

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

環境エネルギー部

林田 守正 成澤 和幸

1. まえがき

我が国の二酸化炭素排出のうち約 20%は運輸部門であり、自動車からの排出量がその大半を占めている。温暖化対策を短期間で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り、その最も現実的な転換の受け皿はバスであると考えられる。本研究の目的は、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、路線バスに最適な新方式動力システムを検討し、その導入による環境負荷低減効果を明らかにすることである。本報では、路線バス車両を用いて都市域の営業路線上で実車走行を行い、車速データから加減速の挙動を解析してバス特有の走行実態を明らかにした。この結果に基づいてシリーズハイブリッド方式の中型路線バスを想定し、エネルギー回生の可能性等について計算と模擬実験により考察した。

2. 路線バス走行実態の調査

2.1. 調査対象路線と測定方法

図 1 に、調査を行ったバス路線の配置を示す。

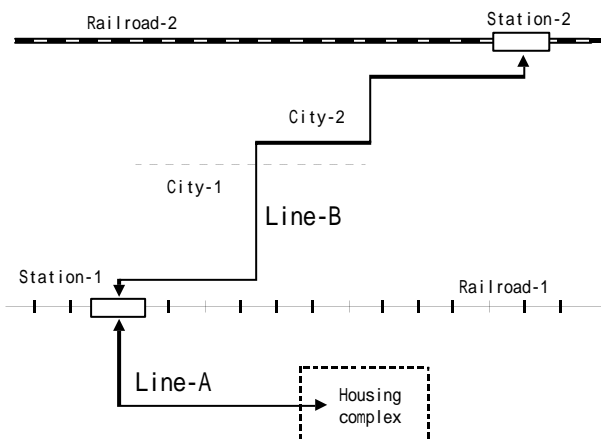


図 1 走行実態調査を行ったバス路線

路線 A は東京近郊の鉄道の駅と住宅団地を結ぶ短距離路線であり、路線 B は市街地を挟んで並行する鉄

道の 2 つの駅を結ぶ路線である。表 1 にそれらの路線の走行条件を示す。

表 1 調査対象としたバス路線の走行条件

Line	Distance	Bus stop interval (Average)	Speed limit
A	3.12 km	0.34 km	30 km/h
B	8.23 km	0.33 km	40 km/h

調査に当たっては、路線バス車両を借り切って実際の営業運行と同様の路上走行を各路線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 10.5 m、エンジン出力 169 kW、定員 77 名の機械式変速機付ディーゼルバスである。

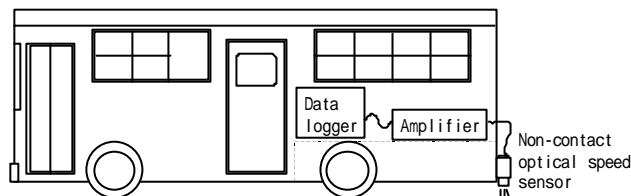


図 2 実車路上走行における車速データ収集システム

測定方法としては、図 2 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に記録して測定後に詳細な解析を行った。

2.2. 測定結果と考察

図 3 に、各コースにおける走行距離 1 km 当たりの発進・停止の頻度を示す。その頻度は路線 A、路線 B とともに 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 モード⁽¹⁾よりも 2 回/km 程度上回る結果を得た。これはトラック等の他の大型車と比べて、停留所での停車・発進が加わることで、立席客への配慮から加速度が制限されるため赤信号等で停止する確率が高まることによるものと考えられる。

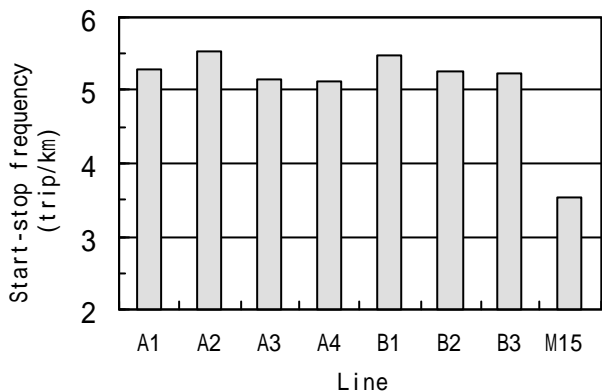


図3 路線バスの走行距離当たりの発進・停止頻度

図4に、各路線における平均車速および停車時間率をM15モードと比較して示す。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。また路線Aでの停車時間率はM15モードよりやや小さい結果が得られた。

