

# 先進電動マイクロバス交通システムモデル事業

- 先進デマンドバスシステムとその展開 -

交通システム研究領域	林田 守正	水間 毅	大野 寛之	佐藤 安弘	山口 知宏
環境研究領域	成澤 和幸		早稲田大学	大聖 泰弘	紙屋 雄史

## 1. まえがき

路線バスは乗客数が適切であれば、自家用車と比較して1人あたりのエネルギー消費量、環境負荷、ならびに道路や駐車スペース有効利用の点で格段に優れる。また大規模なインフラが不要で、キメ細かな輸送が可能である。しかし特に地域部の路線バスの輸送量はマイカー利用の浸透等によって年々低下し、バス路線廃止に伴い交通弱者が移動手段を失う事例も生じている。このような中、旅客需要の少なくマイカー依存度の高い地域部の都市を対象とした、省エネルギーで利便性の高い先進的な公共交通システムを提案するために、平成16年度より早稲田大学を中心とした「先進電動マイクロバス交通システムモデル事業」が、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「民生部門等地球温暖化対策実証モデル評価事業」の1つとして進められている。当研究所は、最新のITS技術を用いた「先進デマンドバスシステム」の構築を担当しているため、その内容と、これまでに実施した先行検討結果を報告する。

## 2. 先進電動マイクロバス交通システムモデル事業の概要

### 2.1. 先進デマンドバスシステム

先進デマンドバスシステムは、後述の先進電動バス車両を、利用者の乗車・降車希望（デマンド）に応じて柔軟かつ合理的に走行させるための運行システムである。従来のデマンドシステムは、情報処理の大部分をマンパワーに頼ったもので自動化が遅れていた。また過疎地域等の小規模のシステムが主であり、経路変更の自由度が極めて小さいものであった。ここで検討する「先進デマンドバスシステム」においては、GPSによる位置検知や情報伝送等のITS技術を活用して、デマンドに応じた最適運行経路を自動計算

し運転手へ瞬時に指令し、バスの配車時刻や目的地到着時刻についても利用者に情報提供するという機能を持たせる。またバスが設定経路上を既存の交通流や信号機のタイミング、乗客のデマンドに対応して走行する際の所要時間やエネルギー消費量を定量的に評価する技術、ならびに地理情報システム上で動作するアプリケーションを用いてモデル地区の基礎的集客能力を算定し、仮定したデマンドバス経路の利便性を数値評価して需要を予測する技術等を構築する。

### 2.2. 実施体制

本事業は、「先進電動マイクロバス車両」と「先進デマンドバスシステム」という車両システムと運行システムの両者を結合させることにより、大幅な省エネルギー、低公害化、乗車環境改善等を同時に図ることができる先進的なバス交通システムを提案するものである。本事業は早稲田大学が中心となって全体のとりまとめと実証実験の実施を行い、昭和飛行機工業（株）が先進電動マイクロバス車両の開発、当研究所は先進デマンドバスシステムの構築を担当するという、共同プロジェクトである。

### 2.3. 先進電動マイクロバス車両

本事業で開発するバス車両では、走行中の排出ガスが無くエネルギー効率も高いこと、静粛で変速ショックが無く乗心地が良いこと等の利点に注目して、純電気動力方式を採用した。これは走行距離が短いため可能であり、また先進的でクリーンなイメージを持たせて利用者への啓発効果をもねらうものである。開発のポイントは、高効率な永久磁石式同期モータシステム、高エネルギー密度の二次電池と高出力密度の蓄電装置の組み合わせ、ターミナルで安全かつ手軽に急速充電ができる非接触充電システム等である。車体は乗降が容易な低床構造である。その概要を図1に示す。

