

B-14 地球温暖化防止対策技術の総合評価に関する研究

(3) 交通分野における重点対策の普及に当たっての技術的評価

③ コミュータ交通分野に適する動力システムに関する研究

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

燃費性能研究室

野田 明・佐藤由雄

音響研究室

田中丈晴

(委託先)

早稲田大学

大聖泰弘

平成6-8年度合計予算額 24,065千円

(平成8年度予算額 8,031千円)

[要旨]

通勤用カー（都市内短距離用途の超小型自動車）に適する動力方式、並びにその性能や環境負荷の評価手法を検討し、動力システムの基本コンセプトを考察した。

まず近年の最新技術を用いた電気動力方式について調査を行い、それらを応用した改良型ホイールインモーター駆動機構を検討して、既存の電気自動車の性能改善の可能性を見出した。

次に市販の電気自動車（EV）に発電機等を追加してハイブリッド化を試み、航続性能改善等に関する台上実験を行って、シリーズハイブリッド方式の通勤用カーへの適合性を確認した。

その結果に基づき、市販EVの直流モーターと変速機を使用したシリーズハイブリッド方式の模擬的な通勤用カーをシャシダイナモメータ上に設定して都市内走行パターンで加減速運転を行い、小型軽量化による加速性能向上や省電力効果を確認した。またハイブリッド通勤用カーは発電機容量の大小により「充電依存型」と「自立型」の二種類に性格付けられることを示し、航続性能向上と低環境負荷の両立を図るために、電池と発電機の最適な組合せをシミュレーションにより検討した。

続いて技術動向の調査結果を踏まえ、IGBTインバータ制御の交流モーター、低燃費小型エンジンや最適な発電制御等の新技術要素を採用した新しいシリーズハイブリッドシステムを構成し、性能やエネルギー効率の改善を台上単体実験等により考察した。その結果、変速機無しで都市内走行に必要な加速能力が得られ、回生ブレーキにより要求電力量の約20%を節減できること等を明らかにした。

最後に、上記で考察したシリーズハイブリッド方式通勤用カーの走行に伴う二酸化炭素排出量の算出方法を検討した。さらに通勤用カーのライフサイクルにわたる二酸化炭素排出量を既存の乗用車と比較し、通勤用カー導入による二酸化炭素削減効果を予測した。

[キーワード] 通勤用カー、電気自動車（EV）、ハイブリッド自動車、加減速運転

1. 序

日本における二酸化炭素の総排出量のうち、約20%は自動車によるものである。また世界的にみても自動車による二酸化炭素排出量は先進国、発展途上国を問わず急速に増加していることから、これを削減する技術の普及は急務である。自動車交通による二酸化炭素排出の削減のためには、電気自動車、ハイブリッド自動車等の新しい動力方式の自動車の普及が大きな効果をもたらすと考えられている。そこで、本研究では最も効果的と思われる通勤交通分野において、そのような自動車の普及を促進するための動力システムに関する技術的可能性を明らかにする。

2. 研究目的

通勤等の短距離用途に超小型で省エネルギー、低公害の新しいタイプの自動車（以下、「通勤カー」という。）を大量普及させ、自動車交通による二酸化炭素排出量の削減を図ることが国内外で検討されている。その通勤カーに搭載可能で必要十分な性能を有し、かつ二酸化炭素排出量の削減効果が大きい動力システムについて考察し、その技術的課題を明らかにして、最適なコンセプトを定めることを目的とする。

3. 研究内容

本研究では電気モータのトルク特性や回生ブレーキ機能に着目して、通勤カーの動力方式として電気動力およびシリーズハイブリッド動力方式を候補とし、市販電気自動車をシリーズハイブリッド化した車両Aの台上実験やシミュレーションにより適合性を吟味した。また動力システムを構成する要素技術について、技術動向調査や、模擬的な通勤カー車両B、車両Cを設定して行った実験的な検討により、最適な動力システムのコンセプトを求めて基本設計を行った。さらに実際の利用目的や運転条件を反映した動力システムの性能と二酸化炭素排出量の評価方法を検討して、新たな動力システムを搭載した通勤カーの導入による二酸化炭素排出量削減効果を予測した。

4. 電気動力方式の改良に関する検討

電気自動車に適した動力方式として、車輪の中に駆動用モータを組み込むホイールインモータと呼ばれる方式がある。この方式は高性能電気自動車「IZA」において実績があることから、これを通勤カーに適用するための改善要件を検討した。図1にこのシステムの基本図を示す。改善の要点は減速ギア付とすることにより小型で高トルクを可能とし、加速時の電力損失が低減できる点にある。さらに、高速回転を可能とするために三相同期モータはロータ構造を永久磁石はめ込み型とする。また制御用のインバータ主回路素子として第三世代IGBTを用い、モータ制御方式として減磁制御、最大トルク制御、最大効率制御を組み合わせ

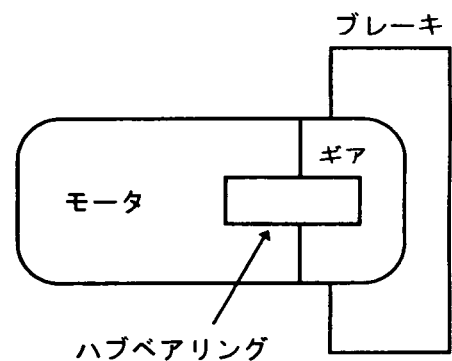


図1 減速ギア付ホイールインモータの概念

より小型で高トルクを可能とし、加速時の電力損失が低減できる点にある。さらに、高速回転を可能とするために三相同期モータはロータ構造を永久磁石はめ込み型とする。また制御用のインバータ主回路素子として第三世代IGBTを用い、モータ制御方式として減磁制御、最大トルク制御、最大効率制御を組み合わせ

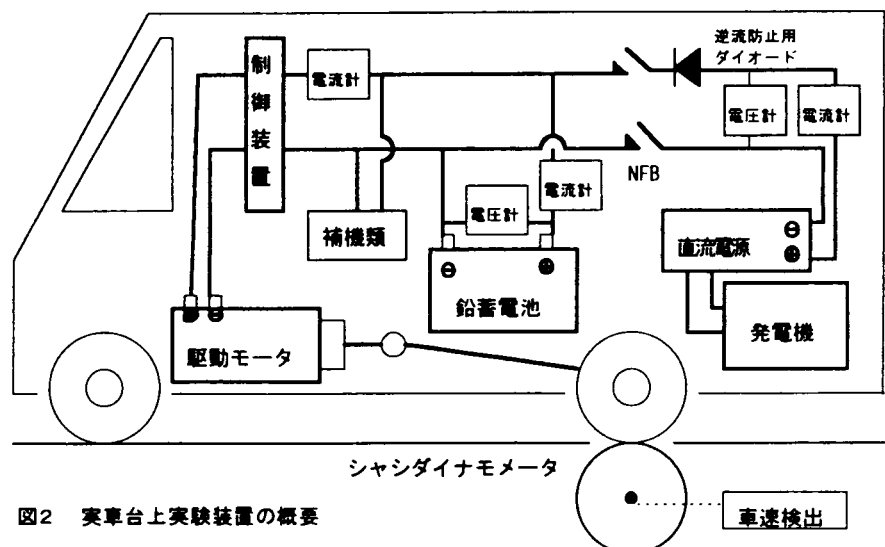


図2 実車台上実験装置の概要

せた最適制御法を採用する等の改良を加え、ユニット質量は26.4kgながら最大トルク63.6N・m、最高回転数8500rpmの高性能が得られ、従来の電気自動車の性能を大幅に改善することを可能とした。

