

日本港湾経済学会 第63回 全国大会自由論題

# デジタルツインを活用したコンテナターミナルの運用効率化 —実操レーションに即した計画法の提案—

2025年9月4日 @沖縄船員会館

(発表者) 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 名誉教授)

## 本日のトピックス



1. 課題意識
2. 背景・先行研究と産業界の現状
3. CT荷役作業へのAI/デジタル技術導入
4. 確率モデルシミュレーション
5. まとめ

## 1. 課題意識

### 1.1. 課題意識

- ✓ 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（大規模コンテナ物流時代）=これまでのノウハウに基づく作業計画では生産性の高い運用ができなくなってきた。
- ✓ 高能率荷役機器の導入に加え運用面でも効率アップを図ることが求められている。
- ✓ コンテナターミナル（CT）への生産性向上の要求→生き残りをかけた新技術導入への投資が必要※。
- ✓ 港湾デジタルツイン導入に関する研究は多いが、実際の荷役作業に沿った手法にまで言及した研究は少ない。

大型コンテナ船荷役



出所) 三井E&amp;S

※港湾の近代化を怠った国は、単線しかない鉄道の支線の様な存在になってしまう。そして、主要港からフィーダー・サービスを受けるしかない。大型コンテナ船は単に「箱」を運んでいるだけのようにみえる。だが実際には、一国の経済をグローバル・サプライチェーンに結ぶ仲介役を果たしているのである。

コンテナ物語—世界を変えたのは「箱」の発明だった 増補改訂版 マルク・レビンソン（著）、村井 章子（訳）

## 1.2. デジタイゼーションとデジタライゼーション

### デジタイゼーション

#### Digitization

アナログプロセスをデジタルで処理できるようにする

例) アナログレコード→CD化

### デジタライゼーション

#### Digitalization

デジタル技術を活用しながらビジネスプロセス自体を変革して、新しいビジネスモデルを実現する

例) CD販売→サブスクストリーミング配信

#### コンテナターミナル (CT) のデジタライゼーション

荷役機械の自動化、  
IoT化、運用管理の  
電子化

デジタイゼーション



出所) 著者作成

## 2. 背景・先行研究と産業界の現状

## 2. コンテナターミナルとは

今日、国際貨物物流の多くを海上コンテナ輸送に頼っており、超大型コンテナ船に対応したコンテナターミナル（CT）が整備されている。

超大型コンテナ船



24,000TEU

出所) shipspotting.com

船幅 61.5m (24rows)

RTG方式CTの全景



岸壁長8.4km, STS65機, RTG210機

出所) 三井E&S

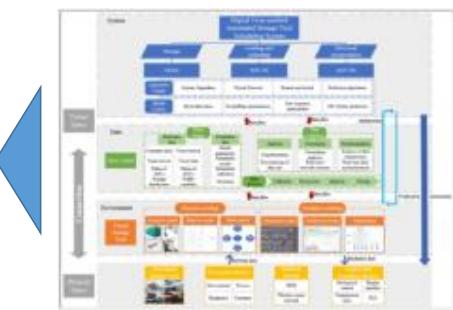
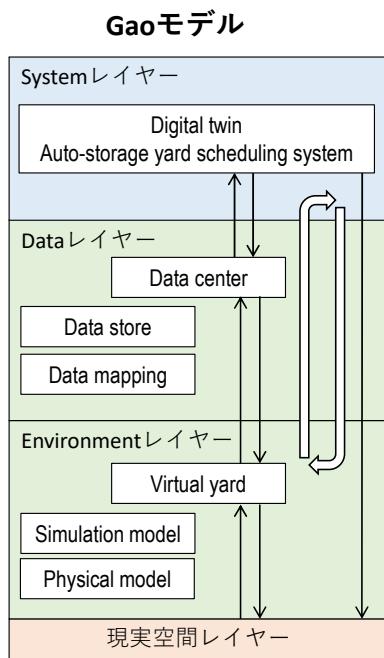
### 2.2. Terminal Operating System (TOS)

