

輸送時間変動下における クロスボーダー輸送モデルの開発

川崎 智也¹・花岡 伸也²

¹学生会員 東京工業大学大学院博士後期課程 理工学研究科国際開発工学専攻
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1-14-12)

E-mail: kawasaki@tp.ide.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学大学院准教授 理工学研究科国際開発工学専攻(同上)

E-mail: hanaoka@ide.titech.ac.jp

本研究では、内陸開発途上国が港湾にアクセスする際のクロスボーダー輸送において、国境と港湾で直面する輸送時間変動をボトルネックとして考慮した経路選択モデルを提案し、各ボトルネック改善効果をシナリオ分析するものである。モデルの特徴的な点としては、各ボトルネックでの輸送時間変動が原因として、期待到着時間が確率的に変動する点と、各ボトルネックでの輸送時間分布を畳み込み、一つのボトルネックとして一元的に表現している点にある。シナリオ分析では、国境および港湾における輸送時間信頼性が向上した場合について分析した。港湾は国境と比較して信頼性が低いため、港湾信頼性向上は国境信頼性向上と比較して、より効果が大きいことが分かった。港湾選択では、両ケース共に類似の傾向を示しており、各経路での輸送時間信頼性の差が縮まるに従ってラムチャパン港のシェアが減少し、ベトナム港湾のシェアが上昇することが分かった。

Key Words : inland cargo flow, shipment time variability, cross-border transport, landlocked developing country, Lao PDR

1. はじめに

内陸開発途上国は沿岸に位置する開発途上国と比較してGDP成長率が低い¹⁾。また、Gallup²⁾らは内陸国であること自体が国の経済成長率を0.5%引き下げている。世界銀行³⁾によると、多くの内陸開発途上国では、経済発展する上で二つの問題を抱えている。一つは海に接する近接国も開発途上国であることで、もう一つは米国、欧州、日本など世界の主要経済市場から離れていることである。“離れていること”とは単純に距離だけの問題ではなく、クロスボーダー輸送のボトルネック⁴⁾として認識されている国境や開発途上国である近接国の港湾通過が必要であることを内包している。

海上輸送は規模の経済などの理由から、国際貿易には必要不可欠であり、それは内陸国にとっても同様である。しかし、基本的に内陸国には自国内に港湾が存在しないことから、港湾アクセスには近接国の通過が必須である。港湾アクセスはクロスボーダー輸送となり、少なくとも一回の国境通過が必要である。国境通過は輸送時間と費

用を著しく増大させ、貿易活動に悪影響を及ぼす。国境通過による金銭的、時間的費用が原因となり、内陸国の輸出入量は8割減少しているという報告もある⁵⁾。越境の困難さを示す例として、Mackellarら⁶⁾の研究がある。それによると、アフリカ大陸における国境通過費用は、約1,600kmのトラック輸送または約11,000kmの海上輸送と同等の費用を要することが確認されている。

国境に加え、開発途上国に位置する港湾が著しく輸送時間の信頼性を害することが一般的に認識されている⁴⁾。例えば、内陸開発途上国であるウガンダのゲートウェイ港湾であるケニアのモンバサ港では、時間変動が激しく、30日の待ち時間を強いられることがある⁴⁾。ヴェンチャン-ラムチャパン港間の最長と最短輸送時間⁷⁾の差を比較すると、国境では約10時間、港湾では約15時間の差が生じている。また、開発途上国の都市間および国間リンクでは、交通量が少ないことから、トラックは自由流速度で運行されている⁸⁾。

このように、内陸開発途上国から近接国の港湾にアクセスするクロスボーダー輸送では、二つのボトルネック

により強い輸送時間変動が発生している。これらの問題を解消するために、大メコン河流域圏（GMS, Greater Mekong Subregion）では、国境におけるシングルストップの実施や国間のトラック相互乗り入れなど、活発な投資が行われようとしている⁹⁾。様々な施策の効果を定量的に把握するためには、上で挙げた二つのボトルネックのような、クロスボーダー輸送の特徴を捉えた経路選択モデルが必要である。当分野においては、柴崎、渡部¹⁰⁾の国際コンテナ貨物流動モデル（MICCS）が代表的であり、荷主の港湾選択において船会社との相互依存関係を考慮している点が特徴的である。国境通過に関しては、実際に越境地点で遭遇する「狭義の越境抵抗」と越境地点以外や輸送開始以前の準備段階で発生する費用等の「広義の越境抵抗」を越境輸送抵抗費用として考慮している。越境抵抗は文献や調査などから5段階に設定されており、越境抵抗値を輸送の一般化費用に考慮している。しかしながら、強い輸送時間変動下でのクロスボーダー輸送において、経路選択に大きな影響を及ぼすと考えられる時間変動費用が含まれていない。国境や港湾では、実際の通過時間より、それらの地点での時間変動が荷主の経路選択を決定する期待一般化費用に大きく影響するものと考えられる。また、港湾はボトルネックとして扱われていない。そこで本研究では、輸送時間などの客観的数値を入力値とした、時間変動費用を考慮した経路選択モデルを構築する。構築されたモデルを用いて、ラオス発タイまたはベトナムの港湾までをケーススタディとして、クロスボーダー輸送促進の為の施策がどのように内陸貨物輸送に影響を及ぼすのかを考察する。既存研究において、輸送時間変動を考慮した開発途上国のクロスボーダー輸送における経路選択モデルは存在しない。

2. モデルの概要

(1) 研究の対象

本研究が対象とする経路は、本船甲板渡し（FOB, Free on Board）を交易条件と仮定し、内陸開発途上国の港湾アクセスにおける陸上輸送の責任範囲内とする。FOBによると、貨物の売り主（輸出者）は貨物船に荷物を積みまでの貨物輸送に関わる全ての費用と盗難、損傷などのリスクを負わなければならない。それ以降は買い主（輸入者）が全ての費用とリスクを負担する。したがって、本研究では、ラオスに位置する荷主の倉庫あるいはトラックターミナルを出発し、国境を通過して、タイまたはベトナムの港湾で貨物船に荷物を積みに至るまでのクロスボーダー経路とする（図-1）。出発地はヴェンチャンまたはサワナケットで、到着地はタイまたはベトナムの港湾である。また、実際の港湾アクセスでは、一港湾に

つき一経路であることが一般的であるので、経路および港湾選択は同時に決定される。つまり、リンクベースの経路選択ではなく、ルートベースの意思決定問題となる。したがって、本研究では、内陸開発途上国から海上輸送を利用して輸出される貨物量を所与として近接国の港湾までの経路別貨物量を出力する経路選択モデルの開発を目指す。なお、本研究で開発するモデルは、輸出入の両場合で適用可能である。

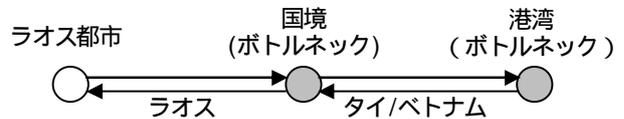


図-1 研究の対象経路

(2) 荷主の行動仮説と本モデルの特徴

本研究では、国際陸上貨物輸送市場の主たる行動主体である荷主に着目する。このほかの行動主体として、フォワーダーや3PLなども存在するが、簡略化および既存研究¹⁰⁾との整合性を図ることを目的として、荷主と表現する。荷主は期待一般化費用が最小となるように、輸出入時の利用経路を選択するものとする。荷主の港湾選択では、船社との関係も重要であるが、インフラ整備などの施策効果が把握が困難になること、ベトナムの港湾の成長により船社の行動が変化することなどを理由として、船会社の港湾選択を同質と見なしてモデルを構築する。

