

B-55 低環境負荷型都市交通手段に関する研究

(2) 都市交通自動車に適した高効率型動力システムの技術的評価に関する研究

研究代表者 交通安全公害研究所交通公害部 成澤和幸

運輸省 交通安全公害研究所

交通公害部

原動機研究室

成澤和幸・林田守正

計測研究室

小高松男・石井 素

燃費性能研究室

野田 明

音響研究室

田中丈晴

(委託先)

早稲田大学

大聖泰弘

平成9-11年度合計予算額 29,983千円

[要旨]

都市域における実走行パターンを用いて、従来型乗用自動車を走行させる際の有効エネルギーと廃棄エネルギーを定量的に解析するとともに、各種のエネルギー回生システム構成要素の国内外における開発状況を調査し、乗用自動車に最適な動力方式を検討した。次にシャーシダイナモメータ上での実車運転、およびモータ単体運転装置による台上運転により、スーパーキャパシタと二次電池による運動エネルギー回生効果について実験的に考察した。さらに、実車の駆動モータシステムと等価な電力出入を再現できる充放電試験装置に電池、スーパーキャパシタ、発電機を配置して模擬的なハイブリッドシステムを構成し、各要素の容量や接続を替えて入出電力量を計測した。それにより、ハイブリッドシステムにおける回生効果や、構成要素間のエネルギー移動についての詳細な評価手法を検討した。それらの検討結果に基づき、エネルギー回生可能な高効率型自動車を都市域に導入した場合の二酸化炭素排出量抑制効果を予測した。

[キーワード] 廃棄エネルギー、エネルギー回生、二次電池、スーパーキャパシタ

1. 序

わが国における二酸化炭素排出量の約20%は運輸部門から生じており、そのうちの自動車が占める比率は約9割となっている。輸送機関別のエネルギー消費の伸びをみても、自動車はその伸び率が高い。したがって、乗用自動車の低燃費化を図り、二酸化炭素排出を抑止することは運輸部門において最も重要かつ緊急の課題である。とりわけ、乗用自動車が都市域で使用される際には燃料消費効率が極めて悪い。そこで、都市域において二酸化炭素排出量の少ない乗用自動車の普及を図るために、エネルギー回生技術を応用して高効率化を図った乗用自動車用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

乗用自動車都市域で使用される際には頻繁に加減速を繰り返すため、減速時において運動エネルギーをブレーキ等で消費し熱として放散することから燃料消費効率が極めて悪い。また、従来の自動車用機関では最良の運転条件でも燃料の有するエネルギーの20~30%が出力として使用されるにすぎず、残りは熱エネルギーとして廃棄される。そこで、本研究では、それらの廃棄エネルギー回生が可能な高効率の自動車用動力システムについて、都市域で使用する乗用自動車に最適な方式を明らかにした上で、廃棄エネルギー回生技術の向上を図り、その結果を基にエネルギー回生型乗用自動車を都市域に導入した場合の二酸化炭素排出抑止効果を推定することを目的とする。

3. 研究内容

まず、都市域で使用される乗用車の使用実態に適する廃棄エネルギー回生の方式を検討するとともに、スーパーキャパシタ（以下、キャパシタとも呼ぶ）等の構成要素の開発状況を調査し、それに基づいてエネルギー回生効率の向上について基礎的な検討を行った。次に、エネルギー回生システムが応用可能な原動機方式を選定し、回生システムとの組合せ手法を考察した。また最新の構成要素技術を用いたエネルギー回生システムを試作し、効率向上を図った。最後に、ハイブリッド原動機とエネルギー回生システムを組み合わせた高効率動力システムの最適化を図り、それを採用した自動車を都市域に導入した際の二酸化炭素抑止効果を総合的に評価した。

4. 結果・考察

4. 1. 都市内乗用車の有効エネルギーと廃棄エネルギーの推定

(1) エンジンにおける燃料エネルギーの損失

現在の自動車では、エンジンにおいて、燃料が有する化学エネルギーの一部だけが機械出力として有効利用され、残りは機械損失、冷却損失や排気ガス損失として廃棄される。10・15モードを例として運転時の所要駆動エネルギーと燃料消費量から計算すると、代表的な小型ガソリン乗用車の場合、実用状態において燃料エネルギーが車両駆動に利用される割合は10~15%である⁽¹⁾。

したがって燃料エネルギーの85~90%がエンジン段階での損失であり、その約半分、すなわち燃料エネルギーの約40%が排気の熱エネルギーおよび、ガス運動エネルギーとして放出されている。この排気のエネルギーは、一部の自動車ではターボチャージャでエンジン過給に利用されているが、タービン発電機で電氣的に回収すればより高度な有効利用が可能になると考えられる。

(2) 車両駆動エネルギーの解析

表1 加減速を伴う都市内走行パターン

Driving pattern	10・15mode	City-A	B	C	D	E
Max. speed (km/h)	70	23.7	44	49	58	69
Average speed (km/h)	30	5	11	25	22	39
Running avg. speed (km/h)	33	8	18	30	36	50
Stooping time (%)	29	42	40	14	40	22
Go-stop frequency (/km)	1.7	15.3	4.5	1.7	1.7	0.5

解析に用いた都市内走行パターンを表1に示す。10・15モードの他、東京都内における乗用車の実走行データから抽出した実走行パターン、City-AからCity-Eまでの5種類を用いた。City-

Aは渋滞が激しい状態、City-Eは比較的流れが速くかつ加減速幅の大きな状態を表し、City-B～Dはその中間的なパターンである。

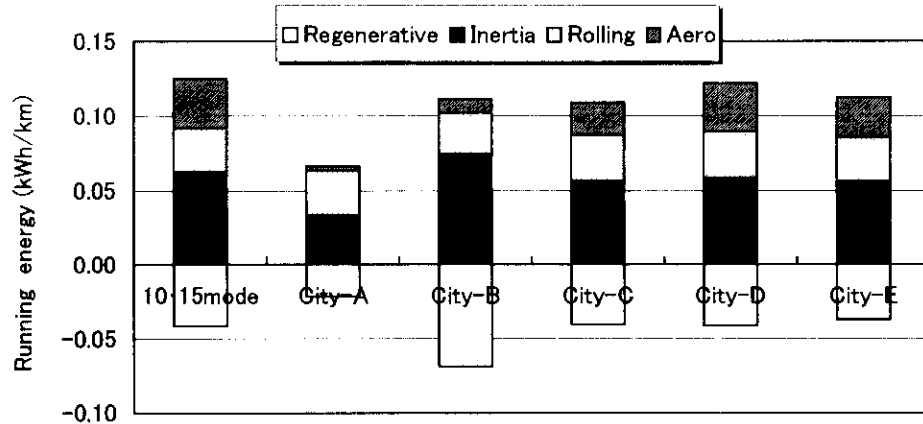


図1 都市内走行における車両駆動エネルギーと回生可能エネルギー

図1に小型乗用車でこれらのパターンをシミュレーション走行した場合の車両駆動エネルギー構成と回生可能なエネルギーの計算結果を示す。いずれのパターンでも加減速の頻繁さを反映して車両駆動エネルギーの50～60%が慣性加速エネルギーであり、減速時の走行抵抗を相殺した分は計算上は回生が可能と推定できる。残りは回生不可能な転がり抵抗と空気抵抗であり、車速が高いパターンほど空気抵抗の割合が大きい。回生可能な運動エネルギーは慣性加速エネルギーの30～70%、車両駆動エネルギー全体の20～40%に相当し、これを何らかの手段によって回収、再利用することにより大幅なエネルギー効率の向上が図れると予測される。

4. 2. エネルギー回生システム構成要素の開発状況と動力方式の選定

制動時に運動エネルギーを回収し蓄積するためには駆動モータを発電機として作動させ、発生した電気エネルギーを二次電池等のデバイスに蓄積する、いわゆる電力回生制動が最も多く用いられている。新型二次電池として、エネルギー密度が鉛酸電池の約2倍のニッケル水素電池が市販ハイブリッド自動車等に実用化され、リチウムイオン電池の開発も進んでいる。その開発例を図2、図3に示す⁽²⁾。

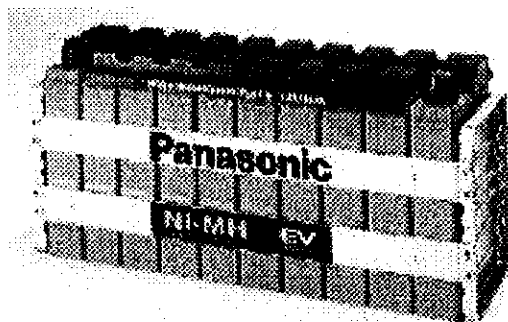


図2 ニッケル水素電池の開発例⁽²⁾



図3 リチウムイオン電池の開発例⁽²⁾

また電池に比べ急速大電流の充放電が可能で耐久性にも優れる回生素素としてキャパシタとフライホイールが研究されている。キャパシタは有機電解液系と希硫酸系があり、後者の開発例を図4

に示す⁽³⁾⁽⁴⁾。フライホイールはエネルギーを高速回転体に機械的に貯蔵し外部との授受は電気的に行う要素であり、その開発例を図7に示す⁽⁵⁾。フライホイールはエネルギー密度がキャパシタより大きいが機械的な信頼性の確保が課題である。また、排気を持つ熱エネルギー等を回収するタービン発電機が研究されており、乗用自動車に装着可能な小型のタイプのタイプも試作されている。

