

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

西村 健太郎¹・柴崎 隆一²・山口 拓哉³

¹学生非会員 元東京大学大学院 工学系研究科システム創成学専攻

E-mail:kennishil1218@gmail.com

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／技術経営戦略学専攻

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

³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:takuya-yamaguchi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

本研究は、著者らがこれまでに世界各地を対象に構築してきた、物流やインフラ政策などの、コンテナ輸送への影響に関するシミュレーションを目的としたインターモーダル国際物流モデルに、航空輸送ネットワークを加えることで、混雑を考慮しつつ全輸送機関の実ネットワークに基づいて配分を行う統合モデルを構築する。配分においては、時間価値が他の輸送機関よりも高い航空貨物を、他の貨物と同一のモデルで同時に扱うため、品目別配分モデルを適用した。構築したモデルにより推計されたユーラシア大陸地域のゲートウェイ港湾および空港の輸出入貨物量や、ユーラシア大陸内の航路別航空輸送量を実績値と比較し、概ね妥当な再現性が得られることを確認した。

また、構築したモデルを用いて、特定の空港やSea & Air型輸送の利用促進に関するシミュレーションを行い、航空輸送の利用が促進される条件や、適用する施策に応じて利用空港がシフトすることを確認した。

Key Words : *intermodal shipping network, network assignment model, air shipping network, Sea & Air, policy simulation*

1. はじめに

グローバル化による世界各地域の交易の拡大や、中国の「一帯一路」構想等に基づいたインフラ整備に基づいた陸上輸送の競争力の強化によって、国際輸送ネットワークは複雑化・多様化している。航空輸送についても、世界経済がリーマンショックによる不景気から回復してきたことで、2019年末時点では図-1に示すように輸送力が再び成長している。

一般的に、航空輸送は、輸送時間が最も短く運賃が最も高い輸送機関であるため、単価の高い貨物の輸送に適している。また、腐りやすい生鮮食品や、納期の迫った自動車部品など、輸送時間の観点から航空輸送を選択する品目や場面もみられ、総じて時間価値の高い貨物に利用される傾向がある。よって、陸上輸送機関との連携により最終目的地まで効率よく輸送することも求められる。

また航空輸送における輸送時間の短さと、海上輸送における輸送費用の安さを生かし、航空輸送と海上輸送の

複合輸送（Sea & Air型輸送）も注目されている。近年では、アジア発貨物が仁川やドバイまで海上輸送され、その後航空輸送で欧米へ輸送される経路が比較的良好に利用されている。

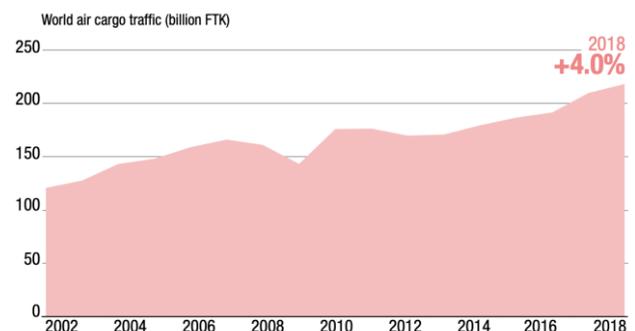


図-1 世界の航空貨物輸送量の推移

出典：IATA, Seabury, Airbus Market Forecasts¹⁾



図-2 仁川空港を経由するSea & Air輸送の実績（海上→航空）

出典：Sea & Air Transport 2018²⁾より著者作成

図-2に、仁川空港を利用するSea & Air輸送（海上→航空）の最近の実績を示す。図に示されるように、年変動が大きいものの、仁川空港から近い仁川港や平沢港を利用した輸送が中心となっていることがわかる。

本研究では、今後の変化が予想される航空貨物輸送ネットワークについて、海上輸送や陸上輸送との競合等を同一のネットワークに基づいて定量的に分析するツールとして、著者らがこれまで構築してきたインターモーダル国際物流ネットワークモデル^{3,4)}を航空輸送も含める形で拡張することを目的とする。また、構築したモデルの有用性を確認するために、特定の空港の利用促進施策の提案や、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。

2. 既往研究

国際海上コンテナ貨物を対象としたモデル構築に関する研究例は多いものの、その多くは仮想的で単純化されたネットワークを対象とした検討や、実ネットワークを対象としても地域や輸送機関を絞ったものがほとんどである。また、航空輸送を含むマルチモードな輸送ネットワークを対象とした研究についてはさらに少ない。

Tavasszy et al.⁵⁾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、混雑の影響を考慮していないことなどのため、再現性もあまり高くはない結果となっている。Wang et al.⁶⁾は、米国を対象として混雑を考慮した陸上輸送ネットワークや港湾からの海上輸送を含めたモデルを構築している。

一方、著者ら^{3,4)}は、ユーラシア大陸の陸上輸送と全世界の海上コンテナ輸送を対象に、実ネットワーク上での混雑および海上輸送と陸上輸送の競合を考慮したモデルを構築した。また、複数の指標から概ね妥当な再現性が得られていることも確認している。

航空輸送を含む複合輸送モデル構築に関する近年の主な研究としては、Heinitz and Meincke⁷⁾やITF⁸⁾、Meijs⁹⁾が挙げられる。Heinitz and Meincke⁷⁾は、実ネットワークに基づいてネットワークを構築し、輸送需要の配分モデルを構築しているものの、海上輸送は含んでおらず、混雑も考慮していない。ITF⁸⁾については、全世界の海上・陸上・航空輸送ネットワークを考慮した配分モデルを構築しているものの、単純な最短経路探索による配分であり、混雑の考慮や、再現性の確認なども行われていない。一方、Meijs⁹⁾は、Tavasszy et al.⁵⁾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、混雑の影響は考慮しておらず、構築したモデルを用いたシナリオ分析も行っていない。

以上をまとめると、全世界を対象として海上・陸上・航空の各輸送機関の実際の貨物輸送ネットワークを同一のモデルで扱い、シミュレーションを実施した研究は世界的に見ても少なく、混雑等も考慮した現状再現性の高いシミュレーションモデルの構築に成功し、政策分析などに活用された研究例は未だ存在しないといえる。

3. モデル構成

本研究で構築するモデル（以下、本モデルとする）は、著者らの既存モデル^{3,4)}をベースとし、新たに航空輸送の実ネットワークを追加することで、海上・陸上・航空輸送ネットワークを含めたシミュレーションモデルとなっている。また、時間価値が高い航空貨物をその他の貨物と同一のネットワークで配分するために、車種別ネットワーク配分の手法を応用し、品目別に配分を行う。

本モデルは、著者らの既存モデル^{3,4)}と同様に、確率的ネットワーク配分に基づいて輸送機関別の貨物輸送需要（OD貨物量）を決定する上位問題と、利用者均衡配分に基づいて輸送機関別の経路輸送費用および時間を決定する下位問題に分かれている。このような2層構造となっている理由は、特に海上輸送においては、荷主ことでの費用となる海上輸送運賃が、各リンクの輸送船社にとっての限界費用などにあまり依存せず、海運市場の需要と供給のバランスによって経路ベースで決定することが多い現状を反映するためである。以下に各モデルの詳細を述べる。

(1) 上位問題

本モデルにおける上位問題のネットワーク構成を図3に示す。本研究では、既存モデル^{3,4)}の上位ネットワークに対し、空港ノード（ユーラシア大陸外の空港は貨物の発着ノードとなる）、空港間リンク、陸上ODノードとユーラシア大陸内空港ノードを結ぶ陸上輸送リンクを追加している。

