

ZigBee センサーネットワークに対する マイクロ波無線電力供給システムの研究開発 II

鈴木 望[†] 篠原真毅[†] 三谷 友彦[†]

[†] 京大生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: [†] {n-suzuki, shino, mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし ワイヤレスセンサーネットワークでは各センサー端末のバッテリーを定期的に交換する必要があり、コスト上の問題となっている。そこで本研究はマイクロ波無線電力伝送を用いてバッテリー交換の不要な、または無線かつ遠距離からバッテリーを充電することのできるワイヤレスセンサーネットワークの実現を目指す。送電マイクロ波中における ZigBee 通信実験を行った結果、送電マイクロ波周波数を 2.46GHz として検討を進めることとした。ZigBee 通信が行えなくなるマイクロ波電力密度は通信の受信信号強度に大きく依存していることがわかった。整流回路と受電パッチアンテナを組み合わせることでレクテナを作成し負荷抵抗を接続して無線電力伝送実験を行ったところ、65%の変換効率と ZigBee 端末を動作させるだけの出力電圧が得られた。レクテナに ZigBee 端末を接続して無線電力伝送実験を行ったところ端末を動作させることができ、他の端末と通信している様子が確認できた。また、二次電池を使用することで ZigBee 端末の動作と二次電池への充電を同時に行うことができた。

キーワード マイクロ波無線電力伝送, ZigBee, 受信信号強度 (RSSI)

Study and Development of Microwave Power Transmission System for ZigBee Sensor Network II

Nozomu SUZUKI[†] Naoki SHINOHARA[†] Tomohiko MITANI[†]

[†] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: [†] {n-suzuki, shino, mitani}@rish.kyoto-u.ac.jp

• **Abstract** Battery problems of a wireless sensor terminal including its lifetime and exchange cost are serious obstacles to constructing a wireless sensor network. The objective of the present study is to develop a ZigBee sensor network powered by external microwave, in order to realize a battery-less or wirelessly-charged wireless sensor network. We conducted ZigBee communication experiments while the ZigBee device was irradiated with external microwave. From the experimental results, we used 2.46 GHz as the power transmission microwave frequency. The external microwave power density which interrupts the ZigBee communications depended on received signal strength indicator (RSSI) of the ZigBee communication. Next, we developed a rectenna by connecting the rectification circuit to a power receiving patch antenna. We conducted power transmission experiments with the developed rectennas. We obtained a conversion efficiency at 65 %, and confirmed that these rectennas could output enough voltage to operate the ZigBee device. Finally, we conducted ZigBee device operation experiments by microwave power transmission. The ZigBee device could be operated by microwave power, and could communicate with another ZigBee device. Using secondary batteries, we succeeded to operate a ZigBee device and charge the batteries at the same time.

Keyword Microwave Power Transmission, ZigBee, Received Signal Strength Indicator

1. 研究背景・目的

近年、センサーネットワークは広い用途に使用されることが期待されており、例えば建物内の冷暖房やセキュリティ管理（ビルディングオートメーション）、温度や湿度などのモニターによる農業生産管理などが挙げられる。しかし、有線で通信・電源を確保するシステムにおいてはネットワーク端末自体よりも配線にコストがかかってしまう場合がある。一方、ワイヤレス通信とバッテリーを用いるシステムでは配線の必要が無く、電源の確保が難しい場所にも適用が容易だが、各端末に対してバッテリー交換の必要がある。

本研究の目的は、マイクロ波無線電力伝送を用いてバッテリーレスまたは遠距離からのバッテリー充電を可能とするワイヤレスセンサーネットワーク端末の開発である。通信端末にはZigBeeを採用した。ZigBeeは無線通信規格の一つであり、無線LANやBluetoothに比べ消費電力が小さいという利点があるが、送電できる電力の限られるマイクロ波無線電力伝送に適している。また、ZigBeeは生産コストも低く、ネットワーク容量が大きくセンサーネットワークに適した規格と言える[1]。

