

平成26年度～28年度成果報告書

インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発 プロジェクト

インフラ状態モニタリング用センサシステム開発 ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発

平成29年3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 国立研究開発法人産業技術総合研究所
一般財団法人マイクロマシンセンター
明星電気株式会社
沖電気工業株式会社
高砂熱学工業株式会社

目 次

まえがき	3
1.研究開発の成果と達成状況.....	4
1.1 研究開発の成果	4
(1)要約(和文).....	4
(2)要約(英文)	5
1.2 研究開発の目標.....	6
1.3 各研究成果の詳細内容	7
研究開発項目①ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発.....	7
①-(1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発(国立研究開発法人産業技術総合研究所)	7
①-(2) コアモニタリング用 AIN 圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発(一般財団法人マイクロマシンセンター)	12
①-(3) コアモニタリング用センサ端末の開発(明星電気株式会社)	14
①-(4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発(沖電気工業株式会社)	18
①-(5) コアモニタリングシステムの開発(高砂熱学工業株式会社)	22
研究開発項目②コアモニタリングシステムの構築と実証実験.....	25
②-(1) 地域・病院エネルギー供給設備診断のためのモニタリングシステムの開発(高砂熱学工業株式会社).....	25
1.4 成果の普及.....	30
1.5 目標に照らした達成状況.....	31
2. 特許、論文、外部発表の状況.....	37
(1)特許(出願者、出願番号、出願地域、出願日、発明の名称、発明者).....	37
(2)論文(発表者、所属、発表内容、発表先、査読、発表年月)	37
(3)外部発表	38
(4)その他の公表	41

まえがき

都市機能を支えるライフライン系の都市インフラ(電気、ガス、上下水道、情報、エネルギー)の安全な保全是、社会・産業インフラ維持管理・更新等の重要な社会課題の一つとして捉えることができる。ライフラインは、これまで経験にもとづく非定常な保守管理が主体であり近年各種の管理システムが進化しているとはいえ、システムへの投資効果が確認されにくく、普及については緒に就いたばかりである。特に、病院、地域エネルギー供給システムなどのインフラはその公共性も高く、その中核となる発電機、ボイラ、ポンプ、医療情報機器などの駆動機器、回転機器を核としたシステムの保全是都市機能の安定化・安全化に重要な役割を担う。

今回の開発では、ライフラインの心臓部ともいえる搬送ポンプを主対象とした。ポンプを中心とした搬送システムに不具合が生じると、配管経路の末端にある空気調和機器まで搬送する能力が無くなるため、空調の完全なる停止となってしまう。他の設備機器である熱源システム、空気調和システムでは、不具合が生じても多少なりの出力が得られることから、空調の完全なる停止までは陥りにくい。つまり、設備中の最重要機器は熱媒を搬送するポンプで、これを主対象とすることの意義は大きい。ポンプの製造台数は、近年減少傾向にあるものの年間 230 万台(ターボ機械協会、2013 製造統計より)におよび、その中から軸動力が数 10kW を超える横型および立型ポンプを監視対象としても膨大な件数があり、予防保全による設備の安全な維持への効果は大きい。

そこで、本プロジェクトは、搬送ポンプの振動監視の無線化により、有線方式での制約(配線・センサ取付工事)を無くし、異常振動固有の監視周波数情報だけを収集する小型(ペットボトルキャップ)端末により、複雑かつ膨大なログ解析を必要とせず、異常検知・メンテナンス時期予測が行えるモニタリングシステムの開発を行った。本報告書においてその成果を報告する。

1.研究開発の成果と達成状況

1.1 研究開発の成果

(1)要約(和文)

ライフラインのポンプを対象とした振動監視を目的として、異常振動固有の周波数情報だけを収集する P 型(ペットボトルキャップ)端末、電池交換無しで 10 年間連続稼働するマルチホップ中継端末(M 型中継端末)、複雑かつ膨大なログ解析無しで異常検知・メンテナンス時期予測が行えるモニタリングシステムの開発と予備的実証実験を行い、以下の結果を得た。

①ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発

(1)コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発：振動発電だけで、ポンプの異常診断を行うための鹿威しセンサデバイスを開発した。超低消費電力アナログ回路、高圧電材料 ScAlN を用いた振動発電センサデバイス、振動発電に特化した高効率整流回路等を開発し、振動発電による電力から無線送信を行うことで、被センシング対象の振動レベルを検知可能な自立動作を実証した。

(2)コアモニタリング用 AlN 圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発：AlN センサデバイス量産化を目的として、低周波振動センサ(振動発電センサ)及び高周波振動センサの試作開発を行い、P 型端末へ供給を開始した。また、高耐久・低コストパッケージング技術の開発を行い、プラズマ活性化 Au-Au 接合によるパッケージングの試作と実用レベルの封止性能を確認した。

(3)コアモニタリング用センサ端末の開発：低周波振動センサ、高周波振動センサ、サーミスタ、及び無線モジュールを搭載し、設置個所の振動及び温度データを無線送信可能な P 型端末を開発した。また複数の P 型端末からの無線データを収集し、タイムスタンプ等付加情報を付加して、M 型中継端末に無線送信するセンサデータ収集端末を開発した。予備的実証実験として実証現場のポンプに P 型端末を設置し、振動データの収集と無線送受信の動作検証を完了した。

(4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発：電池交換無しで 10 年間送受信できる、低消費電力マルチホップ無線ネットワークシステムの開発を行った。本システムを 10 年間動作させるためには、同期精度を上げて省電力通信性能を強化するとともに、コリジョンを減らして再送による無駄な電力消費を減らす必要がある。クロック補正機能を持つ同期型省電力通信方式の開発及び M 型中継端末に接続するセンサデータ収集端末数の平滑化技術を開発し、160 μ W 以下の消費電力を実現し、CR123A 型電池 2 本で 10 年間連続動作する見通しを得た。

(5)コアモニタリングシステムの開発：鹿威しセンサデバイスの開発と同時進行させるために、鹿威しセンサデバイスの疑似データを生成する信号発生器「鹿威しエミュレータ」を開発した。それらを用いて、ポンプの振動データを収集し、起動停止の判定などデータのフィルタリング、異常検知のロジックならびに保全までの余裕時間の算出方法を纏めた。これらの仕様に基づき、データ収集からフィルタリング、異常検知を行うコアモニタリングシステムの試行版を開発した。

②コアモニタリングシステムの構築と実証実験

(1)地域・病院エネルギー供給設備診断のためのモニタリングシステムの開発：機械室が 2 つの階にある病院と大型機器が設置されている地域熱供給の 2 施設を実証実験に選定し、既存の振動加速度ピックアップを用いてポンプの振動特性を収集した。病院施設では、立型ラインポンプのモニタリングに好適な位置としてモータスツールを特定した。地域熱供給施設では、横型渦巻きポンプのモニタリングとしてポンプ本体とモータの軸受け部を特定した。これらの施設にて、P 型センサ端末試作のシステムを構築した。

(2)要約(英文)

①(1) Development of Sensing and Power-Generating Devices for Core Monitoring: A tipping bucket sensor device (TBS) was developed for conducting fault diagnostics of pumps using only vibration-based generator. We developed an ultra-low power analog circuit; a device that harvests energy from vibrations using ScAlN, a new material with high piezoelectric properties; and a high-efficiency rectifier circuit specifically designed for the vibration-based generator. Self-sustaining operations for detecting vibration levels of a sensing target were verified through wireless transmissions powered by the vibration-based generator.

(2) Development of a Wafer-Level Packaging Technology for AlN Piezoelectric Devices Used in Core Monitoring: With the objective of mass-producing AlN piezoelectric devices, we developed prototypes of a low-frequency vibration sensor (power-generating device) (LVS) and a high-frequency vibration sensor (HVS). Thus, we started providing the sensors to a P-type node (plastic bottle cap size) manufacturing.

(3) Development of Sensor Nodes for Core Monitoring: We developed the P-type node equipped with a LVS, a HVS, a thermistor, and a wireless module, enabling wireless transmission of vibration and temperature data for the installation point. A sensor data collection node was also developed for collecting wireless data from a plurality of P-type nodes and for wirelessly transmitting this data to an M-type relay node after adding a time stamp and other information.

(4) Development of a Network System for Core Monitoring: We developed a low-power, multi-hop wireless network system capable of transmitting and receiving data for ten years without battery replacement. To ensure the system could operate for ten years, we developed a time-synchronized power-saving communication method with a clock-correcting function, and a smoothing technique for the number of sensor data collection nodes connected to the M-type relay node.

(5) Development of a Core Monitoring System: We developed a tipping bucket emulator, which is a signal generator that generates pseudo data for TBSs to simultaneously develop and improve the TBS. Using this simulator, we collected vibration data for pumps and established data filtering such as determinations for starting and stopping pumps, and fault detection logic including for calculating the time remaining until maintenance is required.

②(1) Development of a Monitoring System for Diagnostics on District and Hospital Energy Supply Facilities: We selected two facilities for verification tests, including a hospital having equipment rooms on two stories, and a district heat supply facility provided with large machinery, and collected vibration characteristics of pumps using conventional acceleration pickups. A system with prototype P-type sensor nodes was constructed at each of these facilities.

1.2 研究開発の目標

今回の開発では、都市ライフラインの心臓部ともいえる搬送ポンプを主対象としている。ポンプを中心とした搬送システムに不具合が生じると、配管経路の末端にある空気調和機器まで搬送する能力が無くなるため、空調の完全なる停止となってしまう。他の設備機器である熱源システム、空気調和システムでは、不具合が生じても多少なりの出力が得られることから、空調の完全なる停止までは陥りにくい。つまり、設備中の最重要機器は熱媒を搬送するポンプで、これを主対象とすることの意義は大きい。ポンプの製造台数は、近年減少傾向にあるものの年間 230 万台(ターボ機械協会、2013 製造統計より)におよび、その中から軸動力が数 10kW を超える横型および立型ポンプを監視対象としても膨大な件数があり、予防保全による設備の安全な維持への効果は大きい。

また、モニタリングシステムにはクラウド利用型のネットワークシステムを構築し、都市インフラである熱エネルギーの供給施設、災害時の防災拠点ともなる病院施設など施設群を実証試験する。地域エネルギー供給設備では、設備機器容量が大型で振動発電用の加振力も十分に獲得できる。しかし、大容量の電動機やインバータ機器が多数設置されていることから、ノイズ等による無線通信への影響、受信不良によるデータ欠測が課題である。実証実験では、これらの施設環境に対してデータサンプリング、データ伝送、監視が確実に実行されることを検証する。一方、病院施設では、機械室が分散し(熱源機械室、空調機械室、医療用ユーティリティ機械室)、機器容量が中小規模、かつ振動強度が小さい。このため鹿威しセンサデバイスからのパルス出力の時間間隔が、通常時において 1 時間に数回程度と想定され、監視に必要な十分なデータが得られるかが課題である。これらから、開発システムの普及展開を実現させるには、両特質をもつ施設での実証が有意義である。

このシステムを普及させるためには、設置コストを含めポンプ 100 ヶ所程度を常時モニタリングできるシステムとして数百万円程度に抑える必要がある。また、設置環境が暗所・消灯の場合もあり、安定的に光発電を行うことができないため、振動発電だけの発電量で自立動作し、限られたデータ量でモニタリングを可能にする低コストの端末が求められる。本プロジェクトで開発した圧電 MEMS 発電型振動センサと鹿威し(蓄電キャパシタの電力が閾値を超えるとデータ送信する)回路の組み合わせたセンサ端末(P 型端末)は、ポンプの異常振動の周波数領域に合わせて MEMS をアレー化することで周波数変化および強度変化を検知可能で、ペットボトルサイズ(直径 30mm)に小型化することができる。このサイズであれば、振動センサのピックアップと同様の大きさであることから、設置場所の制約も小さく、異常を捉えやすい場所に固定することができる。この端末(無線モジュールを含む)は、1 個あたり数千円程度での製品化を目指して、開発と現場実証を進める。

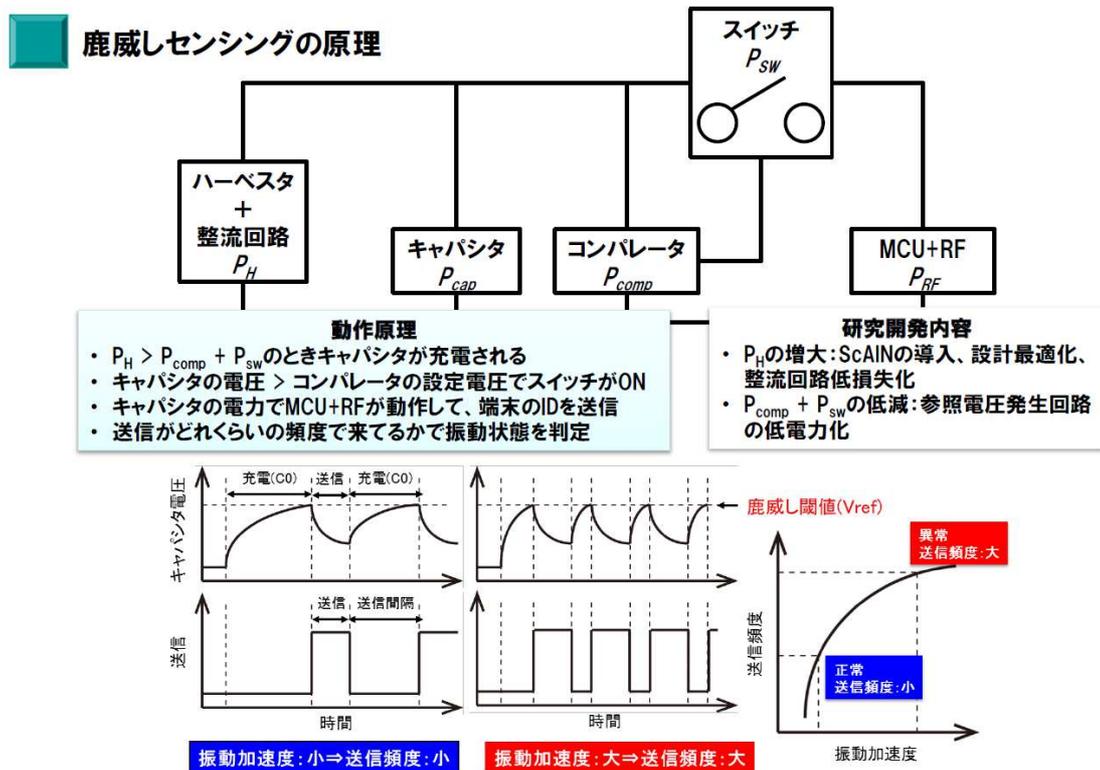
また、モニタリングシステムの設置環境は、コンクリートの壁、鉄扉、金属配管、大型機器等による通信障害物も多く、センサ端末とモニタリングシステムの親機間を、データ欠損なく送受信することは困難である。さらに、設備の更新によるレイアウト変更によっても電波環境が変化することから、マルチホップによる中継が必要となる。本プロジェクトでは、30m の通信距離を確保しつつ、マルチホップ通信を低消費電力化するための技術として、高精度な時刻同期技術、データ通信の再送を伴わない衝突回避制御方式を開発することで、電池だけで 10 年動作し、設置が容易な小型マルチホップ中継端末及びそれを用いた高信頼性ネットワークの構築と実証を実施する。

1.3 各研究成果の詳細内容

研究開発項目①ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発

①-(1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発(国立研究開発法人産業技術総合研究所)

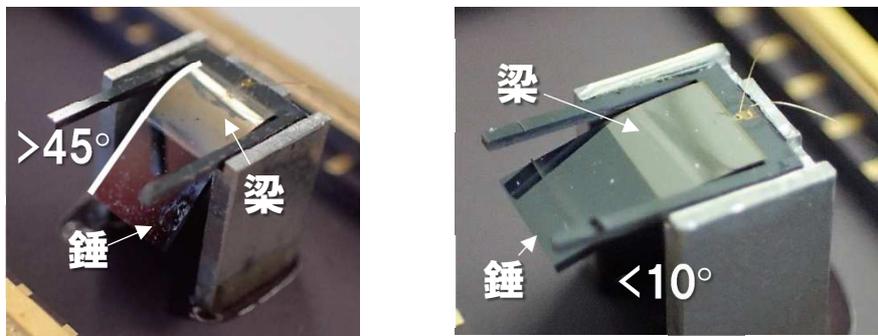
図①-(1).1 に示すように、当該コアモニタリングシステムの中核をなす自立型振動センサ端末の開発を行った。我々の振動センサ端末は振動発電デバイスを搭載し、被センシング対象から発せられる振動エネルギーを電気エネルギーに変換することで動作する。変換された電気エネルギーは整流された後にキャパシタに充電され、無線送信に関わる電力として使用される。すなわち、入力される振動レベルが大きければ、より頻繁に無線送信が起り、反対に入力される振動レベルが小さければ無線送信頻度が下がることとなる。したがって、無線送信頻度を時系列で追跡することで、被センシング対象の振動レベルを検知することができる。我々はこの検知システムを“鹿威し方式”と呼んでいる。このような振動センサ端末の開発では、振動発電と振動センサの機能を兼ね合わせた振動発電センサデバイスの高効率化を含む発電効率の向上、MCU や RFIC を含む電気回路の超低消費電力化が重要な開発項目となる。



