JOURNAL OF LOGISTICS AND SHIPPING ECONOMICS No.59
海 運 経 済 研 究 第 59 号 抜 刷

［自由論題］

# デジタルツインを活用したコンテナターミナルのデータドリブン運営に向けた評価手法の提案
## ―オペレータの要望に基づく評価軸の分析―

市 村 欣 也
（九州大学大学院博士課程，株式会社三井 E&S）
篠 田 岳 思
（九州大学）

Japan Society of Logistics and Shipping Economics
日 本 海 運 経 済 学 会

2025

［自由論題］

# デジタルツインを活用したコンテナターミナルのデータドリブン運営に向けた評価手法の提案
## —オペレータの要望に基づく評価軸の分析—

市　村　欣　也
（九州大学大学院博士課程，株式会社三井 E&S）
篠　田　岳　思
（九州大学）

*The utilization of digital twins is an effective approach to accelerating digital transformation (DX) in container terminals (CTs), and some CTs have already begun to adopt this technology. On the other hand, discussions regarding the configuration and utilization of digital twins are not enough, as automated CTs were developed before digital twins became widespread in the industry, and these terminals had already introduced various technologies for automation and DX. The present study reviews published literatures on the configuration and utilization of digital twins in CTs and proposes a conceptual model system. Although the adoption of digital twins enables CTs to obtain key performance indicators (KPIs) related to cargo handling easily, no method has yet been proposed to evaluate improvements along a specific evaluation axis, due to conflicts among several KPIs. To address this, we conducted factor analysis based on survey data collected from CT operators in Japan, focusing on the factors they prioritize. The results identify potential evaluation axes and offer fundamental insights for further research on how changes in container handling conditions improve CT efficiency, as reflected in KPIs derived from digital twins.*

## Ⅰ．はじめに

国際海事機構（International Maritime Organization: IMO）は2024年1月1日以降すべての加盟国に対して，寄港した船舶との情報を交換するための単一集中型デジタルプラットフォーム，すなわち海事シングルウィンドウ（Maritime Single Window: MSW）の使用を義務付けた[1)]。我が国でも，2003年から貨物の輸出入や船舶の入出港に係る行政手続のシングルウィンドウ化が進められている。シングルウィンドウの使用は船舶の到着，停泊，出発の手続きを合理化し，世界中の海運の効率を向上することを目的としているが，ターミナルオペレーションシステム（Terminal Operation System: TOS）と情報連携させることにより，世界中のコンテナターミナル（CT）でデジタルトランスフォーメーション（DX）が大きく前進すると見られている。

デジタルツインのコンセプトは2002年に提唱されたとされ[2)]，近年様々な分野で研究が急速に盛んになっている（Klar et al.（2023））。CTのDXを加速するためには，様々なデータをリアルタイムに一元処理できるデジタルツイン技術が効果的と考えられており，実装するCTも出始め

1）IMO website, “Maritime Single Window”（https://www.imo.org/en/OurWork/Facilitation/Pages/MaritimeSingleWindow-default.aspx 2025.3.9最終アクセス）

2）Klar et al.によると，1970年代にアメリカ航空宇宙局（NASA）はアポロ計画で宇宙船の状況をリアルタイムにシミュレーションするといったツイン化に取り組んでいたが，デジタルツインの提唱は，2002年のミシガン大学製品ライフサイクルセンター創設のプレゼンテーションであるとしている。

ている（Yao et al.（2021））。CTや港湾への実装が進むにつれ，デジタルツインの構成や効果の定義に関する研究も盛んになっている（Neugebauer et al.（2024））。一方CTでは，2000年代後半以降に自動化システムが普及期に入ったことに伴い，荷役機器状態，作業タスクの計画や実行状況がリアルタイムで電子データ化され，CT内のあらゆる情報が一元的に集約されるようになった。デジタルツインが産業界に普及する以前から自動化やDXが進展したことで，CTにおけるデジタルツインの統一的な定義はいまだ形成段階で[3]，活用方法のケーススタディを重ねているところである。

CTにデジタルツインを導入すると，荷役状態に関する様々な数値を重要業績評価指数（KPI）として得ることができる。更に，シミュレータと組み合わせられていれば，現在のKPIのみならず未来の数値も得ることが可能である。KPIは，例えばSTSC[4]の荷役能率やRTGCの作業待ち時間といった観測可能な数値である。岸壁での本船荷役能率とゲート前の外来シャーシ渋滞のように背反するKPIもあり，CTごとに独自のバランスで組み合わせて運営している。著者らのこれまでの研究では，CTオペレータが荷役作業に対して重要視している項目を整理し，デジタルツイン領域でAI，IoT，ICTといったデジタル技術を適用することがそれらの改善に有効であることを示した（市村・篠田（2025））。しかし，各CTにとってのKPIのバランスや評価軸までは言及できておらず，デジタルツインで得られる膨大なデータを活用するためには，その解明が必要となる。

