

波浪予測に基づく外海シーバースの待ち行列に 関する基礎的研究

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE QUEUEING THEORY OF THE OPEN SEA BERTH BASED ON THE WAVE FORECASTING

須 田 熙*・湯 沢 昭**

By Hiroshi SUDA and Akira YUZAWA

1. 序 論

波浪の影響を直接受ける防波堤工事や遮蔽のない外海シーバースでの荷役時の安全を確保し、効率のよい作業を行うためには、的確な波浪予測が不可欠である。わが国の港湾工事に波浪予測を導入したのは1965年9月に小名浜港が最初で、以来鹿島港、八戸港の各港においても採用され、港湾工事の円滑な促進に寄与している。また近年では、石油タンカーにみられるように船舶の大型化に伴い、遮蔽のない外海シーバースでの荷役が行われており、波浪予測の重要性は今後とも増大するものと思われる。

波は風によって生じることは明白であるが、その発生には、風速・吹走時間・吹送距離が影響し、沿岸波浪の場合には、さらに浅水影響・摩擦影響を考慮し、予測を行わなければならない。

従来行われている波浪予測手法は、大きく2つに分類することができる。1つは、P・N・J法やS・M・B法¹⁾²⁾にみられる決定論的モデルであり、もう1つは、本研究で提示している非決定論的モデルである。決定論的モデルを構築する困難さは、各要因の因果関係を定量的に把握することはもちろん、予測時点での各要因の予測の困難さにある。つまり、予測時点の予測気圧配置より、風速・吹走時間・吹走距離を求め、さらに沿岸形状を考慮し、予測波浪を求めるわけであるが、この場合、予測気圧配置の精度が後々まで影響し、いうなればいかに気圧配置を予測するかがポイントとなっている。

これに対し、非決定論的モデルは、諸要因のすべての影響が波自身に取り込まれていると考えているため、他の要因との因果関係の把握、定量化のためのデータ収集を避けて通ることができる。また現時点以前のデータで

予測を行うため、予測時点での気圧配置や風速・吹走時間・吹走距離といった要因の予測を必要としないところに大きな特徴がある。逆にこのことが欠点となることもある。たとえば、気圧配置が急激に変化した場合には、予測精度が甚だしく落ちることもある。このことは決定論的モデルにおいても同様で、いずれの方法でも2～3日が波浪予測の限度と考えられる。

また決定論的モデルでは、気圧配置の予測や各要因の因果関係の分析のためには専門的知識が要求されるため、現場への実用化には波浪予測の専門家が不可欠である。非決定論的モデルにおいては、要因と波高との関係を統計的に分析しておけば、容易に予測が可能であるため、波浪予測のシステム化が可能である。

波浪予測の応用として本研究では、外海シーバースの待ち行列について検討を加えた。

従来、船舶の係留施設は、陸域付近に建設されるのが通例であったが、船舶の大型化に伴い沖合に建設されるようになってきた。一般にこのような施設をシーバースとよんでおり、シーバースも防波堤の内側に設置されている場合と外側に設置されている場合とでは、その性格が異なる。防波堤の内側に設置されたシーバースは、台風とか異常気象を除けば、荷役作業中の安全は確保されているが、外側に設置されたシーバースについては、外洋の波浪を直接受けるため荷役作業中の適切な波浪予測が必要となる。また、実稼働日数も内側と外側とは異なる場合が多い。

このようなシーバースの最適数を決定するためには、従来より多数の研究がなされてきている³⁾⁴⁾。しかし、これらの研究は、防波堤内の経済的バース数の検討が主であり、波浪の影響を考慮した研究はあまり見当たらない。

一般的な最適バース数の決定方法としては、船舶の到着分布と荷役サービス分布に着目した待ち行列モデル(Queueing Model)⁵⁾と計算機によるSimulation Model

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 東北大学助手 工学部土木工学科

とが代表的であり、これらの方法はいずれも遊休バースと船泊のバース待ちによる費用や稼働時における便益を考慮して最適バース数を決定している。しかし、外海シーバースにおいては、滞船による待ちだけでなく、波浪による待ちも考慮しバース数の決定を行わなければならないものと思われる。

2. 統計的手法による波浪予測⁶⁾

本研究では、短期予測（12時間後から72時間後）を目的としており、重回帰型波浪予測と判別型波浪予測からなっている。重回帰型は実数値で予測するのに対し、判別型はある基準波高より上か下かの予測を行うもので、実際の予測が作業可能の可否だけで十分なる場合が多いためである。使用したデータは、予測地点（北東北A港）の有義波高、風速、気圧および印刷天気図より極東付近（東経110°~160°、北緯20°~55°）の地上気圧値（図一1参照）を用いた。使用サンプル数は、予測式作成のために4384個（昭和47年~昭和52年までの9時と21時の1日2回）と予測式の精度を検証するための730個（昭和53年）である。

(1) 重回帰型波浪予測式の作成

重回帰型波浪予測式は、目的変数 Y に予測時間の有義波高を、説明変数 X に 図一1 に示したポイントの気圧値と北東北A港の風速・気圧および予測時点での有義波高を取り入れており、予測式は式(1)のようになる。

