

車両搬送ロボット用非接触走行中給電システムの開発

正員 清水 修^{a)} 非会員 花房 一義^{**} 非会員 新崎 晃大^{***}
正員 郡司 大輔^{****} 非会員 酒井 優人^{*5} 非会員 池田 広盛^{*6}
非会員 松岡 史倫^{*7}

Development of Dynamic Wireless Power Transfer System for Vehicle Logistics Robot

Osamu Shimizu^{*a)}, Member, Kazuyoshi Hanabusa^{**}, Non-member, Kota Arasaki^{***}, Non-member, Daisuke Gunji^{****}, Member, Yuto Sakai^{*5}, Non-member, Hiromori Ikeda^{*6}, Non-member, Fuminori Matsuoka^{*7}, Non-member

(2020年*月*日受付, 2021年*月*日再受付)

Laborsaving is a major issue in production. In an automotive production line, a yard that is used as a temporary storage for vehicles before shipping. The vehicle-loading robot that operates autonomously has been proposed to automate the alignment of vehicles in the yard instead of human driving. In this study, the dynamic wireless power transfer system that includes the structure of the roadside for the vehicle-loaded robot is proposed. It is proven that the transmitter coil has enough durability for the load of the robot weight using simulation and actual measurement. It is also shown that the reinforcement bars of the road structure cause considerable eddy current loss even with stainless steel. This is similar to loss by coil resistance. This system achieves a 1.8kW dynamic wireless power transfer with an automated coil detection system and a frequency control system, under factory conditions.

キーワード: 走行中ワイヤレス電力伝送, ロボット, 自動搬送機

Keywords: dynamic wireless power transfer, robot, auto guided vehicle

a) Correspondence to: shimizu.osamu@edu.k.u-tokyo.ac.jp

* 国立大学法人東京大学大学院 新領域創成科学研究科〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8561

** TDK株式会社 技術・知財本部応用製品開発センターエネルギーユニット開発部第1開発室〒 272-8558 千葉県市川市東大和田 2-15-7

Development Section 1, Energy Units Development Dept. Advanced Products Development Center, Technology & Intellectual Property HQ, TDK Corporation, 2-15-7, Higashi-Ohwada, Ichikawa city, Chiba 272-8558

*** TDKラムダ株式会社 技術統括部システム電源開発部〒 272-8558 千葉県市川市東大和田 2-15-7

R&D Division System Power Supply Department WPT Development Group TDK-Lambda Corporation, 2-15-7, Higashi-Ohwada, Ichikawa city, Chiba 272-8558

**** 日本精工株式会社 新製品開発部技術リサーチ室〒 251-8501 神奈川県藤沢市鶴沼神明 1-5-50

New Product Development Department Technical Research Office, NSK Ltd., 1-5-50 Kugenmashimmi, Fujisawa city, Kanagawa 251-8501

*5 新明工業株式会社 BR 次世代物流事業部 次世代物流室〒 471-0856 愛知県豊田市衣ヶ原 3-20

SHINMEI INDUSTRY CO.,Ltd BR NEXT GENERATION

1. 研究の背景

自動車製造工程において、製造した工場建屋から自動車を運送用のトラックに積載、出荷するための一次置き場としてヤードと呼ばれる一時駐車場所がある。従来は工場建屋からヤードまで作業員が出荷する自動車を運転して運んでいたが、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。ヤードの運用上には2つの特徴がある。出荷するトラックへの積載箇所が複数あることと、トラックの到着時刻にばらつきがあることである。これらの状況に

LOGISTICS DIV. YUTO SAKAI 3-20, Koromogahara, Toyota city, Aichi, 471-0856

*6 トヨタ T&S 建設株式会社 中日本事業部本社営業所〒 470-0375 愛知県豊田市亀首町上向イ田 65

TOYOTA T&S CONSTRUCTION CO.,LTD., Central Japan Business Dept. 65, Kamekubi-cho Kamimukaida, Toyota city, Aichi, 470-0375

*7 トヨタ自動車株式会社 車両物流部車両管理室〒 471-0854 愛知県豊田市元町 1

TOYOTA MOTOR CORPORATION, Strategy Planning & Administration Dept. Vehicle Logistics Div., 1, Motomachi, Toyotashi, Aichi, 471-0854

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⁽¹⁾⁻⁽³⁾が進んでいる。一方で AGV は運搬のみを目的としているため, 車両は自走によって AGV に搭載される必要がある。

そこで本研究では停止車両を自ら車両搭載可能で, 自律走行可能な車両搬送ロボット (VLR:Vehicle Logistics Robot) を活用する。VLR は車両を搭載して運ぶロボットである。LiDAR(Light Detection and Ranging) や赤外線センサを搭載し, それらを活用しながら障害物を検知しリアルタイムに与えられた経路を辿って自律走行をする機能を備えている。しかし, VLR にも課題がある。自律走行するためにはセンサを多く使用し, 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 VLR の台数を増やし, 充電する VLR と運用する VLR 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, VLR の保管場所の確保が困難という課題がある。

