

JOURNAL OF LOGISTICS AND SHIPPING ECONOMICS No.58

海 運 経 済 研 究 第 58 号 抜 刷

[自由論題]

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

市 村 欣 也

(九州大学大学院, 株式会社三井 E&S)

篠 田 岳 思

(九州大学 名誉教授)

Japan Society of Logistics and Shipping Economics

日 本 海 運 経 済 学 会

2024

[自由論題]

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

市 村 欣 也

(九州大学大学院, 株式会社三井 E&S)

篠 田 岳 思

(九州大学 名誉教授)

The growth of global supply chains, the volume of trade cargo transported by maritime containers is increasing, and Container Terminals (CTs) are required to boost operational efficiency in addition to installing high-efficiency cargo handling equipment. The author calls today's situation in which large amounts of cargo are transported by mega container vessels and large number of containers are handled in a short period of time at CT "the era of large-scale container logistics". In the era, it is becoming impossible to operate at a high level by the conventional know-how. Although some research on improving the function of Terminal Operating System (TOS) and optimize work plans using Artificial Intelligence (AI) have been published until today, there is no present study focus on the method and its structure to create high productivity cargo handling plans by link of TOS and AI. In the present research developed a conceptual design for the method which create multiple plans with different conditions optimized by link of TOS and AI in the digital twin, carry out simulations using a logistics simulator, compare the results using an emulator, feedback to planner and then make final decision by human, and its system configuration.

I. はじめに

コンテナ貨物輸送は荷役や輸送の効率を飛躍的に向上させると共に、製造業における国際分業を加速させた。製造業の国際分業化と共にグローバルサプライチェーンが発展し、貿易貨物量の増加に対応して、輸送効率を高めるためコンテナ船が大型化し、現在、積載量が24,000TEUを超えるものも就航している。これらの大型コンテナ船では1回の寄港で積み下ろしするコンテナ数が多くなるため、コンテナターミナル (Container Terminal, CT) は生産性の向上が求められており、各CTは、生き残りをかけて新技術導入への投資を競わなければならなくなっている^{1) 2)}。APMT TERMINALSは2023年5月2日、オランダ・ロッテルダム港のMAASVLAKTE-II自動化ターミナルにおいて、コンテナ船Monaco Maersk に対する9,233個のコンテナ荷役を36時間で完了した、すなわち1時間あたり256個のコンテナを荷役したと報じた³⁾。

荷役能率向上に対応するため、CTでは複数コンテナの同時荷役や動作速度の高速化に対応した高能率型荷役機器を導入しているが、ソフト面、すなわち運用の効率を向上させる作業計画を立てなければハード的に高めた能力を十分に発揮することはできない。CTの生産性は荷役の

1) R. マルク, 村井章子訳『コンテナ物語 増補改訂版』, 日経BP, 2019, 354 ~ 363ページ。

2) 松田琢磨『コンテナから読む世界経済』, KADOKAWA, 2023, 250 ~ 258ページ。

3) APM TERMINALS "News & Updates", 2023.5.2 (<https://www.apmterminals.com/en/maasvlakte/practical-information/news-and-updates/2023/230502-new-record-in-container-handling> 2024.1.19 最終アクセス)

順番や蔵置の場所等を指示する作業計画により左右されるが、CT内では複数のコンテナ船に対する作業やゲート搬出入作業等の様々な作業が同時進行しており、複数の最適化指標がトレードオフになっていることも多い。このため、熟練ノウハウを持つプランナーがバランスを考慮しながら作業計画を立てている。また、COVID-19による物流混乱の影響が発生する以前から、コンテナ船の到着遅れが大きくなっていることが指摘されており、赤倉（2020）によると欧州・北米基幹航路全体の2018年の東アジア・欧米輸入港での定時到着率は7割を切り、平均遅延日数は概ね0.7～1.1日であった。コンテナ船の到着遅れはCTに対して短時間での計画変更を要求することが多く、作業計画の立案をいっそう複雑なものにしている。

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、著者は「大規模コンテナ物流時代」と呼び、荷役業務の質⁴⁾や量が大きく異なるため、これまでのノウハウに基づいて作業計画を立てる方法では生産性の高いCT運用ができなくなってきたと考える。すなわち、プランナーの熟練ノウハウは定量的評価が難しい暗黙知であり、変化する環境の中で最良という確証も得難く、さらに条件の異なる複数の計画で荷役した結果を比較評価することもない。大規模コンテナ物流時代に適応した作業計画では定量的かつ多面的な検討を行うため、CT内の蔵置や作業に関する情報を一元的に管理するターミナルオペレーティングシステム（Terminal Operating System, TOS）のデータと人工知能（AI）による最適化をデジタルツイン（DT）領域で連携させ、条件の異なる複数の計画を立て、物流シミュレータでシミュレーションし、エミュレータにより結果の比較をプランナーにフィードバックしたうえでヒトによる最終判断を行うという方法が必要となると考える。

