

一般財団法人 関西空港調査会

2020 年度調査研究助成事業

航空貨物を含めた

全世界国際物流シミュレーションモデルの構築

成果報告書

2021 年 3 月

東京大学

柴崎隆一

第1章 はじめに

1.1 研究背景および目的

人類の歴史の中で、国際物流は文明を発達させる上で重要な役割を担い、物流を実現させる輸送機関も時代とともに発展してきた。はるか昔では、海上輸送は木製の筏、陸上輸送は動物に荷台を引かせて貨物を移動させていた。一方、今では世界中で莫大な数の大型船舶や鉄道、大型トラックなどが同時に貨物輸送を行っている。航空輸送においても、1903年にライト兄弟が人類で初めて飛行機による飛行を成功させてから、多くの開発が続けられ、今ではアジアからヨーロッパを補給なしで飛行する航空機が多く活躍している。

輸送機関の技術が特に発展した20世紀には、貨物の種類によらずに輸送や積卸を行うことのできるコンテナの登場によって、貨物の輸送および荷役の効率が飛躍的に向上し、国際物流を発展させる一因となった。コンテナは、積卸する設備さえ整えばあらゆる輸送機関で輸送が可能であることから、海上・陸上における複合輸送もより一層発展するようになった。近年では、中国の「一带一路」構想に基づき、中欧班列をはじめとした陸上輸送の利用促進が進められている。陸上輸送の成長に伴い、陸上輸送に注目した研究も行われている。西村 [1]は、「一带一路」構想による陸上輸送の利用促進に注目し、ユーラシア大陸を対象に海上輸送と陸上輸送の競合を考慮できるシミュレーションモデルを構築している。また、構築したモデルを用いて「一带一路」構想に関連したシナリオ分析も行い、「一带一路」構想に基づく施策の影響を定量的に評価している。

コストの高い航空輸送についても、経済のグローバル化に伴って発展しており、Chang et al. [2]によれば、1970年代から10年ごとに輸送量を倍増させてきている。近年はリーマンショックの影響で世界経済が停滞していたものの、新興国の経済成長などの影響で回復の兆しを見せていることで、輸送量が再び増加し始めている。Fig.1-1で示すように、航空輸送の年成長率は近年再び上昇しており、Airbus [3]によれば、今後20年間にわたって年間4%の成長が見込めると推測されている。また、それにより、輸送機関の競合が注目されている。一般的に、航空輸送は、海上輸送や陸上輸送と比べ、輸送時間が最も短く、運賃は最も高い輸送機関であるため、単価(単位重量当たりの価格)の大きい貨物に向いていることに加え、腐りやすい生鮮食品や、納期の迫った自動車部品など、単価以外の観点から航空輸送を選択し得る要因のある品目や場面もみられる。柴崎ら [4]は、東アジアと欧洲間を中心とした長距離輸送における品目別の機関分担に注目し、品目ごとに航空輸送閾単価は異なるものの、航空輸送と他の輸送機関で十分競合し得る品目があることを示している。輸送量で比較すると、航空輸送量は、世界の全輸送量(海上輸送や陸上輸送との合計)の約0.5%にしか満たない一方で、輸送金額で比較すると、世界の全輸送金額の約35%にもなる(IATA [5])。特に航空貨物輸送においては、1995年から2004年までの間に、航空旅客輸送と比較して50%以上も早く成長していると言われている(Wong et al. [6])。

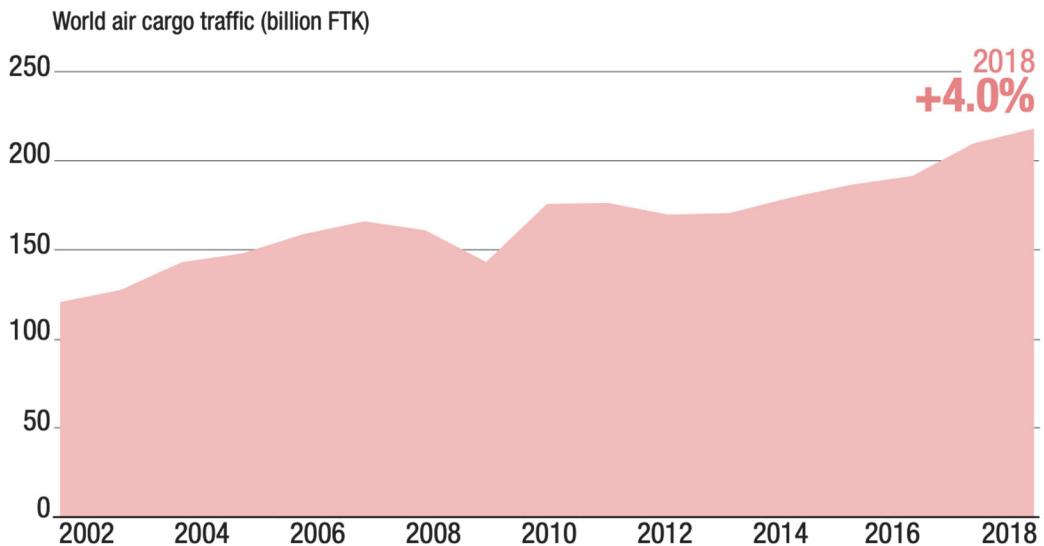


Fig.1-1 世界の航空貨物輸送量の推移（単位：billion FTK）

出典: IATA, Seabury, Airbus Market Forecasts [3]

以上のように、航空輸送は世界経済が不景気に陥っていた時には停滞期も存在していたものの、長期的に見れば20世紀後半から成長を続けており、今後20年においてもさらなる成長が見込まれることから、他の輸送機関との競合がより一層活発になっていくことが推測される。

世界各地における航空輸送インフラの整備については、国レベルの取り組みと、国際機関レベルの取り組みがそれぞれ進められている。中国では、世界最大のハブ港として「北京大興国際空港」が昨年開港し、ユーラシア大陸の航空輸送ネットワークの拡大が見込まれる。また、ICAO（国際民間航空機関）では、増大が見込まれる航空輸送需要に備え、世界的に調和のとれた航空交通管理（ATM）に関する基本的方向性が取りまとめられ、国際的な「インターチェンジオペラビリティの確保」を実現するために、米国のNextGen、欧州のSESAR、そして日本のCARATSのように世界各地で地域に即した長期ビジョンが策定されている。具体的には、空港発着能力や安全性、燃料消費量等の向上率の定量的な目標を設定しており、日本のCARATSでは、2025年までに、管制処理容量を2倍に向上、安全性を5倍に向上、燃料消費量を10%削減、航空保安業務の効率性を50%以上、CO₂排出量を10%削減、といった目標が設定されている[7]。これらの取り組みにより、世界規模で運航効率が向上することが見込まれる。

このように、輸送経路の多様化および複雑化は近年活発に進んでおり、世界の情勢に応じて、どの輸送ルートがどの程度使われているのか、また、その理由を把握することは、今後の世界のコンテナ輸送の動向や、各国の政策実施による輸送ネットワークへの影響を分析するのに不可欠と言える。

よって、本研究では、成長が見込まれている航空貨物輸送の変化を実ネットワークに基づいて捉え、かつ、海上輸送や陸上輸送との競合や協調を定量的に分析できるツールとして、国際海上コンテナやコンテナ相当貨物の輸送実態を再現した国際物流ネットワークモデルを構築することを目的とする。さらに、構築したモデルを用いて、特定の空港の利用を促進させる施策の提案や、航空輸送の発展が他の輸送機関に与える影響の分析を行う。

1.2 ユーラシア大陸の輸送動向

1.1 節でも述べたように、2013 年に中国の習近平国家主席が現代版シルクロードとも呼ばれる「一带一路」構想を提唱し、新たな経済圏の構築を目指すことを宣言してから、中国を中心にユーラシア大陸の国際物流は発展を続けている。特に陸上輸送においては、従来のシベリア鉄道の代替手段として、中国-ヨーロッパを結ぶチャイナランドブリッジの利用が促進されている。Fig.1-2 に示すように、2013 年以降、チャイナランドブリッジの中心的な役割を担う「中欧班列」の取扱貨物量が飛躍的に増加している。このように、コストが高くとも輸送速度が速い陸上輸送の利用が活発になっていくことは、陸上輸送と同様にコストよりも輸送時間の短さが重視される航空輸送の利用にも影響を与えることが推測される。

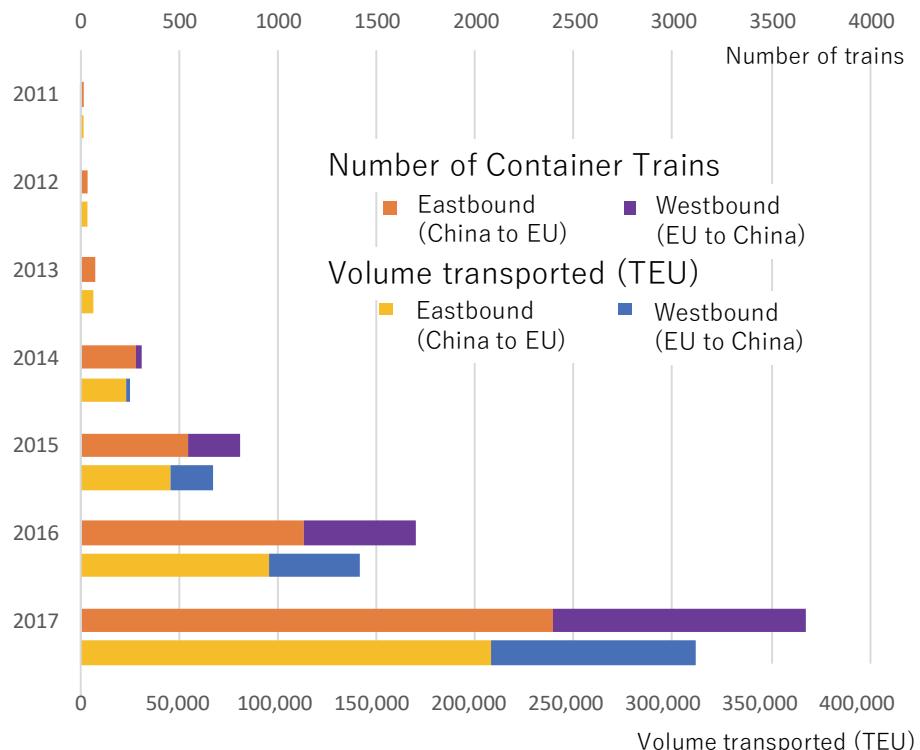


Fig.1-2 近年の中欧班列の輸送量

出典：Eurasian Development Bank(2018) [8]etc.

1.3 Sea & Air 型輸送の発展

航空輸送の成長に伴い、他の輸送機関との競合が予想される一方で、Sea & Air 型輸送のような、他の輸送機関との複合輸送も注目されている。Sea & Air とは、海上輸送と航空輸送を両方用いる輸送経路のことを指しており、海上あるいは航空輸送のみで輸送するよりも利便性やコスト面が優れている場合に用いられる。海上輸送の欠点である輸送速度の遅さは、近距離の輸送に関してはそれほど影響がないため、各国から周辺のハブ空港まで海上輸送で輸送し、ハブ空港から航空輸送を用いて目的地まで輸送する形は、Sea & Air の強みの形の 1 つと言える。

Sea & Air 型輸送が活発である国の一として、韓国が挙げられる。韓国にはアジア最大のハブ空港である仁川空港があり、周辺の港湾も発達していることから、Jung et al. [9] のように、国内と周辺諸国間の Sea & Air 輸送に関する分析が多くされている。Fig.1-3 に示すように、2010 年代前半の世界的な不景気の影響で航空輸送が停滞していた時期には、Sea & Air 型の輸送も停滞していたものの、近年は景気回復に伴い、Fig.1-4 が示すように、Sea & Air 型輸送の利用は回復してきている。ただし、Sea & Air 型輸送を利用する貨物は、輸送量自体が少ないため、世界情勢に応じて輸送量の変動が激しい傾向がある。仁川空港を経由する Sea & Air 型輸送を利用する貨物量についても、2018 年度の前半から生じている米中摩擦の影響を受け、仁川港のように一部の港の Sea & Air 型輸送量は減少しており、今後の世界情勢によって、Sea & Air 型輸送の利用状況は大きく変わることが予測される。

仁川空港を経由する Sea & Air 型輸送において、大きなシェアを占める仁川港と平沢港について、中国の各港湾から輸送される貨物量を Fig.1-5, Fig.1-6 にそれぞれ示す。また、各港の位置関係を Fig.1-7 に示す。各図より、中国内で屈指の規模の貨物取扱量をもつ上海港よりも、煙台 (Yantai) 港や威海 (Weihai) 港、石島 (Shidao) 港のように、仁川港や平沢港と地理的距離の近い港ほど Sea & Air 型輸送が盛んであることがわかる。これは、岡田 [10] によると、北米向けの商品を扱っていた韓国の繊維・衣類メーカーが、1990 年代に中国の山東省に生産拠点を移した一方で、中国の空港へのアクセスの悪さや中国発航路の便数の少なさから、中国発仁川経由の Sea & Air 型輸送が検討され始めたことに由来している。

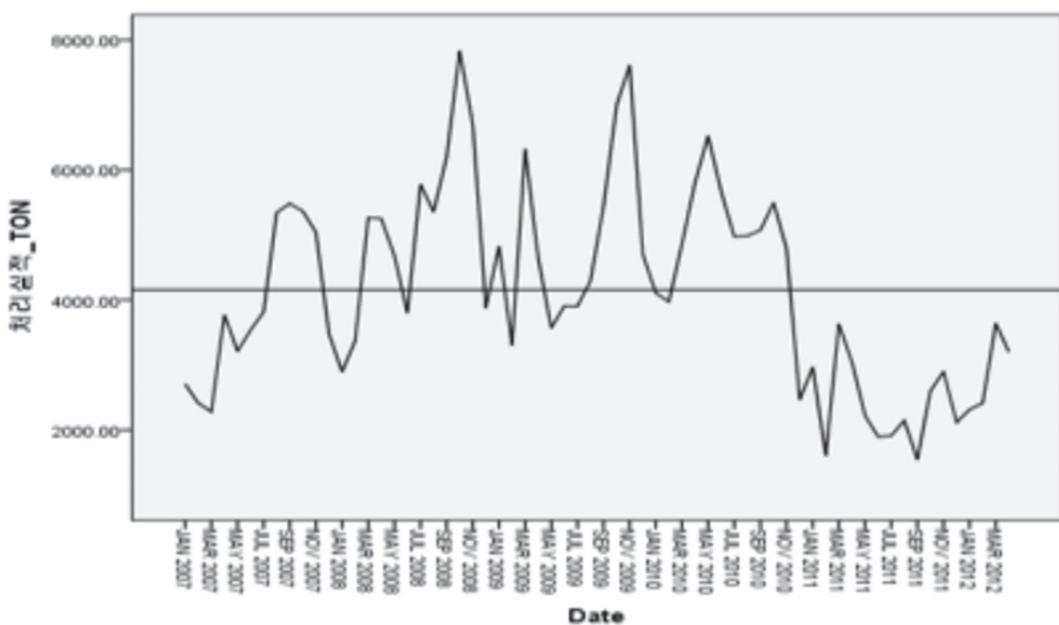


Fig.1-3 中国-韓国間における Sea & Air 型輸送量の推移 (ton ベース)

出典 : Jung et al. [9]

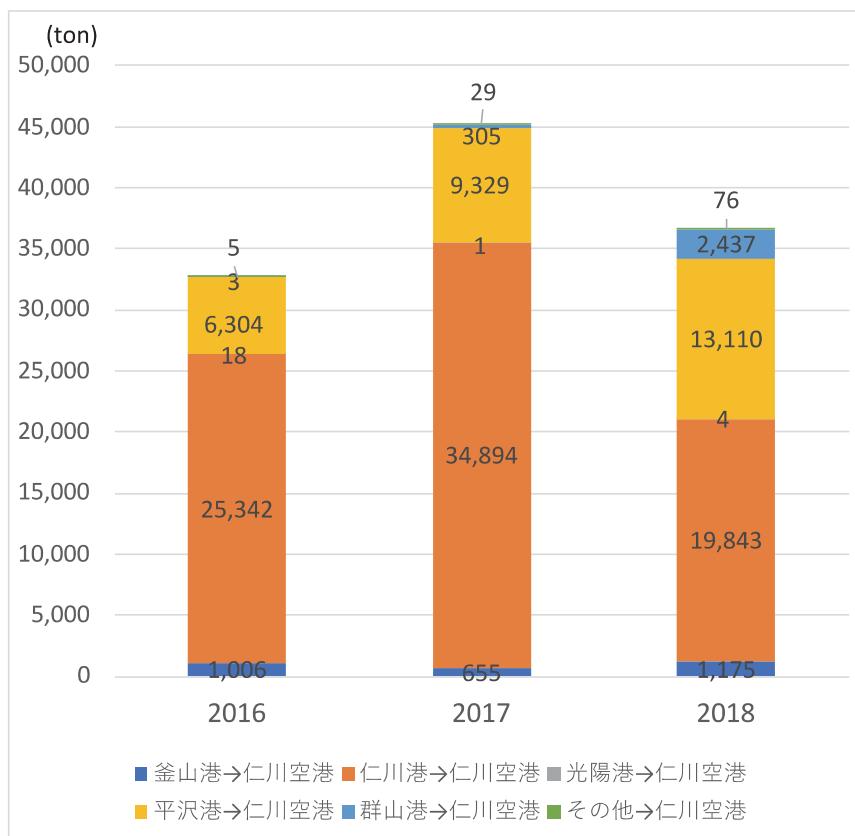


Fig.1-4 韓国の仁川空港を利用する Sea & Air 型輸送の輸送量推移

出典 : Sea & Air Transport 2018 [11] より作成

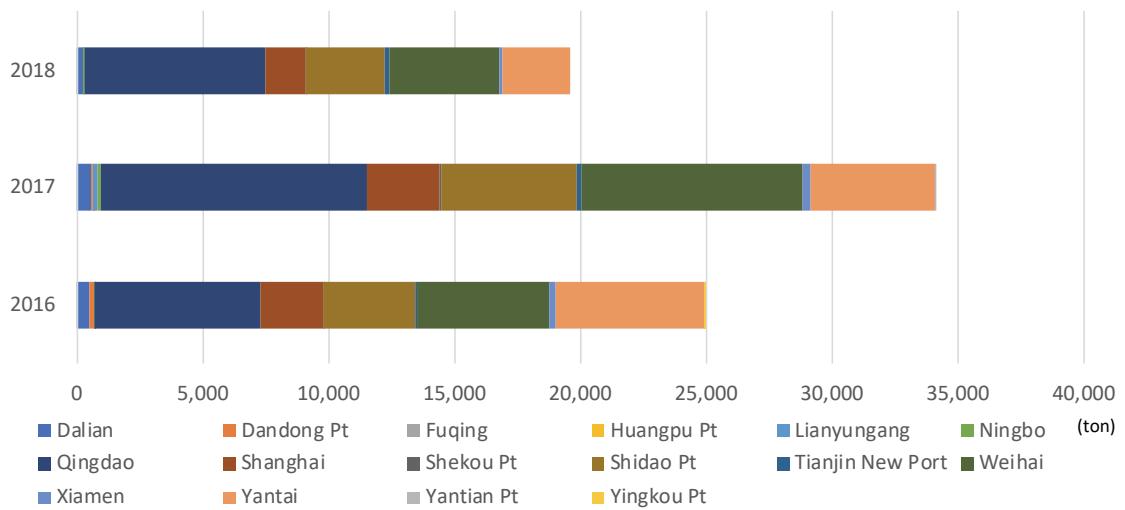


Fig.1-5 仁川港に輸送される貨物の出発港（中国）ごとの輸送量

出典：Sea & Air Transport 2018 [11]より作成

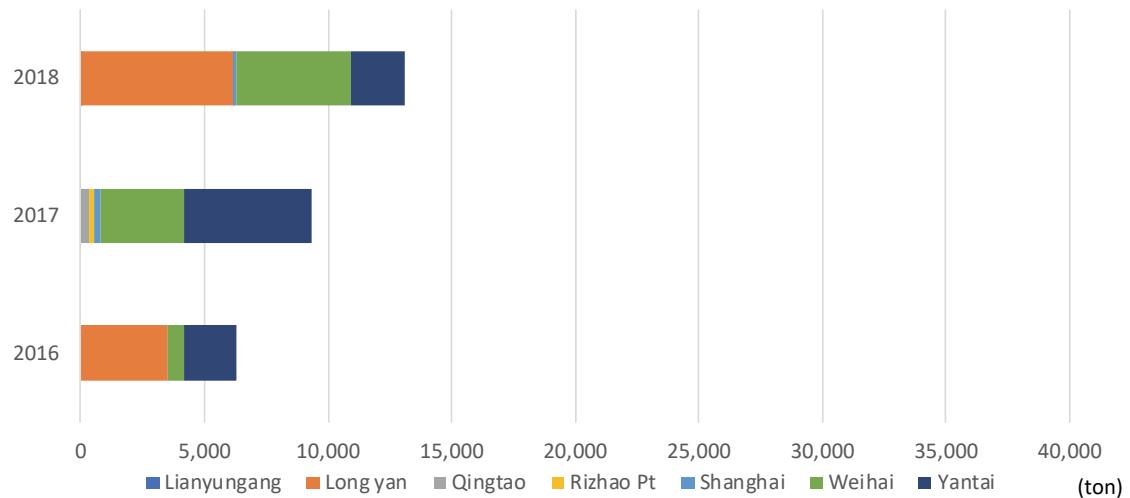


Fig.1-6 平沢港に輸送される貨物の出発港（中国）ごとの輸送量

出典：Sea & Air Transport 2018 [11]より作成



Fig.1-7 各港湾の位置

**今後も成長が期待される
アジア市場を網羅。
さらに拡大していく、充実の
新・航空ネットワーク。**



Fig.1-8 沖縄ハブのイメージ図（出典：ANA）

日本においても、東南アジア等の周辺諸国をターゲットとした Sea & Air 型輸送の実施が期待できる空港として、沖縄の那覇空港がある。ANA 総合研究所 [12]によると、那覇空港は、2007 年に提唱された「アジア・ゲートウェイ構想」に基づき、アジア主要都市を結ぶ新たなハブ空港として 2009 年に貨物ハブ事業が開始された。ANA による沖縄ハブのイメ

