

地方港のコンテナ・ターミナルにおける ゲート処理能力向上策の提案

神田 忠士¹・大西 秀樹²・瀬木 俊輔³・元野 一生⁴

¹正会員 国土交通省四国地方整備局高松港湾・空港整備事務所長（〒760-0011 高松市浜ノ町72番9号）
E-mail:kanda-t88s3@mlit.go.jp

²非会員 国土交通省四国地方整備局港湾危機管理官（〒760-8554 香川県高松市サンポート3-33）
E-mail:oonishi-h88s3@mlit.go.jp

³正会員 京都大学工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
E-mail:segi.shunsuke.6e@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 国土交通省中部地方整備局（〒460-8517 名古屋市中区丸の内2丁目1番36号）
E-mail:motono-i88s3@mlit.go.jp

大都市のみならず地方のコンテナ・ターミナルにおいても、ゲート前にトレーラーの待ち行列が発生している。本研究では、高松港をケースに、待ち行列シミュレーションモデルを構築し、混雑抑制策の効果を同シミュレーションモデルで計算した。現地調査の結果、トレーラーの到着台数は100パーセンタイル値で111台/日。ゲートの処理時間は平均156.1秒で「裾の重い分布」形状を示すことを確認した。年間のトレーラーの待機時間約2,750時間、社会損失額約3,690万円を算出した。

また、待機車両の発生を簡便に評価するためゲート利用率の活用を提案した。実測処理時間の平均値を利用して計算すると、ゲート利用率0.8が閾値となることを確認した。最後に、レーンの増設、ゲート処理時間の短縮、入構台数の割り当てなど時間短縮効果と適用可能性を検討した。

Key Words : *container terminal, gate congestion, queueing model, container trailer*

1. はじめに

近年、コンテナ・トレーラー（以下「トレーラー」と略す）のコンテナ・ターミナル（以下「ターミナル」と略す）への入出構に深刻な混雑が発生している。ターミナル前の混雑は、待機するトレーラー運転手（以下「運転手」と略す）の時間を浪費するだけでなく、渋滞による近隣交通にも影響を与えかねず、社会的な問題となっている。またこの現象は、大都市のターミナルだけでなく、地方のターミナルでも発生が報告されるようになってきた。

また、運転手の待機時間は、単に運転手の労働時間を徒に費やすといったことだけでなく、運転手の不足が深刻になっている現状も相まって、我が国の物流の効率化にも逆行する事態でもある。

しかしながら、地方のターミナル・オペレーター（以下「オペレーター」と略す）は、コンテナ取扱量も少なく経営基盤も脆弱なため、料金徴収のない陸側ゲート

（以下「ゲート」と略す）の混雑対策のための設備投資に慎重にならざるを得ない状況にある。また、ゲートの処理能力の評価方法やゲート処理能力向上方策について定まったものはなく、どのような方策を採るかはオペレーターに任されている現状にある。

このため、著者らは、高松港コンテナターミナル（3.7万TEU、2016年）を事例に、地方のターミナルにおけるゲート混雑によるトレーラーの待機時間、および社会的損失額を算出し、具体的なゲート処理能力向上策を提案しようとするものである。この検討結果をもとに、他のコンテナ取扱量の少ないターミナルでのゲート処理能力向上策の普及の一助とするものである。

2. 既存文献でのゲート処理能力向上方策の評価

ゲートでは、構内に進入する運転手が持参する書類やコンテナの照合確認などが行われる。ターミナルのゲート処理能力は、待ち行列理論に基づくゲートの利用率¹⁾

で説明できる。ゲート利用率が 1.0 を超えると渋滞が発生する。渋滞の発生を抑制するには、ゲートへのトレーラー到着率 (λ)、ゲートのレーン数 (s)、またはレーン当たりのサービス率 (μ) を制御する方法がある。

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} \quad (1)$$

ρ : ゲートの利用率 (%)

λ : ゲートへのトレーラー到着率

[時間当たりトレーラー到着台数] (台/時間)

s : ゲートのレーン数

μ : レーン当たりのサービス率

[時間当たりゲート処理台数] (台/時間)

まず、ゲートのレーン数 (s) を追加することで、ゲートの処理能力を向上させることである。レーン数を追加するに足る交通量が発生していないと、過剰な投資となる。Guan and Liu²⁾は、NY/NJ港をケースに、ゲート運営費用(レーン数と、そこに配置される検査員数とその時間単価に代表される)と、ゲート混雑により発生するトレーラーの時間費用とは、トレードオフの関係にあるが、この総費用の最適化をシミュレーションにより求めている。高松港には入構用のレーンは一つしかないため、レーン数の追加設置と検査員の配置に要する費用と混雑の社会的費用とを比較することになる。

第二に、ターミナルのゲート処理時間 ($1/\mu$) の短縮である。ゲート処理時間の値が公表されたターミナルは限られている。元野ら³⁾の文献調査によると、トレーラー1台当たりの平均のゲート処理時間は最大で225.0秒、最小で14.9秒と開差が大きい(表-1)。博多港は、ゲート管理にコンテナ搬出入情報の統合システムHiTS (Hakata Port Logistics IT System) を接続し、ゲートブースにタッチパネルを導入。運転手にコンテナ情報を事前登録したIDカードを携帯させることで、ゲート処理時間の短縮を図っている³⁾。

表-1 ターミナル別にみたトレーラー入構時のゲート処理時間

ターミナル名	ゲート処理時間 (秒)
博多港 IC ターミナル (HiTS 導入後) ³⁾	53.2
名古屋港 TCB ターミナル (集中管理ゲート導入前) ³⁾	158.4
名古屋港 TCB ターミナル (集中管理ゲート導入後) ³⁾	14.9
横浜港本牧ふ頭 BC ターミナル (コンテナ搬入時) ⁴⁾	120.0
国内 A 港 A ターミナル (コンテナ搬入時) ⁵⁾	225.0
New York/ New Jersey 港 B ターミナル (入構) ⁶⁾	146.4

注) 博多港は、輸出コンテナ(実入、空)を搬入、または輸入コンテナ(実入、空)の搬出のために入構しようとするトレーラーのゲート処理時間の平均値。名古屋港は、輸出コンテナ(実入)を搬入するトレーラーのゲート処理時間の平均値である。

出典) 参考文献番号 3)4), 5), 6)を基に著者らが整理したもの。

名古屋港では、ターミナル毎のゲート処理を廃止し、一元的にゲート処理を行う集中管理ゲートを2011年に導入。個々のターミナル・ゲートではトレーラーはゲート処理なし(通過に要する時間は平均14.9秒)で通過できるように混雑を解消している³⁾。