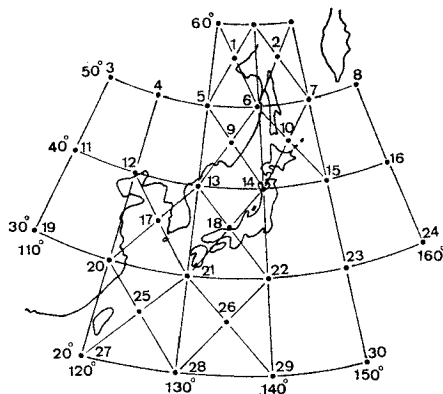
$$Y_i = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_{30} X_{30} + a_{31} X_{31} + \dots + a_{60} X_{60} + a_{61} X_{61} + \dots + a_{66} X_{66} \dots \dots (1)$$

Y_i : 予測時間（12~72時間後）の有義波高 (cm)

$X_1 \sim X_{30}$: 12時間前の30ポイントの気圧値 (mb)

$X_{31} \sim X_{60}$: 現時点での30ポイントの気圧値 (mb)

X_{61} : 12時間前の北東北A港の有義波高 (cm)



図一1 地上気圧データポイント

X_{62} : 12時間前の北東北A港の気圧値 (mb)

X_{63} : " 風速 (m×10)

X_{64} : 現時点での北東北A港の有義波高 (cm)

X_{65} : " 気圧値 (mb)

X_{66} : " 風速 (m×10)

$a_0 \sim a_{66}$: パラメーター

重回帰型波浪予測式のパラメーターの計算には、段階式重回帰分析を適用した。また予測式作成のための必要サンプル数および予測精度を検証するため、次の2ケースについて検証を行った。

(Case I) 必要サンプル数の検討

重回帰型波浪予測式の必要サンプル数を検討するため、サンプル数を366（1年分）、731（2年分）、1096（3年分）、2192（6年分）、4384（1日2回6年分）の5ケースについて行った。

(Case II) 予測時間の変化に対する予測精度

予測時間と精度との関係を検証するため、予測時間を12・24・36・48・60・72時間後とし、各予測精度を求めた。

(2) 判別型波浪予測式の作成

波浪予測を現場で応用する際、必ずしも正確なる波高を予測する必要はなく、ある工事なり作業が安全に遂行可能かどうかの判断で十分なる場合が多い。たとえば、石油タンカーが外洋シーバースで支障なく荷役を行うための作業限界波高は1.5m前後であり、波浪予測としては、作業時間内の波高が1.5m以上になるかどうかの判断で十分なのである。このような予測として本節では判別型波浪予測式の作成を行う。

判別型波浪予測式の作成には、東北大学大型計算機センターのライブラリープログラムSTATPAC-6判別関数1(DISCR)を使用した。この判別関数の目的は、 p 個の変数で規定される母集団が g 個あり、これら母集団にはすでに n_1, n_2, \dots, n_g 個の過去の情報が存在し、これをもとに新たに得られた観測値が、 g 個の母集団のうちどの母集団に帰属しているかを客観的に判別する。すなわち、 g 個の母集団(群)で観測された p 個の変数の1次関数の集合を計算し、 g 群間の判別の指標として使われ、判別係数を決定する。なお、母集団は、分散共分散の等しい正規分布であるという仮定が必要である。

ここでは、 p 個の変数として式(1)で用いた66変数を使用し、母集団としては、12時間後から72時間後までの各時点における観測有義波高が基準波高(1.5m)未満とそれ以上の2群に分け、予測時間ごとに判別関数を作成した。

(3) 重回帰型予測式の誤差の検討^{7),8)}

重回帰型予測式が適切であれば、残差はランダムで、その分散も小さくなるはずである。もし残差がランダムでなく、何らかの傾向を有するならば、使用されている要因に不備が存在するものと思われる。一般に時系列データの線形回帰推定の場合には、残差はランダムではなく、得られた推定値も適切なものでない場合が多い。これは、取り扱う要因にも問題はあるが、回帰式が線形の場合、要因間の非独立性に起因するところが大きい。この問題の解決策として、推定に用いるデータを粗い時間間隔でサンプリングし、それによって残差間の相関が無視できるようにする方法も考えられるが、この方法によると問題の本質から遠ざかってしまう。しかし、限られた要因とサンプルを用いて作成された回帰式の残差に何らかの相関があっても、実際上いたしかたない場合も多い。ただ、その相関が何に起因するか、あるいはどのような相関があるのかがわかれば、回帰推定値を補正することは可能である。

