



荷役方式を考慮した本船と岸壁クレーンの荷役時間 推定モデル構築に関する研究

西村, 悦子
陳, 麗瑩

(Citation)

土木学会論文集D3 (土木計画学), 67(5):I_869-I_878

(Issue Date)

2011

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2011 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002798>



荷役方式を考慮した本船と岸壁クレーンの荷役時間推定モデル構築に関する研究

西村 悦子¹・陳 麗瑩²

¹正会員 神戸大学大学院准教授 海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

E-mail: e-nisi@maritime.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

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-欧州間を中心に積載容量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を発揮するには、寄港地数の減少にあり、これはターミナルで一度に取り扱われるコンテナ数が膨大になることと、そのコンテナの大多数がトランシップコンテナとなることを意味する。このような超大型船が寄港するターミナルを対象に岸壁空間利用やヤード空間利用の最適化を行った研究があるが、ここで必要となる荷役時間データを、実在する港湾であらゆる状況下でのデータを収集することは困難である。そこで本研究では、荷役方式別のシミュレーションモデルを構築し、これから得られた時間データやこれに影響を及ぼす要因を収集して、本船と時間推定モデルを構築することを目的とする。

Key Words : *terminal planning, container terminal, port operation, simulation, multiple regression analyse*

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対象に、岸壁空間利用の最適化¹⁾ やヤード空間利用の最適化²⁾ 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は当該船の優先バースを他船が利用できないことを前提として、他船の係留位置と係留順を決定している。ここでの各船の荷役時間は、係留バースによって異なることもあったと仮定し、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 (QC) ごとに保管ブロック単位で作業時間データを与えている。

一般に本船の荷役時間の予測には、荷役個数と割当てられるQC数で決定され、ターミナルごとにQCの性能やドライバーの技能などで1時間当たり何個荷役できるとの試算があり、これに基づく。ただし、これはコンテナの保管場所が船の係留バース背後にあることが前提となっている。つまり、本船の到着までに、この前提に合わない場合は、事前に係留バースの直近にコンテナの再配置が行われる。そこで、この無駄な作業がなるべく発生しないように、効果的な作業計画立案が必要であり、その計画とは、コンテナの保管場所や船の係留位置を決定する問題である。

そこで、事前に直近だけでなく、保管場所と離れたバースとの間においても作業時間データが必要となり、船単位とQC単位の荷役時間に着目し、これを計画立案前に得るためのモデルを考える。なお、モデル構築に使用するデータは、本来ならターミナルからの実績値を用いるべきであるが、数に限りがあり、多様な状況変化を反映していないことから、その現象をシミュレーションによって再現し、ここから得られたデータを元に簡便に時間データを得るモデルを構築する。具体的な処理の流れ

は次のようになる。

ステップ1：入力データの準備（船別・QC別データとして、船の到着、荷役個数、係留場所、保管場所等）

ステップ2：本船荷役シミュレーションモデルの構築（各荷役機器のスプレッダーの作業サイクル、ヤードトレーラーの動きを表現）

ステップ3：シミュレーション実行によって、船別・QC別の荷役時間を得る

ステップ4：ステップ1の入力データ、およびステップ3で得られた荷役時間を用いて重回帰分析を行う

ステップ5：分析を行った中から、推定精度の高いものを本研究の時間推定モデルとする

また既往の研究³⁾では、船単位の荷役時間を推定するモデルを提案している。しかしながら、荷役方式が1種類であり、QC単位のモデルはないため、マシンの種類やQC単位の荷役時間推定を行えるモデルを構築する。

2. 世界の主要港湾での荷役方式採用状況

コンテナ取扱量によってコンテナ港湾の混雑度は異なり、これはターミナルの規模、保管容量、レイアウト等を決定する際の指標にもなる。また使用される荷役機器は、その特徴、設置時期と地域的背景等によって違いがある。そこで、モデル化する荷役方式を決定するために、2007年のコンテナ取扱量上位30港に属する135ターミナルを抽出し、文献⁴⁾や当該ターミナルのWebサイト等から主として利用されている荷役機器を調べた。図-1は各荷役方式に該当するターミナル数の割合を示し、複数種類のマシンを併用するターミナルもあることから、各荷役方式で当該マシン単独採用の割合と、他のマシンと併用する割合を示す。タイヤ式門型クレーン（RTG）のみが採用されるターミナルは全体の3割、RTGも含むケースが全体の3分の2である。レール式門型クレーン（RMG）、ストラドルキャリア（SC）、シャーシ（C）のみの採用はそれぞれ、3.0%、11.1%、6%であるが、その他との併用はそれぞれ2割、全体の2.6割、4割強と多いことが分かる。ここで、RTGは世界中で採用件

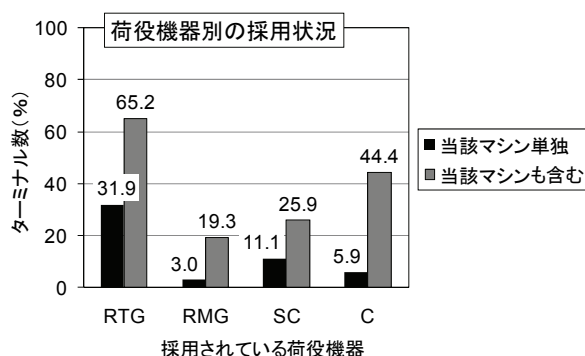


図-1 主要港湾における荷役機器の採用状況

数が非常に多く、SCはRTGに次いで単独採用が多く、図中から分かることではないが、国内や欧州ではこれらを採用するターミナルが非常に多い。またRMGは比較的新しく、大規模ターミナルに多く採用されている。このことから、本研究ではRTG、RMGとSCのターミナルをモデル化する。