5. 電気自動車のシリーズハイブリッド化の試み

5.1 実験方法

図2に、実車台上実験装置の概要を示す。供試車両は市販の電気自動車をベースとし、航続距離の延伸を図るため小型発電機と直流電源を付加してシリーズハイブリッド車とした車両Aで、シャシダイナモメータ上で定速運転および10・15モード運転を行った。表1に車両Aの諸元を示す。発電機は表2に示す発電機aを用い、車両運転中は常時稼働とした。直流電源は交流電力を任意の直流電力に変換し、定格出力容量は1.5kWである。なお、本報では商用電源からの初期充電により電池に蓄えられた電気エネルギーを「電池エネルギー」、発電機から直流電源を通じて得られる電気エネルギーを、「給電エネルギー」と定義する。

表1 車両Aの諸元

項目	仕様	
駆動モータ	種類	直流分巻
	最大出力	20kW
	最大トルク	66N・m
電池	種類	鉛蓄電池
	容量	150Ah×10個直列
	質量	430kgf
制御方式	トランジスタ制御	
変速機	前進5段 後進1段	
車両質量	1315kg (発電機等含)	

表2 発電機aの諸元

項目	仕様	
エンジン	形式	空冷単気筒直接噴射式ディーゼル
	排気量	230cm ³
	回転速度	3000rpm (一定)
定格出力	2.05kW (単相交流100V)	
質量	50kg	

■要求電力(全時間平均) □要求電力(最大)
■単位距離当り要求電力量

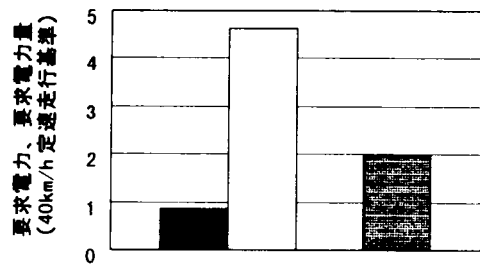
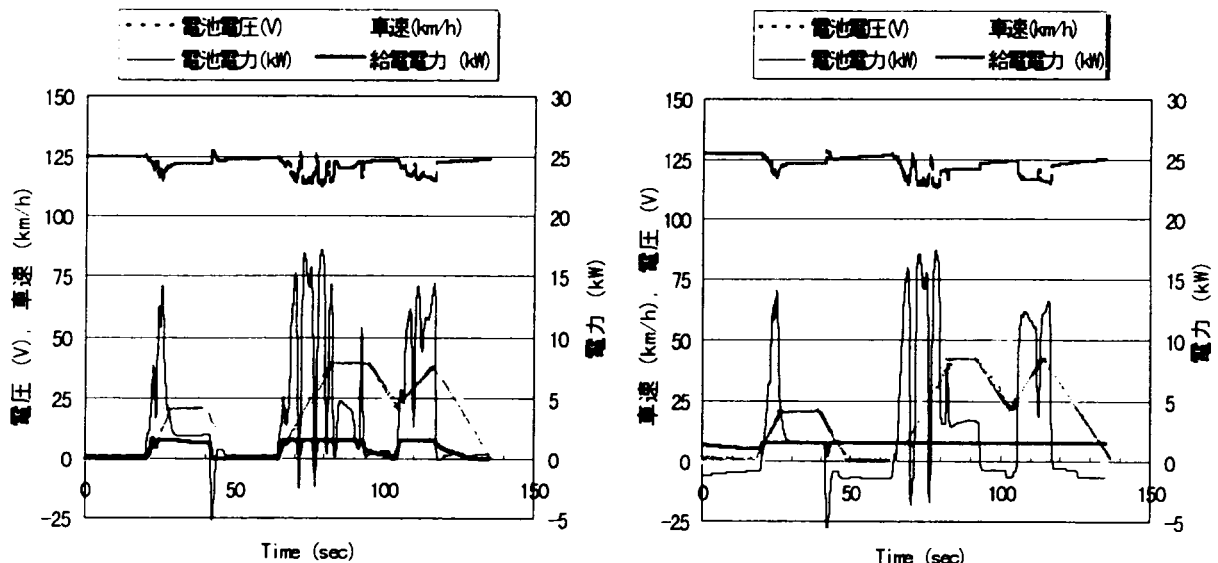


図3 10モード運転に要求される電力と電力量



(a) 給電電圧125Vの場合

(b) 給電電圧130Vの場合

図4 10モード運転時の電池電圧、電池電力と給電電力

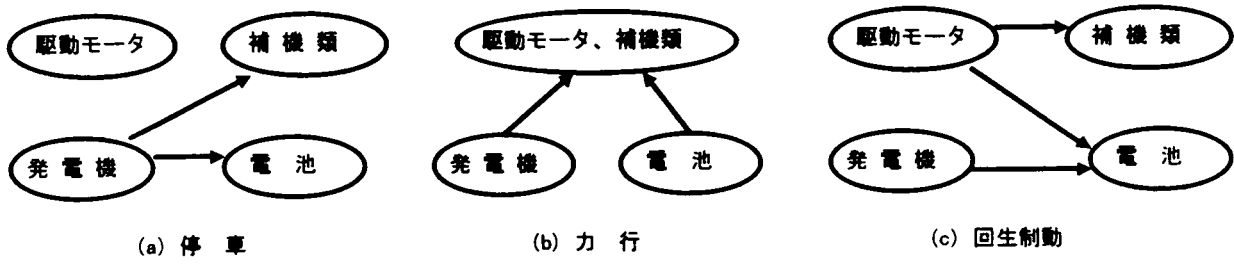


図5 機器間の電力需給(給電電圧130V)

5.2 実験結果および考察

シリーズハイブリッド方式では発電効率を高め、制動時の電力回生も有効に活用することが重要と考えられる。そこで通勤カーを実用に供する場合を想定して、加減速と停車を含む運転における車両Aの要求電力(パワー)、要求電力量(エネルギー)を測定した。図3に、10モードを例として40km/h定速走行時を基準として表した結果を示す。10モード運転時の全時間平均電力は定速運転時より若干小さいのに対し、最高電力は約4.5倍にも上る。一方、10モード運転の距離当たり要求電力量は、定速運転時の2倍程度を必要とする。

そこで、発電機からの給電の最適化を検討した。その結果の一例として、図4に給電電圧を無負荷時電池電圧と同一の125Vに設定した場合と、5V高い130Vに設定した場合の、10モード運転時の電池電圧、電池電力および給電電力を示す。電池電力を見ると、両条件とも車両の発進、加速の際に顕著なピーク状の電力が現れ、定速走行に移ると減少し、制動時には回生電力により充電される。一方給電電力を見ると、設定電圧125Vでは停車中は給電されず発電機は無負荷状態で稼働し、車両が発進し電池電圧が低下すると同時に給電が開始されて電池と発電機双方の電力が車両に供給される。また回生電力はベース車と同等であった。したがって給電電圧125V設定の場合、電力回生機能は保たれるが、給電電力は車両の力行中だけ電池を補い、その平均値は定格容量の50%程度に留まるという結果となった。しかし給電電圧130V設定の場合は、電池は停車中にも充電され、給電電力は全時間にわたり最も熱効率が高い定格の100%近い値を示す。また回生制動時の充電電力は図4(a)と比べて給電電力分だけ増加しているの、給電電圧を130Vとしても電力回生機能は損なわれないと判断できる。一方、どちらの設定でも車両への悪影響は発生しなかった。したがって本実験の範囲では給電電圧130Vに設定する方が適当であると言える。その場合の機器間の電力需給関係を図5に示す。

