国土技術政策総合研究所報告
No.68　2022 年 10 月
（YSK-R-55）

世界のコンテナターミナルにおける
沖待ちの把握・分析手法の構築

赤倉康寛*

要　旨

2017 年の東西基幹コンテナ航路におけるアライアンス再編を契機としてコンテナサービスの定時性が低下し始め，2020 年夏以降の輸送需要急増と新型コロナウイルス感染拡大等によるコンテナ輸送の能力制約の影響で，世界の主要港湾において大量のコンテナ船の沖待ちが発生しており，輸入物資が届かずに経済を混乱させるサプライチェーン・クライシスを引き起こしている．

本報告は，AIS データを活用してコンテナターミナルにおける沖待ちを把握する手法を構築し，世界及び日本のターミナルについて多様な分析を行ったものである．その結果，コンテナの沖待ち時間・量は，ターミナルの陸側の能力制約がない状態では，バース占有率や着岸船腹量，実際の到着遅延及び着岸時間長期化と一定の関係性があることや，日本のターミナルの沖待ちは小型船が多いことが確認された．また，日本のターミナルでの沖待ちによる CO_2 排出の増加量を推計し，削減対策を提案した．加えて，サプライチェーン・クライシス下で大量の沖待ち船が生じた海外ターミナルでは，バース占有率が平常時範囲内の場合と，バース占有率が約 8 割にまで達した場合に大別された．さらに，沖待ちデータの重要性を踏まえ，リアルタイムに沖待ち時間・量を把握するシステムを開発した．

キーワード：ターミナル混雑，バース占有率，AIS，錨泊，遅延

* 港湾研究部　港湾システム研究室室長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1　国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019　Fax：046-842-9265　　e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目　　次

1. 序論……1

2. 沖待ち状況の把握方法……2
2.1 沖待ちの海域と形態……2
2.2 使用データ……2
2.3 沖待ち船把握及び沖待ち時間推計方法……3
2.4 コンテナ沖待ち時間・量の推計方法……3

3. 世界及び日本の主要港湾・ターミナルの沖待ち状況の分析……4
3.1 世界の主要港湾・ターミナルの沖待ち状況……4
3.2 日本の主要港湾・ターミナルの沖待ち状況……5
3.3 沖待ちとターミナル運営状況の関係性の分析……7
3.4 コンテナ船の沖待ち削減による定時性向上方策……8

4. 沖待ちによる CO_2 排出増加量の推計……10
4.1 港湾にかかる地球温暖化対策の状況……10
4.2 排出量推計手法……11
4.3 排出量推計結果……12
4.4 削減対策の効果推計……12

5. サプライチェーン・クライシス下の沖待ち状況の分析……14
5.1 Los Angeles/Long Beach 港の状況……14
5.2 沖待ち把握・分析結果……15

6. リアルタイム把握システムの開発……18
6.1 沖待ちデータの精度……18
6.2 リアルタイム把握システム……18

7. 結論……19

謝辞……20

参考文献……20

1. 序論

2017 年の東西基幹コンテナ航路におけるアライアンス再編を契機としてコンテナサービスの定時性が低下し始め，2020 年夏以降の輸送需要急増と新型コロナウイルス感染拡大の影響で，世界中の港湾において大量のコンテナ船の沖待ちが発生しており，輸入物資が届かずに経済を混乱させるサプライチェーン・クライシスを引き起こしている．一方，沖待ち隻数を公表している港湾はほとんどなく，ターミナル運営状況と沖待ちとの関係性を論ずることが困難な状況にある．以上の状況を踏まえ，本研究は，AIS データを活用してコンテナターミナルにおける沖待ち船を網羅的に把握する手法を構築し，世界及び日本のターミナルについて多様な分析を行ったものである．

1990 年代後半からの Maersk 社により先導された大型化により，コンテナ船の最大積載能力は約 5 千 TEU から，約 2 万 4 千 TEU にまで増加してきた．船型大型化による単位コスト低減を図るためには，大型化に見合った貨物を集荷する必要があることから，コンテナサービス統合のための船社の合併やアライアンスの拡大が進んできた．**図-1** に，就航船の最大船型と，東西基幹航路（東アジア～欧州及び東アジア～北米）のサービスを提供するアライアンス・船社数の推移を示す．積載能力の増大に応じて，アライアンス・船社数は減少してきており，2017 年にはアライアンスは 3 つにまで集約され，同時に，航路サービスも統合集約された．集約後のサービスは，需要の多く高効率な港湾・ターミナルに集中しており，2019 年 11 月時点で，3 アライアンスによる東アジア～北欧州航路の全 20 サービスのうち，Rotterdam 港に 19 サービス，上海港に 14 サービスが寄港し，東アジア～北米西岸航路の全 33 サービスのうち，Los Angeles/Long Beach 港に 23 サービス，上海港に 20 サービスが寄港している．

このような特定の港湾・ターミナルへの寄港の集中は，ハブ＆スポーク構造による輸送の効率性を向上させる一方，スケジュールの乱れ，輸送需要の急増や荷役能力の低下，天候不順等に対して沖待ちや遅延が発生しやすくなる．**図-2** に，Sea-Intelligence[1)]による近年の遅延船（スケジュールより 2 日以上遅れて到着した船）の平均遅延日数の推移を示す．2016 年～2017 年末まで増加し，2018 年は横ばいで推移したものの，2020 年初よりさらに増加し，2022 年には 1 週間を超えていた．2021 年通年で定時（スケジュール翌日まで）に到着したのは，就航便の 35.8%であった．このような遅延は寄港が集中する特定の港湾・ターミナルに起因する部分が大きく，赤倉 [2)]によれば，2018 年 4～12 月の東西基幹コンテナ航路の遅延の約 8 割は欧米及び中国の港湾において発生していた．

遅延によるスケジュールの混乱は，各港湾における沖

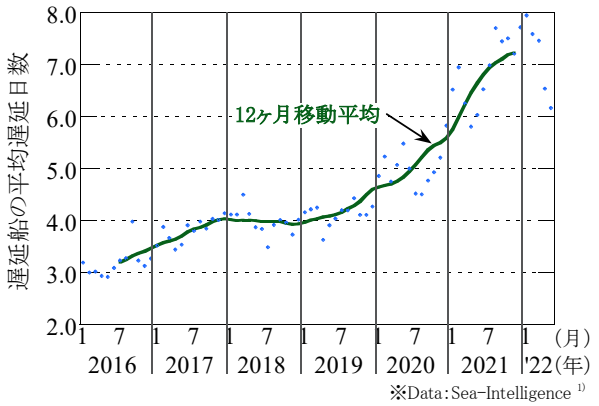

図-2　2 日以上遅延船の平均遅延日数

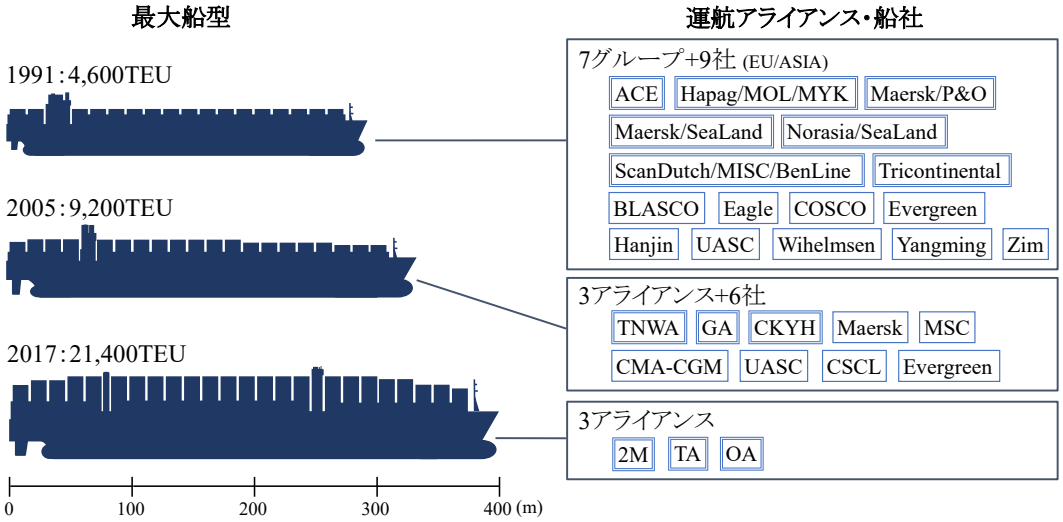

図-1　就航船の最大船型と東西基幹航路の運航アライアンス・船社数の推移

待ちを増加させていると想定されるが，沖待ち船の統計を公表しているのは Los Angeles 及び Long Beach 港しか見当たらない．高ら [3]は，大阪湾を対象に，船速 3 kt 未満，かつ，バース近傍以外に位置した船を沖待ち船として把握している．Marine Traffic[4]は，各港湾周辺の錨泊指定海域での停泊船を沖待ち船として把握し，その隻数の推移を港湾混雑の指標として提供しており，同様のサービスが eeSea，Project44，Vessel Value，Kuehne+Nagel 等でも開始された．しかし，いずれも着岸ターミナルは特定できず，沖待ち状況とターミナル運営状況との関係性は議論されていない．また，後述するが，錨泊以外の方法で沖待ちをする船もあり，網羅的な把握が出来ているかどうかも確認が必要である．

本報告は，「世界のコンテナターミナルにおける船舶の沖待ち時間の把握・分析」（土木学会論文集 B3，Vol.77，No.2，pp.I_157-I_162，2021 年 9 月），「Analysis about Delay of Container Trunk Lines and Offshore Waiting for Calling to Congested Container Terminals」（IAME2021Conferene，2021 年 11 月），「我が国のコンテナターミナルにおける沖待ち船の待ち時間及びコンテナ量の推計」（沿岸域学会誌，Vol.34，No.3，pp.19-28，2021 年 12 月），「我が国のコンテナターミナルにおける船舶の沖待ちによる CO_2 排出量と対策効果の推計」（土木学会論文集 B3，Vol.78，No.2，掲載決定），「Analysis of Deterioration of Port Performance and Long Offshore Waiting under Global Shipping Crisis」（IAME2022 Conference，掲載決定）をとりまとめ，さらに，加筆をしたものである．

以降，本報告においては，2. にて各ターミナルの沖待ちコンテナ船の把握方法について述べ，3. で海外及び日本の主要港湾・ターミナルにおける沖待ち状況とターミナル運営状況の関係性を分析し，4. で日本のターミナルにおける沖待ちによる CO_2 排出の増加量を推計し，5. で 2020 年秋以降のグローバルサプライチェーン・クライシス下の大量の沖待ち船発生状況について分析を加え，6. でリアルタイムに沖待ちを把握するシステム開発について述べ，7. でとりまとめる．

2. 沖待ち状況の把握方法

2.1 沖待ちの海域と形態

多くの港湾では，船舶が錨泊するための海域を指定しているが，収容能力（面積）が十分ではないことも多く，それ以外の海域での沖待ちも多く見られる [3]．また，待つ形態として，アンカーを下ろして錨泊する方法だけでなく，漂流や減速により待つ場合もある．**図-3** に，沖待ち船の航跡例を示すが，上図の錨泊では，錨泊地点において船舶の航跡が同心円状に重なっていたのに対し，下図の漂流では全く異なった航跡となっていた．このような沖待ちを漏れなく把握するためには，港湾による指定錨泊海域だけでなく，港湾沖合の相当程度広い範囲を対象として，船舶の動静を把握する必要がある．

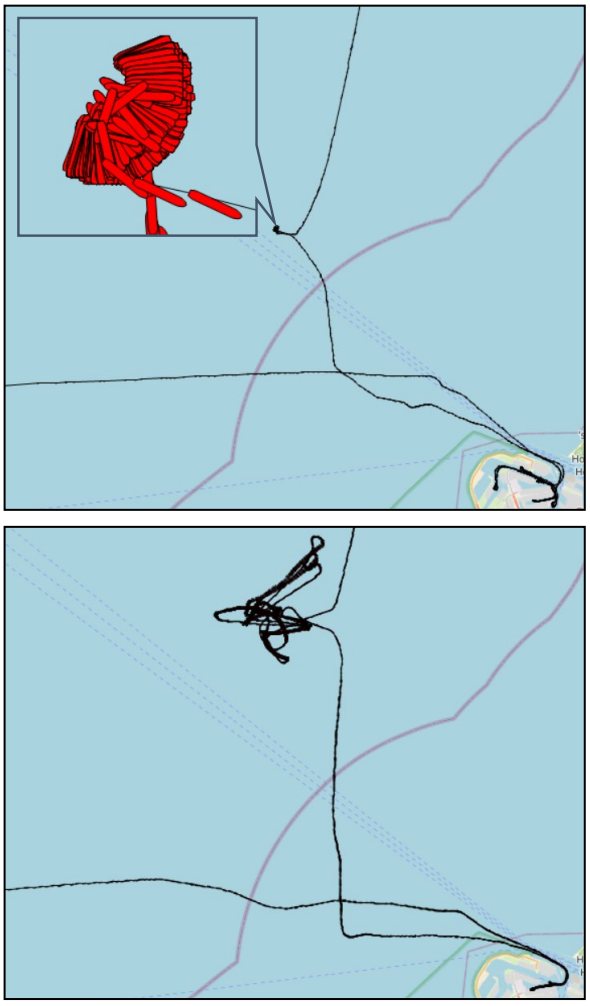

図-3　沖待ちの航跡例（上：錨泊，下：漂流）

2.2 使用データ

沖待ちを把握するための船舶の動静は，一定規模（国際航海する貨物船は 300 GT）以上の船舶に搭載が義務付

けられており，自船の船名，位置，針路，速力等を一定間隔で発信する AIS（Automatic Identification System：自動船舶識別装置）によって発信されたデータを使用して把握した．各船の信号は，地上に設置されたアンテナにおいて，周辺海域を高密度に把握可能であるが，距離の問題から，沖合海域の動静把握は難しい．一方，各船の信号は，衛星により，大洋上においても受信が可能であるが，衛星が上空を通過する場合にのみ受信するため，その密度は低くなる．本研究では，港湾沖合のある程度広い範囲の船舶動静を把握する必要があることから，必要に応じ，地上及び衛星の両方で受信されたデータを統合して使用した．

