

ISSN 1346-7328

国総研資料 第59号

平成15年3月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 59

March 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

鈴木 武・佐藤英治

Actual Motions and Motion Model of Large-Sized Quay Crane
in Container Handling

Takeshi SUZUKI and Eiji SATOH

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

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

鈴木 武*, 佐藤栄治**

要 旨

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。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 6,000TEU 級の Post-Panamax 型であるが、これを大きく超える 13,000TEU 級の Super(-Post)-Panamax 型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。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正確に予測し、課題を正しく同定することが必要である。

このため本研究では、コンテナクレーン(コンテナ荷役用の門型岸壁クレーン)の設計諸元を整理するとともに、コンテナクレーンの荷役動作とその際の船舶のローリングを実測し、クレーンおよびその荷役の特性を整理した。そして、それらの実測結果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、その再現性を確認した。できた荷役動作モデルを利用し、コンテナクレーンの荷役時間に対する船型、クレーンの運動性能および運転条件の感度を分析した。

キーワード：コンテナクレーン，荷役動作，サイクルパス，設計諸元，ポストパナマックス

* 沿岸海洋研究部沿岸域システム研究室長

** 港湾空港技術研究所 施工制御技術部施工技術研究室研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土技術政策総合研究所

電話：0468-44-5025, Fax：0468-44-5074, E-mail：suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

Actual Motions and Motion Model of Large-Sized Quay Crane in Container Handling

Takeshi SUZUKI*
Eiji SATOH**

Synopsis

The international ocean container freight is in fierce global competition. The organizations connected with ocean container freight make own all efforts to enhance their service competences. In this trend, ship's enlarging is one of major measures. Upsized ships require improving port facilities, which contain enlargement and speed-up of container quay cranes.

In order to seek appropriate measures, we extracted the trends from development of design items of container quay cranes, and measured motions of the Post-Panamax size container quay crane and rolling of container ships as well in the Port of Shimizu. Based on the observation data on container handling in Port of Shimizu, we formulated a numerical model on the motions and the cycle times of large-sized quay crane for container handling, and confirmed that calculated cycle times by the numerical model conformed measured one. We made the sensitivity analysis on the performance indices of the crane and on the pose time by each step in the container handling cycle to the cycle time.

Key Words: container crane, motion of cargo handling, cycle path, design spec, Post-Panamax

* Head of Coastal Zone Systems Division, Coastal and Marine Department

** Researcher of Construction Equipment Division, Construction and Control System Department, Port & Airport Research Institute

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan National Institute for Land and Infrastructure Management
Phone : +81-468-445025 Fax : +81-468-445074 e-mail : suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. コンテナクレーンの構造諸元	1
3. コンテナクレーンの荷役実態	5
3.1 計測の対象と方法	5
3.2 計測時の気象・海象	6
3.3 船体の傾斜	7
3.4 荷役動作	12
4. 荷役動作シミュレーション	22
4.1 荷役サイクルパスモデルの作成	22
4.2 感度分析	26
4.3 直角軌道との比較	27
5. 結論	28
謝辞	29
参考文献	29
付録 A. コンテナの掴み放し位置 (実測)	30
付録 B. スプレッダの軌道 (実測)	31
付録 C. スプレッダの軌道 (モデル)	32
付録 D. スプレッダのサイズ・移動速度・吊荷重とクレーンの走行位置の経時変化 (実測)	33

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¹⁾。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 6,000TEU 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^{2),3)}。そのうえで、それら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正確に予測し、課題を正しく同定することが必要である⁴⁾。

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。）の設計諸元を整理するとともに、コンテナクレーンの荷役動作とその際の船舶のローリングを実測し、クレーンの荷役動作の特性を整理する。そして、それら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、その再現性を確認する。できたモデルを利用して、コンテナクレーンの荷役時間に対する船型、クレーンの運動性能および運転条件の感度を分析する。

2. コンテナクレーンの構造諸元

コンテナクレーンの基本的な構造諸元は、①アウトリーチ、②揚程、③クレーン重量、④バックリーチ、⑤横行速度、⑥巻速度、⑦走行速度である（図-1 参照）。アウトリーチと揚程は、荷役可能な船舶の大きさを制限し、クレーン重量は、クレーンの基礎ひいては岸壁構造に影響を及ぼす。バックリーチは、一般にハッチカバーの取り回しに影響を与え、各種速度は、荷役のサイクルタイムに影響を与える。以下、これらの諸元をわが国に現存するコンテナクレーン（2000 年 2 月現在）のデータを整理することにより、その特徴を把握する。

(1) アウトリーチ

建造年ごとのアウトリーチの変化を図-2 に、アウトリーチの頻度分布を図-3 示す。1980 年代初頭までのものは全て 40m 弱であるが、それ以降は最大値の増加と最小値の減少という幅の広がりを見せている。最大値の増加は、それまでパナマ運河通航の最大標準船型を前提としていたものが、船社間の運賃競争激化によりコンテナ船の大

型化が始まり、パナマ運河通航可能な範囲で最大まで大きくしたパナマックス型船型の登場、そしてパナマ運河の通航を想定しないより大型の船型が登場した⁵⁾。コンテナ船の大型化は、輸送価格競争と積降貨物の大量集荷と相互に作用しあいながら、その後も進行してきている。アウトリーチは、荷役サービスを提供することができる最大の船幅を想定して決定されるものである。つまり、大型のコンテナ船による海上輸送を行うということは、大型のコンテナ船に加えて、その大型の船のコンテナを荷役できるコンテナクレーンが不可欠であり、その船型の大型化にアウトリーチは対応してきたという

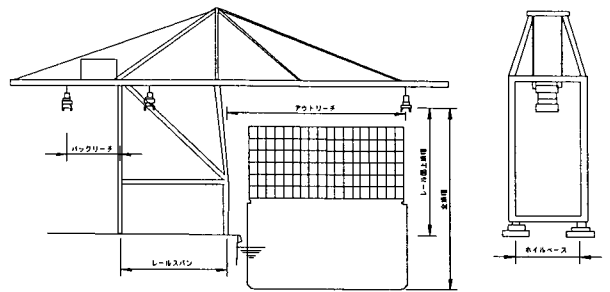


図-1 クレーンの主要な諸元

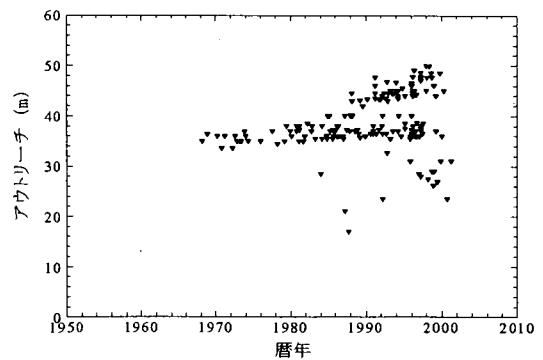


図-2 建造年次ごとのアウトリーチ

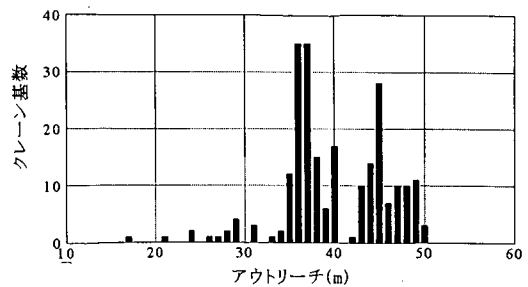


図-3 アウトリーチの頻度分布

ことである。

他方、地方港へのコンテナ船の寄港に伴い、アウトリーチの小さい岸壁クレーンも設置されるようになってきた。日本の船会社は積降貨物の大量集積を重視していたためコンテナ船の地方港への配船を忌諱してきた。しかし、船会社間の国際的な競争が激しくなると、地方でも一定のコンテナ輸送のニーズとポテンシャルがある地域には、外国の船会社が小型のコンテナ船を配船するようになり、地方港に小型のコンテナクレーンが整備されるようになった。このようにして進んできた地方港湾へのコンテナ輸送の普及であるが、地方の港湾でもコンテナ輸送の経験を積み重ねることによって、新たな取扱貨物のニーズの顕在化や寄港航路の増加が徐々に見られるようになってきている。

海上コンテナ輸送そのものは、極論すれば、規格化されたサイズ・強度・接合機構を持つコンテナという箱に貨物を詰め、陸上輸送と海上輸送の間で積み替えを容易にすることによって効率的な一貫輸送を形成する技術である。その輸送技術をどのような形で使うかは、荷主や船社やターミナルオペレーターやポートオーソリティーや荷役機械メーカーなど関係者が市場原理を基礎として知恵と工夫を凝らして決めて行けばよいものである。現在できあがっている大手船会社による大量輸送だけがコンテナ輸送であると決めつける必要はない。海上輸送を含めたトータルなシステムとして関係者が輸送サービスの利益を享受し、そしてその結果社会が広く利益を受けることができる輸送形態を構築することこそが重要なのである。そのとき、港湾サイドでは、そのような様々な輸送サービスに充分に応えることができる荷役インフラの一つとして、高性能なコンテナクレーンを適切に供給して行くことが重要事項の一つになる。

(2) 揚程

アウトリーチとレール面上揚程の散布図を描くと、図-4のとおりとなる。両者の間には全体的に見て直線関係が見て取られるため、 L_{ground} をレール面上揚程、 R_{out} をアウトリーチ、 ϕ を推定パラメータとして、次式により直線回帰を行う。

$$L_{ground} = \phi_0 + \phi_1 \cdot R_{out} \quad (1)$$

結果は、表-1のとおりで、相関係数は0.92という高い値が得られる。一方、切片はt値が小さく、切片の推定

値は0ではないという仮説の信頼水準(両側)、つまり切片のt値から求められる非超過確率は42%しかない。これは原点を通る直線をなしていることを意味し、同時にアウトリーチとレール面上揚程は一定の比率にあり、それは1:0.75であることを意味している。

散布図のトレンドをもう少しミクロに見ればS字を描いているようにも見える。アウトリーチおよびレール面上揚程は、対象とするサイズのコンテナ船の船幅とデッキ上のコンテナ積付位置の最高点(以下、「最大積付高さ」という。)を超えるように設計される。従って、アウトリーチとレール面上揚程は、当該バースで利用が想定されるコンテナ船の最大船型の船幅と最大積付高さを現している。それが、S字を描いて増大しているのは、コンテナ船の大型化の過程が船幅と最大積付高さが、常に一定の比率で大きくなってきたのではなく、ある時は船幅が大きくなり、ある時は最大積付高さが大きくなり、またある時は船幅が大きくなりという過程を経て、それぞれが大きくなってきたということを現している。

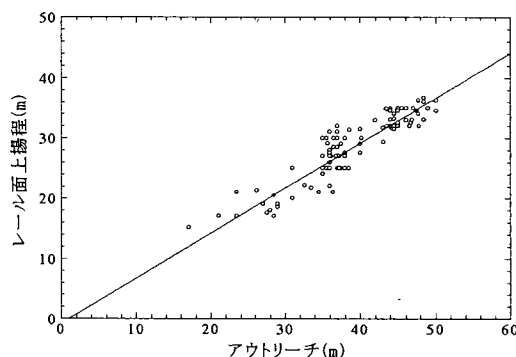


図-4 アウトリーチと揚程の関係

表-1 直線回帰の結果

係数	推定値	標準誤差	t値	相関係数	標本数
ϕ_0	-7.01	0.86	-0.82	0.92	238
ϕ_1	0.746	0.02	35.08		

(3) クレーン重量

材質が変化しなければ、クレーン重量は一般にその体積に比例する。体積は、構造等が大きく変化しなければ、大まかにはアウトリーチ×レール面上揚程×ホイールベースに比例する。2.(2)のとおりレール面上揚程はアウトリーチに比例するため、アウトリーチが大きくなると、構造と材質が変化しなければ、クレーン重量は概略その2乗に比例すると考えられる。しかし、単純にアウトリーチの2乗でクレーン重量が大きくなると、クレーン基礎

や電動機やブレーキが大きくならなければならず、費用が急速に大きくなってしまふ。このため、さらにはクレーン構造体の使用材料等を少なくして種々の効率化を達成するため、材料・構造の改善努力がなされ、クレーン重量の増加は2乗則よりも小さく抑えられている。この関係は、クレーン重量 W に対するアウトリーチ R_{out} の弾力性が2であったものが、技術進歩 ϕ によって弾力性が低減されたとみることができ、次式により表すことができる。

$$\frac{\dot{W}}{W} = (2 - \phi_3) \cdot \frac{\dot{R}_{out}}{R_{out}} \quad (2)$$

ただし、 \dot{W} は W についての時間微分を表す記号である。この微分方程式は次のように解くことができるので、この式をもとに非線形回帰を行う。

$$W = \phi_2 \cdot (R_{out})^{2 - \phi_3} \quad (3)$$

ここで ϕ_2 および ϕ_3 は推定パラメータである。回帰の結果は図-5 および表-2 のとおりで、平均値修正相関係数は0.80と比較的良好な回帰結果が得られている。推定された技術進歩 ϕ_3 は0.63と本来の弾力性2に対して31%を占めている。

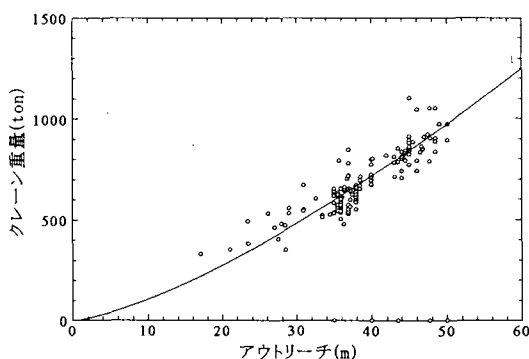


図-5 アウトリーチとクレーン重量の関係

表-2 指数回帰の結果

係数	推定値	標準誤差 ⁺	t値 ⁺	相関係数 ⁺⁺	標本数
ϕ_2	4.41	0.80	5.50	0.80	229
ϕ_3	0.62	0.05	33.24		

+) 自由度を修正した値である。
 ++) 平均値を修正した値である。

(4) バックリーチ

アウトリーチとバックリーチの関係を見るために、両者の散布図を作成しても明確なトレンドは見いだせない(図-6参照)。散布図のなかで20mを超すバックリーチのクレーンは、神戸港と横浜港のものだけであるので、それらクレーンが何故大きなバックリーチを付けたのか調べてみると、神戸港は25mのクレーンが7基、横浜港は26.2mのものが2基ある。これらは、シャーシ式のヤードにおいてバックリーチ下にスタッピングヤードを設け、そこにあるコンテナを岸壁クレーンで直接取り扱うために長いバックリーチが採用されている。また、散布図の中にはバックリーチ2m以下のものが多数存在している。それらのうち、バックリーチ2mのクレーンは、横浜港に10基、大阪港に5基、バックリーチ1.7mのクレーンは東京港に2基ある。なぜこのようなバックリーチのないクレーンが建造されたかを調べてみると、いずれも岸壁背後の用地が狭く、バックリーチの部分までスタッピングヤードとして土地を利用しているため、バックリーチ荷役を放棄した設計をしたもようである。このような20mを超えるバックリーチや2mに満たないバックリーチはヤード方式やヤード面積といった他の要素の制約によってもたらされたものである。他のクレーンのバックリーチの傾向とは大きく異なっている。そこでこれらのクレーンを除外してみると、アウトリーチとバックリーチの間には直線傾向が見られる。このため、 R_{back} をバックリーチ、 R_{out} をアウトリーチ、 ϕ を推定パラ

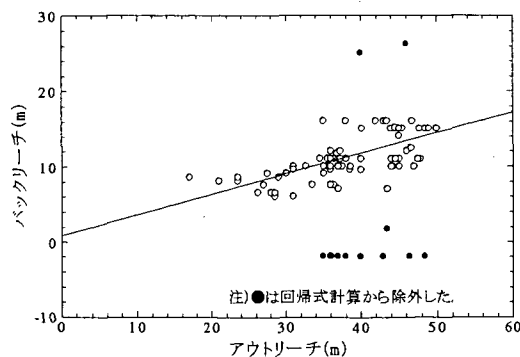


図-6 バックリーチとアウトリーチの関係

表-3 直線回帰の結果

係数	推定値	標準誤差	t値	相関係数	標本数
ϕ_1	0.834	0.999	0.84	0.61	209
ϕ	0.273	0.025	11.03		

メータとして次式により直線回帰を行う。

$$R_{back} = \phi_4 + \phi_5 \cdot R_{out} \quad (4)$$

結果は表-3 のとおりとなる。相関係数は0.61 とやや相関が高いといったレベルである。切片は小さく t 値も小さいので、回帰直線は原点を通る直線と考えることができる。アウトリーチとバックリーチは特別な制約要因がなければ 1:0.3 という一定の比率の関係にあることが分かる。バックリーチ下は一般にハッチカバー置き場として設計される場合が多い。船が大きくなるとハッチカバーも大きくなるので、アウトリーチとバックリーチが一定の比率になるのは実態面からも肯定することができる。

(5) 横行速度

アウトリーチと横行速度について散布図を作成すると図-7 のとおりとなり、両者は概ね直線関係にあることが分かる。そこで $V_{trolley}$ を横行速度、 R_{out} をアウトリーチ、 ϕ を推定パラメータとして次式により直線回帰を行う。

$$V_{trolley} = \phi_6 + \phi_7 \cdot R_{out} \quad (5)$$

結果は表-4 のとおりである。直線回帰の結果は、相関係数 0.83 でかなり良好な直線性がある。また切片の t 値は-2.95 であり、切片の値を 0 と見ることは適当ではないものの、横行速度の標本平均は 167m/min であるので、相対的には切片はあまり大きなものではない。アウトリーチと横行速度は概ね比率一定の関係であることが分かるので、結果として、アウトリーチの付け根から先端ま

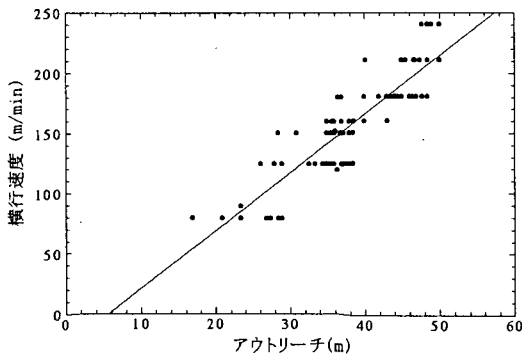


図-7 横行速度とアウトリーチの関係

表-4 直線回帰の結果

係数	推定値	標準誤差	t 値	相関係数	標本数
ϕ_6	-25.39	8.62	-2.95	0.83	238
ϕ_7	4.80	0.21	22.51		

で全速で移動した場合、どのクレーンでも同じ時間を要することになる。その時間は回帰式と横行速度平均値から 14sec と求められる。

(6) 巻速度

レール面上揚程と巻速度について散布図を作成すると図-8 のとおりとなり、両者は概ね直線関係にあることが分かる。そこで V_{hoist} を巻速度、 L_{ground} をレール面上揚程、 ϕ を推定パラメータとして次式により直線回帰を行う。

$$V_{hoist} = \phi_8 + \phi_9 \cdot L_{ground} \quad (6)$$

結果は表-5~6 のとおりである。直線回帰の結果は、無負荷時も全負荷時もともに相関係数 0.85 程度でかなり良好な直線性がある。また全負荷時は t 値が-2.11 で切片を 0 と見ることは適当でないものの、巻速度の標本平均は 123m/min (無負荷) および 54m/min (全負荷) であるので、相対的には切片はともに 0 と見なすことができる。この結果、レール面上揚程と巻速度は比率一定の関係であることが分かるので、レール面上揚程を下から上まで全速で巻上した場合、どのクレーンでも同じ時間を要し、その時間は 14sec (無負荷)、32sec (全負荷) であることが分かる。

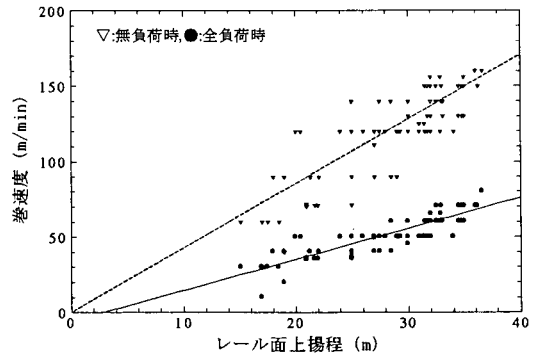


図-8 巻上速度と揚程の関係

表-5 直線回帰の結果 (無負荷時)

係数	推定値	標準誤差	t 値	相関係数	標本数
ϕ_8	-0.69	5.66	-0.12	0.82	238
ϕ_9	4.27	0.19	22.29		

表-6 直線回帰の結果 (全負荷時)

係数	推定値	標準誤差	t 値	相関係数	標本数
ϕ_8	-4.93	2.33	-2.11	0.86	238
ϕ_9	2.02	0.08	25.54		

(7) 走行速度

走行速度は97%のクレーンが45m/minであり、実質的に走行速度にバリエーションはない(図-9)。考えられる

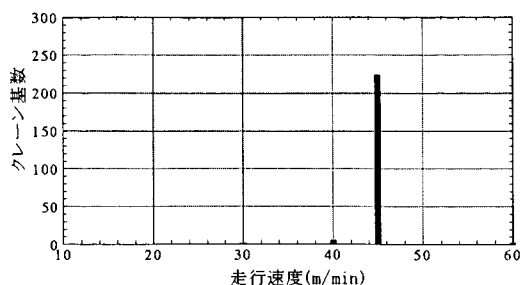


図-9 走行速度の度数分布

理由としては、クレーン周辺での作業者の安全を考慮するとスピードアップが難しいことや、全荷役時間に占める走行時間の割合があまり大きくないためスピードアップが重視されていないこと、があげられる。

