VT-25-037,ITS-25-028,TER-25-104

乗用車と大型車の共存を考慮した走行中ワイヤレス給電システムの電力条件検討

李　悦*　　居村　岳広（東京理科大学）

Power Condition Analysis of Dynamic Wireless Power Transfer Systems Considering the Coexistence of Passenger Cars and Heavy-Duty Vehicles

Yue Li*, Takehiro Imura, (Tokyo University of Science)

The adoption of heavy-duty electric vehicles requires higher power in dynamic wireless power transfer (DWPT), causing over-specification for passenger cars. This study investigates a multi-receiver coil approach for heavy vehicles and evaluates power conditions considering coil installation rate, road gradient, and vehicle speed to enable coexistence of both vehicle types.

キーワード：走行中ワイヤレス給電，電気自動車，大型車
(Dynamic Wireless Power Transfer, Electric Vehicles, Heavy-Duty Vehicles)

1. はじめに

電磁誘導現象を利用したワイヤレス給電技術により、道路に埋め込まれた送電コイルから走行中の電気自動車に給電する、いわゆる走行中ワイヤレス給電（DWPT: Dynamic Wireless Power Transfer）技術に関する研究が世界中で盛んに行われている[(1)~(3)]。日本においては、二酸化炭素排出量の18.5～20%を運輸部門が占めており、そのうち20～30%はトラックやバスなどの大型車によるものである[(4)(5)]。したがって、大型車分野における低炭素化・排出ガス低減を図るためには、DWPT技術による電動大型車の普及が期待される。

近年、数学的モデルや統計データを用いてDWPT対応高速道路の経済性を評価する研究や[(6)(7)]、大型車に焦点を当てた電気特性に関する研究が発表されている[(8)(9)]。また、高速道路における送電コイル実装に向けて、埋設時の電気的・機械的特性の評価や、待機損失を低減するための車両検出手法などに関する研究も進められている[(10)(11)]。

しかし、大型車の電動化を妨げる要因として、以下の点が挙げられる。第一に、大型車に対するDWPTでは、普通自動車に比べて要求電力が大きいため、給電道路の出力を大型車に合わせると普通自動車に対してはオーバースペックとなり、コストや漏洩磁界の増加といった問題が生じる[(12)(13)]。さらに、長距離貨物輸送の需要に対応するためには、高速道路における送電コイルの敷設率を高める必要があるが、導入コストやメンテナンスコストの観点から最適な配置設計が課題となっている[(14)]。

そこで本研究では、乗用車と大型車が共存可能なDWPTシステムの電力条件を検討することを目的とする。具体的には、従来研究されている普通自動車と互換性のある受電コイルを大型車に複数搭載することを提案し、実スケールにおけるDWPTの供給電力を算出する。さらに、東名高速道路（以下、東名道）および中央自動車道（以下、中央道）の標高データを用い、勾配や車両速度を考慮した乗用車のNISSAN Leaf Sおよび大型車のVolvo FL Electricの消費電力を求め、走破可能性を評価した。

2. 計算手法

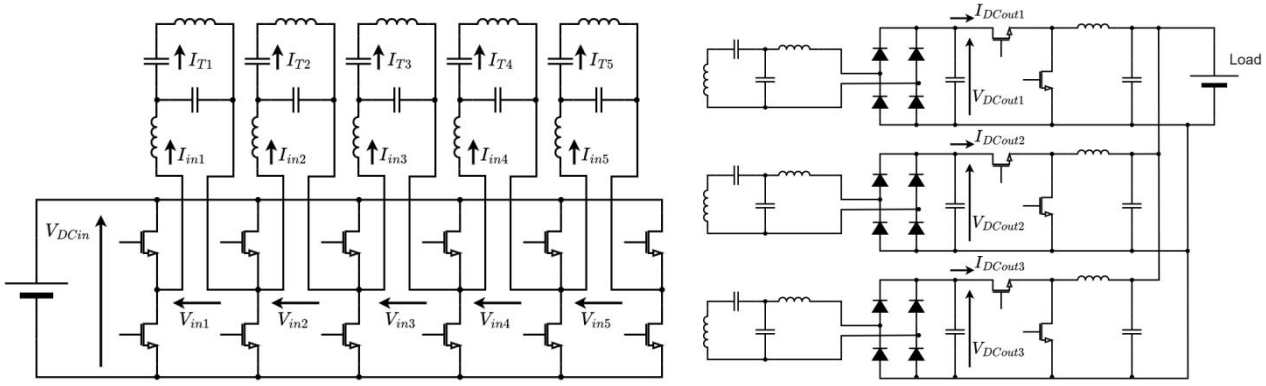
〈2･1〉　供給電力　本研究では、Fig.1に示す送電回路および受電回路構成について検討を行う。送電回路にはN-Leggedインバータを用いる。これは複数レグを有するインバータ構成であり、レグ数を削減しつつ、各送電回路への入力電圧を位相シフト制御によって独立に制御可能である。

