低公害車普及による 長期CO₂管理システムの開発

桑野 将司¹・塚井 誠人²・岩本 真由子³

¹正会員 鳥取大学大学院准教授 工学研究科 (〒680-0814 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: kuwano@sse.tottori-u.ac.jp

²正会員 広島大学大学院准教授 工学研究院 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

Email: mtukai@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 西日本旅客鉄道 (〒530-0012 大阪市北区芝田2-4-24)

E-mail: mayuko-iwamoto@westjr.co.jp

本研究では、施策目標を達成可能、かつ総施策実施費用が最小、すなわち最適な施策シナリオを、バックキャスティング・アプローチに基づいて、中国地方を対象とするCO₂管理施策立案モデルを定式化することによって導出するシステムを開発した。従来のフォアキャスティング・アプローチでは、最適な施策が必ずしも得られるとは限らなかった。しかし、本研究では、施策目標「中国地方の全自家用乗用車からの2020年のCO₂排出量を1990年比25%削減」を達成可能、かつ、総施策実施費用が最小となる時点別のEV購入補助金額、および急速充電器の設置数を得ることができた。また、充電インフラの整備に対する支出額の割合がEV購入補助に対する支出額の割合よりも大きく、現在の車両に対する補助金政策が十分でない可能性を明らかにした。

Key Words : backcasting, emission form private cars, household car ownership and use

1. はじめに

1992年に開催された地球環境問題に関する「リオ会議」において、各国首脳が地球環境を社会的共通資本と認知したことにより、世界規模の地球温暖化対策が始まった。わが国でも、温室効果ガスの25%削減を目標に掲げて排出量削減に取り組んでいるものの、温室効果ガスの排出量削減が未達の場合の罰則は設けられていないため、達成計画の目標が実現できる保証はない。

現在知られている範囲で、その強度と排出量を共に考慮すると、人為的に排出されている温室効果ガスの中では、CO₂の影響が最も大きいとされる。CO₂の排出源を産業、民生、運輸、発電・石油精製等を行うエネルギー転換の4つの部門に分類すると、総排出量に占める割合は産業部門に次いで運輸部門が多い。さらに、運輸部門の8割を自動車からのCO₂が占め、その約50%は各世帯が保有する自家用乗用車に由来する¹⁾。これらを踏まえると、CO₂排出量を削減する施策の中でも、各世帯が保有する自家用乗用車の保有・利用行動に働きかける施策は、有効な地球温暖化対策と期待される。

世帯のモビリティを確保しつつ、自動車からのCO₂排

出量を削減できる方策として、ハイブリッド自動車（以下、HV）、および電気自動車（以下、EV）などの低公害車の普及が注目されている。EVは、排出原単位がHVよりも小さい。しかし、現在市販されているEVの航続距離は、長い場合でも200km程度であってガソリン自動車（以下、GV）に比べて短いこと、充電インフラの整備が必要であること、および車両価格が高額であることなど、その普及に関する課題は多い。

EV普及によるCO₂排出削減効果予測には、長期的な普及予測手法が必要である。このための計画立案手法として、既往研究ではフォアキャスティング・アプローチが用いられてきた。この方法は、温室効果ガス削減施策を例にとると、分析者が予め施策シナリオを設定し、それを施行した場合のEV普及台数を予測する方法であり、最適な施策オプションは用意した複数のシナリオから、政策目標の達成可能性や費用効率性に配慮して選ばれる。しかし、通常のフォアキャスティング・アプローチでは、途中の施策実施シナリオを明示的に考慮していない場合が多い。また実際には、複数の施策手段間に補完性や代替性が存在するため、施策の効果がその実施順序に左右されるという動的性質を有している場合がほとんどであ

る。そこで、近年では、バックキャスティング・アプローチ²⁾に基づく施策の検討が着目されている。バックキャスティング・アプローチとは、削減目標を確実に達成可能、かつ最適な（例えば、総施策実施費用が最小である）施策シナリオを、将来の目標時点から現在に向かって逆向きに導出する方法である。

本研究では、目標が達成可能な施策を、その実施順序の最適性も含めて検討可能なバックキャスティング・アプローチに基づき、自動車からのCO₂排出量削減施策を提案する長期CO₂管理システムの開発を目的とする。具体的には、購入段階、維持段階、および走行段階から成る世帯の自動車保有・利用行動に影響を及ぼす要因を分析するため、車種選択モデル、および買い替え・廃棄車齢と年間走行距離の同時決定モデルを構築する。構築したモデルを用いて、施策実施による世帯の自動車保有・利用行動の変化が、中国地方全体の自動車販売シェア、保有シェア、CO₂排出量に及ぼす影響を分析する。その上で、構築したモデルをサブモデルとして組み込んだ、CO₂管理施策立案モデルを、バックキャスティング・アプローチとして定式化し、その解を求めることによって、中国地方の全世帯が保有する自動車からのCO₂排出量を、2020年に1990年比で25%削減可能、かつ総施策実施費用が最小となる施策シナリオを導出する方法論を提案する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

(1) バックキャスティング・アプローチに基づいた施策検討に関する研究

長期的な政策目標の達成に必要な複数施策の立案手法に関する既往研究は、時系列に沿った具体的な施策実施順序が明示されていない研究³⁾と、動学的最適化等を用いて最適化問題を定式化し、それらを明示する研究^{4,5)}の2種類に大別できる。後者の研究に着目すると、芦名ら⁶⁾は、2030年の国内の電力部門におけるCO₂排出量に関して、複数の削減目標量に関する制約条件を設定し、線形計画法を用いて目的関数である施策実施期間内の総発電費用を最小にする時点別、および電力会社別の電力構成を削減目標量ごとに導出した。その結果、削減目標によって、全体の削減量に対する各電力会社の必要削減量の割合が異なり、導入すべき電力も異なることが明らかとなった。増井ら⁷⁾は、制約条件として2050年における国内のCO₂排出量を1990年比で70%削減することを設定し、目的関数を耐久消費財のストック、社会資本ストックなどから生み出される期間内の総効用として、目的関数が最大となる時点別の実施施策の組み合わせと実施規模、および生産・消費等の経済活動量を動学的最適化手法を用いて導出した。分析の結果、期間後半で施策の実

