

## AGV 用非接触充電システムの試作と効率評価

田端 隆伸<sup>†</sup> 山本 貴久<sup>†</sup> 堀 智<sup>†</sup> 稲垣 直樹<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 小島プレス工業(株) 〒470-0207 愛知県みよし市福谷町広久伝 15 番地  
<sup>‡</sup> 名古屋工業大学 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

E-mail: <sup>†</sup> {t-tabata, taka-yamamoto, hori}@kojima-tns.co.jp, <sup>‡</sup> inagaki@ieee.org

**あらまし** 近年, 電磁誘導方式や磁界共鳴方式などを利用し, モバイル機器や電気自動車 (EV) などに非接触で充電を行うことが研究されており, 小電力機器では実用化され始めている.

本研究は, 生産工場等で使用されている AGV (無人搬送車: Automated Guided Vehicle) の運用を助けるために, モータ駆動用バッテリーの非接触充電システムを構築することを目的とした. まず, HF (High Frequency) 帯を利用した第 1 次試作・評価を実施した. 第 2 次試作では改良を加え, LF (Low Frequency) 帯を利用し, シールド板フェライトシート装着による充電効率の向上, 搭載性向上などを実現した.

**キーワード** AGV, 無人搬送車, 非接触充電システム, HF 帯, LF 帯, フェライトシート

## Trial production and efficiency evaluation of a wireless charging system for AGV

Takanobu TABATA<sup>†</sup> Takahisa YAMAMOTO<sup>†</sup> Satoshi HORI<sup>†</sup> and Naoki INAGAKI<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Kojima Press Industry Co., Ltd. 15 Hirokuden, Ukigai-Cho, Miyoshi, Aichi, 470-0207 Japan

<sup>‡</sup> Nagoya Institute of Technology Gokiso-Cho, Nagoya-Shi, Aichi, 466-8555 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {t-tabata, taka-yamamoto, hori}@kojima-tns.co.jp, <sup>‡</sup> inagaki@ieee.org

**Abstract** Recently, wireless charging systems by electromagnetic induction method or resonance method for mobile equipments and electric vehicles (EV), etc. have been studied, and wireless charging systems for low power devices are now commercially viable.

This paper intends to develop a wireless charging system for an AGV (Automated Guided Vehicle), in which batteries are used to drive the motor, and then to facilitate the system operation at the factory. Firstly, we carried out a trial production of a system and the efficiency evaluations at HF (High Frequency) band. Secondly, a prototype production and the evaluations have been carried out at LF (Low Frequency) band, and have achieved noticeable improvements in the charging efficiency and the mountability applying ferrite sheet on the shield plates.

**Keyword** AGV (Automated Guided Vehicle), wireless charging system, HF Band, LF Band, ferrite sheet

### 1. まえがき

近年, 携帯電話やスマートフォン, ノートパソコン, タブレット端末, デジタル音楽プレーヤーなどモバイル機器が急速に普及している. それらにはバッテリーへの充電が必要となるが, ユーザーとしては充電作業が手間となるため, 利便性の向上を目的として, 非接触充電技術が研究されている [1].

その中で電動歯ブラシや, 電気シェーバーなどは利便性に加え, 水周りの製品であるため, 充電時の漏電に対する安全対策として, 接点が露出しない非接触充電が製品化されている. また, ワイヤレス充電の国際規格標準化を目的とし, 2008 年 12 月にワイヤレスパワーコンソーシアム (WPC) が設立され, 5W 程度ま

でのデバイスを対象に規格書が発行された [2]. 2012 年 7 月現在のメンバー数は 113 社となっており, この規格に準拠した製品が発売され始めている.

それらの製品化された技術は電磁誘導方式を採用しており, その課題としてはほぼ接触に近い距離程度しか電力を伝送できない事が挙げられる. その解決策として, 2007 年に MIT の Marin Soljacic のグループが発表した共鳴方式無線電力伝送がある [3], [4]. 伝送距離 2m で伝送効率は 40 ~ 50% であるが, 60W の電球を点灯させることが確認された. この技術は比較的大電力を遠くに伝送できるため, 特に電気自動車や産業機器, それ以外にもモバイル端末, 医療機器, 家庭用機器などへの電力伝送の応用が期待され, 組織的に活発

な研究が行われている[1].