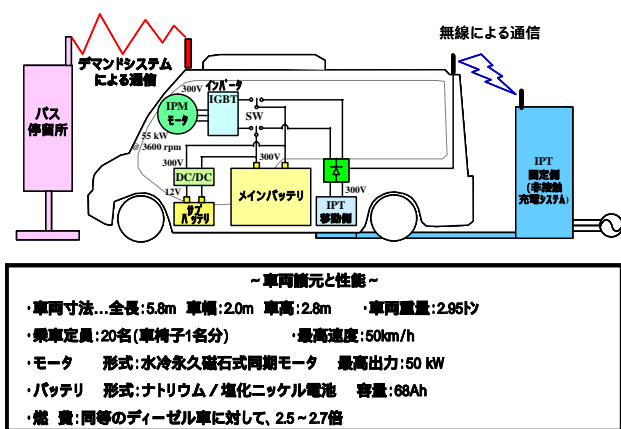


図1 先進電動マイクロバス車両の概要

## 2.4. モデル地区における実証試験

本事業では平成17年11月以降に、マイカー依存度が高く路線バスの輸送量が低下している典型的な地域部の都市の例として、埼玉県本庄市をモデル地区として、提案システムの実証試験を行う予定である。実証試験では、図2に示すように、早稲田大学本庄キャンパス、上越新幹線本庄早稲田駅、JR高崎線本庄駅を結ぶ経路を基本とし、乗降客の有無に関わらずバスを発着させる停留所（以下、「基本停留所」という。）を数カ所仮設する。また基本経路の東西1km程度の範囲にデマンドがあった場合のみ経由するバス停（以下、「デマンド停留所」という。）を数カ所仮設する。この実証試験の詳細については後述する。

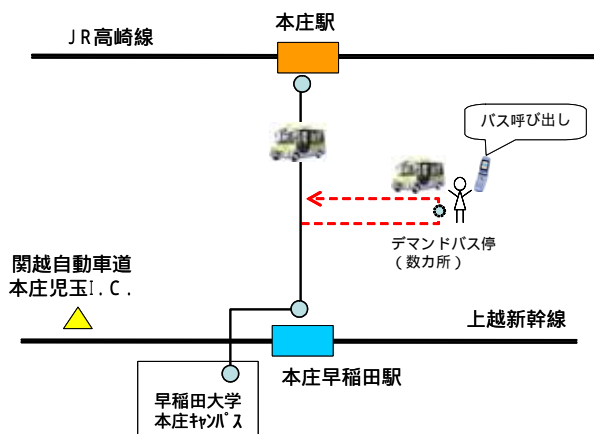


図2 実証試験のモデル地区とデマンドの概念

## 3. 先進デマンドバスシステムの構築

先進デマンドバスシステムは、下記の3つの部分から構成される。

- (1) GPSによる位置検知と特定小電力無線通信による情報伝送を利用したバス運転指令システム
- (2) 走行シミュレーションによる最適経路選択、時間

管理、および省エネルギー効果等の定量的評価

(3) 地理情報システム (GIS) を応用したデマンド路線の利便性評価および需要予測

以下に、その内容を述べる。

### 3.1. 位置検知・情報伝送・運転指令システム

#### 3.1.1. システムの構成と機能

バスの利用者が携帯電話を利用してデマンドを発信し、運行管理センタにおいて、その情報を受けて、走行中のバスにそのデマンドがあった付近の停留所へ向かうことを指示するシステムを検討した。その構成と情報伝送の流れを図3に示す。

本システムは、GPSにより車両位置を検知し、特定小電力無線により運行情報を運行管理センタに伝送する「位置検知・運行情報伝送システム」と、車両位置、利用者からの呼び出し等により運行管理センタからバスへ運転指示を行う「運転指示システム」から構成される。位置検知・情報伝送・運転指令システムを構成する各装置の概要は以下の通りである。

#### 車載装置機器構成

バス車両に設置する車載装置は、操作・表示を行う車上処理装置、緯度経度・時刻受信を行うGPS受信機、GPSのディファレンシャル制御を有効にするDGPS用FM多重レシーバ、車両の速度を把握する速度データ取得装置、および地上基地局装置との無線通信を行う無線機から構成される。運転者へのデマンド停留所経由の指示は、その経由パターンに応じて設定された系統番号を運転席に表示する形で行われる。

