

# 多段階配分による全世界インターモーダル物流ネットワークシミュレーションモデルの構築とミャンマーを対象とした政策シナリオの検討

山口 拓哉<sup>1</sup>・河内 昂輝<sup>2</sup>・渋谷 圭吾<sup>3</sup>・柴崎 隆一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>非会員 前東京大学大学院 工学系研究科システム創成学専攻

<sup>2</sup>学生非会員 東京大学 工学部システム創成学科

<sup>3</sup>学生非会員 東京大学大学院 工学系研究科システム創成学専攻

<sup>4</sup>正会員 東京大学大学院准教授 工学系研究科レジリエンス工学研究センター/技術経営戦略学専攻

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: shibasaki@tmi.t.u-tokyo.ac.jp

本研究は、筆者らの研究グループでこれまでに構築してきた全世界インターモーダル物流ネットワークシミュレーションモデルについて、計算の収束性を向上させるため、配分手法を均衡配分から多段階配分へ変更した。この際、並列計算を導入することで計算時間を抑えるとともに、サブモデルと上位モデルの統合などのモデル構成の変更を行った。

次に、構築したモデルを、ミャンマーを中心とする ASEAN 地域に適用し、主要港湾の輸出入貨物量について概ね良好な再現性が得られていることを確認したうえで、当該地域において将来想定される物流インフラ政策が地域に与える影響を検討した。具体的には、陸域 ASEAN と中国との間の国境サービス改善シナリオにおいては、ミャンマーのみの改善が他 ASEAN 諸国からの貨物のシフトにつながる一方、陸域 ASEAN 全域での改善が中国国境輸送量の地域全体での増加につながることを確認された。また、ミャンマーとタイの間の GMS 東西回廊における国境サービス改善シナリオでは、東西回廊とティラワ港の協調関係が確認された。最後に、ヤンゴン港の海上サービス追加シナリオでは、ヤンゴン港を中国および ASEAN の貨物のヨーロッパ方面への輸出港とすることは既存の需要量では難しいことが示唆された。

**Key Words:** *global intermodal logistics network simulation model, multistage allocation, Myanmar, policy scenario analysis, parallel computing*

## 1. はじめに

### (1) 研究背景および目的

世界経済の成長とグローバル化に伴う貿易の拡大により、先進国だけではなく発展途上国も含めた国際物流モデルシミュレーションの必要性が高まっている。その例として、Shibasaki et al.<sup>1)</sup>による均衡配分をベースとした全世界インターモーダル国際物流ネットワークシミュレーション (GLINS) モデルは、モデルの改良を重ねながら多くの地域に適用されている。たとえば、Yamaguchi et al.<sup>2)</sup>および山口ら<sup>3)</sup>は、GLINS モデルを陸域 ASEAN 地域へ適用し、特にミャンマーにフォーカスして近隣諸国も含めた政策分析を行っている。

しかし Shibasaki et al.<sup>1)</sup>等で用いられてきたモデルでは、

その構造に起因する課題が発生している。このモデルは、陸上および海上の実輸送ネットワーク上で容量制約に基づき均衡配分を行う下位モデルと、両ネットワークを統合した仮想的なインターモーダル輸送ネットワーク上で確率配分を行う上位モデルの二層構造となっている。ここで、容量制約の厳しいネットワークにおいて均衡配分やモデルの繰り返し計算を行うと、計算結果が振動する可能性が高まる。たとえば Yamaguchi et al.<sup>2)</sup>における港湾取扱量の再現性は、一般的には十分高いといえるものの、タイの中で互いに近接するバンコク港とレムチャバン港の取扱量に関しては、結果が安定せず収束していない。

そこで本研究では、Shibasaki et al.<sup>1)</sup>等で用いられてきたモデルの課題である結果の振動を抑えるために、①上位モデルと下位モデルのうちの陸上サブモデルを統合する

とともに、②均衡配分ではなくより容量制約の影響が反映されやすいと考えられる段階配分を用いたモデルを構築する。ここで、段階配分への変更により計算時間の増大が予想されることから、③並列計算アルゴリズムの導入も実施する。さらに、前述した港湾取扱量の結果の不安定性を踏まえ、④従来モデルで考慮されていた船舶、鉄道、道路、内航水運における容量制約に加え、港湾ターミナルの容量制約も考慮する。加えて、⑤陸上輸送ネットワークを ASEAN だけでなく中国を含むユーラシア地域へと拡大し、中国と ASEAN の間の輸送における海路と陸路の競合を考慮することができるモデルへと拡張する。

また、構築したモデルを用いて陸域 ASEAN、特にミャンマーにフォーカスしたシナリオ分析を行う。Yamaguchi et al.<sup>2)</sup> および山口ら<sup>3)</sup> で述べられているように、現在ミャンマーにおいてはインフラ開発に関して多くの論点が残されており、それぞれのシナリオに基いてシミュレーション分析を行い、その効果を定量的に検証することは非常に重要である。本研究では陸上輸送ネットワークに中国が加わったことを念頭に、陸域 ASEAN～中国間国境およびミャンマー～タイ間国境のサービスレベル改善に関するシナリオと、ヤンゴン港の海上サービス追加に関するシナリオに関してシミュレーションを実施する。

以上、5点のモデルの改良およびモデルを用いたシナリオ分析を本研究の目的とする。

## (2) ミャンマーの国際物流環境

ミャンマーの国際物流における主要な拠点および回廊を図-1 に示す。詳細は山口ら<sup>3)</sup> で述べられているため、ここでは今回新たに注目する中国との間の輸送環境について述べる。

中国との間の輸送に関しては、ミャンマー北部の都市ムセ (Muse) と隣接する中国の瑞麗 (Ruili) を経由する形でのトラックを用いた輸送が大半を占める<sup>4)</sup>。中国側の区間である瑞麗と雲南省の省都昆明の間は高速道路が整備されており効率の良い輸送がなされているものの、ミャンマー側の区間であるムセとミャンマー第二の都市マンダレーの間は 430 km の輸送に 12 時間程度かかるなど効率化されているとはいえない。そのため最近では、バイパス建設によるムセ～マンダレー間の輸送時間短縮も計画されている。

このようにミャンマーの高い経済成長に応じて、中国や同じく急成長を遂げている他の ASEAN 地域との貿易活性化のための国内のインフラ開発のニーズが高まっており、限られた資源の中で効率的にインフラ開発を行うための政策シミュレーションによるシナリオ分析は意義があるものと考えられる。

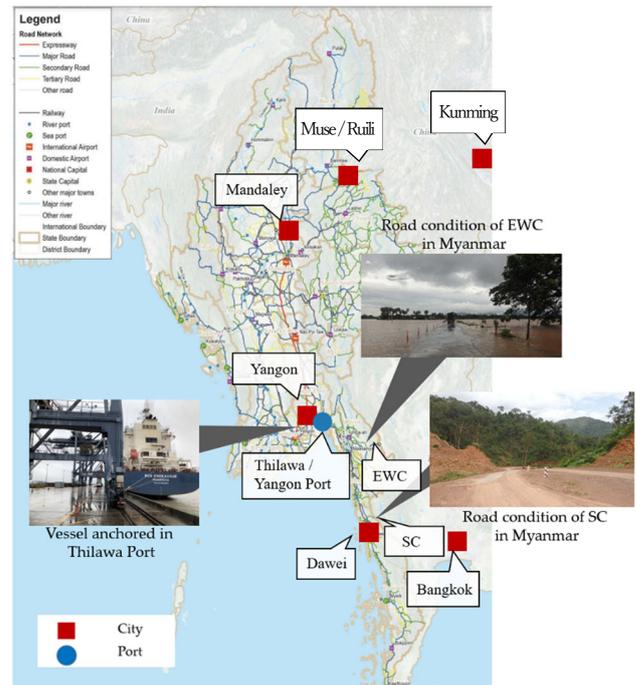


図-1 ミャンマーの主要な拠点および回廊

出典：Yamaguchi et al.<sup>2)</sup> を一部修正

## 2. 既往研究

陸域 ASEAN を対象とした物流シミュレーションの既往研究に関しては Yamaguchi et al.<sup>2)</sup> で詳細に述べられているため、ここでは段階配分手法を大規模交通ネットワークシミュレーションに適用した研究と、並列計算を交通ネットワークシミュレーションに適用した研究をそれぞれ整理する。

段階配分手法を交通ネットワークシミュレーションに適用した研究は、以下のものが挙げられる。Zhang<sup>5)</sup> は、最短経路問題を段階配分手法により繰り返し解くことで、経済・社会・環境の観点からインターモーダル輸送と単一モード輸送の比較分析を可能にするモデルを構築した。Hai<sup>6)</sup> は、地下交通システムが交通状況や排気ガス排出量に与える影響を評価するための実証的手法を重力モデルにより構築しており、OD 需要量を分割し段階配分手法を適用している。

並列計算を交通ネットワークシミュレーションに適用した研究は以下のものが挙げられる。Lee et al.<sup>7)</sup> は、マルチプロセッサシステム内の複数のプロセッサの使用や、同一のネットワークにある複数のコンピュータの使用により、計算時間を短縮する並列交通シミュレーション手法を、ネットワークを地理的に分割する方法により適用し、物流シミュレーションの並列計算を実現している。Mehbood et al.<sup>8)</sup> は、グラフとしてモデル化された米国の道

路ネットワークデータに対して、Apache Spark ビッグデータプラットフォームを用いたシングルソースの最短経路グラフ問題を適用している。Florian<sup>9)</sup>は、線形近似法と最短経路問題を並列化して解く Solaris スレッドを用いて、SUN SPARC Center 1000 上でのマルチスレッド並列計算を実装し、ウィニペグ、オタワ、モントリオールの各都市の道路ネットワークに適用している。

以上のように、大規模交通ネットワークにおいて混雑項を考慮したシミュレーション計算を行う場合には、解の安定性や計算プロセスのわかりやすさを重視して均衡配分ではなく段階配分を採用し、それを前提に並列計算を導入する場合もあることがわかる。本研究においても同様の立場から、均衡配分ではなく段階配分を採用したモデルを構築することとする。

