

大水深波浪観測データによる波浪推算法の検証

永井紀彦*・冷水康悦**・後藤智明***

1. はじめに

波浪推算は、港湾・海洋構造物の設計波の算定にあたって不可欠なものとなっている。このため、推算結果の信頼性を現地観測データと比較検証することは、極めて重要である。しかしながら、従来の波浪観測は、浅水変形を受けた後の比較的浅い水深における観測地点のものが多く、また、波高観測だけが行われているものが多かった。したがって、波浪推算結果の検証資料として利用できる大水深海域で観測された波浪の周波数および方向スペクトルのデータは、ほとんどないのが実状であった。本報告は、運輸省第二港湾建設局によって取得されたいわき沖 154 m 水深における波浪データおよび周波数、方向スペクトルを用いて、波浪推算モデルを検証したものである。

2. いわき沖波浪観測システムの概要

図-1 は、いわき沖波浪観測システムの位置を示したものである。天然ガス開発用のプラットフォームの脚を利用した4台のステップ式波高計と、超音波式流速計(水平方向2成分)および水圧式波高計、あわせて7CHの波浪データが同時記録され、方向スペクトル解析が可能なシステムとなっている。データは、無線テレメータにより42 km離れた広野中継局に送信され、そこから有線テレメータにより、第二港湾建設局小名浜港工事事務所内の監視局に送られる。観測は2時間毎に行われ、0.5 s 間隔で20分間の各チャンネルのデータをA/D変換し、事務所内のミニコンおよび港湾技術研究所の大型計算機でデータ解析を行っている。

3. 波浪推算モデル

実用的な波浪推算モデルは、有義波法とスペクトル法に、大きく区分される。スペクトル法は、さらに成分波法(DP)およびハブリッドパラメータ法(CH)に区

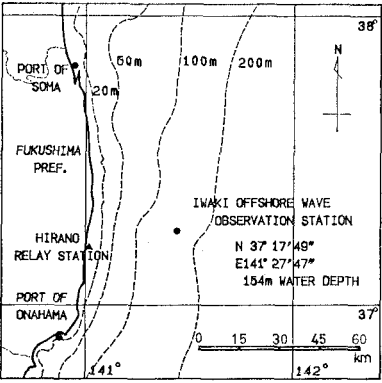


図-1 いわき沖位置図

分される。DP法としては、井上モデル(1967)、MRIモデル(Isozaki, 1973)、山口・土屋モデル(1979)などがある。CH法としては、TOHOKUモデル(Joseph, 1981)、MRI-2モデル(Uji, 1984)、ドルフィンモデル(山口, 1986)などが提案されている。

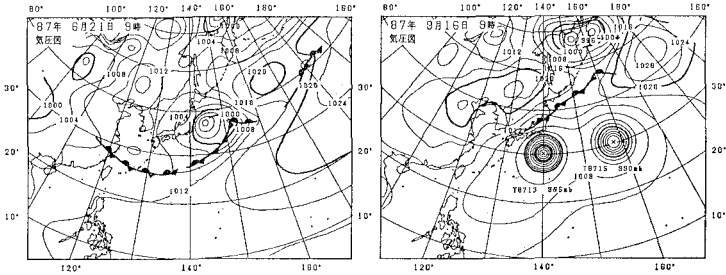
波浪推算の結果は、波推算モデル以上に、その前提となる風の計算結果によって大きく異なったものとなることが知られている。従来の風の計算は傾度風モデルによるものが多かったが、大気の安定度の影響を考え鉛直方向の風速変化を考慮したCardoneモデル(Cardone, 1969; 磯崎, 1974)、さらに台風の影響を別に考慮し計算精度向上をねらったハイブリッドモデル(日本気象協会, 1987, 1988)などといった新しいモデルも開発されている。

本報告では、波推算モデルとしては有義波法(井島, 1967)とスペクトル法(緯度経度座標を用いた改良MRIモデル)の2種類を、風推算モデルとしては傾度風モデル、Cardoneモデルおよびハブリッドモデルの3種類の比較検討をおこなった。

4. 検討対象とした気象擾乱

波浪推算モデルの検証に用いた2種類の擾乱に関する気象概要を図-2に示す。(1)の擾乱は、1987年6月19

* 正員 前運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長(運輸省港湾技術研究所海洋水理部主任研究官)
** 正員 工修 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所調査課
*** 正員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部海洋エネルギー利用研究室長



(1) 前線を伴った低気圧 (2) 台風の通過

図-2 検討対象とした気象擾乱

日から21日にかけて前線を伴う低気圧が本州東岸を通過したものである。(2)の擾乱は、1987年9月16日から18日にかけて台風13号および15号が通過したものである。