#### 地上基地局装置機器構成

停留所に設置する地上基地局装置は、操作・表示を行う地上処理装置、停留所に接近したバスの車載装置との小電力無線通信を行う無線機、公衆網を介し運行管理センタ処理装置とのパケット通信を行う携帯端末から構成される。

#### 運転管理センタ処理装置機器構成

運転管理センタに設置するセンタ処理装置は、操作・表示を行う中央処理装置、および公衆網を介して地上基地局装置とのパケット通信を行う携帯端末から構成される。

#### 携帯電話装置機器構成

停留所付近で扱う携帯電話装置は、デマンド操作・表示を行う処理装置、および地上基地局装置との無線通信を行う無線機から構成される。利用者のデマンドは、各自の携帯電話から、特設された受付専用ホーム

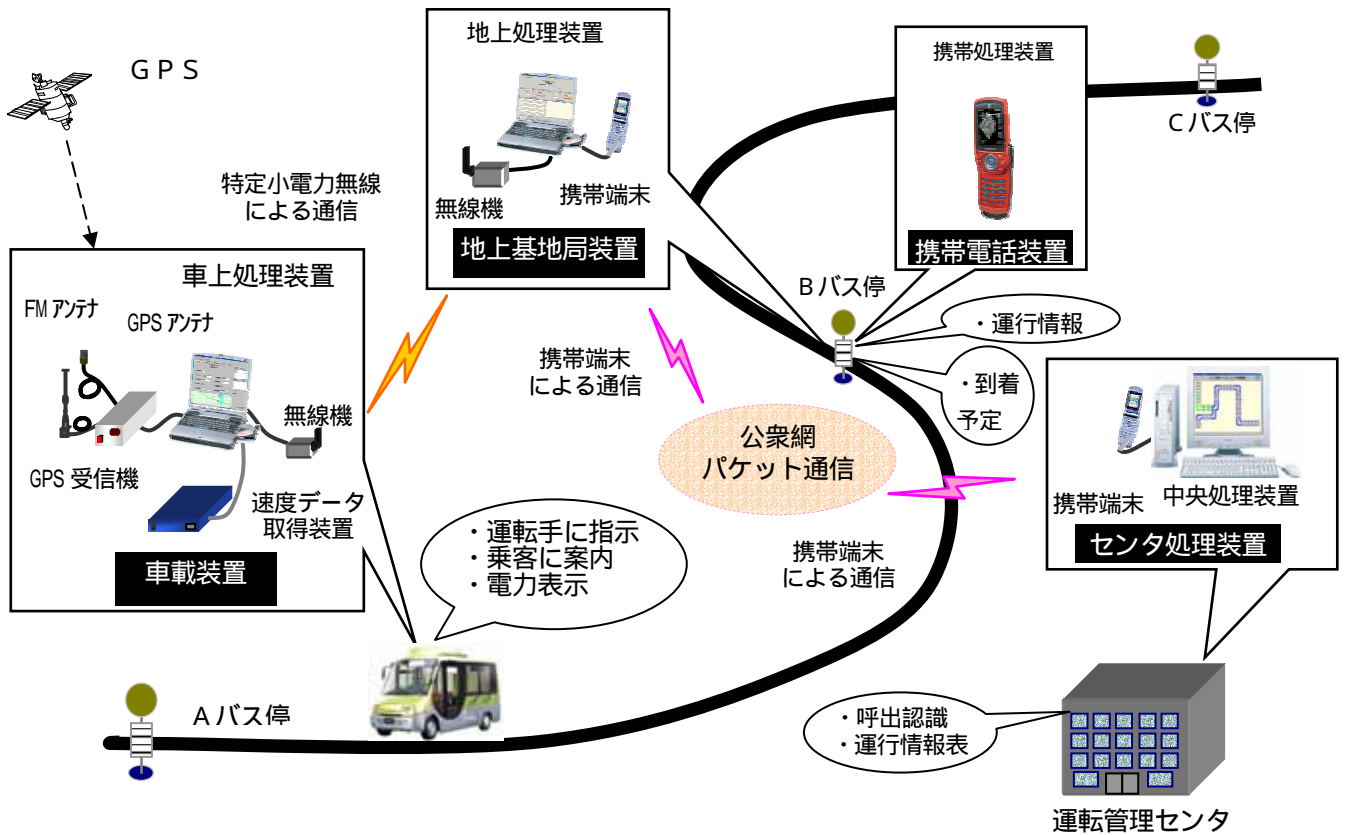


図3 GPSによる位置検知と特定小電力無線による情報伝送を利用したバス運転指令システムの構成

ページにアクセスする形で、公衆網を通じて運転管理センタに直送られる。

一方、運転指示基本システムは「位置検知・運行情報伝送システム」上のソフトウェアで「車上処理装置上で動作する運転指示/表示」、「地上処理装置上で動作する停留所指示/表示」、「中央処理装置上で動作するセンタ指示/表示」、および「携帯処理装置上で動作する呼出操作/表示」の各機能で構成される。

### 3.1.2. 先行確認試験

情報伝送・運転指令の先行試作システムの基本的な動作・機能を確認するための確認試験を、図2の本庄市内の早稲田キャンパス付近にて行った。基本停留所は本庄キャンパス、キャンパス入口、新幹線本庄早稲田駅、高崎線本庄駅の4ヶ所とし、デマンド停留所は本庄早稲田駅西方にある関越自動車道本庄児玉IC付近の1箇所のみとした。