

B-55 交通需要の地域特性に適合した運輸部門の環境効率向上策とその普及促進策に関する研究
 (4) 環境効率向上策のアジア諸国への適用可能性評価に関する研究

独立行政法人交通安全安全環境研究所 環境研究領域
 EFフェロー

成澤和幸・林田守正
 鄭 四発(中国清華大学)

平成 12-14 年度合計予算額 3,098 千円
 (うち平成 14 年度予算額 3,098 千円)

1. はじめに	102
2. 研究目的	102
3. 研究実施計画	102
4. 結果および考察	102
4. 1. 交通需要の解析	102
4. 2. 環境に優しい交通機関の考察	105
(1) 輸送部門の解析	105
(2) 交通機関の効果的なプランニングと維持管理	106
(3) 省エネ・低排ガス車両	107
4. 3. 環境に優しい自動車の開発と評価	107
(1) 車両の仕様と概要	107
(2) エネルギーフローと動力システムの構成	108
(3) パフォーマンスのシミュレーションと評価	109
5. 本研究により得られた成果	110
6. 参考文献	111
7. 国際共同研究等の状況	111
8. 研究成果の発表状況	111
9. 成果の政策的な寄与・貢献について	112

[要旨]

本研究の目的は発展途上にあるアジア諸国に適した環境に優しい輸送機関を求めることにある。そこで現在急激にモータリゼーションが進展している中国北京市をモデルにして、二酸化炭素排出を抑制しつつ、大気汚染を改善することが出来る公共交通機関としてデュアルモードハイブリッドバスを取り上げ、その導入の可能性、導入した場合の排出削減量について考察した。その結果、すべてのバスがデュアルモードバスになれば、中国全土においてバスが2002年に消費した2億1000万トンの原油量の25% (5000万トン) の削減と5kmの無公害走行ができること等が明らかとなった。

[キーワード] 輸送転換、都市交通バス、発展途上国、デュアルモード動力システム、エネルギー回生

1. はじめに

中国北京市における交通需要の変化は極めて急激である。90年代には6年間で輸送人員は2.5倍に増加した。また自動車の台数増加も急で、90年代の年平均増加率は乗用車で30%、バス等を含む総台数で20%である。この中でバスは7%増加している。平均経済成長率が10%程度を維持する中で地下鉄整備が進められているが、今後もバスを含む自動車輸送に依存していかなければならない現状にある。実際北京市では2008年のオリンピックに向けて地下鉄やライトレールシステムを建設し、総延長距離を2.8倍にする計画であるが、発展途上の国にとってコストの高い公共交通機関の建設は負担が大きいと、自由度が高く、比較的安価に導入できるバス輸送についても強化していく方針である。このため環境にやさしいバスの開発が望まれている。

2. 研究目的

地球温暖化防止の観点から、今後急激な増加が見込まれる乗用車の使用を抑え可能な限りバスにシフトする必要がある。そこで、60人乗りデュアルモードバスに用いるための、モーター、ニッケル水素電池やキャパシター等から構成されるハイブリッド動力システムを想定して、実用条件下におけるエネルギーフロー解析からバスの総合エネルギー効率を算出し、各種使用条件下における二酸化炭素排出低減効果を求める。

3. 研究実施計画

バス用ハイブリッド動力システムの実用条件下におけるエネルギーフローを解析するためのプログラムを作成する。これを用いてバスの総合エネルギー効率を求める方法を考案する。そして各種使用条件下における燃費を計算し、無公害電気走行を確保した条件下で、二酸化炭素排出を低減できるデュアルモードバスの技術的方向性を定める。

4. 結果および考察

4. 1. 交通需要の解析

発展途上にある多くの国にとって経済発展は緊急の課題である。このため、エネルギー消費量が急増しており、地球温暖化と天然資源の枯渇が最も深刻な環境問題になりつつある。図1は20世紀

における全地球のCO₂排出量の増加を示す[1]。20世紀後半の増加が急であり、液体燃料からのCO₂排出は1970年代から化石燃料の中で最大である。日本の統計によれば、輸送部門はCO₂総排出量の約20%を占めている[2]。輸送部門の燃料消費と排ガスを削減するための環境に優しい交通機関の導入はすべての国に共通する課題である。