2. 送受信システム

本研究で想定する受電システムの概略図を図1に示す。このシステムはレクテナ素子、蓄電素子、ZigBee端末から構成される。送電マイクロ波にはISMバンドである2.4GHz帯を用いる。しかしZigBee通信にも2.4GHz帯の周波数を使用しているため、送電マイクロ波によって通信が正しく行えなくなることが考えられる。

本研究ではZigBee端末キットにZEC社製ZB24FM-Zを使用する。このキットは各ZigBee端末に温度センサーが取り付けられており、温度データを一定時間ごとに送信する仕様になっている。ZigBee端末にはネットワークの管理をするZC端末、通信の中継を行うZR端末、ネットワークの末端となるZED端末があり、本研究では主にZED端末に対して送電を行う。ZED端末は2.7~3.4Vの入力電圧で動作し、消費電力の時間平均は3.1V入力時で68mW程度であり、入力電圧によって多少変動する。また、ZED端末の電源を入れた直後の1秒間程度、および起動後の1秒毎に1.5ミリ秒間程度に消費電力が185mWとなる時間がある。起動後のZED端末の入力インピーダンスは144Ωで、この値は入力電圧が変わってもほぼ一定となる[2]。

端末蓄電素子にはキャパシタまたは二次電池を使用する。蓄電素子はZED端末の消費電力が変動しても電圧を一定にする働きのほかに、一時的に送電マイクロ波が放射されていなくても端末を動作させる働きを持つ。

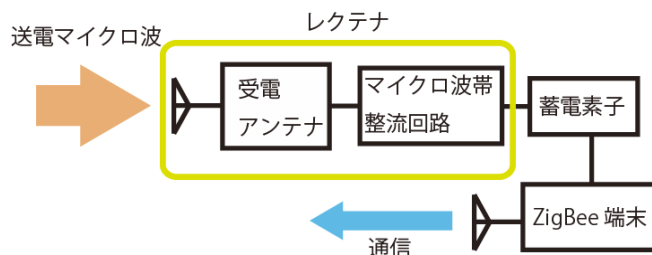


図1: 受電システム

3. 送電マイクロ波中でのZigBee通信実験

図2の測定系において、通信中のZED端末に対して2.4GHz帯の送電マイクロ波を放射したとき放射マイクロ波電力が大きいとZigBee通信が行えなくなることが確認された。また、送電マイクロ波の周波数を2.46GHzにすると他の2.4GHz帯の周波数に比べて高い電力密度のマイクロ波中でもZigBee端末が通信を行えることがわかった[2]。本研究ではZigBee通信が行えなくなる際の送電マイクロ波電力密度を最大通信可能電力密度と呼ぶこととする。最大通信可能電力密度はZigBee通信の受信信号強度によって大きく異なった。受信信号強度とはZC端末が受信した信号を復調した際の電力であり、一般的にこの値はRSSI（Received Signal Strength Indicator）と呼ばれる。本研究で使用したZigBeeキットは送信する信号の電力を増減させる操作ができないため、RSSI値は基本的に親機であるZC端末と通信先のZED端末との距離や角度によって決まる値であり、実験においてRSSI値を変化させる場合はZC端末の位置や角度を変化させた。図3は図2の測定系を使用してRSSI値を-49dBm、-54dBm、-66dBmと三通りに変化させた際の最大通信可能電力密度の測定結果である。RSSI値が変わっても送電マイクロ波の周波数による最大通信可能電力密度の大小の変化は見られなかったが、RSSI値が大きいほど最大通信可能電力密度は大きくなった。

