

波浪推算モデル SWAN による伊勢湾台風時波浪の再現

小林 智 尚*・座波慎一郎**・安田 孝 志***

強風・風向急変場・短吹送距離である伊勢湾台風来襲時の伊勢湾を対象に湾内波浪を波浪推算モデル SWAN を用いて再現を試み、推算結果から SWAN に用いられている各項の特性について検討した。その結果、風から波へのエネルギー輸送項に Janssen (1991) の quasi-linear 理論を用いると Snyder ら (1981) の理論に比べて湾内波浪のスペクトルは低周波数側に移動し代表波高も増大した。また移流項に 1 次の風上差分を用いると SWAN 標準の高次の半陰解法を用いた場合に比べて波浪方向スペクトルの分布形が数値誤差により広がることが確認された。

1. はじめに

波浪推算モデル SWAN (Booij ら, 1999) は第三世代波浪推算モデル WAM (WAMDI Group, 1988) を極浅海領域に拡張したモデルである。SWAN は広島湾や大阪湾 (間瀬ら, 2001), 東京湾 (橋本ら, 2002), 伊勢湾 (小林ら, 2002, 2003) などの浅い小領域にも適用され、その推算精度や適用性について報告されている。

しかしこれらの研究では主に現地波浪に対する SWAN の再現性についての議論が多く、モデルの物理特性については、水谷ら (2002) による波浪スペクトル形状に関する検討など、わずかである。一方 1985 年に風向急変場などの特徴的な風域場に対する波浪推算モデルの相互比較が SWAMP (Sea Wave Modeling Project) として行われた (Komen ら, 1994)。この時、対象風域場に対する波浪場の真値がなくともモデルごとの推算結果を相互比較することにより、個々のモデルの特性を把握できた。

本研究では上記の点をふまえ、伊勢湾台風来襲時の伊勢湾を対象に SWAN による波浪場の推算を行い、推算結果からモデルの物理特性について議論する。この風域場は強風で吹送距離が短くさらに風向きが急変する場であり、波浪推算モデルにとっては推算結果に特徴が現れる場の一つである。また SWAN のエネルギー・ソース項や移流項を変更した推算結果を相互比較し、これらの項の特徴や寄与についても検討する。

2. 波浪推算モデル SWAN

ここでは波浪推算モデル SWAN Cycle III version 40.11 を用いた。SWAN については他の文献に詳しく述べられている (たとえば, Holthuijzen ら, 2000; Young, 1999; 小林, 2002) ので参照して頂きたい。

エネルギー・ソース項のうち、風から波へのエネルギー

ギー輸送項 S_{in} には Snyder ら (1981) の理論に基づくモデルが SWAN では標準となっている。一方 SWAN の原型である波浪推算モデル WAM Cycle 4 (Günther ら, 1992) ではこの項 S_{in} に Janssen (1991) が提唱する quasi-linear 理論が採用されている。本研究ではこの項 S_{in} に Snyder らの理論と Janssen の理論を適用して波浪推算を行い、両者の推算結果を比較してそれぞれの特性を把握する。

浅水砕波によるエネルギー散逸 S_{br} と 3 波波浪成分間での非線形相互作用によるエネルギー輸送 S_{nl} は極浅海域に拡張するために SWAN で新たに追加されたエネルギー・ソース項である。小林 (2002) はこれらの項について検討を行い、特に浅水砕波によるエネルギー散逸 S_{br} が伊勢湾内での波浪推算に寄与していることを示した。

SWAN では移流項の差分化に高次の半陰解法を採用して移流項の計算精度を向上させている。そこでここでは WAM に採用された 1 次の風上差分による推算結果と比較してこの移流項についても検討した。

