

IoTソリューション向け電池レス無線スイッチ

Energy Harvest Switch Directed for IoT Solution

佐田 紀文
Norifumi Sata

野田 雅明
Masaaki Noda

大石 傑
Suguru Oishi

要 旨

今後の市場拡大が見込まれるIoT市場をターゲットに、電源を持たない装置や配線が困難な装置、電池交換が困難な装置からの情報取得を実現する電池レス無線スイッチを開発した。電池レス無線スイッチは押下操作により電磁誘導発電する自己発電部と、928MHz帯無線通信部で構成されており、電源供給なしでON、OFF信号を無線送信できる。自己発電部はさまざまな装置への搭載を考慮し、小型・薄型形状としながら独自の磁気回路反転機構、速動機構により業界トップレベルの発電量（300 μJ ）を確保し、また無線通信部においては独自の高効率アンテナ、制御技術により安定した通信品質を実現した。

Abstract

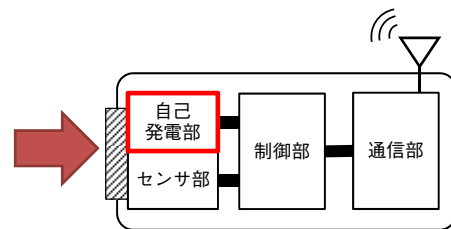
Targeting the growing IoT device market, the Energy Harvest Switch is a device that can obtain information yet is wireless and has no power supply and no need for battery replacement. The Energy Harvest Switch has a mechanism where, with the press of a button, a self-power generating unit creates an electromagnetic induction generation of electricity. This electricity is enough to generate the 920MHz band wireless communications module, which proposes a battery-less device that can send on-off signals wirelessly. Taking into account that the Energy Harvest Switch will be mounted on a variety of appliances, the self-power generating unit itself is thin and compact, thanks to an original method that inverts the magnetic circuit in a kinetic manner, ensuring the highest level of electric power generation (300 μJ) in the IoT market. Our original high-efficiency antenna and control technology regulates the wireless communications module, which also ensures stable quality in wireless communications.

1. はじめに

近年、インターネットなどの情報インフラストラクチャが社会に浸透したことから、ありとあらゆるものがネットワークに繋（つな）がるM2M（Machine to Machine）の仕組みが注目を集めている。そして、M2Mの登場により、モノ同士が人を介さず情報交換を行い、自動的に制御を行う、IoT（Internet of Things、モノのインターネット）の世界の到来への期待が高まっている。そこで、IoTソリューションの実現に向けて、近年、注目が高まっているのが、われわれの身の回りのどこにでもある微小エネルギーを電力に変換し活用するエネルギーハーベスティング技術である。

筆者らはM2Mの進展に欠かせないと予測される状態検知、位置検知センサ用途に、電源を持たない装置や配線が困難な装置、電池交換が困難な装置に向けたエネルギーハーベスティング技術が活用できないかと考え、

第1図に示すように自己発電部を有し、センサ部にてスイッチ操作を検知し、通信部から信号を送信する、小型・薄型で安定した通信品質を実現する電池レス無線スイッチを開発した。



第1図 電池レス無線スイッチブロック図

Fig. 1 Block diagram of an energy harvest switch

2. 開発目標およびエネルギーハーベスティング技術概要

IoTやM2Mへの多くの展開を期待するうえでは、電池レス無線スイッチには、汎用性の高い機能が必要となる。

他社から製品化されている電池レス無線スイッチの仕様を第1表に示す。この表から、大きな発電量を得るためには、スイッチの操作において大きな操作力と長いストロークを必要とすることがわかる。ここで最大操作力

第1表 電池レス無線スイッチベンチマーク

Table 1 Benchmark of an energy harvest switch

メーカー	最大操作力 [N]	ストローク [mm]	発電量 [μJ]	変換効率 [%]
A社	7	3	200	12
B社	4.5	1.8	200	25
C社	15	5.5	400	5

