2012年4月3～4日低気圧に伴う日本海沿岸での 波高極値の追加検討

野中 浩一¹・山口 正隆²・宇都宮 好博³・日野 幹雄⁴・畑田 佳男⁵

¹正会員 (前) 愛媛大学契約職員 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail:nonakahirokazu@gmail.com

²正会員 愛媛大学名誉教授 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail:myamag@dpc.ehime-u.ac.jp

³正会員 一般財団法人 日本気象協会 事業本部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

E-mail:hiro@jwa.or.jp

⁴正会員 株式会社テクノシステム (〒693-0034 島根県出雲市神門町735-3)

E-mail:m_hino@technosystem.co.jp

⁵正会員 愛媛大学大学院理工学研究科講師 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail:hatada.yoshio.mj@ehime-u.ac.jp

日本海における2012年4月3～4日の低気圧(LPS)を対象として、気象庁MSM風資料を入力条件とした第3世代モデルSWANによる波浪推算を異なる時間間隔 Δt や仮想的低気圧条件のもとで行い、最大波高の最大値 H_{maxM} などを調べた結果、① H_{maxM} に及ぼす Δt の影響は有意であり、クーラン数1.5以下が望ましいこと、②風速場を15 %増幅することにより、確率的波浪シミュレーションで想定される H_{maxM} に達すること、③当該低気圧は最も大きい H_{maxM} を生じるコースをとったこと、④移動速度の減速により H_{maxM} が大きくなり、最大の増加量1.1 mが速度比2/3の場合にみられること、⑤当該低気圧は日本海の北東部沿岸に風速、コース、移動速度に関して現実的な最悪条件に近い条件での異常波高をもたらしたことが指摘された。

Key Words : April 3-4, 2012 LPS, Japan Sea, MSM winds, SWAN, maximum significant wave heights

1. 緒言

2012年4月3日から4日にかけて日本海を西から東へ横断した低気圧(以下2012年4月低気圧あるいは当該低気圧と言う)は日本海沿岸北東部に既往最大級の異常波高をもたらしたことが観測資料(川口ほか¹⁾)や推算資料(野中ほか²⁾)に基づいて指摘されていることから、その特性の細部を検討することは今後の災害対策や施設設計に有用な基礎資料を提供すると考えられる。

当該低気圧時の波浪の推算研究は森ほか³⁾、Lee⁴⁾と上述の野中ほか²⁾によってそれぞれ独自の観点から行われているが、ここでは当該低気圧に伴う波高の特徴を、種々の観点から得た波浪推算資料に基づいて再度検討する。すなわち、野中ほか²⁾と同じく気象庁提供のMSM風資料を入力条件とする第3世代波浪推算モデルSWANによる波浪推算を各種の条件のもとに行い、まずは最大波高に及ぼす波計算時間間隔の影響をみる。ついで、当該

低気圧時の最大波高の空間分布の特徴を際立たせるため、当該低気圧の①強度(風速)、②コース、③移動速度、を仮想的(人為的)に変えた場合の波浪推算結果との比較および可能想定最大波高の空間分布の推定結果⁵⁾との対比を行う。

2. 海上風と波浪

(1) 2012年4月低気圧(L2012. 04. 03-04)の特性

4月2日21時朝鮮半島付近にあり、中心気圧1006 hPaの当該低気圧は3日から4日にかけて日本海を西から東へ急速に発達しながら通過しオホーツク海に達した^{3) 4)}。この間の中心気圧は低気圧の中心が佐渡島北方にあった3日21時には964 hPa、津軽半島付近にあった4日3時には962 hPa、オホーツク海南部にあった4日9時には952 hPaにまで低下した。この結果、日本海では暴風が吹続

