

# 屋外型搬送機用の非接触走行中給電システムの埋設と評価

清水修<sup>1)</sup> 花房一義<sup>2)</sup> 新崎晃大<sup>3)</sup> 郡司大輔<sup>4)</sup> 酒井優人<sup>5)</sup> 池田広盛<sup>6)</sup> 松岡史倫<sup>7)</sup>

## Evaluation of Road-Embedded Dynamic Power Transfer System for Outdoor Use Logistic Vehicle

Osamu Shimizu Kazuyoshi Hanabusa Kota Arasaki Daisuke Gunji  
Yuto Sakai Hiromori Ikeda Fuminori Matuoka

Wireless power transfer has been proposed to solve the issue of the electric contact fault or maintenance in the direct charging system. In this research, dynamic wireless power transfer system is developed for outdoor logistics vehicles. This paper describes the embedment of the power transmitter system in the road surface of the wireless power transfer system and the change of the transmitter coil with time.

**KEY WORDS:** EV and HV systems, charge/discharge, wireless power transfer, road (A3)

### 1. 研究の背景

自動車製造工程において、製造した部品の工場建屋間の移動や運送用のトラックに積載、出荷するためには屋外での運搬が必要になる。

従来は工場建屋間の移動は作業員が出荷する部品を乗せたトラックを運転していたが、工程の省人化を進めるためには自動で運搬する必要がある。また工程や生産される部品が変更されるごとに運送ルートは変更になる。これらの状況に応じて軌道を変える必要があること、すなわち自律走行可能であることが必須となり、工場内で使用される予め決められた軌道でのみ動く自動搬送機 (AGV : Auto Guided Vehicle) を使用することは困難である。その問題解決のために AGV の自動運転化について研究開発<sup>(1)-(3)</sup>が進んでいる。

しかし、自立走行型の AGV にも課題がある。自律走行するためには多くのセンサを使用し、高度な制御を実現する計算機が必要になるため、消費電力が大きくなる点である。

消費電力の増大に対する解決手段として大量のバッテリーを搭載することと AGV の台数を増やし、充電している AGV と運用する AGV の 2 つを用意するという方法がある。

しかしバッテリーの搭載場所の確保や、AGV の保管場所の確

保が困難という課題がある。この AGV の運用課題に対して本研究では磁界共振結合型の非接触走行中給電 (DWPT : Dynamic Wireless Power Transfer) を提案する。

走行中に車両に給電を行うこと、AGV に搭載するバッテリー量を削減することができる。さらに自動車同様<sup>(4)</sup>にバッテリーの重量が低減されることで運行に係るエネルギーの削減も期待できる。

すでに屋内で使用される AVG 用途では停車型の非接触給電<sup>(5)-(7)</sup>が提案されており、一部実用化されている。そして走行中給電は前述のとおり、自動車用途として研究がなされている<sup>(8)-(10)</sup>が AGV での商品化例はまだない。

走行中給電には接触式と非接触式が提案されているが、接触式の充電器は従来の AGV の停車中充電で発生している充電器の端子の摩耗による不具合が懸念されるため、本研究では非接触式を選択している。

本論文では AGV に適用するための DWPT システムの試作と実証について述べる。2 章で AGV のシステム構成について述べ、3 章で DWPT システムの構成について述べる。また 4 章では路面に敷設する送電コイルの設計と機械的評価について述べ、5 章で DWPT システムの評価について述べる。6 章で DWPT システムの経時変化について述べ、7 章で結論を述べる。

### 2. AGV の構成

ここでは AGV の構成について述べる。本研究で開発した DWPT システムを登載した、AGV の外観を Fig. 1 に示す。AVG は駆動部と部品搭載部に分かれており、駆動部には距離センサや LiDAR が設けられている。これらのセンサにより障害物や経路を検知可能である。そして外部コントローラによる手動走行だけでなく、自律走行アルゴリズムが登載されており、自律走行が可能である。受電コイルは地面と対向するように取り付けられている。