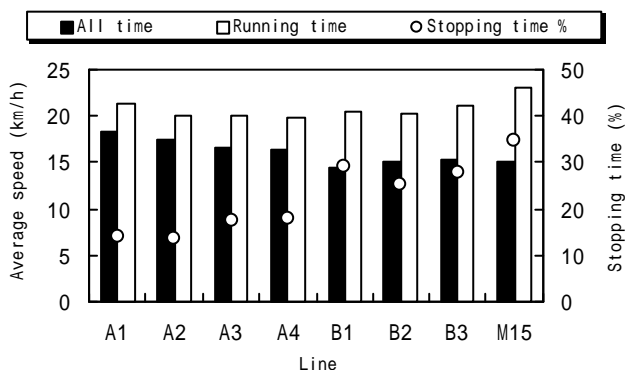


図4 路線バスの平均車速と停車時間率

各路線の走行は、停車状態から発進加速し途中の加速減速を経て減速停止に至る「ショートトリップ」(以下、「トリップ」という)という走行単位の集合であると見なすことができる⁽²⁾。図5に路線Bにおける各トリップの発進加速時の平均加速度、図6に減速停止時の減速度の分布を、車速変化領域別に示す。図中の各プロットは1回の連続した加速または減速の過程における平均値を示す。加速は変速操作を挟んで断続的に行われるため、発進直後の加速度は最大の場合で5 km/h/s (約0.14G)を超え、M15モードの約2.5倍という高い値を示すが、40km/h付近では2 km/h/s

に低下する。減速停車の場合は40km/h付近から停止まで連続的に減速し、平均減速度は4~5 km/h/s程度で、やはりM15モードの2倍程度の値を示す。

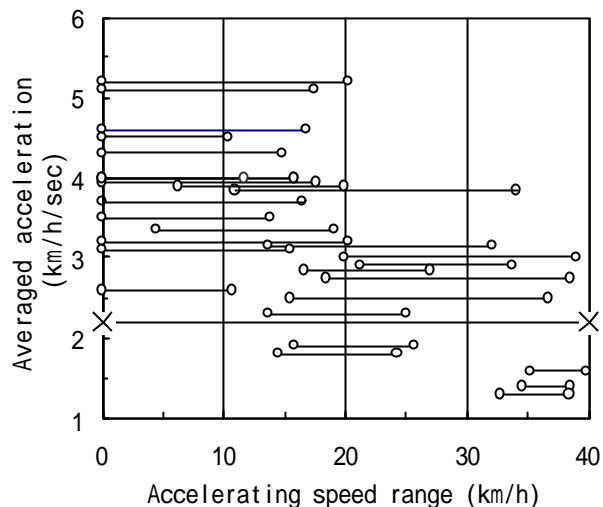


図5 発進加速時の平均加速度分布 (○: 路線B、×: M15モード)

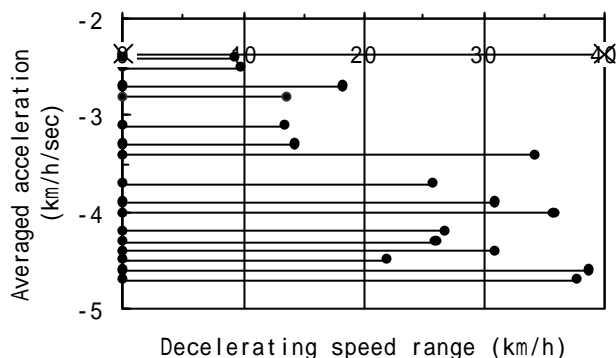
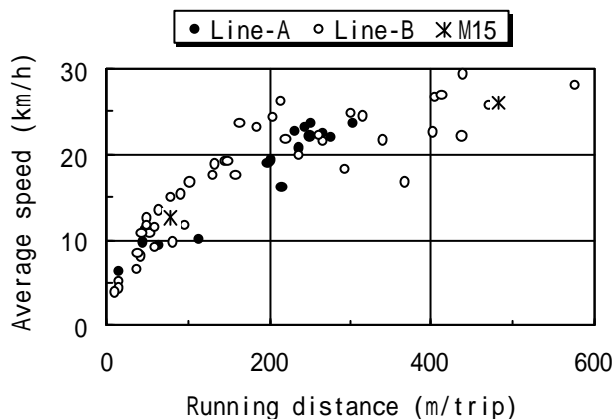