ターミナルオペレーティングシステム(TOS)はCT内の蔵置や作業に関する情報を一元的に管理するソフトウェアで  
荷役計画作成の**支援ツール**。

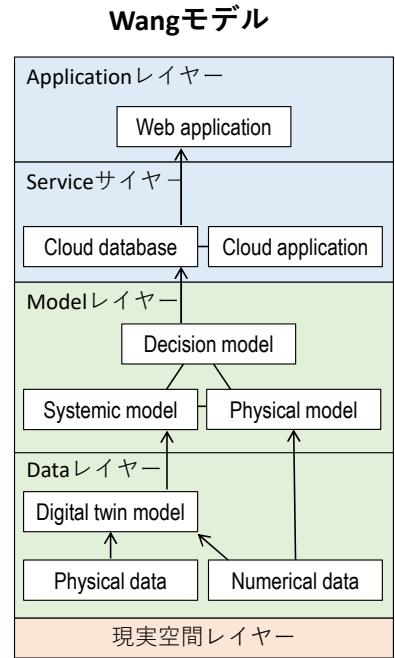


出所) 三井E&S製品パンフレット

## 2.3. CTデジタルツイン関連研究の動向



Gao et.al., Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling , Advanced Engineering Informatics, 2021/12



Wang et.al., Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports, Case Studies on Transport Policy, 2021/7

出所) 各論文から著者作成

## 2.4. デジタルCTの事例紹介1

豪州RBS(Realtime Business Solutions)社  
3D-TOSをベースに最適化機能を付加



出所) <https://rbs-tops.com/terminal-operating-system/topx-expert/tops-intelligent-3d-digital-twin-reality/>

米クレーンメーカーMi-Jack社  
機器位置管理システムをベースにCTデジタルツインに拡張



出所) <https://mi-jack.com/mi-star/accuvue-virtualized-terminal-operations/>

## 2.5. デジタルCTの事例紹介2

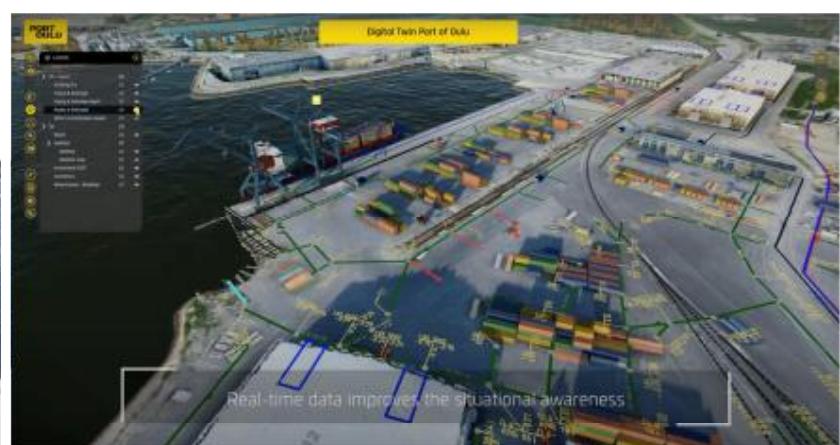
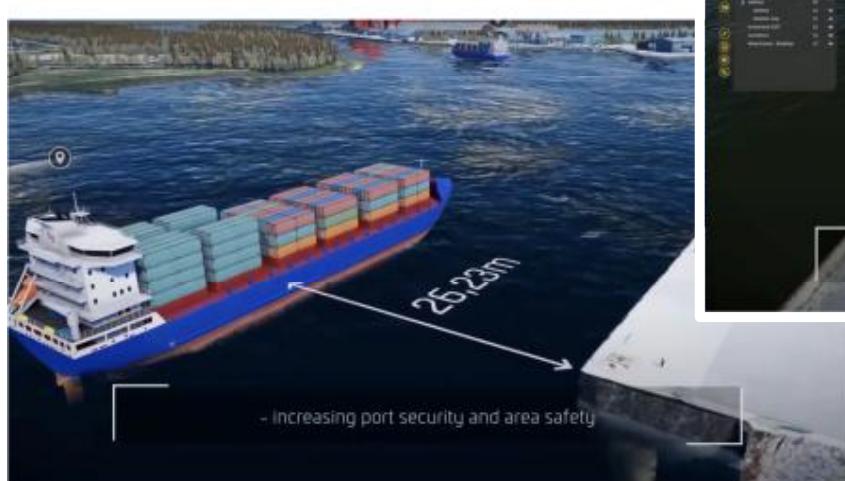