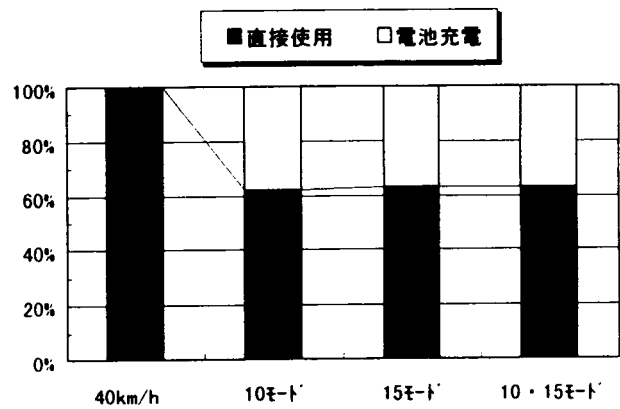


図6 給電エネルギーの用途(給電電圧130V)

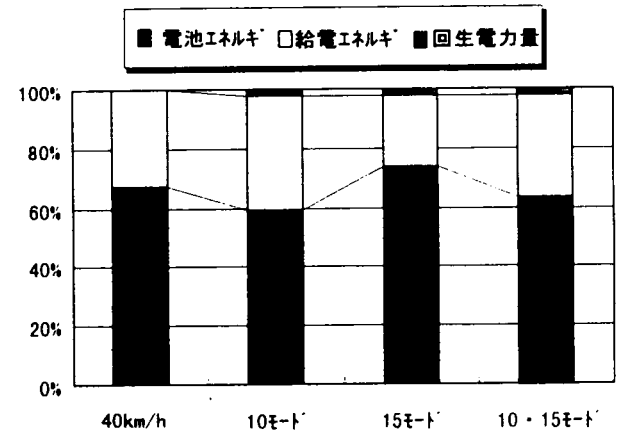


図7 要求電力量の供給源(給電電圧130V)

図6に、給電エネルギーの使途の積算結果を示す。

40km/h 定速運転では給電エネルギーの全てが駆動モータ等で直接使用されるが、10・15 モード運転では約 60%が直接使用され、40%は電池への一時的な充電を経て使用される。これは 10・15 モード運転では停車時間等を利用して力行時の電力ピークを補うことが可能なことを示しており、シリーズハイブリッド方式の大きな特長である。

図7に、車両運転に際しての要求電力量全体に対する電力供給源の分担を示す。定速運転の場合は70%弱が電池エネルギー、30%強が給電エネルギーにより供給される。10モード運転の場合は給電エネルギー分が約10ポイント増加し、回生電力量が約3%となる。15モードの場合は要求電力量が大きく、給電エネルギー分は5ポイント減少するが、回生電力量分は若干増加する。10・15モード運転と40km/h定速運転における電池エネルギーと給電エネルギーの分担率はほぼ等しいので、次にこれら二つの運転条件で実際に連続運転を行って一充電当たりの航続距離を確認した。

図8に、その結果をベースのEVと比較して示す。航続距離の延伸率は定速運転で65%、10・15モード運転では80%と大きな値を示すが、これは給電に加え、電池の放電率が減少し電池内部損失が低減されたためと考えられる¹⁾。発電機等による質量増加が車両の5%、電池の25%であるのに対して特に10・15モード運転での航続距離の延伸率は非常に大きく、ハイブリッド化による延伸効果はベースEVに同量の電池を追加するよりも著しく高いと考えられる。以上の結果から、シリーズハイブリッド方式は加減速の頻繁な都市内走行の通勤カーに適した動力方式であると判断できる。

6. シリーズハイブリッド方式に関するシミュレーション

シリーズハイブリッド方式の通勤カーを想定し、発電機出力をパラメータとして各種稼働条件で運転した場合の電池内部エネルギー変化をシミュレーションにより試算した。稼働条件としてZEVエリア設定方式(特定区間で発電機を停止)、充電率範囲保持方式(電池内部エネルギーを一定に保つよう断続)、定常発電方式(常時稼働)等を設定した。その結果の一例を図9に示す。これより、定常発電方式を主体として電池内部エネルギーを20~80%に保つこと、使用形態に合わせ電池

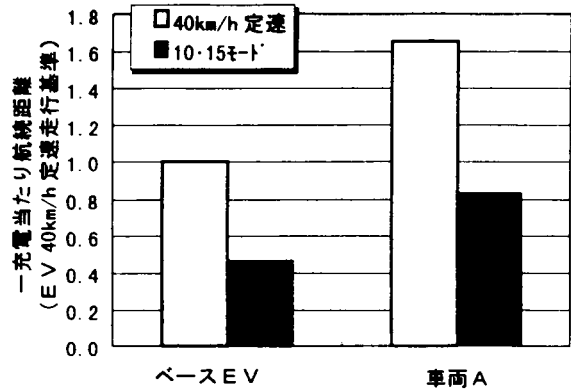


図8 シリーズハイブリッド化による航続距離の延伸

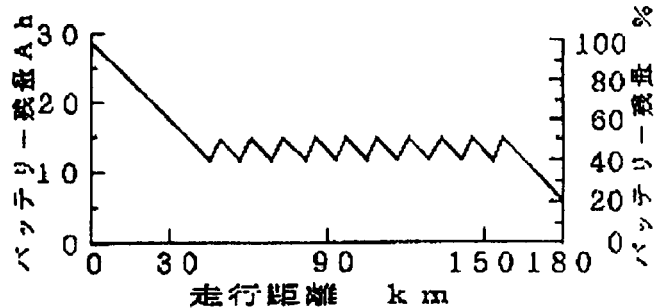


図9 シミュレーション結果の一例
(充電率範囲保持方式、発電機出力13.3kW)

表3 車両B(模擬通勤カー)の諸元

項目		車両B	(車両A)
車両質量 (kg)		700	1310
前面投影面積 (m ²)		1.74	2.19
駆動モータ	種類	直流分巻	←
	最大出力 (kW)	14	←
	最大トルク (N・m)	66	←
主電池	種類	鉛蓄電池	←
	端子電圧 (V)	120	←
変速機		前進3段	前進5段

表4 車両Bに採用した発電機の諸元

項目	仕様	
	発電機 a	発電機 b
定格発電出力 (kW)	2.1	4.3
質量 (kg)	50	100
エンジン	形式	空冷直接噴射式ディーゼル
	排気量	230 cm ³ 412 cm ³
	回転速度	3000 rpm (一定)

容量と発電機出力を最適に組み合わせることが望ましい等の結果が得られた。

7. シリーズハイブリッド方式の模擬コネクタカーによる考察

7.1 実験方法

車両Aのベース車である市販EVの直流モータ、変速機等を使用して車体を小型・軽量化し、発電機等を付加してシリーズハイブリッドとした模擬的なコネクタカー（車両B）をシャシダイナモメータ上に設定した。その諸元を表3に、前述の車両Aと比較して示す。図2と同様の実験装置で車両Bを台上運転し、加速性能や各部の電力出入量を測定した。発電機は表4に示す二種類を用いた。発電機bの定格出力は発電機aの約2倍である。変速段は特記無い限りベースのEVの5段の内、2～4速の3段のみを使用した。運転パターンとしては、全力加速、定速運転、10・15モードの他、東京都内における乗用車の通勤走行データから抽出した実走行モードを使用した。

7.2 実験結果および考察

(1) 小型・軽量化による加速性能向上

コネクタカーの使用条件は発進、停止や加減速の多い都市内走行が主体と考えられるため、動力性能としては低・中速域における加速能力が最も重要と考えられる。図10に、車両Bを発進から40km/hに達するまで全力加速させた場合の平均加速度を示す。変速操作として1速発進から2速、3速とシフトアップするシフトAの他に、2速発進→3速の加速シフトBと、3速固定で発進・加速する加速シフトCを設定して比較した。シフトAでは減速比は最も大きい、モータの回転慣性重量の負担が大きいことと、途中2回の変速操作に数秒程度を費やすため、3パターン中最も低い加速度を示す。これに対しシフトB、Cでは変速操作が省略されて車速の上昇に要する時間が短縮され、平均加速度は大幅に向上する。車両Bを車両Aと比較すると、変速回数を省略するほど加速能力の向上が著しく、特にシフトCでは減速比が高いにも拘わらず車両Aの約2倍の平均加速度が得られた。これは、図中に参考として示した都市内実走行データ中の高加速パターンにも十分に対応し得る加速力である。