運転管理センタはキャンパス入口近くの大学構内、地上基地局はデマンドバス停付近に仮設した。この先行確認試験時点では、パソコンを利用した模擬携帯電話装置をデマンドバス停の地上基地局装置の近くに置き、特定小電力無線を利用して利用者のデマンドを模擬した。車両は、電動バスを想定した乗用車を模擬車両として使用した。

以下に、デマンド運行手順と機能確認の一例を説明する。あらかじめ本庄キャンパスから本庄駅の方向に、系統1として「本庄キャンパス キャンパス入口 本庄早稲田駅 本庄駅」、系統2として「本庄キャンパス キャンパス入口 本庄児玉IC 本庄早稲田駅 本庄駅」を設定した。

本庄キャンパス発車時点ではデマンドが無く、運転席には系統1が表示され、運転者はその前提で次のキャンパス入口に向かう。

車両がキャンパス入口に到着する前に、本庄児玉ICから、本庄駅まで乗車する旨のデマンドを模擬携帯電話により入力。

センタにそのデマンド情報が表示され、キャンパス入口に到着した車両に対し系統2に変更する指示を出す。また、呼出をした模擬携帯電話にデマンド可能であることを送信。

センタから車両への通信により運転席の車載装置の表示が系統1 系統2に変更されることを確認する。その後、車両はキャンパス入口を出発し、新たな系統指示にしたがって本庄児玉ICへ到着。

センタで車両の本庄児玉ICへの到着を確認。車両は本庄児玉ICを出発し本庄早稲田駅へ到着。



図4 先行確認試験の様子

センタ画面上で、本庄早稲田駅への到着を確認。

車両は本庄早稲田駅を出発して本庄駅へ向かう。

先行確認試験では、反対方向を含め、6つの系統と8通りの運行手順を設定した。主な機能確認項目は、

- ・模擬携帯電話装置からのデマンド
- ・センタからの指示に従い車上の系統番号表示が変更
- ・センタ処理装置で車両位置とデマンドの表示があり、系統番号を変更可能

