

B-55 交通需要の地域特性に適合した運輸部門の環境効率向上策とその普及促進策に関する研究
(3) 低燃費型新形式バスの導入による運輸部門の環境負荷低減に関する研究

独立行政法人 交通安全安全環境研究所 環境研究領域 成澤 和幸、林田 守正
群馬大学 教育学部 紙屋 雄史
早稲田大学 理工学総合研究センター 大聖 泰弘

平成 12-14 年度合計予算額 15,158 千円
(うち平成 14 年度予算額 4,570 千円)

[要旨]	82
1. はじめに	82
2. 研究目的	82
3. 研究実施計画	82
4. 結果および考察	83
4. 1. 構成要素技術の調査	83
4. 2. 路線バス走行実態の調査	84
(1) 調査対象路線と測定方法	84
(2) 測定結果	84
4. 3. 新形式バスの基本構想	86
4. 4. 要素技術性能の定量化	87
(1) 駆動モータシステム	87
(2) 蓄電装置	89
4. 5. 燃費評価プログラムの作成と燃費の予測	90
4. 6. デュアルモード動力バス導入のモデル化	90
4. 7. デュアルモード動力バス導入による CO ₂ 排出量低減効果の推測	94
5. 本研究により得られた成果	97
6. 引用文献	98
7. 国際共同研究等の状況	98
8. 研究成果の発表状況	99
9. 成果の政策的な寄与・貢献について	99

[要旨]

車上および地上からの供給エネルギーを併用する自動車用デュアルモード動力システムの要素技術開発調査を行った。一方、路線バスの実車走行を行って測定した車速データを解析することにより運転実態を把握し、それに基づいてバスの要求動力性能を明らかにした。さらに都市用路線バスに適するデュアルモード動力システムの基本構成を検討した。

都市用バスの代表的運転条件を抽出し、台上単体運転装置と充放電試験装置により駆動モータシステムやキャパシタ等の要素性能を定量的に評価する手法を検討した。また動力システム内の電力流動をシミュレートしてエネルギー消費量を計算するプログラムを作成した。それをういてデュアルモード動力システムを採用したバスの燃費を予測し、従来車の2倍の燃費を達成する技術の見通しを得た。

それらの結果に基づき、デュアルモード動力バスの導入形態や輸送転換率をモデル化して、モデル地区における二酸化炭素抑制量を推定し、この新形式バスを導入可能な地域全体で用いた場合の二酸化炭素抑制効果を予測した。

[キーワード] 輸送転換、都市交通バス、デュアルモード動力システム、構成要素、エネルギー回生

1. はじめに

我が国の二酸化炭素排出の内、約20%は運輸部門であり、自動車の排出量はその大部分を占めている。温暖化対策を短期間のうちに効果的に進めるためには、自家用乗用車から公共交通機関へ需要を誘導することが重要な課題である。しかし鉄軌道系システムは新規整備が困難で、かつ大量輸送を前提とするため、最も現実的な転換の受け皿はバスであると考えられる。そこで、エネルギー効率に優れたバス輸送を充実させ利用促進を図るため、都市交通用バスに最適な新方式動力システムの技術評価を行い、その導入による二酸化炭素排出抑止効果を明らかにする必要がある。

2. 研究目的

インフラ整備が不要で、多様な交通需要にきめ細かく対応できるバス輸送の特長を最大限に生かして、乗用車に過度に依存している旅客輸送をバスに転換することにより、運輸部門に起因する環境負荷の低減を早急に実現する。そのため市街地では外部から集電し電気モータによる無公害運転、郊外ではハイブリッド走行による自立運転が可能なデュアルモード動力システムについて検討し、バスへの適用の可能性を明らかにする。それに基づいて、その新型動力システムを採用したバスを都市交通に導入した場合の環境負荷低減効果を、輸送転換率等を考慮して定量的に推計する。

3. 研究実施計画

初年度は、デュアルモード動力システムに応用可能な要素技術開発調査を行う。一方、都市域で運行されている路線バスの走行実態調査を行い、その要求動力性能を求める。これらの結果からバス用デュアルモード動力システムの基本構成を検討する。2年度目は個別要素技術の性能評価に基

づいて、要素技術性能の定量化を行うと共に、都市用バスの代表的使用条件を抽出し、両者の結果を用いて燃費評価プログラムを作成する。そしてデュアルモード動力システムを採用したバスの燃費を評価し、従来車の2倍の燃費を達成する技術を明らかにする。3年度目は大都市域の導入モデル地区を選定し、導入形態を数値モデル化して、乗用車から転換する旅客量を推定する。その結果からモデル地区における二酸化炭素排出抑制量を推計し、このシステムを導入可能な地域全体で用いた場合の二酸化炭素排出削減効果を予測する。

4. 結果および考察

4. 1. 構成要素技術の調査

デュアルモード動力システムに応用可能と考えられる要素として下記の機器が開発されている。

① 電気モータ駆動システム

トロリーバス用として、インバータ制御により出力120kWの交流誘導モータ1基を駆動するシステムが実用化されている。また路線バス用として、同様にインバータで出力150kWのモータ2基を制御するシリーズハイブリッドシステムが試作されている⁽¹⁾。さらに路線バスの低床化に対応するための車輪内蔵型（ホイールイン）モータの開発例もある⁽²⁾。いずれも減速時には電力回生ブレーキにより車両の運動エネルギーを回収することが可能である。

② 外部給電装置

トロリーバス用として、架線からカーボン接触器付ポールにより集電する方式が採用されている。またイタリアで、図1に示すように路面に埋設した柔構造電線を車両の電磁石で吸引し接触集電する方式が開発されている⁽³⁾。一方、超高速磁気浮上式鉄道用として非接触式分散型誘導集電装置が開発されているが、車速の低い都市用路線バスへの応用は困難と考えられる。

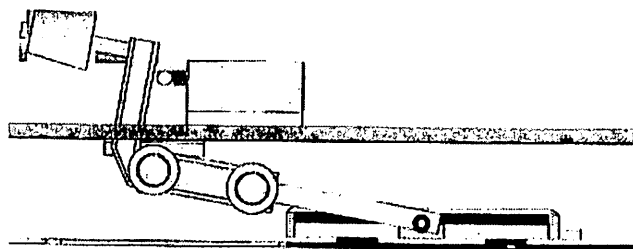


図1 路面埋込電線用接触集電装置⁽³⁾



図2 電気二重層キャパシタ⁽⁴⁾

③ 車載電源装置

大型自動車用シリーズハイブリッドシステム用に、低燃費・低公害のディーゼルエンジン、圧縮天然ガスエンジンにより駆動される高効率の発電機が試作されている。またニュージーランドで小型軽量で高出力のマイクロガスタービン発電機を搭載したバスが開発されている。

④ エネルギー蓄積装置

大型車用シリーズハイブリッドシステムのエネルギー蓄積装置として、高出力密度のマンガニリチウム電池や電気二重層キャパシタ (図2) (4) が開発されている。

⑤ 車両案内機構

バス車体側方の案内輪と路上案内軌条により走行するガイドウェイバスが開発され (5)、また磁気レーンマーカによる自動操舵により走行する方式も研究されている (6)。どちらの方式も車両は専用軌道と一般道路の両方を走行することが可能である。

4. 2. 路線バス走行実態の調査

(1) 調査対象路線と測定方法

東京都内のバス路線において実車走行によるバスの運転実態調査を行った。表1に調査を行った路線の例を示す。路線Aは私鉄の駅と団地を結ぶ路線、路線Bは市街地を挟んだ私鉄線の駅とJR線の駅を結ぶ路線である。調査に当たっては、営業用バス車両を借り切って実際の路線運行と同様の路上走行を各コース毎に数回ずつ繰り返し、車速を連続測定した。供試車両は全長10.5m、定員77人の機械式変速機付ディーゼルバスである。測定方法としては、図3に示すように車体後部に光学式の非接触車速計を取り付けて車速を連続的に検出し、車内に搭載した増幅器を介してデータロガーに記録した。

表1 走行実態調査を行ったバス路線の例

Line	Course	Distance (km)	Speed limit (km/h)	Bus stop interval (km)
A	Rail. station - Housing complex	3.12	30	0.34
B	Rail. station - City - Rail. station	8.23	40	0.33

