船舶運航スケジュールの遅延を考慮した時空間世界物流シミュレーションモデルの構築

渋谷　圭悟[1]・柴崎　隆一[2]

[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
（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）E-mail: kei5-0216@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

[2]正会員　東京大学大学院　工学系研究科システム創成学専攻准教授
（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）E-mail: shibasaki@sys.t.u-tokyo.ac.jp

海上コンテナ輸送の遅延は国際物流に深刻な影響を与える．そのため荷主の立場では遅延を考慮して輸送経路を比較するニーズが存在する．本研究では，貨物の詳細な発着時刻を組み込むために，時空間ネットワーク上でコンテナ貨物を配分するコンテナ輸送経路選択モデルを構築する．モデルでは，貨物を 1 日分ずつ段階的に配分し，各配分後にネットワークを更新する配分手法を導入することで，輸送遅延が徐々に発生していく様子を表現した．また，構築したモデルを北米アジア航路に適用し，概ね有効な再現性が得られることを確認した．さらに，構築したモデルを用いてシナリオ分析を実施し，Los Angeles 港で局所的に混雑が発生した場合にはアジア港湾間の輸送にも遅延が伝播すること，2021 年 9 月以降の設定では 2021 年 8 月以前の設定と比較して各港湾の沖待ち時間は増加すること，船速上昇による遅延回復戦略が船会社にとって有効であること，抜港による遅延回復戦略の効果は小さいことが示された．

Key Words: *network assignment model, GLINS model, time-space network, transportation delay, maritime contaier shipping*

1. はじめに

2020 年初頭に発生した新型コロナウイルス感染症の流行以降，海上コンテナ輸送サービスの遅延が大きな問題となった． 特に，アジア～北米西岸航路において新型コロナウイルス感染症下での海上輸送の遅延は顕著であり，米国 Los Angeles (LA)港や Long Beach (LB)港では，多くの船舶が直ちに入港できず「沖待ち」状態が大規模に発生した．渋谷ら[1]および Shibuya et al.[2]において整理した通り，2021 年中旬から寄港船舶における小型船の割合が増加したことや，陸上輸送の混乱及びコロナウイルスの感染抑制のため港湾における労働力が制限されたことが原因で，2021 年 9 月から 11 月にかけて沖待ち船舶数は 40 隻にまで増加している．またこのような混雑はアジア地域を始めとした世界各地に伝播し，各地で混雑や混乱が見られたとされている[3),4)]．

さらに，大規模な輸送遅延の影響を受けた運航スケジュールの回復を目指して，各船会社が運航している海上コンテナ輸送定期航路サービスにおいて当初予定していた寄港地への寄港を取りやめる「抜港」や，サービス自体を取りやめる「欠便」も実施された．我が国の港湾も

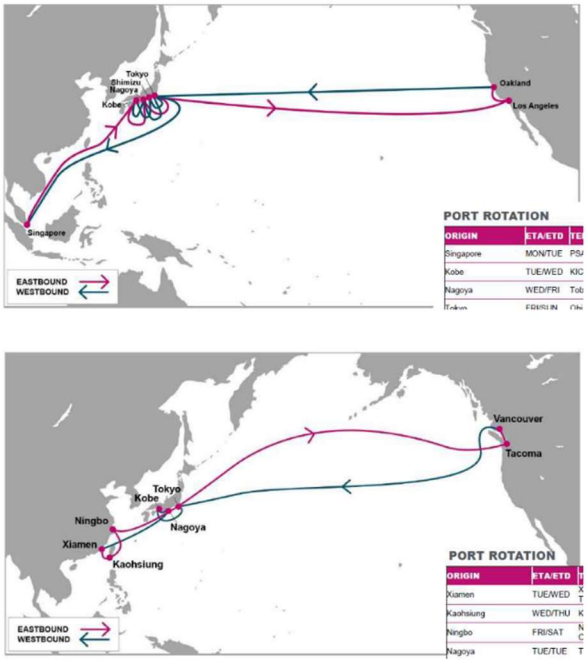


図-1 FP1（上）および PN1（下）の航路
出典：Ocean Network Express[5)]

このような措置の影響を受けている．例えば，ONE 社が所属する The Alliance の主要な日本北米間直航サービスである FP1 および PN1（図-1）においては，2021 年 4～12 月の期間で高い欠便率を記録している（米 LA・オークランドに寄港する FP1 では輸出入 18%，米タコマとカナダ・バンクーバー に入港する PN1 では輸出 23%輸入 21%）[5]．

このような 2020 年中旬以降の海上コンテナ輸送における遅延の激化は，海運業界に混乱をもたらすことにつながった．すなわち，輸送遅延の悪化により安定した海上コンテナ輸送サービスの供給が不十分となった一方で，巣篭り需要が堅調に増加したことや各企業が在庫確保の必要性が発生したことにより，貨物輸送需要は拡大した．結果として，需要と供給のアンバランスが原因となり，海上運賃が大きく上昇する結果などをもたらした．

また荷主の立場では，輸送技術の進歩やインフラ整備の進展に伴う輸送ルートの多様化により最適輸送ルートの選択が複雑化しているという事実や，輸送遅延など物流が混乱に陥っている中でサプライチェーン強靭化のため輸送経路の複線化が重要であるという状況から，コンテナ貨物の輸送経路選択に関するモデル化のニーズが高まっている．インターモーダル国際物流ネットワークモデルの構築や諸地域への適用に関する研究としては，最短経路探索モデルを適用した ITF-OECD[6]や，パスサイズロジットモデルを用いた Tavasszy ら[7]などが挙げられる．これらの複数輸送機関を含む大規模な物流シミュレーションモデルの構築，適用に関する研究では，十分なデータの入手が困難なため，よりシンプルなモデルが用いられる傾向がある．さらに，荷主の立場から国際海上コンテナ貨物の輸送経路選択モデルを構築した研究例として，Bell et al.[8]は，頻度ベースで輸送割り当て手法を海上コンテナ貨物に適用した配分モデルを構築した．Fan et al.[9,10]は，北米大陸を対象として，コスト最小化に基づいて最適な航路，船のサイズ，港湾，後背地輸送経路を決定する輸送経路選択モデルを開発した．Shibasaki et al.[11]による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）モデルは，実際のコンテナ貨物輸送需要や輸送機関ごとのネットワーク，各リンクの各種サービスのレベルを所与とし，現実に近いネットワーク上で荷主の立場から経路選択をするとともに，グローバルな貨物流動を考慮しつつローカルに適用できるモデルである．また Yamaguchi et al.[12]は，Shibasaki et al.[11]のモデルを改良しつつ，港湾における容量制約を組み込んだ海上コンテナ輸送経路選択モデルを構築した．以上のモデルは，ある一定期間分の OD 貨物量をまとめて一度で配分するマクロ的なシミュレーションモデルであり，貨物と船舶の詳細な発着時刻を考慮することはできない上に，海上コンテナ輸送の遅延を考慮していない．そのため，いずれのモデルも輸送の遅延およびその伝播を再現できない．

一方で，貨物の詳細な発着日時まで考慮するコンテナ輸送経路選択モデルの研究例として，時空間ネットワーク上での配分モデルを構築した研究がいくつか存在する．Agarwal and Ergun[13]は，時空間ネットワーク上で船舶のスケジューリング問題とコンテナ輸送経路選択問題を同時に考慮する数学モデルを開発した．Wang et al.[14]は，海上コンテナ輸送定期航路サービスネットワークを時空間ネットワーク上で表現し，コンテナ輸送経路選択モデルがリンクベースの線形計画法の定式化によって多項式で解けることを示した．この研究では，構築したモデルを実際の定期航路サービスデータに適用し，シミュレーション分析を行っている．さらに，Lin and Chang[15]は，定期船輸送における船舶の配船と貨物配分問題を分析するために時空間ネットワークに基づく数学的定式化を提案し，北極海航路に適用した．一方で，シナリオ分析では 3 航路のみに絞ってモデルを適用しているなど課題も残っている．これらのモデルは，時空間ネットワーク上で海上輸送ネットワークを表現し，貨物の輸送経路選択問題を解くことでコンテナ貨物を配分するものであり，貨物と船舶の詳細な発着日時を考慮することができる．一方で，特定の港湾における混雑が発生した場合などに輸送遅延が発生し，海上輸送サービスの発着時刻が変化するという実務のオペレーションにおける輸送遅延を組み込んだモデルではない．そのため，ある港湾の混雑から生じた輸送遅延がそのほかの港湾間の輸送に伝播していく様子は再現できない．

以上より，(1) 貨物の詳細な発着時刻を考慮し，(2) 輸送遅延による海上コンテナ輸送サービスの発着時刻の変化を組み込むことにより輸送遅延の伝播を再現する海上コンテナ輸送経路選択モデル，は存在しない．

このような背景を踏まえて，本研究では Shibasaki et al.[11]の GLINS モデルのうち海上輸送ネットワークのみを対象とした GLINS-MS モデル[16,17]をベースとし，海上コンテナ輸送の遅延を考慮しつつ荷主の立場で貨物の輸送ルートの選択をシミュレーションできるモデルを構築する．その際，モデル内で遅延を表現するために各リンクの詳細な発着日時を考慮してネットワークを接続する必要があるため，GLINS-MS モデルで用いられる海上輸送ネットワークを時空間ネットワークに拡張したシミュレーションモデルを構築し，輸送遅延により船舶の発着時刻が変化する状況を表現する．これにより，ある港湾の混雑により発生した輸送遅延が他港湾間の輸送の遅延へと伝播していく様子を再現する．さらに，構築したモデルを北米-アジア航路に適用し，複数のシナリオを設定してシミュレーション分析を行う．

