

2050年脱温暖化社会プロジェクト 交通チーム前期報告書

2007年12月

目次

サブテーマ（１）

リードタイムを考慮した新技術導入の効果評価と政策手段に関する研究

I．リードタイムを考慮した技術普及シナリオの構築	1
II．燃料補給と走行に伴うライフサイクル排出量	9
III．代替燃料スタンド最適整備戦略モデルの開発	27
IV．2020年から2050における自動車の燃費向上 とCO ₂ 削減の到達予測	45

サブテーマ（２）

バックキャスティングによる長期削減シナリオの策定に関する研究

V．技術革新と需要変化による長期削減シナリオ	67
VI．地域を対象とした環境配慮型交通社会の実現戦略	75

研究分担者一覧（2007年3月現在）

S－3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案手法の確立に関する総合研究プロジェクト

5：技術革新と需要変化を見据えた交通部門のCO₂削減中長期戦略に関する研究

(1) リードタイムを考慮した新技術導入の効果評価と政策手段に関する研究 (H16-18)

I．リードタイムを考慮した技術普及シナリオの構築

森口 祐一 独立行政法人国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター
センター長

小林 伸治 独立行政法人国立環境研究所 社会環境システム研究領域 室長

松橋 啓介 独立行政法人国立環境研究所 社会環境システム研究領域
主任研究員

II．燃料補給と走行に伴うライフサイクル排出量

八木田 浩史 独立行政法人産業技術総合研究所
ライフサイクルアセスメント研究センター チーム長

工藤 祐揮 独立行政法人産業技術総合研究所
ライフサイクルアセスメント研究センター 研究員

III．代替燃料スタンド最適整備戦略モデルの開発

石田 東生 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 教授

岡本 直久 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 助教授

堤 盛人 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 助教授

IV．燃費改善技術と新燃料・次世代自動車の見通し

大聖 泰弘 早稲田大学 理工学部 教授

(2) バックキャスティングによる長期削減シナリオの策定に関する研究 (H16-18)

V．技術革新と需要変化による長期削減シナリオ

松橋 啓介 独立行政法人国立環境研究所 社会環境システム研究領域
主任研究員

森口 祐一 独立行政法人国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター
センター長

VI．地域を対象とした環境配慮型交通社会の実現戦略

加藤 博和 名古屋大学大学院 環境学研究科 助教授

本報告書は、環境省地球環境研究総合推進費 S－3「脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案手法の確立に関する総合研究プロジェクト」の課題 5．「技術革新と需要変化を見据えた交通部門のCO₂削減中長期戦略に関する研究」の前期研究期間（2004年度～2006年度）の成果をまとめたものです。

サブテーマ（１）

リードタイムを考慮した新技術導入の
効果評価と政策手段に関する研究

I. リードタイムを考慮した技術普及シナリオの構築

本課題では、交通分野を対象とし、2020年頃に向けて、実用化済みもしくは実用化に近い技術の大量導入によるCO₂削減効果を、導入決定時期と実際に効果が現れる時期とのタイムラグや、一次エネルギー供給技術、燃料補給インフラの整備などの周辺条件を考慮して評価する手法を開発するとともに、削減促進のための政策手段との関係を明らかにすることを目的とする。また、2020年に向けた交通部門の基準シナリオおよび対策シナリオを構築し、交通関連技術の予測結果とともに、シナリオチームへ提供することを目的とする。

技術予測に関する情報収集と燃料供給を含むエネルギー効率を踏まえた検討を行った結果、2020年時点での対策の実効性においては、CO₂削減に資する数多くの自動車技術の中で、ハイブリッド車の導入が最も有力であると考えられた。また、電気自動車が、近距離の移動手段として有力と考えられた。燃料電池車の大量普及については、コストと燃料供給面が課題であり、いずれも2020年までに克服することは、現在の情勢を考慮すると困難と考えられた。一方で、2050年時点を目指して戦略的に水素社会を目指すことによる脱石油とCO₂削減の有効性が検証されれば、インフラ整備を先行させて、同時にCO₂排出量の少ない水素の製造と供給に本格的に取り組む必要がある。その普及にかかるリードタイムを考慮するため、代替燃料スタンド最適整備戦略モデルの開発に着手した。走行実態調査を踏まえたシミュレーションの結果、従来の予測に比べて大幅に少ない数のスタンドの設置で燃料供給を賄うことができることが示唆された。これらの知見を踏まえて、2020年の交通部門の基準シナリオと対策シナリオ案を作成した。脱温暖化のために、乗用車のほとんどをハイブリッド車に切り替える必要があり、そのためには、生産設備の急速な拡充が重要であることを指摘した。また、本部門の2020年の排出量を1990年レベル以下にまで減少させるためには、ここで想定した技術面の対策のみでは不十分であり、交通需要面も含めたさらなる対策が必要になると考えられた。さらに、乗用車の車格別に詳細な分析を行う枠組みを構築し、近年の軽乗用車の増加等に伴って乗用車CO₂排出量は横ばいから減少に転じたことを確認した。

[キーワード] 二酸化炭素、技術革新、自動車技術、燃料電池車、交通

1. はじめに

脱温暖化社会の実現に向けて、交通分野においても中長期的政策オプションの検討を行うことが要請されている。近年のわが国の部門別CO₂排出量の推移をみると、交通部門は民生（家庭・業務）部門とともに、増加が著しい。第一次オイルショック後の30年間に着目した場合、他部門と比べた交通部門の排出増加はさらに顕著であり、GDPの伸びとほぼ比例した傾向を示している。部門別CO₂排出量に占める交通部門のシェアは約20%と、他の先進諸国と比較した場合にはむしろ小さめであるが、このことに寄与してきた鉄道をはじめとする公共交通機関のシェアが低下しつつあることを考慮すれば、交通部門の対策の重要性はますます高まると想定される。また、高齢化の進展や、余暇交通など生活の質の向上を求める交通需要の多様化・拡大が進むことも予想される。

交通需要の中で自動車の分担率はますます高まっており、その燃費低減に関わる技術革新の可能性と燃料供給源の選択は、交通部門のCO₂削減可能性の鍵を握っているといっても過言ではない。近年、石油代替燃料を使用する自動車の性能向上は著しく、環境問題への意識が高まる中で徐々に普及も進みつつある。また、従来のエンジン駆動に代わり、エンジンとモータとのハイブリッド駆動を経てモータ駆動へと変遷していく兆しがみられる。これらの代替技術については、水素供給、電力供給において十分な低炭素化が進み、かつ末端のエネルギー補給施設整備が十分に行われることが、CO₂削減効果をあげつつ大量普及を進めるための必要条件となるが、これには明確な政策誘導とリードタイム（準備期間）を要する。一方、鉄道など、自動車以外の輸送機関への転換を考慮する場合には、同様に長いリードタイムと強力な政策誘導が必要と考えられる。

2. 研究目的

本課題S-3-5では、2020年まで、2050年までの2つのタイムスパンについて、交通部門からのCO₂排出量の大幅削減のための中長期戦略を策定することを目的とする。2020年についての検討では、対策の投入時期と効果の発現時期とのタイムラグを考慮した対策効果評価手法を構築し、ボトムアップ型技術選択モデルで必要とされる要素技術の効果や費用に関する基礎情報など、戦略研究プロジェクト全体からの要求に応じて、必要な知見を提供する。また、2050年についての検討では、削減目標をまず与え、その達成に必要な技術革新・交通行動変化のシナリオを描くバックキャストイング手法を適用して、目指すべき長期的な将来像とそこへの道筋を提示する。

本サブテーマ1では、2020年頃に向けて、現時点で実用化済み、ないし実用化に近い技術の大量導入によるCO₂削減効果を、導入決定時期と実際に効果が現れる時期とのタイムラグや、自動車用燃料供給技術、燃料補給インフラの整備などの周辺条件を考慮して評価する手法を開発するとともに、削減促進のための政策手段との関係を明らかにする。これらを踏まえて、2020年に向けた交通部門の基準シナリオおよび対策シナリオを構築することを目的とする。

3. 研究方法・結果

2020年の中期に向けて、交通行動を大幅に変更させる施策の導入可能性については、その地域類型毎の差や、効果の不確実性が大きく、また専門家の見解も分かれていることから、全国一律の交通行動変化シナリオを示すことは困難である。そのため、中期を扱うサブテーマ1では技術予測を中心に行い、交通行動を変化させる施策の地域類型別の導入可能性は長期を扱うサブテーマ2で扱うこととした。

本サブテーマ1では、技術予測において重要と考えられる従来技術車と新技術車の技術予測、自動車用燃料供給技術の動向を考慮した分析、燃料供給インフラの整備戦略に関する検討を各行い、一方で、これらを踏まえて、技術の大量導入による削減効果と効果が現れるまでのタイムラグを示す削減効果評価モデルを開発し、2020年の基準シナリオと対策シナリオを構築する。また、短期的な施策の効果を正確に把握するため、乗用車の車格別CO₂排出量の分析を行う。

(1) 燃費改善技術と新燃料・次世代自動車の見通し

従来のガソリン車、ディーゼル車、さらには低燃費・低公害車（クリーンエネルギー車）を含む各種自動車の燃費ならびにCO₂の削減に有用な2020年時点で実現可能と予想される動力システムや関連する要素技術を調査抽出し、その効果と今後の課題について検討した。

電気自動車、ハイブリッド車、燃料電池車等の次世代自動車の低燃費技術を調査した結果、2020年までには、乗用車や小型貨物車へのガソリンハイブリッド車の普及の実現可能性が高いと考えられた。30～50%のCO₂削減効果が期待される。貨物車に関しては、既存のディーゼルエンジンの効率化が考えられるが、2010年前後に施行されるポスト新長期排出ガス規制への対応のため、燃費改善技術は停滞し改善は困難と見られた。電気自動車は、近距離のパーソナルユースに重点をおいた導入が有り得ると考えられた。

燃料電池車に関しては、夜間電力の充電によるランニングコストの低減とCO₂対策としては有効である。一方、コストと燃料供給面の課題の克服に時間がかかり、2020年時点で効果が現れるほどの大量普及を見込むことは困難と考えられた。ただし、二酸化炭素をほとんど排出しない方法で水素が生成可能となる見込みがあるとするれば、燃料供給施設の先行的整備や補助金支出などの強力な普及促進策を採用する戦略も考えられる。

(2) リードタイムを考慮した技術普及シナリオ

中期的な燃費改善技術と次世代自動車技術の可能性について調査し、多様な調査結果を踏まえて議論を行うとともに、国土交通省の需要予測報告の内容を精査し、特に強い温暖化防止策を導入しない場合（BAU）について、交通部門の輸送機関別に燃料・エンジン技術の普及を想定した2020年「基準シナリオ」を策定した。また、2020年に脱温暖化に向けた対策を導入した場合の「対策シナリオ」の検討に用いるために、車両製造設備の整備や車両の購入・普及にかかるタイムラグを念頭に置いて、コーホートに基づく技術導入対策効果評価モデルの基本設計と試作を行った。図I-1に示すとおり、自動車なかでも乗用車に関して詳細な推計を行った。さらに、これを用いて対策シナリオの暫定版を作成し、交通部門に関する議論のベースとして提供した。これを踏

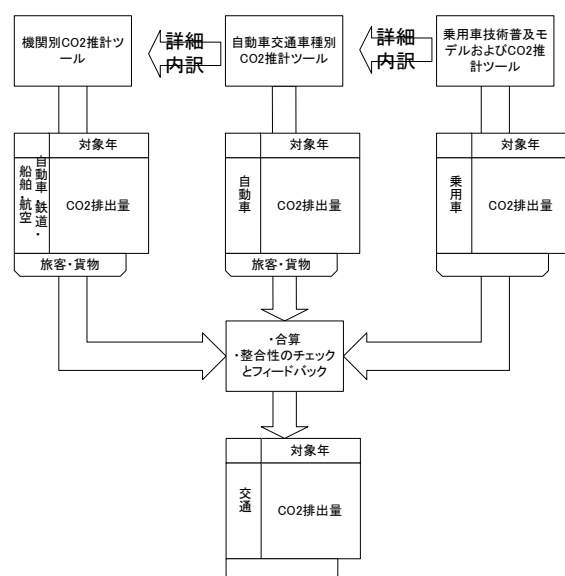


図 I-1 対策評価モデルの基本構造

表 I-1 2020年シナリオの概要

シナリオ	基準	ハイブリッド車等 大量普及	+交通需要管理
ハイブリッド車等の普及	乗用車HEV 20% 小型貨HEV 10%	乗用車HEV 83% 小型貨HEV 50% 軽乗用BEV 83%	
ハイブリッド車等の燃費	ガソリン/ディーゼル車の現状の燃費を40%改善した数値 (小型貨物HEVは同20%改善した数値)		
燃費改善 (現状比)	乗用、バス、小型 貨10%	乗用20%、バス10%、軽乗用10%、普 通貨5%、小型貨15%	
自動車交通量 (02年比)	乗用車15%増(なお、90年比66%増) 貨物車5%減(なお、90年比5%減)	乗用車8%減 貨物車15%減	
航空、鉄道、船舶	航空、鉄道、船舶の効率率は5%改善する一方、航空機輸 送量が約20%増加する		
CO2排出量	+19% (乗用+27%、軽自動車+68%、貨物-7%)	±0% (乗用-3%、軽自動車+22%、貨物-13%)	-13% (乗用-21%、軽自動車+4%、貨物-21%)

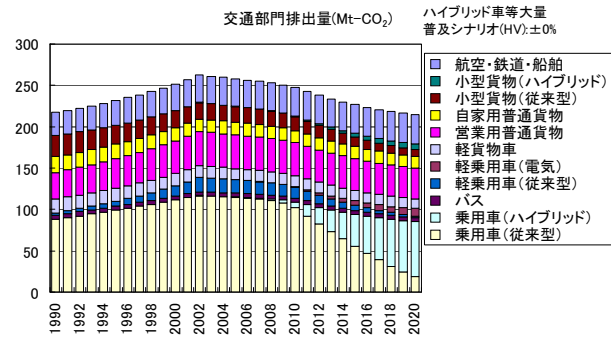


図 I-2 2020年ハイブリッド車等大量普及シナリオにおける排出量内訳

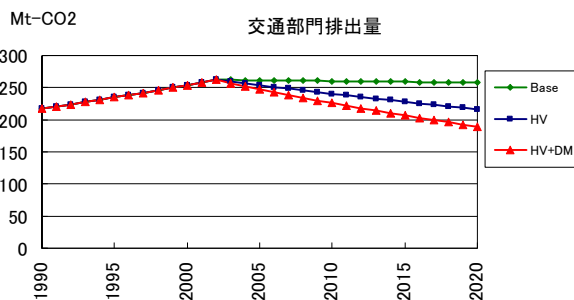


図 I-3 基準シナリオと対策シナリオによる2020年交通CO₂排出量予測例

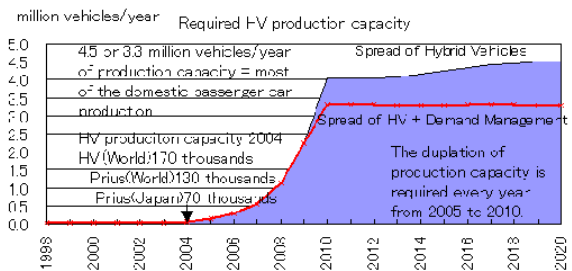


図 I-4 対策シナリオ時に想定したハイブリッド乗用車の必要生産能力

まえ、コーホートに基づく技術導入対策評価モデルの詳細設計と開発を行うとともに、自動車以外の交通機関からのCO₂排出量考慮する、対策シナリオについて軽乗用車に電気自動車を導入する等の改善を行った。また、短中期政策の方向提示に役立てるため、乗用車について車格別のCO₂排出構造の詳細な分析を行う枠組みを構築した。さらに、シナリオを各地で発表し、コメントを受けてシナリオのブラッシュアップを行った。

2020年基準シナリオ(BAU)の概要を表I-1に示す。なお、HEV (Hybrid Electronic Vehicle, ハイブリッド車)、BEV (Battery Electronic Vehicle, バッテリー電気自動車)である。その場合、2020年における自動車からのCO₂排出量は、1990年比約19%の増加となる。

同様に、ハイブリッド車(Hybrid Vehicles)等の大量普及を中心的な対策として想定した2020年対策シナリオ(HV)を表I-1の通り作成した。この場合、乗用車の新車の大半を早期にハイブリッド車に置き換えるために、ハイブリッド乗用車生産設備の増強を前年比2.0倍という加速度的なペースで6年間継続して行い、国内出荷向けだけで年産400万台にまで高める必要がある。この場合、2020年における自動車からのCO₂排出量は、図I-2に示すとおり、1990年比±0%となる。

しかし、これらだけでは排出量の大幅削減は達成できず、1990年比では依然として横ばい程度となってしまう。そこでさらに、自動車交通需要の削減(Demand Management)(基準シナリオ比乗用車-20%、バス±0%、貨物車-10%)を組み合わせた対策シナリオ(HV+DM)を作成した。このとき、2020年における自動車からのCO₂排出量は、1990年比約13%の減少となる。

各シナリオの排出量を比較すると、図I-3の通りとなる。また、ハイブリッド乗用車の生産設備の必要量を図示すると、図I-4の通りとなった。なお、ここでは、需要削減を乗用車の保有台

数の削減として計算している(線で示す)が、保有台数の変化を想定せずに、1台あたりの走行の削減で需要削減を行う場合には、生産設備の必要量は対策シナリオ(HV)と同様の生産設備量(面で示す)が必要である。

なお、対策シナリオ(HV)において、ハイブリッド乗用車生産設備の増強を前年比1.5倍のペースで10年間継続し、国内出荷向けだけで年産400万台にまで高める場合は、2020年時点でのハイブリッド乗用車普及率は63%にとどまり、排出量は90年比約3%の増加となる。このことから、2020年における大幅削減に向けては、急速な対応を促すことが重要であると考えられる。

また、各種燃費改善技術、石油代替燃料導入の動向とそれに伴う代替燃料補給スタンドの整備の必要性をより詳細に技術導入対策効果評価モデルに反映させるため、運輸部門のCO₂排出量の大部分を占める乗用車を対象として、1990年以降2004年までの各年の乗用車の燃費の向上と走行量の推移を踏まえ、乗用車の車格(排気量)別CO₂排出構造の分析を行う枠組みを構築した³⁾。

各年度の排気量別初度登録年別自動車保有車両数⁵⁾、軽乗用車保有車両数および新車販売台数⁶⁾、ハイブリッド車の販売台数⁷⁾、文献4)で推計した排気量別年間平均走行距離、自動車走行量⁸⁾などから推計した、乗用車パワートレイン別・排気量別走行量を算出した。この15年間のトレンドをみると、1990年代初頭に対して小型乗用車の走行量は減少しつつある一方で、普通乗用車と軽乗用車の走行量が増加する傾向にあることがわかる。これは、普通乗用車については物品税の廃止および自動車税の税率変更により小型乗用車との税負担格差が縮小したことが、また軽乗用車については2度の規格変更により保有台数が変化したこと起因するものと考えられる。また乗用車走行量全体として近年ではほぼ横ばいもしくは微減傾向にあるのは、年間平均走行距離が小さい軽乗用車の保有が増加していること、またそれが大きいディーゼル車の保有が減少していることが一因である。

4. 考察

技術予測に関する情報収集と燃料供給を含めたエネルギー効率を踏まえた検討を行った結果、2020年時点での対策の実効性においては、ハイブリッド乗用車が最も有力な自動車技術の一つであるとの見通しが得られた。燃料電池車の普及に関しては、コストや燃料供給面に課題が残されており、2020年時点に大量普及を見込むことは困難と考えられるが、将来的に炭素を排出しない方法での水素生成が可能との見込みが得られれば、先行して燃料供給スタンドの整備を行うこともあり得る。その普及にかかるリードタイムを考慮するため、代替燃料スタンド最適整備戦略モデルの開発に着手した。走行実態調査を踏まえて、1ヵ月間の自動車の走行をシミュレートした結果、従来に比べて大幅に少ない数のスタンドの設置での燃料供給可能性が示唆された。

これらの知見を踏まえて、2020年の交通部門の基準シナリオと対策シナリオ案を作成した。脱温暖化のために、乗用車のほとんどをハイブリッド車に、軽乗用車のほとんどを電気自動車に切り替える必要があり、そのためには、生産設備の急速な拡充が重要であることを指摘した。また、本部門の2020年の排出量を1990年レベルより大幅に減少させるためには、ハイブリッド車等への切り替えでは不十分であり、交通需要面も含めたさらなる対策が必要になると考えられた。また、乗用車に関しては、車格別の詳細な分析を行う枠組みを構築した。今後、短期的な対策の効果を把握するためにモデルに組み込む計画である。

5. 本研究により得られた成果

- ・低CO₂車技術選択モデル構築に必要となる基礎データの収集と基本的な考え方の整理を行い、自動車用燃料インベントリの作成を行った。
- ・1ヵ月間の自動車の走行をシミュレーションすることで、燃料供給スタンドの設置戦略の評価を可能とし、従来に比べて大幅に少ない数のスタンドの設置での燃料供給可能性が示唆された。
- ・2020年の交通部門の基準シナリオと対策シナリオ案を作成した。
- ・2020年時点での効果の実効性という点では、ハイブリッド乗用車が最も有力な自動車技術の一つであるとの見通しが得られた。但し、そのためには、製造能力の急速な拡大が重要である。
- ・本部門の2020年の排出量を1990年レベル以下にまで減少させるためには、想定した技術面の対策のみでは不十分であり、交通需要面も含めたさらなる対策が必要になることを明らかにした。
- ・1990年以降現在までの乗用車CO₂排出量のトレンド分析を行った。燃費性能の着実な向上と燃費の良い乗用車の普及により、また乗用車走行量の伸びの頭打ちにより、着実に増加し続けていた乗用車CO₂排出量が近年では横ばいから微減傾向にあることが確認された。

6. 引用文献

- 5) (財) 自動車検査登録協会の、各年3月末現在自検協統計自動車保有車両数
- 6) (社) 全国軽自動車協会連合会統計、<http://www.zenkeijikyo.or.jp/statistics/index.html>
- 8) 国土交通省総合政策局情報管理部、各年自動車輸送統計年報

7. 国際共同研究等の状況

S-3プロジェクトの一員として、Open Symposium “Low-Carbon Society Scenario toward 2050: Scenario Development and its Implication for Policy Measures” にて欧州の専門家との間で意見交換を行った。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- ① Kudoh Y., Kondo Y., Matsushashi K., Kobayashi S., Moriguchi Y., Applied Energy, 79/3, 291-308(2004)
”Current status of actual fuel-consumptions of petrol-fuelled passenger vehicles in Japan”
- ② Yuki Kudoh, Takahiko Hasegawa, Yoshinori Kondo, Keisuke Matsushashi, Yuichi Moriguchi, et al., Proceedings of the 21st Worldwide Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, (2005)
”Environmental Impacts of Introducing FCEVs and BEVs within Road Traffic System of Tokyo”
- ③ 工藤祐揮, 松橋啓介, 森口祐一, 近藤美則, 小林伸治, 土木学会論文集, No. 793/IV-68, 41-48, (2005)
「ガソリン乗用車の実燃費マクロ推計式の構築」

＜その他誌上発表（査読なし）＞

（２）口頭発表（学会）

①工藤祐揮・松橋啓介・森口祐一：第23回エネルギー・資源学会研究発表会（大阪 2004. 6） 同講演論文集 269-272

「日本におけるガソリン乗用車の実燃費の実態について」

③工藤祐揮, 松橋啓介, 上岡直見, 森口祐一, 第33回環境システム研究論文発表会（札幌 2005. 11）同講演集 263-268

「市区町村の運輸部門CO₂排出量の推計」

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

①森口祐一：地球環境研究総合推進費一般公開シンポジウム（脱温暖化社会に向けて）2005年11月16日

「脱温暖化に向けた近未来の交通システム」

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

主に、S-3脱温暖化2050プロジェクトを通じて、環境省やIPCCに対して科学的知見が提供される。

Ⅱ．燃料補給と走行に伴うライフサイクル排出量

1．エネルギーチェーンサイクル全体からのCO₂排出量

現在の自動車用パワートレイン（動力装置）の主流である内燃機関では、自動車の燃料タンクに蓄えられた化石燃料を内燃機関で燃焼させることにより推進力を得る。このとき、大気中にCO₂が放出される。一方、自動車用非従来型燃料の中で、現在の内燃機関にもそのまま適用できるとされるバイオマス燃料は、炭素中立という、持続可能な形態で管理されているという暗黙の仮定が想定されており、温室効果ガスの国家インベントリについて定めたIPCCのガイドラインに基づき、その燃焼に伴うCO₂排出は勘定しなくてもよいとされている。また、内燃機関自動車に代わる次世代自動車の鍵を握るとされる燃料電池自動車の燃料である水素には炭素分が含まれないため、車上に搭載された燃料電池で発電してモータで走行する際にCO₂排出はない。しかし、バイオマス燃料や水素を各種一次エネルギーや再生可能エネルギーから製造し、燃料の補給設備に供給するまでの過程ではさまざまな化石エネルギーが投入されるため、自動車走行時のCO₂排出はゼロであるが、燃料の製造・供給段階ではCO₂が排出される。つまり、LCA的な視点に基づくと、自動車用燃料としてバイオマス燃料や水素を用いる場合にも、CO₂が排出される。

Well to Wheel (WtW) 分析とは、自動車用燃料が一次エネルギーや再生可能エネルギーから製造・供給され、自動車で行きに使用されるまでのライフサイクル（エネルギーチェーンサイクル）全体での環境負荷を定量化する枠組である。WtW分析は、今後の国家のエネルギー戦略や自動車メーカー・エネルギー産業の技術開発や経営戦略を練る上で重要であり、日本では経済産業省が実施する「水素・燃料電池実証プロジェクト」（JHFC: Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project）の総合効率検討特別委員会¹⁾やトヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社²⁾などで、また米国³⁾や欧州⁴⁾などでも、それぞれの地域のエネルギー事情と自動車の普及状況にあわせた分析が行われている。

図Ⅱ-1に、内外のWtW分析で検討対象とされている自動車用燃料供給方法と、各種石油代替燃料自動車の組み合わせの一例を示す。WtWの一連のエネルギーチェーンサイクルのうち、一次エネルギー・再生可能エネルギーが採掘されてから自動車用燃料として精製され、自動車のタンクに搭載されるまでをWell to Tank (WtT)、搭載された自動車用燃料が行きに使用されるまでをTank to Wheel (TtW)と、分けて評価されることが多い。

低CO₂車技術選択モデル構築のためには、自動車用燃料製造と供給に伴うインベントリ作成と、自動車走行時のエネルギー消費量（燃費）の算出が必要となる。本研究では、各種自動車用燃料のWtT段階でのエネルギー消費量・CO₂排出量は、筆者がWG委員として参加して収集した、各種エネルギー変換プロセスでのインベントリデータの提供を行ってきた文献¹⁾での検討結果を引用する。TtW段階での自動車走行時のエネルギー消費量は、文献¹⁾では自動車の排ガス・燃費測定に使用されている10・15モードと呼ばれる走行試験モードに基づくエネルギー消費量が掲載されている。低燃費車や各種石油代替燃料車の既存自動車に対する燃費面での優位性を検討する上では、10・15モード燃費の比較は確かに有効な指標の一つとなりうるが、多くの自動車ユーザが経験しているように、既存自動車の実使用時の燃費は10・15モード燃費通りの燃費性能を発揮できない場合が多く、これは石油代替燃料車の燃費にもあてはまる可能性がある。そこで本研究ではTtW段階に

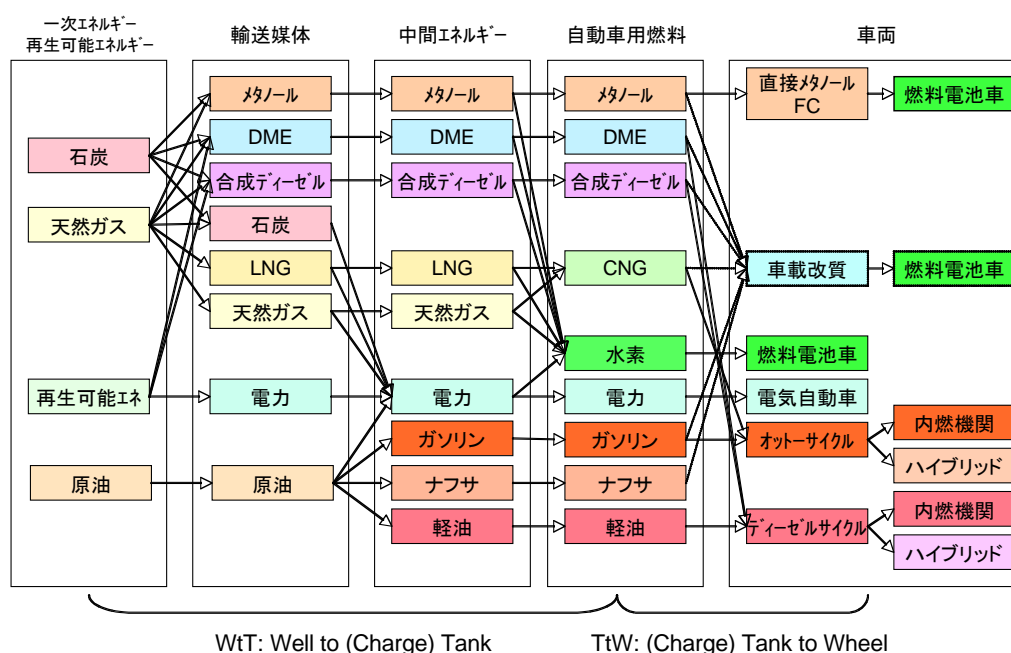


図 II-1 Well to Wheelエネルギーチェーンサイクルの一例

については、文献¹⁾のレビューによる低燃費車・各種石油代替燃料車の10・15モード走行時のエネルギー消費量・CO₂排出量の把握に加え、燃料電池車・電気自動車については、構築した自動車のパワートレインの状態を模擬可能な自動車走行シミュレーションモデルを用いて実走行時のエネルギー消費・CO₂排出特性を算出した。

(1) Well to Tankエネルギー消費量・CO₂排出量

文献¹⁾では、あるプロセスに投入されたエネルギーとそれに伴うCO₂排出量は、一次エネルギーにまで遡って算出している。すなわち、LCAのインベントリ分析の観点からは積み上げ法ではなく、産業連関法に基づいて算出していることになる。

図 II-2に、文献¹⁾から作成した日本の条件におけるWtTエネルギー消費原単位およびCO₂排出原単位（電力は平均電源構成を加味した算出結果）を示す。以下に、WtT分析の主な論点を示す。

- ・ 文献¹⁾ではエネルギー消費とGHG（温室効果ガス）排出量を分析対象物質としている。GHGとしてはCO₂、CH₄、N₂Oを採用し、GWP（地球温暖化係数）を用いてCO₂換算しているが、化石燃料の燃焼に伴うCH₄およびN₂Oの排出量はないものとしている。
- ・ 対象年度である2010年頃に実現・導入可能であると想定される自動車用燃料製造・供給技術と自動車技術を分析の対象としている。
- ・ 想定するエネルギーチェーンサイクルには様々な不確実性が存在する。これは例えば輸送距離や一次エネルギーの採掘場所のような条件設定に基づくものや、将来の技術進歩などである。WtW分析ではこれらの想定されうる不確実性を考慮し、幅を持たせて評価している。したがってWtW分析の結果に大きな幅が含まれる場合、その解釈にあたってはその幅が生じる原因が何にあるのかに留意する必要がある。

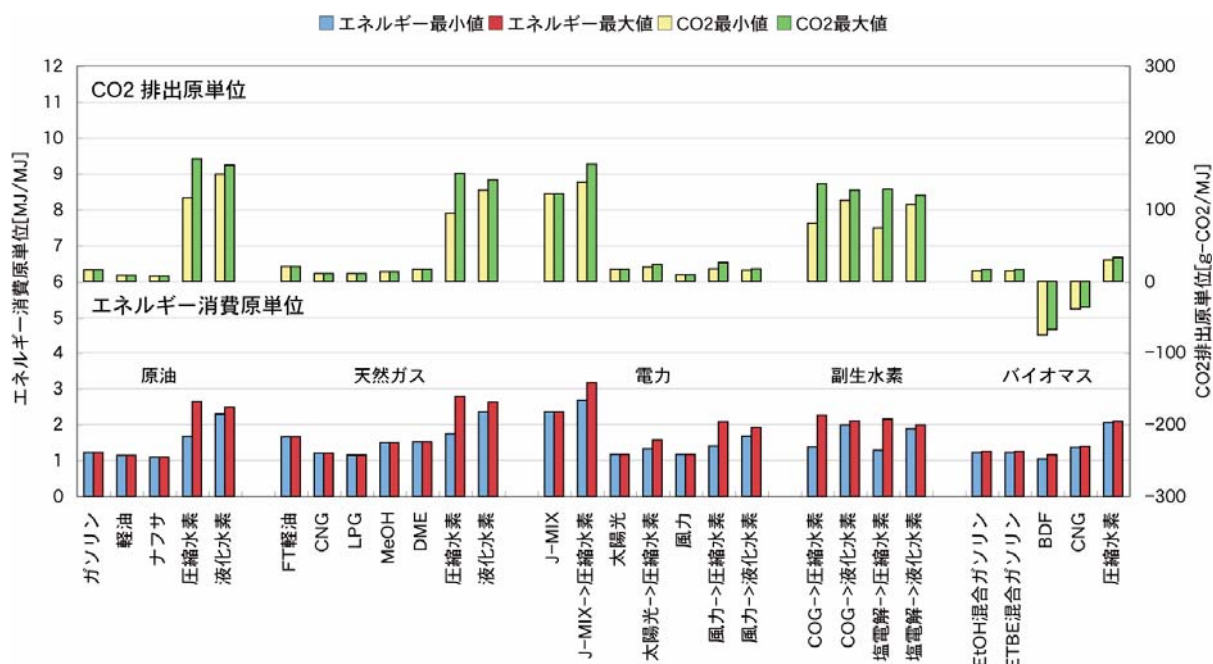
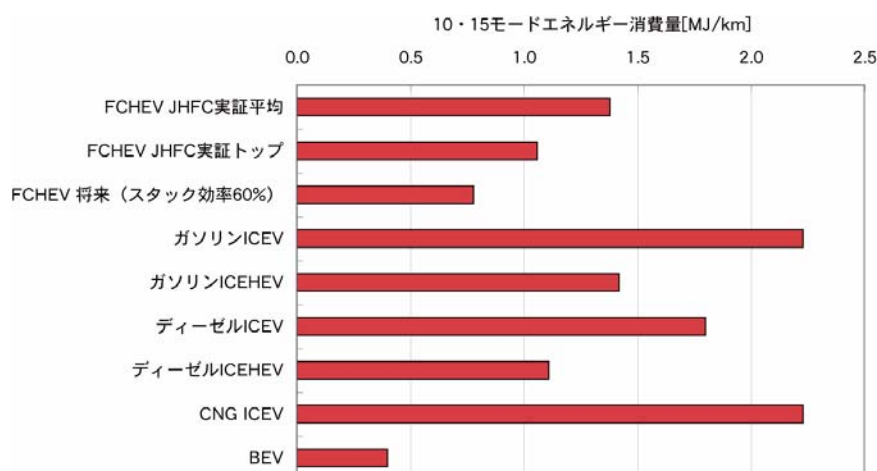


図 II-2 Well to Tankエネルギー消費原単位およびCO₂排出原単位

- ・ エネルギー消費を算出する場合の各物質の発熱量は、LHV（低位発熱量）を採用する。これは、TtW段階で想定する各種自動車の内燃機関の動作温度が高く、水蒸気の潜熱回収が難しいためである。
- ・ WtW段階で想定されている各種エネルギー変換プロセスではエネルギーフローだけに着目し、これらプロセスの設備建設や運用に伴うエネルギー投入とCO₂排出量は分析対象外とする。電力について、汽力発電は設備建設・運用時のCO₂排出の寄与度が低いためにこれらをカットオフした、化石燃料燃焼に伴うCO₂だけをカウントしているが、発電時に燃料の燃焼がないためにCO₂が排出されない原子力、水力、太陽光、風力発電では、発電設備の建設や運用段階で排出されるCO₂を含めた発電源別CO₂排出原単位を用いる。
- ・ 各パスに含まれるプロセスでのエネルギー消費原単位は、生産物1単位あたり生産するために投入された原料およびエネルギーの発熱量の和として算出する。またCO₂排出原単位はプロセスでの炭素収支を考慮して、投入物のCO₂排出量の和と生産物のCO₂排出量の差として算出する。
- ・ 自動車用燃料としての水素の製造・供給パスのうち、日本に特有なものとして、製鉄所におけるCOG（コークス炉ガス）に含まれる副生水素、苛性ソーダ工場からの塩電解水素の利用がある。副生水素のエネルギー消費原単位ならびにCO₂排出原単位は、以下の前提にしたがって算出している。すなわち、COGに含まれる水素や苛性ソーダ工場の塩電解水素は二次的な副産物であるとして捉えられるために、LCA的な観点からはエネルギー消費や環境負荷は配分されないと考えられる。これらの現在の利用用途のうち、基本的に燃料として利用されているものが自動車用燃料の水素として供出可能であるとし、その利用によるエネルギー消費量とGHG排出量は、燃料として代替燃料を利用した場合との差分によって定義されるものとする。
- ・ バイオマス起因の自動車用燃料については、バイオマスの生産段階で摂取された炭素は吸収されたものと考え、マイナス表示でその量を表記している。その量は炭素収支がゼロとなるように、