3. コンテナクレーンの荷役実態

港湾における岸壁クレーンの荷役実態を把握するために、清水港袖師第一埠頭 No.6 岸壁 No.5 コンテナクレーン(PP型対応、門型構造、ロープトロリ式、コンテナ荷役用クレーン)の実際の荷役状況を計測し、その特徴を整理する。

3.1 計測の対象と方法

(1) 計測対象クレーン

中島ら(1993)³⁾が清水港袖師第一埠頭コンテナターミナルで調査したパナマックス型コンテナ船の荷役調査の結果とある程度の比較ができるように、同じ清水港袖師第一埠頭コンテナターミナルを調査の対象にする。袖師第一埠頭コンテナターミナルは清水港の主力コンテナターミナルで、興津第二埠頭コンテナターミナルと一体的に運営されている。袖師第一埠頭コンテナターミナルの概要を表-7に示す。

当該ターミナルには5基のコンテナクレーンがあり、そのうち2基がパナマックス型対応で、3基がPP型対応である。この3基のPP型コンテナクレーンの中で、最新鋭のクレーンの性能を把握すること、そしてクレーンの制御信号の取得が容易であることを考慮して、平成10年に設置された当該ターミナルでは最新の5号機を調査対象クレーンとした。各クレーンの主な諸元を表-8に示す。

(2) 対象船舶

荷役効率は船舶の大きさによって異なるため、対象コ

表-7 袖師第一埠頭コンテナターミナルの概要

バース Berth	Depth: 12m, Length: 720m, Public Berth
総面積 Grand Total Area	176,392 m ²
蔵置面積 Storage Area	148,220 m ²
蔵置能力 Capacity	5,423 TEU (Ground Slot)
設備 Equipments	Gantry Crane: 5units (Rope Trolley Type) (Outreach: 32m x 2, 41m x 3) Transfer Crane: 10units (RTG) (35t x 5, 45t x 5) Fork Lift: 10 units (18t x 3, 20t x 1, 21t x 6) Reach Stacker: 1units (40ton) Yard Tractor: 24units (shared with Okitsu) Yard Chassis: 29units (shared with Okitsu)
リーフアー電源 Reefer Receptacles	48 plugs (220V/60A) 19 plugs (440V/30A)
ゲートとスケール Gate & Scale	Gate: 12lanes 40ton Scale: 1unit
メンテナンスショップ Maintenance Shop	No.1: 1,072 m ² (for Machine) No.2: 1,284 m ² (for Container)
CFS	Indoor: 2,160 m ² , Outdoor: 1,852 m ²
薫蒸施設 Fumigation Area	900 m ²
検疫施設 Inspection Area	654 m ²
照明塔 Illumination Tower	7 places
管理棟 Office	1,417 m ²

表-8 コンテナクレーンの諸元

クレーン番号 Crane No.	1	2	3	4	5
設置年月 Completion Date	1973.11	1985.8	1994.2	1996.1	1998.12
改造年月 Upgrade Date	1992.3	no	no	no	no
吊上荷重(t) Lifting Capacity	37.0	41.5	45.0	45.0	45.0
定格荷重(t) Rated Load Capacity	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5
アウトリーチ(m) Outreach	31.6	32.0	40.8	40.8	40.8
バックリーチ(m) Back reach	11.6	12.0	12.0	12.0	12.0
全揚程(m) Lifting Range	38.5	38.3	50.0	50.0	50.0
レール面上(m) ^{注2)} Above Rail	27.0	27.0	35.0	35.0	35.0
レールスパン(m) Rail Span	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
巻速度(m/min) Hoist Velocity	50/120	50/120	60/130	60/130	60/130
横行速度(m/min) Trolley Velocity	150	150	180	180	180
走行速度(m/min) Run Velocity	45	45	45	45	45
軌法線間距離(m) Pier Face & Rail Distance	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

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。

ンテナクレーンの設計対象船型に近いPP型の船舶(以下、「PP船」という。)と、それに対してかなり小さい近海航路の船舶(以下、「K船」という。)を各1隻、合計2隻を調査対象船舶に選定した。対象船舶の主な諸元は、表-9のとおりである。

表- 9 対象船の諸元

	ポストバナマックス船 (PP 船)	近海航路船 (K 船)
船の長さ Length of Ship	283.8 m	143.3 m
型幅 Molded Breadth	40.0 m	20.5 m
型深 Molded Depth	23.9 m	10.5 m
載荷重量 Dead Weight	81,819 t	10,299 t
積載能力 Container Capacity	6,214 TEU	702 TEU
ベイ数 No. of Bay	40'x17, 20'x2	40'x8
列数 No. of Row	16 / 14	8 / 6
段数 No. of Tier	6 / 9	4 / 4
満載喫水 Load Draft	14.0 m	7.35 m
満載排水量 Load Displacement	108,181 t	unknown
軽荷喫水 Light Draft	4.3 m	1.8 m
軽荷重量 Light Weight	26,362 t	unknown
仕向先 Destination	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) 計測内容

a) 計測項目

クレーンの荷役動作とその主要な影響要因の関係を把握することが、本研究の目的の一つである。このため、クレーンの荷役動作についての諸情報を計測すると同時に、荷役を行っているコンテナ船のローリングを計測する。近年のコンテナクレーンは、多くの部分が電子制御されているため、その制御信号を取り出すことによって、クレーンの荷役動作を把握することができる。対象としたクレーンで計測が可能であった項目は、表-10 のとおりである。今回はこの全項目を 0.5 秒間隔で記録することにした。コンテナ船の動揺は、対象船舶の計器によってそれを知ることができる。しかし、対象船舶の計器から直接信号をとるための機器を設置・撤去する時間を確保することが困難であるため、対象船が着岸の後、傾斜計とデータロガーを船内に持ち込み、設置することで、Roll 角（以下、単に「傾斜角」という。）を測定することにした。データロガーの計測ピッチとデータ記憶能力の制限から、計測を 1 回当たり 3 時間程度で PP 船は 2 回、

表- 10 クレーンの計測項目

分類	計測項目	計測内容
荷役動作	スプレッド位置(m)	鉛直方向位置 (レーム面からの高さ) 横行方向位置 (ハックリチ先端からの距離)
	スプレッド速度(m/min)	巻上下速度 (巻上が正) 横行速度 (海行きが正)
	走行速度(m/min)	走行速度 (南行きが正)
	ワイストックの状態	ワイストックの開閉の別
	スプレッドのサイズ	20ft, 40ft, 45ft の別
	荷重(ton)	吊荷重から吊具重量を減じる
	スプレッドの振れ角(deg)	スプレッドの Sway 角 (海側が正)
気象	振れ止め装置の状態	振れ止め装置の on/off の別
	風速(m/s)	クレーンの風速計の風速
時刻	時刻(day, hr, min, sec)	クレーン制御装置の時計の時刻

K 船は 1 回計測することにした。データの記録間隔は 1 秒である。また、計器による計測だけでは荷役作業中に発生するイベントの種類、内容等を把握することが困難であるため、それらを把握するためビデオ撮影を併せて行うことにした。

b) 計測期間

本研究では、クレーンの荷役動作の実態を把握することに加えて、コンテナ船が係岸中の荷役動作中断の実態を調べることを目的の一つとしている。このため、ある 1 隻のコンテナ船の荷役において、対象船舶が着岸して離岸するまでの間に対象とするコンテナクレーンが動作停止を含めてどのような動作を行っているかを全て計測する。

計測は、対象船舶の寄港に併せて、PP 船は 2000 年 10 月 20-21 日、K 船は 2000 年 12 月 20 日に行った。

3.2 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。これにあわせて計測を行った時間は、PP 船が 2000 年 10 月 20 日 21:30~10 月 21 日 15:00、K 船が 2000 年 12 月 20 日 12:00~16:30 である。このときの気象・海象の状況を表-11~12、図-10~11 に示す。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。

表- 11 計測時の気象・海象状態 (PP 船荷役)

月日	時	風向	風速 (m/s)	雨量 (mm)	波向	波高 (m)	周期 (sec)	潮位 (cm)
10/20	20	N	3.9	0.5	SSE	0.4	6.2	233
10/20	21	N	4.3	5.5				235
10/20	22	NNW	3.5	7.0	SSW	0.6	4.6	238
10/20	23	NNW	2.8	3.0				236
10/21	0	NE	6.9	0.5	SW	0.5	5.6	228
10/21	1	NE	7.7	0.0				218
10/21	2	NE	9.5	0.0	WSW	0.6	5.8	202
10/21	3	NNW	3.5	0.0				187
10/21	4	WSW	2.6	0.0	SSE	0.7	7.4	175
10/21	5	WNW	3.0	0.0				168
10/21	6	NW	2.2	0.0	SSE	0.6	7.3	166
10/21	7	N	1.6	0.0				171
10/21	8	NNE	2.0	0.0	SSE	0.5	7.0	184
10/21	9	NE	2.7	0.0				200
10/21	10	NE	1.2	0.0	S	0.5	6.9	216
10/21	11	SE	5.4	0.0				232
10/21	12	SSE	5.2	0.0	-	0.5	6.6	243
10/21	13	SSE	6.6	0.0				247
10/21	14	SSE	5.9	0.0	-	0.4	6.3	247
10/21	15	SSE	5.2	0.0				239
10/21	16	S	1.8	0.0	SSE	0.5	6.0	231

注 1) 気象は、静岡県が、清水港日の出地区 (標高 41.0m) にて観測した値である。
 注 2) 風向、風速は、10 分平均値である。
 注 3) 波浪は、運輸省第五港湾建設局が、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、気象庁が、清水港日の出地区にて観測した値で、DL からの高さである。

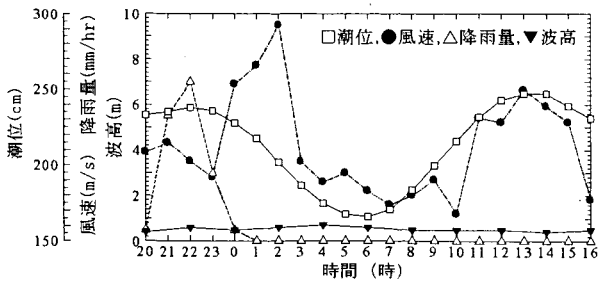


図-10 気象・海象状態 (PP 船荷役)

表-12 計測時の気象・海象状態 (K 船荷役)

月日	時	風向	風速 (m/s)	雨量 (mm)	波向	波高 (m)	周期 (sec)	潮位 (cm)
12/20	11	NNE	9.2	0.0				225
12/20	12	N	5.9	0.0	NNE	0.4	6.2	235
12/20	13	NNE	3.5	0.0				244
12/20	14	NNE	4.5	0.0	SSW	0.6	4.6	246
12/20	15	NE	7.0	0.0				239
12/20	16	NNE	4.8	0.0	SW	0.5	5.6	228
12/20	17	NNE	4.0	0.0				211

注1) 気象は、静岡県が、清水港日の出地区 (標高 41.0m) にて観測した値である。
 注2) 風向、風速は、10分平均値である。
 注3) 波浪は、運輸省第五港湾建設局が、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、気象庁が、清水港日の出地区にて観測した値で、DL からの高さである。

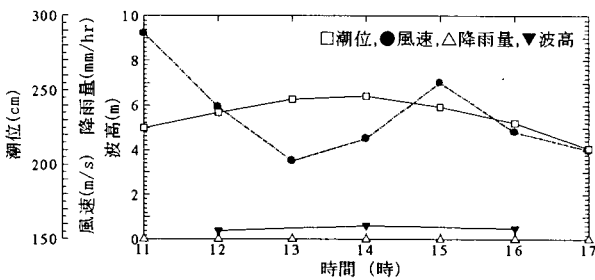


図-11 気象・海象状態 (K 船荷役)

3.3 船体の傾斜

(1) 傾斜計の補正

船体のローリングを計測するために用いた傾斜計 ((株) 東京測器研究所製 KB5-AC) は、倒立振り子式である。この傾斜計は傾斜を静的に計測するために開発されたものであるため、傾斜計に加速度が作用すると出力が変化してしまう。船体の傾斜の計測では、作用した加速度による出力分を運動方程式から補正しなければならない。補正を行うために必要になる減衰率と固有振動数を求めるため、傾斜計を港湾空港技術研究所 (当時、港湾技術研究所) の大型水中振動台に乗せ、一定の周波数

の水平振動を与え、振動台の加速度と傾斜計の出力を計測した。実験の条件と結果は表-13 のとおりである。

表-13 傾斜計の振動実験の条件と結果

Case	振動台の周波数(Hz)	振動台の加速度(mm/s ²)	傾斜計の最大出力(deg)
1	0.3	750	3.87
2	0.3	363	1.91
3	0.2	337	1.79
4	0.1	93.4	0.465

振動実験の運動方程式は、傾斜計の錘の質量を M 、傾斜計の錘を支える棒の長さを l_2 、傾斜計の振動の減衰率を γ 、傾斜計のバネ定数を k 、傾斜計の位置を x_1 、傾斜計の錘の変位を x_2 、同変位角を θ_2 とすると、

$$M \cdot (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) = -2M \cdot \gamma \cdot \dot{x}_2 - k \cdot x_2 + M \cdot g \cdot \theta_2 \quad (7)$$

となる (図-12 参照) ので、これを変形すると、

$$\ddot{x}_2 + 2\gamma \cdot \dot{x}_2 + \omega^2 \cdot x_2 = \ddot{x}_1 \quad (8)$$

$$\omega^2 = \frac{k}{M} - \frac{g}{l_2} \quad (9)$$

という式が得られる。ここで、 ω は傾斜計の固有角振動数である。

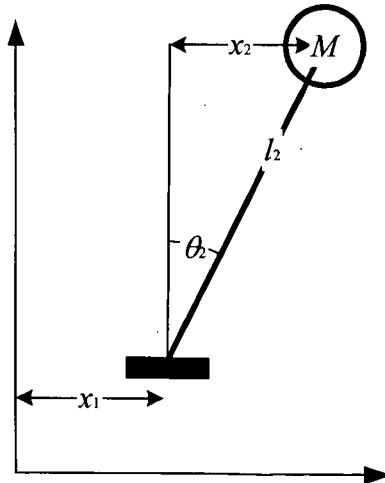


図-12 振動実験の状態

θ_2 と x_2 および傾斜計の出力 θ_2 と θ_2 の関係は次のとおりである。ここで、 η は傾斜計の出力換算係数である。

$$l_2 \cdot \theta_2 = x_2 \quad (10)$$

$$\eta \cdot \theta_2 = \theta_3 \quad (11)$$

また、 x_1 が角振動数 ω ，加速度の片振幅 a_0 の正弦振動をしていると見なせば、

$$x_1 = \frac{a_0}{\omega^2} \sin(\omega \cdot t) \quad (12)$$

式(8)は次のようになる。

$$\ddot{\theta}_3 + 2\gamma \cdot \dot{\theta}_3 + \omega^2 \cdot \theta_3 = \frac{\eta}{l_2} \cdot a_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (13)$$

ところで、船体傾斜角の計測での傾斜計の運動方程式は、

$$M \cdot (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) = -2M \cdot \gamma \cdot \dot{x}_2 - k \cdot x_2 + M \cdot g \cdot (\theta_1 + \theta_2) \quad (14)$$

と表される (図-13 参照)。ここで、 θ_1 は船体の傾斜角、 l_1 は傾心からの高さである。これを、水中振動台での実験の運動方程式と同様に θ_1 と θ_2 の関係式に変形すれば、次式のとおりとなる。

$$\ddot{\theta}_3 + 2\gamma \cdot \dot{\theta}_3 + \omega^2 \cdot \theta_3 = \frac{\eta}{l_2} \cdot l_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + \frac{\eta}{l_2} \cdot g \cdot \theta_1 \quad (15)$$

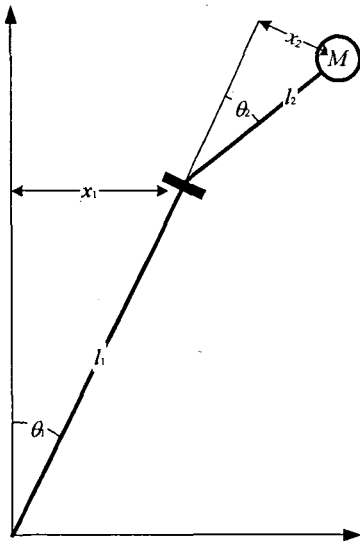


図-13 実測での状態

この方程式は、 θ_1 と θ_2 の加速度と速度が 0 つまり静止状態のとき、 θ_1 と θ_2 は等しくなるので、

$$\omega^2 = \frac{\eta}{l_2} \cdot g \quad (16)$$

でなければならない。これを式 (13) と (15) に代入すると、

$$\ddot{\theta}_3 + 2\gamma \cdot \dot{\theta}_3 + \omega^2 \cdot \theta_3 = \frac{\omega^2}{g} \cdot a_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (17)$$

$$\ddot{\theta}_3 + 2\gamma \cdot \dot{\theta}_3 + \omega^2 \cdot \theta_3 = \frac{\omega^2}{g} \cdot l_1 \cdot \ddot{\theta}_1 + \omega^2 \cdot \theta_1 \quad (18)$$

という関係式が得られる。

式 (17) をもとに、得られた実験結果から γ と ω を最小二乗法で推定する。観測値と計算値で一元配列の分散分析を行えば、F 値は 9.15×10^{-6} となり、両者が異なる信頼度は 0.2% しかない。

船舶傾斜の実測値 θ とここで得られたパラメータを用い、実際の船舶の傾斜角 θ を求める。計算は、式 (18) を差分方程式に変換し、内挿差分を収束するまで繰り返す。用いた差分方程式は、

$$\begin{aligned} \theta_1(t+1) = & \left(\frac{2l_1 \cdot \omega^2}{g \cdot \Delta T^2} + \omega^2 \right)^{-1} \left[\frac{l_1 \cdot \omega^2}{g \cdot \Delta T^2} [\theta_1(t+2) + \theta_1(t)] \right. \\ & + \left(\frac{1}{\Delta T^2} + \frac{\gamma}{\Delta T} \right) \theta_2(t+2) - \left(\frac{2}{\Delta T^2} - \omega^2 \right) \theta_2(t+1) \\ & \left. + \left(\frac{1}{\Delta T^2} - \frac{\gamma}{\Delta T} \right) \theta_2(t) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

である。ここで、 ΔT はサンプリング間隔で 1sec である。

表-14 振動実験による傾斜計パラメータの推定結果

Case	傾斜計の最大出力 (deg)	
	観測値	計算値
1	3.87	3.89
2	1.91	1.88
3	1.79	1.78
4	0.465	0.497

推定結果
$\gamma = 0.659 \text{ sec}^{-1}$
$\omega = 10.2 \text{ sec}^{-1}$

(2) 船体傾斜の特徴

船体のローリング角の計測器出力を、式(19)を用いて補正した結果を図-14~16 に示す。

船体の傾斜は、2つの意味でクレーンの構造と荷役動作に影響を及ぼす。一つは静的な傾斜で、クレーンのア

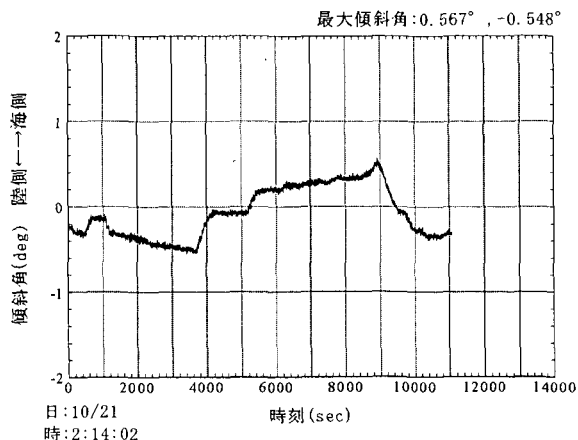


図-14 船体の傾斜角の計測結果 (PP 船①)

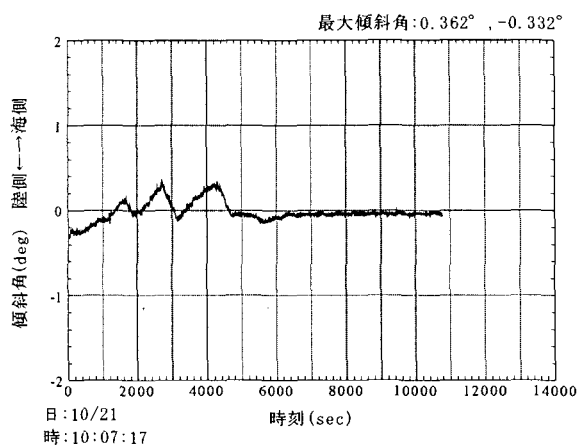


図-15 船体の傾斜角の計測結果 (PP 船②)

