

# 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

—タイを事例として—

タイではエネルギー消費量の38%が運輸部門に起因しており、また貨物輸送の92%がトラックによって輸送されている。トラック輸送はCO<sub>2</sub>排出の主要因の1つであることから、鉄道や水運によるインターモーダル輸送の活用が求められている。本研究では、インターモーダル輸送の活用によるエネルギー節減効果を計測するため、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つの輸送機関の機関分担率を決定変数としたエネルギー消費量最小化モデルを輸送時間と輸送料金を加えた多目的最適化問題として構築した。そして、タイのバンコクーハジャイ間の貨物輸送をケーススタディとしてエネルギー節減効果を計測し、モデルの有効性を検討した。

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

**花岡 伸也**

HANAOKA, Shinya

博(情科) 東京工業大学大学院理工学研究科准教授

**タクシム・ハスナイン**

Taqsim HUSNAIN

修(工) ジョージ・ワシントン大学博士後期課程  
(George Washington University, Doctoral Student)

**川崎 智也**

KAWASAKI, Tomoya

修(工) 東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程

**ピシェ・クナダムラクス**

Pichet KUNADHAMRAKS

博(工) タイ運輸省運輸交通政策計画室  
(Ministry of Transport, Office of Transport and Traffic Policy and Planning (OTP), Thailand)

## 1—はじめに

タイでは運輸部門が最大のエネルギー消費部門であり、38.3%を占める<sup>1)</sup>。そのうち、乗用車とトラックで78.6%が消費され、鉄道が0.5%、水運が4.6%、残り16.3%が航空である<sup>2)</sup>。また、タイ国内では貨物の多くがトラックによって輸送されており、国内貨物輸送のメトリックトンベースの機関分担率(2005年)は、トラック92.8%、水運(海上、内陸)5.1%、鉄道2.1%、航空0.01%である<sup>3)</sup>。トラック輸送はトンキロあたりのエネルギー効率が相対的に悪く、CO<sub>2</sub>排出の主要因の1つとなっている。また、道路混雑や大気汚染排出も引き起こす。

国家開発の長期ビジョンを示すものとして、タイでは国家経済社会開発計画(National Economic and Social Development Plan)が1962年から策定されており、5カ年毎に計画の目的と目標が設定される。2002年に策定された第9次計画では、経済的安定性・持続性の確保、国家の発展基盤の確立、貧困の解消などが目的となっており、その具体策の中にはエネルギー消費量やロジスティクス費用の削減が含まれている<sup>4)</sup>。

貨物輸送の分野でエネルギー消費量を削減する手段として、インターモーダル輸送(複合一貫輸送)<sup>注1)</sup>の活用がある。しかし、タイのインターモーダル輸送を対象とした従来研究は、インターモーダル輸送のパフォーマンスレベルの評価手法を提案した筆者らの研究<sup>5)</sup>以外は見あた

らないのが現状である。

本研究では、インターモーダル輸送の活用によるエネルギー節減効果の計測を試みる。具体的には、インターモーダル輸送を含めた複数の輸送機関選択肢を考え、エネルギー消費量を最小化する最適な輸送機関間の機関分担率を求めるモデルを構築する。そして、エネルギー消費量が最小化されたときの機関分担率とケーススタディ地域における実際の機関分担率との比較から、エネルギー消費削減量を計測する。

エネルギー節減効果を計測するためには、トラック、鉄道車両、船舶など異なるエネルギー効率を持つ輸送機関のエネルギー消費量を、同一OD、同貨物量の条件下で推定する必要がある。本研究では、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つの輸送経路が実際に利用可能なタイのバンコクーハジャイ間をケーススタディとし、モデルの有効性を検討する。

ただし、現実には、荷主、物流事業者、フォワーダーなどは、主に輸送料金と輸送時間を考慮して輸送機関を選択している。そこで本研究では、貨物輸送の機関選択にエネルギー消費量を考慮すると仮定する。これは、間接的にはCO<sub>2</sub>排出量を考慮すると想定したものである。その上で、輸送料金と輸送時間だけでなく、エネルギー消費量を含めた3つの目的関数を最小化する多目的最適化問題としてモデルを構築する。そして、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1つの目的関数の値を

改悪しなくてはならない解<sup>6)</sup>を最適解とする多目的最小化問題を解く。これにより、単目的関数としてエネルギー消費量のみを最小化する機関分担率ではなく、パレート解となる機関分担率において、輸送料金と輸送時間がどの程度影響を受けるのかも計測できる。さらに複数のパレート解を示すことで、意思決定者の判断を支援できると考える。

また、モデルに入力するいくつかのパラメータに対して感度分析を実施することで、計算結果の信頼性も検討する。

インターモーダル輸送の活用によるエネルギー消費削減の効果について、多目的最適化問題の中で位置づけた研究は、筆者らの知る限り本研究が初めてである。

## 2—モデル

### 2.1 多目的最適化問題の定式化

本研究では、日本エネルギー経済研究所<sup>7)</sup>、Greene and Fan<sup>8)</sup>、Schipper, et al<sup>9)</sup>を参考に、機関分担率を決定変数( $s_j$ )とする多目的最適化問題を定式化する。