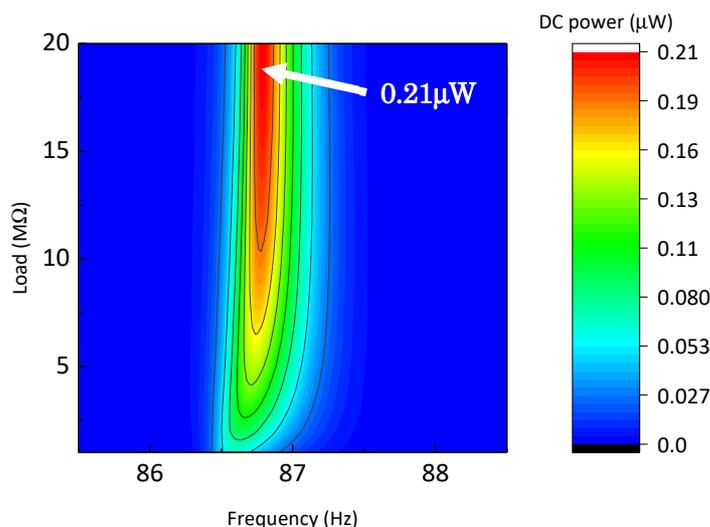
図①-(1).1 鹿威し方式の概略図

初めに、端末に電力を供給する振動発電センサデバイスの開発を行った。振動発電用の圧電材料として代表的な PZT あるいは AIN を用いて、半導体 MEMS 技術により圧電片持ち梁を試作した。試作された片持ち梁の発電特性を評価したところ、ポンプが発する振動と同等程度の振動加速度の調和振動において出力電圧と発電量がそれぞれ直流で 1V、0.1 μ W を達成した。さらに H26 年度に行われた調査により、AIN に比べて 5 倍程度大きな圧電定数を持つ ScAlN 薄膜が振動発電デバイスに有効であることが示唆されたため、これの適用を試みた。ScAlN は極めて大きな圧縮応力を本質的に有する材料であり、片持ち梁型の振動発電デバイスを実現する上で全体の応力制御が課題である。そこ

で我々は、AIN を併せて用いる AIN/ScAlN 積層構造を考案した。AIN は圧電材料であることはもちろんのこと、引張応力と高い絶縁性能を有し、ScAlN と結晶構造が類似しているため ScAlN と併せて用いる応力緩和材として理想的な材料である。AIN を ScAlN の下部であって下部電極の上部に挿入する構造を試作したところ、熱酸化膜/下部電極/圧電材料/上部電極の多層膜を 4 インチ基板上に成膜した後の基板反りが、AIN 応力補償層のないものは $173\mu\text{m}$ であったのに対し、応力補償層を挿入したものは $3\mu\text{m}$ にまで低減させることに成功した。この構造を用いて試作された ScAlN 振動発電センサデバイスは図①-(1).2 に示すように片持ち梁の垂れ下がりが大きく改善された。振動発電の出力特性を図①-(1).3 に示す。整流後の直流出力として、電圧 2.1V、発電量 $0.21\mu\text{W}$ を達成した。これにより AIN 振動発電センサデバイスに比べて発電量が増強しており、ScAlN が振動発電に対して有用であることを明らかにした。また、AIN 応力補償層のないものに比べて発電量は 66% 増強しており、ScAlN の強力な圧縮応力を効果的に緩和する手法を世界に先駆けて開発した。ScAlN 薄膜は産総研九州センターで発見された圧電材料であり¹⁾、産総研の内部技術である優位性を生かし世界に先立って振動発電デバイスへの搭載が達成された。



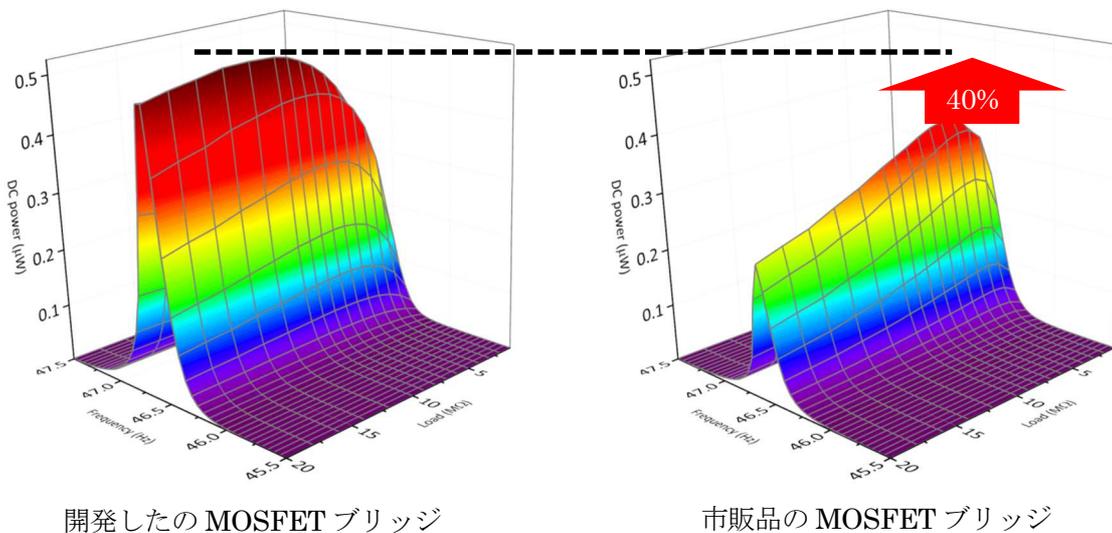
図①-(1).2 AIN 応力補償層がない場合(左図)とある場合(右図)における片持ち梁構造の変形具合の様子(応力補償層がない場合は、ScAlN の圧縮応力の影響で梁が 45 度以上下方に垂れ下がっている。一方、応力補償層がある場合は、垂れ下がりが 10 度以内に抑制された。)



図①-(1).3 試作された ScAlN 振動発電センサデバイスの発電量の評価結果を示す等高線図(グラフの横軸は印可した振動の周波数、縦軸は接続した負荷の抵抗値を表している。)

回路に供給可能な電力量を向上させ端末の自立動作を達成するためには、振動発電センサデバイス

の性能向上と同時に整流回路の高効率化も極めて重要である。そこで、圧電材料を用いた振動発電に特化した整流回路の開発に着手した。整流回路にはいくつかの方式がすでに提案されており、最も基本的なダイオードブリッジ回路よりも MOSFET を用いたブリッジ回路が高効率である。さらに電力を消費して効率を改善する方式もあるが、当該振動発電の場合は発電量が極めて少ないために効率を上昇させることができない。そこで本研究開発では、MOSFET のパッシブブリッジ回路を開発することとした。すなわち、MOSFET を振動発電センサデバイスの出力に適合させる。しかしながら、振動発電センサデバイスの共振時の等価回路がモデル化されておらず回路シミュレーションを行うことができなかった。そこで、試作した実際の振動発電センサデバイスの共振時の負荷特性を計測し、電流源、キャパシタ、絶縁抵抗からなる等価回路モデルによるフィッティングで回路定数を決定したところ、等価回路モデルと計測結果が十分一致した。求めた等価回路を用いて MOSFET ブリッジ回路のシミュレーションを行い、効率が最もよくなる MOSFET を設計した。ブリッジ回路のゲートに振動発電センサデバイスの出力を直接接続する回路構成を用いて、MOSFET のチャンネル幅を $2500\mu\text{m}$ 以上とすることで高電圧、低電流の AIN 系圧電振動発電デバイスに特化した高効率整流回路を設計した。設計された整流回路を Silterra 社の $0.18\mu\text{m}$ テクノロジーにより試作したところ、従来品の MOSFET を用いた場合に比べて出力電圧が 40% 増大した(図①-(1).4)。そして、開発された整流回路を振動発電デバイスに接続し直流出力電圧を計測したところ、 0.5m/s^2 の振動加速度の振動を印可によって 2.1V 、 $0.51\mu\text{W}$ の発電量を得た。



図①-(1).4 開発した MOSFET ブリッジを用いた AIN 振動発電センサデバイスの発電量

発電性能の向上に加えて鹿威し回路の省電力化にも取り組んだ。従来品を用いた回路構成では、振動発電センサデバイスからの電力のみで回路を駆動することは不可能であった。中でもコンパレータ並びに参照電圧発生回路の消費電力が支配的であるため、これらを独自開発することで省電力化を試みた。コンパレータにおいては、バイアス電流を大幅に削減し省電力化を行った。これにより応答性が失われるが、当該コアモニタリングシステムでは特段高速の応答性が要求されないために問題は生じない。参照電圧発生回路においては、ドレイン電流がほぼ流れない MOSFET の弱反転領域を利用し消費電力の削減を行った。これらの回路は、端末の小型化を考慮し整流回路と鹿威し回路をワンチッ

プに集積化可能なように、整流回路と同じ Silterra 社の 0.18 μm テクノロジーを用いて試作した。その結果、コンパレータにおいては従来品に比べておよそ 1/10 に、参照電圧発生回路においてもおよそ 1/30 に省電力化が達成された。これにより、回路の駆動電圧と待機時の消費電流は 1.6V、74nA となり、図①-(1).5 に示すように消費電力としてはおよそ 0.12 μW にまで省電力化された。これは、上述した ScAlN 振動発電デバイスと高効率整流回路の供給できる電力量を下回っており、端末の完全自立動作への見通しが得られた。

開発した AlN 振動発電センサデバイスと鹿威し回路を組み合わせ、端末の動作実証を行った。その結果、実際のポンプと同等程度の微弱な振動から発電した電力を用いて無線送信を行うことに成功した。図①-(1).6 は動作試験における鹿威し回路中の蓄電キャパシタの電圧の時間変化を示したものである。蓄電キャパシタには振動発電デバイスで発電された電力が充電される。電圧が一定のしきい値電圧(1.55V)に達したときに、充電された電力を消費して MCU 並びに RFIC が駆動し無線送信を行うため、電圧が下降している様子が分かる。試験では 40bit のペイロードを有するデータ列の送信に成功した。図中の実線と点線はそれぞれ印可している振動の加速度が 0.60、0.45 m/s^2 のものを示しており、振動加速度の違いにより送信頻度が異なることが分かる。これは、振動発電デバイスと鹿威し回路を組み合わせたシステムによって当該研究開発が目指すモニタリングシステムの基本的な動作が実証されたことを示している。

鹿威し回路消費電力 (μW)

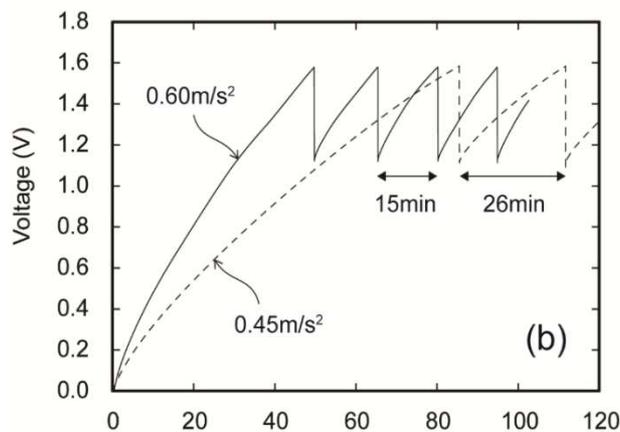
部品	開発品	従来品
コンパレータ	0.021	0.18
BGR	0.072	2.0
その他	0.026	0.026
鹿威し消費電力	0.12	2.2

図①-(1).5 鹿威し回路の消費電力振動発電センサデバイスの発電量

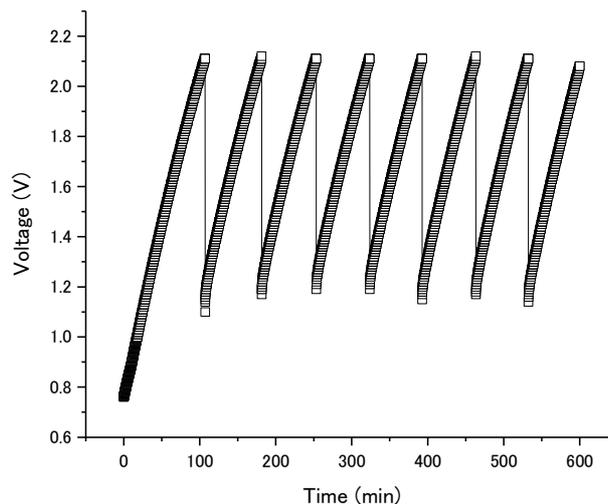
前述のシステムでは参照電圧の発生に電池を使用した。参照電圧発生に必要な電力は極めて小さく計算上その寿命は 10 年を大幅に超えるが、電池は端末の不具合を引き起こす要因の一つになる。そのため長期信頼性を確保するためにも電池を搭載しない完全自立型であること望ましい。そこで、開発された ScAlN 振動発電センサデバイス、超低消費電力の参照電圧発生回路を搭載した完全自立の端末システムを組み上げて試験した。その結果、図①-(1).7 に示すように振動周波数 86.8Hz、振動加速度 1.0 m/s^2 の振動を印可時におよそ 70 分間隔で無線送信が発生し、完全自立動作の実証に成功した。今回の実証では、印可している振動加速度が 1.0 m/s^2 と電池を使用した実証時よりも最低駆動振動加速度が 2 倍ほど大きい。これは、電源電圧以下の領域での誤動作を防ぐために無線送信が行われるトリガーとなるしきい値電圧が高めに設定されているためである。これは開発したコンパレータの機能改善で回避可能である。また送信間隔を 60 分以内にするには、無線送信に関わる消費電力を削減すれば良い。無線通信の搬送波周波数として、到達距離と使用環境を勘案し 920MHz 帯を選定している。

ところが都内の熱供給施設で無線送信試験を行ったところ、無線振動センサ端末とデータ収集端末間においては受信強度に余裕があることが明らかとなった。今後、さらに端末の消費電力を削減し、端末の小型化あるいはより短い送信頻度が求められる場合には、搬送波周波数を 2.4GHz 帯に変更することで、消費電力が削減できる可能性が示唆された。

本研究開発では、振動発電センサデバイスを用いて超低消費電力の自立型無線振動センサ端末を開発した。入力される振動の振動加速度の違いにより無線送信の頻度が変化し、相対的な振動レベルを検出できる。電池寿命が十分に 10 年以上となる超低消費電力の端末構成において、 0.45m/s^2 以上振動加速度を持つ振動が印可されると端末は無線送信を開始する。振動周波数が 100Hz 以下の領域における振動加速度 0.45m/s^2 の振動は極めて微弱な振動であり、ポンプに限らず様々な環境振動に対する振動センサ端末として、インフラの維持管理等への適用が期待できる。



図①-(1).6 AIN 振動発電デバイスを接続した鹿威し回路の動作試験における、蓄電キャパシタの電圧の時間変化



図①-(1).7 ScAlN 振動発電デバイスを接続し、超低消費電力参照電圧発生回路を搭載した完全自立型の鹿威し回路の動作試験における、蓄電キャパシタの電圧の時間変化

参考文献

1) M. Akiyama, T. Kamohara, K. Kano, A. Teshigahara, Y. Takeuchi, and N. Kawahara, “Enhancement of

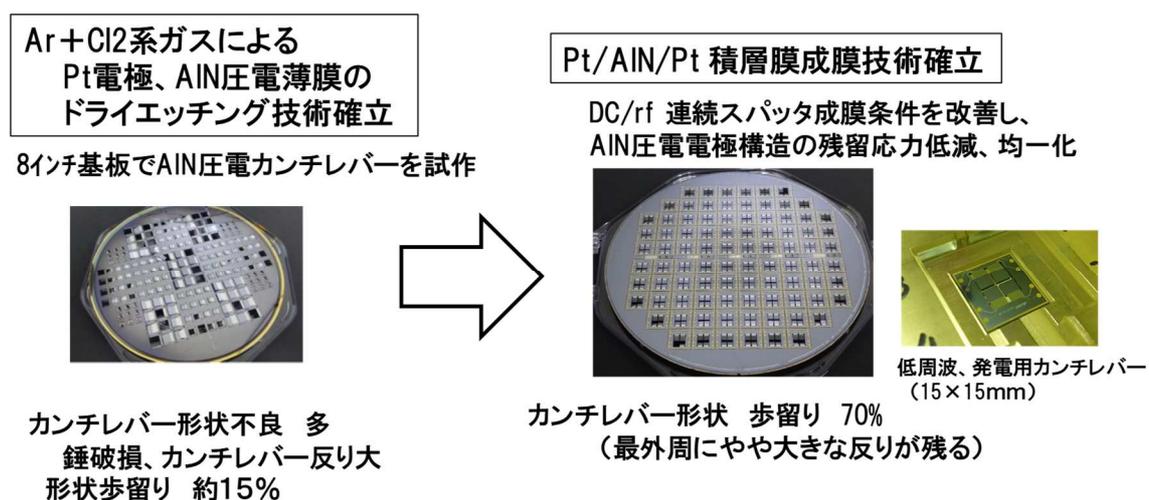
Piezoelectric Response in Scandium Aluminium Nitride Alloy Thin Films Prepared by Dual Reactive Cosputtering,” Adv, Mater. 21, pp.593-596 (2009).

