

# 路線バス用シリーズハイブリッド動力システムにおける 充放電損失エネルギーの評価

環境研究領域 林田 守正 成澤 和幸 紙屋 雄史  
元環境研究領域 倉嶋 大輔 鄭 四発

## 1. まえがき

運輸部門におけるエネルギー消費を抑制し環境負荷を低減するためには、旅客需要を自家用車から路線バス等の公共交通機関へ誘導することが必要とされている<sup>(1)</sup>。しかし利用者の減少が続く路線バスを活性化させるためには、車両のハード面についても抜本的な改善が必要と考えられる。本研究では、発進停止が頻繁で車速が比較的低い路線バスに最適な動力方式として、電気モータで車両を駆動し回生制動が可能なシリーズハイブリッドシステムに着目した。実車走行によるバス特有の走行パターン調査結果に基づいてバス用のシリーズハイブリッドシステムを設定した。これを模擬した充放電試験装置による実験を行い、二次電池（以下、「電池」という）やスーパーキャパシタ（以下、「キャパシタ」という）を補助的な蓄電装置として用いた場合に生じる充放電損失について詳細に考察したうえで、エネルギー効率の評価を試み、従来型のバスと比較した。

## 2. 実験装置と実験方法

### 2.1. 路線バスの運転パターンと車両の想定

調査に当たっては、路線バス車両を借り切って営業運行に準じた路上走行を行い、車速を連続測定した。供試車両は全長 10.5m、エンジン出力 169kW、定員 77 名の一般的な機械式変速機付ディーゼルバスである。

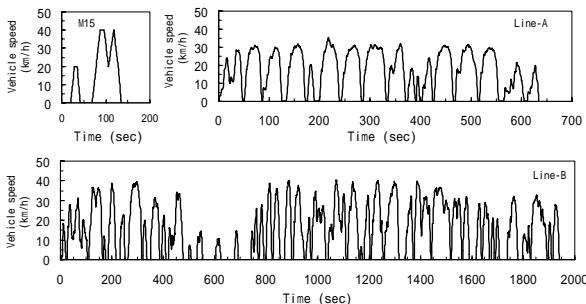


図1 路線バスの都市内走行パターン

図1に、その測定データから抽出した都市内の二路線のバス車速パターンを、大型車の代表的な車速パターンとされるM15モードと共に示す。上記の調査結果から、路線バス車両は連続加速と回生制動が可能な電気モータにより駆動されることが望ましく、航続距離の点からは車載発電機を電源とするシリーズハイブリッド方式が最適であると考えられる<sup>(2)</sup>。そこで4つの車輪に内蔵されたモータ4基による全輪駆動<sup>(3)</sup><sup>(4)</sup>のシリーズハイブリッド方式中型路線バスを想定した。その諸元を表1に示す。

表1 想定車両の諸元

Item		Specification
Size (L, W, H) (mm)		9,000×2,300×3,000
Passenger & driver (person)		60
Vehicle mass (kg)		7,800
Traction Motor System	Type	In-wheel AC Induction
	Max. Output power	40 kW (× 4 =160kW)
	Regen. power	25 kW (× 4 =100kW)
	Controller	PWM Inverter
Acceptable volt.		DC 190V - 290V
Auxiliary consumption (kW)		2.0
Maximum vehicle speed		65 km/h

### 2.2. 静止型模擬実験装置

まず、表1の想定車両が実際に路上を走行する際の要求電力や回生電力を測定するために、想定車両の駆動モータシステム（三相交流誘導モータ、インバータ等）を実機単体台上運転装置に架装し、図1の車速パターンにしたがって加減速運転を行って電力出入データを得た。次に、想定車両のモータシステムを充放電試験装置、車載発電機を直流電源装置に置き換え、二次電池（以下、「電池」という。）やスーパーキャパシタ<sup>(5)</sup>（以下、「キャパシタ」という。）を接続して、静止型の模擬的なシリーズハイブリッドシステムを

