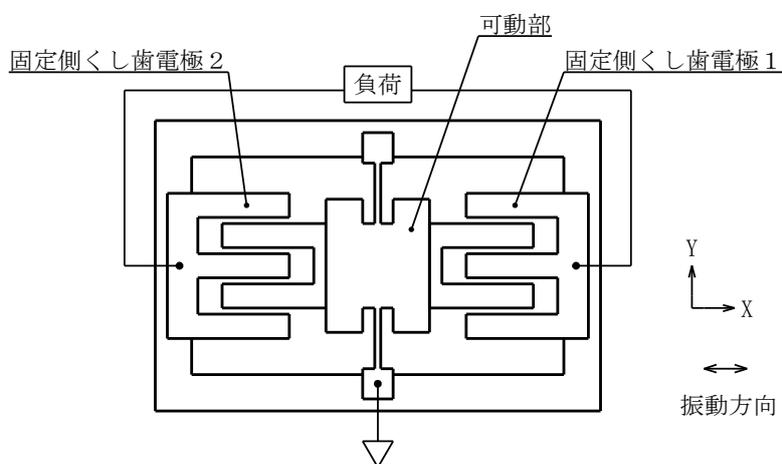


図 3-③-(1)-4.1 広帯域型エネルギーハーベスタ模式図

インパルス型と同様、左右に櫛歯を設けたデザインとなっているが、振動方向を図中 X 軸方向に設定した点が異なっている。こうすることで、同一面内の一部に MEMS 構造ストッパーを簡単に設けることが可能となった。ばね定数は X 軸方向が最小となる設計のため、左右のエレクトレットによる静電力を正確に一致させないと、振動原点が移動してしまう恐れがあったが、固体イオンエレクトレットは帯電電圧を正確に制御できるため、この点は問題なかった。

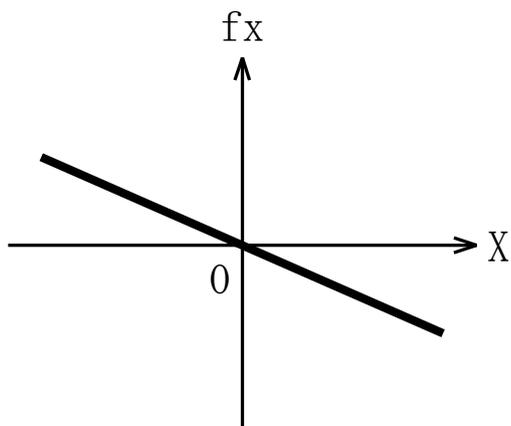


図 3-③-(1)-4.2 広帯域型エナジーハーベスタの荷重特性

振動方向である X 軸方向の荷重特性を図 3-③-(1)-4.2 に示す。ただし、左右の固定櫛歯電極の電位が 0 のときを示している。このとき左右の静電力は釣り合っているため、可動部はばねの弾性力のみを感じて振動することが分かる。したがって単純な機械共振系と同様な特性で共振振動することが分かる。また、静電力ギャップが完全に消失しているため、微小な振動で振動開始することも可能である。一方、両固定電極間に負荷抵抗を接続すると、静電誘導電流がここに流れるため、左右の固定櫛歯電極に電位差が生じ静電力のバランスが崩れる。このとき可動部が静電力に抗い仕事をするにより機械的エネルギーが電気エネルギーに変換されることとなる。このことを定量的に議論するため作成したモデルを図 3-③-(1)-4.3 に示す。

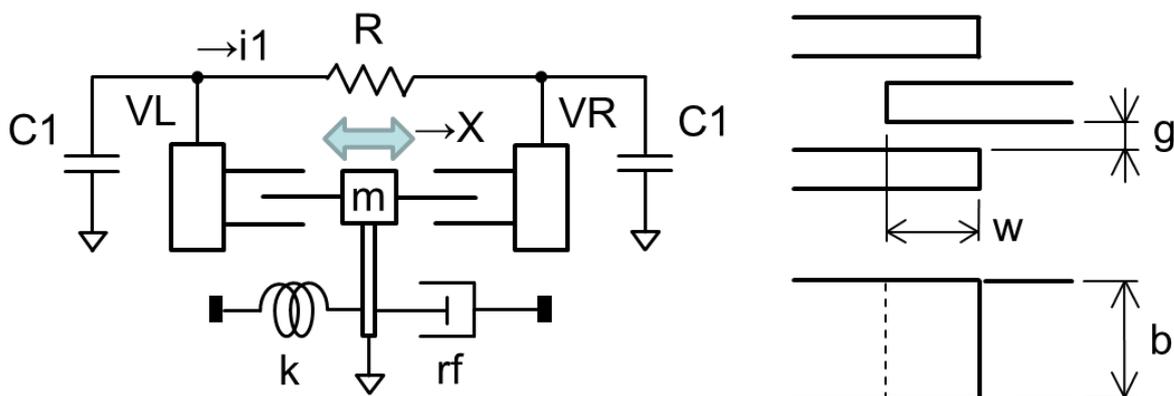


図 3-③-(1)-4.3 広帯域型エナジーハーベスタの荷重特性

このとき、可動部の運動方程式は式（7）で表される。

$$m\ddot{X} = -m\ddot{Y} - kX - r_f\dot{X} - \frac{A}{2V_0}(V_L - V_0)^2 \quad \dots (7)$$

$$A = \frac{2n\varepsilon_0bV_0}{g} \quad : \quad \text{力係数}$$

n : 櫛歯（左側）の歯数

$\varepsilon_0$  : 真空の誘電率

$V_0$  : 固体イオンエレクトレット帯電電圧

$C_1$  : 浮遊容量

$\omega_0$  : 機械的共振角振動数

X : 可動部と固定部の相対変位

Y : 外部振動変位

最適負荷抵抗を接続した際の挙動について、式（7）を近似・変形すると、式（8）が得られた。

$$m\ddot{X} = -m\ddot{Y} - \left(k + \frac{A^2}{C_0}\right)X - \left(r_f + \frac{A^2}{C_0\omega_0}\right)\dot{X} \quad \dots (8)$$

ここで  $r_f$  は空気摩擦などの機械的ダンピングを表す項で、機械的損失となる部分を示している。そしてこの項に加算される形となっている  $\frac{A^2}{C_0\omega_0}$  の項は、負荷抵抗により生じる電氣的ダンピング項である。ここは電氣的損失ではなく、発電でエネルギーを取り出すことにより生じた項なので、この項が機械的ダンピング項よりも大きければ、エネルギー変換効率は 50% を超え、原理的には 100% に近づけることが可能となる。そして力係数を大きくすることで、これが実現可能であることが理論的にわかった。ただし、この場合にはトータルのダンピングが大きい状態なので、共振系としての Q 値は小さくなる。これは微小振動を高感度で拾い上げる点では不利であるが、逆に見方を変えれば、周波数特性がワイドバンドになったことに相当している。これを積極的に活用することで、周波数変動に強いエネルギーハーベスタが実現可能となる。実際の環境振動は、先に述べたように、一定周波数でないインパルス振動やランダム振動も多く存在する。また機械装置の周期的な振動源の場合も、インバータ制御により周波数がある程度変動する例がある。こういったアプリケーションを想定すると、本発電素子のような広帯域特性のエネルギーハーベスタは有用である。

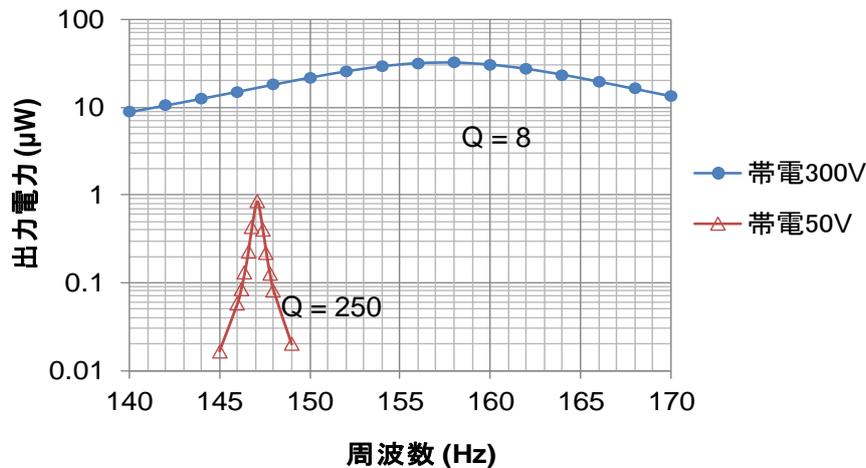


図 3-③-(1)-4.4 広帯域型エネルギーハーベスタの周波数特性 (シミュレーション)

ここでは、エネルギーハーベスタに最適負荷を接続して正弦波振動を印加した際の周波数特性について、式(7)を数値的に解いて求めたシミュレーション結果を図3-③-(1)-4.4に示す。ここで、機械的ダンピング項  $r_f$  はゼロとして、電気的ダンピング項の効果だけが現れるようにした。帯電電圧が高いと  $Q$  値が小さくなり、広帯域特性になることが読み取れる。これは、力係数が帯電電圧に比例しているため、電気的ダンピングが増加したことを示している。外部振動の加速度は、共振ピーク時に可動部の最大振幅が  $200 \mu\text{m}$  となる条件から設定した。その結果帯電  $50 \text{ V}$  の方は  $Q$  値が高いため、小さい加速度 ( $0.7\text{m/s}^2$ ) で  $200 \mu\text{m}$  に達し、結果的に出力電力も小さい。一方、同一デバイスの帯電電圧を  $300 \text{ V}$  にした方は、 $Q$  値が低いため大きい加速度 ( $25\text{m/s}^2$ ) が必要となったが、その分出力電力も大きい。微小振動の増幅に関しては不利であるが、強い振動が印加されても壊れにくく、振動の強さに応じて大きい出力を出せる点が特徴である。

以上により、広帯域な周波数特性を持つエネルギーハーベスタの設計指針が明らかとなった。

### 3-③-(1)-5 まとめ

固体イオンエレクトレットの特徴のひとつである、力係数を大きくできるという点をフルに活用するため、課題を抽出しそれらを解消する種々の構造について検討した。その結果、従来から多く研究されている狭帯域周波数特性の共振型エネルギーハーベスタ以外にも様々な構造に対して固体イオンエレクトレットが有用なことがわかった。特に、実証グループとの連携から得られた知見に基づき、インパルス振動に特化したエネルギーハーベスタ、広帯域周波数特性のエネルギーハーベスタの有効な設計指針を明らかにした。本研究と平行してこれらの発電素子の製作研究も実施しており、早期の超高効率環境振動型発電素子の実現を目指す。

### 3-③-(2) エナジーハーベスタの製作

株式会社鷲宮製作所、国立大学法人東京大学

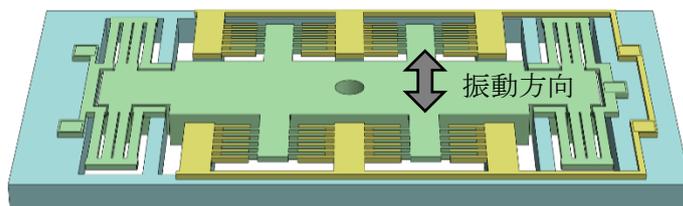
#### 3-③-(2)-1 目標

研究項目 3-③-(1) において、超高効率の環境振動型発電素子のバリエーションとして、インパルス振動に特化したエナジーハーベスタと、広帯域周波数特性を持つエナジーハーベスタの設計指針を得た。本研究項目ではこれらの発電素子の実現のために特に重要な、高アスペクト比シリコン構造の製作プロセスの確立を目指した。そのため、最新のプロセス装置を導入し、微細加工技術の研究開発を実施し、その成果をもとにエナジーハーベスタの製作・評価試験を実施し、設計指針の実証をした。

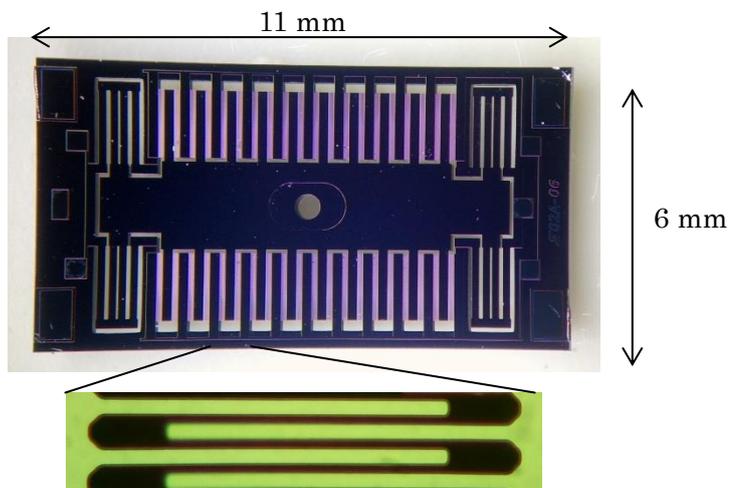
さらに、並行して進められているイオン液体（研究項目 3-②）との融合によるさらに高効率なエナジーハーベスタの実現をめざし、その基礎研究として電気機械的な結合方法についても開発した。

#### 3-③-(2)-2 インパルス型エナジーハーベスタの製作

研究項目 3-③-(1)-2 で得られた設計指針に基づき、製作したインパルス型エナジーハーベスタの各工程を図 3-③-(2)-2.1 に示す。



(a) 模式図



(b) MEMS 加工品

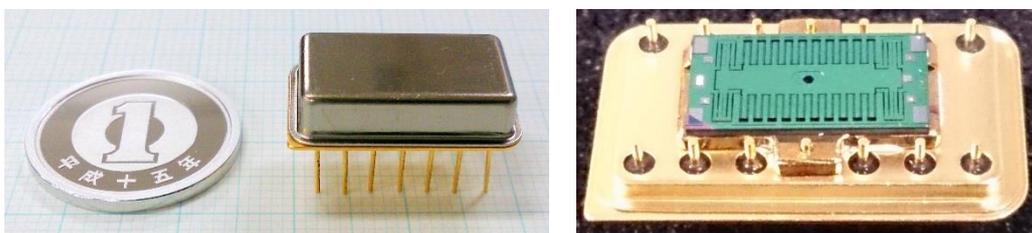
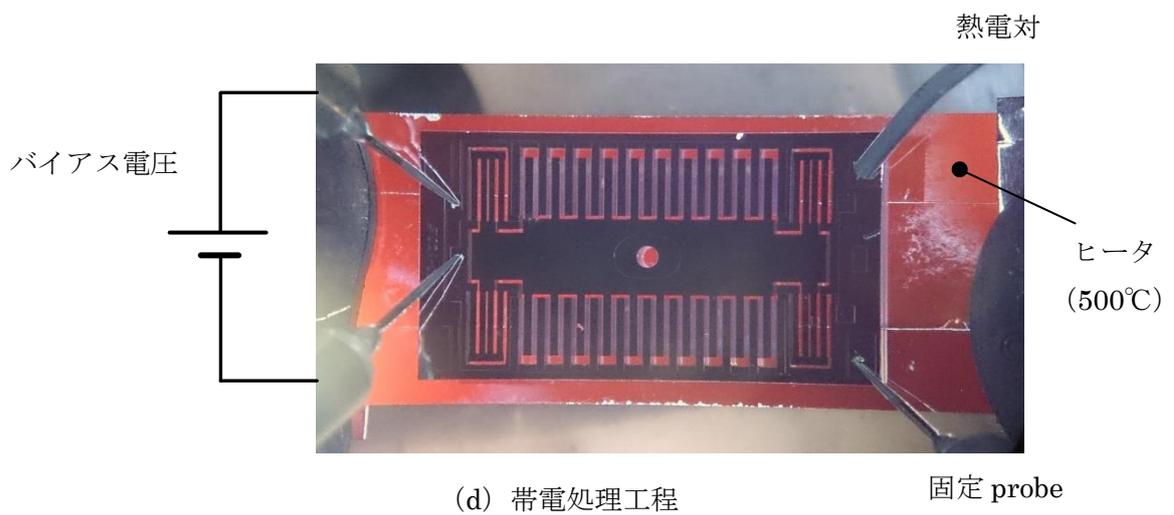
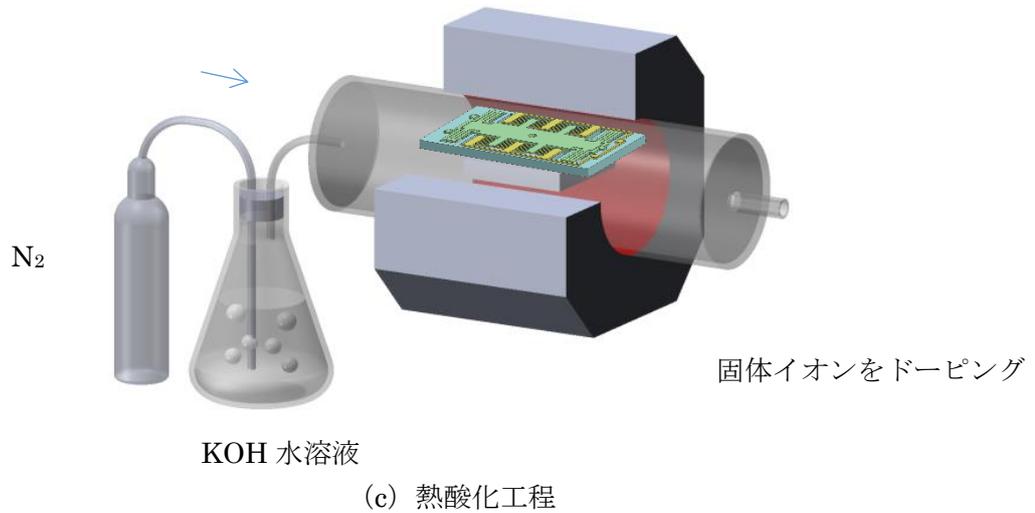


図 3-③-(2)-2.1 インパルス型エネルギーハーベスタ試作品

このデバイスは、まずは固体イオンエレクトレットと MEMS 櫛歯構造の組合せの有効性を確認することを目的とし、新装置を立ち上げる前に従来の装置を利用して MEMS 加工をした。製作したインパルス型エネルギーハーベスタにて発電実験を行った様子を図 3-③-

(2)-2.2 に示す。ボイスコイルを用いて一定の強さでインパルス加振し、電圧と電流（加振から 10ms の実効値）を記録した。この測定を、負荷抵抗を変えながら実施した結果を図 3-③-(2)-2.3 に示す。

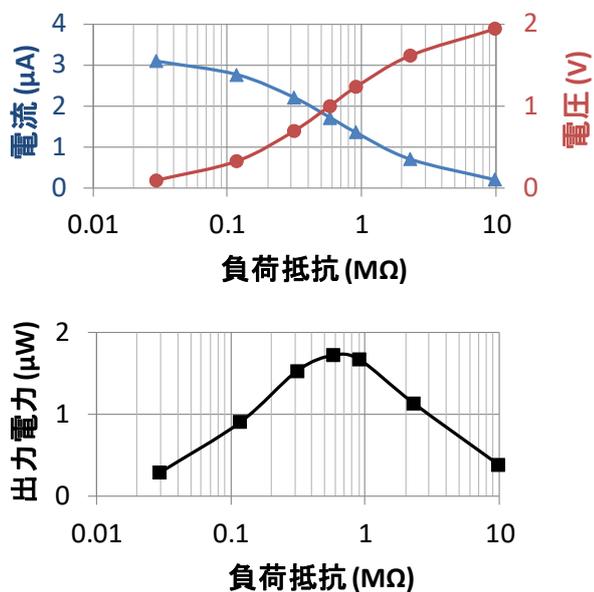
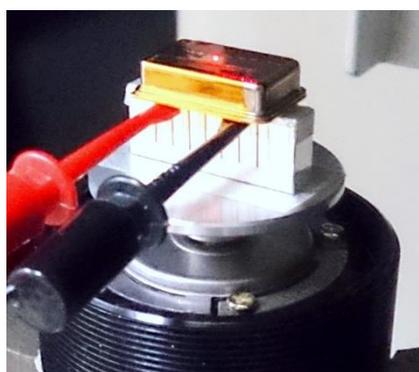


図 3-③-(2)-2.2 インパルス加振試験方法 図 3-③-(2)-2.3 インパルス加振試験結果

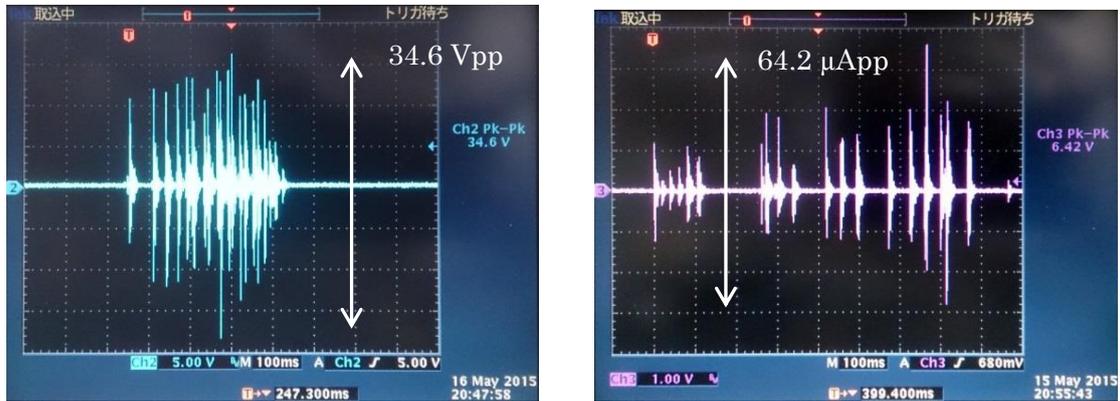
出力電力は、上記電圧と電流から算出した。この負荷特性のピーク値より、出力インピーダンスが  $0.6 M\Omega$  であると判断できる。これは、狭ギャップの櫛歯側面をエレクトレット化した効果であり、出力インピーダンスを低減できることが実証できた。

続いて、さらに簡単に、また強くインパルス加振する方法の一例を図 3-③-(2)-2.4 に示す。静電ギャップを乗り越えるように加振するには強いエネルギーは不要であるが、瞬間的な加速度は大きい必要があった。そのためには硬い物体が軽く衝突するのが最適であり、ここではステンレス製のねじを擦りつけることで、簡単に連続的なインパルス加振を実現した。



図 3-③-(2)-2.4 ねじ擦りによる連続インパルス加振

この方法で加振した際の電圧波形（負荷抵抗  $1\text{ M}\Omega$ ）と電流波形（短絡）を図 3-③-(2)-2.5 に示す。



(a) 電圧波形（負荷  $1\text{ M}\Omega$ ）

(b) 電流波形（短絡）

図 3-③-(2)-2.5 ねじ擦りによる連続インパルス加振時の発電波形

瞬時値で  $34.6\text{ V}_{\text{pp}}$  発生しており、これは正弦波近似すると  $150\text{ }\mu\text{W}$  に相当する。これは、固体イオンエレクトレットと MEMS 櫛歯構造の組合せによって、大出力のエネルギーハーベスタを実現可能であることを実証した。また、短絡電流  $64.2\text{ }\mu\text{A}$  は、LED を直接点灯できるほど大きな発電電流であり、それをデモンストレーションした結果を図 3-③-(2)-2.6 に示す。

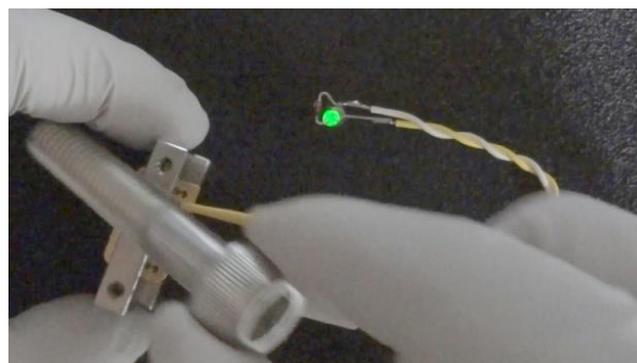


図 3-③-(2)-2.6 ねじ擦りによる LED 直接点灯

以上により、固体イオンエレクトレットと MEMS 櫛歯構造の組合せの有効性が示された。また、インパルス振動に特化したタイプのエネルギーハーベスタを金属パッケージ状態まで製作でき、実用段階に近い技術であることを実証できた。一方、狭い電極ギャップ間

に働く静電力により、金属どうしの衝突などの強いインパルス振動を必要とするなど、特性に関する課題も明らかとなった。

### 3-③-(2)-3 インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）の製作

ここでは、3-③-(1)-3 で設計指針が得られた、段付き櫛歯構造のエネルギーハーベスタを製作し実証した。模式図を図 3-③-(2)-3.1 に示す。段付き構造の実現に向けて MEMS プロセスを開発した。最終的に得られたプロセスの概要を図 3-③-(2)-3.2 に示す。

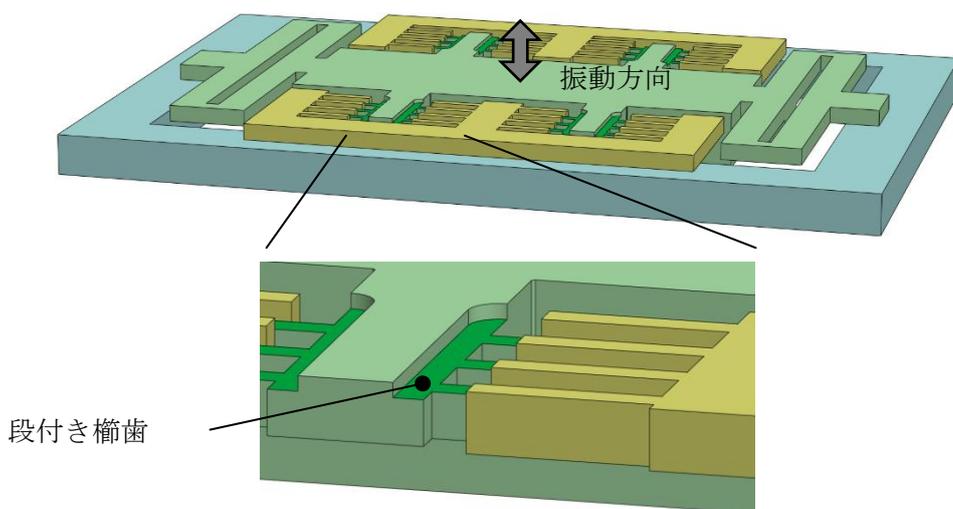


図 3-③-(2)-3.1 インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）模式図

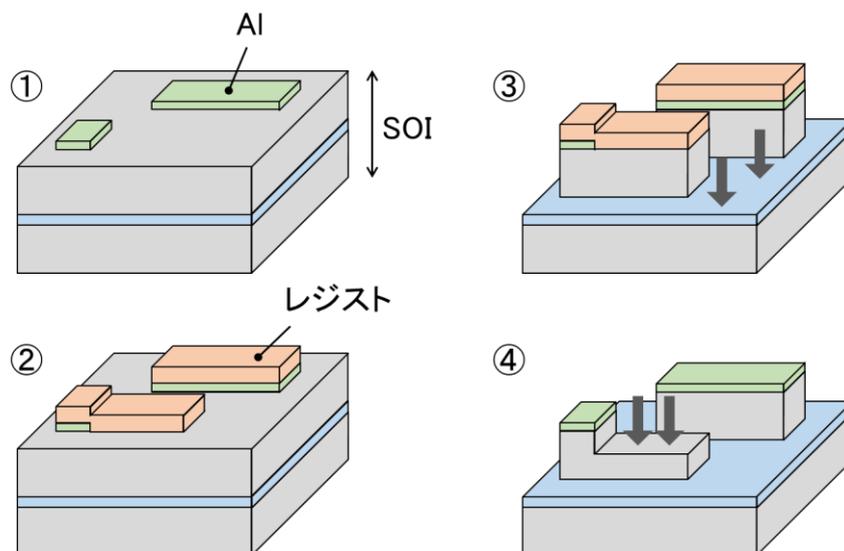


図 3-③-(2)-3.2 段付き櫛歯の MEMS 加工プロセス

考案した段付き櫛歯構造のプロセスを、導入した新型 DRIE 装置を用いて開発した。その結果、設計通りの形状に加工することに成功した。加工後の SEM 画像を図 3-③-(2)-3.3 に示す。

