

# 電動バスを用いた低炭素型観光交通システムによる二酸化炭素削減評価\*

## Evaluation of CO2 reduction by low carbon tourist transport systems with electric bus \*

宇野元浩\*\*・鈴木直司\*\*\*・紙屋雄史\*\*\*\*・石太郎\*\*\*\*\*・出井惣太\*\*\*\*\*

By Motohiro UNO\*\*・Naoshi SUZUKI\*\*\*・Yushi KAMIYA\*\*\*\*・Taro ISHI\*\*\*\*\*・Souta DEI\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

奈良公園周辺は、東大寺を始めとする世界遺産等の文化観光施設を有する「国際観光都市」であり国内外から年間1300万人の観光客が訪れる。そのため特に春秋の観光シーズンには、奈良市内は交通渋滞が生じており、平城遷都1300年祭（H22年）を契機とする観光客増加により、更なる交通環境の悪化が予想される。奈良県では、環境に優しい「国際観光都市」とするため、奈良公園周辺地域への自動車の進入抑制とともに、奈良公園内での電動バスなど環境に優しい移動手段の導入を目指している。そのため、平成21年度には、地域の企業、市民等の協力で、奈良市等とともに、奈良公園周辺地域への自動車の進入を抑制し、公共交通利用を促進するため、電動バスを含む奈良公園内の周遊バスの運行、パークアンドバスライド、交通規制を伴う社会実験（10月31日、11月1日、3日）および、奈良市役所から奈良県庁間のシャトルバスに電動バスを用いた実証試験（11月8日、15日、22日、23日）を実施した。

社会実験、実証試験で用いた電動バスは、早稲田大学と昭和飛行機工業株式会社によって開発されており、充放電特性に優れる最新のリチウムイオン電池の搭載、な

らびに従来必要な給電施設までの移動を省くことができ、短時間充電が可能となる停留所設置型非接触急速誘導充電器（IPS）の導入により、短時間の充電で従来の電動バスと比較し走行可能距離の増大を可能にしている。

本研究では、社会実験および実証試験時の走行実績や実施した各種調査の結果等を用いて、電動バスを導入することによる奈良公園周辺での二酸化炭素排出量の削減率を計測することを目的としている。また電動バス利用者に対して行ったアンケート結果から電動バス利用者の視点に立った評価、課題の抽出を行った。



写真-1 電動バス外観（定員12名）



写真-2 IPS外観

\*キーワード：交通環境、公共交通運用

\*\*工修、正会員、株式会社ニュージェック

（大阪市北区本庄東二丁目3番20号

TEL：06-6374-4267、E-mail：unomt@newjec.co.jp）

\*\*\*工修、株式会社ニュージェック

（大阪市北区本庄東二丁目3番20号

TEL：06-6374-4442、E-mail：suzukins@newjec.co.jp）

\*\*\*\*工博、早稲田大学

（東京都新宿区大久保3-4-1-55S-704

TEL：03-5286-3123、E-mail：kamiya@waseda.jp）

\*\*\*\*\*工博、早稲田大学

（東京都新宿区大久保3-4-1-55S-704

TEL：03-5286-3123、E-mail：t-ishi@aoni.waseda.jp）

\*\*\*\*\*工学、奈良県

（奈良市登大路町30番地

TEL：0742-27-8103、E-mail：t-ishi@anoi.waseda.jp）

### 2. 低炭素型観光交通システム

社会実験では低炭素型観光交通システムとして、奈良公園内では電動バスを含む周遊バスの運行、並びに奈良

県庁交差点～大仏殿交差点～高畑交差点においては一方通行規制（奈良県庁東交差点からの進入を可）を実施し、車両の進入を抑制した。同時に奈良公園内をより快適に歩行できるように一方通行規制により空いた車道を利用し歩行空間を創出した。奈良公園外では郊外に無料駐車場（奈良坂駐車場、国道24号高架下駐車場）を設け、無料シャトルバスの運行を実施した（国道24号高架下駐車場からは無料レンタサイクルの貸出も実施）。また、駐車場案内版を設置することで迷走車両の減少を測る等、奈良公園内外において、マイカーからのCO2排出量を削減するための様々な施策を実施した。



