

港湾工事のための波浪予報

吉 村 芳 男*

1. は し が き

港湾工事は海上作業を主とするので、工事の進捗は波に影響されるが、なかでも防波堤工事は外海に面して行なわれる場合が多く、直接波を受けるため影響の度合いが強い。

太平洋に直面する小名浜港では、有義波高1.0mをもって防波堤工事の作業可能限度としており、1.0m以下の日数は表一のように年間230日程度あるが、連続した作業可能日になると連続日数の増加につれてその度数も延日数も急速に減少してゆく。

表一 作業可能連続日数の分布 (1966年)

連続日数	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日
度 数	226	97	53	30	23	19	13
延 日 数	226	194	159	120	115	114	91

防波堤工事には数日間の連続した作業期間を必要とする作業内容があって、たとえばケーソンの据付け作業は1回に3～4日程度の連続日数を必要とするので、据付け可能な機会は年に30～50回、延日数にして120～150日程度しかないことになる。したがって工事の円滑な遂行のためにはこれらの少ない機会を確実に捉えることが必要である。また作業中に波を受けた場合は、作業の中断や、やり直しのみでなく、いったんケーソンの転落水没やマウンドの破壊などの事故が発生すると、その復旧に手間がかかり相当期間工事を中断せざるを得ない羽目に追い込まれる。このため作業可能日がいつ始まりいつまで続くか、いつ波が来襲するかなど、波の状況をあらかじめ把握しておくことが工事を安全かつ円滑に遂行する上に必要となってくる。

筆者は小名浜港において1965年の後半から民間気象会社の協力を得て防波堤工事の管理のために波浪予報を実施したが、予報の根拠に明確な欠点があり、また予報精度についても不十分な点があったので、その後検討を加え客観的波浪予報法をまとめたのでその具体的内容、精度などについて述べる。

2. 1 か月予報

一般に工事は1か月を単位として実施計画が作られるが、予報は予報期間が長くなるにつれて精度が低下してゆくので、工事の計画、準備、実施の各段階に応じて1か月予報、1週予報、3日予報の組合せで行なう。

さて1か月をこえる長期の気象予報の方法としては、(i) 天候の変動の中に見出される周期性に着目して予報を行なう周期法、(ii) 気圧、気温などの気象要素間のおくれの相関関係に基づいて予報を行なう相関法、(iii) ある気象現象について過去にさかのぼって現在までの変化と類似したものを求めて将来も類似が継続するとして予報を行なう類似法、(iv) 半旬、旬、月などの平均天気図から外そうによって予想平均天気図を作成して予報を行なう平均天気図による方法などがある。

このうち、相関法は気象要素に直線的な関係のものが少なく、気象要素そのものが長期傾向を有していて非定常的であるため相関係数によって長期予報を行なうことに問題があったが、近年電子計算機の使用によって膨大な量の相関係数が容易に計算できるようになった結果、ある地点と北半球上の各地点との気象要素についての相関分布図を作成することによって、大気の大循環と関連した総観的立場からの長期予報が可能になった。これが相関シノプテックスと呼ばれる方法で、気象庁では本邦各地の気象要素と北半球500mb高度との同時相関分布図および1か月から11か月までのおくれの相関分布図を作成し長期予報に利用している¹⁾。

また類似法には、ある地点の気象要素の時系列の類似を求めるものと、気象要素の平面的分布の類似を求めるものとある。気象庁では北半球月平均500mb天気図上の各格子点における高度偏差の分布の類似、過去3か月における地上の気圧、気温、降水量の偏差分布の類似、あるいは北半球半旬平均500mb天気図の高度偏差の象限別分布による天気図型の推移の類似などによって類似年を選び出している。

これらの結果によって気象庁予報部から毎前月末に季節予報資料の形で、各種気象データとともに、予報根拠の解説をつけて500mb月平均予想天気図が発表される。この解説の中にはいくつかの類似年があげられているので、類似の度合いによって適当な類似年を選び出し、予報月と同月の毎日の地上天気図によって波を推算するか、またはその月の波の観測値があればその値をそ