施規模を増加させることが望ましいことを明らかにした。国立環境研究所ほか⁸⁾は、増井ら⁷⁾の研究の目的関数を期間内における施策実施の総費用の最小化に変更して分析を行ったところ、増井ら⁷⁾の結論とは異なり、早期に施策を実施することが望ましいことを示した。

CO₂排出量を、制約条件ではなく目的関数として導入した分析として、Doyenら⁹⁾の研究がある。この研究では、将来の目標時点における全部門からのCO₂排出量、および計画期間内の総施策実施費用の和を目的関数として、これを最小にするCO₂排出量削減系列を導出するモデルを、動的計画法によって構築した。

(2) 社会的相互作用に関する研究

EVやHVの普及過程では、財の特性を踏まえた選択肢間のその普及が高まることが新たな普及を促すという、社会的相互作用が存在すると考えられる。本節では社会的相互作用に関する既往研究についてまとめる。

ロジャーズ¹⁰⁾は、マーケティング分野で新製品の普及プロセスにおける社会的相互作用の影響を考慮した研究を行った。この研究では、時間変数を使って新製品の初期の採用者と追従者を明示的に考慮したイノベーション普及プロセスモデル（以下、イノベーションモデル）を提案している。イノベーションモデルでは、新製品の採用者は革新者、初期採用者、前期多数採用者、後期多数採用者、遅滞者の5カテゴリーに分類される。ロジャーズは、各カテゴリーの新製品採用に関する社会経済的特性やコミュニケーション特性を考察し、普及初期では緩やかであるが、普及率が一定の閾値を越えると普及速度が上昇し、普及速度はさらに急激に増加することを示した。このような普及曲線が描かれる理由として、新技術の普及プロセスでは、採用者と追従者の間での直接的な情報交換に加えて、世論を通じて追従者に間接的にコミットする正の社会的相互作用である社会的同調行動の影響が強いことを挙げている。一方で、酒井¹¹⁾は、イノベーションモデルの問題点を指摘している。具体的には、全ての新製品の普及曲線が正規分布に基づくことや、各カテゴリーに含まれる人数の割合が全ての分析において同じ割合で分布されると仮定するなど、製品による特性の差異を無視しているため制限が強すぎる点である。

酒井の指摘に対しては、様々な改良モデルが試みられており、今日ではBass¹²⁾が提案した耐久消費財の新製品成長モデル（以下、Bassモデル）が広く適用されている。Bassモデルは、販売実績を基に集計的な販売台数を記述する微分方程式型のモデルであり、その普及曲線の形状は、イミテーター係数、潜在市場規模、およびイノベーション係数の、3パラメータで記述される。実証的にはこれらの同定方法が課題となるが、これは分析時点の製品普及状況によって、以下の3手法に大別される。第一

の手法は、製品がある程度普及している場合に適用される方法であり、実際の販売数のデータから最小二乗法を用いて推定する¹³⁾。第二の手法は、製品が市場に投入されたばかりであるか、まだ投入されていない場合に適用される方法であり、過去の類似製品における推定値、あるいは普及プロセスに関する既往研究での推定値を適用する^{14) 15)}。第三の手法は、製品がわずかに普及している場合に適用される方法であり、イミテーター係数と潜在市場規模の推定には第二の方法を、イノベーション係数は第一の方法を適用する¹⁶⁾。このように、販売実績が少ない、あるいは販売実績が全くない無い場合でもBassモデルのパラメータの設定は可能である。しかし、本研究で対象とするEVは、その普及要因として充電インフラの整備状況や航続距離などの、従来のGVやHVでは問題とはならなかった要素を考慮しなくてはならない。したがって、過去の類似製品におけるパラメータの値を用いる方法の適用は困難である。また、Bassモデルは、1度新製品を購入した人は同じ製品を購入し続けること、および、対象とする新製品が1種類に限定されるという仮定がなされる。前者に関して、本研究では1度EVを購入した世帯はその後GVやHVではなく、EV保有世帯であり続けるという仮定が必要とされ、現実的ではない。後者については、GVやHV、EVがある場合などは考慮できない。なおBassモデルを複数選択肢に拡張した感染症モデル¹⁷⁾が数理生態学の分野で提案されているが、普及曲線の形状を決定するパラメータ設定数が多くなるなど、実証上の課題が残っている。

社会的相互作用の影響を非集計型行動モデルの枠組みの中で考慮した研究として、Brock & Durlauf¹⁸⁾は、社会的相互作用を内生的に考慮した二項選択モデルを提案した。具体的には、選択モデルの効用関数内に、社会的相互作用項として他者の平均的な選択結果（選択割合）を導入する。社会的相互作用項に関するパラメータ推定値が正であれば、各個人は他者のうち多数を占める選択に同調する（社会的同調行動をとる）傾向にあることを意味し、パラメータ推定値が負であれば、多数が行う選択とは異なる選択を行う傾向にあることを意味する。福田らは、Brockらのモデルを違法駐輪行動¹⁹⁾やETC購入行動²⁰⁾に応用し、それらの行動に社会的同調行動が存在する可能性を示唆した。

(3) 世帯の自動車保有・利用行動に関する既往の研究

自動車保有・利用行動は、複数の選択行動から構成されており、各選択行動の変化が他の選択行動に影響を及ぼす。このため、個別段階の相互影響を考慮した統合モデルが必要である。De Jong²¹⁾は、買い替えタイミングの決定（生存時間モデル）、購入車種の決定（離散選択モデル）、年間走行距離当たりのエネルギー消費量、およ

び年間走行距離の決定（重回帰モデル）などから成る一連の世帯の自動車の維持段階と走行段階を統合したモデルを構築した。山本ら²²⁾は、車種・メインドライバー同時選択モデル（離散選択モデル）と、これらの属性を与件とした各保有自動車の年間走行距離モデル（重回帰モデル）を構築している。また、桑野ら²³⁾は自動車維持段階と走行段階の相互依存性をコピュ関数を用いた多変量生存時間分析によって考慮した保有期間と年間走行距離の同時決定モデルを提案している。

