

スマートポート実現に向けたコンテナターミナルの データドリブン運営評価に関する研究：シミュレーションアプローチ

Research on Data-Driven Operational Evaluation of Container Terminals for Smart Port Realization: Through a Simulation Approach

○正 市村 欣也^{*1,*2}, 神谷 宗^{*2}, 篠田 岳思^{*3}
Kinya ICHIMURA^{*1,*2}, Shu KAMIYA^{*2} and Takeshi SHINODA^{*3}

^{*1,*3} 九州大学 Kyushu University.

^{*2} 株式会社三井 E&S MITSUI E&S Co., Ltd.

While major ports worldwide are advancing toward smart port initiatives utilizing digital twins, to implement digital twin technology in Japanese container terminals, which are multi-layered management and operational structures, it is essential to quantitatively evaluate the improvement in operational efficiency resulting from their adoption of digital twin. In this study, we propose a method to quantitatively and comprehensively evaluate the impact on various KPIs of optimizing cargo handling conditions (e.g., using AI-based logic). This is achieved by reproducing cargo handling operations, using TOS data, on a logistics simulator within a digital twin.

Key Words: Container Terminal, Smart Port, Digital Twin, Data-Driven Operation, Logistics Simulator

1. 緒 言

コンテナターミナル (CT) の自動化は、1993 年オランダのロッテルダム港デルタターミナルで供用開始以降、世界中に普及してきた。自動化 CT では、荷役機器が自動化されているのみならず、ターミナルオペレーションシステム (TOS: Terminal Operation System) と荷役機器制御システム (ECS: Equipment Control System) が荷役に必要な情報を集約し、作業状況を一元的に管理している⁽¹⁾。近年注目されているスマートポートは、単なる荷役作業の自動化や可視化にとどまらず、デジタルツインを戦略的に活用して荷役の能率向上や迅速化、非熟練作業者の活用、環境対策といった課題の解決を図るものであり、サプライチェーン全体との統合やスマートシティとの連携も視野に入れた港湾インフラの高度化が期待されている⁽²⁾。韓国政府はスマートポートの重要性を認識し、港湾・海運産業における運用効率と競争力を高めるため多額の投資を行う政策を取っている⁽³⁾。一方、日本では官民が連携したサイバーポートの実現のため、港湾における行政手続きや民間事業間取引の電子化と港湾インフラの管理・利用情報のビッグデータ化を通じた港湾イノベーションを目的とした「港湾関連データ連携基盤」が 2020 年に稼働開始した⁽⁴⁾ものの、多層的組織構造で CT が管理・運用されているため、諸外国と比較してステークホルダーが多く、スマートポートへの投資が容易ではない環境にある⁽⁵⁾。

CT での荷役作業には多数の重要業績評価指数 (KPI) があり、各 CT で独自の重み付けを行い評価している。スマートポートの普及には、これらの KPI を可視化してステークホルダーに導入効果を示すことが不可欠となる。著者らは、これまでにデジタルツインと物流シミュレータを連携させたデジタル CT システムを提唱してきたが、本研究では、AI などの最適化ロジックにより生成される荷役条件が KPI に及ぼす影響を可視化、評価する手法を開発し CT へ実装することを目指す。国内の一般的な中規模 CT を対象に、まず、着目する KPI として本来必要でない荷役であるリハンドリングの削減を設定し、TOS 情報からリハンドリングの発生状況を分析した。そのうえで、最適化ロジックを組み込み可能なシミュレーションモデルを構築し、物流シミュレータにより実際の荷役を再現可能なことを確認した。これにより、今後最適化ロジックの効果を検証するためのツールを構築した。

^{*1} 株式会社三井 E&S 成長事業推進事業部 (〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4)

^{*2} 九州大学 大学院工学府船舶海洋工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

^{*3} 九州大学 名誉教授

E-mail of correspondin author: kinya@mes.co.

2. 先行研究

前述の通り、1990年代初頭には自動化CTが稼働し始めるが、同時期には汎用の物流・FAシミュレータソフトウェアを使用し、荷役機器やシャントラックをモデル化したシミュレーションが実施されていた。山崎らは、シミュレーション結果としてクレーン稼働率などのデータを取得したり、三次元アニメーションを観察することでヤード内渋滞箇所を把握したりする手法を提唱した⁶⁾。古賀らは、コンテナ船（本船）荷役作業計画を複数制約の有る数理最適化問題として定義し、最適化計算やルールベースのアルゴリズムを用いて自動計算する技術を開発した。これを本船積み込み作業の計画に適用し、計画作業者の熟練度に左右されない計画作成を提唱した⁷⁾。また前田らは、国土交通省が運用しているCONPAS（Container Fast Pass）の搬出入予約機能を実装したCTを離散系システムシミュレーションで解析し、ターミナルのゲート前渋滞や待機時間の解消、ゲート全体の処理効率化に予約機能が有効であること検証した⁸⁾。このようにCTでは、1990年代初頭より自動化に伴う荷役・保守データの集約化やコンピュータシミュレーションによる荷役の再現といったデジタル空間の利用が実用化されており、TOS上で荷役作業計画を支援するシステムの開発も続いている。近年はAI、IoT、高速通信などの技術発展に伴い、現実空間とデジタル空間の融合による運営効率化に関する研究は現在まで盛んに行われている。Neugebauerらは、システムをデータ連携のレベルにより、手動入力によるシステムが運営を支援する「デジタルサポート」、リアルタイムかつ自動的にデータを仮想空間にミラーリングする「デジタルシャドウ」、デジタル仮想空間でデータを解析して現実空間に自動的に反映する「デジタルツイン」に分類、整理した⁹⁾。