構成した。図2にその実験装置の概要を示す。本実験では、モータシステムの標準電圧を実機の30%に設定することにより、システム内の電力流動を実機1ユニット分の30%にスケールダウンした。蓄電装置としては、モータの最大出力を担保できる容量の鉛酸電池(電池A)これとほぼ同容量のニッケル水素電池(電池B) または「小容量鉛酸電池(電池C)とキャパシタの併用」の三通りとし、モータシステム1ユニット分に必要なモジュール数の30%相当を模擬システムに並列接続した。キャパシタの蓄電容量は概ね図5に示す1トリップ分の回生電力量を吸収可能な値とした。これらの蓄電装置の諸元を表2に示す。発電機出力はM15モード運転時の平均要求電力とほぼ等しい21kWとし、模擬システムでは直流電源出力をその30%に設定して、電池の充電状態(SOC)が $60 \pm 10\%$ に保たれるように「一定出力稼働」または「停止」の起動・停止操作を行った。この実験では充放電試験装置を、前述の台上運転で得た電力出入データに従い連続制御することによって、想定車両の実走行運転を模擬し、各機器の出入電力をクランプ式電力計で測定してデータロギに記録し、測定後に正負別積算等の演算処理を行った。

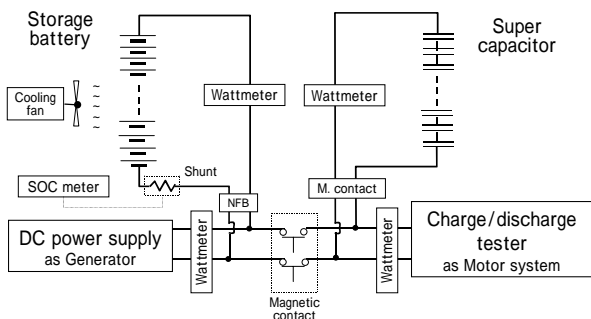


図2 静止型模擬ハイブリッドシステムの構成

表2 供試蓄電装置の諸元

Device	Type	Nominal capacity (1 module)	Nominal voltage (1 module)	Number of module	
				for 1 unit	Experiment
Battery-A	Lead-acid	25Ah	12	20	6
Battery-B	Nikkel-metal hydride	28Ah	12	20	6
Battery-C	Lead-acid	15Ah	12	20	6
Super capacitor	Organic	62F	54	6.67	2

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 蓄電装置の選定について

図3に、発電機稼働状態でM15モードの模擬運転を行った場合の、模擬システムの電圧変動を実機換算値で示す。蓄電装置として電池Aを使用した場合は、100

秒目付近の回生制動時に電圧がシステムの上限值(290V)を大幅に超えるため、実機では回生電力の制限が必要となる。一方、電池B、または「電池C・キャパシタ併用」を使用した場合は280V以下に抑制され、特に後者では、電池は小容量ながらキャパシタによる電圧上昇抑制効果が顕著である。そこで以降の実験では、蓄電装置として電池B、または「電池C・キャパシタ併用」を検討対象とした。

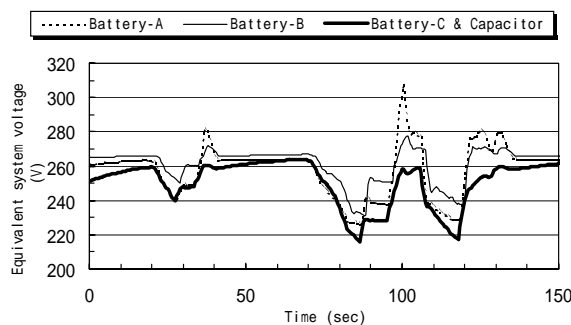


図3 模擬システムの電圧変動(実機換算値)

#### 3.2. 車上的における発電電力量の行方

図4に、「電池C・キャパシタ併用」で、前述のように発電機を起動・停止しながら路線Bの模擬運転を行った場合の発電電力量と回生電力量の流入先別の割合を示す。発電電力量の4割強がモータシステムと補機類に直接供給され、残りの6割強は電池とキャパシタに一旦充電される。また回生電力は1割強が補機で直接消費され、残りの大半がキャパシタを充電する。シリーズハイブリッドシステムのエネルギー効率を評価するためには、これらの蓄電装置で生じる充放電損失を把握することが不可欠であると考えられる。