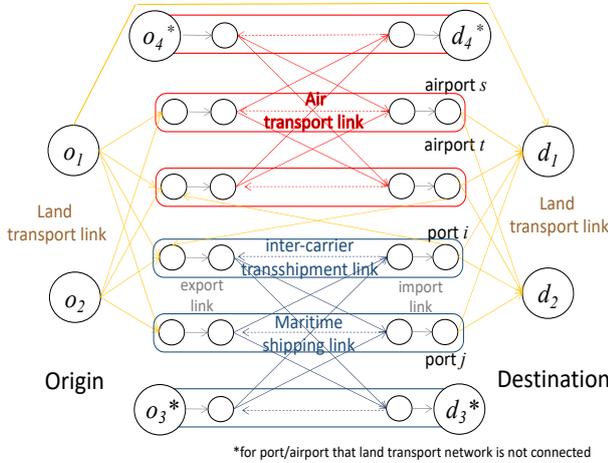


図-3 本モデルの上位ネットワーク構成

上位問題は、コスト最小の経路以外にもフローが流れる確率的ネットワーク配分を適用する。本モデルの確率的ネットワーク配分は、以下に示すロジットモデルと等価な Dial 配分手法を適用している。なお、効用確定項 V_h^{od} は、輸送費用および輸送時間に基づいて算出された一般化費用で表される。

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

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

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

ここで、 U_{hm}^{od} ：発ノード o から着ノード d まで運ばれるある貨物 m がある経路 h を選択することによる効用、 H^{od} ：発ノード o から着ノード d までの輸送経路の集合、 O, D ：貨物の発着ノード集合、 V_h^{od} ：発ノード o から着ノード d までの経路 h についての効用確定項 (US\$/TEU)、 ε_{hm}^{od} ：発ノード o から着ノード d までの経路 h についての効用誤差項、 F_h^{od} ：経路 h を選ぶ貨物量 (TEU/年)、 Q^{od} ：発ノード o から着ノード 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である。

(2) 下位問題

下位問題は、海上輸送サブモデルと、陸上および航空

輸送サブモデルの2つからなり、いずれも各輸送機関の混雑を考慮するため、Wardrop の第一法則に基づいた利用者均衡配分手法を適用している（既往モデルと同様に、海上輸送サブモデルは輸送時間、陸上および航空輸送サブモデルは一般化費用に基づく配分とする）。ここで、航空輸送ネットワークを単独の配分モデル（サブモデル）として構築することも検討したものの、海上輸送や陸上輸送ネットワークに比べるとネットワーク密度が疎であることなどにより、適当な結果を得られなかった。そこで、航空輸送と直接的に競合する可能性がより大きい陸上輸送ネットワークと統合したサブモデルを構築することとする。本サブモデルにおける利用者均衡配分問題は、以下のように定式化される。

$$\min z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} u(x_a) dx \quad (4)$$

$$\begin{aligned} s. t. \quad x_a = & \sum_{(o,i) \in O \times I} \sum_{k \in K^{oi}} \delta_{a,k}^{oi} \cdot f_k^{oi} \\ & + \sum_{(j,d) \in J \times D} \sum_{k \in K^{jd}} \delta_{a,k}^{jd} \cdot f_k^{jd} \\ & + \sum_{(o,d) \in O \times D} \sum_{k \in K^{od}} \delta_{a,k}^{od} \cdot f_k^{od}, \forall a, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K^{oi}} f_k^{oi} - q^{oi} = 0 \quad \forall o, i \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K^{jd}} f_k^{jd} - q^{jd} = 0 \quad \forall j, d \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K^{od}} f_k^{od} - q^{od} = 0 \quad \forall o, d \quad (8)$$

$$f_k^{oi} \geq 0, f_k^{jd} \geq 0, f_k^{od} \geq 0, \forall k, o, d, i, j \quad (9)$$

ここで、 $u(x_a)$ ：リンク a の一般化費用 (US\$/TEU)、 O ：陸上輸送ネットワークを考慮しない地域の空港・港湾を含む地域代表発ノード (O ノード) の集合、 D ：陸上輸送ネットワークを考慮しない地域の空港・港湾を含む地域代表着ノード (D ノード) の集合、 I ：陸上ネットワークと接続する輸出港湾の集合、 J ：陸上ネットワークと接続する輸入港湾の集合、 K^{oi} ： O ノード—輸出港 i 間の輸送経路集合、 K^{jd} ： D ノード—輸入港 j 間の輸送経路集合、 K^{od} ： O ノード— D ノードの輸送経路集合、 f_k^{oi} ： O ノード—輸出港 i 間の経路 k のフロー (TEU/year)、 f_k^{jd} ： D ノード—輸入港 j 間の経路 k のフロー (TEU/year)、 f_k^{od} ： O ノード— D ノード間の経路 k のフロー (TEU/year)、 $\delta_{a,k}^{oi}$ 、 $\delta_{a,k}^{jd}$ 、 $\delta_{a,k}^{od}$ ：クロネッカーのデルタ（リンク a が oi 間、 jd 間、 od 間の経路 k に含まれる場合は 1、含まれない場合は 0）、 q^{oi} ： O ノード—輸出港 i 間の陸上貨物輸送需要 (TEU/year)、 q^{jd} ： D ノード—輸入港 j 間の陸上貨物輸送需要 (TEU/year)、 q^{od} ： O ノード— D ノード間の陸上貨物輸送需要 (TEU/year) である。

本モデルで追加する航空輸送リンクおよび空港内リン

クを図-4 に示す。各リンクのコスト関数については、Chao and Hsu¹⁰⁾や Ohasi et al.¹¹⁾、石倉¹²⁾を参考に、既存モデル^{3,4)}における海上および陸上ネットワークのリンクコスト関数と同様の考え方にに基づき、以下の通り設定した。なお、本モデルにおいては他の輸送機関と統合して扱うため、航空輸送においても、便宜的に、トン-TEU 換算係数を用いて海上コンテナ 1TEU あたりのコストとして定義した。

a) 航空輸送リンク

$$u_{As}(x_a) =$$

$$\alpha \left[vt_c \cdot \left[\left(\frac{l_a}{v_a} + TWAi_a \right) \cdot \left\{ 1 + b_9 \cdot \left(\frac{x_a}{TT \cdot fCAP_a \cdot Freq_a} \right)^{b_{10}} \right\} \right] \right] \quad (10)$$

ここで、 $u_{As}(x_a)$ ：航空輸送リンクのコスト関数 (US\$/TEU)， α ：航空機の種類 (フレーター/ベリ) によって異なる係数， x_a ：リンク a のフロー (TEU 換算量)， CA_a ：リンク a の航空輸送費 (US\$/便)， $fCAP_a$ ：リンク a の貨物容量 (ton/年)， l_{ave} ：対象全航空リンクの平均消費率， TT ：トン-TEU 換算係数 (ton/TEU)， vt_c ：品目 c の時間価値パラメータ (US\$/hour/TEU)， l_a ：リンク a の輸送距離 (km)， v_a ：リンク a の輸送速度 (km/hour)， $TWAi_a$ ：貨物を航空機に積み込むまでの期待待ち時間(hour)， b_9, b_{10} ：航空輸送混雑関数に関するパラメータ (石倉¹²⁾より $b_9=0.8939$ ， $b_{10}=2.1469$ とする)， $Freq_a$ ：リンク a の頻度 (便/年) である。なお、モデル内で消費率を計算せず、平均消費率を実績値 (2016 年：25.3%) に基づき予め設定している点が、海上モデルと異なる。

