

# 大型岸壁クレーンによるコンテナ荷役の実測とシミュレーション分析\*

Measurement and Simulation of Container Handling under Large-Sized Quay Side Gantry Crane \*

鈴木武\*\*・樋口直人\*\*\*・佐藤栄治\*\*\*\*

By Takeshi SUZUKI\*\*・Naoto HIGUCHI\*\*\*・Eiji SATO\*\*\*\*

## 1. はじめに

国際コンテナ輸送は世界的な激しい経済競争を背景に熾烈なサービス競争が展開されている。国際コンテナ輸送に関与する各主体は総力を挙げて競争力の強化に取り組んでいる<sup>1)</sup>。こうした流れの一つにコンテナ船の大型化がある。現在日本に就航しているコンテナ船の最大船型は積載能力6,600TEU級のPost-Panamax型(以下、「PP型」という。)であるが、これを大きく超える13,000TEU級のSuper(-Post)-Panamax型(以下、「SP型」という。)船舶の就航が検討されている。船舶の大型化は、港湾の様々な面から能力の向上を求める。求められる事柄の一つに岸壁クレーンの大型化と荷役速度の向上がある。この要請に的確に応えていくためには、まず現時点でのクレーンの荷役実態を正しく把握することが必要である<sup>2),3)</sup>。そのうえで、そのデータをもとに船型が大型化した場合の状態をできるだけ定量的に予測し、課題を正しく同定することが必要である<sup>4)</sup>。

このため本研究では、コンテナ荷役用の門型岸壁クレーン(以下、「コンテナクレーン」という。)の荷役動作を実測し、そのデータをもとに荷役のサイクル時間の特性を整理・分析する。そして、その実測値を基礎とした荷役動作シミュレーションモデルを作成し、SP型クレーンの荷役性能を予測する。

## 2. コンテナクレーンの荷役動作の実態

### (1) 調査対象施設・船舶

コンテナクレーンの荷役動作の実測を、清水港袖師第一埠頭第5号コンテナクレーンで行った。対象となる荷役は2000年10月20-21日のPP船および同12月20日の近海型(以下、「K型」という。)船舶を対象とした。袖師第一埠頭コンテナターミナル、第5号コンテナクレーンおよび各コンテナ船の諸元は、

\*キーワード: コンテナ荷役, コンテナクレーン, 港湾計画

\*\*正員, 国土技術政策総合研究所(横須賀)沿岸海洋部

(横須賀市長瀬3-1-1, TEL0468-44-5025, FAX44-5074)

\*\*\*学生員, 工修, 東北大学大学院情報科学研究科

\*\*\*\*, 港湾空港技術研究所施工・制御技術部

表- 1 袖師第一埠頭コンテナターミナルの諸元

バース	水深: 12m, 延長: 720m
面積	17.6 ha
主な設備	ガントリークレーン: 5基 トランスファクレーン: 10基

表- 2 第5号コンテナクレーンの諸元

設置年月	1998.12
定格荷重	30.5 t
アウトリーチ	40.8 m
レール面上揚程	35.0 m
巻速度(無負荷)	130 m/min
巻速度(全負荷)	60 m/min
横行速度	180 m/min

表- 3 対象船の諸元

	PP 船	K 船
船の長さ	283.8 m	143.3 m
型幅	40.0 m	20.5 m
型深	23.9 m	10.5 m
載荷重量	81,819 t	10,299 t
積載能力	6,214 TEU	702 TEU
コンテナスロット	-	-
デッキ列数	16	8
デッキ段数	6	4
ホールド列数	14	6
ホールド段数	9	4
満載喫水	14.0 m	7.35 m
仕向先	欧州	韓国・中国

表- 1~3のとおりである。

### (2) 計測項目

荷役動作を把握するために、スプレッドの位置と吊荷の状況を表す指標を選択し、それらをコンテナクレーンの調査項目とした。調査項目は、スプレッド鉛直方向位置(m)、スプレッド横行方向位置(m)、スプレッド巻速度(m/min)、スプレッド横行速度(m/min)、走行速度(m/min)、荷重(ton)である。

(3) 計測結果

(a) 計測時の気象・海象

計測の対象とする船舶が接岸してから離岸するまでの時刻は、PP船が2000年10月20日22:11~10月21日14:47, K船が2000年12月20日12:09~16:20である。このときの気象・海象の状況は図-1~2のとおりである。若干の降雨や風があったものの荷役を行ううえでは全般に恵まれた条件であった。

