

高速貨物輸送機関の導入がモーダルシフトに及ぼす効果の分析*

A Study on the Modal-shift Effect of a High Speed Freight Transport System

井村幸代**・浅野光行***

By Sachiyo IMURA**・Mituyuki ASANO***

1. 背景と目的

近年の環境意識の高まりを受けて、運輸部門において環境負荷の高いトラック輸送から、環境にやさしい海運・鉄道への転換としてモーダルシフトが注目されている。しかし、鉄道輸送は時間的な問題に加え、その輸送力自体が小さく、モーダルシフトの効果はあまり期待できないことが指摘されている。このような背景を受けて、高速性かつ環境にやさしい輸送機関として、新幹線などの高速輸送機関を用いた貨物輸送が注目されている。本研究では、物流量の多い東海道・山陽新幹線エリアをケーススタディーとして、新幹線と同等の高速貨物輸送機関の導入がモーダルシフトに及ぼす影響を犠牲量モデルと呼ばれるモデルを用いて検証し、さらにその環境効果（CO2 排出削減効果）について分析する。その際に、炭素税などの政策の導入がなされた場合の効果なども合わせて考察していくこととする。

2. 対象地域およびデータ

対象地域は、東海道・山陽新幹線の駅を持つ5県（東京、愛知、大阪、広島、福岡）にある駅を停車駅と決め、その物流背後圏15県を含む全20県間の物流を対象とする。

物流データは、2000年に実施された第7回全国貨物純流動調査の「3日間調査」のデータの中から、発着県毎、品目毎、輸送機関毎の輸送費用、物流時間、重量のデータを用いる。その際に、データの欠落が多数存在したため、発着県、品目、輸送機関毎に費用、時間の輸送重量を重みとする加重平均値を求め、その値を用いることとした。また、距離のデータは、鉄道、高速輸送機関はJR時刻表より、トラックは全国貨物自動車営業キロ程図より、海運はフェリー・旅客船ガイドより、航空は航空会社の時刻表より算出した。

なお、今回の研究の前提条件としてインフラの整備に関する費用等は考慮しないものとする。

*キーワード：モーダルシフト、高速輸送機関、炭素税

**学生員、早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻

***フェロー会員、工博、早稲田大学理工学部社会環境工学科教授

(東京都新宿区大久保3-4-1 51号館15階07室、
TEL03-5286-3408、FAX03-5272-9723)

3. 犠牲量モデル

犠牲量モデルは、交通機関別交通量を推定する際に用いられるモデルで、利用者は損失（犠牲量）が最小になるように交通機関を選択すると仮定するものである。犠牲量の主たる要因として運賃と所要時間があり、次のような式1が用いられる。

$$S = C + d \cdot T$$

ここで、 S は犠牲量（円）、 C は運賃・料金（円）、 T は所要時間（時）、 d は時間価値（円/時）である。

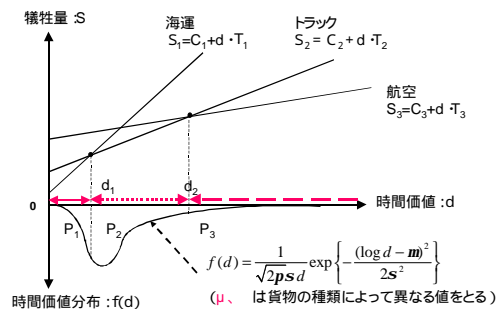


図1 犠牲量モデルの考え方

図1は、ある2地点間において海運、トラック、航空の3つの輸送機関が競争する場合を示す。図中の横軸は、貨物の時間価値で、縦軸の上側は犠牲量との関係を、下側は確率密度との関係を示す。

これにより、各輸送機関の分担率(P_1, P_2, P_3)は以下のようなになる。

$$P_1 = \int_0^{d_1} f(d) dd \quad P_2 = \int_{d_1}^{d_2} f(d) dd \quad P_3 = \int_{d_2}^{\infty} f(d) dd$$

ただし、 $\int_0^{\infty} f(d) dd = 1$ である。

ここで、各貨物の時間評価値分布 $f(d)$ はグラフ下部の対数正規分布によって示され、次式で表される。

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\psi s d}} \exp \left\{ -\frac{(\log d - m)^2}{2s^2} \right\}$$