### 3. モデル構成

#### (1) 全体構成

本研究で扱うモデル（以下「本モデル」とする）は、Shibasaki et al.<sup>1)</sup>に示された GLINS モデル（以下「従来モデル」とする）構成を参考に、配分方法に関して変更を加えたうえで、港湾の容量制約の考慮や陸上ネットワークの拡張といったモデルの修正を行っている。本モデルは、地域間貨物輸送需要（OD 貨物量）および海上・陸上の輸送ネットワークを所与として、個々のコンテナ貨物や陸上輸送されるコンテナ相当貨物が輸送経路や輸送機関を選択する、配分モデルである。本モデルで対象とする各輸送機関（船舶、道路、鉄道、内航水運）には容量があり、容量の上限に近づくと混雑が発生する。この問題を、従来モデルでは、Wardrop の第一法則に基づく利用者均衡（UE）原理に基づく配分問題として表現していたのに対し、本モデルでは、リンクフローを段階的に加算してリンクコストを増大させる段階配分手法によって解く。また、コスト最小となる輸送経路以外のルートも利用されることを想定し、上位モデルにおいては確率的ネットワーク配分を行う。

本モデルの全体構造を図-2 に示す。図に示されるように、国際海上コンテナ輸送ネットワークと陸上輸送ネットワークを統合したインターモーダル国際物流ネットワーク上の配分モデル（上位モデル）を基本モデルとして、詳細な国際海上コンテナ輸送ネットワーク上での配分モデルをサブモデル（下位モデル）にもつ構造となっている。従来モデルでは、大規模ネットワークに確率的利用者均衡配分を適用することが困難であったため、陸上輸送ネットワーク上の配分モデルも独立したサブモデルとなっていたものの、後述する配分方法の変更により上位モデルに統合することができるようになった。しかし、

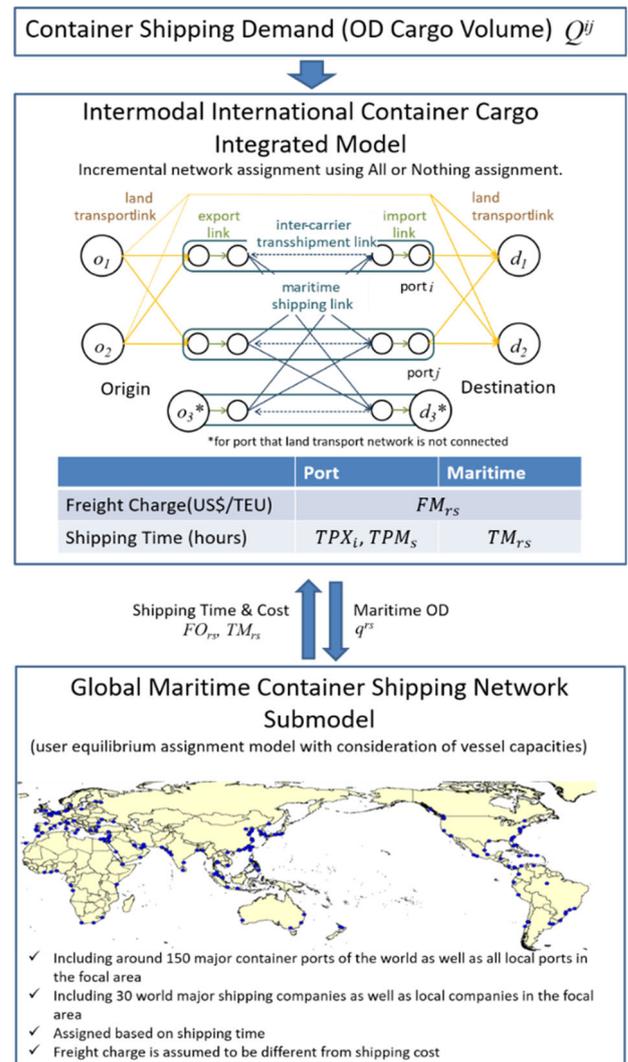


図-2 本モデルの全体構成

国際海上コンテナ輸送市場においては、寄港港湾ごとに張られたリンクベースではなく、輸出入港間の経路ベースで運賃が決定されると想定されることから、輸送時間に基づきリンクベースで行うネットワーク配分計算とは別に運賃を計算する必要がある。よって、本モデルでも従来モデルと同様に、海上輸送モデルはインターモーダル国際物流ネットワーク上での配分モデルと切り離し、独立したサブモデルとして計算を行うこととする。

#### (2) 上位モデル

発地 $o$ から着地 $d$ までの各経路 $h$ における効用の確定項を $V_h^{od}$ とし、誤差項が互いに独立でガンベル分布に従うとすると、経路 $h$ を選ぶ貨物量は以下の式で表される。

$$F_h^{od} = Q^{od} \cdot \frac{\exp(\theta \times V_h^{od})}{\exp(\theta \times V_h^{od}) + \sum_{h' \in H^{od}} \exp(\theta \times V_{h'}^{od})} \quad (1)$$

$F_h^{od}$ : 経路  $h$  を選ぶ貨物量 (TEU)

$Q^{od}$ :  $o$  から  $d$  までの年間輸送需要 (TEU/年)

$\theta$ : ガンベル分布における分散パラメータ

$H^{od}$ :  $od$  間の経路集合

確定項  $V_n^{od}$  は、発地  $o$  から着地  $d$  までの輸送費用と時間を考慮した一般化費用によって定義される。輸送費用について、発地  $o$  から着地  $d$  までの最短経路が海路と陸路を経由する経路である場合は、海上輸送運賃 (港湾料金を含む) 及び陸上輸送運賃の合計を考慮し、陸路のみを経由する経路である場合は陸上輸送運賃のみを考慮する。時間について、発地  $o$  から着地  $d$  までの最短経路が海路と陸路を経由する経路の場合は、海上輸送時間、輸出入港湾におけるリードタイム、陸上輸送時間を考慮し、陸路のみを経由する経路である場合は陸上輸送時間のみを考慮する。輸送時間については、時間価値パラメータ  $vt$  を乗じることで費用に換算する。上位モデルのネットワーク構成を図-3 に示す。

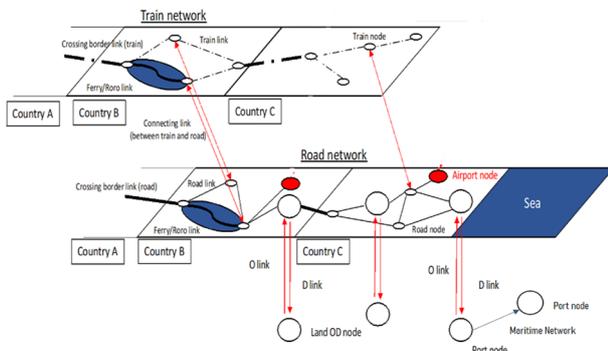


図-3 上位モデルのネットワーク構成

a) 陸上リンク

上位モデルの陸上輸送ネットワークは、実ネットワークに基づいて構成されている。ネットワーク内のリンクとしては、以下の5種類が挙げられる。これらのリンクにおけるコスト関数は、従来モデルと同様であるため詳細は省略する。

- ① O リンク, D リンク: 貨物の発着ノード (OD ノード) となる地域代表ノードと道路ノードを接続
- ② 道路リンク
- ③ 鉄道リンク
- ④ 道路-鉄道接続リンク
- ⑤ 内航水運リンク

道路リンク, 鉄道リンク, 内航水運リンクにおいては、国境を跨ぐ場合、国境通過フラグを設定し越境コストを上乗せする。また、陸上輸送市場は後述する海上輸送市場と異なって完全競争的と考え、運賃は限界輸送費用に一致するものと仮定し、輸送費用と輸送時間を考慮した一般化費用に基づく段階配分を行う。ここで、貨物の集中による混雑を考慮するため、道路リンク, 鉄道リンク, 内航水運リンクにはリンク容量を設定し、各リンクコス

トをリンクフローの増加関数とする。

b) 港湾内リンク

港湾内リンクには港湾 O リンク, 港湾 D リンク, 船社間積替リンクの3種類が存在する。それぞれのリンクのコスト式について説明する。港湾内のネットワーク構成を図-4 に示す。

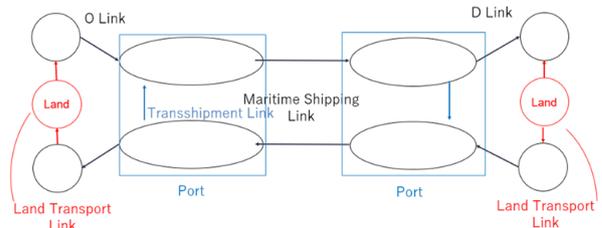


図-4 上位モデルにおける港湾内のネットワーク構成

港湾 O リンク, 港湾 D リンクのコスト  $u_l$ ,  $u_u$  は以下の式で表す。費用としては、税関手続きにかかる費用 (通関費用および書類準備費用) およびトレーラによる輸送が一回増えることで新たに発生する輸送費用の固定費用分を考慮する。なお、港湾荷役料金は海上輸送サブモデルで考慮されているためここでは考慮しない。また時間としては、輸出入時の港湾リードタイムに加え、港湾容量制約に基づくターミナル内の荷繰りの遅延も考慮する。

$$u_l(x_a) = \frac{CFR_o}{2} + vt \cdot TS_r \left\{ bp_1 \cdot \left( \frac{x_{all_r}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} + \lambda_r \cdot (CBX_r + vt \cdot TBX_r) \quad (2)$$

$$u_u(x_a) = \frac{CFR_o}{2} + vt \cdot TUS_r \left\{ bp_1 \cdot \left( \frac{x_{all_r}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} + \lambda_r \cdot (CBM_r + vt \cdot TBM_r) \quad (3)$$

$r$ : リンク  $a$  の属する港湾

$CFR_o$ : トレーラ輸送における固定費用 (US\$/TEU)

$vt$ : 貨物の時間価値 (US\$/TEU/hour)

$TS_r$ : 港湾  $r$  における輸出時のリードタイム(hour)

$TUS_r$ : 輸入時の港湾リードタイム(hour)

$bp_1, bp_2$ : 港湾混雑に関するパラメータ(本研究では、 $bp_1=2.5, bp_2=1.0$  とする)

$x_{all_r}$ : 港湾  $p$  における年間コンテナ取扱量(TEU/year)

$pcap_r$ : 港湾  $p$  の年間取扱容量(TEU/year)

