

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1197

June 2009

海洋短波レーダによる津波観測の実現に向けた吹送流推定システムの検討

渡辺 一也

富田 孝史

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 背景	4
1.2 津波の沖合観測	4
1.3 海洋短波レーダによる津波観測と沿岸津波予測への期待	4
1.4 海洋短波レーダによる津波観測における課題	4
1.5 本研究の目的と内容	4
2. 海洋短波レーダによる観測について	5
2.1 海洋短波レーダに関する既往の研究	5
2.2 海洋短波レーダによる観測の有用性	5
3. 重回帰分析を使用した吹送流の即時的除去手法	7
3.1 研究対象領域とモニタリングスポット	7
3.2 観測データに基づいた第二海堡周辺の流れの特性	7
3.3 流速データからの吹送流成分の除去についての検討	10
3.4 課題	10
4. 自己完結型の吹送流推定システム	11
4.1 自己完結型の吹送流推定システムの概要	11
4.2 海上風データの推定について	11
4.3 バルク法を使用した吹送流の推定	14
4.4 課題	16
5. おわりに	16
謝辞	16
参考文献	16
記号表	18
付録	18

Investigation of Wind-Driven Currents Estimation System for Tsunami Observation Using High Frequency Radar

Kazuya WATANABE*

Takashi TOMITA**

Synopsis

Japan has high risk of large-scale earthquakes occurring around coasts, which generate tsunamis generally. Offshore tsunami detection is effective for prevention and reduction of human loss by the tsunami. GPS tsunami detection system is actually established in Japan. Further, recently a monitoring system with high frequency (HF) radar, which observes currents on the ocean surface mainly, is expected to detect tsunamis in deeper seas.

In the ocean surface, there are many kinds of currents due to tides, wind, wave as well as tsunamis. Especially, wind-driven currents may be important for tsunami detection with the HF radar, because they are in a similar range of tsunami period and are obstacles for accurate estimation of tsunami-induced current.

In this study, two type systems for removing wind-driven currents from data obtained in the HF radar. In the system measurement data of current and wind at any points is utilized to estimate the spatial currents are demonstrated. The other is the self-contained estimation system of wind-driven currents. In the system, the ocean winds are estimated with the analyzed wave height and period from the HF radar data and the Sverdrup-Munk-Bretschneider's (SMB) method, calculating the wave height and period from wind duration and fetch. Using the estimated winds, the wind-driven currents are calculated by employing the theoretically derived surface share force.

Key Words: Self-Contained, wind-driven current, wind speed, Sverdrup-Munk-Bretschneider's method, HF radar, tsunami

* Postdoctoral Fellow, Tsunami Research Center

** Research Director, Tsunami Research Center

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5052 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:watanabe-k@pari.go.jp

海洋短波レーダによる津波観測の実現に向けた 吹送流推定システムの検討

渡辺 一也*・富田 孝史**

要 旨

近年、日本の沿岸部においては大地震の発生により津波が来襲することが懸念されている。沿岸に來襲する津波を把握できれば、それは防災体制の構築等に有用である。実際、津波の沖合観測に向けてGPS波浪計も設置されているが、さらに沖合における観測技術として海洋短波レーダがある。これは面的に海面の表層成分の流れを観測するものである。しかし、実際に観測データから津波を検出するためには、海洋に存在する様々な周期の流れ成分を除去する必要がある、特に津波と同程度の周期帯にある吹送流の除去が鍵となる。

海洋短波レーダによる観測データから吹送流をリアルタイムに除去する手法を構築した。吹送流の推定においては、流速のデータと併せて海上風のデータも必要となるが、従来の風速計による海上風計測では、観測塔やブイを利用して風速計や流速計を設置するために設置場所が限られるので、データの取得は困難なことが予想される。そのため、そういった場合においても使用できるように海洋短波レーダから得られる情報のみを利用した自己完結型の吹送流除去手法についての検討も行った。

キーワード：自己完結型，吹送流，津波，海上風，SMB法，海洋短波レーダ

* 津波防災研究センター特別研究員

** 津波防災研究センター上席研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5052 Fax：046-844-1274 e-mail:watanabe-k@pari.go.jp

1. はじめに

1.1 背景

我が国では、東海地震、東南海・南海地震などの大地震とそれに伴う大規模な津波が懸念されている。現在の気象庁による津波予測情報は地震発生から3分を目標に津波警報（大津波、津波）または津波注意報を発表している優れたものであるが、2006年11月15日および2007年1月13日の千島列島沖の地震による津波の際には、津波警報が発表されたにもかかわらず実際に来襲した津波は、北海道東部沿岸で10～40cmで津波警報を出す基準以下のものであったことや気象庁が津波注意報を解除した後の16日午前にかけても津波が到達し、東京・三宅島で最大80cmを記録した等の問題点も指摘されている。

1.2 津波の沖合観測

現在の予報は気象庁マグニチュードを元に計算されている。明治三陸津波のような「ぬるぬる地震」や「ゆっくり地震」と呼ばれているタイプの地震であると、断層の動きがゆっくりと大きいため、気象庁マグニチュードの大きさに比べて津波が大きくなる可能性がある。そのため、そういった場合には津波を小さく見積もってしまうことが考えられる。現状では「ぬるぬる地震」の予測は難しいため、津波を過小評価しないためには、実際に沖合で計測することが効果的であると考えられる。

津波の沖合観測の有効性は、永井ら（2003）により室戸岬沖合13kmに設置されたGPS波浪計により実証されている。

1.3 海洋短波レーダによる津波観測と沿岸津波予測への期待

沿岸部から約80kmと遠い地点の海面を観測することが可能な海洋短波レーダは、GPS波浪計よりもさらに沖合での津波観測の可能性があり、津波が沿岸部まで到達するまでの時間を確保することが可能な技術であると期待ができる。さらに、従来行われたような観測よりも短い、即時的な観測が可能な海洋短波レーダ技術も開発中であることから津波観測への期待が高まっている。

また、津波観測ができたと仮定し、そのデータを活用して、沿岸津波予測を行った研究がある（例えば、泉宮・今井（2005）、泉宮・中島（2006）、Tomita et al.（2006））。

1.4 海洋短波レーダによる津波観測における課題

海洋短波レーダで観測できる主なものは流れである。実海域には津波による流れの他にも、潮流、吹送流など

様々な流れが混在している（図-1参照）。このため津波を検知するためには、様々な流れ成分を含んだ観測値から津波成分を抽出する必要がある。短周期および長周期成分については、清水ら（2006）により提案されている数値フィルターにより影響を除去することが可能である。しかし、海洋短波レーダが観測する表層流速は、水表面を吹く風により大きな影響を受けるので、それによる流れ（吹送流）を除去しなければならない。さらに、吹送流の数分程度の周期は、短い周期の津波の周期に近いので、吹送流の除去は重要である。

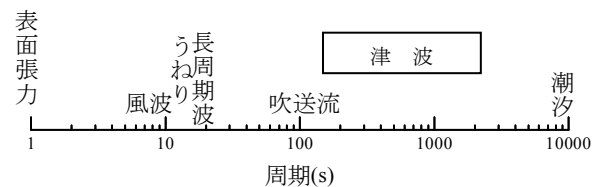


図-1 海における流れ成分

吹送流は、時間的・空間的に非定常な現象であり、沿岸の流動に大きな影響を与えている。吹送流の影響を推定するためには、時間的・空間的な流れの把握が重要となるが、従来行われている固定式の流速計による流速観測では局所的に変化する流れまでを捉えることは難しいと考えられる。海洋短波レーダは、空間的な流速を観測することを目的とした機器でありこの点を解決している。

吹送流の推定においては、流速のデータと併せて海上風のデータが必要である。一般的な海上風計測では、観測塔やブイに風速計を設置するために設置場所が限られ、空間的に変化する風速場の観測は困難である。空間的な風速場を知る手法としては、気象庁によるGPV (Grid Point Value) などがあり、日本国内の多くの大学や研究機関に数値予報GPVデータがリアルタイムで配信されている。GPVとは、気象庁が作成している数値予報資料のことである。メソモデルによるデータセットは日本周辺について5kmメッシュで3時間毎にデータを提供している。しかし、本研究では津波を対象としているために、リアルタイムでの観測が求められる。

1.5 本研究の目的と内容

本資料は、5章により構成されている。

第1章では、本研究における背景と目的について述べた。第2章では、海洋短波レーダによる観測についてとして、海洋短波レーダに関する既往の研究をレビューし、海洋短波レーダの現況について示した。また、流れの特性・原理について説明し、海洋短波レーダによる津波観測の

有意性を示した。

第3章では、重回帰分析を使用した吹送流の即時的除去手法の検討を行った。流速計により測定された流速、風速計により観測された海上風速、海洋短波レーダにより測定された流速データにより重回帰式を作成し、即時的に吹送流を除去する手法を提案した。この手法により、リアルタイムでの吹送流の推定が可能であった。

第4章では、陸上設置という利点をもつ海洋短波レーダ以外の観測機器では洋上での流速や海上風の観測は困難であることが予想されるため、海洋短波レーダにより取得されたデータのみでの吹送流の推定を試みた。海洋短波レーダから得られる波高、周期とSMB法から海上風を推定し、さらに推定された海上風速とバルク式を使用することにより吹送流の推定を行った。

第5章では、「おわりに」として、本研究における結論と課題についてまとめた。

2. 海洋短波レーダによる観測について

2.1 海洋短波レーダに関する既往の研究

Crombie (1955) により発見された海洋短波レーダによる観測は、現在では環境モニタリングを目的とした流況観測、黒潮の海況観測、漂流物（ゴミ）の観測などに既に実用的に使用されている。そのため、東京湾や有明海、伊勢湾をはじめとして湾内の流動把握のためなどに多く設置され始めている。流況把握に使用されている、一方で、上記以外の目的にも様々な試みが行われている。