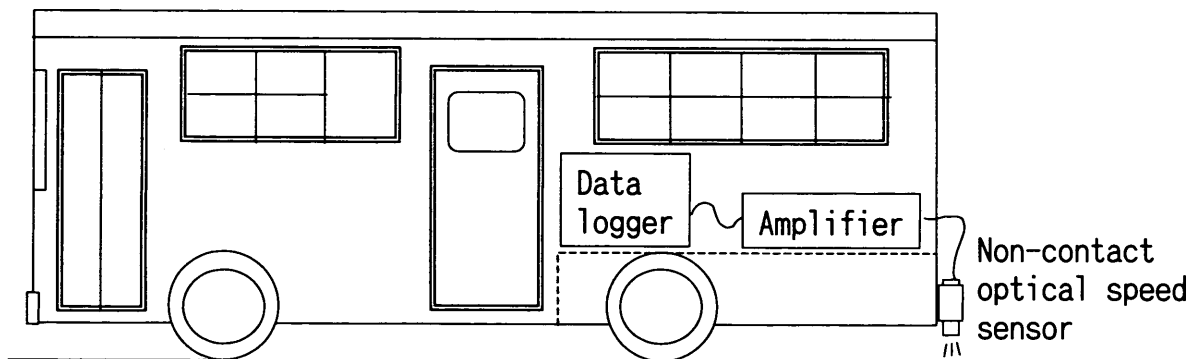


図3 実車路上走行における車速データ収集システム

(2) 測定結果

図4に、各コースにおける走行距離1km当たりの発進・停止の頻度を示す。頻度は路線A、路線Bとも5~5.5回/kmであり、大型自動車の代表的走行パターンとされるM15サイクル (7) よりも2回/km程度上回る結果を得た。これは、バスはトラック等の他の大型車と比べて、停留所での停車・発進が加わること、立席客への配慮から加速度が制限されるため僅かなタイミングで赤信号で

停止する確率が高まること等によるものと考えられる。

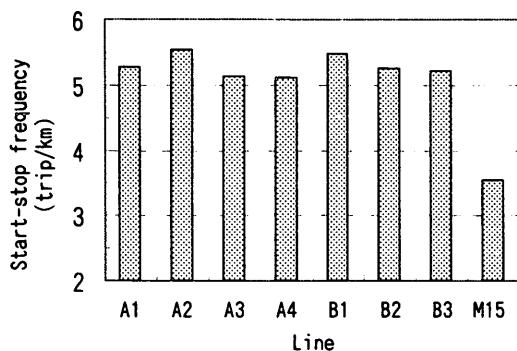


図4 都市路線バスの発進・停止頻度

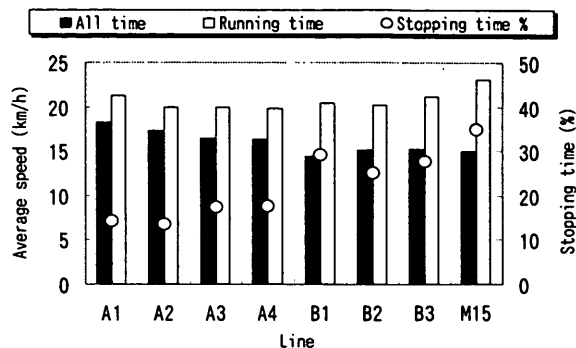


図5 都市路線バスの平均車速

図5に、各コースにおける平均車速および停車時間率を示す。いずれも全時間平均車速は15km/h前後、走行中平均車速は20km/h前後である。路線Aの場合は路線Bに比べて発進・停止の頻度は同等であるが、停車時間率が低く全時間平均車速が若干高い傾向を示す。これは道路の制限速度は低いが交通量が比較的少なく、一回当たりの停車時間が短いためと考えられる。

図6に加速度の分布を、車速領域別に示す。図中の各プロットは1回毎の連続した加速における平均値を示すものである。発進直後の加速度は5 km/h/s以上を示すが、40km/h付近では2 km/h/s前後となる。一方、減速停車の平均減速度は3～5 km/h/s程度を示した。

図7に、発進加速の際の各変速段における加速度の一例を示す。20km/hまでは2速、35km/hまでは3速、次いで4速を使用している。2速による加速度の最大値は7 km/h/secを示すが、その後2回の変速操作により加速が中断されるので、0→40km/hの平均加速度は地下鉄車両とほぼ同等の3 km/h/sに留まっている。したがって発進停止の頻度が特に高い都市路線用バスには、連続的な加速とエネルギー回生制動が可能な電気モータ駆動方式を採用することが望ましいと考えられる。

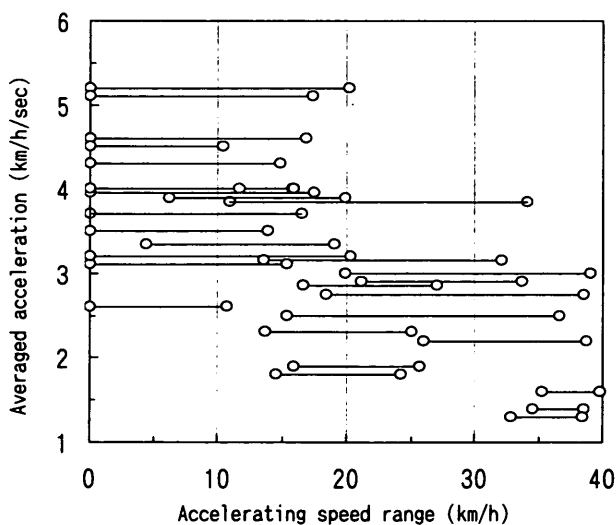


図6 車速領域別の加速度分布

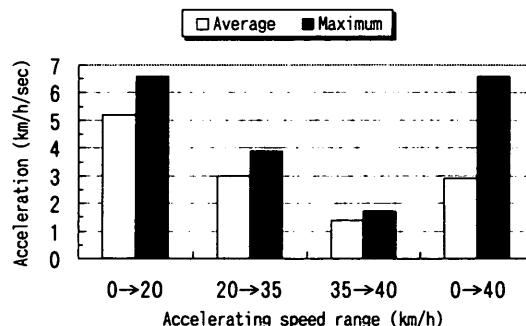


図7 発進加速時の加速度の例

4. 3. 新形式バスの基本構想

以上の調査結果を踏まえ、新しい動力方式の都市用路線バスの基本概念を考察するためのモデルとして、全長9m、車両質量7,800kg、定員60人の中型路線バスを想定した。図8に、そのバスで路線A、路線BおよびM15サイクルを運転した場合の走行要求エネルギーと回生可能なエネルギーの計算予測結果を示す。車速が低く車両質量が大きいため、慣性加速エネルギーが全要求エネルギーの65%前後を占め、計算上回生可能なエネルギーは40~50%に達する。したがって制動時のエネルギー回収が極めて重要であると考えられる。

図9に、上記の運転における要求パワーと回生パワーの計算値を示す。要求パワーの最大値は約100kW、平均値は15kWであり、回生パワーの最大は100kWと予測される。

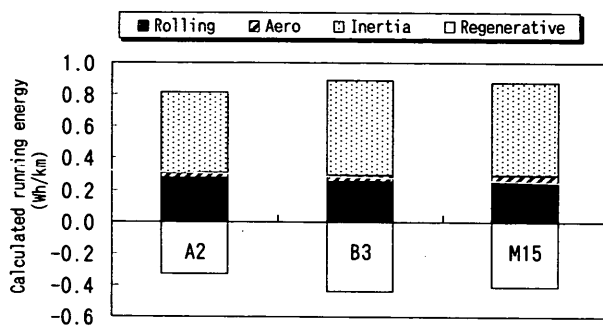


図8 要求エネルギーと回生可能なエネルギー

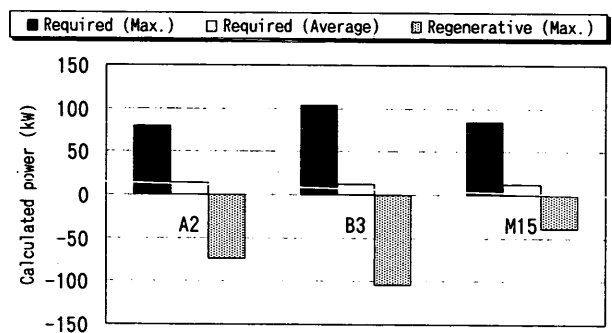


図9 要求パワーと回生パワー

上記の要件に基づき、動力システムの基本概念を検討した結果を図10に示す。連続的な高加速と効果的なエネルギー回生を図るために、最高出力40kWの車輪内蔵型モータ⁽²⁾4基を搭載する4輪駆動とし、電源は車載発電機(出力30kW)または路面埋込電線からの接触集電を選択して給電する。また発電機出力の平準化や電力回生制動のためのエネルギー蓄積デバイスとして、マンガンリチウム電池と電気二重層キャパシタを併用することとした。