- 1) 東京大学 (277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)
- 2) TDK (株) (272-8558 千葉県市川市東大和田 2-15-7)
- 3) TDK ラムダ (株) (272-8558 千葉県市川市東大和田 2-15-7)
- 4) 日本精工 (株) (251-8501 神奈川県藤沢市鶴沼神明 1-5-50)
- 5) 新明工業 (株) (471-0856 愛知県豊田市衣ヶ原 3-20)
- 6) トヨタ T&S 建設 (株) (470-0375 愛知県豊田市亀首町上向イ田 65)
- 7) トヨタ自動車 (株) (471-0854 愛知県豊田市元町 1)

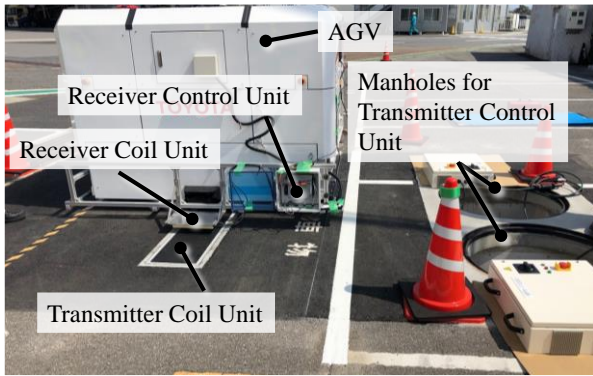


Fig.1 DWPT System with AGV

AGVの重量は最大積載状態で最大5800kgである。また最大積載状態で10km/hでの走行が可能である。バッテリー電圧は従来のAGVと同様に48から64Vの範囲である。

### 3. AGVに搭載したDWPTシステム

ここでは本研究で開発したDWPTシステムについて述べる。DWPTシステムの構成をFig.2に示す。DWPTシステムは送電側と受電側双方ともコイルと共振コンデンサを直列に接続したSS(Series-Series)方式である。コイルの電気的設計は最適設計手法<sup>(1)</sup>を用いている。

コイル間のエアギャップ58mmとして、設計時の制約条件はTable.1とTable.2に示す主要諸元にまとめられている。コイルのターン数、層数は上記の設計法で得られた結果である。

DWPTシステムの受電システムは受電コイルユニットと受電コントロールユニットに分かれている。受電コイルユニットは受電コイル、フェライト、共振コンデンサで構成され、受電コントロールユニットは整流器と制御回路で構成されている。AGVの駆動部側に搭載されており、受電コイルはAGVの中央に取り付けられている。送電コイルユニットは受電コイルユニットと対向するため、受電時にAGVの両端に取り付けられたタイヤが送電コイルユニットにできる限り直接乗らないようにするためである。受電コイルユニットをFig.3に示す。

巻線とフェライト、共振コンデンサが防水されたケースの中に配置されている。巻線はリッツ線を使用しており、2層ス

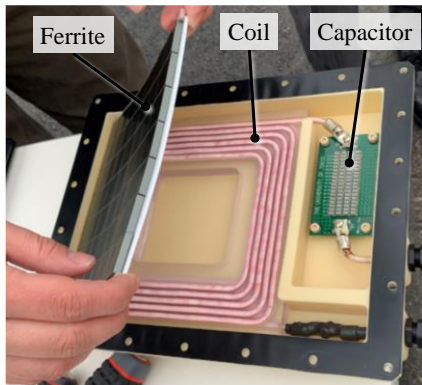


Fig.3 Receiver Coil

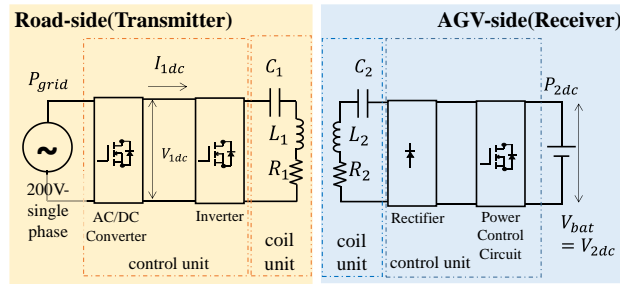


Fig.2 DWPT System with AGV

パイラル巻きである。受電システムの主要諸元をTable.1に示す。

路面側送電システムも大きく2つの構成に分かれている。送電コイルユニットと送電コントロールユニットである。送電コイルユニットは送電コイル、共振コンデンサで構成され、送電コントロールユニットはAC/DCコンバータとインバータで構成されている。

