

自動化・AI化による我が国港湾の 効率性向上に関する研究について

Improvement of port's performance through introductions of
automated system and Artificial Intelligence in Japan

運輸総合研究所主任研究員 瀬賀康浩

Yasuhiro SEGA

Senior Research Fellow,

Japan Transport and Tourism Research Institute (JTTRI)

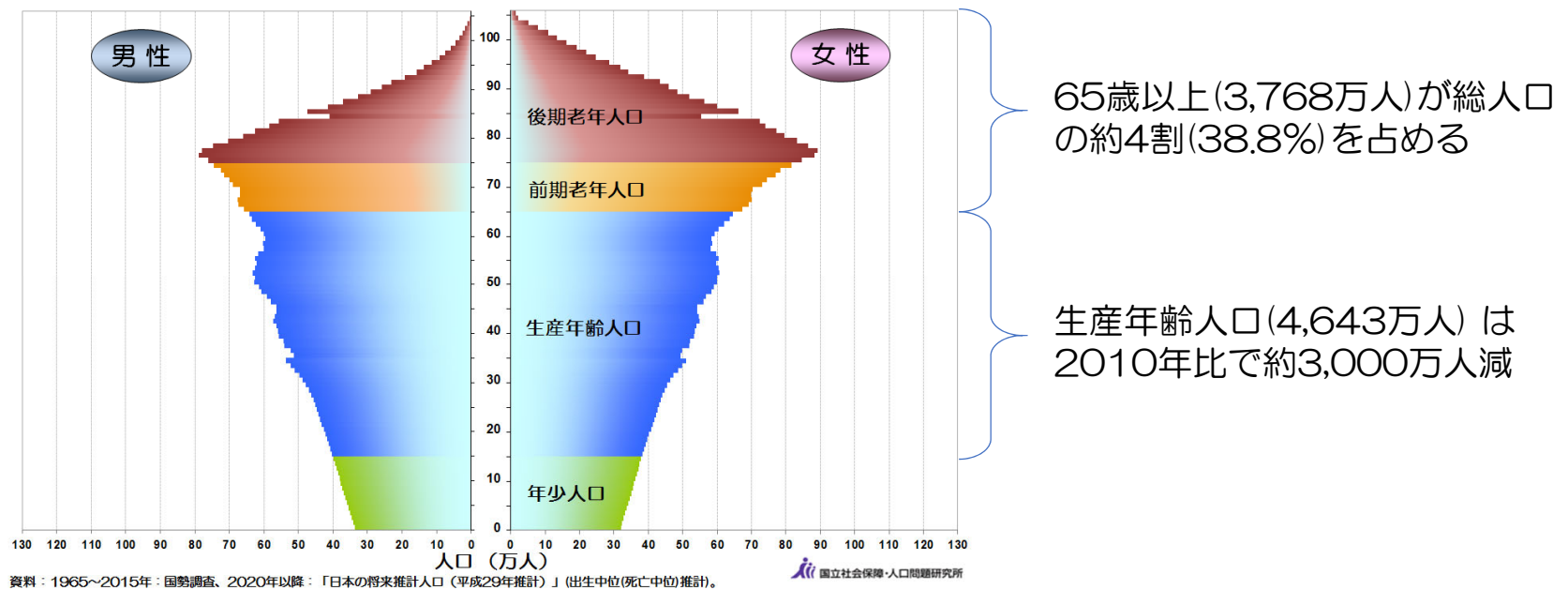
1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

我が国における生産年齢人口の見通し

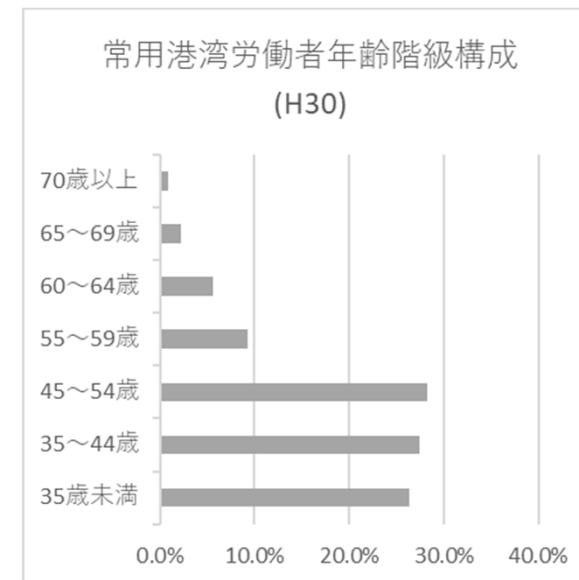
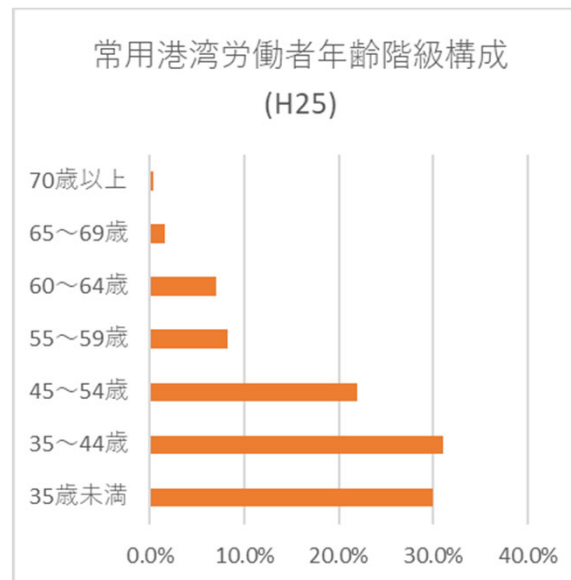
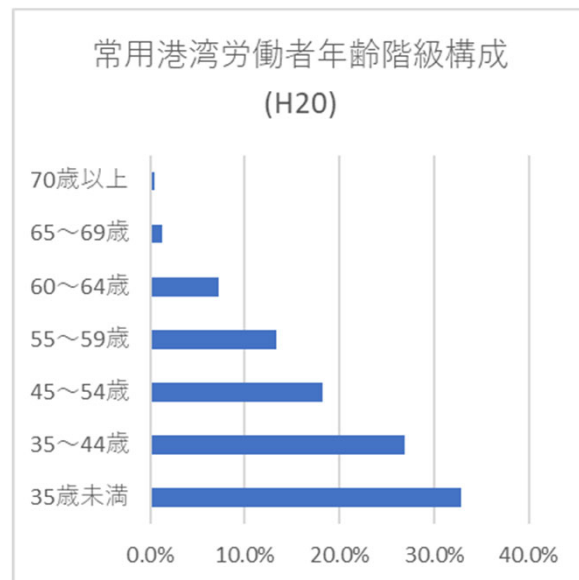
- 我が国は、少子高齢化に伴う生産年齢人口の減少などの状況に直面
- 2050年には総人口の約4割が65歳以上となる見通しであり、生産年齢人口は2010年比約3,000万人減となる見通し

2050年の人口ピラミッド



6大港の常用港湾労働者の年齢階級構成

6大港	35歳未満	35～44歳	45～54歳	55～59歳	60～64歳	65～69歳	70歳以上	44歳未満	45歳以上
H20	32.8%	26.9%	18.2%	13.3%	7.2%	1.3%	0.4%	59.7%	40.4%
H25	29.9%	31.0%	21.9%	8.2%	7.0%	1.6%	0.4%	60.9%	39.1%
H30	26.4%	27.4%	28.3%	9.2%	5.6%	2.2%	0.8%	53.8%	46.1%



