

信頼性手法によるシーバース稼働シミュレーション手法の開発

鹿島建設㈱ 正会員 山本 正明
 鹿島建設㈱ 正会員 田辺 寛明
 鹿島建設㈱ 正会員 松本 隆

1. はじめに

石油備蓄基地等において原油受払施設としてシーバースを計画する場合、その構造形式の選定及びバース数の決定は、基本的かつ重要な問題である。これらの判断は、建設コストやメンテナンスコスト等の経済性、立地条件や気象海象条件等の自然環境条件、原油の受払計画及び着栈荷役作業の安全性などを総合的に評価して行われているが、その判断基準は必ずしも明確なものとはなっていないのが現状である。

特に近年船舶の大型化に伴い、これらシーバースも外海に建設されるようになってきており、外海の波浪の影響を直接受けるため、シーバースの構造形式、バース数の決定を行う際には、滞船による待ちだけではなく波浪の影響による待ちも考慮した上でシーバースの稼働状況を推定する必要がある。このため、本研究ではこれらの判断をより客観的、合理的に行うために、確率論的概念を取り入れた信頼性手法によりシーバースの稼働状況をシミュレーションする手法の開発を行ったものである。

2. シミュレーション手法の概要

一般にシーバースの稼働状況を推定する方法としては、タンカーの到着時間、荷役時間の分布に着目した待ち行列モデルと、直接計算機により稼働状況をシミュレーションする方法とに大別されるが、今回の研究では後者の方法によりシーバースの稼働状況を推定することにした。シーバースの稼働状況は、シーバース構造形式、配船計画及び建設地点における気象海象条件（波浪条件）に大きく左右される。つまり、シーバースにおける稼働状況をシミュレーションするためには、タンカーの配船計画、シーバースの構造形式を設定した上で、気象海象条件とタンカーの入港から着栈・荷役・離栈までの一連の作業を、出来る限り現実に近い形でモデル化を行う必要がある。本研究では、タンカー配船計画、気象海象条件、タンカーの着栈・荷役必要作業時間等をランダムに変動する事象と仮定した上で、モンテカルロシミュレーション法によりシーバースの稼働状況を算定することにした。

図-1 に今回開発したシミュレーション手法の基本フローを示す。このシミュレーションの特徴は、まず原油の受払計画に基づいてタンカーの年間配船計画と、現地における気象海象観測データから出来る限り実際の現象に近い形で再現した人工気象海象条件の時系列グラフを設定し、次に配船計画に従ってタンカーの着栈、荷役、離栈の各作業を人工気象海象条件の時系列グラフ上で入港から順次必要作業時間を計算しながらシミュレーションすることにより、年間のタンカー稼働状況を求めていることである。この計算を繰り返す事により、年間のタンカー稼働時間、滞船時間、波浪による作業待ち時間等の期待値を求めることが出来る。さらに、配船計画を変更して計算することで最適配船計画を求めることも可能であるし、タンカー稼働状況の期待値に基づいて経済性の比較を行えば、最適バース数の決定や構造形式の比較も可能と考えられる。

3. 配船計画

本研究では、配船計画の作成に先立って出光興産㈱若狭小牧シーバースを始めとし、各地のシーバースにヒアリング調査を実施し、その結果を基に図-2 に示す配船計画用フロー図を作成した。原油バースの場合、

シミュレーション基本フロー

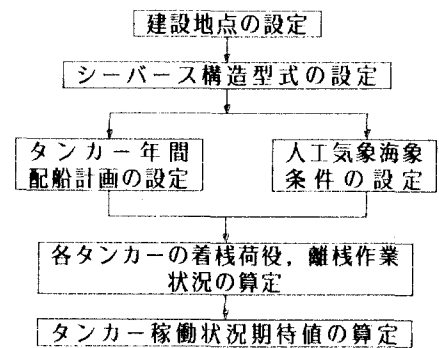
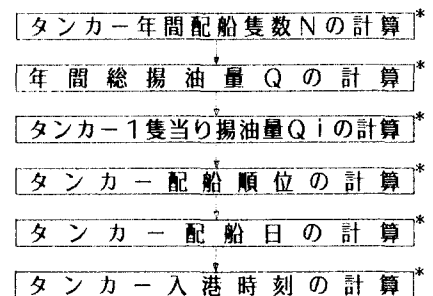