①-(2) コアモニタリング用 AlN 圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発(一般財団法人マイクロマシンセンター)

AlN 圧電薄膜付 Si カンチレバー構造の振動センサデバイスの開発を行った。本開発では、数 kHz 以上の高周波振動成分の異常を検知する高周波振動センサと、低周波の主に回転成分の異常を検出する先端に錘を有する低周波用振動センサの 2 種類のデバイスについて、いずれも量産を想定し、8 インチ Si ウエハを用いた試作開発を行った。

まず、振動センサの出力特性に直結する圧電特性を左右する圧電膜の配向特性とカンチレバーの反りに影響する積層膜構造の膜応力について検討した。その結果、基板 rf パワーを変えると AlN 膜応力は大きく変化することが明らかになった。一方、積層構造の膜応力は、電極として用いた Pt 薄膜の成膜温度で制御できることがわかり、スパッタ条件を最適化することで、AlN 膜の結晶性が高く、積層膜構造の膜応力も小さく、ウエハ面内分布も少ない成膜条件を見いだすことが出来た。その圧電積層構造の圧電特性は、圧電定数 d_{31} で目標 1.0 以上の 1.14 pm/V を得られた。

AlN 圧電薄膜付 Si カンチレバー構造の振動センサデバイスは、パターン設計は産総研が実施し、マイクロマシンセンターが、8 インチ SOI ウエハを用いて作製した。この圧電カンチレバー加工技術開発の過程で、圧電積層構造のパターンを形成するためにオールドライエッチング技術及び、前述したようにカンチレバーの反りをウエハ面内で揃える AlN 圧電薄膜の 8 インチウエハ面内応力制御技術を確立し、良品歩留り 70%以上を達成する加工技術を獲得した。圧電構造の電極には、Pt 薄膜を用いているが、通常の Pt ドライエッチングで使用される Ar イオンミリング法では選択比が取れないので、塩素ガスを添加したリアクティブなドライエッチング条件を確立した(図①-(2).1)。



図①-(2).1 AlNカンチレバー試作ウエハ・デバイス例

試作した低周波用振動センサを産総研、明星電気に提供し、発電特性の基本動作を確認し、H28 年度から開始した、0 次実証実験用の端末に搭載され動作実験を行った。

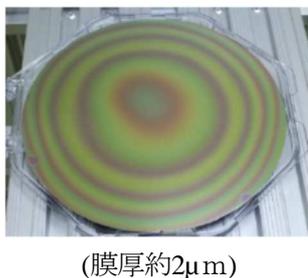
高周波振動センサも試作開発を行い、センシング動作を確認した。高周波センサも低周波の発電デ

バイスと同じプロセスで加工を行ったが、共振周波数特性を上げるために、低周波発電デバイスでは、レバーを形成する活性層の厚さは $10\mu\text{m}$ の SOI 基板を用いているが、高周波センサは、活性層厚 $50\mu\text{m}$ 前後の SOI 基板を用いた。また、振動特性の検討用のマルチビーム構造の振動センサも設計され、同一のウエハから加工されている。

今後、脆弱な構造体を有する圧電カンチレバー専用の洗浄技術及び面内応力制御技術の精密化により、さらに歩留りの向上、低コスト化を図る。

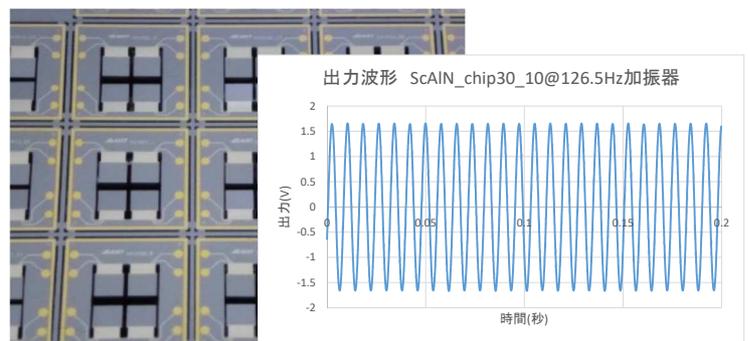
また、センサ出力の向上のために、AIN 膜に Sc を添加した ScAlN 膜用の成膜装置を導入して成膜実験、カンチレバー構造の加工技術にも取組んだ。ScAl 合金ターゲットは ScAlN 膜の圧電特性が最も高くなる濃度近傍の Sc44%組成を用いた。成膜条件の検討では、AIN 成膜実験で得られた知見を活かし、配向性を制御することにより、AIN の 3 倍程度の圧電得性 ScAlN 膜を形成することが出来た。膜厚の分布は装置制限により、ターゲットのサイズが AIN 用の装置よりも小さいことから、面内膜厚の分布が 14%とやや大きい、専用のターゲットを導入することにより、改善できると考える (図①-(2).2)。また、圧電特性も、EDX 分析により Sc の組成比約 35%で成膜されていることが確認され、合金ターゲットの 44%組成よりも低いことから、成膜条件の改善によりさらなる向上が期待される。

この ScAlN 膜を有する、圧電カンチレバー(発電デバイス)の試作開発も実施した(図①-(2).3)。詳細評価は、今後実施するが、振動による出力特性も確認できた。基本的なプロセスフローは AIN 圧電カンチレバーと同じであるが、難エッチング材料の ScAlN のドライエッチングを可能にするために、Ar+Cl₂ を用いたリアクティブドライエッチング条件を再度検討し、調整した。



(膜厚約 $2\mu\text{m}$)

図①-(2).2 ScAlN成膜8インチウエハ



図①-(2).3 ScAlN圧電カンチレバーと出力例

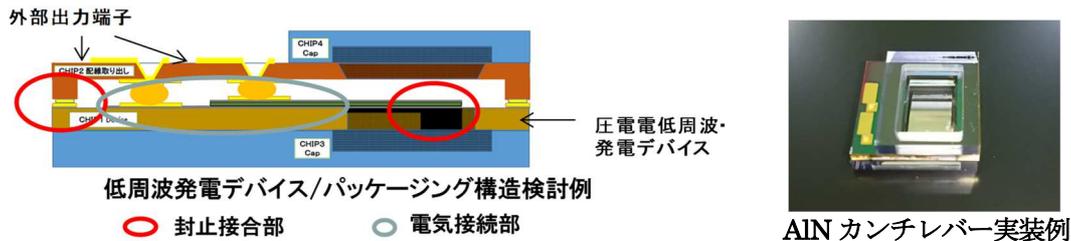
脆弱なカンチレバー構造を有する AIN 圧電薄膜付 Si カンチレバー振動センサデバイスを実用化するには不可欠な、高信頼性、且つ低コストなパッケージング技術開発を進めた。

低コスト化のためには、封止部と電気接続部を同時に接合・接続する方法を念頭に検討を行った。まず、簡易的な実装実験用デバイスを用いて、幾つかの材料/構造の接合特性を評価し、プラズマ活性化 Au-Au 接合方法により、圧電デバイスデバイスに熱的なダメージがほとんど無い 200°C の低温でも、 100Mpa と十分な接合強度で、リークレートが $10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以下の良好な封止特性が得られることを確認した。また同様に電気接続部は、Au スタッドバンプの塑性変形を用いることにより、プラズマ活性化 Au-Au 低温接合でも低抵抗な電気接続が得られることを確認した。本パッケージング技術を用いて、実際の圧電デバイスへの適用をチップレベルで実施して、寄生容量が大きい等の課題があることも明らかになった(図①-(2).4,5)。

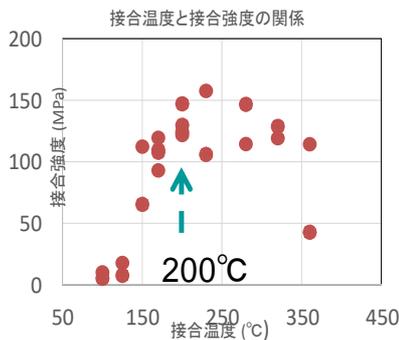
この課題に対応するとともに、さらなるセンサ特性の向上を狙い、大気圧によるダンピングによる

振動特性の劣化防ぐ目的でガラス基板を用いた真空封止構造の開発に着手した。封止シール部と同じ接合構造で電気接続を行うことにより、確実な真空封止を実現することを考え、キャップ部の加工法、構造を新たに設計した(図①-(2).6)。本構造は、信頼性の高い真空封止が可能で、デバイス性能の向上にも寄与するとともに構造が単純化されたので低コスト化にも寄与すると考えている。

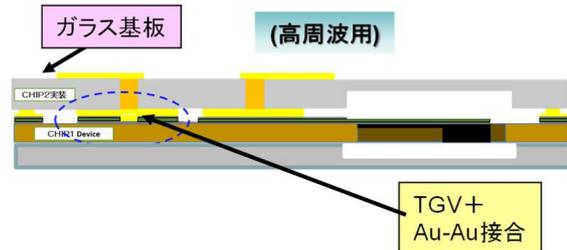
このプラズマ活性化 Au-Au 低温接合は、容易にウエハレベルパッケージングに展開することが可能であり、簡便で低コストな接合技術と言える。今後は、実際のカンチレバーセンサを用いて、実装実験を行い、端末の実証実験用デバイスとして提供する予定である。



図①-(2).4 ウエハレベルパッケージ構造



図①-(2).5 Au-Au接合温度と強度の関係



図①-(2).6 改良ウエハレベルパッケージ構造

①-(3) コアモニタリング用センサ端末の開発(明星電気株式会社)

P型センサ端末の試作と耐久性評価

背景と必要性

予知保全のために回転機器に設置されているモニタリングセンサは、データ伝送および電源供給のため有線接続する必要かつ工事費用とセンサの点検費用が大きな客先の負担となっていた。そのため設置工事の簡易化、配線工事の低減、センサメンテナンスコスト低減した小型パッケージ、無線自立発電動作、耐久性の振動センサが必要となった。

課題

- ・回転機器の予知保全に有効な高周波振動レベル計測が必要。端末の共振周波数を高くするためにシミュレーションの結果 直径約35mm以下のプリント基板大きさが必要となった。そのため部品実装面積が制限される課題があった。
- ・突発事象である地震検出機能の要求があるが、自立発電の小型センサ端末では常時検出の電力を確保できずかつ小型端末には実装できない課題があった。

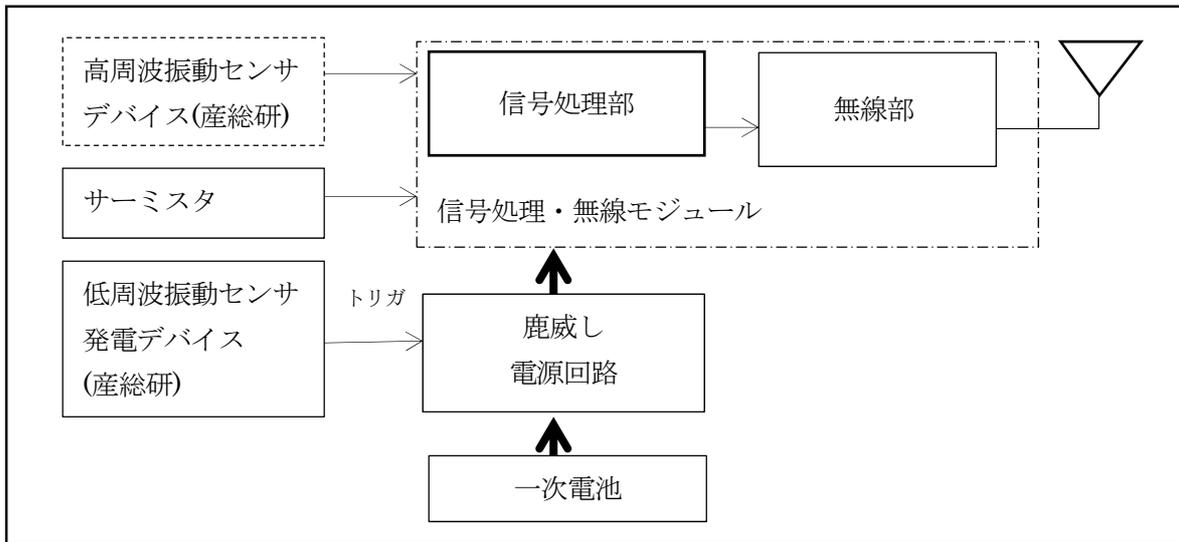
成果

- ・振動センサとサーミスタを搭載した直径30mmのP型センサ端末を開発した。

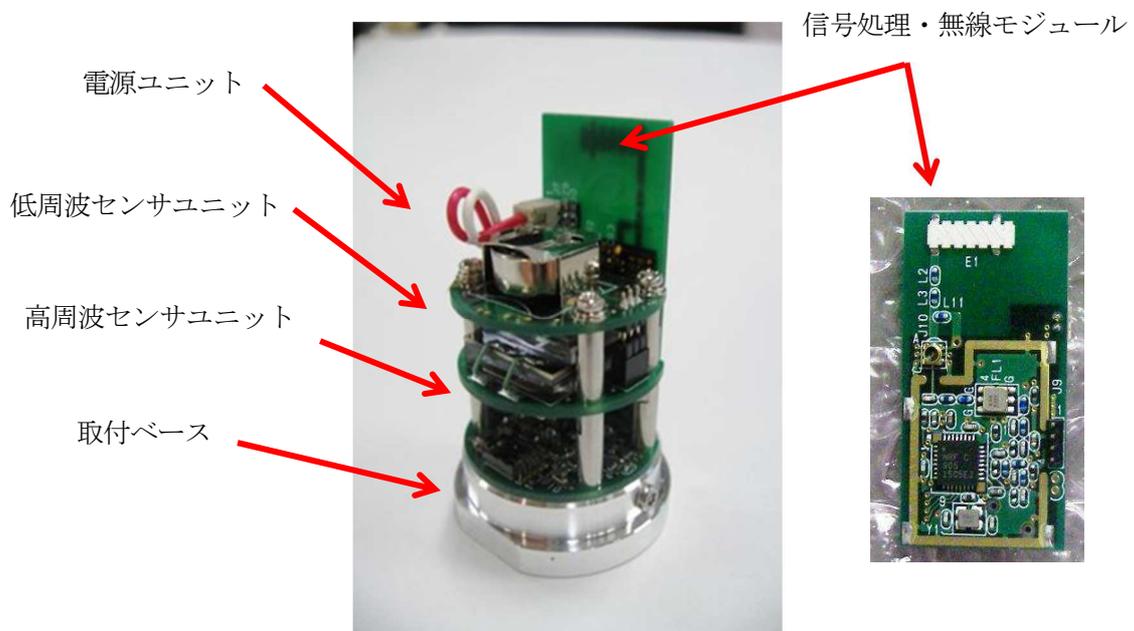
- ・突発事象の地震検出実現するために感震器(地震センサ)を接続できるセンサデータ収集端末を開発した。

