

三陸内湾域で卓越するうねり性波浪の起源と海岸地形との関係について

小松幸生^{1,2}、藤井孝樹^{1,2}、田中 潔²

1: 東京大学大学院新領域創成科学研究科 2: 東京大学大気海洋研究所

1. はじめに

岩手県大槌湾内において、4年8か月にわたって海上風と波浪のモニタリングを実施した(図1)。このモニタリングにより、沖合から伝播して来るうねりの影響の定量的解明とうねりの発生海域の特定など、多くの成果を得つつある。本稿では、このモニタリングの概要とうねりに関して得られた知見について簡単に紹介する。

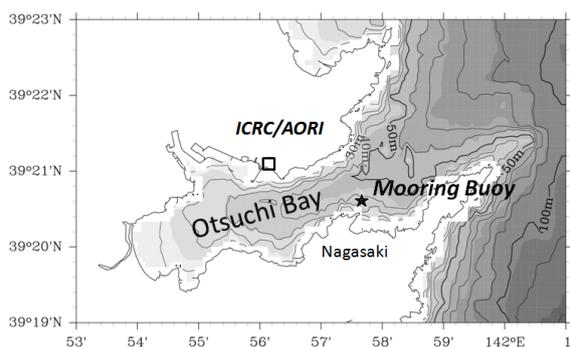


図1. 東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター(□; ICRC/AORI)とモニタリングブイの設置位置(★)。

2. 風と波浪のモニタリング

風と波浪のリアルタイムモニタリングは、文部科学省東北マリンサイエンス拠点形成事業の一環として、大槌湾の湾内南部の長崎から300m離れた水深40mの場所(図1、39-20.65°N, 141-57.62°E)に観測ブイを設置して、2012年10月3日から2017年6月7日まで実施した。大槌湾は、リアス海岸に特有の典型的な半閉鎖性の小規模湾で、幅が3km程度しかない湾口が太平洋に向かって開いており、後述するように、

この湾口部の地形が湾内波浪の特徴を規定する主要因子となっている。観測ブイは、単独測位方式のGPS受信機を搭載した発泡ポリスチレン製の円盤型ブイ式波高計(直径1.1m、高さ0.6m; (株)ゼニライトブイ製のカスタム仕様)とブイの上部1.5mの高さに付設した2成分超音波風速計(Model85106; R.M. Young Company製)で構成され(図2)、ロープを介して2点で海底に係留した。なお、波高計は、周期が3s以上の波浪にブイが追従するように設計されており、送受信機、制御・記録装置、太陽電池パネル、蓄電池も搭載されている。

風速と風向は、超音波風速計で毎正時直前の10分間、0.5s間隔で連続計測し、データは波浪ブイ内部のSDカードに記録した。ブイの水平方向の回転に伴う風向の測定誤差は付属の磁気方位計(Model32500; R.M. Young Company)で自動的に補正されている。なお、解析では10分間の平均値のみを使用しており、ブイの動揺に伴って生じる風速と風向の計測誤差の影響はほぼ相殺されているため解析結果には大きく影響しない。

GPS波高計では、毎正時直後の20分間、ブイの3次元の変位を0.4s間隔で測位し、データ処理をしてSDカードに記録した。このGPS波高計はハイパスフィルタによってGPSシステムに起因する測位誤差の影響を除去しており、既存の超音波式波高計との比較では有義波高で0.1m、有義波周期で0.5s、有義波向で数度程度の計測精度を有している(Harigae et al., 2004)。得られた3次元測位データはゼロアップクロス法により、有義波高、有義波周期、有義波向を

自動算出し、10分平均の風速・風向と併せて1時間ごとに Iridium 衛星経由で、リアルタイムにインターネットで配信した (<http://lmr.aori.u-tokyo.ac.jp/feog/kosei/ootuchi/>)。なお、連続データを記録した SD カードは、約半年ごとのシステムのメンテナンス時に回収した。波浪データについては、ブイの20分間の鉛直変位と水平移動速度のクロススペクトルから波浪エネルギーの2次元スペクトルを1時間ごとに計算し (Isobe et al., 1984)、解析に利用した。