近年、港湾DTの導入に関する研究やCT作業計画にAIを適用する研究が増えてきたが⁵⁾、CTにおける実際の荷役作業に沿った手法を示した手法にまで言及したものは見当たらない。そこで本研究では、前述のCT作業計画方法を実現するために、DT領域においてTOSのデータベースが持つデータをAIと連携させる方法や、得られた結果をどのように実際の荷役作業に反映するかというプロセスに着目し、様々な環境のCTにおいても汎用的に利用できる作業計画方法と、そのシステムの構成について概念設計を行った。

II. TOSを用いて行うCT作業計画とAIの適用

1. CTにおけるTOSの役割

CTでは、輸出入、サイズ、実入り・空、常温・冷凍冷蔵等、様々な種類のコンテナが保管されており、それらはクレーンやシャーシトラックを使用して移動を繰り返している。さらにコンテナ船の動静を基に岸壁の使用計画を立てたり、船社の代理人として各種の貿易に関わる手続きを執行したりとCTオペレータの業務は多い。このようにCTは規模が大きく複雑なシステムであり、システムを円滑に運用するためにTOSが活用されている。TOSはコンテナの在庫情報や搬出入情報、輸出入情報を一元的に管理するコンピュータシステムで、情報機器ハードウェアの進歩と共に機能も進化してきた。本船計画、ヤード蔵置計画、荷役機器管理等を行うサブシステムを有し、荷役作業計画の立案や作業進捗の管理を行う作業者の判断を支援している⁶⁾。

4) 例えば、大型コンテナ船の荷役では、より多くのギャングが同時に荷役作業を行うことになり、作業の交錯による効率低下を最小限にする管理も必要となる。

5) Wangら（2021）は港湾DTのシステム構成を提唱し、それに必要な技術を整理している。Klarら（2023）は、港湾DTの構成を説明したうえで港湾外のDTとの連携を検討している。Gaoら（2022, 2023）はDT領域のCT上で蔵置ヤードクレーンのシミュレーションを行い、クレーンの荷役待ち時間を削減する手法について発表している。

6) 例えば、Inutsukaら（2024）の4章など。

2. CT作業計画の例

(1) 蔵置座標計画

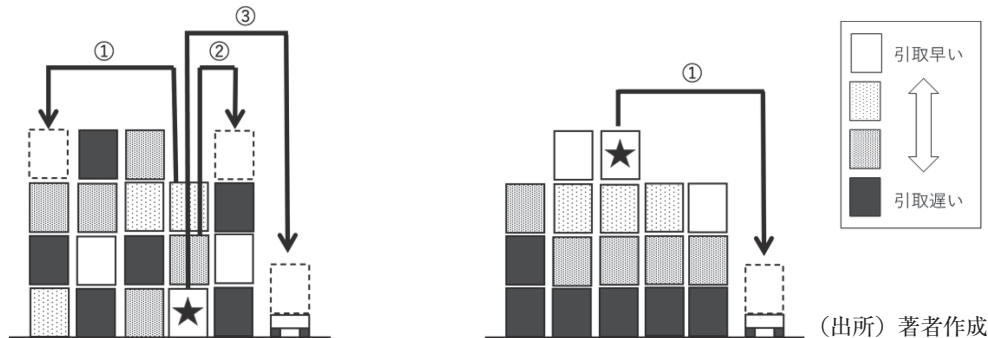
CT内のコンテナ蔵置ヤードにおいて、何処にどのコンテナを蔵置するかはヤード蔵置計画システムで管理、計画されている。同システムは、コンテナ蔵置状況のリアルタイム表示、輸出入コンテナ/空コンテナのヤード割当、コンテナシフト計画の登録、蔵置コンテナ情報の管理といった作業を行う。

コンテナの蔵置座標を計画する場合、輸入コンテナでは、CT外の陸運事業者が手配するシャーシトラック（外来シャーシトラック）が引き取りに来る順番が早いものほど上に積む必要がある。また、輸出コンテナでは、コンテナ船への積み込み順と逆に積む必要がある。図1（a）に示すように、先に出すコンテナ（星印の付いているもの）が下に積まれている場合、その上のコンテナを一旦別の列に退避させた後で対象となるコンテナ荷役を行う必要がある。この作業を「荷繰り」と呼び、CTの運営上は無駄な作業である。

図1（b）に示すように、早く取り出すコンテナほど上に積まれるよう計画することが、CT運営において求められる項目のひとつである。ここで輸入コンテナの場合、外来シャーシトラックが引き取りに来る日時を事前を知ることが計画時の重要なファクターとなるため、予約システムを用いて到着日時を管理したり、AIにより到着予測日時を推定したりする必要がある。