この VLR 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で, VLR に搭載するバッテリーを削減することができる。さらに自動車同様に⁽⁴⁾ 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。屋内で使用される AVG 用途では停車型の非接触給電⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾が提案されており, 一部実用化されている。走行中給電は自動車用途としても研究されており⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾, 接触式給電⁽¹¹⁾も提案されている。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 VLR 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 VLR 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。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 VLR を使用した DWPT システムの評価について述べ, 7 章で結論を述べる。

2. VLR のシステム

本研究で DWPT システムを搭載した VLR の外観を Fig. 1 に示す。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。駆動システムの主要諸元を Table. 1 に示す。VLR の重量は車両搭載状態で最大 5800kg である。車両搭載状態で 10km/h での走行が可能である。またバッテリー電圧は 48 から 64V の範囲である。

3. 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文献⁽¹²⁾の手法を用いている。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. 2 と Table. 3 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。

(3-1) VLR 搭載受電システム 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。VLR の駆動部側に搭載されており, 受電コイルは VLR 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 VLR の両端に取り付け

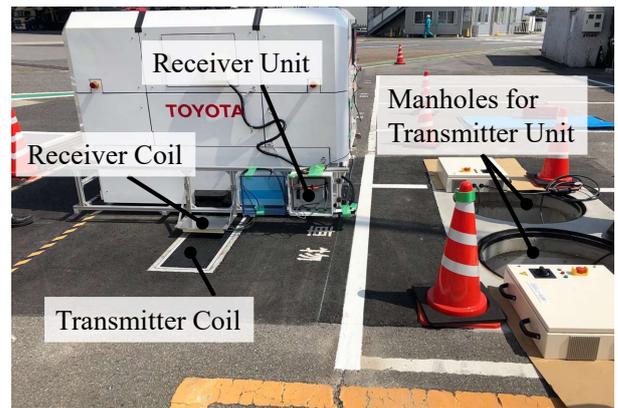


Fig. 1. DWPT system of VLR

Table 1. Specifications of VLR

symbol	unit	parameter	value
w_{vlr}	kg	maximum weight of VLR	5800
v_{max}	km/h	maximum speed	10
V_{bat}	V	battery voltage	48-64
I_{batmax}	A	maximum battery current	40
w_{bat}	kg	battery weight	126
u_{bat}	mm	size of battery	W:800 D:700 H:180

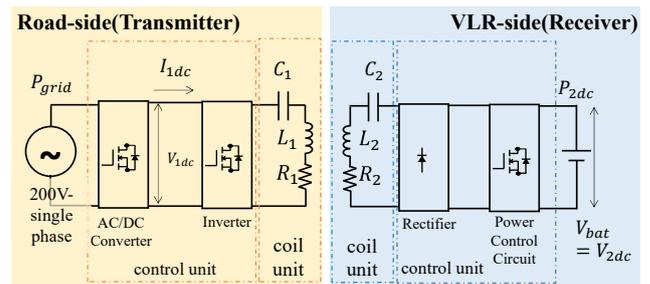


Fig. 2. System Configuration of DWPT

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層スパイラル巻きである。受電システムの主要諸元を Table. 2 に示す。

受電コントロールユニットのケースも防水されており, 受電コイルユニットと受電コントロールユニットは Table. 2 に示したリッツ線で接続されている。受電コントロールユニットとバッテリーは AV 線で接続されている。制御回路には過電圧や過電流, 過昇温を防ぐための回路が実装されている。

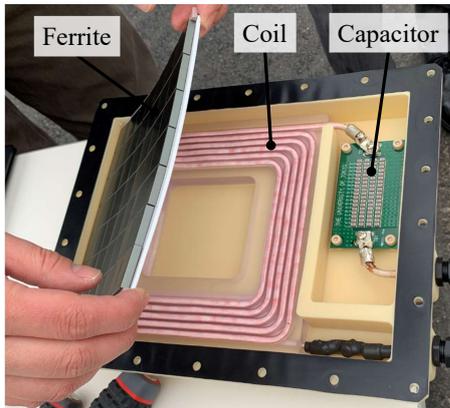


Fig. 3. Structure of Receiver Coil

る。インバータは定電流制御を行っており, 結合係数の低下と共に出力が上昇した場合は AC/DC コンバータによって出力制限を行っている。

〈3・2〉 路面側送電システム 路面側送電システムの部品構成と配置を Fig. 4 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