図-1 低炭素型観光交通システムの概要

以下に、社会実験における周遊バスの運行概要および実証試験におけるシャトルバスの運行概要を示す。

(1) 社会実験における周遊バスの運行概要

社会実験期間に運行された奈良公園内周遊バスの概要を表-1に示す。社会実験3日間で合計104便の運航があり、その内32便が電動バスによる運行であった（その他はディーゼルバス）。

表-1 周遊バス概要

運行時間	9時～16時30分（県庁発最終便）
走行ルート	奈良県庁～大仏殿～奈良公園シルクロード交流館～春日大社駐車場～大仏殿～浮御堂～奈良県庁（一周約5.5km）
便数	32便/104便（社会実験3日間合計） （電動バス/周遊バス総便数）
利用者数	525人/4003人（社会実験3日間合計延べ利用者数） （電動バス/周遊バス全体）



図-2 周遊バスルート及びIPS設置箇所



写真-3 電動バス利用状況（奈良県庁）

(2) 実証試験における電動バスの運行概要

実証試験中に運行された電動バスによるシャトルバスの運行概要を表-2に示す。4日間で60便の運航があり、延べ395名の利用があった。

なお、本試験に際して社会実験では春日大社駐車場に設置したIPSを奈良市役所駐車場に移設している。

表-2 シャトルバスの運行概要

運行時間	9時～17時（県庁発最終便）
走行ルート	奈良市役所～奈良県庁（片道約3km）
便数	60便（試験4日間合計）
利用者数	395人（試験4日間合計延べ利用者数）



図-3 シャトルバス走行ルート及びIPS設置箇所  
(奈良県庁に設置したIPSは据え置き)

### 3. 社会実験で行った調査の概要

社会実験で実施した調査の概要を表-3に示す。本研究でCO2削減率を算定する際に用いたデータは網掛けで示した調査結果から得ている。

表-3 調査概要

調査	調査実施日					調査方法
	通常時 (11/7)	実験日 (10/31)	実験日 (11/1)	実験日 (11/3)	その他	
駐車場利用者調査	●				●	ヒアリング
駐車場台数調査	●				●	人手カウント調査
周遊バス利用者調査		●	●	●	●	アンケート手渡し・郵送回収
路線バス・周遊バス利用者数調査	●	●	●	●		人手カウント調査
シャトルバス利用者数調査		●	●	●	●	人手カウント調査
旅行速度調査フープ	●				●	実走行
観光客実態調査	●	●	●	●	●	アンケート手渡し・郵送回収
歩行者数調査	●				●	人手カウント調査
路線バス・タクシー利用者調査		●	●	●	●	アンケート手渡し・郵送回収
交通量調査	●				●	人手カウント調査
渋滞長調査	●				●	人手カウント調査
ナンバープレート調査	●				●	人手カウント調査
鉄道利用者調査	●	●	●	●	●	アンケート手渡し・郵送回収
生活者調査					●(事後)	Webアンケート

### 4. CO2排出削減率算定方法

乗用車で奈良公園を来訪する予定であった観光客が電動バスを利用することで削減されるCO2の割合を算定した。算定の考え方として、

- ① バスがディーゼルバスから電動バスに転換することによる効果（電動化の効果）
- ② マイカーからバスへのモーダルシフトによる効果（モーダルシフトの効果）

の2つの効果をそれぞれ算定し、最終的には電動バスに転換した観光客が本来マイカーにて排出するはずであったCO2排出量と、電動バスによるCO2排出量を比較し、低炭素効果としてCO2削減率を算定した。以下のそれぞれのCO2削減率の算定式を示す。

