

荷役方式を考慮したコンテナ船の荷役作業時間推定モデルの構築\*  
Estimating Handling Time for Containerships with Considering Types of Machine  
Introduced to the Container Terminal\*

陳麗瑩\*\*・西村悦子\*\*\*・今井昭夫#  
Liyang CHEN\*\*・Etsuko NISHIMURA\*\*\*・Akio IMAI#

## 1. はじめに

コンテナ取扱量の増加とその傾向が期待される中、アジア - 欧州間を中心とした、積載容量 10,000 TEU を超える超大型船が就航している。超大型船の導入効果が発揮できるような航路形態は、ハブ&スポーク型のハブ間での運航に利用され、従来船型よりも寄港地数を減少させることにあり、このことは、一度取り扱われるコンテナ数が膨大になることを意味する。当然のことであるが、貨物がそれだけ集積出来ることが前提であり、この場合、ターミナルで扱われるコンテナの大多数がトランシップコンテナとなる。

著者らは超大型船が寄港するターミナルを前提に、岸壁空間利用の最適化<sup>1)</sup>やヤード保管スペース利用の最適化<sup>2)</sup>に関する研究を行っている。文献 1)は一定期間に寄港する船の在港時間の合計を最小化することを目的に、超大型船の寄港時にその利用バースを他船が利用できないことを前提として、各船の利用バースの位置と係留順を決定している。ここでは、各船の荷役時間は係留バースに依存するものとし、所与として与えている。また文献 2)は超大型船とフィーダー船の間で貨物の移動が今まで以上に頻繁に起こることを想定し、トランシップコンテナの一時保管場所を決定する問題として、対象船の滞在時間の合計を最小化している。ここでは超大型船とフィーダー船の担当岸壁クレーンごとに保管ブロック単位で作業時間データを所与として与えている。

上記の文献で使用されている荷役時間データは船・岸壁クレーンとコンテナ保管場所との位置関係、荷役コンテナ数等に依存すると仮定している。そこで既往の研究 3)では、荷役シミュレーションモデルを構築し、ここで得られた時間データを元に、船ごとの荷役時間推定モデルを提案している。しかしながら、前提とした荷役方式が 1 種類であり、また岸壁クレーンごとのモデルが

ないため、本研究では他の荷役方式にも対応可能なモデル、および岸壁クレーンごとのモデルを構築することを目的とする。

## 2. 荷役作業シミュレーションモデル

本研究実施のために現存するターミナルにおいて、現場での荷役作業内容の変更、及び荷役機械の投入台数など変動させることは不可能である。そのため、まず荷役方式種別を反映させるターミナルの荷役作業シミュレーションモデルを構築し、そこから各種データを抽出する。

### (1) シミュレーションモデルの概要

コンテナターミナルで実施される荷役作業は、主に本船向けと外来トラック向けに分けられる。より現実的なモデルを構築するには、両者をモデル化するべきであるが、ヤード内での荷役効率化を目的として、一般にはコンテナ蔵置位置は揚げと積みのブロックに区分され、さらに船の到着時期によってブロック内を区別している。従って、本船向けの荷役作業と外来トラック向けの荷役作業との間で互いに干渉ことはほとんどないようにコントロールされている。このことから、本研究では本船荷役のみをモデル化する。なお文献 4)によると、2007 年世界のコンテナ取扱ランキング上位 30 港湾で導入されている荷役方式を調べると、比較的大規模なターミナル 154 ヶ所のターミナルのうち、各マシンの利用率はタイヤ式門型クレーン (RTG) が 20%、レール式門型クレーン (RMG) が 1.9%、ストラドルキャリア (SC) が 9.7% と多く、2 つ以上のマシンが同一ターミナルで利用されている比率は 43.4% であった。そこで本研究では、AutoMod と呼ばれる離散型シミュレーションソフトを使って RTG、RMG、SC それぞれの荷役方式のターミナルをモデル化する。

### (2) マシン別モデルの特徴

RTG と RMG はヤード内に配置され、ヤードブロックとヤードトレーラー (YT) 間のコンテナの受け渡し作業を担当し、岸壁とヤード間は搬送用 YT が担当する。これに対し、SC はこれ自身がコンテナ搬送と荷役の両方を行え、機動性が高い。

\* キーワード : 港湾計画、ターミナル計画

\*\* 学生員 神戸大学大学院海事科学研究科

\*\*\* 正会員 工博 神戸大学大学院海事科学研究科准教授  
(神戸市東灘区深江南町 5-1-1, TEL/FAX : 078-431-6258,  
E-mail : e-nisi@maritime.kobe-u.ac.jp)

