

S-3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案
手法の確立に関する総合研究プロジェクト

3. 都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価

(7) 都市における需要変化に伴う誘発二酸化炭素排出量変化

東京大学

新領域創成科学研究科

吉田好邦

〔要旨〕昨年度の成果である産業連関表を用いた誘発二酸化炭素排出量の分析から得られた結果のひとつとして、運輸部門におけるCO₂排出量の削減が大きな効果を持つことが示唆された。この結果を踏まえ今年度は都市間の貨物物流に着目し、需要変化に伴って誘発される貨物物流におけるCO₂排出量を評価した。本研究では物流の波及に注目した地域間の物流構造の新しい計算手法を提案している。データとしては、物流に関して公表されているもののうち最も代表的なデータベースである「物流センサス」を利用する。本手法で評価する物流は2つある。ひとつは生産から消費に向かって、すなわち上流から下流に物の流れをみることによる派生物流である。派生物流はある製品が生産されたときにそれが最終消費者に搬送されるまでに発生する地域間の物流をさす。もうひとつは下流から上流に向かって、消費に由来して誘発される物の流れをみることによる誘導物流である。誘導物流では、最終消費者が消費する製品の製造過程をさかのぼるときに、製造過程で地域間に発生する物流をさす。本手法は各種産業の生産や家計の消費行動と物流との関係を接続する物流産業連関分析といえる。北海道で農水産品が1トン生産されたときの派生物流を計算すると、農水産品の生産による物流は、農水産品自体の搬送にとどまらず、軽工業品（加工食品を含む）等に形を変えて各地域に物流を誘発する。本手法の応用事例として、鉄道、海運へのモーダルシフトのCO₂削減ポテンシャルを検討した。軽工業品・金属機械工業品のモーダルシフト効果が大きく、シフト率30%でそれぞれ100万トン程度のCO₂削減ポテンシャルを有することが示された。

〔キーワード〕誘導物流、派生物流、産業連関分析、最終需要、モーダルシフト

1. はじめに

運輸部門のCO₂削減策を考えると、貨物物流の影響は甚大である。物流の効率化については近年各方面において様々な対策が実践されつつあるが、その潜在的な削減効果を包括的に検討した例はない。本研究では物流の波及に注目した地域間の物流量の新しい計算手法を提案し、モーダルシフト等のCO₂排出削減ポテンシャルの分析に適用する。使用するデータは、物流に関する公表データのうち最も代表的なデータベースである全国貨物純流動調査（物流センサス）¹⁾である。

2. 研究目的

本手法で評価する物流は2つある。ひとつは生産から消費に向かって、すなわち上流から下流に物の流れをみることによる派生物流である。派生物流はある製品が生産されたときにそれが最終消費者に搬送されるまでに発生する地域間の物流をさす。もうひとつは下流から上流に向かって、消費に由来して誘発される物の流れをみることによる誘導物流である。誘導物流では、最終消費者が消費する製品の製造過程をさかのぼるときに、地域間に発生する物流をさす。本稿では紙面の制約により誘導物流について主に述べるが、本手法は各種産業の生産や家計の消費行動と物流との関係を接続する、いわば物流産業連関分析といえる。都道府県間物流の手段（陸上、鉄道、船舶などの種別）については物流センサスにデータが存在するため、県間の物流削減量が得られることによる、モーダルシフトによる効果の分析を行う。

3. 研究方法

(1) 派生物流

派生物流はある製品が生産されたときにそれが最終消費者に搬送されるまでに発生する地域間の物流をさす。以下にある製品が生産されたときに発生する物流が、どの県の何の最終需要に誘発された物流かに分類する手法を示す。

① 派生物流行列 $X_c^{(k)}$

ij 成分は i 県から j 県への出荷量を表す。行列は品目別にある。ある派生物流行列に対して、追って物流が発生する。順次派生する物流は最終消費者に届けられたものを控除して次の物流が派生する仕組みで、収束するまで順次発生する。