自動車に起因する環境問題には、排ガスによる大気汚染、CO₂排出による地球温暖化、および自動車騒音があるが、本研究ではCO₂排出に着目する。中国のようなアジアの発展途上国では、急速に拡大するモータリゼーションによって貨物と旅客の交通需要が莫大になっており、当然、エネルギー需要も莫大である。発展途上諸国における輸送部門からのCO₂排出は先進国の数年前に見られたのと同じ推移で増加している。図2は20世紀後半における液体化石燃料からのCO₂排出と一人当たりのCO₂排出を中国と日本の間で比較したものである[1]。日本では1960年から1980年、中国では1980年から現在までの経済成長期において、液体燃料からのCO₂排出が急増した。日本では、自動車のCO₂排出が輸送部門全体の90%を占めている。近年の日本では、莫大な台数の自動車が環境に及ぼす悪影響を抑制するために、ITS（高度道路交通システム）と低排ガス省エネ自動車が導入されている。それでもなお、輸送部門からのCO₂排出はこの10年間で23%も増加した[2]。現在、中国では、自動車が貨物と旅客からなる輸送部門全体の80%を占めていて、ここ数年、経済が成長し続けている。先進諸国の反省点を踏まえると、環境に優しい交通機関の導入は今の中国にとって非常に重要であるとともに緊急の課題である。

