

路線バス用シリーズハイブリッドシステムのエネルギー効率* (実走行条件における車上発電エネルギーの充放電損失等に関する検討)

林田 守正*¹, 成澤 和幸*¹
倉 嶋 大 輔*², 紙 屋 雄 史*³

Energy Efficiency of Series Hybrid Power System for Transit Buses (Estimation of Charge-discharge Loss of Generated Electric Energy on Board)

Morimasa HAYASHIDA*⁴, Kazuyuki NARUSAWA,
Daisuke KURASHIMA and Yushi KAMIYA

*⁴ Environment Research Department, National Traffic Safety and Environment Laboratory,
7-42-27 Jindaijihigashimachi, Chofu-shi, Tokyo, 182-0012 Japan

The driving conditions of suburban transit buses were investigated with a chartered bus. Based on this data, a series hybrid system was designed for transit buses from the viewpoint of the acceleration performance and the energy saving. In order to measure the electric energy flow on board, the dynamometer bench tests and the static simulated experiments were carried out with storage batteries and ultra capacitors. It was clarified that the charge-discharge loss in the storage devices can be estimated by the calculation using the internal resistance and current. And, the energy efficiency of the series hybrid system was evaluated in compared with conventional engine-powered buses for a trial.

Key Words: Energy Saving, Power Plant, Thermal Efficiency, Energy Storage, Diesel Engine

1. 結 論

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、旅客輸送需要を乗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⁽¹⁾。しかし路線バスの輸送量は長年にわたって減少を続けており、その一因として、現状のバス車両が利用者にとって走行性能や乗り心地の面で魅力に欠ける点が多いことは否めない。したがってバスの利用促進を図るためには、車両のハード面についても、従来の概念にとらわれない新技術の導入が必要と考えられる。本研究では、発進停止が頻繁で最高速度が低く、立席乗車がある路線バスの動力方式として、電気モータのみ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。まず営業路線上の実車走行によりバス特有の走行パターンを調査し、それに基づいて路線バス用のシリーズハイブリッド動力システムを設定した。これを模擬した充放電試験装置等による実験を行い、二次電池やウルトラキャパシタ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の把握方法について検討したうえで、総合的なエネルギー

効率の評価を試み、従来型のバスと比較した。

2. 路線バス走行パターンの調査

2・1 調査方法 図1に、調査を行ったバス路線の配置を示す。路線Aは東京近郊の鉄道駅と住宅団地を結ぶ約3.1kmの短距離路線、路線Bは市街地を挟んで並行する鉄道の2つの駅を結ぶ約8.2kmの中距離路線であり、沿線には商業地域や住宅地域などを含む。

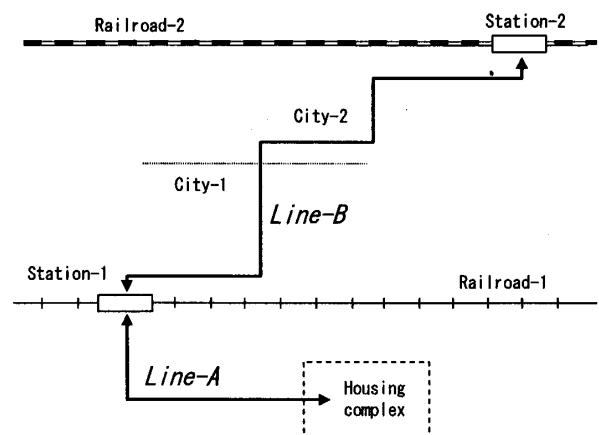


Fig. 1 Investigated Suburban Transit Bus Route

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に準じた路上走行を行い、車速を連続測定した。通勤時間帯を想定して路線上の全ての停留所に停車し、停車時間は各々5秒程度とした。供試車両は

* 原稿受付 2003年7月25日。

¹ 正員、(独)交通安全環境研究所(☎182-0012 調布市深大寺東町7-42-27)。

² 准員、(独)交通安全環境研究所。

³ 正員、群馬大学教育学部(☎371-8510 前橋市荒牧町4-2)。

E-mail: hayasida@ntsel.go.jp

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。車速は, 車体後部に取り付けた光学式の非接触車速計により検出し, 車内に搭載した増幅器を介してデータログに 500msec 毎の車速データを連続記録して, 測定後に解析処理を行った⁽²⁾。

