

豊橋市における炭素税導入を考慮した電気自動車普及の環境・経済影響評価

豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻

藤井友章^{*}, 宮田 謙, 洪澤博幸

概要：

本研究では電気自動車による低炭素社会作りについて調査した。日本の愛知県豊橋市を事例として、電気自動車の生産や利用促進を図るため補助金政策を行い、さらに二酸化炭素（CO₂）排出量抑制のため炭素税を導入し、応用一般均衡モデル（CGE）により環境および経済への影響を分析した。豊橋市には産業連関表が存在しないため、公表されている産業連関表の愛知県産業連関表をブレイクダウンし、本研究独自の産業連関表を推計した。その際、電気自動車社会を分析するための新たな産業として、電気自動車生産、太陽光発電、コジェネレーション、電気自動車輸送を導入した。

本研究では電気自動車社会に寄与する産業に対し補助金を支出するケースと、補助金に加え炭素税も導入したケースを想定し分析した。またどちらのケースにおいても純間接税率を90%と80%に変化させ、補助金率による変化を分析した。

補助金のみを導入したケースでは、電気自動車、太陽光発電、コジェネレーション、電気自動車輸送、その他輸送の産出量を増加させる結果となった。それと代替する形で鉱業、石油・石炭製品などの産出量は減少している。また家計部門においては電気自動車の購入が増加する結果となった。しかし多量のCO₂を排出する産業の生産増加に伴い、CO₂の総排出量はわずかながら増加してしまった。これは省資源型の電気自動車普及によるリバウンド効果と解釈される。

一方、炭素税を導入したケースでは追加的補助金の対象となる産業の産出量を増加させ、多くのCO₂を排出する鉄鋼業や、その他窯業・土石製品産業の産出量を減少させた。その結果、総産出量は若干減少している。しかし同時にCO₂総排出量の減少も見られた。これは価格インセンティブ効果から多くのCO₂を排出する産業の産出量が減少したためであると言える。

追加的補助金を支出した場合、市民の豊かさを表す等価的偏差が減少してしまうことが分かった。これは消費者物価が減少し、プラスの所得効果があるものの、家計所得や余暇時間の減少がそれ以上であるためにこのような結果となったと解釈される。しかし、炭素税を導入すると逆に家計所得や余暇は増加の傾向を見せ、等価的偏差は増加した。

本研究ではCO₂増加の問題を、炭素税導入により抑制することができた。豊橋市において適切な補助金や炭素税の導入により、電気自動車の普及、CO₂の減少、家計効用の増加という環境共生型都市への道筋を示すことができた。近い将来2010年の愛知県産業連関表が公表される予定であり、本モデルの推計精度を向上させることが今後の課題である。

キーワード: 応用一般均衡分析, 電気自動車社会, 電気自動車, 太陽光発電, 豊橋市

Environmental and Economic Impacts of Electric Vehicles with Carbon Tax in Toyohashi City in Japan

Graduate School of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology
Tomoaki Fujii, Yuzuru Miyata and Hiroyuki Shibusawa

Abstract:

In this paper, we explore the economic impact of promotion and realization of an electric vehicle society (EVS) in Toyohashi City in Japan. More concretely, this paper emphasizes a computable general equilibrium (CGE) modeling approach to evaluate the following issues: economic impacts of subsidies for promotion of an EVS, economic impacts of carbon tax for reducing CO₂, industrial structure change towards an EVS and modal shift occurring towards an EVS.

Our simulation results demonstrate that after applying 5 ~ 25% up subsidies to five industries including electric vehicle (EV) manufacturing, EV transport, solar power, cogeneration and other transport, the total industrial output and city GDP increase. A large growth rate is found in industries where subsidies are introduced, but non-ferrous metal industry also grows without subsidies due a repercussion effect. Moreover, it is interesting that decreasing proportions are found in oil and coal product, mining, heat supply and gasoline vehicle (GV) transport industries. However the total CO₂ emission in Toyohashi City is increased being interpreted as a rebound effect.