3. 波浪推算条件

本研究では伊勢湾湾口からの外洋波浪侵入も考慮するため、外洋まで含めた大領域での計算から 2 回のネスティングを行い伊勢湾内の波浪推算を行った。そのときの計算条件を表-1 に、計算大領域および小領域での海底地形図を図-1 に示す。計算大領域では周囲の境界条件を閉境界としている。今回は台風来襲時の推算を行うため、計算領域内の波浪には台風に伴う強風が支配的と考えられる。したがって台風が計算大領域内に存在していれば、計算大領域の境界条件はあまり重要でないと判断した。

表-1 波浪推算条件

推算条件	計算大領域	計算中領域	計算小領域
計算領域			
(経度)	128.0~144.0°	135.7~138.2°	136.5~137.4°
(緯度)	28.5~40.5°	33.63~35.58°	34.20~35.10°
格子点数	101×76	101×79	91×91
格子間隔	約 17.8×14.6 km	約 2780×2280 m	約 1100×910 m
時間間隔	6 分	3 分	1 分
境界条件	閉境界	ネスティングによる開境界	

* 正会員 博(工) 岐阜大学助教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
** 修(工) サニー・トレーディング(株)
*** 正会員 工 博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

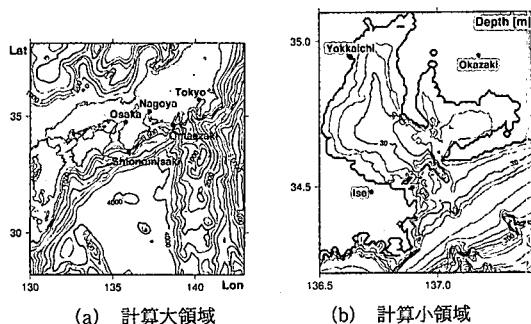


図-1 計算領域と海底地形

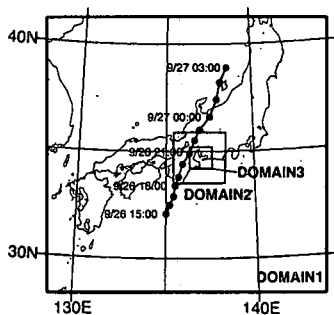


図-2 伊勢湾台風の台風中心経路と気象モデルの計算領域 (大澤ら, 2001)

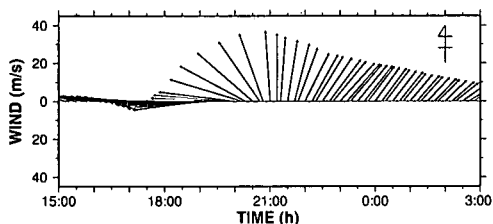


図-3 伊勢湾湾央での海上風の時間変化

解析期間は伊勢湾台風の接近から通過するまでの1959年9月26日15時から翌日3時までとした。この期間での台風中心の移動経路を図-2に示す。この図の領域は次に述べる領域気象モデルでの計算領域でもある。

本研究では大澤ら(2001)が台風ボークスおよび領域気象モデルMM5(5th-Generation Mesoscale Model)を用いて求めた水平3km格子間隔の海上風データを用いた。伊勢湾湾央での海上風風向風速の時間変化を図-3に示す。この図から今回の波浪推算対象が強風・風向急変場であることがわかる。

4. 解析結果

(1) 推算再現性の検証

まず波浪推算結果を観測値と比較し、その推算結果の

妥当性を検証する。ただし伊勢湾台風来襲時の観測値は得られなかったため、伊勢湾に台風が接近した2001年8月21日前後の波浪場を図-1(a)に示す計算大領域での御前崎および潮岬において検証する。これらの地点での有義波高の観測値(財)沿岸開発技術研究センター提供と推算値の時系列を図-4に示す。この図では波浪推算モデルに風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} に Snyder らの理論を用いた標準のSWANと Janssen の理論を用いた場合との推算結果を示している。これらの図では推算値は観測値を良好に再現していることがわかる。特に風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} に Janssen の理論を用いた場合には御前崎において有義波高が最大となる台風最接近時(8月21日)前後でよい再現性を示している。一方 Snyder らの理論を用いた場合は Janssen の理論を用いた場合に比べて大きな値の有義波高を推算している。