海洋短波レーダの津波観測への応用は、1970年代から試みられている（例えば、Barick (1979), Lipa et al. (1979), Lipa et al. (2005)）。しかし、実際に海洋短波レーダによる津波の観測事例は無い。そのため、既往の研究では、津波による流れが観測できたものとして、津波の検出や津波の初期水位変動の推定などに活用している。

現在行われている、多くの海洋短波レーダによる観測では、環境の把握が主眼であること、さらに観測精度向上のために、1時間程度という観測時間で流れの時・空間的な変動を解析している。しかし、津波の検出には、この観測時間は不適切であり、より短い時間での観測が必要である。短時間の観測に関しては、電力中央研究所が15分間隔での観測に成功している（坂井ら (2002)）。さらに技術開発により、より短いインターバルでの観測が可能になりつつあるため、津波観測に対しても期待ができる。

2.2 海洋短波レーダによる観測の有用性

(1) 海洋短波レーダの特性

海洋短波レーダを津波観測に適用することを検討するにあたって、その特徴を整理する。

第一の特徴は、広範囲にしかも遠距離の流速データを測定できることである。さらに、陸上に基地局を設けるために従来の手法に比べて保守・維持が容易であることが利点として挙げられる（土木学会 (2001)）。

図-2は、津波検出点の海岸からの距離と津波の到達時間の関係を示したものである。ここでは、津波検出点から海岸までの平均水深を200m、500、1,000mと仮定した場合に津波検出から沿岸までどの程度の時間的余裕があるのかについて示した。平均水深を1,000mと仮定した場合には、津波が沖合で観測されてから沿岸に到達するまでにおよそ13分程度かかる。平均水深が200mと浅くなれば、さらに時間的な余裕は増大し約30分程度となる。そのため、海洋短波レーダにより遠点での津波観測が可能であれば、非常に有用である。

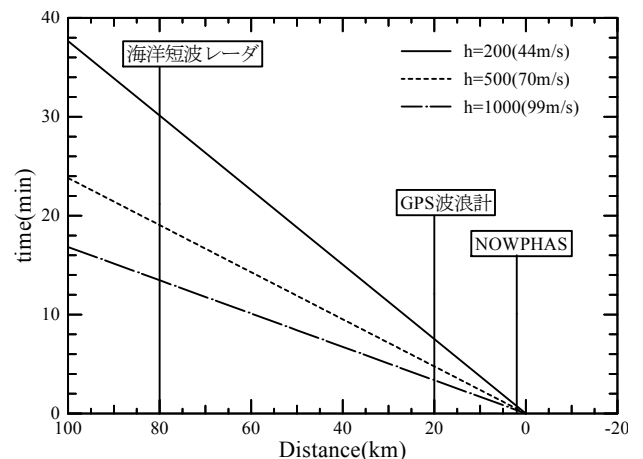


図-2 計測距離と津波到達時間との関係

(2) 海洋短波レーダによる流れ観測の原理

海洋短波レーダが海面の流れを観測する基本原理は、ドップラー効果を利用したものである。レーダ基地局に向かってくる流れにのった波により反射された電波は、流れの速さに対応して高周波数側に変調し、逆に遠ざかる流れに乗った波により反射された電波は低周波数側に変調する。この周波数の変化を解析することにより流れを観測する。

レーダを反射する海面の波は、様々な周波数の成分波が重なったものである。これに波長 λ の電波が入射すると、 $L \cos \Delta = \lambda/2$ （ここにLは海の波の波長、 Δ は電波の入射角）の関係を満たす波長を持つ成分波によって最も強く散乱される（ブラッグ散乱）。遠方の観測では入射角 Δ

はほぼ0と近似できるため、電波の波長の半分の長さをもつ成分波から強い電波が帰ってくる。その波の進行方向は、レーダ基地局に向かう向きと遠ざかる向きである。

いま深海域を考えると、海の波の波長 L および波速 C_w は、それぞれ、 $L=g/(2\pi f^2)$ および $C_w=Lf=\lambda f/2$ （ここに、 g は重力加速度、 f は波の周波数）で計算できるので、両式から、 $g/(2\pi f^2)=\lambda/2$ が導け、最終的に、 $f=\sqrt{g/\pi\lambda}$ が得られる。ドップラー効果により変化する周波数は近づく波の場合には $(+f)$ および遠ざかる波の場合には $(-f)$ となる。これは、海に流れがない場合であり、この周波数変調分を f_d と置く。なお、HFレーダの場合、使用する電波の周波数は24.515MHzであり、その波長 λ は12.2mである。このとき、 $f_d=\sqrt{g/\pi\lambda}$ から、 $f_d=0.505\text{Hz}$ となる。

海に流れがある場合には、流れによる周波数の変化は f_d からの変化として捉えることができる。図-3のように、横軸にドップラー周波数（受信した電波の周波数-送信した電波の周波数）をとって電波のスペクトルを整理すると、 f_d とピーク周波数 f_0 の差 $|f_d - f_0|$ として流れによる周波数変化は現れる。

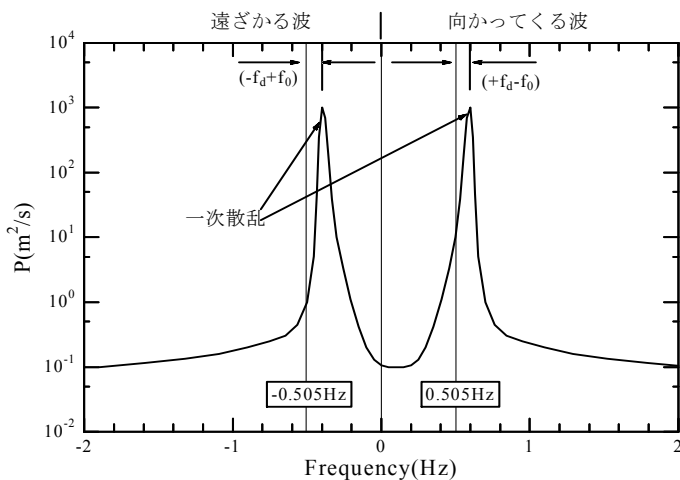


図-3 ドップラースペクトルの例

また、電波の飛んだ方向の流れ成分しか観測できないので、任意の向きをもった流れを捉えるためには、同じ海域を少なくとも2方向からの電波により観測する必要がある。2方向の流れ成分をベクトル合成することにより、流れの向きや大きさを把握することができる。

計測方法の詳細については既往の文献（例えば、Barrick (1972)）に詳しい。

(3) 海洋短波レーダによる流れ観測の原理

海洋短波レーダによる流れの一般的な観測では、図-4に例示するように、流れの向きを測定するために、2つの

地点から電波を発射する。観測原理からレーダ観測では電波の照射方向の流動しか見ることができないので、流れの向きを定めるためには2方向の流れ成分を得なければならない。すなわち、2つの電波が同時刻に交差する地点において流れベクトルが推定できる。

面的にデータを取得するためには、電波を照射する方向を変化させる必要がある。多くの場合、照射する方向間隔は15度である。具体的には、ある方向に向けて一定の時間電波を送信するとともに受信し、次に照射方向を変化させて同様の観測を行う。これを基準局毎に行って、電波が交差する領域（図-4中の太線で描かれている内側の部分）において流速が観測される。

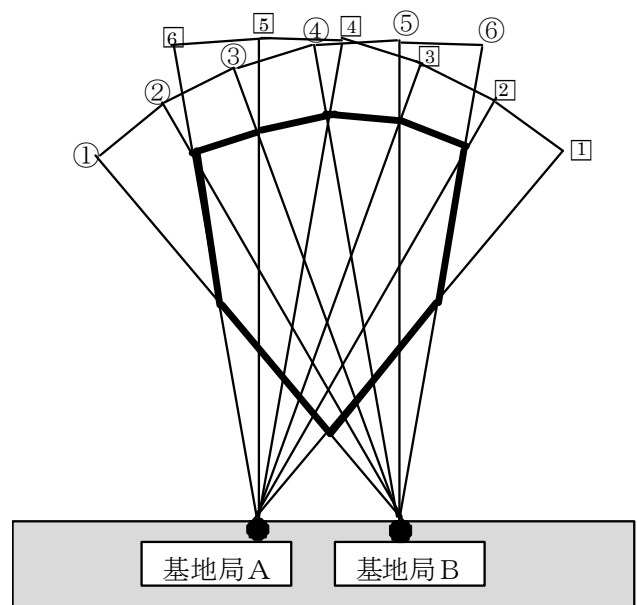


図-4 流速測定方法の概念図

観測範囲における全ての電波交差点毎に2つの基準局から同時に電波を照射すると、全範囲を観測するのに多大な時間を必要とする。したがって、一般的には基準局毎に、各測点において電波照射方向の流速を測定し、その流速を時間補間することにより所定の時刻の流速を求める。ついで、両基準局から算出された2方向の流速を合成して、流速ベクトルを推定する。

一方向の観測には、周波数を算出するためにスペクトル解析を行うので、ある程度のデータ数が必要であり、一方向当たり数分以上の観測を行うのが一般的である。それを幾つかの方向について行うので、全体の観測時間は数十分となる。一方向当たりの観測時間に5分程度（正確には256秒、0.5秒間隔で512個のデータ取得）取られているようである。これは、この時間でレーダ観測した結

果と、流速計による流速の直接観測値との間の誤差が数cm/sと小さかったからである。

以上が基本的な海洋短波レーダによる流れの観測の原理であるが、さらに、短時間で流況観測を可能とする方法としてDBF (Digital Beam Forming) 方式がある。これは、電波送信アンテナ1本に対し、受信アンテナを複数基設置するものである。この複数基設置した受信アンテナで観測した、観測範囲の全方位から帰ってきた信号を同時に処理することにより、一度の送受信で観測を行うことができる。すなわち、観測時間が従来の手法に比べて短くすることができる。