All the commodity prices decrease since subsidies are given to some industries. Hence Toyohashi City's economy shows a direction where the demand for conventional vehicles and energy use are decreased, conversely, the demand for EVs and renewable energy are increased illustrating a different life style from the current one.

Regarding CO₂ emissions, we introduced a carbon tax of 1,000 yen/t-CO₂ for industries except the five industries mentioned above. As a result the total CO₂ emission is decreased and the equivalent variation shows a positive value as compared with the base case. Thus introducing 5 ~ 25% subsidies and the carbon tax can really represent a realistic alternative society to EVS in Toyohashi City.

Keywords: CGE model, electric vehicle society, electric vehicle, solar power, Toyohashi City, Japan

豊橋市における炭素税導入を考慮した電気自動車普及の環境・経済影響評価

豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻
藤井友章^{*}, 宮田 謙, 洪澤博幸

1. 目的

18世紀後半から始まった産業革命以来、石炭や石油を利用して人間の活動が飛躍的に拡大した。その結果、地球温暖化を促進する温室効果ガスが著しく増加し、近年の地球の平均気温は上昇傾向にある。代表的な温室効果ガスは二酸化炭素（CO₂）、メタン、一酸化炭素などが挙げられる。それらの中でもCO₂は全体の94%を占める。さらに二酸化炭素の発生源を調べると、約20%が自動車の排気ガスとなっている。そこで本研究では、自動車に着目し地球温暖化の緩和のため、現在注目されている電気自動車(EV)を普及させた際の環境と経済影響を分析することを目的とする。そのため本研究では愛知県豊橋市を事例として、EVの生産や利用促進を図るための補助金政策を行い、さらにCO₂排出量抑制のため炭素税を導入し、応用一般均衡モデル(CGE)により環境および経済への影響を分析する。

2. 豊橋市の産業連関表

豊橋市には産業連関表がないため、公表されている愛知県産業連関表をブレイクダウンし、豊橋市の産業連関表をフレータ法により推計した。基本となる愛知県の40部門表を、電気自動車社会に合わせる形で表1産業分類のように38部門表に分類する。

この産業分類では愛知県40部門表の「自動車」製造部門を「ガソリン自動車」、「電気自動車」に分類する。さらに「電力・ガス・熱供給」部門を「電力」、「都市ガス」、「熱供給」のそれぞれ3部門に分類し、さらに「太陽光」と「コジェネレーション」の部門を追加した。

この38部門表については、国勢調査、工業調査、商業統計、事業統計などを用いて豊橋市の産業連関表を推計した。

経済主体は38産業部門(表1)、2制度部門(家計、政府)、2生産要素(資本、労働)、資本勘定(資本調達、資本蓄積)、市外部門の5区分から構成されている。

表1 産業分類

部門番号	部門名	部門番号	部門名
1	農林漁業	2	鉱業
3	食料品	4	繊維製品
5	パルプ・紙・木製品	6	化学製品
7	石油・石炭製品	8	プラスチック製品
9	陶磁器	10	その他の窯業・土石製品
11	鉄鋼	12	非鉄金属
13	金属製品	14	一般機械
15	電気機械	16	情報・通信機器
17	電子部品	18	ガソリン自動車
19	電気自動車	20	航空機
21	その他の輸送機械	22	精密機械
23	その他の製造工業製品	24	建設
25	電力	26	太陽光
27	都市ガス	28	熱供給
29	コジェネレーション	30	水道・廃棄物処理
31	商業	32	金融・保険
33	不動産	34	ガソリン車輸送
35	電気自動車輸送	36	その他輸送
37	情報通信	38	サービス

3. 電気自動車導入の応用一般均衡分析

3.1 モデルの主要前提条件

本モデルの主要前提条件は以下のようであるが、このほかにもモデルの細部について様々な仮定を設定する。それらについてはモデルの説明の中で適宜言及する。

- (1) 豊橋市の2005年の経済を対象とし、経済主体は豊橋市の家計、38産業、政府、市外部門とする。
- (2) 市場は38生産物市場、労働市場、資本市場の40市場とし、これらの市場は競争的で、均衡状態にあるとする。