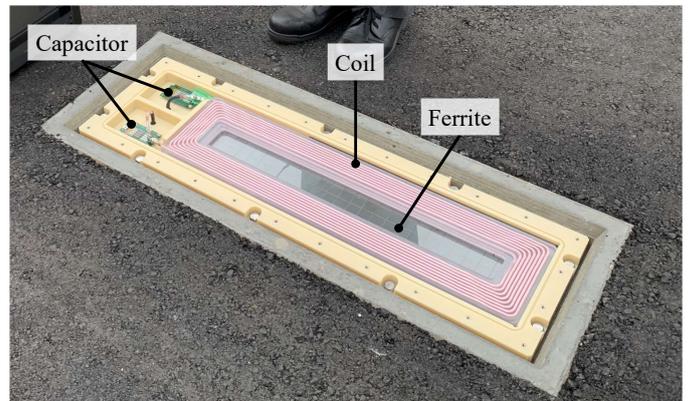


Fig. 5. Structure of Transmitter Coil

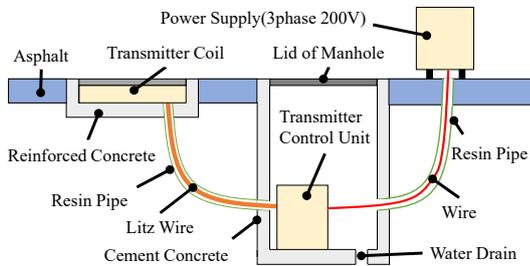


Fig. 4. Position of Transmitter System



Fig. 6. Transmitter Control Unit in Manhole

Table 2. Specifications of Receiver System

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
P_{2max}	W	maximum input	2560
T_{2ctrl}	mm	transverse of receiver control unit	56
B_{2ctrl}	mm	breadth of receiver control unit	186
H_{2ctrl}	mm	height of receiver control unit	217
T_{2coil}	mm	transverse of receiver coil unit	297
B_{2coil}	mm	breadth of receiver coil unit	249
H_{2coil}	mm	height of receiver coil unit	37.5
NT_{2coil}	mm	turns of receiver coil unit	5
LT_{2coil}	mm	layers of receiver coil unit	2
-	-	specification of litz wire	AWG44x6250
-	-	specification of ferrite	PC95

Table 3. Specifications of Transmitter System

symbol	unit	parameter	value
V_{1dcmax}	V	maximum DC voltage	300
I_{1dcmax}	A	maximum DC current	14
V_{c2max}	V	maximum resonance voltage	6000
I_{1acmax}	A	maximum AC current	20
P_{1max}	W	maximum output	2100
T_{1ctrl}	mm	transverse of transmitter control unit	355
B_{1ctrl}	mm	breadth of transmitter control unit	344
H_{1ctrl}	mm	height of transmitter control unit	104
T_{1coil}	mm	transverse of transmitter coil unit	942
B_{1coil}	mm	breadth of transmitter coil unit	282
H_{1coil}	mm	height of transmitter coil unit	50
NT_{1coil}	mm	turns of transmitter coil unit	7
LT_{1coil}	mm	layers of transmitter coil unit	2
-	-	specification of litz wire	AWG44x6250
-	-	specification of ferrite	PC95

ある。しかし、VLR 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。送電コイルを Fig. 5 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。そしてケースの上面には樹脂製の蓋が取り付けられる。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。送電システムの主要諸元を Table. 2 に示す。電力変換回路が筐体内に2つ入っているため、送電コントロールユニットは受電コントロールユニットと比較して大型となっている。コイルユニットを配置した溝の底面は VLR がコイル上を通過した際の加重にコンクリートが耐える必要があるため鉄筋コンクリートとしている。送電コントロールユニットはコンクリート補強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。送電コントロールユニットの外観を Fig.6 に示す。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 Table. 2 に示したリッツ線と同仕様の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。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. 送受電コイルの機械設計と評価

ここでは送受電コイルの機械設計と評価について述べる。VLR 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 600mm² 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。

〈4・1〉 送電コイルの設計 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 VLR 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 VLR 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。

拘束条件を与えた位置と荷重を入力した位置を Fig. 7 に示す。4つのタイヤには均等に荷重がかかっているとされている。そして、コイルカバーの厚さを 10mm と 15mm とし

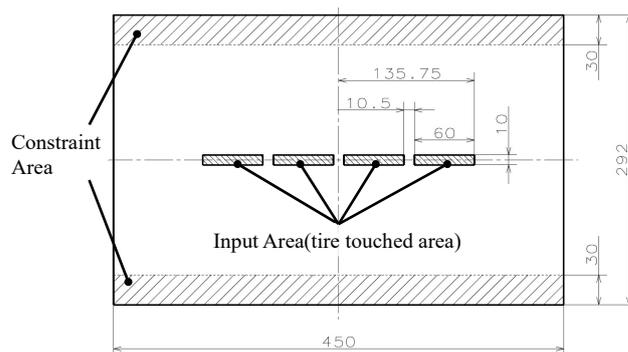


Fig. 7. Conditions of Stress Analysis (Top View)