第三は、時間当たりトレーラー到着台数(分子: λ)を制御することである。制御する方法として、一つは、ターミナル予約システム TAS (Terminal Appointment System) を導入し時間当たりトレーラー到着台数をあらかじめ割り当てることで到着台数を制御する。または、ゲート運営時間を拡大し時間当たりトレーラー到着台数を分散させる方法がある。TAS は、カナダの Vancouver 港⁷⁾、英国 Southampton 港⁸⁾、豪州 Botany 港⁹⁾などで導入され一定の成果を収めている。また、ゲート運営時間を早朝や夜間、昼休み時間への拡大することの試みも始まっている。LALB 港は、ピーク時間帯の搬出入トレーラーに対しての交通緩和料金を課し、オフピーク時間帯の利用を促す PierPASS プログラムを 2005 年に導入。一定の成果を上げている¹⁰⁾。NY/NJ 港でも同様の取り組みを行った¹¹⁾。しかし、時間外作業による割増料金が課せられることや、コンテナの受け取りが深夜になることへの影響も指摘されている。

以上の混雑軽減策は、コンテナ取扱量の多い港湾での報告である。コンテナ取扱量の少ない地方の港湾でこれらの混雑軽減策が有効かどうかの議論はなされていない。

このため、本研究では、高松港コンテナターミナルをケースに、トレーラーのゲートへの到着交通量とゲート処理時間を現地調査し、ゲートの処理能力を評価するとともに、待機時間の改善策を提案するものである。3章では、ゲートに入構しようとするトレーラーの時間帯別の到着交通量とゲート処理に要する時間(以下「処理時間」と称する)を現地調査し、これらの特徴を把握する。4章では、待ち行列理論にもとづいたシミュレーションモデルを構築し、年間あたりのトレーラーの待機時間の延べ時間数と、その社会的な損失額を算定する。また待機時間の抑制に向けた対策を提案し、その効果をシミュレーションモデルを用いて検証する。5章では、まとめとして、研究の考察と待機時間の抑制に向けた改善点を整理する。

3. ゲートに入構するトレーラーの交通特性とゲートの処理能力

(1) ゲートでの入構手続きの概要

まず、調査を行う高松港コンテナターミナルの概要を紹介する。同ターミナルは2016年に3.7万TEUの取り扱いがある。ターミナルの規模は、水深マイナス10メートル

の岸壁2バース，ヤード面積4.2ha。主要な荷役機械は，ガントリークレーン1基，ハーバークレーン1基，ストラドルキャリア2基。週当たりの航路数は，釜山トランシップ航路4便，中国航路2便，神戸フィーダー航路1便の計7便である。(図-1)

ゲートのレーン，入構用，出構用にそれぞれ1レーンが用意されている。トレーラーのゲート確認手続きは，入構目的(実入りコンテナの搬入・搬出，空コンテナの搬入・搬出)ごとに異なる(表-2)。

ゲートでの手続きは，港湾保安の確保のための「三点確認(本人・所属・目的の確認)」と，コンテナの引き取りや受け取りを行うため運転手の持参する書類とオペレーターが持つ情報を照合する「照合確認」の手続きがある。ゲートでの手続きの流れは，次のとおりである。(図-2)

- a) まず三点確認のうち目的確認を行う。運転手は検査員に持参書類を提示し，入構目的を告げる。



図-1 高松港コンテナターミナルのレイアウト

- b) 本人確認，所属確認は，運転手が降車し，PSカードをゲート事務室前に設置したカードリーダーにかざして，PSカードの情報が正確なものかどうかを確認する。PSカードは，国土交通省が発行する認証カードで，氏名，所属，写真が示され，全国の港湾で利用できる。
- c) 三点確認を終えた運転手は，照合確認の手続きに入る。手続きは，運転手がゲート事務室に赴き，事務所備え付けPCにコンテナ引き渡し番号やフォワーダー名を入力しオペレーターの持つ情報との照合確認を行う。
- d) 以上の手続きの後，運転手はヤード内にトレーラーを入構させ，目的のコンテナ・スロット位置に行くことができる。ゲートイン手続きで入力された情報は，ヤード内の荷役機械のオペレーターに共有され，コンテナの積み卸ろしがなされる。

(2) ゲート処理時間の把握と特性

個々のトレーラーのゲート処理時間を計測する。具体的には，ゲートに入構するトレーラーの三点確認と照合確認に要する時間にかけて入構するトレーラーごとに計測する。また，トレーラーの入構目的も記録する。処理時間の計測は，繁忙期ではない2017年6月19日(月)から23日(金)の5日間とした。

表-2 トレーラーの入構目的と三点確認の確認項目

入構目的	ゲートで三点確認の確認項目
実入コンテナ搬入	1) 人物確認(本人確認，所属確認) 2) コンテナ貨物搬入票確認(目的確認)
実入コンテナ搬出	1) 人物確認(本人確認，所属確認) 2) コンテナ引取り表確認(目的確認)
空コンテナ搬入	1) 人物確認(本人確認，所属確認) 2) 搬入表なし，口頭で目的確認 3) 空コンテナ内部の確認
空コンテナ搬出	1) 人物確認(本人確認，所属確認) 2) コンテナ引取り表確認(目的確認)



トラックを降車しゲート横のカードリーダーにPSカードをかざし，確認。目的確認は，警備員にトラック席上から口頭説明。

ゲート横の管理事務所に備え付けのPCに貨物情報，荷主情報などを入力。コンテナ情報を照合の上，必要な書類を受理。

トラックに乗車し，ゲートを通りヤードへ進む。

図-2 高松港コンテナターミナルでの三点確認，照合確認の流れ

三点確認、照合確認に要した時間を表-3に示す。全車種のトレーラー381台の平均の処理時間は、三点確認に平均70.1秒、照合確認に86.0秒、合計の処理時間に156.1秒を要している。合計の処理時間の標準偏差は68.0秒、変動係数も0.436とばらつきの大いことがわかる。

次に、処理時間帯別のトレーラーの台数を図-3に示す。処理時間に長時間要するトレーラーも存在し、「裾の重い分布」形状を示していることがわかる。処理時間に長時間を要するトレーラーが存在する理由は、オペレーターによると、運転手がPSカードを携帯していなかったり、持参した書類と事前に登録したデータの不一致などによるものと考えられる。

また、車種別の平均の処理時間は、実入りコンテナ搬入174.9秒、空コンテナ搬入156.4秒、シャーシのみの入構132.2秒である。これは、入構するトレーラーの確認内容が一部異なることによるものと考えられる。

(3) ゲートに入構するトレーラーの交通特性

まず、時間帯別のトレーラーの交通量を整理し、交通の発生特性をみる。入構するトレーラーの入構目的（コンテナは実入りか空コンテナか、コンテナの搬入か搬出か）別のシェアも確認する。

表-3 三点確認、照合確認に要する時間

	三点確認	照合確認	処理時間計
平均値(秒)	70.1	86.0	156.1
最大値(秒)	362.0	307.0	471.0
最小値(秒)	10.0	8.0	37.0
標準偏差(秒)	34.0	54.1	68.0
変動係数	0.485	0.629	0.436