受電回路には個別受電回路構成を採用し、搭載する各受電コイルに対して共振回路・整流器・DC/DCコンバータをそれぞれ接続する。

共振回路にはDouble-LCC回路を用い、その共振条件を式（1）に示す。Double-LCC回路は、結合がない場合には電源側から見て反共振回路となり、入力電流がほぼゼロとなる。このため、制御やスイッチングを用いずとも、車両が存在しない場合の待機損失を低減できるという利点を有する。以上の理由から、本研究では共振回路としてDouble-LCC 回路を採用する。

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{L_{T0}C_{Tp}}}=\sqrt{\frac{C_{Tp}+C_{Ts}}{L_TC_{Tp}C_{Ts}}}=\frac{1}{\sqrt{L_{R0}C_{Rp}}}=\sqrt{\frac{C_{Rp}+C_{Rs}}{L_RC_{Rp}C_{Rs}}}\quad(1)$$

Double-LCC 回路の出力電力特性に基づいて回路計算ソフトの MATLAB を用いてシミュレーションを実施し、送電コイルの敷設率を 100%、67%、50%、40%、30%、20%、10%とした計 7 パターンに対して平均受電電力を算出する。ここでの敷設率とは、送電コイルおよび受電コイルを等間隔に設置した際の配置割合を表す。各敷設率に対する「受電コイル 3 個分の平均電力」および「受電コイル 1 個分の平均電力」を Table 1 に示す。



(a)　送電回路図　　(b)　受電回路図

図 1　DWPT システム回路構成

Fig. 1.　Circuit configuration of the DWPT system.

表 1　各敷設率に対する平均電力

Table 1.　Average power for each installation ratio.

Installation rate [%]	Average power of 3 receiving coils [kW]	Average power of 1 receiving coil [kW]
100	94.0	31.3
67	63.8	21.3
50	47.8	16.0
40	38.2	12.7
30	28.6	9.5
20	18.9	6.3
10	9.6	3.2

なお、敷設率 50%と 100%の結果を比較すると数値が単純に 2 倍とはなっていないが、これは敷設率の変化に伴う結合係数の変動によって、受電電力が線形に比例しないためである。

〈2･2〉　消費電力　車両の消費電力は以下のように算出する。総合的な走行抵抗は式（2）で与えられる。Fig.2 に示す車両に作用する加速抵抗F_{acc}、転がり抵抗F_{roll}、勾配抵抗F_{grad}、空気抵抗F_{air}はそれぞれ式（3）～（6）のように表される。本研究では、加速度抵抗および向かい風・追い風による空力変動は考慮しない。

$$F(t)=F_{acc}(t)+F_{roll}(t)+F_{grad}(t)+F_{air}(t)\quad(2)$$

$$F_{acc}(t)=m\dot{v}\quad(3)$$

$$F_{roll}(t)=\mu_{rr}mg\cos\varphi(t)\quad(4)$$

$$F_{grad}(t)=mg\sin\varphi(t)\quad(5)$$

$$F_{air}(t)=\left(\frac{1}{2}\right)\rho C_dA(v(t)-v_{wind}(t))^2\quad(6)$$

電気自動車が走行する際、車両を牽引するために必要なパワー $P(t)$は、上り坂の場合を$P_{up}(t)$、下り坂の場合を

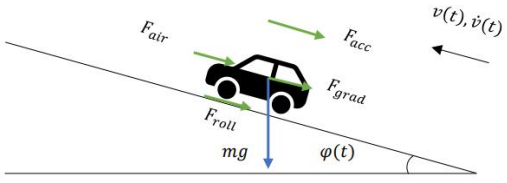


図 2　車両のけん引力

Fig. 2.　Vehicle traction force.