5. 計算条件

波浪推算は、気象図(気圧、気温、水温)の線情報への数値化、線情報から格子情報への空間的補間、6時間毎(水温は10日毎)のデータの時間内挿(ここでは1時間間隔とした)、風の場の計算、波の場の計算といったステップを経て行われる。

気象図の数値化にあたってはデジタイザーを用い、等圧線と等温線の読み取りは、それぞれ2-4mb、2-4°C間隔で緯度経度座標に数値化した。格子点値への空間的補間にあたっては、最小エネルギーの原理に基づくスプライン補間を用いた。図-3に示すように、北緯15度から65度、東経110度から175度の範囲を1度メッシュの格子に分割し、格子点の気圧と温度を求めた。データの時間内挿は、線型補間法を用いた。

表-1は計算ケースを示したものである。風推算と波推算はそれぞれ独立であるため他の組合せも可能であるが、ここでは風推算各モデルの比較および有義波法とスペクトル法との比較に主眼を置いてケースを選定した。

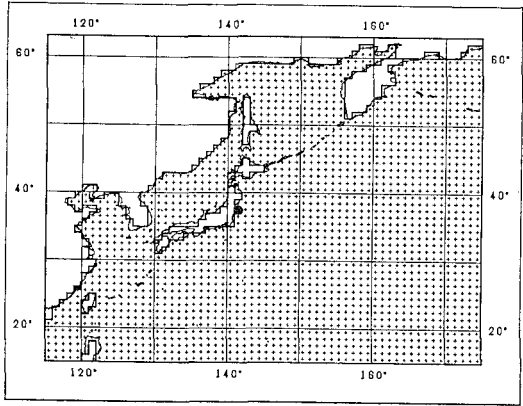


図-3 波浪推算計算格子図

6. 前線を伴った低気圧に関する波浪推算

(1) 有義波法とスペクトル法の比較

表-2は、表-1に示すケース1から3までの推算結果と実測値を比較したものであり、各ケースとも有義波高が最大となる時刻の風速、風向、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ および発生時刻を示している。表中の実測風は、いわき沖プラットフォーム上(D.L. 42m)で測定されたものである。

図-4は、 $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の経時変化について実測値と比較したものである。傾度風モデルで風を推算したケース2とCardoneモデルで風を推算したケース3の計算結果は、表-2に示したように近い結果を得たため、図中には、スペクトル法の値としてケース3の値だけを示している。

実測 $H_{1/3}$ は、6月21日8:00に5.35mを示しているが推算結果は各ケースに共通して実測結果より小さい値となっている。特に、ケース1の有義波法による $H_{1/3}$ の推算値は3.17mとかなり小さい値となることが注目されるが、これは、有義波法ではうねりを精度よく表現することができないためであると考えられる。ケース1と2の風推算は共通であるが、表中の値が異なっているのは、発生時刻の違いによるものである。

(2) 周波数と方向スペクトルの比較

図-5は、ピーク波高時の周波数スペクトル(ケース3)を実測値と比較したものである。棒グラフが推算値を示している(推算における周波数成分は、0.04Hzか

表-1 計算ケース

No.	擾乱	風計算モデル	波計算モデル
1	1987.6	傾度風	有義波法
2	1987.6	傾度風	スペクトル法
3	1987.6	Cardone	スペクトル法
4	1987.9	傾度風	有義波法
5	1987.9	傾度風	スペクトル法
6	1987.9	Cardone	スペクトル法
7	1987.9	ハイブリッド	スペクトル法

表-2 有義波最大時の風速・波浪

ケース	$U_{10.5}$ (m/s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	発生時刻
実測	10.0 (NW)	5.35	9.70	6.21 8:00
No.1	10.0 (E47°N)	3.17	7.10	6.21 3:00
No.2	17.0 (E25°N)	5.12	9.48	6.20 21:00
No.3	16.0 (E26°N)	4.84	9.28	6.20 21:00

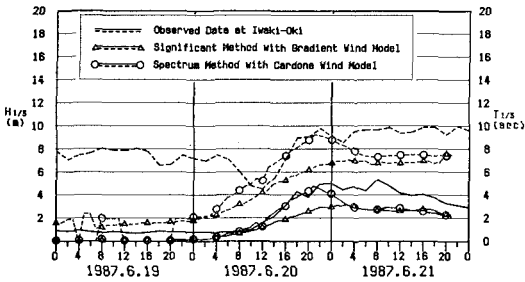


図-4 有義波高・周期の経時変化(6月)