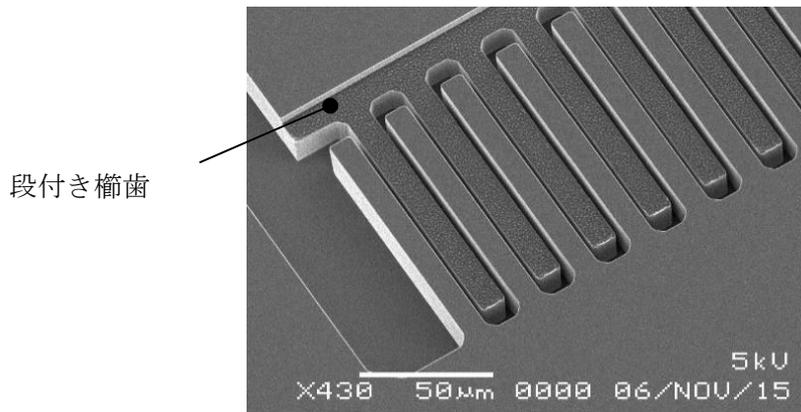


図 3-③-(2)-3.3 段付き櫛歯 SEM 画像

さらに、静電ギャップを乗り越えるために感度を上げる方法として、可動部におもりの実装も行った。ここで、このおもりは振動範囲を規制するストッパーとしての役割も持たせている。模式図と写真を図 3-③-(2)-3.4 に示す。

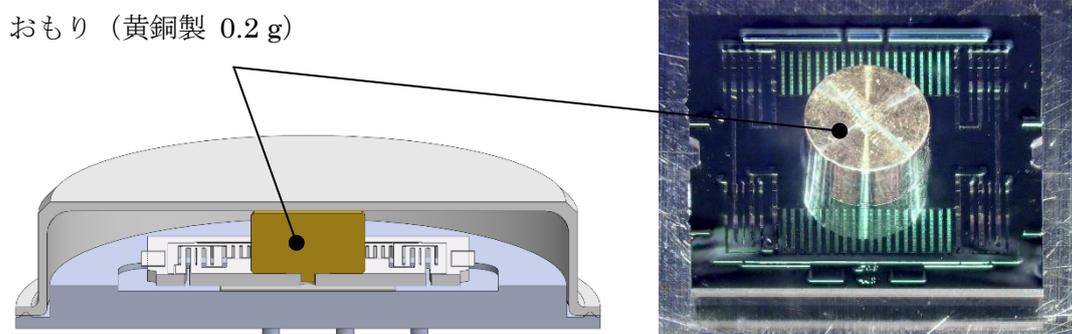


図 3-③-(2)-3.4 おもり実装

その後、一円玉サイズの金属パッケージを溶接封止した。内部は真空 (3 Pa) にした。完成した試作品を図 3-③-(2)-3.5 に示す。

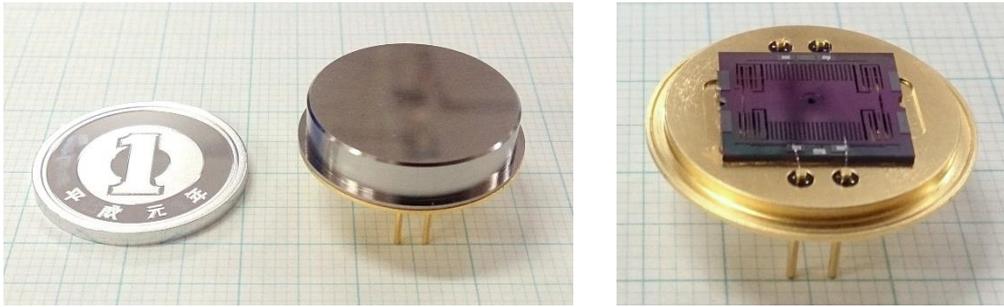
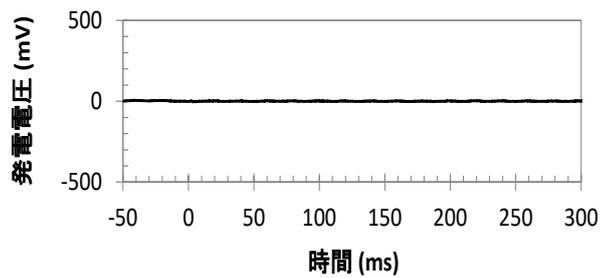


図 3-③-(2)-3.5 インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）試作品

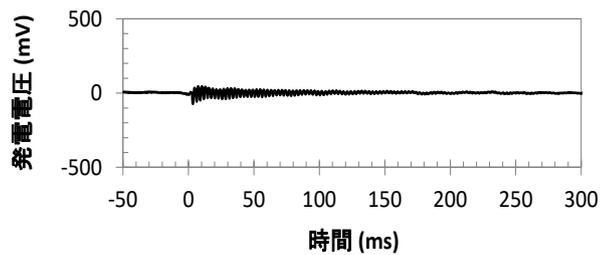


図 3-③-(2)-3.6 インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）加振試験

加振試験の様子を図 3-③-(2)-3.6 に示す。大型の加振機を用いると、微弱なインパルス加振を使用としても機械的ノイズが大きく、うまく評価できなかった。そこで、スポンジ片を 50mm の高さから落下させたときの衝撃で簡易的に評価した。その結果を図 3-③-(2)-3.7 に示す。



段無し おもり無し



段付き おもり無し

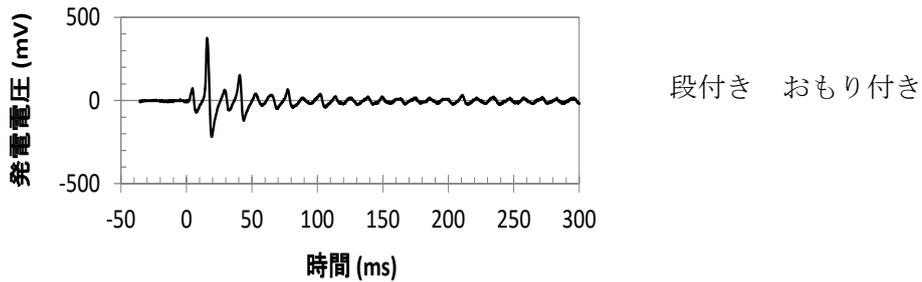


図 3-③-(2)-3.7 インパルス型エネルギーハーベスタ（段付き）微弱インパルス加振試験結果

段無し歯構造の物は、発電波形が得られなかった。これは、非常に小さいインパルス加振であるため、静電ギャップを超えられなかったことを示している。一方、段付き歯構造にすると発電波形を得ることができた。これは、段を付けることにより、静電ギャップを乗り越える効果が生まれることを示している。さらに、可動部におもりを付けることで出力の増加が見られ、これはインパルス加振で得られたエネルギーが増えたことを示している。ただし、加振を少し強めるとすぐにストッパーに接触してしまうため、さらなる出力増大には、力係数を増加させるなどの工夫が必要となることも明らかとなった。

### 3-③-(2)-4 広帯域型エネルギーハーベスタの製作

次に、研究項目 3-③-(1)-4 で得られた設計指針に基づき製作した広帯域型エネルギーハーベスタを製作し実証した。製作した試作品の写真を図 3-③-(1)-4.1 に示す。

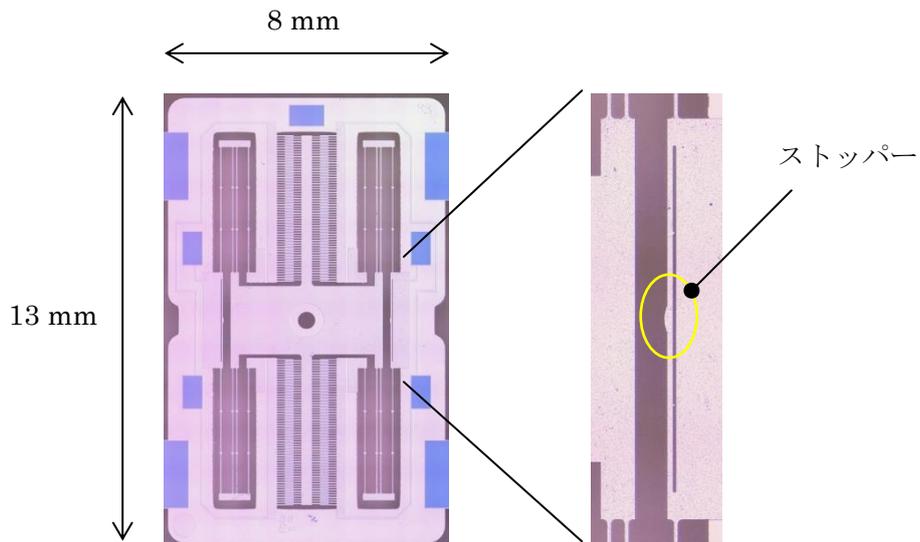


図 3-③-(1)-4.1 広帯域型エネルギーハーベスタ試作品

また、本デバイスを用いて真空チャンバ内で簡易的に試験した結果を図 3-③-(1)-4.2 に示す。ここでは、外部振動を与える代わりに、可動部をプローブで機械的にはじいて加振して発電波形を得た。

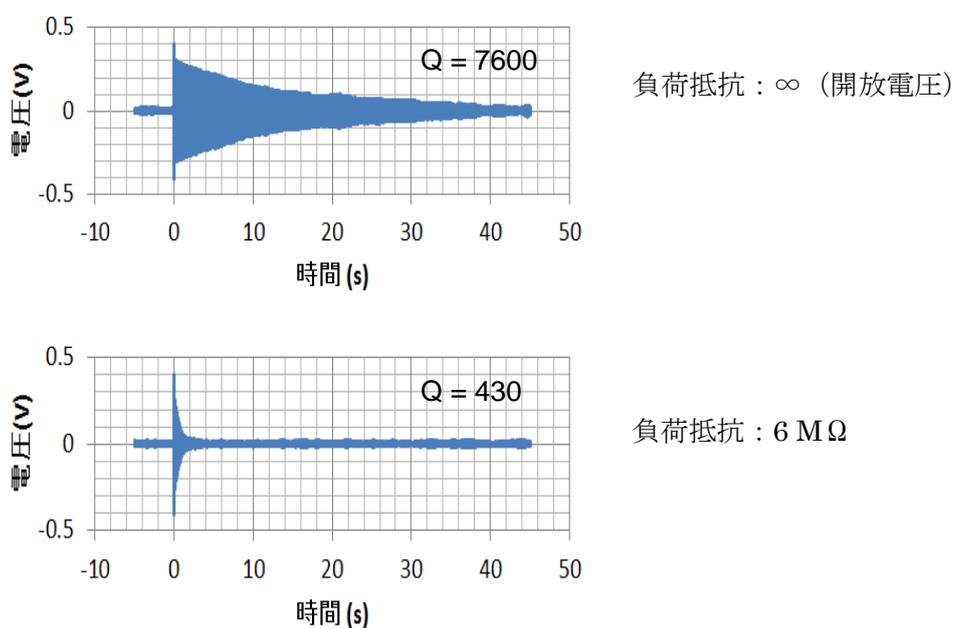


図 3-③-(1)-4.2 広帯域型エネルギーハーベスタの真空中における発電波形

図中の  $Q$  値は、減衰波形の時定数と振動周期から求めた。この結果から、負荷抵抗をインピーダンス整合させると電氣的ダンピングが支配的となることが実証できた。 $Q=430$  ではまだ広帯域特性とは呼べないが、力係数をさらに増加させることで感度ピークを維持したままで  $Q$  値を下げ、広帯域化を実現できる目途が立ったと言える。本デバイスは今後、帯電電圧を上げ、真空封止パッケージに封止し、外部からの機械振動による発電特性を評価する。

### 3-③-(2)-5 固体イオンエレクトレットとイオン液体の融合デバイスの評価

ここでは、3-②の大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエネルギーハーベスタ応用で設計指針が得られた、固体イオンエレクトレットとイオン液体の電気機械的な結合について、基礎的な融合デバイスを製作し実証した。

デバイス評価方法として、まず図 3-③-(2)-5.1 に示す方法を用いた。ここで、固体イオンエレクトレットは裏面のみ  $\text{SiO}_2$  膜を除去し、導電テープを用いることで、ガラス基板上に蒸着した金電極と電氣的に接触させた。また、この時金属電極には電線を半田付けして外部に信号を取り出せるようにした。ここに、図 3-③-(2)-5.1 に示す通り、イオン液体適量を滴下した。図 3-③-(2)-5.2 には実際に用いたデバイスの外観を示す。この状態で、全体を振動発生器に固定し、上部には金属電極のみを配置しイオン液体を挟み込み、発電実験を行なっ

たところ、全く発電量を得ることができなかった。

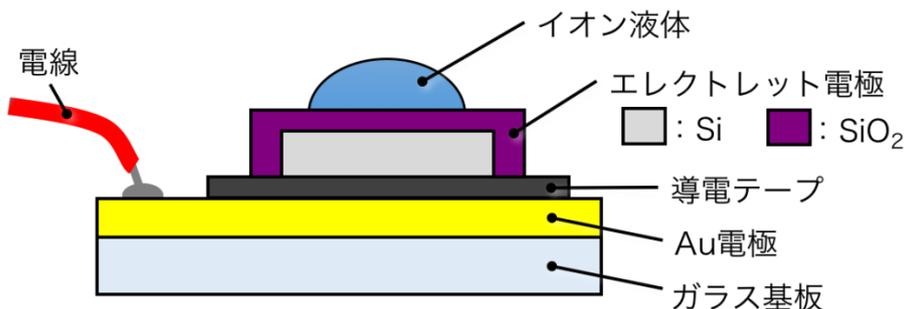


図 3-③-(2)-5.1 固体イオンエレクトレットとイオン液体の電気機械的な結合方法

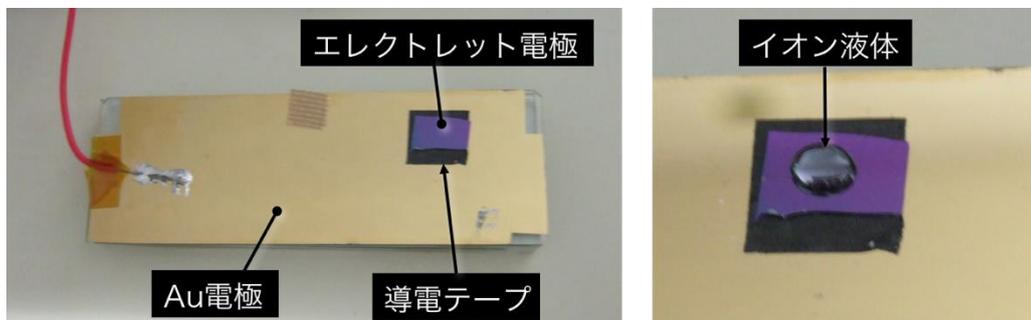


図 3-③-(2)-5.2 固体イオンエレクトレットとイオン液体結合デバイス評価外観

そこで、まず固体イオンエレクトレット(□10mm 以下)上にイオン液体(φ10mm 以下)を滴下したとき、どのような現象が起こるのかを調査した。図 3-③-(2)-5.3 には、固体イオンエレクトレット上にイオン液体を滴下した状態(図左側)と、単純にシリコン酸化膜( $\text{SiO}_2$ )上にイオン液体を滴下した状態(図右側)、つまりエレクトレット化していない状態を、側面と上面から観察し考察した。その結果固体イオンエレクトレット上のイオン液体は、上面から液体の境界がはっきりと見え、これは図下方の断面模式図でしめした通り、固体イオンエレクトレットとイオン液体の電気二重層キャパシタに由来すると考えられる。これは、接触面積の変化を著しく妨げることとなり、発電量を著しく低下させる一因であると考えられる。ただし、これだけでは発電量を全く得られないことの説明にはならない。

そこで、次に表面電位計を用いて、表面の電位がどのように変化していくのかを調査した。その結果を図 3-③-(2)-5.4 に示した。ここではまず、固体イオン液体のみの表面電位、次にその上にイオン液体を乗せた状態での表面電位、最後に一度イオン液体を乗せた後にイオン液体を取り除いた場合のそれぞれの表面電位を比較した。ここで、用いた表面電位計は測定範囲の平均値を出力するものであり、グラフにはその平均値で表されている。また、イオン液体の乗せる場所、乗っている場所、またはもともとあった場所を赤点線で示した。その結果より、固体イオンエレクトレットのみの場合帯電が残っているが、イオン液体が固体イ

オンエレクトレットに接触すると、イオン液体の有無に関わらず固体イオンエレクトレットの帯電がなくなっているのが確認できた。また、図 3-③-(2)-5.3、3-③-(2)-5.4 で示した内容を総合的に考察すると、固体イオンエレクトレットとイオン液体を直接接触させたことにより、接触面積変化が著しく低下し、かつ固体イオンエレクトレットの帯電劣化もあり発電量が得られなかった可能性が高い。以上からこの2点を根本的に改善するためには、固体イオンエレクトレットとイオン液体の界面には撥水性の保護膜が必要であると判断し結論づけた。

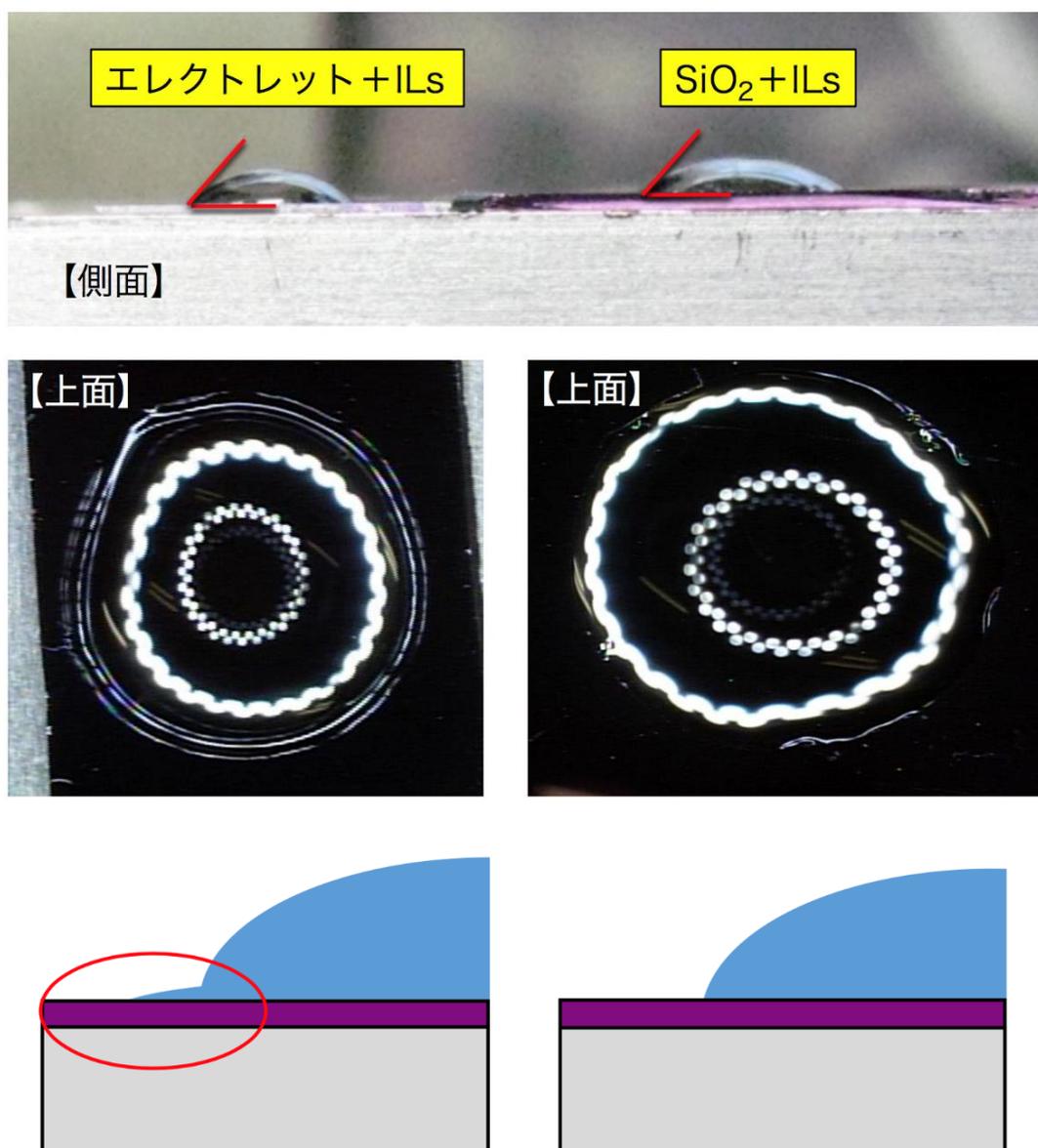


図 3-③-(2)-5.3 固体イオンエレクトレット有無での側面、上面状態比較

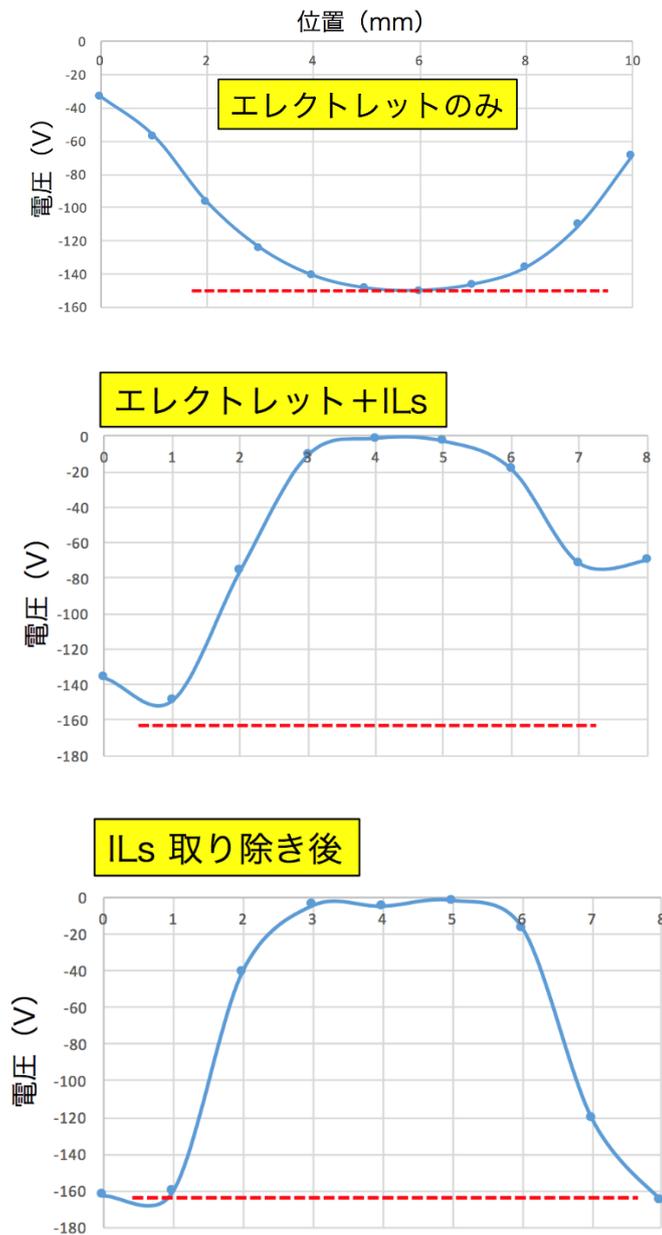


図 3-③-(2)-5.4 表面電位計による帯電量評価結果

上記対策として、本プロジェクトでは2種類の方法を構築した。ひとつは、イオン液体自体に保護膜を用いた場合、ふた、目は固体イオンエレクトレットに保護膜を用いた場合である。以下に、それぞれについて報告する。

まずは、イオン液体上に保護膜を用いた場合である。この方法は従来オイルなどを用いた研究例があり、そこにヒントを得てイオン液体に応用した独自の技術である。図 3-③-(2)-

5.5にはそのプロセスチャートを示す。まず、Si 基板上に1 $\mu\text{m}$ 程度のCytopを成膜し、その後フォトレジストの密着性を高めるために、非常に弱いO<sub>2</sub>プラズマ処理をした。その後、リソグラフィーを行った後、今度は強いO<sub>2</sub>プラズマを用いてCytopのパターニングを行った。これを、フォトレジスト除去後に180 $^{\circ}\text{C}$ で30分間熱処理すると、撥水効果を持ったパターンができ上がり、ここにイオン液体を滴下するとそのパターン通りに配置できた。最後に、このパターン上に配されたイオン液体の上からParylene Cを1 $\mu\text{m}$ 程度成膜した。このデバイスの外観写真を図3-③-(2)-5.6に示した。ここでは、実験のため、いくつかの異なるパターンを用意した。

このデバイスを用いて、図3-③-(2)-5.7に示したようにデバイス、固体イオンエレクトロッドをセットし、発電実験を行なった。ここで、固体イオンエレクトロッドは酸化膜厚が約550 $\mu\text{m}$ 、帯電電圧が約-200Vのものを使用した。その発電実験結果を図3-③-(2)-5.8に示した。ここで、与えた振動周波数は1Hzであった。図からもわかるように、振動に合わせて約 $\pm 10 \times 10^{-8}$  Aの発電電流を得られている。この結果は、当初の想定よりは小さな値ではあるが、保護膜として用いたParylene Cの厚さが1 $\mu\text{m}$ とやや厚いためであると考えられる。ところが、この方法では、機械強度を考えると保護膜をこれ以上薄くするのは困難であった。

