

東北大学○正員 湯 沢 昭

東北大学 学員 室 井 進 次

東北大学 正員 須 田 薫

1 概論 自然環境の影響を大きく受ける土木工事では、工程管理や安全管理の面から自然環境の予測制御が重要な部分を占めている。中でも海上作業の多い港湾工事では、波浪や風の影響を直接受け、作業時の適切な波浪予測が望まれている。

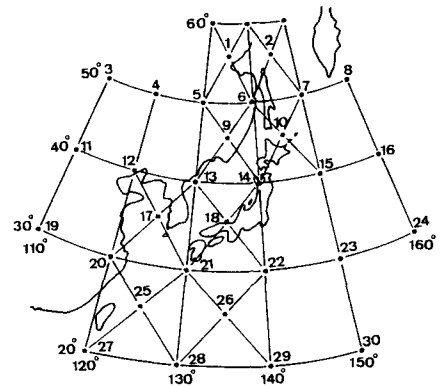
波は風により発生することは明らかであるが、その発生には風速・吹走時間・吹走距離が影響し、沿岸波浪の場合には、さらに海底の影響を受ける。従来より行なわれている波浪予測手法は、SMB法やPNJ法に見られるような決定論的モデルであり、これらのモデルを構築する困難さは、各要因の因果関係を定量的に把握することは勿論、予測時点での各要因の予測の困難さにある。つまり予測時点の予測気圧配置より風域を想定し、風速・吹走時間・吹走距離を求め、さらに沿岸形状を考慮し、予測波浪を求める。この場合、予測気圧配置の精度が大きく影響し、いくなればいかに気圧配置を予測するかがポイントとなっている。そのために、気象の専門的知識が要求されるため、現場への応用には波浪予測の専門家が不可欠である。

それに対し、本研究で提示している統計モデルは、諸要因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なうため、予測気圧配置を考慮する必要がなく、気象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できるため、波浪予測のシステム化が可能である。しかし、気圧配置が急激に変化した場合には、予測精度が低下することもある。このことは決定論的モデルにおいても同様である。

本論文では、統計的波浪予測として、多変量解析に基づく重回帰型及び判別型の予測手法を述べ、さらに重回帰型の誤差を検討することにより、修正重回帰型についても論じる。また波浪予測の応用として、工程管理・安全管理、さらには波浪の影響を受けるタンカーシーバースの待ち行列について検討を行なう

2 統計的手法による波浪予測 本研究では短期予測（12時間から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、判別型ではある基準波高より上か下かの予測を行なう。これは、実際の予測が作業の可否判断だけで十分な場合が多いためである。重回帰型波浪予測による予測誤差を検討した結果、ある規則性が見出されたため、重回帰型予測値の修正として、修正重回帰型波浪予測について検討を行ない、判別型波浪予測については、港湾作業と作業限界波高との関係波浪予測の誤判別損失を考慮した判別基準点の決定方法、及び確率予測について検討を行なった。

いずれの手法も使用したデータは、予測地点（北東北A港）の有義波高・風速・気圧及び印刷天気図より極東付近（東経 $110^{\circ}-160^{\circ}$ 、北緯 $20^{\circ}-55^{\circ}$ ）の地上気圧値（図・/参照）を用いた。使用サンプル数は、予測式作成のための4384個（昭和47年—52年までの7時と21時）と、予測式の精度を検証するための730個（昭和53年）である。



（図・/） 地上気圧値のポイント

2・1 重回帰型波浪予測式の作成 重回帰波浪予測式は、目的変数Yに予測時間の有義波高を、説明変数Xに(図・ノ)で示したポイントの気圧値と予測地点の有義波高・風速・気圧を考え、パラメータの計算には重回帰分析を適用した。

$$Y_i = a_0 + \sum_{j=1}^{66} a_j X_j \quad \text{----- (ノ)}$$

Y_i : 予測時間(ノ2-72時間後)の有義波高(cm)
 X_{1-X30} : ノ2時間前の30ポイントの気圧値(mb)
 X_{31-X60} : 現時点での " (mb)
 X_{31} : ノ2時間前の予測地点の有義波高(cm)
 X_{32} : " 気圧値(mb)
 X_{33} : " 風速(m)
 X_{34} : 現時点での予測地点の有義波高(cm)
 X_{35} : " 気圧値(mb)
 X_{36} : " 風速(m)

