

AISデータと待ち行列モデルを用いた バース・ウィンドウ運用効率化の基礎的検討

岡本 辰生¹・竹内 泰弘²・伴田 勝³

¹正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒460-0003 名古屋市中区錦2-3-4)

E-mail:okamoto_t@cfk.co.jp

²非会員 国土交通省 中部地方整備局 四日市港湾事務所 (〒510-0064 三重県四日市市新正3-7-27)

E-mail:satou-m852a@mlit.go.jp

³非会員 国土交通省 中部地方整備局港湾空港部 (〒460-8517 名古屋市中区丸の内2-1-16)

E-mail:banda-m82ac@mlit.go.jp

コンテナ航路では船舶の大型化や寄港の多頻度が進んでいる。各ターミナルでは、航路サービスの変化に柔軟に対応でき、船滞時間を極力少なくできるバース運用とバース能力を客的に評価する手法の開発が求められる。本研究では、四日市港を対象に、AISデータをもとにコンテナ船の到着時間特性および係留時間特性を分析した。それぞれ指数分布、3次のアーラン分布の形状を示すことを確認した。さらに、シミュレーションモデルを構築し、コンテナ船の大型化や航路増便によりもたらされる輸送力の増分に対する滞船時間の変化を予測した。この結果、船舶の大型化は輸送力の増え方に対して相対的に滞船時間の増え方が小さい一方、航路増便は滞船時間の増え方が輸送力の増え方を上回るという結果を得た。また、バースの一体運用により滞船時間は効果的に抑制できることを確認した。

Key Words : *container terminal, berth window, queueing model, AIS*

1. はじめに

我が国では、高度な経済成長によって港湾貨物が急激に増加した昭和30年代から40年代初頭において、バルク型の貨物船の船混みが深刻な社会問題となったことを受け、貨物を適正に受け入れるための必要バース数の設定方法等に関する研究が盛んに行われてきた¹⁾。

一方、その後急激に進展したコンテナリゼーションやサプライチェーンの国際化、近年のアジア諸国の著しい経済成長を受け、最近ではコンテナ船、とりわけアジア・近海航路において、高い寄港頻度の確保と在港時間を極力少なくするバース運用が求められており、これを実現するためのバース能力の評価手法の開発が必要になっている。

また近年は、GPSによって船舶の位置を追跡できるAIS (Automatic Identification System : 船舶自動識別装置) 情報が利用することで、船舶の動静を詳細に把握できるようになり、数値シミュレーションの助けにより、最適なバース運用を客観的に評価できるようになってきた。

本研究では、四日市港霞ヶ浦地区をモデルケースとして、まずバースの待ち行列シミュレーションモデルを構

築するとともに、AIS情報等を用いてコンテナ船の到着時間特性と係留時間特性を明らかにする。次に、同シミュレーションモデルにより現状のバース能力を評価する。さらに、現在、独立して運用されている2つのバースが将来の港湾再編により連続した1つのバースとして運用された場合のバース能力の増加を評価する。

2. バース混雑シミュレーションモデルの開発

(1) モデルの基本的な考え方

本研究では、コンテナ船の入出港が待ち行列モデルで表現できるものと考えた。港外に到着した船舶は、バースに空きがあれば着岸し、空きがなければ空きができるまで港外で滞船するというのが基本的な考え方である。

この際、一般的な待ち行列モデルでは、予め窓口の数を設定した上で、窓口に着岸する客の到着頻度とサービス時間を与えることで待ち時間を予測するが、船舶が着岸するバースの場合、物理的に分離されていない連続的な施設であれば、複数のバースを跨いだ着岸も可能なため、バースの数ではなく延長に着目してモデル化を行うこととした。すなわち、港外に到着した船舶は、希望す