(4) 本研究の位置づけ

バックキャスティング・アプローチは、適切に設定された目的関数と制約条件の下で、目的関数を最適化するような、各時点での実施施策の種類、および実施規模の組み合わせが導出できるため、CO₂管理施策のような長期的な施策提案に適している。またEV普及を考慮する上で重要な社会的相互作用に関する研究の蓄積は、都市・交通計画では乏しく、社会的相互作用を考慮したバックキャスティング・アプローチに関しては、ほぼ既往研究が行われていない状況にある。

本研究では、バックキャスティング・アプローチの考え方を応用して、HVやEVなどの低公害車の普及による長期CO₂管理システムの開発を行う。具体的には、中国地方の全世帯が保有する自動車からのCO₂排出量を、2020年に1990年比で25%削減可能、かつ総施策実施費用が最小となる施策シナリオを提示する。分析システムで用いる世帯行動の予測には、自動車保有・利用に関連する選択行動を、購入段階、維持段階、および走行段階として捉えたうえで、既往研究の分析方法に基づき、それぞれについてモデルを定式化し、パラメータ推定を行う。購入段階では、仮想のGV、HV、EVのうち最も購入したい自動車を選択するSP調査を実施し、Brock & Durlauf¹⁸⁾のモデルを応用することによって、社会的相互作用の影響を考慮した車種選択モデルを定式化する。維持段階と走行段階には、桑野ら²³⁾が提案したコピュ関数による2変量生存時間モデルを適用し、買い替え・廃棄車齢と年間走行距離の同時決定モデルを推定する。

3. 使用データの概要

本研究では、中国地方の5県を対象地域とした世帯の自動車保有・利用に関する2種類のアンケート調査結果に基づいて分析を行う。購入段階の分析には2010年に実施した調査（以下、2010年調査）を、維持段階、および走行段階には、2006年に実施した調査（以下、2006年調査）の結果を使用する。両調査の概要を表-1に示す。なお本研究では、両調査の形式や調査項目がほぼ同一で、

かつ調査間隔も短いため、世帯の自動車保有・利用行動に影響を及ぼす要因は、両調査間で同一と仮定して分析を行う。

2010年調査では、調査時点では普及率が低いハイブリッド自動車（HV）と電気自動車（EV）の普及要因を分析するため、SP調査を実施した。具体的には、ガソリン自動車（GV）、HV、EVの3車種を選択肢とし、選択肢の属性として、車両価格、公的補助金額、航続距離、走行費用、維持費用、給油・充電時間、給油・充電場所、自動車前年度販売シェアの8属性を導入した。そして、既往研究を参考に、各属性に対して2～3種類の水準値を設定し、実験計画法を用いて、25種類のプロファイルを作成した。回答者には、このうち4種類のプロファイルをランダムに提示して、それぞれのプロファイルに対する選好を質問している。

4. 世帯の自動車保有利用・利用行動の分析

(1) 世帯の自動車購入段階の分析

本研究では、保有自動車の買い替えによって世帯が新たに自動車を購入する際の選択車種について、ロジットモデルを適用して分析を行う。車種を選択肢は、ガソリン自動車（GV）、ハイブリッド自動車（HV）、電気自動車（EV）の3車種とする。

車種選択モデルでは、他者の購入動向に自身の意思決定が部分的に左右される社会的相互作用を考慮する。具体的には、前年の新車販売台数のうち当該車種が占める割合（以下、前年の新車販売シェア）を社会的相互作用に関する代理変数として、効用関数に導入する。本研究では、社会的相互作用に1年の時間遅れを仮定することにより、同時性の問題を回避したモデル推計とシミュレーションを行う。車種 i の効用関数を式(1)に示す。

$$V_i = \beta \mathbf{x}_i + \gamma \mathbf{z}_i + \eta s_i \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_i$ は車両特性に関する説明変数ベクトル、 $\mathbf{z}_i$ は世帯・メインドライバー属性に関する説明変数ベクトル、 s_i は前年の新車販売シェア、 β 、 γ 、 η は未知パラメータである。

2010年調査のSP調査結果を用いて、定式化したモデルを推定した結果を表-2に示す。表-2の自動車属性に関する説明変数に着目すると、購入価格および走行費用に関するパラメータ推定値は、負で有意となっており、期待された符合条件を満たしている。急速充電器設置密度に関するパラメータ推定値が正で有意な値となり、EVの急速充電器設置数の増加がEVの普及を促進する傾向にあることを示している。世帯・メインドライバー属性に

表-1 調査の概要

調査期間	2006年10月12日から 2006年10月18日	2010年1月29日から 2010年2月3日
対象世帯	世帯人数2～4人 自動車保有台数1～2台	世帯人数1～6人 自動車保有台数1台以上
対象地域	中国地方各県（鳥取、島根、岡山、広島、山口）	2006年の調査と同じ
調査方法	Web調査	2006年の調査と同じ
回答数	回収数500世帯 有効数415世帯	回収数1001世帯 有効数903世帯
質問項目	・世帯属性： 世帯人数、居住地特性、年収等 ・個人属性： 性別、年齢、職業、免許有無等 ・現在の保有自動車属性： 車種、購入年、走行距離等 ・過去の保有自動車属性： 車種、購入年、走行距離等	・世帯属性： 2006年調査と同じ ・個人属性： 2006年調査と同じ ・現在の保有自動車属性： 2006年調査と同じ ・将来の購入車種意向： SPカードに示すGV、HV、EVのうち最も購入したい車種

関する説明変数では、世帯年収が正で有意に、メインドライバーの性別が負で有意となった。すなわち世帯年収が低い、メインドライバーが女性の場合に、電気自動車の選択確率が高くなることを意味している。前年の新車販売シェアに着目すると、そのパラメータ推定値は正で有意となった。これは、前年の新車販売シェアが高い自動車の購入確率が高くなることを示しており、社会的同調行動が存在することが確認された。