図Ⅱ-3 低燃費車・石油代替燃料車の10・15モードTank to Wheelエネルギー消費量

吸収量と燃焼時の排出量が同じになる値としている。

(2)低燃費車・石油代替燃料車の10・15モードTank to Wheelエネルギー消費量

図Ⅱ-3に、各種低燃費車・石油代替燃料車の10・15モードTtWエネルギー消費量¹⁾を示す。文献¹⁾での分析対象車は、ガソリン内燃機関自動車(ICEV)、ガソリン内燃機関ハイブリッド車(ICEHEV)、ディーゼルICEV、ディーゼルICEHEV、CNG ICEV、燃料電池ハイブリッド車(FCHEV)、バッテリー電気自動車(BEV)の7車種である。ここでは基準となるICEV・ICEHEV・BEVについては現状の技術を想定し、現在は開発段階にあるFCHEVは原則として2005年から2010年頃の技術を想定し、燃料電池のスタック効率は60%として基準車との比較・検討を行っている。これらすべての車両の基本性能は原則として同等とし、車室内スペースや車両の形状も共通であるとしている。これら車両のTtWエネルギー消費量はシミュレーションモデルGREEN(General Research for Energy Efficiency of New Technology Vehicles)を用いて評価しているが、FCHEVについてはJHFC実証試験で得られた現在の技術水準におけるエネルギー消費量も公表されている。

(3)低燃費車・石油代替燃料車の10・15モードWell to Wheel CO₂排出量

WtW CO₂排出量は、TtW段階の各種自動車のエネルギー消費量と、自動車用燃料のCO₂排出係数・WtT CO₂排出量から算出できる。図Ⅱ-4に、低燃費車・石油代替燃料車の10・15モード走行時におけるWtW CO₂排出量を示す。

図Ⅱ-4では、それぞれの低燃費車・石油代替燃料車のWtW CO₂排出量は幅をもって示している。これは、それぞれの車両で使用される自動車用燃料供給方法によるWtT CO₂排出量の違いに起因するものである。特にBEVのWtW CO₂排出量の幅は、BEV用電力を太陽光・風力の再生可能エネルギーで発電するか、日本の平均電源構成による電力CO₂原単位を使用するかによって大きく異なってくる。

現状の技術水準における直接水素型のFCHEVのWtW CO₂排出量はガソリンICEHEVには勝るものの、内燃機関を使う自動車の中で最も高い効率が期待されるディーゼルICEHEVと比較すると、水素製

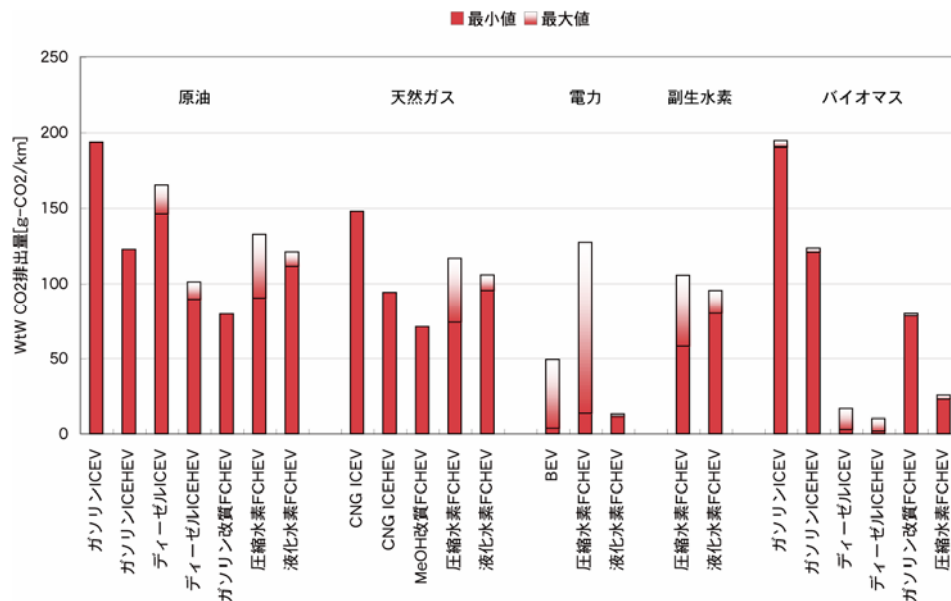


図 II-4 低燃費車・石油代替燃料車の10・15モードWell to Wheel CO2排出量

造・供給パスによっては上回る場合が多く、副生水素を利用した場合にはディーゼルICEHEVを下回る可能性がある。燃料電池車は、投入可能な一次エネルギー・再生可能エネルギーが多用であるという特徴があるが、それに加えてCO₂排出量削減の可能性をさらに向上させるためには、燃料電池本多淫の高効率化とともに、水素製造段階、すなわちWtT段階における各エネルギー変換プロセスの高効率化を図っていくことが重要である。

(4) 燃料電池車・電気自動車の実走行時のWell to Wheel分析

前述の通り、自動車の燃費すなわちエネルギー消費量は、自動車走行試験モードである10・15モードの値と実走行条件下とは異なった値を示す。また渋滞時のエネルギー消費と円滑な走行条件でのエネルギー消費は異なるなど、自動車のエネルギー消費量には平均旅行速度依存性があることが知られている。そこで本研究では、時々刻々と変化する車両の走行動態に応じて変化するパワートレインの状態を模擬可能な自動車走行シミュレーションモデル⁵⁾を用い、FCHEV・BEVのTtW実走行時のエネルギー消費量を算出し、これを①のWtTエネルギー消費量・CO₂排出量と合わせることで燃料電池車・電気自動車のWtWエネルギー消費量・CO₂排出量を求めた。なお、FCHEV・BEVとの比較のために、ガソリンICEVについてもエネルギー消費量・CO₂排出量を算出した。

① 自動車走行シミュレーションモデルの概要

図 II-5に、構築した自動車走行シミュレーションモデルの概要を示す。走行データによって与えられる速度・加速度と車両諸元により、走行抵抗が計算される。この時々刻々と変化する走行抵抗に抗して自動車を走らせるために必要なトルク・回転数が、パワートレインから得られる。ICEの特性はエンジンのマップにより決定される。必要なトルク・回転数をモータから得るため、FCHEV・BEVでは図 II-6のような車両システムを想定した。なお、想定した3種類の乗用車は排気量2,000ccクラスのカブ乗用車 (GV) と、このGVと自動車としての機能が同等であると考えられる純水素タンクとニッケル水素電池を搭載した燃料電池車 (FCEV)、リチウムイオン電池搭載の

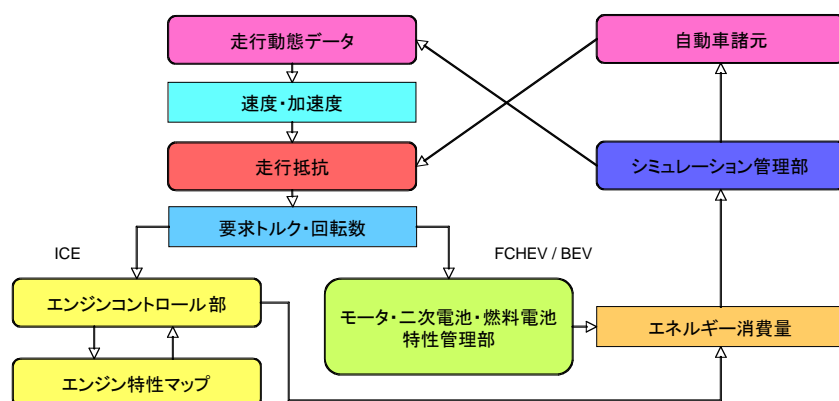


図 II-5 自動車走行シミュレーションモデルの概要

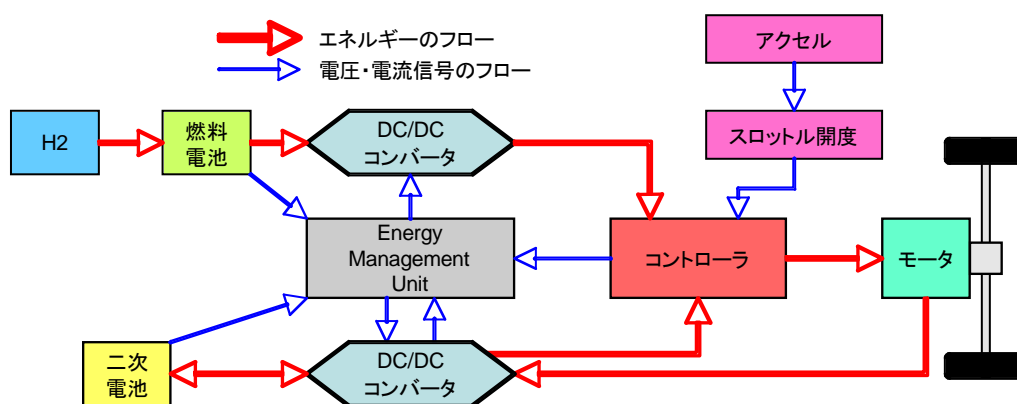


図 II-6 想定したFCHEVの車両システム

表 II-1 車両の諸元

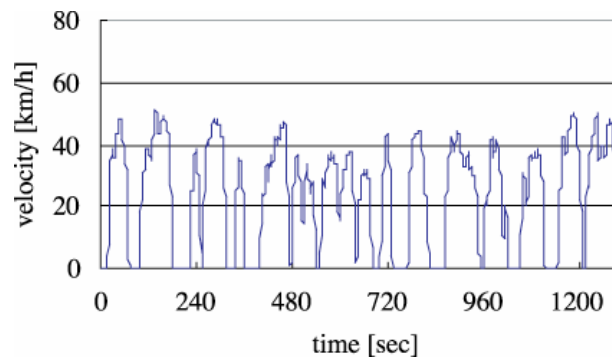
パワートレイン出力		ガソリンICEV：100kW，2,000ccクラス モータ：80kW
共通諸元		前面投影面積：1.98m ² 、空気抵抗係数：0.34、転がり抵抗係数：0.01、タイヤ有効半径：0.292m
BEV用リチウムイオン電池諸元		容量：34.6Wh、最大出力：41.8kW
FCHEV諸元	燃料電池	最大出力：80kW、水素タンク：160L、35MPa
	ニッケル水素電池	容量：47.6Wh、最大出力：37.9kW
車両総重量		ガソリンICEV：1,269kg、BEV：1,717kg、FCHEV：1,469kg

電気自動車（BEV）であり、これら自動車の諸元は表 II-1に示す通りである。

図 II-7に、このモデルで想定した2種類のスタック特性を持つ燃料電池の出力特性を示す。ここでは文献⁶⁾に掲載されているFCスタック特性のうち、効率最大のものをCaseA、最小のものをCaseBとした。図 II-6に示すように、自動車用固体高分子型燃料電池には特定の出力域で効率のピークが存在する。そこで燃料電池車のエネルギー効率を上げるため、燃料電池高効率領域を積極的に利用する制御方式としてFC/二次電池ハイブリッドシステム文献⁷⁾を自動車走行シミュレーションモデルに適用した。このハイブリッドシステムでは以下のような制御が行われる。なお、FC/二次電池ハイブリッドシステムでの出力領域の定義は表 II-2に示した。

表Ⅱ-2 FCHEVの出力領域の定義

出力領域	電気出力[kW]	定義
低出力域	0～8	FC最大出力の10%以下
中出力域	8～15	FC最大効率出力（15kW）以下
高出力域	15～40	FC最大効率出力+二次電池最大出力(40kW)
超高出力域	40～80	FC最大出力以下



図Ⅱ-8 実走行データの一例（平均旅行速度23.7km/h）

- ・ 低出力域では、モータ用電力は電池により供給
- ・ 中出力域では、FCの部分負荷運転により供給
- ・ 高出力域では、電池の部分出力でのアシストによるFC最高効率出力運転により供給
- ・ 超高出力域では、電池の最大出力でのアシストによるFC運転の効率化により供給

自動車走行シミュレーションモデルによって算出したFCHEVの10・15モード効率、燃料電池の出力特性がCaseAの時は0.469であり、トヨタFCHVの10・15モード効率の0.5とほぼ同じ値が得られた。このことから、この自動車走行シミュレーションモデルを用いて算出したTtWエネルギー消費量には、一定の信頼性があると考えられる。

② 燃料電池車・電気自動車の実走行時のエネルギー消費量・CO₂排出量

東京都内で観測された10パターンの実走行データ（図Ⅱ-8）を自動車走行シミュレーションモデルに適用して算出した、FCHEV（燃料電池出力特性：図Ⅱ-7のCaseA）・BEVの実走行時のWtW CO₂排出量を図Ⅱ-9に示す。比較のため、ガソリン車のTtWエネルギー消費量もあわせて示した。ここで、燃料電池車用水素のWtT CO₂排出量については、数多くの水素供給パスの中から塩電解副生水素、LNGオンサイト改質水素、日本の平均電源構成による水電解水素の3つを選択し、また電気自動車用電力は日本の平均電源構成による電力を想定した（表Ⅱ-3参照）。

図Ⅱ-9から、平均旅行速度が遅いような走行動態、すなわち、都市部のように渋滞が多発するような交通状況で使用する場合には、エネルギー回生が可能なFCHEV・BEVはガソリンICEVと比べてエネルギー消費の面では大幅に優位であり、平均旅行速度が20km/h以下の領域では、選択される自動車用燃料供給パスを問わずFCHEV・BEVのWtW CO₂排出量はガソリンICEVよりも低くなる。しかし、このFCHEV・BEVのガソリンICEVに対するCO₂排出量の優位性は平均速度が上昇するにつれて薄れ、特にFCHEVのWtW CO₂排出量は、選択する水素供給パスによってはガソリンICEVのそれよりも多くなりうる。このことから、自動車起因のCO₂排出量削減のためは、FCHEV・BEVのCO₂排出量削減

表 II-3 WtW CO2排出量算出に用いた各種CO2排出原単位・排出係数^{AIST2)}

自動車用燃料	WtT CO2排出原単位 [g-CO2/MJ (LHV)]	TtW CO2排出係数 [g-CO2/MJ (LHV)]
ガソリン	11.42	73.6
軽油	5.45	74.3
電力（日本平均電源構成）	123.06	
水素（塩電解副生水素）	22.23	
水素（LNGオンサイト改質）	121.34	
水素（日本平均電源構成による水電解水素）	266.30	

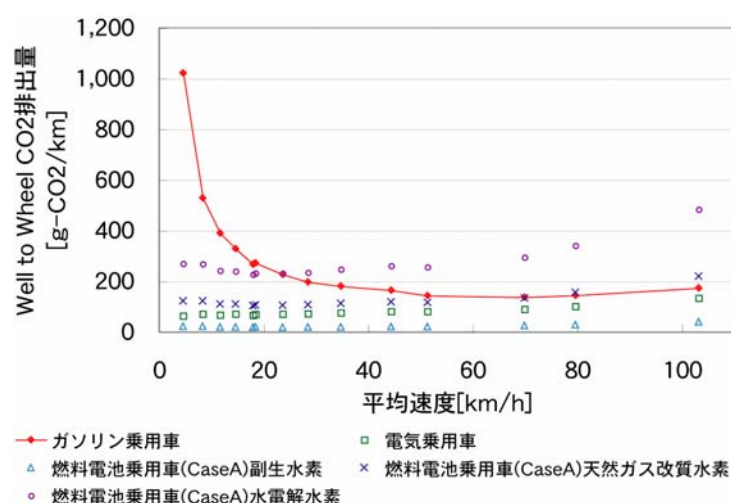


図 II-9 実走行時のWtW CO2排出量

ポテンシャルを考慮すると、平均旅行速度が低い大都市でFCHEV・BEVを優先的に導入することが効果的であるとの示唆が得られる。

2. 統計解析による乗用車実燃費の実態分析

前述の通り、各種自動車の燃費面での環境優位性を検討する上では、自動車のカタログにも掲載されている10・15モード燃費の比較は確かに有効な指標の一つとなりうるが、多くの自動車ユーザーが経験しているように、既存自動車の実使用時の燃費（実燃費）は10・15モード燃費通りの燃費性能を発揮できない場合が多い。これは、実燃費は自動車の走行動態、整備状況や、走行する地域の交通状況、気象条件など様々な要因に強く依存するためであり、これらすべての要因の組み合わせを考慮して、自動車の燃費を測定できる走行試験モードは存在しない。したがって、10・15モード燃費から実燃費への適切な換算式を採用することにより、達成計画に挙げられた排出削減量を達成できるか否かを判断することができる。

実燃費の実態を把握するためには、大別して2つの方法がある。一方は統計データから得られる自動車走行量と燃料消費量から実燃費を推計する方法である。例えば自動車輸送統計年報⁸⁾を用いると、地域・車種区分別の自動車燃費を過去に遡って算出することができる。しかし、ここから得られる値は実績値に基づく自動車総体としての燃費であり、各種燃費向上技術が搭載された自動車が大量普及した場合の燃費を推計するためには不向きである。他方は自動車ユーザーへのアン

ケート調査を実施して、実燃費を統計的に解析する方法である。例えば文献⁹⁾では、アンケート調査により乗用車の10・15モード燃費と実燃費の関係の把握を行っているが、乗用車ユーザの車の使用実態や使用地によって異なる実燃費を、限られたサンプル数の中で統計的信頼性の高い解析を行うことは困難であった。

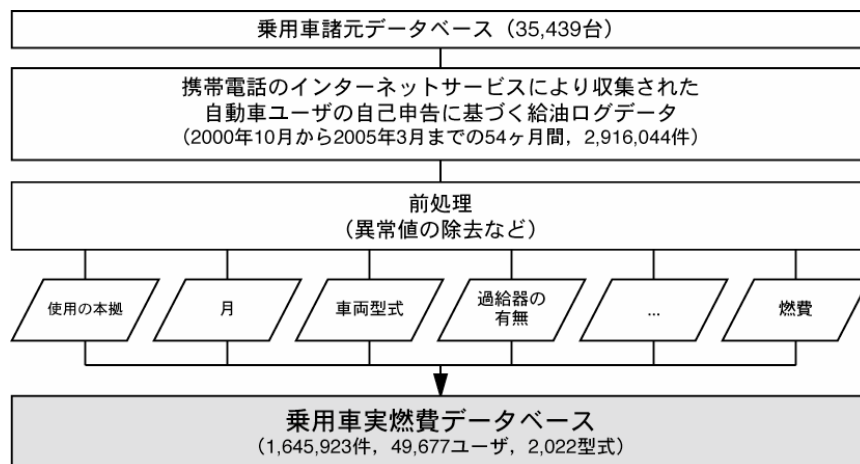
様々な要因によって変化する実燃費を高い統計的信頼性を持って解析するために、筆者らは携帯電話のインターネットサービスを利用して全国規模で収集された自動車ユーザの自己申告に基づく給油ログデータに着目し、実燃費データベースを構築してきた。このデータベースから得られた成果の一部は文献^{10),11)}などで紹介してきたが、各種燃費向上技術の投入により着実に向上してきた自動車新車の10・15モード燃費が実燃費に与える影響を解析するため、またデータベースから得られる実燃費の信頼性をさらに高めるため、筆者らは給油ログデータの分析対象期間を拡張し、実燃費データベースの更新を行った。本稿では最新の实燃費データベースを用い、日本における乗用車実燃費の実態を包括的に把握する。

なお、「燃費」は燃料消費率と燃料消費量の両方に用いられることがある。本来、燃費は燃料消費率の略語であり、日本ではその単位として燃料1リットルあたりの走行距離[km/L]が用いられている。しかし、自動車走行に伴う燃料消費量とCO₂排出量の算出に必要となるのは、[km/L]の逆数が示す単位走行距離あたりの燃料消費量であり、自動車のエネルギー消費を表わす単位としてはこの方が合理的である。そこで、本稿では欧州で一般的に用いられる[L/100km]を燃料消費量の単位として採用し、以下では燃料消費率と燃料消費量の定義と単位の違いを明記した。

(1) 実燃費データベースの概要

筆者らは、乗用車カタログデータと給油ログデータを用いて、乗用車実燃費データベースを構築してきた。図Ⅱ-10に、このデータベースの概要を示す。

まず、各乗用車の自動車諸元値を調査するため、インターネット上のある自動車情報サイトで公開されている、日本の自動車市場で販売された年式・グレードごとの自動車カタログデータを取得した。2006年5月中旬に取得した42,393台分の自動車カタログデータから、2005年3月までに発売された年式で、かつ車両型式に含まれる自動車識別記号¹²⁾から乗用車と特定できる35,439



図Ⅱ-10 乗用車実燃費データベースの概要

台分のデータを抽出し、乗用車諸元データベースを作成した。

次に給油ログデータとして、携帯電話コンテンツ「e燃費」の、自動車ユーザの自己申告に基づく給油ログデータを選択した。このサービスの利用を希望するユーザは、事前に携帯電話のインターネットサービスを利用して、(a)居住地の郵便番号、(b)車両型式、(c)エンジン過給器搭載の有無、(d)トランスミッションの種類、(e)給油する燃料の種別、を登録する。以後は給油後にオドメータ（走行距離計）の読みと給油量を携帯電話で入力して送信することにより、データサーバに給油ログデータが蓄積される。

給油ログデータの初期登録5項目のうち、車両型式、エンジン過給器搭載の有無、トランスミッションの種類の3つを乗用車諸元データベースの該当項目と組み合わせることにより、以下に示す16項目を実燃費データベースのフィールドとして採用した。(1)ユーザ、(2)使用の本拠の市区町村コード、(3)給油年月、(4)自動車メーカ、(5)車両型式、(6)車種（軽乗用車、乗用車）、(7)燃料種別（ガソリン、軽油）、(8)パワートレインの種類（ガソリンオットーサイクルエンジン、ガソリンロータリーエンジン、ディーゼルエンジン、ハイブリッド）、(9)過給器の有無（過給器搭載、自然吸気）、(10)トランスミッションの種類（MT、AT/CVT）、(11)駆動方式（二輪駆動、四輪駆動）、(12)直噴エンジン搭載の有無、(13)可変バルブタイミング（VVT）機構搭載の有無、(14)排気量、(15)車両重量、(16)10・15モード燃料消費率。これらのフィールドは、実燃費の集計要素として用いる。

車両型式ごとの諸元値は年式やグレードによって異なるが、給油ログデータではそのシステムの仕様上、各登録ユーザが保有する車両の年式やグレードまでは特定することは出来ない。そこで、乗用車諸元データベースに含まれる車両型式の年式、グレード区分を統合し、値に幅のある諸元については以下の数値を代表値として採用した5、151型式の自動車諸元値を、給油ログデータに関連付けた。

- ・ エンジン排気量、燃料タンク容量には、それぞれの最大値を採用した。
- ・ 車両重量、10・15モード燃料消費率には、それぞれの最小値と最大値の平均値を採用した。

本研究では、2000年10月から2005年3月までの54ヶ月間に全国から集められた2,916,044件の給油ログデータから、まず統計的信頼性を高めるために以下のデータを除去した。

- A-1. 登録ユーザの使用の本拠が特定できないデータ。
- A-2. 乗用車諸元データベースに情報が含まれていない型式を保有しているユーザのデータ。
- A-3. 満タン率（＝給油量／燃料タンク容量）が60%未満、または100%より大きいデータ。

次に、給油ログデータ i をユーザ u 、型式 v の燃料消費率 $FE_{u,v}$ [km/L]

$$FE_{u,v} = \sum_{i \in u,v} (d_{u,v,i} / f_{u,v,i}) / n_{u,v,i} \quad (1)$$

に集計したときに、以下のデータを除去した。ただし、 $d_{u,v,i}$ [km]、 $f_{u,v,i}$ [L]、 $n_{u,v,i}$ はそれぞれユーザ u 、型式 v の給油ログデータ i の走行距離、給油量、データ数である。

- B-1. $FE_{u,v}$ を構成するユーザ u 、型式 v の給油ログデータ i のうち、Grubbs検定により有意水準5%で外れ値と見なされるデータ。
- B-2. $n_{u,v,i}$ が5未満のユーザ u 、型式 v のデータ。
- B-3. $FE_{u,v}$ の分散が $10[(\text{km/L})^2]$ より大きいユーザ u 、型式 v のデータ。

最後に、ユーザ u 、型式 v の燃料消費率 $FE_{u,v}$ [km/L] を型式 v の燃料消費率 FE_v [km/L]

表Ⅱ-4 実燃費データベースのデータサイズ

種別		ログデータ数	ユーザ数	型式数
軽乗用車GV		151,742	4,734	265
乗用車 DV	1,501~2,000cc	2,005	68	11
	2,001~2,500cc	13,674	397	37
	2,501~3,000cc	33,111	918	53
	3,001cc~	6,205	169	12
	全体	54,995	1,552	113
乗用車 GV	~1,500cc	195,047	6,540	294
	1,501~2,000cc	777,483	22,797	780
	2,001~2,500cc	274,964	8,157	265
	2,501~3,000cc	99,578	2,981	163
	3,001cc~	62,834	1,895	126
	全体	1,561,648	47,104	1,893
乗用車 GV_RT	1,501~2,000cc	22,935	780	7
	2,501~3,000cc	961	25	1
	全体	23,896	805	8
乗用車 HV	~1,500cc	3,571	145	6
	2,001~2,500cc	1,813	71	2
	全体	5,384	216	8
全種別合計		1,645,923	49,677	2,022

$$FE_v = \sum_{u \in v} FE_{u,v} / n_v \quad (2)$$

に集計したときに、以下のデータを除去した。ただし、 n_v は型式 v を保有するユーザ u の数である。

C-1. FE_v を構成するユーザ u 、型式 v の燃料消費率 $FE_{u,v}$ のうち、Grubbs検定により有意水準5%で外れ値と見なされるデータ。

C-2. n_v が3未満の型式 v のデータ。

上記のデータを除去した1,645,923件の給油ログデータを用いて構築した乗用車実燃費データベースには、延べ49,677ユーザ、2,022型式の情報が含まれる。そのサンプル数の内訳を表Ⅱ-4に示した。表Ⅱ-4で、“DV”、“GV”、“GV_RT”、“HV”はそれぞれガソリンオートサイクルエンジン乗用車、ガソリンロータリーサイクルエンジン乗用車、ディーゼルエンジン乗用車、ガソリンハイブリッド乗用車を表す。ここで、乗用車GV_RTの排気量は、自動車税課税時の排気量区分である「単室容積×ローター数×1.5」で換算した。

本研究で算出する実燃費は、前回給油時からの走行距離と燃料給油量を基とする、いわゆる「満タン法」で算出する。したがって、各ユーザが毎回給油する際に満タンにしていることが前提となるが、満タン給油しないユーザが存在しうる。「e燃費」ではユーザに満タン給油することを推奨しており、携帯電話でデータ入力する際にも満タンにしたかどうかの確認画面が表示される。ここで、2回以上連続して満タンにした状況が確認できて初めて、2回目以降に入力したデータが給油ログデータとして保存されるシステムになっている。また実燃費データベースを構築する際、前述A-3の満タン率基準に該当する給油ログデータは除外したため、全1,645,923件のデータの満タン率平均は76.8%（標準偏差8.82%）であった。給油は乗用車の燃料タンクが完全に空になる前に行う必要があることを考えると、満タン率平均値からほとんどのデータが満タン給油されていると考えて差し支えないであろう。中には満タン率の低い場合もあるが、データベース構築にあ

たつては前述B-2に示したように、対象期間中5回以上給油したユーザのログデータだけを対象としており、ある1回の給油データがそのユーザの累積実燃費に与える誤差は小さくなる。したがって、本データベースから得られる満タン法に基づく乗用車実燃費は、一定の信頼性を持つと考えられる。

(2) 乗用車実燃費の実態

データベースから得られる乗用車実燃費に考察を加える。以下では、給油ログデータ i をフィールド k, l, m, \dots に集計した場合の実燃料消費率 $FE_{k,l,m,\dots}$ [km/L]、実燃料消費量 $FC_{k,l,m,\dots}$ [L/100km] は、それぞれ式 (3)

$$\begin{aligned} FE_{k,l,m,\dots} &= \sum_{i \in k,l,m,\dots} d_i / \sum_{i \in k,l,m,\dots} f_i \\ FC_{k,l,m,\dots} &= 100 \times \sum_{i \in k,l,m,\dots} f_i / \sum_{i \in k,l,m,\dots} d_i \end{aligned} \quad (3)$$

で算出する。ただし、 d_i [km]、 f_i [L] はそれぞれ給油ログデータ i の走行距離、給油量である。

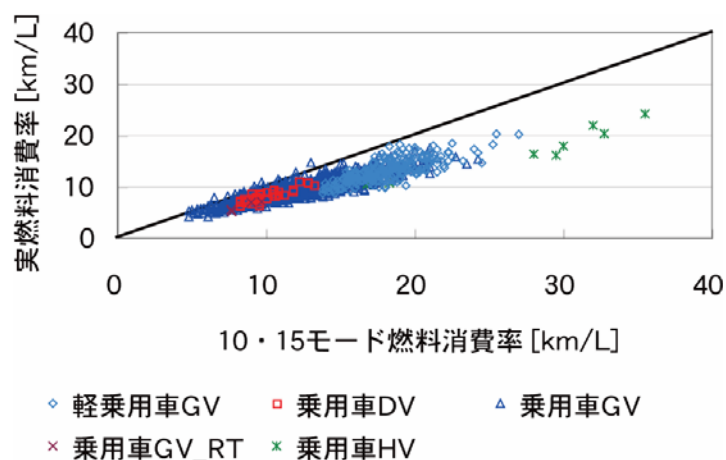
① 10・15モード燃料消費率と実燃料消費率

車両型式別の実燃費を算出した。図Ⅱ-11に、10・15モード燃料消費率 FE_{10-15} [km/L] と実燃料消費率 FE_{actual} [km/L] の関係を示す。また式(AIST4)を用いて FE_{actual} を FE_{10-15} で説明した回帰分析の結果と、式(AIST5)を用いて実燃料消費量 FC_{actual} [L/100km] を10・15モード燃料消費量 FC_{10-15} [L/100km] で説明した回帰分析の結果を、それぞれ表Ⅱ-5、表Ⅱ-6に示す。

$$FE_{actual} = a \times FE_{10-15} + b \quad (4)$$

$$FC_{actual} = c \times FC_{10-15} + d \quad (5)$$

表Ⅱ-5、表Ⅱ-6で、軽乗用車GVの決定係数が他よりも低くなっている。軽自動車メーカは、軽乗用車ユーザのライフスタイルや軽乗用車に対して持つ車としての価値観に応えるために、軽自動車の規格の中で、ハッチバック、ワゴン、クロカンなど様々な車両タイプの乗用車を選択肢として提供しており、10・15モード燃料消費率に幅がある。また軽乗用車規格内でより高いエンジン性能を得るために過給器が搭載されている場合も多く、同じ型式でも過給器の有無によって10・15モード燃料消費率が異なる。このような軽乗用車をめぐる背景に、表Ⅱ-5で軽乗用車GVの



図Ⅱ-11 10・15モード燃料消費率と実燃料消費率

表Ⅱ-5 式(4)の回帰分析の結果 (FE_{actual} と FE_{10-15})

種別	係数 a	係数 b	決定係数	サンプル数
軽乗用車GV	0.743	-0.324	0.59	240
乗用車DV	0.752	0.712	0.73	36
乗用車GV	0.622	1.73	0.83	1,347
乗用車GV_RT	0.939	-1.85	0.91	4
乗用車HV	0.697	-2.18	0.92	8

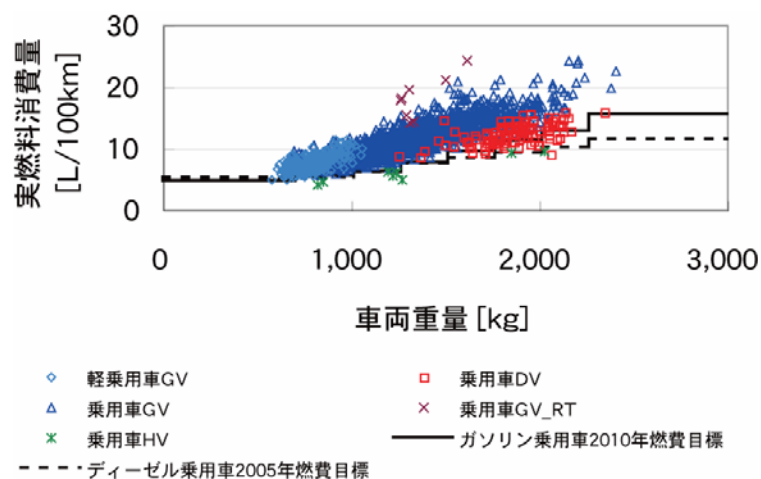
表Ⅱ-6 式(5)の回帰分析の結果 (FC_{actual} と FC_{10-15})

種別	係数 c	係数 d	決定係数	サンプル数
軽乗用車GV	1.50	-0.553	0.61	240
乗用車DV	1.10	1.22	0.67	36
乗用車GV	1.01	2.49	0.82	1,347
乗用車GV_RT	1.87	-5.63	0.91	4
乗用車HV	1.71	-0.246	0.96	8

決定係数が低い一因があると考えられる。

② 車両重量と実燃料消費量

エンジンで消費された燃料は自動車の運動エネルギーに変換されるため、燃料消費量を説明する自動車諸元として車両重量を選択し、車両型式ごとの車両重量 w [kg]と実燃料消費量 FC_{actual} [L/100km]の関係を図Ⅱ-12に示した。図Ⅱ-12で、ガソリン乗用車2010年燃費基準目標値



図Ⅱ-12 車両重量と実燃料消費率

表Ⅱ-7 式(6)の回帰分析の結果 (FC_{actual} と w)

種別	係数 e	係数 f	決定係数	サンプル数
軽乗用車GV	9.09E-3	0.493	0.47	265
乗用車DV	5.10E-3	2.95	0.34	113
乗用車GV	8.43E-3	0.442	0.72	1,628
乗用車GV_RT	2.12E-2	-10.7	0.60	8
乗用車HV	4.64E-3	0.238	0.92	8

（[L/100km]単位）またはディーゼル乗用車2005年燃費基準目標値（[L/100km]単位）よりもプロットが下にあれば、その型式の実燃料消費量も燃費基準目標値を達成していることを意味する。また式(6)で FC_{actual} を w で説明したときの回帰分析の結果を表Ⅱ-7に示す。

$$FC_{actual} = e \times w + f \quad (6)$$

③ ガソリン乗用車のハイブリッド化による実燃料消費量改善率の推計

現在の技術水準で、乗用車GVをハイブリッド化した場合の実燃料消費量改善率を試算する。

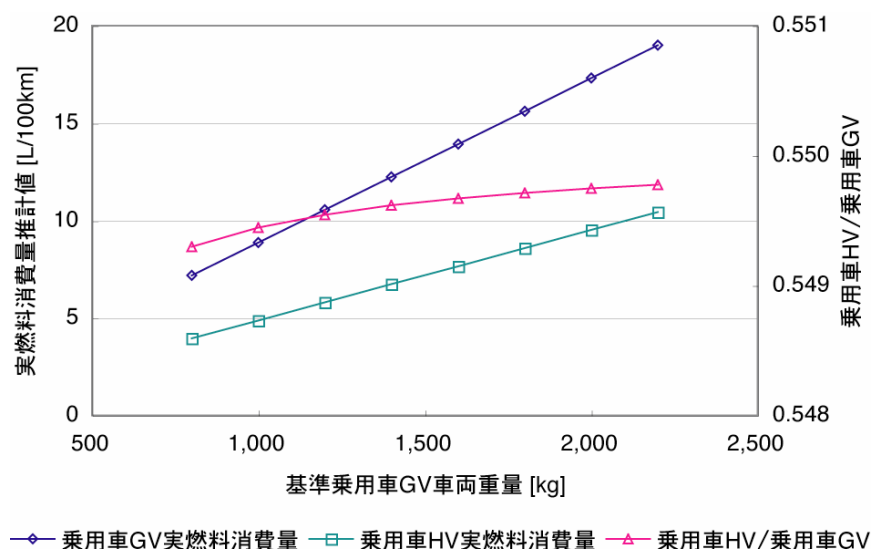
まず、データベースに情報が含まれる8型式の乗用車HVと、自動車として同等の機能を持つと考えられる乗用車GVを、同じ自動車メーカーの中から以下の通り選択した。

- ・ 同じ車名に乗用車GVと乗用車HVがラインナップされている場合、その乗用車GVを選択した。
- ・ 乗用車HVのエンジン型式が乗用車GVに搭載されているエンジンの改良版である場合、改良前のエンジンを搭載する乗用車GVを選択した
- ・ 上記のどちらにも該当しない場合には、最もエンジン排気量が近い、同程度の年式の乗用車GVを選択した。

