

第24回

「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム

講演論文集

The 24th Symposium on Electromagnetics and Dynamics (SEAD24)

会期：2012年5月16日(水)～18日(金)

会場：富山国際会議場

主催：電気学会(産業応用部門)
共催：日本機械学会、日本AEM学会
協賛：精密工学会、日本シミュレーション学会、
日本磁気学会、近畿工学・超電導学会、
粘性流体研究連絡会、静電気学会、
日本液晶学会、日本鉄鋼協会、
日本原子力学会、日本ロボット学会
後援：公益財団法人富山県ひとづくり財団、
公益財団法人日本教育公報発行協会富山支部、
富山市



電動アシスト自転車の非接触充電

立花 邦彦*

岡 宏一*

山脇 敬介*

Wireless charge of Electric Assistant Bicycle

Kunihiko Tachibana*, Koichi Oka*, Keisuke Yamawaki*

This paper presents a charging system for electric assistant bicycle by wireless power transmission using magnetic field resonance. The charging system is used the coil of power transmission frequency of 100[kHz] and low Q factor. The summary and experimental result of the system is shown.

キーワード：ワイヤレス電力伝送，充電システム，磁界共鳴，低 Q 値，伝送効率

Keywords : Wireless Power Transfer, Charging System, Magnetic Field Resonance, Low Quality Factor, Transmission Efficiency

1. 緒言

2007 年に MIT(Massachusetts Institute of Technology)が電磁共鳴型無線電力伝送⁽¹⁾を発表してから，研究機関や企業では，共鳴型の研究が盛んに行われている。しかし，現在，日本国内では磁界共鳴型による非接触給電装置は，製品として販売されていない。本稿では，電動アシスト自転車のために，非接触給電システムを利用することを提案する。非接触によるバッテリーの充電システムとして，簡便な共鳴電力伝送を用いた装置を開発し，利用者の負担軽減をめざす。なお，今回の電動アシスト自転車は，複数台数を複数の人による共同利用のためのものである。

自転車に搭載することから，受電コイルを小型，薄型，軽量にすること，駐輪装置に固定した時の位置ずれに対応可能であること，安全であることなど，運用を考慮した装置とするため，磁界共鳴型を選択した。

回路設計やパターンワーク，部品の入手が比較的簡単である 100[KHz]を送電周波数とすることで，伝送効率よりも実現性を優先した。また，多くの研究では高 Q 値を採用しているが，受電コイルを小型化するために低 Q 値とした。

本稿においては，送受電コイルでの実験，装置設計，および実際の充電システムを紹介し，低 Q 値，100[KHz]の送電周波数であっても，実用的な装置となることを報告する。

2. 電動アシスト自転車

〈2・1〉 対象自転車 今回対象とした，電動アシスト自転車は，次の型式である。⁽²⁾

型式：シュガードロップ (Panasonic 製)

〈2・2〉 バッテリー 自転車に搭載されているバッテリーの仕様は次の通りである。⁽²⁾

種類：リチウムイオン電池

容量：26[V]-5[Ah]

セル数：7セル

〈2・3〉 充電器 自転車製造者の当該バッテリー用の専用充電器の仕様は次の通りである。⁽²⁾

充電時間：約 3 時間

消費電力：80[W]



(a) Electric Assistant Bicycle



(b) Battery and Charger

図 1 電動アシスト自転車

Fig.1. Electric Assistant Bicycle

* 高知工科大学
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185
Kochi University of Technology,
185 miyanoguchi, tosayamada-cho, kami, kochi 782-8502

3. 充電システム

〈3・1〉 全体概要 今回の充電システムの要求事項は、自転車のバッテリーに非接触により充電が行えることと、自転車の固有番号（管理番号）とバッテリー電圧をモニタできることである。赤外線通信により、命令・情報を伝送することとした。

駐輪場に設置する固定側と、自転車に搭載する移動側の機能ブロック図を図1に示す。図1の駐輪制御系統は、主に自転車の施錠に関わる制御を行うものであり、本稿では取り扱わない。図1に示した各構成回路の概要に関しては、個別に後述する。固定側で直流に変換した電圧をスイッチングし、送電コイルに供給する。自転車側では、受電コイルの出力を整流後に定電圧化、電流を制限し、充電を行うという一般的な構成とした。