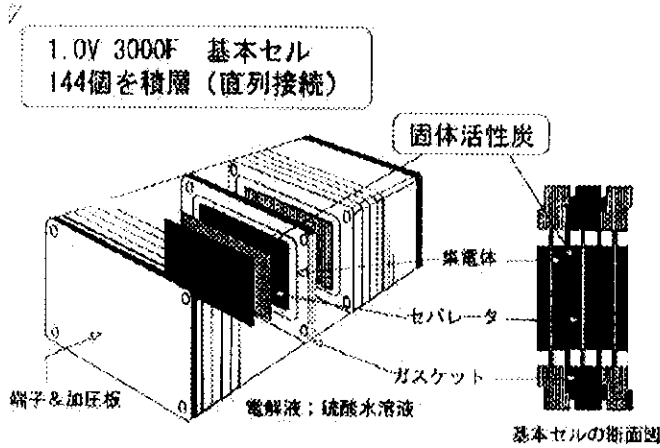


図4 スーパーキャパシタの開発例⁽³⁾⁽⁴⁾

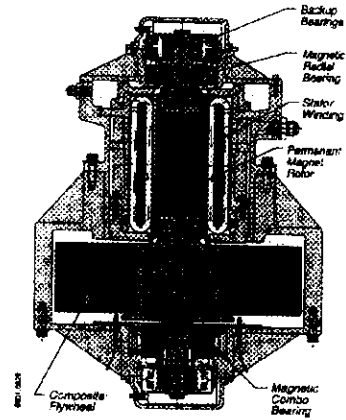


図5 フライホイールの開発例⁽⁵⁾

一方、エネルギーを機械的に回生する機構としては、制動時に油圧ポンプを駆動しアキュムレータに圧力エネルギーとして蓄積し再発進時に利用する「蓄圧式」と称する方式が開発されているが、機器の重量や容積がかさむため大型バス等に限定して試用されている。したがって搭載スペースや重量面の制約が極めて大きい乗用車においては電気的手段によりエネルギー回生を行うことが適切と考えられるため、原動機としては電力回生制動が可能な電気動力方式またはシリーズハイブリッド電気方式を選定し、それらに注目として実験的な検討を行うこととした。

4. 3. スーパーキャパシタ併用によるエネルギー回生向上の基本的な把握

市販の小型電気自動車にスーパーキャパシタを付加してシャシーダイナモメータ上で加減速を伴う運転を行い、減速時の電力吸収量を測定して電池のみの場合と比較した。それにより、キャパシタによるエネルギー効率向上を図るための基礎資料を得た。

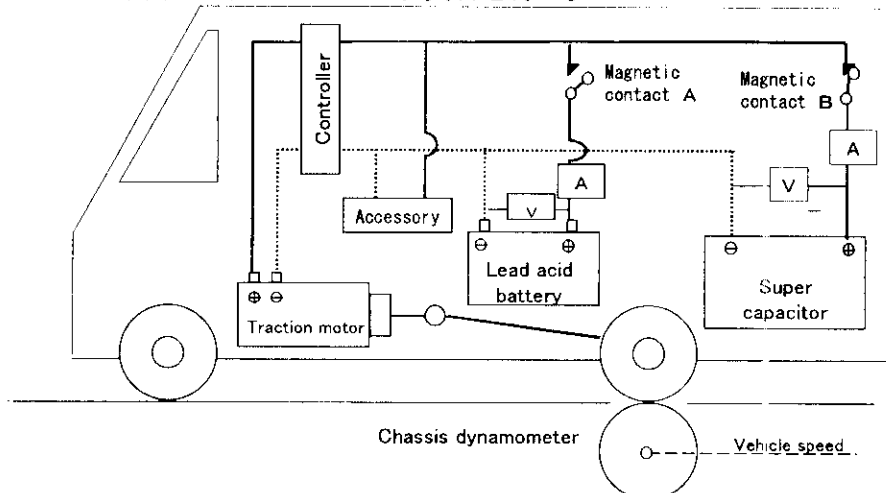


図6 実車台上実験装置の構成

(1) 実験方法

図6に実車台上実験装置の概要を示す。小型電気自動車にキャパシタを付加し、シャシーダイナモメータ上に架装して表1の都市内加減速パターン運転を行った。減速時は回生制動を活用するために2速までシフトダウン操作を行った。

供試車両とキャパシタの諸元を表2、表3に示す。キャパシタの最大蓄積エネルギーは電池の僅か0.15%相当である。二次電池とキャパシタには電磁開閉器A、Bを設け、主回路と断続した。開閉操作としては、車両の加減速に応じてどちらか一方を閉じる「切換」、常に双方を閉じる「並列」、常に開閉器Aだけを閉じる「電池のみ」を設定した。「切換」の場合、減速時は開閉器Bを閉じてキャパシタに回生電力を吸収させ、回生が失効したら開閉器Aを閉じて電池に切り換えた。また、キャパシタに蓄えたエネルギーを直後の加速時に放出する「切換1」とキャパシタ電圧が上限に達するまでは放出しない「切換2」⁽⁴⁾の二通りを設定した。電池とキャパシタの電流はクランプ式電力計で連続測定し、測定後に積分して各々の入出エネルギー量を算出した。

表2 供試電気自動車の諸元

Item	Specification	
Vehicle mass (kg)	1360	
Front projection area (m ²)	2.19	
-	Type	D.C. Shunt
	Max. power (kW)	20
	Max. torque (N·m)	66
Battery	Type	Lead-acid
	Capacity (Ah)	150
	Bass voltage (V)	120
	Int. resistance(mΩ)	70
Transmission	5 speed	

表3 実車実験用スーパーキャパシタの諸元

Item	Specification
Max. voltage (V)	160
Capacity (F)	6.4
Int. resistance (mΩ)	100
Storage energy (Wh)	22

(2) 実験結果および考察

図7に「切換」で70km/hからの減速、停止の際の回収電力量を、キャパシタの初期電圧を変えて測定した結果を示す。変速時の回生中断や電氣的な損失等により回収電力量は計算値の60%以下に留まっている。キャパシタは初期電圧が低いほど大電流の吸収が可能のため、初期電圧0Vの場合の回収量は120Vの場合の約2倍であった。また電池との合計回収量もキャパシタ初期電圧が低いほど増加する結果が得られた。本実験の条件設定範囲では「電池のみ」に比べて合計回収量が多いのは初期電圧が80V以下の場合に限られることから、電力回収量を増やすためには、減速前に蓄積エネルギーを放出してキャパシタ電圧を下げておくことが重要と考えられる。

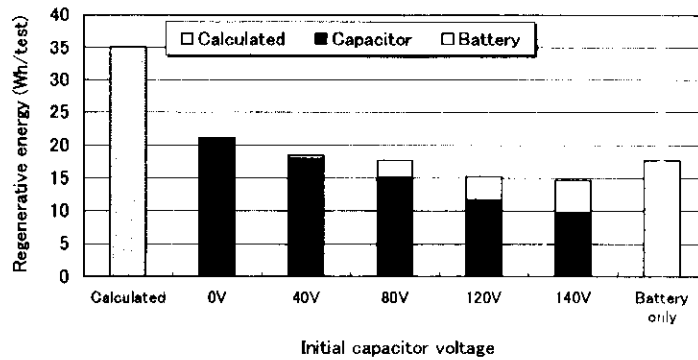


図7 時速 70km/h からの減速時に電池とキャパシタに回収されるエネルギー

図8～図10には都市内パターン運転時のキャパシタと電池による運動エネルギー吸収量の例を示す。いずれの場合もキャパシタ自体のエネルギー吸収量は、「切換1」の場合が「切換2」や「並列」より多く、特にCity-AやCity-Cの比較的車速の低いパターンでは大差が生じている。「切換2」では回収エネルギーの蓄積、「並列」では電池により共にキャパシタの電圧が高めに維持されるためにエネルギー回収量が少なくなったと考えられる。一方電池との合計回収量をみると「切換」運転が「並列」や「電池のみ」を下回る場合がある。これは高速域からの減速時には、キャパシタ電圧は急上昇するが、電池電圧は上昇幅が小さいため、エネルギーは後者に多く回収されるためと考えられる。

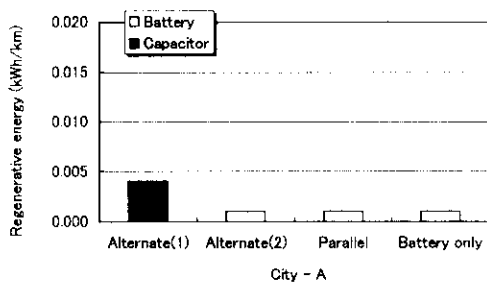


図8 City-A運転時の運動エネルギー吸収量

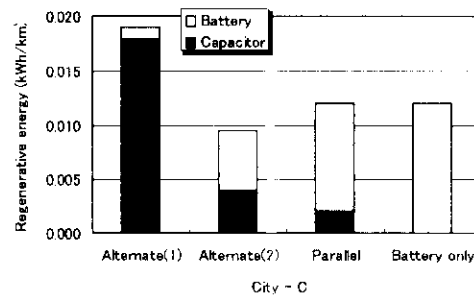


図9 City-C運転時の運動エネルギー吸収量

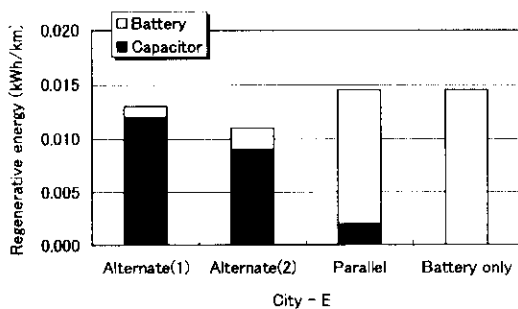


図10 City-E運転時の運動エネルギー吸収量

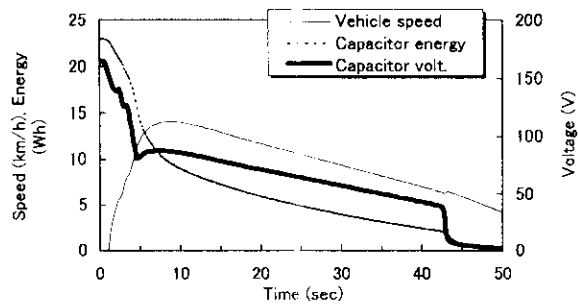


図11 キャパシタ満充電時からの発進状況

図11には満充電状態のキャパシタのエネルギーのみを使用して、10モードの加速を試みた結果を示す。車速が14km/hに達した時点で電圧が約70Vまで低下し、エネルギーは半分近く残存するにも拘わらず加速の継続が不可能となった。