3.2 モデルの構造

(1) 企業

企業は産業別に集計されたものを考える(以下、産業とよぶ)。産業は中間財、労働、資本を投入し、財を生産する。産業の技術は中間投入に関してLeontief型技術、資本と労働についてはCobb-Douglas

型技術とし、規模に関する収穫一定を仮定する。産業の行動は技術の一次同次性から、与えられた産出量に対し、費用最小化行動として定式化される。

$$\min \sum_{i=1}^{38} p_i x_{ij} + (1 + tp_j)(wL_j + rK_j) \quad (1)$$

with respect to x_{ij}, L_j, K_j

subject to

$$X_j = \min\left[\frac{1}{a_{10j}} f_j(L_j, K_j), \frac{x_{1j}}{a_{1j}}, \dots, \frac{x_{ij}}{a_{ij}}, \dots, \frac{x_{38j}}{a_{38j}}\right] \quad (2)$$

$$f_j(L_j, K_j) = A_j L_j^{\alpha_j} K_j^{(1-\alpha_j)} \quad (3)$$

ここで p_i : 産業 i の生産物価格, x_{ij} : 産業 j の中間投入量, tp_j : 産業 j の純間接税率, w : 賃金率, r : 資本収益率, L_j : 産業 j の労働投入量, K_j : 産業 j の資本投入量, a_{0j} : 産業 j の付加価値率, a_{ij} : 産業 j の中間投入係数, A_j, α_j : 産業 j の技術パラメータ

最適化問題から、生産量 X_j に伴う産業 j の中間投入、労働、資本の条件付き需要関数を得る。

$$x_{ij} = a_{ij} X_j \quad (4), \quad LD_j = \left[\frac{(1-\alpha_j)r}{\alpha_j w}\right]^{\alpha_j} \frac{a_{0j} X_j}{A_j} \quad (5), \quad KD_j = \left[\frac{\alpha_j w}{(1-\alpha_j)r}\right]^{(1-\alpha_j)} \frac{a_{0j} X_j}{A_j} \quad (6)$$

ここで、 LD_j : 産業 j の労働需要, KD_j : 産業 j の資本需要

さらに完全競争下における長期均衡の仮定から、以下のゼロ利潤条件を得る。

$$\text{利潤} = p_j X_j - \sum_{i=1}^{31} p_i x_{ij} - (1 + tp_j)[w \cdot LD_j + r \cdot KD_j] = 0 \quad (7)$$

(2)家計

家計は豊橋市における集計化された家計を考える。家計は現在消費と余暇との消費合成財である現在財と、貯蓄による将来財に関して CES 型効用関数を持つとし、予算制約のもとで効用を最大化するような現在財と将来財を選択する。

$$\max_{G,H} u(G,H) \equiv \{\alpha^{1/v_1} G^{(v_1-1)/v_1} + (1-\alpha)^{1/v_1} H^{(v_1-1)/v_1}\}^{v_1/(v_1-1)} \quad (8)$$

subject to

$$p_G \cdot G + p_H \cdot H = (1-ty)FI - TrHO \quad (9)$$

$$FI \equiv (1-l_o)w \cdot E + LI + (1-k_o)(1-k_r)r \cdot KS + KI + TrGH + TrOH \quad (10)$$

ここで、 v_1 : 現在財と将来財との代替弾力性, G : 現在財消費量, H : 将来財消費量, p_G : 現在財価格, p_H : 将来財価格, FI : 完全所得, $TrHO$: 家計から市外への経常移転, l_o : 市外への雇用者所得率, E : 家計の労働時間初期賦存量(=家計の初期働供給量の 2 倍と設定。これは豊橋市における労働時間と余暇時間との実績値に基づく。), LI : 市外からの雇用者所得, KS : 家計の資本ストック初期賦存量, KI : 市外からの財産所得(外生値), $TrGH$: 政府から家計への経常移転, $TrOH$: 市外から家計への経常移転