H20からH30にかけて、常用港湾労働者の年齢階級構成が上にシフトしている(高齢化が進んでいる)ことが分かる。

我が国の生産年齢人口の減少傾向を鑑みれば今後もこの傾向は続くものと考えられ、港湾における若年労働者の確保はますます困難なものになると予想される。

港湾を取り巻く社会経済情勢

- 人口減少・超成熟社会の到来と労働力不足

15歳から64歳までの人口割合

2060年代には1990年代の
約5割にまで落ち込むと予測

労働者不足の顕在化

より効率的で生産性の高い輸送体系の構築が求められている

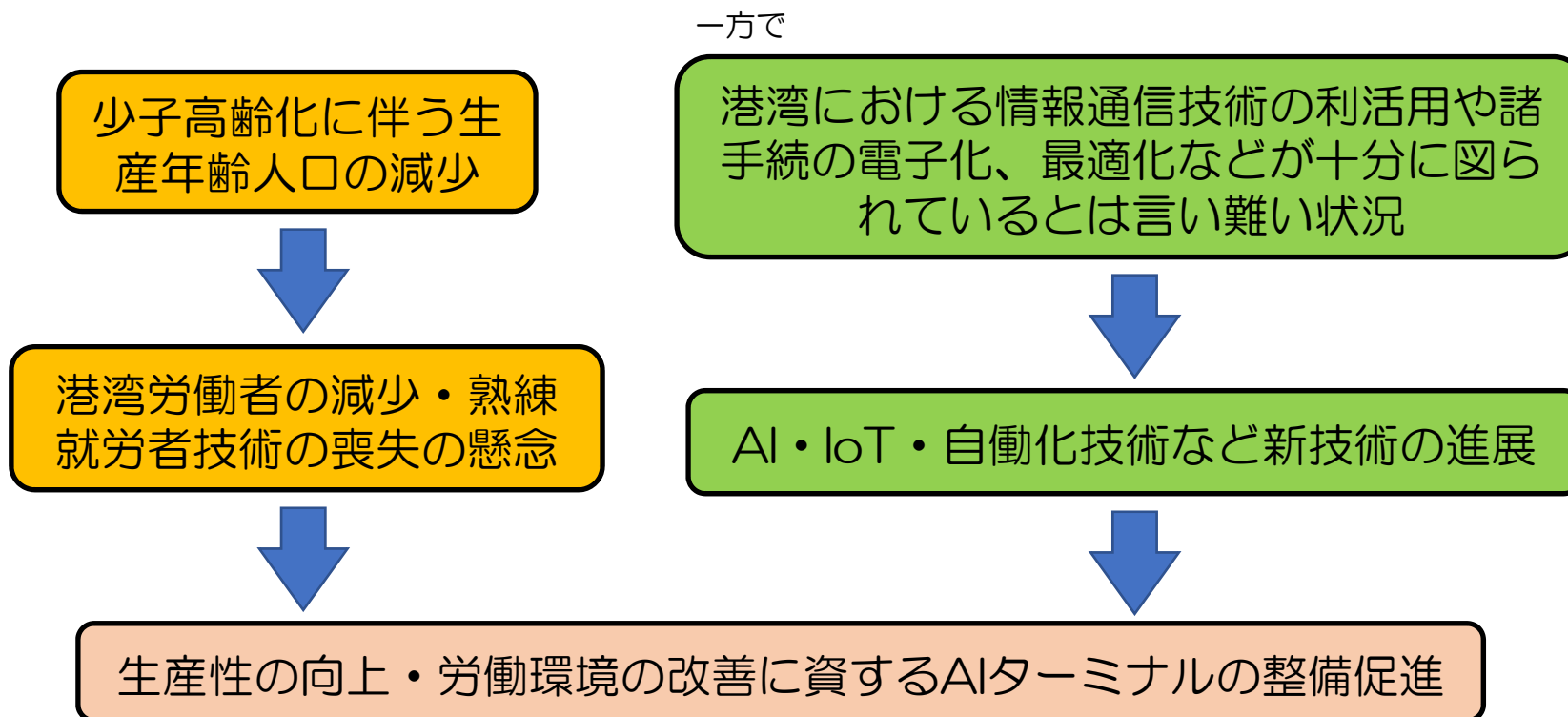
- 第4次産業革命の進展

近年、IoTやAI等の情報通信技術が指数関数的に発展

同技術の活用により、物流分野においてもサプライチェーン全体での効率性の飛躍的向上が期待される

ドローン・自動運転技術等の活用により、労働力不足を補う生産性の向上等が期待される

本研究の目的



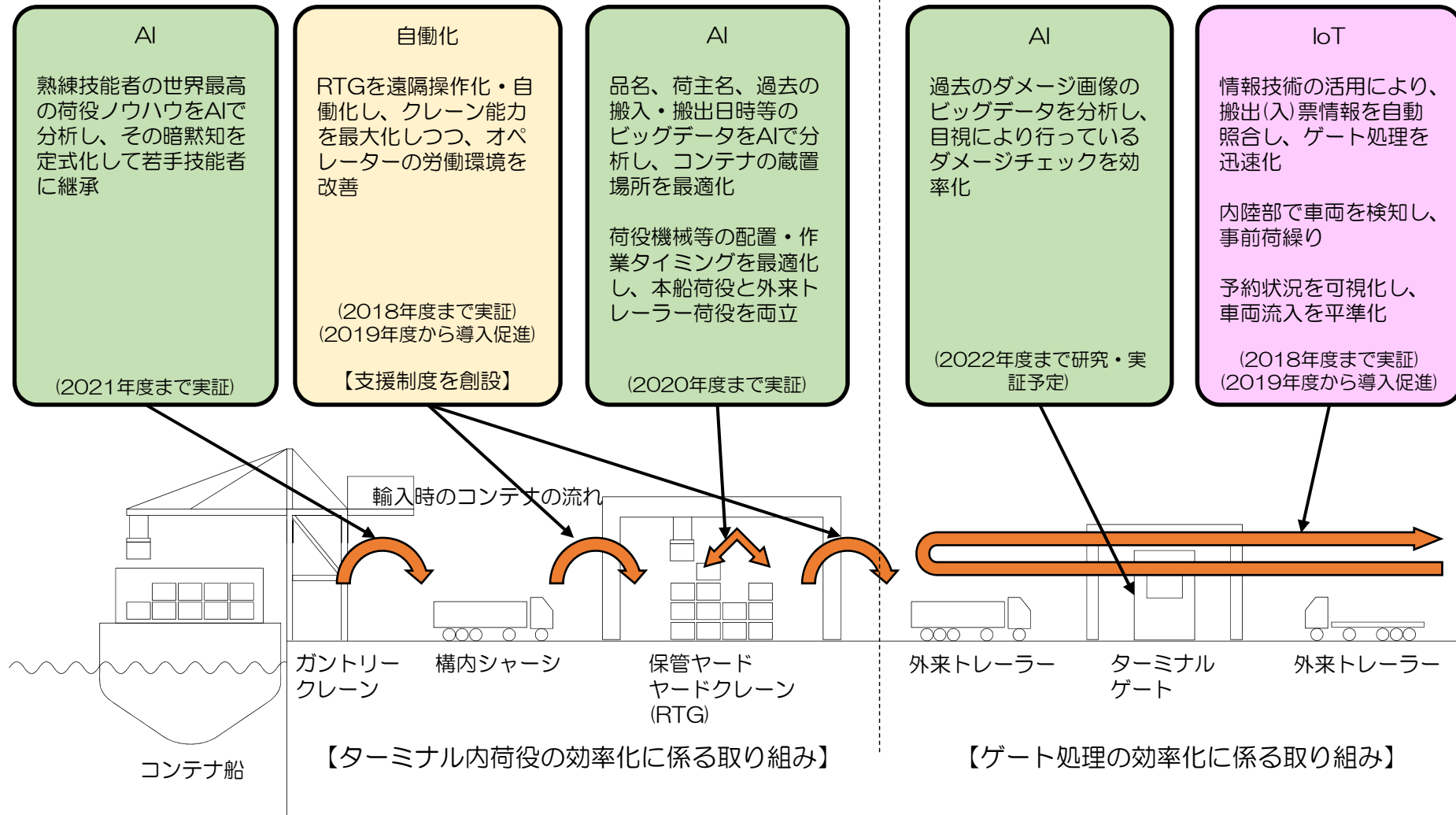
ところで

AIターミナルの整備促進は、労働者不足の解消や生産性の向上にどの程度寄与することとなるのか？

上記を検討するため、まずは自動化設備導入における現状の課題を明らかにし、我が国港湾の効率性向上に資するべく効率性の定量化等につき検討することを目的とする。

1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

AIターミナルについて



雑誌「港湾」2019年3月号資料より筆者作成

AIターミナルについて

・ AIターミナルとは何か？

AI、IoT、自動化技術を組み合わせ、コンテナ蔵置計画の最適化や貨物の搬入・搬出の迅速化等を図ることにより、世界最高水準の生産性を有するコンテナターミナルを形成する施策

AIによる技術

- ターミナルのオペレーションの最適化
- 熟練者の暗黙知の定式化
- コンテナダメージの自動判別 etc

IoTによる技術

- コンテナ、車両情報の自動識別
- 港湾情報の可視化・一元化
- 荷役機械等の予防保全的維持管理 etc

自動化による技術

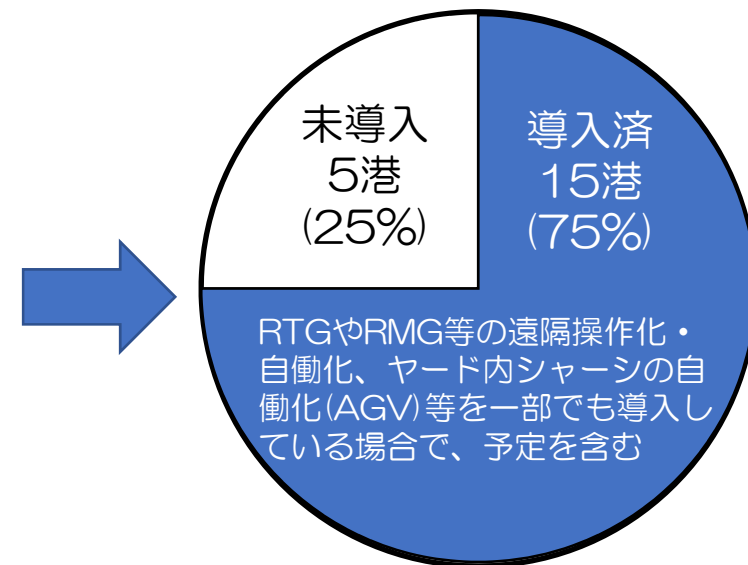
- コンテナの自動搬送・隊列走行
- 荷役機械の遠隔化・自動化 etc

これらの技術は、実証試験段階のものと既に我が国で実用化されているものに分けられる。

← 特にAGVによるコンテナの自動搬送やRTG等の荷役機械の遠隔化・自動化といった「自動化による技術」は、名古屋港飛島地区TCBターミナルで導入済み

順位 (2017年 速報値)	港名	コンテナ 取扱量 (万TEU)	自動化 導入状況 (2018年時点)
1位	上海(中国)	4,023	○
2位	シンガポール	3,367	○
3位	深圳(中国)	2,521	×
4位	寧波・舟山(中国)	2,461	×
5位	香港(中国)	2,076	○
6位	釜山(韓国)	2,047	○
7位	広州(中国)	2,037	×
8位	青島(中国)	1,830	○
9位	ロサンゼルス/ロングビーチ(米国)	1,689	○
10位	ドバイ(アラブ首長国連邦)	1,537	○
11位	天津(中国)	1,507	○
12位	ロッテルダム(オランダ)	1,373	○
13位	ポートケラン(マレーシア)	1,198	×
14位	アントワープ(ベルギー)	1,045	○
15位	廈門(中国)	1,038	○
16位	高雄(台湾)	1,027	○
17位	大連(中国)	970	×
18位	ハンブルグ(ドイツ)	866	○
19位	タンジュンペレパス(マレーシア)	816	○
20位	レムチャバン(タイ)	719	○

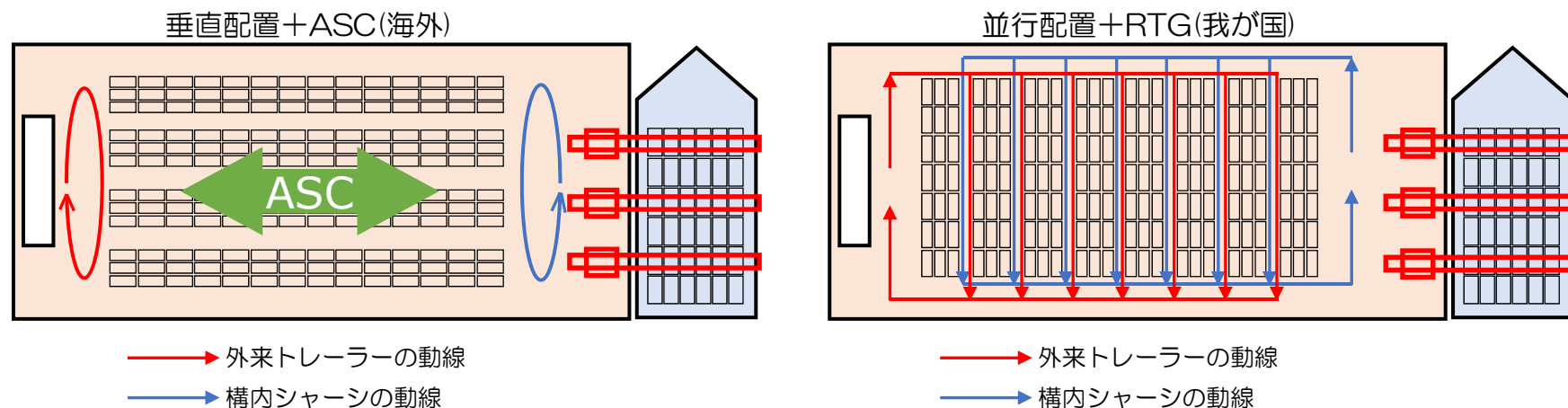
- 世界のコンテナ取扱個数上位20港のうち、2018年時点で15港(75%)が自動化を導入(予定を含む)している状況
- 未導入の殆どが中国の港湾であるが、近年廈門や上海をはじめ、導入の動きが加速している
- 我が国においては名古屋港で半自動化を導入済み、横浜港及び神戸港において2018年度に遠隔操作化を実証



自動化を取り巻く世界の動向

海外のコンテナ港湾の多くが自動化設備導入の実施や計画を進めている趨勢の中、我が国で自動化設備の導入が進まない理由として考えられることは以下の通り。

- 我が国のターミナルは海外のものほど大規模な港湾空間を有していない
- 自動化設備導入のために運営中のターミナルを閉鎖できない
- 海外のターミナルとのレイアウトの違い