リンク a の航空輸送費 CA_a は、以下の式によって表される。

$$CA_a = \left\{ AFC_a + (AMC_a + ACC_a) \cdot \frac{l_a}{v_a} \cdot \frac{1}{24} \right\} \cdot Freq_a + AOC_a \quad (11)$$

ここで、 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) である。これらの費用については、いずれも 1 便あたりの総容量に依存する関数とみなし、以下のように定式化する。

$$AFC_a = AFP \cdot l_a \cdot \left(d_1 \cdot \frac{TT \cdot tCAP_a}{Freq_a} + d_2 \right) \quad (12)$$

$$AMC_a = \left(d_3 \cdot \frac{TT \cdot tCAP_a}{Freq_a} + d_4 \right) \cdot \frac{1}{365 \cdot ODR_{air}} \quad (13)$$

$$ACC_a = \left(d_5 \cdot \frac{TT \cdot tCAP_a}{Freq_a} + d_6 \right) \cdot \frac{ir_{air}}{\{1 - (1 + ir_{air})^{-PP_{air}}\}} \cdot \frac{1}{365 \cdot ODR_{air}} \quad (14)$$

$$AOC_a = d_7 \cdot \frac{TT \cdot tCAP_a}{Freq_a} + d_8 \quad (15)$$

ここで、 AFP ：燃料価格 (US\$/bbl)， $tCAP_a$ ：リンク a の総航空輸送容量 (ton/年)， ODR_{air} ：航空機の年間稼働率 (09 とする)， ir_{air} ：航空輸送の利子率 (10% とする)， PP_{air} ：航空機の償却年数 (10 年を想定)， $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8$ ：機体の容量に依存する係数である。燃料価格 AFP については、IATA の Industry Statistics Fact Sheet¹³⁾ より、2016 年度の価格である 521 US\$/bbl を用いた。また、係数 $d_1 \sim d_8$ については、Chao and Hsu¹⁰⁾ で示された 8 機種 のデータから回帰分析を行い、 $d_1=9.10 \times 10^3$ ， $d_2=9.80 \times 10^3$ ， $d_3=284 \times 10^4$ ， $d_4=242 \times 10^4$ ， $d_5=148 \times 10^7$ ， $d_6=2.99 \times 10^7$ ， $d_7=555 \times 10^3$ ， $d_8=984 \times 10^4$ を得た。

また、本研究では、フレーター便 (貨物専用機) とベリ便 (貨客混載機) を区分し、旅客運賃収入も見込めるベリ便のリンクコスト関数においては、旅客と貨物の運賃比率を考慮した費用低減を行う。これを反映するため、(10) 式において、以下で定義される係数 α を導入した。

$$\alpha = \begin{cases} 1 & (\text{フレーターの場合}) \\ \frac{\beta \cdot fCAP_a}{\beta \cdot fCAP_a + (tCAP_a - fCAP_a)} & (\text{ベリの場合}) \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 β ：旅客に対する貨物の単位重量あたり運賃比率であり、各種航空会社等の Web サイトより運賃情報を収集した結果より、 $\beta=24$ と設定した。

b) 空港内リンク

$$u_{Ax}(x_a) = \frac{CFRo}{2} + vt_c \cdot THAi + \lambda_a \cdot (CBX_a + vt_c \cdot TBX_a) \quad (17)$$

$$u_{Am}(x_a) = \frac{CFRo}{2} + vt_c \cdot THAi + \lambda_a \cdot (CBM_a + vt_c \cdot TBM_a) \quad (18)$$

$$u_{At}(x_a) = vt_c \cdot (TTRS + TCUS) \quad (19)$$

$$u_{Al}(x_a) = u_{Ad}(x_a) = TT \cdot CCHAp_a + vt_c \cdot TLUL \quad (20)$$

ここで、 $u_{Ax}(x_a)$, $u_{Am}(x_a)$: 空港輸出入リンクのコスト関数 (US\$/TEU), $u_{At}(x_a)$: トランジットリンクのコスト関数 (US\$/TEU), $u_{Al}(x_a)$, $u_{Ad}(x_a)$: 空港積卸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), $THAi$: 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), λ_a : 越境パラメータ (通常は 1.0), CBX_a , CBM_a : 出入国において必要な費用 (US\$/TEU), TBX_a , TBM_a : 出入国において必要な時間 (hour), $TTRS$: トランジットにおける待機時間 (hour), $TCUS$: トランジットにおける通関時間 (hour), $CCHAp_a$: 空港 a の 1 ton あたりの使用料 (US\$/ton), $TLUL$: 貨物の積卸時間 (hour) である。

このうち、 $CFRo$ については、既存モデル³⁴⁾と同様に 60.0 (US\$/TEU)とし、また CBX_a , CBM_a , TBX_a , TBM_a についても、既存モデル³⁴⁾と同様に、世界銀行の Doing Business データベース¹⁴⁾に示される「書類準備」および「税関手続」に要する費用および時間の合計とした。 $TTRS$, $TCUS$, $TLUL$ については、Ohasi et al.¹⁵⁾の推計結果を踏まえ、それぞれ 15, 5, 4.5 (hour) と設定した。空港使用料 $CCHAp_a$ については、Review of Airport Charges 2016¹⁶⁾に記載される SDR ベースの旅客 1 人あたりの空港使用料を重量換算した。なお、上記に含まれない 134 空港については、記載 50 空港の平均値を適用した。

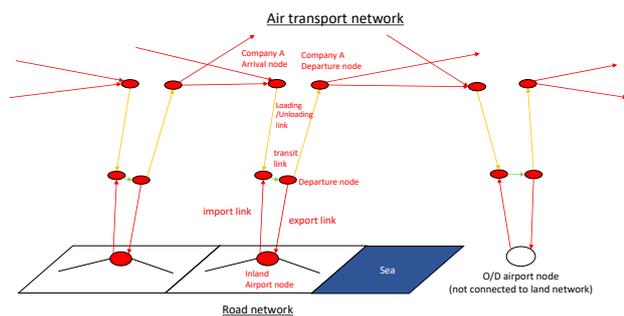


図-4 本研究で構築した航空輸送ネットワーク構成

4. 入力データ

(1) 概要

本モデルで用いる主な入力データは、海上・陸上・航空輸送のネットワークデータ (距離, サービスレベル, 輸送実績など), および地域間輸送需要 (OD 貨物量) である。後者については、時間価値の高い航空貨物の輸送需要を分け、航空貨物およびそれ以外の貨物の 2 種類

の地域間輸送需要を用いる (航空貨物以外の貨物を普通貨物とする)。海上・陸上輸送ネットワークデータおよび普通貨物の地域間輸送需要は、既存モデル³⁴⁾をベースとしつつ、一部港湾の追加や、ヨーロッパの一部の国のネットワークおよび発着ノードを細分化し、港湾数は 187 港, 陸上リンク数は 20,873 本となった。図-5 に本モデルにおける陸上輸送ネットワークを示す。

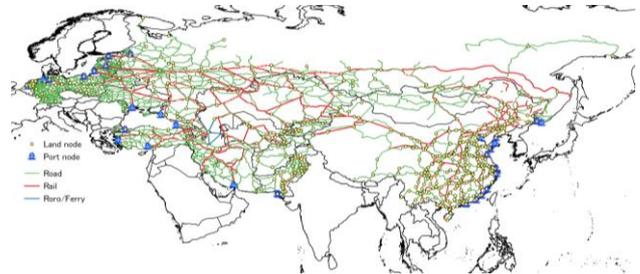


図-5 本モデルの陸上輸送ネットワーク

(2) 航空輸送ネットワーク

航空輸送ネットワークは、ICAO の提供する Traffic by Flight Stage (TFS) データ¹⁶⁾ (各都市間の総流動) を用いて作成した。TFS データ¹⁶⁾には、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, 航空会社, 使用機体, 貨物・郵便・旅客の年間輸送実績 (ton ベース), 貨物・郵便・旅客を合わせた年間総輸送容量 (ton ベース), 貨物の年間輸送実績が年間輸送容量に占める割合, 年間運航便数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。ここで、本研究で着目する航空貨物輸送においては、旅客輸送と異なり LCC の比率が比較的小さいため、LCC が含まれない TFS データ¹⁶⁾ を使用しても大きな問題はないものと考えられる。各航路の距離情報については、TFS データ¹⁶⁾には含まれていないため、各空港の緯度経度情報から、ヒュベニの公式を用いて大圏距離を算出した。各航路の速度については、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。