図11に、上記の想定車両の加速能力と回生制動能力を示す。発進加速時には30km/hに達するまで6km/h/sでの連続加速、40km/hにおいても4km/h/sの加速が可能である。

図12に、上記想定車両と既存車両の同時発進・加速をシミュレーションした結果を示す。想定車両の加速度は5.5km/h/s(一定)としたが⁽⁸⁾、40km/hに達するまでの所要時間は既存車両の約半分である。また既存車両が40km/hに達する時点では想定車両は約10m先行するとの結果を得た。想定車両には、このような加速性能の改善による走行速度向上や信号停止回数の減少等が期待でき、発進停止の頻繁な運転条件に最適な動力性能を有するとの見通しを得た。

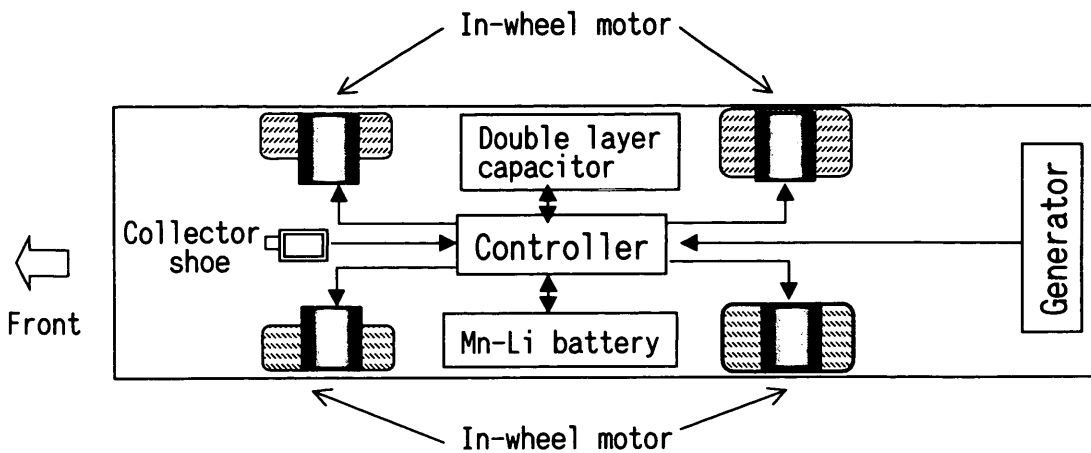


図 10 想定車両の動力システム構成の概念（平面図）

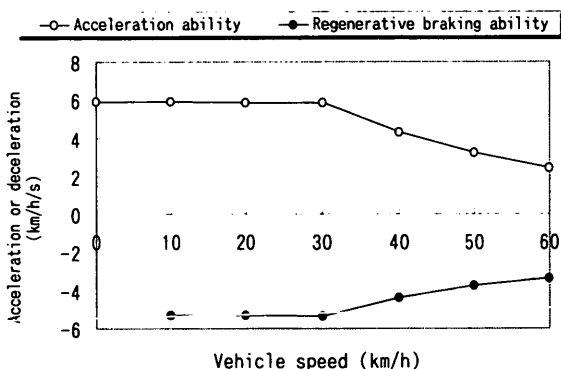


図 11 想定車両の加速・減速能力

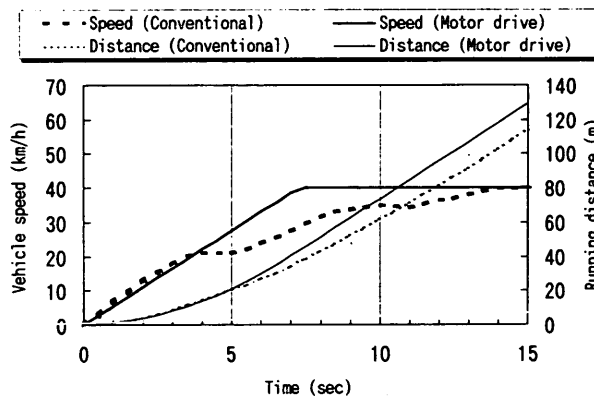


図 12 想定車両と既存車両の発進加速状況

4. 4. 要素技術性能の定量化

(1) 駆動モータシステム

車両としては、表 2 に示す中型路線バスを想定した。車両は各車輪に内蔵した電気モータ 4 基により駆動されるものとし、電源としては郊外で車載発電機（シリーズハイブリッド）による自立走行、市街地で外部集電走行が選択できるデュアルモード動力方式とした。

表 2 想定した路線バスの諸元

Item		Specification
Size (L, W, H) (mm)		9,000 × 2,300 × 3,000
Vehicle mass (kg)		7,800
Passenger & driver		60
Traction Motor System	Type	In-wheel AC Induction (4 units / vehicle)
	Output power	40 kW (× 4 = 160kW)
	Controller	PWM Inverter
	Acceptable volt.	DC 190V - 290V
Total reduction gear ratio		15.0 (Fixed)
Maximum vehicle speed		65 km/h

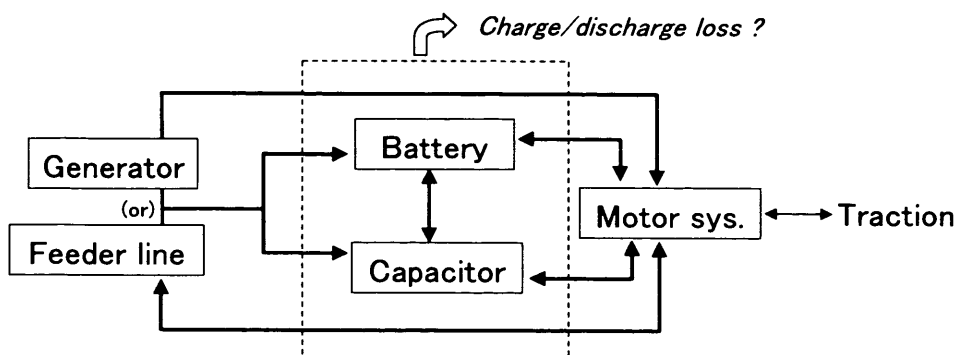


図 13 デュアルモード動力システムにおけるエネルギー流動

図 13 に、デュアルモード動力システムにおける電気エネルギーの流れを示す。主な構成要素はモータシステム（駆動モータ+制御器）、蓄電装置（二次電池、スーパーキャパシタ）、発電機等である。要求側からみた車上の消費電力量を CE_{REQ} (Wh) とすると

$$CE_{REQ} = EM_{IN} - EM_{OUT} + ES_{LOSS}$$

と表される。一方、電源側からみた消費電力量を CE_{SUP} (Wh) とすると

$$CE_{SUP} = EG_{OUT} + (EF_{IN} - EF_{OUT} + EF_{LOSS}) + (ES_{OUT} - ES_{IN} + ES_{LOSS})$$

と表され、当然ながら、 $CE_{REQ} = CE_{SUP}$ である。

但し CE は消費電力量、 EM 、 ES 、 EG 、 EF は各々モータシステム、蓄電装置、車載発電機、集電装置の通過電力量であり、また添字の IN は入力、 OUT は出力、 $LOSS$ は内部損失を示す。

