

ISSN 1880-8468

Technical Report of
International Development Engineering

国際開発工学研究報告

TRIDE-2014-01

June 1, 2014

川崎 智也, 花岡 伸也
内陸開発途上国における輸送時間変
動を考慮した貨物流モデルの開発

Department of International Development Engineering,
Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology
<http://www.ide.titech.ac.jp/TR>

内陸開発途上国における 輸送時間変動を考慮した貨物流モデルの開発

川崎 智也¹・花岡 伸也²

¹日本大学理工学部 助教（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1）

E-mail: kawasaki.tomoya@nihon-u.ac.jp

²東京工業大学大学院理工学研究科 准教授（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1-I4-12）

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

本研究は、内陸開発途上国であるラオスから沿岸国に位置するラムチャバン港（タイ）、ハイフォン港、ダナン港（ベトナム）まで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考慮した貨物流モデルを開発し、輸送時間変動改善効果をシナリオ分析するものである。モデルの特徴は、輸送時間変動により発生するスケジュール変動費用が、クロスボーダー輸送の一般化費用に含まれる点にある。ラオス発着のクロスボーダー輸送を対象としたシナリオ分析では、国境及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もともと低く、港湾の信頼性向上が国境信頼性向上より総費用削減率が大きいことが示された。港湾選択では、港湾及び国境信頼性向上の両ケース共に類似の傾向を示しており、輸送時間信頼性が向上するにつれ、ラムチャバン港の取扱貨物量が減少し、ベトナム港湾の取扱貨物量が上昇することが示された。

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Gallup *et al.*²⁾によると、内陸国であること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、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通過や、近接国の港湾通過を内包している。

海上輸送は国際貿易に必要不可欠であり、それは内陸国にとっても同様である。しかし、内陸国には自国領土内に港湾が存在しないことから、港湾アクセスには少なくとも一回の国境通過が必要なクロスボーダー輸送となる。国境通過は輸送時間と輸送費用を増大させ、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⁾。Mackellarら⁶⁾の研究によると、アフリカの内陸国の国境通過費用は、約1,600kmのトラック輸送あるいは約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。

開発途上国では、国境に加え、港湾も輸送時間の信頼性を害することが指摘されている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⁾。東南アジアの内陸開発途上国であるラオスでは、ヴェンチャン-ラムチャバン港間（図-1参照）の最長と最短輸送時間の差を比較すると、国境では約10時間、港湾では約15時間の差が生じている⁷⁾。

一方、開発途上国の都市間及び国間の道路は交通量が少なく、トラックは概ね自由流速度で走行していることが多い⁸⁾。これは、ヴェンチャン-ラムチャバン港間の輸送時間調査結果⁷⁾において、リンク速度のベストケースとワーストケースで大きな差がないことから裏付けできる。国境及び港湾の通過時間が短縮されれば、国際貨物輸送時間の短縮に大きく貢献するのである。

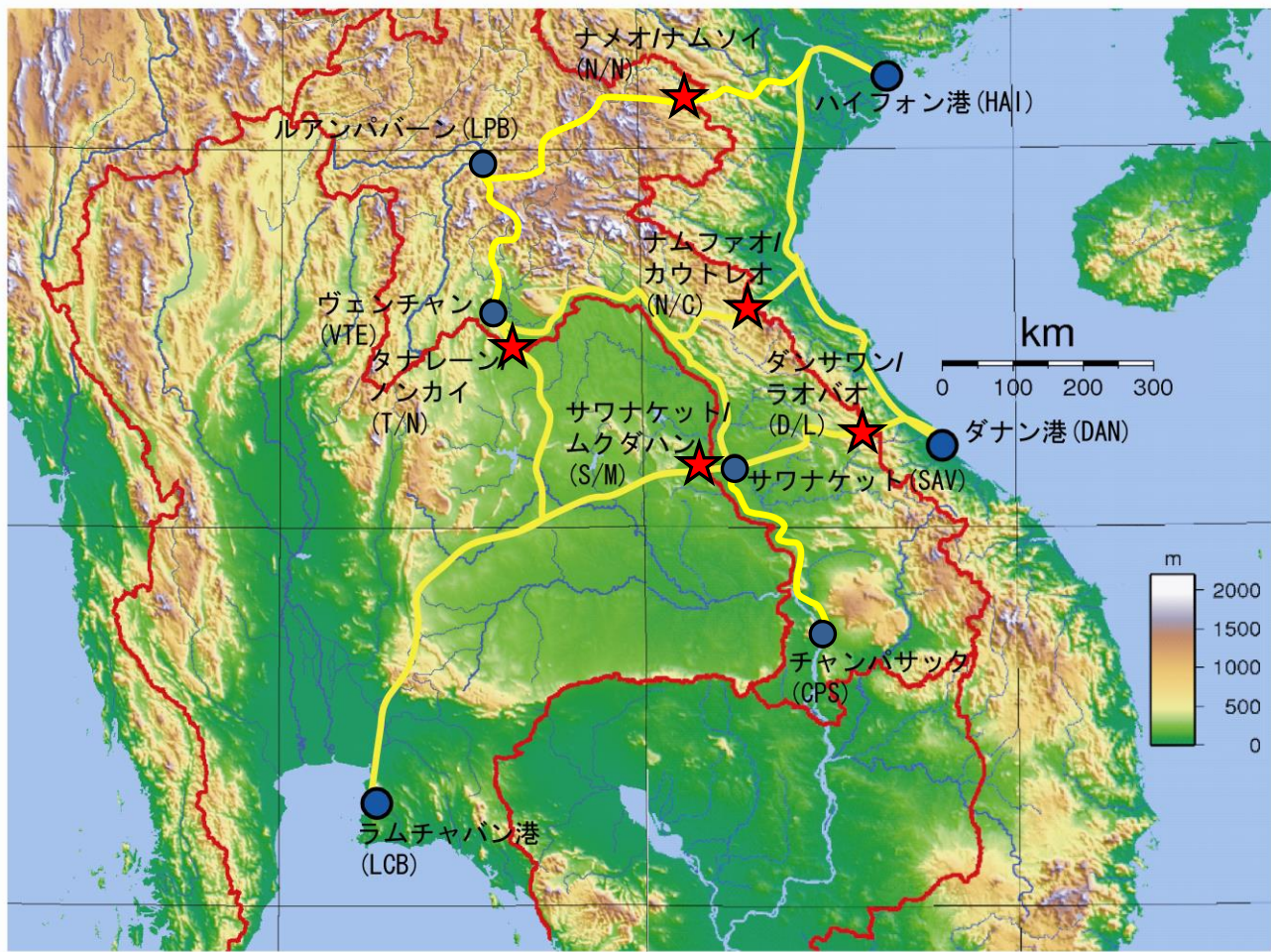


図-1 本研究で対象とする陸上輸送ネットワーク

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で輸送時間変動が発生している。この問題を解消するため、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、クロスボーダー輸送の特徴を捉えた貨物流モデルが必要である。

当分野の従来研究として、柴崎・渡部¹⁰⁾の国際コンテナ貨物流モデルがある。フォワーダー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。越境抵抗は文献と現地調査から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として考慮している。しかしながら、クロスボーダー輸送で経路選択に影響を及ぼすと考えられる時間変動の費用が含まれていない。国境や港湾では、実際の通過時間だけでなく、各地点での時間変動が経路

選択に影響することから、これを費用として考慮する必要がある。

ここで、輸送時間変動によって到着時刻にバラツキが生じたことによる追加的費用を「スケジュール変動費用」とする。本研究は、このスケジュール変動費用を考慮した貨物流モデルの構築を目的とする。また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の貨物輸送を対象に（図-1）、国境及び港湾の輸送時間信頼性を向上させたときの輸送費用削減効果及び貨物流の変化について考察する。

本研究のフローを図-2に示す。まず、2.で貨物流モデルの概要を述べ、スケジュール変動費用を一般化費用に含む点が本モデルの特徴であることに言及する。3.でスケジュール変動費用を定式化し、到着時間分布の特定方法と到着余裕時間の設定方法について解説した後、4.でスケジュール変動価値を推定する。以上の3.と4.より、スケジュール変動費用が算出される。5.では確率的配分モデルに含まれるスケールパラメータを推定する。スケールパラメータ推定には、クロスボーダー輸送の一般化費用と貨物量データが必要となる。一般化費用の推定には、スケジュール変動費用に加え、平均輸送時間などの

