日本海沿岸における波高の極値の再検討

Re-Evaluating Extremes of Wave Heights in the Coastal Area of the Japan Sea

野中浩一¹・山口正隆²・畑田佳男³・宇都宮好博⁴・日野幹雄⁵

Hirokazu NONAKA, Masataka YAMAGUCHI, Yoshio HATADA
Yoshihiro UTSUNOMIYA and Mikio HINO

Measured and hindcasted wave data samples in the coastal area of the Japan Sea during a huge low pressure system in April 2012 are analyzed. The results are that 1) frequent occurrence of large wave heights in recent years gives rise to an increasing trend of low-induced annual maximum wave height data samples at many of the measurement stations and results in augmentation of the return wave heights and their standard deviations, 2) wave models such as SWAN and authors's YH3 reproduce well the time variations of wave heights and wave periods during the low, 3) the low may yield a maximum wave height slightly exceeding 13 m in the Japan Sea, which probably corresponds to the uppermost value in the past 70 years, 4) a Monte-Carlo simulation suggests the likely occurrence of greater wave heights.

1. 緒言

わが国では海岸・沿岸構造物の設計波高の決定に資するため、確率波高など波高の極値が観測資料や推算資料の解析に基づいて評価されてきた。しかし最近では、既往最大（有義）波高を更新する異常ストーム（台風や低気圧など）が相次いで生起・来襲していることから、波高の極値を再評価する必要性が生じており、日本海の沿岸もこうした状況にある。

そこで本研究では、2012年4月3～4日の低気圧（2012年4月低気圧）など異常低気圧時の最大波高の観測資料や推算資料を用いた検討に基づいて、日本海沿岸における波高極値の再評価を行う。

2. 観測資料に基づく確率波高の再評価

(1) 波高観測資料

日本海沿岸の波高の極値は主として台風以外の低気圧や西高東低の気圧配置（低気圧と総称する）時に生起することから、ここでは低気圧時年最大波高資料を扱う。

図-1は対象とする16沿岸波浪観測地点（●印）および波浪推算結果との比較に使用する3 GPS沖合波浪観測地点（●印）の位置と水深を示す。前者の2012年までの資料期間は30年（玄界灘）～43年（留萌、酒田、直江津、金沢）に及ぶが、この間に波高計の設置水深や機種、観測時間間隔などの変更、異常波浪時や長期の欠測および記録の不備などのほかに、近年の自然環境の変化の影響

図-1 19波浪観測地点と水深

が加わり、得られた年最大波高資料は必ずしも等質性を有するとは言えない。個々の地点の観測資料の状況は波浪台帳の記載事項に頼らざるを得ないが、観測時間間隔については港湾局資料では2時間間隔から2005～2006年以降に20分間隔（新潟、浜田では2時間のまま）に、気象庁資料（松前、経ヶ岬）では3時間から1時間に変更されている。

因みに、2012年4月低気圧は多くの観測地点で2012年までの観測期間中の突出した第1位波高（20分間隔資料）をもたらした。これらは酒田で11.01 m（第2位波高10.65 m）、輪島で9.32 m（第2位波高7.73 m）、金沢で9.43 m（第2位波高8.12 m）、福井で9.16 m（第2位波高8.16 m）であり、輪島で1.6 m、金沢で1.3 m、福井で1.0 mそれまでの最大波高を更新した。また、GPS波高計記録として山形県沖で12.39 m、秋田県沖で11.21 mが得られた。

1 正会員 博(工) (前)愛媛大学契約職員
2 正会員 工博 愛媛大学名誉教授
3 正会員 博(工) 愛媛大学講師大学院理工学研究科
4 正会員 博(工) (一財)日本気象協会海洋課主任技師
5 正会員 博(工) (株)テクノシステム代表取締役