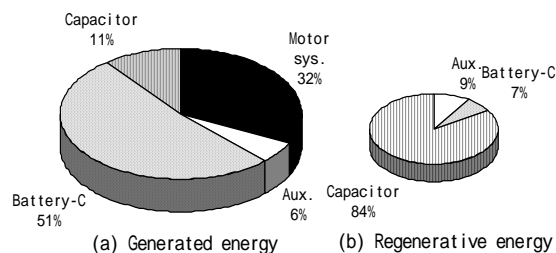


図4 発電電力量と回生電力量の流入先

#### 3.3. 都市内パターン運転中の蓄電装置における局所的な充放電損失の実測

本実験では、実走行条件下の小刻みな電流入出による電池等の充放電損失を評価するために、副反応に伴う電荷の欠損は無視できると仮定して<sup>(6)</sup>、以下の方法により実測した。すなわち図5に示すように電池等

が充電から放電へ切り替わる時点の前後に充電電流量 (Ah) と放電電流量 (Ah) を等しく採り、該当する充電電力量 (Wh) と放電電力量 (Wh) を積算する。それら両者の差が充放電損失エネルギー、比率が充放電効率であるとみなした。図6～図8に、M15モードの模擬運転において、この方法で得た各種蓄電装置の局所的な充放電効率の測定値を示す。電池Bの充放電効率は、発電機稼働中の0.1～0.2Ah程度の入出電流量においては92%前後、発電機停止中のより少ない入出電流量では95%前後の高い値を示す。これに対し、キャパシタと併用する電池Cの充放電効率は、発電機稼働中で85%前後であり、電池Bよりやや低い値を示す。なお発電機停止中は電池Cはほとんど充電されないので充放電効率は評価できない。キャパシタの充放電効率は95%前後であり、微少な入出電流量では100%近い値を示す。