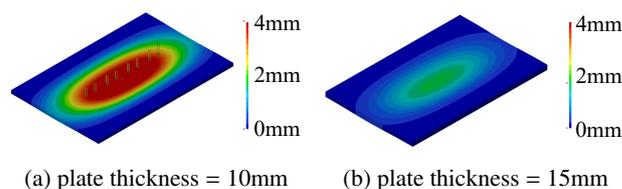


Fig. 8. Results of Displacement Analysis

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. 8 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。

〈4・2〉 送電コイルの機械的性能評価 ここでは送電コイルの機械的性能評価について述べる。機械的性能評価として直接 VLR 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. 9 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 VLR のタイヤ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。

荷重試験の結果を Fig. 10 に示す。荷重試験は 40kN の荷重を 4 回繰り返している。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が分かった。

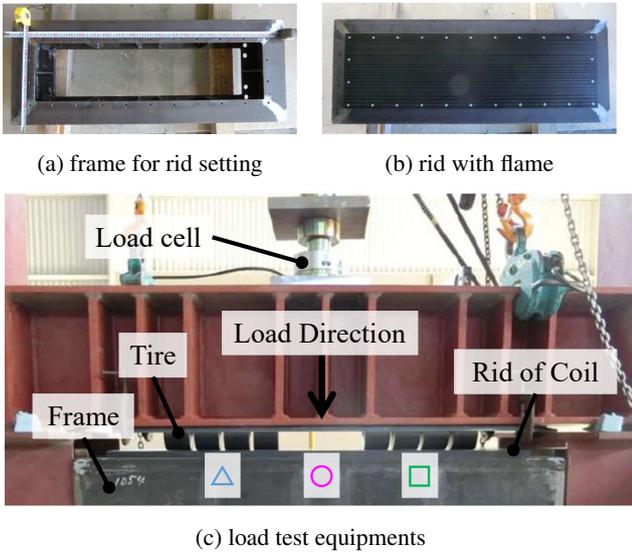


Fig. 9. Test Equipments of Load Test

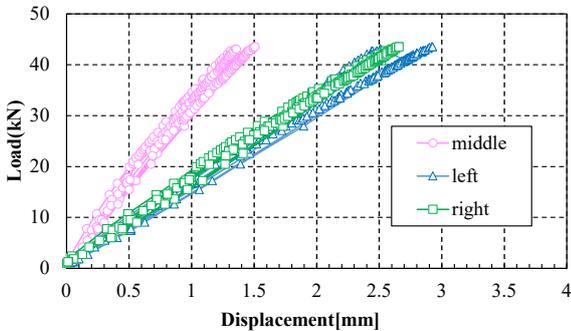


Fig. 10. Result of Load Test of Coil Cover

5. DWPT システムの評価

ここでは DWPT システムの評価手法と結果について述べる。評価項目はコイルパラメータと電力伝送効率である。

〈5・1〉 コイルパラメータ コイルパラメータの設置状況による変化を LCR メータを使用して評価した。周波数は 85kHz, 送電コイルと受電コイルケース間の距離は 25mm である。送電コイルと受電コイルのケース表面からそれぞれのコイルまでの距離が 20mm と 3.5mm であるため、コイル間の距離は 48.5mm である。屋内での単体評価と、屋外での VLR に受電コイルを組付けた状態での評価を実施した。屋外での送電コイル評価については設置工程毎に評価を行っている。受電コイルの上には VLR にコイルを取り付けるためのアルミ製の板が取り付けられている。単体評価では VLR 進行方向である送電コイルの長手方向に対して位置を変更した場合のコイルパラメータを評価する。ベンチで取得したコイルパラメータとコイルパラメータから算出される理論最大効率を Fig. 12 に示す。Fig. 11 に示すように送電コイルの長手方向の位置が x であり、送電コイルの中心と受電コイルの中心が対向している状態を x=0 としている。

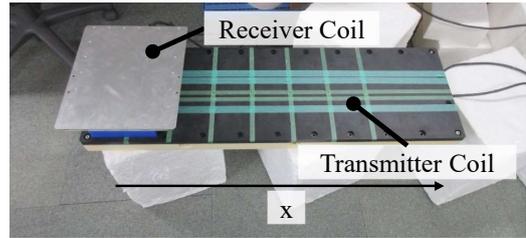


Fig. 11. Setting of Coil Parameter Evaluation

理論最大効率 η_{max} は次式で得られる。

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

$$Q_i = \frac{\omega_0 L_i}{R_i} (i = 1 \text{ or } 2)$$

ここで、 η_{max} は理論最大効率、 k は結合係数、 Q はコイルの Q 値、 L は自己インダクタンス、 L_m は相互インダクタンス、 R はコイル抵抗、 ω_0 は周波数であり、1 は送電、2 は受電側を示す。

