

スマートポートに向けたターミナルオペレーションシステムと 港湾ガバナンスの関係性についての一考察

犬塚 秀世*・市村 欣也**・杉村 佳寿***・吉江 宗生****・篠田 岳思*****

要 旨

本報告は、”logistics” で出版された論文「Study on the Relationship between Port Governance and Terminal Operation System for Smart Port: Japan Case」の日本語訳を一部加筆修正したものである。

近年のグローバル化により国際貿易量は増加しており、国際輸送ネットワークにおける港湾の役割の重要性も増している。その流れに伴い港湾の生産性や安全性の向上、環境負荷の低減等を目的としスマートポートと呼ばれる情報通信技術の活用による港湾運営の高度化の流れが世界中で進んでいる。

コンテナターミナルの運用を管理するための情報システムであるターミナルオペレーションシステムは世界中のコンテナターミナルで幅広く導入されており、スマートポート化においても重要な役割を果たすことが期待される。今後の日本におけるターミナルオペレーションシステムの進化の方向性を検討するにあたっては、その特徴や課題点、背後要因を整理する必要がある。

そこで本稿では、スマートポートに向けた国内外の研究開発事例を文献調査によって整理するとともに、日本で導入されているターミナルオペレーションシステムと、海外において広く導入されているターミナルオペレーションシステムの機能面の特徴を調査し、その相違点を整理した。また、日本や海外の港湾運営管理体制の特徴を調査し、日本のターミナルオペレーションシステムの特徴と、日本の港湾運営管理体制の関係性に関する考察を実施した。さらに、日本のコンテナターミナルにおいてスマートポート化を推進するにあたっての方向性についての考察を実施した。

キーワード：コンテナターミナル、ターミナルオペレーションシステム、港湾運営、スマートポート

* インフラDX研究領域 サイバーフィジカル研究グループ 研究官

** (株)三井E&S 成長事業推進事業部 マーケティンググループ長

*** 客員研究官(神戸大学海事科学研究科教授)

**** 特別研究主幹

***** 客員研究官(九州大学名誉教授)

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 e-mail:inutsuka-h@p.mpat.go.jp

Study on the Relationship between Port Governance and Terminal Operation System for Smart Port

Hideyo INUTSUKA*

Kinya ICHIMURA**

Yoshihisa SUGIMURA***

Muneo YOSHIE****

Takeshi SHINODA*****

Synopsis

This paper is a Japanese translation of the paper “Study on the Relationship between Port Governance and Terminal Operation System for Smart Port : Japan Case” published in “logistics”.

Driven by the trend of globalization, the volume of trade between nations has increased significantly. Ports play an important role in transportation networks. With this trend, the advancement of port operations using information and communication technology, known as Smart port, has become a global trend, with the aim of improving port productivity and safety, and reducing environmental impact.

Terminal operation system, which manages terminal operation processes, have been widely introduced at container terminals around the world, and are expected to play an important role in the smart port concept. In order to discuss the future direction of the advancement of terminal operations systems in Japan, it is necessary to summarize the characteristics and challenges of terminal operations systems.

This paper review literatures of domestic and international R&D cases for smart ports, and summarizes the characteristics of Japan’s port authority (PA) system based on its historical background, and it compares the system functional characteristics of the TOS introduced in Japan with those of TOSs widely introduced in worldwide. It then discusses the relationship between the issues and features of Japan’s TOS and the port operation and management system, and it provides recommendations for smart ports.

Key Words: container terminal, terminal operation system, port governance, smart port

-
- * Researcher, Infrastructure Digital Transformation Engineering Department, Cyber-physical Group
 - ** Manager, Mitui E&S Co.,Ltd, New Business Development Div., Marketing Group
 - *** Visiting Senior Researcher (Professor, Kobe university)
 - **** Senior Director for Research
 - ***** Visiting Senior Researcher (Emeritus professor, Kyushu university)
- 3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5062 Fax : +81-46-844-0575 E-mail : inutsuka-h@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	119
1. はじめに	122
2. 本研究の内容と構成	122
3. 文献調査とターミナルオペレーションシステムに求められる機能の考察	123
3.1 スマートポートに関する文献調査	123
3.2 スマートポートに向けたターミナルオペレーションシステムの機能	125
4. 日本の港湾ガバナンスとコンテナターミナルの運営	125
4.1 日本の港湾ガバナンスに起因するコンテナターミナル運営の特徴	125
4.2 港湾荷役関係者の階層化	126
4.3 日本と諸外国の港湾管理・運営体制の比較	127
5. ターミナルオペレーションシステムの調査	128
5.1 概要	128
5.2 日本と海外のシステムの比較	128
6. 考察	131
7. おわりに	132
参考文献	133
略号表	135

1. はじめに

グローバル化に伴い、国家間の貿易量は大幅に増加しており、港は輸送ネットワークと経済システムにおいて重要な役割を果たしている¹⁾。港湾海事産業は進化の5段階目、つまり紙ベースの港湾、デジタル化された港湾、港域の統合、港湾と都市の統合を経て今日ではグローバルサプライチェーンとの統合に至ったと言われている²⁾。

2010年代以降、コンテナ港湾は「スマートポート」のコンセプトに向けて進化しており、インダストリー4.0の影響を受けて、“port 4.0”という用語が登場している³⁾。スマートポートの定義については諸説あるが、Barbarらは、スマートポートの包括的な定義として、自動化、環境、インテリジェンスの3つの要素を挙げている⁴⁾。

自動コンテナターミナル (Automated Container Terminal: ACT) はスマートポートの典型的な事例であり、無人搬送車 (Automated Guided Vehicle: AGV)、自動スタッキングクレーン (Automated Stacking Crane: ASC)、ターミナルオペレーションシステム (Terminal Operation System: TOS) といった機器やシステムの適用により ACT の動作環境は改善されてきた。一方で既存の自動化荷役機械は気象条件や交通渋滞、設備の故障といった外乱に直面した際にシステムの動作を柔軟に調整する能力が十分ではなく、ターミナルの全体的な効率に影響する恐れが指摘されており⁵⁾、その解決策としてデジタルツインを例とするテクノロジーが提案されてきた⁵⁾。

港湾の環境負荷低減としては、気候や環境の持続可能性を確保しつつ経済発展を促進するというグリーン成長またはグリーン港湾戦略の理念が導入され⁶⁾、港湾の運用管理プロセスにおけるエネルギー効率の向上や生態系、環境の保護といった側面からの取り組みが盛んである⁷⁾。

以上のようなスマートポート化の背景としては、モノのインターネット (IoT)、人工知能 (AI)、5G ネットワーク、ブロックチェーンといったような新技術の登場、そして熟練した人材が不足している中で貨物量が増加していることから、24時間稼働するデジタル化され自動化されたソリューションへの要求があるとされている^{1, 8)}。

本論文において研究対象とする TOS は、コンテナターミナルのさまざまな要素 (情報通信技術 (ICT) システム、コンテナ処理装置、インフラ、ターミナルオペレーターのパフォーマンスなど) に基づき、ターミナル内のすべてのプロセスを担当する管理システムである⁹⁾。

港湾情報連携システム (Port Communication System: PCS) もまた、港湾における重要な情報システムである。PCS は、港湾とその顧客およびフォワーダー、輸送業者、

輸入業者、輸出業者、税関などのさまざまな利害関係者との間の情報交換を提供するために使用される組織間システムであるとされる⁹⁾。

スマートポート化に向けた情報システムの高度化は、日本においては国土交通省港湾局や港湾管理、運営者、その請負事業者である港運会社等によって進められてきた。例えば、国土交通省港湾局が開発運用を行っているシステムとしては、港湾物流手続きの電子化システムとして、2021年から運用開始した Cyber port や¹⁰⁾、コンテナターミナルのゲート前混雑の解消やコンテナトレーラーのヤード内滞在時間を短縮することを目的に開発された搬出入予約システムである CONPAS¹¹⁾、ターミナルオペレーター、荷主、海貨事業者、運送事業者等の関係事業者間で、一元的にコンテナ物流情報を共有化するためのシステムである Colins があり、これらのシステムは PCS の一種としてカテゴライズされ则认为られる。

一方で、コンテナターミナルの運用プロセスを管理する TOS は、一般的には港湾管理者や港運事業者により主体的に導入されるものであり、TOS の改善や高度化はそれらの事業者委ねられている。

本論文は、日本の港湾管理運営体制の特徴をその歴史的背景等に基づき整理するとともに、日本において導入されている TOS のシステム機能面の特徴を、欧州や東南アジア等において広く導入されている TOS と比較する。その上で、日本の TOS の課題点や特徴、港湾運営管理体制と TOS の関係性について考察し、将来のスマートポート化に向けた考察を行う。