* 正会員 北海道開発庁港政課長

のまま予報値とする。なお、類似法によることが適当でない場合は相関シノプテックスによって 500 mb 月平均予想天気図が作成されており、この予想天気図に対する類似年が記載してある。季節予報資料としてはこのほかに、寒候期予報、暖候期予報として(11月～3月)、(4月～9月)に分けて、周期法、相関法、相関シノプテックス法、類似法などの方法によって、各月の月平均 500 mb 高度偏差予想図、類似年、気象要素の予報などが発表されるので参考となる。

類似年による 1 か月予報では、類似の状態がいつまで継続するかの判定がつかないという問題のほかに、類似の程度によって予報精度が変わるので、予報精度を一定に保てないという難点がある。

3. 1 週 予 報

有義波高 1.0m 以上の波の原因を低気圧(前線を含む)、台風、高気圧に分ければ表-2 のようになり、低気圧がもっとも多く、低気圧と台風が 90% とそのほとんどを占め、高気圧はわずか 10% にすぎない。高気圧による波は高気圧からの吹き出しによって生ずるものであるが、低気圧と異なり高気圧の存在が常に波の発生と結びつかず、特定の気圧配置の時のみ高気圧によって波が発生する。したがってその予報がむずかしいが、頻度がきわめて少ないためこの波を予報上省略しても実用的には支障を与えないと考えられるので、1 週予報は台風と低気圧による波に対してのみ行なうこととする。

表-2 波の発生原因別度数

台	風	低 気 圧	高 気 圧	計
19		137	18	174
11		79	10	100%

(1966 年～1967 年)

(1) 台風による波

台風によって小名浜港に來襲する波は、例年 8 月、9 月に集中ししかも低気圧による波よりも卓越するので、8、9 月は台風の波についてのみ予報を行ない、これらの月以外の月は低気圧の波について予報を行なえば良い。

台風は発生の初期から本邦はるか南方の洋上で捕捉され地上天気図に発表されるが、台風からの波はうねりとなって数日間かかって到達するので、天気図によって逐次台風からのうねりを推算して予報を行なう。うねりの推算は 3 日予報におけるそれと同じである。

(2) 低気圧による波

一般に北半球天気図上の高低気圧は西から東に移動してゆくので、予想しようとする日までの日数に応じて、現在地より西の方へ必要な距離だけ隔たった地点の気圧配置によって、現在地の予想を行なうことが可能とな

る。実際上は地上天気図における高低気圧が地形や海陸分布の影響をうけて複雑な動きをするので、これらの影響をうけることの少ない高層天気図が用いられる。わが国では 500 mb 天気図が用いられているが、地上天気図で複雑なパターンをしていた気圧配置は、500 mb 天気図では北極をとりまく同心円的な波状の等圧線となる。等圧線の北方への膨みが気圧の尾根、南方への膨みが気圧の谷で、それぞれ地上の高気圧と低気圧に対応しており、これらの尾根と谷は大体 1 日に経度にして平均 10 度の速さで西から東に移動し、これに対応して地上の高低気圧も移動してゆく。

気象庁では、北半球の地上および 500 mb 天気図により、東西指数、波数分析、等値線図あるいは連続図などを用いて気圧の尾根や谷を追跡し、これに経験的予報則を加味して予報文を作成し、1 週間に 2 回火曜日と金曜日に 1 週間先までの週間予報を発表している²⁾。しかしこの週間予報では毎日の予想天気図がないので波の推算ができない。

小名浜港には低気圧が日本海を通過する場合には風波が來襲し、低気圧が太平洋側を通過する場合には風波または低気圧中心からのうねりが來襲する。波の波高、周期、継続時間などは低気圧の規模、経路、速度によって異なるが、これらの波を気圧の谷の通過によって発生する海面のじょう乱と考えて、波と気圧の谷との関係を直接求めた。

