

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に着目したインター
モーダル国際物流モデルを用いたシミュレーション
分析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-08-12 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中村, 武史 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2519

修士学位論文

中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に着目した
インターモーダル国際物流モデルを用いた
シミュレーション分析

2021 年度
(2022 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

中村 武史

修士学位論文

中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に着目した
インターモーダル国際物流モデルを用いた
シミュレーション分析

2021 年度
(2022 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

中村 武史

目次

1 章	はじめに	1
1.1	ユーラシア大陸における陸上輸送の起源	1
1.2	ユーラシア大陸における大陸横断的陸上貿易の本格的再開	1
1.3	ユーラシア大陸における複合一貫輸送の再興	2
1.4	中国・欧州間鉄道コンテナ輸送	3
2 章	既往研究とアプローチ	5
2.1	既往研究	5
2.2	インターモーダル国際物流モデル(GLINS モデル)の適用事例	5
2.3	本研究のアプローチと本研究の目的	6
3 章	モデル構成	7
3.1	全体構成	7
3.2	上位モデル	9
3.2.1	陸上・航空リンク	11
3.2.2	港湾内リンク	23
3.2.3	配分計算と下位モデルへの出力	24
3.3	下位モデル	27
3.4	本研究で使用するパラメータ	37
4 章	入力データ	38
4.1	国際海上コンテナ輸送ネットワーク	38
4.2	陸上輸送ネットワーク	38

4.3	空港及び航空輸送ネットワーク	40
4.4	国別の通関所要日数及び費用.....	47
4.5	国際海上コンテナ及びコンテナ相当貨物の輸送需要.....	49
4.5.1	空港間輸送需要の推計方法	50
4.5.2	航空輸送される貨物の地域間輸送需要	51
5 章	モデル計算と感度分析	53
5.1	計算方法.....	53
5.2	配分方法.....	53
5.3	ソートアルゴリズムについて.....	54
5.4	モデルの収束状況及び計算結果.....	56
5.5	感度分析.....	58
5.5.1	航空貨物の時間価値パラメータ v_t の変化.....	59
5.5.2	鉄道距離比例運賃の変化.....	59
6 章	シナリオ分析.....	62
6.1	中国・欧州間鉄道コンテナ輸送（中欧班列）のルート特定	62
6.2	中国における中欧班列の発着都市の選定	62
6.3	中欧班列ルートのキャパシティ	64
6.4	中国・欧州間鉄道コンテナ輸送の現状再現性についての検討	64
6.5	複数の要素を考慮した中国・欧州間鉄道コンテナ輸送の成長性と課題	65
6.5.1	設定シナリオ	65
6.5.2	中国国境における鉄道貨物通過量	65
6.5.3	対象 6 都市における空港貨物取扱量の変化.....	66
6.5.4	中国・欧州における港湾貨物取扱量.....	68
6.5.5	本シナリオ分析のまとめ.....	69
6.6	他輸送機関の需要逼迫に伴う輸送量逼迫シナリオ	69

7 章 おわりに	73
7.1 本研究のまとめ	73
7.2 今後の課題	73

1 章 はじめに

1.1 ユーラシア大陸における陸上輸送の起源

中国・欧州間の物流において起源ともいえるべき歴史的背景がシルクロードである。シルクロードの起源は、紀元前 2 世紀ごろの張騫の西域探索といわれ、その後は歴代の中国王朝による西方への進出という軍事的な側面が強かった。しかし、7 世紀ごろの唐の時代から交易路としての機能が本格的となり、中央アジアやアラビアとの間で広域的な交易により、政治、経済、文化、宗教などの面で影響を及ぼし合うようになった。

13 世紀ごろのモンゴル帝国の時代には、交易圏が欧州やアフリカ北部まで広がり、シルクロードの最盛期を迎え、それまで以上に様々な分野で影響を及ぼし合っていく [1]。しかし、16 世紀ごろ、いわゆる大航海時代に入ると、交易の主流はスピード、輸送量、コストの面すべてで勝る海運へと移り、シルクロードは衰退していった。

1.2 ユーラシア大陸における大陸横断的陸上貿易の本格的再開

15 世紀～16 世紀にかけてシルクロードが衰退して以降、ユーラシア大陸における大規模な大陸横断的陸上貿易はなされていなかったが、1970 年代に、日本発を発着とし、ソ連経由欧州向けの複合一貫輸送サービス「シベリア・ランドブリッジ」が開始された。輸送量は 1980 年代初頭まで増加していき、10TEU を突破するまでに至った（図 1.1 を参照）。要因としては、ソ連の政策により、シベリア鉄道や船舶、陸上トラックなどの複合一貫輸送料金を日欧間海上ルートの約 30%に抑えていたということや、当時の不安定な中東情勢などがあげられる。

しかし、リードタイムが不安定であることや、大型コンテナ船投入などによる海上輸送運賃の下落などを背景に、1983 年を境に輸送量は下降していく。さらに、1991 年のソ連崩壊に伴い、ソ連時代のような輸送経路全体に対する補助政策の実行が困難となり、サービスレベルが著しく低下し、シベリア・ランドブリッジは衰退していった [2]。

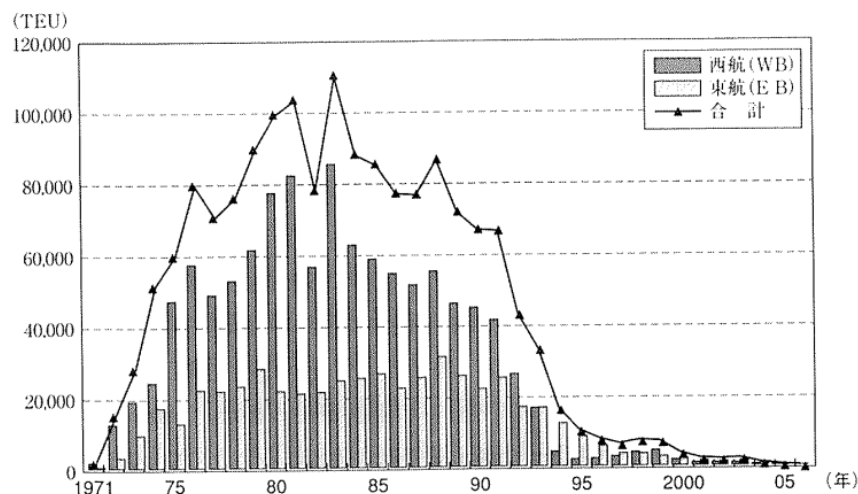


図 0.1 日本発着トランジット貨物輸送量の推移

出典：シベリア・ランドブリッジ [2]

1.3 ユーラシア大陸における複合一貫輸送の再興

2013 年に中国が打ち出した「一带一路」構想において指定された「新ユーラシア・ランドブリッジ経済回廊」によって、「現代版シルクロード」ともいえる陸上ルートの再興が進んでいる。図 1.2 に一带一路の概要を示す。

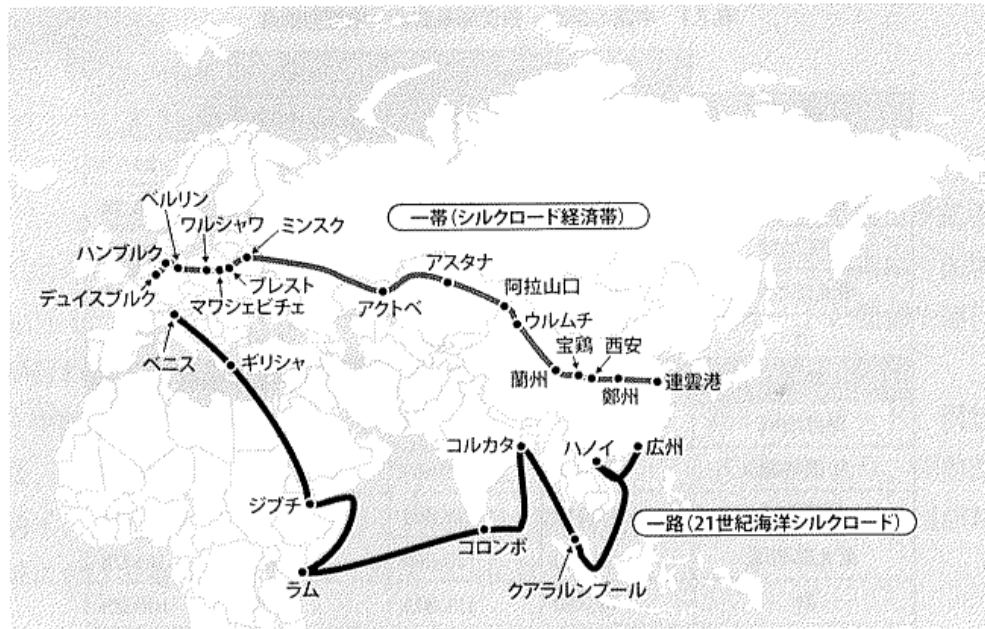


図 0.2 一带一路概要

出典：グローバル・ロジスティクス・ネットワーク [3]

「新ユーラシア・ランドブリッジ」とは、中国・連雲港からオランダ・ロッテルダム港への鉄道輸送経路で、「一带一路」における「一帯（シルクロード経済ベルト）」の重要な基盤となっている。その「新ユーラシア・ランドブリッジ」を中心とする沿線関係国全体の人・モノの往来を活発にするための構想が「新ユーラシア・ランドブリッジ経済回廊」である。しかしこの回廊では、沿線関係国間で線路幅が異なる場合に貨物の積み替えが発生することや、国によってインフラ整備状況が異なるなど多くのボトルネックがある。これらのボトルネック解消と地域的交通インフラ整備拡充に向け、沿線の中で最重要地域といえる中央アジアでは、地域協力型開発プログラムである The Central Asia Regional Economic Cooperation (CAREC)などによる広域的な交通インフラ整備が長年にわたり続けられてきた [4]。国連アジア太平洋経済社会委員会（UN ESCAP）は、ユーラシア大陸における交通整備状況と接続性の評価を行っており、その中で、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送のルートが含まれる鉄道インフラについては高規格で整備されていることを報告している [5]。

この「新ユーラシア・ランドブリッジ経済回廊」を活用する形で発展を見せているのが、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送である。次節にて詳細を述べる。

1.4 中国・欧州間鉄道コンテナ輸送

中国・欧州間鉄道コンテナ輸送は図 1.3 に示したルート概略図の通り、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送のルートには大きく 3 つのルートが存在する。カザフスタンを経由する西ルートが現時点で最も使用頻度が多く、次いで東ルート、中ルートの順に並んでいる。各ルートにおいて、軌道幅が異なっており、両端の中国と欧州は標準軌（1,435mm）、通過国のロシアやカザフスタン等の旧ソ連地域、モンゴルは広軌（1,520mm）で鉄道が敷設されている。したがって、中国国境を越境する際と、ベラルーシ・ポーランド国境を越境する際に国境点で貨物の積み替えが発生する（図 1.3 の赤い△）。このような国境点での貨物の積み替えが中国・欧州間鉄道コンテナ輸送のボトルネックとなってきたが、現在は中国の一带一路構想や、前述の国際機関等の施策による積み替え施設の新設や設備増強などを受け、改善が進んでいる。

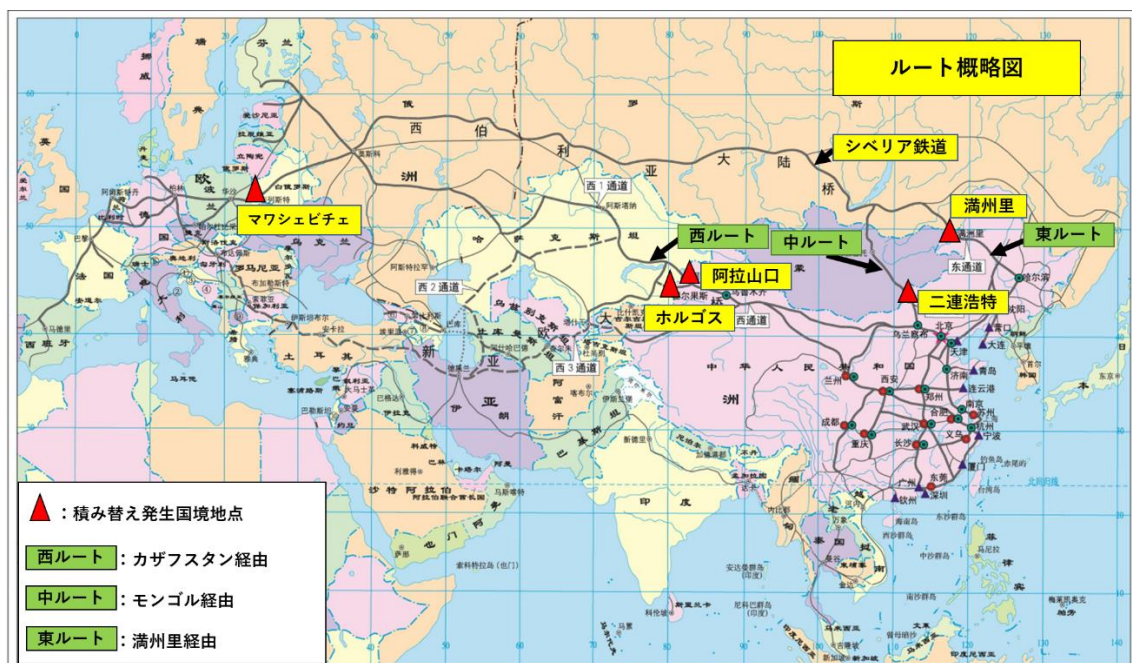


図 0.3 中国・欧州間鉄道コンテナ輸送のルート概略図

出典：中欧班列建设发展规划 [6] より一部加筆

中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に期待されている役割は、1970 年当時の海上輸送に対抗する鉄道貨物輸送サービスという点にではなく、海上輸送よりもリードタイムが短く（海上：約 1~2 か月，鉄道：約 15~20 日，航空：約 5~10 日），航空輸送よりも輸送コストが安い（海上の 2~3 倍，航空の約 1/3）という，海・空の中間的性質を活かした第 3 の輸送機関としてのサービスを提供するという点にある [7]。さらに，海上輸送と比較して正確なリードタイムでの輸送サービスを提供できるという強みもある。主な輸送品目として，西航（中国発欧州向け）貨物は電子機器，アパレル，機械，消費財などがあげられ，東航（欧州発中国向け）貨物は自動車部品，完成車，化学品，飲料，食品，ワイン木材などがあげられる [8]。

EDB，経産省が行った日欧の荷主に対するインタビュー調査では，先述した沿線関係国の輸送インフラのさらなる拡充の必要性とともに，中国地方政府による補助金が大きなリスク要因とし

て挙げられている。中欧班列に対する中国地方政府による補助金は、経済競争力を持たせるために 30～40%程度支払われているとされてきたが、2020 年から段階的に削減され、最終的に廃止されるという [7]。しかし、具体的な金額や割合は示されていないが 2023 年以降も補助金は継続されるといった情報 [9] もあり、実際にいつ、どの程度の削減が行われるのか、または継続されるのかは不明瞭であるのが現状である。

こうしたなか、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送は、2016 年に「中欧班列」としてブランド化されて以降、2019 年までに、列車便数は約 5 倍、輸送量は約 7 倍と、3 年で著しい成長を見せている。表 1.1 にブランド化以降の中国・欧州間鉄道コンテナ輸送の総輸送量、総便数推移を示す。

表 0.1 ブランド化以降の中国・欧州間鉄道コンテナ輸送の総輸送量、総便数推移

出典：各種報道・記事から筆者作成

年度	輸送量(TEU)	前年度比(倍)	総便数	前年度比(倍)	備考
2016	105,794	—	1,702	—	ブランド化初年度
2017	317,930	3.01	3,673	2.16	
2018	543,320	1.71	6,377	1.74	
2019	725,312	1.33	8,225	1.29	
2020	1,135,000	1.56	12,400	1.51	コロナ禍
2021	1,460,000	1.29	15,000	1.21	

2020 年初頭から全世界で続く新型コロナウイルス感染拡大の影響により、その期待、注目度はさらに高まっている。表 1.1 を見ると、世界がコロナ禍に入った 2020 年においても成長を続けていることがわかる。要因として、全世界で旅客便の大幅に減便されたことによるベリースペースの大幅な供給減があげられる。これを受け、航空貨物輸送の代替手段として中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に大きな注目が集まった。それだけでなく、海上貨物輸送でも、港湾作業員の不足やコンテナ不足などの影響を受け、中国発主要航路での運賃高騰が続いており、欧州側の輸出先によっては海上運賃が鉄道運賃を上回るという現象が発生しているという。さらに、新型コロナウイルスの感染拡大に伴う貿易物資の輸送なども頻繁に行われており、2020 年には総輸送量 100 万 TEU、総便数 1 万便を超え、2021 年も成長を維持している。

しかし現在、輸送需要の急激な増加によって国境点における貨物のハンドリング能力が限界を超過し、中国鉄道当局による出発規制が行われるなど未曾有の貨物混雑が発生している。したがって、輸送量は増加し、一見現在も順調な成長を見せているようだが、強みであった正確なリードタイムでの輸送が提供できなくなるなど、インフラ面でのボトルネックを露呈する結果となっている。

2 章 既往研究とアプローチ

2.1 既往研究

一帯一路構想が推進されていく中で、中国・欧州間の物流についての研究は数多くなされている。航空輸送については以下のような研究がある。

Gong et al. [10]では、中国における航空輸送による国際物流の分析を重力モデルを用いて行い、航空貨物にとって、経済規模よりも産業構成の方が重要とし、中国内陸部の需要拡大に対応した空港整備の必要性を指摘している。また、柴崎他 [11]は、東アジア・欧州間の国際物流を対象とした品目別航空輸送単価の推計を行い、他の品目と比較し、単価が大きい貨物や、生鮮食品などは航空輸送を使用する可能性が高いことを示している。

一帯一路の最も重要な構成要素ともいえる中国・欧州間鉄道コンテナ輸送（中欧班列）についての研究も数多くなされている。

Zhao et al. [12]は、中欧班列のハブとなるような都市の候補を中欧班列の運用経験と政府政策を考慮して選出したうえ、鉄道網、一般・高速道路網を考慮した複雑ネットワーク理論とTOPSIS モデルによって各都市の重要度を評価し、混合整数計画法によってハブとして適切な6都市を選出している。Wei et al. [13]は、複数モデルを融合させたハイブリッドモデルを用い、中国国内における中欧班列発着プラットフォーム間の横の連携（アライアンス）の構築を試みている。Himola et al. [14]は、欧州・アジア間の複数輸送機関を対象としたコンテナ輸送についての時系列分析を行い、鉄道貨物の著しい成長を確認している。Wen et al. [15]は、現在複数存在している中国・欧州間の陸上ルート（経済回廊）が、中国・欧州間の海上輸送の代替となりうるか検討し、中国の地域ごとに望ましい代替ルートを提案している。その中で、代替経路選択の最も重要なファクターはインフラへの信頼性であるとしている。Yang et al. [16]は、重慶における国際物流センター設置の経営的・政策的意味合いを海上・鉄道輸送を考慮した一般数理モデルを構築している。そのモデルを用いて、重慶発の中国・欧州間鉄道輸送は、高付加価値製品の輸送を拡大することで、国際物流センターの発展に大きく寄与すると結論付けている。Li [17]では、一般化されたコスト関数に基づくマルチロジットモデルを構築し、海運に対する中欧班列の市場競争力を、定量的に分析している。その結果、中欧班列の運賃の変更が海運とのシェアに大きく影響を及ぼすとし、最適な運賃設定と調整が、競争力を強化し、持続的発展を促すとしている。

以上のような研究がなされてきているが、陸上・海上・海上輸送について考慮に入れた数理モデルを使用し、なおかつ中国・欧州間鉄道に着目した研究はなされていない。

2.2 インターモーダル国際物流モデル(GLINS モデル)の適用事例

インターモーダル国際物流モデルは、これまで全世界様々な地域へ適用されてきた実績がある。表 2.1 にこれまでの適用実績をまとめる、表 2.1 からわかる通り、世界中様々な地域を対象としてモデルを適用し、成果を上げていることがわかる。

表 2.1 GLINS モデルの適用実績
(出典：柴崎 [18]をもとに筆者加筆)

対象地域	対象施策	対象年次
中米	新規空港整備，越境抵抗削減	2010
メコン下流域（カンボジア）	(1) 内航水運の利用促進，(2) 鉄道・高速道路の建設，港湾投資，国境改善	(1)2010 (2)2016
ミャンマーを中心とする東南アジア	GMS 経済回廊の整備，新規港湾整備，越境抵抗削減	2016, 2018
南アジア	貨物専用鉄道（DFC）の建設，新規港湾整備，港湾混雑の解消，国際フェリーの導入	2013
中央アジア・コーカサス	新規港湾整備，カスピ海フェリーの整備，越境抵抗削減，鉄道の整備	(1) 2013 (2) 2016
ユーラシア大陸（中国の一带一路政策，モンゴル，ロシア）	(1) 越境抵抗削減，新規鉄道建設，鉄道輸送容量の改善および運賃補助，(2) 航空輸送アクセスの改善，空港整備，(3) ドライポートの整備	2013,2016, 2018
オセアニア	(1) 新規航路開設，港湾荷役の改善，(2) 折り畳みコンテナの導入，空コン輸送の最適化	(1) 2013 (2) 2018
アフリカ	(1) 越境抵抗削減，鉄道の改善，国際河川の架橋，(2) 経済回廊の整備，AfCFTA の実施，(3) 西アフリカにおける物流環境の改善	(1) 2013 (2), (3)2016
日本	(1) 京浜港・阪神港を対象とした外航コンテナシャトル便の導入，(2) 博多港を対象とした内航フィーダー輸送の促進と外航コンテナシャトル便の導入	(1) 2013, 2016 (2) 2016
全世界	基幹航路におけるハブ港の最適配置	2013
北極海航路	北極海航路の利用可能性，環境税や温室効果ガス排出規制区域の導入の影響	2018

2.3 本研究のアプローチと本研究の目的

本研究では、Shibasaki et al. [19]をベースに上位モデルと下位モデルを統合した山口 [20]，また，Shibasaki et al. [19]をベースに航空輸送ネットワークを追加した西村 [21]を参考にしている．さらに，本研究で使用するモデルは，西村 [21]のモデルの上位モデルと下位モデルを統合した柴崎 [22]で構築されたものである．

これまで様々な地域で適用され，成果を上げているインターモーダル国際物流モデル（GLINS Model : Global Logistics Intermodal Network Simulation Model）を使用し，中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に着目した航空輸送を含むシミュレーション分析を行い，持続的な成長に有効な施策の提案や今後の展望の考察を行う．また，コロナ禍のような異常事態を想定したシナリオの再現を試み，中国・欧州間鉄道コンテナ輸送が安定してサービスを提供するための施策について提案し，実現可能性について考察することを目的とする．

3 章 モデル構成

3.1 全体構成

本研究で扱うモデル（以下「本モデル」とする）は、西村 [23]や Shibasaki et al. [19]のモデルを参考に、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航空輸送ネットワークの統合を行った柴崎 [22]のモデルを使用している。本章では、柴崎 [22]のモデルの詳細について紹介する。

本モデルは、地域間輸送需要（OD 貨物量）および海上・陸上・航空の輸送ネットワーク構成を所与とした時に、個々のコンテナやコンテナ相当貨物が、輸送経路や輸送機関を選択する、機関選択および配分モデルである。これは、四段階推定法で言えば、第 3, 4 段階のモデルである。実際の輸送ネットワークでは、貨物が入っていない空コンテナも輸送されているものの、空コンテナの輸送需要のデータは入手が困難なため、本モデルの輸送需要としては、実入りコンテナ相当貨物のみを対象とする。

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 3.1 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・航空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・航空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、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。

モデルの計算方法や現状再現性の評価方法については、第 5 章で詳細を述べる。

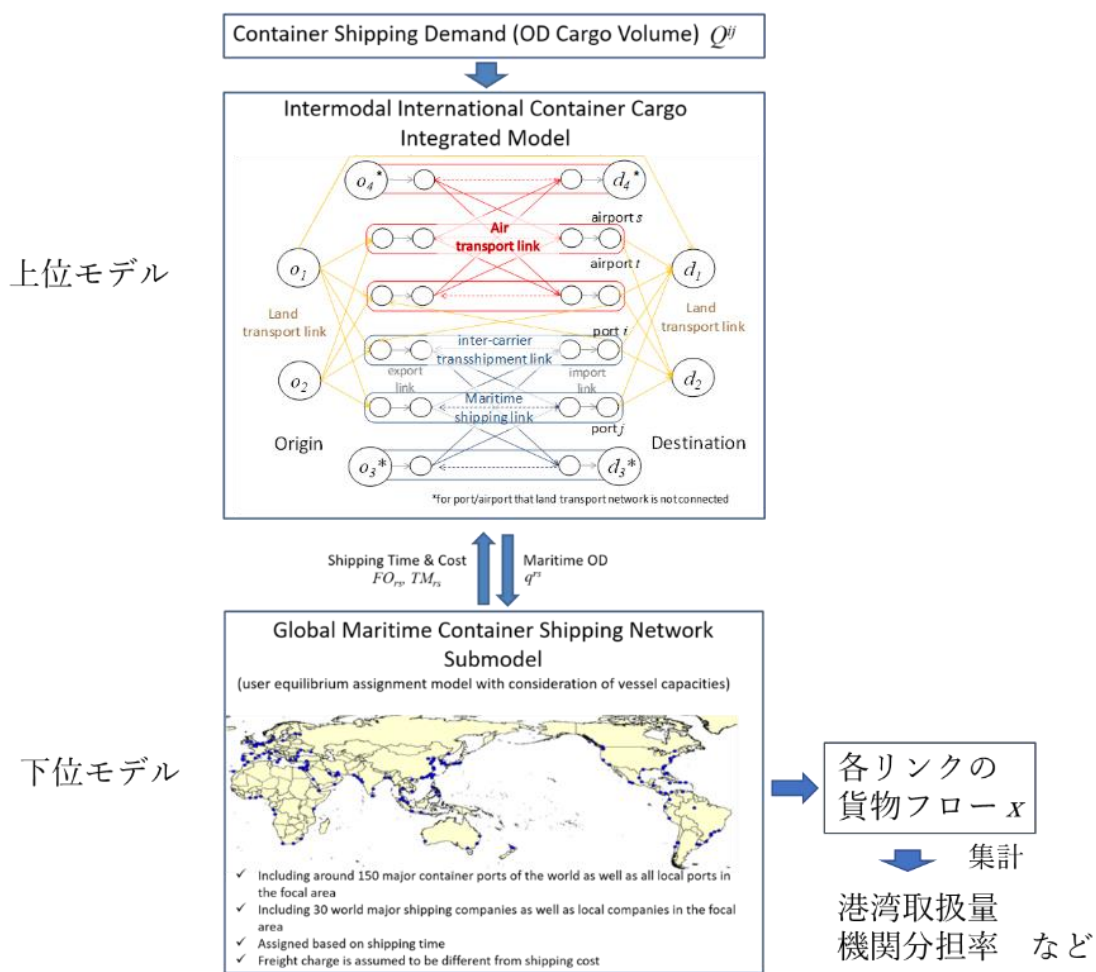


図 3.1 モデルの全体構成
(出典：柴崎 [22])

以上の点より，本モデルは，各輸送ネットワークにおいて混雑を考慮したリンク別の輸送運賃および輸送時間を計算する下位モデルと，全輸送ネットワークを仮想的に表現したネットワークで輸送需要を配分する上位モデルの二層構成としている．以下では，各モデルの詳細を述べる．なお，本モデルでは，国際海上コンテナおよび陸上や航空輸送におけるコンテナ相当貨物を輸送の対象としているため，貨物の単位は海上コンテナの TEU（20 フィートコンテナ 1 本分を 1TEU とする）を統一して用いることとする．

