小樽湾におけるドップラーレーダーによる海面状況の観測

石田廣史*・林 美鶴*・脇川祐樹**・上田 博***

The Sea State Observation by the Doppler Radar in Otaru Bay, Hokkaido

Hiroshi ISHIDA, Mitsuru HAYASHI,
Yuhki WAKIGAWA and Hiroshi UYEDA

Abstract

The observation was made to examine the relationship between the sea state and radar sea echo signals and to obtain information and the characteristics of the sea state from the signals by the doppler radar in Otaru Bay, Hokkaido for 49 days in total from the 14th of December, 1991 to the 31st of January, 1992. Here, the doppler direction is defined as a direction in which the maximum doppler shift of radar sea echo signals occurs, and the doppler speed of the signals is also done as an average doppler speed on that doppler direction.

It was found out that the doppler direction and speed were not related with the direction and speed of winds and currents, but related strongly and agreed so well with the propagating direction and phase speed of waves, respectively. The doppler speed is proportional to the phase speed of the significant waves estimated from the observed wave period with the 1/10 to 1/3 slope. It is concluded that the doppler shift of the radar sea echo signals is mainly caused by the wave propagation even though it might be slightly effected by winds and currents.

1. はじめに

波浪などの海面状況に関する情報は航海の安全や運航効率の向上、そして防災などにとって必要不可欠なものと考えられる。従来より、海面状況に関する情報の内、波浪に関する情報収集システムについてはブイや船舶用に水圧や超音波、そして電磁波などを利用した様々な波浪計が多く開発されてきた。また、船用レーダーの海面反射信号のPPI画像のパターン解析から、卓越波の波長や波向方位（パターン方位）などの情報を得る船用レーダー波浪観測システム^{(1),(2),(3),(4)}なども開発されてきた。

本報告では、北海道小樽湾で1991年末から1992年にかけて合計49日間にわたって実施したドップラーレーダーによる海面状況の観測データを基に、ドッ

プラーレーダーの海面反射信号と海面状況の関係について解析し、それらの特性について報告する。このようなドップラーレーダーによる海面反射信号と海面状況の相互関係や、特性に関する解析的研究はこれまであまり他では見受けられず、両者の相互関係や特性を知る上で重要であると考えられる。

2. 観測概要

2.1 観測地点と期間

ドップラーレーダー観測は図1に示すように、1991年12月14日から1992年1月31日の合計49日間にわたり北海道小樽市石狩湾で行った。レーダー観測は基本的には3時間毎に実施した。ドップラーレーダーは図1の中心地点、小樽市石狩湾新港の小樽開発建設部小樽港湾建設事務所の屋上に設置し、レー

* 正会員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 非会員 第4管区海上保安本部 (〒455-8528 名古屋市港区入船2丁目3-12)

***非会員 北海道大学大学院理学研究科 (〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目)

図1 ドップラーレーダー観測地点

レーダーアンテナ高度は海面上約28mであった。レーダー観測地点の沖合5km、水深25mの所には超音波式の流向流速計と波高波向計（圧力式と併用）が設置されており、観測海域での海潮流の流向と流速、波高と波向方位が1時間毎に観測された。

波高計は、超音波で海底から海面までの距離を計測する超音波式波高計と、海面の上下動に伴う水位変化を海底で水圧変化として計測する水圧式波高計の、両方の波高計を備えた複合型波高計である。碎波などの影響が大きくて超音波式波高計では波高計測が不可能な場合には、水圧式波高計で計測される。波向方位は流向流速計と波高計を用いて、波の水粒子運動から波向方位を求める方法を用いている。そのため、波高が低い場合やうねりと風浪が混在している場合には、水粒子運動はそれらの影響を大きく受けて複雑な運動となるため、正確な波向方位が得られない^{(5),(6)}。

2.2 ドップラーレーダー

表1に観測に用いたドップラーレーダーの仕様概

表1 ドップラーレーダーの仕様概要

項目	仕様	
観測モード	(1)	(2)
周波数	9410 MHz	
出力	40 kw	
アンテナ直径	1.2 m	
アンテナ回転数	1 rpm	
アンテナ高度	28 m (平均海面上)	
ビーム幅	2 deg	
パルス繰り返し周波数	(1) 1500 pps	(2) 750 pps
パルス幅	(1) 0.4 μ s	(2) 0.8 μ s
最大レンジ	(1) 60 km	(2) 30 km