UAE ドバイT2のオペレーションルーム

出所) 著者撮影

## 2.6. デジタル港湾の事例紹介

Sitowiseは荷役ターミナルのみならず、水域を含めた港湾全体をデジタルツイン化をフィンランド・オウル港で実現。



出所) <https://www.youtube.com/watch?v=PlJGVcJP1t8&t=50s>

### 3. CT荷役作業へのAI/デジタル技術導入

#### 3.1. CTオペの重要視項目と今日のデジタル技術

CTオペレーターが重要視している項目

分類	詳細内容	作業レベル
1. 本船荷役を滞りなく進行させたい	<ul style="list-style-type: none"> <li>前日のプランニング作業をスムーズに終えたい</li> <li>本船出港を遅らせたくない</li> <li>当日進行中の作業を止めたくない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>本船プラン、ヤードプラン作成作業の簡素化</li> <li>荷役機器/作業員手配の簡素化</li> <li>予定外作業発生時の対応迅速化</li> <li>作業の安全確保</li> </ul>
2. 今後の本船荷役を改善したい	<ul style="list-style-type: none"> <li>同じリソースでより多くの荷を処理したい</li> <li>より少ないリソースで同じ量の荷を処理したい</li> <li>より低コストで今と同じ作業をしたい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>STSCあたりの構内シャーシ台数削減</li> <li>RTGCアサイン台数削減</li> <li>荷繰り、マーシヤリング回数削減</li> <li>フォアマン、プランナー要員確保の容易化</li> <li>輸入コンテナ、空コンテナを滞留させない</li> </ul>
3. 外来シャーシのターンタイムを短縮したい	<ul style="list-style-type: none"> <li>CTに入るまでの時間を短縮したい</li> <li>CT内滞在時間を短縮したい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ゲート前待ち時間の短縮</li> <li>ゲート処理時間の短縮</li> <li>構内でのレーン進入待ち時間の短縮</li> <li>RTGC荷役作業待ち時間の短縮</li> </ul>
4. 船社、荷主、地域社会の環境負荷低減要求に対応したい	<ul style="list-style-type: none"> <li>有害ガス排出を削減したい</li> <li>削減量を数値化したい、認証されたい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>荷役機器の排出ガスを削減</li> <li>荷役機器の消費エネルギー・排出ガスの見える化</li> </ul>

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

出所) CTオペレーターへのヒアリングを元に著者作成

提唱・実用化されているCT関連技術の例

活用技術分野	提唱・実用化されている技術
AI	<ul style="list-style-type: none"> <li>本船オペスケ・プランニング</li> <li>本船荷役蔵置座標・プランニング</li> <li>本船荷役リアルタイム作業変更</li> <li>荷役機器配置計画(移動距離/配置台数最小化など)</li> <li>輸出コンテナ搬入時置場所決定</li> </ul>
ICT	<ul style="list-style-type: none"> <li>ゲート搬出入予約</li> <li>CT内作業員・機器動態一元管理</li> <li>CT内誘導員への荷役情報リアルタイム共有</li> <li>荷役情報の陸運共有</li> </ul>
IoT	<ul style="list-style-type: none"> <li>荷役機器保守計画自動化</li> <li>荷役機器故障予測</li> <li>消費電力のリアルタイムモニタリング</li> </ul>

- 国土交通省ホームページ『荷繰り最小化AIシステム～導入ガイドライン～』4ページ、<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001610254.pdf>
- Inutsuka H., Ichimura K., Sugimura Y., Yoshie M. and Shinoda T. (2024), "Study on the Relationship between Port Governance and Terminal Operation System for Smart Port: Japan Case", *MDPI Logistics*, 8, 59.
- Ichimura K., Shinoda T., Kasezawa M. and Oba M. (2024), "A Study of Causes of Congestion in front of Stacking Lanes at Container Terminals and Proposal of Countermeasures", *Proceedings of 10th International Conference on Transportation and Logistics (T-LOG 2024)*, Paper ID 16.
- 高橋輝行 (2024), 「クレーン点検システムCREWSの開発」、『クレーン』第62巻7号、p.36-40.