いま、予測すべき状態を成分とするベクトルを Y 、それに影響する観測可能な状態を成分とするベクトルを x とするとき、

$$Y = x \cdot b + e \dots\dots\dots(2)$$

と仮定し、ベクトル b を統計的に求めようとするのが回帰分析である。式 (2) の e は残差ベクトルで $N(0, \sigma^2)$ に従うものと仮定する。しかし、前述したように Y および x が時系列データの場合、 e はランダムではなく、その原因として、① 説明変数の観測誤差、② 省かれた説明変数による影響、③ 説明変数間の非独立性等が考えられる。したがって、ここでは残差ベクトルを

$$e = f(e', Z) \dots\dots\dots(3)$$

e' : e の過去の値

Z : e' 以外の影響

と表現することにする。

回帰分析を波浪予測に応用する場合、観測可能ベクトル x としては、式 (1) に示したように、予測地点の波高、気圧、風速と全域的な気圧配置図が考えられる。気圧配置図からのデータは、メッシュデータに置き換え、各メッシュにおける気圧値を入力することになる。この場合、メッシュを細分化すれば各メッシュ間の相関は高くなるし、過去の波高も時間間隔を短くすれば、変数間の独立性という仮定は崩れることになる。しかし、メッシュを粗くすることは、正確な気圧配置を再現できないし、また、サンプリングの時間間隔を長くすることは、波の連続性を無視することになる。そこで考えられるのが、予測ベクトル Y を残差ベクトル e で補正することにより、予測値の精度を向上させることである。

現時点 t 期において、 Δt 時間後の予測値を

$$Y(t + \Delta t) = \sum_{j=0}^{\Delta t} b_j(t + \Delta t) x_j(t) \dots\dots\dots(4)$$

より求め、そのときの実測値 $y(t + \Delta t)$ との残差を $e(t + \Delta t)$ とすると

$$e(t + \Delta t) = y(t + \Delta t) - Y(t + \Delta t) \dots\dots\dots(5)$$

となる。また、 $e(t + \Delta t)$ と $e(t + 1), \dots, e(t + k), \dots$ の間に次に示す一次の相関があるとすれば、

$$e(t + k) = \rho(t + k) e(t + \Delta t) + \varepsilon(t + k) \dots\dots\dots(6)$$

と表現することができ、 $\varepsilon(t + k)$ は $N(0, \sigma^2)$ と仮定できる。したがって $\rho(t + k)$ は

$$\rho(t + k) = \frac{\sum_{i=1}^N e_i(t + k) e_i(t + \Delta t)}{\sum_{i=1}^N e_i(t + \Delta t)^2} \dots\dots\dots(7)$$

となり、回帰式のベクトル b を求める際に、併せて $\rho(t + 1), \dots, \rho(t + k), \dots$ を求めておけば、現時点 t より Δt 時間後の実測値と予測値との残差 $e(t + \Delta t)$ を基準とし、 k 時点後の修正予測値 $Y'(t + k)$ は次のようになる。

$$Y'(t + k) = Y(t + k) + \rho(t + k) e(t + \Delta t) \dots\dots(8)$$

本論文では、式 (8) を式 (1) と区別するため、修正重回帰型波浪予測式と定義する。

(4) 統計的波浪予測式精度の検証

重回帰型波浪予測式 (式 (1)) と修正重回帰型波浪予測式 (式 (8)) の精度の評価は、式 (9)、式 (10)、表-1 により行い、判別型波浪予測式については、式 (11)、式 (12) の基準に従うものとする。

$$50 \text{ cm 的中率} = \frac{\text{残差の絶対値が } 50 \text{ cm 以下の回数}}{\text{全検証用サンプル数}} \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{予測誤差の標準偏差} = \sqrt{\frac{\sum (\text{残差} - \text{残差の平均値})^2}{\text{全検証用サンプル数}}} \dots\dots\dots(10)$$

$$\text{静穏的中率} = \frac{\text{予測値} \cdot \text{実測値とも静穏の回数}}{\text{予測値が静穏の回数}} \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{荒天的中率} = \frac{\text{予測値} \cdot \text{実測値とも荒天の回数}}{\text{予測値が荒天の回数}} \dots\dots\dots(12)$$

$$\text{平均的中率} = \frac{\text{予測値} \cdot \text{実測値とも一致した回数}}{\text{全予測回数}} \dots\dots\dots(13)$$

(注) 静穏は 1.5 m 未満、荒天は 1.5 m 以上
始めに重回帰型波浪予測式と修正重回帰型波浪予測式の精度について検討してみる。重回帰型波浪予測式のサンプル数と予測精度との関係 (Case I) は 図-2 のようになる。的中率は、サンプル数 1096 (3 年分) まではサンプル数の増加に伴い的中率も上昇し、50 cm 的中

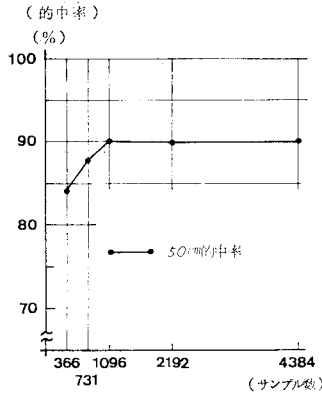


図-2 重回帰型波浪予測式によるサンプル数と的中率

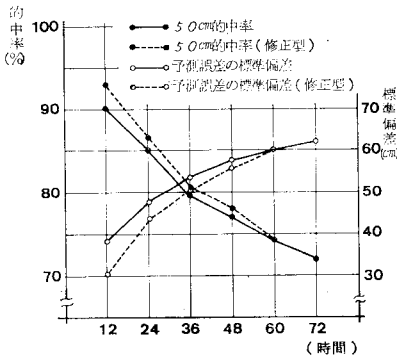


図-3 予測時間と的中率および予測誤差の標準偏差

率で90%に達するが、それ以上の上昇はみられない。つまり、重回帰型波浪予測式を作成するためには、少なくとも3年分程度の蓄積データが必要となる。

予測時間と精度との関係 (Case II) を図-3および表-1に示す。図-3より、予測時間が長くなれば予測精度は低下し、予測誤差の標準偏差は上昇することがわかる。また、修正重回帰型波浪予測式は、予測時間が短

