

リチウムイオン電池を搭載した 短距離走行・高頻度充電コンセプト電動小型バス “WEB”の設計製作ならびに 公道実証試験による環境調和性評価

Development of the Short-range/Frequent-charging Concept Electric Mini Bus “WEB” Equipped with Li-ion Batteries and Its Environmental-harmony Evaluation by On-road Performance Test

紙屋雄史*

Yushi Kamiya

Faculty of Science and Engineering, Waseda University

Abstract

The limited range, high cost, and long charging time of electric vehicles continue to stand in the way of their widespread adoption. In response to this, our research group has created the “Waseda electric-micro bus (WEB)” series of vehicles based on a short-range/frequent-charging concept that minimises the weight and cost of batteries compared to other electric vehicles. The bus features a non-contact inductive power supply (IPS) system to enable rapid, safe, and convenient charging. On-road tests were carried out to verify the practicality of the short-range/rapid-charging concept and determine improvements in environmental performance over a conventional bus. Across different road tests, significant improvements of CO₂ emissions were found.

Key words: Li-ion battery; Electric bus; Wireless charging; Public transport

1 まえがき

近年、自動車の分野においても他の分野と同様に、いわゆる環境・エネルギー問題が大きな話題となって

おり、内燃機関自動車のクリーン化や、代替自動車の開発等が強く求められている。後者の取り組みにおいて、種々の自動車方式の開発が試みられているが、なかでも「電気自動車」は主要な代替候補となっている。

電気自動車は環境調和性に極めて優れている。しかし、「バッテリー」ならびにバッテリーへの「充電」

* 早稲田大学 理工学術院 教授

に係る性能が十分なレベルまで到達出来ていないため、残念ながら乗用車クラスの一部のカテゴリーを除いて、普及していない。このような背景のもと、我々の研究グループは、このバッテリー・充電問題に対処し得る比較的大型の電気自動車の研究開発を長年続けている。具体的には、運転席からボタン操作一つで急速充電を行うことが出来るノンプラグイン方式の非接触急速誘導充電装置“Inductive power supply system”（以後IPSシステムと称す）を車両に搭載して高頻度の充電を行うことで、大きく・重たく・高価なバッテリーの搭載量を大幅に削減すると同時に、航続距離や充電の問題の改善を図る方式（短距離走行・高頻度充電方式）について、検討を進めている。

我々は、このようなコンセプトを採用する対象としては、車格と運用方法の観点から小型もしくは中型の路線バスが最も適していると考え、はじめに市販の非接触充電装置を搭載した電動バスの開発を行い、その優れた性能を確認した¹。さらに、世界最高水準の性能を誇る電動車両IPSシステムの開発を行い、これに成功した²。また、電動バスの普及を実現させるには一般市民からの理解も必要と考え、公道実証試験等

を行い、環境調和性を評価することはもちろんのこと、開発車両の素晴らしさを体験してもらう活動にも力を注いだ³。そして最近では、複製化を意識して製作コストや耐久性等に配慮して設計した電動バスの製作にも成功した。本稿では、早稲田大学におけるこれら活動の紹介を行う。

2 十三人乗り電動小型バスの開発（WEB-0, 1, 2, 1 Advanced）

2.1 車両の設計・製作・性能評価

本研究で開発を続けている電動バスは、“Waseda electric micro bus”（以後WEBと称す）と名づけられている。Table 1に開発車両の主要諸元を示す。

WEB-0は短距離走行・高頻度充電コンセプトの実現可能性を探ることを目的として、早稲田大学の学生が製作した手作り車両である。頻繁な急速充電を行うことを想定して、意識的にバッテリーの搭載量をおさえている。そのため、通常の夜間充電方式電気自動車と比べて車両重量低減、車両初期コスト削減、さらには十分な車室空間の確保が実現できた。WEB-1、

Table 1 Specifications of WEB series and their base vehicle.

