

国際海上コンテナ輸送における遅延の発生・伝播に関する分析

宮島 正悟¹・岡村 京子²

¹正会員 京都大学経営管理大学院 特定教授 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)
E-mail: miyajima.shogo.6z@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 京都大学経営管理大学院 特定准教授 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)
E-mail: okamura.kyoko.7x@kyoto-u.ac.jp

近年、国際海上コンテナ輸送の遅延が問題になっている。グローバルに展開されたサプライチェーンに高度に依存する産業・経済において、発生する遅延が限られた港湾におけるものであっても、その影響はサプライチェーンに関わる国々の広範囲に及ぶ。本研究では、複数国にまたがる海上コンテナ輸送について、コンテナ船運行モデルを構築し、輸送量の拡大等に伴って発生する遅延や、後続のコンテナ船への遅延の伝播現象のメカニズムの把握を試みる。

Key Words: container shipping, supply chain, delay, offshore waiting, queuing model

1. はじめに

世界の産業・経済がグローバルなサプライチェーンに大きく依存する構造が構築され、複数の国をまたぐ国際海上コンテナ輸送（以下、「コンテナ輸送」という。）がその構造の前提となっている。国際的な水平分業の進行という形で物流の変革を促してきたが、一方で、サプライチェーンに関わる国々が、相互に影響を受ける状況が生まれた。その結果、近年発生するコンテナ輸送の遅延が世界的な産業・経済上の問題になっている。

特に、世界のコンテナ輸送の約 2 割を占めるアジア-北米間において、米国西岸に位置する港湾での荷役機能の低下などの要因から多くのコンテナ船が入港できず、沖待ちを余儀なくされている。こうした状況が長期間継続しており、世界的な規模でコンテナ輸送の混乱が見られる。本研究では、コンテナ輸送における遅延発生と伝播のメカニズムを把握するため、シミュレーションを用いた検討を行う。

以下、2. にて北米航路におけるコンテナ輸送の現状の概要を整理し、3. にてコンテナ船の航行と荷役について待ち行列理論を用いてモデル化し、4. にてシミュレーションを試行する。なお、本稿においてはシミュレーションは試行段階であり、途中経過を報告する。

2. 国際海上コンテナ輸送の概況

(1) 北米航路におけるコンテナ輸送の現状の概要

まず、コンテナの荷動きについて整理する。2020年の荷動き¹⁾は、世界合計で約 155 百万 TEU であり、2000年と比べ約 2.5 倍に伸びている。アジア-北米間では 3.0 倍を超える伸び (8.7→26.4 百万 TEU) であった。図-1 に、2019年以降のアジア-北米間のコンテナ荷動き量を、月

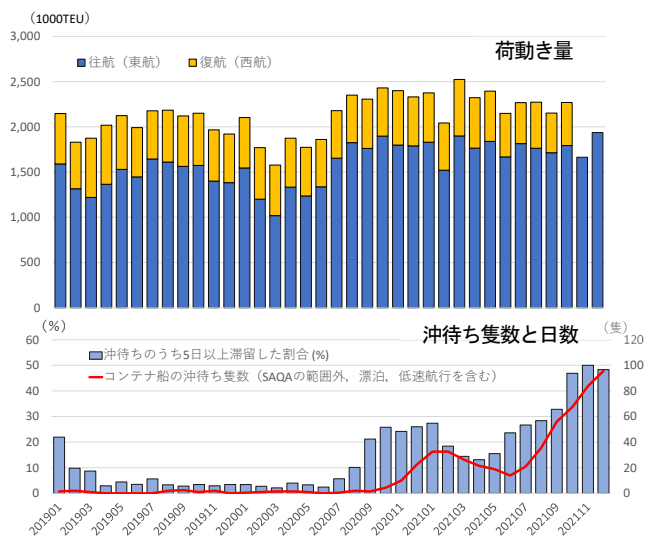


図-1 アジア-北米間の荷動き量と LA 港 LB 港における沖待ち隻数・日数の推移¹⁾²⁾より筆者作成

毎に東航と西航に分けて示す。いずれの月も東航が多く、西航の3倍程度の量に達する。東航の荷動き量は少なくとも過去10年以上にわたり経年的に増加が続いており、その一方で、西航では明確な増減のトレンドが見られないことから、このインバランスは拡大する傾向にある。また、2019年から2020年前半を見ると、2~3月に荷動きが落ち込んで7月~10月にかけてクリスマス需要等による山が見られるという特徴があり、この傾向は2018年以前にも共通していた。しかし、2021年は2~3月の落ち込みが不明瞭であった。