3. 荷役作業シミュレーションモデル

先でも述べたように、現実の港湾ターミナルを対象に、あるゆるケースを想定するために、現場での荷役作業内容の変更や荷役機械の投入台数などを変更して、荷役時間やそれに影響を与える各種データを収集することは不可能である。そのため、荷役機器別に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。

以下では、荷役作業の実態、モデル化の範囲について述べ、次にモデル構築に使用するソフトウェアの概要とモデル表現について説明する。

(1) モデル化の範囲

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が区分され、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、互いになるべく干渉し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。

荷役機器別特徴は以下のようになる。RTGとRMGの方式では、それぞれがヤード内に配置され、ヤードブロック内にヤードトレーラー（YT）上のコンテナを荷役する作業を担当し、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が行え、機動性が高い。

モデルでは、船の到着、岸壁クレーン（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-2と図-3の中の番号順に作業が実施される。つまり図中のAとHはそれぞれ船の到着と出港を示し、図-2のBとG、CとF、DとEはそれぞれ順にQCの荷役、YTの移動、RTGとRMGの荷役作業を示す。また図-3のBとGはQCの荷役作業を示し、CとF、DとGはそれぞれSCの移動と荷役作業を示す。

(2) モデル構築に使用したソフトAutoModの概要

モデル化するために、AutoMod と呼ばれる離散型シミュレーションソフトを利用する。文献 7)によると、製造システム内を移動する製品、それを加工する機械、製品の搬送などの要素をモデル内で表現できるソフトウェアである。主に次の 5 システム ((i)プロセスシステム, (ii)ムーブメントシステム, (iii)ACE グラフィック, (iv)AutoView, (v)AutoStat) から構成される。(i)はモデルのロジックを表現し、シミュレーションの一連の流れをプログラム化するのに利用する。(ii)はモデル内のエリア間の製品や部品の移動(速度、ルート等)を表現するのに利用する。(iii)はグラフィック用のエディタであり、船や搬送車両を表現する。(iv)はアニメーション・クリップを作成可能であり、コンテナの移動を追跡できる。(v)は、シミュレーション結果の統計分析に使用する。

(3) AutoModによるモデル表現

図-2と図-3で示した全体の流れのうち、まずはじめにデータの読み込みがあり、次にサブシステム(本船の入出港, QCによる船と岸壁間の荷役, YTによる岸壁・ヤード間の搬送, RTGとRMGによるYTとブロック間の荷役, SCによる搬送と荷役)へ処理が移る。入力データについて述べ、次にサブシステムのモデル化を述べる。

各種データの読み込みでは、計画期間全体に対し、隻数、直前の船から当該船までの到着間隔がある。また船舶別データには、船番号、係留予定バース番号、QC投入台数があり、QC別データには荷役個数と保管場所がある。各荷役機器のスプレッダーの動きによる作業サイクル時間を確率分布で表現し、これを当該マシンの拘束時間として経過後、次の荷役作業可能となる時刻を与えることで、動きをコントロールする。ここで、表-2に示す k 次のアーラン分布、または正規分布が実績との寄与率 R^2 が高かったため、これを用いる。

a) 本船の入出港

ムーブメントシステムを利用し、船の到着、荷役中の停泊、出港までの経路と図面上のそれらの位置(コントロールポイント、cpと呼ばれる)を以下のように配置し、各種設定を行う。

ステップ1: 船の入港から出港までの経路の描画する

ステップ2: (A)船の到着, (B)待機位置, (C)係留位置, (D)出港の位置, cpを配置する

ステップ3: 各cpにおける作業内容を指定する ((A)で船が到着したら、必ずすぐに(B)に移動するが、(C)の係留予定バースに空きがない場合にそこで待機する。(C)が空き次第、(B)から(C)に移動し、荷役開始となる。荷役が終了すると、(C)から(D)に移動して出港となる。)