		Base vehicle	WEB-0 (2004)	WEB-1 (2005)	WEB-2 (2005)	WEB-1Ad. (2009)
Weight (Net)		2805 kg	3000 kg	3175 kg	3040 kg	3225 kg
Power plant	Type	Diesel engine	Brush less DC Motor	IPMSM	IPMSM	IPMSM
	Max. output	93 kW @3600 rpm	75 kW	50 kW	50 kW	50 kW
	Max. torque	294 Nm @1800 rpm	240 Nm	240 Nm	240 Nm	240 Nm
Zebra battery	Energy density	—	105 Wh/kg	105 Wh/kg	118 Wh/kg	—
	Power density	—	180 W/kg	180 W/kg	180 W/kg	—
	Nominal voltage	—	278 V	278 V	278 V	—
	Max. output	—	32 kW	32 kW	32 kW	—
	Capacity	—	18.9 kWh	18.9 kWh	21.2 kWh	—
	Weight	—	180 kg	180 kg	180 kg	—
Super capacitor	Max. output	—	—	55.7 kW	—	—
	Nominal voltage	—	—	300 V	—	—
	Capacity	—	—	0.14 kWh	—	—
	Weight	—	—	64 kg	—	—
Li-ion battery	Max. output	—	—	—	54 kW	63 kW
	Nominal voltage	—	—	—	259 V	316 V
	Capacity	—	—	—	1.1 kWh	13 kWh
	Weight	—	—	—	29 kg	198 kg
IPS	Max. output	—	—	30 kW	—	30 kW
	Frequency	—	—	20 kHz	—	20 kHz
	Dimensions (Vehicle side)	—	—	88 × 103 × 6 cm	—	85 × 85 × 3.3 cm
	Weight (Vehicle side)	—	—	70 kg	—	35 kg
	Coil to coil air-gap	—	—	50 mm	—	100 mm

WEB-2は公道実証試験用としてWEB-0のコンセプトをそのまま踏襲しつつ製作された白ナンバー付車両である。なお、WEB-1には市販の非接触充電装置が搭載されている (Fig. 1)。さらにWEB-1 Advancedは、当研究グループが独自に開発したIPSシステムを搭載した初めての実験車両である²。急速充電受け入れ性能を考慮して、GSユアサ製の高性能リチウムイオンバッテリーが搭載されている (“LIM40-7”を11直列1並列で採用)。

つぎに、シャシーダイナモ試験によりWEBの環境調和性を評価した結果を紹介する。使用走行モードはM15モード¹、ならびにJE05改モード¹である。ここで後者は、WEBの使用環境がバス路線であることを考慮し、JE05モードの都市内走行部分を最高速度40 km/hに変換したものである。WEB-1、ならびにベースディーゼル車両について、電費、燃費および



Fig. 1 Outer view of WEB-1 and IPS wireless charging system.

CO₂排出量⁴を算出したものをTable 2に示す。電動化後については、短距離走行・高頻度充電コンセプトの採用で軽量化を図ることが出来たこともあり、ベース車両と比較して7割程度もCO₂排出量が削減可能との結論になった⁵。

2.2 車両の公道実証試験

本節では、開発した電動バスの環境調和性評価、ならびにこれをアピールする活動の一環として行った公道実証試験の成果についてまとめる。

2.2.1 奈良公園における公道実証試験の例

はじめに、2009年に奈良公園で行った試験の結果を代表例として報告する⁶。当試験は、WEBを観光用周遊バスとして導入することを想定して行われたものである。走行ルートをFig. 2に示す。IPSシステムは2か所に設置され、1つは拠点となるバス停での充電用(奈良県庁)、もう1つはルート途中での補充電用(春日大社)とした。後者は、利用客乗降中の極短時間で行うIPS補充電の実現可能性を探ることを目的として設置された。

試験条件等をTable 3に示す。県庁では毎回SOC 70%までの回復充電を行い、春日大社での補充電は充電無/1分間/2分間の3パターンから、また空調はクーラをON/OFFの2パターンから選択した。試験日においてはWEBを計6便運行させた。Fig. 3に代表的なデータとしての春日大社1分間充電・クーラOFF条件下の結果(第3便)を示す。図のa)およびd)は、それぞれWEBの速度および標高の変化である。最高速度は50 km/h程度であるが、試験ルート一周には、途中の補充電停止を含め約30分を要したことが確認できる。そのルートは、急こう配の登坂

Table 2 Results of fuel efficiency under different driving modes for WEB.