Marine Exchange of Southern California (MESC)²⁾が発表している米国西海岸のロサンゼルス(LA)港とロングビーチ(LB)港におけるコンテナ船の沖待ちの発生状況を、図-1下部に合わせて示している。LA港、LB港は、アジア-北米間の海上輸送の玄関口となっており、両港合わせて米国の輸入コンテナの約4割を取り扱う。図示した隻数は、日々のコンテナ船の沖待ち隻数を月間で平均した値である。2020年半ばまで両港合わせて数隻程度であったが、2020年10月以降沖待ちが増え始め、2021年1~2月にピークを迎えて一旦減少し、同年6月以降には明確な増加傾向となり、2021年12月には月間平均で96隻に達した。

沖待ちの発生状況を前述の荷動き量と合わせて見ると、2020年の前半までに比べて荷動きは増加しているもののそれだけでは沖待ちの急増を説明することはできない。

なお、沖待ちの日数について、Pacific Merchant Shipping Association (PMSA)³⁾が発表しているデータを基にした、LA、LB両港で沖待ちが発生している船舶の中で5日以上の割合を図-1に合わせて示している。2020年以降に着目すれば、沖待ちが5日以上に及ぶ割合は2020年9月~2021年1月にかけてと2021年10月~12月にかけてピークを示しており、の沖待ち隻数よりも若干ピークの発生が早い。2021年11月には50%にも達している。

(2) コンテナ輸送の遅延に関する先行研究

各港湾におけるコンテナ輸送の遅延に関して、先述のMESC²⁾を除いて、ターミナル側で沖待ちの実績値を公表しているところはほぼ見当たらず、船舶側のデータから分析を行う研究が複数行われている。

赤倉⁴⁾は、欧州向けの輸出を対象に、船舶動静データから寄港実績値を基に定時性の実態の分析を行うとともに、輸送の遅れが経済に与える影響の試算を行った。その中では遅れの要因として、コンテナ船の超大型化の進行に伴う荷役の遅れの発生や、運航スケジュールの中で遅れを取り戻すことの難しさなどを挙げている。

赤倉ら⁵⁾は、欧米および中国のコンテナターミナルを対象に、AIS(船舶自動識別装置)のデータを用いて船舶の沖待ちの分析を行い、その結果、港湾が混雑してバ

ース占有率が高くなると急激に沖待ちが増加する傾向があることを明らかにした。

また赤倉ら⁶⁾は、2014~2015年にLA港、LB港で発生した労使交渉をめぐる人為的な混乱を対象として、沖待ちの日数を推定するとともに荷役効率の低下状況について分析を行った。さらに安部ら⁷⁾は、2021年3月時点までの情報を基に、港湾荷役の効率を低下させる種々の要因の一つとして、荷役に従事可能な労働者の減少などに触れている。

これらの研究においては、実績データの分析などから種々の要因の抽出と分析を行い、それらの要因の影響や対策の方向性について述べているものの、コンテナ輸送の遅延の発生に結びつく具体的なメカニズムや、そのメカニズムに基づく遅延対策について論じているものは、筆者の調べた範囲では見当たらない。そこで、次章以降においてコンテナ輸送のモデル化を行いメカニズムの検討を行う。

3. コンテナ輸送のモデル化

(1) モデル化の前提

コンテナ輸送に限らず現代の輸送機関は、輸送効率を高めるために精緻かつ高密度なシステムとして構築されており、その結果、大量かつ効率的な輸送を可能としている。その一方で、十分な余裕を内包することができないという課題も持つ。そのため、何らかの要因による小さな遅延を許容しにくく、また発生した遅延の拡大が生じやすい。赤倉⁴⁾が述べたように、コンテナ輸送においても、運航や港湾での荷役のスケジュールが高密度で組まれており、元々遅延が発生しやすい状況にあると言える。