($0 < d < \infty$)

ここに、 μ は限界代替率の対数平均値、 σ は限界代替率の対数の標準偏差を表し、貨物の種類によって異なる。

4. 時間価値パラメータの推定

(1) 推定方法

累積確率 (P) の逆関数値 (F^{-1}) が時間価値の対数 ($\ln d$) と線形関係になることから、物流データから競合

する輸送機関毎にこの2つの値を求めることができれば、最小二乗法を用いて傾き ($1/\mu$) と切片 ($-\mu/\sigma$) を求めることができ、この結果を元に対数正規分布のパラメータ (μ, σ) を推定することができる。

(2) 推定結果

既存の 8 品類 79 品目の分類を特性の類似した 15 品目に分類し、時間価値分布の推定を行った。

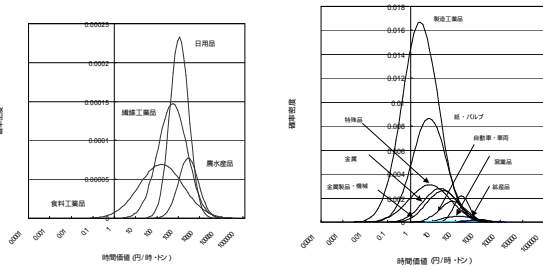


図2 時間価値分布の推定結果

表1 各輸送機関の輸送特性

貨物の分類	μ	モード	メディアン
農水産品	9,049	1,085	2621.094
林産品			8506.252
紙産品	5,747	0,788	168.375
金属	5,892	1,724	18,550
金属製品・機械	5,859	1,631	24,482
自動車・車両	6,062	1,368	86,119
医薬品	7,491	1,620	130,101
石油・石炭製品			
化学工業品	8,574	4,454	0,000
紙・パルプ	4,774	1,727	6,003
繊維工業品	8,708	1,594	476,119
食料工業品	10,625	2,383	140,748
日用品	7,944	1,025	985,521
製造工業品	4,266	1,846	2,358
特殊品	6,363	2,127	6,281

5. 犠牲量モデルの検証

求められた時間価値分布を使用して、構築した犠牲量モデルの再現性の検証を行う。

ここで、誤差率は (実績値 - 推定値) / 実績値として求められる値で実績値と異なる輸送機関を選択した場合の輸送量の誤差を実績値で割った値である。

総輸送量としての誤差は 8.2% とかなり良好な値をとることができた。品目ごとの誤差は林産品、石油・石炭製品を除くすべての品目に関して良好な結果を得ることができた。

6. 貨物の品目特性の把握と対象貨物の選定

3日間調査のデータより時間価値の高かつ輸送単価の高い高付加価値品目で、比較的軽量小口の品目を抽出した結果、本研究では農水産品、日用品、繊維工業品、食料工業品、金属製品・機械、自動車部品・車両の6品目を対象貨物として選定することとした。

表2 各輸送機関の輸送特性

	迅速性 (所要時間)	低廉性 (運賃)	輸送力 (輸送可能量、流動ロット)	ターゲットとなる品目の特徴
鉄道	比較的短い	割安	比較的大量に輸送可能 流動ロット比較的小さい (トラックより大きい)	輸送単価が安く重量が大きな品目
トラック	比較的短い	比較的割安	大量輸送できない 多頻度小口輸送 流動ロット小さい	比較的輸送単価が高く 時間価値の比較的高い品目 日用品などの多頻度小口輸送の品目
海運	非常に長い	割安	大量輸送可能 流動ロット非常に大きい	時間価値が低い品目 輸送単価が安く重量が大きな品目
航空	非常に短い	非常に割高	大量輸送できない 小口輸送 流動ロット非常に小さい	時間価値の高い高付加価値品目 輸送単価が高く重量の小さい 軽量貨物
高速貨物輸送機関	短い	比較的割高 と予想される	比較的大量に輸送可能 高速性実現のため、鉄道 ほどの輸送力はない	時間価値の高い高付加価値品目 輸送単価が高く重量の小さい 軽量貨物

