一般財団法人 関西空港調査会
2020 年度調査研究助成事業　報告書概要版

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

東京大学大学院工学系研究科　准教授　柴崎隆一

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した．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等を実績値と比較したうえで，重慶空港の利用促進に関するシミュレーションを行った．

キーワード：国際物流，航空貨物，ネットワーク配分モデル，インターモーダル輸送

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．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よく利用されている．

本研究では，今後の成長が見込まれ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，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 [1)]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．モデル構成

本研究で扱うモデル（以下「本モデル」とする）は，筆者らの既存モデル [1)]を参考に，配分方法に関して変更を加えたうえで，港湾の容量制約の考慮や陸上・航空輸送ネットワークの上位モデルへの統合といったモデルの修正を行っている．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 [1)]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）を決定する上位モデルと、段階配分手法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モデルに分かれている．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，荷主にとって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．

2.1　上位モデル

本モデルにおける上位モデルのネットワーク構成を図 1 に示す．本研究では，既存モデル [1)]の海上・陸上ネットワークを含む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設定し，航空ネットワークを再現したうえで，海上･陸上･航空ネットワークを統合している．なお，上位モデルの陸上・航空ネットワークは，実ネットワークに基づいて構成されている．本研究で追加された航空ネットワーク構成を図 2 に示す．各リンクのコスト関数については，Chao and Hsu2)や Ohashi et al.3) ，石倉 4)を参考に，既存モデル 1)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基づき設定した（詳細については概要版では省略）．

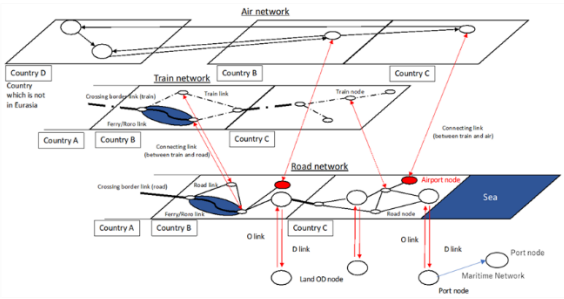

図1　本モデルの上位ネットワーク構成

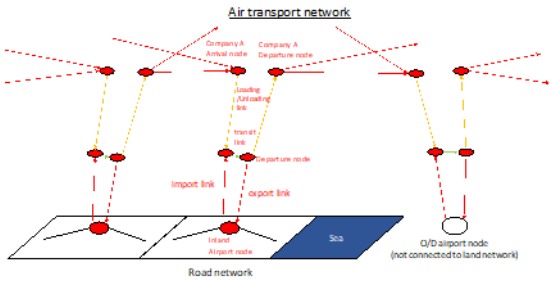

図2　本研究の航空輸送ネットワーク構成

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 $V^{od}{}_h$ 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．

$$U_{hm}^{od} > U_{h'm}^{od}$$
$$\forall h, h' \in H^{od},\ h \neq h', (o,d) \in O \times D \quad (1)$$
$$U_{hm}^{od} = V_h^{od} + \varepsilon_{hm}^{od} \quad (2)$$
$$F_h^{od} = Q^{od} \cdot \frac{exp(\theta \cdot V_h^{od})}{exp(\theta \cdot V_h^{od}) + \sum_{h' \in H^{od}} exp(\theta \cdot V_{h'}^{od})} \quad (3)$$

ここで，$U^{od}{}_{hm}$：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，$V^{od}{}_h$: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$/TEU），$\varepsilon^{od}{}_{hm}$：発ノード o から着ノード d までの経路 h についての効用誤差項，$F^{od}{}_h$：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．

2.2　下位モデル

下位モデルである海上輸送サブモデルは，上位モデルにおいて算出された各コンテナ貨物の輸出港および輸入港（港湾間輸送需要）を所与とし，各運航船社が世界中で運航するコンテナ定期航路サービスがそれぞれ別のリンクとして表される海上輸送ネットワーク上で配分を行うモデルである．