b) QCによる荷役

QCの作業サイクル(スプレッダーがコンテナを掴み

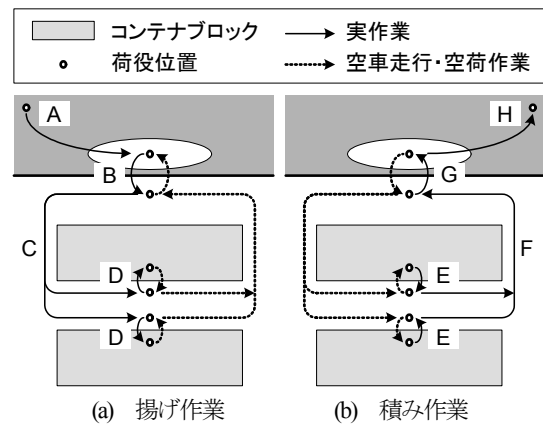


図-2 RTG・RMG方式での作業サイクル

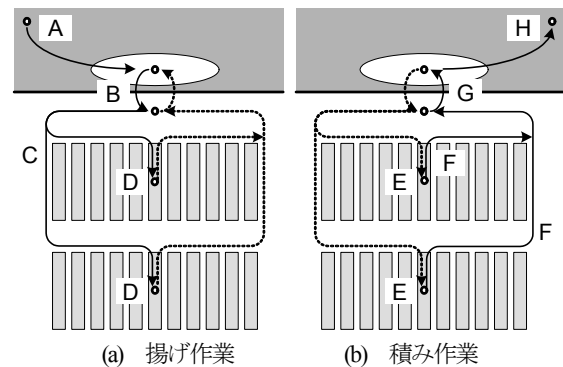


図-3 SC方式での作業サイクル

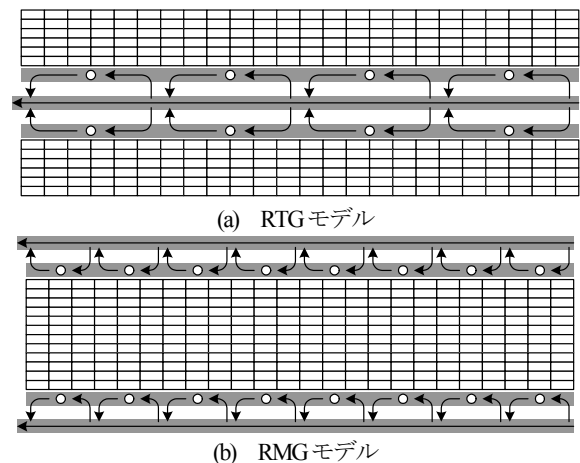


図-4 AutoModでのYTの走行ルートと荷役位置

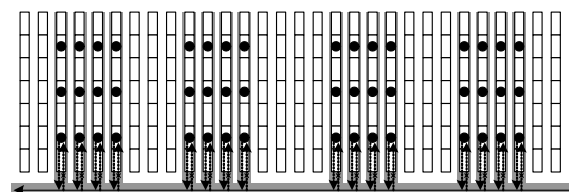


図-5 AutoModでのSC自身の走行ルートと荷役位置

YT上に置いて、復路を経て次のコンテナを掴むまでの時間は、表-2に示す確率分布に従う乱数を用いる。つまり、QC自身やスプレッダーの動きをそのままモデルで表現せず、次のコンテナの荷役開始が可能になる時刻を与えることで、この動きをコントロールする。

c) YTによる搬送

a)と同様に、ムーブメントシステムを利用し、岸壁のQC下からブロック間を走行し、ヤードエリアの指定場所に待機するRTG・RMG下までの経路の描画、QC下とRTG下・RMG下を表現したcpまでの移動を表現する。ここで両モデルで異なる点を以下に整理する。

RTGモデルでは、図-4(a)に示すように、YTとのコンテナ受け渡し場所（○印）は、ブロックの片側に与える。矢印はYTの走行ルートを示すが、○印での荷役予定のYTは目的の○印に向かうが、当該YTが荷役中に他YTがすり抜けて他の地点に向かうために直線矢印がある。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ため、図-4(b)に示すように、cp（○印）を配置する。またYTの走行ルートとその他の設定は、以下のようになる。

ステップ1：YTの走行ルートを図-4(b)のように描画する。

ステップ2：コンテナ受け渡し場所としてcpを配置し、作業中は次の作業ができないように容量1と設定する。

ステップ3：YTの走行速度と加速度は文献5)や現地観測より、表-1のように設定する。YT台数は国内では一般的に、QC1基に4台を割当てるため、同様にする。

ステップ4：YTの行き先（どのcpに行くか）指定を行う。

d) RTGとRMGによる荷役

b)と同様に、当該マシン自身の作業サイクル（スプレッダーがコンテナを掴みYT上に置いて、復路を経て次のコンテナを掴むまで）の時間は、表-2に示す確率分布に従う乱数を用いる。QC1基あたり2台を割当る。

e) SCによる搬送と荷役

図-5に示すように、先の2モデルとは異なり、日本では岸壁に対し垂直方向に配置するケースが多いため、これを採用する。走行ルートと荷役位置の詳細を図-5に示すが、YTと異なる点は、SC自身が矢印示すようにコンテナ上を跨ぐように走行し、ブロック内に荷役位置（●印）を設置する点である。

ステップ1：SCの走行ルートを描画する。

ステップ2：コンテナ受け渡し場所としてcpを配置し、作業中に他のSCがやって来た場合は×印で待機させる。

ステップ3：SCの走行速度と加速度を表-1に示す内容で与える。SCの台数を設定する。（国内で一般的な台数である、QC1基に4台を割当てる。）

ステップ4：各cpでのSCのスプレッダーの作業サイクル時間を表-2の確率分布に従う乱数を用いる。

(4) 使用データ概要

先で述べたデータはターミナルでの荷役に関するものである。ターミナルの規模は、4バースを有するターミナルを前提に、1バースの岸壁延長400m、奥行き400mとする。ここでは対象とする船別・QC別に与える入力

表-1 YTとSCの仕様

走行速度：直線 20km/h（YTの場合）／16km/h（SCの場合）、カーブ 5km/h、加速度 1km/h、減速度 1km/h
積載容量：サイズに関わらず、コンテナ1個

表-2 各荷役機械の平均所要時間(秒)と分布関数

RTG/RMG モデル	往路			復路		
	回数 k	平均	R^2	回数 k	平均	R^2
QC 陸揚げ	16	48	0.650	15	42	0.798
QC 船積み	正規	48	0.634	35	36	0.669
RTG・RMG	19	72	0.578	6	54	0.571
SC モデル	QC 下			ヤード内		
	回数 k	平均	R^2	回数 k	平均	R^2
SC 陸揚げ	17	10	0.988	6	20	0.971
SC 船積み	45	21	0.927	13	15	0.901

表-3 データ A での荷役個数と QC 投入台数との関係

荷役コンテナ数 (個)	50～ 500	501～ 1000	1001～ 2000	2001～
QC 投入台数	1 基	2 基	3 基	4 基

データを示す。

a) 船の到着間隔

対象期間を2週間とし、当該期間内に到着する船の到着間隔は平均3時間と4時間の指数分布に従うとする。1回のシミュレーション実行で50隻前後（乱数の種によって異なる）のデータが得られ、到着間隔3と4時間の2パターン×10ケースの実行で980隻分のデータを得ている。

b) 係留バースの決定

一般に、コンテナの保管場所に最も近いバースを利用することで、荷役時間延長を抑える工夫がされている。しかし、対象船の到着遅れ等によって後続船のスケジュールに影響が出るが、隣接バースを利用することで出港までの時間を短縮することができないかもしれない。つまり、保管場所に近接バース以外にも係留する場合も想定し、そこでの情報を得る必要がある。そこで、保管場所は任意に決定する。

c) 荷役コンテナ数とQC投入台数の割当方法

一般に、QCの投入台数は荷役個数の増加や船のサイズの増大すると、多くのQC数を必要とする。しかし、どの範囲で何基のQCを割当るかは一定ではなく、隣接する他のバースの作業状況やターミナル自身によって異なる。そこで、表-3のようにQC投入台数を荷役個数増加に伴って増やす場合（データA）と、荷役個数に関係なくランダムにQC投入台数を決定する場合（データB）の両ケースでシミュレーション実験を行う。各QCの荷役個数は、荷役個数/QC数によって与えられる。