AIを組み込んだシステムと人間の関係について、機械学習の発展と共に、AIに対して人間が学習手法に関する知識を与え、学習したAIの決断を人間が確認するHuman in the Loop（HIL）のコンセプトが広まった。これに対し、Natarajanらは人間が決断するための情報をAIが提示するAI in the Loop（AIL）を提唱している。両者ともAIと人間が連携して最終判断するシステムであるが、HILが「AIの決断を人間が教示する」のに対してAILは「人間の決断をAIが支援する」ものである¹⁰⁾。著者らは、大型コンテナ船により大量の貨物が輸送され、CTで大量のコンテナを短期間に荷役する今日の状況を「大規模コンテナ物流時代」と呼び、多量のデータが時々刻々発生する中で、生産性の高い荷役を実現するために検討しなければならない条件は莫大な組み合わせになるうえ、急な条件変更や計画変更にも即座に対応する必要があると指摘してきた。そして、この状況に対応するため、TOSデータを用いてデジタル仮想空間のシミュレータ上に再現したCTに対して、AIにより得られる作業条件を入力し結果を可視化するシステム（図1）を用い、AIが提供する結果を人間が比較、最終判断を行うことで、AIによる単なる部分最適ではなく、そのCTが重要視するバランスの全体最適を達成可能なプランを選択する手法を提唱してきた¹¹⁾。このシステムでは、重要な決断は常に人間が行いAIは判断材料を人間に提示するもので、Natarajanらの提唱するAILといえる。

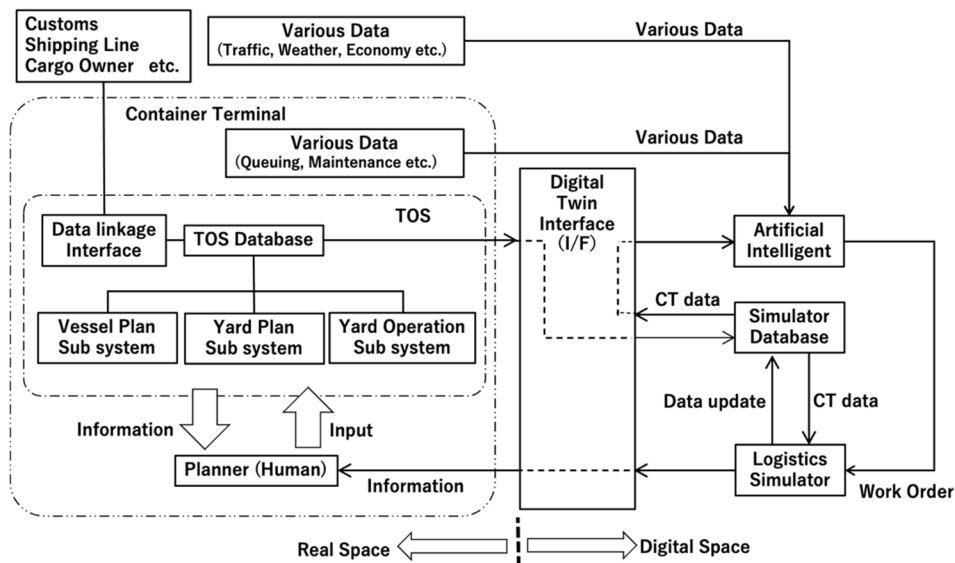


Figure 1 CT digital-twin configuration in collaboration with AI ⁽¹¹⁾

3. デジタルツインシステムを実装する CT と着目する KPI

3・1 CT の概要

本研究の評価手法を検証するため、日本国内の中規模 CT に図 1 のコンセプトに基づくデジタルツインシステムを実装した。対象となる CT は、岸壁長 350m、水深-15.0m の 1 バースで、岸壁クレーン (STSC: Ship to Shore Crane) 2 機で年間約 210,000TEU (TEU: 20ft コンテナ換算単位) のコンテナを扱っている。CT 総面積は 132,300 m² で、コンテナ蔵置ヤードには 20ft スロットが 1,824 あり、タイヤ式門型クレーン (RTGC: Rubber Tired Gantry Crane) 8 機で荷役している。STSC と RTGC の間は、構内専用トラクタヘッド・シャーシ (構内シャーシ) によりコンテナを輸送しており、公道を走行してコンテナを搬出入する外来シャーシと走行路を共有している。通常構内シャーシの走行が優先され、外来シャーシは蔵置ヤードへの進入を待機させられることがある。

3・2 着目する KPI の設定

著者らはこれまでの研究で、国内の複数の CT 運営者にヒアリングし荷役作業実務者が重要視する項目として表 1 を得た⁽¹²⁾。この中には、作業計画作成の容易化 (A1) や作業員 (フォアマン・プランナー) 確保の容易化 (B4) のような、作業データやシミュレーション結果の解析では数値化できないものが含まれるが、数値化可能なものは①荷役機器など使用量の削減 (B1, B2), ②作業の短時間化・削減 (B3, C2), ③作業待ち時間の削減 (C3, C4), ④作業の自由度向上 (B5), ⑤外部環境への配慮 (C1, B5), に類型化可能である。いずれも KPI として採用されるものであるが、荷役機器の作業能率が計画値以上を發揮し本船荷役が計画通りに進行することが前提である。

これらの KPI のうち、リハンドリング数の削減 (B3) は蔵置ヤードの荷役能率向上や船舶スケジュール安定性に直結するものであり、荷役計画の変更のみで改善でき、他の要因の影響を受けにくいためデジタルツインの効果を検証しやすい。そこで、本研究ではリハンドリング回数の削減に着目して検証を行う。