図11には、中速域の全力加速能力を示す。この場合変速段は3速又は4速固定とした。これらの加速においても車両Bは車両Aの2倍程度の加速度を示

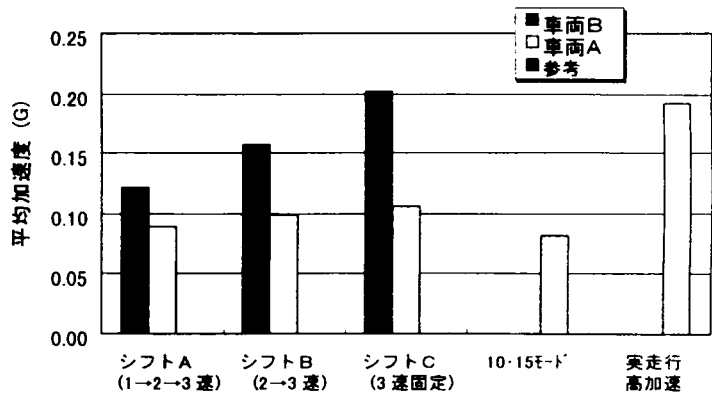


図10 発進加速時の加速能力(0→40km/h)

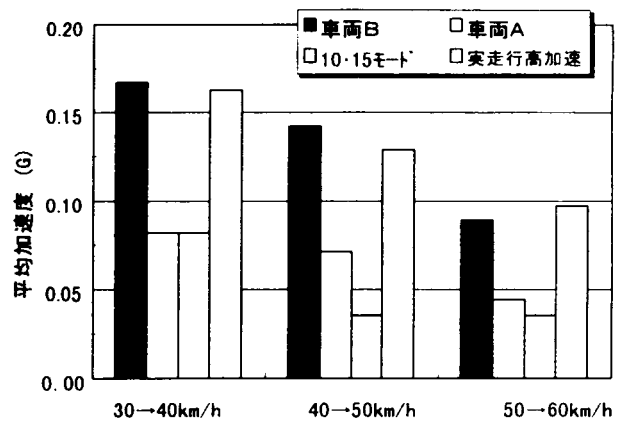


図11 中速域における加速能力

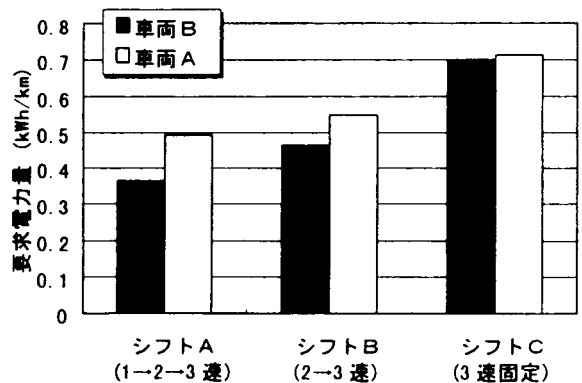


図12 全力発進加速時の要求電力量

表5 加減速を伴う車両運転パターン

運転パターン	10モード	10・15モード	実走行パターン				
			A	B	C	D	E
最高車速 (km/h)	40	70	23.7	44	49	58	69
全時間平均車速 (km/h)	18	30	5	11	25	22	39
走行中平均車速 (km/h)	24	33	8	18	30	36	50
アイドル時間率 (%)	27	29	42	40	14	40	22
発進回数 (10分当り)	8.8	6.6	11.6	8.2	7.5	6.1	3.3

し、実走行時の高加速もほぼカバーできる。したがって電動車両の加速能力を向上させるためには、モータ固有の低速トルク特性を活用し、なるべく変速操作無しで広い車速範囲をカバーすることが極めて有効であると考えられる。

(2) 要求電力量の低減 図

12に、図10の全力発進加速時における単位走行距離当たりの要求電力量を示す。何れの場合も車両Bは車両Aを下回るが、シフトAに比べてシフトB、Cではモータの負荷トルクが高くなり、電流が増加して導線抵抗損失や制御損失が増加するため要求電力量が増大し、車両Bと車両Aの差は小さくなる傾向がみられる。これらの結果から、

加速能力を高めつつ要求電力量を抑制するためには、高速回転型で慣性重量の小さいモータと低めの固定減速比を採用することが適切と考えられる。

次に、同一の運転パターンをトレースした場合の車両Bの要求電力量を車両Aと比較した。表5に、本実験で用いた加減速パターンを示す。実走行パターンは、東京都内の乗用車の走行実験データから編集したもので、渋滞が著しい「実走行パターンA」から、流れがスムーズで比較的車速が高い「実走行パターンE」までの5種類とした。

図13には、これらの加減速運転における要求電力量を車両Aと比較して示す。車両Aを基準にした車両Bの要求電力量の低減率は定速運転では約15%に過ぎないが、加減速運転では慣性抵抗の低減により20~30%と大きく現れている。ただし10モード運転を例にとると、通勤カーの計算上の走行仕事量は車両Aより45%少ないが、要求電力量の低減は35%に留まっている。これは各部の機械的または電気的な損失により小型軽量化の効果が相殺されたためと考えられるため、通勤カーのエネルギー効率を向上させるためには、これらの損失を抑制することが車体の小型軽量化と並ぶ大きな課題と考えられる。

(3) シリーズハイブリッド方式の電力需給

車両Bの要求電力に対する、電池エネルギーと給電エネルギーの二種類の電源の需給関係について検討した。

図14に、車両Bを各種パターンで運転す

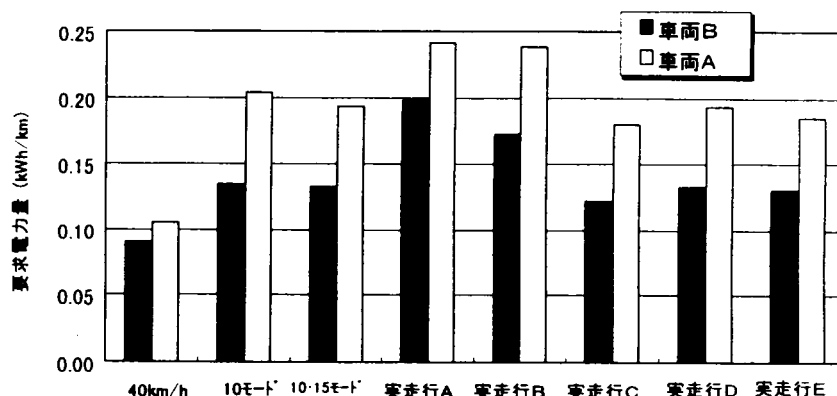


図13 各種運転パターンにおける距離当たり消費電力量

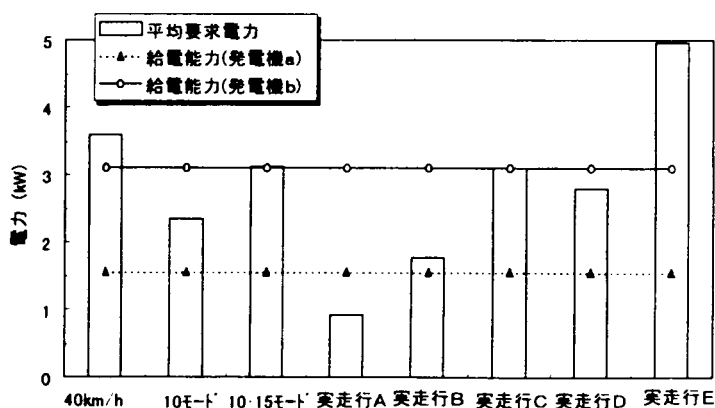


図14 平均要求電力と給電能力

る際の要求電力(kW)と給電能力(kW)を時間平均値で示す。給電能力が平均要求電力を下回る場合は電池エネルギーが減少し、それが尽きれば走行不能となるが、給電能力が平均要求電力と同等以上の場合には発電機の燃料がある限り給電エネルギーだけでも連続走行が可能であると推定できる。