この効用最大化問題を解くことにより、現在財需要関数、将来財需要関数、家計貯蓄を得る。

$$G = \frac{\alpha[(1-ty)FI - TrHO]}{p_G^{v_1} \cdot \Delta} \quad (11), \quad H = \frac{(1-\alpha)[(1-ty)FI - TrHO]}{p_H^{v_1} \cdot \Delta} \quad (12)$$

$$S = p_H H / p_s, \quad (13), \quad \Delta \equiv \alpha p_G^{1-v_1} + (1-\alpha) p_H^{1-v_1} \quad (14)$$

次に式(11)の現在財需要から消費合成財需要と余暇需要を導出する方法について述べる。現在財需要 G は消費合成財需要と余暇需要の合成財であり、以下の最適化問題から得られるものとする。

$$\max_{C,F} G \equiv \{ \beta^{1/v_2} C^{(v_2-1)/v_2} + (1-\beta)^{1/v_2} F^{(v_2-1)/v_2} \}^{v_2/(v_2-1)} \quad (15)$$

subject to

$$p \cdot C + (1-ty)(1-l_o)w \cdot F = (1-ty)FI - TrHO - SH \quad (16)$$

ここで β : 分配パラメータ, v_2 : 消費合成財と余暇との代替弾力性, C : 消費合成財消費量, F : 余暇需要量, p : 消費合成財価格, SH : 名目貯蓄額 ($=p_s \cdot S$)

この効用最大化問題を解くことにより、消費合成財需要関数、余暇需要関数、労働供給関数を得る。

$$C = \frac{\beta[(1-ty)FI - TrHO - SH]}{p^{v_2} \cdot \Omega} \quad (17), \quad F = \frac{(1-\beta)[(1-ty)FI - TrHO - SH]}{[(1-ty)(1-l_o)w]^{v_2} \cdot \Omega} \quad (18)$$

$$LS = E - F \quad (19), \quad \Omega = \beta p^{(1-v_2)} + (1-\beta)[(1-ty)(1-l_o)w]^{(1-v_2)} \quad (20)$$

ここで、 LS : 家計の労働供給

(3)財価格

産業のゼロ利潤条件から以下の費用構成が導かれる。

$$p_j X_j = \sum_{i=1}^{38} p_i x_{ij} + (1+tp_j)[w \cdot LD_j + r \cdot KD_j] \quad (21)$$

これより賃金率、資本収益率が与えられる時、財価格は以下のように求まる。

$$P = [I - A']^{-1} [(1+tp_j)(w \cdot ld_j + r \cdot kd_j)] \quad (22)$$

ここで、 P : 財価格ベクトル, A' : 投入係数転置行列, $[\cdot]$: カッコ内を要素とした列ベクトル, $ld_j \equiv LD_j / X_j$, $kd_j \equiv KD_j / X_j$

(4)市場均衡条件

本研究の市場は 38 財市場、労働市場、資本市場の 40 市場であり、それらの均衡条件は以下のように表される。

財市場

$$X = AX + C + CG + I + EX - EM \quad (23)$$

労働市場

$$LS = \sum_{j=1}^{38} LD_j \quad (24),$$

資本市場

$$KS = \sum_{j=1}^{38} KD_j \quad (25)$$

ここで、 X : 産業産出量ベクトル, EM : 移輸入ベクトル, A : 投入係数行列, C : 家計消費ベクトル, CG : 政府消費ベクトル, I : 投資ベクトル, EX : 移輸出ベクトル, KS : 資本ストックの賦存量