重回帰型波浪予測式の精度を検証するため、次の2ケースについて行なった。

(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、総サンプル数を366(ノ年分)・73(2年分)・1096(3年分)・2192(6年分)・4384(ノ日2回6年分)の5種類について予測精度を計算した。

(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討するため、総サンプル数を4384とし、予測時間(ノ2・24・36・48・60・72時間後)を変化させ、各予測精度を求めた。

2・2 重回帰型波浪予測式の誤差の検討 今、予測すべき状態を成分とするベクトルを $\vec{Y}$ 、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 $\vec{X}$ とすると

$$\vec{Y} = \vec{X} \cdot \vec{b} + \vec{e} \quad \text{----- (2)}$$

と仮定し、ベクトル $\vec{b}$ を統計的に求めようとするのが回帰分析である。 $\vec{e}$ は残差ベクトルで正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うものと仮定する。しかし、 $\vec{Y}$ 及び $\vec{X}$ が時系列データの場合、 $\vec{e}$ は必ずしもランダムではなく、その原因として次のようなことが考えられる。

(ノ) 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

回帰分析を波浪予測に応用する場合、観測可能ベクトル $\vec{X}$ としては、(式・ノ)に示したように、予測地点の波高・風速・気圧及び広域的な気圧配置図が考えられる。これらのデータはいずれも現地において容易に入手可能なデータであり、気圧配置図からのデータはメッシュデータ(図・ノ参照)におきかえ各メッシュの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、波高データも時間間隔を短かくすれば変数間の独立性という仮定はくずれることになる。しかしメッシュを荒くすることは正確な気圧配置が再現できないし、波高のサンプリング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。そこで本論文では、予測ベクトル $\vec{Y}$ を残差ベクトル $\vec{e}$ で補正する方法を考えてみる。

現時点t期において、Δt時間後の予測値を

$$Y(t+\Delta t) = \sum_{j=0}^p b_j(t+\Delta t) \cdot X_j(t) \quad \text{----- (3)}$$

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

$$e(t+\Delta t) = y(t+\Delta t) - Y(t+\Delta t) \quad \text{----- (4)}$$

となる。また $e(t+\Delta t)$ と $e(t+1), e(t+2), \dots, e(t+k), \dots$ の間に次に示す一次の相関があれば

$$e(t+k) = \rho(t+k) \cdot e(t+\Delta t) + \varepsilon(t+k) \quad \text{----- (5)}$$

と表現することができる。また $\varepsilon(t+k)$ は $N(0, \sigma^2)$ に従うものとする。従って $\rho(t+k)$ は

$$\rho(t+k) = \frac{\sum \{e_i(t+k) \cdot e_i(t+4t)\}}{\sum \{e_i(t+4t)\}^2} \quad \text{-----} \quad (6)$$

(式・2)の係数ベクトル $\bar{b}$ を求める際に併わせて $\rho(t+1), \dots, \rho(t+k), \dots$ を求めておけば、現時点 t より $4t$ 時間後の実測値と予測値との残差 $e(t+4t)$ を基準とし、 k 時間後の修正予測値 $Y'(t+k)$ は次のようになる。

$$Y'(t+k) = Y(t+k) + \rho(t+k) \cdot e(t+4t) \quad \text{-----} \quad (7)$$

本論文では、(式・7)を(式・ノ)と区別するため修正重回帰型波浪予測式と定義する。予測地点の波高・風速・気圧は観測設備が整っていれば即入手可能であるが、(図・ノ)に示す地上天気図は、気象庁の発表(ファックスにて入手可能)が4時間程度ずれるため、 $4t$ として4時間を想定するのが妥当であると思われる。