貨物輸送の機関選択において重要となる要因を明らかにするため、荷主、物流事業者、フォワーダーを対象に2005年12月から2006年1月にアンケート調査を実施した(アンケート調査の詳細は3.1で後述する)。輸送機関選択を決定する主要因として、「輸送時間」「輸送料金」「信頼性」「セキュリティ」の優先順位を尋ねたところ、最も重要な要因として「輸送料金」が挙げられ、その次が「輸送時間」となった。そこで本研究では、エネルギー消費量に加え、輸送料金、輸送時間の3つの変数を目的関数とする多目的最適化問題として定式化する。

目的関数は、 $f_1$ がエネルギー消費量最小化(式(1))、 $f_2$ が輸送時間最小化(式(2))、 $f_3$ が輸送料金最小化(式(3))である。制約条件は、機関分担率の合計が1になることと(式(4))、決定変数の非負条件である(式(5))。なお、輸送機関 $k$ は鉄道、水運だけでなくトラックの種別も考慮しており、6輪トラックと18輪トラックは異なる輸送機関となる。

$$\min f_1 = \sum_j \sum_k \mu_{jk} \times s_j \times d_{jk} \times W \times \alpha_{jk} \times \beta_{jk} \quad (1)$$

$$\min f_2 = \sum_j \sum_k \frac{d_{jk}}{v_{jk}} \times s_j \times W \times \sigma_{jk} \times \rho_{jk} + \sum_j \sum_{k-1} D_{jk, j(k+1)} \times s_j \times W \quad (2)$$

$$\min f_3 = \sum_j \sum_k c_{jk} \times s_j \times d_{jk} \times W + \sum_j \sum_{k-1} C_{jk, j(k+1)} \times s_j \times W \quad (3)$$

s.t.

$$\sum_j s_j = 1 \quad (4)$$

$$s_j \geq 0 \quad \forall j \quad (5)$$

$f_1$ : 総エネルギー消費量(BTU)

$f_2$ : 総輸送時間(ton-hr)

$f_3$ : 総輸送料金(Baht)

$j$ : 経路

$k$ : 輸送機関

$\mu_{jk}$ : エネルギー効率(BTU/ton-km)

$v_{jk}$ : 輸送速度(km/hr)

$c_{jk}$ : 単位輸送料金(baht/ton-km)

$d_{jk}$ : 輸送距離(km)

$W$ : 輸送貨物量(ton)

$\alpha_{jk}$ : 積載時のエネルギー消費量補正係数

$\beta_{jk}$ : 空輸送時のエネルギー消費量補正係数

$\sigma_{jk}$ : 積載時の時間補正係数

$\rho_{jk}$ : 空輸送時の時間補正係数

$D_{jk, j(k+1)}$ : 港湾・鉄道ターミナルの積替時間(hr)

$C_{jk, j(k+1)}$ : 港湾・鉄道ターミナルの料金(baht/ton)

$s_j$ : 機関分担率

### 2.2 目的関数

第1の目的関数は、出発地から仕向け地までの貨物輸送に要する総エネルギー消費量の最小化である。本研究では輸送時のエネルギー消費量のみを考慮し、港湾や鉄道のターミナルでのハンドリングに要するエネルギー消費量は、データ取得が難しいことから考慮しないこととする。これにより計算結果が変わる可能性があるが、今後の課題とする。また、エネルギー消費量の単位は、BTU(British Thermal Unit)を用いる。

第2の目的関数は、港湾と鉄道のターミナルでの積替時間を含む、出発地から仕向け地までの総輸送時間の最小化である。式(2)の第1項が輸送時間、第2項が積替時間である。トン単位の輸送時間を計測するため、単位はton-hrを用いる。

第3の目的関数は、出発地から仕向け地までの総輸送料金の最小化である。式(3)の第1項が移動に要する輸送料金、第2項が港湾や鉄道のターミナルの料金である。通貨単位はタイバーツ(Baht)を用いる<sup>注2)</sup>。

### 2.3 入力パラメータ

#### 2.3.1 エネルギー効率( $\mu_{jk}$ )

エネルギー効率は輸送機関別にトンキロ単位で推定する。エネルギー効率は、単位エネルギー消費量を燃費と平均輸送重量で割った値であり<sup>10)</sup>、式(6)で表される。

$$\mu_{jk} = \frac{139,000}{3.7854 \times e_{jk} \times V_{jk}} \quad (6)$$

$\mu_{jk}$ : エネルギー効率(BTU/ton-km)

$e_{jk}$ : 燃費 (km/liter)

$V_{jk}$ : 平均輸送重量 (ton)

1 gallon (US) = 3.7854 liter,

1 gallon of diesel = 139,000 BTU

### 2.3.2 輸送速度 ( $v_{jk}$ )

輸送速度は輸送機関の単位時間あたりの輸送距離で表わされ、式(7)より求める。

$$v_{jk} = \frac{d_{jk}}{t_{jk}} \quad (7)$$

$v_{jk}$ : 輸送速度 (km/hr)

$d_{jk}$ : 輸送距離 (km)

$t_{jk}$ : 輸送時間 (hr)

### 2.3.3 単位輸送料金 ( $c_{jk}$ )

輸送料金は、出発地から仕向け地まである貨物量を輸送するとき、顧客が物流事業者などに支払う料金である。単位輸送料金は、重量あたり輸送料金を距離で割った値として式(8)のように求められる。なお、タイでは各輸送機関の減価償却費用が非常に低いこともあり、固定料金(距離に依存しない料金)は考慮しないこととした。

$$c_{jk} = \frac{B_{jk}}{d_{jk}} \quad (8)$$

$c_{jk}$ : 単位輸送料金 (baht/ton-km)