上記のホームページに対する閲覧状況を調査したところ、1日あたりに平均で10~20件程度のアクセスがあった。また、モニタリングデータに関して、岩手県沿岸広域振興局等の外部の5機関から利用申請があった。本モニタリングについては、地域の漁業者からも好評で、データの利活用が進んだことは、本事業の主要な目的の一つである、震災地域漁業の早期復興に多少なりとも貢献することができたと推察する。なお、内湾域において風と波浪の2次元スペクトルを4年以上にわたってモニタリングした事例は日本国内には無く、国外も聞いたことが無い。風と波浪のデータは東北マリンサイエンスの事業で公開しているので、興味があれば利用されたい。観測の詳細は Komatsu and Tanaka (2017) に記載されている。

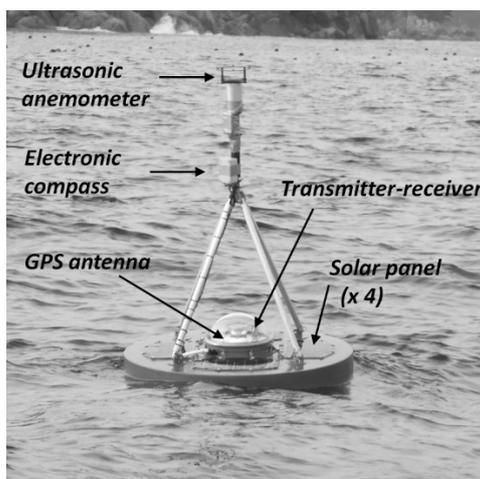


図2. 風と波浪のモニタリングブイ。

3. 大槌湾内の波浪に対するうねりの寄与

大槌湾内の月ごとの有義波向は、月と年に関係なく約60°で、北東方向から伝播して来る成分が卓越している。一方、平均風向は明瞭な季節変動を示し、夏季は180°(南よりの風)、冬季は270°(西よりの風)が支配的である(図3)。有義波向の60°という方向は大槌湾の湾口が開いた方向と一致しており(図1)、加えて、有義波向と平均風向がこのように一致していないということは、湾内の波浪で支配的なのは湾内に吹く局所的な風で発達している風波ではなく、沖合から湾内に向けて伝播して来たうねりであることを示唆している。実際、有義波周期の平均値は約9sと比較的長く(Komatsu and Tanaka, 2017)、また、湾内では10 m s⁻¹を超える風速がほとんど観測されないことを考えると、風波とは考えにくい。さらに、大槌湾内の有義波の波周期と波形勾配の出現頻度を調べると、大槌湾内では沖合域に比べて長い有義波周期の出現頻度が高く、波形勾配が0.01以上の出現頻度が沖合に比べて1桁以上も低い特徴がある(Komatsu and Tanaka, 2017)。すなわち、大槌湾の波浪は、波周期が比較的長く波形勾配が小さいという、うねりの特徴を明瞭に表しており、以上の点からも、大槌湾の波浪は、うねりが支配的であることが推察された。

そこで、大槌湾内で2002年10月~2016年12月の期間中に観測された波浪の全エネルギーに占めるうねりと風波それぞれのエネルギーの寄与率を風速・風向と2次元スペクトルのデータを用いて、Portilla et al. (2009) のアルゴリズムで算出した。季節ごとのうねりと風波の寄与率の平均値を図4に示す。うねりの平均寄与率は82-86%、一方、風波の平均寄与率は4-8%で、うねりの寄与率が圧倒的に高いことが分かった。

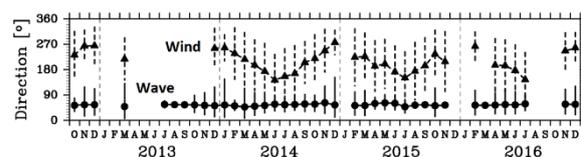


図3. 大槌湾内の有義波向と平均風向の月平均値と月ごとの標準偏差(縦棒)。

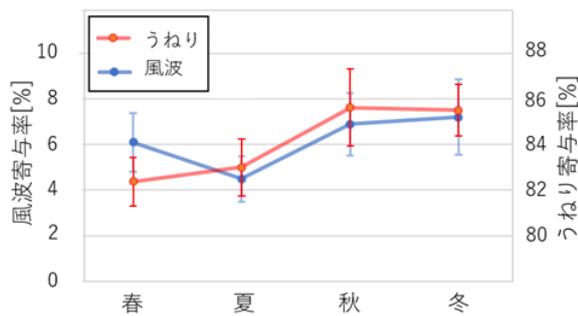


図4．大槌湾内の有義波向と平均風向の季節平均値と標準偏差（縦棒）。

4. 大槌湾内の波浪に支配的な影響を与えるうねりの起源

大槌湾内の波浪は沖合から伝播して来るうねりの寄与が圧倒的に大きいことが分かったが、湾内の観測データだけでは、うねりの起源を特定することはできない。そこで、まず、大槌湾内で観測された有義波高と沖合海上風速との間で相関解析を行い、続いて、数値モデルによるうねりの逆追跡実験と簡単な思考実験でうねりの起源を特定した。