2・2 測定結果と考察 図2に, 多数のショートトリップ (停車状態から発進し, 加減速を経て停止に至る最小の走行単位, 以下「トリップ」という。) で構成される両路線の車速パターンを, 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。最高車速は路線Aで 30km/h, 路線Bで 40km/h 程度であった。1分間当たりのトリップ数は, 概ね路線Aで 1.6, 路線Bで 1.3 であり, M15 モードよりも 5~8 割程度多い。これはトラック等の他の大型車と比べて, 停留所や, 交通信号等により停車頻度が高まるためと考えられる。

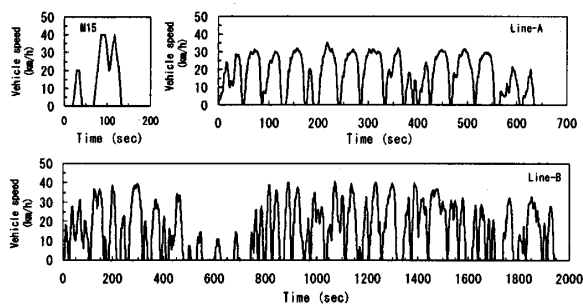


Fig. 2 Bus Driving Speed Pattern

これらのトリップにおける発進直後の最大加速度は 0.2G程度を示すが, 40km/h に達するまでの平均加速度は, 途中2回の変速操作により加速が中断されるため, 0.1G程度に留まっている。これは, 車輪とレールの摩擦係数が極めて小さく加速度が制約される地下鉄電車とほぼ同じレベルであり, 変速操作による加速の中断がバスの発進加速の大きな支障となっていることが伺える。

3. シリーズハイブリッドバスを想定したモータの台上運転

3・1 測定装置および測定条件 上記の調査結果から, 路線バスは発進停止が特に頻繁であり, かつ立席乗客の安全確保が不可欠であるため, 過大な加速度, および加速度の激しい変動は回避されるべきである。また制動の度にブレーキで熱として無駄に放散される車両運動エネルギーも相当量にのぼると推測される。そのため, バス車両は加速度変動が小さく連続的な発進加速と, 減速時の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, 航続距離確保の点からは

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。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^{(3) (4)}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。

Table 1 Specifications of Supposed Series Hybrid Bus

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	

次に, この想定車両が実際に路上を走行する際の電力出入を測定するために, 図3に示すよう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) の実機単体台上運転装置を構成した。

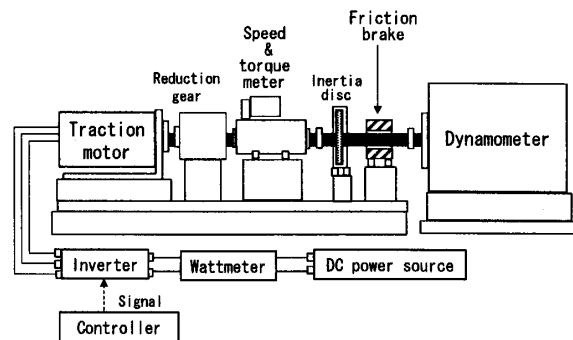


Fig. 3 Bench Test System for Traction Motor

模擬設定車両の走行抵抗は, 下記の式で表される。

$$R = R_R + R_A + R_I \quad \dots \dots (1)$$

$$R_R = C_R \times W \quad \dots \dots (2)$$

$$R_A = C_A \times A \times V^2 \quad \dots \dots (3)$$

$$R_I = dV/dt \times (W + w)/g \quad \dots \dots (4)$$

ここでRは全走行抵抗 (N), R_Rはころがり抵抗 (N), R_Aは空気抵抗 (N), R_Iは慣性抵抗 (N)である。ただし, C_Rは転がり抵抗係数 (= 0.012), C_{AR}は空気抵抗係数 (= 0.194N/A/V²), Wは車両総重量 (= 92610 N), Aは車両前面投影面積 (= 6.73 m²) であり, また, Vは車速 (m/s), wは車量回転部分相当慣性重量 (N), gは重力加速度 (m/s²)をそれぞれ表す。

したがって台上単体運転におけるダイナモメータの回転速度とトルクは次式により定められる。

$$\omega_{DY} = [V / (D/2)] \times (\varepsilon / \varepsilon_B) \quad \dots \dots (5)$$

$$T_{DY} = [R \times (D/2)] / [(\varepsilon / \varepsilon_B) \times \eta_M] \quad \dots \dots (6)$$