(1)P型センサ端末の試作

低周波振動発電デバイス、高周波振動センサデバイス、サーミスタ、無線部を搭載したP型センサ端末(取付寸法直径30mm)を作成した(図①-(3).1、①-(3).2)。



図①-(3).1 P型端末ブロック図



図①-(3).2 P型端末内観写真

低周波振動発電のトリガーで送信動作を確認

低周波振動試験機で共振周波数35Hz低周波センサデバイス搭載のP型センサを加振周波数35Hz、加振

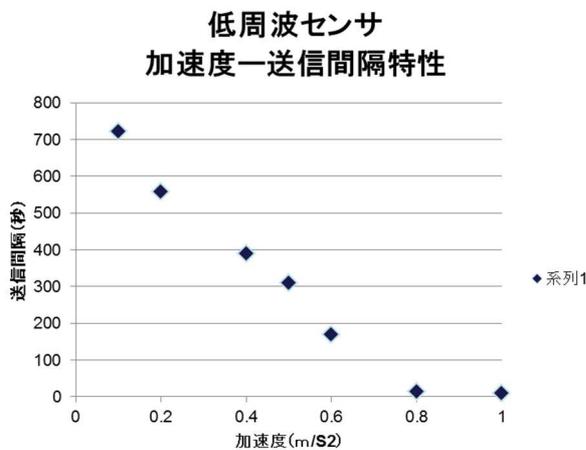
加速度 $0.1\text{m/s}^2\sim 0.8\text{m/s}^2$ で加振し、加速度変化による無線送信周期の変化を確認できた。送信間隔測定により振動加速度が推定できることがわかった(①-(3).3)。

低周波振動発電の送信動作特性を確認

低周波センサデバイスの取扱時、衝撃対策のため、低周波センサデバイスの強度改良と都内地域熱供給事業者施設のポンプ振動周波数に共振周波数を整合のため、低周波センサデバイスの周波数調整を産総研、マイクロマシンセンターにて実施し、改良センサデバイスをP型0次センサ端末に搭載して124Hz低周波センサデバイスの特性を確認した(①-(3).4)。

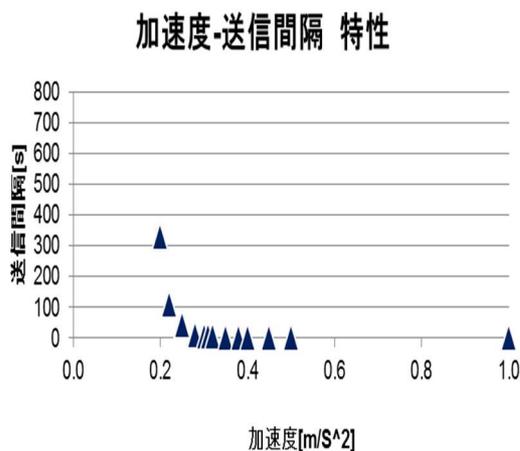
実証実験場での動作を確認

P型0次センサを実証実験場のポンプに設置して、(①-(3).5,6)センサデータ収集端末でモニターを実施し、P型0次端末の基本動作(無線送信間隔の変化と表面温度)を確認した(①-(3).7)。



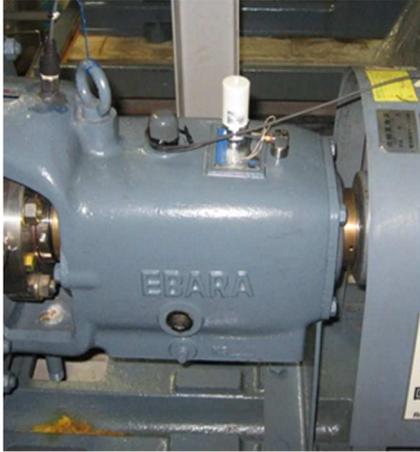
①-(3).3 35Hz 加速度-送信間隔特性

項目	加速度 - 送信間隔特性
振動試験周波数	35Hz
センサ感度	0.1m/s^2
飽和レベル	0.8m/s^2



①-(3).4 124Hz 加速度-送信間隔特性

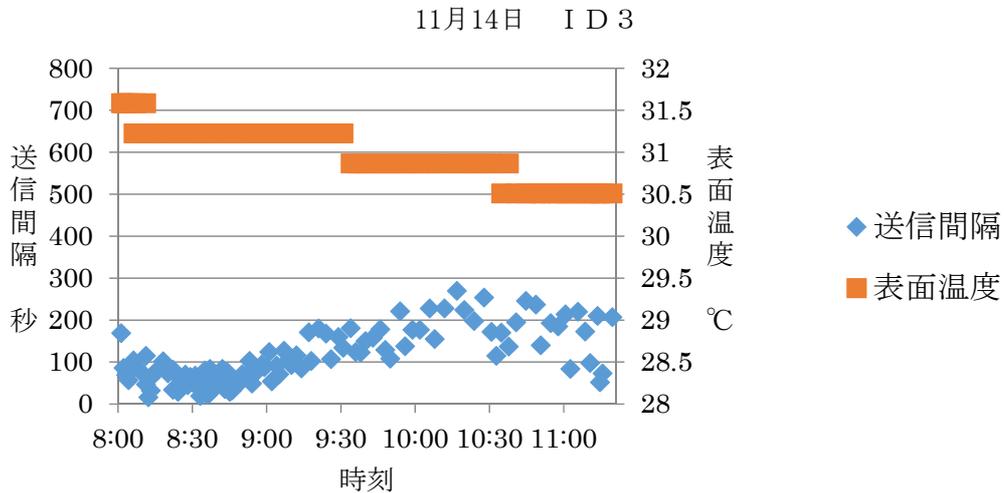
項目	加速度-送信間隔特性
振動試験周波数	126Hz
センサ感度	0.2 m/s^2
飽和レベル	0.5 m/s^2



①-(3).5 実証実験ポンプのセンサ設置状況
都内地域熱供給事業者施設



①-(3).6 実証実験ポンプのセンサ設置状況
病院施設



①-(3).7 測定データ(表面温度、送信間隔)

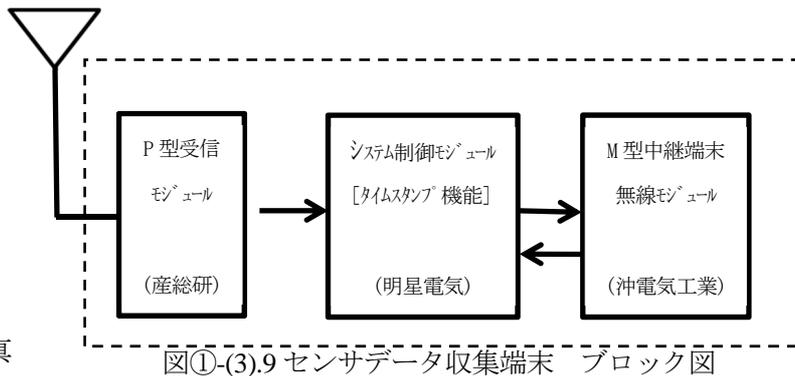
(2)センサデータ収集端末の試作

P型センサ端末から送信された(P型センサ端末ID、振動センサ、表面温度)データをP型受信モジュール(産総研)で受信し、システム制御モジュールにて タイムスタンプ(受信時刻情報)を付加し、P型センサ端末の複数台データをまとめ、センサデータ収集端末情報(送信タイムスタンプおよびセンサデータ収集端末ID)を付加して、M型中継端末(沖電気工業)に送信するセンサデータ収集端末を開発し、試作した(図①-(3).8、9)。

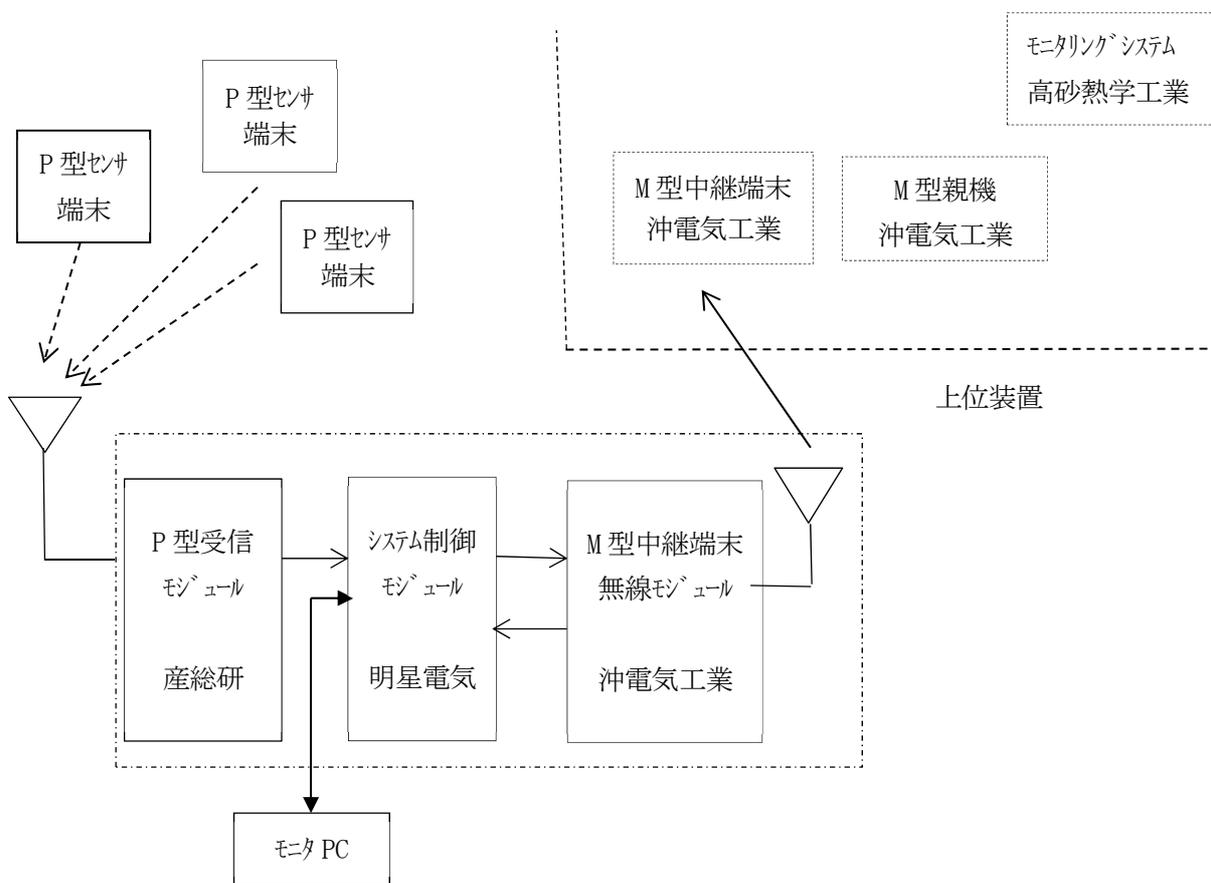
都内地域熱供給施設実証実験場にて、P型端末データがセンサデータ収集端末情報と共にM型中継端末(沖電気工業)に送信され、M型中継端末を経由して、M型親機(沖電気工業)を介して実証実験場のモニタリングシステム(高砂熱学工業)にデータが上がることを確認できた(図①-(3).10)。



図①-(3).8) センサデータ収集端末 写真



図①-(3).9) センサデータ収集端末 ブロック図



図①-(3).10 実証実験場系統図

①-(4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発(沖電気工業株式会社)

本開発では、ライフラインコアモニタリングシステム用ネットワークシステムを実現するための、無線マルチホップネットワークプロトコルスタックと無線端末の管理方式を開発する。

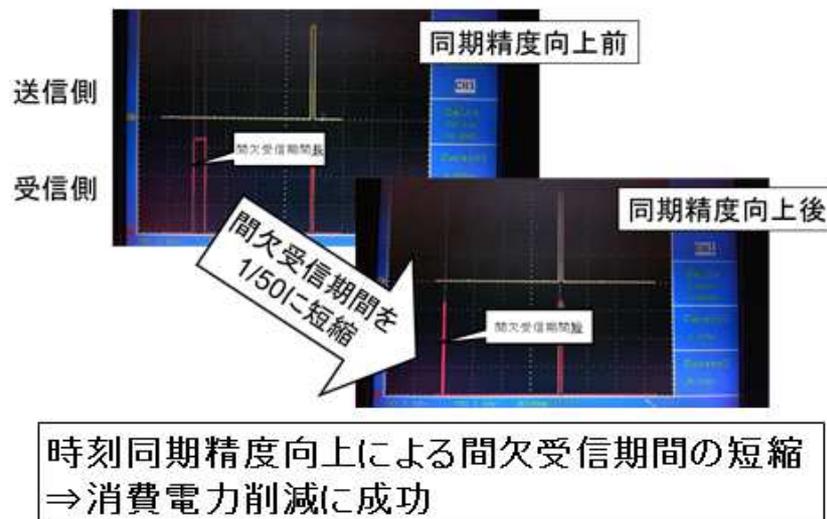
- ・時刻同期型の省電力通信方式の開発

既存の時刻同期型省電力通信方式に、クロック補正方式を盛り込んだ時刻同期型省電力通信方式を開発した。既存の時刻同期型省電力通信方式は、受信側がフレーム受信時に送信側へ時刻情報の同期ずれ幅を通知し、送信側が同期ずれを修正する方法であった。本研究で開発したクロック補正方式は、

短い間隔(同期ずれ測定間隔 10分~20分程度)で連続して通信を実施することで微細な同期ずれを測定し、その値を元に送信側と受信側のクロックの誤差を計算しクロック補正を実施する。

本クロック補正機能を追加することで間欠受信期間を100msecから2msecまで短縮しても、1時間以上の時刻同期が維持できることを確認した(図①-(4).1)。本方式を実装した評価機で消費電力を測定した結果、1時間の平均消費電力が154μWで、H28年度中間目標で設定した省電力性能で、端末消費電力160μW以下の目標値を達成していることを確認した(表①-(4).1)。

マルチホップネットワークスタックの実装に際しては、データ収集のための実装にとどまらず、実際に運用するための機能検討(M型中継端末ハードウェアに必要な機能検討、セキュリティ方式、参加認証方式)を検討し実装をした。



図①-(4).1 時刻同期精度向上による間欠受信期間の短縮

表①-(4).1 時刻同期精度向上による省電力効果

	従来 (2013年度以前)	2014年度 開発方式適応	2018年頃に開発が期 待されるHW利用
駆動電圧	3V	3V	1.8V
動作時電流	50mA	50mA	10mA
スリープ時電流	20uA	20uA	5uA
省電力 通信方式	従来の省電力通信方式 同期の高精度化および パラメタ最適化無	開発した省電力通信方式 同期の高精度化および パラメタ最適化無	開発した省電力通信方式 同期の高精度化および パラメタ最適化無
モニタリングシステムへ 適応時の平均消費電力 (1時間に1回データ収集)	2500uW	160uW	20uW
		方式適応&最適化で 1/15	ハードウェア進化で 1/8

- ・データ通信の再送を伴わない衝突回避制御方式の開発

多くの無線マルチホップネットワークプロトコルでは、通信環境を元に子ノード(本プロジェクトのネットワークではデータ収集端末に当たる)が自律的に親ノード(本プロジェクトのネットワークではM型中継端末に当たる)を選択してネットワークを構築する。よって、例えば通信環境の良い特定の親ノードに子ノードが偏るといった事態は頻繁に発生する。外部電源で動作する通常の無線マルチホ

ップネットワークではこれは問題にならない。しかし、データを中継する親ノードがバッテリー駆動かつ省電力動作をする場合、このことは課題になる。

制御情報としてすべてのデータ収集端末およびM型中継端末が持っている「周辺無線機の数」からデータ通信時のランダムバックオフの幅を算出して衝突回避をする方式を検討した。周辺の無線機数が増えると通信発生時のランダムバックオフ幅が増えるので、データ通信タイミングが集中した際の通信の衝突確率が下がるが、代わりに通信遅延が非常に大きくなる課題が発生した。

