

令和3年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「大型プラントメンテナンスに用いる振動センサネットワークノードモジュールの研究開発」

研究開発成果等報告書

令和4年 5月

担当局 東北経済産業局
補助事業者 国立大学法人 東北大学
仙台スマートマシーンズ株式会社

目次(例)

	ページ
第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	10
1-3 成果概要	10
1-4 当該研究開発の連絡窓口	11
第2章 本論	12
最終章 全体総括	21

研究成果報告について

補助事業者名 : 国立大学法人 東北大学 / 仙台スマートマシーンス株式会社

補助事業の名称 : 大型プラントメンテナンスに用いる振動センサネットワークノードモジュールの研究開発

第1章 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景

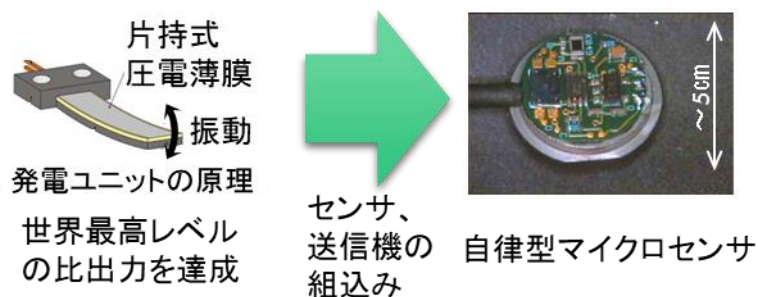
①これまでの取組

セメント、鉄鋼などのプラント業界では、長大なベルトコンベア群が縦横に原材料を運搬し、混合し、反応させて一連の関連製品の重要なプロセスの一翼を担っている。特に、高温の焼成炉など連続運転を前提とした巨大インフラにつながっているようなベルトコンベアは、万が一、トラブルや故障が発生すると、メンテナンスの間、生産がストップするだけでなく、隣接する巨大インフラの定常状態までの立ち上げなどにも膨大なエネルギー・コストがかかることから、その停止リスクは莫大なものとなる。

一方でこのようなベルトコンベア群の管理運用は、連続運転と省力化を実現するため、数 km 四方を僅かに数人で行っている所が少なくなく、保守運用要員の減少と高齢化により適切な管理運用が心配される事業所も表面化しつつある。そこで、日常の運転状況から不具合の発生を事前に予測し、定期点検において適切なメンテナンスを行うことが重要であるが、現在のベルトコンベアの状況のモニタリング手法としては、駆動用モータの動作電流を 24 時間で監視するのが唯一の方法であり、大きな障害が発生しモータに異常な負荷がかかっているか否かは判別できるが、その障害の予兆となるベルトの擦れやひび割れ、加重の偏りや風等によるベルトの異常振動等、モータ以外の駆動部がどのような状態になっているかは監視できない。一旦ベルトコンベアの不具合により生産ラインが停止してしまうと、数億円の損害を出すこともあり得ることから、予兆を迅速に捉え、適切なメンテナンス計画を立案し、事前に事故を防ぐことが重要な課題となる。

本研究開発ではベルトコンベアの予防保全のためのモニタリングとしてベルトコンベア各部における振動の検知により行う。振動は、駆動用モータの異常、ベルトの擦れ、ひび割れ、加重の偏りなどの全ての異常現象を振動センサにより確実に捉えることができた、コスト的にも有利である。

東北大学未来科学技術共同研究センターおよび仙台スマートマシーンス株式会社では、10 年間にわたり振動を用いたエネルギーハーベスティングの研究開発を続けており、最近では発電出力が凡そ 1cm 角の素子で 1mW 以上と世界最高レベルを達成するとともに、この基板をステンレスとすることによって、耐久性を大幅に向上できた。そこで、この素子の発電する電力を元に無線送受信機 BLE (Bluetooth Low Energy) や振動センサを組み込んだ、自立型マイクロセンサを開発した。このセ



自立型

ンサは、外部からの振動により発電し、その電力で当該振動の情報を感知し、振動の特性をリアルタイムで外部に送信することができるため、電池の取り換えや面倒な配線の取り回しがなく、密閉容器等にも容易に組み込めるため、工場等の雨水や砂塵等の劣悪な環境でもメンテナンスフリーで動作することができる。このセンサについて、実際にベルトコンベアを用いたモデルプラントにおいて振動計測が可能であることを確認している。

さらに多数の振動センサデータを用いたビッグデータ処理による予防保全についても全く新しい技術を開発する。従来技術は異常がある場合のデータベースを構築し、取得したセンサデータとの比較を行なうことにより異常の有無の判別を行っている。しかしこの方法では異常の場合のデータベースが必須であり、異常を生じる場合の頻度が小さい場合はデータベースの作成が困難である。それに比べ、本研究開発では多数の振動データを処理することによりデータ全体の時系列「動き」を表示することができ、その「動き方」により異常が起きる可能性があるか否かを判別することを可能とする。

従来技術	新技術
ベルトコンベア駆動モータの駆動電流モニタリング	ベルトコンベア各所の振動のモニタリング
モータの電流データでは、モータの異常は感知できるが、他の要因（ベルトの捻じれ等の不良など）については、当該要因がモータの駆動系に影響してからの感知となるため、感知が遅れてしまう	要所に多くのセンサを設置できるため、ベルトコンベアの故障頻出個所から直接、振動データを取得することが可能 (高機能化、ネットワーク化、安全性・信頼性の向上)
現状は、モータにセンサを取り付け、これを有線でデータを集めているため、長大かつ膨大な配線管理が必要	自律式の振動センサを活用することで、配線の取り回しやバッテリー（電池）等の交換が不要。メンテナンスフリーによる低コスト運用が実現できるとともに、駆動部などの配線が難しく、重量物が取り付けにくい箇所のセンシングが可能。 (高機能化、ネットワーク化、安全性・信頼性の向上、エネルギーはベースティン、低コスト化)
駆動電流の異常は経験の多い管理スタッフの目視による感知に頼る	多数のセンサからの多次元データを同時に取得し、管理するシステムの開発により、自動でベルトコンベアの異常を感知し、情報からどのような状態にあるかを予測し、瞬時に警報を出すことが可能 (機器のネットワーク化・センサフュージョン、低コスト化)
多数の振動センサデータから異常を判別するには異常な状態のデータベース（教師データ）構築が必要	従来のような異常な状態のデータベース無しで本研究開発による処理を行うことにより多数の振動センサデータの時系列の「動き」をにより異常な状態の判別が可能である。



②川下分野横断的な共通の事項

A. 省エネルギー化・エネルギーハーベスティング、B. 小型化、C. IoT、AI 等を活用した製品・サービスを支える技術の高度化、の目標について以下に記述する。


A. 省エネルギー化・エネルギーハーベスティング

セメント製造、製鉄などにおけるベルトコンベアなどの大型プラントでは、予防保全のために装置を停止したりすることは無理があり、既存の装置を運用しながら、予防保全・メンテナンス用のセンサノードモジュールを装置を停止することなく設置し、またそれが本体に影響を及ぼさないことが重要である。このために省電力であるとともに低コストを実現するエネルギーハーベスタが極めて有効である。すなわち配線が不要、電池交換不要で必要な箇所に自由に設置できるエネルギーハーベスティングを適用したセンサノードモジュールが求められている。各産業共通の大型プラントとしてベルトコンベアを取り上げ現状の問題点を現場から聞き取り、それを基にしてフィールド実験調査を行った。結果を下

表左欄に挙げる。これに対して本研究開発における解決すべき研究課題を右欄に示す。

商用電源、一次電池、二次電池などを使用せず、メンテナンスフリーな電源である高出力・高効率エネルギーハーベスタが必須であり、研究開発する。

現用のエネルギーハーベスタでは、今回想定する約 10 km 四方の広大な工場敷地をカバーするための無線出力を確保するには性能が不足している。このため、従来に無い MgHfAl-N 系の圧電薄膜を研究開発し、高出力・高効率エネルギーハーベスタを開発す