表-1 予測精度の段階式評価

分類番号	予測値 ES(m)	0 ≤ ES < 1.5				1.5 ≤ ES			合計
		実測値 OB(m)				0 ≤ OB < 1.0		1.5 ≤ OB	
		0 ≤ OB < 1.5	1.5 ≤ OB < 2.0	2.0 ≤ OB < 3.0	3.0 ≤ OB	0 ≤ OB < 1.0	1.0 ≤ OB < 1.5	1.5 ≤ OB	
12時間後	589	40	7	1	3	29	61	730	
24 "	588	50	21	2	18	20	36	"	
36 "	598	57	30	2	3	15	20	"	
48 "	607	61	33	3	6	8	12	"	
60 "	610	65	34	2	4	7	8	"	
72 "	615	65	34	3	4	2	7	"	
12時間後	594	30	5	1	1	26	73	730	
24 "	583	45	16	2	11	27	46	"	
36 "	595	58	27	2	9	17	22	"	
48 "	602	61	33	3	9	10	12	"	
60 "	608	65	34	2	3	10	8	"	
72 "	614	65	34	3	4	3	7	"	

いほどその効果が明確に現われていることがわかる。さらに波高別に予測時間と精度との関係を見ると表-1のようになる。表-1より予測時間が長くなると、静穏予測(分類番号①~④)の度数が多くなり、反面荒天予測(分類番号⑤~⑦)の度数が著しく少なくなる。これは全波高の平均値が107cmで、予測時間が長くなると回帰による変動が小さくなるためである(表-2参照)。参考として、昭和53年3月20日から3月31日までの実測値と12時間予測値の結果を図-4に示す。

表-2 重回帰型予測式の寄与率

予測時間	寄与率 (R ²)
12	0.6864
24	0.5118
36	0.3860
48	0.2914
60	0.2288
72	0.1784

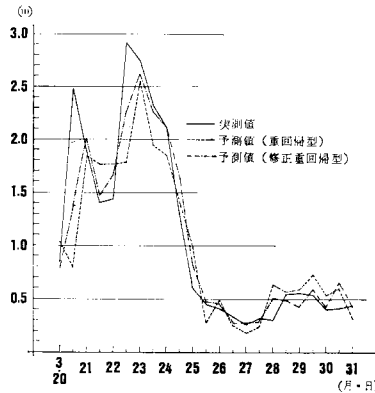


図-4 波浪実測値と12時間予測値(昭和53年)

次に判別型波浪予測式による静穏および荒天的中率を表-3に示す。平均的中率(式(13))では修正重回帰型の方が的中率は高いが、静穏時のみでは判別型の方が高い結果となっている。しかし判別型波浪予測による静穏・荒天的中率は判別基準点(表-3の場合は-1.7)の位置により変化する。図-5は、12時間後判別型波浪予測式による静穏および荒天サンプル群の判別得点の分布を示しており、図-6は、図-5の各判別得点における静穏および荒天サンプル数の比率を表わしている。図-6より、あるサンプルの判別得点が-2以下であれば97%以上の確率で静穏であると予測でき、5以上であれば90%程度以上の確率で荒天と予測できる。判別得点が1.5程度の場合は、50%の確率で静穏(50%の確率で荒天)と予測できる。このように判別型波浪予測の場合は、判別得点の大小により確率予測が可能となる。

表-3 静穏および荒天の中率

予測時間	修正重回帰型			判別型			
	静穏	荒天	平均	静穏	荒天	平均	判別
12	94.3	73.0	91.4	97.1	41.1	79.2	
24	90.2	54.8	86.2	96.9	39.0	71.4	
36	87.2	45.8	84.5	95.3	34.7	66.5	
48	86.1	38.7	84.1	94.1	32.9	64.5	
60	85.8	38.1	84.4	93.2	31.0	61.9	
72	85.8	50.0	85.1	90.9	28.8	59.8	

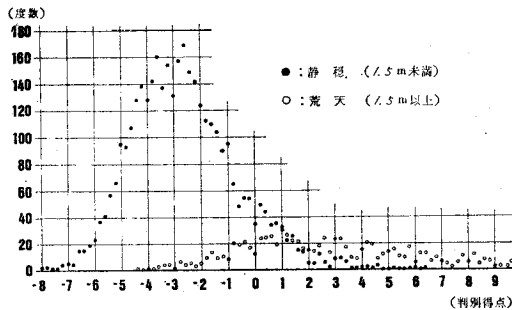


図-5 判別得点の度数分布 (昭和47年~52年)