し、最大で 10 m をはるかに越える異常波浪が生起した。

(2) 観測波高の特性

当該低気圧は北陸沿岸から東北沿岸の多くの観測地点で2012年までの観測期間中の第1位(有義)波高をもたらした。因みに、これらは暫定値として酒田では 11.01 m (第2位波高は 10.65 m), 輪島で 9.32 m (7.73 m), 金沢で 9.43 m (8.12 m), 福井で 9.16 m (8.16 m) である。野中ほか²⁾は日本海沿岸の 16 観測地点において、観測開始年から 2005 年および 2012 年までの低気圧時年最大(有義)波高資料(2012 年までの観測期間 30~43 年)に対して Yamaguchi・Hatada⁹⁾の最小 2 乗法(LSM)モデルを適用して 100 年確率波高とその標準偏差を求め、2006~2012 年の間の低気圧時年最大波高資料が確率波高の推定値に及ぼす影響を明示した。図-1 は野中ほか²⁾による 2005 年および 2012 年までの資料に基づく最適分布から求めた 2012 年までの第 1 位波高に対する再現期間 R 年の観測地点別値を与える。第 1 位波高が大きく更新された輪島、金沢、福井では 2005 年までの資料に基づく最適分布による再現期間(○または●印)は最短でも 429 年をとり、第 1 位波高の突出度の影響が鮮明に現われている。また、再現期間が 70~100 年をとる地点も留萌、瀬棚、深浦、新潟、直江津、藍島の 6 地点に及ぶ。同様の傾向は 2012 年までの資料に基づく場合にもみられるが、異常に長い再現期間を与えた輪島、福井、金沢では再現期間が最長で金沢の 153 年と劇的に短くなり、現実的な値をとる。これから、当該低気圧の最大波高が確率波高の推定値、すなわち、その再現期間に大きく影響することがわかる。

(3) 海上風分布資料と波浪推算条件

入力条件とする海上風分布資料は気象庁MSMモデル(緯度・経度方向空間解像度 $0.05^\circ \times 0.0625^\circ$)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

図-1 第1位波高に対する再現期間 R の観測地点別値

間隔値である。波浪推算には第3世代モデルのSWAN(Booij et al.⁷⁾)のVersion 40.91ABCを適用し、緯度・経度座標方向の空間解像度 $\Delta\lambda = \Delta\phi = 0.1^\circ$ 、周波数区間と個数 $f = 0.04 \sim 1$ Hz, 31個, 方向間隔と個数 $\Delta\theta = 10^\circ$, 36個, 波計算時間間隔 $\Delta t = 5$ min, Komenによる発達項と減衰項(係数 $p = 2$, $\delta = 1$)および観測値との対応を考慮してWu公式による海面抵抗係数の上限値 $C_d^{lim} = 2.1 \times 10^{-3}$ とした。ここではこれを基準ケースとして、 Δt の変更とともに、低気圧条件の人為的な変更(①風速, ②コース, ③移動速度)に伴う波浪推算を行った。

3. 波浪推算結果の検討

(1) 推算精度の検証

図-2 は日本海の北海道から北九州に至る 14 沿岸観測地点と北東部の 3 沖合観測地点(GPS 波浪計)で取得された有義波高の特別値 H とその最大値 H_{max} それぞれについての観測値(添字 obs)と推算値(添字 SWAN)の散布図を示す(野中ほか²⁾)。SWAN による波高推算値は中間値以下でやや過大に、中間値以上でやや過小に評価する傾向が特別値と最大値のいずれについてもみられるが、それぞれの推算値は相関係数 ρ や散布図における勾配値 a_0 が示すように、全体としては非常に広い範囲で観測値との良好な対応を与える。

(2) 波計算時間間隔 Δt の影響

図-3 は基準ケースでの SWAN (SWAN-St) による波浪推算より得た最大波高 H_{max} の空間分布(野中ほか²⁾)を示す。最大波高は秋田・山形沖に形成された最大域から対岸の大陸側や朝鮮半島側に向けて楕円状に減少する空間分布を与える。最大波高の最大値 H_{maxM} とこれに伴う周期 T_{maxM} および出現位置は 13.16 m, 13.6 s, (南北方向 $i = 59$, 東西方向 $j = 147$) である。ここで、 Δt の影響を調べるために、当該低気圧に対して $\Delta t = 10$ min, 20