ージ図を Fig.1-8 に示す。那覇空港の利点としては、上述したように、地理的に東および東南アジアに近いことから、アジアの主要都市へ約 4 時間でアクセスできる点、24 時間空港である利便性を生かして深夜に効率よくトランジットが行える点、そして日本の主要 21 空港と直行便で結ばれているために日本の新鮮な食材が素早く輸送できる点などが挙げられる。現在は、アメリカのメンフィス空港などにより多くの企業を誘致することで、企業による沖縄発着貨物を扱う物流を活性化させ、さらなる輸送ネットワークの拡大を目指している。海上輸送が盛んな東南アジアと地理的に近い空港であることは、当然 Sea & Air 型輸送の経由地に適していると言える。よって、今後空港の容量等がより整備されることで、従来のハブ空港としての役割だけでなく、Sea & Air 型輸送の拠点になることが期待される。

第2章 既往研究

2.1 既往の関連研究

国際物流ネットワークが拡大していく中で、国際貨物輸送のフローを定量的に分析できるツールのニーズは高く、国際貨物輸送を対象としたモデル構築に取り組む研究が多く実施されてきている。ただし、地球規模の実ネットワークの輸送状況などの情報を集めることは難しく、単純な仮想ネットワークを用いたモデルに留まっているものや、十分な再現性の評価に至っていない研究が多い。Jourquin [13]や Maia and Couto [14]は鉄道やトラックによる複合輸送を分析するモデルを構築しているものの、どちらも仮想的なネットワークを用いており、十分な再現性の評価も行えていない。また、その他の輸送（海上輸送や航空輸送）を同時に考慮することもできていない。Tavasszy et al. [15]は全世界の海上輸送および各港の背後輸送ネットワークを対象としたモデルを構築しているものの、単純な最短経路探索等による配分を行なっており、混雑の影響などを考慮できておらず、再現性の評価も行なっていない。Jones et al. [16]や Wang et al. [17]は、地域をアメリカに限定して陸上輸送ネットワークや港湾からの海上輸送を対象としたモデルを構築している。

一方、西村 [1]や Shibasaki et al. [18]は、陸上輸送についてはユーラシア大陸に限定しているものの、実ネットワーク上で混雑を考慮した配分を行い、海上輸送と陸上輸送の競合できるモデルを構築している。また、高い再現性が得られていることも確認しており、海上輸送および陸上輸送の複合輸送を対象としたモデル構築の研究においては最も実用性の高い研究の1つであると言える。ただし、西村 [1]や Shibasaki et al. [18]は、航空輸送ネットワークを含んでいない。さらに、西村 [1]をベースとし、日本も対象国に組み込んだ若島 [19]は、時間価値の異なる2つの品目グループを別々に配分するモデルを構築しており、時間価値の異なる品目を1つのモデルで扱うことを達成している。

航空輸送については、航空会社が貨物輸送を効率的に行い、急速に変化する情勢にも対応できるような輸送戦略の策定を目指すようになってきたことで、1990年ごろより航空輸送のオペレーションに関する研究が増加してきた（Feng et al. [20]）。航空輸送貨物とそれ以外の貨物で時間価値等の性質が大きく異なることから、航空輸送ネットワークを考慮した複合輸送モデル構築の研究はそれほど多くされていない。航空輸送を含む複合輸送モデル構築の研究としては、Heinitz and Meincke [21]や ITF [22]は挙げられるものの、どちらも簡易な仮想ネットワークにおけるモデル構築に留まっている。また、Meijs [23]は、Tavasszy et al. [15]のモデルに航空輸送ネットワークを統合したモデルを構築しており、再現性の評価も行なっている。ただし、Tavasszy et al. [15]と同様に混雑の影響は考慮しておらず、輸送する品目の区別をしていない。また、構築したモデルを用いたシナリオ分析も行っていない。石倉 [24]は、東アジア地域における国際航空旅客流動を対象とし、混雑も考慮したネットワーク配分モデルを構築した。その上で東アジア域内におけるいくつかのシナリオ分析を通じて

モデルの挙動解析を行った。ただし、ネットワークに含まれる輸送機関は、航空輸送と空港の背後圏陸上輸送に留まっており、全輸送機関を含むには至っていない。

また、本研究で適用した段階配分手法と並列計算を交通ネットワークに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 [25]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 [26]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. [27]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. [28]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 [29]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。

2.2 本研究のアプローチ

2.1 節で既往研究の代表例を挙げてきた。ただし、いずれの研究も、海上・陸上・航空輸送の実ネットワークを全て含み、その上、混雑を考慮した推計結果に基づいて現実の輸送実態を再現したモデルを構築していない。よって、本研究では、海上・陸上輸送の実ネットワークを含んで混雑も考慮している Shibasaki et al. [18]のモデルをベースとし、新たに航空輸送ネットワークを統合したモデルを構築する。

しかし、Shibasaki et al. [18]等の研究では、モデル構造に起因する課題が発生している。すなわち、これらのモデルにおいては、陸上および海上の実際の輸送ネットワークを元に容量

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おり、その両モデル間の繰り返し計算は収束が保証されるものではないため、事後的な収束の確認が必要となる。たとえば Yamaguchi et al. [30]に示される結果は、全般的にいえば港湾取扱量の再現性は十分高いものの、たとえばタイの比較的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。バンコク港は、首都に近く陸上輸送コストが安い一方で港湾の容量制約が厳しいのに対し、レムチャバン港は、首都から多少遠いものの港湾容量は十分にあり大型船も入港可能であることから海上輸送コストが安いという、トレードオフの関係にある。このような問題を解決するために、たとえば既存モデル (Shibasaki et al. [18]) では考慮されていない港湾の容量制約を考慮することが考えられるものの、いずれにしても、厳しい容量制約の多いネットワークにおいて、従来のような下位モデルの均衡配分計算やモデル全体の繰り返し計算手法を用いると、計算結果が変動する可能性が高まるという問題が生じる。

そこで本研究では、これまでの研究で用いられてきた配分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容量制約を含む大規模ネットワーク上の配分手法として、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とを目的とする。なお、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、並列計算アルゴリズムの導入も実施する。さらに、前述した現状の計算結果を踏まえ、③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。また、構築したモデルを用いたシナリオ分析も行う。以下、第3章では構築するモデルの構成について、第4章では構築するモデルに必要な入力データについて、第5章では構築したモデルの推計結果について、第6章ではモデルを用いたシナリオ分析について、それぞれ述べていく。

第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 [1] や Shibasaki et al. [18] 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を統合といったモデルの修正を行っている。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 Fig. 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。

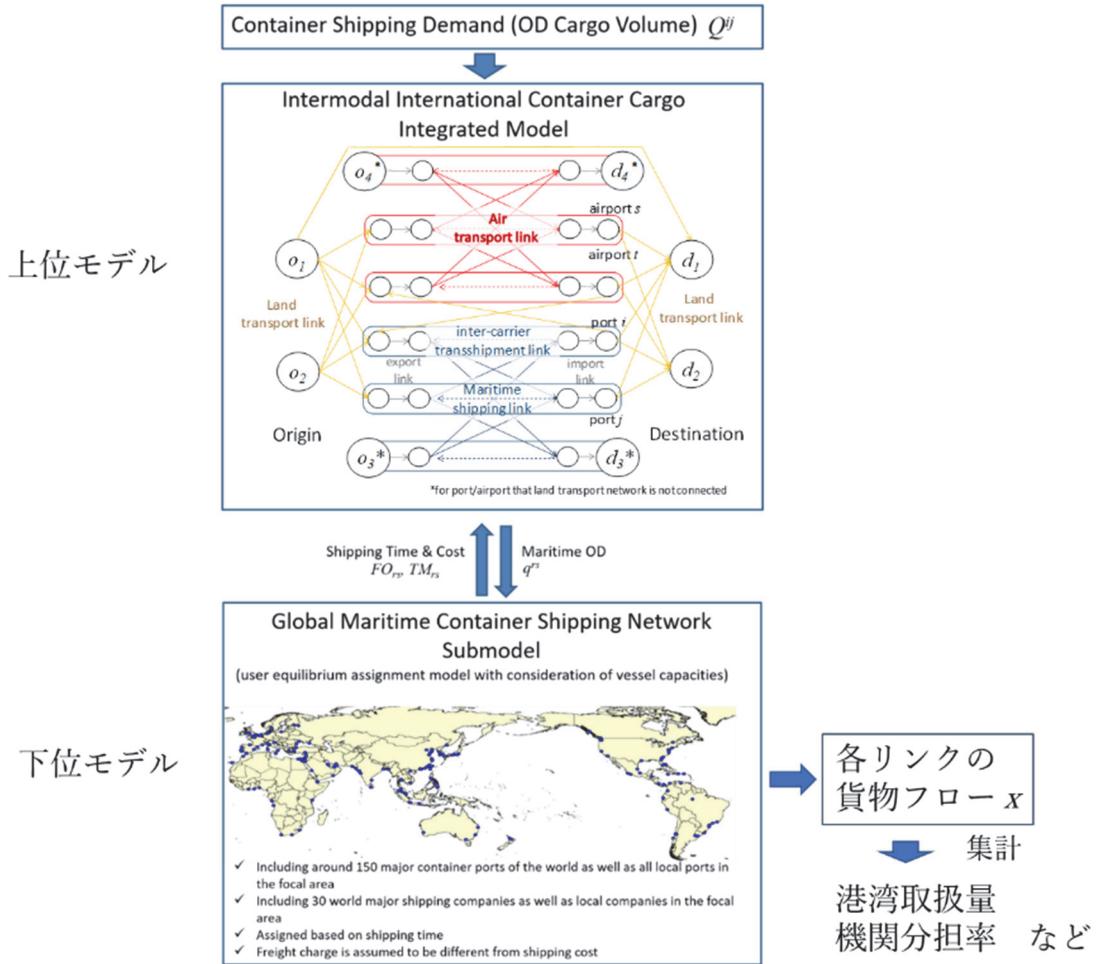


Fig. 3-1 モデルの全体構成

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。

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

$$U^{od}_{hm} = V^{od}_h + \varepsilon^{od}_{hm} \quad (3-2-2)$$

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^{od}_{hm} : 貨物 m が経路 h を選んだ時の効用

V^{od}_h : 経路 h を選ぶときの効用の確定項（観測可能）

ε^{od}_{hm} : 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 [31]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^{od}_h 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)

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

(海上輸送も含む場合)

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

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)

TLA_{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)

TLA_{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)

TLA_{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乗じるパラメータ ($\tau > 1$)

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 rs 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(8)式で表される。

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

Fig. 3-2 に上位モデルのネットワーク構成、Fig. 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。

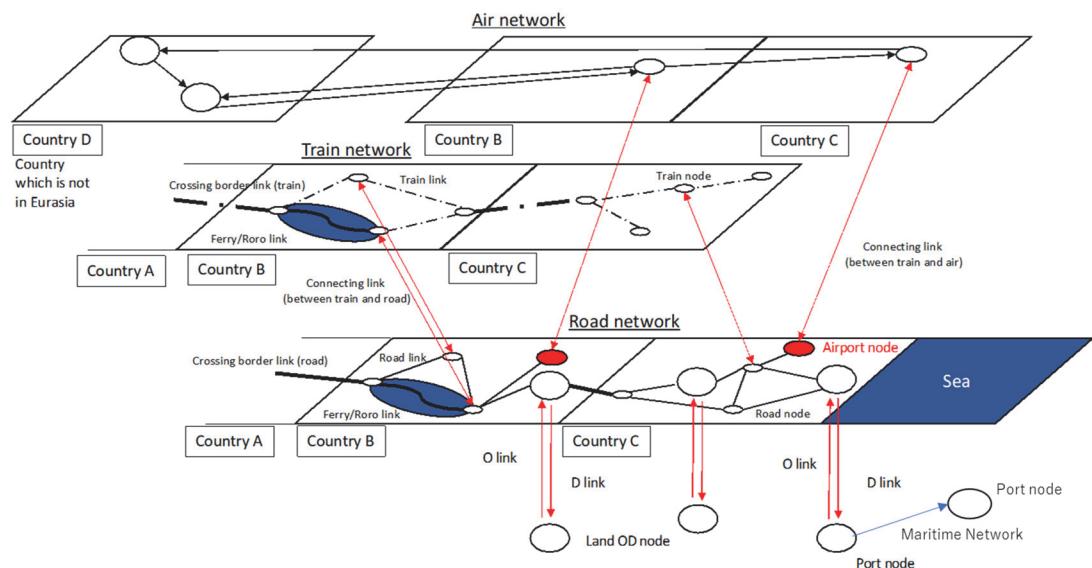


Fig. 3-2 上位モデルのネットワーク構成

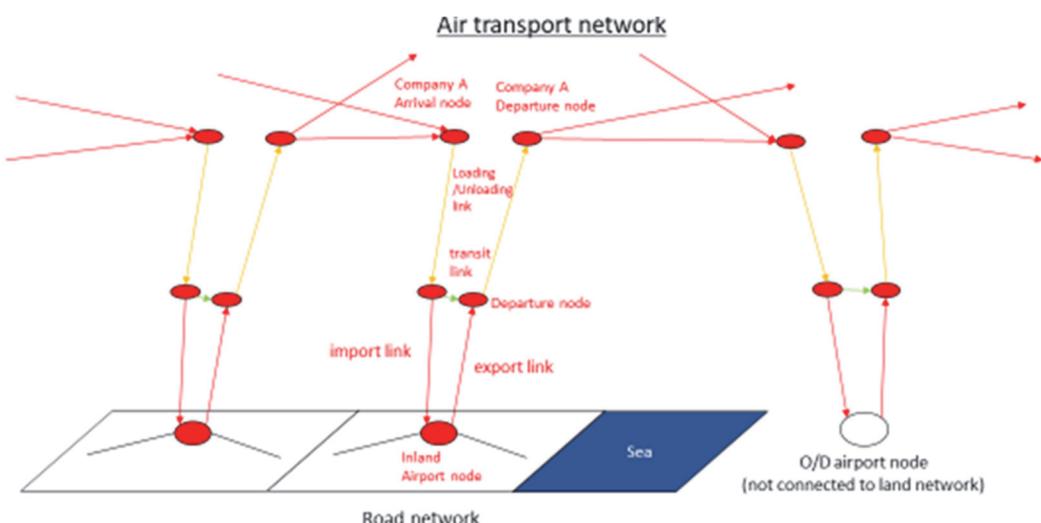


Fig. 3-3 航空ネットワーク詳細

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 : トレーラの速度 (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こ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する。

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

$CORa$: 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する。コスト関数は以下の式で表す。

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

$CFFe$: 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、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）を考慮する。

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 [32]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 [32]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) と設定する。

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する。

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

Ap : 空港

TT : ton と TEU の換算係数

CCHAp^{Ap} : 空港 Ap 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^{Ap} については、4-3 節で詳細を述べる。*TLUL* については、Ohashi [32]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. [18]の海上輸送リンクや Chao et al. [33]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、人件費を考慮する。コスト関数は以下の式で表す。

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

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)

If_{ave} : 対象全航空リンクの平均消席率 (本モデルでは 2016 年度のデータを使用)

$TWAi_a$: 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 [24]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 [24]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 $TWAi_a$ は、以下の式で表す。

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

If_{ave} については、ICAO の提供する Traffic by Flight Stage (TFS)データ [34]より算出し、0.253という値を設定している。TFS データ [34]を含む ICAO 提供のデータについては、本モデルの航空ネットワーク構築にも利用しており、詳細は第 4 章で述べる。

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 [35]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, 以下の式で定義する.

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

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, Chao [33]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, $d_1 = 9.10 \times 10^{-3}$, $d_2 = 9.80 \times 10^{-3}$ を得た. (Fig. 3-5)

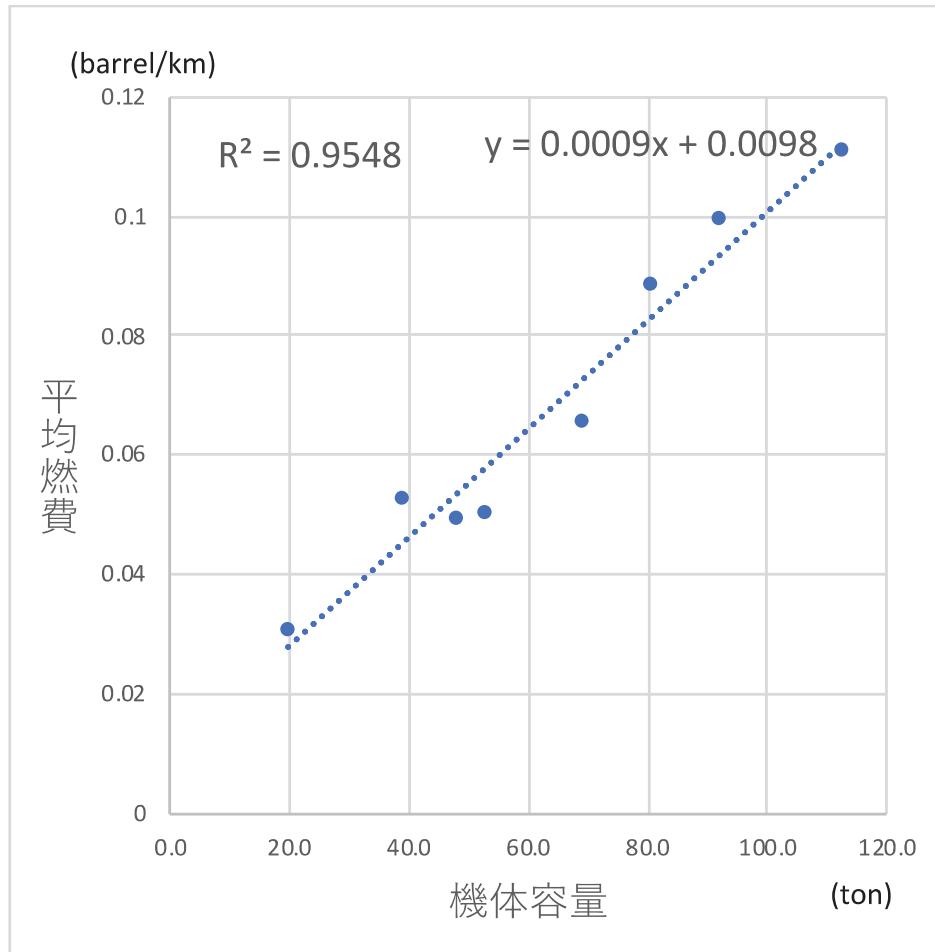


Fig. 3-5 機体の容量と平均燃費の関係

(Chao [33] より筆者作成)

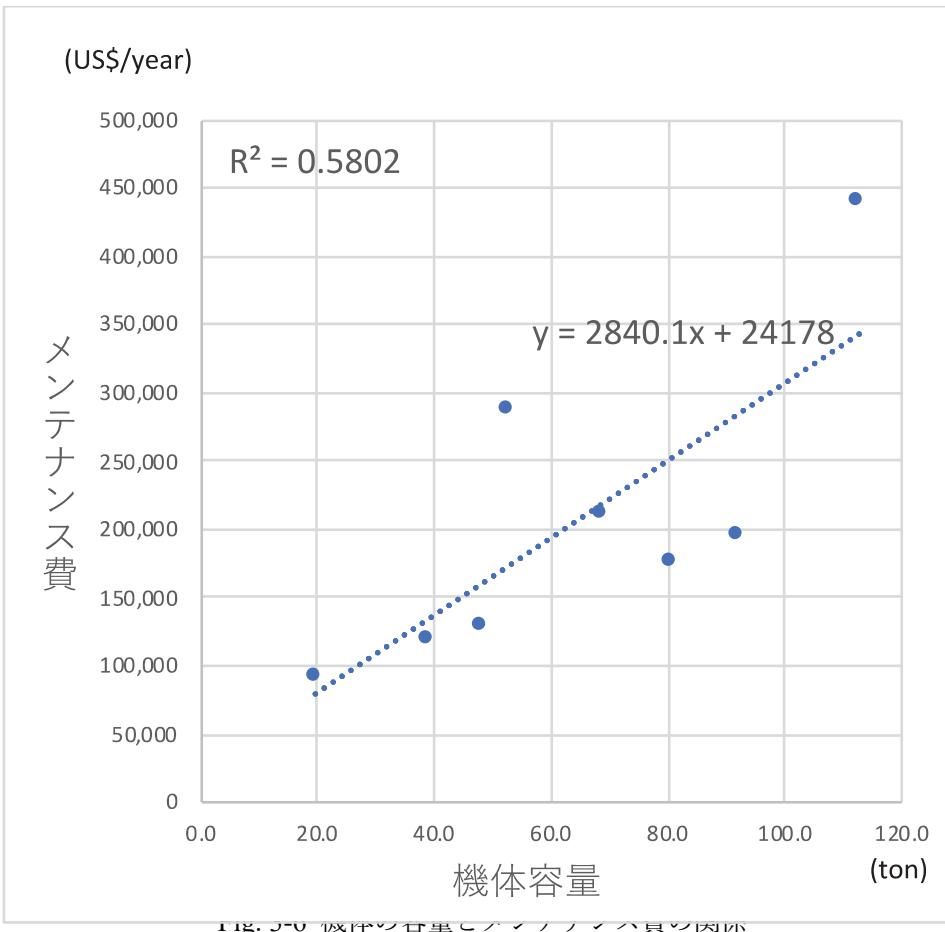
次に、メンテナンス費 AMC_a については、 AFR_a と同様に、各機体の容量によって決まり、各航路の機体の容量のデータを全て入手することは難しいため、以下の式で定義する。

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

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、Chao [33]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、 $d_3 = 2.84 \times 10^4$, $d_4 = 2.42 \times 10^4$ を得た。 (Fig. 3-6)



(Chao [33]より筆者作成)

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, 以下の式で定義する.

