

日本海沿岸における異常波浪の予知

土屋 義人*・駒口 友章**・根本 建治**

1. 緒 言

長期の再現期間に対して異常波浪を予知する場合、観測地点の少ないことや統計期間が短いなどの理由から、過去に観測された波浪だけを対象とした統計処理のみでは十分ではない。近年、原子力発電所を筆頭とする重要施設が沿岸域に建設される場合には、いかなる災害時でもその機能破壊が許されない場合が多く、あらゆる面において高度な安全性の確保が求められており、波浪に関してもわれわれが未だかつて経験していない異常波浪を含めた十分な安全対策が必要と考えられる。しかしながら、わが国沿岸の波浪観測値の取得期間は比較的長期間の記録がある場合でもたかだか20数年程度であり、実測値を用いた極値統計によって異常波浪を求める場合はどうしても外挿によらざるを得ない。この場合、波浪の観測年数が短くなるほどその推定には大きな誤差が含まれることがあるので、この誤差を最小限に抑えるために波浪推算が実施されている。しかし、過去の多くの異常波浪を求める必要性から、このような波浪推算に要する計算時間や計算費用は莫大なものとなる。このため、非常に長期の再現期間を対象として直接に異常波浪を推算する手法の確立が求められている。

このような問題に対して、土屋・駒口(1987a, 1987b)は北西太平洋沿岸の異常波浪の発生機構について考察し、台風の停滞による吹送時間の増加が波浪の発達に重要な役割を果たしていることを示した。また、台風の停滞を考慮したモデル台風を合成して波浪推算を行い、このような場合に異常波浪が発生することを明らかにした。さらに、Komaguchi・Tsuchiya・Shiraishi(1990)は、季節風によって日本海西部沿岸に発生する波浪の発達機構を調べ、低気圧が日本海の海上を通過するとき、もし異常な停滞を起こすならば、吹送時間が増大して異常波浪が発生する可能性があることを明らかにした。そこで本研究では、①波浪観測値を用いて極値統計解析を行い、日本海沿岸の来襲波浪の地域特性を調べ、また高波浪時の天気図を解析し、日本海の異常波浪の発

生条件を考察するとともに、②実際の冬期の低気圧による擾乱をモデルケースとして、異常波浪の発生条件を考慮した波浪推算を行い、この場合に長期の再現期間をもつ異常波浪が発生する可能性があることを示す。

2. 低気圧による波浪の極値統計

(1) 気象資料の解析方法

1980年から1989年までの気象庁で観測されてきた日本海沿岸の4ヶ所(松前、温海、経ヶ岬、鹿島)の波浪観測資料を用いて、10月から翌年3月の期間について波高4.0m以上の高波浪の記録を抽出し、その発生要因となった低気圧について、進行経路、移動時間、最低気圧を極東天気図から調べた。このとき、進行経路の型分類は図-1に示すように、その進行方向によってENE系、NE系、E系、その他の4種類とした。なお、図-1に示した3方向に進行する低気圧によって発生した波浪は、観測された高波浪の事例の90%以上の割合を占めている。また、低気圧の中心が東経130°E~140°Eの範囲を通過した時間を移動時間 T_{dm} として定義する。ただし、低気圧は990mbよりも発達するものを対象とし、台風くずれの低気圧、2つ玉以上となる場合や途中で分裂するものについては解析から除外した。

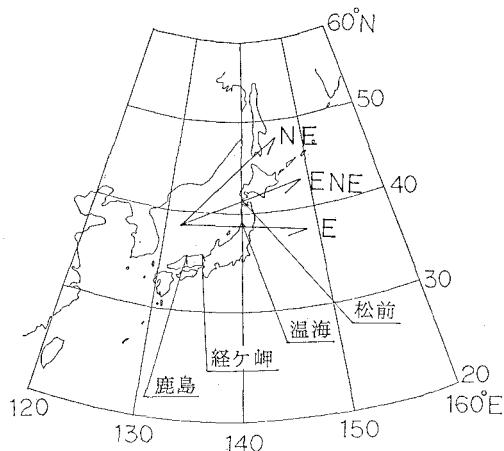


図-1 低気圧の進行経路

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 日本テトラポッド(株)応用水理研究所

表-1 波浪観測資料の諸元

波浪観測局	波高計の設置位置		設置水深 (m)	観測開始日
	北緯(N)	東経(E)		
松前	41°24'29"	140°06'03"	-49	1979年4月1日
温海	38°40'49"	139°35'50"	-45	1981年3月25日
経ヶ岬	35°46'58"	135°13'36"	-47	1976年5月1日
鹿島	35°32'52"	132°58'35"	-47	1984年4月1日