表中の(1)はドップラーモード、(2)は直交2偏波モードを示す。

要を示す。ドップラーレーダーは船用レーダーにドップラーシフトを得るための回路を付加して改良した3cm波レーダーで、観測モードとしてはドップラーモードと直交2偏波モードの2モードを持っている。海面状況の観測にはこのドップラーモードを用い、観測距離レンジは60km、レーダーパルス幅は0.4 μ sで観測を行った。レーダー反射波のドップラーシフトを得るため、回転数は通常の船用レーダーのもの(20~30rpm程度)よりかなり遅く1rpmである。

ドップラーレーダーのシステム概要図を図2に示す。レーダー電波はアンテナから発信されると共にコヒーレント回路に分配されて保存される。レーダー反射波として受信される海面反射信号は、コヒーレント回路で保存されていた発信信号と位相検波器で混合され、ドップラー信号の位相が得られる。その位相はドップラー処理装置でパルスペア方式によって処理され、レーダービーム方向のドップ

図2 ドップラーレーダーのシステム概要

ラー速度とその分散が得られて観測データとして記録される。

ドップラーレーダーの観測データとしては観測方位1度毎、距離250m毎の62.5m区間のドップラー速度の平均と分散が記録される。本解析では、ドップラーレーダーの海面反射信号強度が十分に強い観測距離が2 kmから10 kmの区間の海面反射信号を解析データとした。本観測で用いたドップラーレーダー装置とドップラー信号処理の方法についての詳細は、それぞれ上田^{(7),(8)}と青柳⁽⁹⁾によって報告されている。

3. 解析結果

3.1 観測地点の観測データ

先ず観測期間中の解析可能なケースを調べるため、毎09時の観測地点の各種観測値（以下、観測地点風向・風速・波高・波向方位・波周期とする。）と気象庁発行の沿岸波浪概況図（以下、波浪図とする。）から得た小樽湾での各種解析値（以下、波浪図風向・風速・波高・波向方位・波周期とする。）との比較を基に、観測地点での観測値の精度や有効性などを調査した。

図3に観測地点風向と波浪図風向の関係を示す。図からは両風向が3方位以上異なっている場合が多く見受けられた。このような場合は風速が5 m/s以下と風が弱かった場合に多く見受けられた。このように弱風時には観測地点風向は波浪図風向と大きな差を生じる可能性があることに注意する必要がある。

図4に観測地点風速と波浪図風速の関係を示す。観測地点風速の方が波浪図風速よりも幾分高い傾向を示した。両風速がかなり異なっていた場合は、風向にもかなり差が生じていた。又、一部には風向は一致していたが風速にかなりの差が見られた場合もあった。風の観測データは観測日原簿に基づいたものであり、観測日原簿には毎時間の観測記録が記載されている。この観測日原簿によると、この場合は風が1時間で大きく変化した時であった。

図5に観測地点波向方位と波浪図波向方位の関係を示す。図から両波向方位が3方位以上異なった場合がかなり見受けられ、その多くは観測地点波向方位が北東方向で、波浪図波向方位が北～西～南方向の場合であった。これらのように波向方位が大きく異なった場合は、総じて波高が低かった場合に生じている。特に波高が低い時で波向方位とは異なった方向から風が吹く場合には、観測地点波向方位の精度や信頼性は低いと考えられる。

図3 観測地点風向と波浪図風向

図4 観測地点風速と波浪図風速

図5 観測地点波向方位と波浪図波向方位

図6に観測地点波高と波浪図波高の関係を示す。波浪図波高の方が観測地点波高より少し高い傾向を示すが、1 m以内で比較的よく一致する。波高に1 m以上の差が生じた場合は全て波浪図波高の方が観測

図6 観測地点波高と波浪図波高

図7 観測地点波周期と波浪図波周期

地点波高より高い値を示した。

図7に観測地点波周期と波浪図波周期の関係を示す。波高と同様に、波浪図波周期は観測地点波周期よりも少し長い傾向を示す。波周期に2秒以上の差が生じたのは、1例を除いて波浪図波周期が観測地点波周期より長い周期を示した。