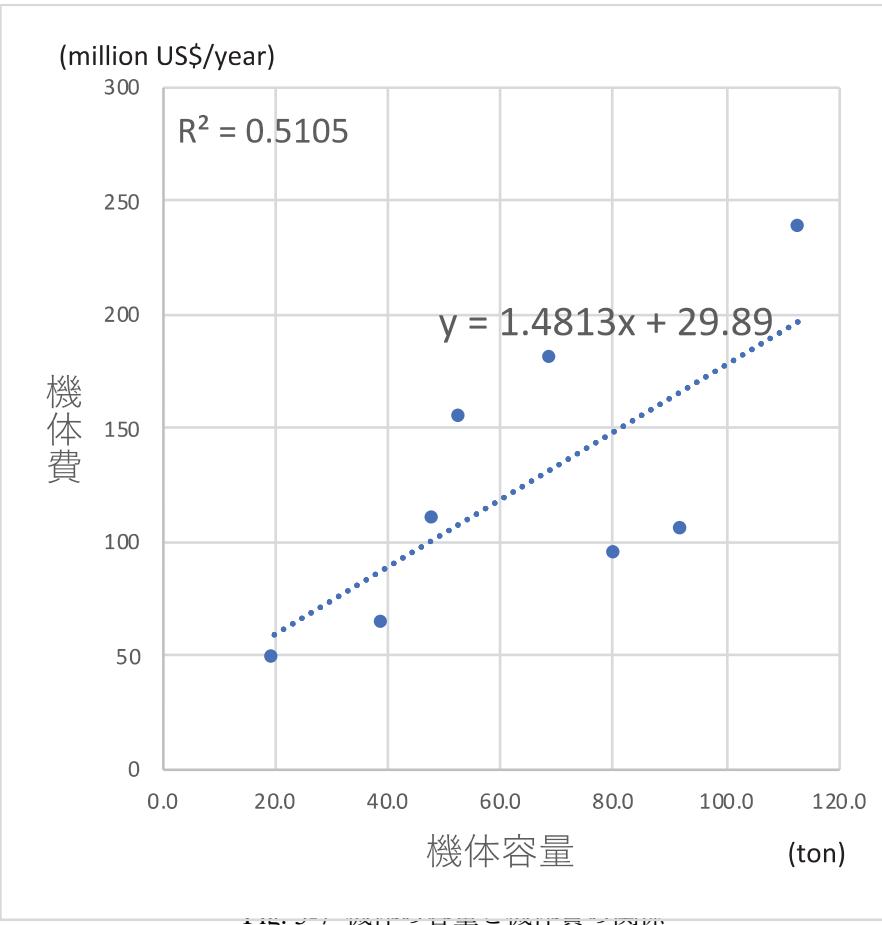
$$ACC_a = \left(d_5 \times \frac{TT \times tCAP_a}{Freq_a} + d_6 \right) \times \frac{ir_air}{\{1 - (1 + ir_air)^{-PP_air}\}} \times \frac{1}{365 \times ODR_air} \quad (3-2-26)$$

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, Chao [33]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, $d_5 = 1.48 \times 10^7$, $d_6 = 2.99 \times 10^7$ を得た. (Fig. 3-7)



(Chao [33]より筆者作成)

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、以下の式で定義する。

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

d_7, d_8 : 機体の容量に依存する係数

d_7, d_8 は、Chao [33]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、 $d_7=5.55 \times 10^3$ 、 $d_8=9.84 \times 10^4$ を得た。 (Fig. 3-8)

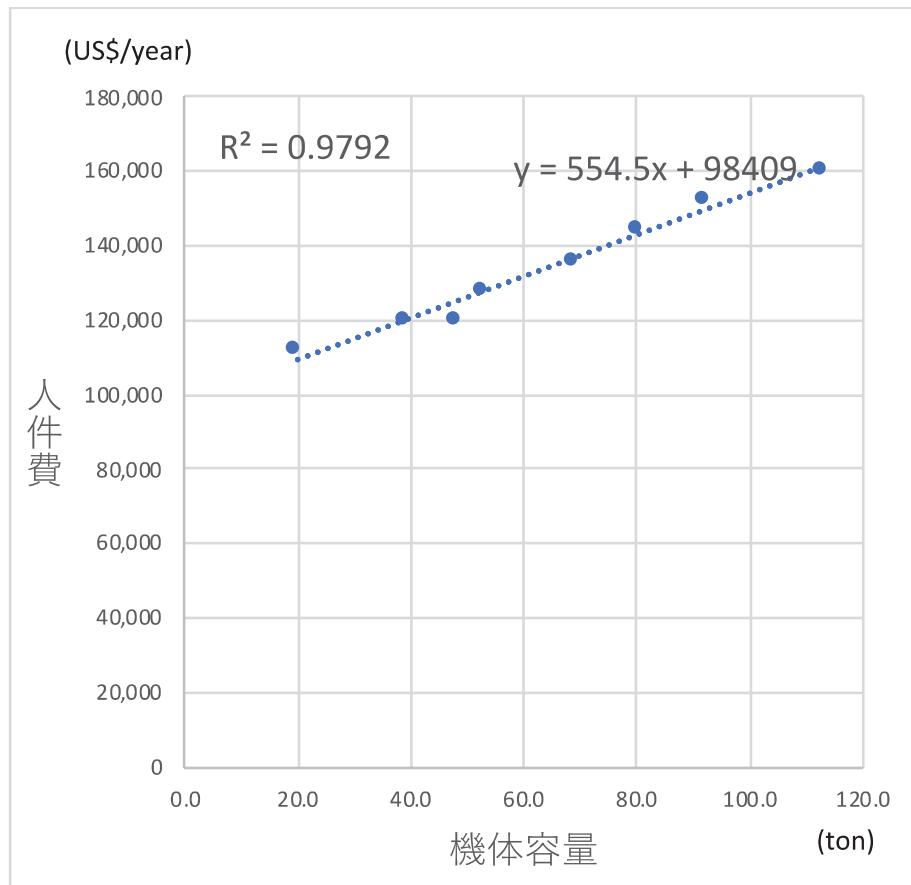


Fig. 3-8 機体の容量と人件費の関係
(Chao [33]より筆者作成)

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。

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

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. [18]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遞減や、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 \hat{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、リンク間干渉のある利用者均衡配分を行う。

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

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

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

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

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

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

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 Fig. 3-9 に示す。

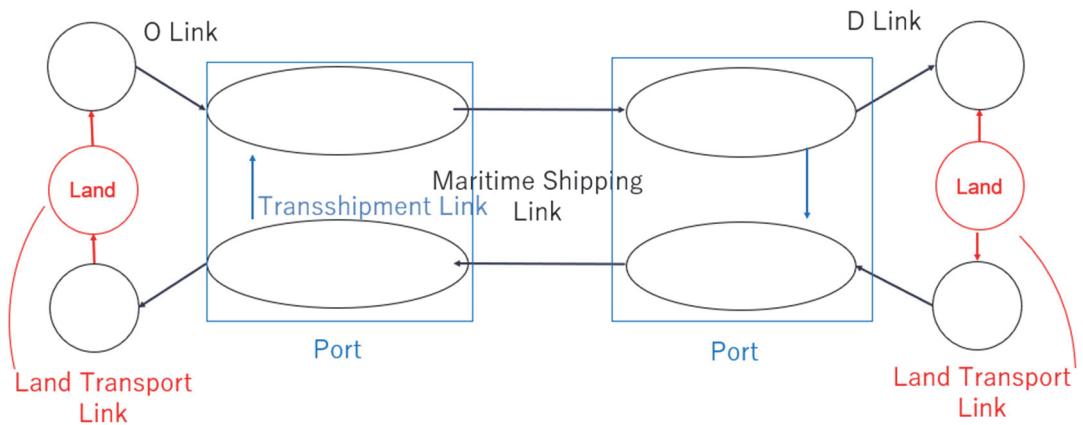


Fig. 3-9 上位モデルにおける港湾内のネットワーク構成

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_b 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。

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

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

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する。

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

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 月に取得し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 vt (US\$/TEU/hour)については、IHS 社の提供する世界貿易サービス (WTS) データベース [36]を用いて値を算出した (WTS 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、若島 [19]が時間価値の高い品目グループと低い品目グループで vt を区別して配分計算を行った手法を用いて、本モデルでは以下の式に基づき航空貨物の時間価値 vt を算出する。なお、扱うデータは 2016 年度のものとする。

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

C : WTS データベース [36]に含まれる全品目の集合 (全品目数 $n=270$)

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、WTS データベース [36]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、従来モデルと同様に 0.5 (US\$/TEU/hour)を採用する。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。上の式に基づいて航空貨物の時間価値を算出した結果、 $vt = 73.7$ (US\$/TEU/hour)が得られるため、これを採用する。

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、若島 [19]の品目別配分モデルと同様に、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 0.5 (US\$/TEU/hour)を用いる。

3.3 下位モデル

Fig.3-10 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.

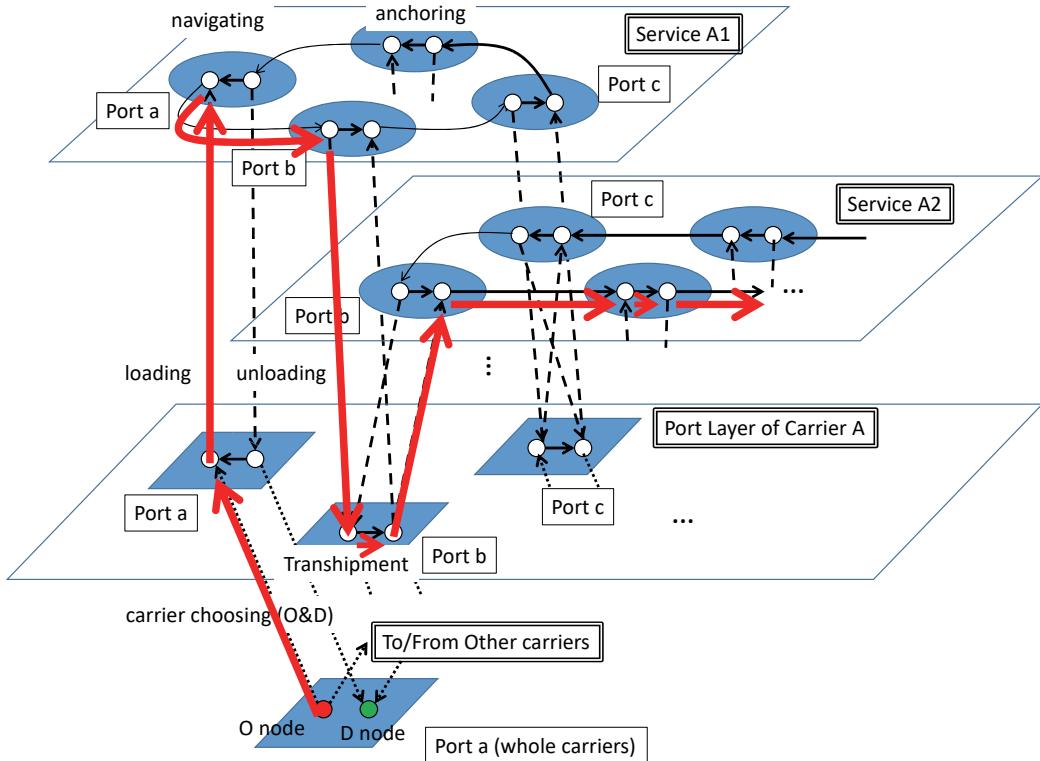


Fig. 3-10 本モデルの海上コンテナ輸送ネットワークの構成（出典：柴崎，川崎 [37]）

Fig. 3-10 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する。

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する。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ところから、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もの、従来モデルでは港湾容量を考慮していない。そこで本研究では、Drewry Maritime Research [38]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。

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。

$$t_n(x_a) = \left(\frac{l_a}{v_a} + \gamma S_a \times TS + \gamma P_a + TP \right) + TW_{a'} \times b\mathbf{1} \times \{lf_a(x_a)\}^{b^2} \quad (3-3-1)$$

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 年間での運航隻数 (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 × 7 day × 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の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。

$$t_t(x_a) = TRS_r \left\{ bp_1 \cdot \left(\frac{x_{all_r}}{pcap_r} \right)^{bp_2} + 1.0 \right\} \quad (3-3-7)$$

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。

$$t_{cx}(x_a) = t_{cm}(x_a) = SSN \quad (3-3-8)$$

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 [39][40]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。

$$TM_{rs} = \min_k \{\sum_{a \in k} t(\hat{x}_a)\} \quad (3-3-9)$$

\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。

$$FO_{rs} = \max_{g \in G} AC_g^{rs} \quad (3-3-10)$$

$$TM_g^{rs} = \min_k \{\sum_{a \in k} t(\hat{x}_a)\}, \forall k \in K_g^{rs} \quad (3-3-11)$$

(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)

$$AC_g^{rs} = \sum_{a \in k_g} c(\hat{x}_a) \quad (3-3-12)$$

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

$$AC_g^{rs} = 0 \quad (3-3-13)$$

K_g^{rs} : 港湾 rs 間の船社 g の輸送経路集合

$c(\cdot)$: 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。

$$k_g = \arg [\min_k \{\sum_{a \in k} [c(\hat{x}_a) + vt \times t(\hat{x}_a)]\}], \forall k \in K_g^{rs} \quad (3-3-14)$$

以下に各リンクの 1TEUあたりの輸送費用 $c(\cdot)$ 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。

$$c_n(x_a) = \left\{ (FC_a + CC_a + OC_a) \times \frac{l_a/v_a}{24} + \gamma S_a \times CS \right\} \times \frac{cap_a}{v cap_a} / freq_a + \gamma P_a \times CP \quad (3-3-15)$$

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。

$$FC_a = FP \times FR_a \quad (3-3-16)$$

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。

$$FR_a = c_1 \times DWT_a^{\frac{2}{3}} \times v_a^3 \quad (3-3-17)$$

c_1 : 船種に依存する係数 (柴崎, 川崎 [37]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。

$$CC_a = VP_a \times \frac{ir}{\{1-(1+ir)^{-PP}\}} \times \frac{1}{365 \times ODR} \quad (3-3-18)$$

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。

$$VP_a = c_2 \times DWT_a + c_3 \quad (3-3-19)$$

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 [37]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。

$$OC_a = c_4 \times DWT_a + c_5 \quad (3-3-20)$$

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 [37]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 Table 3- 1 参照)

スエズ運河純トン $scnrt_a$ は以下の式で表す。

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

Table 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

$scnrt$		c_6	c_7
from	to		
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)

$CB^{N_{ex}}, CB^{N_{im}}$: 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)

$CB^{N_{ex}}$ および $CB^{N_{im}}$ 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た。

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、(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 キャリブレーションによるパラメータ推計

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 Table 3-2 および Table 3-3 に示す。なお、 $b1$, $b2$, β 以外のパラメータについては、Shibasaki et al. [18]と同じ値を用いている。 $b1$, $b2$ については、Shibasaki et al. [18]で $b3\sim b8$ を設定する手法と同様の手法で決定した。 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た。

Table 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			
$b1$	$b2$	$b3$	$b4$	$b5$	$b6$	$b7$	$b8$	θ	β
3.1	1.5	1.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.005	2.4

Table 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

第4章 入力データ

4.1 港湾および海上輸送ネットワーク

本モデルでは、対象港湾および海上輸送ネットワークは、原則として Shibasaki et al. [18]と同じものを適用している。ただし、アラブ首長国連邦周辺の海上輸送ネットワークの再現性向上の観点から、輸送ネットワークに mina khalifa 港を追加している。mina khalifa 港は、すでに対象港とされている mina zayed 港と位置が近いため、mina zayed 港に mina khalifa 港を追加するという扱いにする。よって、ネットワークには修正を加えているものの、対象港湾数および地域間輸送需要（OD 表）は、Shibasaki et al. [18]と同じもの採用している。

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、Shibasaki et al. [18]のネットワークに対し、ポーランド・ドイツ・オランダの道路ネットワークと、トルコの道路および鉄道ネットワークを追加したネットワークを用いている。ネットワークの追加に伴い、この四カ国については、各国のゾーン数も増加させている。詳細は、4.5 節で述べる。

また、陸上輸送ネットワークと航空輸送ネットワークの統合に伴い、空港ノードを各空港の緯度経度に基づいて新たに設定している。各空港の緯度経度については、Open flights [40] の Web サイトより入手している。陸上輸送ネットワークの対象国内に存在する空港ノードについては、最も近くに存在する道路ノードと道路リンクで結んでいる。

ネットワーク内のその他のリンクの速度や距離等の設定については、原則として Shibasaki et al. [18]と同じものを用いているものの、一部のリンクにおいて、データの不備があったため、適宜修正を加えている。

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、Fig.3-3 および Fig.3-4 で示した航空輸送リンクおよび空港内リンク（空港輸出入リンク、航空会社別到着・出発リンク、トランジットリンク）を除き、総ノード数は 18540 個、総リンク数は 20872 本である。Fig. 4-1 に本モデルの陸上輸送ネットワーク図を示す。なお、陸上輸送ネットワークのノードは、OD ノードおよび各リンクの端点を含む。

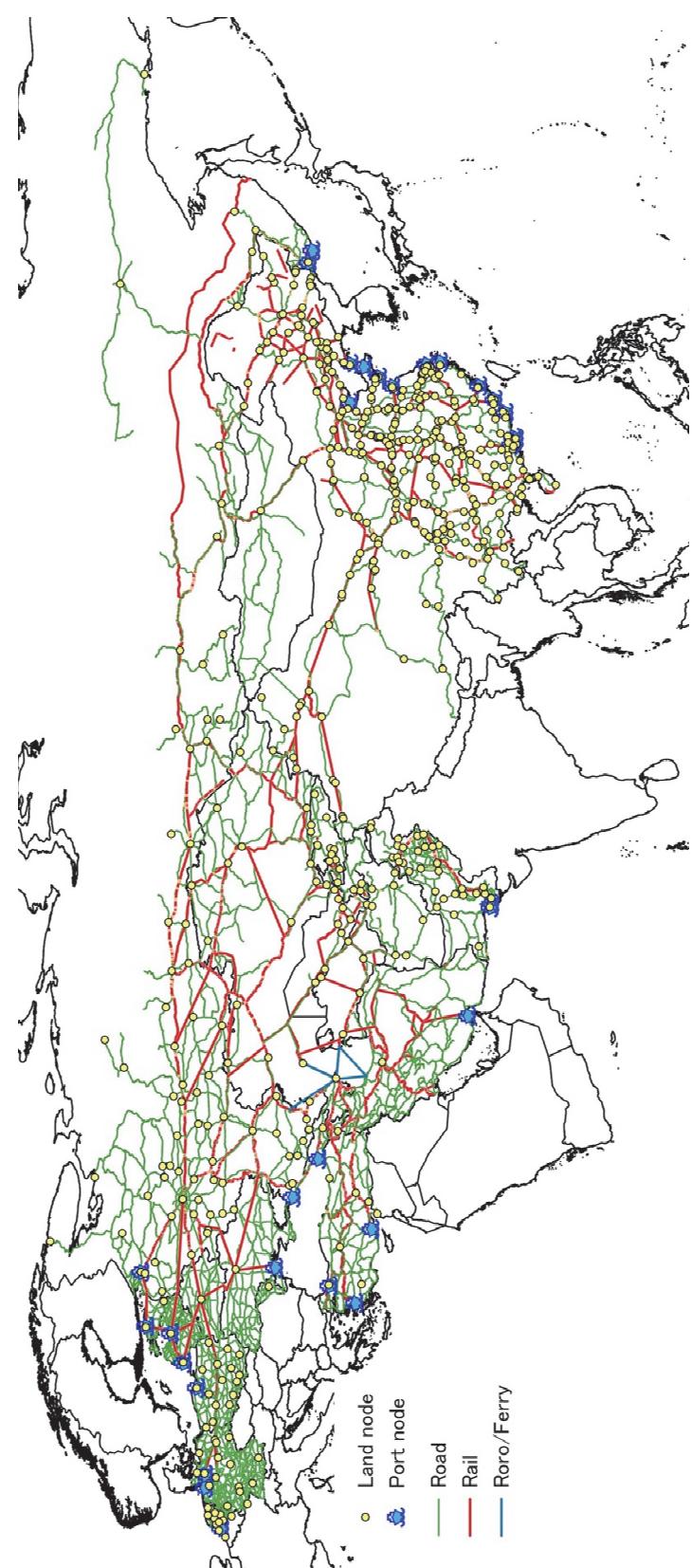
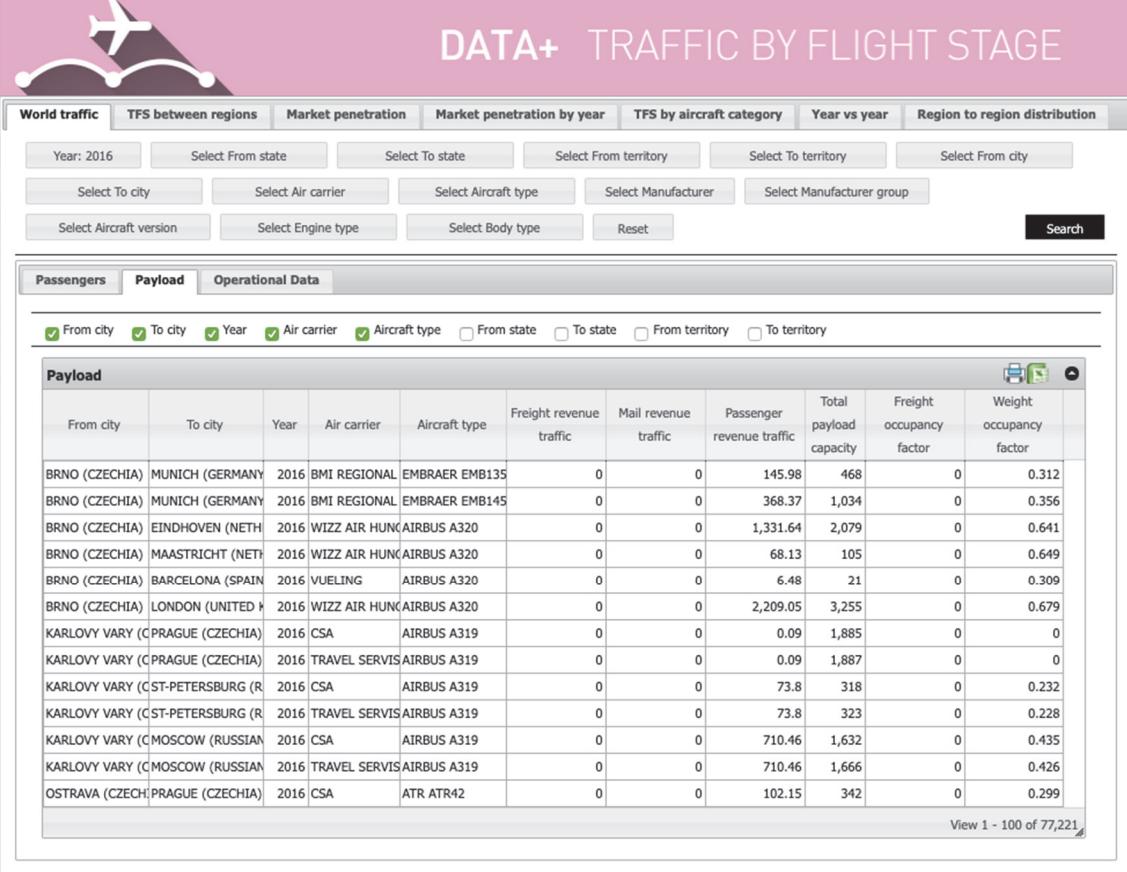


Fig. 4-1 本モデルの陸上輸送ネットワーク図 (QGIS にて作成)

4.3 空港およ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 [34]を主に使用する。TFS データの仕様を Fig. 4-2 に示す。



The screenshot shows the ICAO DATA+ TRAFFIC BY FLIGHT STAGE web application. At the top, there is a navigation bar with tabs: World traffic, TFS between regions, Market penetration, Market penetration by year, TFS by aircraft category, Year vs year, and Region to region distribution. Below the navigation bar are several search and filter buttons for selecting years, states, territories, cities, air carriers, aircraft types, manufacturers, and engine types. A 'Search' button is located on the right side of these filters.