4.シミュレーション分析

4.1 シミュレーションの考え方

シミュレーションは前節の応用一般均衡モデルを用いて、電気自動車（EV）の生産や太陽光発電の導入が与える豊橋市産業に対する波及効果を分析するものである。

本研究では新たな産業として第2節で述べたようにEV生産、太陽光発電、太陽光発電とセットになったコジェネレーション、EV輸送の導入を想定した。

4.2 シミュレーションケースの設定

ベースケースとして、EV生産が自動車生産の15%、太陽光発電が電力供給の10%、太陽光発電とセットになったコジェネレーションがガス・熱供給の10%、EV輸送が道路輸送の15%を想定する。本研究では電気自動車社会の普及を想定しEV生産、太陽光発電、コジェネレーション、EV輸送、その他輸送（主として海運を想定）に対し補助金の支出をするケースと、それに加え補助金対象外の産業に対して炭素税（1,000円/t-CO₂）を課すケースを、分類し分析する。これらを表2に示す。

表2 シミュレーションケース

	純間接税率	炭素税
Base Case	補助金なし	なし
Case 1	90%	なし
Case 2	80%	なし
Case 3	90%	1,000円/t-CO ₂
Case 4	80%	1,000円/t-CO ₂

5.シミュレーション結果

産業産出量、労働需要、CO₂排出量、財価格、その他の変数についてのシミュレーション結果を図1～図4に示す。

5-1 産業産出量

産出量が多い産業はサービス、商業、ガソリン自動車製造業となっている。今回その成長が期待される新産業については、経済に占めるシェアとしては小さいことが分かる。

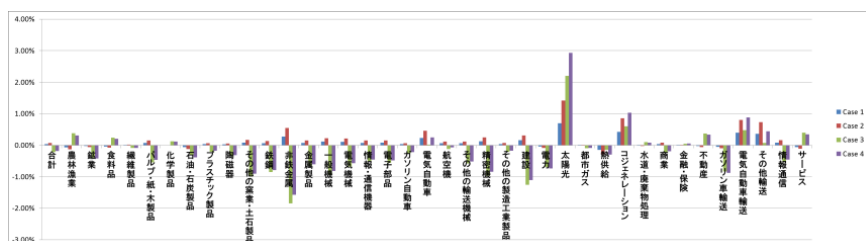


図1 産業産出量 ケース別偏差

Base Case における産業

産出量の結果から、それぞれのケースの結果への変化率を図1に示す。図1から、補助金対象とした産業の産出量が大幅に増加したことが分かる。また、非鉄金属の産業産出量も増加している。非鉄金属の産出量の増加については、EVのバッテリーの需要の高まりが影響しているものと考えられる。補助金の割合を大きくすると、産業産出量の増加率も大きくなっている。

産業産出量の総額はBase Caseの3兆2,442億円に対し、補助金を導入したCase1では3兆2,453億円(+10.8億円, +0.033%)、Case2では3兆2,464億円(+21.9億円, +0.067%)と増加しており、補助金の割合を大きくすると、産業産出量の総額も増加することが分かる。

補助金と炭素税を導入したCase3及びCase4では炭素税を課していない産業（EV製造、EV輸送、その他輸送）に関しても、波及効果により産出量が減少していることが分かる。しかし追加的補助金を導入することにより産出量は増加を示している。Case3では3兆2,373億円(-70.4億円, -0.216%)、Case4では3兆2,384億円(-59.0億円, -0.182%)と減少しており、炭素税の導入による産出量の減少の大きさは補助金による産出量の増加分より大きいことが分かる。

5-2 二酸化炭素排出量

Base Caseにおける二酸化炭素排出量の結果から、それぞれのケースの結果への変化率を図2に示す。補助金を支出したCase 1とCase 2において、減少率の大きい産業として、熱供給(-0.149%, -0.302%), 石油・石炭製品(-0.063%, -0.126%), ガソリン車輸送(-0.049%, -0.098%)などが挙げられる。これらは追加的

