

委託研究開発項目

「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26年度～平成28年度のうち平成27年度分中間年報

委託先名：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(再委託先名：国立大学法人東京大学)、
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

1. 委託研究の内容及び成果等

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) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発

本開発では、振動発電センサデバイスと鹿脅し回路の組み合わせることで、振動波形のピーク値だけをモニタリング可能となり、消費電力を1/100程度低減しながらポンプの異常診断ができるシステムを実現する。このシステムを実現する上で、振動発電に適した振動周波数の選択が重要であることは明白である。そこで、都内の地域熱供給施設の実証現場において実際のポンプ振動を取得するとともに、取得されたデータに対してFFT解析を行い、振動発電に適した振動周波数が110Hz近辺にあることを明らかにした。また、産総研がこれまでに開発してきた鹿脅し回路について、コンパレータ並びに参照電圧発生回路の消費電力の低減や昇圧回路の活用した回路の低電圧化、そして分圧回路の高抵抗化等の当該システムに対する回路の最適化を行うことで、昨年度開発された回路よりも消費電力を60%以上削減し、1.6V-0.26 μ Wを達成した。振動発電センサデバイス開発においては、産総研保有の圧電MEMS技術によりAIN薄膜を用いたデバイスを開発し、整流回路の改良も併せて行うことでDC1.6V-0.05 μ Wの発電量を達成した。昨年度開発されたPZT、AINデバイスでは出力電圧が不十分であったため鹿脅し回路を駆動することはできなかったが、今年度開発されたAIN薄膜振動発電センサデバイスを最適化された鹿脅し回路に実装したところ、振動加速度0.45m/s²の振動から取り出された電力のみを用いて、約26分の通信間隔での無線通信動作実証に成功した。振動加速度0.6m/s²にした場合は約15分の通信間隔となり、わずか0.15m/s²の振動加速度の上昇によって明らかに通信間隔が変化し、鹿脅し方式が振動加速度の変化に対して十分な感度を有していることが明らかとなった。

(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

AIN圧電デバイス量産試作プロセス技術開発では、昨年度開発したAIN圧電デバイスのオールドライプロセスを用いたAIN圧電カンチレバーの8インチウエハ試作を進め、産総研へ良品サンプルを提供し、振動発電特性を確認した。AIN圧電薄膜、Pt電極薄膜、それぞれのウエハ内の内部応力の分布を制御する成膜技術の開発を行い、薄膜を積層したカンチレバー構造のウエハ面内の反り量の制御も可能となった。これらの結果に基づいて、AIN圧電デバイス(振動検出センサ素子、発電素子、センサ素子)試作を実施し、良好に動作するカンチレバーデバイスが得られることを確認した。これにより基本的なAIN圧電デバイス量産試作プロセス技術の開発を完了した。発電性能を向上させるScAIN薄膜形成を行うため、8インチウエハ対応スパッタ装置導入を行い、膜厚の均一性等基本性能の確認を行った。

ウエハレベルパッケージ技術開発は、昨年度、有望な接合方法及び構造材料として抽出したAu-Au活性化接合技術の工程条件の最適化を行い、200℃の低温でも約100MPaと非常に高い接合強度が得られることを確認した。さらに封止構造TEGによる気密封止評価を行い、JIS合格判

定基準よりも小さなリーク速度であることが確認され、封止特性も良好であることが分かった。

これらの結果から、P型端末0次試作用AIN圧電デバイス向けのパッケージ構造としてAu-Au活性化接合による気密封止および貫通構造による取り出し電極を配置したパッケージを設計・試作を行い、P型端末0次試作を行う明星電気に提供した。

【再委託：東京大学】

振動センサ・発電デバイス技術動向の収集を、2015 Transducers、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検討を行った。