※各社カタログ値を基に作成

×ストロークで表される仕事量を入力エネルギーとして、そこから得られる発電量を出力エネルギーとすると、出力エネルギーに対する入力エネルギーの比率が変換効率となる。

さまざまな用途に展開できる汎用性の高い電池レス無線スイッチを実現するには、高変換効率のデバイス開発が必要となる。

また、状態検知や位置検知センサ用途に着目した際、例えば、「ON」と「OFF」や「開」と「閉」など、多くの用途には2つの異なる信号が発信できることが必要となる。そこで電池レス無線スイッチには2種類のボタンを設け、どちらを押下したかで、その状態を不備なく検知できる構造とした。筆者らが開発するデバイスの目標仕様を第2表に示す。

第2表 プロトタイプサンプル目標仕様

Table 2 Target specification of prototype

機能	操作機能	2ボタン
	最大操作力	<10 N
	発電量	300 μJ
	変換効率	>30 %

スイッチ操作のように力学的エネルギーを電力に変換する原理には、一般的に第3表に示すとおり「電磁誘導」、「圧電」、「静電誘導」、「磁歪（じわい）」の4種がある。

今回、小型化への難易度は高いが、発電変換効率の最大化に着目し、最も発電効率の高い「電磁誘導」方式を採用した。

第3表 力学的エネルギーからの電力生成手法

Table 3 Variation of power generation from kinetic energy

	電磁誘導	圧電	静電誘導	磁歪
コア材料	磁石・コイル	圧電材料	エレクトレット	磁歪材料
メリット	発電効率最大	MEMS*で小型化可能	低周波数でも出力大	小型化比較的可
デメリット	小型化すると電圧低下	疲労破壊	構造複雑インピーダンス高	疲労破壊
小型化	× (難しい)	◎ (簡単)	△	○

*MEMS：Micro Electro Mechanical Systems

3. 高効率発電技術

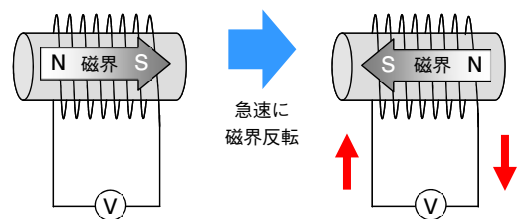
3.1 発電原理

発電の原理にはレンツの法則、およびファラデーの電磁誘導の法則を用いる。すなわち、第2図に示すようにコイルの中を貫く磁束が反転した場合、コイルにはその磁界の変化を妨げる方向に誘導起電力が発生する（レン

ツの法則）。

その際、発生する誘導起電力の大きさEは（1）式に示すように、回路を貫く磁界の変化の割合に比例する（ファラデーの法則）。そこで磁束をできるだけ急速に反転して、単位時間当たりの磁束の変化量である $\Delta\phi/\Delta t$ を大きくすれば、より大きな発電量を得ることができる。ここで、E：誘導電圧[V]、N：コイル巻数[回]、 $\Delta\phi$ ：磁束の変化量[Wb]、 Δt ：時間の変化量[s]とする。

$$E = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

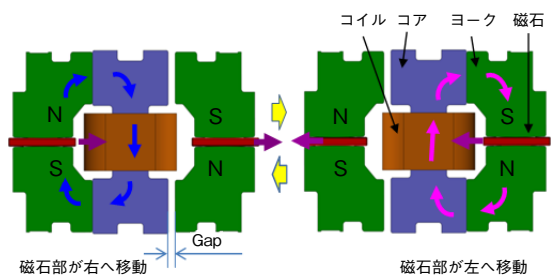


第2図 発電原理
Fig. 2 Principle of power generation

次節以降において、小型、低入力量にも関わらず高い変換効率を実現した「高効率の実現化における磁気回路部」と「速動機構部」について述べる。

3.2 磁気回路

序論で述べたようにスイッチの汎用性を実現するため、磁気回路は第3図に示すような薄く構成できる磁気回路を開発した。



第3図 磁気回路原理
Fig. 3 Principle of magnetic circuit

本磁気回路は固定されたコイル部（コイルおよびコア）の左右に配置した一対の磁石部（磁石とヨーク）が速動機構部と連動する構造となっており、磁石部が図中右から左へ動作することにより、コイルを貫通するコアに流れる磁束が反転する。この磁束反転によりコイルに誘導起電力が発生する。また、コアとヨークにはGapを設定しており、離れた側の磁石部から出た磁束がコアに影響