津波観測においてはさらに短い時間での観測が必要であると考えられる。そのため、観測精度は多少落ちるものの約1分間隔 (128回の掃引, 64秒) での流速の観測技術の検討が行われている。

3. 重回帰分析を使用した吹送流の即時的除去手法

実際に東京湾において海洋短波レーダにより取得されたデータを使用することにより吹送流の影響を除外することができるかについて検討を行った。

3.1 研究対象領域とモニタリングスポット

海洋短波レーダによる津波の観測事例はないが、実測データから吹送流成分を除去する手法を検討するために、海洋短波レーダ、流速計および風速計による種々の観測データが得られる東京湾を対象とした (図-5参照)。

海洋短波レーダは、基地局が船橋、大黒埠頭、千葉の3箇所に設置され、ほぼ東京湾全体での表層の流れ (水深下45cm) を観測している。ここで、図中の黒丸 (●) は、海洋短波レーダで観測が行われている点であり、測定間隔は1.5kmで241点である。観測データから1時間間隔で東西・南北成分の流速データが解析される。其のデータは、東京湾環境情報センターによりwebを通じて一般に公開されている。

第二海堡では、流況および海上風の観測も行われている。流況について、NOWPHAS海象計によって上層・中層・下層の3箇所における流速・流向が、毎正時を中心とした10分間において0.2秒間隔で観測され、それらを平均して1時間間隔のデータとして整理されている。海上風については、関東地方整備局港湾空港部によって風速および風向が、毎正時を中心とした10分間に0.1秒間隔で観測され、流れと同様に、それらを平均して1時間間隔のデータとして整理されている。

具体的には、本研究では、レーダ観測、その比較対象

になる海象計による流況観測、および吹送流を除去するのに必要な海上風の観測が全て行われている第二海堡を対象とした。

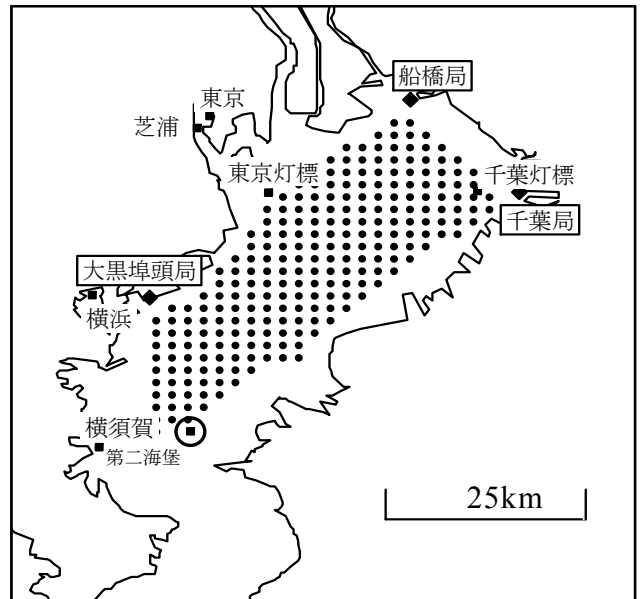


図-5 対象領域

3.2 観測データに基づいた第二海堡周辺の流れの特性

(1) 海象計による観測

第二海堡の海象計で観測された流れの特性を以下に示す。

図-6および図-7は、海象計で観測された上・中・下層の流速を東西および南北成分に分けて、1時間間隔データの時系列として示したものである。この図から、今回取り上げた観測期間において、東西および南北ともに、いずれの層においてもほぼ同じ向きかつ速さで流動していることがわかる。このように鉛直方向に一樣な流れであるので、水表面で顕著に表れる吹送流があれば、それは表層での観測データに際立って表れると考えられる。

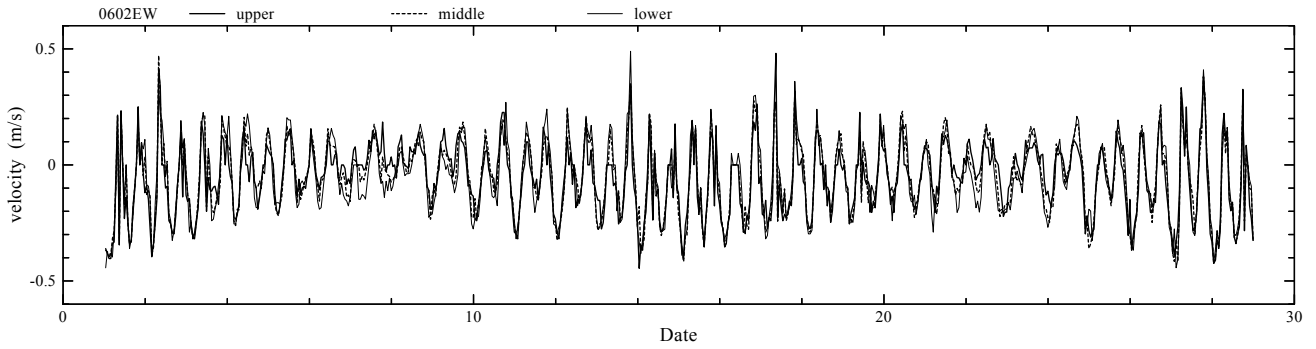


図-6 第二海堡における東西方向流速（上・中・下層）

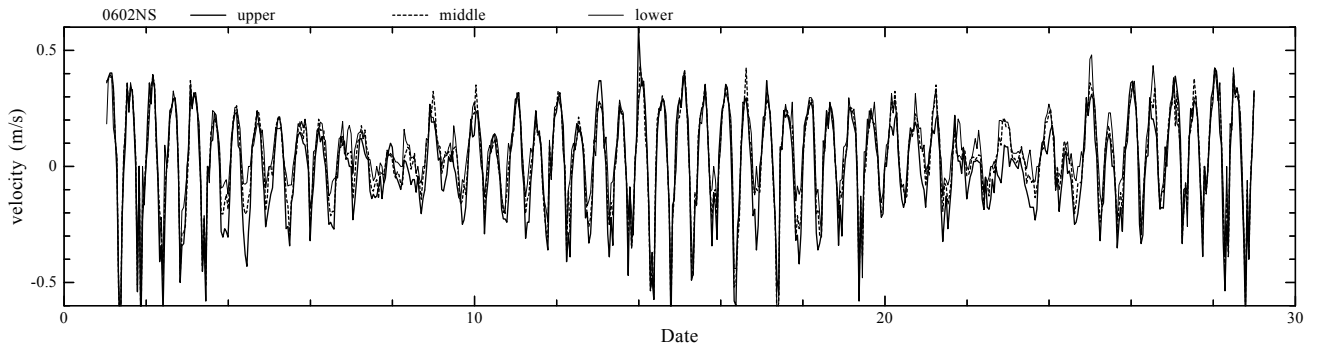


図-7 第二海堡における南北方向流速（上・中・下層）

(2) 東京湾における面的な流れの特性

実際に海洋短波レーダによって観測された流速は、図-8のように、東京湾のほぼ全域にわたる流速ベクトルデータとして示すことができる。この図は、実際に観測された流速データを1/3に間引いて表示したものである。

図-9および図-10に、第二海堡において、2006年5月に海象計により観測された上層流速（図中、点線）、および流速（○印）ならびに海洋短波レーダによる流速（実線）を東西および南北方向成分にそれぞれ分けて示した。

海洋短波レーダと海象計による流速を比較すると、東西および南北各成分ともに、定性的によく一致していることがわかる。しかし、5月5～8日に見られるように、風が強いときには両者の差異が大きくなる。これらのことは、両者の差異は吹送流の影響を示していると考えられる。

風速とレーダより得られた流速の相関を取ると、東西方向では相関係数が0.55であり、南北成分では0.48となっており無視できない大きさである。これは、風が卓越しているときの吹送流の影響を除く必要があることを示している。