図-1

タンカー配船計画作成用フローチャート



*計算はすべて確率分布モデルに乱数を発生させて行う。

図-2

揚油単、タンカー配船数、配船時期等に関するおおよその年間計画はあるが、石油市場、世界情勢等によりタンカーの配船状況はかなり変動する。このため、本フローでもタンカーの年間配船隻数、揚油量、配船日、入港時刻等を、建設対象地点における原油受払計画に対応した乱数モデルにより決定することにした。苫小牧シーバースを対象とした場合、年間配船隻数、年間総揚油量を現地の実績からそれぞれ13隻～20隻、230万kl～330万klの様な確率分布を仮定して求めている。また、図-3に示すタンカー一隻当りの揚油量のヒストグラムによれば、入港するタンカーの大きさ(10万DWT～25万DWT)や揚油地の関係で揚油量が大きく変動することを示している。タンカー配船日については、原油受払計画に従ってタンカーの配船時期を決定し、その期間内における配船日については一様な確率分布を仮定して求めている。新しく建設するバースを対象とする場合には、上記した配船隻数、揚油量、配船日等は当然異なったものとなるため、原油受払計画やタンカー用船計画に従って適切な確率分布を仮定する必要がある。但し、タンカーの入港時刻については、今回ヒアリングした各バースとも、着岸作業の関係上大部分のタンカーが午前中に入港していることから、図-4に示すタンカー入港時刻のヒストグラムは、新しく建設されるバースにも適用出来ると考えられる。

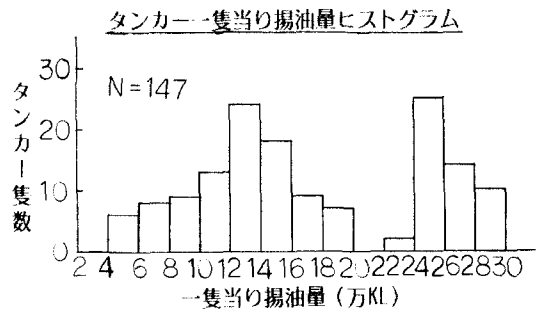


図-3

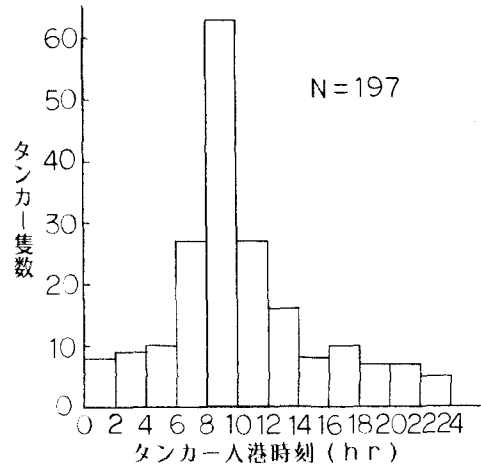


図-4 タンカー入港時刻ヒストグラム

4. 人工気象海象条件

4.1 設定方法の概要

対象海域における気象海象観測データから出来る限り実現象に近い人工気象海象条件を設定する方法として、本研究ではFFT法(高速フーリエ変換)を用いることにした。この方法は、波高、周期、風速等の気象海象現象を相互相関も考慮した定常確率過程としてシミュレーションする手法である。今回は、各種の文献調査及びヒアリングの結果より、シーバースの稼働状況に最も影響を与えると考えられる、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、10分間平均風速 U_{10} の3指標を対象に、それぞれの指標間の相互相関も考慮して人工気象海象条件の設定を行った。