出所) 出典資料を元に著者作成

### 3.2. CTオペの重要視項目とデジタル技術の関係

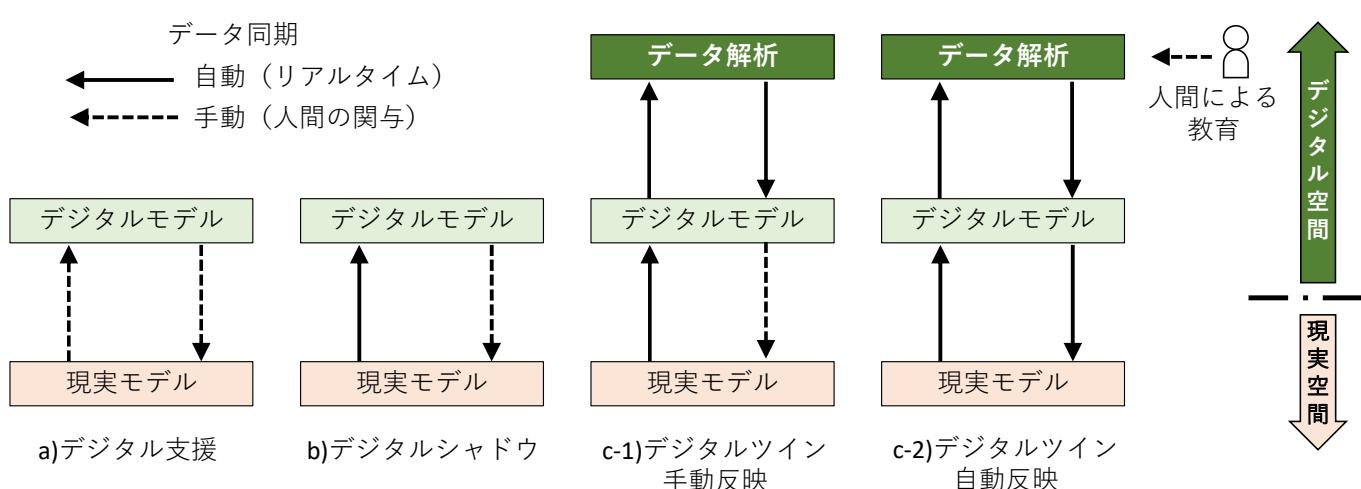
提唱・実用化されている港湾関連AI技術はCTオペが重要視する項目を解決しうる可能性が高い。

		活用技術分野		AI		ICT		IoT							
		適用するデジタル技術		本船荷役識別標・プランニング	本船荷役識別標・プランニング	本船荷役リアルタイム作業変更	荷役機器配置計画	輸入コンテナ搬入時置場所決定	ゲート搬出入予約	CT内作業員・機器動態一元管理	CT内作業員への荷役情報リアルタイム共有	荷役情報の陸運共有	荷役機器保守計画自動化	荷役機器故障予測	消費電力のリアルタイムモニタリング
1	CTオペレータが重要視している項目 (作業レベル)	本船プラン、ヤードプラン作成作業の簡素化	◎	◎									○	○	
	荷役機器/作業員手配の簡素化	◎	◎			◎							◎	◎	
	予定外作業発生時の対応迅速化			◎				◎						◎	
	作業の安全確保								◎	◎					
2	STSCあたりの構内シャーシ台数削減	◎	◎												
	RTGCアサイン台数削減	◎		◎		◎	◎	◎					○		
	荷繰り、マーシャリング回数削減	○	◎	◎	○	○						◎			
	フォアマン、プランナー要員確保の容易化	◎	◎	◎	◎	◎	◎				◎			◎	
3	輸入コンテナ、空コンテナを滞留させない	◎	○												
	ゲート前待ち時間の短縮						○	○				○			
	ゲート処理時間の短縮			◎			○	○				○			
	構内でのレンン進入待ち時間の短縮									○	○	○			
4	RTGC荷役作業待ち時間の短縮								○						
	荷役機器の排出ガスを削減					◎								○	
	荷役機器の消費エネルギー・排出ガスの見える化									◎				◎	

出所)  
著作者成

### 3.3. デジタルツインの定義

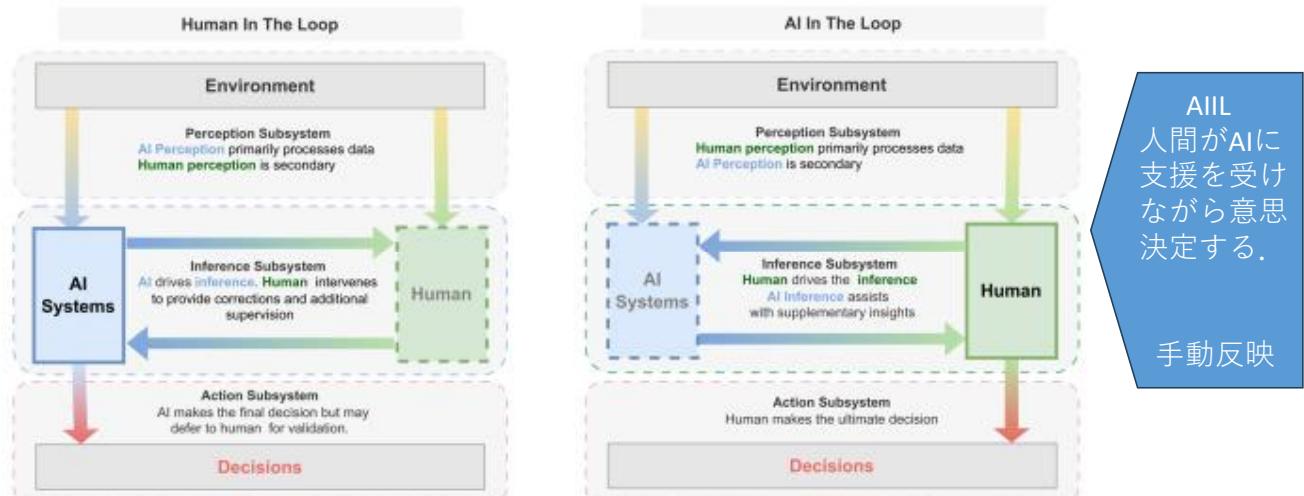
- Neugebauerは、港湾とターミナルデジタル化に関する141の論文を調査し、a)デジタル支援、b)デジタルシャドウ、c)デジタルツインに類型化した。
- 著者らは、デジタルツインを更に分類し、手動反映型システムを提唱。



