

ドライバルク貨物を含むインターモーダル 国際物流ネットワークモデルの構築

小菅 直樹¹・柴崎 隆一²・新井 洋史³・中村 武史⁴

¹学生非会員 東京大学大学院 工学系研究科システム創成学専攻
E-mail: naoki0104@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院准教授 工学系研究科レジリエンス工学研究センター
E-mail: shibasaki@tmi.t.u-tokyo.ac.jp

³非会員 Economic Research Institute for Northeast Asia (ERINA)
E-mail: harai@erina.or.jp

⁴学生非会員 東京海洋大学大学院 海運ロジスティクス専攻
E-mail: m205017@edu.kaiyodai.ac.jp

本研究では、これまで世界各地を対象にコンテナ貨物のみを対象として構築されてきた海上輸送と陸上輸送の双方を含むインターモーダル国際物流ネットワークモデルに、新たにドライバルク貨物を追加し、複雑な貨物の流動を再現し、より多様な政策分析やシミュレーションを可能とするモデルを構築する。

構築したモデルをユーラシア大陸地域に適用してモデルの再現性を確認するとともに、モデルの条件を変化させてシミュレーションを行い、貨物フローの変化を分析するとともに、モデルの実用性の確認を行った。

Key Words : *intermodal network assignment model, international maritime containers, global logistics, multicommodity allocation*

1. 研究の背景および目的

全世界における経済の成長とグローバル化、それに伴う国際貿易の発展によって、国際貨物輸送の重要性は年々高まっている。世界各国間で輸送される品目は、コンテナ貨物、鉄鉱石・石炭・穀物を代表とするドライバルク貨物、原油などの液体バルク貨物、気体のままパイプラインで運ばれることもある天然ガスなど多岐にわたる。これらの貨物は、近年の輸送技術の進化に伴い、海上輸送においてはそれぞれ専用の運搬船で運ばれ、陸上輸送においてはトレーラ、鉄道など複数の輸送モードにて輸送されている。各輸送モード間の接続性も向上し、海上輸送と陸上輸送を組み合わせる貨物を運ぶ例もより多く見られるようになってきている。

一方、輸送技術の進化と、それに伴う複数の輸送ルート・輸送モードの登場により、荷主による輸送方法の選択はより複雑化している。一般に、海上輸送は輸送費用が安く抑えられるものの輸送時間は長くなるのに対し、鉄道などによる陸上輸送は輸送費用が高くなるものの輸送時間を短縮することができる。特に近年は貨物輸送ニーズが多様化し、中国の「一帯一路」構想も伴って、シベリア鉄道や中欧班列をはじめとした陸上輸送の利用が促進されている。このような陸上輸送の成長に伴い、長距離陸上輸送に注目した研究も行われている。たとえば

著者らの研究グループでは、全世界を対象としたインターモーダルな国際物流ネットワークシミュレーションモデルを構築しており、ユーラシア大陸地域を対象に、海上輸送・陸上輸送だけでなく航空輸送も含む複数ルートの競合を考慮できる国際貨物シミュレーションモデルの構築²⁾や、主に陸域ASEAN地域のコンテナおよび陸送貨物を対象として、ネットワーク配分方法の変更などを行ったモデルの構築³⁾などを行っている。

このような国際物流シミュレーションモデルのほとんどは、コンテナ貨物のみを対象としているか、あるいはせいぜい航空貨物やコンテナ貨物に相当する陸上輸送貨物までを対象としたものであり、ドライバルク貨物や液体バルク貨物は対象としていない。しかし、重量ベースでいえば世界の海上輸送貨物量のうちコンテナ貨物の占める割合は1割強でしかない。長距離の陸上輸送においても、たとえばロシアにおける鉄道輸送はドライバルク貨物の構成比が大きく、鉄鉱石、石炭、穀物の3大ドライバルク貨物のみで重量ベースで約半数を占めており、限られた輸送容量をコンテナ貨物と他の貨物で取り合っている状況にある(図-1)。そこで、コンテナ貨物だけでなく、ドライバルク貨物も分析の対象に含め、鉄道のような輸送モードにおける容量の競合を考慮することで、より多様な観点から貨物輸送環境の現状や政策シナリオの分析が可能になると考えられる。

以上を鑑みて、本研究では、コンテナ貨物とドライバルク貨物を同時に取り扱うことができる全世界を対象とした物流シミュレーションモデルを構築し、上述したシベリア鉄道を含むユーラシア大陸地域に適用して、モデルの再現性および実用可能性を分析することを目的とする。なお、本研究では、ドライバルク貨物の中でも特に輸送量が多い鉄鉱石および石炭を対象としてモデルを構築する。

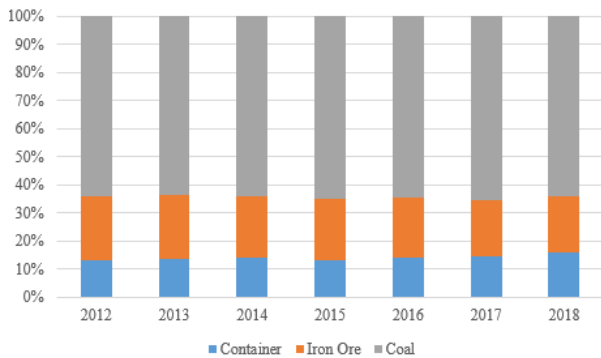


図-1 ロシア鉄道の貨物輸送における本研究の対象品目の割合
出典：日通総合研究所³⁾をもとに著者作成

2. 既往研究と本研究のアプローチ

以下では、主に鉄鉱石や石炭などのドライバルク貨物を対象とした輸送に関して、輸送ルートや輸送モードの選択に焦点を当てた既往研究を整理する。

まず、輸送ルート選択の分析を中心とした研究に関しては、特定の地域に着目した研究が多い。たとえば海上輸送のルート選択に着目した研究として、Ho and Bernal⁴⁾は、米国東海岸～東アジア間の穀物輸送におけるパナマ運河ルートとその他のルートの選択をロジットモデルで推計し、喫水制限が最も重要な要素であることを示している。Bai and Lam⁵⁾は、米国ガルフ発のエネルギー輸送を対象とし、コストや周辺の船舶数をインプットとして、VLGC (Very Large Gas Carriers) の港湾選択をモデル化している。Schøyen and Bråthen⁶⁾は、ドライバルク船に焦点を当て、船舶運航者の視点から北極海航路とスエズ運河ルートの選択を分析している。またShibasaki et al.⁷⁾は、全世界のドライバルク貨物の海上輸送を対象として、船舶動静データに基づきドライバルク船のルート選択モデルを構築している。しかし、これらの研究は海上輸送のみを対象としており、陸上輸送や輸送モードの選択までは考慮していない。

また、ドライバルク貨物を対象に複数の輸送モードを考慮した輸送ルートの選択に関する研究も存在する。たとえばBaótuÂ et al.⁸⁾は、セルビア～トルコ間の肥料輸送を対象とし、陸上輸送、内航水運を含む複数の輸送モ

ードの競合やバルク貨物のコンテナ化を考慮して、複数輸送ルートのコスト分析を行っている。またShen and Wang⁹⁾は、米国における穀物輸送を対象にロジットモデルと回帰モデルを構築し、トラックと鉄道の輸送モード選択とルート選択を推計している。さらにBaresford et al.¹⁰⁾は、貨物の重量、価格、輸送距離、輸送時間、輸送コスト、スケジュールの信頼性を考慮して、中国東北部における道路と鉄道の両者を含む鉄鉱石輸送を検討している。また、ドライバルクではなく石油を対象とした研究ではあるものの、Morison¹¹⁾は、カナダにおけるパイプラインおよび鉄道による原油の出荷を対象とし、荷主のモード選択とルート選択をモデル化し、構築したモデルを用いて輸送パターンの将来変化を予測している。

しかしながら、海上・陸上輸送の双方を考慮した最適な輸送ルートの選択を取り扱っている研究は少ない。たとえばZhang et al.¹²⁾は、鉄鉱石の輸送を対象に2段階のマルチモーダルなモデルを開発し、中国の鉄鋼会社のデータに基づいて、オーストラリアから中国の内陸地域に輸送される鉄鉱石の輸送モード・輸送ルート選択の分析を行っている。またドライバルク貨物を対象とはしていないものの、Wang and Yeo¹³⁾は、Fuzzy Delphi Methodを使用し、韓国～中央アジア間の中古車輸送における複数モードを含む最適な輸送ルートおよび主要なファクターを分析している。しかし、これらの研究は特定の地域のみに着目したものであり、全世界の包括的な貨物の流れの分析を対象としているものではない。さらに、バルク貨物とコンテナ貨物間の輸送容量の競合を考慮したモデルは、筆者らの知る限り存在しない。