4.2 観測データの分析

人工気象海象条件の設定の前に、まず対象地点における有義波高、有義波周期、平均風速の各観測データを分析する必要がある。

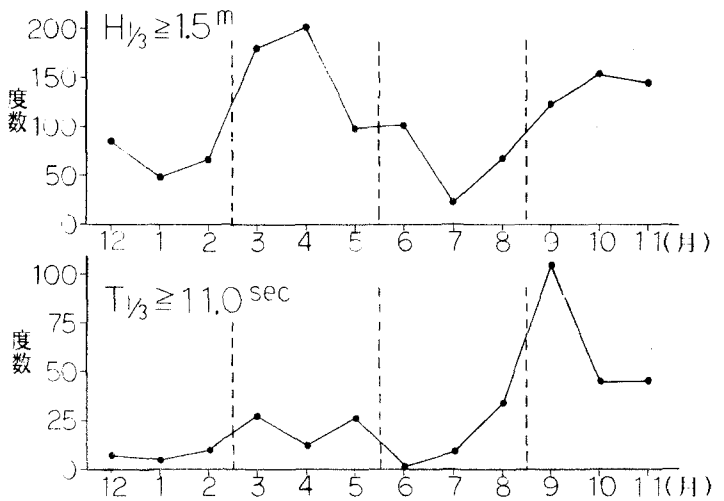


図-5 荷役限界以上となる有義波高、有義波周期の頻度分布

表-1 季節毎の平均値、標準偏差、分布型

		冬 12月～2月	春 3月～5月	夏 6月～8月	秋 9月～11月	分布型
有義波高 (m)	平均値	0.5	0.7	0.6	0.7	対数正規分布
	標準偏差	0.4	0.5	0.3	0.6	
有義波周期 (sec)	平均値	5.5	6.4	6.3	6.9	正規分布
	標準偏差	1.9	1.9	1.5	2.2	
平均風速 (m/sec)	平均値	5.7	5.6	4.7	5.8	正規分布
	標準偏差	3.0	3.4	2.6	3.4	

一般に日本近海の場合、これらの観測データは季節的な変動を示している例が非常に多い。

苫小牧シーバースにおける観測データ(1日12回、2時間間隔)をもとに検討した例を図-5に示す。この図は、1974～1977年にかけて観測された有義波高、有義波周期について、荷役限界に相当する条件

($H_{1/3} \geq 1.5m$, $T_{1/3} \geq 11.0$ 秒)を越える頻度を各月毎にまとめたものである。各月毎に頻度が大きく変化しており、1年間を各季節毎に4つに層別して取り扱えることがわかる。また、対象地点における観測データとしては数年間のデータが必要となるが、実際には1~2年間分しか収集できない場合も多い。以上の事から本研究では、観測データから人工気象海象条件を設定する場合、年間の季節的変動を考慮し季節と季節の間は非定常として取り扱うが、各年毎のデータには変動がないものとし定常性を仮定して取り扱うことにした。表-1に、今回FFT法により人工気象海象条件を設定する際使用した、苫小牧シーバースにおける1975年の観測データの各季節毎の平均値、標準偏差を示す。また、確率紙及びカイ二乗検定により適合度の検討を行った上で設定した観測データの分布型も示す。

4.3 人工気象海象条件のシミュレーション理論

一般に、正規分布する定常確率過程 χ_n は、次式に基づきFFT法を用いてシミュレーションすることが可能である。

$$\chi_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [H_k \cdot \zeta_k \cdot \exp(j \frac{2\pi k n}{N})]$$

- ここに、 N : 継続時間 T の分割数 ($T=N \cdot \Delta t$, Δt は時間刻み)
- n : 時刻 t に対応する変数 ($t=n \cdot \Delta t$)
- k : 円振動数の番号 j : $j=\sqrt{-1}$
- H_k : パワースペクトル、クロススペクトルから定められる係数
- ζ_k : 実数部及び虚数部をそれぞれ独立な正規乱数によって定めた複素数の乱数

