

【研究論文】

【平成28～29年度 県単研究】

県内シーズを活用したエネルギーハーベスティングおよびセンシングシステムの研究開発

小野 仁, 今井 和彦, 太田 晋一*, 高田 健一, 中居 倫夫

機械電子情報技術部 (* 現 新産業振興課)

本研究開発の目的は、宮城県内の新材料, 新デバイス, 技術シーズ等を活用して、工場の製造工程やインフラ劣化等のモニタリングに利用するための無線センサシステムを開発することである。

無線センサシステムの開発においては、ベースキットとして、コールドスタート機構, マイコン, 無線デバイス2種, 電子ペーパードライバの, 5つのモジュールを開発した。次にこのモジュールを用いて、振動発電が可能な磁歪合金シーズを有する県内企業と共同で、磁歪式振動発電デバイスを用いた無線センサシステムの共同開発を行い、この中で当センターは、加速度・温度複合センサ及びこれを用いた無線センサノードを開発した。さらに、無線センサシステムの主要部分について、回路図とソフトウェアを合わせ、「IoT体験キット」として地域企業への技術移転を開始した。

キーワード: エネルギーハーベスティング, 組込み, マイコン, 省エネルギー, 無線, センサ, M2M, IoT

1 緒言

エネルギーハーベスティングは、周囲の環境から微弱なエネルギーを収穫(ハーベスト)して、電力に変換する技術¹⁾であり、工場の製造工程やインフラ劣化等のモニタリングに利用される無線センサシステム用の電源として活用した場合、軽量化, 高耐環境化, 電池交換に要するコストの低減等が期待される。

一方で、宮城県内にはエネルギーハーベスティングや無線センサのシステムを構築可能な新材料, 新デバイス, 技術シーズ等を持つ企業が複数存在する。そこで、このような企業と連携して、エネルギーハーベスティングを応用したセンシングシステムを開発することを試みた。

2 ベースキット開発

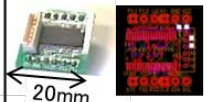
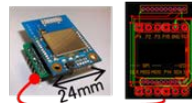
過去の研究結果から、エネルギーハーベスティングに対するコールドスタート機構の有効性、また、これを電源とした無線センサシステム構築に必要なマイコンや無線デバイスについての知見は得られている²⁾。

しかし、これらを組み合わせた回路構成は、エネルギー源の種類, 量や、センシングの目的や信号処理方法によって異なるため、無線センサユニットの試作を効率的に行うため、必要最小限の機能について、表1に示すコンセプトに基づき、市販のデバイスを用いて表2に示すモジュール群を開発し、これらの全体をベースキットとして提案した。

表 1 ベースキットのコンセプト

- 適したデバイスを厳選
- ブレッドボード上に配置可能
- ピン数は最大10程度
- モジュール間のバスはI2C or SPI
- オンボードでデバッグ可能
- 発電素子,コンバータ,センサは市販品活用

表 2 開発したベースキット

モジュール名	写真、PCB図面	スペック	特徴、用途
コールドスタート機構		$V_H=3.6V$ $V_L=0.9V$	停止状態からの起動のために必要
マイコン		16ビット CPU8MHz メモリ64KB	デバッグに消費電力表示, FRAM使用
無線デバイス1		802.15.4 2.4GHz帯	技術適合性証明済み、I2C, SPIバス使用可、内部CPUをユーザがプログラム可
無線デバイス2		802.15.4e 920MHz帯	
電子ペーパードライバ		2.7inch 246*176 (電子ペーパー)	電力が必要なのは書き換え時のみ

3 県内企業との共同開発

東北特殊鋼株式会社(本社:宮城県柴田郡村田町)は、自社開発した鉄コバルト系磁歪合金の用途展開の一環として磁歪発電に着目し、当センターと磁歪式振動発電デバイスを用いた無線センサシステムの共同開発を実施中である^{3) 4) 5)}。