3.2 上位モデル

ある貨物 m が、発地 o から目的地 d までの全経路集合のうち最も効用の高い経路 h を選択するものと想定する。ここで、本モデルが用いている確率的ネットワーク配分では、妥当なリンクコストをもつ経路を抽出し、全体の経路集合としている。効用 U は、観測できる確定項 V と、観測できない誤差項 ε をもつと考えられ、貨物 m が効用最大の経路 h を選択する場合、以下の式が成り立つ。

$$U_{hm}^{od} > U_{h'm}^{od}, \forall h, h' \in H^{od}, h \neq h', (o, d) \in O \times D \quad (3-2-1)$$

$$U_{hm}^{od} = V_h^{od} + \varepsilon_{hm}^{od} \quad (3-2-2)$$

o, d : 貨物の発地および目的地

H^{od} : od 間の経路集合

O : 発ノードの集合

D : 着ノードの集合

h : 発地 o から目的地 d までの経路のうち、効用が最大となる経路

h' : 発地 o から目的地 d までの経路のうち、効用が最大ではない経路

U_{hm}^{od} : 貨物 m が経路 h を選んだ時の効用

V_h^{od} : 経路 h を選ぶときの効用の確定項（観測可能）

ε_{hm}^{od} : 経路 h を選ぶときの効用の誤差項（観測不可能な誤差）

誤差項が独立でガンベル分布に従うと仮定すると、効用を最大とする経路 h を選ぶ貨物量は以下の式で表される。（導出についてはロジットモデルに関する教科書等 [24] を参照されたい）

$$F_h^{od} = Q^{od} \times \frac{\exp(\theta \times V_h^{od})}{\exp(\theta \times V_h^{od}) + \sum_{h' \in H^{od}} \exp(\theta \times V_{h'}^{od})} \quad (3-2-3)$$

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）

θ : ガンベル分布における分散パラメータ

確定項 V_h^{od} は、輸送費用と時間を考慮した一般化費用によって、以下の式で定義される。

（陸上および航空輸送のみの場合）

$$V_h^{od} = -FLA_{od} - vt \times TLA_{od} \quad (3-2-4)$$

（海上輸送も含む場合）

$$V_h^{od} = - (FLA_{oi} + FTO_{ij} + FLA_{jd}) - vt \times (TAL_{oi} + TPX_i + TTM_{ij} + TPM_j + TAL_{jd}) \quad (3-2-5)$$

i, j : 輸出港および輸入港（経路 h に含まれる）

vt : 時間価値パラメータ (US\$/TEU/hour, 具体的な値については、本節の最後に述べる)

FLA_{od} : 発地 o から着地 d までの陸上および航空輸送運賃 (US\$/TEU)

FLA_{oi} : 発地 o から輸出港 i までの陸上および航空輸送運賃 (US\$/TEU)

FLA_{jd} : 輸入港 j から着地 d までの陸上および航空輸送運賃 (US\$/TEU)

FTO_{ij} : 輸出港 i から輸入港 j までの港湾料金を含む海上輸送運賃 (US\$/TEU)

TAL_{od} : 発地 o から着地 d までの陸上および航空輸送所要時間 (hour)

TAL_{oi} : 発地 o から輸出港 i までの陸上および航空輸送所要時間 (hour)

TAL_{jd} : 輸入港 j から着地 d までの陸上および航空輸送所要時間 (hour)

TPX_i : 輸出港 i におけるリードタイム (hour)

TPM_j : 輸入港 j におけるリードタイム (hour)

TTM_{ij} : 輸出港 i から輸入港 j までの海上輸送時間 (hour)

(3-2-5)式の変数のうち、 FTO_{ij} および TTM_{ij} は以下の式で表される。

$$FTO_{ij} = \sum_{(r,s) \in h} FO_{rs} + \sum_{r \in h, r \neq i, r \neq j} (\tau \cdot CR_r - CPX_r - CPM_r) \quad (3-2-6)$$

$$TTM_{ij} = \sum_{(r,s) \in h} TM_{rs} + \sum_{r \in h, r \neq i, r \neq j} \tau \cdot TR_r \quad (3-2-7)$$

r, s : 経路 h 内の港

FO_{rs} : 港 r, s 間で生じる海上運賃 (US\$/TEU, 港湾料金を含む)

CR_r : 港湾 r において同一船社間でトランシップする際に生じるコンテナ取扱料金 (US\$/TEU)

τ : 異なる船社間でトランシップする場合に乘じるパラメータ ($\tau > 1$)

CPX_r, CPM_r : コンテナが積卸される際に生じるコンテナ取扱料金 (US\$/TEU)

TM_{rs} : 港湾 r, s 間の海上輸送時間 (hour)

TR_r : 港湾 r において同一船社間でトランシップする際に生じる時間 (hour)

(3-2-6) の第2項で CPX_r および CPM_r を引いているのは、いずれも第1項に含まれるためである。 CR_r については、積卸の際に生じるコンテナ取扱料金の平均と合計の間の料金が設定されることが多いため、以下の(3-2-8)式で表される。

$$CR_r = 0.75 \cdot (CPX_r + CPM_r) \quad (3-2-8)$$

図 3.2 に上位モデルのネットワーク構成，図 3.3 に航空輸送ネットワークの詳細を示す．以下では，上位モデルに含まれるリンクのうち，陸上・航空リンク，港湾内リンク，仮想海上輸送リンクの順に説明する．

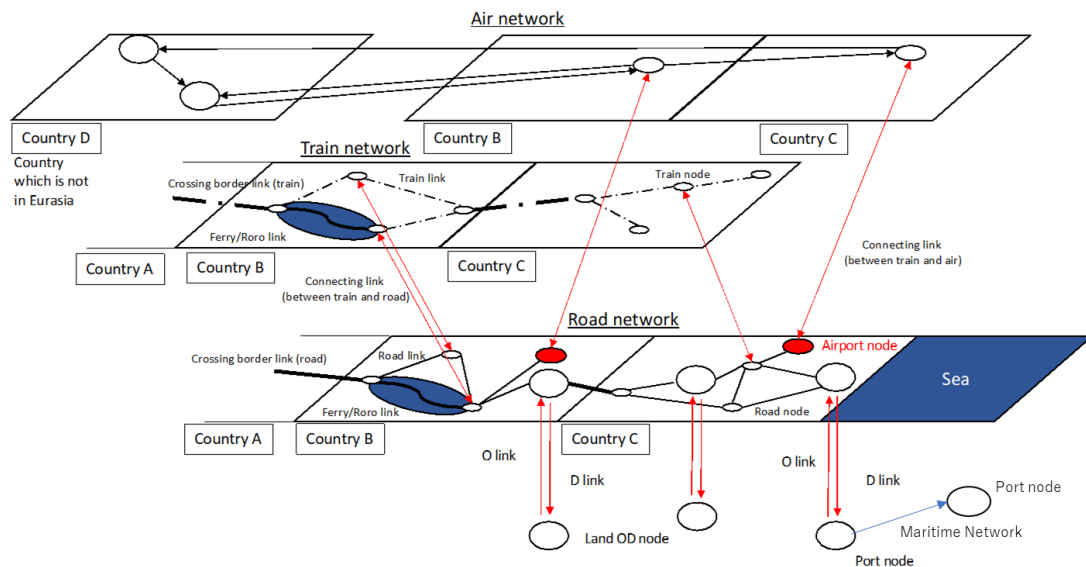


図 3.2 上位モデルのネットワーク構成
(出典：柴崎 [22])

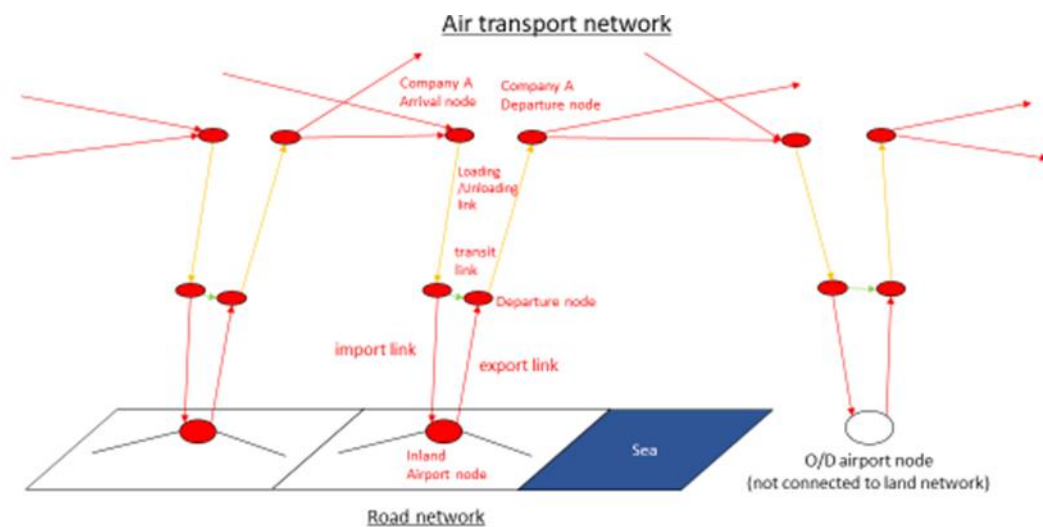


図 3.3 航空ネットワーク詳細
(出典：柴崎 [22])

3.2.1 陸上・航空リンク

上位モデルの陸上輸送・航空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 9 種類が挙げられる．

- ① 発地リンク・着地リンク：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
- ⑥ 空港輸出入リンク
- ⑦ 空港トランジットリンク
- ⑧ 航空会社別出発・到着リンク
- ⑨ 航空会社別輸送リンク

また、鉄道・道路・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・航空輸送市場は後述する海上輸送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、各陸上輸送モードともリンク容量が存在することを想定し、貨物の集中による混雑を考慮することから、道路リンク、鉄道リンク、内航水運リンクの各リンクコストはリンクフローの増加関数となる。それぞれのリンクにおける、1TEU あたりの費用として以下のリンクコスト関数を定義する。

① 発地リンク，着地リンク

発地・着地リンクでは、道路輸送費用のうち、固定費用分を考慮し、リンクコスト関数は以下の式で表す。

$$u_o(x_a) = u_D(x_a) = \frac{CFRo}{2} \quad (3-2-9)$$

u_o : 発地リンクのコスト関数 (US\$/TEU)

u_D : 着地リンクのコスト関数 (US\$/TEU)

$CFRo$: トレーラによる国際海上コンテナ輸送運賃のうちの固定費用分 (US\$/TEU)

発地から着地まで輸送される間にかかる固定費を表現するため、発地リンクと目的地リンクで半分ずつ考慮する。 $CFRo$ については、60(US\$/TEU)を想定している。ただし、 u_o および u_D は全貨物で等しくかかることから、簡便化のためにモデル計算では考慮しない。

② 道路リンク

道路リンクでは、トレーラのリンクコストのうち、道路輸送運賃の距離比例分と、混雑を含む所要時間を考慮する。コスト関数は以下の式で表す。

$$u_{ro}(x_a) = CORo \times (\mu \times l_a) + vt \times \frac{l_a}{vRo_a} \times \{1 + b3 \times (\frac{x_a}{capRo_a})^{b4}\} \quad (3-2-10)$$

u_{ro} : 道路リンクのコスト関数 (US\$/TEU)

$CORo$: トレーラによるコンテナ相当貨物の輸送運賃のうちの距離比例分 (US\$/km/TEU)

μ : 距離パラメータ

l_a : 輸送距離 (km)

vRo_a : トレーラ速度 (km/hour)

$capRo_a$: 当該道路においてコンテナ相当貨物を輸送するトレーラの年間容量 (TEU/年)

$b3, b4$: 道路混雑関数に関するパラメータ

(3-2-10)式は、輸送運賃費用を表す第1項と、混雑による遅れを含む時間費用を表す第2項からなり、時間価値パラメータ vt を乗じることで、一般費用としている。第1項で輸送距離 l_a を μ 倍にしているのは、トレーラによるコンテナ相当貨物の輸送が片荷輸送であることが多く、帰りの輸送費用も合わせて請求されることが比較的多い実態を考慮しているためである。トレーラによる輸送において、必ず帰りの輸送費用も考慮した運賃を請求される場合は、輸送距離を往復の距離とみなして $\mu=2.0$ となる。ただし本モデルでは、帰りの輸送費用まで必ず請求されるとは限らないと想定し、1.0 と 2.0 の中間値である $\mu=1.5$ と設定している。第2項の混雑時間は、均衡配分における一般的な混雑関数を想定している。

③ 鉄道接続リンク

鉄道接続リンクでは、走行費用（運賃のうちの距離比例分）と時間のほかに、鉄道荷役にかかる費用と時間、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。リンクコスト関数は以下の式で表す。

$$u_{rc}(x_a) = \frac{CFRo}{2} + CORo \times (\mu \times l_a) + vt \times \left\{ \frac{l_a}{vRo_a} + THRa_a + \frac{TWRa_a}{2} \right\} \quad (3-2-11)$$

$THRa_a$: ターミナル駅での鉄道荷役に要する時間 (hour)

$TWRa_a$: 鉄道の期待待ち時間 (hour)

$THRa_a$ については、一律 24 (hour) を設定する。

道路運賃のうちの固定費用分 $CFRo$ 、鉄道の期待待ち時間 $TWRa_a$ は、積み込み時と揚げ卸し時でそれぞれ考慮するために、半分としている。鉄道の期待待ち時間 $TWRa_a$ は、以下の式で表す。

$$TWRa_a = \frac{1}{2} \times \frac{YH}{freqRa_a} \quad (3-2-12)$$

$freqRa_a$: 当該路線の一年あたりの鉄道運行頻度 (便/年)

④ 鉄道リンク

鉄道リンクでは、鉄道運賃のうちの距離比例分と、混雑を含む所要時間を考慮する。コスト関数は以下の式で表す。鉄道運賃の距離比例分は、実態に合わせて片道としている。

$$u_{ra}(x_a) = CORa \times l_a + vt \times \frac{l_a}{vRa_a} \left\{ 1 + b5 \times \left(\frac{x_a}{capRa_a \times freqRa_a} \right)^{b6} \right\} \quad (3-2-13)$$

$CORa$: 鉄道によるコンテナ相当貨物の輸送運賃のうちの距離比例分 (US\$/km/TEU)

vRa_a : 鉄道の表定速度 (km/hour)

$TWRa_a$: 当該リンクの起点で接続する鉄道接続リンク a' の期待待ち時間 (hour)

$capRa_a$: 一列車 (一編成) あたりのコンテナ相当貨物の輸送容量 (TEU/便)

$b5, b6$: 鉄道混雑関数に関するパラメータ

⑤ 内航水運リンク

内航水運リンクでは、輸送運賃の固定費と距離比例分、輸送時間、荷役時間、期待待ち時間、そして混雑による遅れを考慮している。コスト関数は以下の式で表す。

$$u_{fe}(x_a) = (2 \times CFFe + COFe \times l_a) + vt \times \left[\frac{l_a}{vFe_a} + 2 \times THFe_a + TWFe_a \times \left\{ 1 + b7 \times \left(\frac{x_a}{capFe_a \times freqFe_a} \right)^{b8} \right\} \right] \quad (3-2-14)$$

$CFFe$: 内航水運によるコンテナ相当貨物の輸送運賃のうち固定費用分 (US\$/TEU)

$COFe$: 内航水運によるコンテナ相当貨物の輸送運賃のうち距離比例分 (US\$/km/TEU)

vFe_a : 内航水運の船速 (km/hour)

$THFe_a$: 起点港および到着港における荷役時間 (hour)

$TWFe_a$: 乗船までの期待待ち時間 (hour)

$capFe_a$: 内航水運一隻あたりのコンテナ相当貨物の輸送容量 (TEU/隻)

$freqFe_a$: 年間運航頻度 (隻/年)

$b7, b8$: 内航水運混雑関数に関するパラメータ

$THFe_a$ については、一律 24 (hour) と設定しており、一本の内航水運リンクで起点港と到着港双方の荷役時間を考慮するために 2 倍している。

乗船までの期待待ち時間 $TWFe_a$ は以下の式で表す。

$$TWFe_a = \frac{1}{2} \times \frac{YH}{freqFe_a} \quad (3-2-15)$$

⑥ 空港輸出入リンク

空港輸出入リンクでは、発地から空港まで、または、空港から着地あるいは周辺空港まで移動するためのトラックを準備する費用と、貨物をトラックとの間で積卸するのにかかる時間（空港での待機時間を含む）を考慮している。

コスト関数は以下の式で表す。

$$u_{Ax}(x_a) = u_{Am}(x_a) = \frac{CFRo}{2} + vt \times THAi \quad (3-2-16)$$

$THAi$ ：空港における荷役時間（hour，トラックが来るまでの待機時間も含む）

$THAi$ は一律 6（hour）を設定する。

⑦ 空港トランジットリンク

トランジットの際には、貨物によっては同機体に積まれたまま次の空港に向かうものも実際は存在するが、本モデルでは、全ての貨物が一度別に機体に積み替えられることを想定する。貨物の積卸にかかる時間は、⑧の航空会社別出発・到着リンクで考慮するため、空港トランジットリンクでは、トランジットの際に次の便を待つ待機時間および通関時間を考慮する。一般に、海上輸送におけるトランシップ時には通関手続きはないものの、Ohashi [25]によると、航空輸送におけるトランジット時には、通関手続きが存在する。よって、コスト関数は以下の式で表す。

$$u_{At}(x_a) = vt \times (TTRS + TCUS) \quad (3-2-17)$$

$TTRS$ ：トランジットの際の待機時間（hour）

$TCUS$ ：トランジットの際の通関時間（hour）

$TTRS$ および $TCUS$ については、Ohashi [25]が世界の主要な空港に対して推計した結果を考慮し、それぞれ 15, 5（hour）と設定している。

⑧ 航空会社別出発・到着リンク

航空会社別出発・到着リンクでは、貨物の積卸時間、および空港使用料を考慮している。

コスト関数は以下の式で表す。

$$u_{Aex}^{ac,Ap}(x_a) = u_{Aim}^{ac,Ap}(x_a) = TT \times CCHAp^{Ap} + vt \times TLUL \quad (3-2-18)$$

ac ：航空会社

A_p ：空港

TT ：ton と TEU の換算係数

$CCHAp^A$ ：空港 A_p の 1ton あたりの使用料 (US\$/ton)

$TLUL$ ：貨物を積卸するのにかかる時間 (hour)

ここで、 $fCAP_a$ および $tCAP_a$ の元データは ton ベースとなっており、10ton を 1TEU と換算して計算に用いている。よって、 $TT=10$ とする。

$CCHAp^A$ については、4-3 節で詳細を述べる。 $TLUL$ については、Ohashi [25] が推計した結果を考慮し、4.5 (hour) と設定する。

⑨ 航空会社別輸送リンク

航空会社別輸送リンクでは、Shibasaki et al. [19] の海上輸送リンクや Chao et al. [26] が定義しているリンクコスト関数に基づき、輸送に伴う燃料費、メンテナンス費、機体費、人件費を考慮している。コスト関数は以下の式で表す。

$$u_{As}(x_a) = \frac{\left[AFC_a + (AMC_a + ACC_a) \times \frac{l_a}{v_a} \times \frac{1}{24} \right] \times Freq_a + AOC_a}{(TT \times fCAP_a \times lf_{ave})} + vt \times \left\{ \left(\frac{l_a}{v_a} + TWAi_a \right) \times \left(1 + b9 \times \left(\frac{x_a}{TT \times fCAP_a \times Freq_a} \right)^{b10} \right) \right\} \quad (3-2-19)$$

AFC_a ：リンク a の燃料費 (US\$/便)

AMC_a ：リンク a のメンテナンス費 (US\$/日)

ACC_a ：リンク a の機体費 (US\$/日)

AOC_a ：リンク a の人件費 (US\$/年)

$Freq_a$ ：リンク a の頻度 (便/年)

$fCAP_a$ ：リンク a の貨物容量 (ton/年)

lf_{ave} ：対象全航空リンクの平均消席率 (本モデルでは 2018 年のデータを使用)

$TWAi_a$ ：貨物を航空機に積み込むまでの期待待ち時間(hour)

$b9, b10$ ：航空輸送混雑関数に関するパラメータ

(3-2-19)における混雑関数の形は、石倉 [27]で定義されたものに従っている。ここで、海上輸送サブモデルの航走リンクでは待ち時間のみに混雑関数がかかっているのに対し、(3-2-19)では輸送時間にも混雑関数がかかっている。これは、混雑が生じる場合において、海上輸送は待機する時間が増えるため、待ち時間のみにかかる一方で、航空輸送は、待機するよりも、代替手段や迂回ルートを考える場合が多く、余分に生じる時間を飛行時間に混雑関数をかけることで反映させるためである。混雑関数のパラメータ $b9, b10$ についても、石倉 [27]より、 $b9=0.8939$, $b10=2.1469$ としている。

貨物を航空機に積み込むまでの期待待ち時間 TW_{Ai_a} は、以下の式で表す。

$$TW_{Ai_a} = \frac{1}{2} \times \frac{YH}{Freq_a} \quad (3-2-20)$$

lf_{ave} については、ICAO が提供する TFS (Traffic by Freight Stage) データ [28] より算出した 0.246 という値を設定している。

本モデルではさらに、リンクごとに旅客および貨物を両方積載するベリー便と、貨物専用機のフレーター便を区別する。容量のみを考慮するとフレーターが好まれるようにも想定されるが、著者らが行ったヒアリング調査等によれば、一部の地域や航空会社を除き、多くの航空会社でベリー便によって貨物を輸送することを好んでいる。これは、旅客便の空きスペースを有効に使えるという効率性によるものであると推測される。よって、(3-2-19) で定義したリンクコスト関数について、リンクがベリー便である場合は、以下の式を適用することで、仮想的にベリー便のコスト u_{AS_belly} を下げている。

$$u_{AS_frater}(x_a) = u_{AS}(x_a) \quad (3-2-21)$$

$$u_{AS_belly}(x_a) = u_{AS_frater}(x_a) \times \frac{\beta \times fCAP_a}{\beta \times fCAP_a + (tCAP_a - fCAP_a)} \quad (3-2-22)$$

β : 旅客に対する貨物の単位重量当たり運賃比率

$tCAP_a$: リンク a の全容量 (ton/年, 旅客と貨物の両方を含む)

燃料費 AFC_a は以下の式で表す。

$$AFC_a = AFP_a \times l_a \times AFR_a \quad (3-2-23)$$

AFP_a : 航空燃料価格 (US\$/bbl)

AFR_a : リンク a における燃費 (bbl/km)

航空燃料価格 AFP_a については、IATA の Industry Statistics Fact Sheet [29] に基づき、2016 年度の値として 52.1US\$/bbl を用いている。燃費 AFR_a については、各機体の容量によって決まり、各航路の機体の容量のデータを全て入手することは難しいため、以下の式で定義している。

$$AFR_a = d_1 \times \frac{TT \times tCAP_a}{Freq_a} + d_2 \quad (3-2-24)$$

d_1, d_2 : 機体の容量に依存する係数

d_1, d_2 については、柴崎 [22]で、Chao [26]で対象とされている 8 機体の容量および平均燃費のデータに基づいて回帰分析を行い、 $d_1=9.10\times 10^{-3}$ 、 $d_2=9.80\times 10^{-3}$ を得ており、これらを本モデルでも適用する (図 3.4)。

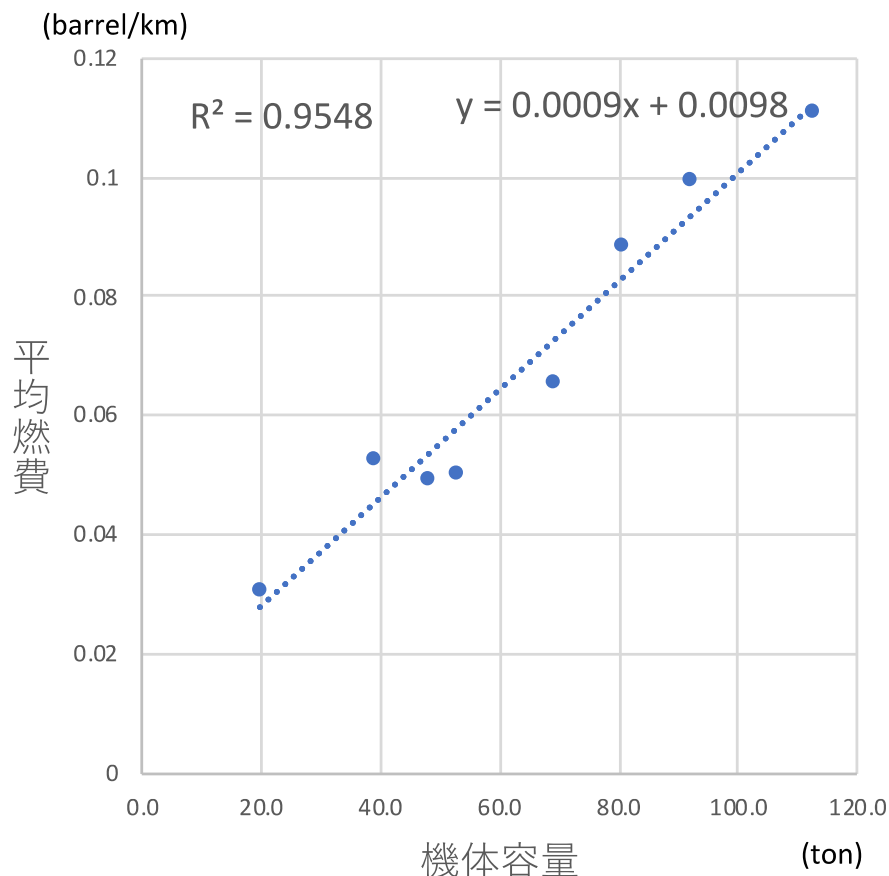


図 3.4 機体の容量と平均燃費の関係
(出典：柴崎 [22])

次に、メンテナンス費 AMC_a については、 AFR_a と同様に、各機体の容量によって決まり、各航路の機体の容量のデータを全て入手することは難しいため、以下の式で定義している。

$$AMC_a = \left(d_3 \times \frac{TT \times tCAP_a}{Freq_a} + d_4 \right) \times \frac{1}{365 \times ODR_{air}} \quad (3-2-25)$$

d_3, d_4 : 機体の容量に依存する係数

ODR_{air} : 年間稼働率 (0.9 とする)

d_3, d_4 は、柴崎 [22]で、Chao [26]で対象とされている 8 機体の容量およびメンテナンス費のデ

ータに基づいて回帰分析を行い， $d_3=2.84\times10^4$ ， $d_4=2.42\times10^4$ を得ており，本モデルでも適用する．
(図 3.5)

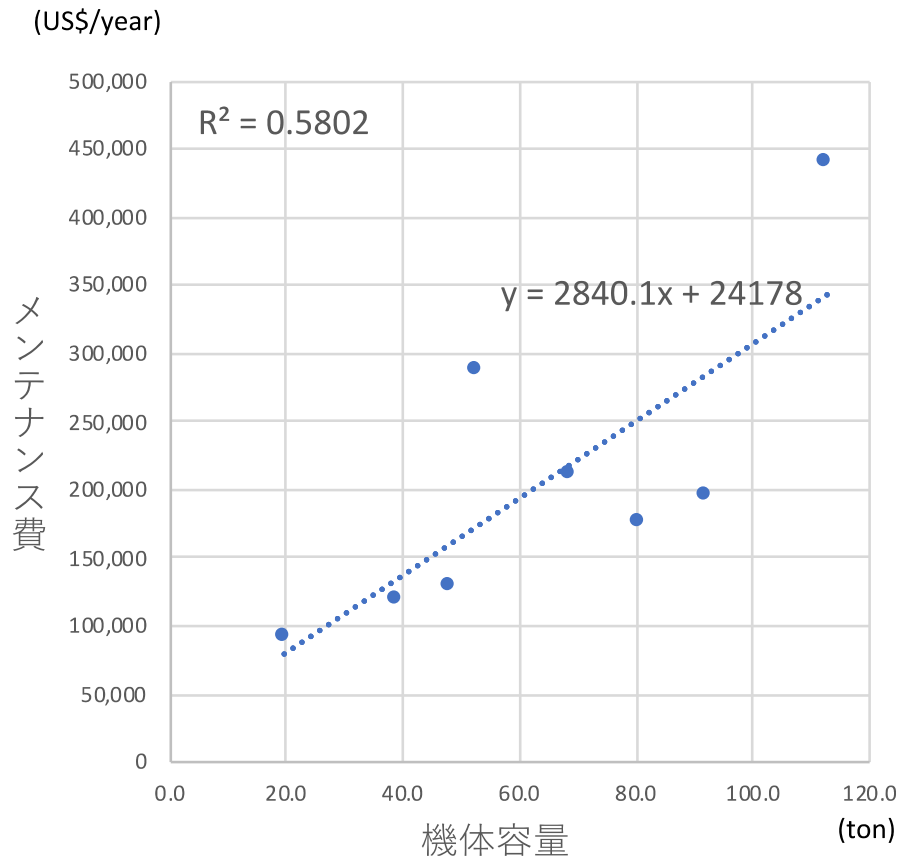


図 3.5 機体の容量とメンテナンス費の関係
(出典：柴崎 [22])