すなわち 500 mb 天気図における気圧の谷が 40°N, 140°E の地点を通過する時刻(図-2 参照)と、気圧の谷に対応すると考えられる低気圧によって、有義波高 1.0 m 以上の波が当港に來襲し始める時刻との関係を 0.5 日単位で求めれば表-3 のようになる。500 mb 天気図は毎日午前 9 時現在のものであり、また波は波高桿による目測値である。以下簡単のため有義波高 1.0m 以上の波を単に波と略称する。表-3 は谷の通過と波の來襲が同じ半日内にあれば時間差を 0 とし、0.5 日単位で時間差を表わし波の來襲が谷の通過に先立つ場合は負号を付してある。当港はほぼ 37°N, 141°E にあって南に開いているが、低気圧が日本海を通る場合は、谷の通過の 1 日から 0.5 日前くらいから波が來始め、太平洋を通る場合は谷の通過と同じか 0.5 日後に來始めており、両者をひくくめて、波の來始めは谷の通過の 0.5 日前から 0.5

表-3 気圧の谷の通過と波の発生

時間差	-1.5日	-1.0日	-0.5日	0	0.5日	1.0日	1.5日	計
日本海低気圧	5 (7)	19 (28)	17 (25)	22 (33)	5 (7)			68 (100%)
太平洋低気圧		1 (2)	2 (4)	24 (43)	20 (35)	8 (14)	1 (2)	56 (100%)
計	5 (4)	20 (16)	19 (15)	46 (37)	25 (20)	8 (7)	1 (1)	124 (100%)

(1966 年～1967 年, 8 月, 9 月を除く)

日後の間に70%強が起こっている。波の継続時間つまり1.0m以上の波が続く日数は表-4のごとくなり、低気圧の経路にはあまり関係なく2日未満が70%強を占めている。

表-4 波の継続状況

継続日数	1.0日未満	1.0~2.0日	2.0~3.0日	3.0日以上	計
日本海低気圧	22	27	13	6	68
太平洋低気圧	27	16	9	4	56
計	49 (40)	43 (35)	22 (18)	10 (8)	124 (100%)

(1966年~1967年, 8月, 9月を除く)

波の来襲の始めと終りの時点における低気圧の位置をプロットすれば図-1のようになる。当港は小さな岬によって東をわずかに遮へいされているに過ぎないので、東から北東にかけての波は岬を回って侵入し、南から南東にかけての波はそのまま直進してくる。日本海低気圧による波は低気圧が134°Eを通過する頃から来襲し始め、137°E付近を通るとき最大波高が表われ、北海道付近に達するまで継続する。一方太平洋低気圧による波は低気圧が142°E付近を通る頃から来襲し始めるが、太平洋における低気圧は三陸沖はるか東方に去ってから発達するものがあって、それからの波が1日以上かかって到達する例がかなりある。

波高分布は表-5のごとくで、日本海低気圧による波

表-5 波高分布

波 高	1.5m未満	1.5~2.0m	2.0~3.0m	3.0m以上	計
12月~2月	23	8	4	1	36
3月~5月	21	7	12	2	42
6月~7月	13	4	3		20
10月~11月	15	5	5	1	26
日本海低気圧	35	15	16	2	68
太平洋低気圧	37	9	8	2	56
計	72 (58)	24 (19)	24 (19)	2 (4)	124 (100%)

(1966年~1967年, 8月, 9月を除く)