まず、大槌湾および大槌湾の南北に位置する釜石湾と宮古湾それぞれの湾内で観測された有義波高と沖合海上風速との間で相関解析を行った。ここで、大槌湾の有義波高は前述のモニタリングブイで得られた値、釜石湾と宮古湾の有義波高は国土交通省の全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)のモニタリングデータを使用した。また、沖合海上風は気象庁の領域モデルGPV/MSM-Sの格子点値を使用し、相関係数は海上風の各格子点からそれぞれの湾に向かう方向の風速成分を使用して計算した。興味深いことに、3つの湾で最北の宮古湾と最南の釜石湾との間の距離は42 kmであるが、相関係数が有意に高い領域 ($p < 0.05$) は3つの湾で明瞭に異なった。しかもその領域の分布する方向は、それぞれの湾から見て各湾の有義波向の方向と一致し、かつその方向はそれぞれの湾の湾口が沖合に向かって開いた方向と一致していることが分かった(図5)。同じ相関解析を、宮古湾のほぼ

真東の沖合(NOWPHASの岩手中部沖観測点)と釜石湾のほぼ真東の沖合(NOWPHASの岩手南部沖観測点)で観測された有義波高を使用して実施すると、海上風と相関係数が有意に高い領域は両者でほぼ一致していた(Komatsu and Tanaka, 2017)。このことは、三陸内湾域の波浪が、沖合から伝播して来るうねりの影響を強く受けており、しかもそのうねりの発生海域は各湾の湾口の形状に強く依存することを示している。湾口部の地形による遮蔽効果によって、それぞれの湾に固有の方向から伝播して来るうねりの影響を強く受けていることが分かった。以上の解析から、うねりの起源のおおよその位置は推定されたが、その場所がうねりの起源となっている要因は不明である。そこで、大槌湾を対象とした波浪予測モデルを用いて追算実験を実施し、その要因を探索した。

波浪予測モデルは、現在主流の第3世代モデル(Komatsu and Masuda, 1996)を使用し構築した。このモデルは、波浪をエネルギーの2次元スペクトルで表現し、その場所場所における時間変化を以下のエネルギー平衡方程式を解くことで推定するものである。

$$\frac{\partial F(f, \theta)}{\partial t} + C_g \cdot F(f, \theta) = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

ここで、 $F(f, \theta)$ は f, θ をそれぞれ成分波の周波数と波向として、場所と時間 t に依存する波浪の2次元スペクトルである。 C_g は成分波の群速度、右辺は、 S_{in} が風からのエネルギー入力項、 S_{nl} が成分波間の共鳴相互作用による非線形エネルギー伝達、 S_{ds} 砕波によるエネルギー散逸を表す。なお、モデルは、太平洋全域(70°S-70°N, 100°E-160°W)を対象としたモデル、三陸沿岸から沖合域(35°N-45°N, 140°E-150°E)を対象としたモデル、大槌湾とその周辺(39.30°N-39.42°N, 141.89°E-142.07°E)を対象としたモデルの3重の入れ子構造にしており、各モデルは外側のモデルの推定値を側面の境界条件とした(1-way nesting)。水平解像度と時間積分幅は、太平洋モデルを $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 15 min、三

陸モデルを $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, 3 min、大槌湾モデルを $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$, 1 s に設定した。また、太平洋モデルと三陸モデルは深水波モデルとし、大槌湾モデルは有限水深波モデルとした。湾奥部や海岸付近の浅水効果は、Booij and Holthuijsen (1999) の浅海モデルの定式を採用して表現した。外力は、太平洋モデルは気象庁の長期再解析値 JRA55、三陸モデルと大槌湾モデルは気象庁の領域モデル GPV/MSM-S の海上風速を与えてモデルを駆動させた。

