

スマートシティ実現のための 環境技術導入施策の経済評価 —EV・PHVの普及分析を中心として—

矢田部 貴司¹・武藤 慎一²・森杉 壽芳³

¹学生員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部土木環境工学専攻 (〒400-0008 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail:g12mc016@yamanashi.ac.jp

²正会員 博(工) 山梨大学大学院准教授 医学工学総合研究部 (〒400-0008 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail:smutoh@yamanashi.ac.jp

³正会員 工博 日本大学総合科学研究所教授 (〒101-8375東京都千代田区五番町12-5)

環境省では京都議定書以降の目標として、2050年までに80%のGHGを削減するとの目標を掲げている。今後も継続的にGHGの削減を行うことが必要な状況となっている。京都メカニズムのような多国とのGHG取引だけでなく自国内でのGHGの削減を考える必要がある。そのような中でスマートシティと呼ばれるものが計画されている。今まで発電施設から一方的に送電されていた電力を、再生可能エネルギー等を利用し都市全体で発電し電力を融通するものである。再生可能エネルギー等で発電した余剰電力はEV・PHV等の蓄電池を利用して蓄電することになる。電力の蓄電はスマートシティを構成する上で重要な役割を果たすことになる。そこで本研究では、EV・PHVを普及させた際の経済的影響およびCO₂削減効果を明らかにすることを目的としている。

Key Words : smart city, electric automobile, economic impact evaluation, CGE model

1. はじめに

わが国の2011年度のGHG総排出量は1,308 (百万tCO₂)であり、1990年比で3.7%の増加となっている¹⁾。京都議定書では、わが国に2012年度時点で1990年度比マイナス6%の目標が課されており、このままでは目標の達成が困難であるが、森林吸収源対策および京都メカニズムによるクレジットを加味すれば、2008年度から2011年度の4年間の平均が1990年度比9.2%減となり目標達成可能とされている²⁾。しかし、2011年度のGHG排出が1990年度比で増加していることや東日本大震災による原子力発電所の停止などもあって、京都議定書の目標が達成できたからと言って安心できる状況にはない。さらに、環境省では京都議定書以降の目標として、2050年までに80%のGHGを削減するとの目標を掲げている。以上より、わが国では今後も継続的に地球温暖化対策を実行し、確実なGHGの排出削減を行うことが必要な状況にある。

そのような中で、環境に配慮した低炭素都市「スマートシティ」と呼ばれるものがある。正確な定義は決

まっていないが、一般的にスマートシティとは、「ICT・環境技術などの先端技術を用いて社会インフラを効率化・高度化した都市や地域³⁾」のことを示している。スマートシティを実現するものとして①太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入。②①で発電した余剰電力を蓄電する電気自動車。③家電を外からリモートコントロールできるICT技術。④電力消費量の多い都市部に環境負荷の少ないグリーン電力を送ることのできる双配電システムの導入などがある。スマートシティ実現のために上記の4点があるが、本研究では電気自動車 (EV) やプラグインハイブリッド車 (PHV等) といった低炭素型の自動車の導入、普及に注目する。また現状での自動車交通からのCO₂排出量は全体の16.3%⁴⁾であり地球温暖化の要因の一つと考えられる。すなわち、既存の高燃費の自動車から環境負荷の少ないEV・PHVへの転換が必要である。

そこで本研究は、次世代自動車の普及率、それに伴う経済的影響およびCO₂排出削減効果を明らかにすることを目的とする。次世代自動車の普及は、スマートシティにおける余剰電力の吸収の役割と自動車由来のCO₂

排出削減を強化するという二つのねらいがある。本研究は、武藤ら^{5) 6)}で適用した応用一般均衡（CGE：Computable General Equilibrium）モデルを用いて分析を進めるが、それらとの違いは自家輸送部門を明示的に導入した点であり、それにより自家用自動車から排出されるCO₂の削減効果を正確に計測することが可能となっている。また、本研究では動学モデルでの数値計算も行うことにより自動車の燃料利用時（走行時）だけでなく、乗り換えを含めた保有時の影響を把握することが可能であり、今後の次世代自動車の普及の方向性を明らかにしようとしたものである。

2. EV・PHVの現状

スマートシティは1. で触れているように各住宅・ビル等の屋根に太陽光電池を設置して発電し、生活・業務に必要な電力を賄った上で余剰電力を電気自動車に蓄電し都市内で電力を融通しあうことを指している。

このようなスマートシティを現実的にしたのが、EVやPHVの実用化である。一般的に、EV等に搭載されているリチウムイオン電池は、約2日分⁷⁾の家庭消費電力を蓄電することが可能である。これまで家庭での太陽光発電等で得られた電力は、余剰分があっても蓄電することができなかったが、電気自動車により可能となる。

EV・PHVを含む次世代自動車の普及の計画は現在までにいくつか行われており、近年行われているものをまとめたものが表-1である。すでに目標年次となっているものは2007年に経済産業省で行われた次世代自動車・燃料イニシアティブ⁸⁾がある。目標年次は2010年となっており普及目標は、低公害車全体で1000万台となっている。現在行われているものとして、環境省で次世代自動車普及戦略がある。この計画では、2020年までに200万台、2050年までに880万台にするというものである。また経済産業省では、次世代自動車戦略2010と呼ばれる計画が進められており2020年までにEV・PHVの新車販売の割合を15～20%にするものである。

このようにEV・PHVを含む次世代自動車の普及に向けて計画が行われている。図-1では現状の普及台数と総自動車台数を表している。国内自動車の総台数7860万台⁹⁾から比較すると、PHVは2009年から市場に投入され始めたばかりで2005年～2011年までの販売台数合計値はEVでは3.4万台¹⁰⁾でありPHVでも0.4万台¹⁰⁾となっている。図-1には示していないがハイブリッド車の保有台数は2011年時点で203万台⁷⁾となっている。2020年までに200万台普及の目標があるが、ハイブリッド車を含めると現時点で達成されている。しかし、スマートシティ

