

波浪推算モデルによる高波浪長周期波の発達伝搬特性の解析

信岡尚道*・加藤 始**・磯 祥明***・寺島裕貴****

1. はじめに

北関東以北の太平洋沿岸には、非常に発達した冬季低気圧の通過に伴い、台風時でもほとんど起こらない様なうねり性の高波浪長周期波がまれに來襲する。例えば、1991年2月には茨城県常陸那珂沖で、有義波周期が約15秒かつ波高も約4.5mにおよぶ波を観測している。そして、このような異常波浪は、1波のもつエネルギーが大きいため、海岸港湾構造物の破損や工事中の仮置きケーソンが移動するなどの多大な被害を引き起こす外力となるので、憂慮する必要がある。

しかし、うねり性の特性を持った異常波浪を十分に推算しうるモデルは確立されていないので、このような波浪について、來襲をあらかじめ予知することができなく、また気圧的な発生要因なども完全には把握されていないと考えられる。

そこで本研究では、先ずうねりを含む風波の方向スペクトルを計算する既存モデルに、風波からうねりへの移行時に高周波成分が相似形を保ちながら減衰する現象を組み込むなどの改良を加える。次に、この改良モデルを用いて上記の気象擾乱による波浪の追算を行い、常陸那珂沖を対象に來襲した異常波の発達伝搬特性および気圧的な発生要因について検討を行う。

2. 波浪推算モデルの改良

(1) 推算モデルの概要

海上風の推算には一般に用いられている Cardon モデル (Cardon, 1969) を、波浪の推算にはアメリカ陸軍航路工学実験部で開発された Resio モデル (Resio, 1981; Resio ら, 1983) を用いた。この Resio モデルはエネルギースペクトル法を用いており、波の周波数間非線形エネルギー輸送効果を全面的に考慮している第3世代のモデルである (山口, 1985)。

では、まずこのモデルの概略を説明する。
モデルの基礎式は式 (1) に示すエネルギー方程式であ

る。

$$\frac{\partial F(f, \theta, X, Y, t)}{\partial t} = G(f, \theta, X, Y, t) - C_\theta(f, \theta) \cdot \nabla F(f, \theta, X, Y, t) \dots\dots (1)$$

ここに、 F : エネルギー、 f : 周波数、 θ : 伝播方向、 C_θ : 群速度、 $G = G_{in} + G_{nl} + G_{ds}$ 、 G_{in} : 風からのエネルギー供給項、 G_{nl} : 周波数間非線形輸送項、 G_{ds} : 減衰項である。

また、波の発達と碎波によるエネルギー減衰などによりエネルギーが釣り合う平衡状態をモデルでは、風波の周波数スペクトルの1つである Kitaigorodskii スペクトル (式 (2)) で形成させる。

$$E(f) = \begin{cases} \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} & f \geq f_m \\ \alpha g^2 f_m^{-5} (2\pi)^{-4} \exp\{1 - (f/f_m)^4\} & f < f_m \end{cases} \dots\dots (2)$$

ここに、 α : 平衡形状係数、 f_m : ピーク周波数である。

そして、波を発達させる周波数間非線形輸送量については、この非線形エネルギー輸送の関係を示すモデルに式 (2) を代入して求めた式 (3) で表す (Resio, 1981)。

$$G_{nl} = D_1 \alpha^2 g^2 f_m^{-4} \exp[1 - (f/f_m)^4] (f/f_m)^3 \dots\dots (3)$$

ここに、 D_1 : 定数である。また低周波領域では、式 (2) の値を越えるエネルギーはうねり成分と考え、別の非線形輸送量の式を用いてさらに発達させる。

なお、高周波領域の平衡状態におけるエネルギーの大きさと非線形輸送量は平衡形状係数 α で変わる。この α は、図-1 に示すように無次元エネルギーと関係づけて過去の研究結果を整理して求めた、式 (4) で表される。

$$\alpha = m_1 \bar{E}^{m_2} \dots\dots (4)$$

ここに、 m_1, m_2 : 定数 (0.044, -0.20) であり、

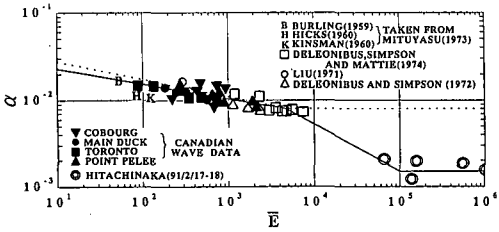


図-1 エネルギーと平衡形状係数の関係 (Donald, 1981)

* 正会員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科
** 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科
*** 工修 三井不動産建設
**** 構造建設コンサルタント

$$\bar{E} = \frac{gE}{U_*^4}$$

E : 全エネルギー, U_* : 海面抵抗係数である.