② 派生物流行列の最終需要帰属量行列 $D_c^{(k)}$

k 回目の派生物流行列 $X_c^{(k)}$ のうち、最終消費者に届けられるものの量。

③ 中間需要行列 F_c

品目 c 別にある対角行列。 ii 成分は i 県における品目 c の中間需要率。中間需要率とは、中間需要を中間需要と最終需要の和である総需要で除した値。中間需要率は産業連関表より算出する。

④ 入荷行列 $N^{(k)}$

ij 成分は k 回目の派生物流における品目 i の j 県への入荷量である。

⑤ 産出係数行列 A

ij 成分は、品目 j の1単位の入荷量に対して出荷される品目 i の量を表す。この行列は地域差を考慮せず、入荷構造を表す U 表と出荷構造を表す V 表、歩留まり行列 E の積 VEU によって得られる。

⑥ U 表

入荷構造を表す。 ij 成分は、品目 j の1単位の入荷量のうち、産業 i に投入される量を表す。したがって、各列の和は1となる。

⑦ V 表

出荷構造を表す。 ij 成分は、産業 j の1単位の出荷量のうち、品目 i の量を表す。したがって各列の

和は1となる。

⑧ 歩留まり行列 E

入荷量に対する出荷量の重量比を対角成分に並べた行列。ii成分が産業iの歩留まり率を表す。

⑨ 出荷行列 $S^{(k)}$

ij成分はk回目の派生物流における品目iのj県からの出荷量である。

⑩ 県間移出行列 R_c

品目別にある。ij成分は品目cがi県から1単位出荷されたときのj県へのお荷量を表す。したがって、各行の和は1である。

以上の行列を用いて派生物流は以下のように計算できる。まず品目cのk回目の派生物流行列を $X_c^{(k)}$ とする。このk回目の派生物流のうち、最終需要に帰属する物流量は $D_c^{(k)} = X_x^{(k)}(I - F_c)$ となる。最終消費者に渡ったこの物流を除いた量 $X_x^{(k)}F_c$ が、中間需要として、各産業へのお荷量となる。入荷行列 $N^{(k)}$ は、 e を全成分が1の横ベクトル $(1 \ \cdots \ 1)$ とし、 $n_c^{(k)} = eX_x^{(k)}F_c$ とすると、 $N^{(k)} = (n_1^{(k)} \ \cdots \ n_c^{(k)})^t$ となる。ただしCは品目の総数である。産出係数行列を A とすると、出荷行列 $S^{(k)}$ は、 $S^{(k)} = AN^{(k)}$ となる。 $S^{(k)}$ を品目別に $S^{(k)} = (s_1^{(k)} \ \cdots \ s_c^{(k)})^t$ と表し、 $s_c^{(k)}$ の成分を対角に並べた対角行列を $\hat{S}_c^{(k)}$ とすると、k+1回目に派生する物流は、 $X_c^{(k+1)} = \hat{S}_c^{(k)}R_c$ となる。ただし、 R_c は県間移出行列である。

以上の枠組みにより、派生物流行列が順次求められる。最初の派生物流行列 $X_c^{(0)}$ を、
 $c = c^*$ のとき

$$X_c^{(0)} = (\delta_{ij}) \quad (ij \text{成分のみが} 1 \text{ で他の成分は} 0)$$

それ以外のとき

$$X_c^{(0)} = O \quad (\text{零行列})$$

となるような行列のセットをすべての品目 c^* と県i、県jの組み合わせについて用意し、派生物流行列を求める。これによって、県iから県jに1単位の品目 c^* の物流が発生したときに、派生物流が求められる。累積の物流量は、 $X_c = \sum_{k=0}^{\infty} X_c^{(k)}$ によって求められる。 Σ は収束状況を見ながら適宜打ち切る。同様にして、最初の1単位の物流を最終需要に帰属させると、品目cについて、

$$D_c = \sum_{k=0}^{\infty} X_c^{(k)}(1 - F_c) \text{ となる。}$$

次に、実際の物流量との整合をとるために、上で求めた単位物流に対する累積の派生物流量 X_c の大きさを調整する。すなわち最初に与える初期物流 $X_c^{(0)}$ の成分を1ではなく、スケール調整して、物流センサスの品目別県間移出量 X_c^{real} のデータに整合するようにさせる。