以上の実験結果から、キャパシタの急激な電圧変動特性が加減速運転時のエネルギー回収・再利用に有利に働く一方、制約をもたらす点が明らかになった。したがって、エネルギー回生効果を上げるためには、運転条件に応じて電池とキャパシタの機能分担や容量の最適化を図り、DC-DC コンバータの使用も検討する必要があると考える。

4. 4. エネルギー回生の最大化および評価方法についての検討

シティコミュータカークラスの超小型電気自動車を単体台上運転装置上に模擬的に設定した。そのエネルギー蓄積デバイスとして二次電池とスーパーキャパシタを併用して都市内運転し、エネルギー回生量を最大化するための検討を行うと共に、キャパシタによる省エネルギー効果を評価する手法を考察した。

(1) 実験装置および実験条件

表4に本実験の供試車両の諸元を示す。駆動系にはインバータ制御の高出力交流モータと固定減速機を組み合わせ、エネルギー蓄積デバイスとして、スーパーキャパシタを二次電池と併用した。

表4 想定した模擬車両の諸元

Items	Specification	
Gross vehicle mass (kg)	910	
Front projected area (m ²)	1.7	
Traction motor	Type	AC Induction
	Max. power (kW)	40/6000rpm
	Max. torque (Nm)	125/3000rpm
	Controller	IGBT Inverter
Battery	Type	Lead - acid
	Mass (kg)	200
	Bass voltage (V)	240
Gear box	1 speed (Fixed)	

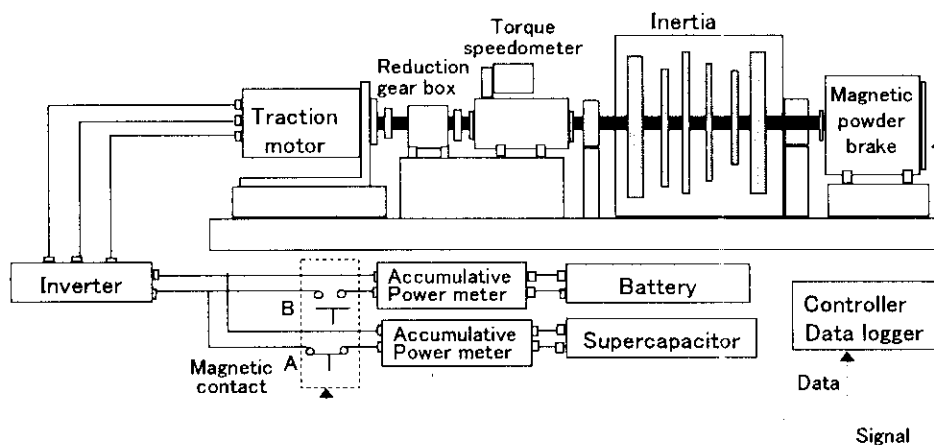


図12 単体台上実験装置の構成

図12に模擬供試車両を設定した単体台上運転装置の構成を示す。装置の一端に駆動モータを架装し、慣性板と電磁パウダブレーキにより、車両質量と減速比に応じた実車相当の負荷を発生させた。スーパーキャパシタ、電池および主回路の電気エネルギー出入量は正負別積算電力計で測定した。

表5 単体実験用スーパーキャパシタの諸元

Item	Specification
Max. voltage (V)	310
Capacity (F)	3.2
Int. resistance (mΩ)	200
Storage energy (Wh)	44
Module	26

表5にスーパーキャパシタの諸元を示す。キャパシタの最大蓄積エネルギーは電池の約0.7%相当である。キャパシタと二次電池には前述の実車実験の場合と同様に電磁開閉器A、Bを設け、主回路と断続した。また開閉操作も同じく、「切換1」、「切換2」、「並列」および「電池のみ」を設定した。回生制動のみでは制動力が不足する場合は摩擦力による機械制動を併用し、またキャパシタのエネルギーで加速中に出力が低下したら速やかに電池に切り換えた。表6には本実験で用いた緩急二通りの基本的な減速パターンおよび減速・加速パターンを示す。

表6 基本的な減速・加速パターン

Pattern	(Speed range)	Slow operation	Steep operation
Braking to stop	70→30km/h	-2km/h/sec	-4km/h/sec
	30→0km/h	-3km/h/sec	
Braking & accelerating	70→50km/h	-2km/h/sec	-4km/h/sec
	50→70km/h	0.9km/h/sec	

(2) 実験結果および考察

① スーパーキャパシタによる制動時の電力回収量増加

ア 回生制動時の発生パワーと回収能力

図13に、70km/hからの減速時に生じる制動パワー（計算値）と、電池の電力吸収能力を示す。緩減速の場合は電池だけで制動パワーの吸収が可能であるが、急減速の場合は減速初期に制動パワーが電池の吸収能力を越えるため、その不足分は機械制動により熱として廃棄せざるを得ない。図14に、初期電圧の異なるキャパシタに直流250Vをステップ状に加圧した場合の充電電力曲線を示す。キャパシタの初期電圧が低いほど充電電力が高く、特に初期電圧100Vの場合は10kW以上の充電を約3秒間保持し、最大25kW近くに達する。

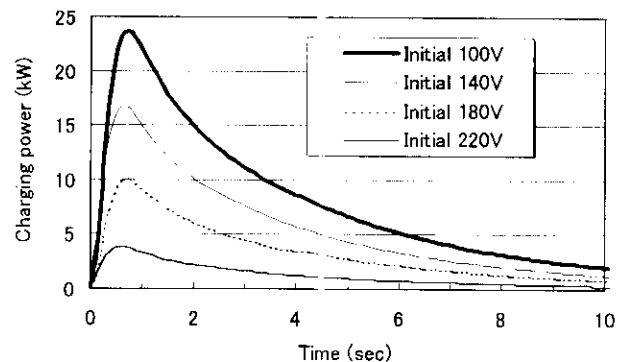
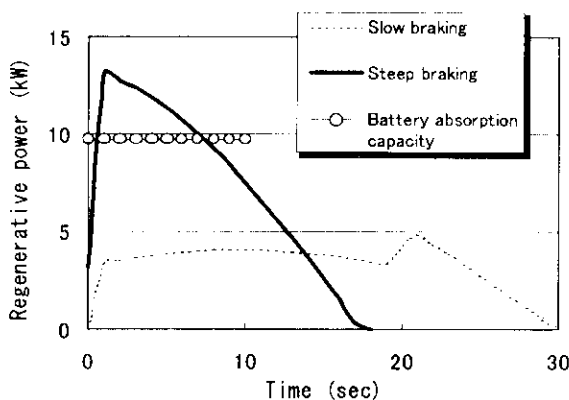


図13 70km/hからの減速時の制動パワーと電池の吸収能力

図14 キャパシタの直流250Vステップ加圧時の充電電力

車両主回路の回生制動時の最大起電力は約 300V であり、その際のスーパーキャパシタの回収能力は図 14 の値を大きく上回ると予想されるため、図 13 に示す減速初期の大きな制動パワーをキャパシタにより回収できると考えられる。

図 15 に各種の開閉器操作のもとで、70km/h から急減速を行った場合のキャパシタと電池のエネルギー回収量を示す。「切換」の場合は図 14 と同様初期電圧を 4 段階に設定したが、キャパシタの初期電圧が高いほどキャパシタ単体だけでなく、電池と合計エネルギー回収量が減少する結果を得た。例えば初期電圧 100V の場合の合計吸収量は「電池のみ」の場合を約 20% 上回り、その大半をキャパシタが吸収しているが、初期電圧 220V の場合は「電池のみ」の場合とほとんど差が認められず、キャパシタの分担率も 40% 程度である。これは、キャパシタの初期電圧が高いほどエネルギー吸収の余地が少ないことに加え、パワー面で吸収能力の劣る電池へ早い段階で切り換えられたため機械制動による損失量が増大したと考えられる。「並列」の場合の合計回収量は「電池のみ」の場合との差が小さかったが、これはキャパシタの電圧変動が電池によって小幅に抑えられ、キャパシタへのエネルギー回収量が少量に留まったものと推定される。

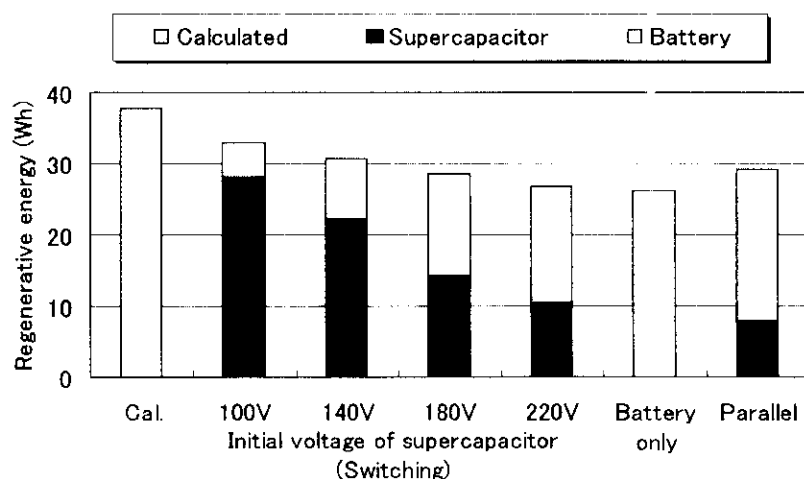


図 15 70km/h からの急減速時にキャパシタと電池に回収されるエネルギー

イ 都市内パターン運転時のエネルギー回収量

前述の四通りの開閉器操作により 6 種類の都市内パターンにしたがって運転を行い、スーパーキャパシタおよび電池へのエネルギー吸収量を計測した。その結果を図 16～図 21 に示す。

