

日本海中部沿岸における波浪の相関予測法

土屋 義人*・鹿島 遼一**・鈴木 義和***
近藤 浩右****・泉 雄 士****

1. 緒 言

捨石の投入やブロック、ケーソンの据付けなど防波堤工事は外海に面して行われる場合が多く、直接波浪の影響を受けやすい。したがって、海上工事に当っては、作業期間の波浪状況を精度良く予測し、工事の円滑な遂行のみならず、ケーソンの転倒、水没などの事故防止を図る必要がある。従来、太平洋側では小名浜¹⁾、鹿島²⁾、苫小牧³⁾や関西国際空港⁴⁾などの大規模な海上工事の実施に伴って波浪予測が行われ、それらの手法や成果も報告されているが、日本海側では前例が無いようである。特に高い精度を要求される短期予測（数時間後の予測）の一般的な方法は、気象変化の特性を考慮して、まず海上風を予測し、その結果を用いて SMB 法等により波浪を予測する。したがって、予測作業に多大の労力を要し、また海上風の予測精度がそのまま波浪の予測精度を支配する。日本海側では、海域が閉じていることに加えて、それをとり囲む多数の気象観測点の存在により、特定地点間の気圧差の経時変化等から直接に波浪を予測できる可能性が高い。本研究では、対象地点として柏崎を選び、相関法により短期の波浪予測式として簡便かつ比較的精度の高いものが得られたので、その方法と成果を報告する。

2. 日本海沿岸の波浪と気圧差の相関

図-1 に示す日本海沿岸 7 地点と気象庁海洋気象観測ブイロボット No. 6 (6 号ブイ) における波高および日本海を囲む気象観測地点のうち 9 通りの地点間の気圧差を各々代表データに選び、その経時変化の相関関係から両者の特性を調べる。対象期間は 1978~1980 年の冬期(10 月~4 月)である。データの観測時間間隔は管轄省庁によって異なるので(運輸省は毎偶数時、保安庁は毎時 30 分、気象庁は 3 時間おき)、全て毎正時のデータに線型補間して解析した。

表-1 に波高と気圧差の相互相関係数の最大値と相関

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木研究所
*** 正会員 工修 東京電力(株) 原子力建設部
**** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部

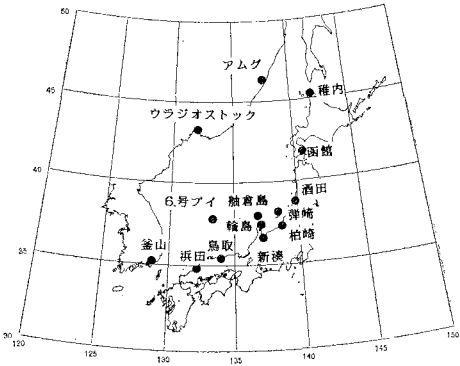


図-1 日本海沿岸の気・海象観測地点

表-1 波高と気圧差の相関関係

最大相関係数									
気 圧 差	酒田	弾崎	柏崎	新湊	輪島	舩倉島	鳥取	6号ブイ	
ア ム グ~稚 内	0.54	0.55	0.53	0.38	0.51	0.42	0.54	0.46	
ウラジオ~函 館	0.68	0.67	0.64	0.50	0.63	0.52	0.67	0.52	
ウラジオ~浜 田	-0.01	-0.04	-0.02	0.47	-0.01	0.00	0.19	0.13	
釜 山~浜 田	0.35	0.46	0.42	0.38	0.47	0.37	0.60	0.37	
函 館~稚 内	0.33	0.26	0.23	-0.07	0.22	0.14	0.08	0.15	
輪 島~函 館	0.77	0.67	0.66	0.08	0.61	0.50	0.49	0.51	
浜 田~輪 島	0.71	0.24	0.74	0.15	0.76	0.67	0.70	0.68	
ウラジオ~ア ム グ	0.60	0.53	0.23	0.23	0.48	0.40	0.40	0.36	
釜 山~ウラジオ	0.40	0.33	0.35	-0.02	0.35	0.30	0.18	0.30	

波高の遅れ時間									
気 圧 差	酒田	弾崎	柏崎	新湊	輪島	舩倉島	鳥取	6号ブイ	
ア ム グ~稚 内	3	6	2	19	1	-9	2	-3	
ウラジオ~函 館	6	7	4	18	4	-5	3	-4	
ウラジオ~浜 田				-16					
釜 山~浜 田	16	16	16	15	13	5	9	6	
函 館~稚 内	-11	-12	-16		-12	-27	-24		
輪 島~函 館	3	1	0	15	-2	-9	-6	-10	
浜 田~輪 島	16	13	11	22	9	3	5	4	
ウラジオ~ア ム グ	3	1	-1	15	-3	-9	-3	-11	
釜 山~ウラジオ	11	7	8	-22	2	-1	-4	-1	