2. 時空間ネットワーク上での海上コンテナ輸送経路選択モデルの構築

本章では，時空間ネットワーク上での海上コンテナ輸送経路選択モデルを構築する．時空間ネットワーク上では、同一港湾であっても時刻の異なるノードは別のノードとして表現されるので，ネットワークサイズが膨大になる．そのため，計算量の削減を目的として，モデルの対象地域を LA 港または LB 港に寄港する北米～アジア航路のサービスに絞ってモデルを構築した．その際，対象サービスを用いて輸送される貨物に絞った OD 表を作成するため，Kawachi et al.[18]で使用した全世界 200 港湾を対象としインターモーダル輸送ネットワーク上でコンテナ貨物の輸送経路を選択する「全世界 GLINS モデル」を用いることとする．全世界 GLINS モデルで計算された配分結果を元に，時空間 GLINS-MS モデルで対象とする海上コンテナ輸送定期航路サービスの輸送対象となるコンテナ貨物の OD 表を再作成し，それを入力として時空間 GLINS-MS モデルで貨物の配分を行う構成となっている．

(1) 時空間 GLINS-MS モデルの構成

a) モデルの基本コンセプト

時空間 GLINS-MS モデルは，輸出入港湾間の貨物輸送需要量（港湾間 OD 貨物量）および海上輸送ネットワークを所与として，各輸出入港湾ペア間の輸送時間を算出する段階配分モデルである（なお，従来の GLINS-MS モデルと同様に，輸送コストについては考慮しない）．時空間 GLINS-MS モデルは，以下の 3 つのコンセプトに基づいて構築した．

① 空間ネットワーク上で配分を行っていた従来の GLINS-MS モデルとは異なり，時空間ネットワーク上で貨物の配分を行う．

② 1 年分の貨物を集約して配分していた従来の GLINS-MS モデルとは異なり，OD 貨物量を 1 日分ずつ段階的に配分する．

③ 1 日分の配分ごとに，ネットワーク内の混雑関数により変化する各リンクの所要時間に従って，時空間ネットワークを更新することで輸送遅延の影響を表現する．

これらのコンセプトは，貨物の発着時刻の変化を正確に表現することで船舶の遅延を再現するために設定した．図-2 に，時空間 GLINS-MS モデルにおける海上コンテナ輸送ネットワークの構成を示す．

図に示すように，時空間ネットワーク上では，同一の港湾のノードであったとしても時刻が異なれば別のノードとして表現され，リンク通過にかかる所要時間が出発ノードと到着ノードの時刻に反映される．また，本研究では，①荷主は輸送開始時点の各海上輸送サービスの混

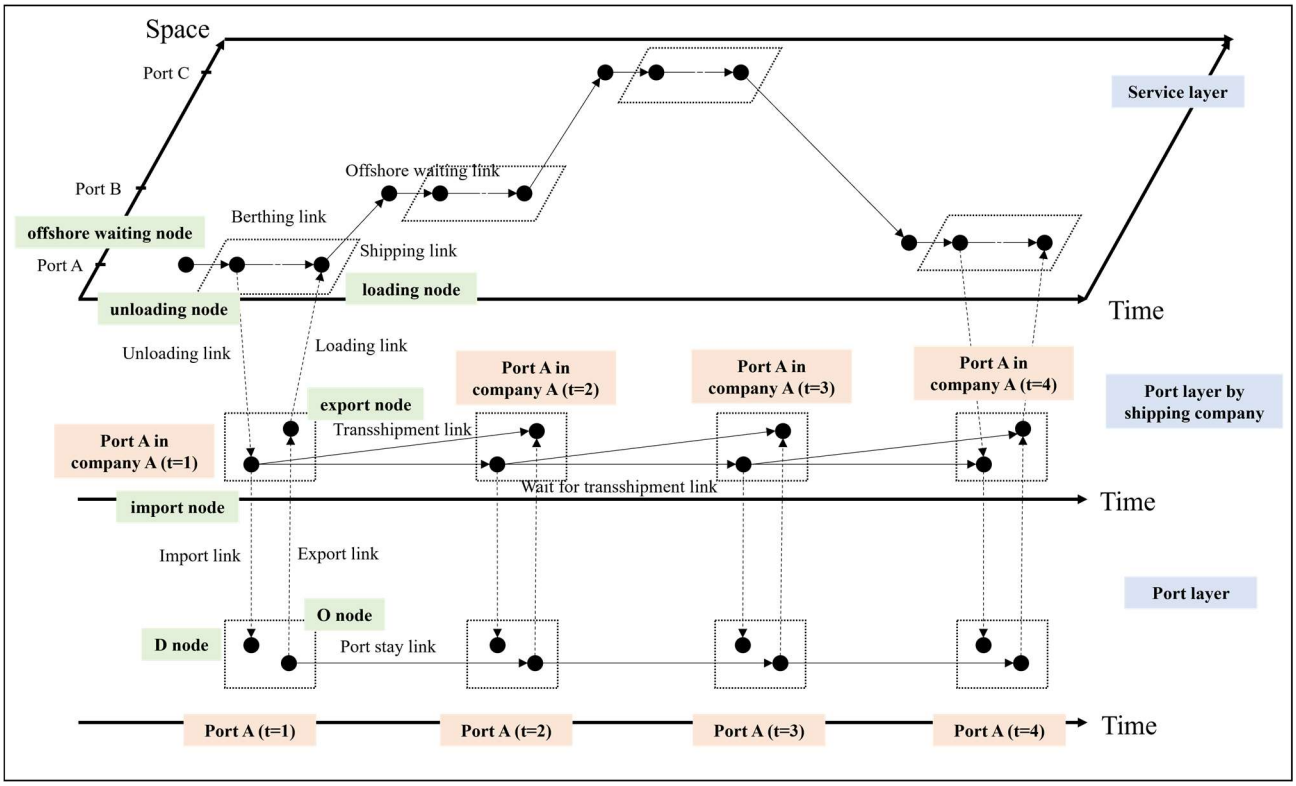


図-2 時空間 GLINS-MS モデルにおける海上コンテナ輸送ネットワーク

雑情報に基づき輸送ルートを選定する，②一度選ばれたルートは途中で変更されず目的地まで運ばれる，という 2 つの仮定をおき，時空間ネットワークを 1 日ずつ更新するアルゴリズムを実装した．このように OD 貨物量を 1 日分ずつ配分し，混雑によって変化する各リンクの所要時間を反映して毎日の配分前にネットワーク全体を更新することで，遅延が徐々に発生する様子を表現する（詳細な配分手法は後述する）．時空間ネットワーク上では，各コンテナ運航船社が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た船社別ネットワークが構成される．時空間 GLINS-MS モデルでは，リンクフロー依存の関数として，全世界 GLINS-MS モデルで考慮していた航走リンクの容量制約および積卸リンクと接岸リンクにおける荷役量に比例した所要時間に加えて，新たに設定した沖待ちリンクにおける所要時間を考慮する．

b) 時空間ネットワークの全体構成

本節では，時空間ネットワークの全体構成および各リンクの出発時刻，到着時刻，所要時間の設定について述べる．時空間ネットワークは，3 つのレイヤ（港湾レイヤ，船社別港湾レイヤ，定航サービスレイヤ）に分けられ，港湾内リンクと定航サービスリンクを合わせると合計 10 種類のリンクによって構成される．

まず， 時空間ネットワークに存在するノードについて説明する．O ノードおよび D ノードは，貨物の発着地（港湾のゲート外に存在）を表すノードである．計算量の制限により，OD ノードは日単位で作成されるものとし，港湾ごと，日付ごとにノードを作成した．次に，港湾内に作成される輸出ノードおよび輸入ノードは，OD ノードと同様に日単位で作成され，船社別にネットワークを作成するため，船社別に作成される．積卸ノードは，岸壁に接岸する船舶内に作成されるノードであり，OD ノードおよび輸出入ノードとは異なり，各サービスの到着時刻に作成されるものとし，各サービスの寄港船舶ごと，寄港地ごと，船社ごとに作成される．最後に，沖待ちノードは，沖待ち中の船舶内に作成されるノードであり，積卸ノードと同様に各サービスの寄港船舶ごと，寄港地ごと，船社ごとに作成される．

次に各リンクについて説明する．はじめに，港湾内リンク群は，港湾レイヤおよび船社別港湾レイヤに存在するリンクであり，輸出リンク，輸入リンク，積替リンク，輸出待ち港湾滞在リンク，トランシップ・輸入待ちリンクの合計 5 種類のリンクによって構成される．港湾レイヤおよび船社別港湾レイヤに存在するすべてのノード（OD ノード含む）が日単位で作成されていることから，これらの港湾内リンクも日単位で作成される．各リンクのコスト関数に関しては，全世界モデルでも存在するリンク（輸出入リンク，積替リンク）については同じ所要時間関数を採用した．以下で，全世界モデルには存在しない残りの 2 種類のリンクについて説明する．

