

1. はじめに

資源や環境の制約が顕在化しつつある現在、環境負荷の少ない循環型社会への移行が強く求められている。大量の物資輸送等を行う港湾活動は、多くのエネルギー消費を伴うため、環境負荷の削減努力が求められる。そうした取り組みを進めていくためには、原料調達・製造・使用・廃棄の全ステージを通じた適切な環境負荷の評価手法が必要となり、港湾分野に適用できる実用的な環境負荷の推定手法を練り上げて行く必要がある。このため、著者は、港湾におけるユニットロード輸送の高度化プロジェクトに伴うエネルギー消費量と CO2 排出量を推計する手法体系の整理と、その手法体系の実用性と信頼性を高めるための個々の稼働・製造過程における条件設定の考え方と計算の基礎となる数値と算法の整理を進めてきた(鈴木武, 2004)。

これまでの体系化の取り組みの中で残された課題の一つに、コンテナ荷役用門型構造ロープトローリ式岸壁クレーン(以下、「コンテナクレーン」という。)の電力消費原単位の推定精度を高めることがある。船舶の大型化により、コンテナクレーンはそのサイズの拡大と運動性能の向上が求められ、あるいはフィーダー輸送に適したコストの低下と荷役効率の向上など様々なニーズにあった改善が求められている。コンテナクレーンのサイズが変化したり、運動性能が変化したり、荷役する船舶が変化したり、コンテナの積付条件が変化したりすると、コンテナクレーンの荷役時の電力消費量は様々に変化する。コンテナクレーンの荷役は、港湾における主要なエネルギー消費源の一つであるため、その推定精度を高めることは、港湾プロジェクトを評価するうえで重要である。このため、本研究では、コンテナクレーンの諸元や荷役条件の様々な変化にともなう電力消費の変化をシミュレートできる数値モデルを構築する。

コンテナクレーンは、荷役動作によって電力を消費する他、①ブームの昇降、②クレーンの走行、③運転室内の機器の稼働、④エレベータの昇降、⑤夜間の照明などによっても電力を消費する。それらのなかで、荷役動作による電力消費が大部分を占める。ここで想定する荷役動作は、スプレッドによって、コンテナをヤードトレーラー上から持ち上げ、乾舷およびデッキ上のコンテナの上空を通過し、船上の然るべき位置にコンテナを降ろす。そして、そこから空の状態ではヤードトレーラー上にスプレッドを戻す。あるいは、船上コンテナを掴んで、ヤードトレーラー上に移動させる。そして、そこから船上コンテナを掴む位置にスプレッドを空で戻す動作である。

この動作をモデル化し、その動作を実行するために必要な力学的エネルギーを見積もり、その見積もったエネルギーからコンテナクレーンが消費するであろう電力量を推計する。

2. 荷役動作モデル

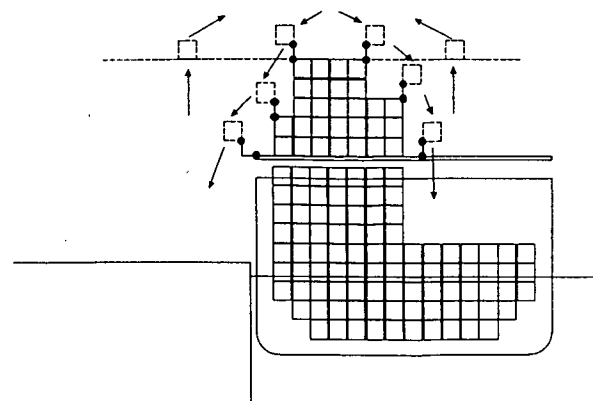
コンテナクレーンの性能・大きさや荷役する船舶の断面形状や積付位置等が変化した場合の荷役パスが変化する。それらを予測するため、荷役動作を力学モデルとして定式化し、そのモデルを用いたシミュレーションの結果を実測値と対比することでモデルの妥当性を確認する。なお、以下の検討においては、利用者の便宜を考慮し、この分野で良く用いられる単位系を使用する。

2.1 モデルの荷役動作

荷役動作の片側パスを単位とし、40ft 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。このために、次の動作条件を仮定する。

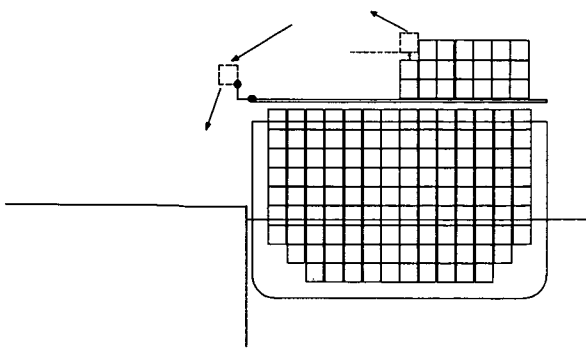
- ① コンテナ1個の総重量は、20ft と 40ft, 実入と空に分けて平均的な値を設定する。
- ② 加減速時の加速度の大きさは、吊荷重によらず一定である。
- ③ 等速運動は最高速度で行い、中間的な速度では行わない。
- ④ 横行は、目的の位置まで移動して停止するように加速・等速運動・減速する。
- ⑤ 最大横行速度は吊荷重によらず一定である。

横行を開始する時点は、最高点に達する時点を開始点として 0.5 秒ずつ早めていき、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



注1) ●と●の間の1辺が安全距離である
注2) 破線は全力で上昇する高さ

図-1 安全距離の確保(障害コンテナ有)



注1) ●と●の間の1辺が安全距離である
注2) 破線は全力で上昇する高さ

図-2 安全距離の確保 (障害コンテナ無)

全距離だけ離れた点を通る軌道となる時点を行開始時間とする。安全距離の確保の仕方は図-1 および2の通りである。

- ⑥ 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単調に加速もしくは最高速度で上昇する (図-1~2)。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。
- ⑦ 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、降下した地点で停止するように加速・等速運動・減速する。ホール内の場合は、ハッチからホール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。

- ⑧ 巻上下の最大速度は吊荷重によって異なる値をとり、その値は一定である。ただし、ホール内の降下の最高速度はそれより低い値となり、吊荷重によらず一定である。
- ⑨ 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。
- ⑩ これらの運動の位置と時間は、0.5秒単位で計算する。これは荷役時間の実測と同じ時間間隔である。

以上により規定される荷役動作モデルの運動速度の時間変化の典型的パターンを図-3に示す。ここで、 $T_x()$ は横行速度の変化時点、 $T_y()$ は巻速度の変化時点、 U_{xmax} は最大横行速度、 U_{ymax} は最大巻速度、 U^*_{ymax} はホール内最大降下速度である。

これらの一連の運動の過程で生じる①離陸時のロック・アンロックやスナッグ防止のための一時停止の時間、②スタッキングコーン着脱の時間、③スプレッドの伸縮や40ftベイで20ftコンテナを取り扱う場合の走行位置変