$B_{jk}$ : 重量あたり輸送料金 (baht/ton)

$d_{jk}$ : 輸送距離 (km)

### 2.3.4 積載時のエネルギー消費量補正係数 ( $\alpha_{jk}$ )

エネルギー効率は、同じ輸送機関でも貨物の積載状況によって異なる。本研究では貨物の積載状況をエネルギー消費量に反映するため、定式化の工夫として、ロードファクター (Load Factor, LF) と空輸送 (Empty Haulage, EH) がエネルギー消費量に与える影響を考慮する。

ロードファクターは輸送機関の貨物容量の利用率を示すもので、式(9)のように表される。貨物輸送の効率性を計る指標として用いられることもある。エネルギー効率はロードファクターにより変化するため、これを用いてエネルギー消費量を補正する。

$$LF = \frac{V_{jk}}{M_{jk}} \quad (9)$$

LF: ロードファクター

$M_{jk}$ : 貨物積載容量 (ton)

輸送機関のエネルギー消費量は概ね重量に比例していることを踏まえると<sup>11)</sup>、異なる積載下でのエネルギー効率はロードファクターとの相関関係によって決定される。そ

こで、ロードファクターによる補正係数を式(10)とする。ロードファクターが100%のとき補正係数は1.0であり、ロードファクターが小さくなるに連れて、式(6)で求めるエネルギー効率が悪くなるように補正係数を定める。補正係数はE-CAFÉ<sup>11)</sup>を参考に輸送機関別に決定した。

$$\alpha_{jk} = \frac{\mu_{jk}^{any}}{\mu_{jk}^{full}} \quad (10)$$

$\alpha_{jk}$ : 積載時のエネルギー消費量補正係数

$\mu_{jk}^{any}$ : 任意積載時のエネルギー効率 (BTU/ton-km)

$\mu_{jk}^{full}$ : 満載時のエネルギー効率 (BTU/ton-km)

### 2.3.5 空輸送時のエネルギー消費量補正係数 ( $\beta_{jk}$ )

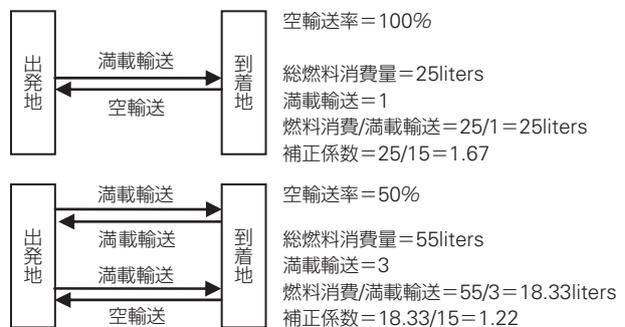
空輸送はロードファクターが0の場合を意味するが、輸送品目の需給関係から必然的に生じることが多い。空輸送が増えるとトンキロあたりのエネルギー効率が悪化することから、空輸送率を補正係数として用いる。これは各輸送機関の出発地と到着地間の積載貨物が空である割合で決定される。本研究では、空輸送率を図-1の考え方を用いて輸送機関別に定め、式(11)のように定式化した。つまり、1往復の復路が空輸送のとき100%であり、2往復で1度の復路が空輸送のときは50%となる。

例

輸送距離 = 30km

燃費 (満載輸送) = 2km/liter, 燃料消費量 (満載輸送) = 15liters

燃費 (空輸送) = 3km/liter, 燃料消費量 (空輸送) = 10liters



■図-1 空輸送率の考え方

$$EH = \frac{N_{jk}^{re}}{N_{jk}^{round}} \times 100 \quad (11)$$

EH: 空輸送率 (%)

$N_{jk}^{re}$ : 復路における空輸送回数 (回)

$N_{jk}^{round}$ : OD間往復回数 (回)

空輸送のエネルギー消費量補正係数は式(12)のように求められる。空輸送が0%のとき補正係数は1.0であり、空輸送率が上がるに連れて、エネルギー効率が悪くなるように補正係数を定める。ロードファクターと同様、輸送機関別に決定した。

$$\beta_{jk} = 1 + \frac{\mu_{jk}^{full}}{\mu_{jk}^{empty}} \times \frac{EH/2}{100 - EH/2} \quad (12)$$

$\beta_{jk}$ : 空輸送時のエネルギー消費量補正係数

$\mu_{jk}^{empty}$ : 空輸送時のエネルギー効率 (BTU/ton-km)

### 2.3.6 時間補正係数(積載時( $\sigma_{jk}$ ), 空輸送時( $\rho_{jk}$ ))

輸送速度も積載貨物量に影響を受ける。空輸送,あるいはロードファクターが1.0未満のときの輸送速度は,満載輸送のときよりも早くなる。よって,エネルギー消費量と同様,輸送時間の算出においてもロードファクターと空輸送による補正が必要である。本研究では,空輸送時の速度は,満載時と比較してトラックは20%,鉄道・水運は10%それぞれ速い,そして積載時は貨物重量に比例して遅くなると仮定し,時間補正係数を設定した。