本稿では、その共鳴方式の電力伝送を用い、産業機器である AGV への搭載を目的とした非接触充電システムの開発内容について報告する。始めに HF 帯を利用した第 1 次試作・評価を実施した。第 2 次試作では改良を加え、LF (Low Frequency) 帯を利用し、充電効率の向上、搭載性向上などを実現した。

## 2. HF 帯非接触充電システム

本章では、HF 帯を利用した AGV 用非接触充電システムの開発について説明する。搭載を検討した AGV の外観及び、寸法を図 1, 2 に示す。これは、生産ラインへの部品供給および、生産ラインでの完成品回収、使用済部品の空箱回収などを自動で行う装置である。床に引かれた走行ラインをセンサーで読み取り、周回ライン上を走行し、別途設けられた制御マーカにより速度や停止位置を制御している。動力である 100W のモータで駆動し、12V のバッテリーを 2 個直列に接続し 24V 電圧で電力を供給している。

生産ラインの稼働時間 8 時間に対し、充電を行わない場合、AGV の連続稼働が可能な時間は 6 時間程度である。昼の休憩時間や作業終了後に充電を忘れた場合や、生産ラインの稼働時間が延長された場合等に充電不足となり、AGV が停止してしまうため、生産ラインに悪影響が出てしまうという問題があった。それを解決するために、非接触充電システムを導入し、荷物積み下ろし時の停車中に AGV 用バッテリーへの継渡し充電を行う。

以下に電力伝送部である HF 帯コイルのシミュレーション結果、実測結果及び、非接触充電システムの実測結果、このシステムに関する課題を示す。

### 2.1. HF 帯コイルのシミュレーション

AGV への搭載スペースと伝送距離等の条件を表 1 に示す。伝送周波数は ISM (Industry-Science-Medical) バンドである 13.56MHz とした。

図 2 に搭載可能スペースを斜線で示した。そこに図 3 のような受電ユニットのケースを設置し、電力伝送面とは反対側の開口はシールド板で遮蔽する構造を検討する。搭載スペースの制限より L, H 方向はコイル直径を 300mm と設定した。また、W 方向に関しては、コイル間距離が広いほど、シールド板とコイルの間隔が狭くなるため、コイルの直径と巻数を変えない条件では伝送特性が劣化する原因となる。そこで、伝送効率が 90% 以上を確保できる最低コイル間距離の検証をシミュレーションで実施した。コイル間距離を 10 ~ 50mm で変化させた時の伝送効率のシミュレーション結果を図 4 に示す。ここでのシミュレーションは

ANSYS 社製 HFSS を用いて解析を実施した。

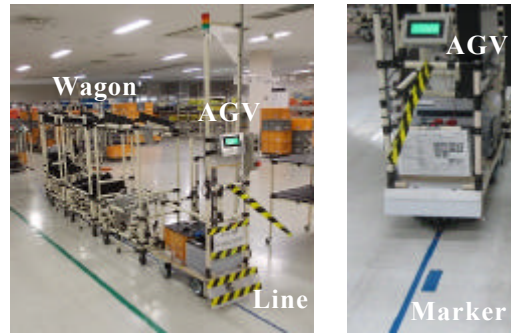


図 1 AGV (台車牽引タイプ) 外観

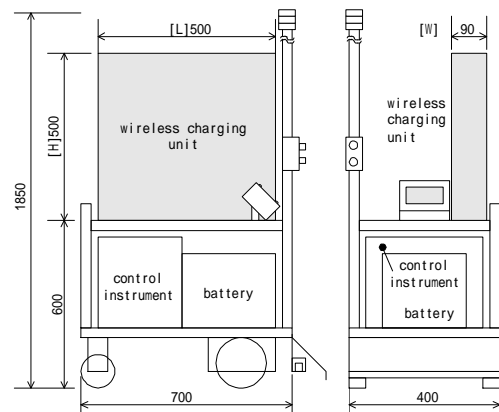


図 2 AGV (台車牽引タイプ) 寸法

表 1 AGV 非接触充電条件

Unit size	[L]500 × [H]500 × [W]90mm
Coil diameter	300mm
Transmission range	100mm
Frequency	13.56MHz
Battery	28Ah, 12V × 2
Output power	60W