出所) 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.  
を元に著者成

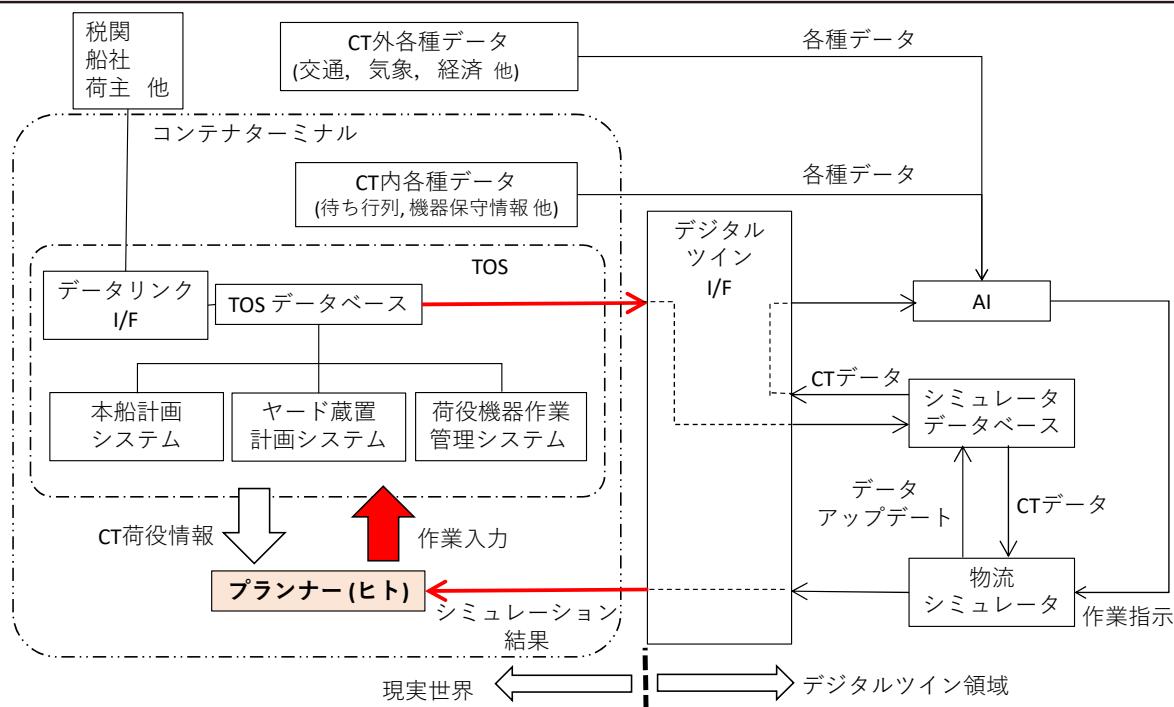
### 3.4. Human in the Loop (HITL)

- HITLは1960～70年代に完全自動化が困難な軍事・宇宙分野で誕生.
- 2000～2010年代に機械学習への人間によるタグ付けとして再定義.
- 2020年代はAIと人間の関わり方を定義. NatarajanらはAI in the Loopを提唱.



出所) Natarajan S., Mathur S., Sidheekh S., Stammer W. and Kersting K. (2025), "Human-in-the-loop or AI-in-the-loop? Automate or Collaborate?", *The 39<sup>th</sup> AAAI Conference on Artificial Intelligence*.