ここで荷役個数の揚げ積み比率は1:1とし、揚げ積み合計で平均1000個3次のアーラン分布（実績との寄与率 R^2 0.735）とする。これは釜山港のPusan East Container Terminal (PECT) のデータに基づくものである。

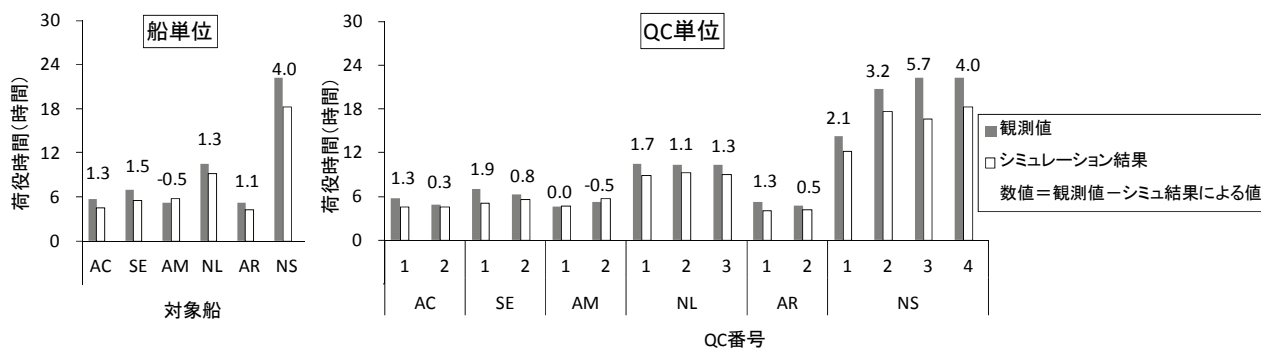


図-6 実在する港湾データでの観測値とシミュレーション結果の比較

d) 各荷役コンテナの蔵置位置

各船の荷役コンテナの保管場所は、まず船単位でいずれのバース背後かを決め、次に当該バース内でQC単位で2ヶ所ずつブロック番号を一様乱数で与える。

(5) シミュレーションモデルの再現性

構築したシミュレーションモデルによる結果が、どの程度現実を再現されているかを明らかにするために、実際のコンテナ港湾で本船荷役にかかった時間と比較する。なお、使用するデータは文献3)の一部である、平成14年9月の5日間に東京港の大井ふ頭で供用された2バースから成るコンテナターミナルである。なお距離データは、QC下とヤード内蔵置位置のコンテナ受け渡し地点（船の係留位置、コンテナの船内格納位置、ヤード内の蔵置位置）を調べ、それら間の距離である。図-6には6隻分の船別・QC別の荷役時間の観測値とシミュレーション結果を示す。なお、図中の数値は両者間の差（時間）＝観測値－シミュレーション結果による値を示す。

まず船別の荷役時間はほとんどのケースで1時間程度のシミュレーション結果が短く、一部30分短い。シミュレーションでは、荷役終了後にすぐに出港できるが、実際には荷役後出港までになんらかの作業があり、この時間がどの程度あるのか、船やターミナルによって異なるのか否かは不明であるため、モデルで表現していない。このことから、上記の結果になっている。

次にQC別の荷役時間をみると、船単位の時間における時間差と同様であり、またその理由も同様のことが考えられる。したがって、モデルを利用する際は、1時間前後の差を含むことを理解した上で利用する必要がある。

4. 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、本船の荷役開始時刻から全QCの荷役作業完了後の出港時刻、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入

力データの中で、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。3.と同様に、計画対象期間2週間にやって来る船980隻を対象とする。

(1) 本船荷役時間と各要因との関係

各船の荷役作業時間に影響を与えられ考えるのは、当該船の荷役コンテナ数、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。移動距離の計測は、保管場所はQC1基に対し保管場所は2ブロックあり、常に複数存在する。ただし、その場所がターミナル内の同一バース背後の区画でまとめておかれるため、距離はそれらの平均値を用いる。

ある2変数間の相関関係が強ければ、多重共線性が発生し、一方は必要ないと判断できることから、上で示した各要因間の相関関係を調べ、説明変数として利用できるか否かを判断する。表4には、データAとBにおける各要因間の相関係数Rを示す（文献6)より）。一般にRは0.4～0.7で中程度、0.7以上なら強い相関があると判断できるため、**印を付す。

データAの結果より、荷役時間と各要因との間では0.4以上で、相関があると判断できる。各要因間でみると、移動距離は他の変数と0.1未満であり、相関関係はないが、荷役個数とQC投入台数との間では0.896と非常に相関が高く、多重共線性の可能性がある。同様に、データBの結果をみると、荷役時間と各要因との間で相関がある程度あり、各要因間でみると、いずれも0.1程度かそれ未満で相関関係はないことがわかる。

上記の結果は、予想できる範囲内であるが、時間推定式を構築後、これを活用する際のことを考えると、表3のように、荷役個数とQC割当数の関係が常に保たれるとは限らない。つまり、状況に応じて割当台数の境界線は変動するものである。またデータBには荷役個数とQC数の依存関係（データA）も含まれることから、時間推定モデル構築にはデータBを用いることにし、次節のモデル検証で、データAでも実現可能か否かを示す。