① 輸出待ち港湾滞在リンク

輸出待ち港湾滞在リンクは，貨物が O ノードを出発した日の翌日以降の輸出に備えて，港湾内で待機する行動を表現するためのリンクである．輸出待ち港湾滞在リンクも日単位で作成した．輸出待ち港湾滞在リンクの所要時間を以下の式に示す．

$$t_{xw}(x_a^{Ct}) = 24 \tag{1}$$

t_{xw}：輸出待ち港湾滞在リンクの所要時間（hour）

② トランシップ・輸入待ちリンク

トランシップ・輸入待ちリンクは，海上コンテナ輸送サービスを使ってある港湾まで運ばれてきた貨物が，翌日以降に到着する別のサービスにトランシップするため，もしくは輸入のために港湾内で 1 日待機する状態を表すためのリンクで，日単位で作成される．トランシップ・輸入待ちリンクの所要時間を以下の式に示す．

$$t_{tw}(x_a^{Ct}) = 24 \tag{2}$$

t_{tw}：トランシップ・輸入待ちリンクの所要時間（hour）

次に，定航サービスリンク群は，定航サービスレイヤに存在するリンクであり，航走リンク，接岸リンク，沖待ちリンク，船積リンク，船卸リンクの合計 5 種類のリンクによって構成される．定航サービスレイヤに存在するノードはその他のレイヤに存在するノードと異なり，各リンクの発着ノードの時刻に作成される．特に，本研究では渋谷 [1]で構築した待ち行列モデルを用いたシミュレーションにより得られる沖待ち時間算出関数を組み込むために，沖待ちリンクを新たに導入した．同一港湾でも時刻の異なる場合は別のノードとして表現するという時空間ネットワークの特性上，定航サービスリンクは各サービスの船社，就航船舶（サービス運航頻度），寄港港湾（周回するという特性上，寄港順も考慮）ごとに作成される．5 種類の定航サービスリンクのうち，接岸リンク，船積リンクの所要時間関数に関しては全世界モデルと同様に設定した．残りの 3 種類について説明する．

③ 航走リンク

航走リンクの所要時間は，各サービスの運航頻度を反映した値とするために，全世界モデルと異なる算出方法で求めた航行時間データ（詳細は後述）に加え，運河通航時間と容量制約による混雑項を考慮した．なお，混雑項のパラメータに関しては，キャリブレーションの結果 b1 =1.5，b2=1.1 とした．

$$t_n(x_a^{Ct}) = (ST_a + \gamma P_a \times TP + \gamma S_a \times TS) + TW_{a'} \times b1 \times \{lf_a(x_a^{Ct})\}^{b2} \tag{3}$$

t_n：航走リンクの所要時間（hour）
ST：海上航行時間（hour）
γP_a：パナマ運河通航のダミー変数（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（hour）
γS_a：スエズ運河通航のダミー変数（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（hour）
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'における出発時の期待待ち時間（hour）
lf_a：リンクの年間平均消席率（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

なお，時空間 GLINS-MS モデルでは，海上航行時間 ST の算出方法を従来の GLINS モデルから変更した．従来のモデルでは，MDS データに記載の各サービスの船速データと，港湾間距離データから海上航行時間を算出していた．一方で，時空間 GLINS-MS モデルでは，各サービスの航行状況をより正確に反映するため，MDS データに記載の各サービスの運航間隔と就航隻数の積から港湾停泊時間（1 寄港あたり 24 時間と想定）を差し引いた総海上航行時間を算出し，港湾間距離で比例配分することで各港湾間の航行速度を算出した．これにより，時空間 GLINS-MS モデルでは，MDS データから算出されるサービス頻度に従うように時空間ネットワークを構築することができる．

④　沖待ちリンク

沖待ちリンクは，港湾の沖合で船舶が待機する状況を表現したリンクであり，航走リンクと船卸リンクの間に存在する．沖待ちリンクの所要時間は，渋谷ら [1]が構築した LA 港を対象とした港湾のキャパシティ等を考慮した船舶の沖待ち時間算出モデルに基づき，以下の式で表す．

$$t_{wo}(x_a^{Ct}) = \begin{cases} (c_1 \times C_{LA}^T + c_2 \times NoV^T) \times \dfrac{Cap_{LA}}{Cap_p} (if\ p \in P_{USA}) \\ (c_1 \times C_{LA}^T + c_2 \times NoV^T) \times \dfrac{Cap_{LA}}{Cap_p} \times \dfrac{1}{3} (if\ p \notin P_{USA}) \end{cases} \quad (4)$$

t_{wo}：沖待ちリンクの所要時間（hour）
p：沖待ちリンクのある港湾
T：沖待ちリンクの発ノードの時刻
Cap_{LA}：LA 港のキャパシティ（TEU）
Cap_p：港湾pのキャパシティ（TEU）
C_p^T：時刻Tにおける港湾pのコンテナ数（TEU）
C_{LA}^T：時刻Tにおける LA 港のコンテナ数（TEU）
c_1，c_2：渋谷ら [1]による重回帰分析により推計された係数

沖待ちリンクの所要時間は，渋谷ら [1]における検討に基づき，港湾到着時刻における港湾全体のコンテナ量および 1 週間あたりの到着船舶数に比例するように設定した．ここで，上記の沖待ち時間算出モデルが Loa Angels 港を対象として構築したものであることも踏まえ，米国港湾とその他の港湾の処理効率の差を考慮して，沖待ち時間算出関数を別個に設定した．米国以外の港湾で沖待ち時間を 1/3 としているのは，AIS データと米国税関データをもとに米国港湾におけるクレーン一基あたりの処理能力が約 15 TEU/hour と推定され，この値がその他の港湾における平均的なクレーン一基あたりの処理能力（約 45 TEU/hour）のおよそ 1/3 に相当するためである．また，係数c_1，c_2は渋谷ら [1]で導出した値（2021 年 8 月以前：$c_1 = 2.88 \times 10^{-4}, c_2 = -0.462$，2021 年 9 月以降：$c_1 = 9.60 \times 10^{-4}, c_2 = -1.15$）を用いた．

また，時刻 T における港湾 p の滞在コンテナ量は，時刻 T における港湾 p のすべてのリンクのリンクフローおよび沖待ちリンクのリンクフローの合計値として定義し，以下の式で表す．

$$C_p^T = \sum_{a \in \boldsymbol{L}_{t_1 t_2}^T} x_{a,p}^{Ct} + \sum_{a \in \boldsymbol{L}_{t_1 t_2}^T} x_wo_{a,p}^{Ct} \quad (5)$$

t1：リンクの発ノードの時刻
t2：リンクの着ノードの時刻
$\boldsymbol{L}_{t_1 t_2}^T$：発ノードの時刻が時刻 T 以下かつ着ノードの時刻が時刻 T 以上であるようなリンクの集合
$x_{a,p}^{Ct}$：港湾pにおけるリンク a のリンクフロー
$x_l_{a,p}^{Ct}$：港湾pにおける沖待ちリンク a のリンクフロー

⑤　船卸リンク

船卸リンクは，船舶から貨物を卸す動きを表すリンクである．全世界モデルでは取扱コンテナ量に比例した所要時間を設定していたものの，時空間モデルでは，日単位の積替ノードに接続する必要があるため，当該リンクの着ノードまでの時刻の差分も所要時間に含める．船卸リンクの所要時間を以下の式で表す．

$$t_u(x_a^{Ct}) = \frac{x_a^{Ct}}{crane_a \times d} + 1.0 + \Delta \quad (6)$$

t_u：船卸リンクの所要時間 (hour)
$crane_a$：リンクaに投入されるクレーンの本数
d：クレーン 1 本・1 時間あたりの処理可能容量（TEU/hour）
Δ：実際の船卸完了時刻と着ノードの時刻の差分（hour）

船舶のサイズに比例して投入されるクレーンの本数$crane_a$については，全世界モデルと同様に，船舶サイズが 2000TEU 増加するごとに投入数が一本増加するという想定をしている．また，クレーンが不足する場合，岸壁長の延伸やバースの増深と比較して追加的にクレーン

を設置することは容易と考えられる．以上の想定に基づいて，$crane_a$は以下の式のように定める．なお，モデル内では便宜的に連続数として扱っている．

$$crane_a = \frac{Vcap_a}{2000} \quad (7)$$

$Vcap_a$：共同運航等も想定した当該船舶の総キャパシティ（TEU）

c) 時空間ネットワークの構築手法

本項では，時空間ネットワークの構築手法について説明する．時空間ネットワークの構築は以下の 4 ステップで構成される．なお，後述するように，本モデルにおいて日単位の配分後に時空間ネットワークを更新する際は，初回の時空間ネットワーク構築時に構築したリンクのみを用いる．これは，1 回目の配分以降に遅延時間を考慮してネットワークを更新したとしてもリンクの出現や消滅は生じないと仮定することで，各リンクのフローを保存するためである．

【Step 1：定航サービスリンク群と港湾内リンク群の作成期間（日数）の決定】

まず，定航サービスリンク群および港湾内リンク群をそれぞれ何日分作成するかを決定する．ここでは，定航サービスリンク群の作成期間分の運航ネットワークが構築されることを意味する．本モデルでは，定航サービスリンク群の到着時刻の遅延が進むにつれて後ろ倒しになることで，積卸リンクの接続先の港湾内ノードの日付も後ろ倒しになる．そのため，遅延後にも接続先の港湾内ノードが存在する状態にするために，港湾内リンク群の作成期間は定航サービスリンク群の作成期間以上に設定する必要がある．定航サービスリンク群の作成期間に対して，港湾内リンク群の作成期間をどの程度長くとるべきかは，発生する遅延の程度に依存する．

【Step 2：港湾内リンク群の作成】

Step 1 で決定した作成期間分の港湾内リンク群を作成する．港湾内リンク群は，前項で述べた通り，モデル対象の各港湾において日単位で作成する．

【Step 3：各サービスに就航する 1 隻目の船舶の定航サービスリンク群の作成】

次に，各サービスに就航する 1 隻目の船舶の運航ネットワークを作成する（図-3）．第一寄港地の寄港日にノードを作成し，各リンクの所要時間分経過したノードを随時作成し，沖待ちリンク，接岸リンク，船卸リンク，船積リンクを作成する．ただし，航走リンクのコスト関数で考慮されている容量制約による混雑項は，上記のノードの時刻を決定する際の所要時間には含めない．これは，容量制約による混雑項は，船舶の遅れではなくコンテナ積載の遅れ（積み残し）を表す項と解釈されるためである．ただし，船卸リンクは，日単位で作成される積替ノードと接続する必要があるため，便宜的に船卸後の時刻の翌日のノードと接続することとした．そして，船積リンクのノードの時刻に，航走リンクの所要時間を加えた値がシミュレーション期間の範囲内である場合に，航走リンクおよび次の港湾の沖待ちリンク，接岸リンク，船卸リンク，船積リンクを作成する．このようにして，各サービスの寄港地を周回するように，繰り返し定航サービスリンク群を作成する．航走リンクの着ノードの時刻が，Step 1 で定めた定航サービスリンク群の作成期間を超えた場合は，その航走リンクは作成せず 1 隻目の船舶のネットワーク構築を終了する．