$\lambda_r$ : 港湾  $r$  における国境通過に係る係数 (本モデルでは 0.5 を採用した)

$CBX_r$ : 港湾  $r$  の属する国の輸出時における通関費用と書類準備費用の和 (US\$/TEU)

$CBM_r$ : 港湾  $r$  の属する国の輸入時における通関費用と書類準備費用の和 (US\$/TEU)

$TBX_r$ : 港湾  $r$  の属する国の輸出時における通関時間と書類準備時間の和 (hour)

$TBM_r$ : 港湾  $r$  の属する国の輸入時における通関時間と書類準備時間の和 (hour)

年間取扱量  $x_{allr}$  は以下の式で表される。

$$x_{allr} = x_{exr} + x_{imr} + 2 \cdot (x_{interTS_r} + x_{intraTS_r}) \quad (4)$$

$x_{exr}$ : 港湾  $r$  における港湾 O リンクの年間フロー (TEU/year)

$x_{imr}$ : 港湾  $r$  における港湾 D リンクの年間フロー (TEU/year)

$x_{interTS_r}$ : 港湾  $r$  における船社間積替リンクの年間フロー (TEU/year)

$x_{intraTS_r}$ : 港湾  $r$  における船社内積替リンクの年間フロー (TEU/year)

ここで、船社間積替リンクおよび船社内積替リンクのフローを 2 倍するのは、取扱量の算出において、トランシップコンテナは船積・船卸の 2 回カウントすることが通常であるためである。

船社間積替リンクのコスト  $u_r$  は以下の式で表す。

$$u_r(x_a) = 0.5 \cdot (CPX_r + CPM_r) + vt \cdot TRS_r \left\{ bp_1 \cdot \left( \frac{x_{allr}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} \quad (5)$$

$CPX_r$ : 港湾  $r$  においてコンテナが船積される際に生じる荷役料金 (US\$/TEU)

$CPM_r$ : 港湾  $r$  においてコンテナが船卸される際に生じる荷役料金 (US\$/TEU)

$TRS_r$ : 港湾  $r$  におけるコンテナの積替時間 (hour)

海上輸送サブモデルで考慮されている通常の港湾荷役料金に対して、追加的に必要となる横持ち費用等を想定して設定している。また、船社間積替に要する時間としては通常の積替時間に加え、①の港湾 O リンク、D リンクと同様に、港湾容量制約に基づくターミナル内の荷繰りの遅延も考慮する。

港湾  $rs$  間の海上輸送運賃  $FORs$  と海上輸送時間  $TMrs$  については、海上輸送サブモデルの計算結果を用いる。

### c) 配分計算と下位モデルへの出力

本研究では多段階配分手法を採用し、各段階において計算された各リンクの一般化費用に基づき、(1)式と同等の結果が得られることが保証されている Dial<sup>10)</sup>の手法に基づいて確率ネットワーク配分を行う。最終的に全 OD を配分し終わった時点で算出された仮想海上輸送リンクのフロー (TEU/year) が、海上輸送モデルのインプットとなる。つまり、以下の式が成り立つ。

$$q^{rs} = x_{rs} \quad (6)$$

$q^{rs}$ : 海上輸送サブモデルにおける港湾  $rs$  間海上貨物輸送需要 (TEU/year)

$x_{rs}$ : 上位モデルにおける港湾  $rs$  間仮想海上輸送リンクフロー (TEU/year)

時間価値パラメータ  $vt$  については、従来モデルと同様に 0.5 (US\$/TEU/hour) を採用した。

### (3) 下位モデル

下位モデルである海上輸送サブモデルでは、上位モデルにおいて算出された各コンテナ貨物の輸出港および輸入港 (港湾間輸送需要) を所与とし、各運航船社が世界中で運航するコンテナ定期航路サービスがそれぞれ別のリンクとして表される海上輸送ネットワーク上で配分を行うモデルである。複数船社が共同運航する場合も、船社ごとに異なるサービスとみなしてネットワークを構成する。また同じ港湾に複数回寄港する場合は、寄港順を保持するために、寄港ごとにノードを別に設定する。

本サブモデルに含まれるリンクは、従来モデルと同様に以下の 6 種類から構成される。①は各港湾間で設定されるリンクであり、残りは港湾内での貨物の動きを表すリンクである。

①航走リンク (各港湾間をつなぐ輸送リンク)

②船積リンク (港における積荷役を表す)

③船卸リンク (港における卸荷役を表す)

④接岸リンク (船が接岸するものの貨物は船内にとどまるという動きを表す)

⑤船社内積替リンク (港における同一船社内の貨物の積替を表す)

⑥輸出入リンク (港における船社の選択を表す)

本サブモデルにおいては、同一船社内のみでトランシップを行うものとし、船社間トランシップは(5)式に示した通り上位モデルで考慮する。すなわち、利用する船社が最初に輸出入リンクを通じて選択された後は、本サブモデル内においては途中の港湾で船社を跨ぐ積替は行われないと想定する。

本サブモデルでは、前述の通り、港湾間海上貨物輸送需要を所与として、各コンテナにおける輸出港  $r$  から輸入港  $s$  までの海上輸送時間  $TMrs$  を最短とするように経路が選択される。本海上輸送サブモデルでも上位モデルと同様、荷主の立場による経路選択を基本的に想定しているものの、実際には、荷主は始めに船社を選択するのみで、船社内ネットワークにおける経路選択は船社が行っているのが実情である。ただしこの船社による輸送経路選択においても、本モデルで想定しているような、輸送サービスが固定、すなわち船社にとっての輸送費用が固

定という短期的な条件のもとでは、各船社が荷主に代わって荷主の立場から選択を行っているとは仮定できる（ただし、船社にとっては海上輸送において不確定な要素は非常に少ないと考えられることから、本サブモデルでは確率配分は採用しない）。

また、特定のサービスや船社に貨物が集中すると混雑が生じ、遅延や積み残しなどの規模の不経済が発生することを想定し、航走リンクにおいて、コンテナ船の容量を考慮しリンクフローに依存するリンクコストを設定する。さらに、国際海上コンテナ貨物輸送市場は、特にグローバルレベルでは輸送船社の数がある程度限られており寡占市場とみなすことができ、運賃については同じ輸出入港間の輸送においては各船社で同一になるものと想定して、モデルの配分計算においては考慮しない（運賃については、配分計算の結果に基づいて別途算出する）。以上の設定は、従来モデルと同様である。

一方で、本サブモデルでは、従来モデルと異なり港湾容量を考慮する<sup>11)</sup>。本来は、港湾内で取扱可能な貨物量を超えて貨物が取り扱われると、荷繰りの遅延や荷積・荷卸のサービスレベルの低下という影響が出るものの、従来モデルではこれを考慮していなかった。そこで本研究では、Drewry Maritime Research<sup>12)</sup>の掲載データを用いて港湾容量による制約をリンクコスト関数に組み込んだ。また、従来モデルでは、簡単のために船積・船卸の時間は積卸量に関わらず一律と仮定していたものの、本研究ではより実態に即した積卸時間を考慮するために、積卸時間を積卸量と港湾の荷役能力を表す投入クレーンの本数の関数として設定することとした。

**a) 航走リンク**

コンテナ貨物が輸送される航走リンクのリンクコストは、航行時間、スエズ運河およびパナマ運河の通過時間、そしてコンテナ船のキャパシティに基づく混雑項を考慮する。具体的なリンクコスト関数は、従来モデルと同様のため省略する。

**b) 船積リンク・船卸リンク・接岸リンク**

船に貨物が積まれる船積リンクは、各船社の港湾レイヤーから各サービスを結ぶ。船卸リンクは、船積リンクとは逆に、各サービスから各船社の港湾レイヤーまでを結ぶ。最後に接岸リンクは、各サービスにおいて当該港湾で荷役されず船舶に積まれたままの貨物の動きを表す。いずれもサービス・船社・港湾ごとに設定される。

船積リンクのコスト関数 $t_l(x_a)$ としては、船積時間だけでなく、サービスの運航間隔の 1/2 で表される期待待ち時間についても考慮する一方で、船卸リンクのコスト関数 $t_u(x_a)$ としては船卸時間のみを考慮する。

$$t_l(x_a) = \frac{x_a}{d \cdot crane_a \cdot freq_a} + 1.0 + \frac{1}{2} \times \frac{YH}{freq_a} \quad (7)$$

$$t_u(x_a) = \frac{x_a}{d \cdot crane_a \cdot freq_a} + 1.0 \quad (8)$$

$x_a$ : リンク  $a$  の年間リンクフロー (TEU/year)

$crane_a$ : リンク  $a$  に投入されるクレーンの本数 (本/隻)

$freq_a$ : 運航頻度 (便/年, 1 年間を 52 週とする)

$d$ : 一本のクレーンが 1 時間あたりに処理できる貨物の個数 (本研究では 45 TEU/hour とする)

$YH$ : 1 年間の総時間 (hour/年, 52 week × 7 day × 24 hour = 8736 hour/年)

船積時間および船卸時間は、貨物量に比例して船積または船卸の荷役に要する時間に加え、港湾内でコンテナ船が入出港するのに必要な時間としてそれぞれ 1 時間を追加している。また、当該サービスの荷役に投入されるクレーン数  $crane_a$  については、船舶サイズに比例して投入されると想定し、以下のように定める。

$$crane_a = \frac{Vcap_a}{2000} \quad (9)$$

$Vcap_a$ : 当該サービスに就航する船舶の平均容量 (TEU/隻)

また、接岸リンクのコスト関数  $t_b(x_a)$  は、船積リンクと船卸リンクの所要時間の和として表される。

$$t_b(x_a) = t_l(x_{a'}) + t_u(x_{a''}) \quad (10)$$

$a'$ : 接岸リンク  $a$  に接続する船積リンク

$a''$ : 接岸リンク  $a$  に接続する船卸リンク

**c) 船社内積替リンク**

船社内積替リンクは、各港湾において同一船社内異なるサービスを接続するもので、船社、港湾ごとに設定する。リンクコスト関数  $t_t(x_a)$  は、港湾容量制約に基づくターミナル内の荷繰りの遅延を考慮した上で以下のように設定した。

$$t_t(x_a) = TRS_r \left\{ bp_1 \cdot \left( \frac{x_{allr}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} \quad (11)$$

