

近年における日本海での異常波浪の再現計算

Hindcasting High Waves in the Japan Sea Generated by Recent Severe Storms

山口正隆*・野中浩一**・畑田佳男***

Masataka YAMAGUCHI*, Hirokazu NONAKA** and Yoshio HATADA***

Wave hindcasting in the Japan Sea using either the 2nd generation model YH3 or the 3rd generation model SWAN was conducted for each of the 8 severe storms which brought about very large waves along the Japanese coastal areas and/or swell-like high waves along the east coastal areas of Korea, in cases where hourly sea wind distribution is taken from the MSM(meso-scale model)-based winds products provided by JMA(Japan Meteorological Agency). The accuracy of each wave model is discussed on the basis of the comparison between hindcasts and measurements for the time variations of wave height and wave period at any of many stations deployed along not only the Japanese coast but also the Korean east coast, and then spatial distribution of the storm-generated maximum wave height was investigated. The main results are as follows. 1)both models reproduce well the time variations of wind waves measured during a storm and SWAN model yields a slightly better estimate than YH3. 2)in a general sense, either of the models evaluates well the swell-like high waves along the east coast of Korea but gives poor verification for the swell-like waves called 'Yorimawari-nami' in Toyama Bay associated with February-Storm in 2008 as did previous studies. 3)estimate for the largest maximum wave height generated by the concerned 8 severe storms is over 13 m in the offshore area of the Tohoku region, while it reaches over 9 m in the northern offshore area of the east coast of Korean Peninsula.

Key Words ; Japan Sea, recent severe storms, wind waves, swell-like waves, Japanese coast, east coast of Korea, MSM-based winds, YH3 and SWAN wave models.

1. 緒 言

最近、わが国の日本海沿岸では太平洋岸など他の沿岸海域と同様に既往最大波高に達するか、あるいは上まわるほどの異常波浪が生起することが少なくないことから、沿岸部の防災対策上これらの波浪を適正に再現・評価する必要に迫られている。また、韓国の東海岸（東岸）では日本海を伝播するうねり性異常波浪により大規模な海岸災害が繰り返し生じてきたことから、同様の状況にある。

従来こうした状況を再現するための波浪推算は手間のかかる作業であったが、最近では高い精度の気象資料（海上風分布資料）の整備と公開、および高度化された第3世代の波浪推算モデルのフリーソフトと

*愛媛大学名誉教授

Prof. Emeritus, Ehime University

**（前）愛媛大学工学部環境建設工学科

（former）Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

***愛媛大学大学院理工学研究科（工学系）生産環境工学専攻

Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

原稿受理 平成26年10月31日

しての公開によって、比較的手軽に行える作業となりつつある。すなわち、日本海を対象とした波浪推算では、全球規模の気象資料を入力条件としたメソ気象モデル (MM5, WRF など) による地形解像度の海上風計算と第 3 世代の波浪推算モデル (WAM, WAVEWATCH3 (WW3), SWAN) による波浪推算を組合わせたストーム時波浪推算が行われてきたが、メソ気象モデルの適用にはかなりの専門知識と習熟が必要となる。しかし、気象庁は 2002 年 5 月 15 日以降空間解像度 $\Delta x = 10 \text{ km}$ 、時間間隔 6 時間の (風) 解析値資料や 1 時間ごとの (風) 予報値資料の公表を開始して以来、いくつかの変更を経て 2007 年 11 月 21 日以降では地形解像度 $\Delta x = 5 \text{ km}$ 、時間間隔 3 時間の解析値資料と 1 時間間隔の予報値資料を提供しており、気象モデルの高度化や地形解像度と時間間隔のかなりの細密化をはかっている。したがって、これらの風資料を公表されている第 3 世代の波浪推算モデルへの入力条件とすることによって、メソ気象モデルの適用なしに適正な波浪推算の結果が得られると期待される。

そこで、本研究では 2003 年～2012 年の間の 8 ケースの特徴的なストームに対して日本海における波浪推算を気象庁による海上風分布資料の入力条件のもとに第 3 世代モデルの SWAN^[1]と第 2 世代モデルの YH3^[2]により実施し、わが国の日本海沿岸や韓国東岸での多数の観測地点における観測資料との比較に基づいて、その妥当性を検討する。また、推算資料に基づいて各ストームにおける最大波高の空間分布の特徴を調べる。

2. 海上風分布資料および波浪推算の方法

2.1 気象庁風資料と対象ストーム

気象庁は段階的に高度化された MSM (メソスケールモデル) を使用して得た空間解像度 Δx 、時間間隔 Δt の (風) 解析値資料と (風) 予報値資料を公表している。これらの資料と波浪推算対象ストームの期間はつぎのようである。

(a) 2002 年 5 月 15 日～2004 年 8 月 31 日の期間

$\Delta x = 10 \text{ km}$, $\Delta t = 6 \text{ h}$ の解析値と $\Delta t = 1 \text{ h}$ の予報値, 静力学モデル

① 2003 年 12 月 17 日～20 日; 直江津で観測最大 (有義) 波高 $H_{max} = 9.23 \text{ m}$

(b) 2004 年 9 月 1 日～2006 年 2 月 28 日の期間

$\Delta x = 10 \text{ km}$, $\Delta t = 6 \text{ h}$ の解析値と $\Delta t = 1 \text{ h}$ の予報値, 非静力学 (NH) モデル

② 2004 年 11 月 26 日～28 日; 深浦で $H_{max} = 10.36 \text{ m}$, 酒田で $H_{max} = 10.65 \text{ m}$

(c) 2006 年 3 月 1 日～2007 年 5 月 15 日の期間

$\Delta x = 5 \text{ km}$, $\Delta t = 3 \text{ h}$ の解析値と $\Delta t = 1 \text{ h}$ の予報値, 非静力学 (NH) モデル

③ 2006 年 10 月 22 日～25 日; 韓国東岸うねり

④ 2007 年 1 月 6 日～8 日; 福井で $H_{max} = 8.16 \text{ m}$

⑤ 2007 年 2 月 14 日～16 日; 酒田で $H_{max} = 9.58 \text{ m}$

(d) 2007 年 5 月 16 日～2007 年 11 月 20 日

$\Delta x = 5 \text{ km}$, $\Delta t = 3 \text{ h}$ の解析値と $\Delta t = 1 \text{ h}$ の予報値, 予報時間 33 時間に延長, 非静力学 (NH) モデル

(e) 2007 年 11 月 21 日～

$\Delta x = 5 \text{ km}$, $\Delta t = 3 \text{ h}$ の解析値と $\Delta t = 1 \text{ h}$ の予報値, 非静力学 (NH) モデルの更新に伴い MSM 用の地形データを変更

⑥ 2008 年 2 月 22 日～24 日; 寄りまわり波, 韓国東岸うねり (22～24 日)

⑦ 2010 年 12 月 28 日～2011 年 1 月 2 日; 韓国東岸うねり (～1 月 4 日)

⑧ 2012 年 4 月 3 日～4 日; 東北・北陸沿岸で既往最大波高発生

以上の解析値資料と予報値資料を組み合わせると $\Delta t = 1 \text{ h}$ ごとの海上風分布資料とする。すなわち、メソスケールモデル (MSM) (南北方向 $N22.4^\circ \sim N47.6^\circ$ 、東西方向 $E120^\circ \sim E150^\circ$ の領域、解像度 $0.05^\circ \times 0.0625^\circ$ 、

505×481 に分割)による3時間間隔解析風に1時間間隔予報値を組入れて1時間間隔のMSM風資料をMSM風の領域で作成する。ただし、実際には緯度・経度座標表示として2006年2月28日以前の(a), (b)で緯度×経度(0.1°×0.125°), 2006年3月1日以降の(c), (d), (e)で緯度×経度(0.05°×0.0625°)ごとに与えられる。その精度は最近のものほど高いと期待される。対象ストームは最大級の異常波高の生起(①, ②, ④, ⑤, ⑧), 異常波高と巨大寄りまわり波の生起(⑥)および韓国東岸での高波高うねりの生起(③, ⑦)と付随的に⑥)という特徴から選択している。各ストームの概況および波浪推算結果の考察は新しいものから過去に遡って順次個別に後述する。

2.2 波浪推算モデルと計算条件

(1) SWAN Version40.91ABC

SWAN^[1]は風波の発生・発達項, Hasselmann らの DIA 近似に基づく4波共鳴非線形相互作用項, パルスモデルによる深海性砕波減衰項, 流れによる相互干渉(wave action スペクトルの保存則を使用), shoaling, 屈折(回折), 底面摩擦の各項, 3波共鳴非線形相互作用項, 浅海・極浅海での砕波減衰項よりなる(深海)・浅海・極浅海用波浪推算モデルであり, 座標系, ソース関数および伝播計算法などに多くの選択肢をもつ。ここでは, Komen らによる発達項, Wu 公式による海面抵抗係数 C_d とその上限値 $C_{dmax} = 2.1 \times 10^{-3}$ を基本条件とし, 球面座標系を採用する。空間解像度は緯度・経度方向に $\Delta\lambda = \Delta\phi = 0.1^\circ$, 周波数条件は $f = 0.04 \sim 1$ Hz の31個(隣接周波数比1.1), 方向間隔 $\Delta\theta = 10^\circ$ の36個, 計算時間間隔 $\Delta t = 5$ 分とする。

Fig. 1は波浪推算領域である $N33^\circ \sim N47.6^\circ$, $E125^\circ \sim 145^\circ$ の領域を示す。図には, ここで使用する観

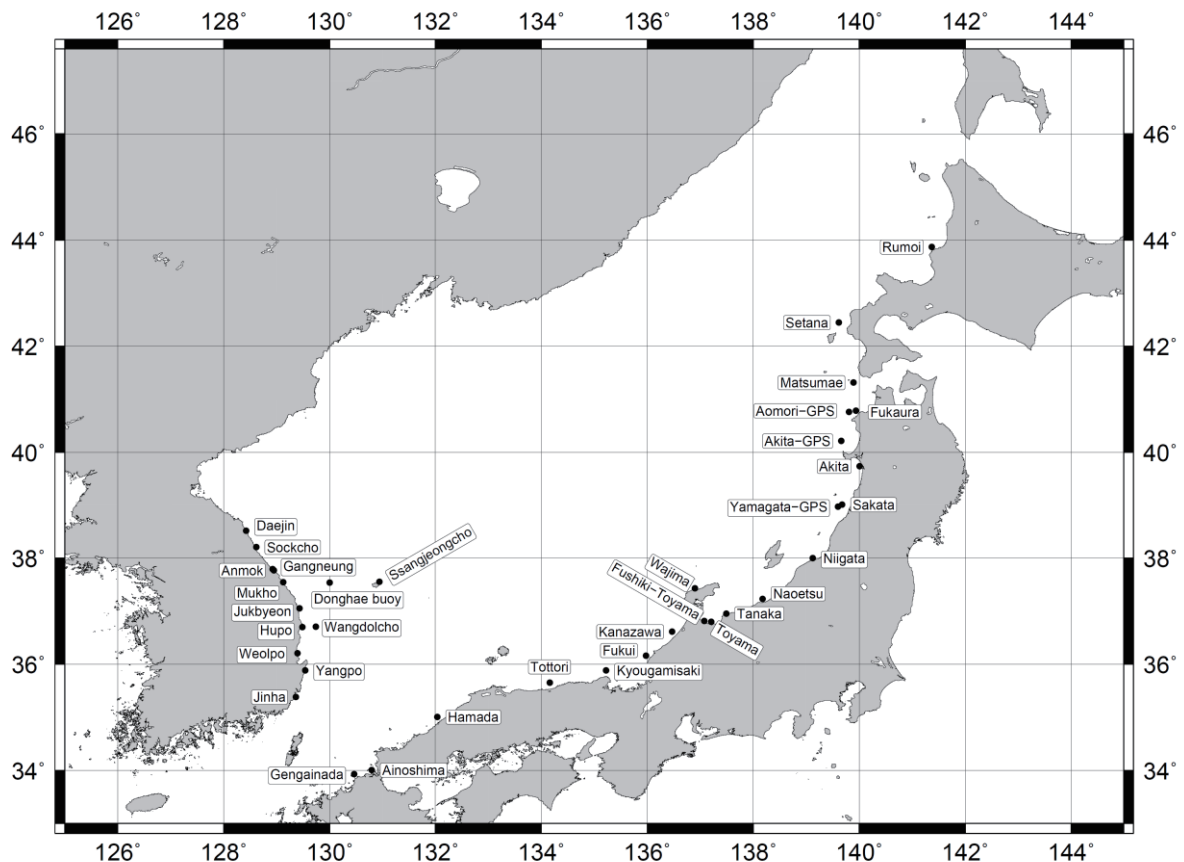


Figure 1 Area of MSM-based sea wind distribution data in the Japan Sea provided by JMA(Japan Meteorological Agency) and wave hindcasting area of the Japan Sea with location of wave measurement stations of Japanese coasts

測資料が得られたわが国の日本海沿岸のみならず韓国沿岸での波浪観測地点名を与える。1 時間ごとの海上風分布は 5 分間隔で線形補間する。境界条件として、領域 4 辺上の陸上のみならず海上の格子点で方向スペクトル値を 0 とする。境界を通じて入射する波浪の影響は大きくないので、この仮定は妥当と考えられる。

(2) 格子点浅海モデル (YH3)

これは風波の発生・発達、パラメータ化された 4 波共鳴非線形相互作用、平衡周波数スペクトルによる砕波減衰, shoaling, 屈折, 底面摩擦, 浸透, 浅海砕波を考慮する第 2 世代のデカルト座標系波浪推算モデル^[2]である。推算対象領域は北緯 40°を基線に南北方向の間隔 $\Delta x = 11$ km, 東西方向の間隔 $\Delta y = 8.5$ km とし, 周波数条件を $f = 0.04 \sim 0.5$ Hz で不等分割した 24 個, 方向条件を $\theta = 0 \sim 360^\circ$ で $\Delta\theta = 10^\circ$ で等分割した 36 個, 時間間隔を $\Delta t = 5$ 分とした。YH3 の発達項は 10 m 高度風速 U_{10} で表示されている。境界条件として領域 4 辺上の格子点で方向スペクトルの値 0 を与える。今回の計算では SWAN と同様に周波数スペクトルの-1 次積率に基づく平均周期 $T_{m-1,0}$ を有義波周期 T とする^{[3], [4]}。

2.3 波浪観測資料 (日本海沿岸と韓国東岸)

波浪推算の精度を検討するため、わが国の日本海沿岸で北東側から南西側にかけて配置されている多数の波浪観測地点のうち使用する波浪推算領域で解像されない局所地形の影響を受ける瀬棚や松前、富山湾内の地点 (田中、富山、伏木富山) や藍島、領域端に近い留萌を除く最大 15 地点の波浪観測資料を用いるが、何らかの理由で推算値と観測値があまりにかけ離れている地点の記録は除外する。また、記録が得られている場合 (2012 年 4 月 3 日~4 日の低気圧のみ) には、東北北部の日本海沿岸沖合に展開されている 3 基の GPS 波浪計記録 (青森県西岸沖, 秋田県沖, 山形県沖) の記録も用いる。Fig. 2 は 22 波浪観測地点と水深を与える。なお、2008 年 2 月 23 日~24 日の低気圧時には寄りまわり波に対する再現性をみるために富山湾湾口の田中と湾奥の伏木富山における観測資料を用いる。

ついで、韓国東岸における波浪観測資料はそれぞれの関連する論文に掲載された図から読取り用ソフトによって得た記録を用いる。これらは以下のようなものである。すなわち 2006 年 12 月 22 日~25 日の低気圧に対



Figure 2 Location of wave measurement stations along Japanese coast facing the Japan Sea.

して Ssangjeongcho (ウツリュウ島), Donghae Buoy, Wangdolcho の 3 地点 (波高のみ) のほか, 前記の 2006 年 10 月 22 日~25 日の低気圧に加えて, 2008 年 2 月 22 日~24 日と 2010 年 12 月 28 日~2011 年 1 月 2 日の各低気圧に Sokcho, Mukho, Hupo, Jinha の 4 地点, このほか 2010 年 12 月 28 日~2011 年 1 月 2 日の低気圧ではこの 4 地点に加えて, Daejin, Gangneung, Jukbyeon, Weolpo, Yangpo の 5 地点の合計 9 地点で, 2008 年 2 月 22 日~26 日の低気圧では Anmok で, それぞれ波高・周期系列図が提示されているので, 読取り用ソフトにより波高・周期の時系列資料を作成する。ここで, 波高は有義波高 H , 周期は有義波周期 T を指す。韓国東岸の Daejin から Jinha に至る 9 地点 (おそらく Anmok も) における波高計は水圧式であり, 波高はスペクトルから, 周期は zero-cross 法で算出されている。このため, 波高・周期, とくに周期の観測資料の精度に問題がある。また, Donghae ではブイ式波高計, 残り 2 地点では不明である。

波浪推算の解像度は 0.1° あるいは約 10 km, 沿岸波高計の位置は海岸から 1~2 km 以内 (韓国東岸では水深 20 m 以浅) であるから, 両者は必ずしも適正な比較とならない点に留意する必要がある。

3. ストーム時波浪推算結果の精度検証

3.1 2012 年 4 月 3 日~4 日低気圧

(1) ストームの概況

この低気圧は日本海で 2012 年 4 月 3 日 3 時の 1000 hPa から 3 日 21 時の 964 hPa へと急速に発達し, 日本海を含め日本周辺海域で暴風が吹送した。この結果, 東北地方から北陸地方の沿岸にかけて巨大波浪が来襲し, 最大波高は酒田で 11.01 m (第 2 位波高 10.65 m), 輪島で 9.32 m (第 2 位波高 8.12 m), 福井で 9.16 m (第 2 位波高 8.16 m) を記録し, 既往最大波高 (括弧内の第 2 位波高) 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。以上は暫定値であり, 川口ら^[5]による最終報告では金沢で 10.85 m, 福井で 9.96 m となっているが, 秋田における 12.22 m とともにそれらの時系列やその絶対値からみて適正な値と考えられないので, 採用していない。

(2) 波浪推算条件

ここでは(a) C_d 式 (山口ら^[6]), (b)風波の発達項, (c)地形解像度, を変えた波浪推算を行う。まず, Komenらによる発達項, 地形解像度 0.1° としたうえで, C_d 式に対して SWAN で与えられた Wu 式

$$C_d = \begin{cases} (0.8 + 0.065U_{10}) \times 10^{-3} & ; U_{10} > 7.5 \text{ m/s} \\ 1.2875 \times 10^{-3} & ; U_{10} \leq 7.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (1)$$

において, ①上限値を $C_{dmax} = 2.1 \times 10^{-3}$ (SWAN-St), ②上限値を SWAN で推奨された $C_{dmax} = 2.5 \times 10^{-3}$ (SWAN-Wu) とする。加えて,

③Mitsuyasu・Kusaba 式 (SWAN-MK)

$$C_d = \begin{cases} (0.581 + 0.063U_{10}) \times 10^{-3} \leq 2.55 \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 8 \text{ m/s} \\ 1.085 \times 10^{-3} & ; U_{10} < 8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2)$$

④Takagaki らの式 (SWAN-Ta)

$$C_d = \begin{cases} \{0.4/\ln(3.12 \times 10^6/U_{10}^2)\}^2 & ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (3)$$

⑤これを近似した Iwano らの式 (SWAN-Iw)

$$C_d = \begin{cases} 4.4 \times 10^{-4} U_{10}^{1/2} & ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

⑥ U_{10} に関する 2 次式で表した Zijlema ら^[7]の式 (SWAN-Zi)

$$C_d = \{0.55 + 2.97(U_{10}/U_{ref}) - 1.49(U_{10}/U_{ref})^2\} \times 10^{-3} ; U_{ref} = 3.15 \text{ m/s} \quad (5)$$

を用いる。式(5)の C_d は $U_{10} = 31.5$ m/s で最大値 2.03×10^{-3} をとり、 $U_{10} > 31.5$ m/s で U_{10} とともに減少する。

ついで、風波の発達・減衰項を option として与えられた⑦Janssen の式とする計算 (SWAN-Ja), ⑧Westhuysen の式で Wu の式(1) ($C_d \leq 2.1 \times 10^{-3}$) を用いる計算 (SWAN-WW), ⑨Westhuysen の式で Zijlema らの式(5) を用いる計算 (SWAN-WZ), さらに Komen による発達式, Wu による C_d 式 ($\leq 2.1 \times 10^{-3}$) とする⑩の場合で⑩ $\Delta x = 0.05^\circ$ の条件 (SWAN-D5) を用いる計算をそれぞれ行う。他の共通する条件として、伝播計算は BSBT (風上 1 次差分スキーム), 3 波共鳴項はなし, 流れ項はなし, とする。ここでは YH3 のモデルの結果を含めて 11 通りの計算結果を提示し, その特性をみる。

(3) 波高・周期の観測結果との比較

Fig. 3 は YH3 と①~⑤の 5 通りの SWAN による (有義) 波高 H および (有義波) 周期 T の時系列と観測時系列の比較を酒田において示す。このうち(a)図は YH3 と Wu 公式で $C_{dmax} = 2.1 \times 10^{-3}$ とした標準条件での SWAN による結果 (①SWAN-St) による結果を, (b)図は SWAN による 5 種類の結果 (①SWAN-St, ②SWAN-Wu, ③SWAN-MK, ④SWAN-Ta, ⑤SWAN-Iw) を与える。⑥~⑩の結果は図の錯綜を避けるため, 省略する。(a)図において YH3, SWAN-St とともに, 観測結果にみられる波高や周期の時間変化をよく再現する。(b)図においては, いずれの SWAN による結果でも波高や周期の時間変化は類似するものの, SWAN-Wu が最も大きい値を, SWAN-St が最も小さい値を, SWAN-MK, SWAN-Ta, SWAN-Iw はいずれもこれらの中間の値を与える。

Fig. 4 は錯綜を避けるため, 推算値を YH3 と SWAN-St に限定した場合に波高・周期観測時系列との比較を東北沖とその沿岸から北九州沿岸に至る秋田県沖, 山形県沖, 深浦, 直江津, 輪島, 金沢, 浜田, 玄界灘の 8 地点について示す。いずれの推算値も急激な風波の発達と緩やかな減少に関して観測値とかなりよく対応する。

Fig. 5 は秋田, 新潟 (ともにほぼ欠測) と瀬棚, 松前, 藍島 (地形による遮蔽効果大), 留萌を除く日本海沿岸 13 観測地点における波高 H , 周期 T , 最大 (有義) 波高 H_{max} に対する推算値と観測値の散布図を順次 YH3 と 10 種類の SWAN に対して示す。このうち, YH3 による結果 (a 図) および SWAN-St による結果 (b 図) はすでに野中ら⁸⁾ (ただし, 観測地点の位置に対して前回と若干異なる取扱い) で提示している。ここで注意すべきは推算資料と観測資料における最大波高の出現時刻がそれぞれにおける誤差や記録の不備等により必ずしも一致しないケースがある点であり, この結果, H の散布図と H_{max} の散布図において個々の資料値が符合しないケースも十分に生じうる。これは当該ストームのみならず他のケースのストーム時においても同様である。さて, Fig. 5 の結果を順次みると, つぎのようである。

1)YH3, SWAN-St とともに, 推算値は最大波高を含めて観測値とよく対応するが, 図中に誤差指標として与えた相関係数 ρ および原点を通る直線の勾配値 a_0 によると, SWAN-St が YH3 よりやや高い精度を示唆する。以下, SWAN による結果を相互比較する。

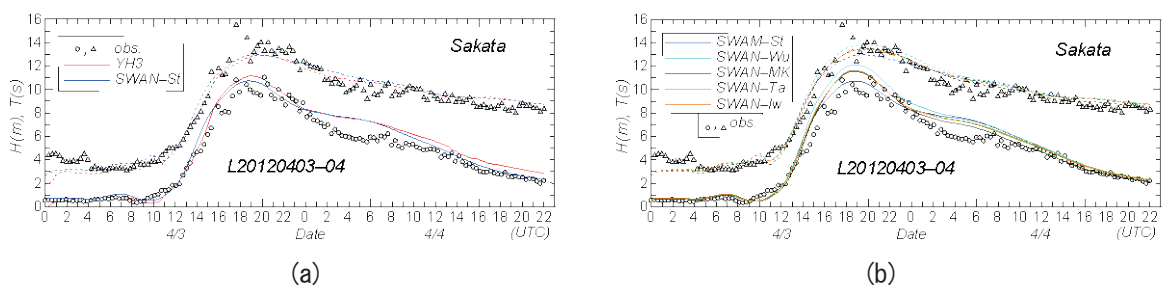


Figure 3 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of (significant) wave height H and (significant) wave period T at Sakata station during 2012.4.3-4 Storm, in cases where (a) YH3 and SWAN wave models or (b) 5 kinds of SWAN models are applied.