輸送機関に生じる遅延としては、自動車の走行における渋滞の研究が多い^{例えば⁸⁾}が、自動車は輸送機関であると同時に目的地まで輸送対象自身が走行する「自己駆動粒子」として取り扱われるため、コンテナ輸送と同列では考えにくい。そこで、輸送対象を輸送機関に載せる運ぶ観点で親和性が高いと考えられる列車の走行と遅延を参考に、モデル構築を検討することにする。

列車の走行と遅延に関しては、都市鉄道のように高頻度に運行される列車を対象とした遅延の発生・拡大に関する研究が蓄積されている⁹⁻¹¹⁾。仮屋崎ら⁹⁾は、首都圏の鉄道運行の実績データを基に、列車遅延状況を分析し、遅延の時間的・空間的な拡大について確認した。また仮屋崎ら¹⁰⁾は、遅延の発生・拡大の要因を、①停車時間の増加、②駅間走行時間の増加に分類した。①は駅での停車時間が乗客数の増加に伴って延びるもの、②は高頻度運行に伴って走行時に先行列車との間隔が詰まることに

よるものである。和田ら¹¹⁾は、仮屋崎らの要因分析に基づき、Newell¹²⁾による線形の追従モデルを用いて列車運行のモデル（以下、「和田モデル」という。）を構築した。このモデルによって列車の遅延やダンゴ運転状態を再現し、さらに、車両間隔の制御手法¹³⁾に基づく遅延解消策を提案した。

コンテナ輸送は、コンテナ船（鉄道では列車）がコンテナ（同、人）を載せて港湾の岸壁（同、駅）まで運び、その後は個々のコンテナごとの動きになる、という流れから鉄道輸送と類似する部分が多く、和田モデルの適用の可能性も期待される。しかし、前述の赤倉ら⁹⁾が指摘したように、港湾には複数のバースがある場合が多く、それらの占有率によって遅延の発生状況が異なること、また赤倉ら⁹⁾や安部ら⁷⁾が指摘したように、天候や人為的要因等の様々な要因によって港湾荷役の効率が一定ではないことなどの特性があり、また運行中のコンテナ船相互の間隔の制御を行うことは現実的とは言えず、和田モデルをそのまま適用することはできない。そこで次節において、上記の特性を踏まえたコンテナ輸送のモデルを構築する。

(2) コンテナ船の航行と荷役のモデル化

本研究では、 M か所の港を順に運航する N 隻のコンテナ船（以下、単に「船」という。）をモデル化する。港湾 m におけるバース数 k_m 、各バースにおけるサービス率 μ_m （単位時間あたりの荷役 TEU 数）とする（図-2）。

船 n が港湾 m で荷役を完了して出発する時刻を $T_m(n)$ とすれば、港湾 $m+1$ を出発する時刻 $T_{m+1}(n)$ は次の漸化式によって表現される（図-3）。

$$T_{m+1}(n) = T_m(n) + t_{Am}(n) + t_{Cm}(n) + t_{Wm+1}(n) \quad (1)$$

ここで、 $t_{Am}(n)$ は港湾 $m \sim m+1$ 間の航行時間、 $t_{Cm}(n)$ は港湾 m での荷役時間、 $t_{Wm+1}(n)$ は港湾 $m+1$ で待機が必要となる場合の時間である。

a) 航行時間 $t_{Am}(n)$

港湾 m と $m+1$ の間の距離を L_m 、移動する速度の期待値を v_m とすると、待機が発生しない場合の船 n の航行時間は次式で与えられる。

$$t_{Am}(n) = L_m / v_m \quad (2)$$

b) 荷役時間 $t_{Cm}(n)$

船 n が港湾 m で荷役するコンテナ数を $q_m(n)$ とすると、荷役時間は次式で与えられる。

$$t_{Cm}(n) = q_m(n) / \mu_m \quad (3)$$

なお、荷役時間とともに、離接岸に要する時間 c_{ad} （一定値）を、荷役の前にまとめて付加する（図-4）。

c) 待機時間 $t_{Wm}(n)$

船 n の到着時に、接岸可能なバースがあれば待機は不要であるが、空きがなければ接岸可能となる時点まで待

機することになる。荷役していた船が出港しバースに空きが生じた時点から船 n が入港を開始することとして、前船との離隔時間 c_{sf} （一定値）を確保する。図-4に示したように、バース数 $k_m = 2$ のいずれかに着いていた船のうち船 n が離岸後、船 $n+2$ が接岸できる。