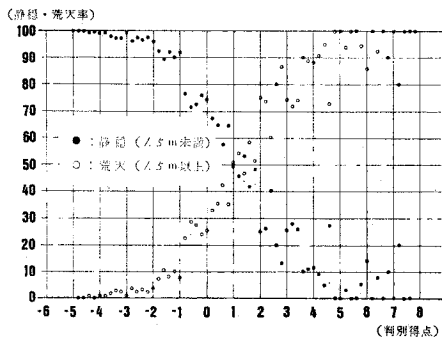


図-6 判別得点と静穏・荒天率 (昭和47年~52年)

3. バース数と経済的入港船舶数の評価

一般に最適バース能力は、港湾単位施設当たりの単位通過貨物量の経費が最小となるような取扱貨物量をもってバースの適能力と定義することができる。港湾における経費は、固定費用として港湾および施設の建設費、維持・管理費が挙げられ、流動費用として船舶関係、荷役、保管、関税および検数料等が考えられる。これらの費用はいずれも稼働時、遊休時においても消費されるものであるが、港湾工学上問題となるのは遊休時における費用の節約である。

本章は、波浪の影響を考慮した場合と波浪の影響がないとした場合のバース数と経済的年間入港船舶数の関係を検討するのが目的であるため、式(14)に示す期待損失額 C の最小をもって経済的年間入港船舶数とする。

$$C = \left(S - \frac{n}{365\mu} \right) a + \frac{n}{365} \bar{t}_w b_1 - \frac{n}{365\mu} b_2 \dots (14)$$

C : 期待損失額 (円/日)

S : バース数

μ : 1日サービス隻数 (隻/日)

n : 年間入港船舶数 (隻/年)

\bar{t}_w : 平均バース待ち時間 (日)

a : バース遊休によるバース損失 (円/日)

b_1 : バース待ちによる船の損失 (円/日)

b_2 : バース待ちがない場合の諸種の利益 (円/日)

(1) シミュレーションモデルによる待ち行列の計算

式(14)より期待損失額の計算には、船舶の平均バース待ち時間、1日サービス隻数および年間入港船舶数が必要不可欠であった。平均バース待ち時間の算定には船舶の到着分布やサービス分布をある確率分布に近似させる待ち行列モデルが広く応用されてきた。これは、到着をポアソン分布、サービスを指数分布、あるいはアーラン分布とした $M/M/S(\infty)$ や $M/E_k/S(\infty)$ モデルである。

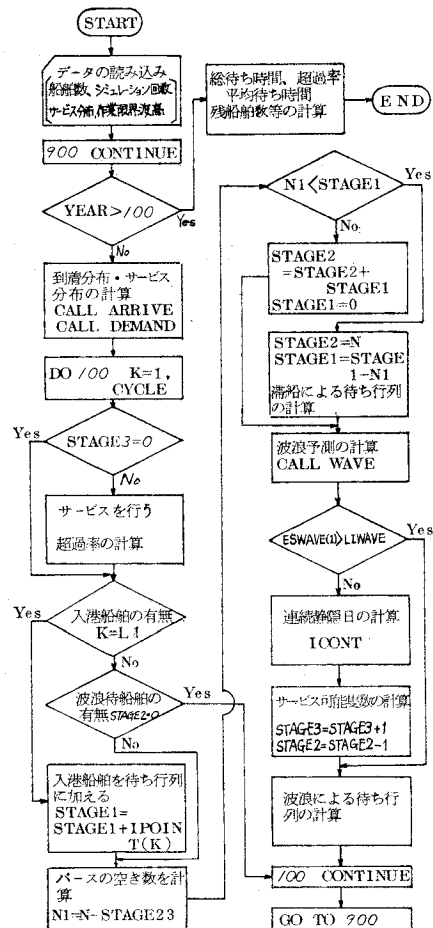


図-7 タンカーシミュレーションのフロー

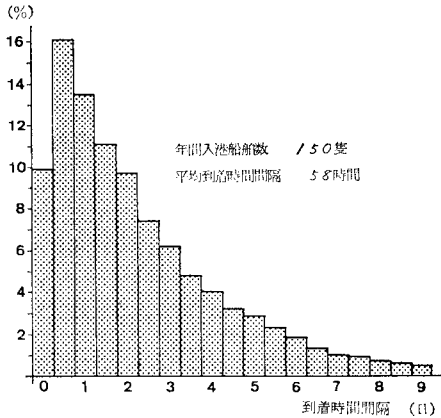


図-8 船舶の到着分布

本研究では、これら到着とサービスの関係のほかに、波浪の影響を考慮するため計算機によるシミュレーションモデルにより待ち行列の計算を行った。シミュレーションモデルのフローを 図-7 に示す。このモデルの特徴は、船舶が入港し、空バースがある場合、荷役を行うかの判断は必要荷役時間内の予測波高が作業限界波高以内かどうかによるところにある。つまり、前章の修正重回帰型波浪予測式を用いて、必要荷役時間内の予測波高を計算し、荷役中に一度でも作業限界波高を超えると予測した場合には、波浪による待ち行列に加わるものとする。しかし、ここで使用している波浪予測手法は、完全なものではないため、作業限界波高以内と予測して作業限界波高以上の波に遭遇する場合が生じる。その遭遇比率をここでは超過率とよび、予測時間と超過率との関係についても分析を行う。以下、計算に用いたデータおよび仮定について述べる。

a) 年間入港船舶数

年間入港船舶数を 50~300 隻とし、一様乱数により到着分布 (指数分布に近似) を求める (図-8 参照)。

b) 荷役サービス分布

ここで対象としている船舶は、10万 D/W~25万 D/W の原油タンカーで、荷役時間とはこれらの船舶がシーバースを占有している時間である。既存シーバースの利用実績を表-4 に示す。これによると船舶の大きさにより平均的バース占有時間は変化するが、ここでは

