

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

小林 智 尚*・樋口 喬 士**・大澤 輝 夫***・安田 孝 志****

波浪推算モデル SWAN を伊勢湾内の冬期常時波浪に適用し、中部国際空港人工島周辺域波浪場の再現性と常時波浪に対する SWAN の特性を検討した。海上風データには MM5 による予報値を用いた。その結果、移流項に高次の半陰解法差分スキームを用いている SWAN では計算格子間隔を数 100 m 程度にすることができ、人工島による波浪遮蔽域や周辺の浅瀬による浅水砕波域も精度良く再現できた。また風から波へのエネルギー輸送項に Snyder ら (1981) の理論を用いた場合、湾内の常時波浪では適切な推算結果を示したが、Janssen (1991) の quasi-linear 理論では有波高 0.1 m 程度の低波浪時に波高を過小評価する傾向が見られた。

1. はじめに

海岸海洋構造物の設計・施工では従来より防災面から高波浪時の構造物周辺波浪場の推定が行われている。しかし近年では環境面から常時波浪場の高精度推定も要求されるようになってきている。また推定する波浪もこれまでの沖波だけでなく、より人間活動が活発な沿岸域、すなわち浅海域や極浅海域での波浪にまで広がっている。

一方波浪推算モデルも WAM (WAMDI Group, 1988) など、波浪の非線型相互作用を明示的に考慮できる第三世代波浪推算モデルにより高精度波浪場推定が可能となっている。そして対象領域を極浅海域まで拡張した波浪推算モデル SWAN (Booij ら, 1999) を用いた湾内波浪の推算も試みられている (たとえば、間瀬ら, 2001; 橋本ら, 2002; 小林ら, 2002, 2003)。ただしこの波浪推算モデル SWAN の推算精度を含めた評価、特に常時波浪場についてはまだ確立していないのが現状である。

そこで本研究では、現在伊勢湾内で建設が進んでいる中部国際空港人工島を対象とし、その周辺部の常時波浪を SWAN で再現する。そしてその推定結果から国際空港人工島が周辺域波浪場におよぼす影響を評価するとともに、波浪推算モデルとしての SWAN の常時波浪場再現特性についても検討する。

2. 波浪推算手法

(1) 推算対象

本研究では伊勢湾常沖渚で建設が進められている中部国際空港を対象として、その空港人工島周辺域での波浪特性について検討する。波浪推算対象領域を図-1 に示す。本研究では伊勢湾および三河湾を含む計算大領域

表-1 図-1 の各計算領域での推算条件

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)	136.5~137.4°	136.69~136.89°	136.79~136.85°
(緯度)	34.4~35.1°	34.75~34.91°	34.80~34.86°
格子数	90×70	40×32	30×30
格子間隔	約 1000×950 m	約 500×495 m	約 220×160 m
時間間隔	6 分	3 分	1 分

(図-1(a))、計算中領域(図(b))と計算領域のネスティングを行い、図-1(c)に示す人工島周辺域での波浪を推算した。図-1 の各計算領域における計算条件は表-1 に示す通りである。

今回の波浪推算では図-1(a) に示す計算大領域での外洋との開境界において、この境界を通しての外洋からの波浪の侵入は考慮しなかった。それは対象としている波浪が常時波浪であり、さらに対象期間中には北西からの季節風が支配的であったため、人工島に作用する波浪は主に湾奥から発生発達した波浪であったからである。

図-1(b) の図中、MT は定点観測点 (中部国際空港海上観測局, MT 局) の位置を示す。図の通り、人工島は西側の陸から張り出した水深 6 m 程度の浅瀬の上にあり、その西側では急激に水深が増加している。したがって西からの波浪に対してはこの浅瀬の西縁部で浅水砕波が発生し、浅瀬上では低波浪場が形成されるものと考えられる。また比較に用いる観測データを得る定点観測点 MT は図-1(c) に示すように人工島の南側に位置している。このため北からの波浪に対してこの観測点は人工島による波浪の遮蔽域にはいる。このように空港人工島周辺域あるいは定点観測点 MT では浅瀬の縁での浅水変形や人工島の遮蔽により複雑な波浪場が形成される。