待機時間 $t_{Wm}(n)$ は、先行した船の接岸時刻や荷役時間に依存する。そのため、ここでは以下のようにして導出する。

待機時間 $t_{Wm}(n)$ を求めるために、平衡状態にある状態 r を考える。船の到着率を λ とすると、 $r \rightarrow r+1$ という状態推移（船が到着）、 $r \rightarrow r-1$ という状態推移（荷役が完了）はそれぞれ λ 、 μ の割合で発生することから、状態方程式は次で与えられる。

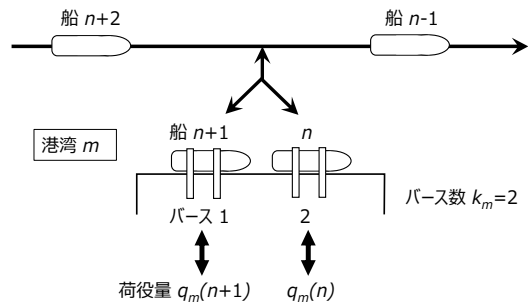


図-2 モデル化における港湾の設定

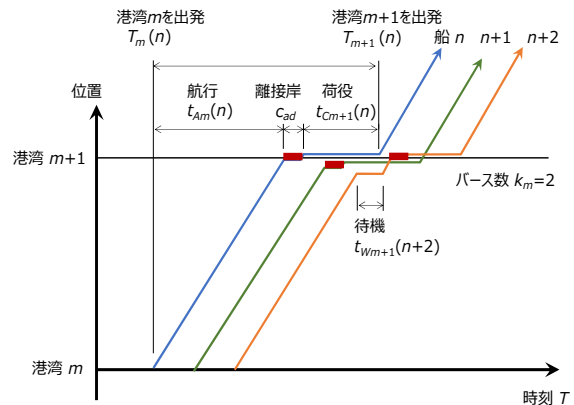


図-3 コンテナ船の運航のモデル化

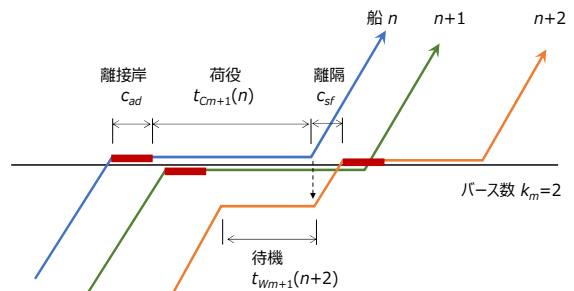


図-4 荷役と待機時間の関係

$$\begin{aligned} \lambda P_0 &= \mu P_1 \\ &\dots \\ \lambda P_{r-1} &= \min(k_m, r) \mu P_r \end{aligned} \quad (4)$$

漸化式を展開すると（付録参照），バースがいずれも使用中である場合の平均待ち時間 $t_{wm}(n)$ は次式で与えられる。

$$t_{wm}(n) = E_0 = \frac{c(c, \rho) 1}{k_m - \rho \mu} \quad (5)$$

以上の a)~c) を式(1)に代入することで、 $T_{m+1}(n)$ を求めることができる。

4. シミュレーションの実施

前章において導いた手法を検証するため、シミュレーションを実施した。表-1 に数値計算におけるパラメータ

表-1 数値計算におけるパラメータ例

項目	記号	相当する数値
港湾数	M	3 港湾
港湾間距離	L	1,000km 相当 (港湾間で一定)
船舶数	N	10 隻が巡回運行
速度	v	300km/日 相当
コンテナ荷役数	q	1 巡当たり平均 3000~8000 個 (正規分布)
荷役効率		2分/個相当