るバースに自船の着岸が可能な延長(=船舶延長+2×綱取長)があるかどうかによって着岸可否を判定し、着岸できない場合には港外で滞船することとした(図-1)。

(2) モデルの前提条件と計算フロー

構築したシミュレーションモデルの前提条件は以下の通りである。

- ①船舶の到着時刻は確率分布に従う乱数により発生させ、外生的にモデルに与える。
- ②船舶は港外に到着した順序で着岸することとし、追い抜きはしないものとする。
- ③港外に到着した船舶は、自船の着岸が可能なバース延長が確保されるまで港外で滞船する。
- ④物理的に分離していない連続した複数のバースは一体的な一つのバースとみなす。
- ⑤船舶の係留時間は確率分布に従う乱数により発生させ、外生的にモデルに与える。着岸後、設定した係留時間を経過した時点で離岸する。

なお、我が国では深夜や休日などの時間帯において、一時的に船舶の受入れを停止するターミナルもあることから、予めバース稼働時間を設定し、時間外に到着した船舶は稼働時間を迎えるまで港外で滞船するという現象を再現できるようにした。

今回構築したシミュレーションモデルの計算フローは図-2に示すとおりである。

3. コンテナ船の到着特性とバース滞在時間

(1) 到着特性

コンテナ船は一般に定期航路として運航されており、基本的には決まった曜日に入出港するかたちでスケジュールリングされている。しかしながら、悪天候の影響や前港における船混み等によってスケジュールに乱れが生じることもあり、大手船社が公表している資料によると、船混みの激しいアジア諸港に寄港するサービスでは、定時到着率が低下しているとされている³⁾。

船舶の港湾への到着特性については、古くからバルク型の貨物船を対象とした研究⁴⁾がなされ、到着パターンはポアソン到着、すなわち到着時間間隔が指数分布に従う場合が多いとされている。一方で、定期スケジュールで運航されるコンテナ船の到着特性は必ずしもバルク型の貨物船と同じパターンではない可能性があることや、近年のアジア主要港で顕在化している船混みが到着特性に与える影響も鑑み、今回の検討対象とする四日市港の到着特性を分析した。

図-3は2006～2015年の10年間の四日市港におけるコンテナ船の入出港データ⁵⁾をもとに整理した着岸時間間隔の分布であるが、指数分布(到着率 $\lambda=2.509$)に従っていることが確認された(図-3)。