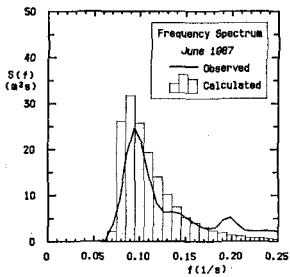


図-5 周波数スペクトル

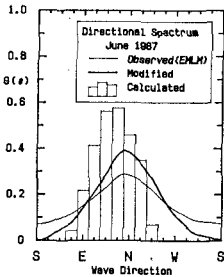


図-6 方向分布形

ら 0.25 Hz までの周波数帯を 0.01 Hz 毎に分割している。)が、実測値と推算値は比較的よい一致を示している。なお、実測値の 0.20 Hz 付近に小さなピークが見られるが、観測精度上の問題なのか、実態的なピークであるのかは、不明である。

図-6 は、方向分布形の比較である。細線の実測値は EMLM 法によって計算された値であり、EMLM 法は一般に方向集中度を小さめに評価することが知られているので、実線でその修正値を示している。すなわち、もっともエネルギーの小さい方向の値がゼロになるように細線のグラフを下にシフトさせ、全面積が等しくなるように一定の補正係数を全体に乗じた。それでも、推算値は実測値よりも方向集中度が大きくなっていることがわかる。

7. 台風の通過に関する波浪推算

(1) 風計算モデルの比較

図-7 (1), (2), (3) は、風計算結果を比較したものである。傾度風モデルと Cardone モデルの計算結果は、よく似た結果となっている。一方、ハイブリッドモデルでは、台風を中心付近で若干風速が大きくなっているようである。

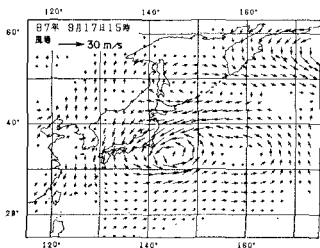
(2) 有義波法とスペクトル法の比較

表-3 は、表-2 と同様に、表-1 に示すケース 4-7 の結果を取りまとめたものであり、図-8 は、図-4 と同様に $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の経時変化を示したものである。実測 $H_{1/3}$ は、9月13日 8:00 に 8.28 m を示しているが、推算結果はケース 7 を除いては、実測値よりも小さくなっている。特に、ケース 4 の有義波法では、 $H_{1/3}$ が 4.41 m しか出ておらず、実測値の半分程度の値に留まっている。スペクトル法では、有義波法よりは $H_{1/3}$ は大きくなっているものの、ケース 5 と 6 では、実測値よりも 1.5 m 程度小さい値となり、実測値との差は表-2 よりも大きくなっている。Cardone モデルで計算された風速は、傾度風モデルよりわずかに小さい値を示し、そのため推算波高も若干小さめになる傾向は、表-2 と共通している。ハイブリッドモデルでは、台風の影響が別に評価されているため、実測に近い $H_{1/3}$ が計算されているが、 $T_{1/3}$ は若干長くなっている。なお、実測 $T_{1/3}$ は 9.30 s と推算値よりも極端に短くなっているが、これは、ノイズによる可能性も高いので注意を要する。

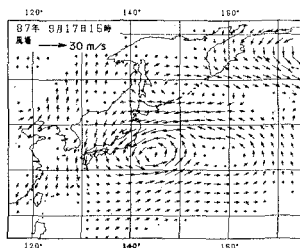
(3) 周波数・方向スペクトルの比較

図-9 および 10 は、実測値と推算値(ケース 7)の方向スペクトルを比較したものである。図-9 は 9月17日 10時の結果であり、図-10 は 9月17日 14時の結果である。それぞれ、左が推算値を、右が実測値を示しており、横軸に方向を、縦軸に周波数を示している。

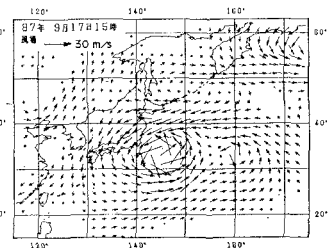
図-9 の推算値と実測値を比較すると、どちらも S から 10° 程度 E 方向にずれたところにピークが見られ、ENE 方向にも弱いピークがあり、両者はよく一致して



(1) 傾度風モデル



(2) Cardone モデル



(3) ハイブリッドモデル

図-7 風推算結果の比較(9月17日)

表-3 有義波最大時の風速・波浪

ケース	$U_{19.5}$ (m/s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	発生時刻
実測	17.3 (NE)	8.28	9.30	9.17 8:00
No.4	13.0 (E40°N)	4.33	8.40	9.17 19:00
No.5	18.0 (E35°N)	6.85	11.12	9.17 15:00
No.6	17.0 (E33°N)	6.71	11.03	9.17 15:00
No.7	15.0 (E22°N)	8.27	13.26	9.17 5:00