本報では，Ⅱ章でデジタルツインの発展とCTへの適用に関する先行研究を整理した。Ⅲ章で提唱するCTデジタルツインシステムと，データドリブン運営に向けて，因子分析により評価軸を求める手法を示した。Ⅳ章では，CTオペレータが重要視する項目を作業実務者の要望で数値化し，因子分析で得られた評価軸を元にCTごとの傾向の差異を分析した。

## Ⅱ．CTにおけるデジタルツインの活用

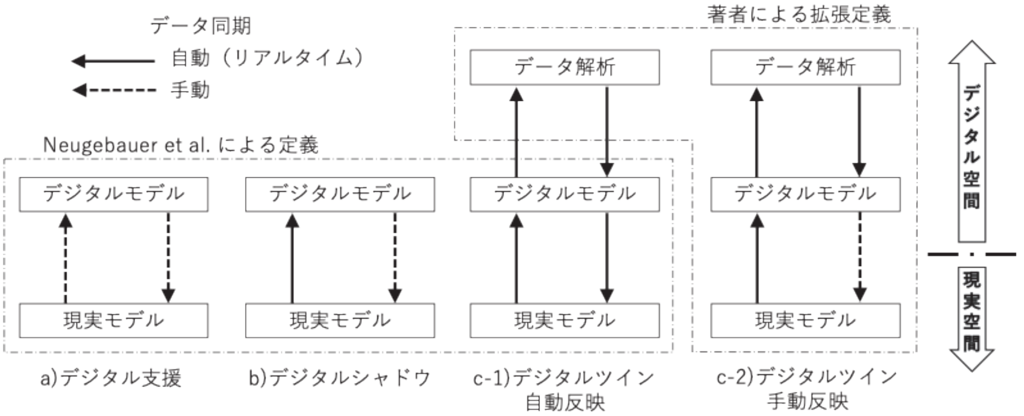
### 1．デジタルツインの定義と構成

Glaessgen and Stargel（2012）は，破損モードが複雑な複合材や，特性が十分に解明されていない材料が宇宙航空機の構造部分に使用されるようになり，従前の実験値や経験に基づく規格では，製品設計やプロジェクト計画時，問題発生時の対処ができなくなるとして，デジタルツインへの移行を対策として提唱した。現実空間の現象を，マルチフィジックス，マルチスケール[5]でデジタル空間上のモデルに反映することにより，危機的状況の事前回避や未知のノウハウの発見を行うという，現在のデジタルツインに至る基本的な方向性を確立したとされる。

Fuller et al.（2020）は，製造，ヘルスケア，スマートシティ分野のデジタルツインに関する26の先行研究を調査し，物理オブジェクトとデジタルオブジェクトの間のデータフローが手動か自動かという視点でデジタルツインを定義し，調査対象の論文で論じているシステムを分類した。Neugebauer et al.（2024）は，港湾とCTのデジタルツインに関して2000年以降に発表された141の先行研究を調査した。そして，Fuller et al.の研究に倣い，実際のオペレーションとデジタルシステムの間のデータ同期が手動か自動かにより，a）デジタル支援，b）デジタルシャドウ，c）デジタルツイン，の3種類に分類した（図1）。これら2つの研究はいずれも，先行研究が採り上げているシステムでデジタルシャドウとデジタルツインを混同しているケースがある

3）例えば，後述のデジタルシャドウとデジタルツインの混同が見られること等。
4）STSC（Ship to Shore Crane）;岸壁クレーン，RTGC（Rubber Tired Gantry Crane）;タイヤ式門型クレーン。
5）マルチフィジクスは複数の物理現象を，マルチスケールは様々な時間的・空間的スケールを指す。

図1　デジタルツインの定義




出所）Neugebauer et al.（2024）を元に著者作成

ことを指摘しており，デジタルツインは現実空間とデジタル空間との間で自動的かつリアルタイムにデータを同期するシステムであると定義している。

## ２．CT計画ツールとしてのシミュレーション

Neugebauer et al.（2024）が調査した141の論文のうち，最も古いのは2017年のものである。一方で，コンピュータシミュレーションを用いたCT計画法は，以前より数多く提案されており，1990年代初頭には現実空間の情報をデジタル空間に取り込むことが行われていた。Silberholz et al.（1991）は，コンテナ港湾の業務プロセスを７つに分類し[6)]，各業務プロセス間の相互作用の複雑さがシミュレーションのモデル化を複雑にしていると説明した。そのうえで，次の業務プロセスの空き状況により作業を割り当てていくキューモデルを構築し，シミュレーションソフトSIMLIBを用いて７つの業務プロセス全体にわたるシミュレーションを行った。同研究は，それ以前の個別業務プロセスに対し，数学モデルを構築して最適解を求める手法から，CT全体にわたる状態変化を時系列で確認できる，現在広く用いられているシミュレーションに移行する最初期の研究の一つである。山崎ほか（1993）は，汎用の物流・FA（Factory Automation）シミュレータソフトウェアを使用してCTの荷役機器やシャーシトラックをモデル化してコンピュータシミュレーションを実施した。外来シャーシのCT内所要時間や，クレーンの稼働率等をアウトプットして能率評価し，シャーシ追い越しレーンを設置したレイアウトの有効性を示した。また，３次元アニメーションを観察することで，ヤード内渋滞箇所の特定と状況を把握する手法も示している。