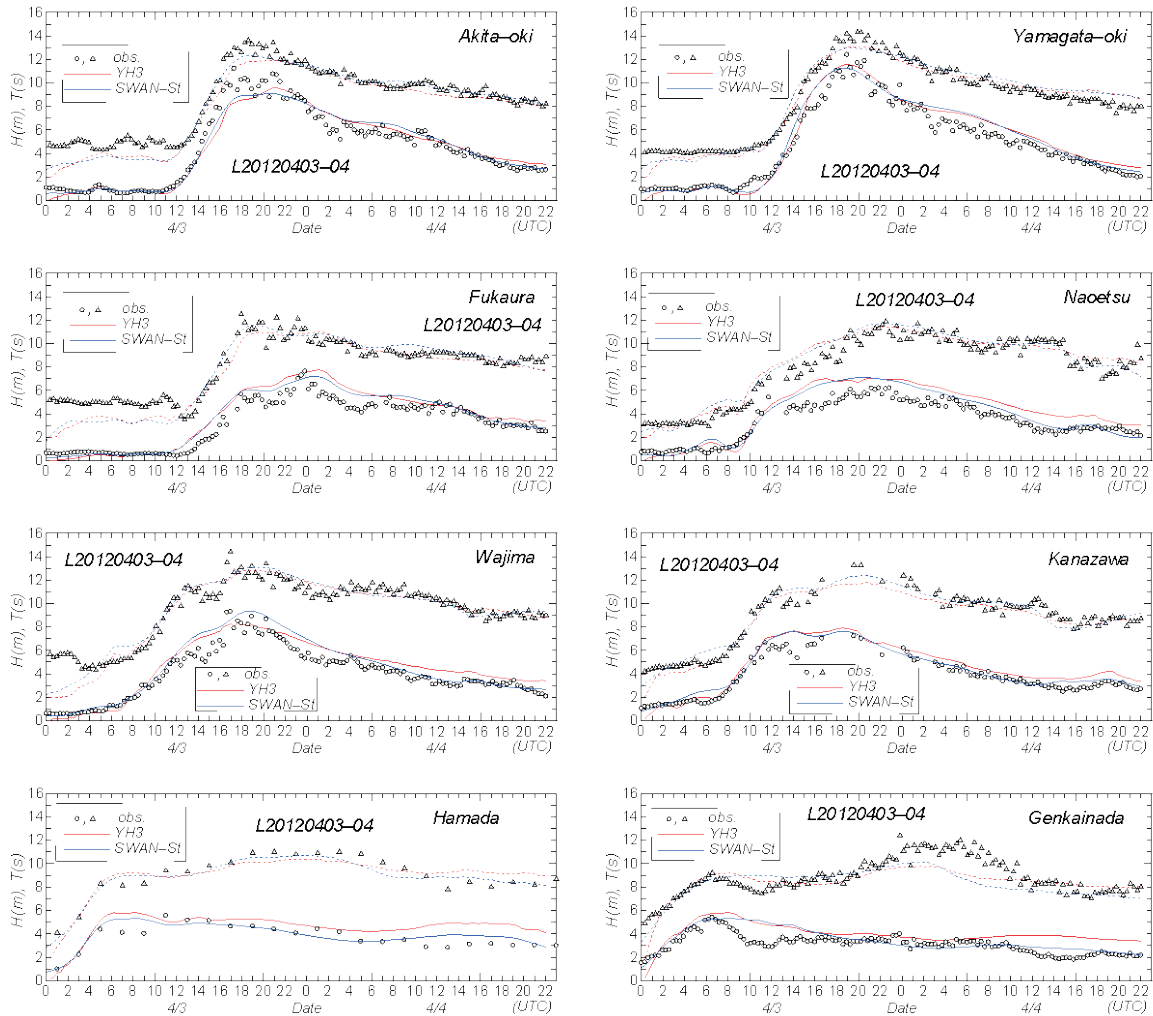


Figure 4 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 8 measurement stations during 2012.4.3-4 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

2)SWAN-St と SWAN-Wu を比べると、 C_d の上限値の増加によって、SWAN-Wu がとくに H_{max} に対してより大きい値を与え、観測値との対応も向上するが、時系列特性を表す H 図や T 図でもより大きい推算値を与える。全体として SWAN-Wu の精度が SWAN-St より高いとは言えない。これは $C_{dmax} = 2.1 \times 10^{-3}$ を標準条件 (SWAN-Standard ; SWAN-St) とした理由である。

3)SWAN-MK は H_{max} のみならず H や T に対して SWAN-St よりやや良好な精度を与える。

4)SWAN-Ta や SWAN-Iw も SWAN-MK と同様に SWAN-St よりやや高い再現性をもつように見える。3 者のうちでは SWAN-MK の精度がわずかに低い傾向にある。

5)SWAN-Ja は H_{max} のみならず、 H や T に対して観測値より過大な値を与えるので、風波の発達項に対してあまり適切な選択と言えない。

6)SWAN-Zi, SWAN-WW, SWAN-WZ は SWAN-St より小さい値を与えるが、誤差指標ではあまり差がない。

7)SWAN-D5 によれば、地形解像度を 0.1° から 2 倍にして 0.05° としても、SWAN-St に比べて有意な精度の向上は示唆されないことから、複雑な地形に囲まれた海域は別として、外海に開いた海域では 0.1° 格子網でも有用な結果が得られる。

Table 1 は Fig. 5 の各図に与えた誤差指標 (ρ, a_0) の一覧である。推算値が観測値より大きめの値 ($a_0 > 1$) や小さめの値 ($a_0 < 1$) を与える特性の差はある程度示唆されるものの、相関係数 ρ の差はあまりなく、いずれも推算値と観測値の間で有意な直線関係を示唆する。

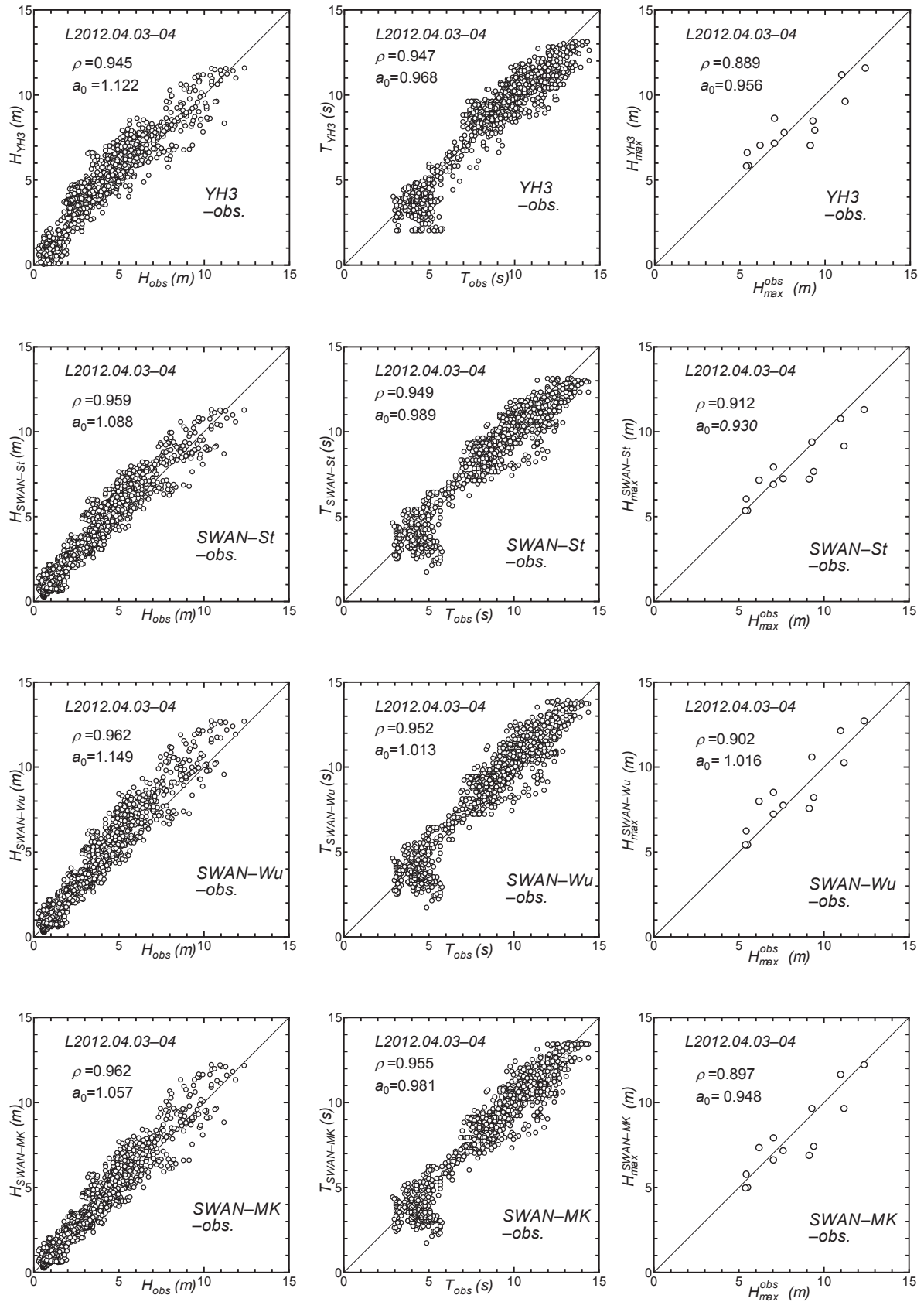


Figure 5 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of time-varying wave height H , time-varying wave period T and maximum (significant) wave height during a storm H_{max} under various wave model conditions in 2012.4.3-4 Storm case(1).

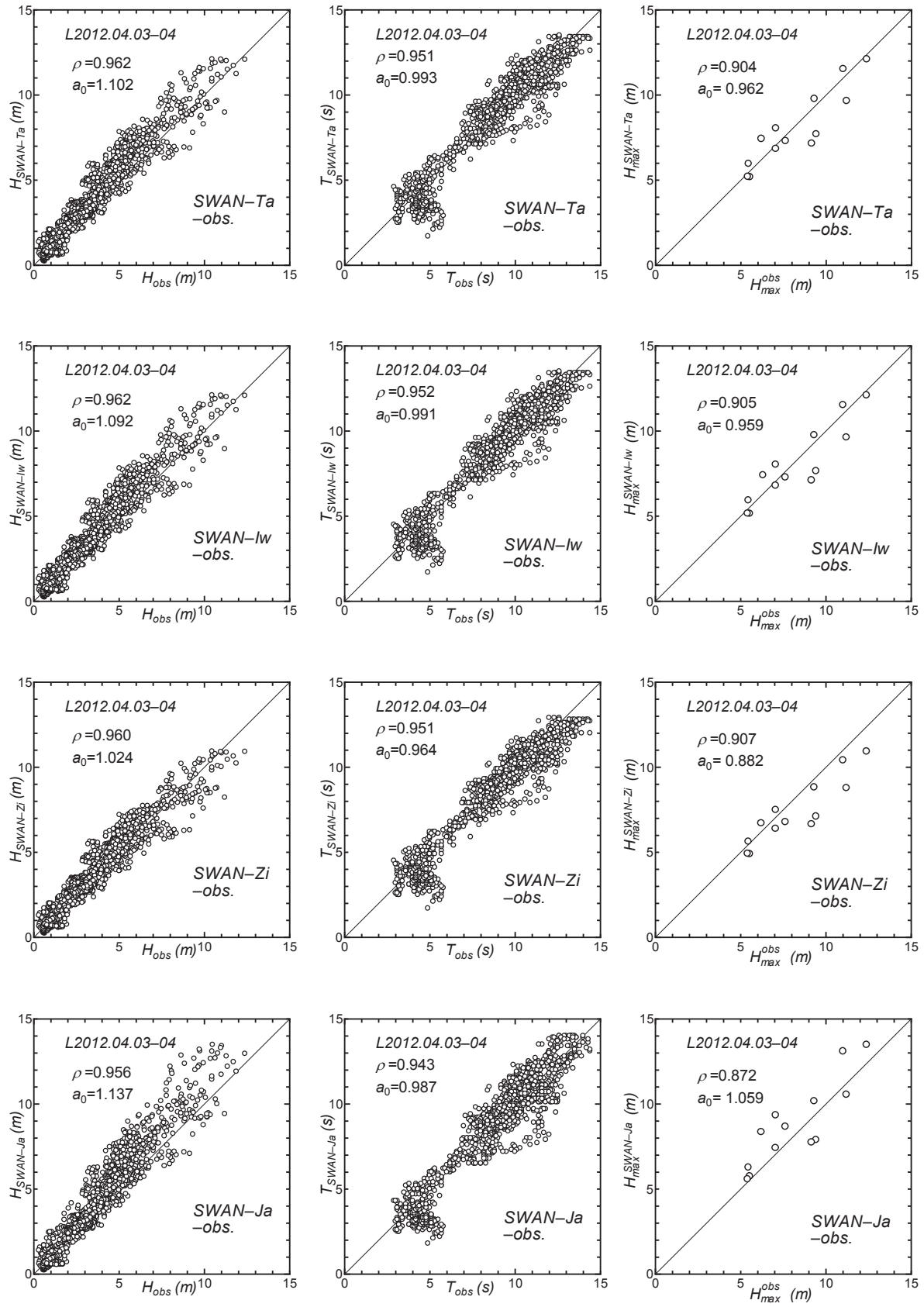


Figure 5 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of time-varying wave height H , time-varying wave period T and maximum (significant) wave height during a storm H_{max} under various wave model conditions in 2012.4.3-4 Storm case(2).

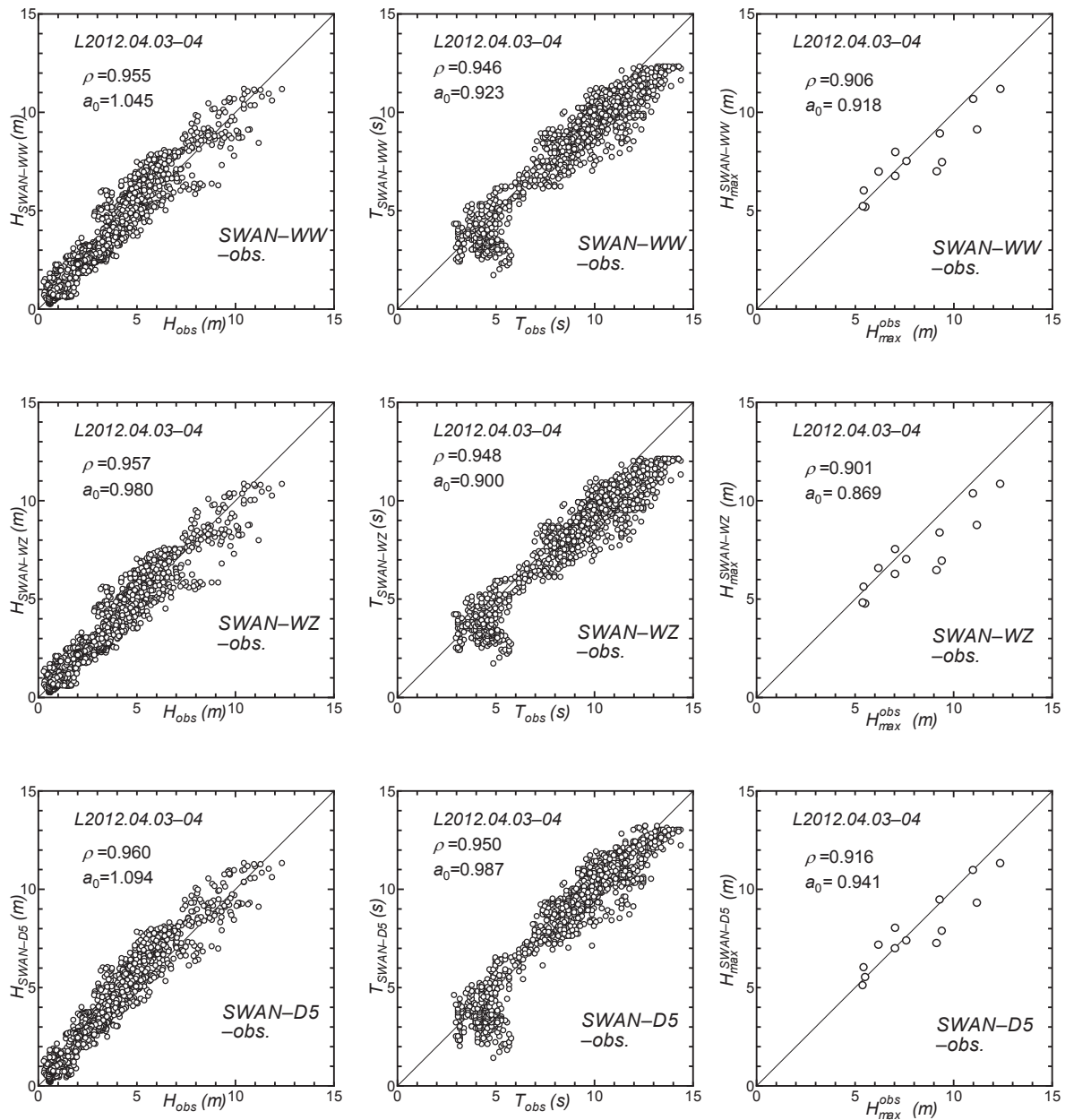


Figure 5 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of time-varying wave height H , time-varying wave period T and maximum (significant) wave height during a storm H_{max} under various wave model conditions in 2012.4.3-4 Storm case(3).

Fig. 6は最大波高 H_{max} の空間分布を YH3, SWAN-St, SWAN-Wu, SWAN-MK, SWAN-Ta, SWAN-Iw, SWAN-Zi, SWAN-Ja, SWAN-WW, SWAN-WZ, SWAN-D5について与える。YH3とSWAN-Stによる結果は野中ら⁶⁾に示したものである。これによると、いずれのモデルでも秋田の南西側 ($i(x) = 59, j(y) = 147$)に最大波高の最大域が形成されており、そこから対岸の大陸側や朝鮮半島側に向けて楕円状に最大波高が減少する空間分布をとる。最大波高の最大値 H_{maxM} とこれに伴う周期 T_{maxM} をTable 2に与える。最大波高の最大値はYH3で13.01 m, SWAN-Stで13.16 mとほぼ対応するが、SWAN-Wuで15.12 mとかなり大きくなり、SWAN-Ta, SWAN-Iw, SWAN-MKで中間の値14.32~14.44 mをとる。SWAN-WZ, SWAN-Zi, SWAN-WWでは12.37~12.82 mである。しかし、Janssenの発達項を使用するSWAN-Jaでは15.47 mをとり、SWAN-Wuよりさらに大きい値を与える。なお、地形解像度 0.05° のSWAN-D5では最大値は13.23 mと地形解像

Table 1 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 5.

model	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3	0.945	1.122	0.947	0.968	0.889	0.956
SWAN-St	0.959	1.088	0.949	0.989	0.912	0.930
SWAN-Wu	0.962	1.149	0.952	1.013	0.902	1.016
SWAN-MK	0.962	1.057	0.955	0.981	0.897	0.948
SWAN-Ta	0.962	1.102	0.951	0.993	0.904	0.962
SWAN-Iw	0.962	1.092	0.952	0.991	0.905	0.959
SWAN-Zi	0.960	1.024	0.951	0.964	0.907	0.882
SWAN-Ja	0.956	1.137	0.943	0.987	0.872	1.059
SWAN-WW	0.955	1.045	0.946	0.923	0.906	0.918
SWAN-WZ	0.957	0.980	0.948	0.900	0.901	0.869
SWAN-D5	0.960	1.094	0.950	0.987	0.916	0.941

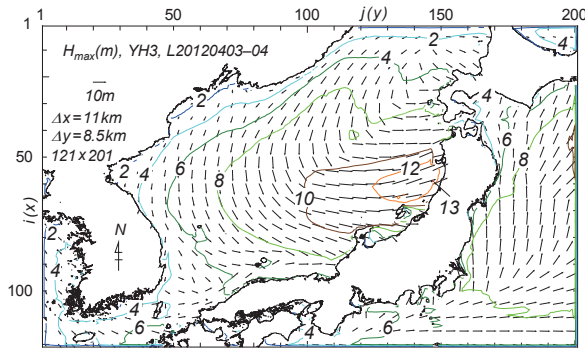
Table 2 A list of spatially largest maximum wave height H_{maxM} associated with corresponding wave period T_{maxM} during a storm and appearance location under various model condition in 2012.4.3-4 Storm case.

model	H_{maxM} (m)	T_{maxM} (s)	i, j
YH3	13.01	13.7	59, 147
SWAN-St	13.16	13.6	〃
SWAN-Wu	15.12	14.4	〃
SWAN-MK	14.44	14.1	〃
SWAN-Ta	14.32	14.1	〃
SWAN-Iw	14.32	14.1	〃
SWAN-Zi	12.68	13.4	〃
SWAN-Ja	15.47	13.8	〃
SWAN-WW	12.82	12.9	〃
SWAN-WZ	12.37	12.7	〃
SWAN-D5	13.23	13.6	119, 292

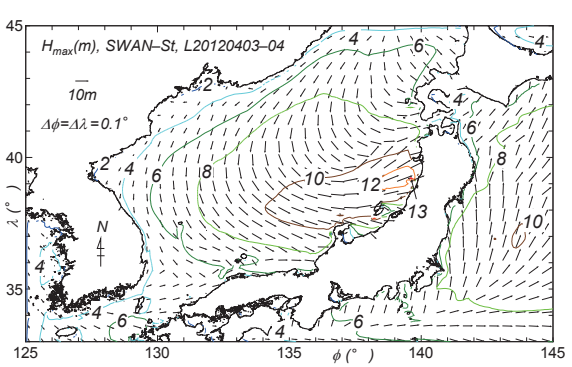
度 0.1° の SWAN-St の 13.16 m とほとんど変わらない。

以上の結果を要約すると、既往最大級の異常波高を生起した当該低気圧時の波浪に対して SWAN ($C_{dmax} = 2.1 \times 10^{-3}$) の精度は YH3 と同様にかなり良好であり、むしろ YH3 より若干高いが、適用する C_d 式により最大波高がかかなり変化することから、いずれを用いるべきか判断に迷うことや Wu 式 ($C_{dmax} = 2.5 \times 10^{-3}$) による C_d や Janssen による発達項を用いると、それぞれやや過大な最大波高が得られることが言える。また外海に開いた沿岸地点では地形解像度 0.1° と 0.05° による推算結果にあまり差はみられない。

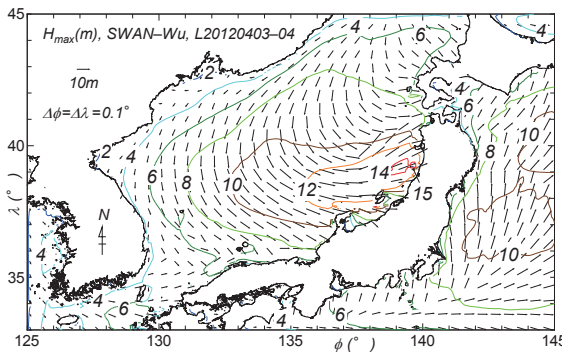
なお、森ら^[9]はこのストーム時の日本海沿岸における波高観測資料と波浪推算資料を用いて波高と個々波の最高波高との関係を検討している。また、Lee^[10]は波浪推算結果を山形県沖および秋田県沖の GPS 波浪計記録と比較して、その妥当性を確認するとともに、日本海における波浪特性を考察している。



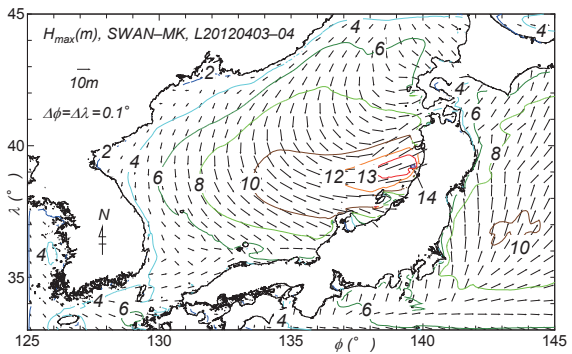
(a) YH3



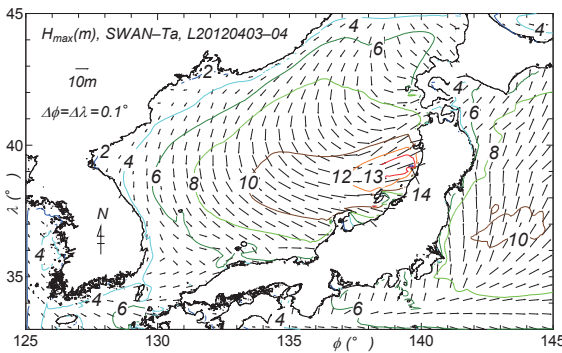
(b) SWAN-St



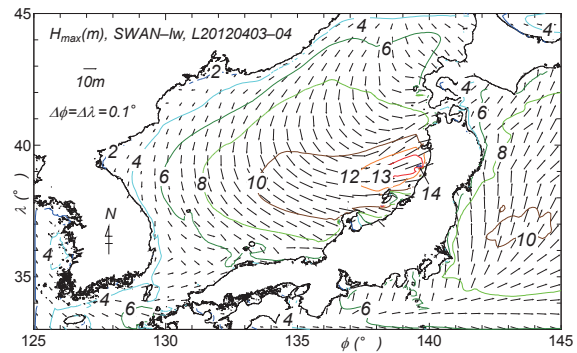
(c) SWAN-Wu



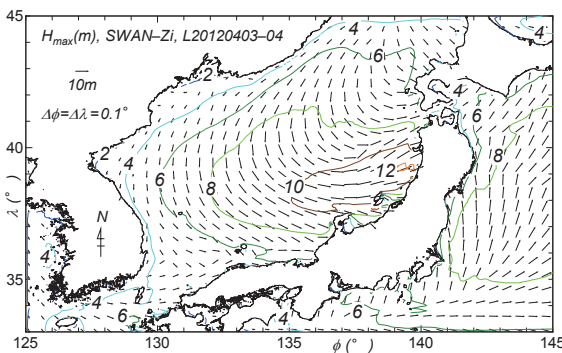
(d) SWAN-MK



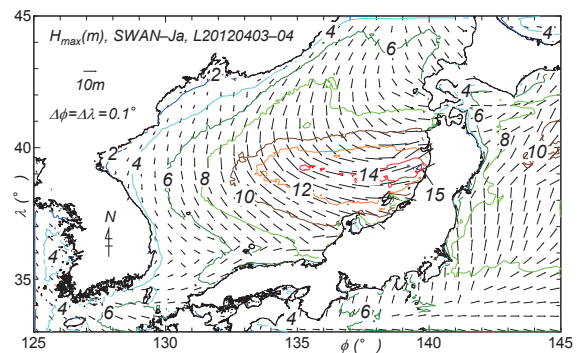
(e) SWAN-Ta



(f) SWAN-Iw



(g) SWAN-Zi



(h) SWAN-Ja

Figure 6 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2012.4.3-4 Storm hindcasted under various model condition such as (a) YH3, (b) SWAN-St, (c) SWAN-Wu, (d) SWAN-MK, (e) SWAN-Ta, (f) SWAN-Iw, (g) SWAN-Zi, (h) SWAN-Ja, (i) SWAN-WW, (j) SWAN-WZ, (k) SWAN-D5(1).