(2) 低気圧時年最大波高資料の特性

図-2は酒田における1970～2005年で2時間間隔、2006～2012年で20分間隔の波高資料より抽出した43年間の低気圧時年最大波高 H_{AM}^L とこれにあてはめた回帰直線 $at+b$ (t : 年)を与える。酒田では最近になって最上位とこれに近い年最大波高 H_{AM}^L が相次いで生起していることから、回帰直線の挙動や勾配値 $a=0.049$ m/yearから明らかなように、 H_{AM}^L の経年的増加傾向がみられる。これは43年の間に行われた波高計の設置水深や機種および観測時間間隔の変更など人為的要因を主因とするほか、自然環境の変化の影響の可能性も考えられる。

図-3は有意水準を5%としたMann-Kendall片側検定（徐ら, 2002）により得た傾向変動強度指数 I_{MK} を16観測地点で示す。 $I_{MK} \geq 1$ (≤ -1)の場合、統計的に有意な増加（減少）傾向あり、 $|I_{MK}| < 1$ の場合、傾向変動（増加あるいは減少傾向）なし、とする。この図は H_{AM}^L 資料における傾向変動の有無および2005年以降の20分間隔資料の導入の影響を表す。傾向変動については統計的に有意な増加傾向（ $I_{MK} \geq 1$ ）を与える瀬棚、松前、深浦、酒田、新潟、直江津、福井のうち、直江津と福井でその傾向が強い。直江津では異なる機関で得られた資料を接続していることから、波高計水深の変化の影響が大きい。また、20分間隔資料の導入は増加傾向の強化（ I_{MK} の有意な増加）を生じ、福井、秋田、深浦、瀬棚、鳥取で強い影響がみられる。

(3) 確率波高の特性

極値統計解析には、候補分布をGumbel分布、Weibull分布およびFT-II型分布、母数推定を最小2乗法、最適分布の選択を最大相関係数基準、再現確率値の分散（標準偏差）の推定をjackknife法に基づくYamaguchi・Hatada (1997)のモデルを用いる。

表-1は3種類の H_{AM}^L 資料（2005年までおよび2012年までの2時間間隔資料と2005～2012年で20分間隔資料に置き換えた資料）に基づく100年確率波高 H_{100}^L とその標準偏差

図-2 低気圧時年最大波高の経年変化(酒田)

図-3 波浪観測地点における傾向変動強度指数

$H_{\sigma 100}^L$ を16観測地点で示す。まず、期間延長が H_{100}^L に及ぼす影響は輪島や福井を除いて有意でなく、確率波高はあまり変わらず、標準偏差 $H_{\sigma 100}^L$ は減少し、期間延長は確率波高の統計的信頼性の向上をもたらす。輪島では2時間間隔資料においても第1位波高が大きく更新されたことから、 H_{100}^L のみならず $H_{\sigma 100}^L$ も大幅に増大する。

ついで、20分間隔資料の導入は酒田、金沢で H_{100}^L の有意な増加を生じるが、輪島と福井では若干の増加にとどまる。これは酒田では2時間間隔資料による値を大きく上まわる20分間隔資料による第1位値11.01 m（2012年4月低気圧時）、金沢では同低気圧時の第1位値9.43 mなどが新たに含まれるのに対して、輪島と福井では2時間間隔資料でも20分間隔資料による第1位値に近い値が得ら