そこで本研究では、著者らの研究グループにより開発された最新のインターモーダル世界物流ネットワークシミュレーション (GLINS) モデル³⁾をベースとして、ドライバルク貨物も含めたモデルへと拡張する。ドライバルク貨物をモデルに組み込むに当たっては、特に海上輸送においてコンテナ輸送と大きく特徴が異なることから、海上輸送部分については独立したサブモデルを構築することとする。一方、陸上輸送については、既存のコンテナ貨物を対象としたモデルにドライバルク貨物のフローも組み込むことにより、輸送容量の競合による混雑やそれに伴う輸送ルート選択を表現できるようにする。

3. モデル構成

(1) 全体構成

本研究で扱うモデルは、山口ら³⁾が構築したモデル (従来モデル) をドライバルク貨物も含む形へと拡張したものである。すなわち、陸上・海上の輸送ネットワーク構成と品目ごとの地域間貨物輸送需要 (OD貨物量) を所与としたときに、個々の貨物が、輸送ルートおよび

輸送モードを選択する、機関選択を含むネットワーク配分のモデルである。本モデルの対象貨物は、コンテナ貨物（空コンテナは含まない）に加え、ドライバルク貨物のうち鉄鉱石、石炭を含む3種類とする。なお本モデルでは、鉄鉱石および石炭をコンテナに入れて輸送することは考慮しない。また、本モデルで対象とする輸送機関は、海上輸送においては船舶、背後圏輸送においては道路、鉄道、内航水運の計4種類である。各輸送機関には容量が設定され、容量の上限に近づくと混雑が発生するものと想定する。

本モデルの全体構成を図-2に示す。図に示すように、コンテナ貨物海上輸送ネットワーク、バルク貨物海上輸送ネットワーク、背後圏輸送ネットワークの3種類のネットワークを統合した多品目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）を基本として、詳細な国際海上コンテナ輸送ネットワーク上での配分モデル、および国際海上バルク貨物輸送における品目別輸送船舶サイズ選択モデルをサブモデル（下位モデル）としてもつ構成となっている。

サブモデルのうち海上バルク貨物輸送の船舶サイズ選択モデルにおいては、上位モデルによって算出された品

目別海上輸送貨物量に基づき、輸出入港湾ペアごとに船舶サイズを選択し輸送費用と時間を算出して、これらを上位モデルにおけるリンクコストとして再入力する、という構造となっている。このサブモデルを上位モデルに含めない理由は、ある港湾ペア間の船舶サイズが変更された場合、フローの変化を通じて他の港湾ペア間の船舶サイズに影響を及ぼすことから、上位モデルの中で一意に求めることが困難であるためである。

(2) 上位モデル

本モデルでは、多段階配分の各回の計算において、確率配分を採用している。

確率配分における効用の確定項 $V_h^{od,c}$ は、一般化費用を用いる。一般化費用 $V_h^{od,c}$ は輸送品目 c ごとに異なる時間価値 vt^c を用いて輸送費用と時間費用の和であらわされる。

図-3に上位モデルのネットワーク構成を示す。

上位モデルには、大別して陸上リンク、港湾リンク、仮想海上リンクの3種類のリンクと、各リンクを構成するノードが存在する。ここで、本モデルにおいては、コ

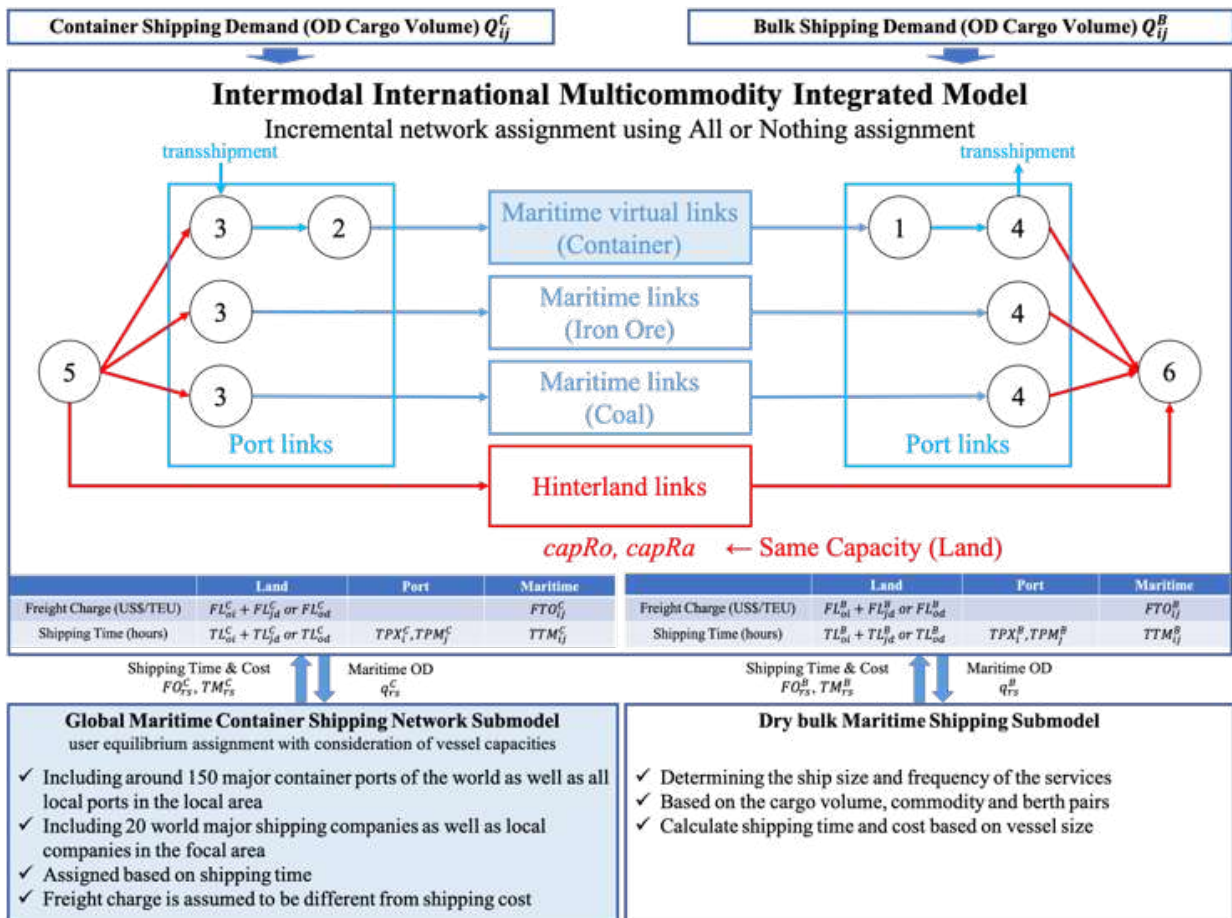


図-2 本モデルの全体構成

ンテナ貨物だけでなく、鉄鉱石と石炭の輸送も考慮するため、各リンクの貨物フローはそれぞれの品目の貨物フローの合計値となる(式(1))。

$$x_a = x_a^{ct} + x_a^{lr} + x_a^{cl} \quad (3)$$

x_a : 上位モデル内のリンク a のフロー (10ton)
 x_a^{ct} : リンク a のコンテナ貨物のフロー (10ton)
 x_a^{lr} : リンク a の鉄鉱石のフロー (10ton)
 x_a^{cl} : リンク a の石炭のフロー (10ton)

なお、従来モデルではコンテナ貨物をTEUの単位で取り扱っていたものの、本モデルではコンテナ貨物とドライバルク貨物を同一の単位で計算できるようにするために、コンテナ貨物の単位を1TEU=10tonとして10tonの単位で統一している。

各リンクにおけるコスト関数は、基本的には従来モデル³⁾と同様に設定する。以下にその概要を述べる。

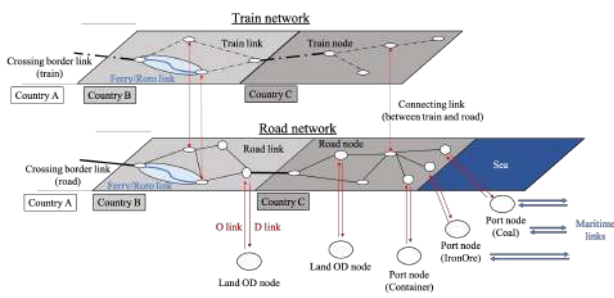


図-3 上位モデルのネットワーク構成

a) 陸上リンク

陸上輸送ネットワークにおける各輸送機関には容量が存在し、あるリンクに貨物が集中した場合には混雑が発生することを考慮する。以下に、陸上輸送ネットワークにおけるコスト関数の例として、鉄道リンクのコスト関数の式を示す。鉄道リンクにおいては、鉄道輸送にかかるコストのうち、運賃の距離比例分と混雑の影響を含む所要時間を考慮する。ここでリンクフローとして式(1)に示した全品目の合計値 x_a が用いられていることに留意されたい。

$$u_{ra}(x_a) = CORa \times l_a + vt \times \frac{l_a}{vRa_a} \times \{1 + b5 + \left(\frac{x_a}{capRa_a \times freqRa_a}\right)^{b6}\} \quad (4)$$

u_{ra} : 鉄道リンクのコスト関数 (USD/10ton)
 $CORa$: 鉄道による輸送運賃のうちの距離比例分 (USD/km/10ton)

vRa_a : 鉄道の速度 (km/hour)