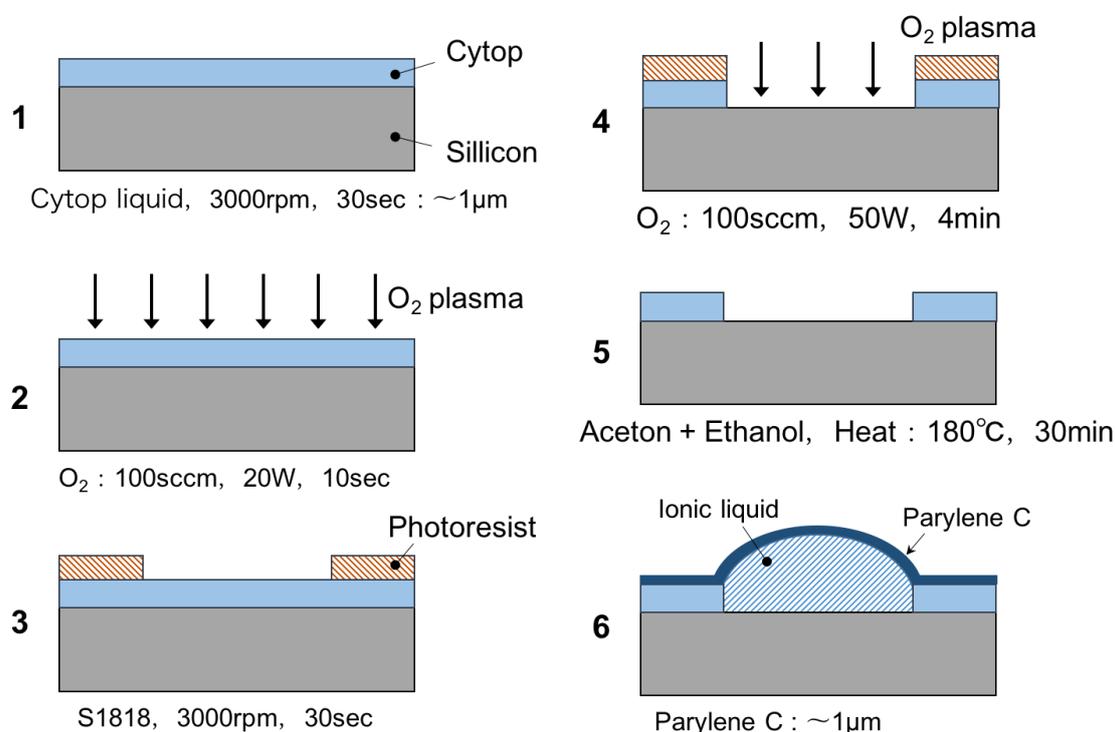


図 3-③-(2)-5.5 イオン液体上への Parylene C 成膜プロセスチャート

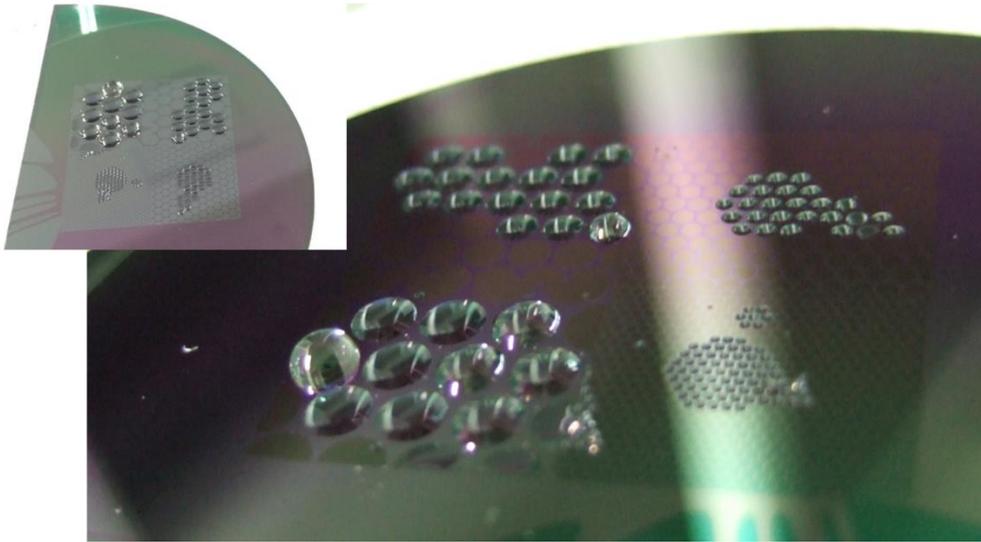


図 3-③-(2)-5.6 イオン液体上の Parylene C 成膜外観写真

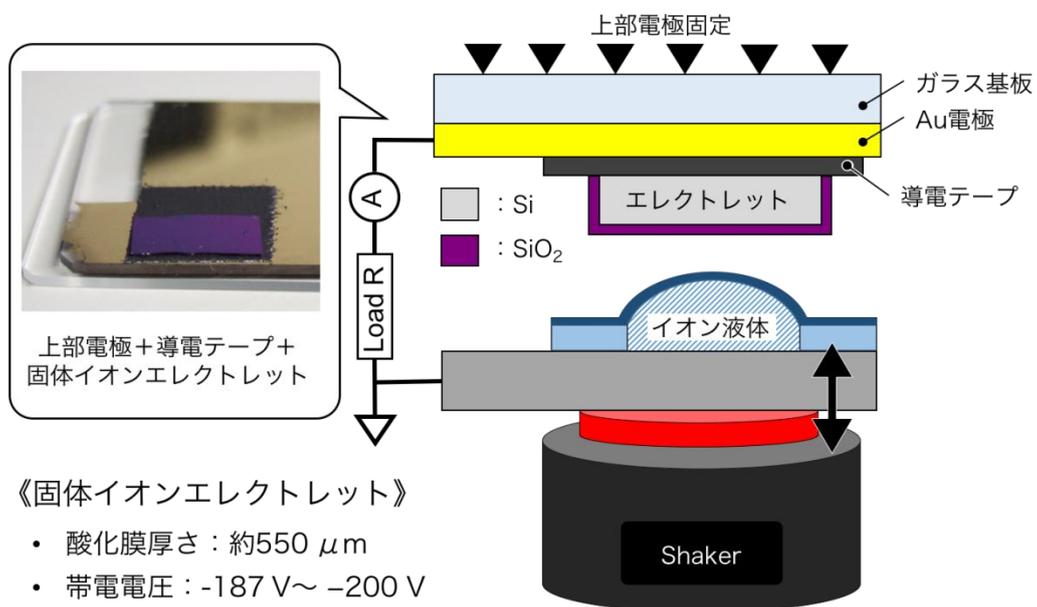


図 3-③-(2)-5.7 イオン液体上に成膜した Parylene C の発電実験系

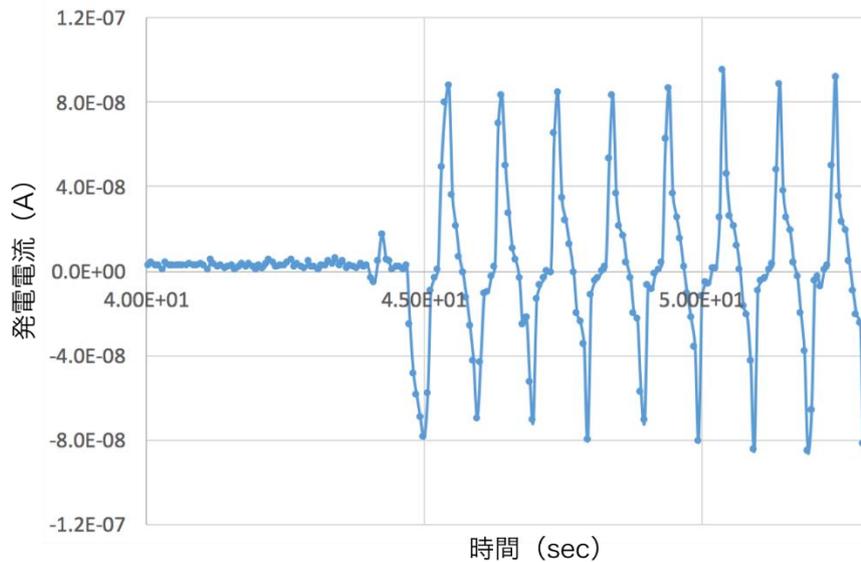


図 3-③-(2)-5.8 イオン液体上に Parylene C 成膜後の発電実験結果

そこで、固体イオンエレクトレット側に保護膜を配することができればさらに薄くできる可能性があったため、その検討、実証を行なった。

イオン液体と電極界面に形成される電気二重層キャパシタのギャップは、一般に数 nm と非常に小さく、それゆえに非常に大きな静電容量を持つとされている。その大きな静電容量を最大限に活用するためには、固体イオン上の保護膜も極力薄くする必要がある。そこで、保護膜の候補として ALD (Atomic Layer Deposition) 膜、及び SAM (Self-Assembled Monolayer) 膜があげられ、検討を進めた。結果として、ALD 膜は成膜時には水を使う必要があり、その水分によって固体イオンエレクトレットの帯電が劣化することがわかった。また、多くの SAM 膜も成膜時に高温にすることにより、こちらもほとんどの材料で帯電劣化が見られた。

最終的に、ダイキン工業のオブツールというフッ素系の SAM 膜のみが成膜後も固体イオンエレクトレットの帯電が残存することがわかった。これを用いて SiO<sub>2</sub> 基板上に成膜実験をし、その上にイオン液体を滴下した実験結果を図 3-③-(2)-5.9 に示した。図中の一番左が未処理の SiO<sub>2</sub> 基板、図中央がオブツールに浸漬するディップ法を用いた膜、図右には加熱蒸着法を用いた膜でのそれぞれの実験結果である。その結果から、未処理の基板上では非常に親水性を示したが、ディップ法、加熱蒸着法の順で基板とイオン液体の接触角が大きくなることがわかった。また、帯電電圧についても図示しないが、全ての方法で帯電電圧の残存を確認できた。

最後にこの組み合わせを用いて、発電実験を行なった結果が図 3-③-(2)-5.10 である。ここでは比較のために、固体イオンエレクトレットのみを用いた場合と、固体イオン液体とイオン液体を融合させた場合の 2 種類の実験を行なった。その結果、固体イオンエレクトレット

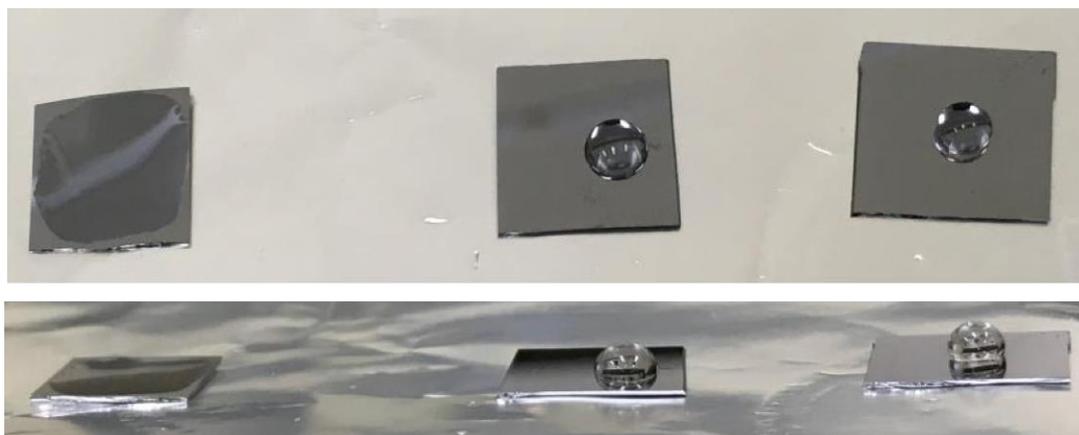


図 3-③-(2)-5.9 オプツールの有無，及び成膜方法による接触角比較

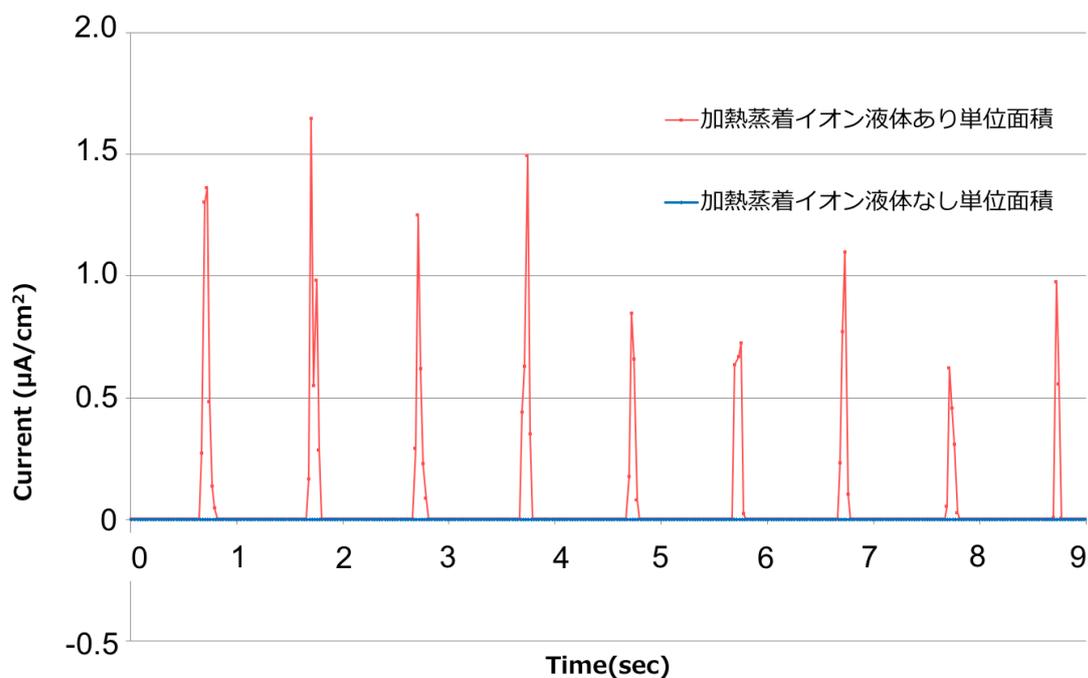


図 3-③-(2)-5.10 オプツールの成膜有無での発電実験結果比較

トレットのみではほとんど発電電流を計測できなかったのに対し、固体イオンエレクトレットとイオン液体を融合させたデバイスでは  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上の発電電流を得ることができた。これにより、イオン液体を固体イオンエレクトレットと融合させることで、固体イオンのみを用いたときより桁違いに発電量が大きくなることを実証できた。

以上から、本テーマでは固体イオンエレクトレットとイオン液体はそのままでは相性が悪いことがわかったが、保護膜を用いることで改善できることがわかり、発電実験デモンストレーションにより実証できた。

### 3-③-(2)-6 まとめ

本プロジェクトでは、まず、研究項目 3-③-(1)で設計指針を得た三種類のエネルギーハーベスタについて製作し、発電特性を実証した。その中で、段付き加工や高アスペクト比構造など、微細加工技術の開発を行い、エネルギーハーベスタの実用化に向けて大きく前進できた。また、静電ギャップ対策の効果についても確認でき、実用デバイス設計の本格研究へ向けて、設計・製作指針が得られた。また、研究項目 3-②で設計指針を得た固体イオンエレクトレットとイオン液体の融合デバイスに関しても、その効果を実証することができた。

以上の検討から、振動環境に応じてさまざまなエネルギーハーベスタを提供する知見と実証結果を得た。特に、ある一定の周波数が繰り返しある場合には縦振動型カンチレバー構造が有効であり、また、周波数領域が、人の日常的な動きなどのように 10Hz 以下と非常に低い場合は、固体イオンエレクトレットとイオン液体を融合したデバイスか、もしくはイオンを完全にポリマー内に固定してしまうゲルエレクトレットを用いるのが有効であり、さらに、周波数が変動するような振動源であれば多極型振動発電構造のデバイスや 3 端子構造を用いるのが有効であることが明らかとなった。

### 3-④ 交通インフラでの振動発電デバイスの導入開発

一般財団法人マイクロマシンセンター

#### 3-④-(1) 交通インフラにおけるターゲット振動の調査と活用仮説立案

##### 3-④-(1)-1 目標

交通インフラ、特に道路環境を中心に高速道路から一般道、老朽化の進んだ橋梁等、様々な交通環境における主要な振動環境を把握し、想定するアプリケーションを提言する。まずは、橋梁を中心に、以下の調査を行う。

- ・ 様々な橋梁の端末設置場所における振動環境を調査し、橋梁による振動周波数、加速度等の違いを把握する。
- ・ また、老朽化の進んだ橋梁の解体に立ち会い、老朽化に伴う構造変化が振動にどのように影響するかを把握し、振動発電デバイスの発電性能のみならず、センサ端末で老朽化を計測する際の振動変化も併せて把握する。

また、道路、鉄道などの橋梁、高架、トンネルなどの大規模構造物における交通振動についても振動環境を計測し、発電エネルギーを見積もるデータとする。

そして、交通インフラでのアプリケーションについて仮説を整理し、併せて必要なセンサ端末について考察する。また、事項③-5 とワーキンググループ活動を開催したので、その結果としてアプリケーションマップは、3-5-(1)、(3)に記載する。

##### 3-④-(1)-2 各想定インフラでのセンサ端末設置場所での振動環境の調査方法

測定機器、測定手順、および解析方法を以下にまとめる。

###### ① 計測機器

- ・ 加速度センサ

RION製 PV -87 高感度型加速計 (図3-④-(1)-2.1)

- 感度：40 pC/m/s<sup>2</sup>
- 周波数範囲：1~3000 Hz
- 共振周波数 9000 Hz
- 最大加速度 ±400 m/s<sup>2</sup>

- ・ データロガー

Keyence製NR-600ポータブルマルチ入力データロガー (図3-④-(1)-2.2) とNR-CA04 加速度計測ユニット (図3-④-(1)-2.3) 組み合わせる。4チャンネル入力により最大サンプリング周波数を100 kHzとする。



図3-④-(1)-2.1 加速度センサ (RION製 PV-87 高感度型加速計)



図3-④-(1)-2.2 ポータブルマルチ入力データロガー



図3-④-(1)-2.3 加速度計測ユニット

## ② 計測手順

エレクトロニクスで加速度計を計測対象に貼り、ケーブルで加速度計をデータロガーに接続し、加速度を計測する。データは一計測あたり500秒間記録した。

### ③ 解析方法

時間領域と周波数領域との両方で解析を行い、測定対象の振動特徴を抽出した。時間領域では時系列で記録した加速度波形より、測定対象の最大振幅に着目し、振動レンジを特定した。周波数領域では主に高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform, FFT）を用いて、上記の加速度波形を周波数領域に変換したのち得られたフーリエスペクトル（あるいは周波数スペクトルと呼ぶ）より、測定対象の周波数特徴を抽出した。着目する特徴は卓越振動数（あるいは振動数帯）とフーリエ振幅である。図3-④-(1)-2.4に振動波形およびFFTスペクトルの一例を示す。また、一波長ごとの周波数帯域を確認するために、ウェーブレット変換によるスペクトル解析を行った。振動波形とウェーブレット変換スペクトルの一例を図3-④-(1)-2.5に示す。

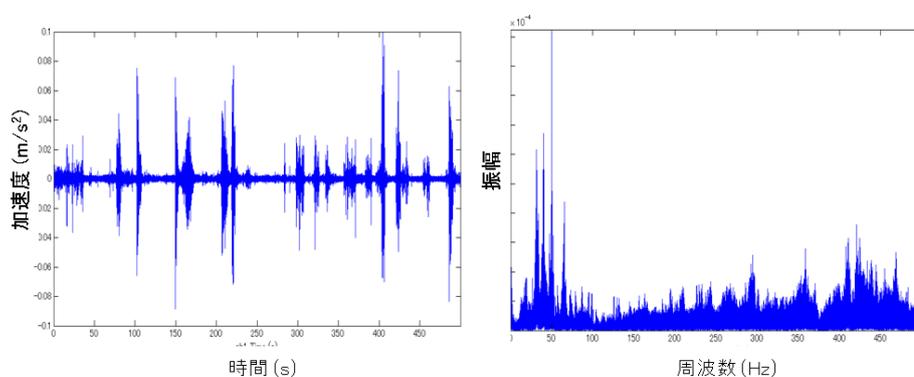


図3-④-(1)-2.4 振動波形およびFFTスペクトルの一例

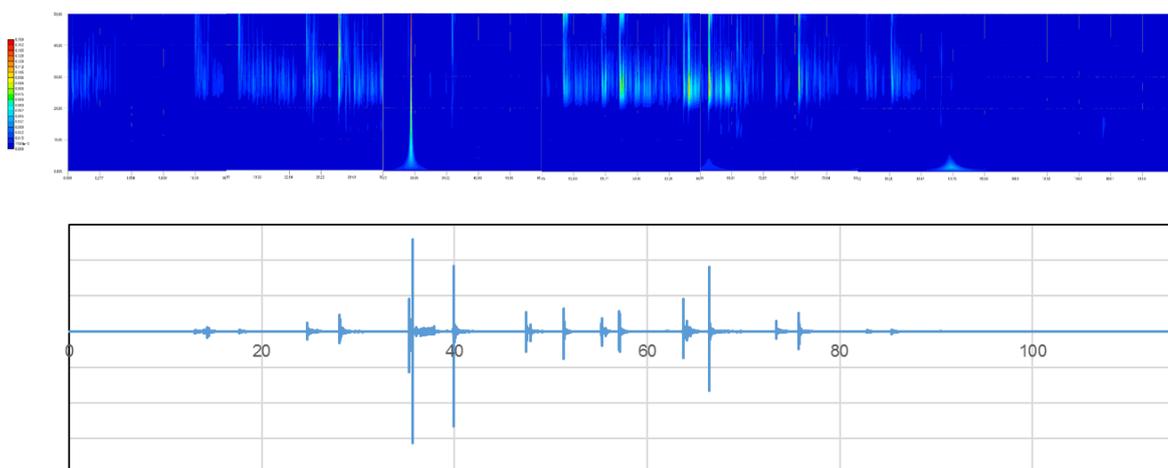


図3-④-(1)-2.5 振動波形とウェーブレット変換スペクトルの一例

### 3-④-(1)-3 交通インフラでの振動環境および損傷に伴う固有振動の変化

本節では以下のような内容の計測について述べる

- ① 交通インフラ（橋梁）における振動環境
  - ・測定対象は一般道の橋梁。
  - ・測定場所および測定数は、橋梁中央部の2測点、また橋梁の数は全7本（京都府綴喜郡井手町内の橋種、橋長、および劣化度の異なるもの、および大門橋（京都府宮津市））
  - ・大門橋においては、床版～主桁撤去の工程において、床版部をコンクリートカッター、ワイヤソーを使用して撤去、切断撤去時の応力開放時や主桁切断撤去作業時における前後の固有振動の変化から、橋梁の損傷と固有振動の変化を計測・解析する。
  - ・周波数解析（フーリエ変換）を行い、卓越周波数の分析を行う。
- ② 橋梁の劣化に伴う固有振動数の変化の調査
  - ・測定対象は、今冬に架替工事の予定されている橋梁。
  - ・架替工事時に、部材を段階的に取り壊しながら振動計測を行う。
  - ・測点数は6点（中央部、側支間部）。
  - ・各段階で得られた振動データに周波数解析（フーリエ変換）を行う。

京都府綴喜郡井手町内の橋本橋、奥玉川橋、山吹橋、庵垣内橋、宮ノ前橋、宮ノ后橋での計測を2016年7月11日に実施した。各橋梁の劣化事前調査結果を表3-④-(1)-3.1～表3-④-(1)-3.6に示す。写真3-④-(1)-3.1～写真3-④-(1)-3.6は各橋梁の外観ならびにセンサ設置状況を示している。なお、京都府内の橋梁劣化判定基準は表3-④-(1)-3.7の通りである。ここでは、判定区分ならびに橋梁構造の異なる宮ノ前橋（RC桁橋：判定区分I）、奥玉川橋（RC桁橋：判定区分II）、山吹橋（PC桁橋：判定区分I）の結果について示す。なお、重量約1.4tの乗用車を20km/h～30km/hで通行させることで橋梁全体を加振した。

大門橋における調査は、劣化した橋梁の破壊に至るまでの過程における構造物の変状を計測し、インフラの劣化診断技術の開発に必要なデータ取得を目的としている。上記の目的を遂行するために、加速度センサを橋梁上部（床版上面、地覆）に設置し、撤去開始前の破壊初期状態（左岸側）、および（※撤去途中は左岸側での計測が危険であるため）撤去途中段階（右岸側）で計測した。加えて、撤去の進捗状況により、必要に応じて計測を実施（右岸側）した。図3-④-(1)-3.1に大門橋の撤去工程（A1橋台～P1橋脚～P5橋脚間の床版の解体撤去）について側面図を示す。

表 3-④-(1)-3.1 劣化事前調査結果（橋本橋）

橋梁名	橋本橋	
フリガナ	ハシモトハシ	
路線名	町道22号線	
架設年次	1993年	
橋長	23.45m	
幅員	8.2m	
径間数	1	
点検実施年月日		
2015年12月22日		
点検結果	判定区分	変状の種類
橋全体	I	
上部構造	主桁	I
	横桁	-
	床版	I
下部構造	I	
支承部	I	
その他	II	鉄筋露出
項目		

所見等（橋全体の健全性の診断の判定根拠） 地覆に鉄筋露出が見られるが、局所的な損傷であるため判定区分Iとする。



写真3-④-(1)-3.1 橋梁の外観およびセンサ設置状況（橋本橋）

表3-④-(1)-3.2 劣化事前調査結果（奥玉川橋）

橋梁名	奥玉川橋		
フリガナ	オクタマガワバシ		
路線名	町道43号線		
架設年次	1967年		
橋長	20.1m		
幅員	5.1m		
径間数	2		
点検実施年月日	2015年12月22日		
点検結果	判定区分	変状の種類	
橋全体	II	腐食、欠損	
上部構造	主桁	I	
	横桁	I	
	床版	II	鉄筋露出
下部構造	II	漏水	
支承部	II	腐食	
その他	III	目地材の脱落、腐食、欠損	
項目			

所見等(橋全体の健全性の診断の判定根拠) 防護柵基礎部に腐食、欠損が発生しており、第三者へ影響が生じる可能性があるが、上流側防護柵の両端部であるため、判定区分IIとする。



写真3-④-(1)-3.2 橋梁の外観およびセンサ設置状況（奥玉川橋）

表3-④-(1)-3.3 劣化事前調査結果（山吹橋）

橋梁名	山吹橋			
フリガナ	ヤマブキバシ			
路線名	町道44-02号線			
架設年次	1986年			
橋長	22.8m			
幅員	5.2m			
径間数	1			
点検実施年月日	2015年12月23日			
項目	点検結果	判定区分	変状の種類	
	橋全体	I		
	上部構造	主桁	I	
		横桁	II	PC定着部の浮き
		床版	I	
	下部構造	I		
	支承部	I		
	その他	I		

