

大槌湾における風・波浪のリアルタイムモニタリング

小松, 幸生
東京大学大学院新領域創成科学研究科 | 東京大学大気海洋研究所

田中, 潔
東京大学大気海洋研究所

<https://doi.org/10.15017/1526162>

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 146, pp.87-97, 2014-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

大槌湾における風・波浪のリアルタイムモニタリング

小松 幸生^{*1,2} 田中 潔^{*2}

(2014年1月28日受理)

Real-time monitoring of wind and wave in Otsuchi Bay, Tohoku, Japan

Kosei KOMATSU and Kiyoshi TANAKA

E-mail of corresponding author: *kosei@aori.u-tokyo.ac.jp*

Abstract

A monitoring of wind and surface wave was started at October 2012 using a mooring buoy with a ultrasonic anemometer and a GPS wave sensor in Otsuchi Bay, Iwate, Japan. Horizontal wind velocity is observed hourly for 600 s in 0.5 s interval, and height, period and direction of surface waves are estimated hourly from three dimensional displacement of the buoy for 1200 s in 0.4 s interval. Statistic data such as mean wind speed and direction, significant wave height, period and direction are distributed hourly in real-time via internet with a chart of time series, and they are utilized for decision of going fishing by fishermen around the Bay. Analysis in the period of the first three months revealed that waves in Otsuchi Bay were predominantly affected by swells propagated from northeastern offshore region and that the significant wave height is significantly correlated with wind velocity toward Otsuchi Bay in the northeastern offshore region faced on the Bay mouth.

Key words : *Wind and wave monitoring, Otsuchi Bay, swell*

1. 緒言

2011年3月11日の東北沖の大地震と津波により、東北地方の沿岸域は壊滅的な被害を受けた。大量のがれきの堆積や藻場・干潟の喪失、岩礁への砂泥の堆積等によって変化した海洋生態系の回復を図るとともに、沿岸地域の産業を復興させることが緊急の課題となっている。その一環として、文部科学省の東北マリンサイエンス拠点形成事業が2012年1月に開始され、東京大学大気海洋研究所では、岩手県大槌湾を主要拠点として、現場モニタリングと数値モデルによる沿岸海洋生態系の変動メカニズムの解明に向けた研究を実施している¹⁾。

大槌湾内では、ワカメ、コンブ、ホタテ、ホヤの養殖業やウニ、アワビの採介藻漁業が盛んであり、湾内の高い生産性を維持するメカニズムとして、以前から、沖合底層からの豊富な栄養塩の流入の影響が指摘されているが²⁾、その流入

のメカニズムについては不明な点が多い。また、波浪による物理的攪乱が、沿岸海洋生態系におけるウニやアワビのような藻食動物とワカメやコンブといった海藻間のバランスを調整する効果を持つと指摘する研究もあるが³⁾、大槌湾の波浪については観測例がなく実態が不明であり、波浪の砕波に伴う乱流の強度ならびに発生メカニズムに関しても多くが謎に包まれている。そこで、2012年10月に、大槌湾内に超音波風速計とGPS波高計で構成されるブイを係留・設置して、湾内の風と波浪のモニタリングを開始し、データをリアルタイムで公開している。

東北沿岸の太平洋に面したリアス式湾内の波浪については、波高と周期の統計的な解析により出現特性や季節変動特性が調べられ、沖合から伝播して来るうねりの影響が指摘されているが^{4,5)}、うねりの発生原因である沖合の海上風との関係については研究例はほとんどない。本研究では、大槌湾内の波浪の特性と海上風との関係を解明することを目的として、風・波浪リアルタイムモニタリングの開始後3カ月間(2012年10月～12月)のデータを解析した。

*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

2. 風・波浪リアルタイムモニタリング

風・波浪リアルタイムモニタリングシステム（以下、システム）は、太平洋に面した岩手県大槌湾の湾口に近い湾南部長崎沖の水深 40m (39°20.65'N, 141°57.62'E) の場所に設置している (Fig.1a)。大槌湾は典型的なリアス式湾で、湾口は沖に向かって北東方向に開いている。システムは、単独測位方式のGPS受信機を搭載したブイ式波浪計（以下、波浪ブイ; (株)ゼンライトブイ）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 (Model 85106; R.M. Young Company) で構成され (Fig.2)、2 点で海底に係留している。

超音波風速計では、風速と風向を正時直前の 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 カードに記録している。また、1 時間ごとに 10 分間の平均風速・風向および最大瞬間風速とその風向を算出して、波浪ブイに搭載された送信機により Iridium 衛星経由でリアルタイムに送信している。なお、ブイの動揺に伴う計測誤差は付属の磁気方位計 (Model 32500; R.M. Young Company) で補正している。

波浪ブイは、直径 1.1m の円盤状のフロート（発泡ポリスチレン製）とこれに搭載された GPS 受信機、送受信機、制御・記録装置、太陽電池パネル、蓄電池で構成される。ブイは、正時直後の 20 分間、その 3 次元的な変位を 0.4s 間隔で GPS で測位し、データ処理の後、測位データを SD カードに記録している。GPS 測位は単独測位方式⁶⁾を採用しているが、この方式は GPS 受信機 1 台のみによる測位のため、比較的 low コストで測位可能という利点を有するものの、GPS 信号が伝播中に受ける大気遅延など GPS システムに起因する誤差が除去できず、Differential GPS (DGPS) 方式 (トランスローケーション方式) や Real Time Kinematic (RTK) 方式 (干渉測位方式) に比べて測位精度は悪い。そこで、波浪ブイでは、受信衛星数の切り替え等に伴う測位データの不連続点の除去およびハイパスフィルタによる GPS システム誤差の影響低減等の、ブイの運動のみを抽出する処理をしており、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精度を得ている⁷⁾。得られた 3 次元測位データからゼロアップクロス法により、20 分間の有義波高、有義波周期、有義波向、最大波高、最大波周期、最大波向、1/10 最大波高、1/10 最大波周期、1/10 最大波向、波数、を算出し、前述の風速データと併せて Iridium 衛星経由でリアルタイムに送信している。