図-2 特別別波高および最大波高に対する観測値と推算値の散布図(野中ほか²⁾)

図-3 基準ケースにおける最大波高の空間分布（野中ほか²⁾）

表-1 H_{maxM} に及ぼす Δt の影響

Δt min	H_{maxM} m	T_{maxM} s	location (i, j)	C_r
5	13.16	13.6	(59, 147)	0.73
10	12.98	13.4	"	1.46
20	11.83	12.8	"	2.93
30	9.60	11.7	"	4.39
60	7.29	10.3	"	8.78

min, 30 min, 60 min とした波浪推算を新たに行った。

表-1は Δt , H_{maxM} , T_{maxM} , 出現位置, クーラン数 C_r の一覧を与える。クーラン数は最低周波数 $f_{min} = 0.04$ Hz, 群速度 $C_{gmax} = 0.78/f_{min} = 19.5$ m/s, 空間間隔 0.1° (緯度方向で $\Delta x \approx 8$ km) に対して $C_r = C_g \Delta t / \Delta x$ により算定する。これによると, H_{maxM} の出現位置はいずれのケースでも同一である。しかし, H_{maxM} の値は $\Delta t=5$ min と 10 min でそれぞれ 13.16 m および 12.98 m とあまり変わらないのに対して, Δt のさらなる増加とともに有意な大きさを小さくなる。このときのクーラン数 C_r は 0.73 と 1.46 および 2.93 以上となっている。すなわち, SWANにおける伝播計算スキームは無条件安定であっても, Δt の増加とともに H_{maxM} の低下がみられる。この事例ではクーラン数を $C_r < 1.5$ とするのが望ましい。

図-4は H_{maxM} の出現位置 (59, 147) における波高 H の経時変化を示す。表-1に与えたように, $\Delta t=5$ min と 10 min のケースでは後者の波高が少し小さくなるだけで, その経時変化にあまり差を生じないが, $\Delta t \geq 20$ min では波高の有意な減少とピーク値出現時刻の遅れがみられ, とくに $\Delta t=60$ min のケースで顕著になる。

4. 日本海北東部沿岸域における仮想低気圧時最大波高の推定

図-4 H_{maxM} の出現位置における異なる Δt 条件での波高の経時変化

(1) 仮想低気圧の設定

2012年4月低気圧は秋田や酒田の沖合海域で既往最大級の異常波高を生起したと推定されることから, 当該低気圧に伴う海上風の時空間分布を1つの基準ケースとして, 仮想的(人為的)に①領域全体で風速 U_{10} をそれぞれ $\alpha = 1.1, 1.15, 1.2, 1.25, 1.3$ 倍した場合の海上風分布を入力条件としたSWAN-Stによる5ケースの波浪推算, ②海上風分布をN方向およびS方向にそれぞれ2ケース(0.5° と 1°)ずつ移動させた4ケースの波浪推算, ③移動速度を2倍(1時間(60分)間隔の海上風分布資料を30分間隔資料とみなす)から1/2倍(2時間(120分)間隔資料)まで15分間隔で変化させた場合の6ケースの波浪推算を実施し, ①風速の増強, ②低気圧コースの変更に伴う強風域の移動, ③風域の移動速度の変化による H_{max} の空間分布や H_{maxM} と T_{maxM} , 出現位置の特徴を調べる。

(2) 風速の増強の影響

図-5は $\alpha = 1.1$ と $\alpha = 1.2$ とした場合の最大波高 H_{max} と平均波向の空間分布を与える。風速の増強によっても波高が増加するだけで, 空間分布の状況はほとんど変わらない。表-2は $\alpha = 1.0, 1.1, 1.15, 1.2, 1.25, 1.3$ の6ケースに対する H_{maxM} と T_{maxM} および出現場所の一覧を示す。 H_{maxM} は, $\alpha = 1.0$ での13.16 m から $\alpha = 1.2$ での17.48 m, $\alpha = 1.3$ での19.69 m へと増加する。出現場所は (59, 147) に停っている。周期 T_{maxM} も H_{maxM} に応じて長くなる。こうした異常波浪の状況下では, 絶対値として H_{maxM} の値(m単位)が T_{maxM} の値(s単位)を上まわる。