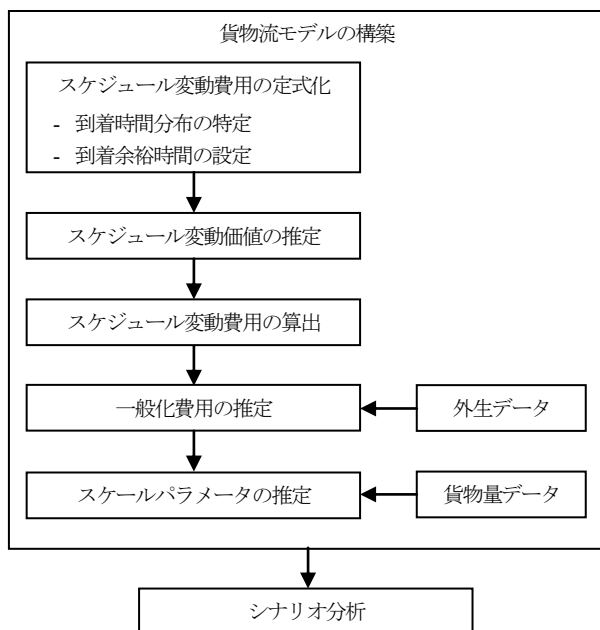


図-2 研究フロー

外生データが必要である。そこで、外生データの設定方法と、貨物量データの推定についても5.で付带的に言及する。6.では、5.までに構築された貨物流モデルを用いて、国境及び港湾の輸送時間信頼性が向上したときの費用削減効果と貨物流の変化をシナリオ分析する。7.では、本研究の結論及び今後の課題について述べる。

2. 貨物流モデルの概要

(1) 研究の対象

多くの貨物流モデル^{例えば、10)}では、国際貨物輸送市場の主たる行動主体である荷主に着目している。しかし、ラオスのような開発途上国では、経路選択や出発時刻などの意思決定において、フォワーダーへの依存がしばしば見受けられるため、本研究では輸送問題に係わる意思決定者をフォワーダーとする。

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の場合、貨物の売り主（輸出者）は貨物船に荷物を積み込む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。本研究で

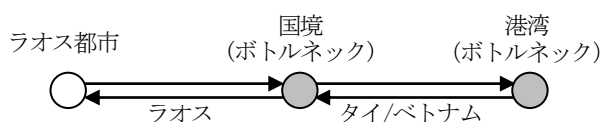


図-3 研究の対象経路

は、ラオスに位置するフォワーダー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込むに至るまでのクロスボーダー経路とする（図-3）。出発地はヴェンチャン（VTE）、サワナケット（SAV）、ルアンパバーン（LPB）、チャンパサック（CPS）で、到着地はタイのラムチャバン港（LCB）またはベトナムのハイフォン港（HAI）とダナン港（DAN）である（図-1）。なお、輸入の場合は逆となる。

開発途上国での実際の港湾アクセスは一港湾につき一経路が一般的であり、経路及び港湾選択は同時に決定される。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または輸入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、スケジュール変動費用を考慮した貨物流モデルを開発する。

(2) フォワーダーの行動と本モデルの特徴

フォワーダーは知覚した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。フォワーダーの港湾選択では船会社との関係も重要であるものの、インフラ整備などの施策効果の把握が困難になることから、すべての船会社は同質と見なしてモデルを構築する。

本研究では、開発途上国のクロスボーダー輸送に係わるフォワーダーは、スケジュール変動費用を考慮して行動していると考ええる。一般的に輸送時間変動が大きいほど、輸送時間信頼性は低いと表現される¹¹⁾。

フォワーダーの行動はロジット型の確率的配分モデルに従うものとする。このとき、フォワーダーの知覚する一般化費用は確率的にバラツキがあるとする。具体的には、知覚した一般化費用 $\tilde{C}^{rsk}$ は、式(1)のように測定可能な一般化費用 GC^{rsk} と確率的な誤差項 ε^{rsk} の和から成る。

$$\tilde{C}^{rsk} = GC^{rsk} + \varepsilon^{rsk} \quad (1)$$

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式(2)のように表される¹²⁾。

$$q^{rsk} = Q^{rs} \frac{\exp[-\theta \cdot GC^{rsk}]}{\sum_{k \in K^{rs}} \exp[-\theta \cdot GC^{rsk}]} \quad (2)$$

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 の一般化費用（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する。また、制約は正であることである。スケールパラメータ

を推定するためには、式(2)に含まれる q^{sk} と Q^s の貨物量データに加え、ODペア rs 間の経路 k の一般化費用 GC^{sk} が必要である。 GC^{sk} は、効用関数の確定項 V^{sk} と $V^{sk}=GC^{sk}$ の関係を持った、対象経路での陸上貨物輸送に関する一般化費用と定義される。 GC^{sk} は式(3)により求められる。

$$GC^{sk} = time^{sk} \cdot VT(ST) + SVC^{sk} + USC \cdot D^{sk} + BC^{sk} + TC^{sk} \quad (3)$$

$time^{sk}$: ODペア rs 間の経路 k の平均輸送時間 (hr)

$VT(ST)$: フォワーダーの時間価値 (USD/TEU-hr)

SVC^{sk} : ODペア rs 間の経路 k のスケジュール変動費用 (USD/TEU)

USC : 単位輸送費用 (USD/TEU-km)

D^{sk} : ODペア rs 間の経路 k の輸送距離 (km)

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

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

本モデルの特徴は、国境と港湾での輸送時間変動によるスケジュール変動費用を考慮した式(3)の第2項にある。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、それらをスケジュール遅着 (SDL : Schedule Delay Late) とスケジュール早着 (SDE : Schedule Delay Early) として表現する。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。

本研究では、平均輸送時間 $time$ 、単位輸送費用 USC 、国境通過費用 BC 、港湾使用料 TC 、輸送距離 D は外生的に与えられる。 ST はフォワーダーの時間価値を推定する際に用いた仮想経路での平均輸送時間であり、 $VT(ST)$ はフォワーダーの時間価値である。

3. スケジュール変動費用の定式化

(1) スケジュール変動費用の考え方

早着、遅着費用を到着時刻の発生確率で重み付けした費用をスケジュール変動費用とし、式(4)のように定式化する。

$$SVC = \int_{-\infty}^{t_a} u(t) \cdot f_k(t) dt + \int_{t_a}^{t_r} s(t) \cdot f_k(t) dt + \int_{t_r}^{\infty} g(t) \cdot f_k(t) dt \quad (4)$$

$u(t)$: スケジュール早着費用関数 $t < t_a$

$s(t)$: 通常の時間消費費用関数 $t_a \leq t \leq t_r$

$g(t)$: スケジュール遅着費用関数 $t_r < t$

t_a : 到着目標時刻

t_r : 到着制約時刻

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

また、費用関数である $u(t)$ 、 $s(t)$ 、 $g(t)$ はそれぞれ式(5)～(7)のように定式化される。

$$u(t) = VT(SDE) \cdot (-t + t_a) + (VT(ST) \cdot T_b) \quad (5)$$

$$s(t) = VT(ST) \cdot (-t + t_r) \quad (6)$$

$$g(t) = VT(SDL) \cdot (t - t_r) + PEN \quad (7)$$

t は時刻、 t_a は到着目標時刻、 T_b は到着余裕時間、 t_r は到着制約時刻を示している (図-4参照)。 $VT(ST)$ はフォワーダーの限界的な時間価値、 $VT(SDE)$ と $VT(SDL)$ はそれぞれスケジュール早着とスケジュール遅着の限界的な時間価値である。 PEN は遅着固定ペナルティである。これら時間価値の詳細な定義については、4.にて詳述する。

図-4を用いて式(4)の考え方を説明する。フォワーダーの到着目標時刻 t_a は、経路 k の到着時間分布 $f_k(t)$ の最頻値とする。到着目標時刻に到着するよう出発時刻 d を選択すると仮定しており、目標とする時刻への到着頻度が最も高くなると考えるのは妥当といえる。

本研究が対象とするような輸送時間変動の大きな経路では、フォワーダーは到着制約時刻 t_r ちょうどに到着するようには出発時刻を選択せず、遅着を回避するため、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する。遅着回避行動は、変動がさほど大きくない経路でも観察される行動であり、本対象経路のように変動が大きな経路でも妥当な仮定である。

到着制約時刻とは、輸出の場合は港湾で海上輸送を利用できる限度の時刻であり、輸入の場合は在庫切れまたは生産ラインの停止を招かない限度の時刻のことである。到着余裕時間は、到着制約時刻と到着目標時刻の差と定義する。その大きさの設定方法は(3)で詳述する。

到着制約時刻に到着すると、待ち時間がゼロとなりスケジュール変動費用は発生しない。しかし、到着制約時刻以前に到着すると待ち時間が発生するため、時間消費費用がかかる。また、到着余裕時間は出発前に予め見込まれていた時間であることから、 $t_a \leq t \leq t_r$ において通常の時間価値 $VT(ST)$ を式(6)に示す通常の時間消費費用関