また本サブモデルでは，より実態に近づけるため，従来モデルと異なり港湾容量を考慮する．具体的にはは，Drewry Maritime Research データ [8)]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み，さらに積卸時間を投入クレーンの本数の関数として設定した．

下位モデルの計算から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．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．入力データ

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 [1]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．

3.1　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 [6]（各都市間の総流動）を用いて作成した．TFS データには，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 3** に本モデルの航空輸送ネットワークを示す．

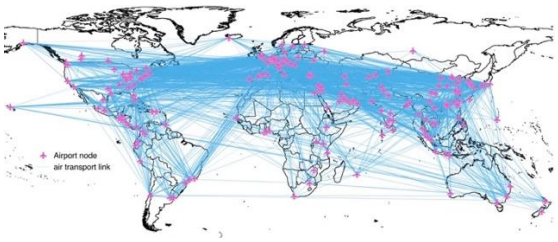

図 3　本モデルの航空輸送ネットワーク

3.2　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 [7]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，既存モデルと同様に，WTS データ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乗じ，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 データに基づいているため，同じ ICAO の On Flight Origin and Destination（OFOD）データ [8]（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乗じることで，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．

$$vt = \sum_{c \in C} \left(\frac{AV_c}{AT_c} \cdot \frac{AV_c}{\sum_{c \in C} AV_c} \cdot IR \cdot \frac{1}{365 \cdot 24} \right) \cdot TT \quad (10)$$

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：年間利子

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73.7（US$/TEU/hour）となった．なお，普通貨物の時間価値は従来モデルと同様，0.5（US$/TEU/hour）とした．

４．推計結果

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 データから集計した国間航空貨物輸送需要に OFOD データから算出した国別の空港輸出入貨物取扱量シェアを乗じることで推計した実績値と，モデル計算の推計値を比較した結果を**図 4** に示す．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．

次に，Yamaguchi et al.[9]において，結果の振動がかなり激しいことが確認されたタイのレムチャバン港とバンコク港の取扱量に着目する．均衡配分を用いた従来モデルと多段階配分を用いた本モデルにおける繰り返し全体計算回数ごとの両港の取扱量の推計値を図 5 に示す．図に示すように，従来モデルでは両港の取扱量が大きく振動しているのに対し，本モデルでは少ない繰り返し全体計算回数でも両港の取扱量が安定していることがわかる．