図 15、図 16 には、各種パターン運転時の単位距離当たりの電池エネルギー消費量、給電エネルギーの消費量と蓄積量を kWh/km 単位で示す。発電機 a 搭載の場合は実走行 A 以外の運転パターンでは走行に伴い電池エネルギーが消費される。発電機 b 搭載の場合はほとんどの加減速パターンにおいて給電エネルギーで要求電力量全てを賄うことが可能で、特に実走行パ

ターン A、B では距離当たりの要求電力量は多いが時間平均電力が小さいので電池エネルギーが蓄積される。一方、実走行パターン E では距離当たり要求電力量は図 13 に示した様に実走行パターン C、D とほぼ同等であるが、電池エネルギーの消費量は最も多い。

なお、図 17 に示すように加減速運転における給電エネルギーの消費分は、直接消費される分と、一時的な電池への充電を経て消費される分が含まれている。そこで図 15、図 16 の給電エネルギーの消費量は両者の合算としてある。

上記の測定結果から、車両 B のシリーズハイブリッド方式では運転パターンの違いによって、消費電力量が変わるだけでなく、電池エネルギーと給電エネルギーの分担比率が著しく異なり、実走行パターンでは平均車速が高いほど電池エネルギーの消費比率が大きくなる傾向が見られる。また給電能力の大小によってもそれらの分担比率は変化し、車両 B は、発電機 a 搭載の場合は通常は走行に伴って電池エネルギーを消費する「充電依存型」、発電機 b 搭載の場合は給電エネルギー

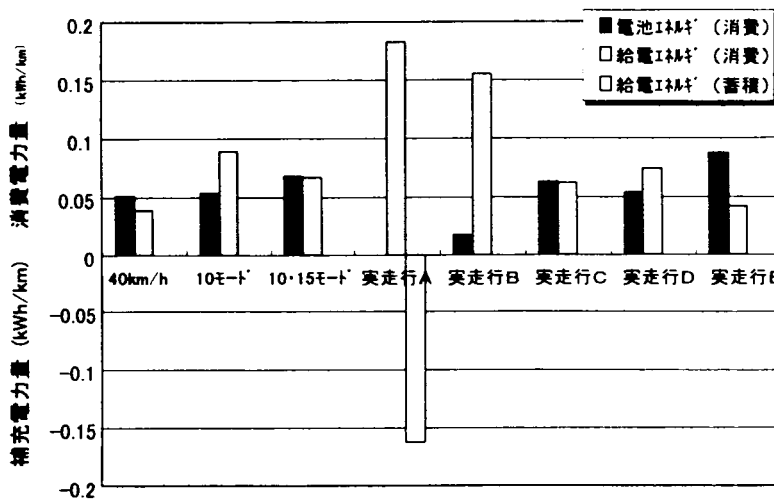


図 15 電池エネルギーと給電エネルギーの消費、蓄積(発電機a搭載)

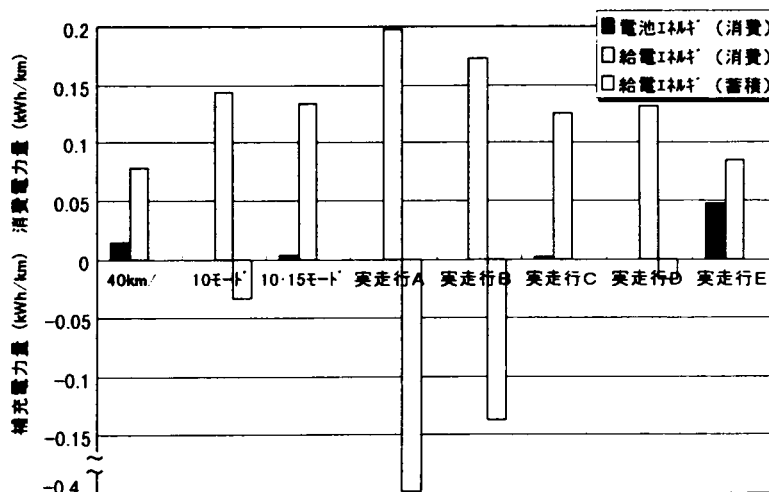


図 16 電池エネルギーと給電エネルギーの消費、蓄積(発電機b搭載)

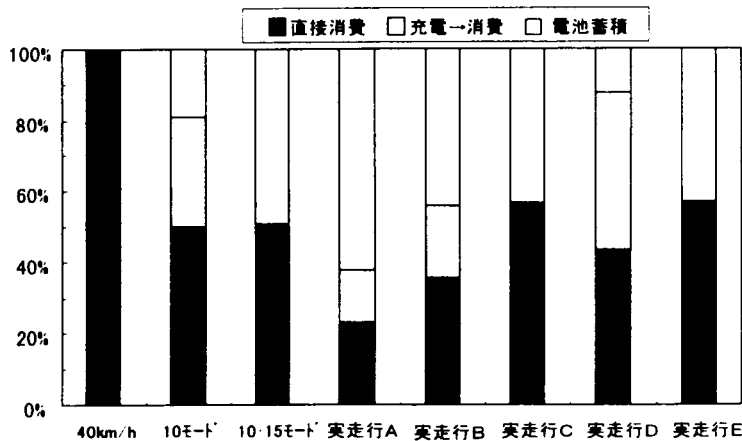


図 17 給電エネルギーの使途(発電機b搭載)

ギだけで都市内走行をカバーできる「自立型」と二つのタイプに性格付けられる。

7.3 二つのタイプのシリーズハイブリッドコンピュータカー

上記の充電依存型と自立型の二つのタイプの得失を検討するため、車両Bについて表6に示すような電池と発電機の組合せによるモデルを設定した。電池と発電機の質量の和は、どの組合せも300kgとした。モデルbでは、燃料タンク容量の違いにより更にサブモデルb1～サブモデルb3を設けた。電源を全て電池とするモデルEVも参考のため設定した。これらのモデルが電池エネルギーだけで走行できる距離を、「ゼロエミッション距離」と定義した。

表6 車両Bのモデル設定

モデル	a	b1	b2	b3	EV(参考)
発電機	発電機a	発電機b	←	←	無し
電池質量(kg)	250	200	←	←	300
燃料タンク容量(liter)	5	5	10	15	0
燃料消費量(liter/hr)	0.82	1.65	←	←	0

図18には各モデルの、10・15モード走行時の航続距離を示す。この場合のコンピュータカーの航続距離は、基本的には式(1)に示すレンジ1で表される。レンジ1は、電池エネルギーと給電エネルギーの和に支配され、燃料タンク容量をパラメータとする。しかし充電依存型の場合は、式(2)に示すレンジ2、すなわち電池エネルギーに支配される航続距離の上限を越えることはできない。モデルaを含む「充電依存型」の航続距離は、レンジ1にレンジ2の制約が加わった形で示される。モデルaは、電池の1/6を発電機に置き換えた分、ゼロエミッション距離は、モデルEVより減少するが、トータルの航続距離はモデルEVより80%増加する。モデルbはゼロエミッション距離は更に低下するが、燃料タンク容量を増やせば航続距離はaタイプより大幅に増加する。特にモデルb3の航続距離は、モデルEVの航続距離の4倍、モデルaの航続距離の2.5