2. 本研究の内容と構成

本研究のフローを図-2.1 に示す。まず、文献レビューではスマートポートや TOS に関する研究開発事例を調査

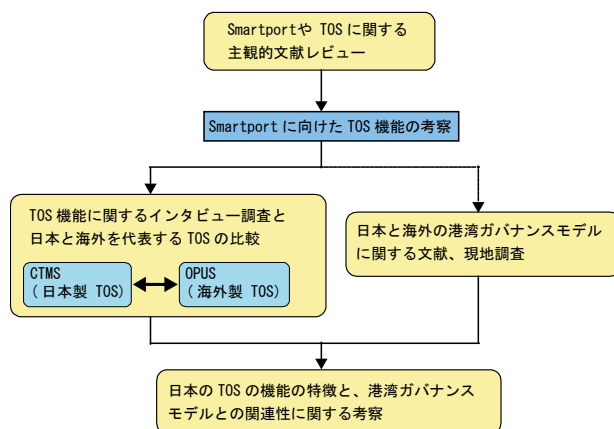


図-2.1 研究フロー

する。文献調査は、1. ソフト面からのコンテナターミナルオペレーションの最適化、2. コンテナターミナルの経営戦略や、サプライチェーン全体に関わる効率化、3. IoT技術のようなハードウェアの導入や、コンテナターミナル外との情報連携に関する研究という、3つの方向性から行った。そして先行研究の動向を踏まえて、スマートポートに向けたTOSのコンセプトと機能を考察したうえで、それらを踏まえて日本と海外を代表するTOSのヒアリング調査を行い、機能の相違点を整理する。同時に日本と海外の港湾ガバナンスについて文献レビューや著者らの訪問インタビュー等の結果を参考にして整理する。最後に、TOS調査の結果と港湾ガバナンスの関連性についての考察を行い、改善点などを提案する。

本論文の特徴としては、スマートポート化の動向の中で、TOSに求められる機能について整理し、日本を代表するTOSシステムの特徴を海外の先進的なTOSとの比較によって明らかにし、日本のTOSシステムの現状と日本における港湾運営、管理体制を関連付けて考察したことと、その上で、日本の港湾のスマートポート化のためのTOSの方向性について提案したことである。

本論文は図-2.1のフローに基づき以下のように構成されている。まず、第3章ではスマートポート化に向けた先行研究を整理し、その動向について述べるとともに、TOSに求められる機能について検討する。第4章では、日本の港湾運営管理体制について整理する。第5章では、日本国内と海外のTOSシステムを比較し、スマートポート化の視点から、それぞれのTOSの相違点について述べる。第6章では、第4章までの内容を踏まえ、日本の港湾運営管理体制やTOSの特徴と課題点について考察する。第7章は以上を踏まえ結言とする。

3. 文献調査とターミナルオペレーションシステムに求められる機能の考察

3.1 スマートポートに関する文献調査

スマートポートに向けた研究開発は、自動化、電動化、デジタル化を含む3つの技術分野を中心として継続的に進んでいる⁶⁾。本稿では、これらの研究開発や調査に関する研究の内、特にデジタル化に関わる研究についてレビューした上でTOSに求められる機能について考察する。スマートポートに関する研究としては、大きく分けると以下の3つの研究の方向性が考えられる。

1. コンテナターミナルにおける蔵置計画や荷役機器の最適化、消費エネルギーの最適化に関する研究や、TOSやデジタルツインを含むソフト面からのコンテナターミナ

ルオペレーションの最適化等に関する研究

2. コンテナターミナルの経営戦略や、陸上・海上コンテナ輸送に関わる効率化や動向調査に関する研究

3. IoTやICT技術の活用によるTOSやコンテナターミナル運用の高度化に関する研究(主にハードウェア面の導入や、コンテナターミナル外との情報連携によるもの)

まず、コンテナターミナルにおける蔵置計画や荷役機器の配置等のターミナルオペレーションのソフト面に関する研究として、例えばDamlaらは、本船揚げ積み作業におけるガントリークレーンのスケジューリングやヤード内の蔵置位置を最適化するために、コンテナターミナルのオペレーションを統合した統合港湾コンテナターミナル問題(IPCTP)を定式化し、制約プログラミング(CP)ソルバーによって解けるということを示した¹²⁾。

また、コンテナが搬入される際の搬入座標決定ロジックの定式化を行い、3ステップ(コンテナ属性の特定、蔵置ベイ候補の選定、蔵置ベイの決定)による座標決定をシミュレーションにより検証し、現状と比較したハンドリングコストの改善を示した研究の例がある¹³⁾。

搬入コンテナ(輸出のためにヤード外から搬入されるコンテナ)の位置決定としては、他にもGMMクラスタリングを活用したオンライン最適化により積計画に基づいたヤード内搬入位置決定ロジックを構築した研究例がある¹⁴⁾。

本船揚げコンテナ(輸入のために本船から陸揚げされるコンテナ)の蔵置位置の決定については、搬出トラックの到着順を考慮することで荷繰りを最小化することが重要な課題のひとつである。Sebastiánらは、データ分析手法に基づくコンテナ滞留時間の予測と、数理モデルによる荷繰りを最小化する本船揚げコンテナ蔵置計画の立案手法を提案した¹⁵⁾。

また、本船揚げコンテナの蔵置場所を顧客ごとに専用のエリアにすることで荷繰りを減少させる、スマートスタック戦略(SS)というコンセプトも提案されている¹⁶⁾。

データマイニングとオペレーションズリサーチの手法により、搬入コンテナの予約において搬入と搬出を1回で行うDouble moveを増やすことでヤード内に進入するトレーラーの台数の低減と到着タイミングの平準化を行い、ヤード内トレーラーの混雑の低減と作業の効率化をメキシコやイタリアにおけるケーススタディにより検証した例もある¹⁷⁾。

上に挙げたコンテナの蔵置計画の定式化や効率的なコンセプトの提案といった研究は多くの先行研究が存在する分野である。コンテナターミナルのオペレーションにおいてコンテナの蔵置計画はTOSが担う機能の一つであ

り、これらの研究はTOSの改善や高機能化に資するものだと考えられる。

TOSの機能に関する研究についてもいくつか例があり、例えばコンテナターミナル運用の効率化を図るための統合Terminal Operation System(ITOS)の提案¹⁸⁾や、TOSの機能を専門家パネルの意見を基に分類し、AHP(Analytic Hierarchy Process)により、重視すべき機能を評価した研究¹⁹⁾がある。

また、コンテナターミナルオペレーションのソフト面からの効率化において、デジタルツインは重要な研究開発テーマである。例えばKan Wangらは、①Physical、②Data、③Model、④Service、⑤Applicationの5層から構成されるデジタルツインのコンセプトを提案し、課題の整理を行った²⁰⁾。

Robert Kiarらは、デジタルツインの歴史と現状を適用ドメインや目的に分けて類型化し、港湾デジタルツインの構成について整理している。港湾はサプライチェーンのノードのひとつであるとともにスマートシティの一部分であり、都市交通や海上物流と密接に関係しておりそれらの多種のプレイヤー間でのデータのやり取りの統一化が重要であると述べている。また、港湾のデジタルツインの適用先として、本船、ヤードオペレーション、後背地輸送、照明や荷役機械のモニタリングといった設備面を挙げ、どのようにデジタルツインが適用されるかを示している²¹⁾。また、デジタルツインモデル上でのAutomated Stacking Crane(ASC)のスケジューリングロジックの検討や⁵⁾、Q学習を適用したASCの消費電力の最適化等の研究事例がある²²⁾。

次に、コンテナターミナルの経営戦略や、陸上・海上コンテナ輸送に関わる効率化や動向調査に関する研究としても、様々な手法を用いた港湾の現状や経営戦略の優先順位の分析評価に関する研究が多く行われている。

例えば、先進国と新興国の港湾の効率性の比較をDEA(データ包絡分析法)により行った事例²³⁾や、ファジイ技法を組み込んだ階層分析プロセスにより港湾改善戦略の優先順位を評価した例²⁴⁾、ターミナル運営のサービス性に影響する要因を整理し、多基準意思決定法を用いてインドの12のコンテナターミナルのサービス性を比較評価した例²⁵⁾等が挙げられる。

また、Barbara T.H. Yenらは、スマートポートの定量的な評価を行うための指標として、環境、自動化、情報化の3カテゴリーで13の指標を定義し、階層分析法(AHP)や包絡分析法(DEA)、Tobit回帰分析を行いそれぞれの指標が港湾のパフォーマンスにどのような影響を与えるかを評価した⁴⁾。

Ignacioらは、スマートポートに向けた新技術の現状をレビューし、スマートポートやポート4.0の新時代において、港湾やターミナルが具体的なプロジェクトをどのように展開しているかをまとめている³⁾。

Othmanらは、エジプトの港湾において、スマートポートの実現と技術導入への準備と適応の度合い、および持続可能性の実現と改善への影響を調査した。彼らはエジプト港湾が持続可能性の実現と改善のためどの程度スマート港湾の実践と技術導入が可能であるかを調査した²⁶⁾。

