

現地で簡単にできる波浪推算法について

後 藤 智 明*・小 舟 浩 治**

1. はじめに

現在、波浪推算は、波浪による港湾災害の究明および港湾構造物の設計波浪の算定などの目的で行なわれている。その他に、波浪推算が適用可能なものとしては、港湾工事の工程管理のための波浪予測や波浪観測結果の補完などが考えられる。このような波浪予測、観測値の補完を目的とした推算では、精度の向上のため観測値で推算値を補正しつつ計算を実施していくことを考えなければならない。したがって、現場または観測点ごとに異なった計算を実施する必要がある。しかしながら、現状では、比較的容易に計算できる手法が開発されておらず、従来の推算システムを用いると経費が多くかかるなどの問題が残されていた。そこで著者らは、工事現場または観測担当事務所等で比較的簡便に波浪の推算が可能なシステムについて研究している。

本論文では、一連の研究の手始めとして、パーソナルコンピュータ程度の計算機を対象とした波浪推算法について検討した結果を報告する。

ここで提案する推算手法は、スペクトル法とパラメタ法の2種類である。波浪の発達・伝播過程のモデル化としては、スペクトル法が磯崎・宇治りが開発したMRI法を修正したものであり、パラメタ法がWilsonの発達式をエネルギー平衡方程式に組み入れたものである。両者ともに、山口ら²⁾が一点法と名付けている方法、すなわち計算対象地点に到達する各成分波の波向線上における計算を通し対象地点の波浪の経時変化を求める形式を採用している。また、計算の高速化をはかるための方法としては、計算に必要な種々の関数をあらかじめ数表として計算機に記憶する方法を用いている。

計算精度に関する検討では、強風域が推算地点上を通過する場合および100 km程度東西にずれる場合の3種類の台風による波浪について、実測値と計算値の比較を行なっている。

2. 波浪推算法

(1) スペクトル法

現在、提案されているスペクトル法による波浪推算モデルとしては、わが国で開発されたものに限定しても、井上、MRI、MRI-II、山口・土屋、東北の合計5種類のモデルがある。本研究では、気象庁の波浪予測業務または港湾施設の設計波の算定に長年利用されてきたという実績があるという理由からMRI法を選び、山口らの言う一点型のモデルに修正する。

図-1に示したように任意の一地点へ襲来する波浪の波向線に一致する座標系を採ると、波浪スペクトル S の発達・減衰・伝播を表す方程式は

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_g \frac{\partial S}{\partial s} = F \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここに、 C_g は群速度を意味し、 F は外力項である。外力項は、波向と風向のなす角 θ と平衡スペクトル S_{PM} との関係から

$$F = \begin{cases} (A+BS)[1 - \{S/S_{PM}\}^2]\lambda(\theta) & S < 1.414S_{PM}, \quad \theta < \pi/2 \\ -(Df)^4 S & S > 1.414S_{PM}, \quad \theta < \pi/2 \\ -\{B\lambda(\theta) + (Df)^4\} S & \theta > \pi/2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と記述される。ここに、 A, B は井上³⁾の定式化した発達係数、 D は減衰係数、 f は成分波の周波数、 $\lambda(\theta)$ は方向分布関数である。また、平衡スペクトル S_{PM} とし

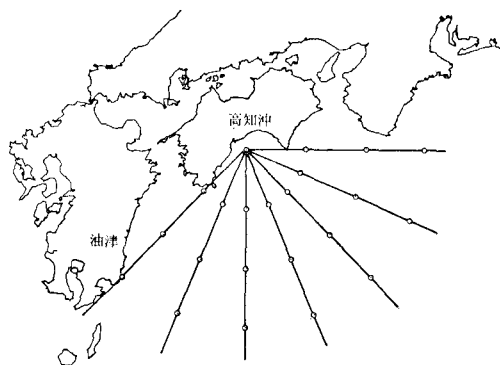


図-1 計算格子

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部主任研究官

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海象調査研究室長

ては Pierson-Moskowitz スペクトルを仮定している。

式 (1) に基づく伝播計算には、演算速度が速いことおよび方向・周波数の離散化が比較的粗いときに高精度なスキームを用いるとエネルギーの集中化をもたらす場合がある⁴⁾ことから風上差分を用いている。