表-1 次世代自動車の普及計画

策定期期	計画名	目標年次	普及目標 (保有台数)
2007年5月	次世代自動車・燃料イニシアティブ【経済産業省】	2010	低公害車全体で1,000万台
2009年5月	次世代自動車普及戦略【環境省】	2020 2050	200万台 880万台
2010年4月	次世代自動車戦略2010【経済産業省】	2020	(EV・PHVで 新車販売の 15～20%)

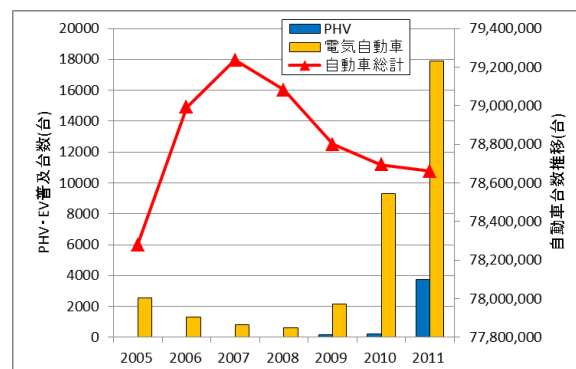


図-1 次世代自動車普及台数推移

で求められるのは余剰電力を吸収する能力のあるEV・PHVである。この両者を普及させることが必要である。

3. 自動車環境評価のためのCGEモデル

(1) 既往研究の整理

EV・PHVのような次世代自動車の普及には多くの税金や補助金等が必要であり、また燃料投入や自動車生産量等も変化するため経済全般を網羅したモデルの適用が必須となる。また、税導入や補助金においては、Deadweight lossが発生する。こうした経済的影響に対する配慮も、EV・PHVの普及を評価するため、また今後の補助金制度等の判断を行うためには重要な要素といえる。そこで、本研究ではCGEモデルに基づく評価を実施する。CGEモデルは、すべての経済活動を扱う一般均衡モデルをベースとし、税などの導入がどの主体にどのような影響をもたらすのか、さらにそれが市場メカニズムを介してどのような経済的影響を生じさせるのかを評価することができる。

CGEモデルを用いた自動車環境の研究では、徳永、武藤ら⁹⁾の研究などがある。徳永、武藤ら⁹⁾は、自動車交通を対象としたトップランナー方式による燃費規制策およびグリーン税制の評価がなされている。そこで用いたCGEモデルとの違いは、自家輸送部門の扱いを詳細化した点である。以降で、その詳細を説明する。

(2) CGEモデルの全体構成

本研究で用いたCGEモデルは、武藤、桐越⁹⁾にて開発

したSpatial CGE (SCGE) モデルを、日本全国1地域を対象とするDCGEモデルとしたものである。ただし、海外とも輸出入を通じて取引しているとする。本モデルでは、国内には企業（ここでは23産業部門（石油石炭製品部門を含む）を想定）、運輸企業（ここでは11運輸部門を想定し、その中には自家輸送部門も含まれる）、家計、政府、公的投資部門、民間投資部門が存在する。

このうち、企業部門では石油石炭製品部門を明示化し、運輸部門では自家輸送部門を考慮した。これに関し、現在の全国産業連関表では帰属計算により自家輸送部門のデータが推計されている。ただし、現状では自家輸送部門に係わる中間投入額データのみしか示されていない。すなわち自家輸送部門の付加価値データが推計されておらず、また家計の自家輸送サービス消費額データも存在しないという問題があった。そこで本研究では、モデル化に関しては自家輸送部門も他の運輸部門と同様に定式化し、パラメータ推定においてデータがない部分を適宜推計して補うことにした。

各主体の基本的な行動モデルは、標準的CGEモデル（例えば13）等と同様に階層型行動モデルを想定し、企業は生産技術制約下での費用最小化行動、家計は効用一定制約下での支出最小化行動をとるものとした。なお、家計は効用最大化行動をとると想定される場合も多いが、ここでは支出最小化行動により定式化を行った。その詳細は3.5) にて説明する。政府、各投資部門の行動モデルについても後述する。

(3) 最適動学モデルの枠組み

本モデルでは、次世代自動車の最適な普及率を導出するため、最適動学 (DCGE) モデルを構築し数値計算を行う。ここでは、斎藤¹⁸⁾が行った労働集約部門と資本集約部門の2部門から成るラムゼイ・モデルを基に定式化する。

まず、消費者の最適化問題を次のように設定する。

$$\max_{u_t} \int (\ln u_t) \exp(-\rho t) dt \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } \dot{K} = wL + (r - \delta)K - e \quad (1b)$$

ただし、 $\dot{K}$: 資本ストックの時間変化、 w : 賃金率、 L : 労働時間、 r : 利子率、 δ : 資本ストック減耗率、 K : 資本供給量、 e : 家計の支出水準。

支出水準については、以下の支出最小化行動を仮定。すなわち、コブダグラス型効用関数を制約とした支出最小化問題を仮定する。

$$e = \min_{X_1, X_2} \sum_i p_i X_i \quad (2a)$$

$$\text{s.t. } X_1^{\alpha_1} X_2^{1-\alpha_1} = u \quad (2b)$$

ただし、 X_i, p_i : 財*i*の消費量、財*i*の財価格、 u :

瞬時効用、 α : パラメータ。

式(2)は、以降で説明する家計の行動モデルの式(26)に相当する。

これを解くと、以下の需要関数が得られる。

$$X_1 = \left\{ \frac{\alpha_1 p_2}{(1-\alpha_1) p_1} \right\}^{1-\alpha_1} u, \quad X_2 = \left\{ \frac{(1-\alpha_1) p_1}{\alpha_1 p_2} \right\}^{\alpha_1} u \quad (3)$$

式(3)を式(2)に代入して支出関数を導出。

$$e = \left[p_1 \left\{ \frac{\alpha_1 p_2}{(1-\alpha_1) p_1} \right\}^{1-\alpha_1} + p_2 \left\{ \frac{(1-\alpha_1) p_1}{\alpha_1 p_2} \right\}^{\alpha_1} \right] u \quad (4)$$