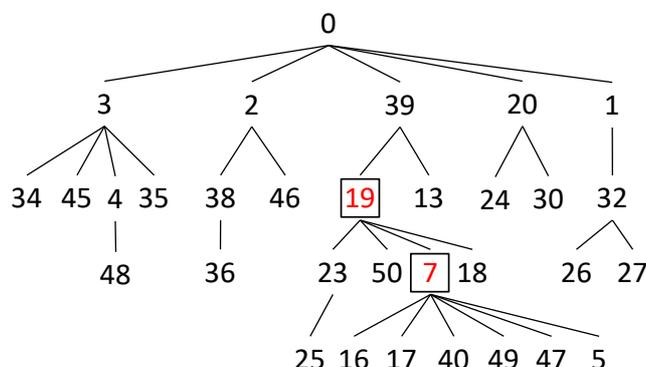
衝突回避の方式として、ランダムバックオフを入れる方法以外にも、特定のM型中継端末にデータ中継が集中しないようにする、データ収集端末の平滑化という手段がある。データ収集端末の平滑化は衝突回避以外にもM型中継端末の負荷を平滑化する効果があり、システム全体でのバッテリー交換周期を均等にするという効果も期待できる。以上のことから本テーマとしては、衝突回避制御方式としてデータ収集端末の平滑化方式を検討することとした。

検討の結果、上記課題を解決するための平滑化プロトコルであるSSM(Statistical Smoothing Method)を開発した。SSMではネットワークのトポロジ情報を元にデータ収集端末の数が他のM型中継端末に比べて著しく多い「外れ値M型中継端末」を見つけ出し、そのM型中継端末に対してデータを中継するデータ収集端末の数を調整するようにコマンドを発行することで平滑化を実現する。

平滑化を適切に実施するためには外れ値M型中継端末の検出方法が重要になる。データ中継をするデータ収集端末数の標準偏差と平均値を利用した検出方法は、今回のように外れ値の存在が想定されるデータの外れ値検出基準としては適切ではない。なぜなら、標準偏差や平均値といった値は外れ値の影響を受けやすいので検出すべき外れ値を見逃してしまう現象が発生するからである。

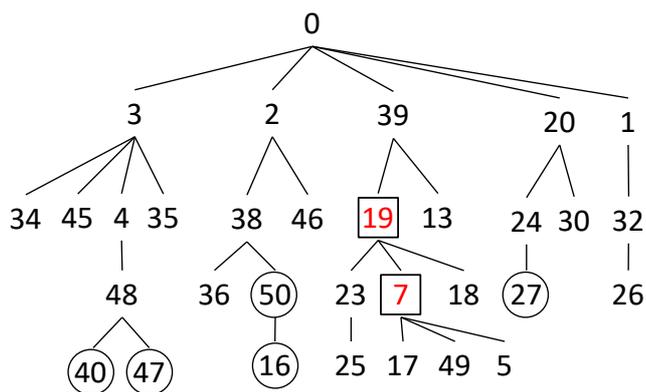
SSMでは外れ値M型中継端末の検出方法として、データの個数とデータ順序から外れ値を選別する箱ひげ図法^{1), 2)}を採用した。箱ひげ図法は、その外れ値の選別方法が外れ値の影響を受けにくいという特徴を持つ。箱ひげ図法を利用することにより、一般的な統計的手法を利用するよりも適切に外れ値M型中継端末を検出できるようになった。

例えば、特定のM型中継端末にデータ収集端末が偏っているネットワークに対してSSMを適用すると、M型端末と通信をするデータ収集端末の数が平滑化される。机上シミュレーションの結果、平滑化によって送信電力を最大二分の一に、輻輳発生率を最大四分の一まで低減できることがわかった(図①-(4).2 および図①-(4).3)。



図①-(4).2 NW初期状態

(特定のM型中継端末(この場合ノード19および7)にデータ転送作業が集中)



図①-(4).3 SSMによる平滑化実施
(データ転送作業が平滑化されている)

本方式に関しては H28 年度に実装および機能検証のための実験が完了し、H29 年度に実環境での実証実験を予定している。

・M 型中継端末の試作

M 型中継端末を試作した(図①-(4).4)。試作機は RFLSI およびマイコンが 1 チップになった RFLSI を利用したことにより、15mm×35mm のサイズで実装できた。

中間目標の省電力性能である稼働期間 1 年以上については、実環境で次年度以降に確認を実施する。



図①-(4).4 M 型中継端末の試作機

・実環境での最適な無線ネットワーク設計方式の開発

実環境での電波測定から、実環境では理論値に比べて電波強度の減衰量が20～30dB程度大きいこと、および受信機の設置高(0m⇒2m)により受信電波強度が10dB程度変わることを確認した。また、実証実験の結果、階を跨いで通信をする際は、パイプシャフトがある場所での通信とそうでない場合とで20dB程度電波強度が変わることを確認した。

さらに、実証実験を通じて、無線ネットワークの通信経路の構築を人手で明示的に実施したいというニーズがあることが分かった。

このことを踏まえ、H28年度はM型中継端末設置後にM型中継端末のRSSI値を容易に測定する機能を持つネットワークの設計構築ツールを開発した。H28 年度はCLI版までが完成した。GUI版はH29年度の早い時期に完成させて実証実験に利用する予定である。

参考文献:

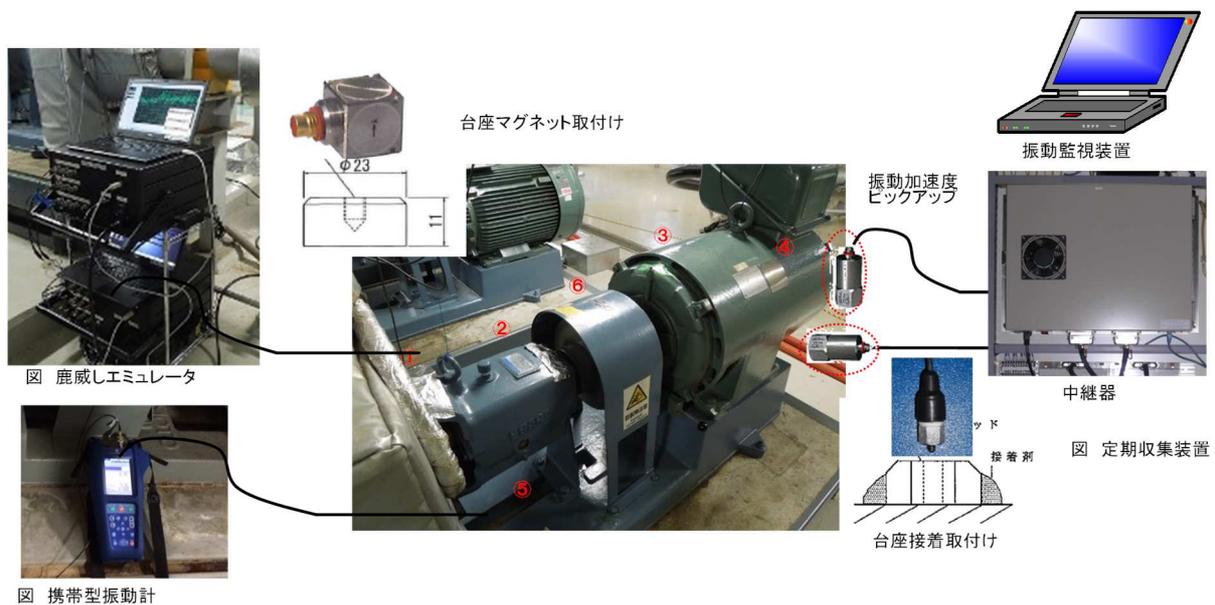
1) 小林道正. "データ分析における「箱ひげ図」の誤解-高校教科書における多数の誤り." 中央大学論

集 34 (2013), pp.57-68.

2)和田かず美. "多変量外れ値の検出~ MSD 法とその改良手法について~." 統計研究彙法 67 (2010), pp.89-157.

①-(5) コアモニタリングシステムの開発(高砂熱学工業株式会社)

P型センサ端末の開発とコアモニタリングシステムの開発を同時進行させるために、P型センサ端末の疑似データを生成する信号発生器「鹿威しエミュレータ」を開発した(図①-(5).1)。これにより、コアモニタリングシステムの要素技術であるデータのフィルタリング機能および異常検知のロジック、保全を必要とするまでの時間を示す余裕時間の予測の仕様特定が、P型端末機を用いた試験を待つことなく進められた。

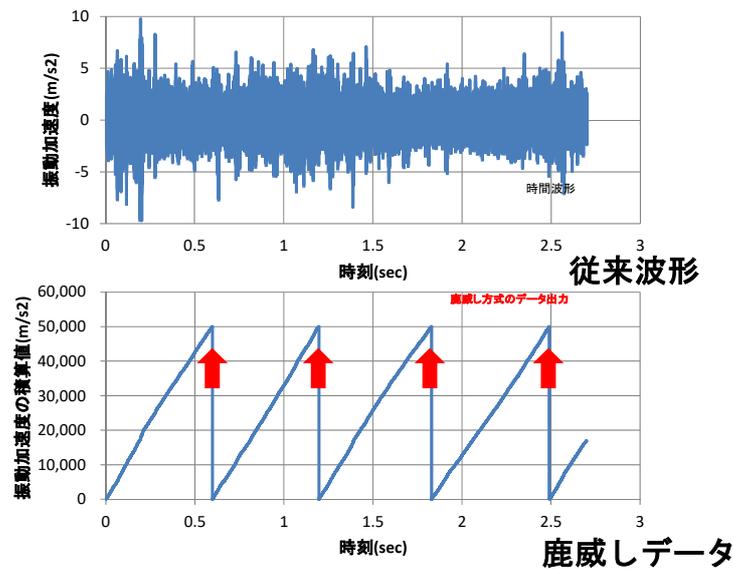


図①-(5).1 鹿威しエミュレータの設置状況

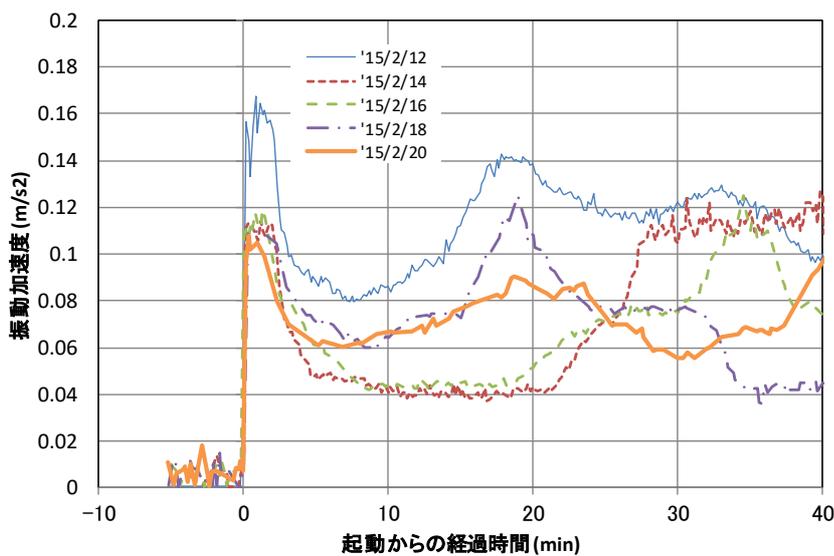
P型センサ端末が出力する鹿威し方式データは、振動強度の大小に伴い出力の時間間隔が異なるため不連続である(図①-(5).2)。この不連続信号を用いたモニタリング装置のシステム化は、これまでに事例がない。そこで、異常検知の確度を高めるための信号前処理として、運転/停止判断、軸回転数による振動特性の補正などのフィルタリング機能の仕様を整備した。研究開発テーマ②-(1)での実証実験サイトにて得られた立型ポンプの振動特性から、ポンプ起動直後では、モータが大きなトルクを出すため振動加速度の急激な変化が想定される。図①-(5).3に起動前後の振動加速度の変化を示す。起動前の振動加速度(暗振動)が 0.01m/s^2 程度に対して、起動直後は一旦 $0.1\sim 0.16\text{ m/s}^2$ に跳ね上がり、 0.06 m/s^2 (暗振動の6倍) $\sim 0.1\text{ m/s}^2$ (暗振動の10倍)に落ち着いた。起動直後の振動加速度に幅があるのは、起動時の制御目標流量による電源のインバータ周波数の違いによるものと思われる。

また、回転数制御など送水流量の変更に伴う部分負荷特性時の振動特性についても知見を得た。送風機の法則では、静圧が軸回転数の2乗、軸動力が軸回転数の3乗に比例することから、軸回転数と振動加速度には累乗の相関が想定される。また、軸回転数と振動加速度に関する既往の研究では、軸回転数比の2乗に比例している。そこで、代表日における起動から120分間の電源のインバータ周波数と測定点②モータスツール部Z方向の振動加速度の変化を図①-(5).4に示す。図

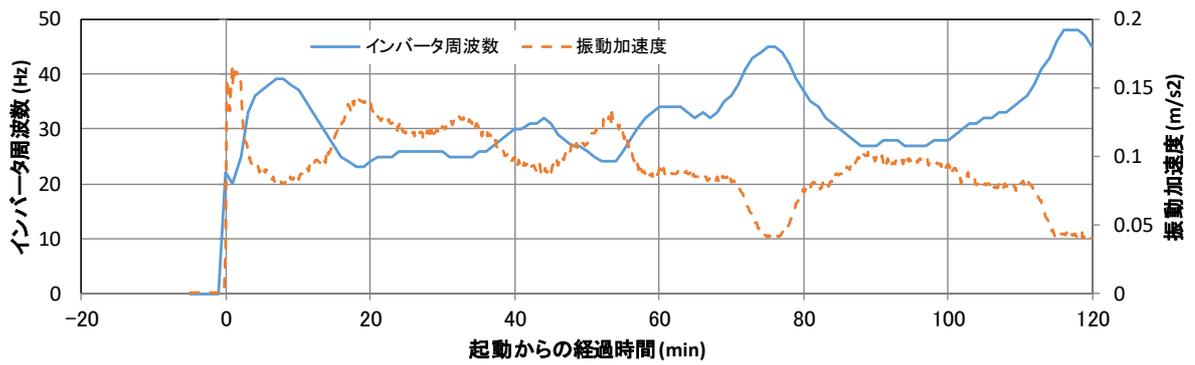
より、起動後インバータ周波数の変化に応じて、振動加速度も急激に変化していた。そこで複数日の起動から120分間のポンプ電源のインバータ周波数と測定点②Z方向振動加速度の相関を図①-(5).5に示す。図より、インバータ周波数の増加に対して、既往の研究と異なる負の相関が見られた。これは、起動後のインバータ周波数が一旦定格周波数近くに増加した後に、目標流量に向けて加減しながら徐々に安定していくため、起動直後の過渡的な状況による特異性があったと想定される。もしくは、立型ポンプ固有の振動特性である可能性もある。これらの仮説に対しては、起動時から定常時、定常以降の負荷変動に応じた部分負荷運転時のデータを基にした更なる詳細解析が必要で、実証実験のフェーズにて解明する。



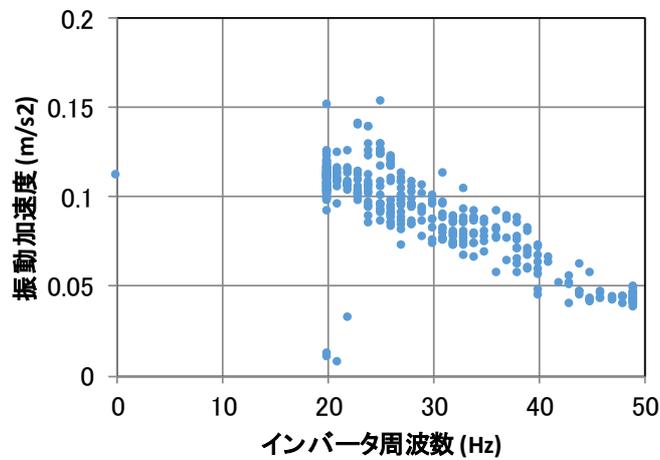
図①-(5).2 従来の振動波形と鹿威し方式データ



図①-(5).3 ポンプ起動直後の振動加速度(立型ポンプの事例)



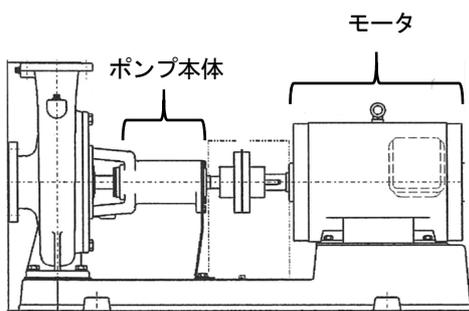
図①-(5).4 ポンプ起動直後の振動加速度とインバータ周波数(立型ポンプの事例)