内陸開発途上国の荷主は、クロスボーダー輸送経路の信頼性が低いために、到着時刻が変動し、その時間的費用を考慮して行動しているものと考えられる。この点を明示的に考慮した国際貨物経路選択モデルは過去にない、本研究の特徴の一つである。

荷主の行動は(1)式のように確率的に決定される。確率的配分モデルは、ODペア rs 間の経路 k の効用関数の確定項 V^{rsk} を、経路 k の一般化費用 GC^{rsk} の関数を $V^{rsk} = -GC^{rsk}$ とし、効用関数の誤差項 ϵ^{rsk} にスケールパラメータ θ のガンベル分布を仮定すれば、各経路 k に配分される貨物量 q^{rsk} はロジット型モデルである(1)式のように表される。

$$q^{rsk} = Q^{rs} \frac{\exp[-\theta \cdot E(GC^{rsk})]}{\sum_{k \in K^{rs}} \exp[-\theta \cdot E(GC^{rsk})]} \quad (1)$$

ここに、

q^{rsk} : ODペア rs 間の経路 k の貨物量 (TEU)

Q^{rs} : ODペア rs 間の貨物需要 (TEU)

θ : スケールパラメータ

GC^{rsk} : ODペア rs 間の経路 k の輸送費用 (USD/TEU)

K^{rs} : ODペア rs 間の経路選択肢集合

スケールパラメータ θ は分析者が観測不能な未知パラ

メータであり、現状を最も良く再現するように推計される。ODペア rs 間の一般化費用 GC^{rsk} は対象経路での陸上貨物輸送費用であり、(2)式により求められる。

$$E(GC^{rsk}) = E(st^{rsk}) \cdot V(ST) + E(SVC^{rsk}) + USC \cdot D^{rsk} + BC^{rsk} + TC^{rsk} \quad (2)$$

$E(st^{rsk})$: ODペア rs 間の経路 k の期待輸送時間 (hr)

$V(ST)$: 荷主の時間価値 (USD/TEU-hr)

$E(SVC^{rsk})$: ODペア rs 間の経路 k の期待スケジュール変動費用 (USD/TEU)

USC : 単位輸送費用 (USD/TEU-km)

D^{rsk} : ODペア rs 間の経路 k の輸送距離 (km)

BC^{rsk} : ODペア rs 間の経路 k の国境通過費用 (USD/TEU)

TC^{rsk} : ODペア rs 間の経路 k の港湾使用料 (USD/TEU)

(2)式の1, 2項を求めるモデルを次章以降で詳述する。本モデルの特徴は国境を港湾での輸送時間変動による費用を考慮している(2)式の第2項にある。本研究では、輸送時間変動によって到着時刻にバラツキが発生すると仮定し、スケジュール遅着 (SDL: Schedule Delay Late) とスケジュール早着 (SDE: Schedule Delay Early) によって表現される。SDLとSDEによって発生した追加的費用をスケジュール変動費用 (SVC: Schedule Variability Cost) と定義する。SVCは早着、遅着費用関数とその発生確率分布との関係から求められる (5章)。

3. スケジュール変動価値の推定

(1) モデル

輸送時間変動によるスケジュール早着および遅着を費用化するには、それぞれの限界価値を推定する必要がある。このような価値をスケジュール変動価値と呼び、輸送時間分布の広がりの変化に対する、荷主の限界的支払い意思額と定義する。スケジュール時間変動価値は、離散選択モデルなどの行動モデルにより推定されるのが一般的で、「平均・分散アプローチ¹¹⁾」と「スケジューリングアプローチ¹²⁾」に大別される。また、これら2つアプローチの特徴を併せ持つアプローチ^{13), 14)}が近年開発されている。スケジューリングアプローチは、早着、遅着、輸送時間といった行動選択の結果が効用関数の引数となっている点において行動理論にも整合しており、平均・分散アプローチに対する利点となっている¹⁵⁾。統合アプローチは基準化所要時間分布を必要とするが、一般的に内陸開発途上国においてはそのようなデータは蓄積されておらず、入手不可能である。それらを踏まえ、本研究では、スケジューリングアプローチを用いてスケジュール変動価値を推定する。

SVC算出に必要な輸送時間、早着時間、遅着時間の各限界価値に加え、遅着ペナルティの4つの値を求めため、(3)式のように定式化する。

$$V = V(C, ST, SDE, SDL, P_L) = \delta C + \alpha E(ST) + \beta E(SDE) + \gamma E(SDL) + \lambda P_L D_L \quad (3)$$

輸送費用 C 、平均輸送時間 ST 、 SDE 、 SDL をモデルの変数として用いる。 P_L は遅着ペナルティであり、 D_L は遅着の場合に1を返すダミー変数である。 $\delta, \alpha, \beta, \gamma, \lambda$ は各変数の限界効用を表すパラメータである。対象とする輸送経路では、輸送時間をランダムで確率変数とみなすことができるので⁴⁾、スケジューリングアプローチは期待効用最大化問題として扱うことができる¹⁵⁾。したがって、期待値演算子 $E(\cdot)$ を ST, SDE, SDL に導入した。各時間価値は、(4)、(5)、(6)、(7)式のようにパラメータの限界代替率により、算出することができる。

$$V(ST) = \frac{\alpha}{\delta} \quad (4)$$

$$V(SDE) = \frac{\beta}{\delta} \quad (5)$$

$$V(SDL) = \frac{\gamma}{\delta} \quad (6)$$

$$V(PEN) = \frac{\lambda}{\delta} \quad (7)$$

(2) SPアンケート設計

a) 輸送時間分布

アンケートでは、図-2のように二つの経路が提示され、回答者はより好ましい選択肢を選択する。各経路 (各選択肢) には到着時刻に関する五つのシナリオが提示される。五つのシナリオは、各経路の平均輸送時間を平均値とした輸送時間分布の第1, 3, 5, 7, 9十分位数($t_i; i=1, 3, 5, 7, 9$)を抽出することで得た。内陸開発途上国から近接国の港湾までの輸送時間は対数正規分布に類似する⁴⁾。本研究では以下の方法により対数正規分布に従う輸送時間分布を特定する。

まず、ヴェンチャン-ラムチャバン間の輸送時間調査結果⁷⁾を参考にし、最小および最大輸送時間の対数が、標準正規分布の99.7%範囲のそれぞれ最下位 ST_{min} と最上位 ST_{max} に相当すると仮定する。このとき、正規分布の標準偏差 σ は(8)式を用いて推定できる。

$$\sigma = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(ST_{max}) - \ln(ST_{min})}{z} \right\} \quad (8)$$

ここでは、99.7%範囲の最上位と最下位を仮定しているので z は3となる。標準正規分布のもう一方の分布特性値である期待値 μ は、 $\ln(ST_{min}) = \mu - 3\sigma$ または $\ln(ST_{max}) = \mu + 3\sigma$ の関係から求めることができる。

ROUTE A

Average shipment time: 23 hours
The shipment cost is 1,300 USD/TEU

The shipment has an equal chance of arriving at seaport at any of the following times:

- 8 hours early
- 6 hours early
- 4 hours early
- 2 hours early
- 5 hours late

A

ROUTE B

Average shipment time: 17 hours
The shipment cost is 1,500 USD/TEU

The shipment has an equal chance of arriving at seaport at any of the following times:

- 4 hours early
- 2 hours early
- on time
- 5 hours late
- 8 hours late

B

図-2 選択枝の一例

以上の手順から得られた標準正規分布から10,000サンプルをランダムに生成し、それらのサンプルを指数を用いて真数に戻す。真数に戻されたサンプルは対数正規分布に従うため、対数正規分布に従う輸送時間分布の分布特性値を求めることができる。以上の手法は、データや情報が比較的少ない内陸開発途上国において、輸送時間分布を特定するのに有効であると考えられる。

b) アンケート票の設計と実施

アンケートの表示方法は、図や表を用いた方法など多様な方法が試みられているが、簡潔な文章により表現する方法が最も被験者の誤認などを発生させづらいことが確認されている¹¹⁾。したがって、本研究では図-2に示すように、文章による表示方法でアンケートを設計した。

平均輸送時間および輸送費用の水準をBanomyongの調査結果⁷⁾を参考にしてそれぞれ6つ設定し、実験計画法により選択枝を18問作成した。輸送時間変動の設定方法は前節で示した通りである。また、荷主は輸送時間変動が大きい経路においては、到着制約時刻に間に合うように、出発時間を幾分早めるものと考えられる。そこで早発時間 t_e を設定し、到着時刻からどの程度ずれて到着するかを示す到着変動時刻 SD_i を以下の(9)式のように求める。

$$SD_i = (D + st) - (D + t_i) - t_e \quad (9)$$

$$= st - t_i - t_e$$

t_i はスケジュール変動を含んだ輸送時間である。 st は平均輸送時間であり、出発時刻を D とすると、 $D + st$ を希望到着時刻とする。 t_e は遅着回避のための早発時間である。 SD_i が正のとき、早着となる。これにより、各経路に到着時間変動のシナリオを五つ作成した。また、Smallら¹⁶⁾を参考にして SDE 、 SDL 、遅着ペナルティ P_L のモデルの入力値を(10)~(12)式のように求める。

$$SDE = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 SD_i \cdot K_i \quad (10)$$

$$SDL = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 SD_i \cdot (K_i - 1) \quad (11)$$

$$P_L = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (K_i - 1) \quad (12)$$

$$K_i = \begin{cases} 1 & SD_i < 0 \\ 0 & SD_i \geq 0 \end{cases} \quad (i=1, \dots, 5) \quad (13)$$

ここで、 K_i は早着のとき1を返すダミー変数である。海上輸送を前提とした陸上輸送を対象としているため、実態として貨物はコンテナで輸送されている。したがって、輸送費用の単位はUSD/TEUとした。

アンケート調査は面接方式によりヴェンチャン5社、バンコク31社、ハノイ12社のフォワーダー（3PLを含む）計49社に対して実施した。実施期間はヴェンチャンが2010年9月16-22日、バンコクが2011年1月10-14日、ハノイが2011年1月17-20日である。また、1社につき18問は幾分多いように見受けられるが、面接方式によりアンケートを実施したことで、回答者の疑問に適宜回答できた。また、面接方式であることから、集中力欠如などの理由によるデータ信頼性低下の可能性は低いと考えられる。

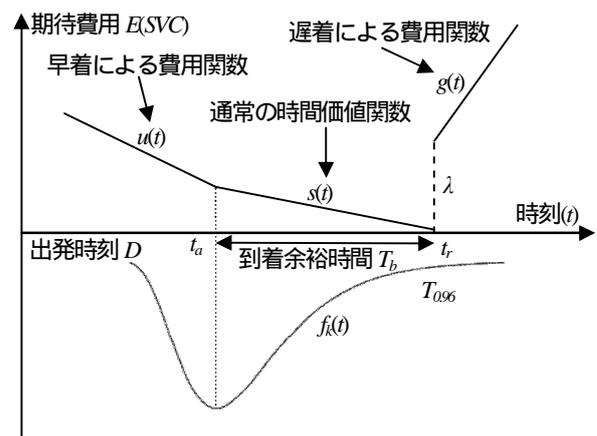


図-3 早着、遅着による費用関数

有効回答データは860のサンプルであった。

(3) 結果・考察

BIOGEME1.8¹⁷⁾を用いて、パラメータ推定を実施した。なお、変数間の相関は低く、モデルの頑健性に悪影響を与えるものとは認められなかった。

表-1 パラメータ推定結果

	推定値	t値
輸送費用(δ)	-0.00311	-8.68
輸送時間(α)	-0.235	-7.08
早着(β)	-0.806	-5.80
遅着(γ)	-1.34	-2.99
遅着ペナルティ(λ)	-3.67	-2.71
定数項	-0.366	-1.28
初期尤度	-596.107	
最終対数尤度	-491.608	
自由度調整済み尤度比	0.165	
サンプル数	860	

パラメータ推定および統計テストの結果を表-1に示す。パラメータの符号は全て負になっており、期待通りの結果を得られた。t値も定数項を除いて高く、99%水準で統計的に有意である。以上より、特定されたモデルの信頼性は高いと考えられる。

表-2 各時間価値推定結果

各時間価値	推定値 (USD/TEU-hr)
時間価値： $V(ST)$	75.56
スケジュール早着価値： $V(SDE)$	278.14
スケジュール遅着価値： $V(SDL)$	430.87
遅着ペナルティ： $V(PEN)$	1,180.06 (USD/TEU)

表-2に各時間価値を示す。 $V(SDE) < V(SDL)$ の関係は従来通りの結果であるが、その差が非常に大きい。例えば、遅着価値は通常の時間価値の5.7倍であることが明らかになった。つまり、1時間の遅着減少は5.7時間の輸送時間減少に相当する。ヴェンチャン-ラムチャパン港の平均輸送時間は18時間⁷⁾であるので、5.7時間は平均輸送時間全体の約3割に相当する。また、インタビュー調査から、荷主は遅着を極端に嫌う傾向が示唆されたので、 $V(SDE)$ と $V(SDL)$ の大きな差は妥当な結果といえる。遅着ペナルティも非常に大きな値を得たが、この文脈で考えると妥当な結果といえる。また、荷主は早着が輸送費用の増大に寄与することも認識していることがインタビュー調査により明らかになっている。したがって、 $V(ST) < V(SDE)$ の関係も妥当であると考えられる。米国における貨物時間価値推定結果¹⁶⁾と比較すると小さい値である。ラオスはIMFによる定義¹⁸⁾では最貧国の一つであ

るため、妥当な値といえる。

4. スケジュール変動費用の推定

(1) 到着余裕時間の決定方法

本研究が対象とする輸送時間に強い変動性がある経路では、荷主は到着制約時刻 t_r にちょうど到着するように出発時刻を選択せず、遅着を回避するために、到着余裕時間 T_b を見込んで出発時刻を選択しているものと考えられる。輸出の場合は、港湾到着後に海上輸送が控えているため、荷主は遅着を嫌う。輸入の場合は在庫切れまたは生産ラインの停止などの恐れがあるため、遅着を非常に嫌う傾向がインタビュー調査により示唆された。図-3に示すように、 T_b は t_r と目標到着時刻 t_c の差と定義する。

ここで、 T_b の大きさをどのように設定するかが問題となる。インタビュー調査をまとめると、ヴェンチャン-ラムチャパン間では平均輸送時間が約20時間となった。幾分長く見受けられるが、本研究では、あくまでも貨物を船に積み込むまでを対象としており、この輸送時間もそれを考慮している。出発時刻が t_r の平均約24時間前であることが分かった。このとき、 T_b は4時間となる。また、国境および港湾で発生する遅延の最大値および最小値から、前章で述べた方法により輸送時間の対数正規分布を求めた。国境と港湾の対数正規分布に従う輸送時間分布はそれぞれ独立して発生するため、それらの合成が当該経路での輸送時間変動になる。それを踏まえ、輸送時間分布の畳み込みを行った（畳み込み手法は次節で詳述）。その結果、最頻値から96%点までの輸送時間が3.84時間となった。この輸送時間はインタビュー調査により明らかにした T_b とおおむね等しい。以上より、本研究では T_b を輸送変動分布の最頻値から96%上位点までの間として定める。つまり、 T_b は国境と港湾で発生する輸送時間変動の大きさ（標準偏差）によって決定されるものであり、変動が小さければ小さいほど輸送費用は小さくなる。ここで、ヴェンチャン-ラムチャパン港だけでなく、ヴェンチャン-ハイフォン港間など、他経路でも96%点で到着余裕時間となる類似の結果を得られた。例えば、ヴェンチャン-ダナン港間の輸送時間は24時間で、出発時間は30時間前である。このとき、到着余裕時間は6時間である。当該経路では、96%点の輸送時間は6.07時間である。