## ３．CTへのデジタルツインの導入

Kastner et al.（2024）は，デジタルツインがCTの運営に対してどのように支援できるかを調査するため，CTオペレータやコンサルタント，TOSベンダー，研究者等専門家17名にアンケートを実施し，デルファイ法を用いて評価した。その結果，現時点で有効な支援として，プロセスデータを遡って分析しCTオペレーションの因果関係をより良く理解することを挙げている。すなわち，再発する可能性のあるオペレーション上の問題について，チームで議論することによって根本原因を特定できるよう，デジタルツインは過去のデータから当時の状態を再現し３次元的に視覚化するというものである。ただし前提として，CTオペレーションに関連する全てのプ

6）①泊地への本船の操船，②本船の着岸・離岸，③岸壁クレーンの配備，④本船へのコンテナ揚げ下ろし作業，⑤岸壁と蔵置ヤード間の輸送，⑥蔵置ヤードの計画と運用，⑦ゲートと蔵置ヤード間の輸送

ロセスのデータを，デジタルシャドウにより記録しておく必要があるとしている。また将来的には，重要なオペレーション上の決定を下す前に，デジタルツインによりCTのパフォーマンスを左右するいくつかの選択肢を準備し，それらを比較評価したうえで判断するようになると論じている。

Gao et al.（2024）は，自動化CTにおいて動的で複雑なAGV（Automated Guided Vehicle）運用計画を最適化するため，デジタルツインによる意思決定支援システムを提唱している。このシステムにおいて，物理レイヤーにある自動化CT（現実空間）のデータはスマートデバイスを通してバーチャル自動化CT（仮想空間）にマッピングされ，仮想レイヤーでシミュレーションと視覚化を実行するために使用される。サービスレイヤーではAGVの作業割当や走行経路，充電タイミング，メンテナンスタイミングを考慮した最適運行計画が作成され，仮想レイヤーに送って検証した後に，物理レイヤーにある実際のAGVによって運行計画が実行される。物理レイヤー，仮想レイヤーの次に物理，仮想，サービス全てのレイヤーのデータを保存するデータセンターを置いている。Wang et al.（2021）は，データ，モデル，サービス，アプリの４つのレイヤーから成るスマートポートのデジタルツインモデルを，5つのステップ[7]で展開することを提唱しているが，Gao et al.（2024）のモデルと比較すると，データレイヤーをデジタル空間にあるモデルレイヤーと物理レイヤーの間に置いている点が大きく異なる。

Glaessgen and Stargel（2012）の定義に従うと，デジタルモデルはマルチフィジクス，マルチスケールのデータを集約する必要があり，特定のシミュレーションで使用するデータの収集だけでは不十分である。Gao et al.（2024）の提唱するデジタルツインモデルでも，仮想レイヤーにおいてバーチャル自動化CTとシミュレーション環境が独立した構成となっており，デジタルツインの仮想環境とシミュレータは区別してシステムを構築する必要があると指摘している。

物流シミュレータによるCTシミュレーションは，ターミナルレイアウトや荷役作業手順を決定するための有用なツールであり，デジタルツインが議論される以前より，主として新設や増設時の計画段階で使用されることが多かった。コンピュータ上でシミュレーションを実施するため，現実空間からデジタル空間へのデータ取り込みは1990年代から行われており，当初は手動でデータを入力する「デジタル支援」であった。2010年以降自動化CTが急速に数を増やしていくが，自動化CTではクレーンの状態やタスク，作業スケジュール，貨物情報等，様々なデータがシステム上に収集され「デジタルシャドウ」を形成するようになる。その後，自動化CTにシミュレーションが組み合わされ「デジタルツイン」として普及し始めた。

## Ⅲ．デジタルツインを活用したCTデータドリブン運営に向けた評価手法の提唱

### １．提唱するCTデジタルツインシステム

先行研究より，デジタルツインにはNeugebauer et al.の定義に加え，現実モデルと同期しているデジタルモデル上でデータ解析を行うプロセスが存在すると定義する。そこで，解析結果をデジタルモデルから現実モデルへ反映する方法の差により，c-1）自動反映とc-2）手動反映に細分化する（図１）。著者らは，CTデジタルツインとして，AI解析の結果を物流シミュレータで可視化し，人間の判断を介して実作業に反映するシステム構成（図２）を提唱している（市村・篠田（2024））。データドリブン運営は，経験や勘に頼らずデータを元に意思決定するが，CTでは複数のKPIのバランスを取りながら意思決定を行う。このため，荷役条件の違いがKPIのバランスに及ぼす影響を，実際の荷役への反映前に確認できる点で手動反映型デジタルツインが有効