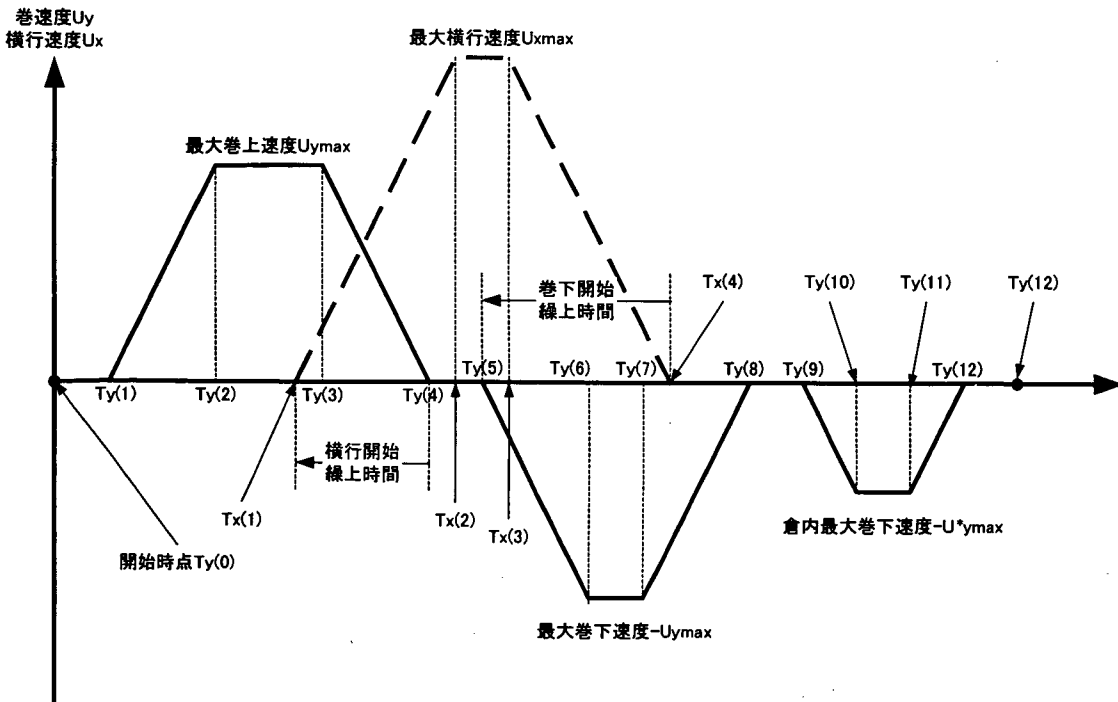


図-3 荷役サイクルのパスモデルの概念

更のための時間、④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、⑤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、それぞれに一定値を与える。

この荷役動作モデルではコンテナクレーンによるコンテナの運搬動作そのものを対象とするので、荷役準備、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をこない、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。このうち、ハッチカバーの移動に伴う動作は、ハッチカバーの置き場所によって前後のコンテナ取扱動作の起終点がシャシの位置とならないため、かなりの時間差が発生する。これを回避するために、ハッチカバー移動の前後にハンドリングするコンテナの船上スロットは一般にハッチカバー位置に近いと考えられるので、ハッチカバー仮置き位置と船上コンテナスロットの片サイクルの代わりにシャシとハッチカバーの片サイクルを実測

結果と見なして処理をする。これらをどう取り扱うかは今後の課題である。

2.2 モデルの空間位置の表現

岸壁、クレーンおよび船舶の岸壁直角方向の各種位置を表す寸法の体系は図-4のとおりで、各変数はそれぞれ以下の通りである。

Bs: 船幅, Bor: 原点から海側レールの距離, Bcr: シャシと海側レールの距離, Brf: 軌法線間距離, Bf: フェンダー高さ, Tide: 潮位 (平均潮位からの偏差), Hht: 乾舷からハッチ上面の高さ, D: 喫水, Hs: 型深, Hoh: 障害コンテナ最高点からスプレッド軌道の最高点までの高さ, Hcmax: デッキから障害コンテナ最高点までの高さ, Hcd: デッキ上コンテナのハッチ上面からの高さ, Hch: ホールド内コンテナからホールド内のコンテナ頂部までの高さ, Hhc: ホールド内コンテナ頂部からハッチ上面までの高さ, Hh: ヤード舗装面から乾舷までの高さ, Hmaxmax: レール面上揚程, Hcha: シャシの高さ,

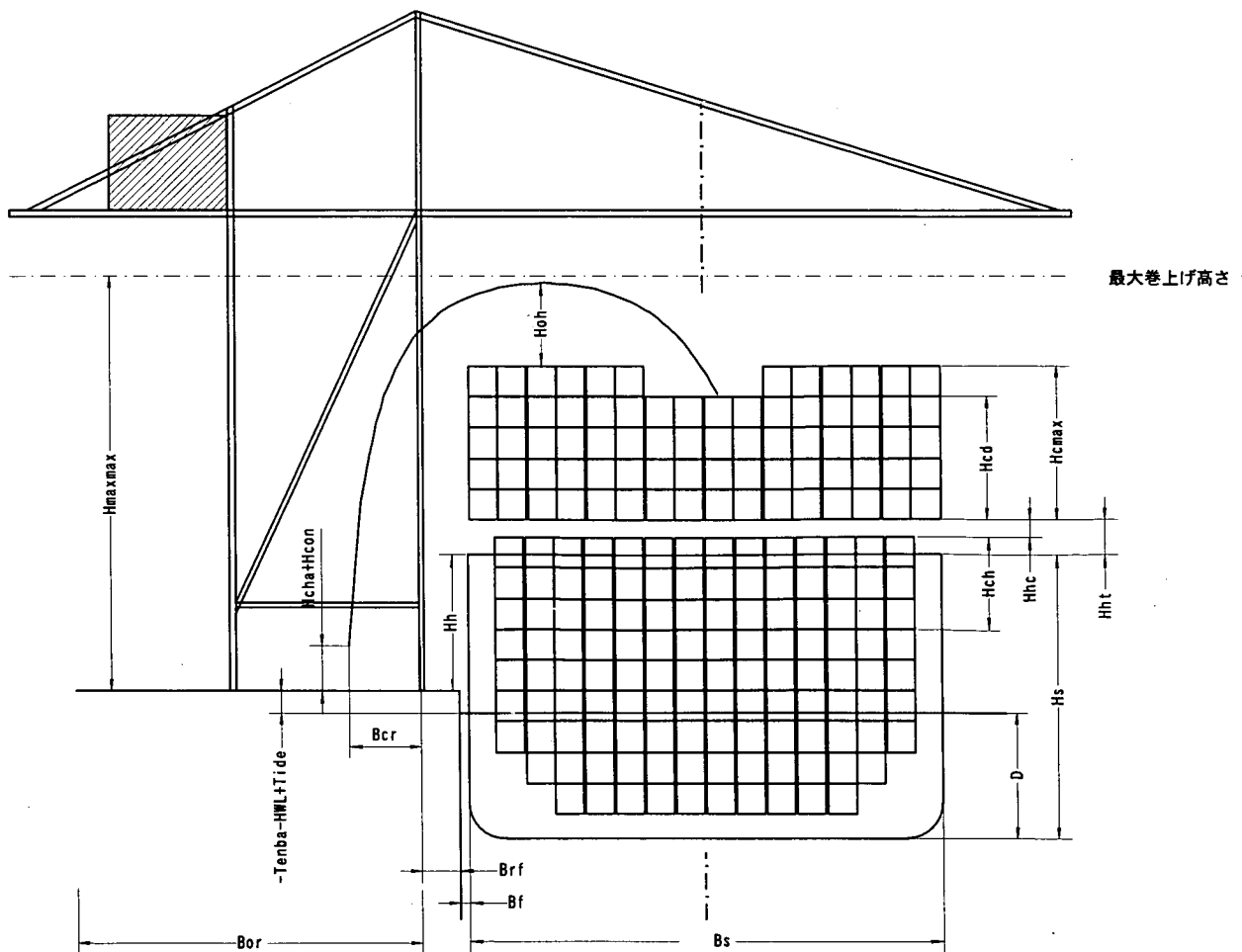


図-4 岸壁・クレーン・船舶の寸法

Hcon : コンテナの高さ, Ha : 吊り荷高さ, Tenba : HWL から岸壁天端までの高さ, HWL : 朔望平均高潮位の平均潮位からの高さである。

2.3 クレーン及び船舶の諸元

清水港袖師第一埠頭第5号クレーンで2000年10月と同年12月に荷役したコンテナ船の実測データ(鈴木武・佐藤栄治, 2003)を用いて, 荷役動作モデルを校正する。実測したコンテナクレーンは, Post Panamax 型対応の門型構造ロープトロリ式のコンテナ荷役用クレーンである。クレーンの諸元は表-1のとおりである。また, 荷役した船舶は Post Panamax 型 (PP 型) と近海航路型 (K 型) であり, その諸元は表-2のとおりである。