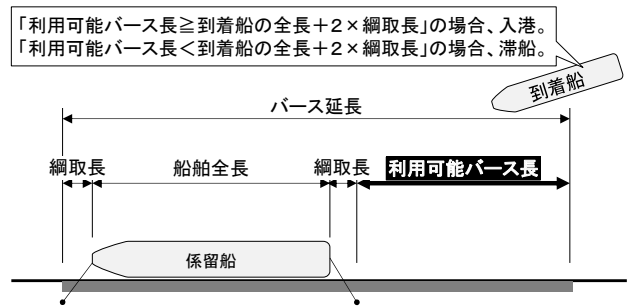


図-1 バース延長に基づく着岸可否判定

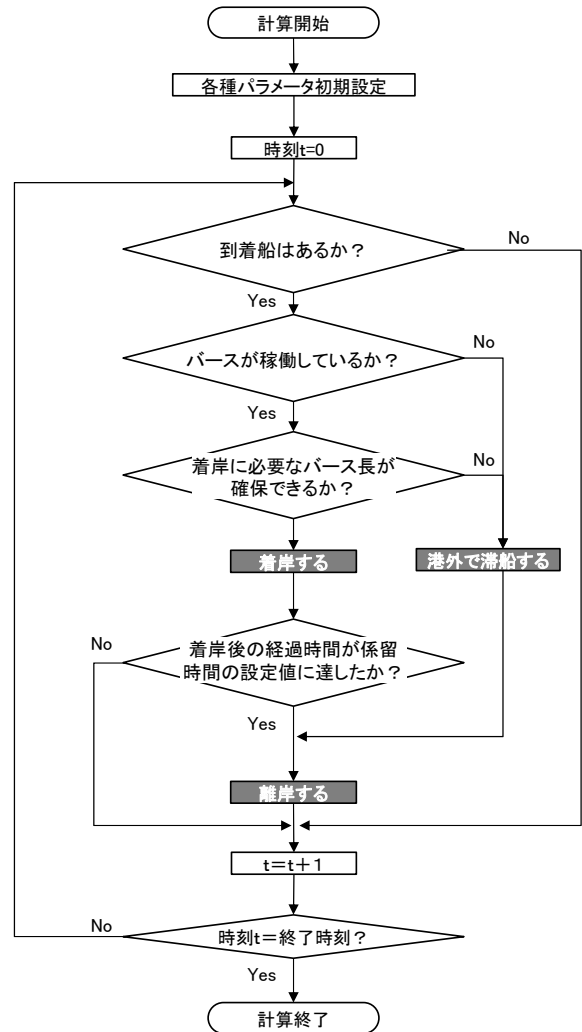


図-2 シミュレーションモデルの計算フロー

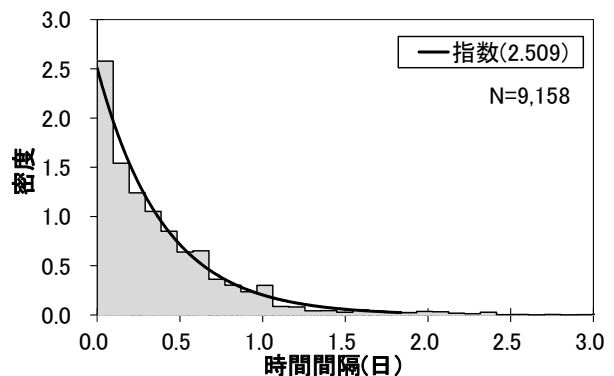


図-3 到着時間間隔の分布

この結果を踏まえ、バース混雑シミュレーションモデルに与えるコンテナ船の到着時刻は、指数分布に従う乱数によって発生させることとした。

(2) バース滞在時間

船舶のバース滞在時間についても古くから様々な研究⁴⁾がおこなわれており、バースへの係留時間は次数 $k=2\sim 3$ のアーラン分布に従うことが多いとされている⁴⁾。

船舶の係留時間は、積卸しするコンテナ個数との正の相関があると考えられる。1寄港当たりの積卸個数と船型には正の相関がある⁶⁾ことを踏まえ、2006～2015年の10年間に四日市港に寄港したコンテナ船の船型と係留時間を分析した結果、船型と係留時間には正の関係があることを確認できた(表-1)。

以上より、係留時間については、船型を4つの階級(500TEU級, 1,000TEU級, 2,000TEU級, 4,000TEU級)に区分して分布特性を分析し、いずれの船型階級においても次数 $k=3$ のアーラン分布に従っていることが確認できたため(図-4)、係留時間は次数 $k=3$ のアーラン分布に従う乱数によって発生させることとした。

表-1 船型階級別の係留時間

船型 (TEU)	平均値 (min)	標準偏差 (min)
500	214.4	222.8
1,000	325.2	147.4
2,000	392.5	173.9
4,000	510.0	181.8

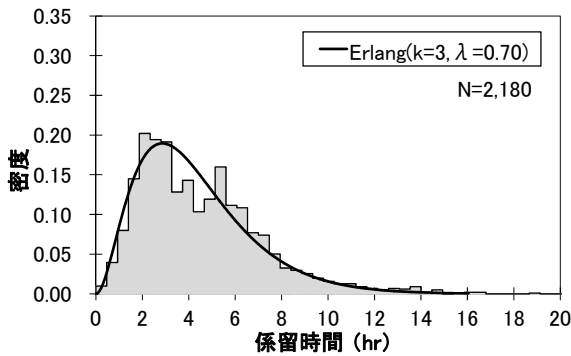


図-4 係留時間の分布(2,000TEU級)