Below the search area, there are three tabs: Passengers, Payload, and Operational Data. The Payload tab is currently selected. It displays a table of flight stage payload data. The table has columns for From city, To city, Year, Air carrier, Aircraft type, Freight revenue traffic, Mail revenue traffic, Passenger revenue traffic, Total payload capacity, Freight occupancy factor, and Weight occupancy factor. The data is presented in a grid format with rows corresponding to specific flight routes and aircraft types. At the bottom of the table, it says "View 1 - 100 of 77,221".

Fig. 4-2 TFS データの仕様 (ICAO Web サイトより)

TFS データは、格安航空会社 (LCC) 以外の全世界の航空会社が就航している航路情報を含んでおり、各航路の出発都市および到着都市（本モデルでは都市と空港を同じものとして扱う）、年度、航空会社、使用機体、貨物・郵便・旅客の年間輸送実績（全て ton ベース）、貨物・郵便・旅客の年間輸送実績容量（ton ベース）、貨物の年間輸送実績が年間貨物輸送容量に占める割合、年間運航便数（別タブの Operation Data から入手可能）のデータが得られる。また、使用機体の情報から、フレーター便とベリー便の区別も行うことができる。各航路の輸送速度については、機体情報に基づき、複数の Web サイトや書籍をもとに設定した。

本モデルでは TFS の 2016 年度データを使用する。ただし、TFS の 2016 年度データに含まれる計 72510 航路・855 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必要以上に複雑になることで、モデル計算が収束しづらくなったり、全体の計算時間が過大になっ

たりしてしまうことが推測される。よって、TFS の 2016 年度データに含まれる全航路のうち、年間運航頻度が 12 便以上（1 ヶ月に 1 便以上）の航路を抽出した。さらに、抽出した航路の貨物輸送実績を集計し、年間貨物取扱量が 15,000ton 以上の計 184 空港を本モデルの対象空港とした（対象空港については、後述する Table 4-2 で示す）。対象航路については、上述した条件に基づいて抽出された航路のうち、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、最終的に計 6825 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 Fig.4-3 に示す。航路を統合する際、輸送容量、運航頻度は合計値を設定した一方で、輸送速度については平均値を設定した。また、航空会社については、三大アライアンス（Star Alliance, One World, Sky Team）に所属している会社については同一の航空会社として扱う。Morrell [41]によれば、各航空会社間の貨物輸送のアライアンスについては、必ずしも旅客輸送の三大アライアンスと同等に扱えないのが実態であり、実際は特定の航空会社間で協定が結ばれていることが多いようであるものの、本モデルでは詳細までは考慮しないこととする。

各航路の輸送距離については、TFS データに含まれていない。よって、各空港の緯度経度情報を利用し、地球上の 2 地点間の距離計算の際に一般的に用いられることが多い「ヒュベニの公式」を用いる。「ヒュベニの公式」は以下の式で表される。

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

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

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

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

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 : 卵酉線曲率半径

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）

「ヒュベニの公式」を用いる際に注意しなければならないのが、グリニッジ子午線（経度 0 度の線）をまたぐ航路の距離計算である。上の式で表されるように、「ヒュベニの公式」は 2 地点の緯度差および経度差を利用するため、グリニッジ子午線が対象の 2 地点間に存在する場合、鋭角ではなく鈍角側の経度差が利用されてしまう恐れがある。よって、本モデルにおいて各航路の距離を計算する際は、グリニッジ子午線が対象の 2 地点間に存在する場合、グリニッジ子午線が 2 地点間に位置しないように 2 地点を平行移動させてから距離計算を行う処理を加えた。

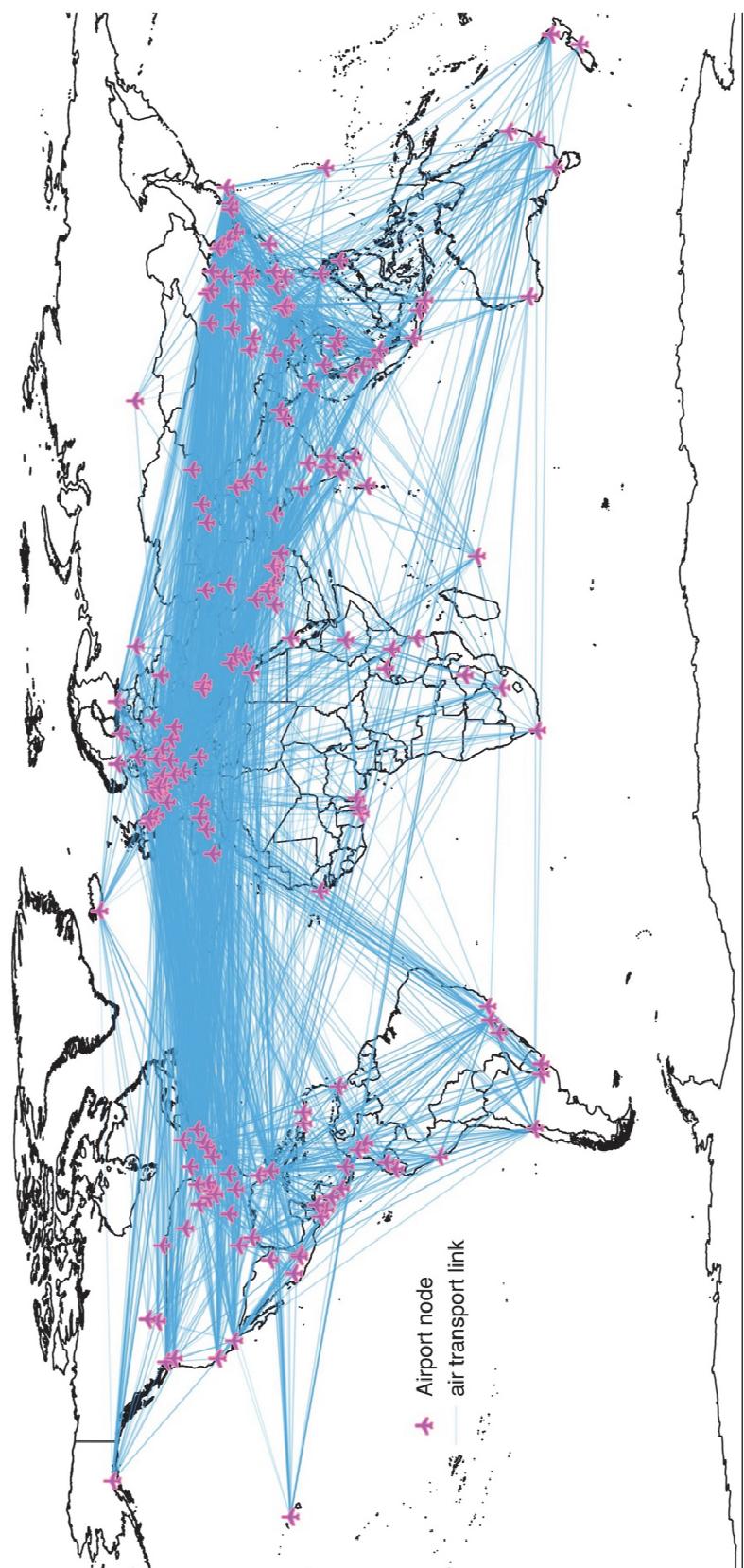


Fig. 4-3 本モデルの航空輸送ネットワーク (QGIS にて作成)

3.4 節の航空会社別出発・到着リンクで考慮する空港使用料 $CCHAp^{Ap}$ については、Leigh Fisher が提供する Review of Airport Charges 2016 [42]を用いて推計した。Review of Airport Charges 2016 [42]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 [42]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、Table 4-1 に示す。モデル対象空港の中で、Review of Airport Charges 2016 [42] に含まれている空港については、1 人あたり平均 55kg と仮定した上で、ton へ換算し、さらに 10ton を 1TEU として、最終的な 1TEU あたりの空港使用料を推計した。一方、その他の 134 空港については、空港使用料等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 [42]に記載されている 50 空港の空港使用料の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 184 空港および各空港使用料の推計値を Table 4-2 に示す。ここで、一般的に、空港使用料の情報は各空港の Web サイトに記載されており、Chao [33] のように対象空港数が限られている研究では、Web サイトから空港使用料データを入手している。本モデルでは対象空港数が多いため、上述した方法で空港使用料を設定したものの、網羅的なデータベースの取得は今後の課題である。

Table 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 [42]

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

Table 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)	airport charge (US\$/TEU)
1	BUENOS AIRES	ARGENTINA	SAEZ	6,002
2	BRISBANE	AUSTRALIA	YBAF	6,002
3	MELBOURNE	AUSTRALIA	YMEN	6,002
4	PERTH	AUSTRALIA	YPJT	6,002
5	SYDNEY	AUSTRALIA	YSSY	7,581
6	VIENNA	AUSTRIA	LOWW	6,920
7	BAKU	AZERBAIJAN	UBBB	6,002
8	BAHRAIN	BAHRAIN	OBBI	6,002
9	DHAKA	BANGLADESH	VGTJ	6,002
10	BRUSSELS	BELGIUM	EBBR	6,026
11	LIEGE	BELGIUM	EBLG	6,002
12	CURITIBA	BRAZIL	SBBI	6,002
13	RIO DE JANEIRO	BRAZIL	SBAF	6,002
14	SAO PAULO	BRAZIL	SBGR	7,300
15	PHNOM-PENH	CAMBODIA	VDPP	6,002
16	CALGARY	CANADA	CYYC	6,002
17	EDMONTON	CANADA	CYEG	6,002
18	MONTREAL	CANADA	CYHU	6,002
19	TORONTO	CANADA	CYKZ	9,352
20	VANCOUVER	CANADA	CYVR	7,476
21	WINNIPEG	CANADA	CYAV	6,002
22	SANTIAGO	CHILE	SCEL	6,002
23	BEIJING	CHINA	ZBAA	6,521
24	CHENGDU	CHINA	ZUUU	6,002
25	CHONGQING	CHINA	ZUCK	6,002
26	DALIAN	CHINA	ZYTL	6,002
27	GUANGZHOU	CHINA	ZGGG	6,002
28	HANGZHOU	CHINA	ZSHC	6,002
29	HONG KONG	CHINA	VHHH	3,210
30	KUNMING	CHINA	ZPPP	6,002
31	MACAU	CHINA	VMMC	6,002
32	NANJING	CHINA	ZSNJ	6,002
33	ORDOS	CHINA	ZBDS	6,002
34	QINGDAO	CHINA	ZSQD	6,002
35	SHANGHAI	CHINA	ZSSS	6,002
36	SHENZHEN	CHINA	ZGSZ	6,002
37	TIANJIN	CHINA	ZBTJ	6,002
38	XIAMEN	CHINA	ZSAM	6,002
39	XI'AN	CHINA	ZLXY	6,002
40	ZHENGZHOU	CHINA	ZHCC	6,002
41	BOGOTA	COLOMBIA	SKBO	6,002
42	MEDELLIN	COLOMBIA	SKMD	6,002
43	SAN JOSE	COSTA RICA	MROC	6,002
44	LARNACA	CYPRUS	LCLK	6,002
45	PRAGUE	CZECHIA	LKPR	6,083
46	COPENHAGEN	DENMARK	EKCH	5,680
47	SANTO DOMINGO	DOMINICAN REPUBLIC	MDSD	6,002
48	GUAYAQUIL	ECUADOR	SEGU	6,002
49	QUITO	ECUADOR	SEQM	6,002
50	CAIRO	EGYPT	HECA	6,002
51	SAN SALVADOR	EL SALVADOR	MSLP	6,002
52	ADDIS ABABA	ETHIOPIA	HAAB	6,002
53	HELSINKI	FINLAND	EFHF	3,939
54	PARIS	FRANCE	LFPB	7,562
55	COLOGNE	GERMANY	EDDK	6,002
56	DUSSELDORF	GERMANY	EDDL	5,835
57	FRANKFURT	GERMANY	EDDF	8,945
58	LEIPZIG	GERMANY	EDDP	6,002
59	MUNICH	GERMANY	EDDM	6,002
60	ACCRA	GHANA	DGAA	6,002
61	GUATEMALA CITY	GUATEMALA	MGGT	6,002
62	SAN PEDRO SULA	HONDURAS	MHLM	6,002
63	BUDAPEST	HUNGARY	LHBP	8,365
64	REYKJAVIK	ICELAND	BIRK	6,002
65	BANGALORE	INDIA	VOBL	6,002
66	CHENNAI	INDIA	VOMM	6,002
67	COCHIN	INDIA	VOCI	6,002

68	DELHI	INDIA	VIDD	5,897
69	HYDERABAD	INDIA	VOHY	6,002
70	KOLKATA	INDIA	VECC	6,002
71	MUMBAI	INDIA	VABB	5,707
72	DENPASAR BALI	INDONESIA	WADD	6,002
73	JAKARTA	INDONESIA	WIII	3,760
74	SURABAYA	INDONESIA	WARR	6,002
75	TEHRAN	IRAN (ISLAMIC REPUBLIC OF)	OIIIE	6,002
76	TEL AVIV	ISRAEL	LLBG	6,002
77	MILAN	ITALY	LIML	6,969
78	ROME	ITALY	LIRA	8,688
79	FUKUOKA	JAPAN	RJFF	6,002
80	NAGOYA	JAPAN	RJGG	6,002
81	OKINAWA	JAPAN	ROAH	6,002
82	OSAKA	JAPAN	RJOO	9,222
83	TOKYO	JAPAN	RJAA	7,784
84	AMMAN	JORDAN	OJAI	6,002
85	ALMATY	KAZAKHSTAN	UAAA	6,002
86	NAIROBI	KENYA	HKNW	6,002
87	KUWAIT	KUWAIT	OKBK	6,002
88	BEIRUT	LEBANON	OLBA	6,002
89	LUXEMBOURG	LUXEMBOURG	ELLX	6,002
90	KUALA LUMPUR	MALAYSIA	WMKK	2,781
91	PENANG	MALAYSIA	WMKP	6,002
92	MALE	MALDIVES	VRMM	6,002
93	MAURITIUS	MAURITIUS	FIMP	6,002
94	GUADALAJARA	MEXICO	MMGL	6,002
95	MEXICO CITY	MEXICO	MMMX	7,461
96	MONTERREY	MEXICO	MMAN	6,002
97	TOLUCA	MEXICO	MMTO	6,002
98	YANGON	MYANMAR	VYYY	6,002
99	AMSTERDAM	NETHERLANDS	EHAM	5,639
100	MAASTRICHT	NETHERLANDS	EHBK	6,002
101	AUCKLAND	NEW ZEALAND	NZAA	7,654
102	CHRISTCHURCH	NEW ZEALAND	NZCH	6,002
103	MANAGUA	NICARAGUA	MNMG	6,002
104	LAGOS	NIGERIA	DNMM	6,002
105	OSLO	NORWAY	ENGM	3,341
106	MUSCAT	OMAN	OOMS	6,002
107	ISLAMABAD	PAKISTAN	OPRN	6,002
108	KARACHI	PAKISTAN	OPKC	6,002
109	LAHORE	PAKISTAN	OPLA	6,002
110	PANAMA CITY	PANAMA	MPTO	6,002
111	LIMA	PERU	SPIM	6,002
112	CEBU	PHILIPPINES	RPVM	6,002
113	MANILA	PHILIPPINES	RPLL	6,002
114	WARSAW	POLAND	EPBC	4,500
115	LISBON	PORTUGAL	LPPT	6,158
116	DOHA	QATAR	OTBD	6,002
117	BUSAN	REPUBLIC OF KOREA	RKPK	6,002
118	JEJU	REPUBLIC OF KOREA	RKTU	6,002
119	SEOUL	REPUBLIC OF KOREA	RKSS	4,299
120	KRASNOYARSK	RUSSIAN FEDERATION	UNKL	6,002
121	MOSCOW	RUSSIAN FEDERATION	UUEE	9,775
122	DAMMAM	SAUDI ARABIA	OEDF	6,002
123	JEDDAH	SAUDI ARABIA	OEJF	6,002
124	RIYADH	SAUDI ARABIA	OERK	6,002
125	DAKAR	SENEGAL	GOOY	6,002
126	SINGAPORE	SINGAPORE	WSSL	4,389
127	CAPE TOWN	SOUTH AFRICA	FACT	6,002
128	JOHANNESBURG	SOUTH AFRICA	FAGC	6,030
129	BARCELONA	SPAIN	LEBL	6,002
130	MADRID	SPAIN	LEGT	6,719
131	ZARAGOZA	SPAIN	LEZG	6,002
132	COLOMBO	SRI LANKA	VCBI	6,002
133	STOCKHOLM	SWEDEN	ESKB	4,112
134	ZURICH	SWITZERLAND	LSZH	8,552
135	KAOHSIUNG	TAIWAN PROVINCE OF CHINA	RCKH	6,002
136	TAIPEI	TAIWAN PROVINCE OF CHINA	RCSS	6,002
137	BANGKOK	THAILAND	VTBD	4,878
138	PHUKET	THAILAND	VTSP	6,002

139	LOME	TOGO	DXXX	6,002
140	PORT OF SPAIN	TRINIDAD & TOBAGO	TPPP	6,002
141	ISTANBUL	TURKEY	LTBA	6,002
142	SABIHA GOKCEN	TURKEY	LTFJ	6,002
143	TEKIRDAG	TURKEY	LTBU	6,002
144	ENTEBBE	UGANDA	HUEN	6,002
145	KYIV	UKRAINE	UKBB	6,002
146	ABU DHABI	UNITED ARAB EMIRATES	OMAA	6,002
147	DUBAI	UNITED ARAB EMIRATES	OMDB	4,399
148	SHARJAH	UNITED ARAB EMIRATES	OMSJ	6,002
149	LONDON	UNITED KINGDOM	EGLL	12,070
150	MANCHESTER	UNITED KINGDOM	EGCC	6,002
151	NOTTINGHAM	UNITED KINGDOM	EGBN	6,002
152	DAR ES SALAAM	UNITED REPUBLIC OF TANZANIA	HTDA	6,002
153	AGUADILLA	UNITED STATES	TJBQ	6,002
154	ANCHORAGE	UNITED STATES	PAMR	6,002
155	ATLANTA	UNITED STATES	KATL	6,002
156	BOSTON	UNITED STATES	KBOS	6,002
157	CHARLOTTE	UNITED STATES	KCLT	6,002
158	CHICAGO	UNITED STATES	KMDW	6,002
159	CINCINNATI	UNITED STATES	KCVG	6,002
160	COLUMBUS	UNITED STATES	KLCK	6,002
161	DALLAS/FORT WORTH	UNITED STATES	KDFW	6,002
162	DETROIT	UNITED STATES	KDTW	6,002
163	GUAM ISLAND	UNITED STATES	PGUM	6,002
164	HONOLULU	UNITED STATES	PHNL	6,002
165	HOUSTON	UNITED STATES	KIAH	6,002
166	INDIANAPOLIS	UNITED STATES	KIND	6,002
167	LOS ANGELES	UNITED STATES	KLAX	6,002
168	LOUISVILLE	UNITED STATES	KLOU	6,002
169	MEMPHIS	UNITED STATES	KMEM	6,002
170	MIAMI	UNITED STATES	KMIA	6,002
171	MINNEAPOLIS	UNITED STATES	KMSP	6,002
172	NEW YORK	UNITED STATES	KLGA	6,002
173	OAKLAND	UNITED STATES	KOAK	6,002
174	ORLANDO	UNITED STATES	KORL	6,002
175	PHILADELPHIA	UNITED STATES	KPNE	6,002
176	SAN FRANCISCO	UNITED STATES	KSFO	6,002
177	SEATTLE	UNITED STATES	KSEA	6,002
178	WASHINGTON	UNITED STATES	KDCA	6,002
179	MONTEVIDEO	URUGUAY	SUAA	6,002
180	NAVOI	UZBEKISTAN	UTSA	6,002
181	TASHKENT	UZBEKISTAN	UTTT	6,002
182	HANOI	VIET NAM	VVGL	6,002
183	HO CHI MINH CITY	VIET NAM	VVTS	6,002
184	HARARE	ZIMBABWE	FVCP	6,002

4.4 国別の通関所要日数および費用

国別の通関所要日数および費用については、原則として Shibasaki et al. [18]が世界銀行の Doing Business データベースから取得した値を用いている。ただし、本モデルにおいて航空輸送ネットワークを統合したことにより、新たに通関所要日数および費用のデータが必要となった国がある一方で、現在世界銀行の Doing Business データベースでは国別の通関所要日数および費用が取得できないという問題がある。よって、通関所要日数および費用のデータが存在しない国については、Shibasaki et al. [18]のデータより、地域ごとの通関所要日数および費用の平均値を算出し、各国に適用している。各国の通関所要日数および費用について、Table 4-3 に示す。なお、本モデルで新たに対象となった国については、国名を太字で示している。

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 (輸出)	越境税関 手續日数 (輸出)	越境書類 準備日数 (輸入)	越境税關 手續日数 (輸入)	越境書類 準備費用 (輸入)	越境税關 手續費用 (輸出)	越境書類 準備費用 (輸入)	越境税關 手續費用 (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
TAJIKISTAN	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
PORUGAL	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
FJJI	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 國際海上コンテナおよびコンテナ相当貨物の輸送需要（OD 貨物量）

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、普通貨物の地域間輸送需要および港湾間海上輸送貨物輸送需要（海上輸送サブモデルの入力データ）については、Shibasaki et al. [18]と同じデータを用いており、TEUベースである。航空輸送される貨物の地域間輸送需要については、Fig. 4-4 のフローチャートに従って推計する。この手順により、陸上ネットワークを考慮する国についてはゾーン、それ以外の国については対象港湾または対象空港が、それぞれ貨物の発着点（OD ノード）となる。

空港間貨物輸送需要と、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は、以下で述べる。

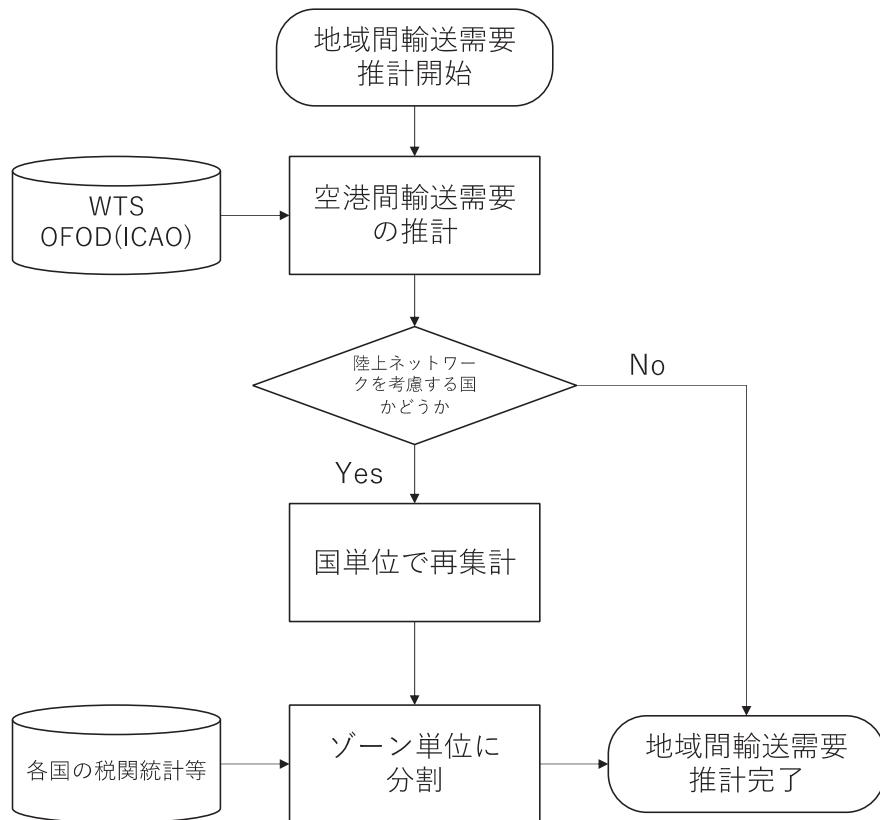


Fig. 4-4 地域間輸送需要の推計フロー

4.5.1 空港間輸送需要

空港間貨物輸送需要の推計は、Shibasaki et al. [18]が各輸送需要を推計する際に用いてい

た, IHS 社の提供する世界貿易サービス (WTS) データベース [36]に基づいて行う. WTS データベースでは現在, 世界 248 国・地域間相互の海上・陸上・航空輸送貨物の年間総輸送量 (ton ベース) および年間総輸送金額 (US ドルベース) のデータが品目別に入手できる (ただし欧州域内流動は含まれない). なお, 海上輸送貨物については, ドライバルク貨物やコンテナ貨物などに分割されたデータ (いずれも ton ベース), コンテナについては, TEU ベースの輸送量データも取得できる. また, WTS データベースにおける品目区分は, IHS 社が独自に分類した区分に従っており, 全部で 270 品目ある. 以下に推計手順を述べる.