解析対象期間は 2001 年 3 月 1 日から 20 日までの 20 日間とした。この期間中、北西からの冬季節風が支配的であったが、異常な気象擾乱は発生しなかった。

(2) 海上風

波浪推算を行う上で、用いる海上風データの時空間分解能や精度が波浪推算結果の精度に影響をおよぼすことを小林ら (2000) は指摘している。また大澤ら (2001,

* 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
** 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
*** 正会員 博(理) 岐阜大学助手大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
**** 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

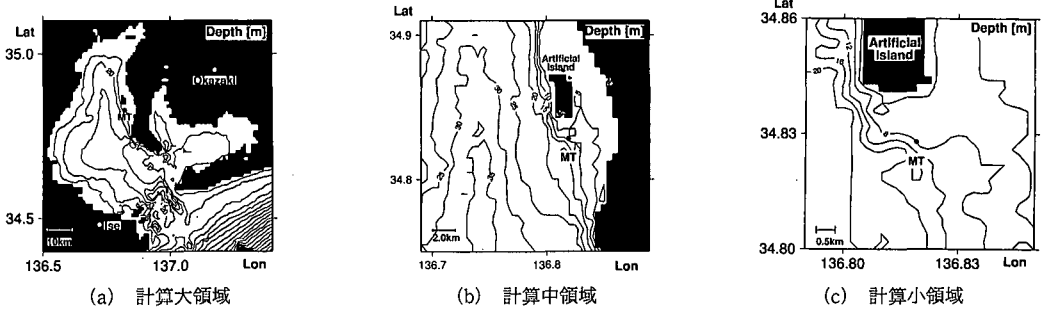


図-1 伊勢湾・三河湾内波浪推算対象領域 (図中, MT は定点観測点を示す)

2002)や橋本ら(2002)は伊勢湾あるいは東京湾を対象としてメソスケール気象モデルによる風域場の予報を行い、湾内では周辺地形の影響を受けた局所的で複雑な海上風場が形成されていることを示した。そこで本研究では高精度の波浪推算のために高精度・高時間分解能を有する海上風データとして領域気象モデルMM5 (Fifth Generation Mesoscale Model)により求められた大澤ら(2002)の計算結果を用いた。この海上風データは、気象予報に気象庁のGPV (Grid-point-value) データを客観解析値として用い、日本列島全域を覆う計算領域から伊勢湾上空の気象場へ計算領域をネスティングさせてMM5によって図-1に示す対象領域場の詳細な気象場の再現した結果得られたものである。この海上風データの時空間解像度は水平格子間隔1 km、時間間隔60 sである。

(3) 波浪推算モデル

本研究では第三世代波浪推算モデルSWAN Cycle III ver.40.11を用いた。SWANは同じ第三世代波浪推算モデルWAMに浅水砕波や非線形三波共鳴の効果を考慮して極浅海に拡張したモデルである。また移流項の差分化では高次の半陰解法を採用して計算精度を向上させており、1 km以下の小計算格子でも推算可能である。これらの特徴は本研究で対象としている伊勢湾内や浅瀬上の中部国際空港人工島周辺域の波浪を推算には適している。

また本研究では常時波浪に対する波浪推算モデルの特性として、風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} 、計算格子間隔についても検討した。

3. 波浪推算結果

(1) 伊勢湾の波浪特性

まず伊勢湾全域や中部国際空港周辺域での波浪特性の概要を把握する。本研究の対象期間2001年3月1日から20日までの解析結果の一例として、ここでは2001年3月2日3時における伊勢湾全域(図-1(a)の計算大領域)での海上風、有義波高、有義波周期、主波向の各空

