全国の詳細な地域分割に基づく交通データ及び需要予測モデルを 用いた効率的な地域別CO2削減割当ての検討

本研究では、全国の詳細な地域分割に基づく交通データ及び需要予測モデルを構築する。これを用いて、現在の国土構造・交通体系のもとで効果的なCO2排出削減を推進するための地域別削減割当てについて検討する。モデル分析では、自動車燃料課税の強化を想定して、CO2削減効果を地域別に計測し、さらにその結果が全国の排出削減の総費用最小化を達成するという性質に着目して、経済効率的な地域別CO2削減割当てを決定する一つの考え方を提示する。本分析の設定条件のもとでは、課税による1人あたりCO2削減量は、都市部よりも地方部で大きくなるが、削減率でみると都市部の方が若干大きくなることが示された。キーワード 交通需要予測、地球温暖化、自動車燃料課税、CO2削減割当て、限界削減費用

| 勽 |)池 | 厚 | 可 |
|----|-------|-----|-------|
| K(| DIKE. | Ats | sushi |

博(工) 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻教授

一

博(工) 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助教

佐々木康朗 SASAKI, Yasuo

前 株式会社価値総合研究所パブリックコンサルティング事業部研究員

山崎 清 YAMASAKI, Kiyoshi 博(工) 株式会社価値総合研究所パブリックコンサルティング事業部主席研究員

1――はじめに

本研究では、都市内及び都市間の両方の交通を網羅した、全国の詳細な地域分割(道路交通センサスBゾーン単位)に基づく交通需要予測モデルを構築する。これを用いて、現在の国土構造・交通体系のもとで効果的なCO2排出削減を推進するための地域別(地方自治体単位)の削減割当てについて検討する。具体的には、地球温暖化対策として自動車燃料課税の強化を想定して、CO2削減効果を地域別に計測する。さらに、その結果が全国の排出削減の総費用最小化を達成するという性質に着目し、この意味で経済効率的な地域別CO2削減割当てを決定する一つの考え方を提示する。

本論文の背景にある社会問題は、地球温暖化である. 現時点(2013年11月時点)のわが国の方針としては、COP16でのカンクン合意をふまえ2020年の排出削減目標達成に向けて引き続き積極的に地球温暖化対策に取り組むこと、さらに長期的には2050年に80%の温室効果ガス削減を目指すことが確認されている 1)、本研究では、運輸部門の CO_2 排出、特にその大半を占める自動車からの CO_2 排出に着目する。2011年のわが国の CO_2 排出量のうち運輸部門は18.6%を占め、さらにそのうち87.8%が自動車からの排出によるものである 2)、本論文では特に断らない限り、 CO_2 といった場合に、自動車利用により発生するものを指す。

自動車からのCO₂排出削減に関して,本研究の貢献は 大きく2点ある.1点目は,地球温暖化対策として自動車燃 料課税を強化した場合の CO_2 削減効果を定量的に計測することである $^{\dot{2}1}$ (以下,この追加的な課税を単に「(自動車)燃料課税」という).これは、化石燃料に課税することでその需要を抑制し、 CO_2 排出を抑える経済的手法であり、一般に炭素税と呼ばれる.1990年代から欧州のいくつかの国で実施されていたが、わが国では、2012年10月より「地球温暖化対策のための税」として、 CO_2 排出量に比例して、従来の石油石炭税に上乗せして課税する形で導入された.税は直接的には燃料を供給する企業に課せられるが、消費者価格に転嫁されることになる。本研究では、価格メカニズムを含む人々の交通行動を明示したモデルを構築することで、燃料課税による CO_2 削減効果が定量的に計測可能であることを示し、実際に数値計算を行う.

本研究の貢献の2点目として、その結果をもとに、社会全体の経済効率性の観点から、地域別の削減割当ての検討を行う。ここで削減割当てとは、温暖化対策の実効性を高めるために、様々な主体(地域別や部門別)に達成すべき排出削減量を割り当てる仕組みである。わが国では導入されていないが注2)、海外では、部門別の削減目標を明記した英国の炭素削減計画(Carbon Budget)3)や、都市圏別の削減割当てを明記した米国カリフォルニア州のSB375(気候保護法)等の事例がある。削減割当てにおける目標値の設定に関しては、確立された方法はなく、様々な可能性が考えられる。本論文では、経済学的には化石燃料への課税が社会全体の費用を最小化するCO2排出削減を導く(排出量に比例して課税される場合)という性質に着目して、わが国全体の削減目標を経済効率的に達成するような地

域別の削減割当てのあり方について検討を行う. また, 実 際に得られた分析結果に基づいて、この考え方のもとでの 削減割当てを示し、地域別にどのような特徴が見られるか を考察する.

分析結果の政策上の活用の可能性については,以下の 通りである. 現在, わが国全体のCO2排出削減目標に関し て、具体的にどの主体がどれだけの責任を負うべきかは明 確にされていない. 地域単位でのCO。排出削減目標に関し ては,各地方自治体が地球温暖化対策地方公共団体実行 計画において設定するものとされているが、それぞれ独自 に設定されるため、全国の削減目標との整合は担保されて いない. このため、全国の目標達成のために、より実効性 を高める仕組みとして、地域別の削減割当ての設定が有 効との意見がある4. 前述の海外の導入事例では、割当て 分の削減を達成できなかった場合に罰則規定を設けてい る例もあるが、わが国でもそのような厳格な制度を導入す るかはさておき、少なくとも各地方自治体が削減目標設定 の際の拠り所とすべき目安となる数値を国が示す必要性は 高いと考えられる. 本研究は、この数値を決定する際の一 つの考え方とそのための方法を提案するものである. なお, 本論文の分析では削減割当てを算出する際に燃料課税を 想定した試算を行うが、これは、実際に各地域に割り当て られた目標を達成する手段を国の政策である燃料課税に 限定することを要請するものではない(2.4節参照).

本研究に関連する既存研究として, 自動車燃料への課 税に関しては、最適な税率に関する理論・実証研究5)や課 税によるCO₂削減効果の試算例⁶⁾はあるが、いずれも一国 全体を対象とし(地域を区分しない)、エネルギー消費に 係る価格弾性値等をもとに分析している. これに対して本 研究では、人々の交通行動を明示したモデルを構築するこ とでより精緻な計算を行うとともに、細かく地域を分割す ることで、地域別のCO₂削減効果を算出する. また、交通 需要予測モデルに関しては、従来は、パーソントリップ調 査のように対象とする都市(圏)を限定したものか、航空 需要予測7)のように全国を対象としつつもゾーニングが粗 いため都市内の交通は捉えられないもののみであった。こ れに対して本研究では、全国のCO2削減目標と地域別の CO₂削減割当てを整合的に捉えるという目的から、全国を 対象とし、かつ十分に細かなゾーニングのもと、都市内及 び都市間の両方の交通を網羅したモデルを構築する. 地 方公共団体実行計画が地方自治体単位で策定されること から、少なくとも市区町村レベルでアウトプットを得られる モデルが必要であり、さらに自治体内の移動も捉えるた め, 本研究では, 道路交通センサスBゾーン単位(一般に 市区町村をさらに複数に分割)でゾーン分割を定義する.