4. バース混雑シミュレーションの実施

(1) 実施方法

シミュレーションの実行にあたっては、四日市港のコンテナターミナルの運用実態を踏まえ、以下の条件を設定した。

①北ふ頭(W81)と南ふ頭(W26,W27)の独立した二つのターミナル(図-5)の利用船社は基本的に決まっているため、船舶に船社の属性を付与して利用バースを固定する。

②先船が離岸してから後船が着岸するまでには一定のタイムラグが必要なため、アーラン分布で外生的に設定した係留時間に対して1時間を加えた値をシミュレーション上の係留時間とする。

③入出港実績によると深夜0時台から6時台に入港する船舶が非常に少ないため、シミュレーション上ではバース非稼働時間帯とみなし、この時間帯に港外に到着する船舶は港外で滞船し、7時以降に入港するものとする。

なお、今回のシミュレーションでは、船舶の到着時間間隔および係留時間を乱数で設定したことから、安定した結果を得るために500個のデータセットを作成してシミュレーションを実行し、その平均値をもって計算結果とした。

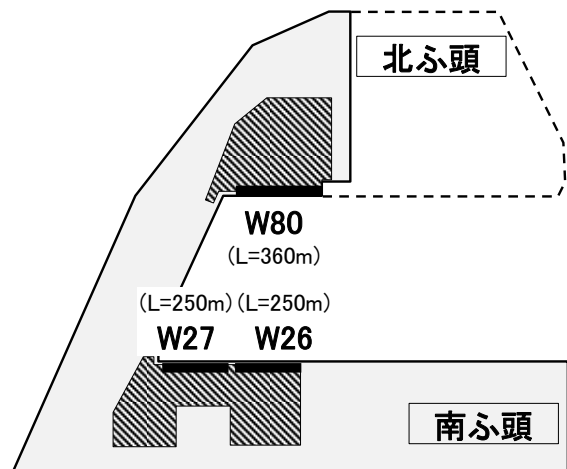


図-5 霞ヶ浦地区のターミナル配置 (現況)

(2) 現況再現性の確認

本研究では、構築したバース混雑シミュレーションモデルを用いてバース一体運用による処理能力向上の効果を検討するが、ここでは使用するモデルの現況再現性を確認する。

図-6、図-7はシミュレーションによって得られた時間帯別の入出港隻数分布と実績値を対比したものである。

入港に関しては、実績値では6時台～8時台に朝ピークがあるが、推計値ではピークが7時台に集中している。また、推計値には実績値にみられる16時頃の夕ピークは存在しない。前者については、シミュレーションでは朝を待って滞船している船舶はバースが稼働する7時に一律に着岸するものの、AIS情報を分析した結果、深夜に港外に到着して滞船した船舶であっても8時台以降に着岸するケースもあり、入港のタイミングには一定のバラツキがあるためと考えられる。後者については、シミュレーションでは港外への到着間隔を指数分布に基づく乱数で与えているためランダムに到着するが、実際には前港スケジュールの影響等から、一定の規則性が生まれているものと考えられる。

