

# 荷役動作モデルを用いたコンテナクレーンの消費電力の推計とその影響要因の分析

ESTIMATION OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION AND ANALYSIS OF ITS FACTORS FOR QUAY CONTAINER CRANE BY HANDLING MOTION MODEL

鈴木武<sup>1</sup>

Takeshi SUZUKI

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 国土技術政策総合研究所(横須賀) 沿岸海洋研究部  
(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

The author built a total system for the estimate of electric power consumption by a quayside container crane. The model calculates full motions of the spreader in the first step. Using the data as the input condition, the model calculates the electric power consumption. Comparing the estimates calculated by the model with observed data, the author verifies that the model explains rather precisely actual electric power consumption of the crane. Categorizing the combination of container ships and container cranes, the author calculated unit electric power consumption per handling weight used by the model. The sensitivities of related factors to the unit electric power consumption were also calculated in cases to shift crane specs and handling conditions respectively.

**Key Words:** container crane, electric power consumption, handling motion, Post Panamax

## 1. はじめに

コンテナクレーンは、船舶の大型化により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重要である。このため、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し、そのモデルを使い、コンテナクレーンの電力消費特性を整理・分析した。

## 2. 荷役動作モデル

### (1) モデルの荷役動作

荷役動作の片サイクルを単位とし、40ft ベイを対

象として、スプレッドの移動をモデル化する。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 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。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。
- ⑥ 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、スプレッドが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。

- ⑦ 降下は、最高点から、陸に向かう場合はシャシ上まで、海に向かう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。ホールド（船倉）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。
- ⑧ 巻上下の最大速度は吊荷重によって異なる値を取り、その値は一定である。ただし、ホールド内の降下の最高速度は、ホールド外より低い値となり、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。

これらの一連の運動の過程で生じる①離陸時の一時停止の時間、②スタッピングコーン（コンテナとコンテナをつなぎ合わせる治具）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・位置決めの時間、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。

## (2) 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 月および同年 12 月に荷役したコンテナ船の実測データを用いて、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    | 441 kN       |
| 定格荷重    | 299 kN       |
| 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。

## (3) 運転特性パラメータ

運転の特性を表す各種パラメータを、実測値から表-3 および表-4 のとおり設定する。

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 |

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   | 18.7 t   |
| 実コンテナ総重量(20ft)    | 14.7 t   | 15.5 t   |
| 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 |

(4) 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、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、安全距離は 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<br>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<br>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  |

3. 電力消費モデル

(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)

$$P_i^Y = W_i^Y \cdot L_i^Y / \eta^{mecha} / \eta^{elec} \quad (1)$$

(巻上下、電力回生)

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

(横行、電力消費)

$$P_i^X = (M_i^X \cdot (g \cdot F + A_i^X) + R_p) \cdot L_i^X / \eta^{mecha} / \eta^{elec} \quad (3)$$

(横行、電力回生)

$$P_i^X = (M_i^X \cdot (g \cdot F + A_i^X) + R_p) \cdot L_i^X \cdot \eta^{mecha} \cdot \eta^{recircul} \quad (4)$$

ここで、 $P_i^Y$  は第  $i$  番目の荷役サイクル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  $i$  番目の荷役サイクル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  $i$  番目の荷役サイクルの吊荷と吊具に作用する重力、 $L_i^Y$  は第  $i$  番目の荷役サイクルの吊具の上昇距離、 $M_i^X$  は第  $i$  番目の荷役サイクルの吊荷と吊具の質量、 $A_i^X$  は第  $i$  番目の荷役サイクルの加速度、 $g$  は重力加速度、 $F$  は横行の際のトロリの摩擦係数、 $R_p$  は横行の際のロープ抵抗等の抵抗、 $L_i^X$  は第  $i$  番目の荷役サイクルにおける加速、等速もしくは減速の区間の水平距離の絶対値、 $\eta^{mecha}$  は機械効率、 $\eta^{elec}$  は電気効率、 $\eta^{recircul}$  は回生時の電気効率である。

2. 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、各荷役サイクルにおける電力消費量を求めることができる。

(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・状況は、表-7～8 のとおりである。

比較の結果は、表-9 のとおりとなり、実測値と推計値はかなり良く一致する。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。

表-7 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-8 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 | t   | 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-9 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。

### (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-10～11 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。

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

表-10 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<br>～4,400 | 4,300<br>～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-11 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/min)             | 60/150  | 70/150  | 90/180  |
| 巻加速度(m/s <sup>2</sup> )  | 0.5/0.7 | 0.5/0.7 | 0.6/0.8 |
| 最大横行速度(m/min)            | 180     | 210     | 240     |
| 横行加速度(m/s <sup>2</sup> ) | 0.5     | 0.5     | 0.5     |
| 走行速度(m/min)              | 45      | 45      | 60      |
| スプレッド(t)                 | 12.5    | 12.5    | 15      |
| トロリ(t)                   | 21      | 24      | 35      |
| リフト                      | Single  | Single  | Twin    |
| 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(N/N)              | 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。

表-12 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-13 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-14 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 (P-P 型, 空)

|     |     | 消費率   |       |       |       |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
|     |     | 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-16 電力消費原単位 (PP-PP 型, 空)

|     |     | 消費率   |       |       |       |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
|     |     | 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-17 電力消費原単位 (SP-SP 型, 空)

|     |     | 消費率   |       |       |       |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
|     |     | 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。

らない傾向がある。このため、実コンテナの場合は、消費電力量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する。空コンテナの場合は、荷役動作片サイクルあたりの電力消費量を求める。この結果は表-12～17 のとおりである。