2・4 判別型波浪予測式の作成 波浪予測を現場で応用する際、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場合が多い。例えば港湾工事において有義波高が70cm以下であればたいの作業が可能であり、ノ50cm以上となるとほとんどの作業が不可能となる。また石油タンカーが外洋シーバースで安全に荷役を行なうための作業限界波高はノ50cm前後であり、波浪予測としては作業時間内の波高が作業限界波高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、判別型波浪予測の作成を行なう。

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を使用した。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、これらの母集団にはすでに $n_1, n_2, \dots, n_g$ 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 個の母集団のどの集団に帰属しているかを客観的に判別する。ここでは p 個の変数として(式・ノ)で用いた6変数を使用し母集団としてはノ2時間後から72時間後までの各時点の観測有義波高を基準波高(作業工種により変化)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。

2・5 判別境界点の決定法 今、2群の判別を考えてみる。判別分析により判別得点の分布が(図・2)のように与えられた場合、誤判別による損失の期待値を最小とするような判別境界点を決定する。

ノ群に属する観測値が誤判別される確率は

$$P(1) \cdot P(2|1) \quad \text{ただし } P(1): \text{先験確率}$$

$$P(2|1) = \int_{-\infty}^{X_0} f_1(x) dx$$

同様に、2群に属する観測値が誤判別される確率は

$$P(2) \cdot P(1|2) \quad P(1|2) = \int_{X_0}^{\infty} f_2(x) dx$$

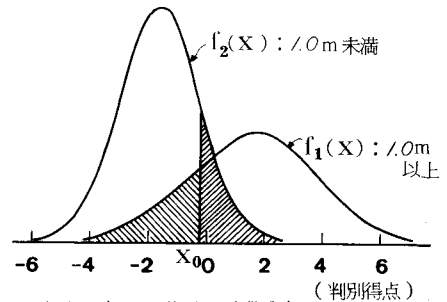
これより誤判別により生じる損失の期待値は次のようになる。

$$C(2|1) \cdot P(1) \cdot P(2|1) + C(1|2) \cdot P(2) \cdot P(1|2) \quad \text{-----} \quad (8)$$

ただし $C(2|1), C(1|2)$: 誤判別による損失

従って、(式・8)を最小とするような判別境界点 X_0 を決定すれば良いことになる。次に誤判別による損失 $C(2|1), C(1|2)$ と、波浪予測を港湾工事に適用した際の関係について考察する。

港湾工事の工事費を構成する項目は、直接工事費・間接工事費それに一般管理費に大別することができる。これらの項目はさらにいくつかの要素を含んでいる。また工事の目的が多様多様であり、気象・海象地形等の自然環境が多様に変化するため工事費の構成を標準化することは非常に困難である(工事費の構



(図・2) 判別得点の度数分布

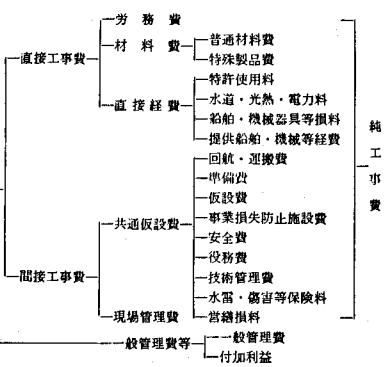
成の一例を図・3に示す)。しかしこれらの工事費は作業中や遊休時においても消費されるものであり、ここで問題となるのは、波浪予測による誤判別の場合の損失を最小とすることにある。

今、判別型予測により波浪予測を行なうと、予測と実況の組合せは(表・ノ)のようになり、(表・ノ)より誤判別として次の2ケースが考えられる。

(Case I): 作業可能と予測し、作業ができない場合でありその時の損失は

$$C(2|1) = \text{ノ日当労務費} + \text{船舶・機械等の供用ノ日当損料} \quad (7)$$

$$\text{供用ノ日当損料} = \text{基礎価格} \times \frac{0.5 \times \text{償却費率}}{\text{耐要年数}} + \frac{\text{年間管理費率}}{\text{年間標準供用日数}}$$