自動車用のDWPTシステムでは急加速や制動、旋回時のグリップ性能の担保のためにアスファルトやコンクリートを用いた路面とする必要がある。

しかし、AGVは自動車のような急な加減速や高速での旋回を行わないため路面としてアスファルトやコンクリートを用いる必要はない。

また送電コイルと受電コイルの距離は近い方が結合係数を向上でき、高効率に送電できるため、送電コイルは舗装に埋設せずに路面に溝を設けて配置することとした。また強度的にAGVに乗り上げられても問題ないコイルの設計をしている。コイルの強度については後述する。

送電コイルユニットをFig.4に示す。受電コイルユニットと同様に巻線とフェライト、共振コンデンサが防水されたケースの中に配置されている。そしてケースの上には樹脂製の蓋が取り付けられる。

送電コイルの主要諸元をTable.2に示す。巻線はリッツ線を使用しており、2層スパイラル巻きである。

送電コイルユニットと送電コントロールユニットの接続をFig.5に示す。送電コントロールユニットはコンクリート補強

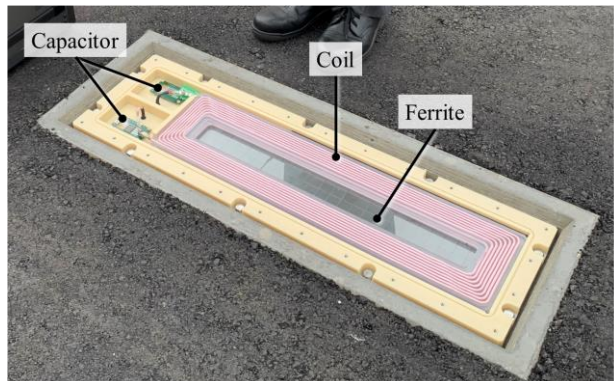


Fig.4 Transmitter Coil

Table.1 Parameters of Receiver Coil

symbol	unit	parameter	value
$V_{2dcmax}$	V	maximum DC voltage	64
$I_{2dcmax}$	A	maximum DC current	50
$V_{c2max}$	V	maximum resonance voltage	3000
$I_{2acmax}$	A	maximum AC current	33
$T_{2coil}$	mm	transverse of receiver coil	297
$B_{2coil}$	mm	breadth of receiver coil	249
$H_{2coil}$	mm	height of receiver coil	37.5
$NT_{2coil}$	-	turns of receiver coil	5
$LT_{2coil}$	-	layers of receiver coil	2

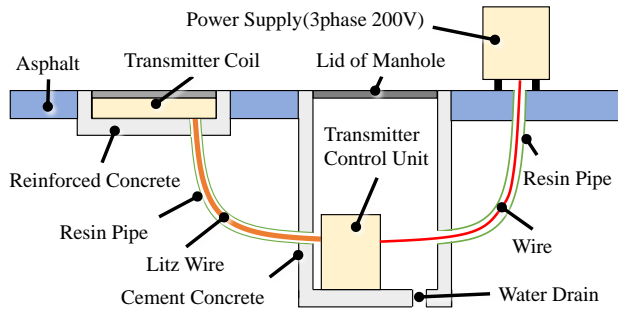
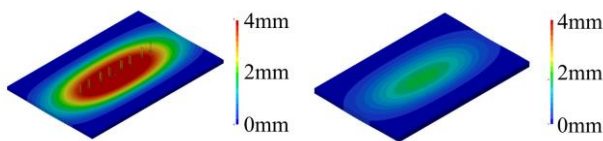


Fig.5 Connection of Transmitter

したマンホールの中に配置しており、コイルユニットを配置した溝とマンホールは樹脂製のパイプでつながっている。

コイルユニットの共振コンデンサと送電コントロールユニットはリッツ線で接続されており、線はコイルユニットのケース下部から防水コネクタを通してコイルユニットに接続される。送電コントロールユニットは単相 200V 電源から電力を供給される。