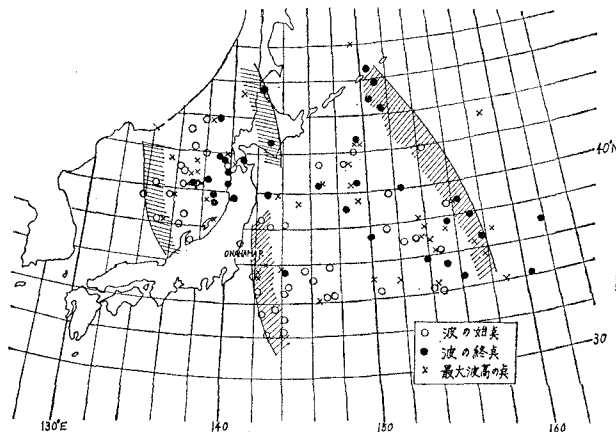


図-1 波の来襲と低気圧の位置

の方が太平洋低気圧による波よりも若干高い傾向があり、季節的には3~5月が高く6~7月が低くなっているが、大部分の波は2.0m以下であって3.0mを越す波はきわめて少なく、また波高と気圧の谷の深さとの間にははっきりした関係は見出されない。

以上の解析結果から気圧の谷の移動を適確に把握できれば、低気圧による波の1週予報が可能となってくる。気圧の谷は平均して10°/日の速度で東進するが、時に15°/日程度のももあるので、140°Eを基準にすれば40°E付近から追跡する必要がある。追跡は図-2の要領で行なう。すなわち毎日の500mb天気図から40°Nに沿った格子点の高度を読み取り、

縦軸に高度、横軸に経度をとって高度プロファイルを描き、前日の高度プロファイルと重ね合わせて差をとれば、前日にくらべて高度の下がった部分(斜線部)が気圧の谷を表わし、高度の上がった部分が尾根を表わす。斜線部の谷部を順次結んでゆけば、この線が気圧の谷の移動状況を示す。これらの気圧の谷や尾根による波は気象学上短波と呼ばれるものであるが、準定常的な長波の浅い谷がある40°E付近で出現し、90°E付近の長波の尾根の部分に來ると不明瞭になり、長波の深い谷がある140°E付近に近づくにつれて再び明瞭に姿を表わしてくる。

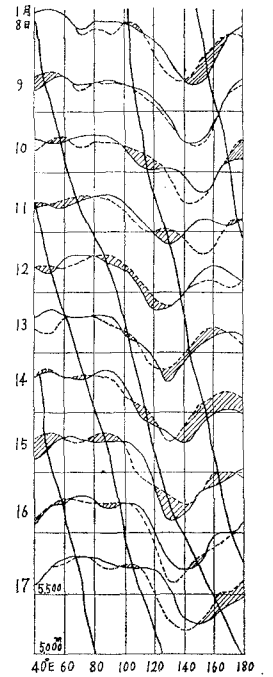


図-2 気圧の谷の移動

気圧の谷の速度は図-2からもわかるように一様な速度ではないが、40°Eから140°Eに至る間の平均速度を求めれば表-6のように季節によって変動し、冬に早く12°/日程度で夏は遅く9°/日程度に低下する。

地球をとりまく2つの緯度圏に沿った平均等圧面高度の差を東西指数といい、この指数が高い時は短波の東進速度が早く低指数の時は遅い。東西指数として全球の30°Nと50°Nの500mb半旬平均高度差をとって気圧の谷の平均速度と対比すれば図-3のようになり、ばらつきがあるが大体比例的関係にある。

これまでの結果を総括すれば、低気圧による波の1週予報は、(i) 500mb天気図における気圧の谷を40°Nに沿って40°Eから追跡して140°Eを

表-6 谷の平均速度

期 間	平均速度 度/日
12月 ~ 2月	12.0
3月 ~ 5月	10.8
6月 ~ 7月	9.0
10月 ~ 11月	10.3

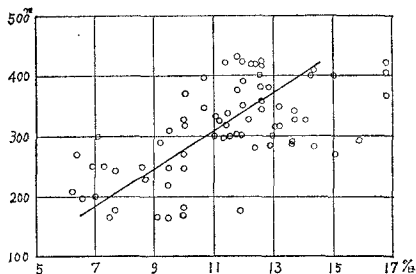


図-3 気圧の谷の速度と東西指数

通過する日時を推定する。谷の速度は先行する谷の平均速度をもとに、東西指数の経過、季節予報資料における東西指数の予想、週間気象予報における短波の速度などを参考にして決める。(ii) 波は気圧の谷の通過時より0.5日前から来襲して2日間継続するものとする。この場合前線の位置などから低気圧が太平洋側を通ると予想される時は、通過時と同一半日以内に波が来襲し始めるものとする。(iii) 波高は春季(3月~5月)は2.0m、その他の季節は1.5mを標準とする。