# 正会員 工博 神戸大学大学院海事科学研究科教授  
(神戸市東灘区深江南町 5-1-1, TEL/FAX : 078-431-6261,  
E-mail : imai@maritime.kobe-u.ac.jp)

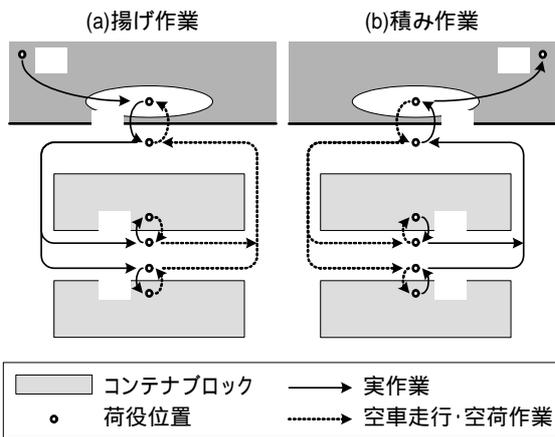


図-1 YC 荷役方式各荷役機械の作業サイクル

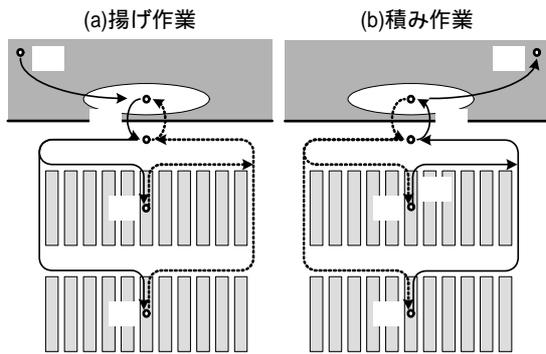


図-2 SC 荷役方式各荷役機械の作業サイクル

モデルでは、船の到着、QC による揚げ荷役、QC 下からヤードまでの移動、ヤード内の保管作業を行い、揚げ作業終了後、積み作業が開始され、ヤードから岸壁まで反方向の荷役作業が行われ、作業が終了して当該船が出港するまでを表現する。この一連の動作は図-1 と図-2 の中の番号順に作業が実施される。つまり図中の  $\bullet$  と  $\circ$  はそれぞれ船の到着と出港を示し、図-1 の  $\bullet$ 、 $\circ$ 、および  $\bullet$  はそれぞれ順に QC の荷役、YT の移動、RTG・RMG の荷役作業を示す。また図-2 の  $\bullet$  は QC の荷役作業を示し、 $\bullet$  と  $\circ$  はそれぞれ SC の移動と荷役作業を示す。各モデルで異なる点を以下に整理するが、図-3 から図-5 の小さい長方形がコンテナ 1 つ 1 つを示し、それら複数をまとめてコンテナブロックと呼んでいる。

a) RTG モデル： 幅方向は 6 列、高さ方向で 5 段積みまで保管可能な容量を持つことを想定する。図-3 示すように、YT は各ブロックの端一方の横を走行し、矢印が YT の走行ルートを示す。また、各ブロックに設置している  $\circ$  の場所で、RTG と YT の間でコンテナ受け渡しが行われる。

b) RMG モデル： RMG は RTG に比べて、幅方向に RTG の 2 倍の容量を持ち、ブロックの両端でコンテナの受け渡しを行えるのが特徴である。そこで図-4 に