仮想的低気圧に伴う最大波高の推定において風速の増加をどの程度に見積もるべきか明らかでないが, 20% ($\alpha = 1.2$) とすれば, 当該低気圧時の最大風速約 31 m/s に対して約 37 m/s になり, 必ずしも想定できない値でない。 $\alpha = 1.2$ に対しては $H_{maxM} = 17.48$ m であり, 当該低気圧 ($\alpha = 1.0$) に対する $H_{maxM} = 13.16$ m より 4.32 m 大きくなる。確率的低気圧モデルによる 10 万年間のシミュレーションで得られる最大風速は 40 m/s 以下, H_{maxM} は

図-5 風速増強のもとでの H_{max} の空間分布 図-6 異なるコースのもとでの H_{max} の空間分布 表-2 H_{maxM} に及ぼす風速増強の影響

α	H_{maxM} m	T_{maxM} s	location (i, j)
1.0	13.16	13.6	(59, 147)
1.1	15.29	14.5	"
1.15	16.37	15.0	"
1.2	17.48	15.3	"
1.25	18.60	15.8	"
1.3	19.69	16.2	"

表-3 H_{maxM} に及ぼすコース変更の影響

course change	H_{maxM} m	T_{maxM} s	location (i, j)
N 1°	12.61	13.4	(48, 146) (49, 146)
N 0.5°	12.56	13.3	(53, 145) (54, 145)
0°	13.16	13.6	(59, 147)
S 0.5°	12.37	13.3	(59, 147)
S 1°	11.25	12.3 12.2	(69, 132) (70, 132)

16mであるから、SWAN-Stで $\alpha = 1.2$ とした場合の H_{maxM} はこれを1m以上上まわる。一方、 $\alpha = 1.15$ とすると、 $H_{maxM} = 16.37$ m (最大風速は 35.7 m/s) であるから、両者は近い値をとる。ただし、確率的低気圧モデルにおける風速は傾度風モデル、推算波高は第2世代モデル YH3 (野中ほか⁵⁾) によるが、野中ほか²⁾が示したように SWANと YH3による推算波高の差は小さい。

(3) 風域移動(コース変更)の影響

当該低気圧のコースを変更した場合の H_{max} と平均波向の空間分布の2例を図-6に与える。また、表-3は4ケースのコース(基準ケースを含めて5ケース)変更に伴う H_{maxM} 、 T_{maxM} および出現位置の一覧を示す。コースをN方向に0.5°変更した場合、 H_{maxM} は基準ケースに比

べて0.6m減少し、出現場所もほぼN方向に移動する。逆にコースをS方向に0.5°変化させた場合も、 H_{maxM} は0.79m減少し、出現場所もS寄りに移動する。基準ケースを含む5ケースの結果をみると、 H_{maxM} の出現位置に相当する佐渡島周辺海域から青森県西側海域では H_{maxM} は12~13mをとる。これらのうちの最も大きい値は基準ケースの場合に生じているのは興味深い。一方、確率的低気圧モデルに基づく波浪シミュレーションの結果⁵⁾では、想定される最大波高(野中ほか²⁾)は北陸から東北の沿岸とその沖合で15~16mと推定されていることから、2012年4月低気圧の仮想的なコース変更に伴う H_{maxM} はこれらの値を上まわらない。

表-4 H_{maxM} に及ぼす移動速度変更の影響

$\Delta\tau$ min	γ_U	H_{maxM} m	T_{maxM} s	location (i, j)
30	2	9.21	11.2	(61, 135)
45	4/3	12.00	12.9	(59, 147)
60	1	13.16	13.6	"
75	4/5	14.08	14.2	"
90	2/3	14.28	14.3	"
105	4/7	14.14	14.2	"
120	1/2	13.85	14.0	"