また台風接近時の比較的低波浪時(8月18日から20日)では観測値に比べて推算値は過小となっている。これは台風が計算対象領域の外か境界付近にあり、領域外から御前崎や潮岬へ波浪の伝播があったが、波浪推算ではこの大領域の外部から侵入する波浪を考慮していないためと考えられる。逆に台風最接近時(8月21日)には計算領域内に台風が存在し、計算大領域の境界条件の影響は無視できたために、良い推算結果が得られている。

図-4に示された推算結果は本研究で対象としている伊勢湾台風来襲時の推算結果でも伊勢湾内での推算結果でもないが、台風来襲時におけるSWANの推算精度を示しており、この結果から伊勢湾台風来襲時においても

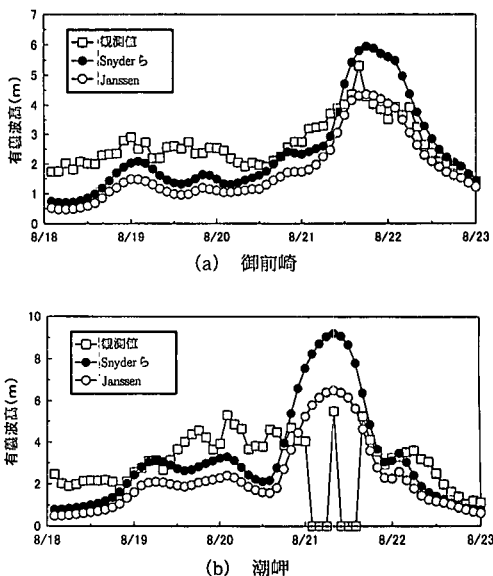


図-4 有義波高のSWANによる推算値と観測値との比較

SWAN は妥当な推算結果を示すものと判断した。

(2) S_{in} の違いによる推算結果の差

伊勢湾台風来襲時の伊勢湾内波浪を、風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} に Snyder らの理論を用いた標準の SWAN と Janssen の理論を用いた場合とでそれぞれ推算し、結果の比較からこの項 S_{in} について検討する。

推算結果の一例として台風最接近時、1959 年 9 月 26 日 21 時における伊勢湾内での有義波高分布などを図-5 に示す。この時台風の中心は伊勢湾の西側にあり、伊勢湾での海上風は図-5(a) のとおり南からの強風となっていた。図-5(b) の有義波高分布から外洋では有義波高が 15 m 以上であるが、湾口部を通して湾内に侵入する波浪成分はあまり多くなく、伊勢湾内では有義波高が 6~8 m、東に接している三河湾では 2~4 m 程度となっている。またこの図で、風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} に Snyder らの理論を用いた標準の SWAN と Janssen の理論を用いた場合の有義波高分布の推算結果を比較すると、分布形はほぼ同様であるが、Janssen の理論を用いた方が大きな有義波高の値を示している。また図-5(c) の有義波周期分布についても同様に両者の分布形はほぼ同様であるが、Janssen の理論の場合にはより長周期の波浪が発生している。ここで湾央および四日市沖における波浪の時系列を図-6, 7 に示す。これらの図から推算時間全体を通して、 S_{in} の項に Janssen の理論を用いた場合の方が Snyder らの理論に比べて高波浪、長周期な波浪場が推算されることがわかる。また有義波高とうねり成分の波高を比較すると Snyder らの理論による推算と Janssen の理論によるものとでの有義波高の差はうねり成分の波高差に起因することがわかる。この傾向は湾央で特に顕著に現れており、逆に湾奥に位置する四日市沖では湾央に比べて弱い。これは四日市沖では浅水砕波によるエネルギー散逸 S_{br} が大きくなっているためである。

