

非線形計画法を用いた モーダルシフトによる環境改善の一考察

Environmental Improvement Problem Solved by Non-Linear Programming
Method based on Modal-Shift Scheme

○見市 晃* 木田 雅司**
Akira MIICHI*, Masashi KIDA**

ABSTRACT ; This study discusses a conversion problem from car into ship and/or train transportation in order to reduce pollutant loads from the two viewpoints; one is money, the other is non-money. While the first money viewpoint has been considered by some researchers, the second non-money viewpoint is newly introduced in this study and will play much important roles in pollution problems in the near future. The proposed conversion problem is transformed into an optimization one to determine share ratio of car, ship and train vehicles by non-linear programming method based on modal-shift scheme. The derived share ratio of transportation vehicles achieves a reasonable environmental improvement.

KEYWORDS ; Modal-shift, Transportation and environment, Non-linear programming method

1. はじめに

現在輸送の主力を占める自動車は、その排出する汚濁物による環境汚染や人体への悪影響、交通事故の多発、交通渋滞の発生などの諸問題をかかえているが、さらに近年は運転手不足、高速道路建設費用の高騰などに注目が集まるようになってきている。このような状況のもとで中長距離の貨物輸送を自動車輸送（以下は自動車）から内航海運（以下は海運）や鉄道輸送（以下は鉄道）に転換するいわゆるモーダルシフトの推進が提唱されている¹⁾。

震災による経験から特定の輸送機関への偏りが混乱を招くことが分かったと共に、各輸送機関の相互の連係が重要であることが判明した。このような、モーダルシフトによるバランスのよい輸送の実現は汚濁負荷の削減をもたらし、さらに大都市周辺の閉鎖性水域の水質をも良くすることに貢献するものと指摘できる。

本研究では、阪神を中心として北九州、東海圏、首都圏、西北海道との貨物輸送をとりあげ、輸送の活性化と環境改善について検討する。とくに阪神地区に近い瀬戸内海での効果を詳細に分析する。

貨物輸送を金銭的な側面と非金銭的側面に分けて考察する。前者は輸送価格（以下はコスト）に代表され、後者は次世代へ引き継ぐべき環境保全を意味する。双方の観点からいずれの問題も非線形計画法としてとらえ、これを解くことにより無理のないモーダルシフトに向けての輸送分担率を求める。

2. 国内貨物輸送の現状と将来予測

貨物輸送を運輸白書²⁾でみると、輸送トンキロでは日本全体として自動車51.5%、海運43.6%、鉄道9.7%

* 追手門学院大学経営学部 Faculty of Management, Outemon-Gakuin University.

** 関西大学大学院工学研究科 Graduate student, Department of Industrial Engineering, Kansai University.

となっており、最近は景気の低迷の余波で輸送総量が減少している。また、CO₂の排出量は、鉄道部門に対し海運は約1.7倍で自動車は約36倍の排出量であることが以前より指摘されている。したがって環境汚染を改善するためには鉄道、海運への転換が望ましいことはいうまでもない。

本研究のモーダルシフトの対象品目については国領³⁾などにより議論がなされているのでそれを踏襲することにする。研究対象領域を主として瀬戸内海としているので阪神―北九州路線を主に検討を行う。

1987年から1991年の5年平均で長距離の輸送分担率を図1、2に示す。海運では阪神―東海圏、阪神―首都圏、阪神―北九州、阪神―西北海道の順に距離に比例して高くなっている。なお、鉄道分担率は阪神―首都圏および阪神―西北海道が大きく、中長距離に強みを発揮している。