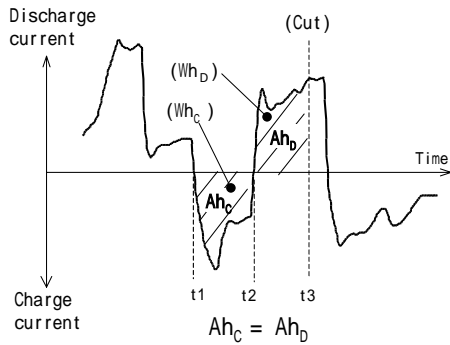


図5 充電電力量と放電電力量の対比

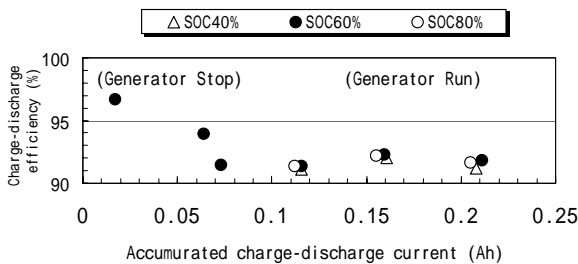


図6 電池Bの局所的な充放電効率

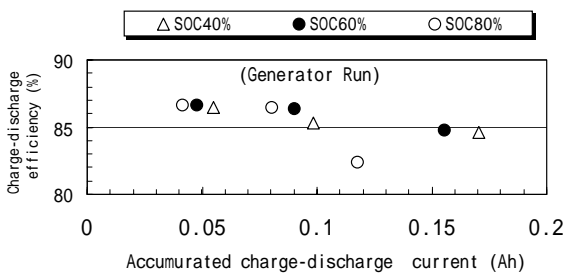


図7 電池Cの局所的な充放電効率

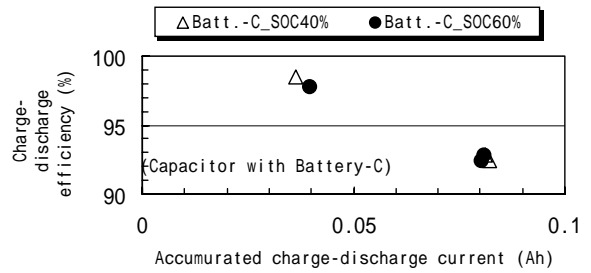


図8 キャパシタの局所的な充放電効率

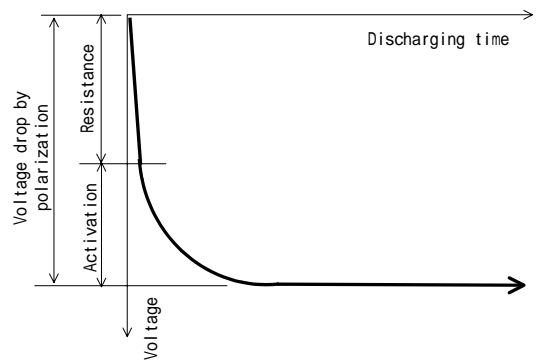


図9 ステップ状放電における抵抗分極と活性化分極

図9に示すように、電池等をステップ状の定電流で放電させた場合、抵抗分極と活性化分極による電圧降下が発生する。図10に、電池Cのステップ状放電における電圧降下の抵抗分極分と活性化分極を示す。前者による電圧降下が大部分であり、60Aの放電では降下量全体の70%以上を占める。電池Bやキャパシタの電圧降下、また充電側の電圧上昇についても同様の傾向がみられた。したがって近似的に、これら蓄電装置の放電時の電圧降下は全て電気抵抗によって生じるものと仮定した。

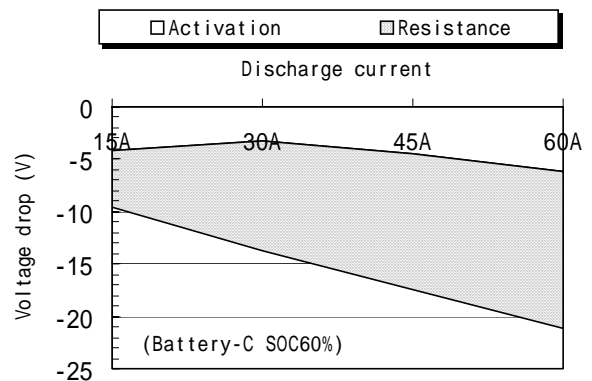


図10 電池Cの電圧降下における抵抗分極と活性化分極

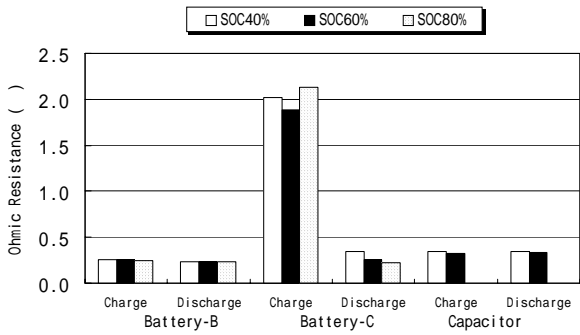


図 11 各種蓄電装置の電気抵抗値

図 11 に、上記のステップ状放電時の電圧降下から得た各種蓄電装置の電気抵抗値( 想定システム 1 ユニット分の換算値) を、異なる SOC 毎に示す。電池 B は内部抵抗値が最も小さく、SOC や充電側 / 放電側の違いによる差は僅かである。電池 C の放電側の抵抗値は電池 B より 10 ~ 30% 大きく、また SOC が小さいほど増大する傾向を示す。一方、電池 C の充電側の抵抗値は放電側の 6 ~ 9 倍にのぼる。キャパシタの抵抗値は SOC や充電・放電の違いによる差はほとんど無く、電池 B より若干大きい値を示す。