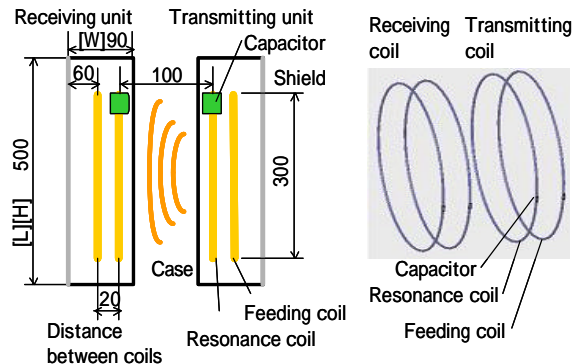


図 3 送受電ユニット構成

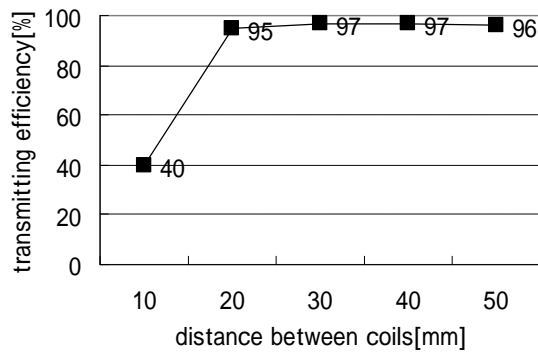


図4 コイル間距離 - 伝送効率特性

シミュレーション結果によると、コイル間距離 20mm ~ 50mm までは伝送効率の目標値 90% を満足しているが、コイル間距離 10mm に狭くなるとインピーダンス整合ができないため、急激に伝送効率が劣化する。これは付録に示すように、自己インダクタンス  $L_s$  と結合係数  $k$  には最適値が存在するためである。これより、最低コイル間距離は 20mm であり、コンデンサ容量を 190pF とした時に伝送効率 95% を得られることが分かった。このシミュレーション結果を基に試作評価を実施した。

## 2.2. HF 帯コイルの試作評価

上記より、コイル直径 300mm、コイル間距離 20mm の条件で、送受電コイルの試作を実施した。試作品の外観を図 5 に示す。

この試作品（コイル）に対し、コンデンサの容量を 160 ~ 190pF に変化させて伝送効率の評価を実施した。評価結果を図 6 に示す。コンデンサ容量が 160pF の時、伝送周波数での伝送効率が 90.2% を達成した。シミュレーションでは 190pF の時に最良の伝送効率となったが、実測では 160pF が最良となった。これは試作品のコイル形状が構造上、真円ではなく八角形に近くなったことや、コンデンサ容量の調整のため、並列接続したこと等で誤差が生じたと考えられる。

