

■図—5 モデル構造 (貨物)



■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

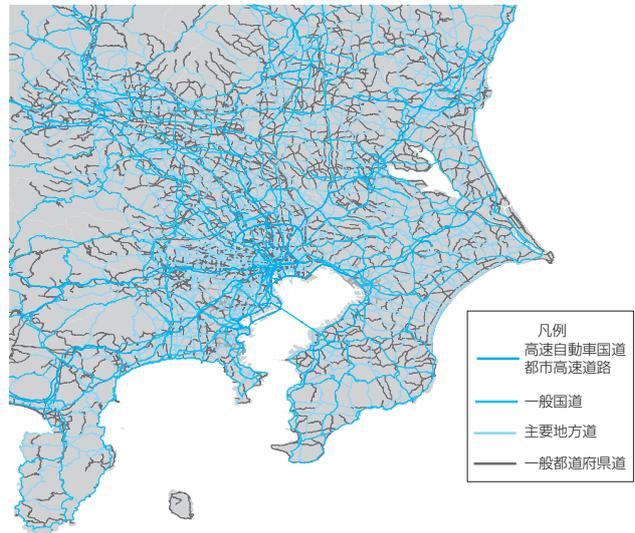
全国を6,693ゾーンに分割する (図—6)。これは道路交通センサス (2005年) のBゾーンに基づく (ただし、一部の離島ではBゾーンを集約)。これは市区町村内をさらに複数のゾーンに分割したものである。

3.2.2 データ作成

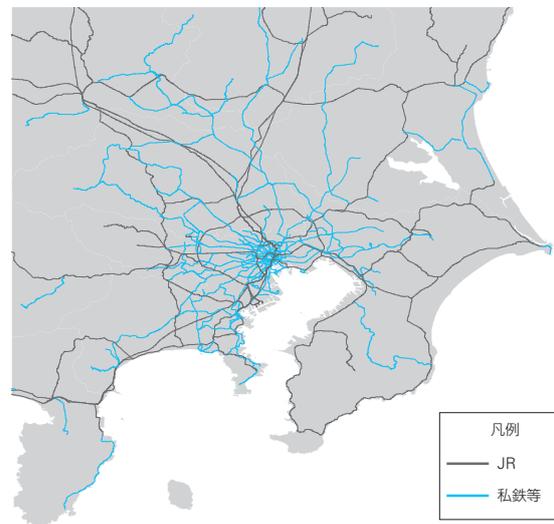
モデル分析に必要な以下の各データを作成した。基本的に2005年時点のデータで統一している。

(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)

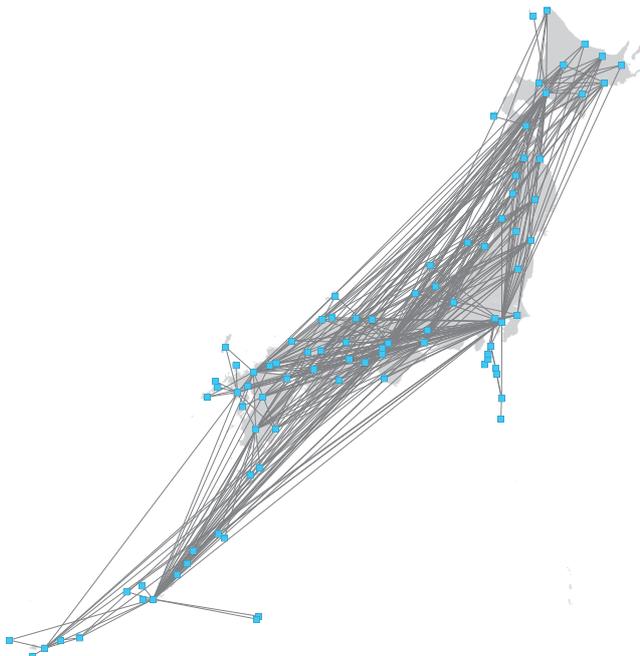
(図—7)。鉄道および航空ネットワークは、国土数値情報 (2005年, 国土交通省) のGISデータより作成した (図—8, 9)。

(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)}、其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CO₂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。

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

ここで、*i*, *j*: 出発地及び目的地を表すラベル (*i*≠*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)、*θ₁*: 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。