追算実験は 2012 年 10 月 1 日から 12 月 31 日の期間を対象として実施した。大槌湾内のモニタリング点に最も近いモデル格子点で最大波高が推定された 2012 年 12 月 5 日の 4 時を起点とし、3 時間毎に 2 次元スペクトルを逆追跡した。ここで、前述の通り、大槌湾内の波浪は波向 60° の成分が卓越することが分かっているため、波向が 60° のスペクトル成分の卓越周波数から算出される群速度から、3 時間遡った先までの場所を順次推定した。そして、逆追跡から推定された場所における波向 60° の成分の有義波高を算出した (図 6)。2 次元スペクトルを過去に遡って追跡すると (図 7)、時間を遡るにつれてスペクトル値は増加し、10 時間遡った 12 月 4 日 18 時に波群は湾から 128 km 沖合で最大の $5 \text{ m}^2 \text{ s}$ のスペクトル値を示し、有義波高は最大の 3.38 m となった。さらに時間を遡ると、スペクトル値は一転して減少し、27 時間遡った 12 月 4 日 0 時に、385 km 沖合で最小となり、有義波高は最小値の 0.58 m となった。

有義波高が最小値であった 12 月 4 日 0 時、波浪が発達過程にある 12 月 4 日 10 時、減衰過程にある 12 月 5 日 1 時の風速・風向の分布を見ると (図 8)、12 月 4 日 0 時に大槌湾の沖合 385 km における風向は北～北北東になっており、大槌湾に向かう方向の風速成分がわずかに存在することが分かる。その後、時間を順方向にたどると、大槌湾に向かう方向の風速の増大とともに、波向 60° の風波成分が発達し、12 月 4 日 10 時には北東からの風速成分が大きくなっており、12

月 4 日 18 時まで発達を続け、この時点で風向が急変するとともに、この成分はうねりとなって減衰しながら伝播し、12 月 5 日 4 時に大槌湾に到達したことが分かる。以上の結果、うねりの元となった風波成分が発達を開始した場所をうねりの起源とすれば、この実験では、湾から 385 km 沖合の場所が起源であると推定された。

ただし、これは、1 回の追跡実験のみの結論である。そこで、うねりが到達した場所での波高を規定する主要な因子が、発生海域の風速と発生海域から到達場所までの伝播距離であると仮定し、この 2 つをパラメータとして以下の思考実験を行ってみた。

まず、大槌湾から 60° の沖合方向に大圏航路に沿って所定の距離にある場所で、大槌湾の方向に向かって所定の風速の風が吹き続けたとする。

風は、この風によって生成された風波が飽和状態に達するまで吹き続けたとする。風波が飽和状態に達すると、風が突然止んで、上記の風波がうねりとなって、大槌湾の方向に減衰しながら伝播する。

そうすると、大槌湾内の波浪に影響を与え得るうねりの発生起源は、大槌湾から 60° 方向の沖合、300 km を中心とした前後 100 km の範囲の海域であることが推察され、前述のモデル追算実験の結果と一致した。特定されたうねりの起源海域は、三陸沖合で発達する低気圧の移動経路上にあり、大槌湾の方向に伝播して行くうねりが発生しやすい気象条件にあることが推察された。

4. おわりに

岩手県大槌湾内で風・波浪のモニタリングを 4 年 8 か月にわたって実施し、大槌湾内の波浪のエネルギーの 8 割は沖合から伝播して来るうねりが寄与していることが分かった。また、そのうねりの起源は大槌湾から 60° 方向の $300 \pm 100 \text{ km}$ 沖合であることも推定された。ただし、三陸内湾域の波浪に支配的な影響を与えるうね

りの発生海域は、湾口部の地形に強く依存することも分かった。湾内の波浪に影響を及ぼすうねりが湾内表層の物質の輸送や湾奥部での擾乱生成など、湾内環境に与える影響を解明することが今後の課題である。