以上の説明で明かなように、外力項の定式化は従来の MRI 法と同じであり、特にパーソナルコンピュータの利用を前提とした顕著な修正を行っていない。ただし、後述のように従来のものに比べ大幅に演算時間を短縮できた理由は、一点法を採用することにより計算点数を少なくしたこと、発達・減衰の過程の計算に必要な種々の関数を全て離散化し、データ化して取り扱い手法を採用したことによる。

(2) パラメタ法

スペクトル法に比べ演算時間が短いと思われるひとつの方法にパラメタ法がある。通常のパラメタ法は風波のスペクトル形に関して何らかの相似性を仮定し、その少数のパラメタの発達・減衰を追跡するものである。

ここでは、先に述べた一点型の MRI 法に比べうねりに関する計算精度が劣るものの演算速度が速いパラメタ法による新しい推算法について述べる。この推算法は、Wilson の式を変形したものをエネルギー平衡方程式の外力項として用いていたものであり、井島、堀川らにより開発された有義波法に近い計算手法である。

波浪の発達に関する Wilson の式は、無次元波高、無次元群速度、無次元フェッチをそれぞれ H_* 、 C_* 、 F_* とおくと、

$$H_* = 0.30[1 - (1 + 0.004F_*^{1/2})^{-2}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_* = 0.685[1 - (1 + 0.008F_*^{1/3})^{-5}] \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表される。ここに、 $H_{1/3}$ 、 C_g 、 U 、 F をそれぞれ有義波高、有義波周期に対応する群速度、風速、フェッチとし、重力加速度を g とすると、 $H_* = gH_{1/3}/U^2$ 、 $C_* = C_g/U$ 、 $F_* = gF/U^2$ である。

いま、波浪の無次元エネルギーを $E_* = H_*^3/16$ ($E = H_{1/3}^3/16$) と定義し、さらに風向きによる波浪の発達状況を規定するものとして方向分布関数 $\lambda(\theta)$ を導入し、式 (3) をフェッチの変化による波浪エネルギーの増分を表するものに書き換えると

$$\frac{dE_*}{dF_*} = a_1 \frac{[1 - \tilde{E}_*]^3}{[1 - (1 - \tilde{E}_*)^{1/2}]} \tilde{E}_* \lambda(\theta) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。一方、群速度に関しては、風向きによらず発達するものと仮定して、同様な書き換えをすると

$$\frac{dC_*}{dF_*} = a_2 \frac{[1 - \tilde{C}_*]^{8/5}}{[1 - (1 - \tilde{C}_*)^{1/5}]} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに、 $a_1 = 1.80 \times 10^{-7}$ 、 $a_2 = 5.85 \times 10^{-7}$ 、 $\tilde{E}_* = [177.8E_*/\lambda(\theta)]^{1/2}$ 、 $\tilde{C}_* = 1.46C_*$ である。

さらに、式 (5)、(6) に $d/dt = dF/dt \cdot d/dF$ の関係を用いると、Wilson の発達式は次式で表される。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + C_g \frac{\partial E}{\partial s} = a_1 \frac{[1 - \tilde{E}_*]^3}{[1 - (1 - \tilde{E}_*)^{1/2}]} \left[\frac{C_g U^2 \tilde{E}_* \lambda(\theta)}{g} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} + C_g \frac{\partial C_g}{\partial s} = a_2 \frac{[1 - \tilde{C}_*]^{8/5}}{[1 - (1 - \tilde{C}_*)^{1/5}]} \left[\frac{g C_g}{U} \right] \quad \dots\dots\dots (8)$$