論文の構成は以下の通りである.2章では,地域別CO2

削減割当てに関して、燃料課税と関連付けることの経済学 的な意味と、本分析における応用について整理する、3章 では分析に用いるモデルについて、その構造やデータ作成 について述べる. 4章では、実際にモデルを用いて燃料課 税の効果を分析し、その結果に基づき削減割当てを設定 する際の地域別の傾向等について考察する. 最後に5章で、 結論と今後の課題にふれる.

−地域別CO₂削減割当ての考え方と理論的 背景

2.1 「効率的な 削減割当て

地域別の削減割当てを検討する際に、困難となる問題 の一つが、実際に各地域に割り当てる削減量の決め方で ある. 割り当ての設定基準には、様々な考え方があり得る ためである. 例えば、地域間の公平性を重視する立場から は、全ての地域に一律の削減率を課すことや、人口1人当た りの排出量を全国一律にすることを目指すような基準が考 えられる. しかし、これらの場合には、CO₂排出削減の費 用構造に関する地域間の違い (代替交通手段の整備状況 等)を考慮していないため、社会全体での効率性が担保さ れない. すなわち、全国で同じ削減量を達成するのに、よ り少ない費用で行える可能性がある. 限界削減費用(追 加的な1単位のCO₂排出削減に要する費用) に地域差があ る場合, 追加的な排出削減は限界削減費用のより小さい 地域で行うことが、社会全体では効率的なためである.

本研究では,経済効率性の観点から,全国の削減目標 を最小の費用で達成するような削減割当てについて検討 する. これは、全ての地域で限界削減費用が等しくなるよ う各地域に削減量を配分することと同じである^{注3)}. このこ とは, 直感的には上の議論からも明らかであるが, 以下の 費用最小化問題より導かれる8. すなわち, 1, ..., nのCO2 排出主体が存在する社会において,各主体の排出削減量 ϵ_{V_i} , そのための費用を $A_i(v_i)$ としたとき、社会全体の削 減目標が平であるならば、これを達成するための社会全体 の費用最小化問題は以下のように定式化できる.

$$\min \sum_{i=1}^{n} A_i(y_i)$$
 $s.t.\sum_{i=1}^{n} y_i = \overline{Y}$ この問題のラグランジュアンは、 (1)

$$L = \sum_{i=1}^{n} A_i(y_i) + \lambda \left[\sum_{i=1}^{n} y_i - \overline{Y} \right]$$
 (2)

となるから、一階の条件は、

$$\frac{dA_i(y_i)}{dy_i} = \lambda, \quad \forall i$$
 (3)

となる.この式の左辺は主体iの限界削減費用であるから,

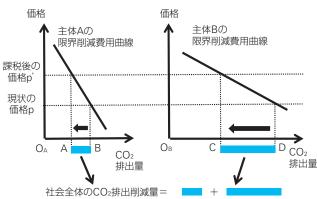
総費用最小化のためには、全ての主体の限界削減費用が 等しくなることが必要となることを意味する.

2.2 燃料課税と経済効率性

自動車燃料への課税が、単位排出量当たり一律になされる場合には、上記の意味での経済効率性が達成される。各主体は、自らの限界削減費用が課税後のCO₂排出の価格(=課税後の単位量あたり燃料価格であり、全ての主体にとって等しい)と等しくなるまでCO₂排出量を減らすためである。すなわち、課税により自動車利用の価格が上昇するのを受けて、各主体は上記のCO₂排出削減に相当する分の自動車利用を減少させる。この課税分は、いわゆるピグー税に相当する^{注4}.

このことを、例としてAとBの2主体からなる社会で図示 したのが図―1である. 図中には、各主体の(自動車から の) CO₂排出に関する限界削減費用曲線が示されている. 主体Aに着目すると、現状の自動車利用の価格(CO2排出 量当たり) pのもとでは、限界削減費用曲線とpを通る水平 線の交点の量, すなわち O_ABOCO_2 排出に相当する分, 自 動車を利用する. これより少ない排出量では, 削減費用が 排出のための費用を上回るので排出量を増やし、逆にこれ より多い排出量では、削減費用の方が小さくなるので排出 量を減らすためである. 課税により価格がp'に上昇すると, 主体Aは自動車利用を減らし、OAAまでCO2排出を減少さ せる.このときの減少幅ABが主体AのCO2削減量である. 他方、主体Bの削減量は同様にしてCDとなるので、社会全 体の削減量はAB+CDである. したがって, 社会全体の削 減量がAB+CDであるとき、主体AとBがそれぞれAB、CD だけ削減するのが経済効率的となる.

一般には、課税による全国の CO_2 削減量がYであったとすると、それだけの CO_2 排出削減のためには、このとき各主体が削減した分だけ、それぞれ排出量を減らすことが最も効率的である。ここで、限界削減費用曲線は主体ごとに異なるが、これは CO_2 排出削減のしやすさの違いを表している。曲線の傾きが急であるほど、排出削減量の増加に伴



■図—1 交通費用加算時のCO₂排出削減

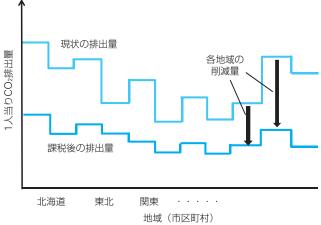
う削減費用の上昇の程度が大きくなり、追加的な削減により大きな費用を要することを意味する。例えば、公共交通等の他の交通手段への転換が比較的しやすい場合や、目的地選択の候補が多く近距離の移動への切り替えが可能な場合には、追加的な排出削減のための費用は比較的小さく、曲線の傾きは緩くなる。一般には個々の主体の限界便益曲線を知ることはできないが、このような課税方式の利点は、それらの情報がなくても、個々人が主体的に行動した結果、社会全体で効率的な削減が達成できることにある。

2.3 本分析への応用

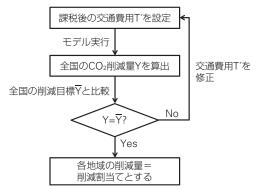
本分析では、上記の考え方を応用して、全国を対象とした交通需要予測モデルにおいて自動車利用の交通費用を一律に増加(燃料課税を想定)させた際の各地域(市区町村)の CO_2 削減量を求め、その値をこのときの全国の総削減量を達成するための地域別割当てと考える。上記の議論において主体を地域と捉えると、全ての地域にとって、課税による CO_2 削減量 y_i が、全国でYに相当する CO_2 削減を達成するための効率的な削減割当てとなるためである。イメージとしては図-2のように、交通費用の増加により地域別の CO_2 削減量が求まる。このとき、限界削減費用は地域によって異なるため、削減量は地域別に異なるが、これを(全国の削減量がYのときの)各地域の削減割当てとする。