**d) 船社選択リンク**

船社選択リンクは、輸出港 (O ノード) ・ 輸入港 (D ノード) と選択された船社の港湾層とを結ぶリンクであり、従来モデルと同様に設定される。

以上で定義された各リンクコスト関数に基づき、本サブモデルについても、従来モデルと異なり段階配分によりリンクフローを求める。最終的なアウトプットである所要時間の総和が、上位問題における港湾  $rs$  間の海上

輸送時間  $TMrs$  となる。つまり、以下の式が成り立つことになる。

$$TMrs = \min_k \left\{ \sum_{a \in k} t(\hat{x}_a) \right\} \quad (12)$$

$\hat{x}_a$  : リンク  $a$  の推計されたフロー

一方、船社  $g$  の港湾  $rs$  間の海上輸送運賃  $FORsg$  は、前述のように船社によらず同一とし、従来モデルと同様に、参入船社が赤字とならず、また輸送需要と供給のバランスの変化によって変化すると仮定のもとに求める。各リンクにおける海上輸送費用も、従来モデルと同じ設定である。

以上の計算で得られた海上輸送時間と運賃を上位モデルの海上輸送リンクにおける時間と運賃として与える。これに基づき上位モデルの計算を行い、得られた海上輸送リンクのフローが下位モデルの OD 貨物量となる。これを収束するまで繰り返す。ここで、(4)式に示した港湾取扱量の計算式は、両モデルのアウトプットに跨って計算される（船社内積替リンクフローのみ下位モデル、その他のフローは上位モデル）ため、当該リンクにおけるフローの計算結果も両モデル間で毎回受け渡す必要があることに注意が必要である。両モデルの繰り返し計算は予め収束が保証されているものではないため、事後的に計算結果が収束しているかどうかを確認する必要がある。

#### (4) 配分手法

ここでは、本研究で導入した多段階配分について述べる。段階配分は、2 地点間の交通輸送需要（OD 交通量）が与えられたとき、その OD 交通量を分割したうえで、輸送コスト最小化の原則に基づきネットワークに配分していく方法である。本研究のモデルでは、OD 交通量を分割し、All or Nothing 配分または確率配分を繰り返してフローを積み上げることで最終的なリンクフローを出力する。均衡配分のようにリンクフローを更新するのではなく加算していくため、計算が収束しないリスクは小さくなるのが想定される一方で、OD 交通量の分割が不十分であると推計の精度が不十分になることや、モデル計算の時間が長くなってしまふ点に注意する必要がある。また段階配分における OD 交通量の分割方法としては、Lee et al.<sup>7)</sup>のように OD 交通量を発生ゾーンによって分割することも考えられるものの、本モデルでは全 OD ペアの OD 貨物量を均等に分割する手法を採用する。具体的には以下の手順に従って配分計算を行う。

##### ①初回リンクコストの計算

ネットワークに含まれる各リンクのゼロフロー時のコ

ストを計算する。

##### ②OD 貨物量の分割

全 OD ペアの OD 貨物量を  $N$  分割して読み込む。本研究では計算時間の短縮のため、初回の分割のみ全体の 30%を読み込み、それ以降は全体の  $1/N$  ずつ読み込みを行う。

##### ③フローの配分

計算されたリンクコストに基づき、分割し読み込んだ OD 貨物量を最短経路探索に基づく All or Nothing 配分（確定配分）または確率的ネットワーク配分の手法を用いて配分する。

##### ④リンクフローへの加算

③の配分結果（当該回のリンクフロー）をそれまでのリンクフローに加算し、当該回までの合計リンクフローを求める。

##### ⑤リンクコストの更新

④で求めた当該回までの合計リンクフローに基づき、各リンクのコストを更新する。

##### ⑥終了判定

予め設定した計算回数 ( $0.7 * N + 1$ ) に達すれば終了、達していなければ②へ戻る。

ここで多段階配分においては、従来モデルで採用していた均衡配分以上に多くの配分計算を繰り返すことが必要であるため、OpenMP を用いた並列計算を導入する。並列計算の手法には大きく分けて、メモリ領域を共有しないでプロセスごとに並列に計算を行うプロセス並列化と、同一のメモリを共有してスレッドごとに並列に計算を行うスレッド並列化が存在する。本研究では、MPI 通信を行う必要がないために並列化効率をより高くしやすく、計算速度の改善が一般に大きいプロセス並列化を採用した。OpenMP API はユーザ指示の並列化のみを対象としており、指示文を挿入することで簡単に並列計算を導入することができる。指示文は OpenMP をサポートしないコンパイラでは単にコメントとして無視されるため、逐次計算プログラムとしての動作も保証される仕様になっている。また、OpenMP では各スレッドは並列領域の開始時に生成され、並列領域が終了すると マスタースレッドのみの逐次処理に戻る。本研究では、モデルの計算時間のほとんどを確率配分または All or Nothing 配分のための最短経路探索が占めているため、この部分における起点ノード別の計算に並列計算を導入することにより、計算時間を約 50%短縮することができた。

#### (5) 入力データ

本モデルで入力する海上輸送ネットワークについては、従来モデルと同様全世界を対象とするのに対し、陸上輸送ネットワークについては、中国と ASEAN の陸路を介した接続が進展していることを踏まえ、Yamaguchi et al.<sup>2)</sup>

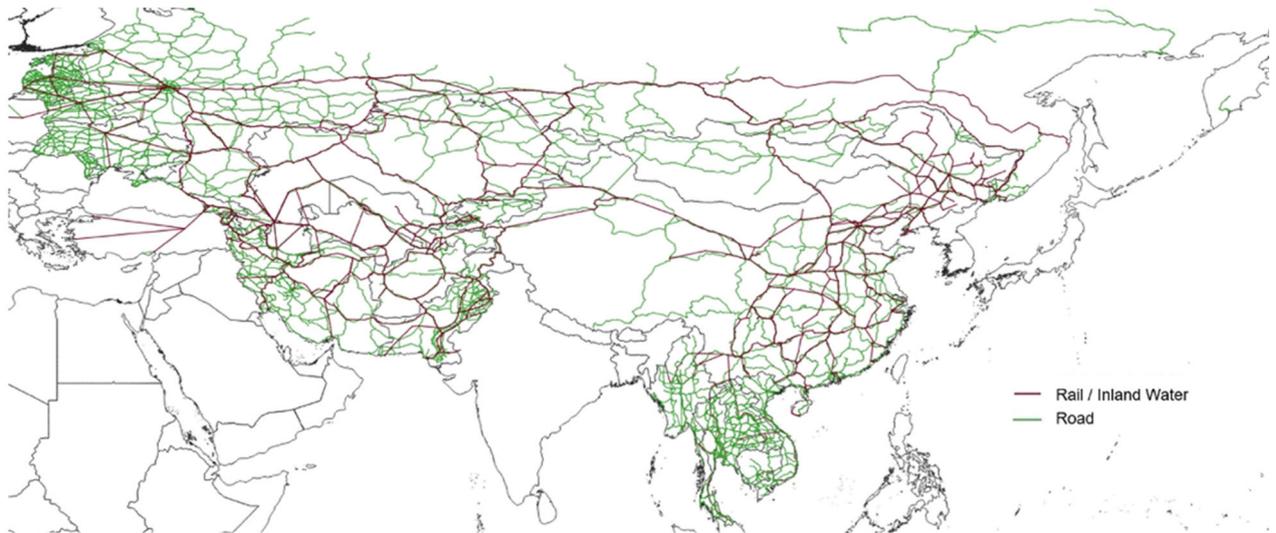


図-5 本モデルの陸上輸送ネットワーク

で対象とした陸域 ASEANに加え, Shibasaki et al.<sup>13),14)</sup>, 西村ら<sup>15)</sup>で使用した中国を含むユーラシア大陸ネットワークを統合し, より広域の陸上輸送ネットワークを対象としたシミュレーションを実施可能とする。

具体的には, 海上輸送ネットワークについては, 全世界の主要港湾および対象地域の中小港湾の合計 208 港, 対象コンテナ定期航路 40 社 1,093 サービス (いずれも 2018 年時点) のネットワークを作成した。また陸上輸送ネットワークについては, ゾーン数 756, 輸出入港湾数 38, リンク数 19,552 のネットワークを作成した。また地域間コンテナ貨物輸送需要データに関しては, IHS 社の GTA Forecasting データ<sup>16)</sup>から得られる世界各国間のコンテナ OD (2018 年) によりアップデートし, 従来モデルを使用した上述の研究と同様の手法によって各国内のゾーンに分割した。本モデルの陸上ネットワークを図-5 に示す。

#### 4. モデルの推計結果と感度分析

##### (1) パラメータの設定

本モデルに含まれるパラメータのうち, 特に本研究に合わせてキャリブレーションや実地調査を通して決定したものを表-1 および表-2 に示す。回廊の通過速度や鉄道・内航水運の運航頻度, 国境抵抗係数などは, (ASEAN を除く) ユーラシア大陸に関しては Shibasaki et al.<sup>13)</sup>, 陸域 ASEAN に関しては Yamaguchi et al.<sup>2)</sup>を採用したほか, 中国-陸域 ASEAN 間の国境抵抗係数  $\lambda$  は, キャリブレーションにより 0.5 に設定した。また, 確率ネットワーク配分における分散パラメータ  $\theta$  は 0.01 とし, 全体計算の繰り返し回数や分割配分における分割回数に

ついては, 回数を増加させる方がより収束の度合いが高まるものの計算時間が膨大になることから, 今回は全体計算の繰り返し回数を 2 回, 上位モデルの分割回数を 50 回, 下位モデルの分割回数を 10 回と設定した。これらの設定値については, 後述する感度分析により妥当性を確認する。

表-1 混雑関数に関する各パラメータの設定値

混雑係数									
海上		道路		鉄道		内航水運		港湾	
b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	C1	C2
3.0	4.0	1.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	3.0	4.0

表-2 本研究で設定した各輸送機関の距離比例運賃 (US\$/km)

地域	距離比例運賃 (US\$/km)		
	道路 CORo	鉄道 CORa	内航水運 COFe
ユーラシア	1.0	1.0	3.0
ミャンマー	1.0	1.75	0.75
ミャンマー以外の陸域 ASEAN	1.0	1.75	0.50