表-1 コンテナクレーンの諸元

項目	諸元
設置年月	1998.12
改造年月	no
吊上荷重	45.0 t
定格荷重	30.5 t
アウトリーチ	40.8 m
バックリーチ	12.0 m
全揚程	50.0 m
レール面上揚程	35.0 m
レールスパン	16.0 m
巻速度	60/130 m/min
横行速度	180 m/min
走行速度	45 m/min
軌法線間距離	4.5 m

注1) 巻速度は, 左が定格荷重時で, 右が無負荷時である。
注2) レール面上揚程は, 全揚程の内数である。

表-2 船舶の諸元

	ポストパナマックス船 (PP 船)	近海航路船 (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
Bay 数	40'x17, 20'x2	40'x8
列数	16 / 14	8 / 6
段数	6 / 9	4 / 4
満載喫水	14.0 m	7.35 m
満載排水量	108,181 t	unknown
軽荷喫水	4.3 m	1.8 m
軽荷重量	26,362 t	unknown
仕向先	欧州	韓国・中国

注1) 列数と段数は, 左がデッキ, 右がハッチである。
注2) 近海航路船の満載喫水と軽荷喫水は, 船室の Draft Gage の値である。他は寄港協約書類からの値である。

2.4 運転特性パラメータ

運転の仕方の特性を表す各種パラメータを, 実測値から設定する。まず, 何らかの理由で大きな遅延が生じたと考えられる150秒を超える片サイクルは除外する。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取り, 平均値を求め, それを運転パラメータとする。シャシ上での停止時間は, その頻度分布15秒を境に2つに分かれるため, 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する。そうして設定した運転特性のパラメータは表-3のとおりである。

表-3 運転特性パラメータ

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

荷役時間のモデルだけであれば, コンテナの重量を変数として組み込む必要はない。しかし, エネルギーを計算するためには, それらを変数としてモデルに組み込んでおく必要がある。このため, コンテナを40ftと20ft, 実と空に分けて重量を与える。ここでは, 対象とする荷役コンテナの分類ごとの平均重量を使用する。また, 最大巻速度は吊り荷重が大きくなると低下するように設計されているため, 運動エネルギーを一定以下にするという条件を仮定し, コンテナの総重量から最大巻速度を推定する。推定式は, 次の通りとなる。

$$V_x^{YM} = \min \left(V_{zero}^{YM}, V_{full}^{YM} \cdot \sqrt{\frac{M_{full}^Y}{M_x^Y}} \right) \quad (1)$$

ここで, V_x^{YM} は荷役する吊り荷重の最大巻速度, V_{zero}^{YM} は無負荷時の最大巻速度, V_{full}^{YM} は全負荷時の最大巻速度, M_{full}^Y は全負荷に相当する吊荷と吊具の質量, M_x^Y は

荷役する吊荷と吊具の質量である。

また、ホールド内最大降下速度は実測値の分布から概ね妥当と見なせる値を設定する。これらをまとめると表-4の通りとなる。

表-4 コンテナ重量と最大速度

	PP 船	K 船
実コンテナ総重量(40ft)	14.5 t	18.7t
実コンテナ総重量(20ft)	14.7 t	15.5t
空コンテナ総重量(40ft)	2.3 t	2.8 t
空コンテナ総重量(20ft)	2.8 t	1.3 t
最大巻速度(40ft 実コンテナ)	1.92 m/s	1.69 m/s
最大巻速度(20ft 実コンテナ)	1.91 m/s	1.86 m/s
ホールド内最大降下速度	0.45 m/s	0.45 m/s

2.5 計算値と実測値の比較

安全距離を決定するために、PP 船 Bay50 および K 船 Bay15 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、実測値からモデルの条件に合わない片サイクルを選び出し、それら片サイクルを計算値と実測値の双方のサンプルから除外し、片サイクル時間の平均を求め、両者を比較し、もっとも適合する安全距離を選定する。結果は、安全距離がPP 船で1m、K 船で8mである(表-5~6 参照)。

表-5 安全距離の同定 (PP 船 Bay50)

		実測	計算 (安全距離)		
			0.5m	1.0m	1.5m
片サイクル 時間(s)	平均	60.0	59.7	59.9	60.3
	標準偏差	18.8	20.1	20.0	20.0
	データ数	230	230	230	230

表-6 安全距離の同定 (K 船 Bay15)

		実測	計算 (安全距離)		
			7.5m	8.0m	8.5m
片サイクル 時間(s)	平均	48.9	48.4	49.2	50.0
	標準偏差	16.7	13.1	13.3	13.3
	データ数	194	194	194	194

実測値との整合を見るため、上記のモデルに表-3 のパラメータを与え、求めた安全距離を与え、PP 船は Bay50 と Bay67, K 船は Bay15 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。その結果から条件に合わない片サイクルを除外し、実測値と比較すると、結果は表-7 および図-5~6 となる。PP 船の場合はかなり

表-7 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	53.6s	52.4s	48.9s	49.2s
標準偏差	18.4s	18.8s	16.7s	13.3s
データ数	424		196	
R ²	0.46		0.19	

注) R²は計算値=実測値と仮定したときの決定係数

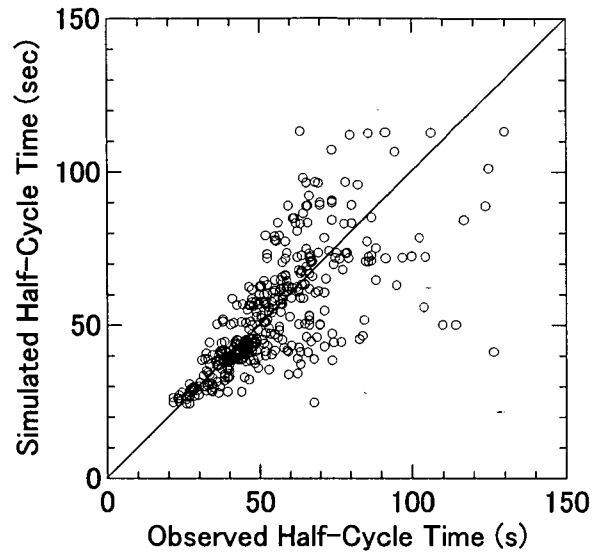
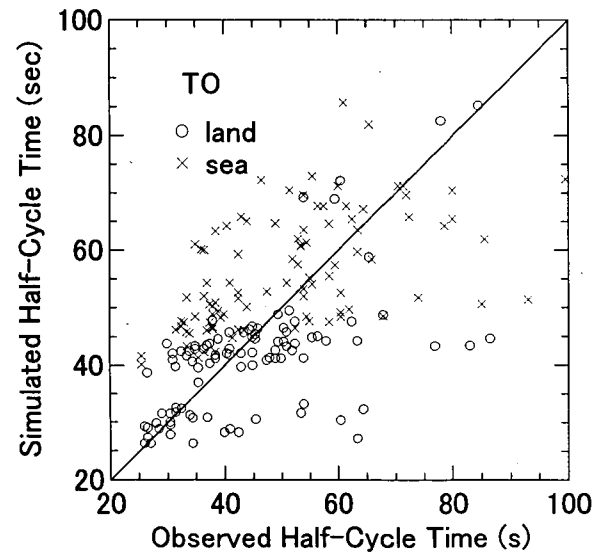