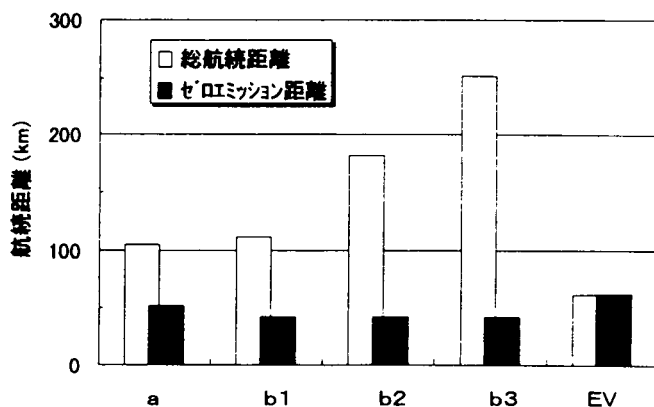


図18 航続距離の比較

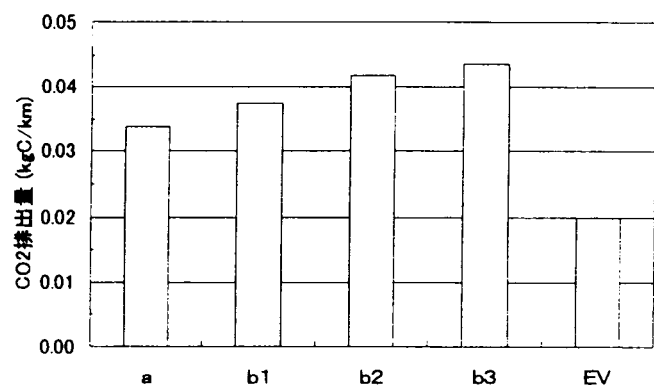


図19 CO₂排出量の比較

$$\text{レンジ1 (km)} = \frac{\text{電池エネルギー (kWh)} + \text{給電エネルギー (kWh)}}{1\text{km当りの要求電力量 (kWh/km)}} \quad \text{式(1)}$$

$$\text{但し、給電エネルギー(kWh)} = \text{給電能力(kW)} \times \frac{\text{燃料タンク容量(liter)}}{\text{燃料消費量(liter/hr)}}$$

$$\text{レンジ2 (km)} = \frac{\text{電池エネルギー (kWh)}}{1\text{km当りの要求電力量 (kWh/km)} - 1\text{km当りの給電エネルギー (kWh/km)}} \quad \text{式(2)}$$

倍となる。したがって航続距離の点では、モデルbを含めた「自立型」の方が有利である。

図19には、各モデルの走行1km当たりのCO₂排出量の試算結果を示す。(計算方法については9.1の項に記す。)日本では発電所で使用される一次エネルギー全体に占める石炭、石油の比率が比較的小さいため、シリーズハイブリッド車では要求電力量に対する電池エネルギーの比率が高いほどCO₂排出量は少なくなると考えられる。モデルaは要求電力量の必ず50%以上を電池エネルギーで賄うためCO₂排出量は抑制されるが、モデルbは要求電力量に対する電池エネルギーの比率が小さいためCO₂排出量はモデルaよりも多くなる。このため環境負荷の点ではモデルaを含めた「充電依存型」の方が好ましいと考えられる。

7.4 シリーズハイブリッドコミュータカーの電源の最適化

厳しいサイズと重量の制約の中で、シリーズハイブリッドコミュータカーの電池と発電機の組合せを最適化する手法を検討した。図20に、発電機の給電能力と、10・15モード走行の航続距離との関係を示す。給電能力は発電機質量に比例し、発電効率は一定であると仮定した。また表6と同様に、電池の質量と発電機の質量の和は300kg(一定)とし、給電能力を上げれば逆に電池容量を減らすこととした。

レンジ2上のモデルaは、燃料5リッターのレンジ1の延長より下方に位置し、燃料を残して電池が尽き走行不能となることを示す。

図20は、「充電依存型」であっても、給電能力を平均要求電力に十分近づければ航続距離は顕著に増大することを示している。したがって走行距離が比較

短的短いコミュータカーは必ずしも「自立型」でなくても良いと考えられる。そこで一案として、燃料10リッターのレンジ2の直線と、電池エネルギーによる上限曲線の交点をc点とし、c点に相当するモデルcを新たに想定した。モデルcは、給電能力は平均要求電力の80%であるが、航続距離は約200kmを確保できる。この航続距離はコミュータカーに十分な値であり、「自立型」と同等であると見なすことができる。またモデルcは電池エネルギーを全体の20%以上必要とし、石油燃料のみに依存することができないので、排出ガスによる環境負荷も抑制されると推定できる。上記の検討結果から、シリーズハイブリッド方式のコミュータカーにおいて、電池と発電機の組合せを最適化するためには、図20のような図を用い、コミュータに求められる性能要件と環境負荷を考慮して様々なモデルを設定し、評価することが適切な方法と考えられる。

8. コミュータカーへの応用を考慮した小型車用動力システムの構成要素の技術動向

電気自動車、電気ハイブリッド車では、直流モータに代わり、インバータ制御による交流モータ

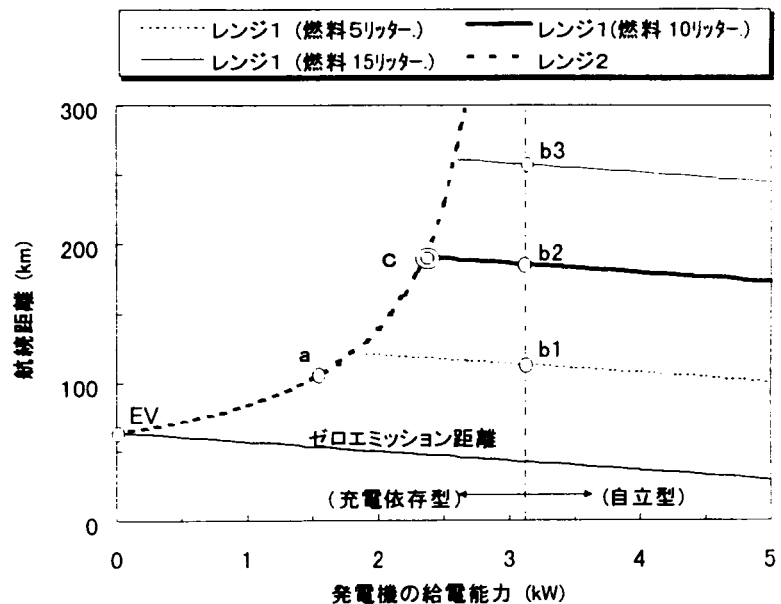


図20 給電能力と航続距離

駆動方式が主流になりつつある。交流モータには同期モータ（通称DCブラシレスモータ）と誘導モータの2種類があり、前者は効率、後者は高速回転や耐久性が特に優れている。

電池については、鉛酸電池に代わる各種の新型電池が開発中であるが、軽量化を第一とすればリチウムイオン電池が最も有利である。エネルギー密度が100Wh/kgと極めて高く、鉛酸電池の3倍、ニッケル系電池の1.5~2倍である。また減速時の運動エネルギーを回収するために、急充電、急放電が可能なコンデンサバッテリーが開発されており、回生効率は約70%である。その一例を表7に示す。一方、電気-ハイブリッド方式用の小型エンジンとしては、ガソリンエンジンが最も有力であるが、熱効率が優れるディーゼルエンジン、排気対策の点で天然ガスエンジン等も候補に挙げられている。