### 2.3.7 港湾, 鉄道ターミナルの積替時間( $D_{jk, j(k+1)}$ )

インターモーダル輸送では,港湾や鉄道のターミナルで積替時間が必要である。積替時間は,荷捌き,保管,積込み作業,コンテナの移動などにより発生する。本研究では, $D_{jk, j(k+1)}$ を積替時間とし,経路 $j$ における輸送機関 $k$ と $k+1$ 間の積替で発生するとした。単位はhourとした。

### 2.3.8 港湾, 鉄道ターミナルの料金( $C_{jk, j(k+1)}$ )

港湾,鉄道のターミナル料金は数多くの要素で構成されている。港湾や駅によって異なり,施設の利用状況によっても異なる。貨物の単位重量で課金されることもあるが,コンテナのタイプごとに課金されることもある。移入と移出によっても料金は異なる。さらに,荷捌き,保管,積込み作業,コンテナ移動の作業によっても変化する。このように,ターミナルでの積替時には数多くの料金の種類が存在し,単位も様々であるが,目的関数の一貫性を維持するため,本研究では共通費用として必ず発生するハンドリング料金のみを考慮し,単位はbaht/tonとした。 $C_{jk, j(k+1)}$ を積替地点での料金とし,経路 $j$ において輸送機関 $k$ と $k+1$ の間で発生するものとした。一般に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。

## 2.4 最適解

本研究のモデルでは,各目的関数の数値,およびそのときの機関分担率をパレート最適解群として算出する。

多目的最適化問題を解くにあたり,本研究ではMiettinen & Mäkeläが開発したウェブ上のオープンソフトウェア WWW-NIMBUS (Non-differentiable Interactive Multi-objective BUdle-based optimization System)を

用いる<sup>12),13)</sup>。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<sup>14)</sup>。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<sup>15)</sup>,GAを用いたアルゴリズムでは優先度を定めても定めなくてもパレート最適解群を得ることができる。

## 3 エネルギー節減効果の計測

### 3.1 データ収集とパラメータ設定

各種の入力パラメータ設定に必要なデータを収集するため,アンケート調査を実施した。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)の周辺である。ラムチャバン港とICDの間には両者を結ぶ貨物専用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<sup>注3)</sup>。

アンケート調査は2005年12月から2006年1月にかけて,コンテナ貨物を取り扱っている300の荷主,物流事業者,フォワーダーを対象に実施した。面談方式のほか,電話,郵便,ファックス,電子メールで調査票を配布した。その結果,データの大半は面談と電話によって得られ,郵便,ファックス,電子メールによる回答率は非常に低かった。300社のうち137社から回答があり,そこから内容の整合性に問題がある回答を除いた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。

アンケート調査票では,輸送機関別輸送重量,輸送機関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,トラック空輸率,トラックのタイプ別燃費,代表的な輸送機関パターン(インターモーダル輸送利用の有無)とその輸送速度,港湾・鉄道ターミナルでの積替時間・料金を尋ねた。

輸送重量,燃費,輸送速度,積替時間の各データ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追加の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る110サンプルと新サンプル62の間で,各データの平均値の検定(棄却域5%の両側t検定)を実施したところ,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を確認した。

回答における輸送機関の利用割合は,メトリックトンベースでトラック77.3%,鉄道13.9%,水運8.8%となった。1章で示したタイ全土のデータと比較すると,アンケート対象地域の特性として鉄道輸送が比較的高い割合を示して

いる。また、トラックの空輸送率は、荷主、物流事業者、フォワーダーの平均値として47.4%という結果を得た。

### 3.2 ケーススタディ: バンコク-ハジャイ間貨物輸送

本研究では、ケーススタディとしてバンコク-ハジャイ間の貨物輸送ネットワークを対象に、インターモーダル輸送の活用によるエネルギー節減効果を計測する。図-2は、バンコクからハジャイを含んだタイ南部の地図である。このネットワークではトラック、鉄道、海上水運の3つの輸送機関が利用可能であり、図-3で示した模式図のとおり3つの経路がある。タイ運輸省へのインタビュー調査によると、2008年の機関分担率は、トラック94.8%、海上水運4.7%、鉄道0.3%、航空0.2%と、大部分がトラックで輸送されている。輸送品目はclass 4として分類されている米、魚、野菜などが多いため<sup>16)</sup>、それら品目の輸送を想定した。

入力パラメータの設定に当たっては、エネルギー効率、エネルギー消費量補正係数、輸送速度、積替時間については、前節のアンケート調査結果から得た数値を用いた。その他については、タイ高官へのインタビューと文献

調査<sup>17)-19)</sup>から得た実データを用いた。

計算に用いるパラメータのデータセットを表-1にまとめた。一部には多少違和感のある数値もあるが、それ以上に信頼できる数値が見つからなかった場合、それらの値を用いることとした。