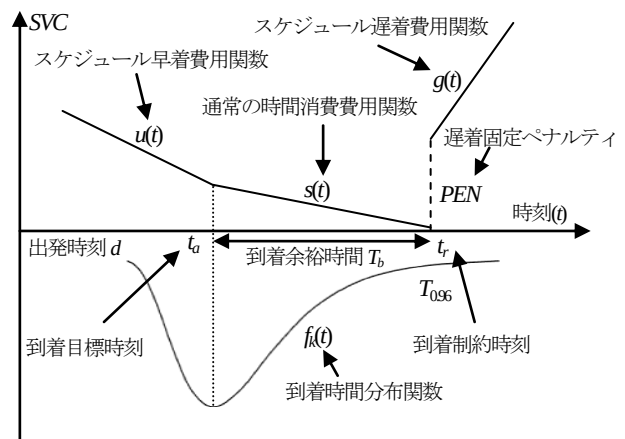


図-4 早着、遅着による費用関数

数 $s(t)$ に用いる。到着目標時刻より早く到着した場合は、 $t < t_a$ においてスケジュール早着価値 $VI(SDE)$ を式(5)に示すスケジュール早着費用関数 $u(t)$ に用いることにより、早着による費用を算出する。遅着の場合は $t_r < t$ において、スケジュール遅着価値 $VI(SDL)$ を式(7)に示すスケジュール遅着費用関数 $g(t)$ に用いることで、遅着による費用を算出する。

スケジューリングに関連する限界費用の大小関係は、多くの実証研究^{例えば、11), 13)}において、遅着が早着より影響が大きいとの結果が得られている。特に物流では遅着が部品調達の失敗や在庫不足につながり、大きな損失を招くと予想されることから、早着と遅着の限界効用の非対称性は人流より大きいと考えられる。そこで遅着時には、4.で推定する遅着固定ペナルティを課すことにより、早着と遅着の非対称性を拡大させる。到着制約時刻以前に到着した場合は遅着扱いとはならないため、遅着固定ペナルティは科されない。

通常、遅着固定ペナルティ及び遅着限界費用は非常に大きいことから、フォワーダーは遅着を避けるために到着余裕時間を設定している。スケジュール変動費用 SVC は費用関数と到着時間分布の確率密度関数の積となり、値は小さくなる。本研究においても、(3)で述べるとおり、遅着固定ペナルティに該当する確率は右裾が厚い到着時間分布の上位96%点であることが計算から判明し、十分に小さい費用が算出される。以上のように、モデル上、遅着の損失は大きいものの、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。

$f_k(t)$ は到着時間分布を示しており、国境 ($t \sim LN(m_{bk}, \sigma_{bk}^2)$) 及び港湾 ($t \sim LN(m_{sk}, \sigma_{sk}^2)$) の各輸送時間分布を合成した、対数正規分布に従う確率密度関数である。

(2) 到着時間分布の特定方法

到着時間分布 $f_k(t)$ の分布特性値を特定するためには、まず各国境及び港湾の輸送時間分布を特定しなければならない。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。

インタビュー調査により得られた各国境、港湾で必要になる最小時間、最大時間からの対数が、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 は式(8)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 $\ln(ST_{max}) = \mu + 3\sigma$ の関係から求められる。

以上の手順から得られた標準正規分布から20,000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、対数正規分布となる輸送時間分布の特性値が求められる。

この手法は、データや情報が比較的に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といえる。

特定結果を表-1に示す。各国境と港湾の位置は図-1を参照されたい。

次に、各国境及び港湾の輸送時間分布を到着時間分布とするために合成する。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、つまり、到着時間分布になる。

Crow and Shimizu¹⁴⁾によると、 M 個の独立した対数正規分布を合成すると、 $M \rightarrow \infty$ のときは中心極限定理により Λ は正規分布に近似する。しかし、本研究の $M=2$ のように、合成さ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。Arvis et al.⁴⁾においても、開発途上国において、経路上に複数の対数正規分布に従うボトルネック（国境、港湾）が存在するとき、輸送時間分布が対数正規分布に従うことを経験的に確認している。したがって、本研究では式(9)の関係を仮定して対数正規分布の合成を実施する。

$$\Lambda = \sum_{k=1}^M L_k = \sum_{k=1}^M e^{Y_k} = e^Z \quad (9)$$

対数正規分布の合成では、 Λ の分布特性値（平均と分

表-1 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 (T/N)	3.5	0.479
サワナケット／ムクダハン国境 (S/M)	3.5	0.599
ナメオ／ナムソイ国境 (N/N)	4.6	1.500
ナムファオ／カウトレオ国境 (N/C)	4.3	0.674
デンサワン／ラオバオ国境 (D/L)	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-2 合成後の到着時間分布の分布特性値（単位：hr）

	平均	標準偏差
T/N・LCB	11.5	1.275
N/C・HAI	13.2	1.657
D/L・DAN	14.5	1.742
S/M・LCB	11.5	1.320
N/N・HAI	13.4	2.141
N/C・DAN	14.8	1.750
D/L・HAI	12.8	1.630

散)を知る必要がある。これを解析的に近似させる方法は、無線通信技術の分野^{15, 16, 17)}では数多くの手法が提案されているものの、交通分野では確立した手法は存在しない。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対数正規分布の合成を実施する。

クロスボーダー輸送経路 k において、フォワーダー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なので、フォワーダーが経路 k で受けるスケジュール変動は $n_{bk}+n_{sk}$ となる。

国境と港湾は十分に離れていることから、輸送時間変動の伝播はないと仮定し、国境と港湾で受けた変動時間の和をその輸送の総変動時間とする。この方法で国境と港湾でそれぞれ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て分布特性値を算出する。以上の方法は無作為性が含まれているため、モンテカルロ法に分類される。この方法により求めた合成後の分布特性値は表-2となる。

(3) 到着余裕時間の設定方法

ここでは、到着余裕時間の大きさの設定方法を詳述する。インタビュー調査の結果、ヴェンチャン-ラムチャバン港間では平均輸送時間が21.0時間となった。既往研究⁷⁾より約3時間長い。本研究では、輸出の場合は貨物を船に積み込むまでの時間を対象としているのに対し、既往研究⁷⁾は港湾到着までを対象としていることが差異の理由と考えられる。また、同じくインタビュー調査により、出発時刻は到着制約時刻の24.5時間前であることが分かった。このとき、到着余裕時間は3.5時間となる。ヴェンチャン-ダナン港間の輸送時間は24.3時間で、出発時刻は30.0時間前である。このとき、到着余裕時間は5.7時間である。ここで、表-3に示す経路上の輸送時間分布の最頻値から99%上位点まで、1%刻みで実値との二乗誤差を確認したところ、96%上位点で3経路の二乗誤差の和が最小となった。

以上より、本研究では到着余裕時間を輸送時間分布の

表-3 到着制約時刻と出発時刻の差と、平均輸送時間

(単位: hr)	VTE-LCB [N=40]	VTE-HAI [N=32]	VTE-DAN [N=28]
到着制約時刻と出発時刻の差	245(2.17)	362(3.13)	300(3.15)
平均輸送時間	21.0(0.86)	30.2(1.11)	24.3(1.29)
到着余裕時間	3.5	6.0	5.7
最頻値-96%上位点間	3.84	5.64	6.07

*括弧内は標準偏差

最頻値から96%上位点までの間として定める。このように設定することにより、到着余裕時間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)によって内生的に決定され、変動が大きければ大きいほど到着余裕時間は大きく見積もられ、出発時刻は早くなる。

以上の方法で到着余裕時間を決定すると、到着余裕時間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、それに呼応して到着余裕時間も小さく見積もられる。このように、本モデルは各ボトルネック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。

4. 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及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。本研究では、このような価値をスケジュール変動価値と呼び、到着時間分布の広がりの変化に対する、フォワーダーの限界支払意思額と定義する。

スケジュール変動価値は、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、Bates et al.¹¹⁾によると「平均・分散アプローチ¹¹⁾」と「スケジューリングアプローチ¹³⁾」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「統合アプローチ^{18, 19)}」が近年開発されている。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。統合アプローチは基準化所要時間分布を必要とする²⁰⁾。しかし、ラオスを含め多くの内陸開発途上国で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。また、平均・分散アプローチは早着と遅着の分別ができない。

スケジューリングアプローチでは、スケジュール変動価値は希望到着時刻(PAT: Preferred Arrival Time)からどれほど乖離して早着/遅着したかによって決定される。本研究におけるPATは、図-4に示す到着制約時刻が相当し、図-5に示すSP調査票ではon timeが相当する。

スケジューリングアプローチにおけるフォワーダーの効用は、PATからどの程度乖離して早着SDE/遅着SDLしたかに加え、輸送費用C、輸送時間STに基づいて決定され、式(10)のように表される。

$$U(d) = \delta C + \alpha ST + \beta SDE + \gamma SDL + \lambda D_L \quad (10)$$

δ , α , β , γ はそれぞれ輸送費用、輸送時間、早着、遅着の限界効用である。 D_L は遅着のとき1を返すダミー変数であり、 λ は遅着の大きさと無関係な遅着そのものに