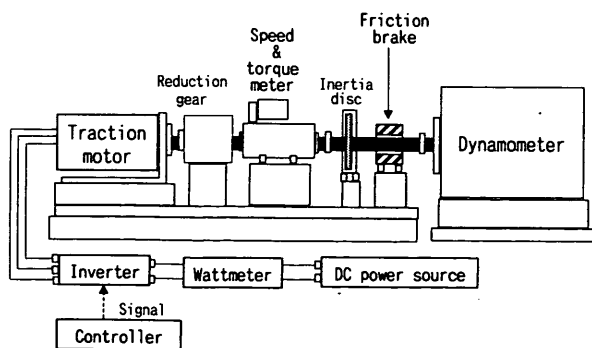


図 14 単体台上運転装置の概要

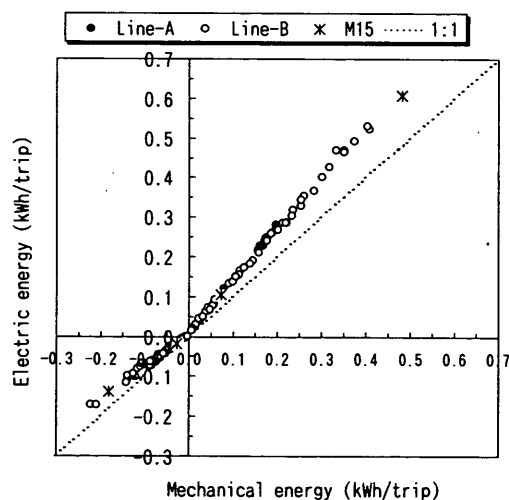


図 15 ショートリッパ®毎の電力量と機械仕事量

エネルギー消費量の削減のためにはモータシステムのエネルギー変換効率向上、回生電力量の最大化、蓄電装置の充放電損失低減、また発電機効率や集電効率の改善が重要である。さらに遡れば燃料精製や送変電等の効率も考慮すべきであるが、本研究では車上の電気エネルギー流動のみを検討対象とした。

図 14 に、想定車両の動力システムを模擬的に設定した台上運転装置を示す。定盤の一端に駆動モータ 1 基を固定し、ダイナモメータに接続して車両の加減速に伴う走行抵抗の 1/4 相当のトルクを発生させた。ダイナモの回転速度とトルクから機械出力を求め、モータシステムの出入電力を積算電力計で測定した。

図 15 に、各ショートトリップ（発進から次の停車まで）毎の機械仕事量とモータシステム要求/回生電力量を示す。両者の比からトリップ毎に求めたモータシステムの平均的な電気-機械変換効率は、要求（駆動）側では 43~80%（全平均 70%）、回生（制動）側では 42~85%（全平均 73%）であるが、仮に永久磁石式同期モータシステムを採用すれば変換効率は 5~10 ポイント改善されるものと考えられる。また要求電力量に対する回生電力量の比率は 2~3 割であったが、高性能の蓄電装置を採用すればより多くの運動エネルギーが電気エネルギーとして回収できると考えられる。

(2) 蓄電装置

電池、キャパシタ等の蓄電装置は自立走行時の回生電力吸収に不可欠である。また実走行中の平均要求電力（パワー）は最大値の 1/3 程度に過ぎないため、蓄電装置を活用して車載発電機や外部給電設備の出力を平準化し電源容量を必要最低限とすることが望ましい。そこで蓄電装置の機能分担や充放電損失について検討するため、図 16 に示すように、モータシステムを充放電試験装置に置き換え、発電機（直流電源で代用）、鉛酸電池（40kW/3.2kWh）、キャパシタ（70kW/0.1kWh）を接続して模擬的なシリーズハイブリッドシステムを構成した。

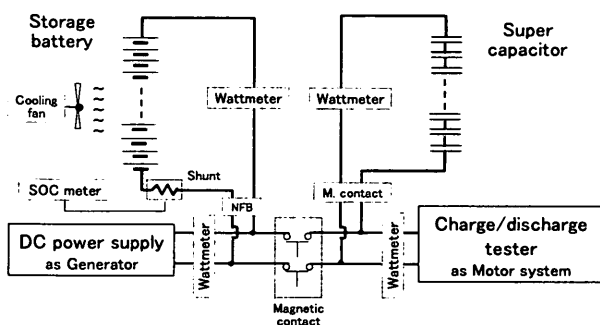


図 16 模擬ハイブリッドシステム実験装置の構成

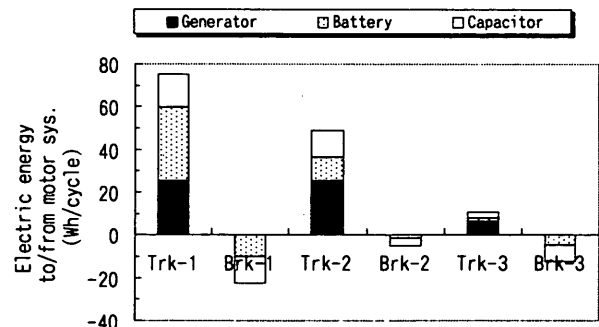


図 17 1トリップにおける各要素間の電気エネルギー移動

図 17 に、解析結果の一例として、トリップ中の加速・減速で分けた小区分毎の要求電力量、回生電力量に対する各要素の供給・吸収の分担を示す。例えば最初の加速時はモータシステムの要求電力量のうち約 35%が発電機、45%が電池、20%がキャパシタが供給分担し、回生時は電池とキャパシタが回生電力量のほぼ半分ずつを吸収すること等が明らかになった。また本装置を用いて定電流

充放電時の端子電圧変化から蓄電装置の内部抵抗を求め、それに電流の自乗値を乗じて積分することにより実走行時に蓄電装置で生じる損失電力量を算定可能とした。

4. 5. 燃費評価プログラムの作成と燃費の予測

以上の実験結果に基づき、任意の要素で構成されるデュアルモード動力システムの燃費を予測する計算プログラムの処理手順を検討した。その結果の一部として、図18に各要素の入出力電力量や充放電損失を計算するためのフローチャート、図19に電池についての計算出力例を示す。これによって、供給電力量に対する充放電損失の比率は5%前後である等の結果を得た。さらに前年度の調査に基づいて車載発電機効率や送变电効率等を設定し、また永久磁石式同期モータや高性能蓄電装置の採用を前提として実走行燃費を試算すると、ハイブリッド走行で3.8~4.6km/リッター、外部集電走行で4.1~5.1km/リッター(軽油換算)であると予測された。したがってこれらを組み合わせた都市域でのデュアルモード走行における燃費は、従来型バスの実用燃費とされる2~3km/リッター⁽⁹⁾⁽²¹⁾の2倍程度の値に到達可能であると考えられる。

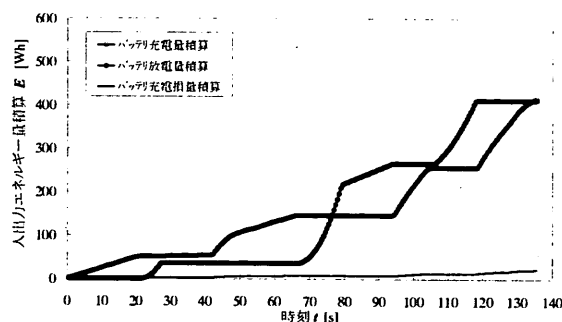
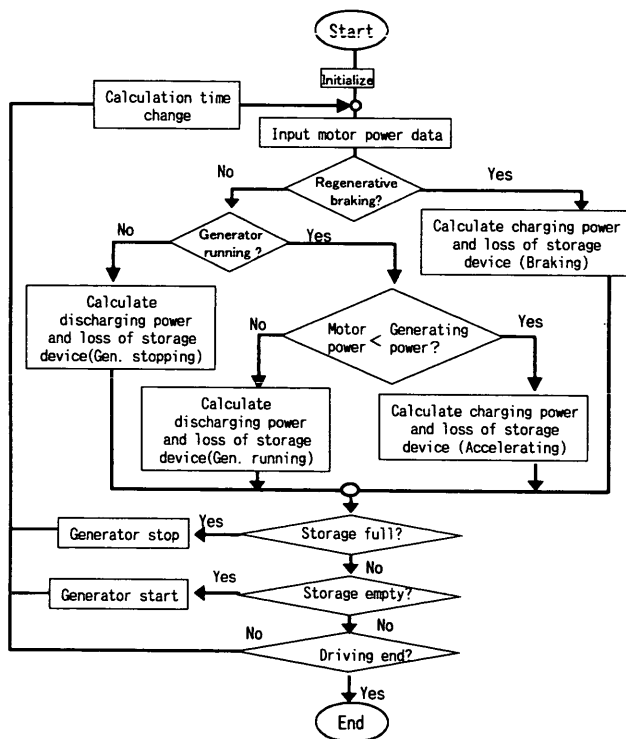