(1) 式に示す理論最大効率の重要パラメータである k と Q は、Fig. 12 の各グラフから求められる。例えば $x = 0$ では、($k = 0.1, Q_1 = 1004, Q_2 = 377$), $x = -300$ では ($k = 0.09, Q_1 = 1063, Q_2 = 365$) であり、 k が 0.1 程度において、 Q が数百以上の高い値であるため η_{max} が 0.97 程度の高い値であることが確認できる。進行方向によって最も大きく変化するパラメータは相互インダクタンスである。中心から 200mm 程度の位置で最も高くなり、それより遠くなると減少する。理論最大効率は中心から ± 200 mm までの範囲では 0.02 程度の变化であり、300mm で 0.95 程度である。

次に屋外での評価について述べる。送電コイルの設置工程毎のコイルパラメータの変化を Fig. 13 に示す。屋内のベンチ計測の結果とアスファルト舗装の上において計測した結果を比較すると大きな変化がなく、鉄筋コンクリートで補強された溝内に配置した場合には抵抗の 126% の増加とインダクタンスの 2% の低下が確認された。送電側コイルの抵抗増加は、漏れ磁束による鉄筋部に発生する渦電流損成分の等価抵抗増加によるものと考えられる。コイルの等価抵抗増加は、 Q_1 の低下に直接関わるものの、もともと Q_1 は 1000 程度あり、この半減の 500 でも十分高く、 k が約 0.1 であることを踏まえると最大効率値への影響は 0.1% 以下と小さく、問題にならないと思われる。一方、鉄筋の多少の発熱に伴う温度上昇とヒートサイクルが伴うため機械的強度の経年変化への影響が懸念され、実用化段階では留意する必要がある。

鉄筋からコイルケース底面までの距離は 63mm, 主磁束が通るフェライト底面までの距離は 72mm である。鉄筋は進行方向 130mm, 横方向 110mm の間隔で格子状に組まれ