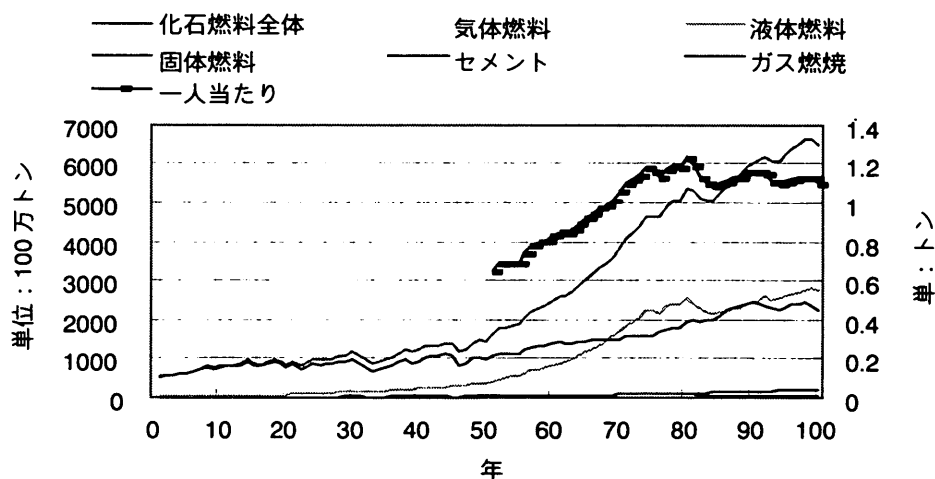


図1 20世紀における全地球のCO₂排出

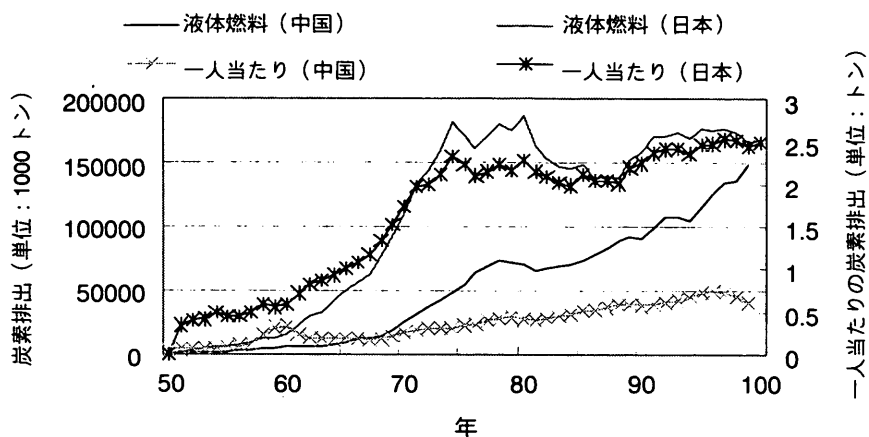


図2 中国と日本の液体燃料CO₂排出の比較

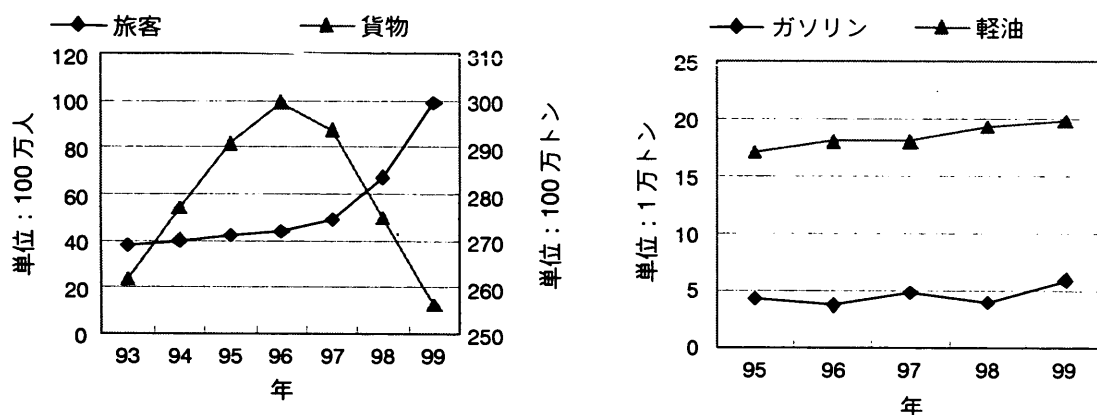


図3 北京における自動車輸送と輸送部門の消費する燃料

本論文では、北京を例に取り、大都市に適した公共バスの選定方法を提案する。まず、各輸送部門と新形式自動車の導入による環境メリットについて述べる。次に、公共交通機関における自動車の急増を踏まえて、世界の最新の省エネ自動車技術を比較する。また、公共バスに適した高エネルギー効率動力システムを提案して、それをシミュレートする。最後に、各種ハイブリッド自動車を評価して、コストパフォーマンスの高い技術について述べる。

アジア諸国の大都市は非常に混雑していて、莫大な交通需要がある。たとえば、北京市の人口は1200万人である。図3は、北京市における1993年から1999年の自動車輸送の変遷と、1995年から1999年に輸送機関によって消費されたガソリンと軽油の量を示す。上図からは旅客数が6年間に2.5倍になったことがわかる。また、貨物輸送は最初の3年間に増加した後、徐々に減少しているが、この減少は工場等の郊外移転によるものである。軽油の消費量はこの3年間で徐々に増加した。図4は自動車台数の6年間の変化である。図5は1993年から1999年の旅客数と車両数の推移である。