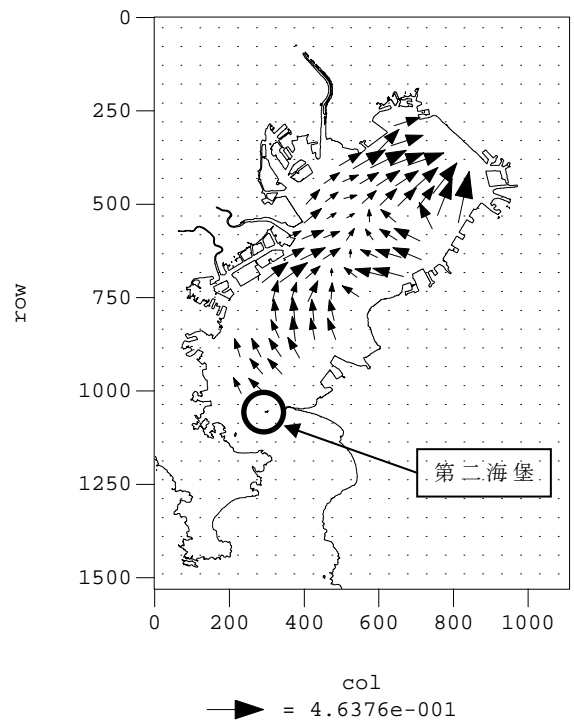


図-8 海洋短波レーダによって取得された面的な流速データ

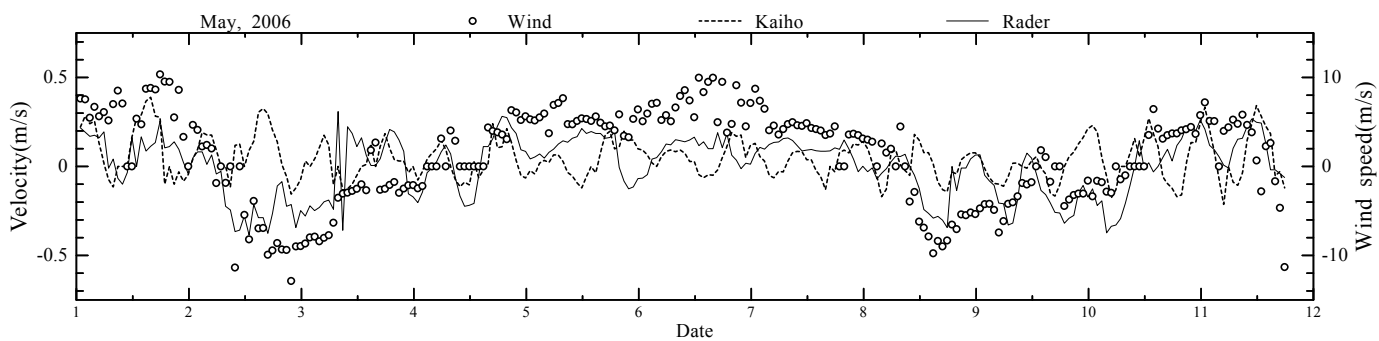


図-9 海象計と海洋短波レーダにより得られた流速の比較（東西成分）

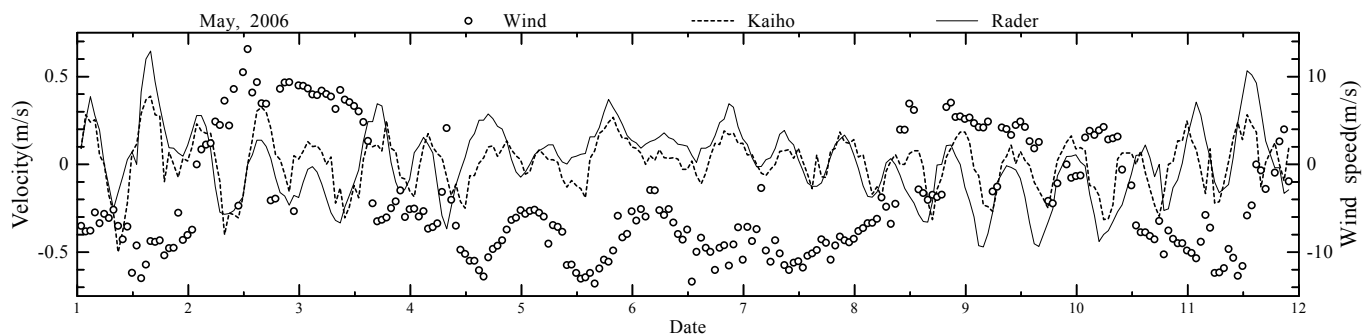


図-10 海象計と海洋短波レーダにより得られた流速の比較（南北成分）

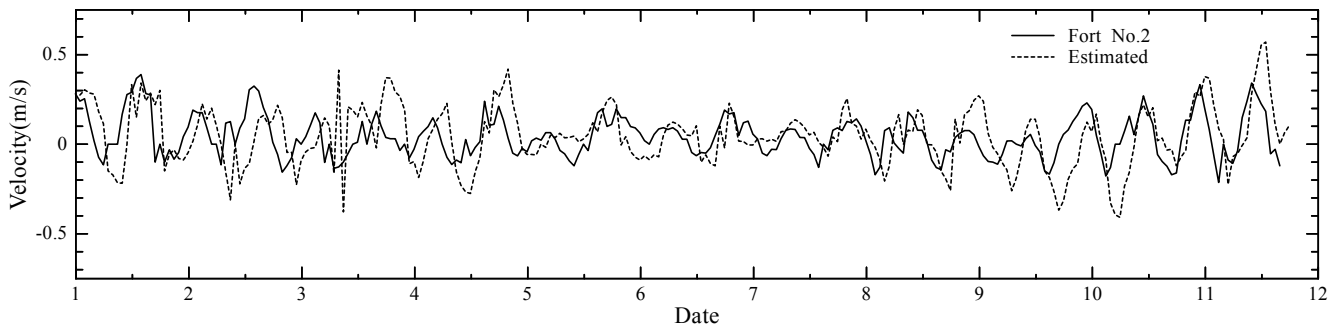


図-11 流速の推定値と海象計の比較（東西成分）

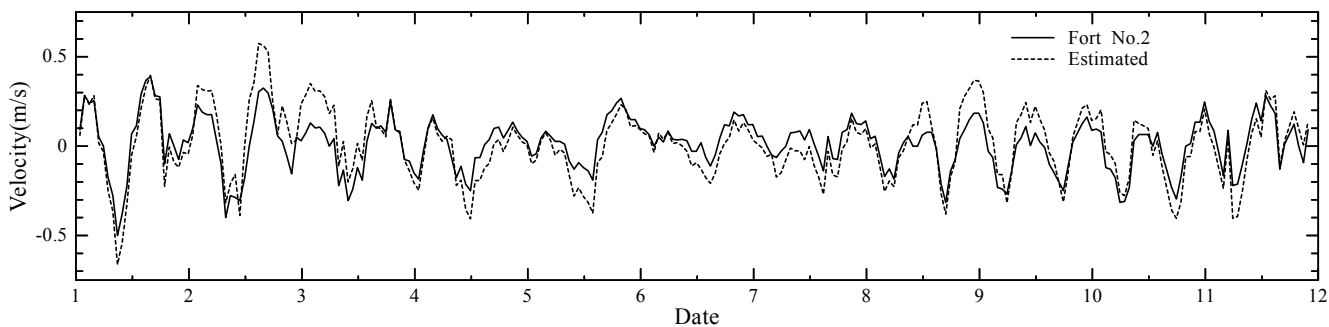


図-12 流速の推定値と海象計の比較（南北成分）

3.3 流速データからの吹送流成分の除去についての検討

本研究では、従来行われていた物理モデルを使用した吹送流成分の推定手法（例えば、犬飼ら（2001））ではなく、重回帰分析を使用した統計学的なアプローチにより吹送流成分を除去する手法について試みた。物理モデルを使用した手法においては、長期間、しかも多岐に渡る観測データの蓄積が必要であるが、吹送流の推定を行うことは可能となってきている。しかし、データ量の多さと計算時間の膨大さの面から、即時性という面からみるとこの手法は今回の検討に対しては適していないと考えられたからである。

一方、統計学的なアプローチである重回帰分析を用いることにより、風速データを使用して即時的に吹送流を推定することができる。具体的には、流速計の流速を目的変数、風とレーダの流速を説明変数とした重回帰分析によって、吹送流の影響を除く。ただし、統計学的なアプローチは、データ数によりその推定精度が左右されるため、今回の検討では、2週間分のデータを使用した。実際に適用するにあたってどの程度の長さのデータが必要であるかは今後の課題である。

図-11および図-12に、レーダによる観測流速から吹送流の影響を除いた流速の推定結果と海象計による上層流速の結果を示す。両者には定量的な一致が認められた。

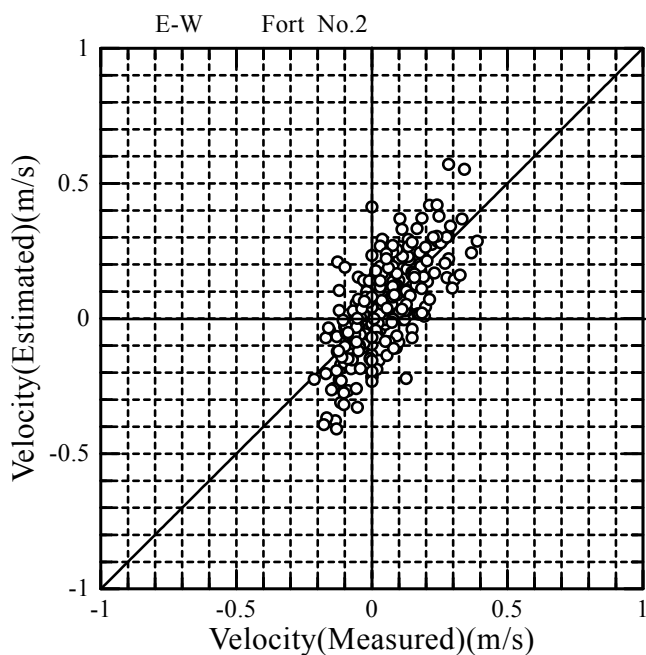


図-13 推定値と実測値の相関（東西成分）

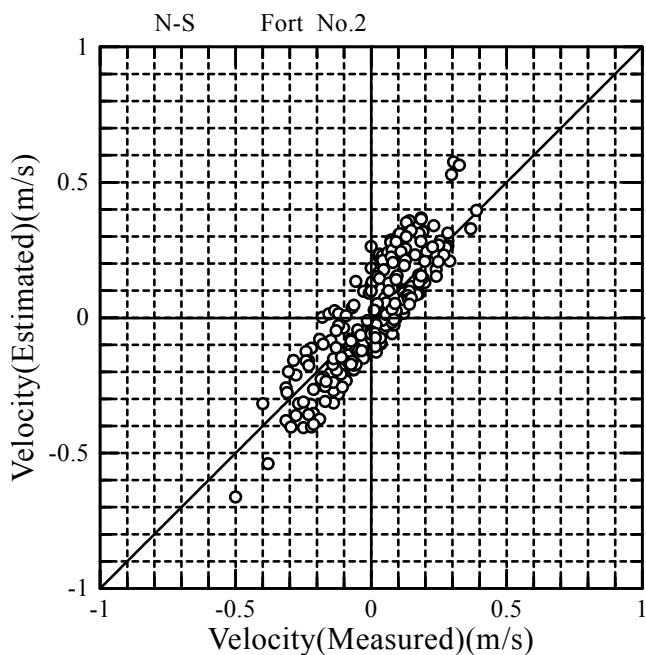


図-14 推定値と実測値の相関（南北成分）

両者の相関を、図-13および図-14に示す。高い相関を得られていることが確認できる。これを相関係数で評価すると、吹送流の影響を除くことにより、推定値と実測値の相関係数は東西成分では0.60から0.69へ、南北成分では0.77から0.86へと精度の向上が見られた。