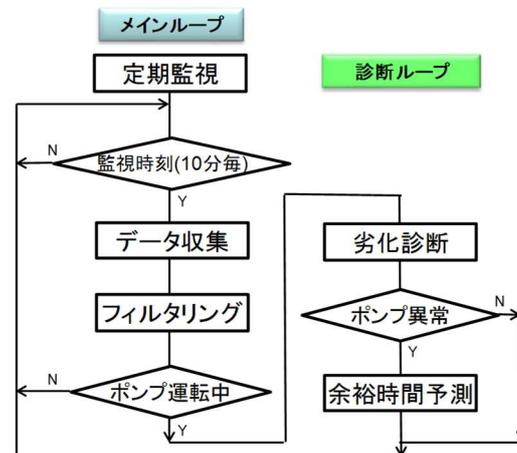
図①-(5).5 ポンプのインバータ周波数と振動加速度の相関(立型ポンプの事例)

次に異常検知では、振動発電の駆動源である低周波領域の振動と振動センサが検出する高周波領域の振動を用いること、ガタ・アンバランスなどの機械的不具合や軸受損傷の発生など、ポンプの通常と異なる状況を判断する。

これまでの開発により、異常検知ロジックとして定常運転時と起動・負荷変動などの非定常運転時の異常検知アルゴリズムを検討し、診断に必要な測定箇所(図①-(5).6)とモニタリングシステムの仕様特定に至った。図①-(5).7に異常検知の大まかな処理フローを示す。

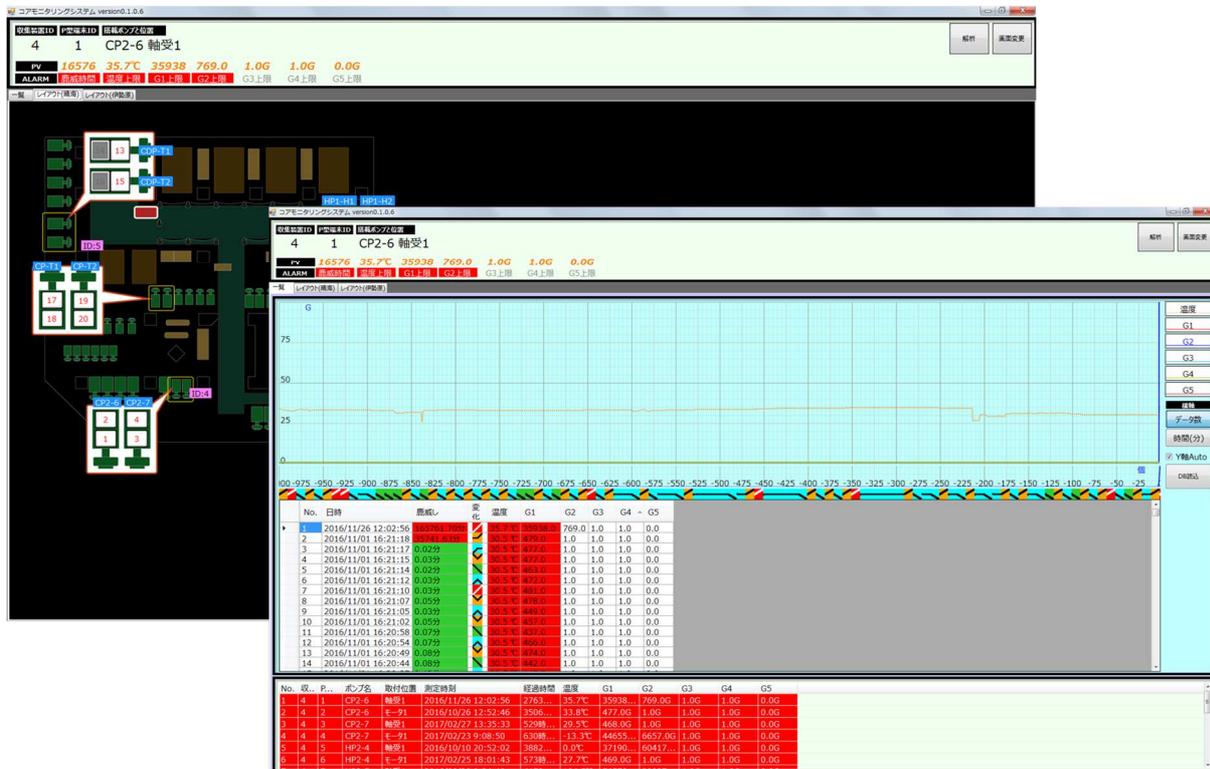


図①-(5).6 ポンプの測定箇所



図①-(5).7 コアモニタリングシステムの処理フロー

以上に示したフィルタリング機能ならびに異常検知ロジックにP型センサ端末のデータ収集機能を組み込んだコアモニタリングシステムの試作機を開発し、実証実験サイトに試験導入した。図①-(5).8に、コアモニタリングシステムの画面表示例を示す。



図①-(5).8 コアモニタリングシステムの監視画面例

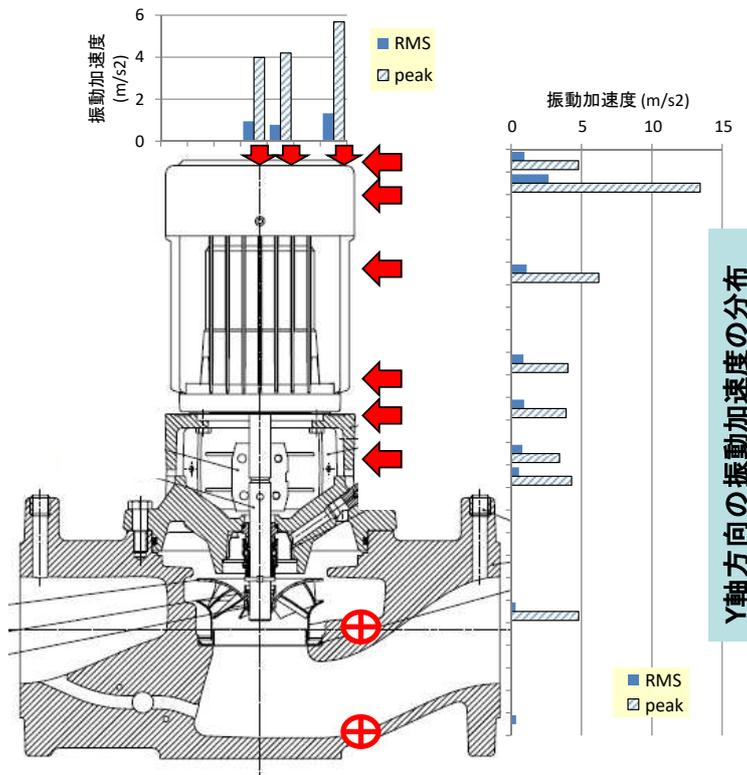
研究開発項目②コアモニタリングシステムの構築と実証実験

②-(1) 地域・病院エネルギー供給設備診断のためのモニタリングシステムの開発(高砂熱学工業株式会社)

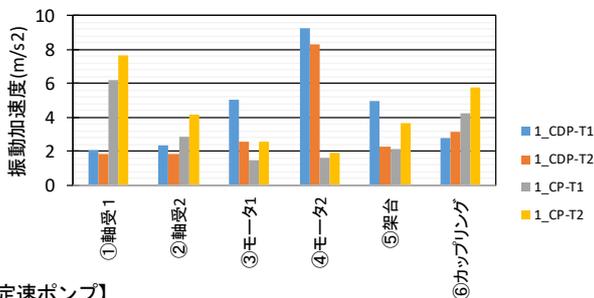
実証サイトとして、H26年度は災害時の防災拠点となりかつ、医療機関として設備の頑健性が求められる病院施設を選定した。さらに、H27年度からは地域熱供給施設を選定し、H28年度まで継続してポンプの振動データを収集してきた。

病院施設では、立型ラインポンプを対象とした。近年、高効率なことから導入が進んでいるものの、実運転下での振動データに関する知見がなく、今回の実証データは貴重である。立型ポンプの各部位と振動方向(Y方向:水平での水の流れ方向、Z方向:垂直方向)の分布から、モータスツールをモニタリングに好適な場所として特定するに至った。図②-(1).1に立型ラインポンプの振動加速度の分布を示す。また、地域熱供給施設では、数10kWの大型渦巻きポンプを対象に、ポンプの振動データを収集してきた。図②-(1).2に渦巻きポンプの測定箇所による振動加速度の差異を、定速ポンプとインバータによる可変速ポンプに分類して示す。

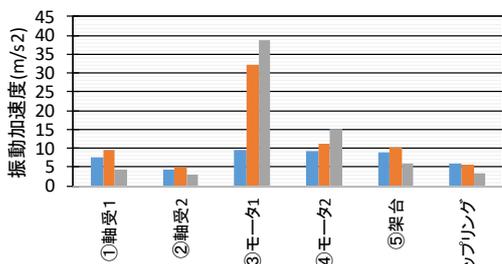
Z軸方向の振動加速度の分布



②-(1).1 立型ラインポンプの振動加速度の分布

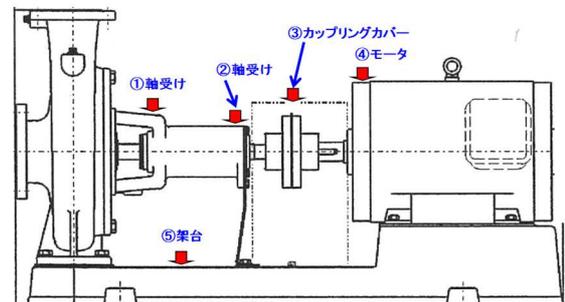


【定速ポンプ】



【インバータ可変速ポンプ】

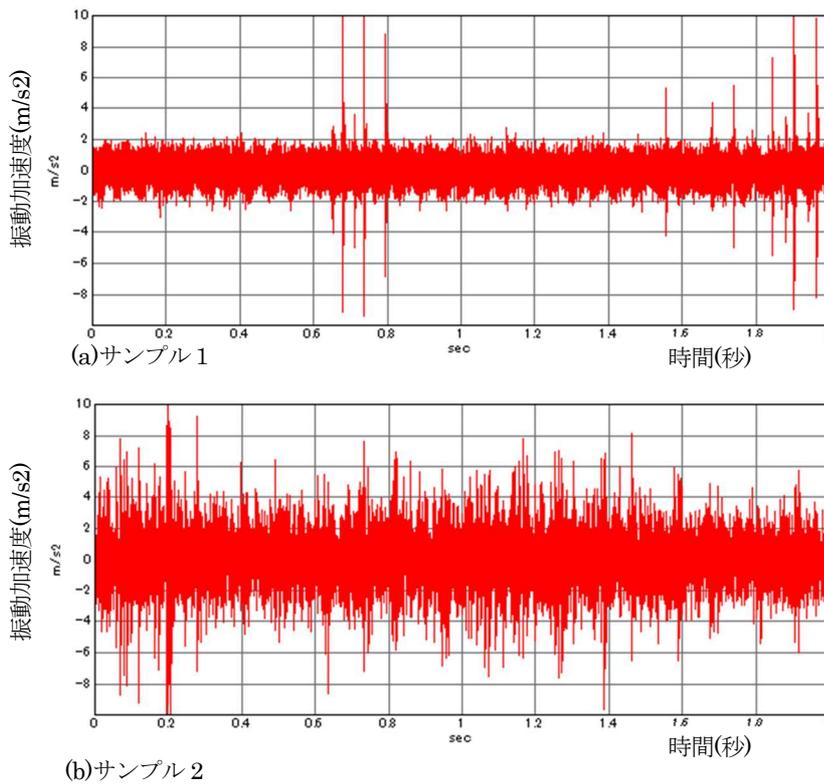
測定箇所



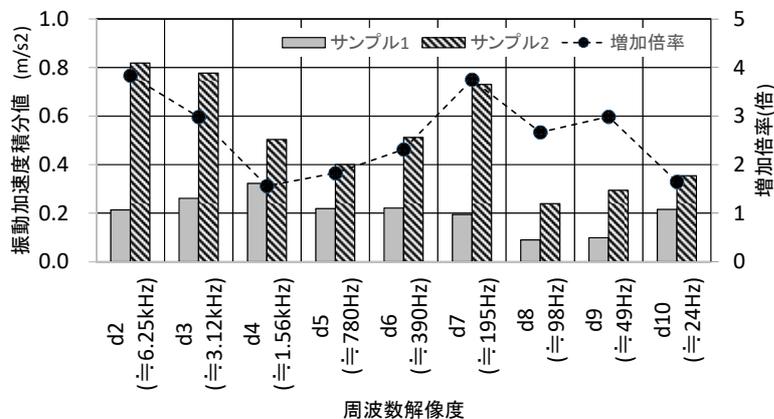
図②-(1).2 渦巻きポンプの振動加速度の分布

これらの収集した振動データに既存の振動データをサンプルとして加えて、信号解析ソフトによるデータ解析を行い、鹿威し方式データによる異常検知の可能性を検討した。図②-(1).3にサンプルデータの時間波形を示す。サンプルとした時間領域での振動波形には、軸回転数に同期

した衝撃波が見られ、(b)サンプル2の方が軸受け損傷の度合いが大きいものであった。鹿威し方式の振動加速度データでは、信号出力から次の出力までの積分値となるため、衝撃波の検出感度が不明である。今回の解析結果では、衝撃波の発生頻度が高まる、つまりは異常の度合いが大きくなるに連れて衝撃波に含まれる高周波数帯域の振動成分が増加することを見極めた。次に、バンドパスフィルタの帯域を変更しながら所定のしきり値を超える回数をカウントアップする信号解析から、異常の程度によってカウント数が増加することを確認した。以上の結果から、衝撃波に対しても、P型センサ端末にて異常を検知できる可能性を得た。図②-(1).4にカウントアップの用いた周波数成分ごとの振動加速度の積分値を示す。図中、周波数成分の分解には、離散ウェーブレット変換(マザーウェーブレット関数：DB-4次)を用いた。



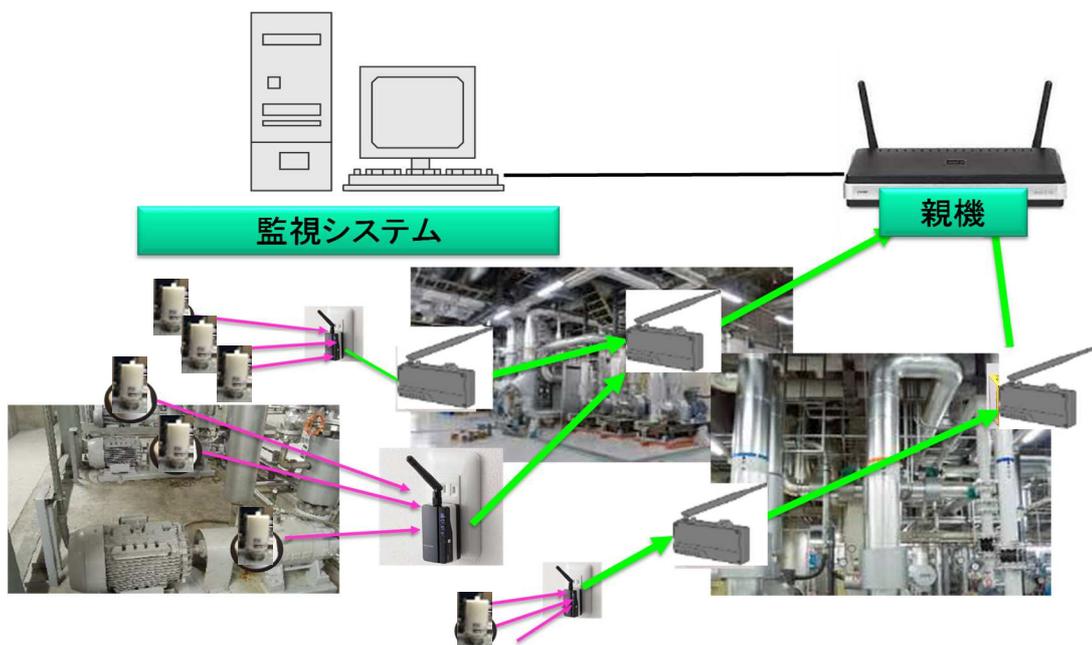
図②-(1).3 軸受損傷時の振動加速度時間波形



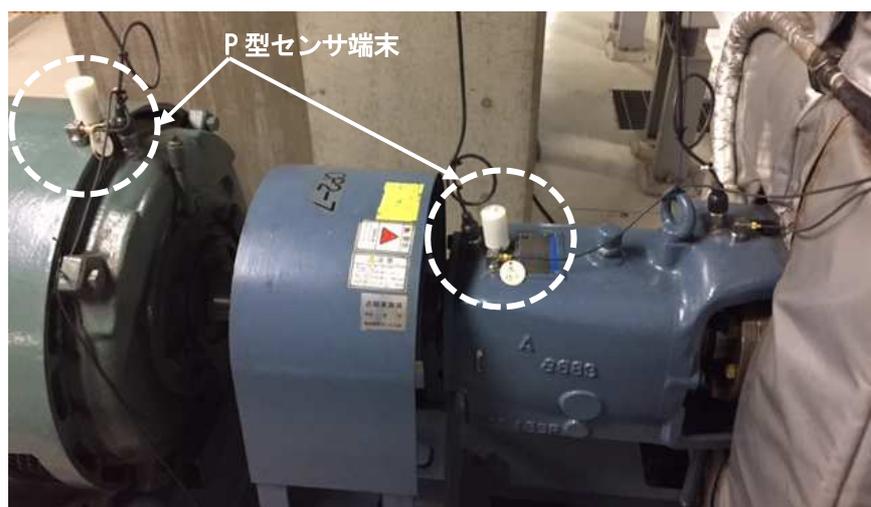
図②-(1).4 周波数成分ごとの振動加速度の積分値(2.7秒間)