図1 コンテナ蔵置ヤードでの積み順

(a) 先に出すコンテナが下にある積み方 (b) 先に出すコンテナが上にある積み方



(出所) 著者作成

(2) 荷役機器配置計画

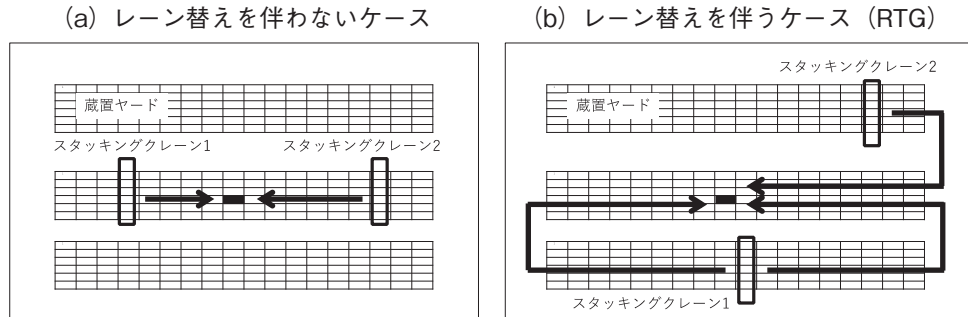
荷役機器作業管理システムは、蔵置ヤードのスタッピングクレーンや構内専用のシャーシトラックといった荷役機器に対し、車載端末を通して次の荷役作業場所や荷役するコンテナの情報を指示する。同システムでは、CT内作業状況のグラフィカル表示、荷役機器への作業指示管理、荷役機器の配置管理、荷役機器車載端末の管理、無線ネットワークの監視といった作業を行う。

蔵置ヤードの特定座標に荷役作業指示が発生した場合、いずれのスタッピングクレーンで作業を行うか指示、管理する必要がある。作業座標に対し最も近いクレーンに作業を割り付けることが基本であるが、図2（a）に示すようにスタッピングクレーン1とスタッピングクレーン2の間に作業が発生した場合、いずれのクレーンに作業を割り付けるかは、作業座標までの距離のみならず、当該作業に続く作業を勘案したうえで総合的に判断する必要がある。

スタッピングクレーンとして世界中で広く使用されているタイヤ式門形クレーン（Rubber Tired Gantry Crane, RTG）はラバータイヤで走行する構造で、タイヤを90度回転させることにより蔵置ヤードのブロック間を移動できるという特徴から、フレキシブルな荷役機器配置が可能となり、少ない台数のクレーンで運用することができる。RTG方式のCTにおいて、図2（b）に示すようにスタッピングクレーンのいないブロックに作業が発生した場合、スタッピングクレーン1、2いずれのクレーンに作業を割り付けるか、またスタッピングクレーン1に作業指示を出

す場合でも、左右いずれの走行路を経てレーン替えするかも指示、管理しなければならない。レーン替えを行う場合、ラバータイヤの回転時間を含め、数分間にわたって走行路を閉鎖する必要があり、本船作業を行うシャーシトラックの走行にも影響がでる。

図2 スタッキングクレーンへの作業割付



(出所) 著者作成

スタッキングクレーンの移動時間を短縮することは、CTの生産性を向上することに寄与する。しかし前述の通り、発生した作業に対してどのスタッキングクレーンを割り付けるかは、単純に作業座標までの距離のみならず、後続の作業や走行路の閉鎖等、CT内の運用状態を総合的に判断して決定しなければ生産性の向上を図ることは難しい。

3. 作業計画へのAIの適用

これまでも、CT独自の運用ルールをロジック化して取り込むことが可能なTOSが存在していたが、これらは限定的なルールの積み重ねであり、全体のバランスを見て最終的にヒトの判断による計画を優先することも多かった。これに対し、荷役計画にAIを適用する動きも出てきた。2019年度より、国土交通省港湾局は「ヒトを支援する AI ターミナル」の取組を開始、その一環としてコンテナ搬出入日時予測等の機能を有する AI を構築し、TOSと連携したうえで従来の運用とAIを活用した運用を比較する現場実証を実施した。その結果、最大約83%の荷繰り回数削減や実運用可能な速度での計画立案が可能であったとしている⁷⁾。国土交通省の実証では、II-2-(1)節で記載した蔵置座標計画へのAIの適用を中心に検証しており、RTGが荷役する順番の検証までは実施しているものの、複数のRTGのうち、いずれが作業する方が効率的かまでは言及していない。