出港については、一部で推計値と実績値の間に乖離が生じているものの、傾向としては概ね実態を再現できている。

以上のように、入出港パターンを完全には再現できていないものの、傾向としては一致しており一定の現況再現性は確保できていると判断した。

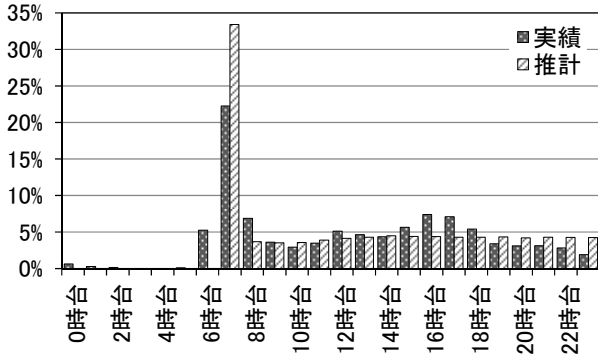


図-6 推計値と実績値の比較（入港）

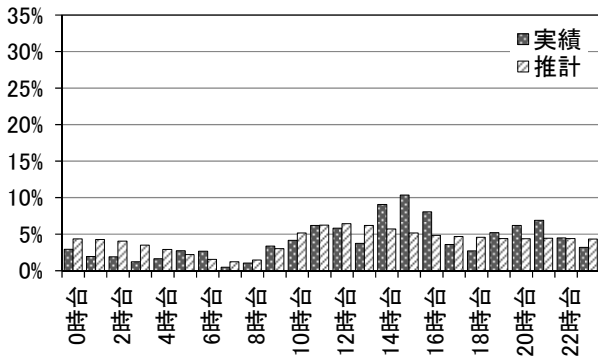


図-7 推計値と実績値の比較（出港）

5. バースの一体運用による処理能力の向上

(1) 船舶大型化と滞船時間の関係

近年、新造船の投入とそれに伴う既存船の転配によってアジア航路においてもコンテナ船の大型化が進展しており、四日市港でも同様の傾向がある。

船型の大型化は、バースの占有延長を大きくするに留まらず、1寄港当たりの積卸個数の増加に伴って係留時間も長くなるため、バースへの負荷を高めると考えられる。

ここでは、霞ヶ浦南ふ頭（W81）を対象に、船舶が大型化した際のバース能力への影響を感度分析的に実施した。W81には現在、東南アジア航路6サービス（2,000TEU級×4サービス、4,000TEU級×2サービス）が寄港している。これらのうち2,000TEU級のサービスが4,000TEU級に大型化した場合を想定し（表-2）、岸壁占有率および滞船時間の変化を推計した。

表-3および図-8はバース混雑シミュレーションモデルによる推計結果である。大型化による船腹量の増分を輸

送力の増分と解釈すると、4便の大型化によって輸送力は1.5倍に増強されるものの、岸壁占有率と滞船時間はこれを下回る増加率に抑えられていることが分かる。

大型のコンテナ船を円滑に受入れ、荷役するためには、バースの延長だけでなく水深や荷役機械等の要件を満足する必要があることに加え、大型船の寄港地として成立し得るベースカーゴが必要になるものの、一定の条件下では効率的な輸送力の強化方策になり得ることを示唆している。

表-2 検討ケースと条件設定①

ケース	便数 (航路・船型)	便数(便/週)		合計
		東南ア		
		2,000	4,000	
Case1-A	現況	4	2	6
Case1-B	1便大型化	3	3	6
Case1-C	2便大型化	2	4	6
Case1-D	3便大型化	1	5	6
Case1-E	4便大型化	0	6	6

表-3 船舶大型化による影響

検討ケース	船腹量 (千TEU/週)	岸壁 占有率	総滞船時間 (hr/年)
Case1-A 現況	16 (1.00)	25.9% (1.00)	1,032 (1.00)
Case1-B 1便大型化	18 (1.13)	27.6% (1.07)	1,133 (1.10)
Case1-C 2便大型化	20 (1.25)	29.2% (1.13)	1,227 (1.19)
Case1-D 3便大型化	22 (1.38)	30.8% (1.19)	1,330 (1.29)
Case1-E 4便大型化	24 (1.50)	32.5% (1.25)	1,434 (1.39)

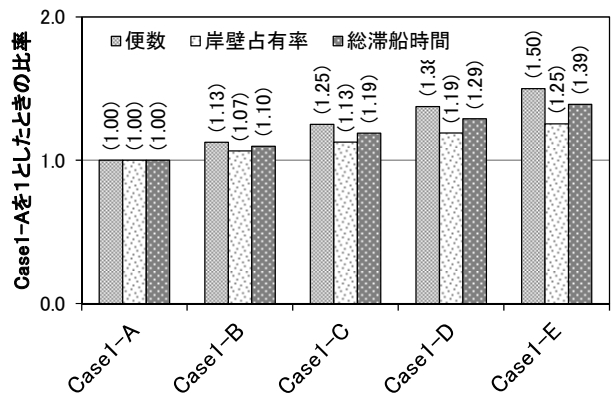


図-8 船舶大型化による影響

(2) 便数増加と滞船時間の関係

W81を対象に航路便数の増便がバース能力にもたらす影響を検討する。Case2-A（現況）をベースケースとして、Case2-Fまで1便ずつ便数を増加させて船腹量、岸壁占有率および滞船時間の変化を推計した（表-4）。