以上の方法で T_b を決定すると、 T_b の決定を動的な問題として取り扱うことが可能となる。何らかの施策によって輸送時間変動が減少し、到着時間分布が小さくなれば早着、遅着リスクが減少する。このとき、輸送時間信頼性は向上するため、それに呼応して T_b も小さく見積もられるのは合理的である。これにより、本モデルは各ポト

ルネットの輸送時間変動削減効果を数量的に明示することが可能となる。以上の点は、本研究が有する特徴の一つである。

(2) スケジュール変動費用の定式化

3章で求めた各時間価値関数と積み込み後の対数正規分布に従う輸送時間分布関数を用いて期待早着、遅着費用を定式化する。

T_b は出発前に予め見込まれていた時間であることから、通常の輸送時間価値（つまり $V(ST)$ ）が相当する。 t_a より早く到着した場合は早着として早着費用関数を用いて時間消費による費用を算出する。遅着費用関数に関しては、到着制約時刻より遅れた場合に適用される。以上より、期待輸送費用は(14)式から求められる。

$$E(SVC) = \int_{-\infty}^{t_a} u(t) \cdot f_k(t) dt + \int_{t_a}^{t_r} s(t) \cdot f_k(t) dt + \int_{t_r}^{\infty} g(t) \cdot f_k(t) dt \quad (14)$$

$u(t)$: スケジュール早着費用関数

$s(t)$: 時間価値関数

$g(t)$: スケジュール遅着費用関数

t_r : 到着制約時刻

t_a : 到着目標時刻

$f_k(t)$: 経路 k の到着時間分布関数 $t \sim LN(m_{sk}, \sigma_{sk}^2)$

$T_{0.96}$: 到着時間分布関数の96%上位点

遅着ペナルティおよび遅着限界費用は非常に大きい。荷主は遅着を避けるために T_b を設定しているため、スケジュール変動費用 $E(SVC)$ は費用関数と確率の積で求めるため、期待費用は小さくなる。同様に、遅着ペナルティに該当する確率は輸送時間分布の上位96%点であるので、十分に小さい。以上のように、遅着そのものの損失は大きい。到着余裕時間が大きいことにより、遅着発生確率は小さく算出されるのは、実際の行動と合致するものと考えられる。定積分の計算にはMaximaを用いた。

$f_k(t)$ は国境 ($t \sim LN(m_{bk}, \sigma_{bk}^2)$) および港湾 ($t \sim LN(m_{sk}, \sigma_{sk}^2)$) の各輸送時間分布を合成後の対数正規分布に従う確率密度関数である。Crow and Shimizu¹⁹⁾によると、 M 個の独立した対数正規分布を積み込みすると、 $M \rightarrow \infty$ のときは中心極限定理により Λ は正規分布に近似するが、本研究のように $M=2$ のような、積み込まれる分布の数が十分少ない場合には、 Λ は対数正規分布に近似する。したがって、本研究では(15)式の関係を保定して対数正規分布の積み込みを実施する。

$$\Lambda = \sum_{k=1}^M L_k = \sum_{k=1}^M e^{Y_k} = e^Z \quad (15)$$

対数正規分布の積み込み方法では、 Λ の分布特性値

(平均と分散)を知ることが必要となる。これを解析的に近似させる方法は、無線通信技術の分野^{20), 21), 22)}では数多くの手法が提案させているものの、交通分野では確立した手法は存在しないのが現状である。そこで、本研究では実際の状況をシミュレーションすることで数値的に対数正規分布の積み込みを実施する。クロスボーダー輸送経路 k において、荷主はまず越境地点にて輸送時間変動に曝される。ここで、一つ目の対数正規分布に従う輸送時間変動分布から1サンプルを取り出す。これを、 n_{bk} とする。次に輸送時間変動に曝される地点は港湾である。国境地点と同様にして、対数正規分布に従う輸送時間変動分布から1サンプル取り出す。これを n_{sk} とする。経路 k では、輸送時間を変動させるボトルネックは国境と港湾の二地点だけであるので、荷主が経路 k で受けたスケジュール変動は $n_{bk}+n_{sk}$ となる。以上の要領で国境を港湾でそれぞれ20,000サンプルをランダムに生成し、 Λ が対数正規分布に従うと仮定し、分布特性値を算出する。以上の方法で求めた積み込み後の分布特性値は表4のようになる。

表-3 各地点での輸送時間分布特性値 (単位: hr)

	平均	標準偏差
タナレーン / ノンカイ国境 (TN)	3.5	0.479
サワナケット / ムクダハン国境 (SM)	3.5	0.599
ナメオ / ナムソイ国境 (NN)	4.6	1.500
ナムファオ / カウトレオ国境 (NC)	4.3	0.674
デンサワン / ラオバオ国境 (DL)	4.0	0.625
ラムチャバン港 (LCB)	8.0	1.186
ハイフォン港 (HAI)	8.8	1.519
ダナン港 (DAN)	10.4	1.612

表-4 輸送時間分布積み込み後の分布特性値 (単位: hr)

	平均	標準偏差
TN・LCB	11.5	1.275
NC・HAI	13.2	1.657
DL・DAN	14.5	1.742
SM・LCB	11.5	1.320
NN・HAI	13.4	2.141
NC・DAN	14.8	1.750
DL・HAI	12.8	1.630

5. ケーススタディ

(1) 入力値の設定

本モデルを用いて各経路の貨物量を求めるには、(2)式において外生的、内生的に与えられる入力値が必要となる。そのうち、内生的に与えられる数値は $V(ST)$ および $E(SVC)$ の二つであり、前章までに推定方法を述べた。これら以外の入力値は全て外生的に与えられる数値で

ある。以下、データ作成方法を詳述する。

$E(st)$, USC , BCI は51社を対象にしたインタビュー調査より求めた。 $E(st)$ は各経路での期待輸送時間の平均である。図-3のように、出発時刻を D とすると、 D から t_i までが $E(st)$ に相当する。 USC は、対象経路内で必要となる全ての費用から、国境、港湾で必要となる費用を除いた1km当たりの費用である。つまり、距離に比例して増加する単位輸送費用である。 BCI は信頼性の高いデータが存在しないため、インタビュー調査で得られた平均値を用いた。しかしながら、輸送時間や費用などと比較して、企業によって回答に若干のバラツキが見受けられた。この理由としては、企業が有しているライセンスや書類の事前準備、さらには輸送品目の差異によって国境でのプロセスが異なるためだと考えられる。インタビュー調査をまとめると、国境で必ず必要となるプロセスは必要書類の提出、通行料及び関税の支払い、ドライバーおよびトラックのイミグレーション、ウェイブリッジによる車重検査、貨物検査の4点である。このうち必要書類の提出では、インボイス、貨物リスト、購入指示書(PO)、宣誓供述書、パスポートの提示が一般的なようである。また、必要に応じて原産地証明書(ASEANではForm Dと呼ばれる)やHSコードの提出

