

# 持続可能な社会のための電気通勤バスへの検討

## Proposal of EV commuter Bus toward Sustainable Society

東京大学大学院 工学系研究科 環境海洋工学専攻  
 修士二年 56946 佐藤 慶子  
 指導教官 村山 英晶 准教授 高橋 淳 准教授

世界の使用エネルギーの中で運輸部門では石油依存度が高く、今後の石油消費増大は途上国のモータリゼーションに牽引されると予想され、その対策として、自動車燃料の多様化（ディーゼル化、ハイブリッド技術、バイオ燃料、燃料電池を含む電気自動車化）が考えられているが、オイルピークに間に合う見通しは無い。また先進国では人口は増えないが免許保有率の高い（しかも大量消費世代の）高齢者層の割合が増加して、人口あたりの自動車保有台数と自動車一台あたりのエネルギー消費量が増えると予想されると同時に、事故の増大が懸念されている。そこで石油消費量の最大部門である交通において、モビリティと安全を確保しつつ環境負荷を低減するための1つのソリューションとして、電気通勤バスを提案する。安全で快適なモビリティを享受した場合の電気通勤バスの可能性について検討し、その検討結果を踏まえて、いつまでにどのくらいの技術が必要とされていくか提言を行う。

### 1. 序論

近年、「持続可能性」、「持続可能」という言葉が社会の様々な場面で多用されているように思われ、「持続可能な社会」とはどのような社会であるか考えてみると、南北間、世代間、価値観などにより様々で、一概に定義できない、指標で評価することは困難な概念であると思われた。しかし、日本において持続可能な社会とは何か現時点で自分なりに考えると、国民が生涯にわたって就業その他の社会活動に参加する機会が確保される公正で活力ある社会は、ひとつの持続可能な社会の姿なのではないかと思う。また高齢化が進んでいるわが国にとっては高齢化社会に備えた対応として公共交通が重要な役割を担い、その充実が不可欠だと思われる。海外では、「コンパクトシティ」という考えも生まれてきているようだが、日本においては、既存のバスの利用が導入までに要するコストおよび時間の面でも有効で、移動の目的や時期など多様な移動のニーズに応じるサービスの提供が持続可能な交通社会を実現する。環境負荷と同時に事故を低減する案として研究室で提案している通勤バスが効果的な1つのソリューションであることが分かっており、さらに環境負荷やエネルギー消費を抑制するため、たくさんある次世代自動車のうち、電気通勤バスが初期適用対象としても適切であると提案する。

省エネルギー・温暖化対策のための技術は様々あるが、その中でもリスクのない省エネルギー技術に注目し、本研究では、石油消費量の最大部門である運輸部門において安全で快適なモビリティを享受した場合のEVの可能性について分析および将来予測を行いどのような技術がいつ必要とされていくかについて提言およびシミュレーションを行う。

### 2. 車の社会問題

#### 2.1 車が増えるための環境負荷増大

世界の使用エネルギーの中で運輸部門では石油依存度が高く、今後の石油消費増大は途上国のモータリゼーションに牽引される。対策として、自動車燃料の多様化（ディーゼル化、ハイブリッド技術、バイオ燃料、FCを含む電気自動車化）が考えられているが、オイルピークに間に合う見通しは無い。

#### 2.2 高齢者の運転による環境負荷と事故の増大

先進国では人口は増えないが（図1）免許保有率の高い（しかも大量消費世代の）高齢者層の割合が増加して（図2）、人口あたりの自動車保有台数と自動車一台あたりのエネルギー消費量が増えると予想されると同時に、事故の増大が懸念されている。