表-1は、本研究で用いた日本海沿岸における気象庁の波浪観測資料の諸元を示した。

(2) 日本海沿岸の波浪の極値統計

図-2は低気圧をその発生要因とする高波浪について、波高の年最大値の極値統計解析を行った結果である。この場合、母集団の設定は低気圧の進行経路を考慮して行い、分布関数として Gumbel 分布を仮定した。統計年数は松前と経ヶ岬が10年、温海が9年、鹿島が6年である。いずれの場合についても Gumbel 分布に対する極値統計の適合度は十分であった。各図をみると、確率波の再現期間が比較的短期間の場合には、鹿島を除いて低気圧を進行経路で分類しない場合に確率波高が最も大きくなっているが、再現期間がかなり長期になる場合には、低気圧を進行経路によって分けた場合に確率波高が最も大きくなることが多い。例えば、温海では NE 系

方向が長期の再現期間に対して確率波高が最も大きくなっている。また、経ヶ岬と鹿島では低気圧が E 系方向に進行する場合が最も危険な経路であることがわかる。したがって、日本海沿岸の異常波浪を求める場合、低気圧をその進行経路によって分類し、日本海海上で最も危険な経路をとる場合に非常に長期の再現期間をもつ異常波浪が発生する可能性がある。また、表-2には各地点について母集団毎に極値統計解析を行い、確率波を算定した結果を示す。この表をみると低気圧を進行経路で分類しない場合は、30年あるいは50年再現期間の確率波高はいずれの地点においても7cm~8mである。このとき、各地点毎の確率波高の大きさを比較すると、鹿島の値が7m前後と最も小さく、温海では8m近い値である。また、松前と経ヶ岬の確率波高の大きさは再現期間が30年の場合と50年の場合には同程度であり、その大きさは温海よりもわずかに小さな値である。この結果は、主に日本海沿岸における波浪の地域性によるものと考えられる。すなわち、鹿島、経ヶ岬、温海の順に季節風の吹送距離が増大し、確率波高が順次大きくなったものである。ただし、松前では温海よりも確率波高が小さくなっているが、これは周辺地形による遮蔽の影響があると考えられる。

表-2 確率波高の算定結果

地点	母集団の設定基準	各々の再現期間における確率波高(m)				
		30年	50年	100年	250年	500年
松前	低気圧を分類しない	7.43	7.73	8.13	8.65	9.05
	NE系方向に進行	6.69	7.05	7.54	8.18	8.67
	ENE系方向に進行	6.10	6.33	6.65	7.06	7.38
	E系方向に進行	6.41	6.75	7.20	7.80	8.25
温海	低気圧を分類しない	7.72	7.90	8.14	8.46	8.70
	NE系方向に進行	7.07	7.46	7.98	8.67	9.20
	ENE系方向に進行	7.32	7.64	8.07	8.64	9.07
	E系方向に進行	7.09	7.43	7.90	8.51	8.97
経ヶ岬	低気圧を分類しない	7.54	7.76	8.06	8.45	8.75
	NE系方向に進行	5.60	5.74	5.94	6.19	6.38
	ENE系方向に進行	5.56	5.72	5.94	6.23	6.45
	E系方向に進行	7.28	7.71	8.28	9.04	9.61
鹿島	低気圧を分類しない	6.85	7.05	7.31	7.67	7.93
	NE系方向に進行	5.58	5.79	6.07	6.43	6.71
	ENE系方向に進行	5.77	5.93	6.14	6.43	6.65
	E系方向に進行	7.53	7.93	8.47	9.19	9.73