(2) 誘導物流

誘導物流は、最終消費者が消費する製品の製造過程をさかのぼるときに、製造過程で地域間に発生する物流をさす。産業連関分析では最終需要に由来する生産を求めるが、同様に最終需要に由来して発生する地域間の物流をとらえたい場合に、以下に示す導出手法による誘導物流を用いる。まず必要となるデータ・用語についてまとめる。

① 誘導物流行列 $X_c^{(k)}$

ij 成分が県*i*から県*j*への年間出荷量を表す品目*c*別の行列。物流は需要に対して誘発する生産を求める度に発生するが、添え字*k*は波及する生産の回数を表し、最終需要の生産による誘導物流における*k*の値が1である。すべての*k*について $X_c^{(k)}$ の和をとることにより（収束計算により）、品目*c*別に全誘導物流が求められる。

② 波及需要量行列 $F_c^{(k)}$

品目*c*別にある対角行列。その*ii*成分は、*k*回目の生産の波及によって県*i*において発生する品目*c*の需要量である。

③ 入荷係数行列 B

ij 成分は、産業*j*の1単位の入荷量のうち、品目*i*の占める量を表す。したがって、各列の和は1となる。この行列は物流センサスの「産業業種・品類別年間入荷量」の表から計算される。

④ 出荷係数行列 D

ij 成分は、品目*j*の1単位の出荷量のうち、産業*i*から出荷される量を表す。したがって各列の和は1となる。この行列は物流センサスの「産業業種・品類別年間出荷量」の表から計算される。

⑤ 歩留まり行列 E

入荷量に対する出荷量の重量比を対角成分に並べた行列。 ii 成分が産業*i*の歩留まり率を表す。

⑥ 投入係数行列 A

ij 成分は、品目*j*の1単位の出荷量に対して入荷される品目*i*の量を表す。この行列は入荷構造を表す B と出荷構造を表す D 、歩留まり行列 E の積 BED によって得られる。

⑦ 入荷行列 $N^{(k)}$

ij 成分は*k*回目の生産の波及の結果必要となる、品目*i*の県*j*への入荷量を表す。

⑧ 出荷行列 $S^{(k)}$

ij 成分は*k*回目の生産の波及の結果必要となる、品目*j*の県*i*からの出荷量を表す。

⑨ 県間移入行列 R_c

品目c別にある。ij成分は品目cが県jに1単位輸送されたときの県iからの輸送量を表す。したがって、各列の和は1である。この行列は「都道府県間流動量（品類別）」の表から計算される。

以上の行列を用いた誘導物流の計算方法は以下になる。まずk回目の生産の波及において、品目cの需要 $D_c^{(k)}$ が発生しているとする。k回目の誘導物流行列 $X_c^{(k)}$ は県間移入行列 R_c に乗じて、

$X_c^{(k)} = R_c F_c^{(k)}$ によって得られる。得られた誘導物流行列 $X_c^{(k)}$ の行和を求めることにより各県で都

合必要となる品目cの出荷量を求める。つまり \mathbf{e} を全成分が1の縦ベクトル $(1 \ \cdots \ 1)^t$ とし、

$\mathbf{s}_c^{(k)} = X_c^{(k)} \mathbf{e}$ とすると、出荷行列 $S^{(k)}$ は、 $S^{(k)} = (\mathbf{s}_1^{(k)} \ \cdots \ \mathbf{s}_c^{(k)})$ となる。ただしCは品目の総数で

ある。次に投入係数行列を A とすると、入荷行列 $N^{(k)}$ は、 $N^{(k)} = A(S^{(k)})^t$ となる。 $N^{(k)}$ を品目別

に $N^{(k)} = (\mathbf{n}_1^{(k)} \ \cdots \ \mathbf{n}_c^{(k)})^t$ と表し、 $\mathbf{n}_c^{(k)}$ の成分を対角に並べた対角行列を、k+1回目の生産の波及