Table 1 Table of Items Terminal Operator's Preferences ⁽¹²⁾

Classifications	Details	Details; Operational Level
A. Ensuring smooth cargo handling and minimizing delays for vessel charging/ discharging operation.	<ul style="list-style-type: none"> Want to smoothly complete the previous day's planning work. 	(A1) Simplifying the process of making vessel and yard operation plans. (A2) Simplifying the arrangement of container handling equipment and workers.
	<ul style="list-style-type: none"> Don't want to delay departure of vessel. Don't want to interrupt work in progress on the day. 	(A3) Quick response to unplanned work occurring. (A4) Ensuring work safety.
B. Improving vessel operational efficiency with limited resources.	<ul style="list-style-type: none"> Want to handle more cargo with the same resources Want to handle the same amount of cargo with fewer resources Want to do the same work at a lower cost 	(B1) Reduce the number of yard chassis assigned each STSC (B2) Reduce the number of RTGCs (B3) Reduce the number of reshufflings and marshalings (B4) Easier securing foreman and planner personnel (B5) Reduce duration of stay for import and empty containers
C. Reducing turn time and waiting time at the terminal gate.	<ul style="list-style-type: none"> Want to shorten the time it takes to enter the CT 	(C1) Reduce the waiting time in front of the gate (C2) Reduce the gate processing time
	<ul style="list-style-type: none"> Want to shorten the time spent in the CT 	(C3) Reduce the waiting time to enter the lane (C4) Reduce the waiting time for RTGC handling work
D. Minimizing environmental impact in respond to requests from shipping companies, shippers, and local communities.	<ul style="list-style-type: none"> Want to reduce harmful gas emissions Want to quantify the amount of reduction & obtain certification 	(D1) Reduce the exhaust gases from cargo handling equipment (D2) Visualize the energy consumption and exhaust gases from cargo handling equipment

リハンドリング回数は、コンテナが CT に入ってから出るまでに不要な荷役を行った回数で、CT への搬入時 (本船荷下ろし又はゲート搬入) と CT からの搬出時 (本船積み込み又はゲート搬出) の荷役を含まない。すなわち、CT 蔵置ヤードにおいて、下段にあるコンテナを取り出すため上段のコンテナを移動する「掘り起こし」と、他の蔵置座標へ移動する「シフト」を指し、シフトは RTGC のみで行う「ベイ内シフト」と構内シャーシを

用いて移動させる「ベイシフト」がある。ベイシフトは、構内シャーシへの積み込み作業と構内シャーシからの荷下ろし作業の2回リハンドリングしたものとカウントする。

3・3 リハンドリング発生状況の現状分析

2025年4月14日から5月4日までの21日間のTOSデータを元に、CT内で発生した荷役作業を調査し、リハンドリングの発生状況を分析した。図2に、本船ごとの荷役数とSTSCあたりの平均荷役能率を示す。STSC荷役作業の総数は9,373回であるが、このうち一時的に岸壁に荷下ろしした後に本船へ積み戻す作業を除いた、実際の輸出入に係る荷役コンテナ数は9,171本（輸出5,234本、輸入3,937本）であった。対象CTには複数サイズの本船が寄港し、本船荷役の最も多いものでは500本以上になる。荷役能率は各本船の平均は32.3~46.1 boxes/hr.（平均値39.0 boxes/hr.）であり、国内CTとして一般的な水準である。なお、ここでの荷役能率は、STSC上の端末に入力された作業完了時刻の間隔を荷役サイクルタイムとし、1時間をサイクルタイムで除して算出した。端末入力のタイミングと実作業とのずれにより、若干の誤差を含む可能性がある。

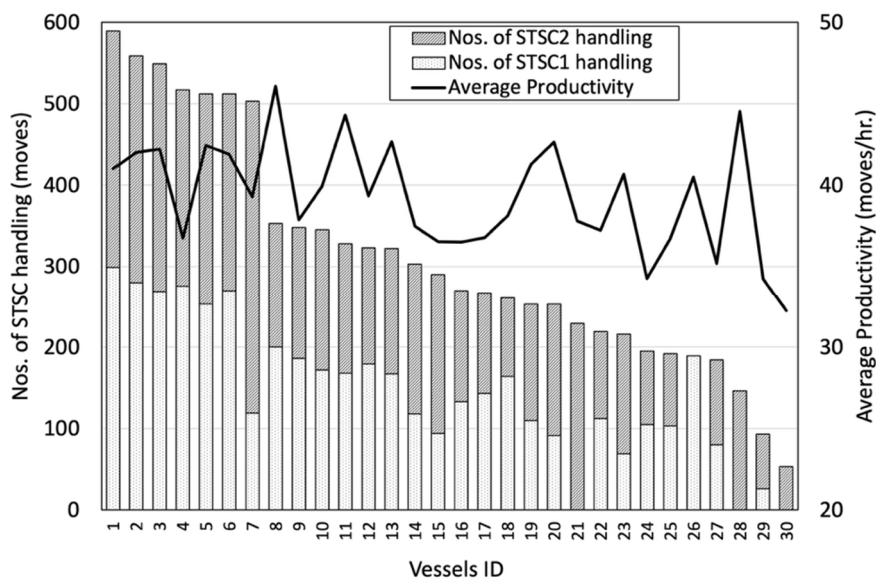


Figure 2 STSC operation during observation period

表2に、対象期間中にCT内で扱ったトラッキング可能なコンテナの集計結果と、式1により年換算した数値を示す。輸出コンテナのリハンドリング割合は14.3%、平均リハンドリング回数（コンテナ1本あたりリハンドリングした回数の平均値）は0.29回であった。一方、輸入コンテナではそれぞれ49.8%、0.98回と輸出より高い値を示した。これは、輸出コンテナは積み込み本船のスケジュールが事前に決まっているため蔵置ヤードの配置を計画可能であり、リハンドリングが発生しにくいことが要因である。一方、輸入コンテナは引き取り日時を予測しにくく、結果としてリハンドリング発生割合が高く、回数も多くなる。なお、対象期間中の40ft:20ft比は52:48で、年間取扱本数をTEU換算すると208,074TEUとなり、年間取扱量と比べても妥当な数値である。