【Step 4：各サービスに就航する 2 隻目以降の船舶のサービスリンク群の作成】

1 隻目の船舶のネットワーク構築が終了したら，2 隻目以降のネットワークを作成する．1 隻目の船舶の第一寄港地の寄港日時にサービスの運航間隔を加算した時刻から順に同様の方法で 2 隻目のネットワークを構成する（図-4．ただし，2 隻目以降のネットワークは，寄港時刻が，定航サービスリンク群の作成期間以下となるような寄港についてのみ作られる．そのため，シミュレーシ

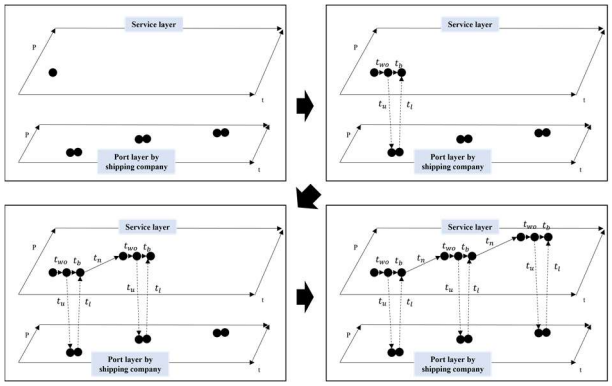


図-3　1 隻目の船舶の運航ネットワーク作成（Step 3）

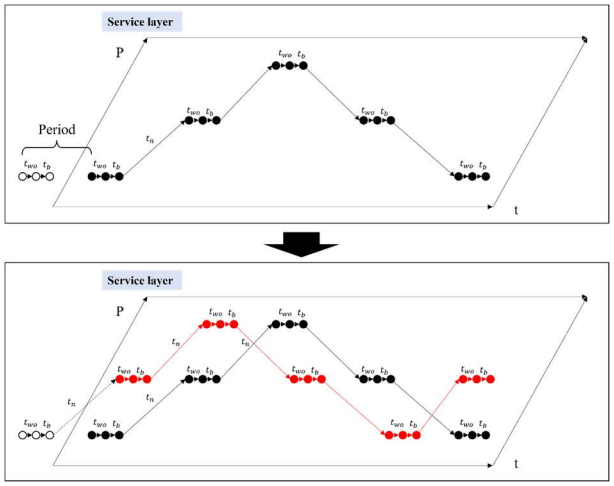


図-4　2 隻目以降の船舶の運航ネットワーク作成（Step 4）

ョン期間内における 1 隻目の第一寄港港湾と 2 隻目の第一寄港港湾は異なる場合がある）．これを各サービスの就航隻数分繰り返し，時空間ネットワーク上で各サービスが就航隻数分の別のネットワークとして作成される．

d) 計算アルゴリズム

本項では，本モデルの配分手法および計算アルゴリズムを説明する．本モデルの具体的な計算アルゴリズムは，以下の Step 0 から Step5 にわけられる．

【Step 0：シミュレーション期間の設定】

OD 貨物量の配分日数を決定する．

【Step 1：初期の時空間ネットワークの作成】

前項で述べた手順により，時空間ネットワークを構築する．シミュレーション中は，このステップで作成された初期ネットワークのリンク数やノード数が保存される．$t_1 = 1$とする．

【Step 2：t_1日目の O ノードから All or Nothing 配分により貨物を配分】

本モデルでは，OD 貨物量に関して出発港湾，到着港湾，出発日を指定するものの到着日は指定せず配分する．例として，日付t_1における港湾P_1の O ノード（以下，$O(P_1, t_1)$と表す）から港湾P_2への配分を考える．ただし，時空間ネットワークのシミュレーション期間をTとする．$O(P_1, t_1)$から日付t_1以降のすべての日付tにおける港湾P_2の D ノード（つまり$[D(P_2, t_1), \dots, D(P_2, T)]$）への輸送時間を比較し，最短到着可能日が$t_2$であるとする．このとき，本モデルでは，$O(P_1, t_1)$から港湾$P_2$への一日分の OD 貨物量$q(P_1, P_2)$を，$[(O(P_1, t_1), D(P_2, t_2)), \dots, (O(P_1, t_1), D(P_2, t_2 + 6)]$の合計 7 日間に分割して割り当てることにした．これは，①荷主は輸入港湾に到着するまで輸送時間の最も短いルートを選択する一方で，②船卸完了から港湾外に存在する D ノードに運び出されるまでには荷主の事情によって異なるタイムラグが存在する，という 2 つの想定に基づく．なお，$O(P_1, t_1)$から港湾P_2への一日分の OD 貨物量に関しては，簡単のためP_1，P_2間の 1 年分の OD 貨物量を 365 分割することで得た．

【Step 3：各リンクの所要時間の更新】

一日分の OD 貨物量を Step 2 の手法により配分し終えたら，各リンクのリンクフローに基づきリンクの所要時間を再計算する．

【Step 4：時空間ネットワークの更新】

次に，Step 3 で計算された各リンクの所要時間に伴って定航サービスリンク群と港湾内リンク群の接続先ノードを変更して時空間ネットワークを更新する．

【Step 5：計算終了の判定】

あらかじめ設定したシミュレーション期間に到達したかを判定する．到達していない場合は，$t_1 = t_1 + 1$とし，更新された時空間ネットワーク上で，Step 2 に戻り O ノードからの配分を行う．到達した場合は計算を終了する．

(2) 時空間モデルのインプットデータ

時空間 GLINS-MS モデルは，インプットデータとして，港湾データ，海上コンテナ輸送ネットワークデータ，港湾間コンテナ輸送需要量データ，各サービスにおける港湾間の航行時間データの 4 種類を必要とする．

時空間GLINS-MSモデルでは，同一港湾でも異なる時刻の場合は別のノードとして表現されるため，ネットワークサイズが膨大となる．そこで，全世界GLINSモデルから対象サービスを絞ってインプットデータを作成した．具体的には，全世界GLINSモデルにおける海上コンテナ輸送ネットワークデータに含まれる831サービスのうち，LAまたはLBに寄港する北米-アジア航路である26サービスを対象とした．この結果，本モデルには47港湾が含まれる．なお，海上コンテナ輸送ネットワークデータは，ネットワークサイズ削減のため，全世界GLINSモデルのように船社別に作成するのではなく，3大アライアンスごとに作成した．各アライアンスに含めた船社の一覧を表-1に示す．

表-1 各アライアンスに所属する船社一覧

#	Alliances	Shipping companies
1	2M Alliance	Maersk, MSC
2	Ocean Alliance	COSCO, CSCL, CMA-CGM, Evergreen
3	The Alliance	Hapag-Lloyd, ONE (NYK, Kinkai Yusen), Yang Ming, Hyundai, ZIM

さらに，対象サービスの絞り込みに伴い，全世界 GLINS モデルの計算結果に基づいて港湾間コンテナ輸送需要量データを再構築した．具体的には，全世界 GLINS モデルにおいて OD ペアごとの輸送経路を段階配分におけるすべての配分時に保存することが計算機性能の制約上難しいことを踏まえ，各 OD ペア間の最短経路に，時空間モデルで対象とする 26 のサービスを利用する場合のみ，対象サービスが寄港する最初と最後の港湾に貨物輸送需要量を計上することで OD 表を再構築した．この際，対象サービスを複数経由する最短経路をもつ OD ペアの場合には，貨物輸送需要量が 2 重に計上されることになる．

次に各サービスにおける港湾間の航行時間データの作成方法について説明する．通例，海上コンテナ輸送定期航路サービスは決められた運航間隔で寄港地を周回し，貨物を輸送する．さらに，中でも多くを占めるWeekly serviceは，毎週決められた曜日に決められた港湾に寄港するという特徴を持つ．しかし，すべてのサービスのスケジュールが公表されているわけではなく，またAISデ

ータなどの運航記録には遅延を含んだ到着時刻のみしか記載されていないため，正確なスケジュールを入手・推定することは難しい．そこで本研究では，(1)b)③で述べた手法で各サービスに就航する船舶のスケジュールを仮想的に作成し，それをもとにして航走リンクの所要時間を算出した．なお，第一寄港地の寄港曜日および時刻はランダムで決定した．ただし，港湾間距離は鳥海 [19]の手法を用いて得た値を用いる．また，本モデルでは港湾間の航行時間の算出方法を上記のように設定したことによって，従来のGLINSモデル上で算出されていた航行時間（MDSデータに記載された定格速度に基づく推計値）と差が生じた．従来のGLINSモデルと本手法で作成した航行時間データにおける，港湾間距離と航行時間の関係を図-5に示す．図より，本研究で採用した手法で推計された航行時間は，従来のGLINS-MSモデルにおいて算出した値と比べて大きいことがわかる．これにより，従来の手法で航行時間の算出に用いていた定格速度が，実際の航行速度よりかなり大きい可能性が示唆された．