以上のデータをもとに、1 ヶ月に 1 便以上の輸送実績をもつ航路を抽出し、年間貨物取扱量が 15,000 ton 以上ある空港間を結ぶ航路 (184 空港・6825 航路) を、本モデルで構築する航空輸送ネットワークの対象とした。図-6 に本モデルの航空輸送ネットワークを示す。

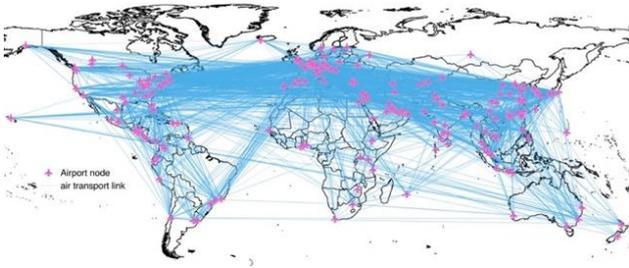


図-6 本モデルの航空輸送ネットワーク

(3) 航空貨物輸送需要および時間価値

本モデルの対象とする航空貨物の地域間輸送需要については、以下の手順で推計した。

まず、IHS社の提供するWTSデータ¹⁷⁾から、陸上輸送および海上コンテナ輸送と競合する航空貨物の国間輸送需要を推計した。ここで、WTSデータ¹⁷⁾から得られる国際航空貨物輸送量は ton ベースの全航空貨物を含む一方で、本モデルで対象とする貨物は、国際海上コンテナおよびそれと代替可能な陸上・航空貨物（以下では「コンテナ相当貨物」とよぶ）である。よって、既存モデル³⁾と同様に、WTS データ¹⁷⁾から品目別に算出したコンテナ化率（海上貨物のうち海上コンテナ貨物の占める割合）を航空貨物輸送量に乘じ、国間のコンテナ相当航空貨物輸送需要を得た。

次に、本モデルで設定する航空輸送リンクの輸送容量は、ICAOの提供するTFSデータ¹⁶⁾に基づいているため、同じICAOのOn Flight Origin and Destination (OFOD) データ¹⁸⁾（各都市間の純流動）から集計した国別輸出入量をコントロールトータルとしてフレーター法を適用し、上記で推計した航空貨物輸送需要量との差異を解消した。

最後に、既存モデル^{3),4)}と同様に、国ごとに設定した地域経済指標から国内ゾーンごとの輸送需要比率を算出し、上記で得た国間のコンテナ相当航空貨物輸送需要に乘じることで、地域間のコンテナ相当航空貨物輸送需要を得た。

また、航空貨物と普通貨物の時間価値 vt (US\$/TEU/hour) については、WTS データに含まれる ton ベースおよび US\$ベースの輸送実績を用いて、以下の式により算出する。

$$vt = \sum_{c \in C} \left(\frac{AV_c}{AT_c} \cdot \frac{AV_c}{\sum_{c \in C} AV_c} \cdot IR \cdot \frac{1}{365 \cdot 24} \right) \cdot TT \quad (17)$$

ここで、 C : WTS データに含まれる全品目の集合、 AV_c : 品目 c の全世界年間航空輸送貨物輸送額(US\$/year)、 AT_c : 品目 c の全世界年間航空輸送貨物輸送量 (ton/year)、 IR : 年間利率 (10%を想定) である。

以上の計算より、航空貨物の時間価値は 737

(US\$/TEU/hour)、普通貨物の時間価値は 0.41 (US\$/TEU/hour) となった。

5. モデルの計算手順および推計結果

(1) 計算手順

本モデルの計算手順としては、まず、下位問題を計算することで出力される各経路の輸送費用および時間を、地域間輸送需要データと合わせて上位問題の入力とし、上位問題を計算して各港湾および地域代表ノード間の輸送需要を出力する。この際、海上輸送サブモデルについては、あらかじめ集計した港湾間輸送需要を入力とする一方で、陸上および航空輸送サブモデルについては、ゼロフローを初期値として計算する。2つのサブモデルの精度差を考慮し、上位問題の初期計算で出力された輸送需要を改めて陸上および航空輸送サブモデルの入力として計算し、再度上位問題を計算することで、モデル全体の初期計算とする。以後、設定した収束判定を満たすまで下位問題と上位問題の繰り返し計算を行い、最終的な推計結果を得る。なお、Intel® Core™ i7-6700 プロセッサおよびランダムアクセスメモリ(RAM) 64.0GB 搭載の windows デスクトップ PC を使用した場合の本モデルの計算時間は、約4時間である。

(2) 推計結果

本モデルにおいて輸送機関間の競合が存在するユーラシア大陸内発着貨物について、海上・陸上・航空輸送の機関分担率に関する実績値と推計値の比較結果を図-7に示す。推計値は海上輸送がわずかに過大に推計されているものの、現実の輸送実態を概ね再現できていると言える。ここで、WTS データ¹⁷⁾より算出した海上輸送貨物の割合 (ton ベース) は 87.2% (2016年) である一方で、図-7で示した海上輸送割合が推計結果および実績ともに 6 割程度であるのは、本モデルにおいてはユーラシア大陸の一部の国のみを対象としており（フランスやスペイン、中東の国などの海に面した一部の国々が含まれていない）、実態よりも内陸国の割合が多いためである。

次に、他の空港や輸送機関との競合が存在するユーラシア大陸内の各空港（陸上ネットワークと接続する空港）の輸出入貨物取扱量について、WTSデータ¹⁷⁾から集計した国間航空貨物輸送需要にOFODデータ¹⁸⁾から得た国別の空港輸出入貨物取扱量シェアを乘じることで算出した実績値と、モデル計算の推計値を比較した結果を図-8（輸出）、図-9（輸入）にそれぞれ示す。両図より、輸出入ともに比較的高い再現性が得られていることがわかる。なお、輸出入ともに、取扱量が比較的小さい空港についての再現性は比較的低くなってしまっているものの、

オーダーレベルでは再現できており、モデル全体として利用されやすい空港と利用されにくい空港の区別の再現はできていると言える。取扱量が少ない空港については、現地調査などでより詳細な情報をパラメータとして設定することで、精度をより向上させることが可能と考えられる。