Ⅲ. TOSにおけるデータ管理

1. TOSとリレーショナル型データベース

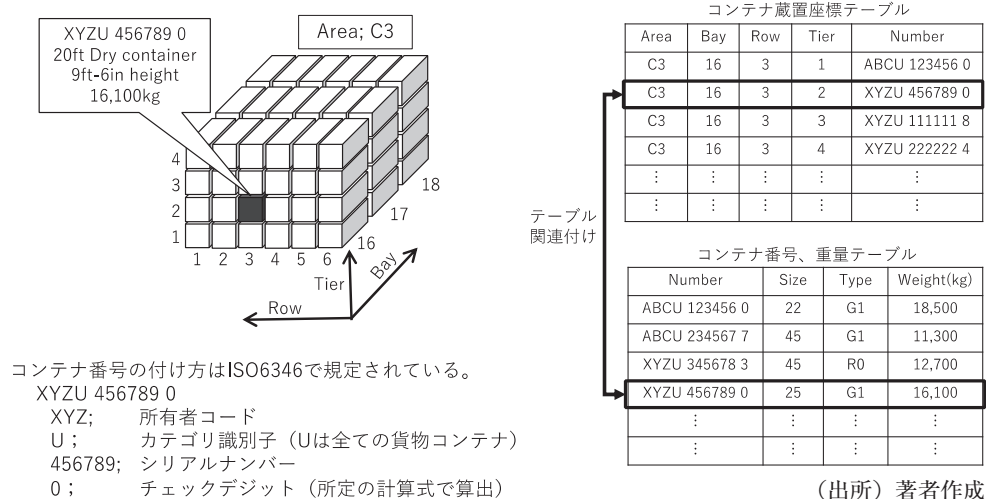
一部の小規模のものを除いて、TOSは共通のデータベースを介して互いに情報連携するサブシステム群（本船計画システム、ヤード蔵置計画システム、荷役機器管理システム等）で構成される。TOSのように、整合性や一貫性が重視される多種多様なデータをリアルタイムで取り扱うシステムでは、リレーショナル型データベース（Relational Database, RDB）を用いることが一般的である。RDBは表形式のデータテーブルにデータを格納し、複数のテーブルを組み合わせデータを取得するもので、データの整合性や一貫性を保ちやすく高度な検索が可能であるというメリットがあるため、現在、様々な情報サービスの基幹システムとして広く活用されている

7) 国土交通省港湾局港湾経済課港湾物流戦略室「AI等を活用したターミナルオペレーション最適化の実証と効果検証を行いAIシステム導入の際のガイドラインをとりまとめました」2023.5.26 (https://www.mlit.go.jp/report/press/port02_hh_000181.html 2024.1.19最終アクセス)

る。

TOSにおけるRDBの使用法の例として、コンテナ番号とサイズや重量を保管するテーブルと、蔵置場所とコンテナ番号の関係を保管するテーブルを連携させ、特定の場所にあるコンテナの情報を示すことが挙げられる（図3）。各テーブルの構成、テーブル間の関連付けやデータ内部処理方法といったRDBの構造は、データの整合性や一貫性を担保したり、処理速度を高めたりするためメーカ独自の工夫がなされている。通常TOSメーカは、データベース構造を自社のノウハウとしてブラックボックス化している。

図3 TOSにおけるRDBの使用例



2. CT内で使用するデータの規格化

(1) CT内データ通信

CT内で扱う情報は、TOSが管理するコンテナ蔵置座標や作業の順番といったデータの他に、クレーンやシャートラック、自動搬送台車 (Automated Guided Vehicle, AGV) 等の荷役機器状態データがある。既に一部のクレーンにはモニタリングシステムが搭載されており、クレーンの状態情報やエラーメッセージを、メンテナンスショップや遠隔監視施設等に設置された端末との間でデータ通信しているが、これらはメーカの独自通信フォーマットを採用している。Ⅲ-1節で述べた通り、TOSのデータベース構造がメーカ独自のものであるためデータフォーマットの統一化が進んでいないことに加え、クレーンモニタリングデータも各社独自のデータフォーマットなので、これまでTOSと荷役機器状態のデータは一元化して活用されてこなかった。

近年、デジタル技術の普及・発展に伴ってCTのDTが注目され始めており、CT内を行き来するあらゆるデータを一元的に扱うための規格化の動きが出てきた。これらのデータフォーマットは階層構造を持つものとなっている。これらのデータを保管するにはドキュメント指向型データベース (Document Database, DDB) との親和性が高く、TOSとAIが連携するシステムにおいては、コンテナの蔵置場所や次の荷役作業の種別といった整合性や一貫性を保つ必要のあるデータと、予測や最適化を行うための多種多様で多量のデータの双方を扱う必要があるためRDBとDDBが併用されるようになっていくと考える。