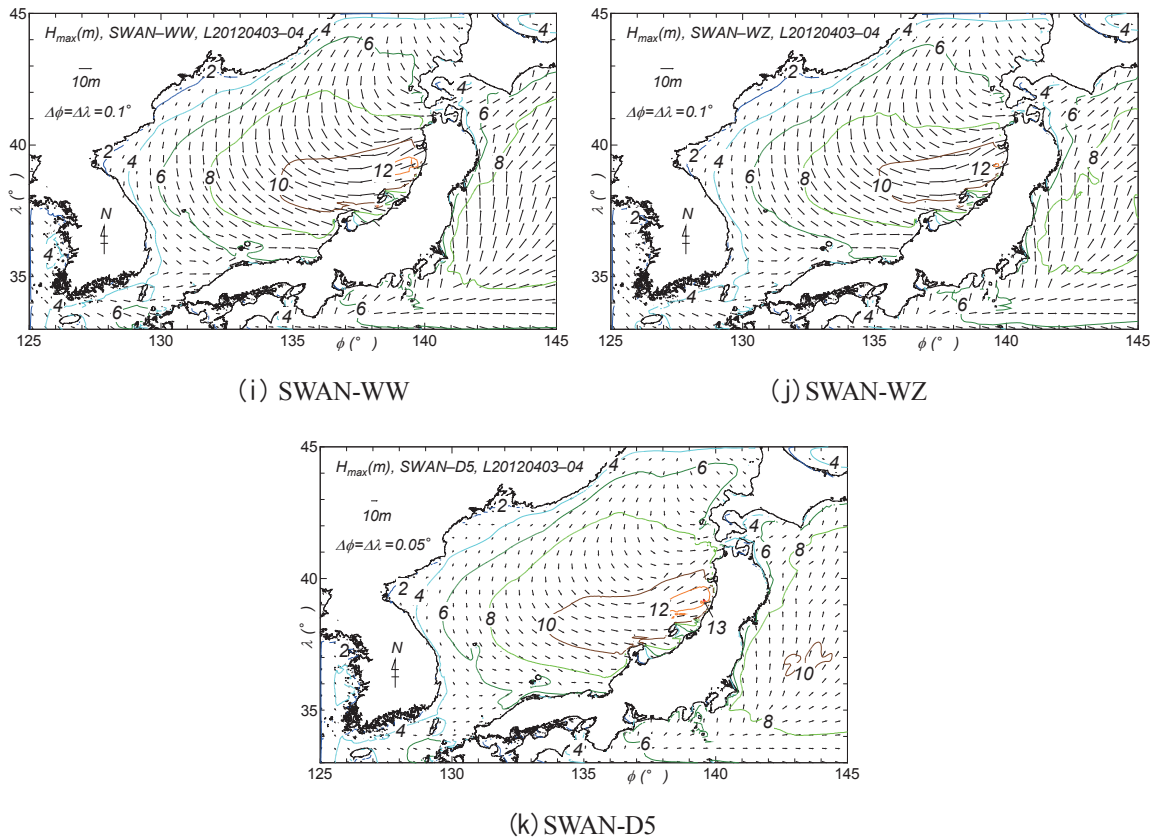


Figure 6 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2012.4.3-4 Storm hindcasted under various model condition such as (a) YH3, (b) SWAN-St, (c) SWAN-Wu, (d) SWAN-MK, (e) SWAN-Ta, (f) SWAN-Iw, (g) SWAN-Zi, (h) SWAN-Ja, (i) SWAN-WW, (j) SWAN-WZ, (k) SWAN-D5(2).

3.2 2010年12月28日～2011年1月2日低気圧

(1) ストームの概況

2010年12月28日に日本海にあった低気圧が発達して29日に三陸沖に進んで冬型気圧配置となったが、30日には日本海と四国沖における2つ玉低気圧が発達、31日には三陸沖に達して強い冬型気圧配置となり、2011年1月2日まで継続した。このストーム時には日本海沿岸中部の輪島での最大波高5.08mから西南部の玄界灘で5.83mと、これらの沿岸域で5~6mの波高が観測されたが、中部から北部の沿岸では4m以下である。むしろ太平洋側の東北沖合では8m以上の異常波高が観測された。Oh・Jeong^[11]によれば、韓国東岸で波高4~6mのうねり性高波浪が観測されている。

(2) 波高・周期の観測結果との比較

Fig. 7は波高・周期時系列に対する推算値(YH3, SWAN-St)と観測値の比較を日本海沿岸では輪島と玄界灘の2地点および韓国東岸では北から南にかけてDaejin(水深 $h=17.5$ m), Gangneun(13.0m), Jukbyen(18.0m), Yangpo(17.8m)の4地点で示す。SWAN-Stでは空間解像度 0.1° 、Wu公式においては $C_d \leq 2.1 \times 10^{-3}$ の標準条件を用いる。韓国東岸での観測値はOh・Jeong^[11]のFig. 2とFig. 3から読取っているため、読取り誤差も小さくない。これによると、日本側の観測地点ではいずれも推算時系列と観測時系列はかなりよく符合するが、YH3がやや過大な値を生じる。一方、韓国東岸でもうねり性波浪に対して両モデルは観測結果と比較的よい対応を与えるが、周期については小さめの値を示す。観測値は水圧式波高計によっているので、大きめに評価されていることから、推算値と観測との多少の乖離はやむを得ない。細部でみれ

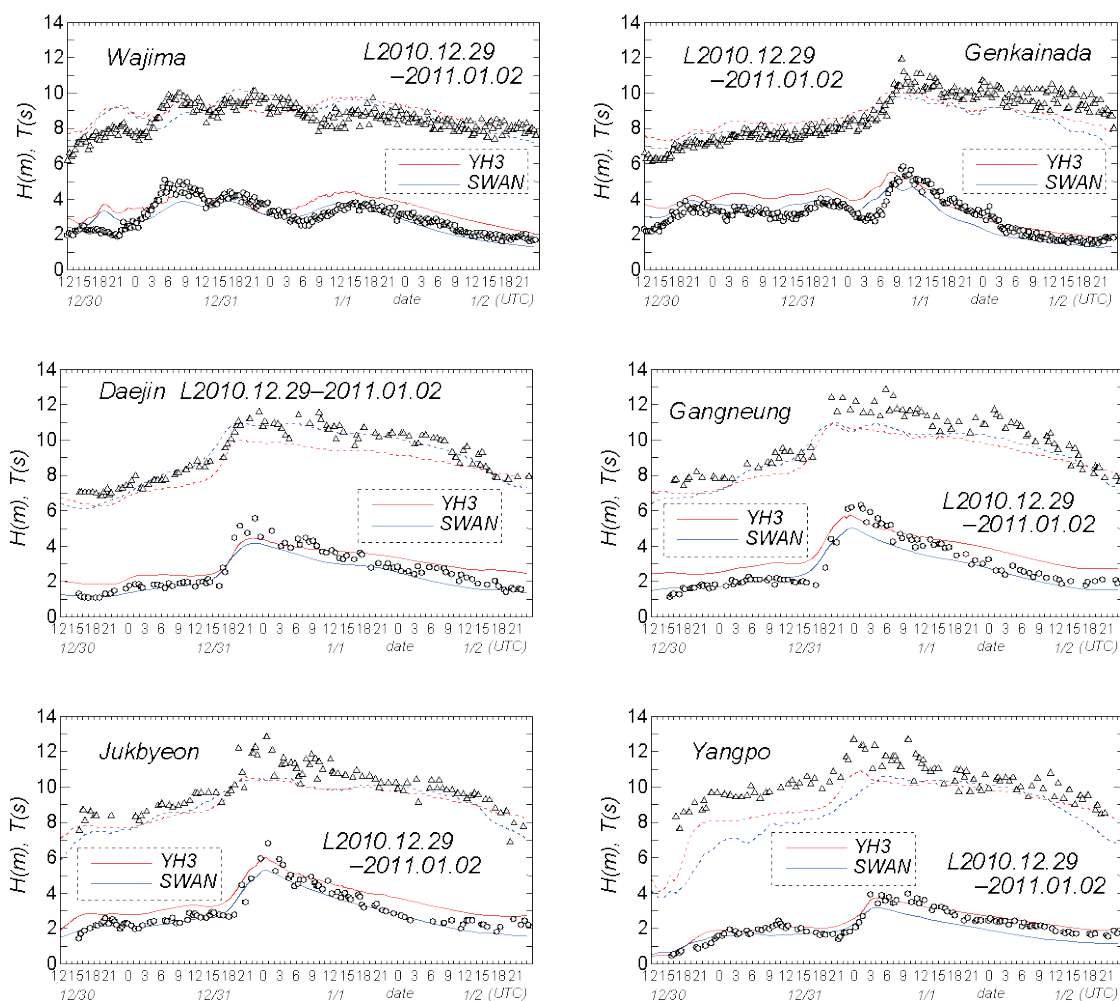


Figure 7 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 2 Japanese and 4 Korean east coastal stations during 2010.12.28–2011.1.2 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

ば、YH3 は SWAN よりやや大きい波高を与え、ピーク値付近で SWAN より観測値に近い値を生じるが、それ以外の時点では観測値を上まわる傾向にある。

Fig. 8 は深浦から玄界灘に至る 10 観測地点における推算値 (YH3, SWAN-St) と観測値の散布図を (時別) 波高 H , (時別) 周期 T , 最大波高 H_{max} について示し, Table 3 は誤差指標の一覧を与える。 H_{max} 図では, 最大波高 (観測年報 ; NOWPHAS2010) のみ記載された山形県沖と秋田県沖の GPS 記録を加えることにより, 対象観測地点数は 12 である。波高に関して YH3 では日本側および韓国側の両地点, とくに日本側地点で観測値よりやや大きい値を与えるのに対して, SWAN-St では日本側地点で観測値と平均的に符合し, 韓国側地点では小さい値をとる。また最大波高でも, 両モデルによる推算値と観測値の平均的対応はよいが, YH3 は日本側地点で大きめの値を, SWAN-St は日本側, 韓国側いずれの地点でも小さめの値を与える。

周期については短い値の場合に推算値と観測値の乖離が目立つ。両モデルによる推算値と観測値の対応は悪くないが, 全体としては波高に比べて周期に対する再現性がやや低い。いずれのモデルでも過小評価となる低い周期部分を除くと, YH3 は SWAN-St よりやや高い精度を示す。以上のように, 推算値と観測値の対応は日本側地点と韓国側地点でやや異なるが, 韓国側地点の波浪記録は水圧式波高計によっていることから, 両者の対応の違いがとくに周期に関して生じることになる。

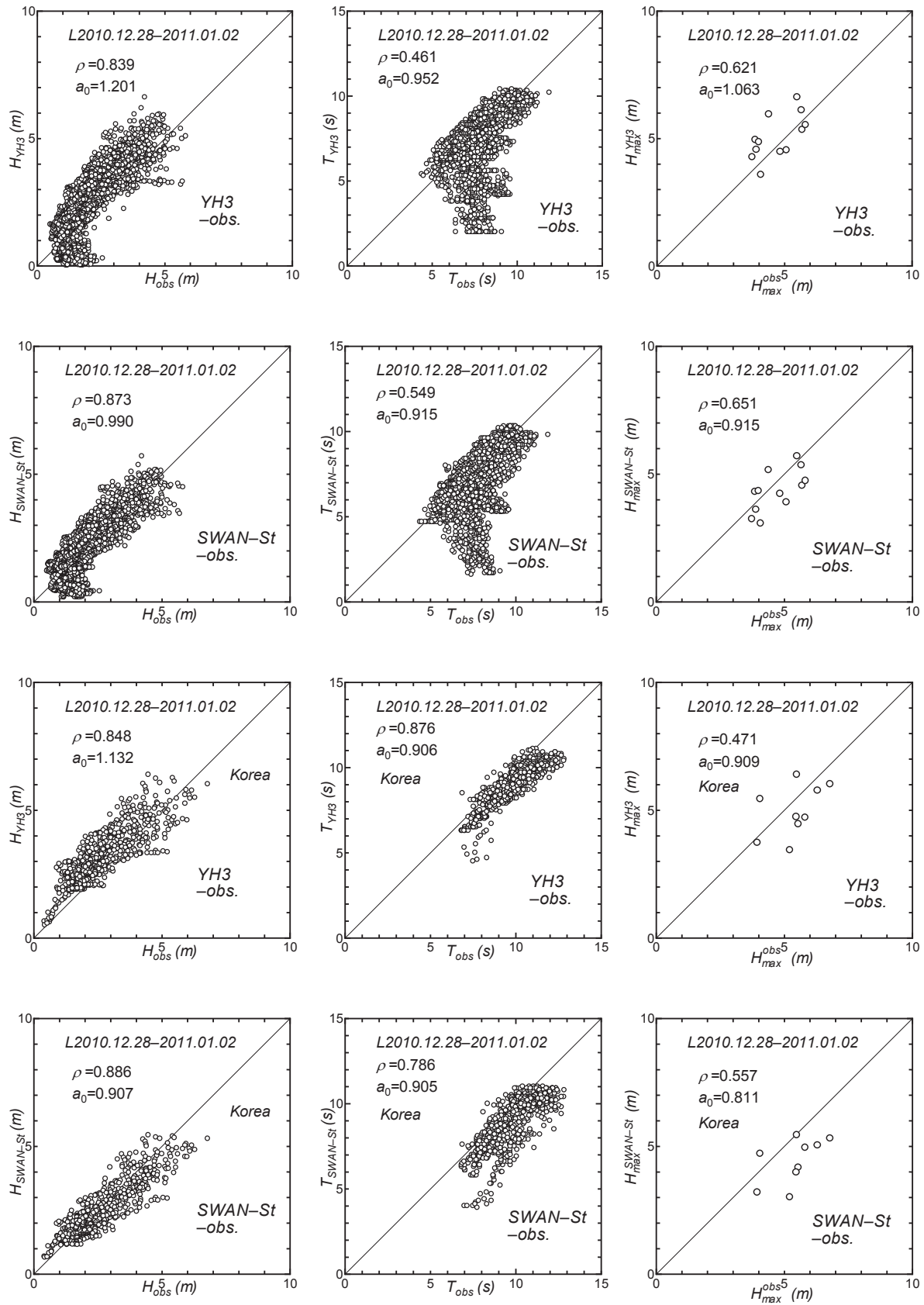


Figure 8 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of wave height H , wave period T and maximum wave height during a storm H_{max} at measurement stations along Japanese coast or east coast of Korea in 2010.12.28-2011.1.2 Storm, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.

Table 3 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 8.

model(loc.)	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3(Japan)	0.839	1.201	0.461	0.952	0.621	1.063
SWAN(Japan)	0.873	0.990	0.549	0.915	0.651	0.915
YH3(Korea)	0.848	1.132	0.876	0.906	0.471	0.909
SWAN(Korea)	0.886	0.907	0.786	0.905	0.557	0.811

Fig. 9 は最大波高の空間分布を YH3 と SWAN-St について与える。両モデルによる空間分布はよく似ている。すなわち、波高は北海道西側海域から北九州沖合や韓国東岸の南部沖合に向けて増加し、波向も NE をとる。YH3 では 6m 波高域のみならず 7m 波高域が広範に広がっている。一方、SWAN-St では日本海の西側海域で 6m 波高域が広がるが、韓国東岸の中部沖合での 7m 域は局所的にもみられない。要するに、YH3 が SWAN-St よりやや大きい波高（日本海では最大で約 0.75 m）を生じていることがわかる。波高に対する観測結果との対応をみても、YH3 がやや大きめの推算値を与えている。因みに、最大波高の最大値 H_{maxM} と相当する周期 T_{maxM} およびその出現位置 $(i(x), j(y))$ は YH3 で 7.30 m, 10.7 s, (66, 66), SWAN-St で 6.88 m, 10.2 s, (72, 66) である。以上のように、このストーム時には日本海の西南部沿岸や韓国東岸でうねり性高波浪が生じている。その特性は YH3 や SWAN-St によってある程度以上再現されると言えよう。

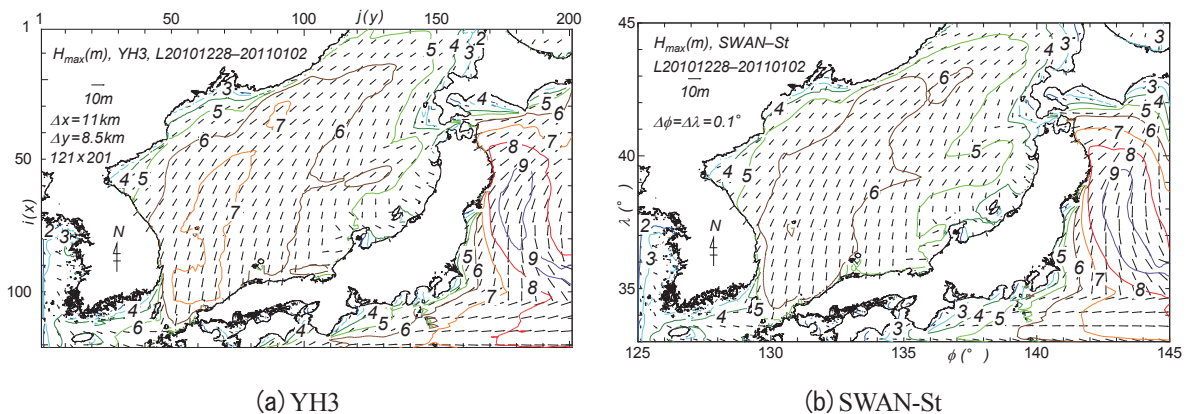


Figure 9 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2010.12.28-2011.1.2 Storm hindcasted with (a) YH3 wave model or (b) SWAN-St wave model.

3.3 2008年2月22日～24日低気圧

(1) ストームの概況

このストームでは 2008 年 2 月 22 日と 23 日に発生した日本海と関東沖の低気圧が発達しながら東進し、24 日にそれぞれ三陸沖と東方沖に達したのち停滞して、強い冬型の気圧配置になった。この発達した低気圧によって 23～24 日に日本海全域で強風・高波高の状態が続き、東北と北陸の沿岸で 6m を越える高波が来襲した。最大波高は酒田で $H_{max} = 7.99$ m, 輪島で 7.73 m が記録された。富山湾では北海道沖に停滞した低気圧に伴い、いわゆる寄りまわり波が来襲し、その規模は最大で 10 m（富山で 9.92 m を観測）に迫るとされた。この結果、佐渡島や富山湾を含む北陸沿岸を中心に、重大な海岸災害が生じた。このストーム時の

波浪の推定に関して多くの研究（間瀬ら^[12]，永井ら^[13]，李ら^[14]，犬飼ら^[15]，駒口ら^[16]，Leeら^[17]，Leeら^[18]，など）が実施されたが，どの研究も富山湾における観測最大波高9.92 mの再現に成功していない。著者らの感覚では9.92 mは大きすぎる値であり，せいぜい6 m 台でないかと推測される。また，当該ストームは韓国東岸に有意な大きさのうねりをもたらしていることから，これに関してKimら^[19]，前出のOh・Jeong^[11]，Yukら^[20]によりうねり性波浪の推算・観測研究が行われている。

(2) 波高・周期の観測結果との比較

Fig. 10 は YH3 および SWAN-St（空間解像度 0.1°，Wu 公式において $C_d \leq 2.1 \times 10^{-3}$ ）による波高および周期の推算時系列と観測時系列の比較を日本海沿岸の 8 地点（酒田，直江津，輪島，金沢，浜田，玄界灘，田中，伏木富山）で示す。田中と伏木（富山）における図の提示は富山湾における寄りまわり波の挙動をみるためである。これらの図によると，YH3 と SWAN-St のいずれも全体として波高・周期の観測時系列をよく再現するが，発達期やピーク時の波高をやや過大評価する傾向にある。周期については，SWAN-St は浜田以西の地点で減衰期にむしろ増加する観測周期の挙動をよく再現する。YH3 も同様の挙動を示すけれども，減衰期に SWAN-St より小さい値をとり，観測周期からも少し乖離する傾向を示す。この傾向は西側の地点ほどやや目立ち，Fig. 11 で述べる韓国東岸の観測地点で顕在化する。ただし，韓国東岸の観測周期は

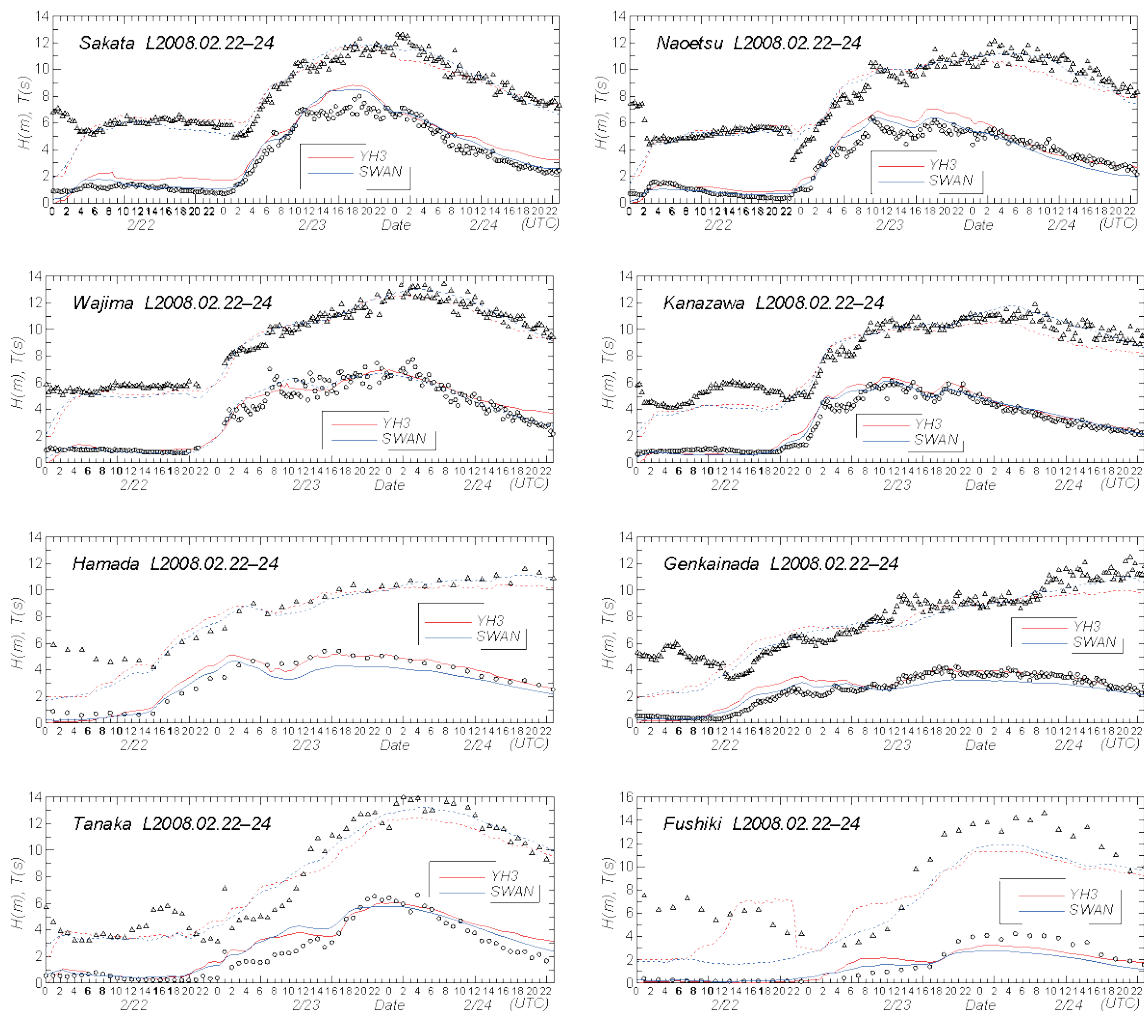


Figure 10 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 8 measurement stations during 2008.2.23-24 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