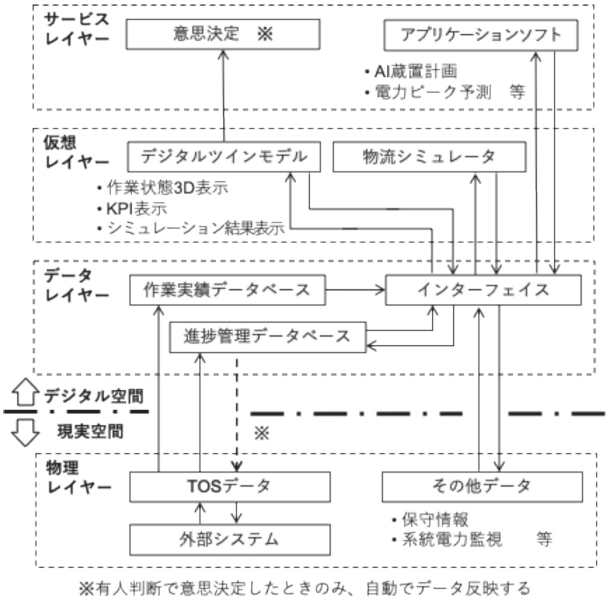
7）Step 1;データ収集，Step 2;３次元ジオファレンスモデルの作成，Step 3;リアルタイム情報統合，Step 4;シミュレーション解析と最適化，Step 5;ダッシュボードによる情報共有

と考える。

### ２．KPIのバランスの評価手法

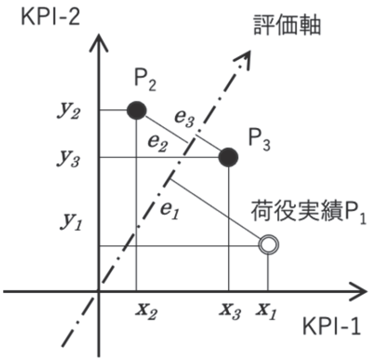
デジタルツインにより得られる膨大なデータを活用してCTの運営効率化を図るためには，効率化の評価軸を明らかにする手法が必要である。そこで，因子分析により求められる共通因子を評価軸として，複数のKPIのバランスを評価する手法を導入する。図３に，KPIが２つのみのケースで結果の評価方法を説明する。実際の荷役からKPI- １が$x_1$，KPI- ２が$y_1$の荷役実績$P_1$が得られ，デジタル空間で一部の荷役条件[8]を変更してシミュレーションした結果，KPI- １，- ２が$x_2$，$y_2$の$P_2$や$x_3$，$y_3$の$P_3$を得たとする。KPI- １，- ２は正の値が大きいほど評価が高いとすると，KPI- １は$P_1$が，KPI- ２は$P_2$が最高評価となり，どの条件変更が最良の結果をもたらすか判断できない。しかし，因子負荷量により$P_1$，$P_2$，$P_3$を評価軸（共通因子）へ因子得点として投影し，それぞれ$e_1$，$e_2$，$e_3$を得ることで数値比較が可能になり$P_3$が最良と結論付けられる。

図２　提唱するデジタルツインの構成




出所）著者作成

図３　KPIと評価軸の関係




出所）著者作成

### ３．CTオペレータの要望の評価軸

それぞれのCTオペレータが何を重要視し，どのようなバランスで運営したいと望んでいるかを，要望の評価軸として分析する。そのため，CT実務作業者の要望を数値化したのち，因子分析により共通因子を求め，要望の評価軸を抽出する。また，今後KPIとの関連付けを容易にするため，要望の評価軸は「ゲート待ち時間をトレードオフにして本船荷役を優先する」や「CT内渋滞をトレードオフにして荷役機器数を最小化する」等のように言語化しておく。

## Ⅳ．CTオペレータの要望の評価軸に関する分析

### １．CTオペレータが重要視する項目

実際のCTではKPIが多岐に渡るが，著者らはこれまでの研究からCTオペレータが重要視する項目として表１を得ている（市村・篠田（2025））。これらの項目はいずれもCTの運営上重要

8）荷役条件とは，RTGCの配置やコンテナの置き場所等CTで調整可能な条件である。

視されるが，RTGC台数等の限られたリソースを本船荷役とゲート荷役のいずれに割り当てるかといったように背反する項目も多い。CTの作業実務者が，どのようなバランスで各項目を重要視しているか分析することで評価軸を見つけるため，国内５港７CTの作業実務者[9)]へのアンケートを実施した。アンケートは，表１の作業レベルに示すA1～D2およびE1その他の16項目に対する重要度について，合計100点で重み付けしてもらった。これにF1年齢[10)]を加えた17項目で因子分析を行う[11)]。