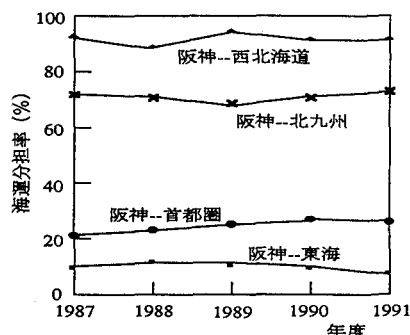


図1 海運分担率の推移

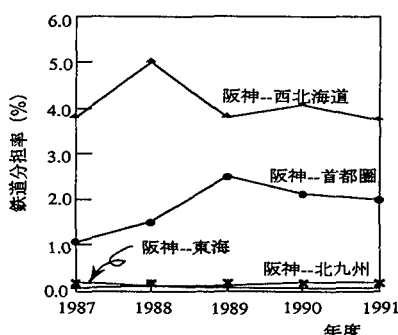


図2 鉄道分担率の推移

貨物輸送を海運・鉄道に誘導した効果をみるために、将来でのモーダルシフトの対象品目別の輸送量予想をする必要がある。ここでは実質GNPの伸び率と対比したGNP弾性値から対象品目別の将来量を予測する。ただし、予想に当たっては前述の国領らによると1987年以降輸送量の伸びと実質GNPの伸びの関係は一定としているのでこれに従うことにした。

一方、日本経済研究センターの予測（日本経済新聞1994年2月23日）によると実質GNPの伸びは1975年～1990年は4.3%、1990年～2000年は2.7%、2000年～2010年は3.5%としている。また近々5年間の伸び率も2.8%になっているため、ここでは2.8%を用いることにする。

このように、実質GNPを2.8%とすると1990年を基準に2000年2005年2010年の阪神―北九州間におけるモーダルシフト対象品目の総輸送予測量は表1のようになった。

表1 モーダルシフト対象貨物の将来予測量

1990年	2000年	2005年	2010年
1066	1321	1496	1694

(単位：万トン)

3. 輸送に関する3指標と社会的効用

将来輸送量が増加すれば、当然のことながら汚染も進行する。ここではまずCOD負荷に着目する。1989年度瀬戸内海に流入するCOD負荷の内、生活と産業によるものを除いたCOD負荷量は82トン/日¹⁾とされている。このうち輸送に由来するCOD量を推定するため、筆者らは神戸市営六甲北有料道路において自動車を発生源とする汚濁負荷原単位を1994年6月から同年12月にかけて測定した。この道路は、中国自動車道の神戸三田インターから神戸市街へ通じるバイパスで自動車のみ有料の、一般道路と高速道路の性格を併せ持つ。測定は降雨毎に道路高架部の雨樋に取付けた採水ビンから試料をとり化学分析を行なった。この内CODは初期の流出汚れが大きい20分弱後の濃度は半分に減っている。以上の分析結果と通過交通量および近辺のアメダス記録(三田局)をもとに大型車、小型車別の汚濁負荷量を求めた。この結果、1台1km当たりのCOD負荷量、すなわち汚濁発生原単位は大型車で330mg、小型車で49mgとなった。この原単位を用いて、瀬戸内海を流域とする高速道路や主要国道から排出するCODの負荷量を13.6トン/日と予測した。

瀬戸内海に流入するCOD負荷量82トン／日のうち、自動車の貨物輸送による負荷は16.5%ということになる。和田らは、道路に堆積する汚濁物の処理を汚水マスや透水性舗装で行なうことを提案している⁴⁾。しかし、道路清掃車の運用が手軽で有効な手段とされている。瀬戸内海地域の年間下水道工事・管理費用は約1兆40億円⁵⁾であるに比して道路清掃車の経費は高々数億円で微々たるものである。しかし、道路清掃車を定期的に運行するのではなくて有効な清掃時点を決定して行うべきであって不定期の清掃を行わなければならない。

本来は汚濁発生を抑制すべきであるという観点より汚濁発生の少ない輸送機関にモーダルシフトすることを考える。

ここでは、モーダルシフトによる環境改善効果を金銭的な側面と非金銭的な側面に分けて考える。金銭的な側面は輸送コストで代表され、輸送量増減として現われ目に見えて改善効果に分かるのでサービスの向上、輸送価格の据え置き、輸送設備の更新など企業努力目標として議論の対象となってきた⁶⁾。