### 3.5. 提唱するTOS・AI間でのデータ連携方法



(出所) 特許第7309133号, 2023.7.7を元に著者作成

### 3.6. 港湾デジタルソリューション(動画)



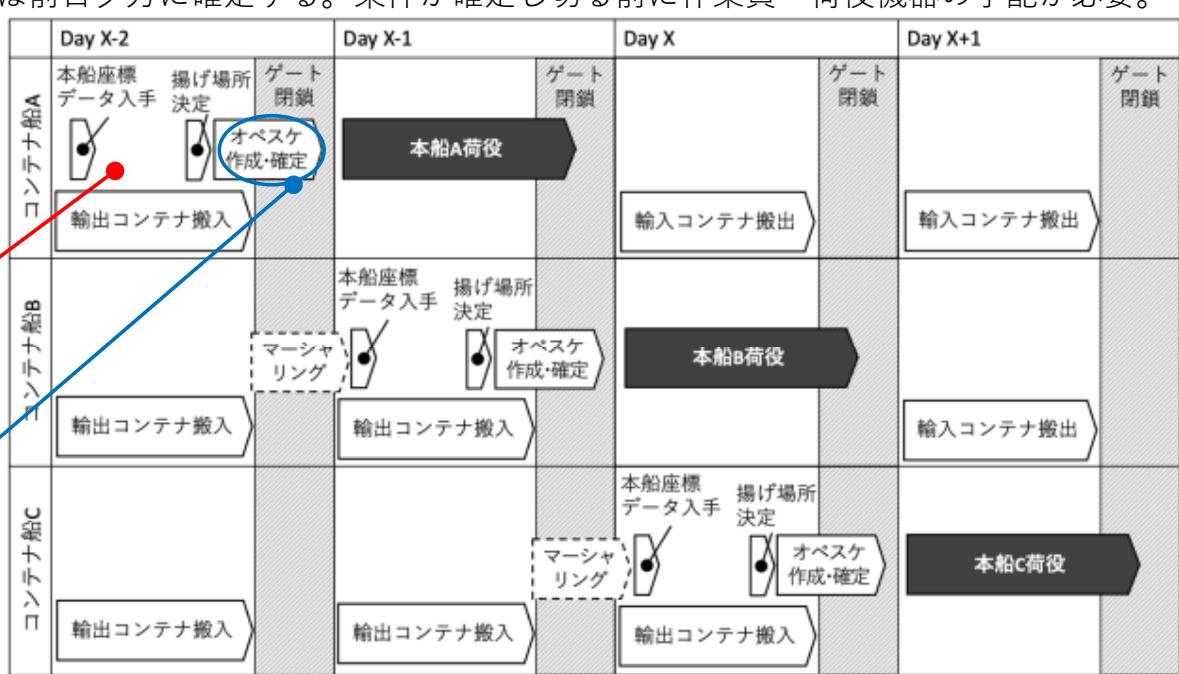
### 3.7. CTにおける本船荷役にかかる各種作業のタイミング

翌日の荷役計画は前日夕方に確定する。条件が確定し切る前に作業員・荷役機器の手配が必要。

前日の早い段階で  
作業員・荷役機器  
の手配したい



条件が最終確定す  
るのは前日夕方  
条件確定後デジタ  
ルソリューション  
を使う



出所) CTオペレータへのヒアリングを元に著者作成

## 4. 確率モデルシミュレーション

### 4.1. 確率モデルと物流シミュレータ

翌日の荷役計画が確定しない段階で確立モデルによるシミュレーションを実施すること検討する。

区分	確率モデル	物流シミュレータ
イメージ	<p>数式モデルの詳細は次ページ参照</p>	<p>デジタル港湾ソフトに含まれているシミュレーションは物流シミュレータによるもの</p>
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>設定条件が定まらない（確率的に発生する）事象でもシミュレーションできる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>途中経過も含めて可視化できる</li> <li>複雑なモデルを構築しやすい</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>モデリングに実CTの計測データ（発生確率分布）が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>全ての設定条件に確定値を用いる必要あり</li> <li>計算時間が長い</li> </ul>

出所) 著著作成

## 4.2. 確率モデル（数式モデル）によるシミュレーション



$$\bar{t}_{\text{wait\_cs}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_{\text{cont}}} (t_{\text{cyc\_cha}} - t_{\text{cyc\_sts}}) \quad (t_{\text{cyc\_cha}} < t_{\text{cyc\_sts}}) \quad (1)$$

$$T_{\text{wait\_sc}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{cont}}} (t_{\text{cyc\_cha}} - t_{\text{cyc\_sts}}) \quad (t_{\text{cyc\_sta}} < t_{\text{cyc\_cha}}) \quad (2)$$

$$t_{\text{cyc\_sts}} = t_{\text{work\_sv}} \times n_{\text{cha}} + t_{\text{work\_sc}} \times (n_{\text{cha}} - 1) \quad (3)$$

$$t_{\text{cyc\_cha}} = t_{\text{work\_sc}} + \frac{L_{\text{cha}}}{v_{\text{cha}}} + t_{\text{wait\_cr}} + t_{\text{work\_rc}} \quad (4)$$