(2) 世帯の自動車維持段階と走行段階の分析

維持段階と走行段階の分析には、多変量間の依存構造を表現可能なコピュラ関数を用いて単変量生存時間モデルを多変量生存時間モデルへと展開した、買い替え車齢 $T(\xi)$ と年間走行距離 $D(\zeta)$ の同時決定モデルを適用する。この同時決定モデルについては、桑野ら²³⁾が詳しいため新規性は無いが、ここではその概要を再掲する。

車齢 τ において買い替え行動が生起しておらず、また年間走行距離 d で1年の自動車利用が終了しない確率を同時生存関数 S で表す。 τ と d の同時分布関数を F とすれば、単変量生存関数は、それぞれ $S^T = F(\tau, -\infty)$ 、 $S^D = F(-\infty, d)$ である。さらに、同時確率密度関数を f とすると、 τ と d に関する同時生存関数 S は、生存コピュラ関数 $\hat{C}$ を用いて式(2)で表される。

$$S(\tau, d) = \Pr[T > \tau, D > d] = \int_d^\infty \int_\tau^\infty f(\xi, \zeta) d\xi d\zeta \quad (2) \\ = \hat{C}(S^T(\tau), S^D(d))$$

生存コピュラ関数の密度関数を $\hat{c}$ 、 $T(\xi)$ 、 $D(\zeta)$ の確率密度関数を $f^T(t)$ 、 $f^D(d)$ とすると、式(2)の同時生存関数より、式(3)を得る。

$$f(\tau, d) = \hat{c}(S^T(\tau), S^D(d)) \times f^T(\tau) \times f^D(d) \quad (3)$$

表-2 世帯の車種選択モデル推定結果

説明変数	推定値	t値
自動車属性に関する説明変数		
購入価格 ^{a)} (万円)(1,2,3) ^{b)}	-0.008	-7.476 **
走行費用(万円/km)(3) ^{b)}	-0.477	-2.066 *
急速充電器密度(箇所/km2)(3) ^{b)}	0.560	2.129 *
世帯・メインドライバー属性に関する説明変数		
世帯年収(万円/年)(1,2) ^{b)}	0.001	4.052 **
メインドライバーの性別(男性=1, 女性=0)(1,2) ^{b)}	-1.132	-6.268 **
社会的相互作用に関する説明変数		
前年の販売シェア(%) ^{b)} (1,2,3) ^{b)}	0.015	10.983 **
定数項(2) ^{b)}	2.215	23.052 **
定数項(3) ^{b)}	1.855	3.376 **
サンプル数	3612	
初期対数尤度	-3968.188	
最終対数尤度	-3650.770	
自由度調整済み尤度比	0.080	

a)購入価格=車両価格-購入補助金額

b)括弧内の1,2,3は説明変数が入力された選択肢を示す
(1:GV,2:HV,3:EV)

*:10%有意, **:1%有意

このとき対数尤度関数は、式(4)で表される。

$$l(\alpha, \beta, \theta) = \sum_i \{ \ln \hat{c}((S^T(\tau_i); \alpha), (S^D(d_i); \beta); \theta) + \ln f^T(\tau_i; \alpha) + \ln f^D(d_i; \beta) \} \quad (4)$$

ここで、 τ_i 、 d_i はそれぞれ自動車 i の車齢と年間走行距離、 α 、 β は未知パラメータベクトル、 θ はコピュラに関するパラメータである。コピュラ関数の選定には、それぞれが異なる依存構造を表現可能な4種類のコピュラ関数を候補としてデータへの当てはめを行い、最も当てはまりの良いコピュラ関数を決定する。

2006年調査の結果を用いた買い替え車齢と年間走行距離の同時決定モデルについて、4種類のコピュラ関数を仮定した推定した結果の最終対数尤度、およびBICを表-3に示す。表-3より、クレイトン・コピュラを仮定したとき、最終対数尤度が最大、BICは最小となつて、最も当てはまりが良いモデルとなった。パラメータ推定結果に着目すると、4種類のコピュラ関数を仮定したモデル間でパラメータ符号はすべて一致しており、また絶対値の大小関係についても大きな違いは見られなかった。これは、本分析では買い替え・廃棄車齢と年間走行距離の2変量間の相関があまり強くなかったためと考えられる。なおコピュラ関数によっては、変数間の負の相関が考慮できない場合があるが、後述するように買い換え・廃棄車齢と年間走行距離の間で負の相関が得られたことは、自動車の耐久性を考慮すると合理的である。

最もあてはまりがクレイトン・コピュラを仮定した場合のモデル推定結果を表-4に示す。買い替え・廃棄車齢に関する共変量に着目すると、メインドライバーの年齢が正で有意に、男性ダミーが負で有意となった。これは、メインドライバーが高齢、あるいは女性の場合、自動車

表-3 最終対数尤度とBICの比較

	最終対数尤度	BIC ¹⁾
ガンベル・コピュラ	-2262.9	4595.5
クレイトン・コピュラ	-2258.4	4586.4
フランク・コピュラ	-2259.7	4589.1
正規・コピュラ	-2260.1	4589.9

1) : BIC (Bayesian Information Criterion): $\ln(L_c) - 0.5 * p * \ln(N)$

表-4 買い替え・廃棄車齢、年間走行距離モデル推定結果

	推定値	t値
買い替え・廃棄車齢(年)に関する共変量		
尺度パラメータ	0.016	4.008 **
形状パラメータ	2.349	27.845 **
メインドライバーの年齢(歳)	0.019	3.668 **
メインドライバーが男性ダミー	-0.187	-1.957 *
世帯構成員人数(人)	0.188	3.965 **
年間走行距離(万 km/年)に関する共変量		
尺度パラメータ	0.680	6.836 **
形状パラメータ	1.893	43.741 **
メインドライバーの年齢(歳)	-1.334 $\times 10^{-4}$	-0.040
メインドライバーが男性ダミー	0.247	3.860 **
世帯構成員人数(人)	-0.112	-3.362 **
コピュラ関数のパラメータ		
クレイトン・コピュラ (順位相関係数)	-0.119 (-0.063)	-5.141 **
サンプル数	1063	
最終対数尤度	-2258.376	
BIC	4586.441	

