

カテゴリカルモデルを利用した波浪予測の適用性

駒口友章*・佐藤勝弘**・後藤智明***・青野利夫****

1. 結 言

波浪予測に適用可能な統計モデルとしては、重回帰モデル、判別型モデル、自己回帰モデルなどの様々なモデルが提案されている。このうち、重回帰モデルの適用性や予測精度については、既に基本的な検討が行われており、適用対象や利用目的によってはかなり有効な情報を与えることが確認されている(小舟ら, 1987)。しかしながら、重回帰式中の観測波浪の項の寄与率が大きく、これによって予測精度が決定されると共に、予測波高が実測波高よりも遅れて発達する傾向がある。このため、現地で実際にこのモデルによって施工管理を行う場合には、予測実行時の直前の波浪観測値を用いて予測値を補正して利用する(駒口ら, 1991, 1992)などの工夫が行われている。また、波浪予測の利用面からみると、必ずしも予測値が連続量として利用されるわけではなく、海象が急変する時期を除き、工種毎に設定された基準波高に対して、作業開始時の予測波高が大きいか小さいかを施工可否の判断材料に用いる場合も多い。一方、判別型モデルは、まず、気圧配置パターンの変化に対応する波浪の変化を調べ、その結果を利用して予め決められた基準波高(例えば作業限界波高)に対する将来の波浪の大小変化を簡便に判別することを目的としており、気圧値の変動情報を有効に取り込むことによって、波浪観測値が無い場合にも、実用的な精度の良い波浪の判別予測を行うことが可能と考えられる。

本研究では、①過去の地上天気図上の気圧配置を、日本を含む広範囲を覆う32個の代表点の気圧値でデジタル化した後、対応する時期の波浪観測値を判別型モデルで解析し、気圧配置の変化に対する日本沿岸の波浪の変化を調べる。

②さらに、上記の解析結果を利用して、波浪の判別予測を実施し、予測地点ごとの判別型モデルによる波浪予

測の適用性を検討する。

2. カテゴリカルモデルによる波浪の判別解析

(1) カテゴリカルモデルの適用方法

本研究では、1987年～1991年の5年間の連続した気象庁の地上天気図から、図-1に示す32個の代表点の気圧値の変化を読み取り、これと対応する時期について日本沿岸の4地点(むつ小川原、常陸那珂、深浦、石狩湾新港)の波浪の変化を、判別型モデルを用いて調べる。このとき、32個の代表点の気圧値の集合は、気圧配置パターンを近似的に表しているものと仮定する。

波浪の判別解析では、AIC(赤池情報量規準)の最小化と要因増加法を組み合わせた坂元の判別型モデル(坂元, 1985)を適用する。このモデルは、式(1)で計算されるAICを最小とする説明変数を分割表の比較によって逐次選択すると共に、説明変数のカテゴリーの区分を自動的にを行い、最適な判別モデルを得ることが可能である。

$$AIC = -2 \text{ (モデルの最大対数尤度)} + 2 \text{ (モデルの自由パラメータ数)} \dots (1)$$

目的変数 I_0 に対して k 個の説明変数の候補が考えられる場合に、説明変数の集合 $\{I_1, \dots, I_k\}$ を I 、その任意の部分集合を J とおき、 I と J のとる値をそれぞれ i, j とおくと、判別モデルのAICは次式となる。

$$AIC(I_0; J) = (-2) \sum_{i,j} n(i_0, j) \log \frac{n \cdot n(i_0, j)}{n(i_0) n(j)} + 2(C_0 - 1)(C_j - 1) \dots (2)$$