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

はじめに, WTS データベースより取得した, 航空輸送貨物の 2016 年度総輸送量データ (ton ベース. 以後データ A とする) を, コンテナ相当貨物の輸送量に換算する. ここで, モデル計算の都合上航空輸送においても単位を TEU に揃える必要がある. 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, 品目ごとに国際海上コンテナ輸送割合 (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量データ (ton ベース, 以後データ B とする) とする. さらに, 10ton を 1TEU と想定し, データ B を TEU ベースのデータに換算した (以後データ C とする).

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 [34]に基づいており, TFS データは格安航空会社のサービスは含んでいないため, モデルに統合した航空輸送ネットワークの総容量と, WTS 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. よって, TFS データ [34] の提供元である ICAO の On Flight Origin and Destination(OFOD)データ [43] (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 データの総量が概ね一致していることがわかる.

Table 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
28,801,850	19,182,578	19,182,580

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 [43]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および地域指標は、原則として Shibasaki et al. [18]で用いられているものを採用する。ただし、ポーランド・ドイツ・オランダ・トルコについては、Shibasaki et al. [18]が設定しているゾーン数では不十分であるため、新たな地域指標に基づいてゾーン数を増加させた。以下の Table 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。

Table 4-5 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

Country	Number of sub-countries (zones)	Zone level	Representative of zonal economy
Kazakhstan	14	oblast	import: zonal value of import (2013) export: zonal value of manufacturing production (2013)
Kyrgyz	8	oblast	Gross Regional Product (2012)
Tajikistan	5	province	Gross Regional Product (2012)
Uzbekistan	13	province	Gross Regional Product (2012)
Turkmenistan	6	province	population (2001)
Afghanistan	7	United Nation region	population (2014-2015 estimates)
Pakistan	31	division	Gross Regional Product (2000) in province level and population (1998) in division level
China	335	prefecture-city	regional value of export and import by trade partner countries and commodities (2015)
Russia	81	federal subject level	regional value of export and import by CIS (Commonwealth of Independent States) and non-CIS countries (2013)
Turkey	7	oblast	zonal value of export and import (2016) Source:TURKISH STATISTICAL INSTITUTE [44]
Poland	16	prefecture	Gross Regional Product (2016) Source:GUS Bank Danych Lokalnych [45]
Germany	16	Länder	zonal value of export and import (2016) Source:DESTATIS Statistisches Bundesamt [46]
Netherland	12	province	Gross Regional Product (2016) Source:cbs [47]
Armenia, Azerbaijan, Belarus, Estonia, Georgia, Iran, Latvia, Lithuania, Moldova, Mongolia, Ukraine	1	country level	-

第 5 章 モデル計算

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. [18]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 (vt 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。

以下、5.1 節で本モデルの計算手順について、5.2 節で本モデルの計算に用いる配分手法について、5.3 節で改良したアルゴリズムについて、5.4 節で本モデルの推計結果および収束状況について、5.5 節で vt および θ に関する感度分析の結果を説明していく。

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. [18]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、本研究で導入した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 [27] 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。

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、達していない場合は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 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

一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の改善

Shibasaki et al. [18] のモデルは全体の計算時間が約 1 時間となっているものの、Shibasaki et al. [18] のモデルを応用した若島 [19] では約 2 時間、西村 [48] では約 14 時間となっており、モデル全体として計算時間の増加が今後の課題となっている。特に、本モデルにおいても、航空輸送ネットワークを統合した上で、若島 [19] が行った品目グループ別配分の手法を用いるため、計算時間の増加が推測される。よって、本モデルでは、ベースとしている Shibasaki et al. [18] のモデルの計算時間の半分以上を占める、配分計算内のソートアルゴリズムの改善を行った。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 [49] 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に入れ替える、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。本モデルでは、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た。

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に、Shibasaki et al. [18]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た。比較結果をTable 5-1に示す。また、モデル全体の計算時間の変化をTable 5-2に示す。各モデルの短縮率を見ると、いずれのモデルでも一定の短縮率を達成していることがわかる。また、海上輸送サブモデルが31%ほどであるのに対し、陸上サブモデルが97%であることは、クイックソートの速度が、ピボットの値によって大きく変わる傾向を示している。ただしTable 5-2が示すように、クイックソート実装によって、モデル全体の計算時間を半分近くまで短縮できており、クイックソート実装の効果があったことがわかる。短縮率のランダム性は、ピボットの値の設定方法に依存するため、今後の課題である。

Table 5-1 クイックソート実装の効果 (Shibasaki et al. [18]にて)

	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%

Table 5-2 モデル全体の計算時間の変化 (Shibasaki et al. [18]にて)

	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 推計結果およびモデルの収束状況

前節まで述べてきたモデルの概要に従ってモデル計算を行い、推計結果を得た。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、Fig.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、各港湾の輸出入貨物量は相違が大きくなく、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。

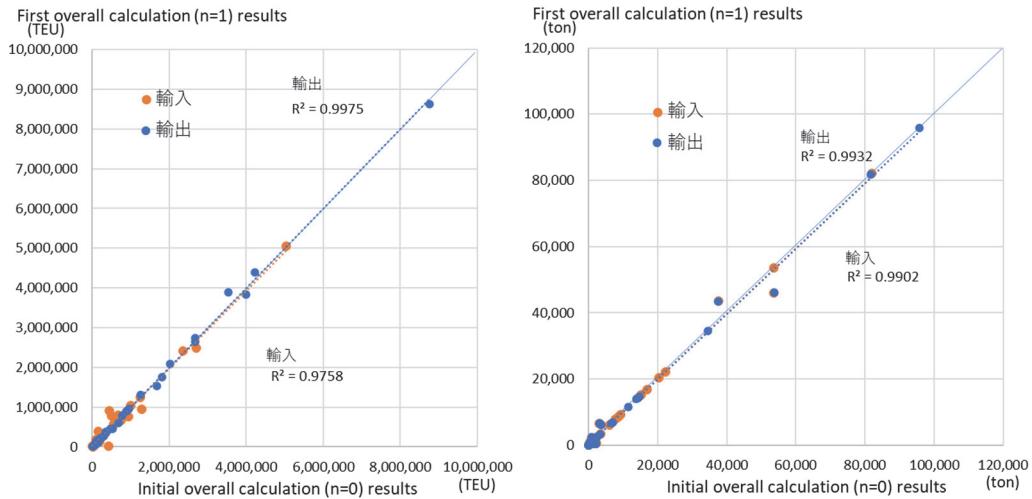


Fig. 5-1 1回目計算前後の港湾取扱量（左）と空港貨物量（右）における比較

次に、Yamaguchi et al. [30]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 Fig.5-2 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。

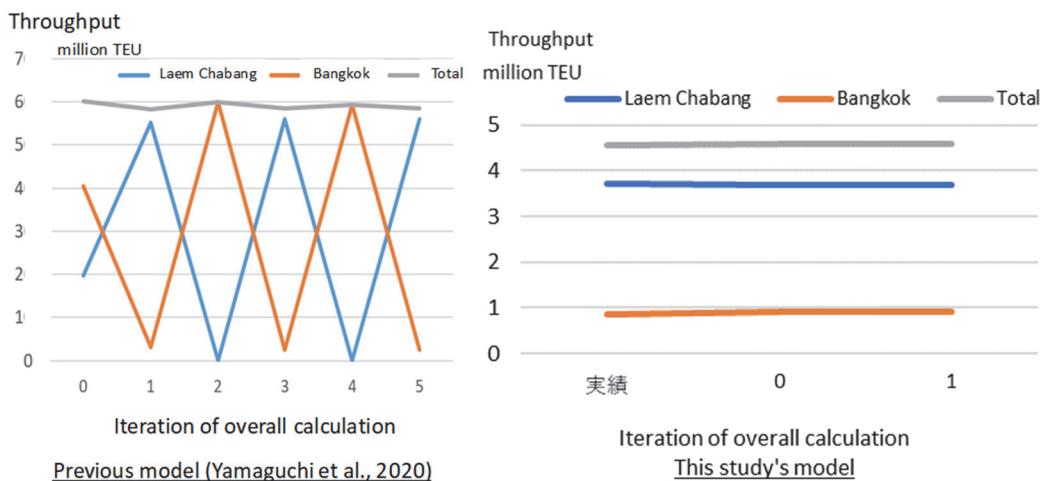


Fig. 5-2 従来モデルと本研究のモデルによる各全体計算回におけるレムチャバン港と
バンコク港の取扱量の推計値

次に、様々な指標から、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 Fig. 5-3, Fig. 5-4 にそれぞれ示す。

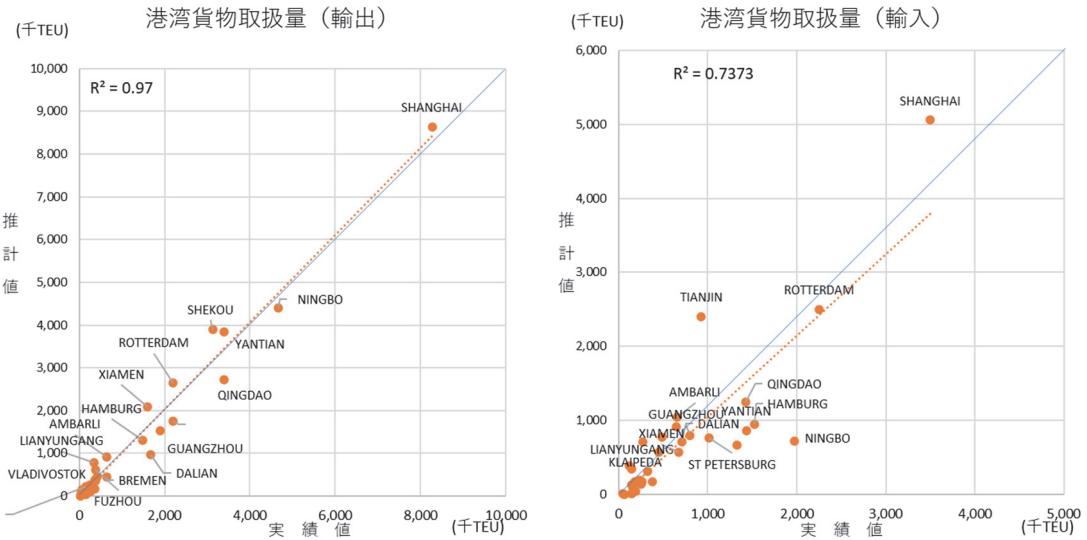


Fig. 5-3 陸上輸送ネットワークと接続する港の輸出入貨物取扱量の比較 (TEU)

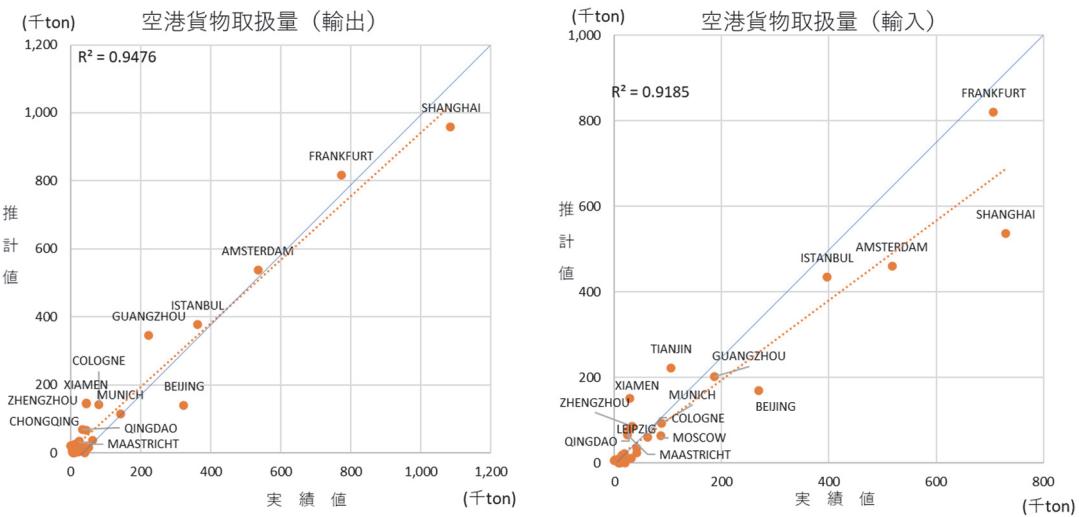


Fig. 5-4 陸上輸送ネットワークと接続する空港の輸出入貨物取扱量の比較 (ton)

Fig. 5-3 で示した結果は、Shibasaki et al. [18]の推計結果と概ね一致していることから、本モデルで航空輸送ネットワークを正常に追加できていることがわかる。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。これらの課題に対しては、本モデルでは考慮できていない港の容量等の条件を組み込むことで解決されることが推測される。

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が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るとは言えず、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 Fig. 5-5 に示す。なお、各国の地域区分は、4.4 節の Table 4-3 に示している。また、Fig. 5-5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。また、Fig. 5-6 に世界各地域間の航路のリンクフローを図示する。

Fig. 5-5 が示すように、世界各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. [18] 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。

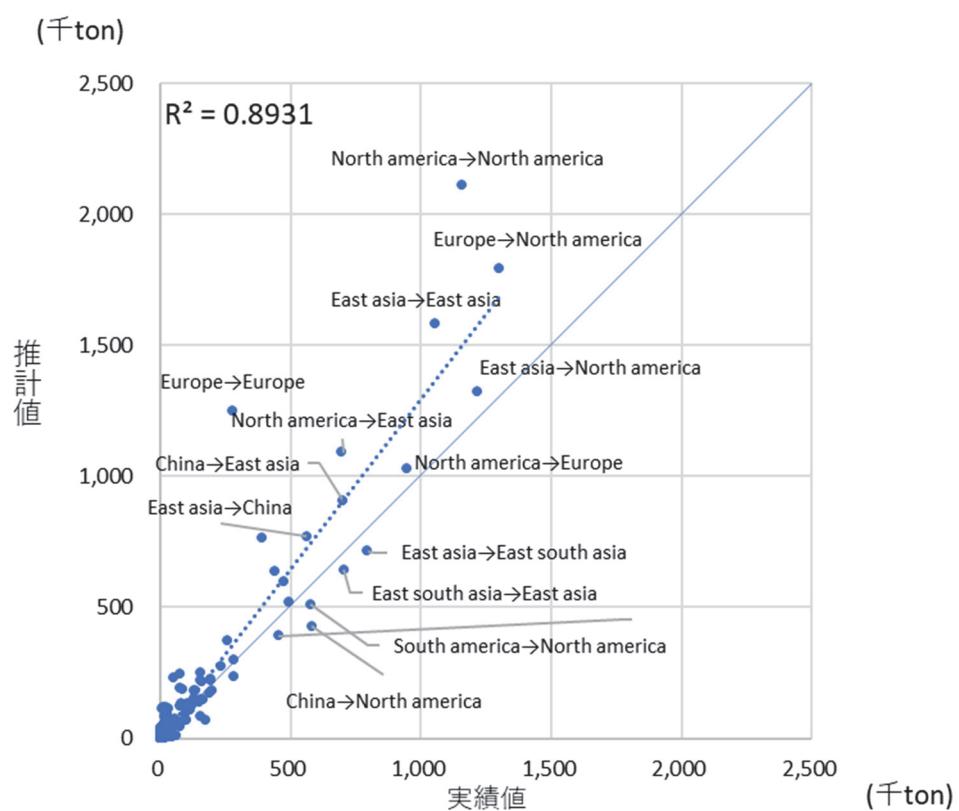


Fig. 5-5 世界各地域間の航路のリンクフローの比較

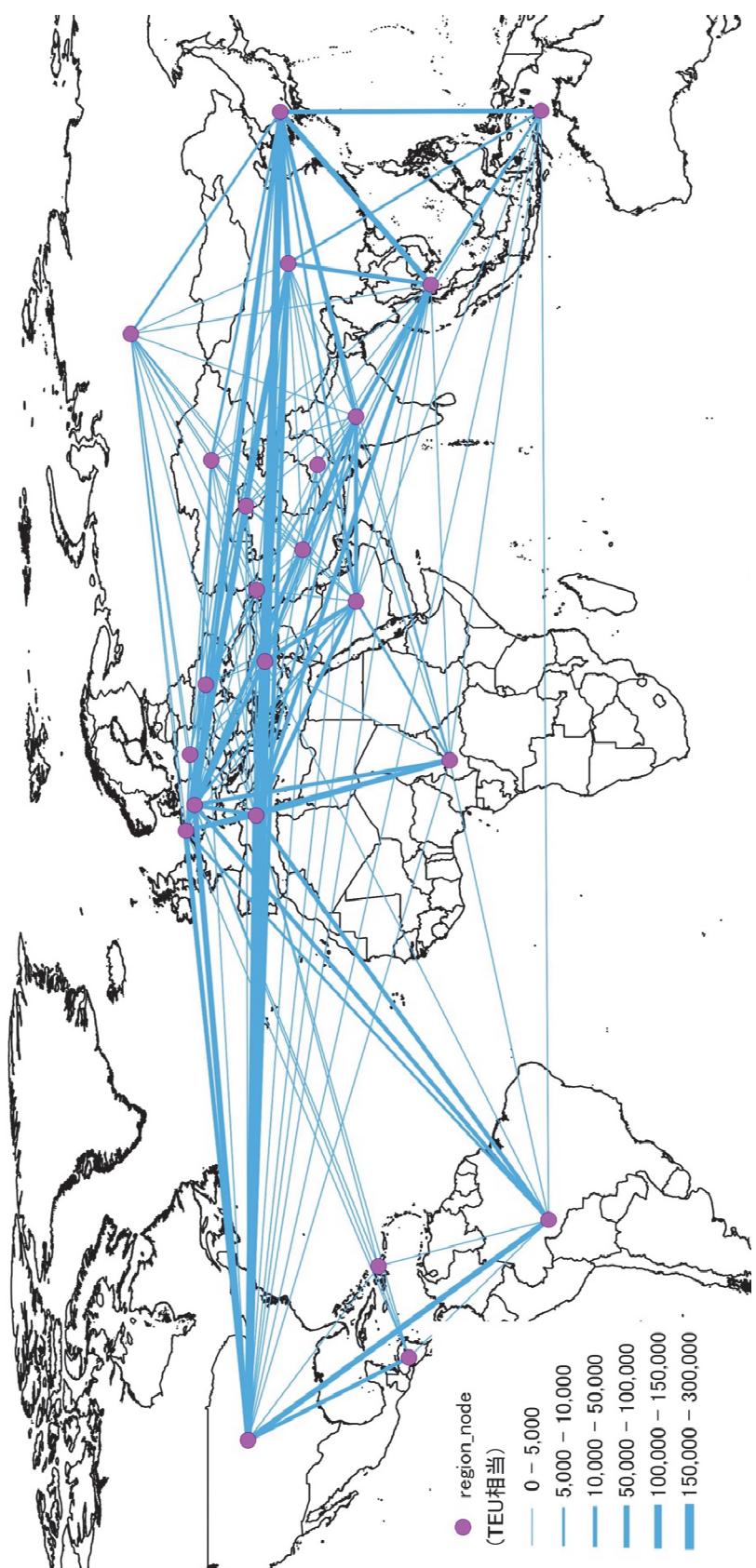


Fig. 5-6 世界各地域間航路のリンクフロー

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、本モデルで設定した時間価値パラメータ vt 、航空輸送および海上輸送の燃料費、陸上輸送における鉄道およびトラックの距離比例運賃について、それぞれ感度分析を行う。