#### (1) 電動化の効果

$$RR1 = 1 - EM_{ele} / EM_{dhi}$$

$$EM_{ele} = \sum_i d_i / ec / (EF_c \times EF_{IPS}) \times BU_{ele}$$

$$EM_{dhi} = \sum_i d_i / fc_d \times BU_{dhi}$$

- RR1 : 電動化効果によるCO2削減率
- EM<sub>ele</sub> : 電動バス1便当たりのCO2排出量 (t-CO2/便)
- EM<sub>dhi</sub> : ディーゼルバス1便当たりのCO2排出量 (t-CO2/便)
- d<sub>i</sub> : 走行距離
  - 5.5 (km) 周遊バスルート
  - 6.0 (km) シャトルバスルート
- ec : 電費<sup>※1</sup>
  - 2.58 (km/kWh) 周遊バスルート
  - 2.68 (km/kWh) シャトルバスルート
- EF<sub>c</sub> : 0.965 (充放電効率)<sup>※2</sup>
- EF<sub>IPS</sub> : 0.92 (IPS効率)<sup>※3</sup>
- BU<sub>ele</sub> : 0.299 (t-CO2/kWh) CO2排出原単位  
関西電力H20年度実績値
- fc<sub>d</sub> : ディーゼルバス燃費 (km/l)
  - 3.6 (km/l) 周遊バスルート
  - 10月31日奈良交通実績値
  - 2.8 (km/l) シャトルバスルート<sup>※4</sup>
- BU<sub>dhi</sub> : 2.624 (t-CO2/l)  
旅行速度調査結果および速度と燃費の関係<sup>2)</sup>より算出  
ディーゼル車のCO2排出原単位  
環境省ガイドラインより
- i : 周遊バスorシャトルバス

※1~3 電費、充放電効率、IPS効率の値については社会実験に先立ち早稲田大学によって実施された電動バス走行試験により得られた結果<sup>1)</sup>を利用した。

※4 シャトルバスルートの燃費の算定には、通常時の旅行速度調査結果（11月7日実施、大宮通、国道24号高架下駐車場~奈良県庁間）と国土技術政策総合研究所が示している速度と燃費の関係<sup>2)</sup>を用いて算定した。

#### (2) モーダルシフトの効果

$$RR2 = 1 - EM_{dhi} / EM_{car}$$

$$EM_{car} = dc_i / fu_c \times BU_{car} \times ASC$$

- RR2 : モーダルシフトの効果によるCO2削減率
- EM<sub>car</sub> : 電動バス1便当たり転換したマイカーが出すCO2排出量
- dc<sub>i</sub> : マイカーの走行距離
  - 3.9 (km) 奈良公園内 ※本節a)参照
  - 6.0 (km) シャトルバス区間
- fu<sub>c</sub> : マイカー燃費
  - 11.8 (km/h) 周遊バスルート
  - 10.2 (km/h) シャトルバスルート ※本節b)参照

$BU_{car}$  : 2.322 (t-CO<sub>2</sub>/l)  
 ガソリン乗用車のCO<sub>2</sub>排出原単位  
 環境省ガイドラインより  
 $ASC$  : 電動バス1台当たり転換した乗用車台数  
 ※本節c) 参照

a) マイカーの走行距離算定方法 (奈良公園内)

奈良公園内で周遊バスを利用した観光客が、周遊バスを利用せず、乗用車で奈良公園内を走行した場合の走行距離を、周遊バスの平均乗車距離と仮定し算定した。算定式を以下に示す。なお、シャトルバスについては奈良市役所から奈良県庁間のピストン輸送であるため、往復距離の6kmとなる。

$$D = \sum_n \sum_m (d_m \times U_{mn}) / \sum_n \sum_m U_{mn} \times 2$$

$D$  : 周遊バス平均乗車距離 (km)  
 $d_m$  : 停留所間 m の延長(km) 地図より測定  
 $U_{mn}$  : 電動バス n 便目における各停留所間 m の電動バス乗車人数(人)

b) 周遊バスルートのマイカーの燃費算出方法

周遊バスルートにおけるマイカーの燃費は国土交通省が公表しているJC08モード走行試験による主要車種別燃費<sup>3)</sup>の平均値に、混雑状況を加味してディーゼルバスの平常時の燃費と社会実験時の周遊バス運行時の燃費の割合を乗じて求めた(奈良交通ヒアリングより平常時のディーゼルバスの燃費は5.0 (km/l)、社会実験時の奈良公園内周遊バスとしてのディーゼルバスの燃費は3.6 (km/l))。結果を表-4に示す。主要車種平均燃費16.4 (km/l) に3.6/5.0を乗じ周遊バスルートの乗用車の平均燃費は11.8 (km/l) となった。

