

人と環境に優しい都市バスシステム実現のために

- 新技術の動向と乗客の観点からの評価 -

交通システム研究領域 林田 守正 水間 毅 大野 寛之 佐藤 安弘
環境研究領域 成澤 和幸 坂本 一朗 自動車安全研究領域 波多野 忠
早稲田大学 紙屋 雄史

1. まえがき

路線バスは乗用車に比べて旅客1人当たりの都市空間利用や環境負荷、エネルギー消費の点で格段に優れ、またインフラ整備が不要でキメ細かな輸送が可能である。しかし道路混雑等による定時性の低下やマイカーの浸透により輸送量は年々減少している。これに対し、各種の新方式バスシステムが導入されつつあるが、コスト高が阻害要因であるうえ、利用増に繋がる技術評価手法が確立されておらず、バスへの公的支援やマイカー抑制に対する国民の理解が得がたい状況にある。そこで本報告では、当研究所が取り組んでいる低環境負荷交通システム高度化に関する評価の一環として、都市バスの機能向上、利用促進に資する新技術全般の実用化の動向と、普及への課題について述べる。また技術評価項目の一例として、先進電動車両等を用いた実車計測によりモータ駆動方式導入の乗客に対する乗心地向上等のメリットの評価手法を考察した結果を報告し、さらに先進電動車両の路線導入に向けた適合性調査等の取り組みを紹介する。

2. 路線バスに関する新技術の実用化の動向と課題

2.1. 全体概要

路線バスの利用促進策としては、従来は路線・ダイヤ等の運用改善や運賃の弾力化などソフト面が主であった。しかし近年の技術革新に伴い、それらを車両や運行システムに反映した新方式バスシステムを採用することにより、ハード面からも利用増に寄与する改善を推進する動向が顕著になっている。またバスは車庫以外のインフラは不要との既成概念を転換し、走行路確保や通信・案内の充実を図るため地上インフラの整備を重視する例も見られる。これらの新方式採用

はコスト増を招くため、多くの場合バス事業者のみの負担による導入は困難である。そのため国や自治体による各種の公的な支援制度も整備されている。しかしながら便利で快適なマイカー利用が一般化している中で、利用者の観点に立ち自発的な利用増を視野に入れた新技術の評価手法が確立しているとは言い難い。

2.2. 車両技術の例

2.2.1. 電動車両

現在、ほとんどの路線バスはディーゼルエンジン駆動車両である。これに対しパワーエレクトロニクスや二次電池等の技術の進歩を反映して、電車と同様に駆動力を全面的に電気モータから得る電動車両の実用化が進められている。中でも車載発電機を主電源とするシリーズハイブリッド車両(以下、「SHEV」という。)として、平成15年8月にガスタービンSHEVによる大都市都心部巡回バスの運行が開始された⁽¹⁾。また平成16年にはディーゼルSHEVの量産、本格運行が開始され、現在中部地方の3事業者の一般路線で運行中である⁽²⁾。図1にそれらの運行例を示す。米国でも都市バス路線にディーゼルSHEVの導入例が見られる。

一方、国内外において燃料電池バスの開発が進められており、わが国でも平成15年8月以降、一般バス路線や博覧会会場で試験的な運行が行われている。

また、車載電池を電源とする純電気方式は航続距離の短さが実用上の制約となるが、近年開発された高性能電池や急速充電装置を活用し、小型車両による短距離路線運行に活路を見出す例が国内外に見られる⁽³⁾。

これら電動車両は主に低公害性、省エネルギー性が注目されるが、モータ駆動ならではのスムーズさ、静粛性も特長となるため、交通機関としての魅力も大いに高まると考えられ、特に上記の都心部巡回バスではそ

れを前面に打ち出している。しかし車両価格は燃料電池バスを別としても、通常車両の 1.7~2.1 倍と非常に高価であり、それに見合う乗客側のメリットや利用増に関する評価指標は整っていない。この点については、独自に実験的な考察を行った結果を後述する。