表-4 既存シーバースの利用実績

	10~15万 D/W	15~20万 D/W	20~25万 D/W	25万 D/W 以上
パイロット乗船-着棧	1.9	2.1	2.1	2.0
着棧-荷役開始	2.1	2.7	2.4	2.6
荷役時間	25.1	27.8	33.5	33.9
荷役終了-離棧	3.1	2.9	3.1	3.3
離棧後の占有時間	1.0	1.2	1.2	1.4
計	33.2	36.7	42.3	43.2

(港湾技術研究資料 No. 201, 原油タンカーバース調査報告 1975-3)

図-9 に示すサービス分布を使用する。また波高別超過率の計算には単位分布 (12 時間から 72 時間まで 12 時間間隔) を用いる。

c) バース数

バース数は 1 から 3 バースとする。

d) 波浪予測

修正重回帰型波浪予測式 (式 (8)) を用いて、12 時間後から 72 時間後まで 12 時間間隔で行う。データは昭和 53 年 1 月 1 日より 12 月 31 日までの 9 時と 21 時の地上天気図と北東北 A 港の同時刻における有義波高、気圧および風速を用いる。なお予測波高はすべて有義波高である。

e) 作業限界波高

船舶がサービスを受ける時点の実測波高が 1.5m 未満で、かつ荷役サービス時間内の予測波高が 1.5m 未満の場合のみサービスを行い、サービス開始時点の実測波高が 1.5m 以上、あるいはサービス時間内の予測波高を 1.5m 以上と予測した場合は波浪待ちとする。

f) 波高別超過率

サービス時間内の波高を 1.5m 未満と予測して、サービス時間内に 1.5m 以上の波高が出現した場合を超過とし、4 段階の波高 (1.5, 2.0, 2.5, 3.0m) を考え、各波高以上に遭遇する比率をもって超過率とする。

g) シミュレーションの回数

昭和 53 年 1 月 1 日より 12 月 31 日までの 730 ポイント (12 時間間隔) を 1 サイクルとし、到着分布とサービス分布の乱数の始点を変え 100 回行う。

h) その他

波浪待ちをしている船舶がサービスを受ける場合、原則的には先着順であるが、先着船舶のサービス時間が予測連続静穏日より長い場合は、予測連続静穏日より短いサービス時間の船舶が先にサービスを受けるものとする。また波高別超過率の計算は、波浪予測を行わない場合でも船舶がサービスを受ける時点での実測波高が作業限界波高以上の場合は、波浪待ちとする。

(2) 計算例

作業限界波高を 1.5m とし波浪予測を行った場合と作業限界波高を考慮しない場合のバース待ち確率累積分布曲線を 図-10、図-11 に、平均バース待ち時間と年間入港船舶数の関係を 図-12 に示す。これらの図より、たとえばバースが 1 基で年間 150 隻の入港船舶数を考えると、作業限界波高を考えない場合には、その 44% が待ち時間なしでサービスが受けられるのに対し、作業限

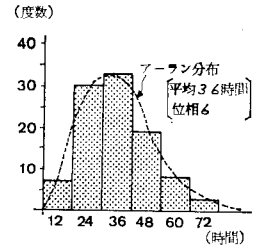


図-9 荷役サービス分布

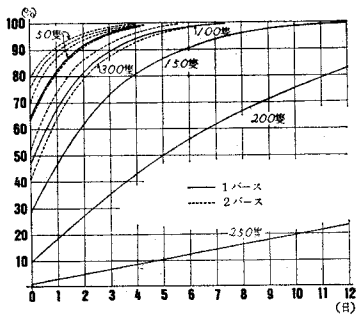


図-10 バース待ち確率累積分布曲線 (作業限界波高 1.5 m)

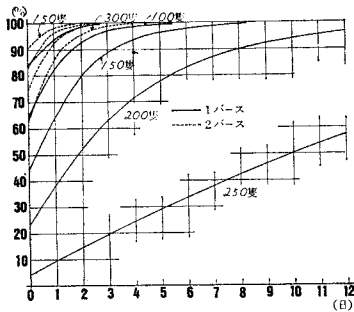


図-11 バース待ち確率累積分布曲線 (作業限界波高なし)