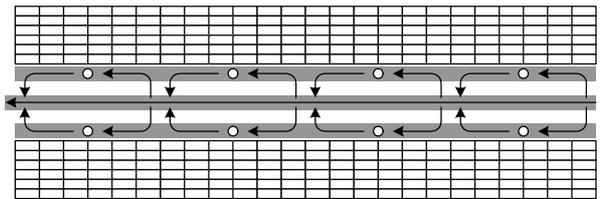


図-3 RTG モデル YT の走行ルートと荷役位置

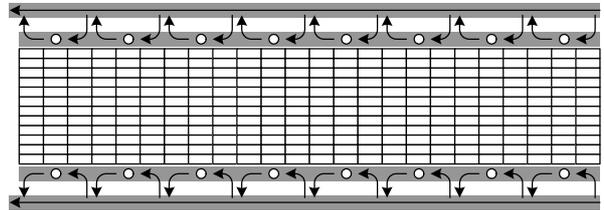


図-4 RMG モデル YT の走行ルートと荷役位置

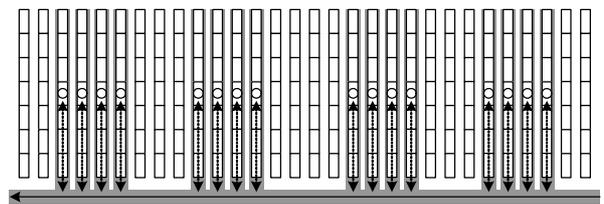


図-5 SC の走行ルートと荷役位置

示すように、ブロックの両端に YT と RMG の間でコンテナを受け渡す場所を設定している。

c) SC モデル： 図-5 示すようにコンテナ保管形態は、先の 2 モデルとは異なり、日本では岸壁に対して縦方向に設置するケースが多い。そこでその形態を採用し、SC 自身の走行ルートは矢印示すようにコンテナ上を跨ぐように設定する。高さ方向は一般的に 4 段積が多いため、これを想定する。

### (3) 使用データ概要

シミュレーションモデルで使用するパラメータは以下ようになる。なおターミナルの規模は、4 パースを有するターミナルを前提に、1 パースの岸壁延長 400m、奥行き 400m とする。

船の到着間隔： 平均 4 時間の指数分布関数

荷役コンテナ数： 揚げ積み合わせて、各船に対し平均 1000 個 3 次のアーラン分布（これは釜山港 PECT を参考にしている。）

各マシンの作業特性と仕様： 文献 5) 等による調査と、大阪港における現地観測による。

荷役作業時間： 荷役機械ごとに、コンテナ積載での移動と空荷での移動に分け、表-1 に示す  $k$  次のアーラン分布に従うことがわかったため、これで生成させる。各船の荷役コンテナの蔵置位置は、ブロック単位で与え、一様乱数で生成させる。

なお、QC は船 1 隻あたり最大 4 基までとし、RTG・RMG で利用の YT は QC1 基あたり 4 台、SC は QC1 基あたり 4 台を割当てる。YT (SC) の走行速度は、直線

表-1 各荷役機械の平均所要時間(秒)と分布関数

	往路		復路	
	次数 $k$	平均値	次数 $k$	平均値
QC 陸揚げ	16	48	15	42
QC 船積み	正規分布	48	35	36
RTG・RMG	19	72	6	54
	クレーン下		ヤード内	
	次数 $k$	平均値	次数 $k$	平均値
SC 陸揚げ	17	10	6	20
SC 船積み	45	21	13	15

で 20km/h (16km/h)、カーブで 5 km/h とし、加速度 1 km/h、減速度 1 km/h、一度に積載できるコンテナ数 1 個とする。

### 3. 重回帰分析による荷役時間推定モデル

先で構築した荷役作業シミュレーションモデルを用いて本船の荷役が始まり、全 QC の荷役作業が完了して、出港するまでの時間、および各 QC の揚げ作業開始時刻から積み作業完了時刻を計測する。またシミュレーション実験で与えたパラメータの中で、時間延長に影響を与えるかもしれない要因を抽出し、作業時間を推定できるモデルを構築する。計画対象期間 2 週間にやって来る船を対象に、コンテナ数を 5 パターン、蔵置場所を 5 パターン、25 種類のデータで行った計算結果を用いる。

#### (1) 荷役方式別の時間推定モデル

各船の荷役作業時間に影響を与えられられるのは、当該船における荷役コンテナ数、QC の投入台数、および係留バースと荷役コンテナの蔵置位置間の移動距離である。そこでこれら 3 つを説明変数、各船の荷役時間を目的変数として重回帰分析を行う。

また同様に、各 QC の荷役作業時間に影響を与えられられるのは、当該 QC の荷役コンテナ数と係留バースと荷役コンテナの蔵置位置間の移動距離である。そこでこれら 2 つを説明変数、QC の荷役時間を目的変数として重回帰分析を行う。

全ての変数を観測データの値、対数変換や指数変換したものを組み合わせて、モデル構築を行った。その結果、移動距離はそのままの値、他の変数は対数変換したものの決定係数  $R^2$  が 1 に最も近くなったため、採用する推定式は式 (1) のようになり、変形すると (2) のようになる。各変数の偏回帰係数等を表-2 に示す。