$capRa_a$: 当該リンクにおける鉄道の一編成あたりの輸送容量 (10ton/train)

$freqRa_a$: 当該リンクにおける鉄道の一年あたりの運行本数 (train/year)

$b5, b6$: 鉄道混雑関数に関するパラメータ

また、各リンクが国境を跨ぐ場合は越境コストを上乗せしている。

b) 港湾リンク

港湾リンクにおいては、輸出港および輸入港におけるターミナル内混雑による遅れを含む所要時間(費用については後述する海上リンクに含まれるためここでは含まない)と、国境通過コストを考慮する。なお本モデルでは、同一名称の港湾であったとしても品目ごとに異なるノードおよびリンクを設定している。

c) 海上リンク

海上リンクにおいては、海上輸送にかかる所要時間、費用を考慮する。コンテナ貨物については積替港でのトランシップも想定するものの、ドライバルク貨物については輸出港から輸入港への直通運航のみを想定する。コンテナ貨物の海上輸送運賃および海上輸送時間は(3)節にて説明するコンテナ海上輸送ネットワークモデルにて計算した結果を使用し、ドライバルク貨物の海上輸送運賃および海上輸送時間は(4)節にて説明するドライバルク海上輸送サブモデルにて計算した結果を使用する。

(3) 下位モデル1 : コンテナ貨物海上輸送ネットワーク配分サブモデル

下位モデルの1つ目であるコンテナ貨物海上輸送ネットワーク配分サブモデルは、上位モデルのアウトプットである輸出港と輸入港の各港湾ペア間のコンテナ貨物輸送量をインプットとして受け取り、各港湾ペア間の輸送費用および輸送時間を出力するモデルであり、従来モデル³⁾から特に変更点はない。ネットワーク構成を図4に示す。

海上輸送時間の計算においては、コンテナ船にも容量が存在し、特定の船社やサービスに貨物が集中すると遅延や積み残しなどの発生が想定されることから、リンクフローに依存する混雑を考慮する。一方、海上輸送費用については、ある1つの船社のサービスのみを使用することから、船社内ネットワークのどの経路を通過しても運賃は同一であると想定し、配分計算の対象とはしない。以上の検討に基づき、本サブモデルでは、混雑を考慮し、輸送時間のみを対象とした確定的な段階配分を適用する。

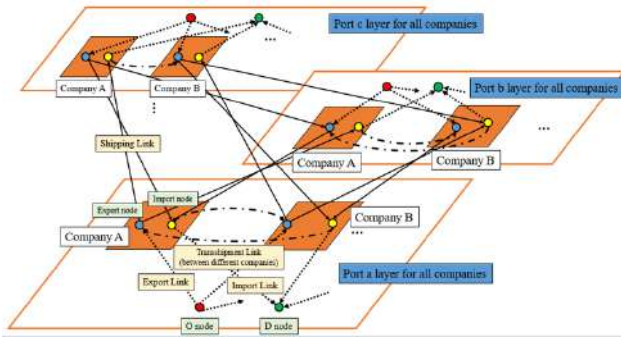


図-4 コンテナ貨物海上輸送ネットワークサブモデルのネットワーク構成³⁾

(4) 下位モデル2：ドライバルク貨物海上輸送船舶サイズ選択サブモデル

下位モデルの2つ目であるドライバルク海上輸送船舶サイズ選択サブモデル（以下、バルクモデルと呼ぶ）は、上位モデルのアウトプットである輸出港と輸入港の各港湾ペア間のドライバルク貨物輸送量をインプットとして受け取り、各港湾ペア間の輸送費用および輸送時間を出力するモデルである。図-5に、バルクモデルの計算手順を示す。

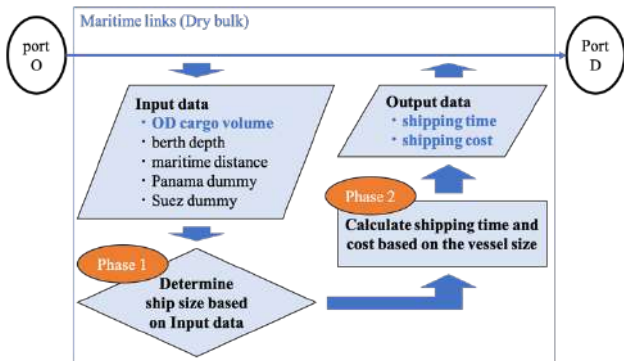


図-5 バルクモデルの計算手順

バルクモデル内の計算手順は、大きく2段階に分けられる。1段階目では、上位モデルのアウトプットである貨物輸送量などの情報をもとに、輸送に用いられる船舶のサイズを推計する。本研究では、Kanamoto et al.¹⁴⁾の研究手法に基づいて、以下の表-1に示すように6種類の船型タイプに分類し、輸出入港湾ペアごとに船型タイプを一種類選択するものとする。2段階目では、船型タイプごとに輸送にかかる各コストや船舶の速度を設定し、推計された船型タイプに基づいて輸送にかかる費用および時間を算出する。算出された各港湾ペア間の輸送費用および輸送時間は、上位モデルのインプットとして用いられる。

表-1 船型タイプとDWTの範囲

船型タイプ	DWTの範囲 (thousand ton)	該当船舶数 (ship)	鉄鉱石 輸送回数	石炭 輸送回数	DWTの代表値 (thousand ton)
VLOC	220~	235	1087	0	400
Capesize	120~220	1362	5511	1927	220
Panamax	65~120	2524	1605	7901	85
Handymax	40~65	3161	887	4337	65
Handysize	20~40	2772	503	1663	40
Minibulk	~20	5390	260	2515	20

a) 船型タイプの推計

選択モデルへの入力変数については、Kanamoto et al.¹⁴⁾を参考に、上位モデルのアウトプットである貨物輸送量に加え、輸出港および輸入港の水深、両港間の海上距離、パナマ運河とスエズ運河の通航を表すダミー変数を考慮する。推計手法は、Kanamoto et al.¹⁴⁾と同様に多項ロジットモデルをベースとするものの、精度を向上するために、前もって閾値に基づいた船型タイプの決定を行うことで、船型タイプを絞ってから多項ロジットモデルを適用する。

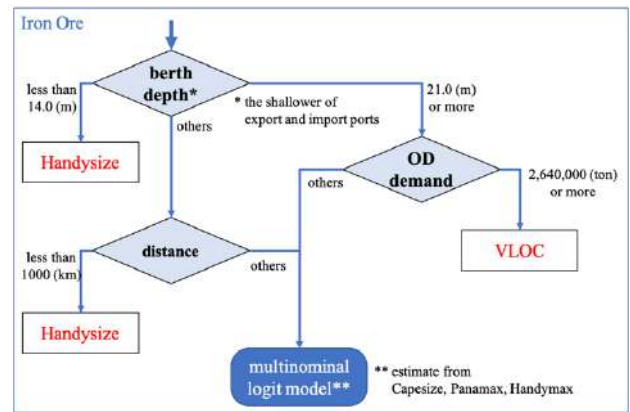


図-6 鉄鉱石輸送における船型タイプ推計フロー

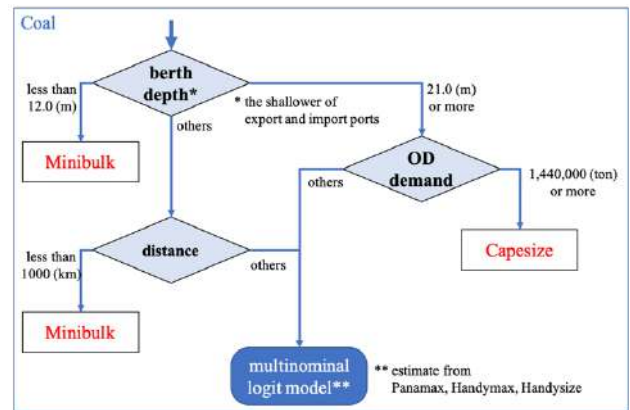


図-7 石炭の輸送における船型タイプ推計フロー

図-6および図-7に鉄鉱石および石炭の輸送における船型タイプ推計フローを示す。鉄鉱石の輸送においては、船型タイプごとの輸送回数をふまえ、MinibulkをHandysizeに統合した。まず、物理的な制約であることから船型タイプの決定に最も影響を与えられとされる港湾の水深をもとに分類する。輸送に用いられた船型タイプ