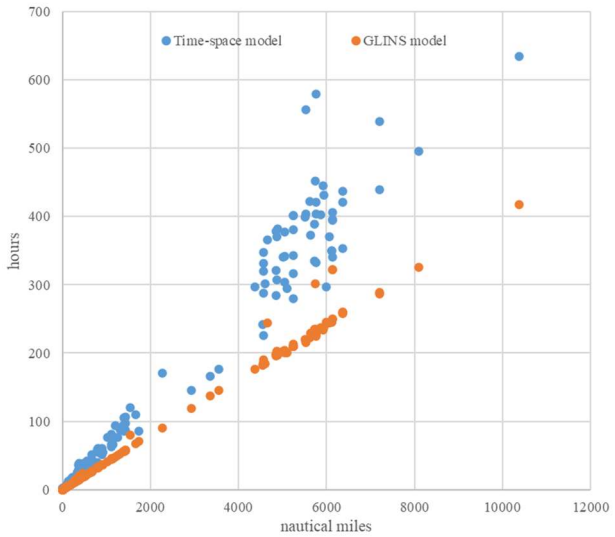


図-5　従来の GLINS-MS モデルと本手法で作成した航行時間データにおける港湾間距離と航行時間の関係

(3)　モデル計算

a)　OD貨物量配分日数およびネットワークサイズの決定

時空間モデルでは，あらかじめ設定した日数分の海上輸送ネットワーク上で，決められた日数分の O ノードから配分を行うモデルである．そのため，配分を行う O ノードの日数および構築するネットワークの日数を決定する必要がある．構築するネットワークの日数を増やすと，各サービスの船舶が 1 周以上寄港港湾をめぐるようなネットワークを構築することができる一方で，リンク数が増大することで計算時間が長くなるというデメリットがある．また，配分する O ノードの日数を増やすと，長期間にわたるコンテナ輸送の分析が行える一方で，構築したネットワークの最大日付でも到着できない OD ペアが発生する場合に計上されない輸送量が発生するというデメリットがある．また，時空間モデルでは，遅延の発生により積卸リンクの接続先の港湾内ノードの日付が後ろにずれていくという特徴がある．そのため，定航サービスリンク群の作成日数分に加えて，遅延日数および積卸リンクと接岸リンクの所要時間の増加分を考慮した日数分の港湾内リンク群をあらかじめ作成する必要がある．

そこで，本節では構築するネットワークの日数および配分する O ノードの日数を複数パターン設定して計算結果を比較することで，モデルの適切な設定値を決定する．計算環境を表-2 に示す．

表-3 に，各設定におけるノード数，リンク数，計算時間を示す．表より，配分する O ノード日数が増えるほど遅延を考慮して作成する港湾内ネットワークの作成日数が増加し，結果として総リンク数が増加し，総計算時間が増加することがわかる．最も大規模な設定である，80 日分の港湾間ネットワーク上で 60 日分の O ノードから配分を行う場合には，計算時間が 130 分となった．本研究では，対象とする 26 サービスの運航周期の分布（対象サービスのうち周期が 35～49 日のものが 21 サービス存在し，80 日分のネットワーク作成でおよそ寄港地を 2 周できる），および港湾ペア間の平均輸送所要時間が 33.8 日であることを加味して，港湾間ネットワークを 80 日作成し，配分する O ノードの日数は 40 日として以下のシミュレーションを行う．

表-2　計算環境

CPU	Intel(R) Xeon(R) E-2246G Dual CPU @ 3.60GHz
OS	Windows 11 Pro for Workstations
メモリ	64.0 GB
コンパイラ	Fortran Builder 6.2 for Windows

表-3　各設定におけるノード数，リンク数，計算時間

港湾間ネットワーク作成日数	配分する O ノード日数	港湾内ネットワーク作成日数	リンク数	ノード数	計算時間（分）
40	10	50	38,084	23,881	5
40	20	56	41,750	26,137	12
40	30	60	44,194	27,641	20
40	40	60	44,194	27,641	30
80	10	90	71,430	44,264	12
80	20	92	72,652	45,016	25
80	40	100	77,548	48,024	68
80	60	110	83,650	51,784	130

b)　時空間モデルの再現性

本項では時空間モデルの現状再現性について検証する．現状再現性の確認には，各港湾におけるトランシップ貨物量を用いる．なお，再現性の確認には 2021 年 8 月以前

の沖待ち時間算出関数のパラメータを採用したモデル（後述する S-1）を用いた．本モデルでは，対象サービスを LA 港または LB 港に寄港する北米-アジア航路の 26 サービスに絞るため，対象サービス間のみのトランシップ貨物量が計上される．一方で，本モデルで対象となるサービス間のみのトランシップ貨物量の実績値は入手できない．そこで，本研究では，PIERS データ [20]をもとに米国向けの輸入貨物についてのみのトランシップ貨物量を集計して比較に用いることとした（表-4）．具体的には，モデル対象の 2018 年における米国向け輸入貨物において Port of Arrival（到着港）がモデル対象の米国港湾（Seattle, Oakland, LA, LB, Jacksonville, Savannah, Charleston, Norfolk, New York/New Jersey）に一致するデータに関してトランシップを集計した．対象データにおいて Place of Receipt（貨物の荷受場所）の港湾と，Port of Departure（出発港湾）の港湾が不一致の場合，Port of Departure の港湾においてトランシップが行われていると想定して計上した．

表-4　各港湾における米国向け輸入貨物のトランシップ貨物量とモデルで推計された合計トランシップ貨物量の比較

Port	Transshipment for import container to USA ports (TEU)	Estimated value of all transshipment container (TEU)
Tokyo	38410	138069
Yokohama	6495	28026
Shimizu	2383	0
Nagoya	3315	563
Kobe	25897	21119
Pusan	628014	1034914
Incheon	29	0
Tianjin	910	0
Qingdao	40431	23996
Lianyungang	364	0
Shanghai	308787	366453
Ningbo	119386	158553
Xiamen	107420	7838
Yantian	183685	124055
Shekou	36500	9122
Guangzhou	651	14666
Hong Kong	369776	112169
Keelung	32609	0
Taipei	80954	386
Kaohsiung	349203	31020
Vung Tau	542021	12571
Laem Chabang	46188	1645
Tanjung Pelepas	20346	0
Singapore	377817	20059
Jakarta	746	0
Pipavav	4200	0
Colombo	96910	0
Prince Rupert	641	0
Balboa	26268	0
Manzanillo	62889	1063
Savannah	0	1830
Halifax	729	0
PortSaid	1286	0
Haifa	7565	0
Koper	23	0

表に示される通り，Shanghai 港や Ningbo 港をはじめとする中国の港湾ではモデル推計値と実績値のオーダーは一致している一方で，それより米国に近い日本の東京港や横浜港，韓国の Busan 港などではモデルによるトランシップ貨物量推計値が過大になる傾向があり，Singapore 港や Vung Tau 港などより遠方の港湾では推計値が過小になる傾向がみられる．このように実績値と推計値で差異が生じる理由としては 2 点考えられる．1 つ目は，実績値と推計値の集計対象が異なることである．推計値ではモデル対象サービス間のすべてのトランシップ貨物量を集計している一方で，実績値では米国向け輸入貨物のみを集計していることが，推計値が過大となる要因となる．一方で，モデルにはアジア域内のフィーダーサービスを含んでいないことが，過小推計の要因となる．これらの実績値と推計値の定義の差異を解消するためには，モデルに含まれる対象サービス数を大幅に増加させる必要があり，そのためにはモデル計算量の増加に伴う計算時間の増加を克服する必要があるため，モデル再現性の検討は今後の課題といえる．

3.　時空間モデルを用いた海上コンテナ輸送の遅延シミュレーションと考察

(1)　シナリオ設定

本章で分析対象とする各シナリオについて説明する．まず，S-0 は，全ての港湾で沖待ち時間をゼロと固定したシナリオである．次に，S-1，S-2 は，2021 年において特に混雑が悪化した LA 港に着目し，同港でのみ混雑が局所的に悪化したと想定したシナリオである．単位コンテナ当たりの沖待ち時間の増加率を，S-1 では LA 港のみ 2021 年下半期の値を用い，S-2 では 2021 年下半期の 3 倍として設定した．

S-3 および S-4 は，それぞれ 2021 年 8 月以前と 2021 年 9 月以降の待ち時間算出関数のパラメータをすべての港湾に対して採用したシナリオである．これらのシナリオは，LA 港において 2021 年 8 月の前後を境に混雑が悪化した [1]ことを考慮して設定した．S-3 では 2021 年 8 月以前，S-4 では 2021 年 9 月以降の設定で構築した待ち行列モデルから得られるパラメータを採用し，シミュレーション結果を比較する．

S-5～S-12 は，各アライアンスにおいて遅延回復戦略を実装したシナリオである．このうち S-5～S-7 では，特定のアライアンスのみで船速上昇により遅延を回復する戦略を実装した．具体的には，サービスの遅延時間が閾値（ここでは24時間とした）を上回った場合に，当該サービスの船速をモデル構築対象の 26 サービスにおける MDS データに記載の船速の平均値（24.4 ノット）まで上

昇させてスケジュール回復を目指す戦略を実装した（S-5 では 2M Alliance，S-6 では Ocean Alliance，S-7 では The Alliance を対象とした）．S-8 では，すべてのアライアンスで船速上昇によるスケジュール回復戦略を実装した．S-9～S-11 では，船速上昇に加えて，各アライアンスのサービスの遅延時間が閾値（ここでは船社へのインタビューをもとに72時間とした）を上回った場合に，各アライアンスのサービスで Oakland 港または日本の港湾を抜港することでスケジュール回復を目指す戦略を実装した（S-9 では Ocean Alliance 運航サービスの Oakland 港への寄港，S-10 では The Alliance 運航サービスの Oakland 港への寄港，S-11 では The Alliance 運航サービスの日本の港湾への寄港を対象とした）．最後に，S-12 では，全てのアライアンスにおいて船速上昇および S-9～S-11 で対象とした港湾の抜港による遅延回復戦略を適用した．