(図・3) 工事費の構成

(Case II): 作業不可能と予測し、作業が可能な場合の損失は

$$C(1|2) = \text{船舶・機械等の供用ノ日当損料} \quad (10)$$

(式・7)(式・10)で示される労務費や損料は、港湾工事の工種により大きく異なる場合が多い。例えば防波堤工事を考えてみると捨石やケーソン据付工事は、労務費に較べ船舶・機械の損料の比率が高く、逆に均し工事等では労務費の比率が高い。従ってここでは

$$\frac{C(2|1)}{C(1|2)} = \frac{\text{ノ日当労務費} + \text{船舶・機械等の供用ノ日当損料}}{\text{船舶・機械等の供用ノ日当損料}} \equiv k \quad (11)$$

とし、(式・8)を次のように変形し、kの値を変化させ損失の期待値を最小とするようなX0を求める。

$$P(2) \cdot P(1|2) + k \cdot P(1) \cdot P(2|1) \rightarrow \min \quad (12)$$

ただし $0 \leq k < \infty$

実況 予測	不可 1	可 2
不可 1	—	Case II C(1 2)
可 2	Case I C(2 1)	—

(表・ノ) 予測と実測の組合せ

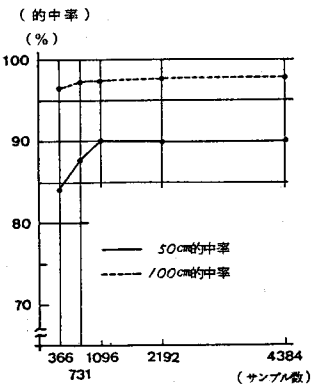
2・6 統計的波浪予測精度の検証 重回帰型及び修正重回帰型波浪予測式の評価は(式・ノ3)により行ない、判別型波浪予測式については(式・ノ4)(式・ノ5)の基準により行なった。

$$(\text{50cm的中率}) = \frac{\text{残差の絶対値が50cm未満の個数}}{\text{全検証用サンプル数}} \times 100 \quad (13)$$

$$(\text{静穏的中率}) = \frac{\text{予測値・実測値とも静穏の個数}}{\text{予測値が静穏の個数}} \times 100 \quad (14)$$

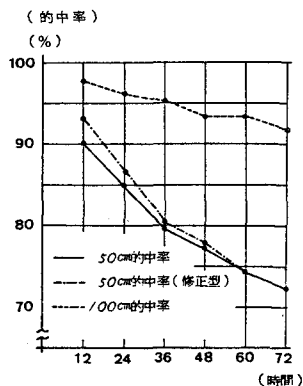
$$(\text{荒天的中率}) = \frac{\text{予測値・実測値とも荒天の個数}}{\text{予測値が荒天の個数}} \times 100 \quad (15)$$

残差 = (実測値 - 予測値)
 静穏: 基準波高未満, 荒天: 基準波高以上



(図・4) サンプル数と的中率

始めに重回帰型波浪予測式の精度について検討してみる。サンプル数と予測精度との関係(Case I)は、(図・4)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、50cm的中率で90%に達するがそれ以上の増加は見られない。これより重回帰型予測式の作成には、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・5)(表・2)に示す。当然予測時間が長くなれば予測精度も低下し、(図・5)より7.2時間予測50cm的中率で7.2%となる。(表・2)は、基準波高を1.0mとした場合の段階式評価を表わしている。