(2) Resio モデルの改良

このモデルの特性を把握するために、1つは世界各国の推算モデルと比較する SWAMP テスト (The Swamp Group, 1985) の case-II (一様風速 20 m/s の場での風波の発達)を行い、もう1つは表-1 に示す6 ケースの気象擾乱における波浪を図-2 に示す領域で追算して、追算値と観測値の比較(むつ小川原, 釜石, 相馬, いわき沖, 常陸那珂の5地点)を行った。これらの結果は、他のモデルや観測値に比べて、全般的に波高が高く周期が短い傾向となった。したがって、推算精度を良くするようにモデルの改良を行う。

波高を低くして周期を長くする方法として、周波数スペクトルの高周波領域における平衡形状を決める係数 α を低下させることが考えられる。この理由は、 α の低下により高周波領域のエネルギーが減衰して、同時に低周波数域のエネルギーが相対的に増加するため周期が長くなるからである。ただし、 α を低くすると式(3)で示されるように非線形輸送量が減るので、この式の係数の調整が必要である。

以上のことを踏まえて、数ケースの条件を設定して SWAMP 計算を行い、他のモデルと同様な波の発達をするケースを探す方法を取った。ケース設定では、 α を低下させるため式(4)の定数の1つである m_2 の値を徐々に

表-1 気象擾乱の期間

Case 1	1989年1月23日～1月31日
Case 2	1990年2月18日～2月22日
Case 3	1990年12月9日～12月17日
Case 4	1990年12月21日～12月29日
Case 5	1991年1月14日～1月19日
Case 6	1991年2月14日～1月18日

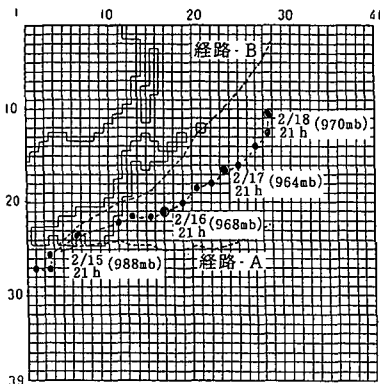


図-2 計算領域

表-2 テスト計算ケース

D_1	α	m_1	m_2	SWAMP CASE	追算		
					CASE	α 拡張	誤差 (結果) $H_{1/3}$ $T_{1/3}$
1.0	0.044	-0.20		A	I	無し	1.10 5.19
	0.040	-0.19		B	--		
	0.037	-0.18		C	--		
	0.034	-0.17		D	II	有り	0.65 5.06
	0.031	-0.16		E	--		
1.3	0.037	-0.18		F	III	有り	0.77 4.30
	0.034	-0.17		G	IV	有り	0.74 4.36
				V	無し		1.11 4.79
	0.031	-0.16		H	VI	有り	0.71 4.48
1.5	0.037	-0.18		I	--		
	0.034	-0.17		J	VII	有り	0.84 4.16
	0.031	-0.16		K	--		

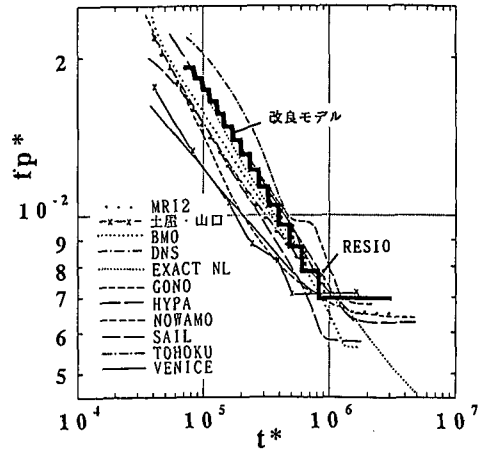


図-3 吹送時間 ($t^* = t \frac{g}{U_*^3}$) とピーク周波数 ($f_p^* = f_p \frac{U_*}{g}$) の関係 (日本気象協会, 1985)