別の港湾水深の分布図を鑑みて、輸出港もしくは輸入港の水深が14.0 (m) 未満である港湾ペア間についてはHandysizeに設定した。次に、輸送需要が著しく多い港湾ペア間について考える。同様に、輸送に用いられた船型タイプ別の年間輸送需要の分布を鑑みて、年間輸送需要が264万トン以上となる港湾ペア間についてはVLOCに設定した。VLOCのDWTがおよそ22万トンであることから、これらの港湾ペア間については、VLOCを用いても月に1回以上の頻度で輸送することが必要という計算になる。続いて、輸送距離に着目し、鉄鉱石の輸送に用いられた船型タイプ別の輸送距離の分布を鑑みて、輸送距離が1,000km未満の港湾ペア間についてはHandysizeに設定した。なお、パナマ運河およびスエズ運河の通航に関しては、本来ならば運河を通航できない船型タイプについても、輸送効率の面から遠回りをすることでより大きいサイズの船型タイプを用いる例がよくあることから、ルールに基づく決定においては考慮しない。

石炭の輸送においては、輸送にVLOCが用いられている実績はない。よって、Minibulk, Handysize, Handymax, Panamax, Capesizeの計5種類の船型タイプの中から、輸送に用いられる船型タイプを推計する。石炭の輸送についても鉄鉱石の輸送と同様の流れでルールを設定しているものの、輸送に用いる船型タイプが異なるため、一部の閾値に異なる値を設定している。特に、年間輸送需要においては、年間輸送需要が144万トン以上となる港湾ペア間をCapesizeに設定しており、これは、CapesizeのDWTがおよそ12万トンであることから、これらの港湾ペア間については、Capesizeを用いても月に1回以上の頻度で輸送することが必要であるという計算に基づいている。

表-2および表-3に鉄鉱石および石炭の船型タイプ選択の推計結果を示す。鉄鉱石では正解率が6割を超えており、石炭でも6割近くであることから、ある程度の精度のあるモデルとして扱うことができる。また、閾値に基づいた決定により船型タイプを絞ることをせずに、5種類の船型タイプをすべて多項ロジットモデルで推計した場合、正解率は鉄鉱石で55.9%、石炭で54.5%であった。このことから、予め閾値に基づいて船型タイプを決定するという手順を挟むことで精度が向上することを示すことができた。

表-2 鉄鉱石輸送における船型タイプ選択の推計結果

	Determined by the threshold	Estimated by logit model	Total
No. of data	308	1007	1315
No. of matches	206	634	840
Match rate	66.9%	63.0%	63.9%

表-3 石炭輸送における船型タイプ選択の推計結果

	Determined by the threshold	Estimated by logit model	Total
No. of data	308	1007	1315
No. of matches	206	634	840
Match rate	66.9%	63.0%	63.9%

b) 輸送コストの算出

バルクモデルの2段階目では、1段階目で推計した船型タイプごとに輸送費用と輸送時間を算出する。輸送費用については、燃料費、資本費、運航費の各項目に加え、スエズ運河、パナマ運河の通航にかかる費用を考慮する。輸送時間については、出発港から到着港までの海上距離を、使用する船型タイプごとに定めた速度で除することにより算出する。

以上のコスト関数の定義や各種パラメータの設定においては、Shibasaki et al.⁹⁾を参考に、回帰分析等により決定した。表-4に、輸送費用の各項目に関する係数の設定値を示す。ここで、これらの係数は、ドライバルク貨物の品目を問わず同一と想定している。

燃料費にかかる係数 c_1^{bulk} は、日本船舶明細書2021年版⁶⁾に記載された日本籍船の実績値より、図-5に示す回帰分析により推計した。資本費（船費）にかかる係数 c_2^{bulk}, c_3^{bulk} は、日本船用工業会データ⁷⁾に基づき設定されたShibasaki et al.⁹⁾と同じ値を用いた。また、運航費にかかる係数 c_4^{bulk}, c_5^{bulk} は、Drewry⁸⁾に示されるデータより図-6に示す回帰分析により推計した。

表-4 ドライバルク貨物海上輸送の航走費に関する各係数の設定値

燃料費	資本費		運航費		
	c_2^{bulk}	c_3^{bulk}	c_4^{bulk}	c_5^{bulk}	
c_1^{bulk}	8.97×10^{-6}	2.42×10^2	1.64×10^7	7.22×10^{-3}	4.37×10^3

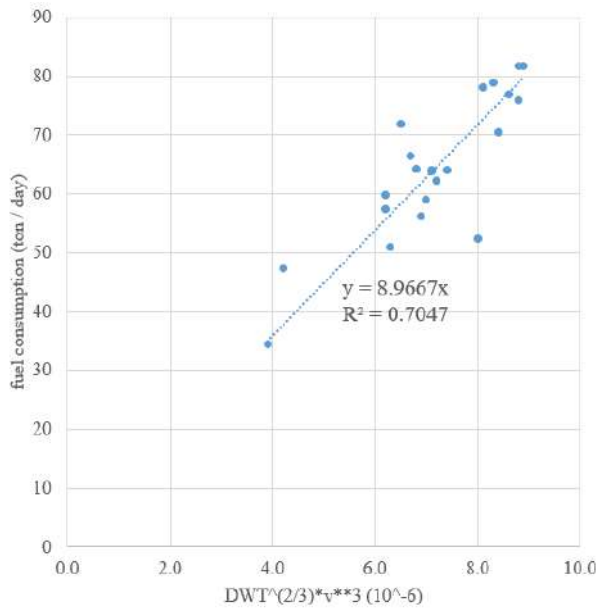


図-8 船舶サイズおよび船速と燃料消費量の関係

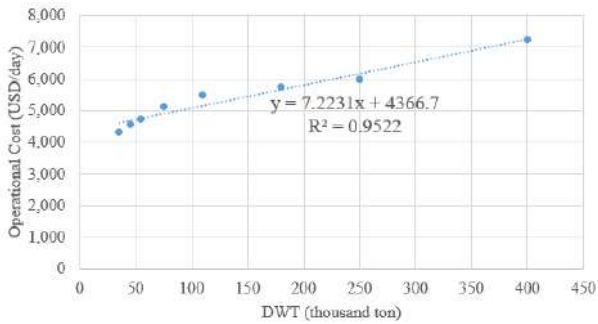


図-9 船舶サイズと運航費の関係

(5) パラメータ設定

本モデルにおける様々なパラメータのうち、新たな設定や見直しを行った混雑関数のパラメータおよび品目別の時間価値について、以下に説明する。

a) 混雑関数パラメータ

混雑関数に関するパラメータのうち、混雑項に係る係数であるb1, b2, c1, c2については、山口³⁾と同様の設定値を使用している。一方、b3-b8については探索的手法により再設定した。表-5に、本モデルにおける混雑関数パラメータの設定値を示す。

表-5 混雑関数に関するパラメータの設定値

混雑関数パラメータ									
海上		道路		鉄道		内航水運		港湾	
b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	c1	c2
3.0	4.0	2.0	6.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	4.0

b) 時間価値

輸送品目cごとに異なる時間価値パラメータ vt^c (USD/10ton/hour) の設定値を表-6に示す。コンテナ貨物

については山口ら³⁾と同じ値とし、鉄鉱石および石炭についてはIHS社の提供するGTA Forecastingデータベース⁹⁾に基づき以下の通り算出した。

$$vt^{Ir} = \frac{SV^{Ir}}{ST^{Ir}} \times \alpha \times IR \times \frac{1}{365 \times 24} \quad (2)$$

$$vt^{Cl} = \frac{SV^{Cl}}{ST^{Cl}} \times \alpha \times IR \times \frac{1}{365 \times 24} \quad (3)$$

vt^{Ir} : 鉄鉱石の時間価値 (USD/10ton/hour)

vt^{Cl} : 石炭の時間価値 (USD/10ton/hour)

SV^{Ir} : 鉄鉱石の全世界年間海上輸送金額 (USD/hour)

ST^{Ir} : 鉄鉱石の全世界年間海上輸送量 (ton/hour)

SV^{Cl} : 石炭の全世界年間海上輸送金額 (USD/hour)

ST^{Cl} : 石炭の全世界年間海上輸送量 (ton/hour)

α : 10tonへの換算パラメータ ($\alpha=10$)

IR : 年間利子率 (10%と設定)

表-6 時間価値パラメータの設定値

時間価値パラメータ		
コンテナ	鉄鉱石	石炭
vt^{Cl}	vt^{Ir}	vt^{Cl}
0.5	0.007	0.011

4. モデル入力データ

本研究で用いる入力データについては、コンテナ貨物については基本的には山口ら³⁾の設定を用いる一方で、ドライバルク貨物については以下の手順で作成する。なお、データは原則として2018年時点のものを用いる。

本モデルにおける主なインプットデータは、港湾における取扱費用や時間などを含む港湾データ、海上輸送ネットワークデータ、陸上輸送ネットワークデータ、貨物輸送需要 (OD貨物量) の4種類である。

(1) 港湾データ

本モデルにおいては、新たに鉄鉱石および石炭を取り扱う港湾を追加する。本モデルの対象とする鉄鉱石および石炭を取り扱う港湾は、世界の主要港湾 (年間取扱量が500万トン以上を目安) および本モデル対象地域 (陸上輸送ネットワークを考慮する地域) のローカル港湾とする。