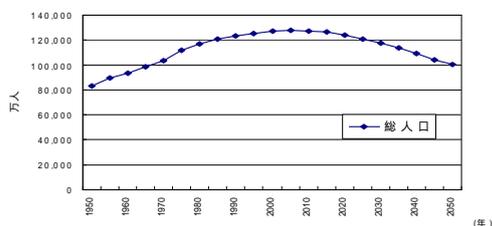


図1 日本の総人口

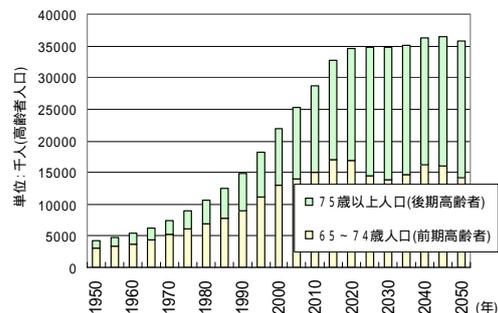


図2 高齢化の推移と将来推計

### 3. 高齢化社会の事故と環境負荷

#### 3.1 推計結果：2050年までの免許保有人口推移

2050年には全免許保有人口の約30%が65歳以上の高齢者になると予想された（図3）。

#### 3.2 事故率推移

事故率は「第1当事者の事故件数/免許保有人口」と定義し、統計量から算出した（図4）。図から16～19歳以外の事故率は時系列を通してほぼ一定なので、2050年まで一定として推計した（16～19歳は4%まで下がるがその後は一定とする）。

(百万人)

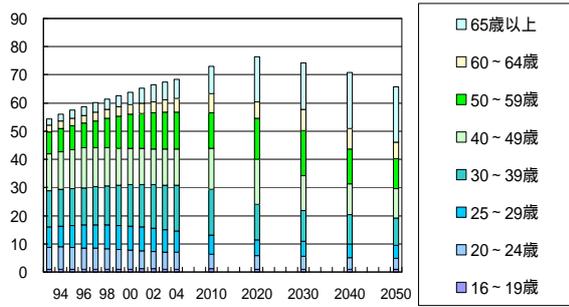


図3 推計結果：2050年までの免許保有人口推移

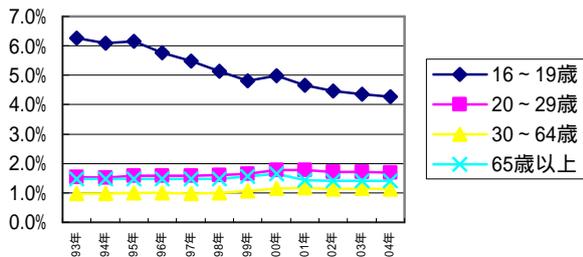


図4 事故率推移

### 3.3 推計結果：2050年までの交通事故件数の推移

事故率の推移から2050年までの交通事故件数を推計した(図5)。2050年には全交通事故の33.8%が65歳以上の高齢者によって引き起こされるものと予測されるので、65歳以上を対象としたこれまでの事故対策とは別の効果的方法があるのではないかと考え、65歳以上の移動のニーズを考えると通勤バスが65歳以下よりもスムーズに適用できるのではないかと考えた。

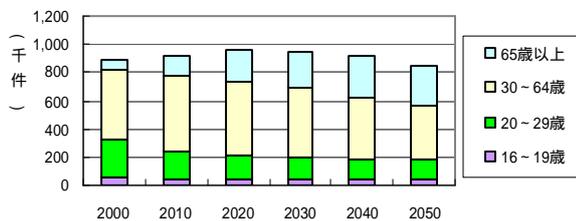


図5 推計結果：2050年までの交通事故件数の推移

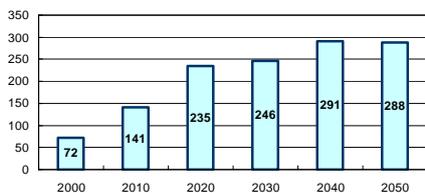


図6 推計結果：2050年までの高齢者による交通事故件数推移

### 3.4 推計結果：2050年までの高齢者による交通事故件数推移

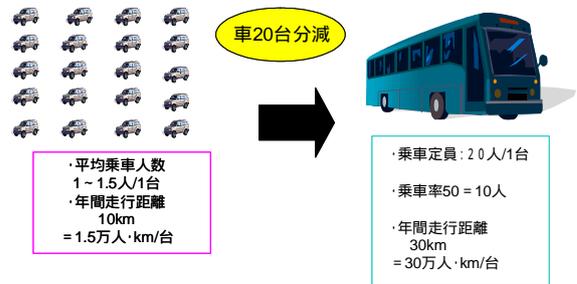
図5の65歳以上事故件数を図6に示す図から高齢者による交通事故は、2040~2050年には2000年比で4倍近く増加することが見込まれる。

