モーダルシフトの整数計画モデル

三木 楯彦*・山内 悟**・新谷 浩一*

An Integer Programming Model for Modal Shift

Tatehiko MIKI, Satoru YAMAUCHI and Koichi SHINTANI

Abstract

The problem authors consider is that of preparing a minimum cost transportation plan for modal shift associated with the milk transportation between Hokkaido and Tokyo.

In this paper, we present a solution method for this problem using an integer programming model with linear objective functions subject to all feasible traffic flows and all the combinations of constructing different candidate links. In order to illustrate the model, results are presented for modal shift with multiple mode of transportation including RORO ships, ferries, rail and milk-tank lorries.

1. はじめに

物流効率化の手段として長距離幹線輸送において自動車から鉄道輸送へ、あるいは海運への輸送機関を転換する方策をモーダルシフトと呼んでいる。近年の多頻度小口配送の要請にも応えつつ海運、特に長距離フェリーとトラックの複合輸送が重要視される。

トラックによる貨物輸送数量が国内物流に占める割合は、輸送トン数ベースで 90%、トンキロベースで約 50%である。他方、内航海運はトン数ベースで 9%、トンキロベースで 45%である。この数字は長距離大量輸送では船舶が、近距離輸送にはトラックが利用されていることの証明である。

近年、トラック業界ではドライバー不足、交通渋滞、法定労働時間の短縮、環境汚染の悪化などで対策に苦慮している。鉄道輸送をみると、速度、環境汚染はトラックに比し格段によく長距離輸送に向くが、旅客輸送ダイヤが過密で、新規線路の設備投資も短期的には難しく今後の伸びは期待できない。

こうして見直されてきたのが内航海運で、運輸省も率先して陸上物流を海上に振り向ける政策を振興している。RORO 船やフェリーは、大量輸送、省エネ、ドライバーや港湾荷役作業員の人手不足解消、環境汚染の軽減などの観点からモーダルシフトの焦点にある。

わが国の高度成長時代は人手不足による人件費の上昇の時期でもあり、輸送革新が叫ばれた。海運界でも荷役革新船が登場し、① リフトオン・リフトオフ方式のコンテナ船、② ロールオン・ロールオフ船、③ 旅客カーフェリーは革新船の三羽鳥と言えよう。そのうち①のコンテナ船は当初、外航海運で発展したが内航においても現在コンテナ船 11 隻、外航コンテナのフィーダー輸送を含めれば 30 隻を越す内航コンテナ船が就船している。②は外航海運(豪州航路)だけでなく内航船では全国に 33 航路の定期幹線がある。③の旅客カーフェリーは内航を主体に就航しているが、旅客用居住区を除けばロールオン・ロールオフ船と変わらない荷役方式である。即ち、旅客カーフェリーは、トラック、コンテナ積載トレーラが車両ごと船内に走り込めること、トラック運転手が船と一緒に乗れること、船社にとっては積揚荷役が人手を要しないこと(機械荷役と同然)、外航コンテナ船で運ばれてきたコンテナをトレーラごとと主要港から地方港へフィーダー輸送ができることが理由で急進展した。

* 正会員 神戸商船大学(〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

** 正会員 阪神油化㈱(〒650 神戸市中央区播磨町 49)

旅客カーフェリーとロールオン・ロールオフ船との比較対照すると次のようになる。

モーダルシフトの検討は単に運賃の比較だけでは結論は得られない。特に新しい輸送路の開発には大なり小なり資本投資を伴う。例えば港湾などでの物流基地や倉庫の新設、コンテナやパレット等のリース、荷役機械や特殊車両の開発ないし採用等はほんの一例である。従って、一定期間の固定費及び変動費を合算した総経費により判断することが不可欠となる。ネットワーク問題を線形計画法で表現したとき、目的関数に含まれる係数は常数でなければならないから一般にリンクの流量に比例する費用(変動費)のみをモデル中に取り入れることができるに過ぎない。著者らは線形計画法の一類型である輸送問題に整数変数を付加することによりそのリンクを使用する時に限って発生する固定費を考慮し得る数理計画モデルを提案し、事例を添え報告する。