また、現場におけるセンサの設置方法としては、P型センサ端末を設置する台座の固定方法に接着とマグネットの2種類を用い、振動特性の違いを検証した。試験の結果、4kHz程度までの振動加速度に差異が無いことを確認し、コアモニタリングシステムの実用的な現場設置に向け道筋を立てた。

実証サイトにおけるモニタリングシステムの構築と実証では、振動発電用共振周波数が約124HzのP型センサ端末試作機を実稼働中のポンプに設置し、ハーベスト電源による鹿威し方式データの収集と、開発したコアモニタリングシステム(試作機)の試験稼働を行った。図②-(1).5に、実証実験装置を概念的に示す。図②-(1).6にP型センサ端末の設置状況を示す。



図②-(1).5 実証実験装置構成の概念図



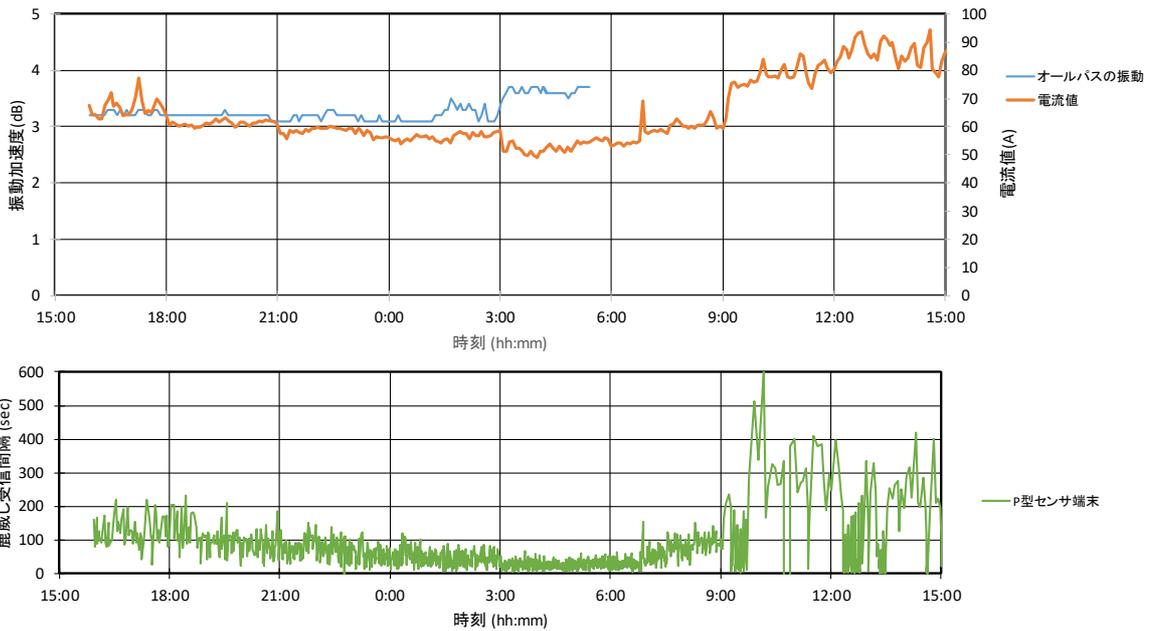
図②-(1).6 P型センサ端末の設置状況

P型センサ端末の実証試験の状況を図②-(1).7のトレンドグラフで示す。図より、ポンプ電流値とP型センサ端末近傍の振動加速度は、ほぼ同様の変化を示している。一方、ポンプ電流値とP型センサ

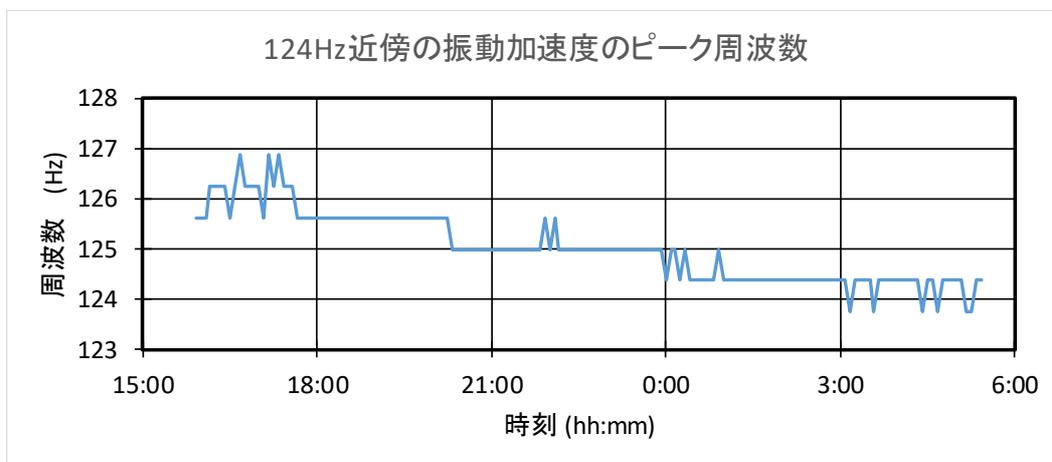
端末の受信間隔^{*}は逆の変化を示している。

※P型センサ端末の受信間隔は、振動発電の共振周波数の振動強度が大きくなるほど発電量が増加し、受信間隔が短くなる。つまり、振動強度の増加と受信間隔は負の相関にある。

ここで、試験期間中の124Hz(P型センサ端末の振動発電用共振周波数)近傍のピーク周波数の推移を図②-(1).8に示す。インバータによる回転数制御のため、周波数が127Hzから124Hzに減少している。これは、P型センサ端末が受ける振動加速度の内、振動発電に作用する成分が変化していることを示す。P型センサ端末の受信間隔は、図②-(1).8に示した振動強度とピーク周波数が相まった結果であることから、H29年度からの実証フェーズでは、多様な状況でのデータ蓄積と評価が必要となる。



図②-(1).7 P型センサ端末の試験データ(ポンプ電流値、センサ近傍の振動加速度、受信間隔)



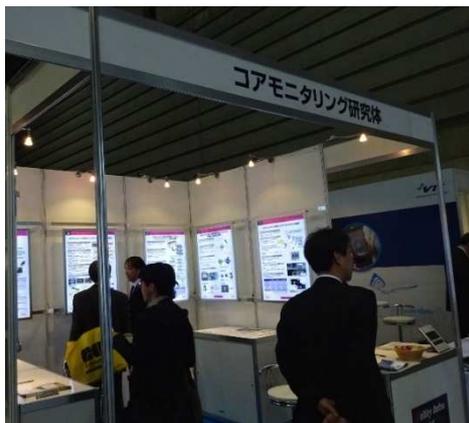
図②-(1).8 P型センサ端末の振動発電用共振周波数近傍のピーク周波数

1.4 成果の普及

展示会への出展や種々の講演会・セミナーでの成果報告ならびにホームページ、ブログ、ユーザとの技術交流を通じて本研究開発の普及・広報を図った。

(i) プロジェクトホームページの開設

プロジェクトのホームページ(<http://ucoms.la.coocan.jp/index.html>)を開設し、研究アウトライン(研究開発概要、研究コンセプト、研究テーマ)、研究体制について紹介、さらにナノ・マイクロビジネス展@パシフィコ横浜(2015年)、MEMS センシング&ネットワークシステム展@パシフィコ横浜(2016年)において、プロジェクトブースでのパネル展示、成果報告会(2015年、2016年)を実施し、広報普及を図った。



第1回 ライフラインコアモニタリングプロジェクト成果報告会	
セッション 2	主催 (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、コアモニタリング研究体 重要な社会課題の一つである都市機能を支えるライフライン系の都市インフラ(電気、ガス、上下水道、情報、エネルギー)の安全な保全のためのライフラインコアモニタリングシステム(UCoMS)の研究開発(「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」)第一回成果報告会です。特に、ライフラインの心臓部にあたるモーター、ポンプ、コンプレッサー等の動力機械に焦点を当てたコアモニタリングに取組みます。 司会:コアモニタリング研究体 逆水 登志夫
12:45 ▶ 13:15	UCoMSプロジェクトのミッションとIoTへのインパクト コアモニタリング研究体 研究体長 伊藤 寿浩
13:15 ▶ 13:30	圧電MEMS振動発電センサデバイスの開発 (独)産業技術総合研究所
13:30 ▶ 13:45	環境センサ・発電用MEMSプロセスプラットフォーム技術の開発 (一財)マイクロマシンセンター
13:45 ▶ 14:00	ネットワーク気象計と小型無線センサへの取組み 明星電気(株)
14:00 ▶ 14:15	920MHz無線マルチホップネットワークの低消費電力化技術の開発 沖電気工業(株)
14:15 ▶ 14:30	回転機器の振動特性とモニタリングシステムの開発 高砂熱学工業(株)

ナノ・マイクロビジネス展でのブース展示

2015年4月22~24日@パシフィコ横浜

ナノ・マイクロビジネス展での成果報告会

2015年4月23日@パシフィコ横浜

(ii) ブログによる情報発信

一般財団法人マイクロマシンセンターが管理するブログニュース(MEMSの波、

<http://gsnpj.blogspot.jp/>)に成果展示や成果報告会の内容を発信して、本プロジェクトの広報・普及を図った。

(iii) ユーザとの技術交流

モニタリングシステムのユーザとな地域冷暖房施設のニーズや本システムの仕様等に対する意見を抽出するため、27年度は、九州福岡地区で供給サービスを行っている西部ガステクノソリューション(株)千代事業所の現場を視察、管理部門・営業部門と本システムについて意見交換を実施した(NEDO 同席)。現状の点検・検査では、簡易振動計でポンプの振動値の確認はしているものの、系統的なデータ収集・分析などは行われていないこと、また、本システムのP型端末(鹿威し方式)で、気付きの情報が得られれば使えそう、設置については、マグネットのような簡易的なものが使いやすそうであるとの意見が出た。

(iv) 成果表彰

①(4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発において、2014~2015年に開発した「時刻同期型の省電力通信方式」に関する研究会発表が短距離無線通信研究会論文賞(IEICE SRW Best Paper Award)に選ばれました。<http://www.ieice.org/~srw/awardee.htm>

1.5 目標に照らした達成状況

研究開発目標	研究開発成果	達成度
<p>①-(1)コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発</p> <p>【実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電量 2V、0.5μW の MEMS 圧電振動センサデバイスの開発 ・低損失整流回路の開発 ・低消費電力鹿威し回路の開発 ・P 型端末の模擬的な動作実証 	<ul style="list-style-type: none"> ・現在までに、最大で AlN の 5 倍の圧電定数を持つ新材料 ScAlN を導入し、2V、0.21μW の出力を達成した。低損失整流回路と組み合わせることで、2.1V、0.51μW の発電量を達成した。 ・整流回路の構成を工夫すると共に低い順方向電圧降下を持つ MOSFET を採用し、さらにこれらをワンチップ化した。これにより AlN 振動発電センサデバイスの出力電圧を従来品比 2.4 倍に増強させ、そのパッケージサイズを 2mm\square以下に小型化した。 ・コンパレータのバイアス電流を削減することによって、従来品の低消費電力コンパレータに比べて消費電流を 90%削減した。また参照電圧発生回路においては、弱反転領域を利用することによって 90%以上の消費電流を削減した。 ・AlN 振動発電センサデバイスと低消費電力鹿威し回路を組み合わせることによって、実際のポンプ振動と同等程度の振動加速度を発生させた加振器上において、鹿威し方式の動作実証を行った。 	<p>H28 年度 達成</p> <p>H28 年度 達成</p> <p>H28 年度 達成</p> <p>H28 年度 達成</p>
<p>①-(2)コアモニタリング用 AlN 圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発</p> <p>【実施計画】</p> <p>a)AlN 圧電デバイス量産試作プロセス技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ・H27 年度で開発した基本プロセス工程を用いて、P 型端末向けセンサ・発電デバイスを試作評価実施して、動作作品を明星電気に収め 	<ul style="list-style-type: none"> ・H28 年度、新たに設計された発電デバイスの試作評価を実施して、外観、AC 特性が良品のデバイスを得られた。産総研により、設計通りの出力、共振周波数を得ることを確認した後、明星電気に動作作品を収めた。H28 年度中に、これも新たに設計される高出力の P 型端末用高周波センサを試作して、明星電気に収めた。 	<p>H28 年度 達成</p>

<p>る。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・AIN プロセスは、量産対応できるようにプロセス確立する。ScAIN プロセスは、小容量ポンプに対して、デバイスが適用できる事を確認し、実用化を図る。 	<ul style="list-style-type: none"> ・8インチ基板を用いた AIN 圧電プロセスは、Pt/AIN/Pt 圧電電極構造のドライエッチング工程を確立することにより、カンチレバー構造を形成することが出来た。さらに、この多層構造のスパッタ成膜条件を検討して、圧電積層膜の応力を制御することによりカンチレバー形状でも形状歩留 70%を得ることが出来るプロセス条件を確立した。ウエハ内全領域で d31 が 1.00pm/V 以上の安定した圧電特性も得られたので、ほぼ量産プロセスは確立できたと言える。 ・ScAIN 圧電プロセスも 44% ScAIN ターゲットを用いて、8インチ基板でほぼ d33 が 15pm/V と良好な圧電特性を得るスパッタ装置の成膜条件を確立し、カンチレバーデバイスの試作も実施した。 	<p>H28 年度 達成</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・カンチレバーの共振 Q 値の広帯域化等によって、振動出力を確保し、ScAIN プロセスと AIN プロセスの発電効率、コスト、温度特性等の評価項目によるベンチマークテストを行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・広帯域化は、マルチデバイス&真空封止による Q 値向上の方針に変わり、対応するデバイスの試作を行った。AIN と ScAIN デバイス・プロセスの比較は、圧電特性、カンチレバーデバイスの試作評価により、出力特性で 3 倍程度、ほとんど共通の加工プロセスで加工できることが分かった。 	<p>H28 年度 達成</p>
<p>b)ウエハレベルパッケージ技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ・P型端末向けセンサ・発電デバイスおよび高周波振動デバイスのウエハレベルパッケージ構造の試作を実施し、歩留まり向上の為にプロセス改良を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ウエハレベルパッケージ技術開発は、圧電デバイスの特性を劣化させないために、低温Au-Au活性化低温接合技術を用いたP型端末0次端末用AIN圧電デバイス向けパッケージ構造を設計し、発電デバイスの試作を行い、明星電気に提供した。振動特性を向上する真空封止接合可能な高周波センサ用のパッケージの設計を行い、試作を実施した。 	<p>H28 年度 達成</p>
<p>c)振動センサ・発電デバイス技術動向調査(東大再委託)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・振動発電センサデバ 	<ul style="list-style-type: none"> ・振動センサ・発電デバイス技術動向の収集を、2015 Transducers、 	<p>H28 年度</p>