所見等（橋全体の健全性の診断の判定根拠）が、軽微であるため判定区分Iとする。



写真3-④-(1)-3.3 橋梁の外観およびセンサ設置状況（山吹橋）

表3-④-(1)-3.4 劣化事前調査結果（庵垣内橋）

橋梁名	庵垣内橋			
フリガナ	アンガイトバシ			
路線名	町道2-19号線			
架設年次	1970年			
橋長	13.4m			
幅員	3.4m			
径間数	1			
点検実施年月日		2016年1月6日		
項目	点検結果	判定区分	変状の種類	
	橋全体	II	遊間の以上、ナットの緩み	
	上部構造	主桁	II	遊間の異常
		横桁	I	
		床版	I	
	下部構造	II	ひび割れ	
	支承部	II	ナットの緩み	
その他	III	ひび割れ		
所見等（橋全体の健全性の診断の判定根拠）		主桁の遊間異常、支承びアンカーボルトのナットの緩みなどの損傷が見られることから、判定区分IIとする。左岸側橋台前面の張コンクリートにIII判定のひび割れが発生しているが、橋梁の体力に影響は無いため、橋全体の評価は考慮しない。		



写真3-④-(1)-3.4 橋梁の外観およびセンサ設置状況（庵垣内橋）

表3-④-(1)-3.5 劣化事前調査結果（宮ノ前橋）

橋梁名	宮ノ前橋		
フリガナ	ミヤノマエバシ		
路線名	町道2-20号線		
架設年次	1992年		
橋長	13.47m		
幅員	5.1m		
径間数	1		
点検実施年月日	2016年1月16日		
項目	点検結果	判定区分	変状の種類
	橋全体	I	
	上部構造	主桁	I
		横桁	-
		床版	II
	下部構造	I	
	支承部	I	
	その他	II	塗装の劣化

床版に遊離石灰、高欄に塗装の劣化が見られるが、軽微であるため判定区分Iとする。



写真3-④-(1)-3.5 橋梁の外観およびセンサ設置状況（宮ノ前橋）

表3-④-(1)-3.6 劣化事前調査結果（宮ノ后橋）

橋梁名	宮ノ后橋	
フリガナ	ミヤノゴウバシ	
路線名	町道16号線	
架設年次	1969年	
橋長	12.0m	
幅員	4.1m	
径間数	1	
点検実施年月日 2015年12月22日		
点検結果	判定区分	変状の種類
橋全体	III	腐食、目地材の脱落
上部構造	主桁	III 防食機能の劣化、桁端部腐食
	横桁	I 防食機能の劣化
	床版	II 剥離・鉄筋露出
下部構造	I	
支承部	III	腐食
その他	IV	目地材の脱落、拡幅部の構造不良
項目	<p>支承部、桁端部の腐食、断面欠損が確認（遊間から直接雨水・土砂流入が腐食原因）と、拡幅部構造不良から判定区分IIIとする。拡幅部構造不良部については、カラーコーンで車両進入を防止している。</p>	



写真3-④-(1)-3.6 橋梁の外観およびセンサ設置状況（宮ノ后橋）

表 3-④-(1)-3.7 京都府内の橋梁劣化判定基準

判定区分		
I	健全	構造物の機能に支障なし
II	予防保全段階	構造物の機能に支障はないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい
III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、または、生じる可能性が著しく高く緊急に措置を講ずべき状態

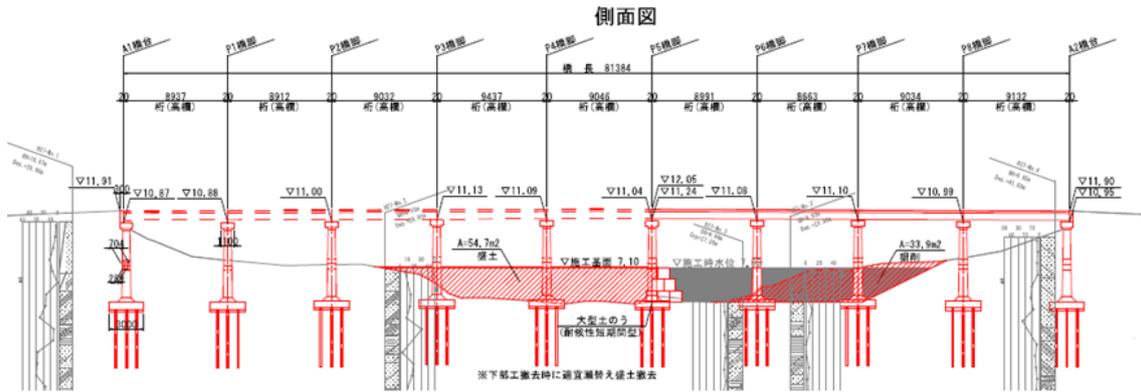


図3-④-(1)-3.1 大門橋の撤去工程 (A1 橋台～P1 橋脚～P5 橋脚間の床版の解体撤去) の側面図

① 宮ノ前橋 (RC桁橋・判定区分I)

床版に遊離石灰、高欄に塗装の劣化が見られるが軽微である、とされている橋梁である。なお、架設年は1992年、橋長は13.47 m、幅員は5.1 mである。

支間中央での最大振幅は0.193m/s<sup>2</sup>となり、卓越周波数は23.6Hzであった。

図3-④-(1)-3.2に振動波形およびFFTスペクトルを示す。

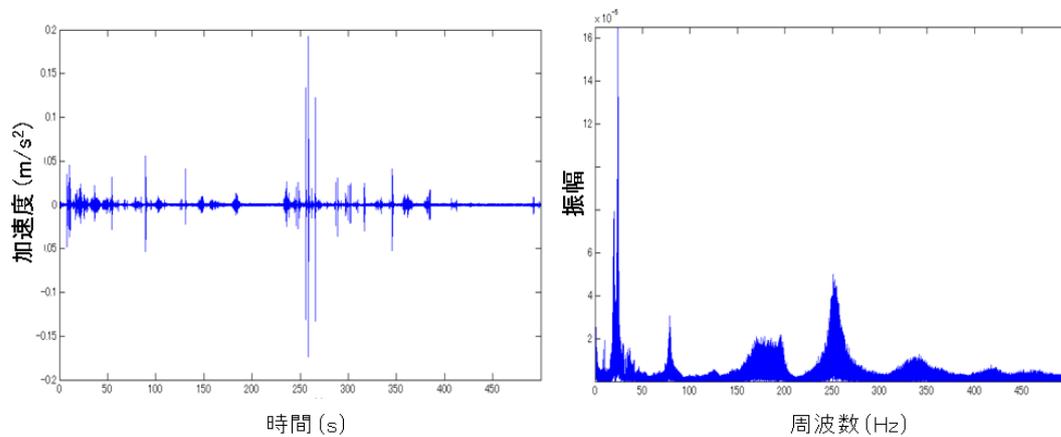


図3-④-(1)-3.2 振動波形およびFFTスペクトル (宮ノ前橋)

② 奥玉川橋 (RC桁橋・判定区分II)

防護柵基礎部に腐食、欠損が発生しており、第三者へ影響が生じる可能性があるが、上流防護柵の両端部である、とされている橋梁である。なお、架設年は1967年、橋長は20.10 m、幅員は5.1 mである。

支間中央での最大振幅は0.108m/s<sup>2</sup>となり、卓越周波数は50.0Hzであった。

図3-④-(1)-3.3に振動波形およびFFTスペクトルを示す。

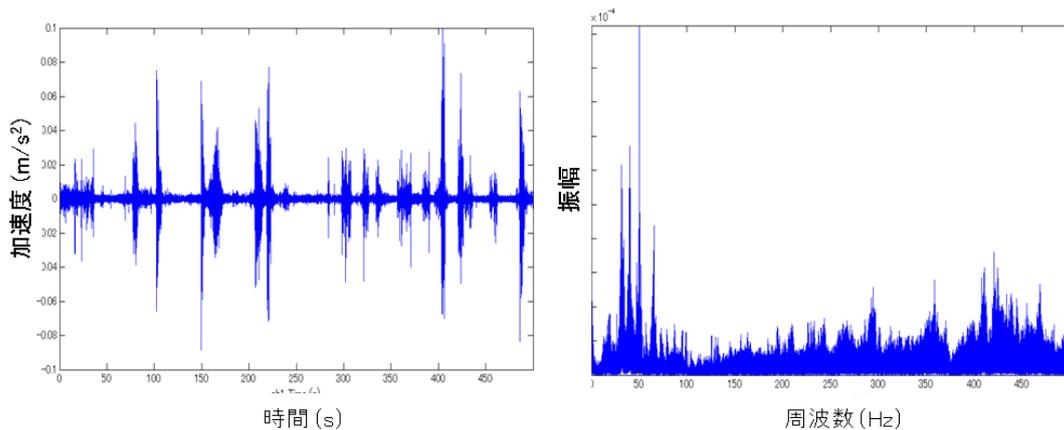


図3-④-(1)-3.3 振動波形およびFFTスペクトル（奥玉川橋）

③ 山吹橋（PC桁橋・判定区分I）

PC定着部に浮きが見られるが、軽微である、とされている橋梁である。なお、架設年は1986年、橋長は22.8 m、幅員は5.2 mである。

支間中央での最大振幅は0.037m/s<sup>2</sup>となり、卓越周波数は8.1Hzであった。

図3-④-(1)-3.4に振動波形およびFFTスペクトルを示す。

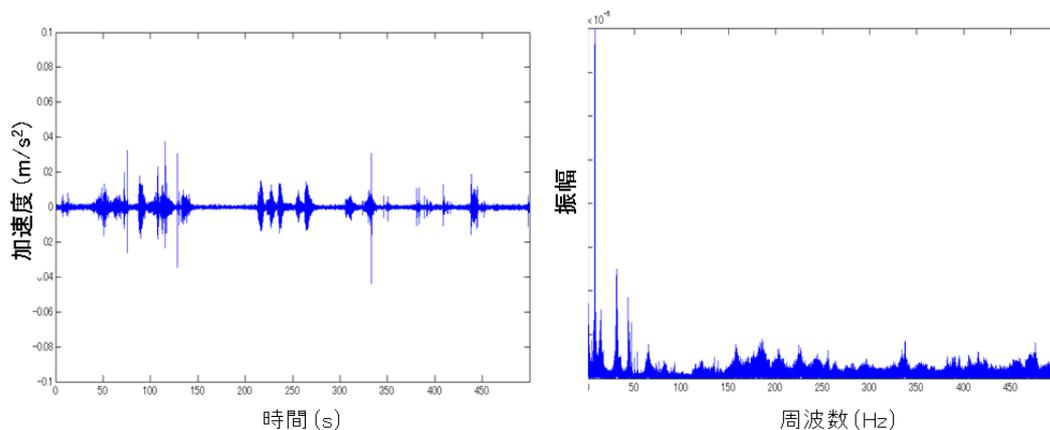


図3-④-(1)-3.4 振動波形およびFFTスペクトル（山吹橋）

以上の結果を橋名、判定区分、最大振幅、および卓越周波数に関してまとめると、表3-④-(1)-3.7のようになる。劣化判定区分や構造形式に基づく最大振幅や卓越周波数の違いは明確に判断できなかった。これに関して、構造物としての部材の諸元（スパンや断面などの寸法）による構造モデルを用いた振動モード解析の結果を得ることで考察することが今後の課題である。

表3-④-(1)-3.8 各橋梁の振動計測結果

橋名	判定区分	最大振幅	卓越周波数
宮の前橋	判定区分I	0.193 m/s <sup>2</sup>	23.6 Hz
奥玉川橋	判定区分II	0.108 m/s <sup>2</sup>	50.0 Hz
山吹橋	判定区分I (PC橋)	0.037 m/s <sup>2</sup>	8.1 Hz

④ 大門橋

2016年12月16日（気温：2.2℃）に計測を行った。なお、センサはCH1とCH2の2チャンネルで計測した。写真3-④-(1)-3.7に示すように、床版端部に設置した。なお、側面図において、加速度センサの設置個所を図3-④-(1)-3.5に示している。



写真3-④-(1)-3.7 加速度センサの設置状況

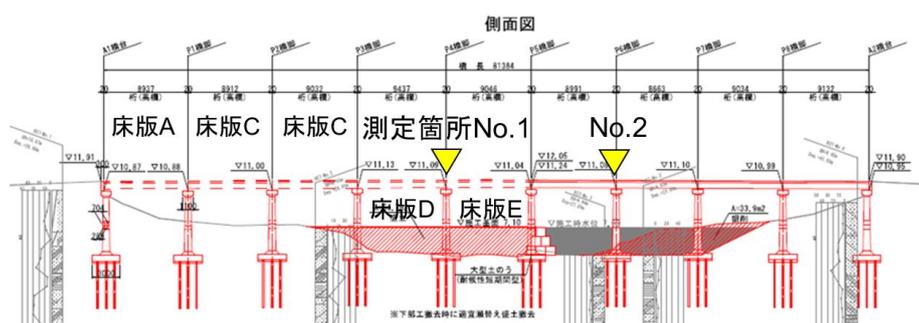
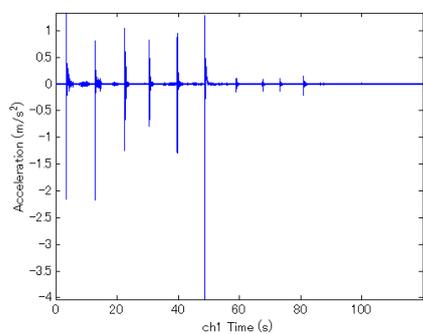
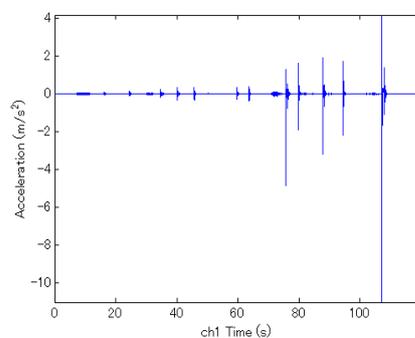


図3-④-(1)-3.5 振動計測箇所

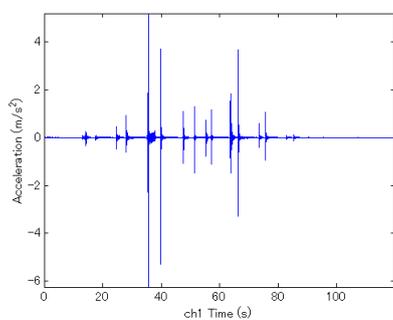
ここでは、床版～主桁撤去の工程において、床版部をコンクリートカッター、ワイヤーを使用して撤去、切断撤去時の応力開放時や主桁切断撤去作業時における前後の固有振動の変化から、橋梁の損傷と固有振動の変化を計測・解析することで、橋梁の劣化に伴う固有振動数の変化を再現して調査することを試みた。すなわち、取り壊し前（STEP1）、床版Aの路肩（地覆）撤去後（STEP2）、床版A、BおよびCの路肩（地覆）破壊後（STEP3）および、床版A鉄筋切断後（STEP4）の各段階での振動計測を行った。以下に各段階での、振動波形（図3-④-(1)-3.6：A2地点での結果）ならびに120秒間にわたる波形のFFT解析による周波数スペクトル（図3-④-(1)-3.7）の結果を示す。なお、各段階における作業の様子を写真3-④-(1)-3.8に示す。



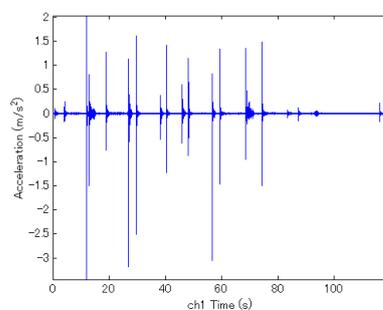
a) STEP1



b) STEP2

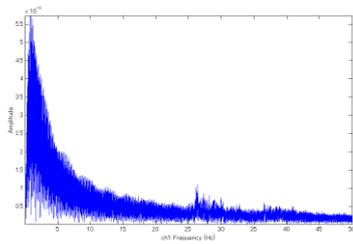


c) STEP3

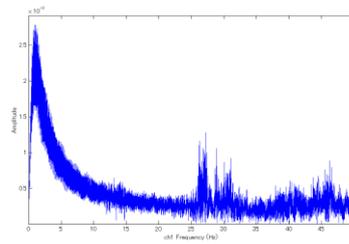


d) STEP4

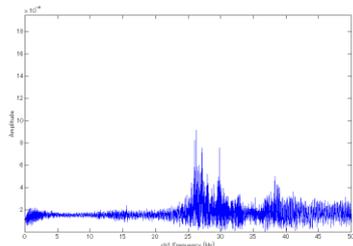
図3-④-(1)-3.6 振動波形（A2地点）



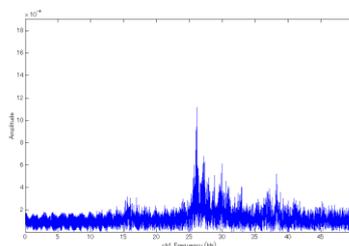
a) STEP1



b) STEP2



c) STEP3



d) STEP4

図3-④-(1)-3.7 周波数スペクトル



a) STEP1



b) STEP2



c) STEP3



d) STEP4

写真3-④-(1)-3.8 撤去・解体の各段階における作業の様子

これより、STEP1～STEP4にかけて、損傷の範囲及び程度が拡大していくとともに、20Hz～30Hzのスペクトルピークが増加している。一方で、10Hz以下の低周波スペクトルが損傷の範囲及び程度が拡大していくとともに（STEP3以降）、消失していることがわかる。一般には、構造物の損傷程度が進むにつれて、振動モード（全体の固有振動数）は低周波へシフトすることが知られているが、上記の結果では異なる結果となっている。これに関して、加振（起震）イベント毎の一波长ごとの周波数帯域を確認するために、ウェーブレット変換によるスペクトル解析を行った。

図3-④-(1)-3.8にSTEP3での振動波形をウェーブレット変換により得られたスペクトルを示す。これによると、全波形（120秒間）でのFFT解析では低周波によるスペクトルが消失していたが、実際には低周波成分も存在することがわかる。一方で、損傷程度が小さかったSTEP1あるいはSTEP2の段階では上記の現象が多く生じていたことが推察される。このことから、損傷の程度が進むことで振動モードが一義的に低周波へ移行するという一般的な知見に加えて、振動毎に卓越周波数の異なる振動モードが発生し、周波数スペクトルが変化していくことが考えられる。

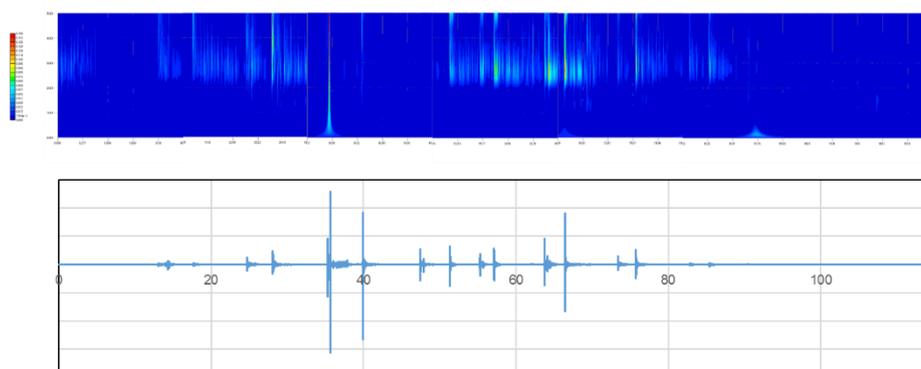


図3-④-(1)-3.8 STEP3での振動波形とウェーブレット変換スペクトル

上記で示した宮ノ后橋と庵垣内橋について、有限要素モデルを用いた振動解析を行った。図 3-④-(1)-3.9 および図 3-④-(1)-3.10 に宮ノ后橋および庵垣内橋の平面図を示す。また、図 3-④-(1)-3.11 および図 3-④-(1)-3.12 に各有限要素モデルにおける一次、二次、三次曲げ振動モードおよび卓越周波数を示す。これより、いずれの場合も実験値と一次曲げモードでの卓越周波数は概ね一致することがわかった。

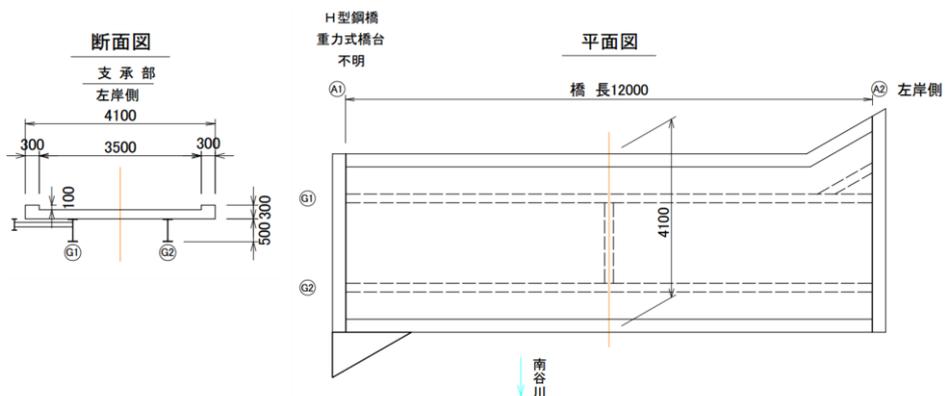


図 3-④-(1)-3.9 断面図および平面図 (宮ノ后橋)

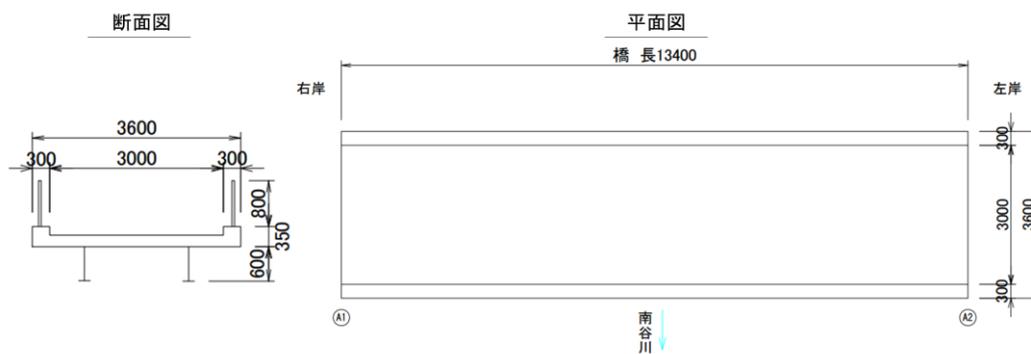


図 3-④-(1)-3.10 断面図および平面図 (庵垣内橋)

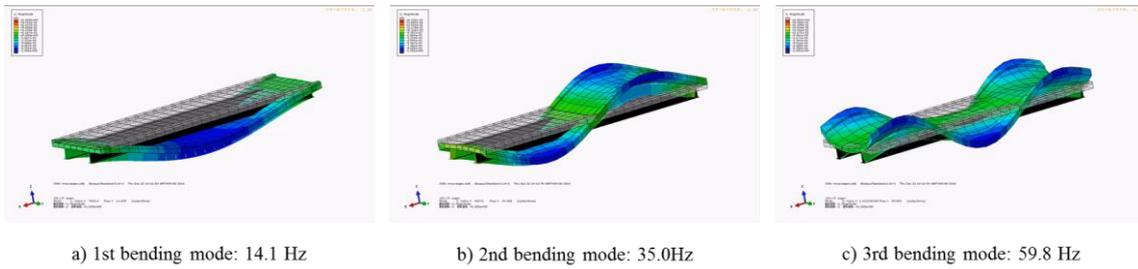


図 3-④-(1)-3.11 振動モードおよび卓越周波数（宮ノ后橋）

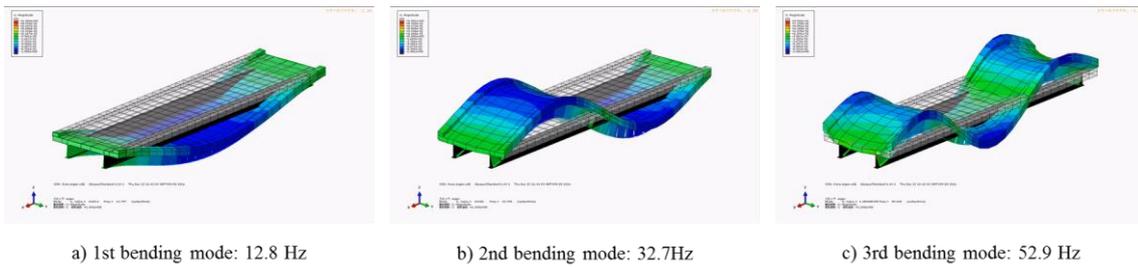


図 3-④-(1)-3.12 振動モードおよび卓越周波数（庵垣内橋）

### 3-④-(1)-4 道路、鉄道の橋梁、高架、トンネルなどの構造物における交通振動

西日本高速道路が管理している京都縦貫自動車道の高架橋の一スパンを計測対象とした（図 3-④-(1)-4.1.1）。橋梁構造は連続鋼板桁とコンクリート床板組み合わせる橋梁であり、支間長は 35.2 メートルである。測点は、支間中央床版、中央横リブ、ジョイント衝撃側、ジョイント衝撃逆側の四点で行った：それぞれの計測風景を図 3-④-(1)-4.1.2 および図 3-④-(1)-4.1.3) に示す。



図 3-④-(1)-4.1 対象橋梁

上記四点の加速度波形とフーリエスペクトルを図 3-④-(1)-4.2 から図 3-④-(1)-4.5 に示す。支間中央床版では最大振幅 0.53 m/s<sup>2</sup>、卓越周波数 3.5、19.1 Hz（図 3-④-(1)-4.2）、支間中央横リブでは最大振幅 0.48 m/s<sup>2</sup>、卓越周波数 3.5 Hz（図 3-④-(1)-4.3）、およびジョイント

衝撃側では最大振幅  $1.1 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数帯  $30\text{-}130 \text{ Hz}$  (図 3-④-(1)-4.4)、の振動特徴が表れたジョイント衝撃逆側では最大振幅  $0.17 \text{ m/s}^2$  の振動特徴が表れたが、卓越周波数は不明瞭である (図 3-④-(1)-4.5)。