を与えないよう工夫している。

本磁気回路を用いれば、コアに流れる磁束を完全に反転でき、発電効率を高くできる一方、磁石による吸着力を瞬時に引き外すための大きな駆動力が必要となる。

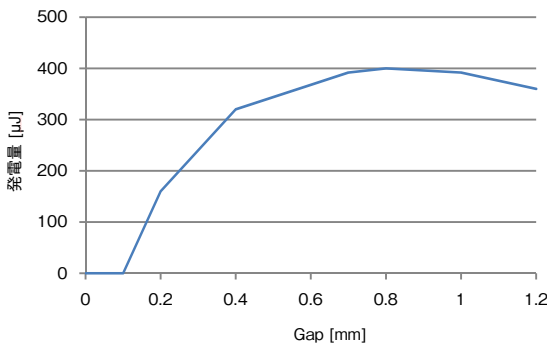
磁石の吸着力がスイッチの操作力に影響することや、デバイスサイズ、コスト面から、磁石を大きくできないなか、発電量を大きくするには、さらに効率を高める必要がある、その方法は(1)式に基づいて、

1. 磁石部の動作時間を短くする (Δt を小さくする)。
2. 磁束変化量を大きくする ($\Delta\phi$ を大きくする)。
3. コイル巻数 N を大きくする。

の3つが考えられ、本稿では1.および2.について述べる。

[1] 磁石部の動作時間短縮

動作時間を短縮するため、磁石部の動作距離を可能な限り短くする。ただし、Gapが狭いと磁束がコアから反対側のヨークを通じて磁石部だけでループを作り、コイルの中を通らない可能性があると考えられる。そこで、磁場解析により検証を行った。



第4図 磁場解析によるGapと発電量の関係性
Fig. 4 Relationship between the gap and the amount of power generation by magnetic CAE

第4図に示すようにGapを0.4 mm以下にすると発電量に影響が出ることがわかった。また、Gap量が大き過ぎると磁石部の動作時間が長くなるため、発電量が低下する。従って、本製品には、磁束が磁石同士で帰還せず、また、変換速度に影響のない、発電効率として最適なGap量を導出し、採用している。

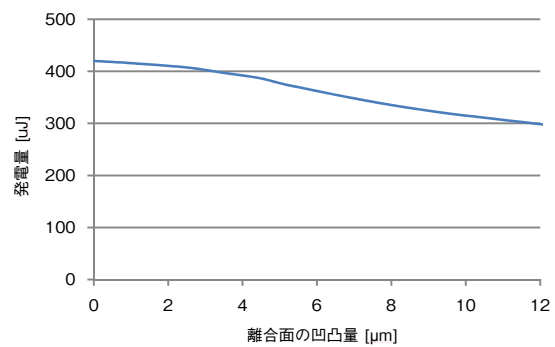
[2] コアを通る磁束変化量を大きくする

磁石サイズ一定の条件下で、コアを通る磁束量を大きくするには、磁気回路内でいかに磁束を外部へ漏らさないかが重要となる。ここでは磁束漏れ対策の1つであるヨーク離合面の平滑化について説明する。まず、磁束の流れにくさを表す磁気抵抗 R を考えた場合、(2)式で表される。

$$R = \frac{l_g}{\mu \cdot a_g} \dots\dots\dots (2)$$

l_g : 空隙の距離, μ : 透磁率,
 a_g : 空隙の断面積

空気の透磁率 μ_0 は鉄の透磁率の約1/5000であることから、磁気回路内に空隙があった場合、ヨーク内を通るのに比べ大幅に磁束が減衰することがわかる。本磁気回路にはヨーク部材が離合する箇所が複数あるが、磁気回路を構成するヨークは離合面であっても隙間なく接する必要がある。