表-5および図-9はバース混雑シミュレーションモデルによる推計結果である。先述の船舶大型化による影響とは異なり、輸送力とみなすことができる船腹量の伸びに対して、岸壁占有率と滞船時間が乗数的に増加している。

5便増を想定したCase2-Fでは船腹量の伸び1.56倍に対して滞船時間は3.39倍にも達している。増便によってバースの負荷が一定以上を超えたために重畳的な滞船が発生し、待ち時間が著しく伸びたものと考えられる。

これは、仕向地の多様性確保や高頻度輸送のために新規航路を誘致するような方向性を志向する場合には、当然のことではあるが、複数船舶の同時着岸が可能となるよう十分な長さのバースを整備することが重要であることを示唆している。

表-4 検討ケースと条件設定②

ケース (航路・船型)	便数	便数(便/週)			
		東南ア 2,000-4,000	韓国 1,000	中国 1,000	合計 2,000-4,000
Case2-A	現況	6	0	0	6
Case2-B	1便増	6	1	0	7
Case2-C	2便増	6	2	0	8
Case2-D	3便増	6	2	1	9
Case2-E	4便増	7	2	1	10
Case2-F	5便増	8	2	1	11

表-5 航路増便による影響

検討ケース	船腹量 (千TEU/週)	岸壁 占有率	総滞船時間 (hr/年)
Case2-A 現況	16 (1.00)	25.9% (1.00)	1,032 (1.00)
Case2-B 1便増	17 (1.06)	29.1% (1.12)	1,336 (1.29)
Case2-C 2便増	18 (1.13)	32.2% (1.25)	1,641 (1.59)
Case2-D 3便増	19 (1.19)	35.4% (1.37)	1,959 (1.90)
Case2-E 4便増	23 (1.44)	40.8% (1.57)	2,740 (2.65)
Case2-F 5便増	25 (1.56)	44.5% (1.72)	3,498 (3.39)

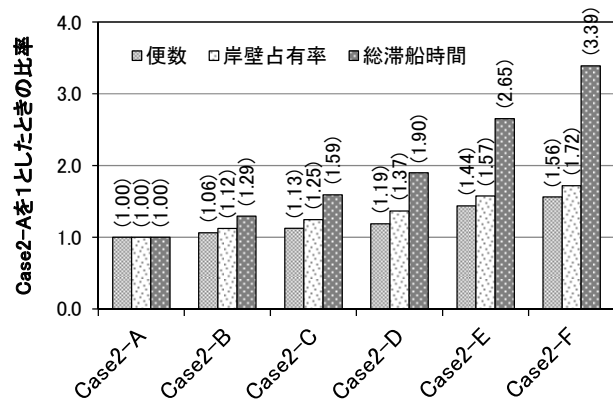


図-9 航路増便による影響

(3) バースの一体運用の効果

ここでは現在は北ふ頭と南ふ頭に独立して配置されているコンテナターミナルを再編集集約し、連続した一つのバースとして運用した場合の効果等を推計する。

四日市港港湾計画 (H23.4改訂) には、北ふ頭のW80に隣接してW81,W82の2つのコンテナバースが計画され

ている。今回はW81(延長350m)を整備し、W80(延長360m)と合わせて連続した710mのバースとして運用し、ここに南ふ頭のW26,W27(合計延長500m)の機能を移転集約することを想定する(図-10)。