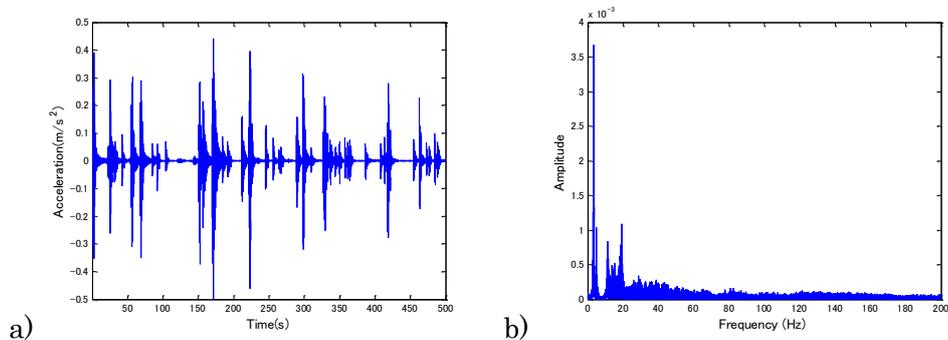


図 3-④-(1)-4.2 橋梁支間中央床版加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

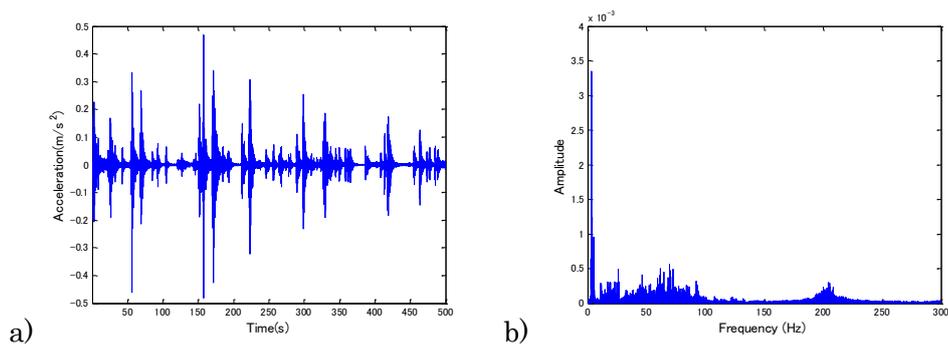


図 3-④-(1)-4.3 橋梁支間中央横リブ加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

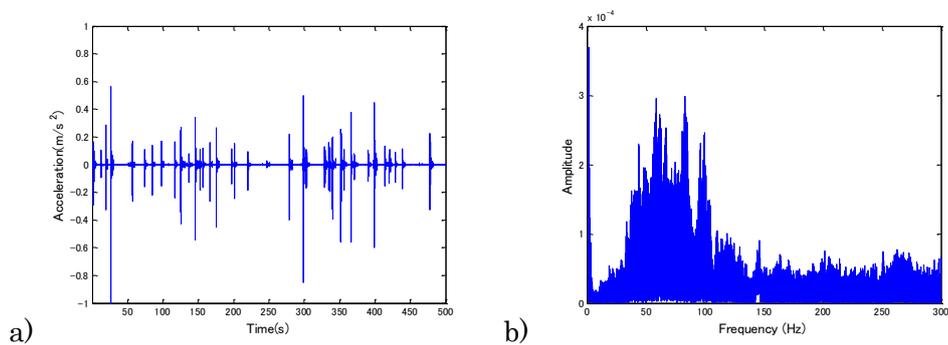


図 3-④-(1)-4.4 橋梁ジョイント衝撃側加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

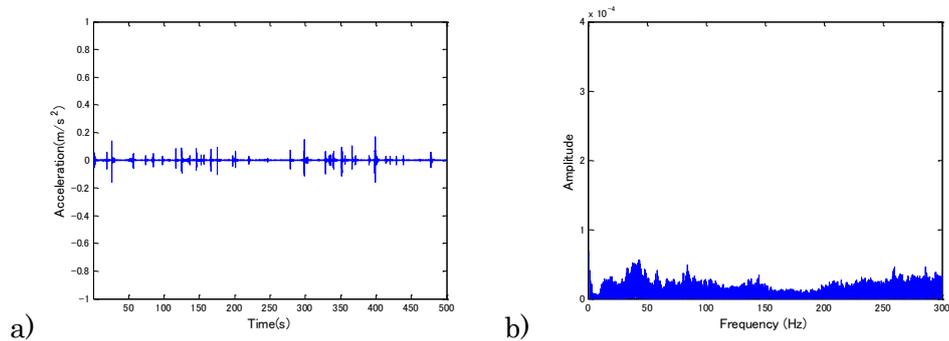


図 3-④-(1)-4.5 橋梁ジョイント衝撃逆側加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

西日本高速道路が管理している京都縦貫自動車道のトンネルの一本を計測対象とした（図 3-④-(1)-4.6.1）。測点は入口歩道路面、入口側壁、中央歩道路面、中央側壁の四点とした。歩道路面の測点は本線からおよそ 0.1m離れた所であり、側壁の測点は地面から 1.7m 高さの所に設定した。それぞれの計測風景を図 3-④-(1)-4.6.2 および図 3-④-(1)-4.6.3)に示す。



a) 全景

b) 歩道路面での計測風景

c) 側壁での計測風景

図 3-④-(1)-4.6 対象トンネル

上記四点の加速度波形とフーリエスペクトルは図 3-④-(1)-4.7 から図 3-④-(1)-4.10 に示す。振動特徴は、入口歩道路面で最大振幅 1.8 m/s<sup>2</sup>、卓越周波数帯 100-200 Hz（図 3-④-(1)-4.7）、入口側壁で最大振幅 0.22 m/s<sup>2</sup> 卓越周波数は不明瞭（図 3-④-(1)-4.8）、中央歩道路面で最大振幅 0.44 m/s<sup>2</sup>、卓越周波数帯 50-200 Hz（図 3-④-(1)-4.9）、および中央側壁で最大振幅 0.12 m/s<sup>2</sup>、卓越周波数は不明瞭である（図 3-④-(1)-4.10）。

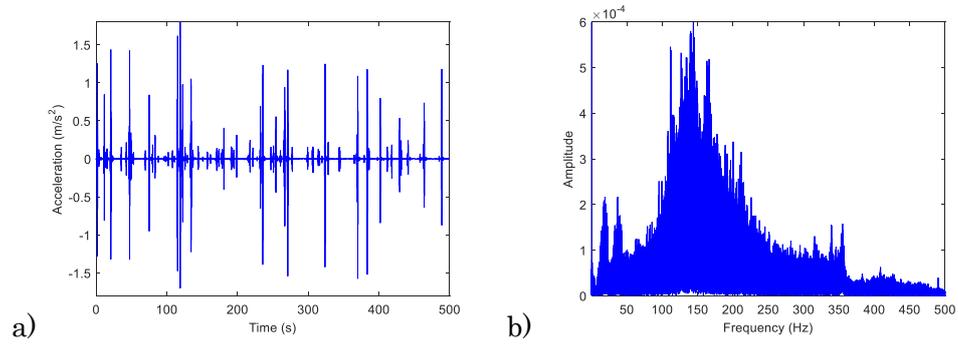


図 3-④-(1)-4.7 トンネル入口歩道路面加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

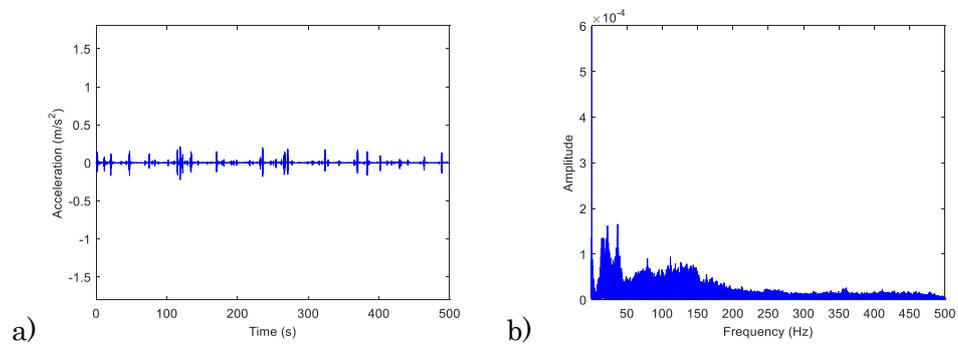


図 3-④-(1)-4.8 トンネル入口壁加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

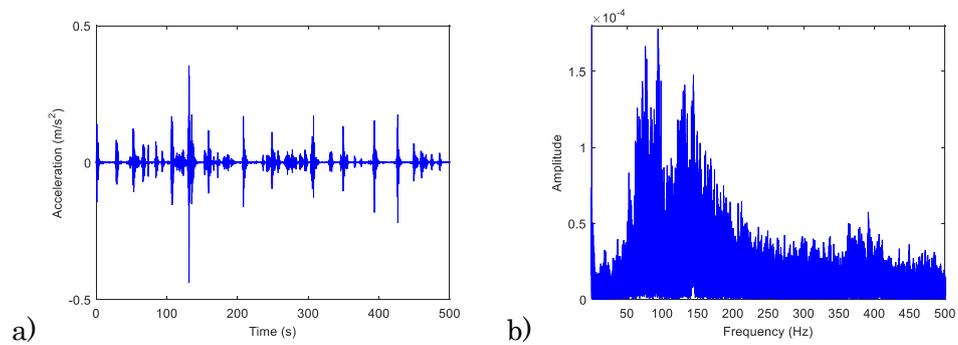


図 3-④-(1)-4.9 トンネル中央歩道路面加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

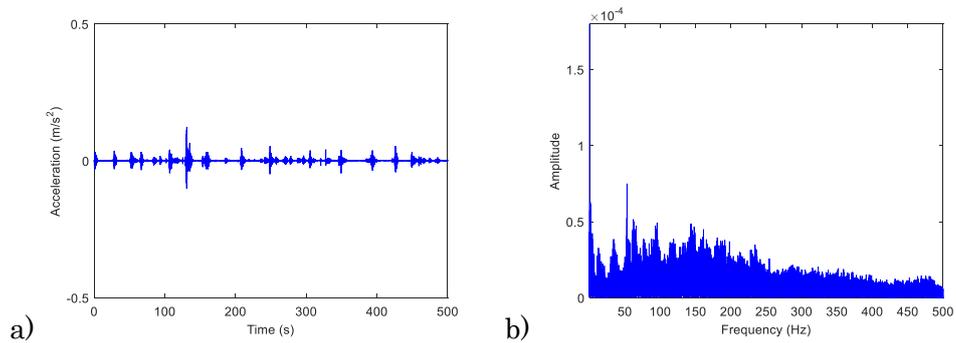


図 3-④-(1)-4.10 トンネル中央壁加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

### 3-④-(1)-5 道路面、線路軌道などの土構造近傍における交通振動

西日本高速道路が管理している京都縦貫自動車道の道路近傍の一箇所を計測対象とした。計測点は道路近傍地面、道路近傍斜面、道路近傍擁壁三点とした。地面の測点は本線から 0.1 m 離れた所であり、斜面の測点は本線から 1.6m 離れた所であり、擁壁の測点は地面から 1.7 m 高さの所に設定したそれぞれの計測風景を図 3-④-(1)-5.1 に示す。



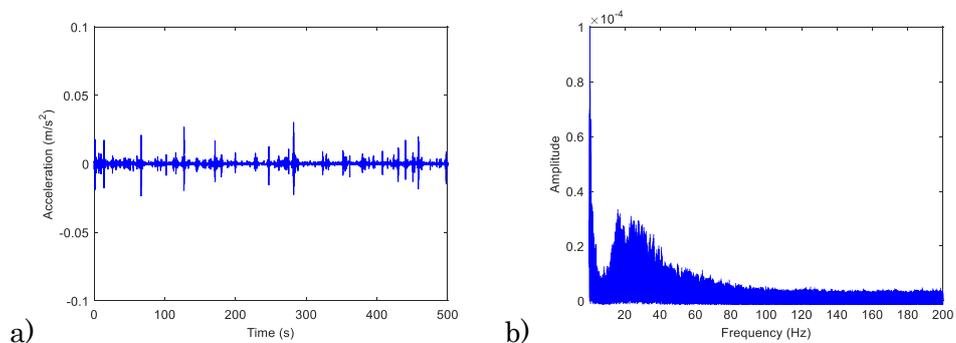
a) 地面と斜面

b) 擁壁

c) 擁壁での計測風景

図 3-④-(1)-5.1 道路近傍対象土構造物

道路近傍地面の加速度波形とフーリエスペクトルは図 3-④-(1)-5.2 に示す。こちらは最大振幅  $0.03 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数帯  $10\text{-}50 \text{ Hz}$  の振動特徴を観察される。



a)

b)

図 3-④-(1)-5.2 道路近傍地面加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

道路近傍斜面の加速度波形とフーリエスペクトルは図 3-④-(1)-5.3 に示す。こちらは最大振幅  $0.09 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数帯  $10\text{-}50 \text{ Hz}$  の振動特徴を観察される。

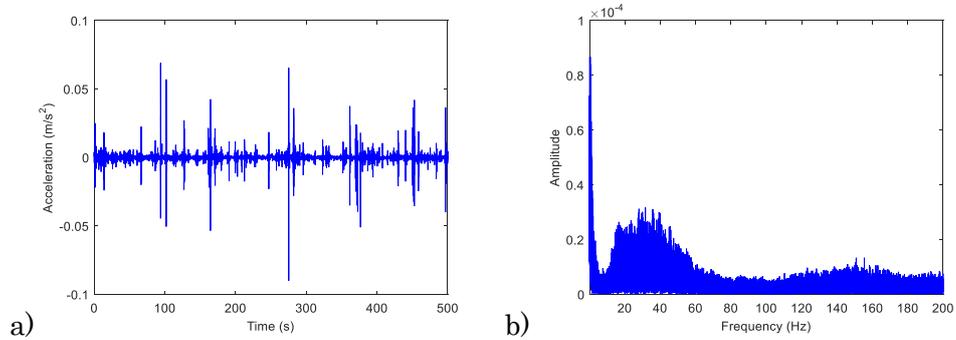


図 3-④-(1)-5.3 道路近傍斜面加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

道路近傍斜面の加速度波形とフーリエスペクトルは図 3-④-(1)-5.4 に示す。こちらは最大振幅  $0.008 \text{ m/s}^2$  の振動特徴が観察されたが、卓越周波数は不明瞭である。

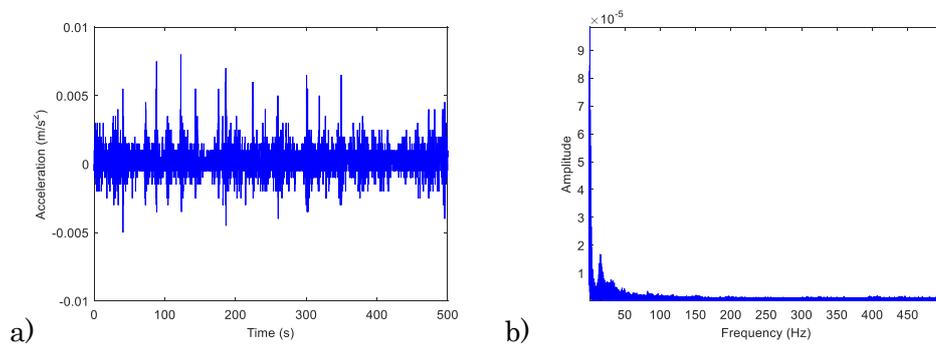


図 3-④-(1)-5.4 道路近傍擁壁加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

### 3-④-(1)-6 道路、鉄道の防音壁、側壁、照明設備等の付帯設備における交通振動

計測対象は西日本高速道路管理がされている京都縦貫自動車道の道路近傍の防護柵の一箇所である。この防護柵の高さは  $0.8\text{m}$  であり、測点は高さ  $0.63\text{m}$  の所であった。計測風景は図 3-④-(1)-6.1 に示す。



図 3-④-(1)-6.1 対象防護柵

防護柵の加速度波形とフーリエスペクトルは図 3-④-(1)-6.2 に示す。こちらは最大振幅  $0.35 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数 14、23 Hz と周波数帯 100-500 Hz の振動特徴が観察される。

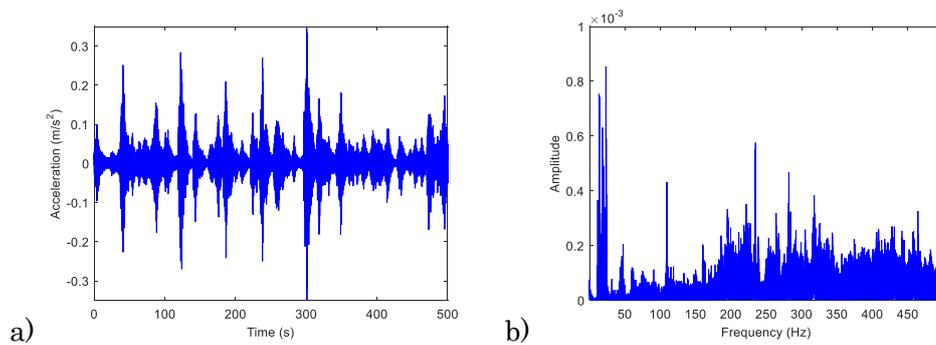


図 3-④-(1)-6.2 防護柵加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

西日本高速道路が管理している京都縦貫自動車道の道路近傍の遮音壁の一箇所を測定対象とした (図 3-④-(1)-6.3.1))。この遮音壁は高さ 1.0mの壁高欄の上に乗っており、遮音壁本体の高さは 2.1mである。測点は遮音壁のポストの元から 0.1mと 0.7m高さの所に設定した。計測風景を図 3-④-(1)-6.3.2)に示す。

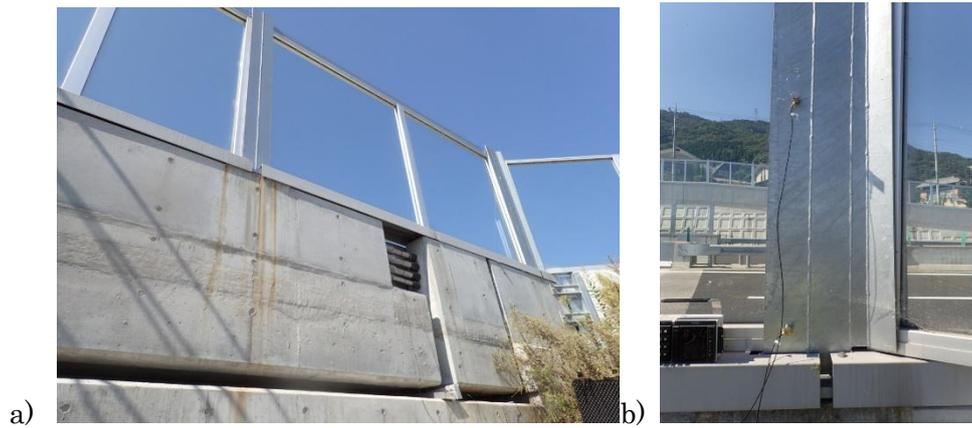


図 3-④-(1)-6.3 対象遮音壁 : a)全景および b)計測風景。

遮音壁の加速度波形とフーリエスペクトルを図 3-④-(1)-6.4 および図 3-④-(1)-6.5 に示す。0.1m の高さの所は最大振幅  $0.33 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数  $401 \text{ Hz}$  と  $468 \text{ Hz}$ 、0.7メートルの高さの所は最大振幅  $1.0 \text{ m/s}^2$ 、卓越周波数  $88,249$ 、および  $401 \text{ Hz}$  の振動特徴が表れた。

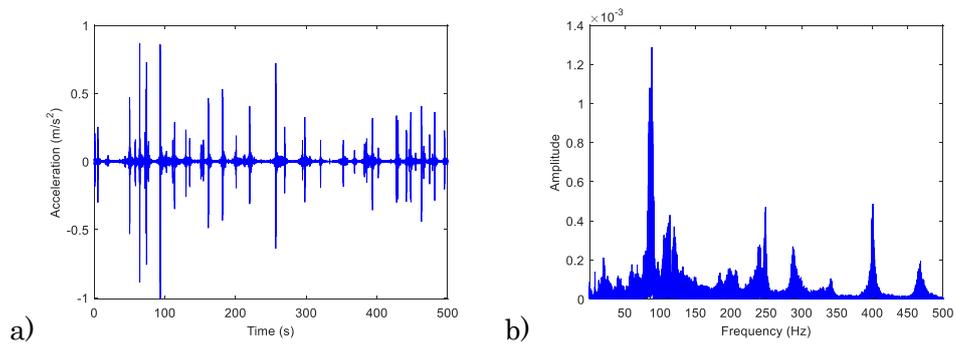


図 3-④-(1)-6.4 遮音壁高さ 0.7メートル所の加速度 :  
a)波形および b)フーリエスペクトル

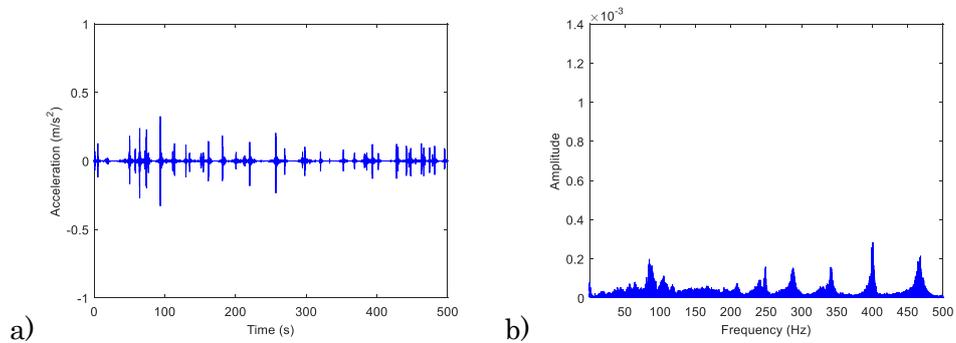


図 3-④-(1)-6.5 遮音壁高さ 0.1メートル所の加速度 :  
a)波形および b)フーリエスペクトル

西日本高速道路が管理している京都縦貫自動車道の道路近傍の表示設備の一本を計測対象とした(図 3-④-(1)-6.6.1))。この表示設備は高さおよそ 6 メートルであり、測点は高さ 1.9 メートルにおける車線方向と車線横断方向の 2 箇所を設定した。(図 3-④-(1)-6.6.2))。

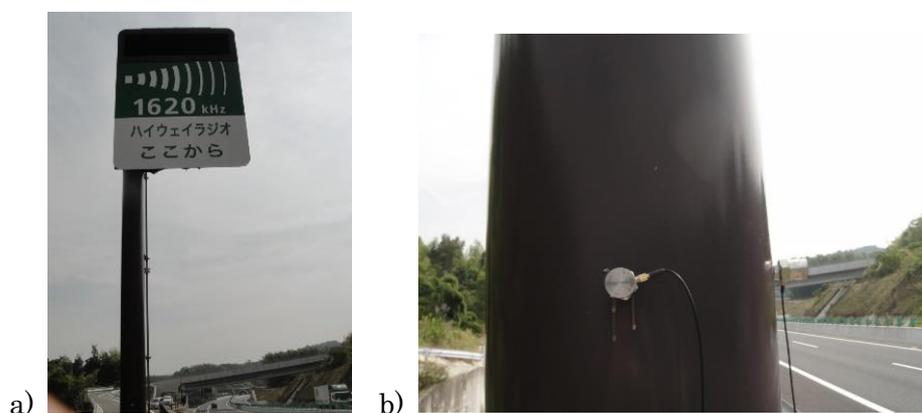


図 3-④-(1)-6.6 対象表示設備：a)全景および b)計測風景

表示設備の加速度波形とフーリエスペクトルを図 3-④-(1)-6.7 と図 3-④-(1)-6.8 に示す。車線方向では最大振幅 0.08  $\text{m/s}^2$ 、卓越周波数 2, 16, 43 Hz。車線横断方向では最大振幅 0.09  $\text{m/s}^2$ 、卓越周波数 2, 16, 43, 120 Hz の振動特徴が表れた。

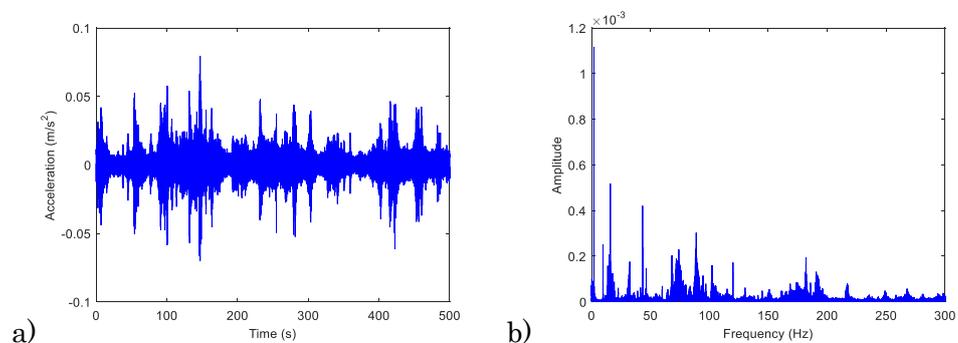


図 3-④-(1)-6.7 表示設備車線方向の加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

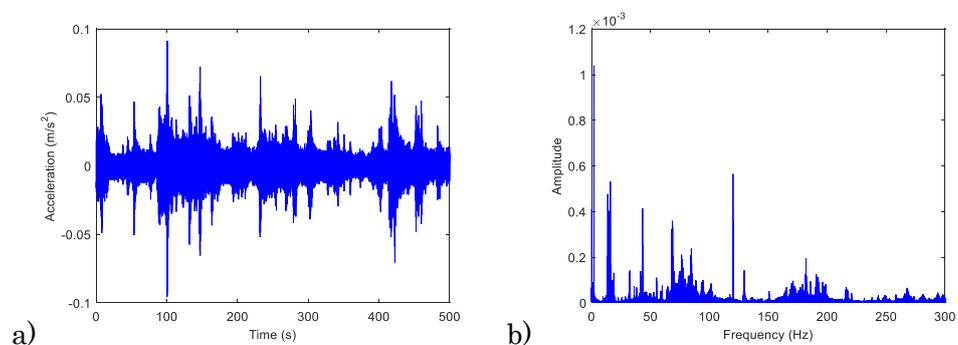


図 3-④-(1)-6.8 表示設備車線横断方向の加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

京都大学桂キャンパス前の照明柱の一本を計測対象とした(図 3-④-(1)-5.9.1)。この照明柱は高さおよそ 4 メートルであり、測点は高さ 1.5 メートルにおける車線方向と車線横断方向の 2 点を設定した(図 3-④-(1)-5.9.2)。

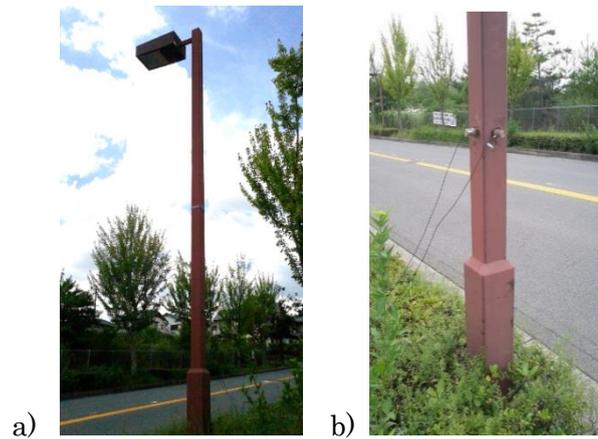


図 3-④-(1)-6.9 対象照明柱：a)全景および b)計測風景

照明柱の加速度波形とフーリエスペクトルを図 3-④-(1)-6.10 と図 3-④-(1)-6.11 に示す。車線方向では最大振幅 0.035 m/s<sup>2</sup>、卓越周波数 4, 15, 31, 65 Hz, 車線横断方向では最大振幅 0.064 m/s<sup>2</sup>、卓越周波数 4, 26, 78 Hz の振動特徴が表れた。