表１　CTオペレータが重要視している項目

| 分類 | 詳細内容 | 作業レベル（因子） |
|---|---|---|
| A. 本船荷役を滞りなく進行させたい | ・前日のプランニング作業をスムーズに終えたい | （A1）本船プラン，ヤードプラン作成作業の簡素化<br>（A2）荷役機器/作業員手配の簡素化 |
| | ・本船出港を遅らせたくない<br>・当日進行中の作業を止めたくない | （A3）予定外作業発生時の対応迅速化<br>（A4）作業の安全確保 |
| B. 今後の本船荷役を改善したい | ・同じリソースでより多くの荷を処理したい<br>・より少ないリソースで同じ量の荷を処理したい<br>・より低コストで同じ作業をしたい | （B1）STSCあたりの構内シャーシ台数削減<br>（B2）RTGCアサイン台数削減<br>（B3）荷繰り，マーシャリング回数削減<br>（B4）フォアマン，プランナー要員確保の容易化<br>（B5）輸入コンテナ，空コンテナを滞留させない |
| C. 外来シャーシのターンタイムを短縮したい | ・CTに入るまでの時間を短縮したい | （C1）ゲート前待ち時間の短縮<br>（C2）ゲート処理時間の短縮 |
| | ・CT内滞在時間を短縮したい | （C3）構内でのレーン進入待ち時間の短縮<br>（C4）RTGC荷役作業待ち時間の短縮 |
| D. 船社,荷主,地域社会の環境負荷低減要求に対応したい | ・有害ガス排出を削減したい<br>・削減量を数値化したい，認証されたい | （D1）荷役機器の排出ガスを削減<br>（D2）荷役機器の消費エネルギー・排出ガス可視化 |

出所）市村・篠田（2025）；CTオペレータへのヒアリングを元に著者作成

## ２．因子相関行列

本節では，CT作業実務者の要望の分析事例を示す。アンケートの回答を元に因子相関行列を作成し，ウォード法による階層クラスタリングで並び替えた結果を表２に示す。因子分析の精度を向上させるため，因子相関係数が高く設問の意図が同じとみなされる質問項目については，得点を合算する。A1とA2は「翌日の荷役準備簡素化」，B1とB2は「荷役機器の投入台数最小化」，C1とC2は「外来シャーシのゲートインまでの時間短縮」，C3とC4は「外来シャーシのCT内滞在時間（ターンタイム）短縮」，D1とD2は「荷役機器の省エネ・環境対策重視」として括られる。

E1とF1の間には，年齢が上がるほど今回挙げた項目以外を指摘する傾向があることがわかったが，「その他」の指すものについて明確な回答が得られておらず，別の分析が必要である。E1とF1は他の因子との相関が低いため，以降の因子分析からは除外する。

## ３．因子負荷量

元データは，上記の合算処理に加え質問項目ごとに最大値を１とする比率で示す正規化を行っ

9）アンケート対象のCTは戦略港湾の３港，国際拠点港湾の２港にあり，年間取扱量は30万TEU以下が２CT，30～80万TEU以下が３CT，80～120万TEU以下が２CTである。対象者は，CTのフォアマン，本船プランナー，ヤードプランナー，ドキュメント作業者，機器・作業員手配者，全体管理者，プランナーOBで，回答数は55である。

10）F1は20歳代＝２，30歳代＝３，40歳代＝４，50歳代＝５とした。

11）分析にはVisual Studio Codeバージョン1.99.0とPythonバージョン3.11.5を用いて，MacOSバージョン15.4上で実行する自作プログラムを用いた。プログラム内で，因子相関行列の作成にはpandasライブラリのcorr関数を，因子分析にはscikit-learnライブラリのFactorAnalyzer関数を使用した。

た。処理したデータを用い，最尤法とバリマックス回転で求めた因子負荷量を表３に示す。固有値が１以上となる共通因子１～４に対して，表４に示す共通因子の名称を設定した[12)]。なお，共通因子１～４の累積寄与率は0.677でありデータ構造の解明には十分と考える。

表２　CTオペレータが重要視している項目の因子相関行列

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A2 | 0.51 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| A3 | 0.14 | -0.02 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | |
| A4 | -0.05 | 0.00 | 0.48 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | |
| B1 | -0.22 | -0.14 | 0.17 | 0.00 | 1.00 | | | | | | | | | | | | |
| B2 | -0.31 | -0.34 | 0.06 | -0.10 | 0.56 | 1.00 | | | | | | | | | | | |
| C3 | -0.46 | -0.36 | -0.43 | -0.51 | 0.03 | 0.17 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| C4 | -0.39 | -0.31 | -0.25 | -0.40 | -0.03 | 0.02 | 0.71 | 1.00 | | | | | | | | | |
| B3 | -0.21 | -0.27 | -0.06 | -0.18 | -0.05 | 0.21 | 0.08 | 0.04 | 1.00 | | | | | | | | |
| B5 | -0.25 | -0.24 | -0.02 | -0.09 | -0.31 | -0.08 | 0.05 | 0.19 | 0.08 | 1.00 | | | | | | | |
| B4 | 0.06 | -0.03 | 0.05 | 0.12 | 0.17 | -0.06 | -0.47 | -0.33 | 0.12 | -0.15 | 1.00 | | | | | | |
| E1 | -0.09 | -0.17 | -0.25 | 0.06 | -0.11 | -0.15 | -0.05 | -0.08 | 0.05 | -0.03 | 0.33 | 1.00 | | | | | |
| F1 | -0.19 | -0.07 | -0.31 | -0.13 | -0.02 | -0.13 | 0.01 | -0.12 | -0.04 | -0.02 | 0.20 | 0.39 | 1.00 | | | | |
| D1 | 0.02 | 0.06 | -0.26 | 0.02 | -0.03 | -0.12 | -0.06 | -0.21 | -0.30 | -0.31 | -0.11 | -0.07 | 0.25 | 1.00 | | | |
| D2 | 0.02 | -0.06 | -0.05 | -0.10 | 0.21 | 0.09 | -0.21 | -0.23 | -0.08 | -0.37 | 0.09 | -0.13 | 0.23 | 0.69 | 1.00 | | |
| C1 | -0.23 | -0.23 | -0.34 | -0.27 | 0.00 | 0.09 | 0.35 | -0.06 | -0.11 | -0.14 | -0.08 | -0.10 | 0.23 | 0.13 | 0.12 | 1.00 | |
| C2 | -0.30 | -0.22 | -0.32 | -0.05 | -0.07 | 0.02 | 0.25 | 0.05 | -0.02 | -0.30 | -0.19 | -0.02 | 0.19 | 0.29 | 0.28 | 0.39 | 1.00 |
| | A1 | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | C3 | C4 | B3 | B5 | B4 | E1 | F1 | D1 | D2 | C1 | C2 |