(2) PortML

PortMLは、シンガポール国立大学の次世代港湾モデリング・シミュレーション研究拠点 (The Centre of Excellence in Modelling and Simulation for Next Generation Ports, C4NGP) が、ス

マート港湾のDT構築のために開発を進めている構造化データフォーマットである⁸⁾。モデリングおよびシミュレーション用に記述するため、埠頭、荷捌き地、岸壁クレーン、AGV等のアセットをマークアップ言語で表記している。将来的には、アセットに加えて荷役作業指示といったイベントも記述できるようになる計画である。

PortMLを使用することで、海事・港湾産業のすべてのステークホルダーが港湾内のアセットの設計、構成、情報を互換性のある構造化データフォーマットで管理、開発できるようになることを目指している。現在、6ヶ国12の大学や研究機関、コンサルがアライアンスを組んで活動しており、PortMLを使用するためのアプリケーションとして、C4NGPはCTシミュレータおよびそのツール群であるSINGAPort Studioを発表している⁹⁾。

(3) Terminal Industry Committee 4.0

Terminal Industry Committee 4.0 (TIC4.0) は、2019年にベルギー・ブリュッセルで登録された非営利で活動する業界団体で、CTオペレータ、港湾コンサルタント、荷役機器メーカー、TOSメーカー、電機メーカー等52社が参画している。港湾ターミナルで使用されるあらゆる機器とプロセスを表現できる共通言語の定義を目的としており、その活動は欧州民間港湾会社およびターミナル連盟 (Federation of European Private Port Companies and Terminals, FEPORT)、ならびに港湾機材製造業者協会 (Port Equipment Manufacturers Association, PEMA) によって推奨されている¹⁰⁾。

TIC4.0では、独自に定めたセマンティックルールに基づいて、人間の言語に近い状態で理解できるようになっており、JSON (JavaScript Object Notation) やXML (Extensible Markup Language) 他いくつかの構造化データフォーマットでの記載が可能である。セマンティックとはコンピュータにデータの意味を理解させ処理する技術であり、TIC4.0のセマンティックルールでは機器やプロセスを6つの基本要素の組み合わせにより表現する¹¹⁾。

IV. 大規模コンテナ物流時代のCT作業計画

1. デジタルツイン (DT) の活用

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大規模コンテナ物流時代は、多量のデータが時々刻々発生するため、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。また、急な条件変更や計画変更にも即座に対応しなければならず、従前の荷役業務とは質や量が大きく異なり、これまでのノウハウに基づく作業計画方法では生産性の高い運用ができなくなっている。大規模コンテナ物流時代に適応した荷役計画を行うには、TOSとAIによる最適化をDT領域で連携させ、条件の異なる複数の計画を立て、AIで最適化された荷役計画に基づいてシミュレーションし、結果の比較をプランナーにフィードバックしたうえでヒトによる最終判断を行う必要があると考える。

8) PortML “About PortML”(https://portml.io/about-portml/ 2024.1.20 最終アクセス)

9) National University of Singapore “A Port Digital Twin Software: SINGAPort Studio v1.0 and Toolkit” (https://cde.nus.edu.sg/c4ngp/wp-content/uploads/sites/17/2020/12/The-Port-Digital-Twin-Toolkit-SINGAPort-Studio.pdf. 2024.1.20 最終アクセス)

10) Terminal Industry Committee-4.0 “About” (https://tic40.org/#/about 2024.1.20 最終アクセス)

11) ①HEADER; メッセージの出所、宛先、基準時刻等を記載、②SUBJECT; CONCEPTを行う対象・主体、③CONCEPT; SUBJECTの状態または行動、④OBSERVED PROPERTY; CONCEPTの大きさや量、⑤POINT OF MEASUREMENT; CONCEPTが実行される時間と場所、⑥VALUE; 単位の6つ (https://tic40.atlassian.net/wiki/spaces/TIC40Definitions/pages/8618041/TIC4.0+Semantic 2024.8.25 最終アクセス)

初期のDTは、実際のCTの状態をリアルタイムにエミュレータで忠実に再現する機能のみであったが、大規模コンテナ物流時代のCTに適応したDTでは、AI最適化の結果に基づいたシミュレーションを行い未来の状態をエミュレータで表示することが求められる。すなわち、使用するヤードクレーンの台数を変えるなど、異なるパラメータでAIがそれぞれ最適化した荷役作業指示に基づくシミュレーションを行う。その結果を比較し、いずれの荷役作業指示がそのCTの目指す全体最適バランスに近いか見比べ、最良と判断したパラメータの作業指示のみを実際の荷役作業指示としてTOSに取り込むことにより作業計画を立てる。