*:10%有意, **:1%有意

を廃棄するまでの期間が長くなる傾向を示している。年間走行距離に関する共変量では、メインドライバーの性別が正で有意に、世帯構成員人数が負で有意になった。すなわち、メインドライバーが男性、あるいは世帯構成員人数が少ない世帯の場合、年間走行距離が長くなる傾向を表している。コピュラ関数のパラメータ推定値は、正で絶対値が大きいほど、買い替え・廃棄車齢と年間走行距離の間で正の相関が高く、負で絶対値が大きいほど負の相関が高い傾向を意味する。表-4より、コピュラ関数のパラメータ推定値から、買い替え・廃棄車齢と年間走行距離の間には弱い負の相関が存在することが明らかとなった。これは買い替え・廃棄車齢が長い自動車は年間走行距離が短く、買い替え・廃棄車齢が短い自動車は年間走行距離が長い傾向を示す結果である。

5. 低公害車普及による最適なCO₂管理施策の導出

(1) CO₂管理施策設計問題の定式化

本研究では、「2020年に中国地方が保有する自家用乗用車からのCO₂排出量の1990年比25%削減」を施策目標として設定する。目標達成に用いる施策の種類は、EVの購入補助、および充電インフラの整備の2種類とする。すなわち、CO₂排出量削減目標が達成可能で、かつ施策の実施に要する総費用が最小となる各時点の施策実施規

模の組み合わせ（施策シナリオ）を、1年間を1時点として、動学的最適化問題を解くことによって、導出する。

想定期間は、2010年から2020年までの10時点である。設計変数は、各時点におけるEV1台当たりの購入補助金額、および中国地方の急速充電器新規設置数とする。制約条件をCO₂排出量削減の目標の達成とし、目的関数を総施策実施費用の現在価値の最小化とする。目的関数と制約条件を、それぞれ(5)、(6)に示す。

$$\min_{c_1, I_2} [(\rho \otimes c)' \cdot \mathbf{I}] \quad (5)$$

$$s.t. \quad CO2_T \leq (1 - 0.25) \times CO2_B \quad (6)$$

ここで、 $\otimes$ は行列の要素積、 ρ は将来の施策実施費用を現在の価値に換算するための割引率ベクトル（ $\rho = 0.03$ ）、 c は施策1単位当たりの実施費用ベクトル、 $\mathbf{I}$ は施策に関する数量ベクトルである。これらは、共に、要素数が $2T$ である。また、添え字 T は時点 t （ $t=1, 2, \dots, T$ ）としたときの目標時点、添え字 B は基準時点（ $t=1$ ）である。

割引率ベクトル ρ は式(7)、実施費用ベクトル c は式(8)～式(10)、数量ベクトル $\mathbf{I}$ は式(11)～式(13)で表される。

$$\rho = \left(\frac{1}{(1+\rho)^1}, \dots, \frac{1}{(1+\rho)^t}, \dots, \frac{1}{(1+\rho)^T}, \frac{1}{(1+\rho)^1}, \dots, \frac{1}{(1+\rho)^t}, \dots, \frac{1}{(1+\rho)^T} \right) \quad (7)$$

$$c = (c_1, c_2)' \quad (8)$$

$$c_1 = (c_{1,1}, \dots, c_{1,t}, \dots, c_{1,T})' \quad (9)$$

$$c_2 = (c_{2,1}, \dots, c_{2,t}, \dots, c_{2,T})' \quad (10)$$

$$\mathbf{I} = (\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2)' \quad (11)$$

$$\mathbf{I}_1 = (I_{1,1}, \dots, I_{1,t}, \dots, I_{1,T}) \quad (12)$$

$$\mathbf{I}_2 = (I_{2,1}, \dots, I_{2,t}, \dots, I_{2,T}) \quad (13)$$

ここで、 ρ は割引率、 c_1 はEV1台当たりの購入補助金額ベクトル（設計変数）、 c_2 は急速充電器1台当たりの設置費用である。 $\mathbf{I}_1$ はEV販売台数ベクトル、 $\mathbf{I}_2$ は急速充電器新規設置台数ベクトル（設計変数）である。

$\mathbf{I}_1$ の要素 $I_{1,t}$ は、式(14)～式(18)で表される。

$$I_{1,t} = A_t \times p_{EV,t} = \sum_{i \in A_t} p_{i,EV,t} \quad (14)$$

$$N_t = N_{t-1} + A_t - D_t \quad (15)$$

$$p_{i,EV,t} = p_{i,EV,t}(V_{i,j,t}) \quad (16)$$

$$V_{i,EV,t} = V_{i,EV,t}(c_{1,t}, p_{EV,t-1}, ST_t / q, \beta \cdot x_{i,t}) \quad (17)$$

$$ST_t = ST_{t-1} \times (1 - w_t) + I_{2,t} \quad (18)$$

ここで、 i は自動車、 A_t は年間購入自動車の台数（自動車販売台数）、 D_t は年間廃棄自動車台数、 N_t は時点 t

の中国地方の自家用乗用車保有台数、 $p_{j,t}$ は車種 j の新車販売シェア、 $p_{i,j,t}$ は自動車 i が車種 j に買い替えられる確率、 $V_{i,j,t}$ は自動車 i を保有している世帯の車種 j に関する効用関数、 ST_t は急速充電器累積設置台数、 q は中国地方の可住地面積、 β はパラメータベクトル、 $x_{i,t}$ は説明変数ベクトル、 w_t は急速充電器の年間故障率である。

本研究では、急速充電器の稼働確率、すなわち基準生存関数は指数分布に従うとする。このとき、急速充電器の年間故障率 w_t は、式(19)で表される。

$$\begin{aligned} w_t &= S(t-1) - S(t) \\ &= \exp\{-\lambda \times (t-1)\} - \exp(-\lambda \times t) \\ &= 1 - \exp(-1/T_c) = w \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 T_c は急速充電器の耐用年数の期待値である。