大型プラント・ベルトコンベア予防保全、メンテナンス上の問題点、および要望	本研究開発で提案するセンサノードモジュールにおける解決すべき研究課題
露天で粉塵等が常時存在 配線や電池交換が不可能 	防塵、防水パッケージング 自立発電（エネルギーハーベスタ）による無線送受信にて 10km 四方の工場をカバー
ベルトコンベアの総長さは約 10km/工場。ベルトコンベアの事故として 2-3 回/年、一事故が起きるとその損害額は数千万円。総設備投資額は 1 億	10m 毎にセンサを設置すると 1000 個/工場となる。センサモジュールの価格を、量産時 20 万円/個以下とする。これには MEMS 技術を適用し、小型化、低コスト化を図る。

る。さらに高出力圧電薄膜高効率振動構造の研究開発、エネルギーハーベスタに適する電源ICの研究開発を行い本開発のエネルギーハーベスタにマッチした電源IC、制御ICを研究開発し、より高出力、高効率を達成する。また、屋外で使用可能な低コストで、防水、防塵で耐久性が高いパッケージングを研究開発し、屋外で使用されるプラント用ベルトコンベアでの長期動作を可能とする。

円以下としたい。	
ベルトコンベアメンテナンスとして現状は両端のモータのテレビモニタまたは、モータ電流のモニタのみで事故予知は不可能、事後対応のみ。	モータおよびローラの振動をセンサにより測定。ベルトコンベアの破断などの前に必ず異常振動が生じるのでこれを振動センサにより検知することにより、予防保全を可能とする。 定常時の振動は0.1-0.2G程度。この10%程度の変動で破断に至るか否かをビッグデータ処理により判断。

B. 小型化

各種大型プラントのモニタリングのための振動センサモジュールにはできるだけプラント本体に影響を及ぼさないように可能な限り小型化、軽量化が必要である。エネルギーハーベスタおよびセンサ、配線、電極などMEMS化を図り小型化を実現する。これはキ、低コスト化にも極めて重要な技術となる。

C. IoT、AI等を活用した製品・サービスを支える技術の高度化

振動センサネットワークノードモジュールを用いたプラントモニタリング用のビッグデータ解析にはIoT、AIを活用しモニタリング技術の高度化を図ることが必須である。多数の振動センサのデータを周波数、継続時間、インパクト時間、振動強度などの多くのデータを多数の振動センサから同時に収集することでその振動から異常な状態を感知する。そのために、ベルトの弛みや捻じれ、亀裂の進展等の状態でのデータサンプルを収集し、当該振動発生時に実際のコンベヤーで起きている事象を推定するためのアルゴリズムを研究開発する。自立電源無線振動センサノード同士のマルチホップ通信およびビッグデータ解析プログラムの開発により複数の取得データを組み合わせ、正確なデータを導き出す技術を確立する。

上記のオ、およびク、の技術により大型プラント・構造物の信頼性向上を果たし、非破壊検査技術の向上および従事者の技術水準の確保向上に資する。また、自動車内のワイヤレス化などのADASやEV化に必要な測定計測技術の高度化、自動走行の実現にも資する研究開発とする。

③研究開発の目的・目標

「特定研究開発等の拠点となる施設」・・・東北大学未来科学技術共同研究センター

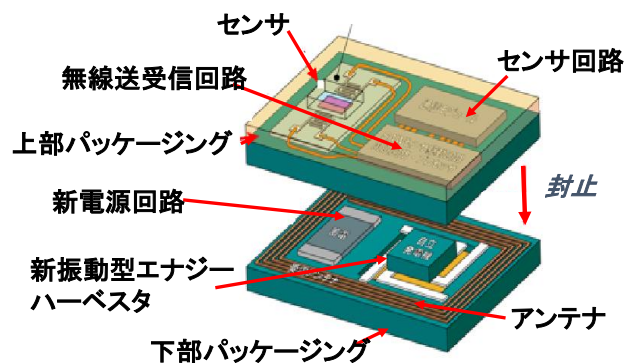
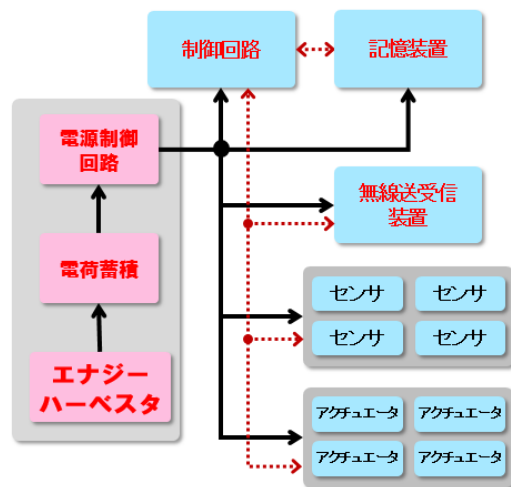
「当該特定ものづくり基盤技術における高度化目標の達成に資する特定研究開発等の実施方法」

(十二) 測定計測に係わる技術に関する事項の高度化目標のうちオ、省エネルギー化・エネルギーハーベスティング、カ、小型化、キ、低コスト化、ク、IoT、AI等を活用した製品・サービスを支える技術の高度化、に係わる研究開発の実施方法についてそれぞれについて概略を述べ、次いで個々の課題について述べる。

オ、省エネルギー化、エネルギーハーベスティング：

本研究計画の開発目的である振動センサネットワークノードモジュールの構成を以下の図に示す。センサネットワークノードにおいては制御回路によりセンサデータを取得・処理し、記憶し、無線でセンサデータを送受信する。このようなセンサネットワークモジュールを駆動するには電源が必要である。現在は、一次および二次電池を用いる構想が殆どである。本研究開発では

この電源として振動を利用したエネルギーハーベスタを用いたセンサネットワークノード構成を研究開発する（下左図）。



エネルギーハーベスタを用いたセンサネットワークノード構成

本研究開発で構想するセンサネットワークモジュールおよびパッケージング構成

本研究開発で各種のエネルギーハーベスタのうち、夜間や光が無い空間での使用、熱移動がほぼ無い場所での使用などを考慮し、振動を利用して発電する方法を選択する。本研究開発項目のターゲットである大型プラントは必ず振動が生じていることから、これを利用することが最も実用的であると判断した。

振動を電気エネルギーに変換する方法として小型で高出力を得ることができる圧電方式を採用することとした。これに対して電磁誘導型は小型化が困難であること、エレクトレッ（静電誘導）型は発電出力が小さいことが難点である。圧電方式の中でも環境に無害でエネルギーハーベスタ圧電材料を選択し、性能指数(FOM; Figure of merit、専門用語解説参照)が高いAlN系の圧電薄膜を実用化する。AlNにコスト的に有利なMg、Hf、Zr等を不純物としてドーピングすることに従来より圧電係数が高く、性能指数が大きいMgHfAl-N圧電薄膜を研究開発している〔補足資料(1)：

Hung H. Nguyen, Hiroyuki Oguchi, Le Van Minh, and Hiroki Kuwano, High-Throughput Investigation of a Lead-Free AlN-Based Piezoelectric Material, (Mg, Hf)_xAl_{1-x}N, ACS Comb. Sci. 2017, 19, 365-369〕。本成果を活用し、大出力で低コストな振動形エネルギーハーベスタを実用化する。

振動センサ、無線送受信装置、CPUなどを駆動するエネルギーハーベスタについては、独自に開発したAlN圧電薄膜をベースとしてMg、Hf、Zrなどの不純物導入により発電出力の増大を図るとともに、同時に開発する電源制御回路との組み合わせによりセンサなどの他デバイスに供給できる実効電力の増大を図る。現状で仙台スマートマシナズ社のAlN圧電薄膜エネルギーハーベスタは、1mW/ccを実現しており、世界トップである。この発電出力をさらに増大させ最終的に5mW/ccを目標とする。また、本エネルギーハーベスタの能力を最大限に引き出す電源制御回路を開発し、実効使用電力の最大化を実現する。

カ. 小型化：本研究開発項目では、MEMS技術を用いた小型化を図り、エネルギーハーベスタ、振動センサ、配線部、電極部、コネクタ部などの小型化、軽量化を図り、被測定物への影響を極力小さくする小型振動センサノードモジュールを研究開発する。