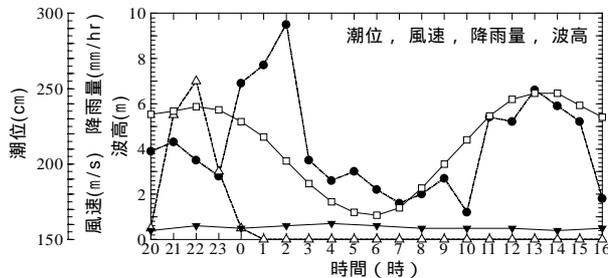


図- 1 気象・海象状態 (PP 船荷役)

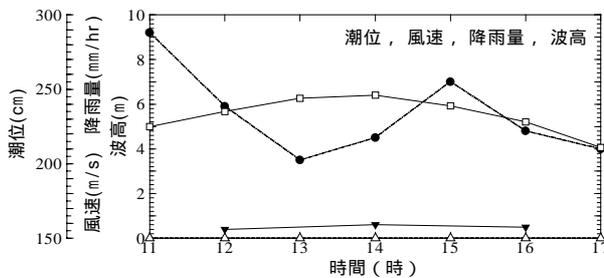


図- 2 気象・海象状態 (K 船荷役)

(b) 運転手

クレーンの荷役動作は運転手の技量等によって変化することが考えられるため、運転手の属性を表-4~5に示しておく。PP船の場合は、経験年数10年の者が半分強の時間搭乗し、残りを3~3.5年の者が搭乗している。K船の場合は、経験年数2年程度の者が搭乗している。荷役事業者からの聞き取りによれば、

表- 4 運転手一覧 (PP 船)

月日	運転時間帯	運転手	年齢	経験年数
10/20	22:17 ~ 0:11	イ	42	10年
10/21	0:11 ~ 2:21	ロ	42	10年
10/21	4:34 ~ 6:21	イ	42	10年
10/21	6:21 ~ 6:59	ロ	42	10年
10/21	6:59 ~ 9:44	ハ	38	3.5年
10/21	9:44 ~ 11:52	ニ	36	3年
10/21	13:00 ~ 14:44	ハ	38	3.5年

表- 5 運転手一覧 (K 船)

月日	運転時間帯	運転手	年齢	経験年数
12/20	12:43 ~ 14:07	ホ	28	2年
12/20	14:07 ~ 16:17	ヘ	31	2年

ば、口の運転手が高位で、他の者は中位の技量水準であるとのことであった。

(c) 片サイクル時間

計測結果のうち、試運転や運転手交代など特別な要因が含まれると考えられる長時間の片サイクルを除外する。除外する片サイクルは、片サイクル時間の頻度分布が大きく分かれる150秒を敷居値とした。片サイクル時間を整理した結果は、表-6のとおりである。

表- 6 片サイクル時間の実測結果

船舶	平均時間	標準誤差	データ数
PP 船	57.8s	0.8s	681
K 船	51.8s	1.5s	211

これらのデータをもとに、吊荷加重(t)、横行方向(海行:1,陸行:-1)、デッキ・ホールドの別(デッキ:1,ホールド:-1)、運転手技量(高:1,中:-1)、定数を説明変数とする線形型の説明関数を想定し、backward ステップワイズの重回帰分析を行った。ステップワイズの敷居値は、係数のF検定P値0.15とした。K船の場合は運転手の技量に分散がないため、運転手の技量は説明変数から除外した。

結果は表-7~8のとおりである。仮定した全ての変数が有意であったが、重相関係数は0.4程度で若干説明力が不足している。この理由は、片サイクル時間の変化が荷重と単純な線形関係にあるとは言

表- 7 片サイクル時間の重回帰結果 (PP 船)

説明変数	係数	標準化係数	F 値
吊荷重(t)	0.96	0.41	133.5
横行方向	2.85	0.14	16.3
デッキ・ホールド別	-2.35	-0.11	9.3
運転手技量	-4.60	-0.21	31.6

重相関係数 = 0.47

表- 8 片サイクル時間の重回帰結果 (K 船)

説明変数	係数	標準化係数	F 値
吊荷重(t)	0.55	0.21	8.7
横行方向	4.05	0.19	7.4
デッキ・ホールド別	-6.89	-0.32	9.3

重相関係数 = 0.41

表- 9 説明変数の相関係数行列 (PP 船)

	吊荷重	横行方向	D/F 別	運転手技量
吊荷重	1			
横行方向	0.19	1		
D/F 別	0.01	0.00	1	
運転手技量	0.05	0.00	0.32	1

注) D/F 別: デッキとホールドの別

表- 10 説明変数の相関係数行列 (K 船)

	吊荷重	横行方向	D/F 別
吊荷重	1		
横行方向	0.35	1	
D/F 別	0.12	-0.01	1

注) D/F 別: デッキとホールドの別

い難いことや、それ以外のカテゴリカルな属性値はそれ自体が直接片サイクル時間の変化を規定しているのではなく、そのカテゴリに含まれるいくつかの要因が偏った傾向を持って発生していることにあると考えられる。なお、各説明変数の相関係数行列は表- 9~10 のとおりで、各説明変数の独立性は高い。