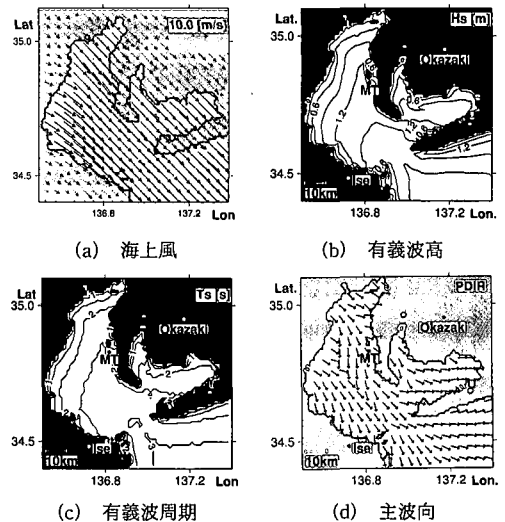


図-2 伊勢湾全域での海上風や波浪の空間分布 (2001年3月2日3時)

間分布を図-2に示す。また図-1(c)に示す計算小領域での推算結果のうち、中部国際空港人工島南側の定点観測点(MT)での有義波高の観測値および推算値を図-3に示す。この図には推算結果として、空港人工島を考慮した場合と考慮していない場合の二つの結果が示されている。この二つの結果の相違については次節で議論する。

図-2に示すように対象期間では北西からの冬期季節風が卓越しており、風速は伊勢湾湾央で最大10数m/s程度であった。またこの季節風の風向特性から波浪も湾奥から発達しているため吹送距離が短く、湾央での有義波高 H_s は大きいても1~2 m程度であり、1 m以下の期間が大半を占めていた。

解析対象期間中はいくつかの小規模な気象擾乱が見られたものの、波浪は期間を通して波高は低く、常時波浪の状態が続いていた。また図-3では特に現状どおり人工島を考慮した場合の波浪推算結果(図中の実線)が比

較的高波浪時にも波浪推算結果を良好に再現していることがわかる。このことから領域気象モデルMM5を用いて再現した詳細な海上風データと波浪推算モデルSWANを用いることにより妥当な推算結果を得られることが示された。

(2) 人工島による波浪場への影響

次に空港人工島が周辺の波浪場におよぼす影響について検討する。ここでは人工島の存在を考慮する、しないの二通りの条件による波浪推算を行い、定点観測点(MT)がある人工島南側の領域に特に注目して検討した。

定点観測点(MT)での有義波高の観測値・推算値の図-3に加え、海上風風向風速時系列を図-4に、人工島を考慮しない場合での主波向を図-5に示す。図-3中実線で示されている人工島を考慮した場合、および破線の人工島を考慮しない場合の波浪推算結果を比較すると、低

波浪時には両者はほぼ同じ推算結果を示しているものの、比較的高波浪時には二つの推算結果に差異が生じていることがある。この高波浪時のうち、3月4日および3月8日における高波浪時を除くイベントでは、人工島を考慮した場合の有義波高が人工島を考慮していない場合に比べて明らかに低くなっている。この期間では図-4に示すように北西からの季節風が強くなっており、図-5のとおり主波向も北西からとなっている。この時の人工島南側、定点観測点MT近傍の波浪場の一例として、2001年3月2日3時における有義波高分布を図-6に示す。この図のうち人工島を考慮していない推算結果(図(a))から、人工島の西にある浅瀬の縁の部分で北西からの波浪が浅水変形し、浅瀬上では複雑な有義波高分布をしていることがわかる。人工島の有無による有義波高差 ΔH_s の分布(図-6(c))から、人工島の東南東側には0.3 m程度の波高差が見られる波浪遮蔽域が形成されていることがわかる。そして定点観測点MTはこの遮蔽域の縁に位置し、この地点でも遮蔽による波高減少が生じている。このことから図-3で見られた、人工島が存在する場合での波高減少は人工島による遮蔽であることがわかった。また波浪推算モデルSWANがこの遮蔽現象を適切に再現していることも確認された。