#### (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ホールド内最大降下速度、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ロープ抜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%、消費率 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、①～⑯もしくは⑮～⑯が、基準ケースの 1/2 になる場合と 2 倍になる場合を想定する。⑩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-18 パラメータの変化と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   | —     |
| 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 |
| 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 |
| 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 |
| ホールド内最大降下速度(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 |
| 横行加速度(m/s <sup>2</sup> ) | 0.25    | 0.100 | -1.0    | 0.122 | -0.9    | 0.141 |
|                          | 1       | 0.103 | 2.1     | 0.126 | 2.7     | 0.146 |
| 巻加速度(m/s <sup>2</sup> )  | 0.3     | 0.113 | 11.9    | 0.142 | 15.6    | 0.162 |
|                          | 1.2     | 0.094 | -7.3    | 0.112 | -8.8    | 0.129 |
| 実コンテナ総重量(20')            | 7.35    | 0.122 | 21.0    | 0.151 | 22.9    | 0.176 |
| (t)                      | 29.4    | 0.079 | -21.8   | 0.095 | -22.9   | 0.108 |
| 実コンテナ総重量(40')            | 7.25    | 0.130 | 28.5    | 0.155 | 26.2    | 0.178 |
| (t)                      | 29      | 0.073 | -27.4   | 0.090 | -26.2   | 0.105 |
| 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 |
| 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 |
| リフト                      | T/S     | 0.093 | -7.7    | 0.108 | -11.7   | 0.161 |
| 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   | 0.125 |
| 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 |
| 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 |
| 走行抵抗係数(N/N)              | 0.00275 | 0.100 | -1.1    | 0.121 | -1.2    | 0.140 |
|                          | 0.011   | 0.104 | 2.4     | 0.126 | 2.5     | 0.146 |
| ロープ抜き等(kN)               | 7.5     | 0.094 | -7.2    | 0.113 | -7.8    | 0.127 |
|                          | 30      | 0.118 | 16.8    | 0.146 | 18.7    | 0.177 |

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-18 および図-1～3 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、

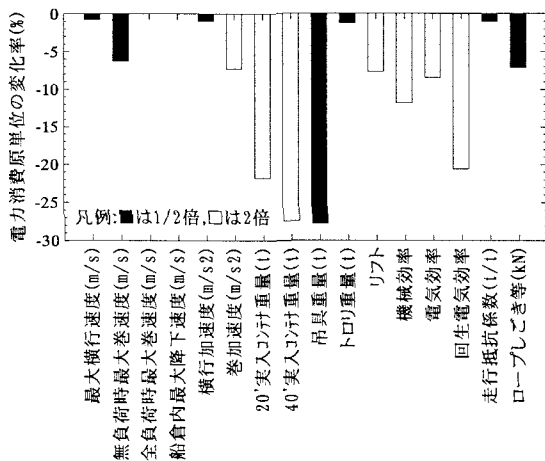


図-1 電力消費原単位の変化率 (P-P 型)

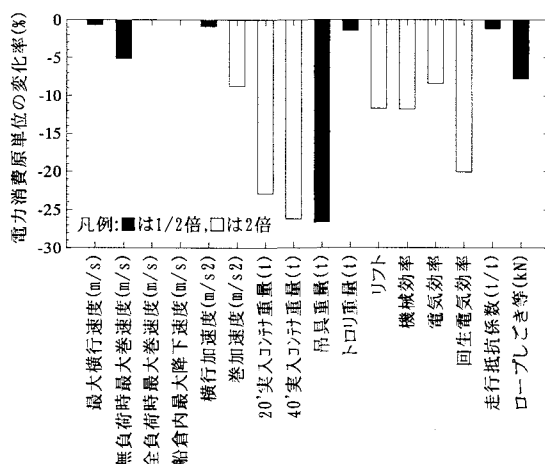


図-2 電力消費原単位の変化率 (PP-PP 型)

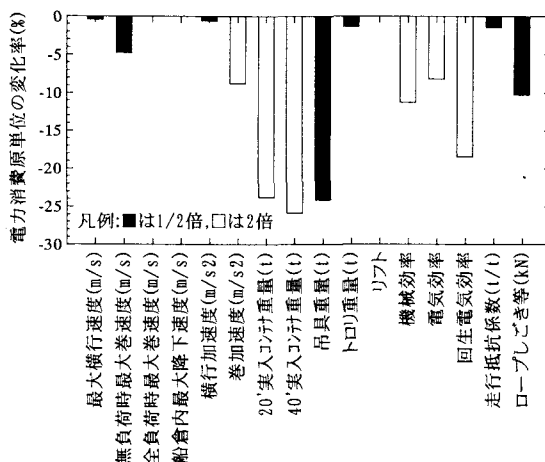


図-3 電力消費原単位の変化率 (SP-SP 型)

電力消費原単位の低下が比較的大きいのは、ロープ扱き等の抵抗の低下、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. まとめ

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、両者はかなり良く一致した。ただし、推計値と実測値の比較は3ケースでしか行っていないため、モデルと実測値との一致の検証を引き続き積み重ねていく必要がある。

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、消費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。

作成した荷役動作・電力消費モデルを用い、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。

その他、電力消費原単位の低下が比較的大きいものは、ロープ扱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。

#### 参考文献

- 1) 鈴木武：サイクルパスモデルによる Super Panamax 型コンテナクレーンの荷役時間分析，海洋開発論文集，Vol.19，pp.631-636，2003。