(図・5) 予測時間と的中率

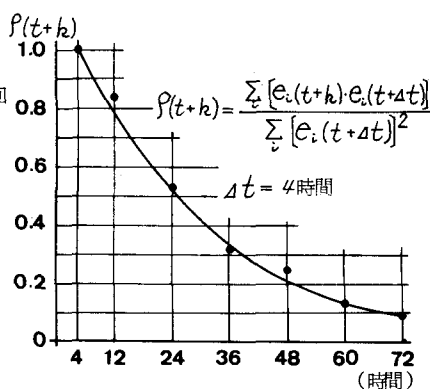
予測時間 (h)	0 ≤ OB < 1.0			1.0 ≤ OB			合計
	0 ≤ OB < 1.0	1.0 ≤ OB < 1.5	1.5 ≤ OB < 2.0	2.0 ≤ OB	0 ≤ OB < 0.5	0.5 ≤ OB < 1.0	
分類番号	①	②	③	④	⑤	⑥	
1/2時間後予測	39.5	4.3	9	8	4	6.5	73.0
36 "	36.3	34	1.0	5	9	9.3	21.7
36 "	33.3	48	1.8	5	1.0	12.2	19.3
48 "	30.9	57	1.8	1.1	1.9	13.6	18.0
60 "	29.3	53	2.3	1.0	2.3	14.9	18.0
72 "	26.6	58	24	1.3	3.2	16.6	16.9
修正重回帰型予測	41.1	3.7	8	1	1	5.2	73.0
36 "	38.3	40	1.0	8	5	7.6	21.2
36 "	34.9	47	14	7	7	10.8	19.8
48 "	31.0	58	1.8	1.1	2.0	13.4	17.9
60 "	28.8	51	24	9	24	15.2	18.2
72 "	26.1	56	2.3	1.3	3.2	17.1	17.2

(表・2) 予測精度の段階式評価

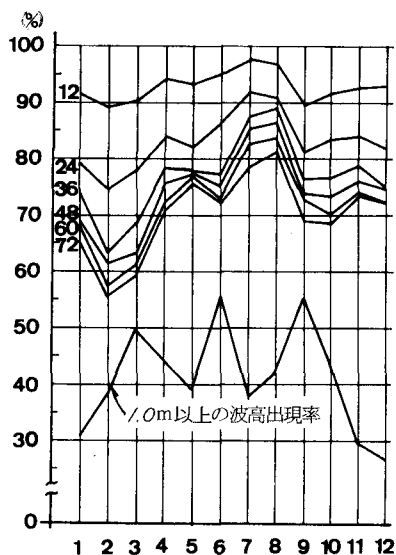
次に(式・7)で示した修正重回帰型波浪予測式の予測精度を同じく(図・5)(表・2)に示してある。また(式・6)の $\rho(t+k)$ の値を(図・6)に示す。これらによると修正重回帰型は36時間以内の予測に効果があることが判る。しかし、重回帰型及び修正重回帰型は、季節あるいは月別で予測精度が変化する。(図・7)は、修正重回帰型予測式を用いた際の月別・予測時間別50cmの中率の変化を表わしている。この図によると1月〜3月の予測精度が低く、逆に7,8月の予測精度が高くなっている。特に2月は1m以上の波の出現率が低いにもかかわらず予測精度が低い結果となっている。

判別型波浪予測式による判別境界点とk値の関係を(図・8)に、判別得点と荒天率の関係を(図・9)に示す。また判別得点分布を(図・2)に示してある。これらの図はいずれも基準波高が1.0mで、1/2時間後予測の場合である。(図・8)より $k=1$ の場合の判別境界点 X_0 の値は-0.1で、同じく2の場合は-0.6となる。また(図・9)よりあるサンプルの判別得点が-2以下であれば10%程度の確率で荒天と予測でき、同じく2以上であれば90%の荒天と予測できる。このように判別型予測の場合には、判別得点の大小により確率予測が可能となる。

3 波浪予測と稼働率 港湾工事の所要作業日数は、(所要作業日数 ≤ 稼働可能日数)の条件が満足されれば計画的に成りたつ訳であるが、作業工種によっては連続作業を必要とするものもある。この場合、連続稼働可能期間を何回期待できるかが問題となり、単なる合計日数では判断できない場合もある。例えばケーソン据付工事では(曳航-据付-中詰-蓋コンクリート)の作業は防災上から連続作業となり、2-3日の静穏日が必要となる。またこの場合の静穏とは、一般には波高・周期・風速が一定値以下の場合を指し、作業工種によりその値は異なる。