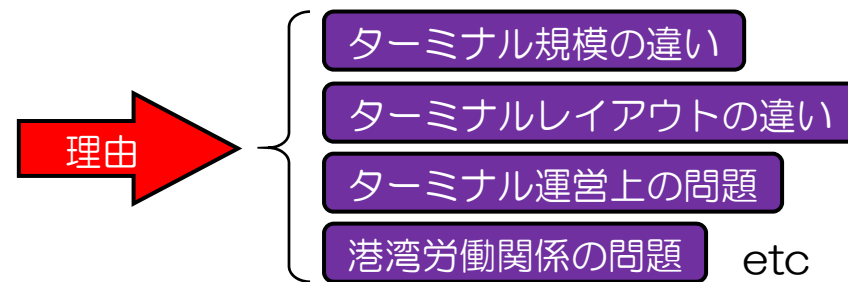
レーン内のコンテナ移動をASC(Automatic Stacking Crane：自走式大型門形クレーン)が行う

レーン内のコンテナ移動を構内シャーシ・外来トレーラーが行う

海外のターミナルでは、ASCと外来トレーラー、構内シャーシの導線が錯綜しないため、自動化設備を導入しても比較的安全確保が容易となる

我が国の自動化設備導入の状況

世界のコンテナ港湾の多くが自動化設備導入の実施や計画を進めている趨勢の中、我が国での導入事例は名古屋港飛島ふ頭南側コンテナターミナル(TCB)の一例のみ



しかしながら

もし自動化設備の導入により港湾が今まで以上に効率的に運営できるということであれば、もっと普及していても良いはず

よって

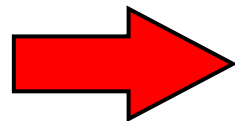
自動化設備の導入によって、港湾の効率性が上がるのか否かを定量的に確認することが必要

1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

現状の自動化設備の導入により、港湾の効率性は上がるのか否か？

仮説

- 現在、わが国では名古屋港の飛島ふ頭南側コンテナターミナル(TCBターミナル)においてのみ、遠隔操作RTGなどの自動化設備が導入されている。しかしながら、それ以外の名古屋港のターミナルや他港においては、未だに自動化設備は導入されていない。
- これはつまり、現時点での自動化設備によるコンテナ荷役は、それほど効率性が高くない(むしろ低い)からではないのか。



仮説の検証を試みる前に、港湾自動化の効果に関する既存研究について調べてみる。

港湾自動化の効果に関する既存研究

執筆者・年	タイトル	手法	対象	概要	知見
一之瀬・2010	海外におけるコンテナターミナル自動化の進展	ターミナル能力及びバース生産性による比較	ハンブルグ港 釜山港 ブリスベン港 名古屋港 アントワープ港	各港の自動化設備の相違点に関する紹介が中心。 バース生産性(TEU/m年)はターミナル能力(TEU/年)から算出しており、ターミナル能力については具体的な計算は記述されず。	岸壁法線に対して奥行が取れないため、名古屋港のみヤードレイアウトが岸壁法線に対して並行であり(他は全て垂直)、そのためASCではなく受け渡しに時間ロスの生じるAGVを使っていることから他港と比較して効率が低いとの記述。
篠田ほか・1999	コンテナターミナルにおける荷役の効率化と機能性評価に関する研究	荷役機械の作業時間を比較、及び機能性・経済性・作業性について多基準分析を用いて総合的に評価	仮想コンテナターミナル(荷役機械の実作業時間計測は、博多港と神戸港にて実測)	仮想のコンテナターミナルに自動搬送台車(ACC)を整備した場合、時間的にどれくらい効率的になるのかをシミュレーションしたもの。 また、機能性・経済性・作業性について、SC方式、TC方式、高密度集積方式(ヤード内に設置する高密度集積上屋へACCを用いて運搬するもの)について、多基準分析を用いて評価を実施。	機能性・経済性・作業性の重みを等しく1とした場合、高密度集積方式の評価値が高く評価され、経済性項目のみ重みを6倍とした場合にはSC方式、TC方式、高密度集積方式の順に選好されるとしている。
元野ほか・2016	コンテナ・ターミナルにおけるゲート混雑対策の効果的な運用に関する考察	社会的ジレンマ理論を用いたゲート混雑対策に関する紹介	ロサンゼルス／ロングビーチ港(米) ボタニー港(豪) 博多港 名古屋港	4つの港湾の事例分析を通じ、「社会的ジレンマ理論」を前提とした仕組みを構築した方が、ゲート混雑対策には有効であることが確認できたとしている。	本論文ではターミナルの自動化については全く触れられていないが、博多港や名古屋港などでのゲートのIT化は処理時間の短縮を図ることができ、ゲートの混雑対策(ターミナルの効率性向上)に有効であることを示している。

- 自動化技術の違いによる港湾毎の効果の比較や、ゲートのIT化による比較はあるものの、自動化技術の有無による効果の違い(自動化設備導入前後の生産性の違いなど)に関する研究は、特に見受けられない。これは、**自動化設備導入のコンテナターミナルが殆ど新規で開業しているためであり、自動化設備導入前との比較ができないから**と思われる。
- 従って、次ページ以降に示すような方法で従来型ターミナルとの比較を試みる。

1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

効率性の比較手法について

対象：名古屋港飛島地区の4つのコンテナターミナル

NCBターミナル

飛島心頭北ターミナル

飛島心頭南ターミナル

TCBターミナル

← 従来型ターミナル

← 自動化設備導入ターミナル

同一地区にある4つのコンテナターミナルにおいて、相対的な効率性比較を試みる。
効率性定量化の考え方は、次の通り。

効率性の比較手法について

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の参考資料における「ターミナルエリアの規模の推計」の記述

対象船型(つまりバース長、バース水深)、年間計画コンテナ取扱量、年間回転数(年間営業日数を平均蔵置日数で割ったもの)等から、ターミナルエリア幅(及び面積)を求めるもの

つまり

バース長、バース水深、ターミナル面積等から年間計画コンテナ取扱量を逆算して推計することが可能

推計した年間コンテナ取扱量をそのターミナルのキャパシティと考えれば、実際の取扱コンテナ量と比較することにより、効率性を判断することが可能

「港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成30年5月 日本港湾協会)【参施】第2章1.4 コンテナターミナルエリアの規模の推計」における記述を基に、各ターミナル規模から計画コンテナ取扱量 V_0 を推計する。

記述から逆算すると、 V_0 は以下の式で表される。

$$V_0 = \frac{(T - L_a \cdot L_{b1} - B_y \cdot k) \cdot (g_1 \cdot g_2) \cdot e}{\{(1-h) \cdot i_1 + h \cdot i_2\} \cdot j \cdot f}$$

ここに、

V_0 : 計画コンテナ取扱量(TEU)

T : ターミナル面積(m^2)

L_a : バース長(m)

L_{b1} : エプロンエリア幅(m)

B_y : バックヤード施設エリア面積(m^2)

=7,500 m^2 (マーシャリングエリア面積90,000 m^2 未満)

=9,000 m^2 (マーシャリングエリア面積90,000 m^2 以上)

k : バックヤードエリア係数(=4.5~5.0)

g_1 : 最大段積係数 (=4~5(TC)、3~4(SC))

g_2 : 有効係数 (=0.6~0.8(TC)、0.65~0.8(SC))

e : 年間回転数(回/年)

$e = D_y / D_t$

D_y : 年間作業日数(日)(=364日)

D_t : ヤード内の平均蔵置日数(日)(=2~7日(輸出)、3~9日(輸入))

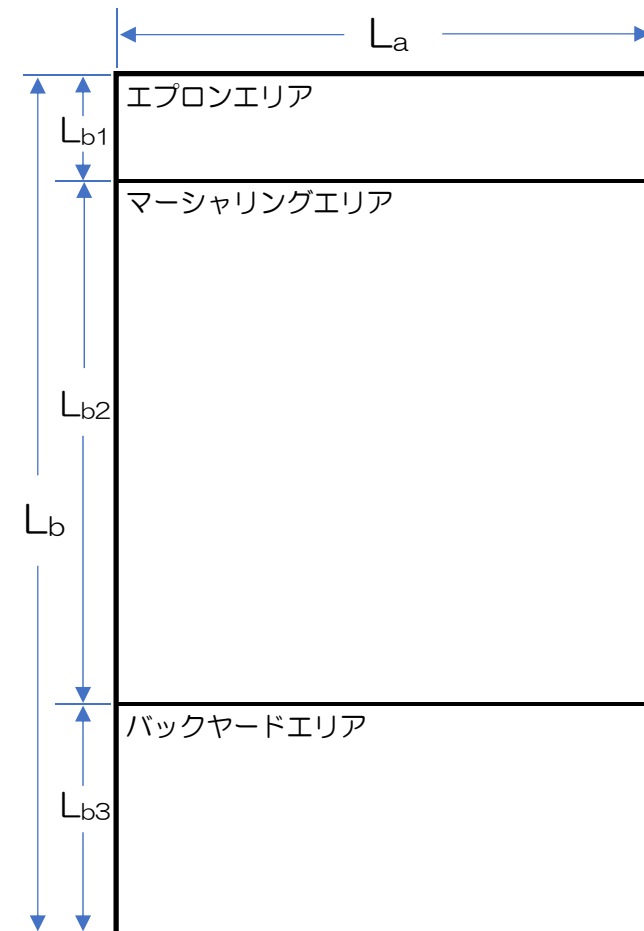
h : リーフコンテナグランドスロット比率(=0.05~0.20)

i_1 : ドライコンテナ1TEUあたりの床面積(m^2)(=14.9 m^2)

i_2 : リーフコンテナ1TEUあたりの床面積(m^2)(=19.5 m^2)

j : マーシャリングエリア係数(=2.5(バース水深15m未満)、3.5(バース水深15m以上))

f : ピーク係数(=1.2~1.3)



計画コンテナ取扱量 V_0 の推計

前ページに示された式において、 T (ターミナル面積)と La (バース長)以外は全て定数である。従って、以下の表に示す数値を当てはめて、**名古屋港飛島地区の各ターミナルにおける計画コンテナ取扱量 V_0 を推計してみる。**

L_{b1}	B_y	k	g_1	g_2
50m(バース水深13m未満) 70m(バース水深13m以上)	7,500 m^2 (MA面積90,000 m^2 未満) 9,000 m^2 (MA面積90,000 m^2 以上)	4.5	4(TC荷役) 3(SC荷役)	0.75
j	f	h	i_1	i_2
2.5(バース水深15m未満) 3.5(バース水深15m以上)	1.25	0.1	14.9 m^2	19.5 m^2

「港湾計画段階におけるコンテナターミナル規模推計モデル」(高橋・2003)のケーススタディの数値を利用

なお年間回転数 e は、 $e = 60$ として計算を行った。これは、ヤード内におけるコンテナの平均蔵置日数をほぼ6日と考えた場合の値である($364 \div 6 \div 60$)。