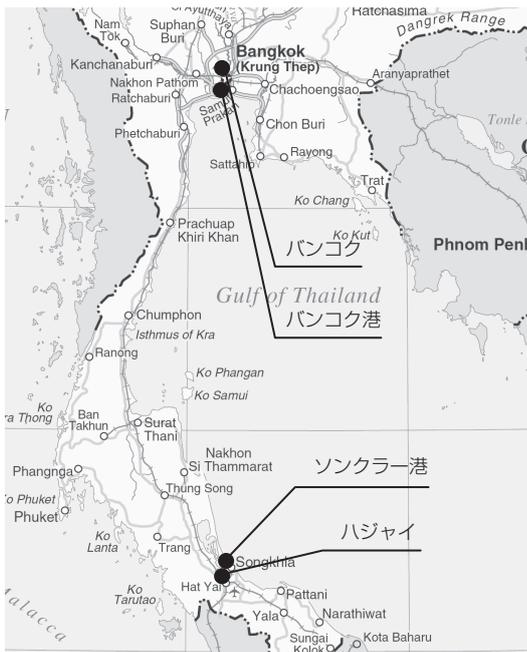
トラック輸送のみの経路1は、インタビュー調査を参考にして輸送機関を18輪トラック(トレーラー)とした。また、鉄道インターモーダルの経路2および水運インターモーダルの経路3のアクセス・イグレスは6輪トラックとした。ハジャイ鉄道ターミナルから貨物の最終仕向地となる都心までの距離は200mと、総輸送距離と比較して非常に短いため、0kmと設定した。

輸送貨物量は200トンと仮定し、各経路におけるロードファクター(LF)と空輸送率(EH)は、タイ運輸省へのインタビュー調査を参考に設定した。

表-1のデータをWWW-NIMBUSに入力し、パレート最適解群とそのときの機関分担率を求めた。結果を表-2に示す。基準解(選択解1)からエネルギー消費量が最小となる選択解(選択解8)までのパレート最適解群を算出している<sup>注4)</sup>。WWW-NIMBUSでは、ある目的関数に優先度を置いてパレート最適解群を求められる。本研究では、エネルギー消費量最小化を優先して計算を行った。このとき、基準解は「パレート最適解群の中で、優先度を置いた目的関数を取り得る最大値と最小値の中間値(最大値と最小値の平均値)となる解」として求められている。

選択解の変化を見ると、エネルギー消費量が削減されると輸送時間は増加し、輸送料金は減少している。つまり、エネルギー消費量と輸送時間はトレードオフの関係にあるが、エネルギー消費量と輸送料金は正の相関関係にある。

基準解での機関分担率は、それぞれトラックのみ(経路1)45%、鉄道インターモーダル(経路2)11%、水運インターモーダル(経路3)44%と算出された。前述した2008年の機関分担率実績はトラック95%と、ほぼトラックのみで輸送していると見なせる。そこで表-3には、2008年の実際の機関分担率<sup>注5)</sup>と比較して、パレート最適解群の機関分担率がどの程度エネルギーを削減しているのか、また他



■図-2 バンコクからハジャイを含んだタイ南部



■図-3 バンコク-ハジャイ間貨物輸送ネットワーク

の目的関数の数値がどの程度変化しているのかについて、その変化率をまとめた。

■表—1 計算に用いたパラメータのデータセット

経路1：トラックのみ	
輸送貨物量	=200ton
エネルギー効率	=480.25BTU/ton-km
輸送距離	=926km
積載時のエネルギー補正係数	=1.45
空輸送時のエネルギー補正係数	=1.23
速度	=43.60km/hr
積載時の輸送時間補正係数	=0.93
空輸送時の輸送時間補正係数	=1.28
単位輸送料金	=0.93baht/ton-km
経路2：鉄道インターモーダル	
輸送貨物量	=200ton
エネルギー効率（トラック）	=1,106.76BTU/ton-km
輸送距離（トラック）	=27km
積載時のエネルギー補正係数（トラック）	=1.25
空輸送時のエネルギー補正係数（トラック）	=1.23
積載時のエネルギー補正係数（鉄道）	=1.09
空輸送時のエネルギー補正係数（鉄道）	=1.05
エネルギー効率（鉄道）	=650BTU/ton-km
輸送距離（鉄道）	=945km
速度（トラック）	=41.1km/hr
積載時の輸送時間補正係数（トラック）	=0.94
空輸送時の輸送時間補正係数（トラック）	=1.28
積載時の輸送時間補正係数（鉄道）	=0.96
空輸送時の輸送時間補正係数（鉄道）	=1.03
速度（鉄道）	=59.51km/hr
積替時間（鉄道ターミナル）	=20hr
単位輸送料金（トラック）	=5.04baht/ton-km
単位輸送料金（鉄道）	=0.46baht/ton-km
鉄道ターミナル使用料	=(45+50) baht/ton
経路3：水運インターモーダル	
輸送貨物量	=200ton
エネルギー効率（トラック）	=1,106.76BTU/ton-km
輸送距離（トラック）	=7+35km
積載時のエネルギー補正係数（トラック）	=1.25
空輸送時のエネルギー補正係数（トラック）	=1.23
積載時のエネルギー補正係数（水運）	=1.43
空輸送時のエネルギー補正係数（水運）	=1.17
エネルギー効率（水運）	=260BTU/ton-km
輸送距離（水運）	=798km
速度（トラック）	=41.1km/hr
積載時の輸送時間補正係数（トラック）	=0.94
空輸送時の輸送時間補正係数（トラック）	=1.28
積載時の輸送時間補正係数（水運）	=0.95
空輸送時の輸送時間補正係数（水運）	=1.17
速度（水運）	=25.37km/hr
積替時間（港湾）	=12hr
単位輸送料金（トラック）	=5.04baht/ton-km
単位輸送料金（水運）	=0.439baht/ton-km
港湾使用料	=(77+68) baht/ton
目的関数代入値	
$f_1$	$=480.25 \cdot 926 \cdot 1.45 \cdot 1.23 \cdot 200 \cdot s_1$ $+ (1,106.76 \cdot 27 \cdot 1.25 \cdot 1.23 + 650 \cdot 945 \cdot 1.09 \cdot 1.05) \cdot 200 \cdot s_2$ $+ (1,106.76 \cdot (7+35) \cdot 1.25 \cdot 1.23 + 260 \cdot 798 \cdot 1.43 \cdot 1.17) \cdot 200 \cdot s_3$
$f_2$	$=926/43.6 \cdot 0.93 \cdot 1.28 \cdot 200 \cdot s_1$ $+ (27/41.1 \cdot 0.94 \cdot 1.28 + 798/25.37 \cdot 0.95 \cdot 1.17 + 2 \cdot 20) \cdot 200 \cdot s_2$ $+ ((7+35)/41.1 \cdot 0.94 \cdot 1.28 + 798/25.37 \cdot 0.95 \cdot 1.17 + 2 \cdot 12) \cdot 200 \cdot s_3$
$f_3$	$=0.93 \cdot 926 \cdot 200 \cdot s_1$ $+ (5.04 \cdot 27 + 0.46 \cdot 945 + 45 + 50) \cdot 200 \cdot s_2$ $+ (5.04 \cdot (7+35) + 0.439 \cdot 798 + 77 + 68) \cdot 200 \cdot s_3$