需要量 $F_c^{(k+1)}$ とする。以上の手続きを繰り返すことにより、誘導物流行列が順次求められる。最初

の波及需要量 $F_c^{(0)}$ を、最終需要によって与えることにより、最終需要により誘発される物流を求めることができる。

(3) 誘導物流の計算例

東京都において金属機械工業品の需要が1トン発生した場合の誘導物流量を計算した結果を示す。表1は品類別に表した誘導物流量であり、図1は重量が大きい誘導物流を、地方別に抜粋したものである。表1より東京都で1トンの金属機械工業品を最終需要として消費することに誘発されて、全国全品類について10.7トンの物流が発生することがわかる。金属機械工業品そのものよりも、材料となる鋳製品の流動量が多い。また、図1から、実際に需要が発生した東京都を含む関東に関わる流通以外にも、金属機械工業が盛んな東海地方でも大きな物流が発生していることが示唆される。図2は、誘導物流を出荷した具体的な県を、品類別に図示したものであり、図3は同様に誘導物流を入荷した県を示している。出荷物流が比較的全国に分散しているのに対し、入荷物流は東京都に偏っており、全国の物流が東京都に集まる現況を表している。また、金属機械工業品を入荷した割合は東京都だけが極端に多く、他の県は鋳製品を入荷している。このことは千葉県、愛知県、大阪府などが、入荷した鋳製品を金属機械工業品に加工して出荷していることを示唆している。

表1 品別誘導物流量

品類	誘導物流量 (kg)
農水産品	550
林産品	219
鉱産品	5,216
金属機械工業品	2,421
化学工業品	1,279
軽工業品	413
雑工業品	184
特殊品	372
合計	10,654