図6 減速停止時の平均減速度分布 (○: 路線B、×: M15モード)

図7に、個々のトリップの走行距離と平均車速を示す。路線Aのトリップ距離は概ね100m以下と、200~250mの範囲に集中している。



これに対し、路線Bのトリップ距離は10~600mの広範囲に分布し、その過半数が200m以下である。これは路線Aに比べ路線が長いこと交通量や信号機・停留所間隔等のバラツキが大きく、渋滞区間では数多くの短小トリップが発生するためと推定できる。また平均車速は概ね走行距離が長いほど高くなるといえるが、車速が40km/h以下に制限されているので、距離200m以上のトリップではその傾向が弱まる。

図8に、それらトリップの内の一つにおける発進加速時の車速変化域別の最大値と平均値を例示する。発進から20km/hまでは2速、35km/hまでは3速、それ以上は4速を使用して加速している。例えば2速で加速中の瞬間最大加速度は6.5km/h/secに近く、これは立席乗客が安全に姿勢を保てる限界に近い値と考えられる⁽³⁾。しかし平均加速度は約5km/h/secとなる。また発進から40km/hに達するまでには途中2回の変速操作で加速が中断されるので、0~40km/hのトータルの平均加速度は3km/h/sに留まっている。

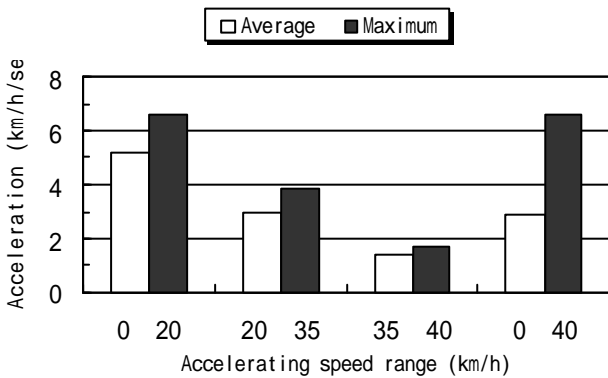


図8 変速段毎の平均加速度と最大加速度

エンジンと機械式変速機を組合せ、摩擦ブレーキを主に使用する既存のバスではこのような加速の中断を余儀なくされるため、加速能力や乗り心地(特に立席乗客)の低下を招いていると考えられる。

3. 新しい方式の路線バス用動力システムの検討

以上の調査結果を踏まえ、新しい形の都市用路線バス用動力システムについて考察するためのベースとして、先ず表2に示すような中型バスを想定した。

図9に、表2の車両で路線A、路線BおよびM15モードを運転した場合の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に達するが、それに比べて平均値は15kWと低い。一方、制動時の回生パワーの最大値も約100kWとなる。

表2 想定した中型路線バスの車両諸元

Item	Specification
Size (L, W, H) (mm)	9,000×2,300×3,000
Passenger & driver (person)	60
Vehicle mass (kg)	7,800
Coefficient of rolling resistance (N/N)	0.015
Coefficient of air resistance (N/m ² /(km/h) ²)	0.04

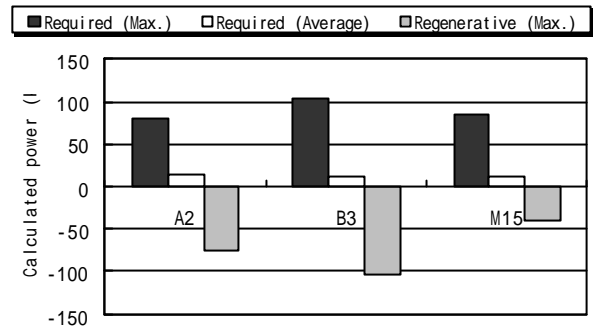


図9 要求パワーと回生パワー(計算値)