Driving modes		M15	Modified JE05
WEB-1 (11 persons : 605 kg)	Travel distance	2.88 km	5.4 km
	Energy consumption (Tank to wheel)	805 Wh	1160 Wh
	Electricity economy (Tank to wheel)	3.48 km/kWh	4.66 km/kWh
	CO ₂ emission (Well to tank (= Well to wheel))*	368 g	530 g
Base vehicle (11 persons : 605 kg)	Fuel economy (Tank to wheel)	7.42 km/L	9.09 km/L
	CO ₂ emission (Tank to wheel)	1010 g	1550 g
	CO ₂ emission (Well to tank)**	75.0 g	115 g
	CO ₂ emission (Well to wheel)	1085 g	1665 g

* 0.375 kg-CO₂/kWh, IPS efficiency × Battery charge / discharge efficiency: 0.86 × 0.95

** Diesel fuel (LHV): 35.5 MJ / L, 5.45g-CO₂/MJ

路(若草山)を含む比較的ストレスの高いルートであった。つぎに b) であるが、これはバッテリー SOC 履歴である。SOC 70%の走行開始時より補充電を経て拠点にもどり、そこで待機時間を利用した回復充電を行っている様子が確認できる。c) はバッテリーの入出力パワーであり、力行・回生・急速充電の様子が確認できる。実験結果より、試験ルート一周の走行で消費した電力を充電するのに要した時間は、拠点バス停にて約6分であった。したがって、一周5.5 km(約30分)のルートを走行する場合、6+1分のIPS充電を行うことで連続走行が可能になることが明らかとなった。当然ではあるが、IPSシステムは運転席におけるボタン操作のみで充電可能であるため、充電時にプラグイン方式の様なプラグ脱着作業は不要である。これには普通1分間程度を要するため、利用客乗降中の極短時間での補充電は、プラグイン方式では事実上不可能と考えられる。

今回の試験でのバッテリー温度の実測結果について、前述の Table 3 にまとめた。1 便走行する度に 1~2℃程度、また IPS 急速充電中には 1~4℃程度

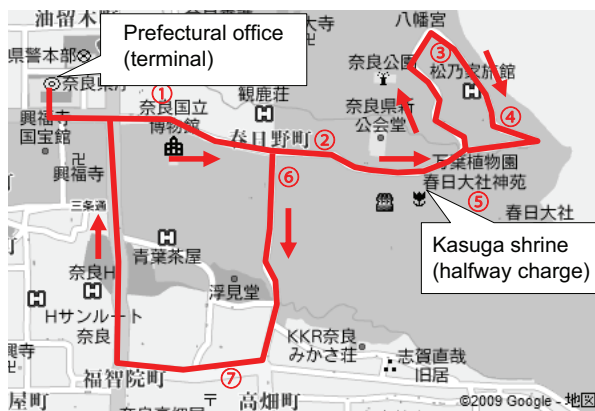


Fig. 2 Nara test route for on-load performance evaluation of WEB.