大きくして、図-1 に示す破線の勾配を緩くする。この時、 m_1 の値は、SMB 法から求めた風速 5 m でのエネルギー発達限界値 ($E=4725$) のところで $\alpha=0.008$ になるようにする。式(3)の係数 D_1 は 1.3 倍と 1.5 倍とした場合も行う。なお、具体的な値は表-2 に示す。

この計算を行ったところ、CASE-G では、元のモデルより波の初期発達時のエネルギーが低下し、吹送時間が長くなるにつれてピーク周波数が下がる結果(図-3, 改良モデル)になり、これが全ケースの中では他の推算モデルに最も近い結果となった。よって、 $m_1=0.034$, $m_2=-0.17$ を基本的に用いることにした。

次に、うねりの特性をモデルに取り込むことを考える。長周期波を観測した 1991 年 2 月 17 日～18 日の常陸那珂沖における風速の観測値と波浪観測データの周波数スペクトルから、無次元エネルギーと形状係数 α を求めた結果を図-1 中に◎で示す。図よりエネルギーは大きい

が、 α は非常に小さい値となっているのがわかる。これは、低周波数成分エネルギーが大きく、高周波数成分エネルギーが減衰しているうねり性波の周波数スペクトル形状の特徴と一致する。この風速減衰に伴いうねりへ移行する時の高周波数成分エネルギーの減衰については、スペクトルの相似形を保ちながら起こることを郭ら(1968)が実験で明らかにしている。しかし、モデルでは α の下限値を0.008と規定しているため、ほとんどこの現象を再現できない。したがってこの点について改良を試みることにする。

まず、吹送距離が1万km以上にはならず、また風速5m以下は考えないと仮定すると、無次元エネルギーが4725以上になる風波はないと考えられる。そこで、無次元エネルギーがこの値より大きい領域では、うねりもしくはうねりへの移行領域ととらえ、 α を低下させることでスペクトルの相似性を保ちながら高周波数エネルギーを減衰させる。ただ、 α を低下させるにもその値に根拠がないので、今回は観測値の傾向に合わせるように風波からうねりへの移行区間と定常区間を考え、図-1の実線のように便宜的に設定した。

この設定で、再び表-1に示す気象擾乱に対して、表-2に示すCASE-I～VIIの条件を用いて波浪追算を行い、先ほどと同じ5地点の観測値と追算値を比較して改良による効果を検討した。比較方法は追算値と観測値の差の自乗平均で評価することにし、その結果を表-2中に示している。この結果より、Resioモデル(CASE-I)やうねりへの移行領域を考えないCASE-Vよりも拡張改良したCASE-IVの方が誤差が小さいことがわかる。

またこの検討の中で、SWAMPのテストを用いて改良した m_1 と m_2 の適値を最確認することも同時に行っている(CASE-III, IV, VI)。その結果は、波高の追算精度が良いケースは周期の追算精度が悪く、逆に周期が良いと波高が悪い結果となり、最適値をここでは決められない。よって、 m_1 と m_2 の値はSWAMPテスト結果を重視することにし、改良モデルはCASE-IVの型とする。

そして、この改良モデルを用いて、1991年2月中旬に常陸那珂沖に来襲した異常波浪の発達伝搬特性解析を行っていく。

3. 1991年2月中旬の気象概況と波浪概況

まず、気象概況であるが、図-2中に示している低気圧の移動経路と中心気圧を見ると、本州を横断中から発達し、16日午前には勢力を強めながら福島沖の海上に進んでいる。その後北東方向へゆっくり進みながら、さらに勢力が台風並の960mbにまで発達し、北海道東方海上に抜けている。