出所）CTオペレータへのアンケート結果に基づき著者算出

表３　最尤法，バリマックス回転による因子負荷量

| | Fact1 | Fact2 | Fact3 | Fact4 | Fact5 | Fact6 | Fact7 | Fact8 | **共通性** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A1+A2 | -0.167 | 0.705 | -0.358 | -0.362 | -0.076 | -0.085 | -0.217 | -0.388 | 0.995 |
| A3 | 0.469 | 0.232 | -0.299 | -0.002 | -0.029 | -0.177 | -0.052 | 0.319 | 0.500 |
| A4 | 0.984 | 0.079 | -0.065 | -0.040 | 0.063 | 0.009 | -0.082 | -0.063 | 0.995 |
| B1+B2 | -0.005 | -0.084 | 0.003 | -0.110 | 0.027 | -0.003 | 0.052 | 0.776 | 0.624 |
| B3 | -0.095 | -0.054 | -0.035 | 0.035 | 0.067 | -0.116 | 0.979 | 0.062 | 0.995 |
| B4 | 0.048 | 0.130 | -0.062 | -0.073 | 0.980 | -0.029 | 0.067 | 0.032 | 0.995 |
| B5 | -0.051 | -0.089 | -0.130 | 0.952 | -0.083 | -0.180 | 0.031 | -0.146 | 0.995 |
| C1+C2 | -0.144 | -0.099 | 0.963 | -0.128 | -0.075 | 0.110 | -0.049 | 0.003 | 0.995 |
| C3+C4 | -0.407 | -0.841 | 0.016 | -0.014 | -0.301 | -0.174 | -0.022 | -0.015 | 0.995 |
| D1+D2 | -0.043 | 0.071 | 0.120 | -0.167 | -0.028 | 0.964 | -0.123 | -0.015 | 0.995 |
| **固有値** | 2.370 | 1.782 | 1.426 | 1.187 | 0.949 | 0.695 | 0.664 | 0.500 | |
| **寄与率** | 0.237 | 0.178 | 0.143 | 0.119 | 0.095 | 0.070 | 0.066 | 0.050 | |
| **累積寄与率** | 0.237 | 0.415 | 0.558 | 0.677 | 0.771 | 0.841 | 0.907 | 0.957 | |

※ Fact：　共通因子

出所）著者算出

表４　各共通因子の名称

| Fact | 因子名称 | 詳細 |
|---|---|---|
| 1 | 当日の本船荷役円滑化 | 当日の本船荷役を円滑に終えることを優先し，外来シャーシのCT内滞在時間をある程度トレードオフしてもよいという評価軸。 |
| 2 | 翌日の計画作成簡易化 | 翌日の荷役計画立案や機器の手配簡易化を優先し，外来シャーシのCT内滞在時間をトレードオフしてもよいという評価軸。 |
| 3 | ゲート渋滞最小化 | 外来シャーシのゲート通過時間を短縮することで，ゲート前渋滞の最小化を優先する評価軸。 |
| 4 | CT内滞留最小化 | CT内にあるコンテナをできるだけ早くCT外に出し，滞留を最小化することを優先する評価軸。 |