ここで便宜的に

$$p_U \equiv \left[p_1 \left\{ \frac{\alpha_1 p_2}{(1-\alpha_1) p_1} \right\}^{1-\alpha_1} + p_2 \left\{ \frac{(1-\alpha_1) p_1}{\alpha_1 p_2} \right\}^{\alpha_1} \right]$$

とおくと、 $e = p_U u$ 。

支出関数を式(1)に代入する。現在価値ハミルトニアンを以下のとおり定義。

$$H_t = \ln u_t + \lambda_t \{ wL + (r - \delta)K - p_U u \} \quad (5)$$

ただし、 λ_t : 共役変数。

最大化条件は以下のとおり。

$$\frac{\partial H_t}{\partial u_t} = 0 \quad \Rightarrow \lambda_t = \frac{1}{p_U u_t} \quad (6a)$$

$$-\frac{\partial H_t}{\partial K_t} = \dot{\lambda}_t - \rho \lambda_t \quad \Rightarrow \frac{\dot{\lambda}_t}{\lambda_t} = -(r - \delta - \rho) \quad (6b)$$

式(6a)を微分して、式(6b)に代入。

$$\dot{\lambda}_t = -\frac{\dot{u}_t}{p_U u_t^2} \quad (7a)$$

式(6b)は以下となる。

$$\frac{\dot{u}_t}{u_t} = r - \delta - \rho \quad (7b)$$

式(7b)がオイラー方程式と呼ばれる条件である。

投資モデルは以下ようになる。投資は、家計貯蓄（ここでは $\dot{K} + \delta K$ ）が投資需要にまわされると想定する。ここでは細江ら¹⁶⁾に従って価格で除している。

$$X_1^v = \frac{\lambda_t}{p_1} \{ \dot{K} + \delta K \}, \quad X_2^v = \frac{1-\lambda_t}{p_2} \{ \dot{K} + \delta K \} \quad (8)$$

ただし、 X_i^v : 財*i*の投資量。

次に企業の行動モデルについて記す。利潤最大化行動を仮定すると以下ようになる。

$$\max_{Z_j, L_j, K_j} \pi_j = p_j Z_j - (wL_j + rK_j) \quad (9a)$$

$$\text{s.t. } Z_j = b_j \left(L_j^{\beta_{L_j}} K_j^{\beta_{K_j}} \right) \quad (\beta_{L_j} + \beta_{K_j} = 1) \quad (9b)$$

式(9)は、以降で説明する企業の行動モデルの式(16)式に相当する。

これを解くと、以下の要素需要関数が得られる。

$$L_1 = \frac{1}{b_1} \left\{ \frac{\beta_{L_1} \cdot r}{\beta_{K_1} \cdot w} \right\}^{\beta_{K_1}} Z_1, \quad K_1 = \frac{1}{b_1} \left\{ \frac{\beta_{K_1} \cdot w}{\beta_{L_1} \cdot r} \right\}^{\beta_{L_1}} Z_1,$$

$$L_2 = \frac{1}{b_2} \left\{ \frac{\beta_{L_2} \cdot r}{\beta_{K_2} \cdot w} \right\}^{\beta_{K_2}} Z_2, \quad K_2 = \frac{1}{b_2} \left\{ \frac{\beta_{K_2} \cdot w}{\beta_{L_2} \cdot r} \right\}^{\beta_{L_2}} Z_2 \quad (10)$$

今、企業行動においてはゼロ利潤条件が成立する。

$$p_j \cdot b_j \left(L_j^{\beta_{L_j}} K_j^{\beta_{K_j}} \right) - (wL_j + rK_j) = 0 \quad (11a)$$

これに、式(5)を代入。

$$p_j = \frac{1}{b_j} \left[w \left\{ \frac{\beta_{L_j} \cdot r}{\beta_{K_j} \cdot w} \right\}^{\beta_{K_j}} + r \left\{ \frac{\beta_{K_j} \cdot w}{\beta_{L_j} \cdot r} \right\}^{\beta_{L_j}} \right] \quad (11b)$$

市場均衡条件式は以下のとおりである。

$$\text{財1: } X_1 + X_1^v = Z_1, \quad \text{財2: } X_2 + X_2^v = Z_2 \quad (12a)$$

$$\text{労働: } L_1 + L_2 = L, \quad \text{資本: } K_1 + K_2 = K \quad (12b)$$

式(12a)より、

$$p_1 X_1 + p_2 X_2 + p_1 X_1^v + p_2 X_2^v = p_1 Z_1 + p_2 Z_2 \quad (13)$$

今、 $p_U u = p_1 X_1 + p_2 X_2$, $\dot{K} + \delta K = p_1 X_1^v + p_2 X_2^v$ より、

$$\dot{K} = p_1 Z_1 + p_2 Z_2 - p_U u - \delta K \quad (14a)$$

$$\dot{K} = p_1 b_1 L_1^{\beta_{L_1}} K_1^{\beta_{K_1}} + p_2 b_2 L_2^{\beta_{L_2}} K_2^{\beta_{K_2}} - p_U u - \delta K \quad (14b)$$

ただし、

$$L_1 = \frac{\beta_{L_1}}{w} p_1 Z_1, \quad K_1 = \frac{\beta_{K_1}}{r} p_1 Z_1$$

$$L_2 = \frac{\beta_{L_2}}{w} p_2 Z_2, \quad K_2 = \frac{\beta_{K_2}}{r} p_2 Z_2,$$

$$p_U = \left[p_1 \left\{ \frac{\alpha_1 p_2}{(1-\alpha_1) p_1} \right\}^{1-\alpha_1} + p_2 \left\{ \frac{(1-\alpha_1) p_1}{\alpha_1 p_2} \right\}^{\alpha_1} \right]$$