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

ただし、

$$\begin{aligned} V_{ija}^m &= \theta_2^m t_{ij}^a + \theta_{4a}^m, \\ V_{ijc}^m &= \theta_2^m t_{ij}^c + \theta_3^m C_i + \theta_{4c}^m, \\ V_{ijb}^m &= \theta_2^m t_{ij}^b + \theta_{4b}^m, \quad V_{ijr}^m = \theta_2^m t_{ij}^r \end{aligned} \quad (6)$$

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_{ijk}^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*: *ij*間の交通手段*k*の一般化時間(時間)、*θ₂^m*: 一般化時間のパラメータ、*θ₃^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_{4k}^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。

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

ただし、

$$\begin{aligned} V_{ij}^m &= \theta_5^m \ln S_j + \lambda^m ACC_{ij}^m \\ ACC_{ij}^m &= \ln \sum_k \exp(V_{ijk}^m) \end{aligned} \quad (8)$$

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*≠*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_j*: 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。

$$P_{ij}^s = \frac{\exp(V_{ij}^s)}{\sum_j \exp(V_{ij}^s)} \quad (9)$$

ただし，

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

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（ $i \neq j$ ）， 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。

■表一2 旅客の交通手段選択のパラメータ推定結果

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 θ_3^m	9.205 (318.19)	6.069 (175.75)	4.401 (133.65)
乗用車定数項 θ_{4c}^m	-4.399 (-328.94)	-1.291 (-82.03)	-0.852 (-56.37)
バス定数項 θ_{4b}^m	-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 θ_3^m	0.212 (0.12)	0.503 (13.18)	2.004 (51.35)
乗用車定数項 θ_{4c}^m	-1.831 (-53.61)	0.304 (15.42)	-1.703 (-87.70)
バス定数項 θ_{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 θ_2^m	-0.145 (-29.46)	-0.434 (-151.42)	-0.639 (-150.66)
自動車保有台数 θ_3^m	3.205 (19.52)	3.350 (59.41)	4.120 (47.67)
航空定数項 θ_{4a}^m	—注	-18.020 (-66.56)	-5.725 (-124.20)
乗用車定数項 θ_{4c}^m	-1.996 (-23.29)	-1.562 (-57.06)	-3.816 (-88.15)
バス定数項 θ_{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 θ_2^m	—注	-0.249 (-39.12)	-0.271 (-21.53)
航空定数項 θ_{4a}^m	—注	0.899 (17.49)	1.637 (19.44)
自由度調整済尤度比	—注	0.852	0.865
サンプル数	—注	81,059	44,222

注：サンプル数=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。

■表一3 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 θ_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CO₂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CO₂削減効果を試算し、その結果をもとにCO₂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^{注11}。

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。

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

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CO₂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CO₂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CO₂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CO₂排出量となる。（現況（2005年）の全国のCO₂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）

$$CO2_{ij} = q_{ij} \cdot d_{ij} \cdot f(v_{ij}) \quad (12)$$

ただし、 i, j : 出発地及び目的地を表すラベル、 $CO2_{ij}$: ij間のCO₂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CO₂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CO₂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CO₂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CO₂排出量は上式で求めるが^{注12)}、加算後のCO₂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CO₂削減率を、ゾーン内々のCO₂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CO₂が約41%減少することが示された（表—5）。また、自動車走行台キロは約38%の減少であった（表—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減

■表—5 自動車からのCO₂排出量（単位：万t-CO₂/年）

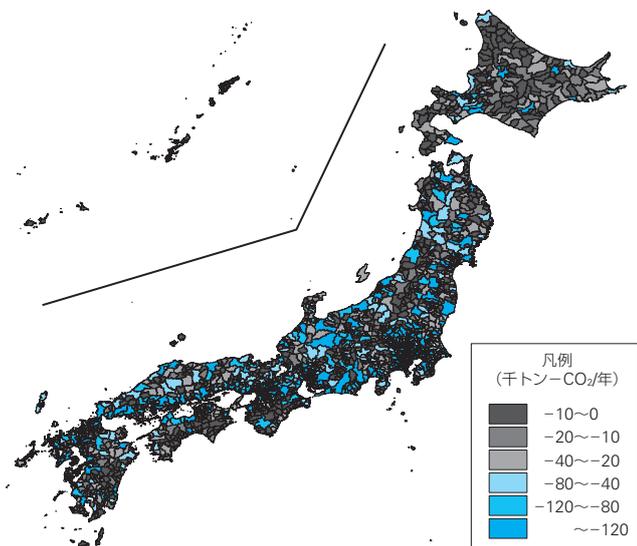
	乗用車	小型貨物	普通貨物	自動車計
現況	12,956	2,716	6,146	21,818
交通費用加算時	9,037	1,415	2,372	12,823
現況からの変化量	-3,919	-1,301	-3,774	-8,994
現況からの変化率	-30.3%	-47.9%	-61.4%	-41.2%