表-4 ゲートに到着した曜日ごとのトレーラー台数

日	6/19 (月)	6/20 (火)	6/21 (水)	6/22 (木)	6/23 (金)	計	平均
台数	87	78	88	66	62	381	76.2

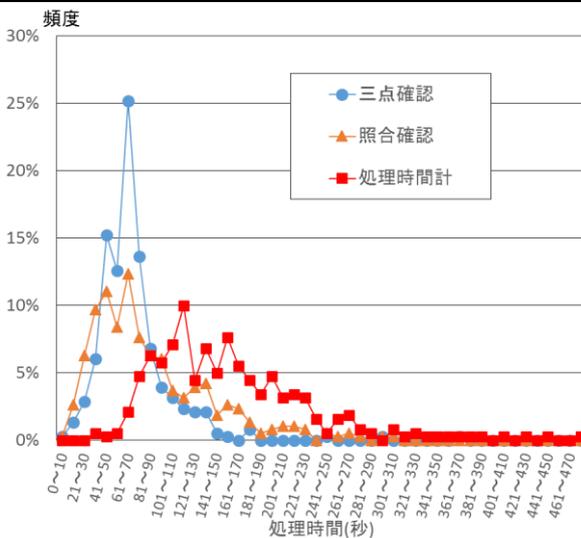


図-3 ゲート処理時間帯別の処理時間の頻度分布

ゲートに到着した曜日ごとのトレーラーの台数を表-4に示す。一日当たり62~88台で推移し、一日平均76.2台である。

一日当たりのゲート到着したトレーラーの時間帯別分布を表-5に示す。

ゲートの運用時間は8時30分から16時30分。11時30分から13時は昼休みとなり、三点確認、照合確認は行われない。11時から11時30分にかけて一日のピークとなる10.0%の到着がある。午後は13時30分から14時にかけて二つ目のピークを迎え、以降は減少していくことが分かる。午前中に全体の56.7%、午後は43.3%の到着となる。

次に、一年間のゲート混雑の総時間を算出するため、平成28年4月から29年3月までの1年間の日々の入構台数を整理した。一年間365日の内訳は、月曜日から金曜日のフル稼働日の日数は239日、土曜日の半日稼働日の日数は47日、日曜・祝祭日の休止日の日数は79日である。トレーラーの総入構台数は20,585台であった。休止日を除いたフル稼働、半日稼働日の計286日間における入構台数のパーセンタイル値を表-6に示す。これによると、日当たりの入構台数は最小値24台から最大値111台となる。また、処理時間の計測を行った6月19日から23日の平均台数(76.2台/日)は、50パーセンタイル値(75台/日)に近いことが確認された。

表-5 トレーラーのゲート到着の時間帯別分布(単位:台)

到着時間	実入 コン テナ	空 コン テナ	シャ ーシ のみ	合計	
				台数	シェア
8:30 ~ 9:00	2.0	2.0	2.6	6.6	8.7%
9:00 ~ 9:30	2.0	2.8	2.4	7.2	9.4%
9:30 ~ 10:00	2.6	2.4	1.8	6.8	8.9%
10:00 ~ 10:30	1.6	2.0	1.8	5.4	7.1%
10:30 ~ 11:00	1.8	3.8	1.6	7.2	9.4%
11:00 ~ 11:30	1.8	3.4	2.4	7.6	10.0%
11:30 ~ 12:00	1.4	1.0	0.0	2.4	3.1%
12:00 ~ 12:30	0.0	1.6	0.2	1.8	2.4%
12:30 ~ 13:00	0.2	0.6	0.2	1.0	1.3%
13:00 ~ 13:30	1.6	2.0	1.0	4.6	6.0%
13:30 ~ 14:00	1.4	3.4	2.6	7.4	9.7%
14:00 ~ 14:30	1.6	2.6	1.8	6.0	7.9%
14:30 ~ 15:00	1.6	2.4	0.4	4.4	5.8%
15:00 ~ 15:30	1.4	1.2	0.2	2.8	3.7%
15:30 ~ 16:00	1.8	1.2	0.0	3.0	3.9%
16:00 ~ 16:30	1.2	0.4	0.4	2.0	2.6%
合計	24.0	32.8	19.4	76.2	100.0%

表-6 トレーラーの年あたりのパーセンタイル別入構台数

Percentile	0	10	20	30	40	50
台数/日	24	41	59	68	72	75
Percentile	60	70	80	90	100	-
台数/日	79	83	87	91	111	-

4. ゲート処理のシミュレーション・モデルの構築と混雑予測

(1) シミュレーション・モデルの概要

ゲートの処理能力を評価する待ち行列シミュレーション・モデルは、離散イベントシミュレーション (discrete event simulation) モデルとして構築した。モデル内のトレーラーの動きは以下の通りである。トレーラーのゲートへの到着は、ポアソン過程に従い発生する。トレーラーの待ち行列はフォーク並びであり、行列先頭のトレーラーは、空いているゲートに入り処理を行う。空いているゲートが無い場合は、ゲートが空くまで待機する。ゲートの処理時間は不確実性を有しており、所与の確率分布に従う。処理を終えたトレーラーは入構し、モデル内から退出する。

以上のトレーラーの動きは、一般的な M/M/c 待ち行列モデルと同じである。他方、本研究のモデルは、より現実的な状況を表現するために、下記のような拡張を行っている。

- a) 一日を 8:30-9:00, 9:00-9:30, ..., 16:00-16:30 の合計 16 個の時間帯に区分し、各時間帯ごとにトレーラーの到着率を設定できるようにした。各時間帯内において到着率は一定であり、時間帯が切り替わる時刻において不連続に変化する。厳密に定義すると、現在時刻 t が時間帯 i に含まれるとき、次にトレーラーが到着する時刻 t の確率密度関数 $f(t)$ は、式(2)、式(3)で与えられる。ただし、 λ_j は時間帯 j の到着率を、 b_j は時間帯 j の開始時刻を、 Φ_j は時刻 t から時刻 b_j までの間にトレーラーが到着しない確率を表す。

$$f(t) = \begin{cases} \lambda_i \exp[-\lambda_i(t-t_c)] & (t < b_{i+1}) \\ \Phi_j \lambda_j \exp[-\lambda_j(t-b_j)] & (b_j \leq t < b_{j+1}, j > i) \end{cases} \quad (2)$$

$$\Phi_j = \exp\left[-\lambda_i(b_{i+1}-t_c) - \sum_{k=i+1}^{j-1} \lambda_k(b_{k+1}-b_k)\right] \quad (3)$$