重要な遷移式は以下になる。

$$\frac{\dot{u}_t}{u_t} = r - \delta - \rho \quad (7b)$$

$$\dot{K} = p_1 b_1 L_1^{\beta_{L_1}} K_1^{\beta_{K_1}} + p_2 b_2 L_2^{\beta_{L_2}} K_2^{\beta_{K_2}} - p_U u - \delta K \quad (14b)$$

市場均衡条件式を加えて、

$$L_1 + L_2 = L \quad (L \text{は固定}) \quad (15c)$$

$$K_1 + K_2 = K \quad (15d)$$

$$p_j = \frac{1}{b_j} \left(\frac{w}{\beta_{L_j}} \right)^{\beta_{L_j}} \left(\frac{r}{\beta_{K_j}} \right)^{\beta_{K_j}} \quad (j=1, 2)$$

ここで定常状態を仮定する。

$$r - \delta - \rho = 0 \quad (15a)$$

$$p_1 b_1 L_1^{\beta_{L_1}} K_1^{\beta_{K_1}} + p_2 b_2 L_2^{\beta_{L_2}} K_2^{\beta_{K_2}} = p_U u + \delta K \quad (15b)$$

$$L_1 + L_2 = L \quad (L \text{は固定}) \quad (15c)$$

$$K_1 + K_2 = K \quad (15d)$$

$$p_j = \frac{1}{b_j} \left(\frac{w}{\beta_{L_j}} \right)^{\beta_{L_j}} \left(\frac{r}{\beta_{K_j}} \right)^{\beta_{K_j}} \quad (j=1, 2)$$

これらより、 r, u, w, K を導出する。ただし、価格は

$$p_j = \frac{1}{b_j} \left(\frac{w}{\beta_{L_j}} \right)^{\beta_{L_j}} \left(\frac{r}{\beta_{K_j}} \right)^{\beta_{K_j}} \text{ を用いることとする。}$$

(4) 企業の行動モデル

企業の行動モデルは、基本的には武藤・桐越⁹⁾と同様である。ここでは、特に交通投入を詳細化している点に特長がある。すなわち、図-2に示すように、企業が投入する業務交通と、中間財投入において必要とされる貨物運輸を明示的にモデル化し、それらは交通機関選択まで考慮した。さらに、交通機関には自家輸送も考慮した。自家輸送とは、本来は各企業が自身の労働、資本の一部と輸送に必要な中間財を投入して、自ら輸送を行うものである。それをここでは仮想的な自家輸送運輸部門を設け、その部門が自家輸送サービスを生産しそれを企業が投入するものとした。これにより、自家輸送をモデル上は他の運輸部門と同様に扱うことができる。

具体的な企業の行動モデルを説明する。企業は、まず合成中間財と合成生産要素の投入量を決定し、その合成中間財に対し中間財 i の合成投入量を決定する。なお、中間財 i の投入には貨物運輸が必要であり、貨物運輸の投入ではさらに自家貨物輸送を含む交通機関選択を行う。一方、業務交通も考慮し、それに対しても自家旅客輸送を含む交通機関選択を行うとした。なお、交通時間消費に関しては、業務交通（旅客運輸）の鉄

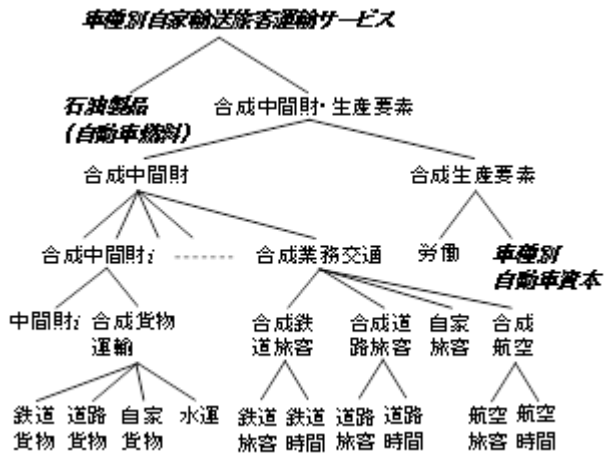


図-2 企業の行動モデルツリー

道、道路交通（バス、タクシー等）、航空において考慮している。これは、出張等において鉄道や道路交通、航空を利用する際、利用者は移動に時間を費やすためである。自家輸送のような自家用車で移動する際も時間を消費するが、それは自家旅客輸送サービスを生産するために投入される労働資源と考えられる。そのため、ここではそれらを自家輸送部門のモデル化において考慮することとし、図-2の企業の自家輸送投入にあたっては時間を投入しないものとした。

次に合成生産要素に関しては、労働、資本の各投入量を決定するものとした。なお本モデルでは、自地域からのみ生産要素を投入している。

以上の行動モデルは、いずれもBarro型CES生産技術制約下での費用最小化行動により定式化する。その具体的な定式化は紙面の都合上主なものだけを示す。企業に関しては、最上位の合成中間財と合成生産要素の投入に関するもの、合成中間財 i の投入に関するもの、そして中間財 i と合成貨物の投入に関するものを示す。

前者の費用最小化モデルは以下のように表される。

$$p_j y_j = \min_{z_j, cf_j} [q_j \cdot z_j + (1 + \tau_j) pf_j \cdot cf_j] \quad (16a)$$

$$\text{s.t. } y_j = \gamma_j \left[\alpha_j \left\{ \beta_j z_j \right\}^{\frac{\sigma_j - 1}{\sigma_j}} + (1 - \alpha_j) \left\{ (1 - \beta_j) cf_j \right\}^{\frac{\sigma_j - 1}{\sigma_j}} \right]^{\frac{\sigma_j}{\sigma_j - 1}} \quad (16b)$$

ただし、 y_j, p_j ：財 j の生産量と財 j 価格、 z_j, q_j ：合成中間財投入量と合成中間財価格、 cf_j, pf_j ：合成生産要素投入量と合成生産要素価格、 τ_j ：純間接税率（間接税率－補助率）、 $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ ：パラメータ、 σ_j ：代替弾力性パラメータ。純間接税は合成生産要素投入額、すなわち付加価値額をタックスベースとした。これは市岡¹⁴⁾のCGEモデルの定式化を採用したものであり、モデル上での税の二重課税を回避するための措置であ