Table 2 Summary of trackable container movements within CT during observation period

Categories	Rehandling	Nos. of Containers	Average of Rehandling	Average nos. of Retention time in CT	Annualized numbers of	
					Containers	Rehandling
Gate-in/ Loading (Export)	Without	2,895 (85.7%)	0	4days 12hr. 28min.	70,201	0
	With	483 (14.3%)	2.01	6days 16hr. 41min.	11,849	23,871
	Total	3,378 (100%)	0.29	4days 19hr. 56min.	82,050	23,871
Unloading/ Gate-out (Import)	Without	1,094 (50.2%)	0	4days 5hr. 56min.	26,048	0
	With	1,085 (49.8%)	1.97	5days 22hr. 29min.	28,793	56,722
	Total	2,179 (100%)	0.98	5days. 2hr. 7min.	54,841	56,722
Total of Export & Import		5,557	0.57	4days 22hr. 21min.	136,891	80,540

ここで、トラッキング可能なコンテナとは、対象期間中に CT に搬入され、CT から搬出されたコンテナを指し、①岸壁荷役により本船荷下ろしし CT 内蔵置の後にゲートから搬出された輸入コンテナ、②ゲートで搬入され CT 内蔵置の後に本船積み込みされた輸出コンテナ、に分類される。ゲート搬入・搬出あるいは本船下ろし・積み込み時刻のいずれかが対象期間外のもの除外した。式 1 では、対象期間前に CT に搬入されたコンテナと期間後に搬出されたコンテナが除外されていることを考慮し、対象期間の前後に CT 内平均滞留期間を付加する補正を行った。

$$N_{an} = N_{cont} \cdot \frac{(D_{op} + 2D_{rt})}{D_{op}} \cdot \frac{365}{D_{op}} \quad (1)$$

N_{an} Annualized numbers of container (boxes)
 N_{cont} Numbers of containers during measured observation period (boxes)
 D_{op} Observation period (21 days)
 D_{rt} Retention days (days)

次に、リハンドリングの発生が多い輸入コンテナについて詳細に分析する。図 3 は、輸入コンテナの本船荷下ろしからゲート搬出までの日数を示すヒストグラムであり、リハンドリングの有無で分類して表示している。横軸は、例えば「本船荷下ろし後 1 日以上 2 日未満」を「2 日」と表記している。分析の結果、「2 日」に引き取られるコンテナが最も多く、その後は日数の経過とともに引き取り数が減少する傾向が見られる。また、CT には蔵置コンテナに対して保管料金が発生しない「フリータイム」が設定されており、この期限直前にあたる 7~9 日目にも引き取り数の増加が見られる。なお、フリータイムは荷主ごとの契約で異なり、一律ではない。

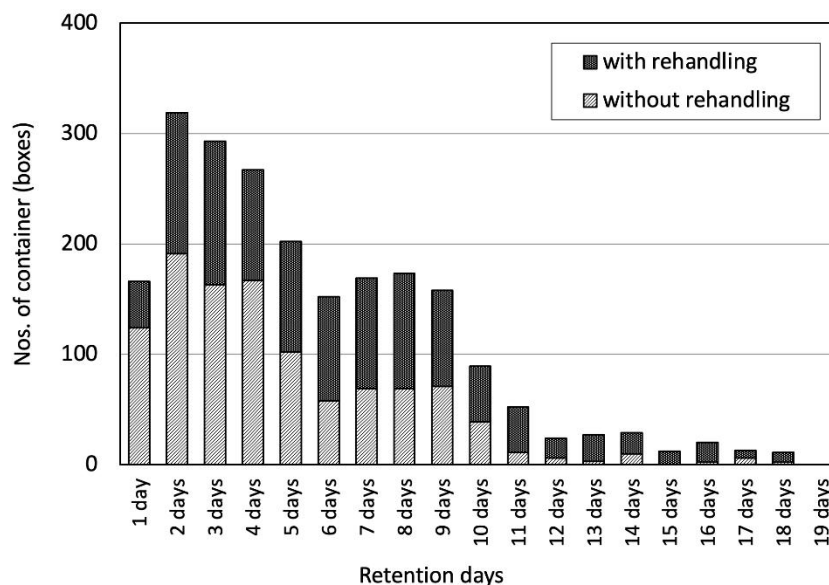


Figure 3 Histogram of retention days for import containers

図 4 は、本船荷下ろし後のリハンドリング発生日数を示すヒストグラムである。1 回目から 5 回目までのリハンドリングが発生した日数を分類している。6 回以上のリハンドリングが発生しているコンテナは 25 個（輸入コンテナ全体の 1.1%）であり、最大で 10 回のリハンドリングが確認されたが、該当数が少ないため図からは除外している。分析の結果、2 回目以降のリハンドリングについても日数経過に伴う増加傾向は見られず、いずれも初期段階に集中して発生していることが判明した。