炭素排出政策も港湾やサプライチェーンのモデリングにおいて考慮されるべきである。Eslamipoorらは、多目的モデリングにより、配送に関わるコストを最小化するとともに、ドライバーと目的地への車両割り当てを最適化することにより、二酸化炭素排出量を削減するモデルを提案した²⁷⁾。他にもEslamipoorらは、異なるデポへの荷物の集配を伴う車両経路問題 (VRP) の数値モデルを提案する²⁸⁾。このモデルはコストと顧客の待ち時間を最小化することを目的としている。港湾の戦略を考えるにあたってはサプライチェーンマネジメントの視点を持ちこのような陸運配送の最適化にも配慮する必要がある。

最後に、5Gに代表されるような近年の情報通信技術の高度化や、センサリング技術の発展に伴い、Internet of Things(IoT)を活用した港湾における情報収集とその活用、またPCSのような、コンテナターミナルとその外部との情報連携もまた重要なトピックである。

Leonardらは、港湾における情報システムを、学術的および実用的な観点から調査している²⁹⁾。この研究では、現在の港湾で使用されている情報システムとして、National single window(貿易書類等の提出のためのEDIシステム)、Vessel traffic services、ゲートシステム(予約および自動処理)、PCS、TOS、ダメージチェックシステム、Port road and traffic control information systems等を挙げている。また、それらの情報システムを支持する技術要素として、Differential GPS(DGPS)による位置測位や、RFIDによるコンテナや車両の認識、OCRやワイヤレスセンサーネットワーク等があることを指摘した。

Amine BOUHLALらは、コンテナターミナルにおけるIoT技術を活用した各種センサーやモニタリング技術の動向調査を行った³⁰⁾。この研究ではInternet of ships(IoS)に焦点を当て、港湾局、船社、荷主等が情報共有できる標準化されたデータシェアのプラットフォームの必要性が論じられている。彼らはまた、船やクレーン、AGVなどから情報をリアルタイムで収集できるデジタルプラットフォームがスマートポートの実現に不可欠であると述べている。

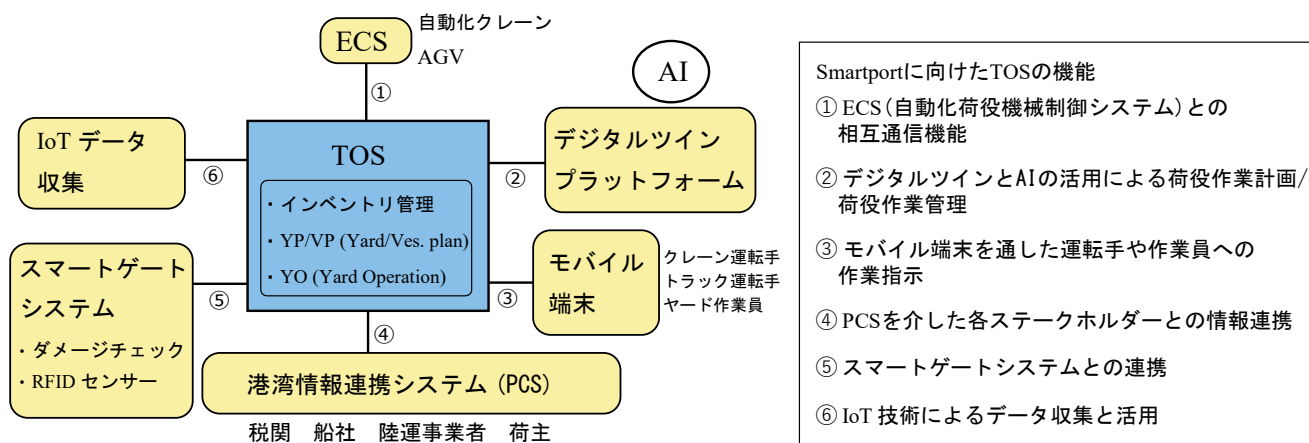


図-3.1 スマートポートのためのターミナルオペレーションシステムの機能

以上のような先行研究を踏まえ、本研究は港湾で使用されているTOSについての機能を調査し、日本と世界のTOSの相違点を整理し、港湾政策制度との関係性を考察し、スマートポートに向けた提案を行った。スマートポートについての先行研究では、実際に港で使用されているTOSシステムの機能に関してベンダーにヒアリング調査を行い、その背景について言及したものは少なく、本論文の特徴であると考えられる。

3.2 スマートポートに向けたターミナルオペレーションシステムの機能

以上のような先行研究の動向を踏まえて、スマートポート化に対応するためのTOS機能の一例として、本論文では図-3.1に示すようなTOSを想定する。このTOSは、従来のTOSが備えているようなインベントリ管理機能や作業計画、管理機能に加えて、スマートゲート、PCS、IoTデータ収集機能とのデータ連携機能を備えるとともに、それらのデータをデジタルツインプラットフォームやECSと仲介し、オペレーションの効率化や自動化に貢献する。言い換えれば、このTOSはスマートポートの中心として情報伝達と荷役作業を制御する役割を担うものである。

4. 日本の港湾ガバナンスとコンテナターミナルの運営

4.1 日本の港湾ガバナンスに起因するコンテナターミナル運営の特徴

日本では戦後間もない1950年に港湾法が制定され、港湾の管理主体としては、単独または複数の地方公共団体が設立する港務局ないしは地方公共団体を港湾管理者とするとされた³⁸⁾。日本でのコンテナリゼーションの始まりは1969年であり、船社による専用使用が港湾法上不可で

あったこと、巨額のコンテナターミナル整備費用の資金調達面の要請から、1967年には京浜及び阪神外貿埠頭公団が設立されている。整備されたコンテナターミナルは1969年の若狭裁定の下で船社にリースされ、船社専用ターミナルとして運営されていった³¹⁾。

専用借受けの対象には外国船社も含まれたが、資本力の小ささを理由に港運事業者は作業を請負うのみとされた。しかし、2000年代以降は港運事業者のターミナル運営への参画が進み、2000年には共同借受けという形で港運事業者のコンテナターミナル運営への参画は一般化していき、船社専用ターミナルでも、港運事業者への転貸や船社・港運の共同借受けが行われるようになった³²⁾。

1990年代には日本の港湾の国際競争力の低下が指摘されるようになり³³⁾、国内のコンテナ港湾の量的、地理的配置を政策的に位置づけた1995年の中枢・中核国際港湾指定を経て、2001年にはスーパー中枢港湾政策が提唱された。この頃までには世界各国で港湾改革が進み、多くの国はいわゆる地主型と言われるLandlord港湾へと転換³⁴⁾、それに伴いグローバルターミナルオペレーター（Global Terminal Operator: GTO）が台頭しグローバル展開を進め³⁶⁾、こうしたGTOの活動に対抗することが政策の背景にあった³⁸⁾。このため、アジアの主要港を凌ぐ港湾コストやサービスの実現を、国内のメガターミナルオペレーター（Mega Terminal Operator: MTO）の育成により目指されることとなったが、MTOは国内港運事業者による共同出資会社を念頭に置いたものであった³⁹⁾。

2004年には京浜港、伊勢湾、阪神港がスーパー中枢港湾として指定され、いくつかのMTOが設立されたが、事実上港運事業者間の縦割り状態が続き、実質的にこれらの港湾でMTOによる一体運営は実現しなかった。

続く国際コンテナ戦略港湾政策で港湾運営会社（Port Operation Company: POC）制度が導入されたことで、港

湾運営の枠組みは変化する。港湾運営会社制度とは、民間の視点を有する株式会社である港湾運営会社が港湾の複数のターミナルを港湾管理者等から借受け一体運営するものであり、POCはターミナル単位で更にターミナルオペレーター（Terminal Operator: TO）に専用的に貸付を行う。貸付先はそれまでターミナル運営に関わってきた船社や港運事業者である。すなわち、PA-POC-TOという世界的にも稀な二層構造である。POCは、MTOのように港運事業者を念頭に置いたものではなく、港湾法上最上位に位置づけられる国際戦略港湾の港湾運営会社は、港湾管理者に加えて国が出資を行うState owned enterprise (SOE) となっている⁴⁰⁾。

もともと港湾法制定時に、港湾管理主体としては欧米のPort Authority (PA) 制度を模した港務局を想定したが普及せず、また日本は港湾改革を経てもPAの商業化、企業化は行われず、アジア内でも中国、韓国、台湾の様にPAの運営機能が民間企業として分離されている訳でもなく^{41、42)}、今日まで港湾管理は地方自治行政の一環として行われてきていることが日本の大きな特徴となる⁴³⁾。大港湾を中心に運営会社制度を通じて民間関与の傾向は強まっているとは言え、大部分の港湾では公設公営のターミナルである⁴⁰⁾。