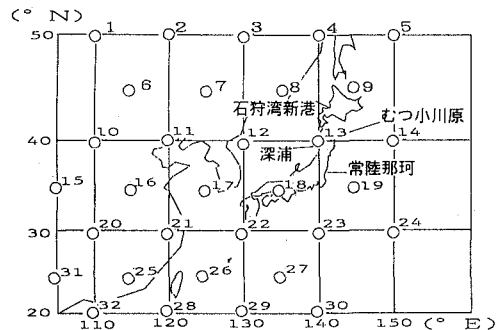


図-1 気圧配置を代表する測点網と予測対象地点

* 正会員 工博 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所
 ** 正会員 工修 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所
 *** 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科(前運輸省港湾技術研究所 海洋エネルギー利用研究室室長)
 **** 正会員 工博 東亜建設(株)技術研究所(前運輸省港湾技術研究所 海洋エネルギー利用研究室)

ここに、 $n(i_0, J)$: 変数 i_0, J のとる値 (i_0, J) に関する同時観測度数、 n : サンプルのサイズ、 $n(J)$: 変数 J に関する周辺度数、 C_0, C_j : 変数 i_0, J の総カテゴリー数である。

要因増加法は、目的変数と説明変数の中の1つの組み合わせの中から、AICが最小となる説明変数を選択した後、残りの説明変数の中からさらにAICが小さくなる説明変数を逐次選択していく方法である。この結果、AICが最小となる組み合わせを最適変数とする。本研究では判別型モデルの適用において、目的変数は予測対象地点の10時と16時の波高とし、説明変数は毎日9時と21時の連続した地上天気図から読み取った32点の気圧値とする。

(2) 波浪の判別解析の結果

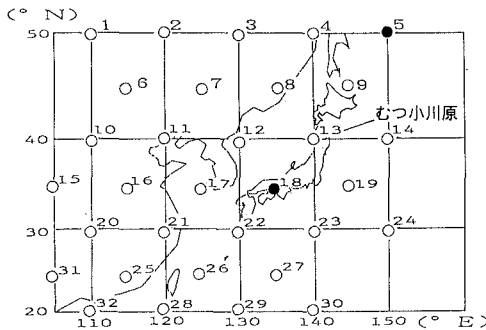
図-2に、むつ小川原および石狩の波高の判別予測に対して最も有効な情報量を与える代表点の位置を示す。これらの図によれば、選択された代表点はいずれの場合も2、3個であり、予測地点は選択された代表点を結んだ重点点付近に位置する。また、表-1に各予測対象地点について、判別型モデルによって選択された説明変数の組み合わせを期間別に示す。表中の記号 P_{ij} は代表点であり、 $i=3, 4, 5$ はそれぞれ予想時刻、12時間前、24時間前の地上天気図の気圧値であることを示し、 $j=1\sim 32$ は代

表点の位置を表している。また、各季節は3～5月を春季、6～8月を夏季、9～11月を秋季、1～2月および12月を冬季と定義した。

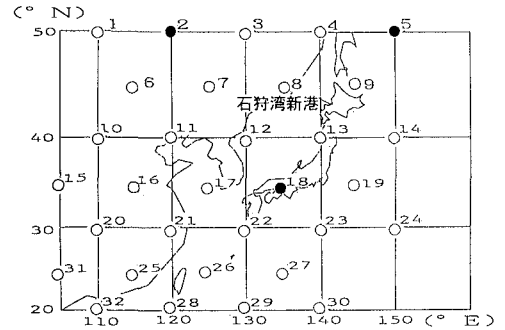
この表から、いずれの場合も選択された説明変数の数は少なく、最大でも深浦(春季)の4個である。また、いずれの地点でも日本列島を挟んで北東のゾーン(北海道北東沖)と南西のゾーン(九州南西沖)の代表点を選択される傾向がみられるが、日本海沿岸の両地点では、大陸側の代表点を選択される場合が多くなっている。こ