「切換 1」の操作を行った場合、低速型の City A では「電池のみ」の場合より 30% 以上増加し、その他のパターンでの合計回収量は「電池のみ」の場合より 10%～15% 増加して計算値の 80% 前後に達した。主回路から発生する回生電力は、City A では起電力が弱く、一方中・高速型の City E の減速時には急激に上昇する。そのような電力の回収は電池では困難であるが、「切換 1」の操作では制動初期のキャパシタと主回路との電位差が大きくとれるためキャパシタへのエネルギー回収が顕著に促進されたと考えられる。しかも制動時のエネルギー回収は概ねキャパシタのみが担うため、電池寿命の向上にも寄与すると考えられる。しかし「切換 2」の場合はキャパシタの電圧が高めに維持されるため「切換 1」の場合よりも回収量が減少する。一方、「並列」の場合の合計エネルギー回収量は何れのパターンでも「電池のみ」の場合とほとんど差が無く、キャパシタの分担率

も 30~40%と低い。これらの結果から、キャパシタを電池と併用して回生制動時の電力回収量を増加させるためには、運転中にキャパシタの内部エネルギーを頻繁に放出して電圧を下げ、次の回生電力受入に備える「切換 1」の操作を行うことが適切と考えられる。

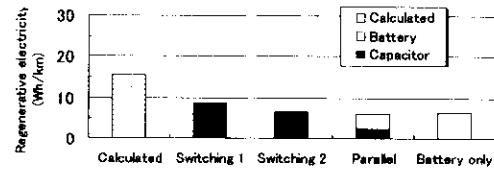
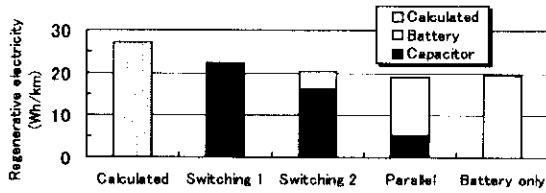


図 16 10・15モード運転中のキャパシタと電池への回収エネルギー 図 17 City-A 運転中にキャパシタと電池に回収されるエネルギー

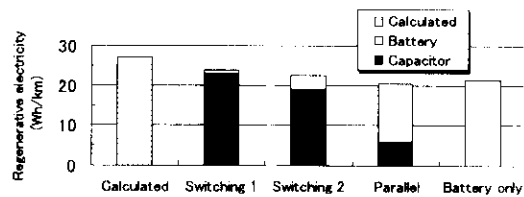
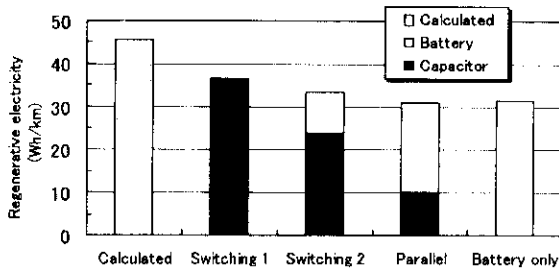


図 18 City-B 運転中のキャパシタと電池への回収エネルギー

図 19 City-C 運転中にキャパシタと電池に回収されるエネルギー

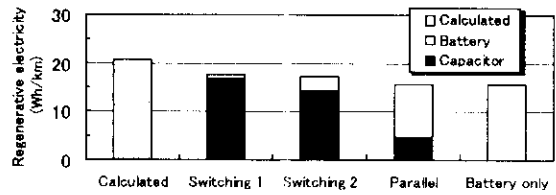
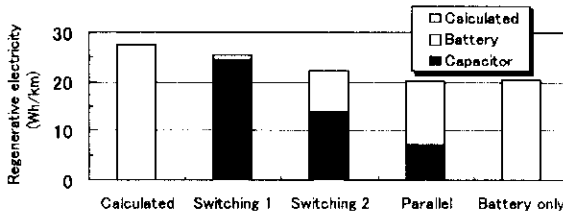


図 20 City-D 運転中のキャパシタと電池への回収エネルギー

図 21 City-E 運転中にキャパシタと電池に回収されるエネルギー

② 回収したエネルギーの再利用

電気エネルギーがスーパーキャパシタや電池に入出する過程では損失が生じるため、回収されたエネルギーに比べ、再利用可能なエネルギーは減少する。実走行時のキャパシタにおけるその比率を評価するため、表 6 下段に示す「減速・加速パターン」を繰り返し、キャパシタの減速時の入力エネルギーと直後の加速時の出力エネルギーを各サイクルに計測した。

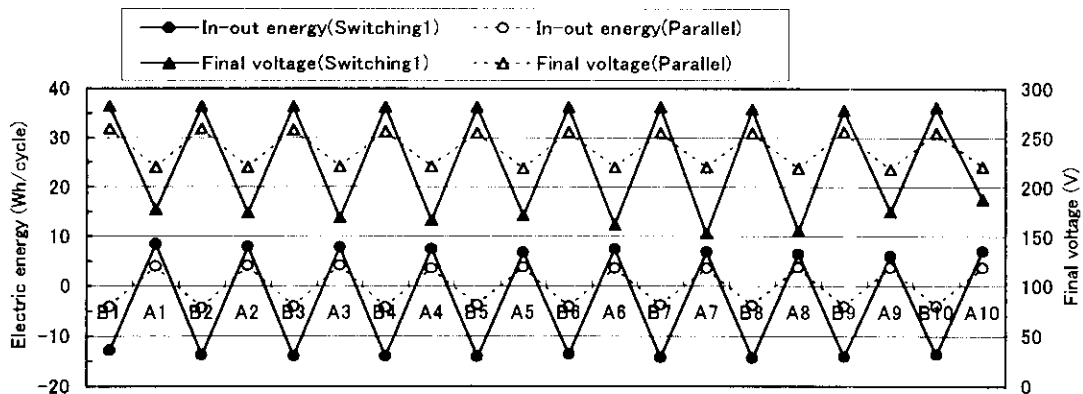


図 22 減速・加速繰り返し時のキャパシタ入出エネルギー
(70km/h—50km/h 急減速・急加速)

図 22 にその結果を示す。各サイクルにおける入力、出力エネルギーは各々ほぼ一定であり、キャパシタ電圧も概ね同じ範囲を上下しているため、入力エネルギーと出力エネルギーの比がキャパシタの充放電効率の指標であると考えられる。

図 23 に減速・加速繰り返し運転時のキャパシタの入力エネルギーと出力エネルギーの平均値を示す。緩急どちらのパターンでも「切換 1」では出力エネルギーは入力エネルギーの 50%程度であるが、「並列」では出力は入力 100%近い値である。そのため、例えば急減速・急加速において、「切換 1」での入力エネルギーは「並列」の場合の約 3.5 倍であるが、出力エネルギーは 2 倍弱に留まっている。その場合の「切換 1」操作におけるキャパシタの入力電流、出力電流は図 24 に示すように最大値でそれぞれ 50A、100Aにのぼり、「並列」操作での 10A 前後に比べて非常に大きくなる結果を得た。すなわち「切換 1」は吸収パワーが極めて大きい反面、キャパシタ入出に伴う内部損失が増大しエネルギーの有効再利用の点では不利な結果となった。このような損失を低減するためには、キャパシタの内部抵抗を極力低減すると共に、エネルギー放出時の電流値を抑制できるような再利用方法を検討する必要がある。

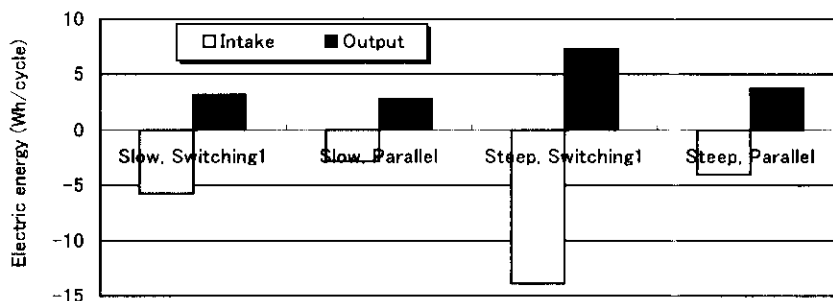


図 23 減速・加速繰り返し時の 1 サイクル毎のキャパシタ入出エネルギー
(70km/h→50km/h 急減速・急加速)

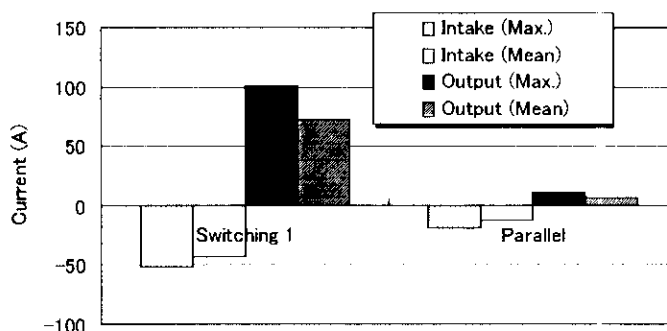


図 24 減速・加速繰り返し時のキャパシタ入出電流平均値
(70km/h→50km/h、急減速・急加速)

4. 5. シリーズハイブリッドシステムの最適化および評価手法の検討

実車の駆動モータシステムと等価な電力出入を再現できる充放電試験装置に電池、スーパーキャパシタ、発電機を配置して模擬的なハイブリッドシステムを構成し、各要素の容量や接続を替えて個別に入出力電力量を計測した。それにより、ハイブリッドシステムにおける回生効果や構成要素間のエネルギー移動についての詳細な評価手法を検討した。