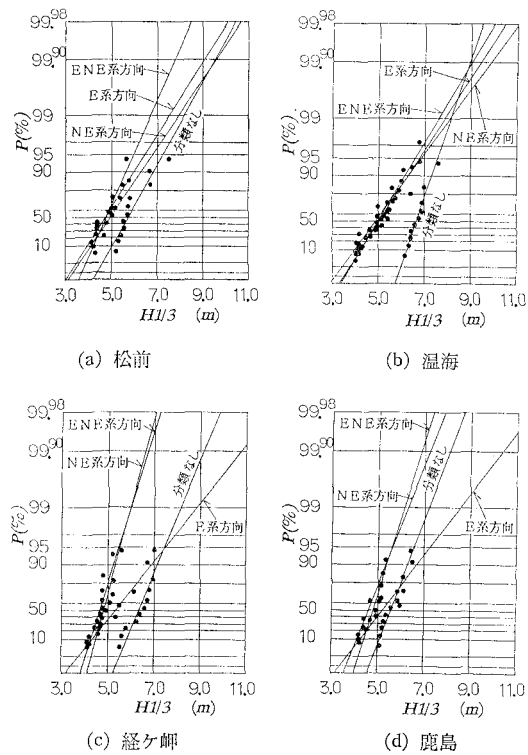


図-2 波浪の極値統計の結果

3. 日本海沿岸の異常波浪の発生条件

日本付近で急速に発達し、日本海に強風をもたらす低気圧は、日本海低気圧、2つ玉低気圧、東シナ海低気圧

などが知られているが、冬期にはいずれの場合も低気圧が東進した後で大陸方面から高気圧が張り出した結果、いわゆる西高東低の冬型気圧配置となって強風が継続する場合が多い。川鍋（1973）の報告では、冬期の季節風は一般には24時間から48時間継続することが多いが、72時間以上の例もみられる。低気圧によって日本海沿岸に発生する波浪は低気圧の規模、吹送距離あるいは吹送時間の増加によって発達するが、日本海は地形的には大陸や半島などによってほぼ閉鎖されていることから、日本海における異常波浪は吹送時間の増加によって発生すると考えられる。すなわち、低気圧が日本海海上で停滞し、移動時間 T_{dm} が長時間となる場合に、吹送時間が増大して異常波浪が発生する可能性がある。そこで、低気圧の移動時間 T_{dm} についてさらに検討する。

図-3は、移動時間の年最大値について極値統計解析を実施した結果である。この図に示すように、移動時間は極値分布に良く適合しており、相関係数は0.955である。

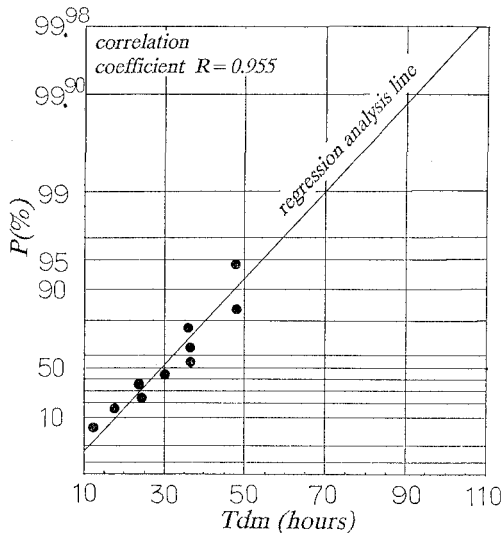


図-3 移動時間の極値統計の結果

また、表-3は移動時間を統計量とした場合に、拡張された移動時間の再現期間と再現期待値を求めた結果である。ここで、移動時間の年最大値の平均は31時間である。

表-3 拡張された移動時間の再現期間と期待値

再現期間 T_m (年)	拡張された移動時間 T_{dm} (hours)
30	58.6
50	63.5
100	70.2
250	79.1
500	85.8

ったが、500年再現期間の移動時間は86時間となる。

以上の検討結果から、日本海の異常波浪は低気圧が対象地点に対して最も危険な経路をとり、かつ、停滞によって日本海海上での移動時間が非常に長時間となる場合に発生する可能性がある。