### 3.5 コミューターバスによる高齢化社会問題の解決

乗用車の平均乗車人数1~1.5人、年間走行距離10000km(1.5万人・km)、通勤バスの乗車定員20人(乗車率50%で10人)、年間走行距離30000km(30万人・km)とすると通勤バス1台で車20台分減らすことになる。すなわち、通勤バス導入により高齢者の運転の機会を減らし、利便性を損なわずに事故を大幅に削減可能と期待でき、高齢化が進んでいるわが国にとって、できるだけ早急な対策を講じる必要がある。なお、図5、図6の推計結果は高齢者の運転による事故数なので、徒歩や自転車での移動にも通勤バスを使ってもらうことで事故はさらに減ると考えられる。また、通勤バスは都市や観光地などの渋滞をおさえることなどにも応用可能である。

### 3.6 電気通勤バス導入による環境負荷低減

環境負荷と同時に事故を低減する案として研究室で提案している通勤バスが効果的で、さらに環境負荷やエネルギー消費を抑制するため、多種多様な次世代自動車のうち、電気通勤バスがPV&EVの初期適用対象としても適切と考えられる(図7、図8)。



車(1000L・20台) = 20000Lのガソリン削減するが  
バス = 10000L使用してしまう。(年間)  
より燃費の良いバスを考える。

図7 コミューターバスの適用

### 通勤バスによる省エネポテンシャル

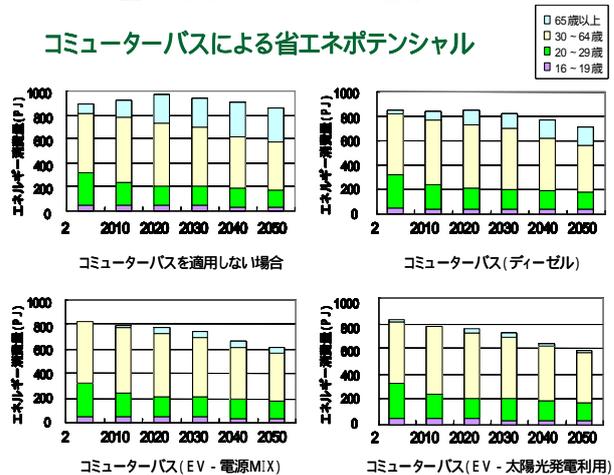


図8 コミューターバスによる省エネポテンシャル

### 3.7 都市部・周辺部・農村部に分けた通勤バス の経済的成立性

以下では、電気バスの特性を發揮するために、ミニバスサイズであまり走行距離も長くない、スピードを出す必要のない使い方として、短距離を走る小型の電気通勤バスを提案し、その可能性を検討することとし、まず通勤バスの経済的成立性を地域に分けて考察する。

表1 通勤バスの役割の考え方

地域		各地域における通勤バスの役割
大都市	都市部	・鉄道や在来のバス等の公共交通機関ではカバーできない地域や区間でのモビリティ確保 ・鉄道やバス路線網と組み合わせ、公共交通のネットワークを強化
	郊外部	・在来の公共交通機関では移動できない地域での移動手段を確保 ・商業施設や公共施設へのアクセス
地方都市	都市部	・交通不便地域の解消 ・中心市街地におけるモビリティの向上や中心市街地での回遊性の向上
	その他地方部	・在来のバスが撤退した地域(住宅地)から商業施設や公共施設へのアクセス性の確保

#### 【前提条件】

- \* 武蔵野市の「ムーバス」、富山県高岡市の実績を参考。
- \* 1日10時間の営業で、走行距離150kmと仮定する。
- \* バス車両購入費：1500万円のものを10年使用すると仮定する。年間150万円 ex.「日野ポンチョ」フルフラットのノンステップバス 2m幅 定員25人 1500万円
- \* 燃料費：1日150km 年間55000km 年間8600L 年間114万円 (燃費:6.4km/L 軽油:132円/Lと仮定)
- \* 人件費：年間600万円と仮定する。(cf.全国全産業男子、平均年収543万円)
- \* バス停などの施設整備費(10年で更新):バス停のポール1基 133000円×30基=399万円(年間40万円)
- \* 車両維持修繕費：100万円
- \* 管理費：100万円
- \* その他の経費：10万円
- \* 合計年間1114万円必要 1日3万円の売り上げが必要。
- \* 運賃が200円なら5人、運賃が100円なら10人

以上のことから、実現可能性として、都市部では可能だが、過疎地域では困難と思われる。

【解決策1】人件費の削減 タクシーを通勤バスに。  
Cf. タクシー運転者(男)の平均年収は308万円。

表2 人件費と乗車人数

人件費	運賃 100円	運賃 200円
600万円	10人	5人
550万円	9.9人	4.9人
500万円	9.4人	4.7人
450万円	9.0人	4.5人
400万円	8.5人	4.3人
350万円	8人	4人
300万円	7.3人	3.7人
0円	4.9人	2.4人