次に、海上風と波高分布を追算値からみる(図-4(a～

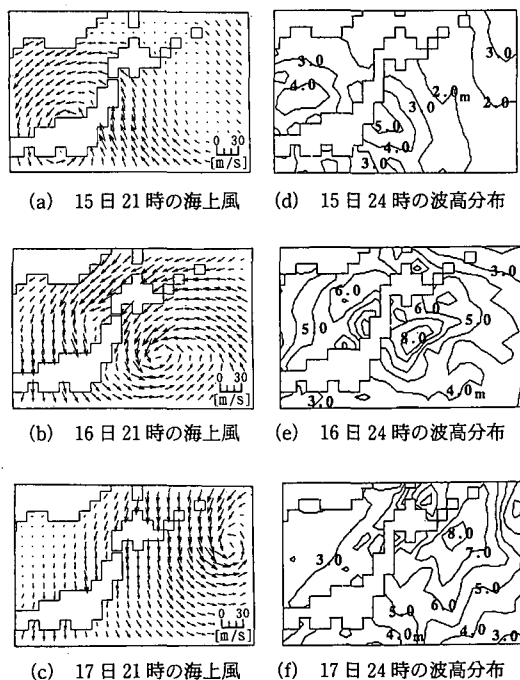


図-4 海上風と波高分布

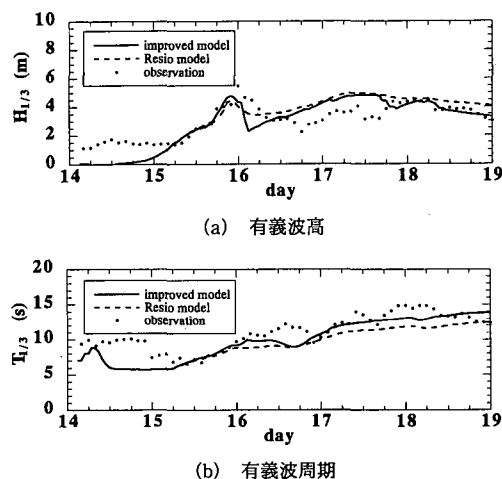


図-5 1991年2月の常陸那珂での波浪の経時変化

f)). 15日夜半には南東風が太平洋から北日本にかけて吹いている。波高についても海上風の強風域に対応して発達しており、図に示していないが主波向きも風向きにほぼ一致していた。これが16日夜半には、低気圧の移動により風向きが急転して強い北東風が東北地方の東方海上で吹いている。波浪の発達域もこの域に移り8m以上の波高となる地点も存在している。この時も発達域での主波向きは風向きと同じ北東を示していた。これが17日夜半には強風域場が北海道東方海上に移り北関東地方の近海では弱い北風に変わり始めている。

さらに、常陸那珂沖での有義波高と有義波周期の経時変化の様子を見る(図-5)。15日夜半に波高の一回目のピークが現れている。これは、南東方向から来襲した波であった。その後波高は一旦低くなるが、さらに時間が経った16日夜半からは再び波高が高くなり始め、18日未明に波高4.5mで周期14.9sとなる異常波が出現した。

4. 高波浪長周期波の発達伝搬特性

ここでは、この異常長周期高波浪が来襲した要因を検討する。考えられる要因は、発達および伝搬中の現象においていくつかあり、以下に挙げる。

- ・うねり性長周期波と高波浪の風波が、異方向から来襲して重なる。
- ・波の周波数間非線形輸送効果による低周波成分エネルギーの発達。
- ・高周波数成分のエネルギーが伝搬中に減衰して、相対的に低周波数のエネルギーの割合が増える。
- ・周波数ごとのエネルギー伝搬速度の差により、低周波成分が主に来襲する。

このうち1991年2月の異常波の要因を調べるにあたり、まず来襲方向を確認するため追算より求めた17日24時の常陸那珂沖の方向スペクトルを見る(図-6)。図より北東方向に限られた非常に狭い範囲にエネルギーがあることがわかる。この結果の妥当性を調べるため、同時刻のいわき沖での方向スペクトルの観測値と追算値を示し