自動車 i の年間走行距離 $d_{i,t}$ 、および時点 t で、自動車 i が買い替えられるかどうか（買い替えスケジュール）は、買い替え・廃棄車齢と年間走行距離の同時決定モデルを用いて決定する。なお、本シミュレーションでは、中国地方が保有する全自家用乗用車台数 N_t は時点により変化しない、すなわち世帯は自動車の廃棄は行わず、買い替えのみを行うとする、と仮定しておく。また、2011年以降の購入自動車は全て新車とする。以上は分析の簡便化のための仮定であり、本来は自家用車保有台数の増減に関しては自動車保有台数選択モデルを、また中古車への買い替えに関しては新車/中古車選択モデルを、それぞれ構築してシステム内に導入する必要がある。しかしこれらのモデル構築には、データの収集可能性や選択肢集合の設定、およびモデルの複雑性などの問題を解決する必要があるため、本研究では取り扱わない。

一様乱数 $r[0,1]$ を用いた逆関数法により、自動車 i の時点 t の年間走行距離 $\hat{d}_{i,t}$ を式(20)より、また自動車 i が買い替えられる期間 $\hat{\tau}_i$ を式(21)によって、それぞれ推定する。逆関数法によって年間走行距離と買い替え期間を決定することにより、両者の依存関係を考慮したシミュレーションを行うことができる。さらに、時点 t 以前の最近の買い替え時点 $\tilde{t}(i)$ は式(22)で定義する。

$$\left[\int_0^\infty (1 - F_{i,t}(\tau, d)) dd \right]^{-1} = IS_{i,t}(r) = \hat{d}_{i,t} \quad (20)$$

$$\left[\int_0^\infty (1 - F_{i,t}(\tau, d)) d\tau \right]^{-1} = IS_{i,t}(r) = \hat{\tau}_i^n \quad (21)$$

（ただし、 $r = r[0,1]$ ）

$$\tilde{t}^n(i, t) = \tilde{t}^{n-1}(i, t) + \hat{\tau}_i^n \quad (22)$$

（ただし、 $n \geq 1$, $\tilde{t}^0 = 0$, $\tilde{t}^n \leq t \leq \tilde{t}^{n+1}$ ）

ここで、 $F_{i,t}$ は時点 t における、期間 τ と年間走行距離 d

に関する同時分布関数、 n は自動車の買い替え回数である。なお、 $\hat{t}_i^n$ は、自動車の買い替えが起こる時点、すなわち $\tilde{t}^n(i, t) = t$ となる時点のみで評価する。式(20)～式(22)で決定した、自動車 i の買い替えスケジュールの例を図-1に示す。なお、初期時点である、2010年の自動車 i の車種 j 、および、年式、中古車と新車の別は既知とする。また、自動車の買い替えは、年度期首に起こると考える。

時点 t での車種 j の保有シェアは式(23)で表される。

$$P_{j,t} = \left(\sum_{i \in A_t} p_{i,j,t} + \sum_{i \in (N_t / A_t)} p_j(\tilde{t}(i, t)) \right) / N_t \quad (23)$$

ここで、右辺第1項の i は $i \in A_t$ 、右辺第2項の i は $i \in N_t$ かつ $i \notin A_t$ について合計する。図-2より最終年次である $t=T$ の、自動車 i からのCO₂排出量 $CO_{2,T}$ は、式(24)で表される。

$$CO_{2,T} = \begin{cases} \hat{d}_{i,T} \times \sum_j (k_j \times p_{i,j,T}) & (i \in A_T) \\ \hat{d}_{i,T} \times \sum_j (k_j \times p_j(\tilde{t}^*(i))) & (i \in N_T \text{ かつ } i \notin A_T) \end{cases} \quad (24)$$

ここで、 k_j は車種 j の排出係数、 $\tilde{t}^*(i)$ は最終年次直近の買い替え時点である。

(2) 遺伝的アルゴリズムの適用

動学的最適化問題を解く主な手法としては、変分法、最適制御理論、および動的計画法²⁴⁾ (dynamic programming, 以下DP)が存在する。しかし、DPの代表的な例である資源配分問題の制約条件は、各段に配分する資源量を設計変数として総資源量、すなわち全段を通じた制約条件である。一方、CO₂管理施策設計問題では、最終時点のCO₂排出量のみ制約条件が設定されている。これは、CO₂管理施策設計問題では、フローとして排出される年間CO₂自体が非平衡な環境系の中で複雑な相互作用を経て、たとえば、同じ状態(フロー)の変数である年間平均気温や年間平均海水面に影響すると考えら

図-1 自動車 i の買い替えスケジュールと保有台数の算出(車種 $j=GV$ の自動車 i が、2012年と2015年に買い替えられる場合)

れるためである。ここで、各時点それぞれのCO₂排出量に制約条件を設けることは可能であるが、その場合、EV普及に関する状態依存効果(インフラ整備や社会的相互作用など)、すなわち施策実施時点以降の将来にわたって、先決した施策が後段のEV普及率に影響するという、本問題の特性が表現できず、長期の施策を検討する意義が失われてしまうため、各時点にCO₂排出量制約を設けた定式化は不適切と考えられる。

また、資源配分問題では、各段に配分した資源量からその段での利得が直接得られる。しかし、CO₂管理施策設計問題においては、各時点でのCO₂削減必要量を設計変数とした場合、施策実施費用とCO₂排出量の間には、世帯の車種選択、販売シェア、保有シェアが介在する。それらの逆関数演算は複雑なため、ある時点のCO₂削減必要量から直ちにその時点での施策実施費用を算出することは容易ではない。

以上より本研究では、CO₂管理施策設計問題をDPの枠組みで定式化可能な組み合わせ最適化問題として定式化する。ただし、設定した問題の最適解の導出を解析的に行うことは容易でないため、本問題の性質を踏まえて、解法として遺伝的アルゴリズム²⁵⁾ (genetic algorithm, 以下GA)を適用して最適解を求めることとする。