このため、民間企業が参入可能な港湾運営市場は限定され、参画主体としては、基本的にはPOC及びその出資者、POCからリースを受けるTOとなる。港湾運営会社の出資者は地場企業を中心に様々な業種が含まれるが、実質的に港湾運営に参画しているとは言い難く、TOとしては船社と港運事業者に限定される。船社に関しては一部外国船社もリースを受けているが、港運事業者については国内企業に限られ、日本の港湾にGT0が進出していないことは大きな市場の特徴になる⁴⁴⁾。

TOとして日本の港運事業者が置かれてきた環境は、外国TOの進出が殆どなかったことを含め競争がなかった点で独特である。歴史的にCTの運営が船社の専用ターミナルから始まり、港運事業者が運営主体となってからもそ

の慣習は踏襲されており、複数の先行研究において日本の特徴として専用、準専用ターミナルの存在が挙げられている^{45~47)}。TOとしての参入以前に、そもそも荷役業としての市場自体、業界秩序が重視された戦後より、登録制、免許制、許可制へと自由化の流れにあるものの、現在に至るまで基本的には船社と港運事業者の契約が船社一元請港運一下請港運の縦割り系列が港湾ごとに踏襲され、配船に対しては船社、日本港運協会、労働組合との事前協議が必要であるという業内規制を守りながら自らの市場環境を維持してきた³²⁾。

外国TOの進出がないことは、スーパー中枢港湾政策が大きな転換点となっている。アジアの中でも、中国、韓国、台湾は港湾運営の効率化と港湾整備のために民営化政策を導入して外資のGT0を受け入れてきたことと対照的に、日本はGT0に伍する国内TOであるMT0の育成に拘った。結果的に国内に産業として自立したTOが未発達で定着していないことも指摘されている⁴⁸⁾。

港湾ガバナンス上、PA機能の分離がなされていないことや、港湾改革の中で目指されたMT0が経路依存性により実現しなかったことにより、国内民間企業による港湾運営が産業として育成されていない。

現在では、日本のコンテナ貨物の大部分を扱う大港湾ではPOC制度が適用され、POCから転貸されたTO（船社、港運事業者）がCTの運営を行っているが、PA-POC-TOの二層構造、さらには港運業界の歴史的に踏襲されてきた秩序の存在から、ステークホルダー間の権利、裁量の範囲は複雑な状況にあり、TOSの導入、発展にも大きく影響する。一方、大港湾以外では、公共事業としてのCT整備が実施されてきたほか、現在でも依然として地方公共団体に運営される公共ターミナルであり、こうした状況もTOSの導入、発展に影響すると考えられる。

4.2 港湾荷役関係者の階層化

表-4.1に日本のPOC制度適用のCTにおける港湾荷役ステークホルダーの階層の一例を、表-4.2に港湾運送事業

表-4.1 日本のPOC制度適用のCTにおける港湾荷役ステークホルダーの階層の一例

	機能	実態	業務内容
港湾管理	所管官庁	国土交通省	港湾計画の確認、岸壁整備
	港湾管理者	自治体	港湾計画の策定、荷捌き地整備
港湾運営	港湾運営会社	第三セクター株式会社	行政財産の借受とCT運営者への貸付、アセット導入と管理
CT運営と荷役作業	CT借受者/会社	民間企業；船社	長期借受、専用使用
	CT運営者/会社	民間企業； 一般港湾運送事業者（元請）	CTの運営業務、荷捌き地荷役機械、TOSの導入
	荷役作業/会社	民間企業； 港湾荷役事業者等（専業）	荷役機械の操作

表-4.2 日本の港湾荷役事業者の種別

事業名	事業内容
①一般港湾運送事業	荷主又は船舶運航事業者の委託を受け、船舶により運送された貨物の港湾における船舶からの受取り、運送されるべき貨物の港湾における船舶への引渡し等に合わせ、②～④を一貫して行う。
②港湾荷役事業	港湾における船舶への貨物の積込又は船舶からの貨物の取卸。船舶・はしけにより運送された貨物の荷さばき場への搬入、または運送されるべき貨物の荷さばき場からの搬出、これらの貨物の荷さばき場における荷さばき若しくは保管等。
③はしけ運送事業	港湾における貨物の船舶・はしけによる運送と、はしけの曳航。
④いかだ運送事業	指定区間におけるいかだに組んで行う木材の運送等
⑤検数事業	船積貨物の積込又は陸揚に際して行う貨物の箇数の計算又は受渡の証明
⑥鑑定事業	船積貨物の積付に関する証明、調査及び鑑定
⑦検量事業	船積貨物の積込又は陸揚に際して行う貨物の容積又は重量の計算又は証明

法で規定される港湾運送事業7事業を示す⁴⁹⁾。

表-4.1で例示したCTでは、港湾管理者から当該港湾内の全てのCTが1つのPOCに長期貸付され、CT毎に借受者（船社または港運）に貸し付けられている。ガントリークレーンは港湾管理者または港湾運営会社が購入するが、実際のCTの運営は船社が借り受ける場合でも一般港湾運送事業の許可を得た民間企業であるCT運営者（元請）が使用することになる。しかしながら、実際にクレーンに乗り込み操作をするのは港湾荷役事業の許可を得た民間企業の荷役作業員（専業）の荷役作業員であるので、クレーンの所有者、借受者、使用者、操作者が異なっている。一方、荷捌き地のクレーンやトップリフタ、シャーシトラクター等荷役機器、並びにTOSはCT運営者が購入し、荷役作業会社が雇用する荷役作業員が操作を行うケースが一般的である。また、荷役機器の保守維持管理は、CT運営者またはCT運営者が委託する請負業者によって行われている。先述した歴史的背景から、日本の港湾荷役においては、表-4.2に示す通り各事業者の作業範囲が明確に分かれている。

4.3 日本と諸外国の港湾管理・運営体制の比較

日本のCT運営形態と諸外国の形態とを比較するため、著者による海外港湾の現地調査⁵⁰⁾等に基づき、アラブ首長国連邦（UAE）・ドバイ港とタイ・バンコク港及びレムチャバン港ターミナルDの状況を表-4.3に示す。表の着色部は民間企業を示す。

港湾運営における研究の視点のひとつとして、港湾ガバナンスモデルの分類がある。広く用いられている港湾ガバナンス類型論として、World bankによるものがあり⁵¹⁾、民営化のレベルに基づいて、Service port（公共サービス型）、Landload port（地主型）、Tool Port（上下インフラ

提供型）、Private port（私営型）の4類型が挙げられている。日本の一般的なコンテナターミナルは、インフラストラクチャーやスーパーストラクチャーを公共セクターが担い、運用を民間が担うという点からTool portに分類される。本論文ではTool port以外の3類型に分類されるターミナルを、東南アジアや中東地域から1港ずつピックアップして比較を行うこととした。

UAEのDP World(DPW)は、2005年に設立した民間企業であり、現在、世界42カ国で72ターミナルを運営しているグローバルターミナルオペレータである⁵²⁾。Port Authority of Thailand (PAT) は、タイ運輸省管轄下の組織として1951年に設立された公社で、国際港湾であるバンコク港、レムチャバン港及び地方港湾チェンセン港、チェコン港、ラノンの計5港を管理している⁵³⁾。Hatchson Port Thailand (HPT) は、Thai Laemchabang Terminal社とHatchison Laemchabang Terminal社の2社で構成され、CKハチソン傘下の民間企業としてタイの港湾を運営している。CKハチソンは、香港を拠点として世界24カ国で53ターミナルを運営しているグローバルターミナルオペレータである⁵²⁾。

いずれも公共セクターと民間セクターの所掌分界点に違いがあるが、それぞれのセクター内では単一の事業主体を構成している。一方日本の港湾運営会社は、2011年の港湾法改正により導入された港湾運営会社制度によるもので、国、地方自治体、民間企業が出資する第三セクター方式の半官半民企業である⁵⁴⁾。港湾ガバナンスモデルの観点からはTool portに分類されるが、表のように公共セクター内や民間セクター内でも事業者が細分化されているのが特徴である。

表-4.3 日本と諸外国の港湾管理運営体制の比較

設備	日本	UAE	タイ	
	一般的な 船社ターミナル例	ドバイ港	バンコク港	レムチャバン港 ターミナルD
港湾ガバナンス モデル	Tool port	Private port	Service port	Landload port
岸壁造成	国	DPW	PAT	PAT
荷捌き地造成	地方自治体	DPW	PAT	PAT
ガントリークレーン 設置	港湾運営会社	DPW	PAT	HPT
CTの借受け	船社	—	—	HPT
ヤードクレーン、トラ クタヘッド等荷役機 器の購入	CT運営会社	DPW	PAT	HPT
荷役機器の 維持保守点検管理	CT運営会社 (請負業者)	DPW	PAT (請負業者)	HPT (請負業者)
TOS購入	CT運営会社	DPW	PAT	HPT
荷役作業員の雇用	荷役作業会社	DPW	PAT	HPT