出典：現況は、2005年時点の値²⁾

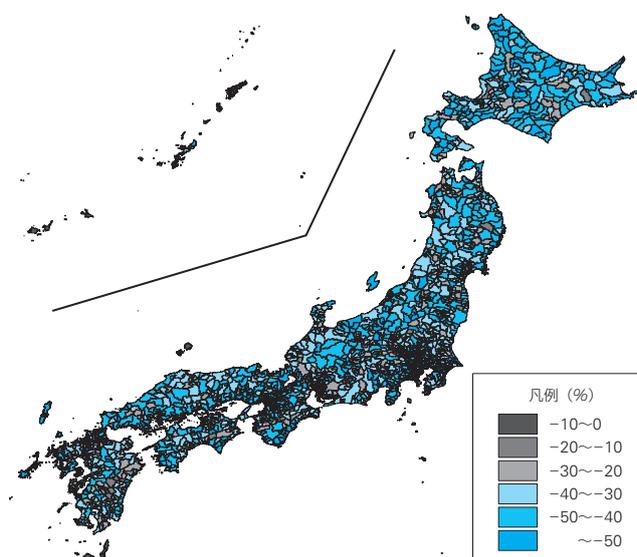
■表—6 自動車走行台キロ（単位：億台キロ/年）

	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%

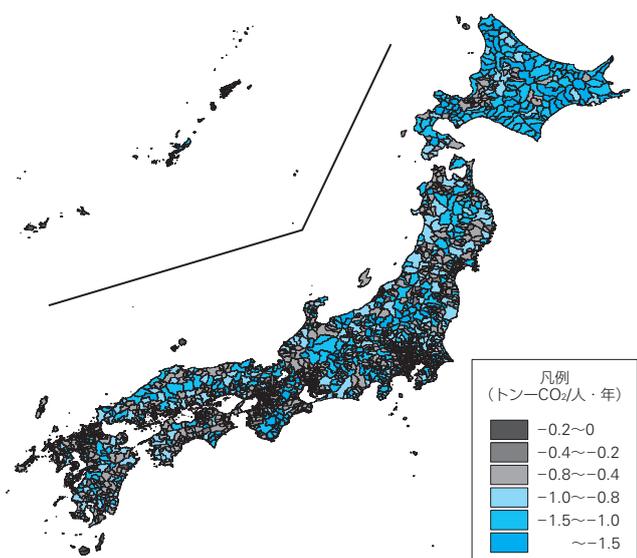
出典：現況は、2005年時点の値¹²⁾



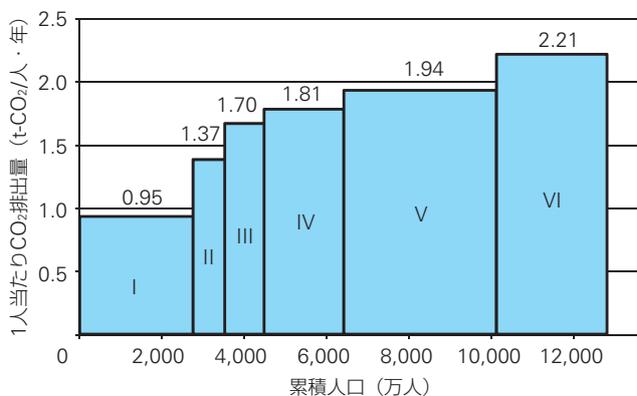
■図一10 交通費用加算時のCO₂排出削減量(自動車計)



■図一12 交通費用加算時のCO₂排出削減率(自動車計)



■図一11 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)



■図一13 現況の都市類型別1人当たりCO₂排出量(自動車計)

削減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人あたり削減量大きい。

図一12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、III…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