これらの図からは旅客数と総台数がともに急増したことがわかる。特に1996年から1999年では旅

客数と総台数の年平均増加率がそれぞれ30%と20%であった。このうち、バスの台数は7%増加したが、

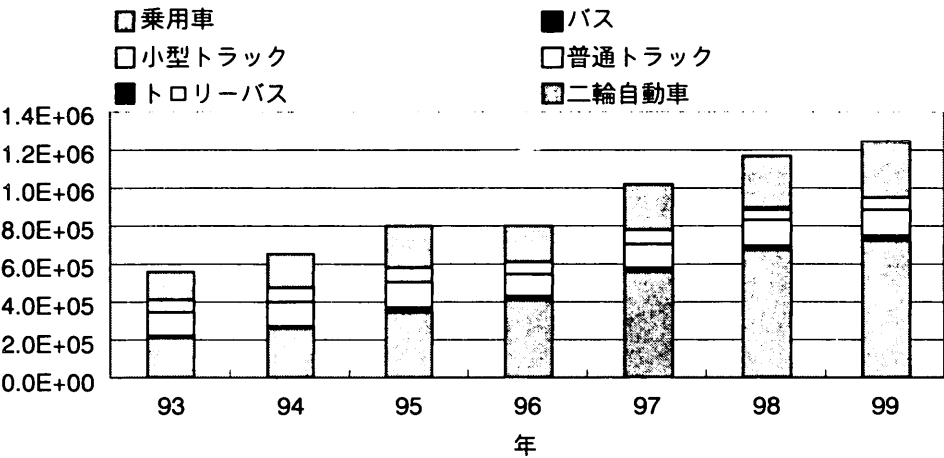


図 4 1990年代の北京の自動車台数の変化

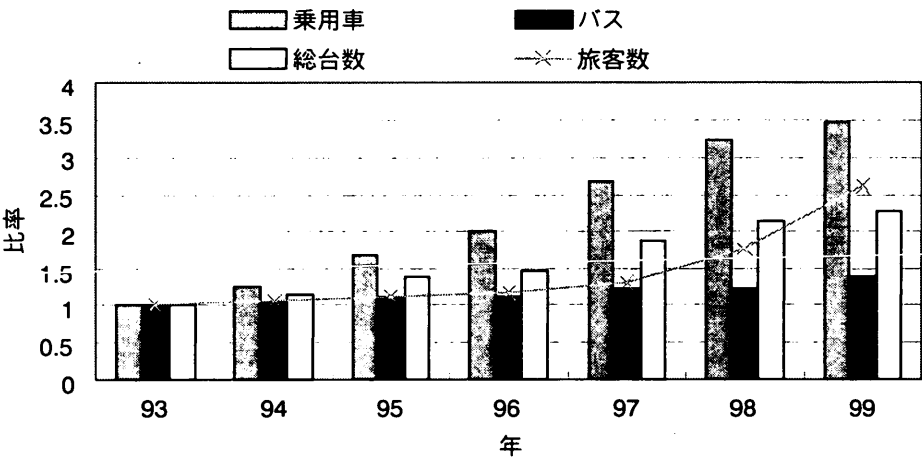


図 5 北京における旅客数と車両台数の推移（1993年 = 1）

トロリーバスの台数はほぼ横ばいであった。今後の経済成長率は年に11%と予測されるため、交通需要も急増するものと思われる。たとえば、バスの台数は2002年に13,000台に達し、公共交通機関を利用する旅客全体の90%（述べ39億4000万人）を輸送しており、2001年から7%増加した。残りの10%、つまり述べ4億6000万人は地下鉄を利用している[3]。2003年の旅客数、交通需要、およびバス台数の予想増加率はそれぞれ23%、18%、および7%である。

4. 2. 環境に優しい交通機関の考察

環境に優しい交通機関は、交通インフラ、自動車、旅客、および維持管理に関わる課題である。この課題について以下に述べる。

(1) 輸送部門の解析

1) 鉄道と自動車

都市の公共旅客交通機関は鉄道システムと自動車システムの2つに大別できる。鉄道システムには地下鉄、在来都市鉄道、およびライトレールがあり、自動車システムにはバス、トロリーバス、およびタクシーがある。地下鉄と在来都市鉄道の輸送力は後者よりも大きい。鉄道は電気によるモーター駆動であり、自動車よりもエネルギー効率が良く、しかも、排ガスを一切出さない。鉄道のデメリットは自動車よりも建設費と維持費が高いことである。たとえば、地下鉄は旅客にとって安価で便利な交通手段であるが、発展途上諸国の都市にとっては経済的負担が大きい。それに比べて、自動車は大幅に安価であり、柔軟性が高く、路線もほぼ自由自在である。従来の自動車のデメリットは多量の排ガスとエネルギー効率の低さである。新形式の電気自動車、ハイブリッド自動車、および燃料電池自動車の開発では、環境問題の緩和を目指している。近年では、IMTS（高度マルチモード道路交通システム）が開発されている。これは、動力システムとして従来のエンジンを使用するものの、所定のルートを自動運転で運行するシステムである。速くてしかも安全なシステムであり、複数の車両を連結できるが、環境上、普通の自動車と同じ問題を抱える。

公共交通機関を充実させるために、北京市は2008年に向けて、地下鉄とライトレールの総延長を2.8倍の202 kmに、また2001年に13,000台だったバスを21,000台にする必要がある。この場合の予想旅客専有率はバスが90%、鉄道が10%となる[4]。北京市を運行するバスの台数は世界の都市の中で最多であるため、環境に優しいバスの導入は非常に重要である。

2) 乗用車と公共バス

自動車の中でもバスは旅客の輸送力が最も高く、輸送人員当たりの燃費と排ガスは乗用車よりも大幅に低い。表1は、都市で利用する場合の乗員一人当たりの平均燃費を乗用車とバスの間で比較したものである。この表からは、バスの乗員一人当たりの平均燃料消費が乗用車の僅か3分の1であること、バスの輸送力が乗用車のおよそ10倍であることがわかる。したがって、都市ではバスを優先的に導入する必要がある。

