

# 走行中の模型電気自動車へのワイヤレス送電デモシステム

†加々美 友宏 ‡松下 隼人 ‡岩堀 大希 †桑原 義彦

†静岡大学大学院工学研究科 ‡静岡大学工学部 〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: [tykuwab@ipc.shizuoka.ac.jp](mailto:tykuwab@ipc.shizuoka.ac.jp)

**あらまし** マイクロ波電力伝送技術を用い、走行中自動車へのワイヤレス送電と路車間通信を同時に行うデモシステムを構築し、動作を確認した。

**キーワード** マイクロ波電力伝送, レクテナ, 路車間通信, 電気自動車, PWM

## Wireless Power Transmission Demonstration System to Running Electric Vehicle Model

†Tomohiro KAGAMI ‡Hayato MATSUSHITA ‡Daiki IWAHORI †Yoshihiko KUWAHARA

†Graduate School of Engineering, Shizuoka University ‡Faculty of Engineering, Shizuoka University

3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561 Japan

E-mail: [tykuwab@ipc.shizuoka.ac.jp](mailto:tykuwab@ipc.shizuoka.ac.jp)

**Abstract** We have developed a demonstrating system of the microwave power transmission to a running vehicle model. The system includes the communication system between the load and the vehicle. The aim is fusion of power transmission and communication system.

**Keyword** Microwave Power Transmission, Rectenna, Road to Vehicle Communication, Electric Vehicle, PWM

### 1. はじめに

電気自動車(EV)が市販され、普及が期待されている。しかし電気自動車には、「走行距離が短い」、「バッテリーの充電時間が長い」、「バッテリーの体積と重量が大きい」などの欠点があり、当面は短距離での使用が想定されている。現在の内燃機関に完全に代替する電気自動車を実現するにはバッテリーに代わる持続的なエネルギー源が必要である。

道路から走行中の車両にワイヤレス送電を行うことができればこの問題が解決できる。ワイヤレス送電には電磁結合方式[1], 磁気共鳴方式[2], マイクロ波方式[3]がある。マイクロ波送電方式はほかの方式に比較し、送電効率がやや劣り、人体への安全性の問題があるが、電子レンジが大量生産されていることから送電源が安く容易に入手可能で、高速情報伝送も容易で、電力伝送と路車間通信を使った高度道路交通システム(ITS)との融合が期待できる。

駐車中の自動車へのワイヤレス送電についてマイクロ波方式での送電が検討されている[4]が、走行中自動車への送電や情報との融合についてはあまり発表されていない。本稿では、模型を用いたマイクロ波送電と路車間通信を同時に行うデモシステムを構築し、実証実験を行ったのでその概要について報告する。

### 2. 設計コンセプト

#### 2.1. ワイヤレス通信と電力電送の融合

マイクロ波は電磁誘導や電磁共鳴に使用される周波数より高いため、高速な通信が可能である。図1に電力伝送と通信を行うシステムの構成例を示す。図1のように従来の通信システムの送信側にパワーアンプ、受信側にカップラーと整流回路を加えることによって、電力伝送と通信の両立が可能となる。

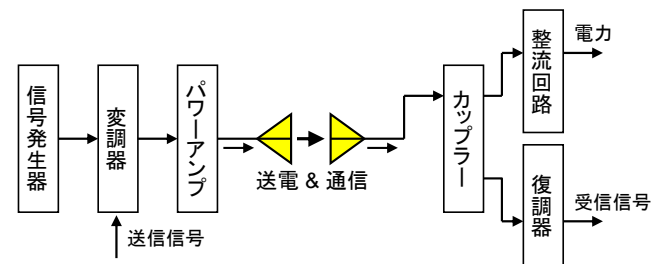


図1 電力伝送と通信を行うシステム構成

#### 2.2. システム全体の構成

- 本研究で構築したシステム全体の構成を図2に示す。今回の試作では、路車間通信により模型の電気自動車の運動を制御するとともに、ウィンカーやクラクションの制御も行う。それぞれのプロッ