4. 低気圧による異常波浪の推算

(1) 気象概況

ここでは、1989年10月下旬～11月上旬に発生した低気圧による気象擾乱をモデルケースとして波浪推算を実施した。この場合の低気圧の進行経路を図-4に示す。この擾乱は低気圧がE系方向の進行経路をとった事例であり、波浪観測資料によると日本海の中央部から西部沿岸において高波浪が発生している。

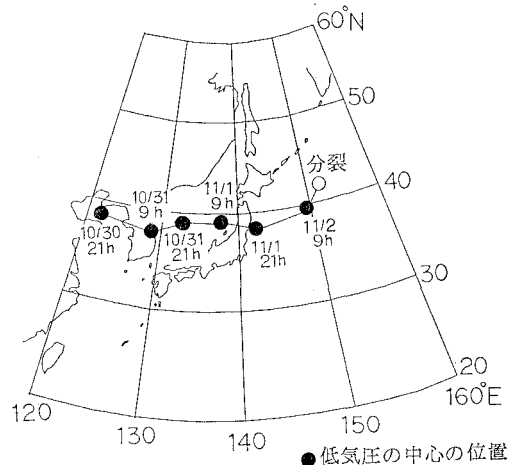


図-4 実際の低気圧の経路

この低気圧は、10月30日頃に黄海の北部で発生したものであり、その後日本海のはほぼ中央部を東進した。この結果、11月1日には日本海の長軸方向に間隔の詰まった直線状の等圧線が形成されている。この低気圧の影響により、日本海の中央部から西部沿岸付近では10月31日の夜半から11月1日の夜にかけて台風並みの強風域が出現した。

(2) 波浪推算の方法

波浪推算は山口・土屋モデル（山口・土屋ら、1978）を用いて実施した。このモデルは、式（1）で表されるエネルギー平衡方程式に基づく波浪推算モデルであり、成分波間の非線形干渉を間接的に考慮している。

$$\frac{\partial E(f, \theta, X, t)}{\partial t} + V(E(f, \theta, X, t) \cdot C_g) = S(f, \theta, X, t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 E は時空間上の波浪のエネルギースペクトル、 S はソースファンクション、 C_g は群速度である。

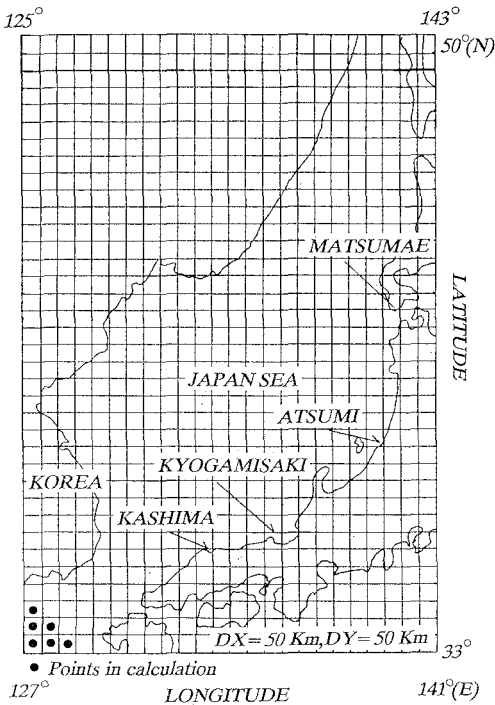


図-5 日本海における計算格子

なお、波浪推算の実施において方向分割は20分割とし、周波数成分は0.05 Hz~0.80 Hzの範囲を17成分に分割した。また、格子間隔は50 Kmとして、日本海全域を対象とした南北方向36×東西方向24の格子網を設けた。図-5に計算格子図を示す。

低気圧による風域場はCardoneの方法(Cardone, 1969)によって推算した。Cardoneの方法は、日本海における気圧値、水温、気温の平面分布を入力データとして、大気境界層内における風域場を計算するものである。ただし、移動時間を長時間としたモデル低気圧の場合は、土屋・駒口(1987b)の方法と同様に実際の進行経路上で低気圧の中心の進行速度が停滞によって遅くなるものと