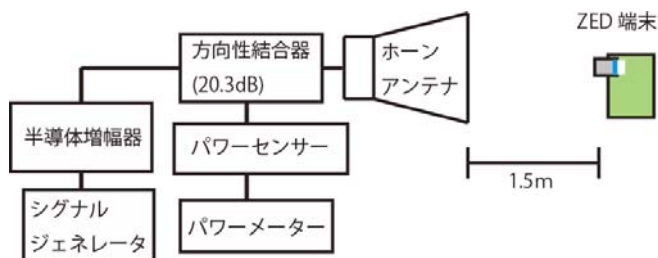


図2: 送電マイクロ波中の通信実験

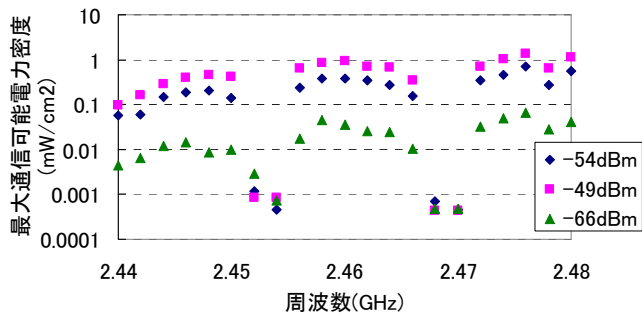


図 3：各 RSSI 値での最大通信可能電力密度の周波数特性

また、送電マイクロ波周波数を 2.46GHz に固定して最大通信可能電力密度の RSSI 値特性を測定した結果が図 4 である。図 3 同様に RSSI 値が大きいほど最大通信可能電力密度は大きくなり、測定した値を RSSI 値に対して両対数にプロットすると点が一直線上に並んだ。この結果から最小二乗法により最大通信可能電力密度 ρ と RSSI 値 S の関係式を求めると

$$\rho = 1.0425 \times S + 50.317 \quad \text{dBm/cm}^2 \quad (1)$$

となり、 S の係数がほぼ 1 であることから mW 表記の最大通信可能電力密度および RSSI 値も比例関係にあると言える。図 4 中の直線は式(1)で表される直線で、この直線より下の電力密度で送電を行うことで通信と送電を同時に行うことができると言える。しかし、RSSI 値は端末の位置を動かさなくても 2dB ほどの振れ幅があり、また ZED 端末の電源を入れる前から送電マイクロ波を放射している場合は最大通信可能電力密度の 1/5 程度のマイクロ波電力密度でなければネットワークに参加して通信を開始できない。よって、システムの安定性の面から RSSI 値はできる限り高い値を確保することが望ましい。

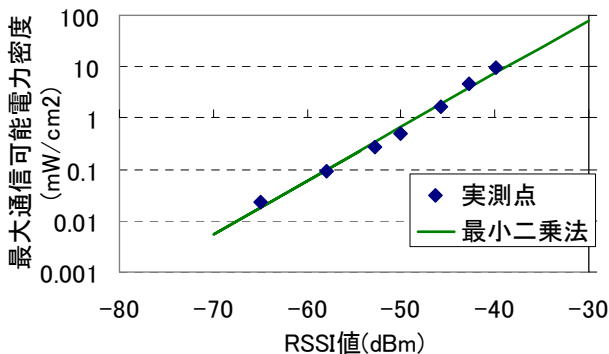


図 4：最大通信可能電力密度の RSSI 値特性

4. レクテナを使用した無線電力伝送実験

送電マイクロ波の周波数を 2.46GHz として、整流回路を作成した。回路の最適負荷を ZED 端末の入力インピーダンスである 140Ω として設計・作成したレクテナ

ナ整流回路の変換効率を測定したところ、回路単体における変換効率は 65% だった。ダイオードは HSMS-2860 を 4 並列で使用した。この整流回路はダイオードのブレークダウンにより 1 素子あたり 60mW 程度の電力しか入力できないため、ZigBee 端末を動作させるには複数の回路を組み合わせる必要がある。この整流回路を利用 6.35dBi のパッチアンテナに接続してレクテナを作成した[3]。このレクテナを 4~9 素子使用して負荷抵抗に接続して無線電力伝送実験を行った。図 5 のように直列と並列を組み合わせる負荷抵抗に接続し、送電マイクロ波を放射したときの受電アンテナへの入力電力の合計に対する変換効率を測定した。以降、図 5 のような接続数を n 直列 m 並列と呼び、各接続数における 140Ω 負荷接続時の変換効率を比較した。各接続数における総入力電力に対する変換効率を図 6 に示す。2 直列 2 並列および 2 直列 3 並列で変換効率が高く、65% と整流回路単体の場合と同等の変換効率を得られた。しかしレクテナ素子を多く使用した方が広い範囲で電力を受け取れるため、ZED 端末の動作に必要な送電マイクロ波電力密度は低くなり通信と送電を両立させやすい。よって ZigBee 端末の配置などの条件により十分な RSSI 値が確保できないような場合は多くのレクテナ素子を使用して送電マイクロ波電力を抑える必要があり、高い電力密度で送電マイクロ波を放射できる場合はレクテナの使用数を減らしてシステムを小型化することができる。