機体費 ACC_a についても， AFR_a と同様に，各機体の容量によって決まり，各航路の機体の容量のデータを全て入手することは難しいため，以下の式で定義している．

$$ACC_a = \left(d_5 \times \frac{TT \times tCAP_a}{Freq_a} + d_6 \right) \times \frac{ir_air}{\{1 - (1 + ir_air)^{-PP_air}\}} \times \frac{1}{365 \times ODR_air} \quad (3-2-26)$$

ir_air ：利子率（0.10 を想定）

PP_air ：航空機の償却年数（10 年を想定）

d_5 ， d_6 ：機体の容量に依存する係数

d_5 ， d_6 は，柴崎 [22] で，Chao [26] で対象とされている 8 機体の容量および機体費のデータに基づいて回帰分析を行い， $d_5=1.48\times10^7$ ， $d_6=2.99\times10^7$ を得ており，本モデルでもこれらを適用する．
(図 3.6)

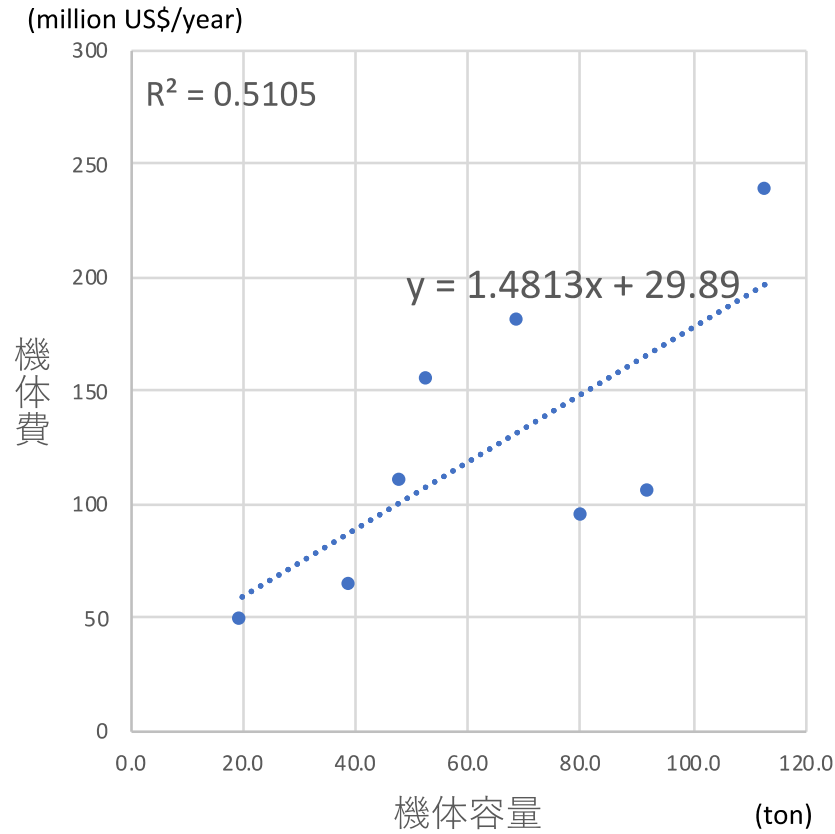


図 3.6 機体の容量と機体費の関係
(出典：柴崎 [22])

最後に、人件費 AOC_a についても、 AFR_a と同様に、各機体の容量によって決まり、各航路の機体の容量のデータを全て入手することは難しいため、以下の式で定義している。

$$AOC_a = d_7 \times \frac{TT \times tCAP_a}{Freq_a} + d_8 \quad (3-2-27)$$

d_7 , d_8 : 機体の容量に依存する係数

d_7 , d_8 は、柴崎 [22] で、Chao [26] で対象とされている 8 機体の容量および年間の人件費のデータに基づいて回帰分析を行い、 $d_7 = 5.55 \times 10^3$, $d_8 = 9.84 \times 10^4$ を得ており、これらを適用する。(図 3.7)

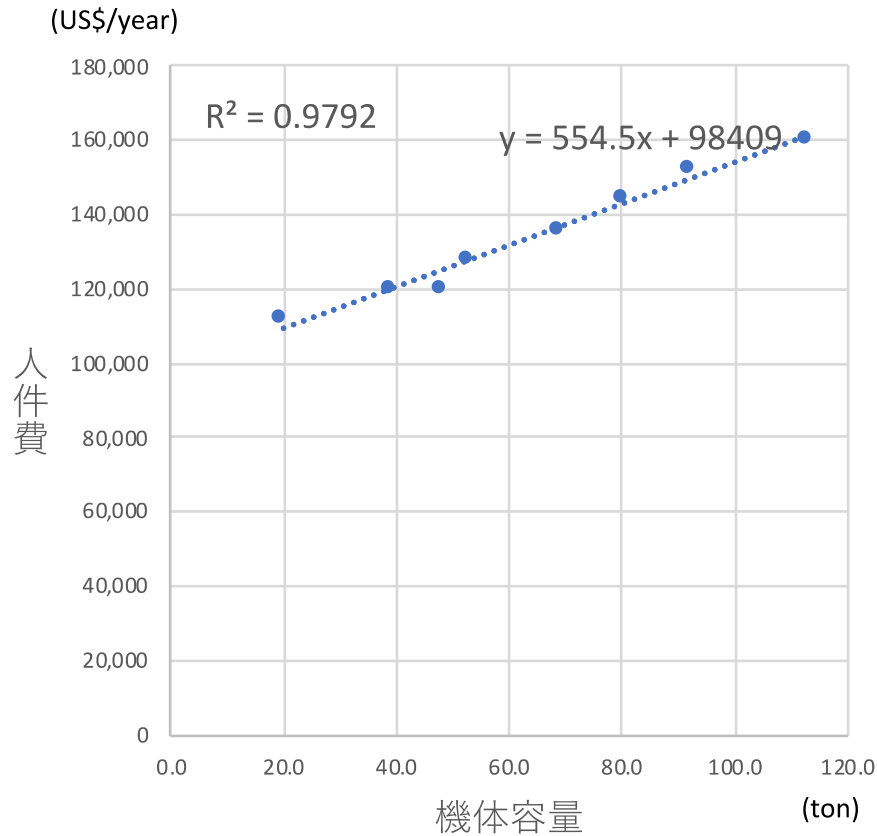


図 3.7 機体の容量と人件費の関係
(出典：柴崎 [22])

⑩ 国境通過における付加コスト

鉄道，道路，域内水運のリンクにおいて追加的に発生する国境通過コストは，以下の式で表す．

$$u(x_a) = u(x_a) + \lambda_a \times \left\{ \left(CB_{ex}^N + CB_{im}^{N'} \right) + vt \times \left(TB_{ex}^N + TB_{im}^{N'} \right) \right\} \quad (3-2-28)$$

N：国境通過前の国

N'：国境通過後の国

u ：リンク全体のコスト関数

λ_a ：国境通過パラメータ（通過しない場合は 0）

CB_a ：国境通過に伴う追加費用（US\$/TEU）

TB_a ：国境通過に伴う追加時間（hour）

国境パラメータ λ_a については，Shibasaki et al. [19]が設定した値を用いており，第三国を通過するだけである場合の越境コスト逓減や，各国間の友好関係および協定等を考慮した値（原則として 0～1.0 の間の値が設定されているが，南オセチア紛争の影響で関係が悪化しているロシア-ジョー

ジア間は 10.0 が設定されている) が設定されている。

一方、航空輸送ネットワークの空港輸出入リンクにおいて追加的に発生する国境通過コストは、以下の式で表す。なお、以下の式における N は、各リンクが存在する国を表す。

(空港輸出リンクの場合)

$$u(x_a) = u(x_a) + \lambda_a \times (CB_{ex}^N + vt \times TB_{ex}^N) \quad (3-2-29)$$

(空港輸入リンクの場合)

$$u(x_a) = u(x_a) + \lambda_a \times (CB_{im}^N + vt \times TB_{im}^N) \quad (3-2-30)$$

なお、式(3-2-25)と異なり、航空輸送では λ_a は 1.0 とし、原則として貨物の発着国にかかわらず越境費用は割り引かれていないものと想定する。ただし第 6 章のシナリオ分析で行うように、政府や空港運営組織によって越境費用や時間が低減される場合は、 λ_a を 1.0 以下に設定できるものとする。以上で定義されたように、道路リンク、鉄道リンク、内航水運リンクの各リンクコストはリンクフローの増加関数であることから、海上輸送サブモデルと同様に、利用者均衡配分問題を解くことで、解が一意に定まる。その時の経路 k 上の各リンクフローの均衡解 x_a に基づく一般化費用の総和が、上位モデルにおける陸上輸送の一般化費用 GL_{od} 、 GL_{oi} 、 GL_{jd} となる。つまり、以下の式が成り立つ。なお、本モデルでは、普通貨物と航空貨物の 2 種類を用いて配分するため、経路ごとの輸送費用および時間についても、普通貨物と航空貨物を別々に保存する。ただし、リンクコスト計算については、ネットワーク上の混雑を考慮するため、普通貨物と航空貨物の前回計算で出力されたリンクフローを足し合わせることで、多段階配分を行う。

$$GL_{oi} = \min_k \{ \sum_{a \in k} u(x_a) \} \quad (3-2-31)$$

$$GL_{jd} = \min_k \{ \sum_{a \in k} u(x_a) \} \quad (3-2-32)$$

$$GL_{od} = \min_k \{ \sum_{a \in k} u(x_a) \} \quad (3-2-33)$$

$$GL_{oi} = FLA_{oi} + vt \times TLA_{oi} \quad (3-2-34)$$

$$GL_{jd} = FLA_{jd} + vt \times TLA_{jd} \quad (3-2-35)$$

$$GL_{od} = FLA_{od} + vt \times TLA_{od} \quad (3-2-36)$$

3.2.2 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 3.8 に示す。

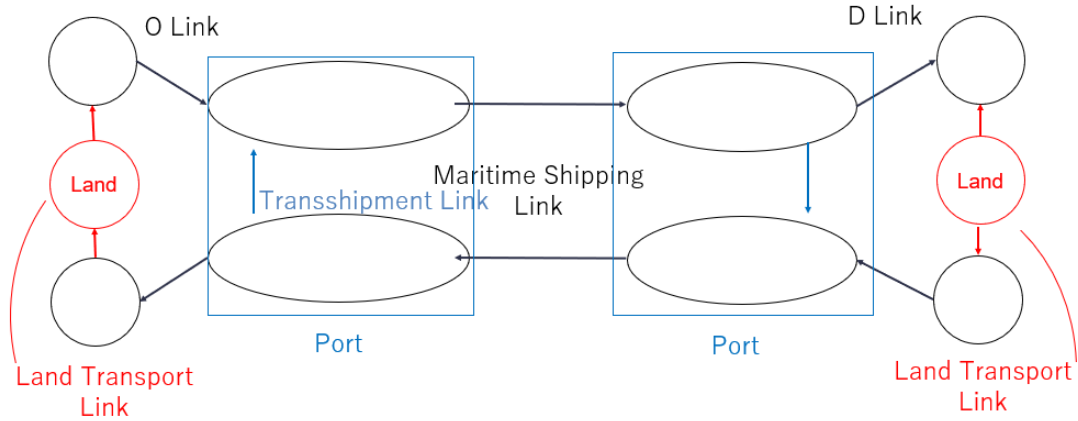


図 3.8 上位モデルにおける港湾内のネットワーク構成

出典：柴崎 [22]

① 港湾 O リンク、港湾 D リンク

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している。

$$u_l(x_a) = \lambda_r \cdot CBX_r + \frac{CFRo}{2} + vt \cdot TS_r \left\{ bp_1 \cdot \left(\frac{x_{all_r}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} \quad (3-2-37)$$

$$u_u(x_a) = \lambda_r \cdot CBM_r + \frac{CFRo}{2} + vt \cdot TUS_r \left\{ bp_1 \cdot \left(\frac{x_{all_r}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} \quad (3-2-38)$$

r ：リンク a の属する港湾

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）

λ_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）

$CFRo$ ：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)

ここで、年間取扱量 x_{all_r} は以下の式で表される。

$$x_{all_r} = x_{ex_r} + x_{im_r} + 2 \cdot (x_{interTS_r} + x_{intraTS_r}) \quad (3-2-39)$$

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

x_{im_r} : 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。

② 船社間積替リンク

船社間積替リンクのコスト u_r は以下の式で表す。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かか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/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している。

$$u_r(x_a) = 0.5 \cdot (CPX_r + CPM_r) + vt \cdot TRS_r \left\{ bp_1 \cdot \left(\frac{x_{all_r}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} \quad (3-2-40)$$

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)

3.2.3 配分計算と下位モデルへの出力

港湾 rs 間の海上輸送運賃 FO_{rs} と、海上輸送時間 TM_{rs} は、海上輸送サブモデルの計算結果を用いる。陸上および航空輸送の運賃 FLA_{oi} , FLA_{jd} と、陸上および航空輸送時間 TLA_{oi} , TLA_{jd} については、下位モデルの陸上および航空輸送サブモデルで得られた計算結果を用いる。港湾リードタイム TPX_i , TPM_j および港湾 r におけるコンテナ積卸取扱料金 CPX_i , CPM_j は、世界銀行の Doing Business データベースにて 2015 年 9 月に取得された値を港湾ごとに用いた。

先に述べた通り、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、(3-2-3)式と同等の結果が得られることが保証されている Dial 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．

$$q^{rs} = x_{rs} , \quad (3-2-41)$$

$$q^{oi} = x_{oi} , q^{od} = x_{od} , q^{jd} = x_{jd} \quad (3-2-42)$$

q^{rs} ：港湾 rs 間の海上貨物輸送需要（TEU/year）

q^{oi} ：発地 o から輸出港 i までの陸上および航空貨物輸送需要（TEU/year）

q^{jd} ：輸入港 j から着地 d までの陸上および航空貨物輸送需要（TEU/year）

q^{od} ：発地 o から着地 d までの陸上および航空貨物輸送需要（TEU/year）

x_{rs} ：港湾 rs 間の海上輸送リンクフロー（TEU/year）

x_{oi} ：発地 o から輸出港 i までの陸上および航空貨物輸送リンクフロー（TEU/year）

x_{jd} ：輸入港 j から着地 d までの陸上および航空貨物輸送リンクフロー（TEU/year）

x_{od} ：発地 o から着地 d までの陸上および航空貨物輸送リンクフロー（TEU/year）

時間価値パラメータ v_t (US\$/TEU/hour)については，IHS 社の提供する Global Trade Atlas（GTA）データベース [30]を用いて値を算出した（GTA データベースの詳細については，4.5 節で述べる）．その際，通常の貨物と航空貨物では時間価値が異なることを想定し，柴崎 [22]と同じく，時間価値の高い品目グループと低い品目グループで v_t を区別して配分計算を行った手法を用いて，本モデルでは次の公式に基づき，普通貨物と航空貨物の時間価値 v_t をそれぞれ算出する．

(普通貨物の場合)

$$vt = \frac{SV_c}{ST_c} \times \alpha_c \times \frac{ST_c}{\sum_{c \in C}^n ST_c} \times IR \times \frac{1}{365 \times 24} \quad (3-2-43)$$

(航空貨物の場合)

$$vt = \frac{AV_c}{AT_c} \times \alpha_c \times \frac{AT_c}{\sum_{c \in C}^n AT_c} \times IR \times \frac{1}{365 \times 24} \quad (3-2-44)$$

C : GTA データベース [30]に含まれる全品目の集合 (全品目数 $n=270$)

SV_c : 品目 c の全世界年間海上輸送貨物輸送量(ton/year)

ST_c : 品目 c の全世界年間海上輸送貨物輸送金額(US\$/year)

AV_c : 品目 c の全世界年間航空輸送貨物輸送量(ton/year)

AT_c : 品目 c の全世界年間航空輸送貨物輸送金額(US\$/year)

α_c : 品目 c の ton/TEU 換算パラメータ

IR : 年間利子率 (10%を想定)

ここで, GTA データベース [30]から得られるデータの種類の都合上, 品目 c の ton/TEU 換算パラメータ α_c については, 普通貨物は品目別に算出する一方で, 航空貨物は一律の値を設定する. 具体的には, 普通貨物については, 国際海上コンテナの輸送量データが TEU ベースと ton ベースの両方が得られるため, 品目別に α_c を算出する. 一方, 航空貨物については, TEU ベースの輸送量データは得られないため, コンテナ相当貨物の単位あたり重量を 10ton とし, 品目にかかわらず一律で 10(ton/TEU)を用いる. 上記公式に基づき, 時間価値を算出した結果, 普通貨物は $vt = 0.88$, 航空貨物は $vt = 88.4$ をそれぞれ用いることとする.

以上のように, 普通貨物と航空貨物では時間価値が異なるため, 上位モデルの計算において, 柴崎 [22]と同様に, 普通貨物と航空貨物の 2 種類を配分する. なお, リンクコストの計算においては, リンク毎の混雑を考慮するため, リンクフローの総量を用いる. 一方, 海上輸送サブモデルにおいては, 時間のみに基づいて配分を行うため, 時間価値の差で配分結果に変化は起きない. よって, 普通貨物と航空貨物をまとめた輸送需要を用いて配分する. なお, 海上輸送サブモデルにおいて運賃算出の際に用いる vt の値は, 普通貨物の 0.88 (US\$/TEU/hour)を用いる.

3.3 下位モデル

図 3.9 に本モデルの海上輸送ネットワークサブモデルの構成を示す。

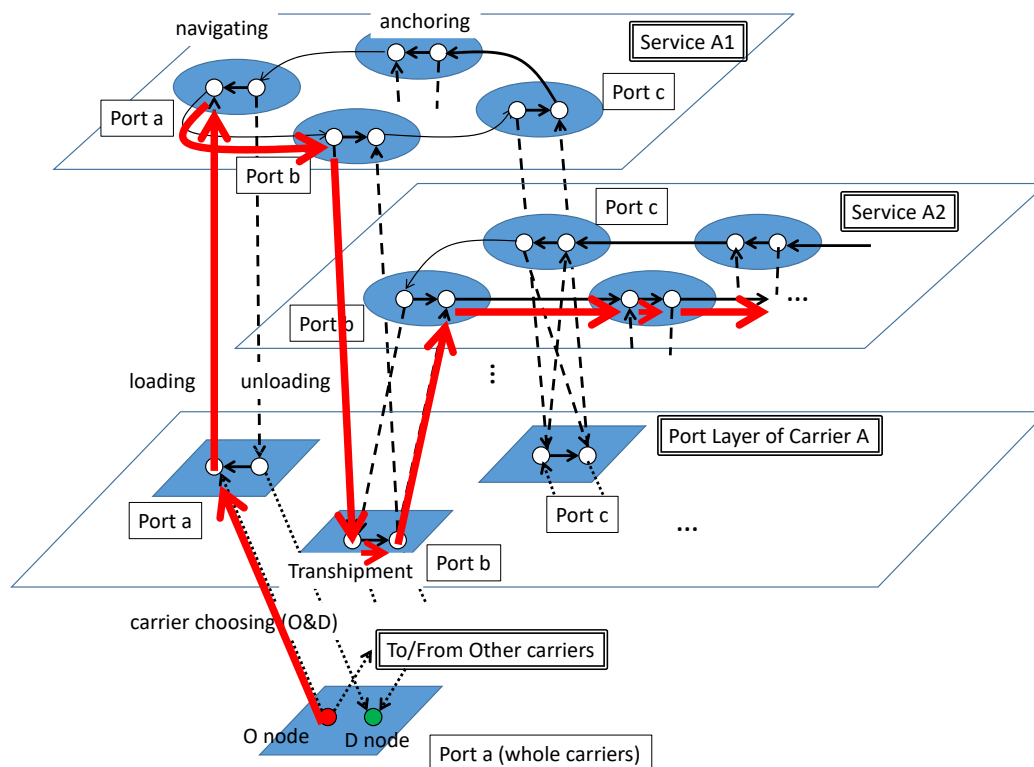


図 3.9 本モデルの海上コンテナ輸送ネットワークの構成（出典：柴崎，川崎 [31]）

図 3.9 が示すように、海上コンテナ輸送ネットワークは、各コンテナ運航船社が世界中で運航するコンテナ定期航路が、サービスごとに別のネットワークとして含まれる実ネットワークである。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、寄港順ごとにノードを別々に設定している。

本サブモデルでは、各コンテナは輸出港および輸入港が決まっている。下位モデルに含まれるリンクは、従来モデルと同様、以下の 6 つである。各港湾間で設定されるのは①のみであり、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 船社選択リンク（港湾における船社の選択を表す）

トランシップを行うときは積替リンクを経由する。本海上輸送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する（船社間トランシップは(3-2-40)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、途中の港湾で船社を跨ぐ積替は行われないと想定する。

海上輸送サブモデルは、3.2 節で述べた上位モデルにおいて算出された港湾間海上貨物輸送需要と、上述した国際海上コンテナ輸送サービスネットワークを所与とし、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 TM_{rs} を最短とするように経路が選択される。本サブモデルでも、上位モデルと同様、基本的に荷主の立場による経路選択を想定しているものの、実際の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。ただし、この船社による輸送経路選択においても、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）という条件下では、各船社が荷主に代わって（荷主にとってのベストな）選択を行っているとは仮定できる。

また、コンテナ船のキャパシティ（容量）を考慮すると、特定のサービスや船社に貨物が集中して混雑が発生することで、遅延や積み残しなどの発生（規模の不経済）が想定されることから、航走リンクにおいて、リンクフローに依存する混雑を考慮している。さらに、国際海上コンテナ貨物輸送市場は、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ることから、運賃については各船社同一となることを想定し、モデルの配分計算においては考慮しないものとする。運賃については、モデルの計算結果に基づいて、別途に各社共通の運賃を算出するものとする。以上は従来モデルと同様である。

ただし、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場合、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ことが考えられるため、Drewry Maritime Research [32]の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でいる。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している。

① 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よる混雑項を考慮する。航走リンクのコスト関数 $t_n(x_a)$ は、以下の式で表す。

$$t_n(x_a) = \left(\frac{l_a}{v_a} + \gamma S_a \times TS + \gamma P_a + TP \right) + TW_{a'} \times b1 \times \{lf_a(x_a)\}^{b2} \quad (3-3-1)$$

t_n : 航走リンクの所要時間 (hour)

l_a : リンク a の距離 (カイリ)

v_a : 船速 (ノット)

γS_a : スエズ運河通航のダミー変数 (スエズ運河を通過するときは 1, しないときは 0)

TS : スエズ運河の通過所要時間 (24hour と想定する)

γP_a : パナマ運河通航のダミー変数 (パナマ運河を通過するときは 1, しないときは 0)

TP : パナマ運河の通過所要時間 (24hour と想定する)

a' : 航走リンク a の出発港における船積リンク

$TW_{a'}$: 船積リンク a' における出港時の期待待ち時間 (hour)

lf_a : リンク a の年間平均消席率 (ロードファクター)

$b1, b2$: 海上混雑関数に関するパラメータ

(3-3-1)式は、混雑がない場合の航行時間を表す第 1 項と、混雑による追加航行時間を表す第 2 項からなる。混雑項は、年間平均消席率 lf_a のべき乗関数を期待待ち時間 $TW_{a'}$ に乗じることで、消席率が増加するほど混雑が加速的に発生することを表現している。

出港時の期待待ち時間 $TW_{a'}$ はサービスの運航間隔と考え、以下の式で表す。

$$TW_{a'} = \frac{1}{2} \times \frac{YH}{freq_a} \quad (3-3-2)$$

$freq_a$: 1 年間の運航隻数 (隻/年, 1 年間を 52 週とする)

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

また、年間平均消席率 lf_a は、1 年間で運航されるサービスの総容量に対し、実際に輸送される貨物の割合を表す値であり、以下の式で表す。

$$lf_a = \frac{x_a}{cap_a \times freq_a} \quad (3-3-3)$$

cap_a : 当該サービスに就航する船舶において当該船社の提供する平均容量 (TEU/隻)

② 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。いずれもサービスと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。すなわち、

$$t_l(x_a) = \frac{x_a}{d \cdot crane_a \cdot freq_a} + 1.0 + \frac{1}{2} \times \frac{YH}{freq_a} \quad (3-3-4)$$

$$t_u(x_a) = \frac{x_a}{d \cdot crane_a \cdot freq_a} + 1.0 \quad (3-3-5)$$

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)

$freq_a$: 1 年間での運航隻数 (隻/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 $\times$ 7 day $\times$ 24 hour = 8736 hour/年)

上記の通り, 船積時間および船卸時間は, 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.

$$crane_a = \frac{Vcap_a}{2000} \quad (3-3-6)$$

$Vcap_a$: 当該サービスに就航する船舶の平均容量 (TEU/隻)

また, 船卸リンクのコスト関数 $t_u(x_a)$ 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.

$$t_b(x_a) = t_l(x_{a'}) + t_u(x_{a''}) \quad (3-3-7)$$

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

③ 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.

$$t_t(x_a) = TRS_r \left\{ bp_1 \cdot \left(\frac{x_{all_r}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} \quad (3-3-8)$$

④ 船社選択リンク

船社選択リンクは, O ノードと各船社の港湾レイヤー, また各船社の港湾レイヤーと D ノード

を結び，船社，港湾ごとに設定される．港湾におけるリードタイム TPX_r , TPM_r は上位モデルで考慮するため，ここでは考慮しない．よって輸出時と輸入時のリンクコスト関数 $t_{cx}(x_a)$, $t_{cm}(x_a)$ は，船社選択が表現され，さらに船社を跨いだ流動が発生しないように O ノードと D ノードが区分されていればよいので，以下の式で表す．

$$t_{cx}(x_a) = t_{cm}(x_a) = SSN \quad (3-3-9)$$

SSN : 十分小さい数 (0.01 hour とする.)