(2) シナリオ分析の結果

a) LA港における局所的な混雑の発生を想定したシナリオ

図-6 に，S-1 および S-2 におけるモデル対象港湾間の平均輸送所要時間の S-0 からの増加量を示す．なお，図中縦軸が輸出港，横軸が輸入港を表し，平均輸送所要時間は，段階配分の最終配分後のネットワーク上で各 OD ペア間の所要日数を計算し，モデルインプットである OD 貨物輸送需要量が 0 より大きい港湾ペアごとに平均をとることにより算出した．図より，両シナリオに共通して，多くの港湾から LA 港および Oakland 港への輸入貨物の所要時間が S-0 と比べて増加しており，特に LA 港での極端な混雑の発生を想定した S-2 においては平均約 300 時間の増加となった．これは LA 港および Oakland 港に到着するためには LA 港の沖待ちを通過する必要があるためであり，いずれも LA 港の沖待ち時間の増加が反映されていると考えられる．一方で，アジア港湾間の輸送所要時間も増加していることが読み取れる．これは，LA 港で大規模な混雑が発生した結果，特定のアジア港湾にサービスが来航しない期間が生じ，輸出貨物が船積されるまでの待ち時間が増加したためと考えられる．具体的には，たとえば S-0 から S-1 にかけての各モデル対象アジア港湾の輸出待ち港湾滞在リンクのリンクフロー増加率は，横浜港で 11.3%，Ningbo 港で 6.10%，Xiamen 港で 6.78%増加している．このことから，LA 港において局所的に混雑が発生した場合には，他港湾間の輸送時間が増加するという形で遅延の伝播が見られることがわかった．

b) 2021年8月以前と9月以降の比較

図-7 に，S-3 および S-4 におけるモデル対象港湾の平均沖待ち時間を示す．図より，Seattle，Oakland，LA，LB などの米国港湾における沖待ち時間は，他港湾の沖待ち時間に比べて大きい結果となった．これは，本研究において米国港湾でのコンテナ処理効率の低さを反映した沖待ち時間算出関数を採用したためと考えられる．さらに，多くの港湾において，S-3 に比べて S-4 の平均沖待ち時間が増加する結果となった．加えて，S-3 から S-4 にかけての LA 港の平均沖待ち時間の伸び率は，沖待ち時間算出関数における港湾内コンテナ量に係る係数の伸び率より大きくなった．これにより，沖待ち時間が増加すると，次々と後続の船が到着することで待ち行列長が長くなり，待ち時間が加速度的に増加していくという状況が，本研究のモデルにより表現されていると考えられる．

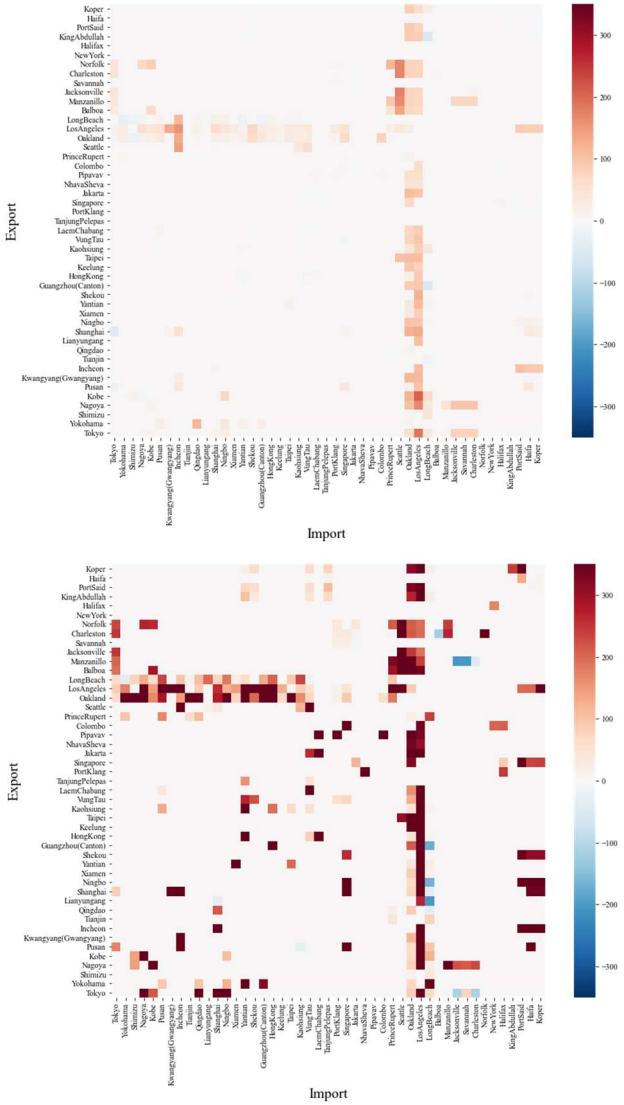


図-6 各港湾間の平均輸送所要時間の S-0 からの変化
（上：S-1，下：S-2）

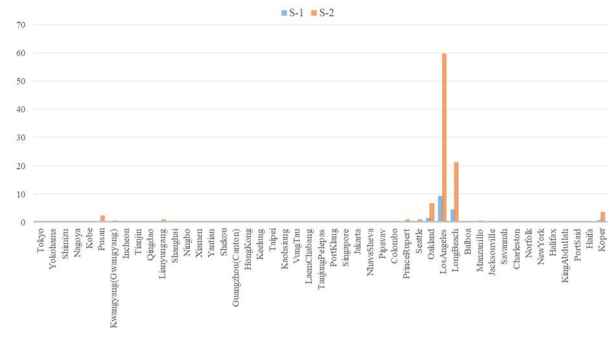


図-7　モデル対象港湾における平均沖待ち時間の比較(S-3, S-4)

また図-8 に，S-4 におけるモデル対象港湾間の平均輸送所要時間の S-3 からの増加量を示す．図より，S-4 では S-3 に比べて LA 港，LB 港，Oakland 港の輸入貨物の所要時間が上昇していることがわかる．これは，2021 年 9 月以降の設定を採用した S-4 では主に米国港湾における沖待ち時間が増加したためだと考えられる．さらに図より，Norfolk 港，Charleston 港，Jacksonville 港などの米国港湾発で東京港や神戸港の日本港湾着貨物の平均所要時間も増加していることが読み取れる．これは，モデル対象サービスにおいては，これらの米国港湾から日本港湾に辿り着くには混雑の激しい LA 港や LB 港を通過する航路になり，港湾混雑増加の影響を受けやすいためと考えられる．

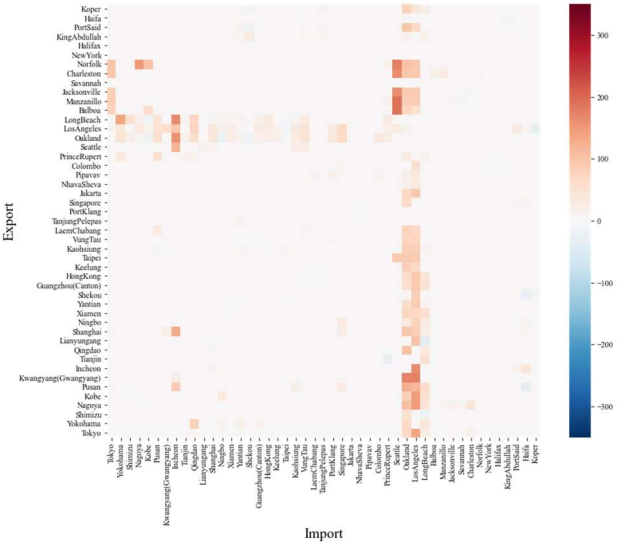


図-8　各港湾間の平均輸送所要時間の S-3 からの変化（S-4）

c)　運航船社による遅延回復戦略の実施シナリオ

図-9 に，各シナリオにおけるアライアンス別の平均積載率（LA/LB 港着東航および同港発西航）を示す．ここでは，LA/LB 港 を発着ノードとして持つ航走リンクの積載率を，それぞれ LA/LB 港 西航および着東航の各サービスの積載率とみなし，十分な量の貨物が流れていると想定される 20 日目以降の航走リンクの積載率をサービスごとに平均したものを各サービスの積載率とし，サービスの年間船腹量に応じてアライアンス別に加重平均を取ったものを各アライアンスの平均積載率とした．図に示すように，各アライアンスで一定の遅延時間を超えた場合に船速を上昇させる S-5，S-6，S-7 では，いずれも船速を上昇させたアライアンスの LA/LB 港着東航の平均積載率が S-1 と比較して大きく上昇した（S-5 で 78%，S-6 で 68%，S-7 で 67%）．これは，モデル対象の 26 サービスの船速の平均値が 15.1 ノットである一方で，船速上昇時には MDS データに記載の船速の平均値である 24.4 ノットと 60%以上の増加率となっていることから，船速を増加させることにより航行時間を大きく削減でき，多くの貨物を獲得できたためと考えられる．