9. シリーズハイブリッドシステムの改良

通勤用車のシリーズハイブリッドシステムのエネルギー効率を一層向上させるため、新技術要素を採用した通勤車、車両Cを単体運転装置上に模擬的に設定した。車両Cの諸元を車両Bと比較して表8に示す。単体運転装置は図21に示すように駆動モータの出力を慣性板と電磁パウダブレーキで吸収する機構で、車両質量と減速比に応じた負荷設定を行った。車両Cでは図22に示すように各構成要素について効率が改善され、トータルのエネルギー効率は車両Bよりも約40%向上する。図23には車両Cの10・15モード運転時の電池出入電力を示すが、特に40~70km/hの中速域における減速時に大きなエネルギー回生効果が得られることがわかる。一方、図24に示すように車両Cは発進から約50km/hまでモータの最大トルク領域を活用し、変速操作無しで車両Bに比べて高い加速度を得

表7 コンデンサバッテリーの諸元

項目	円筒型タイプ	角形タイプ
耐電圧 (V)	120	120
出力密度 (W/kg)	690	520
エネルギー密度 (Wh/kg)	2.2	2.5
単品寸法 (mm)	204×138×175	330×270×160
接続方式 (1台分)	8個直列	2個並列
静電容量 (F)	42	50
総質量 (kg)	38	40

表8 車両Cの諸元

項目	車両C (単体実験)	(車両B) (実車実験)
車両質量 (kg)	700	←
前面投影面積 (m ²)	1.74	←
駆動モータ	種類	三相交流誘導
	最高出力 (kW)	40
	最大トルク (N・m)	125
	制御方式	IGBTインバータ
変速機	1段(固定)	3段
主電池	種類	鉛(密閉型)
	端子電圧 (V)	240
発電機	エンジン燃費 (g/kWh)	245
	発電機電圧	三相交流 110~170
	発電制御	電圧、エンジン発停
直流電源	使用しない	使用

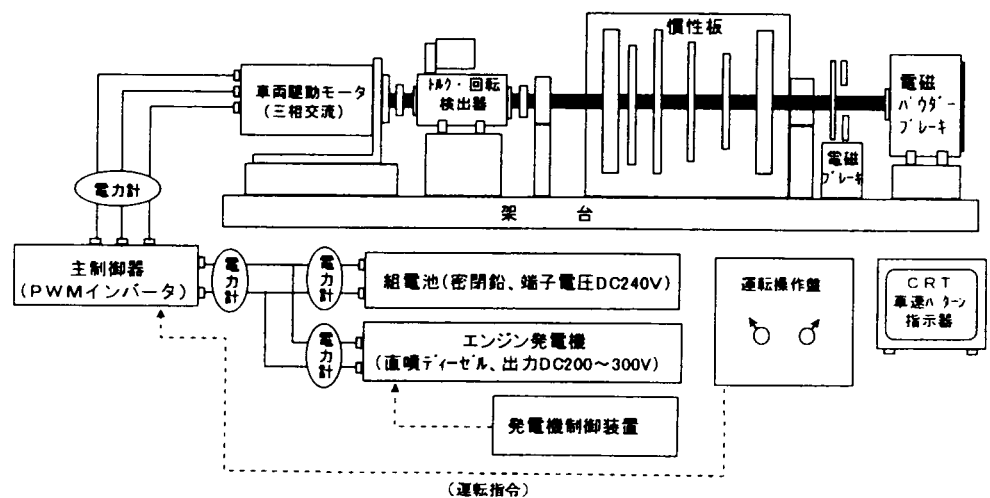


図21 単体台上実験装置の概要

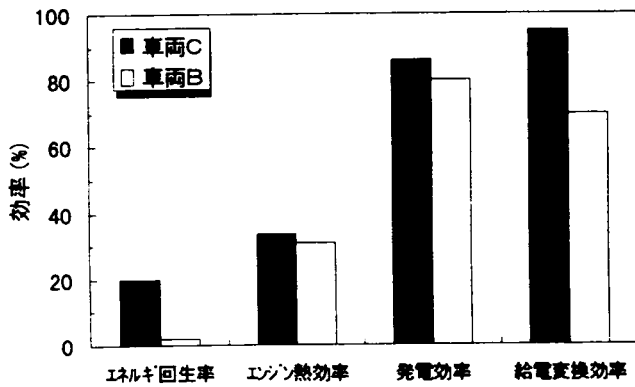


図 22 車両Cの構成要素のエネルギー効率

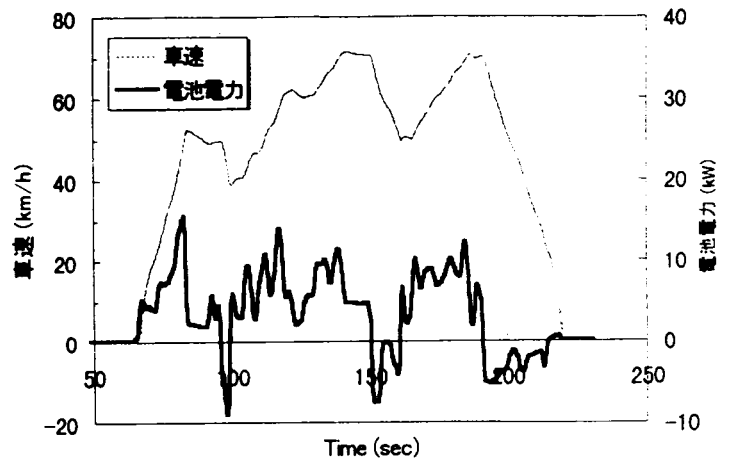


図 23 車両Cの15モード運転時の電池電力挙動

ることができ、通勤カーに最も重要な発進時の加速能力と省エネルギー性を高いレベルで両立させることを可能とした。

10. シリーズハイブリッド方式通勤カーの CO₂ 排出量評価

10.1 走行に伴う CO₂ 排出量の算出

本研究で検討したシリーズハイブリッド車は電池エネルギーと給電エネルギーを併用することを仮定し、その経路はエンジン車や電気自動車よりも複雑であるため、車上の電気エネルギーのフローから CO₂ 排出量を計算する手法について検討した。電気エネルギーは図 25 のように供給、消費されるため、下記の手順で算出するのが妥当と考えられる。

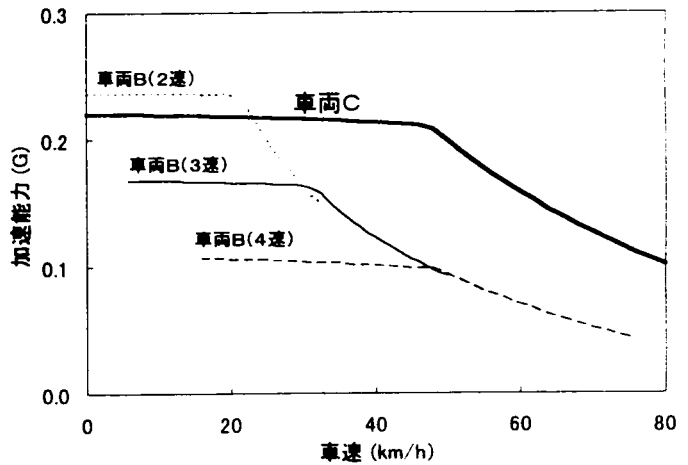


図 24 車両Cの加速能力

(1) 車両の単位走行距離当たりの要求電力量、およびそれを供給する電池エネルギー、給電エネルギー、回生エネルギーの分担、および給電エネルギーの直接消費分と電池経由分をを台上運転時の各部の電力量積算値より求める。