(3)コアモニタリング用センサ端末の開発

i)P型端末構造モデルの耐久性評価

低周波振動発電デバイスと高周波振動センサデバイス、温度センサ、無線モジュールを搭載する来年度実証実験用のP型端末(取付寸法30φ)の構造モデルを作成して 振動周波数8kHzまで振動伝達特性が問題ないことを確認した。プリント基板4枚構成で高周波振動センサ基板を最下位のベース部に設置することで実現した。

ii)センサデータ収集端末の仕様検討

P型端末から振動センサデータ、温度データを収集し、データに端末IDとタイムスタンプ(時刻情報)を付加し、M型中継端末に送信するセンサデータ収集端末の仕様検討を行い、H28年度実証実験用端末の仕様を確定した。

(4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発

本年度は昨年度に開発した高精度な時刻同期型の省電力通信方式をマルチホップネットワークへ適応し、M型中継端末上に実装して評価した。また、データ通信の再送を伴わない衝突回避制御方式開発のための実験及び方式検討を実施した。さらに、実証現場での電波測定を通じて最適な無線ネットワークの設計方式を検討した。また、来年度以降の実証実験に向けて、M型中継端末を試作した。具体的な成果を下記に示す。

i)高精度な時刻同期型の省電力通信方式を利用したマルチホップNWの実装

昨年度に開発した高精度な時刻同期型の省電力通信方式をマルチホップNWスタックに実装し動作確認をした(数週間の連続動作試験を継続中)。マルチホップネットワークスタック実装に際しては、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)を実施し実装をした。来年度以降は今回実装したプロトコルスタックを使って実証実験をする予定である。

ii)データ通信の再送を伴わない衝突回避制御方式の方式検討

想定されるNWトポロジを構築し、データ通信の再送を伴わない衝突回避制御方式の方式検討をした。省電力指向の無線マルチホップNWへ新しい機能を追加する際には、新たな制御通信が発生しないようにする必要がある。このため、まず既存の制御情報としてすべてのノードが持っている「周辺ノードの数」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考案し、検証を行った結果、ランダムバックオフ幅を長くすると通信の衝突によるパケットロスが発生する確率は低くなるが、代わりに通信遅延が非常に大きくなることが分かった。例えば、実環境で想定するネットワークトポロジで省電力無線ネットワークを構築した場合、通信の衝突が原因のパケットロスを0%にした際の通信遅延の理論最大値は3秒程度である。しかし、パケットロスが0%になるまでランダムバックオフ幅を

長くした場合、同じ条件のネットワークでの通信遅延は15秒程度になる。通信遅延抑制を検討した結果、特定のノードにデータ中継が集中しないようにすると遅延を短くできることが分かった。来年度は以上のことを踏まえ、通信遅延を減らすための方式検討および実証を行う予定である。

iii)実証現場での最適な無線ネットワーク設計方式の検討

実証現場で電波測定を行った結果、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から2m)により受信電波強度が10dB程度変わることが分かった。また、通信信頼性を確保するため、1ホップでのネットワーク環境の構築は困難であり、マルチホップ機能が必須であることが分かった。さらに、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。来年度は以上のことを踏まえ、ネットワークの設計構築ツールを開発する予定である。

iv)M型中継端末の開発

上記i)で検討したM型端末ハードウェアに必要な機能を盛り込んだM型中継端末を試作した。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。本研究の目標は電池を利用した連続動作10年である。本試作機では850mAhのR2型電池を利用して2.5年の連続動作を想定している。消費電力特性については来年度実証現場で検証をし、10年連続動作のための施策(「電池を容量の大きいCR123A型電池に変更」、「更に低消費電力のハードウェアの開発」等)について検討を行う。

(5)コアモニタリングシステムの開発

i)鹿威しセンサデバイスのエミュレータ開発

鹿威しセンサデバイスの開発とモニタリングシステムの開発を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。鹿威しエミュレータの機能は、センサの入力信号が振動加速度6点(3軸方向の振動加速度ピックアップ、サーボ型振動加速度センサ3点)、温度3点、予備入力7点の合計16点を持つ。装置外部への出力がアナログ信号とテキストファイルへの記録を持つ。鹿威しセンサデバイスのデータを疑似するための信号処理では、サンプリング周波数5kHzの収集データに対して任意のハイパスフィルタとローパスフィルタの組合せが可能なバンドパスフィルタを掛け、得られたデータの1秒間ごとのピーク値、実効値、積算値を算出、実効値がしきい値を超えた場合にカウントアップするカウンタ機能、計測値のトレンドグラフ表示などのグラフィックユーザインターフェースを持つ。また、フィルタの窓関数は矩形、ハミング、ハンニング、ブラックマンから選択可能としたことで、鹿威しセンサデバイスの共振周波数と同様の周波数特性を持つことができる。さらに、本年度は、3軸方向の加速度センサを3点同時に計測できるエミュレータを2セット開発し、加速度ピックアップ7台とサーボ型振動計3台の同時計測を可能とした。