第5図 磁場解析による離合面の凹凸量と発電量の関係性
Fig. 5 Relationship between surface roughness and amount of power generation by magnetic CAE

第5図に示すシミュレーション結果や試作をとおして、10 μmの隙間でも発電量に影響があったため、量産マージンを考慮し、離合面の隙間を5 μm以下にする検討を行った。第4表に考えられるヨーク端面の加工方法とその特徴、およびデバイス薄型化に与える影響を比較した。

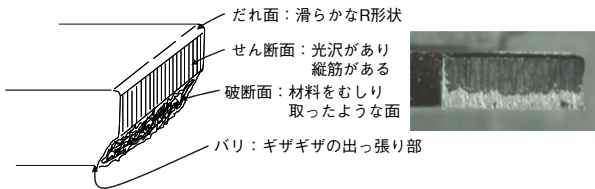
第4表 製造方法比較

Table 4 Comparison of manufacturing methods

	板金 打ち抜き	板金 折り曲げ	ファイン ブランキング	研削
断面仕上げ	△	○	◎	◎
設備	◎	◎	×	△
工数・コスト	◎	◎	×	×
デバイス薄型化	○	×	○	○

薄型かつ低コストとするため、打ち抜き工法を検討する。その場合、打ち抜いた断面を離合面とする必要があるが、通常板金の打ち抜き部は第6図に示すような破断面となり、20 μm~30 μm程度の凹(へこ)みが生じる。そこで、板金の打ち抜き後、端面を薄く削り取るシェーピング加工を採用し、初期試作では凹凸を5 μm以下まで低減することができた。同加工の場合、順送プレスにおける通常の打ち抜きに数ステージの追加で実現できるた

め、コスト面も期待できる。ただし、シェービング加工によって削り取ったカスが工程内に混在するといった懸念もあり、より安価で生産性を維持できる加工技術について継続して検討している。



第6図 打ち抜き後の断面図
Fig. 6 Cross-section of punching surface

3.3 磁石部の動作を早く行う速動機構部

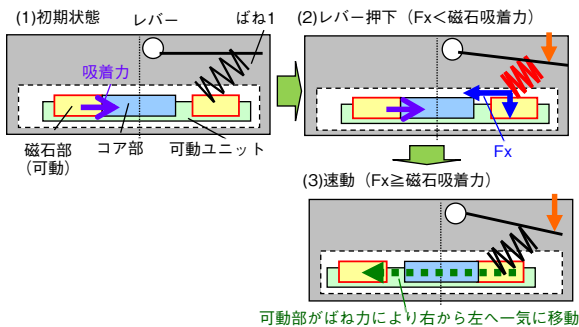
前項で述べた磁気回路について、スイッチ操作をゆっくり行っても、必要な発電量を得るには、磁石部を速動させる必要があります。そのための速動機構に求められる条件を次に示す。

1. ボタン操作速度に関わらず一定の速動動作を行う。
2. 磁気回路に垂直な操作力を水平方向の駆動力に変換する。
3. 薄型デバイス内に収まるサイズで実現する。
4. 磁石の吸着力（約12 N）を引き外して速動する。

特に4. についても汎用性を考慮すると最大10 Nの操作力で12 Nの吸着力を外すような力を増幅する必要がある。

また、1. を実現しようとする、外部のボタンをどれだけゆっくり押しでも内部の磁石部を早く動かすためには、速動ばねを搭載する必要がある。その構造を、低い仕事量の実現と併せて説明する。

前述した機構では操作力は磁石の吸着力に依存する。そこで、操作力を低減させる機構として、“てこの原理”を応用したものを考える。そこで、第7図に本デバイス



第7図 速動機構の原理図
Fig. 7 Diagram of rapid action mechanism

で採用した速動機構の原理図を示し、各ステップの詳細を次に記載する。

- (1) 初期状態
- (2) レバー押下（ばね1のX方向の力 $F_x < \text{磁石吸着力}$ ）：
ばねの圧縮によりX方向の力 F_x が蓄積されるが、まだ磁石部は静止状態にある。
- (3) 速動（ $F_x \geq \text{磁石吸着力}$ ）：
 F_x が磁石の吸着力を超えた時点で、磁石部および可動ベースがX方向に速動する。