リアルタイムで送信しているデータの分解能は、波高が 0.01m、波周期が 0.1s、波向が 1°、波数が 1 波、風速が 0.1m、風向が 1°であり、その内、平均風速・風向、有義波高、有義波周期、有義波向については、時系列図とともにインターネット上で公開している (<http://lmr.aori.u-tokyo.ac.jp/feog/kosei/ootuchi/>)。この

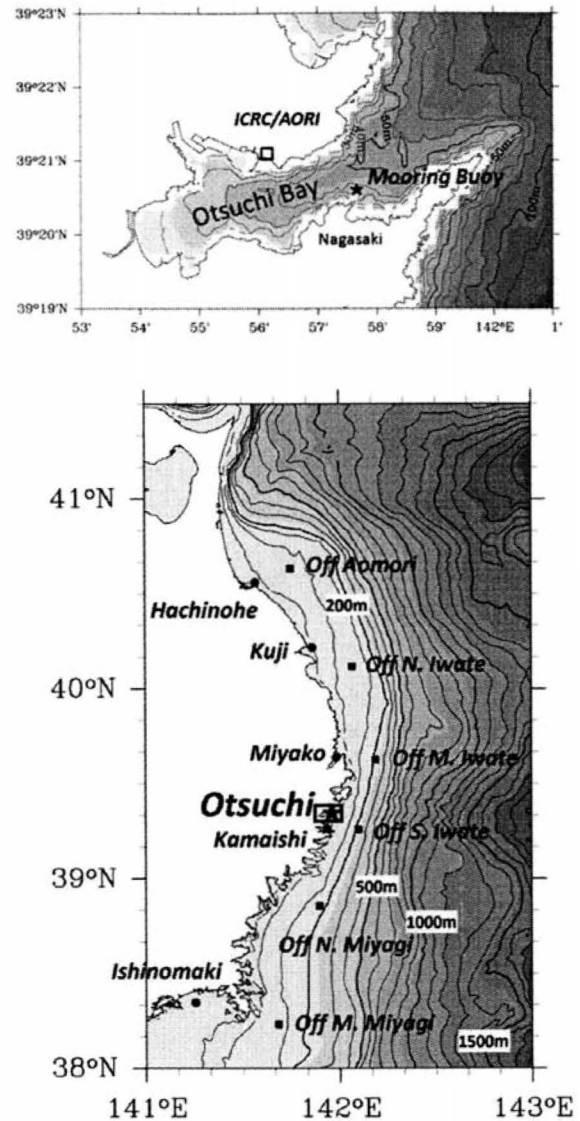


Fig. 1 (a) Mooring location of the real-time monitoring system of wind and wave in Otsuchi Bay. Maintenance of the system is supported by the International Coastal Research Center of the Atmosphere and Ocean Research Institute (ICRC/AORI), the University of Tokyo. (b) Location of wave monitoring stations in the Tohoku area, where Otsuchi Bay is enclosed by a rectangle. Stations except for our system (★) belong to the wave information network 'NOWPHAS' of Ministry of Land, Infrastructure, Transport, and Tourism, Japan. RTK-GPS wave recorders are used in the offshore stations (■) and ultrasonic recorders are bottom-mounted in the inshore ones (●).

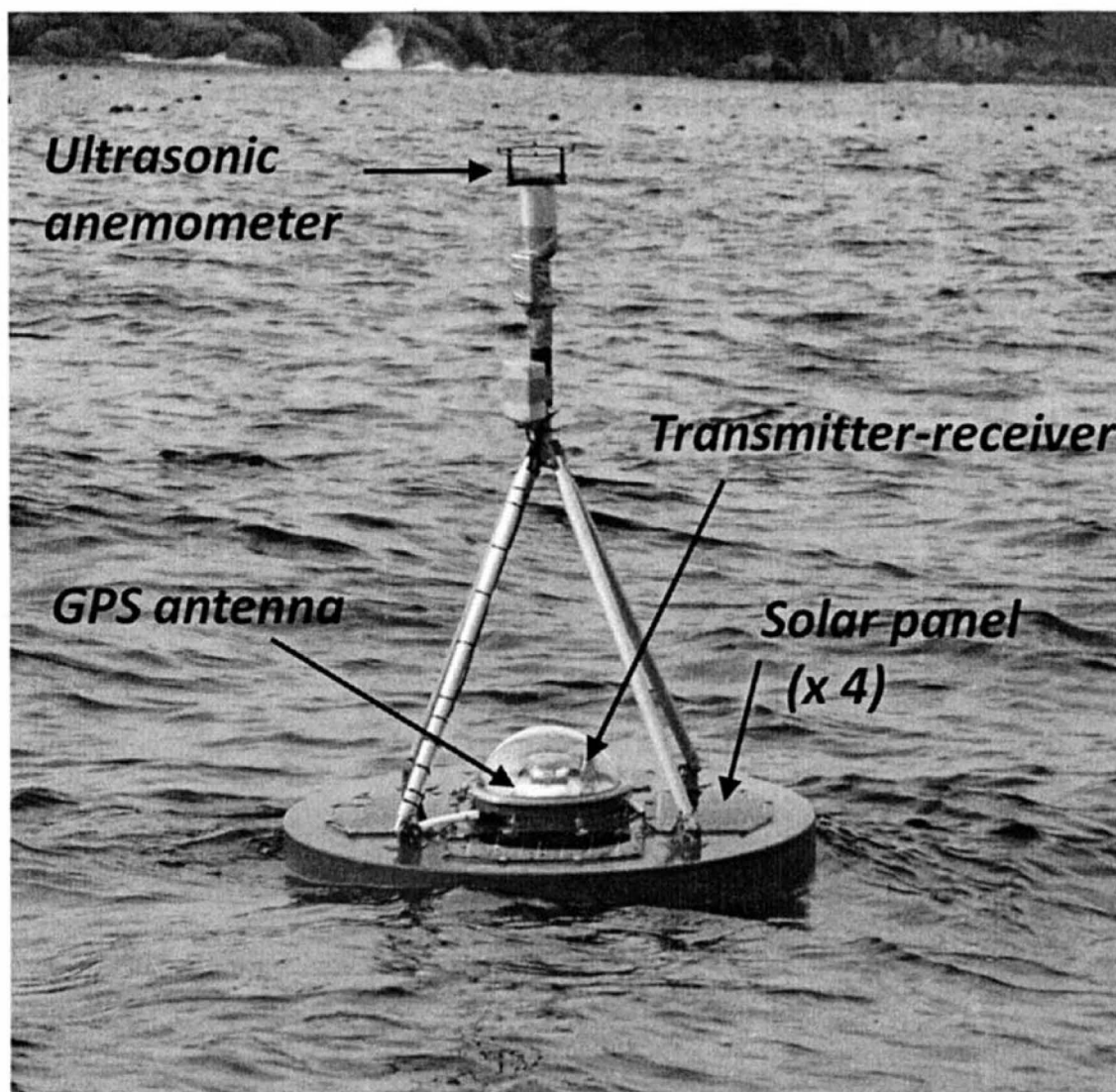


Fig. 2 Real-time monitoring system of wind and wave moored in Otsuchi Bay (8 Feb. 2013).