##### (2) モデル収束状況の確認

本研究で構築したモデルにおいては, 特に上位モデルと下位モデルの繰り返し計算における収束が保証されていないため, 事後的に確認する必要がある。はじめに, 世界主要港における輸出入量の推計結果を, 繰り返し全体計算を 2 回行ったときとその 1 回前で打ち切ったときについて比較し, 図-6 に示す。図からわかるように, 1 回目の全体計算と 2 回目の全体計算で, 各港湾の輸出入貨物量は相違が大きくなり, 全体の計算時間を考慮すれば全体計算を 2 回とするのが適当であると判断できる。

次に, Yamaguchi et al.<sup>2)</sup>において, 結果の振動がかなり

激しいことが確認されたタイのレムチャバン港とバンコク港の取扱量に着目する。均衡配分を用いた従来モデルと多段階配分を用いた本モデルにおける繰り返し全体計算回数ごとの両港の取扱量の推計値を図-7 に示す。図に示すように、従来モデルでは両港の取扱量が大きく振動しているのに対し、本モデルでは少ない繰り返し全体計算回数でも両港の取扱量が安定していることがわかる。

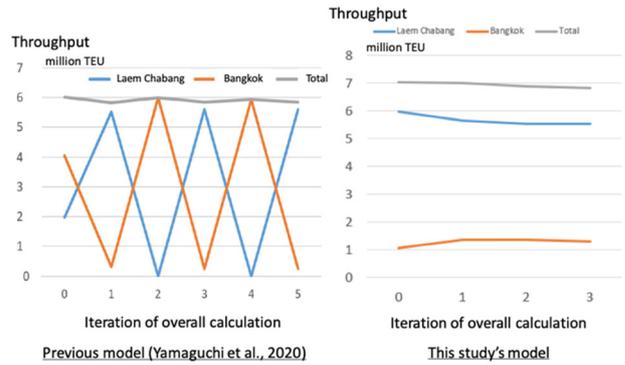


図-7 従来モデルと本研究のモデルによる各全体計算回におけるレムチャバン港とバンコク港の取扱量の推計値

second overall calculation results

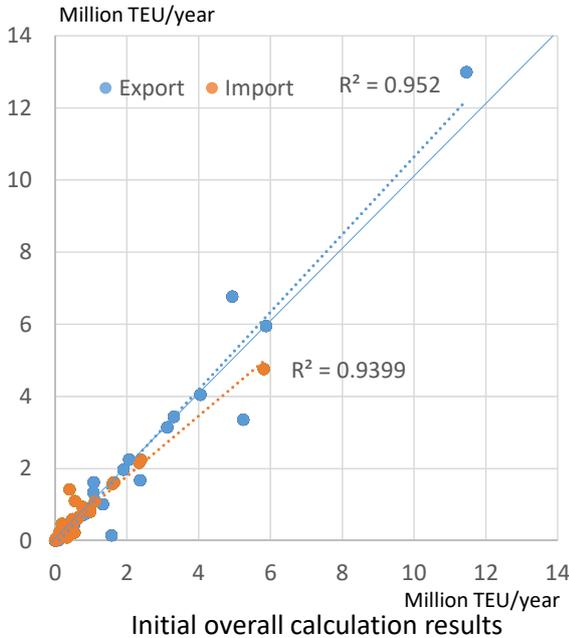


図-6 1回目計算前後の港湾取扱量の比較

(3) モデル再現性の確認

モデルの再現性を確認するために、陸上輸送ネットワークと接続するユーラシア大陸および陸域 ASEAN の各港湾における輸出貨物量および輸入貨物量について、実績値と推計値の比較を図-8 に示す。輸出货量に関しては高い再現性を得ている一方で、輸入量に関しては輸出货量と比較すると再現性が低い。これは、特に輸入において中国各港の取扱貨物量の誤差が大きいことに起因する。このうち、上海港と寧波港のように近接する港湾間で過大推計と過小推計の関係になっているケースだけでなく、南部（広州、深セン等）と北部（大連、天津、青島等）の貨物量バランスが実績値と推計値で異なる（輸出推計値は北部が実績より少なく、輸入推計値は多い）ことも影響していると考えられる。本研究において、国別に得られるコンテナ OD 貨物量のデータを、税関統計を参考に貿易品目構成の地域差（品目によりコンテナ化率が異なる

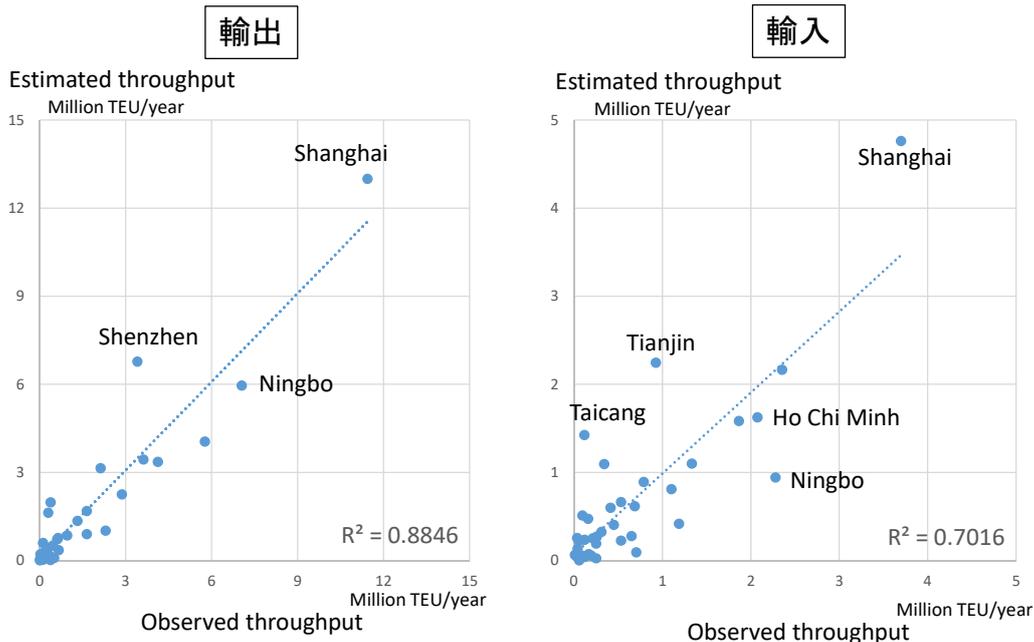


図-8 陸上輸送ネットワークに接続する各港湾の輸出入貨物量の実績値と推計値の比較 (TEU/年)

る)を考慮してより細かい地域レベルに分割しているものの、その考慮が不十分であったためと考えられる。また図-9に、世界の主要ハブ港におけるトランシップ率の実績値とモデル推計値の比較を示す。トランシップ率に関しても、多くの港湾において一定の再現性を有しているといえる。

以上のモデルの計算結果と実績値の比較から、構築したモデルが適用地域において一定の再現性を有していることが確認された。この結果を本研究における Base シナリオとし、陸域 ASEAN と中国周辺のリンクフローを図-10に示す。

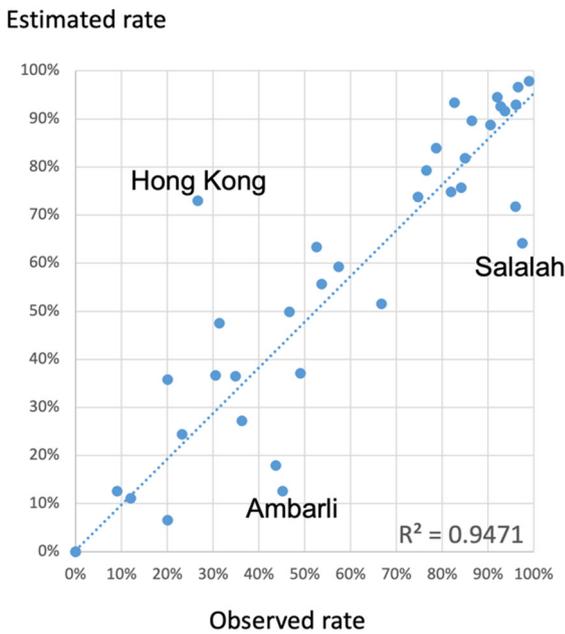


図-9 世界主要ハブ港におけるトランシップ率の実績値と推計値の比較

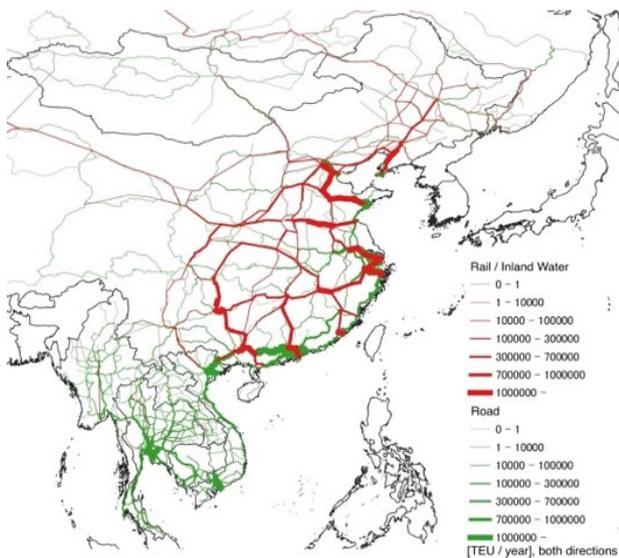


図-10 Base シナリオでの陸域 ASEAN と中国周辺のフロー

#### (4) モデルの感度分析

モデル内で設定するパラメータのうち、上位モデルの確率配分における分散パラメータ、および上位モデル・下位モデルの分割配分における分割回数を変化させたときの結果の相違について、分析を行う。

##### a) 確率配分における分散パラメータ

上位モデルでは確率的ネットワーク配分手法を用いている。その分散パラメータ  $\theta$  を変化させたときの推計値の変化をみる。ここで、 $\theta$  が大きいほど確定配分による配分結果に近づく。ここでは特に違いの大きかった世界主要港におけるトランシップ量およびトランシップ率について、 $\theta = 0.005, 0.01$  (モデル設定値),  $0.05$  としたときの実績値と推計値の比較を図-11に示す。いずれの指標においても、本研究で採用した  $\theta = 0.01$  のときに最も重相関係数が大きい結果となった。