以上で定義された各リンクコスト関数は，文献 [33] に示されるように，Frank-Wolfe のアルゴリズムを用いて解を求める．各リンクコスト関数は，リンクフロー x_a に対して増加関数か， x_a に依存しない関数であるため，唯一解が保証される．また，そのときのアウトプットである所要時間の総和が，上位モデルにおいて港湾 rs 間の海上輸送時間 TM_{rs} となる．つまり，以下の式が成り立つ．

$$TM_{rs} = \min_k \{ \sum_{a \in k} t(\hat{x}_a) \} \quad (3-3-10)$$

$\hat{x}_a$: リンク a を含む経路 k 上の各リンクフローの均衡解

一方，港湾 rs 間の海上輸送運賃 FO_{rs} は，本節冒頭で述べたように，船社によらず同一とする．具体的には，船社ごとに，輸出入港湾 rs 間の 1TEU あたりの平均輸送費用 (US\$/TEU) を求め，最も平均輸送費用の大きい船社の利潤がゼロとなるように， FO_{rs} を設定する．ここで，利潤は運賃から輸送費用を引いた値と定義する．

以上より，海上輸送運賃 FO_{rs} は以下の式で表す．

$$FO_{rs} = \max_{g \in G} AC_g^{rs} \quad (3-3-11)$$

$$TM_g^{rs} = \min_k \{ \sum_{a \in k} t(\hat{x}_a) \}, \forall k \in K_g^{rs} \quad (3-3-12)$$

(港湾 rs 間の船社 g の海上輸送時間 TM_g^{rs} が均衡解 TM_{rs} に等しい場合)

$$AC_g^{rs} = \sum_{a \in k_g} c(\hat{x}_a) \quad (3-3-13)$$

(港湾 rs 間の船社 g の海上輸送時間 TM_g^{rs} が均衡解 TM_{rs} より長い場合)

$$AC_g^{rs} = 0 \quad (3-3-14)$$

K_g^{rs} : 港湾 rs 間の船社 g の輸送経路集合

$c(.)$: 各リンクの 1TEU あたりの輸送費用 (US\$/TEU)

式(3-3-13)について、本モデルでは、港湾 rs 間の船社 g の海上輸送時間 TM_g^{rs} が均衡解 TM_{rs} より長い場合、船社 g は港湾 rs 間の輸送には参入しないものと想定する。

各船社の輸送経路 k_g については、利用者均衡配分において、コストが最小となる解が一意に定まらないため、輸送費用と輸送時間を合わせた一般化費用が最小となる経路を探索する。一般化費用を適用したのは、費用が安くとも極端に遠回りするような経路を除外するためである。よって以下の式で表す。

$$k_g = \arg[\min_k \{\sum_{a \in k} [c(\hat{x}_a) + vt \times t(\hat{x}_a)]\}], \forall k \in K_g^{rs} \quad (3-3-15)$$

以下に各リンクの 1TEU あたりの輸送費用 $c(.)$ の定義を示す。

① 航走リンク

航走リンクの輸送費用 $c_n(x_a)$ (US\$/TEU) は以下の式で表す。

$$c_n(x_a) = \left\{ (FC_a + CC_a + OC_a) \times \frac{l_a/v_a}{24} + \gamma S_a \times CS \right\} \times \frac{cap_a}{Vcap_a} \frac{x_a}{freq_a} + \gamma P_a \times CP \quad (3-3-16)$$

FC_a : コンテナ船の燃料費 (US\$/隻/day)

CC_a : コンテナ船の船費 (資本費) (US\$/隻/day)

OC_a : コンテナ船のその他の運航費 (US\$/隻/day)

CS : スエズ運河の通航費用 (US\$/隻)

CP : パナマ運河の通航費用 (US\$/TEU)

$Vcap_a$: 共同運航等も考慮した当該船舶の総キャパシティ (TEU)

実態に合わせ、スエズ運河通航費用は船舶サイズごと、パナマ運河通航費用はコンテナ単位で設定する。以下に各変数の定義を示す。

(a) 燃料費 FC_a

燃料費 FC_a は、以下の式で表す。

$$FC_a = FP \times FR_a \quad (3-3-17)$$

FP : 燃料価格 (US\$/トン, 2016 年の平均値の 204.7 (トン/日) を採用する)

FR_a : コンテナ船の燃費 (トン/day)

コンテナ船の燃費 FR_a は、船舶が海洋から受ける抵抗力に依存するので、定義式は以下のよう
に表す。

$$FR_a = c_1 \times DWT_a^{\frac{2}{3}} \times v_a^3 \quad (3-3-18)$$

c_1 : 船種に依存する係数 (柴崎, 川崎 [31] による回帰分析で $c_1 = 6.49 \times 10^{-6}$ と定める.)

DWT_a : コンテナ船の積載重量トン

(b) 船費 CC_a

船費 CC_a は以下の式で表す。

$$CC_a = VP_a \times \frac{ir}{\{1-(1+ir)^{-PP}\}} \times \frac{1}{365 \times ODR} \quad (3-3-19)$$

VP_a : コンテナ船の船価 (US\$/隻)

ir : 利子率

PP : 償却年数

ODR : 年間稼働率

$\frac{ir}{\{1-(1+ir)^{-PP}\}}$ は、複利計算下での年間支払率を意味する。また各変数はそれぞれ、 $ir = 0.02$, $PP = 15$ 年, $ODR = 0.9$ と想定する。

またコンテナ船の船価 VP_a は、積載重量トンに比例するものとして以下の式で表す。

$$VP_a = c_2 \times DWT_a + c_3 \quad (3-3-20)$$

c_2, c_3 は、船種に依存する係数であり、 c_1 と同様に、柴崎, 川崎 [31] による回帰分析で、 $c_2 = 8.37 \times 10^2$, $c_3 = 4.46 \times 10^6$ と定める。

(c) コンテナ船のその他の運航コスト OC_a

コンテナ船のその他の運航コスト OC_a は、人件費、保険、開発、営業費などから構成され、積載重量トンに比例するとして、以下の式で表す。

$$OC_a = c_4 \times DWT_a + c_5 \quad (3-3-21)$$

c_4, c_5 についても、船種に依存する係数で、同様に柴崎, 川崎 [31] による回帰分析で、

$c_2 = 6.66 \times 10^{-2}$, $c_3 = 3.98 \times 10^3$ と定める.

(d) スエズ運河通航費用 CS , パナマ運河通航費用 CP

一隻あたりのスエズ運河通航費用 CS は, 以下の式で表す.

$$CS = SDRrate \times \{c_6(scnrt_a) \times scnrt_a + c_7 \times (scnrt_a)\} \quad (3-3-21)$$

$SDRrate$: スエズ運河通航料徴収において用いられる通貨単位 SDR への変換率 (1.39US\$/SDR)

(SDR: IMF によって創設された主要通貨で構成される通貨単位)

$scnrt$: コンテナ船のスエズ運河純トン

c_6, c_7 : スエズ運河庁によって定められる係数 (以下の表 3.1 参照)

スエズ運河純トン $scnrt_a$ は以下の式で表す.

$$scnrt_a = 10.92 \times Vcap_a - 1137 \quad (3-3-22)$$

表 3.1 スエズ運河純トン $scnrt$ ごとに定められる c_6, c_7 の値

出典：スエズ運河庁

$scnrt$ from	to	c_6	c_7
0	5000	7.65	0
5000	10000	5.00	38,250
10000	20000	4.00	63,250
20000	40000	2.80	103,250
40000	70000	2.60	159,250
70000	120000	2.05	237,250
120000		1.95	339,750

また、一隻あたりのパナマ運河の通航費用 CP は、以下の式で表す。

$$CP = c_8 \quad (3-3-23)$$

c_8 : パナマ運河庁によって定められる係数 (72.0 US\$/TEU と設定)

② 港湾内リンク (船積リンク, 船卸リンク, 接岸リンク, 積替リンク, 船社選択リンク)

これらのリンクでは、港湾におけるターミナルハンドリングチャージや入港料などの諸料金を考慮する。しかし費目ごとの諸料金のデータを得るのは難しいため、費目は分けずに輸出、輸入、積替時の港湾料金を設定する。各費用関数は以下の式で表す。なお、船積リンクと船卸リンクでは、輸出入時における関税を考慮する。

$$c_l(x_a) = CB_{ex}^N \quad (3-3-24)$$

$$c_d(x_a) = CB_{im}^N \quad (3-3-25)$$

$$c_b(x_a) = SSN \quad (3-3-26)$$

$$c_r(x_a) = CR_r \quad (3-3-27)$$

$$c_{cx}(x_a) = CPX_a \quad (3-3-28)$$

$$c_{cm}(x_a) = CPM_a \quad (3-3-29)$$

c_l : 船積リンクの費用 (US\$/TEU)

c_d : 船卸リンクの費用 (US\$/TEU)

CB_{ex}^N, CB_{im}^N : 国 N において輸出入時における通関費用 (US\$/TEU)

c_b : 接岸リンクの費用 (US\$/TEU)

c_r : 積替リンクの費用 (US\$/TEU)

c_{cx} : 船社選択リンク (輸出) の費用 (US\$/TEU)

c_{cm} : 船社選択リンク (輸入) の費用 (US\$/TEU)

CB_{ex}^N および CB_{im}^N は、世界銀行の Doing Business データベースにおいて 2015 年 9 月に取得した値を用いている。

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。これを既定の計算回数になるまで繰り返す。ここで、(3-2-39)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。

3.4 本研究で使用するパラメータ

3.2 および 3.3 節で定義した式内のパラメータのうち、キャリブレーションによって決定したものを以下の表 3.2 および表 3.3 に示す。なお、 $b1$, $b2$, $C1$, $C2$, θ については、山口 [20]と同じ値を用いている。 β については、複数のフォワーダーの Web サイトに載っている貨物輸送価格表や、旅客機の航空券価格を複数の Web サイトで調べ、その平均から旅客と貨物の単位重量当たりの運賃比率を算出している柴崎 [22]と同じ値を用いている。

表 3.2 各パラメータの設定値

混雑関数										分散 パラメ ータ	旅客に対する 貨物の単位重 量当たり運賃 比率（航空輸 送）
海上		道路		鉄道		内航水運		港湾			
$b1$	$b2$	$b3$	$b4$	$b5$	$b6$	$b7$	$b8$	$C1$	$C2$	θ	β
3.0	4.0	2.0	6.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	4.0	0.01	2.4

表 3.3 各輸送機関の距離比例運賃（US\$/km）

距離比例運賃(US\$/km)		
道路 $CORo$	鉄道 $CORa$	内航水運 $COFe$
1.0	1.0	3.0

4 章 入力データ

4.1 国際海上コンテナ輸送ネットワーク

本モデルの国際海上輸送ネットワークは、山口 [20] と同じネットワークを採用している。山口 (2021) では、ASEAN を対象としているため、東南アジア地域の中小港湾が含まれているが、本研究が対象とする港湾についても含まれており、ネットワークの更新時間を短縮するため採用に至った。したがって OD 表についても山口 [20] のものを採用している。

4.2 陸上輸送ネットワーク

陸上輸送ネットワークについては、柴崎 [22] と同じネットワークを採用し、より実態に沿った分析を行うため、一部地域ではゾーン数を増加させている。ゾーン数については 4.5 節に詳述する。

航空輸送ネットワークについては、柴崎 [22] の方法に則り、陸上ネットワークと統合し、2016 年から 2018 年のネットワークへの更新を行った。

以上より、本モデルで対象とする陸上輸送ネットワークについては、航空輸送リンク及び空港内リンク（空港輸出入リンク、航空会社別出発・到着リンク、トランジットリンク）を除き、総ノード数は 18345 個、総リンク数は 20879 本である。

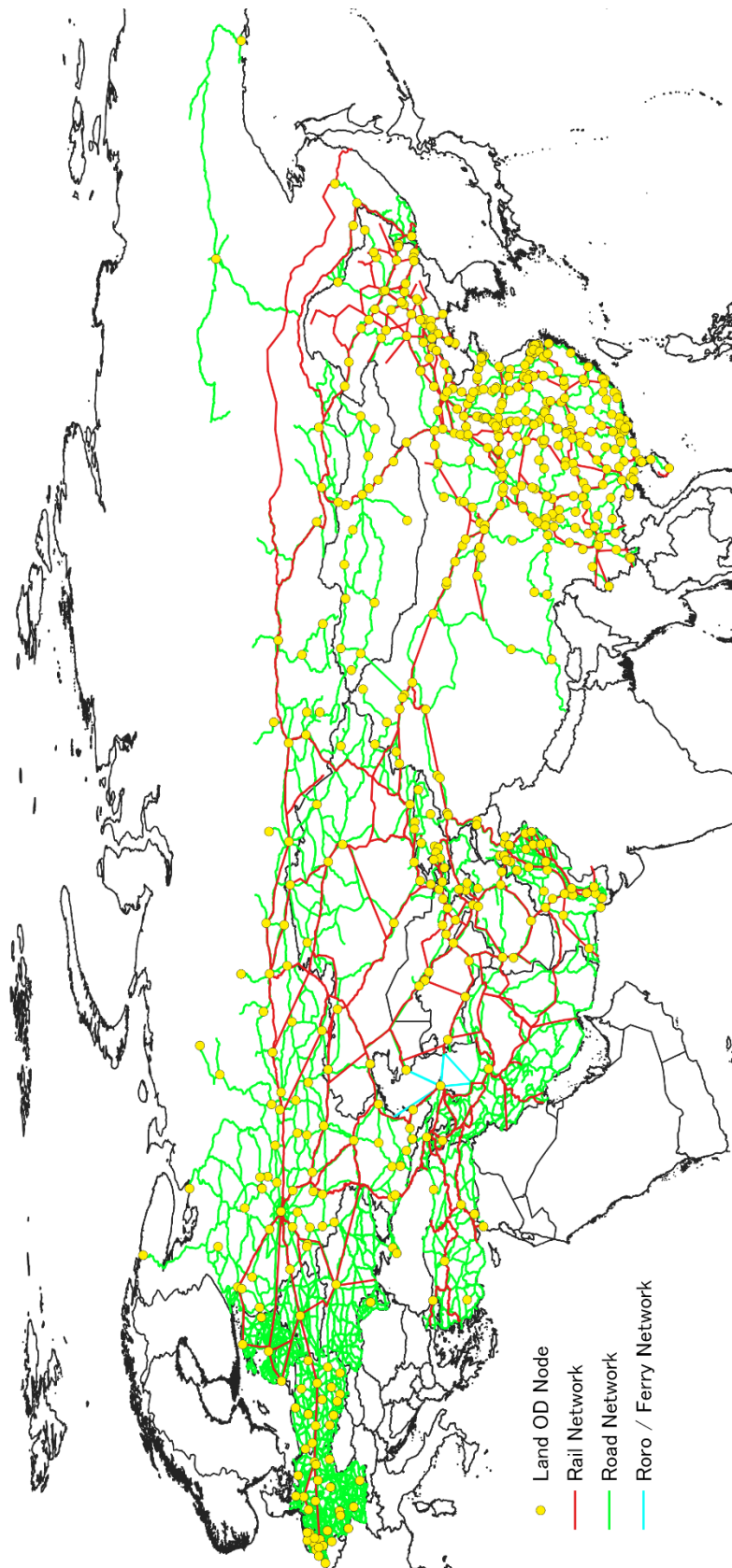


図 4.1 本モデルの陸上輸送ネットワーク図（筆者作成）

4.3 空港及び航空輸送ネットワーク

航空輸送ネットワークの設定については、ICAO の提供する TFS データ [28] を主に使用する。

TFS データは、格安航空会社（Low Cost Carrier : LCC）以外の航路情報を、全世界、全航空会社にわたって含んでいる。得られるデータは、各航路の出発・到着都市、データ十六年度、運航航空会社、使用機体（ベリー便、フレーター便の区別あり）、貨物・郵便・旅客の年間輸送実績・年間輸送実績容量（全て ton ベース）、貨物の年間輸送実績が年間貨物容量に占める割合、年間運航便数である。各航路の輸送速度は、「使用機体」情報から、複数の Web サイト、もしくは書籍を参考に設定した。

本モデルでは、2018 年度の TFS データを使用する。収録されている全航路、全空港（74465 航路、876 空港）をモデルの対象とした場合、航空輸送ネットワークがかなり複雑になり、モデル計算の収束や計算時間の過大につながる事が推測される。よって、柴崎 [22] 同様、年間運行頻度が 12 便以上（1 ヶ月 1 便以上）、年間貨物取扱量が 15,000 トン以上の空港を抽出した結果、全世界で 194 空港が選出された。本モデルでは、これら 194 空港を対象空港とする。対象航路については、その 194 空港間を発着する航路を抽出し、その中で発着都市・航空会社・便種別（ベリー便 or フレーター便）が同じ航路を統合し、最終的に抽出された 7741 本を本モデルの航空輸送リンクとした。本モデルの航空輸送ネットワークを図 4.2 に示す。航路統合の際、輸送容量、運行頻度は合計値、輸送速度は平均値を設定した。また、航空会社については、分類の簡素化のために三大アライアンス（Star Alliance, One World, Sky Team）に所属している航空会社は同一航空会社として扱うが、柴崎 [22] と同じく、本モデルでは各航空会社間の貨物輸送のアライアンスについて、詳細までは考慮しないこととする。

続いて、TFS データに含まれていない各航路の輸送距離の算出について説明する。TFS データに含まれる各空港の緯度経度情報を利用し、地球上の 2 地点間距離の計算に一般的に用いられることの多い「ヒュベニの公式」を用いる。「ヒュベニの公式」を用いる際には、本初子午線を跨ぐ航路の距離計算に注意が必要である。「ヒュベニの公式」では、(4-3-1) ～ (4-3-4) で表される通り、2 地点間の経度差を利用するため、本初子午線を跨ぐ航路の場合、鈍角側の経度差が利用されてしまう恐れがある。よって、本モデルにおいて、本初子午線を跨ぐ航路の距離計算を行う場合、2 地点を、本初子午線を跨がない地点へ平行移動させてから距離計算を行う処理を加えた。公式を以下に示す。

$$d = \sqrt{(d_x \times N \times \cos Y_{ave})^2 + (d_y \times M)^2} \quad (4-3-1)$$

$$s.t. \quad M = \frac{R_x(1-E^2)}{\{1-(E \times \sin Y_{ave})^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (4-3-2)$$

$$N = \frac{R_x}{\sqrt{1-(E \times \sin Y_{ave})^2}} \quad (4-3-3)$$

$$E = \sqrt{\frac{R_x^2 - R_y^2}{R_x^2}} \quad (4-3-4)$$

d : 2 地点間の距離

d_x : 2 地点の経度（ラジアン）の差

d_y : 2 地点の緯度（ラジアン）の差

Y_{ave} : 2 地点の緯度（ラジアン）の平均

M : 子午線曲率半径

N : 卯酉線曲率半径

E : 離心率

R_x : 赤道半径（WGS84 測地系で 6,378,137m）

R_y : 極半径（WGS84 測地系で 6,356,752m）

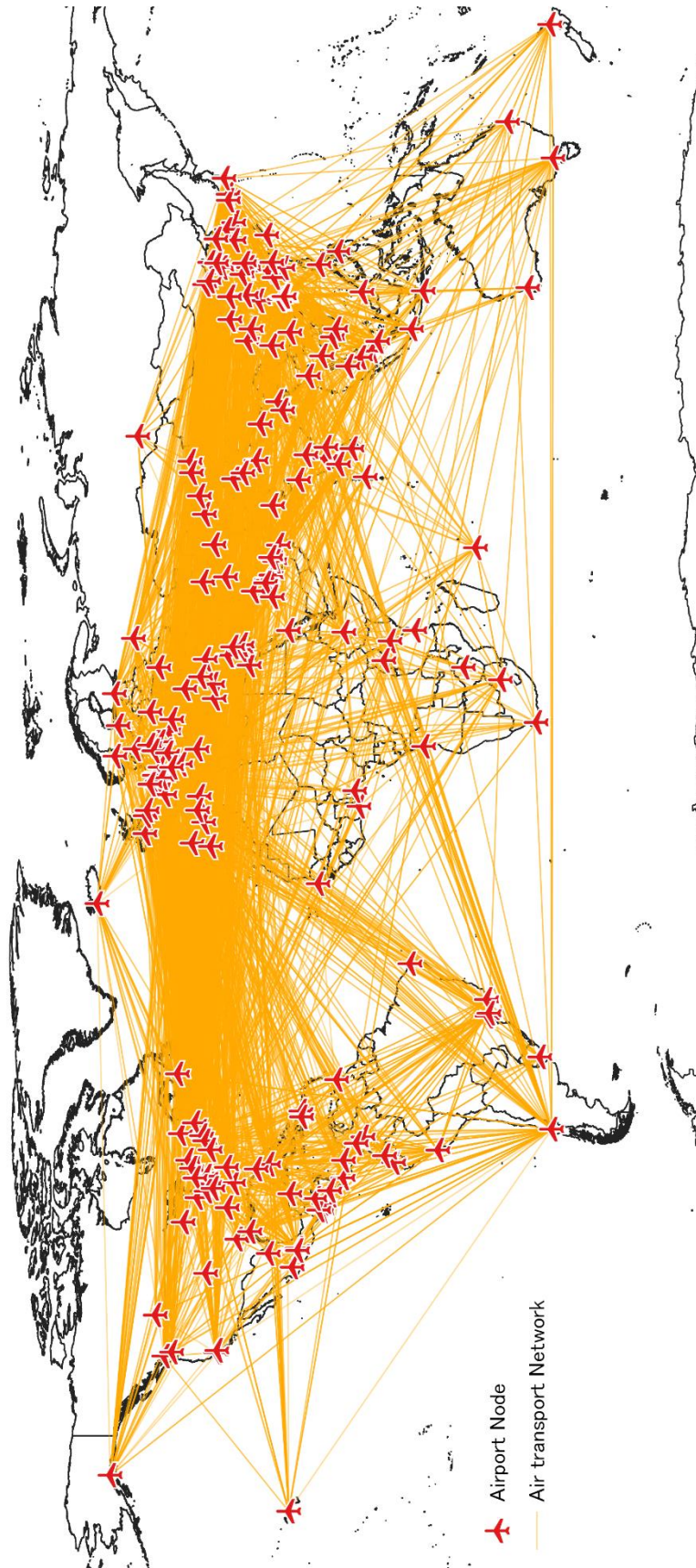


図 4.2 本モデルの航空輸送ネットワーク図（筆者作成）

3-2-1 節の航空会社別出発・到着リンクで考慮する空港使用料 $CCHAp^{4p}$ は、柴崎 [22] と同じく Review of Airport Charges 2016 [34] を用いて推計した。Review of Airport Charges 2016 [34] には世界の主要な 50 空港について、SDR ベースの空港使用料（旅客 1 人あたり）が記載されている。Review of Airport Charges 2016 [34] に記載されている主要 50 空港の旅客一人当たりの空港使用料（SDR ベース）について、表 4.1 に示す。本モデルが対象とする空港の中で Review of Airport Charges 2016 [34] に収録されている空港については、旅客 1 人あたり平均 55kg としたうえで、ton に換算し、さらに 10ton を 1 TEU として、最終的な 1 TEU あたりの空港使用料を推計した。一方、収録されていない空港については、空港使用料の定量的なデータを入手することは困難であるため、Review of Airport Charges 2016 [34] に収録されている 50 空港の空港使用料より算出した推計値の平均値を適用した。

以上より、本モデルで対象とする 194 空港の各空港使用料推計値を表 4.2 に示す。対象空港の少ない研究では、各空港の Web サイトなどから空港使用料を取得している例も見受けられるが、本研究では対象空港が多いため、上述した方法で空港使用料を推計している。しかし、さらなる精度の向上には、各空港の空港使用料を収録した網羅的なデータベースの取得が必要であることは明白であり、今後の課題である。

表 4.1 主要 50 空港の旅客一人当たりの空港使用料（SDR ベース）

出典：Review of Airport Charges 2016 [34]

AIRPORT	SDR	INDEX	AIRPORT	SDR	INDEX
1 London-LHR	47.56	100	26 Prague	23.97	50
2 New Jersey-EWR	43.13	91	27 Johannesburg	23.76	50
3 Moscow Sheremetyevo	38.51	81	28 Brussels	23.74	50
4 Toronto	36.85	77	29 Dublin	23.34	49
5 Osaka Kansai	36.34	76	30 Delhi	23.23	49
6 Frankfurt	35.25	74	31 Dusseldorf	22.99	48
7 New York-JFK	35.04	74	32 Los Angeles	22.88	48
8 Zurich	34.23	71	33 Mumbai	22.49	47
9 Athens	33.69	70	34 Copenhagen	22.38	47
10 Budapest	33.19	69	35 Miami	22.23	47
11 Rome Fiumicino	32.96	69	36 Amsterdam	22.22	47
12 Tokyo Narita	30.67	64	37 Cancun	21.69	46
13 Auckland	30.16	63	38 San Francisco	20.23	43
14 Sydney	29.87	63	39 London-LGW	19.39	41
15 Paris-CDG	29.80	63	40 Bangkok	19.22	40
16 Vancouver	29.46	62	41 Warsaw	17.73	37
17 Mexico City	29.40	62	42 Dubai	17.33	36
18 Sao Paulo	28.76	60	43 Singapore	17.29	36
19 Milan Malpensa	27.46	58	44 Seoul Incheon	16.94	36
20 Vienna	27.27	57	45 Stockholm	16.20	34
21 Berlin Tegel	26.50	56	46 Helsinki	15.52	33
22 Madrid	26.47	56	47 Jakarta	14.82	31
23 Beijing	25.69	54	48 Oslo	13.16	28
24 Washington	25.12	53	49 Hong Kong	12.65	27
25 Lisbon	24.26	51	50 Kuala Lumpur	10.96	23

表 4.2 本モデルの対象空港および各空港使用料の推計値

ID	Airport Name	Country	Code (ICAO)	空港使用料 (US\$/TEU)
1	LUANDA	ANGOLA	FNLU	6001.964271
2	BUENOS AIRES	ARGENTINA	MRBA	6001.964271
3	BRISBANE	AUSTRALIA	YBAF	6001.964271
4	MELBOURNE	AUSTRALIA	YMEN	6001.964271
5	PERTH	AUSTRALIA	YPJT	6001.964271
6	SYDNEY	AUSTRALIA	CYQY	7580.983346
7	VIENNA	AUSTRIA	LOWW	6920.481546
8	BAKU	AZERBAIJAN	UBBB	6001.964271
9	BAHRAIN	BAHRAIN	OBBI	6001.964271
10	DHAKA	BANGLADESH	VGJT	6001.964271
11	BRUSSELS	BELGIUM	EBBR	6025.712215
12	LIEGE	BELGIUM	EBLG	6001.964271
13	CAMPINAS	BRAZIL	SBKP	6001.964271
14	NATAL	BRAZIL	SBSG	6001.964271
15	RIO DE JANEIRO	BRAZIL	SBAF	6001.964271
16	SAO PAULO	BRAZIL	SBGR	7300.471727
17	BANDAR SERI BEGAWAN	BRUNEI DARUSSALAM	WBSB	6001.964271
18	PHNOM-PENH	CAMBODIA	VDPP	6001.964271
19	CALGARY	CANADA	CYYC	6001.964271
20	MONTREAL	CANADA	CYHU	6001.964271
21	TORONTO	CANADA	CYKZ	9352.239462
22	VANCOUVER	CANADA	CYVR	7476.486046
23	SANTIAGO	CHILE	LEST	6001.964271
24	BEIJING	CHINA	ZBAA	6521.133375
25	CHANGSHA	CHINA	ZGCS	6001.964271
26	CHENGDU	CHINA	ZUUU	6001.964271
27	CHONGQING	CHINA	ZUCK	6001.964271
28	DALIAN	CHINA	ZYTL	6001.964271
29	FUZHOU	CHINA	ZSFZ	6001.964271
30	GUANGZHOU	CHINA	ZGGG	6001.964271
31	HANGZHOU	CHINA	ZSHC	6001.964271
32	KUNMING	CHINA	ZPPP	6001.964271
33	MACAU	CHINA	VMMC	6001.964271
34	NANJING	CHINA	ZSNJ	6001.964271
35	QINGDAO	CHINA	ZSQD	6001.964271
36	SHANGHAI	CHINA	ZSSS	6001.964271
37	SHENZHEN	CHINA	ZGSZ	6001.964271
38	TIANJIN	CHINA	ZBTJ	6001.964271
39	WUHAN	CHINA	ZHHH	6001.964271
40	XIAMEN	CHINA	ZSAM	6001.964271
41	XI'AN	CHINA	ZLXY	6001.964271
42	YANTAI	CHINA	ZSYT	6001.964271
43	ZHENGZHOU	CHINA	ZHCC	6001.964271
44	BOGOTA	COLOMBIA	SKBO	6001.964271
45	MEDELLIN	COLOMBIA	SKMD	6001.964271
46	SAN JOSE	COSTA RICA	MGJ	6001.964271
47	LARNACA	CYPRUS	LCLK	6001.964271
48	PRAGUE	CZECHIA	LKPR	6082.531501
49	COPENHAGEN	DENMARK	EKCH	5679.598517
50	PUNTA CANA	DOMINICAN REPUBLIC	MDPC	6001.964271
51	SANTO DOMINGO	DOMINICAN REPUBLIC	MDSD	6001.964271
52	GUAYAQUIL	ECUADOR	SEGU	6001.964271
53	QUITO	ECUADOR	SEQM	6001.964271
54	CAIRO	EGYPT	HECA	6001.964271
55	SAN SALVADOR	EL SALVADOR	MSLP	6001.964271
56	ADDIS ABABA	ETHIOPIA	HAAB	6001.964271
57	HELSINKI	FINLAND	EFHF	3938.813312
58	PARIS	FRANCE	LFPB	7562.163078
59	BERLIN	GERMANY	EDDB	6726.543161
60	COLOGNE	GERMANY	EDDK	6001.964271
61	DUSSELDORF	GERMANY	EDDL	5834.641681
62	FRANKFURT	GERMANY	EDDF	8945.363184
63	LEIPZIG	GERMANY	EDDP	6001.964271
64	MUNICH	GERMANY	EDDM	6001.964271