ここで取扱量実績については、AXS Marine社提供のAXS Dryデータから得られる品目別入出港船腹量 (DWT) より消席率を100%と仮想定して求めた。

この結果、鉄鉱石については76港湾、石炭については130港湾をモデルの対象港湾とした。

(2) 海上輸送データ

ドライバルク貨物の海上輸送ネットワークデータは、本研究で新たに作成したものである。本研究で使用するデータは、鉄鉱石、石炭の各品目において、該当品目を取り扱う港湾ペア間の航海距離および航行速度のデータである。データソースは、航海距離についてはAISデータを使用し、航海速度については、AXS Dryデータを使用している。両品目においてデータの作成方法は同一である。航海速度データについては、AXS Dryデータのvoy_ave_speed列のデータを参照し、船型タイプ別に航海速度の平均値を算出したものを採用している。

(3) 陸上輸送ネットワークデータ

陸上輸送ネットワークについては、以下の点について変更を加えた。はじめに、鉄鉱石および石炭の輸出入港湾との接続を設定した。また、各リンクにおける容量について、鉄鉱石および石炭輸送の容量分だけ拡張した。具体的な設定例として、欧州-アジア間の長距離陸上輸送の主要ルートであるシベリア鉄道および中欧班列（中国～欧州間コンテナ専用列車）に該当するリンクの容量の設定例を表-7に示す。容量の設定は著者らが決定した。

表-7 シベリア鉄道および中欧班列リンクのキャパシティ

section name	from	to	old capacity (TEU=10ton/year)	new capacity (TEU=10ton/year)
BAM_1	Tayshet	Lena-vostochnaya	34,944	3,139,136
BAM_2	Lena-vostochnaya	Tynda	34,944	896,896
BAM_3	Tynda	Komsomol'sk	34,944	896,896
BAM_4	Komsomol'sk	Vanino	34,944	1,345,344
TSR_0	Moscow	Tayshet	489,216	5,014,464
TSR_1	Tayshet	Ulan-ude	489,216	5,014,464
TSR_2	Uran-ude	Karymskaya	489,216	5,014,464
TSR_3	Karymskaya	Bamovskaya	489,216	5,014,464
TSR_4	Bamovskaya	Belogorsk	489,216	5,014,464
TSR_5	Belogorsk	Izvestkovaya	489,216	5,014,464
TSR_6	Izvestkovaya	Volochaevka	489,216	5,014,464
TSR_7	Volochaevka	Smolyaninovo	978,432	5,014,464
TSR_branch_1	Smolyaninovo	Dunay	978,432	285,376
CRE_Eastern	Karymskaya	Manzhouli	489,216	960,000
CRE_Central	Uran-ude	Erenhot	421,200	840,000
CRE_Western	Samara	Alashankou	421,200	840,000

(4) 貨物輸送需要（OD貨物量）データ

ドライバルク貨物の地域間輸送需要および港湾間輸送需要データの作成方針は、基本的には従来モデルと同じであるものの、港湾間輸送需要データの作成方法が一部異なる。具体的には、国どうしの輸送量を港湾どうしの輸送量に配分する際に、従来のコンテナ貨物の港湾間輸送需要データ作成時には、港湾単位で各港湾の取扱量に基づいて配分を行っていたものの、ドライバルク貨物の港湾間輸送需要においては、港湾ペア単位で各港湾ペア間の輸送実績に基づいて配分を行っている。これは、コンテナ貨物の海上輸送が複数港を周回するサービスによるものであるのに対し、ドライバルク貨物の海上輸送は出発港から到着港への直航輸送が主体であることを考慮

したためである。なお、ドライバルク貨物の港湾間輸送需要データ作成においては、従来のコンテナ貨物とは異なり船社は考慮していない。

ドライバルク、コンテナの両貨物に共通して、陸上ネットワークを考慮する国においては、各国ごとに国よりも細かい区分であるゾーンを設定し、国単位の貨物量を分割指標に基づいてゾーン単位に分割している。ここで、鉄鉱石の地域間輸送需要作成においては、特に輸出量が多いウクライナとイランにおいて新たにゾーンを追加した。また分割指標についても、特に鉄鉱石および石炭の輸出量が多い国については、産地の場所を考慮するため、産出量のデータに基づいて配分を行っている。

5. モデル計算

(1) 計算方法

本モデルにおいては、従来モデル³⁾と同様に、上位モデルと下位モデルの計算を交互に行う。はじめに下位モデルのコンテナ海上輸送ネットワークサブモデルとドライバルク海上輸送サブモデルを計算し、出力された輸送費用および輸送時間を上位モデルに代入する。以降の計算では、上位モデルから出力された品目（コンテナ貨物、鉄鉱石、石炭）別の海上リンクフローを下位モデルにおける港湾間貨物輸送需要として下位モデルのインプットとし、下位モデルから出力された品目別の港湾間海上輸送輸送費用と時間を上位モデルのインプットとして、繰り返し計算を行う。なお、本モデルにおける繰り返し計算回数は従来モデルに従い2回としている。

(2) 推計結果

はじめに、陸上輸送ネットワークに接続する港湾の各貨物の輸出入貨物取扱量について、図-10～図-12に実績値と推計値の比較を示す。

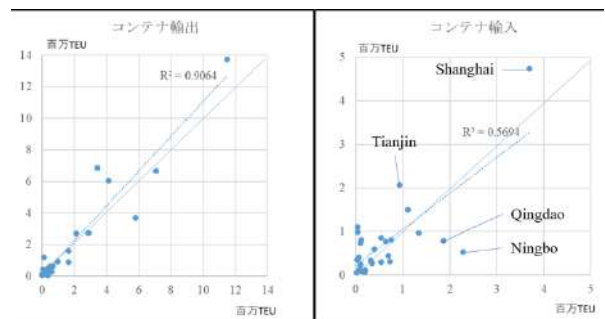


図-10 コンテナ貨物の輸出入取扱量の比較

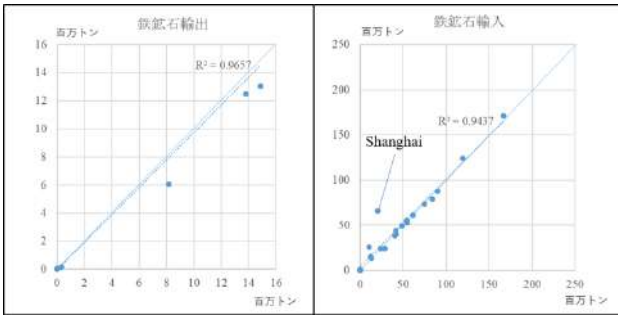


図-11 鉄鉱石の輸出入取扱量の比較

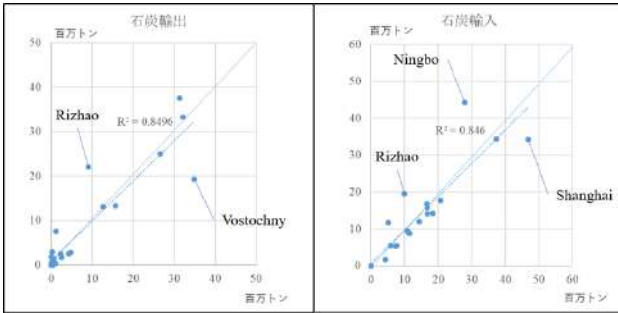


図-12 石炭の輸出入取扱量の比較

図-10 に示すコンテナ貨物の取扱量の再現性を見ると、輸出入ともおおむね良好な再現性を示しているものの、特にいくつかの中国の港湾における再現性がやや低い。これより、中国北部の Tianjin 港と Qingdao 港や中部の Shanghai 港と Ningbo 港など、比較的近接する港湾同士の貨物量の分担・競合関係の再現性に課題があることが推察される。一方で、図-11および図-12に示される鉄鉱石や石炭の港湾取扱量においては、沿岸地域における輸入需要が大きいこともあり、一部港湾においてはコンテナ貨物と同様の課題はみられるものの、ともに概ね高い再現性を示している。

次に、陸上リンクの貨物フローおよび混雑状況（ロードファクター）の推計結果を図-13および図-14に示す。図-13に示すフローの推計結果をみると、長距離の陸上輸送には道路よりも鉄道の方が利用されていることが確認でき、なかでもシベリア鉄道および中欧班列に該当するリンクに貨物が集中していることがわかる。また、図-14に示すロードファクターの推計結果を見ると、全般的に鉄道にフローが集中し、特にシベリア鉄道西部やバム鉄道、中欧班列のカザフスタンと中国の大部分のリンクで混雑が発生していることがわかる。また図-15に、シベリア鉄道本線のウラジーミル付近のリンクの品目別フローの推計値を示す。実績値がないため評価は難しいものの、東向きより西向きの貨物が多く、貨物の大部分を石炭が占めているという結果は概ね妥当といえる。