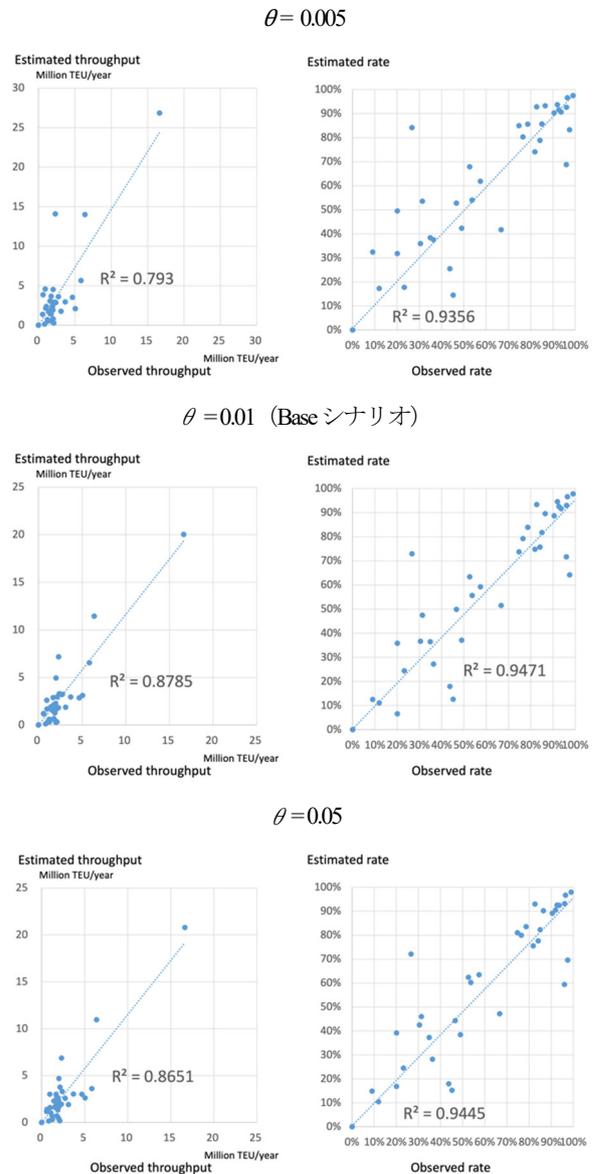


図-11 分散パラメータを変化させたときの各港湾のトランシップ量およびトランシップ率の実績値と推計値の比較

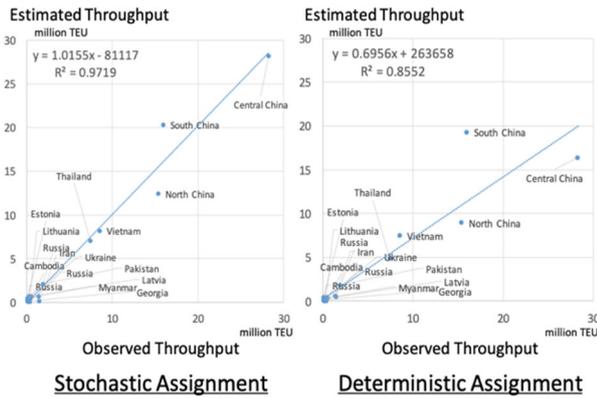


図-12 上位モデルに確率配分 ( $\theta=0.01$ ) および確定配分を適用した場合の各国別港湾取扱量の実績値と推計値の比較

さらに、 $\theta$ を極端に大きくしたケースに相当する確定配分手法を上位モデルに適用した結果について、陸上輸送ネットワークと接続する港湾の取扱貨物量の国別集計値に関する実績値と推計値の比較を図-12 に示す。この図からも、確率配分を適用することでモデルの再現性が高まることが確認できた。

b) 分割回数

多段階配分における分割回数はモデルの精度を左右する要素であり、上位モデルと下位モデルの双方で検討を行った。特に上位モデルに関しては、港湾の容量制約を考慮したことによる影響も受ける。

図-13は、モデル全体の繰り返し計算1回目と2回目における各港湾の取扱量推計値を、上位モデルと下位モデルの異なる分割回数 (N=10,30,50) の組み合わせ別に比較したものである。図からわかるように、港湾取扱量推計値の振動に、分割回数による大きな差異は生じなかった。これを踏まえ、本研究のシナリオ分析では陸上ネットワークの変化を主たる対象としていることから、計算時間も念頭に、陸上ネットワークを含む上位モデルの分割数を増やすことを優先し、上位モデル : N = 50, 下位モデル : N = 10 とした。

5. シナリオ分析

以上で構築したモデルを用いて、特にミャンマーを中心とした ASEAN 地域を対象としたシナリオ分析を行い、本モデルの実用性を確認する。

(1) 中国国境のサービスレベル向上

陸域 ASEAN と中国の貿易における結びつきは強く、陸送での国境通過量も多い。そこで本シナリオでは、ミャンマーと中国、さらには陸域 ASEAN と中国間の輸送環境が向上した場合を想定してシミュレーションを実施

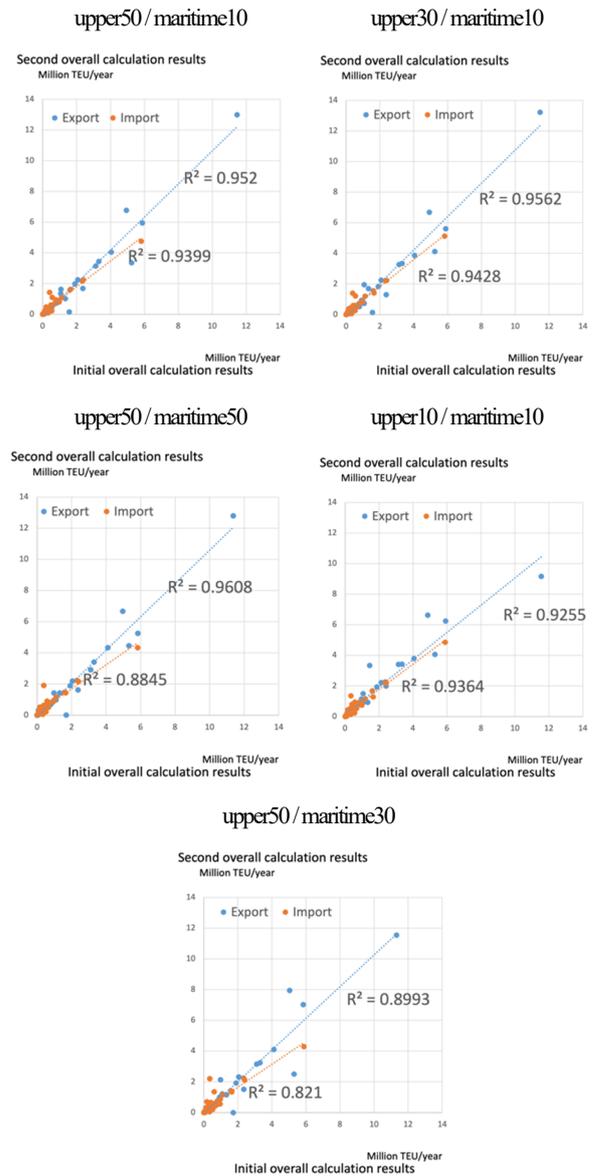


図-13 全体繰り返し計算1回目と2回目における港湾取扱量推計値に関する両モデルの分割回数組み合わせごとの比較

し、ミャンマーおよび陸域 ASEAN 地域への影響をみる。

具体的には、ミャンマー～中国間全国境における税関手続きの簡素化等による国境抵抗の改善、および陸域 ASEAN～中国間全国境における税関手続きの簡素化等による国境抵抗の改善を想定した。具体的に設定したシナリオは表-3 に示す通りである。それぞれのシナリオにおけるミャンマー、ベトナム、ラオスと中国との間の国境貨物通過量の変化を図-14 および図-15 に示す。

図-14に示される通り、Baseシナリオからミャンマー～中国国境の抵抗係数を減少させるにしたがって、ミャンマー～中国国境の通過貨物量は増加し、S1-3においてはBaseシナリオと比較して通過貨物量が約40%増加した。この増加分は、他国の国境を通過する陸上輸送からのシフトと海上輸送から陸上輸送へのシフトの2つの要因が

考えられる。前者に関しては、ラオスの国境通過貨物量が S1-1 から S1-3 まで単調に減少し、ベトナムの国境通過貨物量も S1-3 で大きく減少していることから推察される。後者に関しては、中国国境通過貨物量の伸びが減少分以上にあることから推察される。図-16 に、Base シナリオのリンクフローから S1-3 への差分を示す。上で述べたことに加え、ミャンマーを経由してタイへ向かう貨物フローが増加したことも確認でき、ミャンマーの対中国国境政策が間接的にタイにも影響を及ぼすという結果となった。

一方、図-15 に示される通り、Base シナリオから ASEAN ～中国間全国境の抵抗係数を減少させると、ASEAN 各国～中国国境の総通過貨物量は増加し、特にミャンマーおよびベトナム国境に関しては S1-6 において Base シナリオより約 30%増加する。

以上の結果から、国境抵抗の変更は感度分析として正常に機能していることが確認できた。これによってモデルの妥当性が確認できたとともに、ミャンマー～中国国境のサービス改善が他 ASEAN 諸国の貨物を奪うこと、ASEAN～中国国境のサービス改善が ASEAN 全体と中国の陸上輸送貨物量を向上させることがわかった。

表-3 ASEAN～中国国境のサービス向上に関する設定シナリオ

シナリオ	ミャンマー～中国間の国境抵抗に関する係数	陸域 ASEAN～中国間の国境抵抗に関する係数
Base	0.5	0.5
S1-1	0.4	0.5
S1-2	0.2	0.5
S1-3	0.0	0.5
S1-4	0.3	0.3
S1-5	0.2	0.2
S1-6	0.0	0.0