このシミュレーションでは、観測データの持っている統計的性質(平均値、分布型、パワースペクトル、クロススペクトル)と、設定された人工気象海象条件の統計的性質が、シミュレーションを繰り返すことにより平均的に一致するようになっている。なお、対数正規分布する定常確率過程を取り扱う場合には、対数正規分布する変数の対数をとると正規分布に変換出来ることを利用すれば、上述の基本式をそのまま用いることができる。

4.4 人工気象海象条件の設定結果

1975年の観測データに基づいて有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、10分間平均風速 U の同時シミュレーションを行い、人工気象海象条件を設定した。その結果の一例として、春季における有義波高、有義波周期の設定例と観測データの時系列を図-6、7にそれぞれ示す。これらの図によれば、設定された有義波高、有義波周期は基になった観測データと比較的よく一致したパターンを示しており、平均値、最大値も近い値となっている。また、有義波高

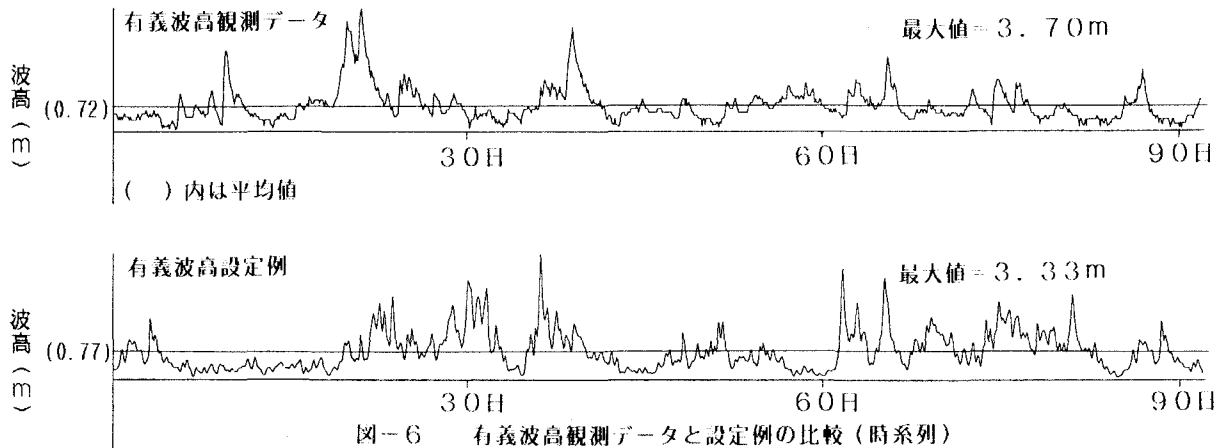


図-6 有義波高観測データと設定例の比較(時系列)

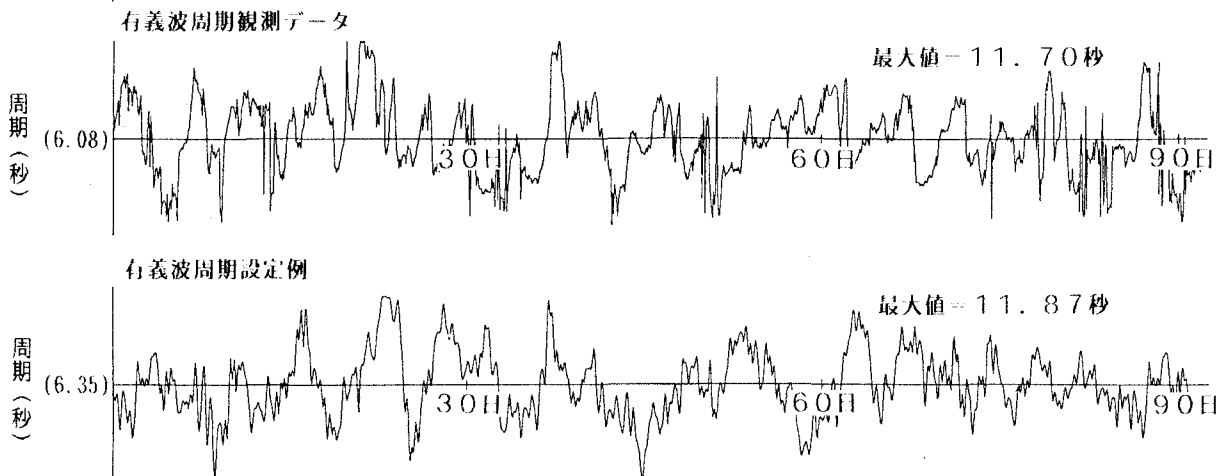


図-7 有義波周期観測データと設定例の比較(時系列)