非金銭的な側面は、環境改善の方向から見たものである。以上に述べたCODについては多くの研究実績があり、NOxについても同様であるが、貨物輸送の自動車から大気に排出されるCO₂は、大気に拡散するため測定し難く、物流面からの研究を除けばLCA法⁷⁾による研究が見られるようになってきたに過ぎない。

本研究ではCO₂について考察する。CO₂による炭素量は、5236.5kt-C／年⁸⁾であり瀬戸内海地域では1083.4kt-C／年と計算できる。燃費効率を自動車0.103リットル／トンキロ⁹⁾、海運0.013リットル／トンキロ¹⁰⁾とすれば、全ての輸送を海運に転換すると瀬戸内海地域では102.5kt-C／年に削減できる。

また、もう一つの非金銭的な指標である自動車の貨物輸送に関わる石油総消費量は、原油換算で39,313千kl／年⁹⁾で、瀬戸内海沿岸において消費される量はこの沿岸地域を通過する交通量より推定されて8135千kl／年であって約21%に当たる。そこで、その全てを海運と鉄道に依存し自動車を用いなければ、実に87%が削減され得る。

この例の非金銭的な側面による環境改善は、上述のように予測計算はできるが海運と鉄道に転換した場合に生ずるマイナス効果を考慮しなければならず、その効果の具体的な計算は難しい。しかし次世代への負の遺産として残さないよう今後積極的に考えなければならない問題である。

4. 輸送によるコスト、CO₂排出量、石油消費量によるモデル化

本研究では、マイナス効果としての輸送料、環境汚染、エネルギー消費について着目し非金銭的な側面として社会効用関数を導入する。輸送コスト、CO₂排出量、石油消費量の3指標をおのをおの横軸に、縦軸に社会的効用関数として社会の環境改善への動きを考察する。ただし効用関数は凹関数として表わされることが知られている。

輸送コストすなわち運賃は、各対象区間に対するトン当たりで条件にもよるがほぼ450kmを越すと自動車運賃が鉄道の運賃を上まわる¹¹⁾。中長距離の自動車輸送は海運、鉄道に較べ高いが利便性と輸送所要時間により輸送の主役を占めている。不況経済下の現在、

輸送は利便性からコストを重視するように変化しつつあることからモーダルシフトの可能性は大きい。

CO₂排出量については⁸⁾¹²⁾ 輸送部門からの分は、わが国全体のCO₂排出量の2割程度を占めていると予測されており、中でも自動車からの排出量が船舶、鉄道のそれに較べ大きい。各輸送機関別のCO₂排出量をトンキロ当たりで表わしたのが図3である。

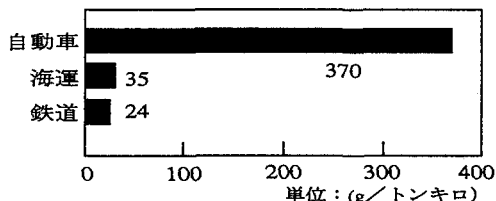


図3 輸送機関別CO₂排出量の比較

自動車はCOD、CO₂だけでなく全ての要素について環境への負の影響度が、海運と鉄道より高い。そこで輸送問題における各機関の、環境影響度と社会的効用を考慮した輸送分担率を求めるモデルを以下のように

定式化する。

ここで、輸送機関とマイナス効果について

$i=1$ は自動車 $j=1$ は汚れ (CO₂排出量)

$i=2$ は海運 $j=2$ は輸送コスト

$i=3$ は鉄道 $j=3$ は石油消費量

を意味するものとする。

いま、自動車、海運、鉄道の分担率をそれぞれ x_1, x_2, x_3 と表わす。このとき輸送機関 i の分担率が x_i のときの j 種のマイナス効果、すなわち社会的影響度を $U_j(x_i)$ と表わす。

さらに、記号を下記のように設定する。

A ; 総輸送量 (トン)