表-4 各変数間の相関係数 R

(a) データ A: 荷役個数に応じて QC 台数を割当てる場合

	荷役個数	移動距離	QC台数	荷役時間
荷役個数	1	.008	.896**	.660**
移動距離	.008	1	-.015	.595**
QC台数	.896**	-.015	1	.482**
荷役時間	.660**	.595**	.482**	1

(b) データ B: ランダムに QC 台数を割当てる場合

	荷役個数	移動距離	QC台数	荷役時間
荷役個数	1	.035	-.076	.685**
移動距離	.035	1	-.106	.350
QC台数	-.076	-.106	1	-.530
荷役時間	.685**	.350	-.530	1

(2) 荷役方式別本船モデル

前項で決定した、当該船の荷役コンテナ数、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、の 3 変数を説明変数として、荷役方式別に本船の荷役時間を目的変数とした重回帰分析を行う。

全変数をシミュレーション結果の値のまま、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。全組合せはマシン別に $3^4=81$ ケースあるため、紙面のスペースの都合上、変数変換なしと最善の組み合わせの結果のみを表-5(a)に示す。寄与率 R^2 が 1 に最も近くなった最善の組合せは、移動距離がそのままの値、他の変数が対数変換したものであり、推定式は式 (1) のようになり、変形すると式(2) のようになる。各変数の偏回帰係数等の統計値を表-5(b)に示す。

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

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

対数変換による効果は、荷役個数と QC 数にある。例えば 100 個から 200 個の方が 1100 個から 1200 個よりも時間延長への影響が大きく、QC1 基から 2 基の方が、3 基から 4 基に増やす場合よりも時間延長への影響が大きい。つまり、変化値ではなく、変化率の大きい場合に時間延長への影響度が大きくなると言える。

また寄与率は共に 0.99 以上で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、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。

偏回帰係数の符号をみると、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た。この理由を以下に述べる。つまり、RTG と RMG モデルの違い

表-5 荷役方式別本船モデル

(a) 変数変換の有無での寄与率 R^2

	変換なし	最善の組合せ
RTG	0.796	0.994
RMG	0.796	0.994
SC	0.782	0.978

(b) 変数変換の最善組合せでの統計値

目的変数		船の荷役作業時間 (時間)		$\ln(y_{SHIP})$	
自由度	979	説明変数	偏回帰係数 $a_i (i=0, \dots, 3)$	標準偏回帰係数	t 値
・ RTG モデル R^2 0.994 F 値 54798		定数	$a_0 = 0.518$		52
		$\ln(x_1)$	$a_1 = 0.996$	0.77	313
		x_2	$a_2 = 0.308$	0.26	104
		$\ln(x_3)$	$a_3 = -0.909$	-0.48	-194
・ RMG モデル R^2 0.994 F 値 54254		定数	$a_0 = 0.520$		52
		$\ln(x_1)$	$a_1 = 0.991$	0.77	311
		x_2	$a_2 = 0.306$	0.26	103
		$\ln(x_3)$	$a_3 = -0.905$	-0.48	-193
・ SC モデル R^2 0.992 F 値 42447		定数	$a_0 = 0.507$		44
		$\ln(x_1)$	$a_1 = 1.012$	0.77	274
		x_2	$a_2 = 0.384$	0.31	112
		$\ln(x_3)$	$a_3 = -0.891$	-0.47	-165

x_1 : 荷役コンテナ数 (×100 個), 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 (km), x_3 : QC の投入基数 (基)

表-6 荷役方式別 QC モデル

(a) 変数変換の有無での寄与率 R^2

	変換なし	最善の組合せ
RTG	0.947	0.994
RMG	0.948	0.994
SC	0.926	0.995

(b) 変数変換の最善組合せでの統計値

目的変数		QC の荷役作業時間 (時間)		$\ln(y_{QC})$	
自由度	2414	説明変数	偏回帰係数 $a_i (i=0, \dots, 2)$	標準偏回帰係数	t 値
・ RTG モデル R^2 0.994 F 値 191508		定数	$a_0 = 0.582$		326
		$\ln(x_1)$	$a_1 = 0.990$	0.79	585
		x_2	$a_2 = 0.297$	0.59	440
・ RMG モデル R^2 0.994 F 値 186783		定数	$a_0 = 0.585$		330
		$\ln(x_1)$	$a_1 = 0.988$	0.79	588
		x_2	$a_2 = 0.295$	0.59	438
・ SC モデル R^2 0.995 F 値 219650		定数	$a_0 = 0.590$		321
		$\ln(x_1)$	$a_1 = 0.992$	0.72	565
		x_2	$a_2 = 0.372$	0.67	533

x_1 : 荷役コンテナ数 (×100 個), x_2 : QC 配置位置と荷役コンテナの蔵置位置間の移動距離 (km)

が、ブロック幅が RMG は RTG の 2 倍、コンテナの受け渡し場所が RTG はブロックの片側面、RMG は両側面に位置する。しかしながら、両者のスプレッダーは共に 1 つであり、RMG モデルで同時に両端に YT が到着しても、両者の荷役を同時に行うことは不可能であり、実際