国境通過貨物量のBaseシナリオからの変化率

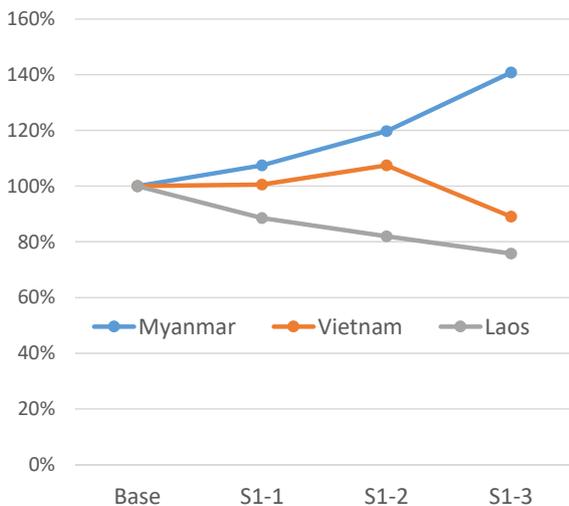


図-14 S1-1～S1-3 (ミャンマー～中国国境改善シナリオ) における ASEAN 諸国～中国間国境通過貨物量の変化

国境通過貨物量のBaseシナリオからの変化率

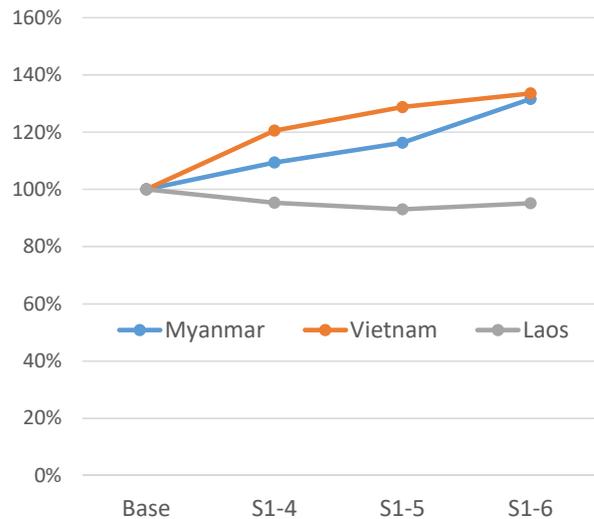


図-15 S1-4～S1-6 シナリオにおける中国との国境通過貨物量の Base シナリオからの変化

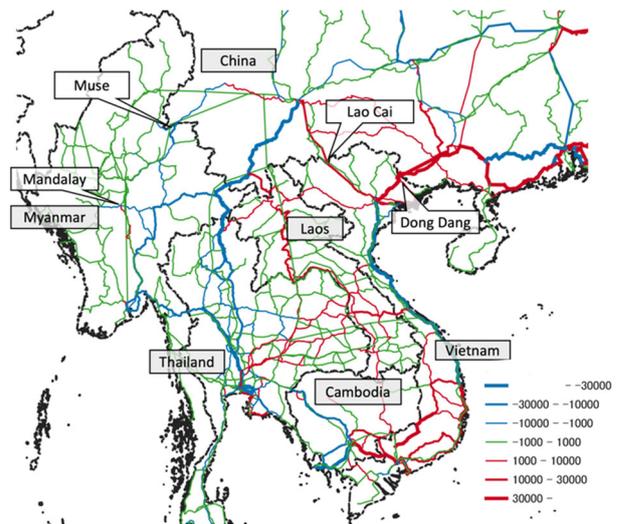


図-16 ASEAN 諸国と中国の S1-3 と Base のフローの差分

## (2) 東西回廊のサービスレベル変化

本シナリオでは、ミャンマーを通過する重要回廊である GMS 経済回廊のうち、東西回廊のサービスレベル向上のシミュレーションを行う。東西回廊の一部であるミャンマーのヤンゴンからタイのタークまでの区間は、ミャンマーとタイの陸上貿易において最も重要な道路であるものの、ミャンマー側の区間はいまだに十分な整備が行われていない。そこで、ヤンゴン～ターク間における道路輸送の利便性向上を想定したシミュレーションを実施する。ここで、Yamaguchi et al.<sup>2)</sup>でも同様のシナリオを実施し、道路速度向上の効果は非常に限定的であるとの結果を得ているため、本研究では国境抵抗の改善を想定した。

具体的に設定したシナリオを表-4 に示す。なおここで

は、国境抵抗変化に対するモデルの感度を確認するため、国境抵抗の改善シナリオだけでなく、抵抗が増加するシナリオも考慮している。各シナリオにおけるティラワ港の取扱量と東西回廊のミャンマー～タイ国境の通過貨物量を図-17 に示す。図より、まず国境抵抗を完全に削減する S2-1 に関しては、Base シナリオより国境通過量が約 14 万 TEU 増加しているのに加えて、ティラワ港の取扱量も約 9.1 万 TEU 増加している。図-18 に示す Base シナリオから S2-1 へのリンクフローの差分をみると、タイのバンコクから東西回廊を通過してヤンゴンへと至る経路の貨物量が増加しているのに加え、タイ北部から東西回廊への輸送量やミャンマー北部からティラワ港への輸送量も増加している一方で、ミャンマー北部からタイ北部の国境を通過してバンコクやレムチャバン港に至る経路では貨物量が減少していることがわかる。一方で、Base シナリオから S2-4 まで東西回廊の国境抵抗を増加させた場合、東西回廊の国境通過量ほどではないものの、ティラワ港の取扱量も若干減少する結果となった。

このことから、東西回廊とティラワ港は、(a) タイ～ミャンマー間の貨物輸送経路として競合関係にあるのに加え、(b) 東西回廊が改善されるとタイ北部の貨物が東西回廊を通過してティラワ港を利用するようになるという補完関係にあり、さらに(c) 東西回廊の利用が増加した結果としてレムチャバン港やバンコク港の取扱量が減少し、両港の背後圏が狭まることにより、両港を利用していた一部のミャンマー北部発着貨物がティラワ港の利用にシフトするという二次的な影響も観察される。この(a)～(c)の3つのインパクトは Yamaguchi et al.<sup>2)</sup>でも観察されていたものの、本研究においては、Yamaguchi et al.<sup>2)</sup>とは異なり(b)や(c)の効果が(a)の効果を上回り、東西回廊の国境抵抗を減少させると東西回廊の交通量だけでなくティラワ港の取扱量も増加する傾向にあることがわかった。これはモデルの変更およびデータのアップデートによって、(a)～(c)それぞれの効果の大小関係が変化したためと推察される。

表-4 東西回廊のサービスレベル変化に関する設定シナリオ

シナリオ	東西回廊の国境抵抗に関する係数
Base	0.4
S2-1	0.0
S2-2	0.2
S2-3	0.6
S2-4	1.0

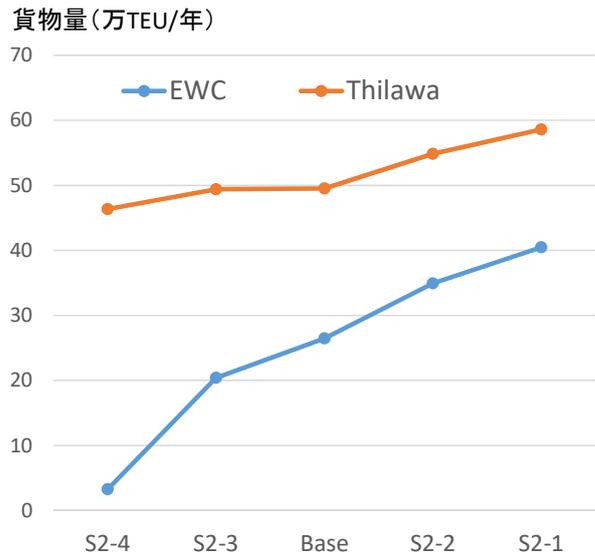


図-17 東西回廊国境抵抗変化シナリオにおける EWC およびティラワ港の取扱貨物量

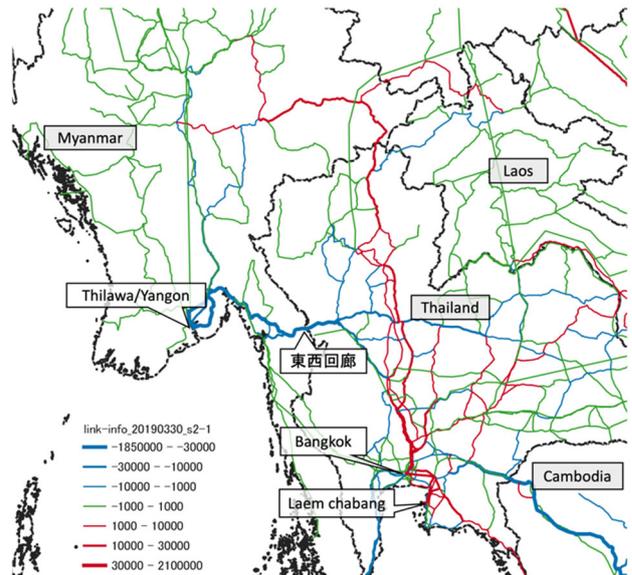


図-18 Base シナリオから S2-1 へのリンクフローの変化

### (3) ティラワ港の海上輸送サービス追加

最後に、ティラワ港の海上輸送サービスを追加するシナリオを検討した。コロンボ港（スリランカ）とチッタゴン港（バングラデシュ）を結ぶ既存の定期コンテナ航路 13 サービスを新たにティラワ港に寄港させる形で、ティラワ港からコロンボ港への海上輸送サービスを新設した。このサービスは、ティラワ港を中国および ASEAN 発着貨物のヨーロッパ方面へのゲートウェイ港湾とすることをめざす政策に対応するものである。

はじめに、中国貨物の輸出入港としてのティラワ港の利用を念頭に、ミャンマー～中国間の国境抵抗を緩和させた場合の新規航路のロードファクター（輸送量/船舶量）の変化を図-19 に示す。国境抵抗が緩和されてもロ

ードファクターの大きな増加は認められず、物流環境が改善しても中国貨物がヤンゴン港へ利用港を大きくシフトすることは想定されないことが確認された。理由としては、ティラワ港の利用が期待されるミャンマーに隣接する雲南省発着の輸出入貨物量がそれほど多くないためと考えられる。

次に ASEAN 貨物の輸出入港としてのティラワ港利用を念頭に、東西回廊のミャンマー～タイ間の国境抵抗を緩和させた場合のロードファクターの変化を図-20 に示す。図-19 に示した結果と比較すれば、国境抵抗の緩和に伴うロードファクターの増加は認められるものの、図-21 に示すように各シナリオにおいてサービス追加前後でティラワ港の取扱貨物量にほとんど変化がないことから、この変化も新たに需要が喚起されたとはまでは言えず、物流環境が改善しても ASEAN 貨物がティラワ港への利用に大きくシフトすることは期待できない事が確認された。