なお、このときの全国の排出削減量Yはモデル実行の結果判明するため、ある決まった削減目標値 \overline{Y} を達成するための削減割当ての検討は、探索的に行う必要がある。そのための分析手順は以下のようになる(図-3)。

まず、現状の自動車の交通費用Tをもとに、燃料課税を想定して、課税後の交通費用T"を設定する(ここで、T及びT"は全てのODの交通費用(4.2節の t_{ij} 及び t'_{ij} に相当)を要素とするベクトル)。モデルを実行し、交通費用T"のもとでの全国での CO_2 削減量Yが得られる、 $Y=\overline{Y}$ であれば、この



■図─2 地域別のCO₂排出削減のイメージ



■図-3 削減目標を達成する削減割当ての検討フロー

ときの各地域の削減量を削減割当てとすればよい。そうでなければ、交通費用T'を修正して($Y < \overline{Y}$ であれば課税を強化する方向に, $Y > \overline{Y}$ であれば緩和する方向に),再度モデルを実行する。このプロセスを, $Y = \overline{Y}$ となるまで繰り返す。

本論文では、全国の削減目標 \overline{Y} は明示せず、ある交通費用T'のもとで、全国の削減量Yおよびこのときの地域別の削減量 y_i を求めるプロセスを示す。また、この y_i は仮に全国の削減目標がYに等しいときの削減割当てに相当するので、その場合の地域別の割当ての傾向について考察する。

2.4 分析の前提, 留意事項

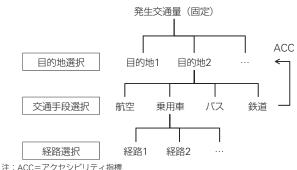
本研究では、冒頭に述べたように「現在の国土構造・交通体系のもとで」分析を行う。すなわち、土地利用条件(人口分布等)や交通インフラ等が現状のまま変化しないことを前提としている。また、交通費用の変化に伴う目的地の変更や他交通手段への転換(旅客のみ)を考慮するが、自動車の燃費改善(消費者による低燃費車の選択、自動車メーカーによるエネルギー効率向上等)は考慮しない。したがって、ここでの分析結果の解釈としては、これらの条件を固定とすることがある程度妥当な期間(目安として数年~10年程度の短中期)での削減割当てといえる注5)、以下で言及する「効率性」は、このような前提に基づくものである(これらの仮定の緩和については5.2.3項参照)。

また、本研究では、2.3節に示したように燃料課税を想定して地域別の削減割当てを算出するが、これは、実際に割り当てられた目標を達成する手段を燃料課税に限定することを要請するものではない。あくまで、各地域(自治体)が応分の費用を負担して排出削減に取り組むことが、総費用最小化の観点からは必要であるという示唆である。

3 本分析で用いるモデル

3.1 モデルの概要

本研究では、都市内及び都市間の両方の交通を網羅 し、全国を対象とする交通需要予測モデルを構築する(旅 客交通と貨物交通の両方を考慮). 価格メカニズムを含む



■図—4 モデル構造 (旅客)

■表-1 距離帯別の利用可能交通手段

| | 航空 | 乗用車 | バス | 鉄道 |
|---------------|----|-----|----|----|
| 100km未満 | | 0 | 0 | 0 |
| 100km~300km | | 0 | 0 | 0 |
| 300km~1,000km | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1,000km以上 | 0 | | | 0 |

注: ○が利用可能な交通手段.

交通行動を明示し、燃料課税の効果が評価可能なモデルである。なお、モデルの構築年次は2005年である。本章では、モデルの構造やデータ作成について述べる。

3.1.1 旅客

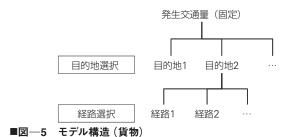
旅客のモデル構造を図―4に示す.ゾーン別の発生交通量は固定とし、目的地選択、交通手段選択、経路選択を扱う.旅行目的は「通勤・通学」「私事」「業務」の3つに区分し、それぞれモデルを構築する.また、距離帯についても、「100km未満」「100km~300km」「300km~1,000km」「1,000km以上」の4つに区分する.交通手段は、「航空」「乗用車」「バス」「鉄道」の4つを考慮するが、各距離帯で利用可能な交通手段が異なるものとし、表―1の通り設定する.本研究では、CO2排出削減に結び付く自動車からの主な転換先は、都市内のごく短距離のトリップを除いて、鉄道やバス、航空であると考え、徒歩や自転車は考慮しない.

目的地選択および交通手段選択は、二段階ネスティッドロジットモデルとして一体的に扱う. すなわち、交通手段選択において算出される各ODのアクセシビリティ指標(ログサム効用)が、目的地選択に反映される. 交通手段選択モデルの説明変数は一般化時間(所要時間に運賃・料金を時間換算して加算)及び自動車保有台数を考慮する. 目的地選択モデルの説明変数は、アクセシビリティ指標と集客力指標(ここでは目的地の従業者数で、モデルの説明力を高めるため導入)である. 本研究では、集客力指標の変化は考慮しないので、アクセシビリティ指標の変化のみが目的地選択に反映される注6).

3.1.2 貨物

貨物のモデル構造を図―5に示す. 交通手段は, データ制約により(自動車以外の貨物交通については道路交通

政策研究論文 Vol.17 No.2 2014 Summer 運輸政策研究 005



■図―6 モデルのゾーニング(首都圏の拡大図)

センサスのような詳細なゾーン単位での調査が存在しない),自動車のみを扱い,交通手段選択は明示しない.したがって,モデルでは目的地選択および経路選択を扱う.貨物については,距離帯は区分しないが,車種を「小型貨物」「普通貨物」の2つに区分し,それぞれモデルを構築する.目的地選択モデルの説明変数は,一般化時間と集客力指標(目的地の従業者数)である注6).

3.2 ゾーニングとデータ作成

3.2.1 ゾーニング

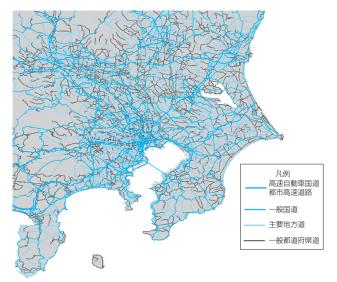
全国を6,693ゾーンに分割する(図―6). これは道路交通センサス(2005年)のBゾーンに基づく(ただし,一部の離島ではBゾーンを集約). これは市区町村内をさらに複数のゾーンに分割したものである.