地上にある単相 200V 電源に接続するために同様の樹脂製パイプを用いてその中に電線を通して接続している。



(a)Plate thickness = 10mm (b)Plate thickness = 10mm  
Fig.6 Results of Displacement Analysis

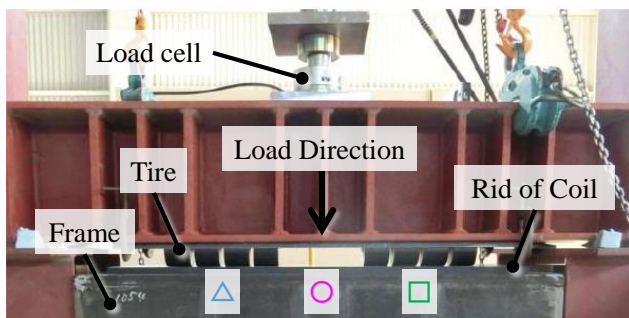


Fig.7 Equipment of Load Test

Table.1 Parameters of Receiver Coil

symbol	unit	parameter	value
$V_{1dcmax}$	V	maximum DC voltage	300
$I_{1dcmax}$	A	maximum DC current	14
$V_{c1max}$	V	maximum resonance voltage	6000
$I_{1acmax}$	A	maximum AC current	20
$T_{1coil}$	mm	transverse of receiver coil	942
$B_{1coil}$	mm	breadth of receiver coil	2282
$H_{1coil}$	mm	height of receiver coil	50
$NT_{1coil}$	-	turns of receiver coil	7
$LT_{1coil}$	-	layers of receiver coil	2

送電コントロールユニットは防水仕様であるものの、水没に耐えうる仕様でない。降雨時にマンホール内には水が溜まる恐れがあるため、マンホールの底には傾斜を設け、最も低い位置に水抜き用の穴を設けている。

#### 4. 送電コイルの機械設計と評価

ここでは送電コイルの機械設計と評価について述べる。AGV に最大積載した場合には車載部の車輪に最も大きな荷重がかかる。その時の輪荷重は輪当たり 3430N であり、車輪の接触面積は 600mm<sup>2</sup> となる。

4 輪全て送電コイルカバーの中央に乗る状態が最も送電コイルユニットへの荷重が大きい状態である。上記荷重に耐えられるコイルカバーの設計と評価について述べる。

送電コイルケースの内部に配置されているコイルやフェライトには AGV の荷重が直接かからないように、コイルカバーと部品の間には 5mm に空隙を設けている。

計算時間短縮のために解析モデルはコイルカバーを長手方向に短くし、コイルカバーに対して両端のみ拘束条件を与えたものとなっている。

また通常の運用では想定しないが、故障時等に AGV がコイルの上を進行方向と直交する可能性も考慮し、車輪が進行方向に対して直行方向に向いた条件での解析を行った。

4 つのタイヤには均等に荷重がかかる条件としている。そして、コイルカバーの厚さを 10mm と 15mm とした場合の応力解析を行った。解析によって得られたコイルカバーの変位を Fig. 6 に示す。コイルケース内部の部品との空隙は設計値 5mm であるため、製造誤差と計算誤差を含んで 4mm を設計上

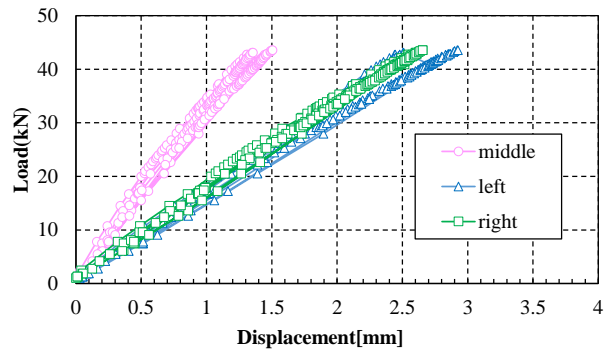


Fig.8 Result of Load Test

の許容変位とする。最大変位が1.7mmであったため、コイルカバーの厚さを15mmとすることでコイルケース内部の部品に荷重がかからないことがわかった。

以上の結果よりコイルカバーの厚さは15mmと決定した。ここで用いたコイルカバーの材料はポリカーボネイトにガラス繊維を重量比で20%混合したものである。コイルカバーの厚さ10mmでは最大60MPa程度の応力が発生することに対して、厚さ15mmでは最大20MPa程度であった。