この式 (7)、(8) がパラメタ法の基礎式となる。

風波の発達の限界は、 E_* または C_* が 1 以上になった時点、すなわち F_* が有限値とならない時で、この場合は全てのエネルギーが風波からうねりへ移行するものとする。うねりになった波浪は次式で減衰するものとする。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + C_g \frac{\partial E}{\partial s} = -D'[gE/C_g] \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} + C_g \frac{\partial C_g}{\partial s} = D''g \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 D' および D'' は係数で Bretschneider のうねりの減衰式に見合うようにそれぞれ 0.9×10^{-2} および 0.8×10^{-2} と定めている。

以上のように計算されるパラメタ法は、周波数を 20 成分程度分割し計算するスペクトル法に比べ、2 個のパラメタの変化を追跡するため、原理的には 1/10 程度の時間で計算が可能であると推定できる。

3. 推算結果

(1) 計算法の違いによる推算結果の差

ここでは、台風 8013 号の襲来に伴う高知沖の推算例を用いて計算法の違いによる推算結果の差を調べる。

図-2 に示した経路図で明かなように、この例は、推算地点の真上を台風の強風域が通過している場合である。

検討した推算ケースを表-1 に示す。表には、計算条件および最大有義波出現時の推算波高と周期について実測値との比で定義した推算精度が記載されている。ま

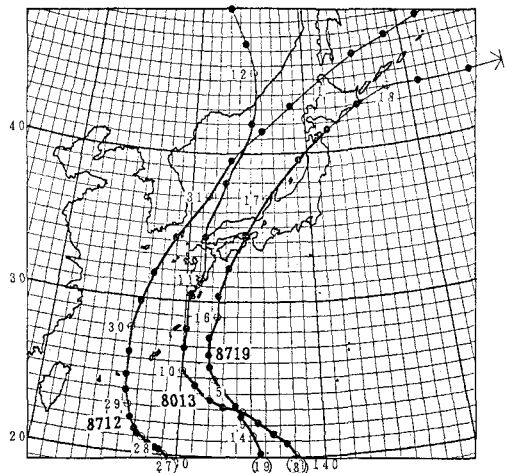


図-2 台風の経路

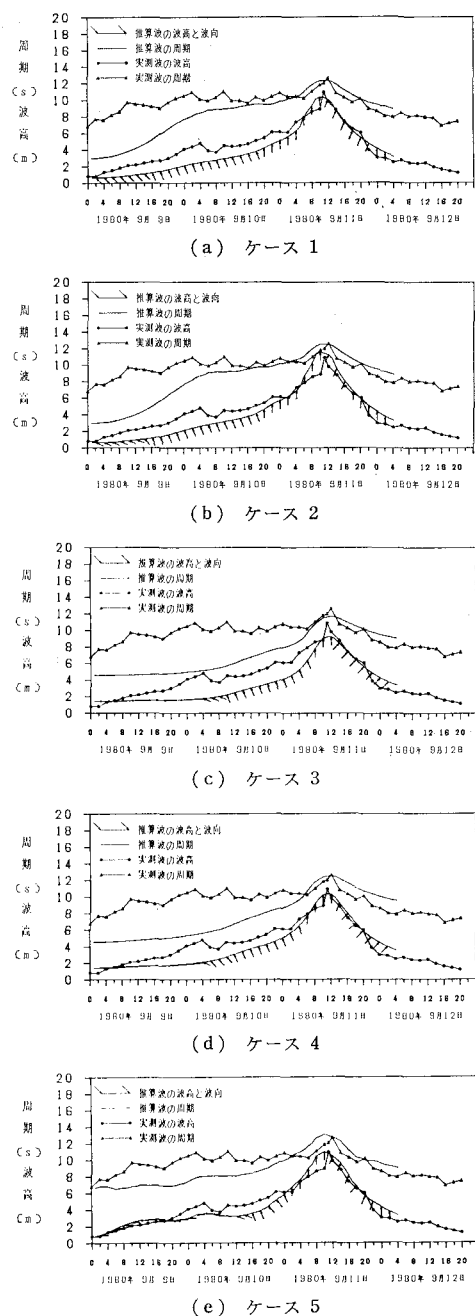


図-3 計算例(その1, 台風8013号, 高知沖)