(3) 低公害車の普及による最適なCO₂管理施策

本研究では、中国地方の世帯属性の分布を再現した約400万台(中国地方の保有自家用乗用車数)に対して、式(5)、式(6)のCO₂管理施策設計問題を上述の遺伝的アルゴリズムを用いて解き、中国地方での低公害車普及による最適なCO₂管理施策の導出を行う。なお、世帯属性の発生についてのばらつきを抑えるため、サンプルの生成を10回行い、それぞれのサンプルセットに対して最適施策を導出することで、解のロバスト性を確保する。

本研究では、2020年のCO₂削減目標を1990年比25%削減と設定する。2010年の国内全ての自家用乗用車からのCO₂排出量の1990年比増加率43.2%を基準とすると、1990年比の削減目標は、2010年比に換算すると、47.6%に相当する。したがって、2020年のCO₂排出量は2010年比、47.6%削減を制約条件としてモデルに施しておく。

導出された施策シナリオに沿った各年のCO₂排出量を、図-2に示す。本研究では、バックキャスティング・アプローチを適用した動学的最適化問題を定式化したことによって、10回全てのサンプルセットにおいて2020年において目標を達成できており、制約条件を満たす解が得られていることが確認できる。また、最適な施策が少し異なるが、安定した解が得られていることがわかる。したがって、以下、導出した解の平均値に着目する。

CO₂管理施策設計問題の設計変数である、各時点のEV1台当たりの購入補助金額を図-3に、急速充電器の新規

図-2 最適施策を施行した場合のCO₂排出量

設置台数を図-4に、それぞれ示す。なお、本研究では、急速充電器1台の設置費用を、充電器本体の価格と工事費用をあわせて1,000万円と設定した。図-3より、EV1台当たりの購入補助金額は現在エコカー補助金制度によって設定されている金額（約100万円）よりも小さい金額となった。また、図-4より、急速充電器の新規設置台数は、2時点、3時点目（2012年、2013年）が最も多い。2020年での稼働急速充電器台数は、約13,000台となった。経済産業省が提示している「次世代自動車戦略²⁶⁾」では、2020年の急速充電器累積設置台数の目標値を全国で5,000台としており、本シミュレーション分析の結果からは、現在の政策では、自家用乗用車部門でのCO₂削減目標を達成できない可能性があることが明らかとなった。

また、各施策に対する支出額の現在価値を図-5に示す。なお、サンプル10セットそれぞれの最適な総施策実施費用の平均値は、約2,700億円であった。また、10年間の延べEV販売台数は約300万台であり、販売されたEV1台当たりにより要した費用は、10年間で約9万円であった。図-5より、いずれの時点においても、充電インフラに対する支出額の割合が、EV購入補助に対する支出額の割合よりも大きいことがわかる。これは、バックキャスティングで社会的相互作用の影響を考慮していること、および各自動車に対して直接補助金を支給するEV購入補助よりも、1台の設置で複数の自動車に影響が及ぶ充電インフラ整備の方が、総施策実施費用が小さく、EV普及に寄与することが理由として考えられる。

上述の施策シナリオを施行した場合の各車種の販売シェアを、図-6に示す。図-6より、EV販売シェアは、最終時点の2020年では、約55%、HVは約40%となる結果が得られた。環境省が提示している「地球温暖化対策に係る中長期ロードマップ²⁷⁾」では、2020年のHVやEVなどの低公害車新車販売シェアの目標値を50%と設定されており、本シミュレーション分析結果の約95%（2020年のHVとEVの販売シェア）よりも小さい。したがって、環境

図-3 EV1台当たりの購入補助金額

図-4 急速充電器の新規設置台数

図-5 各施策に対する支出額の現在価値

図-6 最適施策を施行した場合の販売シェア

省が提示している政策では、CO₂削減目標は達成できない可能性があることが明らかとなった。また、後半で、減少傾向にあるのは、急速充電器の減耗や、販売シェアの経年低下による社会的相互作用の影響が考えられる。なお、生成サンプルの計画期間中の平均買い替え回数は、自動車1台当たり1.49回であった。

6. 結論

本研究では、施策目標を確実に達成可能、かつ総施策実施費用が最小な施策シナリオを、バックキャスティング・アプローチに基づいて、中国地方全体を対象とするCO₂管理施策立案モデルを定式化し、遺伝的アルゴリズムを適用して、その最適解として導出するシステムを開発した。既往研究において、将来計画の立案手法として用いられてきたフォアキャスティング・アプローチ（現在の状態を改善する施策オプションを複数準備しておき、その中から、施策目標を達成可能なオプションを選ぶ方法）では、施策目標が達成可能、かつ総施策実施費用が最小な施策が必ずしも得られるとは限らなかった。しかし、本研究で導出された施策では、予め施策の目標として設定した「中国地方の全自家用乗用車からの2020年のCO₂排出量を1990年比25%削減」を達成可能、かつ、総施策実施費用が最小となる時点別のEV購入補助金額、および急速充電器の新規設置数を得ることができた。導出された施策では、充電インフラに対する支出額の割合がEV購入補助に対する支出額の割合よりも大きく、現在の車両に対する補助金政策が十分でない可能性が明らかとなった。さらに、現在行われている充電インフラ整備に対する投資方法では、CO₂削減目標は達成できない可能性があることが明らかとなった。

今後の課題として、本研究では、計画期間を10年間として施策を検討したため、コーホート効果による年齢別人口変動を考慮していない。しかし、国勢調査などを基に行った人口変動に関する将来予測から考慮することによって、より長期的な施策の検討が可能である。さらに、本シミュレーション分析で自動車価格は一定としている。しかし、実際の市場では普及率が上がるにつれて製品の価格が低下する量産効果が存在する。したがって、普及率と価格変動のメカニズムが導入できれば、より現実的な施策の提示が可能である。また、各種自動車関連施策を実施する場合、消費者は自動車の買い控えや、先買いといった施策の内容を先読みした行動をとる。長期にわたる有効な施策を検討するためには、このような将来を先読みした行動メカニズムを明示的に考慮した調査、分析方法の確立が必要である。