(2) 電池エネルギー消費量より商用電源の消費電力量(kWh)、発電機エネルギー消費量より燃料消費量(リッター)を各々算出する。

* 商用電源の消費電力量 (kWh/km) = 電池エネルギー消費量 ÷ 充放電効率

* 燃料消費量 (リッター/km) =

発電機エネルギー (直接消費分) ÷ 発電効率 + 発電機エネルギー (間接消費分) ÷ 充放電効率 ÷ 発電効率

(3) 商用電源と燃料の消費による CO₂ 排出量を各々の排出原単位を乗じて個別に求め、両者を合計

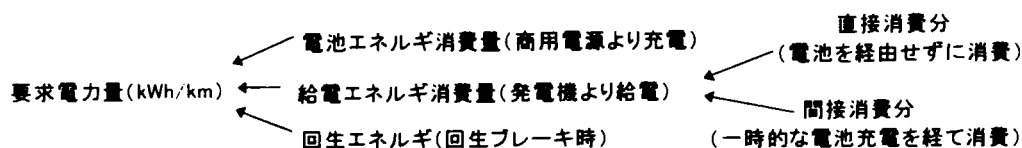


図 25 シリーズハイブリッド車上の電気エネルギーフロー

して1台・単位走行距離当たりのCO₂排出量を算出する。

走行1km当たりのCO₂排出量 (kgC/km) =

商用電源の消費電力量 (kWh/km) × 商用電源の排出原単位 (kgC/kWh) +

燃料消費量 (liter/km) × 燃料の排出原単位 (kgC/liter)

(4) 台数、走行距離を乗じて総量を推定する。

10.2 コミュータカー導

表9 コミュータカー導入によるCO₂排出削減効果の予測

入によるCO₂排出量削減効果の予測

導入されるコミュニ
タカーは電池エネルギー
と給電エネルギーを50%
ずつ使用し、その走行
に伴うCO₂排出量は車
両Cと同等であると仮
定した。本報告では排
出原単位として、商用
電源に0.104kgC/kWh、
発電機の燃料(軽油)

対策の時期	現在	2000年頃	2010年頃
総削減量 (Mt-C/年)	case11) 0.88Mt-C case21) 0.06Mt-C case31) 0.19Mt-C	c12) 1.95Mt-C c22) 0.13Mt-C c32) 0.43Mt-C	c13) 3.52Mt-C c23) 0.44Mt-C c33) 1.00Mt-C
導入一台当たりの 削減率、削減量 (%/台/年/1万km) (t-C/台/年/1万km)	c11) -46% -0.29t-C c21) -25% -0.11t-C c31) -10% -0.06t-C	c12) -46% -0.29t-C c22) -25% -0.11t-C c32) -10% -0.06t-C	c13) -51% -0.33t-C c23) -32% -0.14t-C c33) -14% -0.09t-C
仮定	c11) 1994年度末小型乗 用車3080万台の1割を 代替 c21) 1994年末軽乗用車 520万台の1割を代替 c31) 1994年末小型乗用 車の1割と併用、その走 行距離の5割を代替 *電池交換1回あり	c12) 小型乗用車台数 1割増、その2割を代替 c22) 軽乗用車台数1 割増、その2割を代替 c32) 小型乗用車の2 割と併用、その走行距 離の5割を代替 *電池交換1回あり	c13) 小型乗用車台数 2割増、その3割を代替 c23) 軽乗用車台数2 割増、その5割を代替 c33) 小型乗用車の3割 と併用、その走行距離 の5割を代替 *電池交換無し

に0.775kgC/literを用いた²⁾。またコミュニタカーの製造段階等を含めたライフサイクルにわたるCO₂排出量(以後、「LCCO₂」と記す。)に占める走行部分の排出比率を、小型乗用車のデータを参考とし³⁾車両質量とエネルギー消費率の違いを考慮して推測した。それに基づいてコミュニタカーのLCCO₂を計算し、小型乗用車や軽乗用車と比較してコミュニタカー導入によるCO₂排出削減効果を様々なケースについて予測した。導入の形としては既存車を単純に置き換える他に、小型乗用車にコミュニタカーを追加保有して走行の一部をコミュニタカーで置き換える形も想定した。その結果を表9に示す。コミュニタカー導入によるCO₂排出削減量は、小型乗用車との単純置き換えのケースが、一台当たりでも総削減量でも最も大きい。乗人数や長距離の移動が困難になると考えられる。軽自動車との単純置き換えの形では、一台当たりでは比較的削減効果が高いが、軽自動車の総台数が小型乗用車の六分の一程度のため、総削減量は低いレベルに留まる。小型乗用車と併用の形では、一台当たりの削減率は小さいが、総削減量は意外に大きく、実際に普及を図る上でも現実性が高いと考えられる。

以上の結果より、シリーズハイブリッド方式コミュニタカーの導入は、構造の複雑化やコスト高等が課題として残るが、都市内用途への適合性が高く、かつCO₂排出削減効果が高いと期待できる。

1.1 本研究で得られた成果

- (1) 電気自動車用動力ユニットとして最新のパワーエレクトロニクス技術を応用した減速ギア付ホイールインモータを検討し、既存の電気自動車の性能向上の可能性を見出した。
- (2) 市販の電気自動車に発電機を付加してシリーズハイブリッド化を試み、台上実験により顕著な航続性能向上効果を把握して、シリーズハイブリッド方式のコミュニタカーへの適合性を確認した。
- (3) コミュータカーを想定したシミュレーションにより、運転中の発電出力と電池内部エネルギーの変化の関連について考察した。
- (4) 市販の電気自動車のモータ等を使用した模擬的なコミュニタカーをシャシダイナモメータ上に設

定して台上運転し、小型軽量化による加速性能向上や要求電力量の低減効果を確認した。また給電能力や車両運転条件を変えて発電機、電池と車両の電力需給関係を調べ、「充電依存型」と「自立型」の二タイプを定義し、電池と発電機の組合せの最適化を考察した。

(5) 小型車用動力システムの技術動向についての調査を行い、コンピュータに採用し得る構成要素に関する基礎資料を得た。

(6) 交流インバータモータ等の新技術要素を採用した改良型のシリーズハイブリッドコンピュータを設定し、台上実験等によりエネルギー効率向上と動力性能確保が高いレベルで両立できることを確認した。

(7) シリーズハイブリッド車のライフサイクルにわたるCO₂排出量を定量的に算出する手法を検討し、コンピュータ導入によるCO₂排出量削減効果を予測した。

(参考文献)

(1)清水、他、シミュレーション第10巻第3号 P.63、平成3年9月

(2)環境庁地球環境部、二酸化炭素排出量調査報告書 P.58, P.99、平成4年5月

(3)近藤、他、素材生産に伴う二酸化炭素の排出原単位と自動車生産仮定への適用、エネルギー・資源学会第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集 P.309

(研究発表の状況)

(1)小高、他、第24回交通安全公害研究所研究発表会で発表、講演概要 P.113、平成6年11月

(2)林田、他、第3回日本機械学会交通・物流部門大会で発表、講演論文集 P.91、平成6年12月

(3)林田、他、第25回交通安全公害研究所研究発表会で発表、講演概要 P.109、平成7年11月

(4)林田、他、第4回日本機械学会交通・物流部門大会で発表、講演論文集 P.375、平成8年12月

(5)林田、他、第26回交通安全公害研究所研究発表会で発表、講演概要 P.109、平成8年11月

(6)林田、他、1997SAE Congress and Exposition で発表、SAE paper 970197、平成9年2月

(7)成澤、他、97年度電気自動車研究会研究発表会で発表、概要集 P.61、平成9年4月

(8)林田、他、第5回日本機械学会交通・物流部門大会で発表予定(平成9年7月)

(9)林田、他、自動車技術会1997年秋季学術講演会で発表予定(平成9年10月)