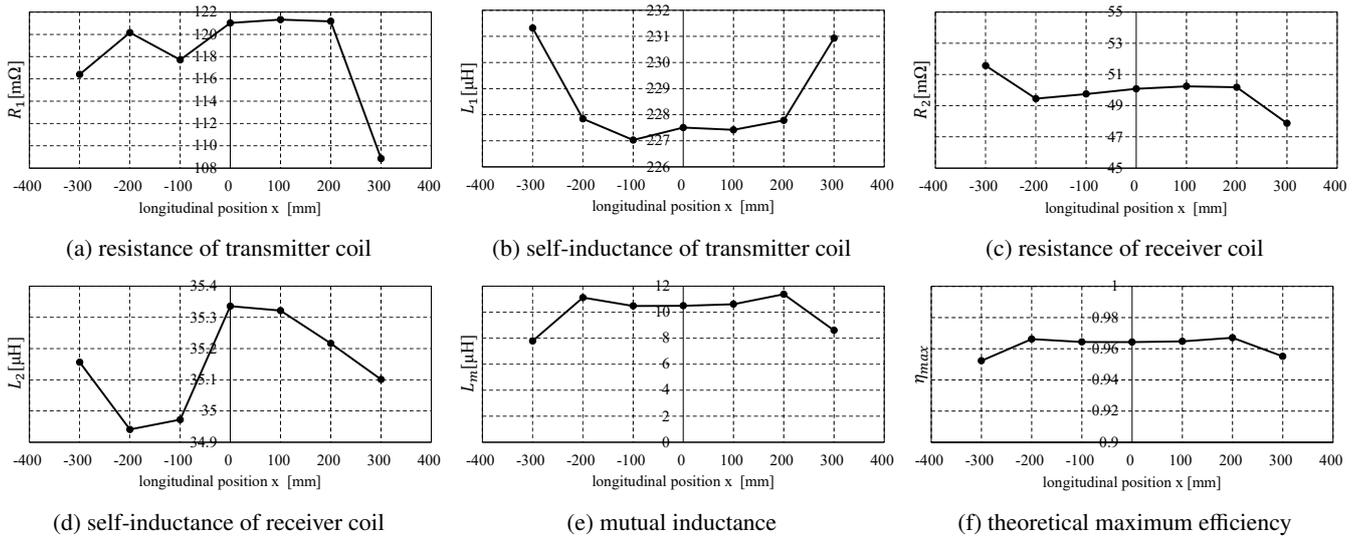


Fig. 12. Coil Parameters Change by Position of Receiver Coil

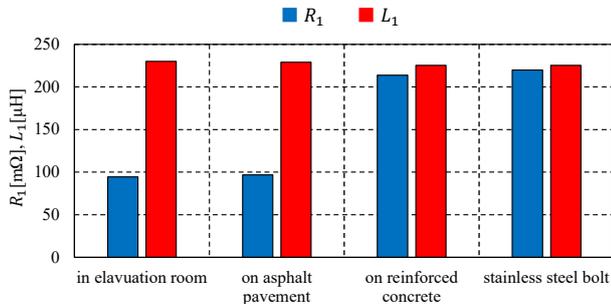


Fig. 13. Parameters Change of Transmitter Coil by Coil Setting

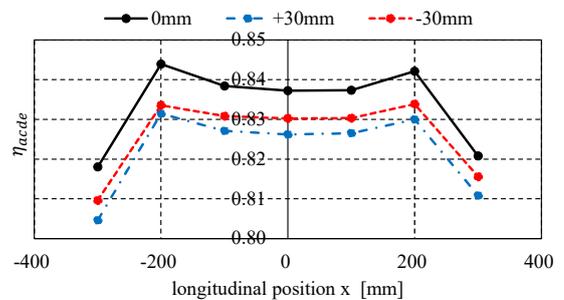


Fig. 14. Efficiency of Grid to Secondary Rectifier Output on Static Bench Test

ており、進行方向と横方向に通した鉄筋は接している。ここで使用した鉄筋の材料は渦電流を考慮し⁽¹³⁾、ステンレス(SUS304)とした。しかしそれでもコイルパラメータには大きな影響を与えることが分かる。さらに送電コイルの蓋の締結に使用するボルトを用いない場合とステンレス製のボルトを使用した場合のコイルパラメータの変化も検証している。その結果、インダクタンスには影響がなく抵抗値は2.8%増加することを明らかにした。コイル抵抗値の2.8%の増加は、主にボルトの渦電流損成分の等価抵抗増加によるものと考えられる。上記鉄筋の場合と同様に効率への影響は無視できると思われるが、ボルトの締結強度に関しての経年変化には留意する必要がある。

〈5・2〉 ベンチでの電力伝送評価 ここではベンチでの電力伝送の結果について述べる。ここでの評価値は送電コントロールユニットの入力 P_{grid} から受電コントロールユニットの出力 P_{2dc} までの変換効率 η_{acdc} 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容量は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 の時の電力伝送結果を Fig. 14 に示す。左右 30mm ずつ横ずれが発生した場合の変化についても評価を行っている。コイルケースの中心を 0mm として、+が進行方向に対して右側である。受電コイルユニットの線の取り出しが左に寄っているため、左右非対称の結果となったと考察できる。Fig. 12 で示したコイル間の伝送効率が約 97% に対し、Fig. 14 は、システム全体の総合効率であり、約 83% 程度となった。これは送電側の高周波インバータ回路や受電側の整流回路等での損失が含まれているためであると考えられる。既往研究で示されている AGV 用の非接触給電の効率が 80% 以下⁽¹⁵⁾ であることや、既に販売されている停止中の非接触給電の効率が 75%~87% である⁽¹⁶⁾ ことから実用上では問題のないレベルと考えられる。また各回路方式や制御の工夫でさらに効率向上⁽¹⁷⁾ が期待できる。

次に DWPT を模擬したベンチでの電力伝送について述べる。ベンチの外観を Fig. 15 に示す。送電コイルユニットはベンチの下部に配置されている。受電コイルユニットはサーボモータによるベルト駆動によって前後に動かされ

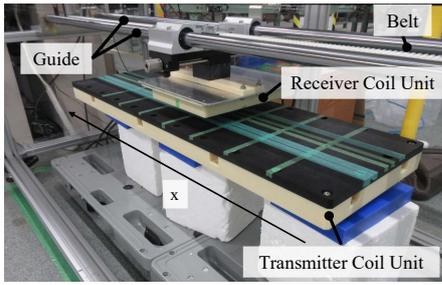


Fig. 15. Overview of DWPT Bench

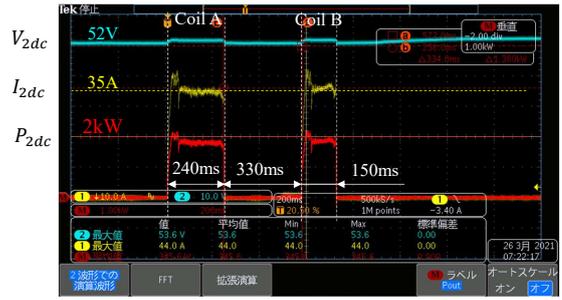


Fig. 17. DWPT Test Result on VLR(10km/h)