ここで、 ω_{DY} はダイナモメータ回転速度 (rad / s), T_{DY} はダイナモメータ吸収トルク (Nm)である。

ただし、 D は想定車両の駆動輪外径 (m), ε はモータから駆動輪までの仮想的な総減速比, ε_B は単体台上運転装置上に設置した減速機の減速比, η_M は機械伝達効率を表す。

減速時に R が負の値をとる場合は制動状態となるためダイナモメータ側からモータを駆動し、モータ側では回生制動機能を最大限に活用し、制動力が不足する場合は摩擦制動を併用した。この台上運転によりモータシステムの要求電力と回生電力を連続測定し、同時にダイナモメータ回転速度と軸トルクを検出して機械出力を測定した。これらのデータを 500msec 毎にデータログに記録し、測定後にトリップ単位、または運転区間全体にわたって解析を行った。

3・2 測定結果 図4に、上記の台上運転で得られたモータシステムの電力入出データの一例を、車両一台分の換算値で示す。電力が正の値を示す場合はモータシステムが電源から電気エネルギーを受けて機械エネルギーに変換し車両を駆動している状態を示す。以下、これを「要求電力」、その積算値を「要求電力量」という。また電力が負の値を示す場合は制動時にモータシステムが車両の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し電源側に戻している状態を示す。以下、これを「回生電力」、その積算値を「回生電力量」という。

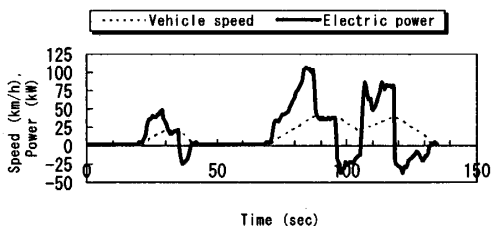


Fig. 4 Required and Regenerative Electric Power

図5に、各種パターン運転における各トリップ毎の要求電力と回生電力の最大値および平均値を示す。要求電力の最大値は 15~130 kW であるが、平均値はその 1/3 程度に過ぎない。回生電力は最大値、平均値とも概ね要求電力の 70% 弱のレベルである。

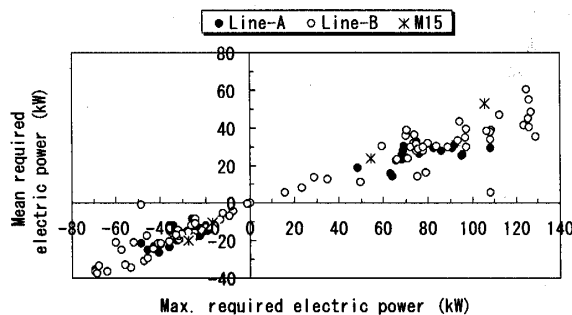


Fig. 5 Required and Regenerative Energy for Trip

なお路線Bのトリップにおける最大の回生電力はM15 モードの場合の約三倍に上っている。これは実際の路線走行においてはM15 モードと比べて、最高車速は 40km/h と同一であるが、減速度が大きいいため回生仕事率が大幅に上回るためと考えられる。

図6に、各種パターン運転における各トリップ毎の機械仕事量と電力量を示す。1トリップ当たりの要求電力量は 0.6 kWh 以下で、これを単位走行距離当たりの値として示すと 1.2~1.3 kWh/km である。当然ながら電気エネルギーと機械エネルギーの変換の過程ではモータ本体や制御器で損失が生じるため、要求電力量は機械仕事量を 20~30% 程度上回っている。一方、1トリップ当たりの回生電力量は、その要求電力量の 15~35% に相当する。これらを運転区間全体で見ると、実走行条件におけるモータシステムの平均的な電気-機械エネルギー変換効率は約 70% であり、また要求電力量の約 1/4 が制動時に回生される結果となる。