2.3 沖待ち船把握及び沖待ち時間推計方法

前述の様々な形態の沖待ち船を網羅的に把握するため，まず，各船の入港から着岸までの所要時間に着目することとした．入港及び着岸を判定するため，**図-4** に示すように，各港の沖合海域に入港判定エリアを，また，各ターミナルの前面海域に着岸判定エリアを設定した上で，船舶が入港判定エリアの外側から内側に移動した時点を入港と判定し，船舶が着岸判定エリアで 10 分間以上 1 kt 以下を継続した時点で着岸と判定した．入港判定エリアは，錨泊，漂流や減速した海域を覆うように，港により異なるが 50 km 程度の規模で，どこから入港しても同じ距離となるように円形で設定することを基本とした．ただし，日本の東京湾や大阪湾では，港湾が隣接しており，円状の入港判定エリアを設定すると，重複が生じることとなる．そのため，東京湾や大阪湾では，湾全体として入湾判定エリアを設定することとした．なお，同港湾内（東京湾・大阪湾の場合，同湾内）のターミナル間移動の場合，前ターミナルの離岸から，次のターミナル着岸までの所要時間を用いて沖待ち判定を行った．例えば，**図-5** の東京湾の航跡例では，最初に着岸した①横浜港本牧 BC ターミナルでは入湾～着岸までの所要時間，次いで着岸した②東京港青海牧ターミナルでは，本牧 BC ターミナル発～着岸までの所要時間により沖待ち船を把握した．

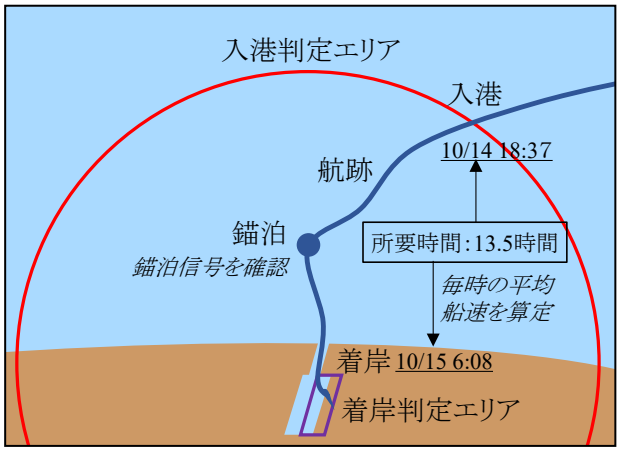

図-4　入港・着岸判定エリア及び所要時間算定イメージ

図-5　東京湾入湾～ターミナル着岸の航跡例

沖待ち船の判定及び沖待ち時間の算定方法のイメージを**表-1** に示す．ターミナル別に，入湾もしくは前ターミナル毎に，着岸船を所要時間により昇順に並べ，以下の条件に合致した船を沖待ち船と判定した．

(a) 入湾もしくは前ターミナル発～着岸までに AIS の Status が錨泊中（at anchor）を記録していた場合
(b) 入湾もしくは前ターミナル発～着岸までに，着岸時を除き，2 時間以上船速 3kt 未満を継続していた場合
(c) 入湾もしくは前ターミナル発～着岸までの所要時間が，a)もしくは b)と同等以上であった場合

表-1 では，(a)に該当するのが〔7〕〔9〕〔11〕〔12〕であるが，AIS の Status は手動でスイッチを入れる必要があるため，実際には錨泊していても Status は航行中のままの船も多い．そのため，船速での錨泊判定が(b)であり，〔10〕が該当する．また，漂流や減速により待つ船が，(a)・(b)と同等以上の時間を要したのが(c)であり，〔8〕が該当する．沖待ち時間は，各船の所要時間から，(a)～(c)に該当しない船の中で最も長い所要時間（表では〔6〕の 3 時間）を控除することにより推計される．

2.4 コンテナ沖待ち時間・量の推計方法

コンテナ船の沖待ちの荷主等への影響の度合いは，どれだけの時間，どれだけのコンテナ量が沖待ちしたのかに依存する．そこで，各ターミナルで相対比較が可能な

表-1　沖待ち船特定及び沖待ち時間推計イメージ

船舶番号		〔1〕	〔2〕	〔3〕	〔4〕	〔5〕	〔6〕	〔7〕	〔8〕	〔9〕	〔10〕	〔11〕	〔12〕
沖待ち時間		0	0	0	0	0	0	2	2	3	4	9	11
所要時間	1	13.7	13.8	15.4	13.6	12.0	14.8	9.0	11.2	9.7	8.0	10.9	10.3
	2	13.1	12.8	11.9	10.6	9.7	7.5	3.3	3.4	1.3	2.8	0.7	2.0
	3				0.5	1.7	3.2	0.0	2.9	0.4	0.7	0.2	0.0
	4							10.7	6.5	2.1	0.2	0.1	0.0
	5							3.3	4.2	4.6	0.3	0.0	0.0
	6									0.8	7.1	0.0	0.3
	7					沖待ち時間					0.5	0.0	0.1
	8											0.4	0.0
	9											6.3	0.0
	10											9.6	0.0
	11											7.4	0.0
	12											4.1	3.2
	13												10.0
	14												1.0

凡例
- 通常航行
- 錨泊信号（船速3kt以上）
- 船速3kt未満2時間以上
- 錨泊信号 & 船速3kt未満

※各セルの数値は平均船速（kt）

沖待ちコンテナの時間・量の指標として，ターミナルの 1 ヶ月のバース延長当たりのコンテナ沖待ち時間・量 W（時・TEU/m/月）を式(1)と定義する．

$$W = \sum_{Ship} \frac{V_{Ship} \cdot T_{Ship}}{L_{Berth}} \quad (1)$$

ここに，V_{Ship}：各船の積載実入コンテナ量（TEU），T_{Ship}：各船のターミナルにおける沖待ち時間，L_{Berth}：ターミナルのバース長（m）である．積載実入コンテナ量は，各船の TEU Capacity：TEU_{Ship} を用いて式(2)で推計した．

$$V_{Ship} = \alpha \cdot TEU_{Ship} \quad (2)$$

ここに，α：消席率は，各船が実際に積載していた実入りコンテナ量の把握が困難であることから，Drewry[5]における 2019 年の世界の長距離コンテナ航路の平均消席率：62.9 %を踏まえて 60 %と設定した．各船の TEU Capacity については，Lloyd's List Intelligence や MDS のデータベース，運航船社の Web Page 等により特定したが，ごく一部の不明船については，岩崎・山形[6]より，載貨重量トン数：DWT_{Ship} を用いて式(3)により推計した．

$$TEU_{Ship} = \beta \cdot DWT_{Ship} \quad (3)$$

ここに，β：変換係数（0.0858）である．

3. 世界及び日本の主要港湾・ターミナルの沖待ち状況の分析

3.1 世界の主要港湾・ターミナルの沖待ち状況

ここでは，世界の主要港湾・ターミナルにおける沖待ち状況の把握結果を示す．前述のとおり，東西基幹コンテナ航路の約 8 割の遅延が欧米及び中国の港湾で発生していた[2]ことを踏まえ，対象港湾は，Los Angeles/Long Beach，Rotterdam，上海（洋山）及び寧波港とし，対象期間は 2019 年 10 月の 1 ヶ月とした．対象ターミナルの概要を，**表-2** に示す．

表-2　対象ターミナル（世界，2019 年 10 月）（1/2）

港湾	ターミナル	バース長（m）	週着岸数（隻）
Los Angeles	APMT	2,230	4.1
	China Ship.	764	2.3
	Eagle Marine	1,216	2.3
	Ever Green	1,648	1.8
	TraPac	1,650	1.8
	Yang Ming	1,236	2.0
	Yusen	1,864	2.7
Long Beach	Pier A	1,097	4.1
	Pier C	549	2.0
	Pier E	865	1.8
	Pier G	1,622	2.3
	Pier J	1,806	2.0
	Pier T	1,524	5.9
Rotterdam	APMT MV2	1,000	15.1
	APMT	1,600	23.3
	ECT Delta-N	1,030	13.3
	ECT Delta-S	2,650	50.6
	Euromax	1,500	40.0
	RWG	1,700	33.9

※週着岸数はAISデータによる算定

表-2　対象ターミナル（世界，2019 年 10 月）(2/2)

港湾	ターミナル	バース長（m）	週着岸数（隻）
上海（洋山）	Phase I-II	3,000	21.9
	Phase III	2,600	17.6
	Phase IV	2,350	15.8
寧波	BSCT	1,258	22.1
	Daxie	1,500	18.3
	Ganji	1,700	20.8
	Meishan	1,800	29.4
	NBCT	1,258	26.0
	Yuandong	1,700	25.7

※週着岸数はAISデータによる算定

各ターミナルの沖待ち状況の把握結果として，沖待ち隻数割合とバース延長当たり沖待ち時間・量を，**図-6** に示す．この期間中，Los Angeles/Long Beach 港ではほとんど沖待ちがなかった．一方，Rotterdam，上海及び寧波港は，ターミナルによるが，着岸船の約 2～4 割が沖待ちをしていた．Rotterdam 港 APMT MV2 ターミナルや寧波港 NBCT ターミナルでは沖待ち隻数割合が 4 割を超え，沖待ち時間・量も非常に多くなっていた．沖待ち船が多くなると，大きな船の沖待ちや長い沖待ちが生じやすくなることが想定された．なお，Long Beach 港の Pier A では 1 隻だけ 1 週間以上に及ぶ長期の沖待ちが見られたが，スケジュール上の予定着岸日に着岸をしていたことから，船社の都合でのスケジュール調整とみなして，データから控除した．また，Rotterdam 港では河川を利用したバージ輸送が行われているが，コンテナ船のみを対象とした AIS データでは把握できなかったため，分析対象に含まれていない．

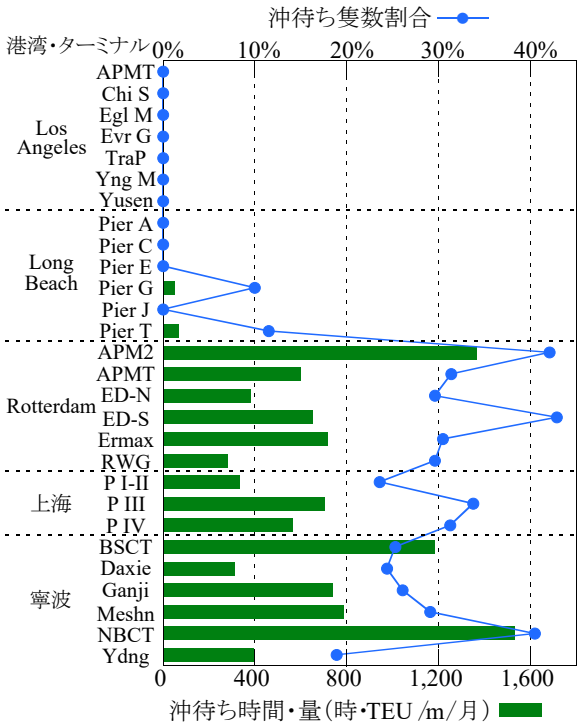

図-6　沖待ち隻数割合及び沖待ち時間・量（世界）

全体として，各船がどれだけの時間沖待ちしたのかをヒストグラムにより示したのが，**図-7** である．およそ 6 割が半日以内であったが，一方で 1 日を超えて沖待ちをしていた船が 14 %に達していた．