以上の推計結果を本研究における base シナリオとし、次章にてシナリオ分析を行うこととする。

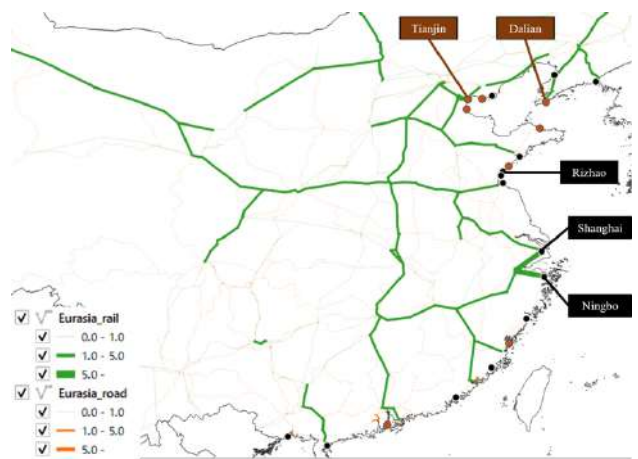


図-13 中国近辺の陸上リンクの混雑状況

次に、鉄鉱石および石炭の船型タイプ推計モデルの再現性を確認する。船型タイプ推計モデル単体での精度は4章にて確認したので、ここではモデル全体に組み込んだ際の精度を確認する。すなわち、インプットである地域間輸送需要を上位モデルの計算にて配分した結果である各港湾間の輸送需要をインプットとした際の、船型タイプ推計モデルの再現性をみる。実績値は、AXS Dry データ¹⁰において最も使用回数が多かった船型タイプを採用している。以下の表-8および表-9に、品目ごとの船型タイプ推計モデルの推計結果を示す。

表-8 鉄鉱石の海上輸送における船型タイプ推計結果

IronOre	no vessel	Observed						Total
		Handysize	Handymax	Panamax	Capesize	VLOC		
no vessel	4554	8	4	3	11	8	4587	
Handysize	10	3	2	6	3	0	24	
Handymax	56	2	10	18	11	0	97	
Panamax	12	9	5	18	18	0	53	
Capesize	111	2	26	55	312	40	449	
VLOC	4	0	0	2	31	53	90	
Total	5147	15	47	102	396	99	5700	

表-9 石炭の海上輸送における船型タイプ推計結果

Coal	no vessel	Observed						Total
		Minibulk	Handysize	Handymax	Panamax	Capesize		
no vessel	11,087	2	3	23	18	2	15,135	
Minibulk	24	7	8	1	8	0	48	
Handysize	10	2	0	0	1	0	13	
Handymax	9	4	1	12	30	0	56	
Panamax	318	26	75	169	666	165	1,364	
Capesize	8	0	3	13	50	50	124	
Total	15,454	41	90	217	751	217	18,720	

輸送実績があるペアに絞った（no vesselを除いた）際の実績と推計結果の一致率は、鉄鉱石では54.1%、石炭では54.2%であり、鉄鉱石ではCapesize、石炭ではPanamaxに推計値が若干偏っている。両品目ともに改善の余地はあるものの、ある程度は精度のあるモデルとして扱うことができると考えられる。

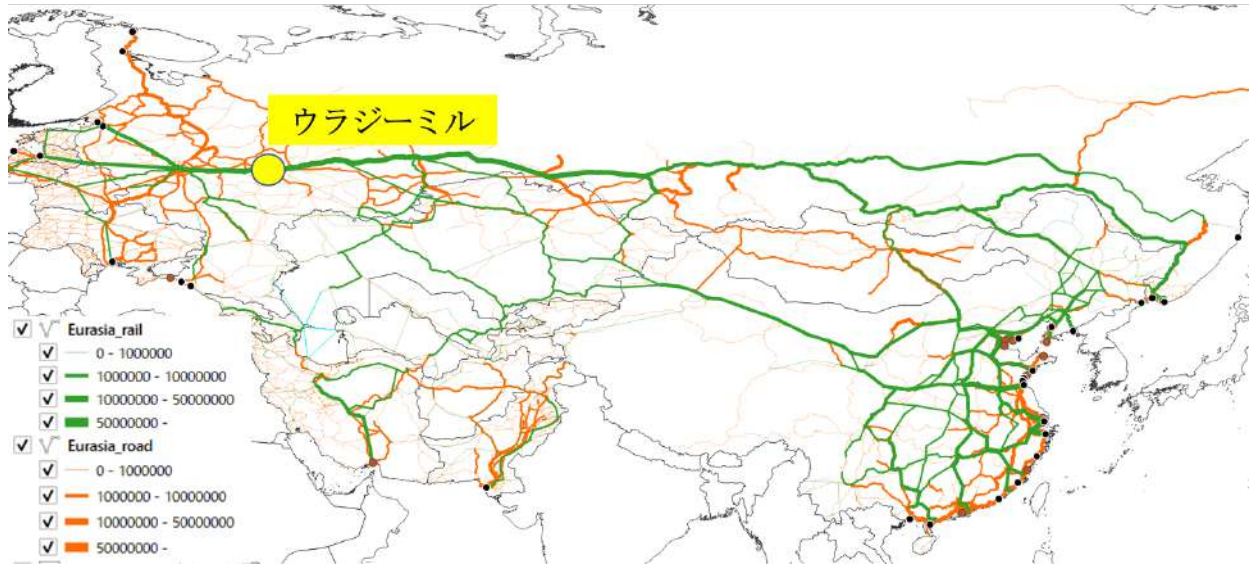


図-14 陸上リンクのフロー推計結果

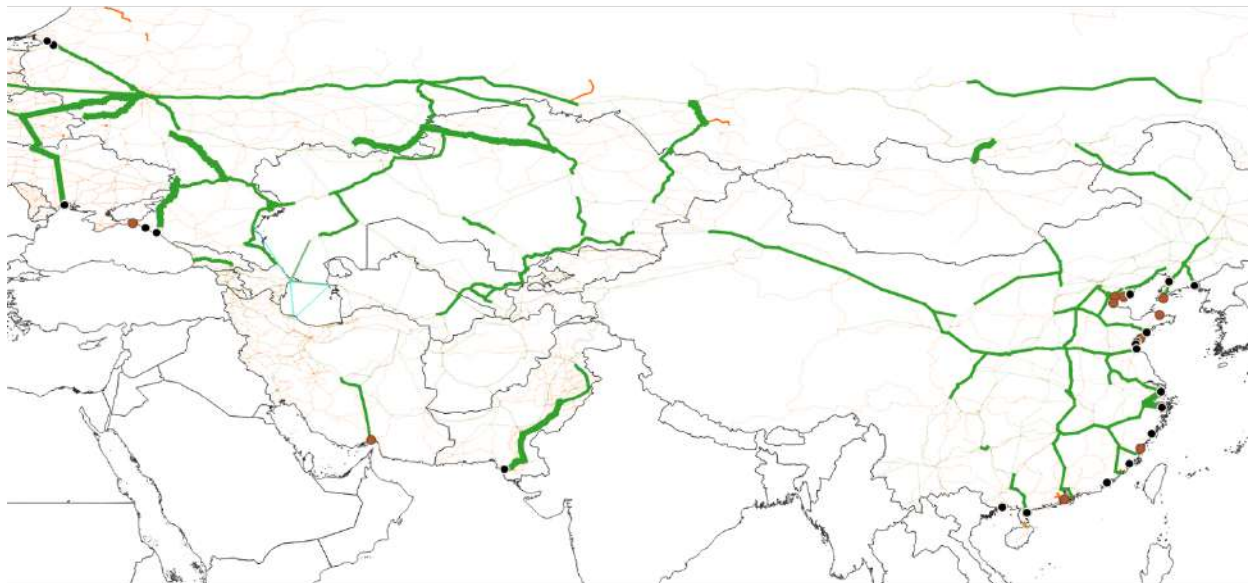


図-15 陸上リンクのロードファクター推計結果

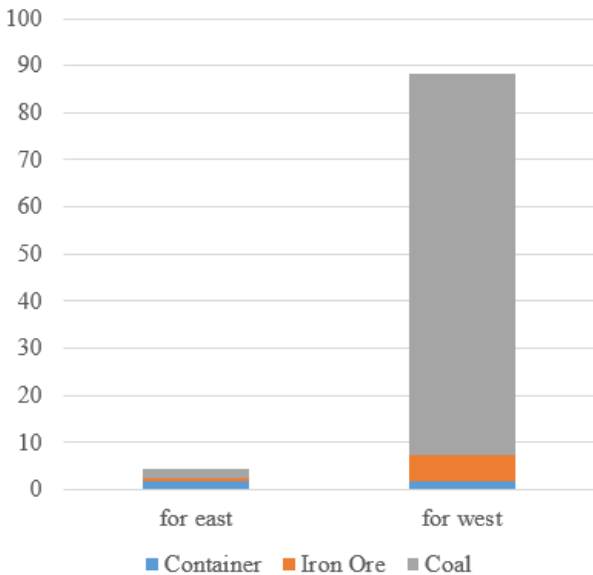


図-16 シベリア鉄道本線ウラジーミル付近における品目別フロー推計値 (million ton)

