

波浪推算における入力の特素化と計算時間の短縮化に関する研究

東亜建設工業(株) 正会員 佐見 誠
東京大学 正会員 磯部 雅彦

1 緒言

海岸・港湾構造物の計画・設計・築造や波浪災害の防止・軽減のために、海岸に来襲する波浪を的確に推定する必要がある。このため、世界各国で種々の波浪推算法が開発されてきた。しかし、SWAMP(1984)の研究報告にもあるように、モデルによって計算結果が異なっているのが現状である。

海洋波の推算法は、Sverdrup・Munk(1974)により開発され、Bretschneider や Wilson(1965)等によって改良されたS.M.B法、波浪スペクトルや波浪の統計的性質を導入してPiersonら(1955)が開発したP.N.J法、そして波浪スペクトルの数値予報へと変遷してきた。

波浪スペクトルの数値予報は主としてスペクトル法及びパラメータ法に大別される。前者のスペクトル法は方向スペクトルの時空間変化をエネルギー平衡方程式に基づいて周波数・方向別に計算する方法である。後者のパラメータ法は、発達段階における風波のスペクトルの相似性に注目して、スペクトルを記述するパラメータの時空間変化を計算することにより風波のスペクトルを推定する方法である。スペクトル法は、非線形干渉項をどのように考慮するかにより、DPモデル(decoupled propagation model)とCDモデル(coupled discrete model)の2つに分けられる。前者における一地点法による波浪推算モデルは、逆屈折計算を通して成分波の屈折および浅水変形を容易に考慮でき、これまでにCollins(1972), Cavaleriら(1981)およびDarrasら(1981)により、研究が行なわれている。一方、我が国では、後藤(1988)、山口(1989)によりパソコンレベルによる波浪推算モデルが提案されているが、これらのモデルは深海域の計算であり、浅海域での経路計算は行われない。また、デジタイザーを用いて等圧線を追跡するので、入力データは非常に大きなものになる。

本研究の目的としては、グリーン関数を用いた弾性平板の変位計算式を利用して気圧分布を滑らかに内挿し、Cardoneの式などに基いて風の計算を行うことにより、少ない入力データ数で、かつ風の場の計算精度の高い波浪推算モデルの開発を行うことである。また、あらかじめ作成した表を参照してソース関数を決定する方法により、計算時間の短縮を図る。

なお、気圧内挿後の風の場の計算は、磯崎・宇治(1974)によるMRIモデルでも使っているCardoneの解法を基本にして行なっている。また、エネルギー平衡方程式は海底地形の変化を考慮したものを用いて、一地点法により計算した。

2 風の場の計算

2.1 気圧の内挿法

風の場の計算に必要となる気圧分布の入力は、入力点数を減らすために、天気図(3時間、6時間、12時間おきのものから経路の長さに応じて選ぶ)上の等圧線に表れる変曲点近傍のデータ(緯度・経度・気圧を1組とする)を入力する。地点数は、二つ玉の気圧配置などの場合は40~50点程度、季節風などのような場合には15~20点程度で、この入力データを用いて、弾性平板に対するグリーン関数である式(1)を利用して気圧の内挿を行う。

$$G(x, y; \xi, \eta) = \frac{4D}{\pi^4 ab} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\sin(i\pi x/a) \sin(j\pi y/b) \sin(i\pi \xi/a) \sin(j\pi \eta/b)}{(m^2/a^2 + n^2/b^2)^2} \quad (1)$$

ここで、 a, b : 平板の2辺の長さ、 m, n : 級数の項数の上限値、 (x, y) : 求める点の座標、 (ξ, η) : データの座標、 D : 弾性係数である。

計算時間の短縮のため、逆屈折計算により求められた経路を含む格子網を考え、式(1)を用いて各格子点上の気圧・気圧傾度・気圧の2回微分値を内挿し、経路近傍の格子点から線形近似により経路上の値を求める。