この中で当センターは、前述のベースキットを活用して、加速度・温度複合センサを利用した無線センサノードを開発した⁵⁾。

3.1 加速度・温度複合センサの作製

東北特殊鋼株式会社の無線センサノードに対する要望は、以下の3つであった。

- ①1つの測定点で数Gまでの3軸加速度振幅と室温程度の温度時間変化の両方を測定可能
- ②測定点は2つで、1m程度離れた箇所に設置可能
- ③センサが被測定物の筐体へねじ止め可能

前記のベースキットはモジュール間のバスとしてI2Cバスが使用可能だが、I2Cバスの特徴として、デバイスの複数接続、信号線の延長が容易であることから、3軸加速度センサ・温度センサともに、I2Cバスに対応したデバイスを使用し、図1に示す加速度・温度複合センサを作製した。

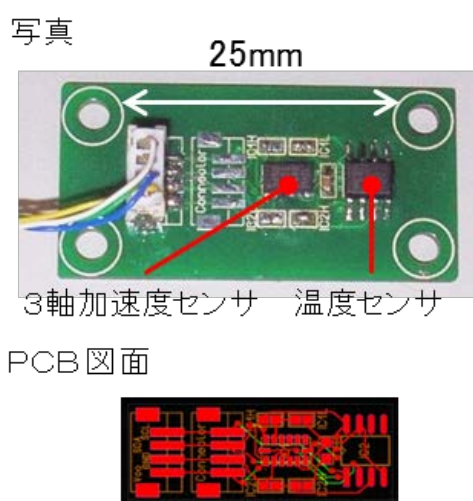


図 1 加速度・温度複合センサの構成

3.2 無線センサノードの開発

東北特殊鋼株式会社の無線センサノードに対する要望は、以下の3つであった。

- ①蓄電デバイスが空の状態(停止状態)からの起動が

可能

- ②数百 μ W以下の消費電力で20秒に1回程度測定データを無線送信可能

- ③無線センサノードの筐体はマッチ箱程度の大きさ

そこで、前記のベースキットのうち、コールドスタート機構、無線デバイス1、マイコンのモジュールを活用し、図2に示す無線センサノードを開発した。

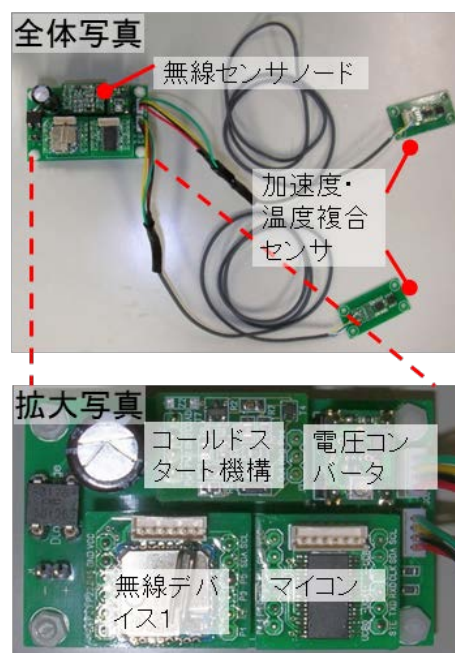


図 2 無線センサノードの構成

図3は、開発した無線センサノードの消費電力及び消費エネルギー累積値の時間変化である。この図に示す通り、無線センサノードが20秒に1回無線送信した場合の平均的な消費電力は約225 μ Wとなった。各デバイスの動作状態と待機状態の時間をソフトウェアにより細かく調整すること(間欠動作)によりこの値を実現している。

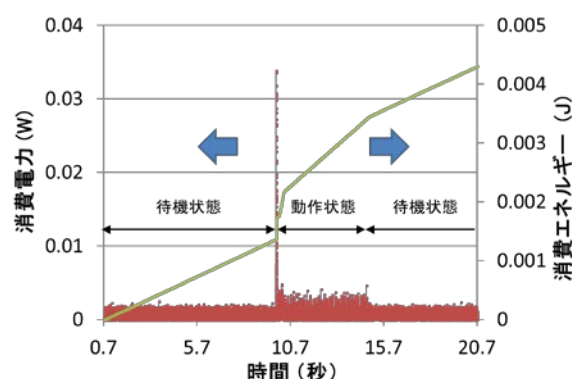


図 3 20 秒に 1 回データ送信した場合の消費電力

3.3 工場内動作試験

今回試作した加速度・温度複合センサと無線センサノードは、東北特殊鋼株式会社が自社開発した磁歪式振動発電デバイスと組み合わせた後、工場内複数箇所で作動作試験中である。