乗用車HVはハイブリッド機構を搭載しており、乗用車GVよりも車両重量は増加する。そこで、基準とする乗用車GVをハイブリッド化させた場合の車両重量を推計するために、データベースに情報が含まれている乗用車HVと対応する乗用車GVの車両重量をそれぞれ w_{HV} [kg]、 w_{GV} [kg] として、単回帰分析を行った結果を式(AIST7)に示す。

$$w_{HV} = 1.09 \times w_{GV} - 19.4 \quad R^2 = 0.96 \quad (7)$$

最後に、式(6)、表Ⅱ-7および式(7)を用いて試算した、基準とする乗用車GVに対し、自動車としてそれと同等の機能を有する乗用車HVの実燃料消費量を図Ⅱ-13に示す。図Ⅱ-13から、現在の自動車技術では、乗用車GVをハイブリッド化することにより、実燃料消費量は乗用車GV に対して約45%削減できるものと推計される。



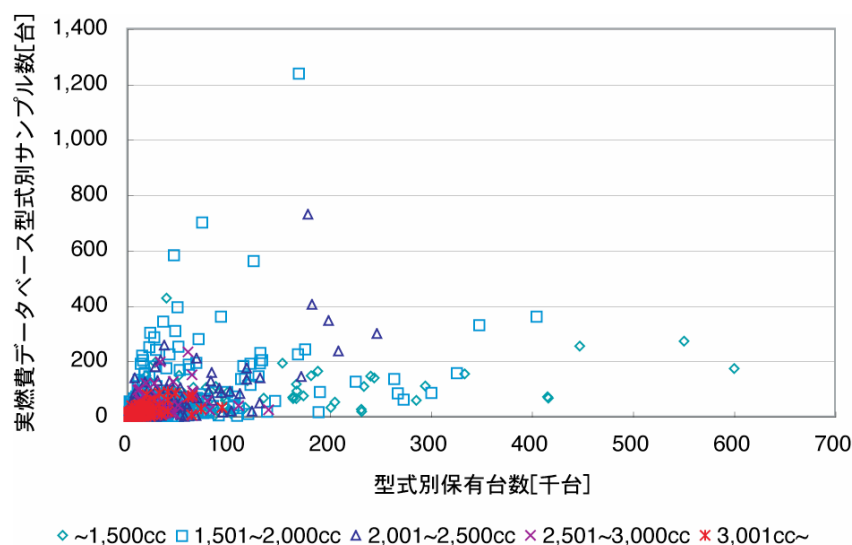
図Ⅱ-13 乗用車GVのハイブリッド化による実燃料消費量向上率

(3) データベースから得られるガソリン乗用車実燃費の妥当性

入手できるデータの制約から、本章ではガソリンを燃料とする乗用車（乗用車GV、乗用車GV_RT、乗用車HV）を対象として、データベースから得られた実燃費の妥当性について述べる。

まず、実燃費データベースから得られるガソリン乗用車実燃料消費量と、統計データから推計される燃料消費量との比較を行った結果を図Ⅱ-14に示す。図Ⅱ-14の「資エネ燃料消費量」ではガソリン消費量にエネルギー生産・需給統計年報／資源・エネルギー統計年報¹³⁾の石油製品消費者向／国内向販売量を、「自輸統燃料消費量」では自動車輸送統計年報⁸⁾の乗用車ガソリン消費量を用い、また両者の走行量は文献⁸⁾の値を用いた。ガソリンは乗用車以外の自動車用燃料としても用いられるため、文献¹³⁾の石油製品消費者向／国内向販売量全体に占めるガソリン乗用車消費分の割合は、文献⁸⁾のそれと等しいものと仮定した。

「資エネ燃料消費量」と「自輸統燃料消費量」とで年度推移の傾向に違いがあるのは、推計に用いた統計値でのガソリン消費量の集計方法の違いに起因するものである。ガソリンは自動車用燃料以外の用途が少ないため、文献¹³⁾の数値の精度は高いと考えられるが、自動車輸送統計調査は自動車輸送の実態を明らかにすることを目的とした標本調査で、自動車燃費を算出するための基礎データとしては適していない可能性がある。しかし現時点では、図Ⅱ-14の「資エネ燃料消費量」と「自輸統燃料消費量」のどちらがガソリン乗用車燃料消費量の実態をより表わしているか



図Ⅱ-15 型式別保有台数と実燃費データベースサンプル数

表Ⅱ-8 平成17年度ガソリン乗用車実燃料消費量推計値

[L/100km]	C1	C2	C3	資エネ	自輸統
全体	11.6	10.7	11.3	10.4	10.4
~1,500cc	8.10	8.42	8.89		
1,501~2,000cc	11.5	10.8	11.6		
2,001~2,500cc	12.7	12.6	13.4		
2,501~3,000cc	14.5	13.9	14.3		
3,001cc~	16.6	15.9	15.8		

注) 「資エネ」、「自輸統」はそれぞれ図8の「資エネ燃料消費量」、「自輸統燃料消費量」を示す。

について、言及することはできない。

データベースから得られるガソリン乗用車実燃料消費量（図Ⅱ-14の「実燃費DB燃料消費量」）は毎年着実に改善しており、2004年度には2000年度比95%の11.6[L/100km]であった。図Ⅱ-14の破線に示したように、この期間の実燃費データベースに含まれるガソリン乗用車全体の平均重量は、1,344[kg]（2000年度）から1,373[kg]（2004年度）と若干(2%)増加している一方で実燃料消費量が減少しているのは、各種燃費向上技術の導入によりガソリン乗用車新車の実燃料消費量が着実に改善されていると同時に、こうした乗用車が徐々に普及しているためであると考えられる。

また図Ⅱ-14で、「実燃費DB燃料消費量」が他の2つの推計値よりも値が大きくなっている一因として、給油ログデータシステムを利用するユーザが保有する車両型式の構成の偏りが挙げられる。図Ⅱ-15に、平成17年3月末現在の型式別保有台数¹⁴⁾のうち、車両型式が乗用車諸元データベースとリンクできたガソリン乗用車39,129,515台と、乗用車実燃費データベースに含まれるその型式のサンプル数の関係を示す。図Ⅱ-15で、型式別保有台数とデータベースサンプル数の相関が高いとはいえない。これは、給油ログデータベースは携帯電話のインターネットサービスにより収集しており、必然的にこのサービスを利用している年齢層や性別の車種選好が強く反映されるためである。

そこで、ガソリン乗用車全体に占める型式別保有割合を考慮し、平成17年度のガソリン乗用車全体および、その排気量別の平均実燃料消費量を推計した。表Ⅱ-8で、C1はデータベースから得られたガソリン乗用車実燃料消費量（図Ⅱ-14の「実燃費データベース燃費」と同じ）、C2は型式別保有台数¹⁴⁾を考慮した上で、各型式の10・15モード燃料消費量を式(5)に適用して算出した場合、C3は型式別保有台数を考慮した上で、各型式の車両重量を式(6)に適用して算出した場合を示す。ここで、各型式の10・15モード燃料消費量および車両重量には、乗用車諸元データベースに含まれるその型式の、最小値と最大値の平均値を採用した。C2全体とC3全体を比較すると、両者のガソリン乗用車実燃料消費量推計値には8%程度の誤差がある。これは、表Ⅱ-6、表Ⅱ-7で、ガソリン乗用車の実燃料消費量を説明する場合に、10・15モード燃料消費量を用いた方が車両重量を用いるよりも決定係数が高いためである。また「資エネ」、「自輸統」の平成17年度ガソリン乗用車実燃料消費量は、表Ⅱ-8のC2全体の97%、C3全体の92%であり、このことから実燃費データベースから得られるガソリン乗用車実燃料消費量は、既存の統計データを用いた推計値と整合性がほぼ取れているといえよう。

また乗用車実燃費データベースを用いることにより、表5でガソリン乗用車の例を示したように、既存の統計データでは不可能であった、パワートレイン・排気量別実燃費の実態を把握することが可能となった。

3. 引用文献

- 1) JHFC総合効率検討特別委員会・財団法人日本自動車研究所：「「JHFC総合効率検討結果」報告書」、平成18年3月
- 2) トヨタ自動車株式会社、みずほ情報総研株式会社：「輸送用燃料のWell-to-Wheel評価 日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書」、平成16年11月
- 3) N. Brinkman, M. Wang, T. Weber and T. Darlington: “Well-to-Wheels Analysis of Advance

Fuel / Vehicle Systems – A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions”, May 2005.

- 4) CONCAWE, EUCAR, JRC: “Well-to-Wheel Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context”, March 2007
- 5) Y. Kudoh, T. Hasegawa, Y. Kondo, K. Matsushashi, Y. Moriguchi, Y. Yoshida, R. Matsushashi and H. Ishitani: “Environmental Impacts of Introducing FCEVs and BEVs within Road Traffic System of Tokyo”, Proceedings of the 21st Worldwide Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, CD-ROM, 2005
- 6) Y. Baba and H. Ishitani: “Well to Wheel Efficiency of Advanced Technology Vehicles in Japanese Conditions”, Presented at EVS20, November 2003
- 7) 長谷川貴彦、吉田好邦、松橋隆治、工藤祐揮: 「燃料電池自動車の設計・評価・不急に関する研究- FCEV走行エネルギー消費算出シミュレータの開発とFCEV購入に関する消費者の選好調査-」、第21回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、pp. 85-88、2005年1月
- 8) 国土交通省総合政策局情報管理部: 各年度自動車輸送統計年報
- 9) 佐川直人、坂口隆洋: 「低燃費車の普及の可能性と自家用乗用車の燃料消費の動向」、第16回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、pp. 545-548、2000年1月
- 10) Y. Kudoh, Y. Kondo, K. Matsushashi, S. Kobayashi, Y. Moriguchi: “Current status of actual fuel-consumptions of petrol-fuelled passenger vehicles in Japan”, Applied Energy, 79, pp. 291-308, 2004
- 11) 工藤祐揮、松橋啓介、森口祐一、近藤美則、小林伸治: 「ガソリン乗用車の実燃費マクロ推計式の構築」、土木学会論文集、793/IV-68、pp. 41-48、2005
- 12) 国土交通省自動車交通局: 自動車排出ガスについて、
<http://www.mlit.go.jp/jidosha/sesaku/environment/osen/osen.htm>、
- 13) 経済産業省政策局調査統計部・経済産業省資源・エネルギー庁資源・燃料部編: 各年エネルギー生産・需給統計年報／資源・エネルギー統計年報
- 14) 財団法人自動車検査登録協会: 平成17年3月末現在市区町村型式別乗用車保有台数

4. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- ① Y. Kudoh, Y. Kondo, K. Matsushashi, S. Kobayashi and Y. Moriguchi: Applied Energy, 79, 291-308, (2004)
“Current status of actual fuel-consumptions of petrol-fuelled passenger vehicles in Japan”
- ② Y. Kudoh, T. Hasegawa, Y. Kondo, K. Matsushashi, Y. Moriguchi, Y. Yoshida, R. Matsushashi and H. Ishitani: Proceedings of the 21st Worldwide Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, (refereed), CD-ROM (2005)
“Environmental Impacts of Introducing FCEVs and BEVs within Road Traffic System of

Tokyo”

- ③ 工藤祐揮、松橋啓介、森口祐一、近藤美則、小林伸治：土木学会論文集、No. 793/IV-68、41-48、(2005)

「ガソリン乗用車の実燃費マクロ推計式の構築」

- ④ Y. Kudoh, K. Matsushashi, Y. Kondo, S. Kobayashi, Y. Moriguchi and H. Yagita: Proceedings of the 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition, (refereed), 393-401, (2006)

“Statistical Analysis of Fuel Consumption of Hybrid Electric Vehicles in Japan”

- ⑤ Y. Kudoh, H. Yagita and A. Inaba: Ecologic Vehicles & Renewable Energies International Exhibition & Conference, (refereed)

“Analysis of Existing Variation in Fuel Consumption of Hybrid Electric Vehicles” (in press, 2007.3.30に発表予定)

<その他誌上発表(査読なし)>

- ①工藤祐揮：環境情報科学、36巻1号、2007年3月

「LCA的視点に基づく代替燃料車の環境評価と地域モビリティ戦略」

(2) 口頭発表(学会)

- ①工藤祐揮、松橋啓介、森口祐一：第23回エネルギー・資源学会研究発表会(大阪 2004.6) 同講演論文集 269-272

「日本におけるガソリン乗用車の実燃費の実態について」

- ②工藤祐揮、長谷川貴彦、近藤美則、松橋啓介、森口祐一、吉田好邦、松橋隆治、石谷久：EVSフォーラム2005(横浜 2005.6) 同講演論文集 148-157

「市区町村の運輸部門CO₂排出量の推計」

- ③工藤祐揮、長谷川貴彦、近藤美則、松橋啓介、森口祐一：第33回環境システム研究論文発表会(札幌 2005.11) 同講演集 263-268

「市区町村の運輸部門CO₂排出量の推計」

- ④工藤祐揮、松橋啓介、小林伸治、森口祐一、八木田浩史：第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(東京 2006.1) 同講演論文集 467-470

「自動車の単体燃費向上による自動車起因のCO₂排出量の将来推計」

- ⑤工藤祐揮、八木田浩史、稲葉敦：第33回土木計画学研究発表会(春大会)(仙台 2006.6) 同講演集

「LCA的視点に基づく移動体エネルギー供給時の環境負荷の考え方- Well to Wheel分析-」

- ⑥工藤祐揮、松橋啓介、近藤美則、小林伸治、森口祐一、八木田浩史：第23回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス(東京 2007.1) 同講演論文集 585-588

「最新のデータに基づく乗用車実走行燃費の実態分析」

Ⅲ．代替燃料スタンド最適整備戦略モデルの開発

代替燃料電池車の大量普及のためには、車両の性能向上と低価格化と並んで、燃料供給インフラの整備を促す必要があり、代替燃料供給スタンドの整備戦略が非常に重要になる。そこで、本研究課題では、代替燃料スタンドの時間的及び地理空間的に最適な立地を明らかにすることを目的に、長期間に渡る自動車の移動再現シミュレータの開発を行った。また、シミュレータを用いて、最も有力と思われる電気自動車に関して、その普及可能性を探った。

代替燃料スタンド最適整備戦略モデルの開発に関する研究では、1 燃料補給期間という長期間での自動車の移動状態を再現するために、ある 1 日の多数の自動車の移動に関する道路交通センサスのデータと、車載型の走行状態計測記録装置を用いて取得する長期間に渡る自動車の移動に関するデータを組み合わせる方法論を開発した。研究に利用可能な長期間に渡る自動車の移動に関するデータが無かったため、独自にプローブ・カー調査を実施してデータを取得し、これを利用している。

モデルによるシミュレーションをもとに、茨城県南地域の主として個人が使用する自家用乗用自動車の 1 ヶ月間の走行シミュレーションを行い、代替燃料スタンドの設置数と 1 燃料補給期間内におけるスタンドへの接近確率の関係を試算した。比較的少量の燃料供給スタンドの設置で普及促進が可能であるとの知見を得た。さらに、開発したシミュレータを用いて、比較的航続距離の短い電気自動車の利用可能性についても試算を行い、自動車を複数保有している世帯で電気自動車の導入可能性が非常に高いことを示した。

〔キーワード〕 自家用乗用自動車、代替燃料自動車、道路交通センサス、プローブ・カー、シミュレーション

1. はじめに

環境面で注目を浴びている代替燃料自動車の大量普及のためには、車両の性能向上と低価格化が必要である。性能の鍵を握る航続距離については、燃料電池車や天然ガス自動車がガソリン車並まで近づいており、市場において十分な需要が見込まれるようになれば、価格も必然的に下がることが予想させる。しかし、実際には全国における代替燃料供給スタンドの数は、電気、エタノール、天然ガス、LPガスの全てを合わせても数百に満たない状況であり（環境省（2005）¹⁾）、航続距離の問題が解消しても現状では代替燃料自動車の普及は見込まれない。代替燃料自動車の普及促進のためには、性能向上と低価格化に加えて、燃料供給インフラの整備を促す必要があり、代替燃料供給スタンドの整備戦略が非常に重要になる。

一方、本研究を進めるうちに、燃料電池車の多くがCO₂の削減という観点からは必ずしも効率的な手段ではなく、むしろ、それ以外の点も含めた環境面での優位性という点で電気自動車が当面の有望な選択肢であるとの見方が研究プロジェクト内で強くなっていった。電気自動車は、自宅での充電も可能なものが開発された結果、供給インフラの未整備な中でも普及の可能性が考えられる反面、現在市販されている電気自動車の価格は、同程度の大きさのガソリン車の約2倍～3倍である。さらに、一回の充電での航続距離はカタログ等に記されている数字で最大でも200km程度であり、実際に市街地を走行する場合にはさらにこれより短くなることを考えると、その性能はガソリン車に比べ著しく劣っている。

2. 研究目的

そこで本研究では、まず、代替燃料スタンドの時間的及び地理空間的に最適な立地戦略に資することを目的として、そのための基礎データを提供し得る、長期間に渡る自動車の移動再現シミュレータの開発を目的とした。

次に本研究では、開発した長期間に渡る自動車の移動再現シミュレータを利用して、日常の自動車移動に支障を及ぼさずに、現行の航続距離程度の性能の電気自動車代替可能な車両がどの程度なのかを推計することとした。

なお、本研究を開始した直後は、代替燃料スタンドの時間的及び地理空間的な最適立地戦略の策定のために、自動車の購入予測モデルの構築も予定していた。しかし前述のとおり、研究の進行中に状況が変化し、自動車の購入予測モデルの作成に代えて、電気自動車の普及可能性を、自動車複数保有世態におけるいわゆるセカンドカーとしての利用可能性という当初予定していなかった観点から検討することとした。

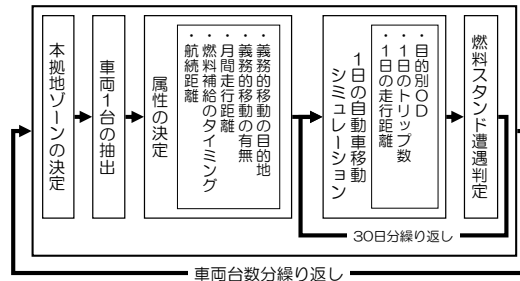
3. 研究方法

（1）研究方法の概要

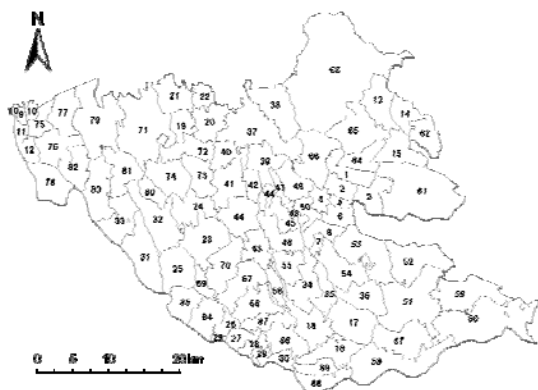
本研究では、まず茨城県南地域を対象に自動車移動に関する特徴を把握しモデル化する。

自動車移動の実態を把握するために、本研究では国土交通省による平成11年度道路交通センサス（正式名称：全国道路街路交通情勢調査）のデータを使用する。これは、平日・休日のそれぞれある一日の自動車移動に関して、多数のサンプルを有しているという特徴を持つ。しかし、代替燃料自動車の普及を探る上では、同時に、長期間に渡っての自動車移動の実態を把握する必要がある。そこで、本研究では、セイフティ・レコーダ(SR)を被験者の自動車に搭載し

て、長期に渡る自動車移動の実態を独自に調査し、センサスとSR両方のデータをもとに自動車移動トリップのパターンや走行距離分布等の傾向を分析し、モデル化する。（具体的なモデル化のための分析については、4. で説明する。）



(2) 対象地域



具体的な分析の単位としては、道路交通センサスのBゾーンよりも細かい、東京都市圏パーソントリップ(PT)調査小ゾーンを用いることにした（図Ⅲ-3）。

（3）使用するデータ

本研究では、1日の交通行動を把握するために道路交通センサスのオーナーインタビューOD調査を用いた。また、長期間の交通行動を把握するためにセイフティ・レコーダ(SR)からのプローブデータ、特にGPS計測による移動軌跡のデータを用いた。また、対象地域における自動車保有台数は市町村ごとの自家用乗用車保有台数のデータ（「茨城県統計情報ネットワーク統計からみた茨城県のすがた 市町村早わかり」 <http://www.pref.ibaraki.jp/tokei/sugata/haya18/index.htm> による）を用いた。

なお、具体的な分析の単位として東京都市圏PT調査小ゾーンを用いるため、道路交通センサスのBゾーン単位のOD表を、交通発生・集中量をあらわす指標としてよく用いられている人口比率を用いて、フレーター法により細分化したゾーンに対応するOD表を作成した。

対象とする茨城県南地域の道路交通センサスの中での自家用乗用車の個人使用車台数等の概要は表Ⅲ-1, 2に示すとおりである。平日休日ともに、約80%が就業者、約20%が非就業者の車両であった。

表Ⅲ-1 対象車種の概要（自家用車個人使用・平日）

平日

台数：台 実働率：%

調査票種別	車両台数	運行台数	運休台数	実働率
自家用乗用車個人使用	6801	4768	2033	70.1
就業者		3963		
非就業者		805		

表Ⅲ-2 対象車種の概要（自家用車個人使用・休日）

休日

台数：台 実働率：%

調査票種別	車両台数	運行台数	運休台数	実働率
自家用乗用車個人使用	6888	4011	2877	58.2
就業者		3365		
非就業者		646		

一方、プローブ・カー調査は、まず始めに、つくば市近辺に居住する17台の自動車に関して、1～3ヶ月程度の間、SRを登載してその走行軌跡に関するデータを取得した。

次に、同様につくば市に居住する、自動車を2台以上保有している7世帯に17台の自動車に関して、1～3ヶ月程度の走行データを取得した。

その詳細については、前者はTsutsumi *et al.*(2005)、後者は宮坂他（2007）にそれぞれ記している。

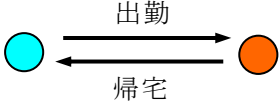
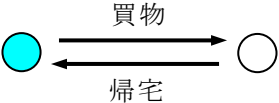
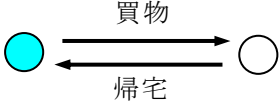
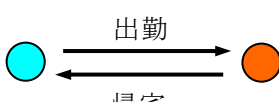
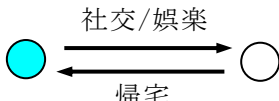
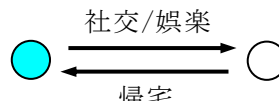
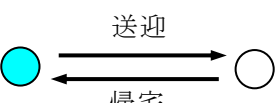
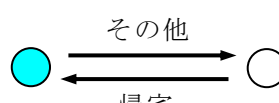
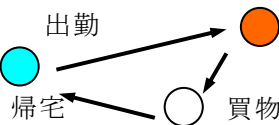
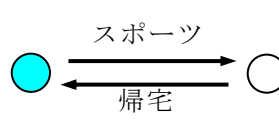
4. 自動車移動の実態に関する分析の概要




(1) 道路交通センサスに基づく自動車移動と保有の実態

本研究では、道路交通センサスのデータをもとに、平日・休日のそれぞれについて、トリップパターン及び一日のトリップ数、一日の走行距離、一ヶ月の走行距離分布を分析している。紙面の制約により、以下にはその一部のみを掲載することとする。詳しくは、Tsutsumi *et al.*(2005)を参照されたい。

①トリップパターン

表Ⅲ-3 道路交通センサスに基づく主要トリップパターンの分類(全体)

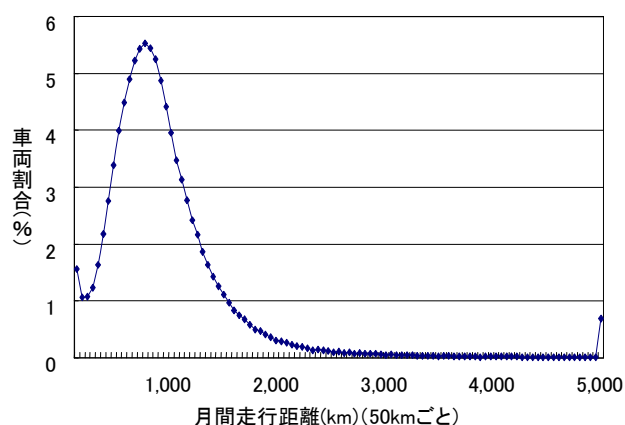
順位	平日	割合	休日	割合
1		46.0% (2193)		24.2% (971)
2		8.2% (393)		9.4% (376)
3		4.4% (208)		9.0% (362)
4		2.0% (93)		3.7% (150)
5		1.7% (83)		3.3% (113)

 : 自宅
 : 会社
 : その他
 平日 : 4768台 休日 : 4011台

表Ⅲ-3は、自家用乗用車の個人使用車において、1日のトリップパターンの集計した結果である。平日の全体では、運行車両の46%が通勤・帰宅の2トリップであった。全トリップパターンの内、出勤・登校の義務的な交通を含むトリップパターンは約65%に及ぶ。一方、休日では、買物・帰宅という2トリップのトリップパターンが24.2%を占めるが、買物を含むトリップパターンは休日において約50%に及び、他の目的と連鎖して買物行動が行われていることが考えられる。

②月間走行距離分布

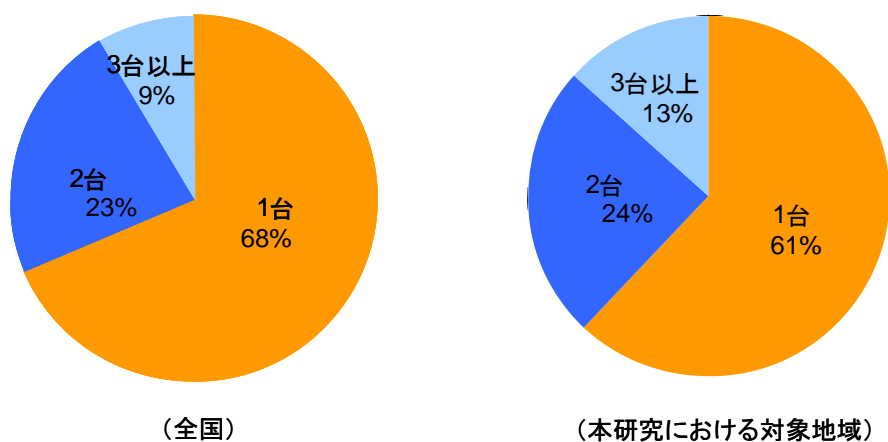
長期間の走行距離分布については、道路交通センサスの初度登録年月から各自動車保有期間を月単位で求め、それを総走行メーターの値から割ることで、月間走行距離とした。その結果は図Ⅲ-4に示すとおりである。



図Ⅲ-4 道路交通センサに基づく月間走行距離の分布

③世帯の自動車保有に関する分析

道路交通センサをもとに、世帯の自動車保有台数を計算した(図Ⅲ-5)。全国で見ると、複数保有世帯の割合が3割を超え、乗用車平均保有台数は1.42台となっている。対象地域である茨城県南地域では、その割合はさらに高くなっており、特に3台以上保有している世帯が全国に比べて多く、自動車依存度の高さがうかがえる。実際、対象地域内の筑西市では、世帯あたり保有台数が1.934台と全国でも2番目に高い数字を記録しており、全国でも自動車複数保有化が進んでいる地域の一つであるいえよう。

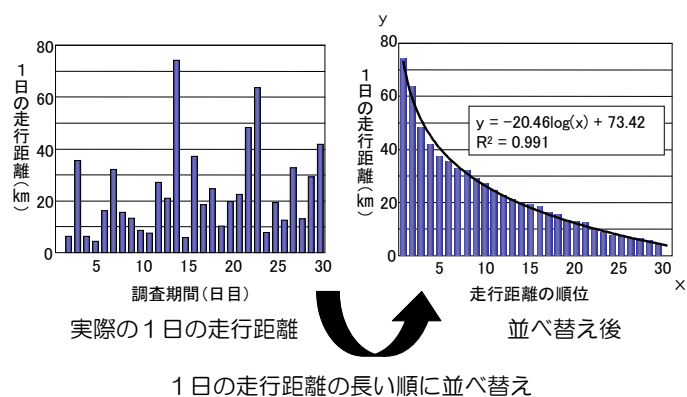


図Ⅲ-5 道路交通センサに基づく保有台数別世帯数の割合

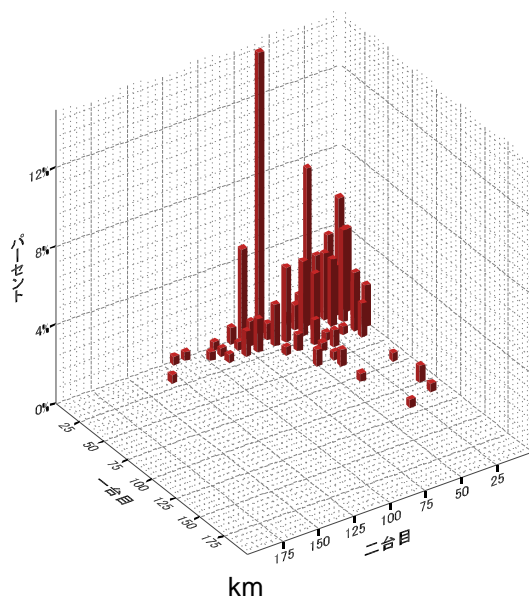
複数保有世帯におけるいわゆるセカンドカーは比較的短いトリップに利用されることが多い。従って、この結果からも、航続距離が短い電気自動車のある程度の潜在需要が示唆される。

(2) プローブ・カー調査に基づく自動車移動実態の概要

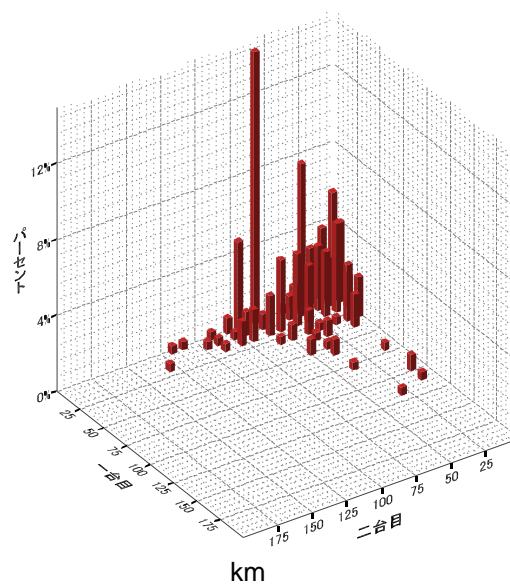
①プローブ・カー調査で得られたデータについても、道路交通センサと同様の分析を行った。図Ⅲ-6には、ある一台の車の毎日の走行距離を示している。これをもとに、30日分間の走行距離は、図Ⅲ-6の右に示すような関係のモデル式を用いて再現を行うこととした。



図Ⅲ-6 プローブ・カー調査に基づく毎日の走行距離とモデル化の考え方



図Ⅲ-7 世帯内の2台の車の
一日の走行距離の分布（平日）（5kmごと）

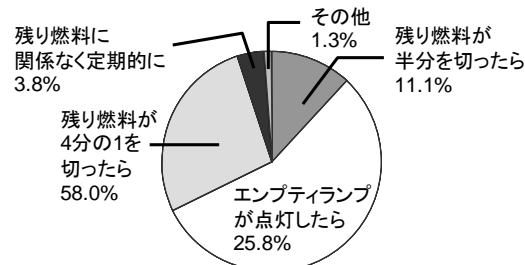


図Ⅲ-8 世帯内の2台の車の
一日の走行距離の分布（休日）（5kmごと）

本研究では、複数保有世帯内のそれぞれの自動車がどのような動きを行っているかを、プローブ・カー調査によって明らかにしている。図Ⅲ-7, 8には、2台の自動車を保有する世帯における各車両の走行一日の走行距離の組み合わせを示している。本研究では、運転者によって個々の自動車の区別を行っており、世帯主が使用する自動車を一台目と定義し、配偶者又はその他の者が使用する自動車を二台目としている。明らかに、世帯内の2台の自動車は独立に走行しておらず、利用に関して影響を及ぼし合っていることが分かる。

(3) 燃料補給のタイミング

燃料補給タイミングについては、筆者らのグループで17年7月に独自に行った「つくばエクスプレス開業前交通実態調査」の中に自動車の燃料補給に関する質問を設け、927世帯計1,539台から有効回答を得た。その結果、約95%の自動車が燃料の残量を目安に燃料補給を行っていることなどが分かった（図Ⅲ-9）。



図Ⅲ-9 燃料補給のタイミング

5. シミュレータの構築

(1) シミュレーション概要

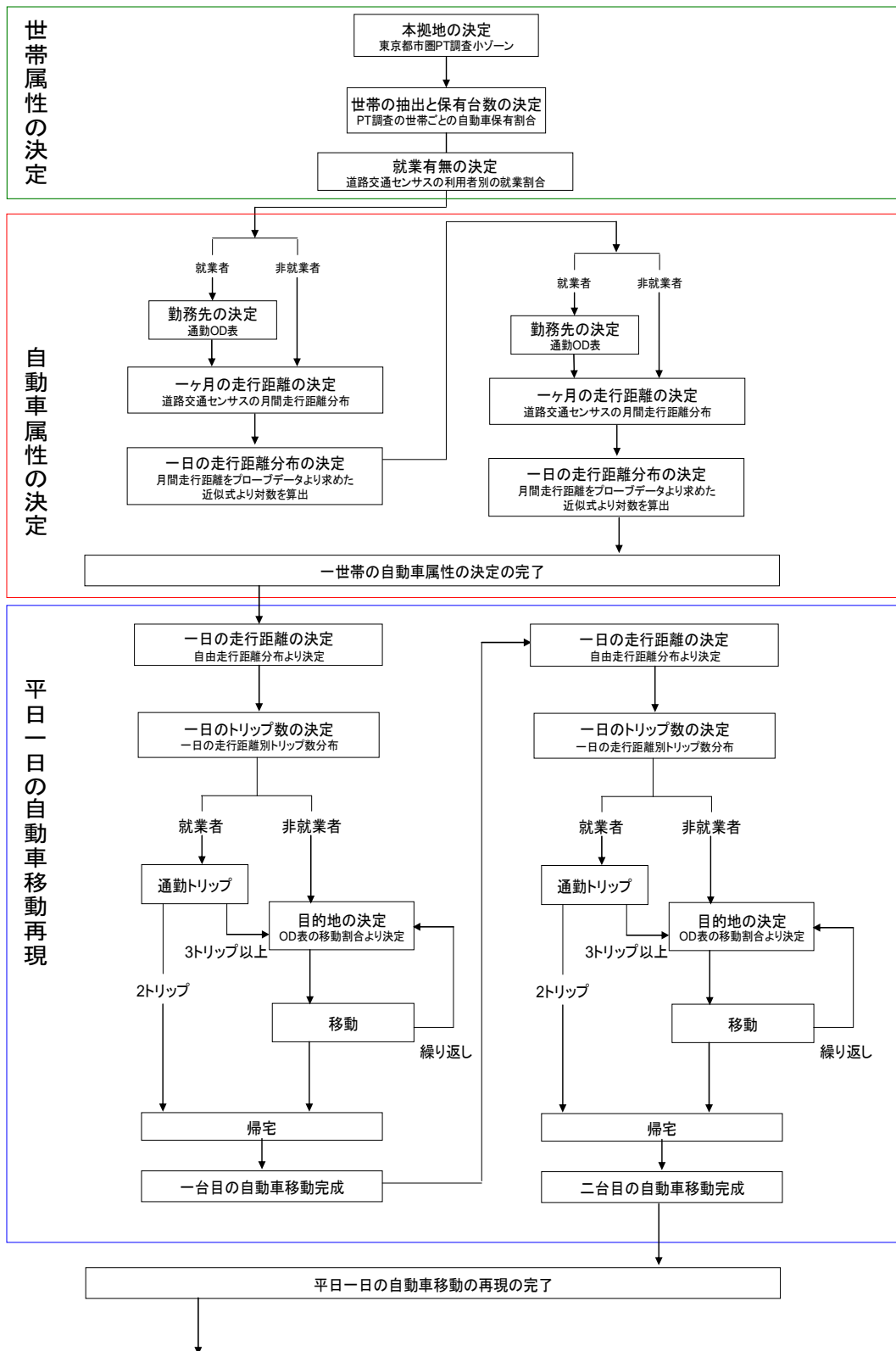
まず、ゾーンごとの自動車保有台数割合に応じて再現を行う自動車の本拠地のゾーンを決定し、そこを本拠地とする自動車を1台抽出する。