(図・6) 予測時間と ρ 値

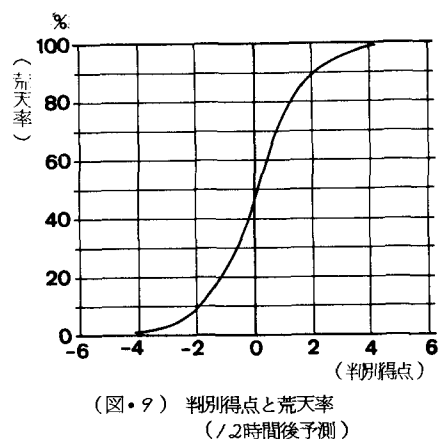


(図・7) 月別・予測時間別の中率(修正型)

稼働可能日数は、暦の日数から休祭日・作業船等の定期保守日及び過去の資料より当海域の自然現象による稼働不能日数を差引いた日数である。しかし、自然現象による稼働不能日数は予測によるしかなく、その予測精度はそのまま工程管理に大きく影響することになる。しかし現在の予測手法では長期（数ヶ月）の予測は不可能に近く、地域性

(k)

(図・8) 判別境界点とk値
(1/2時間後予測)



季節性のある観測記録より推計するしか方法がない。しかし短期予測（ノ3日）は、安全管理の面から高い予測精度が必要とされる。

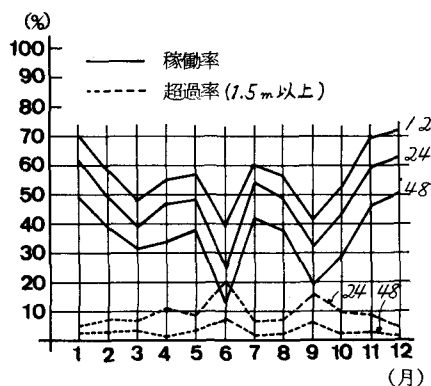
本節では（式・7）の修正重回帰型波浪予測式を用いて波浪予測を行なった際の連続作業と稼働率の関係を検討する。連続作業としては1/2時間から7/2時間までの作業を想定し作業限界波高としては有義波高1.0mとした。また本論では稼働率の計算に以下の仮定をおいた。

(1) 波浪予測は（式・7）により1/2時間後から7/2時間までの1/2時間間隔とする。

(2) 連続作業必要時間内の予測波高が1.0m未満の場合は稼働可能とし、その時間内に一度でも予測波高が1.0mを超える場合は、遊休とする。

(3) 稼働可能と予測し、稼働時間内に1.0m以上の波が出現した場合を超過とし、3段階の波高（1.0, 1.5, 2.0m）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。

連続作業時間を1/2, 2/2, 4/2時間とした場合の稼働率と、同じく2/2, 4/2時間の場合の超過率（1.5m以上）の関係を（図・10）に示す。（図・10）によると、6月・9月の稼働率が著しく低く、逆に超過率は高くなっている。中でも6月の4/2時間稼働率は13.9%（実測でも21.7%）と低く、1.5m以上の超過率は20%にも達している。また11月、12月の稼働率が高く、全体的には3, 6, 9月の季節の変わり目に稼働率が低い。これらの結果は波浪による影響のみを考慮しているが、実際の稼働率はこれらの値からさらに休祭日を差し引くため、稼働率はより低下することになる。このように、港湾工事における稼働日数は波浪によりかなり制約を受けるため、工程管理上作業可能日の把握が重要となる。



4 外海シーバースの待ち行列

従来、船舶の繋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呼んでおり、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、台風とか異状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、また繋留時間も2-3日と長い間荷役作業中の適切な波浪予測が必要となる。また稼働日数も内側と外側とでは異なる場合が多い。