一体運用の効果は、バースにかかる負荷の多寡に影響を受けることも考えられることから、負荷の小さいケースとして現状の船舶大型化と航路増便を与えたケース(Case3-A,Case3-B)に加えて、負荷の大きいケースとして船舶大型化と航路増便の両方を与えたケース(Case3-C,Case3-D)のそれぞれに対して、港湾再編によるバース一体運用あり/なしの2ケース、計4ケースを検討した。

現状相当の小さい負荷に対しては、一体運用による滞船時間削減効果は20%となった。これに対して、船舶大型化と航路増便の負荷を掛けたケースでは滞船時間の46%を削減できるという結果を得た。港湾再編によるバースの一体運用は、貨物需要の増大や船舶の大型化への対応、とりわけ多頻度に到着するコンテナ船を円滑に受け入れ、船混みを緩和できる有効な方策であることが明らかとなった。

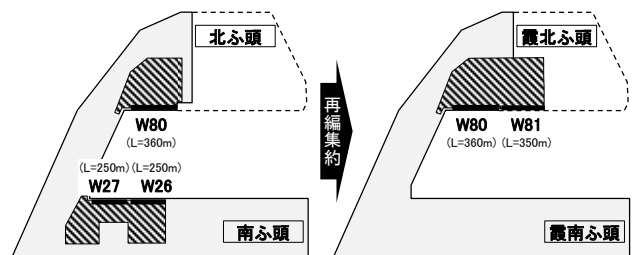


図-10 霞ヶ浦ふ頭の再編によるバース一体運用の想定

表-6 検討ケースと条件設定②

ケース	便数	便数(便/週)			
		東南ア	韓国	中国	合計
Case3-A	現状・再編なし	12 (1,000TEU × 4 2,000TEU × 5 4,000TEU × 3)	3 (500TEU × 1 1,000TEU × 2)	2 (1,000TEU × 2)	17
Case3-B	現状・再編あり	14 (1,000TEU × 4 2,000TEU × 2 4,000TEU × 8)	5 (500TEU × 1 1,000TEU × 3)	3 (1,000TEU × 2)	22

※カッコ書きは船型別の便数

表-7 バースの一体運用による効果

検討ケース	船腹量 (千TEU/週)	岸壁 占有率	総滞船時間 (hr/年)
Case3-A 現状・再編なし	31 (1.00)	20.6% (1.00)	1,930 (1.00)
Case3-B 現状・再編あり	31 (1.00)	31.0% (1.50)	1,543 (0.80)
Case3-C 将来・再編なし	48 (1.56)	29.0% (1.41)	5,685 (2.95)
Case3-D 将来・再編あり	48 (1.56)	43.5% (2.11)	3,092 (1.60)

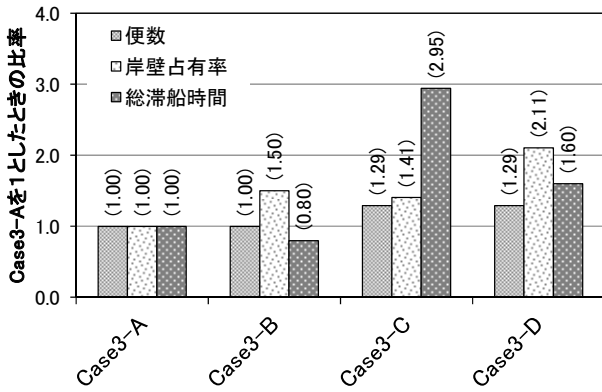


図-11 バース一体運用による効果

6. まとめ

本研究では、四日市港をモデルケースとしてコンテナ船の到着時間特性および係留時間特性を明らかにした上で、今回構築したシミュレーションモデルを用いてバースの一体運用が船混みに対して非常に有効な方策であることを示した。以下に得られた知見を述べる。