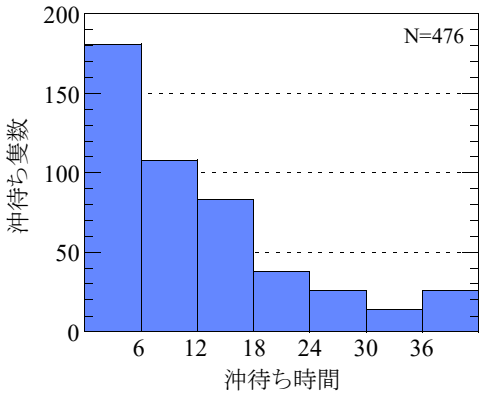

図-7　沖待ち時間ヒストグラム（世界）

3. 2 日本の主要港湾・ターミナルの沖待ち状況

日本の主要港湾・ターミナルについて，前節と同様に沖待ち状況を把握した．対象港湾は，東京，横浜，大阪及び神戸港であり，連続バースで基幹航路等が着岸している主要ターミナルを対象とした．対象期間は，2019 年 10 月及び 2021 年 1 月のそれぞれ 1 ヶ月である．2021 年 1 月時点の対象ターミナルの概要を，**表-3** に示す．なお，東京港では，2020 年 3 月に中防外ターミナル第 2 バースが供用開始し，青海ターミナル第 3 バースユーザーが移転したことから，2021 年では中防外ターミナルを対象に加えた．また，横浜港では，2020 年 8 月に南本牧ターミナル第 4 バースが暫定で供用開始しているが，暫定のため本分析の対象外とした．

表-3　対象ターミナル（日本，2021 年 1 月）

港湾	ターミナル（バース）	バース長（m）	週着岸数（隻）
東京	青海（A0~2,4）	1,570	21.9
	大井（O1~7）	2,354	45.8
	中防外（Y1~2）	630	16.7
横浜	本牧BC	1,150	34.1
	南本牧（MC1~3）	1,390	34.3
大阪	咲洲（C8~9）	1,500	13.5
	夢洲（C10~12）	1,400	29.4
神戸	PI（PC14~17）	700	54.2
	RI（RI2,4~5）	1,350	19.2

※週着岸数はAISデータによる算定

各ターミナルの沖待ち隻数割合とバース延長当たり沖待ち時間・量を，**図-8** に示す．2 つの対象期間において，日本の主要港湾・ターミナルでは，着岸船の 1～3 割が沖待ちをしており，沖待ち時間・量はいずれも 300 時・TEU/m/月以下で，ターミナルにより差があるものの，全般的には，両期間で同じレベルにあった．この図は，**図-6** と同じスケールであるが，日本の港湾・ターミナルの沖待ち時間・量は，Los Angeles/Long Beach 港よりは多く，Rotterdam，上海及び寧波港に比べて少ないレベルにあった．なお，2019 年 10 月には，台風 19 号が首都圏を通過しており，その影響があった 10 月 10～13 日における港外待避は，沖待ちから除いた．

全沖待ち船の沖待ち時間を集計して，ヒストグラムにしたのが，**図-9** である．全般的な傾向は，世界の**図-7** と同様であったが，半日未満の割合が 3/4 を占め，1 日以上の割合は 1 割弱であり，**図-7** に比べて，平均的には少し沖待ち時間が短かった．

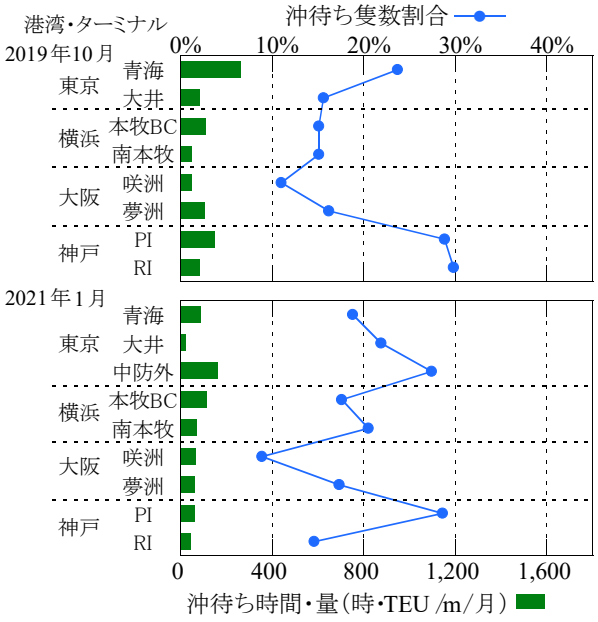

図-8　沖待ち隻数割合及び沖待ち時間・量（日本）

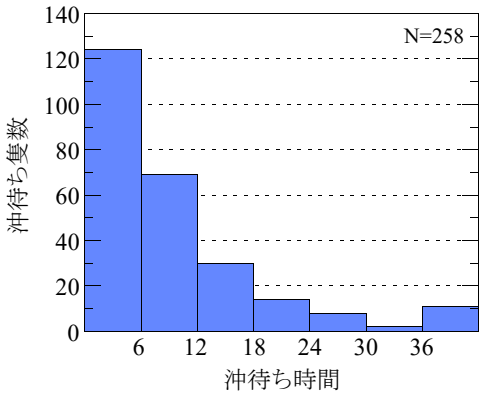

図-9　沖待ち時間ヒストグラム（日本，2019 年）

ここで，沖待ち時間・量で比較すると，**図-8** の日本の主要港湾・ターミナルは**図-6** の Rotterdam，上海及び寧波の主要ターミナルに比べて少なかったのに対し，各船の沖待ち時間の**図-9** と**図-7** の比較では，それほど大きな差が見られなかった．このことは，両者において，沖待ち量，すなわち，沖待ちした船舶の大きさに大きな差があることが想定された．そこで，世界及び日本のそれぞれの 3 つのターミナルについて，着岸船と沖待ち船の船腹量シェアを比較した結果が，**図-10** である．左図の世界では，着岸船と沖待ち時間・量の船腹量シェアがある程度似ていたのに対して，右図の日本では，東京港大井ターミナル及び横浜港南本牧ターミナルにおいて，8,000 TEU 以上船の沖待ちはほとんどなく，大半が 4,000 TEU 未満であり，着岸船に比べて，沖待ち時間・量は，明らかに小さい船型に偏っていた．日本のターミナルでは，東西基幹航路等の大型船を優先し，国内港湾を結ぶ国際フィーダー船（500 TEU 未満）やアジア近海航路（500～4,000 TEU）が相対的に多く沖待ちをしている傾向があることが分かった．

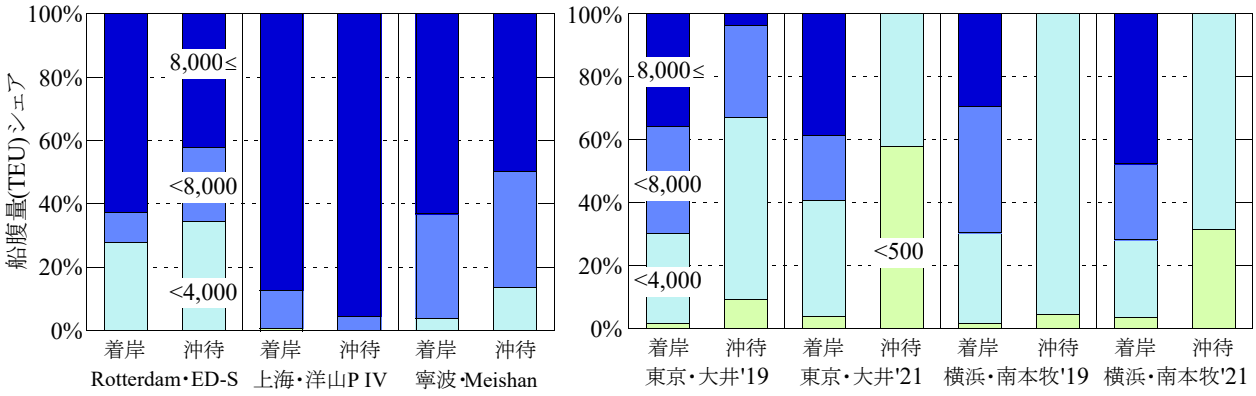

図-10　着岸船及び沖待ち時間・量の船腹量シェア（左：世界，右：日本）

3.3 沖待ちとターミナル運営状況の関係性の分析

これまで把握してきた沖待ちの状況について，ターミナルの運営状況との関係性について分析する．本来，全ての船が定刻に着岸・離岸すれば沖待ちは生じないが，到着遅延や着岸時間の長期化により，バースに空きがないことによって到着した船が沖待ちを強いられる．そのため，沖待ちが発生するかどうかは，バースにどれだけの空きがあるか，すなわち，混雑度に大きな影響を受けると想定される．そこで，この混雑度の指標として，赤倉・安藤[7]による式(4)のバース占有率 R を使用する．

$$R = \frac{\sum_{Ship}\left(BL_{Ship} \cdot BT_{Ship}\right)}{L_{Berth} \cdot T_{All}} \tag{4}$$

ここに，BL_{Ship} ・ BT_{Ship} ：各船のバース占有長（綱取りに必要な長さを含む）及び時間，T_{All} ：算定を行った全時間である．

バース占有率とバース延長当たりの沖待ち時間・量との関係性を**図-11** に示す．全般的に，バース占有率の増加に対して，沖待ち時間・量がべき乗で増加しており，占有率が 30 %台半ばを超えると，沖待ち時間・量が大幅に多くなる可能性があると言える．なお，バース占有率が 100 %よりかなり小さくても沖待ちが発生するのは，スケジュールが曜日や時間帯によって偏っている場合が多く，また，多様な大きさの船が着岸するため，着岸時にもかなりの空きスペースがあるためである．

一方で，**図-11** では，回帰曲線の再現性はそれほど高くはなく，大きく乖離しているターミナルも見られた．その要因の一つが，スケジュール特性と考えられる．**図-12** に，Los Angeles 港 Eagle Marine ターミナルと Rotterdam 港の RWG ターミナルのスケジュール上の着岸位置・時間を表すバース・ウィンドウを示すが，両ターミナルのバース占有率が約 4 割で同レベルであるにもかかわらず，

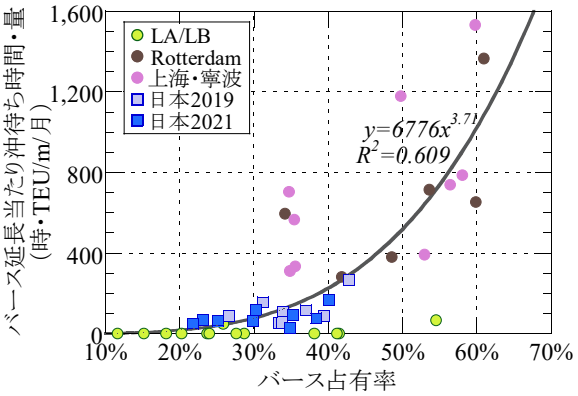

図-11　バース占有率と沖待ち時間・量の関係

沖待ち時間・量には大きな差があった．Eagle Marine ターミナルでは，3 つの本船用バースに 3 つのサービスが着岸しており，同サービスの前船に追いつかない限り沖待ちは生じず，実際に生じていなかった．一方，RWG ターミナルでは，数多くの本船サービスとフィーダーサービスが着岸するスケジュールであり，本船間においても着岸間隔が短い部分が多く存在していた．このようなスケジュールの場合，到着船の遅延や着岸時間の長期化によって，沖待ちが生じやすい．なお，**図-12** の両ターミナルのバース占有率は対象期間中の実際の数値であり，スケジュールから算定されるものとは異なる．

多くの船が離着岸を繰り返すターミナルは沖待ちを生じやすい可能性が想定されたため，着岸船腹量と沖待ち時間・量との関係性を見たのが，**図-13** である．着岸船腹量の多い，すなわち，離着岸回数が多く，船型が大きいほど，沖待ち時間・量が大きくなっていたが，べき乗の回帰曲線より回帰直線の方が，わずかに再現性が高かった．

これらの関係性を踏まえ，ターミナル運営の目安として，沖待ち時間・量に対するバース占有率（**図-12**）と着岸船腹量（**図-13**）との関係を一つにまとめたのが，**図-14**

Los Angeles / Eagle Marine（バース占有率：38.1%，沖待ち時間・量：0時・TEU/m/月）

バース	日	月	火	水	木	金	土
本船用-1	AAS2						
本船用-2	SEA2				SEA2		
本船用-3		APL-EX1					

Rotterdam / RWG（バース占有率：41.8%，沖待ち時間・量：282時・TEU/m/月）

バース	日	月	火	水	木	金	土
フィーダー用-1		ISX4			EURO MAR		NL/FR
フィーダー用-2		SX1			NIX1		
本船用-1	FP1 NETH3 IBESCO UK4		AEU6	ATG1	NOR2	AEGEAN	FP1
本船用-2	NIX2 LOOP E	AEU2	FE3		FE4	PFX2 UKEC	LOOP E
フィーダー用-3	LOOP E	NOR4 SEC11	IBESCO	LOOP E	UK WC ECUK1	RFS	LOOP E
フィーダー用-4	UKWC	LOOP C	NOR3	SCA	BGX	NPX	UKWC