係数が最大となるラグ・タイムを示す。ただし、気圧差の変化が波高の変化に先行する場合を正としてある。新湊を除く各地点の波高は、特に、ウラジオストック～函館、輪島～函館、浜田～輪島間の気圧差と相関が高い。新湊の波高はどの地点間の気圧差とも相関が低い、これは気圧差が代表する数 100 km といった空間スケールに比較してはるかに小さい能登半島が、より一意的に新湊の波浪を支配しているためである。一方、ラグ・タイムは、日本海中部より北の地点、柏崎、弾崎、酒田ほど大きい。特に、ウラジオストック～函館、浜田～輪島の気圧差とのラグ・タイムは大きく、数時間後を対象とした波浪予測に対して有意である。このように、新湊のような地点を除く日本海中部沿岸の波浪予測に対しては、主要地点間の気圧差が重要な因子となることがわかる。

3. 発達期、減衰期の波高予測式

波高予測の対象地点として柏崎を選び、重回帰解析の手法により 6 時間および 12 時間後の波高予測式を作成する。説明変数としては、波高との相関が高かったウラジオストック～函館、輪島～函館、浜田～輪島間の気圧差に舢倉島と 6 号ブイの風速の 2 乗、柏崎と 6 号ブイの波高を加える。検討期間は、1978～1980 年冬期(10～3 月)であり、さらに海上工事稼働・不稼働の限界である有義波高 1 m up-crossing 時および 1 m down-crossing 時に着目して、発達期、減衰期を各 36 ケース抽出した。その一例を図-2 に示す。

図-3 は、柏崎の波高と前記説明変数との相関関係を 0～24 時間のラグ・タイムについて示したものである。(a) が全期間、(b) が発達期(36 ケースをまとめた期間)、(c) が減衰期(36 ケースをまとめた期間)に対応している。各説明変数と柏崎波高の関係は発達期と減衰期で大きく異なり、発達期では全体に相関がやや低下して、先行時間が比較的小さいのに対し、減衰期では相関もある程度高く先行時間も比較的大きい。これは、気象

変化に対する海象の応答が、発達期では早く、減衰期では遅いことに関連している。全期間を対象とした場合の先行時間はほぼ両者の中間的な傾向を示す。また、発達期には、柏崎の波高の自己相関はラグ・タイムの増加に伴い比較的早く減少するのも特徴の一つである。

以上より、精度の高い予測を行うためには、発達期と減衰期の各々に対して予測式を作成し、両者を使い分ける必要がある。発達期、減衰期を対象としてそれぞれ求めた 6 時間後および 12 時間後の柏崎波高の重回帰予測式を表-2 に示す。表中 P は気圧差、 U^2 は風速の 2 乗、 H は波高を、() 内の数字は説明変数の予測対象時刻に対する先行時間を表わしている。なお、6 号ブイのデータを説明変数に加えても、さほど精度の向上が見られなかったため、最終的に気圧差 3 種類、舢倉島風速の 2 乗および柏崎波高の組合せによる重回帰式を採用することにした。6 時間後の予測式では気圧差が第 2 あるいは第 3 説明変数として、12 時間後の予測式では浜田～輪島の気圧差が第 1 説明変数として取り込まれており、予測対象時刻によって気圧差の持つ重要度が異なる。