そのうちの1カ所の設置状況を図4に示す。本開発品は、発電デバイス、無線センサノード、センサを一体化せずに配置の自由度を高めたことが特徴である。

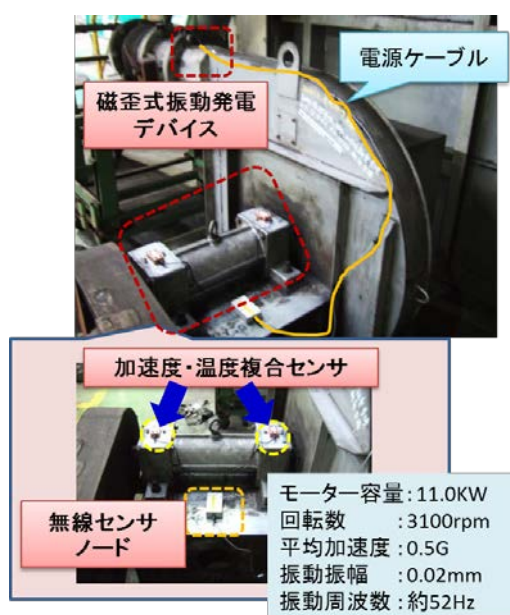


図 4 工場内設置状況(提供:東北特殊鋼株式会社)

また、東北特殊鋼株式会社が開発した表示用ソフトウェア画面に示されたセンシング状況を図5に示す。なお、図5に示された加速度は、簡易的手法²⁾(測定点数を間引くことにより周期的振動の振幅のみを省電力で取得する手法)により得られた加速度振幅である。



図 5 センシング状況(提供:東北特殊鋼株式会社)

4 「IoT体験キット」の開発

これまでの開発を通じて、当センターには超低消費電力かつ低コストの無線センサシステムを構築するためのノウハウが蓄積した。

そこで、地域企業への技術移転のため、超低消費電力IoT/M2M体験キット(略称「IoT体験キット」)を開発した。

なお、超低消費電力とは、本稿ではエネルギーハーベスティングによって得られる程度の電力(数100 μ W以下)で動作することを指す。

4.1 「IoT体験キット」のコンセプト

IoT体験キットは、工場の設備保全等への応用を可能とするため、また、技術移転を容易にするため、表4に示すコンセプトに基づいて開発した。

なお、IoT体験キットは前記ベースキットを用いて構築したので、表1のコンセプトも継承している。

表 3 IoT 体験キットのコンセプト

- ボタン電池を電源とする
- 超低消費電力かつ低コストの無線センサシステム
- 電圧、温度、湿度、気圧、三軸加速度を計測可能
- 回路図、ソースコード、取扱説明書を含む
- 無線デバイスおよびセンサの変更が容易
- ソフトウェアのメンテナンスが容易

4.2 「IoT体験キット」の構成と回路の仕様

IoT体験キットの基本構成は図6の通り。

図6の①～③(マイコン、無線デバイス1及び無線デバイス2)は、前記ベースキットを使用している。

図6の⑧～⑪(温度センサ、3軸加速度センサ、温湿度・気圧センサ)は市販のデバイスを使用しており、全てI2Cバスによりマイコンから制御される。

図6の⑧電源のコイン電池は一般的なコイン型リチウムイオン一次電池CR2032(公称電圧3.0V)である。

図6の④、⑤、⑦(電源電圧測定回路、抵抗値測定回路、高め電圧測定回路)は、マイコンに内蔵されたA/D変換器を用いて、超低消費電力で電圧を測定するための回路である。