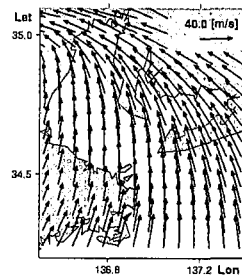
図-5 と同時刻の伊勢湾湾央での波浪方向スペクトルを図-8 に示す。この図で両者の方向スペクトル形状はほぼ同じであるが、Janssen の理論による波浪の方向スペクトルが Snyder らの理論に比べて低周波数側に存在していることがわかる。このことから風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} を表現する Snyder らの理論と Janssen の理論では波浪の発生する周波数帯にわずかに差があることがわかる。そして Janssen の理論では初期波浪から低周波数成分が大きくなっており、波浪の発達段階でも比較的低周波数域で海上風からエネルギー輸送を受けている。その結果図-6, 7 に示すように Janssen の理論を用いた推算結果では波浪は大きなうねり成分（低周波数成分）を含み、大きな有義波高が現れている。

しかし上記の議論とは逆に、図-4 では Snyder らの理

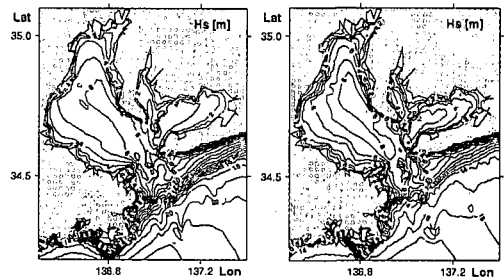
論による推算結果の方が Janssen の理論に比べて大きな値を示している。またこのことに関して、Komen ら (1994) は Snyder らの理論では高周波数領域において風から波へのエネルギー輸送量を過小に評価する傾向があると指摘している。これは図-6, 7 に反するように見える。この風から波へのエネルギー輸送項の S_{in} については波齢なども含め今後系統的に検討する必要がある。

(3) 移流項の差分化の違いによる推算結果の差

波浪推算モデルの移流項の差分スキームの違いが推算結果におよぼす影響について検討する。ここでは標準の SWAN に採用されている高次の半陰解法差分スキームと WAM で用いられている 1 次の風上差分による計算結果とを比較した。推算結果のうち伊勢湾湾央での有義



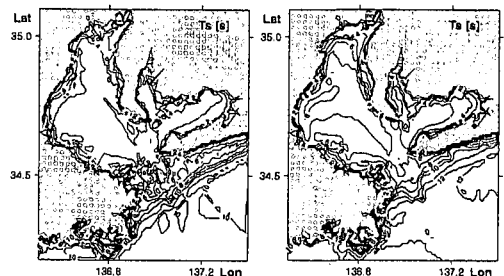
(a) 海上風



Snyder らの理論

Janssen の理論

(b) 有義波高

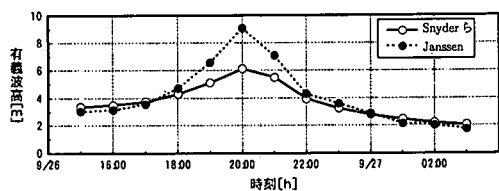


Snyder らの理論

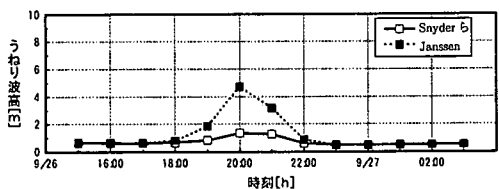
Janssen の理論

(c) 有義波周期

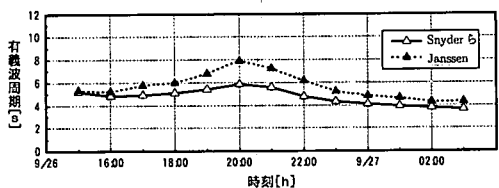
図-5 伊勢湾内での海上風、有義波高、有義波周期分布(1959 年 9 月 26 日 21 時)