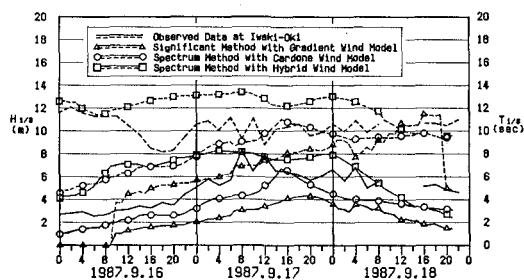
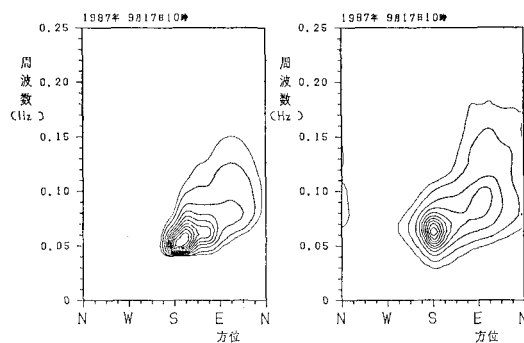


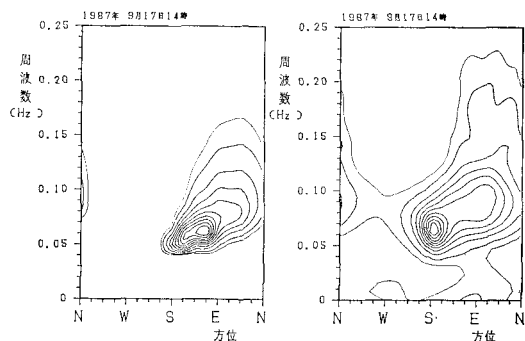
図-8 有義波高・周期の経時変化(9月)



(1) 推算値

(2) 実測値

図-9 方向スペクトル比較図(9月17日10時)



(1) 推算値

(2) 実測値

図-10 方向スペクトル比較図(9月17日14時)

いることがわかる。ただし、ピーク周波数は、実測値の方が若干大きいようである。

一方、図-10の推算値は、図-9と比較してピーク

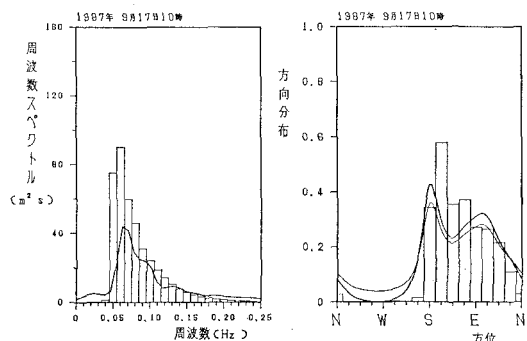


図-11 周波数スペクトルと方向分布形(9月17日10時)

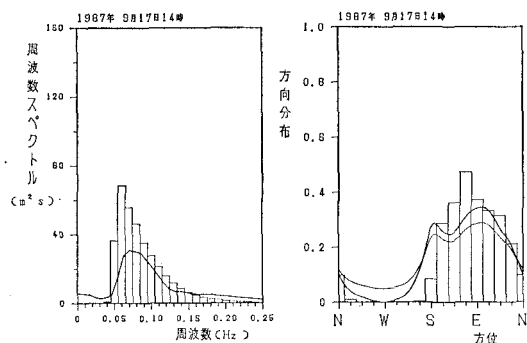


図-12 周波数スペクトルと方向分布形(9月17日14時)

がE方向におよび高周波側にシフトしているが、これは台風の移動に対応したものと思われる。実測値でも、推算値ほどは顕著でないものの、やはりピークのシフトが読み取れる。

図-11 および 図-12 は、それぞれ 図-9 と 10 に対応しており、方向と周波数それぞれに関して積分した結果を示している。いずれの図も、図-8に対応した全エネルギーレベルの相違はあるものの、実測値(折れ線)と推算値(棒)の分布形はよい一致を示している。図-11 と 図-12 を比較すると、やはり、台風の進行と共に、エネルギーのピークがS方向からENE方向へ、低周波側から高周波側へと、シフトしていることがわかる。