これらの部品はブレッドボード上に配線されている。

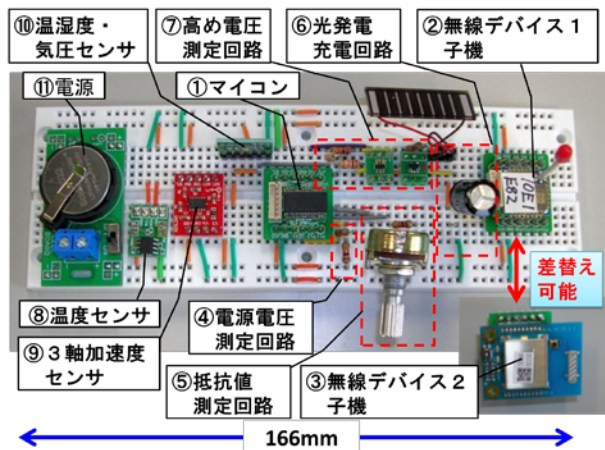


図 6 IoT 体験キットの基本構成

A/D 変換器の参照電圧は 2.5V であり電源電圧より低いので、電源電圧を測定するためには、これを分圧する必要がある。抵抗値を測定する場合も同様である。

電源電圧の分圧には抵抗を用いる(分圧抵抗)が、分圧抵抗の値を大きくすると、A/D 変換器に十分な電圧が供給できなくなるため、分圧抵抗は通常 10kΩ 程度である。一方で 10kΩ の抵抗による電力消費は 1mW 程度であり、超低消費電力機器において大きな問題となる。

そこで、IoT 体験キットでは、図 2 のようにマイコンの I/O ポートの出力設定を HIGH/LOW することにより、動作状態の間だけ分圧抵抗に電流を流し、A/D 変換の性能と超低消費電力を両立させている。

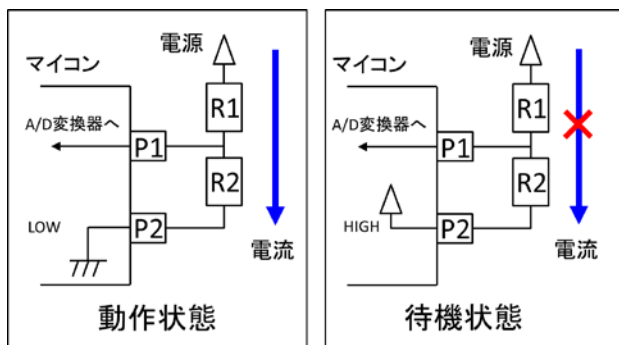


図 7 I/O ポート P2 による分圧抵抗 R1,R2 の制御

測定したい電圧が電源電圧より高い場合、図 7 の回路では I/O ポートの出力設定を HIGH にしても I/O ポートに電流が流れ込んでしまう。そこで、図 6⑦の高め電圧測定回路では、複数の FET を組み合わせることにより、この問題を解決している。

なお、図 6⑥の光発電充電回路は、5V の光電池を用いるため、電源電圧より高い電圧が発生する。

4.3 「IoT体験キット」の特徴

近年の無線デバイスは、図 8 左側のように、内蔵されるマイコンによりセンサを制御するものが増えている。このような無線デバイスは、多種のセンサを制御するためのソフトウェアがあらかじめ用意されているが、そこに含まれないセンサは、センサ制御ソフトウェア(ドライバ)を自ら作成する必要がある。

一方で IoT/M2M は通信距離や通信量の違いに応じて複数の規格が存在し、同じ規格の中でも複数の無線デバイスが存在するため、目的にとって最適な無線デバイスを選択するために、実際に複数の無線デバイスを動作させた比較が必要な場合がある。

ところが、無線デバイス内蔵マイコンでセンサを制御する場合、無線デバイスを交換すると、センサ制御ソフトウェアを作り直す必要がある。

センサ制御ソフトウェアは大きいものではない(概ね数百行以内/センサ)が、確実な動作を要求されること、電源投入から測定開始までと、測定開始からデータ取得までの間に時間待ちが必要であり、センサの数が増えるほど時間制約を守るための作りこみが必要になることから、ソフトウェアの作り直しは大きな労力が必要となる。

そこで、IoT 体験キットでは、図 8 右側のように、無線デバイスの他に外付けマイコンを用意し、外付けマイコンでセンサを制御する。このため、無線デバイスを交換してもセンサ周辺のソフトウェアを変更する必要は無い。