図-5 片サイクル時間の計算値と実測値の散布図 (PP 船 Bay50 & Bay67)



注) ○は陸行, ×は海行である。

図-6 片サイクル時間の計算値と実測値の散布図 (K 船 Bay15)

対応がよい。しかし、K 船の場合は PP 船の場合に比べて対応が悪い。K 船の場合は一部明確な傾向を持って乖離しているグループがある。それは主に陸行の片サイクルである。乖離が大きいのは、20ft サイドの切替を陸行きパスで行っているものがあり、その分の時間がモデルでは海行パスに計上されているためである。また、陸行の片サイクルは、試験的に半自動運転を行ったものが多数含まれているため、それによる乖離が生じていると考えられる。半自動運転のスプレッドの軌跡は、障害コンテナとの衝突を回避するために、全てのパスにおいてかなり高い位置まで巻上げられている。このため、片サイクルの時間が長くなっている。このことは、自動運転が手動運転に比して荷役速度がかなり劣ることを意味し、大型船舶の荷役の場合は、深刻な問題となる可能性がある。今後の重要な技術課題であろう。

3. 電力消費モデル

コンテナクレーンの荷役動作による電力消費を、荷役動作モデルによって求めたスプレッドの運動データを入力条件として、荷役動作を行うために必要な力学エネルギーを求め、そのエネルギーから消費電力を推定することによって求める。このようなモデルを当てはめることによって、対象とするコンテナクレーンの電力消費量を推計する。求めた推計値と実測値を比較し、荷役動作・電力消費の一連のモデルの妥当性を確認する。

次に、作成した荷役動作・電力消費モデルを用いて、電力消費原単位を求める。あわせて、クレーンの諸元や荷役条件を変化させた場合の電力消費原単位の変化に対する感度を求め、感度の高い項目を求める。

3.1 モデルにおける電力消費

コンテナクレーンの電力は、主に吊荷や吊具等を運動させるエネルギーとして消費される。運動のためのエネルギーは、吊荷や吊具等の運動体を運動させるためのエネルギー、その運動を行う際の機械抵抗による機械損失、および、電動機が電気エネルギーを回転力に変換する際の電気損失からなる。それらの関係は、巻上、巻下、横行の動作ごとに次式により表わされる。

(巻上下、電力消費)

$$P_i^Y = W_i^Y \cdot L_i^Y / \eta^{mecha} / \eta^{elec} \quad (2a)$$

(巻上下、電力回生)

$$P_i^Y = W_i^Y \cdot L_i^Y \cdot \eta^{mecha} \cdot \eta^{recircul} \quad (2b)$$

(横行、電力消費)

$$P_i^X = (M_i^X \cdot (g \cdot F + A_i^X) + Rp) \cdot L_i^X / \eta^{mecha} / \eta^{elec} \quad (2c)$$

(横行、電力回生)

$$P_i^X = (M_i^X \cdot (g \cdot F + A_i^X) + Rp) \cdot L_i^X \cdot \eta^{mecha} \cdot \eta^{recircul} \quad (2d)$$

ここで、 P_i^Y は第 i 番目の荷役パスにおける巻上下の際に消費される電力量で、消費を正值、回生を負値とする、 P_i^X は第 i 番目の荷役パスにおける横行の際に消費される電力量で、消費を正值、回生を負値とする、 W_i^Y は第 i 番目の荷役パスの吊荷と吊具に作用する重力、 L_i^Y は第 i 番目の荷役パスの吊具の上昇距離、 M_i^X は第 i 番目の荷役パスの吊荷と吊具の質量、 A_i^X は第 i 番目の荷役パスの加速度、 g は重力加速度、 F は横行の際のトロリの摩擦係数、 Rp は横行の際のロープ抵抗等の抵抗、 L_i^X は第 i 番目の荷役パスにおける加速、等速もしくは減速の区間の水平距離の絶対値、 η^{mecha} は機械効率、 η^{elec} は電気効率、 $\eta^{recircul}$ は回生時の電気効率である。

前章の荷役動作モデルを使って求めたスプレッドの運動データに上記の電力消費の式を適用することにより、各荷役パスにおける電力消費量を求めることができる。求めた電力消費量を対象とする全ての荷役パスについて合計することにより、対象とする貨物を荷役する場合の電力消費量を推計することができる。

3.2 モデルの再現性

モデルの再現性を確認するため、実際の荷役におけるコンテナの船積みと陸揚げの情報をもとに、上記の荷役動作・電力消費モデルを用いてコンテナクレーンの電力消費量を推計し、それと実際に荷役を行った際に電力メータから読み取ったコンテナクレーンの電力量を比較する。このために 2003 年 8 月に行われた清水港袖師第一埠頭第 5 号コンテナクレーンの 3 件の荷役データを使用する。使用するデータの荷役の状況、荷役をした船舶の諸元・状況、気象海象の状況は、表-8~10 のとおりである。

近年設置されたコンテナクレーンは、ここで実測データを使ったクレーンを含めて、電力回生設備が設けられ

表-8 荷役の状況

調査項目	単位	Case1	Case2	Case3
荷役日	-	2003/8/16	2003/8/29	2003/8/31
荷役時間	-	01:00-05:45	00:10-06:20	03:40-11:30
荷役個数(実入)	個	108	161	190
荷役個数(空)	個	51	0	58
電力消費量	kwh	480	560	790

表-9 船舶の諸元・状況

調査項目	単位	Case1	Case2	Case3
船型分類	-	PP型	K型	PP型
船長	m	299.9	163.7	299.9
船幅	m	40.0	26.0	40.0
型深	m	23.9	13.4	24.3
満載喫水	m	14.0	9.3	14.0
荷役開始喫水	m	10.5	5.4	11.5
荷役終了喫水	m	10.5	5.4	11.6
載貨重量トン	ton	81,819	18,299	78,243
積載能力	TEU	6,214	1,181	6,422
デッキ列数	列	16	10	16
デッキ段数	段	6	5	6
ホールド列数	列	14	8	14
ホールド段数	段	9	5	9
仕向先	-	欧州	BANGKOK	欧州

表-10 気象海象の状況

月日	時間	風向	風速(m/s)	波向	波高(m)	潮位(cm)
8/16	1:00	NE	2.9	SSE	0.77	147
	2:00	ENE	4.3	SSE	0.78	145
	3:00	ENE	4.6	SSW	0.85	155
	4:00	ENE	4.8	NW	0.73	172
	5:00	E	6.0	SW	0.84	194
	6:00	E	6.1	SW	0.82	216
8/29	0:00	-	-	SSE	0.32	136
	1:00	-	-	WSS	0.27	140
	2:00	WNW	1.2	SW	0.28	157
	3:00	W	1.1	WSW	0.33	182
	4:00	WSW	0.9	WSW	0.30	208
	5:00	W	2.8	W	0.30	229
	6:00	W	2.2	SW	0.29	236
7:00	-	-	SW	0.29	228	
8/31	3:00	-	-	S	0.30	136
	4:00	-	-	-	0.24	162
	5:00	W	0.5	SW	0.25	193
	6:00	W	1.7	-	0.23	217
	7:00	SSW	0.6	-	0.20	231
	8:00	SSE	2.0	-	0.23	232
	9:00	WSW	5.0	-	0.23	216
	10:00	WSW	6.6	NW	0.27	189
	11:00	WSW	5.6	SW	0.33	158
	12:00	SW	5.0	NNW	0.26	132