$P_{down}(t)$、回生効率をη_{regen}とすると、式（7）～（10）のように記述できる。

$$P(t)=F(t)v(t)\quad(7)$$

$$P_{up}(t)=F_{roll}(t)v(t)+F_{grad}(t)v(t)\cdot\eta_{regen}+F_{air}(t)v(t)\quad(8)$$

$$P_{down}(t)=F_{roll}(t)v(t)+F_{grad}(t)v(t)\cdot\eta_{regen}+F_{air}(t)v(t).\quad(9)$$

$$P(t)=P_{up}(t)+P_{down}(t)\quad(10)$$

T 秒間に必要となる電力量は式 (11) で表される。さらに、Fig.3 に示す電源から車両モータに至るまでのエネルギー変換効率を考慮すると、最終的な必要電力量は式（12）のようになる。なお、回生効率は電気系損失を既に含んでいるため、駆動系損失およびブレーキ摩擦の影響のみで変動するとし、本研究では 70～90%の範囲で設定する。

$$E=\int_0^T P(t)\,dt \quad \cdots\cdots(11)$$

$$E_{discharge}(t)=\frac{E}{\eta_{mec}\cdot\eta_{motor}\cdot\eta_{inv}\cdot\eta_{battery}} \quad \cdots\cdots(12)$$

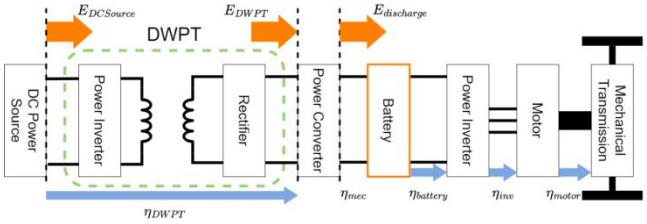


図 3　DWPT システムにおけるエネルギー変換フロー

Fig. 3.　Energy conversion flow in DWPT systems.

表 2　エネルギー変換効率

Table 2.　Energy conversion efficiency.

η_{mec}[%]	$\eta_{battery}$[%]	η_{inv} [%]	η_{motor}[%]	η_{DWPT}[%]
97	98	98	90	88

表 3　車両諸元

Table 3.　Vehicle specifications.

Car model	NISSAN Leaf S	Volvo FL Electric
Weight [kg]	1765	16700
Battery capacity [kWh]	40	565
Air resistance coefficient	0.28	0.6
Front projected area [m^2]	2.5	6.2
Rolling resistance coefficient	0.005	0.005
Number of receiving coils	1	3

エネルギー変換効率および車両諸元の計算には、それぞれ Table 2 および Table 3 のデータを用いる。道路情報としては、東名道および中央道における東京～大阪間（東京を始点とする）往復走行を想定し、勾配データにはゼンリンデータコム社「いつも Navi」より取得した道路標高データを使用する。車両速度は、各車種ごとに各道路の法定速度に基づいて設定する。

3.　電力量収支

〈3･1〉　乗用車（NISSAN Leaf S）　NISSAN Leaf S における回生効率 70%、90%の各条件での供給電力・消費電力および電力量収支の結果を例とし、それぞれ Table 4、Table 5 に示す。また、走行距離に対する SoC（State of Charge）の変化を Fig.4 に示す。

これらの結果から、NISSAN Leaf S は中央道に比べて東名道の方が消費電力量が大きいことが分かる。これは、東名道では乗用車の法定最高速度が中央道よりも高く設定されており、その結果として空気抵抗による消費電力が増加するためであると考えられる。