7. シナリオ1 (高速輸送機関の導入) の分析

(1) シナリオの概要

シナリオ1においては、既存の4つの輸送機関(鉄道、トラック、海運、航空)に加えて、新たに高速輸送機関が導入された場合の輸送機関分担の変化から、高速輸送機関へのモーダルシフトの算定を行う。そこで、高速輸送機関の運賃と物流時間の設定を以下のように行った。

< 幹線の運賃、輸送時間 >

運賃は東海道・山陽新幹線の運賃設定を参考に、東京~新大阪間を基準の1として、各駅間の運賃比率を求め、その値に30000(円/トン)を乗じることで、各駅間の運賃を設定した。輸送時間は東海道・山陽新幹線の各駅間の所要時間を参考に、JR時刻表より算出した。

< 端末のトラック運賃、輸送時間 >

物流背後圏から停車駅のある県までの集荷・配送の運賃、輸送時間は全国貨物純流動調査のトラックによる県間流動のデータを用いてトラックによる県間別、品目別の輸送重量を重みとする加重平均値を用いた。

(2) 高速輸送機関の導入によるモーダルシフト

(1)の設定のもと犠牲量モデルによる輸送機関分担の算定を行い、その結果に基づき品目、輸送機関毎のモーダルシフト率の算定を行った結果を表に示す。

表3 品目、輸送機関ごとのモーダルシフト率

	鉄道	トラック	海運	航空	高速輸送機関
農水産品	0.000%	-0.685%	0.000%	-0.013%	0.698%
金属製品・機械	-0.020%	-0.203%	0.000%	-0.005%	0.227%
自動車部品・車両	-0.014%	-0.123%	-0.011%	0.000%	0.148%
繊維工業品	0.000%	-0.164%	0.000%	0.000%	0.164%
食料工業品	-0.071%	-1.417%	0.000%	-0.001%	1.489%
日用品	-0.035%	-0.309%	0.000%	-0.005%	0.350%
合計	-0.141%	-2.900%	-0.011%	-0.025%	3.076%

(3) 運賃の変化に伴うモーダルシフト量の変化

(1)で設定した運賃を基準として、2倍、3倍と運賃を変化させて、それに伴うモーダルシフト量の変化を分析した結果を図3、表4に示す。

表4 運賃変化に伴うモーダルシフト率の変化

	鉄道	トラック	海運	航空	高速輸送機関
1倍	-0.141%	-2.900%	-0.011%	-0.025%	3.076%
2倍	-0.071%	-1.791%	-0.004%	-0.023%	1.889%
3倍	-0.053%	-1.409%	-0.002%	-0.022%	1.486%
4倍	-0.046%	-1.204%	-0.001%	-0.016%	1.268%
5倍	-0.042%	-1.069%	-0.001%	-0.002%	1.114%
10倍	-0.031%	-0.753%	0.000%	-0.001%	0.785%

は既存研究より25 (g - CO₂/t・km) とした。

表7 各条件におけるCO₂削減効果

	導入前	導入後											
		1倍削減量	2倍削減量	3倍削減量	4倍削減量	5倍削減量	10倍削減量	削減率	削減率	削減率	削減率		
鉄道	4.4	3.7	0.7	0.4	0.4	0.3	4.2	0.2	4.2	0.2	4.2	0.2	
トラック	355.9	255.7	100.2	292.3	63.0	306.4	49.3	314.2	41.7	319.3	36.6	331.2	24.7
海運	5.9	5.7	0.5	5.8	0.1	5.9	0	5.9	0	5.9	0	5.9	0
航空	11.5	11	10.5	1.7	9.8	1.8	9.7	4.7	6.8	8.2	3.3	11.3	0.2
高速輸送機関	0	14.9	-14.9	14.3	-14.3	7.3	-7.3	6.1	-6.1	5.3	-5.3	3.6	-3.6
合計	377.7	281	96.7	318.1	59.6	325.5	52.2	335.1	42.6	342.9	34.6	356.2	21.5
削減率			25.6%		15.8%		13.8%		11.3%		9.2%		5.7%