以上より、リハンドリング数の削減は①発生回数の削減、②リハンドリングなしコンテナの割合の増加、③リハンドリング作業発生の後日化、の 3 点の切り口で検証可能と考えられる。

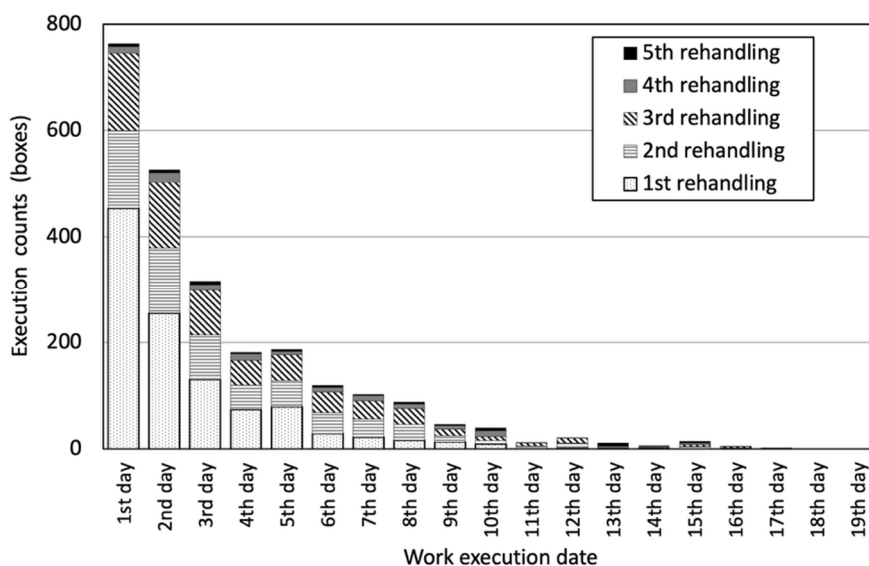


Figure 4 Histogram of work execution date for import containers

3・4 デジタル CT システム

対象となる CT には、三井 E&S 社製の TOS である CTMS がオンプレミスシステムで導入されている。物流シミュレータを含む、データの可視化や分析を行うデジタル CT システムは、TOS から独立したオンプレミスシステムとして設置した。同システムは、クラウド上の AI による最適化システムと連携可能である。物流シミュレータは、FORUM8 社製の 3 次元リアルタイム VR ソフトウェアパッケージ UC-Win/Road をベースに、三井 E&S 社で CT 専用にカスタマイズしてデジタル CT システム内に設置している。TOS のデータベース内に保存されているデータをエクスポートしてデジタル CT システムのインターフェイスを介して取り込む構成で、同インターフェイスから物流シミュレータ及び AI との間でデータが授受される。

4. シミュレーション

4・1 実績シミュレーションによる精度検証

シミュレータの精度検証を行うため、表 3 に示す条件でシミュレーションモデルを構築し、2025 年 6 月 30 日行われたオペレーションを再現した。同日は、1 隻の本船荷役 347 本とゲート荷役 338 本が同時に行われたが、本船荷役は RTGC で荷役した 258 本を対象とした。

Table 3 Conditions of simulation

Items		Units	Values
Number of containers handed	Quay side (Lading/Unloading)	boxes	258
	Gate (In/Out)	boxes	338
STSC	Quantity	cranes	2
	Vessel handling time	sec.	90
	Chassis handling time	sec.	30
RTGC	Quantity	cranes	8
	In-bay handling time	sec.	※1
	Gantry running time	sec.	※2
Yard chassis	Quantity per STSC	chassis	3
	Running speed	km/hr.	25
Gate	In-Gate	lanes	5
	Out-Gate	lanes	5

※1 Data table provides handling time depend on the combination of 'from' position (low, tier) and 'to' position.

※2 Data table provides provide gantry running time depend on distance.

シミュレーションモデルに対して、実績データを以下の通り反映する。

- (1) 各 STSC, RTGC, ゲートに最初に発生する荷役の実績時刻をシミュレーションに反映する。2 番目以降に発生する作業の開始時刻はシミュレーションの結果として得る。なお、最初の荷役開始時刻から最後の荷役完了時刻までの時間を全体オペレーション時間と定義する。ただし、昼休憩時間、すなわち午前最後の荷役完了時刻から午後最初の荷役開始時刻までの時間は含まないものとする。
- (2) STSC の本船荷下ろし・積み込み荷役順番は、各号機の順番のみ実績データ通りとし、荷役時刻はシミュレーションの結果として得る。
- (3) 本船荷下ろし・積み込み荷役及びゲート搬入・搬出荷役のコンテナの蔵置座標ついて、蔵置ヤード内の平面方向座標（ベイ・ロー）は実績データ通りとする。一方、高さ方向（ティア）は、シミュレーションで得られる既蔵置コンテナの最上段に置くものとする。
- (4) 本船荷下ろし・積み込み荷役及びゲート搬入・搬出荷役のコンテナについて、RTGC 各号機への割振り数は実績データと一致させる。しかし、ゲート搬出荷役で対象コンテナが下段にある場合、掘り起こしのために移動した上段コンテナの数はシミュレーション結果として得る。
- (5) 構内シャーシへのコンテナの積み込みは、シミュレーションで得られる到着順に行うものとする。ただし、各構内シャーシは STSC に固定して配置されており、STSC1 にアサインされている構内シャーシが STSC2 の荷役を行なわない運用とする。
- (6) インゲート処理完了時刻の実績データを、外来シャーシのゲート出発時刻としてシミュレーションに反映する。ゲート出発時に蔵置ヤードの目的レーンが混雑している場合は、CT 内待機場所にて待機する。
- (7) 構内・外来シャーシ共に、蔵置ヤード内で目的地の手前に別のシャーシが存在する場合、追い越して先へ進むことを可能とする。