一方、中央道では走行距離が長く、かつ平均走行速度が低いため、供給電力が高く維持される。その結果、敷設率が低くても走破可能であることが確認できる。供給電力と消費電力の大小関係に着目すると、東名道では敷設率 50%以下の場合に供給<消費となり、敷設率 30%以下では電欠に至る。中央道では敷設率 30%以下で供給<消費となり、20%以下で電欠となる。また、敷設率が高く設定された場合には、東名道・中央道のいずれにおいても SoC が 100%を超過する区間が生じる。

さらに、回生効率の違いによる影響を比較すると、例えば回生効率 90%の結果を 70%と比較した場合、東名道での消費電力は 4.9%の削減に留まる一方で、中央道では 7.4%の削減が得られる。これは、中央道の長野周辺にみられるような長く急な下り坂において、回生効率の向上に伴い回収可能なエネルギー量が増加するためである。これにより、消費電力の低減によって SoC の余裕が生まれ、中央道においては回生効率 70%では電欠となった敷設率 20%の条件が、回生効率 90%の場合には走破可能となることが確認された。

〈3･2〉　大型車（Volvo FL Electric）　回生効率 70%、90%における Volvo FL Electric の供給電力・消費電力および電力量収支の結果を、それぞれ Table 6、Table 7 に示す。また、SoC の推移を Fig.5 に示す。

NISSAN Leaf S の結果では東名道の方が消費電力量が大きかったのに対し、Volvo FL Electric では中央道の方が消費電力量が大きくなるという逆の傾向が見られた。これは大型車の場合、両道路における法定速度が同一であるため、走行距離が長く、かつ坂道区間が多い中央道においては、勾配抵抗および転がり抵抗の影響を東名道よりも強く受けることが要因であると考えられる。

供給電力と消費電力の比較に着目すると、東名道では敷設率 67%以下で供給<消費の状態となり、10%以下では電欠に至る。一方、中央道では敷設率 67%以下で供給<消費となり、20%以下で電欠となる。また、東名道・中央道のいずれにおいても敷設率 67%以上では SoC が 100%を超過する区間が生じる。

NISSAN Leaf S と比較すると、Volvo FL Electric は消費電力量が大幅に増加するものの、Table 3 に示すように 3 基の受電コイルを搭載していることに加え、乗用車よりも走行速度が低いため、長時間にわたってより多くの電力を受電できる。その結果、送電コイル敷設率の調整に対する許容範囲が広く、両道路において NISSAN Leaf S より走破性が高いことが明らかとなった。回生効率が 90%の条件では、電欠となるのは中央道における敷設率 10%以下の場合のみ

表 4　NISSAN Leaf S 電力量収支（再生効率 70%）

Table 4.　The energy balance of NISSAN Leaf S (Regeneration efficiency 70%).

	Tomei Expressway				Chuo Expressway			
Installation rate [%]	Power supply [kWh]	Power consumption [kWh]	Energy balance [kWh]	State of charge(SoC) [%]	Power supply [kWh]	Power consumption [kWh]	Energy balance [kWh]	State of charge(SoC) [%]
100	296	144	+152	481	399	122	+277	793
67	202		+58	244	272		+150	474
50	151		+8	119	204		+82	305
40	120		-24	41	162		+40	199
30	90		-54	-35	122		-1	98
20	60		-84	-111	80		-42	-5
10	30		-114	-184	41		-82	-104

表 5　NISSAN Leaf S 電力量収支（再生効率 90%）

Table 5.　The energy balance of NISSAN Leaf S (Regeneration efficiency 90%).

	Tomei Expressway				Chuo Expressway			
Installation rate [%]	Power supply [kWh]	Power consumption [kWh]	Energy balance [kWh]	State of charge(SoC) [%]	Power supply [kWh]	Power consumption [kWh]	Energy balance [kWh]	State of charge(SoC) [%]
100	296	137	+160	499	399	113	+287	817
67	202		+65	262	272		+159	498
50	151		+15	137	204		+91	328
40	120		-17	59	162		+49	223
30	90		-47	-17	122		+9	122
20	60		-77	-93	80		-32	19
10	30		-107	-166	41		-72	-80

表 6　Volvo FL Electric 電力量収支（再生効率 70%）

Table 6.　The energy balance of Volvo FL Electric (Regeneration efficiency 70%).