最も安価な運賃設定のもとでは、最大で 3.076% のモーダルシフトが発生した。また、それによる CO₂ 削減効果は年間で 96.7 万トンとなった。

8. シナリオ 2 (炭素税の導入) の分析

(1) シナリオの概要

シナリオ 1 に加えて、そのインフラへのシフトを促す政策として炭素税が導入された場合のモーダルシフトの効果を分析する。そのために、炭素税の導入に伴う原油・天然ガスもしくは石油製品などの燃料価格の上昇と各輸送機関の運賃の上昇の関係を知り、その値をもとに、ある税率で炭素税を負荷した場合の各輸送機関の輸送費用の設定を行う。

国土交通省の報告書「原油価格高騰が運輸業に与える影響」においては、「運輸部門を中心とした平成 12 年 (2000 年) 産業連関表」を利用した価格モデルの簡易計算法を利用して、原油価格が 2.0% 上昇した場合の、運輸業の各部門の運賃に与える影響を試算している。この計算法では、原油価格の価格変化と他製品の価格変化の関係、この結果を用いて炭素税の導入による燃料価格の上昇が各輸送機関の運賃上昇にどの程度影響を及ぼすのか算定する。

表8 原油・天然ガスの価格上昇と各輸送機関の運賃の上昇の関係

	価格変化率 (%)
原油	20
石油製品	9.686
電力	2
沿海・内水面貨物輸送	0.94
道路貨物輸送	0.813
国内航空貨物輸送	0.528
鉄道貨物輸送	0.378
鉄道旅客輸送	0.2

(2) 炭素税の税率および課税の方法

炭素税の税率の設定については、CO₂ 排出量に応じた課税を実現するため、化石燃料ごとの炭素含有量に応じた税率設定が考えられる。具体的な税率水準については、2010 年時点での CO₂ 排出量を 1990 年度比で 2% 削減するためには、炭素 1 トン当たり約 1 万 3 千円~3 万 5 千円 (ガソリン 1 L あたり約 8 円~22 円) の炭素税が必要になるとの試算がある。(「目標達成シナリオ小委員会中間取りまとめ」)。また、炭素税収を CO₂ 削減のための補助金に充当する場合は、炭素 1 トン当たり約 3 千円 (ガソリン 1 L あたり 2 円) で同様の効果が期待できるとされている。

(3) 税率 30000 (円/C-1t)、上流課税の炭素税

2000 年の原油・天然ガスの輸入 CIF 価格^{注)}の平均値は 22136 (円/k L)、炭素 C 含有量は 0.735 (C-t) となった。

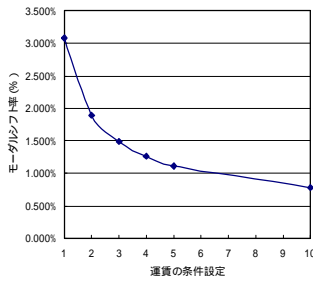


図3 運賃変化に伴うモーダルシフト率の変化

図3より、運賃と高くするとモーダルシフト率は反比例的に少なくなることが判った。

(4) 輸送距離帯ごとのモーダルシフト

(1)で設定した運賃設定のもと、輸送距離帯ごとのモーダルシフト率の算定を行った。

表5には輸送距離帯、輸送機関ごとのモーダルシフト量が全流動量に占める割合を算定した結果を示す。また表6は輸送距離帯、輸送機関ごとのモーダルシフト量が輸送距離帯ごとの全流動量に占める割合を算定したもので、距離帯ごとに変化を見ることができる。

表5 輸送距離帯ごとのモーダルシフト率 (全域)

	鉄道	トラック	海運	航空	高速輸送機関
~ 300km	-0.008%	-0.720%	0.000%	0.000%	0.698%
300~ 500km	-0.004%	-0.523%	-0.002%	0.000%	0.528%
500~ 800km	-0.082%	-0.866%	-0.006%	0.000%	0.950%
800km~	-0.046%	-0.788%	-0.003%	-0.024%	0.898%
合計	-0.141%	-2.900%	-0.011%	-0.025%	3.076%

表6 輸送距離帯ごとのモーダルシフト率 (輸送距離帯内)