表1 旅客カーフェリーとロールオン・ロールオフ船の比較

比較項目	旅客カーフェリー	ロールオン・ロールオフ船
①性格	旅客兼自動車渡船	
②荷役	船社主体で乗組員が荷役に従事 荷役時間制限なし	港湾荷役業者の請負 日曜・祭日不荷役
③埠頭	専用埠頭 船客用ターミナル設備	一般公共埠頭
④船客	乗せる	乗せない
⑤ドライバー	乗せる	乗せない
⑥速力	速い	遅い
⑦定時性	厳しい	緩やか
⑧法的規制	厳しい	緩やか

2. 輸送経路の決定モデル

モーダルシフトは運賃のほか、納期や輸送容量などの輸送サービスに支配されていることは周知の事実である。しかし、コストは第一義的に重要な選択要因であることに変わりはない。そこで、モーダルシフトの選好原理を表すモデル的研究を行った。モデルは、輸送問題をベースにした整数計画モデルである。このモデルはネットワークデザイン問題(NDP, Network Design Problem)⁽¹⁾の一類型で、与えられた基準により既存の輸送ネットワークにおいて枝を付加, 除去, 改善する問題を扱う。定式化の形態は極めて多様で、目的関数が線形のもの、目的関数が非線形でシステム最適化基準を満たすもの、目的関数が非線形で利用者最適化基準を満たすもの、等に大別できる。筆者らは次のような定式化を行ったので提案する。即ち、

ネットワーク $[N; L]$ に対して、

ノード: $i=1, 2, \dots, n$

$i=1$: 発地

$i=n$: 着地

(i, j) : リンク

x : リンクフロー、 $m \times 1$ リンクフローベクトル

x_{ij} : x の元で、実数変数

C : 目的関数

f : 運賃行列

f_{ij} : 第1項の運賃行列 f の元、フローコスト ($m \times 1$ 列ベクトル)

p : 投資費用行列

p_{ij} : 第2項の投資費用行列 p の元

y : リンクの選択ベクトル

y_{ij} : y の元で、整数変数 (0-1 変数)

E : $n \times m$ ノードリンク連結行列

g : $n \times 1$ O-D フローベクトル

g_i : g の元で、フロー値

R : 輸送路の代替案を表す $n \times m$ 行列

q : $n \times 1$ 整数制約式の定数ベクトル

q_i : q の元で、0-1 変数

M : $x_{ij} > 0$ であれば $y_{ij} = 1$ となるような技巧的制約 ($m \times m$ 行列)

ここで、全角文字は行列または列ベクトル、半角文字はスカラー変数とする。

このとき主題の定式化は、整数変数を含む輸送問題をベースとするモデルとして次のように表現できる。
(式 1)

式 1 整数計画モデルの定式化

目的関数

$$\min C = f^T x + p^T y = \sum_{(i,j)} f_{ij} x_{ij} + \sum_{(i,j)} p_{ij} y_{ij}$$

制約条件

$$Ex = g$$

$$Ry = q$$

$$My - x = 0$$

$$x \geq 0$$

$$y = 0 \text{ or } 1$$

ここで右肩の T は転置行列、 M は g に比べて十分大きな値である。

ここで、目的関数の第 1 項は変動費の合計、第 2 項は固定費の合計を表す。制約条件の 1 はネットワークの構造、2 はリンク（輸送路）の代替案の選択、輸送路に貨物が流れる時 ($x_{ij} > 0$) には必ず当該輸送路の選択を示す選択ベクトルが 1 を採る ($y_{ij} = 1$) となることを要請する制約式である。変数 x_{ij} は正の実数、 y_{ij} は 0-1 の整数変数である。

3. 事例的研究

モーダルシフトの対象貨物は「雑貨」である。雑貨とは特に定説はないが、包装または梱包された貨物及びこれに準ずるものというのが極めて大まかな定義となろう。モーダルシフトの対象とされる貨物ということになれば、「ばら荷」、長尺物、液体は除外され、標準 8 トン車に搭載可能な貨物とある程度局限されてくる。そうなると食料品は国民生活からも重要な雑貨である。食料品、特に生鮮食料品の輸送はその貨物の性状からも他の輸送機関の利用は制約があり、専らトラックに依存してきたためモーダルシフトの成功例は少ない。

温度管理が必要な商品あるいは生鮮食料品には数例を挙げれば次のようになる。

① 生乳	釧路→東京	保冷タンク車
② ミカン	熊本→関西 / 関東	トラック
	勝浦→関東	コンテナ
③ アイスクリューム	北海道→関西 / 関東	冷凍 / 冷蔵
④ 輸入チーズ	苫小牧→川崎	コンテナ
⑤ 活魚	熊本→関西	特殊コンテナ