$T_{\text{wait\_sc}}$  STSCの構内シャーシ到着待ち時間 (STSCあたり1船作業の合計)

$\bar{t}_{\text{wait\_sc}}$  構内シャーシのSTSC荷役開始待ち時間 (構内シャーシあたりの平均)

$t_{\text{wait\_cr}}$  構内シャーシのRTGC荷役開始待ち時間

$t_{\text{cyc\_sts}}$  次のSTSC荷役までの時間

$t_{\text{work\_sv}}$  STSCの本船上の荷役作業時間 (構内シャーシ到着前に作業可能)

$t_{\text{work\_sc}}$  STSCの構内シャーシへの荷役作業時間 (構内シャーシ到着後に作業)

$t_{\text{work\_rc}}$  RTGCの構内シャーシへの荷役作業時間

$n_{\text{cha}}$  STSCあたりの構内シャーシ数

$t_{\text{cyc\_cha}}$  構内シャーシのサイクルタイム

$L_{\text{cha}}$  構内シャーシの周回走行距離

$v_{\text{cha}}$  構内シャーシの走行速度

$n_{\text{cont}}$  荷役コンテナ数

項目	確率モデルの詳細	シミュレーション条件設定	
		比較シミュレーションでの条件設定	物流シミュレータ
$n_{\text{cont}}$	荷役コンテナ数は一様分布の乱数で発生	186 ± 19本の範囲で確率的に設定	186本に固定
蔵置場所指定	蔵置場所は、荷役バッチごとに重み付けし確率的に行き先決定	表下の7バッチで、荷役本数比率の確率で行先を決定 確率8.6%で例外処理が発生	実際の荷役のオペスケに従う
$t_{\text{wait\_cr}}$	待ちが発生しない確率と指數関数による待ち時間の合計で決定	平均20秒、標準偏差45 (3台) 平均45秒、標準偏差70 (4台) 確率3%でRTGC長時間待ち (210秒) が発生	ミュレーションの実施結果として得られる
$t_{\text{work\_sv}}$	ガンマ分布で決定	平均76秒、標準偏差0	平均76秒、標準偏差0
$t_{\text{work\_sc}}$	同上	平均30秒、標準偏差0	平均30秒、標準偏差0
$t_{\text{work\_rc}}$	同上	平均38秒、標準偏差0	平均38秒、標準偏差0
$v_{\text{cha}}$	固定値で指定	6.94m/秒 (25km/h)	6.94m/秒 (25km/h)

### 本船荷役バッチ設定

No.	荷役種別	STSC号機番号	蔵置レーン	荷役本数	例外処理	
					行先レーン	本数
1	積み	1	G	8	E	2
2	積み	1	E	28	G, B	4
3	積み	2	E	37	—	0
4	揚げ	2	C	39	D	3
5	積み	2	D	26	E	3
6	揚げ	2	C	25	—	0
7	積み	2	D	23	G	4
合計				186	—	16

## 4.3. 確率モデルの精度検証とシミュレーション事例



### 確率モデル v.s. 物流シミュレー結果比較

項目	単位	確率モデル※1	物流シミュレータ
$n_{\text{cha}}$	台	3	4
$n_{\text{cont}}$	本	186.3	185.9
$\bar{t}_{\text{wait\_cs}}$	秒	98.9	177.9
$T_{\text{wait\_sc}}$	秒	1,127.7	573.7
$t_{\text{cyc\_cha}}$	秒	230.9	255.2
			1,238※2
			399※2
			235.7
			255.3