シミュレーションの結果、全体オペレーション時間は 409 分であり、実績値 417 分に対して誤差-1.9%であった。本シミュレーションは、本船荷役とゲート荷役のパターンを与えて CT 全体の動きを再現するものであり、結果は RTGC やシャーシの動きの変化に現れる。そこで、シミュレーションで得られた各 RTGC の荷役能率について、実績値との比較結果を図 5 に示す。号機により差はあるものの、全体の誤差は+1.4%であった。さらに、ゲート搬出荷役で、掘り起こしで移動したコンテナの合計本数は 195 本であり、実績値の 204 本に対して誤差-4.4%であった。

以上の結果より、本モデルによるシミュレーションが実際の荷役を精度良く再現可能であるといえる。

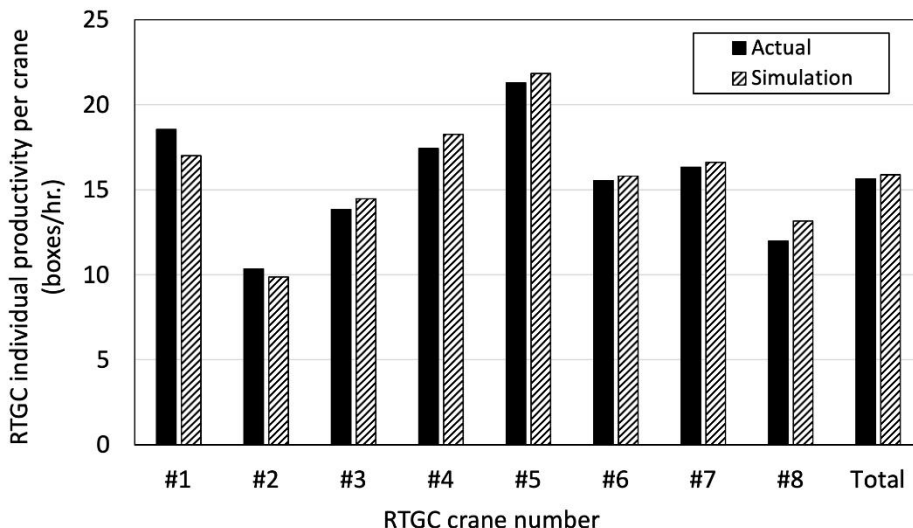


Figure 5 Comparison of productivity between simulation and actual for each RTGC

4・2 RTGC 割付けモデル

4・1 節で述べた通り、実績シミュレーションでは各 RTGC に実績と同じ荷役が割付けられる。このため、AI などの最適化ロジックに基づく荷役条件を採用してシミュレーションを実施する場合、コンテナ蔵置座標や RTGC

使用機数が異なり実績データが使用できない。すなわち、蔵置座標が変更されているにも関わらず、実績データに基づく RTGC 号機で荷役を行おうとすると荷役場所まで移動する走行時間が長くなり、効率が低下するおそれがある。そこで、以下に示す2つの機能を有する割付けモデルを導入した。

- (1) 同一レーン内に複数の RTGC が存在する場合、荷役対象のコンテナに近い RTGC に作業を割付ける。
- (2) レーンに発生する荷役作業数に応じて RTGC をレーン間移動させる。

なお、実際の荷役における RTGC 割付けでは、管理棟からの指示に加え運転手による現場判断も取り入れており、シミュレーションで完全に実績を再現することは難しい。しかし、シミュレーションで荷役条件変更の影響を比較するためには、同じ割付けモデルを使用する必要がある。

4・3 RTGC 機数変更の影響

RTGC 割付けモデルの動作を確認するため、機数を6~8機に変化させて4・1節に示したオペレーションのシミュレーションを実施した。図6に、(a)RTGCの荷役能率、(b)RTGCの作業指示待ち時間と走行時間、(c)外来シャシー(搬入・搬出)のターンタイム、(d)外来シャシーの待ち時間(待機場、レーン内)、について割付けロジックを用いた場合と用いない場合(実績の8機のみ)の結果を示す。なお、RTGCの荷役能率について、4・1節では各号機個別の稼働時間を元に荷役能率を算出したが、CT全体の荷役を考える場合、特定のRTGC荷役が終了してもCT全体の作業は終了しないので、総荷約数を全体オペレーション時間と機数で除して荷役能率を算出した。