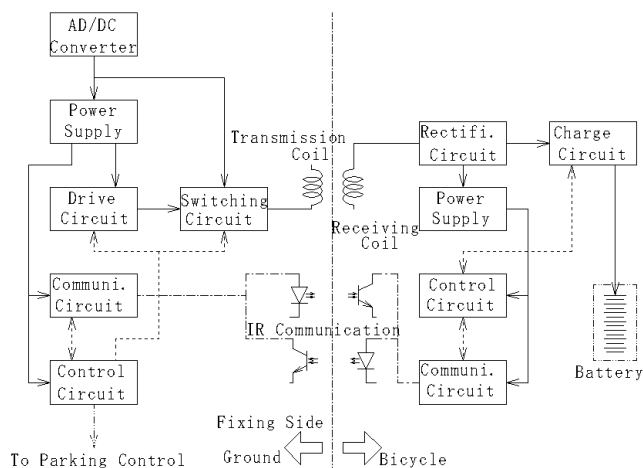


図2 ブロック図

Fig.2. Block Diagram

〈3・2〉 仕様 設計を進めるために必要となる仕様を、仮に次のように決定した。

- (1) 充電
 - 充電時間：6 時間以内
 - 充電電流：1[A]以上(0.2C に相当)
 - (2) 送受電コイル
 - コイル寸法：最大 150[mm]角
 - コイル間隙：20～30[mm]程度
 - 送電周波数：100[KHz]
 - (3) 通信
 - 固定側から自転車：制御指令(充電・電圧モニタ)
 - 自転車から固定側：自転車 ID、バッテリー電圧
- 充電異常

使用する電動アシスト自転車の専用充電器は、最大で約 2[A]の充電電流である。リチウムイオンバッテリーも、小さな電流で時間をかけた充電を行なうと、寿命が延びること、一度に充電される容量が多いことが報告されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

このことを考慮した上で、今回の自転車は共同利用での使用のため、急速充電は必要ないと考え、専用充電器よりも小さな充電電流により充電を行うこととした。

自転車に搭載することから、自転車のどの位置にコイルを取り付けるのかで、許容されるコイルの寸法が決まる。今回は「前輪またはハンドルバーを駐輪装置で固定する」方式であるため、自転車のカゴの前面に受電コイルを搭載することとした。従って、カゴの寸法の制限より、コイルの最大寸法（カゴへの固定部分を含む）を 150[mm]角とした。送受電コイルの間隙は、コイルを小型化することから、目標を 25[mm]程度とした。

仕様(3)に示す通信を行う信号は、駐輪装置および管理システムに最低限必要となる信号である。

4. 送受電コイル

〈4・1〉 コイル寸法 コイルの外寸は、150[mm]であるため、取付枠が必要となることを考慮すると、 $\phi 100$ [mm]程度がコイル自体の最大寸法となる。よって内径 50[mm]、外径 100[mm]のコイルを試作した。

〈4・2〉 試作コイル コイルは表皮効果による影響を小さくするため、使用する線材として、市販されている $\phi 0.3$ [mm]7 本捻りのリッツ線を用いた。平面密巻きとすることで、小型化、薄型化を図り、コンデンサを組み合わせることで、少ない巻き数であっても、希望の周波数で送電ができるようにした。

100[KHz]用のコイルの製作のために、予備実験用の試作コイルを、巻き数 25 回として製作し、特性を測定した。 $0.039[\mu F]$ のコンデンサと組み合わせた場合、無負荷 Q_u は約 60 であり、コイルを 20[mm]～30[mm]で対向させた場合に、 Q_u 値が単峰特性であることを確認した。送電側ローパスフィルタ(以降 L.P.F.)を含めて特性を測定した結果、共振周波数は 90[KHz]であった。共振周波数が小さくなった原因は、L.P.F.を構成するコイルのインダクタンスにより、送電側回路の合計インダクタンスが増加したことによるものであると考える。コイルの巻き数を変更することにより、共振周波数を 100[KHz]となるように調整を行った。

〈4・3〉 実用コイル 試作コイルの実験から得られた結果を基に、実際に使用するコイルを図3に示すように製作した。コイルの特性を測定した結果を表1、表2に示す。コイルのインダクタンス、および結合係数は、LCR メータで測定した。無負荷 Q_u については、発振器とオシロスコープにより測定した。