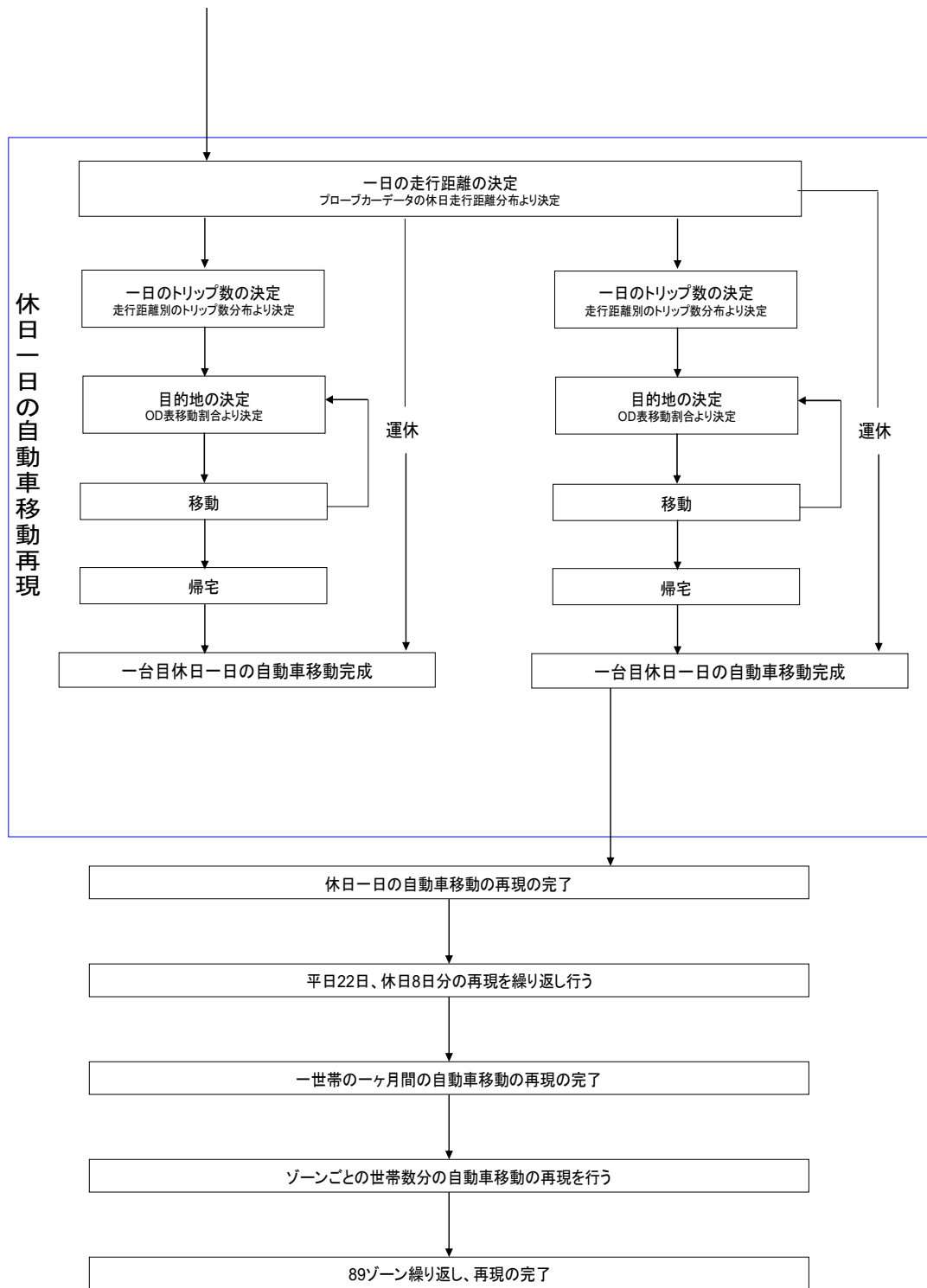
次にその自動車の属性を決定する。属性には、自動車の航続距離、燃料補給のタイミング、義務的移動の有無とその目的地、そして月間走行距離と、それに基づく1日ごとの走行距離分布がある。それらはすべて、4. で述べた分析結果をもとにモデル化されたものである。

属性を決定した後1日の自動車移動の再現を行う。1日の走行距離やトリップ数を決定し、それらやOD表からの目的地選択確率に従うように移動を再現する。また同時に、代替燃料スタンドの配置に関する分析のために、その自動車が代替燃料スタンドを配置したゾーンを通った回数をカウントしていく。

こうしてある1台のある1日の自動車移動の再現が完了する。1日の自動車移動の再現が完了したら、これを30日分繰り返し、これで1台の長期間の自動車移動の再現が完了する。これを、そのゾーンを本拠地とする自動車台数分繰り返し、さらにこれをゾーン数分繰り返すことで、対象地域内の全自動車の長期間の移動の再現が完了する。

世帯内に複数の自動車がある場合にも、一日ごとに、同様に2台目について移動を再現する。その際、図Ⅲ-5,6 の関係をモデル化したものを用いることで、1台目の走行再現結果が2台目の走行再現に影響を及ぼすようにしている。





図Ⅲ-10 長期間の自動車移動再現手順の詳細（複数保有世帯の場合）

図Ⅲ-10には、このような手順の詳細について示している。この図は複数保有世帯の場合であるが、世帯が1台のみの車両を有する場合は、2台目の再現手順をスキップしたものとなっている。

本研究の対象地域内における自家用乗用車の総数は738,999台であり、この全台数に関して上述の再現を実施する。走行距離やトリップ数の決定などは、すべて、4. で説明したような分析結果に基づく確率分布に従ってランダムに行うこととする。その際、擬似乱数を用いているが、本研究では多くの変数を扱い、70万台以上の自動車の移動再現を行うため、生成速度が速く、長い周期を持ち、なおかつ高次元均等分布を持つという特徴を備えた、**Mersenne Twister** を用いている。

(2) 代替燃料スタンド遭遇判定

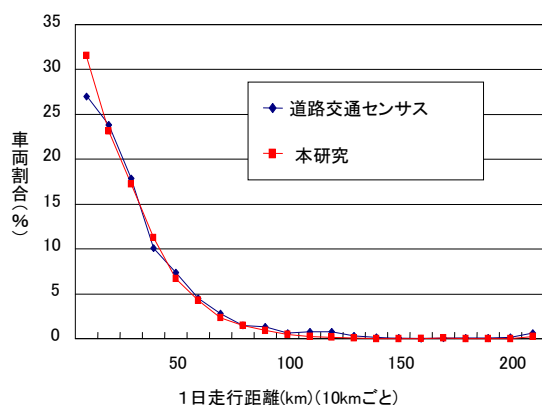
シミュレーションにおいて、自動車移動を行うごとに走行した距離を航続距離から減算していき、航続距離の残り割合が、図Ⅲ-9の割合に従って割り当てられた燃料補給のタイミングにさしかかった時点から燃料がなくなるまでの間の走行において、代替燃料スタンドが配置されたゾーンを走行した場合を、代替燃料スタンドへの「遭遇」とみなすこととする。

6. シミュレーション結果

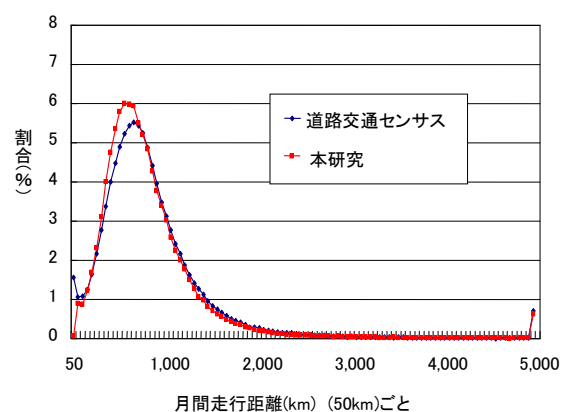
(1) 再現性の検証

①月間および1日の走行距離

上記の手順で長期間の自動車移動再現シミュレーションを行った結果について、1日及び1ヶ月走行距離分布を、道路交通センサスと比べたのが図Ⅲ-11,12である。どちらも良好な結果が得られていることがわかる。(なお、この再現は、世帯内の自動車保有台数を考慮する前の結果であり、各車両が独立に走行すると仮定した結果に基づくものである。次の②も同様。)



図Ⅲ-11 一日の走行距離分布の比較

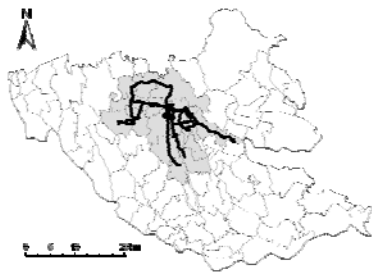


図Ⅲ-12 一ヶ月の走行距離分布の比較

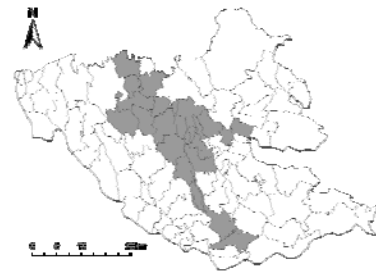
②空間分布の比較

本研究では、実際の自動車の走行範囲とシミュレーション上の仮想自動車の走行範囲を定量的に比較する方法を提案している。手順は、まず、SRより実際の自動車の走行範囲を求める(図Ⅲ-13)、この自動車と本拠地および義務的移動の目的地が同一の自動車を、シミュレーション

結果から抽出する(図Ⅲ-14)。次に表Ⅲ-4に示す値を計測する。これらの値を用いてC/A、C/Bを求めると、



図Ⅲ-13：SRから得られた実際の自動車の走行軌跡の一例



図Ⅲ-14シミュレーション上の自動車の走行範囲の一例

表Ⅲ-4：空間分布の比較に用いる値

A	実際の自動車が走行したゾーン数
B	シミュレーション上の自動車が走行したゾーン数
C	どちらの自動車も走行したゾーン数

表Ⅲ-5：空間分布の比較に用いる値のとり範囲

指標	$\frac{C}{A}$	$\frac{C}{B}$
空間分布イメージ		
	$0 < \frac{C}{A} < 1$	$0 < \frac{C}{B} < 1$
	1	$0 < \frac{C}{B} < 1$
	$0 < \frac{C}{A} < 1$	1
	1	1

2つの値はそれぞれ、実際の自動車移動とシミュレーション結果が完全に一致した場合に1をとり、当てはまりが悪くなるほど0に近づいていく(表Ⅲ-5)。本研究では、この2つの値を用いて空間分布の比較を行っている。その結果を表Ⅲ-6に示す。C/A、C/Bともに1に近い値をとった割合は少ない。しかし、逆にどちらの値も極端に0に近い値をとった割合もほとんどなく、この点から見るとある程度良好なシミュレーション結果が得られたと言えよう。ただし、C/Aと比較してC/Bの方がやや値が低い傾向が見られており、これはすなわち $A < B$ を意味している。Aは実際の自動車の走行範囲、Bはシミュレーション上の仮想自動車の走行範囲であるから、シミュレーションでは走行範囲を過大に推計しやすいことが分かる。

$\frac{C}{B}$	$\frac{C}{A}$				
1.0	0.71%	0.89%	0.68%	0.18%	0.01%
0.8	0.19%	2.91%	7.36%	5.43%	1.55%
0.6	0.19%	2.57%	15.33%	26.24%	9.71%
0.4	0.08%	0.53%	3.29%	8.34%	12.18%
0.2	0.01%	0.02%	0.00%	0.23%	1.37%
0.0					

表Ⅲ-6：空間分布比較結果

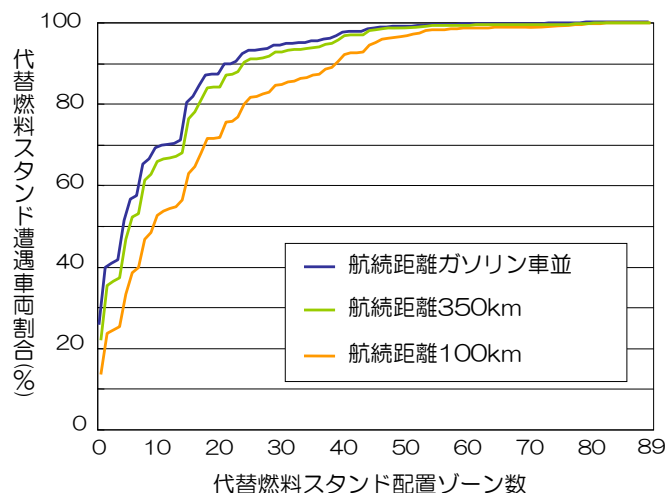
7. 結果・考察

(1) 代替燃料スタンド配置に関するシミュレーション結果と考察

開発したシミュレータを用いて代替燃料スタンドの配置に関する分析を行った。また、遭遇のシミュレーションにおいて大きな影響を与えると考えられる航続距離については、本研究では既存のガソリン車並、天然ガス自動車並、電気自動車並の3種類の航続距離を設定した。ガソリン車並の航続距離はカタログなどから軽自動車、小型自動車普通自動車ごとに平均航続距離を求め、それらの車種ごとに航続距離を割り当てた。天然ガス自動車、電気自動車については、それぞれ350km、100kmと設定した。

これらの設定をもとに代替燃料スタンドに遭遇できる車両の割合を求めた。その結果、既存のガソリン車並の航続距離を設定した場合は、交通量の多い順からの配置の場合は89ゾーン中23ゾーンに配置すれば約90%の自動車が代替燃料スタンドに遭遇できるという結果になった

(図Ⅲ-15)。航続距離350km(天然ガス自動車並)の場合もガソリン車並の航続距離の場合とほぼ同じ結果になった。しかし、航続距離100km(電気自動車並)の場合には、かなり代替燃料スタンドに遭遇する車両の割合は低くなっている。遭遇の割合が90%を超えるのは、交通量を考慮して配置した場合でも39ゾーンと、およそ2つのゾーンに1つは代替燃料スタンドを配置しないとならないということが分かった。



図Ⅲ-15 代替燃料スタンドの配置ゾーン数と自動車のスタンド遭遇割合の関係

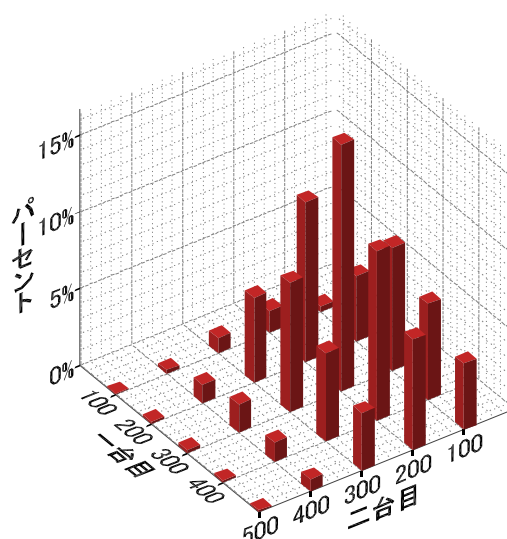
(2) 電気自動車の普及可能性に関するシミュレーション結果と考察

① 現行の自動車利用下における電気自動車の普及可能性

現状における自動車複数保有世帯の自動車利用実態において、電気自動車への代替がどの程度可能であるか考察する。電気自動車の航続距離は、市街地で走行を行う場合、カタログにおける航続距離の50%程度であるということが林田ら(1994)によって指摘されている。そこで、本研究では100kmを電気自動車の航続距離と想定する。図Ⅲ-16は、1台目・2台目それぞれの最長の走行距離を100km単位に区切って表したものである。世帯内のどちらの自動車も100km以内の走行しか行わなかった世帯は0.5%ほどしかなく、残りのほぼ全ての世帯で、少なくともどちら

らか1台は一ヶ月内に100km以上の走行距離を走行しているということになる。しかし、世帯内におけるどちらかの自動車は100km以内である割合はも2.1%であることから、現在の利用状況下でも約3分の1の世帯において電気自動車への転換が可能と考えられる。特に、本研究で定義した2台目、すなわち世帯主以外が主として利用する車において、100km以内の走行に限られている自動車が多い。具体的には、2台目の全車両のうち20%以上が100km以内に限定されているおり、いわゆるセカンドカーが短距離の移動に用られている傾向を確認できる。

なお、1日の走行距離が2台とも100kmを超える世帯において、そのうちの6割の世帯ではどちらかの自動車は200km以下の走行距離になっていることから、もし、電気自動車の航続距離がカタログに示されている数字そのものであれば、70%近い世帯において代替が可能であることが分かる。



図Ⅲ-16 車両を2台保有する世帯における一月の最長走行距離（100kmごと）

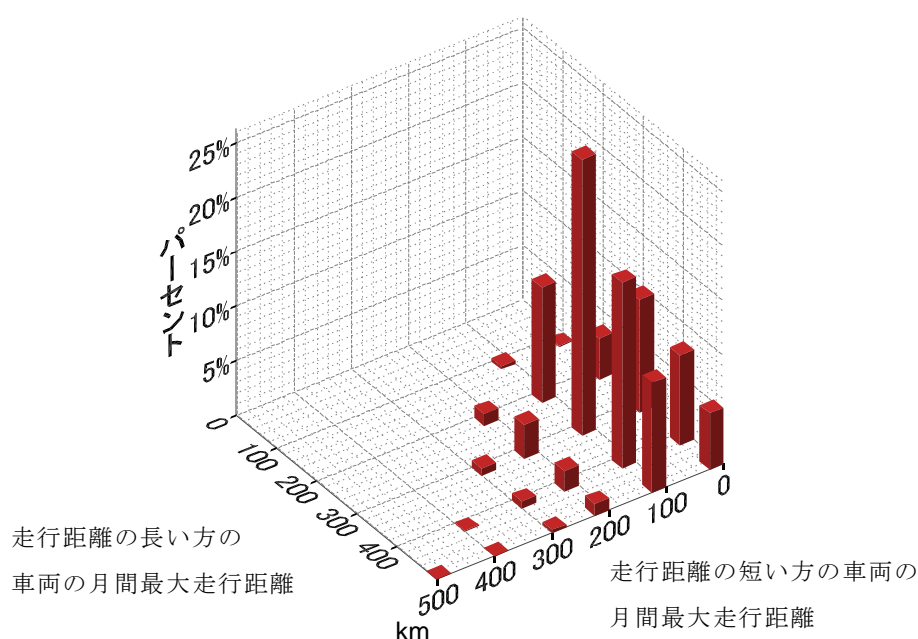
表Ⅲ-7 シミュレーションに基づく車両を2台保有する世帯における電気自動車への代替可能性

代替可能世帯		代替不可世帯	
(2台100km以下)	(1台100km以下)	(1台は200km以下)	(2台とも200km以上)
0.03%	32.1%	41.2%	26.4%
(500台)	(44,497台)	(59,284台)	(38,957台)

②世帯内利用調整についての考察

分析の結果、自動車を2台保有している世帯においては、長期間で両方の自動車が必ずしも長い距離を走っているわけではなく、その日の行動によって走行距離の長い車両が入れ替わることが分かった。そして、1ヶ月間の中で走行距離が100kmを超える利用はあっても、同じ日に2台両方が100kmを超えて走行することはほとんどなく、もう1台は、運休もしくは短距離の行動しか行っていないことが分かった。

そこで、世帯において走行距離や目的に応じて自動車を使い分ける、具体的には、2台のうち一方を長い距離の走行用に使うという世帯内での自動車の利用調整を行えば、電気自動車の航続距離で問題を生じる日がほとんどないと推測される。このことを定量的に確認するために、一ヶ月の間の世帯内の各車両の最長距離が100kmを超えている世帯に関して、このような利用調整を行った上での各車両の月間最大走行距離を計算した（図Ⅲ-17）。図Ⅲ-17において、走行距離の短い方の車両の月間最大走行距離が100km以下であれば、この車は、現在の航続距離性能下でも電気自動車に代替することが十分可能であるといえる。同日に2台の自動車が100km以上を走行している割合は10%未満に過ぎず、世帯内利用調整を用いることで91.2%もの世帯において電気自動車の導入が可能になることが分かった。



図Ⅲ-17 再現における世帯内の2台の月間最大走行距離分布（100kmごと）

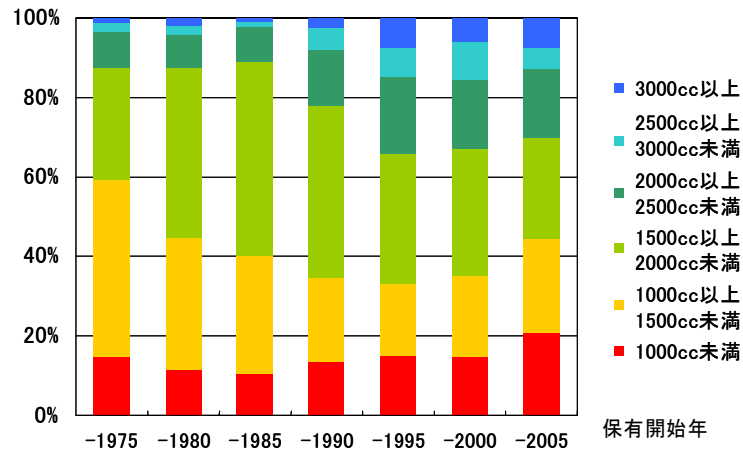
表Ⅲ-8 世帯内利用調整を用いた場合の電気自動車への代替可能性

代替可能世帯	代替不可世帯
どちらか1台の 走行距離が100km以下	2台とも100km以上
91.4% (131,790台)	8.6% (12,365台)

③電気自動車の潜在需要についての考察

本研究では、ガソリンの給油タイミングと一緒に、自動車の過去の購買履歴についても調査を行った。1,072世帯から有効回答を得ることができ、過去保有・現在保有合計で3,214台の自動車に関する回答を得た。配布に関して、多少の地域的な偏り等の問題があるが、これから大まかな自動車保有動向をうかがい知ることができると考える。

自動車ごとの保有開始時期を調べることで、それぞれの時期において購入した自動車の排気量の分布を整理したのが図Ⅲ-18である。これから、近年、軽自動車の割合が高くなっていることがわかる。一方で、排気量3,000cc以上の大きい自動車の割合も1990年～1995年頃を境に大きく上がっており、自動車の購入において、比較的排気量の大きい車と軽自動車との二極化の傾向が見られる。



図Ⅲ-18 保有開始年別排気量の推移

このように、軽自動車の購入割合が増えていることから、本研究で試算したように、電気自動車の潜在的な需要は十分にあるものと考えられる。

8. 本研究により得られた成果

代替燃料電池車の大量普及のためには、車両の性能向上と低価格化と並んで、燃料供給インフラの整備を促す必要があり、代替燃料供給スタンドの整備戦略が非常に重要になる。そこで、本研究課題では、代替燃料スタンドの時間的及び地理空間的に最適な立地を明らかにするために、自動車の移動再現シミュレータの開発を行った。ここで、代替燃料スタンド最適整備戦略モデルの開発に関する研究では、1燃料補給期間という長期間での自動車の移動状態を再現する必要があるため、ある1日の多数の自動車の移動に関するデータである道路交通センサスのデータと、車載型の走行状態計測記録装置を用いて取得する長期間に渡る自動車の移動に関する独自の調査データを組み合わせ、長期間の自動車移動を再現する方法論を開発した。

モデルによるシミュレーションをもとに、茨城県南地域の主として個人が使用する自家用乗用自動車の1ヶ月間の走行シミュレーションを行い、代替燃料スタンドの設置数と1燃料補給期間内におけるスタンドの存在するゾーンの通過確率の関係を試算した。その結果、既存のガソリン車並の航続距離を設定した場合は、交通量の多い順からの配置の場合は89ゾーン中23ゾーンに配置すれば約90%の自動車が代替燃料スタンドに遭遇できるという結果となった。長距離の行楽時の移動等における問題や、実際に過度な混雑を避けるために必要なスタンド数については別途検討しなければならない、現在はゾーン単位でのみ分析を行っている等、まだ精査すべき事項はあるものの、現在のガソリン車並の航続距離の車両であれば、供給スタンドの問題はさほど深刻ではないと考えられる。しかし、市街地での航続距離が100km程度と言われている

る電気自動車に関する同様の計算によれば、スタンド遭遇割合が90%を超えるためには、89ゾーン中39ゾーンにおいてスタンドの設置が必要であることが分かった。

電気自動車には、家庭での充電可能なタイプも開発されるなど、供給スタンドの配置を待たなくても済むという大きな利点がある。そこで、本研究では、電気自動車の航続距離を100km程度とした場合に、実際の程度の車両を電気自動車に代替可能かについてシミュレータを用いて試算した。

本研究では、対象地域内で自動車を複数保有する世帯を対象に計算を行った結果、現在の自動車利用を全く変えることなく電気自動車への代替が可能な世帯は32.1%と推計された。これをもとに全国の乗用車保有台数に換算すると、約380万台の自動車が電気自動車へ代替しても問題がないことになる。さらに、世帯内で目的や距離によって自動車を使い分けることを行えば、電気自動車への代替が可能な複数保有世帯は91.4%と推計された。全国の乗用車の台数で考えれば、約1,100万台もの車両が電気自動車によって代替可能であることとなる。

9. 参考文献

1) 環境省 低公害車ガイドブック2005

(<http://www.env.go.jp/air/car/vehicles2004/htm/frame-1.htm>)

2) 林田守正・成澤和幸：「電気自動車の通勤車両としての適合性について」，日本機械学会第3回交通・物流部門大会．講演論文集，p. 91-94，1994.

10. 国際共同研究等の状況

記載すべき事項はない。

11. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

① Morito Tsutsumi, Haruo Ishida, Naohisa Okamoto, Yoshio Sekine: Long Term Simulation of Family Car Trips for the Allocation of Alternative Fuel Stations, Electronic Proceedings of ICHIT (International Conference on Hybrid Information Technology) Special Sessions: ITS Modelling and Analysis 1, 2006.

(2) 口頭発表（学会）

① Morito Tsutsumi, Haruo Ishida, Naohisa Okamoto and Kosei Suzuki : Modeling Car Trips towards Strategic Allocation of Alternative Fuel Stations, , presented at the 85th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C. January 22-26, 2006 (Compendium of Papers CD-ROM, 06-2631).

② 石田東生・堤盛人・岡本直久・関根喜雄：自家用自動車の長期間移動再現シミュレータを用いた代替燃料スタンド配置に関する研究，『土木計画学研究・講演集』，Vol.34，(CD-ROM 講演番号：98)，2006.

③ 上記(1)①を、2006年9月10日・11日に韓国・済州島で開催された、ICHIT (International Conference on Hybrid Information Technology) 2006 にて 発表した。

④ 宮坂準・関根喜雄・石田東生・堤盛人・岡本直久：「プローブ調査を用いた自動車複数保有世帯における電気自動車の潜在需要に関する考察」土木計画学研究・講演集』, Vol.35, (CD-ROM), 2007. (概要提出済み。本年6月発表予定。)

(3) 出願特許

なし。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし。

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし。

1 2. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、自動車会社との情報交換等の場を設けて成果の広報ができるように努めたい。

IV. 2020年から2050における自動車の燃費向上とCO₂削減の到達予測

2030年から2050年に向けた自動車における燃費改善とCO₂削減のための技術的方策を探った。2030年から2050年の時点で、自動車用の原動機としては、燃費が改善されたエンジン（火花点火エンジンと圧縮着火エンジン）が用いられ、それには依然として炭化水素系液体燃料が利用されるものと予想される。エンジンと液体燃料の組合せは、パワー密度とエネルギー密度の両面で自動車にとって極めて優れた特性を有しており、今後とも超低排出ガス化を前提にメカニズムと制御方式の高度化により、一層の燃費改善が見込まれる。燃料としては、石油系燃料に加えてバイオマス系等の再生可能な燃料も併用される。具体的には、火花点火エンジンでは、ガソリン、バイオエタノール、ETBE（エチルターシャリブチルエーテル）、圧縮着火エンジンでは、軽油、バイオエタノールが使われる。また、幅広いバイオマス系の原料をガス化して合成するBTL（Biomass-to-Liquid）もオクタン価（耐ノッキング性）やセタン価（圧縮着火性）を調整した上で、両エンジンに使われるものと予想される。これらのバイオマス系燃料は従来の石油系燃料と任意の割合で混合して利用でき、既存のエンジン技術と輸送・貯蔵・供給のインフラ技術の対応にもほとんど問題がなく、長期的な燃料転換を漸次図っていく上で極めて好ましい特性といえる。さらに、これらのエンジン車はハイブリッド化により50%から150%の燃費改善が可能である。

また、電気自動車も普及するものと予想され、それには、パワー密度、エネルギー密度、急速充電特性、信頼耐久性を含めたりチウムイオン等の高性能化が課題となっているが、それが達成されれば、従来車に比べて小型化を前提にCO₂の排出は70%から80%程度削減されるものと予想される。電気自動車は短距離走行に適性があり、小型車として市街地での移動の利用のあり方を含めて普及を図る必要がある。また充電に当たっては、夜間充電を主体とし、その電源構成の低炭素化（原子力と再生可能エネルギーの割合の増大）によって一層のCO₂削減が図られることになる。

なお、燃料電池自動車の普及については、耐久性の確保と低コスト化はもとより、燃料となる低炭素系の水素の供給源に大きく依存するので、その面での具体的な検討が必要である。

さらに車両の軽量化は、あらゆる車種において燃費改善に大きく寄与し、それには、超張力鋼、軽金属、樹脂等の活用を図る必要がある。これによって、30%から40%の軽量化が図られることで20%から30%の改善をもたらす効果がある。軽量化は安全性と相反する側面を持っているが、それは先進的な安全車両技術の開発ニーズの動機付けを与えるものである。

[キーワード] 燃費改善，ハイブリッド車，バイオマス燃料，電気自動車，燃料電池車，軽量化

1. はじめに

自動車は運輸交通に占める役割は極めて大きく、今後とも移動と輸送に関わる主要な手段として長期にわたり広く利用され続けるものと予想される。現在わが国では、石油製品の約4割が自動車用燃料として利用され、輸送部門で排出されるCO₂の全体の2割を占め、そのうちの9割近くが自動車から排出されているのが実情である。

したがって、運輸部門における大幅な燃費の改善とCO₂の削減を図るためには、

- ① 従来のエンジン車の燃費改善
- ② それを超える新たな動力システムや新燃料の導入
- ③ 自動車利用のあり方の転換

を図る必要がある。ここでは、前二者の技術を対象に、2030年から2050年にわたる将来のCO₂削減の可能性を考察する。

2. 研究目的

わが国における運輸部門からのCO₂排出量は全体の約2割を占めているのが現状であり、2030年から2050年の長期にわたって石油系燃料の消費を技術的に極力抑え、非石油燃料系の新燃料・エネルギー（バイオマス系液体燃料や自然エネルギーによって発電される電気等）の利用も含めて大幅なCO₂削減が必要とされている。そこで本研究では、自動車における原動機や燃料・エネルギーに関わる技術を対象に、文献調査や数値シミュレーションモデルによって燃費改善とエネルギー効率の向上によるCO₂の削減の可能性を具体的に探ることを目的とした。

3. 研究方法

自動車の燃費改善技術について幅広く文献調査を実施するとともに1)、エンジン車、ハイブリッド車、電気自動車の燃費やエネルギー効率、車両の軽量化等に関しては、数値シミュレーションモデルを作成し、これによって将来の燃費改善の可能性を探った。また、企業から提供を受けた関連する技術資料や2015年度に実施される重量車や乗用車等の自動車燃費基準の策定（経済産業省と国土交通省により実施）に当たって検討した技術についても参考とした2)、3)。

4. 結果・考察

（1）自動車用の燃料・エネルギー

2030年から2050年における自動車の燃費改善とCO₂の削減については、その時点においてどのような燃料・エネルギーがどれだけ利用可能かに大きく依存するといえる。燃料としては、その貯蔵や運搬、供給等の利便性、安全性、経済性さらには社会受容性を考慮すると、大気圧下で液体状態を保つ燃料であることが極めて好ましいと条件といえる。また、従来の燃料との車両技術と供給インフラに関わるコンパティビリティも重要な要件となる。

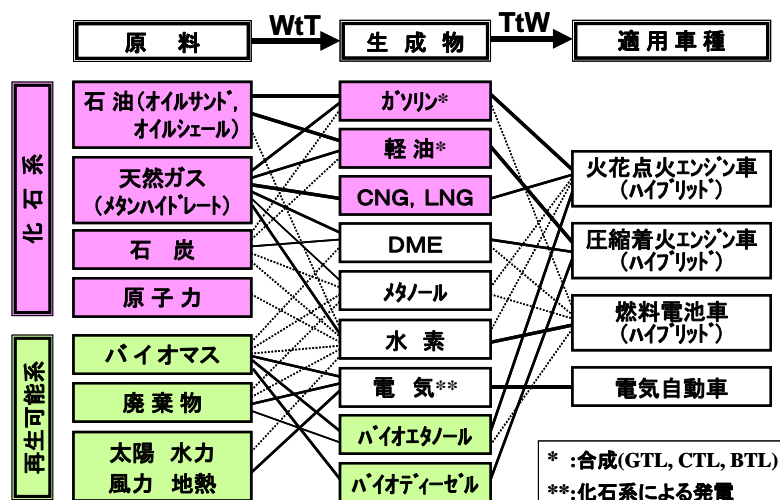
① 各種代替燃料・エネルギー

自動車用燃料の候補としては、従来の石油系燃料の他に、非在来型石油系燃料（オイルサンド、オリノコ重油、オイルシェール等）、合成燃料、バイオマス系等を含めて以下のようなものが想定される。ただし、非在来型石油に関しては相当量の埋蔵量が確認されているが、これらを採掘

し精製するには従来の燃料以上にエネルギーの投入を必要とし、CO₂の排出を助長するので、環境上の制約としてその利用は慎重に対応すべきであろう。

- 在来および非在来の石油系燃料：エンジン車（内燃機関車）
 - ・ ガソリン：火花点火エンジン車
 - ・ 軽油：圧縮着火エンジン車
- 各種の合成燃料
 - ・ GTL（天然ガス等を原料とするGas-to-Liquid）：圧縮着火エンジン車
 - ・ DME（ジメチルエーテル，加圧して液化して利用）：圧縮着火エンジン車，
 - ・ 水素：火花点火エンジン車，燃料電池自動車
- バイオマス，廃棄物
 - ・ バイオエタノール：火花点火エンジン車
 - ・ バイオディーゼル（植物油を原料とする脂肪酸メチルエステル）：圧縮着火エンジン車
 - ・ BTL（Biomass-to-Liquid）：圧縮着火エンジン車（火花点火エンジン車）
 - ・ ETBE（エチルターシャリブチルエーテル，オクタン価向上剤）：火花点火エンジン車
 - ・ 水素：火花点火エンジン車（圧縮着火エンジン車）
 - ・ DME：圧縮着火エンジン車（燃料電池自動車）
- 天然ガス（天然ガス田，メタンハイドレート）
 - ・ 圧縮天然ガス自動車（CNG車）
 - ・ 液化天然ガス自動車（LNG車）
- 電力（火力（石油，石炭，天然ガス，廃棄物），原子力，水力，太陽光，風力，地熱）
 - ・ 電気自動車

以上の車種と燃料・エネルギーと関係を図IV-1に示す。



図IV-1 将来の自動車用の燃料・エネルギーの生成ルート

（２）バイオマス系燃料 4)

上記の自動車用の代替燃料・エネルギーのうち、バイオマスを中心とした再生可能な燃料への移行の意義としては、下記のような好ましい特徴があり、それらの複合的な効果についても長期的な視点で評価して普及を図り、石油系燃料からの移行を進める必要がある。

- ・ 温室効果ガスの排出削減
- ・ 多様な燃料の利用によるエネルギーセキュリティの改善
- ・ 廃棄物を含めた資源の循環的利用の推進
- ・ 地域で生産される資源エネルギーの同地域での有効利用（地産地消）とそれによる地域の環境と経済の好循環
- ・ バイオマスの生産・利用による水資源や景観等の国土保全
- ・ そのような取り組みの情報や技術の供与を通じた途上国への国際貢献

① バイオエタノール

バイオマス燃料のうち、自動車用ガソリン代替の燃料であるバイオエタノールが有力である。オクタン価が高く、耐ノッキング性が高いため、エンジンの圧縮比を高めて燃費を向上させ、出力の増大に寄与する効果がある点で火花点火方式の燃料として適している燃料である。

その原料としては、サトウキビやトウモロコシ、規格外の小麦やコメ等の糖分や澱粉質のほか、最近では間伐材や建築廃材、農業廃棄物等のセルロースも利用可能で、いずれも最終的には発酵技術により生産される。特にセルロースの利用は食料生産の阻害要因とならない点で、国内外で広く利用されることが好ましいといえる。

バイオエタノールは今後の発酵技術の進展によって、大幅な生産時間の短縮と収率の改善の可能性もある。また、水とエタノールを高効率で分離する高分子分離膜の開発も進められており、加熱によって蒸留分離する方式に比べて大幅なエネルギーの節約が可能である。

わが国では3年前に容積で3%までの濃度（E3と呼ぶ）であれば、既販車でも問題ないことが確認されて、利用可能となっている。全国数地域において、バイオエタノールの製造、3%混合ガソリン（E3）の流通・利用に係る実証事業が展開されているところである。

今後は、10%混ぜたE10の普及が目標となる。車両技術としては、オクタン価が高い利点の反面、燃料系統の金属腐食防止やゴム系材料での浸み出しや劣化の防止、排出ガスの悪化抑制等の対策を講じる必要があるが、技術面とコスト面で大きな障害はないと見られる。なお、燃料供給側では、水分の混入によってガソリンとエタノールが相分離するのでその対策を講じなければならぬが、これも防止設備の追加や管理によって克服できるものと考えられる。

わが国では、後述するように2030年代にガソリン代替として原油換算でバイオエタノールを10%程度導入すること見通しが示されている。それには、国内の原料供給には限界があるものの、利用されていない農地の再利用やセルロース系の原料の活用を最大限進める必要があり、2050年にも繋がる取り組みを継続する必要がある4)。