本船については，全てスケジュールを使用したが，フィーダー船はスケジュールが把握できない場合，実績から平均的な着岸・離岸時刻を設定した．

図-12　バース・ウィンドウの例（2019 年 10 月時点）

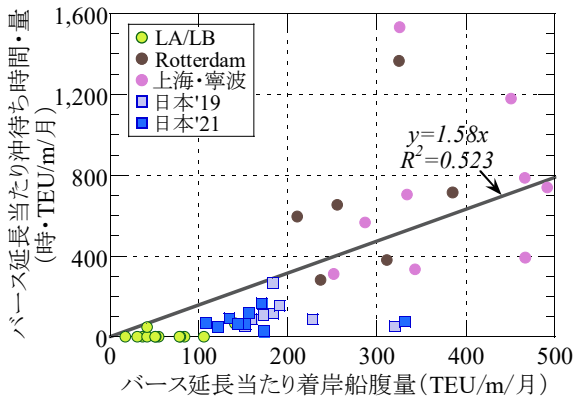

図-13　着岸船腹量と沖待ち時間・量の関係

である．沖待ち時間・量を，小：100 時・TEU/m/月未満，中：100 時・TEU/m/月以上 700 時・TEU/m/月未満及び大：700 時・TEU/m/月以上に分類した．この図に基づけば，バース占有率：約 30 %以上かつ着岸船：約 150 TEU/m/月以上において 100 時・TEU/m/月以上の沖待ちが，バース占有率：約 50 %以上かつ着岸船：約 300 TEU/m/月以上で 700 時・TEU/m/月以上の沖待ちが生じる傾向があると見ることができる．

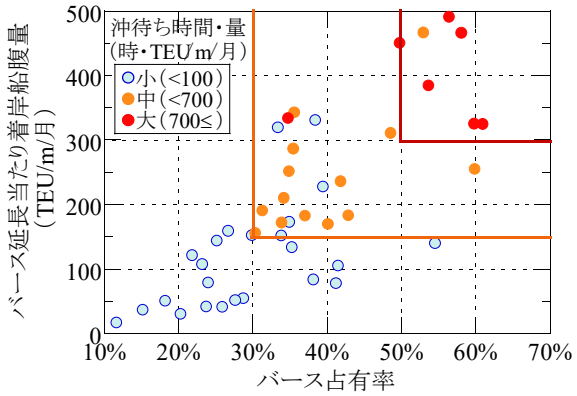

図-14　バース占有率，着岸船腹量及び沖待ち時間・量の関係

また，どれだけ着岸船が遅延し，着岸時間が延びたのかも，沖待ちが発生する引き金として影響していると想定される．世界の各ターミナルについて，到着遅延と着岸時間長期化の実績を確認した結果が，**図-15** 及び**図-16** である．スケジュールが確認出来た長距離の本船のみを対象とした．**図-15** では，約 6 割～全ての船が遅れて到着しており，特に，寧波港 NBCT では 2 日以上の遅延が約 1/3 も占めていたが，同ターミナルはバース延長当たりの沖待ち時間・量が 2019 年 10 月の調査対象ターミナルの中で最も多かった．**図-16** では，約 6～9 割の船の着岸時間が時間内に収まっており，着岸時間が 2 日より多く超過したケースはなかった．この結果から見ると，2019 年 10 月時点では，着岸時間の長期化より到着の遅延の方が沖待ち発生に大きく影響していたと推察される．

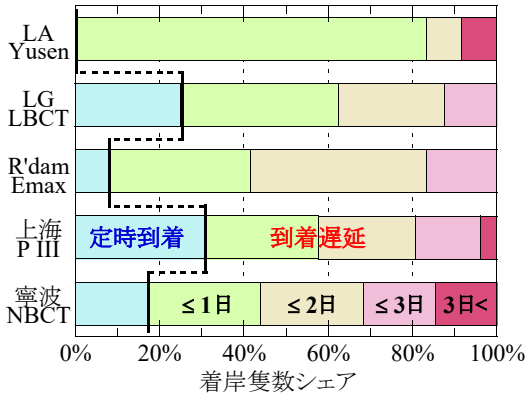

図-15　各ターミナルでの到着遅延の状況

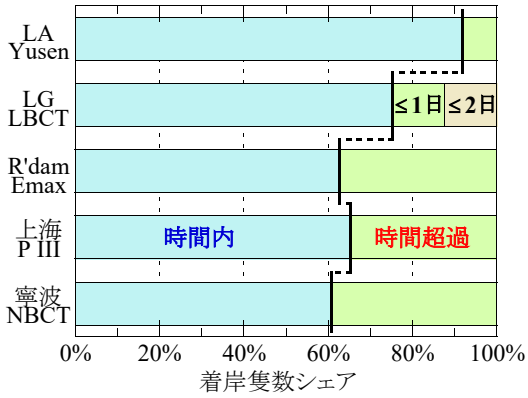

図-16　各ターミナルでの着岸時間長期化の状況

3. 4 コンテナ船の沖待ち削減による定時性向上方策

コンテナ船の遅延の多くが港湾・ターミナルでの沖待ちや荷役の長期化に起因しており，Notteboom[8]によれば，東西基幹航路の遅延の約 2/3 は港湾・ターミナルの混雑が原因である．この状況下でコンテナ船の定時性を向上させるためには，ターミナル混雑が遅延を発生させ，遅延が沖待ちを発生させるとの悪循環を解消するのが有効である．その一つの方法として，ターミナルにおけるバース割り当ての最適化があり，Lai and Smith[9]，今井・西村ら[10),11)]，Bierwirth and Misel[12),13)]等数多くの研究が蓄積されており，現場においても既に様々な工夫がなされていると想定される．

一方で，船舶大型化に伴うアライアンスの再編により，サービスが統合され，特定の港湾・ターミナルへの寄港が集中し，混雑をもたらしている．また，ターミナルは，物理的制約内でより多くのサービスを着岸をさせることにより，利益率の向上が図れる．この環境下では，ターミ

ナルは，沖待ちを削減するために，着岸サービスのスケジュールに余裕を持たせるインセンティブはない．

しかし，沖待ちは荷主への貨物の到着を遅らせ，当該サービスの利用者を減少させる方向に繋がり，ターミナルの取扱貨物量に影響を与える可能性がある．この観点からは，沖待ち時間・量がある一定程度以上にならないようにターミナルを運営することが望ましく，そのための目安となる指標として**図-14** のような分析結果は，更なるデータを蓄積していくことにより，有効な情報となり得ると考えられる．すなわち，沖待ち時間・量は，ターミナル運営の健全性を量る指標としても活用可能であり，各港湾・ターミナルにて，統計としての公表が望まれる．現時点では，沖待ち船を公表している港湾は Los Angeles/Long Beach 港のみしか見当たらず，同港も 2021 年 11 月以降は港湾近傍（40 mile 以内）の新たな錨泊が禁止されたことから，沖待ち船の実数が把握できなくなった．

統計により沖待ち状況が比較可能となれば，ターミナル間の競争の促進にも繋がり，スポット貨物を予約する荷主は，沖待ち時間・量の多い港湾・ターミナルを避けたサービスの予約が可能となる．**図-17** は，Marine Traffic[4] において，月 4 回程度，各港の沖合で錨泊していたコンテナ船の隻数を確認した結果を月別に集計した結果であるが，2019 年 10 月には沖待ちがほとんどなかった Los Angeles/Long Beach 港では，2020 年の冬期には，後述するように，沖待ち隻数が大幅に増加していた．ただし，このデータは Los Angeles/Long Beach 港の公式統計とは差異がある．もし，このようなデータが，多くの港湾の公式データにおいて，ターミナル別に把握可能となれば，荷主のサービス選択における参照情報が増加し，輸送の定時性向上に繋がる可能性がある．

ターミナルの混雑度を下げる方法としては，バースの拡張整備やガントリークレーンの増設等の能力増強があり，その効果は確実であるが，多くの費用と長い時間が必要となる．日本の主要港湾・ターミナルにおいては，沖待ちが小型船に偏っていたが（**図-10**），国際フィーダー船を運航する井本商運 [14]は，外航船優先の運営により国際フィーダー船に沖待ちが発生していることから，本船用バースに隣接した国際フィーダー船のバース整備を要望している．Rotterdam 港では，APMT MV2 及び RWG ターミナルにはバージ用バースがあり，ECT Delta ターミナルや APMT に隣接する RCT もフィーダー船及びバージ用であり，専用のバースを整えている．一方，日本では，神戸港では，PI ターミナル PC-17 の南隣と RI ターミナル RC-6 の西隣にフィーダー船用のバースがあり，横浜港では本牧 CD が整備中であるが，東京・大阪の両港湾では見当たらない．ただし，東京港 [15]では，港湾計画改訂に向けた長期構想において，国際フィーダー船専用バースの整備と外貿埠頭へのシームレスな接続の必要性が記載されている．

また，隣接ターミナルの一体的な運営による運営規模の拡大も，統合前の各ターミナルのピークが異なる場合，空いているバース延長を確保出来る可能性が高くなるし，長いバースを連続して運用することで，同じ占有率においても空きバース延長が長くなるため，着岸できる可能性が高まる．**図-18** に東京港大井ターミナルのオペレーター単位でのバース占有率を示す．同ターミナルは，7 バースが 4 オペレーターにより運営されているが，バース占有率が高い時間帯はターミナルによって異なっており，バースの融通による沖待ち削減の可能性がある．例えば，1 月 21 日の午前は，5 バースはほとんど占有されていた一方，6-7 バースは着岸船がなかった．

主要港湾では，多くのオペレーターが運営するターミナルが併存し，同一アライアンスが複数のターミナルに分けて寄港していることもめずらしくない．**表-4** に，AIS データにより，Los Angeles，Rotterdam，寧波及び東京港（2021 年 1 月）での 3 大アライアンス構成船社の所属船の着岸ターミナルを整理したが，Los Angeles 港の 2M 以

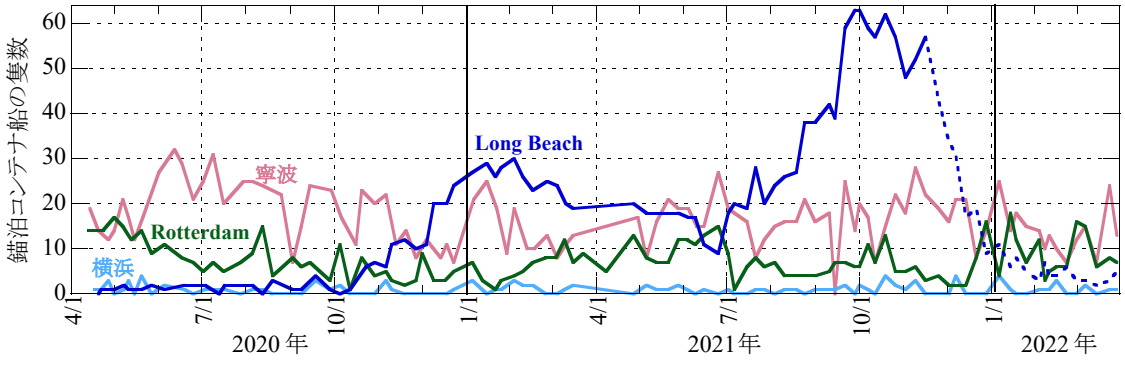

図-17　Marine Traffic[4]における各港沖合の錨泊コンテナ船の隻数の推移

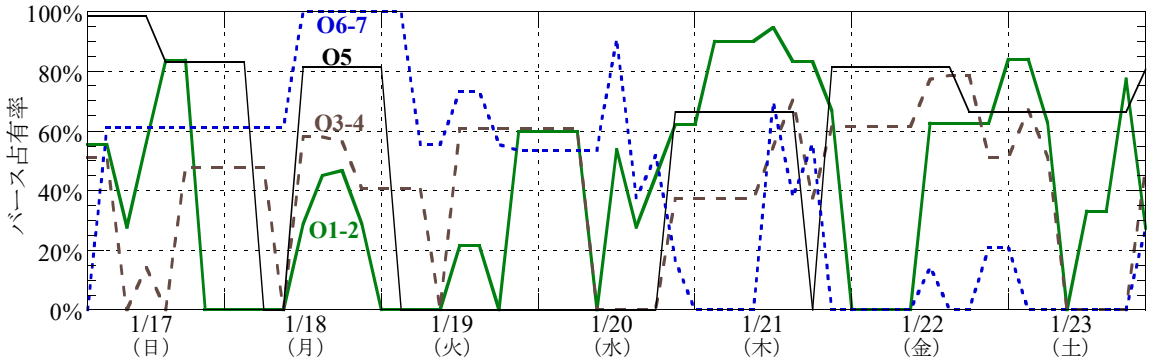

図-18　東京港大井ターミナルのバース占有率の推移（2021 年 1 月，3 時間毎）

表-4　各港のアライアンス所属船の着岸ターミナル

Alliance	Los Angeles	Rotterdam	寧波	東京
2M	APMT*	APMT APMT MV2* ECT D-N*	Ganji* Meishan	大井6-7 中防外2
The Alliance	China S* Tra Pac* Yang Ming* Yusen*	ECT D-S* RWG*	BSCT Daxie Meishan NBCT	青海0-2 大井1-2* 大井3-4* 大井6-7*
Ocean Alliance	China S* Fenix M* Ever Port*	ECT D-S Euromax* RWG*	Daxie Meishan NBCT Yuandong*	青海0-2 青海4* 中防外1