有義波高



うねり成分波高

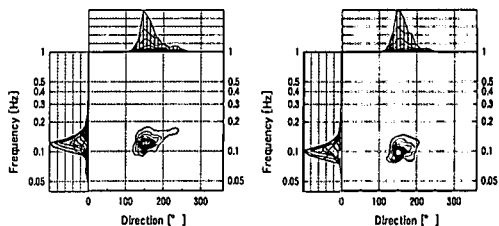


有義波周期

図一6 伊勢湾湾央での推算結果

波の時系列を図一9に示す。図中、1次の風上差分による推算では風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} に Janssen の quasi-linear 理論を用いている。この図から、移流項に1次の風上差分を用いた場合に比べて波高、周期ともにやや大きな値を示すが、うねり成分の波高も含め両者には大きな差は見られなかった。

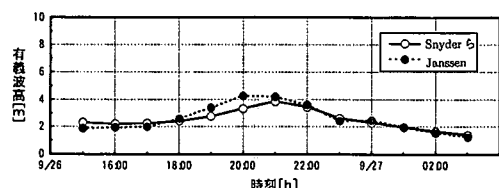
この推算結果を波浪方向スペクトルと比較する。伊勢湾湾央で得られた波浪方向スペクトルのうち1959年9月26日21時と24時の結果を図一10に示す。この図では、1次の風上差分による推算結果では高次の差分スキームを用いた場合に比べて波浪方向スペクトルが広がっていることがわかる。これは1次の風上差分では差



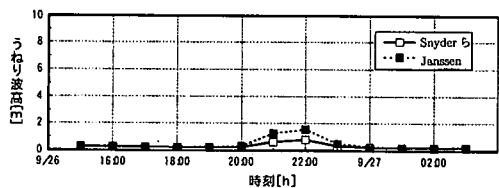
Snyder らの理論

Janssena 理論

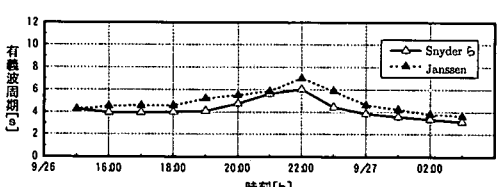
図一8 伊勢湾湾央での波浪方向スペクトル (1959年9月26日21時)



有義波高

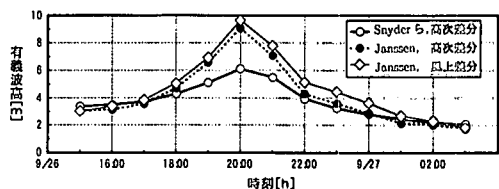


うねり成分波高

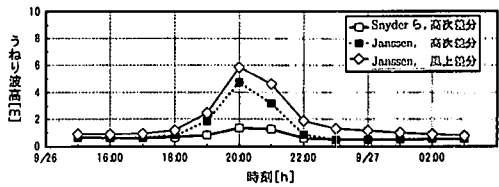


有義波周期

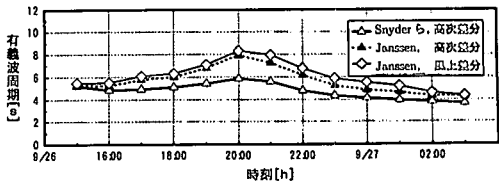
図一7 四日市沖での推算結果



有義波高

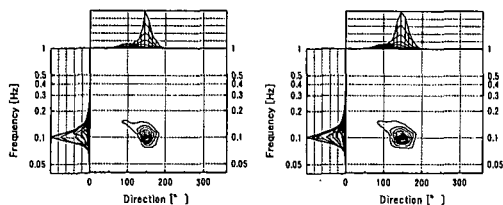


うねり成分波高



有義波周期

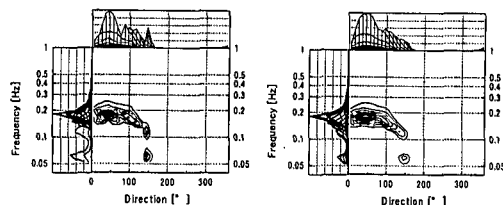
図一9 伊勢湾湾央での推算結果 (S_{in} に Janssen の quasi-linear 理論を採用.)