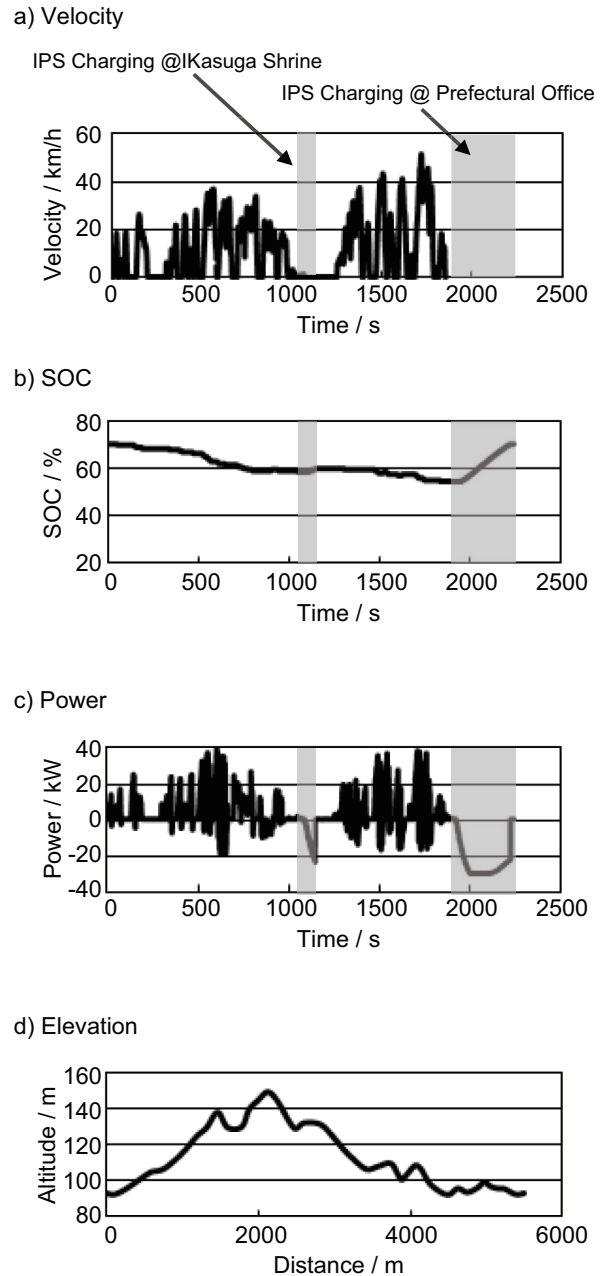


Fig. 3 Nara test results (test No. 3 in table 3) for on-load performance evaluation of WEB.

Table 3 Degree of battery temperature rise during on-road evaluation test of WEB.

Test No.	A/C	Charging time at Kasuga shrine sec.	Run			IPS				
			Temperature / °C	Time / sec.	Temperature / °C	Time / sec.	Start	End	Δ T	
			Start	End	Δ T	Start	End	Δ T		
1	OFF	—	19*	20	1	2646	20	22	2	413.0
2	ON	—	24	26	2	2309	26	28	2	494.6
3	OFF	60	29	30	1	1856	30	32	2	312.5
4	ON	60	32	33	1	2227	33	37	4	752.3
5	OFF	120	37	38	1	2134	38	39	1	227.9
6	ON	120	39	40	1	2176	40	42	2	388.1

* Outside temperature: 17 °C

上昇している。最終便終了時は42℃となっているが、“LIM40”が異常として検知する温度は65℃であり、たとえ周回数をこれ以上増やしたとしても、自然放熱作用により限界温度まで到達することはないと考えられる。

以上の検討結果より、本質的に航続距離性能に制約のある電気自動車ではあるが、IPSシステムを搭載した短距離走行・高頻度充電コンセプトを採用することで、事実上のエンドレス運用が可能となることを示すことが出来た。

2.2.2 その他の地域における公道実証試験

前節で紹介した奈良公園以外にも、多数の地域で試験を行った。紙面の都合上紹介は出来ないが、サブテーマとして電動バスの実用化に向けた様々な取組みの検証と問題点の把握等も同時に行った。ディーゼルバスと並列運行ができた地域においては、低炭素効果が7割程度達成できるとの結論が得られた。

3 二十五人乗り電動小型バスの開発(WEB-3)

本章では、これまで13人であった乗車定員を拡充することを目的として新規に設計・製作した25人乗り電動小型バス“WEB-3”を紹介する。新規開発車両はこれまでと同様、非接触給電システムIPS Systemを採用した“短距離走行・高頻度充電”をコンセプト

としている。我々は、WEBシリーズの製作にあたり、コストの観点から専用設計車体を採用せずに、あえて市販車を改造する方式を採用しているが、ここでは、ベース車両として、モデルチェンジ後の日野自動車製低床マイクロバス“ポンチョ”を用いた。開発車両の特長等を以下にまとめる。