以上より、ミャンマーの物流政策においてティラワ港のゲートウェイ港としての影響力向上を目指す場合、国境陸路政策によって越境を促すより先に、国内の物流網の整備により需要喚起を行う必要があることが示唆される。

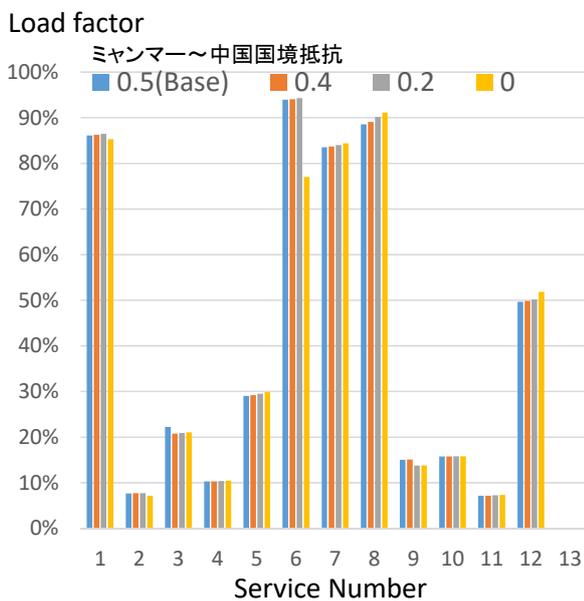


図-19 ミャンマー～中国国境抵抗変化シナリオにおけるティラワ港新規寄港サービスのロードファクターの変化

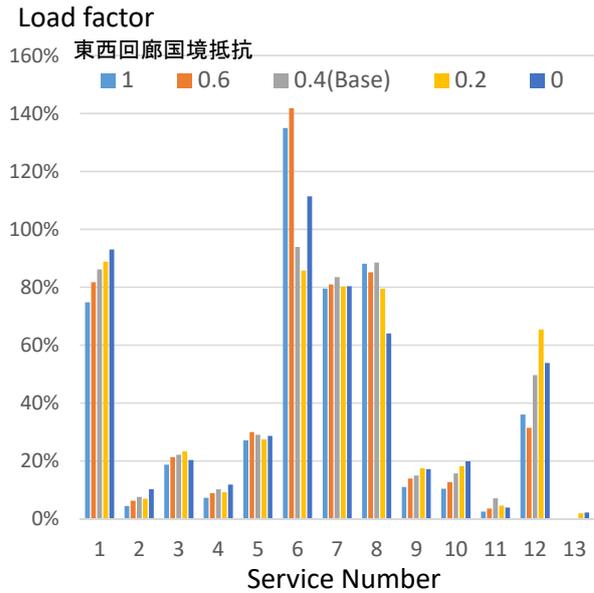


図-20 東西回廊国境抵抗変化シナリオにおけるティラワ港新規寄港サービスのロードファクターの変化

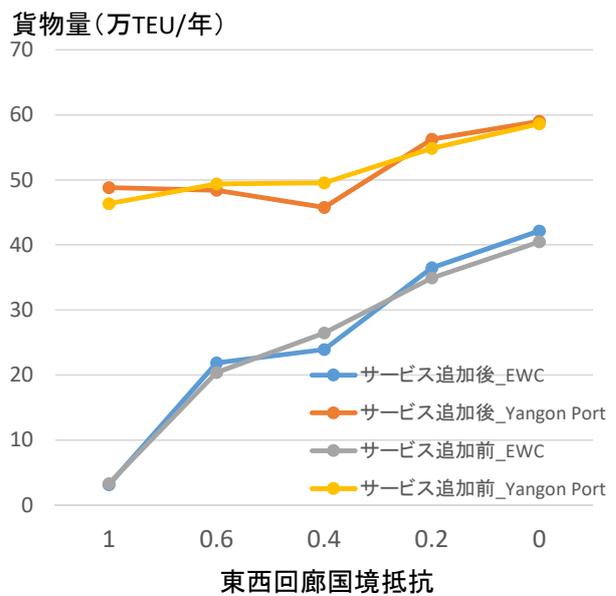


図-21 東西回廊国境抵抗変化シナリオにおけるサービス追加前後の東西回廊およびティラワ港の取扱貨物量

## 6. 結論

本研究では、従来、均衡配分を用いてモデル計算を行っていた Shibasaki et al.<sup>1)</sup>による GLINS モデルについて、計算結果の振動を回避しやすい多段階配分へと変更し、併せて陸上サブモデルを上位モデルに統合するというモデル構成の変更を行った。各モデルの分割回数や確率配分のパラメータに関する検討を行ったうえで、モデルの計算結果を実績値と比較することで、構築したモデルが

適用対象地域 (ASEAN, 中国, 中央アジア, 欧州等を含むユーラシア大陸) において一定の再現性を担保していることを確認した。

次に, 本研究で構築したモデルを用いてミャンマーを中心とした陸域 ASEAN 地域の国際物流シミュレーションを行った。具体的には, 陸域 ASEAN~中国間の国境のサービスレベル改善シナリオにおいては, ミャンマー~中国国境のみのサービス改善が他 ASEAN 諸国の貨物を奪うことにつながる一方, 陸域 ASEAN~中国国境全体のサービス改善は ASEAN 全体と中国の陸域輸送貨物量を向上させることが分かった。また, 東西回廊のミャンマー~タイ国境のサービス改善シナリオでは, 東西回廊とティラワ港の協調関係が確認された。最後に, ティラワ港の海上サービス追加シナリオでは, ティラワ港を中国および ASEAN 発着貨物のヨーロッパ方面へのゲートウェイ港とすることは既存の貨物輸送需要量では難しいことが示唆された。

以上は本研究の成果といえる一方で, 今後取り組むべき課題も残っている。はじめに, モデルの精緻化をさらに進める必要がある。本研究で用いたモデルは一定の再現性を得ることができた一方で, 再現性が十分とは言えない点も残されている。たとえば, 中国の港湾における輸入貨物量の再現性が相対的に低い点については, 中国各地域発着の OD 貨物量の精度を向上させる必要があると考えられる。また, さらなるシナリオ分析も行っていく必要がある。例えばこの地域には将来開通が予定されている鉄道があり, ミャンマーをはじめとした陸域 ASEAN に及ぼす影響について考察することは重要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Shibasaki, R., Kato, H., and Ducruet, C. : *Global Logistics Network Modelling and Policy: Quantification and Analysis for International Freight*, Elsevier, 2020.
- 2) Yamaguchi, T., Shibasaki, R., Samizo, H., and Ushirooka, H. : Impact on Myanmar's logistics flow of the East-West and Southern Corridor development of the Greater Mekong Subregion—A global logistics intermodal network simulation, *Sustainability*, 13(2), 668, 2021. doi: 10.3390/su13020668
- 3) 山口拓哉・柴崎隆一・三溝裕之・後岡寿成 : インターモーダル国際物流モデルを用いた GMS 東西・南部回廊を中心とするミャンマーにおける物流政策シナリオの検討, 土木計画学研究・講演集, 62, 7005, 2020.
- 4) JICA : ミャンマー国「ヤンゴン・マンダレー・ムセ」幹線間における高品質な両荷物流事業実現に向けた事業調査 (基礎調査), 2017. <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12288064.pdf>
- 5) Zhang, M. and Pel, A.J. : Synchromodal hinterland freight transport: Model study for the port of Rotterdam, *Journal of Transport Geography*, 52(C), 1-10, 2016.
- 6) Hai, D., Xu, J., Duan, Z., and Chen, C. : Effects of underground logistics system on urban freight traffic: A case study in Shanghai, China, *Journal of Cleaner Production*, 260, 121019, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121019.
- 7) Lee, D.H. and Chandrasekar, P. : A framework for parallel traffic simulation using multiple instancing of a simulation program, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 7:3-4, 279-294, 2002. doi: 10.1080/713643721
- 8) Arfat, Y., Mehmood, R., and Albeshri, A. : Parallel shortest path graph computations of United States road network data on Apache Spark, In: R. Mehmood, B. Bhaduri, I. Katib, I. Chlamtac eds., *Smart Societies, Infrastructure, Technologies and Applications. SCITA 2017*, Springer, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-94180-6\_30.
- 9) Florian, M., Chabini, I., and Le Saux, E. : Parallel and distributed computation of shortest routes and network equilibrium models, *IFAC Proceedings Volumes*, 30(8), 1259-1264, 1997. doi: 10.1016/S1474-6670(17)43994-2
- 10) Dial, R. : A probabilistic multipath traffic assignment algorithm which obviates path enumeration, *Transport Research*, 5, 83-113, 1971.
- 11) 萩原雅貴・柴崎隆一, 荷主と船社の選択行動を考慮した国際海上コンテナモデルによる船舶大型化シミュレーションの試行, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 30, pp.375-384, 2020.5 (2020S-GS7-4)
- 12) Drewry Maritime Research : *Global Container Terminal Operators Annual Review and Forecast*, 2018.
- 13) Shibasaki, R., Nishimura, K., Tanabe, S., and Kato, H. : Belt and Road Initiative: How does China's BRI encourage the use of international rail transport across the Eurasian continent? In: R. Shibasaki, H. Kato, C. Ducruet eds., *Global Logistics Network Modelling and Policy: Quantification and Analysis for International Freight*, Elsevier, Chapter 16, pp.321-335, 2020.
- 14) Shibasaki, R., Arai, H., and Nishimura, K. : Impacts of Eurasian transport connectivity enhancement on Russia - An approach by intermodal logistics network assignment model, *E3S Web Conferences* 135, 02001, Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019), 2019.
- 15) 西村健太郎・柴崎隆一・田邊怜・加藤浩徳 : ランドブリッジと海上輸送の競合を考慮したユーラシア大陸インターモーダル国際物流ネットワークモデルによる一帯一路政策の分析, 土木計画学研究・講演集, 57, OR7453, 2018.
- 16) IHS Markit Ltd. : *GTA Forecasting Database*, IHS Markit Ltd., London, UK, 2021.