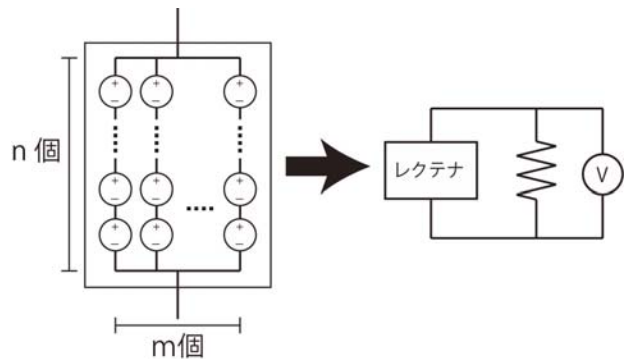


図 5：レクテナの接続方法

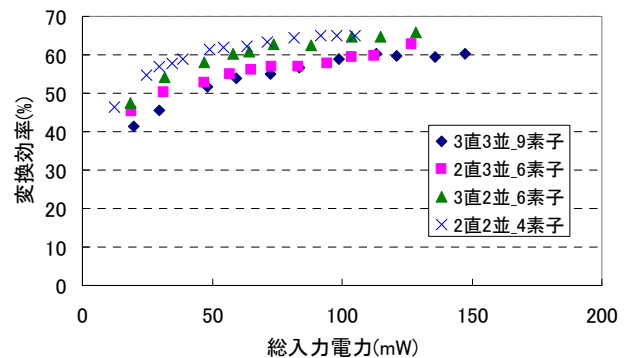


図 6：レクテナの変換効率

5. 無線電力による ZigBee 端末の動作実験

負荷抵抗の代わりに ZED 端末をレクテナに接続して無線電力伝送を行い、ZED 端末の動作実験を行った。図 7 のように ZED 端末と並列にキャパシタを挿入してレクテナを接続し、出力電圧および ZED 端末が動作している際の送電マイクロ波電力密度を測定した。通信が正しく行えるように ZED 端末と ZC 端末は十分に近づけた状態で実験を行った。ZED 端末の電源スイッチを ON にした状態でレクテナに向けてマイクロ波を放射すると、キャパシタに電力が充電されて次第に電圧が上昇したが端末の動作に必要な 2.7V まで電圧が上がっても端末が起動しなかった。このとき、一度端末の電源スイッチを OFF にしてから ON にしなおすと端末は青樹に起動することができた。このことから、送電マイクロ波の ON・OFF のみで ZED 端末を起動させるにはキャパシタの電圧が端末の動作に必要な値まで上昇してから ON となるようなスイッチング素子が必要と考えられる。端末の起動後は正常に動作し、無線送電と同時に通信を行える様子が確認できた。レクテナ接続数を 2 直列 2 並列、2 直列 3 並列、3 直列 3 並列の 3 通りで実験を行った。ZED 端末を動作させている際の送電マイクロ波電力密度に対する出力電圧を図 8 に示す。3V の出力に必要な電力密度は 3 直列 3 並列では $0.34\text{mW}/\text{cm}^2$ 、2 直列 3 並列では $0.52\text{mW}/\text{cm}^2$ 、2 直列 2 並列ではおよそ $0.6\text{mW}/\text{cm}^2$ であった。