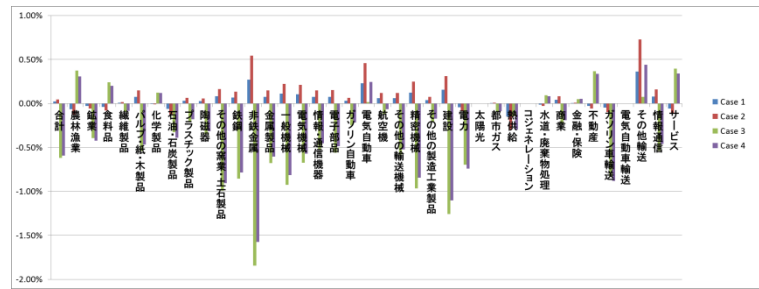


図2 CO₂排出量 ケース別偏差

補助金によりコージェネレーション, 太陽光発電, EV輸送への代替に伴うものと解釈される。増加が大きい産業はその他輸送((Case 1, Case 2に対応して)+0.361%, +0.728%), 非鉄金属(+0.271%, +0.545%)などが挙げられる。これらは産業産出量が増加した産業と対応している。二酸化炭素の総排出量は, Case 2において, 1,855t-CO₂の増加(+0.047%)となった。これはリバウンド効果であると考えられる。リバウンド効果とは, エネルギー効率改善に伴って副次的効果が発生し, 改善によりもたされると推計される削減量の一部または全てを相殺してしまう現象のことである。

炭素税を導入したCase 3とCase 4では, 多くの産業で排出量が減少した。減少率の大きい産業は非鉄金属((Case 1, Case 2対応して)-1.846%, -1.574%), 建設業(-1.259%, -1.103%), その他窯業・土石製品(-0.991%, -0.908%)などが挙げられる。CO₂総排出量はCase 4において, 23,505 t-CO₂の減少(-0.595%)となった。これらはCO₂排出量の多い産業の産出量が減少したためであると考えられる。増加が大きい産業は農林漁業(+0.375%, +0.309%), 不動産(+0.366%, +0.377%), その他輸送(+0.075%, +0.439%)などが挙げられる。

Case 3およびCase 4のCO₂総排出量を比較すると, Case 3では-24,429 t-CO₂ (-0.618%), となっており, 補助金率を増加させるとそれに伴いCO₂排出量も増加することが分かる。

5-3 財価格

Base Caseにおける財価格の結果から, それぞれのケースの結果への変化率を図3に示す。財価格は財価格方程式より, 生産要素価格によって決定される。本モデルでは労働をニュメール財としているため, 変化するのは資本収益率である。資本収益率は総資本供給量と総資本需要量が均衡することによって決定されるが, 本モデルではベンチマークデータセットが均衡していないため, 補助金なしのケースにおいても全ての価格は1とはなっていない。

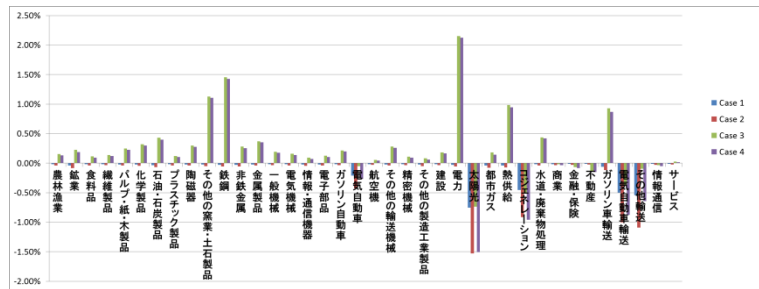


図3 財価格 ケース別偏差

補助金を追加するケースにおいては, 追加補助金がある産業の価格は減少している。また, 炭素税を導入することにより鉄鋼やその他窯業・土石製品等のCO₂排出量の大きい産業の財価格は, 増加が大きくなっている。

5-4 主要変数

Base Caseにおける主要変数の結果から, それぞれのケースの結果への変化率を図4に示す。Case 1とCase 2において家計所得の減少は, 資本収益率の減少や政府からの経常移転の減少によるものであり, 生産段階における省資源が生産要素への需要を減らし, それが家計所得を減少させていると言え