次に評価結果について述べる。機械的性能評価として直接AGVから荷重を受ける蓋単体の荷重試験を行った。

試験に使用した設備をFig.7に示す。コイルカバーのコイルケースへの取り付け構造と同様の構造の金型を用意し、それに対してコイルカバーをボルトで蓋を取り付ける。

そして蓋の上からAGVの車輪を模した半円筒型の金属で荷重を与える。与えた荷重はロードセルで計測し、変位は接触式変位計で計測する。変位を評価する位置は、解析で得られた最も変位が大きくなる左右それぞれの4つの車輪の中央と、左右の車輪間である。

試験に使用した設備をFig.8に示す。解析条件では車輪8個の総荷重27.4kN相当の場合の最大変位が1.7mmであることにに対し、実測では左側の車輪中央で平均1.6mm、右側の車輪中央で1.7mmと解析結果とよく合っている。また許容変位4mmに対しても問題ないことを明らかにした。

### 5. DWPT システムの評価

ここではDWPTの評価について述べる。DWPTの評価はベンチとAGVで行っている。使用した送電コイルは1台である。ベンチでは受電側の電圧源はバッテリーではなく定電圧電源を用いており、48Vの定電圧としている。送電側の共振コンデンサ量は16.5nF、受電側の共振コンデンサ容量は99nFである。送電周波数85kHz、コイルユニット間ギャップ25mmで10km/hの速度で受電コイルを動かした際の電力伝送結果をFig.9に示す。

送電コイルユニットに断続的にパルス電圧を印加し、受電コイルユニットの有無による電流の変化を検知し、その変化

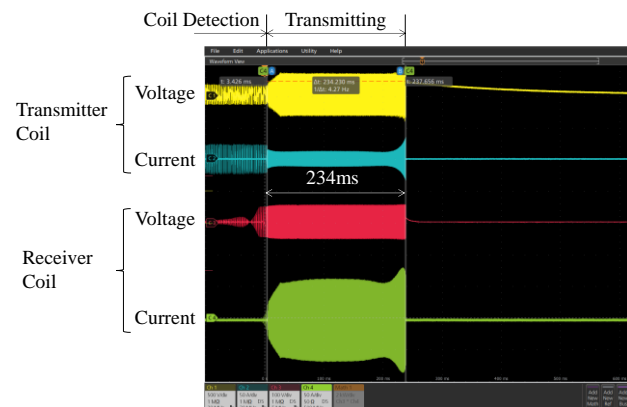


Fig.9 DWPT Test Result on AGV

によって受電コイルユニットの有無を判断している。受電コイルユニットを検知した後に送電を開始し、その後電流が閾値を超えた場合には受電コイルユニットが送電コイルユニット上から外れたと判断し、送電停止する<sup>(4)</sup>。そのため、電力伝送前にもコイルに電圧を印加している。送電時の基準とした送電周波数は85kHzとしている。

コイル検知が自動的にできており、送電開始と停止も自動的にできている。234msecの送電が出来ていることから、0.658mの区間で給電が出来たこととなる。

次にAGVに受電システムを搭載してDWPTを行った結果について述べる。AGVに受電システムを搭載した電力伝送結果をFig.10に示す。

検証を行った走行速度は10km/hである。送電コイルユニットは2台設置しており、それぞれA、Bと呼ぶ。設置用の溝の工事時に深さ5mmの違いが生まれたため、受電コイルユニットとのギャップは送電コイルユニットAとのギャップは25mm、送電コイルユニットBとのギャップは30mmである。

Fig.11に示すように設置時にコイルのインダクタンスに変化があったため、送電周波数は84.5kHzとしている。

コイルユニットAでは240msの給電時間と、1.8kWの受電電力を確認できた。一方でコイルユニットBでは37%の給電時間減少を確認した。

コイル間のギャップが大きくなり、結合係数が低下したことにより、送電コントロールユニットの電流値が増え、送電開始の制御閾値を下回るタイミングが変化した影響であると考えられる。