1 過予報にあたり注意すべき点は、気圧の谷が通過しても波が来襲しない場合があることである。8月、9月を除いた1966年と1967年の2年間に於ける気圧の谷の通過回数は153回あったが、谷が通過しても波が来襲しなかった場合が31回、高気圧からの吹き出しやきわめて遠い低気圧からのうねりといった、谷の通過と関連のない原因による波の来襲が23回認められた。波が来襲しなかった前記31回の中には、波の観測が目測であるため夜間に来襲した波の見落としも何回かあると考えられるが、その多くは冬季の西高東低の気圧配置による北西風のため波が弱められ、あるいは前線が著しく北偏または南偏し、それに伴って低気圧が本邦をはるか離れて通過するために波が来襲しなかったものである。しかしこれらの気圧配置は数日間持続するので、波の観測値を検討して以後の予報値を補正すれば良い。また90°~110°E付近で短波が分離して新しく気圧の谷が発生することがあるので注意を要する。

4. 3日予報

3日予報は当日の午後、明日および明後日の波浪予報を行なうものである。当日までの地上天気図、極東地上予報天気図(毎日16時電送)および気象通報などの気象資料をもとに、地上

における高低気圧や前線の移動、強度の変化、新しい低気圧の発生の有無などを運動学的法則や経験則によって求めて明後日までの予想天気図を描き、この天気図によって波を推算する。波の推定においては、風浪とうねりでは推算法が異なり、また気象の変化の速度によっては波の推算を必要としない場合もあり、あるいは推算ができない状況も生じるので、すべての波の推算を一律に行なうのは適当でなく、状況に応じた推算法の組合せが必要である。小名浜港については次の4つに分類して推算を行なうこととした。

- (i) 当港が風域に入って風波が卓越する場合
- (ii) 浪源が当港から離れてうねりが卓越する場合
- (iii) 気象の変化がきわめて急激な場合
- (iv) 気象の変化が緩慢で本邦付近にとくに波を起こす原因がなく現在の気圧配置がしばらく継続する場合

(i) の場合は通常の波の推算法を適用すれば良い。当港ではWalden⁹⁾の図表を使用した⁹⁾が、どの方法を用いるにしても、風域の変化や他の浪源からの波との重合などを忠実に計算に取り込むことは、予想天気図の精度を考慮すれば計算の繁雑さを増すだけであるので、主要な浪源について波を求め、推算値と実測値とを絶えず対比して推算値を補正して予報するのが实际的である。(ii) については台風などの強い気象しょう乱に対しては、簡便な宇野木の式⁷⁾によって中心域の波を求め、それからのうねりはS. M.の図表⁵⁾を用いた。この場合、気象庁から海上実況通報として船舶による波の目視観測値が、波高を0.5m単位、周期を2秒単位、波向を36方位で発表されるので、この通報値を波の推算値のチェックに用い、あるいは通報値そのものを使ってうねりの計算を行なう。観測値の分布を図-4⁶⁾に示す。(iii) はたとえば春先の台湾坊主のように低気圧が急速に発達しながら近くを駆け抜けるような気象変化の激しい場合は、気象