る。それに対し、炭素税を導入した Case 3 と Case 4 では、政府から家計への経常移転が増加したことから、家計所得が増加している。また等価的偏差は Case 2 では、Base Case と比較すると-10 億 2,966 万円となり、豊橋市の人口 1 人あたりでは 2,680 円のマイナスであった。家計所得や余暇が減少していることが原因と考えられる。それに対し Case 4 では 24 億 5,772 万円の増加となり、豊橋市の人口 1 人あたりでは 6,568 円の厚生改善であった。

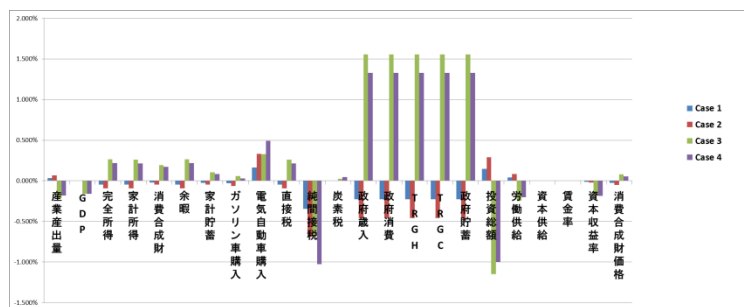


図 4 主要変数 ケース別偏差

6.まとめ

豊橋市における補助金による電気自動車社会への転換は、電気自動車、太陽光発電、コジェネレーション、電気自動車輸送、その他輸送の産出量を増加させる結果となった。それと代替する形で鉱業、石油・石炭製品などの産出量は減少している。また家計部門においては電気自動車の購入が増加する結果となった。しかし多量の CO₂ を排出する産業の生産増加に伴い、CO₂ の総排出量はわずかながら増加してしまった。これは省資源型の電気自動車普及によるリバウンド効果と解釈される。

一方、炭素税を導入したケースでは追加的補助金の対象となる産業の産出量を増加させ、多くの CO₂ を排出する鉄鋼業や、その他窯業・土石製品産業の産出量を減少させた。その結果、総産出量は若干減少している。しかし同時に CO₂ 総排出量の減少も見られた。これは価格インセンティブ効果から多くの CO₂ を排出する産業の産出量が減少したためであると言える。

補助金率を上げると総産出量は増加し、それに伴い CO₂ 排出量も増加することが分かった。炭素税を導入すると CO₂ 排出量が大きい産業の産出量が減少し、総産出量も減少した。その結果、CO₂ 総排出量も減少した。本研究では、補助金率を 10% ずつ上げて変化率を比較したが、どの部門でもほぼ比例的に変化していることが判明した。中でも追加的補助金の対象となった産業の変動の大きさは、他の産業と比べ大きい。

追加的補助金を支出した場合、市民の豊かさを表す等価的偏差が減少してしまうことが分かった。これは消費者物価が減少し、プラスの所得効果があるものの、家計所得や余暇時間の減少がそれ以上であるためにこのような結果となったと解釈される。しかし、炭素税を導入すると逆に家計所得や余暇は増加の傾向を見せ、等価的偏差は増加した。

本研究では CO₂ 増加の問題を、炭素税導入により抑制することができた。豊橋市において適切な補助金や炭素税の導入により、電気自動車の普及、CO₂ の減少、家計効用の増加という環境共生型都市への道筋を示すことができた。近い将来 2010 年の愛知県産業連関表が公表される予定であり、本モデルの推計精度を向上させることが今後の課題である。

参考文献

- 1)宮沢健一 編：日本経済新聞社 「日経文庫 産業連関分析, 1980 年
- 2)辻村江太郎/黒田昌裕 著：筑摩書房 「日本経済の一般均衡分析」, 1982 年
- 3)John・B・Shoven/John・Whalley 著・小平 裕 訳：東洋経済新報社「応用一般均衡分析 理論と実際」, 1993 年
- 4)南齋規介/森口祐一/東野達 著：独立行政法人 国立環境研究所 地球環境研究センター 「産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) -LCA のイベントリデータとして-」, 2004 年