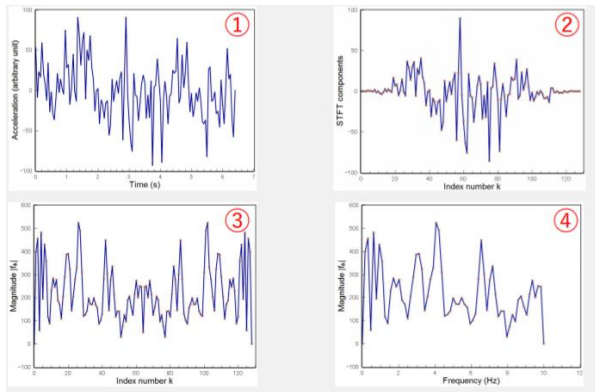
キ. 低コスト化：上記のMEMS技術による小型化とともにバッチ処理による量産技術を適用することにより低コスト化を図る。また、従来Si基板を用いて作製していたエネルギーハーベスタの構造を抜本的に見直し、市販で流通しているステンレススチール基板を適用することにより、格段の低コスト化を実現する。

ク. IoT、AI等を活用した製品・サービスを支える技術の高度化：

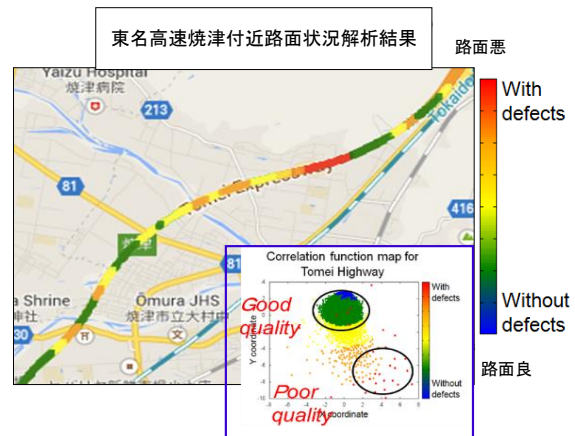
本研究開発では、得られたセンサデータを、AIを活用したビッグデータ処理により予防保全を行う。特に振動センサデータの周波数解析においては特徴量を算出するパラメータ数を69次元とし

て次元を削減する事無くビッグデータ処理を行い、時系列の振動データの「動き」により教師データとしての異常データベース無しで、予防保全メンテナンスモニタリングを行うことを可能とする。本開発のビッグデータ処理により大型プラントのメンテナンス技術の画期的な高度化を図る。

本研究開発で適用するビッグデータ解析手法は解析エンジンとして本研究開発のアドバイザである(株)toor 開発の“toorPIA”を用いて振動計測に適用し、ベルトコンベアの振動を計測し、故障予知を行うアルゴリズムを開発することによりシステムを構築する。



上記のような振動センサデータから 69 次元のパラメータを抽出し、特徴量を算出するビッグデータ解析を適用。特徴量を時系列で整理すると教師データ無しで故障予知が可能となる。



車載振動センサによる東名自動車道（焼津付近）の振動データを toorPIA をエンジンとしたビッグデータ解析を行い、その良否を判定した例。本研究開発においても類似の手法で実施。

本提案者は既に自動車道路表面のモニタリングに” toorPIA” を解析エンジンとして用いた道路路面モニタリングシステムを開発し、東北自動車道、東名自動車道などに適用して有効性を実証している〔補足資料（2）：サナ、高枝、金田、桑野、車中搭載の加速度センサを用いた高速道路のビッグデータ解析、日本機械学会回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集（学会賞受賞）、2015. 10. 28-30、新潟〕。開発したシステムでは、自動車のバネ下に振動センサを設置し、走行時の前頁左図のような振動センサデータから 69 次元のパラメータを抽出して特徴量を算出している。本開発システムにより、前頁右図のように東名高速道の路面状況のモニタリングが 700m 毎に路面の良し悪しを表示することが可能とした。従来のビッグデータ解析では次元数を制限せざるを得ず、このような高次元の特徴量は導出して表示することが不可能であったが、提案者が開発した手法により、より確度が高い解析が可能となった。本開発システムにおいてもこの手法を適用し事故等の教師データと比較する事無く予防保全が可能システムを開発する。本研究開発では各種プラントの予防保全のためのモニタリングのためにセンサネットワークノードを構成するので、さらに格段に大きい多次元のパラメータを処理することが必要であり、マップ作成部と同期させる状態分析図を用いることで解決を図る。

エネルギーハーベスタでは無線送受信距離に限度があるので、広大な敷地に広がるプラントのモニタリングをエネルギーハーベスタ駆動のワイヤレス通信で行うために相互に適切に離れた距離に設置された各センサネットワークノード間をアドホック方式を適用しエネルギーハーベスタで得られる電力レベルで送受信可能なセンサネットワークを構成する。

④補助事業の具体的内容と実施結果

【1. 高出力・高効率エネルギーハーベスタ研究開発課題への対応】

【1-1】MgHfAl-N 薄膜形成の最適化【令和元年度、令和2年度実施】（東北大、仙台スマートマシ

ーンズ(株)が実施)

高出力エネルギーハーベスタの実現のために東北大学にて独自開発したエネルギーハーベスタ性能指数が世界で一番大きい $\text{MgHf}_{1-x}\text{Al}_x\text{-N}$ 圧電薄膜の成分比 x を量産に適するマグネトロスパッタリングの手法により実現する。このための各種スパッタリング条件の適正化を実施する。

(令和1年度実施結果)

MgHfAl-N 薄膜形成の最適化に向けて、東北大学にて開発したコンビナトリアル手法により見出した $\text{MgHf}_{1-x}\text{Al}_x\text{-N}$ 圧電薄膜の成分比 x を量産に適するマグネトロスパッタリングの手法に移植するためにスパッタリング条件の適正化を実施した。ターゲット材料、薄膜形成の電力、電圧、ガス圧などのスパッタ条件などの薄膜形成条件について検討し最適化に成功し、目標とおりの成果を得た。

(令和2年度実施結果)

性能指数 100GPa 以上を目標に、Mg, Hf の添加量解析と量産に適した条件 (圧電定数、誘電率、ヤング率) の獲得を目標とした。Mg, Hf の添加量解析に関しては、Al-N 薄膜への Mg, Hf の添加量を調整できることをスパッタターゲットの成分比を変化させることで実証した。量産に適した条件獲得に関しては、Mg, Hf の添加量を約 40%にしたことで圧電定数が約 2 倍となり、性能指数 (FoM: Figure of Merit) 100GPa 以上とした目標値を達成した。

【1-2】エネルギーハーベスタ振動構造の最適化【令和元年度、令和2年度実施】(東北大、仙台スマートマシーンズ(株)が実施)

高出力エネルギーハーベスタの実現のために振動エネルギーを最も効率良く発電膜である MgHfAl-N 圧電膜にて電気エネルギーに変換できる振動構造を最適化する。このため振動構造体として従来の MEMS 構造体である Si 基板ではなく、ステンレス基板を採用し、振動構造も従来のカンチレバーでは無く、より広い帯域での振動を発電に使うことができる非線形構造を採用する。基板を Si からステンレスに替えることは同じ力を加えても変位が大きくなることにより大出力化を達成できるとともに硬脆材料から延性材料への変更により寿命も飛躍的に長くなることが期待できる。

(令和元年度実施結果)

エネルギーハーベスタ振動構造の最適化を高耐久化、最適共振周波数化、高出力化の観点から検討した。振動構造体材料として従来の MEMS 構造体である Si 基板ではなく、ステンレス基板を採用し高耐久性を実現した。振動構造として円型、両持ち梁型、片持ち梁型の 3 種類について検討し、それぞれ対象周波数領域、帯域幅などにより対応できる設計法を数値解析および実験により確立した。

(令和2年度実施結果)

エネルギーハーベスタ (EH) の高出力化を目的とし、①最大出力 $5\text{mW}/\text{cm}^3$ 以上となる EH の作製②プラントモニタリング用途の目標振動数における最大出力エネルギー密度となる発電素子機構の開発を目標とした。①に関しては、EH 最大出力 $5\text{mW}/\text{cm}^3$ を達成した。②に関しては、目標振動数・帯域幅での最大出力エネルギー密度となる発電素子構造体の設計、数値シミュレーションを実施し最適構造を確立した。