図-7 異なる進行速度比のもとでの H_{max} の空間分布

(4) 低気圧の移動速度の影響

表-4 は入力する海上風分布の時間間隔 $\Delta\tau$ を異なる値とみなした場合、すなわち移動速度（速度比 γ_U ）を変えた場合の H_{maxM} 、 T_{maxM} 、発生位置の一覧を基準ケースを含めた 7 ケースについて与える。これによると、 H_{maxM} は基準ケース（ $\gamma_U = 1$ ）の 13.16m から移動速度比 γ_U の減少（時間間隔 $\Delta\tau$ の増加）とともに大きくなり、 $\gamma_U = 2/3$ （ $\Delta\tau = 90$ min）で最も大きい 14.28 m をとったのち減少に転じる。一方、 H_{maxM} は γ_U の増加（ $\Delta\tau$ の減少）とともに小さくなり、 $\gamma_U = 2$ （ $\Delta\tau = 30$ min）では最も低い 9.21m になる。 H_{maxM} の出現位置は移動速度が最も大きい $\gamma_U = 2$ （ $\Delta\tau = 30$ min）を除いて基準ケースの場合の（59, 147）と変わらない。要するに、海上風分布を同一とした仮想低気圧の移動速度が当該低気圧の 2/3 と遅い場合には 1.1 m の H_{maxM} の増加が見込まれるが、

図-8 H_{maxM} 出現位置における異なる進行速度比のもとでの波高の経時変化

その程度はそれほど大きいとは言えない。

図-7 は $\gamma_U = 2$ （ $\Delta\tau = 30$ min）および $\gamma_U = 2/3$ （ $\Delta\tau = 90$ min）、すなわち低気圧の進行速度が基準ケースのそれぞれ 2 倍および 2/3 倍のケースに対応する H_{max} の空間分布を示す。進行速度が速いケース（ $\gamma_U = 2$ ）では基準ケース（ $\gamma_U = 1$ ）に比べて、 H_{max} が領域全体で小さくなるとともに H_{maxM} の位置が W 方向に若干移動し、波向の場合にもその影響が現れる。また、遅いケース（ $\gamma_U = 2/3$ ）では基準ケース（ $\gamma_U = 1$ ）より H_{max} が領域全体でやや大きくなり、波向の場合も北海道西側海域で若干変化するが、 H_{maxM} 付近の分布状況は変わらない。

図-8は $\gamma_U = 2$ のケースを除く 6 ケースで H_{maxM} が得られた位置（59, 147）において 7 ケースの γ_U について波高 H の経時変化を示す。横軸の時間は実際の日付に対応するものとする（各ストームの終了時点は標準ケース $\gamma_U = 1$ の場合で 4 月 4 日 23 時、 $\gamma_U = 2$ の場合で 4 月 3 日 23 時、 $\gamma_U = 1/2$ の場合で 4 月 6 日 23 時になる）。 γ_U の減少は低気圧の移動速度の減少に対応することから、各ケースの波高の時間変化は γ_U の減少とともに緩やかな増加と減少に変わる。波高のピーク値は表-4に与えたように、 γ_U の減少とともに増加し、 $\gamma_U = 2/3$ （ $\Delta\tau = 90$ min）で最大値をとったのち緩やかな減少に転じる。要するに、当該低気圧が風域場を変えずに、より遅く移動すると仮定した場合に最大で 1.1 m の H_{maxM} の増加が見込まれる。

5. 結語

2012 年 4 月低気圧に対して波計算時間間隔 Δt を変えた波浪推算の結果および仮想的に条件設定をした各ケースの波浪推算の結果から、つぎのことが言える。

①無条件安定の差分スキームを採用している SWAN においても、 H_{maxM} の推算値に及ぼす Δt の影響は非常に大きい。推算精度の確保のためにはクーラン数 C_r を 1.5 以下とすることが望ましい。