表1 コイルデータ

Table 1. Coil data

	Turn	Inductance	Q_u
TX Coil	22	40.5[μH]	59
RX Coil	26	55.5[μH]	62

送電コイルのインダクタンス及び無負荷 Q_u は L.P.F.の L 分を含まない。

L.P.F.用コイルのインダクタンスは 8[μH]。

表 2 結合係数 k

Table 2. Coupling Factor			
Gap [mm]	20	25	30
k	0.34	0.282	0.229

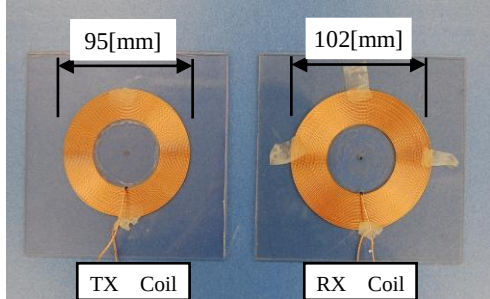


図 3 送受電コイル

Fig. 3. Transmitting and Receiving Coil

5. 固定側（送電側）回路

〈5・1〉 AC/DC コンバータ バッテリは7セル構成となっていて、1セル当たりの満充電電圧が4.2[V]であるから、バッテリーの端子電圧が29.4[V]のとき満充電となる。充電電圧として約30[V]が必要であることから、出力電圧が36[V]で2[A]程度、供給可能なことを必要条件とした。

〈5・2〉 ドライブ回路 発振周波数とデッドタイムを可変することが可能な二相発振用 IC と、ハーフブリッジ MOSFET ドライブ IC とを組合せ、スイッチングを行う回路とした。

〈5・3〉 スwitching回路 2 個の N チャンネル POWER MOSFET と L.P.F.により、送電コイルおよび共振用コンデンサに電力を供給する回路とした。

L.P.F.は2f よりも少し低い周波数である、170[KHz]を目安として設計したが、製作したものは178[KHz]となった。

〈5・4〉 通信回路 赤外線 LED と赤外線リモコン受信モジュールにより、信号の送受信を行う。データ構成は家電製品のリモコンとは異なる、独自の構成とした。通信エラーを防ぐため、スタートビットとストップビットの間で、2回同じデータを送る。受信側で受信データのチェックを行い、同一データでない場合にはデータエラーとして、再度、送り直す処理を行うようにした。

赤外線通信のキャリア周波数は38[KHz]、通信ビットレートは約1667[bps]とした。データフォーマットを図4に示す。

〈5・5〉 制御回路 PIC を使い、充電の開始及び停止、通信の制御を行う。駐輪制御システムへの出力は、フォトカプラを使うことで、混触による事故に備えるようにした。

〈5・6〉 送電側回路 図5に送電側回路のブロック図を、図6に出力点の電圧波形を示す。図5の④点の電圧波形を図6(a)に、図5の⑤点の電圧波形(コイルの電圧)を図6(b)に、それぞれ示す。また、図7に試作した基板を示す。