	Tomei Expressway				Chuo Expressway			
Installation rate [%]	Power supply [kWh]	Power consumption [kWh]	Energy balance [kWh]	State of charge(SoC) [%]	Power supply [kWh]	Power consumption [kWh]	Energy balance [kWh]	State of charge(SoC) [%]
100	1112	694	+418	174	1249	791	+458	181
67	755		+61	111	848		+57	110
50	566		-129	77	635		-156	72
40	452		-242	57	507		-283	50
30	338		-356	37	380		-411	27
20	224		-470	17	251		-539	5
10	113		-581	-3	127		-663	-17

である。また、NISSAN Leaf S と比較して坂道による回生エネルギーの変動が大きいことが、SoC 推移の傾きの変化から確認できる。

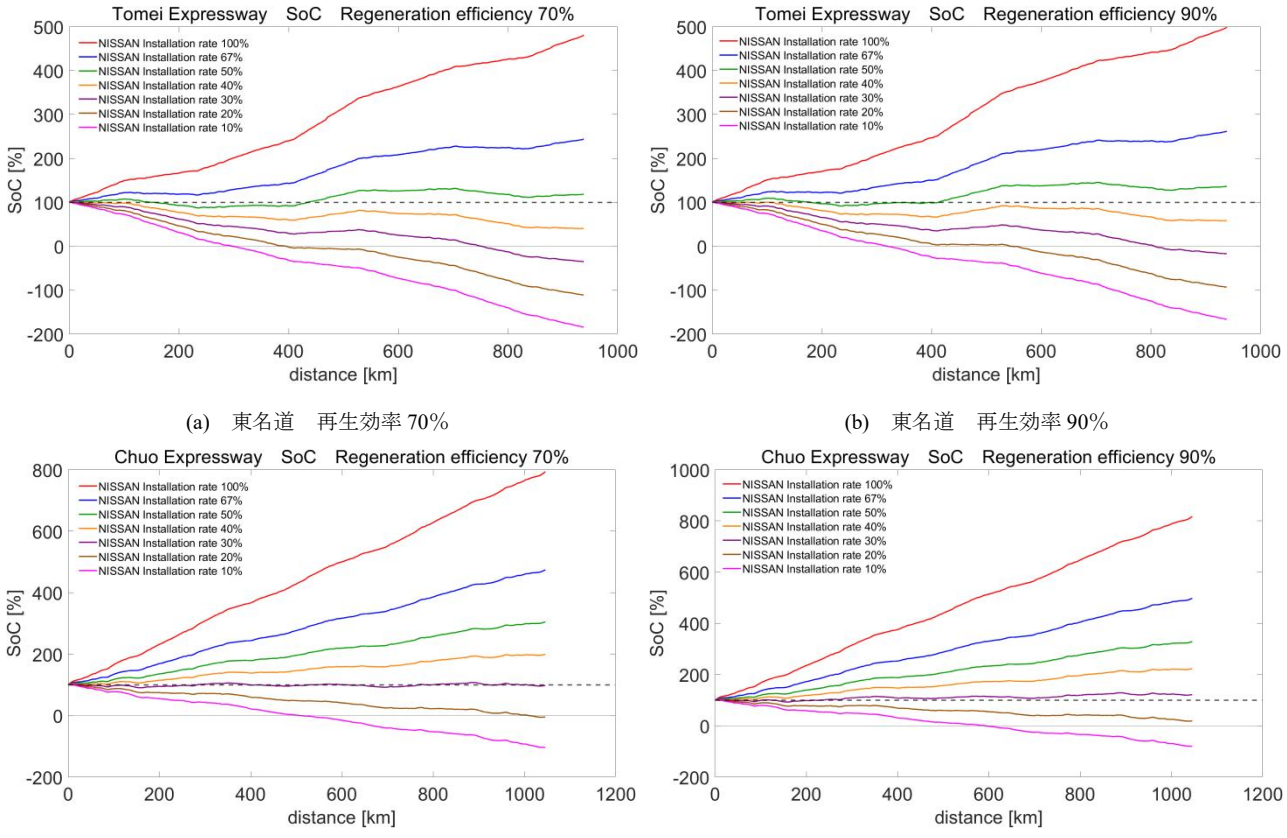
〈3･3〉　走破条件　以上の計算結果に基づき、大型車と乗用車が共存可能な DWPT システムの電力条件を評価するため、両道路における各敷設率での SoC 積算値および走破可否を Table 8 にまとめる。表中では、◎を「バッテリー容量を超える余剰電力量が生じる状態」、○を「正の電力量収支を維持して走破可能な状態」、×を「バッテリー容量が不足し電欠に至る状態」と定義する。