表1 乗用車と公共バスの燃費の比較（都市モード）

種別	重量 (kg)	乗員数	燃費 (L/100km)	
			1台の燃費	一人当たりの燃費
乗用車	1,050	3	9	3
公共バス	95,000	40	38	0.95

(2) 交通機関の効果的なプランニングと維持管理

輸送を効率的に行うには、路線の拡大に並んで維持管理システムの改善が重要である。交通機関を効果的にプランニングして、維持管理すれば、車両の平均運行速度が上がり、交通機関の燃費と排ガスが低くなる。

交通機関のプランニングには、乗り継ぎの最適化、バス運行ルートの設定、交通需要に応じたバス輸送力の設定などが含まれる。これらの要点を十分に考慮すれば、バスに乗車する旅客の数が増え、徒歩とバス待ちに費やされる時間が減る。高度な輸送管理では、リアルタイム交通監視および誘導システムが採用されているが、これらには運行平均速度を引き上げて、車両の流れをスムーズにするメリットがある。

(3) 省エネ・低排ガス車両

先に述べたように、バスの台数は今後、急増する。したがって、燃費と排ガスのレベルが今のままだと、燃料消費と排ガスが大幅に増えてしまう。地球温暖化を悪化させない取り組みにおいては、燃料を最大限に節約できる技術が大きな役割を果たすことになる。このような技術としては、電気自動車、ハイブリッド自動車、低排ガス燃料（CNG/DME/高品質ガソリンや軽油など）、および排ガスの後処理（触媒コンバータやDPF）がある。

図6は、日本における燃料別・動力システム別の平均エネルギー効率を示す[5]。精製燃料の種類別（ガソリン、軽油、およびナフサ）と動力システム別（ICEV = 内燃エンジン車、EV = 電気自動車、HEV = ハイブリッド電気自動車、FCHEV = 燃料電池ハイブリッド自動車）にエネルギー効率を比較している。

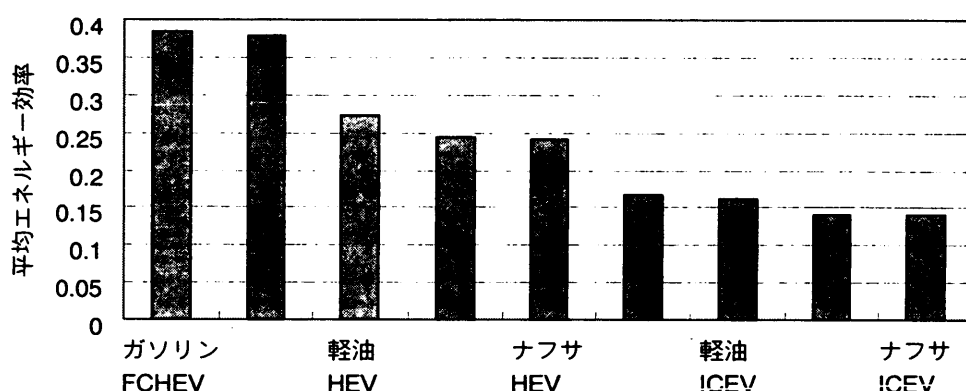


図6 燃料別・動力システム別平均エネルギー効率

エネルギー効率が高い順に動力システムを並べると、FCHEV > HEV > EV > ICEVとなり、エネルギー効率はそれぞれ0.38、0.25、0.18、0.15である。これらの数値は各国でそれぞれのエネルギー事情等によって異なるものと思われるが、上の図は今後開発すべき高エネルギー効率自動車の傾向を示しており、現に多くのメーカーが取り組んでいる方向と一致している。現在、HEVテクノロジーが熟成を迎えつつあるが、バッテリー性能と高コストが実用上の障害になっている。FCHEVは将来的にマーケットのほとんどを占めることになるだろうが、現時点では、多くの問題（技術面、インフラ面...）が未解決である。現在使用されているバスのほとんどがディーゼルICEVである。この2年間でシリアルとパラレルの両方のHEVバスが開発されて、実用化され始めている[6, 7]。FCHEVバスはまだ開発されたばかりである。日本では、純粋な水素を燃料とする燃料電池バスが2002年に初めて開発され、現在、走行試験中である[8]。