CT内を行き来するあらゆるデータを一元的に扱い、DT領域に取り込むためにはデータの規格化が不可欠である。Ⅲ-2節で述べた通り、現在、構造化データフォーマットに規格化の動きが出てきている。大規模コンテナ物流時代におけるCTのDT構築には規格化されたデータを活用する必要がある。DTの活用により、ますます複雑化するCT作業計画立案を効率的かつ多面的な検討に基づく判断を行うことが可能になる。

2. TOS・AI間でのデータ連携方法

Ⅱ-3節で述べた国交省の事例やGaoら（2022, 2023）の研究により、CTの荷役作業の生産性を向上するためのAIに関する研究は進みつつある。一方でⅢ-1節に述べたように、TOSメーカはノウハウの流出を恐れデータベースの詳細、特にRDBの構造を公開しない。このため、TOSメーカ自身が自動計画や生産性向上のロジックを開発しTOS内に組み込む場合は、直接データベースからデータを読み込み、加工、処理することが可能になるが、別のメーカが開発する場合は契約を結んでRDBの構造を開示してもらう必要がある。ただし、その場合でも開示される情報は部分的なものになることがほとんどである。様々なメーカが提供する自動計画や生産性向上のロジックを様々なメーカのTOSに組み合わせるようにするため、市村らは、図4に示すTOSデータベース内のデータをインターフェイス（Interface, I/F）経由でDT領域と共有するシステム構成を提案している¹²⁾。

CTにおいて、TOSデータベースに収納されている情報は本船計画システム、ヤード蔵置計画システム、荷役機器管理システム等のサブシステムを介してプランナーと呼ばれる作業員に伝えられる。プランナーはTOSサブシステムが表示する情報と経験に基づくノウハウにより、CT全体のバランスを考慮し、全体効率が最高になるようにコンテナ蔵置座標やスタッキングクレーンの配置等の作業計画を立て、TOSデータベースの情報をアップデートする。クレーン運転手他現場の作業員は、プランナーが立てた計画を荷役機器管理システムの車載端末を介して入手し、それに沿って荷役作業を進めていく。

近年のTOSは外部システムと連携しており、税関が保有する通関情報や船社が保有するコンテナ船内の積付け情報等を取り込めるようになっている。さらに、荷主あるいはその代理人に対してCT内の貨物の状況に関する情報を提供している例もある。日本においては、2018年度より「官民が連携した港湾の電子化（サイバーポートの実現）」に向け、港湾における行政手続きや民間事業者間取引の電子化、ペーパーレス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ビジネスイノベーションを目標とする「Cyber Port（サイバーポート）」の構築を開始している¹³⁾。

図4に示す構成では、TOSのデータベースが保有するデータをDT領域に取り込み、物流シミュレータ上に仮想CTを再現し、再現されたCT上でAIによる最適化を適用するものである。こ

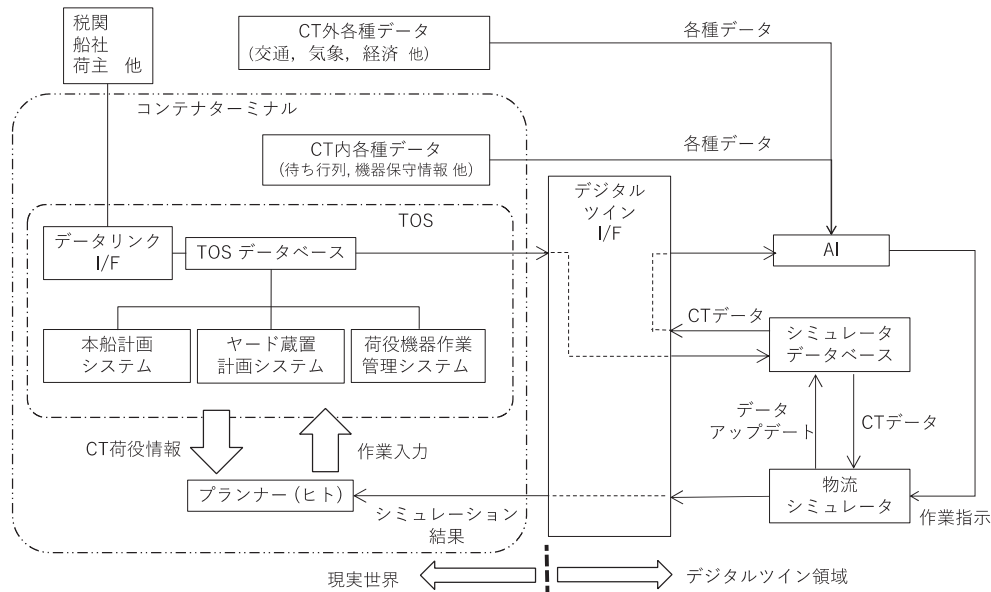
12) 市村欣也，多田淳一，“荷役作業指示支援システム”，特許第7309133号，2023.7.7