この結果より、DWPT システムを導入することで、既存車両が東京～大阪間を電欠することなく走破可能となるパターンが多数存在することが確認された。特に、◎となる条件では、バッテリー容量の削減や、100%を超過した電力量を双方向送電として活用することも可能であり、車両積載効率の向上およびシステム全体のコスト削減が期待でき

表 7　Volvo FL Electric 電力量収支（再生効率 90%）

Table 7.　The energy balance of Volvo FL Electric (Regeneration efficiency 90%).

	Tomei Expressway				Chuo Expressway			
Installation rate [%]	Power supply [kWh]	Power consumption [kWh]	Energy balance [kWh]	State of charge(SoC) [%]	Power supply [kWh]	Power consumption [kWh]	Energy balance [kWh]	State of charge(SoC) [%]
100	1112	626	+486	186	1249	701	+548	197
67	755		+129	123	848		+147	126
50	566		-61	85	635		-66	88
40	452		-174	69	507		-193	66
30	338		-288	49	380		-321	43
20	224		-403	29	251		-450	20
10	113		-513	9	127		-573	-1



(a)　東名道　再生効率 70%

(b)　東名道　再生効率 90%

(c)　中央道　再生効率 70%

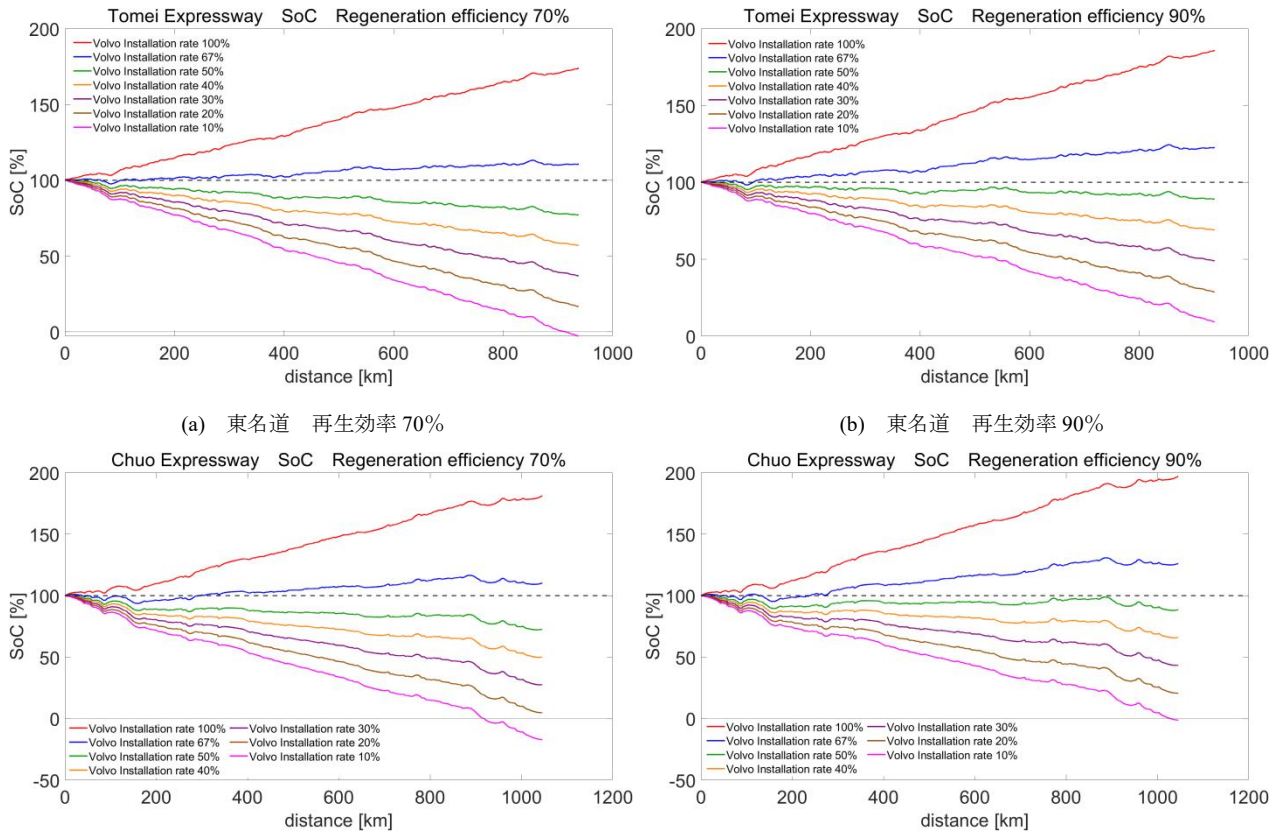
(d)　中央道　再生効率 90%

図 4　NISSAN Leaf S　SoC 推移

Fig. 4.　SoC profile of NISSAN Leaf S.

る。

回生効率が比較的低い 70%の場合であっても、中央道では敷設率 30%以上、東名道では敷設率 40%以上であれば、NISSAN Leaf S および Volvo FL Electric の全条件において途中の駐車・停車による受電を行うことなく走破できる。一方で、敷設率をさらに高くすると NISSAN Leaf S の SoC が 100%を超過し、過剰供給によるオーバースペックが生じる。Table 3 に示すように、NISSAN Leaf S のバッテリー容量は大型車と比較して極めて小さいため、許容される供給電力量の範囲が狭くなることが要因である。したがって、敷設率は 20～40%の範囲に設定することが合理的であると考えられる。また、東名道と比較して中央道は長距離かつ長