5. ターミナルオペレーションシステムの調査

5.1 概要

コンテナターミナルでは、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。さらにコンテナ本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、コンテナターミナルオペレーターの業務は多い。このようにコンテナターミナル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が活用される。

Miguel Hervás-Peraltaらは、TOSを、コンテナターミナルで実施されるすべてのプロセス（例：ローディング/アンローディング/トランスポート/ストレージプロセス）およびその周辺（例：船舶やトラックの到着計画、ゲートでのトラックの行列）の計画、管理、監視を行う、ターミナルのコアを成すソフトウェアと定義することができる¹⁹⁾。彼らはまた、TOSの実装はターミナル運営者が手掛ける中でも難しいプロジェクトの一つであり、運営者側の多くの努力を必要とすると述べている。

GT0の一部は、TOSを独自に開発し、運営するCTに導入している。例えばドバイに本拠を置くDP world社は、CARGOES P&TというTOSパッケージを開発し、自社ターミナルへの導入を進めている。HPS社のnGen、PSA社のCITOSといった製品も、GT0による独自のTOSの例である。

独自に開発したTOSを有するGT0を除き、TOS導入を目指す港湾運営者にとって現実的な選択肢の一つが、世界中の様々な企業によって提供されているTOSパッケー

ジ製品を必要に応じてカスタマイズし導入することである。ビジネス向けのオンラインサイトである webiner careによると、2023年におけるベストTOSパッケージとして、表-5.1に示す9製品が挙げられていた。これらのTOSは世界中のターミナルで導入されており、例えば、Navis N4はアメリカ、ヨーロッパを中心に世界中のコンテナターミナルで導入されている。他にもOPUS terminalは、アジアを中心としてスペイン、UAE、イラン、マレーシア、アメリカ、ブラジルなどで導入されている。

日本のコンテナターミナルにおいては、1973年に東京港大井ふ頭で初めて導入されて以来、TOSは大規模なターミナルのみでなく小規模ターミナルにおいても広く普及している⁵⁵⁾。日本国内で導入されている主なTOS製品の例は、日本のコンテナターミナルやTOSベンダーのインターネットホームページ情報によると表-5.2のとおりである⁵⁶⁾⁶⁰⁾。

いずれの製品も、提供企業の業種は様々だが、TOSのみを専門とする企業というよりも、港湾荷役機械メーカーや、業務系システムベンダー等の企業が製品の一つとして販売するような形態となっている。

日本のコンテナターミナルではその中でも三井E&S社のCTMSの導入事例が多く見られ、表-5.1で示したようなグローバルTOSパッケージの導入事例は少ないが、外航海運会社が運営するターミナルを中心に海外製のシステムも導入されている⁶¹⁾。

5.2 日本と海外のシステムの比較

本論文では、主に欧州や東南アジアにおいて導入されているTOSパッケージであるOPUS Terminalと、日本において広く導入されているCTMS(Container Terminal

表-5.1 TOS製品の代表例

製品名	企業	国	主な導入先	備考
Navis N4	Navis	アメリカ	アメリカ、ヨーロッパを中心に世界中	
OPUS Terminal	Cyber logitec	韓国	韓国、タイ、アメリカ、UAE、ブラジル等世界中	
GullsEye	GullsEye	トルコ		
Master Terminal	JADE Logistics	アメリカ	アメリカ、UAE、ニュージーランド等	Navisグループ
Hogia Terminal	Hogia	スウェーデン	スウェーデン、ニュージーランド等	
CommTrac	TBA	イギリス		バルク、Ro-Roターミナル用
CATOS	Total softbank	韓国	アジア、欧州	
Mainsail	Mainsail	アメリカ	アメリカ、イギリス等	
Autostore TOS	TBA	イギリス		

表-5.2 日本の主なTOS製品

製品名	企業	導入先の例
Container Terminal Management System (CTMS)	三井E&S	東京港、神戸港、横浜港、名古屋港ほか
コンテナターミナルシステム	三菱ロジスネクスト	大阪港ほか
コンテナターミナル統合管理システム	シスコム	下関
コンテナターミナル総合システム	ADK富士システム	秋田港、酒田港
PORT-IT Systems	正興ITソリューション	博多港、伊万里港ほか

表-5.3 ヒアリング調査対象

企業	クラス	インタビュー内容
システムサプライヤーのパートナー企業	マネージャー	OPUS システムの仕様
	チーフ	
港湾荷役システムサプライヤー	マネージャー	CTMS システムの仕様

Management System)について、表-5.3に示すシステム導入コンサルタントエンジニアや、バンダーエンジニアへのインタビューを実施し、両システムの特徴と相違点について主に第2章で定義したスマートポートのためのTOS機能の観点から整理した。両システムの特徴を以下に示す。

1) OPUS Terminal

OPUS Terminalは韓国のCyber Logitec社(本社シンガポール)が開発したTOSシステムである。アジアを中心とし、韓国、タイ、マレーシア、インドネシア、UAE、アメリカ、スペイン、ブラジルといった世界中のコンテナターミナルにおける導入事例があるグローバルTOS製品である。OPUS Terminal は顧客のリクエストに対応してTOSの機能をカスタマイズ可能な点が特徴である。

2) CTMS

CTMSは日本の三井E&S社が開発したTOSシステムであり、

日本国内を中心として導入されている。東京港、神戸港、横浜港、名古屋港といった、日本国内でもコンテナ取扱量が多いターミナルにおける導入例が多いという特徴がある。CTMS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で構成されており、各コンテナターミナルやターミナルオペレーターの状況に合わせて、サブシステムを選択的に導入することが可能である⁵⁶⁾。

これらのTOSの機能を調査した結果、相違点として主に以下のような点が挙げられることが分かった。

1) 蔵置計画、本船積み付け計画の自動化

積コンテナをどの本船スロットにどのような順番で積みつけるかを計画する機能である。積み付け時には、コンテナのサイズ、タイプ、揚げ港といった属性ごとにグルーピングすることで本船揚げ作業時のリハンドリングを極力発生させないようにするとともに、船の安定性を考慮し重量が大きなコンテナを底部に積みつけるように計画される¹⁴⁾。

OPUSの本船プランニングシステムでは、操作者は各コンテナのシーケンス順を指定するのみであり、本船積み付けスロットはシステムにより自動決定される。この機能により、1万TEUクラスの船でもおよそ30分程度でプランニングを完了することができる。CTMSでは、積み付けノウハウをロジック化した支援ツールはあるものの、各ターミナル固有の運用ルールに従って積コンテナ情報を基

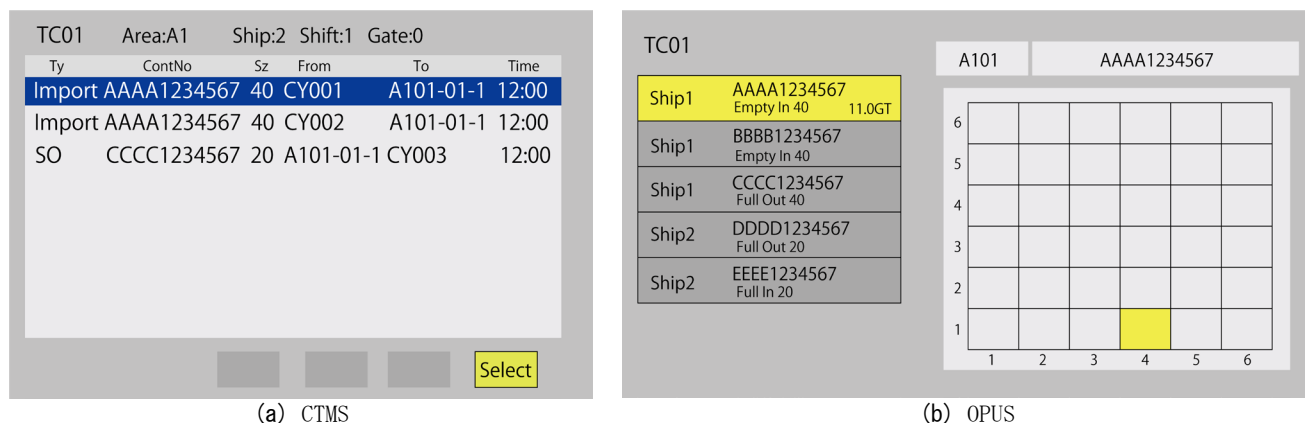


図-5.1 RTG車載端末の画面例

表-5.4 OPUS Terminalの最適化機能

機能	対象荷役	説明
クレーンワーキングプラン	ガントリークレーン	ガントリークレーンのオペレーションスケジュールの分析及び生成
ヤードプラン支援	YP/YO	コンテナ蔵置計画
ヤード内トレーラー渋滞解析	ヤードトレーラー	ヤード内道路における渋滞分析と、渋滞が予測されるルートを回避するように誘導する
ヤードクレーン運用パターン分析	RTG、RMG	RTGやRMGの最適な配置、作業配分パターンの生成