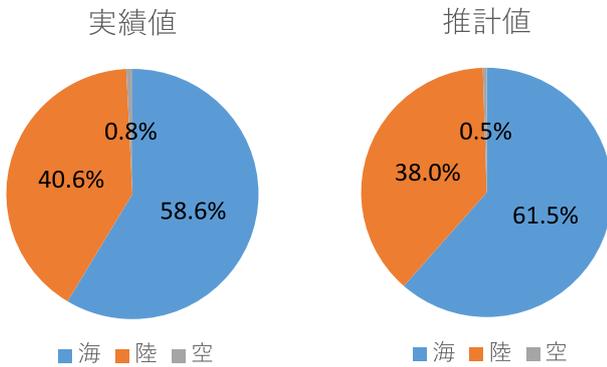


図-7 機関分担率に関する実績値とモデル推計値の比較

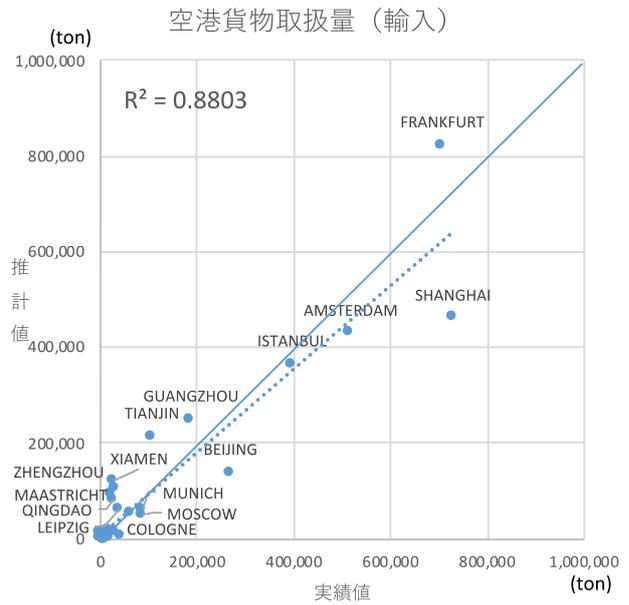


図-9 ユーラシア大陸内空港の輸入貨物取扱量 (2016年)

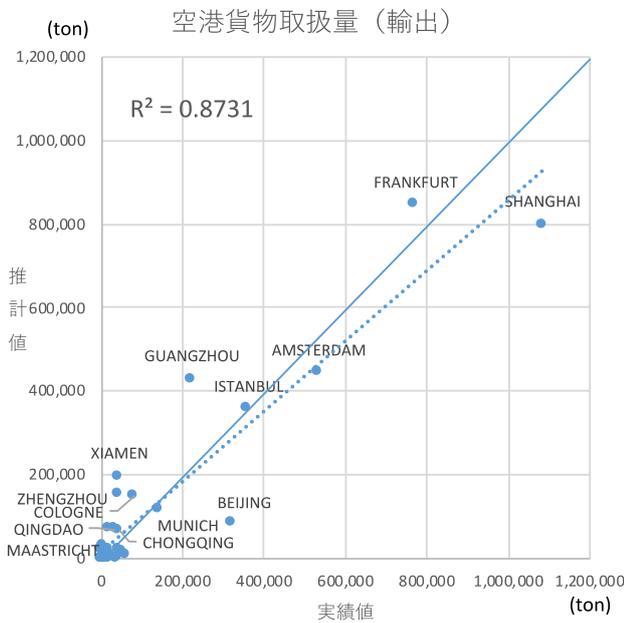


図-8 ユーラシア大陸内空港の輸出貨物取扱量 (2016年)

(3) 感度分析

a) 時間価値パラメータ v_t

本モデルでは、航空貨物とそれ以外の普通貨物でそれぞれ異なる時間価値パラメータ v_t を設定し、時間価値の異なる品目別配分を行っている。一方で、実態としては品目ごとに時間価値は異なり、航空貨物の中でも比較的、時間価値の小さい貨物において、陸上輸送や海上輸送とより競合していることが予想される。

そこで、本モデルで設定する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 $v_t = 73.7$ を半減させたケース (370 US\$/hour/TEU)、4分の1にしたケース (185 US\$/hour/TEU) について、海上輸送を用いる航空貨物の輸送量を比較する。図-10 に各ケースの比較結果を示す。図に示すように、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のシェアが増加しており、本モデルの計算が妥当なものであることも示している。

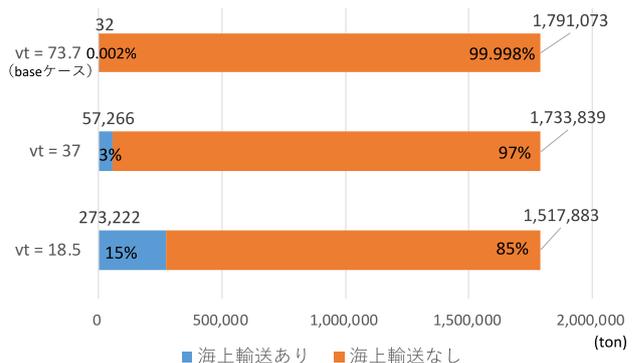


図-10 海上輸送も利用する航空貨物のシェアの比較

b) 燃料費

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。貨物を航空輸送するのに必要な燃料費が全輸送費に占める割合を3章(12)～(15)式に基づき算出した結果、台北（台湾）－香港（中国）間（距離は約 800km）で約 17%、台北－アムステルダム（オランダ）間（距離は約 10,600km）で約 47%であり、航空輸送において燃料費が全輸送費の中で大きなシェアを占めることがわかる。

そこで本項では、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52.1US\$/bblから140.0US\$/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、204.7US\$/tonから646.8US\$/tonに変更
- 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200.0US\$/bbl、海上輸送燃料価格を924US\$/tonに変更

計算結果を以下に示す。はじめに、陸上輸送ネットワークと接続する空港（以下、陸上接続空港とする）の輸出入貨物取扱量の総量の変化を図-11に示す。なお、5章に結果を示した本モデルによる現状再現結果をbaseケースとしている。図より、航空燃料価格が140US\$/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200US\$/bblまで高騰した場合は、総量にあまり変化がない。これより、航空貨物については、燃料価格が上昇すると一定の価格までは他の輸送機関へのシフトがあるものの、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。

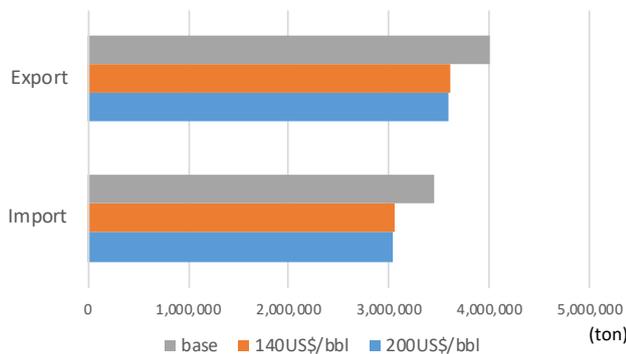


図-11 陸上接続空港の輸出入貨物取扱量の総量の変化

次に、主要な陸上接続空港における輸出入貨物取扱量の変化を図-12、図-13に示す。両図より、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）空港や厦門（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140US\$/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200US\$/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。

以上より、航空輸送は、燃料価格の高騰が起きた場合、貨物取扱量が一定量減少するものの、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。ただし、一部の空港については、燃料価格の高騰によって貨物取扱量が大幅に増減する可能性があるため、特定の空港や港に注目した分析等を行う際は、燃料価格の設定にも注意を払う必要があると言える。