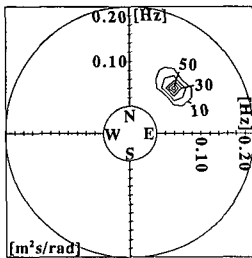


図-6 常陸那珂方向スペクトル

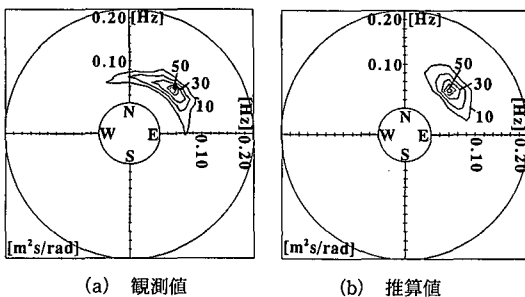
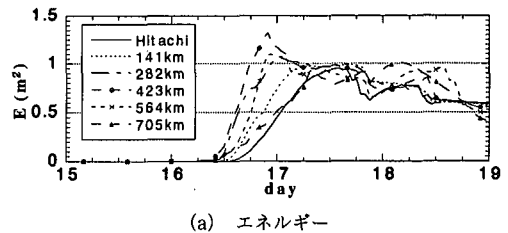
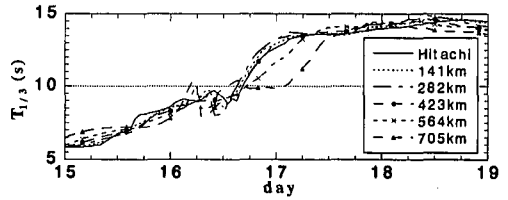


図-7 いわき沖方向スペクトル



(a) エネルギー



(b) 有義波周期

図-8 北東方向5地点の北東成分波の経時変化

たものが図-7である。追算結果の方がやや来襲方向の範囲が狭いが、両結果とも北東成分が大半を占めていることから、結果はほぼ妥当であるといえる。

次に、常陸那珂沖に来襲したこの北東成分エネルギーの発達伝搬過程を調べるため、常陸那珂から北東方向に141 km間隔にとった5地点における北東成分波のエネルギーと周期の経時変化を示したのが図-8である。16日午後から17日未明にかけて常陸那珂より282 km～564 kmの地点でエネルギーが発達している。これは、この区間でこの時刻に北東風が強かったことから、ここでの風波の発達によるものと考えられる。周期についても同様に発達しているが、通常風波時の発達よりはるかに長周期となっている。この原因は低周波数成分の方がエネルギー伝搬速度が速いので周囲から速く伝搬してきたためと、計算上では高周波成分については他方向のエネルギー成分と合わせた周波数スペクトルエネルギーに対して式(2)で決められた平衡エネルギー以上になると減衰するようになっていたためと考えられる。一方、常陸那珂における傾向を見ると、141 km～564 kmの地点に比べエネルギーの発達が遅れている。このことに加えて、風速は時間が経過すると弱くなることも考慮すると、先ほどの地点などで発生発達した波が伝搬して来たと考えられる。また、周期の方からみても、エネルギーの発達より周期の発達が早いことから、伝搬速度の速い

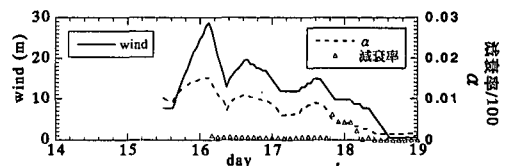


図-9 風速と平衡形状係数と高周波数成分波の減衰率

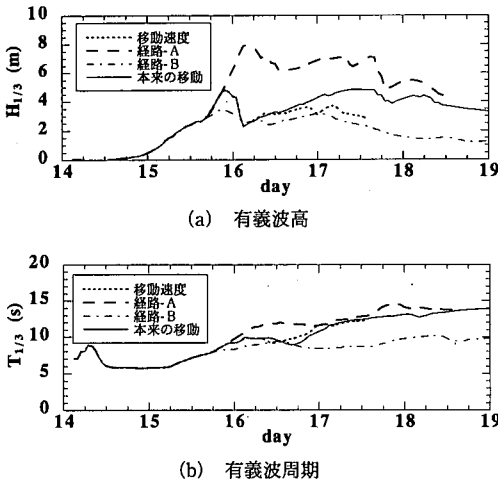


図-10 疑似計算による常陸那珂での波浪の経時変化

低周波成分波がまず伝搬してきて、そのあと各成分波も伝搬してきたと考えられる。

さらに、この伝搬の途中で風域の変化に伴いうねりに転化していく領域のエネルギー減衰について確認してみる。図-9に常陸那珂沖から282 kmの地点での風速および平衡形状係数、北東方向0.20 Hz成分波の減衰率(1/100表示)を示す。風速の低下に伴い平衡形状係数 α も低下しており、0.008以下になっている。これは今回の改良で設けたうねり性の領域に入っていることを示している。また、17日夜半から18日早朝にかけて高周波数エネルギーの減衰が大きくなっているのも図から分かる。