大部分水圧式波高計によっているので、過大な値を与える可能性も否定できない。

また、寄りまわり波に関連して富山湾口沿岸の田中では YH3, SWAN-St とともに観測値とよく符合するが、富山湾内の伏木富山では、波高・周期の両者に関して YH3, SWAN-St いずれも観測値より小さい値を生じている。より詳細には、田中における波高に関して YH3 は SWAN-St とあまり変わらないが、周期に関してはより小さい値を与える。しかし、いずれにしても今回の計算では既往の研究と同様に、富山湾における 10 m 近い最大波高の出現を全く再現できない。この点に関して再度多方面から詳しく調べる必要がある。

メソ気象モデル WRF と SWAN を使用した間瀬ら^[12]の結果およびメソ気象モデル MMS と WW3 あるいは SWAN を使用した李ら^[14]の結果と比べても、直江津、輪島での観測値との対応は同程度である。また、間瀬ら^[12]は田中で 5 m を越える波高の推算値と予測値を与え、これは Fig. 10 に示した観測値とも近いようにみえる。一方、李ら^[14]の結果は伏木富山において低めの波高を与える。ただし、間瀬ら^[12]は伏木富山の結果を、李ら^[12]は田中の結果を提示していない。以上の結果は本研究の成果とそれほど変わらない。

Fig. 11 は韓国東岸沖合の Ssangjeongcho (ウツリユー島)^[17]、東岸沿岸の Sokcho^[11]、Anmok^[17]、^[19]、^[20]、Mukho^[11]、Hupo^[11]、Jinha^[11]における波高・周期時系列に対する推算値と観測値の比較を示す。推算値は 2 月 22 日から 24 日にかけての緩やかな波高や周期の経時変化に関して観測値とよく符合するようにはみえるが、論文に掲載された錯綜した図から読み取った観測値には有意な読み取り誤差が含まれる可能性もあるため、明確な比較が難しい点もある。

個別にみると、Ssangjeongcho では波高に関していずれの推算値もやや大きめの値を与える。周期に関しては低めの値を生じるが、比較的良好に対応する。この地点における波高計の種類は明らかでない。韓国における波浪観測体制から考えて、ブイ式(wave rider)によるものと推測される。両モデルのうち、YH3 は SWAN-St よりやや大きい波高と小さめの周期をとり、観測値との関係では SWAN-St の方がよい対応を、とくに 24

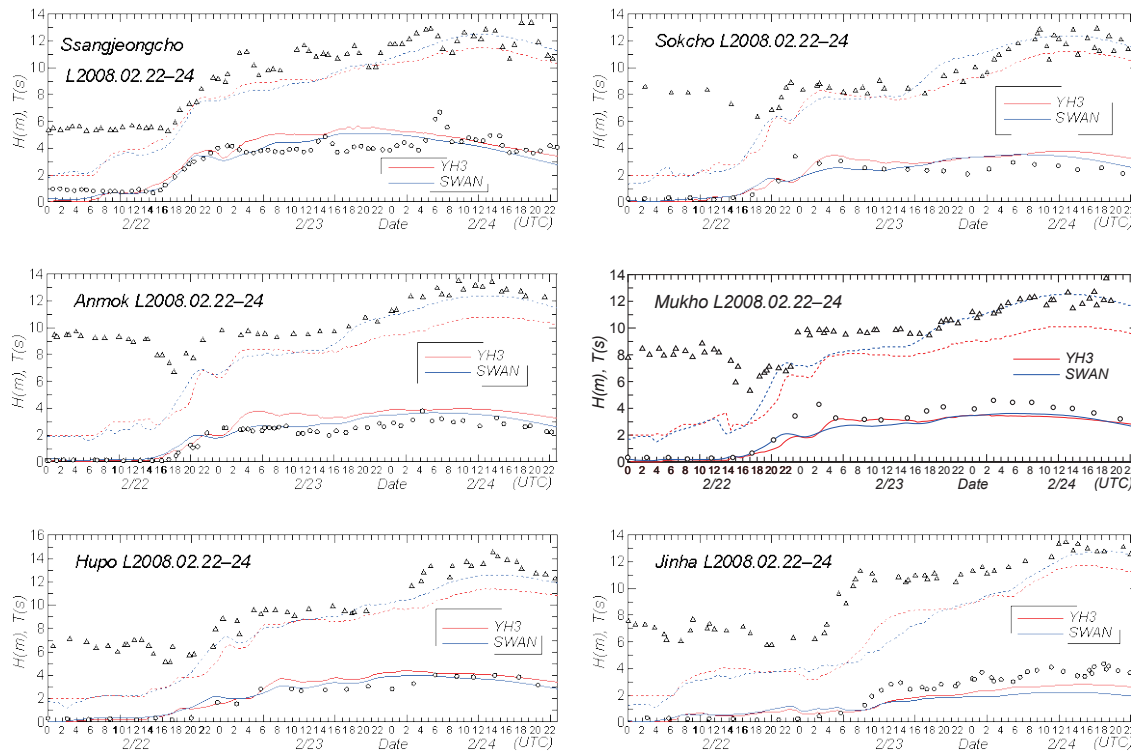


Figure 11 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 5 measurement stations along east coast of Korea during 2008.2.23-24 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

日の周期に対して与える。これは残りの5地点についても言える。ただし、Mukho, Hupo, Jinhaでは両モデルはほぼ同じ波高値を示す。また観測値と比べると、Jinhaでは両モデルとも過小な波高と周期を与える。

全体としてみれば、YH3とSWAN-St、とくにSWAN-Stは2008年2月22~24日低気圧時において韓国東岸沖合と沿岸のうねり性高波高の経時変化（時間経過とともにあまり変化しない波高や緩やかに増加する周期）の挙動を比較的良好に再現すると言える。ただ、周期に対するモデルの過小評価の傾向はSsangjeongchoを除く地点（おそらくAnmokも含む）で用いられた水圧式波高計による観測周期の特性（高周波成分の水理学的filteringによる周期の過大評価）によるところも少なくないと考えられる。

さらに、既往の推算値との比較結果と比べると、YH3やSWAN-StのうちとくにSWAN-Stによる結果は、SsangjeongchoやAnmokにおいてはKimら^[19]やYukら^[20]の結果と、AnmokにおいてはLeeら^[17]の結果と同程度の対応を与えるようにみえる。

Fig. 12は地形解像度を2倍（YH3で5.5×4.3 km、SWAN-Stで0.05°）とした場合の波高・周期時系列の比較を直江津、田中、伏木と韓国東岸のSokchoについて示す。これによると、地形解像度の向上によって推算値と観測値の対応はわずかに向上しているようにみえるけれども、伏木富山における過小評価の傾向は解消されていない。

Fig. 13は波高 H 、周期 T 、最大波高 H_{max} についての推算値と観測値の間の散布図をYH3（11×8.5 km）とSWAN-St（0.1°解像度）に対して与える。観測地点は日本側で深浦、酒田、新潟、直江津、輪島、金沢、福井、鳥取、浜田、玄界灘の10地点であり、田中と伏木富山を除いている。また韓国側ではSsangjeongcho, Sokcho, Anmok, Mukho, Hupo, Jinhaの6地点である。Table 4は H 、 T 、 H_{max} に対する誤差指標の一覧をモデル別（YH3とSWAN-St）、地域別（JapanとKorea）に表す。YH3およびSWAN-Stによる日本側の結果をみると、 H 、 T 、 H_{max} のいずれによっても推算値と観測値の関係は概略のところ45°直線で近似されており、両者の対応が良好であることがわかる。ただし、 H に関してその勾配値 a_{0H} が示すように、推算値は観測値より全体としてやや大きい。とくにYH3はSWAN-Stより波高をさらに大きめに評価する。また周期に関しては、時系列に関する比較図でみたように、波浪の減衰期にYH3による推算値は観測値を過小評価するので、相関図において相関係数 ρ と勾配値 a_0 が小さくなっている。最大波高 H_{max} について図ではYH3がSWAN-Stより観測値とよい対応を示すようにみえるが、 ρ と a_0 は必ずしもこの特徴を支持しない。これは大きい H_{max} について観測値との乖離があることによる。

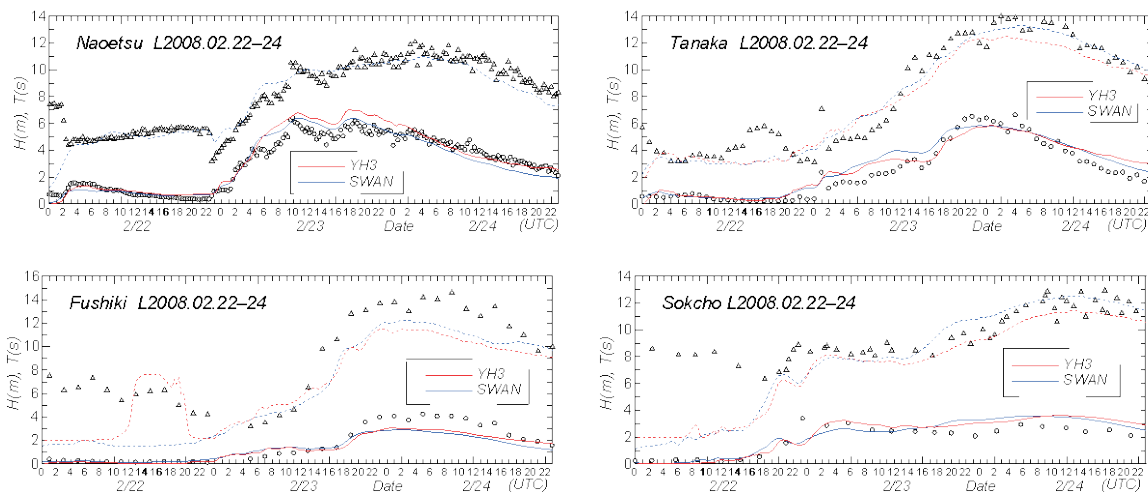


Figure 12 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 3 Japanese coastal stations and 1 Korean east coastal station during 2008.2.23-24 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models with doubled space resolution are applied.

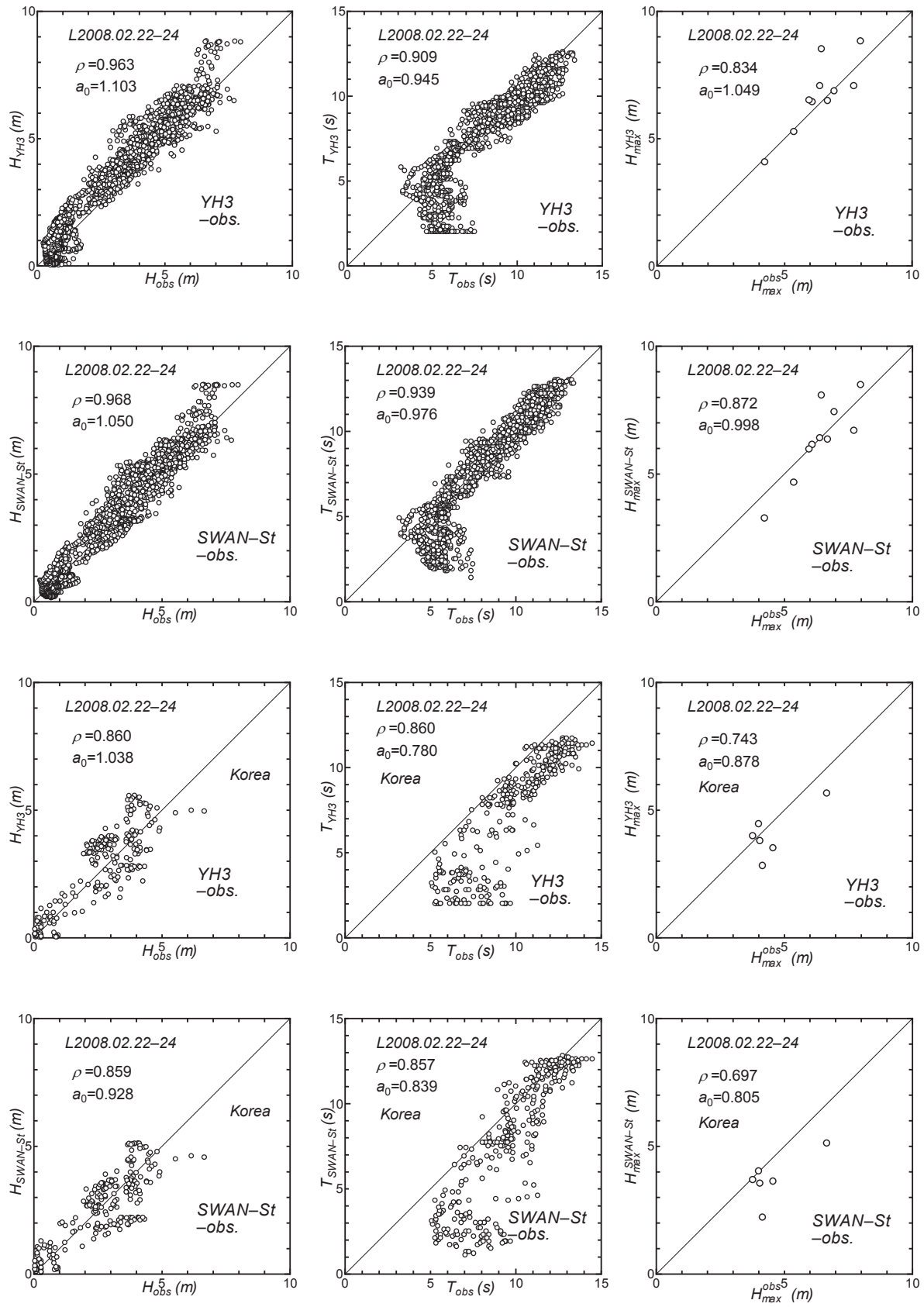


Figure 13 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of wave height H , wave period T and maximum wave height during a storm H_{max} at measurement stations along Japanese coast and east coast of Korea in 2008.02.22-24 Storm, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.

Table 4 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 13.

model(loc.)	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3(Japan)	0.963	1.103	0.909	0.945	0.834	1.049
SWAN(Japan)	0.968	1.050	0.939	0.976	0.872	0.998
YH3(Korea)	0.860	1.038	0.860	0.780	0.743	0.878
SWAN(Korea)	0.859	0.928	0.857	0.839	0.697	0.805

韓国東岸の地点においても時系列図で推算値と観測値の対応関係をみたように、 H および T に関する散布図はかなりの資料のばらつきを示す。このなかで、波高については平均的には推算値と観測値はある程度対応するが、周期については推算値が観測値をかなり下まわる。両モデルでは SWAN-St が YH3 に比べて観測値にやや近い値を与えることから、この資料値が 45°直線により近くプロットされている。この結果は相関係数 ρ より勾配値 a_0 に反映されている。最大波高 H_{max} に関しては、いずれのモデルも小さめの値を与えるが、YH3の方が SWAN-St より観測値に近い値を示し、 ρ や a_0 もこれを支持する。

Fig. 14 は最大波高 H_{max} の空間分布を YH3 と SWAN-St について与える。最大波高の最大値 H_{maxM} と相当する周期 T_{maxM} およびその出現場所（秋田沖）の位置 ($i(x)$, $j(y)$) は YH3 で 9.83 m, 12.1 s, (51, 137), SWAN-St で 9.82 m, 12.3 s, (51, 138) であるから、両者はほぼ一致する。いずれのモデルでも H_{max} はここを中心に三方に減少してゆき、大陸側で 4 m を形成する。波向は N 方向を主とする。両モデルの挙動はかなり類似する。

既往の結果と比べると、間瀬ら^[12]は富山湾を含む北陸沿岸の波高分布を 4 時点で与えているが、図からは分布状況が明瞭にみえない。一方、李ら^[17]および Lee ら^[17]は日本海全域、東北・北陸地方沖合海域、富山湾周辺の最大波高 H_{max} の空間分布を与えている。これによると、 H_{max} の最大域は佐渡島の北側海域に現れ、その値は 10 m を越え 11 m より小さい、今回の SWAN-St による結果と比べると、最大域は若干南側に位置し、その値も 1 m 程度大きい。また、犬飼ら^[15]は気象庁 MSM 風資料を入力条件とした SWAN による波浪推算から佐渡島周辺の北陸沿岸海域で 11 m を越える波高域の広範な出現を示しており、今回の結果や李ら^[14]や Lee^[17]の結果よりさらに大きい波高を与える。さらに、永井ら^[13]は傾度風モデル（速報天気図による気圧）による海上風分布を入力値とする WAM に基づく波浪推算から酒田沖に 12 m 波高域を与えると

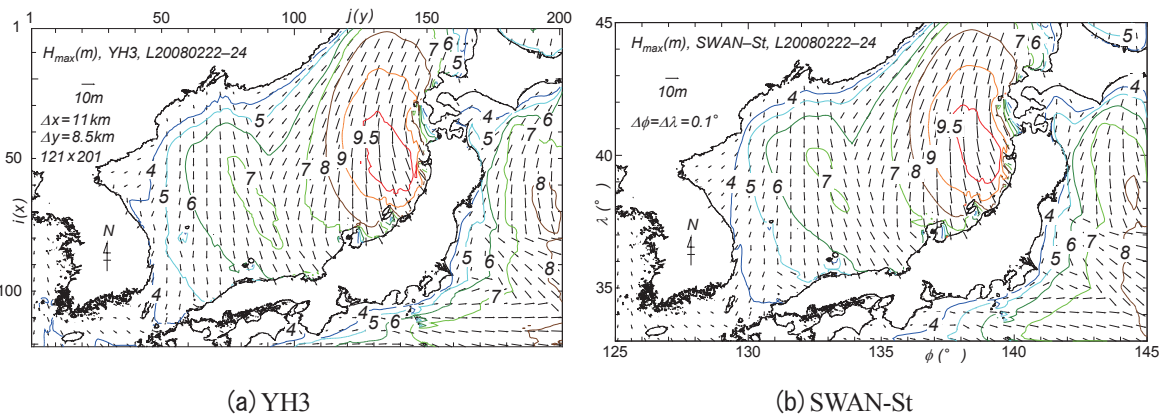


Figure 14 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2008.02.22-24 Storm hindcasted with (a) YH3 wave model or (b) SWAN-St wave model.

もに、伏木富山における波高・周期について推算結果は観測結果と符合するが、富山では全くの過小評価となっていることを示している。さらに、Lee ら^[18]は風速の増強によって伏木富山における観測結果の波浪推算による説明を行っているが、あまり合理的と言えない。

韓国東岸については、上述したように、Lee ら^[17]は Gangneung 近くの Anmok における波高・周期の観測値と MM5 による海上風分布を入力とする WW3 による推算値の比較から、波高に関しての比較的よい対応と周期に関しての過小評価を示している。また、Yuk ら^[20]も ECMWF 風入力 SWAN による推算値と観測値（前述の Anmok とウツリュウ島の Ssangjeongcho）との比較を行っている。後者についてもある程度の対応を示しているが、観測資料（とくに波高）の時間変動が大きすぎて適正な比較となっていない。さらに、Kim ら^[19]は MM5 による入力風あるいは RDAPS/KMA による入力風のもとで SWAN（構造（直交）格子網と非構造（三角形）格子網）による推算結果を Ssangjeongcho および Anmok における観測結果と比較し、波高に関してある程度の再現性を確認しているが、周期に関しては過小評価の傾向を与えている。要するに、本研究と同様な比較事例となっている。

以上の結果をまとめると、YH3 は H 、 T の時系列や H_{max} をおおむね適正評価するが、波高を多少過大評価するとともに、減衰期の周期を過小評価する傾向にある。SWAN-St は YH3 と同様、あるいは YH3 以上に適正な挙動を与えるが、局所的には異常値が出ることもある。また、両モデルとも富山湾内では波高を過小評価することから、地域を限定した詳しい研究が必要である。さらに、韓国東岸のうねり性波浪に対する再現性はいずれのモデル、とくに SWAN-St で悪くないが、1,000 km を越えるうねり性波浪の伝播を適切に評価する難しさは残る。

最大波高 H_{max} の最大値 H_{maxM} は YH3 で 9.8 m、同じく SWAN-St で 9.8 m、間瀬ら^[12]で提示なし、李ら^[14]で 10 m 以上、犬飼ら^[15]で 11 m 以上、永井ら^[13]で 12 m 以上と評価されており、出現場所は佐渡島の沖合北側海域である。今回の値は既往の推定値より小さいが、沿岸の複数の観測地点において推算値と観測値は平均的によく符合するので、いずれのケースが適切な推定値かは判定できない。

3.4 2007年2月14日～16日低気圧

(1) ストームの概況

2007年2月14日日本海を進んだ低気圧や沿海州から東へ進んだ低気圧が北海道の南海上や北海道の東へ達し、強い冬型の気圧配置を形成した。この結果、日本海では東北沿岸にある深浦で最大波高 $H_{max} = 8.65$ m、秋田で 8.74 m、酒田で 9.58 m、能登半島先端にある輪島で 6.91 m の高波高が観測された。

(2) 波高・周期の観測結果との比較

Fig. 15 は時系列に対する推算値と観測値の比較事例を深浦、酒田、直江津、輪島で示す。いずれの地点でも YH3、SWAN-St のモデルによらず推算値は発達期から平衡期を経て減衰期に至る過程の波高・周期に対する観測値の挙動とよく符合する。細部でみると、YH3 は酒田と輪島の減衰期、直江津の最盛期と減衰期で波高をやや大きく、深浦と酒田でピーク時付近の周期をやや小さく評価する。SWAN-St は深浦でのピーク時付近で大きめの波高を与え、直江津や輪島の減衰期で波高や周期をやや小さく評価する。

Fig. 16 は深浦から玄界灘に至る 12 地点における H 、 T 、 H_{max} についての推算値と観測値の散布図を、Table 5 は誤差指標の一覧を示す。YH3 は H 、 T の両者について平均的に観測値とよい対応を示すが、SWAN-St よりやや低い観測値との対応を生じ、波高についてやや大きめの値を、周期についてもやや低めの値を与える。これらの特徴は誤差指標のうち勾配値 a_0 に現れている。また、両者とも H_{max} に関して観測値と平均的によい対応を示すが、大きい H_{max} についてはやや低めの評価となっている。

Fig. 17 は H_{max} の空間分布を示す。いずれのモデルでも最大域は酒田の南西側で佐渡島北東側の海域に現れ、最大値も 9 m を若干越える。因みに、最大波高の最大値 H_{maxM} とその周期 T_{maxM} および出現場所は YH3 で 9.09 m、11.5 s、(61, 142-143)、SWAN-St で 9.20 m、11.9 s、(62, 142-144) であるから、相互にかなり近

い値をとる。波高はこの最大域から西側の朝鮮半島に向けて減少する。波向はW方向を主体とし、下記の2007年1月6日～11日低気圧時より反時計方向に2方位傾く。この低気圧時に酒田で観測された H_{max} は

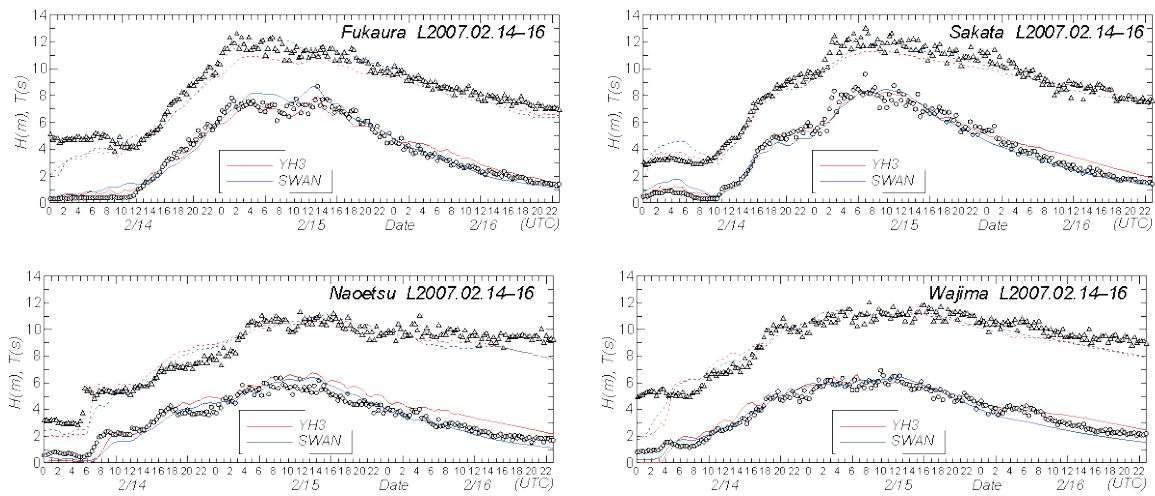


Figure 15 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 4 measurement stations along Japanese coast during 2007.2.14-16 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