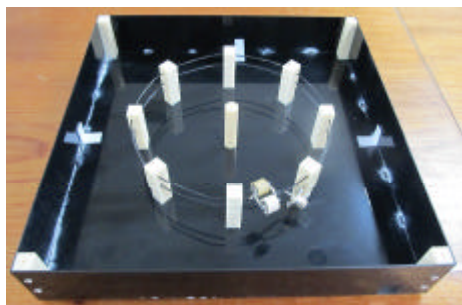


図5 試作品（コイル）外観

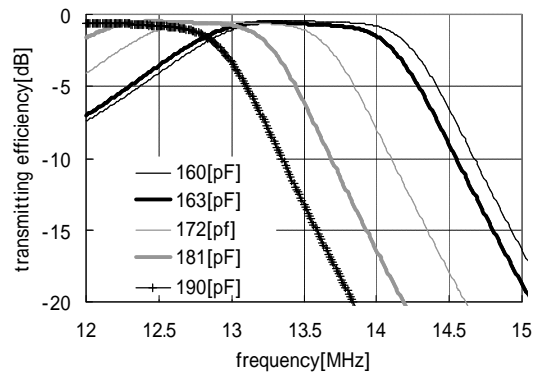


図6 伝送効率評価結果

## 2.3. HF 帯非接触充電システム性能

上記のように試作したコイルを用いて非接触充電システムを構築した。システムのブロック図を図 7、システムの外観を図 12 に示す。AGV が指定の停車位置に停車すると、高周波電源のスイッチが自動で ON となる。非接触充電の仕組みとしては、高周波電源で伝送周波数 (13.56MHz) の信号を 60W の電力で発生させ、送電コイルに供給する。そこから 90.2% の伝送効率で受電コイルに電力が伝送される。AGV 側で受電された高周波は、整流器と平滑コンデンサで直流に変換された後、DC-DC コンバータでバッテリーへの充電電圧である 26V に変換される。その後、バッテリーに充電電力として供給される。バッテリーが満充電に近くなると高周波電源への反射波が増加するため、自動で充電を OFF することができる。このようにして、作業者が不要な全自動の継足し充電システムを構築した。

問題点として、高周波かつ、大電力であるため、整流時に損失が発生し、システム充電効率の低下の原因となっている。整流効率としては 64% であり、システム充電効率は、51% であるため、さらなる効率改善が求められる。また、他形状の AGV への搭載や、送電側の工場への設置のしやすさ考慮すると、ユニットの小型化が求められる。

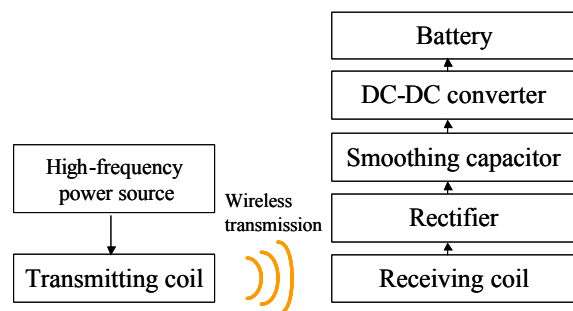
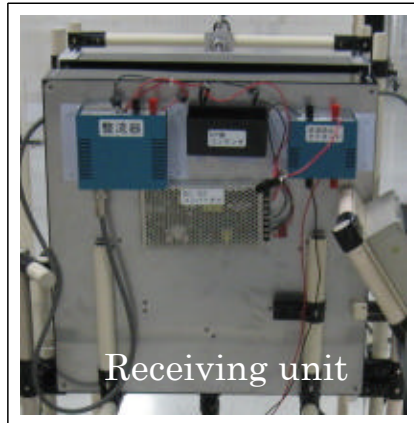
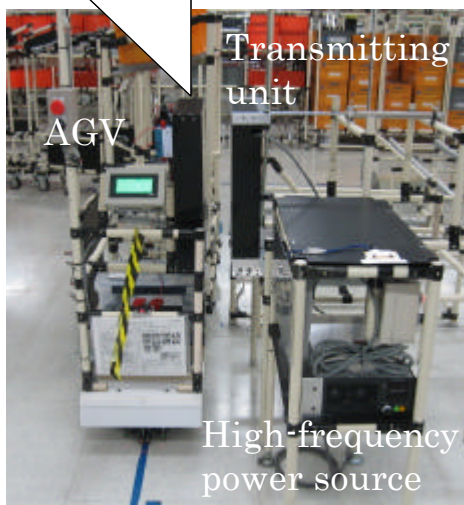