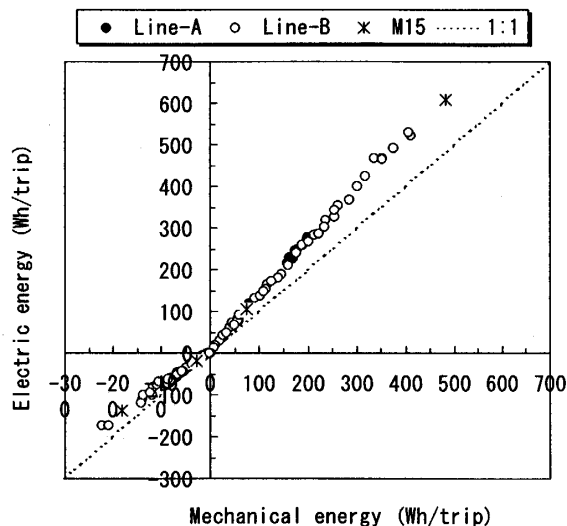


Fig. 6 Required and Regenerative Energy for Trip

4 模擬ハイブリッドシステムによるエネルギー効率評価の検討

4.1 実験方法と実験条件 図7に実験装置の概要を示す。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、これに二次電池（以下、「電池」という。）やウルトラキャパシタ⁽⁵⁾（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。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6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±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グに記録し、測定後に正負別積算等の演算処理を行った。

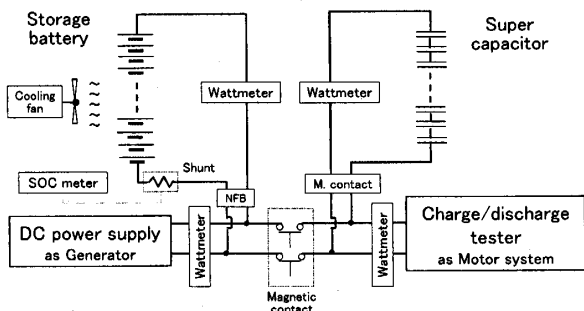


Fig. 7 Static Simulated Series Hybrid System

Table 2 Specification of Battery and Ultra Capacitor

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

4.2 蓄電装置の選定について 図8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秒目付近の減速における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、実機では回生機能を制限し回生電力を絞ることが必要となる。

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、電圧は280V以下に留まる。特に後者の場合、電池は小容量でありながらキャパシタによる電圧上昇抑制の効果が顕著に現れている。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」を検討対象とすることとした。

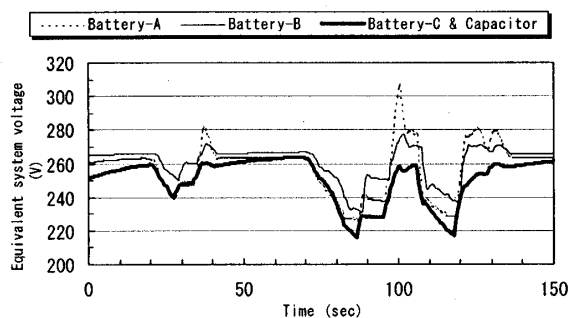


Fig. 8 System Voltage under M15-mode Operation (Generator Run)

4.3 蓄電装置における充放電損失について

4.3.1 車上的における発電電力量の行方 図9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。

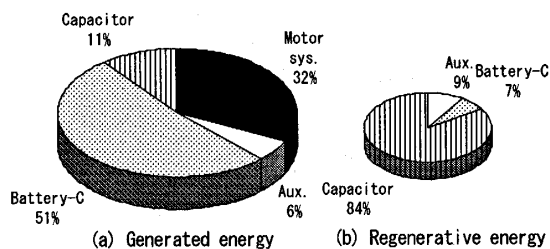


Fig. 9 Destination of Generator & Regenerative Energy (Line-B Operation, Generator Run or Stop)

4・3・2 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逸失は無視できるものと仮定して⁽⁶⁾、以下の方法により実測した。すなわち図 10 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。

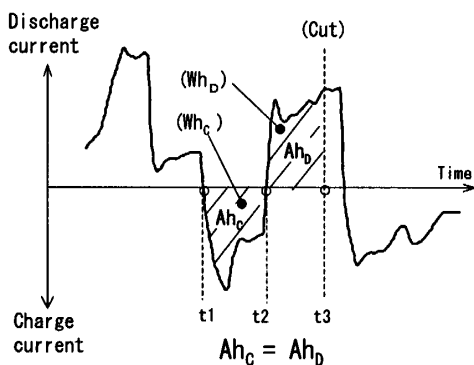


Fig. 10 Measurement of Local Charge-discharge Loss

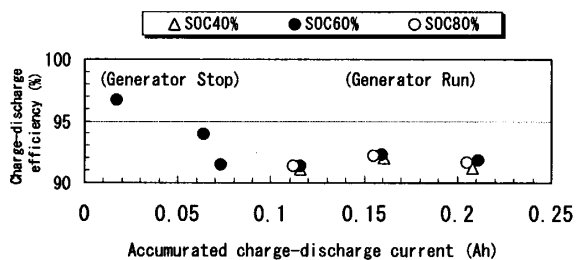


Fig. 11 Charge-discharge Efficiency of Battery-B (M15-mode Operation)