に対するペナルティである¹³⁾。

本研究で対象とする輸送経路では、輸送時間をランダムな確率変数とみなせるので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える²⁰⁾。よって、期待値演算子 $E(\cdot)$ を ST 、 SDE 、 SDL に導入し、式(11)のように表される。

$$EU(d) = V(C, ST, SDE, SDL, P_L) \quad (11)$$

$$= \delta C + \alpha E(ST) + \beta E(SDE) + \gamma E(SDL) + \lambda P_L$$

P_L は遅着到着確率であり、モデル入力値は後述の式(19)と式(20)から求められる。例えば、図-5のROUTE Aでは遅着確率が20%であるため、 P_L は0.2となる。 P_L は0～1の連続値で単位を持たず、値が1に近づくほど遅着の確率は高くなる。 λ は遅着そのものに対するペナルティであり、遅着の可能性が高い(P_L が高い)選択肢は敬遠される可能性が大きいいため、符号は負と期待される。また、式(11)に含まれる変数は、出発時刻 d に依存する。例えば、出発時刻を早めれば、遅着到着確率は減少する。スケジューリングアプローチでは、選択可能な出発時刻のうち、式(11)の効用を最大化する出発時刻が選択されることを仮定している¹¹⁾。出発時刻を早めると、輸送業務以外に充てる時間の減少による不効用の発生が考えられる。しかし、スケジューリングアプローチではこの効用は無視されている¹¹⁾。

本研究では、以上の出発時刻に関する考え方に従って効用関数を同定する。また、到着時間分布は出発時刻と独立と仮定する。すなわち、どの出発時刻を選択しても、到着時間分布は同一とする。

ここで、式(3)の「 $USC \cdot D + BC + TC$ 」は時間消費費用以外の金銭的費用であり、式(11)の δC に対応する。式(11)の $\alpha E(ST)$ 、「 $\beta E(SDE) + \gamma E(SDL) + \lambda P_L$ 」はそれぞれ時間消費費用($time \cdot VT(ST)$)、スケジュール変動費用(SVC)に対応している。すなわち、式(3)の費用関数と式(11)の効用関数を構成する変数は、金銭的費用、時間、スケジュール変動時間の3変数と共通している。また、2.で述べたように $V = -GC$ であり、(3)で後述するように、式(11)

のパラメータの符号は全てマイナスである。したがって、両式は同等である。

各時間価値及び遅着固定ペナルティ PEN は、各変数の限界効用を表わすパラメータ(δ , α , β , γ , λ)の限界代替率により、以下のように算出することができる。

PEN は式(15)に示すように、輸送費用 C と遅着発生確率 P_L の限界代替率により得られる²¹⁾。 P_L は0～1で単位を持たない数値で表され、 λ は遅着そのものの不効用を表していることから、輸送費用との限界代替率は、遅着のペナルティによる不効用を避けるための支払意思額となる。

また、 λ は単位が存在せず、輸送費用 C の単位はUSD/TEUであることから、 PEN の単位はUSD/TEUとなる。

$$VT(ST) = \frac{\alpha}{\delta} \quad (12)$$

$$VT(SDE) = \frac{\beta}{\delta} \quad (13)$$

$$VT(SDL) = \frac{\gamma}{\delta} \quad (14)$$

$$PEN = \frac{\lambda}{\delta} \quad (15)$$

(2) SPアンケート設計

式(11)のパラメータの特定のためには、フォワーダーの経路に対する選好データが必要となるため、アンケート調査を実施する。

a) 輸送時間分布

アンケートでは、図-5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到着時間分布の第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従う確率変数である⁴⁾。ヴェンチャン-ラムチャバン港間の輸送時間調査結果⁷⁾の最大及び最小の輸

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
- 3 hours late
- 8 hours late

B ☐

図-5 選択肢の一例

送時間も用いて、3.で示した方法により対数正規分布の分布特性値を求める。

b) アンケート票の設計と実施

輸送時間変動性を扱うSP調査では、文章によって表現する方法が、被験者の誤認などを最も発生させづらいことが確認されている¹⁹⁾。そこで、本研究では図-5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。

平均輸送時間及び輸送費用の水準について、既存の調査結果⁷⁾を参考にそれぞれ6つ設定し、実験計画法により選択肢を18問作成した。輸送時間変動は前節で示した輸送時間分布から特定する。

3.で述べたとおり、フォワーダーは到着制約時刻に間に合うように出発時刻を早める傾向があることが、インタビュー調査により明らかになっている。そこで早発時間 t_e を設定し、目標到着時刻からどの程度乖離して到着するかを示す到着変動時刻 SD_i を以下の式(16)のように求める。

$$SD_i = (d + t_i) - t_e - (d + time) \\ = t_i - (t_e + time) \quad (16)$$

$time$ は平均輸送時間であり、出発時刻を d とすると、 $d+time$ が希望到着時刻となり、図-4では t_0 が相当する。 t_i はスケジュール変動を含んだ実際の輸送時間であり、合成後の対数正規分布（図-4では $f(t)$ ）に従っている。シナリオを5つ設定するために、到着時間分布から第1, 3, 5, 7, 9十分位点を5つ抽出する。これらの値を式(16)に代入し、 SD_i の大きさを確認する。例えば、 SD_i が正のとき、スケジュール変動を含んだ実際の輸送時間 t_i が早発時間と平均輸送時間の和（ t_e+time ）より長くなり、希望到着時刻を超えるため、遅着となる。

以上の方法により SD_i を5つ求め、到着時間分布のシナリオを各選択肢に追加した。これが、図-5に示す5つのスケジュール変動時間に相当する。また、Small et al.²⁰⁾を参考にして SDE 、 SDL 、 P_L のモデルの入力値を式(17)～(20)のように求める。

$$SDE = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 SD_i \cdot (K_i - 1) \quad (17)$$

$$SDL = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 SD_i \cdot K_i \quad (18)$$

$$P_L = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 K_i \quad (19)$$

$$K_i = \begin{cases} 1 & SD_i > 0 \\ 0 & SD_i \leq 0 \end{cases} \quad (i=1, \dots, 5) \quad (20)$$

ここで、 K_i は遅着のとき1を返すダミー変数である。本研究では海上輸送を前提とした陸上輸送を対象として

おり、実態として貨物はコンテナで輸送されていることから、輸送費用の単位はUSD/TEUとした。

本研究では、出発時刻の選択により、式(11)を構成する変数の効用が変化するものと仮定した。また、出発時刻を早めることによる不効用は無視することから、出発時刻の選択は図-5に示すアンケート票に明示されていない。到着時間分布は出発時刻と独立とし、どの出発時刻を選択しても到着時間分布は不変であると仮定した。また、出発時刻が変化しても、輸送費用及び平均輸送時間は変化しないものとした。

以上のように出発時刻変更そのものの効用は考慮せず、出発時刻変更によって効用関数に含まれる $E(SDE)$ 、 $E(SDE)$ 、 P_L の効用を考慮することにより、スケジューリングアプローチにおける出発時刻に対する考え方と本研究で実施するSP調査との整合性を図った。

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48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ものの、面接方式で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。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いえる。有効回答データ数は860である。

(3) 結果・考察

本研究では、各回答者より18サンプルを得た。各回答者より複数の回答を得た場合、回答者間の異質性を考慮してモデルを構築する必要がある²¹⁾。ミックスドロジットモデル²²⁾はこのような同質性を考慮できる。本研究では、二項ロジットモデルとモックスドロジットモデルを用いてモデルを構築し、最も頑健なモデルを採用することとする。二項ロジットモデルの効用関数を式(22)に示す。

$$U(d)_{ij}^{BL} = EV(d)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (22)$$

$U(d)_{ij}^{BL}$ は個人 i が選択肢 j を選択する二項ロジットモデルの効用である。 $EV(d)$ と ε はそれぞれ観測可能な効用とIID特性を有している誤差項である。ミックスドロジットモデルの効用関数については、式(23)に示す通り、個人間の異質性を考慮する誤差項が追加される。

$$U(d)_{ij}^{MXL} = EV(d)_{ij} + \sigma \xi_i + \varepsilon_{ij} \quad (23)$$

$U(d)_{ij}^{MXL}$ は個人 i が選択肢 j を選択するミックスドロジットモデルの効用である。 σ は未知パラメータで、 ξ_i は個人間の誤差項で、標準正規分布 $\xi_i \sim N(0,1)$ ($f(\xi_i)$)に従うと仮定する。 $f(\xi_i)$ の分布系に関しては強い裏付けが存在しない