一方図-3において人工島の有無による波高差が顕著に現れていない高波浪時、3月4日と8日では西からの海上風が発生し、ほぼ同じ方向の波浪が卓越していることが図-4、5からわかる。この時の定点観測点近傍の波浪の一例として、2001年3月4日18時における有義波高分布を図-7に示す。この図からこの期間では人工島による波浪の遮蔽域が人工島の東北東側に移動しており、定点観測点MTは図(a)から浅瀬の縁での浅水変形後の波浪場の中には存在するものの、この図(c)に示された波高差 ΔH_s の分布から遮蔽域には入っていないことがわかる。

以上のことから、中部国際空港人工島周辺域では、人工島のある浅瀬の西縁での浅水砕波に加え、人工島による波浪の遮蔽によって複雑な波浪場が形成されていることがわかった。

(3) 波浪推算モデルの特性検証

ここでは中部国際空港周辺域での波浪場を用いて、計算格子および風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} の点から波浪推算モデルSWANの特性を検証する。

前節まではネスティングを用いて湾全域を推算対象にしながら、中部国際空港人工島周辺域では約200 mの小さな格子間隔で波浪推算を行った。ここでは異なる計算格子間隔で推算を行い、計算精度や計算負荷に対する計算格子間隔やネスティングの影響について検討した。

計算対象領域を図-1(a)計算大領域とし、表-2に示

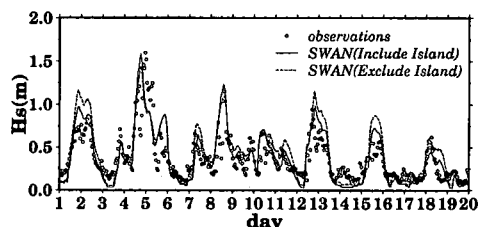


図-3 定点観測点(MT)での有義波高観測値および波浪推算値

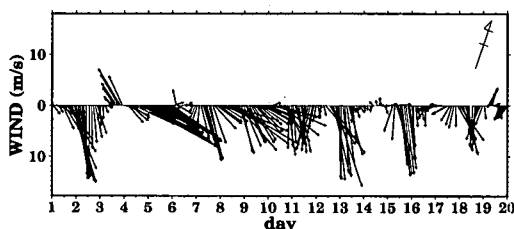


図-4 定点観測点(MT)での海上風風向風速時系列。気象モデルMM5による解析値

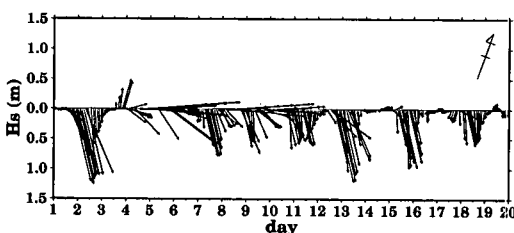


図-5 定点観測点(MT)での主波向時系列(ベクトル長は有義波高を表す、人工島を考慮しない場合の推算結果)