た, ケース 1~5 に関して推算有義波の経時変化を実測値と比較したものが図-3である。

表-1 に示した推算ケースのうちケース 1~4 は, 格子幅 Δs , 周波数分割幅 Δf , 方向分割幅 $\Delta \theta$ をそれぞれ 100 km, 0.01 Hz, 22.5° に固定して, 推算モデルを変えた場合の例である。波モデルの SMRI および SLTP は, 本論文で提案した一点型のスペクトル法およびパラメタ法をそれぞれ意味する。また, 方向分布関数の違い

表-1 推算ケース(台風8013号, 高知沖)

ケース	推算モデル	ΔS (km)	Δf (Hz)	$\Delta \theta$ (度)	方向分布関数形	推算値の精度	
						波高	周期
1	SMRI	100	0.01	22.5	$\cos^2 \theta$	0.95	1.03
2	SMRI	100	0.01	22.5	$\cos^4 \theta$	1.06	1.04
3	SLTP	100	—	22.5	$\cos^2 \theta$	0.86	1.03
4	SLTP	100	—	22.5	$\cos^4 \theta$	0.95	1.04
5	MRI	100	0.01	22.5	$\cos^2 \theta$	1.00	1.09
6	SMRI	50	0.01	22.5	$\cos^2 \theta$	0.94	1.01
7	SMRI	200	0.01	22.5	$\cos^2 \theta$	0.93	1.01
8	SMRI	100	0.005	22.5	$\cos^2 \theta$	1.05	1.04
9	SMRI	100	0.01	11.25	$\cos^2 \theta$	0.91	0.98
10	SLTP	200	—	22.5	$\cos^4 \theta$	0.89	0.98
11	SLTP	100	—	11.25	$\cos^4 \theta$	0.99	1.02
12	SMRI	100	0.01	22.5	$\cos^2 \theta$	0.96	1.05

による推算結果の差についても検討しており, 方向分布関数形として $\cos^2 \theta$ 則および $\cos^4 \theta$ 則の2種類を比較している。なお, 風モデルとしては, 藤田の台風モデルを用いている。

ケース 5 の MRI は, 面的に推算する従来型の推算であり, この場合の風推算モデルは Cardon の方法を用いたものである。

表および図から, SMRI 法, SLTP 法ともに, 面的に波浪を推算する MRI 法に比べ遜色ない結果が得られ, かつ実測値と比較的良好な一致を示すことがわかる。ただし, 有義波の立ち上がりの部分の周期は SLTP 法の結果が実測値に比べて著しく小さく, うねりの取り扱いに関しては何らかの修正が必要とする。また, 方向分布関数として $\cos^4 \theta$ 則を選ぶと $\cos^2 \theta$ 則に比べ有義波高が SMRI 法, SLTP 法ともに多少大きめの結果となる傾向も読み取れる。

最大有義波高出現時の周波数スペクトル形について, 実測値と SMRI 法の推算値を比較したものが図-4である。推算値が実測値に比べ低周波側に多少ずれるが,

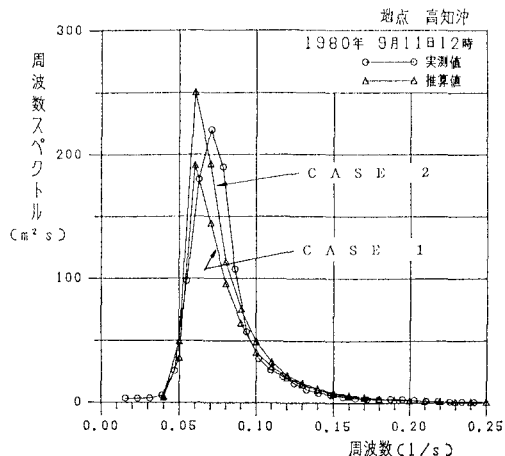
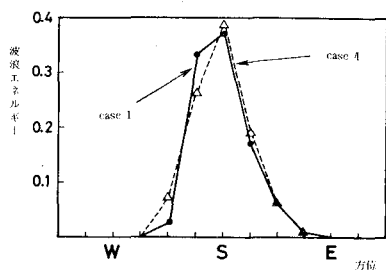