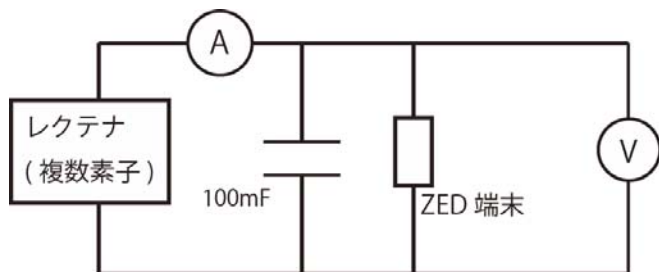


図 7：ZED 端末の動作実験

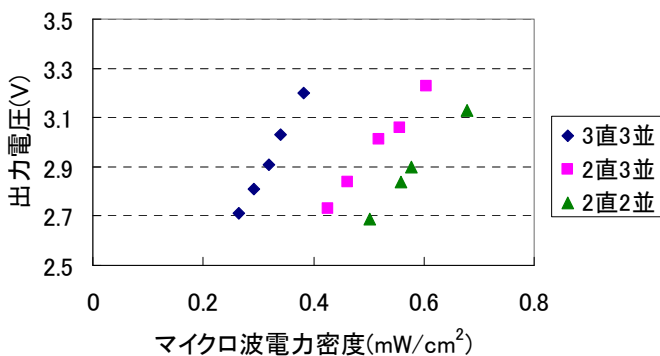


図 8：送電マイクロ波電力密度に対するレクテナの出力電圧

次に、図 9 のようにキャパシタの代わりに二次電池を接続して無線電力伝送による充電実験を行った。二次電池は SANYO 製 enloop の単四型を 2 本直列で使用した。二次電池は前もって抵抗に接続しておき、放電しきった状態で実験を行った。二次電池と直列に $5\text{m}\Omega$ の抵抗を接続し、この抵抗にかかる電圧を測ることで二次電池に流れる電流を測定した。ZED 端末の電源スイッチを ON にした状態で送電マイクロ波を放射すると二次電池の電圧の上昇が確認されたが、端末の起動にはキャパシタを使用した場合と同様に電圧が上昇した後に一度端末の電源を OFF にする必要があった。端末の電源を OFF にした状態で 30 秒ほど二次電池の充電を行った後に端末を起動し、二次電池の電圧および二次電池に流れる電流を 2 分毎に測定した。入力電力の大小による差を比較するためにレクテナへの入力電力が 197mW の場合と 245mW の場合で実験を行った。測定結果を図 10 に示す。二次電池に電流が流れ込み、時間と共に二次電池の電圧が上昇している様子が確認できた。入力電力が大きいと電圧、電流ともに増加したが、電圧の差は 1% 程度しかなく、電流に大きな違いが見られた。