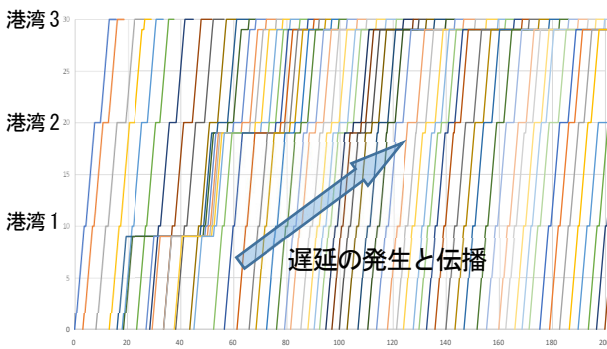


図-5 シミュレーション結果の一例

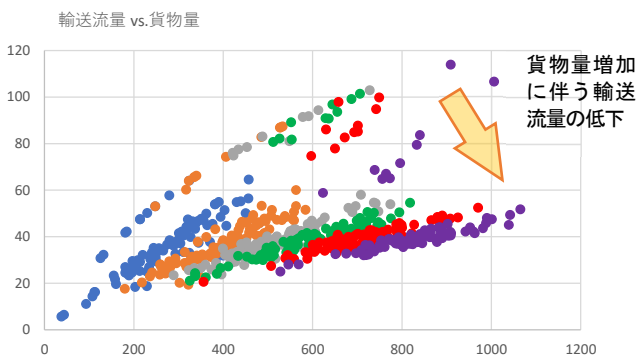


図-6 貨物量と輸送流量との関係の例

の一例を示す。

3か所の港湾に巡回運航する 10 隻の船を対象として、モデル化を行っている。計算結果の一例として船の運航ダイアグラムを図-5 に示す。横軸に時間、縦軸に位置をとっており、図の下から上に運航し、上端に達した船は荷役完了後、再び下から運航を続ける。

図より、2 巡目になるとダイアグラムの線の間隔が変化してくることが確認できる。船相互の接岸や荷役のタイミングが近づくことになり、遅延が発生していることが分かる。また、他の船へ、あるいは次の港湾へと遅延が伝播している様子も見られる。

図-6 は、輸送するコンテナ数の増加に伴う輸送流量の変化を示したものである。図中のプロットは船に対応する。荷役量の多いグループほど、低い値を示しており、コンテナ数の増加に伴って荷役時間が長くなり、待機も増加するため、船の移動に制約が生じることがわかる。

なお、本シミュレーションはまだ改良を進めている途中でであり、今後さらに検討を進めたい。

5. おわりに

本研究においては、北米西岸の港湾における国際海上コンテナ輸送の概況を整理するとともに、待ち行列理論に基づいて、コンテナ船の運航と荷役をモデル化した。そのモデルに基づき、長期化する遅延の発生と伝播のメカニズムを、シミュレーションにより検証する手法を検討した。本研究はまだ途中経過ではあるものの、現時点までに遅延の発生と伝播を再現できる可能性は確認できた。

沖待ちが長期間継続する状況は、世界の産業・経済に対して極めて大きな影響を及ぼしており、早期解消が望まれる。それと同時に、今後の物流のあり方に対して課題を投げかけられているとも言えよう。

今後、さらに具体的なコンテナの動きを踏まえた分析を進めていきたい。

謝辞：本研究を進めるに当たり、所属寄附講座における関係者から大変貴重な示唆をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

付録 アーランの C 式より平均待ち時間の導出

$\rho = \lambda/\mu$ とおくと、式(4)より次の漸化式が得られる。

$$P_r = \frac{\rho}{\min(r, k_m)} P_{r-1} \quad (r=1, 2, \dots) \quad (6)$$

式(5)より、

$$P_i = \frac{\rho^i}{i!} P_0 \quad (0 \leq i \leq k_m) \quad (7)$$

$$P_i = \frac{\rho^{km}}{i!} P_{km} \quad (i > k_m) \quad (8)$$

次の正規化条件に代入する。

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i = 1 \quad (9)$$

これより、次の P_0 が得られる。

$$P_0 = \left[\sum_{i=0}^{k_m-1} \frac{\rho^i}{i!} + \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\rho}{k_m} \right)^i \frac{\rho^{k_m}}{k_m!} \right]^{-1} \quad (10)$$

ここで、 $\rho = \lambda/\mu < k_m$ の時に限って次式は収束する。

$$\sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\rho}{k_m} \right)^i = \frac{k_m}{k_m - \rho} \quad (11)$$

