

フーリエ・スペクトル法による海上荒天 予測方法について*

畠山修三**

要旨

この予測法の概要は次のとおりである。

気象庁から毎日送信される 500 mb 北半球天気図を使用し、予測地点上空の気圧波波動を調和解析してフーリエ・スペクトル成分波を求め、これら成分波を利用して予想気圧波を求める。この予想気圧波から、これに対応する地上低気圧の位置とそして別に求めた実験式を使用して、低気圧の中心付近の風浪波高を求める。低気圧と予測地点との位置関係により、地域特性を含む現地の風浪波高への修正や現地へ到達するうねりの計算を行い、最終的に現地波高は風浪とうねりの R.M.S. 値で求められる。この予想波高を作業限界波高と比較することにより、向う 1 週間から 1 ヶ月先までの任意の期間の作業可能日及び作業不可能日（荒天日）の予測を行う方法である。

1. はしがき

海上作業では、波高が増大してある限界を越すと、作業の能率が急激に低下し、同時に危険性が増大して遂には作業不能となる。この限界以下の波高の日が海上作業可能日であり、限界以上の波高の日が作業不能日つまり荒天日である。工事施行管理上問題になるのは、その日が作業可能日であるか否か、すなわちその日の波高が能率よく安全に作業出来る限界*** 以下であるのか、または以上であるのかであって、波高そのものの値はあまり問題にならない。

また、防波堤工事等においては、1 回に 3～4 日間の連続した作業可能日を必要とするように、ある期間作業可能状態が連続しなければならぬので、作業可能日については日数だけではなく、その連続状態や分布状態を予測出来ないとうまく作業が出来ない。

現在 3 日以上先の海上波浪の状態を予測する唯一の方

法として、類似法が使用されている。この方法の基本は、互に既往の気圧配置の経過が類似すれば将来の推移も類似するという経験則に立っている。実際には、選び出された一連の類似天気図の連続した類似日数には限界があり、気圧配置の経過の類似はせいぜい 4 日位のものであり、期間が長くなると類似がくずれてくる。従って、類似法によって行なわれる波浪予測は、予測期間が長くなると精度が落ちて来るため、予測の信頼度が低い。

海上波浪の長期予測について、現在類似法以外に方法が無く、この面の技術開発が切に望まれている。

この研究は、長期予測の精度向上を目的とした客観的な波浪の長期予測法に関する一試案として行なわれたものである。

2. 予測法の概要

2.1. 500 mb 高度場の予測

波浪予測に必要なのは気圧波の谷の位置とその強弱であり、これがわかれば、これに対応する地上の気圧配置も推定でき、この気圧配置に伴う波高もある幅をもって予測できる。

次に予想気圧波の求め方について述べる。500 mb 北半球天気図を使用し、波浪を予測しようとする地点に近接する等高線波動を調和解析して、フーリエ・スペクト

* On the Forecasting Method of Sea Condition by the Transaction of Fourier Spectral Component Waves.

** Syuzo Hatakeyama, 海洋気象エンジニアリング Co. Ltd.

—1980年6月10日受領—

—1981年9月21日受理—

*** 2.2. 参照.

ル成分波を求める。これら成分波を、気象力学上の法則、即ち「波長の長い波は遅く、波長の短い波は速く移動する」という、Rossby, Haurwitz* 及び Petterssen によって導かれた法則に準じて移動させ、再び合成して予想気圧波を求める。この予想気圧波を求める予測式として、次式を採用した。

$$\hat{y} = A_0 + \sum_{K=1}^N [A_K \cos K(x-ct) + B_K \sin K(x-ct)] \quad (1)$$

ここで

- \hat{y} : t 日後の予想気圧波の振幅幅
- t : 日数
- c : 移動速度, 単位 °long./day, $c = \alpha \cdot K$
- α : 実験的に求められる常数
- $\alpha = 0.75$ (後述)