\* タクシー：273740台、バス：225000台(全国)

なお、自動運転システムの導入により、無人で運転できるようになれば、事故や渋滞を防ぐのに加え人件費が削減できる。

#### 【解決策2】 燃料費の削減 軽油 電気

- \* 1日150km走行時、軽油は23.5L、3104.4円。
- \* 電気通勤バス：燃費5km/kWh(現状)、電力量料金5.75円/kWhとすると、1日150km走行時、172.5円となる。1/18のコスト削減。
- \* 年間：114万円(0IL) 6.3万円(電気)
- \* 車両費そのまま電気の場合、合計1006万円、1日2.8万円の売り上げが必要。
- \* 運賃が200円なら4.7人、運賃が100円なら9.3人

表3 電気の場合の燃料費と人件費の組み合わせによる乗車人数(車両費そのまま)

人件費	運賃 100円	運賃 200円
600万円	9.3人	4.7人
550万円	8.8人	4.4人
500万円	8.3人	4.2人
450万円	7.9人	3.9人
400万円	7.4人	3.7人
350万円	7.0人	3.5人
300万円	6.5人	3.3人
0円	3.7人	1.9人

## 4. 電気通勤バスのさらなる可能性について

### 4.1 日本のエネルギー構成の変遷

我が国の一次エネルギーの構成を図9に示す。

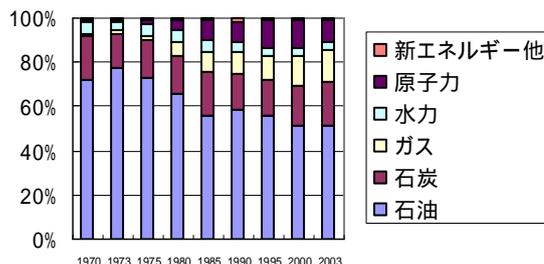


図9 一次エネルギー供給

### 4.2 21世紀になって

交通だけが石油依存で残っているため、交通の脱石油の必要がある。そのためにはエネルギー源の多様化(バイオ燃料、EV、ハイブリッド etc)が考えられる。

### 4.3 電源の多様化とWTV分析

モビリティと安全を確保しつつ環境負荷を低減することを考える。

#### ・ITS(高度道路交通システム)

SCMによる物流の効率化はすでに進行中で一定の成果がある。今後、自動車技術、社会インフラとしてITSの進化で、乗用車の事故と環境負荷低減がある程度期待されている。しかし、エネルギーセキュリティや高齢者のモビリティ問題の抜本的な解決手段とは言えない。

### ・自動車燃料の多様化

オイルピークに間に合う見通しは無いものの、運輸部門脱石油戦略としては一つの有効な選択肢と考えられる。ただし、高齢者を中心とする近未来のモビリティや安全を確保するものではない。特に、バイオ燃料は食糧問題とのトレードオフであり(米国のトウモロコシの価格高騰の例)、太陽光の利用効率としてはPVよりもはるかに劣る。そこで、本研究では、ソーラーカーからの連想で、軽量化やPVとの併用でのEVによるさらなる脱石油の可能性について論じる。

### ・運輸部門での一つのソリューションとしてEV(電気自動車)、EV-PV(太陽光発電利用のEV)

EVはガソリン車と比べて効率が良く、中でも太陽光の利用が効果的である。ガソリン車と比べると、現在の日本の電源構成でも燃費3倍、太陽光利用ならば6倍の燃費である(図10, 図11)。EVもPV-EVも初期コスト高が乗用車への適用のネックとなっているが、年間走行距離の長い通勤バスでは比較的導入しやすいと考えられる。

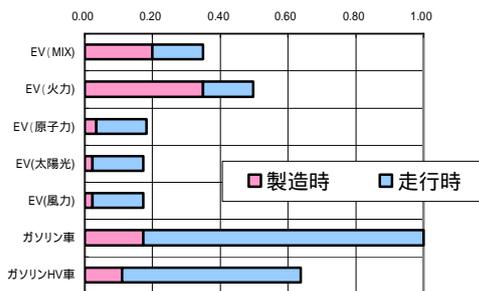


図10 エネルギー消費(ガソリン車=1)