表-4 パラメータ推定結果

説明変数	二項ロジットモデル				ミックスドロジットモデル			
	モデル1		モデル2		モデル3		モデル4	
	係数	t値	Estimate	t値	Estimate	t値	Estimate	t値
輸送費用 (δ)	-0.00311	-8.68	-0.00304	-8.99	-0.00299	-8.22	-0.00287	-8.99
輸送時間 (α)	-0.235	-7.08	-0.238	-10.47	-0.260	-7.08	-0.261	-10.47
スケジュール早着 (β)	-0.806	-5.80	-0.802	-4.81	-0.805	-4.81	-0.790	-4.81
スケジュール遅着 (γ)	-1.34	-2.99	-1.34	-3.14	-1.34	-3.13	-1.35	-3.14
遅着ペナルティ (λ)	-3.67	-2.71	-3.66	-2.44	-3.65	-2.47	-3.60	-2.44
定数項	0.366	1.28	-	-	0.370	1.19	-	-
σ	-	-	-	-	0.0871	0.252	0.0872	0.261
ハルトン抽出の回数	-		-		1,000		1,000	
初期尤度	-596.107		-596.107		-596.107		-596.107	
最終対数尤度	-491.608		-492.312		-491.607		-492.310	
自由度調整済み尤度比	0.165		0.166		0.164		0.168	
サンプル数	846		846		846*		846*	

表-5 各時間価値と遅着固定ペナルティの推定結果

各時間価値	推定値 (USD/TEU-hr)
時間価値: $VT(ST)$	78.29
スケジュール早着価値: $VT(SDE)$	263.82
スケジュール遅着価値: $VT(SDL)$	440.79
遅着固定ペナルティ: PEN	1,203.95 (USD/TEU)

ため、多くの研究で標準正規分布が仮定されている通り²⁴⁾、本研究においても標準正規分布に従うと仮定した。誤差項 ε がガンベル分布に従うと仮定すると、二項ロジットモデルにおける個人 i が選択肢 j を選択する確率(P_{ij}^{BL})は式(24)のように表される。

$$P_{ij}^{BL} = \frac{\exp[EV(d)_{ij}]}{\sum_j \exp[EV(d)_{ij}]} \quad (24)$$

一方、ミックスドロジットモデルの場合の同様の確率($L_j(\xi)$)は、式(25)のように表される。

$$L_j(\xi) = \frac{\exp[EV(d)_{ij} + \sigma \xi_i]}{\sum_j \exp[EV(d)_{ij} + \sigma \xi_i]} \quad (25)$$

ξ の分布形は標準正規分布と仮定したため、ミックスドロジットモデルにおける個人 i が選択肢 j を選択する確率(P_{ij}^{MXL})は、式(26)に示すとおり、確率($L_j(\xi)$)と確率密度分布($f(\xi)$)の積となる。

$$P_{ij}^{MXL} = \int_{\xi_i} L_j(\xi) f(\xi_i) d\xi \quad (26)$$

式(26)は標準正規分布を内包しているため、ミックスドロジットモデルのパラメータ推定はシミュレーションを要する。本研究では、多くの研究^{例えば、25)、26)}で用いられているハルトン数列によってシミュレーションを行い、未知パラメータを推定した。

前節で示したアンケート調査から得られたフォワード

ーの経路選択における選好データを用いて、二項ロジットモデルとミックスドロジットモデルのパラメータを推定した。ソフトウェアはBIOGEME1.8²⁷⁾を用いた。なお、変数間の相関を確認した結果、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。

パラメータ推定及び統計テストの結果を表-4に示す。

二項ロジットモデル(モデル1)の定数項のt値は1.28と低く統計的に有意とは認められないため、モデルから除外してモデル2を構築した。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値は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いえる。

ミックスドロジットモデル(モデル3、4)については、個人間の誤差項 σ のt値が低く、統計的に有意とは認められず、モデルに考慮する必要がないことが示唆される。以上より、本研究ではモデル2を採用し、各時間価値を推定することとする。

表-5に推定された各時間価値を示す。 $VT(SDE) < VT(SDL)$ の関係は従来通りの結果であるものの、その差が非常に大きく、遅着価値は通常の時間価値の5.6倍である。つまり、1時間の遅着減少は5.6時間の輸送時間減少に相当する。ヴェンチャン-ラムチャバン港間の平均輸送時間は18時間²⁸⁾であるので、5.6時間は平均輸送時間全体の約3割に相当する(ただし、1時間の遅着減少後も依然遅着の状態が保存される場合に限る)。

インタビュー調査から、フォワードーは遅着を極端に嫌う傾向が示唆されており、 $VT(SDE)$ と $VT(SDL)$ の大きな差は妥当といえる。遅着固定ペナルティも大きな値を得ることができ、同様に妥当な結果といえる。また、早着は出発前に予め見込まれていない時間である。インタビュー調査によると、フォワードーは通常の時間価値より

も早着が輸送費用の増大に寄与することを認識している。以上より、 $VI(ST) < VI(SDE)$ の関係も妥当といえる。

SPデータを用いてパラメータ推定を実施するとき、アンケートに含まれる各変数の水準設定がパラメータ推定結果の信頼性に影響を与える。本研究では、各変数の水準を妥当な値に設定するために、GMS地域でのクロスボーダー輸送に精通している専門家に値の妥当性をアンケート前に確認した。さらに、パイロット調査も実施することで、パラメータ推定結果の信頼性向上に努めた。したがって、結果の信頼性は十分に確保されているものとする。

5. スケールパラメータ θ の推定

(1) 一般化費用推定のための入力値の設定

式(2)のスケールパラメータ θ を求めるには、式(3)で与えられている一般化費用 GC を求める必要がある。

式(3)を構成する変数のうち、内生的に与えられる数値は $VI(ST)$ 及び SVC の二つであり、前章までに推定方法を述べた。これら以外に入力値は全て外生的に与えられる数値である。表-6にその一覧を示す。以下、データ設定方法を詳述する。

$time$, USC , BC は51社を対象にしたインタビュー調査より求めた。 $time$ は各経路での輸送時間の平均である。図-4では、出発時刻 d から到着目標時刻 t までが $time$ 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、距離に比例して増加する単位輸送費用として定義される。 BC 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ことが考えられる。

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、ドライバー及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5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 : Purchase Order)、宣誓供述書、パスポートの提示が一般的である。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、 BC についてはタイ側国境では1TEU当たり100USD、ベトナム側国境では共通で1TEU当たり80USDと設定した。

TC 及び D はJETRO²⁹⁾を参考に設定した。 TC に含まれるプロセスも多岐に渡る。荷役料、書類作成料、書類準備、税関申告及び貨物検査は、タイ及びベトナムの国内港湾ではそれぞれ概ね共通料金である。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。 TC は、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

式(2)のスケールパラメータ θ は、実際の貨物量と推定貨物量との誤差を最小化するように求められるため、ラオス各都市の発生貨物量及び経路別貨物量のデータ

表-6 外生的に与えられる入力値一覧

変数	変数の説明	設定方法	数値		
$time^{rk}$	ODペア rs 間の経路 k の平均輸送時間	インタビュー調査より得た経路別の輸送時間の平均 (国境と港湾の所要時間を含む)	LPB-LCB : 20.2 hr VTE-LCB : 21.0 hr SAV-LCB : 20.8 hr CPS-LCB : 23.7 hr	LPB-HAI : 19.7 hr VTE-HAI : 30.2 hr SAV-HAI : 34.5 hr CPS-HAI : 26.6 hr	LPB-DAN : 29.1 hr VTE-DAN : 24.3 hr SAV-DAN : 19.3 hr CPS-DAN : 24.4 hr
USC	単位輸送費用	インタビュー調査より得られた研究対象ネットワーク内の単位輸送費用	2.3 USD/TEU-km		
D^{rk}	ODペア rs 間の経路 k の輸送距離	JETRO ²⁹⁾ より設定	LPB-LCB : 1,000 km VTE-LCB : 700 km SAV-LCB : 700 km CPS-LCB : 950 km	LPB-HAI : 690 km VTE-HAI : 880 km SAV-HAI : 1,150 km CPS-HAI : 1,300 km	LPB-DAN : 1,150 km VTE-DAN : 780 km SAV-DAN : 430 km CPS-DAN : 880 km
BC^{rk}	ODペア rs 間の経路 k の国境通過費用	インタビュー調査より得た国境別通過費用の平均	タイ側国境共通 : 100 USD/TEU ベトナム側国境共通 : 80 USD/TEU		
TC^{rk}	ODペア rs 間の経路 k の港湾使用料	JETRO ²⁹⁾ より設定	ラムチャバン港 : 1,400 USD/TEU ハイフォン港 : 800 USD/TEU ダナン港 : 850 USD/TEU		

(式(2)における Q^s 及び q^{sk})が必要である。しかし、そのようなデータは存在しないため、以下の手順で推定した。

柴崎・渡部²⁹⁾により推定された、2003年におけるラオスから全世界へ輸送されるコンテナ貨物量 (TEU/年) から、海上ではなく、陸路で輸送されているタイ、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²⁹⁾では、ラオスは北部、中部、南部の3つにゾーニングされており、北部及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。これより、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 Q^s 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。JICA²⁹⁾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²⁹⁾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、航空貨物及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-7のようになる。