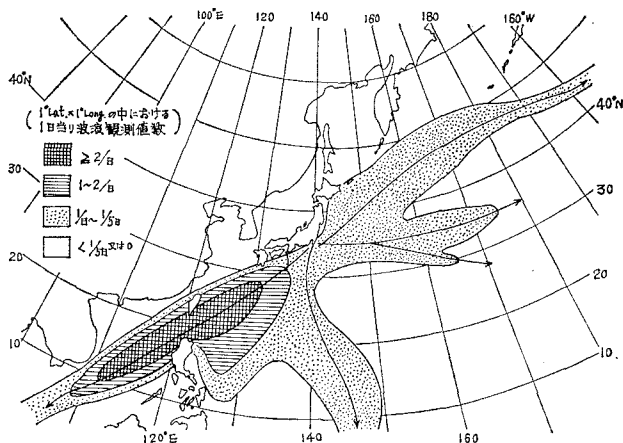


図-4 船舶による波の観測値の密度

予報そのものが困難で風速、吹送時間、吹送距離が定めがたく、計算による波の算出がきわめて不正確になる。こういった時は既往の天気図の中から類似の変化を示す一連の天気図を抽出し、その時の波の実測値に基づいて推定する。資料が蓄積されて類型化が進めば精度の向上が期待される。(iv) の場合はとくに波の推算を行なうこともないが、きわめて遠い浪源からのうねりが到達することがあるので注意を要する。

以上の4つの場合を通じて、予報精度を向上するには波の実測値と絶えず対比しながら推算値を補正することが必要であって、このため有義波高などが即座に得られる波浪計の設置が望ましい。

5. 予報の精度

波浪予報の直接の目標は作業可能日の予報であるから、作業可能か否か、すなわち波高が1.0m以上か未満かについて予報と実際を対比して予報の精度を検討する。この場合実測波高には $\pm 0.1\text{m}$ の誤差を許容する。作業可と作業不可とを表-1のように分割表にまとめれば、予報の適中率 f は

表-1 分 割 表

予報 \ 実測	作業不可	作業可	計
作業不可	M	n	$C_1 = M + n$
作業可	m	N	$C_2 = m + N$
計	R_1	R_2	$T = C_1 + C_2 = R_1 + R_2$

$$f = (M + N) / T$$

で表わされる。しかしこの中には予報をある技術によって出したか否かにかかわらない統計的確率も含まれている。この統計的に適中する回数 D は

$$D = (C_1 R_1 + C_2 R_2) / T$$

となる。したがって予報の適中数 $F = M + N = fT$ から D を差し引いたものが技術の有効性によって適中した回数となり、次式の S によって予報技術の有効性を表わしている。

$$S = \frac{F - D}{T - D} \times 100$$

この S を技能点と称し⁷⁾、全予報が適中した場合は $F = T$ となって S は100%となり、 $F = D$ の場合は S は0となって予報技術は無効であることを示す。

各予報の適中率と技能点は表-8のようになる。1か月予報については波の観測値を用いて予報したが、欠測月が多いので、1966年から1968年までの平均をとった。1週予報、3日予報はいずれも1968年に対するもので、このうち1週予報は簡単のため波はすべて気圧の谷の通過時の0.5日前に来襲するものとした。

予報の適中率は1か月予報で65%、1週予報で75%、明後日子報で80%、明日予報で85%程度である。技能点については1か月予報は20%程度でかなり低いものもあるが、1週予報から3日子報になるにつれて大幅に上昇するとともに、月によるばらつきも減少し予報の確実性が増大してゆく。季節的には気象変化の激しい春先に精度の低下が認められる。

6. 予報の効果

防波堤工事に対する波浪予報の効果を月間工事工程計画の達成率で検討することとし、波浪予報によらなかった1964年度と、波浪予報を全面的に利用した1966年度とを対比する。なお1966年度の波浪予報は改良以前のものである。工種ごとの年平均達成率は表-9のようになって計画達成率の著しい向上が見られる。しかしこの達成率の向上の中には、波浪予報のほかに、平行して行なった工法の研究改良の成果が複合されていると考えられる。そこで達成率向上に果たした波浪予報の役割を評価するため、1964年度における防波堤工事の実施状況を調べて見る。表-10は波高計の故障で欠測した4月から6月までを除いた9か月間の作業可能日数と各工種の実働作業日数の比較表である。表-9と表-10とから、基礎捨石と基礎均しの作業は、作業可能日を一杯に利用しているにもかかわらず達成率が低く、一方ケーソン据付けから根固捨石に至る各作業は、実働日数が少なくすむにもかかわらず達成率が低い。これは基礎捨石と基礎均しは、海上の状態に応じて作業の開始と中止が迅速に行なえるので、作業可能日をほとんど全部利用できたが、