る。

式(16)を解くと、以下の需要関数が求められる。

$$z_j = \frac{1}{\gamma_j (\beta_j)^{1 - \sigma_j}} \left(\frac{\alpha_j}{q_j} \right)^{\sigma_j} \Psi_j^{\frac{\sigma_j}{1 - \sigma_j}} y_j \quad (17a)$$

$$cf_j = \frac{1}{\gamma_j (1 - \beta_j)^{1 - \sigma_j}} \left(\frac{1 - \alpha_j}{\{1 + \tau_j\} pf_j} \right)^{\sigma_j} \Psi_j^{\frac{\sigma_j}{1 - \sigma_j}} y_j \quad (17b)$$

ただし、

$$\Psi_j = (\alpha_j)^{\sigma_j} \left(\frac{q_j}{\beta_j} \right)^{1 - \sigma_j} + (1 - \alpha_j)^{\sigma_j} \left(\frac{\{1 + \tau_j\} pf_j}{1 - \beta_j} \right)^{1 - \sigma_j}.$$

これを式(16a)の目的関数に代入すると、財 j 価格が以下のように導出される。

$$p_j = \frac{1}{\gamma_j} \Psi_j^{\frac{1}{1 - \sigma_j}} \quad (18)$$

次に、合成中間財 i の投入量決定モデルを示す。

$$q_j z_j = \min_{z_{ij}} \sum_i q_{ij} z_{ij} \quad (19a)$$

$$\text{s.t. } z_j = \gamma_j \left[\sum_i \alpha_{ij} \left\{ \beta_{ij} z_{ij} \right\}^{\frac{\sigma_j - 1}{\sigma_j}} \right]^{\frac{\sigma_j}{\sigma_j - 1}} \quad (19b)$$

ただし、 z_j, q_j ：合成中間財 i の投入量と合成中間財 i の価格（なお、 i は合成業務交通財も含む）、 $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_j$ ：パラメータ（ $\sum_i \alpha_{ij} = 1, \sum_i \beta_{ij} = 1$ ）、 σ_j ：代替弾力性パラメータ。

式(19)を解くと、以下の需要関数が求められる。

$$z_{ij} = \frac{1}{\gamma_j (\beta_{ij})^{1 - \sigma_j}} \left(\frac{\alpha_{ij}}{q_{ij}} \right)^{\sigma_j} \Psi_j^{\frac{\sigma_j}{1 - \sigma_j}} z_j \quad (20)$$

$$\text{ただし、} \Psi_j = \sum_i (\alpha_{ij})^{\sigma_j} \left(\frac{q_{ij}}{\beta_{ij}} \right)^{1 - \sigma_j}.$$

これを式(19)の目的関数に代入すると、合成中間財価格が求められる。

$$q_j = \frac{1}{\gamma_j} \Psi_j^{\frac{1}{1 - \sigma_j}} \quad (21)$$

最後に中間財 i と合成貨物の投入量決定モデルを示す。

$$q_{ij} z_{ij} = \min_{x_{ij}, z_{Fj}} [p_i x_{ij} + q_{Fj} z_{Fj}] \quad (22a)$$

$$\text{s.t. } z_{ij} = \gamma_{ij} \left[(1 - \alpha_{Fj}) \left\{ (1 - \beta_{Fj}) x_{ij} \right\}^{\frac{\sigma_{ij} - 1}{\sigma_{ij}}} + \alpha_{Fj} \left\{ \beta_{Fj} z_{Fj} \right\}^{\frac{\sigma_{ij} - 1}{\sigma_{ij}}} \right]^{\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_{ij} - 1}} \quad (22b)$$

ただし、 x_{ij} , p_i : 中間財 i の投入量と財 i の価格,
 z_{Fj} , q_{Fj} : 合成貨物運輸投入量と合成貨物運輸価格,
 α_{Fj} , β_{Fj} , γ_{ij} : パラメータ, σ_{ij} : 代替弾力性パラメータ.
 式(7)を解くと、以下の需要関数が求められる。

$$x_{ij} = \frac{1}{\gamma_{ij}(1-\beta_{Fj})^{1-\sigma_{ij}}} \left(\frac{1-\alpha_{Fj}}{p_i} \right)^{\sigma_{ij}} \Psi_{ij}^{\frac{\sigma_{ij}}{1-\sigma_{ij}}} z_{ij} \quad (23a)$$

$$z_{Fj} = \frac{1}{\gamma_{ij}(1-\beta_{Fj})^{1-\sigma_{ij}}} \left(\frac{\alpha_{Fj}}{q_{Fj}} \right)^{\sigma_{ij}} \Psi_{ij}^{\frac{\sigma_{ij}}{1-\sigma_{ij}}} z_{ij} \quad (23b)$$

ただし、

$$\Psi_{ij} = (1-\alpha_{Fj})^{\sigma_{ij}} \left(\frac{p_i}{1-\beta_{Fj}} \right)^{1-\sigma_{ij}} + (\alpha_{Fj})^{\sigma_{ij}} \left(\frac{q_{Fj}}{\beta_{Fj}} \right)^{1-\sigma_{ij}}.$$

これを式(22)の目的関数に代入すると、合成中間財 i の価格が求められる。

$$q_{ij} = \frac{1}{\gamma_{ij}} \Psi_{ij}^{\frac{1}{1-\sigma_{ij}}} \quad (24)$$

ここで、改めて財 j 価格がどのように形成されているかを見ておく。式(18)の p_j は、式(21)および(24)より財 i 価格 p_i と合成貨物運輸価格 q_{Fj} の関数になっていることがわかる。

企業行動モデルの定式化に戻ると、以降のモデルは式(16)か式(19)のいずれかの枠組みで定式化できる。そのためそれらの定式化を示すことは省略したい。その中で業務交通における交通時間投入に係わるモデルは、一般化価格モデルを用いることにした。これは、旅客運輸サービスとその消費のために必要な交通時間は代替関係ではなく、旅客運輸サービス消費に対して一定の交通時間投入が必要になると考えたためである。なお、一般化価格モデルはBarro型CES関数による定式化においては $\sigma_{pj} = 0$ とした完全非代替モデルと解釈できる。