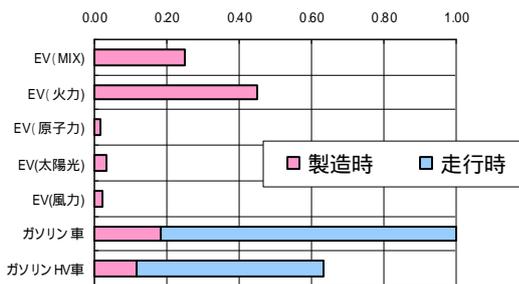


図11 CO<sub>2</sub>排出量(ガソリン車=1)

### 4.4 太陽光の利用

太陽光発電は上述のようにCO<sub>2</sub>排出削減の観点からは魅力的であるが、家庭で導入する場合はペイバックタイムの長さが問題となっている。通勤バスではどうだろうか。

#### 家庭に太陽光発電を導入する場合

太陽電池の市場の一般的な値段は、周辺機器や工賃を含めて、1kW当たり約70万円、平均的な夫婦子ども二人の家族構成では、電力使用量は年間4490kWh(10万円)とされている。一般家庭向けの太陽光発電の標準的な3kWのシステムでは、年間約3000kWhの電力を起こすことができるので、ほぼ70%を太陽光発電で発電できることになる。よってすべてPVでまかなおうとすると、4.5kWのシステム(約315万円)が必要となり、ペイバックタイムは約30年となる。

### 電気バスに太陽光発電を導入する場合

一方、バス事業所で太陽光発電を行う場合、軽油で年間8600L(114万円)だったものが、(55000km×0.266kWh/km=)14630kWhとなり、PVなら約15kW 1千万円の初期投資となつて、軽油使用車と比べたペイバックタイムは約8年となるので、家庭と比べると導入の実現可能性は高い。

### 4.5 現状のPVで発電可能な電力量

地球に降り注ぐ太陽光エネルギーを、太陽電池で電気エネルギーに変換することによって年間にどれだけ利用できるのかを計算する。大気圏外での太陽光エネルギーの強さは1,367(W/m<sup>2</sup>)である。しかし、成層圏を通過して地表に到達する頃には、一番強いときで約1,000(W/m<sup>2</sup>)に減少する。この1,000(W/m<sup>2</sup>)という値は、真夏の快晴の日の真昼に観測されるもので、季節変動・朝昼晩・天気を考慮すると平均的にはさらに少なくなる。日本における平均日射量は12.6(MJ/m<sup>2</sup>)とする。1日は86,400秒であるから、これは146(W/m<sup>2</sup>)に相当する。

太陽電池の発電量は日射量に比例するので、1年間に利用できるのは365日と考えて、4,599(MJ/m<sup>2</sup>)である。太陽光エネルギーから電気エネルギーへの変換効率を20%とすると、年間に利用できる電気エネルギーは次のようになる。

$$4,599(\text{MJ}/\text{m}^2) \times 0.20 = 919.8(\text{MJ}/\text{m}^2)$$

よって、日本の宅地面積(約15000(km<sup>2</sup>))、太陽電池の面積、宅地面積の1/4、年間平均日射量、12.6[MJ/day・m<sup>2</sup>] = 145[W/m<sup>2</sup>]と仮定すると現状のPVで発電可能な電力量は最終エネルギー消費量の約1/4を賄える(図13)。

乗用車のエネルギー消費量(運輸部門)から変換効率15%で運動エネルギーになり、電気エネルギーから運動エネルギーの変換効率は70%で、EVに変換される(図14)。同図から、自動車の運用に対してPVは発電可能量的には十分なポテンシャルを有するものであることがわかる。

### 4.6 夜間電力の利用について

太陽光パネルからの電気はCO<sub>2</sub>削減の面では極めて有効であるが、コストの面では発電所からの夜間電力を利用したほうがはるかに有利であり、導入初期には現実的であると考えられる。

現在、富士重工業(株)や三菱自動車工業(株)で研究・開発が進められている電気自動車は、家庭用の100Vコンセントで充電可能である。使用する電気代はガソリン代の約3分の1~7分の1であり、安価な深夜電力を利用するようにすれば、さらに経済的である。(EVの燃費を10km/kWhとすると、1km走るのに1円の電気代ですむ。ここで、電気代は東京電力の夜間料金10.07円/kWhを、EVの燃費は東京電力(株)の開発目標値を使用した(図15)。)



図13 PVの可能性(エネルギーの総量について)