鹿威しセンサデバイスのエミュレータは、付属のアナログ信号を出力する振動加速度センサをポンプに設置することで、鹿威し方式のセンサデバイスから出力される信号と同様のパルス信号およびカウント値を得ることができる。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検討が、鹿威しセンサデバイスを用いた試験を待つことなく進められ、さらに得られた知見はセンサデバイスの開発仕様に反映可能となった。また、来年度に行うP型端末実証の準備として、出力信号の無線伝送についての装置設計と試験用機材を準備した。

ii)データフィルタリング機能の開発

鹿威しセンサデバイスは、低周波帯域に共振点を持つセンサと高周波帯域に共振点を持つセンサの組合せで構成されることから、ポンプの軸受、機械剛性、芯ずれなどで発生する異常振動をFFTなどの周波数解析をすることなく検知できる。しかしながら、鹿威しセンサデバイスの信号は、振動強度の大小に伴い出力の時間間隔が異なるため、不規則の信号となる。この不規則の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、フィルタリング機能を加えた。昨年度のフィルタ仕様に加え、本年度は異常検知ロジックの仕様を固めた。

- a) 機器の運転／停止判断：起動の前後で生じる振動強度の急激な変化を検知する。これは鹿威し方式の信号で、出力の時間間隔の変化と捉え、この変化をしきい値判断することで機器の運転／停止の状態を特定するものである。実稼働下のポンプの運転データを解析した結果、停止時の暗振動 0.01m/s^2 に対して運転時の振動は $0.04\sim 0.1\text{m/s}^2$ となり、その増加倍率は数倍オーダーのとなることが判明した。この特性は、昨年度の縦型ポンプに加え、本年度は横型渦巻きポンプについても確認した。この結果、パルス信号の時間間隔が明らかに短くなった場合には、「起動した」と判断し、以降のデータをモニタリングシステムに使用する判断ロジックが組み立てられる。
- b) 機器の軸回転数の同定：近年、ポンプの軸回転数は、負荷に応じた可変流量制御としてインバータを用いた軸回転数制御が普及している。軸回転数の変化は振動強度の大小に影響することから、鹿威し方式でのパルス信号の出力間隔およびカウンタ値の大小から軸回転数の同定方法を検討した。大型に部類するポンプの実験結果を用いて、インバータによる軸回転数制御で可変流量としているポンプの定格流量に対する比率と、各種振動特性値(振動加速度のピーク値と実効値、振動加速度の波高率、振動速度の実効値、振動変位の実効値)の解析結果から、振動加速度のピーク値と実効値に二次関数の相関があることを確認した。なお、軸回転数と流量は比例関係にあるため、流量の比率は軸回転数の比率とみなせる。この結果、鹿威しセンサデバイスの信号出力間隔およびカウンタ値をパラメータとした軸回転数の同定について妥当性を確認した。ただし、モニタリングシステムの実用化検討として、軸回転数による補正よりは、定格回転数時に絞って診断を行うなどの実務的な適用方法の検討を加えた。
- c) 振動加速度の補正：振動強度の増加から異常検知を行うには、軸回転数によって影響される振動強度の大小を取除く必要がある。そこで、フィルタリングによって同定した軸回転数を用いて、例えば定格周波数での信号間隔もしくはカウンタ値に補正する。先に示した流量の比率と振動加速度(ピーク値もしくは実効値)の相関では、 $r^2 > 0.99$ の非常に寄与率の高い近似式が得られた。この結果、軸回転数をパラメータとした二次式を用いることで鹿威しセンサデバイスの信号出力に対する補正の基本式が得られた。
- d) 異常検知ロジックの開発：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た。この結果、1台のポンプに対して、基準点と監視点の2点以上の振動加速度を計測し、それらの増加度合から判断することが有効との結論を得た。