	鉄道	トラック	海運	航空	高速輸送機関
~ 300km	-0.009%	-0.828%	0.000%	0.000%	0.802%
300~ 500km	-0.060%	-7.552%	-0.025%	0.000%	7.619%
500~ 800km	-1.970%	-20.739%	-0.149%	-0.010%	22.753%
800km~	-2.413%	-41.299%	-0.157%	-1.265%	47.062%

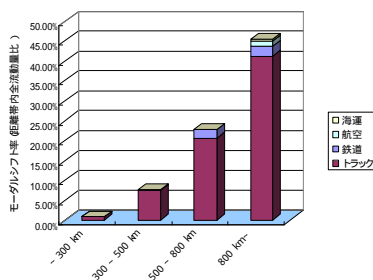


図4 輸送距離帯ごとのモーダルシフト率 (距離帯内全流動量比)

輸送距離帯別に見て、500~800 km、800km~ などの中長距離の輸送においては高速輸送機関が他の輸送機関を凌いで、優位性を発揮することがわかった。特に、800 km~ の長距離領域においては航空からのシフトも多く、高速性という点で航空と競合する輸送機関となる可能性をもつことがわかった。

(5) モーダルシフトによる CO₂ 削減効果

高速輸送機関へのモーダルシフトの結果、CO₂ 削減効果が期待される。そこで、導入前後での CO₂ 排出量を算出し、CO₂ 削減量の算定を行った。算出に当たっては各輸送機関の CO₂ 排出原単位を用い、高速輸送機関について

表9 原油・天然ガスの平均価格及び炭素含有量

	エネルギー源別輸入CIF価格 (円/kL)	炭素C含有量 (C-t/kL)	需要 (kL)
原油	19613	0.723	235683
LPG	38060	0.824	18411
LNG	27667	0.761	54500
原油・天然ガス平均	22136	0.735	308594

ここに、炭素1tあたり30000円の炭素税が課税された場合の原油・天然ガスの輸入CIF価格の上昇率は、 $30000[\text{円}/\text{t-C}] \times 0.735[\text{t-C}/\text{kL}] = 22065[\text{円}/\text{kL}]$

よって炭素1tあたりに30000円の炭素税が課税された場合の原油CIF価格の上昇率は、

$$22065[\text{円}/\text{kL}] \div 22136[\text{円}/\text{kL}] = 0.997$$

となり、約99.7%上昇することがわかる。

表8の結果を用いて炭素1tあたり30000円の炭素税が原油に課税された場合の各輸送機関の運賃上昇率を算定し、その値をモデルの運賃のパラメータに反映させることで、炭素税のモーダルシフト促進効果を算定した結果を表10に示す。

表10 税率30000(円/C-1t)、上流課税の炭素税のシフト促進効果

	鉄道	トラック	海運	航空	高速輸送機関
農水産品	1.4	-303.7	258.0	0.0	44.2
金属製品・機械	477.2	-623.6	54.3	-1.8	93.9
自動車部品・車両	69.7	-414.3	283.2	-0.4	61.8
繊維工業品	11.6	-10.7	0.0	0.0	-1.0
食料工業品	63.9	-43.6	0.6	0.0	-20.9
日用品	137.6	-72.1	0.0	-0.6	-64.8
合計	761.4	-1468.0	596.2	-2.9	113.3
シフト促進効果	0.028%	-0.054%	0.022%	-0.0001%	0.004%

(単位: トン/3日間)

(4) 税率30000(円/C-1t)、下流課税の炭素税

2000年の石油製品卸売価格の平均値は47704(円/kL)、石油製品1kLあたりの炭素C含有量は0.685(C-t)となった。

表11 石油製品の平均価格及び炭素含有量

	2000年石油製品卸売価格 (円/kL)	炭素C含有量 (C-t/kL)	需要 (千kL)
ガソリン	89007	0.630	60565
ナフサ	20922	0.609	48665
灯油	27178	0.683	29053
軽油	70384	0.721	38137
A重油	25293	0.756	29752
C重油	21211	0.809	30195
石油製品平均	47704	0.685	236367