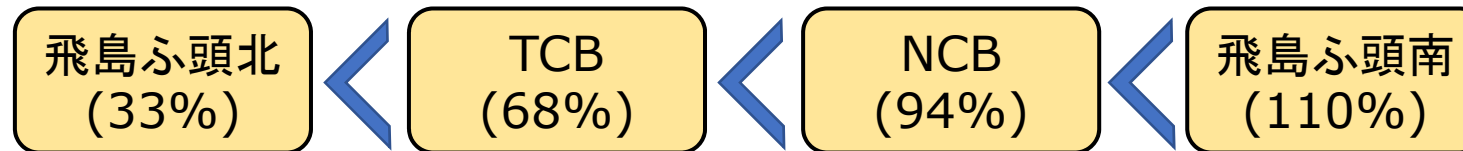
名古屋港飛島地区の4ターミナルの比較

20ページの逆算式に基づいて名古屋港飛島地区の推計計画コンテナ取扱量を推計したところ、結果は以下の通り。

港湾名	施設名	バース水深(m)	荷役方式	バース長(m)	ターミナル面積(m ²)	年間回転数e=60としたときの推計計画コンテナ取扱量	2017年実績	実績/推計
名古屋港	名古屋コンテナふ頭(NCB)	R1	SC	350	289,000	572,344	537,372	94%
		R2	SC	300				
		R3	SC	250				
	飛島ふ頭北	90号	SC	185	170,000	277,031	92,423	33%
		91号	SC	185				
		92号	SC	250				
	飛島ふ頭南	93号	SC	350	246,000	314,397	344,284	110%
		94号	SC	350				
	飛島ふ頭南側(TCB)	TS1	TC	400	362,000	720,536	489,831	68%
		TS2	TC	350				

表の右端に実績値/推計値をパーセンテージで示した。キャパシティに対する実際の使われ方を示したものであることから、効率性を定量化したものと考えることができる。

自動化ターミナルが高効率とはならない理由



自動化設備が導入されているにもかかわらず、明らかにNCB、飛島ふ頭南より値が低い

何故、このような差が生じるのか？

- ・ 発着地からターミナルまでの距離の差？
- ・ ゲートでの手続時間の差？
- ・ 寄港する船舶の大きさの差？

同じ飛島地区であり、差はない

共通の集中管理ゲートを使っている

むしろTCBが最大水深岸壁を有している

このような結果となった一因に自動化設備があるのではないかと考える

では何故、自動化設備は高効率とならないのか？

次ページ以降に、ある港運事業者からのヒアリング結果を示す。

自動化ターミナルが高効率とはならない理由

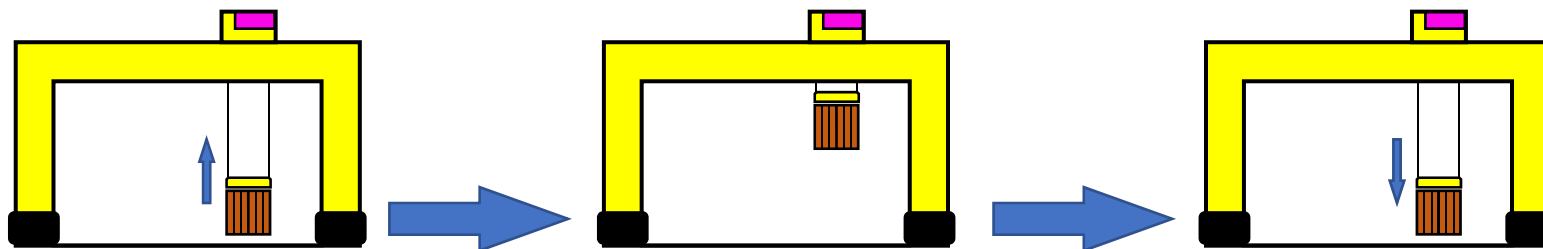
- 自動化RTGの動作が熟練オペレーターの扱う手動RTGと比べて遅い



熟練オペレーターの操縦するRTG(手動RTG)は、コンテナを下に下げた状態で水平に移動しても、目的の位置でコンテナを揺らさずにピッタリと止めることができる。



自動化されたRTG(自動化RTG)で同じことをした場合、停止時にコンテナが揺れて危険な状態となる。

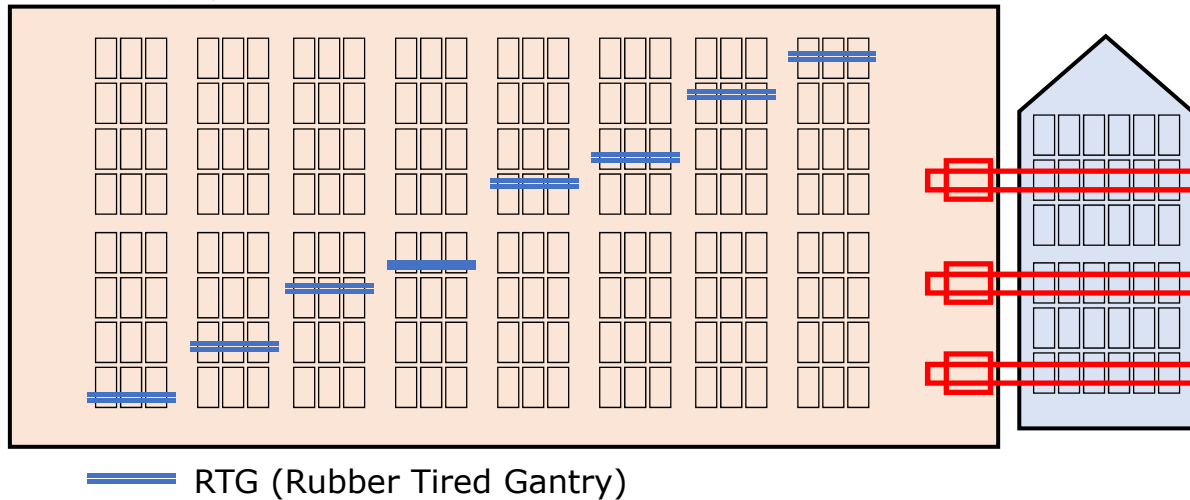


従って、自動化RTGが移動する場合、いったんコンテナを上上げて移動し、目的の位置でまた下げることになる。このため、手動RTGと比べておよそ3倍の時間がかかってしまう。 24

自動化ターミナルが高効率とはならない理由

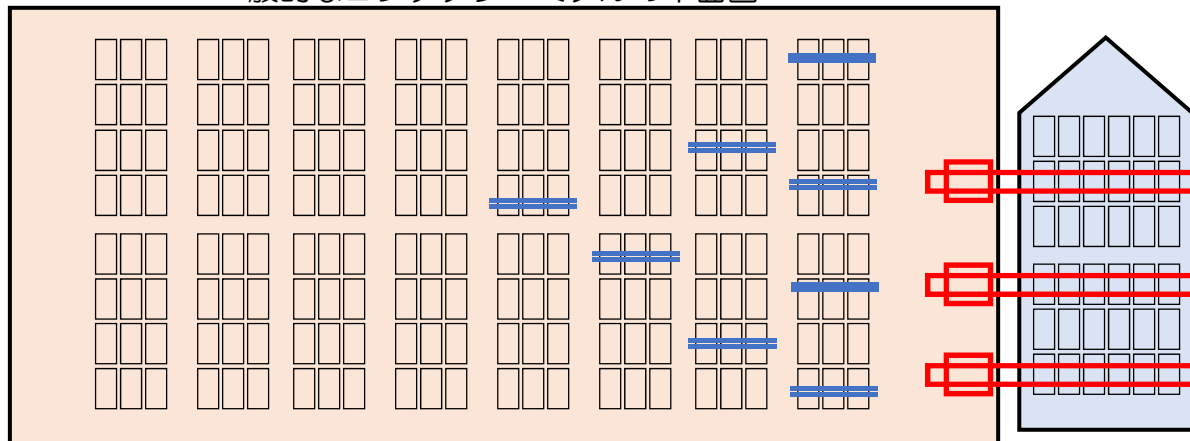
- 着船時に重点的にRTGを配備することができない

飛島南側コンテナターミナル(TCB)の平面図



ヤード内作業を平準化するためレーン毎にRTGを配置していることから、着船時にRTGの機動性を発揮することができず、本船荷役が相対的に時間を要することとなる。

一般的なコンテナターミナルの平面図

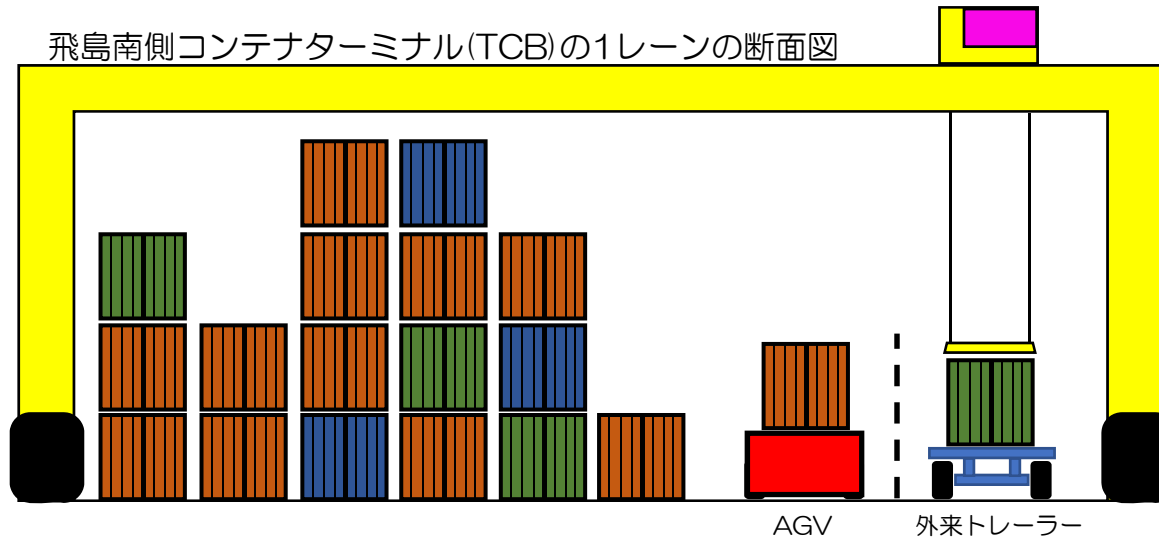


着船時には本船荷役に対応するため、海側にRTGが重点配備される。このため、素早い本船荷役への対応が可能となる。

自動化ターミナルが高効率とはならない理由

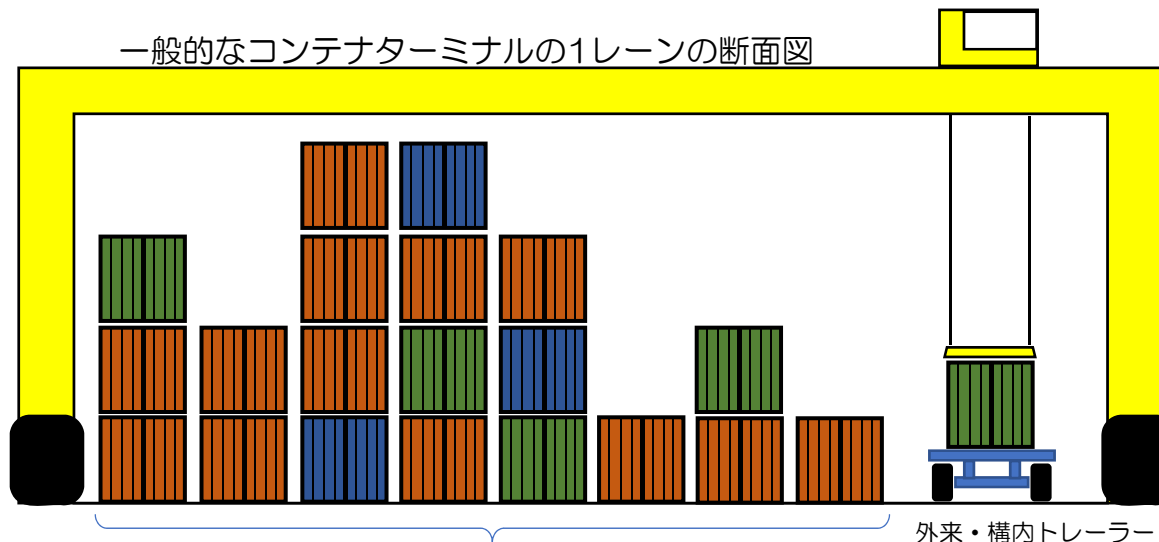
- AGV用の動線を確保すると、ヤードを広く使うことができない

飛島南側コンテナターミナル(TCB)の1レーンの断面図



1レーンの中に、外来トレーラーの動線と構内搬送用のAGV(Automated Guided Vehicle)の動線があるため、コンテナの蔵置スペースがそれだけ少なくなる。