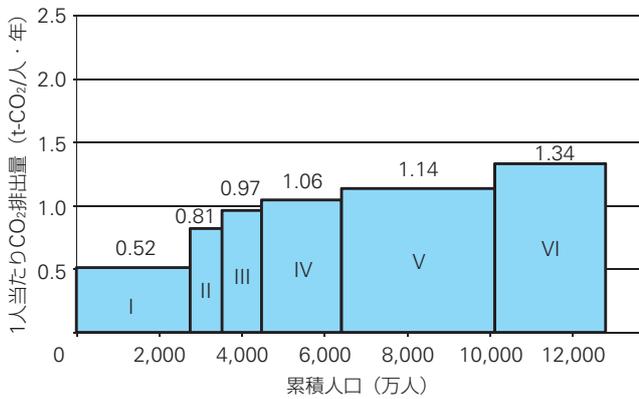
人未満の6つに分類(ただし、東京23区は全て区分Iに分類)したものを指す(以下の図中の番号に対応)。したがって、おおよそ番号が大きくなるにしたがい都市部から地方部へと移る。

図一13は、現況の1人当たりCO₂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CO₂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。

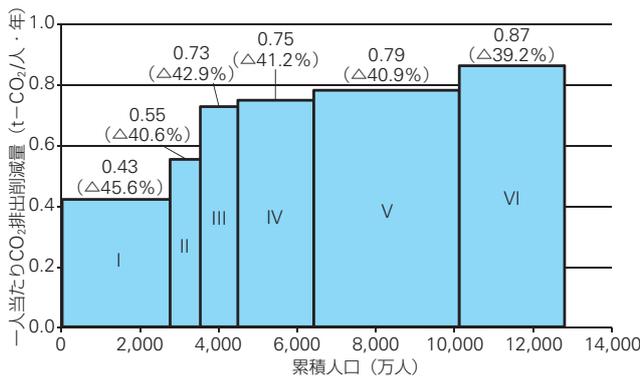
交通費用加算時の1人当たりCO₂排出量を都市類型別に集計したのが図一14である。また、これをもとに、現況の排出量から交通費用加算時の排出量を差し引き、1人当たりの削減量を求めたのが図一15である。

交通費用加算時の1人当たりCO₂排出削減量は、もともと排出量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、先の図一11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—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CO₂削減の一助となれば幸いである。

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があるが、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CO₂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、ピギー税率は、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)。これを狭義のピギー税と区別して、ポーモル・オート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

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) 東京都市圏パ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 CO₂ emissions reduction quotas. We calculate the CO₂ 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 CO₂ 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*

市区町村単位のSCGEモデルを用いた 東日本大震災の経済被害の空間的把握

小池 淳司¹・佐々木 剛²・佐々木 康朗³・山崎 清³

¹正会員 神戸大学教授 工学部市民工学科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:koike@lion.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail:139t119t@kobe-u.ac.jp

³正会員 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 (〒100-0004 東京都千代田区大手町二丁目2-1)

E-mail: sasaki2213@vmi.co.jp

本研究では、市区町村単位の空間的応用一般均衡 (SCGE) モデルを用いて東日本大震災の経済被害を空間的に把握する。東日本大震災では津波の被害が大きく、被災地域においても沿岸部と内陸部では被害の程度が大きく異なるが、既往研究では、地域の分割が最も細かいものでも都道府県単位であり、このような違いを考慮した地域別の経済被害の分析が十分になされていない。そこで本研究では、全国を市区町村単位で 2342 地域に分割し、地域間の財の輸送費用や移出入、所得移転を考慮した SCGE モデルを構築して、詳細な地域別の分析を行う。また、その計算のための経済データを、各種の既存統計に基づく推計により作成する。

分析では、東日本大震災の影響として、被災地域である岩手県・宮城県・福島県・茨城県の内陸・沿岸部別の資本ストック毀損の程度が、SCGE モデルにおける各地域の企業の生産効率の低下に反映されると仮定して、各地域の経済被害の計測を行った。その結果、被災地域の沿岸部を中心に東北地方で大きく被害が出ていることに加えて、直接の被災地域ではない関東以西の工業地帯にまで被害が波及していることが示唆された。

Key Words : *Economic Impacts Spread, Great East Japan Earthquake, Spatial Computable General Equilibrium Model Of Municipality Level*