【1-3】エネルギーハーベスタパッケージングの最適化【令和元年度、令和2年度、令和3年度実施】

(東北大学、仙台スマートマシーンズ(株)が実施)

実際の屋外に存在するプラント監視に用いるには耐塵性、耐候性、耐温度性、耐衝撃性が必要である。また、コストも満足しなければならない。これに堪えるエネルギーハーベスタパッケージングを開発する。このために硬質エンジニアリングプラスチック材料をパッケージング材料として採用する。耐温度性は $-40^\circ\text{C} \sim +140^\circ\text{C}$ を目標とする。

(令和元年度実施結果)

エネルギーハーベスタパッケージングに用いる材料についてエンジニアリングプラスチック、金属材料の双方について、密封法として接着剤およびねじ止め法について検討した。その結果、金属材料を用いて密封法として接着剤とねじ止め法の併用が有効であることを研究テーマの予備確認として明らかにした。

(令和2年度実施結果)

EHおよびセンサモジュールの耐環境性(耐温度性: -40℃~+140℃ 防水・防塵: クラス IP54 以上

)の獲得に向けた①材料選定、密封方法の最適化②耐環境試験条件の設定を実施した。①に関しては、パッケージング構造を含めた密封方法の最適化を行った。パッケージング材料としてエンジニアリングプラスチック PEI を選定。密封方法は張り合わせ精度と強度の観点より常温硬化型接着剤 EP340 を選定。②の EH&センサモジュールの耐環境試験条件の設定に関しては、第三者試験機関に相談の上、国際規格 IEC60529 準拠の保護等級 IP54 を設定し、保護性能試験 (IP54) を実施し、合格を得た。

(令和3年度実施結果)

耐衝撃性の獲得として、パッケージ形状の改良を行う事により 10G 下での連続駆動を可能とした。また、実フィールドを模した実振動条件下において、エネルギーハーベスタの発電およびセンサノードの給電を確認した。

【2. 振動センサネットワークノードモジュールの研究開発およびセンサを用いたプラントモニタリング用のビッグデータ解析手法の研究開発課題への対応】

【2-1】センサネットワークノードシステムの最適化【令和元年度、令和2年度、令和3年度実施】(東北大学、仙台スマートマシーンス(株)が実施)

開発するエネルギーハーベスタを自立電源として市販の振動センサ、CPU、無線送受信デバイスを組み合わせ、振動センサネットワークノードシステムとして最適化する。

(令和元年度実施結果)

センサネットワークノードシステムとして開発するエネルギーハーベスタを自立電源として市販の振動センサ、CPU、無線送受信デバイスを組み合わせ、振動センサネットワークノードシステムとして一次試作した。このため宇部興産において工場フィールドにてベルトコンベア振動についてデータ収集および基本的な解析を行い、主たる周波数領域などを明らかにした。

(令和2年度実施結果)

センサネットワークノードとして①センサ信号無線送受信距離 100m 以上の実現 ②情報送信速度最大 1Mbps を実現させるシステム構成を実現した。

(令和3年度実施結果)

振動センサノードシステムの設計/製作コスト計 30 万円以下を実現。また、実フィールドを模した実振動条件下に於いて、センサの駆動及びセンサデータの送受信を確認した。

【2-2】プラントモニタリング用ビッグデータ解析手法の研究開発【令和元年度、令和2年度、令和3年度実施】(東北大学、仙台スマートマシーンス(株)が実施)

プラントモニタリング用監視システムとして異常値の検出・判断が重要である。このために常時データと異常時データをビッグデータとして比較するアルゴリズムを開発する。データとして振動

周波数、持続時間、不連続性・連続性、などのパラメータを定義しその組み合わせの特徴により判断する。このアルゴリズムはビッグデータソフト会社であるアドバイザーの toor 社と連携して取り組む。

(令和元年度実施結果)

プラントモニタリング用ビッグデータ解析手法の研究開発として取得したフィールド実験データを活用し、周波数領域、強度などの特徴を算出しマッピング化し、異常値の検出・判断が可能なアルゴリズム仕様を明らかにして試作発注した。

(令和2年度実施結果)

昨年度試作の解析プログラムを基とし、実データに沿う、予防保全を目的としたアルゴリズムの仕様を決定した。また、アルゴリズムの仕様を基に、参照データのマッピング処理と、経時変化データの読み込み及びマッピングを適宜実施できるプログラムの開発を完了した。

(令和3年度実施結果)

実フィールド上で得た経時データ変化を元に、解析プログラムの作成を完了した。

1-2. 研究体制

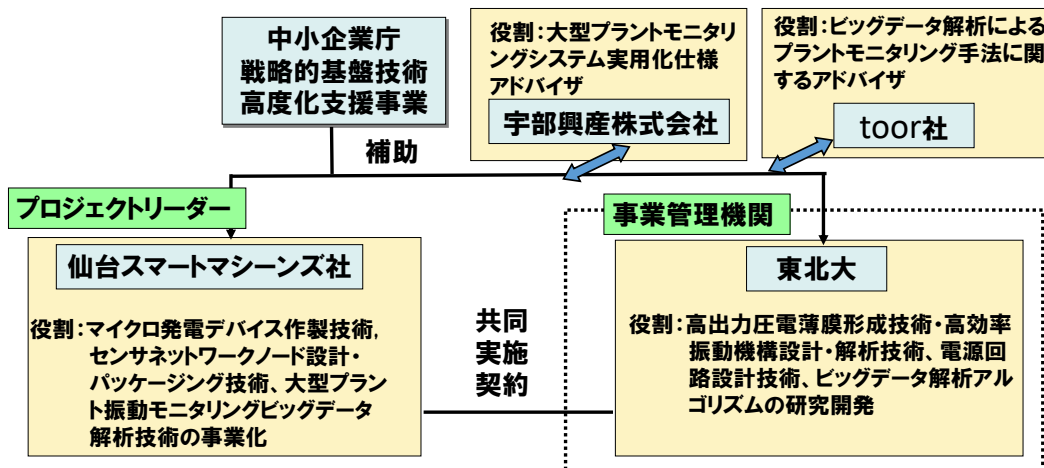
PL: 仙台スマートマシーンズ株式会社 CTO (最高技術責任者)・代表取締役 桑野 博喜

SL: 東北大学未来科学技術共同研究センター特任教授 加藤 忠

川下ユーザとしてのアドバイザー: 宇部興産株式会社

ビッグデータ解析エンジンと本開発システムとのインタフェースアドバイザー: toor 株式会社

研究体制・役割分担



1-3. 成果概要

本研究開発では、主に「高出力・高効率エネルギーハーベスタ研究開発課題への対応」と「振動センサネットワークノードモジュールの研究開発およびセンサを用いたプラントモニタリング用のビッグデータ解析手法の研究開発課題への対応」の2点について実施した。それぞれの成果概要を示す。

①高出力・高効率エネルギーハーベスタ研究開発課題への対応

・マグネトロンスパッタリングの量産用途として、性能指数 100GPa 以上を誇る MgHfAl-N 薄膜の

形成を達成する為、スパッタリング条件の適正化 (MgHf_{1-x}Al_x-N 圧電薄膜の成分比 x) を実施。結果として X=0.45 の時に最大の FOM を実現できることを確認した。

- ・エネルギーハーベスタの振動構造に関して、プラントモニタリングでの適応を考慮した、高耐久化、最適共振周波数化を念頭に、両持ち梁型、片持ち梁型について検討し、数値解析および実験により確立した。構造を確立した上で、最大出力 5mW/cm³ 以上となる EH の作製と、目標振動最大出力エネルギー密度となる発電素子機構を開発した。

- ・エネルギーハーベスタのパッケージング方法に関して、エンジニアリングプラスチックを用いた高耐久性のパッケージング法を開発した。また、EH およびセンサモジュールの耐環境性 (耐温度性: -40°C~+140°C 防水・防塵: クラス IP54 以上) の獲得に向けた耐環境試験を実施し、IP54 規格の合格を得た。