一般的なコンテナターミナルの1レーンの断面図



レーンを広く使える

外来トレーラーと構内トレーラーの動線が共通であり、レーンを広く使うことが可能である。

現状の自動化設備の課題に対する解決策

- 自動化RTGの動作が熟練オペレーターの扱う手動RTGと比べて遅い点について
- 着船時に重点的にRTGを配備することができない点について

国交省はAIを活用した「熟練技能者の荷役ノウハウ継承・最大化実証事業」を令和3年度まで実施予定

熟練技能者の暗黙知をAIにより定式化することにより、荷役ノウハウの継承が図られる。



RTGの操縦席で熟練オペレーターの操作技量をAIに学習させている様子(国土交通省資料より)

現状の自動化設備の課題に対する解決策

- AGV用の動線を確保すると、ヤードを広く使うことができない点について

自動運転技術を応用した構内搬送用車両について、官民において実用化を検討中

AGV用の動線を確保する必要が無いことから、従来通りヤードを広く使える。また、既存の動線をそのまま用いることから、工事のためにヤードを閉鎖する必要もなくなる。

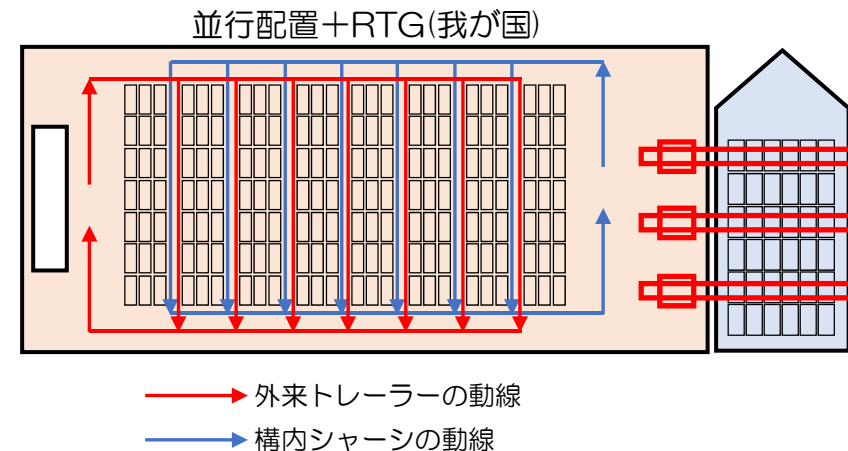
UDトラックによる完全自動運転の大型トラックのデモ走行
「自動運転トラックは道路交通法の規定がない場所での利用を想定している。実用化すれば港湾のコンテナ輸送や物流施設内の荷物運搬が24時間可能になり、生産性の向上が期待できる。」
日経産業新聞(2018/12/13)に記事掲載

現状の自動化設備の課題に対する解決策

- 岸壁と並行配置のターミナルだと動線が錯綜する点について

「遠隔操作RTGの安全確保のためのモデル運用規程」を策定済

「遠隔操作RTGの安全確保のためのモデル運用規程」を策定 3月29日
港湾新聞(2019/4/9)に記事掲載



海外のターミナルと異なり、我が国ではコンテナレーンが岸壁と並行配置で、外来トレーラーと構内シャーシの動線が錯綜するため、自動化・遠隔化の荷役機械を導入するには安全確保が課題となっていた。

自動化設備導入の必要性について

現状の自動化コンテナターミナル

効率性が高いとは言えないことから
普及が進んでいない

普及を阻害する課題の
解消に向かいつつある

従って

人口減少・超成熟社会の到来と労働力不足

AI等の活用による技術の進展

これら2点を鑑みれば

将来的には自動化設備を積極的に導入すべき

そのためのAIターミナル

1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

新たに生じた疑問点

仮に自動化設備が今よりも進展し、熟練技能者が活躍する効率的なコンテナターミナルと比べ遜色のない状況になったとき、どのような港湾(コンテナターミナル)であれば、AIはその効力を発揮するのか？

仮説

- AIの能力が格段に上がったとするならば、現時点で効率性の低い港湾(コンテナターミナル)であれば、その効果が発揮できるのではないか。

名古屋港飛島地区でのターミナル比較

← 共通項が多いことから、単純に物理的なスペックだけで比較

しかしながら

将来的な労働者不足を考慮するのであれば、効率性を計る要素に労働者数が必要

そのほか就航航路数、ガントリークレーン設置数、ターミナル面積も考慮

ターミナル単位での比較は統計情報を鑑みると困難であり、港湾単位での検討を試みる

→ 港湾の効率化に関する既存研究について調べてみる

港湾の効率性に関する既存研究

効率性検討手法にDEA(包絡分析法)を用いたもの

執筆者・年	タイトル	手法	対象	概要	知見
Itoh・2002	Efficiency Changes at Major Container Ports in Japan: A Window Application of Data Envelopment Analysis	DEA	コンテナ取扱港8港	入力としてターミナル面積、岸壁数、ターミナル労働者数の3つ、出力としてコンテナ取扱量の1つを用いて、1990年から1999年の10年間における時系列変化に着目して解析を行っている。なおターミナル労働者数は、コンテナ貨物と在来貨物の価格(重量ではない)の比によって割り出しを行っている。	CCR(収穫一定)モデルでは、東京港、名古屋港、清水港に比べ、横浜港、神戸港、大阪港、四日市港、北九州港の効率値が低く表れている。BCC(収穫可変)モデルでは、運営規模の小ささから四日市港と清水港の効率値が高くなった。
倉本、赤井・2013	国内港湾運営の効率性に関する要因分析-財政要因を考慮した分析-	DEA	コンテナ取扱港55港	入力としてターミナル面積、岸壁延長、クレーン数、最大水深、経営関係人件費の5つ、出力としてコンテナ取扱量、港湾収入の2つを用いて、財政面に着目して解析を行っている。	前年度の他会計からの財源依存度の高い港湾は、効率的な運営を阻害している可能性を示した。また前年度の公債依存度に関しても、それが高い港湾は効率値が低くなることを示した。
湯、寺田・2013	管理形態の違いが日本のコンテナ港湾の効率性に与える影響-DEA(包絡分析法)を用いた研究-	DEA	コンテナ取扱港59港	入力として岸壁延長、最大水深、荷役機械数、ターミナル面積の4つ、出力として輸移出コンテナ数、輸移入コンテナ数、輸移出コンテナフレートトン、輸移入コンテナフレートトンの4つを用いて、港湾の管理形態(港格、管理者、立地)に着目して解析を行っている。	港格と効率値には正の相関があることを確認した。管理者については、管理組合、市町村、都道府県の順に効率値が高くなった。立地に関しては、瀬戸内海の大部分を含めた日本海側が太平洋側よりも高くなった。

港湾の効率性に関する既存研究

効率性検討手法に生産関数を用いたもの

執筆者・年	タイトル	手法	対象	概要	知見
小川・2014	地方公共団体による港湾の管理運営の効率性に関する一考察～ソフトな予算制約問題の視点から～	コブ・ダグラス型生産関数	港湾113港	被説明変数として恒常的管理運営費、説明変数としてソフトな予算制約に関するもの(前期の他会計依存度、財政力指数)、規模(取扱貨物量、公共岸壁利用率、管理港湾数)、要素価格(労働の価格要素、その他の価格要素)、制度的要因(特定重要港湾ダミー)を用いており、港湾の管理運営における費用構造をコブ・ダグラス型生産関数により推計している。	前期の他会計からの繰入率が高いほど、効率的な管理運営が阻害されている可能性があることを示した。また、複数の港湾を単一の港湾管理者が管理した方が、一港湾あたりの管理運営費が逡減することを示唆した。
宮本・2015	我が国の港湾における効率性の計測に関する研究	コブ・ダグラス型生産関数	港湾105港	被説明変数として施設使用料と役員利用料の合計額、説明変数としてバース数と港湾管理者の人員費総額を用いており、労働分配率を(港湾管理者の人員費総額)/(施設使用料と役員利用料の合計額)とすることで、全要素生産性(TFP)を推計している。	TFPを計測すると、半数を超える55港でマイナスの成長となったことが示された。また、港格、港湾管理者、新産・工特、太平洋・日本海、取扱貨物量の変化量、漁港との隣接の有無を説明変数として重回帰分析を行っているが、国際戦略港湾において1%有意でマイナスの当てはまりがよかったものの、その他の説明変数においてあまりよい結果が得られていない。

- 港湾の効率性検討手法には、主にDEA(包絡分析法)と生産関数によるものがあるが、本研究ではコブ・ダグラス型生産関数を用いたもので検討することとする。

1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

生産関数を用いた港湾の効率性の比較

コンテナターミナルの年間取扱コンテナ量Vは、外貿コンテナ船の就航航路数B、ガントリークレーン設置数C、ターミナル面積T、ターミナルで働く労働者数Wなどによって決まるものと考えてみる。

このとき、以下のようなコブ・ダグラス型生産関数を仮定し、推計を行う。

$$V = A \cdot B^{\alpha_1} \cdot C^{\alpha_2} \cdot T^{\alpha_3} \cdot W^{\alpha_4}$$