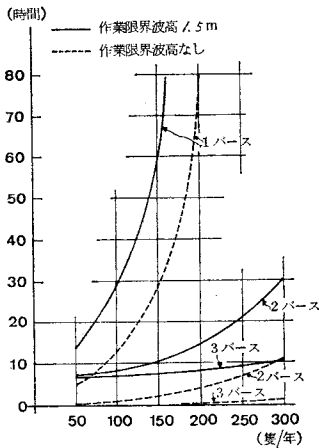


図-12 平均バース待ち時間

界波高を 1.5 m とし、波浪予測を行った場合には 28% まで低下する。また平均バース待ち時間を 30 時間から 60 時間に増加することがわかる。いずれの場合も年間入港船舶数が 160~200 隻を超えると平均バース待ち時間が指数的に増加するため経済的なバース利用が望めなくなる。

式 (14) において、 $a=100$ 万円/日、 $b_1=250$ 万円/日、 $b_2=50$ 万円/日 とし、年間入港船舶数と期待損失額の関係を示したのが 図-13 である。これによると、たとえ

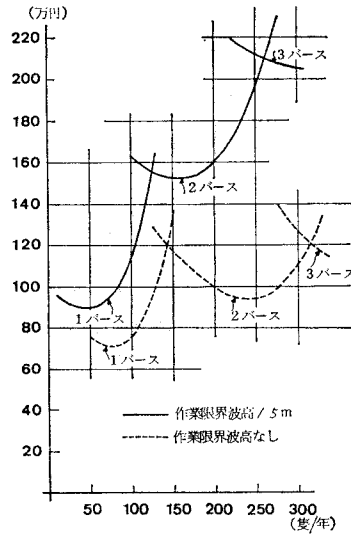


図-13 期待損失額と年間入港船舶数

ば年間入港船舶数が 300 隻の場合、波浪の影響がない場合の経済的バース数は 2 隻であるが、波浪の影響を受ける場合の経済的バース数は 3 基となる。このことから、外海シーバースの最適バース数を決定する際に波浪の影響がいかに大きいかかわかる。

最後に、式 (8) を用いて波浪予測を行った際の波高別超過率とサービス時間との関係について検討する。定常状態では、サービス分布が一定であれば年間入港船舶数の多少にかかわらず波高別超過率はほぼ一定となるため、ここではサービス分布を単位分布、年間入港船舶数を 100 隻として計算を行った。図-14 は、サービス時間の波高別超過率の関係を示しており、サービス時間が長くなれば超過率も大きくなるのがわかる。たとえば、サービス時間が 36 時間で、

波浪予測を行わない場合には、2.5 m 以上の超過率が 2.4% であるが、波浪予測を行った場合には 1.8% に低下し、同じく 24 時間の場合には 1.4% から 0.6% へと低下する。しかし、図-14 に示した超過率は、サービスが終了するまでバースを離棧しないと仮定してあるが、サービス中においても随時波浪予測を行うことによって超過率は著しく低下することが可能である。しかしその場合には、船舶の待ち時間はより増加することになる。この関係を示したのが 図-15 である。曲線 A は、従来の待ち行列と同じく波浪の影

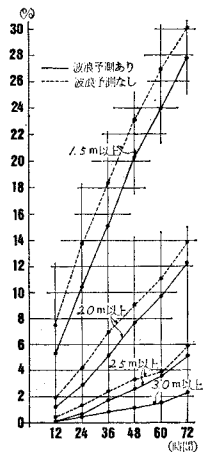
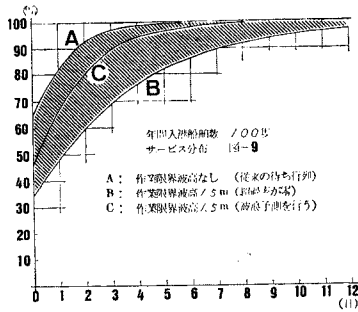


図-14 サービス時間と波高別超過率



図一15 パース待ち確率累積分布曲線の範囲

響がないとした場合のパス待ち確率累積分布曲線を示しており、曲線Bは、超過率が零の場合の同曲線を表わしている。したがって、波浪予測を行った際のパス待ち確率累積分布曲線Cは、予測精度が高くなれば曲線Bに近づき、逆にその精度が下がれば曲線Aに近づくことになる。

(3) シーバースへの適用策

本節では、重回帰型および判別型波浪予測を外海シーバースの波浪予測に用いる際の問題点について検討する。

タンカーが入港し、荷役完了前に $H_{1/3} \geq 1.5$ m の波が出現すると予測された場合には、シーバースへの係船は行わず待機し、 $H_{1/3} < 1.5$ m と予測されるときは係船、荷役を行うが、誤判別の確率は、修正重回帰型 12 時間予測で 5.7%，24 時間で 9.8%，36 時間で 12.8%，判別型では同じく 2.9%，3.1%，4.7%（表—3 参照）であるからきわめて低いといえる。しかし、誤判別の確率は低いとはいえ、静穏と予測し荷役中に荒天となる場合がある。このときは、 $H_{1/3}$ が 1.5 m になれば荷役を中止し、フローティングホースを切り離し、気象が悪化の方向にある場合は解らん作業を行い離脱する。離脱時点での最悪の波高は、離脱作業時間中における波の発達を考えると $H_{1/3}$ が 3 m 程度に達するものと思われるので、シーバースの係船中における波に対する最悪の条件には、この値を使用するのが妥当であろう。もしも係船時に $H_{1/3} \geq 1.5$ m となっても 12 時間以内に 3 m 以上になる確率は 0.11%，24 時間以内では 0.47%（図—14 参照）であるから 3 m 以上の状況に遭遇する確率はきわめて低いといえる。また荷役中においても逐次新しい情報で波浪予測を行うことができるので、その時点で荒天と予測された場合、ただちに離脱作業を開始すれば 3.0 m 以下の状態で離脱するのに十分な余裕がある。したがって、本予測手法をシーバースの波浪予測に適用することは、安全上きわめて有効であると思われる。