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

(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

i) オンサイトでのデータ取得とセンサ設置位置、設置法、ネットワーク構築法の検証

実証実験のサイトとして、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と、建物群に冷温熱を供給する地域熱供給施設を選定した。施設内にあるポンプ類の中から、熱源水系統のポンプにデータ収集装置を設置し、振動データを収集した。昨年度から測定開始した立型ポンプに加え、本年度からは横型渦巻きポンプの

測定を開始した。立型ポンプは、その高効率性から近年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少ない。立型ポンプの実測では、10℃程度の冷水系統と40℃程度の温水系統の2つの温度域、軸動力11kWと22kWの中・大型ポンプについてデータを取得した。この結果、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、モニタリングに好適な場所として「モータスツール」を特定した。また、横型渦巻きポンプでは、モータの軸受け部が好適であることを確認した。

さらに、別施設にて監視している横型ポンプの既存の振動加速度データについて、信号解析ソフトによるポンプ異常時のデータ解析を行い、鹿威し方式の振動加速度データでの異常検知の可能性を検討した。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、軸受け損傷の可能性が高いものである。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、つまりは異常の程度が高まるにつ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確認した。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、鹿威しセンサデバイスの中で高周波数に共振点を持つセンサのカウント増加として検知できる可能性を得た。

センサの設置方法としては、P型端末を設置する台座の固定方法として、接着とマグネットによる振動特性の違いを実稼働の現場にて検証し、4kHz程度までに差異が無いことを確認した。

ii) 鹿威しエミュレータを用いた予備測定と不定期データによるシステム検証

上記(5-i)にて開発した鹿威しセンサデバイスのエミュレータを、実証実験サイトの病院施設、並びに地域熱供給施設に設置し、測定を実施した。例えば立型ポンプでは、振動加速度ピックアップを監視に好適な場所として特定したモータスツールに、サーボ型振動加速度センサを架台に設置し鹿威し方式の信号出力が得られることを確認した。鹿威しエミュレータでは、サンプリング周期5kHzの振動データを1秒刻みでファイルに出力している。この出力として、ポンプ運転開始直後の起動トルクによる振動加速度の急激な上昇、起動後の制御目標値に向けたインバータ制御に伴う振動加速度の変動、運転の時間経過に伴う振動加速度の積算値の増加を立型ポンプ及び横型渦巻きポンプについて確認した。さらに、実際の機械室環境での長時間連続運転においてもエミュレータ本体が安定して稼働することを確認した。

2. 成果(当該年度分についてのみ記載)

(1)研究発表・講演(口頭発表も含む)

24件

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	小林 健	(国研)産業技術総合研究所	圧電 MEMS 振動発電センサデバイスの開発	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
10	荒川 雅夫	(一財)マイクロマシンセンター	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	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
11	坪倉 光佑	明星電気(株)	ネットワーク気象計と小型無線センサへの取組みの開発とセブン-イレブン店舗実装	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
12	川本 康貴	沖電気工業(株)	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	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
13	柴田 克彦	高砂熱学工業(株)	回転機器の振動特性と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/ 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
14	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
15	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

16	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	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	2015/9/10
17	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
18	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
19	川本 康貴	沖電気工業(株)	Clock adjustment for low-power Listening wireless communication system	International Conference on Internet of Things and Applications	2016/1/22
20	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」開催期間 「平成 28 年 3 月 15 日(火)~17 日(木)」	2016/3/17
21	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	2016/3/17
22	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
23	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	未定
24	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	未定

(2) 特許等
2件

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 マシンセンター	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

(3) 受賞実績
0件

3. その他特記事項(当該年度分についてのみ記載)

(1) 成果普及の努力(プレス発表等)

なし

(2)その他

なし

契約管理番号	1 4 1 0 1 1 0 0 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 1 0 1 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 1 0 2 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 1 0 3 - 0
契約管理番号	1 4 1 0 1 1 0 4 - 0