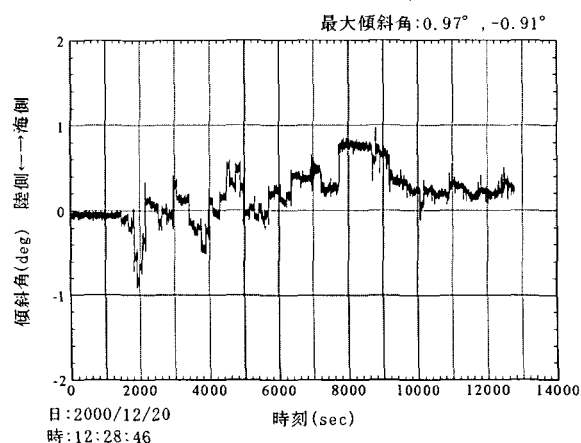


図-16 船体の傾斜角の計測結果 (K 船)

ウトリーチおよび脚のピアヘッドラインからの後退距離に影響を与える。静的な傾斜は荷役動作にも影響を与え、傾斜が大きくなると、コンテナやスプレッドをハッチに

挿入し難くなる。ちなみに、PIANC が提案する荷役時のコンテナ船の許容 Roll 角は、荷役効率 100% で 1.5deg 、荷役効率 50% で 3.0deg である⁹⁾。二つ目は動的な傾斜によって引き起こされる船体の水平方向の振動で、それが大きくなると、デッキ上のコンテナ、もしくは、ハッチへのスプレッドの位置決めを困難にする。コンテナクレーン製作工事共通仕様書(平成 11 年改訂版)では、振れ止め装置による位置決め時のスプレッドの横行方向の許容片振幅を 0.1m と設定している。この許容振幅は、スプレッドの振幅がこの値を超えると直ちに位置決めに支障がでるというものではないが、かなり十分なレベルの振れ止め能力という経験的な目標値である。運転者がスプレッドの振れ止め装置を必要としているということは、横行方向の短周期の振動が荷役の支障となっていることを現している。

船体傾斜の荷役への影響を考察するにあたり、船体傾斜角の計測値を静的な成分と動的な成分に分解する。計測結果から振動と呼べるような動的な成分は概ね周期 2 分以下であることが見てとれる。同時に、2 分という時間は待ち時間を含めて平均した場合のコンテナ 1 個あたりの荷役のサイクルタイムであるので、実作業上のサイクルタイムは、ほとんどそれより小さいものである。このため、静的成分と動的成分の数居値を 2 分とすれば、荷役のサイクルによる影響までを動的な成分としてカバーすることができる。そこで、2 分以上の成分を求めるために、121 個、すなわち 121 秒分の傾斜角データの移動平均をとる。それを静的な成分とし、それを傾斜角データから差し引いた値を動的な成分とする。

a) 静的な船体傾斜

船体のローリングの静的な成分を図-17~19 に示す。この結果によれば、荷役時における船体の傾斜角は PP 船で 0.54deg ~ 0.53deg 、K 船で 0.80deg ~ 0.84deg であったことが分かる。PP 船は Auto Heel Control System (自動ヒール制御装置) を有し、装置が始動する傾斜角が 0.5deg 、停止する傾斜角が 0deg にセットされ、装置が作動していたので、図-13 は当該装置が作動した結果とみることができる。今回の計測は、船体動揺に関して、気象・海象条件ともに比較的恵まれた条件(静穏時)であった。こうした条件下での船体傾斜を計測することはできたが、厳しい気象・海象条件(荒天時)の場合に、K 船の船体傾斜がどうなるのか、PP 船の自動ヒール制御装置がどれほど有効に作動するのか、そしてその時の荷役がどのような状況になるのかを知ることはできていない、今後の課題である。

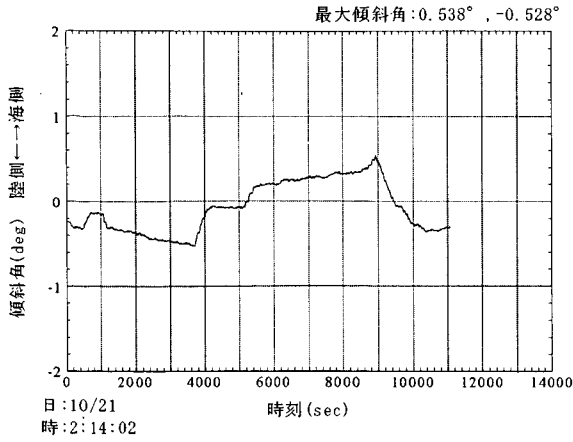


図- 17 静的な船体傾斜 (PP 船①)

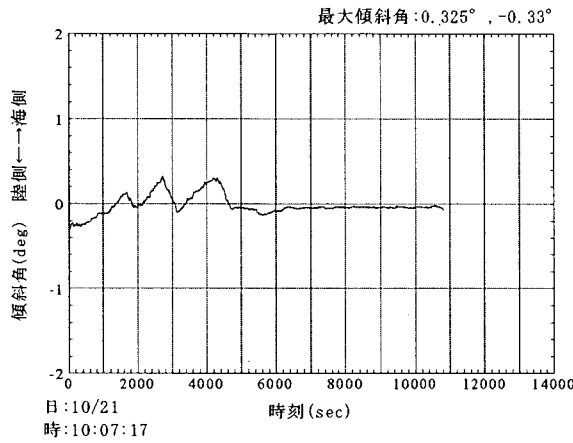


図- 18 静的な船体傾斜 (PP 船②)

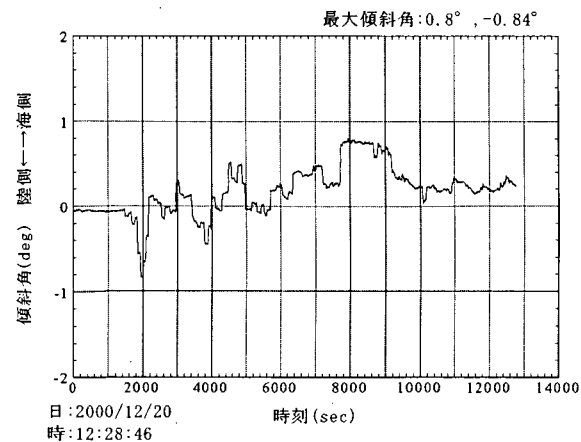


図- 19 静的な船体傾斜 (K 船)

b) 動的な船体傾斜

動的な船体のローリング角の発生頻度を図-20~22 に示す。これらの分布はいずれも正規分布に近い形状をしている。傾斜角の最大・最小値は、PP 船が標準偏差の約 4 倍程度であるのに対し、K 船は約 10 倍である。K 船の場合は、スパイク状に大きな傾斜が発生しているためである。これは、舷側のコンテナを吊り上げるときのコンテナへのスプレッドの上載と、それに続く船体傾斜が逆位相となるタイミングでのコンテナの吊り上げ、もしくは、コンテナを吊り下ろすときのコンテナの吊り降ろしと、それに続く逆位相タイミングでのスプレッドの引き上げによって生じている。(図-23 参照)

また、船体の傾斜による横行方向の水平振動は、傾斜角とメタセンターの距離から求められ、最も振幅が大きくなるデッキ最上段の舷側のコンテナ最上部の最大片振幅は PP 船が 0.08m, K 船が 0.21m 程度である。(表-15 参照)

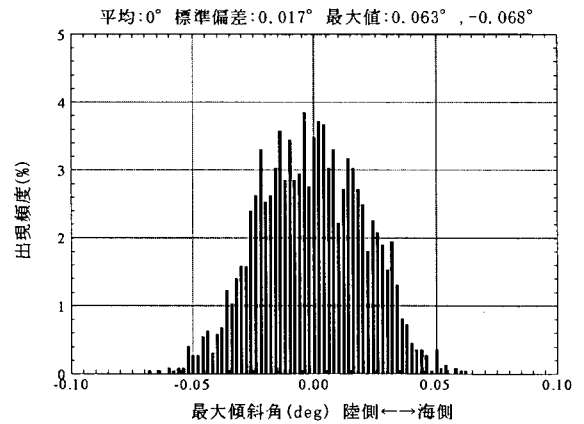


図- 20 動的な船体傾斜角 (PP 船①)

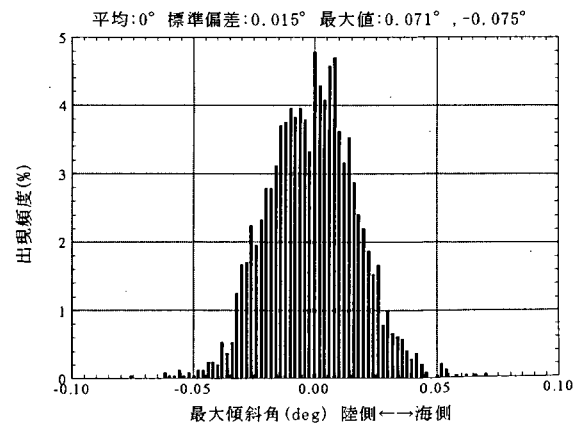


図- 21 動的な船体傾斜角 (PP 船②)

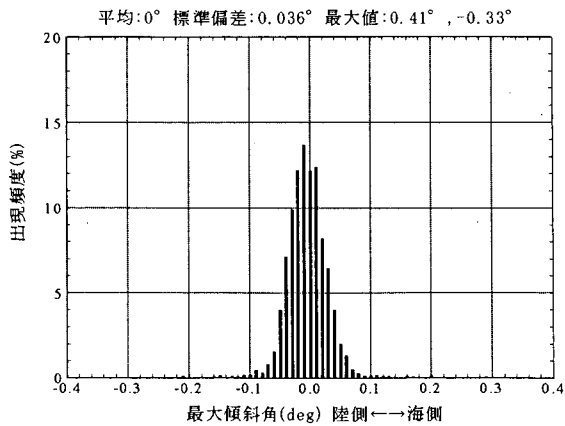


図-22 動的な船体傾斜角 (K 船)

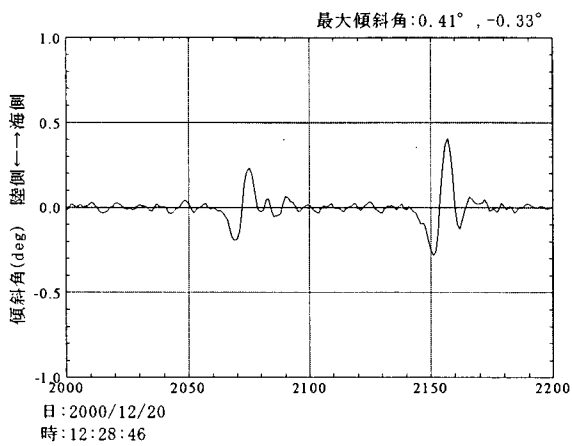


図-23 スパイク状の動的な傾斜 (K 船) の例

表-15 横行方向の水平振動

	PP 船①	PP 船②	K 船
船体傾斜角の平均 (deg)	0	0	0
船体傾斜角の標準偏差 (deg)	0.017	0.015	0.036
船体傾斜角の最大値 (deg)	0.063	0.071	0.41
傾斜角の最小値 (deg)	-0.068	-0.075	-0.33
浮心〜デッキ最上段舷側の距離 (m)	32	32	16
デッキ最上段端での最大振幅 (m)	0.073	0.082	0.21

傾斜角の測定値から最大エントロピー法によって振動エネルギーの周波数スペクトルを求める。結果は図-24～26のとおりとなる。これらの図では、周期 60 秒～120 秒の領域は、振動エネルギーがほとんどないため図中に含まれていない。また、最大エントロピー法の次数は、それぞれ 139, 112, 97 である。

この結果を見ると、PP 船のケースでは、周期 15 秒付近に最大の鋭いピークがあり、16.4 秒に第 2 のピークがある。そして、他の周期には振動エネルギーがほとんど

ないことがわかる。これに対して、K 船のケースでは、多数のピークが存在するとともに、振動エネルギーも周期 6 秒～60 秒の間で幅広く分布している。これは、移動

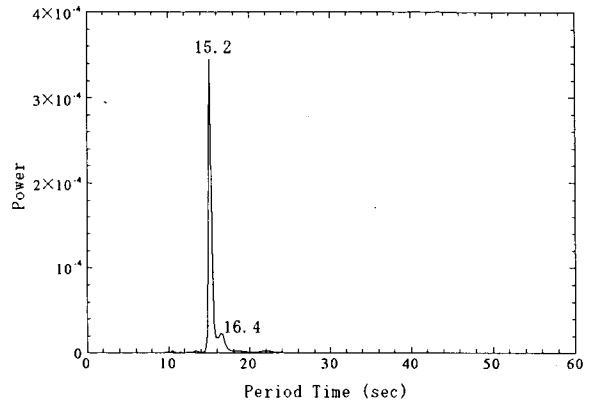


図-24 船体傾斜角のパワースペクトル (PP 船①)

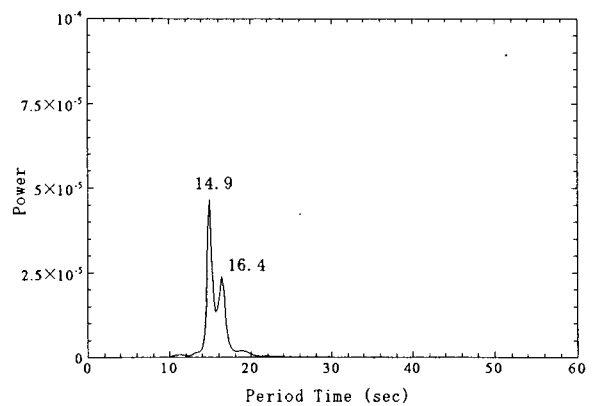


図-25 船体傾斜角のパワースペクトル (PP 船②)

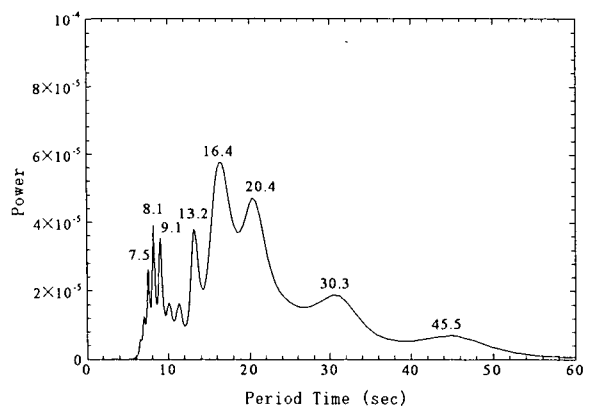


図-26 船体傾斜角のパワースペクトル (K 船)

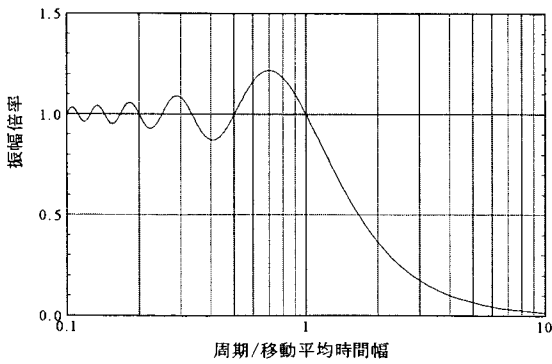


図- 27 移動平均によるフィルター特性

平均のフィルター周波数特性(図-27)とよく一致しているため、その影響によるものであると考えることができる。このため、それらを割り引いて考える。そのうえで、最大のピークが存在している周期16.4秒周辺に着目して分析を行う。

エネルギーが最大となっている周期 T_s から、一般に用いられている次の関係式⁷⁾を用いて、メタセンター高さ GM を推定する。

$$T_s = 2\pi \cdot C \cdot B / \sqrt{GM \cdot g} \quad (20)$$

ここで、 C : 定数(大型商船では一般に0.4付近の値をとるので、計算には0.4を用いる。)、 B : 船幅、 g : 重力加速度である⁷⁾。結果は表-16のとおりである。笹・白石⁸⁾が行った5万DWT級コンテナ船の係留時の動揺計算においては、 $GM=5.73m$ を使用している。5000~10000GTの貨物船では軽荷時で GM は1.4~3.9mとなることが知られている⁹⁾。また、船舶は一定の横揺れ特性を持つように設計されるため、ケンプの横揺れ数は一般に8~14をとる¹⁰⁾。

これらの知見と最大エネルギーを持つ横揺れ周期から求めた GM の推定値およびケンプの横揺れ数を比較すると、概ね整合していると考えられるので、最大エネルギーを持つ横揺れ周期は、船舶の横揺れの固有周期であると推測される。

表- 16 メタセンタ高さとケンプの横揺れ数

	PP 船①	PP 船②	K 船
船体傾斜の周期(sec)	15.2	14.9	16.4
C 値	0.4	0.4	0.4
船幅(m)	40	40	20.5
メタセンタ高さ(算出値)(m)	4.46	4.64	1.01
ケンプの横揺れ数(算出値)	7.5	7.4	11.3

3.4 荷役動作

(1) 運転手の概況

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予想されるため、運転手の属性を表-17~18に示しておく。PP船の場合は、経験年数10年の者が半分

表- 17 運転手一覧 (PP 船)

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

注) 技能レベルは、ターミナル関係者の主観的な相対評価である。

表- 18 運転手一覧 (K 船)

月日	運転時間帯	運転手	年齢	経験年数	技能レベル
12/20	12:43~14:07	ホ	28	2年	中
12/20	14:07~16:17	へ	31	2年	中

注) 技能レベルは、ターミナル関係者の主観的な相対評価である。

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、ロの運転手が高位で、他の者は中位の技量水準であるとのことであった。

(2) コンテナ船接岸中の作業時間

調査対象船の接岸中の作業時間の配分を図-20に示す。まず荷役前の準備に約45分、荷役後の終了動作に約15分、シフト体制によって定まるシフトとシフトの間の空き時間があり、その残りが荷役操作の時間となっている。

表- 19 コンテナ船接岸中の作業時間配分

	PP 船		K 船	
	延時間	構成比	延時間	構成比
荷役準備	0:47	4.7%	0:43	20.7%
荷役操作	12:20	74.6%	3:17	94.7%
シフトの間隔	3:08	19.0%	0:00	0.0%
終了動作	0:17	1.7%	0:11	5.3%
合計	16:32	100.0%	3:28	100.0%

注) 延時間の単位は、時分である。

この結果、コンテナ船の接岸中に荷役操作に費やした時間の割合は、PP船が75%、K船が95%である。従って、仮に、シフト体制を変更してシフト間の休止時間をとらないようにすることができれば、PP船の場合で約3時間、全体の約20%の時間が短縮される。また、通信技術を駆

使し、荷役作業の最終確認を接岸前に済ませてしまうことができれば、約45分-αの時間が短縮されることになる。

(3) 計測コンテナの船上積付位置

計測したコンテナの積み放し位置を、潮位を補正してプロットしたものが図-28~29である。調査対象のPP船では、全スロットを清水港取扱に割り当てているベイはみあたらず、いずれのベイも分割され、その一部区画が割り当てられていた。また、ヤードシャシの位置もほぼ一定であることがわかる。

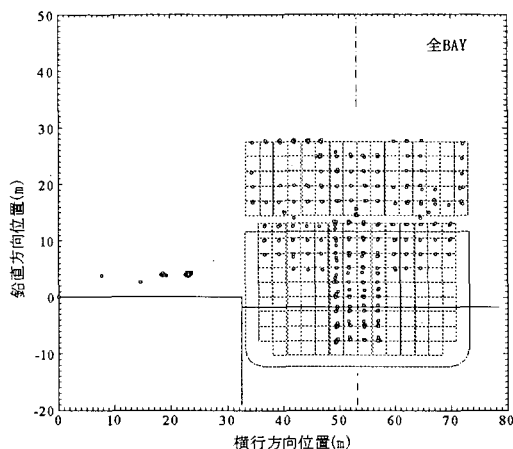


図- 28 計測コンテナの積み放し位置 (PP 船)

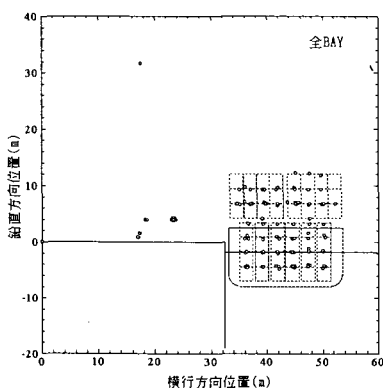


図- 29 計測コンテナの積み放し位置 (K 船)

(4) サイクル時間の状況

荷役効率を、通常、サイクルタイムで評価する。実際の荷役では、陸揚げから船積みに切り替わるときやハッチカバー荷役をするときなど、荷役サイクルが完結しない荷役がしばしば存在するため、それらの処理がやっか

いである。そこで、一般的に行われているように荷役を往復のサイクルで評価することはやめ、往路と復路をわけて片サイクルで評価することにする。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は除外する。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秒を数居値とした。片サイクル時間を整理した結果は、表-20のとおりである。