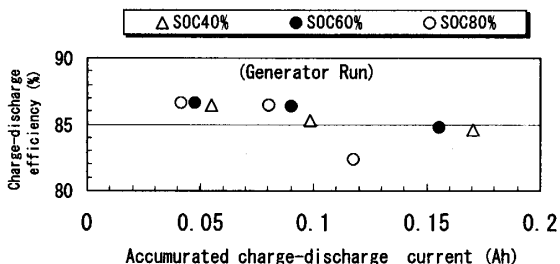


Fig. 12 Charge-discharge Efficiency of Battery-C (M15-mode Operation, with Capacitor)

図 11～図 13 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。

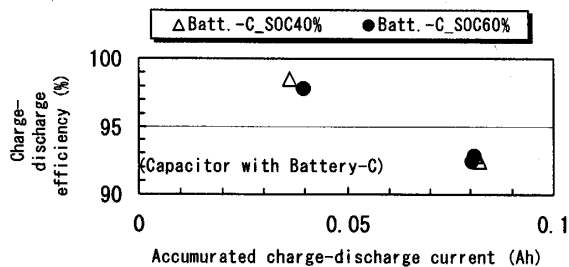


Fig. 13 Charge-discharge Efficiency of Capacitor (M15-mode Operation, with Battery-C)

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 は殆ど充電されないため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。

4・3・3 内部抵抗と充放電損失の計算 図 14 に、電池のステップ状の定電流放電における分極（電圧降下）を模式的に示す。開始直後の急激な降下は電気的な抵抗分極に起因し、降下量及び電力損失はオームの法則に従うとされる⁽⁷⁾。それに続く曲線状の降下は活性化分極に起因するとされるが⁽⁷⁾、損失量は明確にされていない。

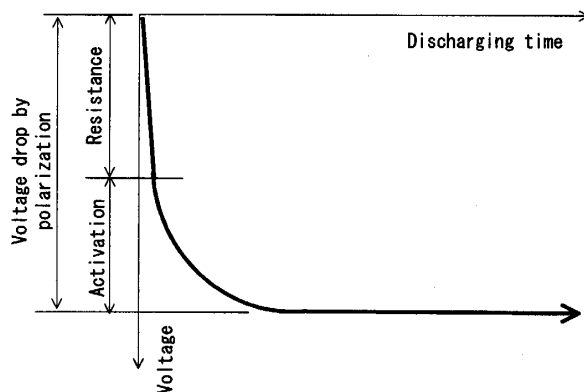


Fig. 14 Battery Voltage Drop under Step-discharging

図 15 に、電池 C を図 13 のようにステップ状に放電させた場合の電圧降下における、抵抗分極分と活性化分極分を示す。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、放電時の電圧降下は全て電気抵抗により生じるものと仮定した。

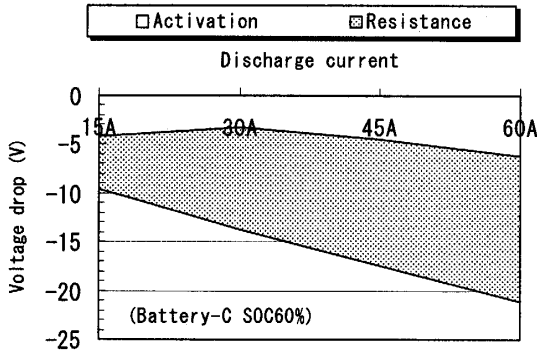


Fig. 15 Voltage Drop by Polarization (Battery-C)