4. 3. 環境に優しい自動車の開発と評価

(1) 車両の仕様と概要

北京市における公共交通事情を踏まえて、本研究ではまずデュアルモードバスについて検討する。図7はバスの走行ルートと駆動モードを示す。バスはバス停Aとバス停Dの間を往復運行する。排ガスの問題が極度に厳しいバス停Bとバス停Cの区間では、純粋電気モードで走行する。他の区間では

ハイブリッドモードで走行する。各区間の距離はそれぞれ $l_{AB} = 6 \text{ km}$ 、 $l_{BC} = 5 \text{ km}$ 、 $l_{CD} = 6 \text{ km}$ である。表2はバスの仕様と諸元の一覧である。

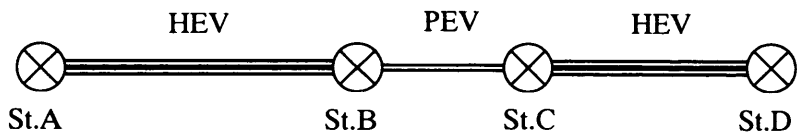


図7 バスの走行ルートと駆動モード

表2 デュアルモードバスの目標仕様

項目	数値
車両総重量	9,450 kg
乗車定員	60名
最高速度	65 km/h
補助電源の出力	2 kW
電気走行距離	5 km

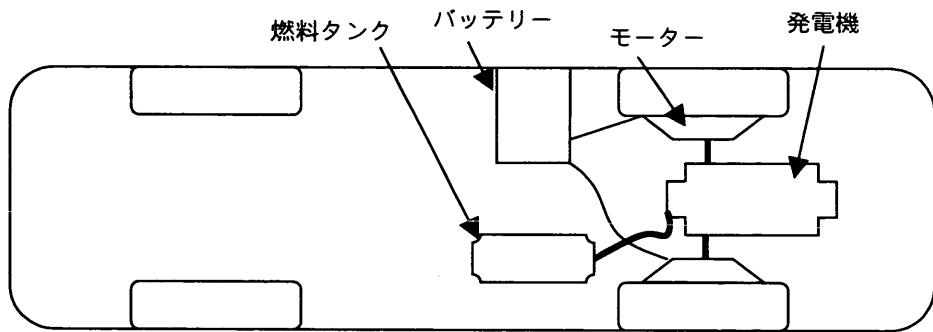


図8 デュアルモードバスの概略図

ここで提案するバスの概要を図8に示す。動力システムは発電機1個、燃料タンク1個、車輪内蔵モーター2個、およびバッテリー一式から構成される。

(2) エネルギーフローと動力システムの構成

表3は動力システムのコンポーネント間の主なエネルギーフローの一覧である。3種類のエネルギーフローを純粋電気モードとハイブリッドモードについて表記した。PEVモードではバッテリーが放電されて、そのSOC（充電レベル）が低下する。HEVモードでは、発電機がモーターとバッテリーの両方に電力を供給するので、バッテリーのSOCが高レベルのまま維持される。

動力システムの出力、エネルギー条件、およびエネルギーフローモードの主な諸元（発電機の出力、モーターの出力、およびバッテリー容量）を表4にまとめる。

表3 デュアルモードバスの主なエネルギーフロー

モード	サブモード	エネルギー供給	エネルギー受給
PEV	アイドリング	バッテリー	補助電源
	走行	バッテリー	モーター
	再利用	モーター	バッテリー
HEV	低速走行	発電機	モーター、発電機
	高速走行	発電機、バッテリー	モーター
	再利用	モーター	バッテリー

表4 動力システムの主な諸元

項目	最高速度	パラメータ値
モーター	方式	車輪内蔵AC駆動
	最高出力	90 kW×2
発電機	出力	50 kW
バッテリー	方式	NiMH
	容量	100 Ah
	可用エネルギー	11 kWh

(3) パフォーマンスのシミュレーションと評価

ここでは、提案するデュアルモードバスのシミュレーションと評価を行った。図9はシミュレーション手法の説明図である。モードの選択と各モードにおける発電機とバッテリー間の電力配分は出力制御モジュールによって決定される。このバスはルートのほとんどをハイブリッドモードで走行するが、規制エリアに到達したとき、またバッテリーのSOCが下限値以上になったときには純粋電気モードに切り替わる。