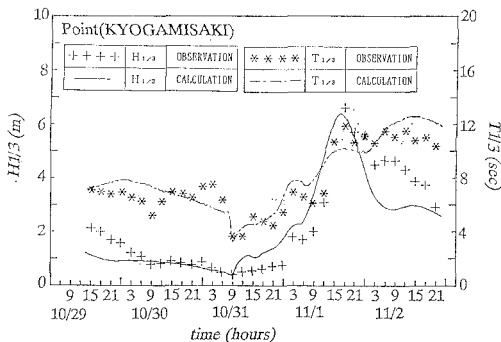
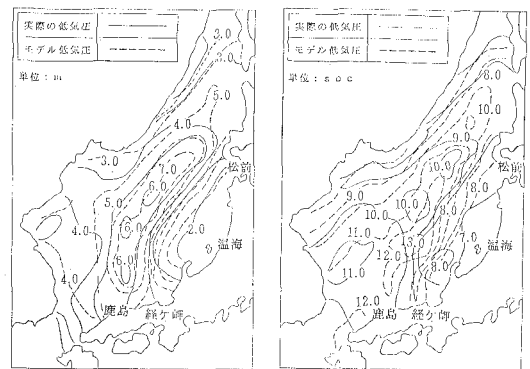


図-6 推算波浪と観測波浪の比較

した。図-6は、実際の擾乱に対する経ヶ岬沖の有義波の推算値と波浪観測値を比較した結果を示す。この図をみると、波高および周期の推算値の時系列はいずれも観測値の大きさや変化を良好な精度で再現している。したがって、波浪推算モデルの沖波波浪に対する推算精度は十分である。

(3) 異常波浪の推算例

図-7は実際に起こった擾乱の場合と500年再現期間の移動時間を与えた場合とについて、日本海を低気圧が通過した直後の波浪の平面分布を比較したものである。各図からわかるように、低気圧が危険な経路をとり、かつ、移動時間が停滞によって長時間となった場合には、日本海の中央部沿岸の波浪の発達が著しい。このとき、波浪の発達には最大7m程度までであるが、周期は実際の擾乱に対して最大10秒程度までの発達であるのに対して、移動時間が増大するモデル低気圧の場合は最大13秒の波浪域が出現している。



(a) 波高分布

(b) 周期分布

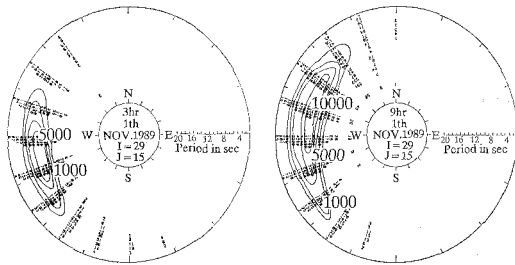
図-7 移動時間の違いによる波浪の平面分布の変化

(4) 異常波浪の発生機構

ここでは、方向スペクトルを調べることにより、日本海沿岸における異常波浪の発生機構を明らかにする。

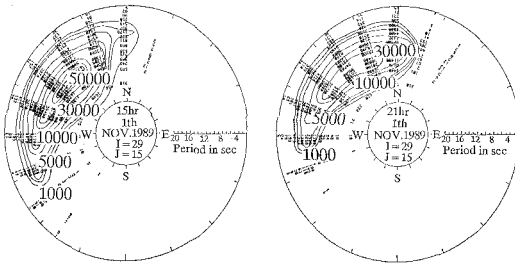
図-8には実際の擾乱とモデル低気圧について、経ヶ岬沖における波浪の方向スペクトルの分布の変化を示す。

近藤ら(1985)は異常波浪の極値統計解析を実施した結果、日本海中部沿岸ではフェッチの大きいN45°WよりN寄りの方向から来襲する波が特に高波浪となることを示した。同様に経ヶ岬沖の波浪もN方向寄りの場合が高波浪となると考えられる。実際の擾乱では、経ヶ岬沖で有義波の最大値が観測されたのは11月1日18時であり、波高6.67m、周期12.0秒であった。この前後の時間について図-8から方向スペクトルの変化をみると、実際の擾乱では11月1日15時頃からNW方向~N方向の波浪エネルギーが急速に増加した結果、高波



1) At 3:00, Nov. 1.