<p>イス、センサネットワーク、MEMS 技術関連等の最新動向調査を行う。</p>	<p>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、IEEE SENSORS 2015、Power MEMS 2015、IEEE MEMS 2016の文献あるいは会議出席により実施した。それらの収集からAIN圧電デバイスに適用可能な周波数ブロードバンド化技術を抽出するとともに、それらの技術の本開発への適用可能性について調査を行った。</p>	<p>達成</p>
<p>①-(3)コアモニタリング用センサ端末の開発 【基本計画】</p>		
<p>・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するため振動または変位、温度も同時に計測可能なセンサ端末を開発</p>	<p>・低周波振動センサデバイス、高周波振動センサデバイス、サーミスタおよび無線器搭載し、設置個所の振動および温度データを無線送信可能なP型端末を開発した。またP型端末無線データを受信して振動、温度情報を収集してタイムスタンプ等付加情報を付加し、上位装置の無線送信するセンサデータ収集端末を開発した。</p>	<p>H28年度 達成</p>
<p>・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作でき、さらに地震等の突発事象を検出できるセンサ端末を開発</p>	<p>・P型端末はインフラ設備の回転機器に設置し、低周波振動センサデバイスの振動発電にて、1時間に1度以上、振動、温度データを無線通信する。地震等の突発事象はP型端末からのデータを収集するセンサデータ収集端末に機能搭載した。</p>	<p>H28年度 達成</p>
<p>・片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下のセンサ端末を開発</p>	<p>・P型端末の外形寸法は工事性(片手で実装できる)および高周波振動特性を考慮して小型化を図り(直径30mm、高さ50mm突起部除く)を開発した。</p>	<p>H28年度 達成</p>
<p>・実環境下で10年以上の信頼性を有するセンサ端末を開発</p>	<p>・P型端末を10年以上の性能保証できる端末の開発。10年の加速振動試験方法を開発し最終端末作成後、加速試験を実施して確認する。</p>	<p>H29年度 達成見込</p>
<p>【実施計画】 a)センサデータ収集端末の試作、受信モジュール(産総研)、M型中継端末(沖電気工業試作)、</p>	<p>・P型センサ端末から送信された(P型センサ端末ID、振動センサ、表面温度)データをP型受信モジュール(産総研)で受信し、システム制御モジュールにてタイムスタンプ(受信時刻情報)を付加し、P型センサ端末の複数台データをまとめ、センサデータ収</p>	<p>H28年度 達成</p>

<p>システム制御モジュール(地震情報の入力端子含む)</p> <p>b)P 型端末(0 次試作)開発</p> <p> 外径：約 35 φ</p> <p> 質量：50g 以下</p> <p> (1 次電池除く)</p> <p>c)P 型端末耐久試験(実環境 1 年以上)</p> <p>①-(4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発</p> <p> 【基本計画】</p> <p> ・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数を用い、その距離は実環境下で 30m 以上</p> <p> 【実施計画】</p> <p>M 型中継端末</p> <p> ・省電力性能稼動年数 1 年以上(実証実験環境下での見込)端末消費電力：160μW 以下</p>	<p>集端末情報(送信タイムスタンプおよびセンサデータ収集端末 ID)を付加して、M 型中継端末(沖電気工業)に送信するセンサデータ収集端末を開発した。</p> <p>・P 型端末(0 次試作)外径 30mm、質量約 40 g を試作した。</p> <p>・実環境動作 1 年以上の P 型端末を開発。 H28 年 9 月より現場での実証で確認中。</p> <p>・920MHz 帯特定小電力無線を使い、利用が想定される熱供給システムのポンプ室にて、56m の距離(中継端末 1 台によるマルチホップ構成)で問題なく無線通信が実現できることを確認した。</p> <p>・本研究で開発したクロック補正方式を適用した時刻同期型省電力無線機(M 型中継端末)の試作機を作成した。</p> <p>・本研究で開発したクロック補正方式本方式を実装した評価機で消費電力を測定した結果、1 時間の平均消費電力が 154μW で、H28 年度中間目標で設定した、端末消費電力 160μW 以下の目標値を達成していることを確認した。この値から 1 年間連続動作に必要なバッテリーサイズは約 550mAh である。CR123A サイズのバッテリー容量は一般的に 1300mAh 程度なので、十分目標を達成できる見込みを得た。</p> <p>・システム運用時のオーバーヘッド(コリジョン発生のための)を軽減するために、M 型中継端末に接続するデータ収集端末数平滑化技術を開発した。机上検討の結果、5 分に 1 回データ送信する条件下では、送信電力が半分、衝突発生率が 4 分の 1 になること</p>	<p>H28 年度 達成</p> <p>H29 年度 達成見込</p> <p>H28 年度 達成</p> <p>H28 年度 達成</p> <p>H28 年度 達成</p> <p>H28 年度 達成</p>
---	--	---

<p>・悪環境下での無線通信距離：30m 以上 (920MHz 特定省電力・マルチホップの動作条件として)</p>	<p>が分かった。現在、開発はラボ内検証を終了しており、今後、屋外での大規模実験を実施する予定である。</p> <p>・920MHz 帯特定小電力無線を使い、利用が想定される熱供給システムのポンプ室にて、56m の距離(中継端末 1 台によるマルチホップ構成)で問題なく無線通信が実現できることを確認した。測定した無線経路は途中に障害物(コンクリート壁で覆われたエレベータホール)のある環境で実施した。</p> <p>同じ経路でマルチホップなしの場合、通信エラーの発生頻度が高くなることを確認しており、マルチホップによる中継が必要となるケースが実環境であることも確認した。</p>	<p>H28 年度 達成</p>
<p>①-(5)コアモニタリングシステムの開発</p> <p>【基本計画】</p> <p>・開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発</p>	<p>・P 型 0 次試作機の発電素子から出力される鹿威し方式データ、ならびに振動素子から出力される振動データ、センサ部温度を収集する装置を開発。</p> <p>・実証サイトにて実稼働中のポンプに設置して動作を確認。</p>	<p>H28 年度 達成</p>
<p>【実施計画】</p> <p>・フィルタリング、異常検知、保全までの余裕時間予測の要素技術を開発</p>	<p>・従来の振動加速度ピックアップを用いて収集したポンプの振動加速度から、運転/停止時、軸回転数の違いによる振動加速度の特性を把握。</p> <p>・鹿威し方式データを用いた異常検知のロジックならびに余裕時間の予測手法を特定。以上の知見からモニタリングシステムの要件を完成。</p>	<p>H28 年度 達成</p>
<p>・異常検知の精度確保：異常発生頻度に対し、検知率 95%(2σ)を達成</p>	<p>・既存の軸受の劣化進行に伴う振動データと保全前後の振動データで異常検知の感度を確認。</p> <p>・故障シミュレータから発生する異常振動、ならびに高砂熱学工業で実稼働しているポンプにて異常を故意に発生させ、その診断を実施。これらから診断確度が 95%であることを検証。</p>	<p>H28 年度 達成</p>
<p>・安全な維持管理の持続：回転部位に起因す</p>	<p>・実証サイトの運転管理者、メンテナンス業者と、保全作業と振動監視での代用についてのヒアリングを適宜実施。ポンプの日常</p>	<p>H28 年度 達成</p>

<p>る保全項目の 70%をカバー</p> <p>②コアモニタリングシステムの構築と実証</p> <p>【実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングシステムの連続稼働：実設備にて、データ収集、伝送から異常検知、保全までの余裕時間予測までを一連に処理 ・実証実験：代表的な病院施設、地域熱供給施設の各 1 件で実証 ・クラウド利用型ネットワークシステム：ネットワークを構築し、モニタリングシステムの連続稼働を実施 	<p>保全項目の 70%について振動による検知の代用が可能であることを検証。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鹿威し方式データの収集からフィルタリング、異常検知、結果表示、異常に対して保全までの余裕時間を予測するモニタリングシステムの試験機を完成。 ・地域熱供給施設(所在地：東京都)にて、モニタリングシステムの試験機を稼動。H28 年度下期からは病院施設(所在地：神奈川県所在)にても試験機を稼動。 ・地域熱供給施設の機械室にて、P 型端末機からモニタリング装置までのローカルネットワークを構築し、モニタリングシステムを稼動。 	<p>H28 年度 達成</p> <p>H28 年度 達成</p> <p>H28 年度 達成</p>
--	---	--

2. 特許、論文、外部発表の状況

(1)特許(出願者、出願番号、出願地域、出願日、発明の名称、発明者)

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	発明の名称	発明者
1	(一財)マイクロマ シンセンタ－	特願 2015-134997	国内	2015/7/6	振動発電デバイス及び 無線センサ端末	荒川 雅夫 他
2	(国研)産業技術総 合研究	特願 2015-219413	国内	2015/11/9	振動検出素子	魯 健 他

(2)論文(発表者、所属、発表内容、発表先、査読、発表年月)

番号	発表者	所属	発表内容	発表先	査 読	発表 年月
1	張 嵐、 魯 健、 山下 崇博、 牧本 なつみ、 武井 亮平、 小林 健	(国研)産業技術 総合研究所	A Self-Powered S- Shape-Spring Sensor: Sensing the Specific Low-Frequency Vibration with High Sensitivity	Japanese Journal of Applied Physics	有	2016/8/12
2	武井 亮平、 岡田 浩尚、 牧本 なつみ、 伊藤 寿浩、 小林 健	(国研)産業技術 総合研究所	Simulation of an ultra-low-power power management circuit for MEMS cantilever piezoelectric vibration energy harvesters	Japanese Journal of Applied Physics	有	2016/9
3	武井 亮平、 岡田 浩尚、 野田 大二、 太田 亮、 伊藤 寿浩、 小林健	(国研)産業技術 総合研究所、 (一財)マイクロ マシンセンタ ーMNOIC 開発 センター	Wireless Vibration Sensing System Powered by a Piezoelectric MEMS Vibration Energy Harvester	IEEE SENSORS Proceedings	有	2016/11
4	武井 亮平、 岡田 浩尚、 野田 大二、 太田 亮、 伊藤 寿浩、 小林 健	(国研)産業技術 総合研究所、 (一財)マイクロ マシンセンタ ーMNOIC 開発 センター	High Efficiency MOSFET Bridge Rectifier for AlN MEMS Cantilever Vibration Energy Harvester Japanese Journal of Applied Physics	Japanese Journal of Applied Physics	有	2017/3

(3)外部発表

番号	発表者	所属	発表内容	発表先	発表年月
1	—	コアモニタリング研究体	ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発(全体概要)	ナノ・マイクロビジネス展 2015 (パネル展示)	2015/4/22
2	—	(国研)産業技術総合研究所	コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発	ナノ・マイクロビジネス展 2015 (パネル展示)	2015/4/22
3	—	(一財)マイクロマシンセンター	コアモニタリング用 AIN 圧電デバイスのウェアレブルパッケージ技術の開発	ナノ・マイクロビジネス展 2015 (パネル展示)	2015/4/22
4	—	明星電気(株)	振動センサ、無線、制御回路の小型パッケージと回転機への固定部の開発	ナノ・マイクロビジネス展 2015 (パネル展示)	2015/4/22
5	—	沖電気工業(株)	コアモニタリング用ネットワークシステムの開発	ナノ・マイクロビジネス展 2015 (パネル展示)	2015/4/22
6	—	高砂熱学工業(株)	コアモニタリングシステムの開発	ナノ・マイクロビジネス展 2015 (パネル展示)	2015/4/22
7	—	高砂熱学工業(株)	コアモニタリングシステムの構築と実証	ナノ・マイクロビジネス展 2015 (パネル展示)	2015/4/22
8	伊藤 寿浩	(国研)産業技術総合研究所	UCoMS プロジェクトのミッションと IoT へのインパクト	ナノ・マイクロビジネス展 2015/ 第 1 回ライフラインコアモニタリングプロジェクト成果報告会	2015/4/23
9	清水 昭浩	高砂熱学工業(株)	建築設備におけるセンサ活用とエネルギー・ハーベスティング	第 6 回エネルギー・ハーベスティング技術シンポジウム	2015/5/21

10	川本 康貴	沖電気工業(株)	クロック補正機能による同期型省電力無線通信方式の性能向上に関する考察	電子情報通信学会 短距離無線研究会	2015/8/24
11	柴田 克彦、 清水 昭浩、 陶 昇	高砂熱学工業(株)	立型ポンプから発生する機械振動の実態調査	空気調和衛生工学会大会	2015/9/16
12	武井 亮平、 牧本 なつみ、 岡田 浩尚、 伊藤 寿浩(東大、産総研)、 小林 健	(国研)産業技術総合研究所	Design of MEMS Cantilever for Low Frequency Vibration Energy Harvesters	28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference	2015/11/13
13	武井 亮平、 岡田 浩尚、 牧本 なつみ、 伊藤 寿浩、 小林 健	(国研)産業技術総合研究所	回転機診断システムを目指した低周波振動 MEMS 環境発電デバイスの設計	エレクトロニクス実装学会	2016/3/22
14	牧本 なつみ、 武井 亮平、 田原 竜夫、 秋山 守人、 小林 健、 東京大学：伊藤 寿浩	(国研)産業技術総合研究所	AIN 薄膜の縦方向圧電定数を指標とした圧電 MEMS プロセスモニター	2016 年度精密工学会春季大会学術講演会	2016/3/17
15	太田 亮、 原田 武、 野田 大二、 網倉 正明、 上野 昭久、 荒川 雅夫	(一財)マイクロマシンセンター MNOIC 開発センター	AIN 圧電デバイスのウエハレベルパッケージング技術の開発	2016 年度精密工学会春季大会学術講演会	2016/3/17
16	武井 亮平、 牧本 なつみ、 岡田 浩尚、 伊藤 寿浩(東大、産総研)、 小林 健	(国研)産業技術総合研究所	回転機診断システムを目指した低周波振動 MEMS 環境発電デバイスの設計	第 30 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会	2016/3/22
17	武井 亮平、 岡田 浩尚、	(国研)産業技術総合研究所	圧電振動発電を用いた無線センサ端	強誘電体応用会議	2016/5/27

	牧本 なつみ、 伊藤 寿浩、 小林 健		末の検討		
18	(一財)マイクロ マシンセンター	—	研究開発プロジェ クト(RIMS、 UCoMS)の活動報 告	「MEMS の波」 (MMC 運営のブロ グ)	2016/5/17
19	小林 啓洋	沖電気工業(株)	省電力無線センサ ネットワークにお ける衝突確率低減 手法	電子情報通信学会 短距離無線通信研 究会	2016/8/22
20	野田 大二、 太田 亮、 網倉 正明、 上野 昭久、 原田 武、 荒川 雅夫	(一財)マイクロ マシンセンター MNOIC 開発セ ンター	MNOIC の取り組 みと振動発電子用 圧電膜のスパッタ 成膜について	日本真空学会 ス パッタリングおよ びプラズマプロセ ス技術部会	2016/8/29
21	武井 亮平、 岡田 浩尚、 野田 大二、 太田 亮、 伊藤 寿浩、 小林 健	(国研)産業技術 総合研究所 (一財)マイクロ マシンセンター MNOIC 開発セ ンター	High Efficiency MOSFET Bridge Rectifier for AlN MEMS Cantilever Vibration Energy Harvester	SSDM	2016/9/28
22	(一財)マイクロ マシンセンター	—	ライフラインコア コアモニタリング システムの研究開 発	MEMS センシング & ネットワークシ ステム展 2016	2016/9/14
23	伊藤 寿浩	国立大学法人東 京大学	ライフライン系都 市インフラへの自 律電源無線モニタ リングシステムの 活用	MEMS センシング & ネットワークシ ステム展 2016 研究 開発プロジェクト 成果報告会	2016/9/15
24	下山 勲	(一財)マイクロ マシンセンター	Development of Utility Infrastructure Core Monitoring System(UCoMS)	IMPACT(Internation al Microsystems, Packing, Assembly and Circuits Technology conference), October 26-28,	2016/10/27

25	武井 亮平、 岡田 浩尚、 野田 大二、 太田 亮、 伊藤 寿浩、 小林 健	(国研)産業技術 総合研究所、 (一財)マイクロ マシンセンター MNOIC 開発セ ンター	Wireless Vibration Sensing System Powered by a Piezoelectric MEMS Vibration Energy Harvester	IEEE SENSORS	2016/11/2
26	青柳 桂一	(一財)マイクロ マシンセンター	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	2017/1/23
27	今本 浩史	(一財)マイクロ マシンセンター	IoT 社会に向けた MEMS センサとセ ンサシステムの取 り組み	先進実装・電子部 品研究会第2回公 開研究会	2017/2/27
28	川本 康貴	沖電気工業(株)	ライフラインコア モニタリングシス テムの背景および 本システム向けの ネットワークプロ トコルについての 解説	化学工業会	2017/3/8

(4)その他の公表

なし

契約管理番号	14101100-0
契約管理番号	14101101-0
契約管理番号	14101102-0
契約管理番号	14101103-0
契約管理番号	14101104-0