13) 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.61，2022，3～18ページ

の構成には以下の特徴がある。

- TOSデータベースからシミュレータデータベースへ方向でデータが受け渡され、AI自身がTOSデータベースを書き換えることがない。
- AIが最適化した計画に基づき物流シミュレータに荷役指示を出す。
- 物流シミュレータによりAIが最適化した計画に基づくCTの動き再現し、結果をプランナーが確認し、ヒトが了承したときのみTOSデータベースに反映する。

図4 AIと連携したTOSの構成



(出所) 著者作成

3. DT領域における物流シミュレータの適用

例えば、輸入コンテナの蔵置座標決定を最適化するAIを構築する場合、図5(a)に示すようなコンテナ船に対する岸壁クレーン荷役と蔵置ヤードでのスタッキングクレーン荷役を構内用シャーシトラックによる水平搬送で1対1に結んだモデルでは不十分である。すなわち、実際のCTでは図5(b)に示すように複数のコンテナ船、複数の岸壁クレーンが同時に作業をしており、さらにゲートから入ってくる外来シャーシトラックもあるので構内用シャーシトラックとの導線が交錯し、複数の作業が相互に影響を及ぼし合っている。このような複雑な作業の組み合わせを評価するには、物流シミュレータを用いて、実際の動きを再現することが有効であると考えられる。

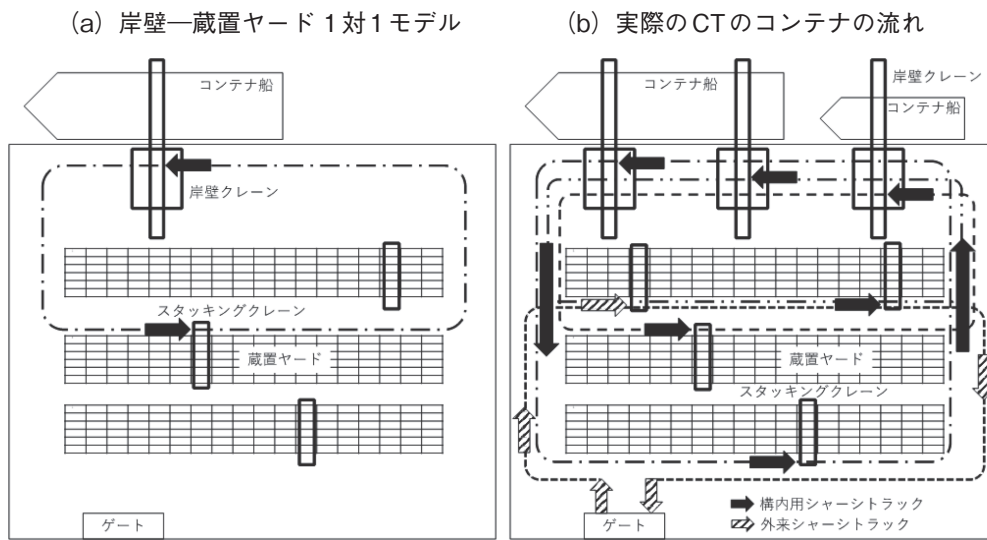
4. AI解析結果のフィードバック

DT領域においてAIが最適化した作業計画を、実際のCT作業計画にフィードバックする際、自動的に直接TOSへ取り込み作業指示を生成するとCT内の業務が全体最適になっているか評価できない。一般的なCTが重要視する指標として、本船着岸時間が短いこと、荷役作業が平準化していること、少ないエネルギー（電気、軽油）で作業できること等が挙げられるが、これらはトレードオフになっているものも多い。例えば、本船作業中は外来シャーシトラックのスタッキングクレーンへの進入を一切受け付けなければ本船荷役作業の最適化は図られるが、これに反して、外来シャーシトラックの待ち時間が長くなりCTとしてのサービスレベルは低下するといったように、個別の荷役作業を部分最適してもCTとして全体最適になっているとは限らない。全体最適は互いにトレードオフとなっている事象のバランスを取ることであり、どのようなバランス

を最良とするかは各CTの方針により異なる。

AIの判断基準に、全体最適のためのバランスを数値設定して組み込むことは可能であるが、トレードオフとなっている作業は多種多様であり正解を一つに導き出すことは困難である。その対策として、AIが生成した作業指示に基づくシミュレーションの結果を表示し、ヒトが最終判断したものを実際の作業指示に取り込むことが有効であると考ええる。Ⅳ-2節でAIによる最適化と物流シミュレータの連携について述べたが、総荷役時間や平均荷役能率といった最終結果のみならず、荷役状況の過程をグラフィカルに示すことでCT内作業の滞留や待ち状態を評価しやすくなると考える。この際、TOSの情報を含め、DT領域に集約したデータを全て表示できるグラフィックエミュレータを使用することで効率的に判断できる。