3.4 課題

今後の課題は以下のようなものである。

- 今回の検討では、2週間分のデータを用いて回帰分析を行ったが今後どの程度まとまったデータ数が必要であるのかを検討する必要がある。
- 第二海堡において点として検討を行った場合に、風の影響を除くことが可能であった。しかし、広い領域ではもっと複雑な風の挙動が起こることが考えられる。そのため、より広範囲における面的な風データに対する検討が必要である。
- リアルタイム予測を可能とするためには、事前に回帰式を作成しておく必要がある。また、回帰式の作成に使用するデータの取得期間についてもさらに検討していく必要がある。

4. 自己完結型の吹送流推定システム

前章までの検討により、海洋短波レーダによる流速、流速計による流速、海上風のデータに対して重回帰分析を行うことにより、リアルタイムでの吹送流の除去が可能であることが示された。しかし、海域によってはこれらの流速計や風速計によるデータを取得することが困難である場合も考えられる。そこで、そういった場合においても使用可能な手法について検討した。

4.1 自己完結型の吹送流推定システムの概要

本研究により提案する自己完結型の吹送流推定システムの概要を図-15にまとめた。本システムは、海上風の推定から吹送流までの推定を海洋短波レーダから得られるデータのみにより行うことに特色がある。

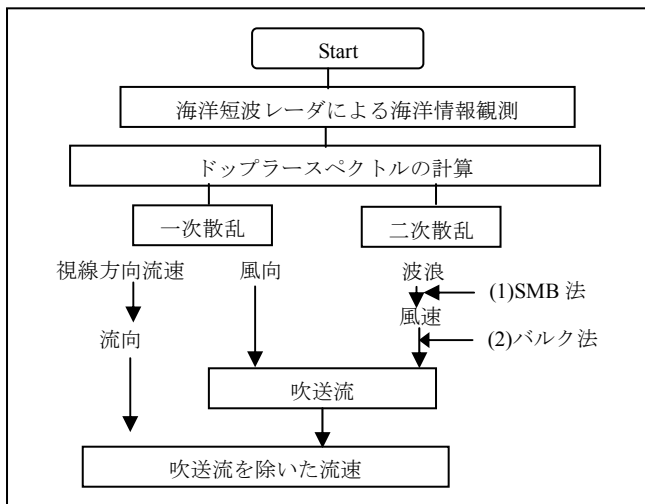


図-15 海洋短波レーダにより取得できるデータと吹送流除去システムのフロー

海洋短波レーダによって観測可能な海象情報は、流速・流向、波高・周期、風向であり、それぞれのデータ取得の関係について図-15に示している。

観測したデータから表層流速を解析する技術は既に確立し活用されている（例えば、日向（2005））。波浪についても概ね解析する技術も開発されてきている（例えば、橋本ら（2000）、児島ら（2001））。一方、風速については未だ手法が確立されていないのが現状である。しかし、Huangら（2004）らはSMB法を逆問題として扱い、間接的に海上風の風速を推定した。本研究では、この手法を採用して風速を推定することとした。その推定された風速とバルク法から吹送流の流速を推定し、海洋短波レーダによる観測データの一次散乱から推定される風向から吹

送流を推定した。

4.2 海上風データの推定について

海上風の推定にあたっては、以下に示す式（1）を使用した。（Huangら，2004）

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.26 \tanh \left[\left(\frac{1}{f_m U_{10}} \right)^{3/2} \frac{(3.5g)^{3/2}}{10^2} \right] \quad (1)$$

ここで、 H_s ：波高、 U_{10} ：海上10mの風速、 f_m ：波浪スペクトルのピーク周波数である。この式はもともとSky radarに対して提案されていたものをHFレーダで使用できるように改良したものである。

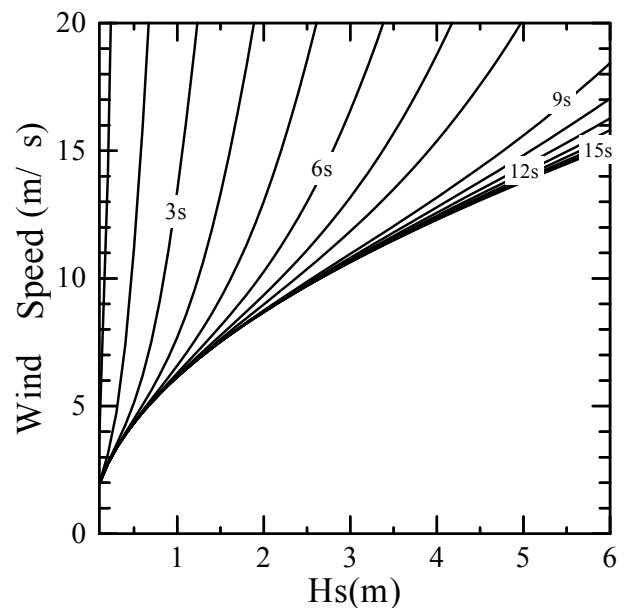


図-16 海上風の風速と波高・周期の関係

図-16には、式（1）に対して周期を1～15秒まで1秒間隔で変化させたものを実線で示している。周期が10秒程度を超えると、コンターの間隔が狭くなり、風速の推定に周期が与える影響が小さくなること分かる。また、同じ波高の場合には周期が大きくなると、推定される風速は小さくなる。周期を同じとした場合には波高が大きくなると推定される風速は大きくなる。実際の観測値では、波高が大きいものの風速の値が小さい場合もあり、図に示される様な理論値と合わない場合もある。そのため、実海域での検討が必要となる。今回は、この式の妥当性について、NOWPHASにより計測された新潟沖（マフコタワー）の波高・周期と海上風速のデータを用いて検討を行った。ここでは、波高・周期と海上風の観測が2時間ごとに行われている。

まず、新潟沖の風の特徴について整理した。図-17に、

風速・風向の度数分布を示す。新潟沖における海上風の観測は、海面より17.6mの地点で行われている。式(1)では、基準高さ10mの風速の使用を想定しているため、式(2)に示される、べき法則を使用し海上10mにおける風速への換算を行った。本文中に示されている風速の図および使用したデータは、全て、べき法則により海上10mへと修正を行ったものである。

$$U_z = U_{10} \left(\frac{Z}{10} \right)^\alpha \quad (2)$$

ここで、 U_z : 観測地点での風速 (m/s), Z : 海面からの距離 (m), α : べき指数であり、海上の値0.12を使用した。

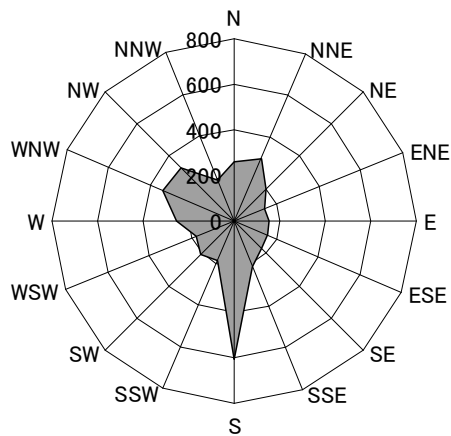
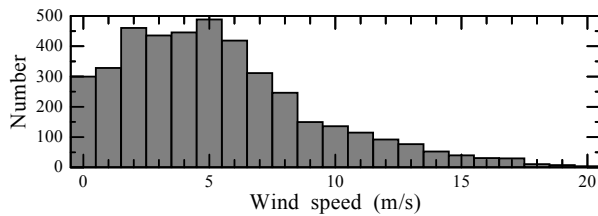


図-17 2006年の風の特徴(新潟沖)

上段: 風速(海上10m)の分布, 下段: 風向の分布

新潟沖の風速の度数分布を見ると、5m/s程度のものが一番多く、時には10m/sを越える風も観測されている。風向の度数分布を見ると南からのものが卓越しており、北側からのものについてはばらつきが見られるような分布となっている。

次に新潟沖における波浪の特性について整理した。その結果を図-18に示す。新潟沖においては、波高は余り大きくなく最大でも5m程度となっている。また、周期は4秒から7秒あたりのものが卓越していることが分かる。

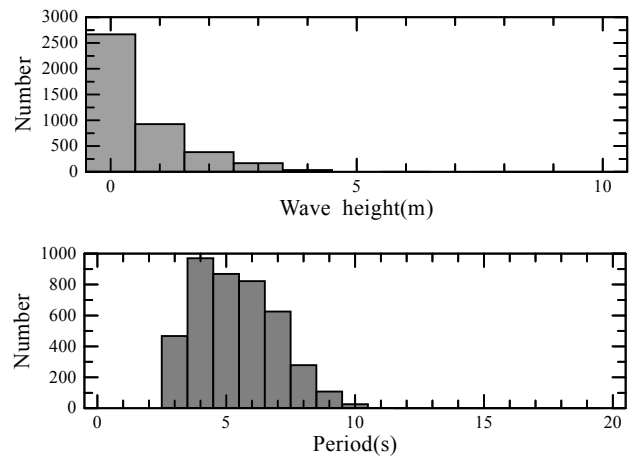


図-18 2006年の波浪の特性(新潟沖)