(1) 車両の回転部分慣性重量の削減

ベース車両からのコンバートにあたり、不要なクラッチやフライホイール等を取り外すことで、特に加速の際に悪影響を及ぼす回転部分慣性重量を約8割削減した。大型車の場合、特に低速側のシフトを選択した際に回転部分の悪影響が顕著となるため、この効果は絶大である。

(2) ロングエアギャップ型非接触充電装置の採用

WEBシリーズでは、IPSを採用することによりバッテリー搭載量を削減し、車両コストの削減、車両重量の削減が可能となっている。しかし、従来のものは十分な送電長が確保できておらず、送電側が地面から突出した構造となっていた。新規車両用のIPSにおいては、コイル配置などの改善により送電エアギャップ長の拡大に成功し（コイル間ギャップ140mm）、車両のニーリング機能との併用で地上送電部を地面から突起させることなく設置できるようになった。Fig. 4に新旧WEBの外観を、Fig. 5に新型IPSの外観を示す。

(a)



(b)



Fig. 4 Outer view of WEB series and IPS wireless charging system.

(a) Previous model (WEB-1 Advanced) and charger (left), (b) WEB-3 and new charging system (right).

(3) 電動車両用新基準を満たした設計

コンポーネントレイアウトにあたり、乗車スペースの確保と平成24年度より施行される電動車両用新基準を満たすことを優先課題とした。この新基準は道路運送車両の保安基準17条-2別添110と111で定められている。別添110は動力系（作動電圧が直流60V以上である部分を有する動力系）および充電系連結システムの感電からの保護に関する規定である。その内容は、「活電部は直接接触できないよう保護すること」、「感電保護のための警告表示をすること」等である。別添111は駆動用蓄電池パックならびに電気回路（作動電圧が直流60V以上である部分を有する動力系）の取付位置に関する規定である。「地上から高さ800mm以下の車両前端部から420mm、車両後端部から300mmの位置には取り付け不可」と規定している。本車両ではバッテリーおよびモータ・インバータがこれらに該当するため、Fig. 6のように、エンジンルーム内にモータ・インバータを、バッテリーに関しては車室内後部に集約して配置することで対応した。またバッテリーを隔壁で完全に隔離し、保安基準の求める安全性にも適合した設計とした。WEB-3においても、WEB-1 Advancedと同様にGSユアサ製のバッテリーを採用した（“LIM40-7”を14直列3並列で採用）。

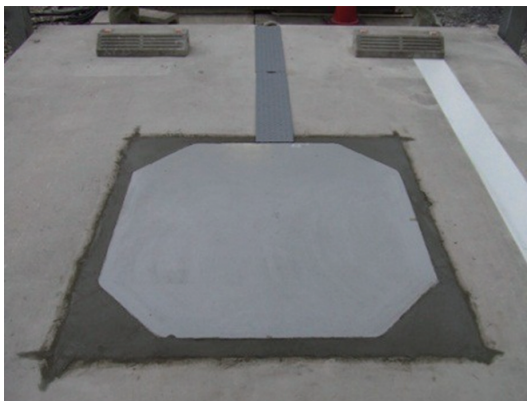
以上の設計により製作されたWEB-3の諸元をTable 4に示す。また、営業緑ナンバーを取得後、埼玉県本庄市の公道にてディーゼルバスとの比較走行をした結果、Well to Wheel比較のCO₂排出量削減効果は「約6割」との結論になった。

4 五十五人乗り電動中型バスの開発（WEB for Suntory）

本章では、これまでの開発車両と比較して乗車定員を拡充することを目的に新規設計・製作した55人乗り電動中型バス“WEB for Suntory”について紹介する。外観をFig. 7に示す。本車両は、これまでの開発車両とは異なり、コスト削減のため非接触急速充電システムは搭載していない。代替方式として接触急速充電システムを導入した「短距離走行・高頻度充電」コンセプトを採用している。航続距離が短い分だけ充電回数は増加するが、実績があり利便性の高いCHAdeMO方式の急速充電システムを採用することで本問題に対処することとした。ベースは日野自動車製中型バス「メルファ」である。開発車両の諸元をTable 5に示す。本車両の設計にあたり、WEB-3と同様に大幅なコストアップをもたらさない範囲で回転部分慣性重量を可能な限り削減することを主要な目標とした。これを実現するために、ベース車両からのコンバートの際、不要なクラッチやフライホイール、さらにはミッション等を取り外すこととした。