(ガスタービン発電車両) (ディーゼル発電車両)
図1 運行中のシリーズハイブリッド車両

2.2.2. 連接車両

2 車体 (またはそれ以上) の連接構造を有し、全長や乗車定員が通常車両を大幅に上回るバス車両である。欧州の都市では数多く使用され、ブラジルでは 3 連の車両もあるが、わが国では道路事情や法令の制約、また高価であること等により導入は数例に留まっている。平成 17 年 3 月にはラッシュ時の輸送力不足が顕在化していた神奈川県内の路線に、新たに欧州製の超低床構造・後車体推進方式の連接車両が投入され、4 台が運行中である⁽⁴⁾。外観を図 2 に示す。



図2 運行中の超低床 (ノンステップ) 連接車両

2.2.3. 低床車両

平成 12 年 11 月の旧交通バリアフリー法の施行に伴って路線バスの低床化が推進されている。特に乗降口に段差が無く床面高さが概ね 30cm という超低床ノンステップバスが開発され、その普及率はバス総車両数の約 15% に達している。図 1、図 2 も超低床ノンステップ車両である。課題は車体構造が複雑化するため製造コストが数百万円程度上昇することであり、また低床部分の限定、車内の突起や後部客席への段差等、さ

らに改良を進める余地があると考えられる。

2.2.4. その他

1) 液体式自動変速機 (トルコン): 手動変速機に代えて装備すれば、エンジン車でも変速ショックが大幅に緩和され、特に立席客の乗心地が顕著に向上する。国内では普及率が極端に低いですが、近年、電子制御や直結機能を備えた高性能自動変速機が開発され、事業者側にも積極導入の動きがある。

2) デュアルモード車両: 後述のデュアルモードバスシステム用として、一般道路と新設専用軌道 (走行路) の両方が走行可能な車両が実用化されている。軌道走行用の案内機構を装備し、また自動運転や連結 / 隊列運転も試行されている。一方、道路と鉄道線路の直通運転が可能な車両も開発され、実用化が間近である。

2.3. 運行システム

2.3.1. バスロケーションシステム (バスロケ)

バスの位置情報を利用者に提供するシステムで、国内では現在 100 近い事業者が導入している。情報通信や I T S 技術の急速な進歩に伴い、広域的なバスの位置情報を運行センタにおいて一括管理することが可能となった。停留所やターミナルでのバス接近案内の他、インターネット経由でパソコンや携帯電話画面上でバスの位置情報等が得られるシステム例が増え、また車内での情報提供例もある。課題としては、数千万~数億円程度の初期投資を要し、運営時の通信費等もかさむ点が挙げられる。図 4 に、その例を示す。



図4 バスロケーションシステムの実用例

2.3.2. デマンドシステム

利用者の乗車 / 降車希望 (デマンド) に応じ、運行経路やダイヤを柔軟に変更、設定する路線バスの運行システムであり、一般的に需要が少ない地域や路線に

適するが、その形態は多様である。従来は電話連絡等による手作業に頼っていたが、最近はバスロケと同様に高度な情報通信技術を採用したシステムが各地で導入されている。デマンドの発信方法としては電話の他、押釦、専用端末、インターネットと多様化し、携帯電話画面操作や音声自動認識を活用した完全自動化システムも試行されている。その例を図5に示す。



図5 デマンド発信装置の例

2.3.3. PTPS (公共交通優先通行システム)

公道において路線バス等の公共交通車両が優先的に通行できるように支援するシステムで、従来のバス優先/専用レーンの設置のみでは効果が不十分な例が多かったが、最近は光ビーコン等を使用した図6のような優先信号制御や違法走行車監視等の機能が備わり、バスの定時制確保に大きく寄与している⁽⁵⁾。PTPSは一般車との利害が相反する面もあるため、導入に向けては事業者計画だけでなく地元関係各方面を交えての協議、合意形成が極めて重要である。