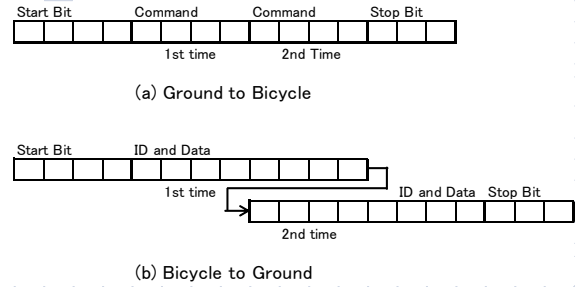


図 4 赤外線データフォーマット

Fig.4. IR Communication Data Format

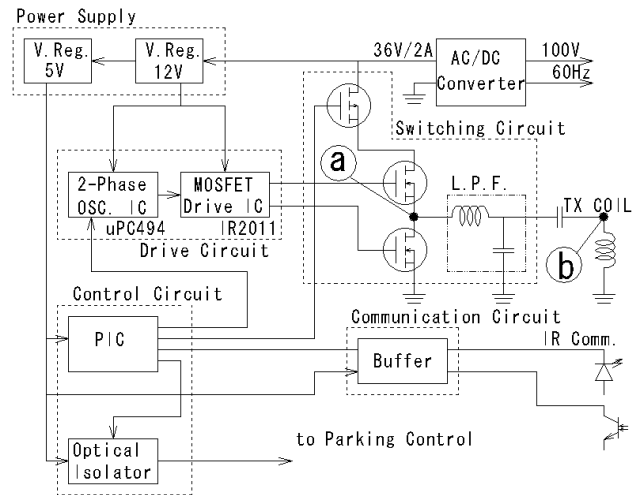
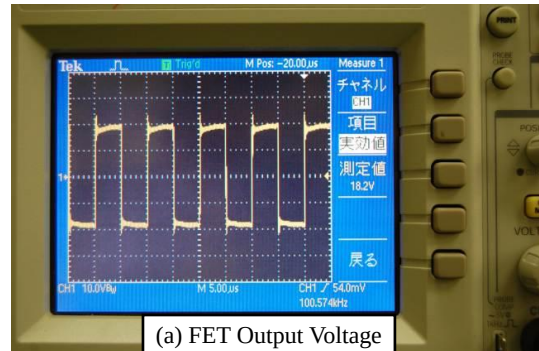
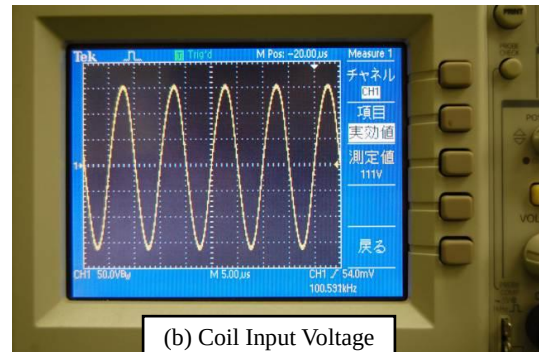


図 5 送電側回路ブロック図

Fig.5. Power Transmitting Circuit Block Diagram



(a) FET Output Voltage



(b) Coil Input Voltage

図 6 電圧波形

Fig.6. Voltage Waveform

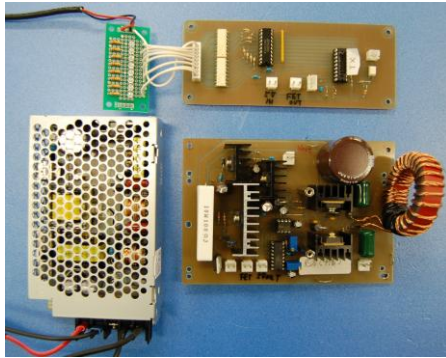


図 7 試作送電側回路

Fig.7. Trial Product of Power Transmitting Circuit

〈5・6〉 コイル電圧 送電コイルの電圧は、損失を無視すれば、直列 LCR 回路が同調したときに、L に発生する電圧を求める式、「電圧×Q 値」で計算した値でなければならない。図 5 (b)に示したように、送電コイルに発生している電圧は 111[V]であり、計算値 114[V]にほぼ等しい値である。

$$\text{電圧(測定値)} = 18.2[\text{V}], Q_L(\text{計算値}) = 8.87$$

$$\begin{aligned} \text{コイル電圧(計算値)} &= 18.2 \times 8.87 = 161[\text{V}] \\ &= 114[\text{Vrms}] \end{aligned}$$

6. 自転車側（受電側）回路

〈6・1〉 整流回路 受電コイルと共振用コンデンサにより得られた電圧は、ショットキーバリアダイオードによるブリッジ全波整流後、チョークコイルを使用せず、コンデンサのみでの平滑とした。

〈6・2〉 充電回路 当初、整流回路からの出力を、チョップ回路により変圧・定電圧し、その後、定電流する方式としていた。しかし、実験を行ってみると、効率が良くなり、熱損失も計算値よりも大きなことが分かった。そこで、部品点数を少なく出来る 3 端子レギュレータを用いて、定電圧出力を得ることにした。電流制限に関しても、3 端子レギュレータを用いる簡単な構成とした。

〈6・3〉 回路電源 自転車のバッテリーは、許容最低電圧になると、出力が切り離されてしまう。この状態になってしまうと、赤外線通信を行うことが出来ないため、制御回路用にバックアップ用バッテリーを準備した。自転車のバッテリーが充電されると、このバックアップ用バッテリーも同時に充電される。約 7 日間、バックアップ可能な容量とした。