コンポーネントレイアウトにあたっては、車室空間の確保を最優先に進めた。車内の様子をFig. 8に示す。これを実現するために、駆動用モータは、新規設計した小型軽量のモーター一体型ギアボックスを介して、ディファレンシャルギアに直結させた。また、インバータはエンジンルーム内に、バッテリーに関しては車室内後部に集約して配置することとした。なお、バッテリー格納に際し、車室との隔壁の一部をスケルトン加工とすることで、乗客に対して視覚的に電気駆動シス

(a)



(b)



Fig. 5 Latest IPS wireless charging system model: (a) Primary side and (b) Secondary side.

Table 4 Specifications of WEB-3.

		Base vehicle	WEB-3
Capacity		31 persons	25 persons
Weight (Net)		5730 kg	6430 kg
Power plant	Type	Diesel engine	Brush less motor
	Manufacturer	Hino Motors	UQM Technologies
	Max. output	132 kW	145 kW
	Max. torque	490 Nm	400 Nm
Battery	Type	—	Mn-Li-ion
	Manufacturer	—	GS YUASA“LIM40-7”
	Connection	—	14 series × 3 parallel
	Nominal voltage	—	372 V
	Capacity	—	44 kWh
	Max. charge current	—	600 A (5C)
	Max. discharge current	—	360 A (3C)
	Weight	—	756 kg
IPS	Weight / Dimensions (Vehicle side)	—	60 kg / 120 × 120 mm
	Max. output	—	30 kW
	Mechanical air-gap	—	110 mm
	Coil to coil air-gap	—	140 mm

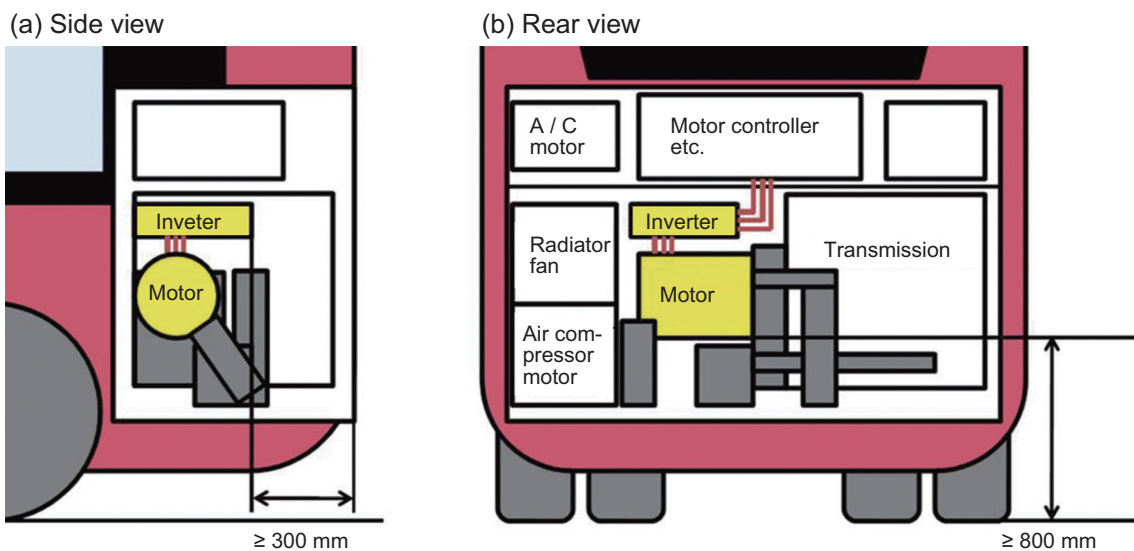


Fig. 6 Components layout of WEB-3.