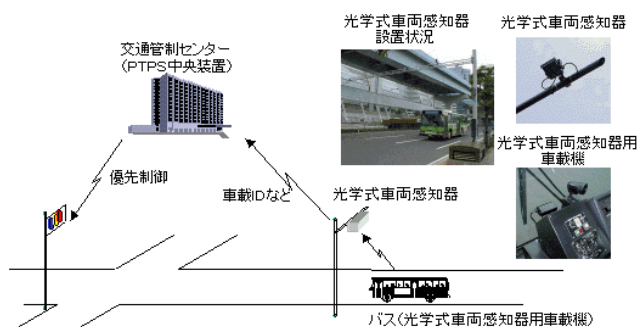


図6 PTPSのバス優先信号制御システムの例⁽⁵⁾

2.4. デュアルモードバスシステム

前述の専用車両が一般道路と専用軌道(走行路)の両方を直通運行する新方式のバス交通システムで、マルチモード、バイモーダル等とも呼ばれる。専用軌道部分では定時性、速達性を確保し、しかも乗客は一般道路上の各方面路線へ乗換無しで直通できるという利点を兼ね備える。法規上も、専用軌道部分は鉄軌道、

一般道路上は自動車として扱われる。国内では平成13年より、愛知県内で図7に示すような側方案内方式のガイドウェイバスが運行している。海外ではドイツ、イギリス、オーストラリアに実用例が見られる。また平成17年には、磁気マーカによる非接触誘導方式で、軌道上の隊列走行が可能なマルチモードバスシステムが博覧会場内の交通機関として運行された。

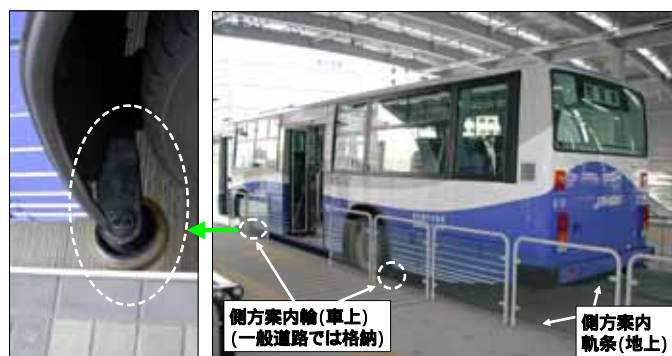


図7 側方案内式ガイドウェイバス (専用軌道上)

3. 電動車両化による乗車環境改善の評価手法検討

3.1. 計測の概要

新方式システムの一例として電動車両を取り上げ、従来のディーゼル車と比較として、乗客が期待する乗車環境の改善効果、すなわち変速ショック等の加速度変動、車内騒音、振動の低減について客観的な評価方法を検討した。そのために、小型バスの実車走行による比較計測を実施し、走行条件、計測方法や評価変数の設定に関する先行的な考察を試みた。

3.2. 計測条件

3.2.1. 供試車両

供試車両としては、表1に示す三種類の小型バスを使用した。車両Aは一般的なマイクロバス(計測車に改造)である。車両Bは平成16~17年度のNEDO補助事業において開発された先進電動バス(電池式)⁽³⁾であり、車両CはそのベースとしたFF・超低床のディーゼルマイクロバスである。車両A、Cをエンジン車両、車両Bを電動車両の例とし、それらを乗客の観点から数値評価により比較する手法の検討を行った。

3.2.3. 走行条件

走行路は当所自動車試験場の試験路等を使用した。走行条件としては、表2に示すような発進加速、定速走行、登坂/降坂等を設定した。これらのパターンを、供試車両の運転席に設置した車速パターン指示器(画面上に指定車速と実車速を表示)に予め入力しておき、計測時は運転者が指示画面を見ながら走行した。