ここで、気圧の内挿に式(1)を使う場合、級数の項数の上限値 m, n の値をより小さくすることが計算時間の短縮に結びつく。このため予備計算を行なって、 $a = b = 1.75$ 、 $m = n = 60$ とした。さらに、格子点の内挿時には、式(1)を (i, j) に関する配列としておくことにより計算時間の短縮を図る。

2.2 風場の計算法

2.1 で述べた内挿により求めた気圧、気温データを用い、Cardone の解法を基礎にして、風場の計算を行う。Cardone の解法を用いて計算を行うには、計算点上での海面気圧、海上気温、海面水温が必要となるが、海面水温のデータは入手が難しく、また精度が低いため、水温データを用いずに計算を行った。このことに伴い、等圧線とのずれを表わす角度 θ' は、高橋(1947)により示された緯度と θ' の関係を用いて決定した。摩擦速度 u_* と 10m 高度での風速 U_{10} との関係は、光易(1984)により導かれた次式を用いた。

$$(u_*/U_{10})^2 = \begin{cases} (0.581 + 0.063 U_{10}) \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 8 \text{ m/s} \\ 1.085 \times 10^{-3} & ; U_{10} \leq 8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 計算結果

海上風の推算は、精度と計算時間を考慮して格子点数を 41×41 とし、気圧の入力データ数は日本海側で 30 点、太平洋側で 50 点とした。気圧分布や風場の計算結果を図-1~5、表-1~2 に示す。図-1 は、日本海側での波浪推算を行なうための気圧の内挿結果で、1989 年 11 月 1 日 3 時の等圧線図である(ただし、等圧線間隔は 2mb である)。

また、この等圧線図上に示した点(1)~(7)での風速を算出し、天気図に示されている風速と比較したものが表-1 である。このときの風速風向図を図-3 に示す。図-2 は、太平洋側での波浪推算を行なうための気圧の内挿結果で 1983 年 2 月 19 日 9 時のものである。表-2 は、この場合の天気図上の風速・風向と計算結果を比較したものである。

図-1、2 ともに天気図の気圧配置と良く一致している。また、表-1、2 には風速・風向について実測値と計算値を比較したものである。これより、風向については良好な一致を示しているが、風速については計算値がやや大きめの値となっている。しかしながら、図-1、2 から分布形状として良好な対応を示していると考えられる。

1989 年 11 月 1 日 (3 時)

		$U_{10}(\text{m/s})$	風向
1	計算値	19.3	N
	実測値	24.5~27.0	SSE
2	計算値	19.9	N
	実測値	9.1~11.5	N
3	計算値	9.8	W
	実測値	6.5~9.0	W
4	計算値	2.7	WNW
	実測値	6.5~9.0	WSW
5	計算値	7.2	W
	実測値	3.9~6.4	W
6	計算値	9.1	WNW
	実測値	3.9~6.4	WNW
7	計算値	25.0	NNE
	実測値	16.8~19.2	NNE

表-1 風速・風向の比較

1983 年 2 月 19 日 (9 時)

		$U_{10}(\text{m/s})$	風向
1	計算値	16.7	NE
	実測値	16.8~19.2	NE
2	計算値	11.6	ESE
	実測値	14.2~16.7	E
3	計算値	16.1	WNW
	実測値	21.9~24.4	W
4	計算値	10.7	WNW
	実測値	6.5~9.0	W
5	計算値	13.3	WNW
	実測値	9.1~11.5	W
6	計算値	11.8	WNW
	実測値	14.2~16.7	WNW
7	計算値	12.8	WSW
	実測値	11.6~14.1	SW

表-2 風速・風向の比較

1983 年 2 月 19 日 (9 時)