また、K船では、ホールド内のかかなりの数(陸行き荷役のみ)に半自動運転を行った。普段使用していない半自動運転を開始する際、練度不足のため長い片サイクル

表- 20 片サイクル時間の実測結果

船舶	平均時間	標準偏差	データ数
PP 船	57.8s	21.4s	681
K 船	51.8s	21.8s	211

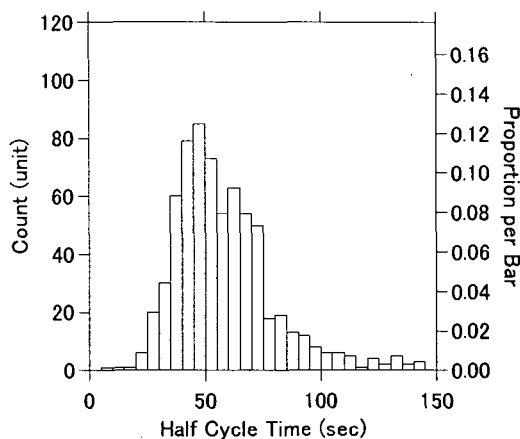


図- 30 片サイクル時間の分布 (PP 船)

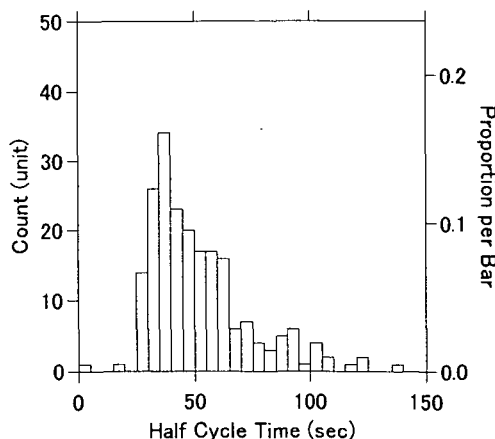


図- 31 片サイクル時間の分布 (K 船)

が数回発生している。結果はそれらを考慮して解釈する必要がある。片サイクルタイムの頻度分布を整理した結果は表-20、図-30~31 のとおりである。平均値はPP 船で57.8 秒、K 船で51.8 秒であった。各々の標準偏差は21.4 秒、21.8 秒であるから、両者の差にWelch の検定を行えば、t 値は3.5 となり片側尤意確率は0.0%となる。PP 船はK 船に比べて船幅と乾舷高さが著しく大きい、つまり荷役パスの延長が長いので、PP 船のサイクルタイムはK 船のそれよりも大きくなるのは、理にかなっている。

(5) 動作停止時間の特性

クレーンが一連の荷役動作を完遂するために動作途上で必然的に生じる各種の停止状態もしくはほとんど停止する状態の継続時間の発生頻度分布と記述統計量を求める。まず、3.4 (4)の理由から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継続時間を読みとり、発生頻度分布を求め、記述統計量をまとめる。離着陸時およびハッチ挿入時の停止時間はその上空2.5m (ハッチ挿入は5m) までに位置する時間を読みとり、対象地点での巻上下速度を0m/min から上空幅2.5m (ハッチ挿入は5m) までを等加速度運動で上昇もしくは下降する(この場合は減速運動) 時間を差し引いたものとする。結果は図-32~49 のとおりである。ハッチカバー直下のコンテナの停止時間は同条件で整理しにくいので、除外してある。

シャシへの着陸の際の停止時間およびシャシから離陸する際の停止時間の頻度分布は、15 秒を境に大きくグループが分かれる。この要因はスタッキングコーンの着脱作業によるものと考えられるため、停止時間が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、そのグループの平均値から平均停止時間を差し引いた時間を着脱時間とした。各停止時間の記述統計量は表-21~22 のとおりである。

表- 21 停止時間の実測結果 (PP 船)

停止項目	平均値	標準偏差	データ数
シャシへの着陸時	4.2s	2.8s	247
シャシからの離陸時	3.2s	0.8s	286
デッキ積付位置への着陸時	12.3s	7.9s	111
デッキ積付位置からの離陸時	5.4s	8.7s	110
ホールド内着陸時	3.8s	7.0s	210
ホールド内離陸時	3.8s	1.6s	209
ハッチ挿入時	4.2s	6.1s	147
スタッキングコーン着脱	-	-	-
シャシへの着陸時	24.7s	10.6s	76
シャシからの離陸時	22.0s	4.9s	39

表- 22 停止時間の実測結果 (K 船)

停止項目	平均値	標準偏差	データ数
シャシへの着陸時	6.8s	3.5s	93
シャシからの離陸時	3.2s	0.7s	104
デッキ積付位置への着陸時	15.6s	13.8s	41
デッキ積付位置からの離陸時	4.4s	3.4s	42
ホールド内着陸時	6.6s	10.4s	60
ホールド内離陸時	4.6s	1.5s	58
ハッチ挿入時	9.5s	11.8s	55

K 船ではPP 船に比してローリングが大きいことに加え、船上積付位置でスキュー動作が頻繁に行われていたために、着陸時間が長くなっている。同様にローリングやスキューの大きさのために、ハッチ挿入時間も長くなっていると考えられる。

スプレッド伸縮と40'ベイにおける20'サイドの変更は、K 船で頻繁に行われていたが、PP 船では少ない。このため、代表ケースとしてK 船の実測結果を整理する。結果は表-23 のとおりである。

表- 23 スプレッド伸縮と20' サイド変更時間 (K 船)

停止項目	平均値	標準偏差	データ数
スプレッド伸縮	28.5s	12.2s	8
サイド変更	41.8s	15.7s	5

注1) スプレッド伸縮は、コンテナサイズを変更する動作を含む片サイクルを対象とし、それに伴う走行位置の変更時間を含めている。
注2) サイド変更は、スプレッド伸縮を含まないサイド変更のみの片サイクルが対象である。

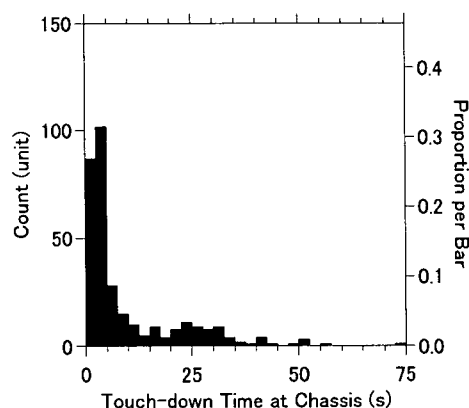


図- 32 シャシへの着陸の際の停止時間 (PP 船)

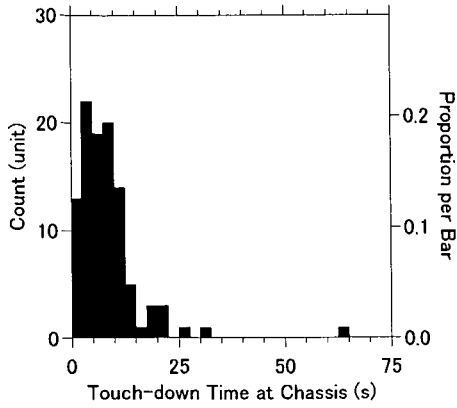


図- 33 シャシへの着陸の際の停止時間 (K 船)

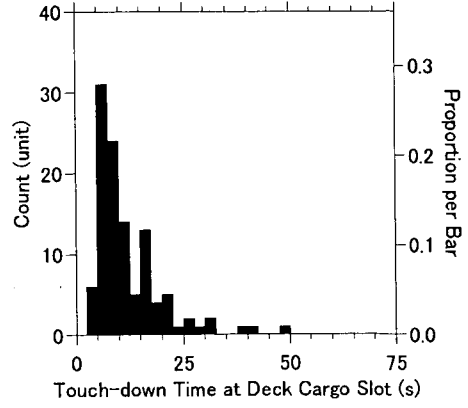


図- 36 デッキ積付位置への着陸の際の停止時間(PP 船)

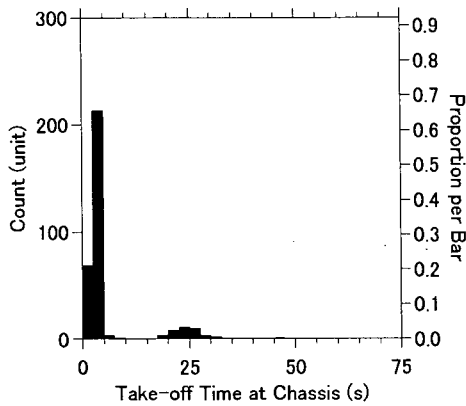


図- 34 シャシから離陸の際の停止時間 (PP 船)

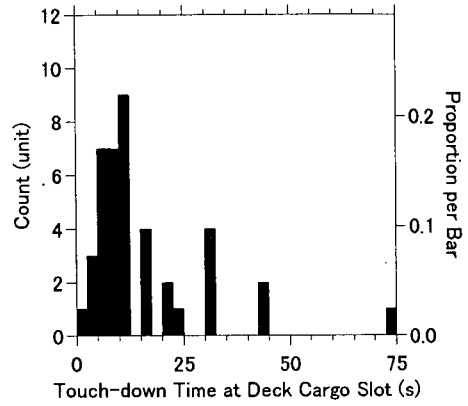


図- 37 デッキ積付位置への着陸の際の停止時間 (K 船)

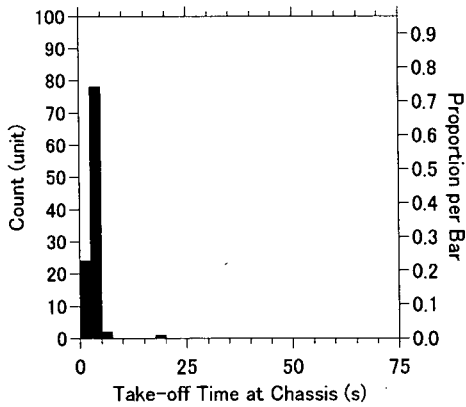


図- 35 シャシから離陸の際の停止時間 (K 船)

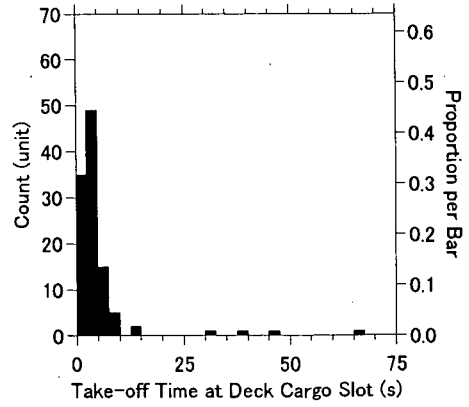


図- 38 デッキ積付位置から離陸の際の停止時間(PP 船)

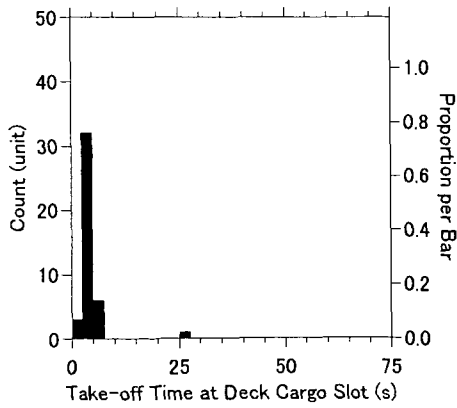


図- 39 デッキ積付位置から離陸の際の停止時間 (K 船)

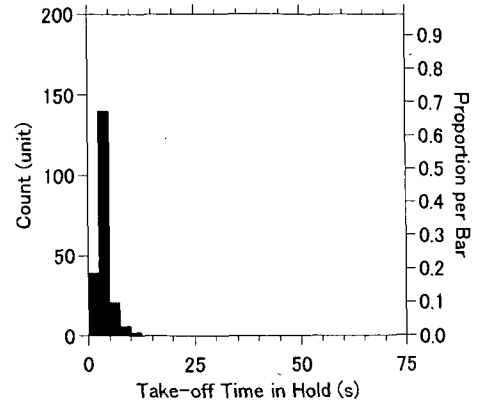


図- 42 ホールド内での離陸の際の停止時間 (PP 船)

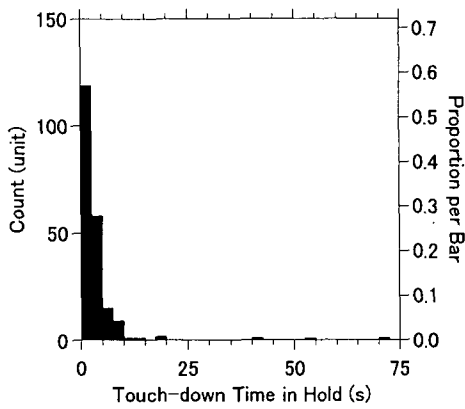


図- 40 ホールド内での着陸の際の停止時間 (PP 船)

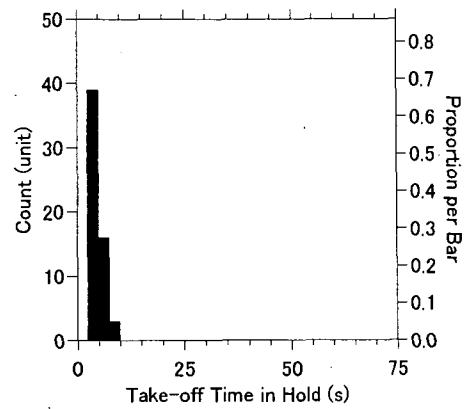


図- 43 ホールド内での離陸の際の停止時間 (K 船)

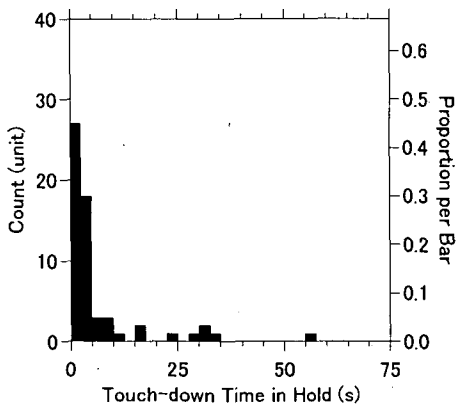


図- 41 ホールド内での離陸の際の停止時間 (K 船)

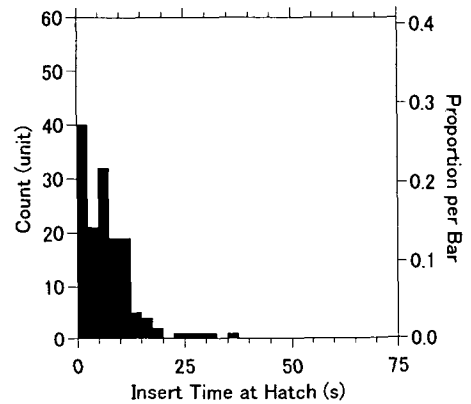


図- 44 ハッチ挿入の際の停止時間 (PP 船)

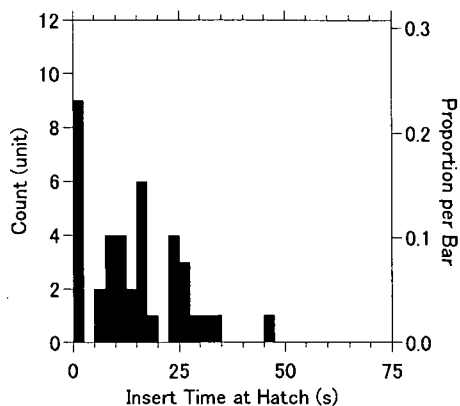


図- 45 ハッチ挿入の際の停止時間 (K 船)

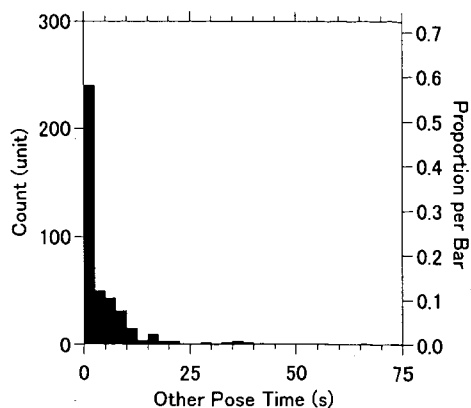


図- 48 その他の停止時間 (PP 船)

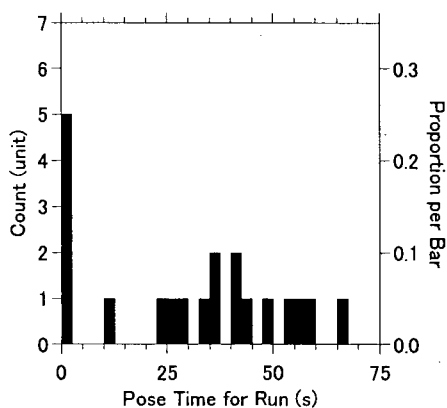


図- 46 走行の際の停止時間 (PP 船)

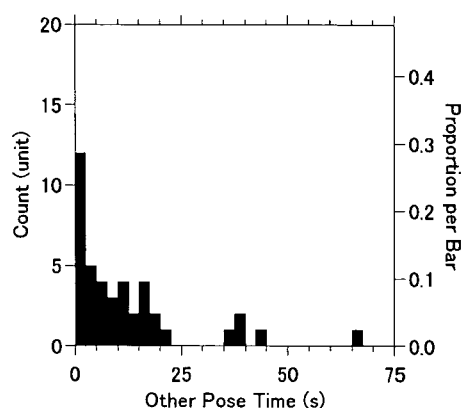


図- 49 その他の停止時間 (K 船)

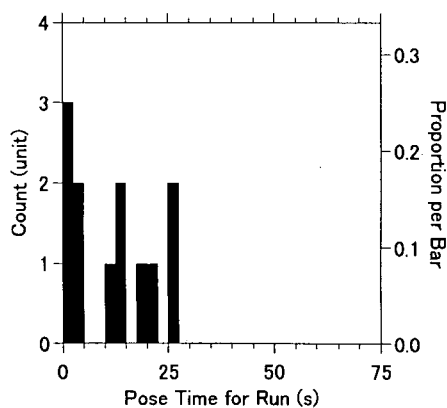


図- 47 走行の際の停止時間 (K 船)

(6) 巻上下速度の特性

最大巻上下速度の分布は図-50～59 のとおりである。ホールド外の場合は、データの多くの部分がクレーンの設備能力曲線上にある。このため、この区間では、クレーンの性能をかなり使い切った運転がなされていると考えることができる。これに対して、ホールド内はコンテナ積付位置の深さにかかわらず最大速度が概ね 30～40m/min とかなり低く抑えられている。

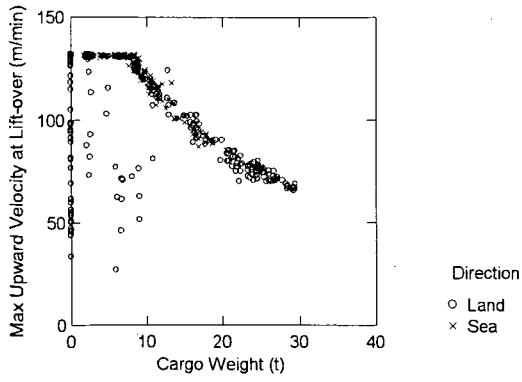


図- 50 吊荷重と最大巻上速度 (PP 船)

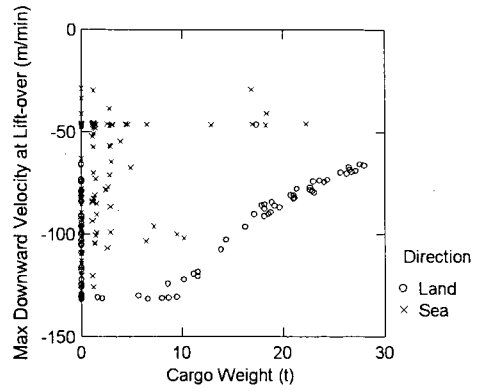


図- 53 吊荷重と最大巻下速度 (K 船)

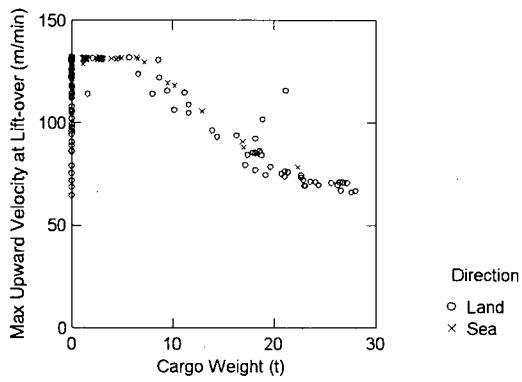


図- 51 吊荷重と最大巻上速度 (K 船)

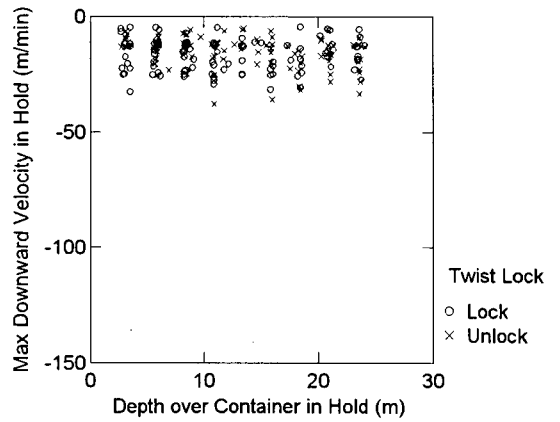


図- 54 ホールド内積付位置と最大巻下速度 (PP 船)