を求められる場合もあり、差異が発生する。以上の状況を考慮した結果、タナレーン/ノンカイ国境では1TEU当たり100USD、ベトナム側国境では共通で80USDと設定した。

TC および D はJETRO²³⁾を参考に設定した。 TC に含まれるプロセスは多岐に渡るが、荷役料、書類作成料、書類準備、税関申告および貨物検査は国内の港湾では共通料金であることが一般的である。国内の港湾間で料金に差異が発生するのはターミナルハンドリング料である。以上を踏まえて、ラムチャバン港では1,400USD/TEUとし、ハイフォン港、ダナン港はそれぞれ800USD/TEU、850USD/TEUと設定した。なお、以上で定めた入力値は輸出入で共通とする。

(2) 発生集中貨物量の推定

信頼性の高いモデルを開発するためには、高精度で現況再現することが一つの条件となる。現況再現には、ラオスの各都市と各港湾間の貨物量データが必要である。しかしながら、そのようなデータは存在しない、または入手するのが困難であるため、以下の手順で推定した。

柴崎、渡部⁹⁾により推定された2003年におけるラオス

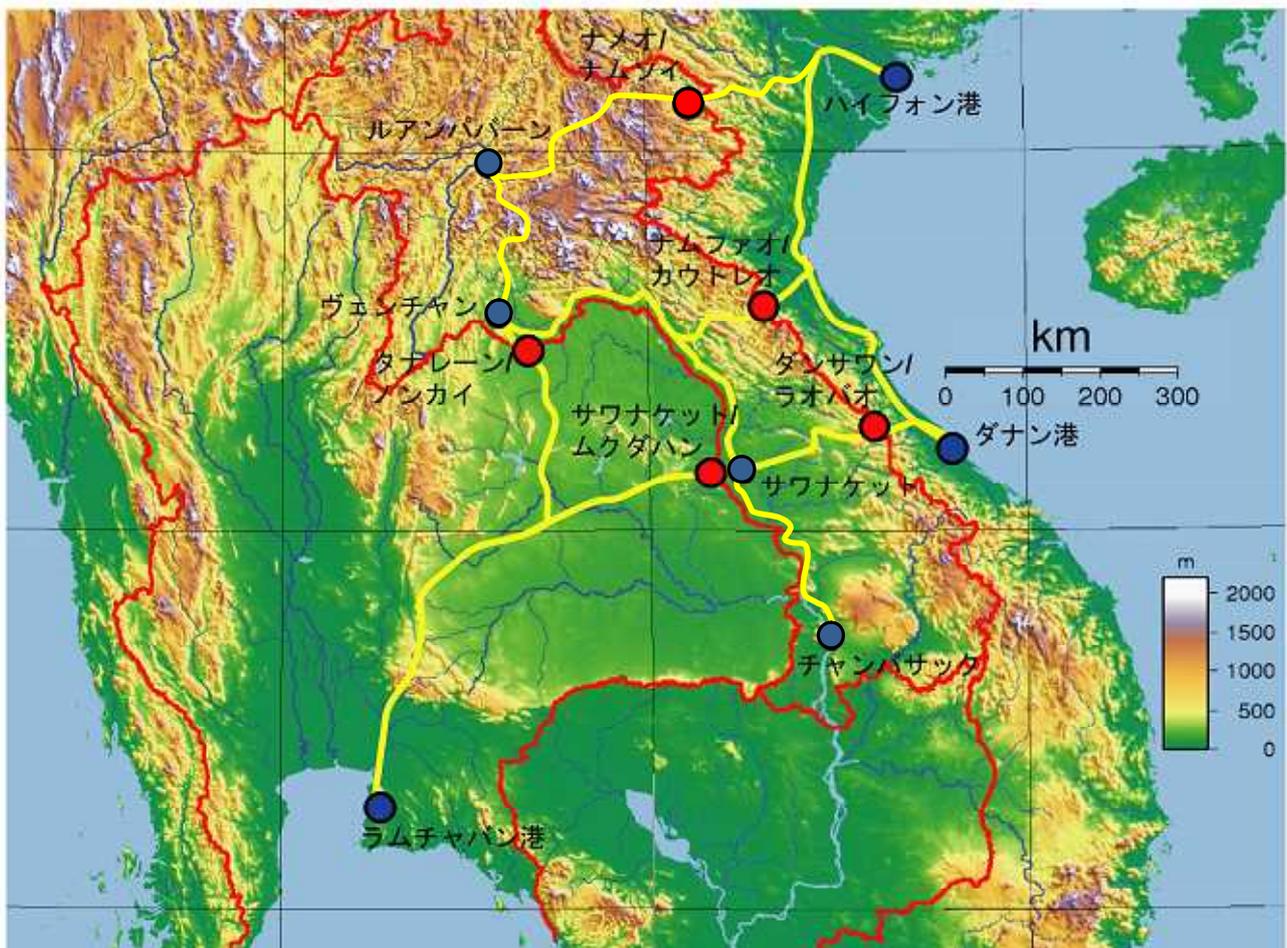


図-4 陸上輸送ネットワーク

から全世界へ輸送されるコンテナ貨物量 (TEU/年) から、海上輸送を用いず、陸上輸送のみで輸送されると考えられるタイ、ベトナム、カンボジア、ミャンマー、中国南部 (雲南省、広西チワン族自治区、広東省、貴州省、湖南省) への貨物量を除いた値を、ラオス・タイまたはベトナムの港湾の貨物量として推定した。柴崎、渡部⁹⁾では、ラオスは北部、中部、南部の3つにゾーニングされているが、北部および南部の大部分の貨物はそれぞれルアンパバーンとチャンパサック発着と仮定する。したがって、北部発着の貨物量をルアンパバーン、南部発着の貨物量をチャンパサックをセントロイドとして発生貨物量を推定した。中部発着の貨物量に関しては、ヴェンチャンとサワナケット発着が大部分を占める。JICA²⁴⁾に ton/年の都市別発生貨物量があり、そちらを参考にして中部発着の貨物量をヴェンチャンとサワナケットに按分した。なお、柴崎、渡部⁹⁾で推定された貨物量データは 10トン=1台=1TEUと換算されており、航空貨物および海上非コンテナ貨物輸送は計算の対象外としている。以上の方法を用いて求めた各セントロイドでの発生貨物量は表-3のようになる。

表-5 発生貨物量推定結果 (TEU/年, 2003年)

	輸出 (Q^{sk})	輸入 (Q^{sk})
ルアンパバーン ($k=1$)	5,968	7,603
ヴェンチャン ($k=2$)	4,736	10,805
サワナケット ($k=3$)	8,525	4,698
チャンパサック ($k=4$)	3,856	4,978

サワナケットを除くと、輸入超過というラオスの現状²⁵⁾を反映できた結果となった。サワナケットはセボン鉱山で産出される銅の輸出量が多く、輸出超過となっている²⁴⁾。原則として、ラオスの銅の輸出はサワナケット以外ではほとんど存在しない。

次に、各港湾へ向かう貨物量を推定する。しかしながら、ここでも各港湾においてラオスから到着した (または向かう) 貨物量を示すデータは存在しない。そのため、本研究ではインタビュー調査から得られた、ラオスの各都市発着貨物の港湾選択比率から各港湾へ向かう貨物量を推定する。インタビュー調査で得られた港湾選択確率の傾向は企業間でバラツキがほとんど見受けられなかったため、この情報を用いてラオス発着貨物の各港湾での貨物量を推定する。例えば、ヴェンチャン発着貨物では、タイの港湾が85%を占めていることが分かった。タイの港湾では、ラムチャバン港がほぼ独占してラオス発着貨物を取り扱っているため、ヴェンチャン発着ラムチャバン港経由の貨物量は $0.850Q^{s1}$ となる。ベトナムの港湾はハイフォン港とダナン港の利用が大部分を占めており、利用率は7対3であるとインタビュー調査により分かっ