$$\ln y = \ln a_0 + a_1 \ln x_1 + a_2 x_2 + a_3 \ln x_3 \quad (1)$$

$$y = e^{a_0} \times x_1^{a_1} \times e^{a_2 x_2} \times x_3^{a_3} \quad (2)$$

決定係数は共に 98% であり、良好な値が得られている。また有意水準 0.05、各自由度での F 値は 2.605 より、

表-2 本船荷役時間推定モデル

目的変数 $y_{SHIP}$ : 船の荷役作業時間				
自由度	説明変数	偏回帰係数 $a_i (i=0, \dots, 3)$	標準偏回帰係数	$t$ 値
2149	定数	$a_0 = 0.553$		97
	$x_1$	$a_1 = 0.987$	1.60	239
	$x_2$	$a_2 = 0.314$	0.54	194
	$x_3$	$a_3 = -0.920$	-0.97	-145
RTG モデル	$R^2$ 0.983	F 値 42112		
RMG モデル	定数	$a_0 = 0.555$		99
	$x_1$	$a_1 = 0.985$	1.60	241
	$x_2$	$a_2 = 0.313$	0.54	195
	$x_3$	$a_3 = -0.919$	-0.97	-146
RMG モデル	$R^2$ 0.984	F 値 42840		
SC モデル	定数	$a_0 = 0.549$		87
	$x_1$	$a_1 = 1.002$	1.48	220
	$x_2$	$a_2 = 0.389$	0.61	216
	$x_3$	$a_3 = -0.915$	-0.88	-131
SC モデル	$R^2$ 0.983	F 値 41543		

$x_1$  : 荷役コンテナ数  
 $x_2$  : 係留バースと荷役コンテナの蔵置位置間の移動距離  
 $x_3$  : QC の投入基数

表-3 QC ごとの荷役時間推定モデル

目的変数 $y_{QC}$ : QC の荷役作業時間				
自由度	説明変数	偏回帰係数 $a_i (i=0, \dots, 2)$	標準偏回帰係数	$t$ 値
9979	定数	$a_0 = 0.582$		326
	$x_1$	$a_1 = 0.990$	0.79	585
	$x_2$	$a_2 = 0.297$	0.59	440
RTG モデル	$R^2$ 0.982	F 値 270959		
RMG モデル	定数	$a_0 = 0.585$		330
	$x_1$	$a_1 = 0.988$	0.79	588
	$x_2$	$a_2 = 0.295$	0.59	438
RMG モデル	$R^2$ 0.982	F 値 272151		
SC モデル	定数	$a_0 = 0.590$		321
	$x_1$	$a_1 = 0.992$	0.72	565
	$x_2$	$a_2 = 0.372$	0.67	533
SC モデル	$R^2$ 0.984	F 値 307714		

$x_1$  : 荷役コンテナ数  
 $x_2$  : 係留バースと荷役コンテナの蔵置位置間の移動距離

全モデルとも F 値の絶対値はそれよりかなり大きく、統計的に有意である。

偏回帰係数の符号についてみると、荷役コンテナ数と移動距離は共に正となり、QC の投入台数は負となっている。これはコンテナ数の増加や、係留バースが荷役コンテナの蔵置位置から離れると荷役時間が延長することを意味し、反対に投入 QC 数を増やすと荷役時間短縮につながるという妥当な結果が得られている。各偏回帰係数は、RTG と RMG モデルは互いに近い値が得られており、これは両者の作業特性と仕様が近いためだと考えられる。QC の偏回帰係数をみると、SC モデルのそれは他のモデルより大きく、SC 作業仕様と特性により、SC の方が荷役時間かかることを意味している。

また偏回帰係数の検定については、有意水準 0.05、各自由度における  $t$  値は 1.645 であり、荷役コンテナ数、移動距離、QC の投入台数の  $t$  値はその絶対値がそれより

表-4 ダミー変数を利用した荷役時間推定モデル

目的変数 $y_{SHIP}$ : 船の荷役作業時間				
	説明変数	偏回帰係数 $a_i(i=0, \dots, 5)$	標準偏回帰係数	$t$ 値
$R^2$ 0.980 F 値 64201 (自由度 6449)	定数	$a_0 = 0.661$		170
	$x_1$	$a_1 = 0.991$	1.50	365
	$x_2$	$a_2 = 0.339$	0.55	316
	$x_3$	$a_3 = -0.918$	-0.92	-220
	$x_4$	$a_4 = -0.162$	-0.18	-91
	$x_5$	$a_5 = -0.165$	-0.19	-92
目的変数 $y_{QC}$ : QCの荷役作業時間				
$R^2$ 0.979 F 値 342457 (自由度 29939)	定数	$a_0 = 0.680$		541
	$x_1$	$a_1 = 0.990$	0.75	887
	$x_2$	$a_2 = 0.321$	0.61	721
	$x_4$	$a_4 = -0.142$	-0.18	-180
	$x_5$	$a_5 = -0.144$	-0.18	-183
	$x_1$ : 荷役コンテナ数 $x_2$ : 係留バースと荷役コンテナの蔵置位置間の移動距離 $x_3$ : QCの投入基数 $(x_4, x_5)$ : 0-1 ダミー変数 (RTGモデルなら(1,0)、RMGモデルなら(0,1)、SCモデルなら(0,0)とする)			