5.5.1 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 73.7 (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。しかし、実態としては、航空輸送される貨物でも、上記平均値よりも時間価値の低い品目は一定数存在し、それらの貨物の一部は海上輸送も利用することが推測される一方で、5.4 節で述べた推計結果においては、海上輸送を利用する航空貨物はごくわずかしか存在しないという結果になっている。よって、航空貨物の時間価値パラメータ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。これより、本項では、航空貨物の時間価値パラメータを段階的に下げた場合に、海上輸送を用いる貨物の増加量を検証する。具体的には、本モデルの時間価値パラメータである $vt = 73.7$ を半減させたケース (37.0US\$/hour/TEU)、4 分の 1 にしたケース (18.5US\$/hour/TEU)、10 分の 1 にしたケース (7.37US\$/hour/TEU)、100 分の 1 にしたケース (0.737 US\$/hour/TEU) について、海上輸送を利用する航空貨物の輸送量と海上輸送を利用しない航空貨物の輸送量を比較する。比較結果を Fig. 5-7 に示す。Fig. 5-7 に示すように、時間価値パラメータが小さくなるほど、海上輸送も用いる航空貨物が大幅に増加することがわかる。この結果より、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と言える。

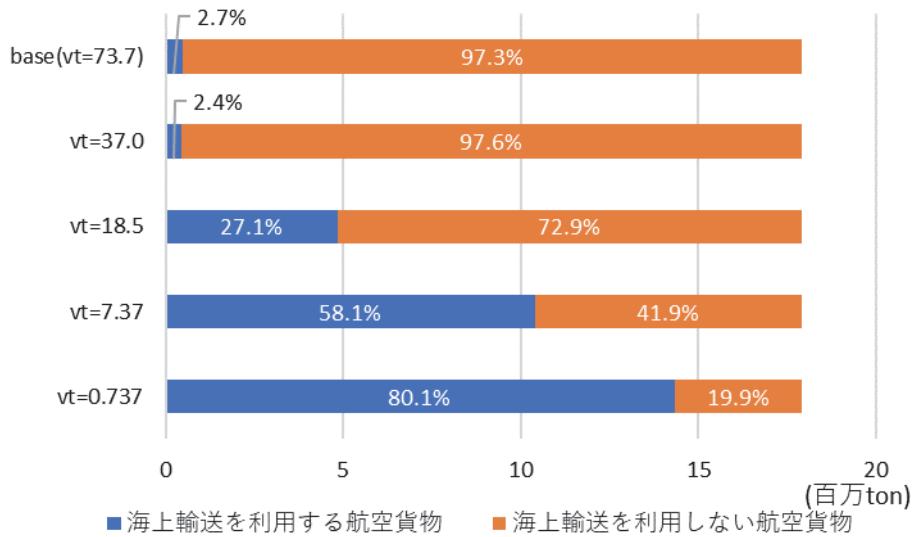


Fig. 5-7 海上輸送を利用する航空貨物量と利用しない航空貨物量の割合

5.5.2 燃料費の変化

航空輸送にかかるコストにおいて、燃料費は大きな割合を占める。特に 10,000km を超える長距離飛行においては、燃料費が全体の輸送コストの 5 割以上を占めることも珍しくない。Table 5-3 に、短距離および長距離の航空輸送における燃料費が占める割合を示す。

Table 5-3 短距離および長距離の航空輸送における燃料費が占める割合
(Chao [33] より筆者作成)

航路 (機体: B747-400F)	距離(km)	燃料費(US\$)	輸送費用合計(US\$)	燃料費の占める割合 (%)
TAIPEI(TAIWAN) – HONG KONG(CHINA)	812	1,046	4,628	22.6%
TAIPEI(TAIWAN) – LOS ANGELES(USA)	10,897	8,685	14,169	61.3%

一方、Fig. 5-8 に示すように、燃料価格は年ごとに大きく変化するため、輸送費の中で大きな割合を占める燃料価格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。

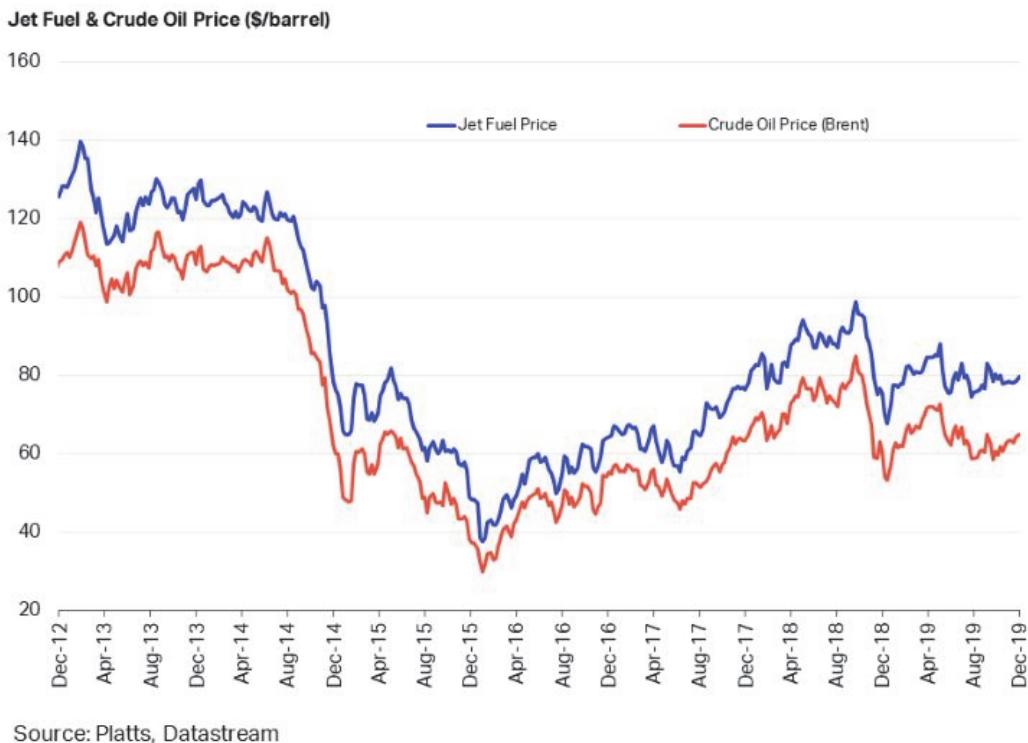


Fig. 5-8 燃料価格の推移（出典：IATA [50]）

よって、本項では、燃料価格の変化が航空輸送に与える影響を検証する。具体的には、以下の2段階で航空輸送および海上輸送の燃料価格を上昇する場合を想定する。

- ① 航空輸送燃料価格を 52.1 US\$/bbl から 140.0 US\$/bbl (2012 年価格) に変更する。海上輸送燃料価格についても同じ増加率を適用し、580.7 US\$/ton から 1577.4 US\$/ton に変更する。
- ② 燃料価格がさらに高騰した場合を想定し、航空輸送燃料価格を 200 US\$/ton、海上輸送燃料価格を 2253.4 US\$/ton に変更する。

以上の設定をもとに計算した。まず、各設定において、陸上輸送ネットワークと接続する空港（陸上空港とする）の輸出入貨物取扱量の総量の変化を Fig. 5-9 に、陸上輸送ネットワークと接続する港湾（陸上港湾とする）の輸出入貨物取扱量の総量の変化を Fig. 5-10 に示す。なお、5.4 節で述べたモデル推計結果を base ケースとする。Fig. 5-9 より、航空燃料価格が 140 US\$/bbl まで高騰すると、輸出入貨物の取扱総量はともに減少するものの、さらに 200 US\$/bbl まで高騰した場合は、総量にあまり変化がないと言える。これより、航空貨物については、一定の価格まで燃料価格が上昇すると、さらに価格が高騰しても取扱総量にはあまり影響がないことが推測される。一方、Fig. 5-10 より、燃料価格が高騰した場合の港湾取扱量の減少率は低いものの、量としては約 10 万 TEU の減少が見られる。よって、燃料価格が高騰した場合、海上輸送量の割合自体はほとんど変わらないものの、一部の貨物は他の輸送機関へのシフトはすることが推測される。

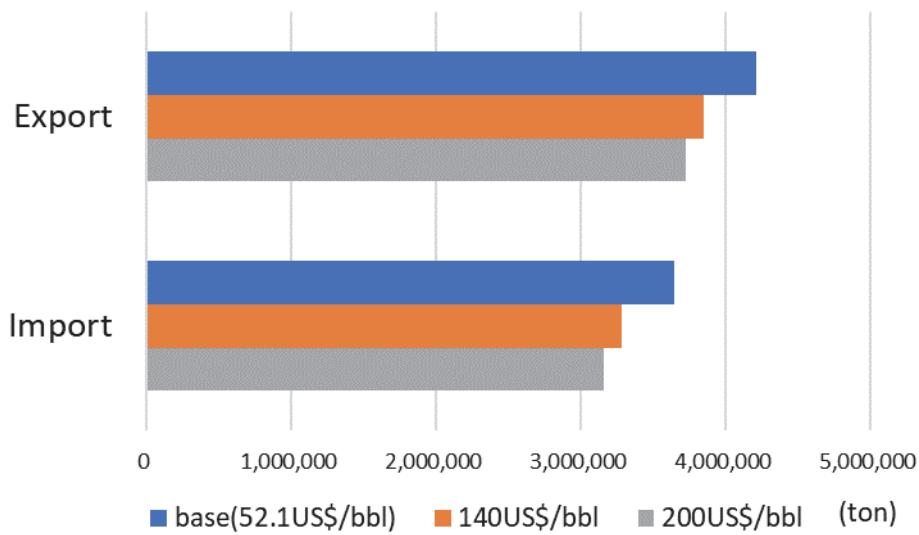


Fig. 5-9 陸上輸送ネットワークと接続する空港の輸出入貨物取扱量の総量の変化

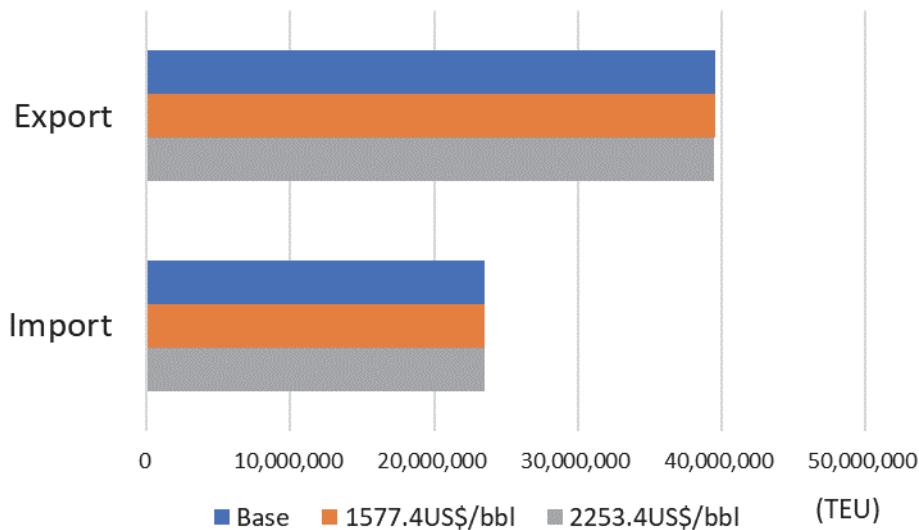


Fig. 5-10 陸上輸送ネットワークと接続する港湾の輸出入貨物取扱量の総量の変化

続いて、主要な陸上空港の輸出入貨物取扱量の変化を Fig. 5-11, Fig. 5-12 に、主要な陸上港湾の輸出入貨物取扱量の変化を Fig. 5-13, Fig. 5-14 にそれぞれ示す。

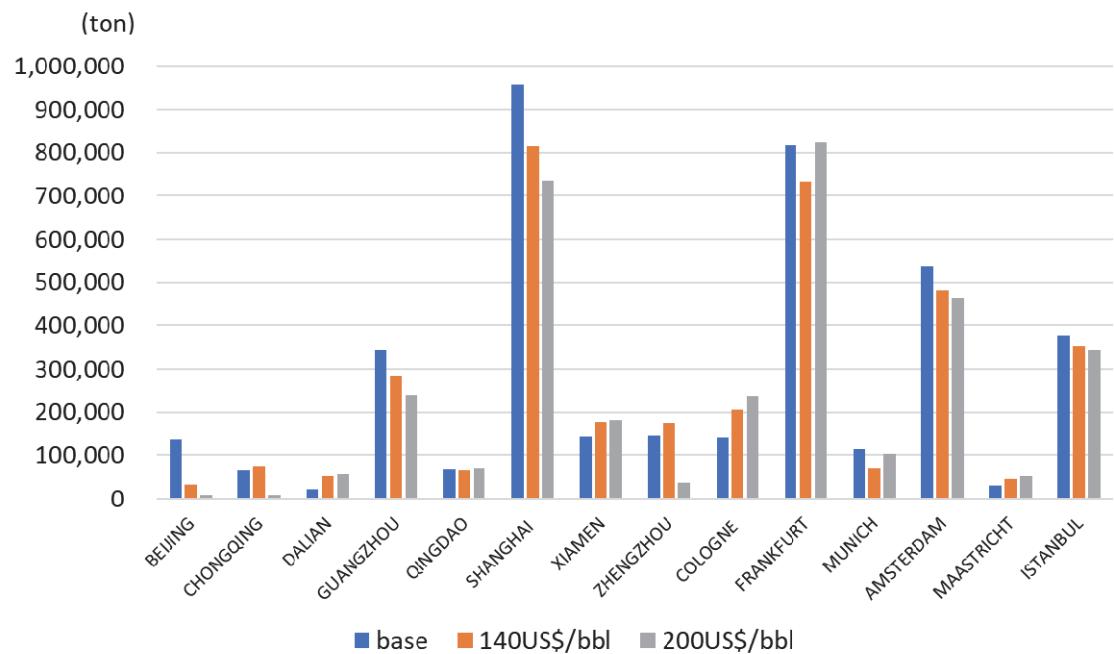


Fig. 5-11 陸上空港の輸出貨物取扱量の変化

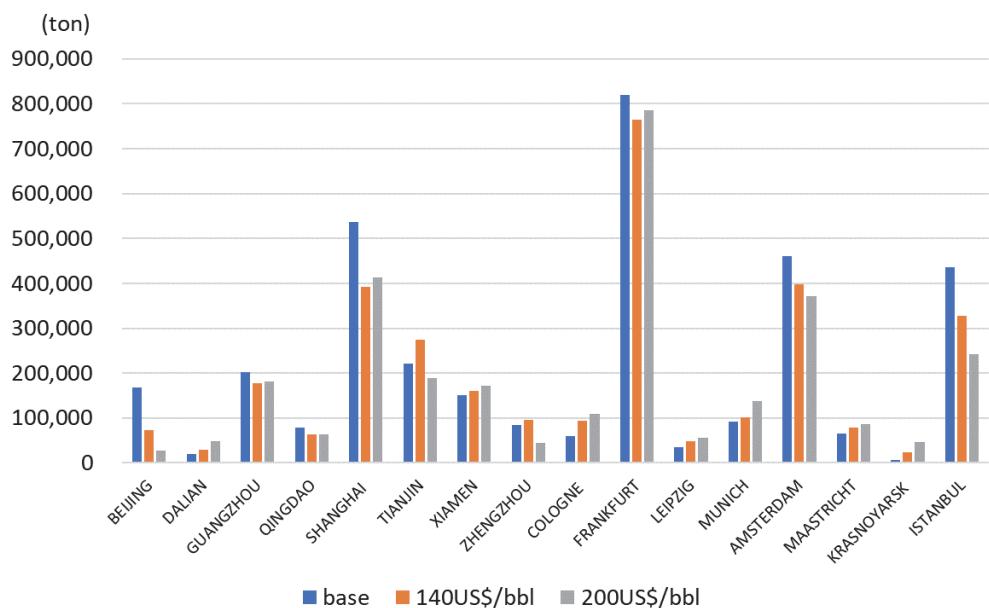


Fig. 5-12 陸上空港の輸入貨物取扱量の変化

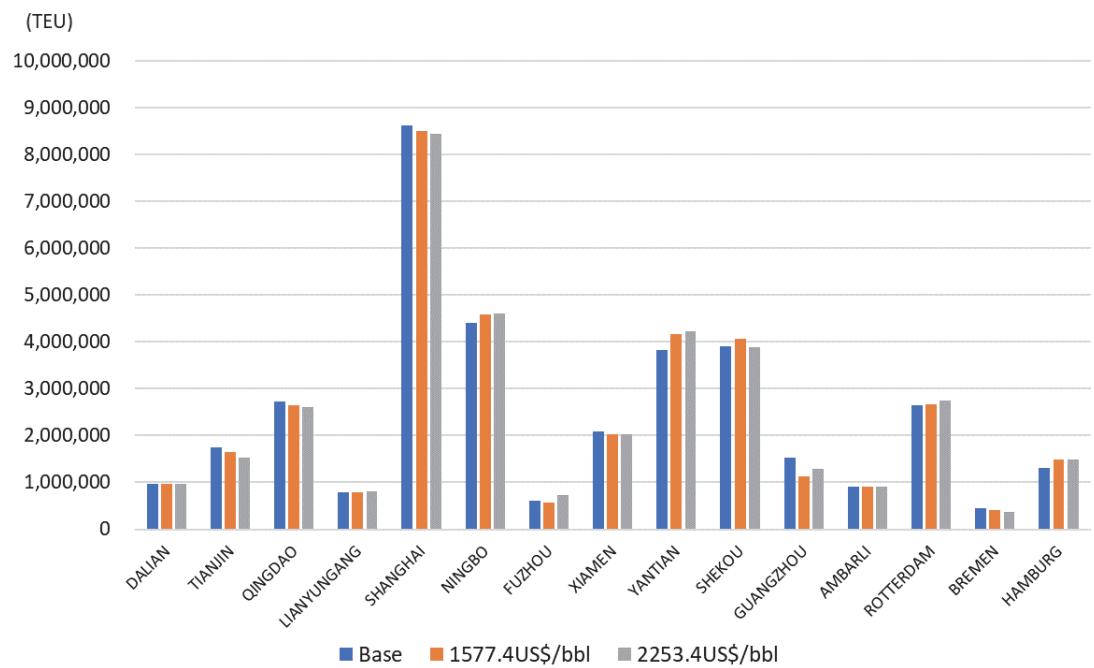


Fig. 5-13 陸上港湾の輸出貨物取扱量の変化

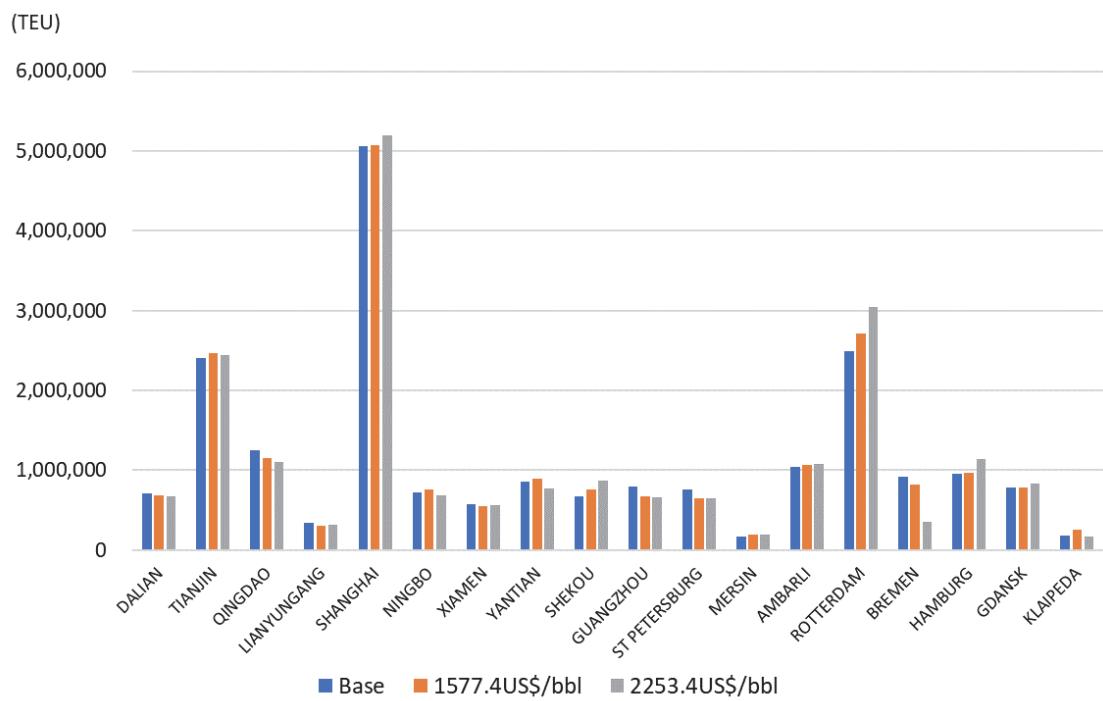


Fig. 5-14 陸上港湾の輸入貨物取扱量の変化

Fig. 5-11, Fig. 5-12 より、まず、中国の多くの空港において、燃料費が上がるほど輸出入ともに貨物取扱量が減少することがわかる。ただし、大連（Dalian）空港や廈門（Xiamen）

空港のように、一部の空港では貨物量の増加が見られることから、貨物の中には燃料費の高騰によって他の空港へシフトするものもあることが推測される。ヨーロッパの空港においても同様であり、空港によって燃料費の高騰が取扱量の減少を引き起こす場合と、逆に増加を生む場合がある。また、前述したように、航空燃料価格が 140 US\$/TEU に増加した場合は、大きく取扱量が減少する空港が多い一方で、さらに 200 US\$/TEU まで増加した場合は、それほど大きく取扱量が減少する空港はないことも確認できる。一方で、Fig. 5-13, Fig. 5-14 より、燃料価格が高騰したときの港湾輸出入貨物量の変化については一様ではない。Fig. 5-10 で港湾取扱量の総量が変化しないことを考えると、海上輸送については、燃料費が高騰すると、一部の貨物については、利用する港が周辺の港にシフトする傾向があることが推測される。

以上より、海上輸送については、燃料価格の高騰が起きても全体の傾向が大きく変わることはないことが確認された一方で、航空輸送については、燃料価格の高騰によって貨物取扱量が大幅に増減する空港もあることがわかった。