K : 波数, $K=1, 2, \dots, 18$

$$N=18$$

$$i=1, 2, \dots, 36$$

$$A_0 = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} y_i$$

$$A_n = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} (-1)^i y_i$$

$$A_K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{2N} y_i \cos Kx_i$$

$$B_K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{2N} y_i \sin Kx_i$$

$$y = A_0 + \sum_{K=1}^N (A_K \cos Kx + B_K \sin Kx)$$

但し、1周期を360°とし、それを36等分して、その分点座標を $x_1 (=10^\circ)$, $x_2 (=20^\circ)$ ……、 $x_{36} (=360^\circ)$ とし、またその分点座標に対応する気圧波(等高線)の振幅を y_1, y_2, \dots, y_{36} とし、フーリエ級数により x と y との関係式を導いてある。

(1)式において、移動速度を決めるための α の決定が重要である。このため(1)式から求められる予想波形が現実の波形に近似するように α を決めた。その方法として、予想波形と実況波形のそれぞれの谷の位置を比較し、次式を使用して漸近的に α を求める方式を採用した。

$$\alpha_2 = \alpha_1 \frac{t}{t + \Delta t} \quad (2)$$

ここで、

α_2 : 修正された係数

α_1 : 修正前の係数

t : 日数。 t 日後に予想波形と実況波形の谷の位置を比較する

Δt : t 日後における実況波形の谷の、予想波形の谷よりの遅れ

予想波形を10日先の実況と比較して α を求めたところ、偏西風の強弱による α の変動区間は0.7~0.8であった**。 $\alpha=0.75$ を使用すれば、年間を通じて使用できる。

2.2. 海面波高を求める実験式

一般に、低気圧に伴う風の強さは低気圧の中心の気圧に比例し、低気圧の強さは500mbの正渦度に比例する。したがって、保存性の高いうず度を利用し、これから直接海面波高の長期予測ができるはずである。

500mb等高線波形において、トラフ東方のインフレ

* Haurwitz波 (有限横幅の場合)

$$\phi' = A \cos \frac{2\pi}{D} y \cos \frac{2\pi}{L} (x-ct)$$

$$c = U - \frac{\beta L^2}{4\pi^2} \frac{D^2}{D^2 + L^2}$$

(正野重方, 気象力学, 岩波全書参照)

** 昭和53年

月/日	4/7	4/21	5/12	5/30	6/13	6/28	7/4	7/17	8/4	8/24	8/31	9/7	9/21	10/30	12/19
α	0.75	0.75	0.75	0.68	0.75	0.75	0.75	0.75	0.68	0.75	0.75	0.75	0.68	0.68	0.75

昭和54年

月/日	1/2	1/16	1/22	2/1	2/8	2/12	2/18	3/1	3/27	←(谷の通過日)
α	0.75	0.75	0.75	0.82	0.82	0.75	0.75	0.75	0.75	

クシオン・ポイント付近はうず度水平傾度 $(-\frac{\partial \zeta}{\partial s})^*$ の最も大きい所で、この位置が低気圧の中心位置と対応することが知られている。

いま、 $-\frac{\partial \zeta}{\partial s}$ の定量化のため、トラフ軸と子午線が平行、等高線がトラフ軸に対して対称形、等高線の間隔が同じ、という単純なモデルを考えてみる。この場合、地衡風うず度は

$$\zeta_g = \frac{g}{f} \frac{1}{s^2} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 - 4Z_0) \propto (\bar{Z} - Z_0) \tag{3}$$

となる。ここで、 \bar{Z} は平均気圧高度を表わす。また、 $\frac{\partial \zeta_g}{\partial y} = 0$ であるから、 $-\frac{\partial \zeta_g}{\partial s}$ は次のように書ける。

$$-\frac{\partial \zeta_g}{\partial s} = -\frac{\partial \zeta_g}{\partial x} \propto -\frac{\partial (\bar{Z} - Z_0)}{\partial x} \propto \frac{\sum \Delta Z_0}{L/2} \propto \frac{h}{L/2} \tag{4}$$