〈6・4〉 制御回路 バッテリー電圧、および充電電流を測定し、バッテリーの充電を管理する。基準電圧 IC と分圧回路、アンプを組合せることにより、PIC 内蔵の A/D 変換器の分解能でも、精度を得られるように構成した。受電電圧の異常、充電電圧の異常時には、充電を停止すると共に、送電側（固定側）に、異常データを赤外線により送信する。また、赤外線では、自転車 ID も同時に送信する。

〈6・5〉 受電側回路 図 8 に受電側回路のブロック図を示す。充電方式は、電流制限付き定電圧方式である。

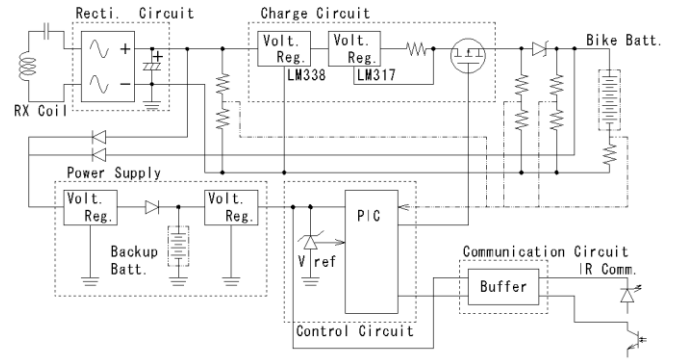


図 8 受電側回路ブロック図

Fig.8. Power Receiving Circuit Block Diagram

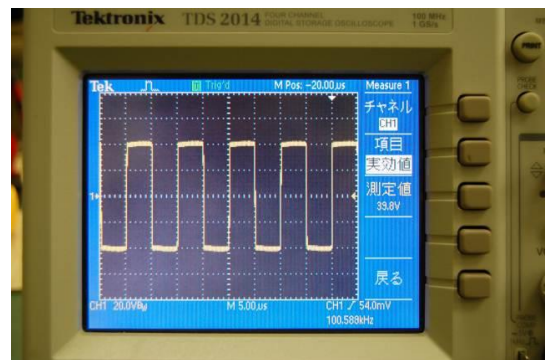


図 9 受電コイル電圧波形

Fig.9. Power Receiving Coil Voltage Waveform

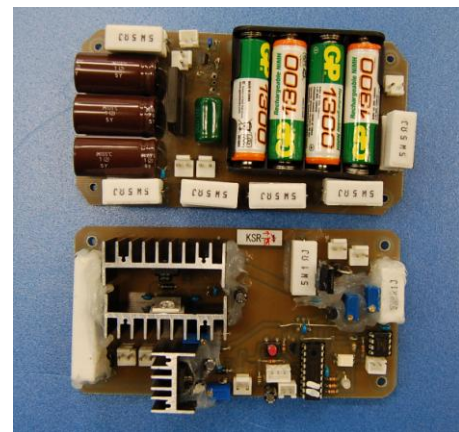


図 10 試作受電側回路

Fig.10. Trial Product of Power Receiving Circuit

〈6・6〉 コイル電圧 受電コイルに発生する電圧は、送電コイルの電圧に、結合係数 k とコイルの巻き数比 n を掛けた値、「電圧＝送電側コイル電圧× k × n 」となる。

$$\text{送電側コイル電圧} = 111[\text{Vrms}] = 157[\text{V}_{0-p}]$$

$$k = 0.206(\text{間隙 } 30[\text{mm}], \text{ L.P.F.を含む})$$

$$n = 26/22 = 1.182$$

$$\text{電圧} = 157 \times 0.206 \times 1.182 = 38.2[\text{V}_{0-p}]$$

図 9 に示した電圧と違いが生じている原因は、コイルの間隙を調整している治具の設定時の誤差によるものと考えられる。

〈7・5〉 設置状況 実証実験用として県内企業により、固定側および自転車側装置を製作してもらった。自転車に装着した状態と、駐輪装置に駐輪した状態を図 14 に示す。