以上の結果から、パターン運転中の各蓄電装置における充放電損失エネルギーは、次式に示すように、充電 / 放電の小区分毎に、電流自乗値に電気抵抗値にを乗じて得られる損失電力を積分し、それらを総和することにより算定できると考えられる<sup>(8)</sup>。

$$EL = ( ELB_C + ELB_D + ELC_C + ELC_D ) / 3600 \dots (1)$$

$$ELB_C = \sum_{i=1}^p \int_{t1i}^{t2i} I_{BC}^2 \times R_{BC} dt \dots (2)$$

$$ELB_D = \sum_{j=1}^q \int_{t1j}^{t2j} I_{BD}^2 \times R_{BD} dt \dots (3)$$

$$ELC_C = \sum_{k=1}^r \int_{t1k}^{t2k} I_{CC}^2 \times R_{CC} dt \dots (4)$$

$$ELC_D = \sum_{l=1}^s \int_{t1l}^{t2l} I_{CD}^2 \times R_{CD} dt \dots (5)$$

ここで、EL は一測定区間における充放電損失電力量の総量 (Wh)、ELB は電池内部の損失エネルギー (J)、ELC はキャパシタ内部の損失エネルギー (J) であり、添

字の C は充電側、D は放電側を意味する。ただし、IB は電池電流 (A)、IC はキャパシタ電流 (A)、RB は電池の電気抵抗 (Ω)、RC はキャパシタの電気抵抗 (Ω) である。また、t1、t2 はそれぞれ小刻みな充電または放電の一分毎の開始時刻と終了時刻を示す。

図 12 と図 13 に、この方法によって求めた M15 モードの模擬運転( 発電機稼働状態) における電池内部での局所的な充放電損失エネルギーの計算値を、実測値と比較した結果を例示する。電池 B、電池 C とも SOC が 60% の場合には、充放電損失エネルギーの計算値は実測値とほぼ一致する。また図 14 に示すように、電池 C と併用されるキャパシタにおいても、入出電流量は電池より少ないが、計算値は実測値とほぼ一致する。