ここに、A：その他技術的要素 B：航路数 C：クレーン数 T：ターミナル面積 W：ターミナル労働者数

外貿コンテナ航路数B

ガントリークレーン設置数C

ターミナル面積T

これらについては、「数字で見る港湾2018」(発行：(公社)日本港湾協会)及びweb上のデータを元に算出

ターミナル労働者数W

← データがないため、推計

ターミナル労働者数Wについては、まずは**港湾毎の港湾荷役労働者数を算出し**、その後でWを推計するという二段階での計算を行う。

常用労働者数(平成28年度月間平均) (単位：人)							
港 湾 名	現場職員	労働者				小 計	総 計
		港湾荷役 労働者	はしけ 労働者	いかだ 労働者			
京 浜	東 京	772	3,019	27	1	3,046	3,818
	川 崎	72	990	8	0	998	1,070
	横 浜	856	3,931	127	0	4,058	4,915
	小 計	1,700	7,940	162	1	8,102	9,802
名 古 屋	646	3,802	15	77	3,894	4,540	
大 阪	766	5,064	103	2	5,169	5,935	
神 戸	923	3,765	93	0	3,858	4,781	
関 門	424	2,649	115	20	2,784	3,209	
計5港	4,458	23,220	488	100	23,808	28,226	
計88港	2,109	20,435	188	254	20,876	22,985	
全国93港	6,567	43,655	676	354	44,685	51,252	
北 海 道	140	1,406	5	11	1,422	1,562	
東 北	182	1,596	3	11	1,610	1,792	
北陸信越	117	967	8	74	1,050	1,167	
関 東	2,059	11,289	194	9	11,492	13,550	
中 部	972	6,182	21	109	6,312	7,284	
近 畿	863	5,991	112	8	6,111	6,974	
神 戸	998	5,155	107	0	5,262	6,260	
中 国	334	3,122	37	44	3,203	3,538	
四 国	111	1,070	12	30	1,112	1,223	
九 州	645	6,338	177	58	6,573	7,218	
沖 縄	146	538	0	0	538	684	

「数字で見る港湾2018」(発行：(公社)日本港湾協会)に示された港湾の労働者数は上記の通りであり、港湾毎の労働者数は京浜港(東京港、川崎港、横浜港)、名古屋港、大阪港、神戸港、関門港(下関港、北九州港)の各港のみである。

港湾荷役労働者数の推計

運輸局単位でまとめられて
いる港湾労働者数の内訳

webや刊行物などで個別港湾の単位で公表しているのは、関東、中部、四国、九州の各運輸局のみ(その他の運輸局は公表していない)

従って

個別労働者数の不明な港湾については、以下の考え方で推計を試みる

対象とする港湾

重要港湾以上の港格で、かつ外貿定期コンテナ航路を有する港湾

推計手法

取扱貨物量(t)に比例するものとして運輸局単位でまとめられた港湾労働者数を按分(但し、1港あたりの港湾労働者数の下限を40人とする)

下限を40人としたのは、外貿コンテナ取扱量が最小である油津港の港湾労働者数が39人であるため

港湾名	取扱貨物量 (万t)	港湾荷役労働 者数(人)	港湾名	取扱貨物量 (万t)	港湾荷役労働 者数(人)	港湾名	取扱貨物量 (万t)	港湾荷役労働 者数(人)
東京港	9,078	3,019	関東(京浜港を除く)		3,349	徳島小松島港	781	151
川崎港	8,498	990	鹿島港	6,019	679	高松港	1,900	90
横浜港	11,350	3,931	茨城港	3,416	152	松山港	891	144
名古屋港	19,597	3,802	千葉港	15,329	1,737	今治港	115	85
大阪港	8,467	5,064	中部(名古屋港を除く)		2,380	三島川之江港	1,037	87
神戸港	9,986	3,765	清水港	1,615	404	高知港	461	144
北海道		1,406	御前崎港	335	88	九州		6,338
室蘭港	2,368	147	三河港	2,131	742	宇部港	3,347	328
苫小牧港	10,937	533	四日市港	5,901	420	下関港	464	366
函館港	3,303	189	敦賀港	1,590	158	北九州港	10,150	2,283
小樽港	1,172	93	近畿(大阪港を除く)		927	博多港	3,572	749
釧路港	1,581	111	舞鶴港	1,161	103	三池港	210	124
石狩湾新港	613	68	堺泉北港	8,356	492	伊万里港	154	95
東北		1,596	和歌山下津港	3,639	237	長崎港	274	133
八戸港	2,817	242	中国		3,122	八代港	444	207
仙台塩釜港	4,666	375	境港	381	77	熊本港	372	88
秋田港	763	95	浜田港	44	44	大分港	6,534	425
酒田港	356	66	水島港	8,460	871	細島港	372	161
小名浜港	1,663	159	福山港	4,404	473	油津港	141	39
北陸信越		967	広島港	1,443	182	志布志港	1,065	176
新潟港	3,117	439	徳山下松港	4,973	529	川内港	146	59
直江津港	756	137	岩国港	1,595	197	沖縄		538
伏木富山港	669	126	三田尻中関港	456	85	那覇港	1,216	198
金沢港	341	84	四国		1,070			

港湾労働者数の実数値が判明しているものはそのまま記入している。
不明なものについては、40人を下限として取扱貨物量に比例して推計している(色付き枠)。

ターミナル労働者数の推計

コンテナターミナル
で働く港湾労働者数

← 公表されているデータが存在しない

↓
従って

各港のコンテナターミナルで働く労働者数については、以下の考え方の元で推計を試みる

推計手法

←
コンテナ荷役に携わる港湾荷役労働者数は、バルク貨物の荷役と比べ、トンあたり2倍の人員を、また完成自動車を扱う港湾については、自動車荷役にトンあたりバルクの3倍の人員を要するものとして各港の労働者数を按分
(但し、コンテナ1TEUあたり17tと仮定し、1港あたりのターミナル労働者の下限を15人とする)

↓
下限を15人としたのは、コンテナ荷役をする際のギャング(荷役チーム)が、1ギャング概ね13~17人というヒアリング結果から

ターミナル労働者数の推計

6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について

港湾名	港湾荷役労働者数(人)	コンテナターミナルの港湾労働者数(人)	港湾名	港湾荷役労働者数(人)	コンテナターミナルの港湾労働者数(人)	港湾名	港湾荷役労働者数(人)	コンテナターミナルの港湾労働者数(人)
東京港	3,019	2,383	関東(京浜港を除く)	3,349		徳島小松島港	151	25
川崎港	990	49	鹿島港	679	17	高松港	90	19
横浜港	3,931	1,826	茨城港	152	17	松山港	144	29
名古屋港	3,802	922	千葉港	1,737	31	今治港	85	58
大阪港	5,064	2,910	中部(名古屋港を除く)	2,380		三島川之江港	87	31
神戸港	3,765	1,955	清水港	404	263	高知港	144	27
北海道	1,406		御前崎港	88	23	九州	6,338	
室蘭港	147	16	三河港	742	33	宇部港	328	17
苫小牧港	533	47	四日市港	420	56	下関港	366	125
函館港	189	16	敦賀港	158	21	北九州港	2,283	348
小樽港	93	18	近畿(大阪港を除く)	927		博多港	749	365
釧路港	111	20	舞鶴港	103	20	三池港	124	42
石狩湾新港	68	28	堺泉北港	492	20	伊万里港	95	76
東北	1,596		和歌山下津港	237	16	長崎港	133	27
八戸港	242	22	中国	3,122		八代港	207	43
仙台塩釜港	375	44	境港	77	33	熊本港	88	21
秋田港	95	37	浜田港	44	23	大分港	425	21
酒田港	66	32	水島港	871	56	細島港	161	45
小名浜港	159	23	福山港	473	39	油津港	39	17
北陸信越	967		広島港	182	47	志布志港	176	50
新潟港	439	56	徳山下松港	529	39	川内港	59	30
直江津港	137	30	岩国港	197	27	沖縄	538	
伏木富山港	126	47	三田尻中関港	85	20	那覇港	198	46
金沢港	84	48	四国	1,070				

ここまでで推計したコンテナターミナルで働く港湾労働者数と、以下の表に示す港湾毎のスペックを基に、前述した生産関数の両辺の対数を取って重回帰分析を試みる。

港湾名	外貿コンテナ取扱量(TEU)	外貿航路数(便/週)	クレーン数(基)	ターミナル面積(ha)	港湾名	外貿コンテナ取扱量(TEU)	外貿航路数(便/週)	クレーン数(基)	ターミナル面積(ha)	港湾名	外貿コンテナ取扱量(TEU)	外貿航路数(便/週)	クレーン数(基)	ターミナル面積(ha)
東京港	4,500,156	102.0	38	168.6	福山港	70,516	12.0	2	11.1	釧路港	23,653	2.0	1	1.6
横浜港	2,621,009	97.0	38	232.2	金沢港	64,306	5.0	2	10.0	八代港	20,305	2.0	2	3.6
名古屋港	2,588,600	84.0	28	161.7	伊万里港	56,163	6.0	1	7.7	御前崎港	20,155	3.0	2	6.2
神戸港	2,218,860	83.0	33	157.5	下関港	53,081	1.0	1	7.2	舞鶴港	19,272	3.0	2	13.7
大阪港	2,049,701	70.5	21	124.4	石狩湾新港	50,723	2.0	1	9.0	川内港	17,936	3.0	0	3.0
博多港	848,612	38.5	9	56.2	千葉港	47,136	4.0	2	8.0	三池港	17,365	4.0	0	4.3
北九州港	474,692	42.0	10	75.4	酒田港	41,055	3.0	2	8.7	徳島小松島港	17,331	3.0	1	7.6
清水港	452,765	29.5	8	38.8	敦賀港	39,574	3.0	1	17.6	茨城港	16,684	2.5	2	18.0
苫小牧港	219,281	10.0	3	22.6	境港	38,503	5.0	1	6.6	小樽港	13,244	1.0	1	2.4
四日市港	196,950	16.0	6	33.5	三河港	37,327	6.0	2	9.6	高知港	13,210	2.0	1	8.0
広島港	164,917	18.3	3	11.5	高松港	33,461	6.0	1	4.2	熊本港	10,147	3.0	1	2.9
新潟港	162,422	8.0	3	28.0	岩国港	32,089	5.0	0	14.2	長崎港	8,680	3.0	1	1.2
仙台塩釜港	161,094	7.8	4	21.6	松山港	31,596	6.0	2	8.9	和歌山下津港	6,745	2.0	1	6.0
水島港	129,616	20.0	4	16.3	今治港	29,816	4.0	1	4.7	鹿島港	5,478	1.0	1	28.0
川崎港	98,816	14.0	3	24.5	直江津港	29,787	2.0	1	6.7	宇部港	4,915	2.0	0	4.0
那覇港	80,644	5.5	4	20.9	小名浜港	28,557	2.0	1	13.0	函館港	4,198	1.0	0	2.4
三島川之江港	79,807	12.5	0	9.1	八戸港	26,484	3.0	2	6.0	浜田港	4,151	1.0	0	1.6
志布志港	77,365	8.0	2	20.0	大分港	26,263	4.0	2	22.0	室蘭港	3,440	1.0	1	4.2
伏木富山港	75,138	4.5	2	10.4	三田尻中関港	26,164	4.0	1	14.0	油津港	2,703	1.0	0	4.0
秋田港	72,659	3.0	2	11.3	堺泉北港	25,307	2.0	2	20.2					
徳山下松港	71,216	13.0	2	12.3	細島港	24,848	5.0	2	12.5					