である。これらを全て異常なく確認した。その様子を図4に示す。

### 3.2. 走行シミュレーションによる最適経路選択・省エネルギー効果の評価

#### 3.2.1. シミュレーションの機能

本デマンドバスシステムでは、デマンドを受けると、バスはそれが生じた周辺の最適な停留所に向かって経路を変更し、その後当初の目的地に走行することとなるが、その際、時間、距離、エネルギー消費量等が最小となるルートを経路選択してバスに走行を指示する必要がある。そのための経路選択、およびバスの走行に伴う電力、消費エネルギーや環境負荷（CO<sub>2</sub>排出量等）を動的なシミュレーションを実行して計算する。

モデル地区のデマンドバス経路周辺における既存

の自動車交通流が交通OD表や、図5に示すような信号制御等に基づいてコンピュータで再現されたシミュレーション上に、デマンドバスの指定系統の走行を重ね合わせる。利用者からのデマンドがあった場合、道路混雑状況を考慮して乗降希望の停留所までの複数ルート探索とそれらの所要時間、消費エネルギー等を計算し、設定した判断条件（時間最短、エネルギー最少等）によって最適経路を決定する。また、先進電動バスや既存の自家用車の消費エネルギー等を算出して、本報で提案する交通システムの導入効果を数値評価する。



図6 走行経路、時間、CO<sub>2</sub>排出量等の計算画面例

#### 3.2.2. シミュレーションの試行例

モデル地区において前述のデマンドバス路線を設定し、自家用車利用者の一部がデマンドバスに移行するものと仮定してシミュレーションを試行し、既存の自家用車やバスを含めてCO<sub>2</sub>排出量や走行時間がどの程度変化するかを試算した。その計算結果の画面出力例を図6に示す。この例ではデマンドバス車両は図2の電動バス車両と同一車体のディーゼル車と仮定した。その経路は本庄キャンパスを出発し、デマンドが生じた本庄児玉ICを経由し時間最短条件で在来線本庄駅へ向かうこととした。また既存のバス路線として、本庄早稲田駅から本庄駅へ直行する路線を設定した。本庄児玉ICを経由するデマンドバスは1時間あたり3本運行し、自家用車の通行台数は朝夕のピーク時は閑散時の10倍とし、自家用車からデマンドバスへの転換者は10人（バス1走行あたり）と仮定した。

バス（既存/デマンド）、自家用車（デマンドバス導入後は減少）の合計燃料消費量の推定値からは、表1に示すように、バスがディーゼル車両であっても、



図5 交差点の信号制御の設定画面例

そのデマンド運行方式化による CO<sub>2</sub> 排出量の削減率はピーク時で 25%、閑散時で 12%程度と予測される。

表 1 デマンドバス導入による CO<sub>2</sub> 排出量変化の試算 (ディーゼル車両の場合、単位:kg/1 時間当たり)

時間帯	デマンドバス導入の前後	乗用車	路線バス	合計
ピーク時	導入前	3,371	157	3,528
	導入後	2465	165	2,630
閑散時	導入前	399	188	587
	導入後	331	183	514

また電動バス車両と、同一車体のディーゼル車両で上記路線を運行した場合の、1 時間当たりの CO<sub>2</sub> 排出量を試算すると、前者の CO<sub>2</sub> 排出量は後者の 15%程度に過ぎないため、デマンドバスをディーゼル車両から電動車両に置き換えると、CO<sub>2</sub> の排出量はさらに低減されると考えられる。

### 3.3. デマンド路線の利便性評価および需要予測

#### 3.3.1. 評価機能

本事業で提案するバス交通システムは、利用者にとって利便性が高く相応の需要が見込まれることも重要ある。しかし従来のバス路線等の利便性や需要の評価は主観に頼る部分が多く、合理性を欠く点が残ることは否めない。そこでデマンドバス運行の現場とは別に、デマンドバス停ならびに走行経路の設定の妥当性を客観的に評価し、需要を予測する手法を考察する。