上段: 波高の分布, 下段: 周期の分布

上記のデータを用いて式(1)の精度について検討を行った。図-19は、波浪データから式(1)により推定した風速と実際に観測された風速を比較したものである。波の周期による影響を検討するために図中に記号で4種類の周期に分類をしている。

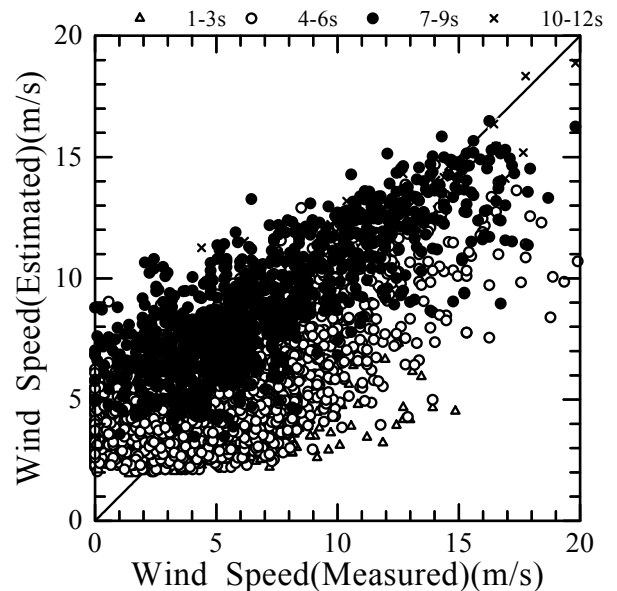


図-19 海上風の風速の観測値と推定値の関係

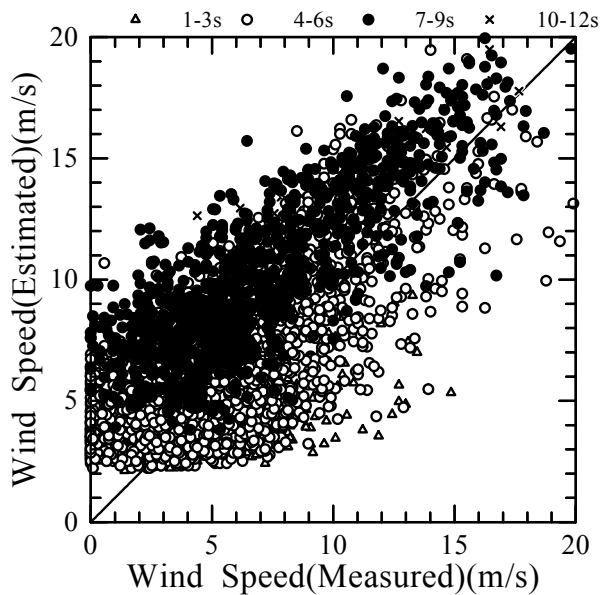


図-20 海上風の観測値と推定値の関係
(波高に20%の測定誤差を加算した場合)

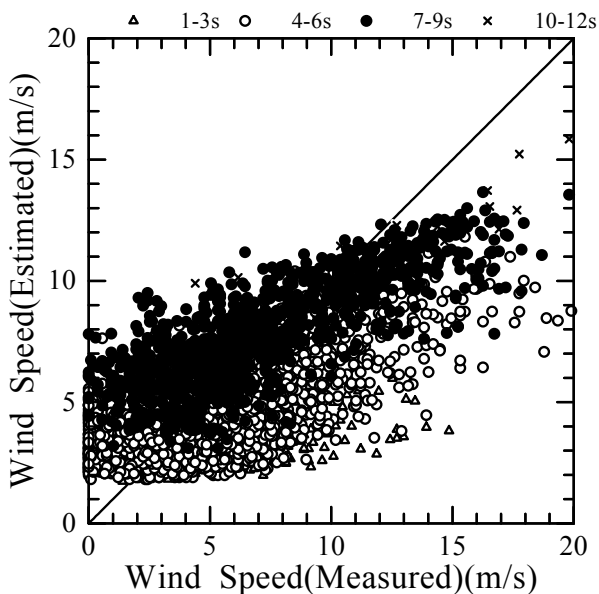


図-21 海上風の観測値と推定値の関係
(波高に20%の測定誤差を減算した場合)

図-19から、SMB法による推定値は実測値と比較して良好な結果となっている。このときの相関係数を求めると0.72である。しかし、周期別に見ると△で示される周期1-3sで推定値が小さく、7-9sと周期の長い●でやや推定値が過大となっている。

そこで、海洋短波レーダによる観測がNOWPHASの観測に対して過大(+20%)もしくは過小(-20%)であった場合について、海上風の推定にどのような影響を与えるのかを図-20と図-21にそれぞれ示した。

図-20より、計測された波高が過大であった場合には、風速の推定値も大きくなる。特に周期の大きな領域ではその差が顕著となる。反対に、図-21のように計測された波高が小さくなると、風の推定値も小さくなるが、特に、周期が長いもので風速の大きな領域での推定値が悪くなる。これは、周期が長く波高が小さいうねりの影響であると考えられる。SMB法では海上風に起因した波浪を対象とした関係を想定しているため、うねりの成分については考慮していないことから、推定の誤差が大きくなったものと考えられる。

同様に周期の観測精度についても検討を行った。先程とは逆に波高を固定し、周期に±20%の誤差が存在した場合に推定値がどのように変化するかを検討した。結果を図-22と図-23に示す。

この検討においても、周期観測の測定誤差により、本手法の適用範囲から外れ、推定値と実測値の誤差が大きくなっている。そのため、波高・周期の適用範囲・条件についても詳細な検討が必要である。

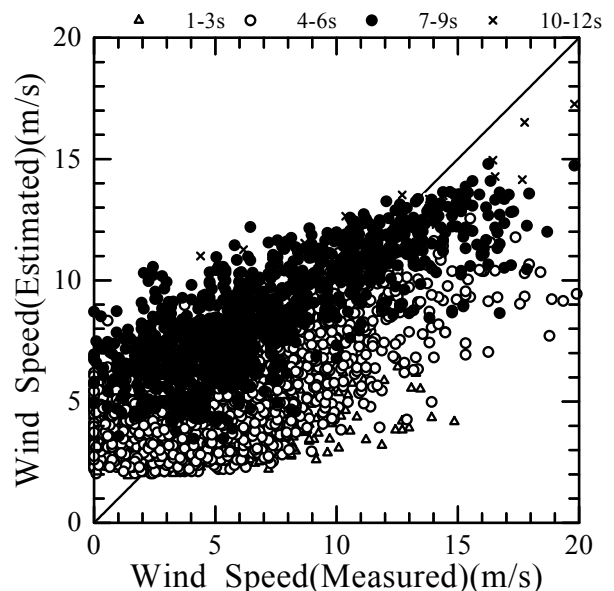


図-22 海上風の観測値と推定値の関係
(周期に20%の測定誤差を加算した場合)

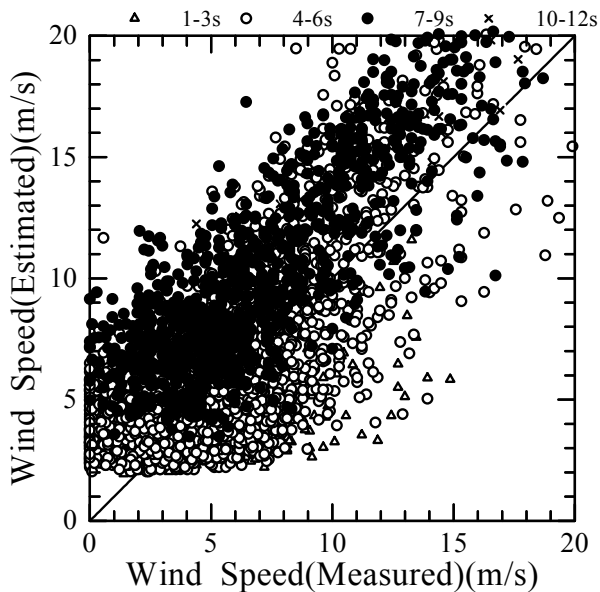


図-23 海上風の観測値と推定値の関係
(周期から20%の測定誤差を減算した場合)

4.3 バルク法を使用した吹送流の推定

まず、吹送流の推定にあたっては、実際の使用を考えた時にリアルタイムで推定を行うことが可能であるという点からバルク法を用いることとした。バルク法は簡便で、使い勝手が良いため広い分野において用いられている。しかし、そのような理由からバルク係数には様々な値が提案されている。どの値を選択するかにより吹送流の推定精度に大きな影響を与えられとされる。そのため、バルク係数の感度分析を行うことにより、バルク係数が吹送流の推定に与える影響についても検討を行った。

(1) 吹送流の推定方法

吹送流の推定にあたって、流動場が十分に発達し、流速が水深方向にほぼ一定であると仮定した。概念は図-24のようであり、使用する式は海域の状態により、式(3)、

(4)、(5)を選定する必要がある。式を選定にあたっては、馬場・山下(2004)により提案された摩擦深度による分類を使用することとした。今回は摩擦深度が十分に大きいため、領域③であるとした。そのため、計算には以下の式(5)を用いた。この手法を使用するにあたっては対象領域での深浅データが存在し、上記の分類ができることが前提となる。