Fig. 7 Outer view of WEB for Suntory.



Fig. 8 Inner view of WEB for Suntory.

Table 5 Specifications of WEB for Suntory.

		Base vehicle	WEB for Suntory
Capacity		60 persons	55 persons
Weight (Net)		6890 kg	6780 kg
Power plant	Type	Diesel engine	Brush less motor
	Manufacturer	Hino Motors	UQM Technologies
	Max. output	165 kW	200 kW
	Max. torque	600 Nm	900 Nm
Battery	Type	—	Mn-Li-ion
	Manufacturer	—	GS YUASA“LIM50E-8”
	Connection	—	12 series × 2 parallel
	Nominal voltage	—	355.2 V
	Capacity	—	35.5 kWh
	Max. charge current	—	600 A (6C)
	Max. discharge current	—	250 A (2.5C)
	Weight	—	420 kg
Heater	Type	—	Electric air heater
	Max. output	—	4 kW
Charger	Type	—	CHAdEMO
	Manufacturer	—	TAKASAGO LTD.
	Max. output	—	50 kW
Discharger	Manufacturer	—	POWER TITE
	Max. output	—	1.5 kW (AC100 V)

テムをアピールできるようにした。ちなみに、バッテリーについてはレイアウトの観点から、エネルギー体積密度性能に優れた最新のGSユアサ製の高性能リチウムイオンバッテリーを搭載した(“LIM50E-8”を12直列2並列で採用)。その他の特長としては、格納式車いす用リフトの搭載、さらには、メインバッテリーを非常用電源として利用するためのAC100Vインバータの搭載等があげられる。また、走行にあたってPV発電電力(敷地内に設けられた490kWのPVシステムにより発電)を一部用いることで、さらなる低炭素効果が得られるよう、運用面での工夫もしている。

5 まとめ

本稿では、電気自動車の「バッテリー・充電問題」に対処することを目的として行っている我々の研究グループの活動を紹介した。

はじめに、(1)短距離走行・高頻度充電コンセプトを採用した先進電動マイクロバス“WEB”，ならびに、(2)開発システムの環境調和性等を把握することを主な目的として行った公道実証試験の成果について報告した。さらには、すでに複製化も軌道にのりはじめた最新の電動マイクロバス(3)WEB-3、(4)WEB for Suntoryについて、その諸元・性能・特長等の紹介を行った。

早稲田大学における本研究の成果は、今後の我が国における電動バスの普及⁷⁻⁹を通じたスマート社会の実現⁵に大きく寄与するものと確信している。

文 献

1. Y. Kamiya, Y. Daisho, F. Kuwabara, and S. Takahashi, “Development and Performance Evaluation of an Advanced Electric Micro Bus Transportation System”, *Review of Automotive Engineering (JSAE)*, **28**(2), 259-266 (2007).
2. 紙屋雄史, 大聖泰弘, 松木英敏, 電動車両用非接触急速充電システム, 電気学会誌, **128**(12), 804-807(2008).
3. 紙屋雄史, 大野寛之, 林田守正, 高齢者に優しい電動コミュニティバス, *IATSS Review*, **33**(4), 341-348 (2008).
4. トヨタ自動車株式会社, みずほ情報総研株式会社, 輸送用燃料の Well-to-Wheel 評価 (2004).
5. 紙屋雄史, 電気エネルギー利用による自動車の低炭素化, 平成21年電気学会電力・エネルギー部門大会特別企画(パネルディスカッション)講演資料, p.31-38 (2009).
6. 紙屋雄史, 大聖泰弘, 非接触急速充電装置を搭載した先進電動マイクロバスの設計製作ならびに公道実証試験による環境調和性評価, 自動車技術,

- 65(3), 98-104(2011).
7. 浮揚亮太, 年鑑(7)バス-総合-, 自動車技術, 66(8), 46-50 (2012).
8. ぼると出版, バスマインターナショナル, 23(3), (2012).
9. 廣田寿男, 紙屋雄史, 電動車両の現状と将来展望, 自動車技術, 66(9), 11-17 (2012).