表 1 供試小型バス車両の諸元

項目	車両 A	車両 B	車両 C
全長 (mm)	6,990	5,770	
全幅 (mm)	2,010	1,995	
全高 (mm)	2,610	2,830	
車両質量 (kg)	3,780	3,175	2,700
定員 (名) (カッコ内は改造前)	9 (29)	11 (20)	20
原動機	ディーゼル	交流同期モータ	ディーゼル
最大出力 (kW)	114	50	93
変速機	手動 5 速	手動 5 速 (通常は 2 速固定)	手動 5 速
レイアウト	F R キャブオーバ	F F セミボンネット	

表 2 供試車両の走行条件

種別	条件	車両 A	車両 B	車両 C
発進加速	パターン	12秒間で 0-40km/h		
	変速操作	2 3 4速	2速固定	1 2 3速
定速走行	車速	40km/h		
	変速段	4速	2速	3速
登坂	勾配	18 20°		
	変速段	2速	1速	
降坂	勾配	16 12°		
	変速段	2速	1速	

3.2.3. 計測項目と計測方法

- (1) 車速：車体後部または前部に光学式非接触車速計を設置して測定した。
- (2) 車両加速度：客席中央部の床面に低容量 ($\pm 2G$) 加速度センサを設置し、発進加速時等の加速度を計測した。この加速度値を時間微分してジャーク値を得た。これらは乗心地や不快感の主な指標とされる⁽⁶⁾。
- (3) 車内騒音：原動機に近い前部の乗降扉付近への着席を想定し、床面から 1.1m の高さにマイクロホンを設置した。評価値は A 特性の騒音レベルとした。
- (4) 座面振動：JIS7760 に準拠した人体振動測定用 3 軸振動計による振動加速度の測定を試みた。騒音と同様に前部の座面上に円盤状の座席用振動加速度センサを設置し、人体質量相当のウェイトを置いた⁽⁷⁾。それらの測定器の車上配置を図 8 に示す。

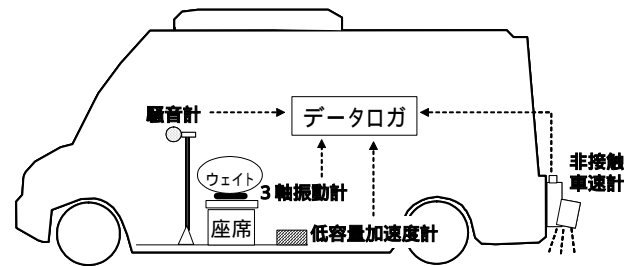


図 8 車上の測定器の配置

3.3. 結果および考察

3.3.1. 発進加速時の車両加速度とジャーク

バスの加減速運転において、特に発進加速部分に注目した。路線バスの走行実態に基づいた表 1 の単純な発進加速に沿って車両 A および車両 B が加速した場合の車両加速度とジャークを図 9、図 10 に示す。