ここで、

h : 気圧波（等高線）の波高（°lat.）。谷から峰までの高低差。

$L/2$: 気圧波の半波長（°long.）。谷から峰までの距離。

である。

上述の簡単な考察から、うず度水平傾度は $\frac{h}{L/2}$ に比例するとして、気圧波の波形から直接海上の風浪波高を求める無次元式を次のように作成した。

$$\frac{H_{1/3}}{H_1} = \frac{H_0}{H_1} + a_1 \left(\frac{h}{L/2} \right)^{a_2} \tag{5}$$

ここで、 H_1 は作業限界波高を表わし、 $1m$ と定めた。ちなみに、作業限界波高を $1/10$ 最大波高 ($H_{1/10}$) で $1m$ と定めている港湾工事事務所が多い。 $H_{1/3}$ は有義波高 (m) を表わす。 H_0/H_1 , a_1 , a_2 は最小二乗法で求められる。

標本のとり方については、 $\frac{h}{L/2}$ と風浪との対応を見る

$$* \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial s} + QZ = 0$$

Z : 渦度 Q : 発散

**

$\frac{h}{L/2}$	0.23	0.19	0.33	0.34	0.33	0.40	0.66	2.0	1.2
$H_{1/3}/H_1$	1.2	1.7	2.4	1.4	2.5	1.5	3.5	7.7	5.5

第1表 気圧配置による波高の分類表（八戸港）。

気圧配置の型	風向	風速 (m/s)	波高 (cm)
夏型	S~SW	4~6	40
		7~10	40
		11~15	40
冬型	W	4~6	40~60
		7~10	40~60
		11~15	40~60
	NW	4~6	60~80
		7~10	110~130
		11~15	150~170
N	4~6	80~110	
	7~10	120~180	
	11~15	200~300	
北高型	NE	4~6	180~250
		7~10	250~300
		11~15	300~450
移動高	W	4~6	40
		7~10	40
		11~15	40
東高西低	SE	4~6	80~100
		7~10	100~120
		11~15	120~140

ため、地形効果のない純粋な風浪だけを選ぶことに注意しなければならない。ここでは、このようにして選出された純粋標本9例**から、 $H_0/H_1 (=0.3)$, $a_1 (=4.46)$, $a_2 (=0.76)$ を求めた。標本の数が少ないが、次の機会に標本を増やして検討したい。なお、 $\frac{h}{L/2}$ と $H_{1/3}/H_1$ との標本相関は $\gamma = 0.94$ であった。有意検定については、 $\alpha = 0.01$ として自由度 (1.7) に対して $F_\alpha = 12.25$, そして $F = 53.13$ であり、この相関は危険度 1% で有意である。

3. 予測手順

前述の (1), (5) 式から、向う 1 ヶ月先位までの任意の期間における海上の低気圧の位置（気圧波形のインフレーション・ポイントに着目）とその中心付近の風浪波高を予測することができる。次に低気圧と予測地点（現地）との位置関係により、地域特性（地形効果など）を含む現地の風浪波高への修正や、現地へ到達するうねりの計算を行い、最終的に現地波高は風浪とうねりの R.M.S. 値

第2表 週間予測と実測の作業可能日 (昭和53年4月~54年3月, 八戸港).

日 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	的中率 (%)		
4																																80.0		
5																																	80.6	
6																																	73.3	
7																																	83.9	
8																																	90.3	
9																																	86.7	
10																欠																		
11																																	80.0	
12																																	80.6	
1																																	74.2	
2																																	75.0	
3																																	77.4	
																																	年平均	80.2

----- 予想作業可能日
 _____ 作業可能日

で求められる。

現地の風浪波高への修正は、統計的に作成された波高分類表 (第1表参照) か、あるいは修正係数を用いて行う。

現地へ到達するうねりの計算は次のように行う。(6) に示す Bretschneider のうねりの推算式 (1968) を使用して到達波高を求める。これに沿岸係数を乗ずれば、現地のうねり波高が求まる。

$$\frac{[H_{1/3}]_D}{[H_{1/3}]_F} = \left[\frac{0.4F}{0.4F+D} \right]^{1/2} \quad (6)$$