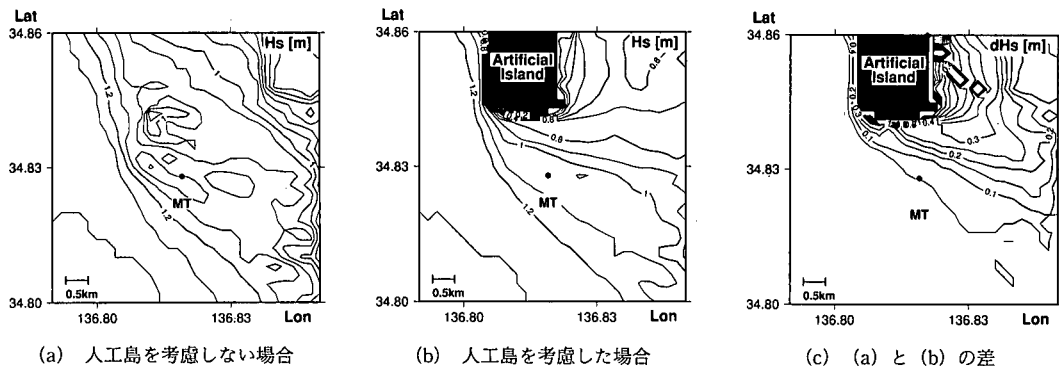


図-6 定点観測点 MT 周辺の有義波高分布と差（3月2日3時）

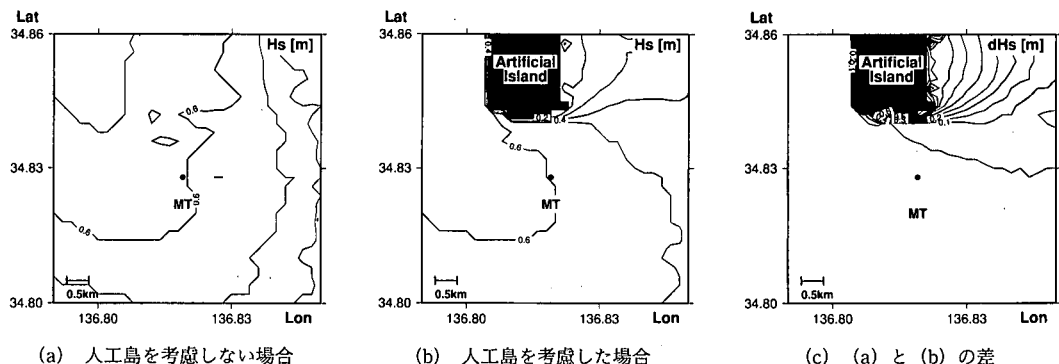


図-7 定点観測点 MT 周辺の有義波高分布と差（3月4日18時）

表-2 ネスティングを用いない場合での推算条件

推算条件	Case 1	Case 2
計算領域（経度） （緯度）	136.5~137.4° 34.4~35.1°	
計算格子数	90×70	134×134
計算格子間隔	約 1000×950 m	約 600×600 m
計算時間間隔	6分	2分

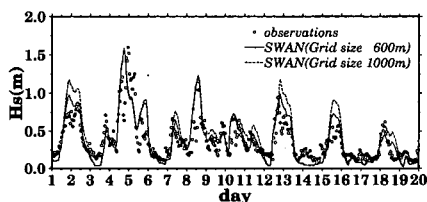


図-8 定点観測点 (MT) での有義波高観測値および波浪推算値

すように計算格子間隔約 1000 m と約 600 m の 2 ケースについて行った。計算は空港人工島を考慮して行い、前節と同様に定点観測点 MT での波浪について比較した。定点観測点 MT での有義波高の推算結果を観測値とともに図-8 に示す。この図では Case 1（計算格子間隔約 1000 m）では高波浪時に観測結果を十分には再現していないが、Case 2（計算格子間隔約 600 m）では全体に良い再現性を示している。これは計算格子間隔 1000 m では計算領域内で人工島を正確に表現できなかったが、格子間隔 600 m では人工島による波浪の遮蔽域が再現されているためと考えられる。このことは局地的な沿岸地形や海底地形が影響をおよぼす海域においてその地形を正確に再現する必要性を示している。一方計算量はネスティングを用いた表-1 の条件で行った波浪推算に対