参考文献

- 1) 国立環境研究所：温室効果ガスインベントリオフィス, <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>, 閲覧日 2013 年 2 月 10 日。
- 2) ロベール, K. H.: ナチュラル・ステップ, 新評論, 2010。
- 3) 松橋啓介, 駆動祐揮, 守口祐一: 交通部門におけるCO₂排出量の中長期的な大幅削減に向けた対策, 地球環境, Vol.12, No.2, pp.179-189, 2007。
- 4) 戸川卓哉, 加藤博和, 鈴木祐大, 林良嗣: 地球環境制約を前提としたバックキャスティング・アプローチによる都市空間構造導出手法, 土木計画学研究・講演集, Vol.40, CD-ROM, 2009。
- 5) 奥田隆明, 三室碧人: バックキャスティングに基づく都市鉄道投資の便益計測, 土木計画学研究・講演集, Vol.40, CD-ROM, 2009。
- 6) 芦名秀一, 藤野純一: 多地域最適電源計画モデルを用いたわが国電力部門におけるCO₂削減シナリオの検討, エネルギー・資源, Vol.29, No.1, pp.1-7, 2008。
- 7) 増井利彦, 松岡譲, 日比野剛: バックキャスティングによる脱温暖化社会実現の対策経路, 地球環境, Vol.12, No.2, pp.161-169, 2007。
- 8) 国立環境研究所, 京都大学, みずほ情報総研: 低炭素社会に向けた道筋検討, <http://www.nies.go.jp/osirase/chotatsu/kokoku/2009/20091028-2.html>, 最終閲覧日 2011 年 1 月 25 日。
- 9) Doyen, L. Dumas, P. and Ambrosi, P.: Optimal Timing Next Term of CO₂ Mitigation Policies for a Cost-Effectiveness Model, *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.48, pp.882-897, 2008。
- 10) ロジャーズ, E. M.: イノベーション普及学, 産能大学出版部, 1990。
- 11) 酒井博章: 普及モデルによる顧客細分化の実証, オイコノミカ, Vol.42, No.1, pp.1-13, 2005。
- 12) Bass, F. M.: A New Product Growth Model for Consumer Durable, *Management Science*, Vol.15, pp.215-227, 1969。
- 13) 森川高行, 村山杏子: DIFFUSION MODEL を用いた海外観光旅行者数の予測, 土木計画学研究・講演集, Vol.15, No.1, pp.205-210, 1992。
- 14) Mahajan, V., Muller, E. and Bass, F. M.: New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research, *Journal of Marketing*, Vol.54, pp.1-26, 1990。
- 15) 清水哲夫, 屋井鉄雄: 自動料金収受システムの普及予測に関する基礎的研究, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.19, pp.157-160, 1999。
- 16) 松本光崇, 近藤伸亮, 藤本淳, 梅田靖, 槌屋治紀, 増井慶次郎, 李賢映: クリーンエネルギー自動車の普及評価モデルの構築, エネルギー・資源, Vol.3, pp.49-55, 2008。
- 17) 稲葉寿: 感染症の数理モデル, 培風館, 2008。
- 18) Brock, W. and Durlauf, S.: Interactions-Based Models, *Technical Working Paper*, No.258, pp.1-131, 2000。
- 19) 福田大輔, 上野博義, 森地茂: 社会的相互作用存在下での交通行動とミクロ計量分析, 土木学会論文集, No.765/IV-64, pp.49-64, 2004。
- 20) 福田大輔, 渡邊健, 屋井鉄雄: 利用者間の相互依存性を考慮した ETC 車載器普及モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, pp.463-472, 2004。
- 21) De Jong, G.: A Disaggregate Model System of Vehicle Holding Duration, Type Choice and Use, *Transportation Research Part B*, Vol.30, pp.263-276, 1996。
- 22) 山本俊行, 北村隆一, 河本一郎: 世帯内での配分を考慮した自動車の車種選択と利用の分析, 土木学会論文集, No.674/IV-51, pp.63-73, 2001。
- 23) 桑野将司, 藤原章正, 塚井誠人, 張峻屹, 岩本真由子: コピュラを用いた自動車保有期間と走行距離の同時決定モデルの開発, 土木学会論文集 D, Vol.66,

No.1, pp.54-63, 2010.

24) 鍋島一郎：動的計画法，森北出版，1968.

25) 棟朝雅晴：遺伝的アルゴリズム—その理論と先端的手法—，森北出版，2008.

26) 経済産業省：次世代自動車戦略 2010，
<http://www.meti.go.jp/press/20100412002/20100412002-2.pdf>，閲覧日 2011 年 2 月 10 日.

27) 環境省：地球温暖化対策に係る中長期ロードマップ，
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=12381>，閲覧
日 2011 年 2 月 10 日.

(2013. 2. 25 受付)

DYNAMIC CO₂ MANAGEMENT SYSTEM IN LOW EMISSION VEHICLE PROMOTION

Masashi KUWANO, Makoto TSUKAI and Mayuko IWAMOTO

In Japan, the government promised to reduce CO₂ emission in 2020 by 25% comparing with 1990's levels as a countermeasure of the global warming problem. CO₂ emission from transportation sector shares 20 % of total CO₂ emission, and it is brought by 90% from car. Therefore, effective politics are required to reduce the car CO₂ emission. This study, purposes to develop the dynamic approach for CO₂ management policies including the investment, timing and its amount choice of available, policy measure, in order to meet the reduction target under the policy-cost minimization standard. Our analysis is organized as follows. At first, this study develops two models which objective variables are renewal period and annual vehicle kilometer, or purchasing car type. The models are used as the sample generator of the target area. The optimization problem which designs the dynamic policy type and amount is formulated with the constrained condition about the reduction target, for the cost minimization of policy implementation. Through empirical application of the proposed model system, the effectiveness of the simulation system is clarified.