(1) 実験装置および実験条件

表4で供試車両として想定した超小型電気自動車に発電機を付加してシリーズハイブリッド車とし、そのモータシステムの電力出入を充放電試験装置に置き換え、電池、キャパシタおよび発電機（直流電源で代替）を並列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。充放電試験装置は専用プログラムに従い、最小0.1秒刻みの電流または電力制御による過渡状態の充放電が可能である。充放電試験装置による模擬自動運転は、実機台上運転に比べ下記の利点を有する。

- a) 運転の精度が高く、繰返しによるバラツキが極めて小さい。
- b) 実車より低い電圧で、実車と等価なエネルギー出入状態が再現可能であり、構成要素の容量、種類選定の自由度が高い。
- c) 測定に要する時間が短く、また安全性が高い。

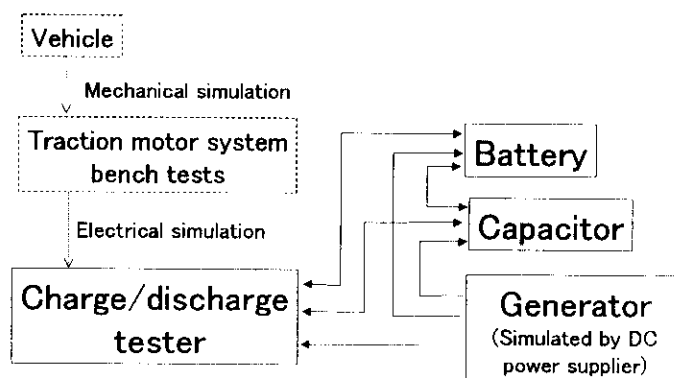


図25 充放電試験装置による電気的な模擬運転の概念

図25にその配置と、各要素間の電気エネルギー移動の概念を示す。発電機からモータシステム、電池、キャパシタへはエネルギーが一方的に出力されるが、後の三者の間では加速、制動等の運転状態によって相互にエネルギーが出入する⁽⁶⁾。表7～表9に、本実験で使用した電池、キャパシタおよび発電機（直流電源）の諸元を実車換算値で示す。模擬電気ハイブリッドシステムを構成する各要素の容量は、モータシステムの使用電圧を実車の30%にスケールダウンした条件下で、実車と等価な電力出入状態が再現できるように設定した。

表7 供試二次電池の諸元(実車換算値)

Item	A	B	C
Type	Lead-acid		Ni-MH
Capacity	15	25	28
Module	20 Series		
Bass voltage	240		

表8 供試キャパシタの諸元(実車換算値)

Item	A	B	C
Type	Nonorganic solution		
Max. voltage (V)	300		
Capacity (F)	3.4	6.9	10.3
Max. storage energy	43	86	129

表9 供試発電機の諸元(直流電源で模擬、実車換算値)

Item	A	B
Max voltage (V)	300	
Rated output power	2.5	5.3

キャパシタについては、1モジュール当たり耐電圧13V、容量80Fのものを直並列に組み合わせて所定の容量を設定した。これらの機器の電気エネルギー出入量を個別に正負別積算電力計で測定して、実車相当の値に換算した。

運転にあたっては、前項の、都市内パターンに従った単体台上実機運転から得た電力出入連続データに基づいて充放電試験装置専用の運転プログラムを編集し、自動模擬運転を行った。

(2) 実験結果および考察

① 二次電池の入出力特性 図26、図27に、電池Bおよび電池Cの、実走行時に対応した充放電状態における端子電圧を示す。

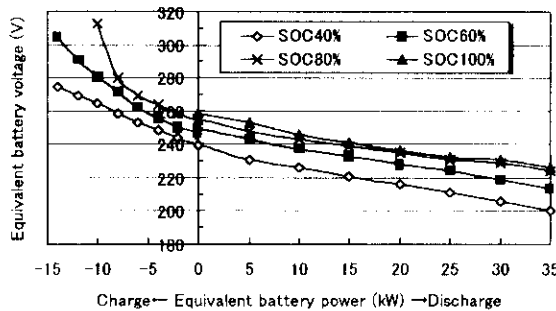


図26 電池Bの充放電電力と電圧(実車換算値)

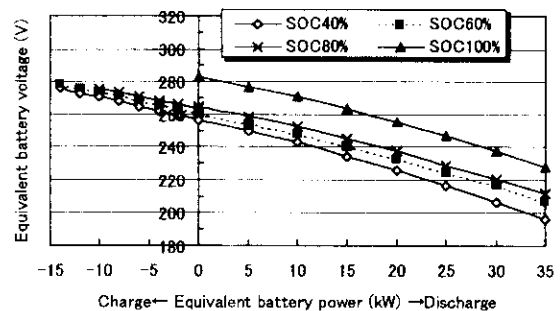


図27 電池Cの充放電電力と電圧(実車換算値)

電池電圧は、加速等による放電時は無負荷時よりも降下し、また回生制動等による充電時には上昇する。このような電圧の降下、上昇が過大であると、加速能力の維持や回生電力の回収に支障をきたすことになる。電池Bの場合、放電側では放電電力の増加に伴って直線的に降下する。また内部エネルギー量(SOC)が少ないほど低圧側に移行し、SOC60%以下ではその移行幅が大きい。しかし充電側では充電電力の増加に対して電圧は急激に上昇し、特にSOCが高い場合はモータシステムの上限(300V)を超えるので、急制動時には電池だけでは回生電力を全て回収できないことが予想される。これに対し電池Cの場合は放電・充電の両側にわたり電圧の変化は直線的である。電池Cは電池Bと比較して、放電側の降下率はやや大きい、無負荷時電圧が若干高いため急加速の放電時における電圧はほぼ同等である。電池CにおけるSOCの影響は電池Bとは逆に、満充電付近でやや大きい、ハイブリッド車で多用されるSOC80%~40%の範囲では比較的小さいため、発電機停止時でもSOCの変化にかかわらず安定した加速能力が得られると考えられる。また電池Cでは充電側での急激な電圧上昇が起きないため、実走行時の回生電力回収の点で電池Bより有利であると予想される。

② キャパシタの入出力特性 図28、図29にキャパシタCの、使用電圧の下限から上限までにおける充放電時の時系列的な電圧変化を示す。充電の場合、急制動時に相当する12kWの充電は15秒以上、また緩制動時相当の充電は30秒以上持続可能であり、キャパシタだけでも回生電力を回収でき

と考えられる。放電の場合は、加速に要する電力が回生電力を大幅に上回るため電圧は急激に低下するが、急加速時でも数秒程度は所要電力を供給できる能力を有すると考えられる。

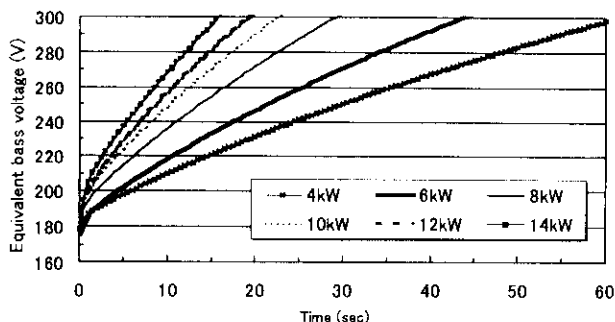


図 28 キャパシタCの充電時の電圧上昇(実車換算値)

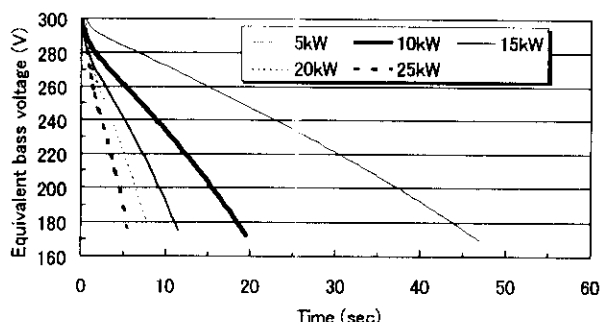


図 29 キャパシタCの放電時の電圧降下(実車換算値)

③ キャパシタ併用による回生制動時の電圧上昇抑制

図 30 に 70km/h からの回生制動時の際の最高電圧と、電池およびキャパシタに回収される電力量を示す。電池Bのみの場合では最高電圧が上限値 (300V) を超えるため機械制動の併用が必要となるが、キャパシタAを併用すれば上限値以内に抑制され、容量の大きいキャパシタB、Cを併用し電池への回収量を減らせば最高電圧はさらに低下する。一方、電池Cの場合はキャパシタ無しでも電圧上昇は小幅であり、上限値以内に留まる。またキャパシタ併用による電圧上昇抑制、電池回収量低減の効果は、電池Bの場合より小さく、図 27 の特性に沿った結果を得た。

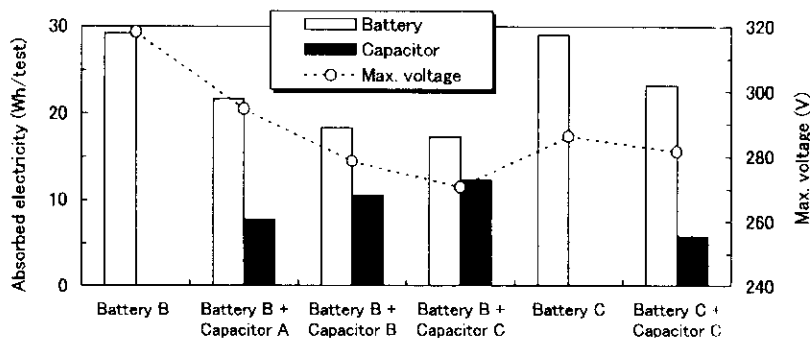


図 30 急減速時の最高電圧と回収電力量(70km/h→0, 0.11G)