表—3より、実際の機関分担率と比較して、基準解のケースでエネルギー消費量が25%削減されることが示された。他の選択解においても、水運インターモーダルの分担率増加によりエネルギー消費量が大きく削減されている。この結果より、エネルギー削減のためには、トラックから水運へのモーダルシフトが有効であることがわかる。ただし、エネルギー消費量を最小化する選択解8では、水運インターモーダル輸送（経路3）が100%という結果となった（表—2）。エネルギー消費量最小化には水運インターモーダルへの集中が望ましいことを意味しているが、2008年の水運インターモーダルの機関分担率は僅か4.7%であり、実現は極めて困難である。

表—3において、エネルギー消費量とトレードオフの関係にある輸送時間は、実際の機関分担率と比較して、基準解のケースで37%増加し、他の選択解ではそれ以上に増加している。インターモーダル輸送によるエネルギー削減効果は大きいですが、輸送時間増加というトレードオフの影響は無視できない。また、各選択解の変化率の推移を見ると、輸送時間の感度は大きいものの、輸送料金は感度が小さい。少なくとも本研究のケーススタディにおいて、エネルギー消費量との関係では、輸送時間に配慮することが求められる。

### 3.3 感度分析

本研究ではモデルに入力するパラメータの設定に当たり、いくつかの仮定の下、可能な限り現実に即した数値を用いた。しかし、当然のことながら計算結果は設定した数値の大小に影響を受ける。そこで、計算結果の信頼性を検討するため、トラック速度、港湾使用料、港湾での積替時間の3つのパラメータが機関分担率に及ぼす影響を感度分析した。感度分析は基準解で実施した。

まず、トラック速度変化の結果を図—4に示す。横軸はパラメータであるトラック速度の変化率、縦軸は各経路の機関分担率の変化である。トラックの速度が減少するに従い、経路1のトラックのみの分担率がわずかに減少した。しかし、速度が20%減少時で経路1の分担率は0.103%減少と下げ幅は極めて小さい。以上より、トラックの速度変化は機関分担率に影響を与えないことが示された。

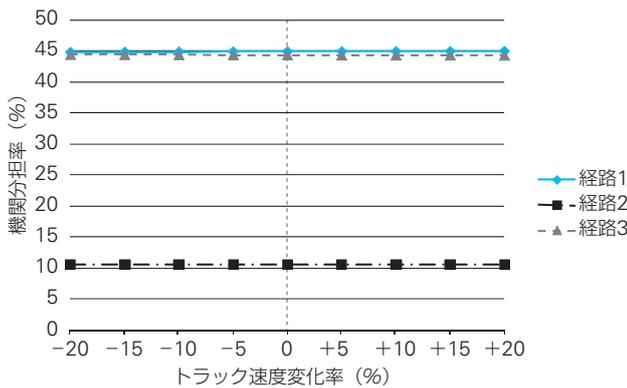
港湾使用料は、半減(-50%)から倍増(+50%)の範囲で各経路の分担率の変化を分析した。結果を図—5に示す。経路2の鉄道インターモーダルに与える感度が高く、港湾使用料50%増加のとき経路2の分担率が7.55%増加し、18.16%となった。逆に、30%削減時は分担率がほぼ0%になった。このように、港湾使用料の増減は鉄道インターモーダルの分担率に影響を与えている。ただし、感度分析範囲内で各経路の分担率の上下関係が逆転する