- b) 16:30 以降にはトレーラーは到着しないため、基本的にはこの時刻にシミュレーションを終了する。ただし、16:30 の時点でトレーラーの待ち行列がある場合には、それらの全てのトレーラーの処理が完了してからシミュレーションを終了する。
- c) 11:30-12:00, 12:00-12:30, 12:30-13:00 の時間帯はゲートの昼休み時間であるため、これらの時間帯はトレーラーの新規のゲート処理を行わない。これらの時間帯に到着したトレーラー、および 11:30 以前に到着したが 11:30 までにゲート処理を始められなかったトレーラーは、13:00 まで待ち行列を作り待機する。ただし、11:30 の時点で処理中のトレーラーがあるゲートは、ゲート処理を終えてから休憩

時間となる。

- d) ゲートの処理時間が従う確率分布は、ノンパラメトリックなヒストグラムによって与える。0-10 秒, 10-20 秒, 20-30 秒, …のように複数の階級を作成し、各階級の度数を設定する。処理時間 τ の累積分布関数 $G(\tau)$ は式(4)で与えられる。ただし、 P_i は階級 i の度数を、 l_i は階級 i の左端の数値を、 r_i は階級 i の右端の数値を、 N は総階級数を表す。

$$G(\tau) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{i-1} P_j + \frac{\tau-l_i}{r_i-l_i} P_i & (l_i \leq \tau < r_i) \\ 1 & (\tau \geq r_N) \end{cases} \quad (4)$$

- e) 待機時間(1 日に入構した、すべてのトレーラーの待機時間の合計、以下同じ)や待ち行列に並んだトレーラーの台数(行列の長さの目安になる、以下、待機台数)などの平均値を計算する際には、一日のシミュレーションを 1,000 回行ったうえで、この 1,000 回分のシミュレーション結果を用いて計算を行う。これにより、不確実性による平均値の偏りを低減できる。

以上、a)~e)の拡張により、待機時間は時間帯毎に算出された到着率と当該時間帯における一台あたりの待ち時間との積を合計したものととなる。

(2) シミュレーション・モデルによるゲートでのトレーラーの待機時間の算出

a) 年間のトレーラーの待機時間と社会的損失の算出

(1)で構築したシミュレーション・モデルを用い、ゲートでのトレーラーの待機時間を算出する。この際、混雑の程度は一日の入構台数に応じて異なることから、表-6に示した11通りの入構台数の各々についてシミュレーションを行う。

まず、ゲートの処理時間分布には、三点確認と照合確認に要した処理時間のヒストグラムを用いる。トレーラーの時間帯別到着率は、表-6のパーセンタイル別入構台数を表-5の到着時間シェアで割り振った数値とする。これらのデータをシミュレーション・プログラムに入力して、各パーセンタイル (0,10,20,30, …, 90,100) に対応する待機時間を算出する。

次に、年間の待機時間(以下、年間待機時間)は、隣り合うパーセンタイルごとに平均待機時間を計算し、区間日数28.6日を乗じ、これらの合計を算出することで求める。なお、区間日数28.6日は、年間のゲート運営日数(286日)を、シミュレーションに使ったパーセンタイル区間(10)で除して得ている。今回の試算では、年間待機時間は約990万秒(約2,750時間)を得た(表-7)。

待機時間の発生による年間の社会的損失額の算出は、年間待機時間に、実勢のコンテナ輸送運賃から算出したトレーラーの時間単価(3.73円/秒)を乗じて求める。年間

の社会的損失額は約3,690万円に上るとの結果を得た。

トレーラーの時間単価については、高松港コンテナターミナルを利用する港運会社に、40ftコンテナ1本あたりの運賃の見積り〔コンテナ取り扱い実績の多い荷主数社を想定し、輸送距離(数パターン)とコンテナ数量(年あたり)を条件付けた仮想的なもの〕を徴収した上で、インターネットで公開されているナビゲーションソフトを用い、輸送の所要時間をそれぞれ算出し、輸送距離毎に異なる時間単価の平均を算出した。

b) 入構台数の増加による混雑の爆発的な増加

次に、コンテナの取扱量が増えて、入構するトレーラーの台数が増えた場合のゲート前の混雑をシミュレーションした。現状での日あたり最大入構台数111台を上回る、150台び200台の頻度で入構した場合、待機時間は、111台の場合の101,107秒(約28時間)に対し、それぞれ429,035秒(約119時間)、1,385,999秒(約385時間)と急激に増加することになり、近隣交通に大きな影響を及ぼすことが予想される(図-4)。このことは、混雑が顕在化する前に対策を講ずることの必要性を示唆するものである。

c) ゲート利用率からみた待機台数の変化

また、トレーラーの到着台数から得られるゲートの利用率(ρ)と、シミュレーションにより得られる待機台数

との関係を見る。ゲートの利用率(ρ)は(1)式により得られる。トレーラーの到着台数は、30分ごとの総数とする。レーン数(s)は1とする。サービス率(μ)は、処理時間の平均値の逆数である。図-3に示した処理時間の分布から平均値を計算すると、 $\mu=156.1$ 秒/台となる。

到着台数が100パーセンタイル値(111台/日)における、ゲート利用率と待機台数を図-5に示す。ゲート処理が始まる午前8時半に、ゲート利用率が0.8を超え混雑が発生し始める。10時にゲート利用率が0.7に落ちると待機台数の減少が見られる。10時半にはゲート利用率が1.0を超え、再び待機台数が増加する。11時半から13時までの入構台数が減りゲート利用率は0.3を下回るものの、昼休みを迎えゲート処理が行われないことから、待機台数は増加し一日のピークの10台を記録する。午後は、一時的にゲート利用率が1.0を超えるがその後は減少し、それに合わせて待機台数も減少している。

また、今後、ターミナルでのコンテナ取扱量が増え、一日あたりの到着台数も増加した場合における、ゲート利用率と待機台数との関係を見る(図-6)。入構台数が150台/日に増えた場合のシミュレーションを行った結果、同じようにゲート利用率が0.8を越える時間帯では待機台数が増加し、下回る時間帯では待機台数の減少していくことが確認できる。ゲート利用率の値が大きくなるにつれ待機台数の増加の割合が高くなる傾向が見られる。休み時間に入構するトレーラーは、そのまま待機台数に加算されていくこともわかる。

表-7 パーセンタイル毎のトレーラーの待機時間

パーセンタイル	待機時間(秒/日)	区間平均(a)	区間日数との積(a)×28.6
0%	6,119		
10%	12,066	9,093	260,046
20%	20,235	16,150	461,893
30%	26,435	23,335	667,371
40%	29,285	27,860	796,787
50%	31,914	30,599	875,140
60%	35,816	33,865	968,543
70%	40,095	37,956	1,085,536
80%	45,031	42,563	1,217,302
90%	51,687	48,359	1,383,060
100%	101,107	76,397	2,184,954
年間待機時間(秒/年)			9,900,630