大きく、統計的にも有意である。いずれの説明変数を予測に役立つことが分かった。

標準偏回帰係数から値の大きさで、荷役時間延長への影響度を知ることが出来る。そこで各変数の中で、全モデル共に最も影響を与える説明変数を調べた所、荷役コンテナ数がそれに該当し、次にQCの投入台数、移動距離の順であることが分かった。

(2) ダミー変数を用いた時間推定モデル

荷役方式別に時間推定モデルを構築したが、ここではマシンの区別を変数としてモデルに組み込み、1つのモデルでマシンの区別が出来るものを考える。質的変数の説明変数を回帰分析に組入れるためには、0 または 1 を値とするダミー変数 $x_4$ と $x_5$ を用いて荷役時間推定モデルを構築する。なおダミー変数の値は、RTGモデルでは $x_4 = 1, x_5 = 0$  とし、RMGモデルでは $x_4 = 0, x_5 = 1$ 、SCモデルで $x_4 = 0, x_5 = 0$  とする。

前節 3.(1)と同様に、各変数を指数や対数に変換することも検討した結果、移動距離は無変換の値、他の変数を対数変換したものの決定係数が1に最も近かった。これを式(3)に示し、式変換すると、式(4)のようになる。

$$\ln y = a_0 + a_1 \ln x_1 + a_2 x_2 + a_3 \ln x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 \quad (3)$$

$$y = e^{a_0} \times x_1^{a_1} \times e^{a_2 x_2} \times x_3^{a_3} \times e^{a_4 x_4} \times e^{a_5 x_5} \quad (4)$$

なお、各モデル式の偏回帰係数の値を示したのが、本船、QC 毎にそれぞれ式(5)と(6)になる。

$$y_{SHIP} = e^{0.661} x_1^{0.991} e^{0.339 x_2} x_3^{-0.918} e^{-0.162 x_4} e^{-0.165 x_5} \quad (5)$$

$$y_{QC} = e^{0.680} x_1^{0.990} e^{0.321 x_2} e^{-0.142 x_4} e^{-0.144 x_5} \quad (6)$$

表-4に各変数の偏回帰係数、F値、各変数の  $t$  値等を示す。

決定係数は共に 98%となり、有意水準 0.05、各自由度での F 値は 2.605 より、全モデルとも F 値の絶対値はそれよりかなり大きく、統計的に有意である。

偏回帰係数の符号は荷役コンテナ数と移動距離は共に正、QCの投入台数は負となっている。またダミー変数の偏回帰係数の符号も負となっており、 $x_4$ と $x_5$ 両方が0であるSCモデルに比べて、 $x_4$ もしくは $x_5$ のいずれかが1であるRTGとRMGモデルの時間が短くて済むとことを意味している。

また偏回帰係数の検定については、有意水準 0.05、各自由度における  $t$  値は 1.645 であり、荷役コンテナ数、移動距離、QC の投入台数の  $t$  値はその絶対値がそれより大きく、統計的にも有意である。いずれの説明変数を予測に役立つことが分かった。

標準偏回帰係数から、各変数の中で、全モデル共に最も影響を与える説明変数を調べた所、荷役コンテナ数がそれに該当し、次にQCの投入台数、移動距離の順であることが分かった。

4. 終わりに

本研究ではターミナルの荷役シミュレーションモデルから得られた計算結果をもとに、荷役方式の種類を考慮した荷役時間推定モデルを構築した。シミュレーションにおけるモデル化の範囲にもよるが、構築した推定モデルを用いれば、船の到着前に荷役時間をある程度推定でき、作業スケジュール立案への活用に期待できるものである。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、大阪港湾埠頭公社業務部の山崎輝男様、振興課の趙白様にはマシンの作業特性と仕様の把握、時間データ収集の場をご提供頂いたことに関して、心から感謝致します。また本研究は、科学研究費(21710153)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M. and Papadimitriou, S., Berth allocation at indented berths for mega-containership, *European Journal of Operational Research* 179(2), 579-593, 2007.
- 2) Nishimura, E., Imai, A., Janssens, G.K. and Papadimitriou, S., Container storage and transshipment marine terminals, *Transportation Research Part E* 45(5), 771-786, 2009.
- 3) Nishimura, E., Imai, A., Zhao, B. and Kaneko, H., Estimating containership handling times in a container terminal, *Infrastructure Planning Review* 20, 703-710, 2003.
- 4) Informa UK, Containerisation International Yearbook 2009.
- 5) 渡辺逸郎, コンテナターミナルの理論と計画, 日本コンテナ協会, 1996.