に本船スロットを手動で決定していることが多い。ただし積み付け計画は船社が作成する場合もあり、その場合にTOSに求められる機能としては、積み付け計画の受信と表示、必要に応じた修正である。

2) 荷役機械への指示機能

車載端末は、コンテナターミナル内での荷役作業を担当するクレーンやトレーラーの運転士に実施するべき作業の指示を与えるためのシステムであり、OPUS、CTMSともに、これらの車載端末アプリケーション並びに通信システムを提供している。OPUSとCTMSの相違点として、次作業選択におけるポリシーの違いが挙げられる。図-5.1に、OPUSとCTMSそれぞれのRTG車載アプリケーションの画面例を挙げる。

図-5.1(a)に示しているのはCTMSのRTG車載端末アプリケーションの作業選択画面である。運転手が選択可能な荷役作業の種別やコンテナ番号、移動先等の情報が一覧表示されており、運転手は次に実行する作業を選択し画面右下の”select”を押す。このようにCTMSの車載は基本的に運転手が対象作業を選択して完了する。表示される作業の範囲は設定にもよるが、クレーンの担当するエリアの作業を全て参照し、その中から運転手が経験に基づいて効率よく作業を行うための順番を選択する。

図-5.1(b)に示しているのはOPUSのアプリケーション画面であり、左側の作業スケジュールに沿って作業を実施する。次に実施するべき作業の詳細情報も画面の右側

に同時に表示される。このようにOPUS Terminalでは、クレーンの次着手作業が車載端末上で指示され、ドライバーはその指示に従って移動・荷役作業を実施する。これらの作業着手順は、ヤード内の繁閑や交通状況等に基づき効率的な運用ができるように判断され、後述するAIサービス機能がこれらの判断を支援している。

さらにRTGクレーン方式のターミナルでは、作業の繁閑に合わせてRTGクレーン配置を柔軟に変更することができる。この場合のRTGクレーンへの移動指示についても、OPUSでは作業の状況によりRTGクレーンの配置をシステムが決定し必要に応じて移動指示を発出するが、CTMSではシステムによる指示よりセンタオペレータの経験に基づく判断を優先してRTGクレーンの移動指示を出す運用を行なっている。これは、システムの制約というよりも、日本のコンテナターミナル運用における現場の判断を優先する傾向に基づいていると考えられる。

3) AIサービスによる最適化機能

OPUS Terminal は、AIサービス機能として、TOSやIoTプラットフォームから収集したデータを活用し、業務プロセス、リソースの状況、作業パターンを分析し予測モデルを構築する。

表-5.4に、OPUSのAIサービスの機能を示す。AIサービスの機能としては、ガントリークレーンのオペレーションスケジュール作成支援、リハンドリングを最小化するヤード蔵置計画支援、ヤード内のトレーラー渋滞の予測

と渋滞を避けた移動経路指示、RTGの稼働パターン分析と稼働計画の作成、ターミナルゲート前や退場後の渋滞予測がある。

6. 考察

日本の港湾運営・管理体制は、第3章で述べたように港湾ガバナンスに起因して港湾管理者、港湾運営者、TOに階層化しており、港湾荷役の作業体制も歴史的背景に起因して複雑となっている。その特徴を海外の港湾と比較すると、公共セクターと民間企業の所掌分解点および公共セクターと民間企業それぞれの所掌内における階層化が異なる点である。

重要な点は公共セクターと民間企業それぞれの所掌内における階層化であり、ドバイ港、ラムチャバン港いずれも、機材、システムの調達から荷役作業員の雇用まで、港湾荷役にかかる一切を単一の民間企業で行っている。バンコク港は、公社（公共セクター）運営であるが、荷役作業員の雇用まで単一の団体で行っている点はドバイ港、ラムチャバン港に通じるものがある。一方、日本では、CTを借り受けている船社、機材、システムを調達し港湾運営全般を取り仕切るCT運営会社（元請）、実際の荷役作業を行う作業会社（専業）と階層構造になっている。

コンテナターミナルの効率的な運用のために導入されるTOSだが、日本ではTOSの導入はCT運営者である一般港湾運送事業者が行い、実際の操作はその下の階層である港湾荷役事業者等が行うことが一般的である。日本と海外のTOSについてヒアリングによる比較調査を行ったところ、日本国内のTOSは荷役機械の作業選択を機械の運転手主導で行う点や、本船積み付け計画における自動化が進んでいない点において海外TOSとの相違点があることが分かった。日本のTOSにもこれらの自動化の機能は実装されているものの、実際のコンテナターミナルの運用においてこれらの機能が活用されていないという意見もあった。

すなわち日本のTOSにおいて計画機能の自動化が進んでいないことの要因は、システムの制約よりも、日本のコンテナターミナルの運用における現場の作業者の判断を優先するポリシーにあるという可能性がある。

また、スマートポートに向けた動向として自動化コンテナターミナル(Automated Container Terminal: ACT)があるが、ACTと従来ターミナルではTOSに要求される制御システムの水準が異なる。通常のターミナルでは一連の作業指示を一括で生成し、その指示をどのような順番で実行するかは人間が決めれば良いが、自動化コンテナタ

ーミナルではTOSが正確な順序付けとタイミングを含むより短い一連の移動指示を生成する可能性が高い⁶²⁾。またトレーラーの進入順の制御およびその順に従った作業指令が必要である⁶³⁾。

OPUSでは、順序つけられた作業指示を明示する機能を有しており、コンテナターミナルの自動化に対応可能である。一方、人間主体の作業選択ポリシーを採用しているCTMSにおいてACTに対応するためには、TOSとは別に、自動化されたターミナルでは個々の機械の動きを指示し、単一又は機械群の動きを調整するECSを備える必要がある⁶²⁾。CTMSでは、自動化機器統括管理システム(Automated Equipment Control System: AECS)を提供しており、作業を行うクレーンを決定する機能を持っている⁶⁴⁾。

日本は世界に先んじて自動化を強力に推進し、製造業における競争力をつけてきた⁶⁵⁾。しかしながら、港湾荷役の計画業務においては、標準化されておらず定量化が難しい暗黙知に基づく部分が多くあり、そのことが自動化を進めることが難しい原因となっている可能性がある⁶⁶⁾。

従って現場の判断を重視する日本のコンテナターミナル運営を維持し、さらに効率的な運用をサポートするためには、業務の安全性に支障がない範囲でモバイルターミナルシステム等の作業者へ情報提供を行うシステムの充実が有効であると考えられる。また、荷役機械の自動化を選択する場合にはECSシステムの付加が必要となる。

また、日本の船社ターミナルはステークホルダーの高度な階層化から利益を上げる主体としての自立化が求められなかったことや、個々のターミナル毎に独自の荷役作業体制やシステムが導入されることで隣接するターミナル同士の連携がとりにくい環境が生み出されたことが、国内のTOSにおいて計画機能等の自動化が進んでいない要因の一つとして考えられる。一方貨物量や寄港頻度が少ない地方港（本稿では国際戦略港湾以外を意図している）では、複数の港運会社の間での棲み分けがなされてきた。ひとつのコンテナヤード内で、港運会社毎に使用するヤードスペースや荷役機械を区分けするような事例も見られており、そのことが生産性の低下を招いているという指摘もある³⁹⁾。

日本のコンテナ港湾の多数を占める地方港では集荷圏が細分化され、稼働率の低下を招いているという指摘もある³⁹⁾。このような港湾では高機能なTOSの導入はむしろコストとなり、競争力の向上に寄与しない恐れがある。船社が寄港地を選定する際の基準となる港湾の競争力は、①その地域における貨物需要②港湾のサービス性③コストとされており³⁹⁾、TOSの高機能化は②港湾のサービス性向上および③コストの低減に有用であると考えられる。

TOSの高機能化によるメリットは荷役作業の効率化によるサービス性の向上とターミナル運営におけるプランニング作業等の効率化であり、深刻化する人手不足に対する対策のひとつになり得る。日本では特に地方において少子高齢化と人手不足は深刻であり、システムの高度化はそれらの問題の解決策となり得るため、日本の地方港はTOSの高機能化に適していると考えられる。

また、デジタルツインを活用したスマートポートの構築のためには、包括的なデータ収集が不可欠である。例えばKan Wangaらが提唱する5層のスマートポートにおいては、リアルタイムでコンテナターミナル全方位のデータを収集するとともに、それらを統合することの必要性を述べている²⁰⁾。