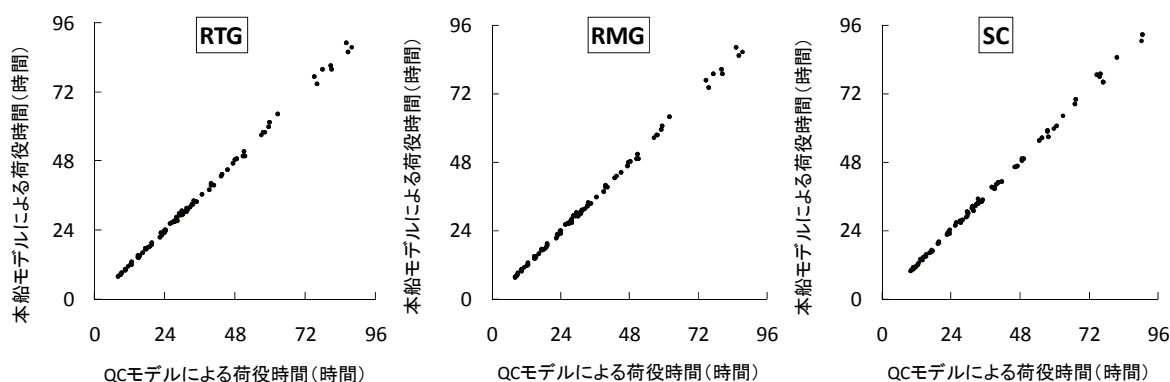


図-7 本船モデルと QC モデルによる荷役時間の比較

には片方の作業が終了後にもう一方の作業を行う。したがって、運用上は RTG と RMG は大差がない。以上のことから、RMG の保管スペースは増えるが運用上は RTG とほぼ同様であるため、このような結果となっている。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では、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値の大きさで、荷役時間延長への影響度をみる事が出来る。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、次いで QC の投入台数、移動距離の順であることが分かった。

(3) 荷役方式別 QC モデル

前項(2)と同様に、本船モデルの説明変数の中から QC の投入台数を除いた、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、以上の 2 変数を説明変数として、荷役方式別に QC 別の荷役時間を目的変数とした重回帰分析を行う。

前項(2)と同様に、全変数をシミュレーション結果の値のまま、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。変数変換なしと最善の組合せでの寄与率を表-6(a)に示す。最善の組合せは、移動距離がそのままの値、他の変数は対数変換したものであったため、推定式は式(1)のようになり、変形すると式(2)のようになる。対数変換の効果は、本船モデルと同様と考えて良い。各変数の偏回帰係数等の統計値を表-6(b)に示す。

寄与率は共に 0.99 以上であり、 F 値の絶対値は大きく、統計的にも有意である。偏回帰係数の符号、荷役方式ごとの各偏回帰係数の大きさ、偏回帰係数の t 検定、標準偏回帰係数から値の大きさから分かる荷役時間延長への影響度はいずれも、前項(2)と同様の結果が得られており、

統計的にも有意であり、いずれの説明変数も QC の荷役時間を推定するのに役立つことが分かる。

(4) ダミー変数を用いた統一モデル

前項(2)と(3)では荷役方式別に時間推定モデルを構築したが、1 つのモデルで荷役方式の違いを表現でき、これが荷役方式別モデルと同等の推定精度があれば、モデル利用上は使い勝手の良いものとなる。そこで荷役方式の区別を変数としてモデルに組み込んだ、統一モデルを検討する。質的変数を回帰分析に組入れるためには、0 および 1 の整数値を用いることが知られており、ここではダミー変数として(x_4, x_5)を用いる。なお RTG モデルでは(1, 0)、RMG モデルでは(0, 1)、SC モデルで(0, 0)とする。

前節(2)と(3)と同様に、変数変換の有無を表-8(a)に、最善の組合せにおける統計値を表-8(b)に示す。最前の組合せは、移動距離を無変換、他の変数を対数変換したものであり、これを式(3)に、式変換したものを式(4)に示す。

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

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

表-7に各変数の偏回帰係数、 F 値、各変数の t 値等を示す。寄与率は共に 0.98 以上となり、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、統計的にも有意である。

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であり、 x_4 と x_5 両方が 0 である SC モデルに比べて、 x_4 と x_5 のいずれかが 1 である RTG と RMG モデルの時間が短くなることを意味する。

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、次いで QC の

投入台数，移動距離の順であることが分かった。

(5) モデルの選択

本節では，荷役方式別（RTG，RMG と SC）の本船モデルと QC モデル，ダミー変数を用いた統一本船モデルと統一 QC モデルの合計 8 個の推定式を構築した。

本船モデルに関して，荷役方式別モデルと統一モデルを比較すると，前者の R^2 は 0.994（RTG と RMG 方式）と 0.992（SC 方式）であり，後者の R^2 は 0.993 であった。また QC モデルをみると，荷役方式別モデルの R^2 は 0.994（RTG と RMG 方式）と 0.995（SC 方式）であり，統一モデルの R^2 は 0.993 であった。

いずれのモデルにおいても偏回帰係数等の統計値は妥当な結果が得られており， R^2 の値が 0.001 程度の差しかないことから，荷役方式別に使い分けるより，変数で荷役方式を区別する方が使い勝手が良いと考える。そこで本船モデル，QC モデル共に，ダミー変数を用いた統一モデルを採用する。

5. モデルの推定精度の検証

本研究で採用する統一本船モデルに対し，QC 数を 1 基としたとき，QC の荷役時間を推定できるかもしれない。そこでまず本船モデルが QC モデルとして利用できるか否かを検証する。またターミナルの規模がモデル構築に利用したものと異なる場合や，実在の港湾データでは推定精度が異なると予想されるため，これらの検証も行う。

(1) 本船モデルの可能性

本研究で採用する本船モデルと QC モデルは，次のように式で表現できる。

$$y_{SHIP} = e^{0.617} x_1^{0.996} e^{0.332x_2} x_3^{-0.901} e^{-0.149x_4} e^{-0.157x_5} \quad (5)$$

$$y_{QC} = e^{0.668} x_1^{0.992} e^{0.306x_2} e^{-0.131x_4} e^{-0.137x_5} \quad (6)$$

式(5)において，QC 投入台数を 1 基とすれば，QC 1 基の場合の荷役時間が求められる。これが QC モデルによる時間と差がなければ，QC モデル自体を必要とせず，本船モデルで QC の荷役時間も推定できることになる。そこで，QC 数が荷役個数に依存する，データ A を用いて，両モデルによる時間の相関を見たのが図-7 である。