上記の機構により速動、かつ、低操作力を実現できる。これらの技術により、達成した製品仕様を第5表に示す。この結果、操作力も抑えられているうえに、非常に高い発電効率を実現していることがわかる。

第5表 発電ユニットの試作品性能

Table 5 Prototype performance of power generation unit

		目標	開発品
機能	操作機能	2ボタン	2ボタン
	最大操作力 [N]	<10	8
	発電量 [μJ]	300	400
	変換効率 [%]	>30	42

4. 無線システム

求められる無線仕様は、低消費電力だけでなく、ライセンスフリーで屋内使用でも広いエリアをカバーでき、小型で機器に組み込まれても、通信距離が劣化しないことが望ましい。さらには、発電電力が一時的で、持続しないという制約課題に対応する必要もある。以下に電池レス無線スイッチならではの課題と対策を述べる。

4.1 無線周波数選定

ライセンスフリーである特定小電力無線において、無線スイッチに使用できる周波数帯は、第6表に示すように混信対策として送信前に自デバイス以外の無線信号の存在を確認するキャリアセンス機能が必要でない周波数帯に限られる。

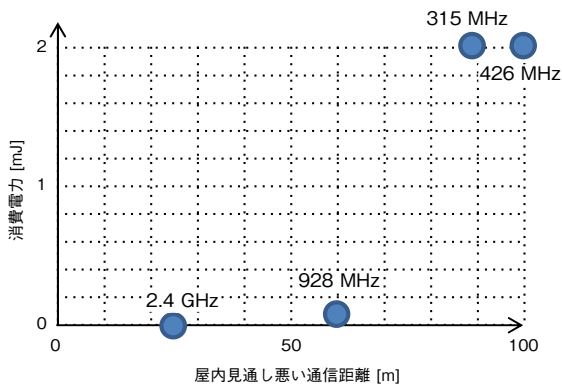
第6表 キャリアセンスなし特定小電力無線周波数帯

Table 6 Specified low-power radio without carrier-sense

項目	315MHz帯	426MHz帯	928MHz帯	2.4GHz帯
ARIB規格	STD T-93	STD T-67	STD T-108	STD T66
送信電力	25 μW eirp*	10 mW	1 mW	10 mW
データレート	4.8 kbit/s	4.8 kbit/s	100 kbit/s	1Mbit/s
リンクバジェット	100 dB	105 dB	100 dB	95 dB

*eirp：実効等方放射電力（effective isotropically radiated power）

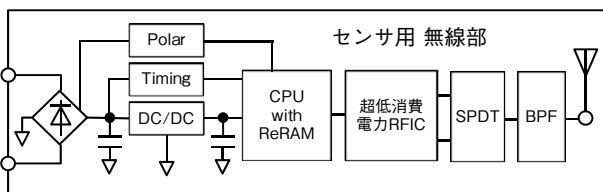
周波数選定に当たり、一般に周波数の低い方が電波伝搬ロスが低く、より遠くまで電波が届き、データレートが高い方が同じ長さの電文を送信するうえでは送信時間を短くでき、消費電力が節約できる。機器のサイズを2.4 GHzの1/4波長程度に固定して考えた場合、各周波数帯の空中線電力から受信感度の差分であるリンクバジェットはどの周波数もほぼ同じレベルとなるが、電波伝搬ロスを考慮した通信距離、ならびにデータレートを考慮した消費電力から最適な解を考えると、第8図のように928 MHz帯が最も望ましく、本システムに採用している。



第8図 無線システム伝播（でんぱ）距離比較
Fig. 8 Radio system propagation distance comparison

4.2 機器構成と使用デバイス

第9図に示すように、低消費電力のため、RFIC（Radio Frequency Integrated Circuit）はトップクラスの低消費電力である当社製MN87401を使用し、CPUはバイト単位で不揮発性メモリーの内容が書き換え可能なReRAM（Resistive Random Access Memory）マイコンを搭載している。無線内容の秘匿性を考慮した場合、電文内容をシーケンシャルに変化させる暗号化が必要であり、次の送信に備え変化するシーケンシャル符号を不揮発性メモリーに保存する必要がある。このとき、通常のフラッシュメモリーではブロック単位での書き換えが必要で、かな