3.2.2 データ作成

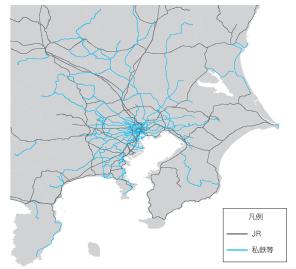
モデル分析に必要となる以下の各データを作成した.基本的に2005年時点のデータで統一している.

(1) 交通ネットワーク

ゾーン間交通費用の算出及び交通量配分の実施に用いるため、道路、鉄道、航空の各交通ネットワークデータを作成した. 道路ネットワークは、デジタル道路地図データ(財団法人日本デジタル道路地図協会)をもとに、2005年時点で存在する都道府県道以上の道路を対象として作成した



■図-7 道路ネットワーク(首都圏の拡大図)



■図―8 鉄道ネットワーク(首都圏の拡大図)

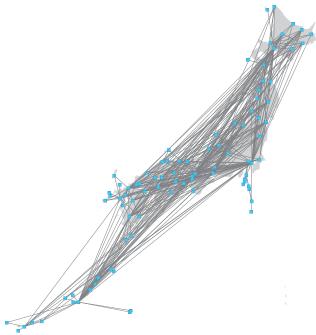
(図一7). 鉄道および航空ネットワークは, 国土数値情報 (2005年, 国土交通省) のGISデータより作成した (図一8,9).

(2) 交通量データ

OD別の交通量データ(平均的な1日あたりの人トリップ 数注7)を,旅客は目的別及び交通手段別に,貨物は車種別に作成した.自動車(旅客・貨物)の交通量データは, 道路交通センサス(2005年)を用いた.バス,鉄道に関しては,三大都市圏内々の移動は各都市圏パーソントリップ調査注8,その他都道府県間の移動は幹線旅客純流動調査(2005年)を用い,三大都市圏以外の県内々の移動は,東京都市圏パーソントリップ調査(1998年)を元に構築した目的地選択モデルを用いて推計した.航空は,幹線旅客純流動調査を用いた.

(3) 交通費用データ

各ODの交通費用として,一般化時間のデータを,交通 手段別に作成した(自動車に関しては,旅客と貨物で共通



■図-9 航空ネットワーク(全国)

とする). 所要時間の算出には, 前掲のネットワークデータを用いた注⁹. 特に, 自動車に関しては, 混雑を考慮した交通量配分 (確率的利用者均衡配分) の結果を用いた. なお, バスについては, ネットワークを明示的に作成していないため, 自動車の交通費用に一律の係数を乗じて作成した.

(4) 集客力指標データ

目的地選択で用いる集客力指標データとして,各ゾーンの従業者数データを,事業所企業統計(2006年)のメッシュデータをGIS上で面積按分して作成した注10).

(5) 自動車保有台数データ

交通手段選択で用いる自動車保有台数データとして,各 ゾーンの人口1人当たり自動車保有台数のデータを作成した.市区町村別に,自動車保有台数(財団法人自動車検 査登録情報協会(2006年)の市区町村別自動車保有車両 数および同軽自動車保有台数の合算値)を人口(2005年 国勢調査)で除して,1人当たり自動車保有台数を算出した.ゾーンの人口1人当たり自動車保有台数は,当該ゾーンの属する市区町村の値とした(同一市区町村のゾーンでは 1人当たり自動車保有台数は等しいと仮定).

3.3 モデルの定式化

モデル構造の定式化を以下に示す. なお, 本研究では, ゾーン内々の交通変化についてはモデルによる計測を行わない (ゾーン内々の CO_2 排出の扱いについては4.2.2項). そのため, 以下本節で示すゾーンi, jは, 異なるゾーンに言及している (i+j).

3.3.1 旅客

(1) 経路選択

乗用車の交通量配分を,貨物の自動車と同時に,確率 的利用者均衡配分を用いて行う.したがって,経路選択 は,ロジットモデルとして下記の確率選択式で表される.

$$P_{ijw} = \frac{\exp(-\theta_1 t_{ijw})}{\sum_{l} \exp(-\theta_1 t_{ijw'})}$$
(4)

ここで、i, j: 出発地及び目的地を表すラベル $(i \pm j)$ 、 P_{ijw} : 出発地i目的地jのODにおける経路wの選択確率、 t_{ijw} : ij間の経路wの一般化時間 (時間), θ_1 : パラメータである.

(2) 交通手段選択

交通手段選択はロジットモデルとし、その確率選択式を下式の通りとする。前述の通り、選択肢として考慮する交通手段は距離帯によって異なる。

$$P_{ijk}^{m} = \frac{\exp\left(V_{ijk}^{m}\right)}{\sum_{k'} \exp\left(V_{ijk'}^{m}\right)} \tag{5}$$

ただし,

$$V_{ija}^{m} = \theta_{2}^{m} t_{ij}^{a} + \theta_{4a}^{m},$$

$$V_{ijc}^{m} = \theta_{2}^{m} t_{ij}^{c} + \theta_{3}^{m} C_{i} + \theta_{4c}^{m},$$

$$V_{ijb}^{m} = \theta_{2}^{m} t_{ij}^{b} + \theta_{4b}^{m}, \quad V_{ijr}^{m} = \theta_{2}^{m} t_{ij}^{r}$$
(6)

である.

ここで、m:目的を表すラベル、i, j:出発地及び目的地を表すラベル (i+j)、 P_{ij}^m :出発地i目的地jのODにおける交通手段kの選択確率 (距離帯に応じて、a (航空)、c (乗用車)、b (バス)、r (鉄道)のうち利用可能なもののみを考慮)、 V_{ijk}^m :交通手段kの効用、 C_i :出発地iの1人当たり自動車保有台数 (台/人)、 t_{ij}^k :i間の交通手段kの一般化時間 (時間)、 θ_i^m :一般化時間のパラメータ、 θ_i^m :自動車保有台数のパラメータ (自動車を考慮する距離帯のみ)、 θ_{ik}^m :各交通手段の定数項である。

(3) 目的地選択

目的地選択はロジットモデルとし、その確率選択式を下式の通りとする.式中のアクセシビリティ指標は、交通手段選択モデルより算出されるログサム効用である.

$$P_{ij}^{m} = \frac{\exp(V_{ij}^{m})}{\sum_{i'} \exp(V_{ij'}^{m})}$$
 (7)

ただし.

$$V_{ij}^{m} = \theta_{5}^{m} \ln S_{j} + \lambda^{m} A C C_{ij}^{m}$$

$$A C C_{ij}^{m} = \ln \sum_{k} \exp(V_{ijk}^{m})$$
(8)

である.