以上のように波高が1m以下で、特に波向方位と風向が一致しない場合や風が急変していたような場合、観測地点の観測波向方位の精度や信頼性は低いと考えられ、解析データとして用いるには疑問が残る。従って、このような場合の観測データは本解析のデータベースからは除外した。又、波浪図波向方位・波高・波周期は観測地点でのそれぞれの観測値よりも幾分大きい値を示す傾向を持つことも判った。これらの観測結果の比較検討を基に、ドップラーレーダーの海面反射信号強度が十分強く、風も比較的強くて(風速約5~11m/s)波も比較的高く(波高約1~3.4m)、そして風や波などが急変していない

ような観測状況を観測データの中から31ケースを選出し、ここでの解析対象のデータベースとした。

3.2 海面反射信号のドップラー特性

ドップラーレーダーの観測データは方位1度毎、距離250m毎の反射信号のドップラー速度である。各観測方位のドップラー速度は、観測距離2kmから10kmの区間で得られた250m毎の32個のドップラー速度の平均値とした。本解析では、各観測方位のドップラー速度の中で、最大のドップラー速度を得た観測方位を「ドップラー方位」と定義する。ドップラー方位は10度単位で求めた。又、そのドップラー方位のドップラー速度を単に「ドップラー速度」と定義する。

レーダー海面反射信号のドップラーシフトは、海面状況の種々の要因によって生じている。その物理的要因として考えられるものとして、(1)波飛沫の風による飛散、(2)海潮流、(3)波の伝搬などが挙げられる。まず波飛沫の影響について調査した。風と波は相互に密接に関係し、風向と波が伝搬してくる方向(波向方位)とはかなり良く一致していることが多い。そのため、解析データベースの中から風向とドップラーレーダー観測によって求めたドップラー方位を比較したところ、両者が大きく異なる2ケースが見出された。

表2にその2ケース、1月20日と24日の風とドップラーレーダーの観測値を示す。20日は風は2.9m/sと高くなく波飛沫はあまりなかったかもしれないが、24日は風速は10m/sと高く多くの波飛沫が生じていたと考えられる。両日とも、ドップラー方位はともに320度であったが、両日の風向はそれぞれSE(225度)とWSW(247.5度)でドップラー方位とは約80~100度も大きく異なる。波飛沫は風によって風下方向に飛散されるはずなので、ドップラー方位と同じような方位になるはずであるが大きく異なる。従って、レーダーの海面反射信号に波飛沫の飛散が大きく影響し、その影響がドップラーシフトを生じさせる主な要因になったとは考え難い。

表2 観測地点風向・風速とドップラー方位・速度

観測日時	観測地点		ドップラーレーダー観測	
	風向	風速(m/s)	方位(度)	速度(m/s)
1月20日09時	SE	2.9	320	1.9
1月24日03時	WSW	10.0	320	3.0

次に海潮流の影響について調査する。図8と9に観測地点での海潮流の流向及び流速とドップラー方位及び速度の関係を示す。この図の海潮流の流向は、

図8 ドップラー方位と観測地点流向

図10 ドップラー方位と観測地点波向方位

図9 ドップラー速度と観測地点流速

ドップラー方位と比較するため、通常の流向の「流れて行く方向」を示しているのではなく、「流れて来る方向」を示している。ドップラー方位と速度はそれぞれ280～360度、1.9～3.4 m/sの範囲の値を取っ

ているが、観測地点での海潮流の流向と流速はそれぞれ200～230度、0.7～1.2 m/sとほぼ一定値を示し、両者の間には強い相関は見受けられない。レーダーの海面反射信号には幾分か海潮流の影響は含まれている可能性はあるが、レーダーの海面反射信号に海潮流が大きく影響し、その影響がドップラーシフトを生じさせる主要因になったとは考え難い。

最後にレーダーの海面反射信号のドップラーシフトと波との関係について調査した。観測地点波向方位とドップラー方位の関係を図10に示す。ドップラー方位は観測地点波向方位と30度以内でよく一致している。従って、ドップラー方位は観測地点波向方位と強い相関を持ち、海面反射信号のドップラーシフトは波の伝搬方向が強く影響すると考えられる。又、図11に観測地点波周期から推定した有義波の位相速度とドップラー速度との関係を示す。両者の間には相関係数が約0.92と高い相関が認められるが、近似線の傾きは約1/10で切片が1.8 m/sと、緩や