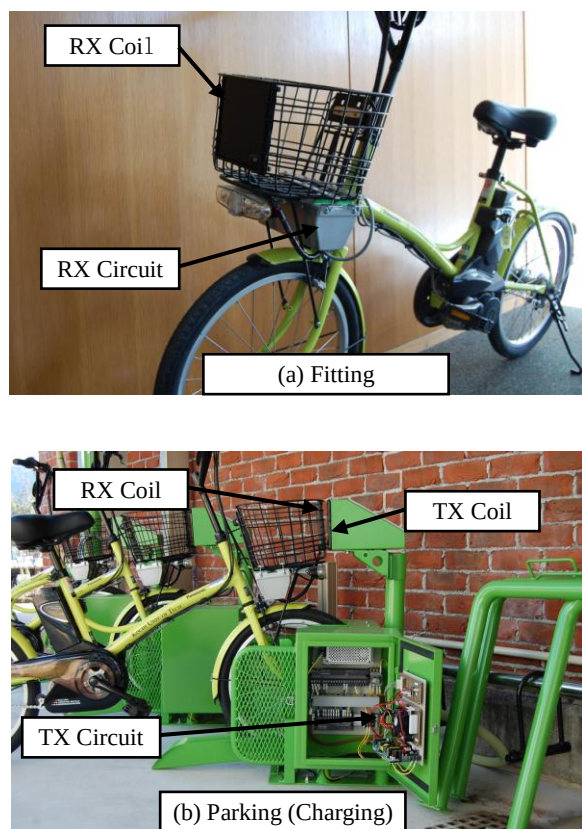


図 1 4 装着・駐輪（充電）状態

Fig.14. Fitting and parking (Charging)

〈7・6〉 製品との比較 日本国内において、Qi 規格⁽¹⁰⁾の充電器が販売されている。Qi 規格は電磁誘導方式の製品であるが、参考までに効率に関して比較を行う。Qi 規格の製品⁽¹¹⁾の平均総合効率は約 50%である。開発したものは、間隙 25[mm]で横ずれ無しの条件で、50%程度であり、Qi 規格製品と同等の効率を得られている。

〈7・7〉 課題（改善） kQ を大きくすることにより、効率を上げることが、コンバータ式電源回路では常識となっている。しかし、 kQ を大きくすると、使用する部品の耐圧が高いものが必要となる。送電側コイルに発生する電圧は、送電コイルの Q_L に依存する。また、受電側電圧は送電コイルの Q_L と結合係数 k 、及び送受電コイルの巻き数比 p により決まる。従って、これらのパラメータのバランスを考える必要がある。回路での問題としては、受電側では電圧および電流制限を行なうために、10[W]以上を熱として消費させている。

送受電コイルを工夫すること、熱として受電回路で消費させている電力を小さくすること等により、伝送効率および総合効率を上げる必要がある。

8. 結言

電動アシスト自転車に搭載されているリチウムイオン電池を、磁界共鳴方式により非接触により充電する装置を開発した。送電周波数 100[KHz]と小型コイルの組み合わせによる磁界共鳴であっても、実用的な電力送電が可能であることを示した。

共鳴コイルを用いず送電コイルと受電コイルのみによる方式を採用すること、共振コンデンサの容量を大きくすることにより、送受電コイルの小型化、薄型化に成功した。

今回、対称コイルでなく非対称コイルであっても、充電に必要な電力を伝送することが可能であったため、非対称コイルを使用した。

伝送効率および総合効率を向上させるため、コイルの最大直径寸法は変更せず、伝送距離を含め、送受電コイル、および回路の見直しを計画している。また、受電側状態を送電側にフィードバックする方法等により、最適制御を行うことも計画している。

文 献

- (1) A.Kurs, et al : "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", SCIENCE, Vol.317, No.5834, p.83-86 (2007)
- (2) パナソニック : Sugar Drop 取扱説明書(2010)
- (3) 電池・充電器メカ : 電池・充電器パンフレット・説明書
- (4) トランジスタ技術編集部 : 電池応用ハンドブック, CQ 出版社 (2005)
- (5) 山村英徳 : トリクル・コア活用百科, CQ 出版社 (1992)
- (6) 長谷川彰 : スイッチングレギュレータ設計ノウハウ, CQ 出版社 (2010)
- (7) 熊谷秀幸編集 : 電源回路設計 2009, CQ 出版社 (2009)
- (8) 著 J.G.Kassakin et al 訳 赤木泰文他 : パワーエレクトロニクス, 日刊工業新聞社 (1997)
- (9) 半導体・電子部品メカ : テータシート
- (10) ワイヤレスパワーコンソーシアム : <http://www.wirelesspowerconsortium.com/jp/>
- (11) 日立マクセル : エアボルテージ 取扱説明書