■表一 二 エネルギー消費量を優先したときのパレート最適解群

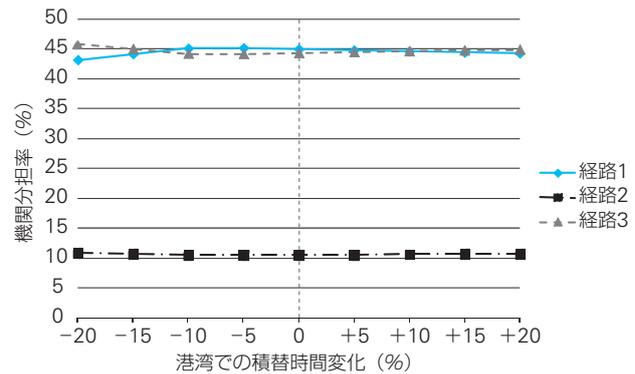
選択解	機関分担率 (%)			目的関数		
	経路1 (s <sub>1</sub> )	経路2 (s <sub>2</sub> )	経路3 (s <sub>3</sub> )	エネルギー消費量 (BTU X 10 <sup>6</sup> )	輸送時間 (ton-hr X 10 <sup>3</sup> )	輸送料金 (baht X 10 <sup>3</sup> )
1 (基準)	44.98	10.61	44.41	124.54	8.69	154.40
2	38.55	9.10	52.35	118.76	9.13	152.54
3	32.13	7.58	60.29	112.97	9.56	150.68
4	25.70	6.06	68.24	107.19	10.00	148.83
5	19.28	4.55	76.17	101.41	10.43	146.97
6	12.85	3.03	84.12	95.62	10.87	145.11
7	6.43	1.52	92.05	89.84	11.30	143.26
8	0	0	100	84.06	11.74	141.40

■表一三 実際の機関分担率がパレート最適解の機関分担率になったときの各目的関数の変化率

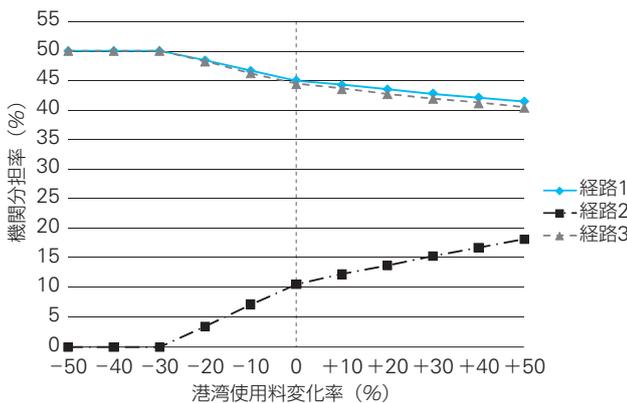
選択解	エネルギー消費量 (BTU * 10 <sup>6</sup> )	変化率 (%)	輸送時間 (ton-hr * 10 <sup>3</sup> )	変化率 (%)	輸送料金 (baht * 10 <sup>3</sup> )	変化率 (%)
1 (基準)	124.54	-25.64	8.69	37.74	154.40	-17.56
2	118.76	-29.10	9.13	44.72	152.54	-18.55
3	112.97	-32.55	9.56	51.53	150.68	-19.54
4	107.19	-36.00	10.00	58.51	148.83	-20.53
5	101.41	-39.45	10.43	65.32	146.97	-21.53
6	95.62	-42.91	10.87	72.30	145.11	-22.52
7	89.84	-46.36	11.30	79.11	143.26	-23.51
8	84.06	-49.81	11.74	86.09	141.40	-24.50



■図一四 トラック速度変化による機関分担率変化



■図一六 港湾での積替時間変化による機関分担率変化



■図一五 港湾使用料変化による機関分担率変化

レベルではない。なお、経路1が経路3と同様の傾向で分担率が変化する理由は不明である。

港湾での積替時間変化を示した図一六では、12%削減と9%増加のとき、経路3の水運インターモーダルと経路1のトラックのみの分担率の上下関係が逆転している。しか

し、分担率の変化自体は非常に小さく、感度は高くない。

以上より、3つのパラメータを感度分析した結果、計算結果は比較的安定しており、計算結果に信頼性があることが示された。

#### 4 結論

本研究では、エネルギー消費量、輸送時間、輸送料金の3つの目的関数を最小化する多目的最適化問題としてモデルを構築し、インターモーダル輸送の活用によるエネルギー削減効果の計測を試みた。定式化においては、貨物の積載状況をエネルギー消費量と輸送時間に反映するため、ロードファクターと空輸送を補正係数として加える工夫を行った。

タイのバンコクーハジャイ間の貨物輸送ネットワークにモデルを適用した結果、ほぼトラックのみで貨物が輸送され

ている現状と比較して、パレート最適の基準解(トラックのみ45%, 鉄道インターモーダル11%, 水運インターモーダル44%)のとき, エネルギー消費量が25%削減することを示した。また, 輸送時間がエネルギー消費量とトレードオフの関係になっていることを示し, エネルギー消費量を最小化するには輸送時間を犠牲にする必要性を明らかにした。さらに, トラック速度, 港湾使用料, 港湾での積替時間の3つのパラメータを対象に感度分析を実施し, 計算結果に信頼性があることを確認した。

今後の課題として, 一般化費用を用いた単目的関数への変換の試みが挙げられる。エネルギー消費量と輸送時間は, 貨物に対する適切なエネルギー価値および時間価値がわかれば費用に換算できる。今後, エネルギー価値や時間価値の推定, そして単目的関数による最小化問題の定式化および最適解の導出に取り組みたいと考えている。また, インターモーダル輸送の活用には, 輸送機関に適した貨物の特徴を把握することも重要である。輸送機関別の品目情報収集も今後の課題として挙げられる。