④ 構成要素の都市内パターン運転時のエネルギー収支

鉛酸電池の場合を例として都市内走行時の、シリーズハイブリッドシステム構成要素の容量とそれらのエネルギー収支との関連を調べた。

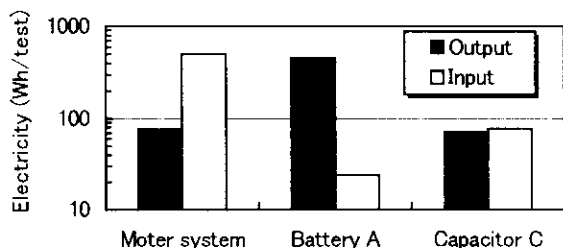


図 31 電池AとキャパシタCの出入電力量 (10・15モード運転、発電機無)

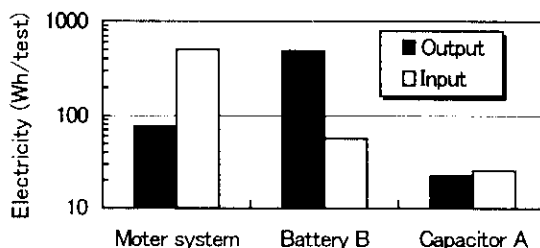


図 32 電池AとキャパシタCの出入電力量 (10・15モード運転、発電機無)

図 31、図 32 に、発電機無しで 10・15 モード運転を行った際のモータシステムと電池、キャパシタの出入電力量を対数軸で示す。図 31 はキャパシタの電池との相対的なエネルギー蓄積容量が本実験中で最大 (3.6%)、図 32 は最小 (0.7%) の条件である。モータシステムの入力は走行の要求電力量、出力は回生電力量であり、前者は後者の約 15% である。

図 31 の組み合わせでは、回生電力量の大半はキャパシタに回収され、電池は主に放電のみを行っていることを示す。キャパシタに回収されたエネルギーは直後の加速時等に出力されるため最終的には収支ゼロとなっており、一時的にエネルギーを蓄積するバッファの役割を担っている。これに対し図 32 の場合は回生電力の回収は主に電池が担い、キャパシタの出入電力量は僅かである。この実験条件の例では、キャパシタを電池と並列接続した上で主にキャパシタへ回生電力を回収するためには、そのエネルギー蓄積容量は少なくとも電池の 4% 程度は必要であるとの結果が得られた。

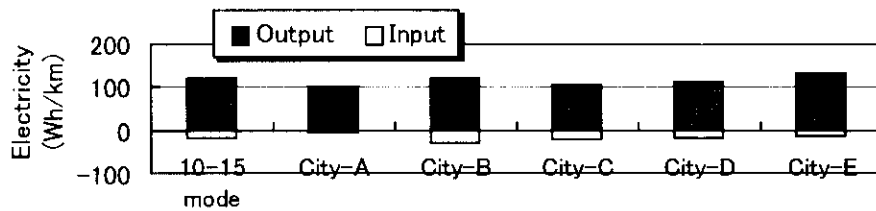


図 33 都市内パターン運転時の電池の出入電力量(発電機B使用、キャパシタ無し)

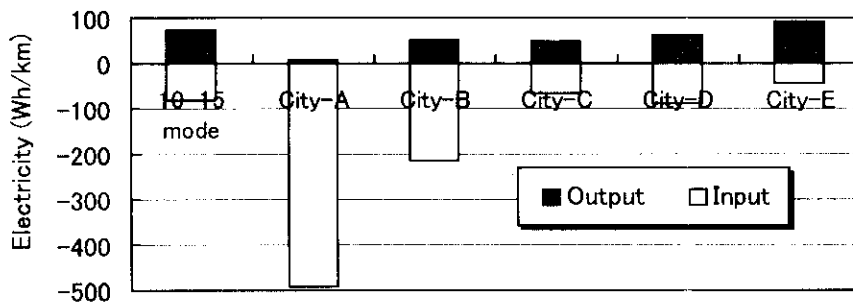


図 34 都市内パターン運転時の電池の出入電力量(発電機B使用、キャパシタ無し)

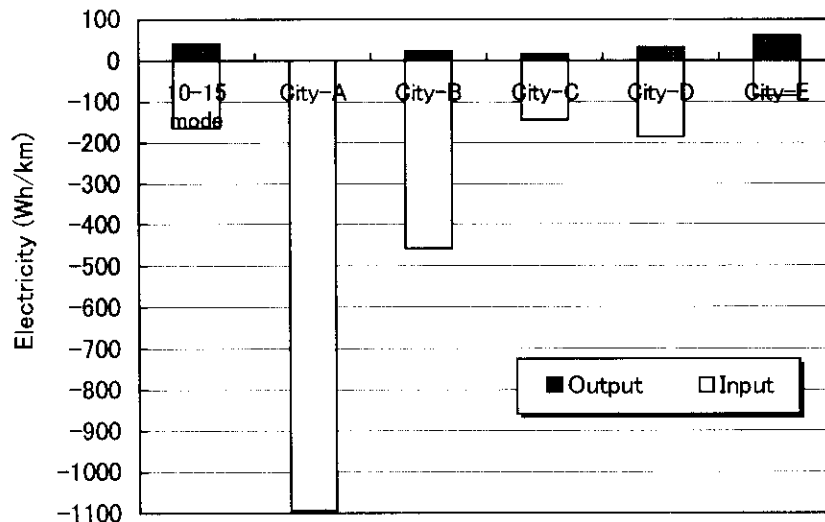


図 35 都市内パターン運転時の電池の出入電力量(発電機B使用、キャパシタ無し)

図 33～図 35 に発電機無し、および発電機併用のハイブリッド運転で各種都市内パターン運転を行った場合の、電池の出入電力量を走行距離 1 km 当たりの値で示す。回生電力量は要求電力量の 3～20% であり、図 33 (発電機無し) の場合はそれが電池への入力電力量となる。発電機併用時は発電電力量の一部が直接モータシステムに給電され、残りが電池に充電されるため、発電機無しの場合に比べて電池の出力電力量は減少し、入力電力量は増加する。エネルギー収支をみると、図 34 (発電機 A) の場合、City-A～City-D ではトータルの発電電力量が要求電力量を上回り、その剰余分が電池に蓄積されるため、電池の内部エネルギーは運転時間の経過と共に増加する。10・15 モードでは出力と入力の電力量がほぼ等しい。City-E では発電電力量が要求電力量を下回るため、電池のエネルギー収支は出力が入力を上回り、内部エネルギーは減少する。一方、図 35 (発電機 B) では全てのパターンで発電電力量が要求電力量を上回るため、電池の内部エネルギーは増加し、特に供給されるため、トータルでは発電電力量が過剰な場合でも電池からの出力電力量が存在する。

⑤ 各要素間の電気エネルギー移動の解析

前述の図 25 に示した、ハイブリッドシステム構成要素間の電気エネルギー移動は、運転状態に応じて単独または複数同時に発生し、それらの組み合わせは単純計算では数十通りに上る。表 10 に、その一部を示す。例えば Flow-A は弱い加速、Flow-B は強い回生制動で生じるパターンである。

表 10 シリーズハイブリッドシステム内の電気エネルギー移動パターン

(G: 発電機、B: 電池、M: モータシステム C: キャパシタ)

Name	Electricity flow pattern
Flow A	G→B G→M G→C
Flow B	G→B M→B M→C
Flow C	G→M B→M C→M
Flow D	G→B G→M G→C
Flow E	G→M G→C B→M B→C
Flow F	G→B

図 36、図 37 に、シリーズハイブリッドシステム構成で 10・15 モード運転を行う際の、それら移動パターンの出現回数と累積時間の割合の一例を示す。

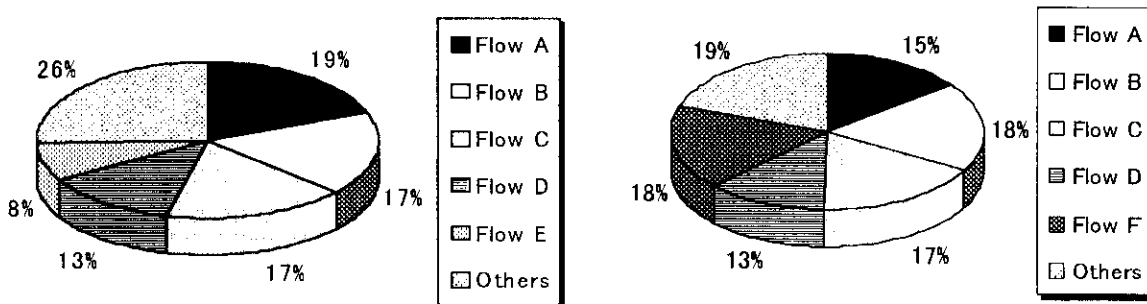


図 36 電気エネルギー移動パターンの発生回数割合 (10・15 モード運転、電池C、キャパシタC、発電機B使用)

図 37 電気エネルギー移動パターンの発生時間割合 (10・15 モード運転、電池C、キャパシタC、発電機B使用)

この条件下では、表5のFlow-A~Flow-Dの移動パターンが回数、時間とも各々10~20%の割合を占める。Flow-Fは停車中にのみ発生するパターンで、回数は極めて少ないが時間割合は20%近くに達する。

図38に、10・15モード運転における各要素間の移動電力量を多い順に示す。発電量が要求電力量に比べ大幅に過剰なため発電機から電池への出力量が最も多く、発電機からモータシステムへの出力量がこれに次ぐ。しかし発電機Aを使用する場合は発電機からの出力量は減少し、電池やキャパシタからモータシステムへの出力量が増加すると考えられる。また電池とキャパシタの間にごく少量のエネルギー移動が見られるが、これは再生制動時にキャパシタに回収されたエネルギーが停車後に緩慢に電池へ移動するものである。