*構成船社もしくは船社系オペレーターの出資，借り受けを示

外，同一アライアンス船が複数ターミナルに着岸していた．アライアンス構成船社もしくは船社系オペレーターが運営・出資しているターミナルが複数あるために，分散して着岸している可能性も想定される．

ターミナル運営規模拡大の動きとしては，Singapore 港では，新 Tuas ターミナル完成後には，現存 5 ターミナルを全て新ターミナルに集約させ，横持ち輸送をなくして効率的な運営を確保するとしている．香港港では，2019 年に既存 4 ターミナルが Hong Kong Sea Port Alliance を結成し，その運営を一体化した．日本でも，神戸港において 2016 年に PC15-17 の一体運営が開始され，横浜港でも 2020 年に南本牧ターミナル 4 バースが完成して Maersk による一体運営が開始され，ONE も着岸を集約させている．東京港でも，港湾計画改訂に向けた長期構想において，バースウィンドウ・ガントリークレーンの相互融通によるターミナルの一体的利用が掲げられている．このような一体運営の推進により沖待ちの削減が期待できるが，一方で，船社は，融通の利く専用ターミナルを指向する傾向もあり，また，運営規模が大きくなると，各船の着岸場所の決定において，当該船に積載するコンテナの蔵置位置との関係性を考慮する必要性が強くなる面もある．

4. 沖待ちによるCO_2排出増加量の推計

4.1 港湾にかかる地球温暖化対策の状況

我が国において，2050 年カーボンニュートラル実現を目指す一環として，カーボンニュートラルポート（CNP）形成に向けた施策が展開されており，2022 年 3 月末時点で 21 港湾及び 2 地域にて CNP 形成計画の検討会等が立ち上げられ，計画が深められている．また，2021 年 10 月には我が国として国際海運のカーボンニュートラルを目指すことが示され，11 月の IMO（国際海事機関）第 77 回海洋環境保護委員会において，2050 年カーボンニュートラルの目標化の共同提案をしている．その実現に向けて，我が国の大手船会社（日本郵船，商船三井及び川崎汽船）では，いずれも，ゼロエミッション燃料船の開発プロジェクトを始動させている [16]．

一方，詳細は5. にて述べるが，2020年秋以降，国際コンテナ輸送において，輸送需要の急激な増大と新型コロナウイルス影響による能力制約等により，北米や中国を始め世界の多くの港湾で大量のコンテナ船が沖待ちを強いられている．このような状況は，カーボンニュートラルを目指す海運や港湾にとって大きな障害となる可能性が想定されるが，これまで，沖待ちによるCO_2排出の増加量をコンテナ船の航行実績に基づいて推計した研究は見当たらない．IMOは，4th GHG Study[17]において国際海運によるCO_2排出量の現状及び将来予測を行っており，その中でAISデータを用いたボトムアップ・アプローチの排出量推計では，各船の航行や錨泊等の運転モードに応じた排出量を積み上げて推計しているが，沖待ちは特定されていない．CNP形成計画マニュアル[18]は停泊中の船舶のみが対象であり，環境省による届出外排出量推計[19]における船舶にかかる排出量推計では，港湾区域内の航行は対象となっているが，沖待ちは考慮されていない．また，酒井・渡邉[20]は，我が国のコンテナターミナルのCO_2排出量を推計しているが，沖待ちはないと設定されている．

表-5　東京湾の全コンテナターミナルの沖待ち状況（2021 年 1 月）

港湾	東京				川崎	千葉	横浜				合計
ターミナル	品川	青海	大井	中防外	東扇島	千葉中央	大黒	本牧BC	本牧D	南本牧	
沖待ち隻数	15	18	40	20	12	4	1	26	27	30	193
沖待ち船の割合	23%	19%	20%	27%	25%	27%	2%	18%	28%	20%	21%
平均沖待ち時間	8.4	11.1	7.5	12.4	7.8	10.5	1.0	8.5	11.5	8.7	9.3

以上の状況を踏まえ，本章では，東京湾の全コンテナターミナルを対象に，沖待ちを含む着岸船の航行速度を把握することにより，沖待ちによる CO_2 排出の増加量と，その対策の効果を推計する．

4.2 排出量推計手法

沖待ち船の把握方法は，3. で述べたとおりであり，2021 年 1 月の全ターミナルの沖待ち隻数，隻数割合及び平均沖待ち時間を，**表-5** に示す（東京・横浜港の主要ターミナルの隻数割合については**図-8** の再掲）．各船の CO_2 排出量については，入湾もしくは他ターミナル離岸からの各時の平均航行速度及び停泊時間を整理し，IMO[17]をベースとして，航行時及び着岸時の CO_2 排出量を推計した．

主機の出力は，航行時の海水抵抗，すなわち，浸水断面積と，速度の 3 乗に比例する [21]ことから，IMO[17]のデータより，定格出力 W_d (kW)を(5)式により定式化した．

$$W_d = 0.046 \cdot B \cdot d_d \cdot v_d^3 \qquad (5)$$

ここに，B ：船幅(m)，d_d ：満載喫水(m)，v_d ：設計速度(m/s)である．載貨重量トン数に対して，IMO[17]によるデータ及び本研究の推計式による定格出力を**図-19** に示す．IMO[17]では船の TEU 階級毎に設計速度が示されているため，本研究の推計式には不連続点があるが，IMO[17]による離散データを良く再現できていることが確認できた．なお，図では載貨重量トン数に対して平均的な船幅と満載喫水の数値を用いて示したが，実際の推計では，各船の諸元値を直接用いた．

実際の航行時の主機出力 W_n (kW)は，航行速度 v_n (m/s)を用いて(6)式により推計した．

$$W_n = \frac{(d_n/d_d)^{0.66} \cdot (v_n/v_d)^3}{\eta_w \cdot \eta_f} \cdot W_d \qquad (6)$$

ここで，各船の航行時喫水：d_n (m)は把握が困難なため，赤倉・高橋 [22]より平均的な状況として，満載喫水の 85%とした．また，η_w ：天候補正係数（0.867，ただし 1,000 TEU 未満：0.909），η_f ：汚れ補正係数（0.917）である．

主機の燃料消費量 FC_m (g/h)は，エンジン及び燃料油タイプ別の消費率 SFC (g/kW/h)及びエンジン負荷率 L を用い(7)式により推計した．

$$FC_m = SFC \cdot \left(0.455 \cdot L^2 - 0.710 \cdot L + 1.280\right) \cdot W_n \qquad (7)$$

ここで，エンジン及び燃料油タイプ別の割合は，EMEP/EEA[23]の 2010 年データに対して，2020 年の Clarkson データにより燃料油タイプ割合を更新し，消費率の全体平均は 177 g/kW/h であった．エンジン負荷率の係数は設計速度から離れることよる効率の低下を示している．

補機及びボイラーによる実出力は，IMO[17]においては，船の TEU 階級毎に，運転モード（通常航行，離着岸操船，錨泊及び停泊）毎の出力が整理されていたことから，載貨重量トン数に対して，回帰式を作成して推計した．例として，補機の通常航行及び錨泊時の推計式を**図-20** 及び**図-21** に示すが，いずれも IMO[17]による離散データを良く再現できていた．補機及びボイラーの燃料消費量 FC_s (g/h)は，(8)式により出力 W_s (kW)から推計した．

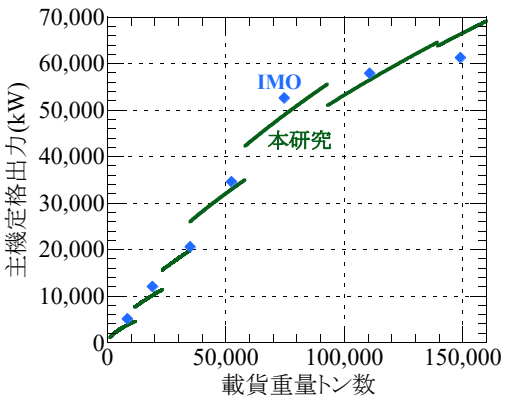

図-19　主機定格出力の推計式

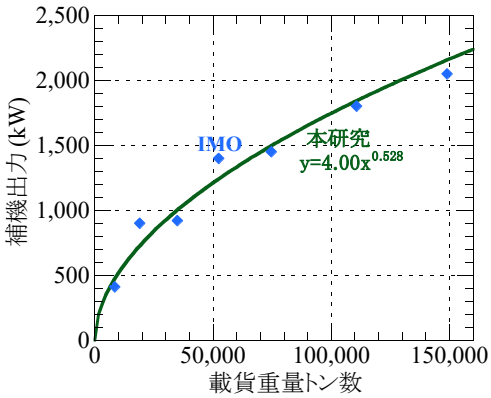

図-20　補機の航行時出力の推計式

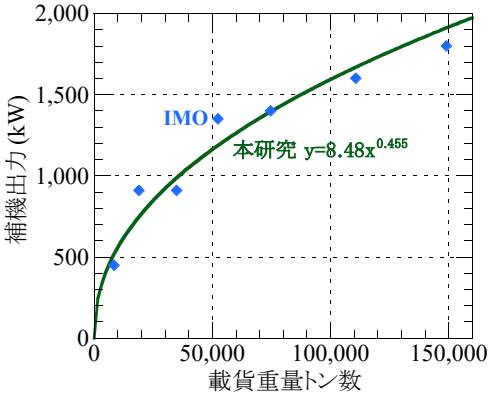

図-21　補機の錨泊時出力の推計式

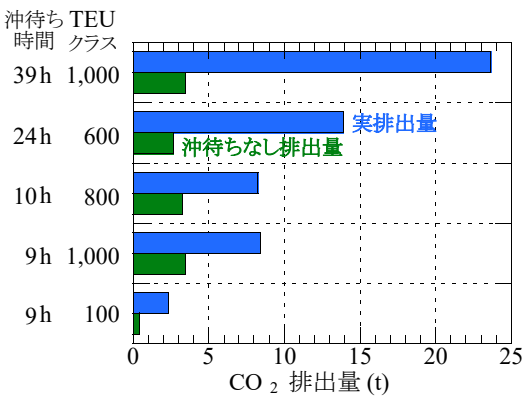

図-22　実排出量と沖待ちなし排出量（入湾～青海 T）

$$FC_s = SFC \cdot W_s \quad (8)$$

時間あたりの CO_2 排出量 EM (g/h)は，主機，補機及びボイラーの合計燃料消費量 FC_{All} (g/h)と，燃料油タイプの割合から，(9)式により推計した．

$$EM = 3.115 \cdot FC_{All} \quad (9)$$

以上の各船の CO_2 排出量推計結果に対して，各船の沖待ちがない場合に想定される排出量を推計し，その差を沖待ちによる CO_2 排出の増加量とした．沖待ちがない場合の排出量は，各ターミナルにおいて，入湾もしくは前着岸ターミナル別に，沖待ちがなかった船舶の平均航行時間及び航行速度を適用して推計した．その結果の例として，東京湾入湾後に東京港青海ターミナルに着岸した沖待ち船の排出量を，**図-22** に示す．実排出量は，船型（TEU 積載能力クラス）が大きく，沖待ち時間が長いほど排出量は多くなった．一方，沖待ちなしの排出量は，航行時間 2.8 時間，船速も他の着岸船の平均値となるため，船型の大小に依存した．沖待ちによる排出の増加量は，最大で約 20 t，最小で約 2 t であった．

4.3 排出量推計結果

東京湾の全ターミナルについて，2021 年 1 月停泊コンテナ船の CO_2 排出量及び沖待ちによる CO_2 排出の増加量を推計した結果が，**表-6** である．東京湾のコンテナターミナルでのコンテナ船の停泊時の月間排出量は，5,091 t となった．この排出量は，CNP 形成計画で削減対象となっている基本となる量であることから，規模を確認するため，年排出量に換算した上で，酒井・渡邉 [20]と比較を行ったのが，**表-7** である．単純比較したところ，酒井・渡邉 [20]による 2003 年時点に対して，排出量で約 2 割削減，排出量原単位では，この 17 年間でコンテナ取扱量が微増であった横浜港で 2 割超，取扱量が約 4 割増加した東京港では 4 割超の改善となっていた．船舶のエンジンの燃焼効率や大型化による輸送効率の改善が大きな要因と想定されたが，推計方法の相違の影響も含まれている．