なお、ブラジルは大生産国であり、サトウキビを使って年間約1200～1400万kLを生産し、現在E23の利用が義務付けられている。2004年には240万kLの輸出実績があり、今後も大幅な増産のポテンシャルを持っており、わが国も相当量の輸入を検討する余地がある。また、米国では2005年における増産により、ブラジルを抜いてはじめて世界一の生産国となった。トウモロコシの利用

が主流であり、E10対応が車両側に義務付けられ、数州ではE10の利用が義務化されている。2005年に包括エネルギー政策法が成立し、石油の消費抑制の観点からバイオマス燃料の導入も重点施策に挙げられている。その一環として、ゼロから高濃度までの任意の混合比で運転可能なフレキシブルフュエルビークル（FFV）の使用を推進する動向もあり、わが国のメーカーも輸出用にFFVの開発を進めているが、供給面を考えるとわが国での普及の可能性は低いと考えられる。

②ETBE（Ethyl Tert-Butyl Ether）

バイオエタノールとイソブチレンからETBEを合成した上でガソリンに混合する方法もある。オクタン価向上効果があり、エンジンの性能や排出ガスへの悪影響はほとんどないことが確認されている。スペインやフランス、イタリア等のEU諸国において低濃度で混合されている事例がすでにある。石油連盟では、精油所内で取り扱え、相分離の心配がないことから、2010年度を目処に7%混合することを目指す方針を表明している⁴⁾。これにより、全体のガソリン需要量の20%に対してETBEを混合することで、原油換算で21万トンのバイオマス導入量に相当するとしている。京都議定書の目標達成のため、2010年には輸送用としてバイオマス燃料を原油換算で50万kL導入することを目指しているため、4割程度を占めることになる。ただし、ETBEは化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律（化審法）の第二監視化学物質であるため、今後経済産業省と事業者間で2年かけて行われる長期毒性に関する検討の結果を待つ必要がある。なお、イソブチレンは石油連産品であり、これを使ってETBEを無制限に高濃度で混ぜることには資源的にも問題があり、中長期的にはCO2抑制対策としては自ずと限界がある。

③バイオディーゼル（BDF: Bio Diesel Fuel）

軽油代替の燃料としては、菜種油やパーム油あるいは各種の廃食油等の植物油をメタノールで脂肪酸メチルエステルとしたものである。わが国では、数カ所の地域において、主に廃食用油を原料としてその地域ですでに製造し利用されている。一般家庭から回収したの廃食用を原料とすることを基本とし、効率的な回収体制の整備と量的規模の拡大が課題とされている。また、100%BDFとBDF混合軽油の燃料品質の確保が重要であり、5%程度であれば既販車でも問題なく利用可能であり、B5と呼び、この程度の混合を想定した品質規格が決定したところである。

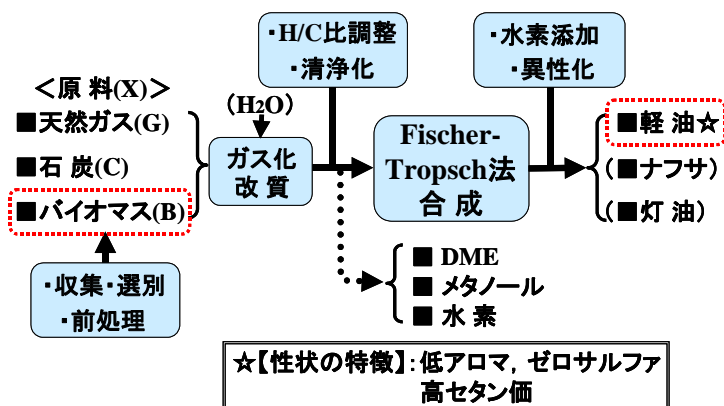
なお、EU内では菜種油やひまわり油を主な原料としてこの程度の濃度での利用がすでにドイツやフランス、イタリア等で実施されており、2004年にはEU全体で217万kLの生産実績がある。また、2010年に輸送用にバイオマスを5.75%導入する目標値がEU指令で提示しているが、BDFが中心となるものと予想される。

④バイオマス合成軽油

各種のバイオマスを高温でガス化し、Fisher-Tropsch法等で合成して液体燃料とする方法があり、BTL（Biomass To Liquid）と呼ばれ、図IV-2に示すような行程で製造される。その際、原料の収集や選別の過程を合理化してコストを抑える必要がある。また、植物油（パーム油）を軽油原料に20%程度混合して水素化精製した軽油代替燃料の製造方法も研究開発されている。

これらの事例を表1に示すが、BTLでは軽油の他、ナフサや灯油も生成され、異性化することにより圧縮着火性（セタン価）を調整したり、高オクタン価としてガソリン代替燃料としても使える可能性もある。バイオマス原料の生産を含めたバイオマスリファイナリ（Biomass Refinery）として、BTLを工業的な量産化を実現しようとする試みもあり、長期的な視点から規模の効果を活かした本格的な実用化が期待される方法といえよう。また、この種の燃料の原料としては、食料

生産を阻害しないことが必要であり，農業廃棄物や廃木材，間伐材，一般ゴミ等の利用を前提にすべきであろう。



図IV-2 自動車用代替燃料の合成

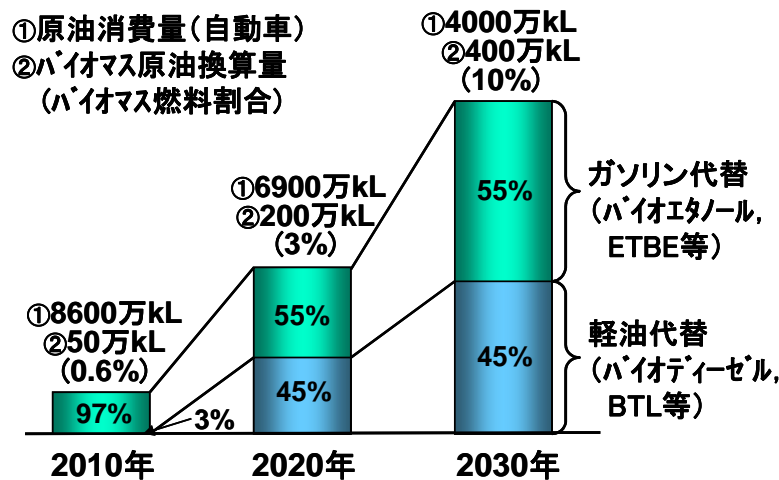
表IV-1 Biomass-to-Liquidの製造試行例

国名	プロジェクト名・品名	実施機関	計画(実施)年次
日本	トータルBTLディーゼル製造技術の開発	産総研バイオ研究センター	2005～2011年度
日本	植物油脂類(パーム油20%)の水素化分解による燃料油転換	新日本石油(株) トヨタ自動車(株)	2005年～
ドイツ	Sunfuel	Choren社	すでに商業化
フィンランド	NExBTL	Neste Oil社	実施中
EU	バイオ化学変換と熱化学変換の統合バイオマス・リファイナリー	Biofuels in the European Union – A Vision for 2030 and beyond (BIOFRAC)	2006年～
EU	CHRISGAS: Clean Hydrogen-rich Synthesis Gas	EUプロジェクト	2004～2008年
米国	バイオマス・リファイナリー Industrial Bioproducts: Today and Tomorrow	エネルギー省	2003年～

現状では，バイオマス燃料の自動車用燃料への利用はきわめてわずかである。2010年度での京都議定書目標達成における新エネルギーの導入見通しのうち，自動車用のバイオマス燃料の利用は燃料原油換算50万kLであり導入目標を達成するためには，その差分45～46万kLを輸入量で賄うか，ETBEを併せて利用する必要がある。それには，長期契約に基づいた一定の水準の安定的な輸入量を確保しつつ，国産バイオマスの生産体制を強化することが求められる。さらには，特にアジア地域において，わが国の支援と協力によって適切な環境配慮を行いつつ，バイオマス燃料の生産と普及を計画的に推進し，生産地域での利用を促すとともに，わが国に安定的に輸入する可能性についても検討が必要であろう。

各種原料による生産が可能なガソリン代替と軽油代替の利用について，2010年から2030年の目標の概要を図IV-3に示した⁴⁾。2030年の時点では，自動車用燃料に占める石油の依存割合は80%程度抑制され，残りの20%は電気やバイオマス，天然ガスによって代替することが可能であろう。ま

た、後述するように、その時点では自動車の燃費も全体として30%から40%改善されよう。



図IV-3 自動車用バイオマス燃料の普及目標
(環境省：エコ燃料利用推進会議報告書，2005～2006年)

(3) 自動車用の燃費・エネルギー効率の向上

2050年における自動車用の主要な動力システムとしては、①エンジン車とそのハイブリッド化、②電気自動車、③燃料電池自動車の3種が想定される。それらの2000年での燃費レベルを基準(baseline)として、2050年での改善レベルを以下に予測する。

① エンジン車とハイブリッド車^{5),6)}

・石油系燃料を使った場合、エンジンを含む動力システム全体の燃費改善は現状の動力システム技術を基準とすると40%～50%程度の燃費改善が可能と予想される。重量車とガソリン乗用車のカテゴリでの主要な技術な燃費改善技術と2015年度での燃費基準の達成のための要素技術とその改善割合は以下のとおりであり、それらを集積して全体の燃費改善を図らなければならない^{2),3)}。これによって、重量車では2002年度の平均燃費に対して12.2%，乗用車では2004年度の平均燃費に対して23.5%の改善が目標となっている。2030年から2050年にわたる長期的な燃費改善には、これらの技術を中心とし、さらに精緻なエンジン機構や制御方式も含めて一層高度化することが必要とされる。

● 重量車燃費基準に対応した技術の評価（（ ）内は燃費改善率）

1) エンジンの改良

① 熱効率の改善

- ・ 4バブル化&センタノズル化 (1.0～1.5%)
- ・ 直噴化 (4.0～5.0%)
- ・ 燃焼室改善 (0.5%)
- ・ 高過給化 (BMEP=2.0MPa以上) (2.5～4.5%)
- ・ 過給機効率改善 (0.3～0.5%)
- ・ 燃料噴射高圧化 (200Mpa相当) (2.0%)
- ・ EGR (1.0～1.5%)
- ・ 可変過給機 (0.5%)

- ・ インタークーラー化 (1.5～2.5%)
- ・ エンジン全体制御最適化等 (3.0%)
- ・ ターボコンパウンド (0～1.5%)

②損失の低減

- ・ フリクション低減 (1.0～1.5%)
- ・ アイドル低回転化 (0.5%)
- ・ 補機駆動損失低減 (0.5～1.0%)

2) エンジン使用領域の最適化

- ・ 変速機の多段化 (1.0～5.0%)
- ・ トルコン A T (-9.0～-4.0%)
- ・ デフ低ギヤ比化 (0.5～3.0%)
- ・ 最終段直結化 (0.5～3.0%)

3) その他

- ・ アイドリングストップ (0～4.0%)

● 重量車の排出ガス規制への対応による燃費への影響

軽油を燃料とする重量車について、2009年から2010年に導入が予定されている2009年排出ガス規制に対応するために必要なNO_xとPMの低減を目的とした排出ガス対策技術導入等に伴って燃費が悪化する。具体的に考慮した主な排出ガス対策技術（燃費悪化率）は次のとおりである。

1) PM低減技術（▲2.0～3.0%）

- ①エンジン本体：燃料噴射系改良（高圧噴射化等）、燃焼室・吸気系改善
- ②排気後処理装置：連続再生式D P F

2) NO_x低減技術（▲5.0～7.0%）

- ①エンジン本体：E G R改善（冷却・増量）、燃料噴射系改良（噴射率制御精緻化等）
- ②排気後処理装置：吸蔵型NO_x還元触媒（L N T）、尿素添加型NO_x還元触媒（S C R）

● 2015年度の乗用車等の燃費基準に対応した技術

①従来燃費改善技術の一層の改良（全2.0～4.0%）

- ・ エンジンの高圧縮比化
- ・ フリクション低減
- ・ 軽量化
- ・ 車両走行抵抗低減
- ・ 低ころがり抵抗タイヤ
- ・ エンジン全体制御最適化

②エンジン改良

<ガソリンエンジンの改良>

- ・ 4バルブ (1.0%)
- ・ 2バルブ/2点点火 (2.0%)
- ・ 可変動弁系 (1.0～7.0%)
- ・ 直噴ストイキエンジン (2.0%)
- ・ 直噴リーンバーンエンジン (10%)
- ・ 可変気筒 (7.0%)
- ・ ミラーサイクル (10%)
- ・ 大量E G R (2.0%)
- ・ ローラカムフォロワー (1.0%)
- ・ オフセットクランク (2.0%)
- ・ 可変圧縮比 (10%)

<ディーゼルエンジンの改良>

- ・ 4バルブ化 (1.0%)
- ・ 電子制御燃料噴射装置 (1.5%)
- ・ コモンレール (2.5%)
- ・ ディーゼルエンジン直噴化 (8.0%)
- ・ 高圧噴射化 (1.0%)
- ・ 過給機及び過給機効率改善 (2.0～2.5%)
- ・ インタークーラー (1.0%)
- ・ E G R (0.5～1.0%)
- ・ ローラカムフォロワー (1.5%)
- ・ オフセットクランク (2.0%)

③補機損失低減

- ・ 電気パワーステアリング (2.0%)
- ・ 充電制御 (0.5%)

④駆動系改良

- ・ アイドルニュートラル制御 (1.0%)
- ・ A T 多段化 (1.0~4.0%)
- ・ C V T 化 (7.0%)
- ・ 自動MT (AMT・DCT) 化 (9.0%)
- ・ MT 化 (9.0%)

⑤燃費性能の優れた自動車の導入

- ・ ハイブリッド自動車 (15~70%)
- ・ ディーゼル自動車 (20%)
- ・ アイドリングストップ自動車 (4.0~7.0%)

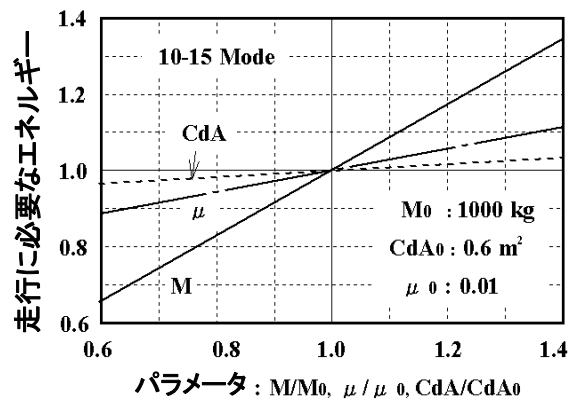
● 乗用車等の燃費に影響する要因

2009年排出ガス規制（ポスト新長期規制）への対応、オフセット衝突基準への対応等、今後の排出ガス規制や安全規制の導入等による燃費影響度の評価を行った。具体的に考慮した燃費影響要因（燃費影響率）は次のとおりである。

- ①排出ガス規制への対応（全▲3.0~▲7.5%）：ディーゼル車や直噴リーンバーン車の2009年排出ガス規制に対応する技術として、エンジン本体の改良（EGR改善によるNO_x低減，高圧噴射化によるPM低減等）やNO_x吸蔵還元触媒，連続再生式DPF等の後処理装置により燃費が悪化する。
- ②安全対応（全▲0.1~▲1.4%）：オフセット衝突、歩行者保護、ISO-FIX 等への対応による重量増、走行抵抗の増大による燃費悪化が生じる。
- ③騒音対策（全▲0.1%）

・ハイブリッド化によって市街地走行では1.6~2.5倍程度の燃費改善（40%~60%のCO₂削減）の改善が見込まれる。ハイブリッド化には、簡易型（マイルドハイブリッド）のものから、モーターと発電機を利用する高度なシステムまでであるが、初期コストの増加分がランニングコストの低減によって解消する必要がある⁶⁾。

・乗用車においては車両の軽量化，空気抵抗と転がり抵抗の低減が進み，全体として，ハイブリッド化も含めて，2~3倍の改善が可能である。軽量化技術としては，超高張力鋼，軽金属，プラスチック（CFRPを含む）が有力な候補である。従来の鋼鉄は引っ張り強度が500MPa程度であったが，最近技術開発が進められている超高張力鋼では，1000MPaから1500MPaの値が達成されている。加工性や生産性，コスト高，市場でも品質の共通化等の課題はあるものの，この種の材料の利用は軽量化にはもっとも有効な手法である。この分野ではわが国に鉄鋼メーカーが技術的にリードしており，車両への適用が進展することが強く期待される。これら軽量化により走行エネルギーが削減される傾向をシミュレーションした結果を図IV-4に示す。



図IV-4 走行抵抗因子と走行に必要なエネルギー

・ バイオ系燃料が利用されたケースでは、石油系燃料を使った場合の燃焼技術がそのまま利用され、熱量換算の燃費（熱効率）はほぼ同等であるが、燃料の原料収集、精製、輸送、貯蔵に関わるCO₂を考慮しても全体としてのCO₂削減効果は極めて大きい。

・ バイオ系燃料は在来の石油系燃料に対して任意の割合で混合できるので、長期にわたって移行を可能にする点でも大きな利点がある。（例えば、エタノールはガソリンと、FAMEは軽油に対して任意の割合で混合可能であり、効率は同等で排出ガス対策も容易である。）

② 電気自動車⁵⁾

現在の電源構成を考慮してWTWでのエネルギー効率とCO₂排出量の両面で他の車種と比べて最も有効である。エネルギー密度とパワー密度の点で最も優れているリチウムイオンに代表される二次電池の性能が大きく進展している。乗用車の分野で大幅に利用されるとCO₂の削減に極めて有効であり、一層の高効率化、信頼耐久性の向上、大幅なコスト低減を図りながら普及を推進する必要がある、このため国の研究開発の支援策が推進されている。電気自動車は特に短距離の利用には最適であり、発電を含めた総合エネルギー効率がきわめて高い反面、長距離走行しようとするとも電池の搭載量を増やす必要があり、コスト増と重量増加を招く。短距離走行に特化して社会的な受容性を醸成するための先行的な取り組みが必要である。

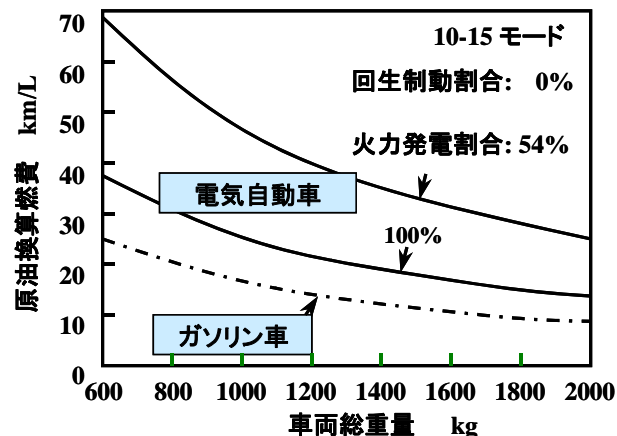
電気自動車の利用形態として、個人が利用する軽自動車やコミュニティマイクロバス（筆者らが開発した10数名乗りでバッテリーの搭載量を抑制して非接触急速充電を行うシステムを利用した車両）を想定すると、CO₂の排出量は70%から80%の大幅な削減が予測され、次のような利点が挙げられる。

- ・ 暖機の損失がなく、低振動で低騒音である点も好ましい。
- ・ 家庭等での夜間充電が可能なことは、利便性と電力コスト負担の軽減の点で普及に大きく寄与する。そのような配慮が電力供給側に求められる。
- ・ 利便性の確保のため、駐車場での適切な充電設備の設置も進める必要があり、充電システムの共通化や課金制度の整備も不可欠である。
- ・ 将来非石油系をもとにした電源（原子力、自然エネルギー、バイオ系）の割合を増やす

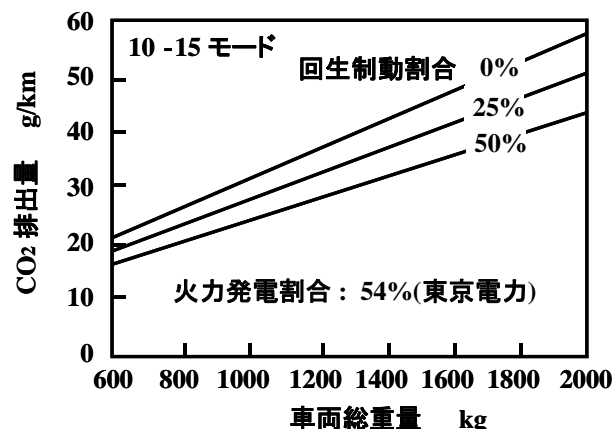
ことでCO₂の削減効果はさらに高まる。

- ・ 回生制動が可能であり、加減速を伴う走行でエネルギー効率の大幅な改善が可能であり、これは、ハイブリッド車や燃料電池車でも得られる特性である。

図IV-5,6にシミュレーションによるガソリン車との原油換算燃費比較とCO₂排出量を示すが、電気自動車は化石燃料の節減とCO₂の抑制の両面できわめて優位であり、また軽量化も必要なことが分かる。



図IV-5 電気自動車とガソリン車の原油換算燃費の比較



図IV-6 電気自動車におけるCO₂排出量

③燃料電池自動車^{5), 8)}

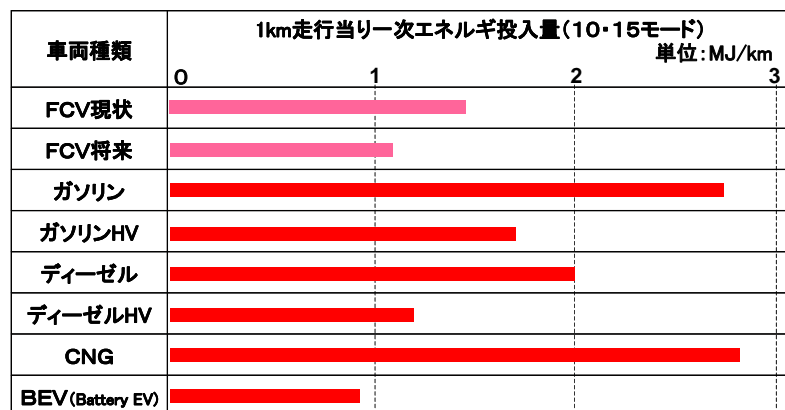
水素の製造を石油や天然ガス、石炭等の化石燃料に依存する限り、従来車に対するCO₂の削減効果は大きくないのが現状である。化石資源の依存を脱却して水素社会へと移行する中間期にあつては、化石燃料の利用を許容するとしても、究極的にはCO₂の排出抑制が可能は資源をもとにした水素の供給を実現しなければならない。そのような条件が整えば、普及の可能性があるが、貯蔵や供給、車載性、利便性についてもまだ克服すべき点が多い。

現在、燃料スタックについては改善が進められてはいるものの、きわめて大幅な信頼耐久性の

向上やコンパクト化，材料と生産に関わるコストの低減が必要である。なお，発電機構についても微視的な現象を含んでおりまだ不明な点が多く，その最適設計の手法や材料の探索についてもさらに研究開発を進めなければならない状況にある。

水素の貯蔵技術に関しては，圧縮水素では走行距離の制約と利便性の点から普及は限定的となるため，吸蔵方式も含めて革新的な貯蔵技術の可能性を探る必要がある。現在，35MPaで高压容器に充填する方法が一般的であるが，これが一充填距離を制限している点である。その解決策として，一層の燃料電池システムの高効率化とともに，70MPaへの高压化も試行されているものの，充填時のエネルギー消費については無視できない量である。また，研究開発と水素インフラの設置については国の支援を継続的に行う必要がある。

以上の各種の自動車の現時点でのWell-to-Wheelのエネルギー効率とCO₂排出量をわが国における水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC，2006年3月）で比較評価した例を図IV-7, 8にそれぞれ示す⁹⁾。これらの図より，現状では，燃料電池車よりもディーゼルハイブリッド車の方が高効率であり，また小型電気自動車（BEV）が最も効率的なことが分かる。将来，燃料電池車におけるCO₂の大幅削減のためには，燃料である水素が非化石資源（再生可能資源，原子力等）から製造させることが前提となる。また，ここに示した長期的には他の車種においてもさらに燃費改善が進展するものと予想される。

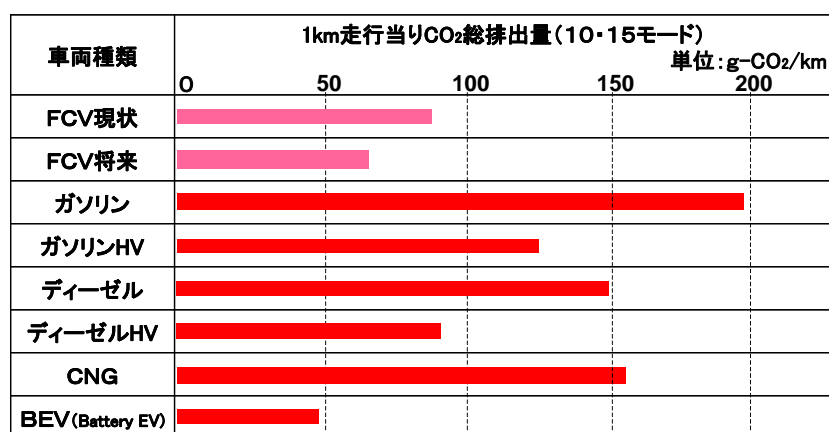


FCV現状:「水素ステーション」「FCV」データはJHFC実証結果トップ値、
その他データは文献トップ値により算出

FCV将来:FCVの将来FCシステム効率60%と文献トップ値により算出

電力構成:日本の平均電源構成

図IV-7 各種自動車の走行距離当たりのエネルギー投入量（総合効率）の比較



FCV現状:「水素ステーション」「FCV」データはJHFC実証結果トップ値、
 その他データは文献トップ値により算出

FCV将来:FCVの将来FCシステム効率60%と文献トップ値により算出

電力構成:日本の平均電源構成

図IV-8 各種自動車のCO₂総排出量の比較

また、2020年～2030年と2050年代における上述の各種自動車の燃費改善とCO₂の削減について予想した結果をそれぞれ表IV-2,3に示す。

表IV-2 将来の各種自動車の総合効率とCO₂排出量の比較

(現在のガソリン車の基準とする2020年～2030年での予測)

各車種	相対総合効率	相対CO ₂ 排出量
■現在のガソリン車	100(基準%)	100(基準%)
☆将来のガソリン車	120～135	83～74
■現在のディーゼル車	115～125	87～80
☆将来のディーゼル車	140～150	71～67
☆将来のガソリンHV	150～220	67～45
☆将来のディーゼルHV	160～240	63～42
☆将来のEV(軽サイズ)	200～250	25～20
●バイオマス燃料の利用	—	97～93
●車両の軽量化	115～125	87～80

【仮定】・総合効率=燃料効率×車両効率

・EV電源における化石燃料火力の熱量割合:50%

・バイオマスの熱量換算混合割合:5～10%

・車両の軽量化:20～30%

表IV-3 将来の各種自動車の総合効率とCO₂排出量の比較
(現在のガソリン車の基準とする2050年代での予測)

各 車 種	相対総合効率	相対CO ₂ 排出量
■現在のガソリン車	100(基準%)	100(基準%)
☆将来のガソリン車	130～140	77～71
■現在のディーゼル車	115～125	87～80
☆将来のディーゼル車	145～155	69～65
☆将来のガソリンHV	160～250	63～40
☆将来のディーゼルHV	180～280	56～36
☆将来のEV(軽サイズ)	220～280	19～14
●バイオマス燃料の利用	—	90～80
●車両の軽量化	125～135	80～74

【仮 定】・総合効率=燃料効率×車両効率

・EV電源における化石燃料火力の熱量割合:40%

・バイオマスの熱量換算混合割合:10～20%

・車両の軽量化:30～40%

4) 2050年に向けた課題

- ① 自動車単体の燃費改善やCO₂低減のための技術開発を推進すると同時に、地球環境対策とエネルギー政策として低CO₂の燃料・エネルギーの低CO₂化に関わる長期的な展望を示す必要がある。
- ② 従来車のハイブリッド化や電気自動車の開発に関連して、モーター、2次バッテリー、制御系デバイス、制御ソフト等の一層の高性能化と低コスト化を図る必要がある。
- ③ 再生可能な資源を活用した電気自動車用の低炭素電力の供給が確保できれば、相乗効果による大幅なCO₂の削減効果が可能になる。
- ④ 長距離走行の用途には、利便性の点で、液体燃料を用いるエンジン車とそれをハイブリッド化した自動車が依然として有利であり、石油への依存軽減とCO₂削減には、バイオマス系燃料の従来燃料への混合のため、その供給源を確保する方策を推進する必要がある。
- ⑤ 今後のエンジン車、ハイブリッド車、電気自動車の普及に当たっては、それらの効率向上の見通しを長期予測し、WTW、用途、利便性、社会経済性の観点からの比較検討した上で普及策を講じる必要がある。
- ⑥ それと同時に、産業・経済活動、個人のモビリティを含めて自動車の利用のあり方を抜本的に改善すべきであり、ITSの高度化、都市交通系の再構築、鉄道へのモーダルシフト（通勤、長距離旅客、長距離輸送等）をあわせて推進する必要がある。
- ⑦ その際、大都市では公共交通機関の利用によって、モビリティが確保される一方、地方では、公共交通機関の衰退と自動車への依存が一層進み、今後も燃料消費が増大が続く可能性があり対応策が必要である。また、自ら運転免許を持たず自動車で移動できない若齢者、身障者、高齢者に対する交通手段の提供も求められている。
- ⑧ これらのハード、ソフト両面の取り組みの成果は、わが国のCO₂低減対策に止まらず、モータリゼーションが進展する途上国での対策にも積極的に活用すべきであり、わが国が果た

しうるグローバルな貢献は極めて大きい。

表3に示したように、2050年における車両単体としての燃費向上とCO₂削減に加えて、下記のような交通量の適正な抑制と交通流の円滑化を進める必要がある。そのためには、①公共交通システムの充実、②物流の高効率化、③モーダルシフト、④自動車に依存した商習慣や生活様式の変更等を促進する必要がある。それには、情報通信技術の一層の高度化が大きな役割を果たす役割はきわめて重要になるものと予想され、自動車単体の技術的進展との適切な役割分担を検討する必要がある。いずれにしても、2050年の時点では、一層の単体の燃費改善や代替燃料の普及と利用に関わる取組みが強力に推進されれば、石油消費量、ひいてはCO₂の排出量をさらに削減し、現時点の水準から30%から40%以下（60%から70%以上の削減）程度とすることが可能になるものと予想される。

5. 研究により得られた成果

2020年から2030年、さらに2050年に向けた自動車の燃費改善とCO₂の削減の技術的可能性について文献や数値シミュレーションによる調査検討した。その結果の概要をまとめると、以下に示すように、石油系液体燃料を利用する火花点火エンジン車（ガソリン車）と圧縮着火エンジン車（ディーゼル車）の燃費改善に加えて、新たな各種の動力システムや燃料・エネルギーの開発・実用化によってそれぞれさらに大幅なCO₂の削減効果が可能になるものと予想される。これらのうち、ハイブリッド化や電気自動車の導入はCO₂の削減効果が大きいことが分かる。また、ハイブリッド化、バイオマス燃料の利用、車両の軽量化は相乗的な削減効果をもたらす点に特徴がある。

（現在のガソリン車基準のCO₂削減割合）

① 従来車自体の燃費向上	(30～40%)
② それらのハイブリッド化	(40～60%)
③ それらへのバイオマス燃料の利用	(10～20%)
④ 電気自動車の導入	(70～80%)
⑤ 車両の軽量化	(20～30%)

このようなCO₂の削減を実現するための技術として、エンジン、バッテリー、パワーエレクトロニクス、制御システム、材料、加工・生産、バイオマス燃料に関する技術は、活用可能なものや近い将来実用化されると予想される技術も多く、それらの基礎から応用にわたる研究開発と実用化を推進する必要がある。

なお、燃料電池車については、水素供給源の確保の不確実性もあり、輸送・貯蔵方法、スタック自体の大幅な耐久信頼性の確保、低コスト化等、解決すべき技術的課題が多いのが現状であり、ここでは将来のCO₂削減効果を見込むことは差し控えることとした。

上述の技術については、今後それぞれの特徴を活かしながら混在し競合するものと予想されるが、その普及割合によって自動車全体のCO₂の排出量が決まることになる。したがって、全体としての大幅なCO₂削減には、長期的視点に基づいた新技術の開発やその実証事業に対する支援、環境特性や用途、利便性、コストに配慮したそれぞれの適正な普及を誘導する施策を講じる必要がある。

ろう。

6. 引用文献

- 1) 大聖他「自動車工学 ー基礎ー」自動車技術会, 2002年
- 2) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会重量車判断基準小委員会(2015年度での車両総重量3.5トンを超える重量車の燃費基準の策定)最終取りまとめ (2005年11月)
 - ・ 報告書 <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/09/091110/01.pdf>
- 3) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会自動車判断基準小委員会・交通政策審議会陸上交通分科会自動車交通部会自動車燃費基準小委員会合同会議 (2015年度における乗用車等の「自動車のエネルギー消費効率の性能向上に関する製造事業者等の判断基準等の改正について」) 最終取りまとめ (2007年2月)
 - ・ 報告書 http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/09/090202_2/01.pdf
- 4) エコ燃料利用推進会議 資料・報告書 (環境省, 2005年～2006年)
- 5) 逢坂, 大聖他「電気自動車ハンドブック」丸善, 2001年
- 6) 木原, 大聖「高性能ハイブリッド自動車の研究」山海堂, 2005年
- 7) 大聖他「バイオエタノール最前線」工業調査会, 2004年 (2006年改訂)
- 8) 大聖他「燃料電池自動車のすべて」山海堂, 2005年
- 9) JHFC関係資料, 日本自動車研究 (2005年～2006年)

7. 国際共同研究等の状況

- (1) 日中自動車交流協会の招きで中国の天津大学と精華大学において講演と情報交換 (2007年1月)
- (2) “2nd International Workshop on Environmentally Friendly Vehicles”を国土交通省・交通安全全環境研究所との共催 (2007年2月)
- (3) 韓国の高麗大学機械工学科と熱流体, エンジン, ハイブリッド車分野の研究交流に関する協定の締結 (2007年2月)
- (4) International Council of Clean Transportation (ICCT) にメンバーとして参加し, 運輸に関わる地域環境と地球環境に関わる諸問題の解決に取り組んでいる。(組織と具体的な活動に関しては <http://www.theicct.org/>に掲載されている。)

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

- ① Y. Daisho, “Developing Advanced Low-Emission and Fuel-Efficient Vehicle Technologies beyond 2010, ” Review of Automotive Engineering 27, JSAE, 2006
- ② Y. Kamiya, Y. Daisho, et al, “Development and Performance Evaluation of an Advanced Electric Micro Bus Transportation System - Part 1: Waseda Advanced Electric Micro Bus -, ” EVS22, October 23-28, 2006
- ③ Y. Daisho, ”Perspectives on Future Motor Vehicle Technologies Associated with Environmental and Energy, ” エコデザイン 2006 (2006年12月)
- ④ “Developing and Evaluation of an Advanced Electric Micro Bus Transportation System

- Part 2: Advanced On-Demand Bus System -,” EVSS, October 23-28, 2006

- ⑤ 大聖, 「今後のディーゼル車の排気浄化技術に関する動向」, No. 19-06 シンポジウム「ディーゼルクリーン化を目指す最新後処理・燃焼技術」, 自動車技術会 (2007年1月) 大聖 (分担執筆), 「バイオマスの利活用について～バイオマス由来燃料を中心として～」衆議院調査局環境調査室 (2007年2月)

<論文 (査読あり)>

- ① Yutaka Murata, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, et al, “Achievement of Medium Engine Speed and Load Premixed Diesel Combustion with Variable Valve Timing,” Society of Automotive Engineers International (SAE), SAE World Congress SP-2005, 2006/4
- ② Yutaka Murata, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, et al, “Potential of Emissions Reduction by Premixed Diesel Combustion with Variable Valve Timing,” Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE) Review of Automotive Engineering, Vol.27, 2006/7
- ③ 紙屋雄史, 大聖泰弘他, 「先進電動マイクロバスの開発と性能評価 (第1報)」論文番号 20074109, 自動車技術会論文集Vol.37, No.1 (2007年1月)
- ④ 村田 豊, 大聖泰弘他, 「可変バルブ機構による高負荷ディーゼル燃焼のエミッション低減に関する研究」自動車技術会論文集, Vol.37, No.1, 2007年1月
- ⑤ 神谷憲太郎, 村田 豊, 大聖泰弘他, 「多段噴射による大型ディーゼルエンジンの排出ガス低減」自動車技術会論文集Vol.37, No.2, 2007年3月

<その他誌上発表 (査読なし)>

- ① 環境省エコ燃料利用推進会議報告書, 100-110 (2006年5月, 8月)
- ② Yutaka Murata, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, et al, “Miller-PCI Combustion Concept for Lowering Diesel Emissions,” FISITA 2006 World Automotive Congress, 2006/10
- ③ 大聖泰弘, 「自動車用バイオマス燃料の将来展望」月刊誌・潤滑経済, 2006年11月号
- ④ 大聖泰弘, 「自動車用燃料の将来展望～バイオマス利用の普及に向けて～」季刊・環境研究 (日立環境財団), 142号, 2007年
- ⑤ 斎藤 孟, 大聖泰弘, 「自動車排出ガス低減技術の到達点と今後の見通し」, 環境情報科, 2007年3月号