なお、ガントリークレーン数が0の港湾については、その多くがジブクレーン(ガントリークレーンの半分程度の能力)を使っていることから、計算上は0.5基としている。

重回帰分析による生産関数の推定

ここまでで推計したコンテナターミナルで働く港湾労働者数と、以下の表に示す港湾毎のスペックを基に、前述したコブ・ダグラス型生産関数の両辺の対数を取って重回帰分析を試みたところ、結果は以下のようになった。

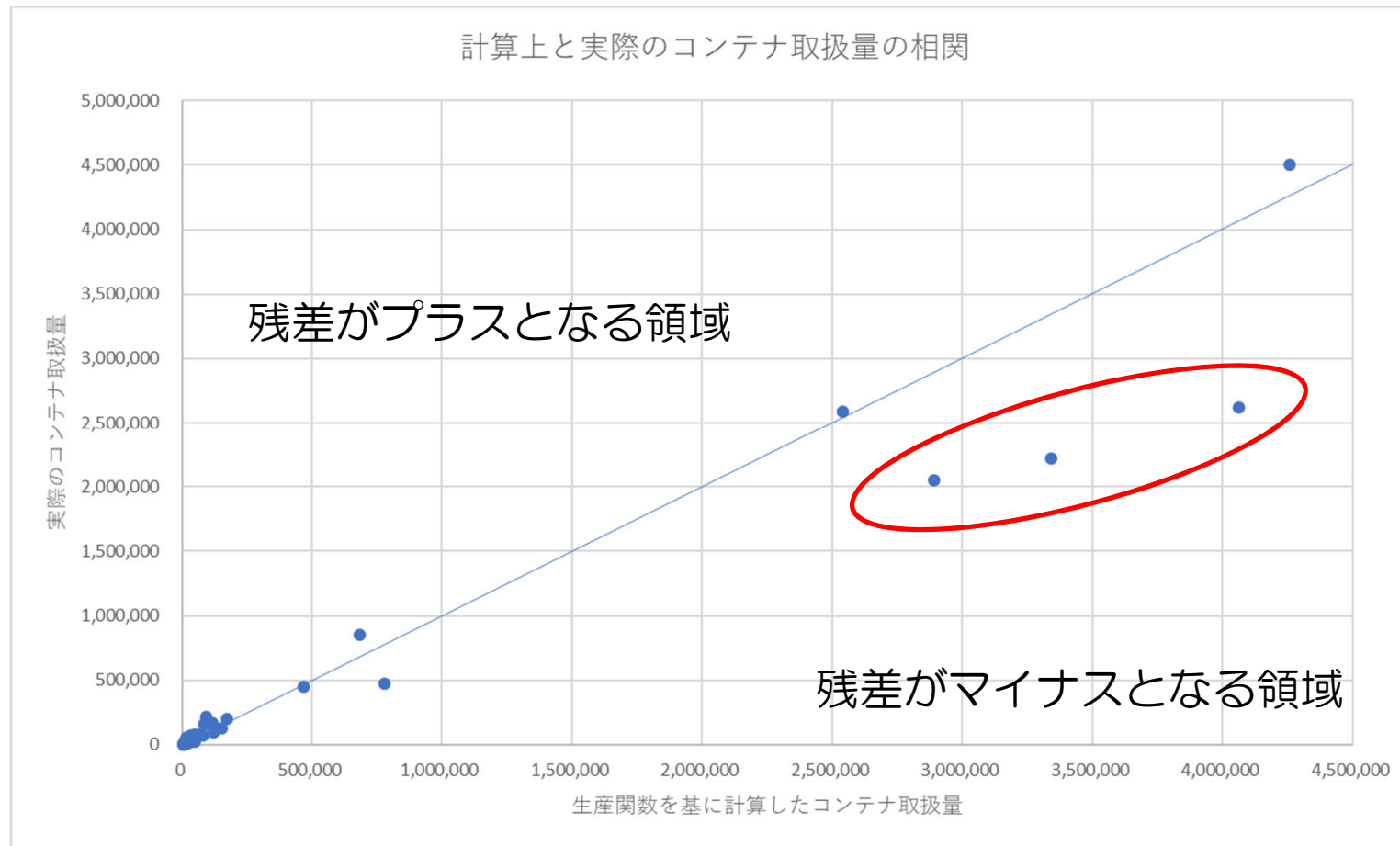
重相関R	重決定R2	補正R2	標準誤差	観測数
0.961	0.923	0.917	0.486	61
A	α_1	α_2	α_3	α_4
7.841***	0.607***	0.273*	0.216**	0.324***
*** : 1%有意 ** : 5%有意 * : 10%有意				

従って、各港湾のコンテナ取扱貨物量は以下の式で表されることとなる。

$$\underline{V=7.841 \cdot B^{0.607} \cdot C^{0.273} \cdot T^{0.216} \cdot W^{0.324}}$$

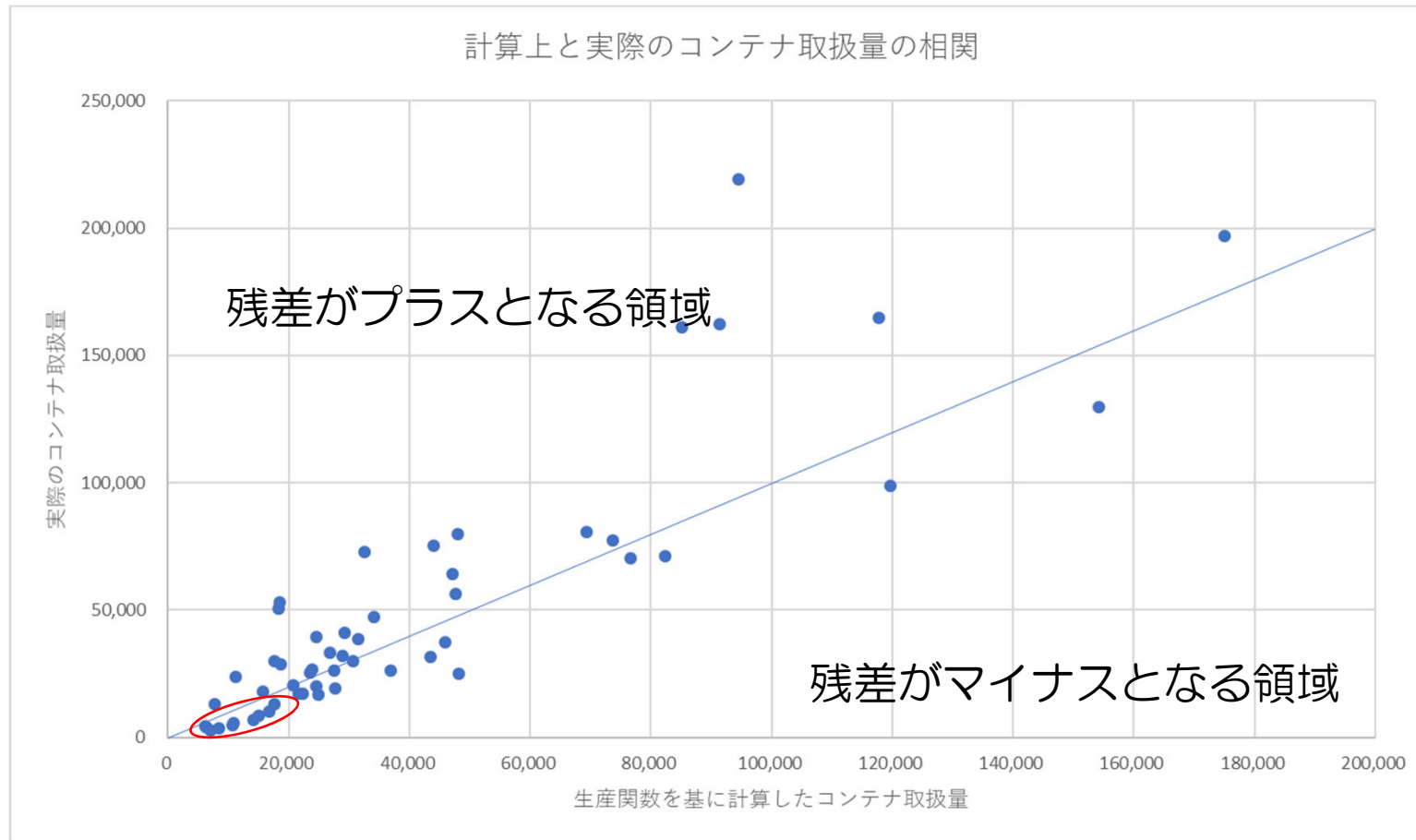
逆に、この式を基に各港のコンテナ取扱量を計算し、実際のコンテナ取扱量との相関を取ったところ、次のグラフのようになった(なお、データはプロットした点の表記のみであり、港名は記していない)。

残差の正負による判定



グラフに示した斜線より左上に位置するものは残差(実際のコンテナ取扱量から計算上のそれをひいたもの)がプラスであり、右下に位置するものはマイナスとなる。これを見ると、実際のコンテナ取扱量が200万TEUを超える大港湾のいくつかにおいて、マイナス側に乖離が生じていることが分かる。