L_i ; 輸送機関 i の平均走行距離 (キロメートル) $i=1,2,3$

a_{i1} ; 輸送機関 i の出す汚れ (CO₂排出量) (グラム / トンキロ)

a_{i2} ; 輸送機関 i の輸送コスト (円 / トンキロ)

a_{i3} ; 輸送機関 i の燃料消費量 (リットル / トンキロ)

ところで、総輸送量 A (トン) は自動車、海運、鉄道にそれぞれ Ax_1, Ax_2, Ax_3 ずつ分担される。

輸送機関 i の輸送量は、 Ax_i となり、CO₂排出量は、

$$(i \text{ の輸送量}) \times (\text{CO}_2 \text{ 排出量}) \times (\text{平均走行距離}) = Ax_i a_{i1} L_i \quad (1)$$

となる。同様に輸送コストは、

$$(i \text{ の輸送量}) \times (\text{輸送コスト}) \times (\text{平均走行距離}) = Ax_i a_{i2} L_i \quad (2)$$

となり、石油消費量は、

$$(i \text{ の輸送量}) \times (\text{燃料消費量}) \times (\text{平均走行距離}) = Ax_i a_{i3} L_i \quad (3)$$

となる。

これらの輸送により、CO₂の排出総量は $A \sum_{i=1}^3 a_{i1} x_i$ となる。

同様に総輸送コストは $A \sum_{i=1}^3 a_{i2} x_i$ 、石油総消費量は $A \sum_{i=1}^3 a_{i3} x_i$ となる。

ただし、平均値を基準に無次元化してある。

したがって、輸送機関 i の j 種の社会影響度は $U_j \left(\sum_{i=1}^3 a_{ij} x_i \right)$ となる。

このような定式化を阪神地区を中心に北九州、東海圏、首都圏、西北海道に対しておこなっているが地域別の添字をつけると複雑となるために定式化では省略して (1), (2), (3) 式で代表させている。

ここで、 j 種のマイナス効果による効用に対する寄与度を λ_j とすると

目的関数は次の一般式で表わすことができる。

$$\sum_{j=1}^3 \lambda_j U_j \left(\sum_{i=1}^3 a_{ij} x_i \right) \rightarrow \min_{x_1, x_2, x_3} \quad (4)$$

制約条件

$$\sum_{i=1}^3 x_i = 1 \quad (5)$$

$$x_i \geq 0$$

この非線形計画法による輸送モデルは、社会的影響度を表わす効用関数 $U_j(x)$ を $\left(1 - e^{-\sum_{i=1}^3 a_{ij}x_i}\right)$ と仮定すると目的関数は次のように書き換えられる。

$$-\sum_{j=1}^3 \lambda_j \left(1 - e^{-\sum_{i=1}^3 a_{ij}x_i}\right) \rightarrow \max_{x_1, x_2, x_3} \quad (6)$$

制約条件

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 x_i - 1 &= 0 \\ x_i &\geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

この制約条件に対して、ラグランジュ乗数を定義し、クーン・タッカーの定理を用いて解き最適解 x^* を求めた。

5. 数値計算

もともと決定変数 x_i^* (分担率) は、市場経済での自然な活動の中で決まって行くものと考えられる。ここでは、理論的に示される値として興味があるので一応目安が与えられたものと考えている。

寄与度 λ は、シャドウプライス¹³⁾ として考えられるものであって輸送コスト、CO₂排出量、石油消費量を感度解析により求めそれぞれ 4.5, 6.0, 5.6 としている。

上記の定式化で必要であった

λ_i , a_{i1} , a_{i2} , a_{i3} の原単位等は文献⁸⁾ に詳述されているのでここでは略す。

また、環境白書¹⁾ にモーダルシフトを推進するために税制上の優遇措置や日本開発銀行等による融資による支援の必要性について書かれているが、本研究では分担率に対する理論的な値を上記モデルを用いて算出したものである。