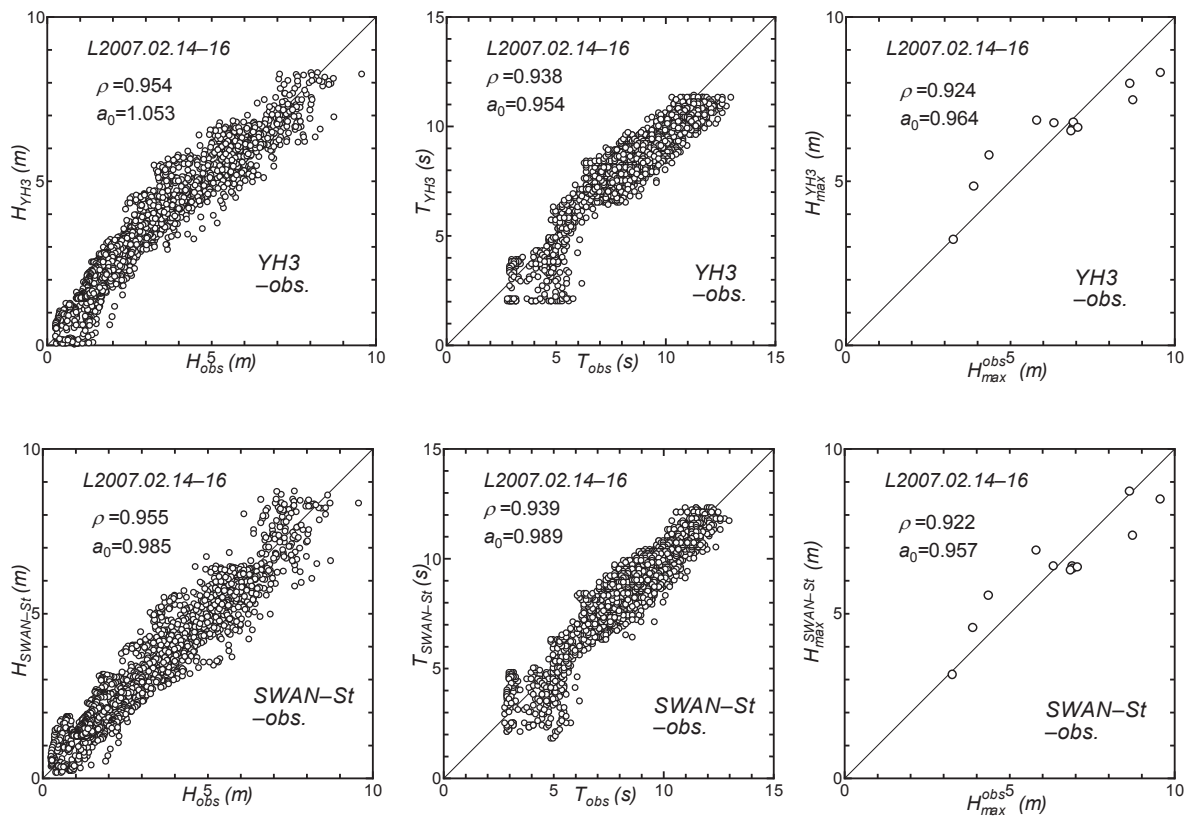


Figure 16 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of wave height H , wave period T and maximum (significant) wave height during a storm H_{max} at 12 measurement stations along Japanese coast in 2007.2.14-16 Storm case, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.

Table 5 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 16.

model	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3	0.954	1.053	0.938	0.954	0.924	0.964
SWAN	0.955	0.985	0.939	0.989	0.922	0.957

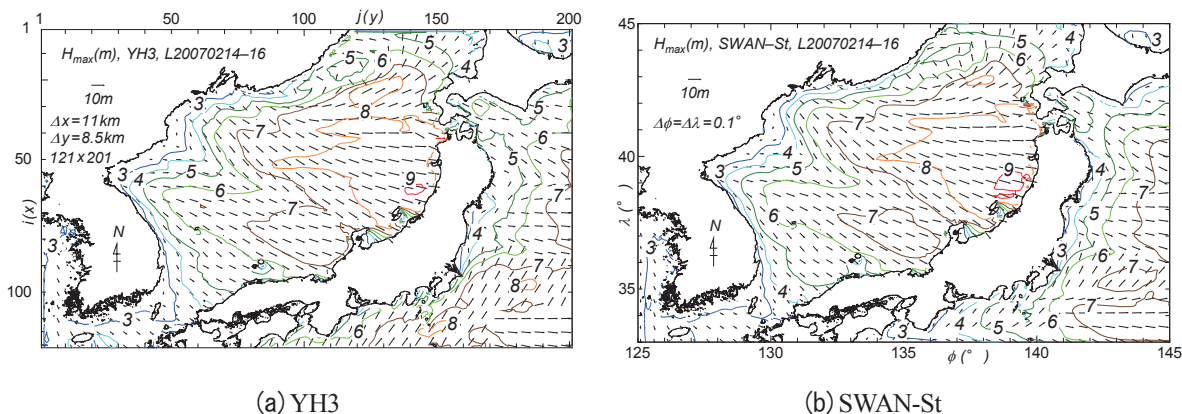


Figure 14 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2007.02.14-16 Storm hindcasted with (a) YH3 wave model or (b) SWAN-St wave model.

9.58 mであるから、Fig. 16 でみたように、推算値は観測値より 1 m 程度低い。気象庁 MSM 風資料は 2.1 に分類した(c)段階のモデルによっているの、最新の(e)段階による資料より精度が低いのかもしれない。

3.5 2007 年 1 月 6 日～8 日低気圧

(1) ストームの概況

2007 年 1 月 6 日に日本海と本州南岸を進んだ 2 つ玉低気圧のうち、後者は発達しながら三陸沖を通過して 7 日に北海道南部、千島列島へと進み、強い冬型の気圧配置を形成した。この結果生じた N 寄りの強風により、北陸沿岸のうち新潟沖で最大波高 $H_{max} = 8.28$ m, 直江津で 7.65 m, 金沢で 7.79 m, 福井で 8.16 m の高波高が観測された。

(2) 波高・周期の観測結果との比較

Fig. 18 は波高・周期時系列の比較事例を酒田、新潟沖、金沢、玄界灘において与える。いずれのモデルによる推算値も北から南に至る地点でも観測値とかなりよく符合する。ただし、酒田においてピーク時に推算値が観測値よりやや大きい。これは玄界灘（最大波高 4 m 以下）でも同様である。個別にみると、YH3 は新潟の減衰期や玄界灘の全期間の波高についてやや大きめの値を与える。SWAN-St は玄界灘の発達期でやや小さめの値を生じる。周期については両モデルとも同様の値を示し、全体としてやや低めの値をとる。

Fig. 19 は深浦から玄界灘に至る 10 地点（直江津：欠測、輪島：高波高部欠測）の H , T , H_{max} についての推算値と観測値の散布図を、Table 6 は誤差指標の一覧を示す。YH3 は波高に関してやや大きめの値をとり、周期に関しては平均的に観測値に近いが、やや小さい値を与える。SWAN-St は波高に関して観測値と比較的よい対応を示すが、周期に関してはやや小さめの値を与える。 H_{max} に対しては YH3, SWAN-St, ともに比較的よい対応を与える。SWAN-St は YH3 に比べていずれの誤差指標についても ρ が 1 に近く、また波高について a_0 も平均的に 1 をとることから、SWAN-St の精度が少し高いことを表す。

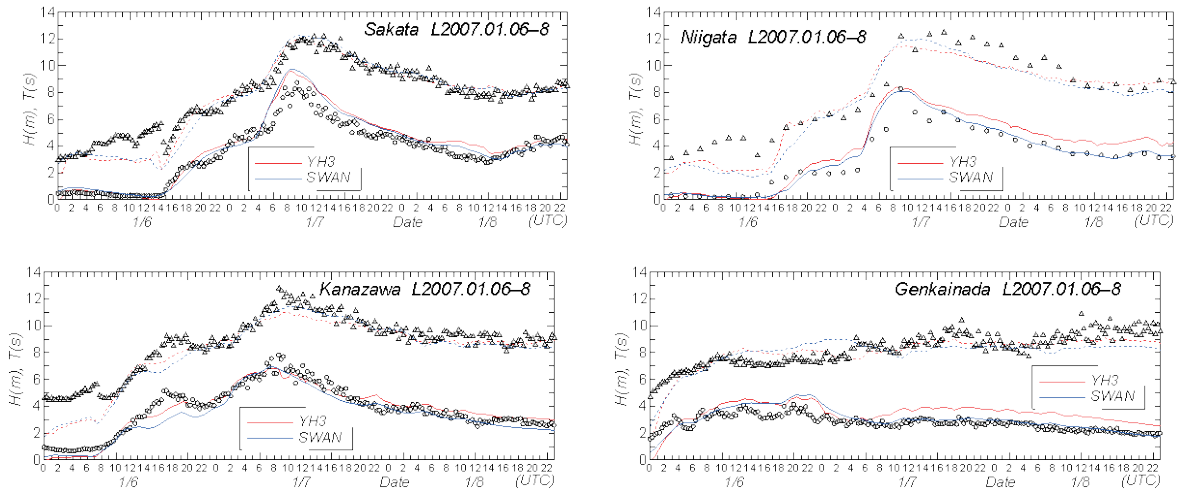


Figure 18 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 4 measurement stations along Japanese coast during 2007.1.6-8 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

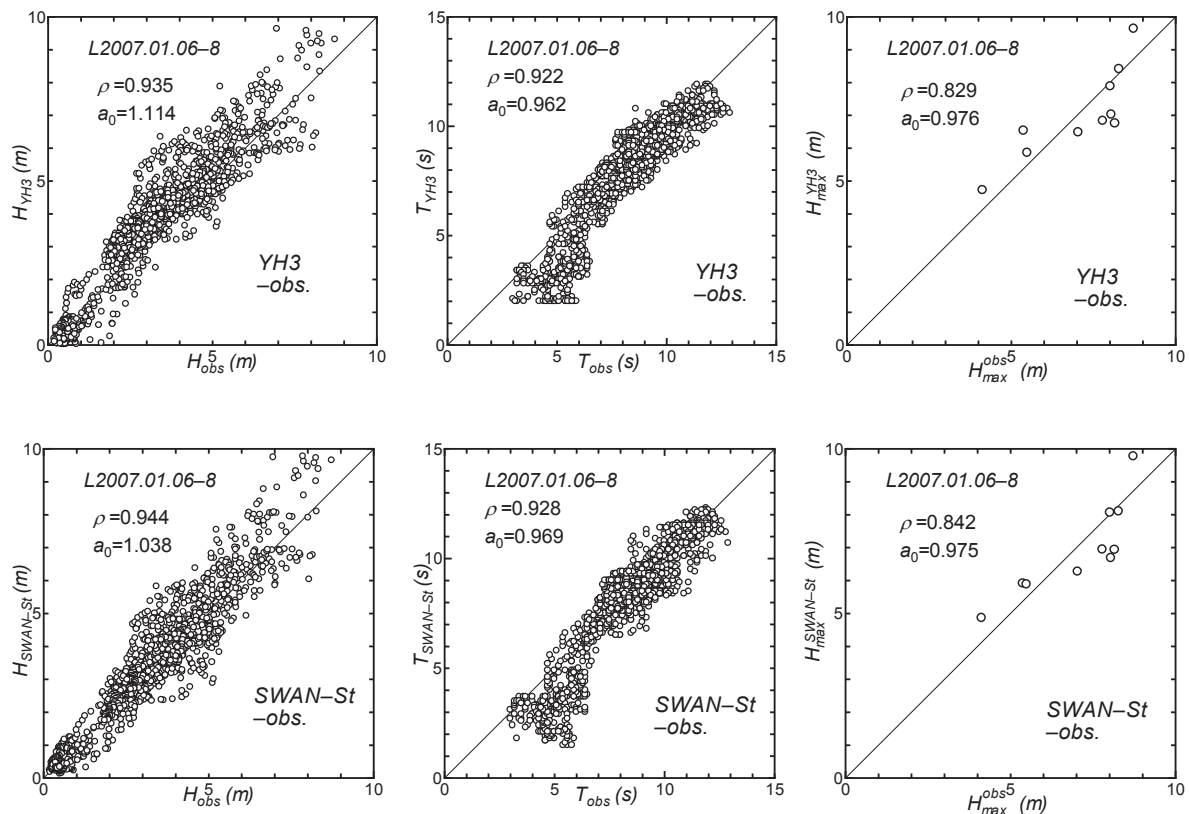


Figure 19 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of wave height H , wave period T and maximum (significant) wave height during a storm H_{max} at 10 measurement stations along Japanese coast in 2007.1.6-8 Storm case, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.

Fig. 20は H_{max} の空間分布を与える。いずれのモデルの場合にも波高10mの最大域は酒田の沖合に現れ、そこから大陸側に減少する。酒田における H_{max} の観測値は8.73 mであるから、Fig. 17でもみたように、推算値が観測値より1 m程度大きい。新潟沖ではよい一致が得られる。波向は全体としてN~NNWである。両モデルによる空間分布は類似するが、YH3による最大域がSWAN-Stによるものよりやや狭い。因みに、最大波高の最大値 H_{maxM} と相当する周期 T_{maxM} および出現場所はYH3で10.22 m, 11.7 s, (61, 147), SWAN-Stで10.68 m, 12.2 s, (59, 147)であるから、上記の特徴が現れている。

Table 6 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 19.

model	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3	0.935	1.114	0.922	0.962	0.829	0.976
SWAN	0.944	1.038	0.928	0.969	0.842	0.975

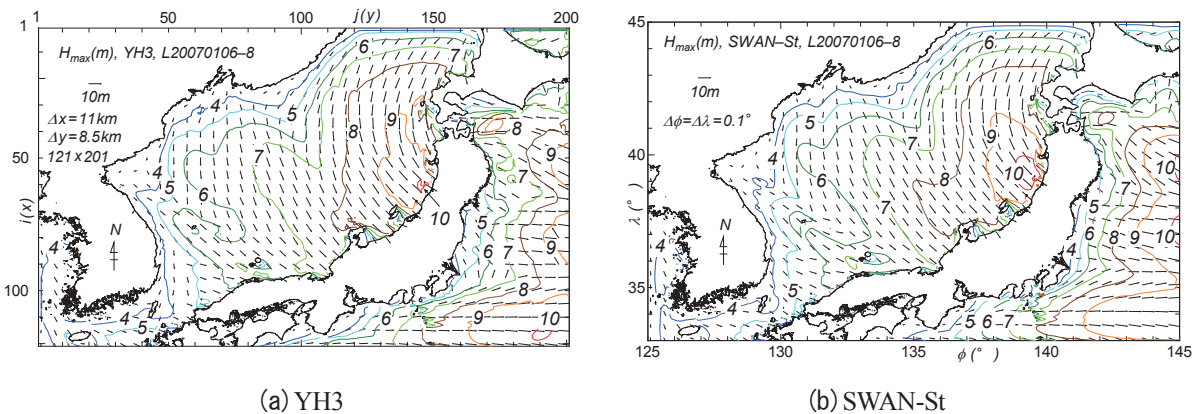


Figure 20 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2007.1.6-8 Storm hindcasted with (a) YH3 wave model or (b) SWAN-St wave model.

3.6 2006年10月22日~25日低気圧

(1) ストームの概況

2006年10月23日に黄海北部、朝鮮半島を通過した低気圧が日本海に入るとともに、四国沖から発生した低気圧が東へ進み、シベリアから中国東北部の高気圧との間で強い気圧傾度の場合が形成された結果、東寄りの強風が吹送しやすい状況になった。24日以降も太平洋側の低気圧の東への進行や優勢な高気圧の東方への進行に伴い、東寄りの強風が吹きやすい状況が継続した。このため、日本海沿岸の西南部で高波が出現し、浜田で最大波高 $H_{max} = 5.76$ m, 玄界灘で5.34 mが観測された。

一方、韓国の東岸でも23日に高波浪が来襲し、最北端にあたる Sokcho では最大波高9.69 m, ピーク周期12.8 sが観測されている^[20]。このストームに対して Yukら^[20]はECMWFによる風を入力条件とするSWANによる波浪推算を実施し、Sokchoをはじめ5地点における波高・周期の観測時系列との比較・検討や最大波高分布についての考察を加えている。そして、彼等以前に行われた Kim・Lee^[21]による推算結果より高い精度をもつとしている。

(2) 波高・周期の観測結果との比較

Fig. 21 は YH3 および SWAN-St により推算した波高・周期時系列と観測時系列の比較を輪島，鳥取，浜田，玄界灘の 4 地点で示す。YH3, SWAN-St による推算値はともに観測値とよく符合する。YH3 と SWAN-St の推算精度に対する優劣は地点に依存するので，判断できないが，YH3 は SWAN-St より波高をやや大きめに評価するようである。

Fig. 22 は直江津から玄界灘に至る 8 地点における波高 H ，周期 T ，最大波高 H_{max} に対する推算値と観測値の間の散布図を YH3 と SWAN-St の場合にそれぞれ与える。直江津より北東側の地点（新潟から深浦）では波高が最大でも 2 m 以下と小さいうえに，周期の挙動も安定しないので，比較対象から省いている。まず波高については，YH3 はやや大きめの値を，SWAN-St はやや小さめの値を与えるが，推算値と観測値の対応はよい。YH3 によるばらつきが SWAN-St によるものより少し大きい。周期については，YH3 は小さめの値を与え，ばらつきも大きいのにに対して，SWAN-St はより観測値に近い値を生じ，ばらつきも小さい。要は，SWAN-St が YH3 より若干よい対応を示す。 H_{max} に関しては，いずれの推算値も観測値とよく対応するが，この場合には YH3 が SWAN-St より観測値とよく符合する結果を与える。

Table 7 は誤差指標の一覧である。波高については相関係数 ρ でみれば，YH3, SWAN-St とともに観測値とのかなり高い相関を与えるが，勾配値 a_0 でみると，YH3 はやや大きめの値を，SWAN-St は小さめの値を与える。周期については SWAN-St が YH3 より高い精度を示すが，最大波高については YH3 が SWAN-St より高い相関とよい対応を示唆する。

Fig. 23 は韓国東岸の 5 地点（Sokcho, Gangneung, Mukho, Hupo, Jinha ; いずれも水深 20 m 以下）での Yuk ら^[20]による観測波高・周期時系列を YH3 と SWAN-St による推算時系列と比較したものである。Oh・Jeong^[11]が示したように，観測波高のピークは北部の Sokcho から南東部の Jinha に向けて出現時刻を遅らせ，中部以南で波高を減少させる挙動を示す。北側 3 地点（Sokcho, Gangneung, Mukho）のピーク波高は，いずれもほぼ 8 m を越える。ただし，観測値は時間的に起伏の大きい挙動を与える図から読み取っているため，読取り誤差は無視し得ないであろう。さて，推算値と観測値の対応は北側から地点別につぎのようである。

1) Sokcho では YH3, SWAN-St とともに波高と周期の観測値の時間変化をよく再現するが，発達期では観測値に比べて遅れた挙動をとる。SWAN を用いた Yuk ら^[20]の結果では推算値に比べて全期間で低い値をとく

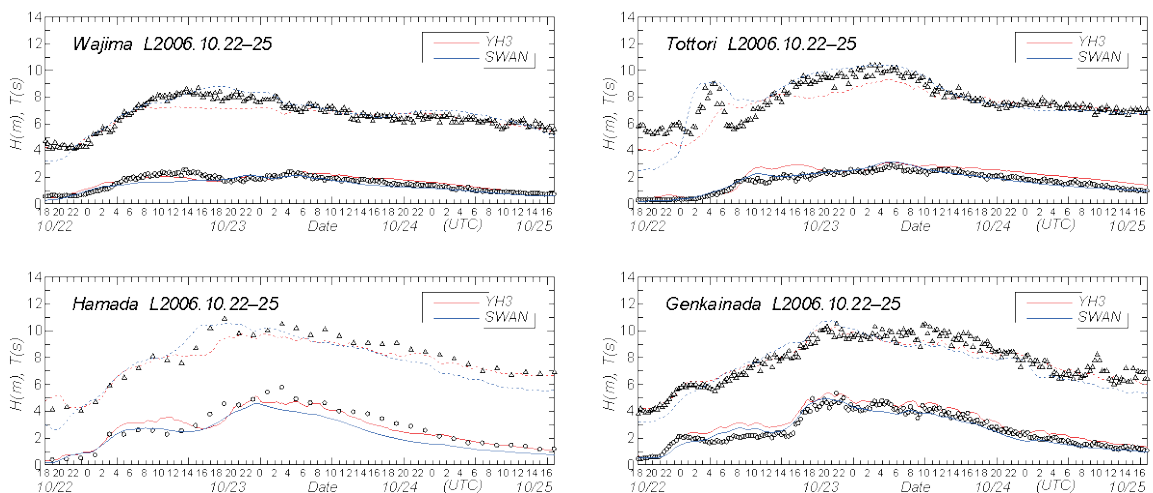


Figure 21 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 4 measurement stations along Japanese coast during 2006.10.22-25 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

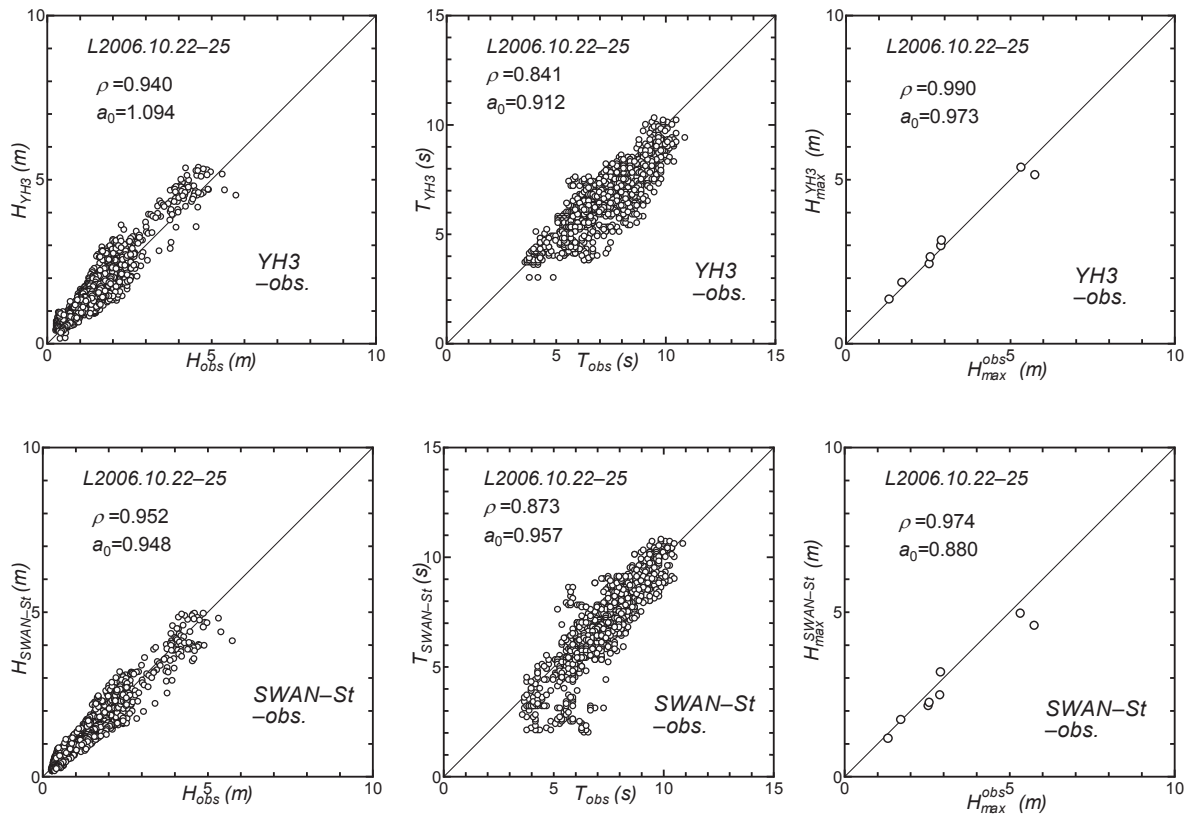


Figure 22 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of wave height H , wave period T and maximum (significant) wave height during a storm H_{max} at 8 measurement stations along Japanese coast in 2006.10.22-25 Storm, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.