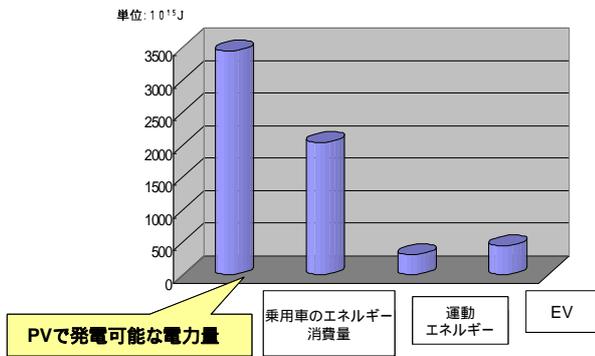


図 14 PVの可能性(自動車を動かすエネルギーとして)

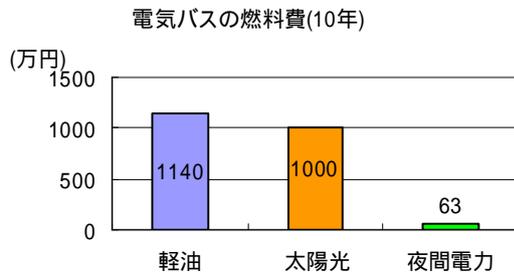


図 15 電気バスの燃料費

電気バスの場合には、前述のとおり、年間 55000km 走行するバスを軽油で動かすと 8600L(114 万円)かかるのに対し、電気だと約 15000kWh(21 円/kWh で約 30 万円、夜間の 5.75 円/kWh で約 6.3 万円)となり、経済的成立性の観点からもプラグイン EV は有力な選択肢を考えられる。なお、夜間の電力を使用する場合は発電所の増設にはつながらないことから、EV 普及のネックとなっている電池技術の進展が期待される。

#### 4.7 バスの CFRP 化

コストが下がれば、高い軽量化ポテンシャルを持つ CFRP は車体軽量化による省エネルギー・環境負荷低減に大きく貢献するであろうということが本研究の先行研究により分かっている。多種少量生産であるバスは、設計の自由度が高く設備投資が少ない CFRP のメリットが最大限に発揮され、また EV の弱点である電池の軽量化にもつながると期待される。

## 5. まとめ

本研究では以下の知見を得た。

- ・総人口は減少するが、高齢者は増加し、今後、わが国は高齢化が進展する。高齢者の免許保有率が増加すると、それに伴い事故件数も増加する。具体的には、高齢者の割合は 2 倍になるが、高齢者の運転による事故は 4 倍に増えることを時系列で予測した(高齢者が被害者となるケースも入れるとさらに増えるであろう)。
- ・通勤バス導入により高齢者の乗用車の運転機会を減らし、利便性を損なわずに事故を大幅に削減可能と期待できる。
- ・交通事故件数の減少に加え、脱石油化技術として、電気通勤バスが効果的と考えられる。石油以外の様々なエネルギーで電気を作ることが可能。
- ・採算性を考えないと、既存のバスで効果が期待できること

が分かったが、採算性を考えると、農村部は成立が困難であると考えられる。自動運転システムが導入され、無人運転できるようになれば、採算性で最も大きなウエイトを占める人件費が削減でき、実現の可能性が高まる。

- ・安価な深夜電力も利用するようにすれば、さらに経済的である。
- ・多種少量生産であるバスは、設計の自由度が高く設備投資が少ない CFRP のメリットが最大限に発揮される。
- ・電気通勤バスの導入は、高齢者が一人で家に引きこもることなく、安心して積極的に社会参加できるようになるための解決策の一つになる。

#### 参考文献

- [1] EDMC2005 エネルギー・経済統計要覧, 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット, 2005
- [2] 海道清信, コンパクトシティ持続可能な社会の都市像を求めて, 2001.8
- [3] 交通まちづくり研究会 (編集), 交通まちづくり 世界の都市と日本の都市に学ぶ, 2007.7
- [4] 中村文彦, バスでまちづくり 都市交通の再生をめざして, 2006.10
- [5] 中村文彦, コミュニティバスの導入ノウハウ, 2006.8
- [6] 縄田和満, Excel による統計入門, 1996.7
- [7] M. Yamamoto, M. Kan, K. Uzawa and J. Takahashi, Proposal of a local circulation bus made by CFRP, Proceedings of 9th Japan International SAMPE Symposium, (2005-11), pp.20-25.