いずれの荷役形式においても，ほぼ 45 度の一直線上に並んでおり，また寄与率 R^2 は 0.999 とほぼ 1 であることから，本船モデルの式(5)で QC 数を 1 基に指定すれば，QC の荷役時間が求められることが明らかとなった。

(2) ターミナル規模の変化

4 バース供用のターミナルデータを用いて時間推定モ

表-7 ダミー変数を利用した統一モデル

(a) 変数変換の有無での寄与率 R^2

	変換なし	最善の組合せ
本船モデル	0.786	0.993
QC モデル	0.933	0.993

(b) 変数変換の最善組合せでの統計値

○ 統一本船モデル				
目的変数 $\ln(y_{SHIP})$: 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
自由度 2939 R^2 0.993 F 値 79163	定数	$a_0 = 0.617$		170
	$\ln(x_1)$	$a_1 = 0.996$	1.50	365
	x_2	$a_2 = 0.332$	0.55	316
	$\ln(x_3)$	$a_3 = -0.901$	-0.92	-220
	x_4	$a_4 = -0.149$	-0.18	-91
	x_5	$a_5 = -0.157$	-0.19	-92
○ 統一QCモデル				
目的変数 $\ln(y_{QC})$: QC 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
自由度 7244 R^2 0.993 F 値 252049	定数	$a_0 = 0.668$		541
	$\ln(x_1)$	$a_1 = 0.992$	0.75	887
	x_2	$a_2 = 0.306$	0.61	721
	x_4	$a_4 = -0.131$	-0.18	-180
	x_5	$a_5 = -0.137$	-0.18	-183
x_1 : 荷役コンテナ数 (×100 個)， x_2 : 係留バース (QC 配置位置) と荷役コンテナの蔵置位置間の移動距離 (km)， 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)				

デルを構築したが，ターミナル規模への影響も見るために，2，3 と 4 バースを有するターミナルを対象にモデルの推定比較を行う。具体的には先で構築したシミュレーションモデルを用いて，2 バース運用なら 1 と 2 番バースに船を係留させ，両バースの背後エリアのいずれかに荷役コンテナを保管する。3 と 4 バース運用も同様に，係留バースの範囲とコンテナの保管場所をその範囲内で与えて，対象船 430 隻の荷役時間を求めた。

まずシミュレーション結果の傾向を見るために，図-8 にあるような，移動距離区分（係留バースに対し，荷役コンテナの保管場所が直背，隣接バース背後，その他のどこにあるか）別に，各ターミナル規模での時間を図-9 のように整理する。

コンテナの保管場所が直背にある場合，4 バース運用で時間が短く，2 と 3 バース運用ではほぼ同一である。またいずれの荷役方式でも同様の結果になった。隣接バース背後に保管される場合には，背後と反対の傾向にあり，4 バース運用で時間が長く，SC は他より時間が長い。2 バース隣接背後に保管される場合では，4 バース運用に

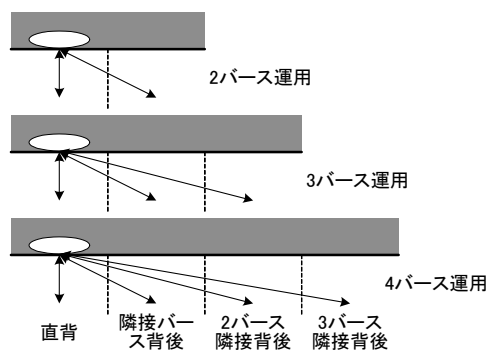


図-8 船の係留位置とコンテナの保管場所との関係

よる時間が短く、隣接バースのケースとは異なる結果となった。荷役方式の区別では、RMGによる時間が若干他より短く、SCが最も長い。これは3バース隣接の場合も同様である。ところで、4バース運用時には保管場所も分散されるため、いずれの位置関係でも時間が短くなると予想した。しかしながら、図中の隻数からも分かるように、隻数が少ないから時間が短くなるとは限っておらず、荷役個数の多い船がどこに多く、該当するかもこの結果に反映されることから、単純に保管場所のみでの時間延長比較は出来ないことがわかる。ただ、荷役方式別の傾向は予想通りの結果となっており、シミュレーションから妥当な結果が得られた。

次にこのシミュレーションによる結果と入力データを元に推定式で得られた推定値を比較し、表-8に両者間の寄与率を示す。荷役方式やターミナル規模によって若干違いがあるものの、いずれのケースも寄与率 R^2 が0.95以上あり、一般に利用されるであろうデータAにおいても、あてはまりが良く、荷役時間推定の役立つと言える。

(3) 実在する港湾データによる観測値での検証

実在する港湾で収集した観測データを元に、時間推定モデルによる荷役時間と観測値との比較を行う。なお、使用データは3(5)と同一のものである。

図-10には6隻分の本船荷役時間と、QCごとの荷役時間の観測値と推定値を示す。なお図中の数値は、表下にあるように、aがシミュレーション結果の差、bが推定値との差を示し、正の値は観測値が長いことを意味する。

この結果より、まず本船荷役時間は全て推定値が短くなっている。これは先でも述べたように、観測値には、荷役終了後、出港のための作業があり、この時間が含まれる。したがって、このような結果になっている。また、時間差は30分程度から、最大5時間というものもあるが、30分から1時間程度のものについては上記の理由によると言え、ほとんど差がないと言える。船NSについてはQC4のように本船の荷役時間より長く予想するケースもあり、コンテナ数やQC数が多い場合に精度が落ちるのがわかる。同様にQCの荷役時間をみると、差が1時間前