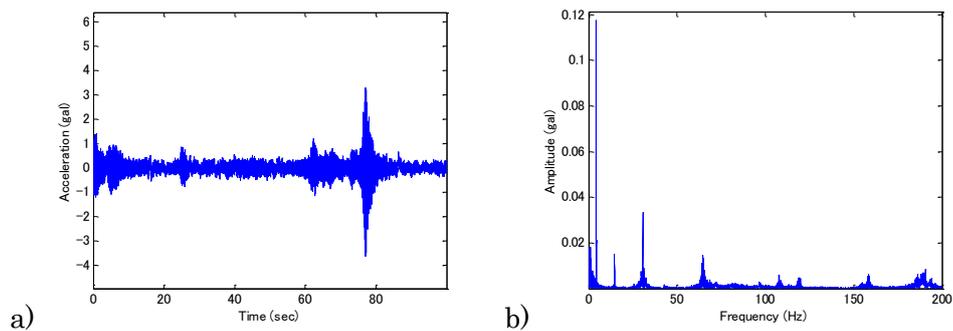


図 3-④-(1)-6.10 照明柱車線方向の加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

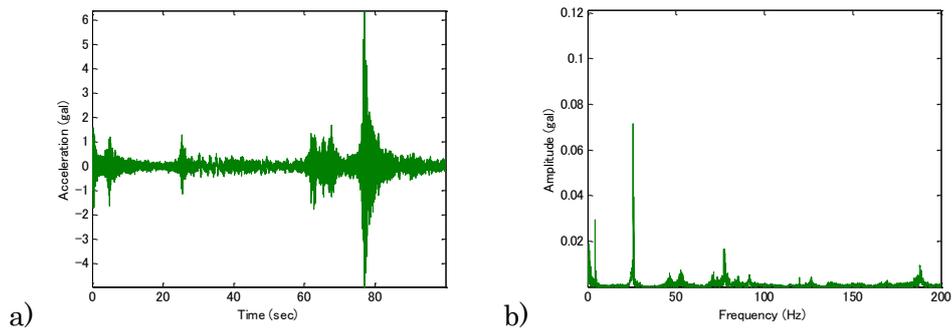
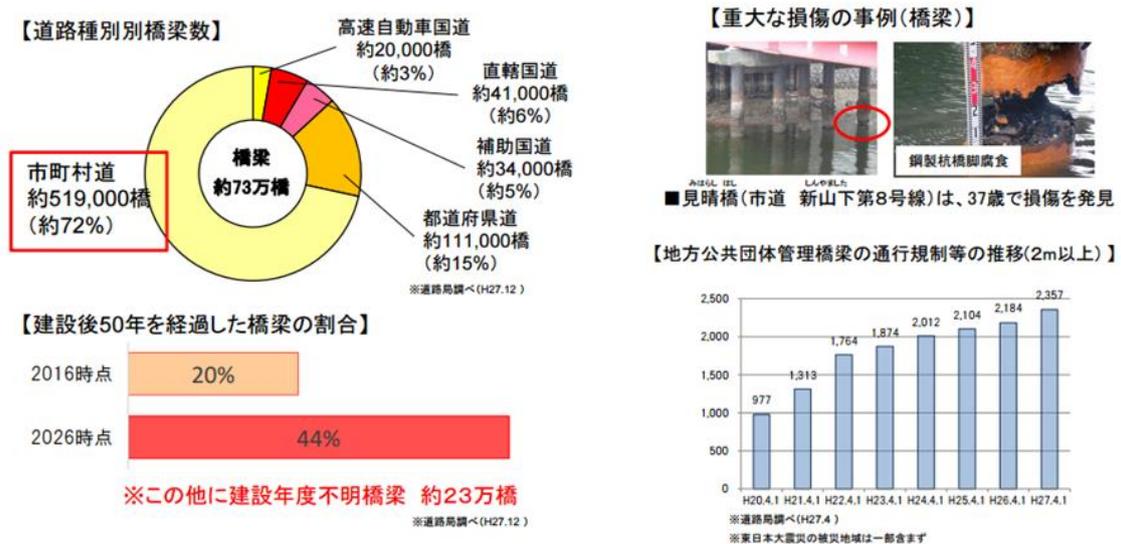


図 3-④-(1)-6.11 照明柱車線横断方向の加速度：a)波形および b)フーリエスペクトル

### 3-④-(2) アプリケーションの仮説立案

社会インフラ、特に全国的高速道路、国道、地方自治体の直管の県道や市道等の道路、さらに全国に張り巡らされた鉄道網の橋梁やトンネル、さらにこの本体に付随する照明塔、表示設備、遮断壁、防護柵等は、老朽化が進んでおり、メンテナンスの重要性が益々高くなっている。国土交通省の発表（図 3-④-(2)-1）によると、全国約 73 万橋の橋梁のうち、7 割以上となる約 52 万橋が市町村道にあり、建設 50 年を経過した橋梁の割合は、2016 年は 20% であるが、2026 年に 44% と増加すると報告されている。この課題は、地方に多く存在しているにも関わらず、地方自治体で橋梁の保安に業務に携わる土木技術者数が 5 人以下の市区が約 60% 以上、町に至っては 0 人が 30% と、圧倒的に不足している点である。特に橋梁は、人海戦術でのメンテナンスでは限界があるとされていて、安価で安定な、インフラモニタリングの自動化が焦眉の急とされている。



<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>

図 3-④-(2)-1 国土交通省報告書

このモニタリングの自動化には、老朽化に伴う初期破損や強度劣化等をその共振周波数の変化、あるいは負荷に伴う歪量の変化、クラック等の発生に伴う AE（アコースティックエミッション）等を検出するセンサ、そのセンサ信号から橋梁の健全度を抽出する信号処理、そのデータを中央監視室に送る無線・有線通信網等が必須であるが、将来設置する膨大な数のセンシングシステムの電池交換の工数を大幅に減らすための自立発電（エネルギーハーベスト）技術も極めて重要である。橋梁でのエネルギーハーベストは、太陽電池、風力発電、振動発電等が考えられ、特に直射日光が当たる場所では太陽電池は大きな電力が得られるが、太陽光は曇りや雨が続くと途端に電力が減ることや、さらに日光が入らない大型橋梁の下面や、内部には振動発電が有用といえる。

振動型のエネルギーハーベストでは、振動の周波数と、その振幅である加速度が発生電力の指標になるが、3・④項で詳細に報告されているように、周波数は大型橋梁（鉄鋼やコンクリート）の中央床板やリブ、ジョイントで 3Hz から 20Hz、加速度は 0.2 m/s<sup>2</sup> から 0.5m/s<sup>2</sup>、道路の防護柵や遮音壁、表示設備では 10Hz から 500Hz、加速度は 0.1 m/s<sup>2</sup> から 0.3m/s<sup>2</sup> となっている。特徴としては、場所によって、周波数が何桁も変わっていること、加速度は決して大きくないことである。このような定常振動に加えて、電車・列車や、大型のトラック等が通過した場合は、非定常的に大きな加速度が得られる。

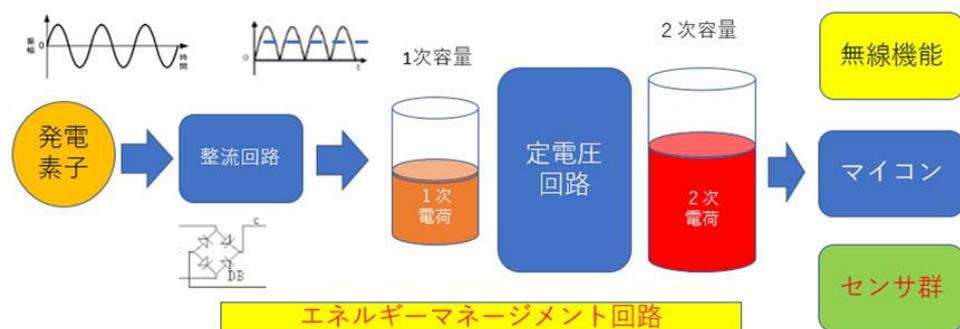


図 3-④-(2)-2 発電素子を用いた無線センサ端末と、エネルギーマネージメント回路

エネルギーハーベスト素子を含むセンサシステムを社会インフラに応用する場合は、このような幅広い周波数で効率的な発電が要求される。しかしながら、このプロジェクトで開発・製造する静電 MEMS 型は比較的 Q 値が大きな振動子を使うため、その発生定常周波数にあったエネルギーハーベストを開発する必要があり、容易ではなかった。ただし、連続的な定常周波数に振動ではなく、インパルスであれば、Q 値の高い静電 MEMS 型エネルギーハーベスト素子は、内部振動子が Q 値の逆数の時間で共振状態を保持できるため、比較的容易に電力の発生が可能である。すなわち、定常振動ではなく、電車や自動車・トラッ

ク等が通過した場合に発生するインパルス振動を積算する方式である。図 3-④-(2)-2 に典型的な発電素子を使った場合のセンサ端末のブロックダイアグラムを示すように、非定期的に発生する電力を蓄積し、有効に利用するためのエネルギーマネージメント回路が特に有用である。一般的なエネルギーマネージメント回路は、整流回路、一次蓄積容量、定電圧回路、2次蓄積回路で構成され、発生する電圧、電流、周波数や頻度、負荷であるセンサや無線システム等でこのエネルギーマネージメント回路の設定を柔軟に変更することが重要である。また、定電圧回路や負荷は、機能が動作を始める電圧閾値まで電圧が上昇する間に無効電流が流れると、1次、2次容量に電荷が溜まらない場合があり、それぞれの機能の間に何らかの遮断回路を挿入する必要性もある。

このように、橋梁を中心に実際の社会インフラでの振動状態を把握し、具体的なインフラモニタリングに必要なセンシングの項目を洗い出し、運用システムを試験的に構成して検証実験を同時に行うことが益々重要になっている。

### 3-④-(3) まとめ

損傷程度の異なる橋梁での振動の違い、および損傷進展を想定した取り壊し時の段階的な振動の変化により、損傷の程度が進むことで振動モードが一義的に低周波へ移行するという一般的な知見に加えて、振動毎に卓越周波数の異なる振動モードが発生し、周波数スペクトルが変化する知見が得られた。また、対象橋梁における振動の特徴として、振幅は支間中央において $0.5\text{m/s}^2$ 程度であり、ジョイント部は支間中央より大きくなることがわかった。また、周波数は支間中央において一般的に $50\text{Hz}$ 以下の卓越周波数であるが、ジョイント部は $100\text{Hz}$ 以上高い周波数もあることがわかった。また、対象トンネルにおける振動の特徴として、振幅は自然風により入口は中央より大きくなり、車道に近いために歩道路面は壁より大きくなることがわかった。周波数は一般的には $100\text{-}200\text{Hz}$ 高い周波数であるが、側壁における卓越周波数が不明瞭であった。さらに、対象道路近傍の土構造物振動の特徴として、土構造は一般的に $0.1\text{m/s}^2$ 以下の小さい振幅であり、土構造は一般的に $50\text{Hz}$ 以下の周波数であることがわかった。なお、対象付帯設備の振動の特徴として、振幅は表示設備、照明柱は一般的に $0.1\text{m/s}^2$ 以下の小さい振幅であり、防護柵、遮音壁は表示設備、照明柱より三倍以上大きくなることがわかった。特に、高い箇所は低い箇所より大きくなること、および横断方向は車線方向より少し大きくなることがわかった。周波数は表示設備、照明柱は一般的に $50\text{Hz}$ 以下であり、防護柵、遮音壁は $200\text{Hz}$ 以上の卓越周波数もあることがわかった。

また、アプリケーション案については3-④-2項に記したが、本アプリケーション開発は事項の3-⑤項と連携して、高効率振動発電デバイス導入ワーキンググループとして活動してきた。アプリケーションマップ等については、3-⑤-(3)項に記載した。

### 3-⑤ オフィス・工場等での環境発電デバイスの導入開発

#### 3-⑤-(1) センサネットワーク用の端末の仕様抽出とアプリケーション開発

##### 3-⑤-(1)-1 各想定環境でのセンサ端末設置場所での振動環境の測定

ダイキン工業株式会社

##### 3-⑤-(1)-1.1 目標

オフィスや工場等における主要な振動環境を把握するために、以下を計測する。

- ・人体、特にセンサ端末を設置する指、手首・足首、上腕、首、頭部、腹部等の様々な動作時の振動環境
- ・オフィスや工場等での様々な場所、装置での振動環境

##### 3-⑤-(1)-1.2 人体における振動環境の計測

人体部位 5 箇所(足、腰、胸、手、首)に加速度センサを装着し、安静時、歩行時、階段昇降時の振動状況を計測した。この計測結果をもとに、各部位の振動の大小関係を確認した。最も大きい加速度が得られた階段下降中の計測結果について以下に示す。

###### 【計測対象】

- ・人体部位：5箇所(足、腰、胸、手、首)

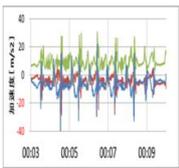
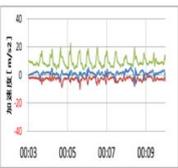
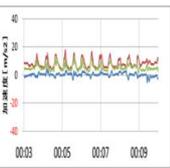
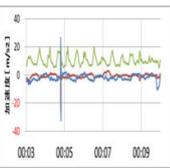
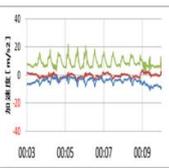
###### 【計測条件】

- ・動作状況：階段降下中
- ・使用センサ：ATR-Promotions 社製 小型無線多機能センサ「TSND121」
- ・サンプリング周期：1ms

###### 【計測結果】

- ・加速度の大小関係：足 >> 首 ≒ 胸 > 手 ≒ 腰
- ・人体振動の特徴(今回の計測より)：
  - 加速度は最大で～38.0 m/s<sup>2</sup>程度(瞬時値)、平均値は～10.5 m/s<sup>2</sup>程度まで分布
  - 周波数は～6Hz程度(範囲)に分布
- ・測定イメージと加速度波形のグラフを表 3-⑤-(1)-1-2-1 に示す。

表 3-⑤-(1)-2-1 人体部位 5 箇所の振動計測結果(一覧)

	足	腰	胸	手	首
測定イメージ					
加速度の波形(階段降下中)	 <p>平均加速度 =10.5 [m/s<sup>2</sup>]</p>	 <p>平均加速度 =3.9 [m/s<sup>2</sup>]</p>	 <p>平均加速度 =4.6 [m/s<sup>2</sup>]</p>	 <p>平均加速度 =4.0 [m/s<sup>2</sup>]</p>	 <p>平均加速度 =4.7 [m/s<sup>2</sup>]</p>
※3軸の加速度(絶対値)の合計値を、時間平均した値(重力加速度分(9.8m/s <sup>2</sup> )を減算して算出)。					

### 3-⑤-(1)-1.3 オフィス・工場における振動環境の計測

オフィス、工場における主要な振動源として、空調機と工作機械に着目し、振動環境の計測を行った。各装置における計測結果について以下に示す。

#### 【測定対象】

- ・ 空調機（室外機：上面、 室内機：吹出口）
- ・ 工作機械（補機）

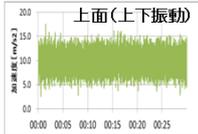
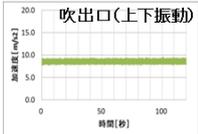
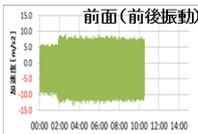
#### 【測定条件】

- ・ 動作状況：運転中
- ・ 使用センサ：ATR-Promotions 社製 小型無線多機能センサ「TSND121」
- ・ サンプルング周期：1ms

#### 【測定結果】

- ・ 加速度は最大で～12.3m/s<sup>2</sup>程度（瞬時値）、平均値は～4.1 m/s<sup>2</sup>程度まで分布
- ・ 測定イメージと加速度波形のグラフを表 3-⑤-(1)-1-3-1 に示す。

表 3-⑤-(1)-1-3-1 空調機と工作機械の振動計測結果（一覧）

	空調機(室外機)	空調機(室内機)	工作機械(補機)
測定イメージ			
加速度の波形(運転中)	 <p>平均加速度 = 1.8 [m/s<sup>2</sup>]</p>	 <p>平均加速度 = 0.2 [m/s<sup>2</sup>]</p>	 <p>平均加速度 = 4.1 [m/s<sup>2</sup>]</p>
※加速度(絶対値)を時間平均した値 (重力加速度分(9.8m/s <sup>2</sup> )を減算して算出)			

### 3-⑤-(1)-1.4 まとめ

オフィスや工場等における主要な振動環境を把握するために、人体（足、腰、胸、手、首）と装置（空調機、工作機械）に加速度センサを設置して振動を実測した。人体における加速後は、最大で～38.0 m/s<sup>2</sup>程度（瞬時値）、平均値は～10.5 m/s<sup>2</sup>程度まで分布しており、装置における加速後は、最大で～12.3m/s<sup>2</sup>程度（瞬時値）、平均値は～4.1 m/s<sup>2</sup>程度まで分布していた。

### 3-⑤-(1)-2 アプリケーションの仮説立案

ダイキン工業株式会社

#### 3-⑤-(1)-2.1 目標

前述の⑤-(1-1)項の振動環境にて期待できる発電量からアプリケーションを想定する。また、これまでの国家プロジェクト（グリーンセンサネットワークプロジェクトや道路インフラモニタリング）の参画企業との意見交換を通じて、新規アプリケーション候補を抽出する。

#### 3-⑤-(1)-2.2 各振動環境にて期待できる発電量

オフィス（人体、空調機）、工場（工作機械）で加速度計測を実施した結果に基づき、各振動に対して見込まれる発電量を試算した。試算式は、研究項目①②③を担当している静岡大学、および、鷲宮製作所より提供して頂いた。

##### 【試算条件】

- ・ 歯電極部の可動域=±400μm
- ・ デバイス重量=2g
- ・ Q値=924

##### 【試算結果】

- ・ 人体：最大で～4.4mW 程度（瞬時値）、～1.2mC/h（平均値）
- ・ 空調機（室外機）：最大で～1.3mW 程度（瞬時値）、～1.6mC/h（平均値）
- ・ 空調機（室内機）：最大で～2.5μW 程度（瞬時値）、～0.12mC/h（平均値）
- ・ 工作機械（補機）：最大で～4.5mW 程度（瞬時値）、～8.7mC/h（平均値）
- ・ 各振動源の振動特性、周波数特性、発電量試算値の一覧を表 3-⑤-(1-2-2)-1 に示す。

表 3-⑤-(1)-2-2-1 オフィス・工場等における振動例と発電量試算値（一覧）

分類	オフィス・工場等			
	人体	空調機(室外機)	空調機(室内機)	工作機械(補機)
振動源				
振動の性質	インパルスの	連続振動	連続振動	連続振動
最大加速度	38m/s <sup>2</sup>	8.9m/s <sup>2</sup>	1.9m/s <sup>2</sup>	12.3m/s <sup>2</sup>
周波数特性				
発電量(共振時の予測値※)	平均値: ~1.2mC/h 瞬間値: ~4.4mW	平均値: ~1.6mC/h 瞬間値: ~1.3mW	平均値: ~0.12mC/h 瞬間値: ~2.51μW	平均値: ~8.7mC/h 瞬間値: ~4.5mW
[図: 静大/多極型の例] 凡例: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 可動域: 制約なし</li> <li>- 可動域: ±400um</li> </ul>				

※瞬間値：30秒間のうちの最大値を抽出、平均値：30秒間の積算値から算出

### 3-⑤-(1)-2.3 想定アプリケーション

前述の振動計測の結果から、オフィス・工場等における振動は広い周波数帯域に分布していることが分かった（レンジ：15～170Hz）。この振動の利用には、ワイドレンジに対応した振動発電デバイスが有効になると想定される。

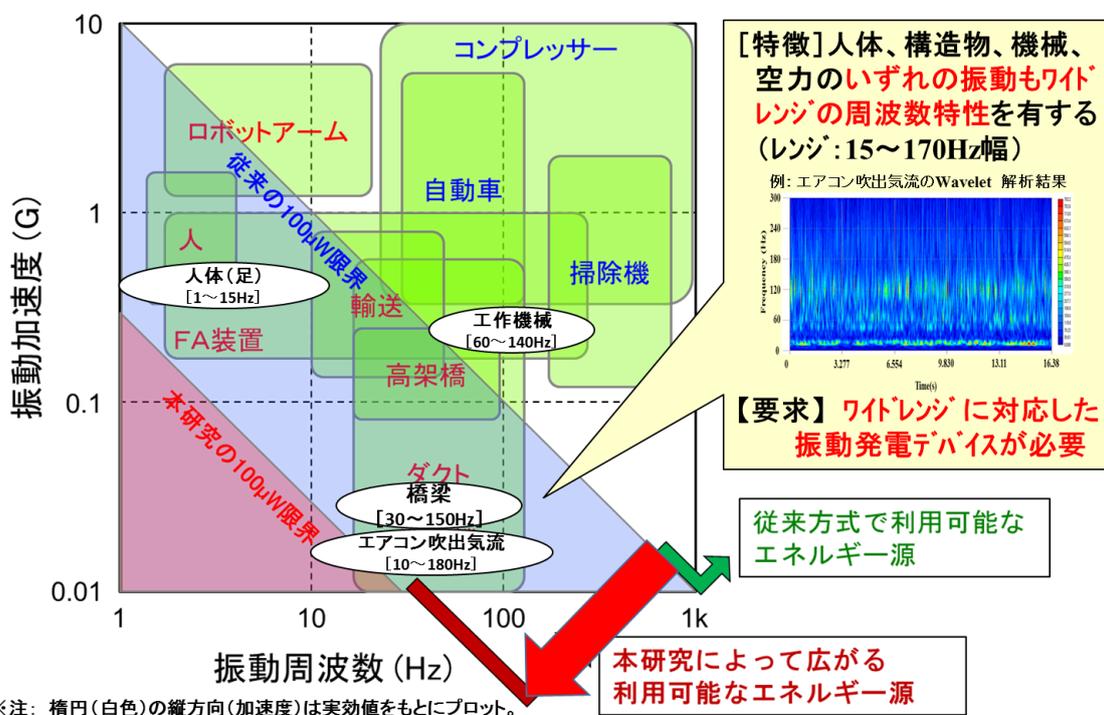


図 3-⑤-(1)-2-3-1 オフィス・工場等における振動の位置づけ

### 3-⑤-(1)-2.4 まとめ

オフィス（人体、空調機）、工場（工作機械）で加速度計測を実施した結果に基づき、各振動に対して見込まれる発電量を試算した。試算結果は、～4.5mW 程度（瞬時値）、～8.7mC/h（平均値）となった。また、これらの振動の周波数特性分析を行った結果、幅広い周波数帯域に分布していることが明らかになった（レンジ：15～170Hz）。アプリケーションとしては、ワイドレンジに対応した振動発電デバイスが有効になると想定される。

[補足] 振動発電デバイスの用途を含めたアプリケーション案については、3-⑤-(3) 項に記載する。

### 3-⑤-(2) 待機電力の削減に向けたエネルギーハーベスタの活用例の提言

ダイキン工業株式会社

#### 3-⑤-(2)-1 目標

振動エネルギーから待機電力を供給できる可能性を確認するため、以下を行う。

- ・ オフィスや工場での主要装置類の環境振動の計測と待機電力を把握する。
- ・ 振動発電による期待される電力量削減効果を抽出する。

#### 3-⑤-(2)-2 振動発電による期待される電力削減効果

前述した空調機以外にも検討範囲を広げ、振動する家電を抽出し、その待機電力を整理した。待機電力は、0.01W～1.74W の範囲であった。各家電の待機電力の一覧を表 3-⑤-(2)-2-1 に示す。これらの待機電力を全て振動発電で賄うことができれば、大きな社会貢献となる。一方で、事業性を考慮すると投資対効果が大切になるため、投資にあたる発電デバイスの必要台数を試算した。一例として、冷暖房兼用エアコンの待機電力を賄うために必要となる発電デバイスの個数を図 3-⑤-(2)-2-1 示す。試算条件は、発電量が 10mW (本研究の 2020 年時点の発電量目標値である)、運転時間と待機時間が 12 時間ずつとした。この場合、待機電力の 100% 賄うには 174 個のデバイスが必要 (10% の場合は 17 個) となる。

表 3-⑤-(2)-2-1 振動する家電の待機電力例

冷暖房兼用エアコン	1.74 W
食器洗乾燥機	1.35 W
空気清浄器	0.99 W
電子楽器	0.40 W
扇風機	0.26 W
洗濯機	0.21 W
ミキサー	0.02 W
ドライヤー	0.01 W

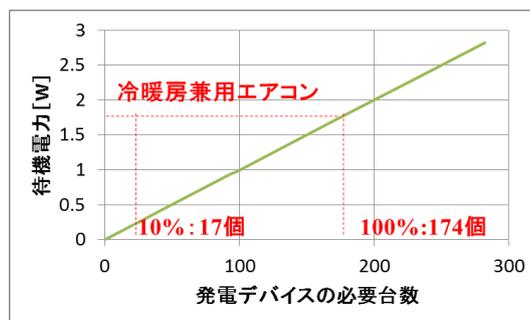


図 3-⑤-(2)-2-1 待機電力を賄うために必要な発電デバイスの台数

#### 3-⑤-(2)-3 まとめ

振動する家電の待機電力について整理し、その待機電力を賄うために必要となる振動発電デバイスの台数を試算した。待機電力は 0.01W～1.74W の範囲であり、冷暖房兼用エアコンの待機電力である 1.74W を 100% 賄うには 174 個のデバイスが必要という結果になった。実用化に向けては、マルチデバイス化や、デバイスの低価格化が課題となる。

### 3-⑤-(3) 実用的なアプリケーションとビジネスモデルの抽出

ダイキン工業株式会社

#### 3-⑤-(3)-1 目標

前述した周囲の振動状況の把握、期待される発電量の試算の各結果から、アプリケーション候補を抽出し、実用性や投資回収期間等の検討を加えて、実用的なアプリケーションとビジネスモデルの抽出を行う。

#### 3-⑤-(3)-2 実用的なアプリケーションの抽出

本研究の開発デバイスの特性（圧電型と比較して、小型で低加速度・低周波数でも発電できる）を活かす観点から、従来の振動発電技術では活用できなかった微振動を対象として、アプリケーションの抽出を行った。また、社会のニーズに応えるような、安心・安全・省エネ・健康社会を実現する新しいアプリケーションの抽出を目指した。抽出したアプリケーションを整理したマップを図 3-⑤-(3)-2-1 に示す。

アプリケーション検討の方針： 微小な振動エネルギーから得た電力を有効活用するには、省電力で動作する無線センサ端末を振動発電により稼働し、そのセンシングデータを活用したサービス等を提供することが実用的だと考えた。そこで、振動源にどのようなセンサを設置し、どのような目的に利用するかという観点で、アプリケーション検討を進めた。

アプリケーションの抽出： 活用する主な振動の種類として、機械振動、空力振動、人体振動、構造物振動を考えた。具体的な振動源とアプリケーションの一例を以下に記す。

- ・空調機 [空力振動]： 吹出温度を計測し、性能劣化診断を行う
- ・空気清浄フィルタ [空力振動]： 加速度を計測し、メンテ時期診断を行う
- ・工作機械 [機械振動]： 加速度等を計測し、故障診断、メンテ時期診断を行う
- ・人体 [人体振動]： 活動量や温度を計測し、健康診断、環境診断を行う