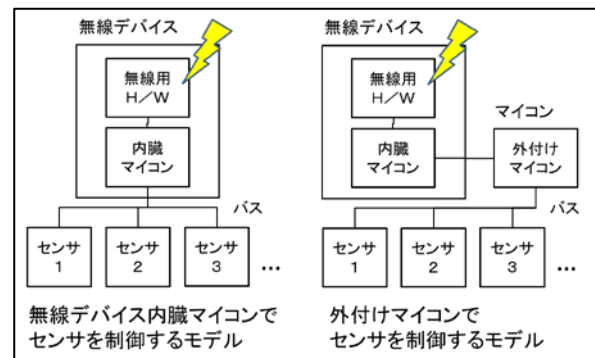


図 8 センサ制御のモデル

IoT 体験キットはまた、ソフトウェアを一行書き換えるだけで、任意のセンサ構成でのデータ取得を試行できる。但し、図 1 の構成に、さらに 3 軸加速度センサ 1 個と温度センサ 1 個を加えた構成を最大構成とする。

なお、超低消費電力を維持するため、ソフトウェアの変更に加え、センサの着脱や若干の回路変更が必要だが、ブレッドボード上なので容易である。

4.4 「IoT体験キット」の評価

IoT体験キットを、図6の構成で無線デバイス1を用い、自家用車のセンターコンソール上に置き、10秒に1回データを送信し、無線デバイス1の受信機を自家用車内に置き、自家用車を標高114mの地点から標高18mの地点まで走行させ、200点の時刻でデータを取得した結果は図9の通りである。

図9には、走行による加速度振幅の変化、空調による車内の気温と湿度の変化、標高による気圧の変化が捉えられている。なお、加速度は、簡易的手法²⁾により取得した。

図6の構成で無線デバイス1を用い、データ送信の時間間隔を変えた場合の消費電力の変化を測定した結果は、表4の通りである。

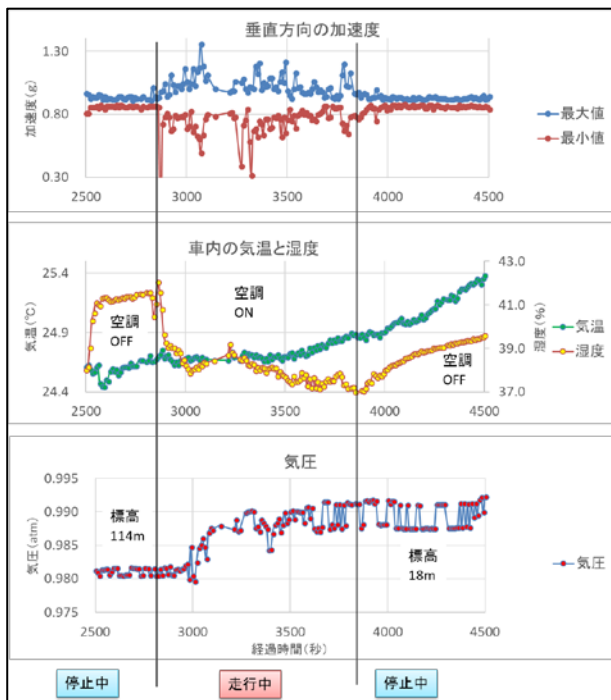


図 9 IoT 体験キットによるデータ取得結果(一部)

表 4 IoT 体験キット(無線デバイス1使用)の消費電力

無線送信の 時間間隔	平均消費 電力	電力消費比率	
		動作状態	待機状態
10秒	150μW	90%	10%
100秒	30μW	50%	50%
600秒	20μW	20%	80%

図6の構成で無線デバイスを変えた場合の消費電力と、無線デバイスが送信したパケットを受信側で正常に受

信できた距離(パケット到達距離)を比較した結果は表5の通りである。

但し、IoT体験キットの消費電力は全てのデバイスの消費電力の積算であるため、表4及び表5の平均消費電力は、概ね±10%程度の機差がある。

表 5 IoT 体験キットの無線デバイスを変えた比較

使用した無線デバイス	無線デバイス1	無線デバイス2
周波数帯	2. 4GHz	920MHz
出力	1. 8mW	20mW
平均消費電力 ^(※1)	150μW	800μW
パケット到達距離 ^(※2)	100m程度	300m以上 ^(※3)