(5) 運輸企業の行動モデル

運輸企業は、貨物、旅客のそれぞれに対し鉄道、道路（バス、タクシー等）、自家輸送の各部門、それに加え貨物には水運、旅客には航空が存在する。その行動モデルは3. (2)の企業行動モデルと同じとした。ただし、自家輸送部門は仮想的に設けた部門であり、補足説明する。

自家輸送は、実際には各企業が生産のために投入する資本の一部と、運転に費やす時間、そして自動車燃料や自動車の維持保全サービスなどの中間財を投入してなされる。この資本の一部とは具体的には自動車の

ことであり、運転に費やす時間には労働の一部が充てられている。そして中間財については、実際に自家輸送に用いられた中間財を推計することにより現状の産業連関表でデータ化されている。しかし、自動車資本の投入額および運転に費やす時間については明確にされておらず、自家輸送部門の付加価値はゼロとなっている。また、家計も企業と同様、自家用自動車により自家輸送を行っているが、現状の産業連関表ではこの家計が行っている自家輸送サービスも、推計が困難なためか消費額がゼロとなっている。

なお、車種としては普通車、小型車、軽自動車、環境車の4車種とした。その結果、自家輸送旅客運輸部門は投入する自動車資本の車種ごとに存在することになり、それぞれが自家輸送旅客運輸サービスを生産している。自家輸送旅客運輸部門も、自動車以外の資本を投入していると考えられるが、ここでは簡単化のため自動車資本のみを投入するとした。さらに、各自家輸送旅客運輸部門が投入する石油製品についても、投入する自動車資本の車種ごとに燃費が異なるため、石油製品の投入効率パラメータを変えることにより燃費の違いを考慮した。図-2に示したように最上位の石油製品と合成中間・要素財の投入モデルは、代替弾力性をゼロとした。これはレオンチェフ型関数を意味しており、その中の石油製品投入に関わるパラメータを平均燃費データより車種ごとに設定することとした。

一方、投資と資本蓄積の関係については、ここでは車種別の自動車資本を新たに考慮したことにより、それらへの投資と資本蓄積を考慮することになる。そこで、今まで民間資本ストックの蓄積にまわされるとしていた投資のうち、自動車関係の投資需要について自動車資本の蓄積にまわされるものとした。さらに、自動車関係の投資需要の車種については、現状の車種別保有台数より求めた。以上より、例えば車体課税の変更があった場合には、車種別自動車関連の投資需要が変化し、その結果蓄積される車種別自動車資本の経路も変化することになる。蓄積が進んだ車種の自動車資本は、資本供給量が増加するため自動車資本利子率が低下する。その結果、当該自動車資本を投入して生産を行う自家輸送旅客運輸サービスの価格も低下し、その需要が増大することになる。そのとき、うまく環境車の自動車資本の蓄積が進めば、その石油製品投入は他のものより効率的であるため、石油製品投入の節約が図られ、それがCO₂排出の削減に繋がることになる。

(6) 家計の行動モデル

家計の行動モデルも武藤・桐越¹³⁾と同様であるが、交通消費において自家輸送を明示化し、それを含む交通消費において自家輸送を明示化し、それを含む交通



まず、家計は総利用可能時間に賃金率を乗じて求められる時間所得に、資本を企業に提供して得られる資本所得を加えた総所得を得る。この総所得から所得税が差し引かれ、さらに貯蓄を差し引いたものを消費に充てるとする。なお、所得税率は一定、貯蓄はその額を一定とする。家計が消費に充てる、いわゆる可処分所得は以下のとおり求められる。

ただし、 Ω_H ：家計の可処分所得、 $T_{H,w}$ ：総利用可能時間と賃金率、 $K_{H,r}$ ：資本供給量と利子率、 τ_H ：所得税率（一定）、 $\overline{S_w}$ ：貯蓄額（一定）。

の財については貨物運輸のみを投入するとしてモデル化した。なお、貨物運輸、旅客運輸ともに、自家輸送を含む交通機関選択を行うものとしている。このうち旅客運輸では、鉄道、道路（バス、タクシー）、航空に関し交通時間消費も考慮している。それは企業の場合と同じで、これらによる移動では移動者が時間を費やしているためである。一方、合成余暇については、余暇と合成通勤の消費量を決定し、合成通勤に対して余暇と合成通勤の消費量を決定し、合成通勤に対しては自家旅客輸送を含む交通機関選択を行うものとした。

以上の家計の行動モデルは、効用最大化行動による定式化に対して双対アプローチを利用し、効用水準を一定とする条件下での支出最小化問題により定式化する。これにより、例えば最初の合成消費財と合成余暇の消費量決定問題は、企業行動モデルの式(16)~(18)と全く同じ枠組みで、変数のみを入れ替えることにより定式化できる。すなわち、それらは以下のように表される。

$$\text{s.t. } U_H = \gamma_{ZH} \left[\alpha_H \{ \beta_H z_H \}^{\frac{\sigma_{ZH}-1}{\sigma_{ZH}}} + (1-\alpha_H) \{ (1-\beta_H) l_{CH} \}^{\frac{\sigma_{ZH}-1}{\sigma_{ZH}}} \right]^{\frac{\sigma_{ZH}}{\sigma_{ZH}-1}} \quad (26b)$$

ただし、 U_H, p_H : 効用水準と効用価格指数、 z_H, q_H : 合成財消費量と家計の合成財価格、 l_{CH}, w_H : 合成余暇消費量と合成余暇価格、 $\alpha_H, \beta_H, \gamma_{ZH}$: パラメータ、 σ_{ZH} : 代替弾力性パラメータ。

式(26)を解くと、以下の需要関数が求められる.