**謝辞:** 本研究は運輸政策研究所の客員研究員として遂行した研究をまとめたものである。ご支援頂いた運輸政策研究所に厚く感謝申し上げます。また, 貴重なご指摘をいただいた匿名の査読者にも感謝の意を表したい。

#### 注

注1) インターモーダル輸送とは, ある輸送単位の物品を組み替えることなく, 鉄道車両, トラック, 船舶, 航空機などの異なった輸送機関を組み合わせる輸送形態のことである。

注2) 1円=0.37Baht(2009年1月時点)。

注3) ラムチャバン港とICDを結ぶ貨物専用鉄道路線は, State Railway of Thailand(SRT:タイ国鉄)によって1996年から運用されている。1997年と1998年には, 両者間で運ばれるコンテナ貨物量はトラックよりも鉄道の方が多かったが, 1999年に半分ずつとなり, 以後はトラック輸送による貨物量が増え続け, 2008年には鉄道25%, トラック75%となっている。鉄道輸送による貨物量が大きく伸びない一因として単線の問題があり, SRTは複線化を検討している。(データは2009年1月に実施したSRTへのインタビュー調査で入手した資料に基づく)。

注4) パレート最適解は無数にあるが, WWW-NIMBUSでは, 優先した目的関数の基準解と最適解の間で, 等間隔に最大15までパレート最適解を抽出できる。

注5) 航空を除いてから再接分したトラック94.98%, 海上水運4.7%, 鉄道0.3%を用いた。

#### 参考文献

- 1) Energy Policy and Planning Office[2006], "Energy Data Notebook Quarterly Report", Ministry of Energy, Thailand.
- 2) Energy Policy and Planning Office[2003], "Energy Strategy: Energy for Thailand's Competitiveness", Ministry of Energy, Thailand.
- 3) Ministry of Transport[2005], "Domestic Freight Transport Statistics", Ministry of Transport, Thailand.
- 4) バンコク日本人商工会議所[2004], タイ国経済概況2004/2005年版。
- 5) Kunadhamraks, P. and Hanaoka, S.[2008], "Evaluating the logistics performance of intermodal transportation in Thailand", *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, Vol.20, No.3, pp.323-342.
- 6) Collette, Y. and Siarry, P.[2003], "Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies", Springer.
- 7) 日本エネルギー経済研究所[1993], "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」, No. 93-6.
- 8) Greene, D.L. and Fan, Y.[1994], "Transportation Energy Intensity Trends: 1972-1992", *Transportation Research Record*, No.1475, pp.10-19.
- 9) Schipper, L., Scholl, L. and Price, 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*, Vol.2, No.1, pp.57-76.
- 10) Department of Energy[1982], "Energy Efficiency in Transportation", Department of Energy, USA.
- 11) National Highway Traffic Safety Administration[2003], "Development of an Enhanced-CAFÉ Standard", Corporate Average Fuel Economy (CAFÉ), USA.
- 12) Miettinen, K. and Mäkelä, M.M.[2000], "Interactive Multi-objective Optimization System WWW-NIMBUS on the Internet", *Computers & Operations Research*, Vol.27, No.7-8, pp.709-723.
- 13) Miettinen, K. and Mäkelä, M.M.[2006], "Synchronous Approach in Interactive Multi-objective Optimization", *European Journal of Operational Research*, Vol.170, No.3, pp.909-922.
- 14) Miettinen, K., Mäkelä, M.M. and Toivanen, J.[2003], "Numerical comparison of some penalty-based constraint handling techniques in genetic algorithms", *Journal of Global Optimization*, Vol. 27, No.4, pp.427-446.
- 15) Bazaraa, M.S., Sherali, H.D., and Shetty, C.M.[1993], "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms(2nd Ed.)", John Wiley & Sons.
- 16) Ministry of Transport[2006], "The Development of Multimodal Transport and Logistics Supply Chain Management for Implementation of Action Plan", Ministry of Transport, Thailand.
- 17) PDP Australia Pty Ltd/Meyrick and Associates[2005], "Promoting Efficient and Competitive Intra-ASEAN Shipping Services. Thailand Country Report", REPSF Project No.04/001, Association of Southeast Asian Nations(ASEAN).
- 18) Ministry of Transport[2001], "The Study of Actual(freight) Transportation Cost by Roads, Waterways and Railways", Ministry of Transport, Thailand.
- 19) State Railway of Thailand[2004], "Annual Report of State Railway of Thailand", Thailand.

(原稿受付 2009年4月20日)

## Measurement of Energy Savings Effect by Intermodal Freight Transport in Thailand

By Shinya HANAOKA, Taqsim HUSNAIN, Tomoya KAWASAKI and Pichet KUNADHAMRAKS

In Thailand, transport sector is the largest energy consuming sector (38%). Road haulage of freight transport accounts for approximately 92% of total domestic freight movements. Accordingly, it is one of the largest contributors to adverse environmental impacts. This study presents one option to reduce energy consumption through modal shift from trailer to intermodal transport involving railway and waterway. It focuses on freight movements between Bangkok and Hat Yai in Thailand. Energy savings are measured by multi-objective optimization model using decision variables consisting of three mode options: trailer only, intermodal-rail and intermodal-waterway. In addition to energy consumption, the objective function also includes time and charge of shipment factor.

**Key Words :** *intermodal transport, energy consumption, multi-objective optimization model*

この号の目次へ <http://www.jterc.or.jp/kenkyusyo/product/tpsr/bn/no47.html>