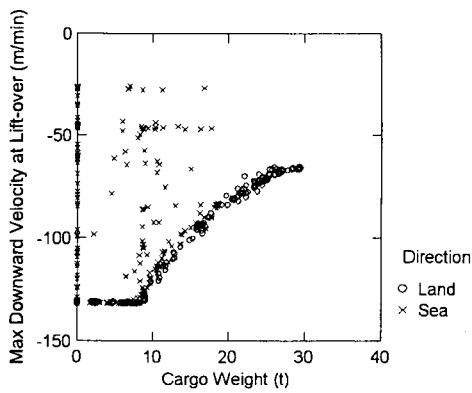


図- 52 吊荷重と最大巻下速度 (PP 船)

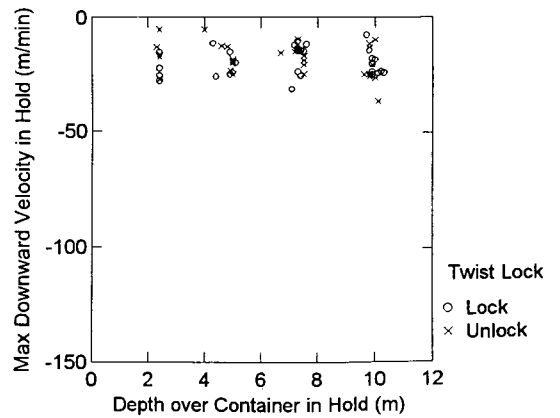


図- 55 ホールド内積付位置と最大巻下速度 (K 船)

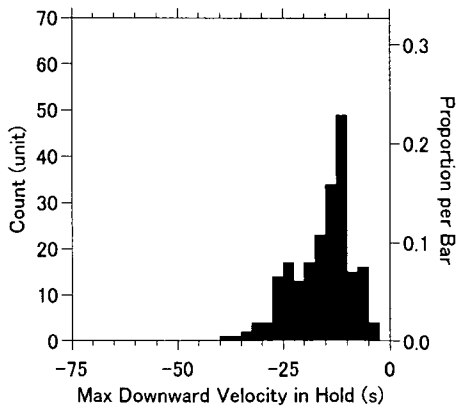


図- 56 ホールド内最大巻下速度の頻度分布 (PP 船)

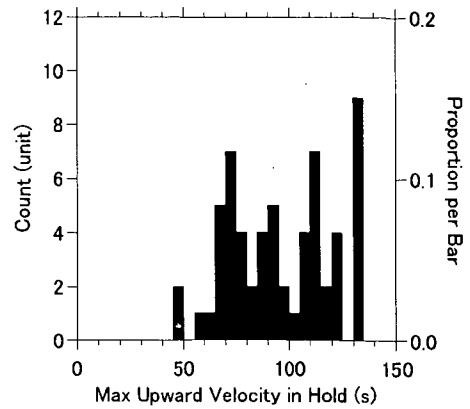


図- 59 ホールド内最大巻上速度の頻度分布 (K 船)

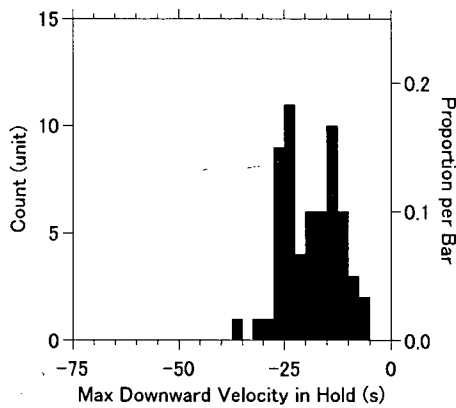


図- 57 ホールド内最大巻下速度の頻度分布 (K 船)

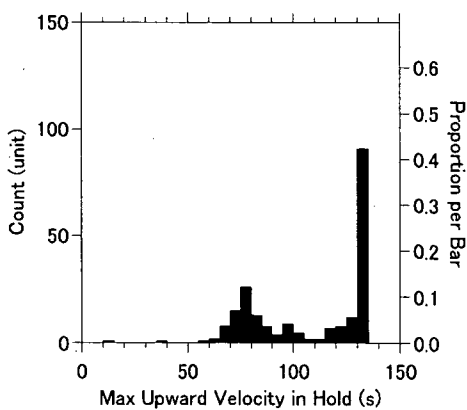


図- 58 ホールド内最大巻上速度の頻度分布 (PP 船)

(7) 吊荷重

吊り荷重の頻度分布は図-60~63 のとおりである。吊り荷重の確率分布は、空コンテナなどの点分布と多峰分布がくみ合わさったものであり、今回の計測結果では、おおまかにみると、40'の場合も20'の場合も最大重量 α にピークがあり、更にそのピーク集団と空コンの間にピークがある。これに空コンのピークを加え、三峰型の分布である。従って、分布型に正規分布を仮定することは、かなり大胆な仮定であるといえる。

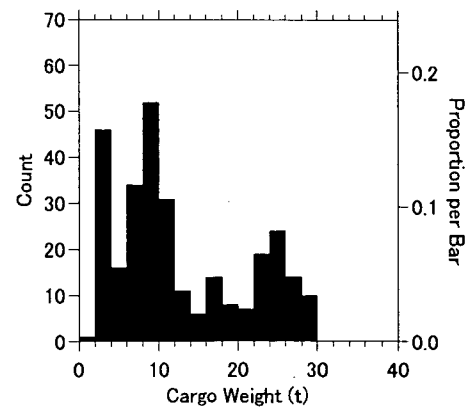


図- 60 40' コンテナの吊荷重 (PP 船)

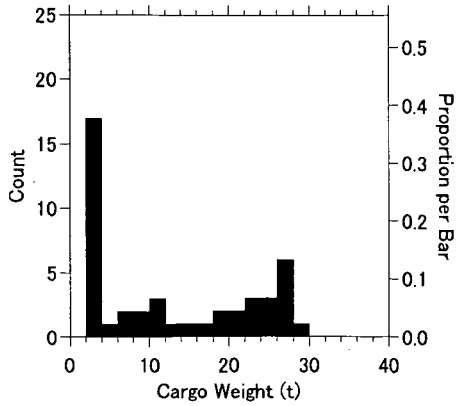


図- 61 40' コンテナの吊荷重 (K 船)

ブレッダーの距離からスプレッダーの横行方向の振れ幅を求め、その頻度分布を作成する。結果は図-64～65 のとおりである。これは全て手動運転によるものであるが、この区間を自動運転しようとする場合には、この振れ幅をセルガイドの許容値以下に制御できなければならない。

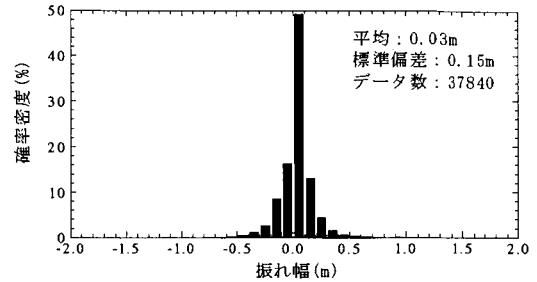


図- 64 スプレッダの横行方向振れ幅 (PP 船)

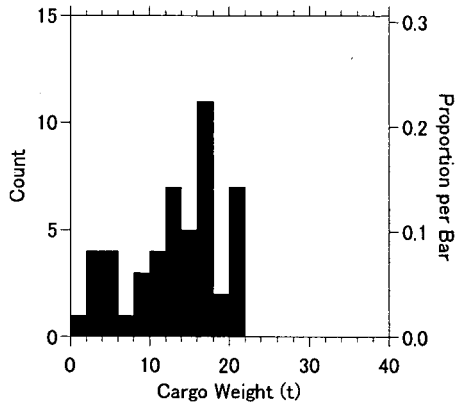


図- 62 20' コンテナの吊荷重 (PP 船)

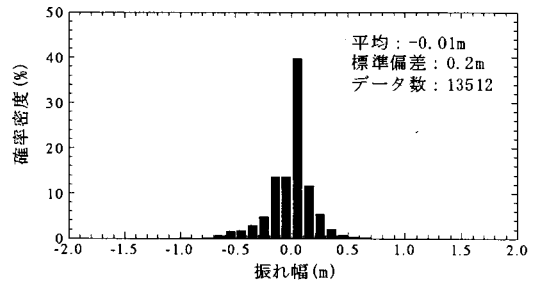


図- 65 スプレッダの横行方向振れ幅 (K 船)

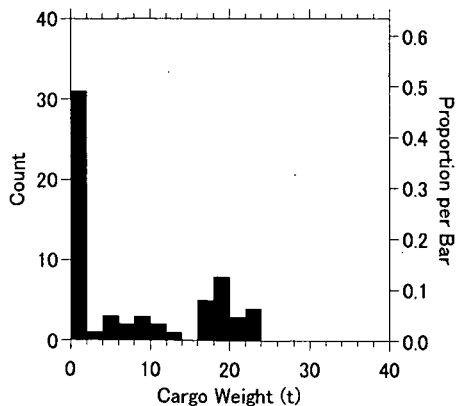


図- 63 20' コンテナの吊荷重 (K 船)

(8) スプレッダの振れ幅

ハッチ上空で横行速度の絶対値が 25m/min 以下の時の全計測値について、スプレッダーの振れ角とブームとス

(9) サイクル時間への影響要因

a) 要因別のサイクル時間分布

片サイクル時間への影響要因を見るため、吊荷 (有/無), 横行方向 (海行/陸行), 船上積付位置 (デッキ/ホールド), 運転手技量 (高/中) 各々で片サイクル時間をグループに分けて頻度分布を作成する。結果は図-66～72 のとおりである。

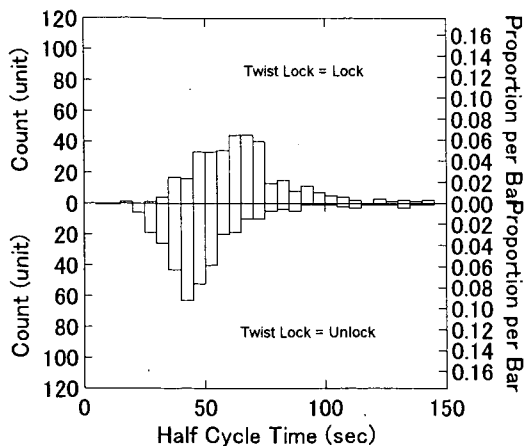


図- 66 吊荷の有無と片サイクル時間分布 (PP 船)

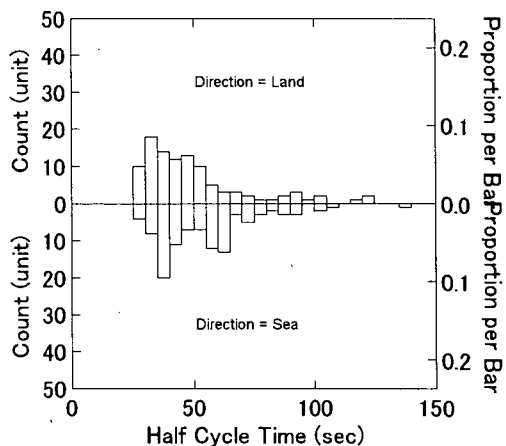


図- 69 横行方向と片サイクル時間分布 (K 船)

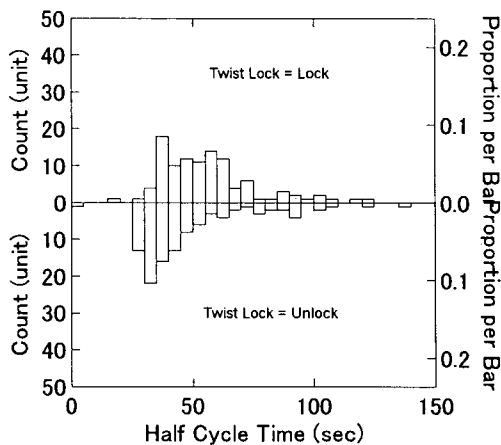


図- 67 吊荷の有無と片サイクル時間分布 (K 船)

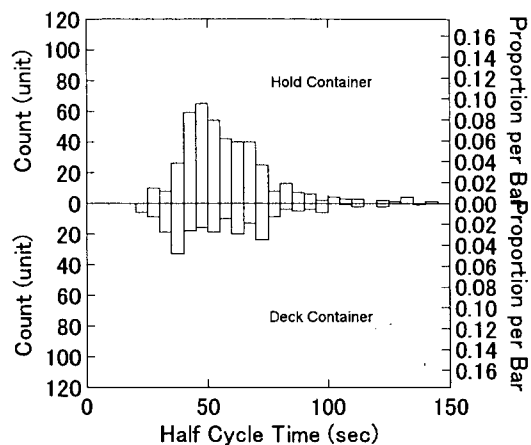


図- 70 デッキ/ホールド別片サイクル時間分布 (PP 船)

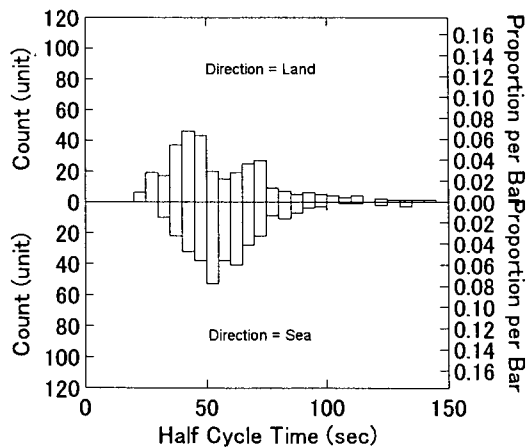


図- 68 横行方向と片サイクル時間分布 (PP 船)

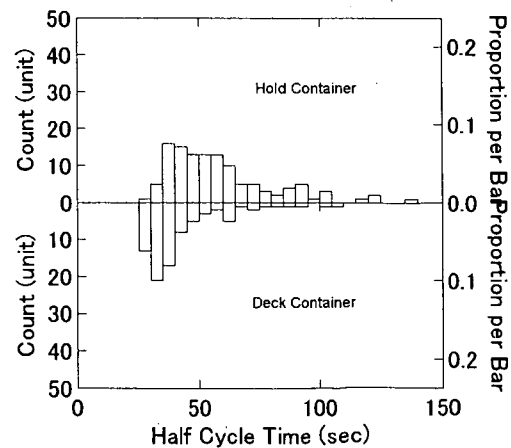


図- 71 デッキ/ホールド別片サイクル時間分布 (K 船)

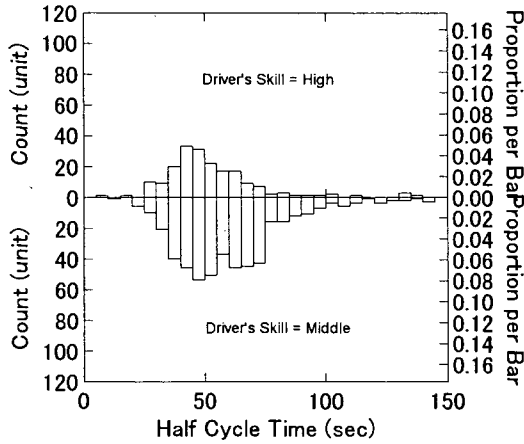


図- 72 運転手の技量と片サイクル時間分布 (PP 船)

結果を見ると選定した各要因は、いずれも片サイクル時間の大小に影響を及ぼしているように見える。また、横行方向別ではかなり顕著な双山分布が現れている。このことから、これらのグループ分けのもとでは、片方のグループで特性が大きく分かれる片サイクルが混在しているを知ることができる。

b) 重回帰による要因分析

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-24~25 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身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。大型船になると、スプレッドの移動に多くの時間を費やしている。この移動時間を規定するのは主として吊荷の重量と荷役パス延長であるが、この重回帰分析には荷役パス延長が入っていない。これを加えれば重相関係数がかなり向上する可能性があるが、移動位置と荷重とクレーンの運動性能から運動方程式を解いて、ここからスプレッドの移動に要する時間を求め、実測値との整合をみた方が重回帰分析によるアプローチ

表- 24 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- 25 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- 26 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- 27 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

よりも直接的であると考えられる。なお、各説明変数の相関係数行列は表-26~27 のとおりで、各説明変数の独立性は高い。

4. 荷役動作シミュレーション

4.1 荷役サイクルパスモデルの作成

クレーンの性能や荷役対象船型が変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、そのシミュレーション結果を実測値と対比することで適合性を確認する。

(1) モデルの荷役動作

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。このために、次の動作条件を仮定する。

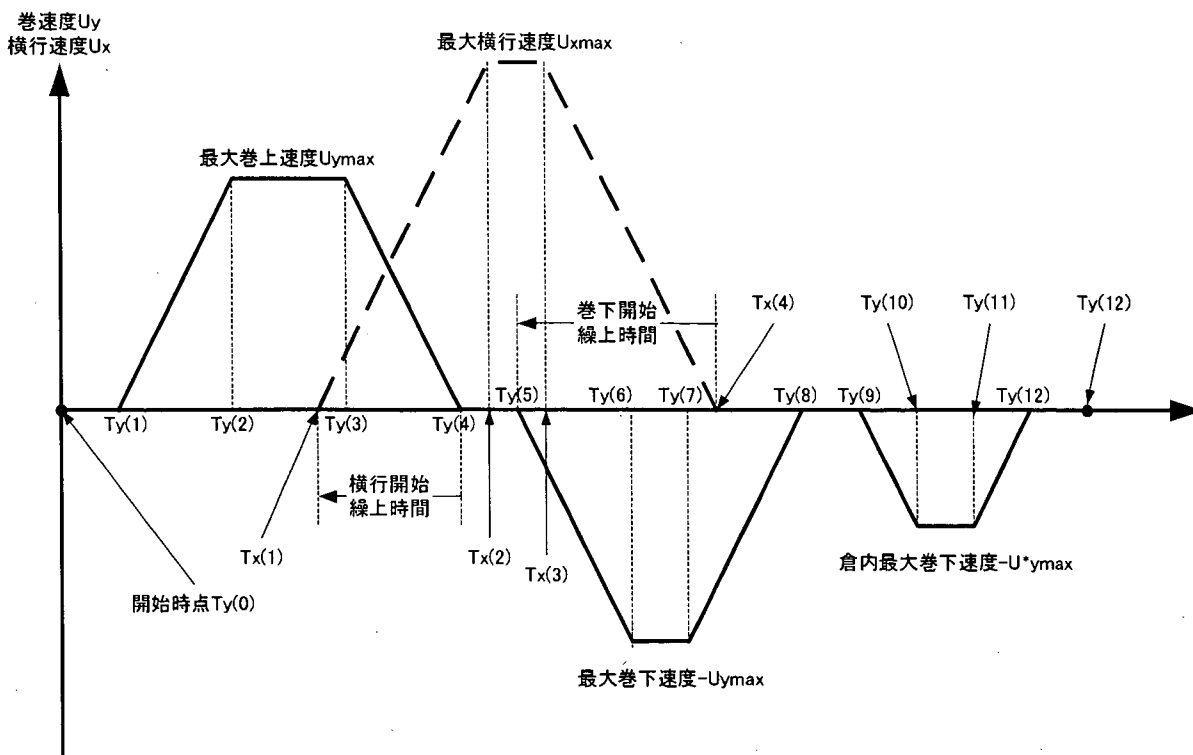


図- 73 荷役サイクルのパスモデルの概念

- ① 加減速時の加速度の大きさは一定で、等速運動は最高速度で行い、中間的な速度では行わない。
 - ② 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。
 - ③ 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、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横行開始時間とする。
 - ④ 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、ホールド内の降下の最高速度は低下する。
 - ⑤ 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。
 - ⑥ これらの運動の位置と時間は、0.5秒単位で計算する。これは実測と同じ時間間隔である。
- 以上の荷役サイクルのパスモデルの概念を図-73に示す。ここで、 $T_x(\cdot)$ は横行速度の変化時点、 $T_y(\cdot)$ 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} はホールド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、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。3.4(9)b)の重回帰分析の結果から、運転手の技量の違いによって片サイクル時間が変化するという結果を得ている。この場合、技量レベルが関係者の主観による、しかも相対的なもの