沖待ちによる CO_2 排出の増加量については，東京湾の全コンテナ船合計で 768 t であり，停泊時の約 15%に相当することが判った．**表-5** において沖待ち船の割合が高く，平均沖待ち時間が長い東京港中防外や横浜港本牧 D ターミナル等では，沖待ちによる増加排出量が大きくなっている傾向が見られたが，沖待ち排出量割合では，着岸船と沖待ち船の船型差も関係していると想定された．

4.4 削減対策の効果推計

IPCC[24]では，船舶による排出量を，各航海の発港と着港が同国内かどうかで，国内海運と国際海運に分類して

表-7　停泊時排出量の既往研究 [20]との比較

項目	港湾	酒井・渡邉（2003年）	本研究（2020年）	差
CO_2 年排出量 (t)	東京港	39,176	32,506	-17.0%
	横浜港	31,550	25,121	-20.4%
排出量原単位 (kg-CO_2/TEU)	東京港	12.9	7.6	-41.0%
	横浜港	13.3	10.4	-22.0%

表-6　各ターミナルの停泊時及び沖待ち CO_2 排出量推計結果（t/月）

港湾	東京				川崎	千葉	横浜				合計
ターミナル	品川	青海	大井	中防外	東扇島	千葉中央	大黒	本牧BC	本牧D	南本牧	
停泊時排出量	296	712	1,333	419	140	56	188	680	537	729	5,091
沖待ち排出量	95	98	90	108	26	22	1	96	139	94	768
沖待ち割合	32%	14%	7%	26%	19%	39%	0%	14%	26%	13%	15%

いる．前者は国としての CO_2 排出量に算入されるが，後者は特定の国には属さずIMOにおいて排出量削減の議論がなされている．そのため，日本の港湾に寄港するコンテナ船の沖待ちは，定義上，日本と国際海運の排出量に分けられ，それぞれが削減を検討することとなる．ただし，環境省[19]では，この分類での排出量推計が困難であることから，便宜上，港湾区域内の航行は国内排出量とみなして推計している．一方，CNP形成計画[18]においては，船舶の航行時の排出量は対象となっていない．

このような状況の中で，沖待ちによる CO_2 排出量の削減について，既往の研究では，川嶋[25]が，みなしETA（Estimated Time of Arrival：到着予定時刻）を用いた港湾予約サービスを提案している．Global Industry Alliance[26]も，船舶の Just-In-Time Operation として，各船が着岸可能となるRTA（Requested Time of Arrival：指定到着時刻）を現状より早い段階で入手することによる沖待ちの削減を検討している．

これらの例を参考に，東京湾におけるコンテナ船の沖待ち削減の対策を，**図-23** に示すように二種類検討した．現状では港湾近傍到着までにRTAを確認し，必要に応じ沖待ちすることとなっているが，対策①湾内減速では東京湾入湾時点でRTAを確認し，着岸まで減速航行する方法である．**図-24** にイメージを示すが，入湾後に一定の速度で航行することにより，排出量を抑えることができる．東京湾内の港湾間移動の場合も，出港時にRTAを確認することで同様の減速航行が可能となる．さらに，対策②湾内外減速では，湾内での港湾間移動の対策①に加えて，東京湾外から入湾する船舶については，太平洋航行時（数日前）にRTAを確認し，東京湾内では通常航行可能なように，東京湾入湾まで減速航行で時間調整をする方法である．推計上，湾内は通常航行としたが，後述するように数日後のRTAは不確実性が高く，実際には東京湾内でも減速航行が必要となることも想定される．一方，ここでは，太平洋航行時の減速による排出量削減は算入しなかった．また，いずれの対策でも，同港湾内のターミナル移動（同ターミナルでの一時沖合待機を含む）における沖待ちは削減できない．

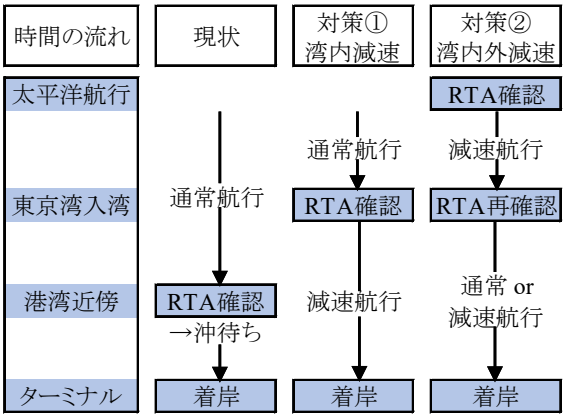

図-23　東京湾入湾～着岸の沖待ち削減対策のイメージ

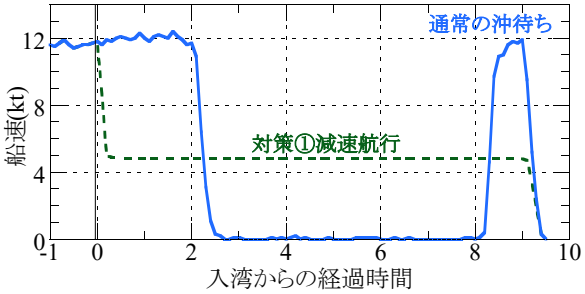

図-24　削減対策①の船速推移のイメージ

各沖待ち船に対して，対策①及び②を施した場合の CO_2 排出量削減効果の推計結果を**表-8** に示す．ターミナルにより効果は異なるが，全体では，対策①湾内減速の実施により沖待ちによる排出量増を概ね半減させることができ，対策②湾内外減速により排出量増の約 3/4 を削減できるとの結果であり，排出量増を大幅に抑制できる可能性があることが判った．

比較のために，**表-8** においては，③LNG二元燃料船就航及び④陸電供給の CO_2 削減量も推計した．③LNG二元燃料船については，同船が2020年時点の新造船と同じ割合で寄港すると仮定した場合で，③1)停泊時の削減量及

表-8　各ターミナルでの沖待ち削減による CO_2 排出量削減効果の推計結果（削減量：t/月）

港湾	東京				川崎	千葉	横浜				合計
ターミナル	品川	青海	大井	中防外	東扇島	千葉中央	大黒	本牧BC	本牧D	南本牧	
①湾内減速	62	52	63	72	3	12	0	50	55	48	417
沖待ち削減率	65%	52%	71%	67%	13%	54%	11%	52%	40%	52%	54%
②湾内外減速	86	70	75	104	11	12	0	91	64	67	579
沖待ち削減率	90%	71%	83%	96%	43%	56%	11%	94%	46%	71%	75%
③1) LNG船停泊	13	32	59	19	6	2	8	30	24	32	226
③2) LNG船湾内	36	70	137	50	12	5	14	54	46	64	487
④陸電供給	55	127	234	76	26	10	34	123	94	128	907

び 2)停泊及び航行時の削減量である．航行時の削減量の推計では，出湾時は入湾時と同じ量が削減されるとみなした．④陸電供給については，米国カリフォルニア州港湾において，陸電供給施設の設置完了（2014 年）時の目標が着岸船舶の 50%以上での供給となっていたことから，陸電により補機の排出量が半減する [20]と設定した．沖待ち削減対策と比較をすると，対策①湾内減速は③1)停泊時の削減量を超え，対策②湾内外減速では③2)停泊及び航行時の削減量を超えるが，④陸電供給には及ばないとの結果であった．

以上の削減対策について，実行上の課題について整理する．対策①湾内減速では，入湾もしくは他港出港時に，さらに，②湾内外減速では，東京湾入湾の数日程度前に RTA がほぼ確定している必要がある．RTA はターミナルの着岸船の状況や他船の遅延により変化するので，実際には，随時の調整が必要となり，推計結果ほどの削減が難しい場合も想定される．また，長い時間沖待ちしていた船は，減速航行の平均速度が低く設定されているが，航路航行において他船との関係性に考慮が必要なほか，固定ピッチプロペラ船（2020 年 3 月時点で，プロペラの種別が判明した就航コンテナ船の中で，81%の隻数を占める）では主機の安定した回転が得られない速度となっている可能性がある．

なお，2021 年 11 月より，Los Angeles/Long Beach 港では，従来の 40 mile 地点での到着順の入港リストを，前港湾発時点の情報に基づく CTA（Calculated Time of Arrival：推計到着時刻）に変更しており，川嶋 [25]によるみなし ETA に近いシステムに変更されたが，各ターミナルの RTA 決定方法には変更がないため，港湾から 150 mile を超える海域で沖待ちしている船が見られる．

一方で，比較対象とした LNG 二元燃料船の輸送能力は，2020 年時点の就航船ではわずか 0.03%に過ぎない．ただし，インセンティブとして，京浜港では LNG 燃料船の入港料を免除している．また，陸電供給施設も，我が国ではこれから整備が始まる段階にある．

5. サプライチェーン・クライシス下の沖待ち状況の分析

5.1 Los Angeles/Long Beach港の状況

新型コロナウイルス感染拡大の影響により，2020 年の前半はコンテナ輸送量が落ち込んだが，同年夏からの輸送需要の急激な増加と，感染拡大によるターミナル処理能力やドレージ能力の不足，コンテナやシャーシの不足等により，コンテナ船が大量に沖待ちを強いられ，特に欧米において，生活物資やクリスマスのギフトが東アジアから届かないサプライチェーン・クライシスが発生している．

大量の沖待ちコンテナ船については，特に，米国西岸の代表港湾であり，沖待ち隻数を随時公表している Los Angeles/Long Beach 港が大きく報道されていることから，まず，公表されているデータで状況を確認した．**図-25** に，Los Angeles/Long Beach 港の輸出入別実入コンテナ量変化率（対 2019 年同月比）を示すが，輸入量が 2020 年 7 月に増加に転じてから，平均で約 2 割の増加率を示していたのに対し，輸出量は低迷したままで，2021 年後半には 2 割超の減少率も多く見られた．2020 年後半以降，東アジアから米国への輸送需要が増大して，輸送能力の不足により東航（米国輸入）の運賃が高騰する一方，西航の運賃は微増に留まりその差が非常に大きくなっており（**図-26**，Drewry），ドレージ能力の不足もあり，船会社は運賃の安い東航の貨物を輸送するより，空コンテナのままできる限り早く東アジアへコンテナを返却することを優先させているものと想定される．このことが米国輸出を阻害しているとの見方があり，2021 年 5～11 月に米国のコンテナ輸出の 24.5%, 157 億ドルが損なわれたとの推計 [27]もある．このため，米国議会にて，米国連邦海事委員会（Federal Maritime Commission）の船会社への監視権現況化等を盛り込んだ米国改正海運法案（Ocean Shipping

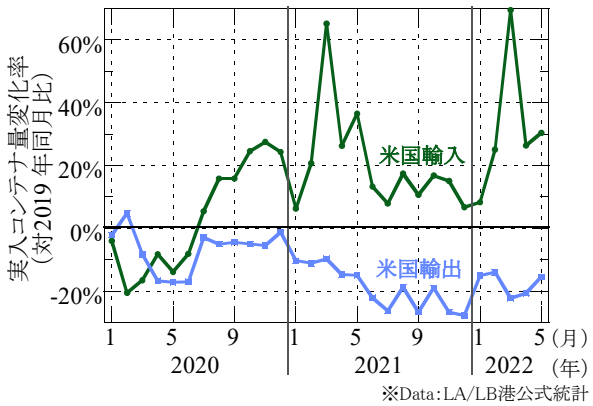

図-25　LA/LB 輸出入別実入コンテナ量変化率

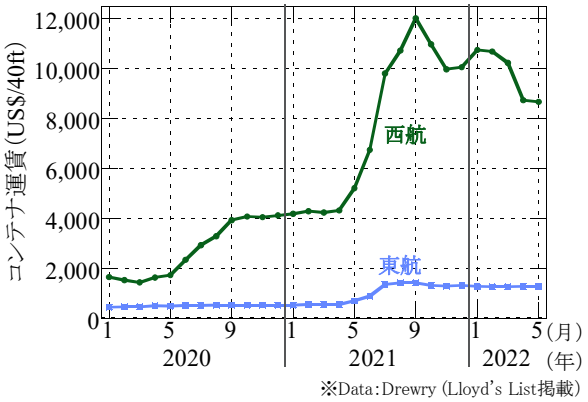

図-26　上海～Los Angeles 東航・西航別運賃推移

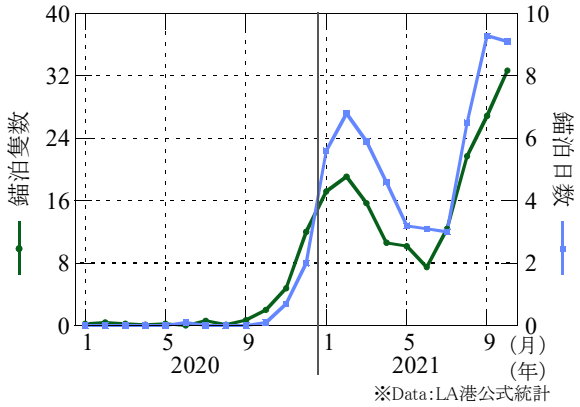

図-28　Los Angeles 港での平均錨泊隻数・日数

Reform Act）が米議会に提出され，2021 年 12 月に下院で可決され，修正案が 2022 年 3 月に上院で，6 月に下院で可決され，同月にバイデン大統領が署名して成立した．同法案には，多くの米国農業団体が支持を表明している．