②振動センサネットワークノードモジュールの研究開発およびセンサを用いたプラントモニタリング用のビッグデータ解析手法の研究開発課題への対応

- ・センサネットワークノードとして、センサ信号無線送受信距離 100m 以上、情報送信速度最大 1Mbps を実現させるシステム構成を実現した。また振動センサノードシステムの設計/製作コスト計 30 万円以下を実現した。

- ・プラントモニタリング用ビッグデータ解析手法の研究開発として取得したフィールド実験データを元に、周波数領域、強度などの特徴を算出しマッピング化し、異常値の検出・判断が可能な解析プログラムを作成した。

1-4. 当該研究開発の連絡窓口

所属：仙台スマートマシーンズ株式会社

氏名：高山 洋佑

電話：022-795-5080

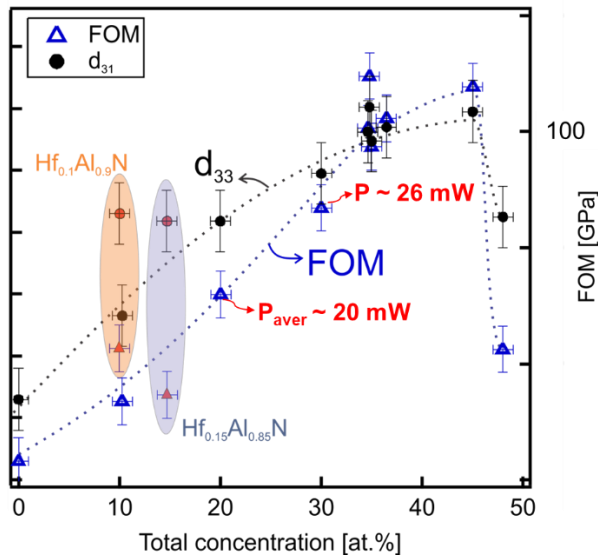
E-mail: takayama-y@ssmcoltd.co.jp

第2章 本論

以下に、本研究開発で実施した研究開発内容とその成果・データの詳細を述べる。

1 MgHfAl-N 薄膜形成の最適化

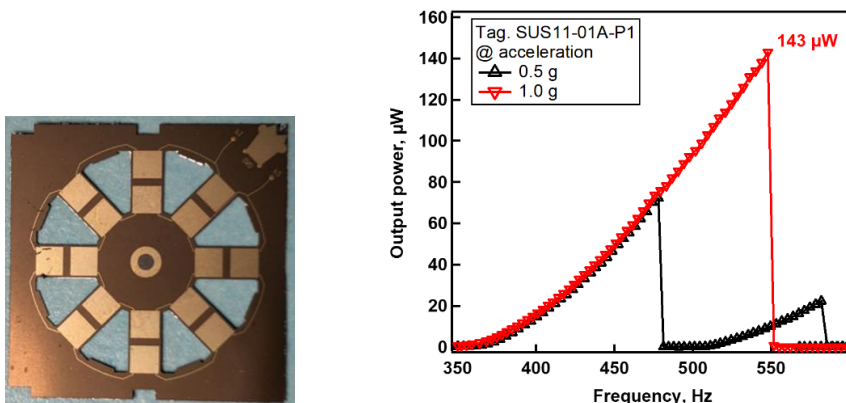
マグネトロンスパッタリングの量産用途として、性能指数 100GPa 以上を誇る MgHfAl-N 薄膜の形成を達成する為、スパッタリング条件の適正化 (MgHf $_{1-x}$ Al $_x$ -N 圧電薄膜の成分比 x) の研究開発を実施した。開発結果を以下のグラフに示す。



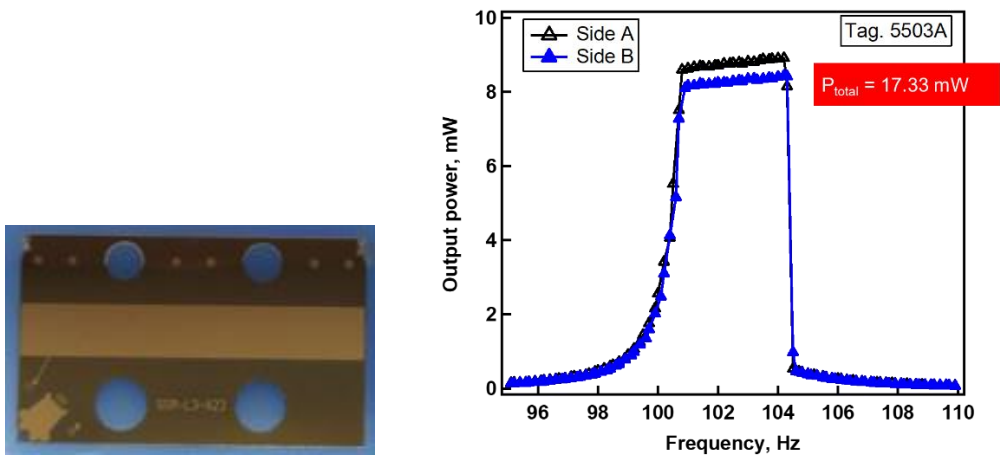
グラフ横軸はターゲット材 Hf の成分比率を表している。グラフの縦軸は圧電定数 (d_{33} モード) と FOM を表している。上記結果より、Hf の成分比率が 45% の時 ($x=0.45$) の時に最大 FOM 120GPa を得られることが分かった。

2 エナジーハーベスタ振動構造の最適化

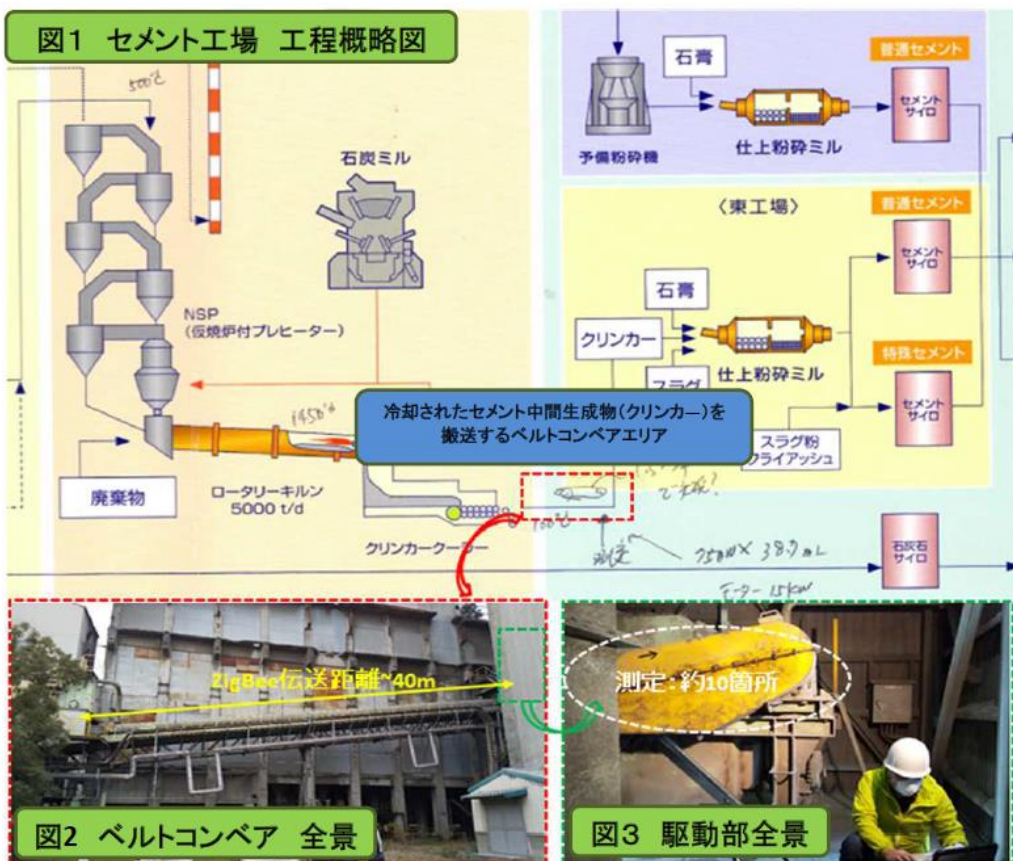
エナジーハーベスタの振動構造に関して両持ち梁型、片持ち梁型の設計/製作を行い、評価を実施した。下図が両持ち梁型エナジーハーベスタの構造図と周波数/出力特性のデータである。