65	ACCRA	GHANA	DGAA	6001.964271
66	ATHENS	GREECE	LGAV	8423.235166
67	GUATEMALA CITY	GUATEMALA	MGGT	6001.964271
68	SAN PEDRO SULA	HONDURAS	MHLM	6001.964271
69	HONG KONG	HONG KONG	VHHH	6001.964271
70	BUDAPEST	HUNGARY	LHBP	8364.623473
71	REYKJAVIK	ICELAND	BIRK	6001.964271
72	BANGALORE	INDIA	VOBL	6001.964271
73	CHENNAI	INDIA	VOMM	6001.964271
74	COCHIN	INDIA	VOCI	6001.964271
75	DELHI	INDIA	VIDD	5896.658946
76	HYDERABAD	INDIA	VOHY	6001.964271
77	KOLKATA	INDIA	VECC	6001.964271
78	MUMBAI	INDIA	VABB	5707.380818
79	DENPASAR BALI	INDONESIA	WADD	6001.964271
80	JAKARTA	INDONESIA	WIII	3760.289623
81	TEHRAN	IRAN (ISLAMIC REPUBLIC OF)	OIIE	6001.964271
82	DUBLIN	IRELAND	EIDW	5923.903525
83	TEL AVIV	ISRAEL	LLBG	6001.964271
84	MILAN	ITALY	LIML	6969.055763
85	ROME	ITALY	LIRA	8687.794368
86	FUKUOKA	JAPAN	RJFF	6001.964271
87	NAGOYA	JAPAN	RJGG	6001.964271
88	OKINAWA	JAPAN	ROAH	6001.964271
89	OSAKA	JAPAN	RJOO	9221.931508
90	TOKYO	JAPAN	RJAA	7784.063004
91	AMMAN	JORDAN	OJAI	6001.964271
92	ALMATY	KAZAKHSTAN	UAAA	6001.964271
93	NAIROBI	KENYA	HKNW	6001.964271
94	KUWAIT	KUWAIT	OKBK	6001.964271
95	BISHKEK	KYRGYZSTAN	UAFM	6001.964271
96	BEIRUT	LEBANON	OLBA	6001.964271
97	LUXEMBOURG	LUXEMBOURG	ELLX	6001.964271
98	KUALA LUMPUR	MALAYSIA	WMKK	2781.277186
99	PENANG	MALAYSIA	WMKP	6001.964271
100	MALE	MALDIVES	VRMM	6001.964271
101	MAURITIUS	MAURITIUS	FIMP	6001.964271
102	CANCUN	MEXICO	MMUN	5505.914326
103	GUADALAJARA	MEXICO	MMGL	6001.964271
104	MEXICO CITY	MEXICO	MMMX	7460.89211
105	MONTERREY	MEXICO	MMAN	6001.964271
106	TOLUCA	MEXICO	MMTO	6001.964271
107	YANGON	MYANMAR	VYYY	6001.964271
108	KATHMANDU	NEPAL	VNKT	6001.964271
109	AMSTERDAM	NETHERLANDS	EHAM	5639.448611
110	AUCKLAND	NEW ZEALAND	NZAA	7653.934291
111	MANAGUA	NICARAGUA	MNMG	6001.964271
112	LAGOS	NIGERIA	DNMM	6001.964271
113	OSLO	NORWAY	ENGM	3341.04574
114	MUSCAT	OMAN	OOMS	6001.964271
115	ISLAMABAD	PAKISTAN	OPRN	6001.964271
116	KARACHI	PAKISTAN	OPKC	6001.964271
117	LAHORE	PAKISTAN	OPLA	6001.964271
118	PANAMA CITY	PANAMA	MPTO	6001.964271
119	LIMA	PERU	SPIM	6001.964271
120	CEBU	PHILIPPINES	RPVM	6001.964271
121	MANILA	PHILIPPINES	RPLL	6001.964271
122	WARSAW	POLAND	EPBC	4500.374272
123	LISBON	PORTUGAL	LPPT	6158.350297
124	DOHA	QATAR	OTBD	6001.964271
125	BUSAN	REPUBLIC OF KOREA	RKPK	6001.964271
126	JEJU	REPUBLIC OF KOREA	RKPC	6001.964271
127	SEOUL	REPUBLIC OF KOREA	RKSS	4299.445502
128	BUCHAREST	ROMANIA	LRBS	6001.964271
129	MOSCOW	RUSSIAN FEDERATION	UUEE	9775.068158
130	NOVOSIBIRSK	RUSSIAN FEDERATION	UNNT	6001.964271
131	DAMMAM	SAUDI ARABIA	OEDF	6001.964271
132	JEDDAH	SAUDI ARABIA	OEJF	6001.964271
133	RIYADH	SAUDI ARABIA	OERK	6001.964271
134	DAKAR	SENEGAL	GOOY	6001.964271
135	SINGAPORE	SINGAPORE	WSSL	4389.424309

136	CAPE TOWN	SOUTH AFRICA	FACT	6001.964271
137	JOHANNESBURG	SOUTH AFRICA	FAGC	6030.193231
138	BARCELONA	SPAIN	LEBL	6001.964271
139	MADRID	SPAIN	LEGT	6719.015054
140	ZARAGOZA	SPAIN	LEZG	6001.964271
141	COLOMBO	SRI LANKA	VCBI	6001.964271
142	STOCKHOLM	SWEDEN	ESKB	4112.497503
143	ZURICH	SWITZERLAND	LSZH	8551.571473
144	KAOHSIUNG	TAIWAN PROVINCE OF CHINA	RCKH	6001.964271
145	TAIPEI	TAIWAN PROVINCE OF CHINA	RCSS	6001.964271
146	BANGKOK	THAILAND	VTBD	4878.034325
147	PHUKET	THAILAND	VTSP	6001.964271
148	PORT OF SPAIN	TRINIDAD & TOBAGO	TTPP	6001.964271
149	ANKARA	TURKEY	LTAB	6001.964271
150	ISTANBUL	TURKEY	LTBA	6001.964271
151	IZMIR	TURKEY	LTBJ	6001.964271
152	SABIHA GOKCEN	TURKEY	LTBA	6001.964271
153	ASHKHABAD	TURKMENISTAN	UTAA	6001.964271
154	ENTEBBE	UGANDA	HUEN	6001.964271
155	KYIV	UKRAINE	UKBB	6001.964271
156	ABU DHABI	UNITED ARAB EMIRATES	OMAA	6001.964271
157	DUBAI	UNITED ARAB EMIRATES	OMDB	4398.744823
158	SHARJAH	UNITED ARAB EMIRATES	OMSJ	6001.964271
159	LONDON	UNITED KINGDOM	CYXU	12070.2447
160	MANCHESTER	UNITED KINGDOM	EGCC	6001.964271
161	NOTTINGHAM (EMA)	UNITED KINGDOM	EGBN	6001.964271
162	DAR ES SALAAM	UNITED REPUBLIC OF TANZANIA	HTDA	6001.964271
163	ANCHORAGE	UNITED STATES	PAMR	6001.964271
164	ATLANTA	UNITED STATES	KATL	6001.964271
165	BOSTON	UNITED STATES	KBOS	6001.964271
166	CHARLOTTE	UNITED STATES	KCLT	6001.964271
167	CHICAGO	UNITED STATES	KMDW	6001.964271
168	CINCINNATI	UNITED STATES	KCVG	6001.964271
169	COLUMBUS	UNITED STATES	KLCK	6001.964271
170	DALLAS-FORT WORTH	UNITED STATES	KDFW	6001.964271
171	DENVER	UNITED STATES	KDEN	6001.964271
172	DETROIT	UNITED STATES	KDTW	6001.964271
173	HONOLULU	UNITED STATES	PHNL	6001.964271
174	HOUSTON	UNITED STATES	KIAH	6001.964271
175	INDIANAPOLIS	UNITED STATES	KIND	6001.964271
176	LOS ANGELES	UNITED STATES	SCGE	6001.964271
177	LOUISVILLE	UNITED STATES	KLOU	6001.964271
178	MEMPHIS	UNITED STATES	KMEM	6001.964271
179	MIAMI	UNITED STATES	KMIA	6001.964271
180	MINNEAPOLIS	UNITED STATES	KMSP	6001.964271
181	NEW YORK	UNITED STATES	KLGA	6001.964271
182	OAKLAND	UNITED STATES	KOAK	6001.964271
183	ORLANDO	UNITED STATES	KORL	6001.964271
184	PHILADELPHIA	UNITED STATES	KPNE	6001.964271
185	SAN FRANCISCO	UNITED STATES	KSFO	6001.964271
186	SAN JOSE	UNITED STATES	KSJC	6001.964271
187	SEATTLE	UNITED STATES	KSEA	6001.964271
188	WASHINGTON	UNITED STATES	KDCA	6001.964271
189	MONTEVIDEO	URUGUAY	SUAA	6001.964271
190	NAVOI	UZBEKISTAN	UTSA	6001.964271
191	TASHKENT	UZBEKISTAN	UTTT	6001.964271
192	HANOI	VIET NAM	VVGL	6001.964271
193	HO CHI MINH CITY	VIET NAM	VVTS	6001.964271
194	HARARE	ZIMBABWE	FVCP	6001.964271

4.4 国別の通関所要日数及び費用

国別の通関所要日数及び費用については、柴崎 [22]で使用している値を用いている。原則として世界銀行の Doing Business データベースから取得した値を使用しているが、現在、Doing Business データベースでは、国別通関所要日数及び費用のデータを取得できないという問題がある。データの取得ができない国の対応として、柴崎 [22]では、Shibasaki et al. [19]のデータより、地域ごとの通関所要日数及び費用の平均値を算出し、各国に適応している。各国の通関所要日数及び費用の一覧を表 4.3 に示す。

Table 4-3 国別の通関所要日数および費用

Country	region	越境書類 準備日数	越境税関 手続日数	越境書類 準備日数	越境税関 手続日数	越境書類 準備費用	越境税関 手続費用	越境書類 準備費用	越境税関 手続費用
		(輸出)	(輸出)	(輸入)	(輸入)	(輸出)	(輸出)	(輸入)	(輸入)
JAPAN	east asia	5	2	5	2	120	75	140	135
REPUBLIC OF KOREA	east asia	3	1	2	1	55	15	65	30
DEM. PEOPLE'S REP. OF KOREA	east asia	10	2	10	2	151	72	153	83
MONGOLIA	east asia	28	2	28	4	145	160	110	150
CHINA	east asia	14	2	15	4	305	80	260	80
HONG KONG	east asia	2	1	2	1	105	0	100	0
TAIWAN PROVINCE OF CHINA	east asia	5	1	5	1	175	100	240	100
PHILIPPINES	east south asia	8	2	8	2	105	85	90	185
VIET NAM	east south asia	12	4	12	4	160	100	130	95
LAO PEOPLE'S DEM. REP.	east south asia	15	2	13	7	290	150	205	195
CAMBODIA	east south asia	14	3	15	3	220	275	225	280
THAILAND	east south asia	8	1	8	2	175	50	135	255
MALAYSIA	east south asia	5	1	3	1	85	60	120	60
SINGAPORE	east south asia	2	1	1	1	120	50	100	50
MYANMAR	east south asia	12	3	10	4	175	80	165	80
INDONESIA	east south asia	11	1	13	4	165	125	210	125
BRUNEI DARUSSALAM	east south asia	10	2	9	3	166	108	153	147
TIMOR-LESTE	east south asia	10	2	9	3	166	108	153	147
BANGLADESH	south asia	14	3	22	3	225	150	370	150
NEPAL	south asia	14	4	14	5	295	300	250	300
INDIA	south asia	8	2	8	4	420	144	468	144
SRI LANKA	south asia	12	2	11	2	135	160	190	285
PAKISTAN	south asia	11	3	11	2	96	200	130	200
RUSSIAN FEDERATION	Europe	13	1	12	2	200	550	285	650
KAZAKHSTAN	central asia	21	9	21	9	330	425	310	425
UZBEKISTAN	central asia	31	5	46	8	285	200	335	200
TURKMENISTAN	central asia	30	30	30	30	240	240	240	240
TAJKISTAN	central asia	20	3	20	4	700	550	580	420
KYRGYZSTAN	central asia	23	3	25	11	210	300	280	420
AFGHANISTAN	central asia	44	8	49	7	570	300	680	300
UNITED STATES	north america	2	1	2	1	230	60	205	90
CANADA	north america	4	1	3	1	295	35	205	75
MEXICO	north america	5	2	4	2	200	150	290	200
COSTA RICA	central america	6	2	7	2	240	105	215	155
EL SALVADOR	central america	7	2	8	3	243	100	236	171
GUATEMALA	central america	7	2	8	3	243	100	236	171
PANAMA	central america	5	1	6	1	160	50	150	200
BELIZE	central america	7	2	8	3	243	100	236	171
HONDURAS	central america	8	2	8	4	260	135	255	130
NICARAGUA	central america	10	3	11	4	310	110	325	200
DOMINICAN REPUBLIC	Caribbean	3	2	5	2	215	200	235	200
BAHAMAS	Caribbean	10	3	7	3	375	130	300	220
JAMAICA	Caribbean	10	4	10	3	450	235	490	550
CUBA	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
PERU	south america	5	2	7	3	150	130	150	185
CHILE	south america	7	2	5	2	220	100	170	100
BOLIVIA	south america	10	3	16	4	354	260	368	313
ECUADOR	south america	10	4	15	4	375	200	350	250
COLOMBIA	south america	5	2	6	2	300	350	250	170
VENEZUELA	south america	34	7	54	10	690	500	695	700
ARGENTINA	south america	6	2	22	3	450	150	610	400
BRAZIL	south america	6	3	8	4	325	400	275	450
URUGUAY	south america	8	2	7	3	325	250	440	250
PARAGUAY	south america	10	3	16	4	354	260	368	313
SURINAME	south america	10	3	16	4	354	260	368	313
GUYANA	south america	10	3	16	4	354	260	368	313
IRAN (ISLAMIC REPUBLIC OF)	western asia	12	2	24	2	270	175	330	220
BAHRAIN	western asia	6	2	8	3	380	70	380	110
IRAQ	western asia	50	13	50	15	1,050	700	1,150	700
KUWAIT	western asia	11	3	13	4	320	183	354	206
QATAR	western asia	11	3	13	4	320	183	354	206
UNITED ARAB EMIRATES	western asia	4	1	4	1	230	30	190	30
SAUDI ARABIA	western asia	6	1	6	6	145	115	135	200
OMAN	western asia	5	1	5	1	285	65	250	65
JORDAN	western asia	6	2	8	3	135	80	385	65
ISRAEL	western asia	4	1	4	1	110	110	120	70
LEBANON	western asia	11	3	16	6	370	285	315	400
TURKEY	western asia	6	2	8	2	220	200	280	200
ARMENIA	Europe	9	1	9	2	260	75	190	135
AZERBAIJAN	Europe	15	4	14	3	515	425	535	425
GEORGIA	Europe	4	1	5	1	255	200	255	240
GREECE	Europe	11	1	8	2	160	230	140	265
ITALY	Europe	11	2	10	2	180	145	130	145
PORTUGAL	Europe	7	1	6	1	195	125	200	265
SPAIN	Europe	4	1	4	2	30	18	30	18
ALBANIA	Europe	11	2	12	2	130	65	115	65
BULGARIA	Europe	12	2	9	2	200	50	150	70
CROATIA	Europe	8	3	9	2	360	70	215	70
CYPRUS	Europe	7	2	7	2	217	119	235	135

ROMANIA	Europe	7	1	8	1	410	75	420	75
SLOVENIA	Europe	10	1	9	1	135	60	195	85
MOROCCO	Africa	6	1	10	2	125	100	300	150
WESTERN SAHARA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
TUNISIA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
NORTH MACEDONIA	Europe	4	1	4	1	86	50	80	60
MONTENEGRO	Europe	4	3	6	3	190	30	225	30
SERBIA	Europe	4	3	6	3	190	30	225	30
BOSNIA AND HERZEGOVINA	Europe	11	3	13	4	314	200	338	234
ALGERIA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
EGYPT	Africa	7	1	8	2	125	100	210	100
LIBYA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
MALTA	Europe	6	1	4	2	280	50	260	50
AUSTRIA	Europe	3	1	3	1	130	60	145	60
BELGIUM	Europe	3	1	4	1	190	100	270	100
DENMARK	Europe	3	1	2	1	255	75	205	75
FINLAND	Europe	4	1	3	1	170	85	180	85
FRANCE	Europe	4	1	5	1	310	80	300	150
GERMANY	Europe	4	1	3	1	175	30	185	55
UNITED KINGDOM	Europe	3	1	2	1	175	75	180	75
IRELAND	Europe	5	1	5	1	205	185	165	70
LUXEMBOURG	Europe	3	2	2	2	305	120	300	120
NETHERLANDS	Europe	4	1	3	1	160	90	220	90
SWEDEN	Europe	3	1	2	1	120	55	130	55
SWITZERLAND	Europe	11	3	13	4	314	200	338	234
CZECHIA	Europe	9	1	8	1	165	55	140	55
HUNGARY	Europe	6	2	9	1	175	70	115	70
POLAND	Europe	10	1	9	1	145	65	120	65
SLOVAKIA	Europe	7	2	8	2	235	55	215	55
ESTONIA	Europe	3	1	2	1	220	25	200	25
LATVIA	Europe	5	1	4	2	200	100	315	100
LITHUANIA	Europe	4	1	3	1	100	60	130	70
UKRAINE	Europe	22	1	20	2	250	300	555	350
BELARUS	Europe	8	1	22	1	160	160	565	200
REPUBLIC OF MOLDOVA	Europe	11	3	13	4	314	200	338	234
NORWAY	Europe	11	3	13	4	314	200	338	234
ICELAND	Europe	7	2	7	2	217	119	235	135
GAMBIA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
GUINEA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
GUINEA-BISSAU	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
LIBERIA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
MALI	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
MAURITANIA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
SENEGAL	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
SIERRA LEONE	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
TOGO	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
GHANA	Africa	10	4	26	5	125	150	310	450
COTE D'IVOIRE	Africa	15	5	19	7	290	200	410	300
BURKINA FASO	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
NIGERIA	Africa	12	3	14	12	280	350	330	360
NIGER	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
BENIN	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
CAMEROON	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
CENTRAL AFRICAN REPUBLIC	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
CHAD	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
CONGO	Africa	32	8	34	10	790	400	690	400
EQUATORIAL GUINEA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
GABON	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
ANGOLA	Africa	25	5	25	7	560	400	825	400
DEM. REP. OF THE CONGO	Africa	25	5	13	10	270	400	575	400
SUDAN	Africa	25	5	25	7	270	400	575	400
ETHIOPIA	Africa	8	2	13	5	230	170	575	125
ERITREA	Africa	25	5	25	7	270	400	575	400
DJIBOUTI	Africa	13	2	11	2	295	170	320	170
SOMALIA	Africa	25	5	25	7	270	400	575	400
BURUNDI	Africa	8	2	13	5	230	170	250	250
KENYA	Africa	12	4	11	3	305	375	250	510
MADAGASCAR	Africa	15	2	14	3	200	270	190	315
MALAWI	Africa	8	2	11	2	270	170	490	125
MAURITIUS	Africa	5	1	5	1	285	75	295	100
MOZAMBIQUE	Africa	12	2	16	2	230	250	490	340
RWANDA	Africa	12	4	11	2	230	170	250	125
UGANDA	Africa	8	2	11	5	230	170	575	250
UNITED REPUBLIC OF TANZANIA	Africa	8	4	13	5	270	250	575	250
ZAMBIA	Africa	8	2	11	2	270	250	490	250
ZIMBABWE	Africa	8	2	11	2	230	250	490	250
BOTSWANA	Africa	8	2	7	2	230	250	490	250
SOUTH AFRICA	Africa	8	2	7	2	355	65	405	125
NAMIBIA	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
AUSTRALIA	Oceania	5	1	3	1	285	65	200	170
NEW ZEALAND	Oceania	5	1	5	1	220	50	175	50
PAPUA NEW GUINEA	Oceania	5	1	4	1	253	58	188	110
BARBADOS	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
HAITI	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
TRINIDAD & TOBAGO	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
REUNION	Africa	5	3	4	4	260	130	225	130
SEYCHELLES	Africa	5	3	4	4	260	130	225	130
COMOROS	Africa	15	5	11	2	265	150	265	150
MALDIVES	south asia	9	4	9	4	375	200	460	200
ANTIGUA & BARBUDA	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
CABO VERDE	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
DOMINICA	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
FUJI	Oceania	5	1	4	1	253	58	188	110
GRENADA	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
MARSHALL ISLANDS	Oceania	5	1	4	1	253	58	188	110
MICRONESIA, FED. STATES OF	Oceania	5	1	4	1	253	58	188	110
PALAU	Oceania	5	1	4	1	253	58	188	110
SAO TOME & PRINCIPE	Africa	12	3	14	4	295	210	371	258
SOUTH SUDAN	Africa	25	5	25	7	270	400	575	400
ST. KITTS & NEVIS	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
ST. LUCIA	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323
ST. VINCENT & THE GRENADINES	Caribbean	8	3	7	3	347	188	342	323

4.5 国際海上コンテナ及びコンテナ相当貨物の輸送需要

3.2 節で述べたように、本モデルでは、時間価値の異なるグループとして、普通貨物の地域間輸送需要と、航空輸送される貨物の地域間輸送需要を2種類用意し、両方の輸送需要を用いてモデル計算を行う。ただし、港湾間海上輸送貨物輸送需要（下位モデル（海上サブモデル））への入力データについては、山口[20]と同じデータを用いている。普通貨物の地域間輸送需要は、山口[20]で使用されていたものについて、本モデルの対象地域に合わせたものを用い、航空輸送される貨物の地域間輸送需要は、図4.2のフローチャートのように推計した。この手順に沿うことで、陸上ネットワークを考慮する国については各ゾーンが、それ以外の国については対象港湾、または対象空港がそれぞれの発着点（ODノード）となる。

この章では、柴崎[22]と同様の方法で行った空港間輸送需要と、航空輸送される貨物の地域間輸送需要の具体的な推計方法について述べる。

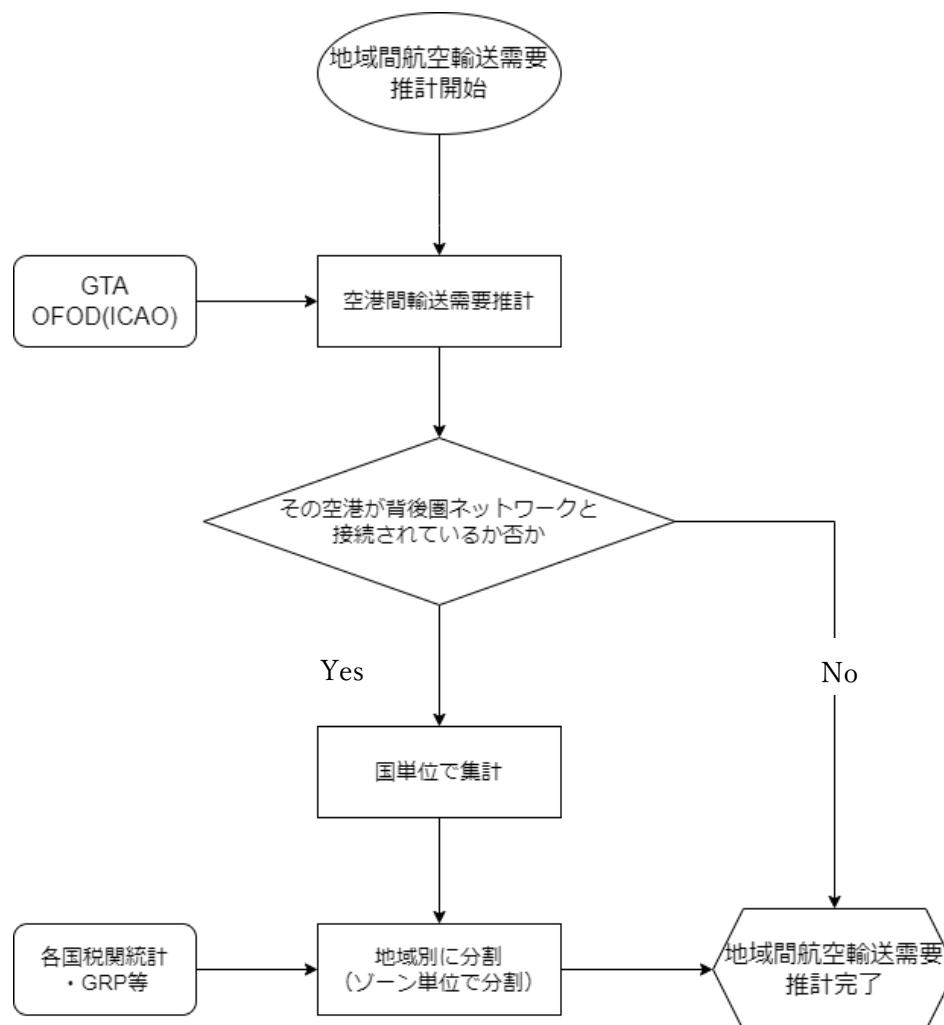


図 4.2 地域間輸送需要の推計フロー

4.5.1 空港間輸送需要の推計方法

空港間輸送需要の推計は、柴崎 [22]と同様 IHS 社の提供する Global Trade Atlas(GTA)データベース [30]に基づいて行う。現在 GTA データベースでは、248 の国及び地域間の、海上・陸上・航空輸送貨物の年間輸送量 (ton ベース) 及び年間総輸送金額 (US ドルベース) のデータが品目別に入手できる。ただし、欧州内の国・地域間の貨物流動は含まれない。また、輸送品目については、IHS 社独自の品目区分に従い、全部で 270 品目に分かれている。以下、推計の手順を示す。

4.5.1.1 航空輸送コンテナ相当貨物の国別輸送量 (TEU ベース) の推計

初めに、GTA データベースより取得した航空輸送貨物の 2018 年度総輸送量データ (ton ベース、以後データ A) をコンテナ相当貨物の輸送量に換算する。本モデルの計算は TEU 単位で行われているため、航空輸送貨物においても単位を TEU にそろえる必要がある。よって、ton ベースの海上輸送貨物の輸送量データと、TEU ベースの海上輸送貨物の輸送量データに基づいて、品目ごとにコンテナ化率を算出し、便宜的に航空輸送貨物にも適用する。算出した国際海上コンテナ輸送割合を品目別にデータ A に乗じ、コンテナ相当貨物の航空輸送貨物量データ (ton ベース、以後データ B) とする。さらに、10ton を 1TEU と想定し、データ B を TEU ベースのデータ (以後データ C) に換算した。

4.5.1.2 国別輸送量データ (データ C) のフレーター法による補正

本モデルの航空輸送ネットワークは、ICAO の提供する TFS データ [28]に基づいている。しかし、TFS データは格安航空会社 (LCC) のサービスは含んでいないため、モデルにインプットした航空輸送ネットワークの総容量と、GTA データに基づいて集計したデータ C の総量の間に不均衡が生じていた。したがって、TFS データの提供元である ICAO の On Flight Origin and Destination(OFOD)データ [35] (③で詳細を述べる) によって集計した国別輸出入量とデータ C の比較に基づき、データ C の値をフレーター法で補正した (補正後のデータを以後データ D とする)。データ C・データ D・OFOD データの総輸送量の比較を Table 4-4 に示す。Table 4-4 より、フレーター法を用いた補正により、データ D と OFOD データの総量が一致していることがわかる。

表 4.4 各データの総輸送量比較 (ton ベース)

データ C	データ D	OFOD データ
58,125,371	24,363,123	24,363,123

4.5.1.3 航空輸送コンテナ相当貨物の国別輸送量 (TEU ベース) の空港レベルへの分割

データ D を空港レベルへ分割する際に用いる指標として、ICAO の提供する On Flight Origin and Destination(OFOD)データ [35]を用いる。OFOD データは各都市 (空港) 間の純流動データを含んでおり、空港ごとの輸出入量が集計できる。よって、集計した空港ごとの輸出入量から、各国内の空港の輸出入量シェアを算出し、データ D を空港レベルへ分割した。