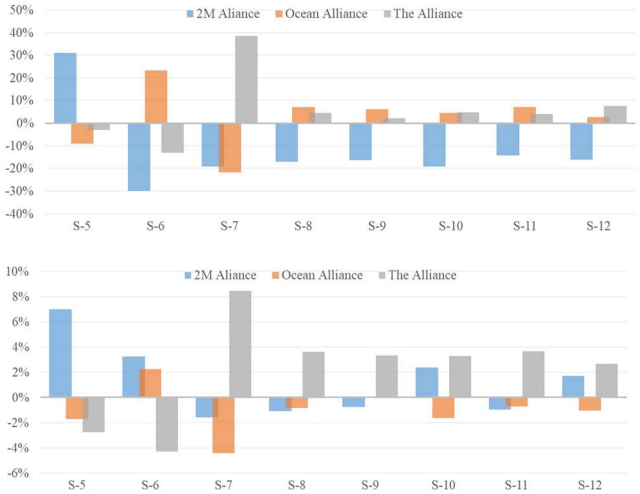


図-9　S-1 から各シナリオにかけてのアライアンス別の平均積載率の変化（上：LA/LB 港 港着東航，下：同港発西航）

また図-10 に，S-5～S-7 におけるモデル対象港湾間の平均輸送所要時間の S-1 からの増加量を示す．図より，いずれのシナリオにおいても LA 港および LB 港発着貨物の輸送所要時間が減少していることがわかる．このうち，S-5 における所要時間の減少幅は最も小さく，S-6 では東南アジア港湾発 LA/LB 港着東航の所要時間の減少がみられ，S-7 ではインド港湾発 LA/LB 港着東航の所要時間の減少がみられた．これらは，各アライアンスのサービスの寄港地の特性を反映していると考えられる．これらの結果から，アジア港湾発 LA/LB 港着ルートの所要時間低下には，Ocean Alliance および The Alliance の船速上昇の方が 2M Alliance の船速上昇に比べて効果的であることがわかった．一方で，CII (Carbon Intensity Indicator)規制[21]の適用が始まり二酸化炭素排出量削減の必要があること，および船舶の供給量が増加傾向にあるという背景から，コンテナ船の航行は減速傾向にある．そのため，今後の実際の遅延時の速度上昇幅は本シナリオで設定した値より小さくなる可能性があり，将来の状況をシミュレーション

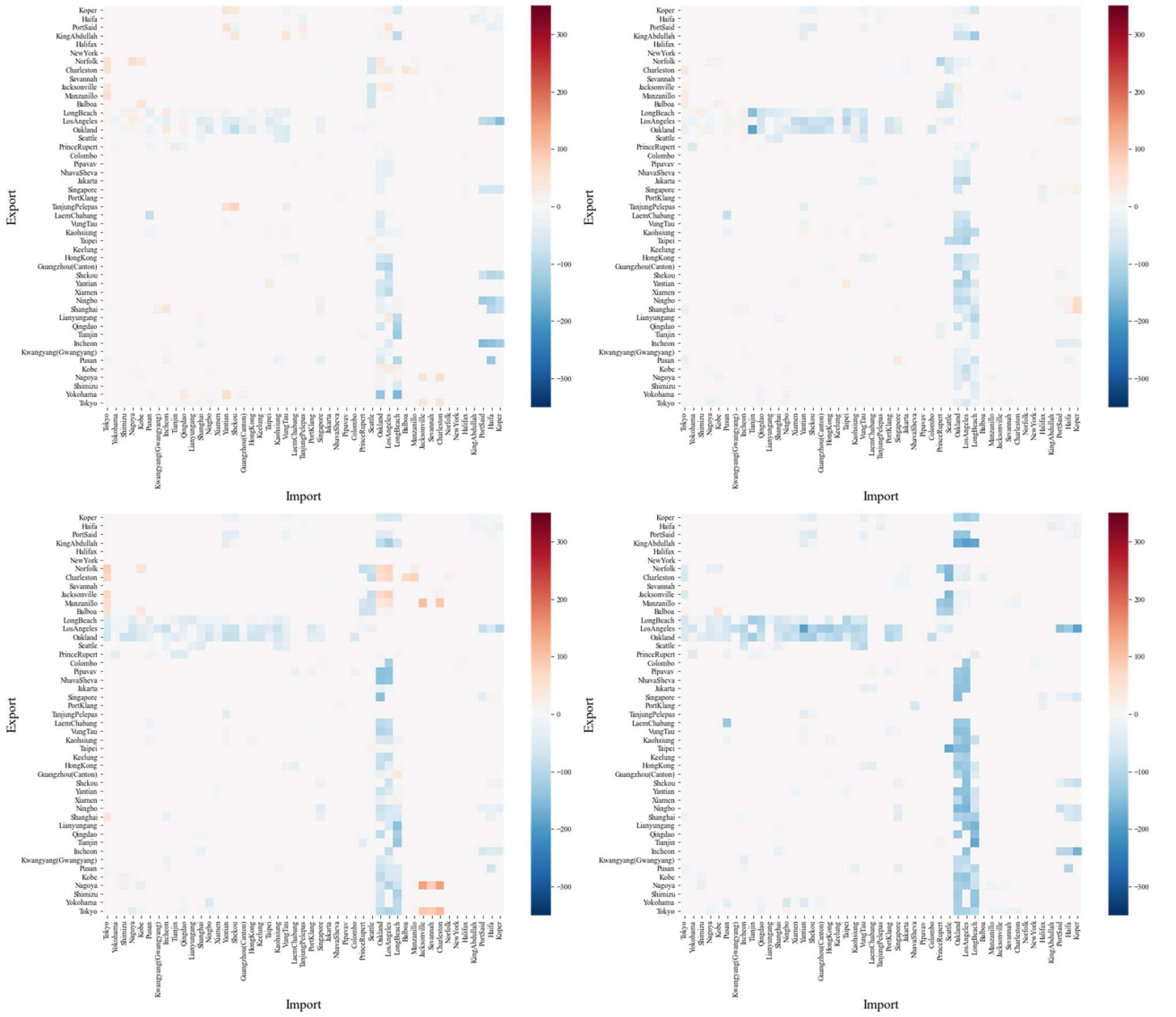


図-10　各港湾間の平均輸送所要時間の S-1 からの変化（左上：S-5，右上：S-6，左下：S-7，右下：S-8）

する際には，将来における現実的な速度上昇幅を想定したシナリオを検討することが必要である．

さらに，すべてのアライアンスで船速上昇によるスケジュール回復戦略を適用した S-8 においては，S-1 に比べて，各アライアンスの LA 港着東航の平均積載率は，2M Alliance で 17%減少，Ocean Alliance で 7%増加，The Alliance で 5%増加となった（図-9）．これは，各アライアンスの運航するサービスの通常時の船速が小さいサービスほどスケジュール回復戦略適用時に船速上昇幅が大きくなることを反映しており，Ocean Alliance と The Alliance は通常航行時の船速が小さいため， 2M Alliance に比べて船速上昇戦略によって有利になったためと考えられる．逆に言えば，今後炭素排出規制などが実施され，平均船速を減少せざるを得ない状況に陥った場合には，2M Alliance は現行の航行速度からの船速減少幅が大きくなり，LA 港着東航の北米～アジア航路のシェアを失う可能性があるといえる．さらに，図-10 右下に示すように，すべてのアライアンスで船速上昇による遅延回復戦略を取った場合には，特定の船社のみで船速上昇を行う場合に比べて，LA 港および LB 港発着の輸送所要時間の減少量が大きいことがわかる（S-5 では平均 10.7 時間，S-6 では平均 22.0 時間，S-7 では平均 22.5 時間，S-8 では 48.2 時間の減少）．このことから，荷主の立場からいえば，全船社が等しく船速を上昇させることで，積載率の偏りが少なくなり全体の輸送時間を削減できる可能性があることが示唆された．

最後に，すべてのアライアンスでの船速上昇に加えて，特定アライアンスの特定港湾の抜港を行うことでスケジュール回復を目指す S-9，S-10，S-11，S-12 シナリオの結果について考察する．まず東航（図-9 上）に関して，いずれのシナリオでも，すべてのアライアンスでの船速上昇のみを実装した S-8 と比較して，当該アライアンスの

LA/LB 港着東航の平均積載率はほとんど変化しなかった．これは，抜港によってスケジュールが回復される日数が，速度上昇と比較して小さかったためだと考えられる．実際に，たとえば図-11 に示す S-10 における最終配分後のサービス番号 19 のダイヤでは，40 日目以降で Oakland 港を抜港しているものの，LA 港から東京港までの所要時間は，抜港した場合（図中①）で 11.6 日，抜港しない場合（図中②）で 9.81 日となっており，全体の輸送時間に与える影響が小さかったと考えられる．次に，西航に関して，The Alliance 運航サービスの Oakland 港への寄港を抜港した S-10 および全てのアライアンスにおいて船速上昇および S-9～S-11 で対象とした港湾の抜港による遅延回復戦略を適用した S-12 では，S-8 と比較して 2M Alliance のシェアが増加した．以上の結果より，本モデルでは沖待ちによる遅延の発生した主な港湾は LA 港や LB 港であったため，日本港湾や Oakland 港の抜港は遅延を回避するという意味では効果が薄かったと考えられる．また，各サービスは LA 港の直後に Oakland 港に寄港する航路となっており，地理的距離が小さい Oakland 港を抜港することで短縮可能な距離が短いため，抜港によるスケジュールの回復効果は薄かったと考えられる．

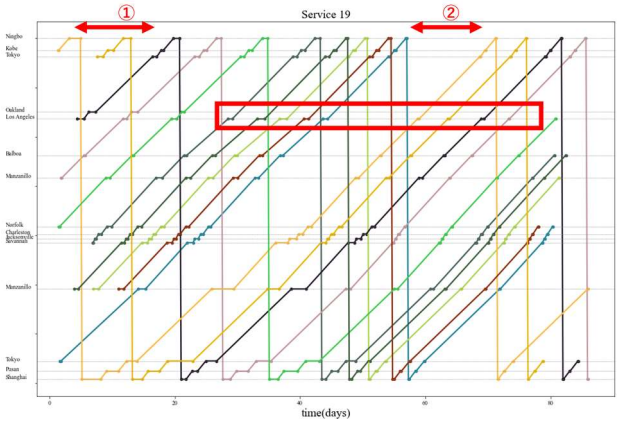


図-11　S-10 における最終配分後のサービス番号 19 のダイヤ

4. 結論

本研究では，柴崎らの一連の研究における国際物流モデル（GLINS モデル）をベースとし，時空間ネットワーク上で 1 日分ずつ貨物を配分するモデルを構築した．その際，渋谷ら [1]の沖待ち時間算出関数を組み込むことで，輸送遅延により到着時刻が変化する状況を再現した．特に，荷主は出発時点の混雑情報を得て輸送ルートを選定するという想定のもと，各日の配分後に混雑状況を反映して時空間ネットワークを更新するアルゴリズムを採用した．さらに，長期のシミュレーションを行いつつも，計算量の制限を克服し到達不可能な OD ペアを減らすために，初期ネットワークの構築日数と配分する O ノードの日数の設定について検討した．以上により構築したモデルを LA 港または LB 港に寄港する北米～アジア航路に適用し，各港湾のトランシップ貨物量に基づき一定の再現性があることを確認した．さらに，構築したモデルを用いて輸送遅延を考慮した複数シナリオについてシミュレーションを行い，以下の結果を得た．