Table 7 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 22.

model	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3	0.940	1.094	0.841	0.912	0.990	0.973
SWAN	0.952	0.948	0.873	0.957	0.974	0.880

に波高に関して与えている。

2)Gangneung では YH3 と SWAN-St による推算値はストーム期間の全体で観測値とよく符合するが、周期に対してより低い値を与える。これは Sokcho でもみられる。観測記録が水圧式波高計によっていることを考慮すると、ある程度当然の結果である。Yuk ら^[20]による結果でも推算値と観測値のよい対応がみられるが、減衰期では推算波高の減少が急激であって、観測波高からの乖離が目立つ。

3)Mukho でも両モデルによる推算値と観測値との対応は良好であるが、発達期において YH3 は観測値より短い周期を与える。Yuk ら^[20]の結果では推算波高はストーム期間の全体で観測波高より低い値をとるが、推算周期は観測周期とよく符合する。つまり、波高の再現性は不足しているが、周期の再現性は良好という

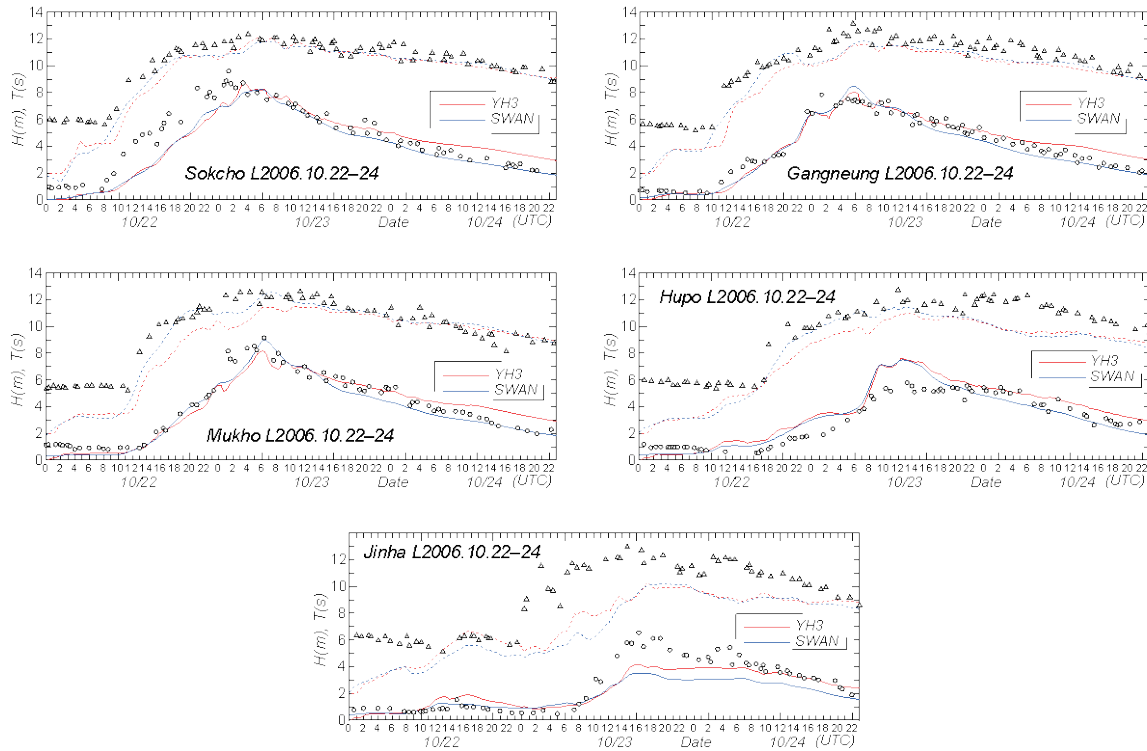


Figure 23 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 5 measurement stations along east coast of Korea during 2006.10.22-24 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

特徴がみられる。

4)Hupo では YH3, SWAN-St とともに波高に関して減衰期後半を除いて過大評価となっている。一方、周期に関してストームの全期間で過小評価となっている。Yuk ら^[20]の結果では推算波高は発達期から減衰期前半で観測波高とよく符合するが、減衰期後半の波高や全期間の周期について過小評価となっている。要するに、発達期から最盛時には Yuk ら^[20]の推算値の再現性が高いが、それ以外ではいずれの結果でも推算値と観測値の間に有意な相違がみられる。

5)最も南東側に位置する Jinha では YH3 による減衰期の波高を除いて YH3 と SWAN-St による推算値は観測値よりかなり小さい値を与える。この挙動は Yuk ら^[20]の結果においても同様である。

今回の結果では、より南東側に位置する Jinha で推算値と観測値の隔たりが目立ち、過小評価の傾向が著しい。この原因が海上風の精度にあるのか、約 10 km あるいは 0.1° という沿岸波浪に対して低い使用格子網の地形解像度にあるのか、などに関しては現段階では明らかでないが、とりわけ周期に対する観測精度が低い水圧式波高計が水深 20 m 以浅の地点に設置されていることから、地点ごとに異なる地形解像度の影響も無視しえないと推測される。

Fig. 24 は韓国東岸沿岸 5 地点における波高 H 、周期 T 、最大波高 H_{max} に対する推算値と観測値の散布図を YH3 および SWAN-St の場合にそれぞれ示す。いずれも波高 H に関しては平均的にある程度以上に良好な対応がみられるが、周期 T に関しては過小評価が目立つ。最大波高 H_{max} に対しては上位の 3 地点ではよい対応を示すものの、下位の 2 地点では推算値と観測値の隔たりが大きい。波高 H に対して SWAN-St が YH3 より平均的に小さい値を与えるのに対して、周期 T と最大波高 H_{max} については両モデルは同程度の対応をとり、有意な差はみられない。

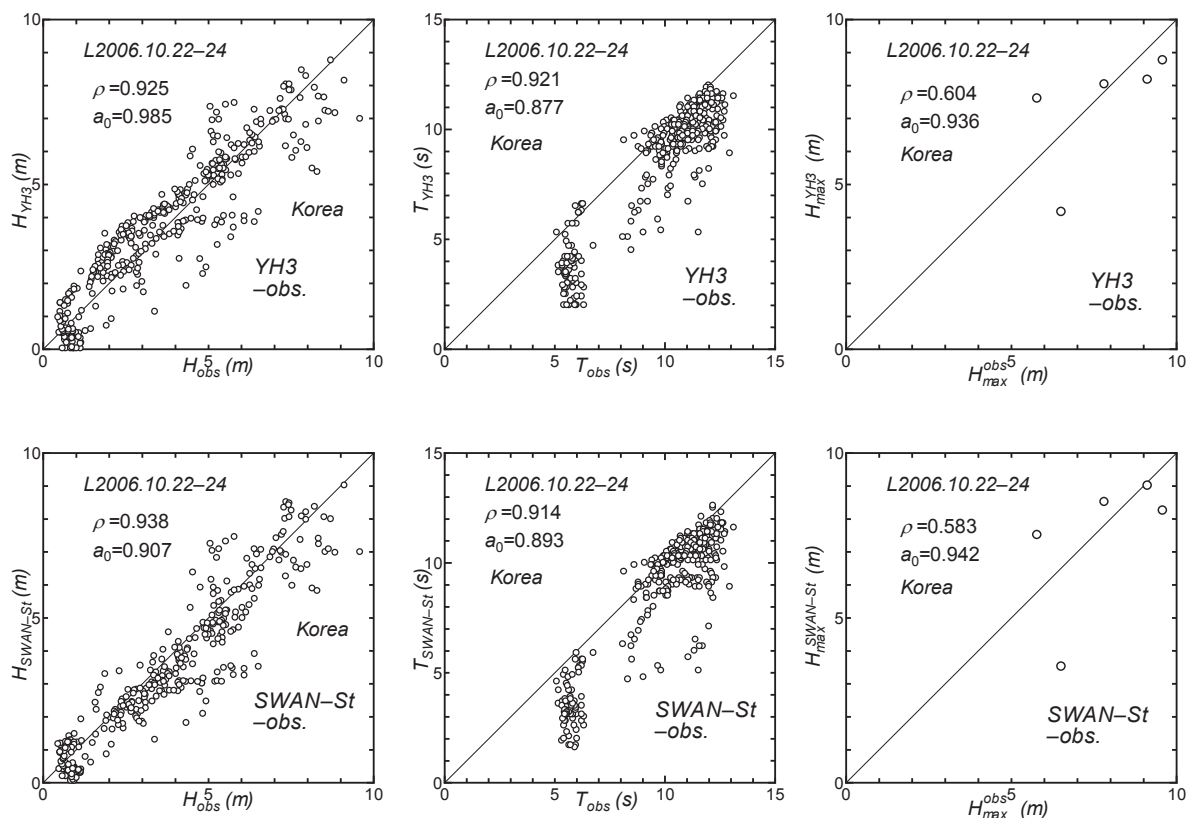


Figure 24 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of wave height H , wave period T and maximum wave height during a storm H_{max} at 5 measurement stations along east coast of Korea in 2006.10.22-24 Storm, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.

Table 8 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 24.

model	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3	0.925	0.985	0.921	0.887	0.604	0.936
SWAN	0.938	0.907	0.914	0.893	0.583	0.942

Table 8 は誤差指標の一覧である。Fig. 24 に示した資料値の散布状況を反映して、波高 H に対して SWAN-St による相関係数 ρ が YH3 によるものよりかなり小さい。これは Fig. 24 でみたように、減衰期において SWAN-St が YH3 より小さい値を与える傾向（観測値は両推算値の中間をとる傾向）を反映した結果である。この特徴を除けば、両モデルによる結果に有意な差はみられない。

Fig. 25 は Ssangjeongcho (ウツリユー島), Donghae (Buoy), Wangdolcho における観測波高時系列と YH3 および SWAN-St による推算波高時系列の比較を示す。観測資料は著者らにとって読解不能な韓国語で書かれた Kim・Lee^[21]から再録しているので、観測条件の細部は不明である。これらの図によると、いずれの地点でもモデルによらず推算値と観測値の対応は不十分である。すなわち、

1) Ssangjeongcho では非常に激しい起伏をもつ観測波高時系列に対して、平均的にみると両推算波高は発達期で追従するが、最盛期から減衰期で過大となっている。

2) Donghae および Wangdolcho でも前半部と後半部で推算波高と観測波高のある程度有意な対応関係がみられなくもないが、最盛時付近では観測波高はほとんど変化しないのに対して、推算波高は増減を伴っており、両者にかんがりの隔たりがある。

また、Kim・Lee^[22]に与えられた SWAN による推算波高は観測波高に全く追従しない。しかし、2005 年 10 月 20~25 日の低気圧に対しては当該ケースより少しよい対応関係が得られている。さらに、Lee・Yamashita^[22]では 2005 年 10 月 20 日~25 日の低気圧と 2006 年 10 月 22 日~25 日の当該低気圧の 2 ケースを扱っているが、大部分の図と説明は前者のケースに限られるので、当該ケースについて検討できない。上述した韓国東岸沿岸の 5 観測地点での観測波高と推算波高の有意な対応関係を考慮すると、2006 年 10 月 22 日~25 日低気圧時の上記 3 地点における観測値の精度に根本的な問題があるように思われる。

Fig. 26 は最大波高 H_{max} の空間分布を YH3 および SWAN-St について与える。最大波高の最大域は韓国東岸の中央部から北側の海域に出現しており、YH3 では 8 m 域が広範に出現し、9 m 域も広くみられる。一方、SWAN-St では 8 m 域が広がるが、9 m 域はごく局所的にすぎない。両モデルによる 8 m 域はおおむね対応するものの、YH3 では最大域はより北側に位置し、9 m 域がかなり広い。最大波高はこれらの最大域

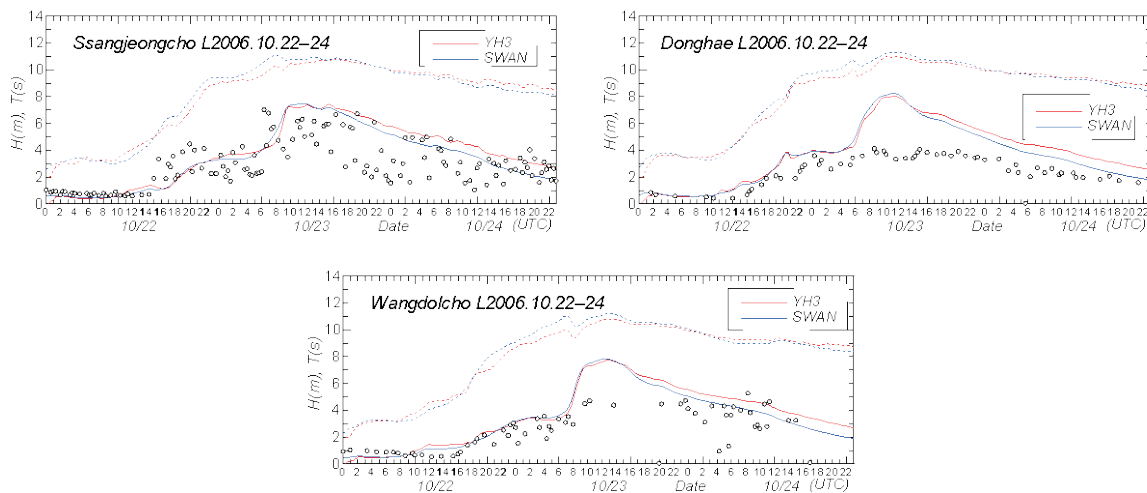


Figure 25 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 3 measurement stations at far-offshore and onshore locations of east coast of Korea during 2006.10.22-25 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

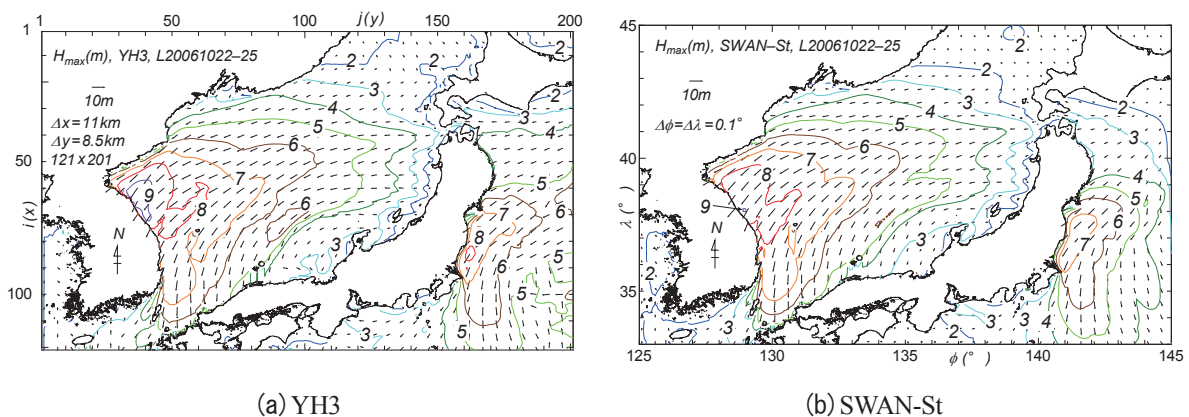


Figure 26 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2006.10.22-25 Storm hindcasted with (a) YH3 wave model or (b) SWAN-St wave model.

から E 方向に減少し、3 m 域の先端が津軽海峡に達している。韓国東岸での波向は全体として NE 寄りである。因みに、最大波高の最大値 H_{maxM} とその周期 T_{maxM} および出現場所は YH3 では 9.55 m, 11.5 s, (63, 37), SWAN-St では 9.01 m, 11.3 s, (71, 41)であるから、YH3 の場合に H_{maxM} は 0.5 m 大きく、出現位置も北西側にずれている。

これらの H_{max} の分布図を Yuk ら^[20]の Fig. 7 と比べると、分布状況は似ているが、Yuk ら^[20]の 8 m 域は今回のいずれの結果よりも狭いことから、Yuk ら^[20]による最大波高 H_{max} は今回の結果より全体として小さいように思われる。これは海上風分布として空間解像度 0.25° (時間間隔はたぶん 6 時間) の ECMWF による解析風を使用したことに起因する可能性がある。

まとめとして、YH3 と SWAN-St は北陸から九州北部に至る日本側の観測地点のみならず韓国東岸沿岸の北東側観測地点における波高・周期の観測結果をよく再現するが、その精度は SWAN-St の場合にやや高いと言える。ただし、韓国東岸における最大波高の最大値に対しては、YH3 が SWAN-St より 1 m 弱大きい値を示し、YH3 が観測値により近い値を与える。

3.7 2004 年 11 月 26 日～28 日低気圧

(1) ストームの概況

2004 年 11 月 26 日に日本海北部を発達しながら東北東に進んだ低気圧は 27 日にオホーツク海に入ってさらに発達し、日本付近は強い冬型の気圧配置になり、29 日まで続いた。この結果、日本海沿岸の北部で高波が生じ、酒田で $H_{max} = 10.65$ m (2012 年までの第 2 位値)、深浦で 10.36 m (2012 年までの第 1 位値) が記録された。

(2) 波高・周期の観測結果との比較

2.1 で示したように、当該ストームが属する期間では気象庁 MSM 風解析値資料の空間解像度は $\Delta x = 10$ km, 時間間隔 $\Delta t = 6$ 時間と空間・時間解像度が(c) (2006 年 3 月 1 日～2007 年 5 月 15 日の期間) 以降の期間における資料と比べて半分になっており、海上風分布資料の精度低下は免れないものと推測される。

Fig. 27 は波高・周期時系列に対する推定値と観測値の比較を深浦、酒田、直江津、輪島、浜田、玄界灘の 6 地点で示す。いずれの推算値も日本海沿岸の北側地点から南西側地点でそれぞれ急激な発達とその後の緩やかな減少を示す観測値とよく符合するし、推算値のうちでは周期を含めて YH3 が SWAN-St よりよい対応を与える。しかし、巨大波高が生じた深浦ではピーク時波高に対して YH3 は観測値に比べて SWAN-St より一層過小評価となっているし、酒田では YH3, SWAN-St の両モデルともピーク値付近の波高・周期を低く評価する。これは空間変化の著しい風や波の場に対して地形解像度や時間解像度、とくに前者が不足することに起因する可能性が高い。

Fig. 28 は日本海沿岸の 10 波浪観測地点 (上記 6 地点と新潟、金沢、経ヶ岬、鳥取の 4 地点) における推算値と観測値の散布図を波高 H , 周期 T , 最大波高 H_{max} それぞれについて与える。YH3 では波高 H についてやや大きい値を与えるが、高波高になるほど過小評価の傾向を示す。最大波高 H_{max} にも低～中間波高時の若干の過大評価の傾向と高波高時の過小評価の傾向がみられる。周期 T に関してもその傾向がうかがえる。SWAN-St では波高 H に関して全体を通して過小評価の傾向にあり、高波高時には資料値の 45°直線からの隔たりが大きい。最大波高 H_{max} については推算値と観測値の平均的対応はよいが、高波高時に低い値を与える。周期 T についても過小評価が目立つ。推算値と観測値の対応は YH3 の方が SWAN-St よりよい。これらの特性は Table 9 に一覧を掲げた各誤差指標の値に反映されている。全体を通じてみると、2.1 に示した(b) 期間における気象庁 MSM 風資料の品質がそれ以降の期間におけるものより、やや劣る特性が波浪推算の結果にも現れていると推測される。これは次に述べる 2003 年 12 月 17 日～20 日のストームに対する結果から一層明らかになる。

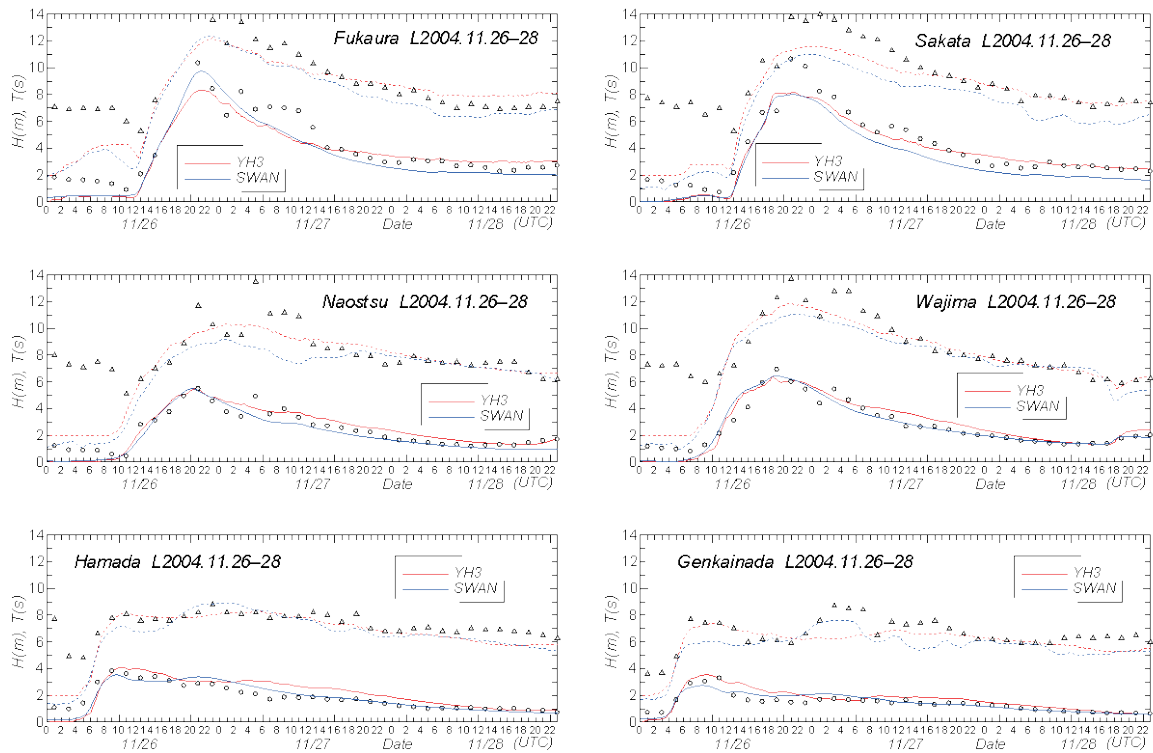


Figure 27 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 6 measurement stations along Japanese coast during 2004.11.26-28 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

ついで、Fig. 29 はストーム期間中における最大波高 H_{max} の空間分布を(a) YH3 と(b) SWAN-St の場合に示す。いずれの結果でも最大波高 H_{max} の 10 m 域は北海道南西端から東北北西端にかけての沖合海域に出現し、そこを中心に等値線が西方向に延びている。最大値は 11 m を越える。このため、日本沿岸の波高は観測結果との比較でみたように、南西側の地点 (玄界灘) から北側の地点 (深浦) に向けて次第に増大する特徴を示す。また、YH3 が SWAN-St よりやや広い高波高域を与えるものの、その空間分布はよく似ており、両者の実質的な差は少ない。波向は W を主体とし、N 寄りをとった他のストーム時の波向の空間分布と異なっている。

ところで、最大波高の最大値 H_{maxM} と相当する周期 T_{maxM} および出現位置は YH3 では 11.46 m, 12.7 s, (33, 144), SWAN-St では 13.40 m, 12.6 s, (32, 146)となっており、SWAN-St における H_{maxM} が約 2 m 大きいものの、 T_{maxM} や出現場所にそれほど相違はない。しかし、 H_{max} の出現位置 (32, 146) における水深は 613 m, そのまわりの 4 地点の水深は 48 m, 587 m, 968 m, 318 m をとり、水深 48 m 地点との間で水深の空間変化が非常に大きくなっている。SWAN ではこのように水深の空間変化が著しい場合に、非現実的な波高が算出される場合が時々見出される。今回の事例ではそれほど突出した波高となっていないが、それでも過大な値となっていると考えられる。最大波高の最大値 H_{maxM} と相当する周期 T_{maxM} としては、YH3 の場合と同じ位置 (33, 144) における 11.10 m, 11.6 s が適切な値でないかと推測される。ただし、周期 T_{maxM} が YH3 の場合と比べて小さすぎるかもしれない。

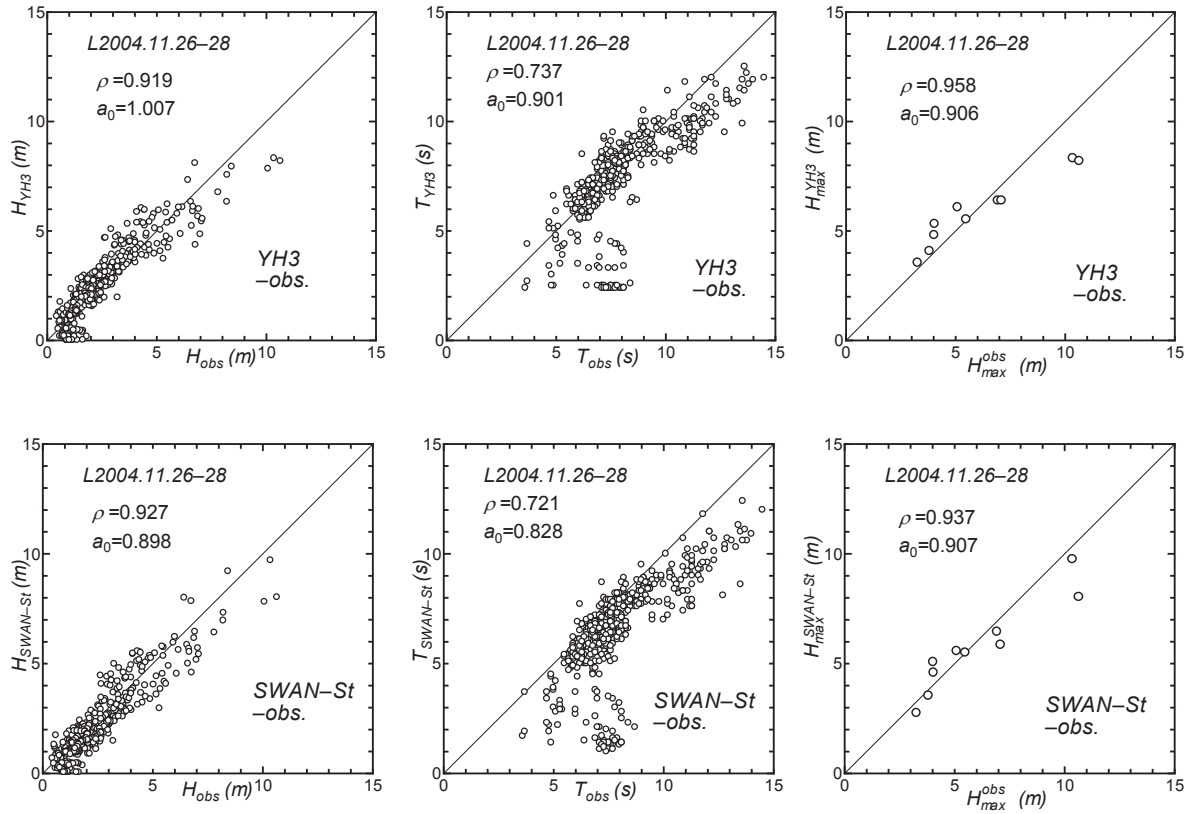


Figure 28 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of wave height H , wave period T and maximum (significant) wave height during a storm H_{max} at 10 measurement stations along Japanese coast in 2004.11.26-28 Storm, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.