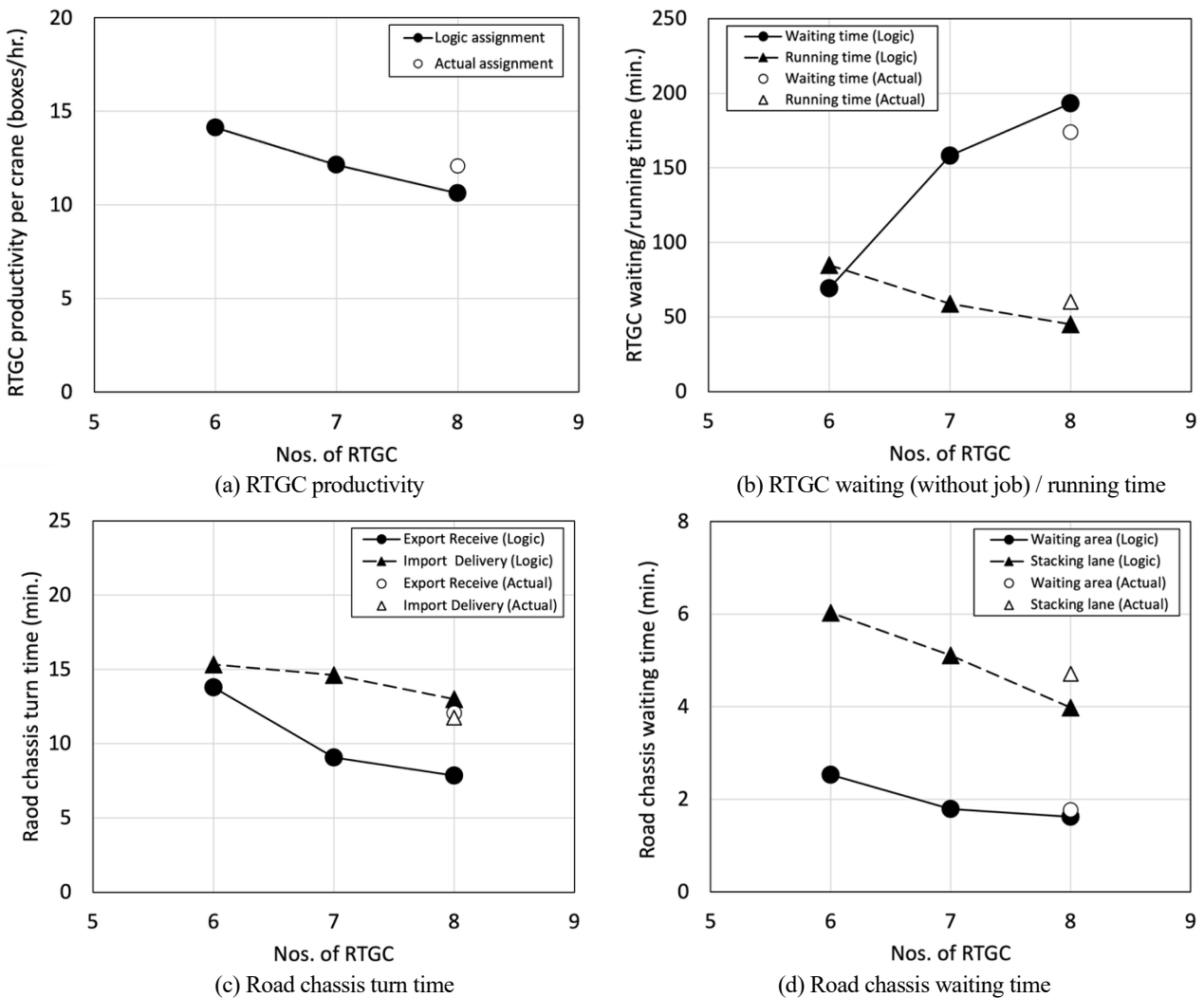


Figure 6 Comparison of Key Performance with numbers of RTGC

図 6(a)では、機数に比例した荷役能率となっている。これは、いずれの機数でも全体オペレーション時間が変化しなかったため、実績データでは本船荷役終了がゲート荷役終了よりも 163 分早く終了し、その後はゲート荷役のみに対応していたことに起因する。すなわち、ゲート荷役は実績データに沿った時刻に作業が発生しており、本船荷役終了後は RTGC 全体の荷役能力に余裕が生まれるため、機数減少の影響が出なかったと考えられる。一方、図 6(b)は機数の減少に伴い、より多くのコンテナを荷役するため RTGC の移動が増加し、走行時間が長くなる傾向を示している。また、機数の減少に伴い作業指示の受信を待つ時間が急速に減少しており、各 RTGC が忙しくなっている様子を示している。しかし、6 機でもまだ作業指示待ち時間があるため、前述の通り機数減少が全体作業時間の減少繋がらない原因となっている。CT 全体の荷役という視点では RTGC 配置数に余裕があるように見えるが、本船荷役を計画通りの時刻に終了させるための荷役能力確保を考慮すると、機数を減らすことはできない。

また、図 6(c)は、外来シャシーのターンタイムが機数の減少に伴い搬入・搬出ともに伸びていることを示している。これは、図 6(d)に示す通り、RTGC の作業が忙しくなることに伴い、外来シャシーが待機場、レーン内いずれでも待ち時間が増えることに起因している。この結果からも、RTGC 機数減少の影響を正しくシミュレーションできているといえる。ここで、外来シャシーの搬入ターンタイムはゲート入場から RTGC 作業完了までの時間を、搬出はゲート入場からゲート退場までの時間を指している。これは、搬入コンテナは蔵置ヤードにコンテナを下ろしたあと、アウトゲートでのチェックなしに退場できるのに対して、搬出では退場時にコンテナチェックを行うため、ゲート前待機を考慮するためである。

以上より、RTGC 割付けモデルを含むシミュレーションが、機数変化の影響を正しく反映できていることが示された。ただし、本船荷役終了後は RTGC の能力に余裕が生まれるので、ゲート荷役の終了時刻に機数削減の影響が出るには至らなかった。このため、RTGC の処理能力を超える荷役が発生するケースでシミュレーション結果がどのような挙動を示すかは検証できていない。しかし、最適化ロジックを組み込み、その性能を評価するという目的においては、現在のシミュレーションモデルは十分機能すると考える。