のパワースペクトル及び有義波高と有義波周期のクロススペクトルについて、設定例と観測データの比較を図-8に示す。この図によれば、パワースペクトル、クロススペクトルとも比較的良好に一致しているが、長周期成分がかなり多い事から気象海象現象には季節変動以上の長周期変動も考慮する必要があると考えられる。

今回の人工気象海象条件の設定では、各年毎の条件が変動しない定常性を仮定しているが、今後は供用期間をカバー出来るような長期の観測データを収集し、年周期変動をも考慮したシミュレーションを行う必要がある。

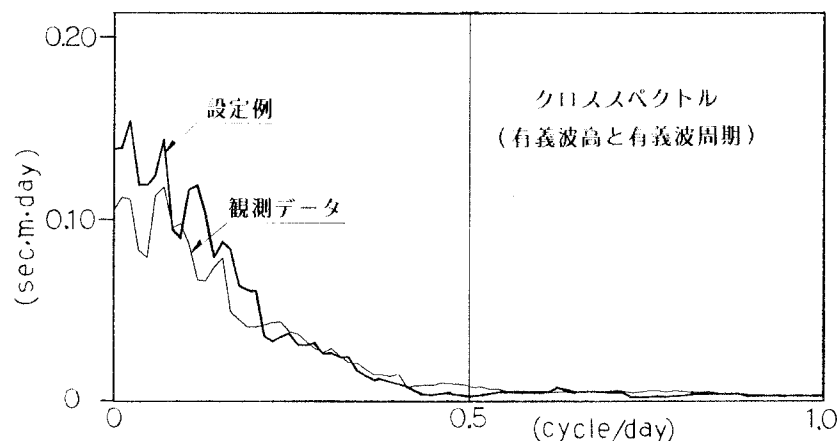
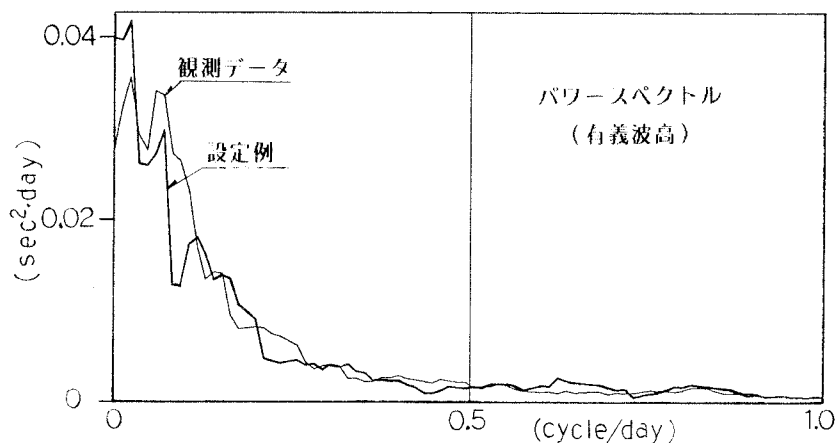


図-8 スペクトルの比較

5. 着栈・荷役作業モデル

5.1 概要

タンカー入港後の着栈、荷役作業のモデルを図-9に示す。この作業モデルは配船計画の場合と同様に、各地のシーバースに対するヒアリング結果を基に作成したものである。この作業モデルは、着栈、荷役作業毎に必要な作業時間を乱数モデルにより決定しており、着栈作業の開始、荷役作業の開始、継続、中止を気象海象条件に応じて判断している。