図7 非接触充電システムブロック図



Receiving unit



Transmitting unit

AGV

High-frequency power source

図 8 HF 帯非接触充電システム外観

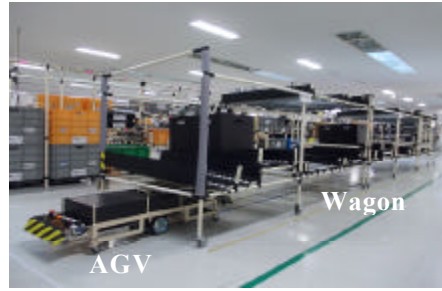


図 9 AGV (低背タイプ) 外観

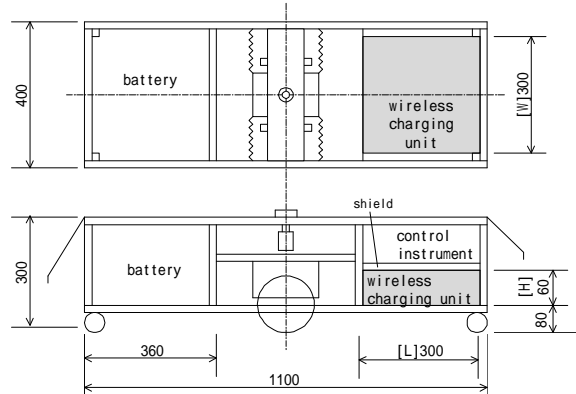


図 10 AGV (低背タイプ) 寸法

表 2 AGV 非接触充電条件

Unit size	[L]300 × [W]300 × [H]60mm
Coil diameter	280mm
Transmission range	80mm
Frequency	136kHz
Battery	28Ah, 12V × 2
Output power	80W

### 3. LF 帯非接触充電システム

HF 帯非接触充電システムでは、充電効率の向上、ユニットの小型化が課題となっている。充電効率の向上に関しては、システム充電効率の中で整流器が充電効率低下の原因となっている。これは高周波かつ、大電力を整流するには大きな損失が発生してしまうためと考えられる。そのため、対策として伝送周波数の低周波化を検討した。前システムの 13.56MHz に対し、約 1/100 である 136kHz を伝送周波数に採用した。また、AGV の方式に関しては台車牽引タイプのみに対応していたが、図 9 のような台車の下を潜り抜ける低背タイプの AGV への搭載も可能とするために、小型かつ低背型の送受電ユニットの開発を実施した。

以下に電力伝送部である LF 帯コイルの試作品とその実測結果及び、非接触充電システムの実測結果を示す。

#### 3.1. LF 帯コイルの試作評価

低背タイプ AGV の寸法図を図 10 に示す。これより算出した搭載スペースと伝送距離等の条件を表 2 に示す。この条件より、図 11 のようなコイル直径：280mm、巻き数：50 巻の平面型コイルを試作した。線材として、高周波抵抗を低減し、Q の向上が期待できるため、0.1mm × 146 本燃りのリッツ線を使用し、伝送周波数の 136kHz で 320 の Q を得た。これを送受電コイルとし、各コイルに 4.7nF のコンデンサを装荷し、伝送距離 80mm で S21 特性を評価した結果を図 12 に示す。共鳴方式では、伝送効率が最大となる、異なる 2 つの共鳴周波数が存在する。今回、高周波側の共鳴周波数が伝送周波数 (136kHz) となるように調整を行い、伝送効率：91% を得た (図 12：改良前)。



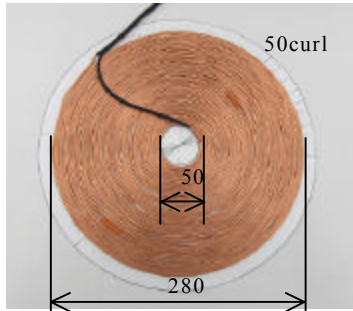


図 11 試作品（平面型コイル）外観

AGV の停車位置（送受電コイルの中心位置ズレ）に関し、ライン上を走行するため、横方向のズレは発生しないが、前後方向には±30mm 程停車位置ズレが発生する。伝送効率の位置ズレ特性を評価すると、図 13（改良前）のようになり、AGV の停車位置が前後方向に±20mm ずれると 90%を下回ってしまう。これはコイル間結合が強く、共鳴周波数が低高 2 周波数に分裂しており、高周波側のみに調整したことが原因である。

付録に示すように結合係数  $k$  に対し、最適な自己インダクタンス  $L_S$  が存在するため、コイル直径を小さく 250mm、巻き数：50 巻に変更し、コイル間結合を弱くした。これにより、図 12（改良後）に示すように低高 2 周波数に分裂していた共鳴周波数が統合され、台形特性になることで位置ズレに強い特性に改良できた（図 13：改良後）。さらに、文献[5]に示す回路構成にすると  $L_S$  を非常に小さくできることが分かっているが、この方法による試作・評価は別の機会とする。