表-4 周遊バスルートにおける乗用車の燃費算出結果

燃費値 (km/l)	該当数
30 ~	0
25 ~ 30	3
20 ~ 25	20
15 ~ 20	26
10 ~ 15	23
5 ~ 10	11
0 ~ 5	0
合計	83
平均燃費	16.4
実験中 想定燃費	11.8

参考) 国土交通省HP

c) 電動バス1台当たり転換したマイカー台数の算出方法

電動バス1便当たりの転換台数は電動バス1便当たり平均乗車人数をマイカー1台当たり平均乗車人数で除すことで求められる。

電動バス1便当たりの平均乗車人数は周遊バスについては周遊バス利用者数調査結果より16.7人となった。シャトルバスについては社会実験では、電動バスの運行はなかったが、ディーゼルバスによるシャトルバスの運行では35便の運航に対して1431名の利用があったことから、十分な需要があると考え、電動バスの定員である12名を平均乗車人数とした。

マイカー1台当たりの平均乗車人数は周遊バスについては周遊バス利用者アンケート結果から求めた。具体的には、アンケートで奈良公園周辺までの主な交通手段に乗用車を選択した回答者の平均同行人数からマイカー1台当たりの乗車人数を算出しており2.3人が得られた。図-4にアンケートの一部抜粋と算定結果を示す。

Q3. どなたとこられましたか?人数も教えてください。(回答者も含む)

属性	①友人・知人で ②カップルで ③ご夫婦のみで ④親子で ⑤孫と ⑥三世代で ⑦学校などで ⑧地域の団体で ⑨職場の団体で ⑩個人で
人数	大人 ( )人 子ども ( )人

Q6. 出発地と奈良公園周辺までの往復の主な交通手段とその選択理由をお答えください(乗用車の場合はご利用の駐車場をお答えください)。また、ご利用の交通手段の移動に関する満足度はいかがでしたか?

①利用交通手段 (ひとつに○)	a) J R ( )	b) 近鉄 ( )	c) 路線バス ( )	d) 観光バス ( )	e) 乗用車 ( )	f) その他 ( )
②利用駐車場 (ひとつに○)	a) 無料パーキング駐車場 (駐車場名: i. 国道24号 ii. 奈良市役所 iii. 奈良阪) b) 奈良公園内駐車場 c) 近鉄奈良駅周辺駐車場 d) JR 奈良駅周辺駐車場 (駐車場名: )					
④満足度 (ひとつに○)	a) 満足	b) やや満足	c) やや不満	d) 不満	e) 分からない	
⑤理由 (該当するものすべてに○)	a) 予定の時間に到着した b) 経済的 c) 移動が楽 d) わかりやすい e) その他 ( )	a) 予定の時間を超過した b) 不経済 c) 移動が困難 d) わかりにくい e) その他 ( )				

■調査結果

アンケート回答者数 (人)	乗用車選択者数 (人)	同行者数計 (人)	マイカー1台当たり平均乗車人数 (人/台)
189	79	185	2.3

図-4 アンケート票 (一部抜粋) と算定結果

またシャトルバス利用者のマイカー平均乗車人数については、パークアンドバスライド駐車場利用者にヒアリング調査を実施した際に、調査員が動向人数を確認し記録したデータを用いており、その結果平均2.5人となった。