Los Angeles 港でのコンテナ船の平均着岸日数と Los Angeles/Long Beach 港での輸入コンテナの平均ターミナル滞留日数の推移を，**図-27** に示す．2020 年前半にはいずれも 2～3 日程度であったが，2020 年後半に急増し，着岸日数は 2021 年以降 6 日前後で推移していたのに対し，滞留日数は最大 8 日超にまで達していた．**図-28** は，Los Angeles 港において，40 mile 以内の沖待ちが禁止される 2021 年 11 月より前の，平均沖待ち隻数及び日数の推移であるが，2020 年 9 月までは沖待ちがほとんどなかったのに対し，10 月より急増し，2021 年 2 月に一旦ピーク（錨泊隻数：19.1 隻，錨泊日数：6.8 日）となり，その後減少したものの，2021 年 7 月より再び増加し，10 月時点で錨泊隻数：32.7 隻，錨泊日数：9.1 日となっていた．Los Angeles/Long Beach の両港の合計では，2021 年 11 月 19 日時点で，錨泊隻数：71 隻，平均錨泊日数：16.9 日，最長錨泊日数：55 日であった．

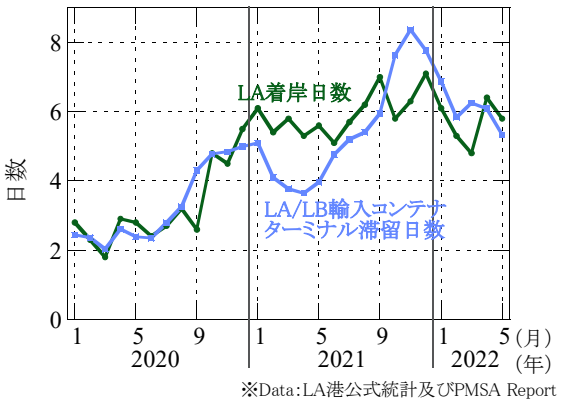

図-27　LA 港の平均着岸日数と LA/LB 港の輸入コンテナの平均ターミナル滞留日数

5. 2 沖待ち把握・分析結果

3. での沖待ち状況の分析については，ターミナルの陸側の要因によりバースへの着岸に大きな制限がない状態で，ターミナル混雑状況や着岸船舶量とある程度の関係性が見られることを明らかにした．しかし，2020 年秋以降のサプライチェーン・クライシス下においては，ターミナルにおいて様々な制約が生じており，この点を踏まえて沖待ち状況の分析を行う．分析対象は，2020 年 11 月～2021 年 1 月の Los Angeles/Long Beach 及び Singapore 港である．**表-9** に，対象ターミナルの概要を示す．Los Angeles/Long Beach 港については，一部のターミナルの名

表-9　対象ターミナルの概要（クライシス分析）

港湾	ターミナル	バース長(m)	週着岸数(隻)
Los Angeles	APMT	2,225	4.7
	Ever Port	1,648	2.1
	Ferix Marine	1,216	3.7
	Trapac	1,652	2.1
	WBCT China S	764	2.8
	WBCT ECT	762	1.6
	Yusen	1,864	4.7
Long Beach	Pier A	1,097	6.5
	Pier C	549	2.1
	Pier E	1,280	3.7
	Pier G	1,171	1.9
	Pier J	1,446	2.6
	Pier T	1,524	4.0
Singapore	Brani	1,000	42.9
	Keppel	1,600	15.2
	Pasir Panjang-1	1,030	25.7
	Pasir Panjang-2	2,650	48.8
	Pasir Panjang-3	1,500	28.7
	Pasir Panjang-4	1,700	13.5
	Pasir Panjang-5	3,000	38.3
	Pasir Panjang-6	2,600	43.9

※週着岸数はAISデータによる算定

称や地形が**表-2** から変化している．なお，長期間の沖待ちが発生していたことを踏まえ，3 ヶ月間の AIS データを使用するものの，中間の 2 ヶ月間（11 月 15 日～12 月 15 日及び 12 月 16 日～1 月 15 日のそれぞれ 30 日間）にターミナルに着岸した船舶を対象とした．

ここで，精度確認のために，Los Angeles 港について，公式統計の錨泊隻数と本研究による沖待ち隻数の把握結果とを比較したのが，**図-29** である．公式統計は日付のみのため，図では，便宜上，各日の 12 時に表示した．日により 1 隻程度の差はあるが，基本的には，Los Angeles 港においては，公式統計の錨泊隻数と本研究による沖待ち隻数は，ほぼ一致をしていた．

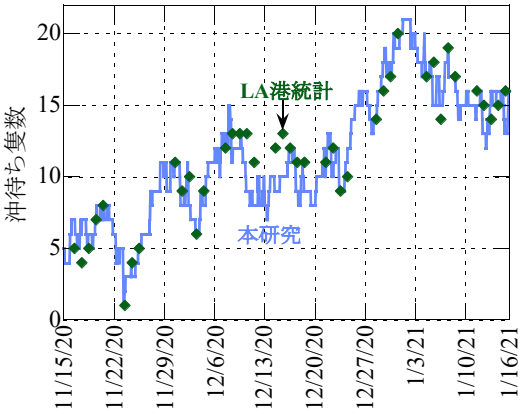

図-29　Los Angeles 港の統計と本研究の沖待ち隻数

以上を踏まえて，Los Angeles/Long Beach 及び Singapore 港の沖待ち隻数の推移を示したのが，**図-30** である．11 月下旬までは Singapore 港の方が多かったが，その後は両港が同程度で推移し，12 月下旬以降は Los Angeles/Long Beach 港の沖待ちが増えており，いずれもピーク時は 30 隻を超える沖待ちが見られた．

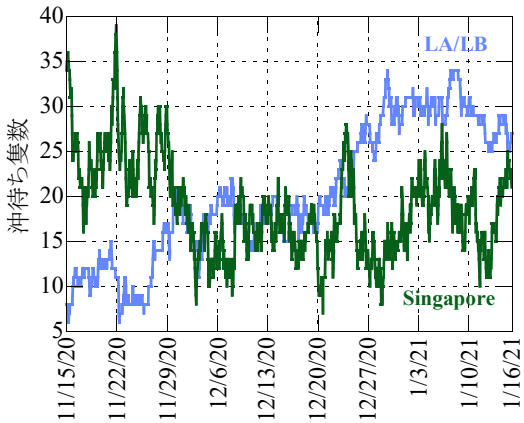

図-30　沖待ち隻数の推計結果

各ターミナルの着岸船に占める沖待ち船の隻数割合とバース延長当たり沖待ち時間・量を，**図-31** に示す．これまで分析した世界（**図-6**）及び日本（**図-8**）に比べて，沖待ち隻数割合も沖待ち時間・量も圧倒的に増加していた．沖待ち隻数割合では，Los Angeles/Long Beach 港では，ほとんどの着岸船が沖待ちをしたターミナルが結構ある一方で，半分以下であるターミナルも見られた．これに対し，Singapore 港では沖待ち隻数割合は 11 月 15 日～12 月 15 日の Pasir Panjang-3 ターミナルを除けば，概ね 2～6 割の範囲に収まっていた．沖待ち時間・量においても，Los Angeles/Long Beach 港ではターミナルにより大きく異なっていたが，Singapore 港では全ターミナルが 2,500 時・TEU/m/月以下であった．Los Angeles/Long Beach 港ではそれぞれのターミナル運営者が異なっているのに対して，Singapore 港では，一部特定船社の専用部分があるものの，基本的には，全ターミナルを，PSA Singapore が一括して運営していることが影響していると見られる．

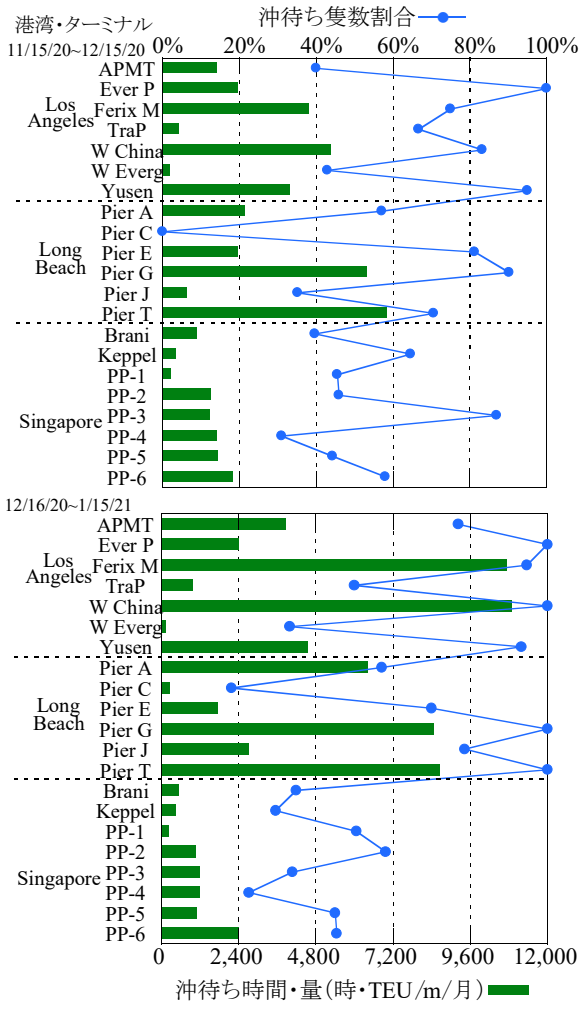

図-31　沖待ち隻数割合及び沖待ち時間・量（クライシス分析）

各船の沖待ち時間の分布について，Los Angeles/Long Beach 港，Singapore 港及び 2019 年 10 月の海外港湾（**図-7**）を比較した結果が，**図-32** である．クライシス下の Los Angeles/Long Beach 港では 36 時間超のシェアが 8 割を超えていたのに対して，Singapore 港は 2019 年の平常時（クライシス前）よりも短い沖待ち時間のシェアが大きく，約半数の船の沖待ち時間が 6 時間以下であった．この状況より，Los Angeles/Long Beach 港の沖待ちは平常時とは全く異なり，異常に長くなっていたことが確認された．

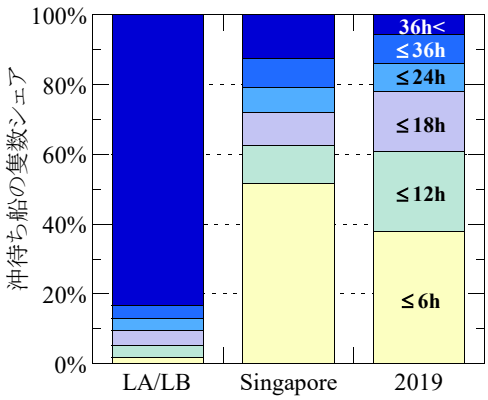

図-32　沖待ち時間の隻数シェアの比較

ターミナル運営状況との関係性を分析するため，**図-11** と同様に，バース占有率とバース延長当たりの沖待ち時間・量との関係を**図-33** に示す．図には，**図-11** の範囲（バース占有率：70%以下かつ沖待ち時間・量：1,600 時・TEU/m/月以下，グレーにハッチング）とその回帰曲線も示したが，この範囲内にあるターミナルも多かった．一方，この範囲内にないターミナルは，①バース占有率は平常時範囲内にあるが，沖待ち時間・量が異常に大きいターミナルと，②バース占有率が平常時より異常に高いターミナルに大別された．

①のターミナルでは，バースにはまだ着岸できる時空間があるにも関わらず，沖待ち時間・量が非常に増加していたことから，例えば，ヤードにスペースが無いといったターミナルの陸側の能力制約により本船荷役が進まないため，着岸を制限していたものと想定される．該当する Los Angeles/Long Beach 港では，この時期に，輸入コンテナ量の急増に加えて港湾労働者に新型コロナウイルス感染のクラスターが発生し，労働力不足で処理が追いついていなかったとの報告[28]がある．

一方，②のターミナルでは，バース占有率が約 8 割になっていたが，着岸船の占有長はバース延長とは一致せずに空きスペースが出ることや着岸船の離岸後に次船の着岸までに空きがあることを踏まえると，実質的にほぼ限界に達していたと見られる．すなわち，バースが空いたら，順次着岸するとの運営をしていたと想定されるが，その沖待ち時間・量の水準は，Los Angeles/Long Beach 港と Singapore 港とのターミナルで大きな差が見られた．Singapore 港は，平常時よりターミナル側で着岸船をコントロールしていると言われており，**4.** で述べた RTA を高い確度を持って，事前に連絡できている可能性がある．その場合，着岸船は着岸予定時刻に合わせて減速航行することにより，沖待ち時間・量を減らすことが可能である．一方，この時期の Los Angeles/Long Beach 港は港湾の沖合 40 mile に到着して始めて沖待ちの列に入ることとなっていたため，港湾機能の停滞にもかかわらず，船が随時到着し，沖待ち船が蓄積していた状況と考えられる．