サワナケットを除くと、輸入超過というラオスの現状³⁰⁾を反映できた結果となった。サワナケットはセポ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²⁹⁾。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ことから、妥当な結果である。また、ラオス経済はヴェンチャンが中心であり、人口も多く、輸入

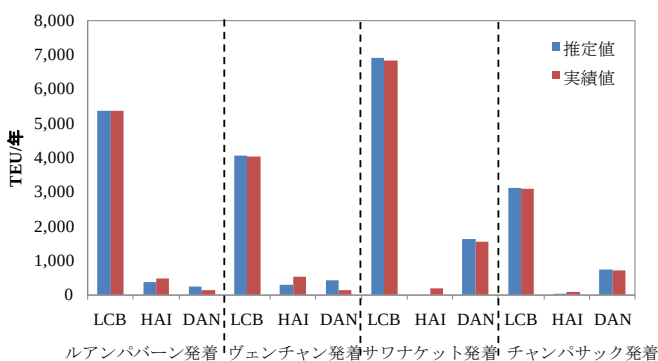


図-6 実績値とモデルによる推定値の比較

表-7 発生貨物量推定結果 (TEU/年, 2003年)

	輸出 (Q^{sk})	輸入 (Q^s)
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

量は最も多い。ルアンパバーンは家具などの加工品を含む木材系の輸出が多い。チャンパサックが位置する南部は目立った産業がなく、人口も少ないため輸出入ともに少ない²⁹⁾。

次に、各港湾へ向かう経路別の貨物量 q^{sk} を推定する。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推定する。インタビューで得られた港湾選択確率の傾向は企業間でバラツキはほとんど見受けられなかった。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。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 $0.850Q^s$ 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であるため、ハイフォン港へ向かう貨物量は $0.105Q^s$ 、ダナン港は $0.045Q^s$ 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。しかし、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、一到着地につき一経路という本研究の設定は妥当といえる。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、フォワーダーは経路ではなく、利用港湾自体を変更するであろう。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追加的輸送費用を伴うためである。

(3) スケールパラメータ θ の推定結果

式(2)のスケールパラメータ θ は、現状を最もよく再現できるように推定する。対象ネットワークは、ルアンパバーン、ヴェンチャン、サワナケット、チャンパサックの4都市をセントロイドとした、4つの輸送ネットワークとし、それぞれ別々に推定する。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では、経路選択において互いに影響を与えず、独立しているためである。各セントロイドとも、ラムチャバン、ハイフォン、ダナン港を到着地とした3経路を選択肢として有し、一到着地につき一つの経路のみ選択可能と仮定する。

推定方法は、式(2)を用いて4つのセントロイド別に、3経路について非線形連立方程式を立て、推定値と実績値の二乗誤差が最小となるようにスケールパラメータを推定する。都市 k 発着のODペア rs 間の現状貨物量 Q^{sk} は既に求めており (表-7)、経路 k の一般化費用 GC^{sk} は式(3)により求められる。

以上の方法によりスケールパラメータ θ を推定した結果、表-8に示す通り、0.0026~0.0282となった。本研究では、1,000km前後の長距離輸送ネットワークを対象にしておき、輸送に関わる一般化費用 (式(2)における GC^{sk})

の値は大きい。一般化費用が大きければ大きいほど、観測不能で一般化費用のバラツキを大きくする要因は増加するため、各経路の一般化費用に対するフォワーダーの認知差は大きくなり、経路間の費用差を正確に判断できなくなる。このような状況のとき、一般化費用の単位変化当たりの経路選択の感度は小さくなるため、通常スケールパラメータは小さく推定される。以上の観点から、本研究において、スケールパラメータが小さく推定されたのは妥当といえる。

なお、対象ネットワーク内ではリンク上で混雑することが考えづらく、混雑状況によって経路変更することはない。そのため、本研究はフロー依存型配分問題ではなく、フロー独立型配分問題に位置づけられる。一方、国境と港湾においては混雑が発生する。その混雑は一般化費用として考慮されており、フォワーダー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している。また、ラオス発着貨物が近接国の港湾の取扱貨物の中で占める割合は非常に低いため、サービスレベル向上などに伴う貨物量増加による混雑の可能性はほとんどない。例えば、ラムチャバン港の2003年アウトバウンド総取扱量1,573,176TEU³⁾の中で、本研究で推定したラオスのアウトバウンド貨物量は11,934TEUと僅か0.008%である。

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図-6のようになり、一定の精度を確保している。なお、輸出入で推定値と実績値の誤差は等しい。

6. シナリオ分析

表-8 スケールパラメータ θ 推定結果

	スケールパラメータ θ
ルアンパバーン発着 ($k=1$)	0.0026
ヴェンチャン発着 ($k=2$)	0.0032
サワナケット発着 ($k=3$)	0.0282
チャンパサック発着 ($k=4$)	0.0101

(1) 国境輸送時間信頼性向上

構築した貨物流モデルと2003年時点の貨物量データを用いて、国境と港湾の輸送時間信頼性を向上させたシナリオ分析を試みる。信頼性向上とは、各国境と港湾で発生する輸送時間分布の標準偏差を小さくすることに相当する。

まず、国境通過に要する輸送時間の信頼性を向上させた場合のスケジュール変動費用と各港湾における取扱貨物量の変化を分析する。シナリオは、各国境の輸送時間分布の標準偏差が10%から90%まで20%刻みで減少す

るように設定した。

図-7は国境輸送時間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、中でもナメオ/ナムソイ・ハイフォン港 (N/N・HAI) の減少率が大きい。これは、ナメオ/ナムソイ国境における標準偏差の現状値が大きいためである。

国境での輸送時間変動が70%以上削減されたとき、変動の大きいナメオ/ナムソイ国境も含め、全ての国境の変動の大きさは概ね同程度となるため、港湾での輸送時間変動が大きい順に、各経路におけるスケジュール変動費用も大きくなる。

現状のスケジュール変動費用の平均値は1,907USD/TEUである。国境での輸送時間変動を90%削減すると、平均値は1,286USD/TEUまで減少し、32.5%の削減となる。また、現状の総費用に対して、スケジュール変動費用は29.5%を占めているが、国境での輸送時間変動を90%削減するとその割合は19.9%まで減少する。

次に、都市別の港湾選択の変化を図-8~11に示す。全都市において、国境での輸送時間変動の削減によって、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。

図-8に示すルアンパバーン発着貨物では、ルアンパバーン・ハイフォン港間のナメオ/ナムソイ国境における輸送時間変動の現状値が大きく、ハイフォン港へのアクセスにおけるボトルネックであった。それが解消されるにつれ、距離が近いハイフォン港の取扱貨物量が大きく増加する。図-9に示すヴェンチャン発着貨物では、ベトナム方面の貨物量が幾分増加するものの、距離も近いラムチャバン港の取扱貨物量が依然として高い。図-10のサワナケット発着貨物では、国境での輸送時間変動が減少すると、変動減少量の大小にかかわらず距離に大きな優位性を持つダナン港の取扱貨物量が劇的に増加する。図-11のチャンパサック発着貨物は、ネットワーク上、必ずサワナケットを通過するように設定されているため、サワナケットと比較してOD距離が長くなり、ダナン港の距離的優位性が減少する。その結果、ダナン港の取扱貨物量の伸びはサワナケット発着貨物ほどにはならない。

図-12に示すラオス全体の発着貨物では、国境での輸送時間変動が70%以上削減されたとき、変動の大きいナメオ/ナムソイ国境も含め、全ての国境の輸送時間変動がほぼ同水準になるため、三つの港湾で取扱貨物量のシェアは同程度になる。

(2) 港湾輸送時間信頼性向上

次に、港湾で要する輸送時間の信頼性を向上させた場合のスケジュール変動費用と各港湾での取扱貨物量の変化を分析する。シナリオは国境信頼性向上の場合と同様に、港湾での輸送時間分布の標準偏差が10%から90%