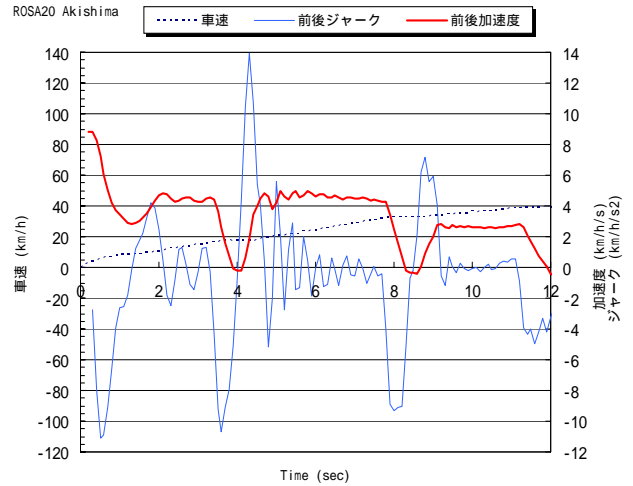


図 9 車両 A の発進加速時の前後加速度とジャーク

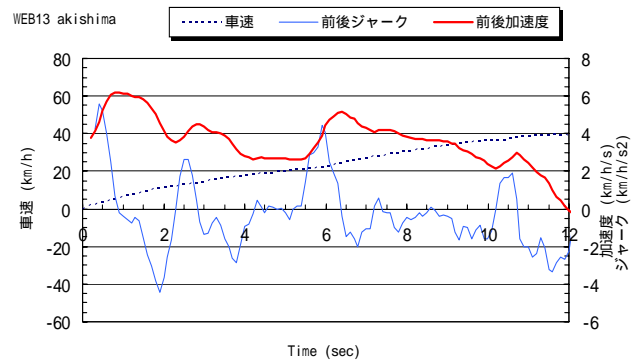


図 10 車両 B の単純加速時の前後加速度とジャーク

車両 A では 2 回の変速操作時に加速度がゼロに急落するが、車両 B では 40km/h に達するまで円滑に加速を継続している。またジャークは、車両 A では急激なピークと正負反転を繰り返すが、車両 B では変動は緩やかである。表 2 に、それらの代表値として、最大値と反転回数を例示する。いずれも車両 C が車両 A を大幅に下回っていることが明確である。一方、高レベルの加速度やジャークの頻繁な出現も乗心地感覚の悪化要因になると考えられる。評価の試みとして、図 11 に加速度のレベル別の時間率、図 12 にジャークのピーク値別の出現回数を示す。しきい値は鉄道車両を参考として仮定したが、一例としてこのような形でバ

ス車両の電動化による加速の平準化、高加速値出現の回避を数値評価することが可能であると考えられる。

表2 加速度とジャークの代表値

代表値		車両 A	車両 C
加速度 (km/h/s)	最大値	8.8	6.2
	正負反転回数	2回	0回
ジャーク (km/h/s ²)	最高値(正)	13.9	5.6
	最低値(負)	-11.1	-4.4
	正負反転回数	19回	9回

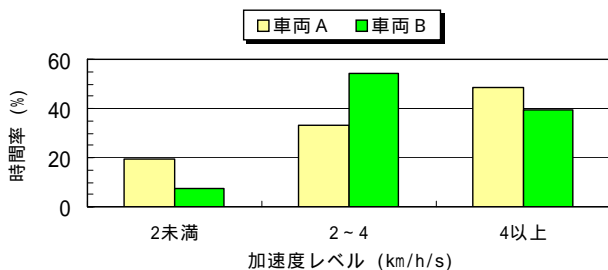


図11 発進加速時の加速度のレベル別時間率

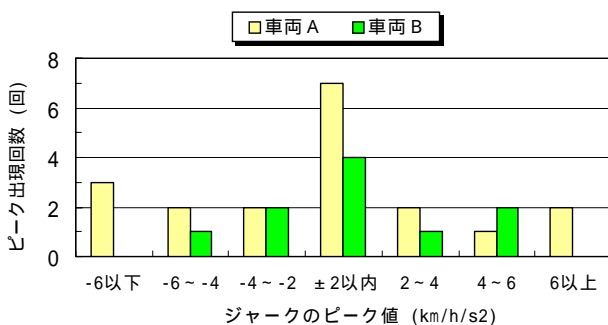


図12 発進加速時のジャークのピーク値別出現回数

3.3.2. 車内騒音

上記と同一パターンの発進加速における車両A、B、Cの車内騒音測定結果を図13に示す。平均値で比較すると、車両Bの騒音レベルは車両Aに対し約11dB、また同一車体の車両Cに対し約7dB低い値を示すため、発進加速においては電動化による車内騒音の低減効果が顕著に表れるといえる。車両Cはエンジンが隔離されているため、車両Aより多少低いレベルを示す。また騒音は加速中に上昇傾向を示すため最高値は平均値より5~10dB高くなること、最高値のレベル自体も短時間ながら不快感に与える影響が大きいためを考慮すると、評価指標とすべき代表値の選定に関してはさらに検討を続ける必要があると考えられる。