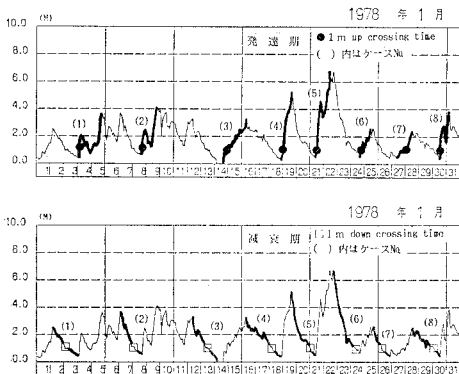


図-2 発達期・減衰期ケース抽出例

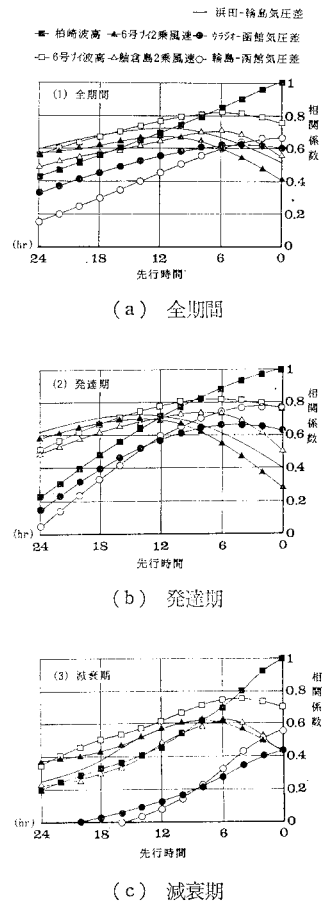


図-3 柏崎波高と各説明変数の相関関係

表-2 重回帰予測式

(a) 6 時間予測

解析対象 データ	説明変数と回帰係数						相関 係数
	定数項	第1説明 変数	第2説明 変数	第3説明 変数	第4説明 変数	第5説明 変数	
発達期		H 柏 (-6)	P 浜-輪 (-6)	U^2 軸 (-6)	P 輪-函 (-6)	P 浜-輪 (-9)	0.86
	0.00831	0.517	0.199	0.00535	0.0440	-0.0764	
減衰期		H 柏 (-6)	U^2 軸 (-6)	P 輪-函 (-6)	U^2 軸 (-11)	P 輪-函 (-10)	0.93
	0.162	0.567	0.00676	0.0893	-0.00292	-0.0461	

(b) 12 時間予測

解析対象 データ	説明変数と回帰係数						相関 係数
	定数項	第1説明 変	第2説明 変	第3説明 変	第4説明 変	第5説明 変	
発達期		P 浜-輪 (-12)	H 柏 (-12)	U^2 軸 (-12)	P 浜-輪 (-13)	U^2 軸 (-17)	0.75
	0.404	0.576	0.659	0.00749	-0.431	-0.00372	
減衰期		P 浜-輪 (-15)	H 柏 (-12)	U^2 軸 (-12)	P 輪-函 (-12)	P 浜-輪 (-12)	0.84
	0.463	-0.0920	0.195	0.00417	0.0540	0.190	

実際の波浪の予測に際しては、予測の対象となる時刻が発達期にあるか、減衰期にあるかを客観的に予測判定し、発達期の式と減衰期の式を使い分ける。ここで使用した判定方法は図-4に示すとおりである。すなわち、予測式を用いて予測対象時刻およびその3時間前、6時間前の波高を予測し、まずその3つの値から波高変化の極値の有無を判断する。波高変化の極値を察知した場合、その後の予測波高が極値の波高より0.5m以上変化

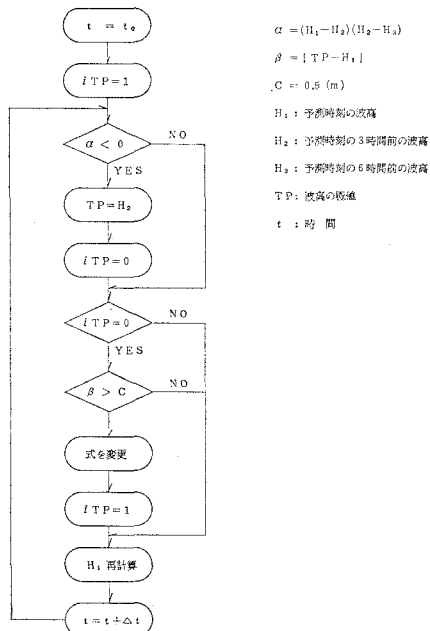


図-4 予測式の使い分け方法

した時点から予測式を変更する。0.5m 未満の範囲で発達・減衰を繰返す場合、予測式は変更しない。予測式変更時の波高は、変更した式で再計算する。対象時刻の3時間および6時間前の値を判定に用いるのは、気圧のデータ取得が3時間毎になっているからである。