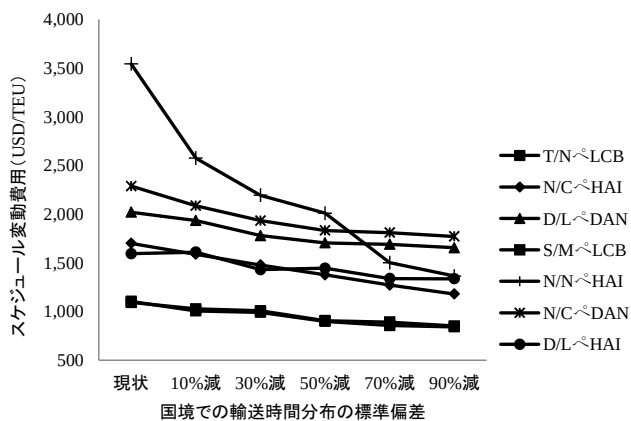


図-7 国境信頼性向上によるスケジュール変動費用の変化

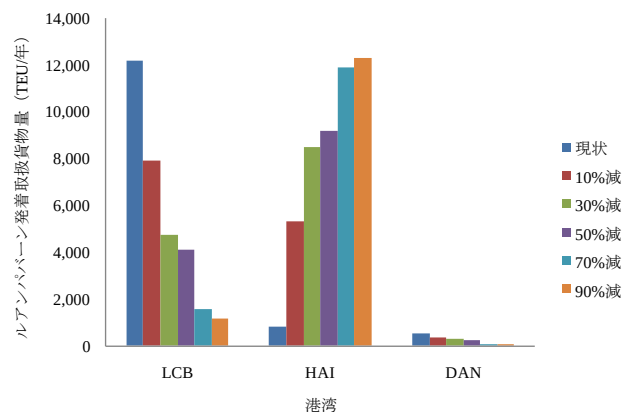


図-8 ルアンパバーン発着貨物の港湾選択の変化

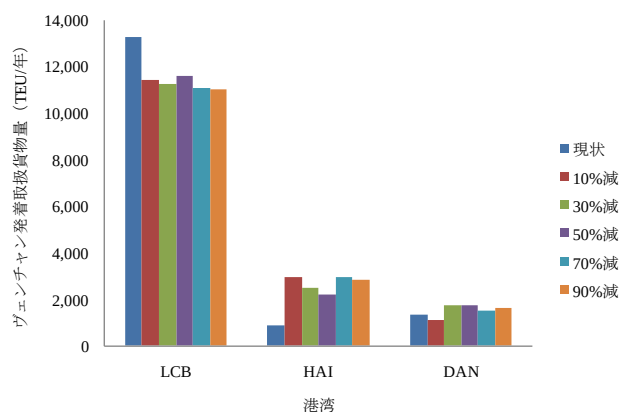


図-9 ヴェンチャン発着貨物の港湾選択の変化

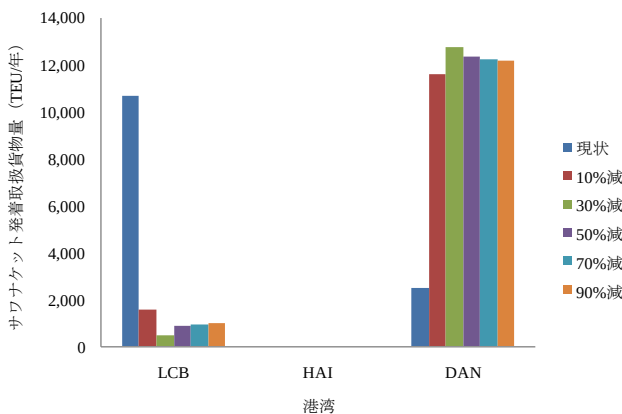


図-10 サワナケット発着貨物の港湾選択の変化

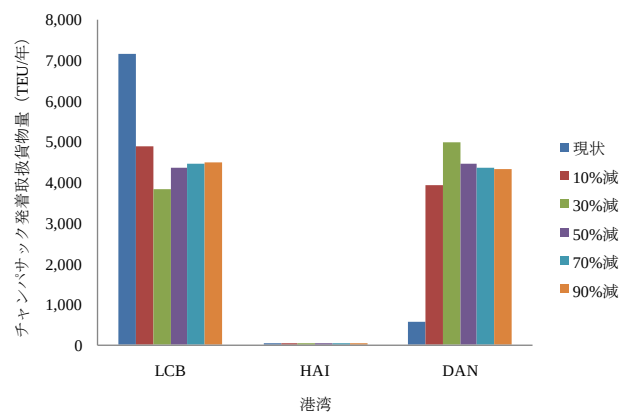


図-11 チャンパサック発着貨物の港湾選択の変化

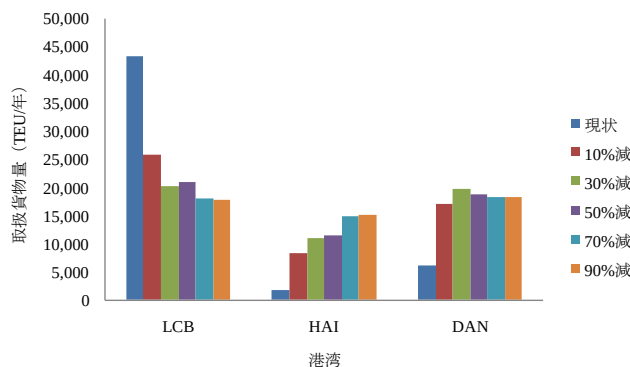


図-12 ラオス発着貨物の港湾選択の変化

まで20%刻みで減少するように設定した。

図-13に港湾輸送時間信頼性向上によるスケジュール変動費用の変化を示す。スケジュール変動費用の削減率は、港湾での輸送時間信頼性向上の方が国境よりも高い。この理由は、現状の港湾での輸送時間変動が国境よりも大きいためである。現状のスケジュール変動費用の平均値は1,907USD/TEUで総費用平均値の29.5%であり、港湾での輸送時間変動の90%削減時には、総費用平均の7.1%である461USD/TEUまで削減される。

港湾信頼性向上の分析においても、国境信頼性向上の場合と同様に、ラムチャバン港の取扱貨物量が減少し、

ベトナム2港の取扱貨物量上昇の傾向が見て取れる。都市別の港湾取扱貨物量を図-14～17に示す。図-14に示すルアンパバーン発着貨物は、距離の近いハイフォン港の取扱貨物量が上昇する。しかし、ナメオ/ナムソイ国境の抵抗が非常に大きく、国境抵抗削減の場合より取扱貨物量の伸びは鈍い。図-15のヴェンチャン発着貨物では、港湾の輸送時間変動が50%以上削減されると、国境と港湾を含めたラムチャバン港向けとダナン港向け経路の輸送時間変動は概ね等しくなり、かつヴェンチャンからラムチャバン港及びダナン港までの距離の差もほとんどないため、両港の取扱貨物量は概ね等しくなる。図-16

