

インターモーダル輸送によるエネルギー節減効果の計測*

Measurement of Energy Savings Effect by Intermodal Freight Transport*

By 花岡伸也(Shinya HANAOKA)**・Taqsim Husnain ***

1. はじめに

タイではエネルギー消費の約40%が交通部門であり、産業部門や民生部門を上回る最大の消費部門となっている¹⁾。貨物交通はトラック輸送が中心で、近年はトンベースで87%~89%を占めている²⁾。そのため、エネルギー消費の増大のみならず、道路混雑や大気汚染の原因となっている。これらの問題を解決する手段の一つとして、鉄道や水運を活用したインターモーダル輸送の推進が挙げられる。

本研究では、インターモーダル輸送によるエネルギー消費の節減効果を、トラックのみ・鉄道インターモーダル・水運インターモーダルの3つの貨物輸送手段のモーダルシェア(%)を決定変数としたエネルギー消費最小化モデルを用いて計測する。ただし、貨物輸送における輸送手段選択の主要因は輸送料金と輸送時間であることから、エネルギー消費だけでなく、輸送料金最小化と輸送時間最小化の3つを目的関数とした多目的最適化問題として定式化する。ケーススタディでは、タイで集計したデータを用いて、エネルギー最小化となる貨物輸送のモーダルシェアを示す。また、トラックのみを輸送手段とした場合とエネルギー消費量を比較する。

2. モデル

(1) データ収集

最適化モデルではエネルギー消費効率などの各種パラメータの設定する必要があるため、アンケート調査を行った。データ収集の対象地域は、タイのハブ港湾であるラムチャバン港とバンコク郊外にある

大規模コンテナデポ(Inland Container Depot, ICD)の周辺で、そこでコンテナ貨物を取り扱っている物流事業者、フォワーダー、荷主を対象にアンケートを配布した。ラムチャバン港とICDの間には両者を直行する鉄道路線が整備されており、タイ国内でインターモーダル輸送が積極的に活用されている唯一の地域でもある。

2005年12月から2006年1月にかけて、300サンプルを、面談、電話、郵送、ファックス、電子メールの各手段で配布し、137の回答を得た。そのうち、回答内容の整合性に問題があるサンプルを除いた合計110サンプル(荷主48、物流事業者32、フォワーダー30)を、パラメータ設定に用いるデータとした。調査票では、輸送手段、手段別輸送重量、輸送手段選択における重要な要因、トラックのタイプ別(中型トラック[6輪]、大型トラック[8-10輪]、トレーラー[18輪])利用頻度、トラック空輸送の割合、トラックのタイプ別燃料消費量(燃費効率)、代表的な輸送手段パターン(インターモーダル輸送利用の有無)とその時の輸送スピードやターミナルでの積替時間・利用料金、を尋ねた。

なお、各データ(輸送重量、燃料消費量、輸送スピード、積替時間)の信頼性を確認するため、2006年2月に同地域の別の企業に対してもアンケート調査を実施し、62の有効サンプルを得た。パラメータ設定に用いた110サンプルと新サンプルの間で、各データの平均値の検定(棄却域5%の両側t検定)を実施し、両者の母集団に有意な差はないこと、つまりデータに安定性があることが確認されている。

回答における輸送手段(トンベース)の割合は、トラック77.3%、鉄道13.9%、水運8.8%となり、タイ全土のデータ²⁾と比較すると、アンケート対象地域の特性として鉄道輸送が高い割合を示している。輸送手段選択における重要な要因を「輸送時間」「輸送費用」「顧客満足度:輸送料金」「信頼性」「セキュリティ」の5項目で尋ねたところ、最も重要な要因として「輸送料金」が挙げられ、その次が「輸

*キーワード: インターモーダル輸送, エネルギー消費, 多目的最適化問題

**正会員 博(情報科学) アジア工科大学院
PO Box 4, Klong Luang, Phatumthani 12120,
THAILAND, TEL: +66-2-524-5681;
E-mail: hanaoka@ait.ac.th

***非会員 修(工学) アジア工科大学院

送時間」となった。通常、貨物輸送でエネルギー消費を考へて輸送手段を選択することはない。そこで本研究では、前述のとおり、エネルギー消費、輸送料金、輸送時間の3つを最小化する多目的最適化問題として定式化する。