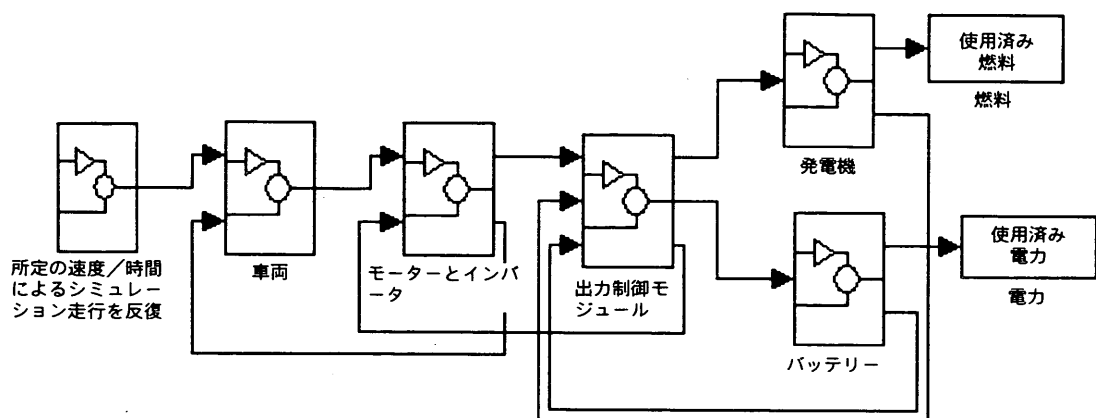


図9 デュアルモードバスのシミュレーションの説明図

このデュアルモードバスの走行制御はPEVモード制御とHEVモード制御から構成される。バッテリーは充電または放電のいずれかに用いるものとし、SOCをできるだけ一定とする。

表5は、SOCの変動範囲を0.6～0.8、エネルギー再利用率を80%としたときのシミュレーション結果である。

表5の数値から図7のルートを走行するこのバスの平均燃費（L/100km）を計算したところ、

$$f_a = \frac{12 \times 40.3}{12 + 5} = 28.4 \text{ (L/100km) となった。}$$

これは、従来のディーゼルエンジンバスの燃費の75%（28.4/37.7）である。この37.7（L/100km）という数値は従来のバスのシミュレーション燃費である。

表5 デュアルモードバスの燃費

項目		PEV	HEV
SOC	開始時	0.8	0.6
	終了時	0.6	0.8
燃費（L/100km）		0	40.3
走行距離（km）		5	12

バスが中国全土において2002年に消費した原油の量は2億1000万トンであるから、すべてのバスがデュアルモードバスになれば、1年に約5000万トンの節約になる。

5. 本研究により得られた成果

近年、アジア諸国において公共交通機関が急速に普及しているので、環境に優しい交通機関を早急に導入する必要がある。北京市では、前述の公共交通機関と省エネバスが提案されている。北京市ではバス台数が年に7%増加しているので、デュアルモードバスを導入することによって、5kmの無公害電気走行と25%の燃費節約を可能にすることが示された。

6. 参考文献

- (1) Carbon dioxide emissions from fossil-fuel consumption and cement manufacture (1999), <http://cdiac.esd.ornl.gov>, 2003.1
- (2) The environment policy of Japanese automobiles. Ministry of the environment, Japan, 2002.10
- (3) Report of statistic data of Beijing city, Beijing: Beijing statistic bureau, 2002
- (4) Beijing Olympic working plans(sketch), Beijing: Organization committee of Beijing Olympic games. 2001
- (5) Y. Baba, H. Ishitani, Wheel to wheel efficiency of fuel cell vehicles in Japanese conditions, EVS18, 2001, Germany
- (6) Y. Horiï, J. Take, Y. Susuki, A hybrid electric drive system for low_floor city bus. EVS19, 2002, Korea
- (7) K Shimizu, T. Tono, T Koike, Development of new hybrid bus, 20025203, 2002 JSAE Annual Congress, Japan
- (8) Toyota FCHV-bus2, Tokyo: The 36th Tokyo motor show 2002 (commercial vehicles)

7. 国際共同研究等の状況

中国清華大学との研究協力協定の下に進めている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表(学術誌、書籍)

<学術誌(査読あり)>

なし

<学術誌(査読なし)>

なし

<書籍>

なし

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

①Sifa Zheng et al, The Application of the Environmental Friendly Transport System to the Asian Countries, Asia Electric Vehicle Conference - 2003 (AEVC-2003), Sep 2003

(3) 特許出願

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表、報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、中国清華大学を通じ、本研究の成果の実用化に努める。