情報は携帯電話でも閲覧可能で、地域の漁業者の出漁判断等に利用されている。なお、システム全体の電源は、ブイ上面に取り付けた太陽電池パネルから賅っている。システムは、2012年10月3日に係留・設置し、同時に稼働を開始した。

3. 観測結果

3.1 大槌湾内の風と波浪の出現特性

システムの運用開始後3ヶ月間の風と波浪の時系列をFig.3に示す。有義波高 $H_{1/3}$ は通常1m未満であるが、間欠的に1mを超えることがある(Fig.3a)。有義波周期 $T_{1/3}$ は高波高時に長くなる傾向がある(Fig.3b)。有義波の波向 $\theta_{1/3}$ (波が伝播して行く方向) は約 230° で大きな変動は少なく、湾内は南西方向に伝播する波浪が卓越している

(Fig.3c)。波形勾配 ($H_{1/3}/L_{1/3}$; 有義波長 $L_{1/3}$ は $T_{1/3}$ から有限水深波の線形分散関係を用いて算出) は、高波高時に高くなる傾向があるが(Fig.3d)、杉本・近澤⁵⁾が指摘しているように、沖合の波形勾配に比べて値は低い。20分間の波数は100~200波であった(Fig.3e)。

湾内の風速は変動が激しいものの 10 ms^{-1} を超えることはまれであった。ただし、期間の後半では風速が強くなる傾向が見られた(Fig.3f)。風向(風が吹き去る方向)は平均すると約 120° であり、湾奥から東南東方向に向かって吹く風が卓越していた(Fig.3g)。なお、風速の有義波向 $\theta_{1/3}$ に沿った成分(順方向を正、逆方向を負とする)を見ると全体的に負値となっており(Fig.3h)、卓越波向と風向きは一致しておらず、両者は 100° 程度ずれていた。

期間中の有義波の波高、周期、波形勾配、波向、ならびに平均風速、風向の出現頻度をFig.4に示す。各々の平均値±標準偏差は、 $0.75 \pm 0.43 \text{ m}$ 、 $8.8 \pm 1.8 \text{ s}$ 、 $0.0063 \pm$

0.0030、 $230 \pm 20^\circ$ 、 $5.0 \pm 3.7 \text{ ms}^{-1}$ 、 $116 \pm 67^\circ$ であった。

有義波高、周期、波形勾配について、それらの超過確率を大槌湾周辺で観測された値と比較してみた (Fig.5)。ここで使用したデータは、国土交通省港湾局の全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS)⁸⁾ から取得した。使用したデータの内、沿岸域の八戸、久慈、宮古、釜石、石巻の各観測点では海底設置型の超音波式波高計が使用されており、沖合域の青森沖、岩手北部沖、岩手中部沖、岩手南部沖、宮城北部沖、宮城中部沖ではRTK方式のGPS波高計が使用されている (Fig.2b)。有義波高の超過確率は、杉本・近澤⁵⁾ が指摘しているように沿岸域で低く、沖合域で高くなっており (Fig.5a)、浅水変形、屈折、砕波等の浅海効果の影響で

波高が減衰していることを示している。中でも大槌湾の波高が、他に比べて明らかに低いのが特徴的である。有義波周期については、沖合域と沿岸域といった分類では両者で大きな違いは見られないものの、大槌湾の波周期は他と比較して長いことが分かった (Fig.5b)。また、波形勾配は、波高の高低を反映して沿岸域で小さく、沖合域で大きくなっており、特に大槌湾では、低波高、長波長のために他と比較して著しく波形勾配が小さくなっていった。大槌湾で波高が低く、波長が長くなる要因については今後の検討課題である。