(a) 東名道 再生効率 70%

(b) 東名道 再生効率 90%

(c) 中央道 再生効率 70%

(d) 中央道 再生効率 90%

図 5 Volvo FL Electric SoC 推移

Fig. 5. SoC profile of Volvo FL Electric.

表 8 走破可否

Table 8. Pass/fail of full-route travel.

Installation rate [%]	Car Model	Regeneration efficiency 70%		Regeneration efficiency 80%		Regeneration efficiency 90%	
		Tomei Expressway	Chuo Expressway	Tomei Expressway	Chuo Expressway	Tomei Expressway	Chuo Expressway
50	NISSAN LEAF S	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	Volvo FL Electric	○	○	○	○	○	○
40	NISSAN LEAF S	○	◎	○	◎	○	◎
	Volvo FL Electric	○	○	○	○	○	○
30	NISSAN LEAF S	×	○	×	◎	×	◎
	Volvo FL Electric	○	○	○	○	○	○
20	NISSAN LEAF S	×	×	×	○	×	○
	Volvo FL Electric	○	○	○	○	○	○
10	NISSAN LEAF S	×	×	×	×	×	×
	Volvo FL Electric	×	×	○	×	○	×

い下り坂区間を含むため、回生ブレーキによって回収可能なエネルギー量が大きく、より低い敷設率でも走破可能となる点も特徴である。

4. 結論

本研究では、東名高速道路および中央自動車道の道路データを用いて、乗用車の NISSAN Leaf S と大型車の Volvo FL

Electric の往復走行における電力量収支を算出し、乗用車と大型車が共存可能な DWPT システムの電力条件を評価した。その結果、SoC の推移より、東名道では敷設率 30%以下、中央道では敷設率 20%以下の場合にのみ電欠が発生することが明らかとなった。