Table 9 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 28.

model	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3	0.919	1.007	0.737	0.901	0.958	0.906
SWAN	0.927	0.898	0.721	0.828	0.937	0.907

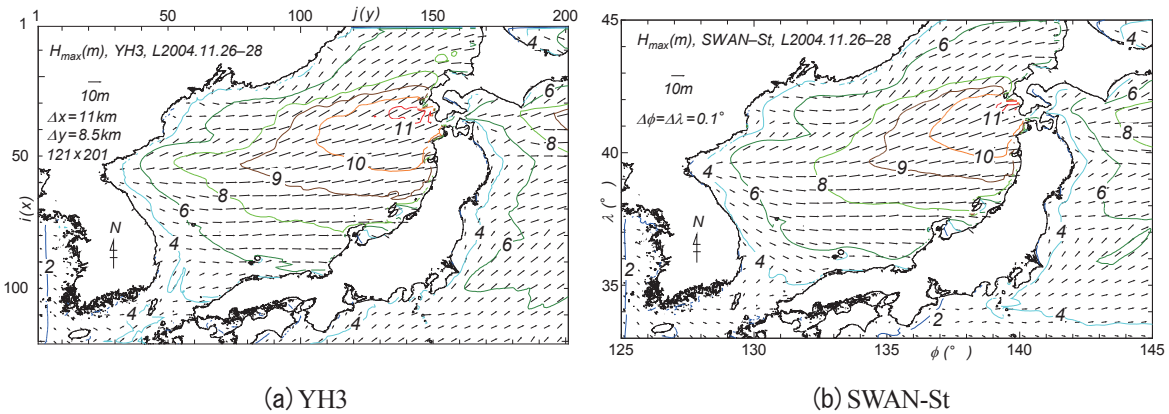


Figure 29 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2004.11.26-28 Storm hindcasted with (a) YH3 wave model or (b) SWAN-St wave model.

3.8 2003年12月17日～20日低気圧

(1) ストームの概況

2003年12月17日に日本海西部から、また関東南岸沖からそれぞれ低気圧が発達しながら東および北東に進み、18日にさらに発達するとともに、19日には別の低気圧が加わって日本付近で強い冬型の気圧配置に変わり、20日には日本の東海上で低気圧が台風並みに発達した。日本海の沿岸では新潟沖で最大波高 $H_{max} = 7.50$ m, 直江津で9.24 m, 輪島で7.62 m などの高波高が観測された。直江津での9.24 mは2012年までの既往最大波高(第1位値)にあたる。

(2) 波高・周期の観測結果との比較

当該ストームは気象庁MSM資料としては(a)2002年5月15日～2004年8月31日の期間に属することから、空間解像度 $\Delta x = 10$ km, 時間間隔 $\Delta t = 6$ 時間で静力学モデルにより得られた結果を利用することになる。したがって、海上風分布資料の品質・精度は上述した(b)期間におけるものより一層低いと考えられる。

Fig. 30は推算値と観測値に基づく波高・周期資料時系列を酒田, 新潟, 直江津, 金沢, 浜田, 玄界灘の6地点で与える。いずれの推算値も全体として観測値にみられる波高・周期の増加・減少の挙動に追従するものの、12月19日の発達期で過大な値を与え、また12月20日の9時頃の観測値における波高・周期の増加・減少をとくに直江津では再現せず、過小評価となっている。これまでに述べてきた各ストーム時の波高・周期に対する推算値と観測値の対応を考慮すると、これは海上風分布の推定精度が相対的に低いことによると推定せざるを得ない。このように、推算値と観測値の対応は十分でないが、YH3がSWAN-Stよりやや良好な対応を与えている。

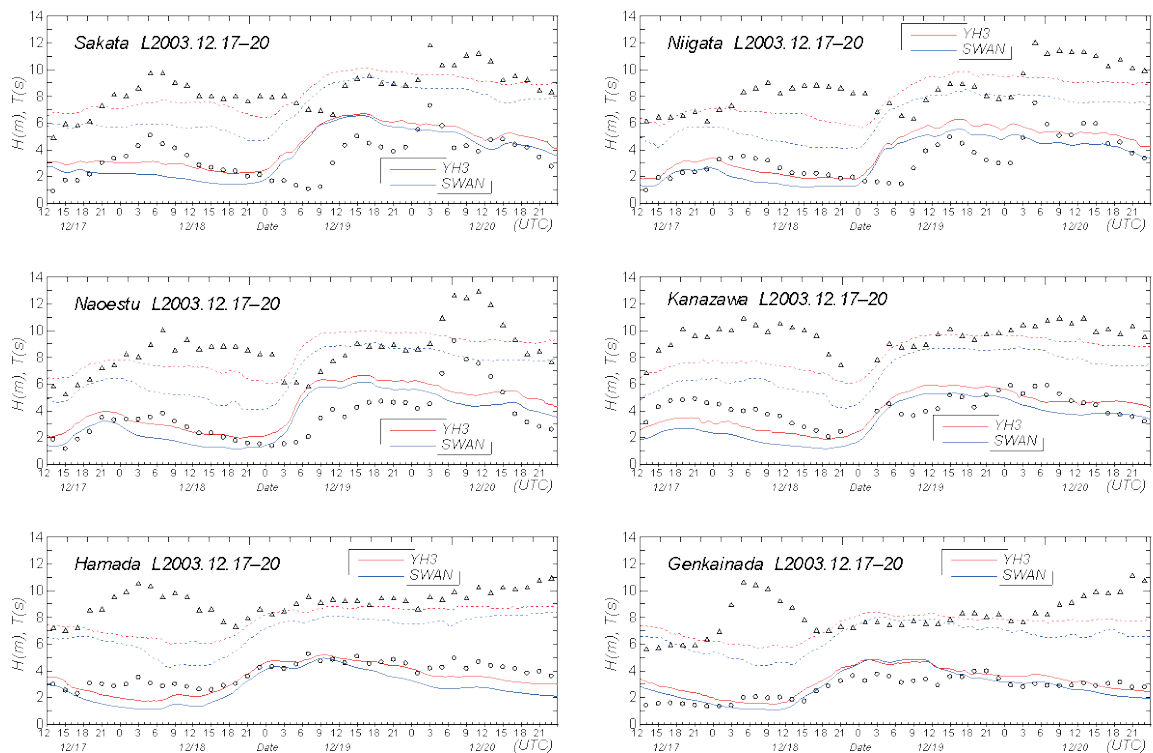


Figure 30 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 6 measurement stations along Japanese coast during 2003.12.17-20 Storm, in cases where YH3 and SWAN wave models are applied.

なお、金ら^[23]、駒口ら^[16]、Lee ら^[17]は MMS による海上風分布を入力条件とする WW3 を用いた波浪推算値が直江津における観測値を比較的よく再現するとしているが、急激な発達・減衰を示し、ピーク波高が 9.24 m に達した観測値と必ずしも対応せず、時系列に対しても過大な値を、最大値に対して過小な値を与えていることから、ここでの結果ほどでないとしても両者の対応は不十分と言わざるを得ない。

Fig. 31 は 10 地点（上記 6 地点と深浦、輪島、経ヶ岬、鳥取の 4 地点）における波高 H 、周期 T 、最大波高 H_{max} に対する推算値と観測値の間の散布図を YH3 と SWAN-St の両モデルについて示す。また、Table 10 は誤差指標の一覧である。誤差指標をみるまでもなく、波高、周期についてはいずれのモデルでも資料値の 45°直線まわりのばらつきが大きく、推算値と観測値の対応が不十分であることを表している。ただし、周期については、YH3 が SWAN-St より観測値との若干よい対応を示す。最大波高についても、資料のばらつきが大きいが、中間波高部で推算値が観測値より大きく、高波高部で小さい傾向や、YH3 が SWAN-St よりその傾向が少なく観測値との若干よい対応を与えることがわかる。しかし、いずれにしろこの事例に対

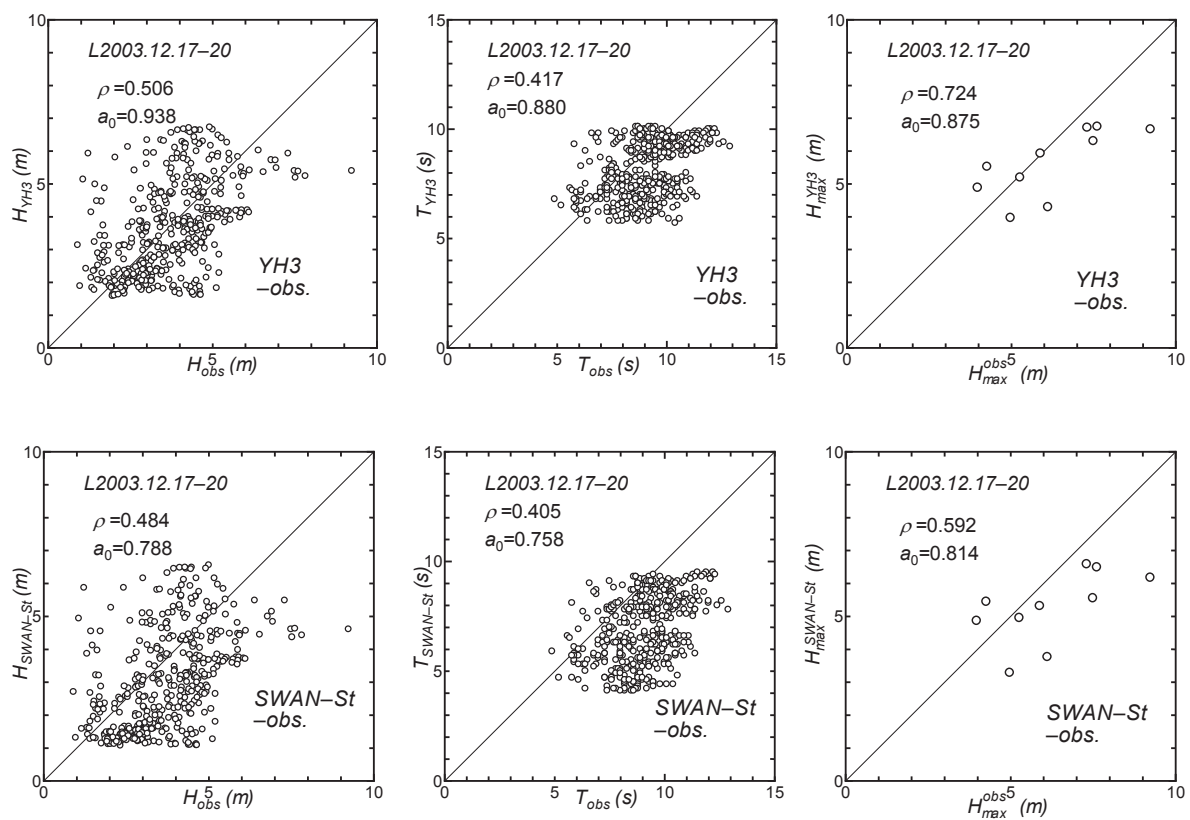


Figure 31 Scatter plot between hindcasts and measurements for any of wave height H , wave period T and maximum (significant) wave height during a storm H_{max} at 10 measurement stations along Japanese coast in 2003.12.17-20 Storm, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.

Table 10 A list of error indices for wave height, wave period and maximum wave height indicated in Figure 31.

model	H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
YH3	0.506	0.938	0.417	0.880	0.724	0.874
SWAN	0.484	0.788	0.405	0.758	0.592	0.814

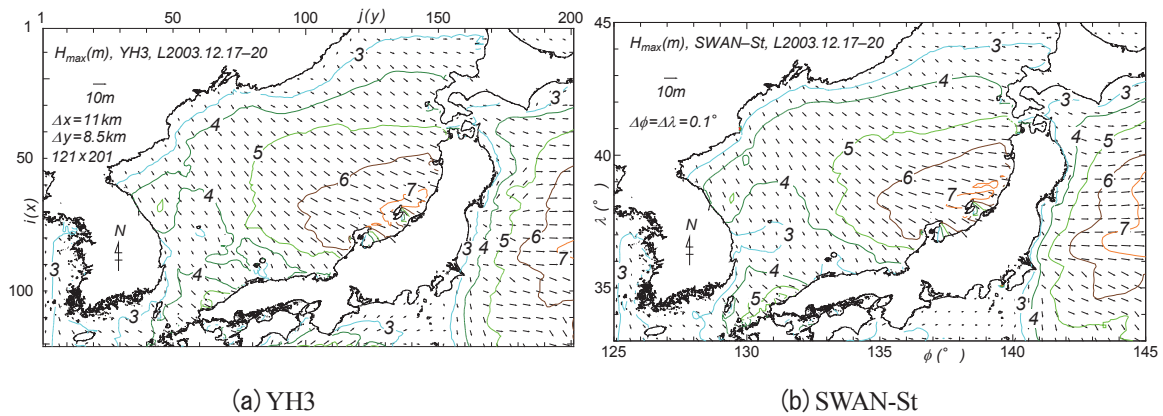


Figure 32 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2003.12.17-20 Storm hindcasted with (a) YH3 wave model or (b) SWAN-St wave model.

する推算値と観測値の対応のレベルは、上述の 7 事例に比べて低い。その要因は個々のストームの特性のほか、入力条件とした海上風分布の品質にあると言わざるを得ない。

Fig. 32 は最大波高 H_{max} の空間分布を YH3 と SWAN-St について与える。その最大域は佐渡島の周辺に出現しているが、等値線の値は 7 m であるから、直江津で観測された 9.24 m よりかなり低い。やはり風速が過小評価されているのであろう。また最大波高は佐渡島周辺から対岸のロシア沿海州沿岸の 3 m に向けて半楕円状に減少する。波向は NW である。因みに、最大波高の最大値 H_{maxM} と相当する周期 T_{maxM} および出現位置は YH3 では 7.15 m, 10.3 s, (66, 143)ほか 1 地点、SWAN-St では 7.11 m, 9.6 s, (66, 142)ほか 3 地点であり、出現場所はそれぞれ佐渡島周辺の複数地点になっている。両モデルによる H_{maxM} は約 7.1 m であって、直江津での最大（観測）波高 9.24 m より 2 m 以上低いし、新潟沖や輪島での最大（観測）波高（7.50 m, 7.62 m）にも及ばない。要するに、10 m 波高域が北陸沿岸のかかなり沖合から佐渡島沖合に移動する挙動が提示されている駒口ら^[6]の結果を考慮すると、今回の結果では海上風分布、したがって最大波高が過小評価されている可能性が高いと推測される。

3.9 全体のまとめ

ここでは、8 ケースのストームに対する結果をまとめて推算値の全体的特性を議論する。Table 11 は 8 ケースのストームに対する誤差指標をモデル別（YH3 と SWAN-St）、地域別（日本側と韓国側）によるまとめ一覧であり、ストームの特性は○印の番号と発生年（2007 年では月も）で示す。①2003 年ストーム時には波高や周期に対する相関係数 ρ は他のストーム時に比べて小さいので、議論からはずすこととする。そこで、まず日本側の結果をみると、YH3 では韓国東岸のうねり性高波浪に注目した⑦2010-2011 年ストーム時には日本側で波浪の発達あまりみられないことから、波高 H のみならず周期 T や最大波高 H_{max} に対する相関係数がともに小さい。また同様に、韓国側でのうねりに注目した③2006 年ストーム時ならびに海上風分布資料の精度がやや低い②2004 年ストーム時には、周期 T に対する相関係数が相対的に小さくなっている。これらの指摘は SWAN-St の場合にもあてはまる。残りの 4 ケース（⑧2012, ⑥2008, ⑤2007-2, ④2007-1）においては波高 H , 周期 T , 最大波高 H_{max} に対する再現性はかなり高いし、周期に対する相関係数が相対的に若干小さい上述の 2 ケース（③2006 と②2004）においても、これを除く各指標値（ ρ と a_0 ）は波高 H および最大波高 H_{max} のみならず、勾配値 a_0 からみて周期 T においてもかなり高い精度を示唆する。

一方、韓国側では波高や周期に対する相関は日本側の結果と比べて全体的に低く、周期に対する勾配値 a_0 もこれが水圧式波高計記録によっているため、1 より有意な程度に小さくなっている。また、最大波高

Table 11 Summary of error statistics for each of 8 storm cases at measurement stations along the Japan coast and east coast of Korea.

No. storm (year)	YH3(Japan)						SWAN-St(Japan)					
	H		T		H_{max}		H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
⑧2012	0.945	1.122	0.947	0.968	0.889	0.956	0.959	1.088	0.949	0.989	0.912	0.930
⑦2010-2011	0.839	1.201	0.461	0.952	0.621	1.063	0.873	0.990	0.549	0.915	0.651	0.915
⑥2008	0.963	1.103	0.909	0.945	0.834	1.049	0.968	1.050	0.939	0.976	0.872	0.998
⑤2007-2	0.954	1.053	0.938	0.954	0.924	0.964	0.955	0.985	0.939	0.989	0.922	0.957
④2007-1	0.935	1.114	0.922	0.962	0.829	0.976	0.944	1.038	0.928	0.969	0.842	0.975
③2006	0.940	1.094	0.841	0.912	0.990	0.973	0.952	0.948	0.873	0.957	0.974	0.880
②2004	0.919	1.007	0.737	0.901	0.958	0.906	0.927	0.898	0.721	0.828	0.937	0.907
①2003	0.506	0.938	0.417	0.880	0.724	0.875	0.484	0.788	0.405	0.758	0.592	0.814

No. storm (year)	YH3(Korea)						SWAN-St(Korea)					
	H		T		H_{max}		H		T		H_{max}	
	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0	ρ	a_0
⑦2010-2011	0.848	1.132	0.876	0.906	0.471	0.909	0.886	0.907	0.786	0.905	0.557	0.881
⑥2008	0.860	1.038	0.860	0.780	0.743	0.878	0.859	0.928	0.857	0.839	0.697	0.805
③2006	0.925	0.985	0.921	0.887	0.604	0.936	0.938	0.907	0.914	0.893	0.583	0.942

H_{max} については相関係数がとくに SWAN-St の場合に小さいし、勾配値 a_0 にもその傾向がみられる。要するに、韓国東岸では日本海を長距離伝播するうねり性高波浪が卓越することや波浪記録が水深 20 m 以浅に設置された水圧式波高計（計測上波高の精度に問題があり、周期を長めに評価する傾向）によっていることから、波浪推算における地形解像度（約 10 km, 0.1° ）の不足や海上風の推定精度の不足と相まって、推算精度の確保が日本側に比べて難しい状況にある。

Fig. 33 は①2003 年ストームを除く 7 ケースの各ストーム時の地点別最大波高 H_{max} に対する推算値と観測値の間の散布図を YH3 と SWAN-St について示す。YH3 は全体として平均的に観測値とよく符合する結果を与え、SWAN-St も同様の挙動を示す。YH3 と SWAN-St を比べると、SWAN-St において若干資料値の 45° 直線まわりのばらつきが小さいが、最大級の波高に対して観測値より低めの値を与える。この結果は相関係数 ρ と勾配値 a_0 に現れている。SWAN においては平均風速 U_{10} に依存する Wu の C_d 式によって、風の摩擦速度を評価し、YH3 では波の発達項を U_{10} 表示の式、言わば一定値をとる C_d 式によって風の摩擦速度を計算していることに相当するので、SWAN におけるパラメータが YH3 より 1 つ多くなり、その結果たとえ他の項を同じと仮定しても SWAN の再現性がより高くなるのは当然とも考えられる。もちろん、YH3 における風波の発達式を u_* 表示に変え、 U_{10} 依存型の C_d 式を使用しても、YH3 の推算精度の向上が確約されないのは言うまでもない。

ついで、Fig. 34 はストーム別最大波高の空間分布を重ね合わせて得た①2003 年ストームを除く 7 ストーム時の最大波高の空間分布を YH3 と SWAN-St について示す。①2003 年ストーム時の最大波高は過小評価されているので、①2003 年ストーム時の結果を入れても Fig. 34 の挙動は変化しない。両モデルによる結果はかなり類似する。そこで YH3 の結果をみると、この場合いずれかのストーム時最大波高で全体の最大値をとる特性が反映される結果、全体の最大値の概略値は酒田付近沖合の 13 m（⑧2012 年ストーム）や朝鮮

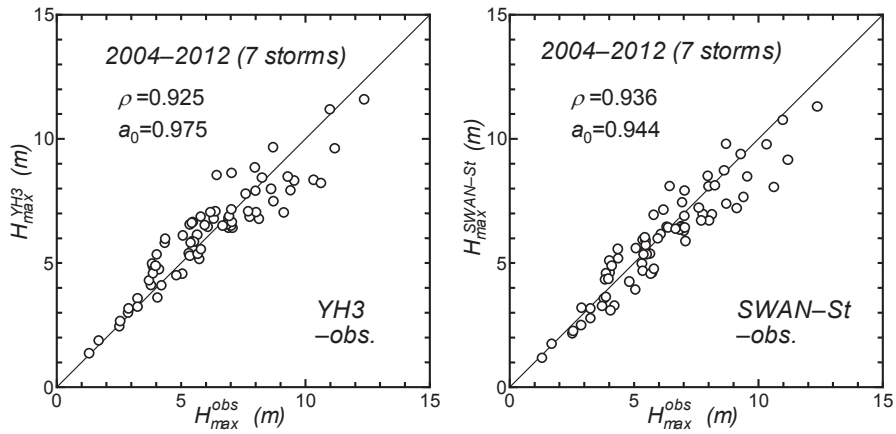
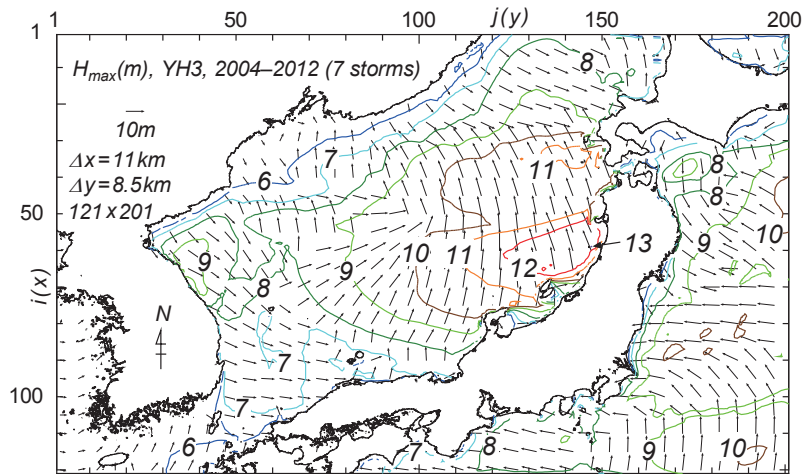
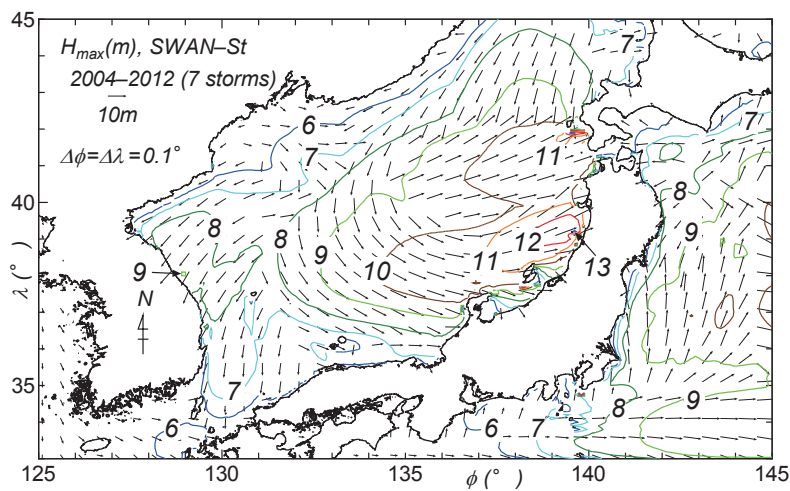


Figure 33 Scatter plot between hindcast and measurement for maximum wave height during a storm H_{max} at all measurement stations along Japanese coast in 7 severe storm cases over the year period from 2004 to 2012, in cases where YH3 and SWAN-St wave models are applied.