4.5.2 航空輸送される貨物の地域間輸送需要

4.5 節の冒頭で述べたように、航空輸送される貨物の地域間輸送需要は、データ D のうち、陸上ネットワークを考慮する国について、一度国単位に集計し直した後、入手可能な地域指標を用いて、ゾーン単位に再度分割する。設定する各国のゾーン数は、原則として柴崎 [22]に準じているが、モンゴルについては新たにゾーン分割し、パキスタン、ロシアについてはゾーンを追加している。また、地域指標については、モデルで使用するデータの年度に合わせ、各国で 2018 年の指標を用いた。GRP や税関データなど、公的な指標が入手しにくい国については、Google Earth Engine [36]を用いて取得した夜間光量を、ゾーン分割の指標に用いている。表 4.5 に、本モデルにおける陸上ネットワークを考慮する国のゾーン数および地域指標を示す。

表 4.5 本モデルにおける陸相ネットワークを考慮する国のゾーン数及び地域指標

Country	Number of region (zones)	Zone level	Zone indicator
China	335	prefecture-city	China Customs Statistics(2018) [37]
Russia	84	Federal subject level	Russian Customs Data(2018) [38]
Kazakhstan	14	oblast	GRP(2018) [39]
Kyrgyz	8	oblast	GRP(2018) [40]
Tajikistan	5	province	Night time Light
Uzbekistan	13	province	GRP(2018) [41]
Turkmenistan	6	province	Night time Light
Afganistan	7	United Nation region	Night time Light
Pakistan	32	division	Night time Light
Turkey	7	oblast	Zonal value of export and import (2018) [42]
Poland	16	prefecture	GRP(2018) [43]
Germany	16	Länder	Zonal value of export and import (2018) [44]
Netherlands	12	province	GRP(2018) [45]
Mongol	17	province	GRP(2018) [46]
Armenia, Azerbaijan, Belarus, Estonia, Georgia, Iran, Latvia, Lituania, Moldova, Ukraine	1	Country	

夜間光量は、国・地域の経済活動状況を知る上で非常に有用とされており、本研究でも採用した。夜間光量は、衛星から夜間の地球を撮影し、その画像から採取するものである。Google Earth Engine では、利用者登録をすることで誰でも無料で使用でき、取得したい地域の GIS 情報を含んだファイルをインプットし、夜間光を採取するコードを入力することで夜間光量を採取できる。さらにそのコードを編集することで、採取期間や対象地域の絞り込みが可能である。

以上のように、地域別に夜間光量を取得し（採取期間：2018/1/1～2018/12/31）、その割合を

分割指標として用いる。ただし夜間光量は、降雪や水面（湖沼など）に反射する光も採取してしまうため、実態にそぐわないことがある点に注意が必要である。

5 章 モデル計算と感度分析

本章では、本モデルの計算手順および推計結果について述べる。本モデルは Shibasaki et al. [19] のモデル計算手順をベースとしつつ、手順やアルゴリズムの観点からいくつか修正を加えており、その修正点についても述べる。また、推計結果の分析に関して、モデル計算全体に影響するパラメータ (v_t や θ) について感度分析を行ったため、感度分析結果についても述べる。

5.1 計算方法

上述したように、本モデルの計算手順は、Shibasaki et al. [19] をベースとしつつ、一部手順を修正している。計算の方針としては、はじめに下位モデル（海上輸送サブモデル）を計算し、経路ごとに出力された輸送費用および時間を上位モデルに代入することで、モデル計算を開始する。具体的な計算手順は以下の通りである。

① モデルの初期解の計算（ $n=1$ 回目の計算）

はじめに、下位モデル（海上輸送サブモデル）については、港湾間海上貨物輸送需要を入力として初期計算を行い、計算結果を上位モデルの入力とし、上位モデルの初期計算を行う（ $n=0$ 回目の計算）。続いて、 $n=0$ 回目の計算において上位モデルより出力された海上貨物輸送需要を下位モデルに入力し、その計算結果を上位モデルの入力とし、上位モデルを計算することで、モデル全体の初期解とする（ $n=1$ 回目の計算）。なお、3.1 節で述べたように、本モデルでは地域間輸送需要は所与とし、第 4 章で述べたようにあらかじめ集計した地域間輸送需要を、上位モデルの毎回の入力データとして計算する。

② $n = 2$ 回目以降の計算

$n=2$ 回目以降の計算については、前回計算で上位モデルから出力された輸送需要を、下位モデル（海上輸送サブモデル）に代入して計算し、下位モデルから出力された各経路の輸送費用および時間を上位モデルに代入して計算する、という手順を一回のモデル全体計算とし、 n が既定回数に達するまで計算を行う。

5.2 配分方法

本節では、本モデルの配分方法である多段階配分について説明する。段階配分は、2 地点間の交通量（OD 需要量）が与えられたとき、その OD 需要量を分割したうえで、ある最小化の原則に基づくシミュレーションによってネットワークに配分する方法である。本研究のモデルでは、OD 需要量を数分割し、All or Nothing 配分または確率配分を繰り返すことで最終的なリンクフローを出力する。均衡配分と異なりリンクフローを更新するのではなく、フローを加算するため、計算が収束しないリスクは小さくなることが想定されるものの、OD 需要量の分割が不適切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う可能性があり、この点に十分注意する必要がある。また段階配分には Lee [47] のように OD 需要量を発生ゾーンによって分割する手法もあるものの、本モデルでは全 OD ペアの OD 需要量を N 分割する手法を採

用している。本モデルの計算の流れについて、以下に示す。

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。

② OD 需要量の分割

全 OD ペアの OD 需要量を 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、以下全体の数%ずつ読み込みを行うこととする。

③ フローの配分

分割した OD 需要量を、計算されたリンクコストに基づき、All or Nothing 配分（確定配分、最短経路探索）または確率ネットワーク配分の手法を用いて配分する。なお、配分にあたっては、OpenMP を用いた並列計算を導入する。

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）を前回までのリンクフローに加算し、当該回までの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、従来の GLINS モデルで採用していた均衡配分以上に多くの All or Nothing 配分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使用になっている。また、OpenMP では各スレッドは並列領域を開始時に生成され、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 配分の計算が占めているため、並列計算の導入により、計算時間を約 50%短縮することができた。

5.3 ソートアルゴリズムについて

これまで様々な地域で適用されてきた本モデルは、対象地域や考慮するパラメータなどが増加したことにより、計算時間の増大が課題となってきた。従来モデルをみると、Shibasaki et al. [19]では、モデル全体の計算時間が約 1 時間となっているが、そのモデルを応用した若島 [48]では約 2 時間、西村 [49]では約 14 時間と増大している。本モデルでは、並列計算の導入による計算時間短縮が達成されているとはいえ、航空輸送ネットワークの統合、品目グループ別配分の適用など

を行っているため、計算時間の増大が推測される。そこで、柴崎 [22]では、Shibasaki et al. [19]でモデルの計算時間の半分以上を占めていた配分計算内のソートアルゴリズムの改善を行っており、本モデルでも採用した。具体的には、従来採用されていた「選択ソート」を、高速なアルゴリズムとして一般的によく用いられている「クイックソート」に変更した。各ソートアルゴリズムの概要を以下で述べる。（アルゴリズムの詳細については、アルゴリズムの関する教科書 [50]等を参照されたい。）

・選択ソート

選択ソートは、配列の要素を順に探索し、最大値の要素を配列の先頭の要素と入れ替える、という手順をソート完了まで繰り返すアルゴリズムである。選択ソートはアルゴリズムが容易で実装しやすいため、よく用いられるが、サイズ n の配列に適用した場合の平均計算時間は $O(n^2)$ であるため、サイズの大きい配列には適していない、という欠点がある。

・クイックソート

クイックソートは、配列の要素からランダムで「ピボット」と呼ばれる指標を1つ選択し、ピボットに基づいて分割したサブ配列を、再帰的にソートしていくアルゴリズムである。クイックソートをサイズ n の配列に適用した場合の平均計算時間は $O(n \log n)$ であり、最も高速なアルゴリズムの1つとしてよく用いられる。ただし、クイックソートの計算時間は配列の分割指標であるピボットの位置に依存する側面の大きさが欠点である。すなわち、ピボットが配列の中央値に近いほど効率良くソートを行うことができる一方で、最小値や最大値に近いと計算時間が $O(n^2)$ になってしまう。ピボットの中央値を探索するには配列のソートが必要になるという矛盾が生じるため、中央値の探索は難しい。よって代替手段として、配列から数個の要素を選択し、その平均値をピボットとして設定する、という手法が一般的に用いられる。柴崎 [22]では、配列の初項・中間項・末項の3つを選択し、その平均値をピボットとして設定している。

柴崎 [22]では、クイックソートの効果を実証するため、航空輸送ネットワークを統合する前の Shibasaki et al. [19]のモデルにクイックソートを実装し、上位モデル・海上輸送サブモデル、陸上輸送サブモデルの各ソート時間を比較している。比較結果を表 5.1、モデル全体の計算時間の変化を表 5.2 に示す。各モデルの短縮率から、クイックソート実装の効果はあるといえるが、ピボット値の設定によって短縮率にばらつきがあることがわかる。しかし、表 5.2 を見ると、モデルの計算時間は4割近く短縮されており、全体的にみてもクイックソートの効果はあるといえる。

表 5.1 クイックソート実装の効果

出典：柴崎 [22]

	選択ソート計算時間 (s)	クイックソート計算時間 (s)	短縮率 (%)
上位モデル	6.36	2.98	53%
海上輸送サブモデル	1816.15	1250.34	31%
陸上輸送サブモデル	973.90	27.00	97%
合計	2796.41	1280.32	54%

表 5.2 モデル全体の計算時間の変化

出典：柴崎 [22]

	クイックソート実装前	クイックソート実装後
全モデル計算時間の合計 (s)	3668.08	2107.70
モデル全体の計算時間短縮率	42.5%	

5.4 モデルの収束状況及び計算結果

本節では、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送の現状再現を試みたシナリオについて計算し、その結果とモデルの収束状況について評価する。現状再現については 6.4 節に詳述している。

前節までで述べてきたモデルの概要に従って分割回数は上位、下位ともに 50 回と設定してモデル計算を行い、推計結果を得た。本研究で使用するモデルにおいては、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、世界主要港湾・空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 5.1 に示す。図からわかるように、初回 ($n=0$) の全体計算と 2 回目 ($n=1$) の全体計算で、各港湾・空港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。特に空港の輸出入貨物については、初回、2 回目の推計結果の相違がかなり小さいことがわかる。

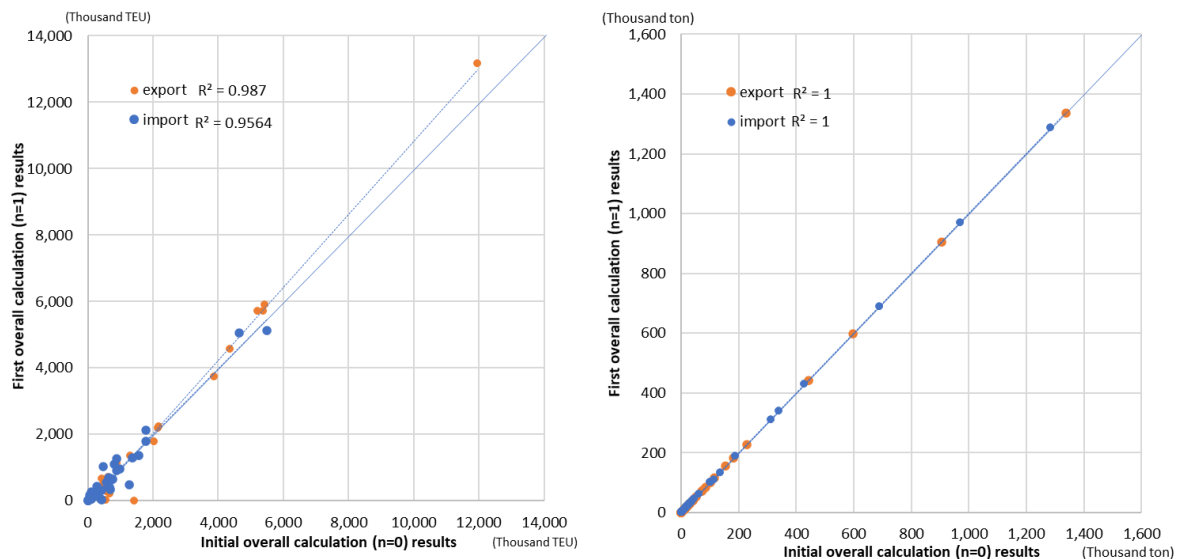


図 5.1 1 回目計算前後の港湾取扱量（左）と空港貨物量（右）における比較

次に、複数の指標から、モデルの推計結果の再現性（モデルが現実の輸送実態をどれだけ再現できているか）を確認していく。

はじめに、陸上輸送ネットワークと接続する港および空港の輸出入貨物取扱量について、実績値と推計結果の比較を図 5.2、図 5.3 にそれぞれ示す。

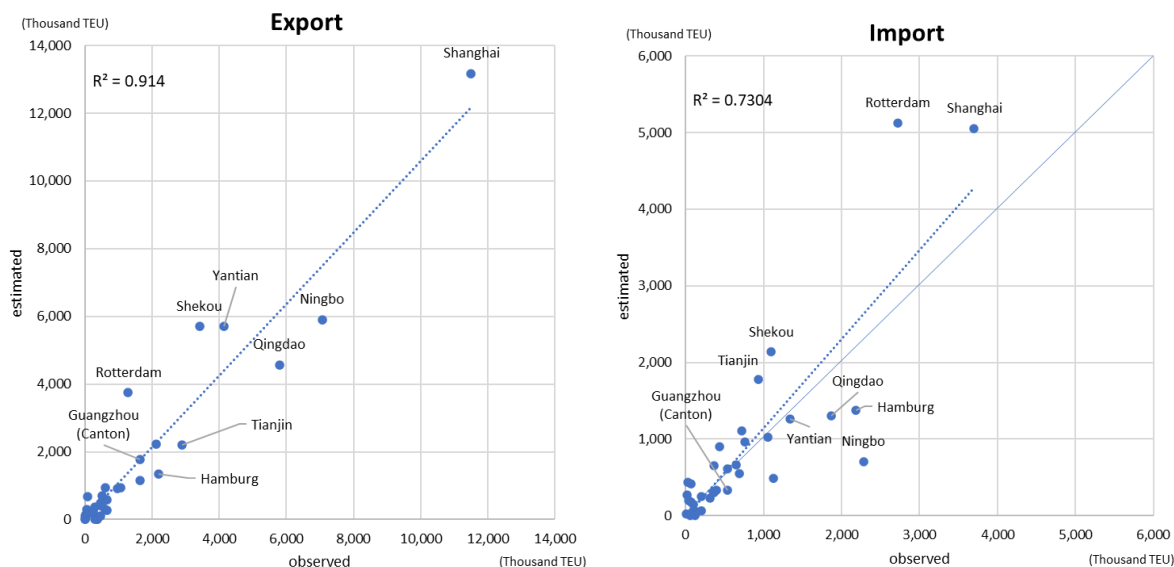


図 5.2 陸上輸送ネットワークと接続する港湾の輸出入貨物取扱量の比較

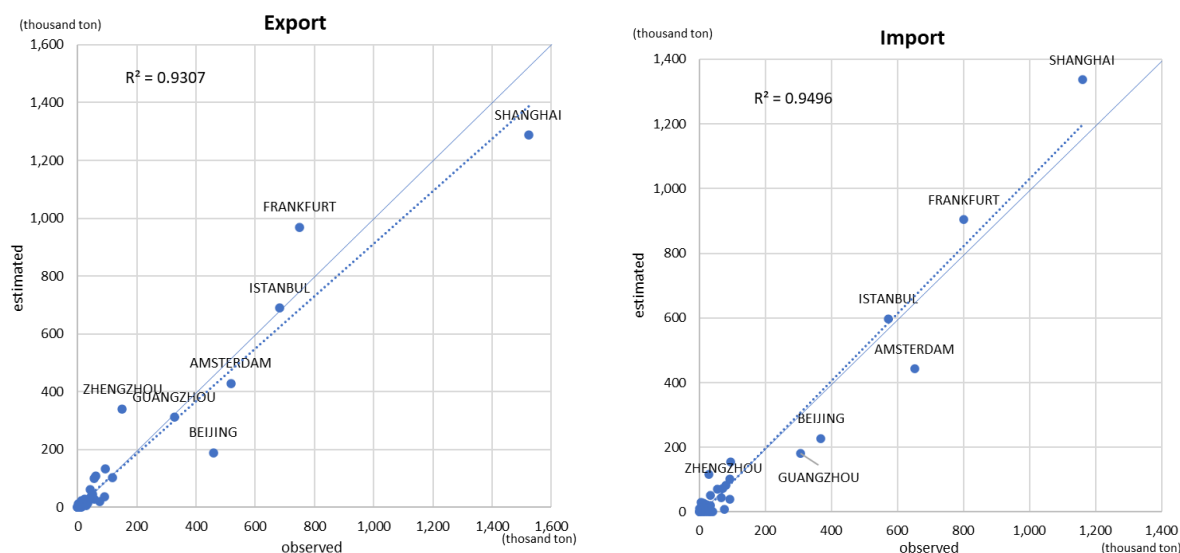


図 5.3 陸上輸送ネットワークと接続する空港の輸出入貨物取扱量の比較

図 5.2 については、これまで GLINS モデルが使用されてきた研究と同等の再現性を得られている。輸出貨物の取扱量が特に高い再現性を得られている一方で、輸入貨物の取扱量の再現性が比較的低い。この傾向はこれまでの研究でも見られ、その理由として、上海港および寧波港のように地理的に近い港の貨物が実績通りに配分されていないことが挙げられる。しかし、本モデルでは港湾の容量の条件を考慮に含めているため、これまでの研究と比較よりも高い再現性を得ることができている。

空港貨物の取扱量の比較については、輸出入ともに比較的高い再現性を得られていると言える。ただし、取扱量の実績値が数万トン以下の空港に関してはあまり再現できていないとは言えず、これは本モデルが扱う輸出需要のオーダーが大きいることが原因と推測される。これらの空港の再現性を高めるには、よりローカルに注目した細かい分析やパラメータ設定が必要である。

さらに、航空輸送ネットワークに関して、世界各地域間の航路のリンクフローについて、実績値と推計結果の比較を図 5.4 に示す。なお、各国の地域区分は、4.4 節の表 4.3 に示している (region 列)。また、図 5.4 においては、ユーラシア大陸内の陸上ネットワークを考慮する国については、地域ではなく国別に集計している。

図 5.4 を見ると、全世界の地域間の航路のリンクフローについても、比較的高い再現性が得られていると言える。北米や欧米、東アジア諸国（陸上輸送ネットワークと接続されていない国）の地域内航路が過大推計気味である理由として、実態では陸上輸送も併せて利用するような貨物も、本モデルでは陸上ネットワークを考慮する国が一部のみであるために、全ての輸送に航空輸送ネットワークを利用せざるを得ない、という状況が発生している可能性が挙げられる。この点については、本モデルをはじめとした Shibasaki et al. [19] の扱うモデルにおいて、複数地域の陸上輸送ネットワークを考慮することは、計算時間やメモリの観点から実現できておらず、モデル構造や計算手法の改良等を行う必要があると考える。

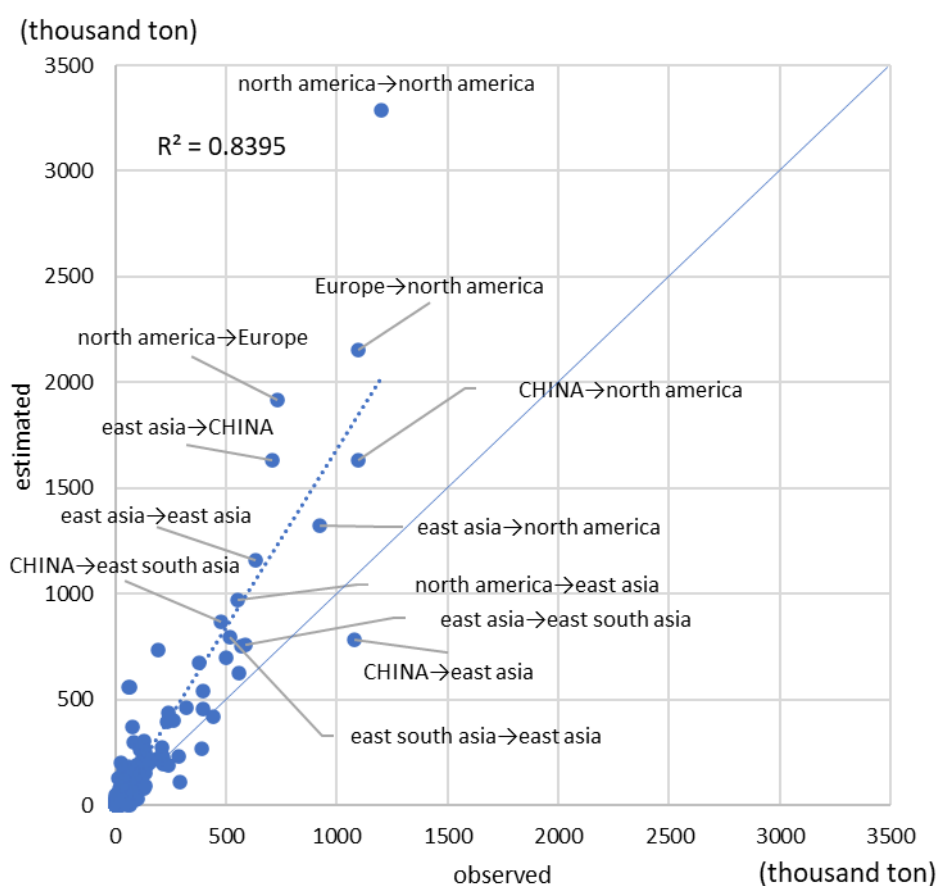


図 5.4 世界各地域間の航路（航空）リンクフローの比較

5.5 感度分析

本モデルでは多数のパラメータを設定しており、パラメータの性質に応じて、外部データより算出している場合、定性的な情報に基づいて設定している場合、キャリブレーションに基づいて設定している場合がある。本モデルの構成やネットワークは複雑で規模が大きいため、全体とし

ては適切なパラメータを設定しているとみなせる場合でも、細部についてみると、状況が異なる場合があることが推測される。本節では、本研究で設定した時間価値パラメータ vt と、本研究が対象とする中国・欧州間鉄道コンテナ輸送と深く関係する鉄道距離比例運賃について、それぞれ感度分析を行う。

5.5.1 航空貨物の時間価値パラメータ vt の変化

本モデルでは、普通貨物と航空貨物で異なる 2 つの時間価値パラメータ vt を設定し、時間価値の異なるグループ別の配分を行っている。一方で、実態としては品目ごとに時間価値は広い範囲で異なっているため、グループごとに時間価値パラメータの平均値を適用する場合、いくつかの指標では再現性が低くなることが想定される。航空貨物については、本モデルでは、航空貨物の全品目の時間価値パラメータの平均値である 88.4 (US\$/hour/TEU) を用いており、5.4 節において比較的高い再現性が得られていることを確認している。そこで、本節では、時間価値パラメータを半減させたケース (44.2US\$/hour/TEU)、1/10 にしたケース (8.84US\$/hour/TEU)、1/100 にしたケース (0.884US\$/hour/TEU) について、本モデルが対象とする 194 空港の空港貨物取扱量の動向を確認する。結果を図 5.5 に示す。図から、 vt を半減したケースを除き、 vt が減少するほど空港貨物量が増加していることがわかる。 vt が半減したケースの挙動については、柴崎 [22]で行っている分析でも同様の傾向が出ており、時間価値パラメータの変化に対する本モデルの推計結果が妥当な反応を示している。

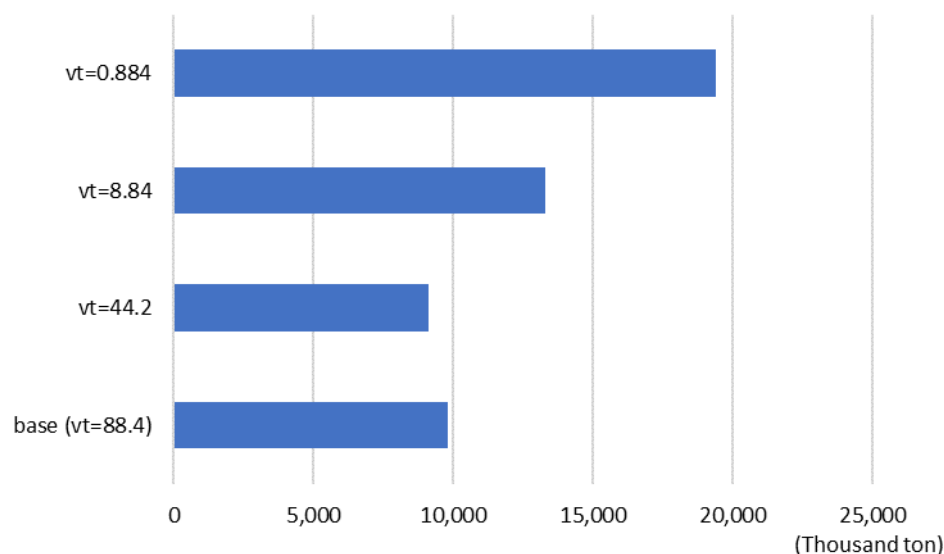


図 5.5 時間価値ごとの陸上ネットワークに接続する空港貨物取扱量

5.5.2 鉄道距離比例運賃の変化

先述の通り、本研究では中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に着目するため、鉄道距離比例運賃を変化させた際の感度を確認することは重要であるといえる。本モデルでは、Shibasaki et al. [19]をはじめとする GLINS モデルの研究の設定に基づき、鉄道の距離比例運賃を一律で 1.0 (US\$/km) と設定している。しかし実態としては、国や地域によって、距離比例運賃は異なることが予測さ

れ、設定する距離比例運賃の値の変化が貨物フローに与える影響は大きいことが推測される。よって本項では、鉄道距離比例運賃の変化が鉄道貨物フローにどのような影響を与えるのかを検証する。鉄道距離比例運賃を10分の1にしたケース（0.1 US\$/km）、100分の1にしたケース（0.01 US\$/km）を推計し、1.0 US\$/kmのケースと比較したフローを図5.6、図5.7に示す（青が増加、赤が減少）。本モデルの道路ネットワーク、鉄道ネットワークについては、図4.1を参照されたい。