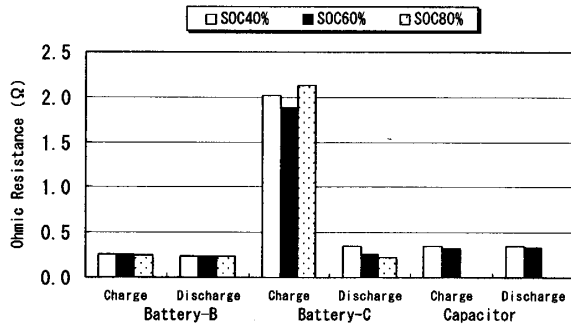


Fig. 16 Ohmic Resistance of Storage Device

図 16 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、各々の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、電流二乗値に電気抵抗値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⁽⁸⁾。

$$EL = (ELB_C + ELB_D + ELC_C + ELC_D) / 3600 \quad \dots (7)$$

$$ELB_C = \sum_{i=1}^p \int_{t1i}^{t2i} I_{BC}^2 \times R_{BC} dt \quad \dots (8)$$

$$ELB_D = \sum_{j=1}^q \int_{t1j}^{t2j} I_{BD}^2 \times R_{BD} dt \quad \dots (9)$$

$$ELC_C = \sum_{k=1}^r \int_{t1k}^{t2k} I_{CC}^2 \times R_{CC} dt \quad \dots (10)$$

$$ELC_D = \sum_{l=1}^s \int_{t1l}^{t2l} I_{CD}^2 \times R_{CD} dt \quad \dots (11)$$

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、 I_B は電池電流 (A) , I_C はキャパシタ電流 (A) , R_B は電池の電気抵抗 (Ω) , R_C 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区分毎の開始時刻と終了時刻を示す。

図 17, 図 18 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）において電池内部で生じる局所的な充放電損失エネルギーの計算値を、前述の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 19 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、局所的な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。

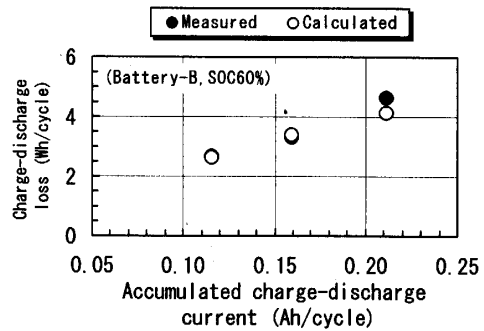


Fig. 17 Charge-discharge Loss in Battery-B (M15-mode, Generator Run, SOC 60%)

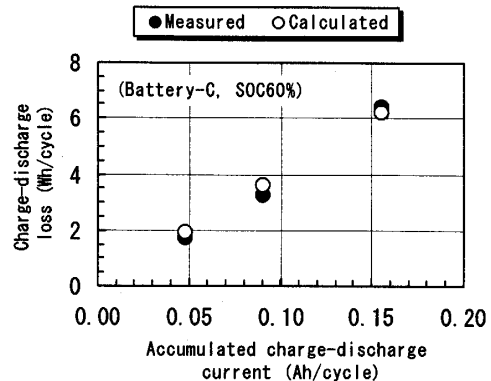


Fig. 18 Charge-discharge Loss in Battery-C (M15-mode, Generator Run, SOC 60%)

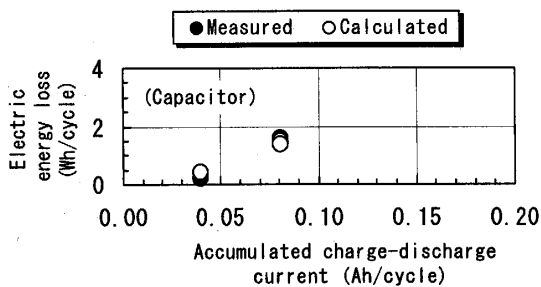


Fig. 19 Charge-discharge Loss in Capacitor (M15-mode, Generator Run, with Battery-C of SOC60%)

4・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20に、その計算結果の一例として、蓄電装置を「電池C (SOC 60%)・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。