図10に、上記の走行シミュレーションにおける距離1km当たりの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。路線バスは発進・停止が頻繁で最高車速が比較的低く、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。したがってエネルギー効率を向上させるためには加速時の要求エネルギーの低減と共に、制動時のエネルギー回収が特に重要であると考えられる。

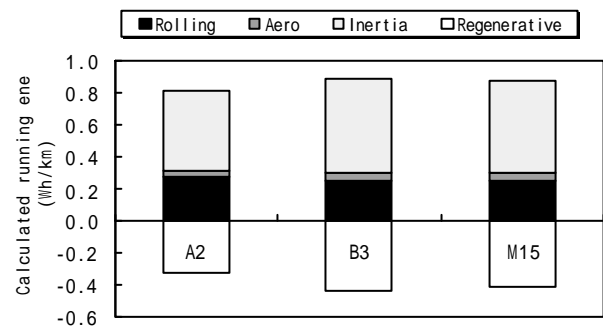


図10 要求エネルギーと回生可能なエネルギー(計算値)

上記の性能要件に基づき、新しい方式の路線バス用動力システムの仕様を検討した。発進停止の頻度が特に高い都市路線用バスには、エネルギー回生に加え、加減速能力の点からも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。そこで車載発電機を主電源とするシリーズハイブリッド方式を選定し、車両駆動は各車輪のハブと一体の内蔵減速ギア付モータ4基による全輪駆動とした⁽⁴⁾⁽⁵⁾。表3にそのモータ駆動システムの諸元を示す。

表3 想定した路線バス用電気モータシステムの諸元

Item		Specification
Traction Motor System	Type	In-wheel AC Induction (4 units / vehicle)
	Output power (3 min. rated)	40 kW (× 4 =160kW)
	regenerative power	25 kW (× 4 =100kW)
	Controller	PWM Inverter
	Acceptable volt.	DC 190V - 290V
Total reduction gear ratio		15.0 (Fixed)
Maximum vehicle speed		65 km/h

走行シミュレーションの結果、この動力システムを搭載した表2の想定車両は、発進から30km/hに達するまで6km/h/sでの連続加速が可能であり、また40km/hにおいても4km/h/sの加速能力を有し、図5に示した加速性能要件を満たすことがわかった。一方、回生制動能力に関しては、図6の要件には若干不足気味であるが、制動エネルギーの大半を電氣的に回収できるものと考えられる。

4. 室内実験による考察

4.1. 想定車両の駆動モータシステム出入電力の測定

4.1.1. 実験装置 図11に台上運転装置の概要を示す。定盤の一端に駆動モータ1基(四輪の内の一輪分)を固定し、減速機と回転速度・トルク検出器を介してダイナモメータに接続した。

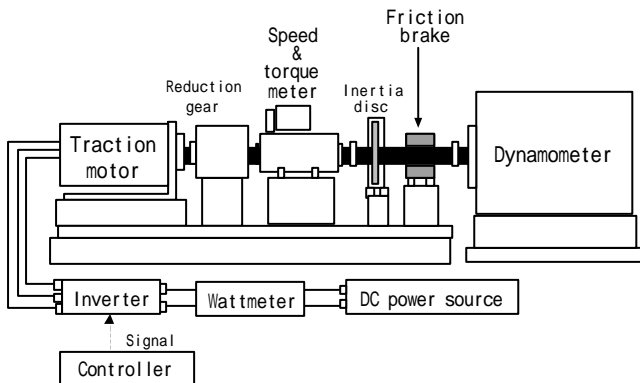


図11 台上単体運転装置の概要

前項で計算した、想定車両の車速変化に伴って生じる走行抵抗の1/4相当のトルクをダイナモメータで発生させ、実車走行データから編集した車速パターンに従いモータを加減速運転した。減速時は電力回生制動を優先的に使用することとした。ダイナモの回転速度、トルクから機械出力を求め、またモータシステムの直流側電力出入を正負別積算電力計で測定した。

4.1.2. 測定結果 図12に、各トリップ毎のモータシステムの要求電力と回生電力について、各々の最大値と平均値(それぞれ車両1台分)を示す。要求側(正の値)をみると、トリップ群の最大電力は15~130kWである。路線Bのトリップ群は路線Aより広範囲に分布し、その最大値はM15モードでの最大値を約25%上回る。また平均電力は最大電力の概ね1/3程度の値である。一方、回生側(負の値)の絶対値は要求側の70%弱であるが、その最大電力はM15モードでの最大値の3.5倍に上る。また平均電力は最大電力の半分程度で、要求側よりも両者の差が小さい。