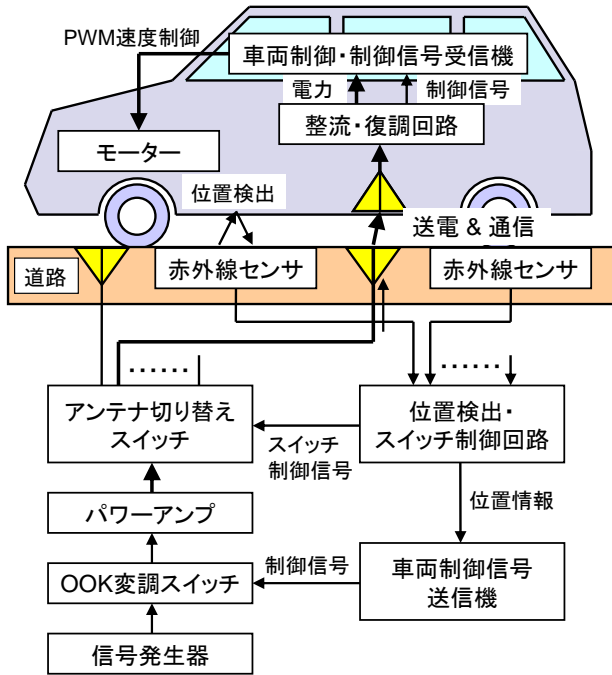


図2 システム全体の構成

クを簡単に説明する。

- ・ 信号発生器：2.45GHzの信号を発生。
- ・ OOK変調スイッチ：信号発生器で発生したCW波をOn-Offし、OOK(オン・オフ変調)を行う。
- ・ パワーアンプ：変調信号を1Wに増幅する。
- ・ アンテナ切り替えスイッチ：路面に設置した送電アンテナを選択する同軸スイッチ。
- ・ アンテナ：2.45GHz円偏波パッチアンテナ。
- ・ 位置検出・スイッチ制御回路：赤外線センサによって車の位置を検出し、アンテナ切換スイッチによりその位置に対応するアンテナから送電する。
- ・ 車両制御信号送信機：位置検出スイッチ制御回路から車両の位置情報を取得し、位置情報に対応した車両を制御するためのOOK変調スイッチの制御信号を発生。
- ・ 赤外線センサ：赤外線を車両に照射し、反射した赤外線の強度から車の位置を検出。
- ・ 整流・復調回路：受電したマイクロ波を整流し、電力と車両制御の信号を分離して出力する。
- ・ 車両制御・制御信号受信機：制御信号を復調し、受信した制御命令に従って車を制御。
- ・ モーター：本試作では携帯電話の振動モーターを使用した。

### 3. 設計

#### 3.1. 通信と共用する整流回路

- ・ マイクロ波を電力に変換すると同時にASK(OOK)

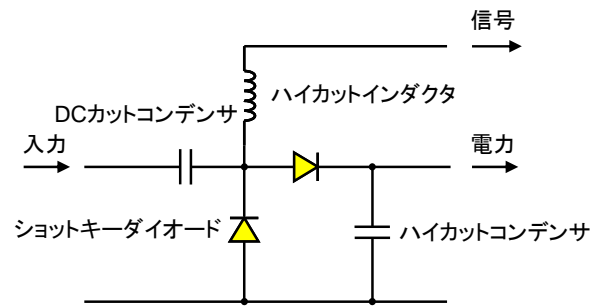


図3 ASK(OOK)復調+倍電圧整流回路

復調を行う整流回路の設計を行った。整流回路の設計は高周波で非線形デバイスのシミュレーションが可能なMEL社の高周波回路シミュレータS-NAPを用いて行った。回路基板のパラメータとして、比誘電率:2.6、基板厚さ:0.8mm、誘電正接:0.001を使用した。図3の倍電圧回路の出力側の電圧は電界コンデンサにより平滑化されるが、2つのダイオードの間の電圧は平滑化されないので復調が可能である。高周波成分が流れないようにインダクタを直列に挿入すれば整流効率を下げることなく復調が可能である。モーターの消費電力は1.5V時に90mWで、負荷抵抗は25[Ω]程度である。マイクロ波の整流回路は200~300[Ω]負荷時に最大効率になることが多い。ここでは100[Ω]負荷で整合する整流回路を4つ並列にすることで、25[Ω]負荷で最適に動作するよう設計した。