図18 燃費予測計算のフローチャート(一部)

図19 電池のエネルギー-入出と充放電損失の計算結果例

4. 6. デュアルモード動力バス導入のモデル化

デュアルモード動力バスの導入先としては、首都・京阪神・中京の三大交通圏や、人口が数十万~百万人規模の地方主要都市が考えられる。図20に、首都交通圏、中京交通圏、京阪神交通圏における交通機関別旅客輸送人員を示す⁽¹⁰⁾。首都交通圏では全体の約60%、京阪神交通圏では50%近くが鉄道を利用しているが、中京交通圏では鉄道利用者は20%程度であり、逆に自家用車の利用が

70%強と圧倒的に多い。しかし何れの交通圏でも路線バスのシェアは数%程度に留まっている。

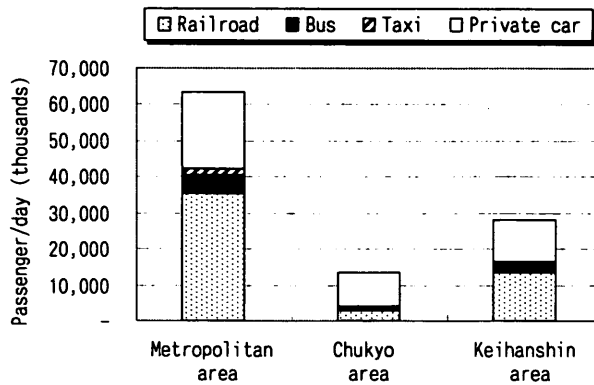


図 20 三大交通圏の交通機関別輸送人員⁽¹⁰⁾

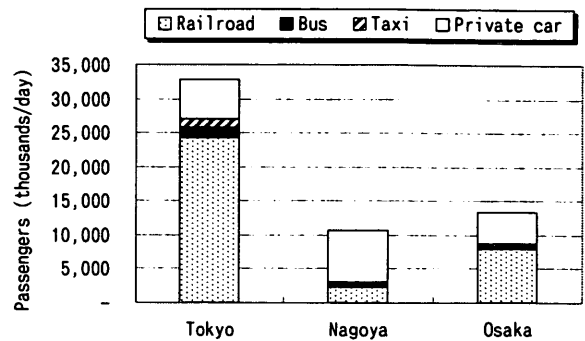


図 21 三大都市の交通機関別輸送人員⁽¹⁰⁾

図 21 に、それらの交通圏の中核である東京、名古屋、大阪の各市内における交通機関別旅客輸送人員を示す⁽¹⁰⁾。東京、大阪では鉄道の比率が更に高まり自家用車の比率は低下しているが、名古屋では市内交通においても自家用車のシェアが約 70%を保っており自家用車依存度が非常に高いことが伺える。バスの比率は地下鉄の発達等もあって首都交通圏では全体の約 60%、京阪神交通圏では 50%近くが鉄道を利用しているが、中京交通圏では鉄道利用者は 20%程度に留まっており、逆に自家用車の利用が 70%強と圧倒的に多い。一方、バスのシェアはやはり 5%前後に留まっている。これは地下鉄網の発達も一因と考えられるが、自由度が高くきめ細かな輸送が可能という路線バスの特長が大都市内の交通に十分に活かされていないことの表れと解釈できる。

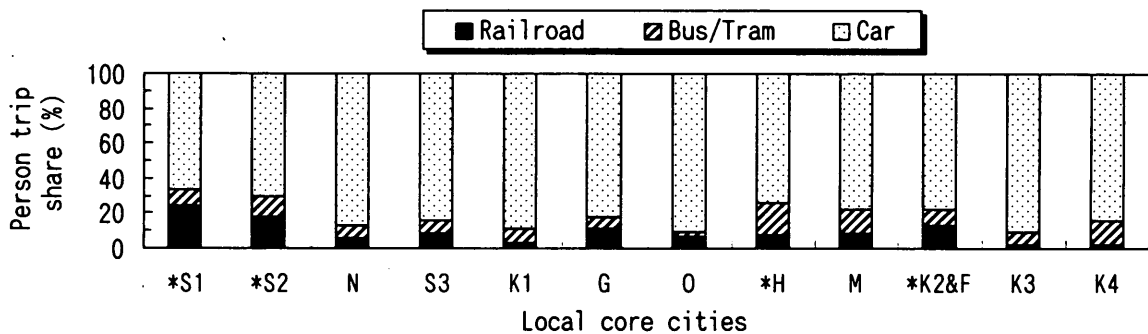


図 22 地方中核都市圏における交通機関別の市内トリップ数 (*は政令指定都市)⁽¹⁰⁾

図 22 に、地方中核都市圏における市内トリップの交通機関別のシェアを示す⁽¹⁰⁾。これらの都市圏では鉄道網が発達しておらず輸送需要も少ないので、札幌等の政令指定都市を除くと鉄道のシェアは非常に低い。また本来なら鉄道に代わるべき路線バスのシェアも（路面電車が在る都市はそれも含めて）10%前後に留まり、ほとんどのトリップを乗用車に依存しているのが実状である。

しかしながらこれらの都市域は人口が集中し交通需要自体は多いので、デュアルモード動力バスの導入候補地となり得る地域である。そこで、これらの地域におけるバス路線の実態をもとに、モデル化を検討することとした。

図 23 に、大都市の公営バスの路線数と営業距離を示す。路線数は 100~150、営業距離は 300~700km

である(11)~(20)。ただし、東京や京都では公営バスとほぼ同規模の民営バス路線が存在する。

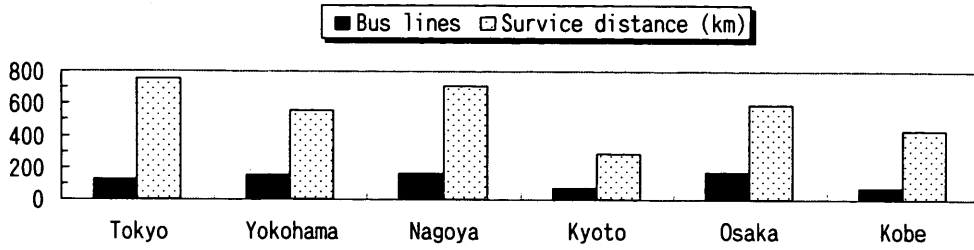


図 23 大都市公営バスの路線数と営業キロ数 (11)~(20)

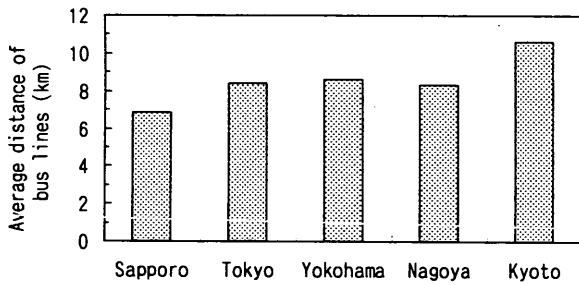


図 24 大都市公営バスの平均路線長 (11)~(20)

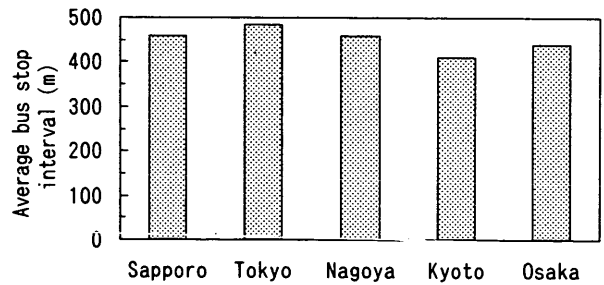


図 25 大都市公営バス路線の平均停留所間隔 (11)~(20)

図 24 に、大都市の公営バス路線の平均路線長を示す。路線長は概ね 8 km 前後で、郊外への観光路線を抱える京都では路線長がやや長くなっている。図 25 に、それらの平均停留所間隔を示す。停留所間隔は 400m~500m と、地下鉄の約半分程度であり、文字通りきめ細かな輸送が行われていることを示している。このような大都市、地方主要都市におけるデュアルモードバスの導入路線のモデルとして、図 26 および表 3 に示すような二種類の路線を想定した。