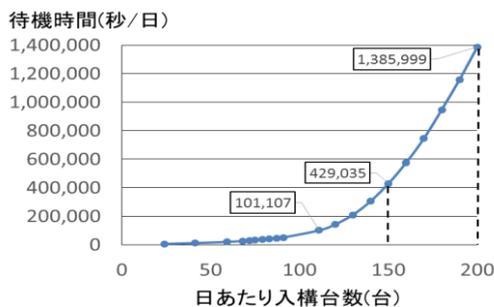


図-4 日あたり入構台数に対する待機時間の変化

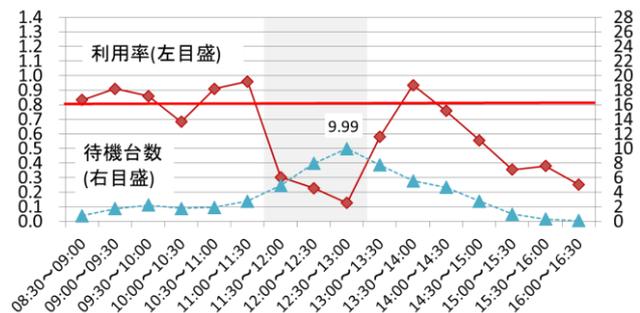


図-5 時間帯ごとのゲート利用率と待ち行列の待機台数の変化 (入構台数111台/日の場合)

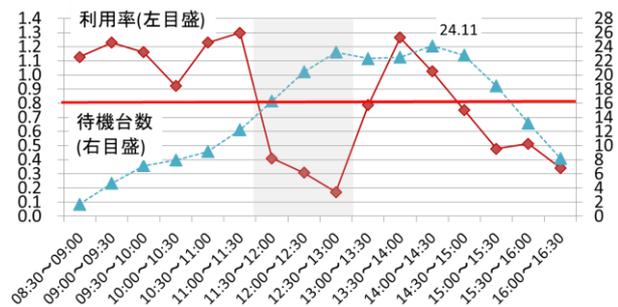


図-6 時間帯ごとのゲート利用率と待ち行列の待機台数の変化 (入構台数150台/日の場合)

この二つの分析から、ゲート利用率を待機の発生しない閾値（ここでは0.8）以下に抑え、トレーラーの到着台数を制限することで待機車両の発生を抑制できると考える。また、昼休み時間帯（11時30分から13時）にゲート処理を行えるようにすると、待機台数の減少に貢献できるとも考える。

(3) 混雑抑制策の適用と効果分析

2章の冒頭に述べたとおり、混雑抑制策を適用して、効果を分析する。

a) ゲートでのレーンの増設

まず、入構台数の増加に合わせてゲートのレーン数を増やす。レーンの数を、現行の1基から、2基、3基と増やすと、待機時間は、100パーセント値で現行の約101,100秒/日から約29,900秒/日、約26,000秒/日とそれぞれ減少する（図-7）。年間待機時間は約990万秒（約2,750時間）から、それぞれ約506万秒（約1,405時間）、約467万秒（約1,297時間）と減少する。このことから、レーン数を1基から2基へ増設したことによる待機時間の減少幅は大きく、混雑抑制に効果的であることが分かる。なお、2基から3基への減少幅はわずかであり、効果的ではない。これは現在の入構台数であれば、ゲート2基で対応できる量（言い方を変えれば、3基目のレーンは他に比べ稼働が少ない状態）であることを示している。

また、100パーセント値でレーン数を1基から2基へ増設したことによる待機時間の減少幅が特に大きくなっている点について、レーン1基でのパーセント毎の待機時間を詳しく見る。図-8は待機時間を発生した時間帯毎に色分けしたものである。これを見ると、入構台数が多くなる100パーセント値で午前と午後の時間帯の待機時間が大幅に増えていることが分かる。表-5のトレーラーの到着時間分布と合わせてみると、昼休み直前の時間帯にゲートに到着したトレーラーの一部が処理されずに昼休みを挟んで午後まで手続きが出来ず、その後も午後に入構台数のピークと相まって混雑が解消されない様子がうかがえる。したがって、レーンを2基に増設することで、午後まで処理を持ち越すことなく、円

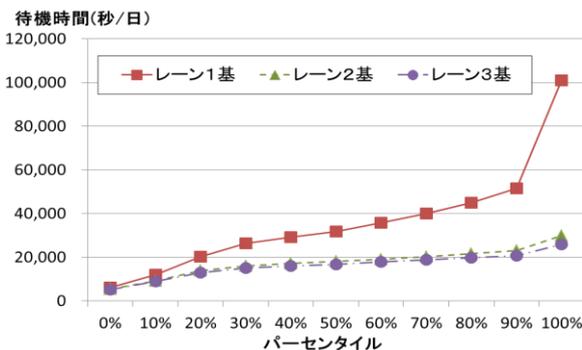


図-7 レーンの増設による待機時間の減少

滑に入構手続きが行われていると考えられる。

レーン増設の社会的便益は、待機時間短縮の時間価値の割引現在価値として評価できる。年間待機時間が一定に留まると考えると、検討年数50年間の場合、レーンの数を1基からn基に増やす社会的便益 B_n は以下の式で計算できる。

$$B_n = \sum_{t=1}^{50} \frac{\beta(W_1 - W_n)}{(1+\rho)^{t-1}} \tag{5}$$

$$= \frac{1+\rho}{\rho} \left[1 - \frac{1}{(1+\rho)^{50}} \right] \beta(W_1 - W_n)$$

ρ は社会的割引率、 β はトレーラーの時間単価、 W_n はレーンの数がn基の時の年間の待機時間である。また、レーンの数を1基からn基に増やす社会的費用 C_n は以下の式で計算できる。

$$C_n = (n-1)F + \sum_{t=1}^{50} \frac{(n-1)c}{(1+\rho)^{t-1}} \tag{6}$$

$$= (n-1)F + \frac{1+\rho}{\rho} \left[1 - \frac{1}{(1+\rho)^{50}} \right] (n-1)c$$

F はレーンの数を1基増やすための設備投資費用、 c はレーン1基の年間の運営・維持管理費用である。

式(5)及び(6)に下記数値を代入して、レーンを2基に増設した場合の B_2 及び C_2 を算出すると、純便益は2億8,890万円となる。また、レーン増設の社会的便益は、およそ2年で設備投資費用を上回ることを確認できる。

- $\rho=4\%$,
- $F=23,000,000$ (2,300万) 円 $c=4,100,000$ (410万) 円/年
- $\beta=3.73$ 円/秒
- $W_1 - W_2 = 9,900,630 - 5,058,687 = 4,841,943$ 秒/年
- $B_2 = 403,496,980$ (4億 349万) 円
- $C_2 = 114,600,035$ (1億1,460万) 円

ここで、設備投資費用(F)は中部地方整備局の資料¹²⁾から引用し、レーンの運営・維持管理経費(c)は追加する検査員1名の人件費(積算資料の「交通誘導員B(法定福利費の事業者負担分を含んだ参考値)」を援用し、平成28年度の稼働日数分の算出をしたもの)を使用している。