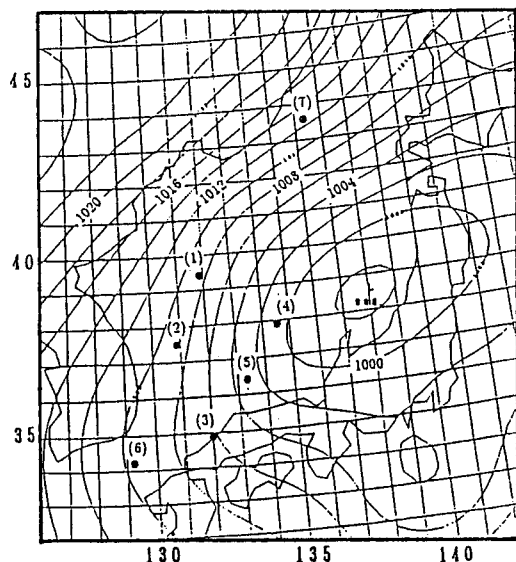


図-1 等圧線図

1989 年 11 月 1 日 (3 時)

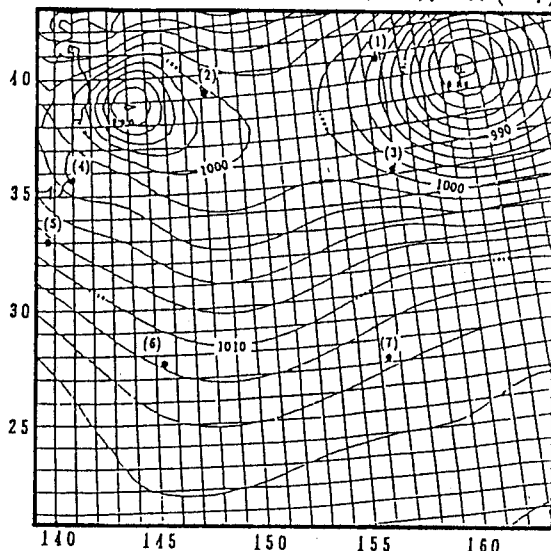


図-2 等圧線図

1983年2月19日(9時)

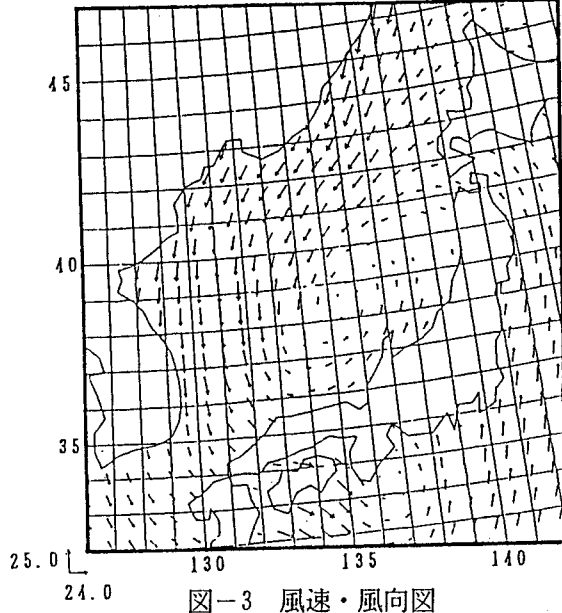


図-3 風速・風向図

1989年11月1日(3時)

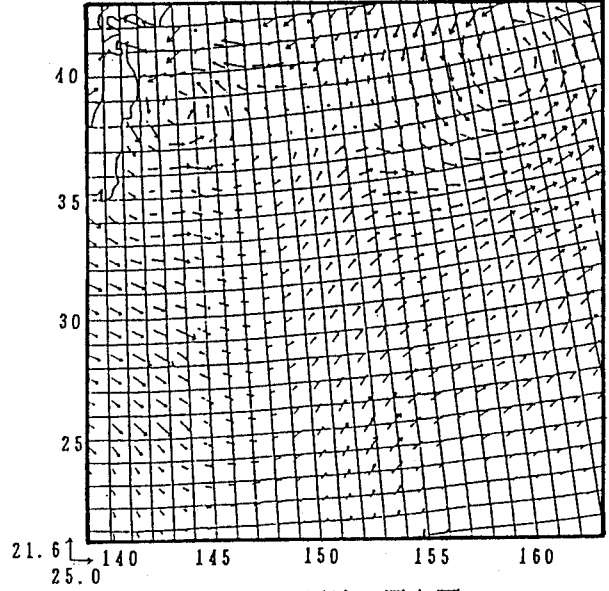


図-4 風速・風向図

図-5は、浜田測候所における風速の実測値と計算値を比較したものである。増加傾向・減少傾向ともに概ね良好な一致を示している。

3 波浪推算モデル

3.1 基礎方程式

浅海波浪推算モデルの基礎方程式は、

$$\frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial t} + C_g \cos \theta \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial y} + C_g \sin \theta \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial y} + \frac{C_g}{C} \left\{ \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial \theta} = CC_g S \quad (3)$$