### 6. 送電コイルの経時変化

ここでは送電コイルの経時変化について述べる。送電コイルは2021年2月に路面に設置し、12月に経時変化を確認した。送電コイルが設置された場所は愛知県豊田市のトヨタ自動車工場内の駐車場にあり、駐車場は日常的に使用されているため、乗用車による乗り上げは稼働日から推定すると約1000回程度と考えられる。

また期間内の豊田市の最高気温は39°C、最低気温は-4.1°Cであった。

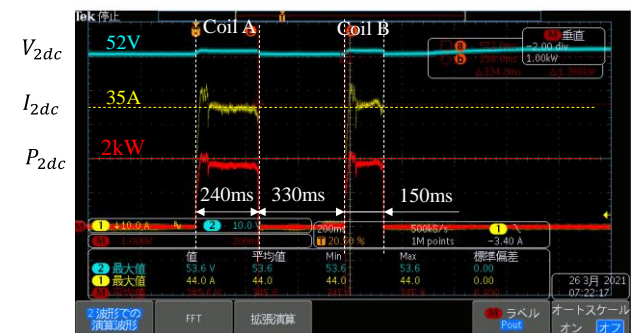


Fig.10 DWPT Test Result on AGV

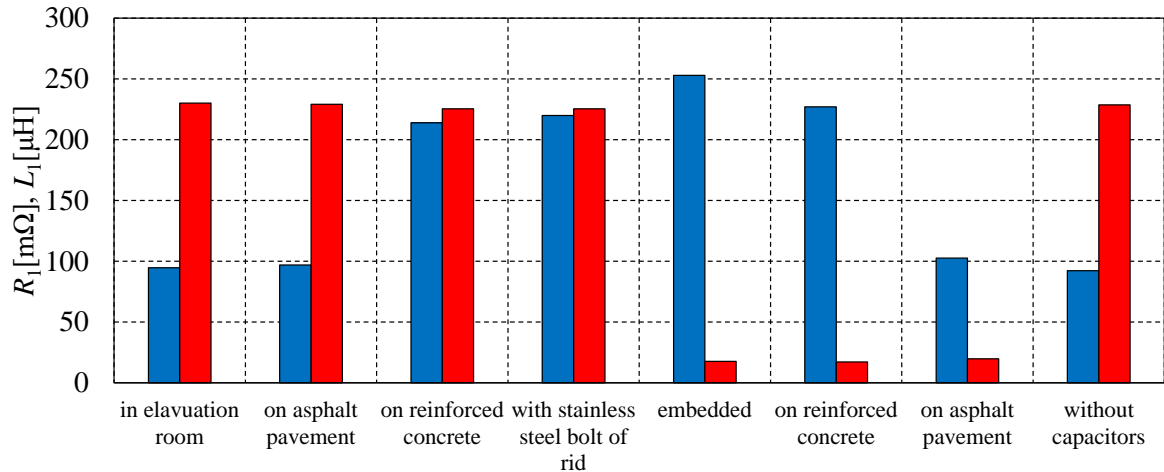


Fig.11 DWPT Test Result on AGV

設置工程とパラメータの変化を Fig. 11 に示す。  $R_1$  は送電コイルの抵抗値、  $L_1$  は送電コイルの自己インダクタンスである。 設置工程ではコイルを設置したコンクリートの枠がステンレス鉄筋を用いているため、コンクリートへの設置時に大幅に抵抗値の上昇が確認できている。さらに、ステンレスのボルトでコイルを固定する際にも抵抗値が上昇している。設置後にインダクタンスと抵抗値が変化している変化は、共振コンデンサの接続の有無によるものである。設置前に共振コンデンサを外した状態かつアスファルト舗装面に置いた状態での計測値と、設置後 10 か月経過した後に再度共振コンデンサを外した状態かつアスファルト舗装面に置いた状態での計測値結果を比較すると、経時変化による計測誤差以上のパラメータの変化は確認できなかった。

またマンホール内部の様子を Fig. 12 に示す。経時変化を確認する前日まで雨が降っていたが、マンホールの内部には水抜き穴が設けられていたため、水が溜まるということはない。