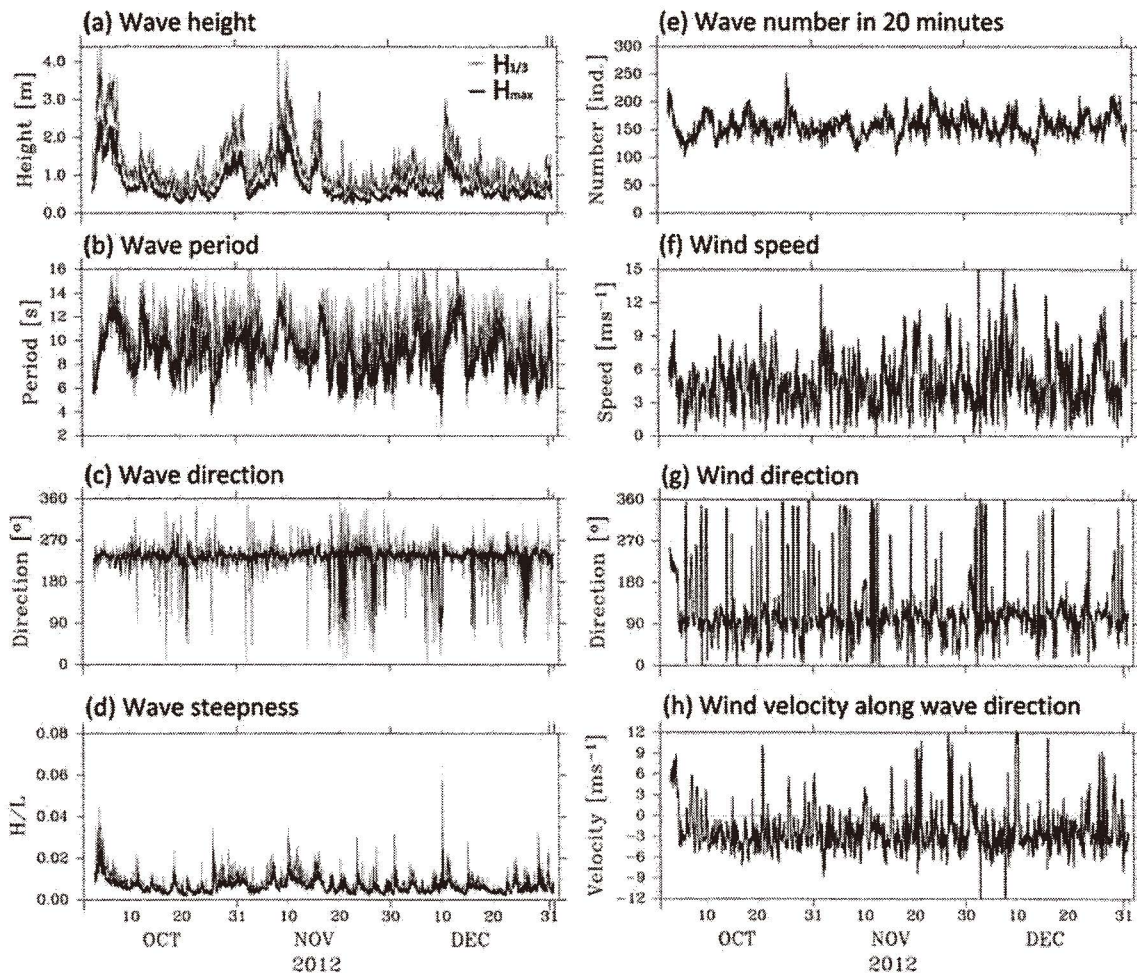


Fig. 3 Time-series of hourly statistics of wave and wind observed by the real-time monitoring system in Otsuchi Bay. Thin (thick) line denotes the maximum (significant) wave height (a), its wave period (b), wave direction (c) and wave steepness (d) in 20 minutes. Wind speed and direction are averages in 10 minutes, and wind velocity along the direction of the significant wave are shown (h). Wave direction denotes the propagation direction and wind direction denotes the direction of wind blowing through.

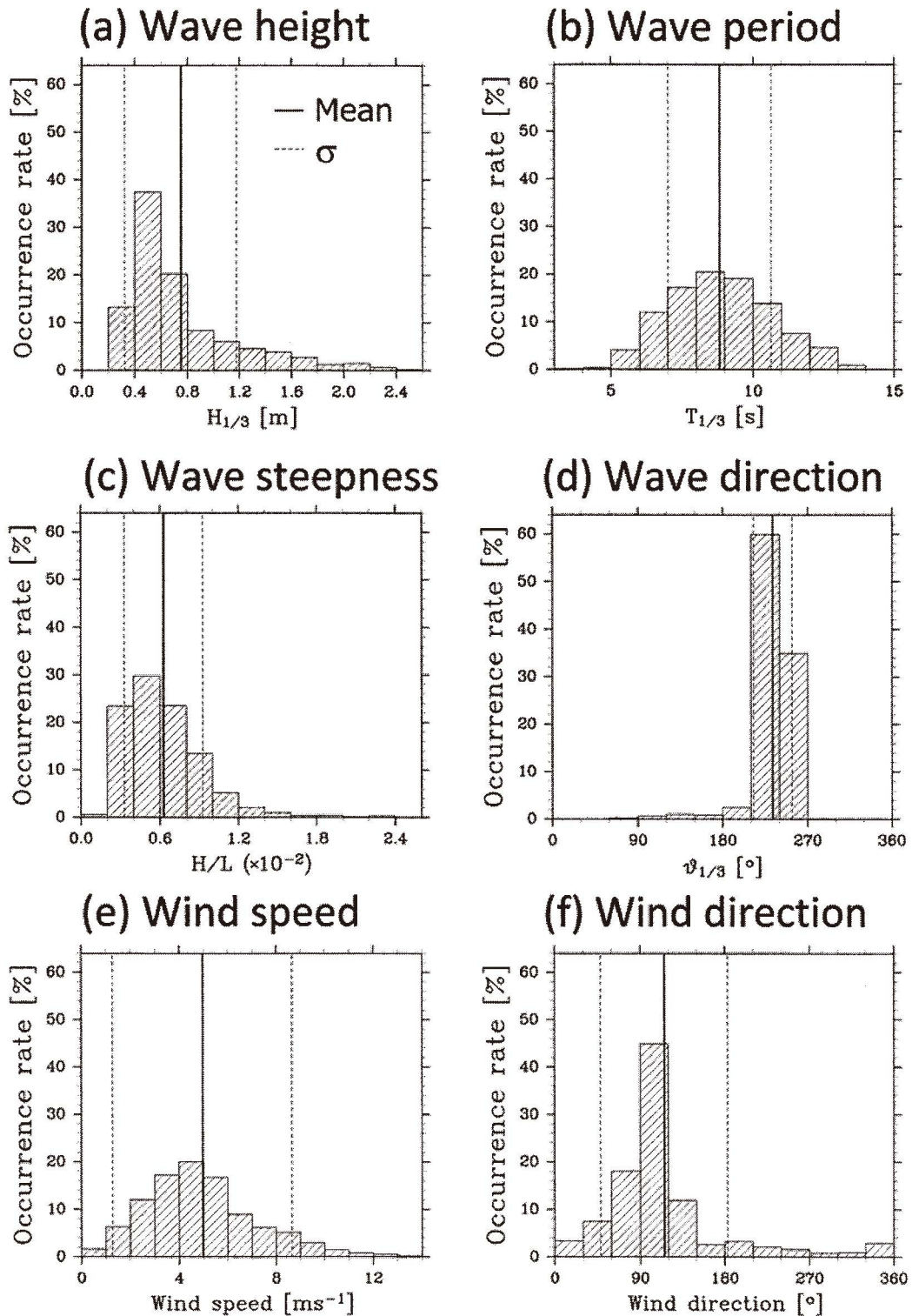


Fig. 4 Occurrence rate of wind and wave in Otsuchi Bay from 3 Oct. to 31 Dec. 2012. Thick solid vertical line denotes the average and dashed one the standard deviation.