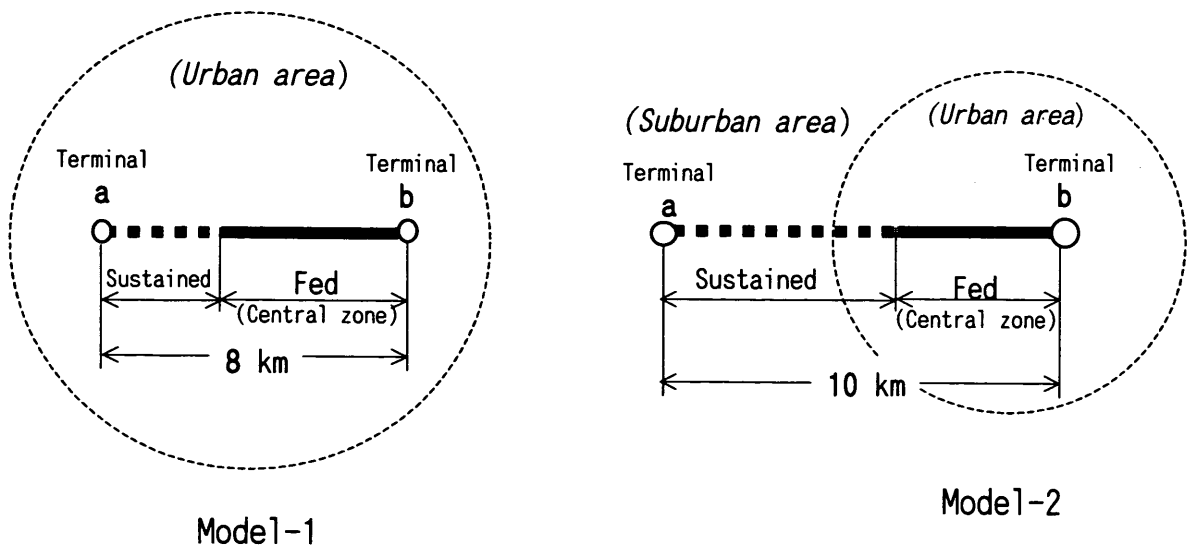


図 26 デュアルモードバスの導入路線モデル

表3 デュアルモードバスの導入路線モデルの運行形態

Line type	Line distance (km)	Day	Deoarture frequency (time/hr)			Total running distance (×1,000km/year)
			Daytime	Rush hour	Early morning, midnigt	
Model-1	8.0	Weekday	10	20	6	910
		Saturday, holiday	10	10	6	
Model-2	10.0	Weekday	6	12	3	734
		Saturday, holiday	6	6	3	

モデル1は大都市の市街地内を起終点とし、極めて多い輸送需要に対して稠密なダイヤで運行する路線である。これに対してモデル2は地方主要都市の郊外部分から都心部に直通するやや長い路線で、運転本数は需要に応じてモデル1の6割程度と仮定した。

これらの路線で運行するバスは、全長11m、車両総重量15tクラスの大型路線バスであると仮定した。図27に、デュアルモードバスの実走行燃費を従来型バスと比較して示す。従来型バスの燃費は文献調査結果から2.1km/リッター⁽¹⁰⁾⁽²¹⁾とした。一方、デュアルモードバスの燃費は、前述の中型バス想定の実験結果から得た車上消費電力量を大型バス相当値に換算し、自立走行時は車載発電機、外部集電走行時は送変電、発電所や燃料精製等の効率を考慮した軽油換算値を示す。さらに後者については効率の高い永久磁石式交流モータやリチウムイオン電池、低ころがり抵抗タイヤ等の採用により要求電力量の低減と回生効果の向上を図った「先進型」も想定した。デュアルモードバスの燃費は従来型バスに比べ、自立走行時で約1.3倍、外部集電走行時で約2倍の値を示している。また先進デュアルモード式では自立走行時で約1.6倍、外部集電走行時で約2.3倍とさらに高い値を示す。

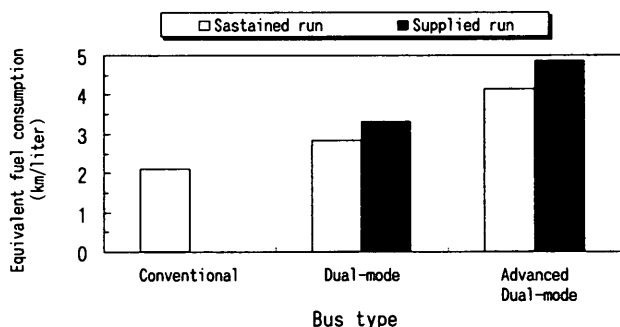


図27 デュアルモードバスの実走行燃費

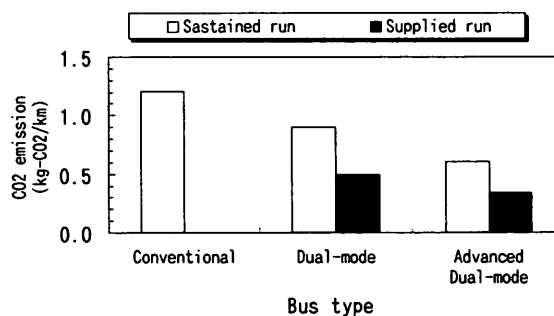


図28 デュアルモードバスの走行1km当たりCO₂排出量

図28に、それらの走行1km当たりCO₂排出量を示す。デュアルモードバスの自立走行時の排出量は燃費の向上に反比例して低減するが、外部集電走行時は、CO₂排出が少ない一次エネルギーを併用する商用電源利用の効果によりさらに低減され⁽²²⁾、先進デュアルモード式バスでは従来型バスの30%弱の排出量となる。

図29に、デュアルモードバス（以下、「デュアルモードバス」とは上記の「先進デュアルモードバス」を指すこととする）の自立走行と外部集電走行の比率を変えて運行した場合の走行1km当たりCO₂排出量を示す。排出量は自立走行の比率が小さくなるほど少なくなるが、路線運行において車載機器と地上設備の両方を有効活用するためには、自立走行区間と外部集電走行区間を概ね

半々程度に設定することが望ましいと考える。そこで図 30 に示すように、モデル1では路線長の40%、モデル2では60%を自立走行区間とし、残りを外部集電走行区間とした。

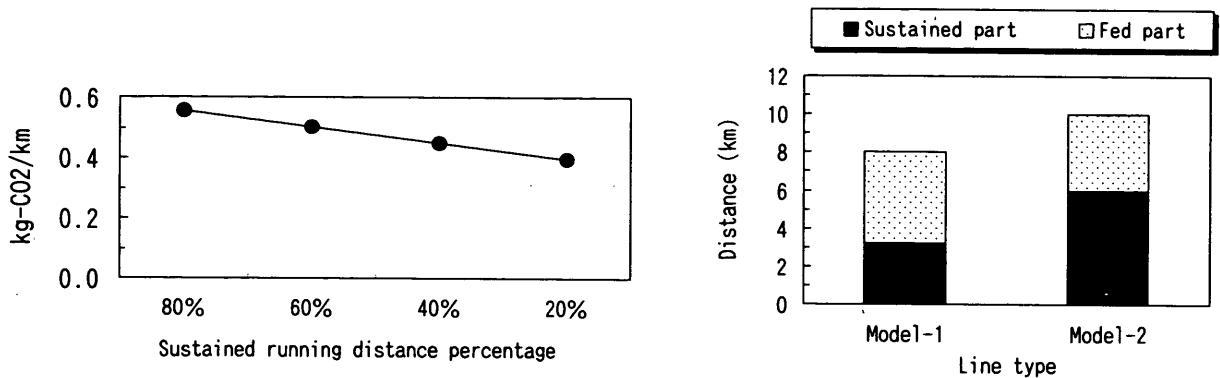


図 29 先進デュアルモードバスの自立走行比率とCO₂排出量

図 30 モデル路線の自立/集電区間構成

4. 7. デュアルモード動力バス導入によるCO₂排出量低減効果の推測

図 31 に、これらのモデル路線におけるデュアルモードバスの運行によって生じる1年間当たりのCO₂総排出量予測値を、従来型バスと比較して示す。モデル2では、従来型バスの運行本数が表1の2/3でありデュアルモードバスの導入と同時に1.5倍に増発して乗客の誘発を図るケースも設定した。ここでは参考のため、先進型路面電車(以下、「LRT」という。)を導入した場合の排出量予測値も併記する。LRTは1編成2車体の連接車を想定し、乗車定員が多いため運転本数はデュアルモードバスの約8割とした。このLRT1編成1km走行当たりの消費電力量は回生有効時で1.55kWh/km、回生無効時で2.15kWh/kmと仮定した⁽⁹⁾。