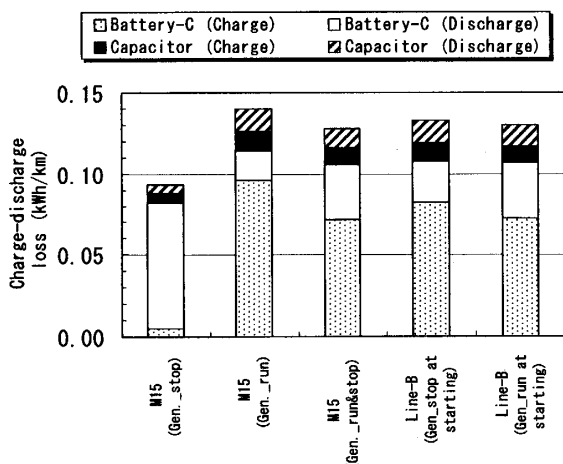


Fig. 20 Charge-discharge Loss in Pattern Operation

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21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。

$$\eta_{HCD} = 1 - (EL / E_{GEN}) \dots (12)$$

ここで、 η_{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。

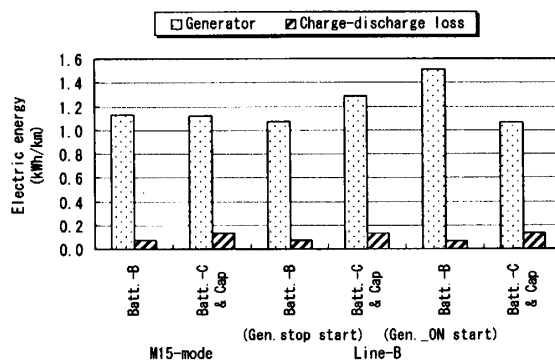


Fig. 21 Generated Energy and Charge-discharge Loss

図21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。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⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を大幅に上回り、EV用リチウムイオン電池に近い値⁽⁶⁾である。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利用を回避することにより、充放電に伴う損失が低減されるためと考えられる。

4・4 模擬システムのエネルギー効率評価 表3に、本実験の模擬シリーズ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。模擬シリーズハイブリッドシステムについては、発電エンジンと発電体の効率を最近の技術動向から仮定し、本実験の結果から得たモータシステムと蓄電装置の効

率を乗算した。また制動時におけるエネルギー回生の効果を反映するために、次式で示すように、パターン運転にわたる要求電力量を「要求電力量と回生電力量の差分」で除した値を「回生係数」と定義した。

$$REG_C = E_{REQ} / (E_{REQ} - E_{REG}) \quad \dots (13)$$

ここで、 REG_C は回生係数、 E_{REQ} はパターン運転全体にわたる要求電力量(kWh/test)、 E_{REG} はパターン運転全体にわたる回生電力量(kWh/test)である。

これを上記の各要素の効率の乗算値に乘じることにより、ハイブリッドシステムの総合効率を算出した。従来型バスについては、大型路線バスの所要駆動エネルギーを式(7)~(11)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⁽¹¹⁾ ⁽¹²⁾)と対比することにより、エンジンの熱効率を概算した。

Table 3 Estimation of total energy efficiency

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	0.366	0.345	0.21~0.26

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。

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、充放電効率もそれに準じる90%程度の値に達する可能性が明らかになった。キャパシタは車両の新造から廃車に至るまで交換無しで使用可能であると推定されるが⁽⁵⁾、ニッケル水素電池等の新型電池をハイブリッド電気自動車に使用した場合の耐久性や寿命については未だ明らかでない点

が多い。したがって蓄電装置を上記のように「小容量鉛酸電池とキャパシタの併用」とすれば、車両の使用過程で交換を必要とする蓄電装置は小容量鉛酸電池だけで済むため、蓄電装置に係わる費用軽減の点でも有利であると考えられる。

5. 結論

本研究によって得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 実車走行調査に基づいて路線バスの運転条件に最適なシリーズハイブリッドシステムを設定し、模擬実験によりモータシステム等の電力出入状況を把握した。
- (2) 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、それが発電エネルギーに対して5~10%程度であることを明らかにした。
- (3) 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。
- (4) 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, 20025538, (2002)
- 3) 加部 他, 自動車技術会講演前刷集, 20035154, (2003)
- 4) H. Smizu, et al, KAZ the Super Electric Vehicle, EVS-18 Proceedings, (2001)
- 5) 佐々木 他, 自動車技術会講演前刷集, 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 (2000), 85-92
- 7) 日本電池(株), 最新実用二次電池(第2版), (1999), 215-217, 日刊工業新聞社
- 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), (1995), 21-23
- 10) 小椋 他, 電気自動車の開発, 自動車技術, Vol. 49-No.9(1995), 28-33
- 11) バスマイナターナショナル 75, Vol.14-No.1(2003), 84-85, ポルト出版
- 12) 国土交通省内部資料