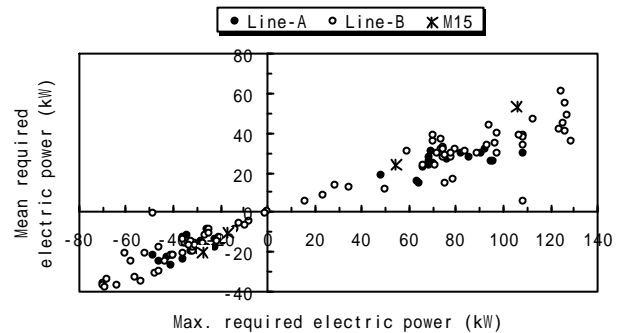


図12 各トリップの最大電力と平均電力

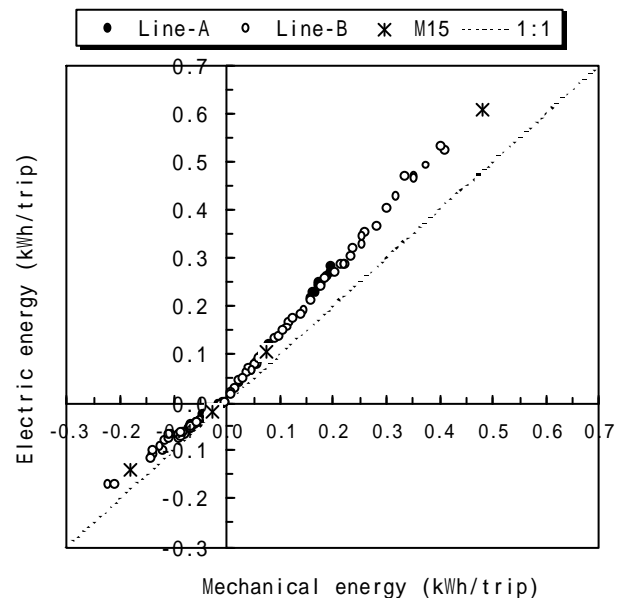


図13 トリップ毎の機械仕事量と電力量

図 13 に、各トリップ毎の機械仕事量とモータシステム電力量を示す。要求側では、電力量は1トリップ当たり 0.55 kWh 以下で、機械仕事量を 30～40%上回っている。一方、回生側では電力量は 0.2 kWh 以下で機械仕事量を 20～30%下回り、要求電力量に対する回生電力量の比率は 15～35%という結果が得られた。

4.2. 模擬ハイブリッドシステムによる効率向上の検討

4.2.1. 実験方法と条件 図 14 に実験装置の概要を示す。駆動モータシステム1基分を充放電試験装置に置き換え、発電機(直流電源で代用)を主電源、鉛酸電池とスーパーキャパシタ(以下、「キャパシタ」という)を補助電源として接続することにより模擬的なシリーズハイブリッドシステムを構成した。

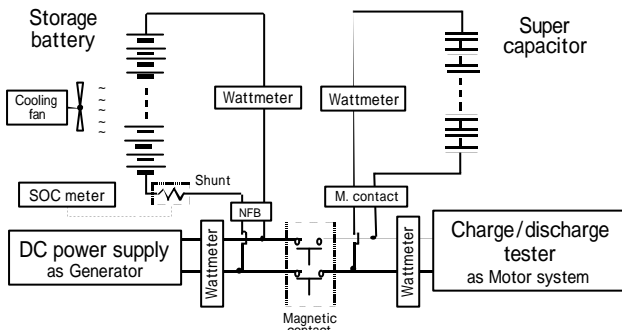


図 14 模擬ハイブリッドシステム実験装置の構成

発電機出力は、路線 B における全時間平均要求電力である 5.3 kW (モータ1基当たり)とし、電池エネルギーの増減にしたがって定格稼働または停止の断続運転とした。表 4 に電池とキャパシタの諸元を示す。それらの容量は、発電機停止中でも電池で数 km、キャパシタで1トリップ程度の走行が可能な値としたが、本実験では発電機稼働中の回生制動時の電圧上昇を抑制するために電池とキャパシタは常時並列接続とした⁽⁶⁾。台上単体運転で得た電力出入データから編集した専用プログラムに従い、充放電試験装置を連続制御することによって、想定したバスの加減速運転を模擬した。