図5.6、5.7を見ると、鉄道距離比例運賃を下げるほど道路から鉄道へ貨物が集まっていることがわかり、モデルの推計結果としては妥当な結果といえる。

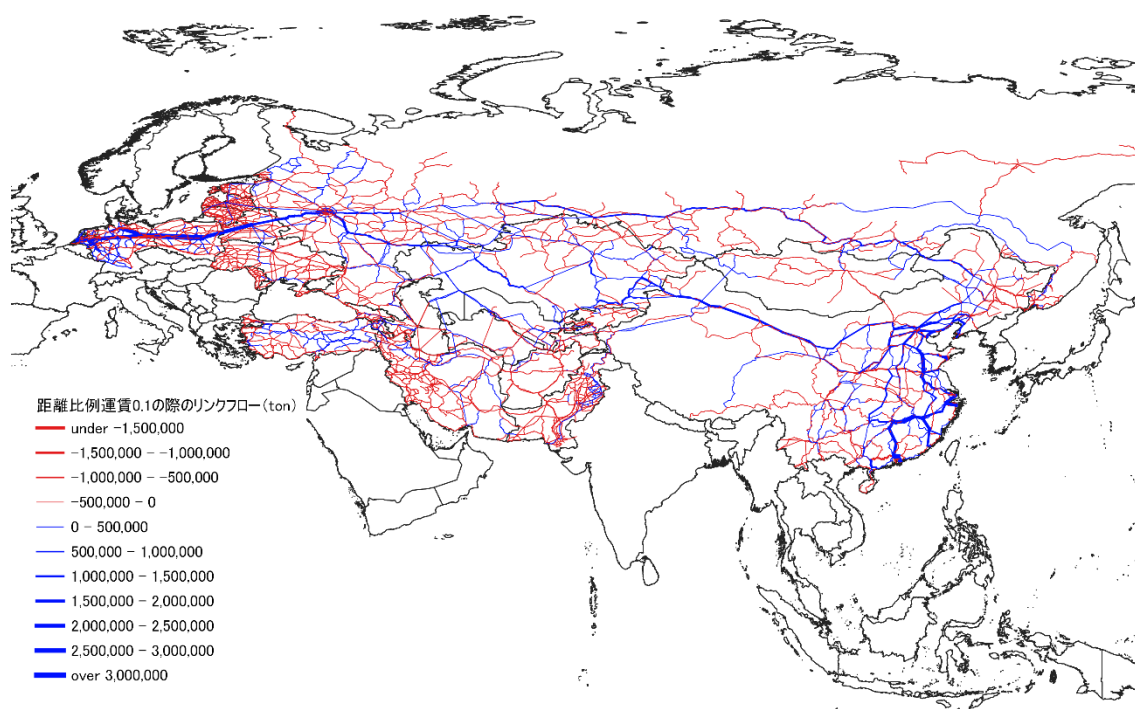


図5.6 鉄道距離比例運賃を0.1に設定した際のbaseケースとのフローの比較

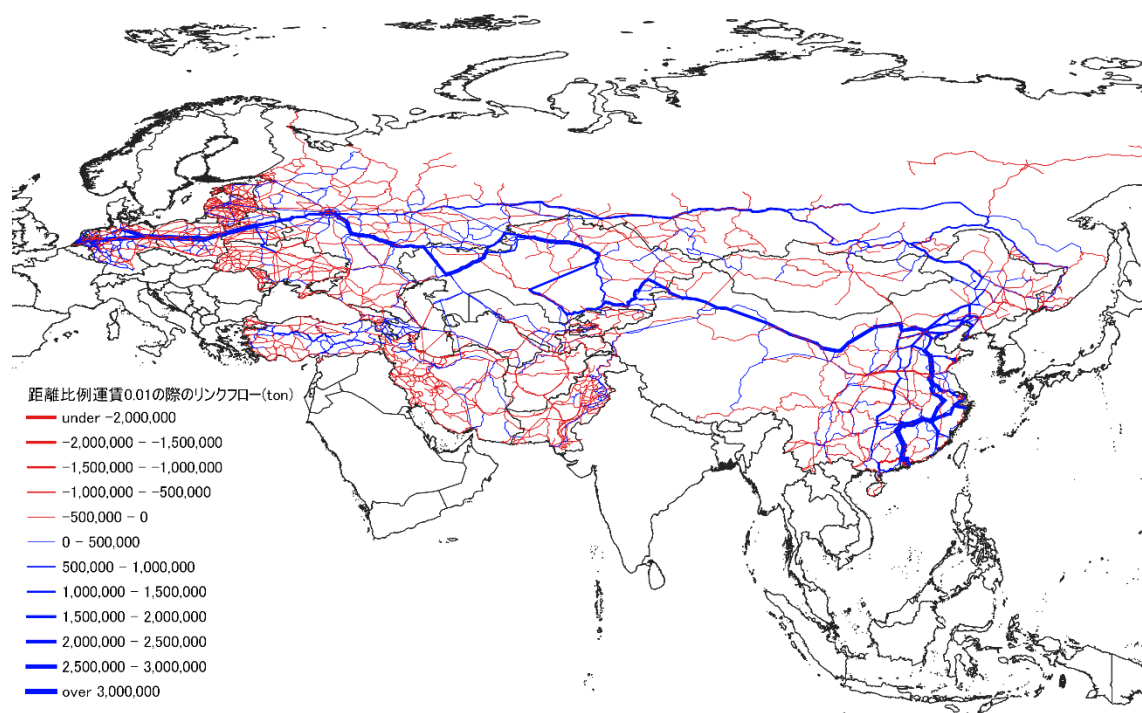


図 5.7 鉄道距離比例運賃を 0.01 に設定した際の base ケースとのフローの比較

6章 シナリオ分析

本章では、本研究で行ったシナリオ分析について解説する。

6.1 中国・欧州間鉄道コンテナ輸送（中欧班列）のルート特定

中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に着目したシミュレーション分析を行うため、本研究で対象とするルートの特定を、中国の使用国境別に西ルート（阿拉山口・ホルゴス国境）、中ルート（二連浩特国境）、東ルート（満州里国境）で行った。しかし、中欧班列がどのようなルートで運用されているかを詳細に述べた文献などは存在しなかったため、中欧班列についての報道記事や各種論文などを参考にし、暫定的にルートを決定した。

中でもロシア・カザフスタン国境については、本モデルが対象とする陸上ネットワーク上に候補が多く存在した。そこで本研究では、柴崎、新井 [51]で最もブロックトレインの通過量が多いとされるヤイサン国境を使用国境と定めた。

ただし、本モデルにおいて満州里経由ルート（東ルート）は、他のルートと比較してフローが流れやすい傾向にあるため、満州里方面への中国国内ルートは特定せずに対応することとする。

6.2 中国における中欧班列の発着都市の選定

現在中欧班列は、中国国内 60 以上の都市から欧州に向けてサービスを展開している。これらすべての都市を対象に分析を進めた場合、ネットワークが煩雑になることが予測されるため、本研究では、2020 年の運行実績と中村他 [7]を参考に、中欧班列の恩恵を受けやすいとされる内陸部の 6 都市を選定した。

また、各都市の位置によって中欧班列の使用ルートが変わることが予想されるが、各都市を発着する中欧班列の列車がどの国境を経由して運行されているかについて詳細に書かれた文献や論文は確認できなかった。したがって本研究では、6 都市の地理的位置と、中欧班列についての報道記事などを参考に、表 6.1 のように各都市を発着する中欧班列の列車の使用国境を推定した。鄭州、武漢については、各都市の位置や、これまでの使用実績によって、二連浩特、阿拉山口・ホルゴス双方を使用することとした。

選定した発着都市を踏まえた本研究で特定したルートを、図 6.1 に示す。

表 6.1 推定した中国 6 都市を発着する中欧班列の使用国境

推定使用国境	都市
二連浩特	鄭州、武漢
阿拉山口 ホルゴス	鄭州、武漢、長沙、成都、西安、重慶

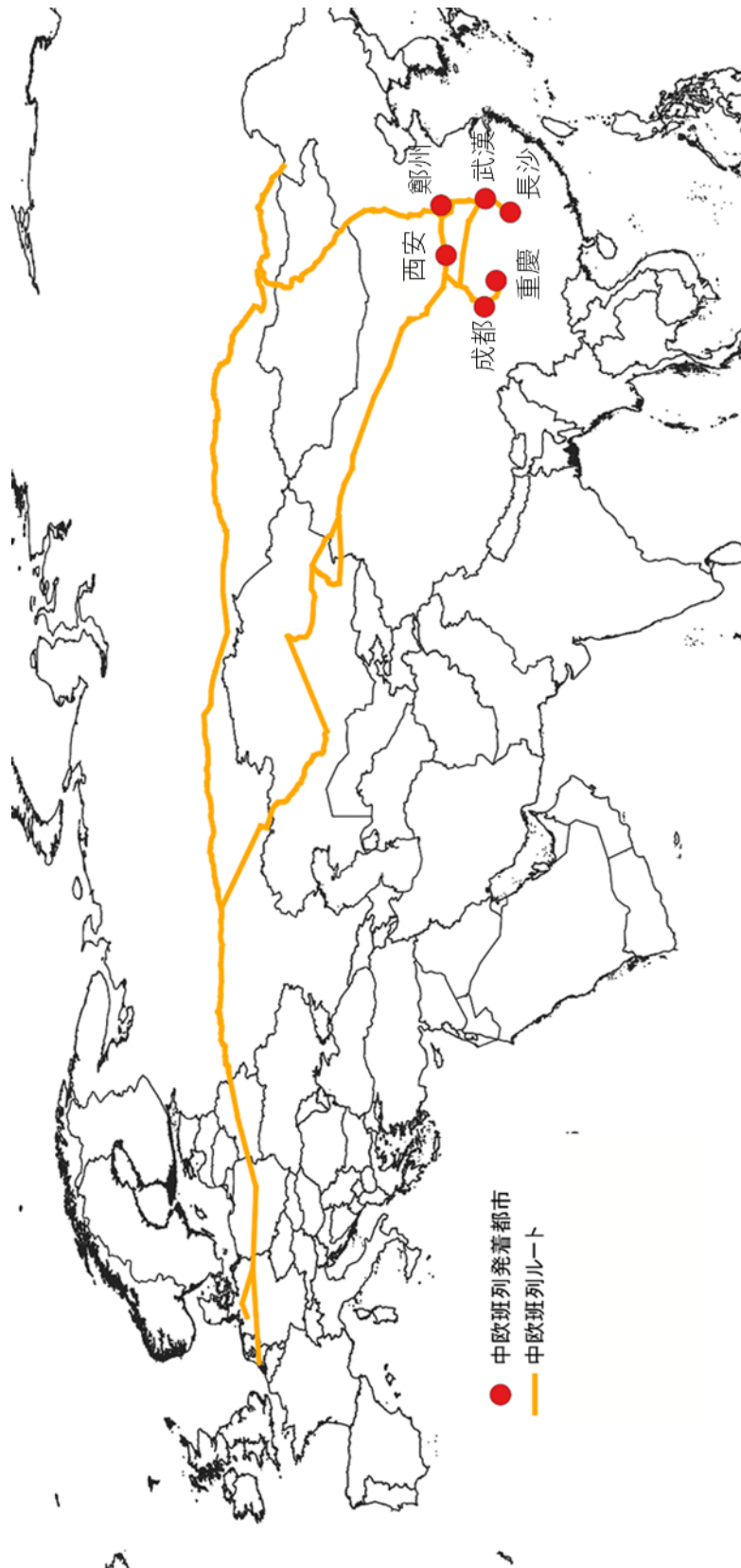


図 6.1 本研究で特定した中欧班列ルートと中国の中欧班列発着都市

6.3 中欧班列ルートのキャパシティ

特定したルートについてより正確に分析を行うため、当該ルートのキャパシティの更新を行った。本モデルでのキャパシティとは、一編成あたりの容量、運行頻度のことを指す。本モデルで採用した中欧班列ルートのキャパシティは、中国・カザフスタン・欧州については 2021 年の中欧班列輸送実績をもとに算出し、ロシア国内についてはロシア政府によるシベリア・バム鉄道の近代化計画 [52]をもとに算出した。中欧班列ルートの使用頻度は、「阿拉山口・ホルゴス国境経由（西ルート）」>「滿州里経由（東ルート）」>「二连浩特経由（中ルート）」の順に使用されており、おおよその使用割合は、西：東：中 = 6：2：1 である。

6.4 中国・欧州間鉄道コンテナ輸送の現状再現性についての検討

中国・欧州間鉄道コンテナ輸送についての分析をより正確に行うため、6.3 節において特定したルートにおいて、現状再現性についての検討を行った。本モデルは 2018 年のデータを使用しているため、2018 年当時の中国・欧州間鉄道コンテナ輸送の現状再現を試みた。具体的な検討結果については以下の通りである。

- ルート上の国際機関である EU(Europe Union：欧州連合)域内、EAEU(Eurasian Economic Union：ユーラシア経済同盟)域内や、東ルートへ貨物が集中するモデルの特性を改善するための国境抵抗値の調整
- 2018 年当時の補助金（運賃の約 40%）を再現するため、特定したルートの鉄道距離比例運賃を従来の 1.0 (US\$/km) から 0.6(US\$/km)へ変更（欧州内の鉄道運賃を減少させることで、欧州港湾→東欧・ロシア間のフローが鉄道に集中してしまうことを可能な限り抑えるため）
- 特定したルートにおける運行頻度（キャパシティ）を輸送実績に基づくものへ変更

以上のような調整の結果、中国国境それぞれにおける鉄道貨物通過量は図 6.2 のようになり、実態の通り、カザフ方面国境の通過貨物量が最も多くなっていることがわかる。また、中国国境の中で最も使用頻度の大きい中国・カザフ国境の 2018 年の通過貨物量実績 [53]と比較しても、高い再現性が得られていることがわかる。本研究ではこの条件下での計算結果を Base シナリオとするが、6.3 節で述べた「西ルート：東ルート：中ルート = 6：2：1」の使用割合を再現できているとはいえず、今後も現状再現については検討を続けていく必要があるといえる。

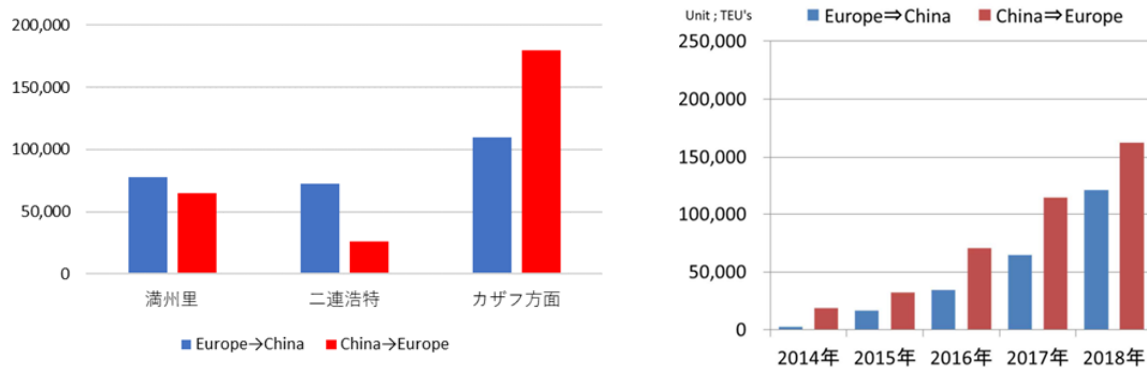


図 6.2 各方面の中国国境における通過貨物量の計算結果（左）と
中国・カザフスタン国境の輸送実績（右） [53]

6.5 複数の要素を考慮した中国・欧州間鉄道コンテナ輸送の成長性と課題

現在中国・欧州間鉄道コンテナ輸送は、利用促進のために支払われている中国・地方政府からの補助金や、コロナ禍による代替需要などによって輸送量は年々増加し続けている。したがって、補助金削減・撤廃後やアフターコロナでも持続的に成長を続けられるかについて検討することは非常に重要である。そこで本節では、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送が持続的に成長するためにはどのような施策が有効か、運賃やキャパシティ（運行頻度）、越境インフラの整備状況（国境抵抗値）などのパラメータを変更して検討する。

6.5.1 設定シナリオ

本シナリオの設定を表 6.2 に示す。base は 6.4 節で設定したシナリオとし、S-2、S-3 では補助金が増額されたケース、S-4 は補助金が減額され運行頻度、国境抵抗値

表 6.2 本シナリオの設定

シナリオ	鉄道距離比例運賃(US\$/km)	運行頻度（便/週）	国境抵抗値
Base	0.6	既定値(※1)	既定値(※2)*(1/3)
S-1	0.6	既定値*2	既定値*(1/5)
S-2	0.4	既定値	既定値*(1/3)
S-3	0.4	既定値*2	既定値*(1/5)
S-4	0.8	既定値*2	既定値*(1/5)
S-5	0.8	既定値*4	既定値*(1/10)

※1 輸送実績に基づき設定した運行頻度

※2 モデル全体で設定された国境抵抗値

6.5.2 中国国境における鉄道貨物通過量

本項では、各シナリオの国境における鉄道貨物取扱量を、base シナリオと比較してどれだけ国際貨物に影響を与えているかを確認する。図 6.3 に、base シナリオと比較した中国国境における方向別鉄道貨物通過量を示す。国境の鉄道貨物通過量は、中国を発着する国際鉄道貨物の増減を

示しており、各シナリオが国際貨物鉄道輸送に与える影響を図る指標として有効であるといえる。

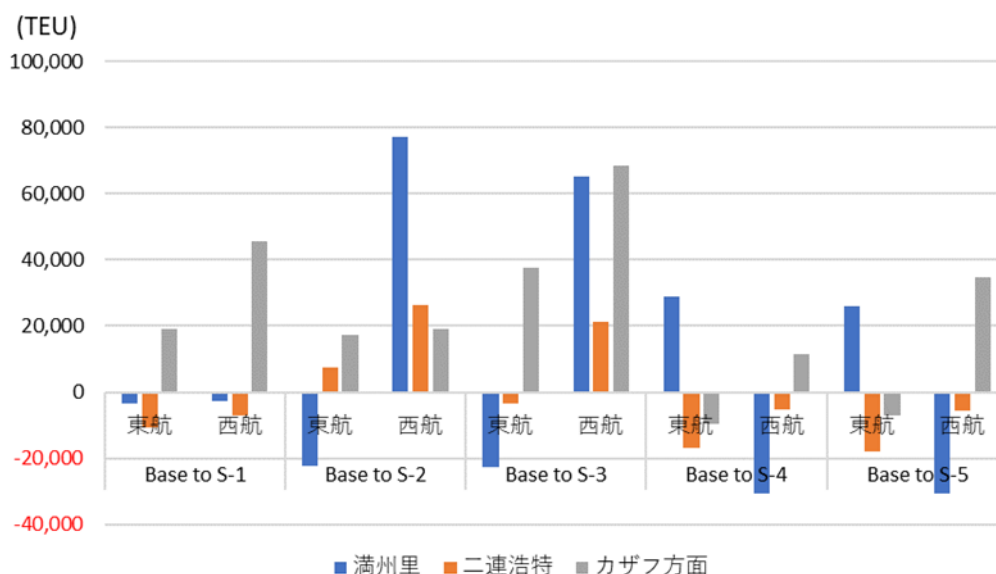


図 6.3 Base シナリオと各シナリオとの中国国境における方向別鉄道貨物通過量の比較

図 6.3 を見ると、国境によって傾向は異なるものの、S-2、S-3 の鉄道貨物量の増加が顕著であり、補助金が中欧班列へ与える影響は大きいことがわかる。方向別にみると、西航フローの増加幅の方が大きい傾向にあり、実態の通り西航の方が利用されやすくなっていることがわかる。しかし、S-4、S-5 を見ると、Base と比較してフローが減少している国境が多いが、満州里の東航、カザフ方面の西航は増加傾向にあり、補助金を減額した場合でも、他の施策との組み合わせによって一定の成果があげられると考えられる。

6.5.3 対象 6 都市における空港貨物取扱量の変化

対象の 6 都市における空港貨物取扱量について、輸出を図 6.4、輸入を図 6.5 に示す。

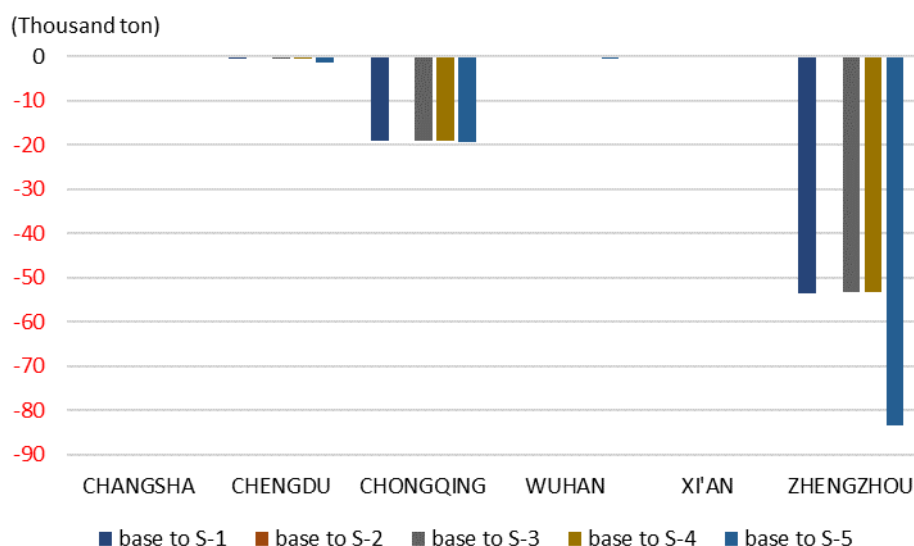


図 6.4 対象 6 都市における Base シナリオと各シナリオとの空港貨物取扱量（輸出）の比較

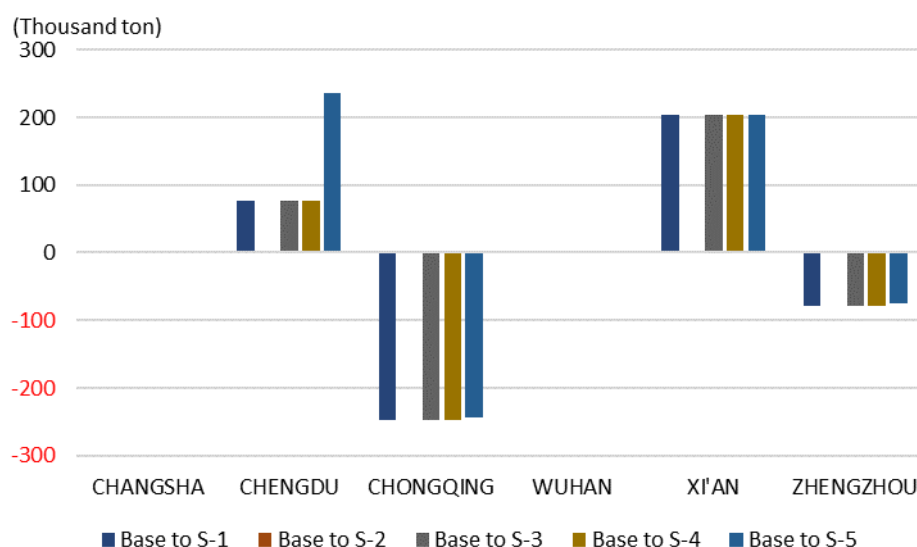


図 6.5 対象 6 都市における Base シナリオと各シナリオとの空港貨物取扱量（輸入）の比較

図 6.4, 6.5 から、重慶、鄭州の空港貨物取扱量が減少していることがわかる。図 6.4 では、内陸部において周辺空港へのフローシフトが発生しておらず、図 6.3 で西航の鉄道貨物量が増加傾向にあることから、航空から鉄道へのシフトが一定量発生しているものと思われる。図 6.5 では、取扱量が増加した空港と減少した空港が存在するため、空港間、また、鉄道へのフローシフトがそれぞれ発生しているものと考えられる。

しかし、シナリオごとに取扱量にばらつきがあり、空港貨物取扱量と中国・欧州間鉄道コンテナ輸送との関係の再現性はあまり高くないといえる。これは本モデルの課題の一つである取扱量の小さい空港の再現性が低いことに起因していると推測される。解決策について検討を重ねたが、いまだ解決には至っていない。ただし中欧班列の現状再現性を向上させることで、結果は改善するものと思われる。

6.5.4 中国・欧州における港湾貨物取扱量

本項では、表 6.1 のシナリオが中国・欧州の海上貨物輸送へ与える影響を確認するため、中国・欧州の港湾貨物取扱量の変化を見ていく。図 6.6, 6.7 が中国、図 6.8, 6.9 は欧州の港湾貨物取扱量を示す。

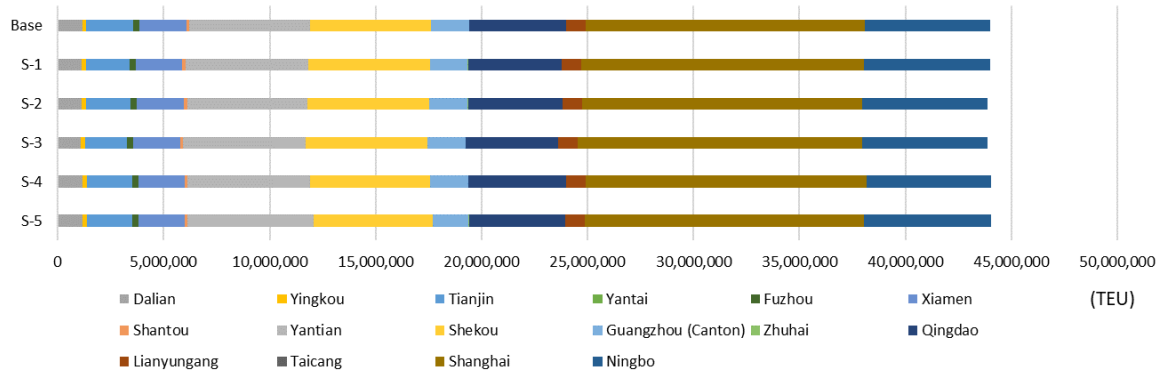


図 6.6 中国の港湾貨物取扱量（輸出）

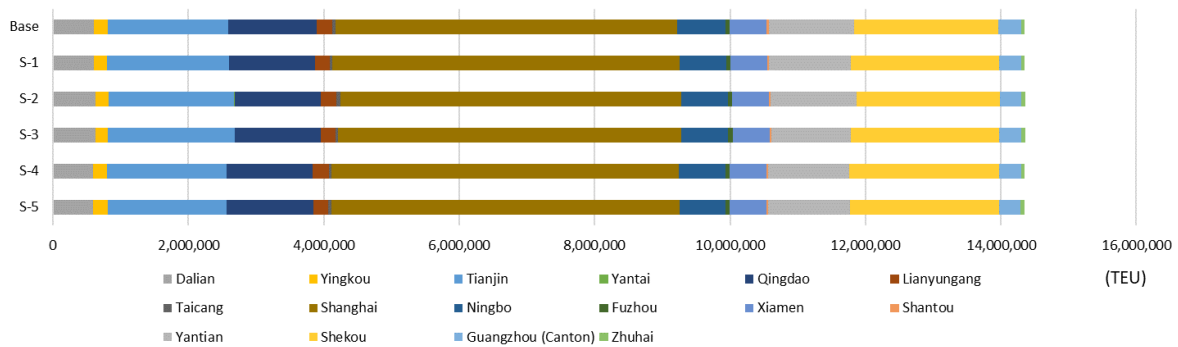


図 6.7 中国の港湾貨物取扱量（輸入）

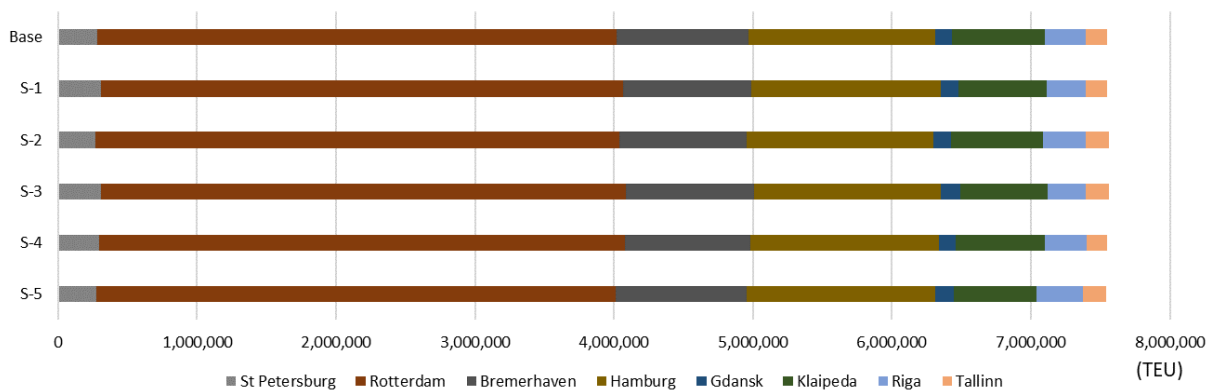


図 6.8 欧州の港湾貨物取扱量（輸出）

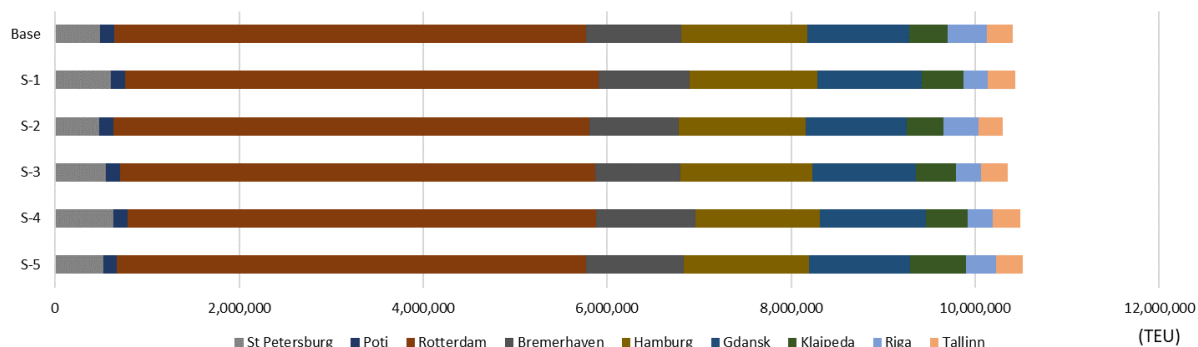


図 6.9 欧州の港湾貨物取扱量（輸入）

図 6.6～6.9 を見ると、表 6.1 のシナリオでは海上輸送への影響は少ないといえる。ただし、中欧班列ルートにおける現状再現性をさらに向上させれば、海運からのモーダルシフトが発生する可能性がある。したがって、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送と海上輸送の関係性をより正確に分析するためにも、現状再現性のさらなる向上は課題であるといえる。