②領域全体における風速の増強（ αU_{10} 倍）は H_{max} の空

間分布をあまり変えずに H_{max} 全体の増加をもたらす。 H_{maxM} は基準ケース ($\alpha = 1.0$) に対する 13.16 m から $\alpha = 1.3$ に対する 19.69 m へ約 50 % 増大するが、その出現場所は変化しない。 $\alpha = 1.15$ とした場合に確率的低気圧モデルに基づく波浪シミュレーションから推測された可能想定最大波高に近づく。

③当該低気圧のN方向あるいはS方向へのコース変更に対応して、 H_{max} の空間分布も変化するが、 H_{maxM} は当該低気圧時の値 (13.16m) より小さくなることから、当該低気圧が同じ規模の低気圧に対して最大級の H_{maxM} を生じるコースをとったことが推測される。

④低気圧の移動速度比 γ_U を1/2から2倍の範囲で変更することにより、 H_{maxM} は基準ケースの13.16 m から 9.21 ~ 14.28 m の間で変化する。最大の H_{maxM} (= 14.28 m)は $\gamma_U = 2/3$ のケースにおいて標準ケースと同じ位置で生じる。すなわち、当該低気圧の進行がもう少し遅かった場合には H_{maxM} がさらに増大した可能性がある。

⑤2012年4月低気圧に対して15%以上の風速増強のケースを除く仮想的最悪条件でも H_{maxM} はシミュレーション低気圧に基づく可能想定最大波高に達しないが、当該低気圧が既往最大級の波高を北日本に生じたのは間違いない。

以上の結果は第2世代モデルYH3によってもほとんど変わらない(山口ほか⁸⁾)。

謝辞：低気圧の移動速度の仮想的変更に関して2014年の海岸工学講演会で貴重な示唆を戴いた新潟大学泉宮尊司教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 川口浩二, 猪股 勉, 関 克己, 藤木 峻: 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2012), 港湾空港技術研究所資料, No.1282, 125p, 2014.
- 2) 野中浩一, 山口正隆, 畑田佳男, 宇都宮好博, 日野幹雄: 日本海沿岸における波高の極値の再検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, I_101-I_105, 2014.
- 3) 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: 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, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_126-I_130, 2013.
- 4) Lee, H.S.: Abnormal storm waves in the East Sea(Japan Sea) in April 2012, *Jour. Coastal Res., Spec. Issue No.65*, pp.748-753, 2013.
- 5) 野中浩一, 山口正隆, 畑田佳男, 大福 学: 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, 2007.
- 6) Yamaguchi, M. and Hatada Y.: 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, 1997.
- 7) Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen L.H.: A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation, *Jour. Geophys. Res.*, 104(C4), pp.7649-7666, 1999.
- 8) 山口正隆, 野中浩一, 畑田佳男: 近年における日本海での異常波浪の再現計算, 工学ジャーナル (愛媛大学), 第 14 巻, pp.94-138, 2015. http://www.eng.ehime-u.ac.jp/about/pub_press/documents/journal_2014.pdf

SUPPLEMENTARY INVESTIGATION FOR EXTREMES OF WAVE HEIGHTS IN COASTAL AREAS OF THE JAPAN SEA ASSOCIATED WITH APRIL 3-4, 2012 LPS

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

Wave hindcastings in the Japan Sea by the third generation model SWAN under input MSM winds conditions were conducted for April 3-4, 2012 Low Pressure System (LPS) and the virtually-modulated LPSs concerning strength, course and moving speed. Investigations of the largest maximum significant wave height H_{maxM} generated by each LPS show the following results: 1) the effect of time increment Δt used in wave hindcasting on H_{maxM} is significant and consequently use of Δt yielding the Courant number less than 1.5 for the lowest frequency and space increment is recommended, 2) a 15 % increase of wind speed in the Japan Sea yields H_{maxM} close to that based on 100,000-year simulations, 3) the actual LPS took a course generating the largest H_{maxM} among the supposed LPSs, 4) 2/3 decrease in translation speed of the LPS gives the largest 1.1 m increase in H_{maxM} . A final conclusion is that the concerned LPS may have brought about extraordinarily high wave heights to the northeastern coastal area of the Japan Sea under actually-conceivable quasi-worst LPS conditions.