※1 図6の構成で10秒に1回のデータ送信を行った場合

※2 外付けの半波長ダイポールアンテナを使用し、障害物の無い屋外で、地上1mの地点で、10回試行した結果

※3 300m以上はセンターの敷地外のため測定不可

受信側の無線デバイスは、送信側から次々に届くデータを取りこぼさないためのソフトウェア上の手当てが必要である。この手当てを施さない場合、送信台数が2台であってもパケット到達率が大きく低下する場合がある。

IoT体験キットの無線デバイス1では、リングバッファを用いてこの課題を解決している。

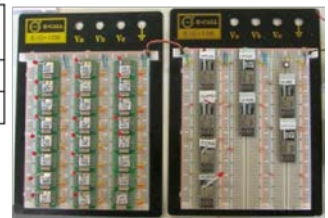
リングバッファは、先入れ先出し(FIFO)のソフトウェア構造である。受信割り込み処理は、受信データをリングバッファに保存するだけとし、後の処理をより優先度の低い割り込み処理に任せることにより、受信割り込み処理に要する時間が減り、受信データの取りこぼしを防ぐことができる。

リングバッファを用いた場合のパケット到達率は送信台数32台で評価を行い、その結果は表6の通りである。

表 6 複数の無線デバイス1による送信結果

台数	時間 占有率	パケット 到達率
1台	6%	95%
32台	18%	92%

ペイロード長: 90バイト
送信時間/台: 5. 7ms
パケット再送信: 無
送信確認: 無 (ACK確認無し)
送信距離: 10~30cm
試行回数: 230~250回



32台の無線デバイス1(うち8台は形状は異なるが同じもの)

4.5 「IoT体験キット」の提供方法

IoT体験キットの活用形態として、データ取得のみを試みるケースと、ソフトウェアや回路を変更して製品開発を試みるケースの2通りを想定しており、取扱説明書も2通

り用意してある。

IoT体験キットはソースコードと回路図を含むため、NDA(秘密保持契約)を締結した上で、技術改善支援事業等を通してノウハウを提供する。

防保全に寄与する無給電・無配線で稼働するセンサシステムを開発」 配付資料

5 結言

先ず、無線センサユニット開発の土台となる汎用性の高い単機能ベースキットを開発した。ベースキットのモジュールは、コールドスタート機構、マイコン、無線デバイス2種、電子ペーパードライバの、計5種類である。

次に、東北特殊鋼株式会社との共同開発において、加速度・温度複合センサと、前記ベースキットを用いた無線センサノードを開発した。

最後に、地域企業への技術移転のため、前記ベースキットを用いた超低消費電力IoT/M2M体験キット(略称「IoT体験キット」)を開発した。

これらの結果得られたエネルギーハーベスティングおよびセンシングシステム開発技術は、技術改善支援事業等を通じて地域企業に移転する。

なお、本研究開発では発電セルの開発も行っており、こちらは特許申請中である。

謝辞

本稿作成にあたりデータを提供していただき、さらに共同研究中の無線センサノードの機能の一部を「IoT体験キット」として地域企業に展開することにご理解をいただいた東北特殊鋼株式会社様に対し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) “エネルギーハーベスティングとは” エネルギーハーベスティングコンソーシアム HP, <http://www.keieiken.co.jp/ehc/about/index.html>
- 2) “平成27年度宮城県産業技術総合センター研究報告” HP, http://www.mit.pref.miyagi.jp/kenkyu/Report_No_13.pdf P1-P7
- 3) 東北特殊鋼(株) HP, http://www.tohokusteel.com/pdf2016/press_release_160224.pdf
- 4) 東北特殊鋼(株) 田山巖 「磁歪発電素子を利用した電池や配線不要のセンサシステムの開発」機械設計 第60巻 第16号 2016年 12月号 P33-P37
- 5) 第54回産総研・新技術セミナー 「工場設備の予