である。

この計算に用いられるソース関数 S としては、風からのエネルギー流入項、非線形干渉に伴う成分波間のエネルギー伝達項およびエネルギー減衰項により形成される。しかし、本モデルはDPモデルであるから非線形干渉項を正確に取扱うことはできない。したがってソース関数は風からのエネルギー流入項 S_{in} 及びエネルギー減衰項 S_{dis} の和によって表現される。

a) エネルギー流入項: S_{in}

Phillipsによる風波の発生項及びMilesによる風波の発達項から構成されると仮定すれば

$$S_{in} = \alpha + \beta E(f, \theta) \quad (4)$$

と表される。ここで無次元係数 α および β としては、山口(1987)により示された次式を用いた。

$$\alpha = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{9.8 \times 10^{-22} U_{19.5}^{1.75} \sigma^{5.25}}{(\sigma/U_{19.5})^2/4 + (K \sin \phi)^2} \times \frac{1}{(\sigma/U_{19.5})^2/9 + (K \cos \phi - \sigma/U_{19.5})^2} d\phi \cos^5 \phi \quad ; |\phi| \leq \pi/2 \quad (5)$$

$$\beta = 0.3 \left(\frac{u_*}{C} \right)^{1.35} f \exp \{ -2.63 \times 10^{-4} \left(\frac{C}{u_*} \right)^2 \} \exp \{ -0.5 \frac{u_*}{C} \} \cos \phi \quad ; |\phi| \leq \pi/2 \quad (6)$$

b) エネルギー減衰項 S_{dis}

このモデルではエネルギー減衰機構として、発達段階における砕波、うねりに対する疑似粘性、逆風および底面摩擦の4つの要因を考慮する。

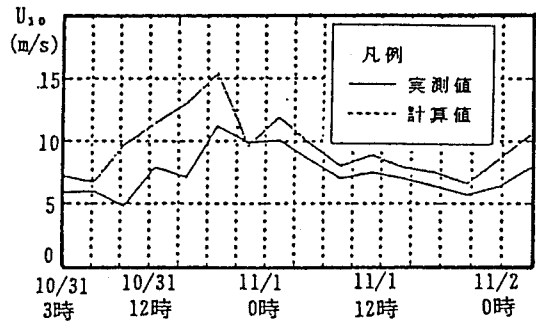


図-5 風速の比較図

1. 砕波によるエネルギー減衰項

砕波によるエネルギー減衰項に対しては、発達過程にある個々の成分波が浅海域での平衡方向スペクトル $E_{\infty}(f, \theta; h)$ より大きいエネルギーを獲得できないと仮定して評価する。また、平衡方向スペクトルは Pierson-Moskowitz(P-M) スペクトル $E_{PM}(f)$ と Thornton の浅海平衡方向スペクトル $E_{TH}(f, h)$ を組み合わせた周波数スペクトル $E_{\infty}(f; h)$ と $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数の積で与える。

$$E_{\infty}(f, \theta; h) = E_{\infty}(f; h)(8/3\pi)\cos^4 \theta \quad ; |\theta| \leq \pi/2 \quad (7)$$

$$E_{\infty}(f; h) = \min\{E_{PM}(f), E_{TH}(f; h)\} \quad (8)$$

$$E_{PM}(f) = 0.0081g^2(2\pi)^{-4}f^{-5}\exp\{-5(f/f_{PM})^{-4}/4\} \quad (9)$$

$$E_{TH}(f; h) = 0.0081g^2(2\pi)^{-4}f^{-5}\tanh^2 kh \quad (10)$$

$$f_{PM} = 0.13g/U_{10} \quad (11)$$

ここで、 $E_{\infty}(f, \theta; h)$: 平衡方向スペクトル、 $E_{PM}(f)$: P-M スペクトル、 $E_{TH}(f; h)$: 浅海平衡スペクトル、 f_{PM} : P-M スペクトルのピーク周波数である。