港湾の管理・運営の各階層で必要とされるデータは異なり、階層ごとに組織が異なるとデータの授受を行うための仕組みが必要になる。

例えば、日本の一般的な船社ターミナルにおいて、ガントリークレーンの所有者は港湾運営会社であり、船社が借受けてリース料を支払っている。それを、港湾運営会社が船社との契約に基づいて運用するが、実際に操作するのは、作業会社の社員である。所有者としての港湾管理会社は、アセットを管理する上でガントリークレーンの稼働量と保守履歴は重要なデータである。港湾運営会社は、荷役効率を最大化する上でクレーンの荷役速度や稼働率（故障率）といったデータが重要で、作業会社は作業を途中で中断しないよう、荷役中も運転手がクレーンの状態に関する情報を一元的に確認できることが重要である。更に、港湾運営会社から受託してクレーンの維持保守管理を請け負っているメンテナンス会社は、保守作業や故障修理を行うためのクレーンの稼働状態、故障履歴等に関するデータは必要となる。このように同じガントリークレーンの情報であっても、ステークホルダーによって必要とするデータは異なる。

スマートポートに向けてこれらのデータを収集、活用するに当たっては、そのデータを収集するシステムを導入する主体により、どのような頻度、精度でデータを取得するかが異なっているという課題がある。すなわち、システムに投資しデータを収集、分析しようとする者は、自身の利益に資する情報収集、分析に特化し、他のステークホルダーが必要としているデータを収集し再配信することは殆どない。むしろ、他者が必要なデータであっても、開示しないケースもある。従って、日本のコンテナターミナルにおけるスマートポート化のためには、階層化したステークホルダー間で必要な情報を共有し、自由にアクセスできるプラットフォームが必要になると考

えられる。

7. おわりに

本論文では、コンテナターミナルのスマートポート化において重要な役割を持つと考えられるTOSに着目し、日本において主に導入されているTOSと、欧州や東南アジアにおいて主に導入されているTOSについて代表的な二例を挙げ、機能面での相違点について調査するとともに、日本における港湾ガバナンスとの関連性について考察した。

考察より導かれた結論を以下に示す。

- 1) 日本の大規模港における港湾管理・運営体制は、コンテナ輸送黎明期からの港湾整備における歴史的背景からステークホルダーの複雑な階層化が特徴となっており、海外の大規模港に見られるようなグローバルターミナルオペレーターによる一元的な管理・運用体制とは異なる。
- 2) 日本のTOSは、荷役機械の作業選択を機械の運転手主導で行う点や、蔵置計画や本船積み付け計画における自動化が進んでいない点において海外TOSとの相違点がある。これは、日本の港湾運用においては現場での作業を行う港湾荷役事業者等の主導による運用が定着していることや、個々のターミナル毎に独自の荷役作業体制やシステムが導入されることで隣接するターミナル同士の連携がとりにくい環境が生み出されたことが要因として考えられる。
- 3) これまで日本のコンテナターミナルでは、港湾荷役事業者等の熟練労働者の技術によって高い生産性を維持してきたという特徴があり、その利点を生かすためには作業員への指示を行うモバイル端末システムの導入は有効であると考えられる。Digital twin platformやAIによるオペレーション計画、管理の効率化や自動化の導入は、サービス性やコストの面に貢献する。日本の地方港では今後の少子高齢化による人手不足から、サービス性の維持が困難となる懸念があり、TOSの計画管理機能の自動化はそれらの対応策として有効であると考えられる。
- 4) Digital twin platformやAIの導入のためには包括的なデータ収集が必要になるが、複数のステークホルダー間で必要な情報をやり取りするプラットフォームが必要になる。日本においては主に国を主体としてPCSが導入されているが、それらはスマートポート化に向けた重要な情報連携基盤となり得る。

(2024年8月8日受付)

参考文献

- 1) Zhen, W.: The Evaluation of Soft Power Investment Effect on Shanghai Port Competitiveness Using DEA Method, *J. Marit. Res.*, Vol.12, No.2, 2015, pp.45–52.
- 2) Deloitte Port Services: Smart Ports Point of View, Deloitte the Netherlands, 2017.
- 3) de la Peña Zarzuelo, I., Freire Soeane, M.J., and López Bermúdez, B.: Industry 4.0 in the Port and Maritime Industry: A Literature Review, *J. Ind. Inf. Integration*, Vol.20, 2020.
- 4) Yen, B.T.H., Huang, M.J., Lai, H.J., Cho, H.H. and Huang, Y.L.: How Smart Port Design Influences Port Efficiency—A DEA-Tobit Approach, *Res. Transp. Bus. Manag.*, Vol.46, 2023.
- 5) Gao, Y., Chang, D., Chen, C.H. and Xu, Z.: Design of Digital Twin Applications in Automated Storage Yard Scheduling, *Adv. Eng. Inf.*, Vol.51, 2022.
- 6) PIANK EnviCom WG 150: Sustainable Ports – A Guide for Port Authorities, PIANK Brussels Belgium, 2014.
- 7) Sogut, M.Z. and Erdoğan, O.: An Investigation on a Holistic Framework of Green Port Transition Based on Energy and Environmental Sustainability, *Ocean. Eng.*, Vol.266, Part3, 2022.
- 8) Zhou, C., Zhu, S., Bell, M.G.H., Lee, L.H. and Chew, E.P.: Emerging Technology and Management Research in the Container Terminals: Trends and the COVID-19 Pandemic Impacts, *Ocean. Coast. Manag.* Vol.230, 2022.
- 9) Moros-Daza, A., Amaya-Mier, R. and Paternina-Arboleda, C.: Port Community Systems: A Structured Literature Review, *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, 2020, Vol.133, 2020, pp.27–46.
- 10) 大西透生・西田知洋・宮崎兼治：サイバーポート (Cyber Port)について，港湾荷役，66 巻，4 号，2021 年，pp.404–407.
- 11) 小倉一仁：阪神港における CONPAS の導入について，港湾荷役，66 巻，4 号，2021 年，pp.408–412.
- 12) Kizilay, D., Van Hentenryck, P. and Eliyi, D.T.: Constraint Programming Models for Integrated Container Terminal Operations, *Eur. J. Oper. Res.*, Vol.286, Issue3, 2020, pp.945–962.
- 13) Gunawardhana, J.A., Perera, H.N. and Thibbotuwawa, A.: Rule-Based Dynamic Container Stacking to Optimize Yard Operations at Port Terminals, *Marit. Transp. Res.*, Vol.2, 2021.
- 14) Cho, S.W., Park, H.J., Kim, A. and Park, J.H.: GMM-Based Online Optimization for Container Stacking in Port Container Terminals., *Comput. Ind. Eng.*, Vol.173, 2022.
- 15) Maldonado, S., González-Ramírez, R.G., Quijada, F. and Ramírez-Nafarrate, A.: Analytics Meets Port Logistics: A Decision Support System for Container Stacking Operations, *Decis. Support Syst.*, Vol.121, 2019, pp.84–93.
- 16) Feng, Y., Song, D.P. and Li, D.: Smart Stacking for Import Containers Using Customer Information at Automated Container Terminals, *Eur. J. Oper. Res.* Vol.301, Issue2, 2022, pp.502–522.
- 17) Caballini, C., Gracia, M.D., Mar-Ortiz, J. and Sacone, S.: A Combined Data Mining–Optimization Approach to Manage Trucks Operations in Container Terminals with the Use of a TAS: Application to an Italian and a Mexican Port, *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, Vol.142, 2020.
- 18) Min, H., Ahn, S.B., Lee, H.S. and Park, H.: An Integrated Terminal Operating System for Enhancing the Efficiency of Seaport Terminal Operators, *Marit. Econ. Logist.*, Vol.19, 2017, pp.428–450.
- 19) Hervás-Peralta, M., Poveda-Reyes, S., Molero, G.D., Santarremigia, F.E. and Pastor-Ferrando, J.P.: Improving the Performance of Dry and Maritime Ports by Increasing Knowledge about the Most Relevant Functionalities of the Terminal Operating System (TOS), *Sustainability*, Vol.11, No.6, 2019. pp.1648.
- 20) 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 Stud. Transp. Policy*, Vol.9, Issue3, 2021, pp.1298–1312.
- 21) Klar, R., Fredriksson, A. and Angelakis, V.: Digital Twins for Ports: Derived from Smart City and Supply Chain Twinning Experience, *IEEE Access*, Vol.11, 2023, pp.71777–71799.
- 22) Gao, Y., Chang, D. and Chen, C.H.: A Digital Twin-Based Approach for Optimizing Operation Energy Consumption at Automated Container Terminals, *J. Clean. Prod.* Vol.385, 2023.
- 23) Wu, Y.C.J. and Goh, M. Container Port Efficiency in Emerging and More Advanced Markets, *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.*, Vol.46, Issue6, 2010, pp.1030–1042.
- 24) Ha, M.H., Yang, Z. and Heo, M.W.: A New Hybrid Decision Making Framework for Prioritising Port