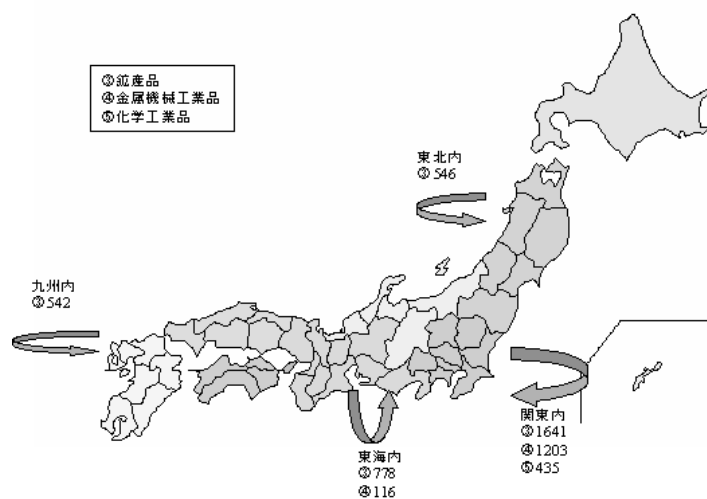


図1 東京都における金属機械工業品1トンによる誘導物流

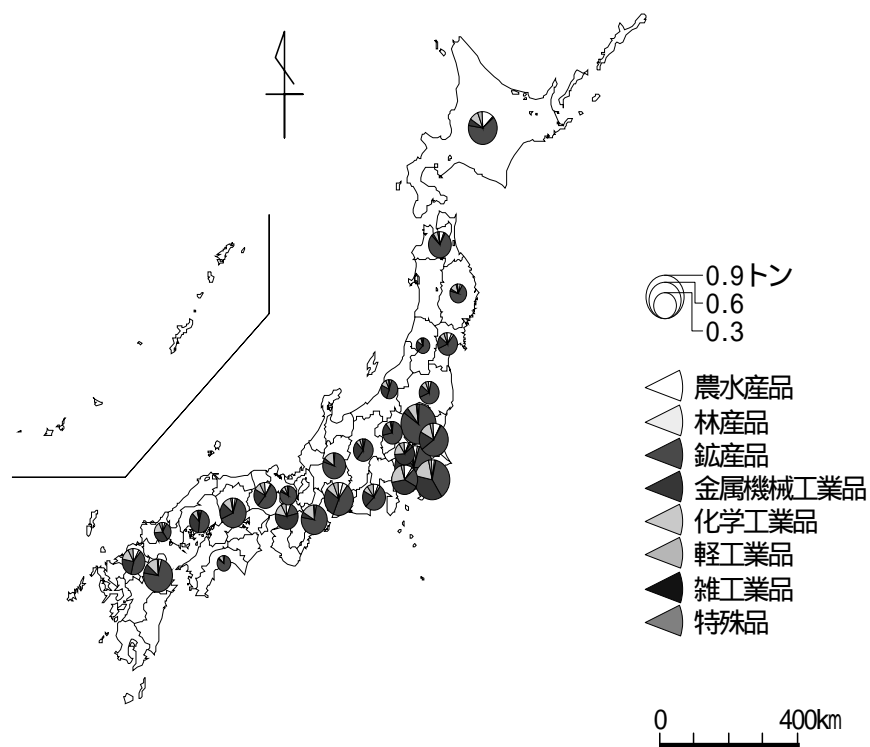


図2 東京都における金属機械工業品1トンによる誘導物流の出荷都道府県

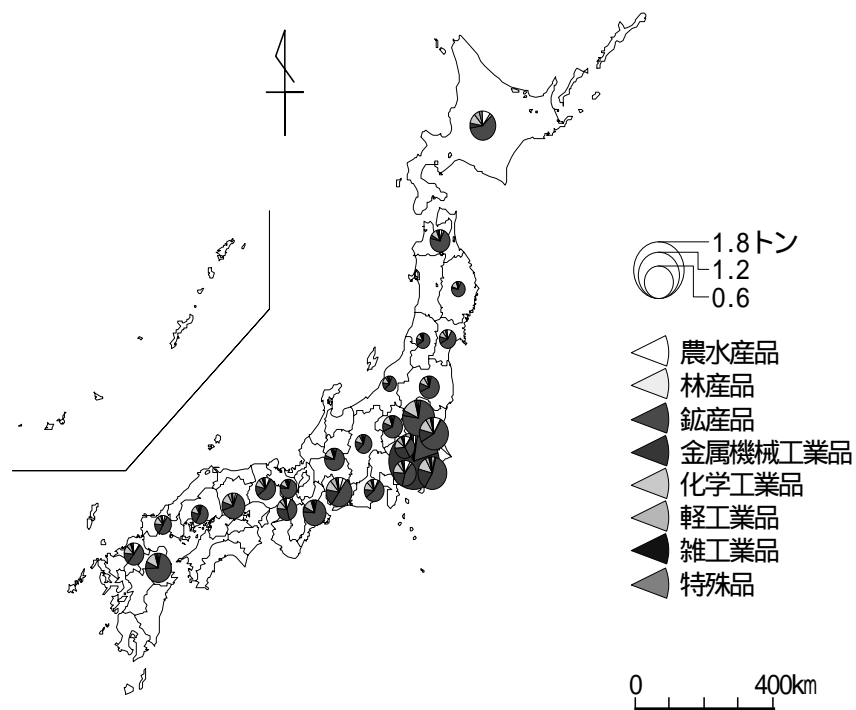


図3 東京都における金属機械工業品1トンによる誘導物流の入荷都道府県

4. 結果・考察

(1) CO₂排出量の計算

物流量からCO₂排出量への換算はトンキロ法による。トンキロ法はCO₂排出量を物流量(t)、距離(km)、排出原単位(g・/t・km)の積でもとめる手法である。また物流センサスの「都道府県・代表輸送機関別年間出荷量(品類別)」によって、発都道府県、品類別に輸送機関の使用比率を知ることができる。各県を結ぶ輸送距離は、県庁所在地間の距離を使用した。以上の方法で全流動量によるCO₂排出量を求めた結果、約111(百万トン)となり、貨物部門から排出される排出量約106(百万トン)⁴⁾と概ね整合的であり、計算手法の妥当性を確認した。