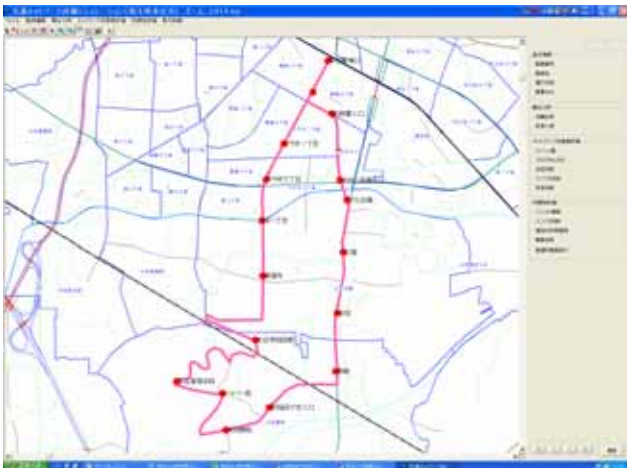


図 7 仮想的なバス路線と停留所の自動配置

骨格となる GIS ソフトウェアは MapInfo 社の「MapInfo Professional® 7.0」を使用している。地図情報データとして道路地図や既存のバス停留所データ、対象地域の人口データ等を備えている。基本機能

は下記の通りである。

地図上の任意の地点にバス路線およびバス停のデータをマウス操作により入力する

範囲と平均バス停間隔を指定し、人口データを基に適切にバス停を配置し路線を自動作成する

設定路線の面的充実度を数値的に評価する。

設定した路線の基礎的集客能力を推定する。

競合する既存バス路線との競合分析

#### 3.3.2. 路線評価等の試行

この機能を使って、モデル地区に仮定した指定範囲にバス停を自動配置した例を図 7 に示す。この仮想的な設定路線は図 2 の基本経路を延長してループ状とした形である。バス路線の面的充実度を評価する指標として、フラクタル次元による定量化を行う。これは評価対象路線の 2 次元的な分布状況を幾何学的に解析するもので、路線を含む領域をメッシュ状に分割し、メッシュ内に存在する路線の分布状況を、小メッシュ分割の場合と大メッシュ分割した場合とで比較することでフラクタル次元を計算し、その大小を路線の粗密の評価指標として使用する。図 7 の仮想路線の利用者数予測の計算状況を図 8 に示す。

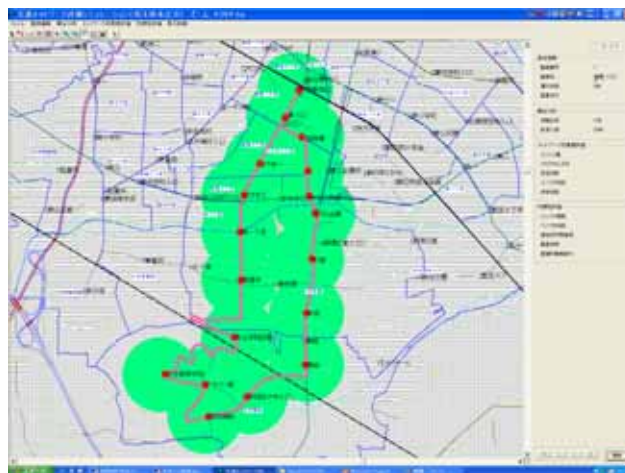


図 8 路線の集客範囲と利用者数予測計算状況

対象路線周辺地域の人口データから非居住区域を除外したうえで、その路線の潜在的利用者数と基礎的集客能力を推定する。集客範囲はバス停を中心とした一定半径の領域で定義し、そこに居住する人口を潜在的利用者数と見なす。この場合、近接する既存のバス路線についても同様に集客範囲を調べ、空白または競合の状況を考慮する。バス停から半径 400m 以内を集客範囲とすれば、潜在的利用者は 5,461 人である。この値に路線の面的充実度と運行本数とを考慮した計