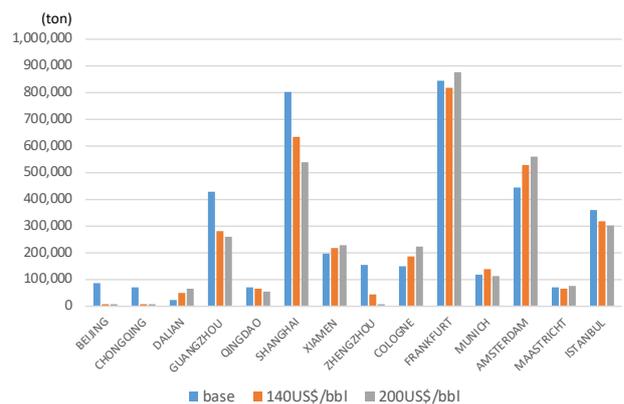


図-12 主要な陸上接続空港の輸出貨物取扱量の変化

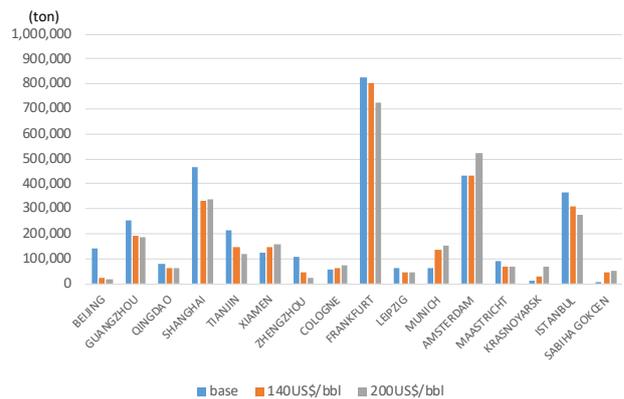


図-13 主要な陸上接続空港の輸入貨物取扱量の変化

6. シナリオ分析

(1) 重慶空港の利用促進による貨物輸送の変化

図-14に示すように、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、輸送機関の競争を考慮する上で重要な都市である。

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おり、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段階的に向上することで、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。

本シナリオで設定する2つのシナリオの条件について、表-1に示す。なお、5章に結果を示した本モデルによる現状再現結果をbaseケースとしている。



図-14 重慶市 (Chongqing) を起点とする中欧班列の概要
出典：Russian RailwaysLogistics

表-1 シナリオ1における設定

シナリオ	航空輸送における越境パラメータ	空港使用料 (US\$/ton)
base	1.0	600
S1-1	1.0	300
S1-2	0.5	300

表-1 の設定に基づいて計算し、貨物取扱量が 5000 ton 以上変化したユーラシア内の空港について、base ケースからの変化量を輸出入別に図-15、図-16に示す。まず、重慶空港の輸出入貨物取扱量に注目すると、輸出貨物量は空港使用料および越境費用・時間の低減によって大きく増加する一方で、輸入貨物量は空港使用料の半減のみでは増加せず、越境費用・時間の低減も必要であることが示された。これは、輸出貨物と輸入貨物では品目に違いがあり、航空輸送の利用のしやすさに違いがあるためと推測される。

続いて、各空港の輸出入貨物取扱量の変化に注目すると、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。変化がより大きいシナリオ S1-2 と base ケースを比較した時の、中国周辺の陸上輸送ネットワークのリンクフローの変化を図-17に示す。図-17より、base ケースでは天津空港、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ことがわかる。これは、重慶空港を利用して航空輸送する際の越境費用や時間が大幅に下がったことで、天津・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、重慶空港を利用したほうが総輸送費用および時間が小さくなることを示している。また、重慶市とカザフスタン方面を結ぶ陸上輸送リンクについても、リンクフローはほとんど変化がないことから、陸上輸送との競合はあまり発生していないことがわかる。ここで、中国の港湾取扱量については、いずれのシナリオでもほとんど変化しなかった。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、海上輸送や陸上輸送との競合というよりは、空港間の競合が発生するようになることが示された。特に、広州 (Guangzhou)、上海 (Shanghai)、天津 (Tianjin)、鄭州 (Zhengzhou) の各空港を利用していた貨物が重慶空港へシフトすることが推測される (天津空港、鄭州空港は輸入貨物のみ)。さらに、図-15、図-16においてヨーロッパ側で取扱量に変化している Frankfurt 空港や Amsterdam 空港においても、陸上輸送ネットワークのリンクフローの変化が見られ、総輸送費用および時間がより短くなるように、Frankfurt 空港から Amsterdam 空港へと利用空港のシフトが起きていることが確認された。

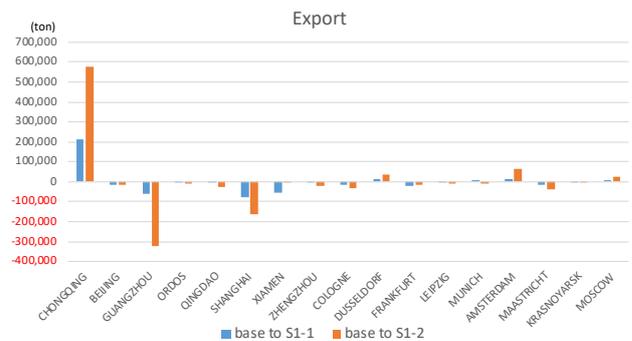


図-15 各空港の輸出貨物取扱量の変化 (シナリオ1)

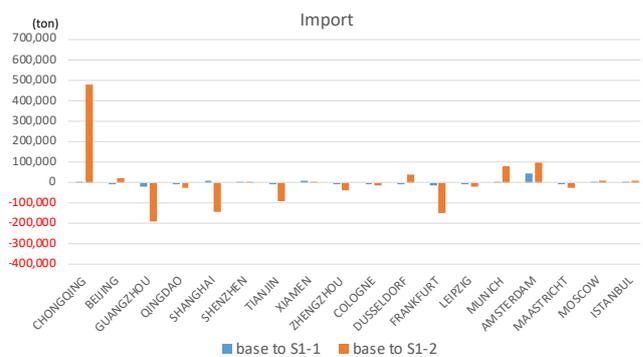


図-16 各空港の輸入貨物取扱量の変化 (シナリオ1)

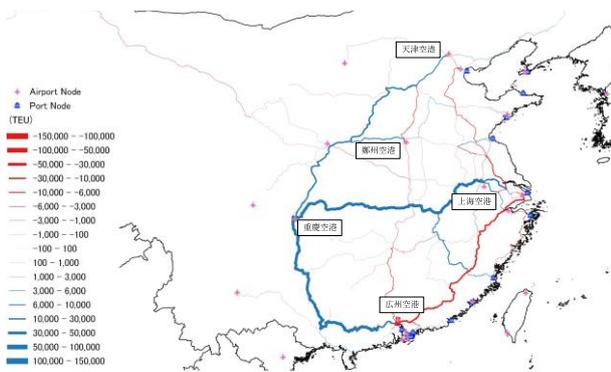


図-17 各空港の輸出貨物取扱量の変化 (S1-2 と base ケースの比較)

(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。図-18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。



図-18 Navoi 空港をハブとする主要航路
出典：Navoi 国際空港 Web サイト 17

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航便が増えたことで、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。

そこで本分析では、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。その後、空港使用料の半減も加えたシナリオを設定し、同様の検証を行う。表-2に各シナ

リオの設定を示す。

表-2 シナリオ 2 における設定

シナリオ	積卸時間 (hour)	トランジット時間 (hour)	空港使用料 (US\$/ton)
base	4.500	20	600
S2-1	2.250	10	600
S2-2	1.125	5	600
S2-3	2.250	10	300
S2-4	1.125	5	300

以下に計算結果を示す。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図-19 に示す。図より、積卸時間やトランジット時間を低減させるだけの S2-1 や S2-2 では、トランジット貨物量を増加させるのは難しい一方で、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 (S2-3, S2-4) 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、現状において Navoi 空港が利用されづらい要因としては、トランジットにより追加的に発生する時間よりも、追加的に発生する費用が障壁となっていることが推測される。また、本シナリオでは、(1) で示したシナリオ 1 と違い、空港使用料を低減しても、Navoi 空港の輸出入取扱量にはほとんど変化しなかった。これより、同様の施策を適用しても、空港の立地によって貨物フローの変化に違いがあることが示唆される。