また、片持ち梁型エネルギーハーベスタの構造図と周波数/出力特性のデータを以下に示す。



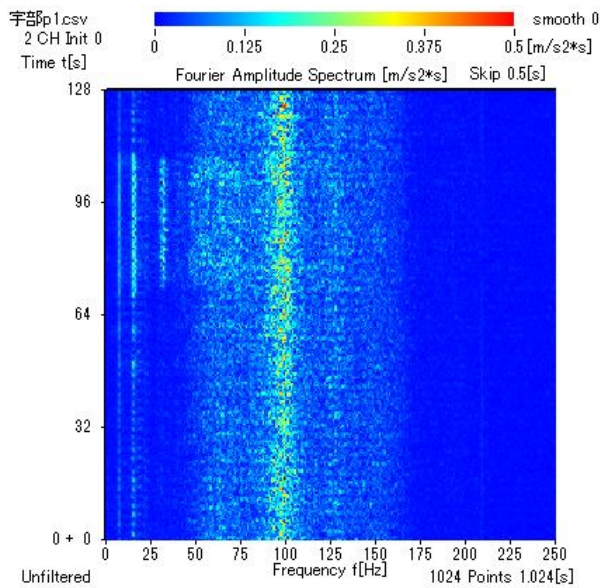
本研究開発では、プラントモニタリングでの適応を考慮したエネルギーハーベスタの開発である。そこで、「川下ユーザとしてのアドバイザー」でもある宇部興産株式会社の協力を仰ぎ、宇部セメント工場にて、プラントコンベア設備の振動周波数、振動強度の測定を実施した。



- ①,②,③,⑨ : コンベアドライブプーリー軸受け
- ⑤,⑥,⑦ : ギヤモーター
- ⑧ : タイミングチェーン外筐部
- ④,⑩ : コンベア端 クリンカーシュート部分外筐



上図は、今回測定対象としたベルトコンベアと測定箇所の写真である。計 10 か所に加速度ピックアップ及び加速度測定機を取付け、測定を行った。測定した加速度データを FFT（高速フーリエ変換）による解析をかけ、それぞれの固有振動数を調べる。例として下図に測定箇所①（コンベア ドライブプーリー軸受け部分）の周波数スペクトルを示す。



この解析結果より、固有振動周波数として、100Hz 近辺で強い加速度が発生していることが分かった。

以上の結果から、本研究開発におけるプラントモニタリングでの最適な振動状態は 100Hz 近辺である事から、上述の片持ち梁型エナジーハーベスタを用いた自立型センサノードモジュールの開発を実施する事とした。

3 エナジーハーベスタパッケージングの最適化

エネルギーハーベスタ素子に耐塵性、耐候性、耐温度性、耐衝撃性を持たせるパッケージングの開発について述べる。パッケージング材料としては、加工性・コストを考慮した上で、金属製エンジニアリングプラスチック製の材質の中で振動減衰率の低いものを候補とする事とした。

以下の図と表は、各材質のパッケージングを使用したエネルギーハーベスタとQ値（減衰率の逆数）を示した結果である。検討結果より PEEK 材である「PEEK-Nature」と PEEK 材にガラス片を混入した「PEEK-Glass」がQ値として高い値を得ることが分かった。



Cap material	Result Q / Power (mW)
Alumina / SUS340	~22 / 1 mW
TECAMAX *	~70 / 5 mW
TECAPEI *	~70 / 5 mW
PEEK-Nature *	~100 / 5 mW
PEEK-Glass (GF30)**	~90 / 5 mW

エネルギーハーベスタとセンサノードシステムの耐候性、耐温度性の獲得については、第三者機関との協議の上、国際規格 IEC60529 準拠の保護等級 IP54 を設定し、保護性能試験（IP54）を実施した。試験用のエネルギーハーベスタとセンサモジュールは下図のような構成で、防塵・耐水性を考慮した外筐で覆った構造となっている。



IP54 は以下の性能を有する規格である。

- 第1特性「5」：塵埃の侵入を完全に防止できないが電子機器の動作には問題がない
- 第2特性「4」：あらゆる方向からの水の飛まつによって機器が影響を受けない

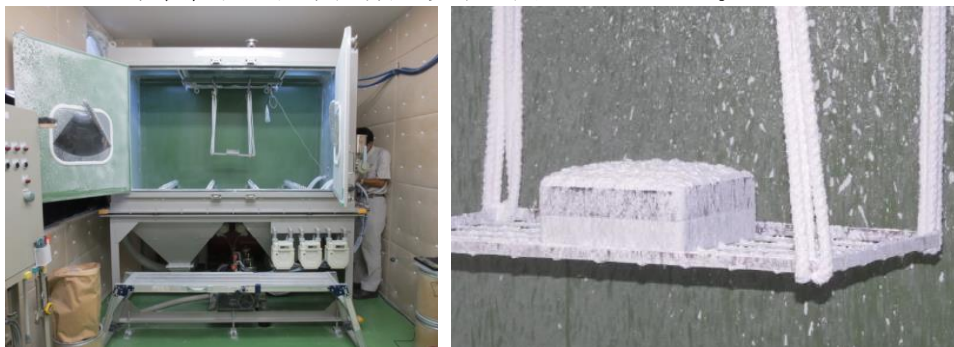
IP54 規格の試験内容については、以下の通りである。

- 第1特性「5」：粉じん試験機内に設置し、8時間の試験の後、電気機器の所定の動作及び安

全性を阻害する塵埃の侵入がないこと。

第2特性「4」：±180度の範囲で、10リットル/分の水量で5分間試験を実施。

IP5xの試験装置及び実験風景は以下の図の通りである。

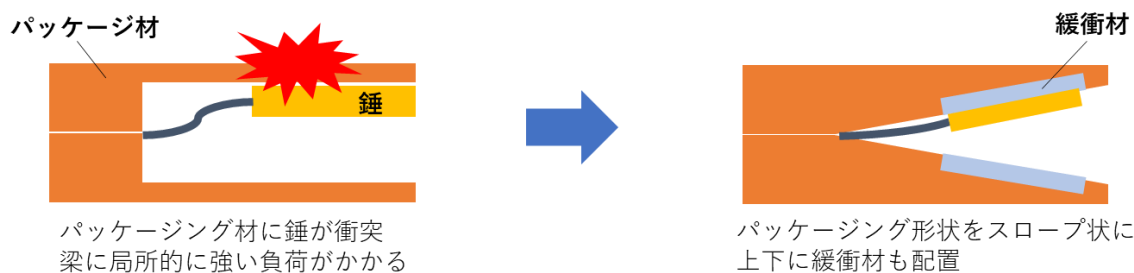


IPx4の試験装置及び実験風景は以下の図の通りである。

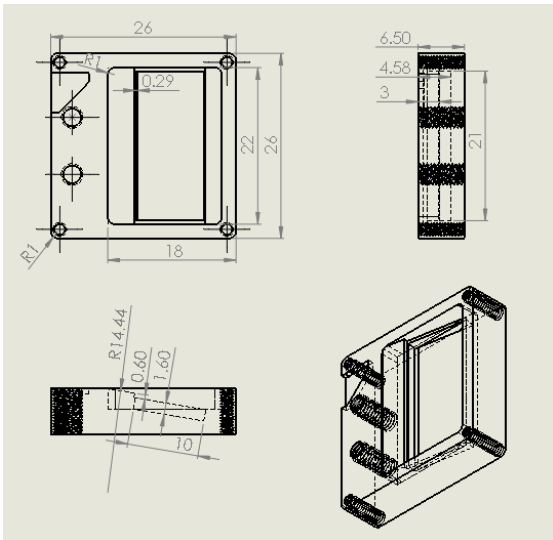


結果として、両試験後でもエネルギーハーベスタ及びセンサノードシステムの駆動は問題なく確認できたことから、保護等級IP54の規格認証を得ることが出来た。

エネルギーハーベスタの耐衝撃性の獲得として、10G下での駆動を実現させるパッケージ形状の検討を実施した。下図のように、平坦なパッケージ材で構成した場合、高い振幅加速度がエネルギーハーベスタにかかった際、エネルギーハーベスタがパッケージ材に衝突した時の衝撃によりエネルギーハーベスタの梁部分が破断するおそれがある。そこで、パッケージング内部にスロープ形状を施し、エネルギーハーベスタの梁部に局所的な負荷がかからないようにした構造を検討した。また、パッケージング上下に緩衝材を配置し、エネルギーハーベスタとパッケージングが衝突した際の衝撃を和らげる構造を検討した。