た。したがって、ハイフォン港へ向かう貨物量は $0.105Q^{s1}$ 、ダナン港は $0.045Q^{s1}$ となる。

都市内での経路変更は交通状況により時々刻々行われている可能性があるが、1,000km近いクロスボーダー輸送において、そのような経路変更は港湾選択に僅かな影響しか与えないものと考えられる。したがって、一到着地につき一経路という本研究の設定は合理的であると考えられる。仮に何らかの理由で国境での輸送時間が非常に長くなった場合、荷主は経路を変更するのではなく、港湾自体を変更するものと考えられる。本研究が対象とするネットワークは長距離のクロスボーダー輸送であり、利用港湾を固定した経路変更は非常に大きな費用を伴う。

(3) 未知パラメータの特定

パラメータ θ は、現状を最もよく再現されるように特定する。具体的には、現状値と推定値の二乗誤差が最小になるように、一到着地につき一経路であるとしてパラメータ θ を推定する。各経路の選択確率は既知である。また、対象ネットワークではリンク上で混雑することが考えづらく、混雑状況によって時々刻々と経路変更することはない。したがって、本研究ではフロー依存型配分ではなく、フロー独立型配分に位置づけられる。国境と港湾においては混雑は発生するが、その混雑は一般化費用に考慮されており、荷主は出発前にその混雑費用を考慮して経路選択するものと仮定する。また、ラオス発着貨物が近接国の港湾で占める割合は非常に低いため、サービスレベル向上に伴う貨物量増加による混雑はほとんどないものと考えられる。例えば、ラムチャバン港の2003年アウトバウンドの取扱量は1,573,176TEU²⁶⁾であるが、本研究で推定したラムチャバン港で取り扱うラオスのアウトバウンド貨物量は11,934.90TEUである。僅か0.008%であり、影響を与えないことが分かる。(1)式を用

表-6 実績値とモデルによる推定値の比較 (TEU/年)

	ラムチャバン港	ハイフォン港	ダナン港
	ルアンパバーン発着		
推定値	5,361.8	359.0	247.1
実績値	5,371.2	477.4	119.4
誤差	-0.2%	-24.8%	107.0%
	ヴェンチャン発着		
推定値	4,044.8	278.8	412.4
実績値	4,025.6	528.3	142.1
誤差	0.5%	-50.9%	190.2%
	サワナケット発着		
推定値	6,905.3	1.32×10^{-18}	1,619.8
実績値	6,820	170.5	1,534.5
誤差	1.2%	-	5.6%
	チャンパサック発着		
推定値	3,122.7	0.6	732.7
実績値	3,084.8	77.12	694.1
誤差	1.2%	-99.2%	5.6%

いてセントロイド別に非線形連立方程式を用いて逆推定する。セントロイド別に推定する理由は、貨物が発生する各セントロイドは互いに独立しているためである。都市 k 発着のODペア n 間の現状貨物量 Q^{nk} は既知であり、経路 k の一般化費用 $E(GC^{nk})$ は本モデルにより求められる。以上より推定したスケールパラメータを用いて輸入の場合を現況再現すると、表-6のようになる。なお、輸出入で推定値と実績値の誤差は等しい。ベトナム港湾における誤差の原因は実績値に問題があるものと考えられる。

(4) シナリオ分析

これまでに推計されたパラメータと2003年時点の貨物

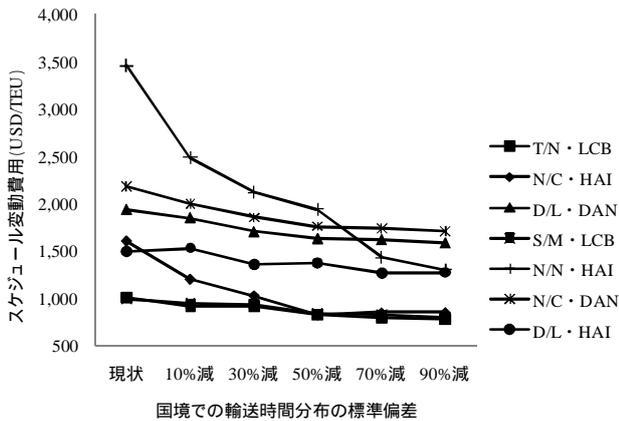


図-5 国境信頼性向上によるスケジュール変動費用の変化

量データに基づき、ボトルネックとなっている国境、港湾の信頼性を向上させた場合についてシナリオ分析を試みる。信頼性向上とは、つまり各ボトルネックにおいて標準偏差を小さくすることに相当する。

a) 国境信頼性向上

まず、越境に要する時間の信頼性を向上させた場合の各ボトルネックに要するスケジュール変動費用と各港湾貨物量の変化を分析する。シナリオは国境の標準偏差が10%から90%まで20%刻みで減少するように設定した。図-5は国境信頼性向上によるスケジュール変動費用の変化を示している。全体的な傾向として、スケジュール変動費用が減少していることが見て取れるが、中でも