- Performance Improvement Strategies, *Asian J. Shipp. Logist.*, 2017, Vol.33, Issue3, 2017, pp.105–116.
- 2 5) Hemalatha, S., Dumpala, L. and Balakrishna, B.: Service Quality Evaluation and Ranking of Container Terminal Operators through Hybrid Multi-Criteria Decision Making Methods, *Asian J. Shipp. Logist.*, Vol.34, Issue2, 2018, pp.137–144.
- 2 6) Othman, A.; El Gazzar, S.; Knez, M. Investigating the Influences of Smart Port Practices and Technology Employment on Port Sustainable Performance: The Egypt Case. *Sustainability* 2022, 14, 14014. [CrossRef]
- 2 7) Eslamipoor, R.: Direct and Indirect Emissions: A Bi-Objective Model for Hybrid Vehicle Routing Problem. *J. Bus. Econ.*, Vol.94, 2024, pp.413–436.
- 2 8) Eslamipoor, R.: A Biobjective Model for Integrated Inventory and Transportation at Tactical and Operational Levels with Green Constraints, *IEEE Trans. Eng. Manag.*, Vol.71, 2024, pp.9764–9775.
- 2 9) Heilig, L. and Voß, S.: Information Systems in Seaports: A Categorization and Overview, *Inf. Technol. Manag.*, Vol.18, 2017, pp.179–201.
- 3 0) Bouhlal, A., Aitabdelouahid, R. and Marzak, A.: The Internet of Things for Smart Ports, *Proc. Procedia Comput. Sci.*, Vol.203, 2022, pp.819–824.
- 3 1) Sugimura, Y., Wakashima, H., Liang, Z. and Shibasaki, R.: Logistics Strategy Simulation of Second-Ranked Ports on the Basis of Japan's Port Reforms: A Case Study of Hakata Port, *Marit. Policy Manag.* 2023, Vol.50, 707–723. [CrossRef]
- 3 2) 小野憲司：国際海上コンテナターミナルの競争力強化に向けた戦略と行政の役割に関する研究，神戸大学博士論文，2006年。
- 3 3) Hatani, F.: Institutional Plasticity in Public-Private Interactions: Why Japan's Port Reform Failed, *J. World Bus.*, Vol.51, Issue6, 2016, pp.923–936.
- 3 4) Zhang, J.: Quasi-Landlord Port Financing in China: Features, Practice and a Contract Theory Analysis. *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, Vol.89, 2016, pp.73–88.
- 3 5) Monios, J.: Polycentric Port Governance, *Transp. Policy*, Vol.83, 2019, pp.26–36.
- 3 6) Notteboom, T. and Rodrigue, J.P.: The Corporate Geography of Global Container Terminal Operators. *Marit. Policy Manag.*, Vol.39, Issue3, 2012, pp. 249–279.
- 3 7) Parola, F., Notteboom, T., Satta, G. and Rodrigue, J.P.: Analysis of Factors Underlying Foreign Entry Strategies of Terminal Operators in Container Ports, *J. Transp. Geogr.*, Vol.33, 2013, pp.72–84.
- 3 8) 黒田勝彦・奥田剛章・木俣順：日本の港湾政策 歴史と背景，成山堂書店，2014年。
- 3 9) 津守貴之：日本のコンテナ港湾政策 市場変化と制度改革，主体間関係，成山堂書店，2017年。
- 4 0) Sugimura, Y., Ishiguro, K. and Kato, A.: Possibility of Sustainable Entry into Overseas Port Operation Markets by Japanese Companies, *Sustainability*, Vol.14, No.19, 2022, pp.12167.
- 4 1) Notteboom, T. and Yang, Z.: Port Governance in China since 2004: Institutional Layering and the Growing Impact of Broader Policies, *Res. Transp. Bus. Manag.*, 2017, Vol.22, 2017, pp.184–200.
- 4 2) Chiu, R.H. and Yen, D.C.: Application of Organizational Life Cycle Theory for Port Reform Initiatives in Taiwan, *Res. Transp. Bus. Manag.*, Vol.14, 2015, pp.14–24.
- 4 3) Sugimura, Y.: Public-Private Partnerships in Japan's Cruise Terminal Operations, *Res. Transp. Bus. Manag.*, Vol.45, PartB, 2022.
- 4 4) YEO, H.: Participation of Private Investors in Container Terminal Operation: Influence of Global Terminal Operators. *Asian J. Shipp. Logist.*, Vol.31, Issue3, 2015, pp.363–383.
- 4 5) Parola, F.; Musso, E. Market Structures and Competitive Strategies: The Carrier–Stevedore Arm-Wrestling in Northern European Ports. *Marit. Policy Manag.* Vol.34, Issue3, 2007, pp.259–278.
- 4 6) Farrell, S.: The Ownership and Management Structure of Container Terminal Concessions, *Marit. Policy Manag.*, Vol.39, Issue1, 2011, pp.7–26.
- 4 7) Notteboom, T.E., Parola, F., Satta, G. and Pallis, A.A.: The Relationship between Port Choice and Terminal Involvement of Alliance Members in Container Shipping, *J. Transp. Geogr.*, 2017, Vol.64, pp.158–173.
- 4 8) Inoue, S. New Japanese Growth Strategy and Port Reform. *East. Asian Econ. Perspect.* 2010, 21, pp.7–20.
- 4 9) 一般社団法人港湾荷役機械システム協会：港湾荷役のQ&A 改訂増補版，成山堂書店，2014年。
- 5 0) 市村欣也：令和5年度海外港湾視察研修会報告(その1)アラブ首長国連邦・タイの港湾を訪問して，港湾荷役，69巻，1号，2024年，pp.127–131.
- 5 1) Munim, Z.H., Sornn-Friese, H. and Dushenko, M.: Identifying the Appropriate Governance Model for Green Port Management: Applying Analytic Network Process

and Best-Worst Methods to Ports in the Indian Ocean Rim,
J. Clean. Prod., Vol.268, 2020.

- 5 2) 市村欣也：令和5年度海外港湾視察研修会報告(その
2)アラブ首長国連邦・タイの港湾を訪問して，港湾
荷役，69巻，2号，2024年，pp.204-208.
- 5 3) (公財)国際港湾協会協力財団：2022年度国際港湾経
営研修 海外港湾事例研究報告(タイ港湾公社)，2022年
- 5 4) 谷上正晃：港湾用語の基礎知識36港湾運営会社，「港
湾」，92巻，3号，2015年，pp.36.
- 5 5) 市村欣也：Q&A コンテナターミナル(以下,CT)で使
用されるTOS(ターミナル・オペレーティング・システ
ム)について教えて下さい.，港湾荷役，63巻，4号，2018年，
pp.439-440.
- 5 6) 三井E&S：事業・製品情報 コンテナ・ターミナル・
マネージメント・システム(CTMS)，
<https://www.mes.co.jp/business/crane/ctms.html>
- 5 7) 三菱ロジスネクスト：製品情報 コンテナターミナル
システム，
https://solutions.logisnext.com/product/product-12/container_system_5.html
- 5 8) 株式会社シスコム：コンテナターミナル統合管理シ
ステム，<https://www.syscomhouse.com/harbor.html>
- 5 9) ADK富士システム株式会社：コンテナターミナル総
合システム，<https://www.adf.co.jp/products/post.html>
- 6 0) 正興ITソリューション：港湾ソリューション，
<https://www.seiko-itsolution.co.jp/port.html>
- 6 1) 渡部大輔：コンテナ物流における港湾情報システム
の現状，日本航海学会誌NAVIGATION，192号，2015
年，pp.43-48.
- 6 2) PIANK MarCom WG 208: Planning for Automation of
Container Terminals, PIANK Brussels, 2021.
- 6 3) 上田剛士・安部智久：コンテナターミナルにおける
遠隔操作RTG導入に対応したレイアウト及びオペレー
ションに関する基本的考察，国土技術政策総合研究所
資料，第1212号，2022.
- 6 4) 星島一輝：トランスターナ遠隔自動運転技術の開発，
三井E&S技報，第2号，2019，pp.32-36.
- 6 5) Senker, P.J.・伊東諄(訳)：自動化：その社会的,経済的
インパクト，日本機械学会誌，第86巻第779号，1983，
pp.1126-1130.
- 6 6) 津守貴之：日本の港湾事業者をめぐる環境変化とそ
の影響，岡山大学経済学会雑誌，第53巻第3号，2022，
pp.189-201.

略号表

ACT: Automated Container Terminal
CT: Container Terminal
AGV: Automated Guided Vehicle
ASC: Automated Stacking Crane
TOS: Terminal Operation System
PCS: Port Communication System
GTO: Global Terminal Operator
MTO: Mega Terminal Operator
POC: Port Operating Company
TO: Terminal Operator
PA: Port Authority
RTG: Rubber-Tired Gantry-crane
ECS: Equipment Control System