図-13 は、方向別エネルギーの経時変化を示したものである。参考として、風速および風向の経時変化(推算値ケース7)、 $H_{1/3}$ の経時変化(実測値および推算値)を示している。方向別のエネルギーは、3成分(S-E, E-N, N-W-S)に分割し、それぞれの方向から来襲するエネルギーの積分値を、それぞれ実線、点線、一点鎖線で表示している。

実測値のグラフで、S-E方向とE-N方向を比較すると9月17日14:00までは、S-E方向のエネルギーが相

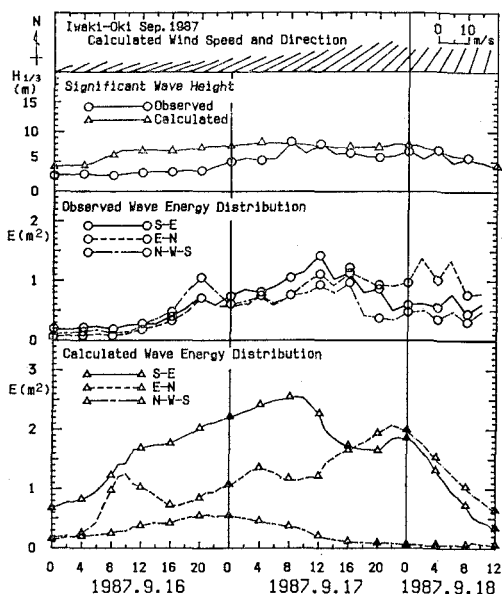


図-13 方向別エネルギーの経時変化

対的に大きかったが、以後は、E-N方向のエネルギーが大きくなっている。これは台風の移動によるものと考えられる。このことは推算値でも同様にあらわれている。推算値ではN-W-S方向からの波エネルギーが実測値に比べて小さくなっているが、西すなわち陸からの波エネルギーは小さいと考えられるので、これは、むしろ実測値の方に問題があると思われる。

8. おわりに

以上のことから、現状の波浪推算においては、スペクトル法が有義波法に比べて精度が優れていること、台風時における風計算モデルとしてはハイブリッドモデルがよいことなどが明かになった。ただし、スペクトル法においては、発達式の定式化、特に方向分布形に検討の余地があること、また、風計算モデルにおいては、気圧場の時間的変化を考慮した方法の採用など種々の課題が残されている。

謝辞 本報告のとりまとめにあたっては、第二港湾建設局の小名浜港工事事務所と横浜調査設計事務所、および港湾技術研究所海洋水理部海象調査研究室のそれぞれの御担当の皆様にご指導・御協力いただいた。また、(株)ゼックスの皆様には、データ整理や図表の作成等御助力いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 井島武士・副島 毅・松尾隆彦 (1967): 数値計算による台風域内の波の分布について—海洋上における台風の場合—, 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 29~38.
- 磯崎一郎・宇治 豪 (1974): 海上風数値モデルの波浪予測への応用, 気象研究所報告 25, pp. 197~231.
- 日本気象協会 (1987): 沿岸波浪予測プログラムの研究開発報告書, 波浪推算のためのデータベースの整備と活用法の研究, 開発(その3), 87 p.
- 日本気象協会 (1988): 内湾の海上風と波浪の推算に関する研究, 海上風の実用推算モデルの開発, 90 p.
- 橋本典明・小舟浩二・亀山 豊 (1988): 現地観測データを用いた方向スペクトル推定法に関する検討, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第2号, pp. 59~94.
- 山口正隆・土屋義人 (1979): 有限風域場における波浪の数値予知法, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 96~100.
- 山口正隆・畑田圭男・日野幹雄 (1986): 波浪推算に基づく佐渡島の波浪遮蔽効果の検討, 土木学会論文集, 第369号 2-5, pp. 195~202.
- 山口正隆・畑田圭男・日野幹雄・早川 淳 (1988): 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.
- Cardone V. J. (1969): Specification of the wind distribution in the marine boundary layer for wave forecasting, New York Univ. School of Eng. and Sci., Rept. GSL-TR69-1, 131 p.
- Inoue T. (1967): On the growth of the spectrum of wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanism and its application to forecasting, Geophys. Sci. Lab. Tr-67-5, New York Univ., 74 p.
- Isozaki I. and T. Uji (1973): Numerical prediction of ocean waves, Papers in Met. and Geophys. 24(2), pp. 207~232.
- Joseph P. S., S. Kawai and Y. Toba (1981): Ocean wave prediction by a hybrid model combination of single parameterized wind waves with spectrally treated swells, The Science Reports of the Tohoku University Series 5, Geophysics Vol. 28, No. 1, 45 p.
- Uji T. (1984): A coupled discrete wave model MRI-2, Oceanogr., Soc. Japan 40, pp. 303~313.