4. 予測式の適用と評価

(1) 予測式の評価方法

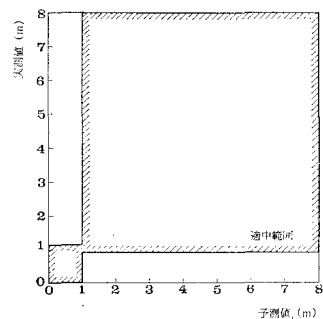
従来、波高予測精度の評価は適中率により行われているが、その算定方法は各地点で種々の方式がとられ、特に定式化されたものはない。代表的なものとしては下記の3方式が挙げられる。

a) 小名浜方式

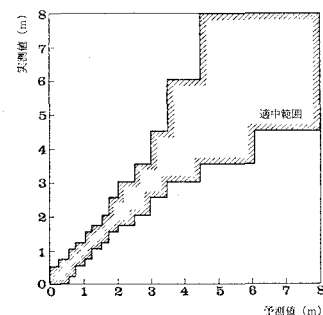
作業可否についてのみ予測精度を検証するものである。作業限界波高は1mと設定されており、予測値に ± 0.1 mの誤差を許容する(図-5(a))。

b) 鹿島方式

波高を14の階級に区分し、予測波高の階級と実測波高の階級の対応に着目するものである。階級は作業可否の限界となる1m付近で比較的細分されており、波高分割幅は小さい。判定に当っては予測階級と実測階級の差が ± 1 以下の場合適中とする(図-5(b))。



(a) 小名浜方式



(b) 鹿島方式

図-5 従来の予測精度の評価方法

c) 苦小牧方式

3段階に区分された波高階級別に、予測波高と実測波高との差を100点満点の点数制により評価するものである。24時間予測については、平均69点以下を予測不適と評価する。

波高変化の予測では、波高1m付近での稼働状態から不稼働状態への移行をどの程度精度良く予測できるかに重点が置かれる。しかし、従来の評価方法により通年あるいは月間の適中率を算定すると、日本海夏期のように静穏で波高の変化が小さい期間では、期間内の数回の時化時における波高変化を予測できなくても、結果として高い適中率を示し、必ずしも適切な判断ができない。このような不合理な点を補う1つの方法として、ここでは発達期は1m up-crossing時から3時間以内、減衰期は1m down crossing時から12時間以内と対象期間に制限を加え、稼働・不稼働移行時付近の予測値に対して適中率を算定することにした。用いた算定方法は鹿島方式である。なお、発達期と減衰期で対象期間が異なるのは、気象変化に対する海象変化の応答が、前者では早く、後者では遅いという特性を考慮したものである。

(2) 予測式の適用と評価

本予測手法を前述の検討期間に適用する。図-6は、発達期の式と減衰期の式の使い分け状況を示したものの一例である。実線が発達期の式で、破線が減衰期の式で予測した部分である。全体としてはよく使い分けられているが、判定基準を極値から波高が0.5m以上変化した時点と設定しているため、例えば1978年1月21日のように、発達期に急速に波高が増大するような場合には、両式の使い分けが遅れることがある。

表-3には、先に抽出した全期間、発達期、減衰期の各々に各予測式を適用した場合の適中率、ならびに同期間にわたり発達期の予測式と減衰期の予測式を使い分けた場合の適中率を示す。当然ながら、発達期は発達期の式で、減衰期は減衰期の式で予測した場合適中率が最も高く、2つの式を使い分けることの重要性がわかる。また、発達期の式で発達期を予測した場合は、減衰期の式で減衰期を予測した場合に比べ、適中率はかなり低い。これは、発達期は減衰期に比べ気象変化に対する海象変化の応答が早いという、応答のパターンが低気圧の移動経路、高気圧の位置等の差異により敏感に左右され、多様であることによるものと考えられる。一方、2つの式を使い分けた場合の適中率は、発達期の式のみで予測した場合と減衰期の式のみで予測した場合の中間的な値を取る。発達期の適中率は発達期の式で予測した場合に比べかなり落るが、これは予測の困難さに加え、先に述べたような急激な波高発達時における両式の使い分けの遅れに起因するところが大きく、今後改良してゆくべき点である。

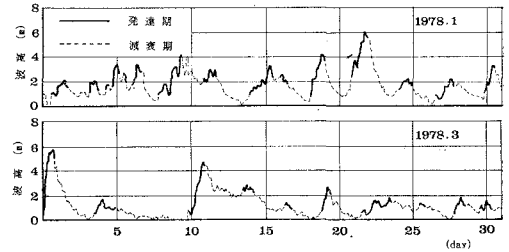


図-6 予測式の使い分け状況

表-3 予測式の適中率

(a) 6時間予測

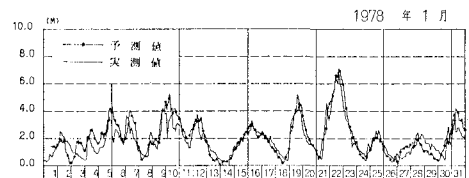
予測式	対象期間	全期間	発達期	減衰期
発達期		69	58	70
減衰期		78	30	92
発達期・減衰期の使分け		77	33	92