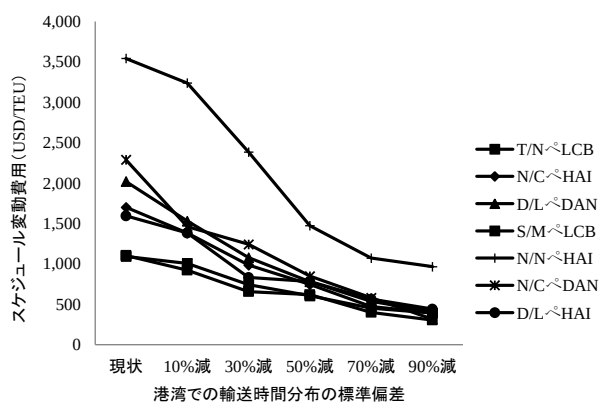


図-13 港湾信頼性向上によるスケジュール変動費用の変化

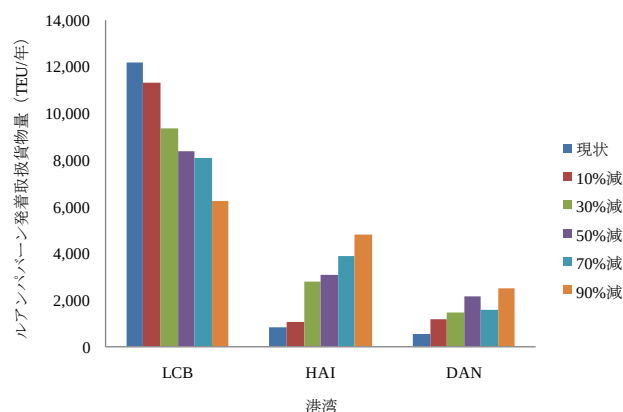


図-14 ルアンパバーン発着貨物の港湾選択の変化

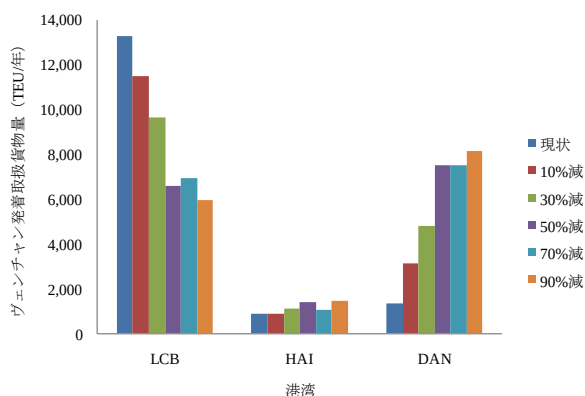


図-15 ヴェンチャン発着貨物の港湾選択の変化

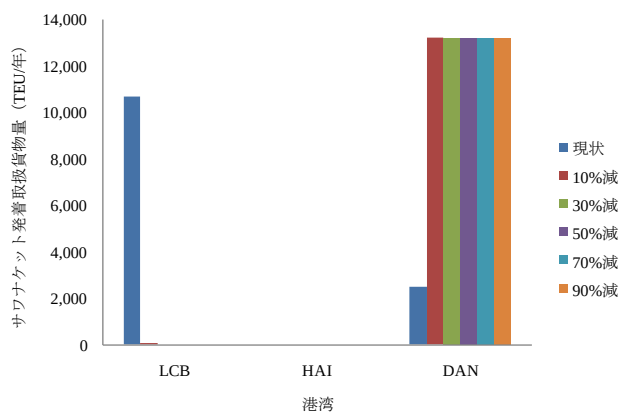


図-16 サワナケット発着貨物の港湾選択の変化

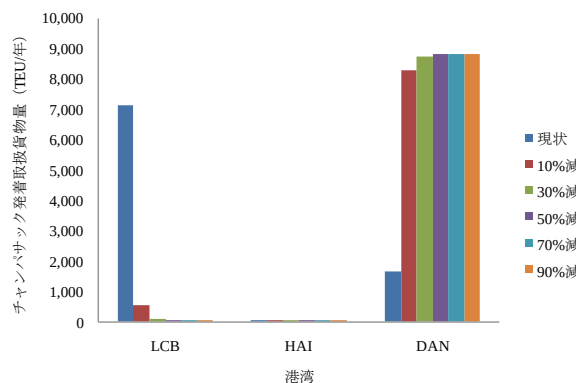


図-17 チャンパサック発着貨物の港湾選択の変化

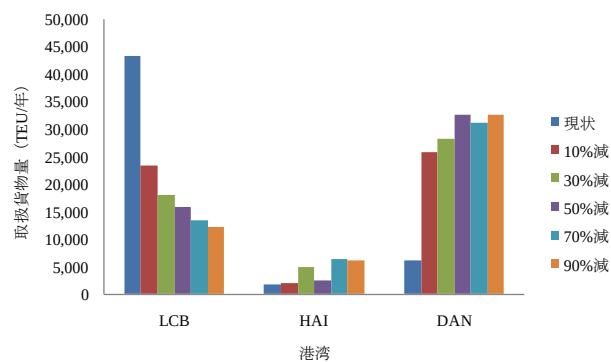


図-18 ラオス発着貨物の港湾選択の変化

と図-17のサワナケット及びチャンパサック発着貨物では、国境信頼性向上の分析の場合と同様に、ダナン港の利用シェアが支配的となる。しかし、ダナン港の利用シェアの上昇率は、国境信頼性向上の場合よりも高い。ダナン港利用の際に通過するダンサワン/ラオバオ国境の輸送時間変動の現状値は比較的低い。そのため、ダナン港そのものの輸送時間変動が減少すれば、距離に大きな優位性を持つダナン港の取扱貨物量が増加するのである。

図-18に示すラオス全体の発着貨物の港湾取扱貨物量では、ダナン港の取扱貨物量が大きく伸び、ハイフォン港の伸びは鈍い。これは、港湾信頼性向上の場合、抵抗の大きいナメオ/ナムソイ国境が改善されず、ルアンパ

バーン発着貨物のハイフォン港の利用がそれほど伸びないためである。

7. おわりに

本研究では、内陸開発途上国が国境と港湾で直面する輸送時間変動を考慮した貨物流モデルを構築した。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これまで存在しなかった。

ラオス発着のクロスボーダー輸送を対象としたシナリ

オ分析より、輸送時間変動削減効果が定量的に評価され、削減量次第では、港湾における取扱貨物量のシェアが逆転するという結果を示した。また、港湾の信頼性向上は国境の信頼性向上と比較して輸送費用削減への影響が大きいことが明らかになった。なお、経路によって輸送時間変動に影響を与えるボトルネックが異なるため、貨物量シェアを伸ばすには港湾別に対策が異なる。例えば、ルアンパバーンからハイフォン港への経路では、ナメオ/ナムソイ国境の抵抗が大きいと、港湾抵抗よりも国境抵抗の削減がより効果的である。サワナケットからダナン港への経路では、ダンサワン/ラオバオ国境の抵抗が比較的低いため、港湾そのものの抵抗の削減がダナン港の取扱貨物量増加に資する。また、本研究ではGMS域内のスケジュール変動価値を推計した。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、貴重な結果である。

GMS域内は、越境交通協定（CBTA：Cross-border Transport Agreement）や経済回廊の整備など、クロスボーダー輸送円滑化の動きが活発な地域である。そのために国境抵抗以上に港湾抵抗がスケジュール変動費用に占める割合が大きくなったことも考えられる。内陸国にとって港湾は近接国の領土内に位置しており、内陸国による港湾の信頼性向上の試みは困難である。近接国の港湾の信頼性向上に、内陸国がどう関わるかが課題となる。

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スケジュール変動費用算出式に積分を含まない“閉じた式”に改良することが肝要である。また、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より有用である。さらに、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。

ラオスからタイ・ベトナムの近接国の港湾までの輸送時間は、対数正規分布に従うランダムな確率変数との仮定を置いたものの、その根拠はアフリカなど他地域での事例に基づいている。本研究が対象とするGMS地域においても同様の仮定を置くことができるか、データを収集して検証する必要がある。

謝辞：本研究は、「The valuation of shipment time variability in Greater Mekong Subregion」（Transport Policy, Volume 32, pages 25-33）の成果の一部が含まれている。またヴェンチャンでの調査にご協力頂いた国際開発センターの馬場勇一氏、ラオス公共事業運輸省のBounta Onnavong博士、及びバンコクでのインタビュー調査にご協力頂いたタイ・タマサート大学のRuth Banomyong准教授に謝意を表したい。なお、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.
- 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*, No.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 (ERIA) 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) 赤松隆，土屋雄二，川上喜博：確率的均衡配分の効率的計算法の開発，交通工学，Vol.26，No.1，1991.
- 13) 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.
- 14) Crow, E. L. and Shimizu, K.: Lognormal Distributions: Theory and Applications, Marcel Dekker, Inc., New York, 1988.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Lam, C.-L. J. and Le-Ngoc, T.: Estimation of Typical Sum of Lognor-

- mal Random Variables using Log Shifted Gamma Approximation, *IEEE Communications Letters*, Vol. 10, No. 4, April 2006.
- 18) Fosgreau, M. and Karlström, A. : The value of reliability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 44, No. 1, pp. 38-49, 2010.
 - 19) Fosgreau, M. and Fukuda, D.: Characteristics of the distribution of travel time on urban road, *European Transport Conference*, Leiden, Netherlands, 2008.
 - 20) 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.
 - 21) 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, Technical report 431, National Cooperative Research highway Program, 1999.
 - 22) Hsiao, C. : Analysis of Panel Data 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
 - 23) McFadden, D. and Train, K.: Mixed MNL models for discrete response, *Journal of Applied Econometrics*, 15, pp. 447-470, 2000.
 - 24) Yannis, G. and Antoniou, C.: A mixed logit model for the sensitivity analysis of Greek drivers' behavior towards enforcement for road safety, *European Transport*, 37, pp. 62-77, 2007.
 - 25) Train, K.: *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, 2003.
 - 26) Sandor, Z. and Train, K.: Quasi-random simulation of discrete choice models, *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(4), pp. 313-327, 2004.
 - 27) Bierlaire, M.: BIOGEME: A free package for the estimation of discrete choice models, *Proceedings of the 3rd Swiss Transportation Research Conference*, Ascona, Switzerland, 2003.
 - 28) JETRO : ASEAN 物流ネットワークマップ 2008.
 - 29) JICA : The Comprehensive Study on Logistics System in Lao People's Democratic Republic, Interim Report, Unpublished Paper, 2010.
 - 30) CIA : The World Factbook, 2011.
 - 31) Bangkok Shipowners 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)

INLAND CARGO FLOW MODEL UNDER SHIPMENT TIME VARIABILITY IN LANDLOCKED DEVELOPING COUNTRY

Tomoya KAWASAKI and Shinya HANAOKA

In this study, inland cargo flow model which considers cost due to shipment time variability facing at border and seaport is developed. Using developed model, the analysis is conducted under several scenarios, such as improving border and seaport reliability. The notable characteristic of the model is that expected schedule variability cost is considered in generalized cost. As a result of scenario analysis, shipment time reliability at seaport has more impact on cost reduction comparing to that of border. For seaport choice, both case of seaport and border reliability increase indicates similar trend, which cargo volume decreases at Laem Chabang seaport and increases at Vietnamese seaport. As a gap of variability scale between the routes decreases, distance factor is getting more important for seaport choice.