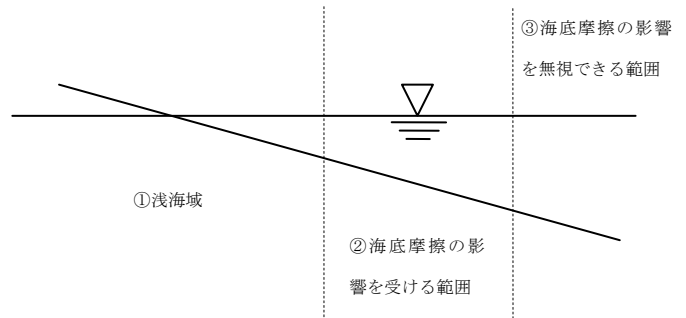


図-24 吹送流推定の際の場合分け

領域①：浅海域

$$\tau_{surface} = \tau_{bottom} \quad (3)$$

領域②：海面摩擦の影響を受ける範囲

$$fu = \frac{\tau_{surface}}{\rho h} - \frac{\tau_{bottom}}{\rho h} \quad (4)$$

領域③：海面摩擦の影響を無視できる範囲

$$fu = \frac{\tau_{surface}}{\rho h} \quad (5)$$

ここで、 $\tau_{surface}$ ：海面せん断応力 (N/m²)、 τ_{bottom} ：底面せん断応力、 h ：水深、 f ：コリオリパラメータ (10⁻⁴ 1/s)、 u ：流速(m/s)、 ρ ：海水の密度 (1025 kg/m³) である。

海面せん断応力を求めるためには、バルク係数を用いた式(6)を使用した。

$$\tau_{surface} = \rho_a C_d |U_{10}| U_{10} \quad (6)$$

ここで、 ρ_a ：空気の密度 (1.2kg/m³)、 C_d ：バルク係数である。

はじめに、式(6)により海面せん断応力を計算し、式(5)を使用することによって吹送流の推定を行った。

(2) バルク式の感度分析

表-1に示される過去の実験により求められた10ケースのバルク係数について感度分析を行った。この表-1に示された U_{10} とバルク係数との関係を示したものが図-25である。

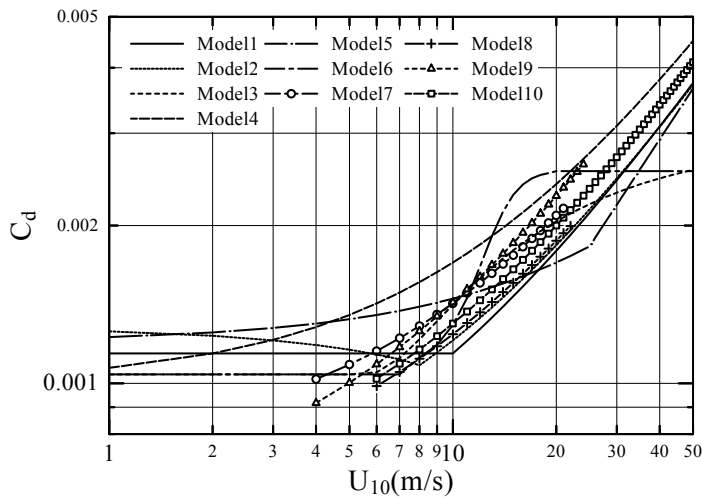


図-25 バルク係数と U_{10} の関係

今回対象とした新潟沖のマフコタワーでは海上風速の最大値が 20m/s であるので、基準風速が 0 から 20m/s のバルク係数の値を見ると、概ね 1×10^{-3} から 2×10^{-3} の範囲に分布していることが分かる。そのため、この範囲の値が吹送流の推定にどのくらいの影響を与えるのかを次に検討した。

ここでは、モデル地形として水深を 30m とし、海上風速を 10m/s と仮定してバルク係数の値を変化させ吹送流の推定をした。バルク係数が最大 (2×10^{-3}) の Model 3 と最小 (1×10^{-3}) の Model 1 を比較すると、流速の推定値には最大 4cm/s の差が生じた。そのため、バルク係数の選定にあっては注意が必要である。

(3) バルク式からの吹送流の推定

新潟沖（水深 34.5m）における吹送流の推定を、本多・光易（1980）により提案されているバルク係数を使用して行った。その結果を図-26 に示す。

図-26 の上段には波高の実測値を示した。2 段目は波浪の周期（実測値）である。3 段目は、海上風であり、実線で示した Case 1 は実測値であり、点線で示した Case 2 は本手法により推定された値である。4 段目は、推定した吹送流であり、実線（Case 1）は実測風速を用いて推定したものであり、点線（Case 2）は推定した海上風から計算したものである。

図中にハッチで示した 23 日のような強風時に注目すると波浪が大きく、精度良く海上風の推定ができています。その結果、吹送流の推定も良好なものとなった。しかし、図中にハッチで示した 29 日に見られるように、周期が長く波高が小さい、うねりの影響があると考えられるデー

タにおいては、3 段目の Case 2 の風の推定が大きすぎていたため、吹送流の推定も大きくなる結果となった。

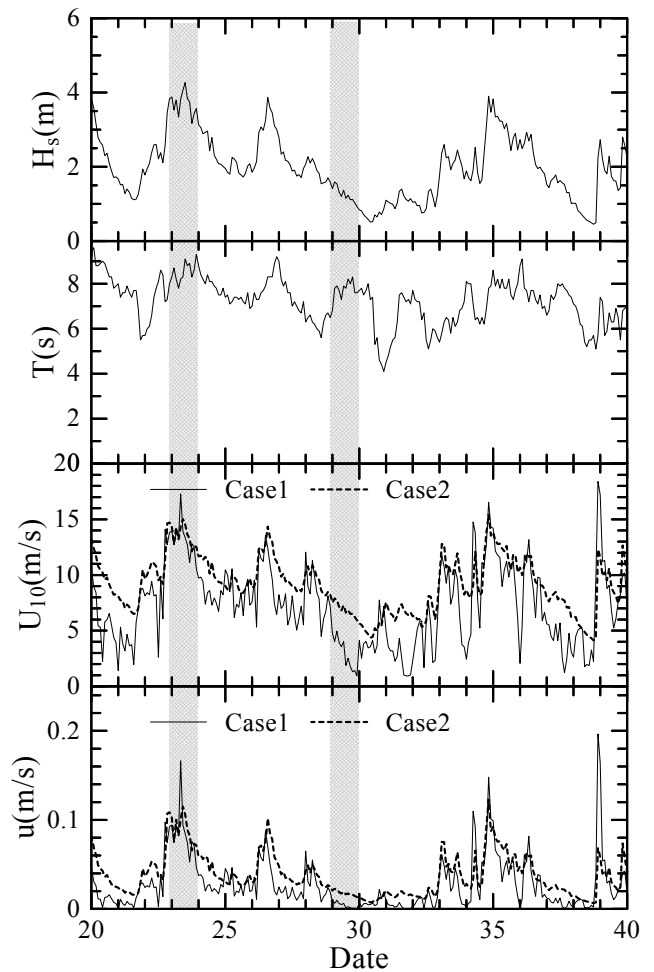


図-26 バルク式より求めた吹送流と波浪、風速データ

表-1 風速とバルク係数の関係

	提案者	風速条件(m/s)	バルク係数 (C_d)
Model 1	Large and Pond (1982)	$U_{10} < 10$	1.14×10^{-3}
		$U_{10} \geq 10$	$4.9 \times 10^{-4} + 6.5 \times 10^{-7} U_{10}$
Model 2	本多・光易 (1980)	$U_{10} < 8$	$(1 - 1.89 \times 10^{-4} U_{10}) \times 1.28 \times 10^{-3}$
		$U_{10} \geq 8$	$(1 + 1.078 \times 10^{-3} U_{10}) \times 5.81 \times 10^{-4}$
Model 3	VanDorn (1953)	$U_{10} < 5.6$	1.04×10^{-3}
		$U_{10} \geq 5.6$	$1.04 \times 10^{-3} + 1.92 \times (1 - 5.6/U_{10})^2$
Model 4	Decon and Webb (1962)		$(1 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-3}$
Model 5	Kondo (1975)	$8 \leq U_{10} < 25$	$(1.2 + 0.025 U_{10}) \times 10^{-3}$
		$25 \leq U_{10} < 50$	$7.3 \times 10^{-5} U_{10}$
Model 6	Amorocho and DeVries (1980)	$0 < U_{10} < 7$	1.04×10^{-3}
		$7 \leq U_{10} \leq 20$	$1.5 \times 10^{-3} \left[1 + \exp\left(-\frac{U_{10} - 12.5}{1.56}\right) \right]^{-1} + 1.04 \times 10^{-3}$
		$20 < U_{10} < 30$	2.54×10^{-3}
Model 7	Garratt (1977)	$3 < U_{10} < 21$	$0.75 \times 10^{-3} + 0.067 \times 10^{-3} \times U_{10}$
Model 8	Smith (1992)	$6 < U_{10} < 22$	$0.61 \times 10^{-3} + 0.063 \times 10^{-3} \times U_{10}$
Model 9	Geernaert (1987)	$4 < U_{10} < 24$	$0.577 \times 10^{-3} + 0.085 \times 10^{-3} \times U_{10}$
Model 10	Yelland and Taylor (1994)	$6 < U_{10}$	$0.6 \times 10^{-3} + 0.07 \times 10^{-3} \times U_{10}$

4.4 課題

SMB法を使用して風速を逆算するため、うねりを含むような状況における解析精度に課題があることが明らかとなった。

また、バルク式を使って海上風速から吹送流速を推定する際のバルク係数の設定法が重要である。ただし、新潟沖では、本多・光易によるバルク係数を用いることにより、強風時の吹送流即ち精度良く推定できた。しかし、弱風時の推定が課題である。

5. おわりに

本研究では海洋短波レーダによる津波観測の可能性について検討を行った。その結果、海洋短波レーダによる観測流速と流速計により観測された流速、海上風のデータから重回帰式を作成することにより吹送流の成分を除去できることを示した。また、流速計による流速、海上風のデータが得られない、観測が困難な海域においても、海洋短波レーダから取得できる波浪データを使用して、SMB法により海上風を推定した。さらに、海上風とバルク式を用いる事によって、吹送流の推定が可能であることを示した。

今後は、今回検討した二つのどちらの手法においても、津波観測を目的とした観測インターバルの短い観測を現地で計測し、手法の検証が必要になる。吹送流・津波の推定を行うことが可能であれば、環境・防災の広い領域に渡って有効に利用することが可能である。そのため、

リアルタイムでの吹送流の推定は、様々な分野に応用が可能であると考えられる。

(2009年3月6日受付)

謝辞

本研究を行うに当たって、国土技術政策総合研究所、沿岸海洋研究部、古川恵太海洋環境研究室長および日向博文沿岸域システム研究室長から海洋短波レーダの流速データを、当研究所・海象情報研究チームからはNOWPHASの海上風、波浪などの貴重なデータを提供して頂いた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 泉宮尊司・中島俊秋 (2006) : 時間平均された海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.246-250.
- 泉宮尊司・今井達也 (2005) : 海洋レーダによる海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.246-250.
- 犬飼直之・早川典生・福嶋祐介・Sheng, Peter (2001) : 直線海岸付近の吹送流による水位変動についての研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.391-395.
- 気象庁 : <<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>> (2009/02/2 アクセス)
- 合田良実 (1972) : 海岸・港湾, 彰国社, 321 p.