5.2 着栈作業

タンカー入港後、シーバースへの着栈許可は、バースマスターと関係者の協議により決定されるものであり、着栈作業開始時における気象海象条件が着栈限界条件以下で、かつ荷役作業終了予定時刻までの予測気象海象条件が係留限界条件以下である場合に許可される。もし、限界条件を越えている場合には着栈は許可されず、着栈許可待ちとなる。着栈作業に必要な時間については、ヒアリング結果より求めた分布型に従って乱数により決定している。

5.3 荷役作業

タンカーは着栈作業終了後すぐに荷役作業を開始するものとした。タンカーの荷役作業中は、定期的(2時間毎)に気象海象条件の観測値(人工気象海象条件)について検討を行うと共に、1日2回(10:30、17:00)出される気象海象条件の予測値についても検討を行い、荷役作業を継続するか中止するかの判断を行う。

もし、気象海象条件の予測値がさらに悪化する方向にある場合には、荷役作業を中止し、ローディングアームを切り離して緊急離栈する。緊急離栈したタンカーは、一旦港外に避泊し、気象海象条件が回復後、再度着栈する。

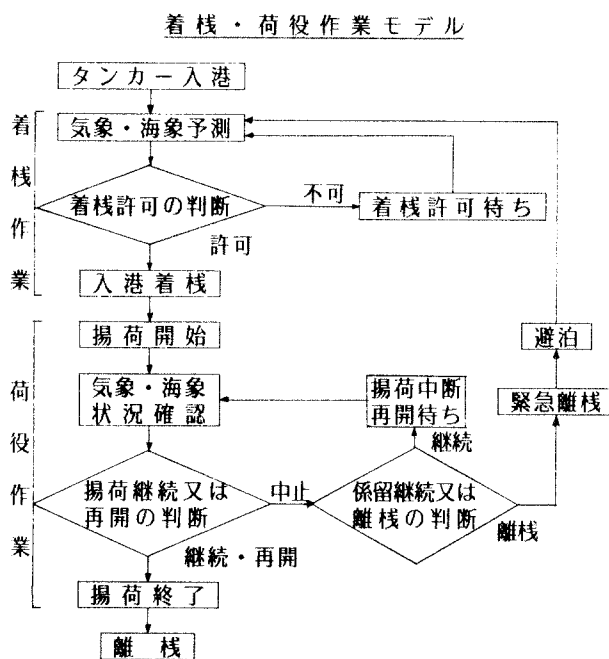


図-9

図-10に、タンカーの荷役作業時における原油の揚荷速度のヒストグラムを示す。この図は、苫小牧シーバースに

おける実績を基に作成したものであるが、タンカーの揚油能力や原油の種類によりかなり大きく変動している。つまり、荷役作業時における必要揚荷時間は、入港するタンカーにより大きく変動する。新しく建設するシーバースの場合には、使用するタンカーの揚油能力や原油の種類を考慮した上で適切な分布型を仮定する必要がある。

5.4 限界条件

シーバースの稼働状況に影響を与える気象海象条件として、本研究では、有義波高、有義波周期、平均風速の3つを考えているが、各地のシーバースにおける限界条件のヒアリング結果及びタンカーの動揺特性に関する調査結果より、図-11に示す限界気象海象条件を設定した。この図で、着棧限界とは着棧許可を出せる条件、荷役限界とはタンカーの荷役作業が継続出来る条件、係留限界とはタンカーを係留したままでもシーバースに悪影響を及ぼさない条件をそれぞれ表わしている。

一般にタンカーの動揺特性を考えた場合、周期の長い波浪が作用するとタンカーの動揺がかなり大きくなることが知られている。今回のシミュレーションでもこの点を考慮して、有義波高と有義波周期の相関を考えた限界条件を設定しており、周期の長い場合には波高が小さくても限界条件を越える場合も出てくる。また、平均風速については、有義波高や有義波周期と独立して判断するものとした。