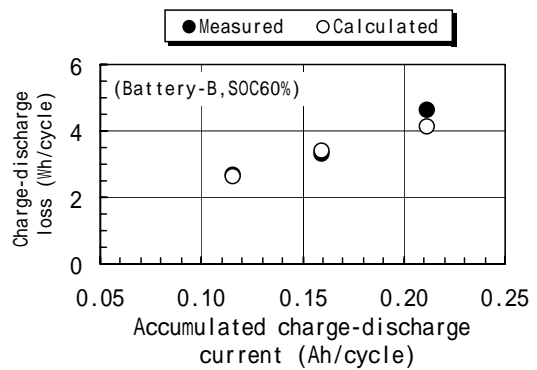


図 12 電池 B の充放電における電流積算値と損失エネルギー

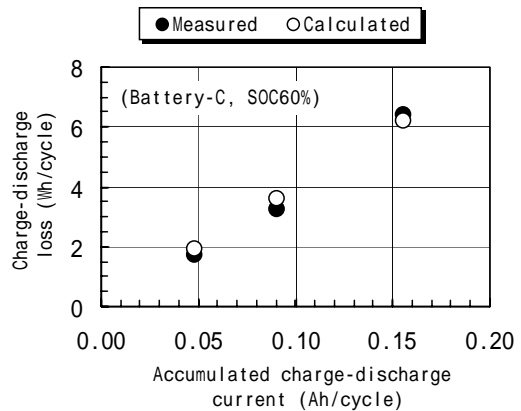


図 13 電池 C の充放電における電流積算値と損失電力量

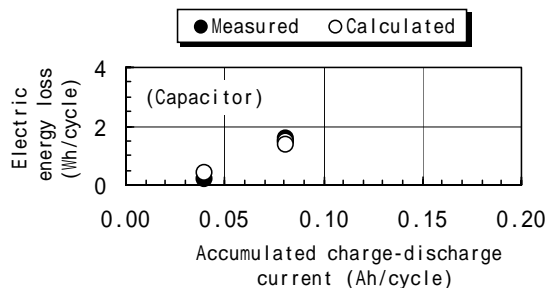


図 14 キャパシタの充放電における電流積算値と損失電力量

### 3.4. 実走行時の充放電損失と発電電力量

以上の結果から、電池のSOCが60%前後であれば、パターン運転中に蓄電装置の充放電により生じる損失電力量は、前述のような内部抵抗と電流値からの計算により推定可能であると考えられる。図15に、その計算結果の一例として、蓄電装置を「電池C(SOC60%)・キャパシタ併用」とした場合の各種パターン模擬運転中に生じる充放電損失電力量の内訳を走行1km当たりの値で示す。M15モードの場合は1サイクル単位で全時間発電機稼働または発電機停止状態とした。また路線Bの場合は運転開始時点で発電機を稼働、または停止状態とし、途中で電池のSOC変化に応じ発電機の起動・停止を行うこととした。M15モード運転でみると、発電機停止の場合は電池放電損失分が大半であるが、発電機稼働の場合は電池充電損失分が大幅に増大し、全損失電力量は発電機停止時の約1.5倍となる。またM15モード繰り返し、および路線Bの運転では、発電機の起動・停止を伴いながら行った場合は、損失電力量は0.13kWh/km前後となり、電池充電損失分がその50~60%を占め、キャパシタによる損失は全体の20%程度である。

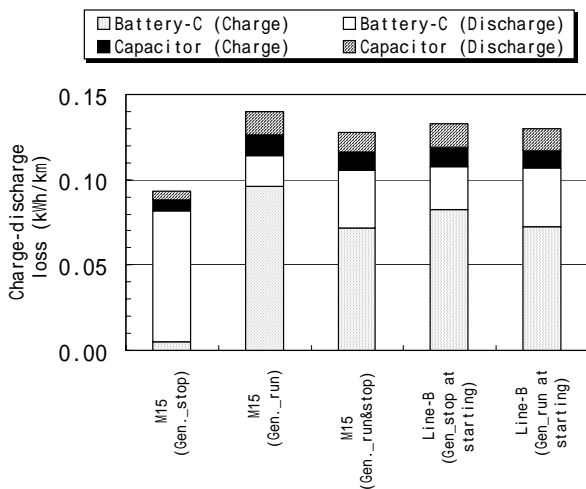


図15 都市内パターン運転における充放電損失電力量の内訳

なお電池Bを用いて、発電機起動・停止を伴う模擬パターン運転を行う際の損失電力量は「電池C・キャパシタ併用」の場合の5~6割に留まった。

図16に、上記の二通りの蓄電装置を用いて、発電機の起動・停止を伴いながらM15モード(繰り返し)と路線Bの運転を行った場合の、車上発電電力量と充放電損失電力量の計算値を対比して示す。ここでは、電池等に蓄積されるエネルギーや制動時の回生エネルギー

を含めた車上の電気エネルギー供給源は全て発電機であることを考慮し、その供給電力量と、充放電損失分を差し引いて有効利用される電力量との比率を「ハイブリッド充放電効率」として次式で定義した。

$$HCD = 1 - (EL / E_{GEN}) \quad \dots (6)$$

ここで、 $HCD$  はハイブリッド充放電効率、 $EL$  は充放電損失電力量(kWh/km)、 $E_{GEN}$  は発電電力量(kWh/km)である。図16によれば本実験の模擬システムのハイブリッド充放電効率は88~96%を示すが、これは60~70%といわれる鉛酸電池式電気自動車(EV)の充放電効率<sup>(9)(10)</sup>を大幅に上回り、EV用リチウムイオン電池に近い値<sup>(6)</sup>を示している。その理由は、全ての電気エネルギーが電池等に蓄えられた後に使用されるEVとは異なり、発電電力の一部を直接使用すること、電池の満充電状態付近の使用を回避することにより、充放電に伴う損失が大幅に低減されるためと考えられる。