ここで、m:目的を表すラベル、i、j:出発地及び目的地を表すラベル($i \neq j$)、 P_{ij}^m :出発地iにおける目的地jの選択確率、 V_{ij}^m :出発地iにおける目的地jの効用、 S_i :目的地jの

集客力指標(ここではjの従業者数), ACC_{ij}^m :出発地iにおける目的地jのアクセシビリティ指標, θ_5^m :集客力指標のパラメータ, λ^m :アクセシビリティ指標のパラメータ, V_{ijk}^m :出発地i目的地jの交通手段kの効用(交通手段選択において算出)である.

3.3.2 貨物

(1) 経路選択

交通量配分を, 旅客の乗用車と同時に, 確率的利用者 均衡配分を用いて行う. 経路選択の確率選択式は, 旅客 と同様である.

(2)目的地選択

目的地選択はロジットモデルとし、その確率選択式を下式の通りとする.

$$P_{ij}^{s} = \frac{\exp\left(V_{ij}^{s}\right)}{\sum_{i'} \exp\left(V_{ij'}^{s}\right)} \tag{9}$$

ただし,

$$V_{ij}^s = \theta_2^s \ln S_j + \theta_3^s t_{ij} \tag{10}$$

である.

ここで、s: 車種を表すラベル、i, j: 出発地及び目的地を表すラベル(i+j), P_{ij}^s : 出発地iにおける目的地jの選択確率, V_{ij}^s : 出発地iにおける目的地jの効用, S_j : 目的地jの集客力指標(ここではjの従業者数), t_{ij} : ij間の一般化時間(時間), θ_2^s : 集客力指標のパラメータ, θ_3^s : 一般化時間のパラメータである.

3.4 モデルのパラメータ

交通手段選択および目的地選択モデルのパラメータを 最尤推定法により推定した。その結果を以下に示す。

3.4.1 旅客

(1) 交通手段選択

旅客の交通手段選択のパラメータ推定結果は,距離帯別および目的別に表一2の通りである. 長距離帯の通勤通学のような特殊な交通行動を除き,いずれの目的でもモデルの尤度比は妥当な値である.

(2)目的地選択

旅客の目的地選択のパラメータ推定結果は、目的別に表一3の通りである.いずれの目的でも、ログサムパラメータはネスティッドロジットモデルの構造と整合的な範囲であり、モデルの尤度比も妥当である.

■表-2 旅客の交通手段選択のパラメータ推定結果

| ■表─2 派各の父週千段選択のハフメータ推定結果 | | | | | | | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|--|--|--|--|
| 100km未満 | 通勤通学 | 私事 | 業務 | | | | |
| 一般化時間 θ_2^m | -1.253 (-153.72) | -0.906 (-72.24) | -0.958 (-74.14) | | | | |
| 自動車保有台数 <i>θ</i> ₃ ^m | 9.205 (318.19) | 6.069 (175.75) | 4.401 (133.65) | | | | |
| 乗用車定数項θ ^m _{4c} | -4.399 (-328.94) | -1.291 (-82.03) | -0.852 (-56.37) | | | | |
| バス定数項 <i>Ө ^m</i> 4b | -2.334 (-364.80) | -0.680 (-84.88) | -1.145 (-130.79) | | | | |
| 自由度調整済尤度比 | 0.364 | 0.454 | 0.415 | | | | |
| サンプル数 ^注 | 594,969 | 423,341 | 351,479 | | | | |
| 100km~300km | 通勤通学 | 私事 | 業務 | | | | |
| 一般化時間 θ_2^m | -0.813 (-142.66) | -0.880 (-144.98) | -1.001 (-211.61) | | | | |
| 自動車保有台数 <i>θ</i> ₃ ^m | 0.212 (0.12) | 0.503 (13.18) | 2.004 (51.35) | | | | |
| 乗用車定数項θ ^m _{4c} | -1.831 (-53.61) | 0.304 (15.42) | -1.703 (-87.70) | | | | |
| バス定数項 $	heta_{4b}^{m}$ | -1.840 (-153.21) | -0.200 (-23.38) | -1.379 (-203.23) | | | | |
| 自由度調整済尤度比 0.223 | | 0.275 | 0.243 | | | | |
| サンプル数 | 93,814 | 191,399 | 246,677 | | | | |
| 300km~1,000km | 通勤通学 | 私事 | 業務 | | | | |
| 一般化時間 8 2 | -0.145 (-29.46) | -0.434 (-151.42) | -0.639 (-150.66) | | | | |
| 自動車保有台数θ ^m ₃ | 3.205 (19.52) | 3.350 (59.41) | 4.120 (47.67) | | | | |
| 航空定数項母們 | 注 | -18.020 (-66.56) | -5.725 (-124.20) | | | | |
| 乗用車定数項θ ^m _{4c} | -1.996 (-23.29) | -1.562 (-57.06) | -3.816 (-88.15) | | | | |
| バス定数項 $	heta_{4b}^{m}$ | -0.676 (-35.79) | -0.354 (-37.72) | -1.788 (-150.18) | | | | |
| 自由度調整済尤度比 | 0.073 | 0.446 | 0.681 | | | | |
| サンプル数 | 20,046 | 155,302 | 235,078 | | | | |
| 1,000km以上 | 通勤通学 | 私事 | 業務 | | | | |
| 一般化時間 8 2 | | -0.249 (-39.12) | -0.271 (-21.53) | | | | |
| 航空定数項 $\theta^m_{4\mathbf{a}}$ | —注 | 0.899 (17.49) | 1.637 (19.44) | | | | |
| 自由度調整済尤度比 | | 0.852 | 0.865 | | | | |
| サンプル数 | | 81,059 | 44,222 | | | | |

注:サンブル数=作成した交通量データにおいて、少なくともいずれかの交通手段のトリップが存在するOD数、通勤通学について、300km~1,000kmでは航空のトリップが存在しないため、交通手段選択で航空を考慮しない、また1,000km以上では、トリップが存在しないため、モデル構築を行わない。

■表─3 旅客の目的地選択のパラメータ推定結果

| | 通勤通学 | 私事 | 業務 |
|--|-------------------------------|------------------|------------------|
| 集客力指標 <i>θ</i> ₅ ^m | 0.466 (33.98) ^注 | 0.150 (11.09) | 0.165 (12.38) |
| アクセシビリティ 指標λ ^m | 0.691 (39.49) | 0.701 (58.81) | 0.335 (49.57) |
| 自由度調整済尤度比 | 0.430 | 0.476 | 0.432 |
| サンプル数 ^注 | 6,666 | 6,672 | 6,667 |

注:カッコ内の値はt値. また, サンプル数=作成した交通量データにおいて, 発トリップが存在するゾーン数.