5.5 気象海象条件の予測

気象海象条件の予測手法については、従来より多くの研究が行われており、その予測精度はかなり高いものとなっている。本研究では従来より行われている気象海象予測値と実際の観測値の分析に基づいて、予測値と観測値の誤差分布を求め観測値から逆算する形で着棧、荷役作業時における予測値を計算した。図-12に予測値誤差のヒストグラムの一例を示す。

6. 今後の課題

今回開発したシミュレーション手法は、シーバースの稼働状況を出る限り現実に近い状況で再現することを目標にしており、現在有効性を確認するため出光興産株式会社小牧シーバースを対象地点としてシミュレーションを実施中である。但し、今回配船計画や着棧荷役作業のシミュレーションにおいて用いた各確率変数の分布型は、小牧シーバースを始めとして各地のシーバースの実績や文献調査の結果を分析して作成したものであり、大部分はそのまま他のバースや新しく建設されるバースに対しても適用可能であるが、タンカー配船計画や必要荷役時間など一部については、対象バースの特性に応じた確率分布を用いる必要がある。今後の課題を以下に示す。

- ①人工気象海象条件の設定にあたっては、年周期変動のような長周期的変動も考慮する必要がある。
- ②既設シーバースを対象として最適配船計画のシミュレーションを行えるシステムとする。
- ③新しく計画されるシーバースを対象として最適構造形式及び必要バース数の選定を行えるシステムとする。

7. 謝辞

本研究にあたって貴重なデータを提供して頂いた出光興産株式会社北海道製油所並びにヒアリングに協力して頂いた石油会社、シーバースの皆様へ深く感謝致します。また、本研究を進めるに当たり数々の貴重な助言を頂いたA.H-S. Ang教授(イリノイ大学)、星谷勝教授(武蔵工大)に厚く感謝致します。最後に本研究は当社の信頼性工学研究会が行った研究結果をまとめたものであり、研究会のメンバー各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 星谷 勝「確率論的手法による振動解析」鹿島出版会、1974.8
- 2) Sinha, A.K. : On Digital simulation of Multicorrelated Random Processes and Its Applications, Ph. D. Thesis. Virginia Poly. Tech. and State Univ., 1973.7.

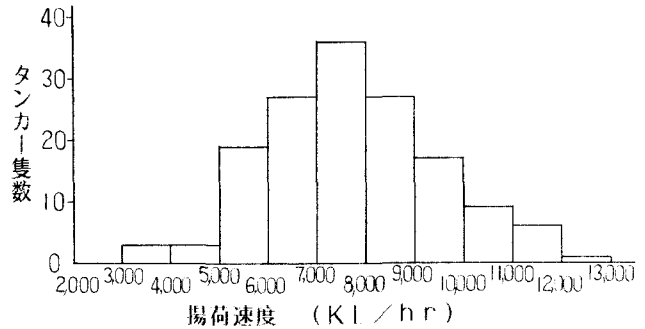


図-10 タンカー揚荷速度ヒストグラム

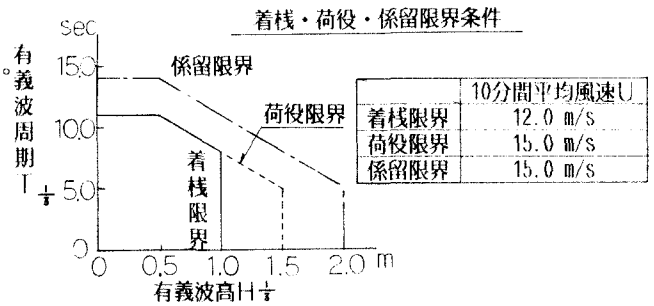


図-11 着棧・荷役・係留限界条件

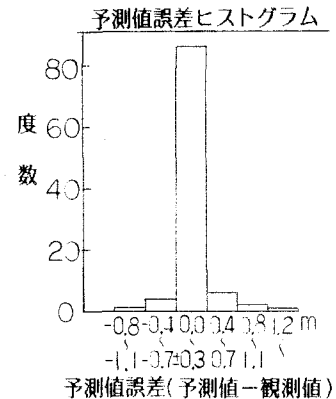


図-12 予測値誤差ヒストグラム