(b) 12時間予測

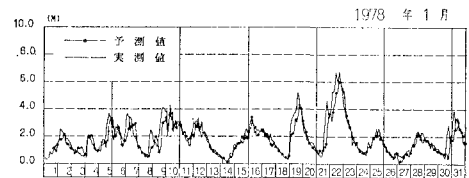
予測式	対象期間	全期間	発達期	減衰期
発達期		51	49	41
減衰期		62	31	66
発達期・減衰期の使分け		61	31	65

単位: %

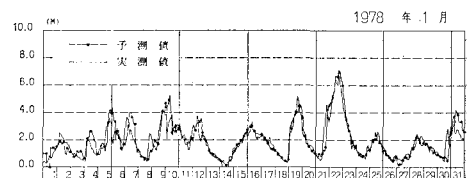
図-7は、各予測式から求めた6時間予測波高と実測波高との対応を示したものの一例である。発達期の予測式は、波高の発達立上り時とピーク値付近は良く合うが、減衰期に過小評価となりやすい。逆に、減衰期の式では、波高の減衰期と1m未満の低波浪時に良い対応



(a) 発達期の式による予測



(b) 減衰期の式による予測



(c) 2式の使い分けによる予測

図-7 実測値と6時間予測値の対応

を示すが、発達期の立上りは実測波高に比べ遅れる。このような発達期あるいは減衰期のいずれか一方の式で予測した場合に見られる実測値とのずれは、実際に適用してゆく際にはいずれも危険側の予測を与えることになる。2つの式を使い分けると、これら両方の欠点を修正することができ、急速な発達、ゆるやかな減衰といった特性がかなりの精度で再現できる。この点からも、両式の使い分けが予測上重要な要素であることがわかる。

最後に、この予測方法を夏期を含む1978年1月～1980年12月の期間に適用した。適中率は表-4のとおりである

表-4 1978年1月～1980年12月への適用結果

	冬期(10月～3月)	夏期(4月～9月)	通 年
12時間予測の場合	61	62	61
6時間予測の場合	77	86	82

12時間予測の精度がある程度低いのは止むを得ないが、波浪推算を併用した鹿島の実績(8時間予測の通年適中率73%)と比べても十分な精度である。季節別に適中率があまり変らないこともこの方法の優れた点である。12時間予測においても波浪の発達あるいは減衰など定性的な傾向は確実におさえられており、明朝の稼働・不稼働を前日夕刻に決定するための指標としては十分実用に耐えるものと考えられる。6時間予測を併用して12時間予測値を時々修正することにより、波高レベルもかなりの精度で事前に把握することが可能である。

5. 結 語

代表地点間の気圧差を説明変数に取込んだ波高の重回帰推定式を、波の発達期と減衰期の各々に対して作成

し、予測に当たり両者を使い分けることにより、比較的精度の高い波高変化の予測式を得ることができた。入力データが入手しやすく、予測計算が簡単なことが第一の長所として挙げられよう。波浪条件にあまり左右されず、夏期・冬期を通じて安定した精度を有する点も特長の一つであり、調査工事を始め、冬期における海上作業の稼働率向上に寄与できるものと考えられる。また、同様な予測手法は、日本海沿岸の他地点についても汎用性が高いものと期待される。18時間後の波高予測式の作成も試みたが、大きなラグ・タイムを有しつつ波高と相関の高い気象因子が無いため、所定の適中率を得ることはできなかった。今後の課題として、より長期の予報へと発展させてゆくには、精度の高い予想天気図を利用した本手法の展開を図る必要がある。

最後に、本研究は、東京電力株式会社の協力による波浪予知研究会(代表者土屋義人教授)として実施した研究の一部であることを付記するとともに、研究の実施に当り快くデータを提供していただいた運輸省第一、第三港湾建設局および気象庁統計課の関係諸官、ならびに数々の貴重な御意見を賜った京都大学防災研究所光田寧教授および京都産業大学藤井健教授をはじめとする波浪予知研究会の諸氏に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 吉村芳男: 港湾工事のための波浪予報, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 35～40, 1970.
- 2) 直轄港湾技術研究会: 鹿島工業港の建設(報告), 昭和49年10月.
- 3) 北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所: 苫小牧港調査報告書, 昭和55年度.
- 4) 三木 亨・小原恒平・川鍋安次: 海上風と波浪予測に関する一考察, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 193～197, 1984.