表-1 要因増加法とAIC最小化によって選択された説明変数の組み合わせ

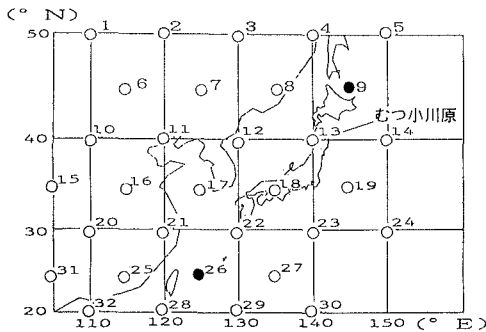
対象期間	むつ小川原	常陸那珂	石狩湾新港	深浦
春季	P505, P518	P504, P522 P328	P405, P418 P402	P405, P527 P403, P306
夏季	P522, P405 P401	P523, P512	P503, P509 P411	P409, P408 P532
秋季	P409, P426	P409, P415 P322	P405, P407 P419	P409, P426
冬季	P421, P309 P409	P305, P319 P521	P305, P511	P409, P417
通年	P505, P518	P521, P409	P505, P423	P505, P523



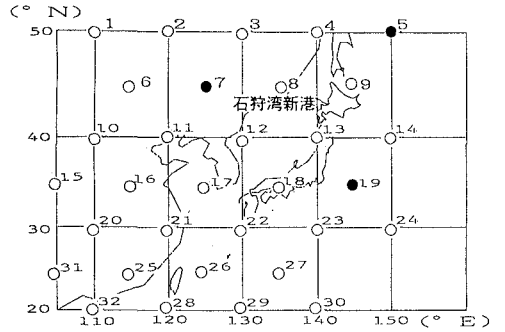
1) むつ小川原 (春季)



2) 石狩湾新港 (春季)



3) むつ小川原 (秋季)



4) 石狩湾新港 (秋季)

図-2 判別型モデルによって選択された代表点の位置 (図中の黒丸)

の結果は、日本海沿岸では選択された代表点が主に西高東低の季節風時の気圧配置パターンに対応することを示すものと考えられる。

(3) 分割表に基づく波浪予測の方法

表-2, 3 にむつ小川原の春季の波浪の判別解析の結果を示す。表中の説明変数 X(2), X(3) は、各々代表点 No. 5 と No. 18 における 24 時間前の気圧値であり、最適なカテゴリ-数は 6 × 2 個である。また、目的変数 X(1) は 10 時と 16 時のむつ小川原の波高であり、カテゴリ-数は 4 個である。これらの表から、例えば No. 5 の気圧値が階級 5, No. 18 の気圧値が階級 1 に属する場合 (気圧階級 51) には、波高階級 4 となる確率は 88.5% であり、気圧配置がこの階級区分となる場合には、1m 以上の高波浪が来襲する可能性が高い。一方、気圧階級 61 に属する場合にも高波浪となる確率が大きい、この場合はその階級区分に属する波浪の観測度数が少ない。このため、波浪予測の方法は各階級中の波高の出現度数に対して出現頻度を乗じた数を出現強度と定義し、その大きさを判

定基準として波高の判別予測を行う方法とする。

3. 波浪の判別予測の結果および考察

図-3 は、判別型モデルの適用期間を通年および季節別に分けた場合の波浪の判別予測の適中率を示す。それぞれの基準波高としては、作業限界波高 1m を採用 (波高階級 4 に対応) し、実測波高が 1m 以下で予測結果が作業可能と判別された場合、および実測波高が 1m 以上で予測結果が作業不可能と判別された場合を予測適中とする。また、適中率は全予測数に対する予測適中の占める割合を求める。

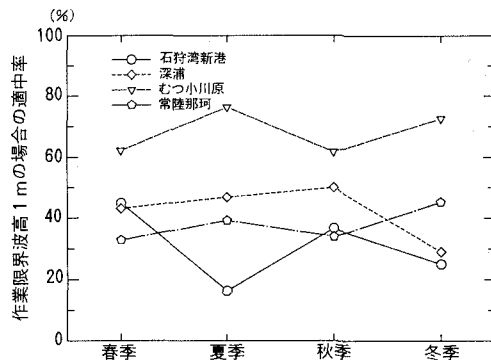
まず、通年の波浪の解析結果を利用した場合では、むつ小川原の適中率が、年間を通じて 60% 程度以上であるが、それ以外の地点ではいずれも 40% 前後となっている。この結果は、解析対象となる波浪データ量が多くなっている反面、季節風時に特有な気圧配置パターンが十分に認識できなくなるものと考えられる。これに対して、季節別の波浪の解析結果を利用した場合は、むつ小川原および常陸那珂の波高の判別予測の適中率は、春季には各々 74.1% および 70.7% に上昇したが、その他の季節の適中率はいずれもたかだか 50% 程度であった。さら