なお、検査員による確認が必要となるのは、①三点確認のうち目的確認（他の確認項目はPSカードの自動認

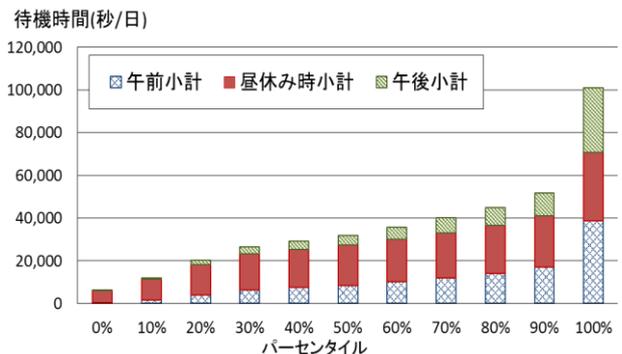


図-8 時間帯毎の待機時間の変化

証システムが導入され自動認証となっている)と、②コンテナの搬入際のコンテナのダメージチェックがある。このため、レーン1基増設あたり、一人の検査員を追加配置することにする。

b) ゲート処理時間の短縮

Motono et al.⁹⁾は、「(我が国や米国では)入構するトレーラーのうち、Improper Document Trailer(書類不備車両)が5%から10%程度含まれる」と指摘している。今回の現地調査で得られたゲート処理時間分布は、裾の重い分布をしており、裾の重い(ロングテイル)部分が全体の約10%程度あり、これらは書類不備車両と推定される。書類不備車両の混入割合を抑えることができれば待機時間の抑制に貢献できるものとする。

このため、高松港コンテナターミナルのゲート処理時間分布からロングテイル部分(処理時間240秒以上、頻度では約10%)がなくなった場合(図-9)について、シミュレーションを行った。この結果、待機時間は100パーセント値(111台/日)で比較すると、現行の約101,100秒/日から、約69,100秒/日へと減少した(図-10)年間待機時間も現行の約990万秒(約2,750時間)から約805万秒(約2,240時間)に減少する。

さらに、博多港のコンテナ情報の事前登録制度を導入しゲート処理時間が大幅に縮小したケース³⁾(図-9)をもとに、シミュレーションを行った。この結果、待機時間は100パーセント値(111台/日)で比較すると、現行の約101,100秒/日から、約28,100秒/日へと減少する(図-10)年間待機時間も現行の約990万秒(約2,750時間)

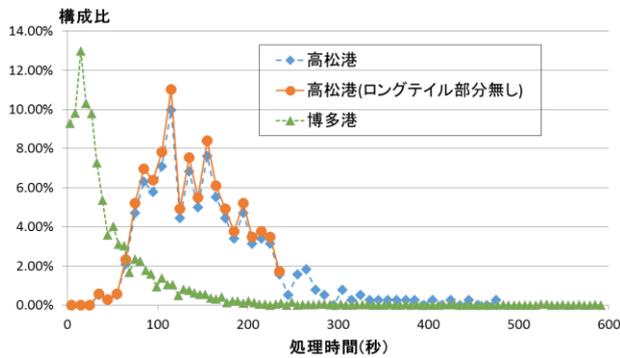


図-9 ゲート処理時間分布の比較

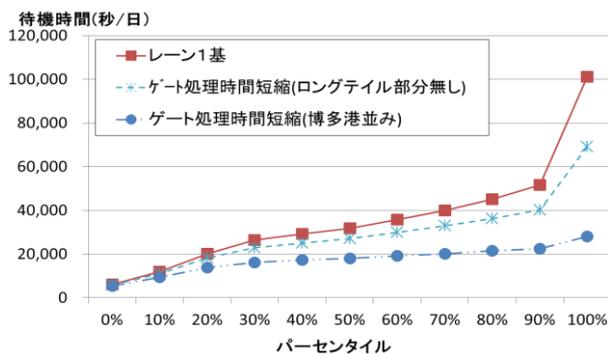


図-10 ゲート処理時間の短縮による待機時間の減少

から約500万秒(約1,390時間)に減少する。

以上のことから、書類不備車両の混入割合を抑える、またはゲート処理時間を短縮すると効果的に待機時間を抑制することを確認した。なお、ゲート処理時間の短縮には、コンテナ情報の事前登録制度の導入、集中管理ゲートの導入、コンテナ情報の共有化などIT技術を生かした環境改善が必要になる。また、トレーラー運転手や荷主など利用者サイドのIT化に対応した装備の導入など協力が必要になる。これらの費用の算出は、選択肢が多いことから今回の検討では行っていない。

c) 昼休み時間帯のゲート処理の実施

現状の高松港コンテナターミナルでは、午前中にゲート通過ができなかったトレーラーや昼休み時間帯(11時30分から13時)に到着したトレーラーは13時のゲート処理の再開まで待機を余儀なくされる。シミュレーション結果(図-5及び図-6)においても、昼休み時間帯にゲート利用率が低下している一方で、待機台数が増加していることが示された。

図-8で再度、現状でのパーセント毎の待機時間を詳しく見ると、昼休み時間帯に発生する待機時間がパーセントにかかわらずコンスタントに発生していることが分かる。また、前記a)でレーン2基からレーン3基への増設しても待機時間削減効果が見られず、待機時間が存在するのは昼休み時間帯の影響があるものと考えられる。したがって昼休みにゲート処理を行うことは、トレーラーの待機時間の抑制を図れる可能性がある。

この昼休み時間帯もゲート処理するケースについてシミュレーションを行った。この結果、100パーセント値での待機時間で比較すると、現行の約101,100秒/日から、約19,200秒/日へと減少した(図-11)。また、100%未満のパーセント値でも大幅に待機時間が減少し、折れ線グラフ全体がゼロに近づいている。年間待機時間も現行の約990万秒(約2,750時間)から約160万秒(約445時間)に減少する。

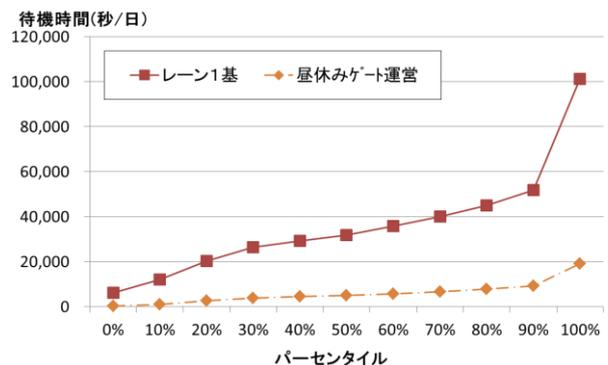


図-11 昼休みゲート処理による待機時間の減少

なお、昼休み時間帯にゲート処理を行うには、検査員の超過勤務が必要になる。また、ゲートを通過してもヤード内でのコンテナの積み下ろし作業を行えないと、トレーラーはヤード内で待機することになり運転手の待機は解消しない。よって、昼休み時間帯のゲート処理を有効にするには、昼休み時間帯にヤード内作業も行う必要があり、時間外労働による追加費用の支払いと労使間の合意が前提となる。

d) 時間当たりのトレーラーの入構台数の割り当て

先の第4章(2)でゲートの利用率が0.8になったのを境にして待機台数が発生することを示した。到着率に逆算すると9.2台/30分になる。これを踏まえて、時間当たりのトレーラーの入構台数を予め混雑が発生しない台数までに割り当てる(TASを導入した)ときの待機時間をシミュレーションする。