- ①定期スケジュールで運航されるコンテナ船にあっても、ランダムに到着する貨物船と同様、到着時間間隔は指数分布に従うことが明らかになった。
- ②コンテナ船の係留時間は船型が大きいほど長く、次数 $k=3$ のアーラン分布に従うことが明らかになった。
- ③船舶大型化は輸送力の増分に対して岸壁占有率や滞船時間の増加率が小さく、バース延長のほか水深や荷役機械の要件を満たし、かつ十分なバースカーゴが必要になるものの、効率的な輸送力強化方策になり得ることが示唆された。
- ④航路増便は輸送力の増分に対して岸壁占有率や滞船時間の増加率が大きいため、新規航路誘致によって多様で多頻度な航路ネットワークを目指す際には、十分な長さのバースを確保することが特に重要であると示唆された唆している。
- ⑤港湾再編によるバースの一体運用は、貨物需要の増大や船舶の大型化への対応、とりわけ多頻度に到着す

るコンテナ船を円滑に受け入れ、船混みを緩和するための有効な方策であることが明らかとなった。

コンテナ船は複数の寄港地を結ぶループで運航されていることから、船舶の大型化や航路の増便は必ずしも当該港のみの条件で決まるものではない。すなわち、周辺港における貨物量の増加が当該港での船舶大型化や航路増便につながる可能性もある。こうした事象に対応し、コンテナ船寄港の機会逸失を防ぐためには、大型コンテナ船の寄港地として成立するためのベースカーゴの維持・拡大と、十分なバース能力の確保が非常に重要であろう。

さいごに、今回構築したシミュレーションモデルは、バースの利用可能性のみから入港可否を判定する簡易なモデルであり、例えばコンテナ蔵置場所と本船着岸場所の位置関係は考慮していない。実際には、コンテナ蔵置場所と本船着岸位置が離れてしまうとヤード内での横持ちが発生したり、この横持ち作業がヤード内の荷役に悪影響を与える可能性があることに留意が必要である。

参考文献

- 1) 例えば、長尾義三、大学講座土木工学 19 港湾工学、共立出版、1968.4
- 2) 東洋信号通信社：船舶動静データ、2018.3.1～2018.4.30
- 3) OCEAN NETWORK EXPRESS：ONE事業説明会資料、[https://www.nyk.com/news/2018/_icsFiles/afiedfile/2018/11/28/181127_one\(jp\).pdf](https://www.nyk.com/news/2018/_icsFiles/afiedfile/2018/11/28/181127_one(jp).pdf)（最終アクセス日：2019年3月9日）
- 4) 例えば、奥山育英、田口登、待ち合せ理論による最適バース数の決定、港湾技術研究所報告、第16巻第3号、1977.9
- 5) 四日市港管理組合：四日市港船席表、2006.1.1～2015.12.31、<http://office.yokkaichi-port.or.jp/pls/home/hve010.edit>
- 6) 赤倉康寛、二田義規、渡部富博：我が国の港湾における外貿航路別コンテナ積卸率、国土技術政策総合研究所研究報告、No.36、2008.9

(2019. 3. 10 受付)

EFFICIENT BERTH OPERATION BY AIS DATA AND QUEUEING MODEL

Tatsuo OKAMOTO, Yasuhiro TAKEUCHI, Masaru BANDA

Container ship operation requires to minimize vessels' waiting hours at ports and to secure stable and frequent port calls. In this paper, we will propose container berth capacity evaluation by AIS data and the queueing model. The AIS data in the port of Yokkaichi indicates that traffics of vessel arrival are represented by the exponent distribution. Vessels' berthing hours are represented by the Arlang distribution. Next, we developed the discrete queueing simulation model for berth capacity. We forecasted vessel waiting hours for handling capacity offered by larger containership arrival or numbers of ship call. The study indicates that the total vessel waiting hours will be escalated for the numbers of container handling even though the capacity proportionally increase for the numbers of call or sizes of vessel. In addition, the waiting hours can be effectively reduced if the plural berths are jointly operated.