出所）著者作成

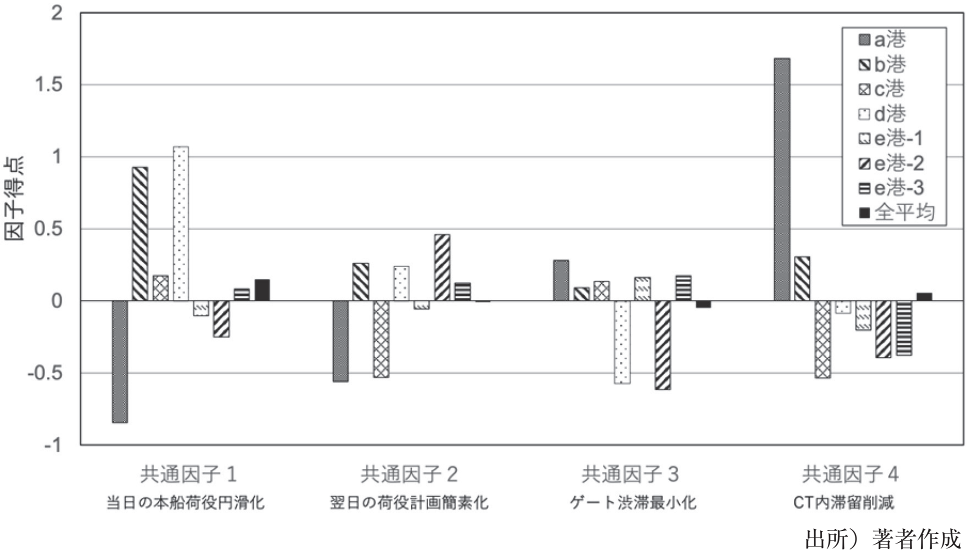
12）表３で，本船作業の円滑化を重要視する項目Ａのうち，共通因子１は当日作業を重要視する因子負荷量A3，A4が高く，共通因子２は前日作業を重要視する因子負荷量A1+A2が高い特徴がある。また，共通因子３は外来シャーシのゲートインまでの時間短縮を重要視する因子負荷量C1+C2が高く，共通因子４はコンテナをCT内に滞留させないことを重要視する因子負荷量B5が高い特徴がある。

図４に，国内５港７CT（回答数53）[13) ]における共通因子１～４の因子得点をCTごとの平均値で示す。因子得点が概ね0.5以上あるいは-0.5以下の，顕著な特性を示す項目についてアンケートを実施したCTオペレータにヒアリングし，以下の背景があることが判明した。

(1)　a港CTでは，構内の渋滞やコンテナ滞留を少なくすることによる全体効率の向上を目指しており，共通因子４の得点が高くなっている。一方，共通因子１，２では外来シャーシのCT内渋滞をトレードオフしており，その反動が得点をマイナスにしている。
(2)　b港CTは，イレギュラー処理が多くなりがちな輸入コンテナ荷役の比率が高く，当日の荷役作業を円滑に進めることを特に重要視しているため，共通因子１の得点が高くなっている。
(3)　c港CTは，多くの輸出コンテナがカット日に搬入される等荷動きが予測しやすく，荷役機器台数の日々の増減も少ないため，翌日の計画作成やCT内滞留削減に対する重要度が低く，共通因子２，４の得点がマイナスになっている。
(4)　e港-２CTは大型コンテナ船の荷役を行っており，連続して多数のコンテナを荷役するため翌日の計画作成に対する重要度が高い。また，高度なゲート管理システムを採用することでゲート渋滞の発生が抑えられているため，共通因子３，４の得点がマイナスになっている。

また，d港CTは，本調査中最小規模のCTで取扱量が少ないためゲート渋滞の発生も限定的である。回答数が少なく精度は限定的であるが，相対的に当日の荷役作業円滑化を重要視しており，共通因子１の得点が高く，共通因子３の得点がマイナスになっていると考えられる。

図４　各港CTの因子得点




出所）著者作成

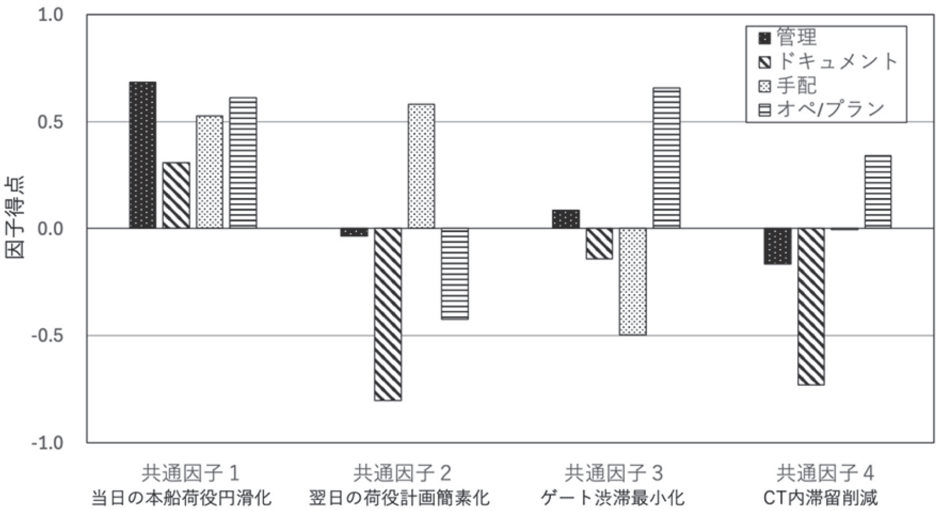
ヒアリングにより，各港CTの置かれている環境が因子得点に影響していることが解明できたが，担当する職種によっても重要視する項目は異なる。図５に，回答が得られた３CTの４業務（回答数17）[14) ]における共通因子１～４の因子得点を職種ごとの平均で示す。

管理業務はCT運営全般にわたり円滑に業務が遂行できるよう管理しており，共通因子１の得点が高くなっていることが特徴的である。ドキュメント業務は，貨物の輸出入書類を実際の荷役作業と紐づけて管理している。荷役当日の作業に関連するため，共通因子１の得点はプラスであ