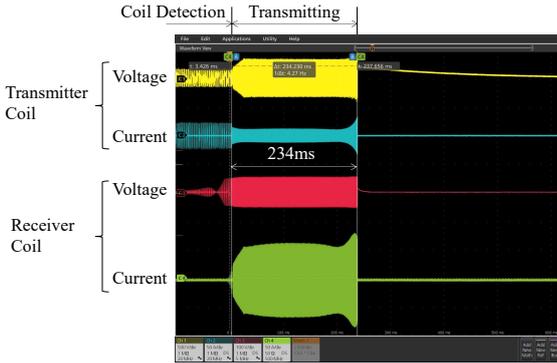


Fig. 16. DWPT Test Result on DWPT Bench(10km/h)

る。受電コイルの最高速度は 10km/h である。

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、その変化によって受電コイルユニットの有無を判断している⁽¹⁴⁾。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。送電時の基準とした送電周波数は 85kHz としている。DWPT の場合、Fig. 12 に示す通り受電コイルユニットの位置によってインダクタンスが変化する。完全共振条件に近づくと急峻に電流が増加し、送電コントロールユニットの電流が許容値を超える恐れがある。そのため送電側の電流位相 θ_{i1} と電圧位相 θ_{v1} を検知し、位相が次式を満足するように送電周波数を自動的に調整している。

$$\theta_{i1} > \theta_{v1} + \theta_{delay} \dots \dots \dots (2)$$

$$\theta_{i1} < \theta_{v1} - \theta_{delay} \dots \dots \dots (3)$$

$$\theta_{delay} = \omega_0 t_{delay}$$

ここで ω_0 は送電側の角周波数、 t_{delay} は送電側回路のインピーダンスが共振条件に近づき、急峻に電流が増加しないようにするための位相を作るための時間である。 $t_{delay} = 700 \times 10^{-9}$ としており、 $t_{delay} < 300 \times 10^{-9}$ になった時に送電停止する。

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. 16 に示す。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 の送電が出来ることから、0.658m の区間で給電が出来たこととな

る。Fig. 12 に示す相互インダクタンスの変化が比較的小さい範囲 ($L_m > 10\mu\text{H}$) よりも広い範囲を走行中給電として活用することを狙っているため、目標を達成できている。この区間は、Fig. 15 の送電コイル上に一致している。一方送電開始前や停止時は送電コイルの端部に相当し、過電流等の誤送電の対策ができた制御であることが確認できた。この時、式 (2) 式 (3) の条件にはなっていないが送電停止は起きていない。またその時の受電電力は 1.9kW である。

6. VLR 搭載評価

ここでは VLR 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。VLR に受電システムを搭載した電力伝送結果を Fig. 17 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。設置時にインダクタンスの変化があったため、送電周波数は 84.5kHz としている。

コイルユニット A ではベンチと同等の給電時間と、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た影響であると考えられる。

この程度の送電距離の差異による給電時間への影響は、制御パラメータの最適化で解決できると考えている。今回の送電用インバータの周波数自動調整範囲を 84.4 から 84.5kHz と狭く設定していたが、それを広げることや、またコイル検知の電流閾値の調整、(2) (3) 式を含めた制御設計の最適化で容易に対応できると考えている。1.8kW の受電電力は VLR が車両搭載状態で 5km/h 走行時の電池出力と同等である。

7. 結 論

本研究では自動車製造工程でのヤードへの車両搬送の課題解決のために、VLR 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) VLR に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) VLR 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) 補強のために SUS 鉄筋を送電コイルユニットの下に配置することで抵抗成分が 126% 上昇する
- (4) 送電電流によるコイル検知と、過電流を未然に防ぐ送電周波数制御を備えた走行中給電システムを構築し、1.8kW の VLR への DWPT を実証した

今後はサイクルタイムの短縮のために VLR 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。例えば VLR が 10kW 受電できるとすると、走行に必要な電力は送電コイルを走行路の半分に敷設することで全て賄うことが出来るようになるため、電池容量は送電コイル間の走行と緊急時の退避移動のみに必要な電力量となり、10 分の 1 程度まで低減できる。また DWPT システムは VLR 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なる。上記のように DWPT システムの運用方法は VLR 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。