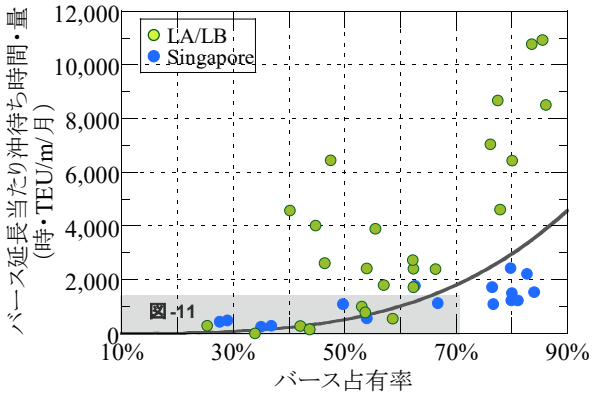

図-33　バース占有率と沖待ち時間・量の関係（クライシス分析）

Los Angeles/Long Beach 港では，2021 年後半になってさらに沖待ち状況が悪化したことから，10 月にはバイデン政権の対策として，両港の 24 時間・週 7 日運営が発表され，さらに，両港は，11 月に，ターミナルに長期滞留しているコンテナに対して課徴金を課す新制度の導入を発表したが，その後長期滞留コンテナが減少したことから，課徴金徴収は延期されている．

6. リアルタイム把握システムの開発

6.1 沖待ちデータの精度

これまで，コンテナターミナルの沖待ちを把握する手法を構築し，その分析結果を示してきた．その中で，3.4において，沖待ちを削減させ，コンテナサービスの定時性を向上させるためにも，ターミナルの沖待ち情報を統計として公開することを提案した．現下のサプライチェーン・クライシス下においては，その重要性が高まっていることは明らかである．

1.にて述べたとおり，現在では，Marine Trafficを始めとし，eeSea，Project44やKuehne+Nagelでも各港の沖待ち（錨泊）隻数を提供している．Lloyd's List Intelligence（LLI）では，日々の分析記事において，錨泊隻数とその輸送能力を記載している．また，Clarksonは，「Port Congestion Index」として，船種毎に，全輸送能力に占める港湾滞在能力（停泊＋沖待ち）の割合を提供しており，IHS MarkitとWorld Bank Groupは大手船社のデータを集計した「The Container Port Performance Index」において，沖待ちを含む港湾滞在時間やクレーン荷役効率等を港湾機能の指標として提供している．このように，様々なデータが提供されることは，荷主や船社の適切な判断を可能とし，競争環境の創出により港湾やターミナルのサービス改善に繋がることから，望ましい方向である．しかし，提供においては，利用者の誤解を招かないように，そのデータの定義や精度に関する情報も合わせ提供すべきである．

5.2において，Los Angeles港の沖待ち隻数について，本研究の推計手法の精度を確認したが（**図-29**），これにLLIの動静データによる錨泊隻数を追加したのが，**図-34**である．LLIの動静データは，各港のターミナル及び錨泊海域の到着・出発日時がAISデータより整理されているため，Los Angeles/Long Beachの錨泊海域に滞在し，かつ，その後同港へ入港した隻数を整理した．LLIのデータとLos Angeles港のデータとの間には，日によってはかなりの差があり，全般的に過小評価であった．Los Angeles/Long Beach港では，もともと設定されていた錨泊海域ではサプライチェーン・クライシス下の沖待ち船は収まりきらず，周辺海域を錨泊・漂流しており，その範囲も，沖待ち隻数が増加するにつれて拡大していたことから，錨泊海域の設定が実態より狭かった可能性が想定される．Marine Traffic，eeSeaやKuehne+Nagelの沖待ち（錨泊）隻数も，確認した範囲では，Los Angeles/Long Beach港のデータとの間に差異が見られた．

船社のデータにおいても，定義の曖昧さが見られる．ONEは，自社の各運航船の各港への到着（Arrival），着岸

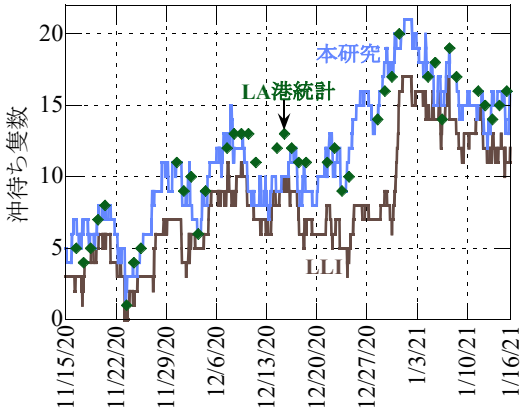

図-34　沖待ち隻数の比較

（Berthing）及び出発（Departure）の日付・時刻が記録されており，沖待ちは到着と着岸との間に位置するはずであるが，実際には，船により沖待ちが到着前の場合と，到着後の場合が混在している港湾が確認された．IHS Markit及びWorld Bank Groupによる「The Container Port Performance Index」は，船社データを用いて港湾滞在時間等を指標化しているが，各船について，どのような定義で港湾の到着・着岸の日付・時刻が整理されているのかによっては，指標の信頼性に影響があると考えられる．

6.2 リアルタイム把握システム

これまで強調してきたとおり，沖待ち統計は港湾の運営状況を把握する指標として非常に重要であり，また，その精度を担保するためにデータの収集・整理手法を明らかにする必要がある．さらに，同港湾内のターミナルによっても沖待ち状況は大きく異なり得ることから（**図-6**，**図-8**及び**図-31**参照），ターミナルベースのデータが重要であるが，既存のサービスでは，港湾別の隻数が基本である．このような状況を踏まえ，記録された過去のAISデータを使用していた2.の方法を用い，リアルタイムに沖待ち状況を自動で把握するシステムを開発した．

システムでは，AISデータを蓄積し，日付が変わると同時に，各ターミナルに前日に着岸した船舶のリストを作成し，当該船舶の入港（入湾もしくは他ターミナル離岸）からのAISデータにより，沖待ち船を把握し，沖待ち時間・量を自動算定する．さらに，着岸船のデータを用いて，各ターミナルのバース占有率も算定する．システムの画面例を**図-35**に示す．実際に，関東地方整備局及び当研究所の東京湾に設置されたAISアンテナからの受信データを用いて，2022年1～2月に実証実験を行い，問題なく稼働することと，事後の検証においても，適切に沖待ちの判定がなされていることが確認された．

図-35　リアルタイム把握システムの画面例

本システムは，AISデータを利用可能な港湾であれば，どこでも稼働可能なものであり，コンテナ物流情報システムColinsやCyber Port（物流分野）が既に稼働し，様々なデータの蓄積とその活用の重要性が強く認識されている状況を踏まえ，本システムの今後の活用方策を考えていきたい．

7. 結論

本報告は，AIS データを活用してコンテナターミナルにおける沖待ち船を網羅的に把握する手法を構築し，世界及び日本のターミナルについて多様な分析を行ったものである．本報告で得られた結論は，以下のとおりである．

(1)　入港（入湾，他ターミナル離岸）から着岸までの所要時間に着目することにより，沖待ち船を網羅的に，かつ，ターミナル別に把握する方法を構築した．

(2)　平常時のターミナルの沖待ち時間・量は，バース占有率の増加，特に 30%程度超に対して，大きく増える傾向にあり，また，着岸船の TEU Capacity や到着遅延，着岸長期化とも関係が見られた．我が国のターミナルでは，小型船の沖待ちが大きな割合を占めており，この沖待ちの削減方策として，ターミナル別の沖待ちデータを統計して公表することや，小型船対応のターミナル整備，ターミナル運営規模拡大の有効性を示した．

(3)　東京湾のコンテナターミナルでは，沖待ちによる CO_2 排出の増加量が，停泊時排出量の 15%に相当することが判明した．対策として，東京湾内外での減速航行により，その増加排出量の半分～3/4 を削減できる可能性があるものの，実際の適用にあたってはターミナルの指定到着時刻の精度向上等課題があることを示した．

(4)　サプライチェーン・クライシス下において，Los Angeles/Long Beach 港では，36 時間以上の沖待ちが 8 割超を占める状態であったこと，Singapore 港を含めた各ターミナルでは，バース占有率が平常時範囲内のターミナルと，約 8 割にまで達するターミナルがあり，後者の中でも Singapore 港のターミナルは沖待ち時間・量が低めであったことが判った．

(5)　沖待ちに関する多くの民間のデータサービスが開始されている中で，データの精度が重要であることを示した上で，本研究の沖待ち把握手法を用いたリアルタイム把握システムを開発した．

サプライチェーン・クライシスは，現在のところ終わりが見えず，コンテナ輸送の定時性の低下は世界貿易・経済を大きく減速させており，いかに輸送の安定性・定

時性を取り戻すかが，海運・港湾にとって大きな課題となっている．その解決に少しでも寄与できるよう，引き続き研究を続けていきたい

(2022 年 8 月 30 日受付)

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費（22K04647）の助成を受けたものです.

参考文献

1) Sea-Intelligence: Global Liner Performance Report (June 29th, 2022), Press Room, 2022.
2) 赤倉康寛：我が国に関わる東西基幹コンテナ航路の遅延状況の把握・分析，国土技術政策総合研究所資料，No.1097，2020.
3) 高欣佳・牧野秀成・古荘雅生：AIS データを用いた沖待ち船舶の航行実態解析に関する研究，土木学会論文集 B3，Vol.70，No.2，pp.I_948-I_953，2014.
4) Marine Traffic: Understanding Port Congestion, Resources., https://www.marinetraffic.com/
5) Drewry: Container Forecaster & Annual Review 2020/21, Quarter 3, 2020.
6) 岩崎幹平・山形創一：船舶の主要諸元に関する解析，国土技術政策総合研究所資料，No.991，2017.
7) 赤倉康寛・安藤和也：AIS データを利用した世界主要コンテナターミナルのバース・ウィンドウ作成による稼働率分析，土木学会論文集 B3，Vol.68，No.2，pp.I_1175-I_1180，2012.
8) Notteboom E., T.: The time factor in liner shipping services, Maritime Economics & Logistics, Vol.8, pp.19–39, 2006.
9) Lai, K. K. and Shih, K.: A study of container berth allocation, Journal of Advanced Transportation, Vol.26, No.1, pp.45-60, 1992
10) 今井昭夫・西村悦子：計画開始時刻を考慮した公共バースの割当法，土木計画学研究・論文集，No.15，pp.557-564，1998.
11) 西村悦子・今井昭夫・Pierre Cariou：岸壁空間の運用規模区分を考慮したマルチユーザーターミナルの生産性に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.26, No.4，2009.
12) Bierwirth, C. and Meisel, F.: A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, European Journal of Operation Research, Vol.202, Issue3, pp.615-627, 2010.
13) Bierwirth, C. and Meisel, F.: A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, European Journal of Operation Research, Vol.244, Issue3, pp.675-689, 2015.
14) 井本商運株式会社：ISO 規格海上コンテナによる次世代型の「国内海上コンテナ輸送網」構築に向けて，交通政策審議会物流体系部会第 1 回物流体系小委員会，資料 6，2015.
15) 東京都港湾審議会：東京港第 9 次改訂港湾計画に向けた長期構想　進化し続ける未来創造港湾　東京港～スマートポートの実現～　答申，令和 4 年 1 月，2022.
16) 日本海事新聞社：海運大手　オールジャパンでゼロエミ船始動，2020 年 1 月 1 日付記事，2021.
17) International Maritime Organization: Fourth IMO Greenhouse Gas Study, 2021.
18) 国土交通省港湾局：カーボンニュートラルポート（CNP）形成計画策定マニュアル，初版，2021.
19) 環境省:令和元年度 PRTR 届出外排出量の推計方法，2021.
20) 酒井浩，渡邉豊：コンテナターミナルにおける CO_2 排出量の評価と削減に関する基礎的研究，運輸政策研究，Vol.9，No.1，pp.15-21，2006.
21) 柳潤：減速運転－メリットと注意点，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol.49，No.1，pp.61-68，2014.
22) 赤倉康寛，高橋宏直：フルコンテナ船の入出港喫水と岸壁水深の関係，運輸政策研究，Vol.4，No.4，2001.
23) European Monitoring and Evaluation Program / European Environmental Agency: Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 – Update Oct. 2020, 2020.
24) Intergovernmental Panel on Climate Change: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.
25) 川嶋民夫：船舶の運航形態の改善による GHG 削減，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol.45，No.6，pp.10-15，2010.
26) Global Industry Alliance: Just-In-Time Operational Roundtable Discussion, 2019.
27) Steinbach S.: Port congestion, container shortages, and U.S. foreign trade, Economics Letters, Vol.213, 110392, 2022.
28) 日本海事新聞社：LA・LB 港　沖待ちコンテナ船 41 隻　混雑解消めどたたず，日本海事新聞，2021 年 2 月 5 日付記事，2021.