また、大型車が 3 基の受電コイルを搭載することで、乗用車よりも低い敷設率でも走破可能となり、既存の乗用車向け DWPT システムが大型車にも適用可能であることが示された。さらに、敷設率を調整することで、乗用車に対する過剰供給を回避できるため、安全性および経済性の両面で最適化が可能であることが確認された。

今後の課題としては、より現実的な車両諸元・交通条件・運用形態を考慮したモデル化に加え、システム障害時のフェイルセーフ設計や、SoC に基づく制御連携手法の検討などが挙げられる。

謝辞

本成果（の一部）は，国土交通省次世代大型車開発促進事業により得られたものです。

文　　献

(1) T. Imura and Y. Hori : “Unified Theory of Electromagnetic Induction and Magnetic Resonant Coupling”, Electrical Engineering in Japan, Vol.199, No.2, pp.58-80 (2017)

(2) V. Cirimele, R. Torchio, A. Virgillito, F. Freschi and P. Alotto : “Challenges in the Electromagnetic Modeling of Road Embedded Wireless Power Transfer”, energies, Vol.12, 2677 (2019)

(3) D. Patil, M. K. Mcdonough, J. M. Miller, B. Fahimi and P. T. Balsara : “Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges”, IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol.4, No.1, pp.3-37 (2018)

(4) T. Aoki and Y. Muromachi : “Decarbonizing Long-haul Heavy Duty Truck Transportation with Electrification”, Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser D3 (Infrastructure Planning and Management), Vol.77 , No.5, pp.1101-1108 (2022)

(5) M. Kii, R. Isikawa and Y. Kometani : “Toward a Carbon Neutral Urban Transportation System in Japan”, IATSS Research, Vol.47, pp.171-178 (2023)

(6) Y. Honma, D. Hasegawa, K. Hata and T. Oguchi : “Locational Analysis of In-motion Wireless Power Transfer System for Long-distance Trips by Electric Vehicles: Optimal Locations and Economic Rationality in Japanese Expressway Network”, Networks and Spatial Economics, Vol.24, pp.261-290 (2024)

(7) K. Darcovich, H. Ribberink, E. Soufflet and G. Lauras : “Application of Real-Life On-Road Driving Data for Simulating the Electrification of Long-Haul Transport Trucks”, World Electric Vehicle Journal, Vol.15, No.149 (2024)

(8) J. M. Miller and A. Daga : “Elements of Wireless Power Transfer Essential to High Power Charging of Heavy Duty Vehicles”, IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol.1, No.1, pp.26-39 (2015)

(9) A. David, M. Tiemann, M. Clemens and B. Schmuelling : “Magnetic Field Analysis of 50 kW Wireless Power Transfer System for Heavy Duty Vehicles”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.60, No.3, 8600204 (2024)

(10) 居村 岳広, 山原 孝裕, 佐々 直哉, 堀 洋一, 田中 広季, 阿部 長門：「N6 交通量相当のアスファルト道路への走行中ワイヤレス電力伝送用表層埋設コイルに関する報告」, 自動車技術会論文集, Vol.56, No.4 (2025)

(11) Y. Sato, T. Imura and Y. Hori : “A Proposal for Reducing Standby Losses and Detecting Vehicles by Series-Splitting Double-LCC Transmission Coils Using N-Legged Converter for Dynamic Wireless Power Transfer”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.145, No.6, pp.409-417 (2025)

(12) S. Hasegawa, T. Imura and Y. Hori : “Theory Development of Far-field Leakage Magnetic Field in Dynamic Wireless Power Transfer for Electric Vehicles Charging and Influence of Ferrite”, Proceedings of the IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power, (2016)

(13) T. Kamiyamaguchi and J. Katsuya : “Study of Electromagnetic Fields Disturbance on Dynamic Wireless Power Transfer Systems in Passenger Cars”, Electrical Engineering in Japan, Vol.55, No.1, pp.146-149 (2024)

(14) Z. Ye, M. A. Bragin, N. Yu and Ran Wei : “Joint Planning of Dynamic Wireless Charging Lanes and Power Delivery Infrastructure for Heavy-duty Drayage Trucks”, Applied Energy, Vol.375, 124029 (2024)