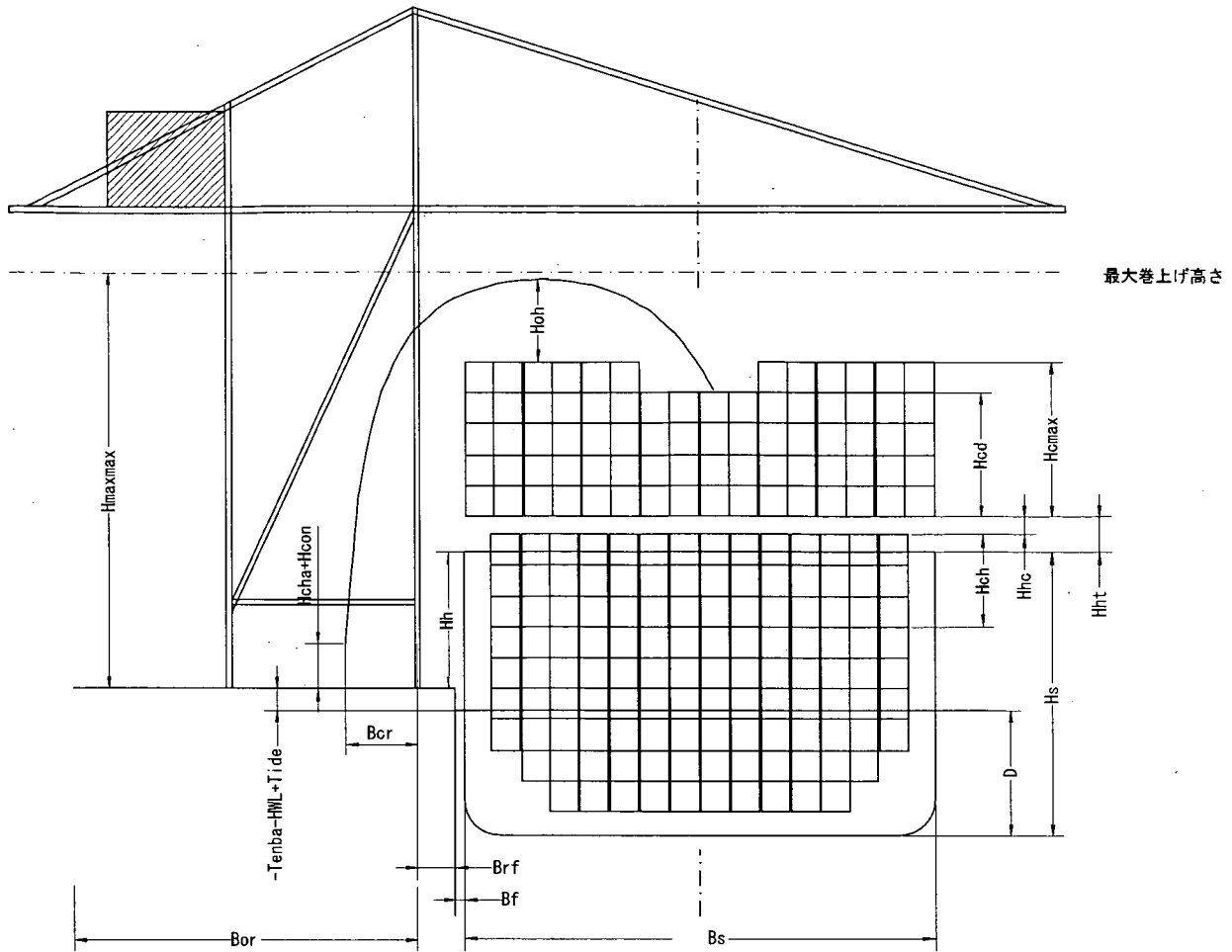


図-74 岸壁・クレーン・船舶の寸法体系

であるため定量化が困難である。従って、この要素を組み込んだとしてもモデルは汎用性のあるものにならないため、ここでは技量レベルを考慮しないことにする。

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、荷役準備、運転手の乗降、試運転、ハッチカバー移動、陸揚げと船積みとの切替、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り扱いの片サイクル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) 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ポイントの位置を表す寸法の体系は図-74 のとおりで、各変数はそれぞれ以下の通り設定する。

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(m), 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 : ヤード舗装面からハッチ上面までの高さ, Hmaxmax : レール面上揚程, Hcha : シャシの高さ, Hcon : コンテナの高さ, Ha : 吊り荷高さ, Tenba : HWL からの岸壁天端高さ, HWL : 朔望平均高潮位の平均潮位

からの高さ、である。

(3) 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、3.4 (4)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（詳細は 3.4 (5)を参照）。設定した運転特性のパラメータは表-28 のとおりである。

表- 28 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	4.2s	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	

(4) 計算値と実測値の比較

まず安全距離を決定するために、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=1m となった(表-29 参照)。実績値との整合を見るため、4.1(1)のモデルに表-28 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-30 および図-75 となる。PP 船の場合にはかなり対応がよいが、K 船の場合には PP 船の場合に比べて対応が悪い。K 船の場合に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。陸行の片サイクルは、試験的に半自動運転を行っているものが多数含まれることによると考えられる。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られているため、片サイクルの時間がある傾向を持って長くなる。これは現在の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この問題はより深刻なものとなる。今後の重要な技術課題であろう。K 船の場合、陸行き片サイクルは半自動運転という特殊条件下のものが多く含まれるため、陸行の片サイクルは実測値と計算値を比較する際に対象から除外する。その上で、実測値および計算値の片サイクル時間の平均値および相関係数を求めると、陸行きを除外しない場合に比べると、相関係数はわずかに悪化するものの、平均値の差は減少する。

表- 29 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- 30 片サイクル時間の計算値と実測値

	PP 船		K 船		K 船 (海行)	
	実測	計算	実測	計算	実測	計算
平均値	53.6s	52.6s	48.9s	39.6s	52.4s	47.3s
標準偏差	18.4s	18.7s	16.7s	13.0s	17.4s	11.7
データ数	419		194		98	
相関係数	0.72		0.49		0.44	

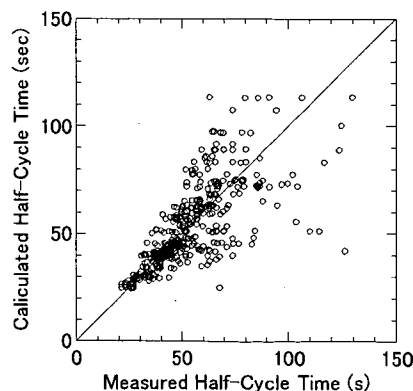


図- 75 片サイクル時間の計算値と実測値の散布図 (PP 船 Bay50 & Bay67)

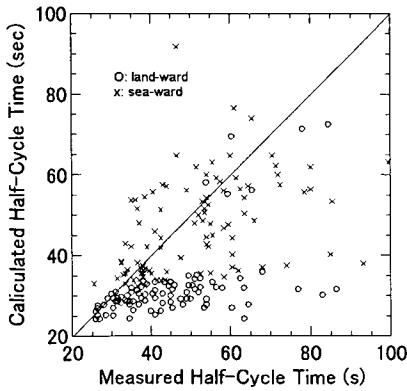


図- 76 片サイクル時間の計算値と実測値の散布図 (K 船 Bay15)

4.2 感度分析

このモデルを用いて船舶のサイズやクレーンのサイズ・性能や運転条件の変化による片サイクル時間の変化を予測する。

(1) 計算条件

構想があると報じられている SP 船の諸元と建設されている SP 型岸壁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①船幅：58m, ②型深：27m, ③デッキスロット：23 列×7 段, ④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①レール面上揚程：45m, ②最大横行速度：4m/s, ③最大巻速度（無負荷）：3m/s, ④最大巻速度（実負荷）：2.5m/s, ⑤加速度：0.5m/s²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。積荷条件は、①消席率：100%, ②荷役コンテナ割合：100%, ③全体に占める 20' コンテナの割合：33% (TEU 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、積荷条件は SP 船と同じとする。

(2) 船舶・クレーンサイズの影響

SP 船-SP 型クレーンおよび PP 船-PP 型クレーンの計算結果は表-31 および 32 のとおりである。SP 船-SP 型コンテナクレーンのケースは、船舶のサイズが大型化するにもかかわらず、運動性能の向上努力によってサイクルタイムは PP 船-PP 型クレーンのケースとほとんど変化がない。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いものになってしまう。この問題を克服するためには、1 港で使用するスロットエリアをベイの中で分割し、クレーン 1 基当たりの延べ荷役時間を減少させ、そのうえでクレーン台数を増加させるか、

クレーンの荷役速度を上げるかのどちらかの方法をとる必要がある。クレーンの台数を増加する方法の場合は、わが国の人件費が近隣諸国に比してかなり高いため、コスト競争力を低下させることになってしまう可能性がある。わが国の国際競争力を高める可能性を追求するためには、あらゆる可能性を考えた荷役性能の更なる向上が求められる。

表- 31 荷役時間

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

表- 32 動作別の片サイクル時間

	運動	離陸	ハッチ停止	着陸	スタックオン 着脱	20' サイド 変更
a: SP 型(s)	36.3	3.8	1.4	5.5	8.4	0.1
b: PP 型(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

a) 荷役ブロックと消席率の影響

このモデルを用いて SP 船-SP 型クレーンおよび PP 船-PP 型クレーンで荷役スロットの位置が中央ブロック、サイドブロックおよび全断面の場合に、それぞれ消席率を 100%, 90%, 80%, 70%と変化させてサイクル時間を計算する。計算結果は表-33 のとおりである。条件が変化した場合に片サイクル時間がどのように変化してい

表- 33 荷役ブロック・消席率別の片サイクル時間

		SP船-SP型クレーン				PP船-PP型クレーン			
		100%	90%	80%	70%	100%	90%	80%	70%
離陸(s)	中央	3.8	3.7	3.7	3.6	3.7	3.7	3.6	3.6
	サイド	3.8	3.7	3.7	3.6	3.8	3.7	3.7	3.6
	全断面	3.8	3.7	3.7	3.6	3.8	3.7	3.7	3.6
ハッチ停止(s)	中央	1.4	1.5	1.5	1.7	1.5	1.6	1.7	1.9
	サイド	1.4	1.4	1.6	1.7	1.4	1.5	1.6	1.8
	全断面	1.4	1.5	1.6	1.7	1.4	1.5	1.6	1.8
着陸(s)	中央	5.4	5.2	5.2	4.8	5.3	5.0	4.8	4.5
	サイド	5.5	5.3	5.1	4.8	5.4	5.2	5.0	4.7
	全断面	5.5	5.3	5.0	4.7	5.4	5.2	4.9	4.6
運動(s)	中央	46.5	44.8	41.7	38.8	47.5	45.1	43.7	41.7
	サイド	38.5	38.0	36.7	36.9	38.4	37.8	36.3	37.2
	全断面	36.3	35.2	35.8	36.7	36.6	35.3	36.1	37.2
スタックオン着脱(s)	中央	8.1	7.4	5.0	4.1	7.6	6.9	5.9	1.7
	サイド	8.6	7.9	7.0	6.0	8.3	7.6	6.7	5.6
	全断面	8.4	7.7	6.9	5.7	8.1	7.4	6.5	5.3
サイドシフト(s)	中央	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.2
	サイド	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5
	全断面	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
片サイクル(s)	中央	65.4	62.9	57.4	53.3	66.0	62.8	60.3	53.6
	サイド	58.0	56.7	54.3	53.4	57.7	56.2	53.7	53.3
	全断面	55.4	53.5	53.1	52.7	55.4	53.3	52.9	52.8
延荷役時間(hr)	中央	10.9	9.5	9.8	7.8	5.8	5.0	4.3	8.9
	サイド	20.2	17.8	15.2	13.0	13.7	11.9	10.2	8.8
	全断面	28.6	24.8	21.9	19.0	18.1	15.7	13.8	12.0

注1) 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2) 100%~70%は消席率を表す。

るかをみると、SP型とPP型で差異はほとんどない。荷役ブロックの違いについては、全断面が最小で、サイドブロックがその次で、中央ブロックが最大となる。この差は消席率が100%の時に最大で、全断面に対して中央ブロックは時間で10.0sec (SP型)、10.5sec (PP型) 大きい。消席率の変化に対する応答は、中央ブロックが最も大きく、全断面が最も小さい。注目すべきは全断面で、消席率が変化しても片サイクル時間はほとんど変化しない。

b) クレーン性能・運転条件の影響

クレーン性能や運転条件の変化による片サイクル時間の変化をみるため、①最大速度(横行)、②最大速度(巻)(無負荷)、③最大速度(巻)(実コンテナ)、④ホールド内最大降下速度、⑤最大横行速度、⑥加速度、⑦離陸時間(シャシ)、⑧離陸時間(デッキ)、⑨離陸時間(ホールド)、⑩位置決・着陸時間(シャシ)、⑪位置決・着陸時間(デッキ)、⑫着陸時間(ホールド)、⑬ハッチ挿入時間、⑭スプレッド伸縮等時間、⑮20°サイドのシフト時間、スタッキングコーン着脱時間{⑯デッキコンテナ(船積み)、⑰デッキコンテナ(陸揚げ)、⑱ホールドコンテナ

表-34 片サイクル時間のパラメータ変化計算

変化パラメータ	パラメータ値	片サイクル(s)	変化率(%)
ベースラインケース	-	55.4	0.0
最大速度(横行)(m/s)	2	60.8	9.7
	8	55.0	▲0.8
最大速度(巻)(m/s)(無負荷)	1.5	57.0	2.9
	6	58.3	5.2
最大速度(巻)(m/s)(実コンテナ負荷)	1.25	59.0	6.5
	5	56.3	1.6
船倉内最大降下速度(m/s)	0.3	64.3	16.0
	1.2	51.3	▲7.4
横行速度(m/s ²)	0.25	60.2	8.6
	1	54.1	▲2.4
加速度(m/s ²)	0.25	66.3	19.6
	1	52.4	▲5.4
離陸(シャシ)(s)	1.6	54.6	▲1.5
	6.4	56.9	2.7
離陸(デッキ)(s)	2.7	55.0	▲0.8
	10.8	56.4	1.8
離陸(船倉)(s)	1.9	54.8	▲1.1
	7.6	56.7	2.3
位置決・着陸(シャシ)(s)	2.1	54.4	▲1.8
	8.4	57.5	3.8
位置決・着陸(デッキ)(s)	6.15	54.4	▲1.8
	24.6	57.5	3.8
着陸(船倉)(s)	1.9	54.8	▲1.1
	7.6	56.7	2.3
ハッチ挿入(s)	2.1	54.7	▲1.3
	8.4	56.8	2.5
スプレッド伸縮等(s)	24.25	55.4	▲0.0
	57	55.4	▲0.0
20°サイドのシフト	20.9	55.4	▲0.0
	83.6	55.5	0.1
デッキコンテナ(船積み)(s)	11	54.6	▲1.5
	44	57.1	3.0
デッキコンテナ(陸揚げ)(s)	12.35	54.5	▲1.7
	29.4	55.8	0.7
船倉コンテナ(船積み)(s)	11	54.3	▲2.0
	44	57.7	4.1
船倉コンテナ(陸揚げ)(s)	12.35	54.1	▲2.4
	29.4	55.9	0.9

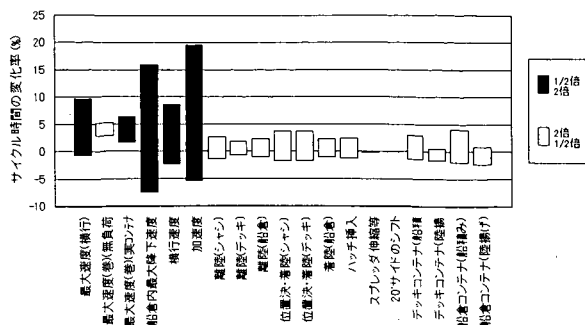


図-77 片サイクル時間の感度分析結果

(船積み)、⑲ホールドコンテナ(陸揚げ)}をそれぞれ1/2倍、2倍に各要素を単独で変化させた場合を、PP船-PP型コンテナクレーンのケースで計算する。結果は表-34および図-77のとおりとなる。この結果、片サイクル時間の短縮に最も効果があるのはホールド内最大降下速度を大きくすることであり、次に効果が大いのは加速度を大きくすることだということが分かる。加速度を大きくするためには、強力な電動機とブレーキが必要になり、それを実現するための技術開発・コストダウンが必要になる。ホールド内最大降下速度を大きくするためには、運動性能ではなく、安全性が問題となる。言い換えれば速度を上げて安全な動作制御ができるかという問題であるので、加速度を上げるよりは相対的に低コストで実現できる可能性があると思われる。

4.3 直角軌道との比較

一般的に設計段階でコンテナクレーンの荷役能力を算出する場合に用いられる計算方法と本荷役シミュレーションによる計算結果を比較する。従来一般的に用いられている方法は、①デッキコンテナ積付エリアの中心およびホールドコンテナ積付エリアの中心からの陸揚げ荷役をデッキ荷役およびホールド荷役の代表ケースとして計算し、その取扱個数による加重平均から全体の平均サイクル時間を想定する。②軌道は直角軌道とする。③軌道の下方クリアランスは0.5mとする。④巻と横行の速度シーケンスは台形型とする。⑤位置合わせは5sec、ロック・アンロックは1.5secとする。というものである。これを4.2で計算したPP船の条件に当てはめて条件を設定(図-78参照)して計算をすると、片サイクル時間は44.7secとなる(表-35参照)。4.2のPP船の計算結果では、片サイクル時間は55.4secなので、全く考慮されていないスタッキングコーン着脱時間8.1sを差し引くと、時間で2.6sec、割合で4.7%の差となる。計算条件にやや実態と合わないものがいくつかあるにもかかわらず結果

はかなり良く一致する。さらに、船舶のサイズが変化した場合を計算する場合に、軌道は直角軌道で相似形となるため、速度や加速度を変化させた場合の相対的なサイクル時間の変化は概ね正しく予測することができると考えられる。このため、従来型のクレーンを基準にして、新しい型のクレーンの荷役サイクル

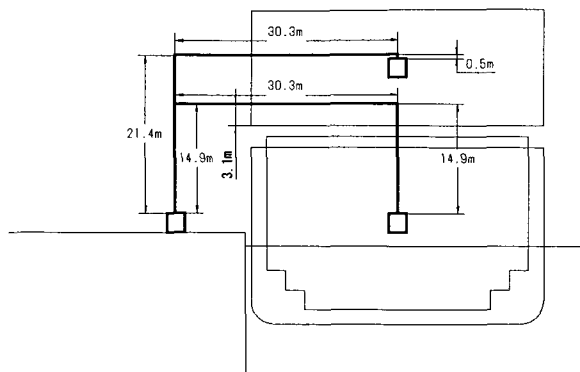


図- 78 直角軌道の寸法条件

表- 35 直角軌道計算の結果

動作	デッキ(s)	ホールド(s)
巻上(無負荷)	14.1	11.2
横行(海行)	16.1	16.1
位置合せ	5.0	5.0
巻下(無負荷)	2.0	4.7
ロック	1.5	1.5
巻上(全負荷)	2.0	16.9
横行(陸行)	16.1	16.1
位置合せ	5.0	5.0
巻下(全負荷)	19.1	16.9
アンロック	1.5	1.5
合計(s)	82.4	94.9
コンテナ個数	96 個	124 個
加重平均(s)	89.5	

ル時間を予測・評価する場合は、従来から使われている直角軌道を仮定した計算方法も十分に使用できると考えられる。ただし、実際の荷役能力との間には若干のギャップが生じる可能性があるため、そのためには本研究で使用したモデルのようなより実態に即した方法で計算することが必要になる。

5. 結論

(1) コンテナクレーンの設計諸元

- ① アウトリーチおよび揚程は、コンテナ船の大型化にあわせてサイズアップしてきている。基本的に、コンテナ船の船幅と型深は時代によりその比率を変化させるが、長期間での変遷をみた場合、両者は

一定の比率で推移してきていることがわかる。つまり、コンテナクレーンの縦横のプロポーションは、大きさにかかわらず一定となっているということである。これに対してクレーンのホイールベースは、コンテナの長さで決まっているので、長期間にわたり変化していない。

- ② 前述のとおり、コンテナクレーンの縦横比およびホイールベースは基本的に一定である。これに、スケールアップに伴う桁断面の増大を考慮すると、クレーン重量とアウトリーチの関係は概ね2乗則に従うと予想される。この両者のべき乗関係を、現有のコンテナクレーンの設計値から帰納的に推定したところ、べき乗数は約1.4であった。軽量化のための革新技術が随時導入されてきたものと推測される。
- ③ 巻速度と横行速度は、揚程およびアウトリーチとそれぞれ概ね比例関係にある。これは、コンテナクレーンのサイズが大きくなっても、吊荷の運搬時間を長くしない努力がなされてきた結果だとみることができる。このことは、換言すれば、平均サイクルタイムを2分以内にするという能力設定が、時代を超えて不変の目標とされてきたということであろう。

(2) コンテナクレーンの荷役状況の計測

- ① 荷役時のコンテナ船の長周期(概ね2分超)成分のローリングは、PP (Post-Panamax)船で $\pm 5.5^\circ$ 、K (近海航路)船で $\pm 8.5^\circ$ の範囲に収まっている。これより短周期のローリングによる振動の幅は、PP船で0.08m、K船で0.21mである。そして、その周期は船体の固有振動周期に相当する周期成分のエネルギーが卓越している。
- ② コンテナクレーンの荷役動作の計測から、スプレッドの各種一時停止時間(シャシへの着陸時、シャシからの離陸時、デッキ積付位置への着陸時、デッキ積付位置からの離陸時、ホールド内着陸時、ホールド内離陸時、ハッチ挿入時、スタッキングコーン着脱(シャシへの着陸時、シャシからの離陸時))の平均値を求めた。

- ③ ハッチ上空でのスプレッドの振れ幅の標準偏差は0.15~0.20mである。

(3) 荷役サイクルパスモデル

- ① コンテナクレーンの運転動作の観察をもとに、荷役サイクルパスモデルを作成した。そのモデルによって算出される荷役の片サイクル時間と実測値の相関係数は、PP船で0.72、K船で0.44であり、平均値の差ではPP船が1.0s、K船では5.1sであった。

大型船の荷役の場合には、このモデルは実測値とよく一致する。

- ② 作成した荷役サイクルパスモデルを用いて、SP (Super-Panamax)船-SP 型コンテナクレーンの平均片サイクル時間を求めた。その結果、片サイクル時間は、PP 船-PP 型コンテナクレーンとほぼ完全に一致した。しかし、1 ペイあたりのコンテナスロット数が大きく異なるため、延べ荷役時間は SP 船-SP 型クレーンが PP 船-PP 型クレーンを大きく上回る。この問題を克服する必要がある、そのために、SP 型クレーンの運動性能の更なる向上が求められる。
- ③ SP 型クレーンを対象として、設定した運動性能および運転条件の全パラメータについて片サイクル時間に対する感度を分析した。その結果、片サイクル時間の短縮に対して高い感度を示したのは、ホールド内最大降下速度と加速度であった。荷役時間を短縮するために大型コンテナクレーンの性能アップを考える場合には、この2つの要素の改善に向けた技術開発等の取組が、重要性が高いと言えるであろう。

(平成 14 年 11 月 15 日受付)

謝辞

コンテナクレーンの現地調査では、状況確認のためのビデオ撮影作業において東北大学大学院情報科学研究科樋口直人氏に長時間にわたる協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

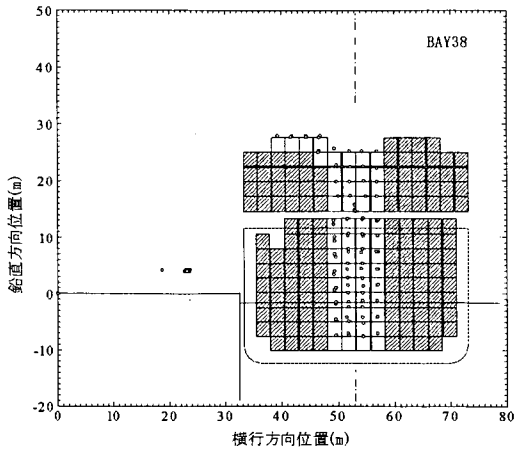
参考文献

- 1) 井上聡史：港湾の国際競争力と経営戦略，港湾，日本港湾協会，2002 年，pp.17-21
- 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 年。
- 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ーパナマックス型コンテナ船の荷役調査ー，港技研資料，No.758，運輸省港湾技術研究所，1993 年。
- 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 年。
- 5) 赤倉康宏ら：世界コンテナ船動静分析 (2000)，港湾技研資料，No.963，運輸省港湾技術研究所，2000 年。
- 6) PIANC: Criteria for Movements of Moored Ship in Harbours, Report of Working Group No.24 of the

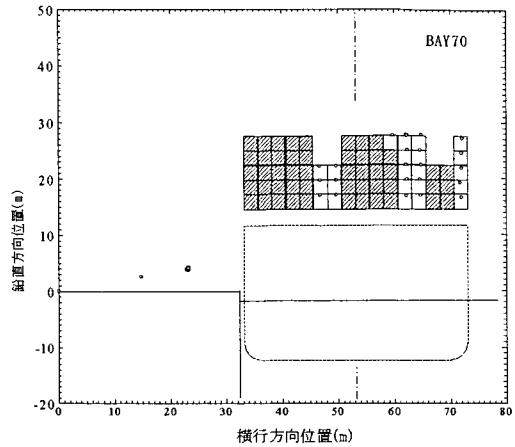
Permanent Technical Committee II, 1995, pp.1-35.