定速走行時の車内騒音を図14に示す。最大値と最小値の差は小さいため、平均値を代表値として差し支えないと考える。車両Bは車両Aを約5dB下回るが、

車両Aと車両Cの差はほとんど認められない。

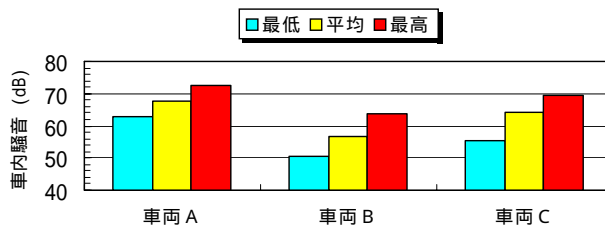


図13 発進加速時の車内騒音

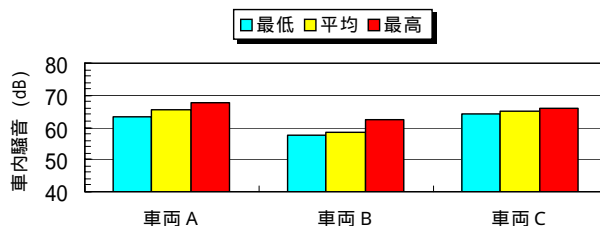


図14 定速走行時の車内騒音

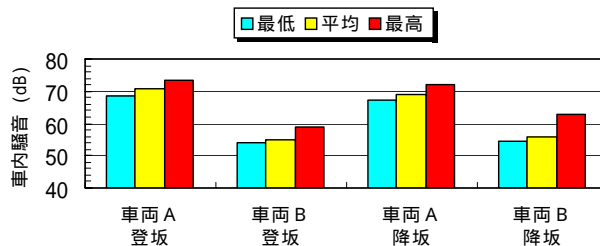


図15 登坂/降坂時の車内騒音

図15に、登坂/降坂時の車内騒音を示す。この場合も平均値を代表値として比較すると、車両Bは車両Aを約15dB下回る。ディーゼル車の場合、登坂/降坂(エンジンプレーキ)時は低位の変速段を使用し、エンジン回転数上昇により高レベルの車内騒音が持続するため、電動車両化による騒音低減効果を非常に高く評価できる走行条件であるといえる。

3.3.3. 座面振動レベル

図16に、同一車体の車両Bと車両Cの座面振動レベルの測定結果例を示す。振動レベルは、X(左右)、Y(前後)、Z(鉛直)方向の振動加速度を周波数補正した瞬時値から次式により1秒毎の実効値 aw を求め、それを時間平均し、対数表示したものである⁽⁷⁾。

$$aw = \left[\frac{1}{T} \int_0^T aw(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

ただし、 $aw(t)$: 周波数補正後の瞬時値

T: 実効値を求める観測時間(1秒間)

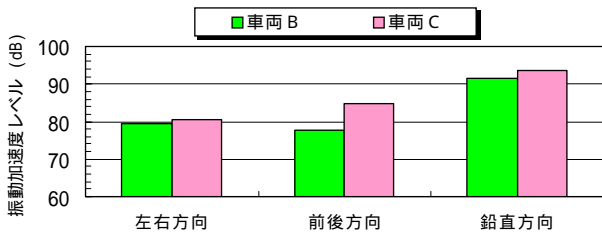


図 16 発進加速時の座面振動加速度レベル (平均値)

車両 B は車両 C のレベルをやや下回るが、特に左右、鉛直方向は僅差であり、今回は電動化による振動低減を的確に評価するには至らなかった。振動レベルによる乗心地評価は鉄道車両では実績があるが、路面状態や車体構造に大きく左右される点があり、バスへの応用については引き続き基本検討を行っていく。

4 . 先進電動バス車両の路線導入への取り組み

車両 B に代表される先進的な電動バス車両の大都市近郊地域への適合性に関する調査を、平成 18 年度 NEDO 補助事業の一つとして、自治体、昭和飛行機工業 (株)、早稲田大学と共同で実施している。市街地と周辺部の交通不便地域を結ぶコミュニティ路線を想定して、実験運行を通じた利用意識把握、車両の最適設計検討、需要予測、デマンドシミュレーション等を計画している。その概念を図 17 に示す。