注1) 気象は、静岡県清水港管理局が、清水港日の出地区(標高41.0m)で観測した値である。
 注2) 風向、風速は、10分平均値である。
 注3) 波浪は、国土交通省中部地方整備局清水港湾整備事務所が、清水港沖(美保防波堤沖約1km、水深51.6m)で観測した値である。
 注4) 潮位は、静岡県清水港管理局が清水港日の出地区に設置した潮位計の値を、気象庁がネットワークシステムで読み取り公表した値で、DLからの高さである。

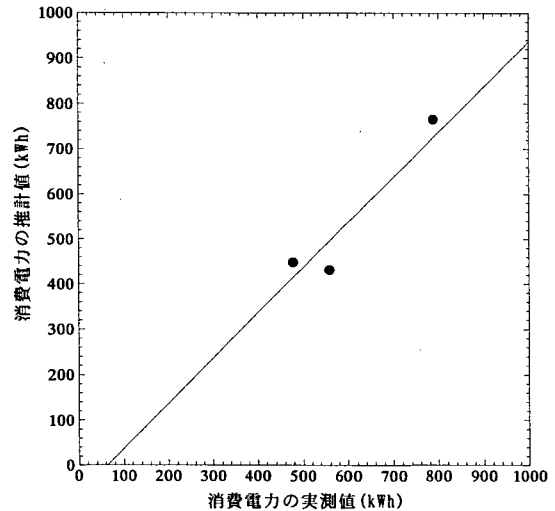
ているものが多い。しかし、各コンテナクレーンの電力メータは、電力の回生によってメータが逆転しないため、電力メータの数値は電力回生がない場合のものに相当する。このため、モデルの妥当性の検証には、電力回生がない場合のモデルで計算を行い比較する。

結果は、表-11 および図-7のとおりとなり、実測値と推計値は良く一致する。実測値からモデルによる推計値を減じた値の平均値は62.7kWhであり、平均で11%のエネルギーが計上されていないことが分かる。考えられる項目としては、①ブーム昇降、②ハッチカバー荷役、③走行、④動力部の慣性抵抗、⑤油圧装置の稼働、⑥照明の点灯、⑦エレベータの昇降、⑧キャビンの電力消費、⑨機械室の電力消費などがある。

表-11 コンテナクレーンの消費電力の実測と推計

	A:実測値	B:計算値	A-B
Case1	480	447	33
Case2	560	430	130
Case3	790	764	26
平均	610	547	63
標準偏差	161	188	58

注) 単位は kWh である。



注) 直線は、傾きを1とし、切片を最小自乗法で求めたものである。

図-7 コンテナクレーンの消費電力の実測と推計

3.3 電力消費原単位の推計

P型、PP型およびSP型のコンテナ船とコンテナクレーンの標準的な諸元を、関係者からの聞き取りをもとに表-12~13の通り設定する。20ftコンテナの全体に占める割合は、横浜港(H12)、東京港(H10)、神戸港(H10)、大阪港(H11)のデータから33%(TEUベース)と設定

する。コンテナの総重量は、2000年10月における清水港での荷役の実測値の平均値を使用する。モデルを単純化するため加速度は負荷によって変化しないものとする。このため、巻加速度は便宜的に全負荷時の値を使用する。

これらの諸元を仮定して船舶・クレーンの各サイズについてコンテナの岸壁荷役時の電力消費原単位を推計する。コンテナを荷役する際の消費電力は、実コンテナの場合、コンテナの総重量に比例する傾向があり、空コンテナの場合、コンテナの重量によらない傾向があると考えられる。このため、実コンテナの場合は、推計しようとするベイの対象コンテナを全て荷役した場合に消費する電力量を求め、それを対象コンテナの総重量の合計で除し、それを電力消費原単位として整理する。空コンテナの場合は、荷役動作ハーフサイクルあたりの電力消費量を求める。

表-12 コンテナ船関係の諸元

項目	P型	PP型	SP型
積載能力(TEU)	1,800 ~4,400	4,300 ~5,400	12,000
デッキ段数	4	5	7
デッキ列数	13	16	22
ホールド段数	8	9	9
ホールド列数	11	14	18
船幅(m)	32.2	39.4	55
型深(m)	21.4	23.4	29
満載喫水(m)	11.5	12.5	17
荷役時喫水(m)	10.1	11	15
ハッチコーミング(m)	2.5	2.5	2.5

表-13 コンテナクレーン関係の諸元

項目	P型	PP型	SP型
最大巻上高さ(m)	31	35	40
防舷材高さ(m)	1.5	1.5	1.5
軌法線間距離(m)	2	3	3
最大吊荷重(t)	30.5	40.6	65
最大巻速度(m/s)	60/150	70/150	90/180
巻加速度(m/s ²)	0.5/0.7	0.5/0.7	0.6/0.8
最大横行速度(m/s)	180	210	240
横行加速度(m/s ²)	0.5	0.5	0.5
走行速度(m/s)	45	45	60
スプレッダ(t)	12.5	12.5	15
トロリ(t)	21	24	35
リフト	シングル	シングル	ツイン
機械効率	0.9	0.9	0.9
電気効率	0.9	0.9	0.9
回生時電気効率	0.6	0.6	0.6
走行抵抗係数(1/t)	0.0055	0.0055	0.0055
ロープしごき等(kN)	15	17	27
コンテナの高さ(ft)	8.5	8.5	9.5

注1) 最大巻速度と巻加速度は、左が全負荷時、右が無負荷時である。
注2) トロリ重量には運転室等を含む。

以上の方法で推計した実コンテナの電力消費原単位が、

表-14~16、空コンテナの電力消費量が表-17~19となる。この表から分かる主な特徴は次のとおりである。

消席率 100%の際に中央ブロックを荷役する場合は、電力消費原単位は全断面を荷役する場合の1.5~1.7倍になる。そして、中央ブロックを荷役する場合と全断面を荷役する場合の電力消費原単位の乖離は、消席率が低下するにつれて小さくなる。電力回生がある場合は、電力回生がない場合の60~70%の値となる。中央ブロックあるいはサイドブロックを荷役する場合は、消席率が低下すると電力消費原単位は低下する。しかし、全断面を荷役する場合は、逆に増加する。

表-14 電力消費原単位 (P-P型, 実)

		消席率			
		100%	90%	80%	70%
回生有	中央	0.154	0.142	0.129	0.117
	サイド	0.124	0.119	0.121	0.117
全面		0.098	0.099	0.100	0.102
回生無	中央	0.258	0.237	0.214	0.191
	サイド	0.205	0.195	0.199	0.192
全面		0.158	0.159	0.161	0.165

注1) 回生有は電力の回生がある場合、回生無は電力の回生がない場合である。
注2) 中央は中央ブロック荷役、サイドはサイドブロック荷役を表す。
注3) 電力消費原単位の単位は kWh/t である。

表-15 電力消費原単位 (PP-PP型, 実)

		消席率			
		100%	90%	80%	70%
回生有	中央	0.201	0.187	0.174	0.144
	サイド	0.160	0.154	0.150	0.145
全面		0.123	0.123	0.125	0.128
回生無	中央	0.336	0.312	0.287	0.235
	サイド	0.262	0.252	0.244	0.237
全面		0.196	0.198	0.201	0.206