高次差分スキーム

1 次の風上差分

(a) 1959年9月26日21時



高次差分スキーム

1 次の風上差分

(b) 1959年9月26日24時

図-10 伊勢湾湾央での波浪方向スペクトル

分による数値誤差が目に見える程度に加わることを意味している。ただし今回は吹送距離が短いなどこの数値誤差が顕著に現れる計算条件ではなかったために図-9のように有義波では差分スキームによる推算結果の差が明確には現れなかった。計算条件によってはこの数値誤差がより顕著に現れる可能性も考えられる。

5. おわりに

本研究では第三世代波浪推算モデルSWANを用いて、伊勢湾台風来襲時の伊勢湾内波浪場の再現を試みた。この対象波浪場は強風・風向急変場でさら短吹送距離という、波浪推算モデルには特徴的な場である。ここでは推算結果からSWANを特に風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} と移流項の差分化スキームについて検討した。 S_{in} の項については本研究の計算条件下では、SWANで標準のSnyderら(1981)の理論にくらべてJanssen(1991)のquasi-linear理論では発生する波浪成分が低周波数領域に移動しており、結果としてより高い有義波高を算定した。また移流項については標準のSWANに比べ、WAM(WAMDI Group, 1988)に採用されている1次の風上差分では波浪方向スペクトルに数値誤差による広がりが見られ、標準のSWANに用いられている高次の半陰解法は数値誤差を抑える上で有効であることがわ

かった。

謝辞: 領域気象モデルMM5による海上風データは岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻大澤輝夫助手よりご提供頂きました。観測波浪データには(財)沿岸開発技術研究センターからのデータを用いました。また本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(13555141)によって行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 大澤輝夫・竹山剛生・安田孝志(2001): メソ気象モデルと台風ボカスを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 281-285.
- 小林智尚(2002): 波浪推算システムとその応用, 水工学に関する夏期研修会, 第38回, B-7-1-B-7-20.
- 小林智尚・樋口喬士・大澤輝夫・安田孝志(2003): 波浪推算モデルによる中部国際空港人工島の波浪場への影響評価, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 196-200.
- 橋本典明・杉本 彰・川口浩二・宇都宮好博(2002): 局地気象モデルと第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 201-205.
- 間瀬 肇・平尾博樹・國富将嗣・高山知司(2001): SWANを用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検証, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 236-240.
- 水谷夏樹・Sang, Ho OH・佐藤裕司・Kyung Dong SUH・橋本典明(2002): 浅海波浪推算モデルSWANの風洞水槽実験による比較検証, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 81-85.
- Booij, N. R., R. C. Ris and L. H. Holthuijsen (1999): A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, No. C4, pp. 7649-7666.
- Günther, H., S. Hasselmann and P. A. E. M. Janssen (1992): The WAM model Cycle 4 (revised version), Deutsches Klima Rechenzentrum, Technical Report, No. 4, 101 p.
- Holthuijsen, L. H. et al. (2000): SWAN Cycle III version 40.11, USER MANUAL.
- Janssen, P. A. E. M. (1991): Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, Journal of Physical Oceanography, No. 21, pp. 1631-1642.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P. A. E. M. Janssen (1994): Dynamics and Modelling of Ocean Waves, Cambridge University Press, 532 p.
- Snyder, R. L., F. W. Dobson, J. A. Elliott and R. B. Long (1981): Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 102, pp. 1-59.
- WAMDI Group (1988): The WAM model—a third generation ocean wave prediction model, Journal of Physical Oceanography, No. 18, pp. 1775-1810.
- Young, I. R. (1999): Wind Generated Ocean Waves, Ocean Engineering Series, Elsevier, 288 p.