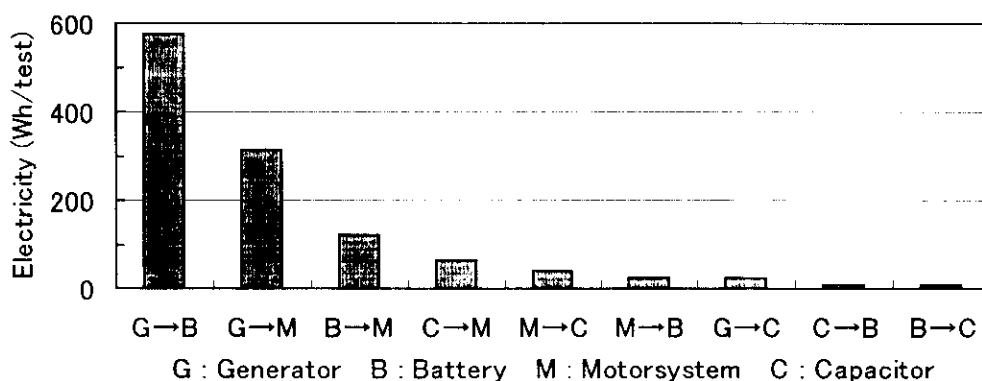


図38 10・15モード運転時の各要素間の移動電力量

(電池C、キャパシタC、発電機B使用) (G:発電機、B:電池、M:モータシステム C:キャパシタ)

電池やキャパシタに電気エネルギーが出入する際にはその都度内部抵抗等により損失が生じる。そのため、ハイブリッドシステムの総合的なエネルギー効率を評価するためには、上記の様な解析により構成要素間のエネルギー移動のパターン、発生順序、発生頻度、個別の移動量等を詳細に把握する必要があると考えられる⁽²⁾。

4. 6. 高効率型乗用車の導入による二酸化炭素排出抑制効果の推定

従来のエンジン乗用車を、高効率でエネルギー回生が可能な電気自動車(EV)あるいはハイブリッド電気自動車(HEV)に転換した場合の一台当たりのCO₂排出削減量を前述の実験および要素開発状況調査の結果に基づき、複数のケースを想定して試算した。さらに、それらを導入可能な都市域に普及させた場合の全体的な排出抑制効果を予測した。

(1) エンジン車からEV又はHEVへの転換による一台当たりのCO₂排出量削減

従来のエンジン車をEV又はHEVに転換した場合の、一台当たりの製造および走行の段階を含むライフサイクルCO₂排出量(以下、「LCCO₂」という)の変化を試算するために、表11に示すように車両重量1tの小型ガソリン乗用車をベースとして6種類のEV、HEV車両を想定した。ベース車ではLCCO₂の13%が製造段階、87%が走行段階で発生し⁽⁷⁾、また製造段階の排出量は車両重量に比例すると仮定した。二次電池の寿命については不明な点が多いため、使用過程で劣化し交換を要するケースと交換不要のケースを想定し、前者の場合は交換電池も製造段階での排出に加算することとした。キャパシタを搭載する場合、EVでは二次電池に追加、HEVでは置

換えとし、どちらも電池・キャパシタの交換は不要とした。

表 11 想定したEV、HEVの重量(単位 kgf)

Type	Vehicle weight	Battry weight	Capacitor weight	Battery renewal
Engine vehicle (Base)	1000	0	0	None
EV-1	1300	300	0	None
EV-2	1300	300	0	Once
EV-3	1350	300	50	None
HEV-1	1250	50	0	None
HEV-2	1250	50	0	Once
HEV-3	1300	0	100	None

図 39 に「EV-1」を例にとり、エンジン車を基準として、電動車両化による重量変化→動力システムの効率変化(回生を除く)→エネルギー回生、の各ステップ毎にライフサイクルCO₂排出量の増減を試算した結果を示す。ベース車に比べ 300kgf の重量増に伴い、製造段階の排出増加に加え、要求駆動エネルギーが増大するためエンジン駆動のままではLCCO₂は約 22%増加することになる。しかし次のステップで、電気動力システムはエンジンよりエネルギー効率が格段に高いことを計算に入れると走行段階の排出量は 35%減少し、さらにエネルギー回生を考慮すると 20%減少する。したがって製造段階での車両重量増加のデメリットを、走行段階でのエネルギー効率向上と回生効果のメリットが大幅に上回る形となり、一台当たりのLCCO₂はベース車より約 3割減少すると推定される。

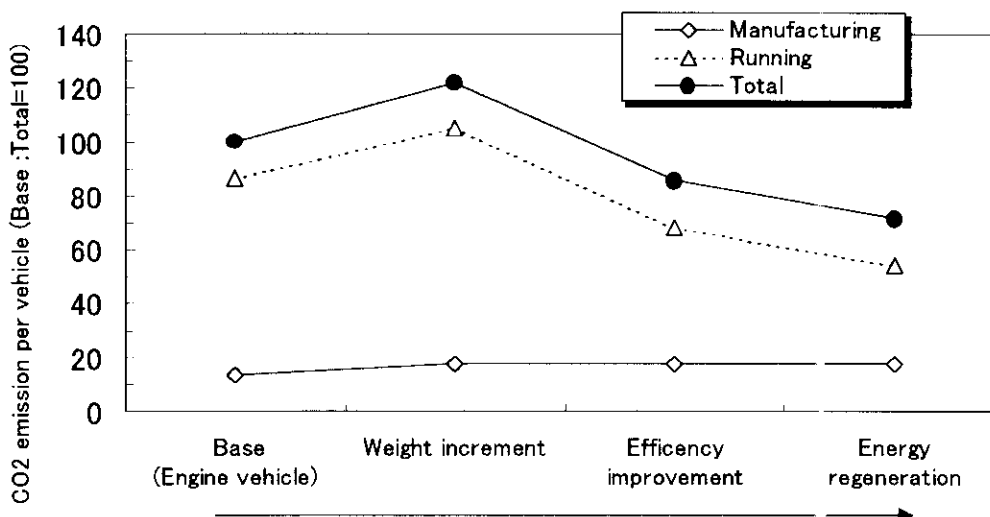


図 39 エンジン車のEV化によるCO₂排出量の増減(エンジン車=100とする)

図 40 に、表 11・各車両のLCCO₂の試算結果をベース車と比較して示す。「EV-1」では上記のようにベース車に比べ 1.72Mt 減少するが、電池交換を要する「EV-2」場合は 1.47Mt の減少に留まる。しかし「EV-3」は、キャパシタにより更に車両重量が増加するものの、エネルギー吸収性の向上と電池の負担軽減→交換不要の効果により「EV-1」と同等の低減量となる。HEVでは電池エネルギー容量がEVより大幅に小さくて済み、キャパシタへの置き換えも可能な

ため、EVに比べ電池によるLCCO₂への影響が小さい。例えば「HEV-3」は「EV-2」に比べLCCO₂が約0.4Mt少なく、航続距離やコスト面での優位性を考え併せると非常に有利である。

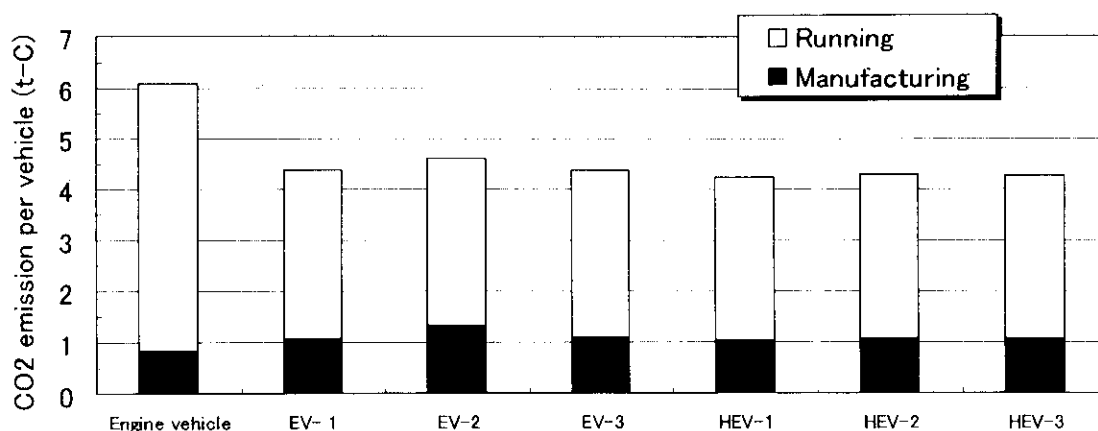


図 40 EV、HEVの一台当たりのLCCO₂

(2) 都市域にEV又はHEVを導入した場合の全体的なCO₂排出抑制効果

図 41 に日本の大都市（東京 23 区と政令指定都市）の乗用車保有台数を示す⁽⁸⁾。東京が約 180 万台、他の大都市はそれぞれ数十万台程度である。ことに東京、横浜、名古屋等は保有台数が多いうえに大型で燃費が悪い普通車（3ナンバー）の比率が高いため乗用車からのCO₂排出が特に多いと考えられ、高効率型乗用車が導入されれば排出抑制効果が高い都市であると考えられる。