残差の正負による判定

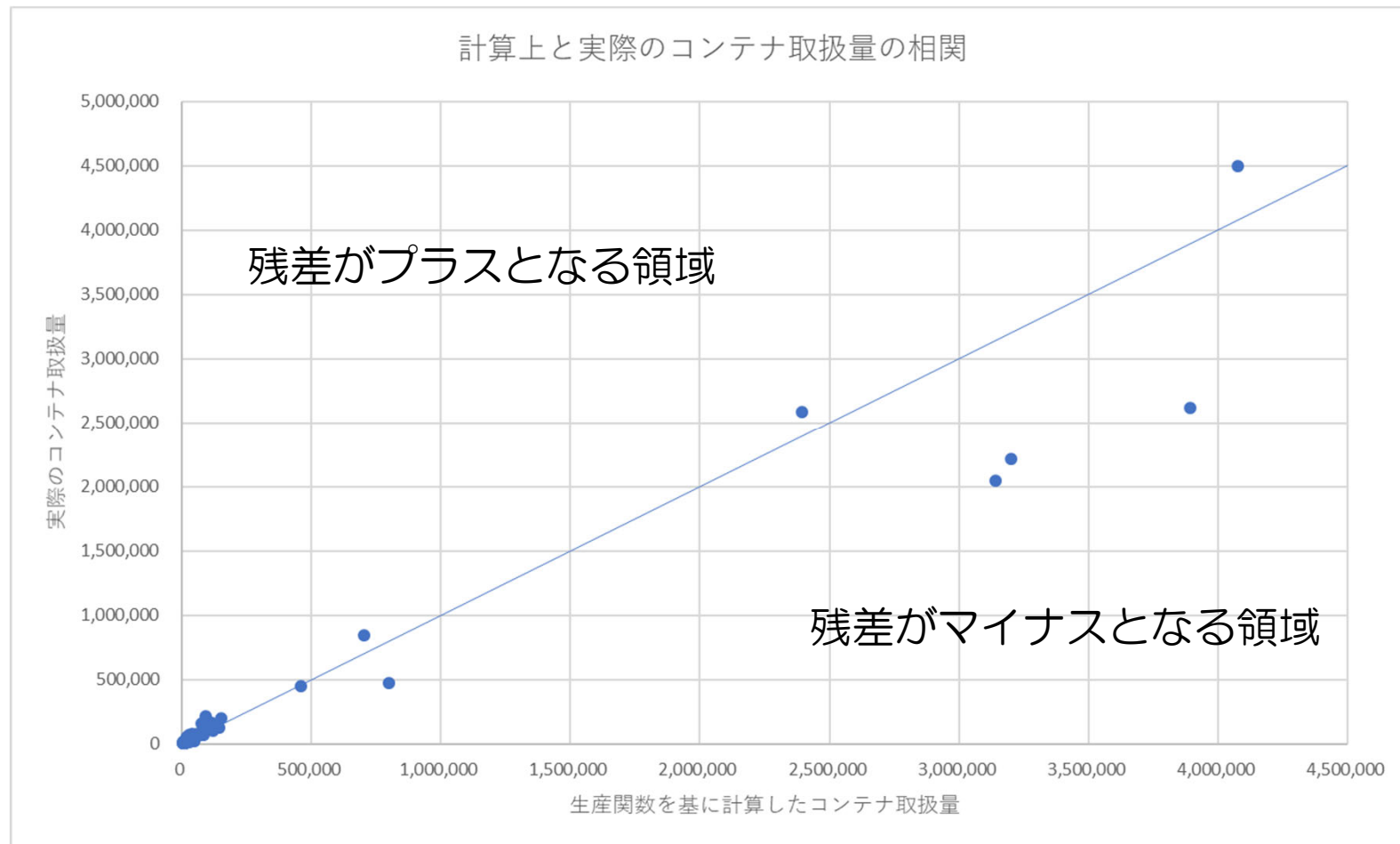


前ページのグラフのうち、計算上のコンテナ取扱量が20万TEU以下となる港湾のみを集めたものである。実際のコンテナ取扱量が少ない港湾ほど、計算上はマイナス側に乖離が生じているようである。

多重共線性のチェック

同程度のコンテナ取扱量を擁する港湾間において多重共線性をチェックしたところ、全体的には相互にほぼ無相関であることを確認した。

念のために、Cを外した形での計算結果を以下に示す。結論としては、若干正負が入れ替わる港湾がみられるものの、44ページで示したグラフとほぼ変わらない結果となった。



推定した生産関数について

ここで、あらためて仮定した生産関数の意味を考えてみる。

$$V = A \cdot B^{\alpha_1} \cdot C^{\alpha_2} \cdot T^{\alpha_3} \cdot W^{\alpha_4}$$

(A:その他技術的要素 B:航路数 C:クレーン数 T:ターミナル面積 W:ターミナルで働く労働者の人数)

$\alpha_1 \sim \alpha_4$ は弾性値であり、それぞれB、C、T、Wの数値が1%変化した場合、Vが何%変化するかを示したものである。

数値を当てはめると

$$V = 7.841 \cdot B^{0.607} \cdot C^{0.273} \cdot T^{0.216} \cdot W^{0.324}$$

つまり

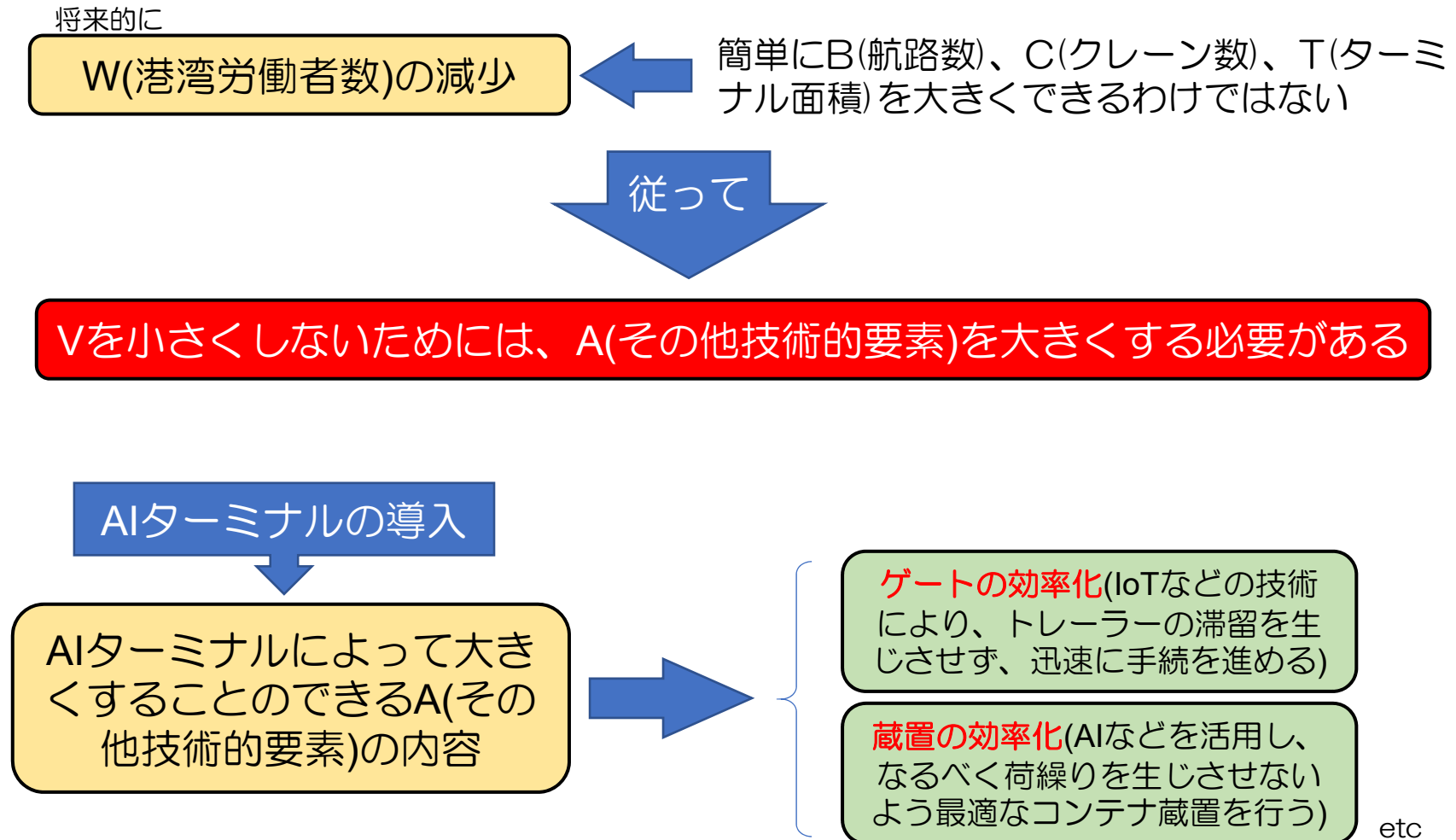
$\alpha_1 > \alpha_4 > \alpha_2 > \alpha_3$ であるから、WはBの次にVの増減に影響を与える要素であるということができ、CやTよりもVに与える影響が大きい。

従って

将来予想されるWの減少は、CやTに比べてコンテナターミナルの生産性に大きな影響を及ぼすことが分かる。

1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

AIターミナル導入による効率性について



AIターミナル導入による効率性について

例えばゲートのサービス率(ゲートでのトレーラー1台あたりの手続時間の逆数)をGとした場合、生産関数は以下のように示すことができる。

$$V = A' \cdot B^{\alpha 1} \cdot C^{\alpha 2} \cdot T^{\alpha 3} \cdot W^{\alpha 4} \cdot G^{\alpha 5}$$

つまり

各コンテナ取扱港のGの値(もしくはゲートでの手続時間)が分かれば、同様な手法でGを含んだ形での生産関数を導くことができ、Wが小さくなったとしても**Gを大きくすることでVの値を維持・増加させることが可能**

G(ゲートのサービス率)
を大きくした事例

HiTS導入後の博多港ICターミナル
(平均ゲート手続時間が53.2秒で、従来式ターミナルの半分以下)

名古屋港飛島地区TCBターミナル
(集中管理ゲート導入前の平均ゲート手続時間158.4秒が、導入後は14.9秒と劇的に改善)

*「コンテナ・ターミナルにおけるゲート混雑対策の効果的な運用に関する考察」(元野ほか・2016)

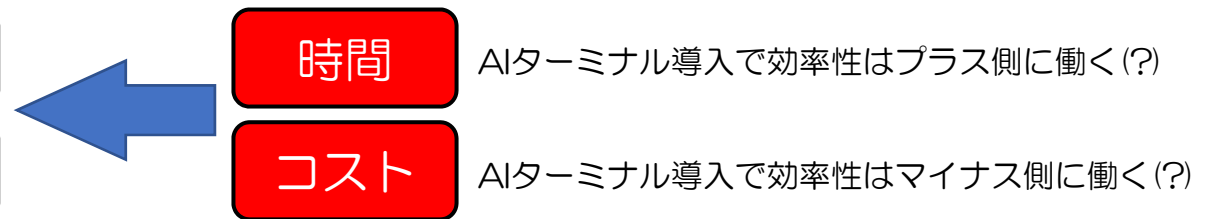
その他、関東地方整備局ではICTを用いたゲート効率化システム『CONPAS』を試験運用中

AIターミナル導入による効率性について

今回検討に用いたデータ



今後検討に加えるべきデータ



効率性を定量化して評価するためには、今回用いた4つの要素だけではなく、前ページに示した「時間」や、更には「コスト」が重要になるとと思われる。今後、こうした「時間」や「コスト」に関するデータを入手・整理した上で、AIターミナル導入前後のコンテナターミナルの効率性算定を行う必要があると考える。

本研究にて得られた知見

ここまで、自動化施設を導入したコンテナターミナルの効率性と、生産関数を基にした港湾毎の効率性について考察を行ってきた。
結果として、以下のような知見が得られた。

自動化設備導入港湾の効率性は、現時点ではそれほど高いとは言えない

しかしながら

今後の現実的な技術進展に伴い、効率性が上がることが期待される

全国の外貿コンテナ取扱港湾のうち、200万TEUを超える大港湾のいくつかにおいて効率性が低いと思われる結果となった

従って

こうした大港湾にこそ、自動化・AI化を含め、効率性向上のための様々な取り組みを進めるべきであると思料する

1. 研究の目的と背景
2. 港湾の自動化を取り巻く現状と課題
3. 疑問点(その1)
4. コンテナターミナル同士の効率性比較について
5. 疑問点(その2)
6. 我が国の外貿コンテナ港湾の効率性について
7. 考察とまとめ
8. 今後の課題

今後の課題

データ項目の追加

時間

コスト

これらのデータについて入手を検討

熟練就労者比率

生産関数の式の中にこのデータを入れることができれば、何年か後に熟練就労者比率が大幅に下がったときの効率性についても検討できることになる

ケーススタディの実施

AIターミナルの有用性立証のために、個々のターミナルにおいてケーススタディを実施し、定量的な評価を行う。

海外事例の調査

海外の自動化ターミナルの導入事例について調査を行う。

ご静聴、ありがとうございました。



JTTRI
Japan Transport and Tourism Research Institute