表-8 予 報 の 精 度

予報種別 \ 月		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 か 月	f	60	63	58	69	61	80	69	74	69	62	68	60
	S	12	16	21	31	22	39	21	21	35	11	34	7
1 週	f	71	52	71	70	71	77	87	84	57	79	73	65
	S	42	3	36	36	42	40	50	24	18	55	40	31
明 日	f	74	79	87	80	81	83	87	90	97	84	93	77
	S	38	58	72	57	62	51	71	74	87	67	86	54
明 後 日	f	77	76	84	83	74	87	81	84	87	81	90	58
	S	39	49	69	65	45	43	50	46	64	62	75	4

表-9 月間工事工程計画の達成率

工種	基礎捨石	基礎均し	ケーソン据付け	日地コンクリート	上部コンクリート	方塊据付け	根固捨石
年度							
1964	55	39	47	32	25	45	33
1966	83	86	72	49	74	56	73

表-10 工種別作業日数

工種	基礎捨石	基礎均し	ケーソン据付け	日地コンクリート	上部コンクリート	方塊据付け	根固捨石
日数							
実働作業日	173	165	57	38	34	18	27
作業可能日数	178						

作業の能率が低いために達成率が低いのである。ケーソン据付け、日地および上部コンクリート作業は、基礎均しの遅れにしたがって遅れた点もあるが、作業上から要求される数日間の連続作業可能日をタイミング良く捉えることができなかったためである。方塊据付けや根固捨石も、前日までに方塊などの積み込みや作業船団の準備を要し、重量物を扱うためさらに静穏な海面を必要とするので、やはり作業可能日をうまく捉え得なかった結果によるものである。

すなわち、1966 年度における達成率の向上は、基礎捨石と基礎均しについては工法改良の結果であり、ケーソン据付けから根固捨石に至る各作業については、波浪予報に基づく精度の高い工事工程の計画と、作業可能日のタイミングな利用とによって達成されたものである。

7. あとがき

本研究は従来の波浪予報における曖昧さを除去し、気象庁発表のオフィシャルな資料と明確な根拠による精度の高い客観的な波浪予報を目指したもので、とくに 1 週予報の改良に意を用いた。本予報は一応小名浜港を対象としてまとめたが、若干係数を変更することによって他地域の港湾へも適用できるものとする。終りに本研究に当って終始懇切なご指導を頂いた、元気象庁予報部長今里 能氏に紙上を借りて厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 和田英夫：長期予報新講，地人書館，p. 119 (1969)
- 2) 気象庁予報部：予報作業指針，その 9，週間予報 p. 7，(1966)
- 3) H. Walden：Die Winderzeugten Meereswellen Teil I Beobachtung des Seeganges und Ermittlung der Windsee aus des Windverhältnissen, Hamburg Deutsche Wetterdienst Seewetteramt, Heft 2, abb-11 a~11 b, (1958)
- 4) S. Unoki：On the ocean waves due to tropical cyclones (3rd paper) mean distribution of wave height and periods. Journal of the Meteorological Society of Japan, Series II, Vol 35, No. 5, p. 44 (1957)
- 5) U. S. Naval Oceanographic Office：Techniques for forecasting waves and swell. H. O. Pub. No. 604, p. 36 (1963)
- 6) 松本次男：波浪予報について，日本船長協会，船長，52 号，p. 79 (1967)
- 7) 気象学ハンドブック，技報堂，p. 734 (1959)