表 4 二次電池とキャパシタの諸元 (モータ1基分の換算値)

Device	Type	Nominal capacity	Max. power	Usable energy
Battery	Lead-acid	26 Ah	40 kW	3.2 kWh
Capacitor	Non-organic	10.3F	70 kW	0.1 kWh

この模擬実験ではシステム使用電圧を実機の 30%に

スケールダウンし、実際に供試した各要素の容量はその実験条件下で実車と相似な電力出入状態が再現できる値とした。各構成要素の出入電力は正負別積算電力計で連続測定しトリップ毎に集計を行った。以下に、それらの中で要求パワー、エネルギーが最大級の図 15 に示すトリップを一例として検討した結果を記す。

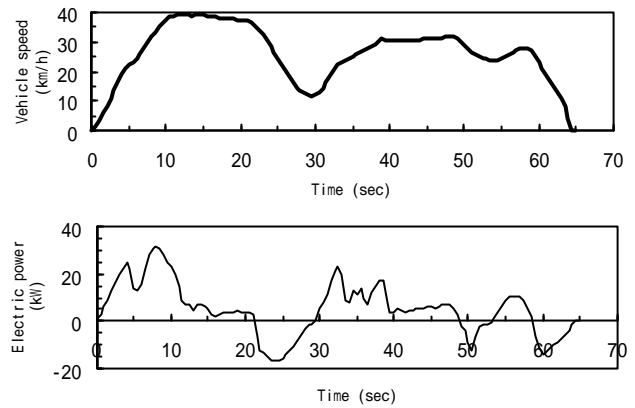


図 15 解析に用いたトリップの車速と要求・回生電力

4.2.2. 実験結果と考察 シリーズハイブリッドシステムのエネルギー効率向上を図るためには、モータシステム等の要素個別の改良だけでなく、それらの種類、容量や稼働条件を適切に選定することが重要である。そこで本実験では後者の観点から、電源側要素の機能分担をパワーとエネルギーの両面から解析することとした。図 15 のトリップは力行と制動を3回ずつ繰り返すため、その都度電力の要求と回生が切り替わる。シリーズハイブリッド方式にはトリップの途中でも小刻みに発電機を起動・停止させる例も見られるため⁽⁷⁾、トリップを力行・制動の転換時点で再分割し、その小区分毎に電力出入の挙動を観察した。

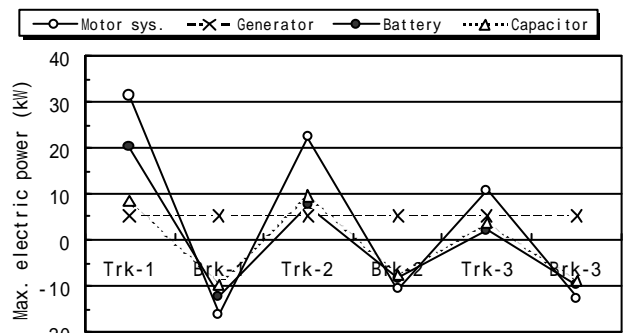


図 16 1トリップの小区分毎の要求・回生電力と各要素の出入電力の最大値 (Trk:力行、Brk:制動)

図 16 に、発電機稼働状態で電池とキャパシタを併用

し運転したトリップにおける各要素の最大出入電力を小区分毎に示す。モータシステムの要求電力は最初の小区分（発進加速）において 30kW を超え、電池はその 60%、キャパシタは 30%の出力を示して発電機出力を補っている。一方、3つの減速側の区分に発生する最大回生電力はほぼ同じ値で、電池とキャパシタがほぼ半分ずつ吸収している。