3.4.2 貨物

(1)目的地選択

貨物の目的地選択のパラメータ推定結果は,車種別に表一4の通りである.

■表-4 貨物の目的地選択のパラメータ推定結果

| | 小型貨物 | 普通貨物 |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| 集客力指標 θ_2^s | 0.226 (15.04) | 0.123 (8.97) |
| 一般化時間 θ_3^s | -2.470 (-65.73) | -0.931 (-54.08) |
| 自由度調整済尤度比 | 0.594 | 0.503 |
| サンプル数 ^注 | 6,624 | 6,615 |

注:サンプル数=発トリップが存在するゾーン数.

4 分析

4.1 分析の概要

構築したモデルを用いて、全国一律に自動車燃料への課税を強化した際の効果を計測する。また、その結果をもとに、2章の議論をふまえながら、地域別の CO_2 削減割当てについて検討する。

4.2 分析方法

4.2.1 燃料課税の設定

燃料課税は、近似的に自動車の走行距離に応じた課税として表現する。具体的には、自動車利用の交通費用(一般化時間)を単位距離当たり一律に増加させて、モデルを実行する。本分析では、全国一律に走行距離1km当たり150円相当の交通費用が加算されるものとして、自動車利用の交通費用を更新する(以下、この設定条件を「交通費用加算」という)。仮に燃費10km/Lの自動車であれば、ガソリン1L当たり1,500円の価格上昇を意味する。なお、この設定値自体には何ら政策的な意図や根拠はなく、本論文の主眼は、あくまで課税による CO_2 削減効果を試算し、その結果をもとに CO_2 削減割当ての検討を行うというプロセスを示すことにある211)。

モデル上は、各ODの道路利用の一般化時間を、上記の交通費用加算を考慮した値に更新する(時間価値を3,000円/時として時間に換算). なお、これらの交通費用は旅客・貨物で共通とする.

$$t'_{ij} = t_{ij} + \frac{150 \times d_{ij}}{3000} \tag{11}$$

ただし, i, j: 出発地及び目的地を表すラベル $(i \neq j), t'_{ij}$: 交通費用加算後のij間の一般化時間 (時間), t_{ij} : 交通費用加算前のij間の一般化時間 (時間), d_{ij} : ij間の距離 (km) である.

4.2.2 CO₂排出量の計測

各ゾーンの CO_2 排出量は、発トリップベースで集計する。 すなわち、トリップの CO_2 排出は全て出発地のゾーンに帰着するものとする。

ゾーン間の CO_2 排出量は、下式により車種別(乗用車、小型貨物、普通貨物)に推計する。これを全てのゾーン間

について集計したものが、全国の CO_2 排出量となる. (現況 (2005年)の全国の CO_2 排出量が統計値 $^{2)}$ と合致するよう、最終的に一律の係数を乗じて補正)

$$CO2_{ii} = q_{ii} \cdot d_{ii} \cdot f(v_{ii}) \tag{12}$$

ただし、i, j: 出発地及び目的地を表すラベル、 $CO2_{ij}$: ij間の CO_2 排出量 (t)、 q_{ij} : ij間の(当該車種の)トリップ数 (台)、 d_{ij} : ij間の距離 (km)、 $f(v_{ij})$: ij間の CO_2 排出係数 (t/(台・km)) (車種別に設定、速度依存)¹¹、 v_{ij} : ij間の旅行速度 (km/h) である。

交通費用加算による CO_2 排出削減量を推計する際には、全てのゾーン間で上式により現況および交通費用加算後の CO_2 排出量を算出する。その際、加算後のゾーン間トリップ数及び旅行速度はモデルの計算結果を用いる。なお、ゾーン内々については、現況の CO_2 排出量は上式で求めるが $^{\dot{2}12}$ 、加算後の CO_2 排出量は、加算後の交通量変化をモデルで算出しないため、当該ゾーン発トリップ(ゾーン内々除く)の平均的な CO_2 削減率を、ゾーン内々の CO_2 削減率に等しいと仮定して削減量を求める。

4.3 分析結果と考察

4.3.1 全国のCO₂排出削減

上記の設定のもと、モデル分析の結果、わが国全体では、交通費用加算により自動車からの CO_2 が約41%減少することが示された(表一5)。また、自動車走行台キロは約38%の減少であった(表一6)。いずれも、旅客よりも貨物で減少率が大きい。

4.3.2 地域別のCO₂排出削減

図―10は、交通費用加算時の市区町村別のCO₂排出削減量を図示したものである。全国のCO₂排出削減率は約41%であるから、仮に全国の削減目標がこの値のときには、最も効率的な削減を達成するという考え方のもとでは、図に示される削減量を各市区町村の削減割当てとすべきであることを示唆している。図―11は、人口あたりの排出削

■表─5 自動車からのCO₂排出量(単位:万t-CO₂/年)

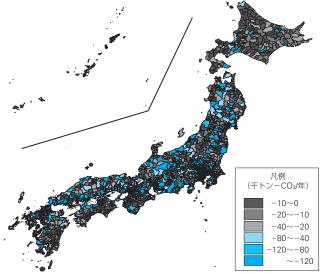
| | 乗用車 | 小型貨物 | 普通貨物 | 自動車計 |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| 現況 | 12,956 | 2,716 | 6,146 | 21,818 |
| 交通費用加算時 | 9,037 | 1,415 | 2,372 | 12,823 |
| 現況からの変化量 | -3,919 | -1,301 | -3,774 | -8,994 |
| 現況からの変化率 | -30.3% | -47.9% | -61.4% | -41.2% |

出典:現況は, 2005 年時点の値²⁾

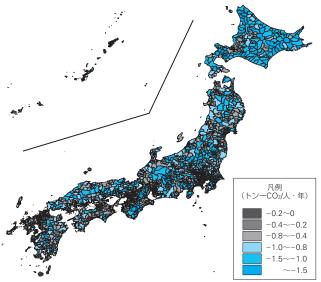
■表-6 自動車走行台キロ(単位:億台キロ/年)

| | 乗用車 | 小型貨物 | 普通貨物 | 自動車計 |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| 現況 | 5,201 | 1,218 | 1,203 | 7,622 |
| 交通費用加算時 | 3,679 | 611 | 435 | 4,725 |
| 現況からの変化量 | -1,522 | -607 | -768 | -2,897 |
| 現況からの変化率 | -29.3% | -49.8% | -63.8% | -38.0% |

出典: 現況は, 2005 年時点の値12)



■図—10 交通費用加算時のCO₂排出削減量(自動車計)



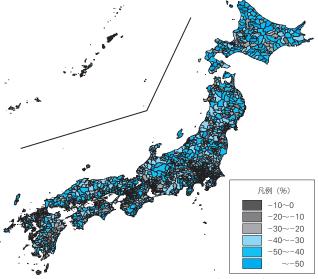
■図─11 交通費用加算時の人口1人当たりCO₂排出削減量(自動 車計)

減量を示したものである. 大まかな傾向として, 都市部より も地方部で1人あたり削減量が大きい.