し、表-2 の Case 2 の計算量はほぼ 4 倍であった。この点からネスティングは有用な手法であることがわかる。

次に SWAN 中の風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} の特性について検討する。SWAN では既定値としてこの項 S_{in} には Snyder ら（1981）の理論が用いられている。一方 SWAN の原型となった波浪推算モデル WAM Cycle 4（Günter ら，1992）ではこの項に Janssen（1991）が提案した quasi-linear 理論が採用されている。そこでここでは SWAN による波浪推算でも S_{in} を quasi-linear 理論を適用して波浪推算を行った。ここでは人工島を考慮して推算した。その結果得られた、定点観測点 MT での推算結果を図-9 に示す。図には観測結果も同様に示

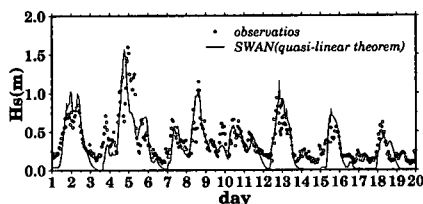


図-9 定点観測点 (MT) での有義波高観測値および波浪推算値 (風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} に quasi-linear 理論を適用)

している。この図では比較的高波浪時ではほぼ満足の精度を有する推算結果を示している。しかし、有義波高 0.1 m 程度の波浪ではその波浪が再現できず、有義波高の値がゼロ近傍まで低下していることがわかる。Komen ら (1994) は Snyder ら (1981) 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評価する傾向にあることが指摘しているが、ここでは全エネルギー量として Janssen の quasi-linear 理論では特に低波浪時に過小評価しているようである。Snyder らの理論による図-3 と比べても観測値に対する再現性は低下していることがわかる。このことから SWAN による今回の伊勢湾内の常時波浪を対象とした波浪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 理論よりも Snyder らの理論によるモデルを用いた方が再現性が高いことがわかった。ただしこの結果は直ちに quasi-linear 理論が Snyder らの理論に劣っていることを示しているわけではない。Young (1999) が述べる通り、波浪推算モデルでは個々のソース項の精度とともにモデル全体の構成も考慮する必要があるからである。また小林ら (2003) が台風来襲時の波浪推算結果から、強風時では逆に Janssen の quasi-linear 理論を用いた場合に Snyder らの理論の場合に比べて大きな有義波高を算出する場合もあることを報告している。したがってこの風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} については今後系統的な検討が必要と考えられる。

4. おわりに

本研究では湾内常時波浪場における第三世代波浪推算モデル SWAN の再現特性について検討することを目的として、伊勢湾内、中部国際空港人工島周辺域での波浪推算を行った。この波浪推算では領域気象モデル MM5 により得られた計算格子間隔 1 km の海上風を用いた。その結果、人工島周辺波浪場は浅瀬による浅水砕破や人工島の遮蔽により複雑であるが、SWAN によりこの波浪場が良好に再現できた。これより計算格子間隔を小さくすることのできる SWAN は複雑な沿岸地形や海底地形を有する湾内などの波浪推算には有効であることがわ

かった。

また波浪推算モデル SWAN の風から波へのエネルギー輸送項 S_{in} を変更して行った推算結果から、このエネルギー輸送項に Janssen の quasi-linear 理論を用いた場合、特に有義波高 0.1 m 程度の低波浪時に有義波高を過小に評価する傾向があることがわかった。

謝辞：中部国際空港海上観測局 (MT 局) の観測データは愛知県企業庁および中部国際空港株式会社よりご提供頂きました。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ポー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.
- 大澤輝夫・深尾一仁・安田孝志 (2002): 伊勢湾地域における高解像度気象場の再現計算とその精度検証, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 181-195.
- 小林智尚 (2002): 波浪推算システムとその応用, 第 38 回水工学に関する夏期研修会講義集, B コース, B-7-1-B-7-20.
- 小林智尚・飯野智彦・足立忠行・安田孝志 (2000): 海上風データの時空間分解能が波浪推算に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 256-260.
- 小林智尚・座波慎一郎・安田孝志 (2003): 波浪推算モデル SWAN による伊勢湾台風時波浪の再現, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 181-185.
- 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.
- 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.
- 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.