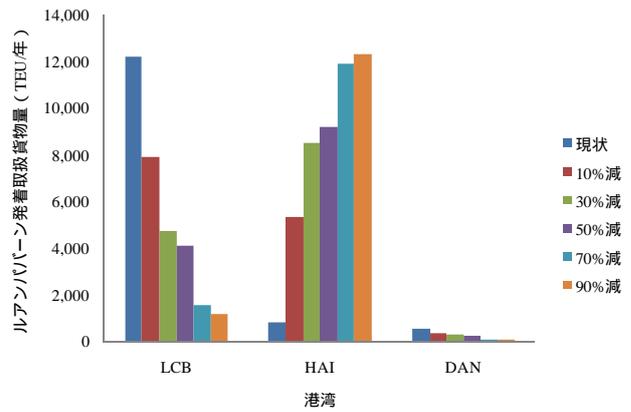


図-6 ルアンパバーン発着貨物の港湾選択の変化

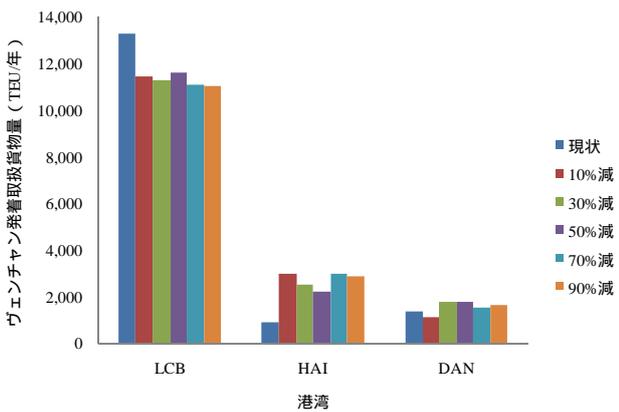


図-7 ヴェンチャン発着貨物の港湾選択の変化

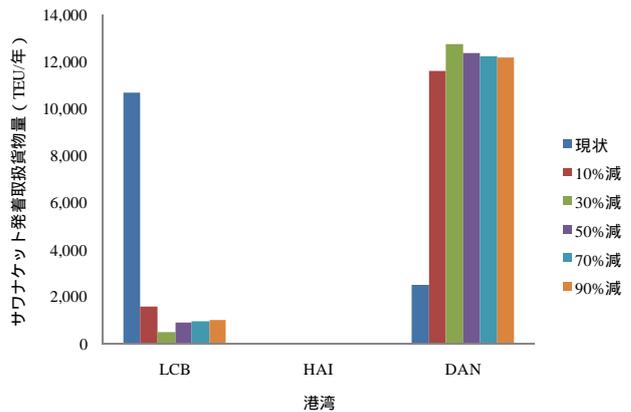


図-8 サワナケット発着貨物の港湾選択の変化

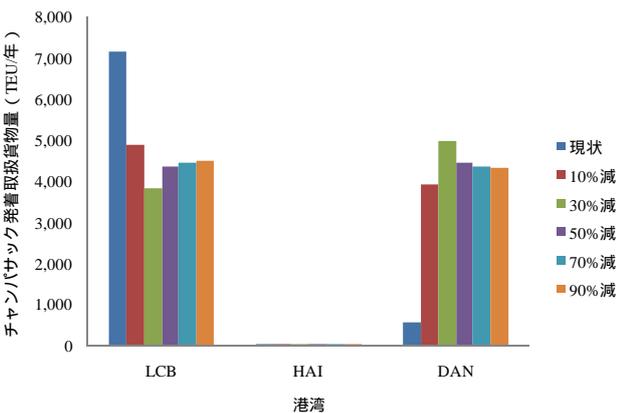


図-9 チャンパスック発着貨物の港湾選択の変化

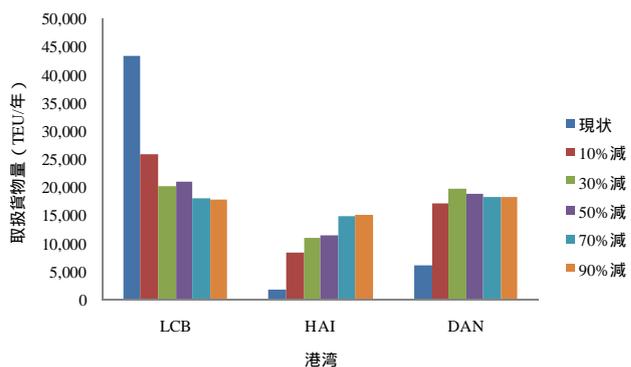


図-10 ラオス発着貨物の港湾選択の変化

NN・HAIの減少率が大きい。これは、ナメオ/ナムソイ国境の現状値の標準偏差が大きいためである。90%減少時では、ほぼ全ての国境で同程度の抵抗になるため、同じくハイフォン港を含むN/C・HAIと同程度の費用になる。

次に、都市別の港湾選択の変化を図-6~9に示す。国境での時間変動の差が縮まるにつれて、ラムチャバン港発着貨物がベトナムの港湾に流れているのが分かる。図-10に示すように、全ての国境抵抗がほぼ同水準になる90%減では、ラオス発着貨物が三つの対象港湾でシェアが同程度になる。ただし、都市別で見ると、各都市に近い港湾のシェアが急激に上昇していることが分かる。特

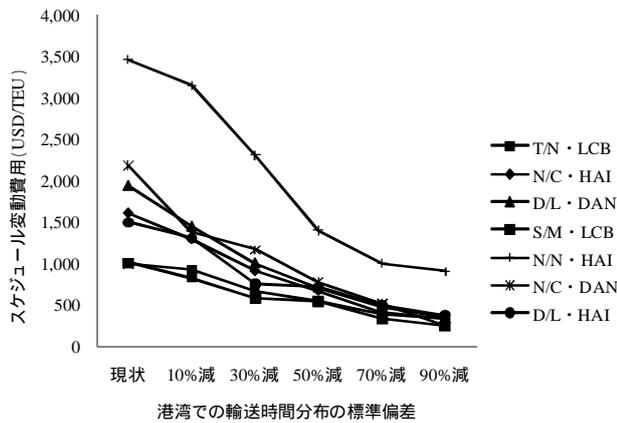


図-11 港湾信頼性向上によるスケジュール変動費用の変化

にサワナケットでは、東西経済回廊で結ばれ、アクセスが容易なダナン港のシェアが非常に高くなる事が分かる。

b) 港湾信頼性向上

次に、港湾で要する時間の信頼性を向上させた場合の各ボトルネックに要するスケジュール変動費用と各港湾貨物量の変化を分析する。設定シナリオは国境信頼性向上の場合と同様に、港湾の標準偏差が10%から90%まで20%刻みで減少するようにした。この場合でも、国境信頼性向上と同様の傾向が見て取れるが、港湾信頼性向上の場合がより変化の度合いが高い。これは、港湾の信頼性が国境の信頼性と比較して低いためである。