13）a港CT ７名，b港CT ８名，c港CT ６名，d港CT ２名，e港-１CT13名，e港-２CT10名，e港-３CT ７名。複数港の横断的管理者，プランナーOB其々１名は除外した。
14）管理業務８名，ドキュメント業務２名，手配業務４名，オペ/プラン業務３名

るが他の共通因子の得点はマイナスになっていることが特徴的である。手配業務は荷役機器や作業員の手配を行うもので，前日の計画に関する共通因子２の得点がプラスになっていることが特徴的である。オペ/プラン業務は，当日の荷役作業遂行管理（オペレーション）と翌日の荷役計画作成（プランニング）を含んでいる。共通因子２の得点がマイナスになったのは，アンケート回答者にオペレーションを重視する方が多かったためと推測される。CTによりプランニングとオペレーションを一体的に運営しているところもあり，個別にアンケートを集計するには限界がある。またプランニングは本船荷役とヤード荷役で担当が別れているCTもあり，両者の意見を個別に収集すると重要視する項目が異なる。本アンケートでは，回答数が少なく分離して集計できなかったので，今後の追加検証が必要である。また，業務によっては回答数が少ないので，分析の精度を向上するためには，より多くのアンケート回答を取得する必要がある。

図５　職種別の因子得点




出所）著者作成

## Ⅴ．まとめ

本報では，デジタルツインの発展経緯とCTへの導入状況を整理し，提唱するCTデジタルツインの構成を示した。また，CTの作業実務者へのアンケート結果の因子分析により，要望の評価軸を抽出する事例を示した。

(1)　近年，CTへのデジタルツイン技術の適用が議論されるようになった。しかしCTでは，デジタルツイン技術が普及する以前からシミュレーションが普及し，荷役作業や機器状態のデータを一元管理する自動化CTが登場した。このため，デジタルツインの使い方や効率化すべき運営上の項目についての議論が必要である。

(2)　現実モデルとデジタルモデルを同期し，デジタルモデル上でデータ解析を行うというデジタルツインの定義に対し，解析結果を手動・自動のいずれで現実空間に反映するかで更に定義を細分化した。データ解析には，シミュレーションによる将来予測や機械学習に基づくAI判断等が含まれ，手動反映型のCTデジタルツインモデルを提唱した。

(3)　国内５港７CTの作業実務者に対するアンケートを実施し，因子分析により各港CTにおける要望を明確にし，ヒアリングによりCTの背景が因子得点に及ぼす影響を解明した。なお，アンケートでは回答者の考えしか分析できないため，回答者の所属するCTや業務内容が結果に及ぼす影響についても配慮する必要がある。

これらの手法の開発を継続することで，デジタルツインで得られる膨大なデータを活用して効率化を図るCTのデータドリブン運営手法を確立していく。

今後の研究では，実際の荷役作業データから評価軸を導出する。その評価軸を，今回得られた要望の評価軸と比較することで，当該CTにおける荷役作業がオペレータの望んでいる方向と一致しているかを判定する。また，STSCの機数や年間取扱量，寄港船舶の大きさといったCTの仕様と，評価軸の関係を分析する。これにより，CTの仕様や特徴に応じて，どのような評価軸を目指すべきか指針を示す。そのうえで，デジタルツイン領域のシミュレーションで得られる荷役作業データについて，評価軸に沿う方向へ結果を改善する荷役条件を求める手法を構築していく。

## 参考文献


Fuller A., Fan Z., Day C. and Balow C., “Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research” *IEEE Access*, 8, pp.108952–108971, 2020.

Gao Y., Chang D., Chen C.H. and Sha M., “A digital twin-based decision support approach for AGV scheduling”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 130, 107687. 2024.

Glaessgen E.H. and Stargel D.S., “The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles”, *Proceedings for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference by American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2012.

Kastner M., Saporiti N., Lange A.K. and Rossi T., “Insights into How to Enhance Container Terminal Operations with Digital Twins”, *Computers*, 13, 138, 2024.

Klar R., Fredriksson A. and Angelakis V., “Digital Twins for Ports: Derived From Smart City and Supply Chain Twinning Experience”, *IEEE Access*, Volume 11, pp.71777-71799, 2023.

Neugebauer J., Heilig L. and Voß S. (2024), “Digital Twins in the Context of Seaports and Terminal Facilities”, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Vol.36, pp.821–917, 2024.

Silberholz M.B., Golden B.L. and Baker E.K., “Using Simulation to Study the Impact of Work Rules on Productivity at Marine Container Terminals”, *Computers & Operations Research*, Vol. 18. No. 5, pp.433-452, 1991.

Wang K., Hu Q., Zhou M.J., 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.

Yao H., Wang D., Su M. and Qi Y., “Application of Digital Twins in Port System”, *Journal of Physics: Conference Series, Conference Series*, 1846-012008, 2021.

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，pp.1-10, 2024.

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ー実オペレーションに即した計画法の提案ー」，『港湾経済研究』，No.63，pp.33-49, 2025.

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，pp.14-21, 1993.