- 国土交通省 九州地方整備局 熊本港湾・空港整備事務所：有明・八代海 環境情報システム <http://www.ariake-yatsushiro-system.jp/ay_kankyo/index.html> (2008年8月1日アクセス)
- 国土交通省中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所：伊勢湾環境データベース <<http://www.isewan-db.go.jp/radar/index.asp>> (2008年8月1日アクセス)
- 児島正一郎・橋本典明・徳田正幸 (2001)：海洋短波レーダによる波浪観測に関する基礎的研究－受信信号中のノイズの影響評価－，海岸工学論文集，第48巻，pp.1446-1450.
- 坂井伸一・平口博丸・松山昌史・坪野考樹・森 信人・杉山陽一・藤井智史・佐藤健治・松岡健志 (2002)：短時間観測が可能なデジタルビームフォーミング方式による沿岸海洋レーダの開発，海岸工学論文集，第49巻，pp.1511-1515.
- 清水勝義・永井紀彦・李在炯・泉裕明・岩崎峯夫・藤田孝(2006)：沖合水面変動記録を用いた津波成分即時抽出法に関する研究，海洋開発論文集，第22巻，pp.523-528.
- 東京湾環境情報センター：気象海象リアルタイム情報 <<http://www.tbeic.go.jp/index2.html>> (2007年4月9日アクセス)
- 土木学会 (2001)：陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測，213p.
- 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信 (2003)：GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測，海岸工学論文集，第50巻，pp.1411-1415.
- 橋本典明・児島正一郎・R, Wyatt Lucy (2000)：海洋短波レーダーにおける方向スペクトルの推定法に関する検討，海岸工学論文集，第47巻，pp.1331-1335.
- 馬場康之・山下隆男 (2004)：広域海浜流（沿岸方向流速）の岸沖分布に関する考察，京都大学防災研究所年報，第47号B.
- 本多忠夫・光易 恒 (1980)：水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究，海岸工学論文集，第27巻，pp.90-93.
- 渡辺一也・富田孝史 (2007)：海洋短波レーダによる津波観測の実現に向けた吹送流成分の除去手法の検討，海洋開発論文集，第23巻，pp.1129-1134.
- Amoroch, j. and J. J. De Vries (1980)：J. Geophys.: A new evaluation of the wind stress coefficient over water surfaces, Res., Vol 85, No.C1, pp. 433-442.
- Barrick, D.E(1979)：A coastal radar system for tsunami warning, Remote Sensing of Environ, Vol. 8, pp. 353-358, 1979.
- Barrick, D.E. (1972)：First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea, IEEETrans. Antennas Propag., AP-20, pp. 2-10.
- Crombie, D.D. (1955)：Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s, Nature, Vol.175, pp.681-682.
- Decon, E. L. and Webb (1962)：The Sea(ed. M. N. Hill),Vol. 1, pp. 43-87, New York; Interscience.
- Garratt, J. R. (1977)：Review of drag coefficients over oceans and continents, Mon. Weather Rev., 105, pp. 915-929.
- Geernaert, G. L., S. E. Larssen, J. Hansen (1987)：Measurements of the wind-stress, Heat flux, and turbulence intensity during storm conditions over the North Sea, J. Geophys. Res., 98, pp. 16571-16582.
- Huang, W, Gill, E. Wu, S. , Wen B., Yang, Z. and Hou. J.(2004)：Measuring Surface Wind Direction by Monostatic HF ground-Wave Radar at the Eastern China Sea, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.29, No.4, pp.1032-1037, 2004.
- Kondo, J. (1975)：Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, Boundary-Layer Meteorol., 9, pp. 91-112.
- Large, W. G., and S. Pond. (1982): Sensible and latent heat flux measurements over the ocean., *J. Phys. Oceanogr.*, 12, 464-482.
- Lipa, B. et al.(2006)：HF Radar Detection of Tsunamis, Journal of Oceanography, Vol. 62, pp.705-716.
- Lipa, B. et al.(2005)：SeaSonde Detection of Tsunami Waves, CODAR report.
- Smith, S. D. (1992)：Sea surface wind stress and drag coefficients, the HEXOS results, Boundary-Layer Meteorology 60, pp109-142.
- Tomita, T., Tatsumi, D. and Takahashi, S.(2006): Improvement of Real-time Tsunami Prediction Based on Earthquake Information and Spatial Distribution of Water Surface Elevation, Proc. Techno Ocean, (CD-ROM)
- Van Dorn, W.G. (1953): Wind Stress on an Artificial Pond, J.Mar. Res., 12, pp. 249-276.
- Yelland, M. J. et al. (1994): The use of the inertial dissipation technique for shipboard wind stress determination. J. Atmos. Oceanic Technology, 11, pp. 1093-1108.

記号表

C_d : バルク係数
 f : コリオリパラメータ (10^4 1/s)
 f_m : 波浪スペクトルのピーク周波数
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 h : 水深
 H_S : 波高
 L : 波長 (m)
 u : 流速(m/s)
 U_{10} : 海上 10m の風速
 U_Z : 観測地点での風速 (m/s)
 Z : 海面からの距離 (m)
 α : べき指数 (0.12)
 ρ : 海水の密度 (1025 kg/m^3)
 ρ_a : 空気の密度 (1.2 kg/m^3)
 τ_{bottom} : 底面せん断応力 (N/m^2)
 $\tau_{surface}$: 海面せん断応力 (N/m^2)

付録 海上風推定手法にうねりが及ぼす影響 についての検討

実測値と推定値が合わない原因について検討するために、流れの分類を行なった。海域の流れの分類にあたっては、合田 (1972) により示されている波形勾配 (H/L) による風波とうねりの分類指標使用することとした。波形勾配の計算にあたって使用した H は観測値であるが、 L は直接観測していないため、周期の観測値と式 (1) に逐次代入法を用いることによって計算した。

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi}{L} h \quad (1)$$

ここで、 L : 波長 (m)、 h : 水深 (m)、 g : 重力加速度 (m/s^2) である。水深は実測値を用い、 $h=34.5\text{m}$ である。波形勾配による流れの分類は、波形勾配が 0.02 以下のものをうねりとし、 0.03 以上のものを風波による流れであるとした。ここで、推定結果と実測値の関係を図-1に示す。図-1に、記号 (○) で示されるものが、波形勾配が 0.03 以上で風波によるものと判断されたケースである。(+) で示されるものが、波形勾配が 0.02 以下であり「うねり」と判別されたものである。両者の間に位置する値は (▲) で示している。

ここで、「うねり」と判断された成分に注目すると海上風が弱い時に多く出現し、推定値と観測値の差が大きくなっていることが分かる。しかし、それ以外のケースにおいては、良好な推定結果となっている。これは、海上

風の推定に用いているSMB法が風波によるものを対象としたものであり、「うねり」時を考慮していないモデルであるためである。既往の研究では、全てのデータを状態により区別することなく同じ様に扱っていたが、波形勾配による流れの分類を行なった結果、SMB法において推定値が合わない原因が「うねり」であることが明らかとなった。

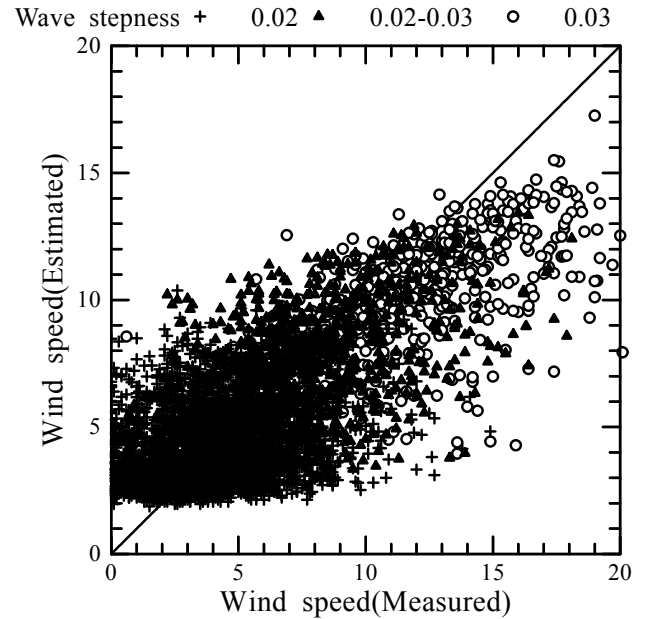


図-1 実測値と推定値の比較 (波形勾配による分類)

港湾空港技術研究所資料 No.1197

2009・6

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬 3 丁目 1 番 1 号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。