算を施した結果、本路線の基礎的集客能力（年間利用者数）669,464人/年と算出された。これは潜在的利用者の概ね1/6が毎日1往復利用する計算となる。しかしながら、モデル地区においては自家用車が1世帯当たり1.5台強普及しており、旅客の大半が自家用車で移動しているものと推定される。また、モデル地区では図9に示すような駅、学校等の公共施設、またショッピングセンター等の集客施設が存在し、これらを吸い込み/吐き出し点とした旅客需要が存在する。したがって次の段階として、これらの要素の影響を適切に反映することにより、需要予測の精度を向上させる予定である。

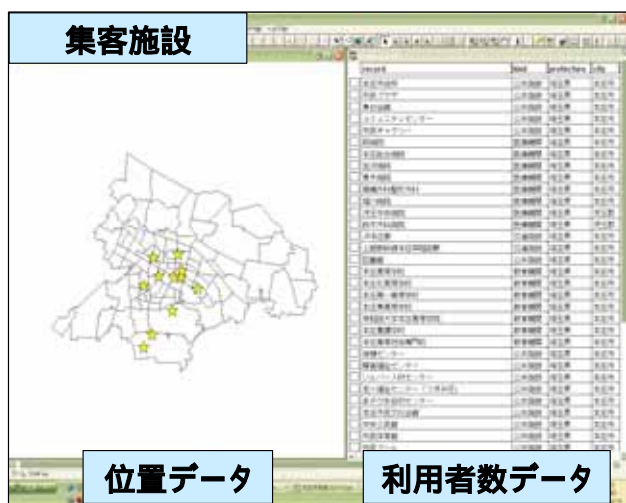


図9 モデル地区における集客施設のデータ



図10 実証試験におけるバス停と経路の配置  
(全てのデマンド停留所を経由する場合)

#### 4. 実証試験と他地域への展開について

##### 4.1. 実証試験に向けた準備

試験に供する先進電動バス車両は2台製作された。「情報伝送/運転指令システム」は、先行確認試験の

結果を反映して実証試験向けの仕様を決定し、システム機器を製作して車載装置を先進電動バス車両に搭載した。また携帯電話によるデマンド受付の環境整備を行った。「走行シミュレーションによる最適経路選択・省エネルギー効果の評価」においては、「情報伝送/運転指令システム」との連携機能を付加して、バス運行と同時に並行して走行シミュレーションを行い、停留所出発のタイミング、選択系統、デマンド停留所への到着予定時刻や、電力出入、エネルギー消費量等の計算結果等の運転指令システムへの出力を可能とした。

##### 4.2. 実証試験の実施要領

実証試験におけるバスの経路としては、現地での調査や協議を経て、図10に示すように、本庄市内に基本停留所4箇所とデマンド停留所3箇所の位置を決定し、これらの経路の違いにより8系統の経路を設定した。運転指令センタは大学構内、地上基地局は各バス停の近傍に仮設する。携帯電話からのデマンドは、本試験においては大学関係者による模擬乗客をデマンド停留所付近に配置して発することとし、様々なデマンドのパターンに応じてバスを適切に運用できるかどうかを検証の主眼とした。また利用者への到着時刻等の情報提供とその信頼性についても確認する。これら内容に沿って諸機能の確認を行い、先進的なバス交通システムとしての有効性を評価する予定である。

##### 4.3. 本事業の他地域への展開について

「路線の利便性評価および需要予測」について、前述のように自家用車保有や集客施設の影響を反映して精度を高める。さらに、モデル地区以外にも5都市を例にとって需要予測を行う。一方、「走行シミュレーションによる最適経路選択・省エネルギー効果の評価」を、前述の実証試験の制約を離れた自由な設定条件下で行ってデマンドシステムの最適化を考察する。それらの結果と、前述の実証試験の成果を踏まえて、本事業で提案する交通システムが導入可能と考えられる地域を全国で40カ所程度選定する予定である。

これら実証試験や評価等の新たなデータが得られたら、改めて報告することとしたい。

#### 謝 辞

前述のように、本事業は(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の補助事業として実施されている。ここに深く謝意を表す。また多大な御協力を頂いている関係各方面の各位にも深謝する。