1. はじめに

平成23年に東日本大震災が発生し、それ以降、震災による経済的影響について多くの研究がなされてきた。本研究では、地域別の影響を細かく分析することを目的とするが、関連する既往研究では、最も細かい地域で47都道府県別に経済的影響を計測したものがあり、県単位の資本ストック被害等を用いてシミュレーションをおこなっている¹⁾。しかし、東日本大震災は、直接の揺れによる被害だけでなく、津波の影響が非常に大きく、同一県内でも、内陸部と沿岸部では資本ストック等の被害状況が大きく異なっている。本研究では、こうした実状を考慮して、都道府県よりも細かい地域単位での経済被害を分析する。そのため、まず全国の市区町村単位での経済データを作成し、これを用いて空間的応用一般均衡モデルを構築する。そして実際に、東日本大震災による被害の波及の空間的な分布の試算を行う。

一般均衡分析によるアプローチでは、あらゆる経済活

動が考慮され、政策の変更による社会厚生の変化を求めることができる。特に、一般均衡モデルを実証分析への適用を意図して開発された応用一般均衡モデル (CGE : Computable General Equilibrium) は、自然災害の経済的影響や環境政策、社会資本整備などの評価手法として応用されるようになった²⁾。さらに、応用一般均衡モデルを空間的に拡張した空間的応用一般均衡 (SCGE : Spatial Computable General Equilibrium) モデルを用いて、それらの影響を空間的に把握する研究も盛んに行われている。SCGEモデルでの計算は、通常、産業連関表などの経済データを用いており、既存の統計データの地域数の制約等から、市区町村単位のような細かい地域を対象とし、かつ全国をカバーするSCGEモデルの構築例はない。そのため、既存のモデルでは、全国の地方自治体単位で経済被害のシミュレーションを行うことは難しい。

本研究では、全国を市区町村単位の行政区分 (平成17年10月時点) に基づく2342地域 (一部離島等は統合している) に分割したSCGEモデルを構築し、詳細な地域別

の分析を行う。そのため、まずこの地域分割に基づく全国の経済データを用意する必要があるが、既存の統計データをそのままの形で利用することができない（地域分割が粗すぎるため等）項目については独自に推計を行い、データを作成する。そして、このデータに基づき構築したモデルで事例分析を行い、各地域の被害や政策の便益の計測ができることを示す。具体的には、東日本大震災の被災地域の資本ストック毀損が当該地域の企業の生産効率を低下させると仮定し、その経済的影響が全国市区町村へどのように波及するのかを分析する。

ここで、本研究で構築するモデルは、中間財の地域間取引を考慮しておらず、これらのサプライチェーンの影響が分析から除外されている。これは、既存の統計データから市区町村単位で中間財の取引額を推計することが困難なためである。したがって、特に被災地域において中間財の取引が多く、付加価値比率が小さい産業が多く存在する場合には、推計する被害額の誤差が大きくなる可能性はある。ただし、上述のように、本研究の主眼は、東日本大震災による経済被害の波及のしかたを細かい地域分布（市区町村単位）で把握することにあり、必ずしも厳密な被害額の計測を意図したものではない。

また、一口に東日本大震災の経済被害と言っても、様々な捉え方があるが、本研究では、震災の発生直後に見られたような被災地域の企業の供給が滞ったことによるサプライチェーンの被害などの、短期的に市場メカニズムが適切に機能しないことによる被害を分析しているのではなく、震災によって資本ストックが毀損し、被災地域の企業の生産効率低下が長期的に続いた場合の経済被害を想定している（そのため一般均衡分析を適用する）。また、原子力発電所の事故関連の影響は一切考慮されていないことにも留意されたい。

以下、2章でSCGEモデルの構造、3章で経済データの作成方法を示し、4章で事例分析とその結果について考察を行う。

2. モデルの定式化

(1) モデルの概要と前提

本研究では、応用一般均衡モデルを空間的に拡張した空間的応用一般均衡（SCGE）モデルを用いる。モデルの構築に際して以下のような仮定をおく。

- 1) I個に分割された国土空間を考える。
- 2) 各地域にはM種類の財が存在し、それぞれに代表的企業がある。また、各地域には一つの代表的家計が存在する。
- 3) 企業は、資本と労働を生産要素として生産を行う。また、その行動は費用最小化行動に従う。
- 4) 家計は企業に生産要素を提供し、対価として労働賃