(2) 口頭発表 (学会)

- ① 大聖泰弘「天然ガス自動車の環境・エネルギー技術の将来展望」, 天然ガス自動車フォーラム第44回研究会 ((社)日本ガス協会) (2006年6月)
- ② 大聖泰弘「クリーンディーゼル研究・開発・普及の課題」, 自動車技術会夏季大会GIAダイアログ (2006年8月)
- ③ 大聖泰弘, 「自動車用燃料・エネルギーの将来」, 第22回エネルギー総合工学シンポジウム (2006年9月)
- ④ 大聖泰弘「今後の自動車用バイオマス燃料の利用について」, (財) 神奈川科学技術アカデミー・フォーラム 2 (2006年12月)

- ⑤ 村田 豊, 草鹿 仁, 大聖泰弘, 「可変弁機構によるディーゼル燃焼の制御と排出ガス低減」自動車技術会シンポジウム「ディーゼルクリーン化を目指す最新後処理・燃焼技術」, No. 01-07, 2007年1月
- ⑥ 大聖泰弘, 「今後のディーゼル車の排気浄化技術に関する動向」自動車技術会シンポジウム「ディーゼルクリーン化を目指す最新後処理・燃焼技術」, No. 01-01, 2007年1月
- ⑦ 大聖泰弘「環境・エネルギー問題における天然ガス自動車の役割と課題」, 天然ガス自動車フォーラム第45回研究会 ((社)日本ガス協会) (2007年3月)

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム, セミナーの開催 (主催のもの)

- ① 第26回早大モビリティシンポジウム「環境・エネルギー, 安全, 情報通信に関する最新の自動車技術」(2006年11月11日, 早稲田大学理工学部57号館202室, 観客350名)
- ② 第25回早大モビリティシンポジウム「環境・エネルギー・安全に配慮した持続可能なモビリティ社会と自動車技術の将来」(2006年11月26日, 早稲田大学理工学部57号館202室, 観客300名)
- ③ “2nd International Workshop on Environmentally Friendly Vehicles”(環境に優しい自動車に関する国際ワークショップ), 2007年2月19日, 26日, 早稲田大学国際会議場, 観客450名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- ① 化学と工業 12月号<Overview>「代替エネルギー」(2006年12月)
- ② 月刊 地球環境 特集「自動車排ガスCO₂削減」(2007年3月号, 日本工業新聞社)
- ③ 成果の記者発表「電動マイクロバス実証実験」(2007年1月24日, 於三鷹市市役所) NHK 首都圏ニュース (2007年1月25日) をはじめ, 各誌でも取り上げられた。
- ④ 日経オートモーティブテクノロジー 2007年冬号「新世代ディーゼルの実力」
- ⑤ EVS 22 (第22回国際電気自動車シンポジウム) において, 燃料電池車と電動マイクロバスの展示を行い, その省エネ性を説明した。

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

- (1) 環境省「エコ燃料利用推進会議」に議長として参加し, 各種のバイオマス系燃料を対象に, 輸送用燃料と熱利用の2010年から2030年にわたる将来の普及シナリオとその達成方策について具体的に検討し, 報告書としてまとめた。
 - ・ 報告書「輸送用エコ燃料の普及拡大について」(平成18年5月)
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/conf_ecofuel/rep1805/index.html
 - ・ 報告書「熱利用エコ燃料の普及拡大について」(平成18年8月)
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/conf_ecofuel/rep1808/index.html
- (2) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会重量車判断基準小委員会に参加し, 2015年度での車両総重量3.5トンを超える重量車の燃費基準の策定に参加し, 技術的な観点から燃

費向上の可能性の検討に協力し、最終とりまとめを行った。（2005年11月）

- ・ 報告書 <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/09/091110/01.pdf>

（3）総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会自動車判断基準小委員会・交通政策審議会陸上交通分科会自動車交通部会自動車燃費基準小委員会合同会議に参加し、2015年度における乗用車等の「自動車のエネルギー消費効率の性能向上に関する製造事業者等の判断基準等の改正について」技術的な観点から燃費向上の可能性の検討に協力し、最終とりまとめを行った。（2007年2月）

- ・ 報告書 http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/09/090202_2/01.pdf

サブテーマ（２）
バックキャストिंगによる
長期削減シナリオの策定に関する研究

V. 技術革新と需要変化による長期削減シナリオ

脱温暖化社会の実現に向けて、交通分野においても中長期的政策オプションの検討を行う必要がある。本研究では、2050年に向けたCO₂削減目標をまず与え、その達成に必要なシナリオを描くバックキャストイング手法を適用して、技術革新と需要変化の組み合わせによる交通部門CO₂削減シナリオを策定することを目的とする。具体的には、バックキャストイング手法を用いたシナリオ策定手法に関する検討を行い、一方で、交通需要変化に関しては都市・地域の特性を考慮するため、地域類型別のケーススタディを通じた検討を行いつつ、各類型別の取り組みによる削減効果を全国への外挿により推計するための枠組みを構築し、これらの成果を総合して、2050年の脱温暖化シナリオを策定する。

バックキャストイング手法を用いた交通ビジョン策定事例をレビューしたところ、2050年における我が国の社会・経済やライフスタイルの状況の想定がまずは最も重要であると考えられた。その基礎資料を得るために、グループインタビュー形式で有識者ヒアリングを行った結果、社会・経済、都市・交通、環境・エネルギー等の姿に関する多様な見解と重要な論点が明らかになった。これを踏まえて、インパクトが大きく行く末が不明確と考えられる要素を、将来のシナリオの方向性を決める要素として整理した。具体的には、居住の形態、都市の構造、それらの地域差とともに、人の気持ちや挙げられた。脱温暖化に向けた対策としては、交通システム全体での対応、経済的インセンティブ、自動車車両の小型軽量化とともに、物流について、近距離は電気自動車、長距離は連結輸送、都市内は地下鉄と台車の連携、地方から海外への直接輸送が挙げられた。

一方で、都市や地域の交通需要変化を促す施策によるCO₂削減効果を全国に外挿するための基礎資料として、日本の都市・地域を都市圏や行政規模や人口規模で分類し、その地域類型別の一人当たり自動車CO₂排出量と類型別人口を示した。また、これを踏まえて、交通サービス量、トリップ数、トリップ長、分担率、輸送効率、燃費、CO₂原単位からなる交通CO₂排出要因別の対策を縦軸に、地域区分を横軸とするマトリックスを構築し、地域区分に応じた対策の積み重ねと地域区分別将来人口予測との組合せによる脱温暖化シナリオの試算を行った。

[キーワード] 脱温暖化、技術革新、交通需要、バックキャストイング

1. はじめに

脱温暖化社会の実現に向けて、交通分野においても中長期的政策オプションの検討を行うことが要請されている。我が国の運輸部門でのCO₂排出量の増加率は他の部門に比べて高く、1990年から2004年の間に20.3%の増加を示し、その削減方策実施は急務である。そのためには、近年の地方圏におけるモータリゼーションと極度の自動車依存型社会の進展が温室効果ガス排出量増加の大きな要因となっている状況を分析し、大幅削減を可能とする対応策を詳細に検討する必要がある。

現在、各自動車メーカーでは新規技術を用いて低燃費自動車、ハイブリッド自動車などを次々に投入しており、自動車単体のCO₂排出量は従来の自動車に比べ大幅に低減されている。しかし、車両技術によるCO₂排出量削減効果は、乗用車の保有台数や走行台キロの伸びあるいは大型化によって相殺されている。今後も、技術施策はCO₂削減に一定の効果を有するものの、それだけで全面解決は困難であり、交通需要に変化を促す交通施策が必要不可欠であると考えられる。交通施策の検討にあたっては、交通活動が地域特性に大きく依存することを考慮することが重要である。すなわち、2050年に向けて大幅な削減を行なうためには、その間に起こる技術革新を見据えた上で、各地域の特性を考慮した適材適所の交通施策を立案・実施することが重要であると言える。

2. 研究目的

本課題S-3-5では、2020年まで、2050年までの2つのタイムスパンについて、交通部門からのCO₂排出量の大幅削減のための中長期戦略を策定することを目的とする。図V-1に示すとおり、2020年についての検討では、主に技術的な対策を対象として、対策の投入時期と効果の発現時期とのタイムラグを考慮した対策効果評価手法を構築する。また、ボトムアップ型技術選択モデルで必要とされる要素技術の効果や費用に関する基礎情報など、戦略研究プロジェクト全体からの要求に応じて必要な知見を提供する。一方、2050年についての検討では、不確実性の高い予測を行うのではなく、削減目標をまず与え、その達成に必要な技術革新と交通行動変化のシナリオを描く

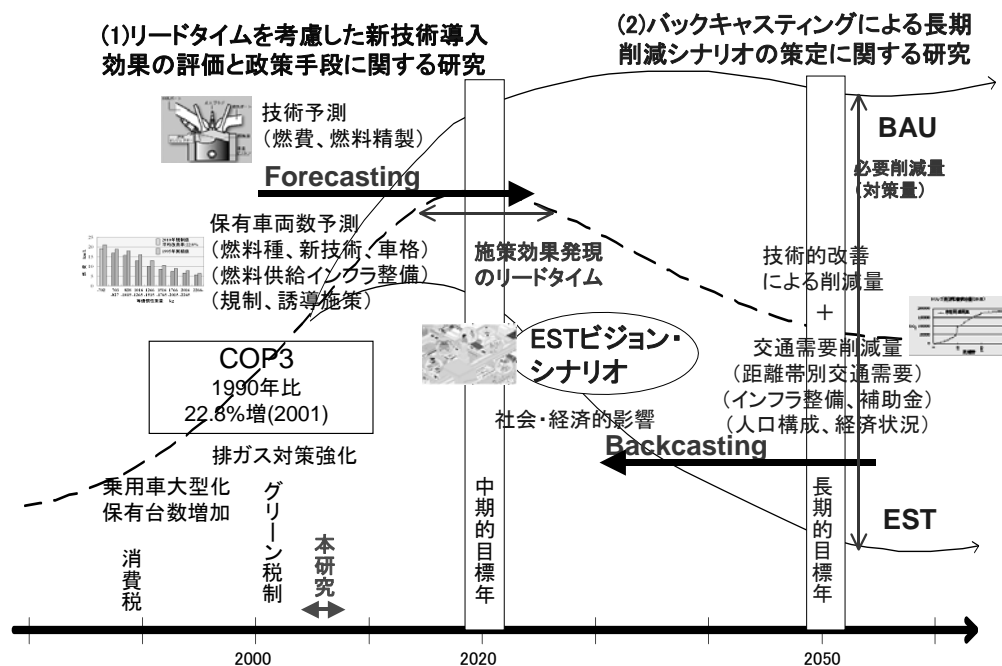


図 V-1 時間軸から見た本課題の枠組み

バックキャスティング手法を適用して、目指すべき長期的な将来像とそこへの道筋を提示する。

本サブテーマ2では、2050年頃を目標年次として、バックキャスティング手法を用いて、現在のトレンドのまま推移した場合（BAU: Business as Usual）をベースに、交通部門からのCO₂削減の数値目標に到達するために必要な削減量を地域別に求め、地域特性に応じた技術革新／交通行動変化の両面の組み合わせによって目標を達成する数種類のシナリオを提示することを目的とする。また、そのために短期のうちに着手すべき政策の方向性について検討を行い、長期的な政策実施までのロードマップを提示するとともに、その社会、経済への影響を把握する。

3. 研究方法・結果

まず、長期的な削減シナリオを策定する方法を検討するために、交通の将来ビジョンを策定した計画や報告書を収集・レビューし、そこに用いられているバックキャスティング手法等の手法を比較した。また、目指す将来ビジョンを妥当なものにするために、その前提条件となる社会・経済的变化のマクロな方向性を明確にし、都市・交通システムの全体像を整理することを目標として、環境・交通・都市等の各分野における有識者を対象とするヒアリング調査を行った。

一方、技術変化の予測はサブテーマ1の技術選択モデルでの知見の蓄積を生かすことができるが、交通需要変化の可能性については本サブテーマで別途検討する必要がある。そこで、交通需要面の施策によるCO₂削減を行う際に重要となる地域特性に応じた削減対策群の提示を行うために、全国を対象とした地域類型別CO₂の構造を整理し、都市・地域分類別に今後導入可能な交通需要面の対策とその削減効果から全国の交通需要変化の可能性を推計するための枠組みを構築し、施策の組合せの試案を作成した。

(1) 将来ビジョンとバックキャスティング

OECD/ESTプロジェクト¹⁾は、バックキャスティング手法を用いた交通分野のシナリオ策定として最も参考になる。

持続可能な発展のための世界経済人会議（WBCSD）による「持続可能なモビリティビジョン」²⁾は、OECD/ESTプロジェクトがバックキャスティング手法を採用していることと好対照をなしている。WBCSDでは、複数の施策の組み合わせによる排出量の予測を行うフォアキャスティング的な手法を用いている。また、交通需要は抑制すべきものではないことを前提としており、技術は需要を誘発する効果があると述べている。検討対象とした施策の組み合わせは以下の4点であった。

- a) カーボンニュートラルな（CO₂排出量を少なくとも80%削減する）燃料
- b) 非常に燃料効率の高いパワートレイン（駆動方式）
- c) より大型の車両への輸送形態の変化の傾向
- d) 情報技術（IT）を用いた輸送システムのより優れた統合による交通流や輸送活動などの向上

輸送の効率化の方法として、鉄道の様な交通システムへの手段転換などはこの中に含まれるが、都市のコンパクト化による徒歩の活用などは含まれない点が特徴と考えられる。

OECD/ESTプロジェクトの手法を踏襲・改良したものでは、具体的な交通計画の立案において、OECD/ESTプロジェクトより緩やかな目標値を設定し、交通手段分担率の具体的な数値まで示したドイツの事例紹介³⁾と、外的要因の変化に複数のパターンを与え、それぞれのパターンについて目標を達成するための将来像を設定した事例^{4,5)}があった。特に、日本が少子高齢化と人口減少に向

かい国際的な立場が変化を続けている状況を踏まえると、外的要因の変化が将来像に与える影響は相当に大きいと考えられる。

(2) 有識者ヒアリング

有識者ヒアリングは、3～4名が一堂に会する座談会形式で意見を聞くグループインタビューとした。対象者は、都市、交通、環境、エネルギー、ライフスタイル等の各分野をリードする約20名を抽出し、平成17年3月中旬に設定した3日間、各2時間の会合にスケジュールが合った11名とした。テーマは、『2050年の移動の形態についての将来展望』として、「脱温暖化社会の達成を意識しない時に、2050年においては人やものの移動はいかなる姿・形のものが想定できるか」、「脱温暖化社会を達成する為に2050年に我が国のCO₂排出量を1990年比60%減（2002年比約64%減）とした場合の移動形態と社会状況はいかなるものが想定されるのか」についてたずねた。

有識者ヒアリングの結果、2050年の将来像を語る上で、以下のようなキーワードが出された。

2050年に至る過渡期でのカタストロフィ、科学技術への不信、分権的意思決定システム、グローバルバリエーション、スローライフ、自然エネルギー、地産地消、IT、水素社会、効率性、時間、移動の速度、インフラの冗長性、モビリティ補完としてのIT、太陽光エネルギー、エネルギー狩猟型・エネルギー耕作型の文明

なお、2050年は遠い将来のため予測が困難との意見も多かった。

本年度は、これらの知見およびシナリオ策定手法⁶⁾を踏まえて、交通のシナリオに与える影響の大きい社会的要因（ドライビングフォース）を意見の相違の観点から表V-1の通り整理した。また、都市・交通のイメージと施策についても併せて整理した。意見が分かれた要因については、S-3全体に合わせて複数のシナリオを構築する際に役立てる他に、地域特性に応じた対策をシナリオに取り入れる際に役立つと考えられる。

(3) 地域類型別排出要因別対策の組合せ

市区町村別自動車CO₂排出量推計結果⁷⁾を元に、都市圏や行政単位、都市規模の地域類型にしたがって、一人当たりCO₂排出量の平均値をそれぞれ推計した。地域類型別CO₂は、図V-2の通りとなった。三大都市圏は人口では50%を占めるが、排出量のシェアは42%とより小さい。東京都市圏、京阪神都市圏の区部、市部で約1.0t-CO₂/人・年前後であるのに対して、その他地域の中小都市や郡部では約2.0t-CO₂/人・年と約2倍に相当している。中京都市圏は、他の二大都市圏よりもその他地方に近い数値となっている。東京都市圏の中では小都市や郡部で高く、その他地方の中では政令

表V-1 シナリオに大きな影響を与える要因等の方向性と意見の相違

	社会(ドライビングフォース)	都市・交通	施策
意見の相違が小さい	少子高齢化 GDP減少	都市基盤の位置は固定的 交通機関や土地利用や地域単位では大きな変化が可能 旅行ニーズの増加	課税によるインセンティブ活用 道路財源による公共交通整備 環境配慮を流行にする
意見の相違が大きい	移民受け入れ 中国・インドの経済水準 意思決定の仕組み 原油価格	居住の動向 根源的な移動ニーズの増減 速度ニーズの増減 資源循環の規模 燃料電池車の普及可能性	※多種多様な施策

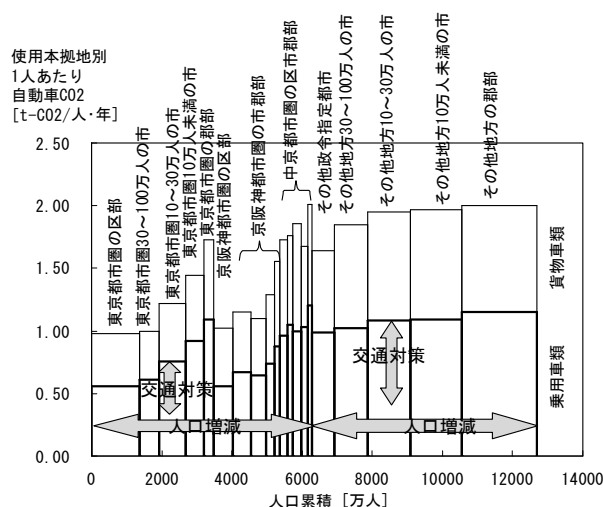
指定都市で低く、両者とも1.5t-CO₂/人・年となっている。なお、OECDの統計値⁷⁾を用いた試算では全国平均の交通部門の一人当たりCO₂は2.0t-CO₂/人・年であり、本推計値は自動車のみの数値とはいえ、やや過小と考えられることに留意する必要がある。日本全体の排出量に占める地域類型別の寄与や、交通手段の代替可能性を考えると、中間的な数値を示している地域での削減可能性が重要であり、そのために、東京都市圏の小都市や郡部、中京都市圏の各地域、その他地方の大都市や中都市を対象として、自動車CO₂の削減につながる交通施策を導入することが重要になると考えられる。

この図を用いて、将来人口の地域的な変動が日本の自動車CO₂排出量に与える潜在的な影響を試算した。一人あたり排出量に変化しないと仮定した場合、2030年に向けて全国一律に人口が7.9%減少する場合には、CO₂も7.9%減少する。これに対して、地方の郡部で人口が減少し、東京都市圏の市部で人口が堅調に推移するとの市区町村別将来推計人口を考慮すると、1.4%の削減を追加的に見込むことができ、9.3%の削減となると予想された。

一方、交通に起因するCO₂排出の構造を示す式(1)を作成し、交通サービス量、アクセス当たり移動距離、交通手段、輸送効率、燃費、燃料当たりCO₂排出原単位の各要因の削減策の積み重ねによる大幅削減の可能性を検討するとともに、バックデータの収集を行っている。

$$CO_2 = \text{交通サービス} \cdot \frac{\text{輸送キロ}}{\text{交通サービス}} \cdot \sum_{\text{交通手段}} \left(\frac{\text{走行台キロ}}{\text{輸送キロ}} \cdot \frac{\text{燃料消費量}}{\text{走行台キロ}} \cdot \frac{CO_2 \text{ 排出係数}}{\text{燃料消費量}} \right) \dots (1)$$

さらに、図V-2に示した地域性に応じて、各要因を削減する施策の組み合わせを検討した例を表V-2に示す。列方向には、大都市圏都市部、大都市圏郊外、地方都市、地方郊外・郡部の4つの地域区分を例とした。行方向には、式(1)の要因に影響する施策を分類している。行列には、各地域区分に適用可能な施策とその削減可能量の例を記載している。例えば、大都市圏都市部では、既に徒歩圏の高密度化が相当に進んでいるため、追加的な削減量は多くないと考えた。都市部では、都心の再開発や再評価による高密度化により移動距離の10%程度の削減が可能と仮定した。燃費改善は、大都市圏での効果が大きいハイブリッド車や鉄道の効率改善により20%の燃料削減が可能とした。郊外部では、都市の範囲での高密度化は不可能とした。こうした数値の積み重ねにより一人当たりCO₂排出量が減少する様子を地域区分別に試算した。さらに、全国の2050年の将来人



図V-2 地域類型別一人当たり自動車CO₂(1999)

表V-2 地域特性に応じた削減策の試案

	大都市圏都市部	大都市圏郊外	地方都市	地方郊外・郡部	全国
徒歩圏の高密度化	●●●●●	△駅前再開発	△駅前再開発	△駅前再開発	202→82(t) 60%減
都市の高密度化	△都心再開発	×	△地方都市の再評価	×	※80%削減は客員ではない
公共交通システム活用	●(△貨物)	△駅付近の鉄道、P&R	○LRT	△駅付近の公共交通	※貨物輸送、都市間輸送、国際輸送の控え方など、課題は多い
積載率改善	△適正規模の車両活用	△適正規模の車両活用	△乗合バス	×	
燃費改善	○都心モード、低燃費率改善	○都市モード	△元々比較的燃費が良い	△元々比較的燃費が良い	
低炭素燃料	△自動車分組率が低いため	○	○	○	
人口(百万人)	48→50	15→10	28→25	36→20	127→105
t-CO ₂ /人	1.16→0.64	1.66→0.72	1.84→0.77	1.99→1.16	1.69→0.78

口予測と市区町村別の2030年の将来人口予測とから、2050年の地域区分別人口を仮定した。これらを集計すると、約60%減を達成する施策の組合せの試算が可能となった。なお、この試算は、地域区分、施策例（実現可能性）、削減量、人口予測を改善する余地が大きいことに留意する必要がある。また、都市間輸送、貨物輸送、国際輸送、航空輸送の取り扱いなど、全体像に大きな影響を与えうる未解決の課題も残されていることに留意する必要がある。

4. 考察

バックキャスティング手法を用いた交通ビジョン策定事例のレビューを行ったところ、日本の2050年における社会・経済やライフスタイルの状況の想定が最も重要であると考えられた。そこで、グループインタビュー形式の有識者ヒアリングで知見を収集し、シナリオ策定手法を踏まえて、シナリオを左右する要因を整理した。S-3全体に関するものでは、移民受け入れ、中国・インドの経済水準、意思決定の仕組み、原油価格が挙げられており、チーム間調整を進めるべき点である。本課題に関連するものでは、居住の動向、根源的な移動ニーズ、速度ニーズ、資源循環の規模、燃料電池車の普及可能性が挙げられ、既に別件で開催済みの参加型会議等より広範な情報収集を踏まえつつ、地域特性に応じた多様性を備えた複数ビジョンを構築していく計画である。

また、交通に起因する排出の構造を示す要因とバックデータを整理し、地域特性別交通施策別の削減量の見積を行い、対策の組合せによる目標達成に一定の目途を得た。

一方、乗用車に関して将来予測モデルを構築し、排出量の大幅増加の可能性を示唆した。また、大都市と地方都市で検討した交通施策メニューを、他の都市規模にも拡張し、実現可能性を考慮した削減余地の大きさを整理した。次年度は、各種技術施策の実施状況の違いによる市区町村別CO₂排出量削減目標をさらに検討し、その達成のために必要な交通施策について、地域類型別の実現可能性や有効性を念頭に置きつつ、具体的な事業量ベースに特定化する。さらに、そのための市区町村類型別施策ロードマップの提案へと進めていくことを予定している。なお、サブテーマ（1）の3.（4）に示す通り、近年の乗用車の走行量およびCO₂排出量は横ばいあるいは微減である。人口減少の本格化によって乗用車の利用動向がどのように変化していくかを今後注視しつつ、モデルの現況再現性を向上させる必要がある。

これまでの定性的な検討と定量的な検討を結びつけることで、2050年におけるビジョンと達成シナリオを数種類提示した。特に、短期の政策の方向性と長期的なロードマップを明らかにし、社会・経済的な影響についても把握する。

5. 本研究により得られた成果

- ・2050年のビジョン全体を左右する要因として、移民受け入れ、中国・インドの経済水準、意思決定の仕組み、原油価格を指摘した。また、交通ビジョンを左右する要因として、居住の動向、根源的な移動ニーズ、速度ニーズ、資源循環の規模、燃料電池車の普及可能性を指摘した
- ・都市や地域の交通施策によるCO₂削減効果を全国に適用するための基礎資料として、地域類型別の一人当たり自動車CO₂排出量と類型別人口を示した
- ・地域類型別および排出要因別の対策の組合せにより2050年にCO₂排出量約60%削減の目標達成が可能な手応えを得た
- ・市区町村レベルでの2050年までの乗用車CO₂排出量推計モデルを構築し、人口密度減少に伴う走

行量増加によって、今後も大幅な排出量増加が続く可能性を示した

- ・交通施策の実施にあたっては、東京・大阪大都市圏の周辺都市、その他の大都市圏の中心部において削減余地が大きいことを示した

6. 引用文献

- 1) OECD"OECD Guidelines towards Environmentally Sustainable Transport", 2002.
- 2) 持続可能な発展のための世界経済人会議(WBCSD)「Mobility2030」, 2004.
- 3) J. Whitelegg et.al."Selected international transport investment and funding frameworks and outcomes", A report for the Australian National Transport Secretariat, Eco-Logica reports, 2003.
- 4) P. Steen, K.H. Dreborg, J. Åkerman"Policy Scenarios for Sustainable Mobility in Europe – the POSSUM Project", Environmental Strategies Research Group/FOA, 1998.
- 5) A. Tuominen"Strategic Impact Assessment Methods for future transport in Europe", NECTAR Conference no 6, Espoo, Finland, 2001.
- 6) Scenarios for Sustainability,
http://www.scenariosforsustainability.org/howto_recipes.php (2005. 12. 15)
- 7) 松橋啓介, 工藤祐揮, 上岡直見, 森口祐一「市区町村の運輸部門CO₂排出量の推計手法に関する比較研究」, 環境システム研究論文集, 32, 235-242, 2004.

7. 国際共同研究等の状況

S-3プロジェクトの一員として、Open Symposium “Low-Carbon Society Scenario toward 2050: Scenario Development and its Implication for Policy Measures”にて欧州の専門家との間で意見交換を行った。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- ① Moriguchi, Y., H. Kato : European J. Transport and Infrastructure Research, 4(1), 121-145, 2004.
“EST case studies and perspectives in Japan”
- ② 松橋啓介, 工藤祐揮, 上岡直見, 森口祐一環境システム研究論文集, 32, 235-242, (2004)
「市区町村の運輸部門CO₂排出量の推計手法に関する比較研究」
- ③ 松橋啓介, 都市計画論文集, 39(3), 331-336(2004)
「大規模市民参加型まちづくりワークショップの事例報告 - 西オーストラリア州パース都市圏におけるフォーラム『都市との対話』の取り組み -」

<その他誌上発表(査読なし)>

- ③ 松橋啓介・J. Kenworthy: 都市計画、255, 20-23 (2005)
「エネルギー消費と人口密度」
- ④ 松橋啓介: 『長期的な戦略による効率的な道路交通システムの実現施策』日本交通政策研究

会, 1-16, 日交研シリーズA-397 (2005)

「京阪神大都市圏における小地域別トリップ・エネルギーと土地利用特性」

⑤ 松橋啓介：環境研究, 141, 22-28 (2006)

「持続可能な交通とまちづくりの方向性」

(2) 口頭発表 (学会)

② 工藤祐揮・松橋啓介・森口祐一・上岡直見・中口毅博：第21回エネルギーシステム・経済・環境カンファレンス (東京2005. 1. 26, 27) 同講演論文集 93-96

「ODデータに基づく運輸部門市区町村別CO₂排出量の推計」

③ 松橋啓介、工藤祐揮、上岡直見, 第1回人と環境にやさしい交通をめざす全国大会in宇都宮 (宇都宮 2005. 6. 25) 同論文集 61-62

「日本の交通CO₂削減における地方都市の交通CO₂削減の位置づけ」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

・環境省地球環境対策課が2005年度に実施した「地球温暖化対策とまちづくりに関する検討会」および環境省自動車環境対策課他が2005年度に実施したESTモデル事業「ESTステークホルダー会議」において、本研究の調査内容が活用された。

支える都市・地域空間構造・ライフスタイルへと改変していく取り組みが必要である。その実施には長期間を要することから、一刻も早く手をつける必要があると言える。この時、将来にわたって持続可能な交通体系を実現するためには、人口減少・少子高齢化による状況の変化を踏まえ、その交通体系がその地域の人々に高い利便性を提供し生活質向上に寄与することが求められる。以上の構図は図VI-1のようにまとめられる。

このような取り組みは、1990年代にOECDが提唱したEST（Environmentally Sustainable Transport）の概念によって包括され、特に欧州では多数の自治体で具体化が進められている。それらの事例を見ると、CO₂削減効果の期待できるLRT整備などの本格的な実施においては、幹線道路の再整備や、歩行者空間の確保、運賃収受の工夫、ロードプライシングやゾーンシステム等の都心部自動車乗り入れ抑制策など、いくつかの施策をパッケージ化し、中長期的な計画のもとに実施している。また、それらの施策を実施していくためには、国からの財政補助が必要な場合もあり、補助制度などの行政側の制度整備も検討する必要がある。

以上を踏まえ、本研究では、日本の運輸部門における長期的なCO₂排出削減目標を達成しうる政策群（パッケージ）の検討に資する、都市・地域でのEST推進に関する情報を提供するために、特に自動車利用増加に伴うCO₂排出増加への寄与が著しく、今後もその傾向が続くと予想される乗用車による旅客交通を対象として、地域特性に応じた実施可能で環境負荷の小さい交通体系の提示と、その実現に向けた中長期的な施策パッケージを提案することを目的とする。そのために、市区町村単位でCO₂排出量削減目標を定量的に算出するモデルシステムを構築し、2020年および2050年での推計を試みる。さらにその結果を踏まえて、市区町村類型別にその地域特性や施策実施効果・実施可能性を考慮した交通施策パッケージの提案を行う。さらに、地方都市を対象に、都市構造やライフスタイルの変革を促す施策が含まれたCO₂削減目標設定型戦略工程表<ロードマップ>を導出する。

2. 市区町村別乗用車CO₂排出量削減目標達成シナリオの作成

2.1 シナリオ作成の考え方

本研究が設定するCO₂排出量削減目標達成シナリオの全体構造を図VI-2に示す。本研究は乗用車の走行に伴うCO₂排出を対象とする。CO₂削減目標値は、OECDのESTプロジェクトで示されている目標を参考に「日本全体で2020年に2000年比25%削減、および2050年に2000年比60%削減（1990年比約50%削減）」とする。

CO₂削減目標の各市区町村への割り当て方法は、本研究では最も簡便な基準として、人口に比例して削減量を割り当てるものとする。つまり、どの市区町村でも削減率は同じとなる。削減目標値は「総量比」、「1人あたり排出量比」で示される。市区町村構成は2000年10月現在のものを用いる。

次に、燃料・車両技術に関する施策（EST1）の全国的な進展による削減量の中・長期（2020、2050年）で見積もる。そしてCO₂排出量（BAU）を推計し、技術政策（EST1）の効果を見込んだ上で、削減目標を補えない分について交通施策（EST2）による必要削減量を算出する。最後に交通施策（EST2）のシナリオ分析を行い、必要実施量の検討を行う。

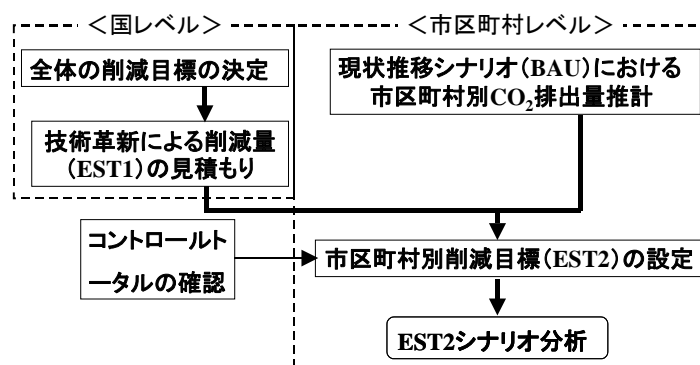


図 VI-2 CO₂ 排出量削減目標達成シナリオ作成の全体フロー

2.2 技術施策（EST1）による削減量の見積もり

技術施策（EST1）の全国的な進展によるCO₂排出削減量を見積もる。乗用車の保有台数、総トリップ長は一定とし、技術革新によって生じる乗用車の部品提供など資源的問題は考慮していない。また、乗用車の区分はエンジンの種類のみとし、買い替え時期の変更は起こらないものとする。

(1) 中期（2020年）技術トレンドシナリオ

中期技術トレンドシナリオとして、既存インフラを用いるハイブリッド自動車や低燃費・低排出ガス車の普及を考える。なぜならば、新規燃料補給所を伴う代替燃料自動車はインフラ整備に多くの時間を要し、2020年の時点で広く普及しているとは考えにくいためである。本研究では、最もCO₂排出量を削減できるハイブリッド車に着目し、「ハイブリッド大量普及シナリオ」、「ハイブリッド普及停滞シナリオ」、「ハイブリッド・低燃費自動車共存シナリオ」の3種類を作成する。なおハイブリッド車はすべてガソリン自動車とする。「ハイブリッド大量普及シナリオ」は、日本自動車販売協会連合会が公開している新車登録台数を年間の乗用車の買い替え台数として、乗用車の買い替えた車がすべてハイブリッド乗用車であるとして普及率を算出する。「ハイブリッド普及停滞シナリオ」では国土交通省が発表した2000年から2003年までの低燃費車普及率の推移²⁾を2020年まで一定とする。「ハイブリッド・低燃費自動車共存シナリオ」では上述した2つのシナリオの中間値を設定する。作成したシナリオによるCO₂削減率（台キロあたり）の見積もりを表VI-1に示す。

(2) 長期（2050年）技術トレンドシナリオ

表 VI-1 中期（2020年）技術シナリオ

シナリオ	普及率			CO ₂ 削減率(2000年 比台キロあたり)
	ハイブリッド	低燃費自動車	それ以外	
ハイブリッド大量普及	83%	17%	—	43.4%
ハイブリッド普及停滞	1%	55%	44%	5.7%
ハイブリッド・低燃費自動車共存	42%	45%	13%	29.2%

2050年には、新規インフラを伴う代替燃料自動車が普及可能となると考えられることから、既存インフラを用いる代替燃料自動車と、新規インフラを用いる代替燃料自動車の両方の普及について検討が必要である。本研究では、新規代替燃料自動車として、適用範囲が広い燃料電池自動車を考え、シナリオを作成する。

長期においても中期と同様に3種類のシナリオを作成する。すべての乗用車が燃料電池自動車に変わるとする「燃料電池自動車大量普及型シナリオ」、燃料電池自動車の普及が技術的な問題などで全く普及しないと想定した「ハイブリッド自動車中心シナリオ」、両者の中間程度に普及する「燃料電池・ハイブリッド共存シナリオ」である。シナリオ作成時の各乗用車の原単位は中期技術トレンドと同様に、日本自動車工業会が公表している平均燃費を用いる。また「燃料電池自動車大量普及型シナリオ」についても中期技術シナリオで用いた買い替え台数を用いる。燃料電池自動車の燃料である水素を生成する方法は副生水素を利用すると仮定する。作成したシナリオを表VI-2に示す。

表VI-2 長期（2050年）技術シナリオ

シナリオ	普及率			CO ₂ 削減率(2000年 比台キロあたり)
	燃料電池	ハイブリッド	低燃費自動車	
燃料電池自動車大量普及	90%	8%	2%	62.8%
ハイブリッド中心	—	93%	7%	49.4%
燃料電池・ハイブリッド共存	45%	50%	5%	56.2%

2.3 市区町村別乗用車 CO₂ 排出量の現状推移（BAU）シナリオの作成

(1) モデルの全体構成

各市区町村における中期（2020年）、長期（2050年）の乗用車CO₂削減目標を決定するために、まず図VI-3に示すCO₂排出量推計モデルを作成し、これを用いてBAUシナリオにおけるCO₂排出量を推定する。

BAUシナリオとは、経済・人口・土地利用等の社会経済指標の伸び、および技術水準や施策の実施水準が現状のまま推移していくものと仮定し、交通需要の趨勢的な伸びを設定した上での推計結果であり、施策効果を計るためのベースラインとなる。