5.5.3 陸上輸送運賃の変化

本モデルでは、Shibasaki et al. [18]の設定に基づき、陸上輸送における鉄道およびトラックの距離比例運賃を一律で 1.0 US\$/km と設定している。ただし、実態としては、国や地域および輸送機関の種類によって、距離比例運賃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、これらのパラメータの変化がユーラシア大陸内の陸上輸送貨物量と航空輸送貨物量に与える影響を検証する。なお、比較には、輸送機関の輸送力を表すトンキロの値を用いる。

具体的には、陸上輸送における鉄道およびトラックの距離比例運賃と共に 0.5 US\$/km まで低減させた場合 (half ケースとする) のトンキロの値の変化を比較する。Fig. 5-15 に base ケース (5.4 節で示した推計結果) と half ケースにおける、ユーラシア大陸内陸上輸送および航空輸送のトンキロ の値と比率を示す。Fig. 5-15 より、陸上輸送のトンキロは増加しており、距離比例運賃の低減に対して正常に反応していると言える。一方で、航空輸送については、トンキロが僅かに減少していることから、陸上輸送の距離比例運賃の低減の影響で、一部の貨物が陸上輸送にシフトしていることが推測される。

以上より、陸上輸送における鉄道およびトラックの距離比例運賃を低減させた場合に起きた変化の割合としては、陸上輸送以上に航空輸送が大きいことが示された。よって、陸上輸送と航空輸送双方に注目した分析を行う際は、陸上輸送のパラメータの設定は慎重に行うべきであると言える。

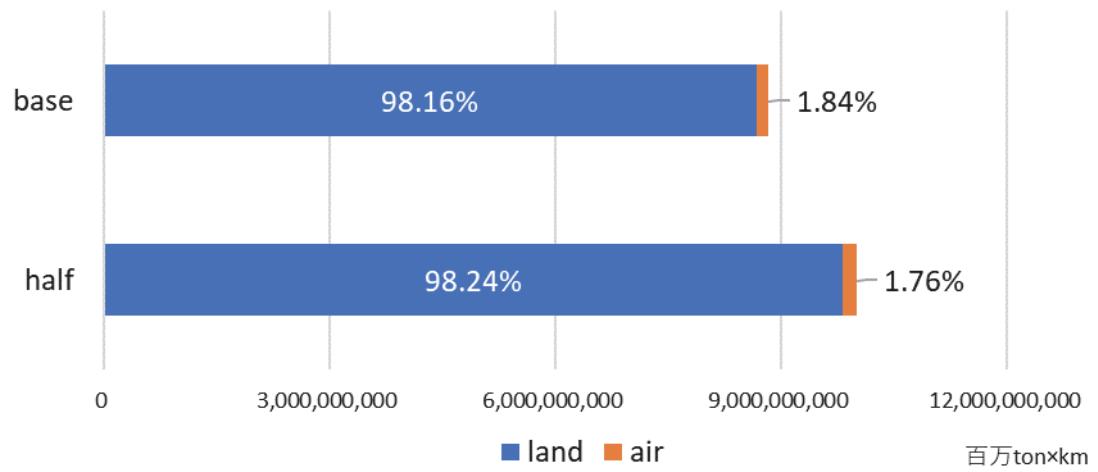


Fig. 5-15 ユーラシア大陸内陸上輸送および航空輸送のトンキロの値と比率

第6章 シナリオ分析

本章では、前章まで述べてきた本モデルを用いて、航空輸送に関するシナリオ分析を行い、本モデルの実用性を確認するとともに、航空輸送の利用を促進させる施策の提言を実施する。

6.1 重慶空港のサービスレベル向上による貨物輸送の変化

Fig. 6-1 に示すように、中国の重慶市は中国の内陸部に位置しており、中国とヨーロッパを結ぶ鉄道である中欧班列の第一便が出発した都市でもあることから、輸送機関の競合を考慮する上で重要な都市である。



Fig. 6-1 重慶市（Chongqing）の位置

出典：RUSSIAN RAILWAYS LOGISTICS [51]

重慶市にある重慶江北国際空港（以下重慶空港とする）は、国内旅客便を中心とする空港であり、貨物取扱量の規模は比較的小さいものの、1990 年に開港してから段階的な空港開発が現在まで続いている。今後の発展が見込まれている。よって、本シナリオでは、重慶空港のサービスレベルが向上することで、航空輸送がユーラシア大陸の貨物輸送に与える影響を分析する。Table 6-1 に具体的なシナリオ設定を示す。なお、第 5 章で述べた推計結果を base シナリオとする。

Table 6-1 本シナリオの設定

シナリオ	越境費用・時間にかかるパラメータ λ_a	空港使用料 (US\$/TEU)
base	0.5	6001.96
S1-1	0.5	3001 (base の半分)
S1-2	0.25	3001 (base の半分)
S1-3	0.0	3001 (base の半分)

Table 6-1 の設定に基づいてモデル計算を行った。はじめに、各シナリオにおける重慶空港の輸出入貨物取扱量を Fig. 6-2 に示す。Fig. 6-2 より、輸出入貨物量とも空港使用料の半減のみでは増加せず、越境費用・時間の低減もあった場合に大きく増加することが示された。

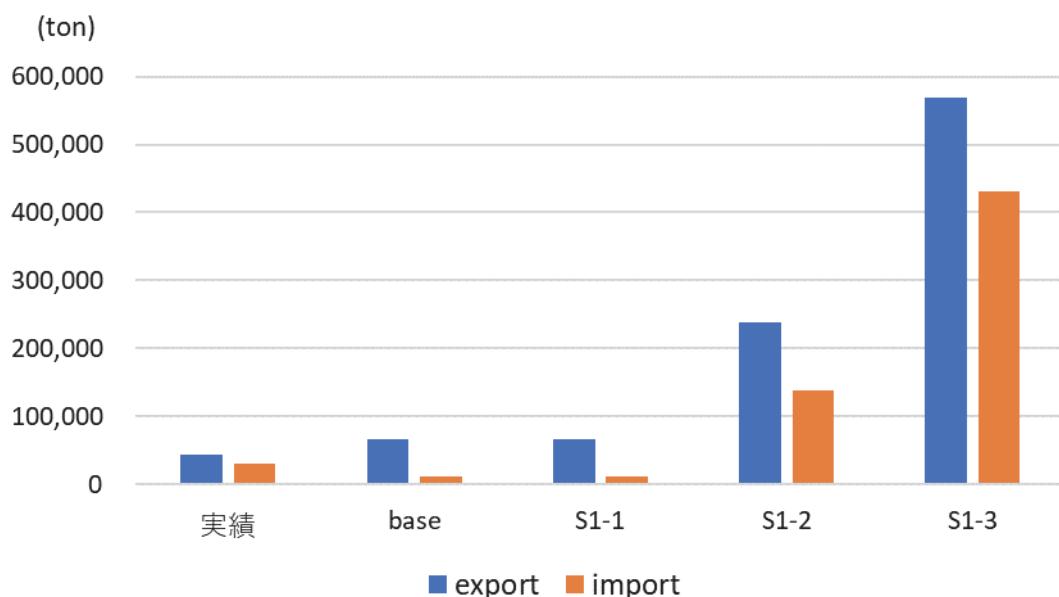


Fig. 6-2 各シナリオにおける重慶空港の輸出入貨物取扱量

また、各シナリオにおける中国の港湾輸出入貨物取扱量を Fig. 6-3、空港輸出入貨物取扱量（陸上ネットワークと接続する空港のみ）の変化を Fig. 6-4 にそれぞれ示す。なお、Fig. 6-4 には、base シナリオと S1-1～S1-3 の貨物取扱量の差が 500 TEU 以上だった空港のみを示している。Fig. 6-3, Fig. 6-4 より、中国の各港湾輸出入貨物取扱量は S1-3 においてもほとんど変化していない一方で、各空港の輸出入貨物取扱量はシナリオごとに一部の空港で比較的大きく変化していることがわかる。よって、本シナリオで想定した重慶空港におけるサービスレベル向上策では、海上輸送との競合は発生しない一方で、空港間の競合は発生する

ようになることが示された。

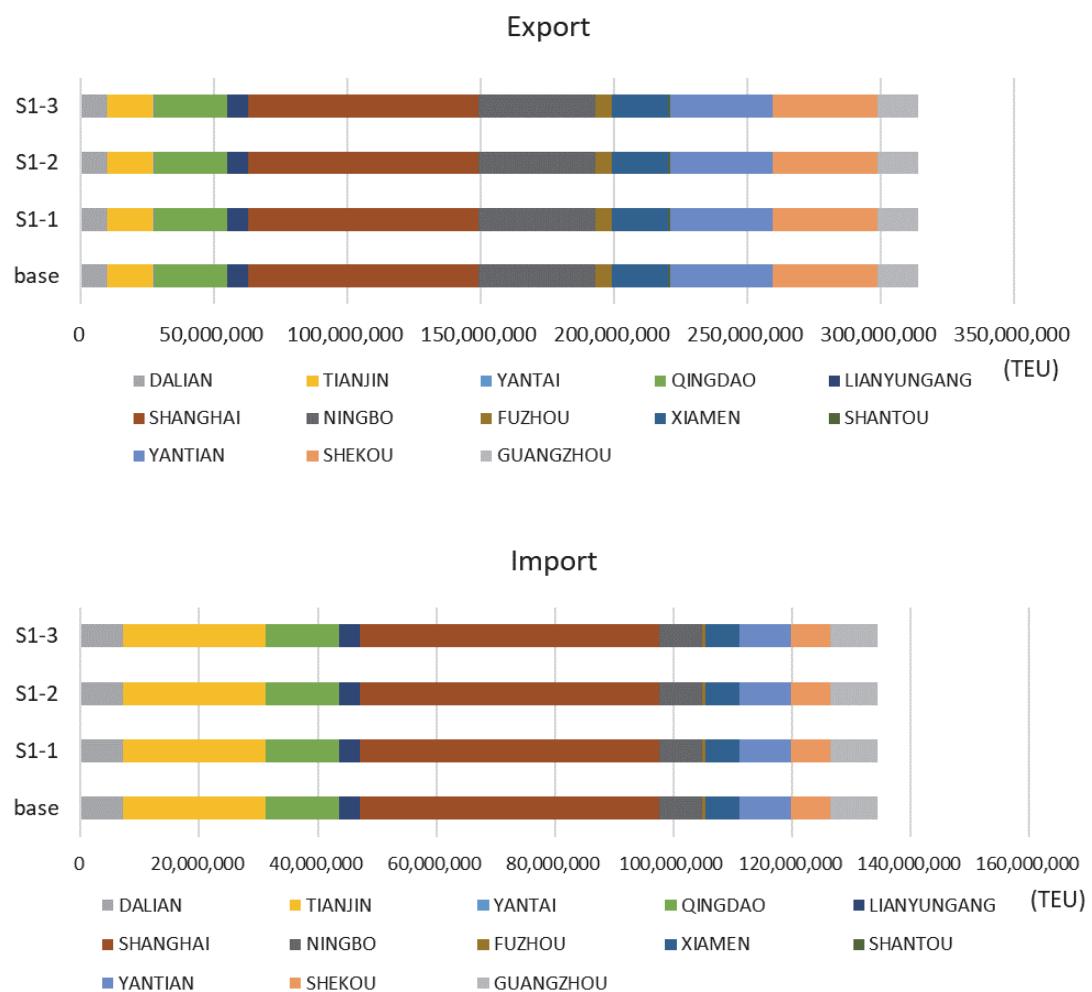


Fig. 6-3 中国の港湾輸出入貨物取扱量

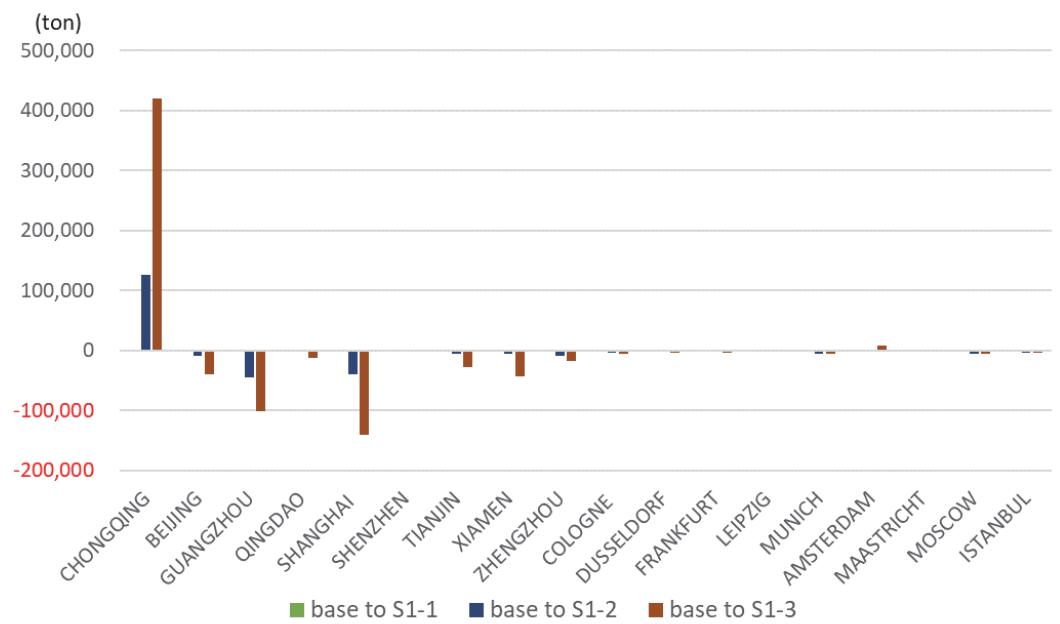
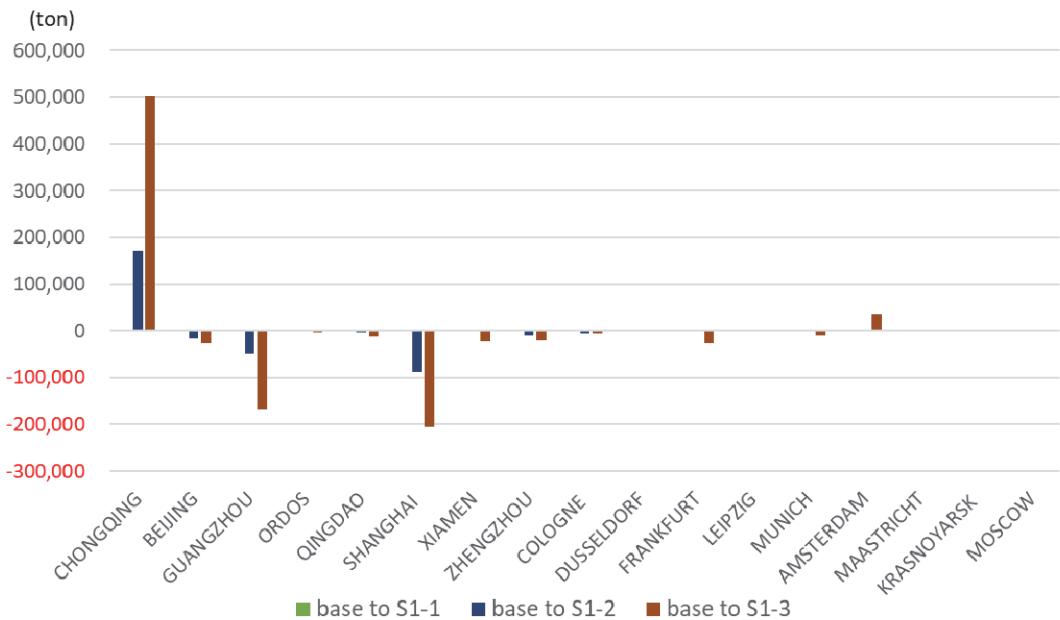


Fig. 6-4 空港輸出入貨物取扱量の変化（上の図が輸出、下の図が輸入を表す）

空港別に見ると、輸出入貨物量とともに、広州空港(GUANGZHOU)、上海空港(SHANGHAI)、北京空港(Beijing)を利用していた貨物が重慶空港へシフトしていることがわかり、特に S1-2, S1-3 で顕著である。中国周辺の陸上ネットワークのリンクフローの変化(base シナリオと S1-3 の差)を Fig. 6-5 に示す。Fig. 6-5 からも、base シナリオでは北京空港、上海空港、広州空港を利用していた貨物が、重慶空港へシフトしている様子がわかる。これは、重慶空

港を利用する際に生じる費用が下がっただけでなく、越境費用や時間が大幅に下がったことで、北京・上海・広州空港を利用する場合よりも陸路で1日以上余計に輸送費用や時間が発生するとしても、総合的に輸送費用および時間が安く済む重慶空港を利用するようになることを示している。

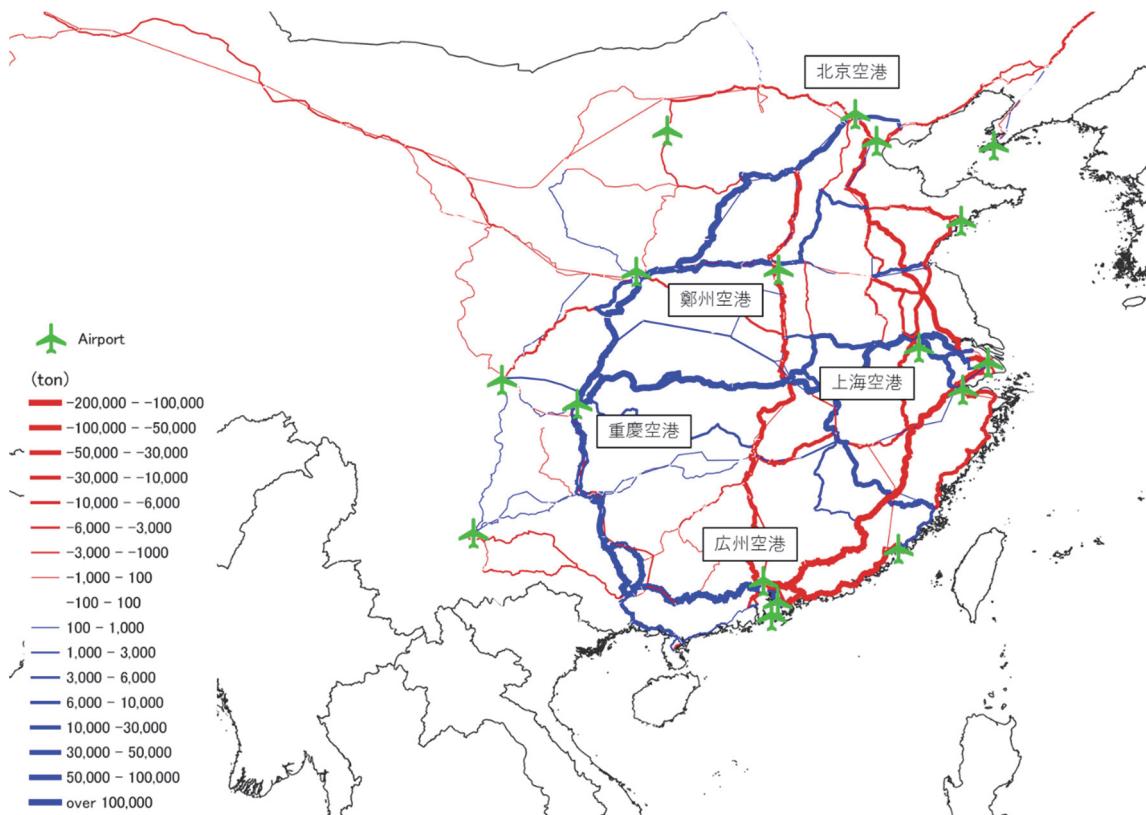


Fig. 6-5 中国周辺の陸上ネットワークのリンクフローの変化 (base シナリオと S1-3 の差)

また、Fig. 6-4 では、中国以外の空港においても、特に輸入貨物量の変化について、Frankfurt 空港の減少量と Amsterdam 空港の増加量が多いことが示されている。これは、Fig. 6-6 で示すヨーロッパ周辺の陸上ネットワークのリンクフローの変化からもわかる。

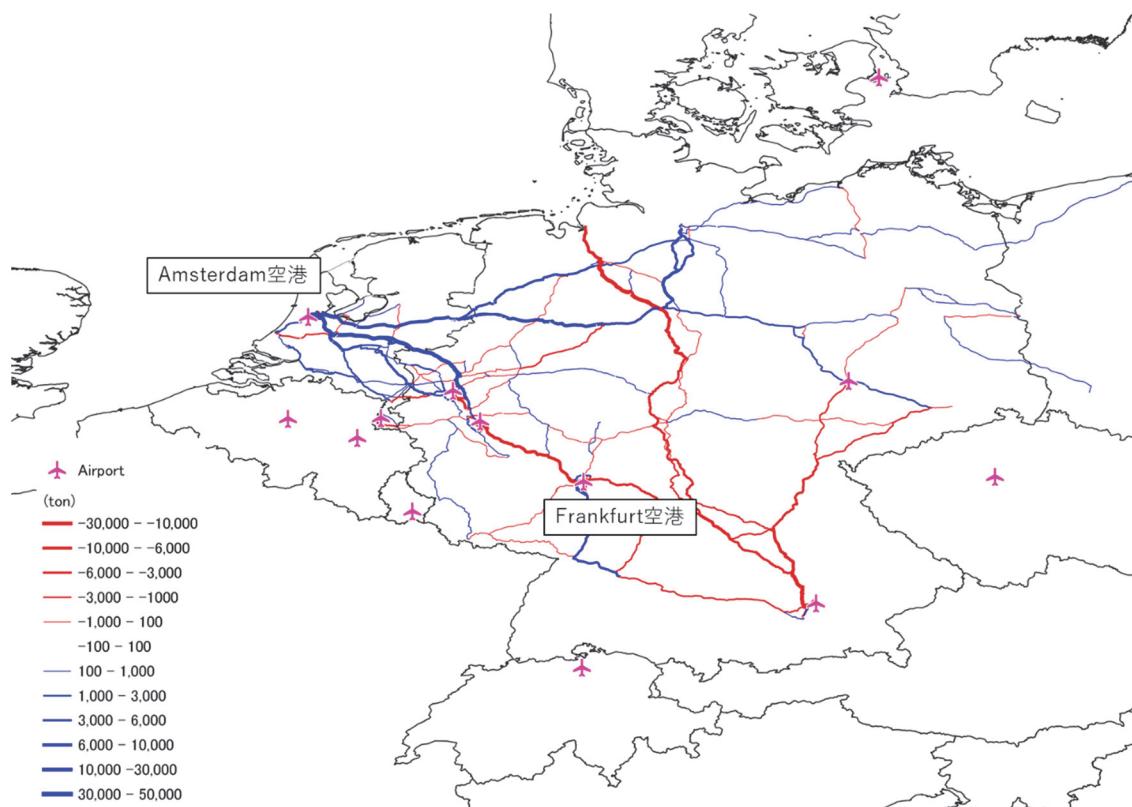


Fig. 6-6 ヨーロッパ周辺の陸上ネットワークのリンクフローの変化(base シナリオと S1-3 の差)