- 7) 日本造船学会編：改訂造船工学便覧 (第 1 分冊)，コロナ社，1976 年，pp.563-564
- 8) 笹健児・白石悟：信頼性手法による船舶の荷役および係留の安全性評価に関する基礎的研究，港湾技研資料，No.956，運輸省港湾技術研究所，2000 年。
- 9) 日本造船学会編：改訂造船工学便覧 (第 1 分冊)，コロナ社，1976 年，p.546
- 10) 日本造船学会編：改訂造船工学便覧 (第 1 分冊)，コロナ社，1976 年，p.564

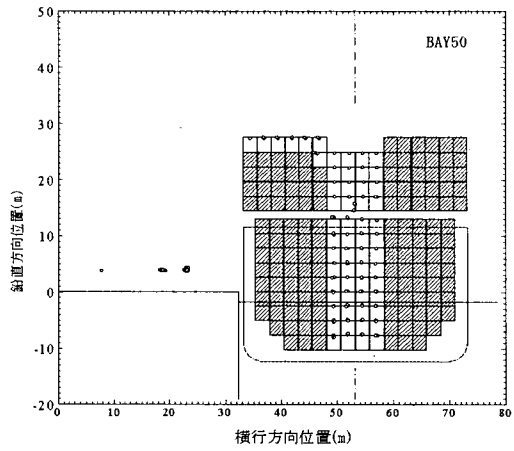
付録 A. 計測コンテナの積み放し位置 (実測)



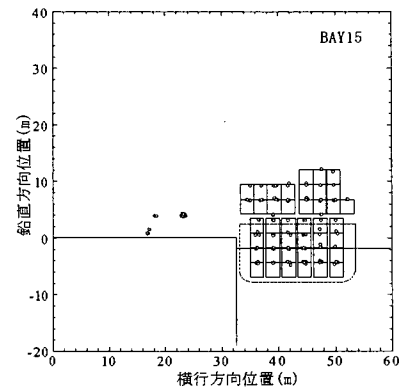
付図 A.1 PP 船 Bay38



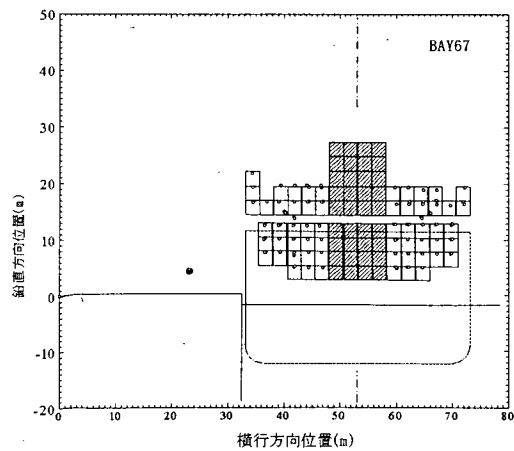
付図 A.4 PP 船 Bay70



付図 A.2 PP 船 Bay50



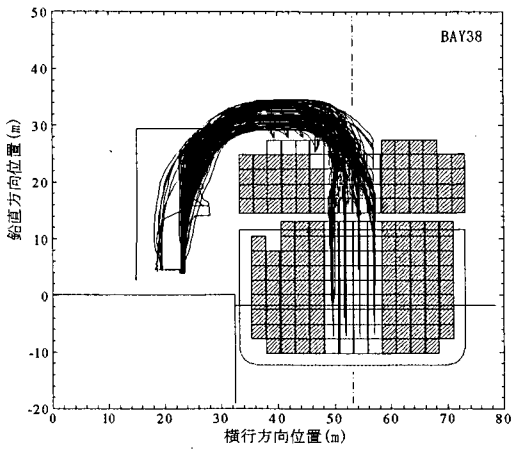
付図 A.5 K 船 Bay15



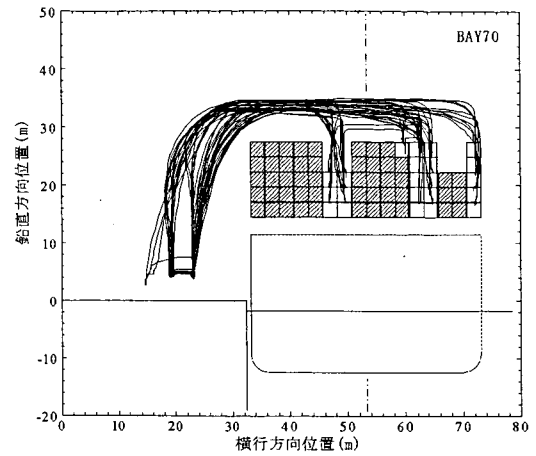
付図 A.3 PP 船 Bay67

- 注1) 水港袖師第一埠頭第5号コンテナクレーンの荷役動作 (2000年10月20~21日および12月20日) の実測結果である。
- 注2) ハッチは非荷役コンテナを示す。
- 注3) 計測方法および計測条件の詳細は本文 3.(1)~(3)および3.1を参照のこと。

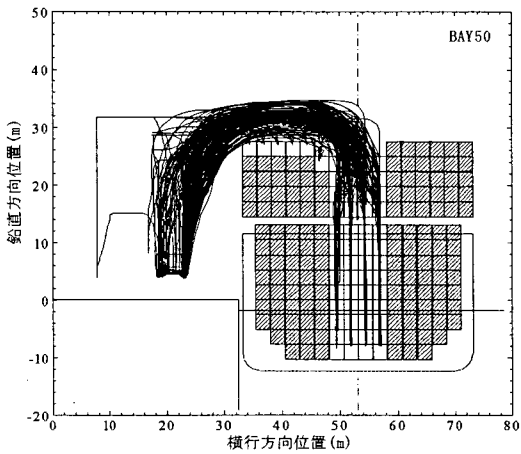
付録 B. スプレッタの軌道 (実測)



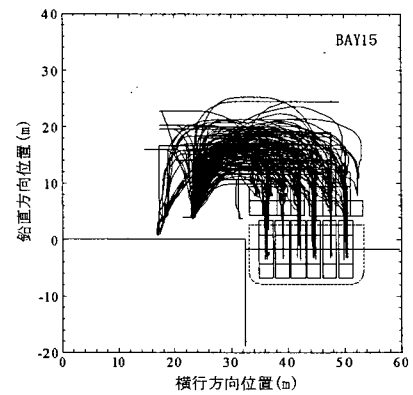
付図 B.1 PP 船 Bay38



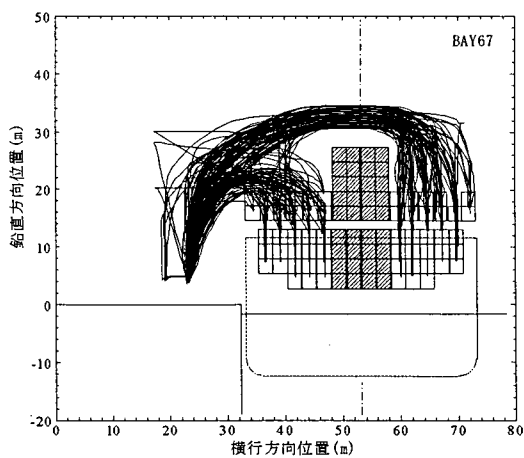
付図 B.4 PP 船 Bay70



付図 B.2 PP 船 Bay50



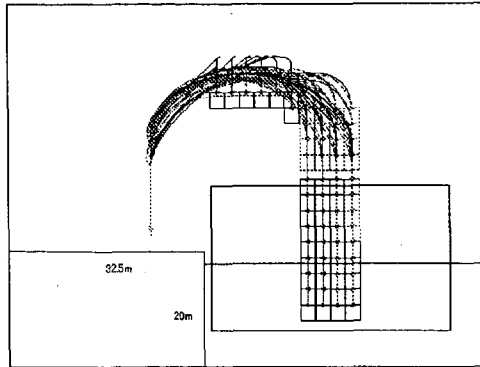
付図 B.5 K 船 Bay15



付図 B.3 PP 船 Bay67

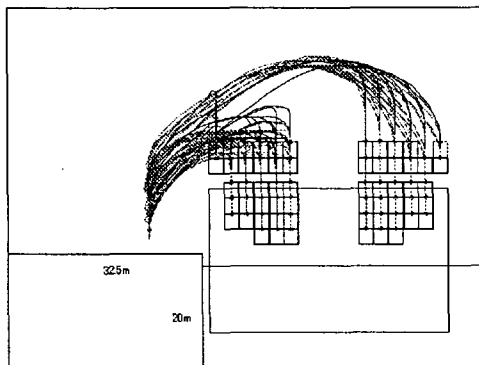
注) 清水港袖師第一埠頭第5号コンテナクレーンの荷役動作 (2000年10月20~21日および12月20日) の実測結果である。計測方法および計測条件の詳細は本文3.(1)~(3)および3.1を参照のこと。

付録 C. スプレッドの軌道 (モデル)

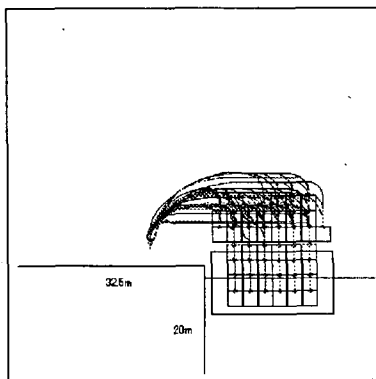


付図 C.1 PP 船 Bay50

- 注1) 清水港袖師第一埠頭第5号コンテナクレーンの荷役動作(2000年10月20~21日および12月20日)の実測結果と同じ条件で、この研究で作成した荷役サイクルパスモデルを用いて片サイクルタイムを計算したときに、便宜的に得られたスプレッドの軌道を表示した。
- 注2) モデルの詳細は、本文4.1を参照のこと。

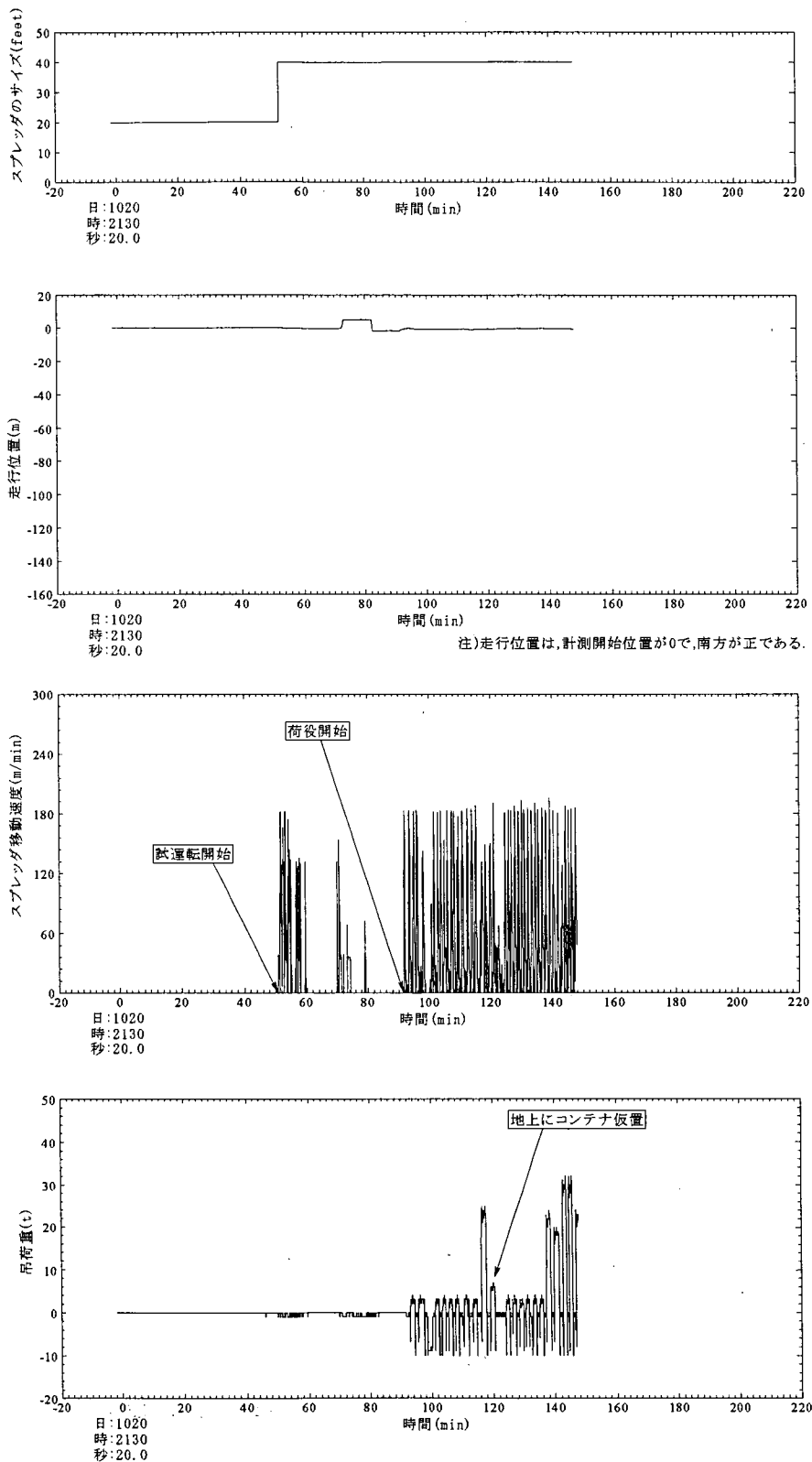


付図 C.2 PP 船 Bay67

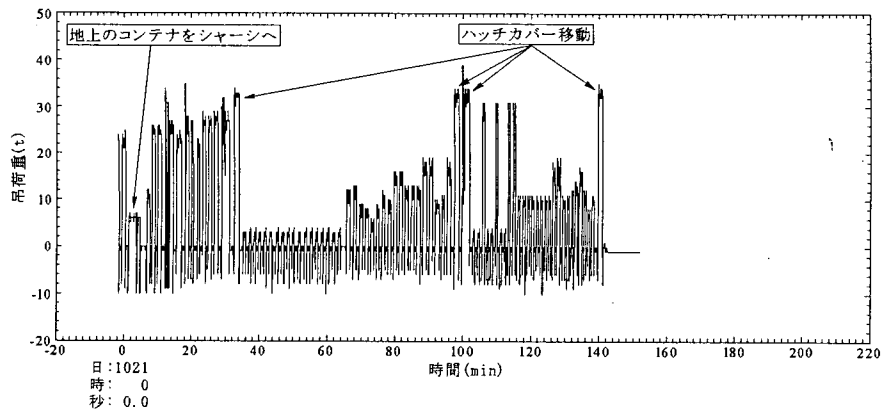
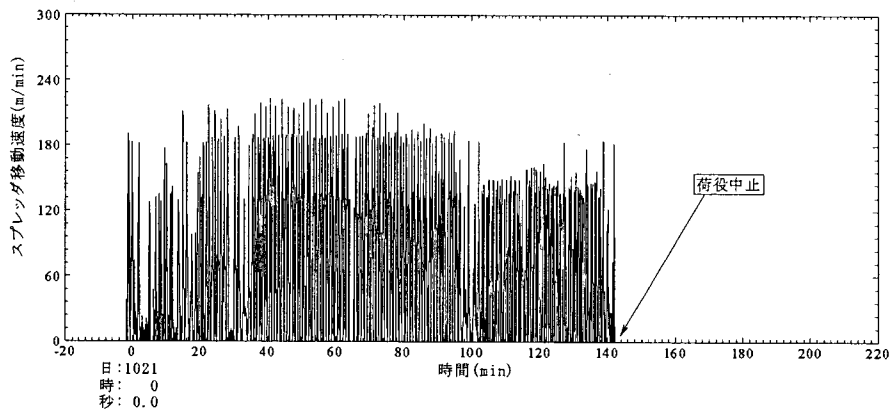
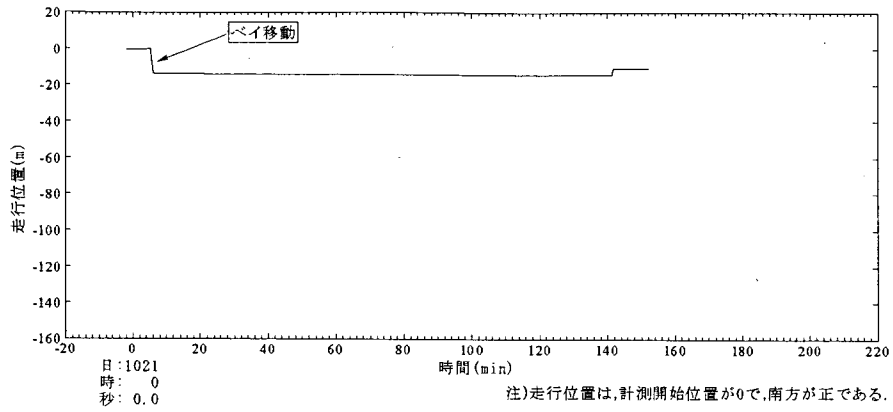
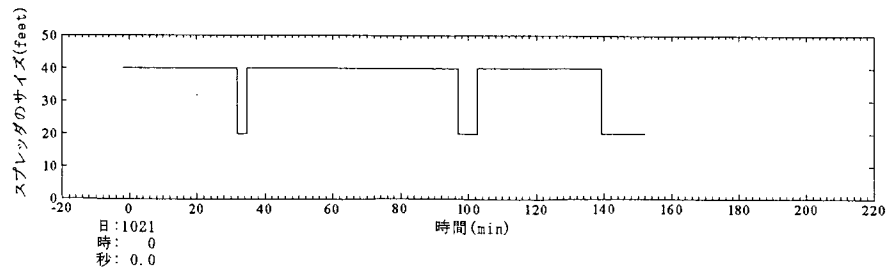