また、現在は「掘り起こし」のみモデル化しており、今後リハンドリング全体の削減を評価するためには「ベイ内シフト」及び「ベイシフト」のモデルを追加する必要がある。

5. 結 語

AI などの最適化ロジックにより生成される荷役条件が、CT 荷役作業の様々な KPI に及ぼす影響を評価するため、着目する KPI としてリハンドリングの削減を設定し、国内 CT の 21 日間の TOS 情報からリハンドリングの発生状況を分析した。輸入コンテナのリハンドリング割合は 49.8%、平均リハンドリング回数は 0.98 回であり、輸出コンテナの 14.3%、0.29 回より高い値を示した。これは、外来シャシーによる輸入コンテナの引き取り日時が予測しにくいことに起因している。また、輸入コンテナの初回ハンドリングは、CT 内滞在中のリハンドリング合計回数に関係なく本船荷下ろし後 2 日が最多で、その後徐々に減少する傾向が見られる。このことから、最適化ロジックによりリハンドリング数を削減する場合は輸入コンテナを優先的に対策し、①発生回数の削減、②リハンドリングなしコンテナの割合の増加、③リハンドリング作業発生の後日化、の 3 点の切り口で検証可能であることを明らかにした。

デジタルツイン上で最適化ロジックを組み込み可能なシミュレーションモデルを構築し、国内の CT 内に導入するため、物流シミュレータが、CT 内の作業状況を実際の荷役に対して問題の無いレベルで再現可能であることを確認した。さらに、シミュレーションに RTGC 割付けモデルを導入し、AI など最適化ロジックを組み込むことが可能なシステムを完成させた。

本研究で構築したデジタル CT システムは、荷役能率の改善に向けた定量的評価に有効であることが示された。特に、リハンドリング削減という KPI に着目した検証により、輸入コンテナの蔵置計画に対する最適化の必要性が明らかとなった。今後は、シミュレーションモデルを改良し、最適化ロジックにより生成される荷役条件をシミュレータに入力し効果を検証する。そのうえで、実際の CT でリハンドリング回数削減に関する効果を検証する予定である。

スマートポート化の流れは世界各港で着実に進行しており、国際港湾協会は、今後 CT において AI や IoT、自動化といった技術の導入が進むことを念頭に、それぞれの技術に対するサイバーレジリエンスを強化するためのガイドラインを発行している⁽¹³⁾。世界的なスマートポート化の流れに日本が乗り遅れないよう、本研究の成果が、CT へのデジタルツインをはじめとする技術導入の指針のひとつとなることを望む。

謝 辞

本研究の一部は、令和 5 年度より国土交通省の港湾技術開発制度の支援を受け実施した。ここに深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) The World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC), “Planning for Automation of Container Terminals”, *MarCom WG Report*, n° 208 (2021), pp.118-122.
- (2) Klar R., Fredriksson A. and Angelakis V., “Digital Twins for Ports: Derived From Smart City and Supply Chain Twinning Experience”, *IEEE Access*, Volume 11 (2023), pp.71777-71799. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3295495
- (3) Zhou L., Suh W., “A Comprehensive Study on Static and Dynamic Operational Efficiency in Major Korean Container Terminals Amid the Smart Port Development Context”, *Sustainability*, 16, 5288 (2024). DOI:10.3390/su16135288
- (4) 小野憲司, “日本の港湾の情報化のこれまでの歴史とサイバーポート政策の今後の展望”, 港湾経済研究, No.61 (2022), pp.3-18,
- (5) Inutsuka, H., Ichimura, K. Sugimura, Y., Yoshie, M., Shinoda, T, “Study on the Relationship between Port Governance and Terminal Operation System for Smart Port: Japan Case”, *Logistics* 8, 59 (2024). DOI:10.3390/logistics8020059
- (6) 山崎正敏, 土井厚二, 飯田日出夫, 金川弘二, 有吉 俊一, 望月 則孝, “コンテナターミナルにおけるコンテナ荷役シミュレーション”, 三井造船技報, 第 149 号 (1993). pp.14-21.
- (7) 古賀祐一, 森本陽, 小林栄治, 福原成浩, 坂本正志, 武本浩一, “オペレーションズ・リサーチを用いたコンテナターミナルにおける本船荷役作業の高速自動計画技術”, 三菱重工技報 Vol.61 No.1 (2024)
- (8) 前田清真, 樋口良之, 野原充, 野原大樹, “CONPAS の搬出入予約機能を実装する港湾コンテナターミナルの離散系シミュレーションによる検証”, 日本機械学会 第 32 回交通・物流部門大会予稿集 (2023).
- (9) Neugebauer, J., Heilig, L. and Voß, S., “Digital Twins in the Context of Seaports and Terminal Facilities”, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol.36 (2024), pp.821–917. DOI:10.1007/s10696-023-09515-9
- (10) Natarajan S., Mathur S., Sidheekh S., Stammer W. and Kersting K., “Human-in-the-loop or AI-in-the-loop? Automate or Collaborate?”, *The 39th AAAI Conference on Artificial Intelligence* (2025), pp.28594-28600.
- (11) 市村欣也, 篠田岳思, “大規模コンテナ物流時代に適応したコンテナターミナル作業計画法の概念設計”, 海運経済研究, No.58 (2024), pp.1-10.
- (12) 市村欣也, 篠田岳思, “デジタルツインを活用したコンテナターミナルの運用効率化”, 港湾経済研究, No.63 (2025), pp.33-49.
- (13) International Association of Ports and Harbors (IAPH), “Cyber Resilience Guidelines for emerging Technologies in the Maritime Supply Chain” (2025).