4. 結論および今後の問題点

本研究においては、統計的波浪予測手法として、重回帰型と判別型の 2 手法を提示し、さらに重回帰型波浪予測の予測誤差を検討した結果、誤差に規則性があることがわかり、修正重回帰型波浪予測式の検討を行った。また、波浪予測の応用として、外海シーバースの待ち行列について検討を加えた。本研究により得られた結論および今後の問題点は以下のとおりである。

(1) 従来の波浪推算による予測に比べ、本研究で提示した手法は、実用面ではるかに簡潔であり、波浪予測の専門的知識がなくとも容易に予測可能である。また、予測が客観的に行われるため、波浪予測のシステム化が可能である。

(2) 統計的手法は、図—2 からわかるように、少なくとも 3 年分程度の波浪データを必要とするが、現在多くの港湾において波浪観測を行っているため、十分実用的である。

(3) 予測精度は、重回帰型・50 cm 的中率、12 時間予測で 90%，36 時間予測で 79%，修正重回帰型では同じく、93%，80% と、現在各港湾で行っている予測精度と比較しても大差ない^{(9), (10)}。

(4) 判別型波浪予測を行うことにより、確率予測が可能である。

(5) 修正重回帰型波浪予測は、特に 36 時間以内の予測に効果がある。

(6) 波浪の影響を受ける外海シーバースは、波浪の影響がないシーバースに比べ、平均パス待ち時間や経済的年間入港船舶数に大きな差があることがわかった。

(7) 荷役サービス中においても常時波浪予測を行うことにより超過率は著しく低下させることができる。

今後の問題点としては

(8) 重回帰型と判別型の予測手法を併用することにより、波浪予測のシステム化と精度の向上を図る。

(9) 式 (3) で示した、残差ベクトル e の説明変数ベクトル Z を考慮することにより、修正重回帰型の精度の向上を図る。

(10) 本研究で提示した統計的波浪予測手法を多数の港湾で適用し、その実用化を図る。

(11) 外海シーバースの経済的評価についてより詳しい検討を行う。

本研究を遂行するにあたっては、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所より種々の便宜とご助言を受けた。また、田中 伸君（現・東洋建設）、細田哲也君（現・埼玉県庁）、高橋知道君（現・日本道路公団）、室井進次君（東北大学工学部大学院）には計算上のご助言をいた

だいた. ここに記して, 深甚な謝意を表わす次第である.

記号 (図-7)

YEAR : シミュレーション回数
 CALL ARRIVE : 到着分布のサブルーチン
 CALL DEMAND : サービス分布のサブルーチン
 CYCLE : ポイント数 (730)
 STAGE 1 : 滞船による待ち隻数
 STAGE 2 : 波浪による待ち隻数
 STAGE 3 : サービス中の隻数
 IPOINT(K) : K 時点に入港した隻数
 N : 総バース数
 NI : 空きバース数
 CALL WAVE : 波浪予測のサブルーチン
 ESWAVE(1) : K 時点の波高
 LIWAVE : 作業限界波高
 ICONT : 連続静穏日

STAG 23 : 滞船と波浪待ちの隻数
 (=STAGE 2+STAGE 3)

参考文献

- 1) 首藤伸夫: 海の波の水理, 技報堂出版.
- 2) 長尾義三: 港湾工学, 共立出版, 1968-3.
- 3) 則武通彦: 公共ふ頭における最適バース数の決定に関する研究, 土木学会論文集, No. 278, pp. 113~122, 1978-10.
- 4) 奥山・田口: 待ち合せ理論による最適バース数の決定, 港湾技術研究所報告, No. 16-3, 1977-9.
- 5) 森村・大前: 応用待ち行列理論, 日科技連, 1978-4.
- 6) 田中・湯沢・須田: 波浪の統計予測に基づく港湾工事等の安全管理に関する基礎的研究, 土木学会講演概要集 (IV), 1981-10.
- 7) 赤池弘次: 時系列解析の基礎, 計測と制御, Vol. 8, No. 3, 1969.
- 8) 添田 喬: データ取得の方法と回帰モデル, 計測と制御, Vol. 14, No. 1, 1975.
- 9) 吉村芳男: ケーソン防波堤の急速施工例, 土木学会誌, 1966-9.
- 10) 西田・赤塚・和智: 外海におけるケーソン防波堤施工方法の研究, 土木学会論文集, No. 171, pp. 43~63, 1969-11.

(1982.10.18・受付)