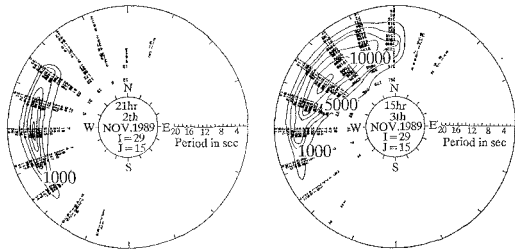
2) At 9:00, Nov. 1.



3) At 15:00, Nov. 1.

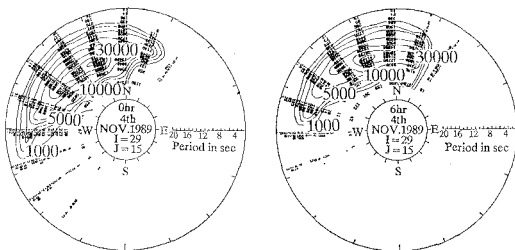
4) At 21:00, Nov. 1.

(a) 実際の擾乱に対する変化



1) At 3:00, Nov. 1.

2) At 9:00, Nov. 1.



3) At 15:00, Nov. 1.

4) At 21:00, Nov. 1.

(b) モデル低気圧に対する変化

図-8 方向スペクトルの時間変化

エネルギーが増加する場合は、長周期の成分が徐々に卓越していく様子がわかる。この結果からわかるように、経ヶ岬沖では E 系方向に低気圧が進行し、かつ移動時間の増加によって吹送時間が増大した場合には、NW~N 方向からのエネルギーの発達が発達が急速となり、この結果として十分に発達した継続時間の長い異常波浪が発生することがわかる。

5. 結 語

本研究では、冬期の低気圧を発生要因とする波浪の極値統計解析を行い、このような異常波浪の場合について日本海沿岸に襲撃する波浪の地域特性を調べ、低気圧によって日本海沿岸に発生する異常波浪の実態について検討した。

この研究で得られた成果を要約すれば以下の通りである。

①日本海沿岸の異常波浪を推算する場合には、低気圧を進行経路によって分類し、最も危険な経路を極値統計解析によって調べる必要がある。

②日本海における低気圧の移動時間は極値分布に良く適合する。

③波浪推算の結果、低気圧が対象地点に対して最も危険な経路をとり、かつ日本海海上での停滞によって吹送時間が増大した場合に、非常に長期の再現期間に対応する異常波浪が発生する可能性がある。

なお、低気圧のモデル化の方法については、より一般的な手法となるようにさらに改良する必要がある。これは今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 川鍋安次 (1973): 日本海における季節風と波, 気象研究ノート, 第 115 号, 日本気象学会, pp. 111-146.
- 近藤浩右・鈴木義和・鹿島遼一・土屋義人 (1985): 日本海中部沿岸における異常波浪の極値統計と佐渡島遮蔽域の波浪特性, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 129-133.
- 土屋義人・駒口友章 (1987a): 波浪推算モデルによる異常波浪の研究, 京都大学防災研究所年報, 第 30 号, B-2, pp. 663-693.
- 土屋義人・駒口友章 (1987b): 台風の停滞時間を考慮した異常波浪の推算, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 157-161.
- 山口正隆・土屋義人・小矢田 宏・渡辺 健 (1978): 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.
- 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, 131p.
- Komaguchi T., Y. Tsuchiya and N. Shiraishi (1990): Generation mechanism of abnormal waves along the Japan coast, 22nd ICCE, ASCE.

浪となったことがわかる。一方、モデル低気圧の場合は NW~N 方向よりのエネルギーの発達する時期が実際の擾乱による場合よりも 6 時間程度早くなっている。また、このように NW 方向あるいは N 方向を中心として