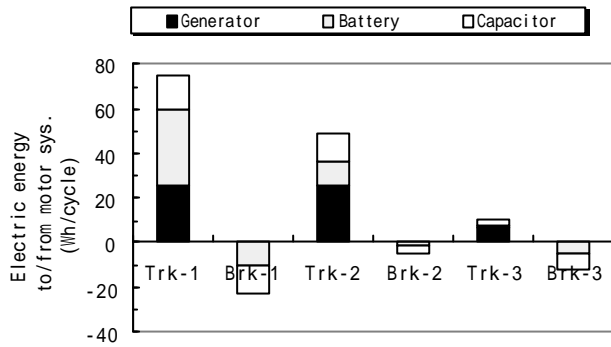


図17 1トリップの小区分における各構成要素の要求電力量の供給と回生電力量の吸収 (Trk：力行、Brk：制動)

図17に、トリップ中の小区分毎の要求電力量、回生電力量に対する電源要素の供給、吸収の分担を示す。要求側をみると、最初の力行では約35%が発電機、45%が電池、20%がキャパシタによる供給であり、2回目、3回目の力行では50%が発電機、残りが電池とキャパシタから半々の供給である。回生側ではいずれも電池とキャパシタでほぼ半分ずつ吸収している。

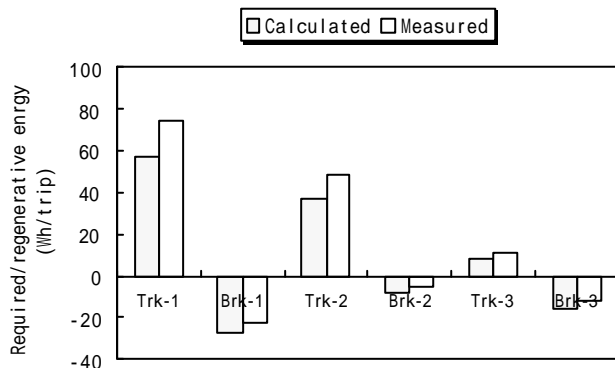


図18 1トリップの小区分における要求エネルギーと回生エネルギーの計算値と電力量測定値 (Trk：力行、Brk：制動)

図18に、小区分毎の要求・回生エネルギーの計算値と、その電力量測定値を示す。小区分毎の電力量は計算値に比べ要求側では30~35%上回り、また回生側は25~35%下回っている。そのような電気的な損失を極力低減することが課題であるが、それらの方策は互

いにトレードオフの関連性を持つ場合が多いので注意が必要である。例えば、仮に発電機出力を増強すればモータシステムに直接供給される電力量が増し充放電損失の減少が期待できるが、その反面、減速中に回生電力と発電電力が競合し補助電源の吸収能力を超えるため、一方の制限が余儀なくされる。また回生側では、補助電源を大容量キャパシタに一本化すれば電圧上昇が更に抑制され、本実験では摩擦ブレーキで熱として消費された制動パワーも回生できる可能性がある⁽⁷⁾。しかしエネルギー容量が極めて小さいため発電機の起動・停止頻度が大幅に増え、かつ発電機停止状態で走行できるのは1トリップにも満たない。

これらの事例ように要素の容量等を変えて損失の低減を図ると、それが別の面で制約をきたすことがあるので、システムの最適化に当たっては要素間の相関性を十分考慮して総合的に検討することが重要であると考えられる。

5. まとめ

- (1) 路線バス車両を用いて都市域の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走行実態を明らかにし、加速能力等の要求動力性能を把握した。
- (2) 路線バスに最適な動力方式としてモータ駆動のシリーズハイブリッド方式に着目し、車両を想定してエネルギー出入を計算と台上運転により把握した。
- (3) 充放電試験装置に電池等を組み合わせて模擬的なシリーズハイブリッドシステムを構成し、ショートトリップ内における構成要素の電力出入を観察して電力回生等のエネルギー効率向上について考察した。

(参考文献)

- 1) 吉田、他、交通安全公害研究所報告第2号、1974
- 2) 田中、他、第7回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、P.68、1977
- 3) 大野、他、「加速刺激に対する立位姿勢の安定性に関する研究」、人間工学第29巻特別号
- 4) 澤藤電機株、第34回東京モーターショー配布資料、2000
- 5) H. Smizu, et al, "KAZ the Super Electric Vehicle", EVS-18, 2001
- 6) 林田、他、第29回交通安全公害研究所研究発表会講演概要、P.95、1999
- 7) 佐々木、他、「キャパシタ式CNGハイブリッドバスの開発(第2報)」、自動車技術会2001年秋季大会前刷集