- 金・資本レントを受け取る。そして、得られた所得から自地域または他地域で生産された財サービス消費する。また、その行動は効用最大化行動をとる。
- 5) 同種の財であっても、生産された地域が異なると、別種の財とみなされる。
- 6) 財の消費には交通費用相当分の負担が必要であり、それは財の追加的消費として表現され、その分も企業により生産される。
- 7) すべての市場は完全競争的であり、長期的均衡状態にある。

(2) 企業の行動モデル

まず、以下のように変数を設定する。

$i \in I = \{1, 2, \dots, I\}$: 財の発地(生産地)の地域

$j \in J = \{1, 2, \dots, J\}$: 財の着地(消費地)の地域

$m \in M = \{1, 2, \dots, m, \dots, M\}$: 産業の種別

地域*i*に立地し産業*m*の財を生産する企業は、労働力と資本を用いて、図-1に示すような生産構造の生産技術を用いて財を生産すると仮定する。

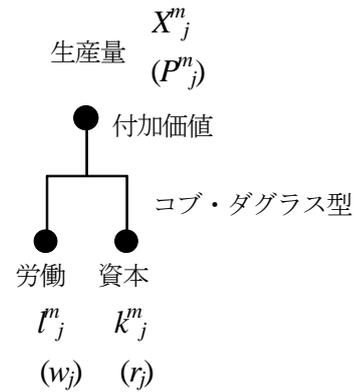


図-1 企業の生産構造

企業の財生産行動は、以下のように付加価値1単位を生産することを制約とした、費用最小化行動として定式化する。

$$\min_{l_j^m, k_j^m} w_j l_j^m + r_j k_j^m \quad (1)$$

$$s.t. VA_j^m(l_j^m, k_j^m) = X_j^m(l_j^m, k_j^m) = 1$$

ただし、 w_j : 労働賃金率、 r_j : 資本レント、 l_j^m : 労働投入量、 k_j^m : 資本投入量、 VA_j^m : 付加価値関数、 X_j^m : 生産関数である。

付加価値関数は労働と資本の規模に関して収穫一定を仮定したコブ・ダグラス型を仮定する。

$$VA_j^m(l_j^m, k_j^m) = X_j^m(l_j^m, k_j^m) = \eta_j^m l_j^{\alpha_j^m} k_j^{1-\alpha_j^m} \quad (2)$$

ただし、 η_j^m : 生産効率パラメータ、 α_j^m : 分配パラメータである。

式(1)の最適化問題を解くと、以下の様に付加価値1単位当たりの労働と資本の要素需要関数が求まる。

$$D_{ij}^m(w_j, r_j) = \frac{\alpha_j^m}{w_j} \frac{1}{\eta_j^m} \left(\frac{w_j}{\alpha_j^m} \right)^{\alpha_j^m} \left(\frac{r_j}{1 - \alpha_j^m} \right)^{1 - \alpha_j^m} \quad (3)$$

$$D_{kj}^m(w_j, r_j) = \frac{1 - \alpha_j^m}{r_j} \frac{1}{\eta_j^m} \left(\frac{w_j}{\alpha_j^m} \right)^{\alpha_j^m} \left(\frac{r_j}{1 - \alpha_j^m} \right)^{1 - \alpha_j^m}$$

(3) 家計の行動モデル

地域jには代表的家計が存在し、自地域と他地域の財を消費する。そして、家計は図-2に示すような入れ子型のCES型効用関数を持つと仮定する。第一段階においては、財の消費合成財の代替関係をCES型で表現する。第二段階においては、自地域の財・サービスと他地域の財・サービスの代替関係をCES型で表現する。