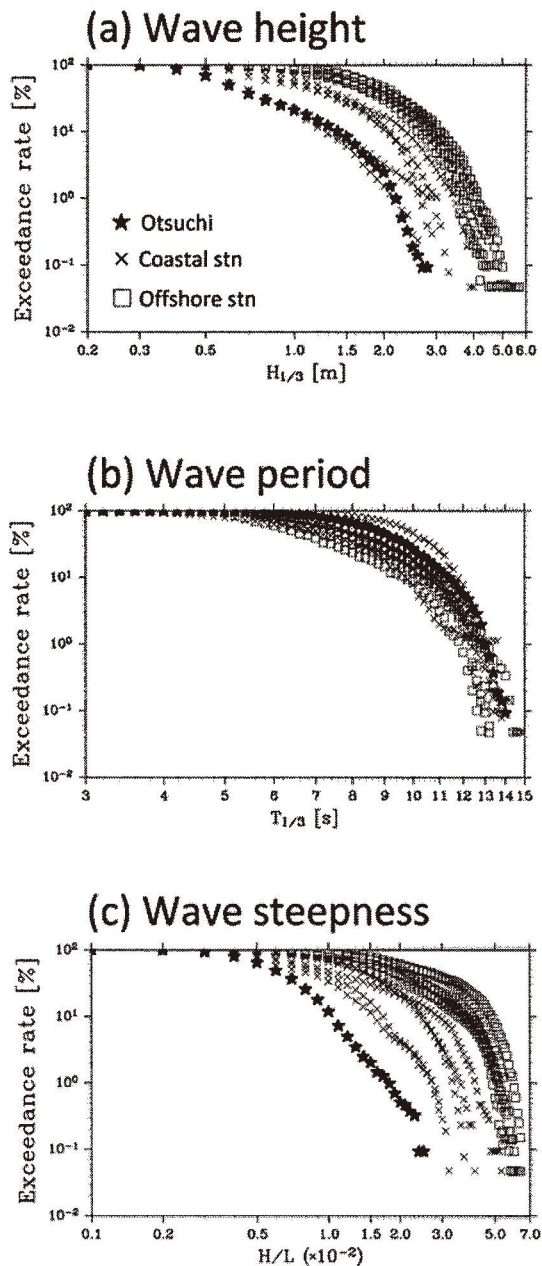


Fig. 5 Exceedence probability of $H_{1/3}$ (a), $T_{1/3}$ (b) and wave steepness $H_{1/3}/L_{1/3}$ observed in the Tohoku area from 3 Oct to 31 Dec in 2012. The probabilities observed in Otsuchi Bay, at the NOWPHAS' coastal and offshore stations are denoted by stars, crosses and squares, respectively.

3.2 大槌湾内の波浪の変動要因

前述の通り、大槌湾内の波向（南西方向）と風向（東南東方向）は一致していない。また、湾の形状に着目すると、湾口が沖に向かって北東方向に開いており、沖合から南西方向に伝播してきたうねりが直接湾内に入って来やすいため、湾内の波浪の主成分は、湾内の風で発達した風波ではなく、湾外から伝播してきたうねりであることが推察される。実際、湾内の有義波向 $\theta_{1/3}$ の方向に沿った風速と有義波高 $H_{1/3}$ との関係調べても、有意な相関関係は見られない (Fig.6)。そこで、大槌湾の波高を沖合、特に大槌湾から見て北東方向の沖合に位置するNOWPHASの岩手中部沖の観測点 (Fig.1b) で同期間に得られた波高と比較した。

大槌湾の有義波高と岩手中部沖の有義波高の散布図を Fig.7a に示す。大槌湾に比べて岩手中部沖の波高が高いのは、前述の通りである。この内、岩手中部沖で有義波向が南西方向 ($210\sim 240^\circ$) であった場合のみを抽出すると、両者の相関関係は強く (相関係数が 0.83)、岩手中部沖で南西方向に伝播している波が大槌湾内に減衰しながら入っていることを示唆している。両者の時間ラグ相関係数を見ると、全データを使って計算した相関係数に比べて、岩手中部沖の有義波向が南西方向であった場合の相関係数は 0.15 程度高くなっていた。なお、湾内に入ってくるうねりには屈折して伝播して来るものもあり、またうねり同士の相互作用もあるため、湾内波浪に寄与するうねりの起源を明確にするためには、数値モデルを用いた解析が必要である。

システムで観測されたデータの内、統計量については 1 時間毎にインターネットで配信しているが、統計処理前の連続データはブイ内部の SD カードに記録・保存しているため、年 2 回の保守・点検の際にブイを陸揚げした際に連続データを回収している。大槌湾内の波浪の方向スペクトルは、0.4 s のサンプリング間隔で観測されたブイの 3 次元的な変位データから、水位と水平 2 方向の水の粒子速度の 20 分間の時系列を作成し、これからクロススペクトルを計算することにより、方向スペクトルを推定することが可能である。磯部他⁹⁾の方法を使用して計算した方向スペクトルの事例を Fig.8 に示す。高波高時 (Fig.8a)、低波高時 (Fig.8b) のいずれもスペクトルのピークは、周波数では $0.07\sim 0.08\text{ s}^{-1}$ 付近、波向では $230\sim 240^\circ$ 付近にあり、単峰型のスペクトル形状を示している。そこで、 $0.06\sim 0.2\text{ s}^{-1}$ の周波数帯で平均した方向スペクトルの期間中の時系列を Fig.9 に示す。なお、図では 6 時間の移動平均を施してある。方向スペクトルのピークは期間中一貫して $230\sim 240^\circ$ の波向に位置しており、かつスペクトルピークの強度が変動していることから、大槌湾内の波浪のエネルギーは、湾外から南西方向に伝播してきたうねりの波高に依存して変動していることを示している。

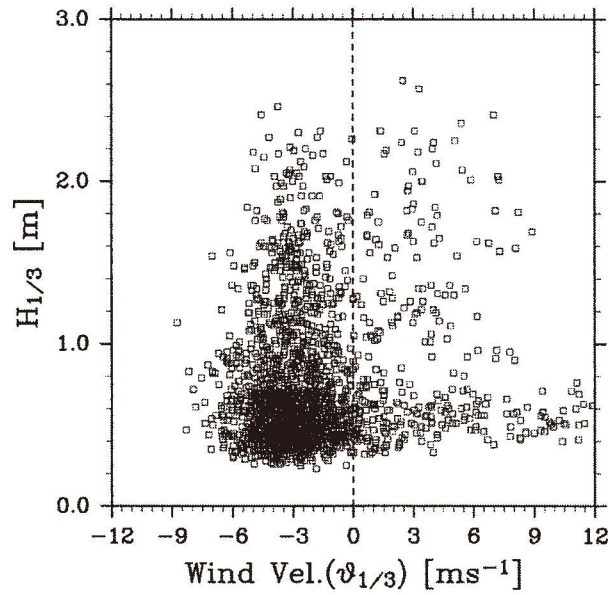


Fig. 6 Relation between the wind velocity along the wave direction and the significant wave height observed in Otsuchi Bay.