$$l_{CH} = \frac{1}{\gamma_{ZH}(1-\beta_H)^{1-\sigma_{ZH}}} \left(\frac{1-\alpha_H}{w_H} \right)^{\sigma_{ZH}} \Psi_{ZH}^{\frac{\sigma_{ZH}}{1-\sigma_{ZH}}} U_H \quad (27b)$$

$$\Psi_{ZH} = (\alpha_H)^{\sigma_{ZH}} \left(\frac{q_H}{\beta_H} \right)^{1-\sigma_{ZH}} + (1-\alpha_H)^{\sigma_{ZH}} \left(\frac{w_H}{1-\beta_H} \right)^{1-\sigma_{ZH}}.$$
$$p_H = \frac{1}{\gamma_{ZH}} \Psi_{ZH}^{\frac{1}{1-\sigma_{ZH}}} \quad (28)$$

7

く、数値計算の際のプログラムも共通化できるというメリットがある（武田¹⁵⁾）。以上のとおり家計の行動モデルは企業と同様に定式化可能であるため、紙面の都合もあり以降の具体的な定式化については割愛したい。

(7) その他主体の行動モデル

企業、家計以外の主体として、政府部門、公的投資部門、民間投資部門を考える。これらについては、徳永、武藤ら⁴⁾での定式化と同様に簡潔なモデル化とした。まず政府は、得られた税収（間接税収と直接税収）から一定額を公的投資に回し、残りを政府消費に充てる。なお、これは地球温暖化対策税収も含むものとする。地球温暖化対策税はその税収を用いて再生可能エネルギーの普及や省エネルギー対策を実施するとされているが、ここでは課税による化石燃料の抑制効果に着目して分析を進めるものとする。次に公的投資に回された資金は、公的投資部門によって公的投資需要に充てられ公共事業が実施される。民間投資部門は、家計貯蓄がそのまま投資に回され投資財購入に充てられるとする。なお、政府消費、公的投資需要、民間投資需要とも、財別支出割合を一定として財消費および財需要に充てられるものとする。

(8) 移輸出入モデル

移輸出入に関しては、特に石油製品などの輸入に関する影響が重要と思われるため、細江ら¹⁶⁾の枠組みにしたがって定式化を行った。輸出入モデルの全体構成は図-4に示すようなものである。まず企業 j の財生産量 y_j が輸出財と国内財に分けられる。この国内財と輸入財から国内供給財が生産され、国内の主体に供給される。なお、定式化については割愛したい。

(9) 市場均衡条件

本CGEモデルの市場均衡条件を示す。

$$\sum_i x_{ji} + x_{jH} + x_{jG} + x_{jGI} + x_{ji} = Q_j \quad (29a)$$

ただし、 $x_{ji}, x_{jH}, x_{jG}, x_{jGI}, x_{ji}$ ：それぞれ企業 i ，家計，政府，公的投資部門，民間投資部門が投入する財 j 消費量， Q_j ：国内供給財供給量， l_j ：企業 j の労働需要量， T_H ：総利用可能時間， l_{SH} ：余暇消費時間， t_m ：交通機関 m の所要時間， x_{mH} ：家計の交通機関 m の旅客運輸サービス消費量， k_j ：企業 j の資本需要量， K_{Hj} ：財種別 j の企業への資本供給量。

式(29a)は財 j の市場均衡条件である。式(29b)と(29c)はそれぞれ労働市場均衡条件，資本市場均衡条件である。労働市場均衡式の右辺は、家計の総利用可能時間より

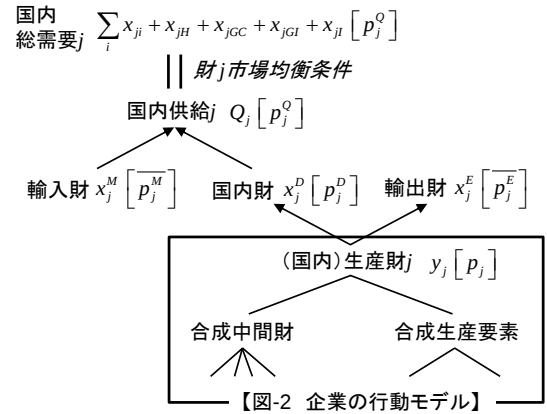


図-4 移輸出入モデルの全体構成

$$\sum_j l_j = T_H - l_{SH} - \sum_m t_m x_{mH} \quad (29b)$$

$$\sum_j k_j = K_H \quad (29c)$$

余暇消費時間，交通消費時間を差し引くことで労働時間を導出したものであり，それが労働供給量となっている。

(10) 経済的影響の計測方法

本稿では経済的影響を、等価的偏差（EV：Equivalent Variation）の概念に基づき家計効用の低下分を貨幣換算することにより計測する。まず式(26)の家計行動モデルより支出水準が式(30a)となることからEVが式(14b)として求められる。

$$e_H = p_H U_H \quad (30a)$$

$$\begin{aligned} EV_H &= e_H(p_H^A, U_H^B) - e_H(p_H^A, U_H^A) \\ &= p_H^A (U_H^B - U_H^A) \end{aligned} \quad (30b)$$

また、支出関数に関しては以下が成立する。

$$e_H^A (= p_H^A U_H^A) = \Omega_H^A, \quad e_H^B (= p_H^B U_H^B) = \Omega_H^B \quad (31)$$

これより式(30b)を変形すると以下のようにEVが実質所得の差分となる。

$$EV_H = \frac{p_H^A}{p_H^B} \Omega_H^B - \Omega_H^A \quad (32)$$

さらに、式(25)の家計所得式と、それに式(29b)，(29c)の生産要素の市場均衡条件式を考慮するとEVは以下のようなになる。

$$EV_H = \left[\frac{p_H^A}{p_H^B} w^B \sum_j l_j^B - w^A \sum_j l_j^A \right] + \left[\frac{p_H^A}{p_H^B} r^B \sum_j k_j^B - r^A \sum_j k_j^A \right] + \left[\frac{p_H^A}{p_H^B} w^B \left(l_{SH}^B + \sum_m t_m^B x_{mH}^B \right) - w^A \left(l_{SH}^A + \sum_m t_m^A x_{mH}^A \right) \right] \quad (33)$$