得られた分担率から、輸送機関別の変化を図4に示す。輸送コスト, CO₂排出量, 石油消費量の変化を表2に示す。

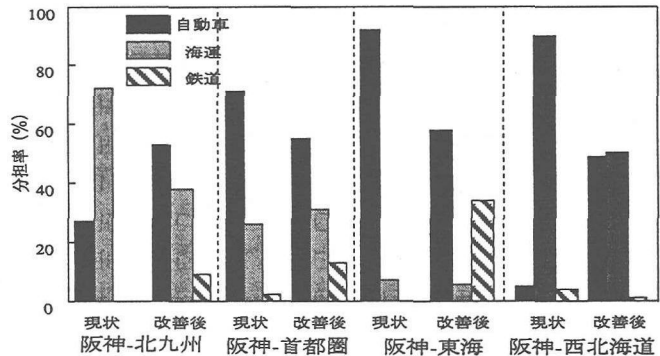


図4 改善による分担率の変化

表2 改善による3指標の変化

	1990年	2010年	
	現状	現在の分担率	改善後の分担率
輸送コスト (億円)	5,716	11,329	9,147
CO2排出量 (千トン)	1,411	2,442	1,962
石油消費量 (原油千kl)	11,000	13,890	13,080

6. 結論

輸送の利便性や輸送時間、また在庫を最小限に抑える計算機偏重の経営形態から、景気の低迷による輸送コストの見直しや震災による輸送機関偏重の弊害からモーダルシフトを実施する気運が高まりつつあるといえる。ここでは輸送の絶対量は確保するという前提の上でモデル化し数値計算を行った結果、図4の結果が示すように自動車、海運、鉄道に対する分担率が得られた。

もともと瀬戸内海では海運の比重が充分に高く、このモデルでは瀬戸内海を含む阪神一北九州では自動車が増える傾向を示し減便による環境改善は望めないことが分かった。より詳細な環境改善の施策に対しては、きめの細かいフェリー航走、道路清掃車の活用等が考えられる。一方他の区間たとえば阪神一東海圏、阪神一首都圏では明らかに輸送機関の間にバランスがとれ汚濁負荷が削減されている。また表2の3指標の改善については2010年ではCO₂排出量が約480千トン、石油消費量は原油換算で約810千kl分少なくすることができる。

この研究により経営上即効性のある輸送コストなど金銭面に片寄りがちな視点を、環境改善のために非金銭面に焦点をあて次世代につながる施策を行う必要があることが分かった。

参考文献

- 1)環境庁編；平成6年版「環境白書」,大蔵省印刷局,1994.
- 2)運輸省編；平成6年版「運輸白書」,大蔵省印刷局,1994.
- 3)国領英雄；海上輸送誘導のための一つの試算,海事交通研究,43集,pp27-53,1994.
- 4)和田,三浦；都市路面堆積負荷流出とモデル化,第11回環境問題シンポジウム,PP39-44,1983.
- 5)日本下水道協会編；平成4年版「下水道統計 財政編」,第49号の2,日本下水道協会,1994.
- 6)運輸経済研究センター編；「環境保全に資する幹線物流体系のモーダルシフトのあり方に関する調査研究 報告書,運輸経済研究センター,1990.
- 7)銭村,井村；建設にともなう環境負荷の定量化に関する研究,環境システム研究,vol.22,pp147-153,1994.
- 8)運輸経済研究センター編；「環境と運輸・交通」,運輸経済研究センター,1994.
- 9)運輸省運輸政策局情報管理部編；平成6年版「運輸関係エネルギー要覧」,大蔵省印刷局,1994.
- 10)運輸省運輸政策局情報管理部編；「内航船舶輸送統計月報」,vol.32,No.8,pp30,1994.
- 11)日本開発銀行編；「調査,我が国物流効率化のための方策」,第189号,pp29,日本開発銀行,1994.
- 12)伊藤,井村；地域間物流に伴うエネルギー消費量及びCO₂排出量の評価に関する研究,環境システム研究, vol.22,pp352-358,1994
- 13)三根；「オペレーションズ・リサーチ」上巻,pp122,朝倉書店,1996.