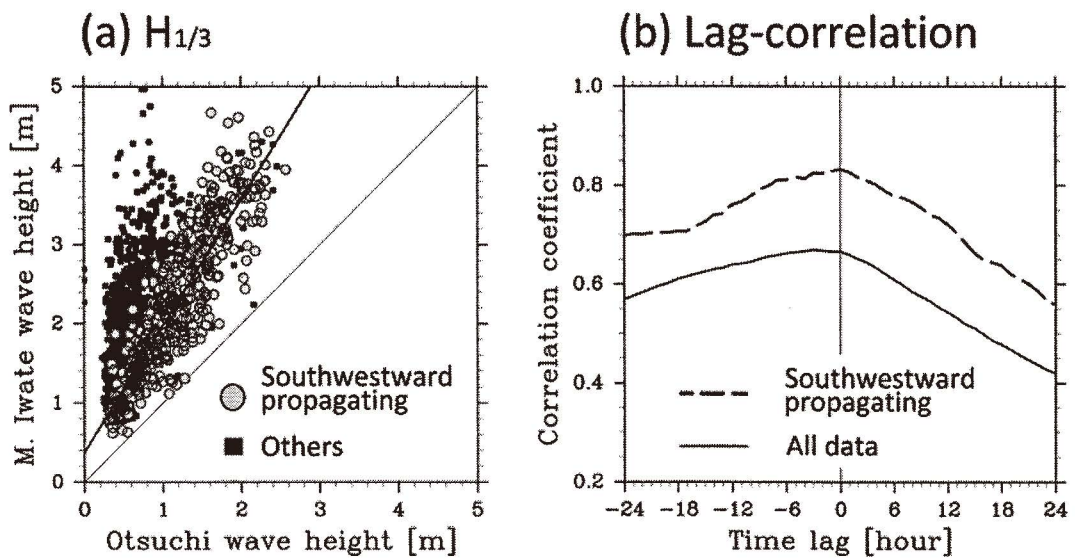


Fig. 7 (a) Relation between the significant wave height observed in Otsuchi Bay and that observed at the offshore Mid Iwate station of NOWPHAS. Gray circles denote the case of waves propagating southwestward ($210\text{--}240^\circ$) at the M. Iwate station. Black thick line indicates the regression line, $H_{1/3}$ at M. Iwate = $1.6 \times H_{1/3}$ at Otsuchi + 0.38 [m]. (b) Lag-correlation between the significant wave height in Otsuchi Bay and that at the M. Iwate station. Dashed line indicates the correlation in the case of waves propagating southwestward at the M. Iwate station.

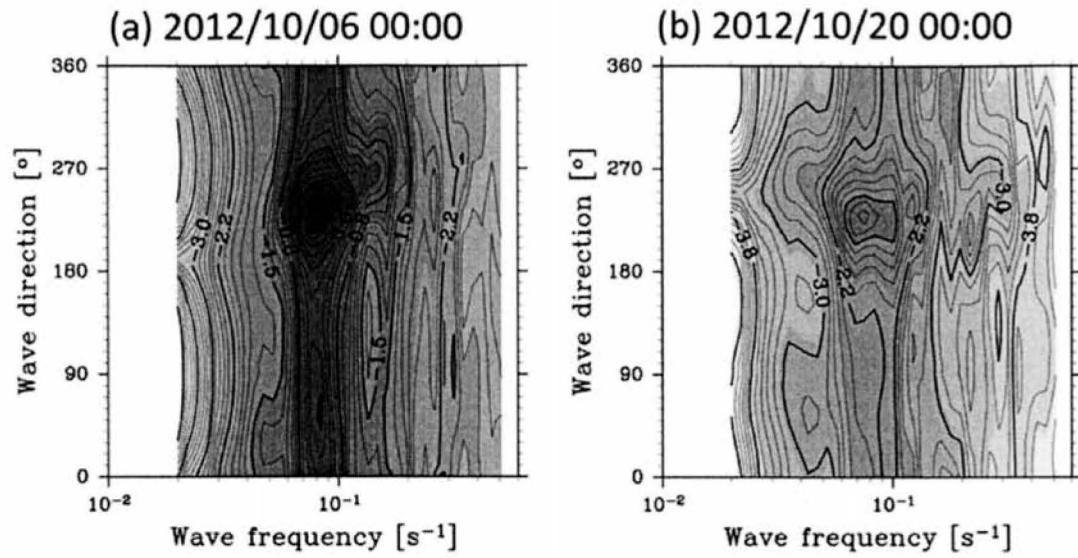


Fig. 8 Directional wave spectrum observed in Otsuchi Bay [m^2s^{-1}]. Contour lines are distributed in logarithmic scale.