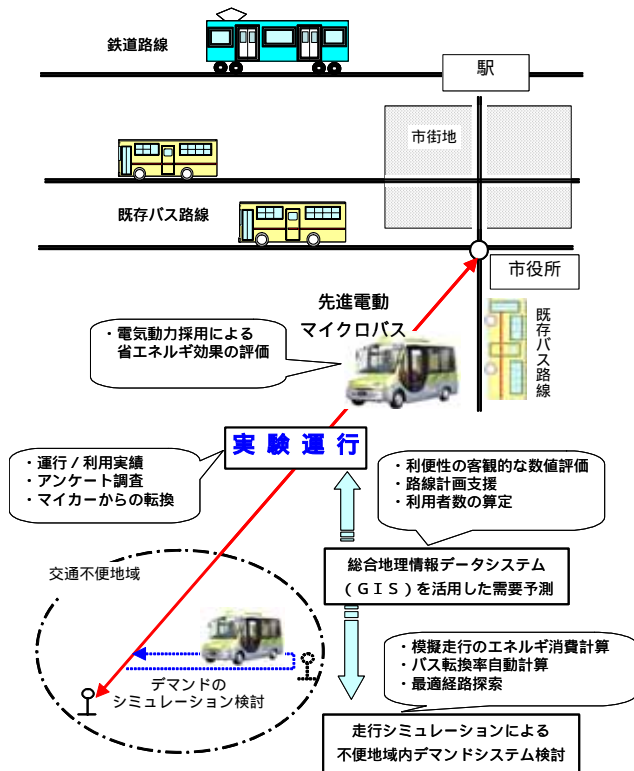


図 17 大都市近郊地域への先進電動バス導入の概念

実験運行は三段階に分けて実施し、最終段階では一般市民を対象とする社会実験をめざしている。

5 . まとめ

(1) 各種の新方式バスシステムの技術開発と実用化に関する動向を述べ、乗客側から見た利点と普及への課題について考察した。

(2) 新方式の一例として先進電動車両を取り上げ、実車走行計測により、従来のディーゼル車両と比較した乗車環境改善の評価手法に関する基本検討を行った。その結果、加速度、ジャーク、車内騒音に関し、適切な走行条件と代表値を選定すれば電動車両の優位性を簡易に数値化できる見通しを得た。振動加速度による評価についてはさらに基本検討が必要である。

(3) 先進電動バスの大都市近郊路線への導入をめざし、その適合性に関する調査を自治体等との共同プロジェクトとして実施している。

今後は、乗客の観点に立った新方式バスシステムの評価対象を乗車環境以外にも広げ、利便性やコスト等の長短を多面的に考察して適切な評価手法を策定するとともに、官公庁関連部署への協力、連携を図りたいと考えている。また共同プロジェクトにより先進電動路線バス等の本格実用化に取り組み、新システムの具体的な普及方策の提言を通じて路線バスの利用を促し、モーダルシフトを推進する所存である。

(参考文献)

- (1) 日の丸自動車興業 (株) 資料 (2006)
- (2) 年鑑バスラマ 2004-2005、P.75 (2004)
- (3) 紙屋、他「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 1 報-」、自動車技術会春季大会 (2006)
- (4) 神奈川中央交通 (株) 資料 (2006)
- (5) (特) ITS-Japan ホームページ (2006)
- (6) 福島・田村「路線バスの走行実態調査とその分析」2005 年度群馬大学教育学部卒業論文 (2006)
- (7) 蓮見「3 軸振動計 VM-54 と人体振動測定システム」小林理研ニュース No.85 (2004)

(謝辞)

技術調査に御協力を頂きました関係各方面の方々、また実車計測実施に御支援、御協力を頂きました NEDO ((独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構)、昭和飛行機工業 (株)、早稲田大学の各位に深謝致します。