モデル1の場合、運行に関わるCO₂排出量は、従来型バスをデュアルモードバスに置き換えることにより約1/3、モデル2の場合は約4割に低減される。またモデル2で増発されるケースでは、増発によるエネルギー消費量の増加により低減量が相殺され少なくなるが、それでも従来型バスの6割程度となり、デュアルモードバス導入による排出抑制効果は明らかである。一方LRTを導入する場合は、運行に関わるCO₂排出量はデュアルモードバスとほぼ同等になるとの結果を得た。

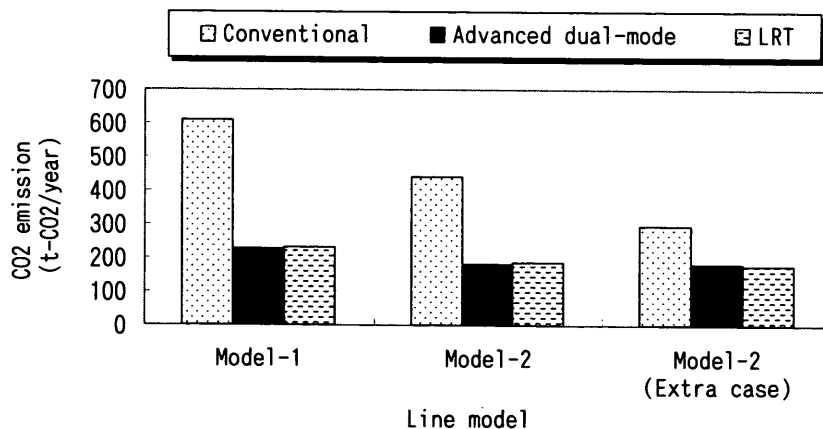


図 31 モデル路線でのバスまたはLRTの運行による年間CO₂総排出量

図 32 に、1 路線の運行に必要なバスまたは L R T の車両製造とインフラ整備による 1 年間当たりの CO₂ 排出量を、モデル 1 を例として示す。必要車両数は表 3 の路線長と運行頻度から算定し、車両 1 両当たりの製造、路線 1 km 当たりのインフラ整備に関わる CO₂ 排出量と、それらの耐用年数は、サブテーマ 1 の研究で得られた数値に基づいた⁽²³⁾。ただしデュアルモードバスの車両製造とインフラ整備に関わる CO₂ 排出はトロリーバスと同等であると仮定した。車両製造に関わる CO₂ 排出量は大差ないが、インフラ整備では従来型バスが皆無であるのに比べ、デュアルモードバスは 50 t-CO₂/年、L R T は 170 t-CO₂/年の排出をもたらす。したがって運行以外に関わる部分をみると、従来型バスに比べ、デュアルモードバスは 2 倍弱、L R T は約 4 倍の排出をもたらすこととなる。

表 4 モデル路線におけるバスまたは L R T の車両製造、インフラ整備による CO₂ 排出量 (モデル 1、t-CO₂/年)

CO2 origine	Vehicle manufacturing	Infrastructure	Total
Conventional bus	55.37	0	55.37
Advanced dual-mode bus	68.31	30.11	98.42
LRT	55.36	170.34	225.70

図 32 に、これら車両製造とインフラ整備による排出量を、運行による排出量に加算して各タイプの路線 1 年間当たりの CO₂ 総排出量とした予測値を示す。従来型バスに比べ、デュアルモードバス導入ではモデル 1、モデル 2 とともに約 50% 削減される。一方、L R T 導入の場合はモデル 1 では 30% 削減されるがモデル 2 では約 10% 弱の削減に過ぎず、モデル 2 の増発ケースでは逆に排出量が従来型バスより増加することとなる。デュアルモードバスと L R T を比較すると、表 3 の輸送規模では、乗用車から両者への転換量に大差が生じない限り、インフラ整備に関わる排出量が格段に少ないデュアルモードバスを導入する方が、トータルの CO₂ 排出量削減に有利であると考えられる。

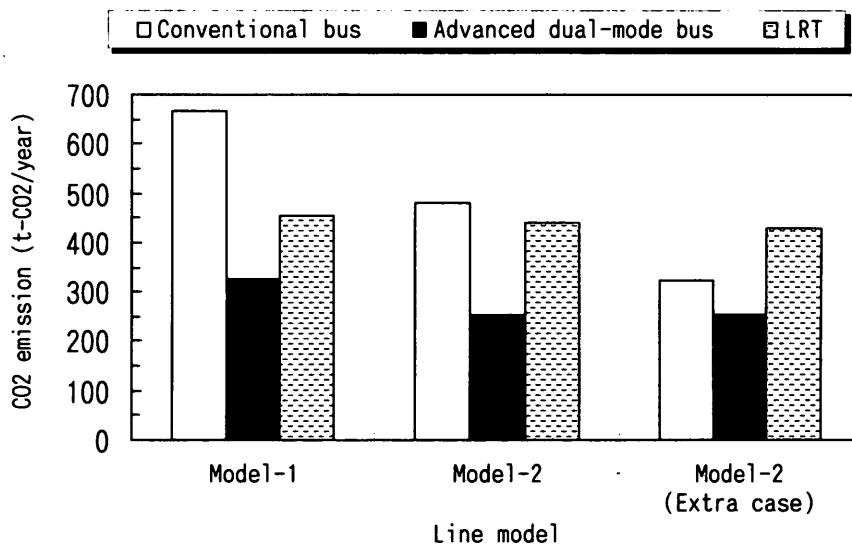


図 32 モデル路線でのバスまたは L R T の運行および車両製造、インフラ整備による年間 CO₂ 総排出量

表5に、国内の27の都市においてこのようなデュアルモードバスの導入が可能と考えられる路線数を示す。モデル1は大都市、モデル2は地方主要都市を対象として、既存の鉄道、バス路線や交通需要等を調査した結果に基づいて導入路線数を仮定した。モデル1については地下鉄網が発達している東京、大阪などの都市は少なく、都市規模の割に鉄道路線が粗な名古屋、京都や福岡などの都市では多めの設定とした。また交通需要が多い割にバス輸送が特に低調とであると判断される地方主要都市ではモデル2の増発ケースを設定した。

さらに、デュアルモードバス導入によりモデル路線上の乗用車による旅客移動の一部がバスに転移することによるCO₂排出量低減効果を推定するために、モデル路線上におけるバスと乗用車の現状での平均乗車人員、および両者の輸送比率（乗用車輸送量のバス輸送量に対する倍数）を表6に示すように想定した。これは各種統計資料に基づいて、平均乗車人員は路線バスが10～15人、乗用車が1.5人とし、バス路線上の旅客移動において乗用車利用者がバス利用者の5～15倍であると仮定して⁽¹⁰⁾、乗用車の総走行距離（台・km）およびその削減量を推定するためのものである。

表5 デュアルモードバスの導入可能路線数

Line model	Apply 1 Line	Apply 2 Lines	Apply 3 Lines	Total number of applied lines
Model-1	-	4 cities	4 cities	20 Lines
Model-2	4 cities	10 cities	2 city	30 Lines
Model-2 (Extra case)	19 cities	1 city	-	20 Lines

表6 バス、乗用車の平均乗車人員と輸送比率

Line model	Passenger/vehicle		Car passenger trip / Bus passenger trip
	Conventional bus	Private car	
Model-1	15	1.5	5
Model-2	10	1.5	10
Model-2 (Extra case)	10	1.5	15

図33に、表5に示した路線の全てにおいて従来型ディーゼルバスを先進デュアルモードバスに置き換え、さらに乗用車利用者の一部がバス利用に転換した場合の1年間のCO₂排出量低減量合計を示す。乗用車の平均燃費は12km/リッターと仮定した。なおインフラ整備に関わる排出量については、デュアルモードバスの給電設備だけでなく、乗用車についてもその増加に対応する道路整備が必要となることから、ここでは考慮しないこととした。