2. うねりによるエネルギー減衰

順風および逆風状態のうねりがエネルギーを失って減衰する機構は、それぞれ次式を用いる。

$$S_{dis}^{(1)} = -D_d E(f, \theta) - E_{\infty}(f, \theta; h) \quad ; D_d = 0.25(u_*/C)^2 f \quad (12)$$

$$S_{dis}^{(2)} = -\beta E(f, \theta) \quad (13)$$

3. 底面摩擦によるエネルギー減衰

底面摩擦によるエネルギー減衰項は、Janssen ら (1984) によれば、次式で与えられる。

$$S_{dis}^{(3)} = -D_f E(f, \theta) \quad ; D_f = C_f \sigma^2 / (g^2 \sinh^2 kh) \quad (14)$$

ここで C_f は、エネルギー減衰係数を表し、本研究では Janssen ら (1984) の研究と同様に、 $C_f = 0.02m^2/s^2$ としている。

以上の各項を総合すると、本モデルのソース関数は、以下に示す 1.~3. の各状態に対して各々次式のように表される。

1. 順風状態 ($|\theta| \leq \pi/2$) の風波

$$S = \alpha + (\beta - D_f)E(f, \theta) \quad ; E(f, \theta) \leq E_{\infty}(f, \theta; h) \text{ and } |\theta| \leq \pi/2 \quad (15)$$

2. 順風状態 ($|\theta| \leq \pi/2$) でのうねり

$$S = -(D_d + D_f)E(f, \theta) + D_d E_{\infty}(f, \theta; h) \quad ; E(f, \theta) > E_{\infty}(f, \theta; h) \text{ and } |\theta| \leq \pi/2 \quad (16)$$

3. 逆風状態 ($|\theta| > \pi/2$) でのうねり

$$S = -(\beta + D_f)E(f, \theta) \quad ; |\theta| > \pi/2 \quad (17)$$

3.2 数値計算法

3.2.1 逆屈折経路計算法

本研究では、一地点法を用いて計算を行うので各成分波の経路を求める必要がある。経路の求め方としては、各周波数成分、各方向成分において波浪推算点を初期位置として、以下に示す逆屈折計算式を用いて Runge-Kutta 法に基づき計算する。

$$\Delta x / \Delta t = C_g \cos \theta \quad (18)$$

$$\Delta y / \Delta t = C_g \sin \theta \quad (19)$$

$$\Delta \theta / \Delta t = \frac{C_g}{C} \left\{ \sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \quad (20)$$

この場合、特定の経路上の各位値における波向は、屈折によりそれぞれ異なることに注意する必要がある。計算手順としては、以下のようになる。

1. 水深分布の内挿

まず、計算領域の水深分布の内挿を行う。この内挿においては、波浪推算点の周りを小メッシュと大メッシュに分け、各格子点上の水深を与え、これを用いて線形近似する。

太平洋側では小メッシュ領域は、5km 間隔で200km 四方のメッシュで、大メッシュ領域は、20km 間隔で2000km 四方のメッシュである。日本海側では、小メッシュ領域は、10km 間隔で230km×200km、大メッシュ領域が50km 間隔で1200km×950km(日本海全域を網羅する)である。

2. 逆屈折経路の計算

1. で求めた水深分布を用いて各周波数、各方向成分について式(18)~(20)を用いて逆屈折経路の計算を行う。実際の計算では、式(20)を以下に示すような式に直して計算する。

$$\Delta\theta = \frac{C_g}{C} \left\{ \sin\theta \frac{g}{C(\cosh^2 kh + gk/C^2)} \frac{dh}{dx} + \cos\theta \frac{g}{C(\cosh^2 kh + gk/C^2)} \frac{dh}{dy} \right\} \Delta t \quad (21)$$