表-1 3種類の低気圧時年最大波高資料に基づく100年確率波高とその標準偏差

loc.	～2005 (2h)		～2012 (2h)		～2012 (20min)		loc.	～2005 (2h)		～2012 (2h)		～2012 (20min)	
	$H_{100}^L \pm H_{\sigma 100}^L$		$H_{100}^L \pm H_{\sigma 100}^L$		$H_{100}^L \pm H_{\sigma 100}^L$			$H_{100}^L \pm H_{\sigma 100}^L$		$H_{100}^L \pm H_{\sigma 100}^L$		$H_{100}^L \pm H_{\sigma 100}^L$	
Rumoi	7.40	0.21	7.29	0.17	7.32	0.16	Wajima	7.82	0.28	9.36	0.89	9.51	0.87
Sedana	9.73	0.85	9.35	0.69	9.47	0.59	Kana.	8.47	0.27	8.36	0.22	9.20	0.48
Matsu.	8.55	0.46	8.48	0.34	8.48	0.34	Fukui	8.63	0.31	9.06	0.39	9.12	0.42
Fuka.	10.18	1.32	10.52	0.98	10.46	0.80	Kyoga.	9.06	0.58	9.08	0.48	9.08	0.48
Akita	9.48	0.41	9.44	0.31	9.68	0.31	Tottori	8.09	0.38	8.03	0.38	7.90	0.36
Sakata	11.00	0.76	10.82	0.58	11.73	0.69	Hamada	8.52	0.47	8.32	0.43	8.32	0.43
Niigata	8.73	0.60	8.98	0.51	8.98	0.51	Aino.	5.79	0.88	5.52	0.73	5.53	0.69
Naoe.	9.33	1.19	9.21	0.90	9.22	0.85	Genkai.	8.23	0.72	8.23	0.66	8.22	0.65

unit of H_{100} and $H_{\sigma 100}$: m

れたことによる。他の地点では2005～2006年以降の20分間隔資料においても突出した H_{AM}^L を含まないことから、 H_{100}^L や H_{5100}^L に及ぼす観測時間間隔の影響はほとんどみられない。

3. 2012年4月低気圧時の日本海における波浪推算

(1) 波浪推算条件

この低気圧は日本海を西から東へ発達しながら進行し、中心気圧は日本海で3日3時の1000 hPaから3日21時の964 hPaに急速に低下した。森ら(2013)およびLee(2013)は当該低気圧に対して波浪推算を行っている。本研究の波浪推算では第3世代モデルのSWAN(Booijら, 1999)のVersion 40.91ABCと第2世代モデルである山口ら(1984)の格子点浅海モデル(YH3)を用いる。入力条件とする10 m高度海上風分布は気象庁による3時間ごとの解析値と1時間ごとの予報値を組み合わせた1時間間隔

値である。SWANでは、空間解像度 $\Delta\lambda=\Delta\phi=0.1^\circ$ 、周波数区間と個数 $f=0.04\sim 1.0$ Hz, 31個、方向間隔 $\Delta\theta=10^\circ$ 、時間間隔 $\Delta t=5$ 分を用い、観測結果の対応を考慮してKomenらによる発達項、Wu公式による海面抵抗係数の上限値を $C_d^{lim}=2.1\times 10^{-3}$ とした。一方、YH3では北緯 40° を基線に東西方向間隔 $\Delta y=8.5$ km、南北方向間隔 $\Delta x=11$ kmとし、周波数範囲と個数 $f=0.04\sim 0.5$ Hz, 24個、方向間隔 $\Delta\theta=10^\circ$ 、時間間隔 $\Delta t=5$ 分、を与えた。YH3の発達項は10 m高度風速で表示されている。波浪推算における海上風分布は1時間間隔値を5分ごとに線形補間して与えた。

(2) 波浪推算結果の考察

図-4は図-1に与えた新潟と藍島を除く14沿岸観測地点と沖合3地点で取得された有義波高、有義波周期の観測資料(H_{obs} , T_{obs})とSWAN, YH3による波高、周期の推算資料(H_{SWAN} , H_{YH3} , T_{SWAN} , T_{YH3})および後者の推算値の間の散布図をそれぞれ表す。また、最下段では最大(有義)

図-4 波高・周期の観測値と推算値の比較

波高 H_{max} についての3種類の散布図を示す。各図中には相関係数 ρ と原点を通る相関直線の勾配値 a_0 を与える。

まず特別波高の間の関係を表した第1段の図をみると、SWAN, YH3ともに各資料値は完全相関を表す45°直線のまわりにプロットされており、推算波高と観測波高の対応が良好であることがわかる。詳細には、SWANによる資料の45°直線まわりのばらつきがYH3による資料のそれよりやや小さく、観測資料により近い値をとるようにみえる。この挙動はそれぞれの相関係数が順に $\rho=0.951$ と0.940、原点を通る直線の勾配値が $a_0=1.12$ と1.14という数値からうかがえる。両推算波高の間の散布図では各資料値の45°直線まわりのばらつきが小さく、統計値は $\rho=0.986$, $a_0=0.966$ をとることから、平均的にみて H_{SWAN} と H_{YH3} はほぼ符合するが、 H_{YH3} が H_{SWAN} よりわずかに大きい特性がうかがえる。