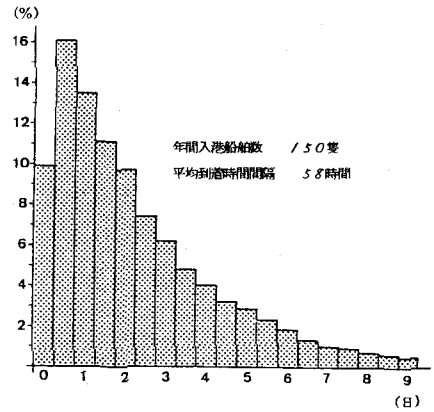
このようなシーバースの最適数を決定する方法は従来より多数の研究がなされてきている。これらの研究では、主に遊休バースと船舶のバース待ちによる費用や稼働時の便益を考慮し最適バース数を決定している。しかし、外海シーバースにおいては、滞船による待ちと波浪による待ちも考慮し、バース数の決定を行なわなければならない。

4・1 バース数と経済的入港船舶数 港湾における経費は、固定費用として施設の建設・維持管理費が挙げられ流動費用としては船舶関係・荷役・保管・関税及び検数料等が考えられる。これらの費用は、稼働時及び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。

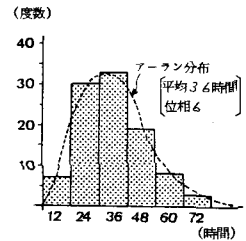
本節では、波浪の影響を考慮した場合と波浪の影響がないとした場合のバース数と経済的年間入港船舶数の関係を検討するのが目的であるため、(式・/6)に示す期待損失額Cの最小をもって経済的年間入港船舶数と定義する。

$$C = (S - \frac{n}{365\mu})a + \frac{n}{365}tw \quad b_1 - \frac{n}{365} \quad b_2 \quad \text{----- (式・/6)}$$

C : 期待損失額 (円/日) S : バース数
 μ : /日サービス隻数 (隻/日) n : 年間入港船舶数 (隻/年)
 tw : 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)
 b₁ : バース待ちによる船の損失 (円/日)
 b₂ : バース待ちがない場合の諸種の利益 (円/日)



(図・/1) 船舶の到着分布



(図・/2) サービス時間分布

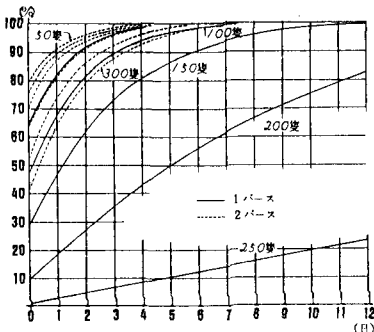
4・2 シミュレーションモデルによる待ち行列の計算 (式・/6)により期待損失額の計算には、船舶の平均バース待ち時間、/日サービス隻数、及び年間入港船舶数が必要となる。本論文では、これらの値をシミュレーションモデルにより待ち行列の計算を行なった。このモデルの特徴は、船舶が入港し、空バースがある場合荷役を行なうかの判段は、必要荷役時間内の予測波浪が作業限界波高未満の時だけ荷役を行ない、作業限界波高以上と予測された場合は待ち行列に加わるものとする。勿論、バースがふさがっている場合も待ち行列に加わる。以下、計算に用いたデータ及び仮定について述べる。