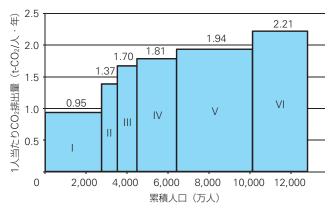
図―12は,市区町村別のCO₂排出削減率を図示したものである.削減割当てを削減率で表現するならば,各市区町村で図に示される削減率を達成すべきということになる.削減率は,多くの市区町村では30~50%程度だが,一部の地方部ではそれよりも小さくなる.これらの地域では,自動車からの転換や目的地の代替が困難であり,交通費用が加算されても自動車が比較的利用され続けるためと考えられる.

4.3.3 都市類型別の傾向

上記の結果をもとに、より明確な傾向を分析するため、都市類型別に結果を比較する. なお、ここで都市類型とは、各市町村の人口等 (2005年時点) をもとに、I…人口100万人以上、II…Iの都市の通勤圏、II…人口50~100万人、IV…人口20~50万人、V···人口5~20万人、VI···人口5万



■図—12 交通費用加算時のCO₂排出削減率(自動車計)



■図―13 現況の都市類型別1人当たりCO₂排出量(自動車計)

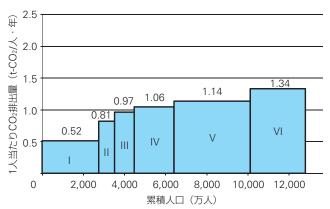
人未満の6つに分類(ただし,東京23区は全て区分Iに分類)したものを指す(以下の図中の番号に対応).したがって,おおよそ番号が大きくなるにしたがい都市部から地方部へと移る.

図一13は、現況の1人当たり CO_2 排出量を都市類型別に集計し、横軸に累積人口を取ったグラフである。1人当たり CO_2 排出量は、都市部よりも地方部で大きく、2倍以上の開きがあることが分かる。グラフの面積は総排出量を示しており、総量に関しても地方部で大きい。

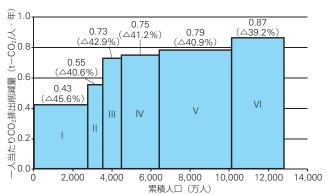
交通費用加算時の1人当たり CO_2 排出量を都市類型別に集計したのが図—14である。また、これをもとに、現況の排出量から交通費用加算時の排出量を差し引き、1人当たりの削減量を求めたのが図—15である。

交通費用加算時の1人当たり CO_2 排出削減量は、もともと排出量が大きい地方部で大きくなり、IとVIで2倍程度の違いがある。これは、先の図-11で確認した傾向と整合的である。一方、削減率で見ると、逆に都市部の方が若干大きい傾向がある。これは、都市部の方が公共交通をはじめとした代替交通手段が整備されており、自動車以外の交通手段への転換が比較的容易であるためと考えられる。

したがって、上記の結果を各地域の削減割当てとした場



■図─14 交通費用加算時の都市類型別1人当たりCO₂排出量(自動車計)



■図─15 交通費用加算時の都市類型別1人当たりCO₂排出削減量 および削減率(自動車計)

合,全体的な傾向としては,削減量では地方部の方が大きく2倍程度の開きがあるが,削減率では都市部の方が地方部よりも若干大きい,ということになる.

5-----まとめ

5.1 結論

本研究では、全国の詳細な地域分割に基づく交通需要予測モデルを用いて、自動車燃料課税の強化を想定して自動車利用の交通費用を一律に増加させた際のCO₂削減効果を計測した。また、その際の各地域のCO₂削減量が、全国での削減量を最も効率的に達成するものであるという考え方のもと、分析結果が地域別のCO₂削減割当ての検討へ応用可能であることを示した。本分析の設定条件のもとでは、全国のCO₂削減率は約41%となった。その際の市区町村別の削減量は、図一10に示した通りである。したがって、仮に全国の削減目標が41%であるとき、最も効率的な削減目標の達成のためには、これらの値を各市区町村の削減割当てとすべきであることが示唆された。なお、2.3節で述べたように、達成すべき全国の目標値が明確である場合には、この結果をもとにさらに探索的に分析を行う必要がある。

わが国では、削減割当ては制度としては実施されておら

ず、具体的な割当てを検討するための方法論も確立されていない。本論文では、あくまで効率性の観点から削減割当てを求める方法を示したが、現実には、公平性にも配慮した割当てでなければ、課税の合意形成が困難になる可能性がある 13 . ただし、その場合でも、議論のための基礎情報として、効率性を達成する削減割当てを定量的に示すことは重要であろう。ここで示した分析の考え方が、将来の実効性のある 13 . たこで示した分析の考え方が、将来の実効性のある 13 .

5.2 今後の課題

本分析はいくつかの仮定,前提に基づいており,より精緻な分析のためには,以下のような課題があり,引き続き検討を行っているところである.

5.2.1 貨物の交通手段分担の考慮

本モデルでは、貨物に関しては、3.1.2項で述べたとおり、 自動車以外の交通手段を考慮しておらず、交通手段分担 を扱っていない、物流では、産業にもよるが、特に長距離 帯では船舶や鉄道のシェアも大きい、データ制約の課題を 克服する必要はあるが、貨物についても交通手段分担モ デルを構築し、モーダルシフトを内生的に扱えるようにな れば、異なる結果が得られるであろう。

5.2.2 モデルにおける燃料課税の表現

本分析では、自動車燃料への課税を、走行距離当たり一律に交通費用を増加させることで表現した。一方、2章で述べたような社会全体の削減費用の最小化のためには、厳密には(走行距離ではなく)排出量当たり一定の費用増加が必要である。車種別では、一般に旅客(乗用車)よりも貨物自動車の方が走行距離当たりのCO2排出量は大きく、そのため現在の設定では、旅客に相対的に過剰な負担を強いている可能性がある。また、本分析の排出係数は旅行速度を反映したものとなっており、一般に地方部よりも混雑している都市部を移動する方が走行距離当たりの排出量は多くなる。そのため、現在の設定では、地方部に相対的に過剰な負担を強いる結果となっている可能性がある。今後、以上のような課題を改善し、より理論と整合的な削減割当ての検討方法を提示したい。

5.2.3 長期の削減割当ての検討に向けて

本研究では、2.4節で述べたように、土地利用条件(人口分布等)や交通インフラ、及び自動車の燃費が現状のまま変化しないことを前提としている。一方で、温暖化対策は2050年までの長期をターゲットとしており、そのような長期の削減目標設定のための地域別割当てを考えると、これらの仮定は妥当でない可能性がある。すなわち、自動車

燃料課税の影響として、より自動車を使わずに生活できるような地域への立地変更や、低燃費車の開発・普及促進などの影響を考慮する必要がある.