ここでは農畜産物輸送の海運への転換事例として生乳を取り上げる。生乳の生産は 4~6 月がピークで、夏場の牛乳の需要期とも一致する。さらに、腐敗し易い性質のため摂氏 4 度内外の低温輸送が必要である。北海道から本土向けの生乳移出量は年間 27 万トン（平成 3 年実績）を越え増加傾向にある。仕向地は大部分が東京地域で、将来輸送方式の開発次第で近畿圏への需要増大も見込まれる。

上記の需要に対し、北海道から関東地域に至る輸送供給力は、JR 貨物のほか長距離フェリー輸送がある。生乳の輸送手段はフェリーが 72%、JR 貨物が 28% の両者で大部分を占め、93 年 7 月生乳専用 RORO 船が投入された^②。フェリー航路は、苫小牧 / 釧路→東京、小樽→新潟、苫小牧 / 室蘭→大洗の 5 航路がある。両地が津軽海峡で隔てられていること、北海道から関東への輸送が翌日配送が困難であること、無人車の普及で省力化の効果が大きいこと等の理由により海運が有利な区間として知られる。モーダルシフトの見地から新しい輸送路には各種の投資が必要とされる。フェリーや RORO 船の利用には低温

一般道 (トラック)
 高速道路 (トラック)
 鉄道
 フェリー・RORO船

表2 北海道から東京都に至る
輸送経路と変動費

輸送方式	主な輸送経路	1ト当たり運賃
①5トコンテナ；JR貨物	札幌(特)→豊田川駅	16,320円/ト
②20フィートコンテナ；内航コンテナ船	苫小牧港→東京港	10,170
③15 トレーラ；内航RORO船	苫小牧港→東京港	12,840
④15 トレーラ；フェリー利用（無人）	苫小牧港→東京港	13,550
⑤10 トラック；フェリー利用（有人）	苫小牧港→東京港	19,470
⑥15 トレーラ；フェリー利用（無人）	苫小牧港→大洗港	13,800
⑦10 トラック；フェリー利用（有人）	苫小牧港→大洗港	19,240
⑧10 トラック；陸上走行	函館港→青森港	24,600

図2 北海道から東京都に至る輸送経路(一部)

整数計画モデルの一例を下記に示しておく(式2)。

参 考 文 献

- (1) Mingyuan Chen and Attahiru Sule Alfa: A Network Design Algorithm Using a Stochastic Incremental Traffic Assignment Approach, Transportation Science (ORSA), Vol.25, No.3, August 1991.
- (2) 原 勝: 北海道農業とほくれん丸の就航, 物流情報, 40 卷 10 号, 21-26, 1993.10.

質 疑 応 答

今井昭夫(神戸商船大学): 1) モーダルシフトではコストだけでなく時間が大きなファクターとなると思われますが、時間を本モデルに組み込むことは可能でしょうか。

2) ケーススタディーでは生産地と消費地が1箇所ずつのようですが、もしそうであれば、本モデルは最短路問題で解けるのではないのでしょうか。

三木楯彦: 時間や輸送路の容量はモーダルシフト問題で考慮すべき重要な要素です。今回のモデルでは考察していませんが、1法として次のような取扱いが可能ではないかと考えます。A 船(長距離フェリー, 船速 23.5 ノット, 船価 40 億円, 航海時間 20 時間, トン当たり運賃 xx 円), B 船(RORO 船, 船速 20.0 ノット, 船価 24 億円, 航海時間 32 時間, トン当たり運賃 yy 円)といった投入船舶の代替案を列挙して納期に合致したルートを選択する場合に整数変数を 1、選択しない場合に 0 とするように定式化する、等です。この点については今後検討してみたいと思います。

2) この事例では北海道の道東と道南両地域に分散する酪農家からの生乳が小樽, 苫小牧, 釧路経由の海路と JR 貨物、さらに道路利用で本州に持ち込まれ、東京を仕向地とする輸送を対象にしています。従って、本質的には図 3 ないし同図で港 A と港 C を除去したモデル構造を持っています。そのため簡単ではあるが最短路問題では解けない形式だと考えられます。