(1)年間入港船舶数を50-300隻とし、一様乱数により到着分布を求める(図・/1参照)。

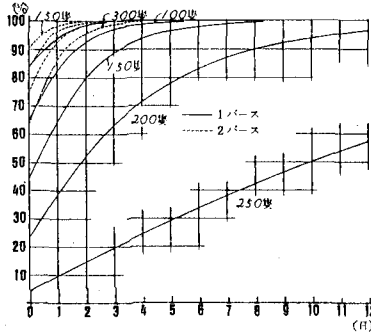
(2)荷役サービス分布は(図・/2)を使用する。また波高別超過率の

計算には単位分布(1/2-7/2時間までの1/2時間間隔)。

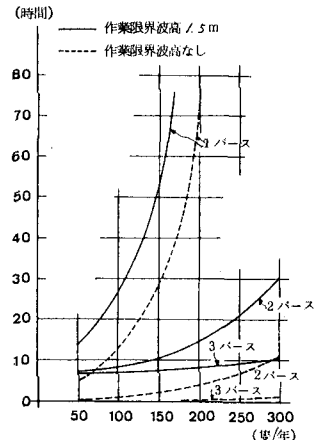
(3)バース数は3バースとする。



(図・/3) バース待ち確率累積分布曲線 (作業限界波高 1.5m)



(図・/4) バース待ち確率累積分布曲線 (作業限界波高なし)



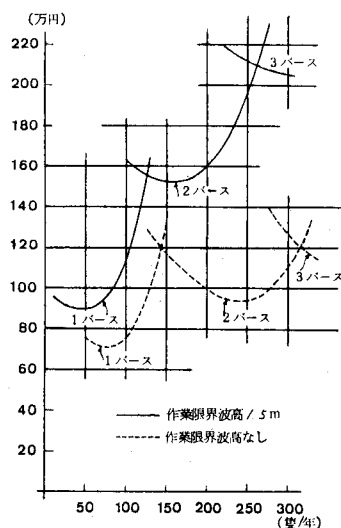
(図・/5) 平均バース待ち時間

(4)波浪予測は(式・7)の修正重回帰型予測式を用いて1/2時間後から7/2時間後まで1/2時間間隔で行なう。

(5)作業限界波高は1.5mとし、船舶が到着した時点の波高が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なう。それ以外の場合は待ち行列に加わる。

(6)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持って超過率とする。

(7)シミュレーションは、昭和53年1月1日より1/2月3/日までの730ポイント(1/2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換え100回行なう。

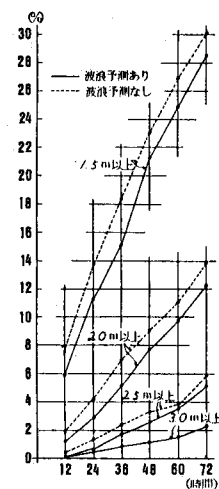


(図・16) 年間入港船舶数と期待損失額

4・3 待ち行列の計算 作業限界波高を1.5mとし、波浪予測を行なった場合と、作業限界波高を考慮しない場合のバス待ち確率累積分布曲線を(図・13)(図・14)に、平均バス待ち時間と年間入港船舶数の関係を(図・15)に示す。これらの図より、例えばバスが一基で年間150隻の入港船舶数を考えると、作業限界波高を考慮しない場合には、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、作業限界波高を1.5mとし波浪予測を行なった場合には28%まで低下する。また平均バス待ち時間も30時間から60時間に増加する。

(式・16)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・16)である。これによるとバスが一基で波浪を考慮した場合の経済的年間入港船舶数は約45隻であるが、作業限界波高を考慮しない場合には約75隻となる。同じくバスが二基の場合は、それぞれ約160隻、240隻となる。

最後に(式・7)を用いて波浪予測を行な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。ここではサービスを単位分布、年間入港船舶数を100隻として計算を行なった。(図・17)はサービス時間と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ことが判る。



(図・17) 予測時間と超過率

5 まとめ 本論文では、波浪予測に多変量解析を導入し、重回帰型、修正重回帰型及び判別型の波浪予測手法を提示した。これらの手法はいずれも実用面ではるかに簡けつであり、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、予測精度も現在各地で行なわれている波浪予測と比較して大差ない結果がでている。波浪予測の応用として港湾工事の稼働率と外海シーバスの待ち行列について検討を行なった。これらの結果によると工程管理やシーバス数の決定に波浪の影響が大きいことが判った。

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いただいた。ここに記して深甚な謝意を表わす。