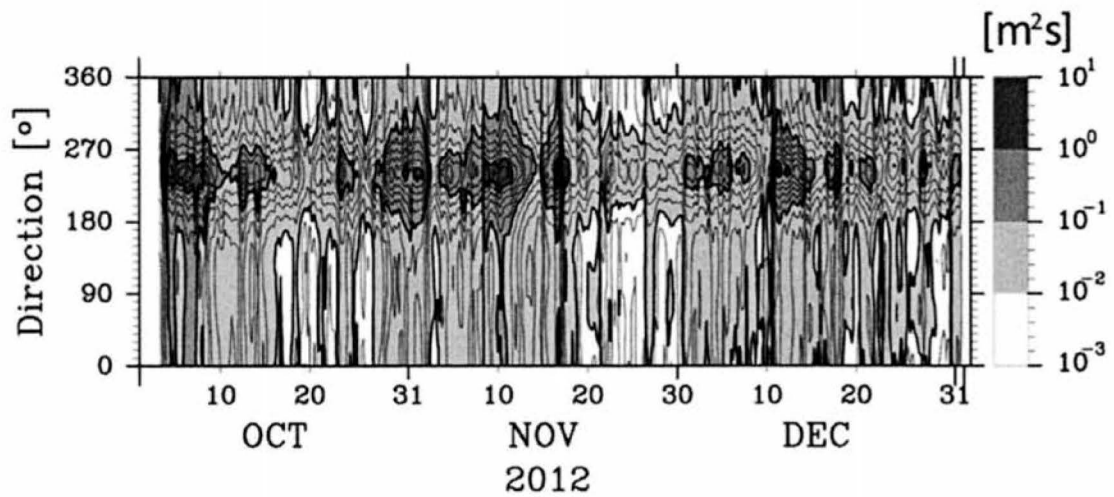


Fig. 9 Time series of directional wave spectrum averaged in the frequency band of $0.06\text{-}0.2$ [s^{-1}] observed in Otsuchi Bay.

4. 考察

大槌湾内の波浪が北東沖合から伝播して来るうねりの影響を強く受けていることは分かったが、そのうねりは元々所定の海域で海上風からエネルギーの入力を受けて発達した風波であるから、もし、海上風と湾内波浪との間に明瞭な関係が得られれば、所定の海域の海上風を監視することで、湾内の波浪の推移をある程度予測することが可能である。

2012 年 10 月～12 月の大槌湾内の有義波高と海上風速との間で時間ラグ相関係数を計算した。海上の各点におけるラグ相関係数の最大値を Fig.10a に示す。なお、海上風速は、気象庁の数値予報モデルの GPV データから海上 10 m の 1 時間毎の東西風速を利用し、相関係数の計算には、海上の各点から大槌湾内の観測点に向かう方向の風速成分を使用した。図には湾口が沖合に向かって開いている方向を補助線で示している。相関係数の高い領域が湾口が開いている北東方向の海域と重なるように位置していることが分かる。このとき、相関係数の最大値が 0.4 以上の海域では時間ラグが $-30 \sim -10$ 時間で、大槌湾から離れるほど時間ラグは大きくなっており、この時間ラグは海域から大槌湾まで波浪が伝播するのに要する時間に対応しているものと考えられる (図略)。

次に、海上の各点から大槌湾内の観測点に向かう方向の風速が期間中に 5 ms^{-1} を超える頻度を Fig.10b に示す。太平洋では北海道東方の海域で頻度が 15% 以上と高く、この海域はラグ相関係数の最大値が 0.5 を超える海域を含んでいる (Fig.10a)。これは、この海域で発生した大槌湾の方向 (南西方向) に吹いている風で発達した風波がうねりとなって大槌湾内に直接伝播し、湾内の波浪に支配的に影響していることを示している。一方、大槌湾から南東方向に沖合の海域も大槌湾方向の風速が 5 ms^{-1} を超える頻度が 15% 以上になっているが (Fig.10b)、ラグ相関係数の最大値は周辺に比べてむしろ低くなっており (Fig.10a)、風によって発達した現場の風波と大槌湾内の波浪とが連動していないことを示している。これは、大槌湾の湾口が北東方向に開いているため、大槌湾から見て南東に位置するこの海域から伝播するうねりは屈折しないと湾内に進入できないことに起因すると考えられる。

大槌湾の位置する東北地方の太平洋側はリアス式海岸で、湾の形状は湾ごとに異なっており、隣り合う湾でも湾内の波浪の状況が大きく異なることが経験的に知られている。そこで、大槌湾の北側に位置する宮古湾と南側に位置する釜石湾 (Fig.1b) の湾内で観測された有義波高 (NOWPHAS データ) とそれぞれの湾に向かう方向の海上風速との間の時間ラグ相関係数の最大値の水平分布を Fig.11 に示す。宮古湾と釜石湾は 50 km も離れていないが、双方の水平分布はもちろん、大槌湾の水平分布 (Fig.10a) と大きく異なっており、湾内の波浪に強い影響を

与える海域が湾口の形状に強く依存していることを示している。

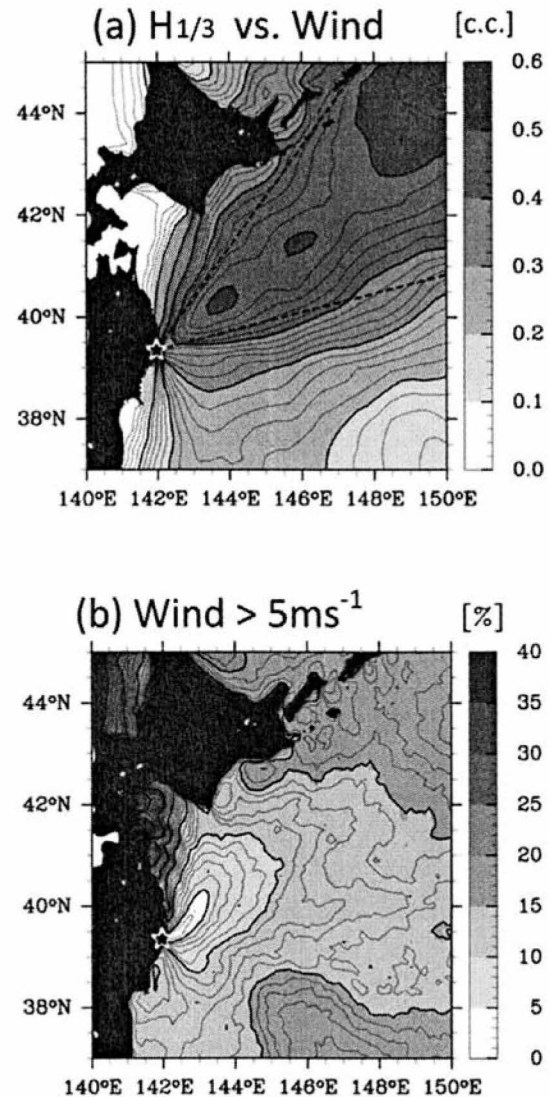


Fig. 10 (a) Horizontal distribution of maximum correlation coefficient between significant wave height in Otsuchi Bay and wind velocity toward Otsuchi Bay from each grid point. Star indicates the location of the station in Otsuchi Bay and dashed line the direction extended from the Bay mouth. (b) Occurrence rate of wind velocity toward Otsuchi Bay over $5 \text{ [ms}^{-1}]$.