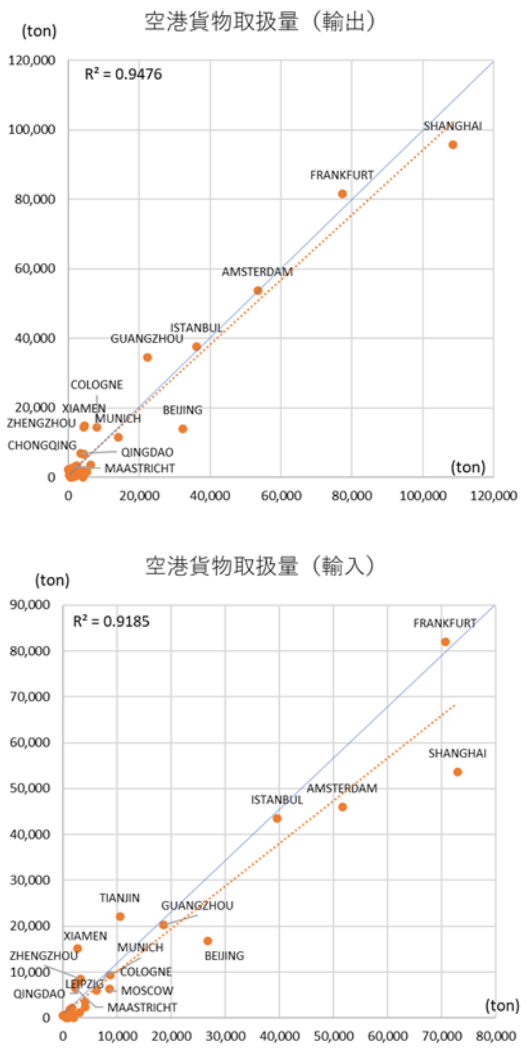

図 4　ユーラシア大陸内空港の取扱貨物量（2016 年）

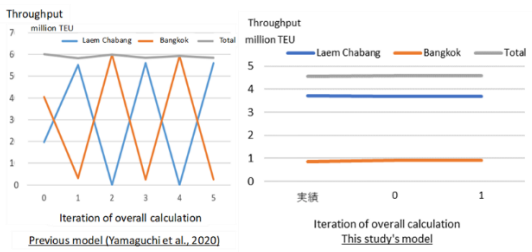

図 5　従来モデル（左）と本研究のモデル（右）による各全体計算回におけるレムチャバン港とバンコク港の取扱量の推計値

５．シナリオ分析：重慶空港の利用促進による貨物輸送の変化

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．

表 1　シナリオにおける設定

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	0.5	6001.96
S1-1	0.5	3001
S1-2	0.25	3001
S1-3	0.0	3001

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 6** に示す．まず，重慶空港の貨物取扱量に注目すると，輸出・輸入貨物どちらにおいても，空港使用料を低減させるだけでは貨物量の増加につながらず，越境費用・時間の低減を組み合わせることによって大きく増加することが示された．

図 6　各空港の取扱貨物量の変化

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 S1-3 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 7** に示す．**図 7** より，base ケースでは北京空港，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，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，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を見ると，わずかなフローの減少を確認できるが，その量は僅かであり，陸上輸送との競合が発生しているとは言えない．さらに，中国の港湾取扱量は，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向上策では，空港間の競合とわずかな陸上輸送からのシフトは発生するが，海上輸送との競合は発生しないことが示された．特に，広州（Guangzhou），上海（Shanghai），北京（Beijin），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．さらに，図 6 において，ヨーロッパ側で取扱量が変化している Frankfurt 空港や Amsterdam 空港においても，輸送頻度，輸送容量どちらにおいても利便性が高い Amsterdam 空港へのフローのシフトが確認できた．

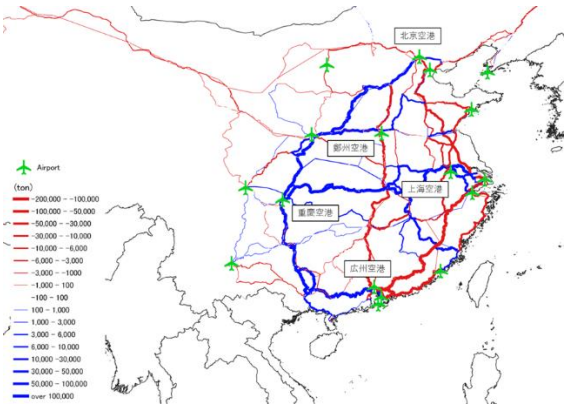

図 7　各空港の輸出貨物取扱量の変化（S1-3 と base ケースの比較）

６．おわりに

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 [1] 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．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．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，ユーラシア大陸内の港湾や空港の輸出入取扱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．また本研究で構築したモデルを用いて，重慶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時間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) Shibasaki, R., Kato, H., and Ducruet, C. (eds.): Global Logistics Network Modelling and Policy: Quantification and Analysis for International Freight, Elsevier, 370p., 2020.
2) 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.
3) 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.
4) 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.
5) Drewry Maritime Research: Global Container Terminal operators Annual Review and Forecast, 2018.
6) ICAO: *Traffic by Flight Stage*.
7) IHS, Inc.: *World Trade Service (WTS) Database*.
8) ICAO: *On Flight Origin and Destination*.
9) Yamaguchi, T., Shibasaki, R., Samizo, H., and Ushirooka, H.: Impact on Myanmar’s logistics flow of the East–West and Southern Corridor development of the Greater Mekong Subregion—A global logistics intermodal network simulation, *Sustainability*, 13(2), 668, 2021.