### 3. コンテナクレーンの荷役動作シミュレーション

#### (1) モデルの作成

船型が大型化した場合の荷役時間を予測するため、荷役動作を力学運動を中心としたモデルとして定式化し、実測値をもとに適合性を検証する。

##### (a) モデルの動作アルゴリズム

片サイクルを単位とし、40' ベイを対象として、スプレッドの移動・時間経過をモデル化する。仮定する動作条件は次の通りである。

加速度・減速度は一定で、等速運動は最高速度で行い、中間的な速度では行わない。

障害となるデッキコンテナの最高点もしくはハッチカバー上面まで加速もしくは最高速度で上昇する。そこから減速を行い、上昇速度が0となる時点で軌道の最高点に達する。最高点がレール面上揚程より高くなる場合は、レール面上揚程が最高点となるように減速時点を早める。

横行は、目的の位置まで移動して停止するように加速・等速運動・減速すると考える。横行を開始する時点は、デッキ上のいずれかの障害コンテナもしくは船側乾舷から一定の安全距離だけ離れた点を通る軌道となる時点とする。

降下は、最高点から、陸行きの場合はシャシ上まで、海行きの場合はデッキ上コンテナ積付位置もしくはハッチまで、降下した位置で停止するように加速・等速運動・減速する。ホールド内の場合は、ハッチからホールド内積付位置まで降下した地点で停止するように加速・等速運動・減速する。ただし、ホールド内の最大降下速度は低下する。

降下を開始する時点は、デッキ上のいずれかの障害コンテナから一定の安全距離だけ離れた点を通る軌道となる時点とする。ただし、降下開始時点はスプレッドが最高点に到達する時点より前にはならない。

これらの一連の運動の過程で生じる 離陸時の口

ック・アンロックや一時停止の時間、スタッキングコーン着脱の時間、スプレッドの伸縮や 40' ベイで 20' コンテナを取り扱う場合の走行位置変更のための時間、デッキ上のコンテナを扱う場合の積付位置直上やシャシ直上での一時停止・位置決め時間、ホールド内であれば積付位置直上での一時停止時間を想定し、それぞれに固定値を与える。

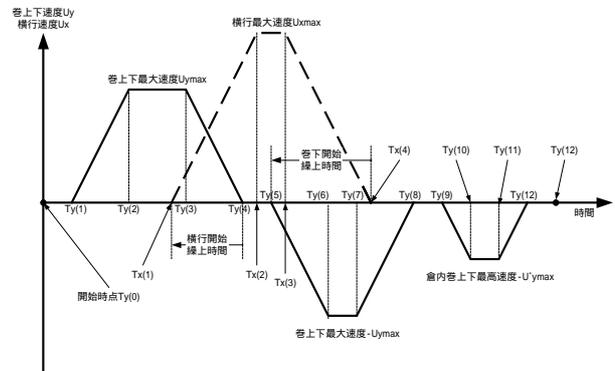


図- 3 荷役動作の速度モデルの概念

この荷役モデルでは純粋にコンテナクレーンによるコンテナの運搬動作を対象とするので、準備、運転手の乗降、試運転、ハッチカバー移動、陸揚げと船積みの切替、ベイ移動、ブームの昇降、積付位置やシャシの間違い、コンテナ等の掴み離しそこない、部品やギャングの積み卸しに伴うクレーンの動作は対象外としている。

表- 11 運転特性パラメータ

	PP 船	K 船	備考
シャシ上離陸時間	3.2s	3.2s	
デッキ上離陸時間	5.4s	4.4s	
ホールド内離陸時間	3.8s	4.6s	
シャシ上着陸時間	4.2s	6.8s	位置決含む
デッキ上着陸時間	12.3s	15.6s	位置決含む
ホールド内着陸時間	3.8s	6.6s	
ハッチ挿入時間	4.9s	9.5s	
スプレッド伸縮時間	28.5s	28.5s	走行等含む
20'のサイド変更時間	41.8s	41.8s	
スタックコーン着脱	-	-	
デッキコンテナ船積	22.0s	0s	
デッキコンテナ陸揚	24.7s	0s	
ホールドコンテナ船積	22.0s	0s	20'のみ
ホールドコンテナ陸揚	24.7s	0s	20'のみ
ホールド内最大降下速度	0.45m/s	0.45m/s	

#### (b) 運転特性パラメータ

運転特性から定まる各種パラメータを実測結果を基に設定する。まず、2.(3)(c)の理由から 150 秒を超える片サイクルは除外した。その上で、各項目ごとに対象となる片サイクルを抽出し該当する時間を読みとり、平均値を求め、それを運転パラメータ