(2) 多目的最適化問題の定式化

(a) 定式化

本研究では、既往研究³⁾⁻⁵⁾を参考に、モーダルシェアを決定変数 s_j として、トンキロベースでエネルギー消費関数を定式化した。 f_1 がエネルギー消費最小化、 f_2 が輸送時間最小化、 f_3 が輸送料金最小化である。制約条件はモーダルシェアの合計が1 (1) することと、決定変数の非負条件である。

$$\min f_1 = \sum_j \sum_k \mu_k \times s_j \times d_k \times W \times \alpha_k \times \beta_k \quad (2)$$

$$\min f_2 = \sum_j \sum_k \frac{d_k}{v_k} \times s_j \times W \times \rho_k \times \sigma_k + \sum_j \sum_{k=1} D_{k,k+1} \times s_j \times W \quad (3)$$

$$\min f_3 = \sum_j \sum_k c_k \times s_j \times d_k \times W + \sum_j \sum_{k=1} C_{k,k+1} \times s_j \times W \quad (4)$$

$$s, t, \quad \sum_j s_j = 1;$$

$$s_j \geq 0; \quad \forall j$$

f_1 : total energy consumption (BTU, British Thermal Unit)

f_2 : total time-factor (ton-hr)

f_3 : total shipment charge (baht)

s_j : freight share (%) of route j

j : number of available route(s)

k : number of available mode(s) in route j

μ_k : energy efficiency of mode k (BTU/ton-km)

v_k : speed of mode k (km/hr)

c_k : unit shipment charge of mode k (baht/ton-hr)

d_k : distance traveled by mode k (km)

W : total freight volume (ton)

α_k : energy adjustment factor for load

β_k : energy adjustment factor for empty haulage

σ_k : time adjustment factor for load

ρ_k : time adjustment factor for empty haulage

$D_{k,k+1}$: transshipment time at terminal from mode k to k+1 (hr)

$C_{k,k+1}$: charge at port/terminal from mode k to k+1 (baht/ton)

(b) パラメータの設定

ここではパラメータの設定方法を解説する。

トラックのタイプ別エネルギー消費効率は、各ト

ラックの平均輸送重量と燃費効率のデータから、満載時の値を μ_k とした。単位は一般的に利用されている[BTU/ton-km]を用いた³⁾⁻⁵⁾。鉄道と水運(内陸水運を想定)については参考文献⁶⁾の値を用いた。

トラックのロードファクター(LF)(容量あたりの輸送重量)はエネルギー消費効率に大きな影響を与えることから、できる限り現実を反映可能な値を設定する必要がある。そこで本研究では、LFに応じて μ_k が変化する調整パラメータを α_k とした。米国のE-CAFE⁷⁾では、車両の燃料消費は重量に比例すると仮定している。本研究もこの仮定に従い、アンケート調査の集計結果からトラックのタイプ別にLFに対応した燃料消費量を求め、そこから対応するエネルギー消費効率を推定し、 α_k を定めた。

一方、貨物輸送では空輸送の割合は無視できない。また、空輸送時の車両のエネルギー消費量も満載時とは異なる。ここで、本研究では空輸送の割合を図-1の考え方を用いて定める。つまり、1往復の復路が空輸送のとき100%であり、2往復で1度の復路が空輸送のときは50%となる。アンケート調査では、空輸送の割合が、荷主が平均51.0%、物流事業者が平均45.9%、フォワーダーが平均43.1%との結果となり、空輸送の割合は高いことが示された。本研究では、空輸送と満載輸送の燃料消費量の比率から、空輸送の割合に応じて μ_k が変化する調整パラメータ β_k を定めた。

Distance from Origin to Destination = 50 km
 Fuel efficiency (FCL) = 2 km/liter
 Fuel consumption (FCL) = 15 liters
 Fuel efficiency (Empty) = 3 km/liter
 Fuel consumption (Empty) = 10 liters

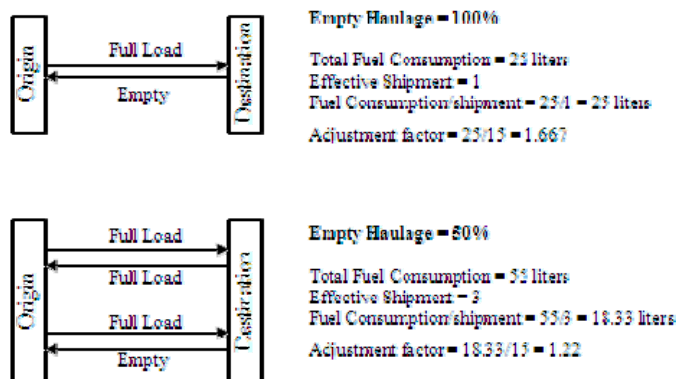


図-1 空輸送の割合の考え方

調整パラメータ α_k , β_k を用いて、貨物の積載重量

に応じたエネルギー消費効率を定めることができる。LFが100%、空輸送が0%のときは両者の乗数は1.0となるが、LFが下がるにつれて、または空輸送割合が上がるにつれて乗数は増加し、トンキロあたりのエネルギー消費効率は悪くなる。