表-2 階級別の波高の出現頻度

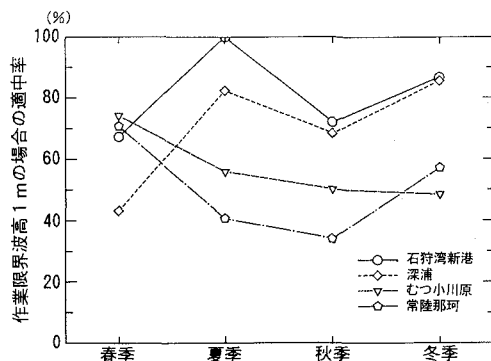
X(2)	X(3)	階級別の X(1) の度数分布				
		階級区分	1	2	3	4
1	1	2	3	1	1	7
1	2	1	0	0	0	1
2	1	5	16	9	3	33
2	2	2	0	1	1	4
3	1	30	50	35	49	164
3	2	6	11	5	3	25
4	1	23	82	101	187	393
4	2	13	13	7	16	49
5	1	3	2	11	123	139
5	2	4	3	6	4	17
6	1	0	0	1	4	5
6	2	0	0	2	2	4
合計		89	180	179	393	841

表-3 各変数の意味と各々の階級の内容

変数	変数 No.	各変数の意味	階級 No.	各階級の内容
X(1)	100	予測対象時刻の波高	1	0 ~ 50
			2	51 ~ 75
			3	76 ~ 100
			4	101 ~ (cm)
X(2)	505	測点 No.5 での 24 時間前の気圧値	1	~ 977
			2	978 ~ 991
			3	992 ~ 1005
			4	1006 ~ 1019
			5	1020 ~ 1033
			6	1034 ~ (hpa)
X(3)	518	測点 No.18 での 24 時間前の気圧値	1	~ 1023
			2	1024 ~ (hpa)



(a) 通年の波浪の解析結果を用いた場合



(b) 季節別の波浪の解析結果を用いた場合

図-3 波浪の判別予測の適中率

に、1m以上の高波浪が来襲した場合の適中率を調べると、春季には80%以上となったが、その他の季節は低い適中率にとどまった。この結果は、太平洋沿岸の地点では、春一番による高波浪のような比較的明確な気象パターンの変化には、判別予測が有効であり、作業不可能に対する危険リスクも小さくなるが、夏季から秋季にかけての台風のように、気圧配置の変化が急速で、かつ高波浪時の欠測が多いような場合には、判別予測の適中率が低下するものと考えられる。一方、日本海沿岸の石狩湾新港および春季を除く深浦の適中率は全般的に良好であり、海象条件が急変し易い秋季に対しても70%程度以上であった。この結果は、日本海沿岸のように主に季節風によって発生・発達した波浪が来襲する地点では、気象パターンの認識による波浪の判別予測が有効であることを示している。

以上のように、判別型モデルによる波浪解析の結果を適切に用いれば、数地点の気圧値の変化に着目するだけでも、実用的な波浪の判別予測が可能である。また、太平洋沿岸における春季や日本海沿岸における秋季のように、特に季節風の影響による波浪が卓越して来襲する時期には、判別予測の精度が十分であることがわかった。

4. 判別型モデルによる波浪予測の適用性

気象パターンの変化を認識することによる波浪の判別予測は、波浪特性が気圧配置の変化等の気象パターンによって明確に区分できることを前提としている。また、波浪予測の精度は、判別型モデルを適用するデータの量や質によって大きく依存することは避けられない。このため、前述したように、気象パターンが明確であり、かつデータの量も豊富な季節風時の高波浪を予測する場合には、判別モデルによる波浪予測は十分な予測精度が期待できるが、夏季から冬季にかけての台風の影響が卓越する高波浪を予測することは困難である。