東京都または愛知県で金属機械工業品の最終需要が1トン発生した場合の誘導物流から排出されるCO₂の量を求め、品類別に分類したものが図4である。誘導流動量の多い鉱産品と金属機械工業品は、CO₂排出量も大きい。東京都で需要が発生した場合よりも、愛知県で需要が発生した場合の方が誘導物流の発生した範囲が狭いことにより、東京都と愛知県の排出量に差が生じている。

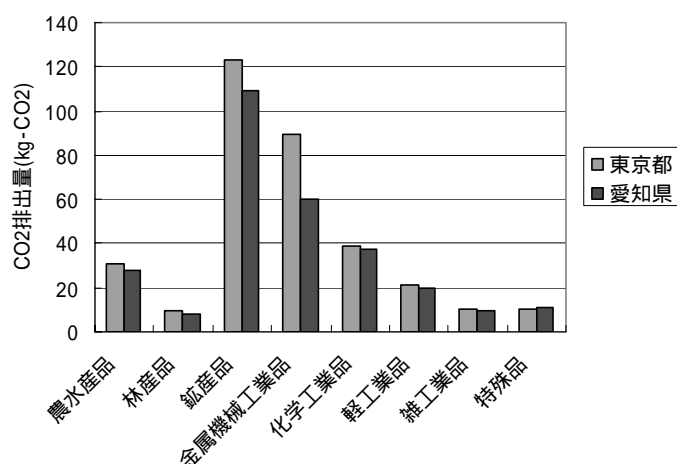


図4 金属機械工業品1トンによる誘導物流の品目別CO₂排出量

(2) モーダルシフトによるCO₂削減

政府が2001年に策定した「新総合物流施策大綱」⁵⁾では、環境負荷を低減させる物流体系の構築と循環型社会への貢献を目標に、2010年までにモーダルシフト化率(500キロ以上での鉄道、海運の利用率)を50%まで向上させるとしている。輸送手段の選択権は貨物の運搬側が握っているわけではなく、少量他頻度配送などの荷主側の要求に応えることを優先する傾向にあるので、貨物業界の一存でモーダルシフトを実施することには限界がある。したがって、本節では荷主に着目してモーダルシフトを検討するために、誘導物流を求める計算を用いて、需要品類別にその品類が運搬される過程の流通におけるモーダルシフト効果を求める。モーダルシフトは自動車輸送を鉄道と海運にシフトするとした。また農水産品の輸送は鮮度等の理由を考慮しモーダルシフトの対象外とする。

図5の棒グラフは1年間の品目別の最終需要量に由来する誘導物流を求め、モーダルシフトによるCO₂削減効果を計算した結果である。この図は最終需要品を生産する過程に関わる産業が、誘導物流における輸送機関をモーダルシフトすることによって達成できるCO₂削減量を示している。農

水産品そのものを運搬する物流でモーダルシフトを実施しなくても、農水産品を消費者に届けるまでに関わった他の品類を運搬する物流のモーダルシフト率を30%に引き上げるにより、約32万トンのCO₂削減となる。また政府が目標としているモーダルシフト率は50%であるが、農水産品以外の全ての物流において30%のシフトを達成すれば、目標である440万トンのCO₂削減が可能である。図5の折れ線は最終需要品類による誘導物流量の合計を示したものである。誘導物流量の大きい金属機械工業品と化学工業品は、CO₂削減の効果も大きい。一方、軽工業品は誘導物流量が比較的小さい割にモーダルシフトの効果が大きい、これは食料品が分類上軽工業に含まれ、自動車輸送の割合が高いことが原因と考えられる。