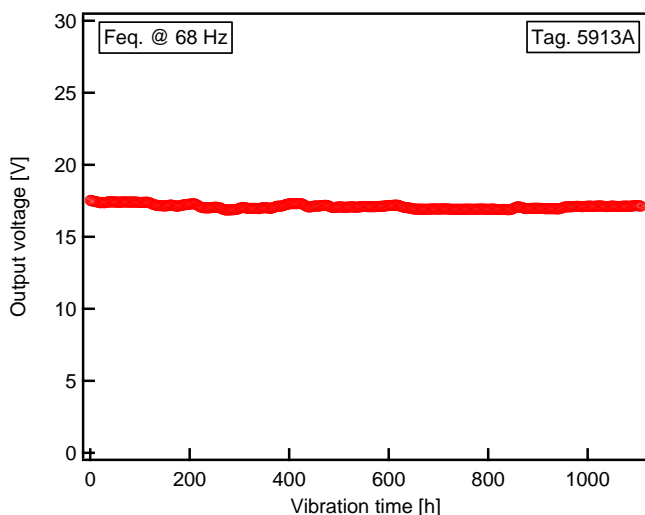
パッケージング形状の概略図を以下に示す。



緩衝材の候補として、以下の3つを評価した。

材質名	製造元	引張強度(MPa)	伸び(%)	ヤング率(kPa)
ハイパーゲルシート30	(株)エクシール	1.7	760	500
α ゲル(θ -5)	(株)タイカ	1.17	710	119.5
α ゲル(θ -7)	(株)タイカ	0.23	480	37.5

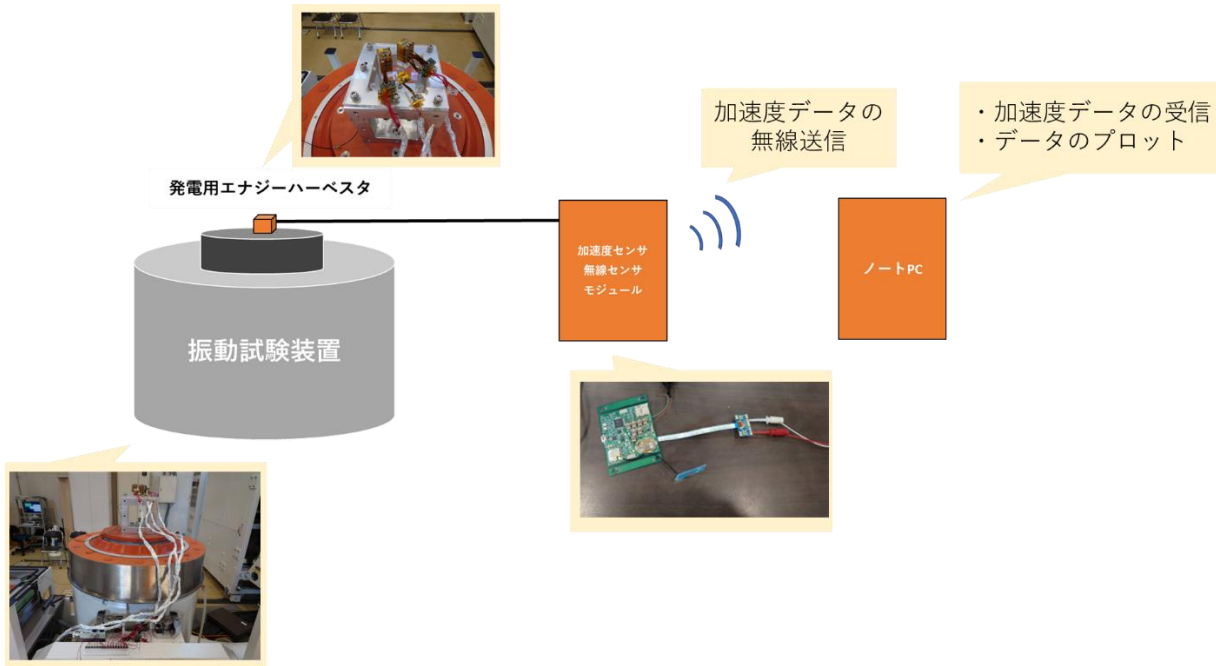
結果として、いずれの緩衝材を用いた場合でも 10G 下の振動で 1200 時間以上の連続駆動を確認した。例として、(株)エクシール社製 ハイパーゲルシート 30 を用いた場合の時間経過に対する出力電圧の偏移を下図に示す。使用したエネルギーハーベスタの共振周波数は 68Hz, V_{p-p} は 17.5V であった。



4 センサネットワークノードシステムの最適化

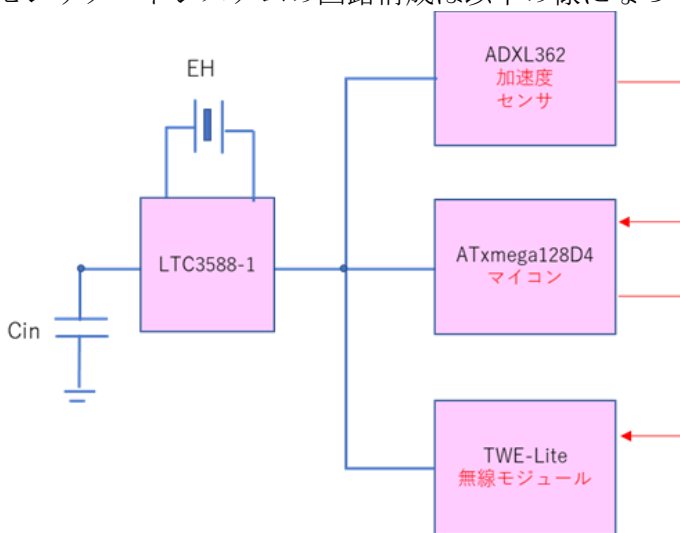
本研究にて開発したエネルギーハーベスタおよびセンサノードシステムを用い、先述の宇部興産株式会社 セメント工場で取得した実振動を再現した環境に於いて、振動発電の確認、加速度デー

データの取得と無線送信の確認を行った。実験構成と概略について以下に示す。



振動データから実振動を再現できる振動試験装置にエネルギーハーベスタを搭載し振動を加える。振動により発生した電力によってセンサノードシステムに搭載された加速度センサ、マイコン、無線モジュールを駆動させる。加速度データはマイコン制御の元無線モジュールによってノートPCへデータを送信される仕組みとなっている。振動データは先述の「宇部セメント工場 測定箇所①」のデータを用いた。

センサノードシステムの回路構成は以下の様になっている。



- ① エネルギーハーベスタの発電によって生じた電荷は、電源回路（LTC3588-1）を介しコンデンサにチャージされる。
- ② コンデンサの電圧が5Vに達した際に、電源回路が3.3Vで下段の加速度センサ、マイコン、無線モジュールへ電源を供給しそれぞれの電子機器を起動させる。
- ③ マイコン制御の元、加速度センサが取得したデータは無線モジュールを通じて、接続先の外部PC

へ送信される。

実験結果を以下に示す。

内部コンデンサ容量 Cin (μF)	初回送信までの時間 (分)	送信スパン (分)	1回あたり送信データ数
5029	102.25	20	3
3662	31.7	12.5	1