市区町村別CO₂排出量推計モデルは、松橋ら³⁾による推計モデルを参考とし、市区町村 i

の乗用車CO₂排出量 E_i が(1)式で決定されると考え、各変数の予測を通じて E_i を推計するものとする。

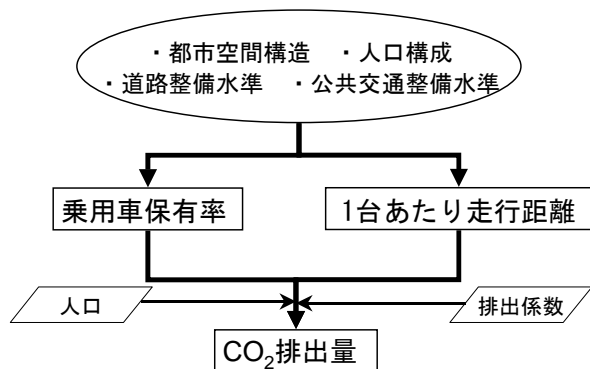
$$E_i = P_i \cdot T_i \cdot e \quad (1)$$

ここで P_i : 乗用車保有台数[台]

T_i : 乗用車1台あたり走行距離[km/台・年]

e : 排出係数[g-CO₂/台km]

乗用車保有台数 P_i は人口と乗用車保有率の積であり、人口は厚生労働省社会保障・人口問題研究所のコーホートを用いた推計値を用いる。乗用車保有率および1台あたり走行距離 T_i は図VI-3の方法で推計する。乗用車保有率、乗用車走行距離の各モデルのパラメータは、2000年の市区町村別データを利用して推定を行う。また、排出係数 e については、まず現状のままであると想定し



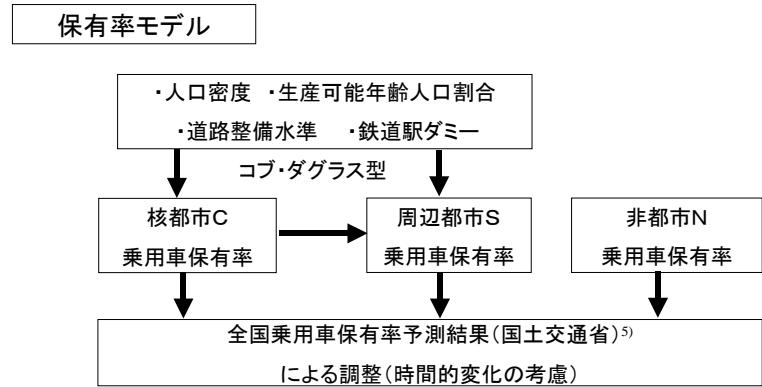
図VI-3 市区町村別乗用車CO₂排出量推計モデルの構成

て推計を行う。

ここでは乗用車を対象としていることから、鉄道・航空が中心となる地域間の旅客交通については推計の対象外となっている。旅客交通CO₂の9割近くは乗用車起源であり、代替手段である鉄軌道やバスは乗用車に比べCO₂排出が移動距離あたりで小さいことから、乗用車CO₂排出量の推計によって特に都市・地域内旅客交通起源の大半が捕捉できているといえる。

(2) 乗用車保有率モデル

図VI-4に乗用車保有率モデルのフローを示す。市区町村間の差異を空間構造やインフラ整備水準で表現するとともに、時系列推移に関しては国土交通省が示した日本全国値の予測結果をコントロールトータルとして用い、この値と各市区町村モデルによる推計結果の総和との比を乗じることで調整を行う。



本研究では、推計モデルを、国土交通省の都市・地域レポートで示した広域都市圏の定義を用いて3つの地域分類に分けて構築する。

C: 核都市

- a) 人口 10 万人以上で、昼夜間人口比率が 1 以上の市区町村
- b) a)の都市で都市間距離が 20km 以内のものは 1 つにまとめる。

S: 周辺都市

- a) 核都市への通勤・通学者が 500 人以上の市町村
 - b) 核都市への通勤・通学者／在住通勤・通学者が 0.05 を上回る市町村
- ただしa)、b)の基準より2つ以上の都市圏に含まれる市町村は、核都市への通勤・通学者の多いほうの都市圏に含まれるものとする。

N: 非都市

- 1)、2)に当てはまらない市町村

周辺都市Sのように経済活動や生活基盤が核都市の影響を受けている場合、核都市Cの影響が大きいことからその乗用車保有率に補正係数を乗じることにより推計を行う。また非都市Nにおいては、市区町村によって産業・年齢別人口に極端な差が生じているため、本研究では2000年現在の値をそのまま用いる。したがって全国平均値と同じ増加率となる。

核都市Cのモデルは、加藤・林（1996）⁴⁾のモデル構造を参考として、(2)式のようにコブ・ダグラス型とする。

$$y_c = \gamma \cdot D_d^{\gamma_2} \cdot A^{\gamma_3} \cdot R^{\gamma_4} \cdot \exp(\gamma_5 \cdot d_s) \quad (2)$$

ここで、 y : 乗用車保有率[台/1000人]

A : 生産可能年齢人口割合[%]

D_d : DID人口密度[人/km²] R : 人口1人あたり道路延長[km/人]

d_s : 鉄道駅ダミー ($d_s=0,1$) $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$: パラメータ

周辺都市 S のモデルは (3) 、(4)式のように定式化する。

$$y_s = y_c \cdot g \quad (3)$$

$$g = \alpha \cdot D^{\kappa_1} \cdot \left(\frac{R}{R_c} \right)^{\kappa_2} \cdot A^{\kappa_3} \quad (4)$$

ここで、 g : 補正係数、 D : 可住地人口密度[人/km²]、

R_c : 当該都市圏の核都市の人口1人あたり道路延長、 $\alpha, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$: パラメータ

補正係数 g はその周辺都市固有の要因を示す指標である。DID人口密度ではなく可住地人口密度を利用したのは、人口集中地区が存在しない市町村が多くあるためである。また、公共交通整備水準は外し、代わりに核都市に対する対象都市からアクセスする乗用車の利便性を考慮している。

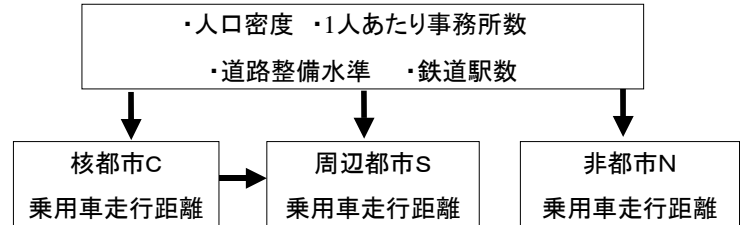
(3) 乗用車走行距離モデル

図VI-5に乗用車走行距離モデルのフローを示す。今後の人口減少によって人口密度が低下する結果、通勤などの移動距離が増加することを表現できる。

乗用車保有率モデルと同様の地域分類を用い、さらに、周辺都市

は核都市の影響を受けると考え、説明変数に核都市との距離を考慮する。

核都市 C のモデルは(5)式のコブ・ダグラス型とする。



図VI-5 乗用車走行距離モデルのフロー

$$L_c = \alpha_0 \cdot P^{\alpha_1} \cdot \exp(\alpha_2 \cdot S) \cdot R^{\alpha_3} \cdot F^{\alpha_4} \quad (5)$$

ここで、 L_c : 乗用車1台あたり走行距離[km/台]

S : 駅数[駅]

P : 可住地人口密度[人/km²]

R : 道路実延長[km]

F : 人口1人あたり事業所数[所/人]

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: パラメータ

次に周辺都市 S のモデルを(6)式に示す。周辺都市では核都市への通勤者が多いため核都市との距離（中心地点間）を加える。

$$L_s = \alpha_0 \cdot P^{\alpha_1} \cdot \exp(\alpha_2 \cdot S) \cdot R^{\alpha_3} \cdot F^{\alpha_4} \cdot d^{\alpha_5} \quad (6)$$

ここで、 d : 核都市との都市間距離[km]

最後に非都市圏 N のモデルを(7)式に示す。説明変数には、産業構造とともに生活水準として小売店数を加えている。

$$L_N = \alpha_0 \cdot P^{\alpha_1} \cdot R^{\alpha_2} \cdot B^{\alpha_3} \cdot F^{\alpha_4} \quad (7)$$

ここで、 B : 小売店数[飲食店数]

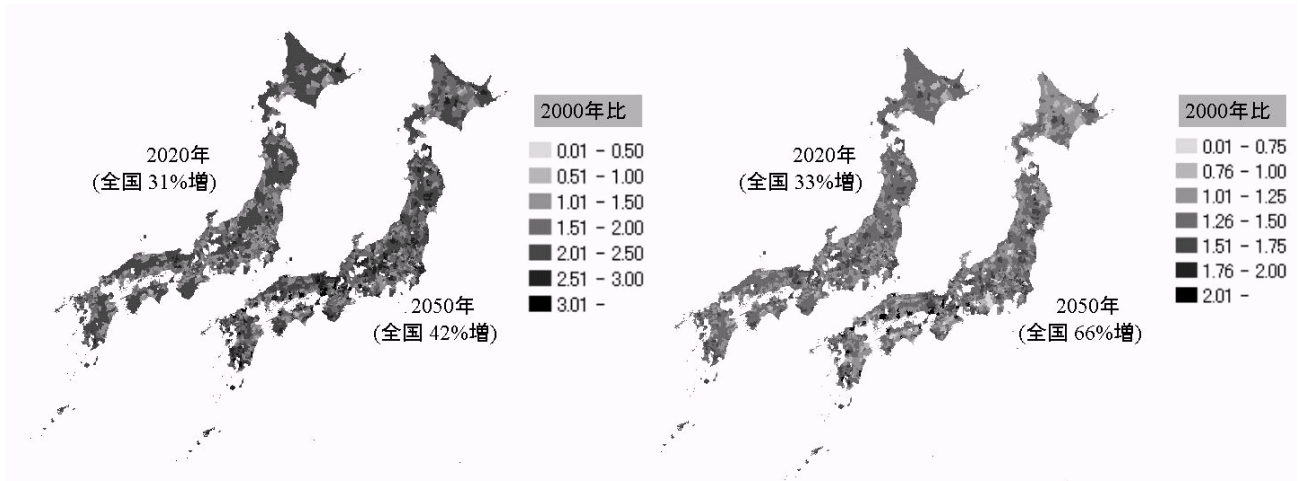


図 VI-6 乗用車保有率推計結果

図 VI-7 乗用車走行距離推計結果

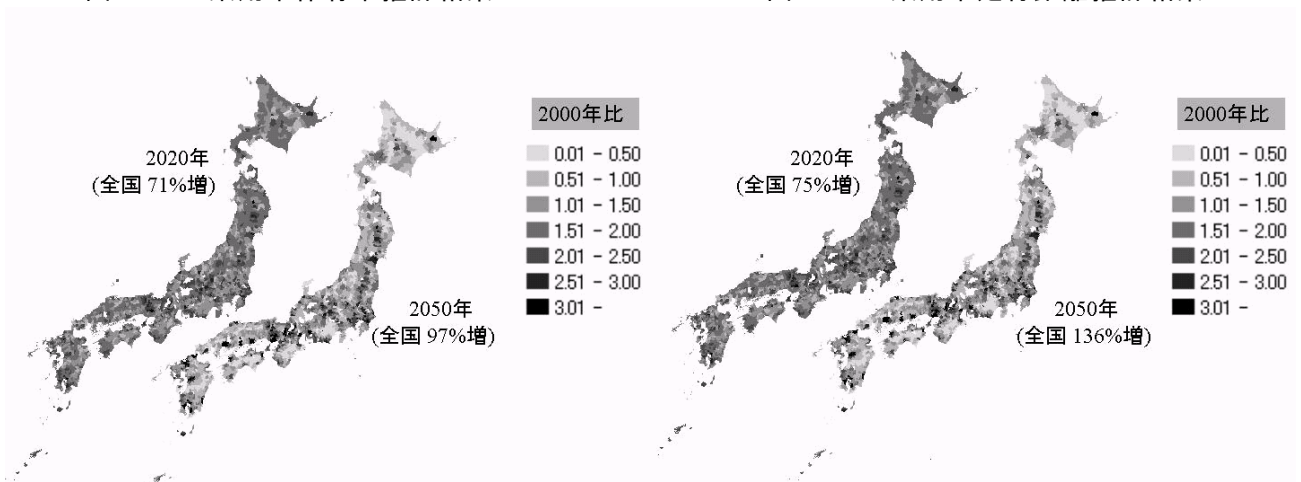


図 VI-8 乗用車CO₂排出量推計結果

図 VI-9 1人あたり乗用車CO₂排出量推計結果

(4) BAUシナリオでの市区町村別CO₂排出量推計結果

以上で構築したモデルを用い、現在の排出技術で固定（燃費、車両構成が不変）とした場合（BAU）の2020年、2050年の市区町村別推計を行う。

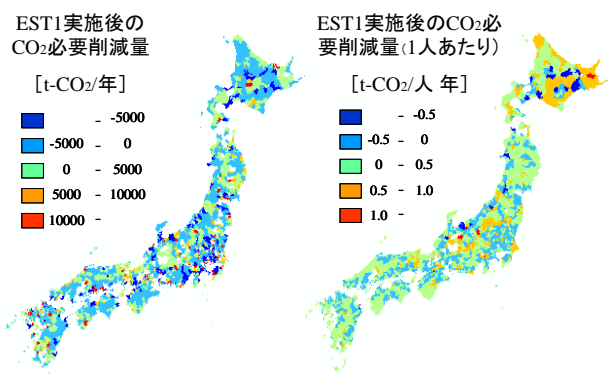
図 VI-6 に乗用車保有率、図 VI-7 に乗用車走行距離、図 VI-8 に乗用車CO₂排出量、図 VI-9 に1人あたり乗用車CO₂排出量の推計結果を示す。

推計より、乗用車保有率は人口減少を上回るペースで引き続き増加し、人口減少により乗用車保有台数は減少に向かうが、1台あたり走行距離が増加するため、総CO₂排出量推計は増加する。2020年、2050年のCO₂排出量推計の増加率は各2000年比1.71、1.97となる。したがってBAUの場合、CO₂排出量は増加の一途を辿る結果となっている。ただし、この値には過大推計の疑いがあり、モデルの構造については今後も精査が必要である。

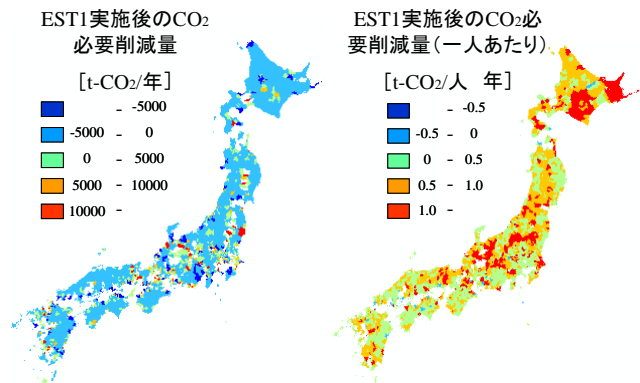
また、総CO₂排出量では都市部の増加が多いものの、1人あたりの値で見ると、人口減少の著しい郊外部・地方部で、人口密度低下に伴うトリップ長増加も相まって増加が大きくなっている。

(5) 市区町村別削減目標（EST2）の設定と都市構造変化による達成可能性検討

本章では、EST2による市区町村別削減目標の設定を行う。2章で示した削減目標値から算出さ



図VI-10 2020年CO₂必要削減量
(EST1「ハイブリッド大量普及シナリオ」適用)



図VI-11 2050年CO₂必要削減量
(EST1「燃料電池自動車大量普及シナリオ」適用)

れるCO₂排出量と、上述の現状推移（BAU）シナリオにおけるCO₂排出量推計値の差が、EST1およびEST2によって削減すべき目標量である。その目標量から3章で見積もったEST1による削減量を差し引いた値がEST2による削減目標量となる。

EST1として最も削減効果の高い「ハイブリッド大量普及シナリオ」、「燃料電池自動車大量普及シナリオ」をそれぞれ適用した場合の残りの必要削減量を図VI-10, 11に示す。この図から、中長期ともにCO₂排出量削減目標達成可能な市区町村がいくつか見受けられるが、1人あたりにすれば必要削減量は大きく、依然不十分であることがわかる。これは、大幅な人口減少によるものであり、人口減少が著しい地方部に必要削減量の大きい地域が多いことがわかる。

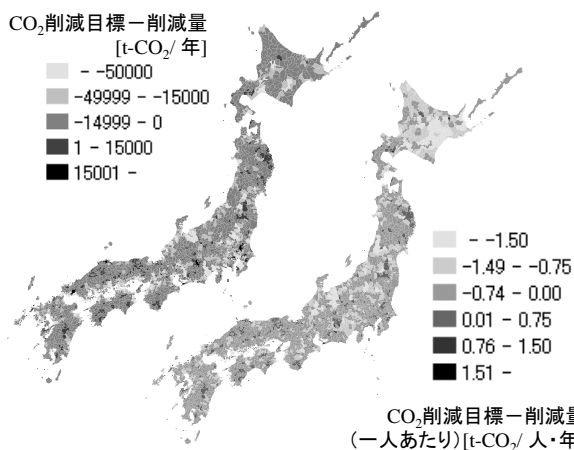
EST2の施策としては様々なものが考えられるが、ここでは都市域のコンパクト化によって乗用車走行距離自体を低下させるシナリオを考える。シナリオの設定を表VI-3に示す。

表VI-3 設定したEST2シナリオ

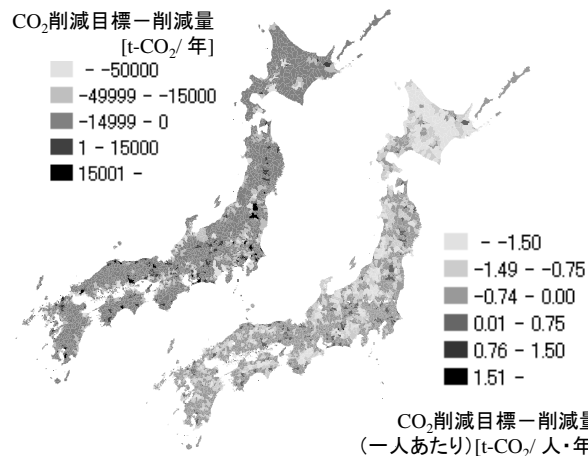
シナリオ名	人口密度	可住地面積	施設整備量
都市域拡大型シナリオ(BAU)	人口増加地域は一定だが、人口減少地域は可住地面積に従う	人口増加地域は人口密度に従い、人口減少地域は一定	変なし
コンパクト化シナリオ	人口増加地域は増加比に従い、人口減少地域は一定	人口密度に従う	可住地面積に従う

- (1) 人口減少地域では、人口密度は変化せず、可住地面積が減少する。
- (2) 人口増加地域では、人口密度が増加し、可住地面積は変化しない。
- (3) インフラ・都市施設整備量は可住地面積の減少に応じ、産業規模（ここでは事務所数）は人口の増減に応じて、比例的に変化する。
- (4) 燃費の将来変化については、トヨタ自動車・みずほ情報総研⁵⁾による推計値を用いる。

分析した結果を図VI-12および図VI-13に示す。BAUと比較して、都市域のコンパクト化はおおよそ、2020年次に20%、2050年次には30%を超える削減効果があり、その結果どのEST1シナリオについても、EST1だけでは達成できなかった全体の削減目標が、EST2の同時実施によって達成可能であることが示された。燃料電池大量普及シナリオでは全市区町村において目標が達成され、2050年には1990年比70%以上のCO₂削減効果を得る。市区町村別では、EST1シナリオによっては非都市圏において一部達成不可能な地域が見られるが、大都市部においての削減が顕著であり、それによって補うことが可能であることが分かった。これは人口密度増加と都市施設の減少によって乗用車保有率が大きく減少したことが要因と考えられる。地域別に見ると、北海



図VI-12 2020年（CO₂削減量目標－削減量）
（EST1「ハイブリッド普及停滞シナリオ」適用）



図VI-13 2050年（CO₂削減量目標－削減量）
（EST1「ハイブリッド中心シナリオ」適用）

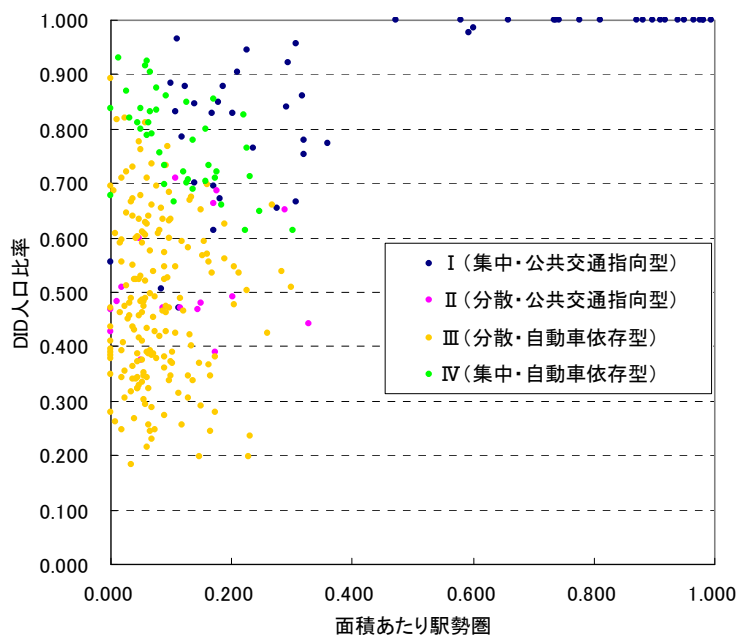
道、北関東、および東海地域において排出量が大きく、都市域コンパクト化による効果が高い地域は、人口密度が低く今後も人口の急増が考えにくい大都市近郊の周辺都市であることも確認できた。

3. 地域特性に応じたEST提案の方法論作成

3.1 地域特性の考慮の必要性

前章で、長期的な旅客交通CO₂削減を達成するためには、全国一律の自動車車両・燃料技術の改善だけでは不十分であり、地域単位での交通体系改変策の実施が必要となることや、各市区町村の削減必要量は大きく異なることが明らかとなった。そこで、EST推進のためには、各市区町村の地域特性に応じて適切な施策パッケージを提案し、それをどの程度実施すれば削減必要量を満たすことができるかを判断する必要がある。例えば、東京や大阪のように公共交通網が既に飽和状態にあり、公共交通利用分担率が高い地域では、公共交通利用促進による効果は逆に期待しづらいと考えられ

る。しかし、自動車依存傾向が高い一方で都心部が密集し、市街地も比較的拡散していない地域では、公共交通の新規整備や利用促進によるCO₂排出量削減が十分期待できると予想される。



図VI-14 総面積あたり駅勢圏面積比率
とDID人口比率との関係（中心都市）

地域特性に応じて交通施策を変更していくことの必要性は、図VI-14から推察することができる。この図は、都市雇用圏中心都市（都市雇用圏の定義、図中のⅠ～Ⅳの分類については5章で示す）を、公共交通整備水準を表す「総面積あたり駅数（駅数を半径1kmと設定、ただし新幹線駅は除外）」と都市部への人口集約性を表す「DID人口比率（DID人口/総人口）」の両指標を用いてプロットしたものである。図の右上に分布する市区町村は公共交通が飽和状態にある地域である。一方、左下に分布する市区町村は公共交通が不十分である上に都市域も拡大しているために、公共交通整備を行っても都市域が現状のままであればCO₂削減効果は期待しづらい地域である。公共交通機関の新規整備が最も有効と考えられるのは、都市域拡大がある程度抑制されていて公共交通整備が飽和状態にない、図の左上に分布する地域であると推察される。

3.2 ESTに資する基幹公共交通システム選定手法

(1) 全体構成

ここでは、適材適所なEST施策パッケージの選定を行うための方法論として、特に、その軸となる基幹公共交通システムの整備・拡充に関するCO₂削減効果や採算性を考慮したシステム選定の手法を構築する。図VI-15は分析のフローを示したものである。本分析は3章と同様、市区町村を分析単位とする。

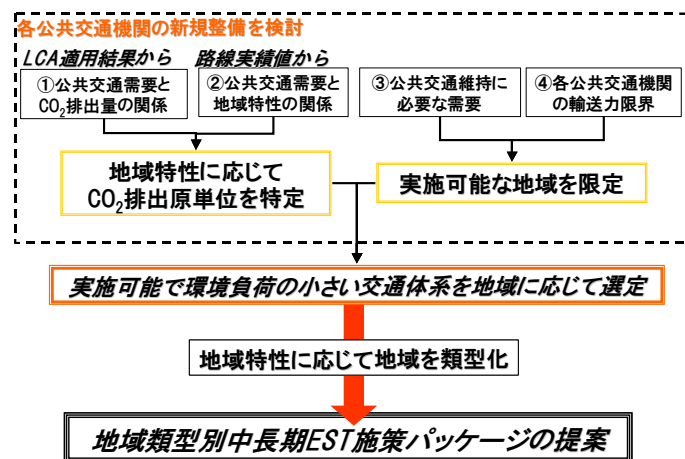
公共交通機関には様々な種類があり、それぞれの特徴に応じて導

入の有効性が異なる。本研究では、鉄道・LRT (Light Rail Transit) ・BRT (Bus Rapid Transit) ・新交通システム (AGT: Automated Guideway Transit) ・モノレール・GWB (GuideWay Bus) の新規整備を対象として、既存鉄道・バス利用、および自動車利用との輸送人kmあたりCO₂排出量の比較を行う。また、各交通機関の導入可能性を検証するために、採算性や輸送力からの評価を合わせて行う。これらはいずれも、地域特性との関係として示される。

本手法では、①各公共交通機関の需要に応じたCO₂排出量の推定結果、および、②現存する国内中量輸送機関の輸送実績と実施地域の相関分析から、中量輸送機関の輸送人kmあたりCO₂排出量を地域特性に応じて特定する。さらに、③公共交通維持に必要な需要（採算性と需要の関係）および④各公共交通機関の輸送力の検討から、公共交通整備が実施可能な地域を限定する。これにより、地域特性に応じた「実施可能で環境負荷の小さい交通体系」の選定が可能となる。

(2) LCAによる公共交通機関導入のCO₂排出量評価

輸送機関のCO₂排出量は、通常、交通関係エネルギー要覧等によって提供される輸送人kmあたり走行起源CO₂排出量の全国平均実績値で評価・比較されることが多い。しかし、路線の新設・整備の場合には、それに伴うインフラ建設や車両製造から発生する環境負荷を考慮する必要も生じる。大都市部の地下鉄のように輸送密度が高い輸送機関では走行段階の環境負荷が卓越するが、



図VI-15 地域別EST施策パッケージ選定フロー

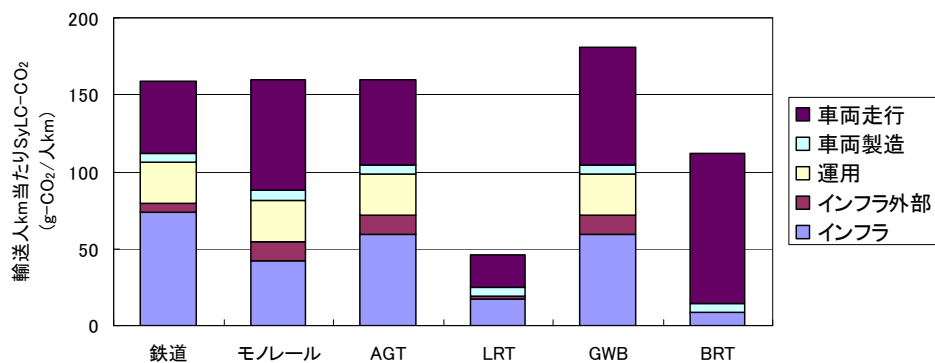


図 VI-16 輸送人kmあたりSyLC-CO₂(需要量10,000人/日)

輸送密度の低い中量輸送機関では建設段階の環境負荷が大きくなる可能性がある。

そこで本研究では、LCA (Life Cycle Assessment) を適用し、各輸送機関についてその施設建設や車両製造における必要資材の調達・輸送から建設・製造、運用、更新に至るまでの各ライフステージにおける排出量の推計を行う。推計の詳細は長田ら(2006)⁶⁾を参照されたい。

都市部で臨海地域でなく高架下部構造が比較的大規模とならない地域を想定し、延長10kmの仮想的な路線を考え、各輸送機関を導入することを想定し、各輸送機関について1日往復の需要量を10,000人/日とした場合のSyLC-CO₂ (輸送機関のシステム全体でのライフサイクルCO₂) を推計する。

SyLC-CO₂推計値を輸送人kmあたりの値に換算した結果を図VI-16に示す。この結果によれば、高架構造を有する輸送機関 (AGT・モノレール・GWB) が大きな値となっている。これは、本体構造物 (インフラ部) の建設はもちろん、付帯構造物 (インフラ外部) の運用分によるCO₂排出量も大きくなっているためであり、それらの輸送機関全体に占める割合は7～8割に達する。

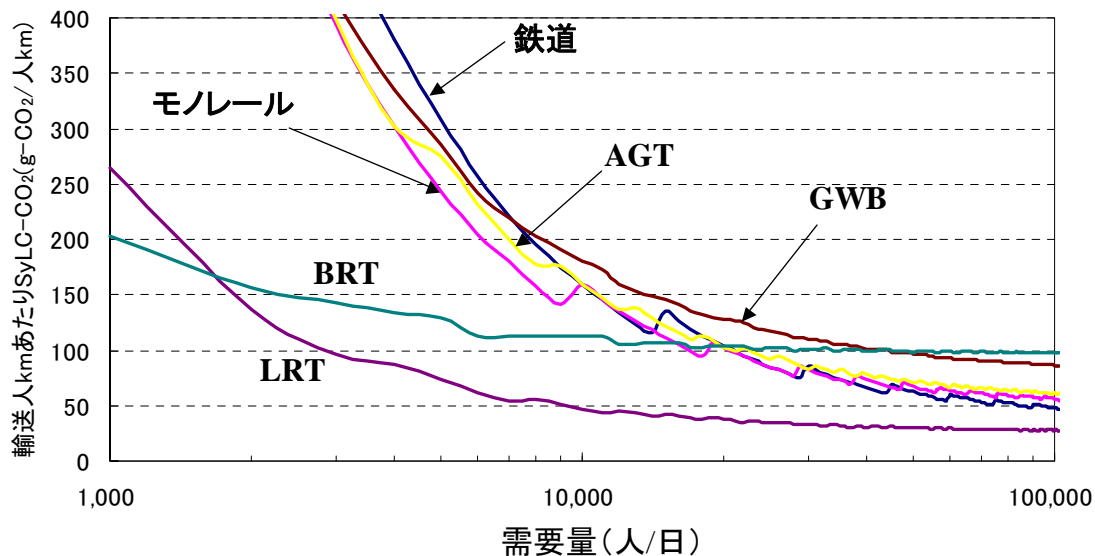
LRTは全ライフステージにおいて、SyLC-CO₂が小さくなっている。これは、必要とするインフラが少ないことや、車両定員に対する車両重量が小さいために車両製造におけるCO₂排出量が小さくなることが原因である。BRTはインフラ建設段階のSyLC-CO₂が小さく、ほとんどを走行段階が占める。この値はバスの燃費によって決まる。GWBも同様だが、GWBの方が少ない加減速回数のため燃費がよく、走行段階でのCO₂排出量が小さい。しかし、GWBは運行規模に対して巨大なインフラを有しているため、インフラ建設段階におけるSyLC-CO₂が大きくなっており、ライフサイクル全体ではBRTのSyLC-CO₂が小さくなっている。

(3) 需要量によるCO₂排出量の感度分析

次に、インフラ建設分は需要量の変化と無関係に一定とし、輸送密度の大小が運行本数の増減に反映されるという仮定のもと、輸送密度に対する輸送人kmあたりSyLC-CO₂の感度分析を行う。

図VI-17にその結果を示す。いずれの輸送機関も、需要量の増加によって輸送人kmあたりSyLC-CO₂は減少するが、最終的には収束し、それ以上減少しなくなる。これは走行以外のCO₂排出量が人kmあたりではほぼゼロになるためである。

LRTおよびBRTのSyLC-CO₂はほとんど車両走行に起因することから、需要量によるSyLC-CO₂の減少幅はあまり大きくならない。需要量がおおよそ2,000人/日以下では、インフラ建設分が最も小さいBRTが、またそれ以上ではインフラ建設分、車両走行分ともにCO₂排出量が小さいLRTが、



図VI-17 需要量変化に伴う輸送人kmあたりSyLC-CO₂の感度分析結果

それぞれ輸送人kmあたりSyLC-CO₂最小の輸送機関となる。また、走行段階のCO₂排出量が多いBRTは、需要量20,000人/日前後でAGT・モノレール・GWBなどの高架構造を有する輸送機関よりもCO₂排出量が大きくなり、40,000人/日前後で燃費の良いGWBより大きくなる。

(4) 地域特性に応じたCO₂最小となる輸送機関の特定

(3)では需要量とCO₂排出量との関係を明らかにしたが、需要量と地域特性との関係を明らかにしなければこの結果を活用することができない。そこで、現存する路線における輸送密度と地域特性との関係分析を行い、LCA結果と組み合わせて地域特性に応じて輸送人kmあたりのSyLC-CO₂を表現することを試みる。

公共交通機関需要量の実績を表す代表的な値として輸送密度が挙げられる。輸送密度は、線区の1日あたり輸送人kmを営業kmで除した値である。上記のLCAにおいては「輸送密度はどの駅間も一定」と設定しているため、そこで用いられている需要量（人/日、往復）はその需要量に対応した輸送密度（人/km）と等しくなる。

国内の地下鉄・路面電車・AGT・モノレールの輸送密度、表定速度などの実績値（平成12年度鉄道統計年報などより）、および導入地域の地域特性を示す指標（平成12年度国勢調査などより）を抽出し、国内の各路線の輸送密度と導入地域の各種指標との関係をみると、DID人口密度や人口などが比較的高い相関を示したが、統計的に高い有意性を得ることができなかった。これは、様々な沿線環境によって輸送密度が影響を受けているためであると考えられ、全路線に共通の傾向を抽出するのは難しいことが明らかとなった。

そこで、表VI-4に示すように、各路線をその機能および表定速度によってA～Fの5つに分類する（地域外からの利用が多く輸送人員が大きい東京モノレール、ゆりかもめ、旧営団地下鉄、東京都営地下鉄、および極端に輸送人員の小さい山万ユーカリが丘線を分析対象から除外している）。この分類を用いて、様々な地域特性変数との相関分析を行った結果、DID人口密度に関して図VI-18のような傾向が得られた。参考のため、2001年3月21日開業のためこのデータが含まれない名

表 VI-4 公共交通路線の機能による分類

路線機能による分類		表定速度	輸送機関	路線数	分類	路線
地方都市市内周遊型	地方都市(東京、大阪、およびその郊外都市を除く)における基幹路線	20km/h以下	路面電車	15	A	札幌市内軌道線、富山地方鉄道軌道線、広島電鉄市内軌道線、長崎電気軌道、鹿児島市交通局、ほか
		20km/h以上		3	B	広島電鉄宮島線、筑豊電気鉄道、京阪電気軌道
			モノレール、AGT	3	C	桃花台新交通、北九州高速鉄道、広島高速交通
大都市交通補完型	東京、大阪、および、その郊外都市、または地方人口百万人以上都市における通勤・通学路線	20km/h以下	路面電車	5	D	東急世田谷線、東京都交通局荒川線、阪堺電気軌道、京福電気鉄道嵐山軌道線、江ノ島電鉄
		20km/h以上	モノレール、AGT	8	E	埼玉新都市交通、横浜新都市交通、神戸新交通、大阪市新交通、湘南モノレール、千葉都市モノレール、多摩都市モノレール、大阪高速鉄道
大都市交通中心型	東京、大阪、および、その郊外都市、または地方人口百万人以上都市における基幹路線			地下鉄	9	F

古屋ガイドウェイバスと、路線バスのため鉄道統計年報に含まれていない基幹バス新出来町線についても図上にプロットしている。また、各機関について単回帰分析を行った結果得られた関係式を図中に示している。

この関係を用い、LCA結果と組み合わせ、DID人口密度に応じた輸送人kmあたりのSyLC-CO₂を表現すると図VI-19のような結果となる。LRTについては、表定速度の低い場合として、国内路面電車の多くが分類される路線分類Aと、専用軌道中心の路線で表定速度の高い路線分類Bの両方の場合を想定し、各分類についての傾向を用いる。BRTについてもLRTと同様の分類を採用する。GWBについては、名古屋ガイドウェイバスの表定速度が30km/hであることから、表定速度の高い路線分類群(B、E)の傾向を用いて推計し、さらに、鉄道、AGT、モノレールに関しては事例が多い路線分類群(B、C、E)の傾向を採用する。また、鉄道・バスについては走行起源CO₂排出量の結果、すなわち既存の鉄道・バス利用の場合について輸送人kmあたりSyLC-CO₂の値と、自動車の排出原単位(平成18年度交通関係エネルギー統計要覧から)の値を示している。