3. 計算打ち切り条件

1組の方向成分・周波数成分(θ , f)について以下の条件に適合したとき、その逆屈折計算を終えることにする。

- (a) 陸地に届いたとき
- (b) メッシュの領域を越えたとき
- (c) 一定時間を越えたとき(太平洋側85時間、日本海側60時間)

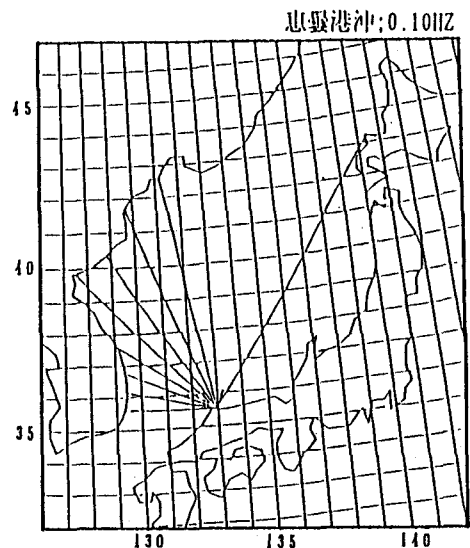


図-6 逆屈折経路図

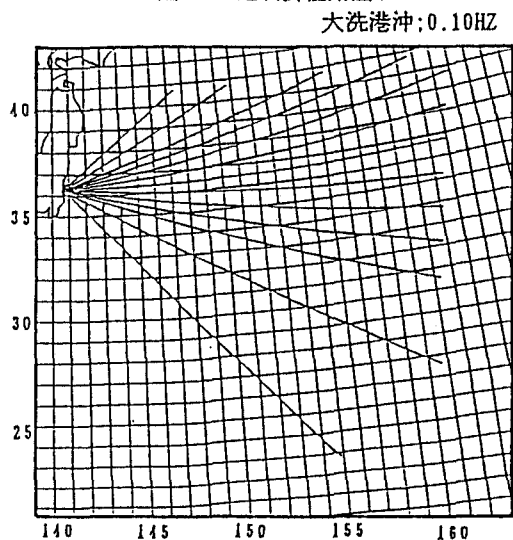


図-7 逆屈折経路図

図-6は、日本海側恵曇港沖における逆屈折経路(周期10秒)を示したものである。北北東側で経路が遮断されているのは、隠岐列島の影響である。図-7は太平洋側で大洗港沖における逆屈折経路を表わしている。

3.2.2 エネルギー平衡方程式の計算

解法としては、時間分割法により式(3)の右辺を0とした移流伝播方程式と移流伝播項を0とした発達減衰式の2つに分割し、1ステップ内でそれぞれを交互に解く近似的解法を用いる。

$$\frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial t} + C_g \cos\theta \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial x} + C_g \sin\theta \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial y} + \frac{C_g}{C} \left\{ \sin\theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos\theta \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial CC_g E(f, \theta)}{\partial t} = CC_g S \quad (23)$$

しかし、実際には本モデルが特性曲線法を用いていることから、式(23)の計算だけを行えば良いことになる。発達・減衰計算は、逆屈折計算により求められた経路上において、式(23)を用いて計算を進める。

3.2.3 諸特性の計算

波浪推算点における平均波の諸特性は、周波数スペクトルから次式を用いて求める。

$$E(f) = \int_{-\pi}^{\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (24)$$

$$\epsilon = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (25)$$

$$H_{1/3} = 4\sqrt{\epsilon} \quad (26)$$

$$T_{1/3} = 1.22 \sqrt{\varepsilon / \int_0^\infty f^2 E(f) df} \quad (27)$$

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi E(f, \theta) \sin \theta d\theta df}{\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi E(f, \theta) \cos \theta d\theta df} \right\} \quad (28)$$