TASの導入をシミュレーションする場合、(1)で構築したシミュレーションモデルに下記拡張をさらに施した。

- ① 各時間帯の割り当ての上限台数を設定できるようにし、その範囲でトレーラーの予約を受け付けるようにする。(以下、「予約枠」とする)
- ② 各時間帯の「平均到着台数」の設定に応じてランダムに生成されるトラックは、当該時間帯の予約枠に余裕がある場合は、その時間帯に予約する。
- ③ 当該時間帯の予約枠に余裕がない場合は、最も近い時間帯を予約することとし、優先順位は、希望到着時間帯→希望到着時間帯+1→希望到着時間帯-1→希望到着時間帯+2→希望到着時間帯-2→…とする。
- ④ 昼休みの時間帯には予約を入れることが出来ない。(なお、昼休みになった時点で処理が終わっていないトラックがある場合、それらのトラックの処理が終わってから昼休みになるものとする。)これは、事前の入構台数の割り当てを導入すると、運転手は午後の最初の時間帯の順番を確保するために昼休み中にゲート前に並ぶことが不要になる、という前提である。
- ⑤ 全ての時間帯の予約枠が埋まっている場合、そのトラックは当日の来訪を諦めることとし、このようなトラックの台数を、統計値として算出できるようにする。

これらの拡張を行った上で、9台/30分の割り当て台数の上限を設けてシミュレーションを行った。その結果、100パーセント値での待機時間は、現行の約101,100秒/日から、約15,600秒/日へと大きく減少し、100パーセント値未満でも待機時間の減少が見られた(図-12)。つまり、入構台数の割り当てを導入すると、運転手の順番待ちという無駄な行動を防ぐことになり、ひいては

昼休み時間帯でのトレーラーの到着台数を抑え、待機時間の抑制ができる。ただし、割り当て台数により処理台数の上限が設定されるので、コンテナ量の増加に対応出来ない点に留意する必要がある。

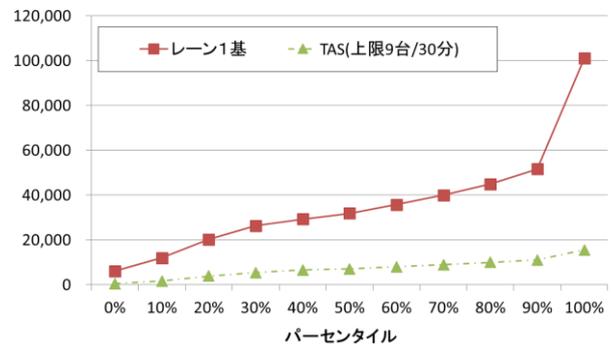


図-12 入構台数の割り当て導入による待機時間の減少

なお、入構台数の割り当てを導入するには、トレーラーからの事前予約、コンテナ情報の共有化などIT技術を生かした環境改善が必要になる。また、トレーラー運転手や荷主など利用者サイドのIT化に対応した装備の導入など協力が必要になる。これらの費用の算出には、選択肢が多いことから今回の検討では行っていない。

(4) 待機時間の抑制策についての評価

a) 高松港の混雑の現状評価

高松港の混雑の現状について、シミュレーションモデルを構築し、シミュレーション結果をもとに、整理・評価する。

シミュレーションモデルは、離散イベントシミュレーションモデルとして構築。一日を8時半から16時半まで30分きざみの16個の時間帯に分ける。この時間帯に到着するトレーラーはポアソン過程により発生するとした。ゲートの処理時間はノンパラメトリックなヒストグラムとして与える。一日のシミュレーションは1,000回分の平均とする。

シミュレーションモデル、ゲート処理時間と年間のトレーラーの入構台数をもとに、高松港の年間の総待機時間は約2,750時間を算出した。これは年間3,690万円の社会的な損失に相当する。

現行の高松港の入構台数においても待機は発生しているものの、今後入構台数が増加すると、待機台数と待機時間は爆発的に増加する。このため、早期に混雑抑制策を講じる必要がある。

待機台数の発生の有無を簡便に評価するうえで、ゲートの利用率が有効である。このケースでは、処理時間の平均値は156.1秒となり、ゲートの利用率0.8が待機車両の発生 の 閾値 となることを確認した。

b) 混雑抑制策の個別評価

上記の混雑抑制策によるそれぞれの待機時間抑制効果(図-13)と課題を整理する。

混雑抑制策として、ゲートレーンを1基から2基に増設すると、年間待機時間を約5割削減でき、費用便益分析でも十分に効果を説明できる。なお、トレーラーの到着台数とゲートの処理能力に応じたレーン設定が大事で、過度のレーン設定は意味をなさない。

ゲート処理時間の短縮策としての書類不備車両の除去では、年間待機時間を約2割削減できる。IT化により博多港並みのゲート処理時間が達成できると、年間待機時間は半減される。IT化による費用負担や利用者の協力が必要になる。

昼休み時間帯にゲート処理を行うと、年間待機時間は約8割削減できる。ただし、運転手の待機時間を真に減らすには、昼休みにゲート処理のみならず、ヤード内のコンテナの荷役作業を行わなければならない。これには労使間の合意が求められる。

時間あたりのトレーラーの入構台数の割り当ては、運転手が順番とりのためにゲートに並ぶ必要がなくなり、ひいては待機時間の主要な原因である昼休みの待機がなくなる。したがって年間待機時間の約8割の削減が期待できる。なお、割り当ての導入には、IT化による費用負担や利用者の協力が必要になる。また、割り当てによる処理台数の上限が生じることになる。

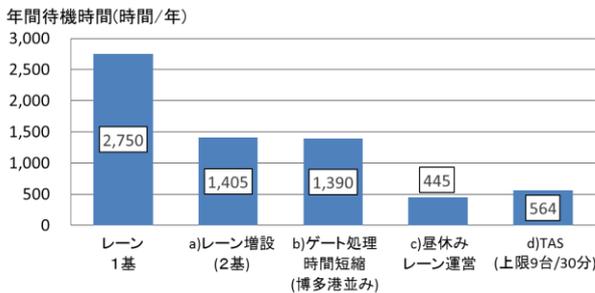


図-13 混雑抑制策による待機時間の短縮効果の違い(年間待機時間の比較)