(a) YH3



(b) SWAN-St

Figure 34 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} generated by 7 severe storms over the period from 2004 to 2012 hindcasted with (a) YH3 wave model and (b) SWAN-St wave model.

半島東岸北部の9m域(③2006年ストーム)のほか、北海道南西沖の11m(②2004年ストーム)や韓国東岸南部から玄界灘沖合にかけての7m(⑦2010年ストーム)が目につく。この図は過去数十年の間の既往最大波高の空間分布を与えるものでないが、過去最大級の波高が最近のこれらのストームによって生じた可能性を考慮すると、既往最大波高の特徴をある程度反映しているかもしれない。

4. 結 語

本研究では、2012年から2003年に遡って、この間に日本海で異常波浪を生起した8ケースの低気圧に対して気象庁MSMによる海上風分布を入力条件とする第2世代モデルYH3および第3世代モデルSWANに基づく波浪推算を実施し、北海道、東北から九州北部に至る日本海沿岸の波浪観測地点のみならず韓国東岸の波浪観測地点で得られた波高・周期時系列との比較を通じて各モデルの精度を検討するとともに、最大波高の空間分布を調べた。その観点は最大級の異常波浪のみならず富山湾での寄りまわり波と称されるうねり性高波浪ならびに韓国東岸でのうねり性高波浪に対する再現性の確認である。主要な結果はつぎのように要約される。

1)2004年9月1日以降、よりの確には2006年3月1日以降を対象とした気象庁による地形解像度 0.1° (あるいは 0.05°)の解析風と予報風からなる海上風分布を入力条件とする場合、地形解像度を約10kmとするYH3あるいは地形解像度を 0.1° とするSWANのいずれのモデルも観測波浪の特性をかなり良好な精度で再現するが、モデルとしてはSWANの精度がYH3よりやや高い。一方、2.1で述べた(a)2002年5月15日~2004年8月31日の気象庁解析・予報風資料を入力条件とする波浪推算結果の再現性に問題があることから、当該風資料の精度はあまり高くないと推測される。

2)寄りまわり波発生時に、いずれのモデルも富山湾湾口部までの波浪をよく再現するが、富山湾内の波浪に対しては既往の研究と同様に過小評価となり、異常な波高をとった寄りまわり波を再現できない。現段階では具体的な対応方法を見出せないが、今後何らかの工夫が是非とも必要である(付録A参照)。

3)いずれのモデルも韓国東岸で観測されたうねり性高波浪をある程度よく再現するが、観測値を発表論文の図からの読取りによっているため、そこに含まれる誤差が比較結果に及ぼす影響も無視し得ない。

4)最大波高 H_{max} の最大値は東北沿岸沖合で13mを越える。一方、対岸の朝鮮半島東岸の北部沖合でも9mを越えるケースもある。

以上要するに、気象庁提供の2004年9月1日以降、あるいは2006年3月1日以降の高地形解像度海上風分布を入力条件とする山口ら^[2]の第2世代の波浪推算モデルYH3およびBooijら^[1]の第3世代波浪推算モデルSWANによって、日本海における異常波浪をかなり高い精度で再現できると言える。

なお、2012年4月3日~4日の低気圧は日本海の東北・北陸沿岸に突出した既往最大波高を生起していることから、可能最大波高の現実的な値を得るために、この低気圧をモデル低気圧として風の場を仮想的に移動させた場合や風速を一定の比率で増幅した場合の波浪推算を行い、最大波高の挙動を調べる研究も興味深いと考えられる。そこで、この検討結果を付録Bで述べる。

参 考 文 献

- [1] Booij, N., Ris, R.C. and L.H. Holthuijsen : A third-generation wave model for coastal regions, 1. Model description and validation, Jour. Geophys. Res., 104(C4), pp.7649-7666, 1999.
- [2] 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄 : エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値予知モデルについて, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127, 1984.
- [3] 川口浩二・猪俣 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, 125pp., 2014.

- [4] 合田良實：耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版界，430p., 2008.
- [5] 山口正隆・野中浩一：波形統計量とスペクトル統計量の比に及ぼすスペクトル形状の影響の検討，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-65, No.1, pp.136-140, 2009.
- [6] 山口正隆・野中浩一・畑田佳男：海面抵抗係数と Toba 定数の変動に関する考察，工学ジャーナル (愛媛大学)，第 14 卷，2015 (投稿中)。
- [7] Zijlema, M., vanVledder G.Ph and L. H. Holthuijsen : Bottom friction and wind drag for wave models, *Coast. Eng.*, 65, pp.19-26, 2012.
- [8] 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, 2014 (印刷中)。
- [9] 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.
- [10] Lee, H.S. : Abnormal storm waves in the East Sea(Japan Sea) in April 5-2012, *Jour. Coastal Res., Spec. Issue No.65*, pp.748-753, 2013.
- [11] Oh, S.H. and W.M. Jeong : Characteristics of high waves observed at multiple stations along the east coast of Korea, *Nat. Hazards and Earth Syst. Sci*, 13, pp.3503-3514, 2013.
- [12] 間瀬 肇・安田誠宏・Tracey H.Tom・辻尾大樹：富山湾沿岸に災害をもたらした 2008 年 2 月冬季風浪の予測と追算シミュレーション，海岸工学論文集，第 55 卷，pp.156-160, 2008.
- [13] 永井紀彦・平石哲也・河合弘泰・川口浩二・吉永宙司・大釜達夫：波浪観測網が捉えた 2008 年 2 月 24 日の日本海沿岸高波の特性，海岸工学論文集，第 55 卷，pp.146-150, 2008.
- [14] 李 漢洙・山下隆男・駒口友章・三島豊秋：メソ気象・波浪推算モデルによる 2008 年 2 月の寄り廻り波の再現計算，海岸工学論文集，第 55 卷，pp.161-165, 2008.
- [15] 犬飼直之・岡本 大：平成 20 年 2 月の佐渡島高波被害に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-65, No.1, pp.1396-1400, 2009.
- [16] 駒口友章・李 漢洙・山下隆男：日本海中部沿岸における異常波浪の発生機構の検証，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.B2-65, No.1, pp.206-210, 2009.
- [17] Lee, H.S., Kim, K.O., Yamashita, T., Komaguchi, T. and T. Mishima : Abnormal storm waves in the winter East/Japan Sea : generation process and hindcasting using an atmosphere-wind wave modelling system, *Nat. Hazards and Earth Syst. Sci.*, 10, pp.773-792, 2010.
- [18] Lee, H.S., Komaguchi, T. and A. Yamamoto : Wintertime extreme storm waves in the East Sea (Japan Sea) : estimation of extreme storm waves in the Toyama Bay, Japan, *Proc. 7th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts(APAC2013)*, 2013.
- [19] Kim, K.O., Lee, H.S., Min, B.I and B.H. Choi : Hindcasting of high swell waves off the Eastern Korean Coast on 24 February 2008 using structured and unstructured wave models, *Jour. Coastal Res., Spec. Issue No.65*, pp.1073-1077, 2011.
- [20] Yuk, J.H., Kim, K.U., Choi, B.H. and K.T. Jung : Swell prediction for the East Korean Coast, *Proc. 7th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts (APAC2013)*, pp.705-712, 2013.
- [21] Kim, T.R. and K.H. Lee : Examination on the wave hindcasting of the abnormal swells in the East Coast(in Korean with English abstract), *Jour. of Korea. Soc. of Ocean Eng.*, 22, pp.13-19, 2008.
- [22] Lee, H.S. and T. Yamashita : On the wintertime abnormal storm waves along the east coast of Korea, *Proc. 6th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts(APAC2011)*, pp.1-18, 2011.
- [23] 金 庚玉・李 漢洙・山下隆男：ポーガス低気圧を援用した MM5 と WW3 の結合モデルによる冬季日本海の異常波浪の再現計算，海岸工学論文集，第 52 卷，pp.176-180, 2005.

付録 A : 富山湾における寄りまわり波の再現計算

本文では、2008年2月22日～24日の低気圧に伴う富山湾湾口部の田中における波浪の再現はほぼ可能であるのに対して、湾奥の富山や伏木富山においてはかなりの過小評価となっていることを述べた。この一因として、波浪推算における地形解像度 (0.1°) の不足が考えられるので、ここでは地形解像度を富山湾に向けて $1'$ (0.0167°) と $30''$ (0.0083°) と3段階で向上させた場合のSWANによる波浪推算の結果をみる。3段階目の $30''$ という相対的に低い地形解像度は入手し得た地形データの制約による。入力とする海上風分布は気象庁MSM風解析値・予報値 (空間解像度 0.05°) より得た1時間間隔値である。

Fig. A1 は第2段階の丹後半島から北海道西南部に至る領域 ($N35^\circ\sim 40^\circ$, $E135^\circ\sim 140^\circ$: 空間解像度 $1'$) および第3段階の能登半島から佐渡島に至る領域 ($N36.5^\circ\sim 38.5^\circ$, $E136.5^\circ\sim 139^\circ$: 空間解像度 $30''$) における最大波高 H_{max} と波向の空間分布をそれぞれ表す。また、Fig. A2 は第3領域で得られた田中、富山および伏木 (富山) における波高 H と周期 T の時系列に対する推算値と観測値の比較を与える。これらの図から、地形解像度を段階的に向上させた高地形解像度波浪推算によっても富山湾湾奥の富山や伏木富山、とくに富山における波浪状況を全く再現できないことが示される。時系列でみれば、高地形解像度化によって波高はむしろ小さくなっている。

寄りまわり波の発生に関して、北陸沿岸のうち富山湾湾口の田中までの各波浪観測地点における波高・周期時系列を波浪推算によってかなり適切に再現できるが、湾奥の富山や伏木富山では過小評価になるというのが畑田・山口^[24]の1998年時点 (実際には1989年) の研究結果であるが、より高精度の海上風分布や高地形解像度でのより高度な第3世代波浪推算モデルの利用によっても2014年時点で同様の結果しか得られないのは残念としか言いようがない。

湾奥における、とくに最大波高 10 m に達する富山での観測結果が正しいとして、富山湾における局所的な地形による風速の増強や複雑な海底地形による非線形的な波浪エネルギーの収束を考慮しても、富山で観測された 10 m に近い最大波高の再現は困難と考えられる。今のところ具体的な対応策は見当たらない。

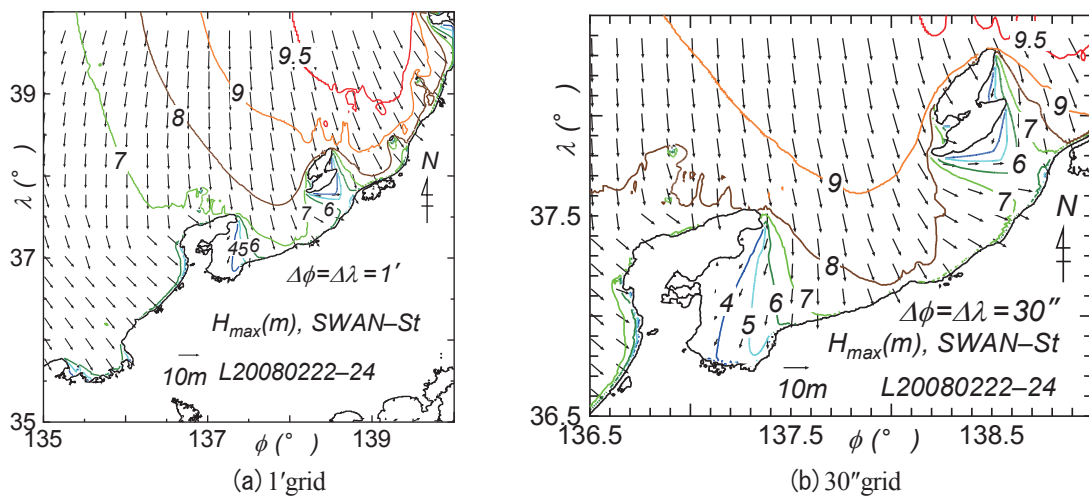


Figure A1 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during 2008.02.22-24 Storm hindcasted with SWAN-St wave model on nested grid of either (a) $1'$ space increment or (b) $1'+30''$ space increments.

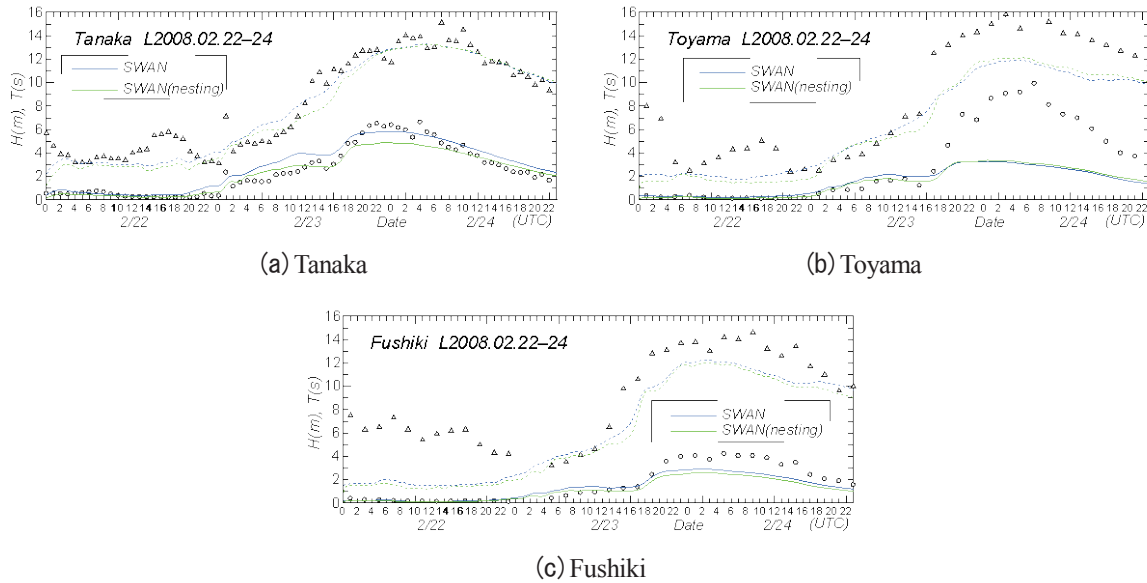


Figure A2 Comparison between hindcasts and measurements for time variations of wave height H and wave period T at each of 3 measurement stations in the Toyama bay during 2008.02.22-24 Storm, in cases where SWAN and nested SWAN wave models are applied.

参 考 文 献 (付録 A)

[24] 畑田佳男・山口正隆：富山湾における特異波浪「寄り回り波」の予測法に関する予備的検討，愛媛大学工学部紀要，第17巻，pp.261-271，1998.

付録 B：日本海北東部沿岸域における仮想時最大波高の推定

2012年4月3日～4日の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つの基準モードとして，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およびYH3による各5ケースの波浪推算，2)当該海上風分布をN方向およびS方向にそれぞれ2ケース（ 0.5° と 1° ）ずつ移動させた計4ケースのSWANによる波浪推算を実施し，風速の増強や強風域の移動に伴う最大波高 H_{max} の空間分布や最大波高 H_{max} の最大値 H_{maxM} と相当する周期 T_{maxM} およびその出現位置の変化を調べる。

Fig. B1は $\alpha = 1.1$ と $\alpha = 1.2$ とした場合のSWANおよびYH3による最大波高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，各モデルによる空間分布の状況はほとんど変わらない。Table B1は $\alpha = 1.1, 1.15, 1.2, 1.25, 1.3$ の5ケースに対する H_{maxM} と T_{maxM} および出現場所の一覧をSWANとYH3（括弧内）の場合に示す。SWANによれば， $\alpha = 1.0$ での $H_{maxM} = 13.16$ 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。また，こうした異常波浪の状況では絶対値として T_{maxM} の値（s単位）が H_{maxM} の値（m単位）を上まわる。最大風速は $\alpha = 1.0$ で $U_{max} \approx 31$ m/sであるから， $\alpha = 1.2$ では $U_{max} = 37$ m/s， $\alpha = 1.3$ では $U_{max} = 40$ m/sに達する。一方，YH3では $\alpha = 1.0$ での13.01 m， $\alpha = 1.2$ での17.40 m， $\alpha = 1.3$ での19.35 mをとり，SWANの場合と同程度の値を与える。これは周期の場合にも言える。しかし，最大値の出現場所は $\alpha = 1.0$ ではSWANの場合と同一であるが， $\alpha > 1$ では主に西方に数十 km 移動し，一定位置を占めるSWANの場合と異なる。Fig. B1を再度みると，最大値はSWANの方がYH3より若干大きいものの，これに次ぐ波高

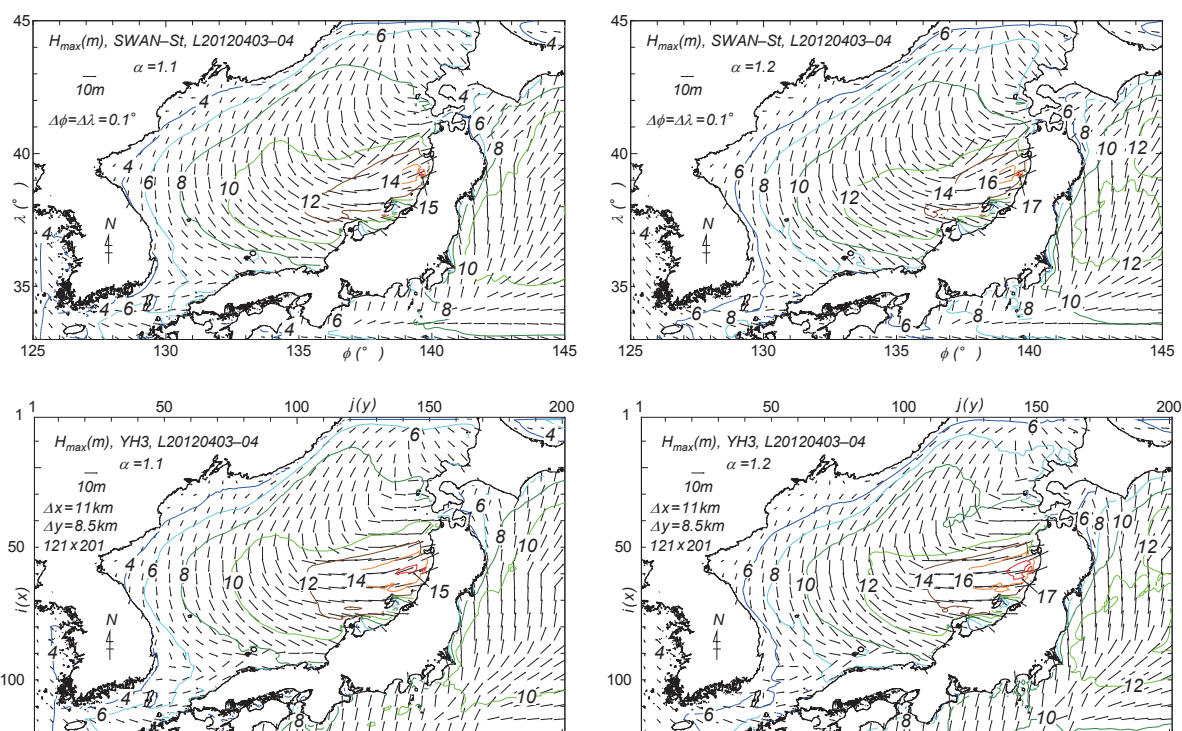


Figure B1 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during tentatively wind speed-increased 2012.04.03-04 Storm hindcasted by use of SWAN-St or YH3 under MSM-based winds conditions.

Table B1 A list of spatially largest maximum wave height H_{maxM} associated with corresponding wave period T_{maxM} and appearance location based on wave hindcasts by SWAN-St or YH3 in tentatively wind speed-increased 2014.04.03-04 Storm.

	H_{maxM} (m)	T_{maxM} (s)	location
α	SWAN(YH3)	SWAN(YH3)	(SWAN), (YH3)
1.0	13.16(13.01)	13.6(13.7)	(59,147), (59,147)
1.1	15.29(15.07)	14.5(14.5,14.6)	(59,147), (58,143) (58,144)
1.15	16.37(16.15)	15.0(15.1)	(59,147), (58,148)
1.2	17.48(17.40)	15.3(15.6)	(59,147), (57,145)
1.25	18.60(18.31)	15.8(15.7)	(59,147), (59,140)
1.3	19.69(19.35)	16.2(16.4)	(59,147), (59,144)

域の広さは SWAN の方が小さくなっており、3 次元的には最大波高の空間分布は SWAN の方が突出している特徴をもつ。

仮想的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。SWAN による場合、 $\alpha = 1.2$ に対して $H_{maxM} = 17.48$ 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 16 m、 $\alpha = 1.2$ とした場合には H_{maxM} は 17.48 m であるから、 $\alpha = 1.2$ とした場合 H_{maxM} はこれを 1 m 以上上まわる。

ついで、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Fig. B2に与える。また、Table B2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 H_{maxM} の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} は標準ケースに比べて0.6 m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0.79 m減少し、最大値の出現場所もS寄りに移動する。標準ケースを含む5ケースの結果をみると、最大値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12~13 mをとる。これらのうちの最大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では、想定される最大波高は北陸から東北の沿岸とその沖合で15~16 mと推定されていることから、2012年4月3~4日低気圧の仮想的コース変更に伴う H_{maxM} はこれらの値を上まわらない。

2012年4月3~4日低気圧に対する仮想的低気圧についての波浪推算結果から、つぎのことが言える。
 1) 領域全体における風速増強 (αU_{10} 倍, $\alpha = 1.1, 1.15, 1.2, 1.25, 1.3$) は最大波高の空間分布をあまり変えずに最大波高全体の増加をもたらす。SWANによる最大波高の最大値 H_{maxM} は既往値 ($\alpha = 1.0$) 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。YH3による H_{maxM} も同程度の値を与えるが、最大値の出現場所が α の変化とともにやや移動する。
 2) 当該低気圧のN方向あるいはS方向への人為的移動に応じて、最大波高 H_{max} の空間分布も変化するが、最大波高の最大値 H_{maxM} は当該低気圧時の値 (13.16 m) 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最大波高を生じるコースをとったことが推測される。

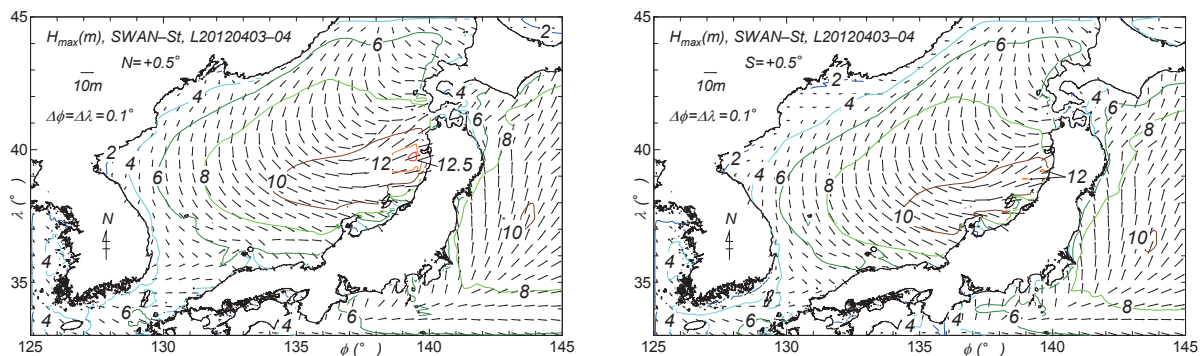


Figure B2 Spatial distribution of maximum wave height H_{max} during tentatively course-changed 2012.04.03-04 Storm hindcasted by use of SWAN-St under MSM-based winds conditions.

Table B2 A list of spatially largest maximum wave height H_{maxM} with corresponding wave period T_{maxM} and appearance location based on wave hindcasts by SWAN -St in tentatively wind speed-increased 2014.04.03-04 Storm.

	H_{maxM} (m)	T_{maxM} (s)	location
course change	SWAN	SWAN	(SWAN)
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)