付図 C.3 K 船 Bay15

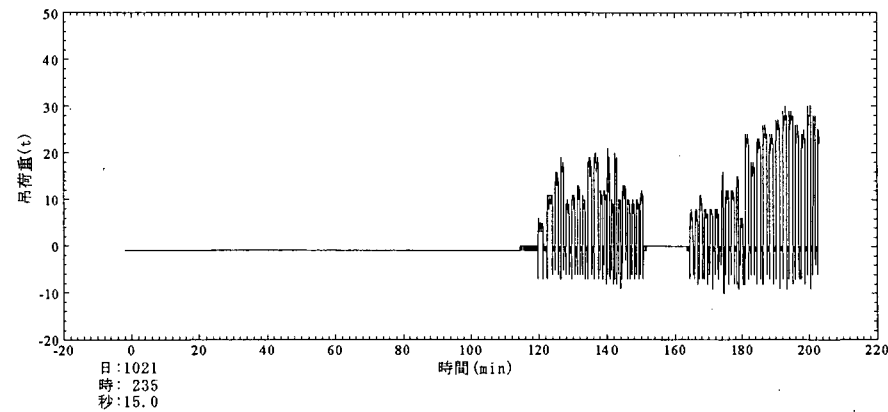
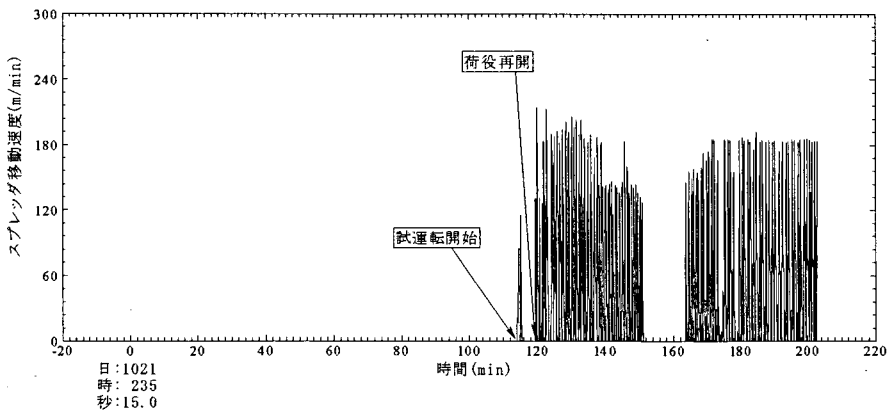
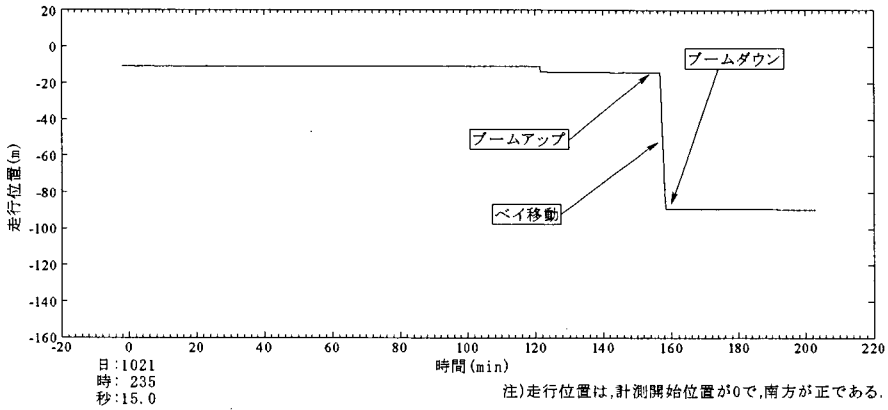
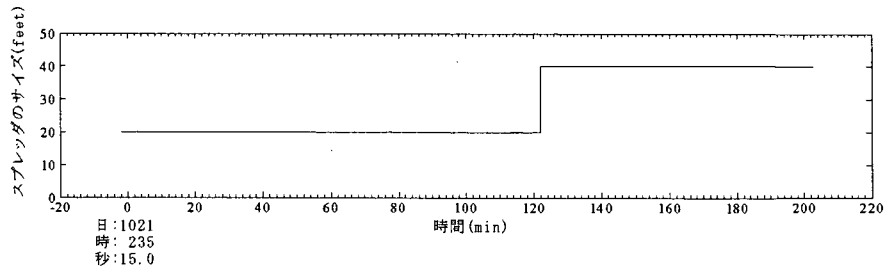
付録 D. スプレッドのサイズ・移動速度・吊荷重とクレーンの走行位置の経時変化（実測）



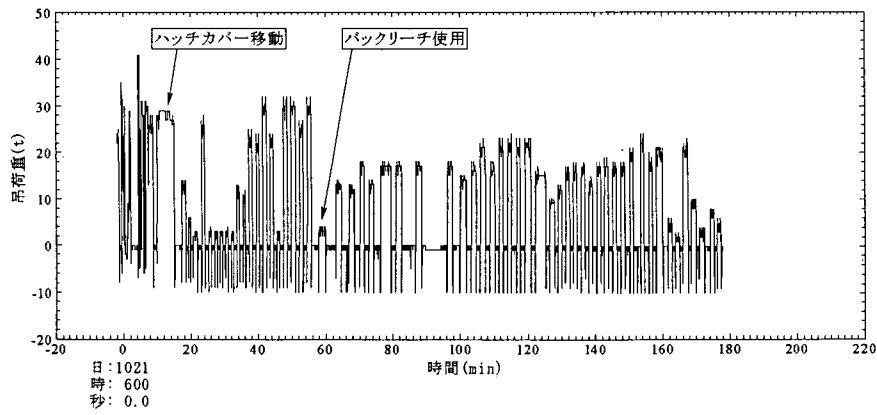
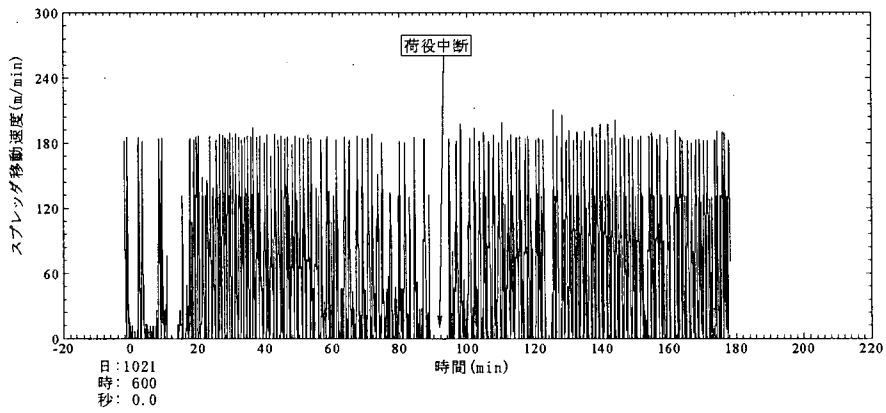
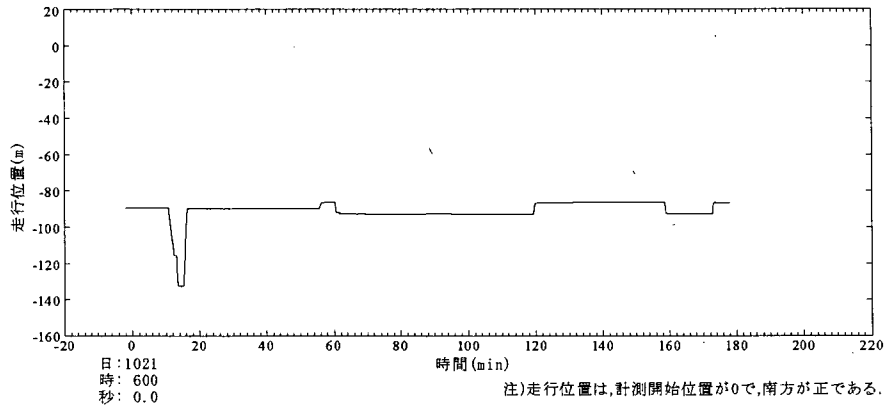
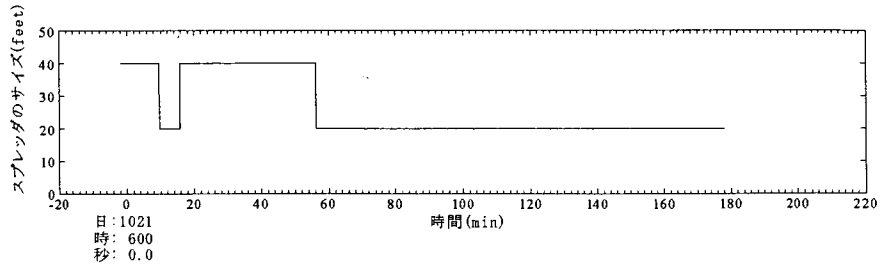
付図 D.1 PP 船[1]



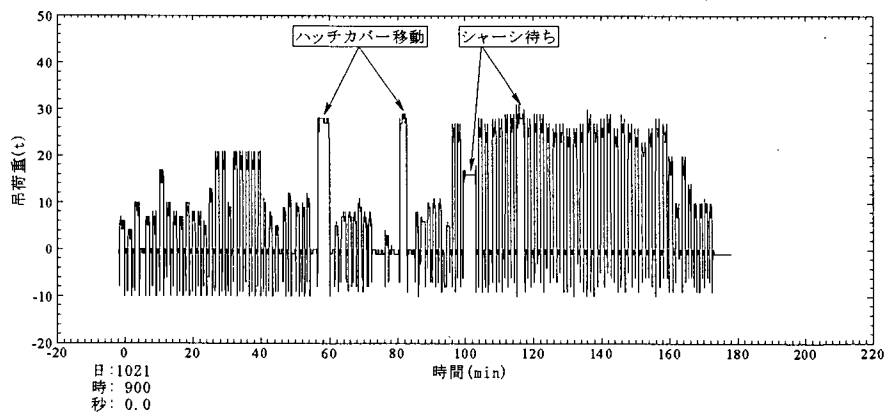
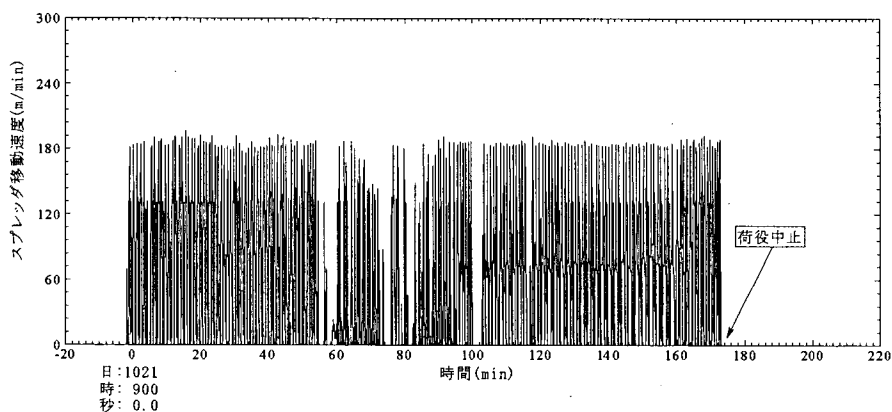
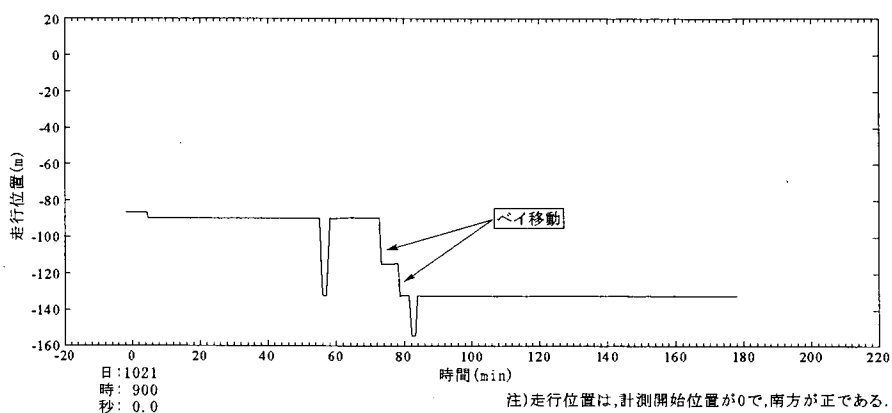
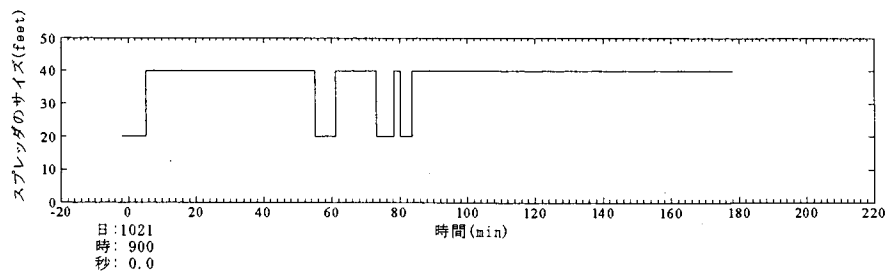
付図 D.2 PP 船[2]



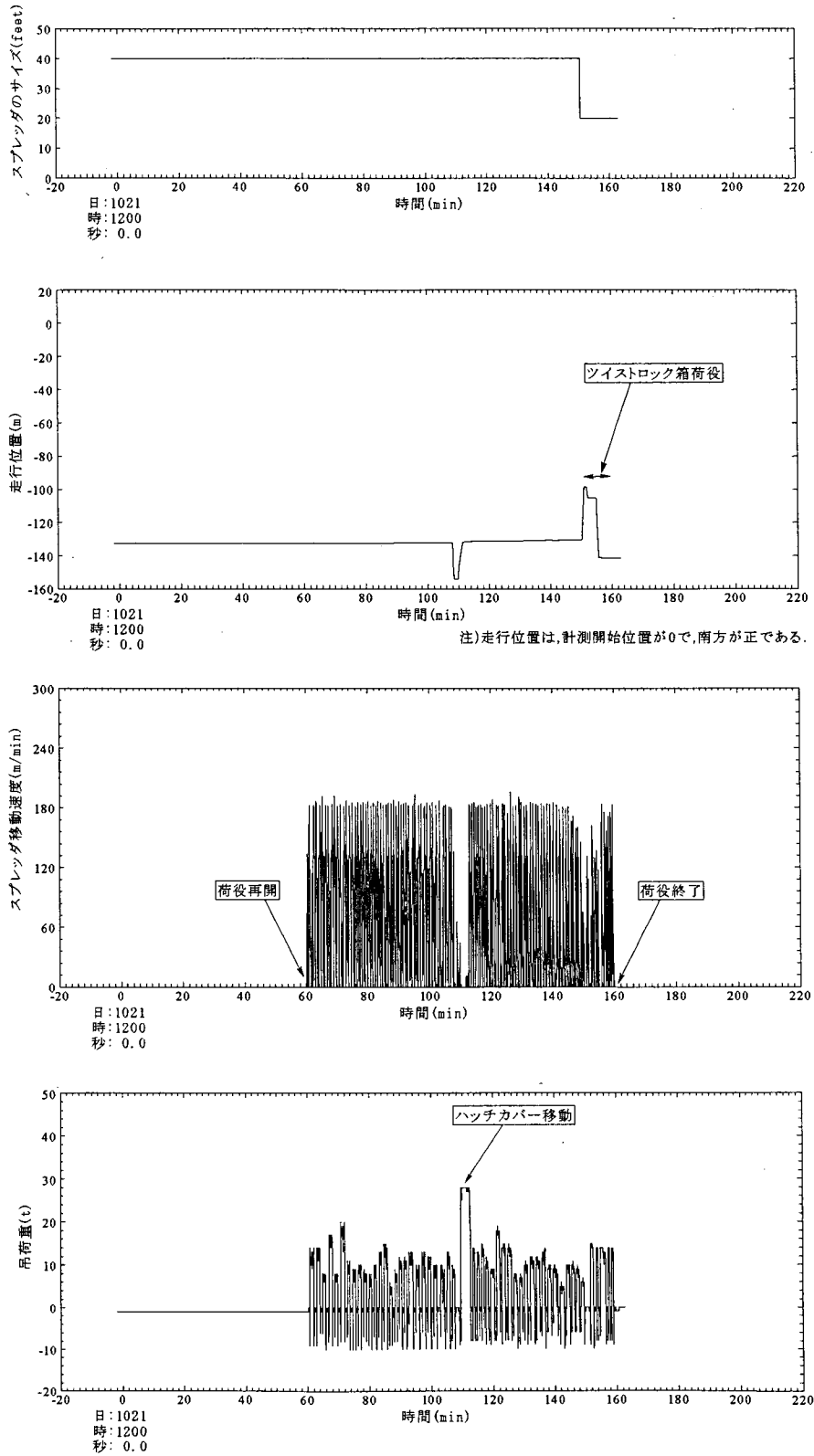
付図 D.3 PP 船[3]



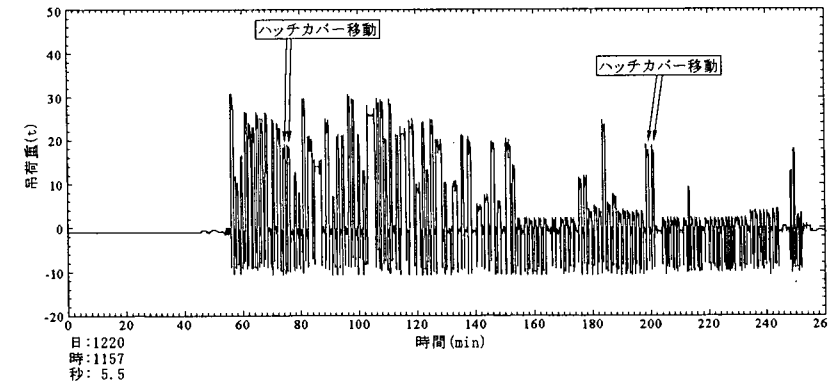
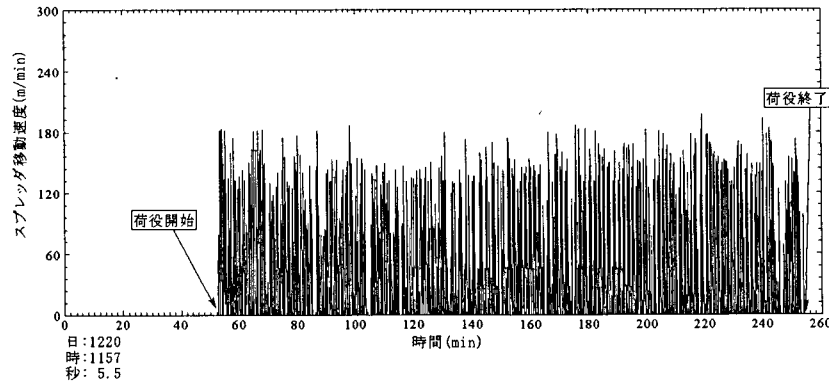
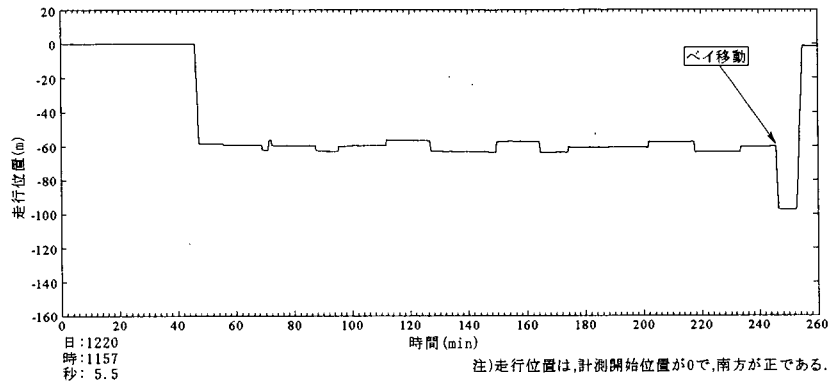
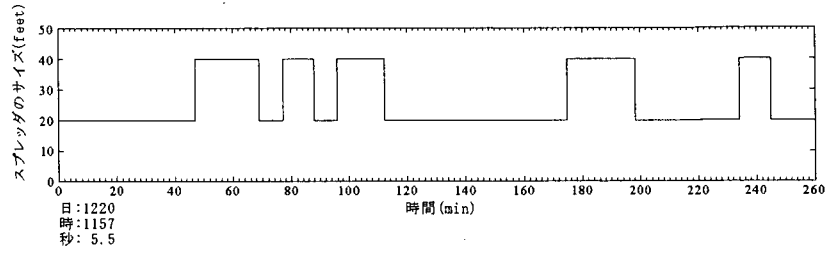
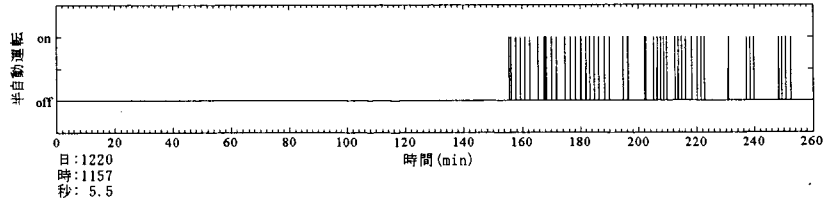
付図 D.4 PP船[4]



付図 D.5 PP 船[5]



付図 D.6 PP 船[6]



付図 D.7 K 船

- 注1) 港袖師第一埠頭第5号コンテナクレーンの荷役動作(2000年10月20~21日および12月20日)の実測結果である。
- 注2) ハッチは非荷役コンテナを示す。
- 注3) 計測方法および計測条件の詳細は本文3.(1)~(3)および3.1を参照のこと。

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 59

March 2003

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018