こうした長期の分析への応用の際に、本研究で用いたモデルでは、将来の交通インフラや自動車の燃費は、外生変数として設定することで、必要に応じて反映することが可能である。また、人口・従業者の分布についても、シナリオを立てて外生変数として与えることはもちろん可能だが、燃料課税の立地への影響を内生的に評価するために応用都市経済モデル¹⁴⁾の援用も考えられる。

謝辞:本研究は、環境省「第Ⅱ期環境経済の政策研究」 採択課題『地方公共団体における地球温暖化対策実行 計画等の実施に伴う環境・経済・社会への影響分析』(研 究代表者:小池淳司)の研究成果の一部を取りまとめたも のである.本研究におけるデータ整備等に関して、株式会 社価値総合研究所の岩上一騎氏の協力を得た.また、査 読者からは丁寧かつ有益なコメントを頂いた.ここに謝意 を記す.

注

- 注1) 自動車燃料への課税によるCO.削減効果には、本文で述べたような価格メカニズムを通じた需要抑制による直接的な効果(価格効果)と、税収により様々な温暖化対策の実施が可能になることによる効果(財源効果)の2つがあるとされるが、本研究では前者のみを扱う.
- 注2) 東京都による事業所を対象とした総量削減義務のように, 地方公共団体独 自の取組み例はある.
- 注3) 厳密には、各主体の限界削減費用が、排出削減量に関して狭義単調増加である場合に必要十分性が成り立つ。そうでない場合は、一律の限界削減費用は、社会全体の費用最小化の必要条件だが十分条件ではない。
- 注4) 狭義には、ピグー税率は、排出による外部不経済を考慮した市場経済で社会的最適を達成する値に設定される。これに対して本論文では、CO2排出の外部不経済を明示しておらず、ここで扱う燃料課税の経済効率性とは、課税によりある一定量のCO2削減を最小の費用で達成するという意味の効率性である(ファーストベストではなく、セカンドベスト)。これを狭義のピグー税と区別して、ボーモル・オーツ税と呼ぶ場合もある⁹)。
- 注5) 前述の英国の炭素削減計画等の事例では,実際に数年単位で削減計画(割当て)が明記されている.
- 注6) 旅客の業務トリップや貨物の目的地選択の解釈としては,交通費用の増加 によって,取引先や出張先,あるいは物資の仕入れ先が近場に切り替わること

- を想定しているといえる. 旅客交通に関しては, 航空需要予測においても同様のモデル式が用いられている7.
- 注7) モデルでは平日・休日を区別していない.
- 注8) 東京都市圏バーソントリップ調査 (1998年), 中京都市圏パーソントリップ 調査 (2001年), 京阪神都市圏パーソントリップ調査 (2000年).
- 注9) ゾーン内々のデータについて、モデル分析上必要としないため、交通費用は 作成していない。また、交通費用加算前のCO₂排出量算出においては、便宜 上、距離を2km、旅行速度を12km/hと設定した。
- 注10) 国勢調査でも市区町村単位の従業者数が調査されているが、本分析のモデルのゾーン分割は市区町村よりも細かいため、本文に記載の方法で従業者数データを作成した。
- 注11) ここでの課税額は、一般に指摘される自動車交通の外部費用¹⁰⁾を大きく上回り、現実の政策としては非現実的であろう。このような課税額を設定したのは、本論文の目的が燃料課税の影響試算というよりは削減割当ての算出にあるため、2050年の削減目標が80%であることをふまえ、全国のCO₂排出率が(削減目標のターゲットが短中期の想定であったとしても)少なくとも数十%オーダーとなるケースを数値例として示すことが適切と判断したためである。なお、参考値として、ある程度現実的な値として課税額を60円/Lとした場合、全国でのCO₂削減率は約7%となった。
- 注12) 注9) を参照.

参考文献

- 1) 地球温暖化対策推進本部 [2013], 「当面の地球温暖化対策に関する方針」.
- 2) 温室効果ガスインベントリオフィス[2013], 「日本の温室効果ガス排出量データ」.
- 3) 英国政府 [2010], "Climate Change: Taking Action".
- 4) 鈴木温・泊尚志・屋井鉄雄 [2011], "英国と米国カリフォルニア州の交通計画 体系における都市間交通と気候変動の考慮", 「運輸政策研究」, Vol. 14, No. 1, pp. 2-16.
- 5) Parry, I. W. H. and Small K. A. [2005], "Does Britain or the United States Have the Right Gasoline Tax?", *The American Economic Review*, Vol. 95, No. 4, pp. 1276-1289.
- 6) 環境省[2008],「環境税等のグリーン税制に係るこれまでの議論の整理」,中央環境審議会総合政策・地球環境合同部会。
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所 [2007], 「航空需要予測について」.
- 8) 細田衛士編著 [2012], 『環境経済学』, ミネルヴァ書房.
- 9) 柴田弘文 [2002], 『環境経済学』, 東洋経済新報社.
- 10) 兒山真也・岸本充生 [2001], "日本における自動車交通の外部費用の概算", 「運輸政策研究」, Vol. 4, No. 2, pp. 19-30.
- 11) 道路投資の評価に関する指針検討委員会編 [1998], 「道路投資の評価に関する指針(案) |.
- 12) 国土交通省 [2006], 「陸運統計要覧」.
- 13) 有村俊秀·岩田和之 [2011], 『環境規制の政策評価: 環境経済学の定量的 アプローチ』, 上智大学出版.
- 14) Ueda, T., Tsutsumi, M., Muto, S. and Yamasaki K. [2013], "Unified computable urban economic model", *The Annals of Regional Science*, Vol. 50, No. 1, pp. 341-362.

(原稿受付 2013年12月9日)

Calculation of Efficient CO₂ Emissions Reduction Quotas by the Nationwide Travel Demand Forecasting Model

By Atsushi KOIKE, Yasuo SASAKI and Kiyoshi YAMASAKI

By using a travel demand forecasting model that covers both inner-city and inter-city transportations of whole of Japan, we discuss economically efficient regional CO_2 emissions reduction quotas. We calculate the CO_2 emissions reduction by introducing a fuel tax as a countermeasure against global warming at each region and illustrate the results can be applied to decide the regional quotas. In our analysis, it has been shown that the CO_2 emissions reduction per capita due to the taxation, which is equal to the region's reduction quota per capita, is bigger in rural areas than in urban areas.

Key Words: travel demand forecasting, climate change, fuel tax, CO₂ emissions reduction quotas, marginal reduction costs