図-4 周波数スペクトルに関する比較



図—5 方向別波浪エネルギーに関する比較

良好な一致を示していると考えられる。図—5 は最大有義波高出現時の波浪エネルギーの方向別割合について SMRI 法と SLTP 法の 2 種類の推算結果を比較したものである。若干の差があるが良好な一致がみられる。

ケース 6～11 は、台風 8013 号の高知沖の推算に関して、方向分布関数を SMRI 法が $\cos^2 \theta$ 則とし、SLTP 法が $\cos^4 \theta$ 則に固定して Δs , Δf , $\Delta \theta$ を変化させた場合の比較である。SMRI 法では、 Δf を細かくした方が大きめの推算値となり、 $\Delta \theta$ を細かくすると逆に小さめの結果となることがわかる。 $\Delta \theta$ を細かくすると推算結果が小さくなることは、一見奇異に思われるが、これは $\Delta \theta$ が細かくなると推算点に向かう計算 ray と方向が一致する場合が少なくなり、MRI 法では、風向きが変化すると元の風向き成分の波浪エネルギーが急に小さく評価されるからである。 Δs の変化に関しては、 $\Delta s=100$ km のケース 1 が 50 km および 200 km に比べ良好な結果となる。これは、格子を細かくすると計算の安定性から時間間隔を同時に細かくする必要があり、時間間隔を細かくすると最大風速の作用時間を短く評価することになったり、また格子が粗いと最大風速出現地点を取りこぼすことが大きな理由である。SLTP 法についても SMRI 法と同様なことが言える。ただし、 $\Delta \theta$ を細かくした場合は、SMRI 法の結果と逆に大きめの推算結果となる。これは、先に述べた MRI 法に比べ風向きの変化が急に推算結果に作用しない方法が採られているためである。

以上の推算ケースの中で代表的な、ケース 1, 4, 5 について演算速度の比較したものが表—2 である。使用した計算機は、パーソナルコンピュータの NEC PC 9801 VX と東芝 J3100SGT および汎用大型計算機 NEC ACOS1000 である。NEC PC9801 VX は日本全国に普

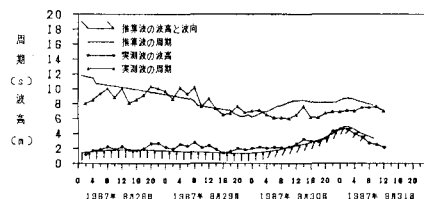
表—2 演算時間の比較

ケース	推算モデル	NEC PC9801VX	東芝 J3100SGT	NEC ACOS1000
1	SMRI	427 s	127 s	5 s
4	SLTP	80 s	30 s	3 s
5	MRI			563 s
12	SMRI	2632 s		21 s

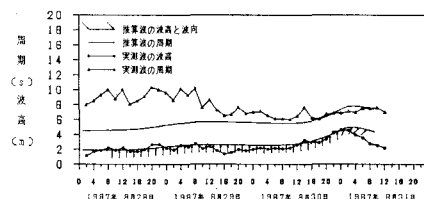
及している 16 ビットの計算機で、東芝 J3100SGT は最近開発されたラップトップ型の 32 ビットのものである。演算時間の比較は、風計算を含め約 5 日分（時間ステップ 126）の計算を実施した場合である。通常の 16 ビットの計算機を用いても、ここで提案した一点型の 2 種類の推算法は SMRI 法で約 7 分、SLTP 法で 1 分強と非常に短時間で実施でき、先に述べた波浪予測または観測結果の補完のための道具としては将来性のある手法であると考えることができる。また、表では、ケース 12 として SMRI 法で計算に用いる各種関数をデータ化せず、推算計算の各段階でその都度計算する手法を採った場合のものとの比較もなされている。この場合は、ケース 1 に比べ推算結果が 1～2% 程度大きくなるが、演算時間は約 6 倍となる。