ところで、異常波浪の発生には、波の発達、減衰にかかわる内部メカニズムの他に、低気圧の強さ、移動経路と速度(吹送時間)、風向などの外力にかかわる要因も大きい。これらの影響をみるため、今回対象とした低気圧の16~18日にかけての移動速度を2倍にした場合と、移動経路を図-2中に示すように従来の東北東方向から東方向と北東方向にそれぞれ変更した場合の疑似推算も行った。

この計算結果を図-10に示す。移動速度を速めた場合、周期に関しては変化がほとんどないが、波高は低くなっている。これは吹送時間が短くなったためであり、このことから、従来の低気圧の移動速度が遅かったので高波浪が発生したと考えられる。また、本来の経路より南側を通るケース(経路-A)では、波高がより高く周期もより長い波が来襲する結果となっている。図には示していないが、この時のエネルギーの来襲方向は、従来の場合よりやや広がっていたけれども北東向きが中心であった。また、常陸那珂に向く風の強さの合計は従来の経路を通った場合より大きいことも確認した。したがって、従来の経路の場合と同じ機構で波が発生や発達そして減

衰するが、スケールがより大きく広範囲で起こるので、一段と危険な波になる。逆に北側を通るケース(経路-B)では、波高も周期も低下している。これは、強風が北海道の陸上とオホーツク海で吹くことになり、太平洋沿岸に来襲する波の発達にあまり影響しないためと考えられる。

5. 結 論

うねり性波を推算するにあたり、波浪推算のResioモデル中に、風波からうねり性の波に移行する時に高周波数成分エネルギーを減衰させるメカニズムを組み込み、6ケースの気象擾乱に適用して良好な改良結果を得た。

この改良モデルを用いて、1991年2月に常陸那珂沖に来襲した長周期で高波浪の波を対象に、発達および伝搬特性を検討した。その結果、エネルギー来襲方向は北東向きに限定され、エネルギーの発達域と中小風域において高周波エネルギーの減衰により長周期波となったこと、低気圧移動速度が遅く強風の吹送時間が長かったため高波浪となったことがわかった。

今後の課題として、うねり性波の周波数スペクトル平衡形状の妥当性の追求や海上風の精度の高い予測などが挙げられる。

最後に、本研究を進めるにあたり、波浪推算モデルの導入などに貢献してくれた当時研究室学生の田中文夫君と窪田英康君、貴重な御助言をして頂いた同学科の三村信男教授と東海大学の後藤智明教授、また観測データを提供して頂いた運輸省の第2港湾建設局と港湾技術研究所の関係者に深甚なる謝意を表します。また、計算には茨城大学情報処理センター所有のHITAC M-660 Lを使用したことをここに付記します。

参 考 文 献

- 郭一羽, 光易恒 (1978): 減衰領域における風波の研究(2) —うねりのスペクトルの形について—, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 170-174.
- 日本気象協会 (1985): 波浪推算のためのデータベースの整備とその活用法の研究開発(その1), 沿岸波浪予測プログラムの研究開発報告書, 98 p.
- 山口正隆 (1985): 波浪推算法とその適用性, 1985年度水工学に関する夏期研修会講演集, B85-02.
- Cardone V. J. (1969): Specification of the wind distribution in the marine boundary layer for wave forecasting, New York Univ. school of engineering and science report GSL-TR69-1, 131 p.
- Resio T. D. (1981): The estimation of wind-wave generation in a discrete spectral model, Journal of Physical Oceanography, Vol. 11, pp. 510-525.
- Resio T. D. and Barbara A. T. (1983): Numerical model for wind-wave prediction in deep water, WIS Report 12, 23 p.
- The SWAMP Group (1985): Ocean Wave Modeling, 256 p.