以上の結果から電動バス1台当たり転換した乗用車台数は周遊バスについては7.3台、シャトルバスについては4.8台となる。

## (2) 低炭素効果

マイカーから電動バスに転換したことによる低炭素効果は次式によって求められる。

$$RR = 1 - EM_{ele} / EM_{car}$$

RR : 電動バス導入による低炭素効果

## 5. CO2削減率算定結果

1便当たりの電動バス、ディーゼルバスから排出されたCO2排出量およびマイカーにて排出されるはずであったCO2排出量算定結果を表-5に示す。

表-5 CO2排出量算定結果

	周遊	シャトル
電動バスの1便当たりの排出CO2量 (kg-CO2/便)	0.72	0.75
ディーゼルバスの1便当たりの排出CO2量 (kg-CO2/便)	4.01	5.62
電動バス1便当たり転換したマイカーが本来マイカーにて排出するはずであったCO2量 (kg-CO2/便)	5.56	6.64

表-6にCO2削減率算定結果を示す。これをみてわかるように電動化の効果によるCO2削減が大きく影響してマイカーから電動バスへ転換することにより、奈良公園周辺のCO2削減率は約9割を達成することが確認できた。

表-6 CO2削減率算定結果

		削減率
① 電動化の効果	周遊	82.1%
	シャトル	86.6%
② モーダルシフトの効果	周遊	27.9%
	シャトル	15.4%
③ 低炭素効果	周遊	87.1%
	シャトル	88.7%
	合計	<b>87.9%</b>

## 6. 利用者視点による電動バスの評価

電動バス利用者に対してアンケート調査（満足度・経済評価など）を実施し、その結果から、電動バスの評価や課題を抽出する。図-5にアンケート票の一部抜粋を示す。

Q9-1 『電気バス』にご乗車された方にお聞きします。乗り心地はどうか？（③やや不満、④不満と回答された方はその理由をお答えください。）

加速時のショック	①満足	②やや満足	③やや不満	④不満
走行中の振動	①満足	②やや満足	③やや不満	④不満
走行中の音	①満足	②やや満足	③やや不満	④不満

Q10 『電気バス』はCO2削減や振動・騒音軽減といった環境にやさしい乗り物ですが、現状では、電気バスの導入には、従来のバスと比較した場合、多くのコストがかかります。従来のバス利用料金と比較して、いくらならば利用してもよいとお考えですか？

①従来のバス料金より(a. 50 円/回 b. 100 円/回 c. 150 円/回 d. 200 円/回)高くてもよい
②従来のバス料金と同じ

Q11 電気バスの実用化、普及に向けた取り組みについて、ご意見、ご感想等を自由にお答えください。

図-5 アンケート票（一部抜粋）

### (1) 利用満足度について

電動バス利用者アンケートにて、乗り心地（「走行中の静音性」「走行中の低振動性」「加速時の低ショック性」の3つの指標）についての満足度を調査している。図-5に結果を示す。結果をみると、3つの指標とも6割以上が「満足」と評価、「やや満足」も含むと約9割が満足と評価している。

自由意見でも登板時のスムーズな走行などを評価する回答が見られるなど概ね高評価を得られた。ただし静音性については、静かすぎて電動バスの接近に気付きにくいなどの意見も見られ、安全性に課題を残す結果となった。また定員12名が少ないことを指摘する声も多く見られ、電動バス乗車定員の増加も今後の課題として挙げられる。

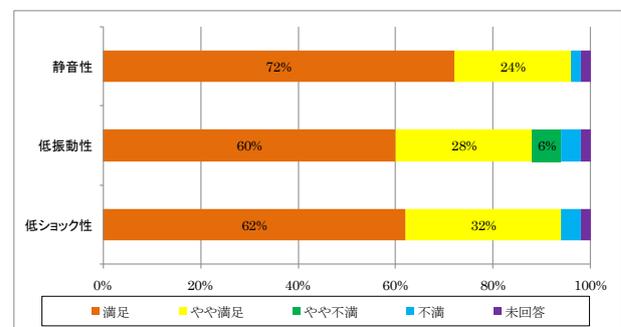


図-6 満足度調査結果

### (2) 付加価値・経済価値について

周遊バス利用者に対するアンケート結果から、電動バスの料金は「従来のバスよりも高くてもよい」と回答した割合が全体の回答者の40.7%にのぼり、「従来のバス料金と同じ」と回答した41.3%とほぼ同数となった。自由意見においても利用料金増に対する意見は賛否両論であった。また、従来バス運賃（100円）よりも高くともよいと回答した人の加重平均をとると1人当たり40.3円高くてもよいとの結果を得られた。