ここで、 F は吹送距離を表わし、簡略化された次式から求められる。

$$F = 170.09 \times [H_{1/3}]_F^{0.43} \quad (7)$$

また、

$[H_{1/3}]_D$: うねりの到達波高

$[H_{1/3}]_F$: 浪源のフェッチの端における波高

D : 予測地点と浪源との距離

である。うねりの到達時間 (t_D) は、簡略化された次式から求められる。

$$t_D = \frac{D}{28 \left\{ 2 - \left(\frac{0.4F}{0.4F+D} \right)^{1/2} \right\}^{1/2}} \quad (8)$$

以上のようにして求められた予想波高を作業限界波高 ($H_{1/10}=1m$) と比較することにより、任意の期間の作業可能日及び作業不能日 (荒天日) を予測できる。なお、予測作業にはパーソナル・コンピューターが使用される。ここで誤解を防ぐため述べておくと、予測には総合的な判断が必要なことは申すまでもない。即ち、低気圧の影響、台風の影響、季節風の影響、その他地形的特性等、あらゆる影響を総合的に判断することが必要で、ここで述べた手法は、それらのうち、低気圧による風浪、うねりを取り扱っているのである。第1表に示すような波高分類表は、予測の誤りを防ぐためにも重要である。

第3表 1ヵ月予測と実測（昭和53年4月24日予測作業実施）。

53年5月の予測と実測（単位 cm）八戸港

月日		5/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
		予測波高	60	70	60	80	60	50	50	50	50	50	60	90	60	50	50	50
実測波高	10時	71	67	44	53	44	37	31	50	47	42	50	79	78	66	54	45	57
	14時	64	56	49	54	54	35	37	60	47	42	65	78	85	72	55	47	55
	平均	68	62	47	54	49	36	34	55	47	42	58	79	82	69	55	46	56
当	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	○	
否				×									×	×				
月日		18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	6/1	2	
		予測波高	50	60	60	70	60	60	60	50	50	50	50	50	150	120	70	50
実測波高	10時	62	58	85	84	71	72	82	61	46	51	35	43	110	118	83	45	
	14時	75	68	80	77	69	78	79	65	52	52	34	43	164	80	81	52	
	平均	69	63	83	81	70	75	81	63	49	52	35	43	137	99	82	49	
当	○	○			○	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○	
否			×	×			×									×		

〔註〕 海上作業の実稼動時間帯は0900~1600

4. 精度の検証

この方法の予測精度について、作業可能日予測的中率という面から検討し、また従来の中率と比較してみる。

従来の予測的中率は、年平均で明日予測は82%位、明後日は73%位、1週間は71%位、そして1ヶ月は52%位である。

この方法を週間予測に1年間にわたって適用した結果、的中率が年平均で80.2%であり、予測精度が9.6%向上した（第2表参照）。

また、1ヵ月先までの予測に試行したところ、78.8%であり、予測精度が26.8%向上した（第3表参照）。なお第3表の大きく外れた日、4、12、13、20日の予測について後日調査したところ、これらは低気圧中心と予測地点との相対位置の予測のはずれ、これに伴う沖波波高から現地波高への修正予測のはずれ、によるものであった。

5. おわりに

この論文は、偏西風帯の波動に対応する地上の低気圧の位置と、これに伴う現地波高の予測を取り扱ったものである。また第3節でも述べたように、波浪予測には、低気圧の影響のほか、台風や季節風の影響、その他地形的特性等あらゆる影響を総合的に判断することが必要である。

前述の(1)式から、2ヶ月先位までの谷の通過日、通過する時の位置、その強弱が計算できる。したがって、新しいデータで3回位繰り返し予測して、それらの予測結果を比較することにより、比較的精度の高い好天の期間、悪天の期間を選出できるはずである。

文 献

- 森田 清, 1971: 情報と予測, 共立出版, 158-168.
 佐藤昭二, 合田良實, 1973: 海岸・港湾, 彰国社, 121-122.
 正野重方, 1972: 気象力学, 岩波全書, 252-253.