式(33)の第一項は企業の総実質労働所得支払額変化、第二項は企業の総実質資本所得支払額変化、第三項は家計の余暇および交通の総実質時間費用変化（家計時間費用変化）を意味し、第一項、第二項をあわせると通常の実質GDP変化になることがわかる。

4. 次世代自動車の経済的影響とCO2削減効果

(1) 地球温暖化対策税（走行時）の数値計算

ここでは2012年10月より開始した地球温暖化対策のための税の評価を行った。すなわち自動車の走行面でのインパクトを見たものである。EVで計測した経済損失額は表-2のとおり4,311.8億円/年となった。これを企業便益（企業の実質GDP変化額）と家計の時間便益（家計の余暇および交通消費の実質時間消費額変化）と政府便益に分けて示すと、家計の方に大きな損失が生じることが分かった。次に、自動車交通におけるCO₂削減効果を示す。図-6は地球温暖化対策税導入による自動車交通部門のCO₂変化を示したものである。自動車交通全体でのCO₂削減量は137.7（万t-CO₂/年）、削減率は0.63%減となっている。個別にみると自家輸送旅客運輸の削減量の79.6（万t-CO₂/年）が最も大きく、削減率（0.63%減）も最も大きくなった。自家輸送旅客は、自動車交通の中で消費額が大きいいためこのような結果になったと考えられる。

5. まとめ

本論文では、スマートシティ実現のための次世代自動車（EV・PHV）の普及および乗り換えに伴う経済的影響とCO₂排出削減量を明らかにするものである。静学計算では、地球温暖化対策税による経済的影響、CO₂排出削減量を明らかにした。自動車保有面での最適動学モデルを用いた数値計測が必要だと考えられる。本論文では、明のみとなっているが、発表日までに数値計測まで行いたい。

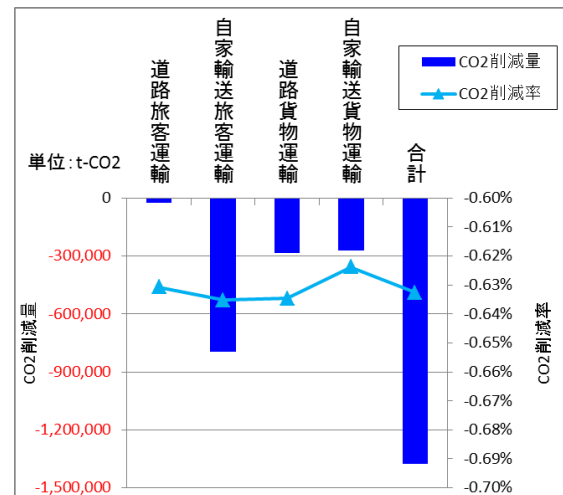


図-6 自動車交通におけるCO₂削減効果（地球温暖化対策税）

表-2 地球温暖化対策税の経済的影響

企業便益(億円/年)	-2,203.7
家計時間便益(億円/年)	-2,850.5
政府便益(億円/年)	742.3
総計(億円/年)	-4,311.8

参考文献

- 1) 環境省：2011年度（平成23年度）の温室効果ガス排出量（確定値）について、日本の温室効果ガス排出量の算定結果ホームページ資料，2013。
(<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/index.html>)
- 2) 地球温暖化対策推進本部：京都議定書目標達成計画の進捗状況，環境省，2013。
- 3) 電子行政：スマートシティとはホームページ資料，
(<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Keyword/20120906/421044/>)，2013
- 4) 国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量，1. 運輸部門における二酸化炭素排出量ホームページ資料，
(http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)，2013
- 5) 武藤慎一，森杉壽芳，上田孝行：動学的応用一般均衡モデルを用いた自動車関連炭素税政策の導入に伴う市場経済的不便益の計測，環境経済・政策学会編，環境税（環境経済・政策学会年報9号），東洋経済新報社，pp.107-118，2004。
- 6) 徳永澄憲，武藤慎一，黄永和，孫林，沖山充：自動車環境政策のモデル分析－地球温暖化対策としての環境車普及促進政策－，文眞堂，2008。
- 7) 増井
- 8) 日産自動車：電気自動車の魅力ホームページ資料，2013
- 9) 資源エネルギー庁：運輸エネルギーの次世代化についてホームページ資料，2013。
(<http://www.enecho.meti.go.jp/policy/fuel/index.htm>)
- 10) 自検協：自動車保有台数統計データ車種別（詳細）保有台数表資料，2013
- 11) 次世代自動車振興センター：電気自動車等保有台数統計（推定値）ホームページ資料
(<http://www.cev-pc.or.jp/tokei/hanbai3.html>)
- 12) 増井利彦，松岡譲，甲斐沼美紀子：日本を対象とした

経済モデルによる炭素税導入の影響分析，環境経済・政策学会編，環境税（環境経済・政策学会年報 9 号），東洋経済新報社，pp.57-67，2004.

- 13) 伴金美他：日本における環境政策と経済の関係を統合的に分析・評価するための経済モデルの作成，平成 23 年度環境経済の政策研究 最終研究報告書，2012.
- 14) 武藤慎一，桐越信：Barro 型 CES 関数に基づく空間的応用一般均衡(SCGE)モデルの一般性向上 -交通モデルを中心に-，交通学研究／2010 年研究年報，pp.255-264，2011.
- 15) 市岡修：応用一般均衡分析，有斐閣，1991.

16) 武田史郎：双対アプローチによる一般均衡モデルの記述，オンライン <http://shirotakeda.org/ja/research-ja/note-ja.html>，2012.

17) 細江宣裕，我澤賢之，橋本日出男：応用一般均衡モデリング プログラムからシミュレーションまで，東京大学出版会，2004.

18) 斎藤孝：2 部門ラムゼイ・モデルにおける不均衡成長，東洋大学「経済論集」37 巻 1 号，2011

(2013.8.2 受付)