アンケートでは、電動バスは環境に優しいがコストが高くなることを説明した上での回答結果であり、このこ

とは観光客が環境に対する意識が高く、環境へのコスト増（この場合 1.4 倍）を容認している結果となっている。

表－7 電動バス料金の評価

	サンプル数	割合
従来のバス料金と同じ	78	41.3%
従来のバス料金より高くても良い	77	40.7%
未回答	34	18.0%

表－8 電動バスの適正料金評価結果

適正料金	サンプル数
+50円/回	37
+100円/回	35
+150円/回	2
+200円/回	3
平均	+40.3

※従来のバス料金と同じと回答した被験者については+0円/回として  
平均値を算出している。

この結果を考慮し、実用化に向けての経済評価を行った。周遊ルートにおいて従来バスを 100 円、電動バスを 150 円で運行した場合の 1 便当たりの収入を試算した。従来バスより電動バスの乗車定員が 12 人と少ないため、電動バスの必要便数が約 2.8 倍（1 日当たり従来バス 19 便（11 月 3 日実績、821 名の利用）、電動バス 53 便）となり、従来バスより高い料金設定としても、1 便当たりの収入は約半分となってしまい（1 便当たり従来バス 4,321 円、電動バス 2,324 円）、収益の面では課題が残る。

表－9 1 便当たり収入算定結果

	便数	利用人数	料金	収入	1便当たり収入
ディーゼルバス	19	821	100	82,100	4,321
電動バス	53	821	150	123,150	2,324

## 7. おわりに

本研究は、マイカーからディーゼルバスへのモーダルシフトによるCO2の削減とともに、既存のディーゼルバスに代わる新しい交通手段として、電動バスを観光地（奈良公園周辺）へ導入することによって削減される一日のCO2排出量の割合を算定することを目的としている。

今回の社会実験の結果では、観光シーズンおよび電動バスの希少価値性から電動バスの利用率が非常に高く、電動化の効果とモーダルシフトの効果を合わせた低炭素効果は、周遊バス（奈良公園内）で 87.1%、シャトルバス（奈良公園周辺）で 88.7%、両方のバスを合わせた全体の効果として、87.9%の CO2 削減効果を得ることができた。電動バスの導入は低炭素社会実現に向けての強力なツールとなることは間違いなく、積極的な導入を図

ることで、次世代の低炭素型の観光交通システム実現の一翼を担うことが期待される。

また電動バス利用者アンケートから走行時の満足度も概ね良好であることがわかったが、定員の少なさ、走行中静かすぎることによる安全性の危惧などの課題も抽出された。

また昨今の環境に対する意識の高まりから、電動バスの運賃は従来バスよりも運賃が高くても構わないという意見も多く聞かれ、平均すると従来バスの約 1.4 倍の運賃でも容認される結果になった。ただし、ここでも定員の課題が見られ運賃を高く設定しても 1 便当たりの収入は従来バスの半分程度にしかならないという結果が得られた。

以上のことから、電動バスの導入は低炭素社会にむけて有効な施策であり、また利用者から見たニーズも高いことが明らかになった。しかしながら実用に向けては、乗車定員、コストの問題は残っており、技術革新や普及・展開する等による乗車定員の増加、コスト縮減が図られることが重要となる。

## 参考文献

- 1) 荻路貴生ほか：先進電動マイクロバス交通システムの開発と性能評価— 第4報：リチウムイオン電池と非接触急速誘導充電装置の導入による車両充電性能向上に関する検討 一、社団法人自動車技術会学術講演会、2010.
- 2) 並河良治, 高井嘉親, 大城温：自動車排出係数の算定根拠, 国土技術政策総合研究所資料 第 141 号, 2003.
- 3) 国土交通省HP：  
[http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_mn10\\_000001.html](http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_mn10_000001.html)