注1) 回生有は電力の回生がある場合、回生無は電力の回生がない場合である。
注2) 中央は中央ブロック荷役、サイドはサイドブロック荷役を表す。
注3) 電力消費原単位の単位は kWh/t である。

表-16 電力消費原単位 (SP-SP型, 実)

		消席率			
		100%	90%	80%	70%
回生有	中央	0.226	0.222	0.199	0.193
	サイド	0.185	0.187	0.182	0.169
全面		0.142	0.141	0.141	0.145
回生無	中央	0.371	0.365	0.324	0.312
	サイド	0.296	0.300	0.291	0.268
全面		0.220	0.219	0.220	0.225

注1) 回生有は電力の回生がある場合、回生無は電力の回生がない場合である。
注2) 中央は中央ブロック荷役、サイドはサイドブロック荷役を表す。
注3) 電力消費原単位の単位は kWh/t である。

表-17 電力消費原単位 (P-P 型, 空)

		消席率			
		100%	90%	80%	70%
回生有	中央	0.930	0.865	0.793	0.725
	サイド	0.758	0.727	0.743	0.722
	全面	0.613	0.617	0.624	0.637
回生無	中央	1.536	1.421	1.294	1.172
	サイド	1.230	1.176	1.204	1.167
	全面	0.973	0.979	0.992	1.016

注 1) 回生有は電力の回生がある場合、回生無は電力の回生がない場合である。
 注 2) 中央は中央ブロック荷役、サイドはサイドブロック荷役を表す。
 注 3) 電力消費原単位の単位は kWh/half-cycle である。

表-18 電力消費原単位 (PP-PP 型, 空)

		消席率			
		100%	90%	80%	70%
回生有	中央	1.086	1.021	0.955	0.811
	サイド	0.882	0.855	0.834	0.815
	全面	0.702	0.705	0.714	0.729
回生無	中央	1.775	1.660	1.542	1.286
	サイド	1.412	1.365	1.328	1.293
	全面	1.092	1.098	1.114	1.142

注 1) 回生有は電力の回生がある場合、回生無は電力の回生がない場合である。
 注 2) 中央は中央ブロック荷役、サイドはサイドブロック荷役を表す。
 注 3) 電力消費原単位の単位は kWh/half-cycle である。

表-19 電力消費原単位 (SP-SP 型, 空)

		消席率			
		100%	90%	80%	70%
回生有	中央	1.738	1.732	1.547	1.470
	サイド	1.397	1.397	1.375	1.280
	全面	1.110	1.102	1.102	1.113
回生無	中央	2.784	2.774	2.446	2.308
	サイド	2.177	2.178	2.139	1.970
	全面	1.668	1.655	1.653	1.673

注 1) 回生有は電力の回生がある場合、回生無は電力の回生がない場合である。
 注 2) 中央は中央ブロック荷役、サイドはサイドブロック荷役を表す。
 注 3) 電力消費原単位の単位は kWh/half-cycle である。

全てのコンテナの総重量を 16t とすると実コンテナのハーフサイクルあたりの電力消費量は、表-17~19 を使って計算すると、電力回生がある場合もない場合も空コンテナの場合の約 2-3 倍である。

3.4 電力消費原単位の感度分析

クレーン性能や運転条件の変化による電力消費原単位の変化をみるため、①最大横行速度、②最大巻速度(無負荷)、③最大巻速度(全負荷)、④船倉内最大降下速度、⑤横行加速度、⑥巻加速度、⑦空コンテナ総重量(20'/40')、⑧実コンテナ総重量(20'/40')、⑨吊具重量、⑩トリリ重量、⑪リフト方式、⑫機械効率、⑬電気効率、⑭回生電

気効率、⑮走行抵抗係数、⑯ロープ扱き等の抵抗を変化させ、その場合の電力消費原単位を荷役動作・電力消費モデルによって推計し、基準ケースと比較する。まず、3.3 で設定した各種諸元・条件を持つ P-P 型、PP-PP 型および SP-SP 型で、20'コンテナの割合 33%、消席率 100%、全断面を荷役する場合を基準ケースと設定する。そして、①~⑩もしくは⑮~⑯が、基準ケースの半分になる場合と 2 倍になる場合を想定する。⑪はシングルリフトの場合とツインリフトの場合を想定する。⑫~⑭は、各パラメータが標準値と 1.0 の中間値まで増加する場合と、その増加量と同じだけ標準値から減少する場合を想定する。その上で、各パラメータがそれぞれ単独に変化した場合について、電力回生があり、実コンテナを荷役するときの各ケースの電力消費原単位を求め、その基準ケースからの変化量を求める。

表-20 パラメータの変化による電力消費原単位の変化

パラメータ	P-P型		PP-PP型		SP-SP型		
	kWh/t	%	kWh/t	%	kWh/t	%	
基準ケース	-	0.101	-	0.123	-	0.142	
最大横行速度(m/s)	1.5	0.100	-0.8	0.122	-0.7	0.141	
6	0.102	0.5	0.123	0.3	0.142	0.2	
最大巻速度(m/s) 無負荷	1.25	0.095	-6.3	0.116	-5.2	0.135	
5	0.112	10.7	0.134	9.0	0.151	6.9	
最大巻速度(m/s) 全負荷	0.5	0.101	0.0	0.123	0.0	0.142	
2	0.101	0.0	0.123	0.0	0.142	0.0	
船倉内最大降下速度(m/s)	0.225	0.101	0.0	0.123	0.0	0.142	
0.9	0.101	0.0	0.123	0.0	0.142	0.0	
横行加速度(m/s ²)	0.25	0.100	-1.0	0.122	-0.9	0.141	
1	0.103	2.1	0.126	2.7	0.146	3.2	
巻加速度(m/s ²)	0.3	0.113	11.9	0.142	15.6	0.162	
1.2	0.094	-7.3	0.112	-8.8	0.129	-8.8	
実コンテナ総重量(20')(t)	7.35	0.122	21.0	0.151	22.9	0.176	
29.4	0.079	-21.8	0.095	-22.9	0.108	-23.8	
実コンテナ総重量(40')(t)	7.25	0.130	28.5	0.155	26.2	0.178	
29	0.073	-27.4	0.090	-26.2	0.105	-25.9	
吊具重量(t)	7.75	0.073	-27.8	0.090	-26.7	0.107	
31	0.158	56.1	0.189	54.0	0.211	49.1	
トリリ重量(t)	10.5	0.100	-1.3	0.121	-1.5	0.140	
42	0.105	3.5	0.128	4.1	0.148	4.7	
リフト	T/S	0.093	-7.7	0.108	-11.7	0.161	13.9
機械効率	0.85	0.114	12.9	0.138	12.8	0.159	
0.95	0.089	-11.9	0.108	-11.8	0.126	-11.3	
電気効率	0.85	0.111	9.5	0.134	9.4	0.155	
0.95	0.093	-8.5	0.112	-8.4	0.130	-8.2	
回生電気効率	0.4	0.122	20.6	0.147	20.1	0.168	
0.8	0.080	-20.6	0.098	-20.1	0.116	-18.5	
走行抵抗係数(1/t)	0.00275	0.100	-1.1	0.121	-1.2	0.140	
0.011	0.104	2.4	0.126	2.5	0.146	2.9	
ロープ扱き等(kN)	7.5	0.094	-7.2	0.113	-7.8	0.127	
30	0.118	16.8	0.146	18.7	0.177	24.8	