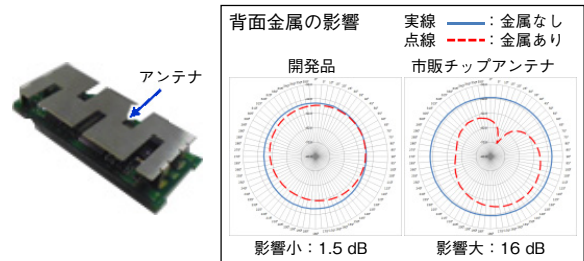
SPDT : Single-Pole/Double-Throw Switch, BPF : Band Pass Filter

第9図 無線部構成図
Fig. 9 Radio section block diagram

りの電力を要していたが、ReRAMを用いることでバイト単位で書き換えが行え、わずかな電力でも暗号化の実現が可能となった。

4.3 小型アンテナ

機器に組み込まれて使用されることを考慮し、裏面に金属がきても影響が少なくなるよう、小型アンテナの開発を行った。開発したアンテナは第10図に示すようにパッチアンテナを小型、変形させた逆L型平面アンテナであり、実装部品を基板とアンテナ板金との間に配置することでさらなる小型化を図っている。通常のチップアンテナと比べて、裏面に金属を配置した際のアンテナ利得の劣化が約14 dB以上軽減されている。



第10図 無線部外観図と背面に金属板を配置したときのアンテナ利得比較

Fig. 10 Radio section appearance and antenna gain comparison with metal back plate

4.4 セキュア通信とペアリング

本機では混信・盗聴対策として、電文に十分な長さの識別符号をもち、ペアリング先の無線親機と共通のユニークな秘密鍵で暗号化を施している。そこで、ペアリングに際しては、親機より、秘密鍵を無線スイッチ側に渡す必要が生じるが、発電が行われたタイミングでしか鍵を送付する機会がないことと、センサが機器に組み込まれてしまっているため、ペアリング用に特別なボタンを設けることができない2つの課題があった。

上記課題を解決するために、機器操作、つまり発電が行われるタイミングのパターンを無線スイッチ側で判別を行い、あらかじめ決められたパターンに一致した場合にのみ、無線スイッチから親機にペアリング鍵要求信号を送信する方式を新規に考案した。親機は要求信号を受け取るとすぐに、暗号鍵とその無線スイッチの識別子を無線スイッチに送り返し、無線スイッチの登録を行う。無線スイッチは、親機から返送されてきた識別子が自識別子と一致することを確認すると、その暗号鍵を新暗号鍵として不揮発性メモリーへの登録を行うことで、ペアリングが完了することとなる。ここで、上記方式を実現

するため、スイッチが押される間隔の長短を判別する必要があるが、電力の関係上、タイマを長時間使用することができないことが課題であった。そこで、新たに時定数を利用した低消費電力タイミング判別回路の開発を行い、無線部起動時に前記、タイミング判別回路の出力を読み、その結果がHighレベルもしくはLowレベルで前回からの起動時間がどれほど経過したかの判別を行っている。以上により、低消費電力ながらセキュアの通信の実現を行っている。

5. まとめ

前述してきた技術により、小型・薄型形状でありながら高効率な自己発電を行いセキュアな通信を実現する、汎用性の高い電池レス無線スイッチを開発した。今後、より汎用性を追及するため、軽い操作性や小型化を検討していくとともに、IoTデバイスとして、本デバイスのさらなる応用展開の検討を行っていく。

執筆者紹介



佐田 紀文 Norifumi Sata
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 メカトロニクス事業部
Electromechanical Control Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



野田 雅明 Masaaki Noda
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 メカトロニクス事業部
Electromechanical Control Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



大石 傑 Suguru Oishi
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 メカトロニクス事業部
Electromechanical Control Business Div.,
Automotive & Industrial Systems Company