しかし、AGV に搭載すると、コイル間結合が弱くなったことにより、受電コイル上部に設置されている制御機器に対するシールド板（図 10）が影響し、伝送効率が劣化してしまう（図 14）。シールド板とコイルの間隔は 60mm であり、コイル単体の伝送特性は 91% であるのに対し、シールド板がある場合は 79% まで劣化する。この問題に対し、フェライト（磁性体）を用い、近接金属の影響を低減するための検討を実施した。表 3 に示すような物性値の異なる 5 種類の材料を準備した。各材料の効果を明確にするため、条件を厳しくし、受電コイルの真上に 400mm のシールド板を設置した。その間に各材料を敷き詰めた場合の伝送効率の変化を評価した結果を図 15 に示す。コイル単体の場合は 91% に対し、シールド板が直近にあると 2% まで劣化する。フェライトの効果としては  $\mu'$  が高く、 $\mu''$  の低い材料を厚く敷き詰める方が効果は高い。これより、AGV には A のフェライトシートを 1 枚敷き詰めることでシールド板の影響を低減することができた。

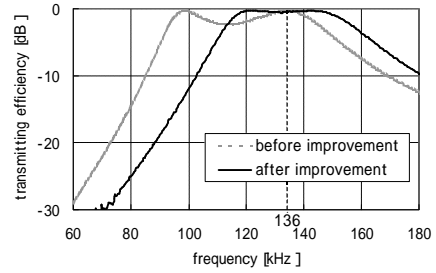


図 12 伝送効率評価結果

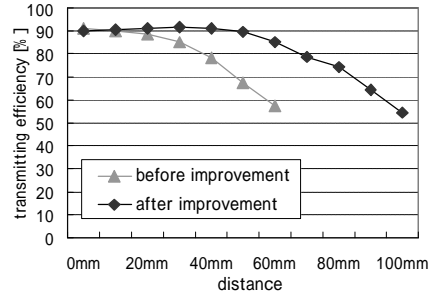


図 13 位置ズレ特性評価結果

表 3 フェライト物性値

	thickness	$\mu'$	$\mu''$	measurement frequency
A	0.1mm	110	5	10MHz
B	7.0mm	130	40	10MHz
C	0.1mm	60	10	10MHz
D	0.2mm	75	0	1MHz
E	0.3mm	75	0	1MHz

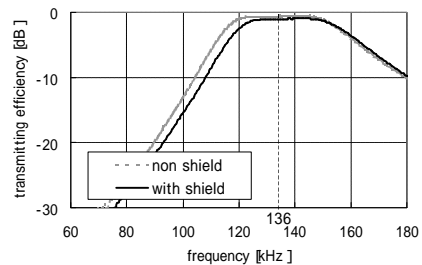


図 14 伝送効率評価結果（改良後）

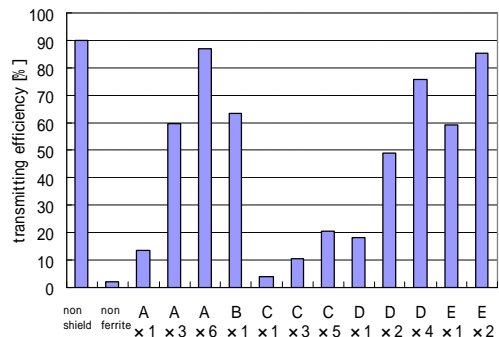


図 15 各フェライトの効果

### 3.2. LF 帯非接触充電システム性能

上記のように開発した平面型コイルを用いて非接触充電システムを構築した。図 16 にシステムの外観を示す。これより、AGV 側には搭載性に優れ、工場側には設置しても段差のない薄型の送受電ユニットが完成した。また、充電効率は、コイル部で 90%、整流部で 85% であるため、システム充電効率は 76.5% と大幅に改善された。

非接触充電システム搭載前後のバッテリー電圧の変化を図 17 に示す。非接触充電がない場合は消費する一方であるので、昼の休憩時間を利用してバッテリー電圧を回復し、1 日の稼働に対応していた。それに対し、HF 帯非接触充電システムにより、自動で継足し充電が可能となり、充電の手間をかけずに 1 日の連続稼働が可能となった。しかし、充電効率が悪いので、長時間稼働するとバッテリー電圧が低下してしまう。さらにこの問題に対応するため、LF 帯非接触充電システムでは充電効率を改善し、毎回の充電で満充電まで回復する事が可能となり、昼の休憩時間や作業終了後にも補足の充電をせずに AGV の連続稼働が可能となった。