よって、次の定常解が得られる。

$$P_0 = \left[\sum_{i=0}^{k_m-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{k_m}{k_m - \rho} \frac{\rho^{k_m}}{k_m!} \right]^{-1} \quad (12)$$

$$P_r = \frac{\rho^r}{r!} P_0 \quad (0 \leq r \leq k_m) \quad (13)$$

$$P_r = \left(\frac{\rho}{k_m} \right)^{r-k_m} \frac{\rho^{k_m}}{k_m!} P_0 \quad (r > k_m) \quad (14)$$

船が到着した時にバースが全て荷役中である確率は、次式のアーラン C 式¹⁴⁾で表される。式(13)より導かれる。

$$\begin{aligned} C(k_m, \rho) &= \sum_{i=k_m}^{\infty} P_i \\ &= \sum_{i=k_m}^{\infty} \left(\frac{\rho}{k_m} \right)^{i-k_m} \frac{\rho^{k_m}}{k_m!} P_0 \\ &= \frac{1}{1 - \frac{\rho}{k_m}} \frac{\rho^{k_m}}{k_m!} P_0 \end{aligned} \quad (15)$$

これ式(15)とリトルの公式より、平均待ち時間 E_0 は次式となる。

$$E_0 = \frac{c(c, \rho)}{k_m - \rho} \frac{1}{\mu} \quad (16)$$

参考文献

- 1) (公財)日本海事センター：海上荷動きの動向一覧，
<https://www.jpmac.or.jp/relation/> (閲覧: 2022.2.21.)

- 2) Marine Exchange of Southern California (MESC): Anchorages Report. (閲覧: 2022.3.2.)
3) Pacific Merchant Shipping Association (PMSA), West Coast Trade Report, <https://www.pmsaship.com/trade-reports/> (閲覧: 2022.3.2.)
4) 赤倉康寛：国際海上コンテナ輸送の定時性の把握・分析と影響試算，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.74, No.2, pp.I_318-I_323, 2018.
5) 赤倉康寛，高橋宏直：世界のコンテナターミナルにおける船舶の沖待ち時間の把握・分析，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.77, No.2, pp.I_157-I_162, 2021.
6) 赤倉康寛，小野憲司：米国西岸港湾の混乱による国際海上コンテナ輸送への影響に関する基礎的研究，土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.72, No.2, pp.I_1005-I_1110, 2016.
7) 安部智久，上田剛士：新型コロナウイルスパンデミック下におけるロジスティクス対応に関する一考察，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.77, No.2, pp.I_187-I_192, 2021.
8) Katsuhiko Nishinari, Daisuke Takahashi: Multi-value cellular automaton models and metastable states in a congested phase, Journal of physics. A, Mathematical and General, Vol.33 No.43 pp.7709-7720, 2000.
9) 仮屋崎圭司，日比野直彦，森地 茂：都市鉄道の列車遅延の拡大メカニズムに関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.27, No.4, pp.871-879, 2010.
10) 仮屋崎圭司，日比野直彦，森地 茂：列車間隔に着目した運行遅延に関するシミュレーション分析，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.67, No.5, pp.I_1001-I_1010, 2011.
11) 和田健太郎，吉相俊，赤松 隆，大澤 実：高密度鉄道ダイヤにおける列車集積化を抑制する運行制御方策，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.68 No.5, pp.I_1025-I_1034, 2012.
12) Newell, G. G.: A simplified car-following theory - a lower order model, Transportation Research B, Vol.36, No.3, pp.195-205, 2002.
13) Carlos F. Daganzo: A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons, Transportation research Part B, Vol.43, No.10, pp.913-921, 2009.
14) 大石進一：「待ち行列理論」，コロナ社，2003.

(Received ????, 20??)

(Accepted ????, 20??)

SIMULTANEOUS ANALYSIS OF THE OCCURRENCE AND PROPAGATION OF DELAYS IN INTERNATIONAL MARITIME CONTAINER TRANSPORT.

Shogo MIYAJIMA, Kyoko OKAMURA

In recent years, delays in international maritime container transport have become an issue. In industries and economies that are highly dependent on globally deployed supply chains, the impact is widespread in

the countries involved in the supply chain, even the delay occurred in limited ports. In this study, we build a model of container vessel operation for shipping containers across several countries, and understand the process of delays that occur as a result of increased transport volumes and the spread of delays to subsequent container vessels..