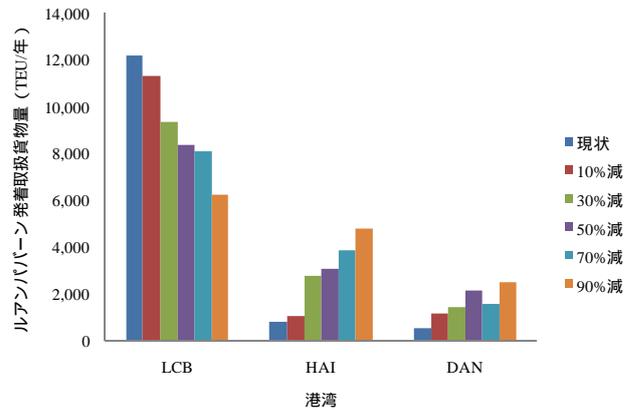


図-12 ルアンパバーン発着貨物の港湾選択の変化

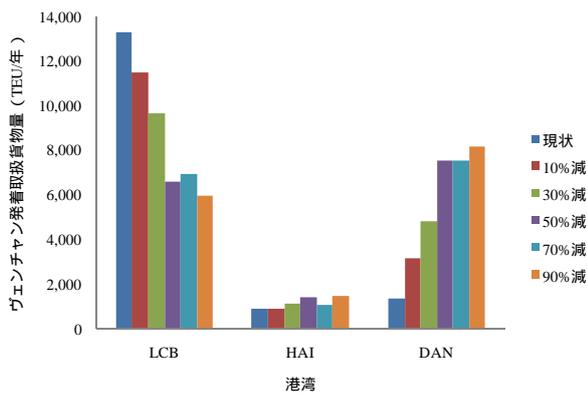


図-13 ヴェンチャン発着貨物の港湾選択の変化

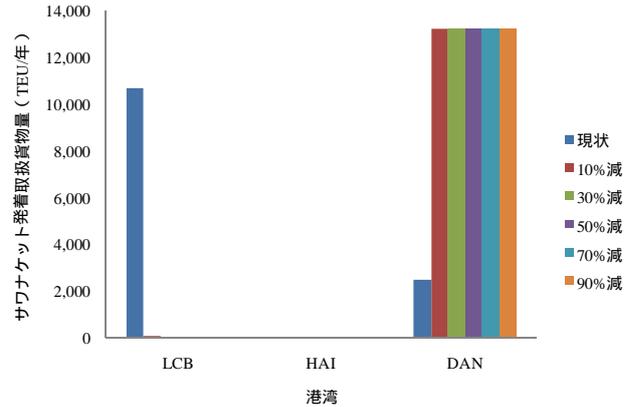


図-14 サワナケット発着貨物の港湾選択の変化

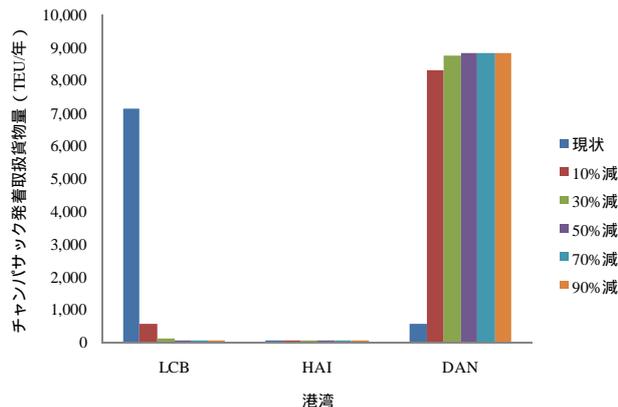


図-15 チャンバサック発着貨物の港湾選択の変化

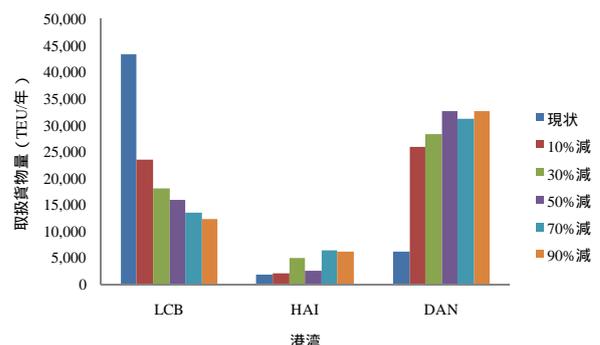


図-16 ラオス発着貨物の港湾選択の変化

6. おわりに

本研究では、内陸開発途上国にとって重要な問題であった輸送時間変動による費用を考慮した経路選択モデルを構築した。クロスボーダー輸送における輸送時間変動は、長年国際機関などを中心に議論されてきた問題ではあるものの、それを定量的に評価するモデルは存在しなかった。本研究で開発されたモデルによるケーススタディの結果、輸送時間変動削減効果が定量的に評価され、港湾選択の貨物量シェアまで逆転するという結果を示すことができた。

今後の課題としては、まずは積分式が多く含まれているため、計算量が多いという点が挙げられる。本モデルは内陸開発途上国の貨物問題を扱う実務的問題に有用であるため、計算量を削減するために“閉じた式”に改良することが肝要である。また、本論でも述べたように、港湾選択行動は船社との相互依存関係が重要であることから、それを考慮したモデルが有用であると考えられる。また、港湾自体のサービスレベルを考慮することも重要である。

対数正規分布に従う輸送時間の畳み込みはノンパラメトリック推定により実施した。そのため、シナリオ分析時に計算量が多くなるのが難点である。畳み込まれた分布の平均や分散などの分布特性値を解析的に求めることができれば、計算量を減少させることが可能になる。

また、GMS域内での各時間変動価値を推計することができた。当地域においてそのような指標は過去に推定された例がなく、極めて貴重な結果であると考えられる。

謝辞：本研究は科学研究費補助金・基盤研究（C）（課題番号：21510140）の助成を受けたものである。この場を借りて謝意を表したい。

参考文献

- 1) Sachs, J. D. and Warner, A. : Fundamental sources of long-run growth, *American Economic Review* Vol.87, No.2, pp.184-188, 1997.
- 2) Gallup, J. L., Sachs, J. D. and Mellinger, A. D. : Geography and economic development, *International Regional Review* Vol.22, No.2, pp.179-232, 1999.
- 3) World Bank : World development report 2009, Reshaping economic geography, 2008.
<<http://econ.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/EXTDEC/EXTRESEARCH/EXTWDRS/EXTWDR20090,,contentMDK:21955654~pagePK:64167689~piPK:64167673~theSitePK:4231059,00.html>> (accessed January 2011).
- 4) Arvis, J-F., Raballand, G. and Marteau, J-F. : The Cost of Being Landlocked: Logistics Costs and Supply Chain Reliability. World Bank Policy Research Working Paper 4258, 2007.

- 5) Raballand, G. : Determinants of the negative impact of being landlocked on trade: An empirical investigation through the Central Asian case, *Comparative Economic Studies*, No.45, pp.520-536, 2003.
- 6) Mackellar, L., Worgotter, A. and Worz, J. : Economic Development Problems of Landlocked Countries. Transition Economics Series 14, Institute for Advanced Studies, 2002.
- 7) Banomyong, R. : Multimodal Transport Corridors in South East Asia: A Case Study Approach. Doctoral Dissertation, Cardiff University, 2000.
- 8) 花岡伸也, 川崎智也 : 中央アジアを対象とした内陸国貨物輸送問題調査報告書, 国際開発工学報告, TRIDE-2010-01, 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻, 2010.
- 9) Economic Research Institute for ASEAN Study Team: ASEAN Strategic Transport Plan 2011-2015, October 2010.
- 10) 柴崎隆一, 渡部富博 : 東・東南アジアにおけるマルチモード国際物流モデルの構築とアセアン物流インフラ施策の評価, 国総研報告, No. 40, 2009.
- 11) Bates, J., Polak, J., Jones, P., and Cook, A. : The valuation of reliability for personal travel, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.37, No.2-3, pp.191-229, 2001.
- 12) Noland, R. B. and Small, K. A. : Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes, *Transportation Research Record*, Vol. 1493, pp.150-158, 1995.
- 13) Fosgreau, M. and Karlström, A. : The value of reliability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 44, No. 1, pp. 38-49, 2010.
- 14) Fosgreau, M. and Fukuda, D. : Characteristics of the distribution of travel time on urban road, *European Transport Conference*, Leiden, Netherlands, 2008.
- 15) 福田大輔 : 旅行時間変動の価値付けに関する研究展望とプロジェクト評価への適用に向けた課題の整理, 土木計画学研究・論文集, Vol. 30, 2010.
- 16) Small, K. A., Noland, R., Chu, X. and Lewis, D. : Valuation of travel-time savings and predictability in congested conditions for highway user-cost estimation, *Technocal report 431*, National Cooperative Research highway Program, 1999.
- 17) Bierlaire, M. : BIOGEME: A free package for the estimation of discrete choice models, *Proceedings of the 3rd Swiss Transportation Research Conference*, Ascona, Switzerland, 2003.
- 18) International Monetary Fund : World economic outlook database, October 2010
<<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2010/02/weodata/index.aspx>> (accessed January 2011).
- 19) Crow, E. L. and Shimizu, K. : Lognormal Distributions: Theory and Applications, Marcel Dekker, Inc., New York, 1988.
- 20) Schwartz, S. C. and Yeh, Y. S. : On the Distribution Function and Moments of Power Sums With Log-Normal Components, *The Bell systems technical journal*, Vol. 61, No. 7, pp. 1441-1462, September, 1982.
- 21) Beaulieu, N. C. and Xie, Q. : An Optimal Lognormal Approximation to

- Lognormal Sum Distributions, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 53, No. 2, March 2004.
- 22) Lam, C.-L. J. and Le-Ngoc, T. : Estimation of Typical Sum of Lognormal Random Variables using Log Shifted Gamma Approximation, IEEE Communications Letters, Vol. 10, No. 4, April 2006.
 - 23) JETRO : ASEAN 物流ネットワークマップ 2008 .
 - 24) JICA : The Comprehensive Study on Logistics System in Lao People's Democratic Republic, Interim Report, Unpublished Paper, 2010.
 - 25) CIA : The World Factbook, 2011.
 - 26) Bangkok Shipoeners and Agents Association : Container Throughput At Laem Chabang Port – 2003
<http://thaibsaa.com/statistics/ports/cat_view/71-port-statistics/237-year-2001-2009/80-year-2003/139-laem-chabang-port.html>(accessed January 2011)