乗用車からの転換率が数%程度では、デュアルモードバスへの置換による効果と乗用車走行削減による効果が半々で、CO₂排出量低減量も年間30kt程度に留まる。しかし転換率が増大するとC

CO₂排出量は大幅に低減され、その大半が乗用車走行削減の効果によるものとなる。仮に乗用車利用者の20%がバスに乗り換えるとすると、年間のCO₂排出量は約140kt低減され、50%が乗り換えると約330kt低減されることとなる。これは乗用車全体の年間CO₂排出量のそれぞれ約0.1%および約0.2%に相当する。

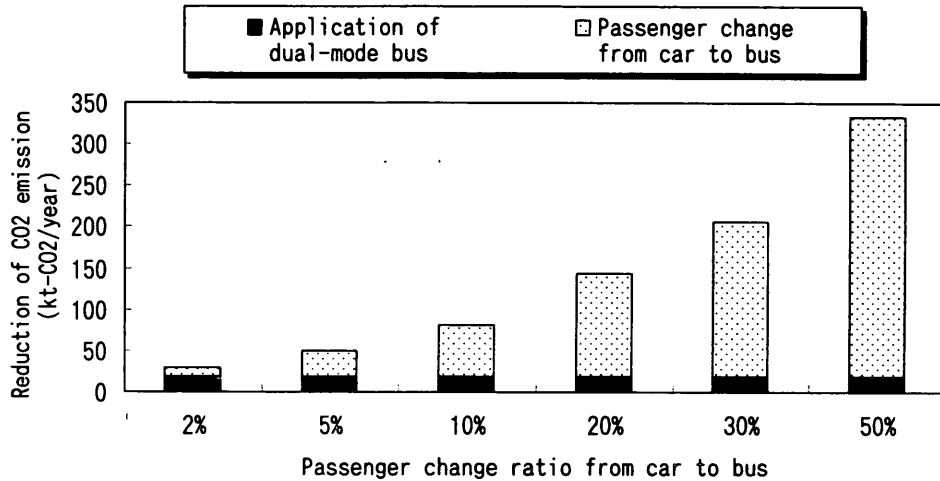


図 33 先進デュアルモードバスを導入可能な全路線で運行した場合のCO₂排出低減量の予測

しかし現実問題としては、利便性が非常に高い乗用車の利用者に対してバスへの乗り換えを促すことは非常に困難である。そのため、デュアルモードバスを導入する場合は、その低環境負荷だけでなく、加減速のスムーズさや車内の静粛性など乗客にとってのメリットを強調すると共に、バスレーン確保や、場合によってはマイカー規制等の利用促進策も必要になると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

- (1) デュアルモード動力システムに応用可能と考えられる構成要素として、駆動電動機、制御装置、集電装置、車載電源装置、エネルギー蓄積装置等の開発状況を明らかにした。
- (2) 既存の路線バス車両を用いて営業路線上で実車走行を行い、得られた車速データを解析して、加速度、減速度等の要求動力性能を明確にするとともに、エネルギー回生の可能性について考察した。
- (3) 都市用路線バスに適するデュアルモード動力システムの基本構成を検討し、加速性能等を計算により予測して既存車両と比較した。
- (4) 路線バス用に車載電源または外部電源で車両駆動するデュアルモード動力システムをとり挙げ、各構成要素のエネルギー出入を解析し、それらの効率を定量的に評価する手法を示した。
- (5) デュアルモード動力システムの燃費を計算により予測するプログラムを作成し、それによる試算の結果、都市域走行において従来型路線バスの2倍の燃費を達成する技術的な見通しを得た。
- (6) 三大都市交通圏および地方主要都市の交通状況と路線バス輸送の実状を踏まえ、デュアルモードバスを導入する二種類の路線モデル形態を検討した。
- (7) デュアルモードバスの燃費および単位走行距離当たりのCO₂排出量を、自立走行と外部集電走行の比率を変えて算定し、モデル路線で運行した場合の年間CO₂排出量を従来型バスと比較した。それによって、デュアルモードバス1路線当たりの運行に関わる年間CO₂総排出量は従来型バス

路線の30%~60%となると推計した。

(8) デュアルモードバスをモデル路線に導入した場合のCO₂排出量は車両製造、インフラ整備に関わる部分を含め、従来型バスより約50%削減され、またLRTの導入と比較しても排出量削減効果が大きいものと予測した。

(9) 大都市、主要都市におけるデュアルモードバスの導入が可能なモデル路線数を仮定し、これらにおける従来型バスの置き換えに加えて乗用車利用者の一部バス転換によるCO₂排出の低減量を試算した。その結果、乗用車からバスへの転換率が高くなるとCO₂低減効果は大幅に上がり、年間の総排出量は20%の転換で約140kt、50%の転換で約330kt低減されると推定した。

6. 引用文献

- (1) 三菱自動車工業(株)第34回東京モーターショー配布資料
- (2) 澤藤電機(株)第34回東京モーターショー配布資料
- (3) 物産交通システム(株)STREAM資料
- (4) (株)シーシーアール資料
- (5) 神戸製鋼(株)ホームページ
- (6) トヨタ自動車(株)IMTS資料
- (7) 吉田他、交通安全公害研究所報告第2報P.39、昭49
- (8) 大野他、人間工学第29巻特別号
- (9) 国土交通省内部資料
- (10) 平成13年度都市交通年報、(財)運輸政策研究機構(国土交通省監修)
- (11) 加藤博和ホームページ、<http://orient.genv.nagoya-u.ac.jp/kato/Jkato.htm>
- (12) 札幌市交通局ホームページ
- (13) 仙台市交通局ホームページ
- (14) 東京都交通局ホームページ
- (15) 横浜市交通局ホームページ
- (16) 名古屋市交通局ホームページ
- (17) 「市バス 地下鉄」、名古屋市交通局、平成14年12月
- (18) 京都市交通局ホームページ
- (19) 大阪市交通局ホームページ
- (20) 神戸市交通局ホームページ
- (21) バスラマインターナショナル75(2003年1月、ポルト出版)
- (22) 二酸化炭素排出量調査報告書、環境庁地球環境部、平成4年5月
- (23) 工藤他、第21回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集(2002年6月) pp.91~96

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表(学術誌、書籍)

<学術誌(査読あり)>

なし

<学術誌(査読なし)>

- ① M. Hayashida, K. Narusawa, : SAE Paper No. 2001-01-0784 (2001)"Electricity Flow Analysis in the Series Hybrid System by the Charge-discharge Tester"

<書籍>

なし

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

- ① 林田守正、成澤和幸：電気自動車研究会第6回研究発表全国大会、概要集 P.83、「スーパーキャパシタによるシティーコミュタカーのエネルギー回生向上」、平成12年7月
- ② 林田守正、成澤和幸：第30回交通安全公害研究所研究発表会、講演概要 P.91、「電気-ハイブリッド動力システムの高効率化に関する研究(第3報) -都市内運転におけるシリーズハイブリッドシステムのエネルギー効率の評価-」、平成12年11月
- ③ 林田守正、成澤和幸、紙屋雄史、斉藤 亮：電気自動車研究会第7回研究発表全国大会、概要集 P.15 (2000)「充放電試験装置によるシリーズハイブリッドシステム内エネルギー流動の解明」
- ④ 林田守正、成澤和幸：第1回交通安全環境研究所研究発表会、講演概要 P.113、「都市域における走行解析に基づくハイブリッドバスのエネルギー効率向上方策」、平成13年11月
- ⑤ 林田守正、成澤和幸、紙屋雄史：日本機械学会第10回交通・物流部門大会、講演論文集 P.263 (2001)「都市交通車両用シリーズハイブリッドシステム内の電力流動に伴うエネルギー損失」
- ⑥ 林田守正、成澤和幸、紙屋雄史：自動車技術会2002年秋季大会学術講演会、前刷集 No.99-01、「都市バスの実走行解析に基づくシリーズハイブリッド方式の活用方策」、平成14年11月
- ⑦ 林田守正、成澤和幸：中国清華大学自動車研究所研究会、「Application of Series Hybrid Power System to Urban Traffic Vehicles」、平成13年12月

(3) 特許出願

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表、報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、国土交通省を通じ、本研究の成果の広報、普及に努める。