6.5.5 本シナリオ分析のまとめ

本シナリオでは、特定した中欧班列ルートに対して、補助金政策を表す距離比例運賃の低減、運行便数の増便を表す運行頻度の増加、国境点における越境インフラ整備向上を表す国境抵抗の低減を行うことで、中欧班列が成長を続けるためにはどのような施策が有効かを検証した。各シナリオ分析の結果、越境インフラの整備向上、運行頻度の増加を行うだけでも一定の効果を示すが、それらの施策に補助金施策を加えることで、中欧班列の成長につながることがわかった。また、補助金を減額した場合でも、運行頻度、越境インフラの拡充によって、貨物量の増加につながる可能性も示された。ただし、他の輸送モードとの関係性については、現時点での中欧班列の現状再現性では明確な分析結果を得ることができなかったため、現状再現性の向上が課題であることがわかった。

6.6 他輸送機関の需要逼迫に伴う輸送量逼迫シナリオ

1.4 節でも述べた通り、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送では、近年輸送実績は伸び続けているものの、国境点での貨物の積替えなどボトルネックが存在している。近年の輸送実績の成長に加え、2020、2021 年のコロナ禍による他の輸送機関からの代替輸送によって急速に輸送需要が拡大し、ボトルネックが露呈する結果となっている。そこで本節では、航空貨物輸送が輸送需要逼迫に陥った場合、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送はどのような挙動を示し、代替輸送の手段としてより機能するにはどのような施策が有効かを検討する。

航空貨物輸送の主たる輸送形態は、旅客便の貨物スペースを使用するベリー輸送である。本モデルの航空輸送ネットワークではベリー便かフレーター便の区別をつけることが可能であるため、対象地域間のベリー便を利用するコストを大幅に増加させることで、コロナ禍の航空貨物輸送ネットワークを表現することとする（S-6）。また、ベリー便を使用できなくなった貨物がフレーター便に集中することが推察されるため、S-6 の条件に加え、対象地域間のフレーター便を利用す

るコストを上げた場合の結果も確認する (S-7)。さらに、航空輸送の需要逼迫によってあふれた貨物が鉄道 2 送を代替輸送として利用するよう、6.4 節で鉄道利用促進に最も効果のあった S-3 を S-7 のシナリオに加え、分析を行う (S-8)。シナリオを表 2、また、S-6、S-7 と Base シナリオと比較した中国周辺のリンクフローを図 6.10、6.11 に示す。

表 6.2 本シナリオの設定

	シナリオ
S-6	ペリー便利用のコスト大幅増加
S-7	S-6 + フレーター便利用のコスト増加
S-8	S-7 + 6.4 節の S-3

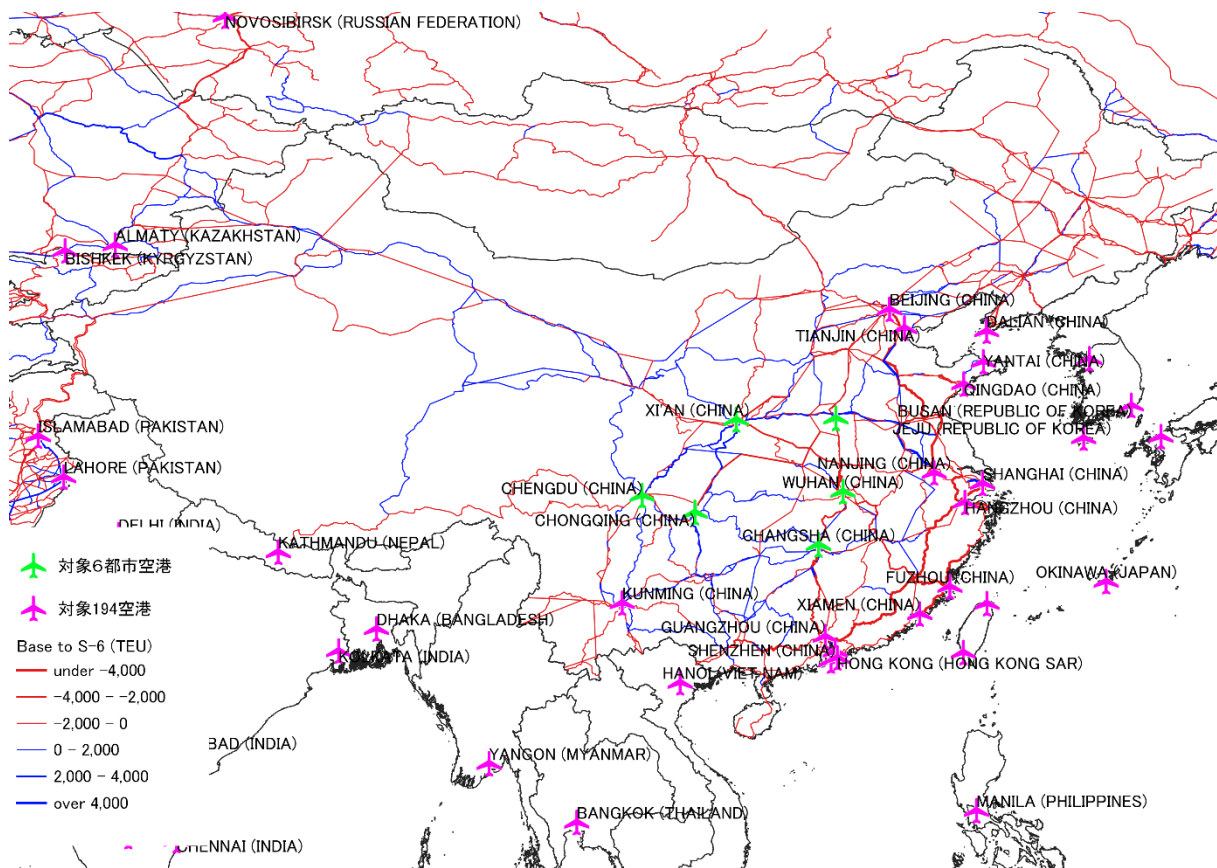


図 6.10 Base シナリオと S-6 を比較した陸上ネットワークリンクフロー

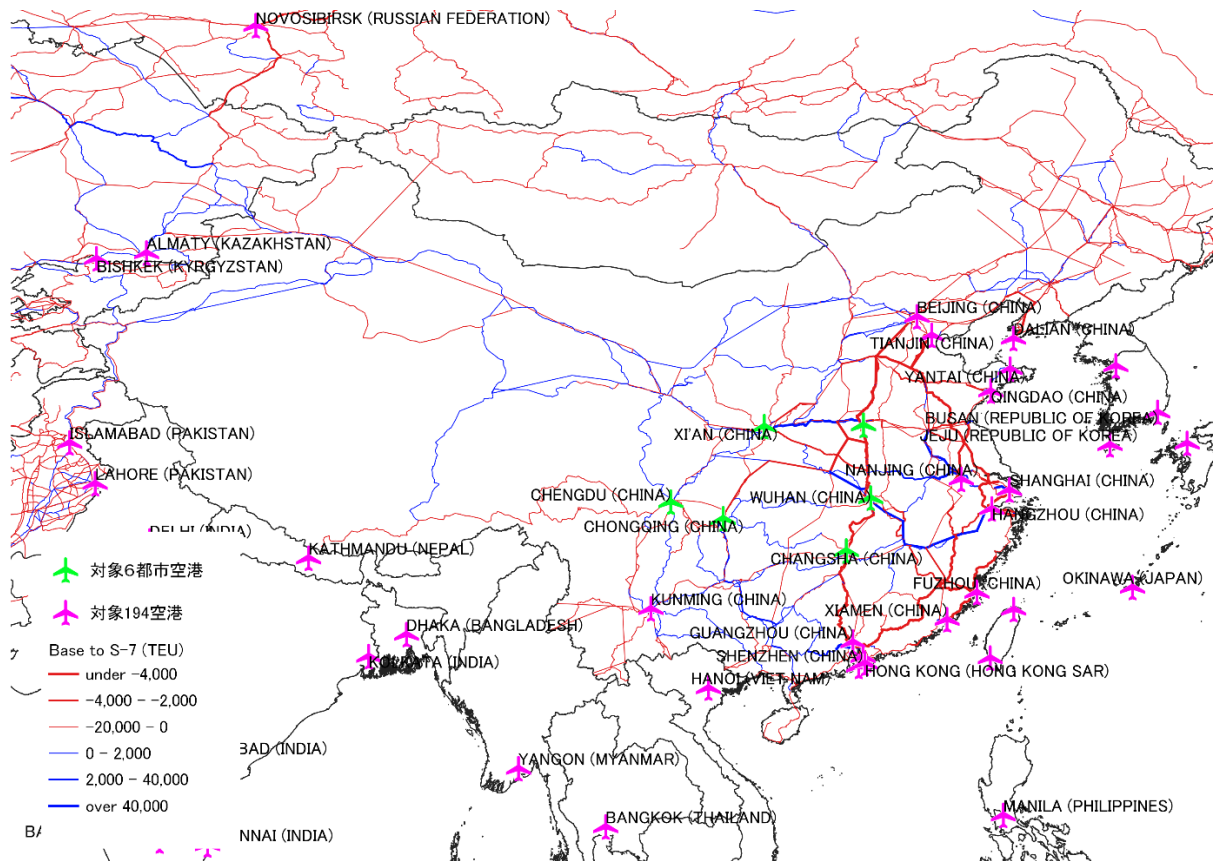


図 6.11 Base シナリオと S-7 を比較した陸上ネットワークリンクフロー

図 6.10 を見ると、特に内陸部において、空港間で貨物の移動が行われていることがわかる。S-6 では、ベリー便の制約のみ設定されているため、フレーター便の発着が多い空港への貨物移動が発生しているとみられる。図 6.11 を見ると、S-6 にフレーター便の利用コストの増加の制約が加わっているため、空港間の貨物の移動が減少していることがわかる。これは、フレーター便の発着が多くとも利用コストが高いために貨物が集まっていない状態になっていると推察され、航空輸送のさらなる需要逼迫を表しているといえる。

Base と S-7 を比較した鉄道リンクフローを示すと、図 6.12 のようになり、Base シナリオと比較して増加するリンク、減少するリンクがネットワーク上に散在しており、輸送の代替として機能しているとはいえない。base と S-8 を比較した図 6.13 を見ると、図 6.12 と比較して中欧班列ルートに沿って連続的にフローが流れており、鉄道輸送が航空輸送の代替として一定の機能を果たしていると考えられる。

以上より、航空貨物輸送の需要逼迫が起こった際でも、補助金施策、運行便数増加施策、越境インフラ整備施策は有効に働き、代替輸送として機能するといえる。しかし、本研究ではこれらの施策のみの検討にとどまっているため、その他航空と鉄道にかかわるパラメータの変更を行い、より精緻な分析を行うことが今後の課題といえる。

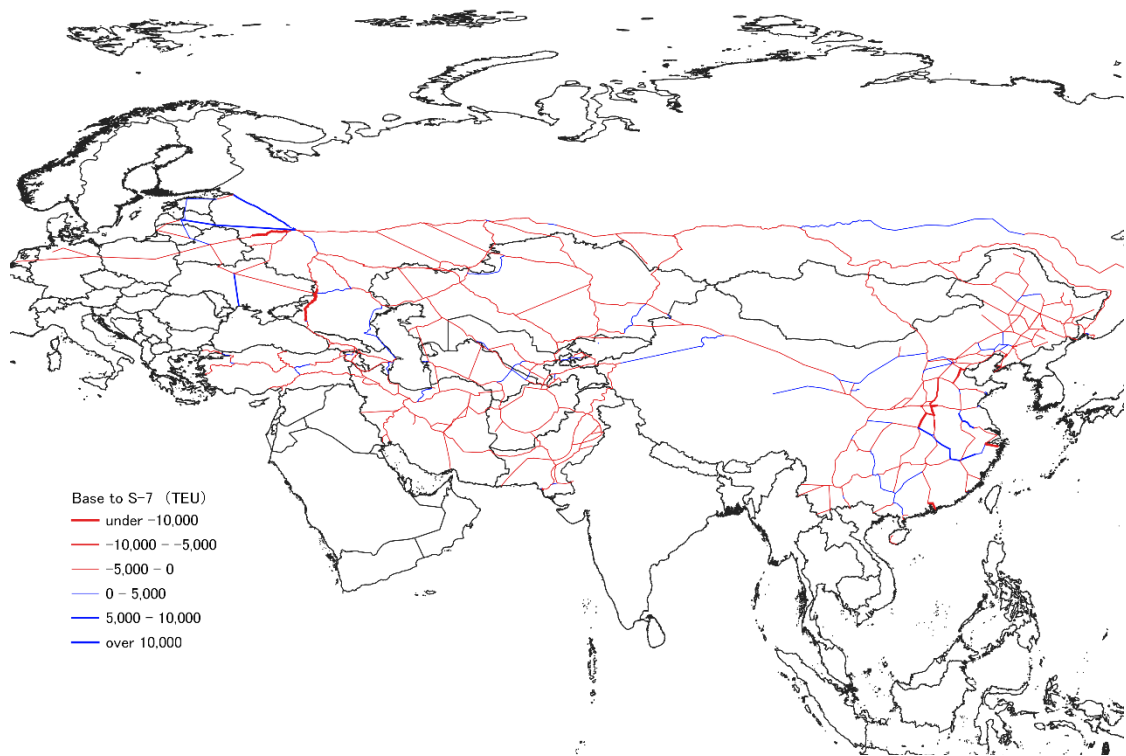


図 6.12 Base と S-7 を比較した鉄道リンクフロー

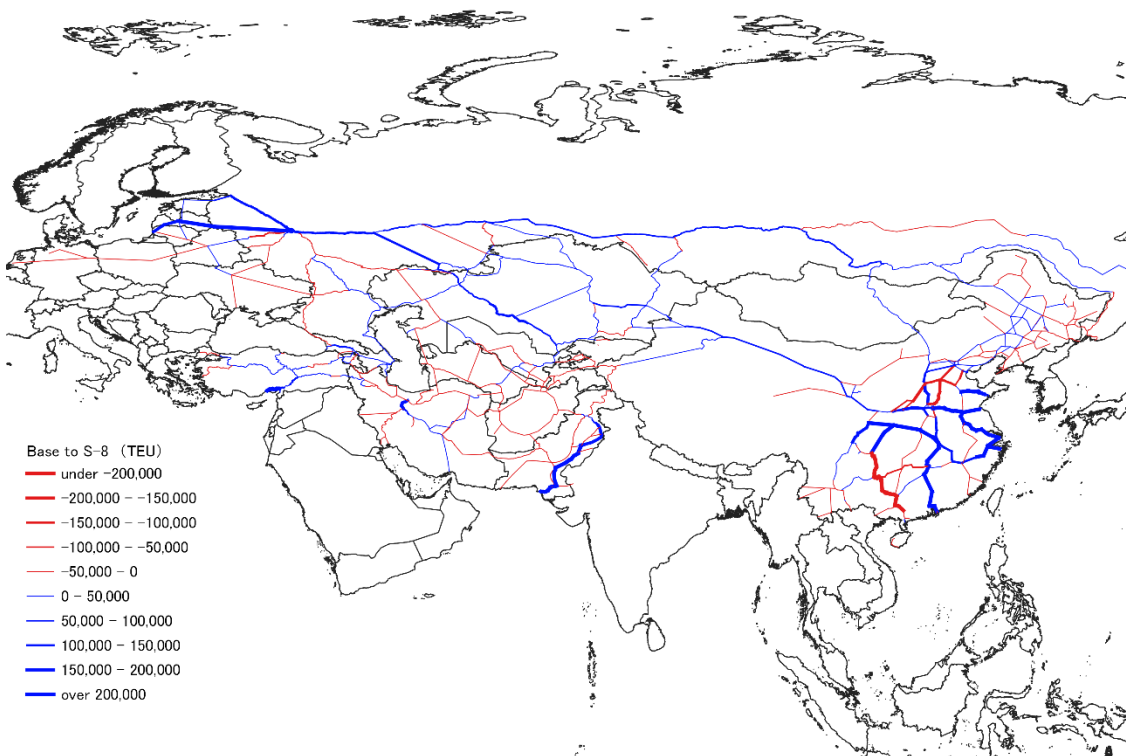


図 6.13 Base と S-8 を比較した鉄道リンクフロー

7 章 おわりに

7.1 本研究のまとめ

本研究では、インターモーダル国際物流モデルを用いて中国・欧州間鉄道コンテナ輸送に着目したシミュレーション分析を行い、持続的な発展の可能性について、複数のシナリオから考察した。

その結果、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送において、運賃低減、国境抵抗低減、運行頻度の増加は、今後の持続的成長のため、また、他の輸送機関逼迫に対応するためにも有効であることがわかった。したがって、中国・欧州間鉄道コンテナ輸送は、補助金施策や、国境点での積み替え施設の充実、運行便数の増加を組み合わせることで、持続的な成長を実現できるのではないかと考察できる。

7.2 今後の課題

本研究では、中国の中欧班列発着都市を内陸部の 6 都市に絞って考察したが、中欧班列は現在 60 都市以上から発着しているため、より分析の精度を高めるためにはより網羅的な検討・考察が必要であるといえる。そのためにはより詳細なネットワークの構築や、キャパシティの設定などが必要だが、計算速度や PC のメモリ数などの兼ね合いも検討せねばならない。

また本研究では、中国国内の鉄道運賃を安くすると、国境方面でなく、より運賃の安い海上輸送を利用するため沿岸部方面への貨物フローが多くなる事象について合理的な解決策を見出すことができなかった。したがって今後は、荷主の輸送手段選択の際の意思をより反映させることができるようなパラメータの開発が必要であるといえる。

中欧班列のシナリオ考察の際、ルートの特定、現状再現性について考察を行ったが、まだ十分な再現ができていないといえない。現状再現性を向上させることで、より実態に即したシナリオ分析が可能になるため、解決すべき課題であるといえる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京海洋大学の渡部大輔准教授には、文献の紹介や対象地域における中欧班列の現状などについて、また、東京大学の柴崎隆一准教授には、モデルの操作方法や計算結果の改善の検討などについて、多大なるご指導・アドバイスをいただきました。ここに深謝の意を表します。さらに、副査を引き受けていただいた渡邊豊教授、坂井孝典准教授にはこの場を借りて感謝申し上げます。

最後に、渡部大輔研究室の Thuta さん、西宮君、戸田君をはじめとする後輩の方々や、大学院の同期の方々、東京大学の柴崎研究室の学生の方々には、研究の手法に関するあらゆる点について多くの有益な助言をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 家田 仁, 「一带一路」をどう読み解くか? ～モンゴル帝国が築いた「寛容」なユーラシア広域交易圏を振り返りつつ～, 運輸と経済 12月号(特別号), 2018, p. p2~8.
- [2] 辻 久子, シベリア・ランドブリッジ 日ロビジネスの大動脈, 成山堂書店, 2007.
- [3] 柴崎隆一 編, グローバル・ロジスティクス・ネットワーク ～国境を越えて世界を流れる貨物～, 成山堂書店, 2019.
- [4] Asian Development Bank (ADB), “CAREC Transport Strategy 2030,” 2020.
- [5] The United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UNESCAP), “Comprehensive Planning Of Eurasian Transport Corridors To Strengthen The Intra- And Inter-Regional Transport Connectivity,” 2019.
- [6] 中国鉄路総公司, “中欧班列建设发展规划,” 中国鉄路総公司, 2016.
- [7] 中村武史、渡部大輔、松井一, “中国・欧州間鉄道コンテナ輸送における中国国内での発着地別の貨物輸送量に関する分析,” 日本物流学会誌 No.29、p61~68, 2021.
- [8] 辻 久子, “10年目を迎えた「中欧班列」,” ロシア NIS 調査月報、2020年7月号、p102~105, 2020.
- [9] RailFreight.com, “China continues subsidies on New Silk Road next year,” 10 12 2021. [オンライン]. Available: <https://www.railfreight.com/beltandroad/2021/12/10/china-continues-subsidies-on-new-silk-road-next-year/>. [アクセス日: 10 1 2022].
- [10] Gong, Q, Wang, K, Fan, X, Fu, X, Xiao, Y, “International trade drivers and freight network analysis – The case of the Chinese air cargo sector,” Journal of Transport Geography, 71, 253~262, 2018.
- [11] 柴崎隆一, 神波泰夫, 渡部大輔, “東アジア～欧州間国際航空貨物の航空/海上輸送の分担に関する一考察,” 日本物流学会誌、第24号、p61~68, 2016.
- [12] Zhao, L, Zhao, Y, Hu, Q, Li, H, Stoeter, J, “Evaluation of consolidation center cargo capacity and locations for China railway express,” Transportation Research Part E 117, p58-81, 2018.
- [13] Hairui Wei, Paul Tae-Woo Lee, “Desining a Coordinated horizontal alliance system for China's inland ports with China railway express platforms along the Silk Road Economic Belt,” Transportation Research Part E, p1~21, 2021.
- [14] Hilmola, O-P, Li, W, and Panova, Y, “Development Status and Future Trends for Eurasian Container Land Bridge Transport,” Logistics, 5,18, 2021.
- [15] Wen, X, Ma, H.L., Choi, T.M., Sheu, J.B. , “Impacts of the Belt and Road Initiative on the China-Europe trading route selections,” Transportation Research Part E, 122, p581~604, 2019.
- [16] Yang, Z, Sun, Y, Lee, P.T.W., “Impact of the development of the China-Europe Railway Express –A case on the Chongqing international logistics center,” Transportation Research Part A, 136, p244~261, 2020.

- [17] Li, S, Lang, M, Yu, X, Zhang, M, Jiang, M, Tsai, S, Wang, C-K, Bian, F, “A Sustainable Transport Competitiveness Analysis of the China Railway Express in the Context of the Belt and Road Initiative,” *Sustainability*, 11, 2896, 2019.
- [18] 柴崎隆一, 地理情報を活用した世界物流ネットワークシミュレーションモデルとシナリオ分析, オペレーションズ・リサーチ, 66 巻, No.12, 2021.
- [19] Shibasaki, R. and Kato, H. and ducruet, C., “Global Logistics Network Modelling and Policy : Quantification and Analysis for International Freight,” Elsevier, 2020.
- [20] 山口拓哉, “大規模並列多段階配分によるインターモーダル国際物流ネットワークモデルの構築と ASEAN 地域への適用,” 東京大学修論, 2021.
- [21] 西村 健太郎, “全世界統合物流シミュレーションモデルの構築,” 東京大学修論, 2019.
- [22] 柴崎隆一, “航空輸送を含む全世界統合シミュレーションモデルの構築,” 関空調査会, 2021.
- [23] 西村健太郎, “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国際物流ネットワークモデルと政策分析,” 東京大学卒業論文, 2017.
- [24] (社) 交通工学研究会編, やさしい非集計分析, 交通工学研究会, 1993.
- [25] Ohasi, H, Kim, T-S, Oum, T-H, Yu, C, “Choice of air cargo transshipment airport: an application to air cargo traffic to/from Northeast Asia,” *Journal of Air Transport Management*, 2005.
- [26] Ching-Cheng Chao, Ching-Wen Hsu, “Cost analysis of air cargo transport and effects of fluctuations in fuel price,” *Journal of Air Transport Management*, 2014.
- [27] 石倉智樹, “東アジアの航空ネットワークにおける国際航空 旅客流動分析のためのモデル構築,” 国土技術政策総合研究所, 2006.
- [28] ICAO, “Traffic by Flight Stage”.
- [29] “ IATA, ” [オ ン ラ イ ン]. Available: https://www.iata.org/en/pressroom/facts_figures/fact_sheets/. [アクセス日: 10 1 2022].
- [30] IHS, Inc, “Global Trade Atlas (GTA) Database”.
- [31] 柴崎隆一, 川崎智也, “南アジア地域を対象としたインターモーダル国際物流モデルの構築と政策分析,” 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 2016.
- [32] Drewry Maritime Research, “Global Container terminal Operators Annual Review and forecast,” 2018.
- [33] (社) 土木学会 土木計画学研究委員会 交通需要予測技術検討小委員会, 道路交通需要予測の理論と適用 第 I 編 利用者均衡配分の適用に向けて, 土木学会, 2003, p. 194p.
- [34] Leigh Fisher, “ Review of airport charges 2016, ” [オ ン ラ イ ン]. Available: <https://www.leighfisher.com/>. [アクセス日: 10 1 2022].
- [35] ICAO, “On Flight Origin and Destination”.
- [36] “Google Earth Engine,” Google, [オンライン]. Available: <https://earthengine.google.com/>.

[アクセス日: 10 1 2022].

- [37] CCS (China Customs Statistics) Information Center, *CCS (China Customs Statistics)*.
- [38] Federal Customs Service of Russia, “Russian Customs Data,” 2018. [オンライン]. Available: <https://stat.customs.gov.ru/>. [アクセス日: 10 1 2022].
- [39] Ministry of National Economy of the Republic of Kazakhstan Committee on Statistics, “National accounts of the Republic of Kazakhstan 2014-2018,” 2020.
- [40] National Statistical Committee of the Kyrgyz Republic, 2018. [オンライン]. Available: <https://www.stat.kg/en/opendata/category/28/>. [アクセス日: 10 1 2022].
- [41] The State Committee of the Republic of Uzbekistan on Statistics, 2018. [オンライン]. Available: <https://stat.uz/en/official-statistics/national-accounts>. [アクセス日: 10 1 2022].
- [42] Turkish Statistical Institute, 2018. [オンライン]. Available: <https://www.tuik.gov.tr/HOME/Index>. [アクセス日: 10 1 2022].
- [43] Statistics Poland, 2018. [オンライン]. Available: <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/start>. [アクセス日: 10 1 2022].
- [44] Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018. [オンライン]. Available: https://www.destatis.de/EN?Themes?Countries-Regions/Regional-Statistics/_node.html. [アクセス日: 10 1 2022].
- [45] CBS, 2018. [オンライン]. Available: <https://www.cbs.nl/en-gb/figures>. [アクセス日: 10 1 2022].
- [46] National Statistics office of Mongolia, “Mongolian Statistical Information Service,” 2018. [オンライン]. Available: https://www.1212.mn/tables.aspx?TBL_ID=DT_NSO_0500_010V1.
- [47] 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. doi: 10.1080/713643721, 2002.
- [48] 若島久幸, “日本における複数の背後輸送機関を考慮した国際物流モデルシミュレーション,” 東京大学卒業論文, 2019.
- [49] 西村健太郎, “確率的利用者均衡配分 (SUE) の理解とモデル適用,” CS, 2018.
- [50] 渋谷哲朗, 情報工学 アルゴリズム (東京大学工学教程), 東京大学工学教程編纂委員会, 編, 丸善出版, 2016.
- [51] 柴崎隆一、新井洋史, “中央アジアに視点を置いた中国の一带一路政策の影響：カザフスタンの鉄道トランジット貨物を中心に,” 日本海運経済学会第 52 号、p81～90, 2018.
- [52] ロシア連邦政府, “Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап),” 2021.

- [53] 株式会社 日通総合研究所, “シベリア鉄道の貨物輸送の利用促進に向けた実証事業等による調査委託業務報告書,” 国土交通省, 2019.
- [54] 中村武史, 渡部大輔, 松井一, “中国・欧州間鉄道コンテナ輸送における中国国内での発着地別の貨物輸送量に関する分析,” 日本物流学学会誌, 2021.
- [55] 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.