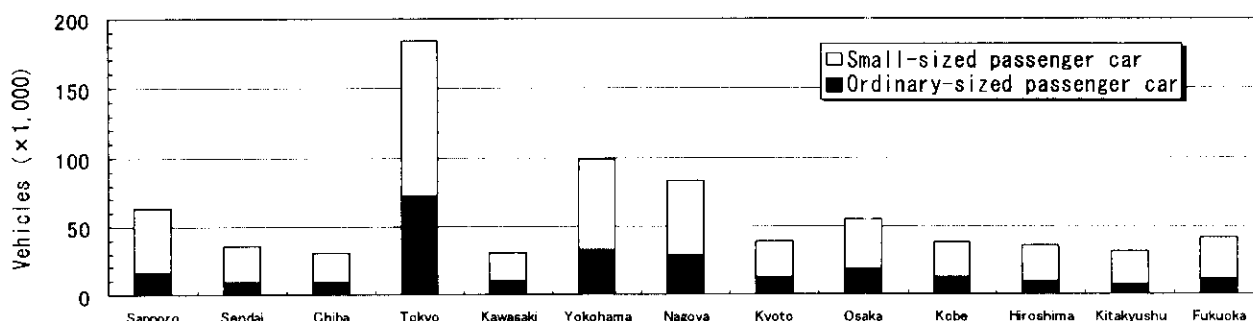


図 41 大都市における乗用車の保有台数⁽⁸⁾

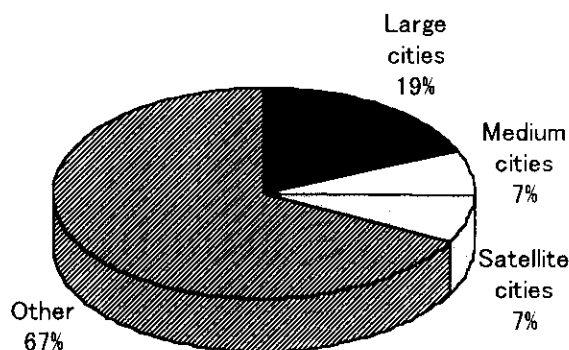


図 42 都市域の乗用車が乗用車全体に占める割合⁽⁸⁾

本報ではこれら大都市に加え、政令で定める中核市（17 都市）および首都・京阪神都市圏の近郊都市を「都市域」と定義した。それら都市域における乗用車の総保有台数は約 1350 万台であり、図 42 に示すように乗用車全体の約 1 / 3 を占めていることから、地理的には極めて限定された都市域に数多くの乗用車が集中して使用されている実態が伺える⁽⁸⁾。

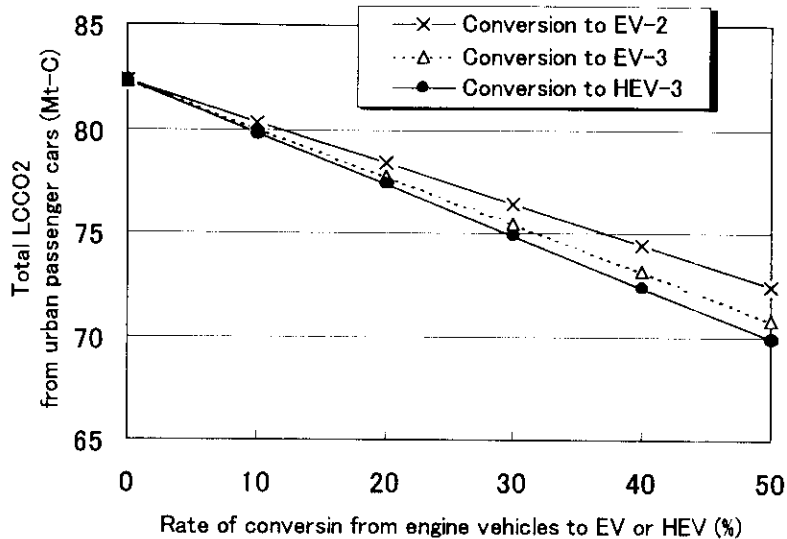


図 43 都市域の乗用車をEV、HEVに置き換えた場合のCO2排出削減効果

図 43 には都市域乗用車の一部をEVまたはHEVに置き換えた場合の、都市域乗用車全体のLCCO2削減効果の試算例を示す。従来の都市域自動車（エンジン車）総数の30%あるいは50%を「EV-2」に置き換えることにより、都市域自動車全体からのLCCO2をそれぞれ約8%、12%低減できると考えられる。また最も削減効果の大きいケースとしては、従来車の30%、50%を「HEV-3」に置き換えれば、都市域自動車全体からのLCCO2がそれぞれ約10%、15%低減されることになると考えられる。

5. まとめ

(1) 加減速の頻繁な都市域の乗用車の走行における有効エネルギーと廃棄エネルギーをシミュレーションにより計算し、走行に要するエネルギーの20~40%が回生可能であると予測した。

(2) エネルギー回生システム構成要素の開発状況を調査し、その結果に基づき都市域の乗用車に適するエネルギー回生可能な原動機として電気動力方式、ハイブリッド電気方式を選定した。

(3) 実車台上実験および単体台上実験により、ハイブリッド電気動力システムのエネルギー蓄積デバイスとしてスーパーキャパシタを二次電池と併用して都市内パターン運転を行い、エネルギー回生の最大化のための実験的な検討を行った。その結果、キャパシタと電池を選択切替接続で併用すればエネルギー吸収量が最大30%増加することを明らかにするとともに、キャパシタの内部エネルギーを頻繁に放出し電圧を下げることで、大電流通電に伴う内部損失を低減するためキャパシタの内部抵抗を低減し出力電流を抑制すること等の必要性を明らかにした。

(4) 充放電試験装置に電池、キャパシタおよび発電機を組み合わせることで模擬的なシリーズ式電気ハ

イブリッドシステムを構成した。それを用いてキャパシタによる回生制動時の電圧抑効果、相対的な容量が異なる条件下での構成要素のエネルギー収支の差異、構成要素間相互のエネルギー移動について定性的、定量的な評価手法を検討した。

(5) エネルギー回生可能な高効率型自動車と従来のエンジン車の二酸化炭素排出量を比較し、さらにそれらを都市域に導入した場合の全体的な二酸化炭素排出低減効果を予測した。

(参考文献)

- (1) 岩井「高効率カー-エネルギー自動車」の開発と将来展望、自動車研究第19巻第6号、P.169(1997)
- (2) 日本電動車両協会、資料「EV World 走ります あなたの街で」、1997年
- (3) 越智、他、「活性炭電極を用いたハイパー電気二重層コンデンサ」、電気製鋼第67巻第4号、1996
- (4) 渡辺、他、「制動エネルギー回生システムの開発」、機械学会第6回交通・物流部門大会講演論文集、1996
- (5) M.A.Pichot et al "The Flywheel Battery Containment Problem", SAE Paper 970242(1997)
- (6) 隆、他、「ハイブリッド電気自動車の各要素効率の燃費影響度予測」、自動車研究第21巻第9号、P.481、1999
- (7) 森口、他、「自動車の地球環境負荷を考える」、金属1993年6月号、P.48
- (8) 運輸省、平成11年度運輸経済年次報告説明用資料、運輸省ホームページ

[研究成果の発表状況]

(口頭発表)

- (1) 成澤和幸、林田守正、小高松男：第27回交通安全公害研究所研究発表会(1997)
「次世代都市用超小型自動車の研究開発(第1報)」
- (2) 小高松男、小池章介：第27回交通安全公害研究所研究発表会(1997)
「大型ディーゼル車排気エネルギーの電氣的回生について」
- (3) 林田守正、成澤和幸：第27回交通安全公害研究所研究発表会(1997)
「通勤用自動車に適する動力システムに関する研究(第3報)」
- (4) 林田守正、成澤和幸：日本機械学会第75期通常総会講演会ワークショップ(1998)
「通勤用カーへのシリーズハイブリッド方式の適用」
- (5) 林田守正、成澤和幸：電気自動車研究会第4回研究発表会(1998)
「通勤用カーの動力システムについて」
- (6) 林田守正、成澤和幸：第28回交通安全公害研究所研究発表会(1998)
「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1報)」
- (7) 成澤和幸、林田守正、小高松男：第28回交通安全公害研究所研究発表会(1998)
「次世代都市用超小型自動車の研究開発(第2報)」
- (8) 林田守正、成澤和幸：日本機械学会第7回交通・物流部門大会(1998)
「スーパーキャパシタによる電動車両のエネルギー回生向上について」
- (9) 林田守正、成澤和幸：自動車技術会1999年春季大会学術講演会(1999)
「スーパーキャパシタと二次電池による電動車両のエネルギー回生について」
- (10) 林田守正、成澤和幸、他：電気自動車研究会第5回研究発表全国大会(1999)
「スーパーキャパシタと二次電池によるエネルギー回生」

- (11) 林田守正、成澤和幸：第 29 回交通安全公害研究所研究発表会（1999）
「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 2 報）」
- (12) 成澤和幸、林田守正、小高松男：第 29 回交通安全公害研究所研究発表会（1999）
「次世代都市用超小型自動車の研究開発（第 3 報）」
- (13) 林田守正、成澤和幸、他：自動車技術会 2000 年春季大会学術講演会（2000 予定）
「充放電試験装置によるシリーズハイブリッドシステムの評価手法」
- (14) 林田守正、成澤和幸、他：電気自動車研究会第 6 回研究発表全国大会（2000 予定）
「スーパーキャパシタによるシティコミュータカーのエネルギー回生向上」

（論文発表）

- (1) 林田守正、成澤和幸、小高松男、野田 明：交通安全公害研究所報告第 25 号（1997）
「コミュータ自動車に適する動力システムに関する検討」（第 1 報）
- (2) 小高松男、他：S A E（米国自動車技術会）Technology for Electric and Hybrid Vehicles
（SP-1331）P. （1998）“Energy Regeneration of Heavy Duty Diesel Powered Vehicles”
- (3) 林田守正、成澤和幸：S A E（米国自動車技術会）Hybrid Vehicle Engines and Fuel Technology
（SP-1422）P. 55、（1999）、“Optimization of Performance and Energy Consumption on Series
Hybrid Electric Power System”