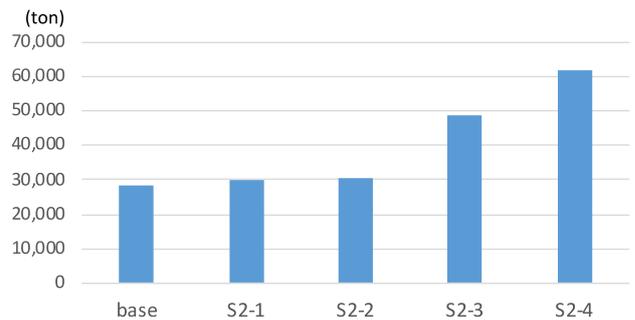


図-19 各シナリオにおける Navoi 空港トランジット貨物量

最後に、S2-4 の設定のまま表-3 に示す 3 つの航路を追加した場合の、各航路を利用する貨物量を分析する (S2-5, S2-6, S2-7 とする)。新たに追加する 3 つの航路は、base ケースでは Navoi 空港と接続していない空港の中から選択して Navoi 空港と結んだものであり、Navoi 空港をハブ空港とするネットワークを拡大することで、Navoi 空港のハブ空港としての機能を強化することの影響をみる。なお、速度や頻度、輸送容量は、いずれのシナリオも、base ケースのネットワークにおいて Navoi 空港を出発空港とする航路の平均値 (速度：901 km/h、頻度：71 便/年、容量：5,100 ton/年) を適用した。

表-3 S2-5, S2-6, S2-7 で追加する航路

シナリオ	到着空港	距離(km)	機種
S2-5	Moscow (Russia)	2,700	プレーター
S2-6	Guangzhou (China)	4,500	プレーター
S2-7	Jeddah (Saudi Arabia)	2,500	プレーター

表-3 で示した 3 航路を追加した時の、各航路のリンクフローを図-20 に示す。図より、いずれの航路についても貨物は流れており、特に S2-5 および S2-7 は Navoi 空港を端点とする航路の平均輸送量に近い貨物量が流れていることから、S2-5 および S2-7 の航路を追加することで、Navoi 空港をハブとする航空輸送ネットワークはより拡大していくことが予測される。

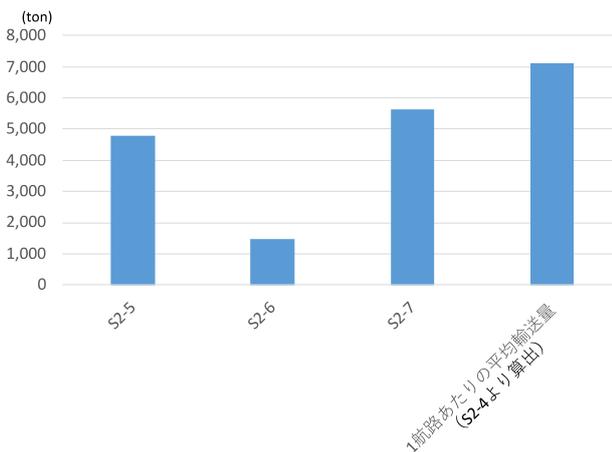


図-20 S2-5~S2-7 で追加した各航路に流れるリンクフローおよび Navoi 空港を端点とする他の航路の平均輸送量

(3) 仁川空港を経由する Sea&Air 型輸送の利用促進

1 章で述べたように、海上輸送と航空輸送を組み合わせた Sea & Air 型輸送が近年注目されている。そこで、本シナリオでは、Sea & Air 型輸送が盛んな国の 1 つである韓国を対象に、中国および韓国間の Sea & Air 型輸送において、中国側の中心な港である青島港と、仁川港を経由して仁川空港へ結ばれるリンクを新たに設定し、仁川側の輸送効率の改善や費用低減によって Sea & Air 型輸送に起きる変化を分析する。また、本シナリオでは、前章で行った感度分析に基づき、航空貨物の時間価値パラメータ vt を 37.0 (US\$/hour/TEU) とした場合と、base シナリオとして設定している 73.7 (US\$/hour/TEU) とした場合の推計結果を比較する。

はじめに、上位問題のネットワークに青島港—仁川空港直通リンク (仁川港経由を想定) を追加する。輸送時間については、青島港から仁川港へフェリーで輸送するのに必要な時間 (330km, 165 時間) と、仁川港到着後から仁川空港で荷積みされるまでの陸上輸送および積替

に要する時間 (12 時間) を考慮し、合計 285 時間とする。輸送費用については、青島港から仁川港までの海上輸送費用 (距離比例海上運賃を 0.5 US\$/km/TEU とし、 $0.5 \times 330 \text{ km} = 165 \text{ US\$/TEU}$)、仁川港から仁川空港までのトラック輸送費用 (距離比例トラック運賃を 1.0 US\$/km/TEU とし、 $1.0 \times 20 \text{ km} = 20 \text{ US\$/TEU}$)、仁川空港の空港使用料を考慮する。ここで、仁川空港の空港使用料については、Sea & Air 型輸送が韓国内で促進されている背景から、通常の空港使用料 (430 US\$/ton) よりもやや安い 300 US\$/ton とする。

以上で設定したシナリオを S3-1 とし、さらなる Sea & Air 型輸送の促進政策として、仁川空港の使用料が 1/3 まで割引された場合 (S3-2) や、使用料の割引は 2/3 に留める一方で仁川港から仁川空港までの輸送効率が上がり輸送時間が 2/3 に短縮されることを想定したシナリオ (S3-3) を設定し、輸送量の変化を分析する。表-4 に各シナリオの設定をそれぞれ示す。

以上の設定に基づいて、それぞれのシナリオについて、上記に示した 2 種類の航空貨物時間価値のもとでモデル計算を行った。図-21 に各シナリオにおける青島港仁川空港 (仁川港経由) のリンクフローを示す。

表-4 シナリオ 3 における設定

シナリオ	仁川港→仁川空港の総輸送時間 (hour)	仁川空港の使用料 (US\$/ton)
S3-1	12	300
S3-2	12	100
S3-3	8	200

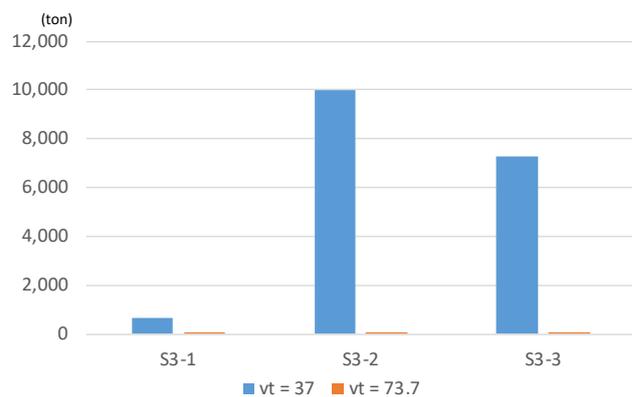


図-21 青島港-仁川空港 (仁川港経由) のリンクフロー

はじめに、図-21 より、現状再現モデルで用いた航空貨物時間価値 (73.7 US\$/hour/TEU) の場合は、S3-1 においてフェリーによる直通輸送を設定しても Sea & Air 型輸送の利用はわずかで、また S3-2 や S3-3 のような利用促進施策を加えても、その輸送量は増えないことがわかる。一方で、航空貨物時間価値を半減 (37.0 US\$/hour/TEU) させた場合は、S3-1 もおいても Sea & Air 型輸送の利用量