図4に整流回路の単体の実装図を示す。DCカットコンデンサは、入力側に直流が加わらないようにするためである。4.9GHzカットフィルタは、整流時の第二高調波成分がアンテナから再放射するのを防ぐ。このとき、フィルタによって第二高調波の定在波が生じる。この定在波がダイオードの位置で最大になるように $\lambda/8$ とすれば第二高調波が整流され整流効率が高くなる。

ダイオードについては整流する電力が大きいので、逆電圧が15Vと大きいAvago社のHSMS-282Bを用いた。ほかに検討したHSMS-286Bと比べ接合容量が0.7pFと大きく、整流効率は多少下がるが大電力が得

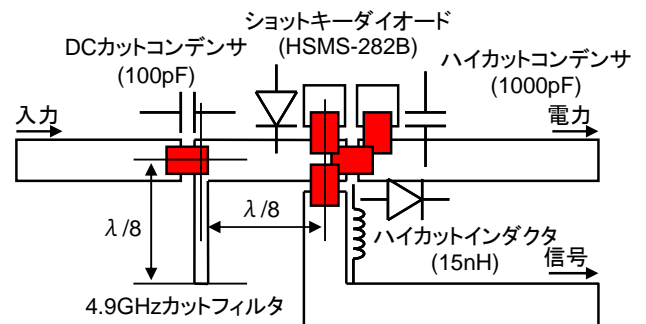


図4 整流回路(単体)

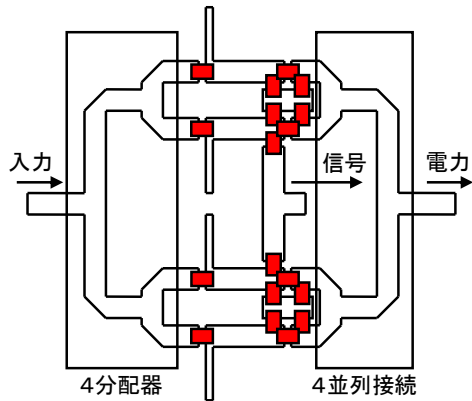


図5 整流回路(4回路)

られる。ハイカットコンデンサは高周波が出力側に流れ込まないようにするためにある。ハイカットインダクターは高周波が復調出力側に入らないようにし、ASKの復調信号のみを取り出す。

図5に設計した通信と共用する整流回路を示す。この整流回路は4分配器で電力を4分配し、図4の整流回路を4つ並列に接続したものである[5]。

### 3.2. PWM 速度制御

パルス幅変調(Pulse Width Modulation)は、図6の様に高速で直流をOn-Offし、これを平滑化することによって高効率で出力電圧を制御する技術で、モーター制御やスイッチング電源に用いられる技術である。PWMのOn-Off時間の比はデューティ比とよばれ、以式(1)で表される。

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (1)$$

今回製作したPWM回路の回路図を図7に示す。速度制御だけでなく正転、逆転、ブレーキ、停止ができるフルブリッジPWMである。また、負荷抵抗が変

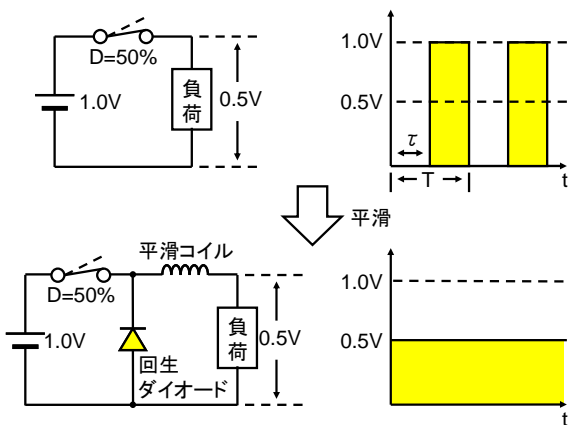


図6 シングルPWM(D=50%時)

換され、効率の向上も期待できる。PWM制御回路はPIC16F886に内蔵のPWMコントローラを用いた。

PWMの設計はTexas Instrument社の回路シミュレータTI-NAを用いて行った。PWMの主な損失はMOS-FETのON抵抗、ゲート寄生容量によるチャージ電流、平滑コイルの抵抗成分、回生ダイオードの順方向電圧である。Nch MOS-FETは、ON抵抗が小さく、応答速度が速く、ゲート容量の小さい東芝の2SK2614を選んだ。回生ダイオードには、順方向電圧が0.35Vと小さく、1Aまでの電流が流せるローム社のRB051L40TE25を用いた。平滑コイルには、330μHで抵抗成分が0.748Ωと小さいサガミエレク社のRTP8010-331-Mを選んだ。PICの出力電流が小さいため、出力電流が大きいANDゲートを通してスイッチングしている。