鉄道と水運はLFと空輸送のデータが収集できなかったことから、LFと空輸送を考慮せず、常に満載で輸送すると仮定した。

輸送時間最小化を示す式(2)では、第1項が輸送時間、第2項が積替時間を示している。トラックのタイプを考慮した輸送手段別スピードはアンケートの結果から直接定めた。また、トラックのスピードも貨物重量に応じて変化すると仮定し、空輸送時には満載時より20%速度が増加するとして調整パラメータを設定した。鉄道と水運では、先と同様に常に満載で輸送すると仮定した。積替時間は、アンケート調査から、港（水運からトラック、またはその逆）では平均3.57時間、鉄道ターミナル（鉄道からトラック、またはその逆）では平均4.63時間という結果を得て、それをを用いることとした。

輸送料金は、参考文献^{8), 9)}を参考にして定めた。ただし、港や鉄道ターミナルでの積替料金は、ハンドリング料金のみを考慮した。積替時間が長くなると、追加的に人件費、保管費などが必要となるが、本研究では考慮しないこととした。

(c) 解法

多目的最適化問題を解くにあたり、Miettinen & Mäkeläが開発したソフトウェア WWW-NIMBUS(N

on-differentiable Interactive Multi-objective BUNDLE-based optimization System)を用いた^{10), 11)}。一意な解を求める単目的最適化問題とは異なり、多目的最適化問題では、パレート最適解群（ある目的関数の値を改善するために、少なくとも他の一つの目的関数の値を改悪しなくてはならない解）を求める。WWW-NIMBUSでは、パレート最適解群は遺伝的アルゴリズム（GA）によって導出される。多目的最適化問題の古典的解法であるスカラ化では、計算する前に目的関数間の優先度を定める必要があったが¹²⁾、GAを用いたアルゴリズムでは優先度を定める必要なくパレート最適解群を得ることができる。

3. ケーススタディ

本研究では、図-2に示す仮想ネットワークにモデルを適用する。輸送総重量は200トンとし、トラックのタイプ、ノード間の距離、LFや空輸送（Empty Haulage, EH）の値は任意に定めた。

本研究では、基準となるパレート最適解を「パレート最適解群の中で、各目的関数が取り得る最大値と最小値の中間値となる解」とした。その上で、エネルギー消費に優先度をおいた場合について計算した結果を表-1に示す。選択解1が基準となるパレート最適解である。以下、エネルギー消費量が削減されるにつれて、輸送時間は増加し、輸送料金は減少する結果となった。ただし、輸送料金の感度は小さい。この結果から、エネルギー消費の削減には、輸送時間を犠牲にする必要性が示された。