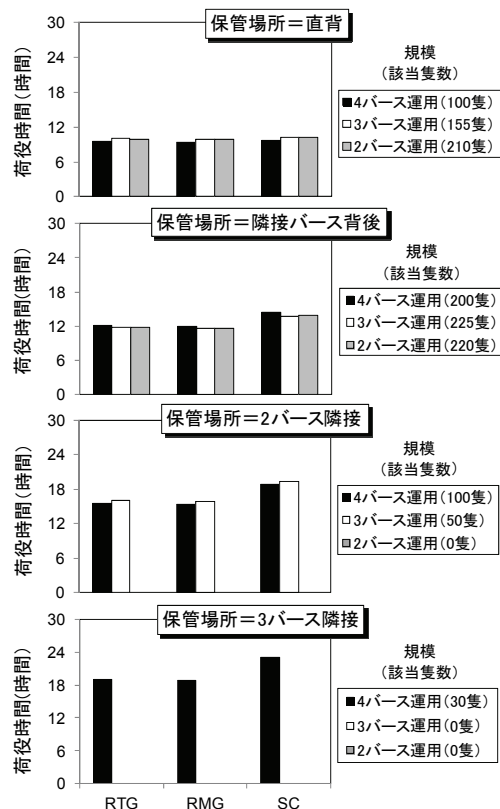


図-9 保管場所別・ターミナル規模別の平均荷役時間

表-8 ターミナル規模別にみたシミュレーションの結果と推定値の比較

		寄与率 R^2	F 値	自由度
2バース運用	RTG	0.960	10256	429
	RMG	0.958	9851	429
	SC	0.949	7946	429
3バース運用	RTG	0.968	6844	429
	RMG	0.968	12754	429
	SC	0.961	10537	429
4バース運用	RTG	0.982	22917	429
	RMG	0.981	22537	429
	SC	0.974	15878	429

後のものは入出港作業にかかる時間と見ることができ、大差がないと判断できるが、船SE担当QCのうち1基やNS担当のQCのうち3基は比較的差が大きい。この理由として考えられるのは次のようである。YTの走行ルート本研究では最短ルートとしているが、これが必ずしも、当時と同一とは限らないこと、さらにハッチカバーの着脱等の別の作業による中断も含まれる可能性があるため、このような結果が出ていると推測できる。したがって、モデルを利用する際は、1時間前後の差を含むことを理解した上での運用の必要はある。

6. おわりに

本研究では、コンテナターミナルの運営にかかるスケジュール立案に必要な荷役時間データを、実在する

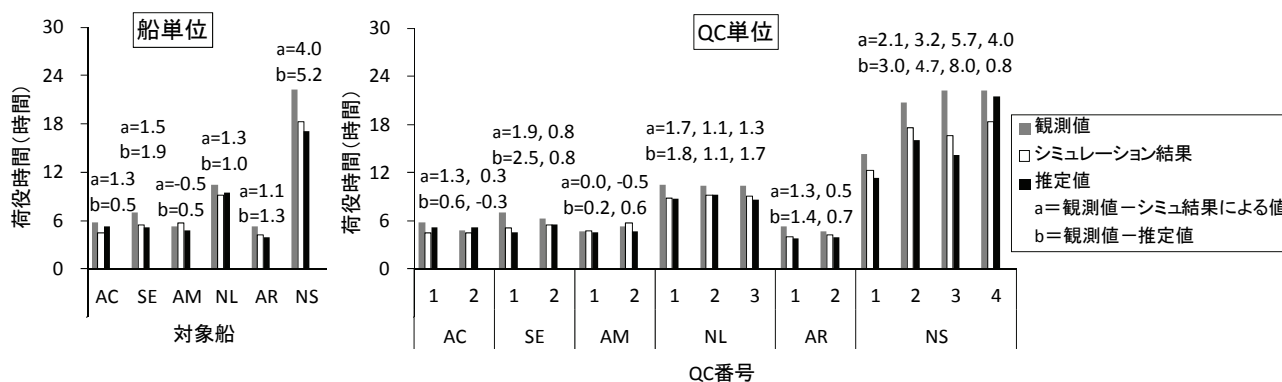


図-10 実在する港湾データでの観測値と推定値の比較

港湾を対象にして、あらゆる状況を想定して収集することが困難であるため、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、荷役時間推定モデルを構築した。世界の港湾で比較的使用されるケースが多い、3タイプの荷役方式を考慮したモデルを構築した。モデルの検証として、ターミナル規模の違いや実在する港湾データとの比較を行ったが、ある程度モデルのあてはまりが良く、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*, Vol.179, No.2, pp.579-593, 2007.
- 2) Nishimura, E., Imai, A., Janssens, G. K. and Papadimitriou, S. : Container storage and transshipment marine terminals, *Transportation Research Part E*, Vol.45, No.5, pp.771-786, 2009.
- 3) Nishimura, E., Imai, A., Zhao, B. and Kaneko, H. : Estimating containership handling times in a container terminal, *Infrastructure Planning Review*, Vol.20, pp.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.
- 6) 田淵正則：SPSS で学ぶ調査系データ解析, pp.14-15, 東京図書, 2009.
- 7) AutoMod, ユーザーズ・マニュアル Vo.12.0, 日本ブルックスオートメーション株式会社.

(2011.2.25 受付)

ESTIMATING TIME REQUIRED FOR SHIP BERTHING AND QUAY CRANE WORKING WITH CONSIDERING TYPES OF MACHINE

Etsuko NISHIMURA and Liying CHEN

There has been shown to be a tendency towards great numbers of the container throughput as the world trade expands. Mega-containerships with the capacity of over 10,000 TEU are mainly serviced between Asia and Europe. Even now the number of ports where mega-containerships call has been almost same as conventional size ships. However, in the future, the effect on introducing mega-containerships will become apparent. At a terminal where mega-containerships are calling, most cargoes to be handled are transshipments from origin to destination ports via that terminal. There are the scheduling problems in order to optimize quay space use and yard space use, those need the time required for ship berthing and quay crane working, it is difficult for us to acquire the information under the situation in actual port terminal. Thus, in this study, we construct the simulation models by types of machine, obtain the time and the factors influenced to that time from these results. This paper develops the models that estimate the time required for ship berthing and quay crane working.