ついで、周期についてはSWAN, YH3による推算値と観測値からなる各資料値は、いずれも45°直線まわりにプロットされており、それぞれの推算値と観測値の対応が平均的にみてかなり良好であることが示される。しかし、この場合にもSWANによる資料値の45°直線まわりのばらつきがYH3によるものよりやや小さいようにみえる。統計値はSWAN, YH3の順に $\rho=0.937$ と0.928, $a_0=0.990$ と0.993をとるから、この傾向がうかがえる。両推算周期の間の散布図では資料値は45°直線のまわりにプロットされ、45°直線からの隔たりも小さい。因みに、相関係数 $\rho=0.984$, 勾配値 $a_0=0.991$ であるから、平均的に T_{SWAN} と T_{YH3} は符合し、きわめて類似した挙動をとることがわかる。周期についてもSWANがYH3よりやや高い再現性を示すが、その程度はわずかである。

さらに、最大波高 H_{max} の間の散布図によれば、SWAN, YH3はともに大きい波高時にやや過小評価、相対的に小さい波高時にやや過大評価(YH3)の傾向にあるが、平均的な対応は十分に有意である。統計値はSWANとYH3の順に $\rho=0.885$ と0.843, $a_0=0.960$ と0.997であり、こうした挙動がうかがえる。両推算値の間では、資料値はかなり近い値をとり、 $\rho=0.957$, $a_0=0.962$ を与える。

以上のことから、波高と周期の特別値に対してSWANとYH3は同程度あるいは前者がやや高い再現精度を与えると言える。

図-5はSWANおよびYH3により得た最大波高と波向の空間分布を示す。SWANによれば、13 mを少し越える最大波高 H_{max}^{SWAN} の最大域(最大値は13.16 m)は低気圧経路にあたる山形県沿岸沖合に出現し、そこからW方向に向けて楕円状に波高が減少する挙動をとる。最大波高は能登半島沖でも10 mを上まわる。一方、YH3によれば、SWANと同様の場所に最大波高の最大域(最大値は13.04 m)が出現する。この場合も能登半島沖で波高は10 mを

図-5 日本海における最大波高と波向(2012年4月低気圧)

越える。両モデルに基づく最大波高および波向の空間分布は全体としてかなり類似する。

結論として、第3世代モデルのSWANは十分有意な再現能力をもつ。しかし、観測資料との比較において適正な結果を得るためには、発達項や C_d^{lim} の選択に関してtuningが必要である。また、第2世代モデルのYH3は波高・周期の時間変化や最大波高の空間分布からみてSWANとそれほど遜色のない再現性を与えると言える。

4. 日本海における波高の極値の考察

1946年以降の低気圧に対する日本海での波浪推算の結果によれば、過去65年の間に日本海あるいはその沿岸部で生じた低気圧時最大波高の最大値は10~11 m(山口ら, 1994; 山口ら, 2006)あるいは最近の低気圧に対して11~12 m(駒口ら, 2009)と見積もられたが、2012年4月低気圧時には森ら(2013)および本研究の結果で約13 mと評価されており、1 m以上高い値が得られた。また、酒田で最大波高11.01 mや山形県沖GPSブイ波高計で12.39 mが観測された。これは異常事象の生起に加えて、海上風・波浪計算における時空間解像度の向上によると推測される。しかし、検討対象期間は100年にも達しないことから、温暖化などによる地球環境の変化を考慮しない場合でも、数千年以上の期間ではより大きい最大波高の出現が想定される。そのため、野中ら(2007)は確

率的低気圧モデルに基づいて発生した10万年の間の仮想的低気圧に対する波浪推算 (YH3モデル, 格子間隔40 km) を実施し, この間に生じた全低気圧に伴う格子点別最大波高を低気圧時のほぼ可能最大波高 H_{max}^{ML} (Most Likely maximum wave height; MLmax) としてその空間分布を明らかにした。