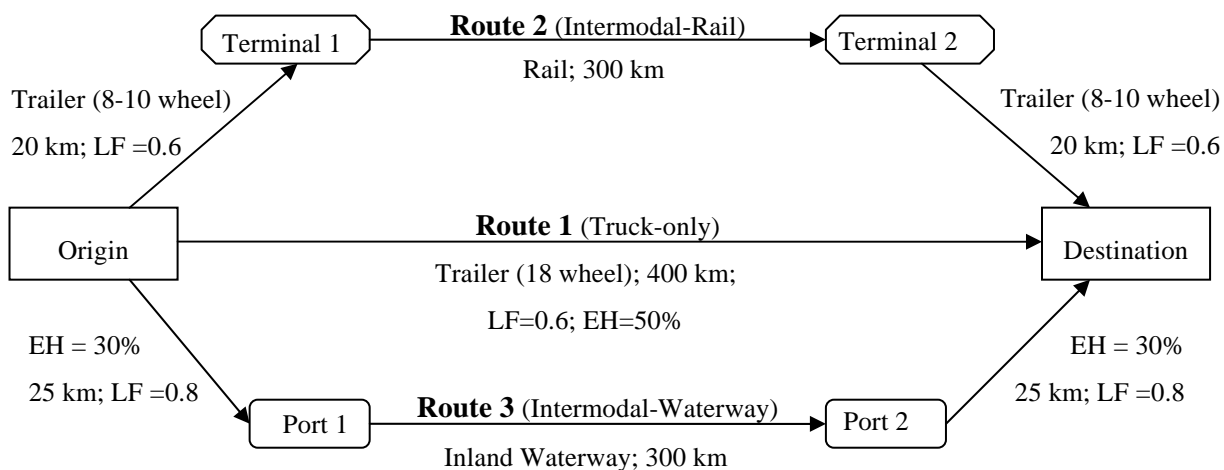


図-2 計算に用いるネットワーク

表-1 エネルギー消費を優先したときのパレート最適解群

Alternatives	Freight Share (%)			Objective Functions		
	Route1 (s_1)	Route2 (s_2)	Route3 (s_3)	Energy (BTU X 10^6)	Time Factor (ton-hr X 10^3)	Charge (baht X 10^3)
1 (基準)	38.46	24.26	37.28	52.11	3.78	92.96
2	32.96	20.80	46.24	49.67	3.98	92.71
3	27.47	17.33	55.20	47.23	4.18	92.46
4	21.98	13.86	64.16	44.79	4.38	92.21
5	16.48	10.40	73.12	42.35	4.58	91.96
6	10.99	6.93	82.08	39.90	4.79	91.70
7	5.49	3.47	91.04	37.46	4.99	91.45
8	0.00	0.00	100.00	35.02	5.19	91.20

表-2 トラックのみ（ルート1）との比較

Alternatives	Energy (BTU X 10^6)	Change (%)	Time Factor (ton-hr X 10^3)	Change (%)	Charge (baht X 10^3)	Change (%)
1 (基準)	52.11	-24.67	3.78	59.63	92.96	-4.75
2	49.67	-28.20	3.98	68.14	92.71	-5.01
3	47.23	-31.73	4.18	76.66	92.46	-5.27
4	44.79	-35.26	4.38	85.17	92.21	-5.53
5	42.35	-38.78	4.58	93.68	91.96	-5.78
6	39.90	-42.31	4.79	102.20	91.70	-6.04
7	37.46	-45.84	4.99	110.71	91.45	-6.30
8	35.02	-49.37	5.19	119.22	91.20	-6.56

また、パレート最適解群の中でエネルギー消費を最小化する選択解8では、水運を活用したインターモーダル輸送（ルート3）が100%という結果となった。エネルギー消費最小化には水運インターモーダルが望ましいことを意味しているが、非現実的な解である。

次に、トラックのみ、つまりルート1が100%のシェアの時との差を比較した結果を表-2に示す。基準解のケースで、インターモーダル輸送によりエネルギー消費量が約25%削減されることが示された。しかし、その分輸送時間は約60%増加している。インターモーダル輸送によるエネルギー節減効果は大きいですが、トレードオフ関係は無視できない。

参考文献

- 1) Department of Energy Development and Promotion (2000) Thailand Energy Situation 2000, Ministry of Science, Technology and Environment in Thailand.
- 2) Ministry of Transport (2003) Annual Report of Ministry of Transport in Thailand.
- 3) 日本エネルギー経済研究所：モーダルシフトとエネルギー効率—トラックと鉄道の比較を中心として—，研究調査報告IEE-SR243，1993.
- 4) Greene, D.L. and Fan, Y. (1994) Transportation energy intensity trends: 1972-1992, Transportation Research Record, 1475, 10-19.
- 5) Schipper, L. (1997) Energy use and carbon emissions from freight in 10 industrialized countries: An analysis of trends from 1973 to 1992, Transportation Research Part D, 2(1), 57-75.
- 6) Regional Economic Policy Support Facilities (2005) Promoting Efficient and Competitive Intra-ASEAN Shipping Services. Thailand Country Report. Australia: PDP Australia Pty Ltd / Meyrick and Associates.
- 7) Enhanced-Corporate Average Fuel Economy (2003) Report on Development of an Enhanced-CAFÉ Standard.
- 8) Ministry of Transport (2001) The study of actual (freight) transportation cost by roads, waterways and railways. http://www.mot.go.th/publish_news/study1.htm
- 9) State Railway of Thailand (2004) Annual Report of State Railway of Thailand (SRT).
- 10) Miettinen, K. and Mäkelä, M.M. (2000) Interactive multi-objective optimization system WWW-NIMBUS on the internet, Computers & Operations Research, 27, 709-723.
- 11) Miettinen, K. and Mäkelä, M.M. (2006) Synchronous approach in interactive multi-objective optimization, European Journal of Operational Research, 170, 909-922.
- 12) Bazaraa, M.S., Sherali, H.D., and Shetty, C.M. (1993) Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. (2nd Ed.). New York: John Wiley & Sons.

4. まとめ

本研究では、インターモーダル輸送によるエネルギーの節減効果を計測することを目的に、多目的最適化問題を定式化し、エネルギー消費を最小化する問題を解いた。各パラメータの感度分析結果については、講演時に発表する。

今後の課題として、タイ国内の貨物輸送ネットワークにモデルを適用すること、また鉄道と水運のロードファクターと空輸送を考慮して定式化すること、が挙げられる。