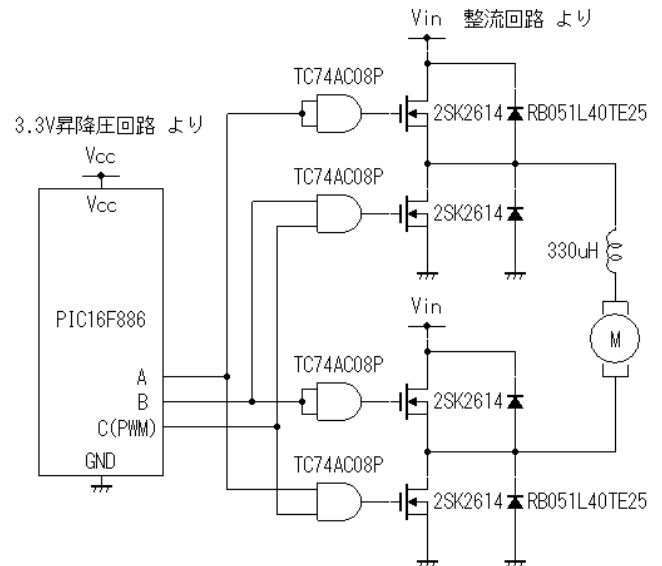


図7 設計したフルブリッジPWM回路

### 3.3. 路側(給電システム)

車の位置を検出し、車両の下にあるアンテナにだけ電力を供給するシステムを構築した。アンテナ切り換

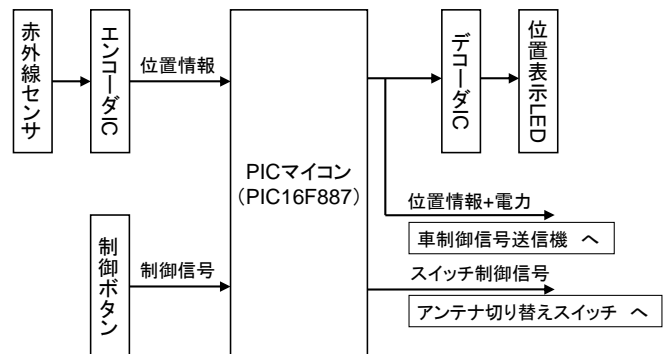


図8 位置検出・スイッチ制御回路の構成

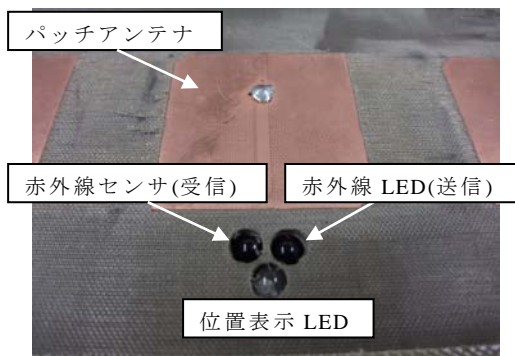


図9 パッチアンテナと赤外線センサの写真

スイッチは同軸スイッチである。

位置検出・スイッチ制御回路の構成を図 8 に示す。制御 IC に I/O 入出力が 44 ポートと多い PIC16F887 マイコンを用いた。そのままでは I/O ポートが足りないため、エンコーダ IC とデコーダ IC を用い、必要な I/O ポートを得ている。

図 9 に道路上のパッチアンテナと赤外線センサの写真を示す。右側が赤外線 LED(送信)、左側が赤外線センサ(受信)、下側が位置表示 LED である。赤外線 LED からの赤外線が車に反射し、赤外線センサで反射強度を見ることで車の位置を検出している。

### 3.4. 通信・車両制御システム

車両の制御信号を送信する送信回路と、データを受信し車両を制御する受信・制御回路の設計を行った。通信には、PIC に内蔵の USART 機能を用い、RS-232C と同じ通信方式で行う。OOK 変調スイッチは、高速でスイッチングが可能な Mini-circuit 社の ZSDR-230 の PIN ダイオードスイッチを用いた。