注 1) リフトは、P 型と PP 型は Twin の場合を、SP 型では Single の場合を記載している。
 注 2) Twin の場合は、吊具重量とトリリ重量を基準ケースより各 5t 大きくしている。Single の場合は、吊具重量とトリリ重量を基準ケースより各 5t 小さくしている。

その結果は表-20 および図-8~10 の通りとなる。最も電力消費原単位の低下が大きいのは、吊具の重量を小さくした場合、もしくは、実コンテナの総重量を大きくした場合である。これは、吊具重量が小さくなるあるいは貨物重量が大きくなると、クレーンの移動体部分が運動

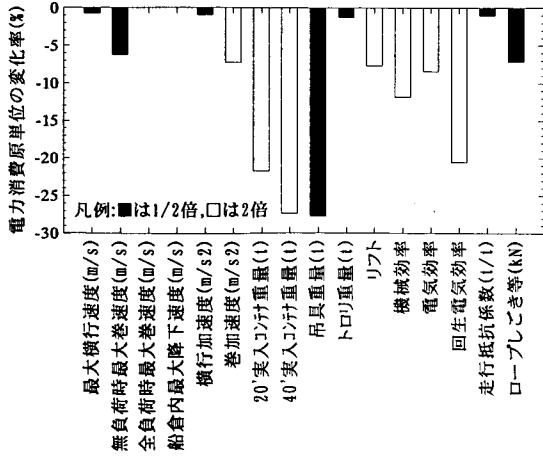


図-8 電力消費原単位の変化率 (P-P 型)

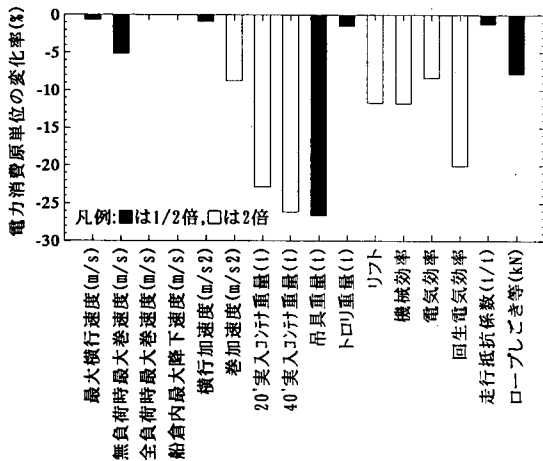


図-9 電力消費原単位の変化率 (PP-PP 型)

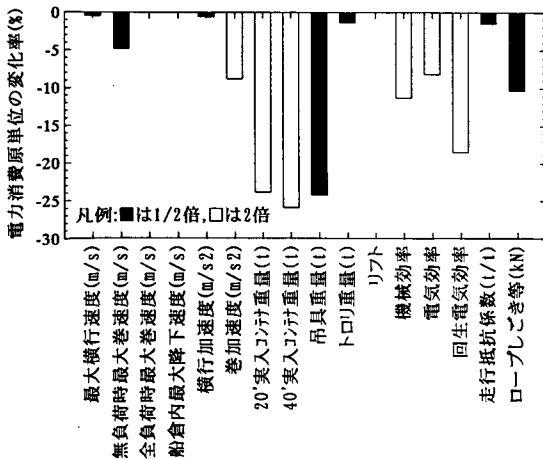


図-10 電力消費原単位の変化率 (SP-SP 型)

することによるエネルギー消費量が、絶対的あるいは相対的に小さくなるためである。次に変化が大きいのは、回生電気効率、機械効率、電気効率が上昇した場合である。その他、電力消費原単位の低下が比較的大きいのは、ロープ抜き等の抵抗の低下、ツインリフトの採用、巻加速度の上昇、最大横行速度の低下である。

4. 結論

本研究では、コンテナクレーンの荷役動作を模擬し、その結果を基にコンテナクレーンの消費電力を推計する数値モデルを作成した。作成した荷役動作・電力消費モデルを用いて推計した値と実測値を比較したところ、両者は非常によく一致した。このため、ここで作成した荷役動作・電力消費モデルを用いれば、コンテナクレーンの荷役動作による消費電力をかなり精度よく推計することができると思われる。

Panamax 型、Post Panamax 型、Super Panamax 型の標準的なコンテナ船・コンテナクレーンを想定し、作成した荷役動作・電力消費モデルを用いて、消席率と荷役ブロックが変化した場合の電力消費量の原単位を推計した。その結果、次のことが分かった。

- ① 消席率や荷役ブロックが異なると、電力消費原単位は変化し、最大値は最小値の 1.5~1.7 倍となる。
- ② 電力回生がある場合の電力消費原単位は、電力回生がない場合の 60~70% となる。

作成した荷役動作・電力消費モデルを用い、消席率 100% で全断面を荷役する場合を基準ケースとして、クレーンの諸元や荷役条件を変化させた場合に電力消費原単位がどれだけ変化するかを調べた。その結果、次のことが分かった。

- ① 設定した条件変化のなかで電力消費原単位の変化が最も大きいのは、吊具重量を小さくした場合か、実コンテナ総重量を大きくした場合である。
- ② 次に変化が大きいのは、回生電気効率、機械効率、電気効率を上昇させた場合である。
- ③ その他、電力消費原単位の低下が比較的大きいものは、ロープ抜き等の横行抵抗の低下、ツインリフトの採用、巻加速度の上昇、最大横行速度の低下である。

(平成 16 年 11 月 25 日受付)

謝辞

港湾荷役機械システム協会 専務理事 藤井喜一郎氏 および第二技術部長 大貫行眞氏には、コンテナクレー

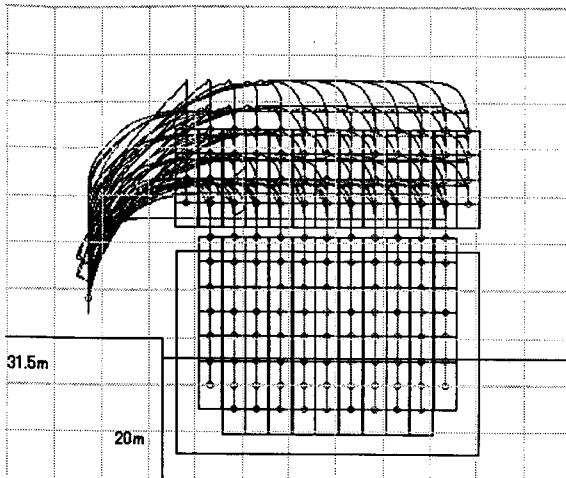
ンの標準的な諸元についての情報を提供頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

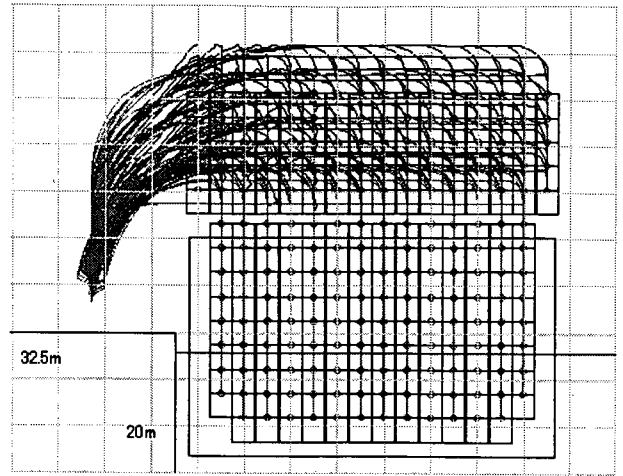
鈴木武 (2004) : ユニットロードを対象とする港湾整備に伴うエネルギー消費量と CO2 排出量の推計体系の基礎的整理, 国土技術政策総合研究所資料, No.192, 国土技術政策総合研究所.