が増え、さらに S3-2 および S3-3 において利用促進策を適用することで、輸送量の大幅な増加がみられる。このことから、Sea & Air 型輸送を利用しやすい貨物の時間価値が、平均的な航空輸送貨物の時間価値と比べ、やや低いことが示唆される。

航空貨物時間価値を半減させたケースにおいては、S3-1 で推計された Sea & Air 型輸送量と比較して、S3-2 の方が S3-3 と比べ輸送量の増加が大きいことから、仁川港到着後から仁川空港で荷積みされるまでの陸上輸送および積替に要する時間を 12 時間と設定した今回のシナリオにおいては、輸送時間をさらに数時間短縮するよりも、むしろ空港使用料などの輸送費用を低減させることが輸送量の増加につながる結果となった。これより、場合によっては、輸送時間の短縮のみならず、輸送費用の削減効果も Sea & Air 型輸送の促進に有効であることが推測される。これは、Sea & Air 型輸送を利用する貨物が、一般的な航空輸送貨物と比べ、相対的に輸送時間よりも輸送費用を重視する傾向があることも一因と考えられる。

なお、本シナリオについては、本モデルの構成上、上位リンクに Sea & Air 型輸送の直通リンクを追加して分析を行ったものの、より精緻な分析を行うには、海上輸送サブモデルにおいて、実際に Sea & Air 型輸送を行っているサービスを追加する必要がある。すなわち、本シナリオのような Sea & Air 型輸送を想定したより具体的かつ精緻なシナリオ分析を行うことは、今後の課題のひとつである。

7. 結論

本研究では、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した既存モデル^{3,4)}をベースとし、世界規模の航空輸送ネットワークを統合することで、海上輸送・陸上輸送・航空輸送ネットワークを全て含む物流シミュレーションモデルを構築した。既存モデルと同様に、下位問題で利用者均衡配分を適用することで混雑を考慮しつつ、上位問題においてコストが最小となる以外の経路にも貨物が流れる確率的ネットワーク配分を適用している。さらに本研究では、時間価値が一般的な貨物よりも高い航空貨物を同一のモデルで配分するため、航空貨物とそれ以外の普通貨物で異なる時間価値パラメータを算出し、品目別配分手法を適用した。このため、入力とする地域間貨物輸送需要 (OD 貨物量) も航空貨物と普通貨物でそれぞれ用意した。

構築したモデルの推計結果について、ユーラシア大陸内発着貨物の機関分担率や、ユーラシア大陸内の港湾や空港の輸出入取扱量、ユーラシア大陸内航路の国ペア別航空輸送量について実績値と比較し、概ね妥当な再現性

が得られていることを確認した。

本研究で構築したモデルを用いて、特定の空港や Sea & Air 型輸送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た。

このように、海上輸送・陸上輸送・航空輸送の実ネットワークを世界規模で含み、混雑も考慮した上で航空貨物と普通貨物を同一のネットワークで配分できるモデルはほとんど存在せず、本研究で構築したモデルの意義は大きいと言える。

本研究の今後の課題としては、以下が挙げられる。まず、比較的貨物取扱量の小さな空港については再現性があまり高くないため、より詳細な現地調査やデータ収集によって、精度を向上させていく必要がある。また、本研究では時間価値を航空貨物とそれ以外の貨物で分けたものの、航空貨物の中でも比較的価値の低い品目が存在することが予想され、シナリオ分析の結果にも影響するため、時間価値をより多段階的に設定することが必要である。ただし、品目別配分では、時間価値の異なる品目グループが増加するほど計算時間が増加してしまい、実用レベルを超える計算時間となるため、モデル計算のアルゴリズムや配分方法の見直しも必要となる。最後に、より多くの地域や空港に注目したシナリオ分析も行っていくことで、モデルの実用性をさらに検証していく必要がある。

参考文献

- 1) IATA: *IATA Cargo Strategy 2015-2020*, 2015. <https://www.iata.org/whatwedo/cargo/Documents/cargo-strategy.pdf>. (最終アクセス日: 2020年1月10日).
- 2) The Korea Customs Office.: *Sea & Air Transport 2018*.
- 3) 西村健太郎, 柴崎隆一, 田邊 怜, 加藤浩徳: ランドブリッジと海上輸送の競合を考慮したユーラシア大陸インターモーダル国際物流ネットワークモデルによる一帯一路政策の分析, 土木計画学研究・講演集, 57, OR7453, 2018.6
- 4) Shibusaki R., Nishimura, K., Tanabe, S., and Kato, H.: How does China's BRI encourage the use of international rail transport across the Eurasian Continent? ~An approach by intermodal logistics network assignment model, *7th International Conference on Transportation and Logistics (TLOG 2018)*, 8-9 September 2018, Dalian, China
- 5) Tavasszy, L., Minderhoud, M., Penin, J. F., and Notteboom, T.: A strategic network choice model for global container flows: specification, estimation and application, *Journal of Transport Geography*, 19(6), pp.1163-1172, 2011.
- 6) Wang, H., Nozick, L., Xu, N., & Gearhart, J.: Modeling ocean, rail, and truck transportation flows to support policy analysis, *Maritime Economics & Logistics*, 20(3), pp.327-357, 2018.
- 7) Heinitz, F. M., & Meincke, P. A.: Modeling framework of origin and destination air cargo routing, *Transportation research record*, 2336(1), pp.83-90, 2013.
- 8) OECD/ITF.: *ITF Transport Outlook 2015*, OECD Publishing/ITF.

- <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)
- 9) Mejis, L.: Global air cargo flows estimation based on O/D trade data, *Air Transport Research Society World Conference*, 2017.
 - 10) Chao, C. C., and Hsu, C. W.: Cost analysis of air cargo transport and effects of fluctuations in fuel price, *Journal of Air Transport Management*, 35, pp.51-56, 2014.
 - 11) Ohashi, H., Kim, T. S., Oum, T. H., and Yu, C.: Choice of air cargo transshipment airport: an application to air cargo traffic to/from Northeast Asia, *Journal of Air Transport Management*, 11 (3), pp.149-159, 2005.
 - 12) 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.
 - 13) IATA.: *Industry Statistics Fact Sheet*. https://www.iata.org/en/pressroom/facts_figures/fact_sheets/. (最終アクセス日:2020年1月10日)
 - 14) World Bank Group.: Doing Business Website “Trading Across Borders” 2016 Rank.
 - 15) Leigh Fischer.: Review of airport charges 2016.
 - 16) ICAO.: *Traffic by Flight Stage*.
 - 17) IHS.: *World Trade Service (WTS) Database*.
 - 18) ICAO.: *On Flight Origin and Destination*.
 - 19) Navoi International Airport. https://www.navoi-airport.com/en/content/flight_information/. (最終アクセス日:2020年1月17日)

MODEL DEVELOPMENT OF INTERMODAL GLOBAL CARGO FLOW SIMULATION INCLUDING AIR TRANSPORT NETWORK

Kentaro NISHIMURA, Ryuichi SHIBASAKI and Takuya YAMAGUCHI

This study aims to add an air transport network into a global intermodal logistics simulation model that the authors developed for simulating the impacts of logistics and infrastructure policies on cargo flow. The developed model considers the capacity constraint of each shipping mode including air transport and commodity-based assignment is applied for considering both air transport cargo with higher value of time and other conventional cargo with lower value of time. The developed model well describes the actual flow, in terms of cargo throughput in each gateway seaport and airport in the Eurasian continent and the air traffic volume in the intra-Eurasian route.

Subsequently, three policy simulations to promote the use of specific airports and Sea & Air transport are examined by using the model; it reveals the conditions under which the cargo throughput of specific airports are increased and the cargo flows are significantly changed.