ここで、Fig. 6-6 を確認すると、Frankfurt 空港へのリンクフローが減少し、Amsterdam 空港へのリンクフローが増加していることが分かる。これは、両空港の中間地域（デュッセルドルフ、ドルトムントなど）において、重慶からの貨物が Amsterdam 空港へシフトしていると考えられる。ここで、重慶空港発 Frankfurt 空港着の航路および重慶空港発 Amsterdam 空港着の輸送頻度および輸送容量を示した Table 6-2 を見ると、前者と比較し、後者の輸送頻度は約 3.3 倍、輸送容量は約 3.2 倍であり、重慶からの貨物は Amsterdam 空港を利用する方が利便性がよいことが分かる。したがって、重慶空港の使用料が低減したことで増加した重慶からの貨物が、重慶発 Amsterdam 着航路を利用するようになったと考えられる。

Table 6-2 重慶-Frankfurt および重慶-Amsterdam 航路の輸送頻度および容量

	輸送頻度(便/年)	輸送容量(TEU/年)
Frankfurt 空港着	76	796
Amsterdam 空港着	250	2,526

6.2 Navoi 国際空港におけるトランジットの利用促進

ウズベキスタンの Navoi 国際空港（以下 Navoi 空港とする）は、ユーラシア大陸の中心に位置しており、従来テクニカルランディング（給油目的の着陸）によく利用されていた。Fig. 6-7 に、Navoi 空港の位置およびユーラシア大陸内の主要な空港との航路を示す。



Fig. 6-7 Navoi 空港および主要航路

出典：Navoi 国際空港 Web サイト [52]

しかし近年、B767 をはじめとした中型機の技術発展によって燃料使用効率が上がり、アジアとヨーロッパを結ぶ直行便が増えたことで、Navoi 空港の貨物取扱量は減少している。こうした情勢を受け、Navoi 空港はユーラシア大陸の中心に位置する地理的な優位性を生かし、ヨーロッパや中東、アジアを結ぶ国際複合輸送の一環としてハブ機能を強化することで、貨物取扱量の増加を目指している。

そこで、本シナリオでは、Navoi 空港のサービスレベルを上げるシナリオを想定し、Navoi 空港の扱うトランジット貨物量の変化を分析する。はじめに、Navoi 空港でトランジットする際に生じる積卸時間およびトランジット時間（通関・次便までの待機時間）を段階的に短縮した場合の効果を検証する。Table 6-3 に各シナリオの設定時間を示す。

Table 6-3 シナリオ設定

	積卸時間 (hour)	トランジット時間 (hour)
base	4.5	20
S2-1	2.25 (base の半分)	10 (base の半分)
S2-2	1.125 (base の 4 分の 1)	5 (base の 4 分の 1)

Table 6-3 の設定に基づきモデル計算を行った。各シナリオにおける Navoi 空港のトランジットリンクのフローから集計したトランジット貨物量の変化を Fig. 6-8 に示す。Fig. 6-8 より、上記の積卸時間およびトランジット時間を低減させるだけでは、トランジット貨物量を増加させるのは難しいことが示された。

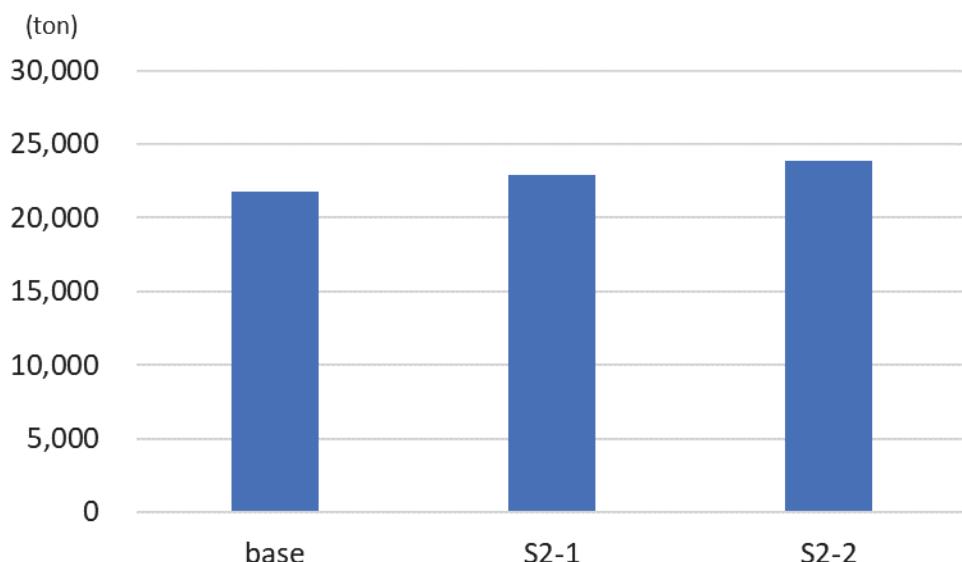


Fig. 6-8 各シナリオにおけるトランジット貨物量の変化

続いて、Navoi 空港の空港使用料も併せて低減させた場合のトランジット貨物量の変化を分析する。Table 6-4 に各シナリオ設定を示す。

Table 6-4 シナリオ設定

	積卸時間 (hour)	トランジット時間 (hour)	空港使用料 (US\$/TEU)
base	4.5	20	6001.96
S2-3	2.25 (base の半分)	10 (base の半分)	3001 (base の半分)
S2-4	1.125 (base の 4 分の 1)	5 (base の 4 分の 1)	3001 (base の半分)

Table 6-4 の設定に基づきモデル計算を行った。各シナリオにおける Navoi 空港のトランジットリンクのフローから集計したトランジット貨物量の変化を Fig. 6-9 に示す。Fig. 6-9

より、Navoi 空港の空港使用料を半減させた状態で積卸時間およびトランジット時間を段階的に低減させると、トランジット貨物量を増加させる効果があることが示された。これより、現状 Navoi 空港が利用されづらい要因としては、トランジットすることで新たに発生する時間よりも、新たに発生する費用が障壁となっていることが推測される。一方で、新たに発生する費用に半分程度の割引を適用することで、障壁ではなくなり、トランジット効率を上げることでさらなるトランジット貨物量の増加が見込まれることも示された。

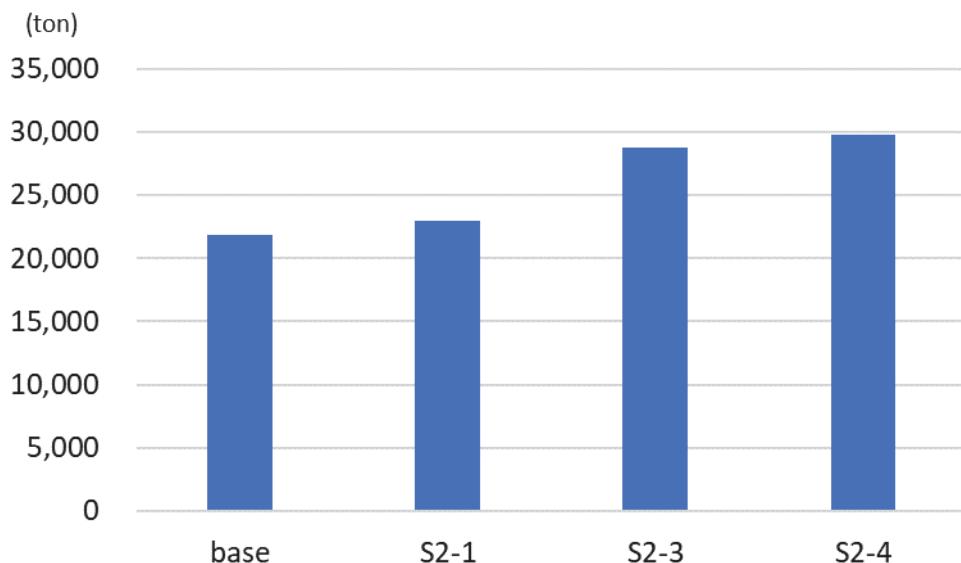


Fig. 6-9 各シナリオにおけるトランジット貨物量の変化

さらに本シナリオでは、最もトランジット貨物量の増加が見込まれるシナリオ S2-4において、Navoi 空港を経由するようになった航路の始点および終点空港ペアを分析する。base シナリオから S2-4 で増加したトランジット貨物量は約 30,000 ton である。Fig. 6-10 に base シナリオと S2-4 を比較した時の、Navoi 空港を端点にもつ航路のリンクフローの増加量を示す。Fig. 6-10 より、ユーラシア大陸の様々な方面における航路の経由地となることがわかる。

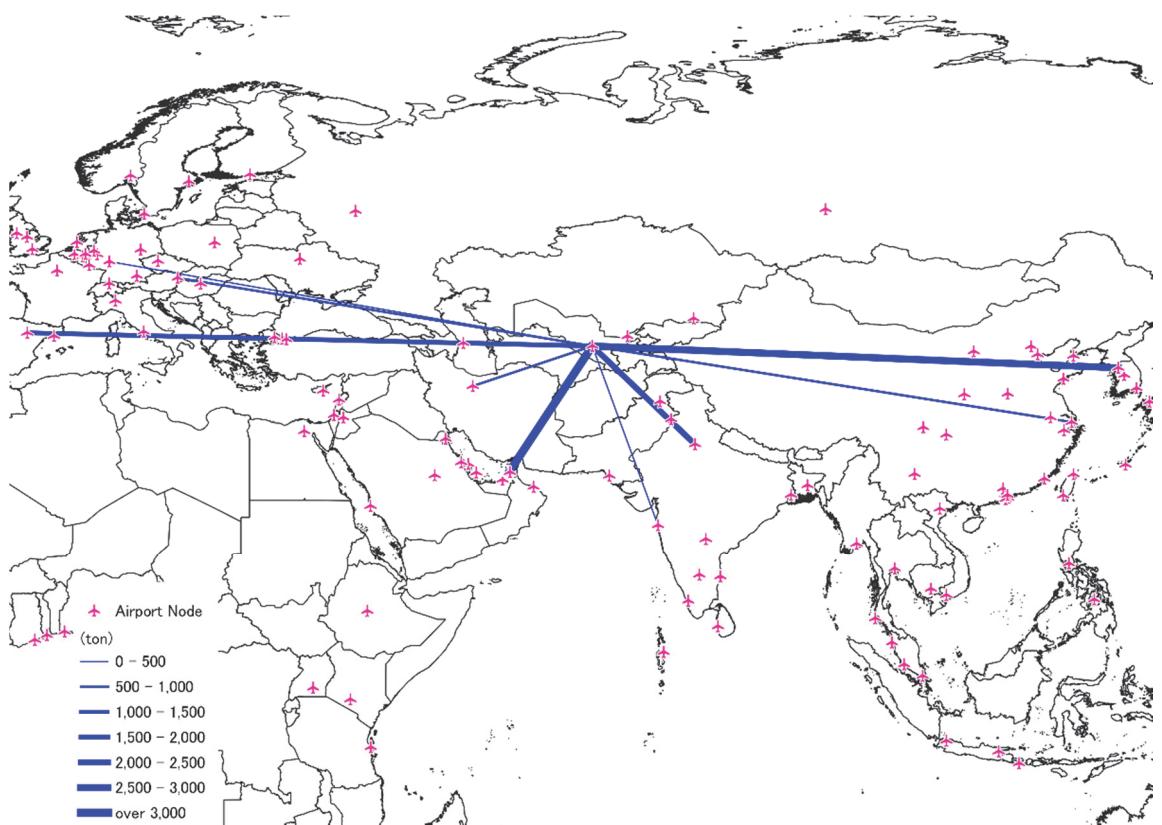


Fig. 6-10 Navoi 空港を端点にもつ航路のリンクフローの増加量

以上の結果より、Navoi 空港は、トランジット作業の効率化とともに、Navoi 空港を経由する際の費用についても何らかの低減策を用いることで、ユーラシア大陸の中心に位置する立地の優位性を生かし、ユーラシア大陸のハブ空港としての役割を強化することができることが示された。

第7章 おわりに

本研究の成果は以下の通りである。

- ① 世界規模の国際物流ネットワークを荷主の立場から再現するモデルとして、陸上および海上輸送の実際のネットワークに基づき、混雑の考慮やコスト最小以外のルートにも貨物が流れるような現実再現性の高い配分計算を行なっている Shibasaki et al. [18]のモデルをベースとし、航空輸送ネットワークを統合した全輸送機関を含む国際物流モデルを構築した。航空輸送ネットワークを統合する上で、時間価値が他の輸送機関と異なる航空輸送貨物を同一のモデルで扱うために、時間価値の異なる貨物グループを同じネットワークで配分できるようにモデル構成を修正した。また、モデル構成の修正の際に、モデルの計算時間の半分以上を占めるソートアルゴリズムを改善し、一定の計算時間短縮を達成した。
- ② モデル計算手法として段階配分を適用し、均衡配分手法を適用した従来モデルで発生していた計算結果の振動を軽減させることができた。また、陸上・航空輸送ネットワークを上位モデルに統合するというモデル構成の変更もあわせて行った。
- ③ Shibasaki et al. [18]と同様の再現性確認指標や、航空ネットワーク独自の指標を用いて、航空輸送ネットワーク統合後も概ね妥当な再現性を得られていることを確認した。
- ④ いくつかの指標から感度分析を行い、各パラメータが変化した時の推計結果の感度を確認した。その上で、特定の空港の利用促進を目指したシナリオを用意し、推計結果の変化を分析することで、航空輸送の利用を促進するための施策案を定量的に考察し、本モデルを実務面において航空輸送の分析に用いる方法を提示した。

本研究の今後の課題は以下の通りである。

- ① 航空輸送ネットワークにおいて取扱貨物量が小規模な空港に関しては高い再現性が得られていないため、よりローカルな指標等を用いて小規模空港の再現性も高めていく。
- ② 入手できるデータの範囲が限られているため、一部の入力データは推計に基づいた値や統一した値を用いている。これらのデータに関しては、引き続きデータ収集やヒアリング調査に基づき、実績値をモデルに用いることができるようとする。
- ③ Sea & Air 型輸送に関するシナリオ分析を行うために、陸上輸送ネットワークの対象国の範囲を拡大する。
- ④ 実際の貨物は品目ごとに時間価値が大きく異なるため、より多種類の品目グループに分けて配分を行えるようなモデル構造にする。
- ⑤ 分割回数を増加させることでより精度の高い結果を得ることが可能になる一方で、分割回数の増加は計算時間の増大につながるため、実務面での使用を考慮すると、両者の適切な組み合わせを検討していくことが必要である。

参考文献

- [1] 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,” 卒論, 2017.
- [2] Chang, Y. H., Yeh, C. H., & Wang, S. Y. (2007). A survey and optimization-based evaluation of development strategies for the air cargo industry. *International Journal of Production Economics*, 106(2), 550-562.
- [3] Airbus, “Global Market Forecast 2019-2038,” 2019. Available: <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>. (最終アクセス日: 2020年1月10日)
- [4] 柴崎, 神波, 渡部, “東アジア～欧州間国際貨物の航空/海上輸送の分担に関する一考察,” 日本物流学会誌, 2016
- [5] IATA, “IATA Cargo Strategy 2015-2020,” 2015. Available: <https://www.iata.org/whatwe/do/cargo/Documents/cargo-strategy.pdf>. (最終アクセス日: 2020年1月10日).
- [6] Wong, W. H., Zhang, A., Van Hui, Y., & Leung, L. C. (2009). Optimal baggage-limit policy: airline passenger and cargo allocation. *Transportation Science*, 43(3), 355-369.
- [7] CARATS 事務局, “CARATS 航空交通システムの長期ビジョン,” 2019.
- [8] Eurasian Development Bank, “SILK ROAD TRANSPORT CORRIDORS: ASSESSMENT OF TRANS-EAEU FREIGHT TRAFFIC GROWTH POTENTIAL,” 2018.
- [9] Jung, H. J., Jeon, J. W., Yeo, G. T., & Yang, C. H. (2012). Forecasting and Suggesting the Activation Strategies for Sea & Air Transportation between Korea and China. *Journal of Navigation and Port Research*, 36(10), 905-910.
- [10] 岡田夕佳, アジアにおける海上輸送と主要港湾の現状, 池上寛, 編, アジア経済研究所, 2012, pp. 19-28.
- [11] “Sea & Air Transport 2018,” The Korea Customs Office.
- [12] (株) ANA 総合研究所, “航空産業入門,” 東洋経済新報社, 2017.
- [13] Jourquin, B. (2006). A multi-flow multi-modal assignment procedure applied to the European freight transportation networks. *Nectar Cluster*, 1.
- [14] Maia, L. C., & Do Couto, A. F. (2013). An innovative freight traffic assignment model for multimodal networks. *Computers in Industry*, 64(2), 121-127.
- [15] Tavasszy, L., Minderhoud, M., Perrin, J. F., & Notteboom, T. (2011). A strategic network choice model for global container flows: specification, estimation and application. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1163-1172.

- [16] Jones, D. A., Farkas, J. L., Bernstein, O., Davis, C. E., Turk, A., Turnquist, M. A., ... & Sawaya, W. (2011). US import/export container flow modeling and disruption analysis. *Research in Transportation Economics*, 32(1), 3-14.
- [17] Wang, H., Nozick, L., Xu, N., & Gearhart, J. (2018). Modeling ocean, rail, and truck transportation flows to support policy analysis. *Maritime Economics & Logistics*, 20(3), 327-357.
- [18] Shibasaki, R., Kato, H., and Ducruet, C. “Global Logistics Network Modelling and Policy: Quantification and Analysis for International Freight, Elsevier” , 2020.
- [19] 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,” 卒論, 2018.
- [20] Feng, B., Li, Y., & Shen, Z. J. M. (2015). Air cargo operations: Literature review and comparison with practices. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, 263-280.
- [21] Heinitz, F. M., & Meincke, P. A. (2013). Modeling framework of origin and destination air cargo routing. *Transportation research record*, 2336(1), 83-90.
- [22] International Transport Forum(ITF)-OECD, “ITF Transport Outlook 2015,” 2015. Available: <https://www.oecd.org/environment/itf-transport-outlook-2015-9789282107782-en.htm>. (最終アクセス日: 2020年1月10日) .
- [23] L. Mejis, “GLOBAL AIR CARGO FLOWS ESTIMATION BASED ON O/D TRADE DATA,” Air Transport Research Society World Conference, 2017.
- [24] 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.
- [25] Zhang, M. and Pel, A.J. (2016). Synchromodal hinterland freight transport: Model study for the port of Rotterdam, *Journal of Transport Geography*, 52(C), 1–10.
- [26] Hai, D., Xu, J., Duan, Z., and Chen, C. (2020). Effects of underground logistics system on urban freight traffic: A case study in Shanghai, China, *Journal of Cleaner Production*, 260, 121019. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121019.
- [27] Lee, D.H. and Chandrasekar, P. (2002). 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
- [28] Arfat, Y., Mehmood, R., and Albeshri, A. (2018). 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. doi: 10.1007/978-3-319-94180-6_30.

- [29] Florian, M., Chabini, I., and Le Saux, E. (1997). Parallel and distributed computation of shortest routes and network equilibrium models, IFAC Proceedings Volumes, 30(8), 1259–1264. doi: 10.1016/S1474-6670(17)43994-2
- [30] Yamaguchi, T., Shibasaki, R., Samizo, H., and Ushirooka, H. (2021). 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. doi: 10.3390/su13020668
- [31] (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.
- [32] Ohashi, H., Kim, T. S., Oum, T. H., & Yu, C. (2005). Choice of air cargo transshipment airport: an application to air cargo traffic to/from Northeast Asia. Journal of Air Transport Management, 11(3), 149-159.
- [33] Chao, C. C., & Hsu, C. W. (2014). Cost analysis of air cargo transport and effects of fluctuations in fuel price. Journal of Air Transport Management, 35, 51-56.
- [34] ICAO, “Traffic by Flight Stage”.
- [35] IATA,. Available: https://www.iata.org/en/pressroom/facts_figures/fact_sheets/. (最終アクセス日: 2020 年 1 月 10 日) .
- [36] Chao, C. C., & Hsu, C. W. (2014). Cost analysis of air cargo transport and effects of fluctuations in fuel price. Journal of Air Transport Management, 35, 51-56.
- [37] 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.
- [38] Drewry Maritaiime Research, “Global Container terminal Operators Annual Review and forecast,” 2018.
- [39] (社) 土木学会 土木計画学研究委員会 「交通ネットワーク」出版小委員会, 交通ネットワークの均衡分析 ー最新の理論と解法ー, 土木学会, 1998, p. 331p.
- [40] (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.
- [41] Open flights,. Available: <https://openflights.org/data.html>. (最終アクセス日: 2020 年 1 月 10 日) .
- [42] P. S. Morrell, 国際航空貨物輸送, 成山堂書店, 2016, pp. 143-155.
- [43] Leigh Fisher, “Review of airport charges 2016,”
- [44] ICAO, “On Flight Origin and Destination”.
- [45] “TURKISH STATISTICAL INSTITUTE,”. Available: <http://www.turkstat.gov.tr/PreTablo>

Arama.do?metod=search&araType=vt. (最終アクセス日:2020年1月15日) .

- [46] “GUS Bank Danych Lokalnych,”. Available: <https://bdl.stat.gov.pl/BDL/start>. (最終アクセス日:2020年1月15日) .
- [47] “DESTATIS Statistisches Bundesamt,”. Available: https://www.destatis.de/EN/Themes/Countries-Regions/Regional-Statistics/_node.html. (最終アクセス日:2020年1月15日) .
- [48] “cbs,”. Available: <https://www.cbs.nl/en-gb/figures>. (最終アクセス日:2020年1月15日) .
- [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] IATA, “Jet Fuel Price Monitor,”. Available: <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>. (最終アクセス日: 2020年1月15日) .
- [52] RUSSIAN RAILWAYS LOGISTICS, “SlideService,”. Available: <https://www.slideserve.com/berne/russian-railways-logistics>. (最終アクセス日: 2020年1月15日) .
- [53] Navoi International Airport.. Available: https://www.navoi-airport.com/en/content/flight_information/. (最終アクセス日: 17 1 2020)
- [54] Dial, R. B. (1971). A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. *Transportation research*, 5(2), 83-111.