アプリケーション候補の整理： 以下の観点で整理し、マップ化を試みた。

- ・振動源の周波数（本研究の開発デバイスの特性を活かした低周波数の振動か）
- ・アプリケーションの最短動作間隔（センサ端末の動作間隔によって必要な電力が決まることから、必要電力の目安として）

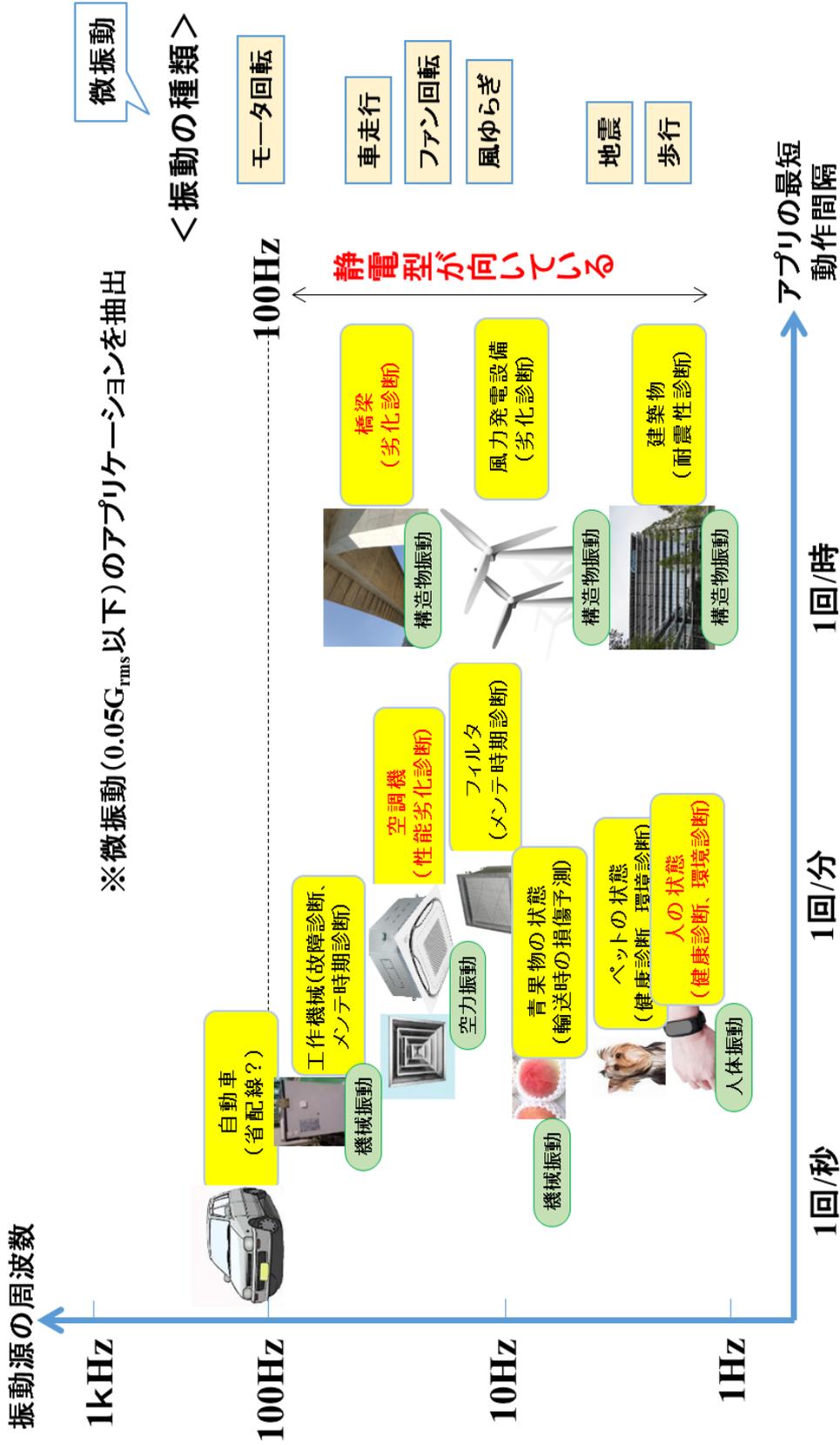


図 3-⑤-(3)-2-1 アプリケーションマップ

### 3-⑤-(3)-3 実用的なビジネスモデルの抽出

実用的なビジネスモデルにするには、以下の実現が課題になる。

- ・ I o Tデバイス（センサ端末）を、複数用途へ展開できるものにする。  
⇒ 端末共通化で低価格化
- ・ 振動計測の新しい試みが出てきており、これらへ積極的に展開する。  
⇒ 啓蒙活動で市場開拓
- ・ 計測だけではなく、計測データを用いたソリューション提案で稼ぐ。  
⇒ 付加サービスで事業拡大

これらを実現するビジネスモデルの概念図を図 3-⑤-(3)-3-1 に示す。

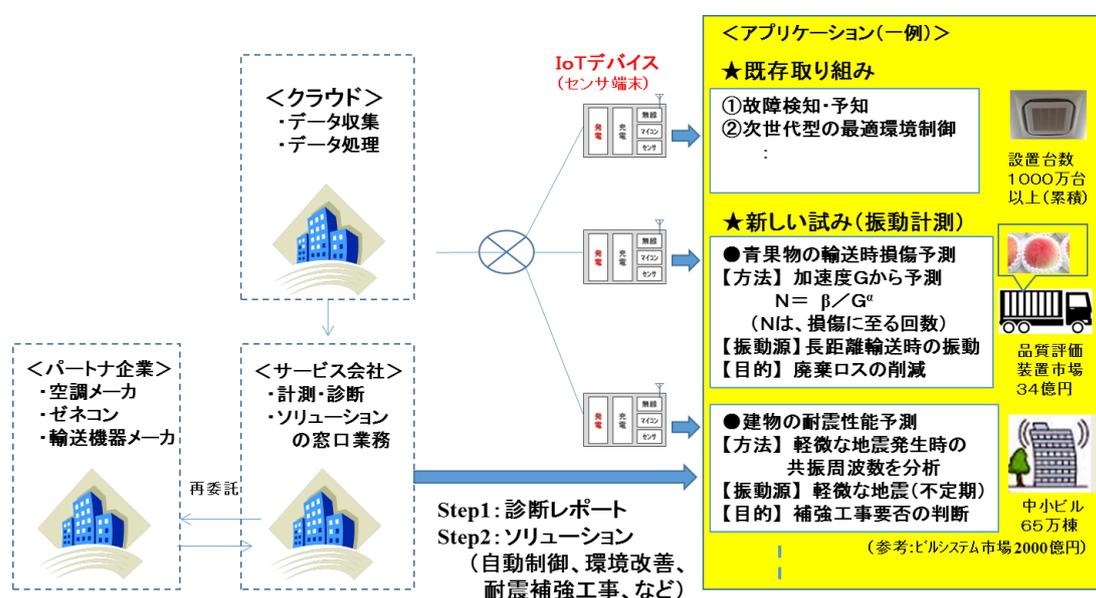


図 3-⑤-(3)-3-1 実用的なビジネスモデルの概念図

上述を踏まえ、これまでに抽出したアプリケーション候補のNABC（価値提案のポイント）を整理し、静電方式の特徴が活かせる市場を検討した。その一覧を表 3-⑤-(3)-3-1 に示す（※表内の実用性は、発電デバイスで十分に発電できる（～10mW）と仮定して評価した）。有望な市場・ビジネスモデル（候補）として、以下の①②を想定している。

- ①空調機の性能低下診断
- ②空気清浄機等のフィルタ交換時期診断

表 3-⑤-(3)-3-1 抽出したアプリケーション候補の NABC

アプリケーション	Needs	Approach	Benefit	Competition	実用性
①空調機の性能低下診断 	顧客: オフィス等 要望: <b>異常の早期検出</b> (事後保全から 予知保全へ)	・ <b>室内機吹出口に 発電デバイス</b> を設置 (空力振動で発電) ・温度センサーを駆動	・クレーム発生の予防 (テナント満足度向上) ・省エネ運用の維持 ・冷媒漏洩の最少化 (地球温暖化防止)	競合: データロガー (電池交換方式) 優位性: ・超小型、再利用容易 (電池交換不要)、 防水加工容易	○
②空気清浄器等の フィルタ交換時期 診断 	顧客: オフィス等 要望: <b>フィルタ交換 の最適化</b> (定期保全から 予知保全へ)	・ <b>フィルタ表面に 発電デバイス</b> を設置 (空力振動で発電) ・圧力/振動センサーを 駆動	・フィルタ交換費の 最少化 ・クレーム発生の予防 (清浄空気の維持) ・省エネ運用の維持	競合: データロガー 優位性: ・超小型、再利用容易 (電池交換不要)、 防水加工容易	○
③青果物の 輸送時損傷度診断 	顧客: 青果販売業者 要望: <b>食品廃棄ロスの 最少化</b> (先ず、原因把握)	・ <b>輸送パレット表面に 発電デバイス</b> を設置 (車両振動で発電) ・加速度センサーを駆動	・食品廃棄費の最少化 (利益率の改善) ・賞味期限の延長 (利益率の改善)	競合: データロガー 優位性: ・超小型、再利用容易 (電池交換不要)、 防水加工容易	○
④工作機械の 故障診断 	顧客: 工場の生産技術 要望: <b>異常の早期検出</b> (定期保全から 予知保全へ)	・ <b>工作機械表面に 発電デバイス</b> を設置 (機械振動で発電) ・加速度センサーを駆動	・ライン停止時間の最短化 (生産性の維持)	競合: 圧電式発電デバイス 優位性: ・低周波数でも電圧が出せる ・超小型で設置が容易	○
⑤人・ペットの 健康診断 	顧客: 個人 要望: <b>病気の早期検出</b> (24Hの健康診断)	・ <b>人体・ペットにウェアラブル 発電デバイス</b> を装着 (歩行振動で発電) ・活動量センサーを駆動	・治療費の最少化 (病気の早期治療) ・安心 (健康の見える化)	競合: データロガー (充電電池方式) 優位性: なし(充電作業が 容易なため[個人実施])	△
⑥建物の 耐震性診断 	顧客: オフィス等 要望: <b>異常の早期検出</b> (補強工事の 必要性判断)	・ <b>建物壁面表面に 発電デバイス</b> を設置 (軽微地震振動で発電) ・加速度センサーを駆動	・安心 (耐震性能の見える化)	競合: データロガー (電池交換方式) 優位性: ・超小型、再利用容易 (電池交換不要)、 防水加工容易	○
⑦待機電力の削減	顧客: 政府、個人 要望: <b>ベース電力の 削減</b> (環境発電の利活用)	・ <b>設備・機器本体に 発電デバイス</b> を設置 (機械振動で発電) ・待機時に電源として利用	・発電所維持費の削減 ・電気料金の削減	競合: PV発電など (高出力型発電デバイス) 優位性: なし (多数の発電デバイス 必要で、非効率)	×

有望と想定した『空調機の性能低下診断』について、その内容を以下に記す。

#### 【発電方法・構成】

エアコン吹出口に発電デバイスを装着する構成とし、気流で振動（発電）させる。同デバイスに温度センサーを搭載・動作させる。搭載イメージを図 3-⑤-(3)-3-2 に示す。

#### 【提供価値】

- ・故障検知・予知（例：吹出温度を計測して能力低下を診断）※
- ・次世代型の最適環境制御（例：供給熱量の予測・最適配分、CPS (Cyber Physical System)対応）

※参考：エアコンが冷えない原因（一例）

1. エアコンそのものの異常（冷媒ガス抜け、コンプレッサー故障など）
2. 部屋の条件が悪い（気密性が悪い、日当たりが良すぎる、最上階など）
3. メンテナンス不良（フィルタの詰まりなど）

【将来】常時計測で、**早期検出 & 多用途展開**へ  
(対象: 既設空調、新旧混在空調)

【従来(故障検知)】冷えなくなってから計測  
(気づきにくく、多くが放置状態)



図 3-⑤-(3)-3-2 発電デバイスを搭載した自立電源型温度センサ端末を活用した  
空調機性能低下診断のイメージ

#### 3-⑤-(3)-4 まとめ

本研究の静電型振動発電デバイスの特性（圧電型と比較して、小型で低加速度・低周波数でも発電できる）を活かす観点から、微振動で発電して無線センサ端末を動作させるアプリケーション候補を抽出し、アプリケーションマップに整理した。さらに、実ビジネス化の観点から、計測だけではなく、計測データを用いたソリューション提案で稼げる可能性のあるアプリケーションを絞り込んだ。有望な市場・ビジネスモデル（候補）は、温湿度センサを活用した空調機の性能低下診断、圧力／振動センサを活用したフィルタ交換時期診断等であると考える。

### 3-⑥ 標準化の戦略立案

#### 一般財団法人マイクロマシンセンター

#### 3-⑥-(1) 目標

エナジーハーベスタの特性測定方法についての国際標準化に取り組む。IEC/TC47/SC47F への国際標準化規格提案を目標とし、MEMS を適用した振動発電デバイスの特性測定項目とそれに対応した特性測定方法を抽出し、それぞれ国際標準化の可能性と必要性を評価したうえで国際標準化提案内容に反映する。並行して、国際標準開発（IEC 国際標準化会議）における関連提案の情報収集を行う。

#### 3-⑥-(2) 標準化すべき特性測定項目及び抑制測定方法等の抽出

一般的なエナジーハーベスタは商用電源等に比較し、発生できるエネルギーは非常に小さいものになっている。そのため、エナジーハーベスタの特性を正確に評価しその評価方法を提供し、標準化していくことは、今後のエナジーハーベスタ開発については非常に重要である。ここでは、振動発電デバイスにおいて、標準化すべき振動発電デバイス特性測定項目及び特性測定方法について抽出を行った。

表 3-⑥-(2)-1 に振動発電デバイスにおける評価項目、特性測定方法の例を示した。振動発電デバイスにおいて、その発電方式や振動の入力方法によって出力が大きく変化する。また、評価における条件（測定条件や負荷条件等）によって、その本来の特性が影響を受けるため。ユーザーにとって比較検討しやすく、目的に対して使用可否判断が容易にできるような標準化項目の提示、特性評価方法の標準化が必要である。

表 3-⑥-(2)-1 おける評価項目、特性測定方法の例

振動発電方式	振動方向	振動波形形状	振動特性	出力
電磁変換 圧電 エレクトレット 磁歪 ...	一次元 二次元 三次元 回転 ...	サイン波 ランダム インパクト ...	線形 非線形 双安定 ...	交流 直流 エネマネ ...

試験装置	試験環境	試験条件	試験手順
加振機 加速度検知器 出力測定回路 負荷回路 ...	固定方法 電氣的接続法 ...	周波数 負荷 掃引速度 振動波形 ...	応答性 ...

### 3-⑥-(3) IEC 国際標準化会議および文書審議状況

IEC 国際標準化会議での、振動発電技術の標準化並びに各国の MEMS 技術の提出規格文書の審議状況について、平成 28 年度は、IEC/TC47/WG7 アドホック会議（平成 28 年 4 月：中国・北京）、IEC/TC47/SC47F アドホック会議（平成 28 年 6 月：中国・成都）、プレナリー会議（平成 28 年 10 月：独・フランクフルト）が開催された。以下、プレナリー会議の状況を報告する。

#### 1) TC47/WG7（エネルギーハーベスタ・エネルギー伝送）ジョイント会議

- ・平成 27 年 10 月にベラルーシ・ミンスクで開催された TC47 プレナリー会議の報告が行われた。
- ・WG7 の提案文書に対する審議が行われ、文書回付中のエネルギーハーベスタに関する韓国提案 5 件について報告が行われた。
- ・Future Work として低消費電力電子機器向けの力学的環境発電デバイスの試験方法について発表が東京大学 鈴木雄二教授により行われた。本規格案は平成 29 年 12 月 23 日 IEC に提出済みである。
- ・今後提案予定のハーベスタに関する規格提案について、東京大学 鈴木雄二教授より報告が行われた。
- ・TC47/WG7 のコ・コンビナ（共同主査）として鈴木先生の就任が了承された。本件については、IEC 事務局より、現在 Q 文書が回付されており、平成 28 年 3 月 31 日の投票により賛成多数であれば鈴木先生の TC47/WG7 コ・コンビナの就任が正式に決定する。

#### 2) TC47/SC47F（MEMS）ジョイント会議

- ・平成 27 年 10 月にベラルーシ・ミンスクで開催された TC47 プレナリー会議の報告が行われた。
- ・SC47F, MEMS 関連の提案文書に対する審議が行われ、文書回付中の日本：2 件、韓国：2 件、中国：1 件、ドイツ：1 件の計 6 件の文書について報告が行われた。うち、日本提案の 2 件については、
  - ① MEMS エレクトレット振動発電デバイス（PL：東京大学 鈴木教授）  
⇒FDIS 化承認（平成 28 年 12 月 9 日 FDIS 投票）  
⇒IS 発行（平成 29 年 3 月）
  - ② MEMS 圧電薄膜の特性測定方法（PL：神戸大学 神野教授）⇒CDV 化承認  
・・・平成 29 年 1 月 6 日 CDV 投票 ⇒FDIS 化承認の文書審議があり、それぞれ次の段階に進捗した。
- ・Future Work として「フレキシブル MEMS デバイスの曲げ信頼性試験方法（名古屋工業大学 神谷教授）」「MEMS 圧電薄膜の耐環境性及び耐電圧試験方法（神戸大学 神野教授）」「スマートセンシング・インタフェースの国際標準化（マイクロマシンセンター 坂

井)」の3件について日本から報告が行われた。

### 3) TC47/WG7 (エナジーハーベスタ・エネルギー伝送) 関連文書審議状況

表 3-⑥-(3)-1 TC47/WG7 の各国の審議状況 (平成 29 年 3 月現在)

	規格案	現状	今後の予定
日本	低消費電力電子機器向けの力学的環境発電デバイスの試験方法 (PNW-47-2354)	NP 提案 (平成 28 年 12 月 23 日) 平成 29 年 3 月 17 日投票予定	平成 29 年 4 月の沖縄アドホック会議にてコメント審議
韓国	圧電型発電デバイス (IEC 62830-1)	IS 発行 (平成 29 年 3 月)	
	熱電型発電デバイス (IEC 62830-2)	IS 発行 (平成 29 年 3 月)	
	電磁型発電デバイス (IEC 62830-3)	FDIS 回付中	IS 発行予定 (平成 29 年 3 月)
	フレキシブル圧電型発電デバイス (IEC 62830-4)	CD 投票 (平成 29 年 1 月 27 日)	CD コメント検討
	フレキシブル熱電型発電デバイス (IEC 62830-5)	CD 回付中	特に動きなし

・表 3-⑥-(3)-1 に TC47/WG7 の各国の審議状況を示す。日本は規格案準備中であった、MEMS 振動発電デバイスの特性測定方法については、より広範囲な振動発電デバイスに適用できると判断し、表題を低消費電力電子機器向けの力学的環境発電デバイスの試験方法とし、IEC/TC47/WG7 に提出した。(平成 28 年年 12 月)。

### 4) TC47/SC47F (MEMS) 関連文書審議状況

表 3-⑥-(3)-2 TC47/SC47(MEMS)関連文書の審議状況 (2017 年 3 月現在)

	規格案	現状	今後の予定
日本	MEMS エレクトレット振動発電デバイス(IEC62047-28)	IS 発行 (平成 28 年 12 月)	
	MEMS 圧電薄膜の特性測定方法(IEC62047-30)	CDV 投票完 (平成 29 年 1 月 6 日)	FDIS 回付
	MEMS 圧電薄膜材料の耐湿熱性、耐電圧性の試験条件及び試験手順(IEC62047-xx)	NP 登録完 (平成 28 年 12 月 16 日) 平成 29 年 3 月 10 日投票予定	平成 29 年 6 月の東京アドホック会議にてコメント審議

韓国	室温環境下の自立 MEMS 材料 応力緩和試験法(IEC 62047-29)	CDV 回付 (平成 29 年 2 月 3 日投票完)	FDIS 回付
	積層 MEMS 材料における界面 密着力の 4 点曲げ試験方法 (IEC 62047-31)	CDV 化承認	CDV 回付
中国	MEMS レゾネータの非線形振 動測定方法(IEC 62047-32)	NP 案投票完 (平成 28 年 11 月 18 日) エキスパート追加ノミネート により CD 化承認	CD 回付
	MEMS ピエゾ感圧抵抗デバイ ス(IEC 62047-33)	NP 案投票完 (平成 28 年 11 月 18 日) エキスパート追加ノミネート により CD 化承認	CD 回付
	MEMS ピエゾ感圧抵抗デバイ スのウエハレベル試験方法 (IEC 62047-34)	NP 案投票完 (平成 28 年 11 月 18 日) エキスパート追加ノミネート により CD 化承認	CD 回付
ド イ ツ	マイクロシェブロン試験法を用 いた粉末ガラス接合構造の接合 強度試験(IEC 62047-27)	IS 発行	

表 3-⑥-(3)-2 に TC47/SC47(MEMS)関連文書の各国の審議状況を示す。日本は MEMS エレクトレット発電デバイスについては、FDIS が承認され、IS 文書として発行した。(平成 28 年 12 月)。

### 3-⑥-(4) まとめ

- 1) 振動発電デバイスにおいて、標準化すべき特性項目及び特性測定方法について項目の抽出を行った。
- 2) IEC 国際標準化会議への参画を通じ、国際標準化に向けた提案活動を継続実施した。
- 3) MEMS エレクトレット発電デバイスおよび低消費電力電子機器向けの力学的環境発電デバイスの試験方法について標準化提案内容の精査を行い内容の充実化を図り、平成 28 年 12 月に IEC への提案を行った。
- 4) IEC 国際標準化会議に参画し、各国の関連提案の情報収集を行った。

### 3-⑦ プロジェクト推進及び研究支援

#### 技術研究組合 NMEMS 技術研究機構 (事務局)

##### 3-⑦-(1) 技術動向調査の実施

振動発電の開発を進めていくにあたり、競合や先端技術の動向を把握していく必要がある。以下に動向調査の取組み結果について記す。

なお、調査は、2000年から2016年末までに特許公開がされた文献に対して行ったが、2015年、2016年については、各国での特許出願公開がまだされていないものや、公開特許文献発行国からのデータ提供にかかるタイムラグがあるため、真の数値より少ないことに留意されたい。

振動エネルギーから発電するタイプとして、静電誘導型、圧電型、磁歪型、電磁誘導型の4つのタイプについて特許出願傾向をPCT国際出願されているものについて調査し、全体の趨勢としては図3-⑦-(1)-1のとおりであった。調査結果では圧電型が多く、出願件数も増えている傾向であった。これに対し、静電誘導型は少ない傾向であった。

なお、図3-⑦-(1)-1で示した「その他」は、国際特許分類(IPC:H02N11/00)の「他に分類されない発電機」で振動発電のキーワードで検索された結果のものである。

振動発電のタイプ別の公開特許文献発行国の割合は図3-⑦-(1)-2のとおりであった。公開文献発行国は、PCT国際出願の受理国であるので、出願人の国籍とみても差し支えない。なお、「欧州」としたものは欧州特許庁及び英国を除く欧州各国を含んでいる。発電タイプ別の出願人国籍では、いずれのタイプも日本が圧倒的に多く、次いで米国、韓国、中国となっている。

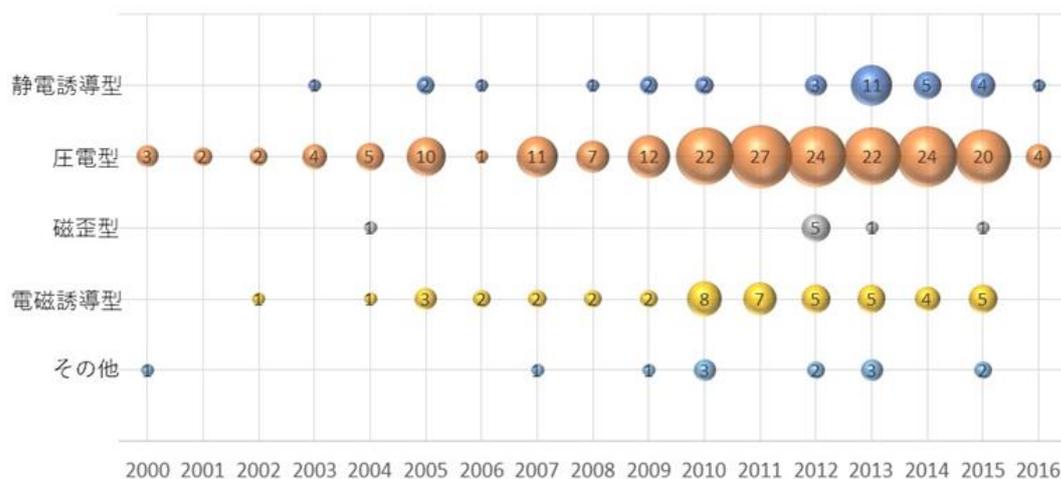


図3-⑦-(1)-1 振動発電に係わるPCT国際出願の特許出願の件数(出願日ベース)

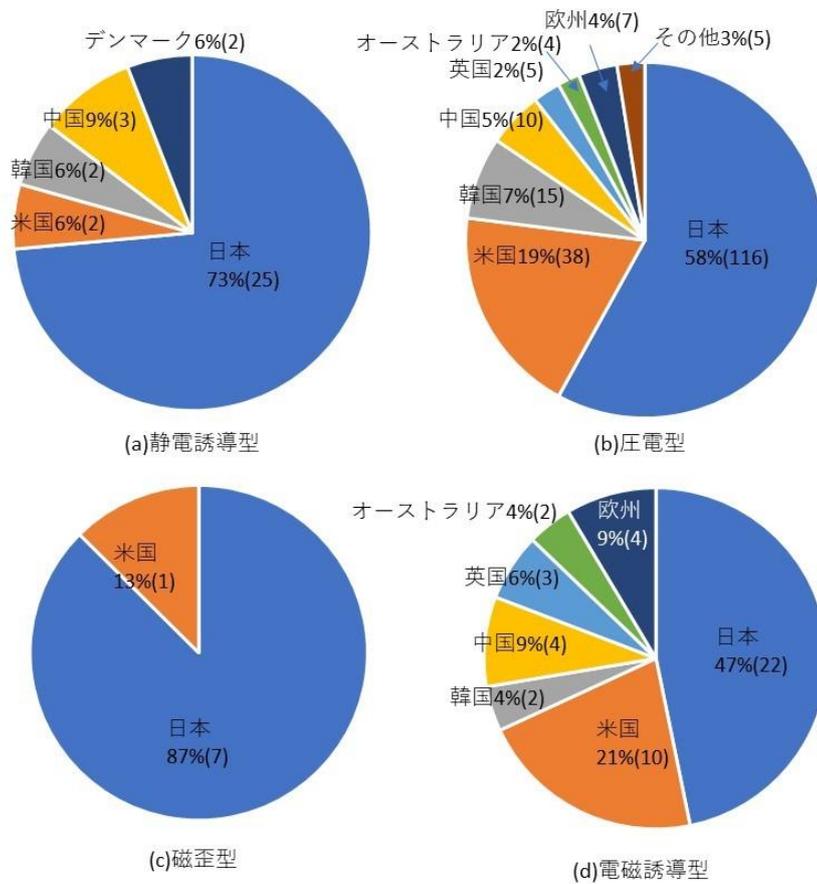


図 3-⑦-(1)-2 PCT 国際出願の出願人国籍の割合 (タイプ別)