① LA 港のみで局所的に混雑が発生した場合に，LA 港以外の港湾間の輸送所要時間が増加した．このことから，LA 港における混雑の発生が，アジア港湾間等の輸送遅延に伝播する可能性が示唆された．

② 2021 年 8 月以前の設定に比べて，LA 港の混雑が悪化した 2021 年 9 月以降の状況を各港湾に適用したモデルにおいては，多くの港湾で沖待ち時間が増加した．また，米国港湾から日本港湾に辿り着くには混雑の激しい LA 港や LB 港を通過する航路になるため，遅延の影響を受けやすい．

③ 船速上昇による遅延回復戦略は，いずれのアライアンスの平均積載率上昇にとっても効果的である．さらに，航行スケジュールに余裕のあるアライアンスは，船速上昇時を適用した際に平均積載率を大きく向上できる可能性が示唆された．炭素排出規制などによりコンテナ船が減速傾向であることから，各アライアンスのプレゼンスが将来的に変化する可能性が示唆された．一方で，抜港による遅延回復戦略の効果は小さかったことがわかった．これは主に沖待ち時間の小さい港湾や LA 港および LB 港らの距離が近い港湾を抜港対象にしていたことで，抜港時に短縮可能な輸送時間や距離が小さかったことが原因として考えられる．

以上で，本研究の目的は概ね達成できたといえる．特に，既往研究の少ない海上コンテナ輸送の遅延再現モデルの分野で，時空間ネットワーク上でコンテナ貨物を配分するモデルを構築し遅延によりサービスのダイヤが変化する様子を再現したことが本研究の貢献であるといえる．しかし，いくつかのモデル上の課題は残っている．

まずは，時空間モデルの現状再現性の向上である．時空間モデルにおいては，海上輸送サービスの詳細な運航スケジュールデータが入手不可能だったことから，サービス就航隻数と運航頻度から算出される周期を港湾間距離に従って分割し航行時間を推定した．仮に AIS データなどの船舶の運航記録データをもとに各サービスの詳細な運航スケジュールデータを抽出することができれば，実際の航行時間に近い値を用いてシミュレーションを行うことができる．また，沖待ちリンクにおける所要時間算出関数についても改善の余地がある．本研究では LA 港の待ち行列モデルから算出されたパラメータを港湾キ

ャパシティに応じてそのほかの港湾に適用した．しかし，各港湾のバース数，ターミナル数，寄港実績など詳細なデータを元にして港湾ごとに待ち行列モデルを作成してパラメータを算出することができれば，より現実に即した物流シミュレーションを実施することが可能である．

次に，モデル適用範囲の拡大である．時空間モデルでは，同一港湾であっても別の時刻のものは別のノードとして扱いネットワークを構築する必要があるため，従来モデルと比較してネットワークサイズが大きくなる．そのため，必要な計算機のメモリ容量の上限や計算時間を考慮し，従来モデルよりサービス数，港湾数，シミュレーション期間をかなり絞ってモデルを構築した．モデルの計算量を削減することができれば，モデルの適用範囲を拡大して追加のシナリオ分析が可能となる．

REFERENCES

1) 渋谷圭悟・柴崎隆一・渡邊英介,・松田琢磨 (2023) AIS データを用いたコンテナ港湾の混雑分析と待ち行列モデルの構築. 土木計画学研究発表会，67，D01-3

2) Shibuya, K., Watanabe, E., Shibasaki, R., & Matsuda, T. (2023). Congestion analysis and queueing modeling at the port of Los Angles using AIS data. Annual Conference of International Association of Maritime Economists (IAME 2023), 6–8 September 2023, Long Beach, USA.

3) 宮前直幸．(2021). 新型コロナが国際物流に与えた影響，コンテナ不足問題に関する情報共有会合，国土交通省，2021 年 4 月 23 日，https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001403344.pdf （2023/10/13 アクセス）

4) 日本海事新聞．(2021). アジア港湾、混雑 全域に波及。コロナ再拡大も影響，2021 年 7 月 30 日，https://www.jmd.co.jp/article.php?no=269664&gateway=none （2023/10/13 アクセス）

5) Ocean Network Express. (2022). コンテナ輸送の課題と ONE の対応について．第 2 回 国際海上コンテナ輸送の需要逼迫問題に関する情報共有会合，国土交通省，2022 年 1 月 14 日， https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001460925.pdf （2023/10/13 アクセス）

6) International Transport Forum.. ITF Transport Outlook 2015 | READ online. The Organisation for Economic Co-Operation and Development. Retrieved January 21, 2021, from https://read.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2015_9789282107782-en#page1

7) 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. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.05.005

8) Bell, M. G. H., Liu, X., Angeloudis, P., Fonzone, A., & Hosseinloo, S. H. (2011). A frequency-based maritime container assignment model. Transportation Research Part B: Methodological, 45(8), 1152–1161. https://doi.org/10.1016/J.TRB.2011.04.002

9) Fan, L., Wilson, W. W., & Tolliver, D. (2009). Logistical rivalries and port competition for container flows to US markets: Impacts of changes in Canada's logistics system and expansion of the Panama Canal. Maritime Economics and Logistics, 11(4), 327–357. https://doi.org/10.1057/MEL.2009.15/FIGURES/7

10) Fan, L., Wilson, W. W., & Dahl, B. (2012). Congestion, port expansion and spatial competition for US container imports. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48(6), 1121–1136. https://doi.org/10.1016/J.TRE.2012.04.006

11) Shibasaki, R., Kato, H., & Ducruet, C. (2020). Global Logistics Network Modelling and Policy : Quantification and Analysis for International Freight. Elsevier.

12) Yamaguchi, T., Kawachi, K., Shibuya, K., Hagiwara, M., & Shibasaki, R. (2023). Global logistics intermodal network simulation modeling by incremental assignment and corridor development simulations in Myanmar. Asian Transport Studies, 9. https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2023.100114

13) Agarwal, R. & Ergun, Ö. (2008). Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping. Transportation Science, 42(2), 175–196. https://doi.org/10.1287/TRSC.1070.0205

14) Wang, S., Meng, Q., & Lee, C. Y. (2016). Liner container assignment model with transit-time-sensitive container shipment demand and its applications. Transportation Research Part B: Methodological, 90, 135–155. https://doi.org/10.1016/J.TRB.2016.04.014

15) Lin, D. Y. & Chang, Y. T. (2018). Ship routing and freight assignment problem for liner shipping: Application to the Northern Sea Route planning problem. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 110, 47–70. https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.12.003

16) Shibasaki, R. & Kawasaki, T. (2019). A transhipment hub in South Asia and its competition: Application of network equilibrium assignment model for global maritime container shipping. Asian Transport Studies, 5(4), 546–569. https://doi.org/10.11175/EASTSATS.5.546

17) Shibasaki, R., Kavirathna, C. A., Aoyagi, S., Shibuya, K., & Kosuge, N. (2022). Impact of the Northern Sea Route by using a global maritime container shipping network simulation (GMCS-NS) model, Annual Conference of International Association of Maritime Economists (IAME 2022), 14–16 September 2022, Busan, South Korea

18) Kawachi, K. & Shibasaki, R. (2022). Impact analysis of future logistics policies on international container cargo flows in inland SASEC area. 9th International Conference on Transportation and Logistics (TLOG 2022), 19–20 September 2022, Incheon, South Korea.

19) 鳥海重喜. (2010). 海上航路ネットワークを用いたコンテナ船の運航パターン分析. オペレーションズ・リサーチ, 55(6), 359-367.

20) S&P Global. Bill of Lading Database, Import Export Data: PIERS | S&P Global. Retrieved January 15, 2023, from https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/mi/products/piers.html

21) 一般財団法人 日本海事協会. (2021, October). 燃費実績の格付け制度 (Carbon Intensity Indicator: CII) の概要及び対応.

(Received July 1, 2022)
(Accepted November 1, 2022)

Time-space network simulation model of global logistics considering delays of liner service schedule due to port congestions

Keigo SHIBUYA, Ryuichi SHIBASAKI

Delays in maritime container shipping have a serious impact on global logistics. Therefore, there is a need for shippers to compare transport routes in consideration of delays. To incorporate detailed arrival and departure times of cargo, this study constructs a model to allocate containerized cargo on a time-space network. The model represents the gradual occurrence of transport delays by introducing an incremental assignment where cargo is allocated on a daily basis, and the network is updated after each allocation. The model is applied to the Trans-Pacific route, and the reproducibility is confirmed. Furthermore, we conduct a scenario analysis using the model and find the following: 1) the offshore waiting time at each port increases in the setting after September 2021 compared to the setting before August 2021, 2) delays propagate to transport between Asian ports when congestion occurs locally at the port of Los Angeles, 3) increasing ship speed is effective for shipping companies as the delay recovery strategy, but cancelling some ports of call is less effecritive.