ここで、 ε :全エネルギー、 $H_{1/3}$:有義波高、 $T_{1/3}$:有義波周期、 $\bar{\theta}$:平均波向である。

4 推算結果

今回は、太平洋側における計算例として大洗港沖における波浪推算を、また、日本海側における計算例として、恵曇港沖における波浪推算を行った。図-8に大洗港沖の波浪推算結果における有義波高・有義波周期の経時変化を実測結果と比較したものである。波高については計算による増加開始点を実測よりも遅く、その傾き(発達程度を表す)は大きい。また、ピークを過ぎてからの減少傾向も両者に差が見られる。これは、低気圧が停滞して二つ玉などの複雑な気圧分布をしたときの内挿の精度が悪いためと思われる。しかしながら、ピーク地点での値は概ね一致している。周期については、あまり良好な一致を示さない。図-9は、日本海側の計算例として恵曇港における波浪推算結果を示したものである。波高についてはピーク時付近で概ね一致している。また、周期についても、概ね一致している。

5 結語

本研究の結果をまとめると以下の通りである。

- ・気圧の内挿は、グリーン関数による変位計算式を用いることにより、少ない入力データ数で精度良く行える。
- ・風場の計算はCardoneの解法を使うことにより、従来の方法に比べて計算精度が上がる。
- ・エネルギー平衡方程式中において、式(6)で示される発達係数 β を用いると、波の発達が多少早すぎるようである。
- ・計算時間は表計算を用いることにより大きく短縮できる。

今後の課題としては、以下のようなことが挙げられる。

推算精度を向上させるためには、

- ・二つ玉の気圧配置のように内挿が難しい場合に、風の計算精度を向上させる。
- ・波浪計算に用いる発達係数としては、より現地に近い、緩やかな波の発達速度をもったものが望まれる。

また、計算時間についてより一層の短縮を図るためには、

- ・経路の長さを適切に決定する。
- ・波の計算において、影響が少ないと考えられる周波数および波向成分の計算を省略する。
- ・逆屈折計算は浅海域のみについて行い、深海域については補間で行う。

などが考えられる。

参考文献

- 磯崎一郎・宇治素:海上風数値モデルの波浪予測への応用, 気象研究所報告, 第25巻, 第3号, pp. 197~231, 1974.
 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博:一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 151~160, 1987.
 山口正隆:波浪推算法とその適用性, 1985年度(第21回) 水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, Bコース, B-2-1~20, 1985.
 山口正隆・畑田佳男・日野幹雄・早川淳:波の方向性を考慮した新しいパラメータ波浪推算モデルの適用性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 227~231, 1988.
 後藤智明・小舟浩治:現地でも簡単に出来る波浪推算法について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 222~226, 1988.

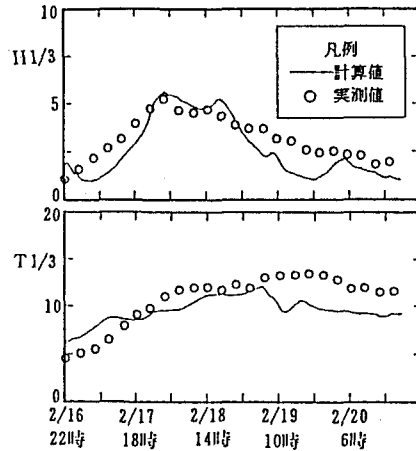


図-8 計算例(太平洋側)

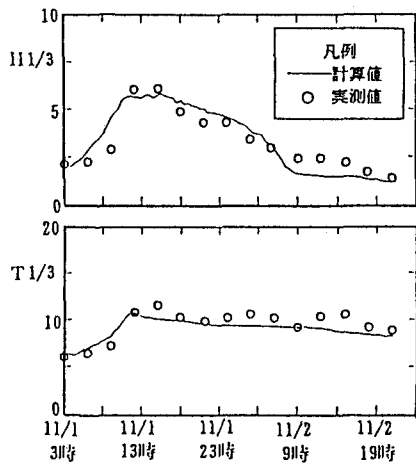


図-9 計算例(日本海側)