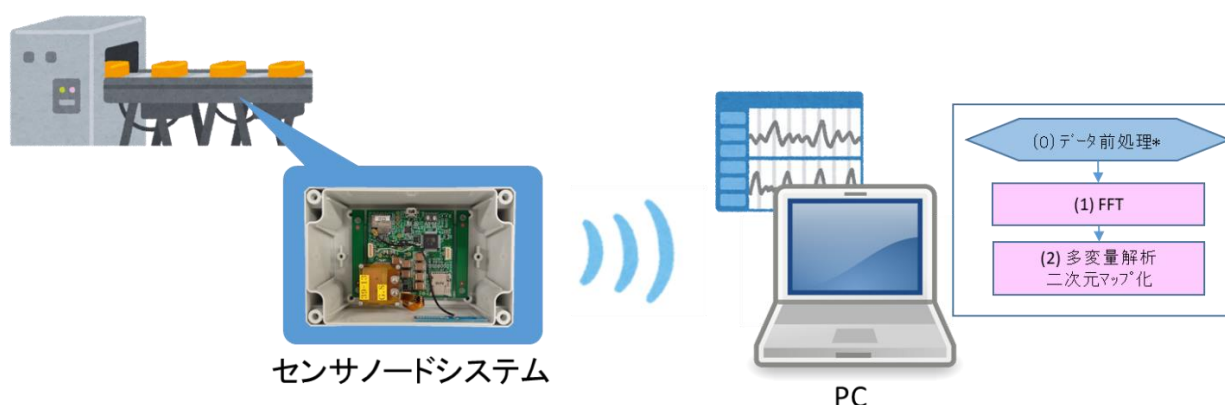
今回、センサノードシステムに搭載する内部コンデンサ容量を2種類用意し、それぞれのデータを取得した。取得データは、振動試験装置の起動開始から加速度データ送信までの時間と、初回データ送信から2回目の加速度データ送信までの送信スパン、一度の送信処理で送る加速度データ数の3つである。

この結果より、内部コンデンサ容量 Cin が大きいほど、初回送信までの時間および送信スパンは長くなるが、一度に送れるデータ数は多くなる。詳細な使用条件等は適用箇所に応じて異なるが、今回の実験よりおよそ30分で立ち上がり、その後12分間隔で加速度データが送信できるという事が分かり、十分実用に足る性能が得られた結果となった。

5 予防保全を目的としたアルゴリズムの仕様決定

プラントモニタリング用監視システムとして異常値の検出・判断が重要である。このために常時データと異常時データをビッグデータとして比較するアルゴリズムを開発する。データとして振動周波数、持続時間、不連続性・連続性、などのパラメータを定義しその組み合わせの特徴により判断する。

システムの構成としては以下のように設定した。



センサノードから送信される加速度データは、PC内で以下の処理を実施する仕様とした。

(0) 加速度データをFFT入力フォーマットへ変換

センサノードシステムから受信した加速度データをFFT入力フォーマットに変換する。

- ・ サンプル周波数 f_s [Hz]=2560
- ・ サンプル間隔 Δt [ms]= $1/f_s \approx 0.391$
- ・ サンプル点数 $N=512$
- ・ 時間窓長 T_w [s]= $N \cdot \Delta t = N/f_s = 0.2$ [s]

(1) FFT 処理

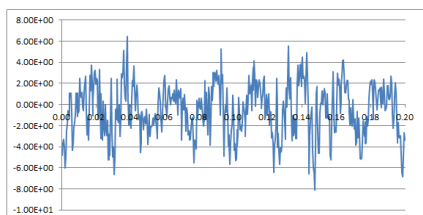
(0)で前処理された加速度データを FFT 処理する

- ・周波数レンジ $f_r[\text{Hz}] = f_s/2.56 = 1000$
- ・周波数分解能 $\Delta f[\text{Hz}] = 1/T_w = f_s/N = 5.0$
- ・分析ライン数 $L = N/2.56 = f_r/\Delta f = 200$

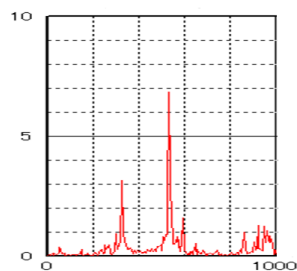
(2) 多変量解析・二次元マップ化

(1)の L 次元の FFT データを次元縮小・表示

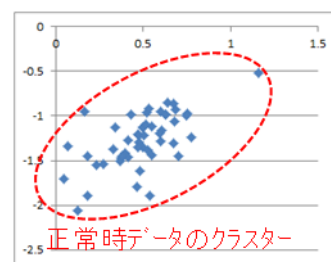
(0) ~ (2) の各処理で得られる出力データ例を以下に示す。



(0) 加速度データ



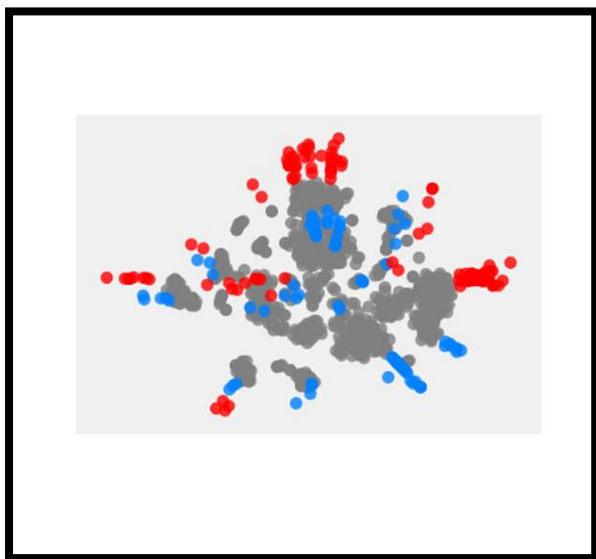
(1) FFT 処理データ



(2) 二次元マップ

6 解析プログラムの開発

参照データのマッピング処理と、経時変化データの読み込み及びマッピングを適宜実施できるプログラムの開発を行った。実際に宇部興産株のフィールドデータから呼び出したマッピングデータを以下に示す。



上図で、灰色でマッピングされている部分がフィールドデータより抽出した多変量解析データをマッピングしたものになる。赤色のデータ群は、フィールドデータとは違う周波数帯のデータ、青色のデータ群はフィールドデータとは違う加速度振幅データを含んだものになる。

このように、通常運転している際に取得できるデータは灰色でマッピングされた部分（これを参照マップと呼ぶ）に収まるが、ある一定の周期性（固有振動、加速度振幅など）が乱れると、参照マップから外れる形となり、データ監視の上で異常検知と紐づける事が可能となる。

最終章 全体統括

本研究開発において、①高耐久、高出力 EH の開発 ②コンベアプラントモニタリング用センサノードシステムの開発 ③異常検知・判断用プログラムの開発 を行った。

コロナ禍による影響で、作製したセンサノードの実地での動作確認、また作製プログラムの実地での運用は本研究期間中に実施する事は適わなかった。しかし、コロナ禍前に宇部興産(株)セメント工場から採取したフィールドデータを用いて、センサノードモジュールからの加速度データの送受信、また異常検知プログラムでのマッピング処理まで確認できたことから、本研究開発結果は、実用化レベルに達したと考える。

・アドバイザーによる講評

「現在市場に出ている異常検知用のシステムとは違い、設置場所を選ばないという点で非常に有用なセンサノードシステムが出来たと考える。 今般のコロナ禍によって、センサノードシステムの現地での運用確認には到れなかったが、本研究開発後も協力会社等にエンジニアリングサンプルの提供を行い、実績を積み、最終製品化へとつなげてほしい (toor 社(D' isum)金田氏)」

・補助事業の成果に係る事業化展開について

- 1) コロナ禍において共創パートナー会社である宇部興産の社内事情が大きく変化しており、本事業の研究開発計画において宇部興産にてのフィールド実験が困難な状況が判明した。これに対し、昨年度取得のフィールドデータの使用とウェブ上での公開でデータ使用を組み合わせることでシミュレーション検討などにより対応している。
- 2) 本事業実施中、振動構造体に関して、振動周期 1Hz 以下の超低周波振動センサを開発した。本センサは巨大建造物のヘルスマニタリング、屋内位置情報把握用途として期待できる。働き方改革や新型コロナウイルス感染症によりリモートワークが推奨される中で、超高層ビル、建築物のリモート監視システムでの活用も考慮している。