6. 貨物輸送需要の変化に関するシナリオ分析

1章でも述べたように、カーボンニュートラル等の動きから、石炭需要が今後世界的に減少するという予測がなされている。一方で、ロシア鉄道等の大陸横断鉄道を含め、コンテナ貨物の輸送需要は、一般に今後も世界的に増加していくと考えられる。そこで本シナリオ分析では、表-9に示す通り、石炭の輸送需要を10%減、20%減にした場合、さらにコンテナ貨物の輸送需要を10%増、20%増にした場合のフローの変化を分析する。

まず、S1およびS2の石炭の輸送需要のみ減少するケースの変化を分析する。図-16および図-17に、シベリア鉄道本線ウラジーミル付近のリンク（図-15と同じリンク）におけるフローの変化を方向別に示す。図-16に示す東向きにおいては、石炭の輸送量がbaseシナリオに比べS1では35%程度、S2では50%程度減少している。一方、鉄鉱石の輸送量は1割程度増加し、コンテナ貨物についてはS2では微増している。また、図-17に示す西向きにおいては、石炭の輸送量はS1で90%程度、S2では80%程度にまで減少する一方で、コンテナ貨物の輸送量はいずれのシナリオにおいても2割程度増加している。この結果から、特にもともと容量いっぱいまで貨物が運ばれていた西向きにおいては、石炭輸送量の減少により、鉄道輸送されるコンテナ貨物が増加するということが推察される。

また図-18と図-19に、baseシナリオからS2へのコンテナ貨物フローの変化を示す。図に示されるように、シベリア鉄道および中欧班列に該当するリンクのフローは増加する一方で、周辺リンクのフローは減少していることがわかる。このことから、baseシナリオでは石炭による

容量逼迫の影響で鉄道を利用できなかったコンテナ貨物が、S2では鉄道を利用するようになってきているということが見て取れる。

さらに図-20と図-21に、baseシナリオからS2への各港湾におけるコンテナ貨物取扱量の変化を輸出入別に示す。図に示されるように、コンテナ貨物の取扱量の合計は輸出、輸入ともに減少しており、baseシナリオでは海上輸送されていたコンテナ貨物の一部が、S2では鉄道の容量に余裕ができたことにより陸上輸送されるようになったことがうかがえる。また港湾別にみると、図-10に示した通りbaseシナリオでは過大推計であったShanghai港やTianjin港の輸入貨物量がS2では減少し、baseシナリオでは過小推計であったQingdao港やNingbo港の取扱量が増加しており、石炭の輸送量減少によって港湾付近の混雑が改善されたため、本来の港湾にコンテナ貨物が流れるようになったことが推察される。

表-10 貨物輸送需要の変化に関するシナリオ設定

シナリオ	石炭の輸送需要	コンテナ貨物の輸送需要
S1-1	10%減	-
S1-2	20%減	-
S1-3	20%減	10%増
S1-4	20%減	20%増

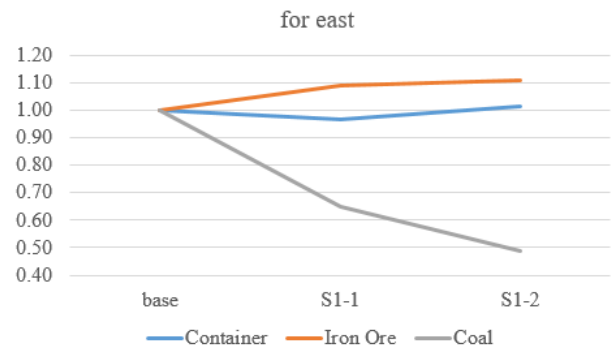


図-17 S1およびS2における品目別リンクフローの変化（ウラジーミル付近東向き、baseシナリオを1とする）

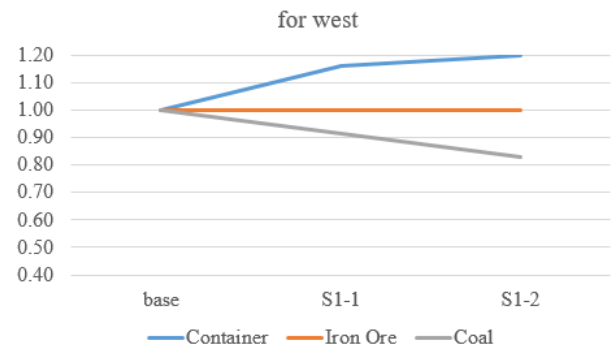


図-18 S1およびS2における品目別リンクフローの変化（ウラジーミル付近西向き、baseシナリオを1とする）

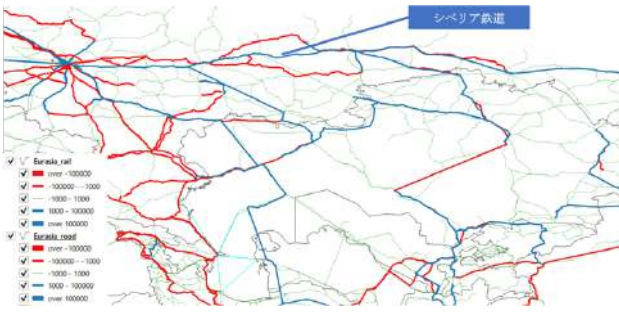


図-19 コンテナ貨物フローのbaseシナリオからS2への変化
(ロシア中央部・カザフスタン付近)

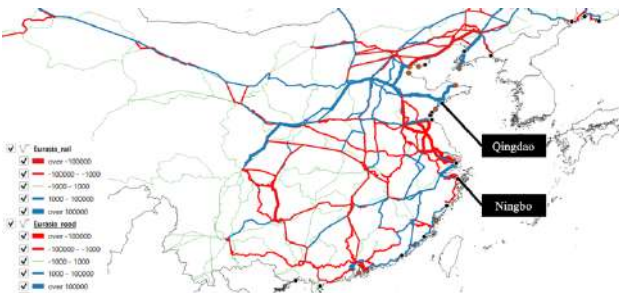


図-20 コンテナ貨物フローのbaseシナリオからS2への変化
(中国付近)

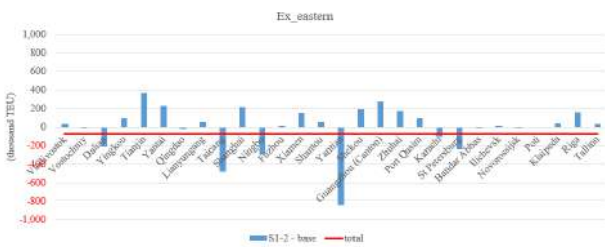


図-21 コンテナ貨物の港湾取扱量のbaseシナリオからS2への変化 (輸出)

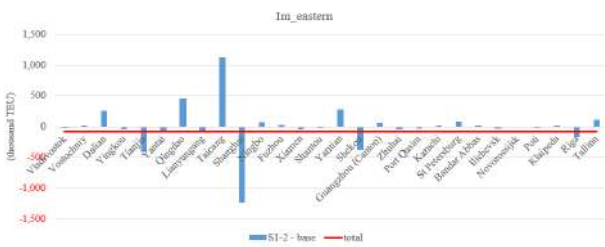


図-22 コンテナ貨物の港湾取扱量のbaseシナリオからS2への変化 (輸入)

次に、コンテナ貨物輸送需要の増加による変化を分析する。図-22および図-23に、シベリア鉄道本線ウラジミール付近の同じリンクにおける、全シナリオのフローの変化を示す。S4におけるコンテナ貨物の輸送量は、東向きにおいてはbaseシナリオの約1.2倍、西向きにおいては

約1.5倍にまで増加している。このことから、コンテナ貨物の輸送需要が増加した場合、特に西向きのフロー増加率がS4で想定したコンテナ貨物輸送需要の伸び率20%よりも大きいことから、シベリア鉄道に貨物がより集中することが示唆される。

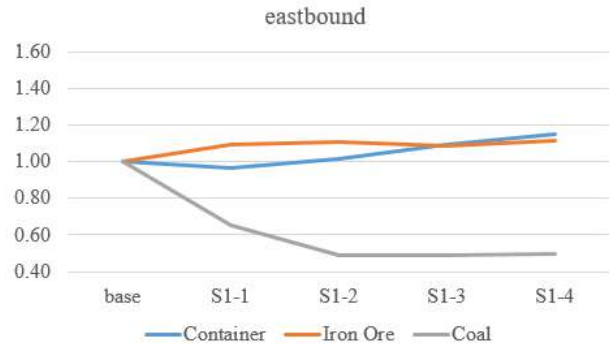


図-23 全シナリオにおける該当リンクの品目別フローの変化 (東向き, baseを1とする)