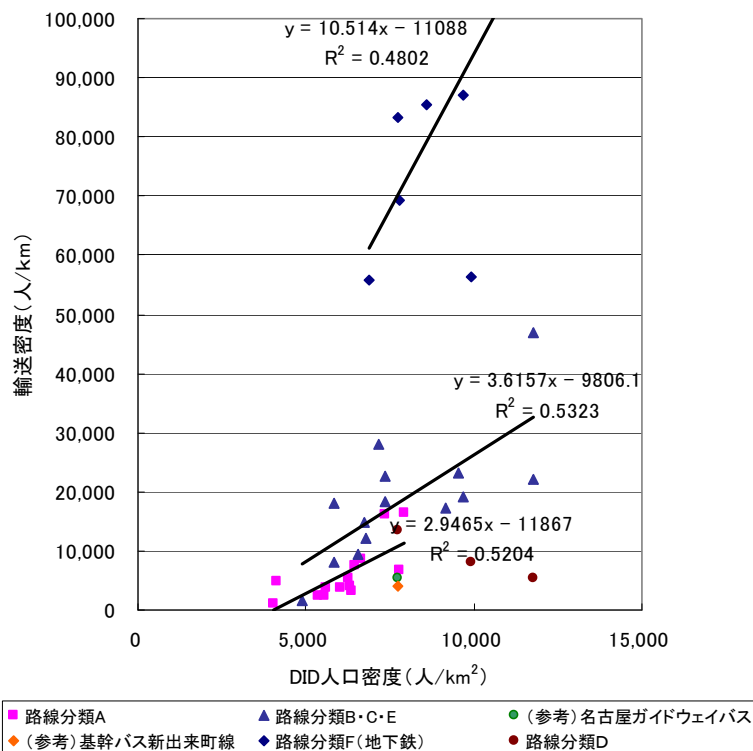
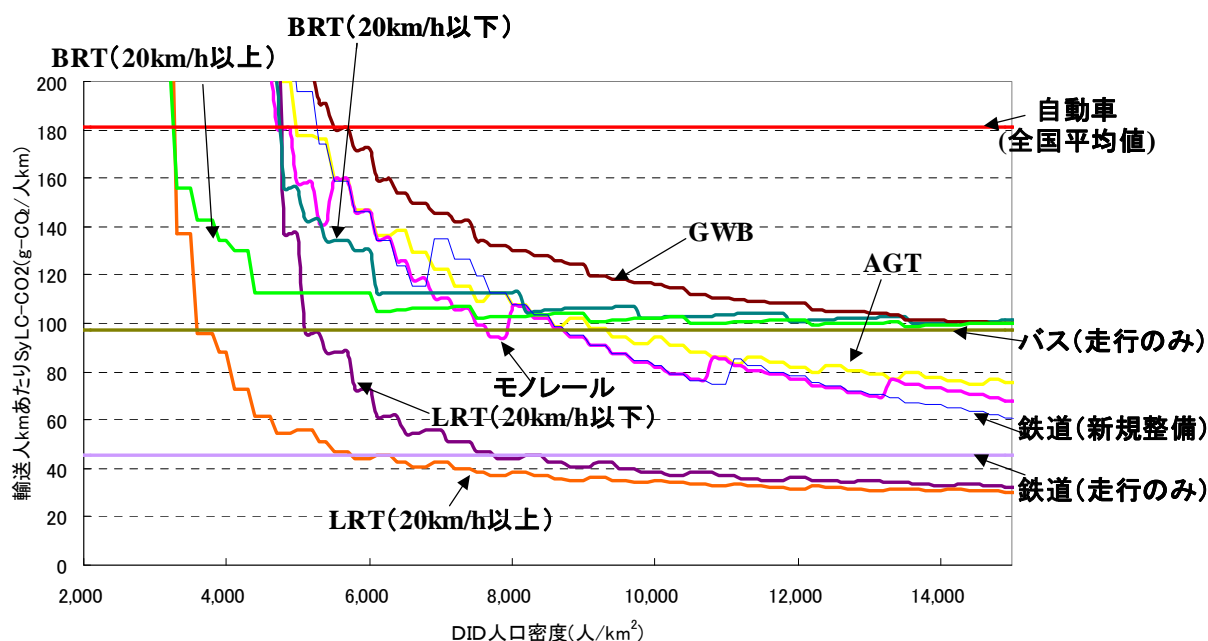


図 VI-18 輸送密度とDID人口密度との関係(平成12年度)



図VI-19 DID人口密度の変化に伴う輸送人kmあたりSyLG-CO₂の変化

図VI-19によれば、ほとんどのDID人口密度の値に対して、LRTが輸送人kmあたりSyLG-CO₂最小の輸送機関となる。ただし、DID人口密度が低い地域では、LRTやBRTなどの新規公共交通導入よりも既存の鉄道・バス路線を活用するほうが環境負荷の小さい場合も出てくる。また、本分析における設定によれば、LRTやBRTの表定速度が、現存する多くの路面電車と同程度の低い表定速度（20km/h以下）の場合、実施効果が期待できるDID人口密度の範囲が極めて小さくなる点も重要である。

表VI-5 各輸送機関の採算性・輸送力からみた導入可能性の範囲（DID人口密度）

実施可能地域	DID人口密度(人/km ²)	
	採算性限界(min)	輸送力限界(max)
LRT	3,600	10,400
BRT	3,600	6,800
AGT	3,600	11,800
モノレール	3,600	22,600
GWB	3,600	6,800
鉄道	3,600	30,000

(5) 導入可能でCO₂削減効果が得られる公共交通機関の特定

以上により、地域特性に応じて環境負荷が小さい交通体系を選定することが可能となった。しかし、環境負荷が最小であっても、実際に実施できるかどうかは、路線の採算性や輸送機関ごとの輸送力の限界を考慮する必要がある。本節では、これらを定量的に明らかにすることにより、公共交通整備の実施可能な地域を特定する必要がある。

詳細については省略するが、採算性および輸送力の検討から、各輸送機関が導入可能な地域の範囲は、表VI-5に示すようにDID人口密度によって設定することができる。

表 VI-6 都市雇用圏の設定（金本ら（2002）⁷⁾）

都市圏設定	DID人口が1万人以上の市町村を含む
区分	大都市雇用圏(Metropolitan Employment Area)：中心市町村のDID人口が5万人以上 小都市雇用圏(Micropolitan Employment Area)：中心市町村のDID人口が1万人以上5万人未満
中心都市	(1) DID人口が1万人以上の市町村、他都市の郊外でない (2) 郊外市町村の条件を満たすが、(a) 従業常住人口比が1以上で、(b) DID人口が中心市町村の3分の1以上か、あるいは10万以上である。
郊外	中心都市への通勤率が、(a) 10%以上のものを(1次) 郊外市町村とし、(b) 郊外市町村への通勤率が10%を越え、しかも通勤率がそれ以上になる他市町村が存在しない場合には、その市町村を2次以下の郊外市町村とする。ただし、 (1) 相互に通勤率が10%以上である市町村ペアの場合には、通勤率が大きい方を小さい方の郊外とする。 (2) 中心都市が複数の市町村から構成される場合には、それらの市町村全体への通勤率が最大の中心都市の郊外とする (3) 通勤率が10%を超える中心都市が2つ以上存在する場合には、通勤率が最大の中心都市の郊外とする。 (4) 中心都市及び郊外市町村への通勤率がそれぞれ10%を超える場合には、最大の通勤率のものの郊外とする

表 VI-7 分析に用いたデータ

指標名	データ	データソース
DID人口密度	DID人口/DID面積	平成12年度(2000年度)国勢調査
可住地人口密度	総人口/可住地面積	平成12年度(2000年度)国勢調査
昼夜人口比率	昼間人口/総人口	平成12年度(2000年度)国勢調査
DID人口比率	DID人口/総人口	平成12年度(2000年度)国勢調査
DID面積比率	DID面積/総面積	平成12年度(2000年度)国勢調査
高齢化率	老齢(65歳以上)人口/総人口	平成12年度(2000年度)国勢調査
公共交通利用分担率	通勤・通学利用交通手段のうち、バス・鉄道	平成12年度(2000年度)国勢調査
乗用車1台あたり平均トリップ長	総走行台キロ/総トリップ数	平成11年度道路交通センサスデータ
1人あたり乗用車保有台数	乗用車保有台数/総人口	全国PT調査データ
面積あたり駅数	GISにより算出	国土数値情報ダウンロードサービス

4. 地域類型別のEST施策パッケージの提案

本章では、全国市区町村を、市街地の空間構造と自家用車依存状況によって類型化し、類型ごとに3章の結果を踏まえて環境負荷最小の交通体系を示すとともに、その実現に必要な中長期施策パッケージを提案する。

4.1 市区町村の類型化

3章の結果は、DID人口密度に応じて、導入可能で環境負荷最小の輸送機関を示したに過ぎず、そのままでは各市区町村の交通体系の提案には用いることができない。そこで、より詳細に地域状況を表現するために、都市圏の規模や人口などの空間環境を示す指標、および交通体系の現状を示す指標を用いて傾向を把握する。さらに、地域の交通体系は、通常、経済的・社会的な連携が深い都市圏内において、中心都市とその郊外地域を結ぶ形で成立していることが多いことから、本研究ではあらかじめ都市圏を定義し、その中心都市を類型化し、中心都市に属する周辺都市・地域の交通体系も中心都市の状況に依存するとして、市区町村の類型化を行う。その上で、各類型に応じた基幹輸送機関の選定と、これを軸としたEST施策パッケージの展開策を提案する。

(1) 都市圏の設定

都市圏の設定には様々な方法があるが、本研究では金本ら（2002）⁷⁾による「都市雇用圏」を用いる（表VI-6）。この定義では、DIDの人口規模によって都市圏を設定し、雇用に着目して中心都市と郊外都市を設定している。交通体系を形づくる最も基本的な要素として、通勤・通学による人の動きが考えられ、その多くが中心都市内もしくは郊外から中心都市への動きであることを考えると、本研究の分析にとって有効な定義であると言える。

(2) 主成分分析による指標の集約化

次に、各地域の交通体系に影響を与える指標として、都市雇用圏により抽出された中心都市（296市区町村、東京は23特別区も扱う）の人口規模やDIDに関する指標、および交通活動に関する指標に注目する。これらの指標を用いて地域を分類するために、主成分分析を用いて指標の集約化を行う。分析に用いた市区町村データを表VI-7に示す。平成12年度（2000年度）国勢調査などによるデータを用い、市町村区分は市町村合併を考慮して2003年3月末における市町村区分を用いる。

表VI-8に主成分分析の結果を示す。a)人口関係6指標から得られた第1主成分を、DID地区の集中度が高く一定の人口の集中を示すものとして「人口集中性」軸と名づける。また、b)交通関係4指標から得られた第1主成分を、鉄道やバスなどの公共交通整備・利用の充実度や、自動車依存の低さを示すものとして「公共交通指向性」軸と名づける。

これら2つの指標を軸にとり、中心都市をプロットした散布図が図VI-20である。この図によれば、中心都市の人口集中性と公共交通指向性には高い相関があることがわかる。東京都の区部など、公共交通指向性が強くかつ人口集中が激しい地域では図の右上に分布する。一方で、多くの地方都市のように比較的交通体系が自動車依存しており、土地利用が拡散傾向にある地域は図の左下に分布している。

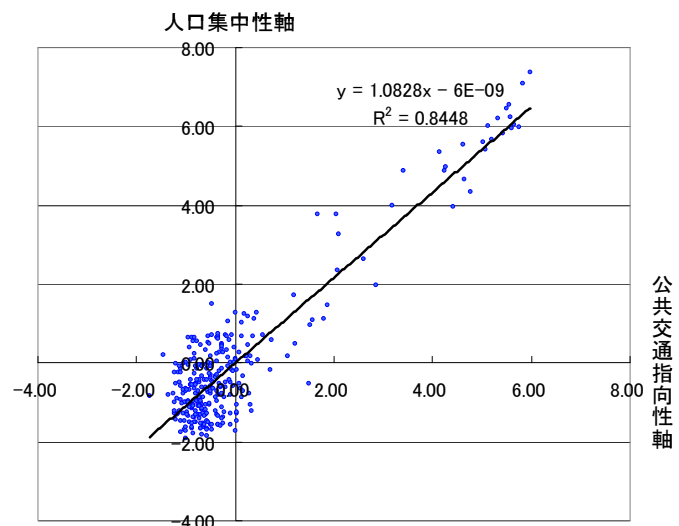
表VI-8 主成分分析の結果

a) 人口関係指標

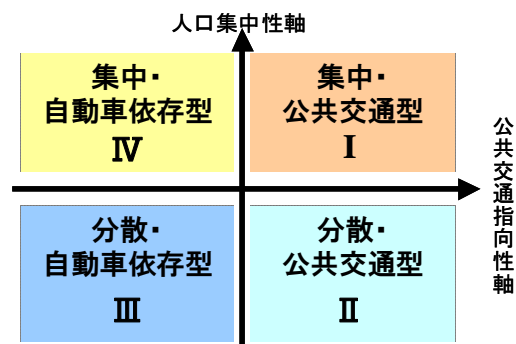
人口関係指標	第1主成分	第2主成分
DID人口密度	0.487	-0.130
可住地人口密度	0.506	-0.045
昼夜人口比率	0.113	0.904
DID人口比率	0.431	0.010
DID面積比率	0.507	0.131
高齢化率	-0.226	0.384
固有値	3.53	1.04
寄与率	58.87%	17.39%
累積寄与率	58.87%	76.27%

b) 交通関係指標

交通関係指標	第1主成分	第2主成分
公共交通利用分担率	0.587	0.167
平均トリップ長	-0.211	0.973
1人あたり乗用車保有台数	-0.528	-0.033
面積あたり駅数	0.576	0.156
固有値	2.55	0.93
寄与率	63.63%	23.32%
累積寄与率	63.63%	86.95%



図VI-20 主成分による中心都市の散布図



図VI-21 主成分による中心都市の分類

地域に適材適所な交通体系を選定するためには、このような地域の傾向を考慮する必要がある。そこで、図VI-21に示すように、主成分の正負を用いて中心都市を「Ⅰ：集中・公共交通型」「Ⅱ：分散・公共交通型」「Ⅲ：分散・自動車依存型」「Ⅳ：集中・自動車依存型」の4つに分類する。

4.2 地域特性を考慮した実施可能で環境負荷の小さい交通体系の特定

前節で示した中心都市の分類、および、前章の地域公共交通整備による環境負荷の定量評価と実施可能性の検討を用い、地域特性に応じて実施可能で最小の交通体系を選定するため、表VI-9、表VI-10で示すように地域を分類する。表VI-9はDID人口が50,000人以上である大都市雇用圏中心都市を、表VI-10はDID人口が10,000人～50,000人である小都市雇用圏中心都市についてそれぞれ示したものである。表に従い地域を①～⑧に類型化し、各地域の特性から目指すべき交通体系を以下のように選定する。また、選定された交通体系を実現するEST施策パッケージとして提案できるパッケージ案を表VI-11に示す。

都市高速鉄道（地下鉄・AGT・モノレール含む）活用：①

東京特別区、および大阪市が分類される。これらの地域では、既に都市交通網が成熟しているため、それらを中心とした交通体系を維持発展させることが重要である。この地域では、表が示すように、幹線部ではLRTやBRTの輸送力では対応できない。また、東京および大阪市を中心都市とする郊外都市は数多く、都心への流入性が非常に高いことから、自動車による渋滞が顕在化しやすい。以上のことから、自動車の都市部への流入を抑制する「ロードプライシング」や「駐車場政策」により、幹線公共交通の優位性を増すことが有効と考えられる。また、「AGT」や「モノレール」のように専用空間が少なく急勾配・急曲線に対応する交通システムの導入が、より環境負荷が小さいと考えられる。

既存路線活用＋LRT・BRT整備：②

分類された全地域において、交通体系の基幹をなす地下鉄や路面電車、またはAGTやモノレールが存在するが、中心都市の郊外地域や郊外都市では公共交通整備が不足し、自動車に強く依存している。現存する交通体系を活用して「LRT」や「BRT」を導入することにより、環境負荷の小さい交通体系に誘導できると考えられる。

LRT整備においては、人口集中性が高いことから、「郊外で専用軌道」により高速運行し、「パーク＆ライド」などを同時実施することにより利便性を高めることができる。BRTについては郊外部が拡散している場合に特に有効であるが、中心部での輸送力による制約を考慮する必要がある。また、都心部でさらに自動車依存しない交通体系を維持するためには、「ロードプライシング」や「駐車場政策」などの自動車流入規制、または「チケットキャンセラー導入」や「運賃体系の見直し」などが考えられる。さらに、フランス・ストラスブール市の例で示したように中心市街地に歩行者空間を拡大する「トランジットモール」の実現により、中心市街地の活性化などの相乗効果が図られ、LRTがより地域に愛される交通機関になることも期待できる。

新規LRT・BRT整備：③

これらの地域は、ある程度人口集中性があり、LRT・BRT整備による削減効果が見込めるにもかかわらず、自動車依存が強いことから、「LRT」・「BRT」整備による交通体系改変によって最もCO₂削減効果が見込める地域である。中心都市に流入する幹線道路網などを見直し、LRTまたはBRTの導入を検討することが有効である。これらの導入においては、②と同様に、いくつかの

表 VI-9 大都市雇用圏中心都市の類型化

		DID人口密度(人/km ²)				
		路線採算性限界制約	SyLC-CO ₂ (LRT)>CO ₂ (鉄道走行のみ)	BRT輸送力限界制約	LRT輸送力限界制約	
		(~3,542)	(~5,800)	(~6,800)	(~10,400)	(10,400~)
大都市雇用圏中心都市 / 分類	I:集中・公共交通型	千代田区	八戸市、熊谷市、行田市、小田原市、刈谷市、四日市市、姫路市、和歌山市、呉市、下関市、高松市、大牟田市、久留米市	松山市、高知市、北九州市、熊本市、鹿児島市	札幌市、仙台市、中央区、港区、江東区、名古屋市、京都市、神戸市、広島市、福岡市、長崎市、那覇市	① 新宿区、文京区、台東区、墨田区、品川区、目黒区、大田区、世田谷区、渋谷区、中野区、杉並区、豊島区、北区、荒川区、板橋区、練馬区、足立区、葛飾区、江戸川区、大阪市
	II:分散・公共交通型	⑥	弘前市、蒲郡市、佐世保市	④	②	
	III:分散・自動車依存型	千歳市、宇部市、防府市、岩国市、大村市、八代市	⑤ 北見市、岩見沢市、山形市、鶴岡市、酒田市、福島市、郡山市、いわき市、つくば市、足利市、小山市、桐生市、伊勢崎市、太田市、長岡市、木更津市、三条市、上越市、富山市、高岡市、福井市、長野市、松本市、西尾市、伊勢市、松原市、彦根市、舞鶴市、鳥取市、米子市、松江市、山口市、徳山市、今治市、新居浜市、那城市、延岡市			
	IV:集中・自動車依存型	室蘭市、碧南市	旭川市、釧路市、帯広市、苫小牧市、石巻市、秋田市、会津若松市、水戸市、日立市、宇都宮市、前橋市、高崎市、甲府市、岐阜市、大垣市、浜松市、沼津市、富士市、岡崎市、豊田市、津市、岡山市、徳島市、佐賀市、大分市、宮崎市	③ 函館市、青森市、盛岡市、新潟市、金沢市、静岡市、豊橋市、安城市、沖縄市		

施策を同時実施すべきである。

既存路線活用：④

これらの地域では、LRTを新規に整備する場合よりも既存鉄道を利用する場合の方が、輸送人kmあたりCO₂排出量が小さくなっている。そのため、新規に路線整備は行わず、既存路線の利用を促進し自動車利用からの転換を図ることが適切な地域であると考えられる。具体的な策としては、「パーク&ライド」や「サイクル&ライド（駐輪場整備）」などの策が有効である。

既存路線活用+LRT・BRT整備：⑤

多くの自動車依存型地方都市がこの分類に含まれる。この地域においては、輸送人kmあたりCO₂排出量において自動車交通に対するLRT・BRTの有効性が示されているが、都市規模を考えると路線需要の確保は容易でなく、導入は慎重に検討する必要がある。そこで、これらの自動車依存している地域では、既存路線利用促進およびバス路線網の充実とともに、特に郊外地域において

表VI-10 小都市雇用圏中心都市の類型化

		DID人口密度(人/km ²)				
		路線採算性限界制約	SyLC-CO ₂ (LRT)>CO ₂ (鉄道走行のみ)	BRT輸送力限界制約	LRT輸送力限界制約	
		(~3,542)	(~5,800)	(~6,800)	(~10,400)	(10,400~)
小都市雇用圏中心都市 / 分類	I:集中・公共交通型	—	瑞穂町、守山市	—	野洲町、名瀬市	—
	II:分散・公共交通型	—	芦別市、余市町、宮古市、羽生市、熱海市、伊東市、三原市、因島市、田川市、唐津市、鳥栖市、福江市	近江八幡市、八幡浜市	—	⑦
	III:分散・自動車依存型	網走市、紋別市、滝川市、遠軽町、静内町、三沢市、長井市、東根市、喜多方市、波崎町、矢板市、館山市、伊那市、佐久市、土岐市、福知山市、西脇市、倉吉市、益田市、萩市、丸亀市、川之江市など	留萌市、稚内市、美唄市、名寄市、根室市、富良野市、倶知安町、岩内町、美幌町、五所川原市、十和田市、むつ市、水沢市、北上市、一関市、古川市、気仙沼市、能代市、横手市、大館市、本荘市、湯沢市、大曲市、米沢市など	新宮市	—	⑧
	IV:集中・自動車依存型	—	本庄市、岡谷市	石垣市	—	—

は積極的に「パーク＆ライド」を行うなど、自動車と共存した交通体系を目指す。

既存路線活用＋自動車共存：⑥、⑦、⑧

LRTやBRTの採算性が見込めず、CO₂削減効果も小さい⑥では、公共交通整備は避け、路線バスが中心となる交通体系となる。また、既存路線の利用促進も必要である。

⑦、⑧は小都市雇用圏中心都市であり、公共交通型（⑦）、自動車依存型（⑧）と分類はしたが、DID人口密度が高い地域でも人口規模が小さいため公共交通整備は難しい。そのため、このような地域では、既存路線を活用・維持しながら、特に郊外地域では自動車が必要不可欠な移動手段となっているため自動車依存を認めざるを得ない。

4.3 地方都市における中長期施策ロードマップの作成例

以上で類型化した中から、特に本研究で地方都市のケーススタディエリアとして選定した長野県飯田市を対象に、具体的な施策ロードマップの作成を、市役所担当者とともにいった。

表 VI-1 1 EST施策パッケージ案

EST	都市高速鉄道活用
パッケージ	ロードプライシング
	駐車場政策
	AGT・モノレールの整備

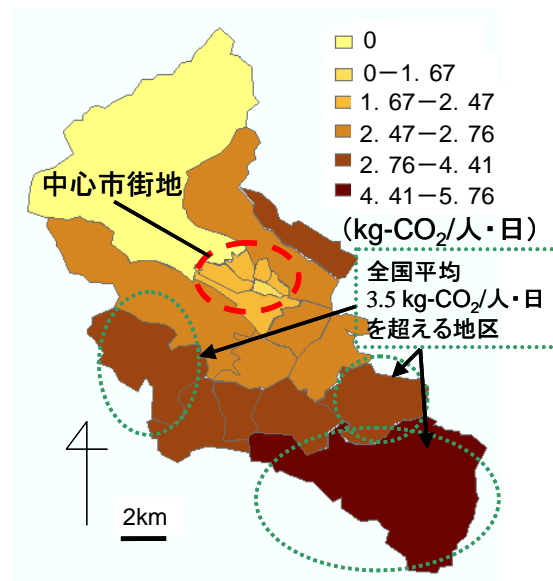
EST	既存路線活用+LRT・BRT整備	
パッケージ	全体	LRT・BRT整備
		既存路線の活用
		運賃収受・料金体系の工夫
		PTPS
	中心	トランジットモール
		ロードプライシング
		駐車場政策
	郊外	パーク&ライド
		郊外で専用軌道

EST	新規LRT・BRT整備
パッケージ	幹線道路の見直し
	LRT・BRT整備
	料金体系・運賃収受の工夫
	PTPS
	運行管理システム導入(BRT)
	パーク&ライド(LRT)
	郊外で専用軌道(LRT)

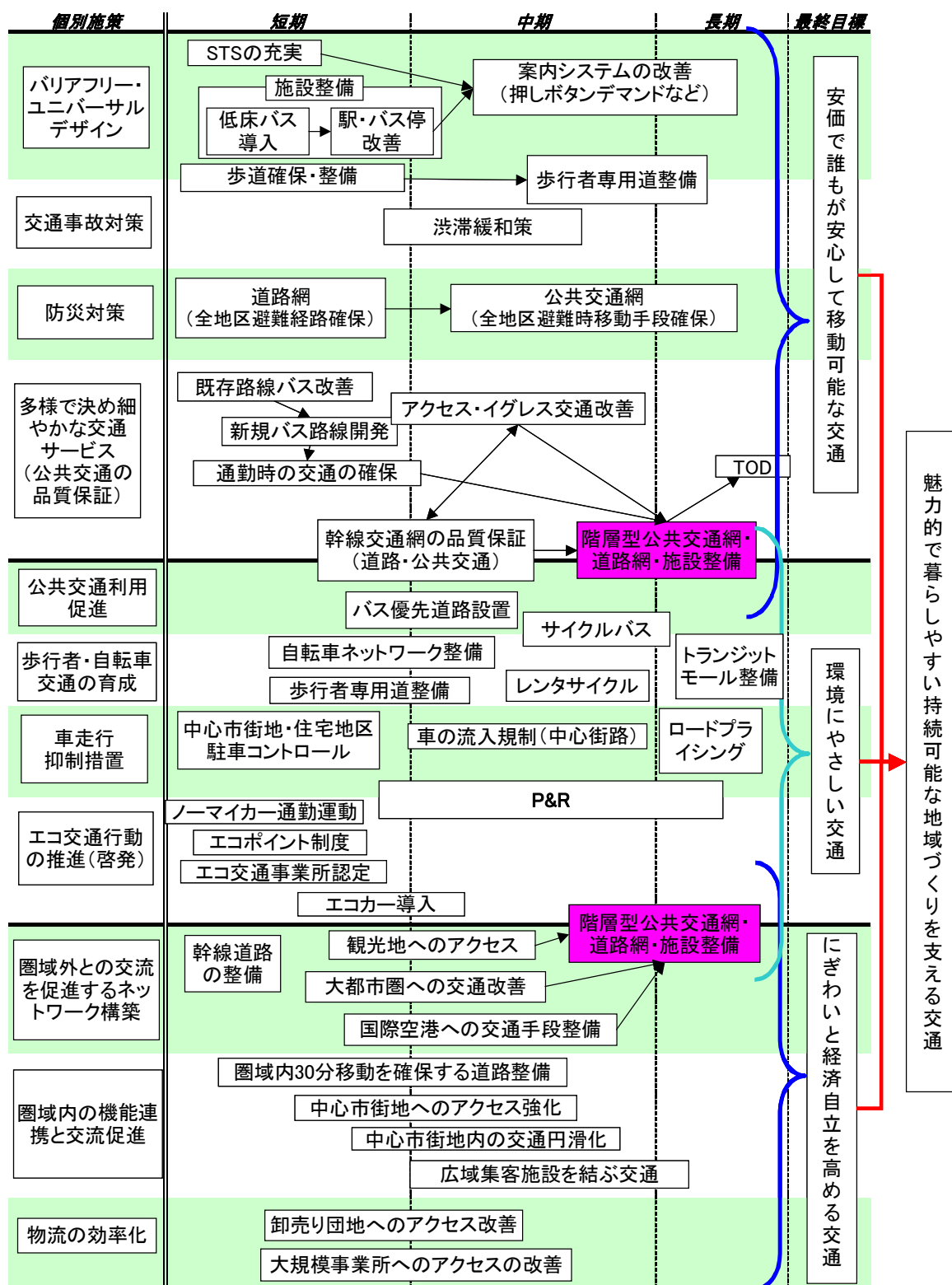
飯田市においては、他の大多数の地方都市と同様、市内のCO₂排出量に関する公式統計が存在しない。そこで本研究では、飯田市で2004年3月に実施された「市民モビリティアンケート調査」の中のパーソントリップデータから得られたトリップ長に利用交通機関のCO₂排出原単位を乗じることにより算出した。パーソントリップ調査は通常多くのサンプルを必要とするが、地方都市の場合は母数（人口）が小さいので、自治体の協力が得られれば調査はそれほど困難ではない。

算出された1人1日あたり交通起源CO₂排出量の地区別分布を図VI-2 2に示す。この図より、中心市街地から遠い地区ほど交通起源CO₂排出量が多くなっている現状が見て取れる。特に、鉄道路線から離れた郊外の3地区では全国平均値3.5kg-CO₂/人・日を上回っている。

このような状況を踏まえ、本研究では地方都市がCO₂排出削減目標の達成を前提とした長期的な交通計画をどのようなタイムスケジュールに沿って実施していくべきかを検討する。その際、今

図VI-2 2 飯田市における1人1日あたり交通起因CO₂排出量推計結果

飯田市は人口約11万人で、大都市から遠く離れた孤立都市圏を形成している。人口密度は中心市街地で高くなっているが、大規模小売店舗・病院等の集客施設は周辺市街地に分散しつつある。産業は工業が比較的多く、通勤が都心に向かわない傾向にある。市内を貫く鉄道や地域内バス路線網はいずれも本数が少なく、利用が非常に少ない。一方で乗用車保有率（2004年）は489台/1000人と全国平均の433台/1000人を上回っており、地方都市に典型的な車依存型社会となっている。その結果、前節の類型では⑧「自動車依存型小都市雇用圏中心都市」にあたり、公共交通への転換が最も難しい類型に属している。



図VI-23 地方都市における持続可能な交通を実現するための施策ロードマップ案

後日本の都市が、少子高齢化や人口減少、それと連動した地域経済の逼迫といった状況の中で、魅力的で暮らしやすい持続可能な地域づくりを行っていくことが求められることを念頭に置いた、従来型のモータリゼーション依存型都市経営からの転換をいかに果たすか、という観点に留意し

た。

欧米の先進自治体における交通政策のレビューを行う一方で、対象地方都市における交通関連施策の現状と将来見通しに関してヒアリング調査を実施した。その結果、日本の都市に具体的に欠けている視点が、以下の6点としてまとめられる。

- 1) 交通分野における環境配慮の必要性の認識
- 2) 地方分権・地域自立という発想
- 3) 行政による公共交通への補助制度
- 4) 政策の総合化（パッケージ化）
- 5) 関係者（ステークホルダー）を巻き込むしくみづくり
- 6) 都市計画との連動

これらの課題に配慮した上で、CO₂削減を含めた地方都市の交通に関する長期的課題に対応するための施策推進スケジュールに関し、対象都市の施策関係者と議論を行った結果として、図VI-23を得た。

5. 本研究により得られた成果

本研究では、脱温暖化社会の実現を目指し、日本の運輸部門における長期的なCO₂排出削減を達成するために、特にCO₂排出増加への寄与が著しく、今後もその傾向が続くと予想される地域内の乗用車交通を対象に、EST政策検討のための分析を進めてきた。具体的には以下の3点について分析を行い、成果を得た。

1) 市区町村単位で構築したCO₂排出量推計・予測モデルを用い、2050年までの全市区町村の乗用車CO₂排出量の値を算出した。その結果、全国ほとんどの地域において大きな増加が見られ、車両・燃料を対象とした技術施策だけで「2050年に1990年比50%削減」を達成することは困難であることがわかった。次に、全国の削減目標量を各市区町村に配分し、市街地コンパクト化を実施した場合の削減効果を推計し、それによって日本全体で中長期に渡り15~30%程度の削減効果が得られ、削減目標が達成されることや、地域によってその効果に大きな違いがあることを明らかにした。

2) この結果を踏まえて、実施可能で環境負荷の小さい交通体系を地域特性に応じて選定する方法論を、新規公共交通整備によるCO₂削減効果分析へのLCA適用、および、採算性や輸送力と地域特性との関係を明らかにすることにより提案した。その結果、地域特性に応じて、新規公共交通整備のCO₂削減効果が大きく変化し、CO₂が最小となる輸送機関の選定を左右することを定量的に明らかにできた。

3) 全国市区町村を都市圏設定、人口関連指標、および交通関連指標をもとにして4つの分類（集中・公共交通型、分散・公共交通型、分散・自動車依存型、集中・自動車依存型）に分け、類型ごとに目指すべき交通体系を提案した。これによって、例えば最も環境負荷削減効果が見込まれる「新規LRT・BRT整備」施策パッケージの対象として、地方中核都市で、ある程度人口集中しているが自動車依存している9つの地方都市を選定することができた。

4) 公共交通整備によるEST施策の実施が極めて困難な人口10万人規模の地方都市を対象に、交

通状況およびCO₂排出量といった、一般には整備されていない基礎データの整備、および、政策実施のフィージビリティに影響を及ぼす諸要因についての整理を行った。それを踏まえ、地方都市における長期的なCO₂削減目標設定型戦略パッケージのタイムスケジュールについて概略を提示することができた。また、「市民意識の啓発」と「公共交通・都市計画道路・用途地域の整合性がとれた見直し」を組み合わせることで公共交通の活性化を行うことで、心理的・物理的障壁を突破するとともに、情報公開や組織化といった政策を合わせて実施することが重要であることを示した。

本研究で残された主な課題として次のことが挙げられる。

- 1) 市区町村別 CO₂ 排出量モデルの精査。特に、走行距離モデルに過大推計の疑いがあり、その見直しが必要である。
- 2) 公共交通起源CO₂の考慮。現段階では機関分担率モデルを導入していない。
- 3) 交通施策パッケージにおけるより詳細な施策検討の必要性。また、中心都市以外の地域での施策を検討し、都市圏全体のネットワークのあり方を検討することも必要である。
- 4) 各地域類型におけるEST施策ロードマップの提案。特に、実施における制度的・資金的問題点の抽出と、住民から見た受容可能性の検討が必要である。

引用文献

- 1) 林良嗣・加藤博和(1998)：巨大都市の爆発的発展と交通システム整備の不均衡、岩波講座 地球環境学 第8巻「地球環境と巨大都市」第4章、pp.81-114、岩波書店。
- 2) 堀洋一(1997)：電気自動車の技術動向、平成9年電気学会全国大会 シンポジウム：電気自動車用バッテリーの技術動向、No.S.14-1
- 3) 松橋啓介・工藤祐揮・上岡直見・森口祐一(2004)：市区町村の運輸部門CO₂排出量の推計手法に関する比較研究、環境システム研究論文集、32、pp.235-242
- 4) 加藤博和・林良嗣(1997)：経済成長レベルと都市構造要因を考慮した乗用車保有水準の分析とモデル化、交通工学 Vol.32 No.5、pp.41-50
- 5) トヨタ自動車株式会社・みずほ情報総研株式会社(2004)：輸送用燃料のWell-to-Wheel評価 - 日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書-
- 6) 長田基広・渡辺由紀子・柴原尚希・加藤博和(2006)：LCAを適用した中量旅客輸送機関の環境負荷評価、土木計画学研究・論文集No.23、no.2、pp.355-363
- 7) 金本良嗣・徳岡一幸(2002)：日本の都市圏設定基準、応用地域学研究、No.7、pp.1-15

研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- ① Moriguchi, Y., H. Kato: EST case studies and perspectives in Japan, European J. Transport and Infrastructure Research, 4(1), 121-145, 2004.
- ② K.Kuriyama, C.Donghai, H.Kato, J.Sugimoto, J.Black, Y.Hayashi: Sustainable

transport policies in Japanese cities: Barriers to implementation, URBAN TRANSPORT 2004, Dresden, Germany, 2004.

<その他誌上発表（査読なし）>

- ① 栗山和之・加藤博和・林良嗣(2004)：アジア大都市における交通システムの持続性検証の方法論、第12回土木学会地球環境シンポジウム講演論文集、pp.39-44
- ② 山根顕・加藤博和・林良嗣(2004)：地方都市における企業と自治体の協働による通勤時の自動車利用抑制方策の実証的検討、土木学会第32回環境システム研究論文発表会講演集、pp.149-154
- ③ 森田紘圭・林良嗣・加藤博和・森本貴志(2006)：全国市区町村の持続可能性に関する経済・環境面からの評価、土木計画学研究・講演集No.33、CD-ROM
- ④ 中條将史・森本貴志・森田紘圭・加藤博和(2006)：技術革新を考慮した地域特性別乗用車CO₂中長期削減シナリオの検討、第14回土木学会地球環境シンポジウム講演論文集、pp.83-90
- ⑤ 森田紘圭・森本貴志・加藤博和・林良嗣(2006)：都市空間構造改変を考慮した運輸部門でのCO₂削減シナリオに関する検討、土木計画学研究・講演集No.34、CD-ROM

(2) 口頭発表（学会）

- ① H.Kato, Y.Hayashi: A Method for Evaluating Environmental Sustainability of Transport Systems Based on Life Cycle Concept and Infrastructure-Activity Interaction”, 10th World Conference on Transport Research, Istanbul, 2004
- ② H.Kato, N.Shibahara, Y.Watanabe: A Systematic Approach for Evaluating Public Transport Systems through LCA, Proceedings of the 7th International Conference on EcoBalance, Tsukuba, pp.333-336, 2006.
- ③ H.Morita, H.Kato, Y.Hayashi(2007): Population Decline and Financial Sustainability of Municipal Authorities in Japan, Proceedings of the International Symposium on Social Management Systems, CD-ROM, Yichang