図-4は、著者の一人(駒口, 1993)が日本海沿岸各地に高波浪をもたらした低気圧による擾乱を抽出し、それぞれの高波が出現する直前の大陸の高気圧およびこれに対応する低気圧の中心の位置を調べた結果である。この図からわかるように、日本海に高波浪をもたらす低気圧は、東経140°E~160°Eおよび北緯40°N~50°Nの範囲に位置していることが多く、一方、大陸の高気圧は東経120°E~130°Eおよび北緯30°N~40°Nの範囲内に位置する。本研究において判別型モデルによって得られた季節風時の解析結果は、このような傾向を支持しており、特に日本海沿岸では高波浪をもたらす特有の気圧配置パターンが存在することを示している。

また、本研究で用いた判別型モデルは与えられた説明変数の集合から、情報量が最大となる組み合わせと最適な

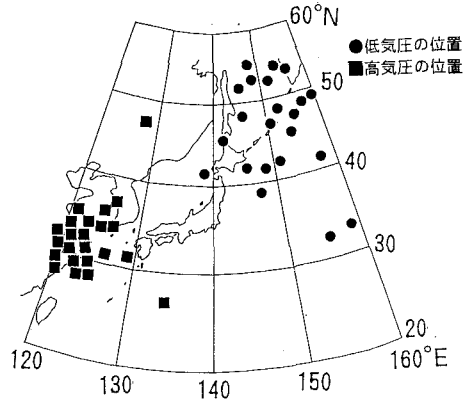


図-4 日本海に高波浪が発生する直前の高気圧および低気圧の中心の位置

カテゴリーの区分を選択するものであり、目的変数の性質を表わすための最適な説明変数が存在しない場合でも判別モデルを得ることがある。表-4, 5に深浦の春季の波浪の判別解析の結果を示す。表中、選択された説明変数は4個であり、X(2)およびX(4)は代表点No.5およびNo.3における12時間前の気圧値、X(3)はNo.27における24時間前の気圧値、X(5)はNo.6における予想時刻の気圧値である。また、各々の説明変数の最適なカテゴリー数は総て2個である。この表によれば、選択された説明変数がいずれも気圧階級1に属する場合には、予測波高が波高階級2および3(波高1m以下)、波高階級4(波高1m以上)となる可能性は同程度となる。さらに、X(2)の気圧値が階級2に変化する場合については、波高階級4の出現度数が30であるのに対して、それ

表-4 階級別の波高の出現頻度

階級区分	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	階級別の X(1) の度数分布				
	1	2	3	4	計				
1	1	1	1	1	12	49	52	51	164
1	1	1	2	2	13	17	19	16	65
1	1	2	1	1	9	11	10	42	72
1	1	2	2	2	15	36	18	39	108
1	2	1	1	1	5	14	8	12	39
1	2	1	2	2	7	6	1	1	15
1	2	2	1	3	3	2	4	4	13
1	2	2	2	2	11	26	15	19	71
2	1	1	1	1	5	6	21	30	62
2	1	1	2	0	3	4	4	26	33
2	1	2	1	2	2	0	5	49	56
2	1	2	2	1	1	6	12	93	112
2	2	1	1	1	1	1	1	0	3
2	2	1	2	3	3	1	1	4	9
2	2	2	1	0	2	3	0	5	5
2	2	2	2	2	2	1	9	11	23
合計					89	181	183	397	850