(2) 他地点への適用例

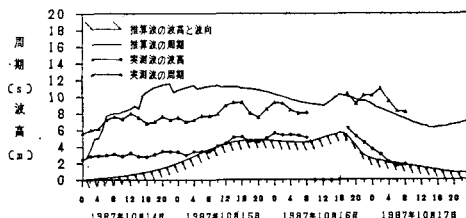
台風 8712 号、8719 号の来襲に伴う油津の波浪推算を



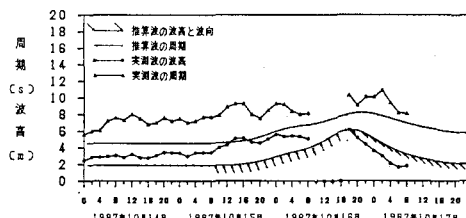
(a) 台風 8712 号, SMRI 法)



(b) 台風 8712 号, SLTP 法)



(c) 台風 8719 号, SMRI 法)



(d) 台風 8719 号, SLTP 法)

図—6 計算例 (その 2, 台風 8712, 8719 号, 油津)

実施し、有義波の経時変化について実測値と比較したものが図-6である。台風8712号の強風域は図-2の経路図で明らかなように推算地点の西方を通過し、台風8719号は東方を通過している。どちらの台風も波向は異なるが、うねりが推算点に到達し、その後風波が来襲した例である。

計算法としては、SMRI法が $\Delta s=100\text{ km}$, $\Delta f=0.01$, $\Delta\theta=22.5^\circ$, $\cos^2\theta$ 則を用い、SLTP法が同じ離散幅の $\cos^4\theta$ 則である。風計算には、Myersの方法を採用している。

図から、SMRI法による結果は周期的に多少難があるものの波高の再現精度がよく、現場で簡単にできる推算手法としては比較的良好な精度を有するものと考えられる。一方、SLTP法については、うねり性の波浪の周期を非常に小さく評価した結果となっている。先に述べたように、今後何らかの修正が必要である。

4. 結 論

本研究では、パーソナルコンピュータを対象とした2種類の推算法を提案し、推算精度の検討を行なった。得られた主要な結論を挙げると以下ようになる。

- ① 磯崎・宇治が開発したスペクトル法による波浪推算手法を一点法に容易に修正ができる。
- ② 新たに提案したパラメタ法の計算は、発達式にWilson式、うねりにBretschneider式を用いているため、有義波法に近い計算結果を与える。ただし、有義波法はLagrange風に波浪を追跡するのに比べ、この方法は波向線に沿った波浪を追跡するため波向別の波浪エネルギーを計算できるという特徴を有する。
- ③ 計算の高速化に関しては、計算に必要な種々の関数

をあらかじめ数表として計算機に記憶する方法を採用すると演算時間を大幅に短縮することができる。

- ④ パーソナルコンピュータ(NEC PC9801 VX)を用いて試算した結果、5日分の計算を台風モデルによる風場計算を合わせてスペクトル法が450秒、パラメタ法が80秒で計算が終了した。したがって、本研究で提案した2種類の波浪推算法は現地で比較的容易に演算可能な方法ということができる。
- ⑤ スペクトル法およびパラメタ法を用いた計算結果は、うねり性の波浪に関しては精度が劣るものの、波高は実測値によく合致し、従来の面的に計算するものに比べ実用上遜色のない計算が可能であることが明らかとなった。

謝 辞: 本研究を実施するにあたり、港湾技術研究所海象調査研究室末次広見研究員、気象協会関西本部森田務氏および沿岸海洋株式会社青木克己氏の助力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Isozaki, I. and T. Uji: Numerical prediction of ocean wind waves, Papers in Met. and Geophys., Vol. 23 (4), pp. 347~359, 1973.
- 2) 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.
- 3) Inoue, T.: On the generation of the spectrum of a wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanisms and its application to wave forecasting, Dept. of Met. and Oceanogr., New York Univ., TR-67-5, 74 p., 1967.
- 4) 後藤智明・小舟浩治・佐藤勝弘: 波浪スペクトルの伝播に関する計算誤差の検討, 土木学会論文集(印刷中)