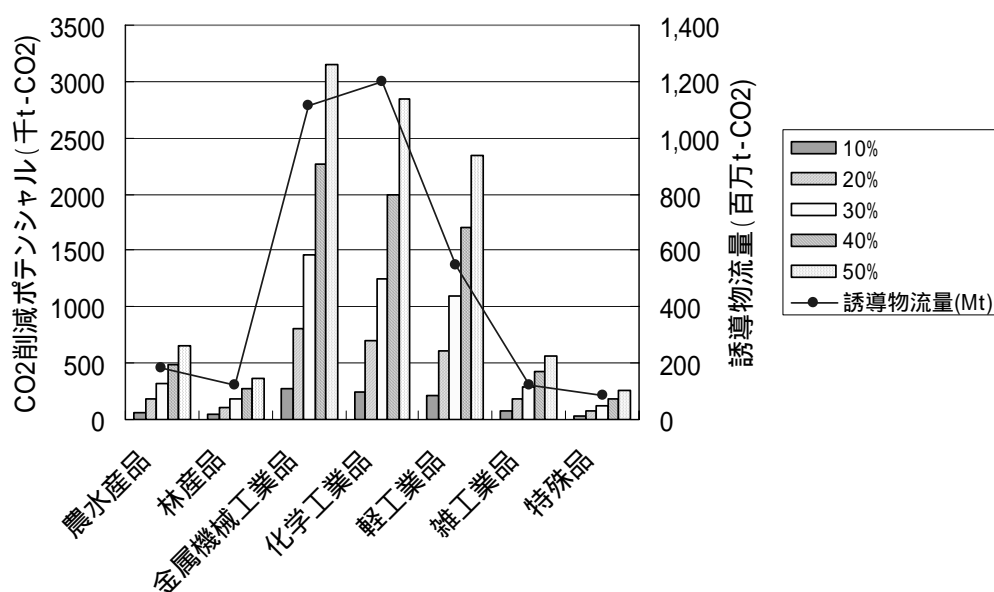


図5 各品目の誘導物流におけるモーダルシフト率とCO₂削減量

5. 本研究により得られた成果

本研究では物流の波及に注目した地域間の物流量の新しい計算手法を提案し、最終消費者が消費する製品の製造過程をさかのぼるときに地域間に発生する物流である誘導物流を求めることによって、物流の波及量と地域特性を明らかにし、モーダルシフトによるCO₂排出削減ポテンシャルを評価した。農水産品以外の全ての物流において30%のモーダルシフトを達成すれば、政府目標である440万トンのCO₂削減が見込まれる。

本手法は各種産業の生産や家計の消費行動と物流との関係を接続する、いわば物流産業連関分析といえる。派生物流の分析を含め、今後幅広い応用の可能性が期待できる。

6. 引用文献

- 1) 国土交通省、「第7回全国貨物物流調査(物流センサス)」
- 2) 村越福雄, 徳永幸之, 須田 熙,「地域間物流産業連関表に関する基礎的研究」, 土木学会第43回年次学術講演会(1987)

- 3) 環境省,「運輸部門及び民生部門の温室効果ガス排出量の変化について」
- 4) 環境省,「2002年度の温室効果ガス排出量増減の要因について」(2002)
- 5) 国土交通省,経済産業省「新総合物流施策大綱」(2001)

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

＜論文(査読あり)＞

- ① 長谷川貴彦, 吉田好邦, 松橋隆治, 「消費者の選好を考慮した燃料電池自動車の普及可能性評価」, エネルギー・資源, 27巻, 2号(2006), 46-52.
- ② 浅野琢, 松橋隆治, 吉田好邦, 行本正雄, 「地域特性を考慮したDME・発電ハイブリッドシステムの設計・評価」日本エネルギー学会誌, 85巻, 1号(2006), 58-65.

＜その他誌上発表(査読なし)＞

- ① 吉田好邦, 「まちづくりのためのエネルギー消費の選好分析」, 環境研究141号(2006), 17-21.

(2) 口頭発表(学会)

- ① 金山真之, 松橋隆治, 吉田好邦, 「住宅用太陽光発電の普及に関する研究」, 第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集(2006), 129-132.
- ② 齊藤周, 松橋隆治, 吉田好邦, 「家電製品への消費者選好を考慮した家庭のエネルギー需要予測」, 第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集(2006), 663-666.
- ③ 吉田好邦, 西森千紗, 松橋隆治, 「物流の波及を考慮した貨物輸送の地域連関」, 第25回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集(2006)(原稿提出済み)

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、本プロジェクトの活動本体、ならびに関係する学会などを通じ、成果の広報・普及に努める。