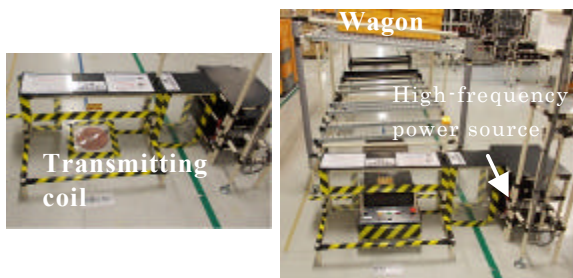


図 16 LF 帯非接触充電システム外観

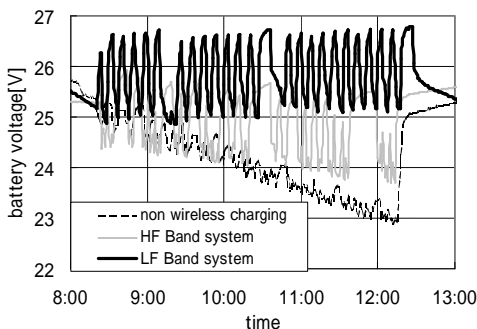


図 17 バッテリー電圧の変化

### 4. むすび

AGV 向けに HF 帯非接触充電システムを開発した。さらに充電効率、搭載性を向上させた LF 帯非接触充電システムを実用化した。これにより、工場作業者が毎日 AGV のバッテリーを充電する作業を省く事ができ、利便性の向上に繋がった。

また、今回の LF 帯コイルは付録 1 に示す手法で設

計を行ったが、今後は付録 2 に示すような、コンデンサとインダクタを用いる外部回路による手法でコイルを設計し、さらなるコイルの小型化、軽量化を目指す。

### 文 献

- [1] 日経 BP 社, ワイヤレス給電のすべて, 2011 年 12 月.
- [2] ワイヤレスパワーコンソーシアム (WPC), (<http://www.wirelesspowerconsortium.com/jp/>)
- [3] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, D.J. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science, Vol. 317. No. 5834, pp. 83 - 86, 6 Jul. 2007.
- [4] A. Karalis, D.J. Joannopoulos, M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Annals of Physics, 323, pp.34-48, 2008.
- [5] Naoki Inagaki, Takanobu Tabata, Satoshi Hori, "Design of LF-WPT systems of sympathetic connection employing non-resonant grounded antennas and external circuits which emulate the systems employing self-resonant electrically small antennas," Proc. IEEE MTT-S IWMS IWPT-2012, pp.101-104, May, 2012.

### 付 録 外部回路の設計

コイル群からなる無線系に接続して、特性インピーダンス  $R_0$  の電源回路と受電回路の間のインピーダンス整合を行い、電力伝送効率を最適化するための外部回路の最適設計は以下の公式により達成できる。

コイル群には自己インダクタンスと相互インダクタンスの最適関係が要求される。結合係数  $k$  に対して自己リアクタンス  $L_s$  の最適値が存在し、大きすぎる場合には巻き数を減らすなどの調整が必要となる。

1. コンデンサ ( $C_0$ ) のみによる外部回路

$$C_0 = \frac{1}{\omega_0 R_0} f(k), L_s = \frac{R_0}{\omega_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-k^2} f(k)}$$

$$f(k) = \sqrt{\left(1 - \sqrt{\frac{1-k}{1+k}}\right) \left(\sqrt{\frac{1+k}{1-k}} - 1\right)} = k - \frac{k^3}{8} + O(k^5)$$

2. コンデンサとインダクタを用いる外部回路[5]

コイル群に並列コンデンサ ( $C_0$ ) と、直列インダクタ ( $L_0$ ) を用いると、コイルの自己インダクタンスを小さくすることが可能で、小形化が可能である。EMI, EMC の問題を軽減し、自動車などのプラットフォームを選択しないためのグランドをコイル群に近接して置く場合には、 $k$  が小さくなり通常の方法では設計が困難であるが、[5] に提案した方法では、比較的設計的に楽となる。

$$L_0 = \frac{r_0}{\omega_0}, C_0 = \frac{1}{\omega_0 R_0} \cdot \frac{1+k}{2k}, L_s = \frac{R_0}{\omega_0} \cdot \frac{2k}{1-k}$$