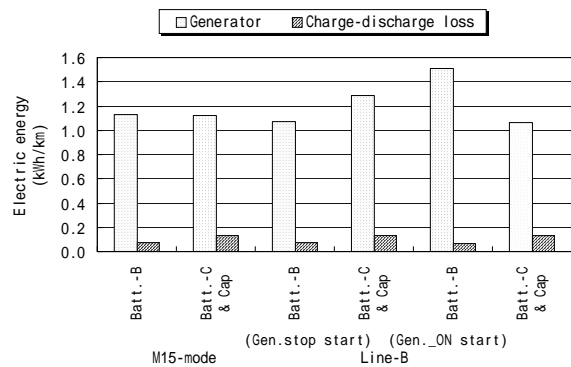


図16 車上発電電力量と充放電損失電力量

### 3.5. 模擬システムのエネルギー効率評価

表3に、本実験の模擬ハイブリッドシステムと、従来型バスのディーゼルエンジンについて、燃料から機械出力に至るまでのエネルギー効率を計算した結果を示す。前者については、発電エンジンと発電体の効率を最新の技術動向から仮定し、各要素の効率および回生エネルギー相当分の修正係数を乗じて総合効率を算出した。後者については、大型路線バスの所要駆動エネルギーを式(1)~(5)に基づいて計算し、これを一般的な都市路線バスの燃費(2.1~2.6km/リッター<sup>(11)(12)</sup>)と対比して熱効率を概算した。実走行条件において従来型バスのディーゼルエンジンと比較すると、本実験の模擬システムの効率は、蓄電装置が電池Bの場合は1.4~1.8倍、「電池C・キャパシタ併用」の場合は1.3~1.7倍であると評価され、永久磁石式同期モータの

採用やキャパシタ容量の最適化を行えば更に1～2割程度の改善が可能と考えられる。ただしハイブリッド化による5%程度の車両重量増加のため、燃費改善効果は若干相殺される点に留意する必要がある。

表3 模擬ハイブリッドシステムのエネルギー効率評価

Component	Bus line-B		Suburban Bus lines
	Series hybrid		Conventional
	Battery-B	Battery-C & Capacitor	
Engine	0.45		0.21~0.26
Generation	0.95		-
Charge-Discharge	0.942	0.888	-
Motor system	0.698		-
Regeneration coefficient	1.303		-
Total	<b>0.366</b>	<b>0.345</b>	0.21~0.26

また本実験で提案したように、路線バス用シリーズハイブリッドシステムの蓄電装置を「安価な小容量鉛酸電池と耐久性に優れるキャパシタの併用」とすれば、高価なニッケル水素電池を採用する場合と同等以上の電圧抑制効果が得られ、充放電効率は後者をやや下回るが電池に関わるコスト軽減の点で有利であると考えられる。

#### 4. まとめ

- (1) 車載発電機がモータシステム等に給電する過程で蓄電装置の充放電により失われるエネルギーは電気抵抗値と電流値から算定可能であり、その発電エネルギーに対する比率は5～10%程度であることを明らかにした。
- (2) 実走行条件における模擬ハイブリッドシステムのエネルギー効率は、従来型バスのエンジンに比べ、最大で二倍近い値に達すると評価した。
- (3) 路線バス用シリーズハイブリッドシステムの蓄電装置として「小容量の鉛酸電池とウルトラキャパシタの併用」を提案し、その利点を示した。

#### (参考文献)

- 1) 国土交通省ホームページ、自動車交通局 (2003)
- 2) 林田 他、自動車技術会講演前刷集 No.82-02、P.5-8 (20025538) (2002)
- 3) 加部 他、自動車技術会講演前刷集 No.30-03、P.11-16 (20035154)、2003
- 4) H. Smizu, et al、"KAZ" the Super Electric Vehicle、EVS-18 Prceedings (2001)
- 5) 佐々木 他、自動車技術会講演前刷集 No.102-01、

P.9-12 (20015569), (2001)

- 6) 堀江 他、EV及びHEV用高性能二次電池システムの研究開発、自動車技術、Vol.54-No.1、P.85-92 (2000)
- 7) 日本電池(株)、最新実用二次電池(第2版)、P.215-217、日刊工業新聞社 (1999)
- 8) M. Hayashida et al、SAE Paper 2001-01-0784 (2001)
- 9) 清水、電気自動車の全て(第2版) P.21-23 (1995)
- 10) 小椋 他、電気自動車の開発、自動車技術、Vol.49-No.9、P.28-33 (1995)
- 11) バスマインターナショナル75、Vol.14-No.1、P.84-85、ポルト出版 (2003)
- 12) 国土交通省内部資料