- (10) O. Onar, J. Miller, S. Campbell, C. Coomer, C. White, L. Seiber "A Novel Wireless Power Transfer for in-motion EV/PHEV Charging", 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)(2013)
- (11) T.Tajima, W.Noguchi, T.Aruga,"Study of a Dynamic Charging System for Achievement of Unlimited Cruising Range in EV", SAE Technical Paper 2015-01-1686(2015)
- (12) 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) 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, no.xx, vol.x, pp.xxx-xxx (2021) to be published
- (13) O. Shimizu, S. Nagai, T. Fujita, H. Fujimoto, H. Sumiya, E. Takahashi, N. Yamaguchi, K. Tani, M. Sato,"Evaluation of Dynamic Wireless Power Transfer with Asphalt Road Embedded Transmitter Coils",2021 Society of Automotive Engineers of Japan Annual Congress (Spring), no.331, pp.1-6(2021)
清水修, 永井栄寿, 藤田稔之, 藤本博志, 角谷勇人, 高橋英介, 山口宜久, 谷恵亮, 佐藤正憲: コイルをアスファルト内に埋設した磁界共振結合型走行中給電回路での電力伝送評価, 自動車技術会 2021 年春季大会予稿集, no.331, pp.1-6 (2021)
- (14) 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)
- (15) T. Tabata, T. Yamamoto, S. Hori, N. Inagaki "Trial Production and Efficiency Evaluation of a Wireless Charging System for AGV," IEICE Technical Report, WPT2012-15
田端 隆伸, 山本 貴久, 堀 智, 稲垣 直樹: AGV 用非接触充電システムの試作と効率評価, 信学技報, WPT2012-15
- (16) ダイフク:「ワイヤレス充電システム D-PAD 仕様」,
<https://www.daifuku.com/jp/pro/dpad/>, ダイフク website, accessed on 6th Oct 2021
- (17) H. Abe, K. Ogasawara, F. Nishimura, T. Ota, H. Kitamura, M. Suzuki, "Efficiency of Wireless Energy Transfer System Using Resonance," IEICE Technical Report, WPT2011-21
安倍 秀明, 小笠原 潔, 西村 太, 太田 智浩, 北村 浩康, 鈴木 真美: 共振を使う磁気結合ワイヤレス給電技術の効率について, 信学技報, WPT2011-21

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,(2019)
- (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," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 137, no.2, pp. 95-103 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
- (8) 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)
- (9) J. Huh, S. Lee, W. Lee, G. Cho, C. Rim "Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.26, no.12, pp. 3666-3679(2011)

清水 修 (正員) 1984 年 7 月 16 日生。2009 年慶応義塾大学大学院政策・メディア研究科博士前期課程修了。同年～2010 年トヨタ自動車, 2010 年～2013 年 SIM-Drive, 2013 年～2017 年本田技術研究所にて自動車部品の研究開発に従事。2016 年慶応義塾大学大学院政策・メディア研究科博士後期課程修了。博士(学術)。2017 年～2020 年名古屋大学未来社会創造機構特任助教。2020 年～同招聘教員。2018 年～2021 年東京大学大学院新領域創成科学研究科特任助教。2021 年～同特任講師。電気自動車用駆動システム・モータ設計, ワイヤレス電力電送に関する研究に従事。電気学会, 自動車技術会, IEEE 各会員。



花房 一義 (非会員) 1963 年 1 月 11 日生。1985 年千葉大学電気工学科卒業。同年 TDK 株式会社入社。パワーエレクトロニクススイッチング電源の開発・設計に従事。2014 年～ワイヤレス給電システムの研究・開発に従事。



新崎 晃 大（非会員） 1990 年 7 月 25 日生。2013 年東京工業高等専門学校 電気・電子工学専攻科卒業。同年 TDK 株式会社入社し，2018 年ワイヤレス給電システムの研究・開発に従事。2018 年より TDK ラムダ株式会社へ出向しワイヤレス給電システムの開発・設計に従事。



郡司大輔（正員） 1982 年 10 月 31 日生。2007 年電気通信大学大学院 電気通信学研究科知能機械工学専攻 博士前期課程修了。2007 年日本精工株式会社入社。2015 年東京大学大学院 新領域創成科学研究科 博士後期課程修了。博士（科学）。ワイヤレス電力伝送，モーションコントロール，電気自動車の要素部品の研究開発に従事。2014 年 電気学会産業応用部門奨励賞，IEEE Transaction on Power Electronics First Prize Paper Awards in 2016 受賞。電気学会，IEEE，自動車技術会各会員。



酒井 優 人（非会員） 1989 年 1 月 27 日生。2011 年室蘭工業大学建設システム工学科 土木コース修了。同年～2012 年株式会社北海道技術コンサルタント，2012 年～2016 年中日本建設コンサルタント株式会社にて河川護岸設計等に従事。2016 年より新明工業株式会社にて無人搬送機，VLR の設計に従事。



池田 広 盛（非会員） 1973 年 12 月 24 日生。1992 年 4 月トヨタ T&S 建設（旧新和建設株式会社）にて，建設現場監理業務に従事。以降，工場施設に関する計画・設計業務，PCa に関する開発・生技業務，土木工事の計画・設計・監理業務を経て，2020 年 9 月～WPT 開発の土木工事計画・設計・監理業務に従事。



松岡 史 倫（非会員） 1992 年 4 月 19 日生。2017 年徳島大学大学院先端技術科学教育部博士前期課程修了。同年～トヨタ自動車株式会社にて完成車物流改善，VLR の開発に従事。