鈴木武・佐藤栄治 (2003) : 大型コンテナクレーンの荷役実態と荷役動作モデルの構築, 国土技術政策総合研究所資料, No.59, 国土技術政策総合研究所.

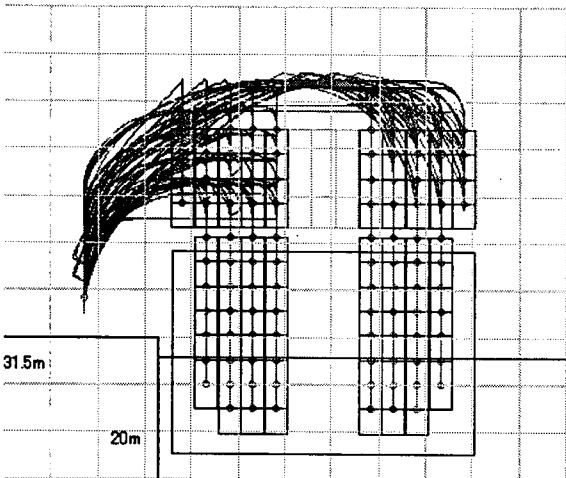
付録 荷役動作モデルで求めたスプレッドの軌道



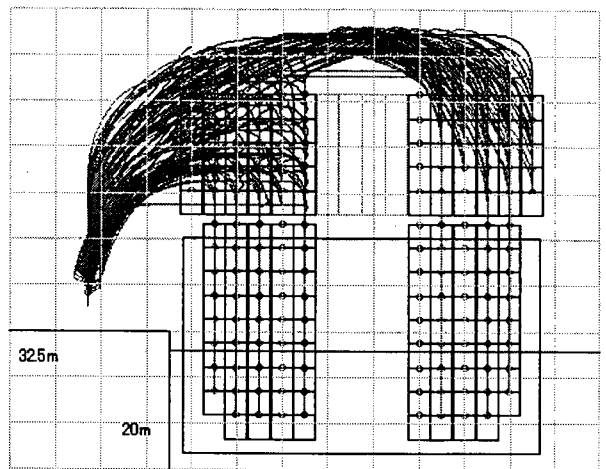
付図-1 P-P型 全断面荷役



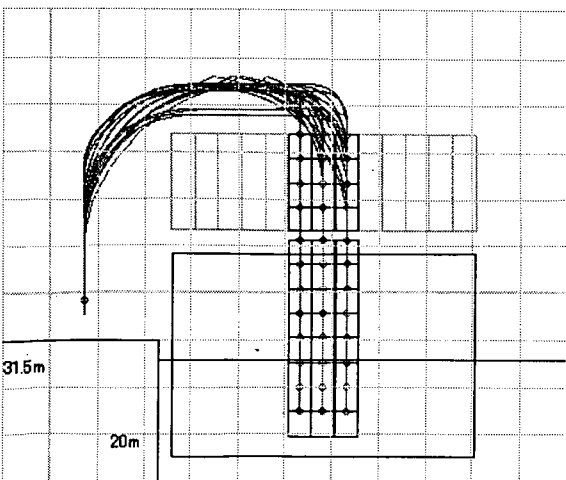
付図-4 PP-PP型 全断面荷役



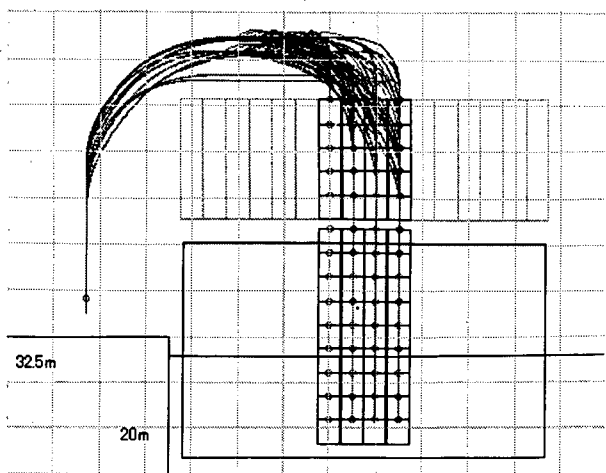
付図-2 P-P型 サイドブロック荷役



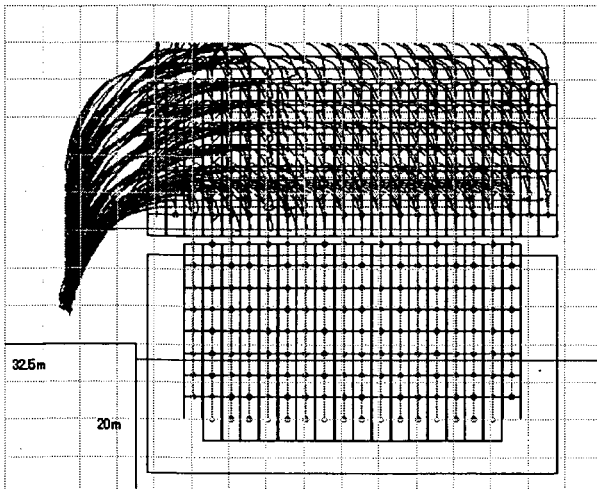
付図-5 PP-PP型 サイドブロック荷役



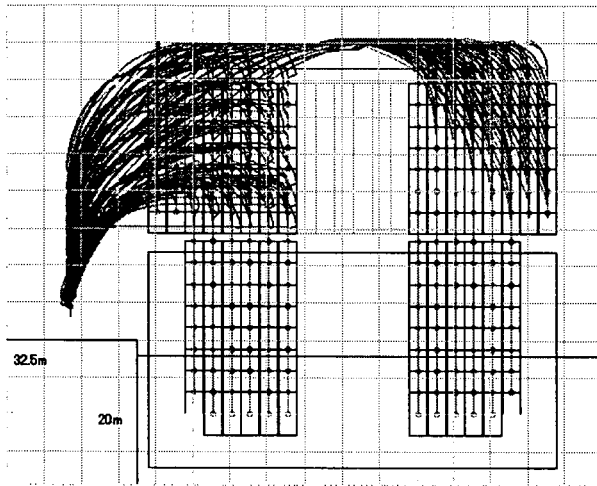
付図-3 P-P型 中央ブロック荷役



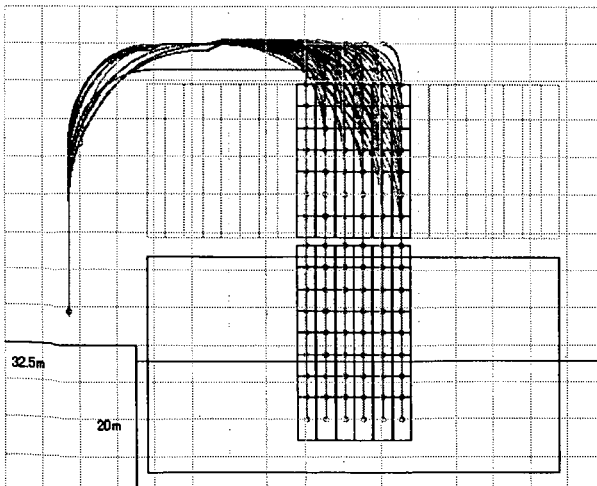
付図-6 PP-PP型 中央ブロック荷役



付図-7 SP-SP 型 全断面荷役



付図-8 SP-SP 型 サイドブロック荷役



付図-9 SP-SP 型 中央ブロック荷役