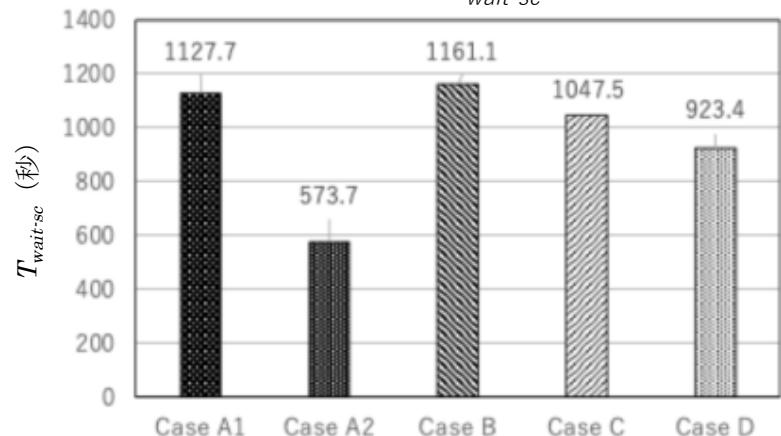
※1 : 2,500回のシミュレーションを繰り返した結果の平均値を示す。

※2 : 1秒単位の計算出力のため平均化計算していない数値は整数で示す。

- 実際の荷役をベースに確率モデルと物流シミュレータによるシミュレーションを実施。
- 確率モデルによるシミュレーションでも、物流シミュレーションに近い結果を得ることが可能。

出所) 著者によるシミュレーション結果

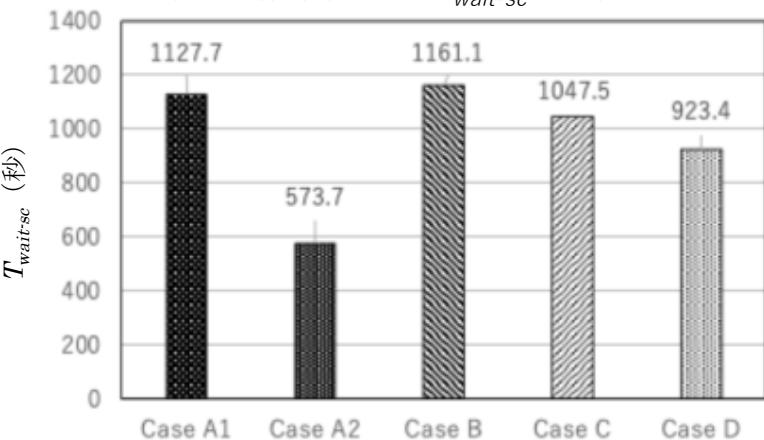
蔵置場所計画による  $T_{\text{wait\_sc}}$  の変化



Case	蔵置場所計画	$n_{\text{cha}}$
A1	実際の荷役バッチに基づく蔵置計画による	3
A2	同上	4
B	Case Aで計画されるレーンまたはその岸壁から遠い側の隣接レーンいずれかを同じ確率で選択する	3
C	輸出(積み)をA～Cレーンのいずれか、輸入(揚げ)をD～Gレーンのいずれかに同じ確率で選択する	3
D	輸出(積み)をAレーン、輸入(揚げ)をDレーンに選択	3

## 4.4. 確率モデルのシミュレーション結果考察

蔵置場所計画による $T_{wait-sc}$ の変化



- Case A1とCase Bを比較すると、隣接する2レーンのうちいずれを選択するか不確定な状態でもシミュレーションで解を得ることが可能であるが、岸壁に近い側のレーンに確定することで30秒程度 $T_{wait-sc}$ を短縮できることが分かる。
- Case A1とCase Cを比較すると、岸壁に近いレーンに輸出、遠いレーンに輸入コンテナを蔵置するレイアウトで運用した場合、荷役バッチごとの蔵置場所を決めなくとも80秒程度 $T_{wait-sc}$ を短縮できことが分かる。特に、輸出、輸入とも最も岸壁に近い側の蔵置レーンを選択する理想的な計画では、Case Cから更に120秒程度短縮できることが分かる。
- Case A2とCase Dを比較することで、蔵置場所の最適化と構内シャーシ台数増加の効果を比較できる。

## 5. まとめ

- 国内CTでのオペレーションを分析しAI技術活用の有効性を確認した。
  - 物流シミュレータにAI技術を適用してオペスケを作成する手法では、確度の高いデータが揃う時を待つ必要がある。確度が低い早い時間帯でも一定の精度で荷役機器や作業員を手配できるよう、確率モデルによる解析手法を考案した。
  - 確率モデルの精度を検証し、事例検討を行った。
- 
- 海外のCTではDT技術の導入が進んでおり、今後、デジタル化された港湾間を結ぶ海運デジタル回廊の形成が進むと予想される。この回廊から外れると基幹航路の寄港地として選定されなくなり、国際海上貨物輸送の日数やコスト増加が危惧される。
  - DT領域でCT荷役作業計画作成の高度化を図るための一連の手法を開発、普及することは、日本のCTにおける持続可能性を維持し港湾の国際競争力低下を防ぐために不可欠である。

ご清聴有難うございました



お問合せ; [kinya@mes.co.jp](mailto:kinya@mes.co.jp)