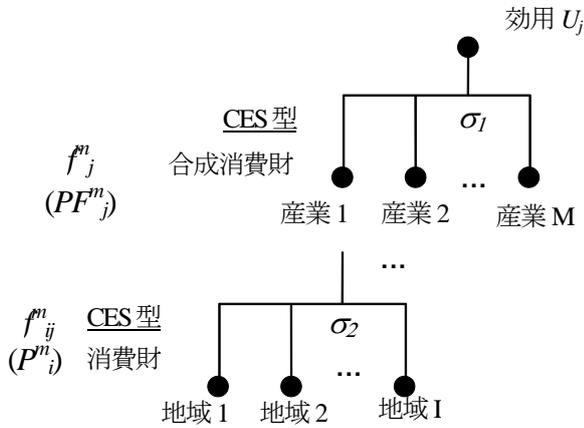


図-2 家計の効用関数の階層構造

第一段階では、所得制約下の家計の効用最大化行動として定式化する。ここで、事例分析の際に必要な地域間での所得移転を所得制約式に考慮する。この地域間所得移転額は経済全体では合計がゼロとなる。また、地域間所得移転額は全地域で固定とし、これはニューメーラル財としての役割を果たしている。

$$V_j = \max_{(f_j^m)_{m \in M}} U_j(f_j^1, \dots, f_j^m) \quad (4)$$

$$s.t. \sum_{m \in M} PF_j^m f_j^m = w_j L_j + r_j K_j - NX_j$$

ただし、 V_j ：間接効用関数、 U_j ：直接効用関数、 f_j^m ：地域jの家計の産業mの財の消費合成財消費量、 L_j ：地域jの労働供給量、 K_j ：地域jの資本保有量、 PF_j^m ：地域j産業mの財の消費合成財価格、 NX_j ：地域jの所得移転である。

ここで、効用関数をCES型により定式化する。

$$U_j(f_j^1, \dots, f_j^m) = \left(\sum_{m \in M} \gamma_j^m f_j^m \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_1} \right)^{\frac{\sigma_1}{\sigma_1 - 1}} \quad (5)$$

ただし、 σ_1 ：消費合成財に関する代替弾力性、 γ_j^m ：消費財に関する分配パラメータである。

式(4)の最適化問題を解くと、産業mの消費合成財の消費量は以下のように w_j, r_j, PF_j^m の関数として求まる。

$$f_j^m = f_j^m(w_j, r_j, PF_j^m) = \left(\frac{\gamma_j^m}{PF_j^m} \right)^{\sigma_1} \frac{w_j L_j + r_j K_j - NX_j}{\sum_{m \in M} \gamma_j^m \sigma_1 PF_j^m \sigma_1^{-1}} \quad (6)$$

第二段階は、以下のように合成消費財消費制約下での家計の費用最小化行動として定式化する。

$$\min_{(f_{ij}^m)_{m \in M, i \in I}} \sum (1 + \alpha_{ij}) P_i^m f_{ij}^m \quad (7)$$

$$s.t. f_j^m = \psi_j^m \left(\sum_{i \in I} \gamma_{ij}^m f_{ij}^m \frac{\sigma_2 - 1}{\sigma_2} \right)^{\frac{\sigma_2}{\sigma_2 - 1}}$$

ただし、 t_{ij} ：一般化費用（道路利用）、 α ：パラメータ、 P_i^m ：地域産業mの財の生産地価格、 f_{ij}^m ：地域jの家計が消費する地域産業mの財消費量、 ψ_j^m ：消費合成財換算パラメータ、 γ_{ij}^m ：財消費シェアパラメータ、 σ_2 ：消費財に関する代替弾力性である。 α_{ij} は輸送マージン率であり、財価格を1としたときの輸送費の割合である。

式(7)の最適化問題を解くと、産業mの消費財消費量は以下のように f_j^m, P_j^m, PF_j^m の関数として求まる。

$$f_{ij}^m = f_{ij}^m(f_j^m, P_j^m, PF_j^m) = \left[\frac{\gamma_{ij}^m}{(1 + \alpha_{ij}) P_j^m} \right]^{\sigma_2} \psi_j^{m(\sigma_2 - 1)} PF_j^{m\sigma_2} f_j^m \quad (8)$$

また、産業mの消費合成財価格は、式(7)の最適化問題に付随するラグランジュ乗数の逆数より以下のように P_j^m の関数として求まる。

$$PF_j^m = PF_j^m(P_j^m) = \frac{1}{\psi_j^m} \left[\sum_{i \in I} \gamma_{ij}^m \sigma_2 [(1 + \alpha_{ij}) P_j^m]^{-\sigma_2} \right]^{\frac{1}{1 - \sigma_2}} \quad (9)$$

さらに、生産関数が規模に関して収穫一定であるため、企業の超過利潤はゼロとなる。したがって、財価格は単位生産量あたりの生産費用（平均費用）に等しくなる。