図5 最適化ロジックを構築するためのCTモデル



（出所）著者作成

V. おわりに

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大規模コンテナ物流時代は、多量のデータが時々刻々発生するため、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しなければならない。本報では、大規模コンテナ物流時代に適応したCTの荷役作業計画方法の概念設計について以下を論じた。

- DTの活用；複雑化するCT作業計画立案を効率的かつ多面的な検討に基づく判断を行うためには、DT領域においてTOSとAIを連携させる必要があると考える。条件の異なる複数の計画を立て、シミュレーション結果を比較したうえで作業計画を確定する。CT内を行き来するあらゆるデータを一元的に扱い、DT領域に取り込むためにはデータの規格化が不可欠である。現在、構造化データフォーマットに規格化の動きが出てきている。大規模コンテナ物流時代におけるCTのDT構築には規格化されたデータを活用する必要がある。
- 独立したTOSとAIの高度な連携；TOSのデータベースにはRDBが使用されているため、メーカー独自ノウハウであるデータベース構造は外部に開示されない。より多くのベンダーがTOSとは独立してAIによる最適化ロジックを開発するため、TOSとAIをI/Fを介して連携させる必要があると考える。TOSはCyber Port等を通じて、税関が保有する通関情報や

船社が保有するコンテナ船内の積付け情報等を取り込み、AIに引き渡すことで最適化の精度が向上する。TOSとAIが連携するシステムにおいては、コンテナの蔵置場所や次の荷役作業の種別といった整合性や一貫性を保つ必要のあるデータと、予測や最適化を行うための多種多様で多量のデータの双方を扱う必要があるためRDBとDDBが併用されると考える。

- 物流シミュレータを利用したAIによる最適化；実際のCTでは複数のコンテナ船、複数の岸壁クレーンが同時に作業をしており、さらにゲートから入ってくる外来シャーシトラックもあるので構内用シャーシトラックとの導線が交錯している。このような、複数の作業が相互に影響を及ぼし合う複雑な作業の組み合わせを評価するには、物流シミュレータを用いて実際の動きを再現することが有効であると考ええる。
- エミュレータによるヒトへの結果フィードバック；AIが最適化した作業計画を自動的に直接TOSへ取り込むのではなく、AIが生成した作業指示に基づくシミュレーションの結果を表示し、ヒトが判断したうえで実際の作業指示に取り込むことが効果的と考える。そのため、シミュレーション結果をエミュレータで表示し、最終結果のみならず荷役状況の過程をグラフィカルに示すことでCT内作業の滞留や待ち状態を容易に評価することができるようになる。多様な評価基準が混在するCTにおいて、個別の荷役作業を部分最適してもCTとして全体最適になっているとは限らない。全体最適は互いにトレードオフとなっている事象のバランスを取ることであり、どのようなバランスを最良とするかは各CTの方針により異なる。

大規模コンテナ物流時代におけるCT作業計画法として、AIによる単なる部分最適を達成するのではなく、AIが提供する結果をヒトが比較、最終判断を行うことで、そのCTが重要視するバランスの全体最適を達成できるプランを選択する手法を提唱した。今回提案した手法の有効性を、実際のCTにおける荷役データを用いて今後検証していく。

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。ここに謝意を示す。

参考文献

- 赤倉康寛「東西基幹コンテナ航路の定時制の把握と遅延要因の分析」、『土木学会論文集D3（土木計画学）』, Vol76-1, 2020.
- Wang, K., Hu, Q., Zhou M., Zun, Z. and Qian, X., “Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports” *Case Studies on Transport Policy*, 9, 1298-1312, 2021.
- Klar, R., Fredriksson, A. and Angelakis, V., “Digital Twins for Ports: Derived from Smart City and Supply Chain Twinning Experience”, *IEEE Access*, Volume 11, 71777-71799, 2023.
- Gao, Y., Chang, D., Chen, C.-H. and Xu, Z., “Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling”, *Advanced Engineering Informatics*, 51, 2022.
- Gao, Y., Chang, D., Chen, C.-H., “A digital twin-based approach for optimizing operation energy consumption at automated container terminals”, *Journal of Cleaner Production*, 385, 2023.
- Inutsuka, H., Ichimura, K., Sugimura, Y., Yoshie, M. and Shinoda, T., “Study on the Relationship between Port Governance and Terminal Operation System for Smart Port: Japan Case”, *Logistics*, 8, 59, 2024.