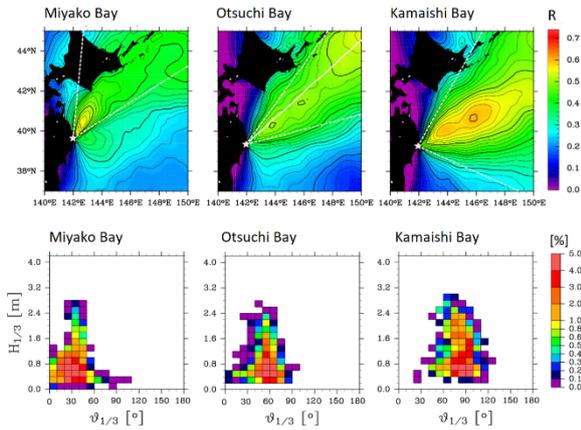


図 5 宮古湾、大槌湾、釜石湾内で観測された有義波高と沖合海上風速との間の相関係数(上)。解析の期間は 2012 年 10 月～2016 年 12 月。図中の白い破線は、各湾の湾口が開いた方向を示す。各湾で観測された有義波高と有義波向の結合出現頻度 (下)。

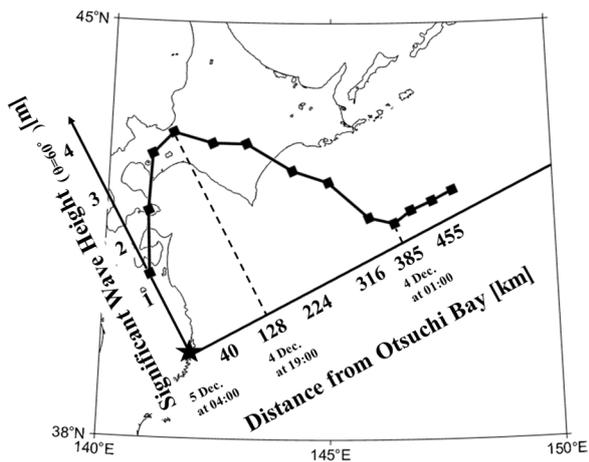


図 6 波浪モデルで推定された 2 次元スペクトルの波向 60° 成分の逆追跡より算出した有義波高。★は大槌湾の位置を示す。

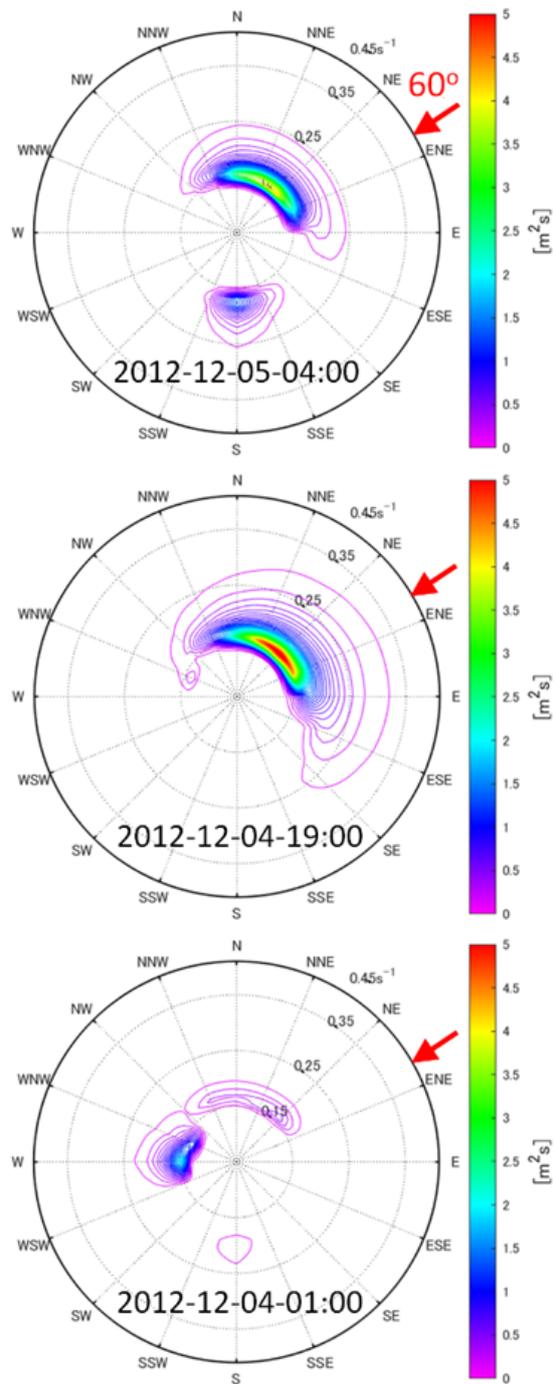


図 7 逆追跡によって推定した日時において、波浪モデルで推定された 2 次元スペクトル。 60° の波向を赤の矢印で示す。

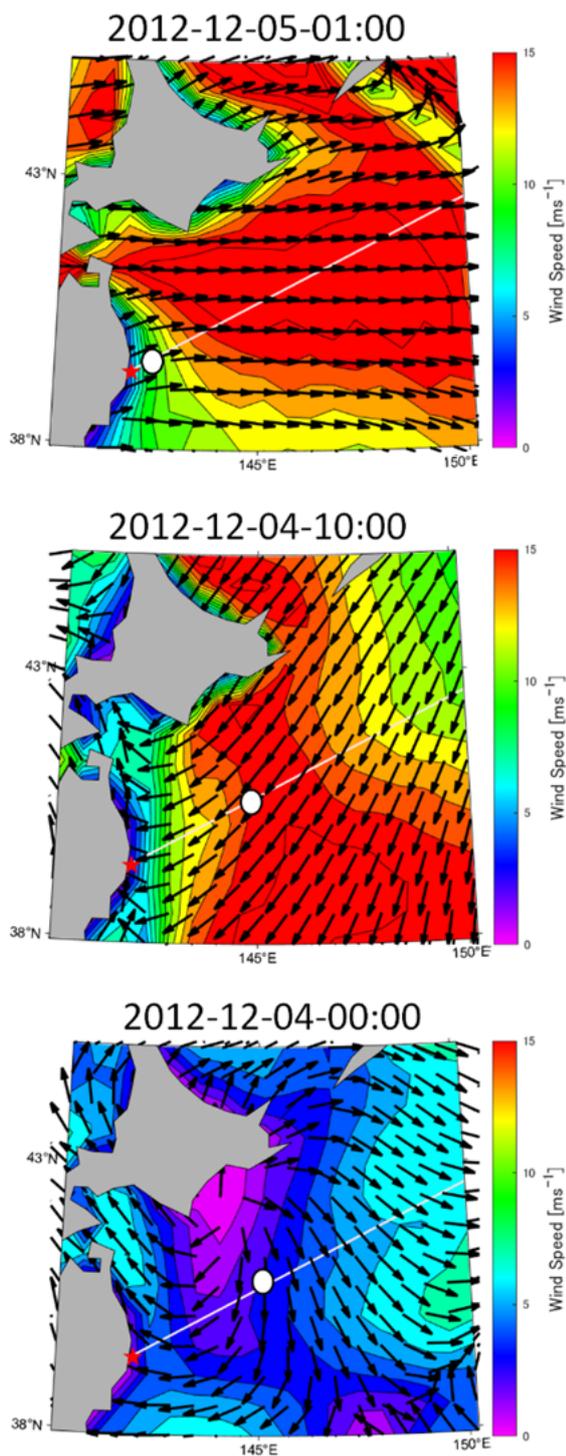


図8 逆追跡で推定した各日時における三陸沖合域の気象庁領域モデルによる風速・風向の分布。白の実線は大槌湾からみて60°の大圏航路、は逆追跡により推定したこの日時における波群の場所、は大槌湾の位置を示す。

参考文献

- Booji N, Ris RC, Holthuisen LH (1999): A third-generation wave model for coastal regions, Part 1, Model description and validation, *J. Geophys. Res.*, 104(C4): 7649-7666.
- Harigae M, Yamaguchi I, Kasai T, Igawa H, Nakanishi H, Murayama T, Iwanaka Y, Suko H (2004): Abreast of the waves: open-sea sensor to measure height and direction. *GPS World*, 16:16-27.
- Isobe M, Kondo K, Horikawa K (1984): Extension of MLM for estimating directional wave spectrum. *Proc. Symp. on Description and Modeling of Directional Seas*, A-6, p15.
- Komatsu K, Tanaka K (2017): Swell-dominant surface waves observed by a moored buoy with a GPS wave sensor in Otsuchi Bay, a ria in Sanriku, Japan. *J. Oceanogr.*, 73: 87-101.
- Komatsu K, Masuda A (1996): A new scheme of nonlinear energy transfer among wind waves: RIAM method - algorithm and performance. *J. Oceanogr.*, 52: 509-537.
- Portilla J, Ocampo-Torres FJ, Monbaliu J (2009): Spectral partitioning and identification of wind sea and swell. *J. Atmos Ocean Technol.*, 26:107-122