5. まとめ

高松港コンテナターミナルを事例に、トレーラーの交通特性とゲートの処理能力を評価した。また、シミュレーションモデルを構築し、混雑抑制策を適用し効果を分析した。

(1) 高松港の交通特性とゲート処理能力

ゲートの入構手続きには、三点確認、照合確認のゲート処理の手続きが必要である。平成28年6月の5日分のゲート処理時間の実測から、処理時間は平均で156.1秒を要し、裾の厚い分布を示すことを確認した。入構するト

レーラーは、昼休みを挟んだ午前と午後にピーク交通量がある。また、平成28年度の一年間の入構台数実績から、年あたりの日交通量は、50パーセントで75台、100パーセントで111台。待ち行列のシミュレーション・モデルを構築し、一年間のトレーラーの待機時間は約2,750時間、社会的損失額は3,690万円と算出した。

ゲート利用率とシミュレーションから得られる待機台数の変化を分析し、ゲートの利用率0.8を閾値とすることで、待機台数の増減を判断できることが分かった。

シミュレーションによると、現在の高松港の交通量では待機台数は、100パーセント値では一日あたり待機時間は平均約15分/台、一日の最大の待機台数は約10台にすぎない。しかし、今後交通量が増えた場合、閾値を超える時間帯が増え、急激に待機台数、待機時間が増加すると予測した。

(2) 混雑抑制策についての評価

ゲートでのレーンの増設は、1基追加するだけで待機時間を半減できる。費用対便益も確保される。処理時間の短縮は、IT化などの環境整備が必要であるが、約5割の年間待機時間の削減ができる。最も削減効果あるのは昼休みにゲート処理を行う、あるいは、トレーラーの入構台数を割り当てることである。昼休みにゲート処理を行うにはヤード内の荷役作業が必要になり関係者との合意が必要になる。また入構台数の割り当ての導入は事前予約制度を的確に運用することで、昼休み時間中の順番待ちの車両がなくなれば、その分の待機時間を削減できるという効果が期待できる。その反面、割り当てによる処理台数の上限が生じることになり、コンテナ量の増加に対応出来ない面も出てくる。

高松港においては、将来深刻な混雑の発生が懸念されることから、本稿で示した4つの混雑抑制策を含め高松港で適用できる混雑抑制策を速やかに講じることが望まれる。また、本稿では、流入する交通量を調査し単位時間当たりのゲート利用率を算出することで簡便に混雑の状況を確認できることを示した。これは高松港に限らず混雑が顕在化していない港湾にあっても、初期的な判断に活用できると考える。

謝辞: ターミナルの現地調査については、港湾管理者である香川県、ターミナル運営者である高松港運(株)と日本通運(株)にご協力いただいた。現地でのトレーラー入構時の所要時間の計測は、讃岐株式会社に委託した。データの一次整理には、港湾空港部港湾保安対策室の片岡隆一課長補佐(H29年度当時)、黒川盛智保安係長に労をかけた。高松港運(株)業務部長細谷典夫氏には、ゲート手続きの詳細と、調査結果の考察にあたり利用者の視点から貴重なコメントをいただいた。ここに全ての関係各位に対

して感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 例えば, 北岡正敏[2010], “待ち行列理論入門”, 日本理工出版会.
- 2) Guan, C. and Liu, R. [2009], “Container terminal gate appointment system optimization”, *Maritime Economics & Logistics*, Vol.11, 4, pp.378-398.
- 3) 元野一生, 古市正彦, 瀬木俊輔 [2016], “コンテナ・ターミナルにおけるゲート混雑対策の効果的な運用に関する考察”, *運輸政策研究*, Vol.19, No.3, 2016, Autumn.
- 4) 里村大樹, 水谷雅裕, 鈴木武 [2014], “コンテナターミナルにおけるゲート通過の円滑性確保に関する研究”, *国土技術政策総合研究所資料*, No.797.
- 5) 里村大樹, 水谷雅裕, 鈴木武 [2015], “コンテナターミナルにおける保安検査の影響分析とゲート通過の円滑性確保に関する研究”, *国土技術政策総合研究所資料*, No.853.
- 6) Motono, I., Furuichi, M., Ninomiya, T. Suzuki, S. and Fuse, M. [2016], “Insightful observations on trailer queues at landside container terminal gates: What generates congestion at the gates?”, *Research in Transportation Business & Management*, 19, pp.118-131.
- 7) Morais, P. and Lord, E. [2006], “Terminal Appointment Systems Study”, *Transportation Development Centre of Transport Canada*.
- 8) Davies, P. [2013], “Container terminal reservation systems design and performance”, *Annual METRANS International Urban Freight Conference*, (online), <http://dtci.ca/research-2/>, 2016/6/5.
- 9) Gilfillan, G. [2013], “Improving Port Efficiency-The PBLIS story”, *IAPH2013, Los Angeles*.
- 10) Giuliano, G. and O’Brien, T. [2008], “Extended gate operations at the ports of Los Angeles and Long Beach: a preliminary assessment”, *Maritime Policy and Management*, Vol.35, No.2, pp.215-235.
- 11) Spasovic, N., Dimitrijevic, B. and Rowinski, J. [2009], “Extended hours of operation at the port facilities in New Jersey: A feasibility analysis”, *New Jersey Institute of Technology*.
- 12) 国土交通省中部地方整備局 [2018], “コンテナターミナルゲートの効率化の手引き”, pp.3-33.

(2018. 4. 27 受付)

PROPOSALS FOR REDUCING TRAILERS’ GATE WAITING TIME AT A CONTAINER TERMINAL IN A LOCAL PORT

Tadashi KANDA, Hideki OONISHI, Shunsuke SEGI and Ichio MOTONO

Landside gate congestion at container terminals has become a serious issue not only in major ports but also in local ports. However, terminal operators in local ports generally do not take effective measures for easing such congestion. In this study, we will investigate the present container terminal gate condition at the port of Takamatsu (Handling volume in 2016: 36,000TEUs) and examine measures to reduce congestion.

First, we measured gate traffic and processing time at the gate in the port. The number of daily arrival trailers ranged from 24 to 111 in FY 2016. Peak traffic times were observed twice: late in the morning and in early afternoon. The processing time probability was heavy-tailed distribution and the average processing time was 156.1 seconds.

Second, we developed a queueing simulation model to calculate trailers’ waiting times at the gate. The simulation shows that the total waiting time is 2,750 hours and the total monetary loss as a result of that waiting time was JPY36.9 million in FY2016. The simulation also revealed that the length of the queue will increase if the number of trailers exceeds 8 in a time period (half an hour). Therefore the utilization rate 0.8 is proposed as a threshold to simply determine whether the number of waiting trailers increases or not. The utilization rate exceeded the threshold in 6 out of 16 time periods in the 100 percentile traffic in Takamatsu port. This implies that congestion will become severe if traffic increases.

Finally, we propose and examine the following measures to reduce waiting time at the gate: increasing the number of lanes, conducting gate operation during lunch break, shortening gate processing time, and introducing a terminal appointment system.