図-6は H_{max}^{ML} をもたらした代表的な仮想低気圧の6時間ごとの経路と中心気圧および当該低気圧時最大波高と波向の空間分布を表す。ここでは2012年4月低気圧に近い経路のものを選択した。限られた格子間隔で日本海領域をできるだけ適切に表すために, N-S軸を反時計方向に45°回転させている。楕円型気圧分布に基づく傾度風の場合は比較的単純であるので, 波高もロシア沿岸沖合の6 m から北海道西部と能登半島の各沖合を結ぶライン上の14 m に向けて単調増加し, 北海道南西端と秋田県男鹿半島を結ぶライン上で16 mに達する。波向はおおむねNWをとる。この場合, 16 m波高域で生じる最大風速は40 m/s以下という現実的にあり得る値をとる。

5. 結語

得られた結果の要点はつぎのようである

- ①低気圧時年最大波高資料には, 統計的に有意な増加傾向が16地点中7地点で検出される。
- ②2012年4月低気圧時最大波高など2006年以降に生じた最上位値やその近くに位置する異常値は20分間隔資料の導入と相まって, 日本海中部沿岸の酒田, 輪島, 金沢, 福井で確率波高とその標準偏差の有意な増加をもたらす。
- ③日本海の沿岸や沖合で取得された2012年4月低気圧時の波高・周期時系列はSWANおよびYH3によってよく再現される。第2世代モデルのYH3の精度は第3世代モデルのSWANの精度と同程度か, あるいはわずかに低い。
- ④2012年4月低気圧時の日本海における最大波高は13 mを少し上まわり, 過去約70年の間の期間最大波高に相当すると推測される。この値は確率的低気圧モデルを用いた波浪シミュレーションより推測された, ほぼ可能最大波高の16 mより約3 m低いことから, 今後さらに異常な高波高が生起する可能性は否定されない。

参 考 文 献

- 駒口友章・李 漢洙・山下隆男 (2009) : 日本海中部沿岸における異常波浪の発生機構の検証, 土木学会論文誌B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.206-210.
- 徐 宗学・竹内邦良・石平 博 (2002) : 日本の平均気温・降水量時系列におけるジャンプ及びトレンドに関する研究, 水工学論文誌, 第46巻, pp.121-126.

図-6 日本海にほぼ可能最大波高を生起する低気圧の経路と中心気圧および波高・波向の空間分布

- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・大福 学 (2007) : 台風時および低気圧時波浪シミュレーションに基づく日本周辺海域における可能最大波高の推定, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.101-105.
- 森 信人・高木友典・川口浩二・加島寛章・間瀬 肇・安田 誠宏・島田広昭 (2013) : 2012年4月3~4日に日本海で急発達した低気圧による暴波浪特性, 土木学会論文誌B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.126-130.
- 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄 (1984) : エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値モデルについて, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.123-127.
- 山口正隆・畑田佳男・中村雄二 (1994) : 波浪追算に基づく日本海沿岸での波高の極値の推定, 自然災害科学J. JSNDS, 13-2, pp.173-191.
- 山口正隆・畑田佳男・野中浩一・大福 学 (2006) : わが国周辺海域における波高の極値の推定, 工学ジャーナル (愛媛大学), 第5巻, pp.153-162.
- Booij, N., Ris, R.C. and L.H. Holthuijsen (1999) : A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation, Jour. Geophys. Res., 104 (C4), pp.7649-7666.
- Lee, H.S. (2013) : Abnormal storm waves in the East Sea (Japan Sea) in April 5-2012, Jour. Coastal Res., Spec. Issue No.65, pp.748-753.
- Yamaguchi, M. and Y. Hatada (1997) : An extremal analysis system and its application to the estimation of extremes of meteorological and oceanographic elements around the coasts of Japan, Proc. WAVES97, Vol. 2, pp. 932-946.