通信の仕様を表 1 に示す。通信方式は OOK、同期は RS-232C と同じ非同期式である。通信速度は、PIC の動作周波数(8MHz)に対し、できるだけ高速でエラーレートの低い 20[kbps]を選択した。30 フレーム/秒以上あればなめらかな動きに感じるので、通信回数は 50 シンボル/秒に設定した。また、通信による送信電力の低下は最大 2.5[%]である。

1 シンボル送信データの構成を図 10 に示す。車両の制御は 8 ビット(1 シンボル)で行う。今回は、車両の進行方向、速度、ウインカー、クラクションを制御で

表 1 通信の仕様

周波数	2.45[GHz]
通信方式	ASK(OOK)
同期方式	非同期
通信速度	20[kbps]
通信回数	50[Symbol/s]

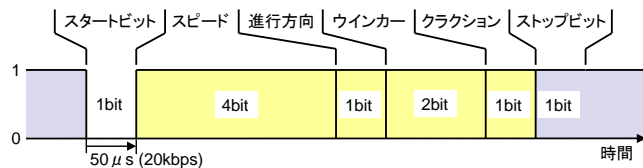


図10 車制御信号データ構成

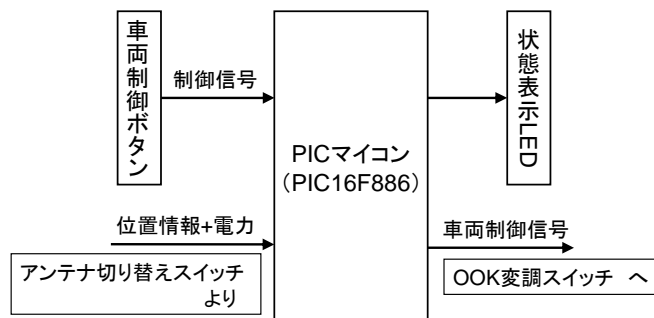


図11 車両制御信号送信機の構成

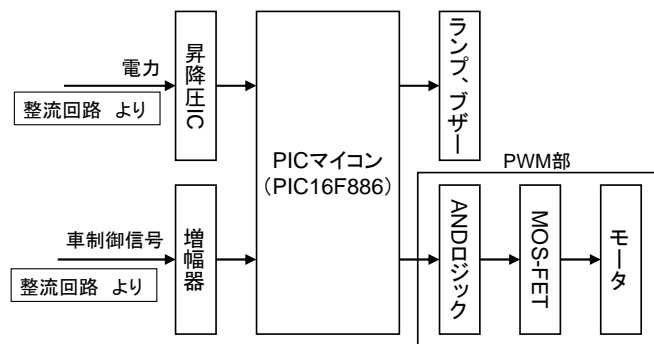


図12 車両制御・制御信号受信機の構成

きるようにした。図 10 のように信号を送信している時以外は 1 で、電力が送り続けられる。車両制御信号送信機の構成を図 11 に示す。車両制御信号送信機は手で車両を操るだけでなく、アンテナ切り替えスイッチの位置情報から自動的に進行方向を変更する。その位置は DIP スイッチによって指定できる。

車両制御・制御信号受信機の構成を図 12 に示す。IC の駆動電圧を保つため、昇降圧 IC には、85%程度の効率で 0.7V~6V の電圧を 3.3V に変換する HOLTEK 社の HT7733A を用いた。整流回路からの通信信号を増幅する増幅器には、PIC 内蔵のコンパレータを用いた。

## 4. 試作評価

### 4.1. 整流回路

試作した整流回路(一回路)の写真を図 13 に示す。整流回路の効率について実測と計算の比較を図 14 に示す。整流効率を見ると、負荷抵抗 200Ω の時の整流効率はほぼ計算通りとなった。360mW 程度で計算値の効率が低下しているが、これはシミュレーションでのダ