図 3-⑦-(1)-2 で示したように、振動発電に係わる PCT 国司出願では日本国籍の出願人が圧倒的に多いため、日本出願の傾向についても調べた。その結果は図 3-⑦-(1)-3 のとおりである。

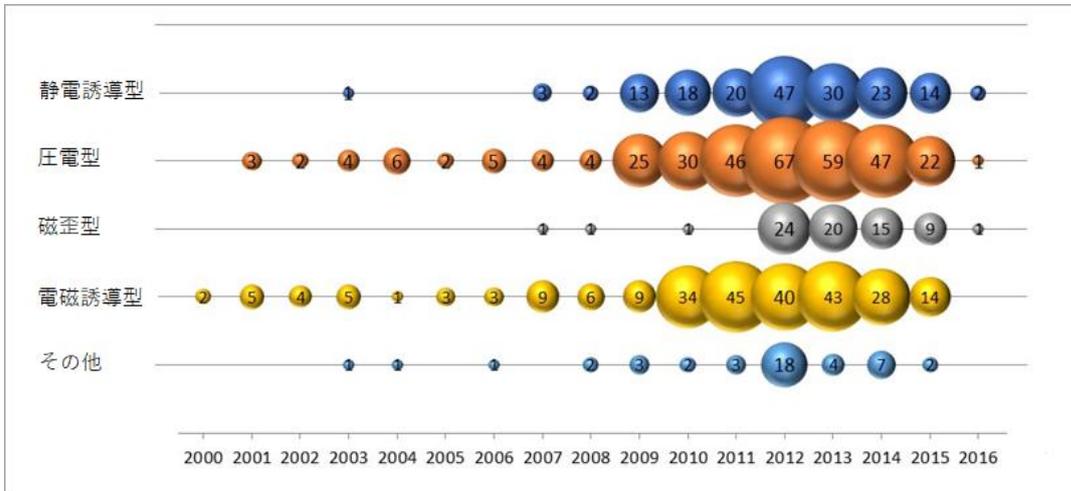


図 3-⑦-(1)-3 振動発電に係わる日本出願の特許出願の件数(出願日ベース)

日本出願でも圧電型が多いが、PCT 国際出願とは違い、静電誘導型のタイプの出願も盛んである。静電誘導型は、2007 年ごろから出願され始め、2012 年にピークになっているが、その後、漸減となっている。これは、各社での知的財産費用の効果的な運用をおこなうため、特許出願内容の精査化が行われるようになった影響によるものと思われる。図 3-⑦-(1)-3 の 2015 年、2016 年は出願公開がされていないだけで、実際には継続して行われているものと推察される。

静電誘導型振動発電については日本が先導していると思われるので、日本出願のデータから、静電型振動発電デバイスの発電部のタイプを大きく 3 つに大別し、それぞれの発明の効果と課題との関係を表したのが図 3-⑦-(1)-4 である。

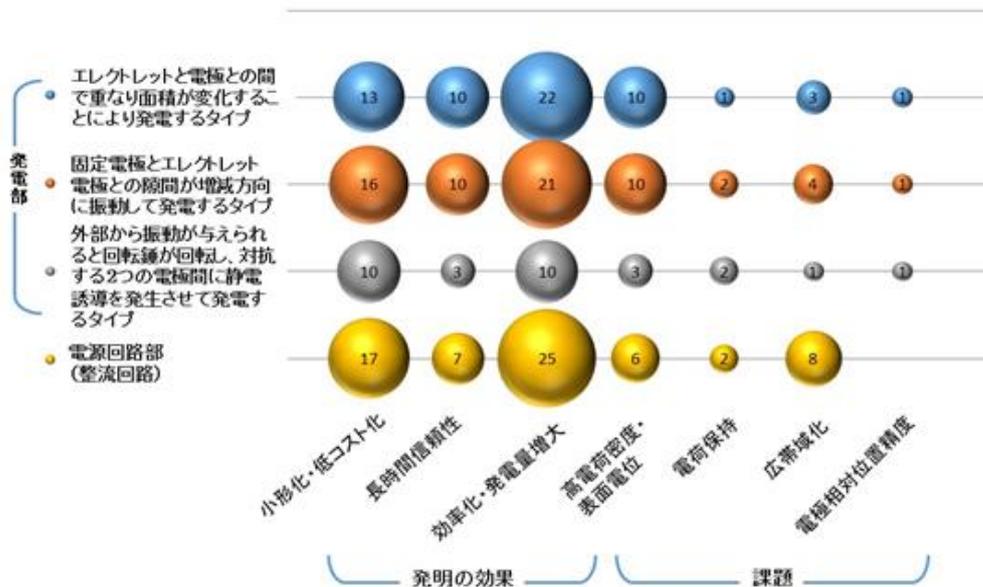


図 3-⑦-(1)-4 静電誘導型振動発電の発明の効果と課題 (日本出願)

発明の効果（特許文献中の【発明の効果】に記載されているもの）は、高効率化、発電量増大を目的としたものが最も多いのは当然だが、そのための手段（課題解決）としては、高電荷密度、高表面電位が多くなっている。長期信頼性のためには、長時間電荷保持が課題解決になるが、電荷保持については少なかった。

また、振動発電は、発電部の他に電源回路部（整流回路）も重要であり、整流回路の工夫で、小型化・低コスト化、効率化・発電量増大の効果を狙ったものが多かった。

さらに、振動発電デバイスの用途は、産業用のワイヤレスセンサネットワーク向けの自立型電源や、モノのインターネット(IoT)の電源として期待されているところから、用途（アプリケーション）についても調査した。特許文献には、振動周波数と発生電力を記載している例が少なく、振動源別によるアプリケーションの特徴は見出せなかったが、図 3-⑦-(1)-5 では振動発電のタイプ別、図 3-⑦-(1)-6 では静電誘導型のアプリケーション例を示す。

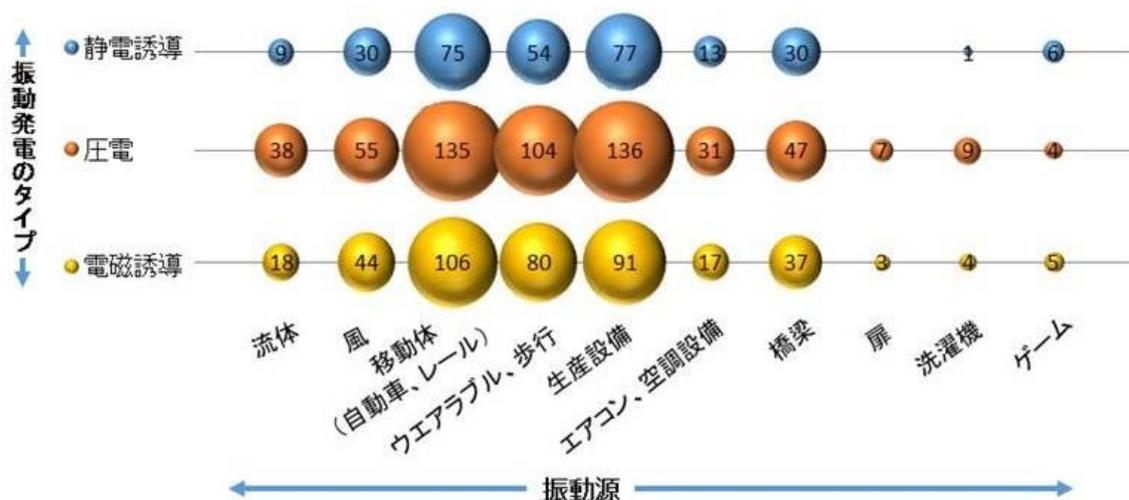


図 3-⑦-(1)-5 特許文献からみた振動発電アプリケーション例（振動源別）

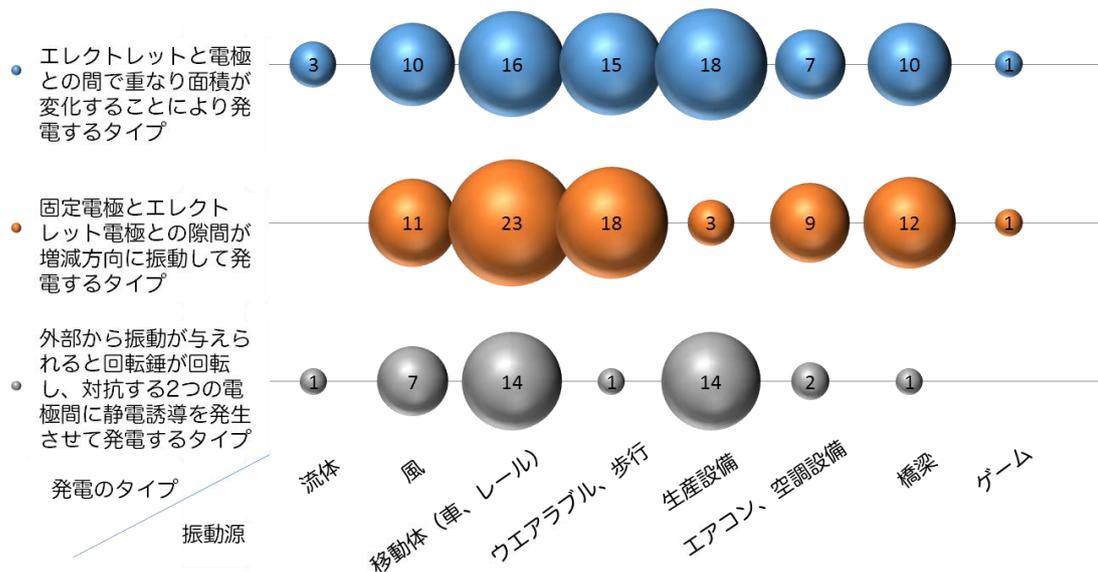


図 3-⑦-(1)-6 特許文献からみた静電誘導型振動発電のアプリケーション例(振動源別)

図 3-⑦-(1)-5 及び図 3-⑦-(1)-6 で、振動源が「流体」及び「風」の例は、配管内を流通する流体の状況を示す情報を検知してその情報を無線送信する例（配管モニタリングシステム）や、流体中に発生する渦流（カルマン渦）により振動発電体が振動、変形することによって発電するもので、風が得られる場所（屋外の常時強風が得られる場所、空調ダクト内、排気ダクト内、トンネル内など）や、移動（走行、運動）することによって風が得られる移動体（自転車、バイク、自動車、鉄道車両等）や、信号機、道路標識、ガードレールなどの風が得られる場所で、照明、非常灯、広告用表示パネル等の（補助）電源として使用される。

振動源が「移動体」の中では自動車へのアプリケーションが多く、その代表例はタイヤ圧のモニタリングセンサ等の電源、その他、自動車機器の補助電源であった。

振動源が「ウェアラブル・歩行」は、携帯型電子機器、腕時計、体温計、温度計、歩数計、リモートコントローラ、携帯オーディオ製品、キーレスエントリー用携帯機、補聴器、心臓ペースメーカー、携帯電話およびゲーム機であった。

振動源が「生産設備」としては、モータなどの回転機や工場内の生産設備、エレベータやエスカレータなどの昇降機などに振動発電体を設置して発電させ、非常用電源や各種センサ電源・通信用電源等の駆動電源として利用する例があった。

以上のように、特許情報文献の実施の形態、実施例からは、アプリケーションを想定した仕様あるいは数値（振動周波数、振幅、発電出力、など）の具体的な記載がほとんど無いため、振動周波数と発電出力の関係図（特許マップ）を作成するには至らなかったが、周波数振動はアプリケーション例の振動源から類推できるので、振動発電デバイスのアプリケーション動向については概ね把握できた。

### 3-⑦-(2) 推進委員会、研究会による研究推進

本研究開発の目的・目標達成に向けて研究開発の円滑な推進を図るため、進捗管理・調整、技術的課題の検討・対策、知財の有効的な取得ならびにその成果展開等を目的として、研究会及び知財委員会を設置した。また本格研究等今後の取り組みに関して検討することを主目的とした高効率 MEH 推進委員会を設置した。研究会および委員会はマイクロマシンセンターが取り纏めを担当した。

#### (ア) 高効率 MEH 推進委員会の実施

高効率 MEH 推進委員会は、提案時の PM 候補を研究開発推進委員長として本研究開発の成果を踏まえながら、本事業目的に係る関連研究や国内外の取り組みを調査するとともに、関連有識者等の見解の収集等を通じて、振動発電デバイスの高効率化、1mW 出力を達成するために、進捗報告と併せて多くの意見交換を実施した。平成 27 年度の開催実績を表 3-⑦-(1)-(1)-1、平成 28 年度の開催実績を表 3-⑦-(1)-(2)-2 に示す。毎回、委員のほぼ全員とオブザーバーとしての NEDO イノベーション推進部の出席と、適時経済産業省の担当部門の参加が得られ、活発な意見交換が行われた。

表 3-⑦-(2)-(1)-1 平成 27 年度 高効率 MEH 推進委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	6月15日(月) 14:00~16:00	MMC 新テクノサロン	35名
第2回	10月5日(月) 14:00~16:00	MMC 新テクノサロン	27名
第3回	12月25日(金) 14:00~16:00	MMC 新テクノサロン	23名

表 3-⑦-(2)-(1)-2 平成 28 年度 高効率 MEH 推進委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	4月14日(金) 14:00~16:00	MMC 新テクノサロン	28名
第2回	7月14日(金) 14:00~16:00	MMC 新テクノサロン	28名
第3回	10月13日(金) 15:00~17:00	MMC 新テクノサロン	21名
第4回	1月16日(月) 15:00~17:00	MMC 新テクノサロン	31名

MMC：一般財団法人マイクロマシンセンター

## (2) 知財委員会の実施

知財委員会は、知財方針の策定、知的財産権の帰属、知的財産の管理・活用について、合理的なルールの確立等を実施する目的で設置した。平成 27 年度開催実績を表 3-⑦-(2)-(2)-1、平成 28 年度開催実績を表 3-⑦-(2)-(2)-2 に示す。

表 3-⑦-(2)-(2)-1 平成 27 年度 高効率 MEH 知財分科会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第 1 回	6 月 15 日 (月) 16:00~17:00	MMC 新テクノサロン	35 名
第 2 回	10 月 5 日 (月) 16:00~17:00	MMC 新テクノサロン	27 名
第 3 回	12 月 25 日 (金) 16:00~17:00	MMC 新テクノサロン	23 名

表 3-⑦-(2)-(2)-2 平成 28 年度 高効率 MEH 知財分科会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第 1 回	4 月 14 日 (金) 16:00~17:00	MMC 新テクノサロン	28 名
第 2 回	7 月 14 日 (金) 16:00~17:00	MMC 新テクノサロン	10 名
第 3 回	10 月 13 日 (金) 13:30~14:30	MMC 新テクノサロン	9 名
第 4 回	1 月 16 日 (月) 13:30~14:30	MMC 新テクノサロン	7 名

MMC：一般財団法人マイクロマシンセンター

## (3) 高効率 MEH 研究会の実施

研究会は、月 1 回実施し、研究開発責任者のもと、各研究者がそれまでの進捗を報告し、中間目標やテーマ終了時目標の達成に向けたそれぞれの研究の進捗や方向性の把握、修正、など研究の進め方についての改善の指示や研究者間の調整を行った。平成 27 年度の開催実績を表 3-⑦-(2)-(3)-1、平成 28 年度の開催実績を表 3-⑦-(2)-(3)-2 に示す。

表 3-⑦-(2)-(3)-1 平成 27 年度高効率 MEH 研究会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第 1 回	4 月 22 日 (火) 15:00~17:30	パシフィコ横浜	9 名
第 2 回	5 月 20 日 (月) 15:00~17:30	国立大学法人静岡大学	11 名
第 3 回	7 月 13 日 (月) 15:00~17:30	MMC 新テクノサロン	21 名
第 4 回	8 月 18 日 (火) 15:00~17:30	MMC 新テクノサロン	23 名
第 5 回	10 月 26 日 (月) 15:00~17:30	MMC 新テクノサロン	23 名
第 6 回	11 月 27 日 (金) 15:00~17:30	MMC 新テクノサロン	24 名
第 7 回	1 月 15 日 (金) 15:00~17:30	MMC 新テクノサロン	33 名
第 8 回	2 月 24 日 (水) 15:00~17:30	MMC 新テクノサロン	22 名

表 3-⑦-(2)-(3)-2 平成 28 年度高効率 MEH 研究会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第 1 回	5 月 12 日 (木) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	21 名
第 2 回	6 月 9 日 (木) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	17 名
第 3 回	8 月 23 日 (火) 14:00～17:30	静岡大学 電子工学研究所	17 名
第 4 回	9 月 12 日 (月) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	24 名
第 5 回	10 月 4 日 (火) 15:00～17:30	京都大学 桂キャンパス	15 名
第 6 回	11 月 4 日 (月) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	28 名
第 7 回	12 月 14 日 (水) 13:30～16:30	オムロン株式会社 京阪奈イノベーションセンタ	19 名
第 8 回	2 月 9 日 (木) 15:00～17:30	MMC 新テクノサロン	23 名

MMC：一般財団法人マイクロマシンセンター

毎回研究員全員の出席と適時オブザーバーとして NEDO イノベーション推進部や経済産業省担当部門の参加が得られ、研究開発責任者や推進委員長の指摘を含め活発な意見交換が行われ、課題の取り組み修正や優先順位の整理など研究効率の向上が図られた。

### 3-⑦-(3) 本格研究等の検討

#### 3-⑦-(3)-1 総括

エネルギー・環境新技術先導プログラム「トリリオンセンサ社会を支える高効率 MEMS 振動発電デバイスの研究」の 2 年間で 1mW 級の高効率な振動発電デバイスの原理検証に成功した。今後は、平成 28 年度よりスタートした IoT 横断型技術開発プロジェクト「学習型スマートセンシングシステムの研究開発」の中で、工場・プラント用途をターゲットとして自立型センサ端末に向けて、ポンプ、モータ等でセンシング、信号処理、無線のエネルギーを賄う高効率の振動発電の開発、および実用化を加速していく。

#### 3-⑦-(3)-2 活動記録の概略

IoT 社会に向けて、自立型で動作するセンサ端末の普及に向けて、環境振動で高効率に発電する自立電源は不可欠となっていく。NEDO イノベーション推進部の指導を受けながら本高効率振動発電デバイスの研究開発の取り組みについて、以下のような情報発信を積極的に行った。

##### 1) 推進委員会での議論

経済産業省担当部門や NEDO プログラムマネージャーはじめ関係者に積極的に推進委員会を紹介し、出席に応じて推進委員長を座長として、今後についての取り組みの議論を実施した。経済産業省からの 3 回、NEDO 関係者は毎回の出席をした。

## 2) その他の取り組み

上記、議論の中から適用アプリケーションの明確化が重要という指摘があり、工場・オフィス、道路インフラ用途に限らず、ウェアラブルデバイス、鉄道、自動車等の想定されるアプリケーション案を抽出し、様々な振動環境におけるアプリケーションマップの作成に向けて展示会等でヒヤリングをおこなった。平成 27 年度にはナノ・マイクロビジネス展併設国際シンポジウム、平成 28 年度にはイノベーションジャパン 2016、MEMS センシング&ネットワークシステム展での成果発表会での報告、およびデモ展示説明を実施した。詳細を以下に示す。

### ① ナノ・マイクロビジネス展 2015

平成 27 年 4 月 22 日～平成 27 年 4 月 24 日 パシフィコ横浜において、主催者（一財）マイクロマシンセンターブース内に新規プロジェクトの紹介としてポスターを掲示した。

### ② イノベーションジャパン 2016

平成 28 年 8 月 25 日～平成 28 年 8 月 26 日 東京ビッグサイトにて年吉 洋 研究開発責任者の発表、および出展し、研究の内容をポスターおよび展示デモを用いて説明した。

### ③ MEMS センシング&ネットワークビジネス展 2016

平成 28 年 9 月 14 日～9 月 16 日パシフィコ横浜において年吉 洋 研究開発責任者の発表を行った。また MEH ブースを開設し、道路の微振動を加振器で再現し、その振動で高効率に発電するデモの展示、およびポスターの展示を行った。

### 1.3 目標に照らした達成状況

実施計画書のテーマ毎に最終目標と研究成果(達成内容)および達成度、要因分析を下記表のように記載する。

研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	成功、失敗の要因分析
① 高密度固体エレクトレットのエネルギーハーベスタ応用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1mW級の発電</li> <li>・10年以上の信頼性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1mW以上の出力達成</li> <li>・推定寿命10年以上</li> </ul>	○	3種類の構造をもとに、研究会での意見交換を実施し方針を整合して進めた。
②大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエネルギーハーベスタ応用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・イオン液体の高信頼技術の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・イオン液体の最適化</li> <li>・10<math>\mu</math>W/cm<sup>2</sup>の目処</li> </ul>	○	有識者の電中研とイオン液体に関する密接な意見交換を継続して進めた。
③高効率エネルギーハーベスタの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・固体イオンとイオン液体の融合による設計指針を示す</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・固体イオンとイオン液体融合デバイス試作</li> <li>・設計指針作成</li> </ul>	○	多くの種類のエネルギーハーベスタを試作評価をすることで振動環境における設計指針をつかむことができた。
④交通インフラでの振動発電デバイスの導入開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実用面の環境調査</li> <li>・アプリケーションの提案</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実用アプリを想定した振動環境、劣化振動を測定</li> <li>・アプリケーション案提案</li> </ul>	○	オフィス・工場と合わせてアプリケーションワーキンググループ活動を繰り返し開催し、情報の共有・意見交換を繰り返した。
⑤オフィス・工場等での環境発電デバイスの導入開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実用的なアプリケーションとビジネスモデルの抽出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実用アプリケーション、ビジネスモデル抽出</li> </ul>	○	
⑥標準化の戦略立案	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国際標準化に向けた提案活動を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国際標準化提案活動を継続実施</li> </ul>	○	マイクロマシンセンター内での標準化活動の実施、および有識者である東大鈴木先生のご指導をいただいた。

## 2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

### (1) 研究発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	年吉 洋	東京大学	MEMS からみた圧電薄膜技術への期待	強誘電体応用会議	2015年 5月
2	三屋裕幸	鷺宮製作所	大容量イオン液体可変キャパシタ技術のエナジーハーベスタ応用"	東大駒場リサーチキャンパス公開シンポジウム	2015年 6月
3	年吉 洋	東京大学	Trillion 時代に向けての MEMS とエナジーハーベスタ技術	次世代センサ協議会 第1回会員情報交流会	2015年 8月
4	三屋裕幸	鷺宮製作所	ゲル化イオン液体によるエナジーハーベスタ応用	第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム (優秀ポスター賞)	2015年 10月
5	芦澤久幸	鷺宮製作所	Impulse-Excited Energy Harvester based on Potassium Ion Electret	PowerMEMS 2015	2015年 12月
6	三屋裕幸	鷺宮製作所	Soft Electret Gel for Low Frequency Vibrational Energy Harvesters	PowerMEMS 2015	2015年 12月
7	藤田博之	東京大学	In situ TEM Observation and Energy Harvesting using MEMS Actuators and Sensors	Journées Nationales sur les Technologies Emergentes en micro-nanofabrication	2015年 12月
8	年吉 洋	東京大学	IoT 応用を目指した MEMS 振動発電素子	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年 3月
9	年吉 洋	東京大学	IoT 社会を支える MEMS エナジーハーベスタ	精密工学会 第379回講習会	2016年 2月
10	年吉 洋	東京大学	トリリオンセンサ社会を支える高効率 MEMS 振動発電デバイスの研究	イノベーションジャパン	2016年 8月

11	今本浩史	NMEMS 技術研究機構	トリリオンセンサ社会を支える高効率 MEMS 振動発電デバイスの研究	イノベーションジャパン	2016年 8月
12	三屋裕幸	鷺宮製作所	A Soft Electret Gel for Low Frequency Vibrational Energy Harvesters	Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2016	2016年 5月
13	年吉 洋	東京大学	トリリオンセンサ社会を支える高効率 MEMS 振動発電デバイスの研究	MEMS センシング&ネットワークシステム展	2016年 9月
14	今本浩史	NMEMS 技術研究機構	トリリオンセンサ社会を支える高効率 MEMS 振動発電デバイスの研究	MEMS センシング&ネットワークシステム展	2016年 9月
15	三屋裕幸	鷺宮製作所	インパルス振動に特化したコインサイズエナジーハーベスタ	第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム (優秀平戸市長賞)	2016年 10月
16	下山 勲	東京大学	High Efficiency Micro Energy Harvester (MEH)	International Microsystems, Packing, Assembly and Circuits Technology conference,	2016年 10月
17	古賀英明	鷺宮製作所	1mW output electrostatic vibratory power generator allowed by optimization of the proof mass	Power MEMS2016	2016年 12月
18	三屋裕幸	鷺宮製作所	A Frequency-Independent Vibrational Energy Harvester using Symmetrically Charged Comb-Drive Electrodes with Heavily-Doped Ion Electrets	Power MEMS2016	2016年 12月

19	青柳桂一	NMEMS 技術研究機 構	MMC25 年と IoT 時代を迎 える MEMS イノベーション	次世代センサ協議会	2017 年 1 月
20	今本浩史	NMEMS 技術研究機 構	IoT 社会に向けた MEMS セ ンサとセンサシステムの取 り組み	エレクトロニクス実 装学会 先進実装・電 子部品研究会	2017 年 2 月

## (2) 文献

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	発表年 月
1	今本浩史	NMEMS 技術研究 機構	トリリオンセンサ社会を支 える高効率 MEMS 振動発 電デバイス研究の最前線	技術情報協会 IoT ビ ジネス・機器開発にお ける潜在ニーズと取り 組み事例集、p180-187	2016 年 4 月
2	三屋裕幸、 小野新平、 三輪一元、 年吉洋、藤 田博之、	鷺宮製作 所	ゲル化イオン液体によるエ ナジーハーベスタ応用	電気学会論文誌 E 掲載巻号 vol.136 No.6	2016 年 6 月

## (3) 特許等

番 号	出願者	出願番 号	国内外 国 PCT	出願日	名 称	発明者
1	鷺宮製作所、東京大学	特願 2015- 196736	JP2016 /078368	2015/10/2	振動発 電素子	年吉洋、藤田博之、 芦澤久幸、三屋裕幸、 石橋和徳
2	静岡大学、鷺宮製作 所、東京大学、マイク ロマシンセンター	特願 2016- 231750		2016/11/29	振動発 電デバ イス	年吉洋、橋口原、 今本浩史、三屋裕幸
3	静岡大学、鷺宮製作 所、東京大学、マイク ロマシンセンター	特願 2016- 231751		2016/11/29	振動発 電デバ イス	年吉洋、橋口原、 今本浩史、三屋裕幸
4	鷺宮製作所、東京大学	特願 2016- 231879		2016/11/29	振動発 電素子	年吉洋、藤田博之、 芦澤久幸、三屋裕幸、 石橋和徳

契約管理番号	14102921-0
--------	------------