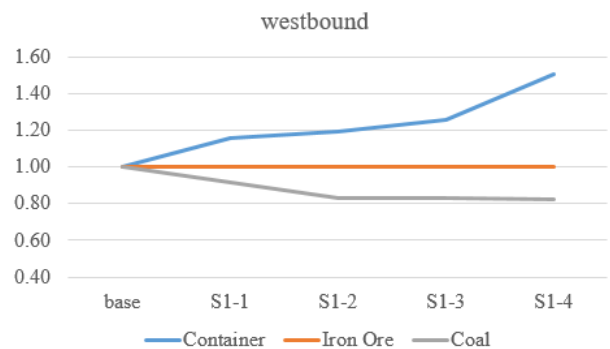


図-24 全シナリオにおける該当リンクの品目別フローの変化 (西向き, baseを1とする)

7. 結論および今後の課題

本研究は、既存のコンテナ貨物のみを対象とした物流シミュレーションモデルに鉄鉱石および石炭のドライバルク貨物を追加することで、特に長距離陸上輸送において混雑の考慮や多品目の競合を考慮できるモデルを構築した。このことは、モデルの分析の幅を広げ、より多様な観点からシナリオの設定や輸送行動の考察を行うことを可能にした。

ドライバルク貨物をモデルに組み込むにあたっては、コンテナ貨物の輸送とは異なるドライバルク貨物の輸送時の特徴を考慮し、特に海上輸送においては、閾値による判定と多項ロジックモデルを組み合わせた船型タイプ選択モデルを構築し、輸送費用や輸送時間を算出した。また陸上輸送についても、混雑関数や容量の再検討を行った。

さらに、構築したモデルを用いてユーラシア大陸地域の多品目貨物輸送の推計を行い、各品目を取り扱う港湾の取扱量、ドライバルク貨物の海上輸送に用いられる船型タイプ、陸上輸送の品目別フローなど、多様な観点から一定の再現性が得られていることを確認した。構築した本モデルの特徴を活かし、ユーラシア大陸地域を対象としたシナリオ分析を実施し、多品目にまたがる輸送行動の変化を考察した。

今後の課題を以下に述べる。

①モデルの推計精度向上

本研究で構築したモデルは一定の再現性を得ることができた一方で、6章にて述べたように推計精度が低い点も残されている。まず、各品目の港湾取扱量の推計については向上の余地がある。本研究ではシベリア鉄道および中欧班列の主要な輸送網については容量の検討を行ったものの、中国国内の鉄道や港湾付近のリンクの検討については行えていない。また、段階配分の分割回数や、分散パラメータ θ の設定についても十分な検討ができていないため、キャリブレーションを通してより精緻に検討を行う必要がある。

また、特に今回新たに追加したドライバルク貨物の輸送に関連するデータ不足についても改善の余地がある。本研究においてはドライバルクの海上輸送についてはある程度の信頼し得るデータが得られているものの、陸上輸送のコストや、港湾におけるコストについてはデータが不足している。今後、モデルを改善していくに当たっては、より多くのデータを取得し活用することで、モデルの精度を改善していける余地がある。

②多様なシナリオ分析の実施

本研究ではドライバルク貨物を追加したことでより多彩な分析を行うことが可能になったものの、主に期限の関係から十分なシナリオ設定および分析が行えていない。後述する北極海航路に関する分析を含め、欧州-東アジア間の貨物輸送に関する多様な分析および考察を行うことは、本モデルの価値をより一層高めるものであると考えられる。

③北極海航路の追加および関連する分析

本研究ではドライバルク貨物を追加し、シベリア鉄道や中欧班列の混雑に関する設定を改善したことで、欧州-東アジア間の輸送をより多彩かつ正確に捉えられるようになった。そこで、近年注目を集めている北極海航路を本モデルに組み込むことにより、より幅広く分析を行うことができると考えられる。特に、北極海航路ではコンテナ貨物のみでなく、主に北極海沿岸で生産される資源輸送を含むドライバルク貨物の輸送において関心を集めていることから、ドライバルク貨物を含む本モデルを活用することの意義があると考えられる。

参考文献

- 1) Shibasaki, R., Kato, H., Ducruet, C. (eds.). 2020. "Global Logistics Network Modelling and Policy: Quantification and Analysis for International Freight." Elsevier.
- 2) 西村健太郎・柴崎隆一・山口拓哉, 航空輸送も含めた全世界統合物流シミュレーションモデルの構築, 土木計画学研究発表会, 62, 7042, 2020.
- 3) 山口拓哉・河内昂輝・渋谷圭吾・柴崎隆一, 多段階配分による全世界インターモーダル物流ネットワークシミュレーションモデルの構築とミャンマーを対象とした政策シナリオの検討, 土木計画学研究発表会, 7061, 2021.
- 4) Ho, J. D., & Bernel, P. 2020. "Panama Canal vs alternative routes: estimating a logit model for grains." *Maritime Business Review*.
- 5) Bai, X., & Lam, J. S. L. 2019. "A destination choice model for very large gas carriers (VLGC) loading from the US Gulf." *Energy*, 174: 1267-1275.
- 6) Schøyen, H., & Bråthen, S. 2011. "The Northern Sea Route versus the Suez Canal: cases from bulk shipping." *Journal of Transport Geography*, 19(4): 977-983.
- 7) Shibasaki, R., Azuma, T., Yoshida, T., Teranishi, H., Abe, M. 2017. "Global route choice and its modelling of dry bulk carriers based on vessel movement database: Focusing on the Suez Canal." *Research in Transportation Business & Management*, 25: 51-65.
- 8) Baótu, S., Deveci, D. A., & Çetin, G. B. 2013. "Multimodal Transport of Bulk Cargoes: a Case Study on Fertilizer Shipments from Serbia to Turkey." *The Foundation for the Development of Gdańsk University Gdańsk* 2013, 75.
- 9) Shen, G., & Wang, J. 2012. "A freight mode choice analysis using a binary logit model and GIS: The case of cereal grains transportation in the United States." *Journal of transportation technologies*, 2(02): 175.
- 10) Beresford, A., Pettit, S., & Liu, Y. 2011. "Multimodal supply chains: iron ore from Australia to China." *Supply Chain Management: An International Journal*.
- 11) Morrison, A. P. L. 2018. "Demand Model for Crude Oil Rail and Pipeline Shipments in Canada." *Master's thesis, University of Waterloo*.
- 12) Zhang, D., Ni, N., Lai, X., & Liu, Y. 2021. "Multimodal iron ore inbound logistics network design under demand uncertainty." *Maritime Policy & Management*, 48(7): 941-965.
- 13) Wang, Y., & Yeo, G. T. 2016. "A study on international multimodal transport networks from Korea to Central Asia: focus on secondhand vehicles." *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 32(1): 41-47.

- 14) Kanamoto, K., Murong, L., Nakashima, M., Shibasaki, R. 2021. "Can maritime big data be applied to shipping industry analysis? – Focusing on commodities and vessel sizes of dry bulk carriers." *Maritime Economics & Logistics*, 23: 211–236
- 15) Shibasaki, R., Azuma, T., Yoshida, T., Teranishi, H., Abe, M. 2017. "Global route choice and its modelling of dry bulk carriers based on vessel movement database: Focusing on the Suez Canal." *Research in Transportation Business & Management*, 25: 51-65.
- 16) IHS Markit Ltd. "Global Trade Atlas (GTA)." 2018.
- 17) 日本海運集会所, 日本船舶明細書 2021 年版.
- 18) Japan Ship Machinery and Equipment Association. 2010. "Database on ship machinery and equipment." <http://www.jsmea.or.jp/senyo/index.html>.
- 19) Drewry Maritime Research, "Ship Operating Costs Annual Review and Forecast 2020/21."
- 20) AXSMarine. "AXS Dry." 2018.

(受付)

DEVELOPMENT OF MULTICOMMODITY GLOBAL LOGISTICS INTERMODAL NETWORK SIMULATION MODEL INCLUDING BOTH CONTAINERIZED AND DRY BULK CARGO

Naoki KOSUGE, Ryuichi SHIBASAKI, Hirofumi ARAI, Takeshi NAKAMURA

The importance of international cargo transportation is increasing year by year, and various items are transported between countries around the world. In addition, the choice of transportation method has become even more difficult. Based on this background, there have been many analyses of transportation behavior using simulation models. However, most of them have been conducted only for containerized cargo and not for other items.

This study develops Multicommodity Global Logistics Intermodal Network Simulation (MGLINS) model which handles containerized cargo and dry bulk cargo at once and applies the model to the Eurasian continental region, including the Trans-Siberian Railway, to analyze the model's reproducibility and practicality.

The characteristics of both containerized cargo and dry bulk cargo are considered in the maritime transport, and same transport mode is applied in the land transport.

As a result, the MGLINS model takes into account congestion and multicommodity competition, which broadens the analysis of the model and makes it possible to set scenarios and consider transportation behavior from more diverse perspectives.