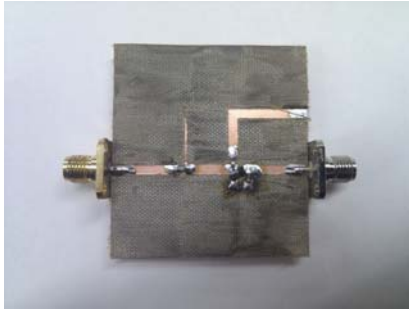


図13 整流回路(1回路)の写真

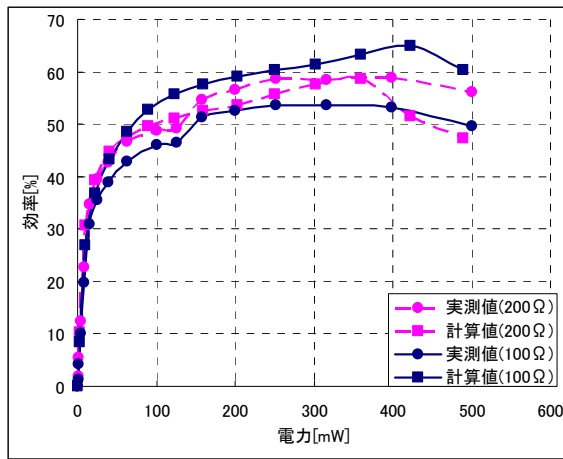


図14 整流回路(1回路)の整流効率

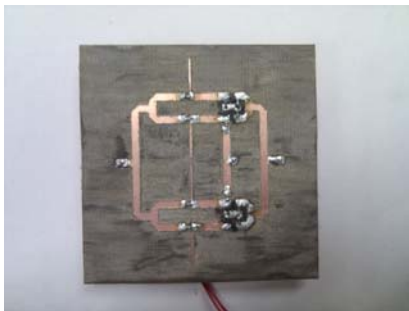


図15 整流回路(4回路)

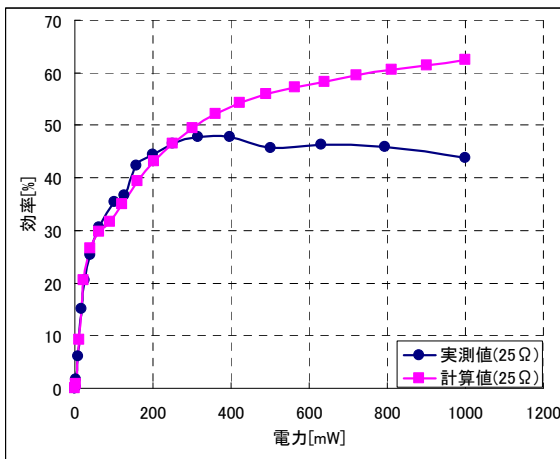


図15 整流回路(4回路)の変換効率

イオード降伏電圧が実際より小さいためと思われる。

試作した整流回路(4回路並列)の写真を図15に示す。整流回路の効率について、実測、計算の比較を図16に示す。試作した整流回路の最大整流効率は400mW時で47.7%である。計算値と実測値を比較すると300mW以下は一致するが、300mW以上から差が大きくなる。これについて原因を特定する必要がある。

#### 4.2. PWM

PWMを実装した模型車両の写真を図17に示す。PWM制御回路によって車両の速度制御と前進、後進、停止が出来ることを確認した。携帯電話用の振動モーターは低電力であるが低トルクであり、デューティ比D=50%以下では始動できなかった。

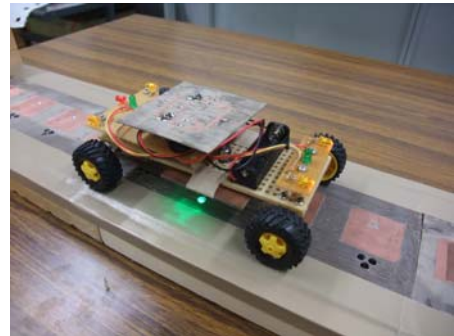


図16 PWMを実装した模型車両

#### 4.3. 路側送電システム

送受信パッチアンテナ間のS21特性を図18に示す。送受信パッチアンテナの距離は26[mm]である。図18よりアンテナ間の効率は最大で-2.08[dB]( $\eta=61.9\%$ )である。アンテナは、 $\lambda/2(61.2\text{mm})$ ごとに配置されている。走行時の送電効率の変化は23.2~61.9%であった。給電系の写真を図19、試作した道路の写真を図20に示す。