ここに、炭素1tあたり30000円の炭素税が課税された場合の石油製品の卸売価格の上昇率は、

$$30000[\text{円}/\text{C-t}] \times 0.685[\text{C-t}/\text{kL}] = 20563[\text{円}/\text{kL}]$$

よって、炭素1tあたり30000円の炭素税が課税された場合の石油製品の価格上昇率は、

$$20563[\text{円}/\text{kL}] \div 47704[\text{円}/\text{kL}] = 0.685$$

となり、約68.5%上昇することになる。

表8より炭素1tあたり30000円の炭素税が石油製品に課税された場合の各輸送機関の運賃上昇率を算定し、その値をモデルの運賃のパラメータに反映させることで、炭素税のモーダルシフト促進効果を算定した結果を表12に示す。

表12 税率30000(円/C-1t)、下流課税の炭素税のシフト促進効果

	鉄道	トラック	海運	航空	高速輸送機関
農水産品	1.8	-339.6	326.3	-0.1	11.6
金属製品・機械	553.0	-669.0	53.8	-2.6	64.8
自動車部品・車両	83.6	-388.1	252.4	-0.6	52.7
繊維工業品	13.9	-0.3	0.0	0.0	-13.7
食料工業品	80.8	-22.5	0.7	0.0	-59.0
日用品	172.3	-37.2	0.0	-0.9	-134.2
合計	905.4	-1456.7	633.2	-4.2	-77.8
シフト促進効果	0.0336%	-0.0540%	0.0235%	-0.0002%	-0.0029%

(単位: トン/3日間)

(5) シナリオ2まとめ

税率30000(円/C-1t)というかなり高い税率で炭素税が付加された場合のモーダルシフトの効果を分析した。しかし、運賃上昇が全体的に小さかったため、高速輸送機関へのモーダルシフトはほとんど起こらなかった。また全体としてシフト量が小さく、炭素税の価格効果によるモーダルシフト促進効果は小さいという結果になった。

9. 税率2400(円/C-1t)の炭素税の税収の試算

昨年11月に環境省が提案した炭素税の税率は2400(円/C-t)となっている。8(3)及び(4)の結果より、価格効果は極めて小さいと予想されるが、税収の還元による2次的効果が期待される。そこで、炭素税の価格上昇がそのまま運賃上昇に転嫁されたと仮定し、各輸送機関の輸送費用の上昇分を計算し、税率2400(円/C-1t)の炭素税の税収を試算した結果、上流課税で94(億円/年間)、下流課税で153(億円/年間)となった。

表13 税率2400(円/C-1t)の炭素税の税収

	上流課税	下流課税
鉄道	0.6	0.86
トラック	85.01	139.55
海運	0.62	0.88
航空	0.05	0.08
高速輸送機関	7.88	12.42
合計	94.17	153.79

(単位: 億円/年間)

10. 今後の課題

本研究では、炭素税の導入に伴う原油価格の上昇と各輸送機関の運賃上昇の関係を、原油価格が2.0%上昇したときの結果をもとに比例的に算定したため、税率30000(円/C-t)という非常に高い税率のインパクトを過小評価している可能性がある。今後、各輸送機関のエネルギー消費やコスト構造の分析を行い、炭素税の導入と各輸送機関の運賃の変化の関係を分析する必要がある。

参考文献

- 1) 黒川久幸 他「犠牲量モデルを用いた新幹線へのモーダルシフトの可能性に関する研究」日本物流学会全国大会講演集、No22; pp.147-150, 2005年
- 2) 黒川久幸 他「時間価値分析による船舶へのモーダルシフトについての検討」日本造船学会論文集、第189号
- 3) 国土交通省「原油価格高騰が運輸業に与える影響」
- 4) 日本エネルギー経済研究所: 「2005 エネルギー・経済統計要覧」
- 5) 石油連盟ホームページ: 石油統計情報

謝辞 -

本研究を進めるに当たりまして、計算プログラム等の作成の際には東京海洋大学の黒川久幸先生に格別の御指導を賜りましたこと、心より御礼申し上げます。

注) CIF価格とは、Cost, Insurance and Freightの略称で、一般にFOB価格に対して、運賃や船荷保険料を上乗せした価格となる。