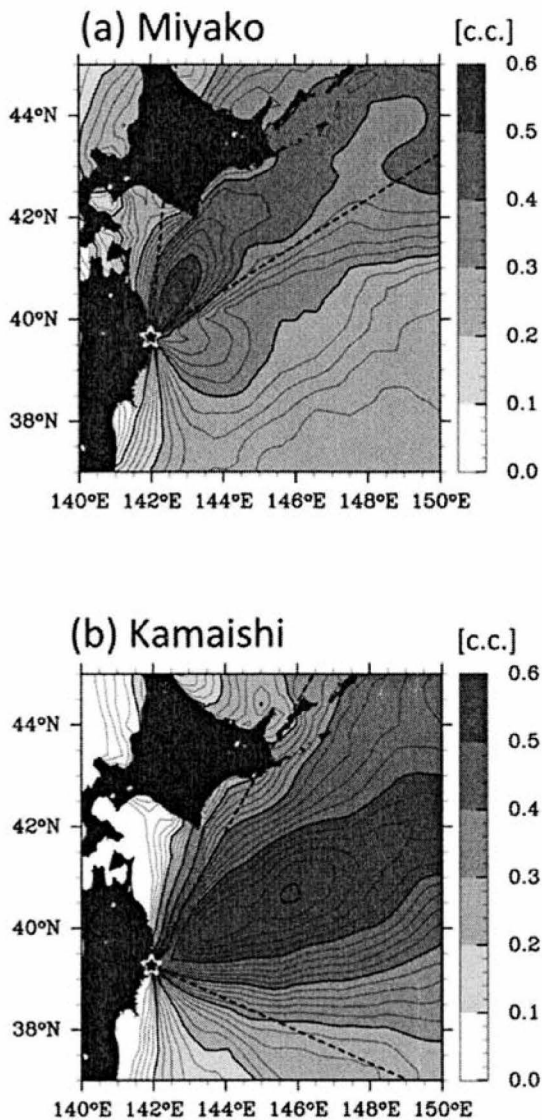


Fig. 11 (a) Same as in Fig.10a but for Miyako Bay. (b) Same as in Fig.10a but for Kamaishi Bay.

5. 結語

2012年10月に岩手県の大槌湾内に風と波浪のモニタリングシステムを設置し、経常的に運用している。超音波風速計と単独測位方式のGPS波高計を付設したブイを係留し、風は0.5sの間隔で10分間、波浪は0.4sの間隔で20分間の計測を1時間毎に行い、風速、風向ならびに波高、波周期、波向等の統計量をリアルタイムでインターネットを通じて公開している。運用開始直後の2012年10月～12月の3

ヶ月間のデータを解析したところ、湾内の波浪は、湾から見て北東沖合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。また、湾内の有義波高の変動は、湾から見て北東沖合の北海道東部の海域における南西向きの風速と強い相関関係にあり、これには湾口の形状が関連していることが示された。

このシステムは、今後もしばらく運用する予定であり、大槌湾内の波浪の季節変動特性と経年変動特性が解明されることが期待される。また、うねりが湾内に伝播していく過程で浅海効果により減衰、変調する実態を、湾内モニタリングと並行して湾外の波浪の方向スペクトルを観測することで解明する計画を立てている。

謝辞

風・波浪リアルタイムモニタリングシステムを設置した場所は、釜石東部漁業協同組合が管理するワカメとホタテガイの養殖施設に隣接しており、システムの設定にあたっては、現場での設置位置の確定作業に同漁協の小川原泉組合長が参加して陣頭指揮をとっていただくなど、同漁協には大変お世話になった。また、設置にあたっては新おおつち漁業協同組合、岩手県水産技術センターにもご協力いただいた。システムの設定作業ならびに保守・管理では、東京大学大気海洋研究所附属国際沿岸海洋研究センターの黒沢正隆氏、平野昌明氏、鈴木貴悟氏他スタッフの皆さんにご支援いただいている。以上の皆様に、深く感謝いたします。本研究は、文部科学省の東北マリンサイエンス拠点形成事業の中で実施しており、東京大学大気海洋研究所の木暮一啓教授と津田敦教授のご支援に感謝いたします。

なお、解析に使用した気象庁の数値予報モデルの海上風データは、地球流体電脳倶楽部のサイト (<http://www.gfd-dennou.org/>) からダウンロードした。

参考文献

- 1) 東北マリンサイエンス拠点形成事業 ; <http://www.i-teams.jp/>
- 2) Furuya, K., K. Takahashi and H. Iizumi, 1993: Wind-dependent formation of phytoplankton spring bloom in Otsuchi Bay, a Ria in Sanriku, Japan. *J. Oceanogr.*, 49, 459-475.
- 3) 川俣 茂, 2001: 北日本沿岸におけるウニおよびアワビの摂食に及ぼす波浪の影響とその評価. 水産総合研究センター研究報告, 1, 59-107.
- 4) 河合弘康・佐藤 真・川口浩二・関 克己, 2012: GPS波高計で捉えた東北～四国地方太平洋沿岸の沖合波浪特性. 港湾空港技術研究所資料, 1249, 1-51.
- 5) 杉本悟史・近澤昌寿, 2008: 気象庁沿岸波浪観測に基づく日本沿岸の波浪特性の調査. 測候時報, 75, 77-95.

- 6) Harigae, M., I. Yamaguchi, T. Kasai, H. Igawa, H. Nakanishi, T. Murayama, Y. Iwanaka and H. Suko, 2004: Abreast of the waves: Open-sea sensor to measure height and direction. *GPS World*, 16, 16-27.
- 7) 山口 功・葛西時雄・井川寛隆・張替正敏・小森茂典・重永卓範・保坂美行, 2005: GPS 単独測位方式による海洋波浪計測, 日本機械学会第14回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集, 29-34.
- 8) 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網;
<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 9) 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司, 1984: 方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張. 第31回海岸工学講演会論文集, 173-177.