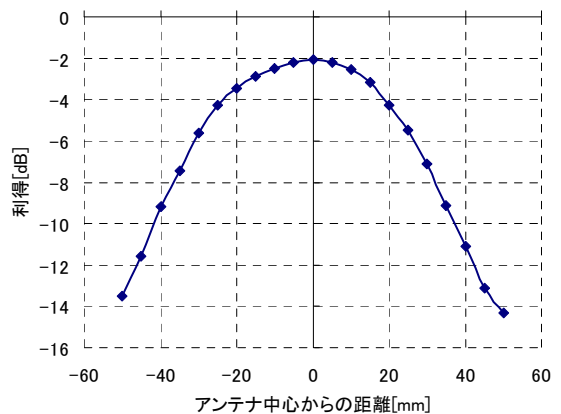


図17 送受信パッチアンテナ間のS21特性

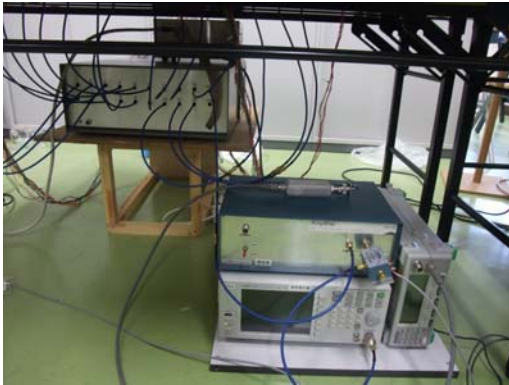


図18 給電系の写真



図 20 試作した道路の写真



図 21 車制御信号送信機

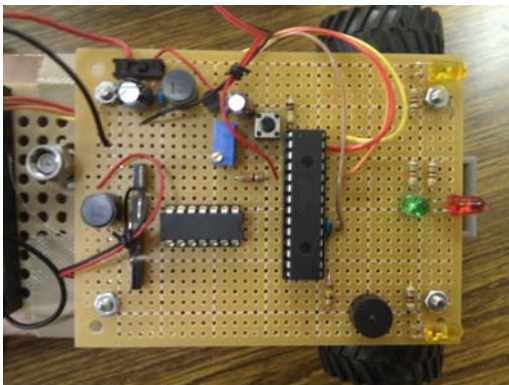


図 22 車制御・制御信号受信回路

#### 4.4. 通信・車両制御システム

試作した制御信号送信機と車両制御・制御信号受信回路の写真をそれぞれ図 21, 22 に示す. 実際に送信機を操作し, 制御信号に従って車両を制御できることを確認した. 送信アンテナを切り替える瞬間に誤ったデータが通信されることがある. これはアンテナ切り替えスイッチのチャタリングによる影響と考えられ, 誤り検出, 誤り訂正技術を導入する必要がある.

#### 4.5. 総合評価

マイクロ波送電と路車間通信を同時に行い, 模型を制御できることを確認した. 総合効率について考える. 試作した整流回路の最大変換効率は 47.7[%]である. パッチアンテナの送受信の S21 特性は, 最大 -2.08[dB]( $\eta = 61.9\%$ )で, 総合効率は最大で 29.5[%]であった.

#### 5. 結言

模型を用いてマイクロ波送電と路車間通信を同時に行うシステムを構築し実証実験を行った. 今回の送電はアンテナの近傍界結合を利用しているが, 実際の車両では遠方界送電となり, さらなる検討が必要である. マイクロ波送電では人体への影響の軽減が課題であるが, 無人工場での移動車両などには容易に適用可能と思われる.

#### 文 献

- [1] 阿部茂, 金子裕良, 非接触給電技術, 電気学会誌, Vol.128, No.12, pp.796-799,2008.
- [2] A. Kurs, et al, Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, in Science Express on June 2007, Vol.317, No. 5834, pp.83-86, 2007.
- [3] M. C. Brown, The history of power transmission, by radio wave, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-32, No.9, pp.1230-1242, 1984.
- [4] 篠原真毅, 松本紘, マイクロ波を用いた電気自動車無線充電に関する研究, 信学論 C, Vol.J87-C, No.5, pp.433-443, 2004.
- [5] 三浦健史, 平山勝規, 篠原真毅, 松本紘, マイクロ波無線電力伝送用レクテナの大電力化に関する研究, 信学論 B, vol.J83-B, No.4, pp.525-533, 2000.