10 か月間に DWPT システムとしての運用はしていないが、周辺環境の変化に対する劣化は認められないという結果が得られた。



Fig.12 Inside of Manhole(10 month later)

## 7. 結論

本研究では屋外での部品運搬の課題解決のために、AGV に DWPT を適用することを提案した。

本研究で得られた結果は下記のとおりである。

1. AGV に 1.8kW 充電可能な屋外設置型の走行中給電システムを開発した
2. AGV の荷重に耐えうる送電コイルユニット及び路面構造を開発した
3. 10 か月の経時変化確認の結果、送電コイルに周辺環境の変化による経時変化は見られなかった

今後はサイクルタイムの短縮のために AGV を最高速度で運用して出力が大きくなることを想定し、十分な電力を受電できるように送電インバータの大電流化や受電側電圧の高電圧化を実施し、さらなる高出力化を目指す。

また DWPT システムは AGV の滞在時間の長い箇所に配置することで充電時間を長くでき、低出力でも充電量を満足できるようにする。

上記のように DWPT システムの運用方法は AGV に搭載するバッテリー量にも影響するため、今後は DWPT に適した運用方法についても検討を進める。

## 参考文献

- (1) C. Hu, R. Wang, F. Yan, N. Chen, "Output Constraint Control on Path Following of Four-Wheel Independently Actuated Autonomous Ground Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4033-4043, 2020
- (2) H. Zheng, R. R. Negenborn, G. Lodewijks, "Robust Distributed Predictive Control of Waterborne AGVs—A Cooperative and Cost-Effective Approach," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 48, no. 8, pp. 2449-2461, 2018
- (3) C. Hwang, C. Yang, J. Y. Hung, "Path Tracking of an Autonomous Ground Vehicle With Different Payloads

- by Hierarchical Improved Fuzzy Dynamic Sliding-Mode Control," in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 26, no. 2, pp. 899-914, 2018
- (4) O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, H. Fujimoto: "Potential for CO2 Reduction by Dynamic Wireless Power Transfer for Passenger Vehicles in Japan" , Energies 2020, 13, 3342, 2020
  - (5) S. Huang, T. Lee, W. Li and R. Chen, "Modular On-Road AGV Wireless Charging Systems Via Interoperable Power Adjustment," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 8, pp. 5918-5928, 2018
  - (6) C. Zhu et al., "Analysis and Design of Cost-Effective WPT Systems With Dual Independently Regulatable Outputs for Automatic Guided Vehicles," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 6, pp. 6183-6187, 2020
  - (7) R. Ota, S. Hoshi, K. Uchida, "Improving the Efficiency by Controlling the Switching Frequency for Secondary-side Converter of an Inductive Power Transfer System," IEEJ Transactions on Industry Applications, vol. 137, no.2, pp. 95-103, 2017
  - (8) 太田 涼介, 星 伸一, 内田 晃介 : 電磁誘導型非接触給電システム用二次側コンバータのスイッチング周波数制御による高効率化手法, 電気学会論文誌 D, vol. 137, no.2, pp. 95-103, 2017
  - (9) G. Covic, J. Boys, M. Kissin, H.Lu ``A three-phase inductive power transfer system for roadway-powered vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.54, no.6, pp. 3370-3378, 2007
  - (10) O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, H. Fujimoto, Y. Omori, ``Development of Dynamic Wireless Power Transfer Coils for the 3rd Generation Wireless In-Wheel Motor", SAE Technical Paper 2015-01-1686, 2015
  - (11) 清水 修, 永井 栄寿, 藤田 稔之, 藤本 博志, 大森 洋一 : 第3世代ワイヤレスインホイールモータにおける走行中給電用コイルの開発, 電気学会論文誌 D, Vol.141, No.8, pp.638-645, 2021
  - (12) D. Kobayashi, K. Hata, T. Imura, H. Fujimoto, Y. Hori, "Sensorless Vehicle Detection Using Voltage Pulses in Dynamic Wireless Power Transfer System," 29th Electric Vehicle Symposium Symposium, pp. 1-10, 2016