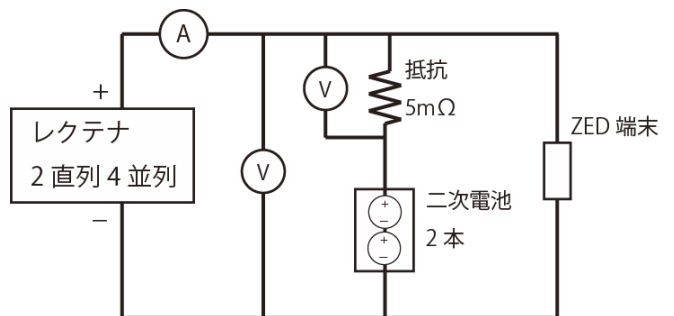


図 9：二次電池への充電実験

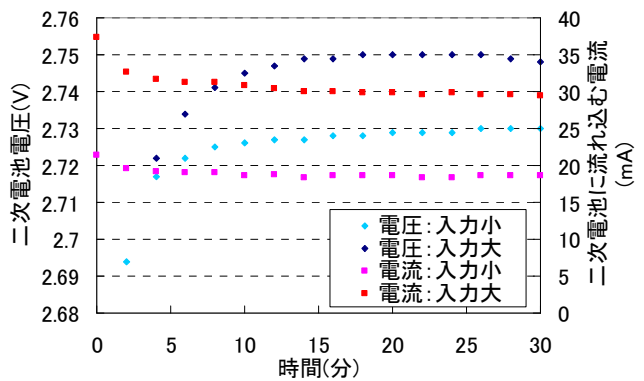


図 10：二次電池の電圧および電流

ZED 端末を起動してから 20 分後の電圧および電流がほとんど一定となった際の電力フローを図 11 に示す。レクテナへの入力電力が変わっても二次電池電圧がほとんど変わらないため ZED 端末の消費電力は変わらず、二次電池に充電される電力が大きくなっている。端末を起動してから 30 分後に送電マイクロ波を停止すると二次電池を電源としてしばらく端末を動作させることができた。送電マイクロ波を停止した後二次電池の電圧の低下にかかる時間を測定したところ、197mW 入力の場合には電圧が 2.6V まで下がるのに 40 秒、2.5V まで下がるのに 4 分かかった。245mW 入力の場合には電圧が 2.6V まで下がるのに 1 分 40 秒、2.5V まで下がるのに 8 分 30 秒かかった。二通りの入力電力において二次電池へ入力される電力は 1.6 倍だったが電圧が保たれる時間は 2 倍以上の開きがあった。このことから二次電池の充電の条件により充放電効率が異なると考えられる。

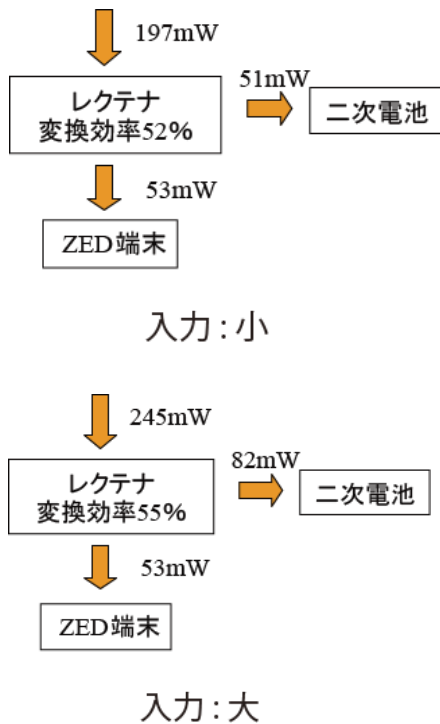


図 10：二次電池の電圧および電流

6. まとめ

本研究で使用した ZigBee 端末に対してマイクロ波無線送電を行う場合、送電マイクロ波周波数は 2.46GHz が比較的適していた。また、最大通信可能電力密度は通信の RSSI 値に大きく依存しており、それらは比例関係にあった。そのため RSSI 値をなるべく高くしてシステムを安定にすることが望ましい。

作成したレクテナを 140Ω 負荷に接続して無線電力伝送における変換効率を測定したところ、2 直列 2 並列および 2 直列 3 並列において変換効率が 65% と高かったが、大きな電力密度で送電できない場合に ZigBee 端末を動作させるには 3 直列 3 並列など素子数を多くして広い範囲でマイクロ波を受電する必要がある。

レクテナに ZED 端末を接続して無線電力伝送実験を行ったところ、端末の起動に問題があったがマイクロ波無線電力による動作と ZigBee 通信を同時に行うことができた。二次電池を用いた実験では ZED 端末の動作と二次電池への充電を同時に行うことができ、30 分の充電で数分間端末の動作が行えた。

文 献

- [1] 鄭立, ZigBee 開発ハンドブック, 株式会社リックテレコム, 東京
- [2] 鈴木望, ZigBee センサーネットワークに対するマイクロ波無線電力供給システムの研究開発, 信学技報, SPS2009-12, pp.11-15, 3 月, 2010 年.
- [3] 鈴木望, 篠原真毅, 三谷友彦, ZigBee 端末用マイクロ波受電システムの研究開発, 信学技報, WPT2010-12, pp.27-31, 10 月, 2010 年.