とした。ただし、ホールド内最大降下速度は実測値の分布から概ね最大と見なせる値を設定した。シャシ上での停止時間の頻度分布が大きく分かれる 15 秒を超えるものは、スタッキングコーンの着脱を行ったものとして整理した。設定した運転特性のパラメータは表 - 11 のとおりである。

(c) 計算値と実測値の比較

安全距離を決定するために、まず、PP 船ベイ 50 の全荷役コンテナを対象に、安全距離を変化させていくつか計算を行う。つぎに、実測値から想定位置以外での停止時間を削除して修正した片サイクル時間を求め、両者を平均値で比較し、もっとも適合する安全距離を選定する。結果は安全距離：1m となった（表 - 12 参照）。実績値との整合を見るため、(a)のモデルに(b)のパラメータを与え、PP 船はベイ 50 と 67、K 船はベイ 15 の実測した全ての荷役コンテナについて片サイクル時間を計算する。その結果を実測値と比較すると、結果は表 - 13 とおりとなる。モデルは概ね適合性が良いが、K 船の場合は適合性が若干低い。

表 - 12 安全距離の同定

	実測	計算（安全距離）		
		0.5m	1.0m	1.5m
片サイクル時間	60.0s	59.9s	60.0s	60.5s

表 - 13 片サイクル時間の計算値と実測値

	PP 船		K 船	
	実測	計算	実測	計算
平均値	53.6s	52.6s	48.9s	39.6s
標準誤差	0.9s	0.9s	2.0s	0.9s
データ数	419		194	
相関係数	0.72		0.49	

(2) SP船の荷役シミュレーション

このモデルを用いて 13,000TEU 級の SP 船の荷役時間の予測を行う。

(a) 計算条件

構想があるSP船の諸元と建設されているSP型コンテナクレーンの設計諸元を参考に、計算条件を設定する。まず船舶の諸元を 船幅：58m， 型深：27m， デッキスロット：23列×7段， ホールドスロット：21列×9段と仮定する。つぎに、クレーンの諸元を レール面上揚程：45m， 最大横行速度：4m/s， 最大巻速度（無負荷）：3m/s， 最大巻速度（実負荷）：2.5m/s， 加速度：0.5m/s<sup>2</sup>と仮定する。運転特性パラメータは、実測したPP船と等しいと仮定する。荷役条件は、 消席率：100%， 荷役コンテナ割合：100%， 全体に占める20'コンテナの割合：33%（FEUベース）を仮定する。このほ

か、比較用のPP船ケースを計算する。当該ケースは、船舶諸元およびクレーン諸元は実測対象船舶・施設の諸元を用い、それ以外はSP船と同条件とする。

(b) シミュレーション結果

SP船およびPP船の計算結果は表 - 14のとおりである。SP型コンテナクレーンは、船舶のサイズが大型化するにもかかわらず、運動性能の向上によってサイクルタイムはPP型とほとんど変化していない。しかし、クレーン1基あたりの取扱個数が増加するため、延べ荷役時間は非常に長くなっている。

表 - 14 荷役時間の計算結果

	a: SP 船	b: PP 船	a / b
延荷役時間(hr)	28.6	18.1	1.58
片サイクル時間(s)	55.4	55.4	1.00
取扱個数(個)	930	588	1.58

表 - 15 動作別の片サイクル時間の計算結果

	運動	離陸	ハッチ停止	着陸	スタッコソ 着脱	20' サイ 変更
a: SP 船(s)	36.3	3.8	1.4	5.5	8.4	0.1
b: PP 船(s)	36.6	3.8	1.4	5.4	8.1	0.1
a / b	0.99	1.00	1.00	1.02	1.04	1.00

4. まとめ

清水港のPP型コンテナクレーンの荷役動作の実測値をもとに、再現性の良い荷役動作のシミュレーションモデルを作成した。作成したモデルによってSP船の荷役時間を予測した結果、サイクルタイムはPP船の場合と変化がないものの、延べ荷役時間はかなり長いものになった。このことは、荷役性能の更なる向上が求められることを示している。

参考文献

- 1) 港湾投資評価研究会編：みなとの役割と社会経済評価，第4章，みなとの課題と将来展望，東洋経済新報社，2001。
- 2) 高橋康弘ら：コンテナクレーンの諸元解析，港技研資料，No.826，運輸省港湾技術研究所，1996。
- 3) 中島忠男・高橋康弘：コンテナクレーンの高能率化基礎調査 - パナマックス型コンテナ船の荷役調査 - ，港技研資料，No.758，運輸省港湾技術研究所，1993。
- 4) 門前唯明ら：リニア搬送台車を活用した荷役システム，土木学会論文集，No.667，IV-50，pp.147-156，2001。