表-5 各変数の意味と各々の階級の内容

変数	変数 No.	各変数の意味	階級 No.	各階級の内容
X(1)	100	予測対象時刻の波高	1	0~ 50
			2	51~ 75
			3	76~ 100
			4	101~(cm)
X(2)	405	測点 No.5での12時間前の気圧値	1	~1009
			2	1010~(hpa)
X(3)	527	測点 No.27での24時間前の気圧値	1	~1018
			2	1019~(hpa)
X(4)	403	測点 No. 3での12時間前の気圧値	1	~1010
			2	1011~(hpa)
X(5)	306	測点 No. 6での予想時刻の気圧値	1	~1014
			2	1015~(hpa)

以外の波高階級の出現度数の総和は32であり、このような場合には出現強度の大きさによる波浪の判別予測が困難になることがわかる。したがって、このような場合には得られた判別モデルは、安定した最適モデルではない可能性があるため、利用には十分な注意が必要である。

以上に示したように、判別型モデルは必ずしも最適モデルが得られるとは限らないが、この結果を適切に用いれば、適用海域や適用期間によっては、他の統計モデルと同程度以上の十分な波浪予測精度が期待できる。特に季節風による波浪のように、気圧配置の変化パターンが安定している場合には、実用的な判別予測が可能である。しかしながら、特異気象による波浪の場合には、解析対象となるデータ量が非常に少なくなることもあって波浪予測の精度はあまり期待することはできない。

5. 結 言

本研究では、地上天気図上の気圧配置パターンを代表点の気圧値で近似的に表わし、気圧配置の変化に対応する沿岸波浪の変化を判別型モデルを用いて解析した。さらに、波浪の判別解析結果を利用して波浪予測を実施し、予測対象地点ごとの波浪予測の適用性を検討した。本研究で得られた主要な成果を要約すれば、以下の通りである。

- ① 判別型モデルを利用することにより、日本沿岸4

地点の波浪観測値を目的変数として判別解析を行った。その結果、波浪の変化を判別予測する為に選ばれた最適な説明変数は、いずれも2, 3個であり、予測対象地点は選択された代表点を結ぶ重点付近に位置することがわかった。

② 波浪の判別解析の結果を利用して波浪予測を実施した。その結果、太平洋沿岸および日本海沿岸のいずれの地点でも、特に季節風時の気圧配置パターンに対応する波浪の判別予測の適中率は非常に良好であったが、太平洋沿岸の台風による波浪が来襲する時期などの適中率は低めとなった。

③ 判別型モデルによって必ずしも最適な判別モデルが得られるとは限らないが、解析結果を適切に用いれば、適用海域や適用期間によっては他の統計モデルと同程度以上の波浪予測精度が期待できる。

なお、今後の課題としては、観測例の少ない特異な気象パターンによる波浪を対象とする場合について、判別予測の方法をさらに検討する必要がある。また、予測の対象となる事象がカテゴリカルであり、その解析対象となるデータ量が豊富であれば、基本的に判別型モデルの適用が可能なることから、簡便な波向予測への応用(駒口ら, 1994)なども考えられる。

最後に、波浪観測データを快く提供して頂いた運輸省港湾技術研究所海洋水理部海象調査研究室および北海道開発局小樽開発建設部小樽港湾建設事務所の関係各位に対して厚く謝意を表明します。

参 考 文 献

小舟浩治・橋本典明・亀山 豊・久高将信 (1987): 重回帰式を用いた波浪予測手法の適用について, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 167-171.
 駒口友章 (1993): わが国沿岸における異常波浪とその予知に関する研究, 京大大学学位論文, 211 p.
 駒口友章・佐藤勝弘・進藤信博・窪内 篤 (1994): 類似気象パターン認識による波向予測の試行, 土木学会第49回年次学術講演会講演集, pp. 676-677.
 駒口友章・進藤信博・河合紀章・木村克俊 (1991): 海上工事の施工管理における波浪予測の運用について, 第38回海岸工学論文集, pp. 961-965.
 駒口友章・松岡道男・進藤信博・木村克俊・窪内 篤 (1992): 浜益漁港における波浪予測の運用について, 第39回海岸工学論文集, pp. 1056-1060.
 坂元慶行 (1985): カテゴリカルデータのモデル分析, 共立出版, 221 p.