図11 ドップラー速度と観測地点における推定有義波位相速度
図中の直線は傾き0.1、切片1.8の近似線。

かな傾きを持った近似線となる。近似線がゼロ点を通るとした時の傾きは約1/3である。このように、ドップラー速度はドップラーシフトを生じさせる要因の中では推定有義波の位相速度と良い比例関係を示し、海面反射信号のドップラーシフトは波の伝搬速度が大きく影響すると考えられる。

レーダー海面反射信号のドップラーシフトを生じさせる要因としては、波の伝搬と同様に波飛沫や海潮流などの影響も考えられるが、以上の解析からは、レーダー海面反射信号のドップラーシフトは、波飛沫や海潮流の影響よりも波の伝搬の影響をより大きく受けると考えられる。ドップラー速度と波の位相速度との関係で両者の近似線の傾きがかなり緩やかなのは、解析データ数、風速や波浪の範囲に限られていることもあるが、波飛沫や海潮流などの影響が、弱くではあるがある程度影響していることが一因であるとも考えられる。しかし、これらの関係をより明らかにするには、今後、より多くの観測データを蓄積し、それらの解析を必要とする。

4. 結 果

波浪などの海面状況に関する情報は航海の安全や運航効率の向上、そして防災などにとって必要不可欠なものと考えられる。ここでは、1991年12月14日から1992年1月31日の合計49日間、北海道小樽湾で実施したドップラーレーダーによる海面状況の観測データを基に、海面状況が解析対象になりうる31ケースを選出し、それらの観測データを基にレーダーの海面反射信号と海面状況の相互関係や特性について解析を行った。

ドップラーレーダー観測で得たドップラー方位や速度は、ドップラーシフトを生じさせる可能性のある波飛沫や海潮流とは強い相関を示さなかった。一方、ドップラー方位は波向方位と強い相関を示しほぼ一致した。又、ドップラー速度は観測周期から推定した有義波の位相速度と強い相関を示し、1/10～1/3程度の比例係数で比例した。このように、波飛沫や海潮流はレーダーの海面反射信号のドップラーシフトに弱くではあるが影響するであろうが、波の伝搬がレーダーの海面反射信号のドップラーシフトを生じさせるのに強く影響していることが判った。

参 考 文 献

- (1) 石田廣史・井上篤次郎・林 美鶴・細田龍介：船用レーダーによる波浪観測と解析—I，一陸

上観測点における実験一，日本航海学会論文集，第90号，23-31，1994。

- (2) Ishida, H., T. Inoue, M. Hayashi, S. Shiotani, R. Hosoda and Y. Kunitake: Wave Observation Aparatus by Marine Radar and Evaluation of its Analytical Results, TECHNO-OCEAN '94 Internatl. Symp., Proc. vol.1, 469-474, 1994.
- (3) 石田廣史・井上篤次郎・塩谷茂明・市川義文・細田龍介：船用レーダーによる波浪観測—II，一実船観測—，日本航海学会論文集，第96号，47-52，1997。
- (4) Ishida, H., T. Inoue, S. Shiotani, Y. Ichikawa and R. Hosoda: Marine Radar Wave Observation System, J. of Japan Institute of Navigation, Commemorative Issue of 50th Anniversary, 31-39, 1998.
- (5) 株式会社カイジョー：複合型超音波式波高計 USW-150カタログ。
- (6) 株式会社カイジョー：超音波流速計RC-500カタログ。
- (7) 上田 博・竹本明生・菊地勝弘・尾崎尚則：都市の豪雪災害の予測と軽減・防除に関する研究，文部省科学研究費重点領域研究「自然災害の予知と防災力」研究成果，pp609，1994。
- (8) 上田 博：風を見る，電子通信学会誌，vol.69，907-911，1986。
- (9) 青柳二郎：ドップラー信号処理とレーダー装置，気象研究所技術報告，第19号，7-23，1986。

質 疑 応 答

河合雅司(富山商船高等専門学校)：図2において有義波位相速度が0 m/sの時でもドップラー速度約1.8m/sが存在しており、この速度は波飛沫や海潮流等の影響とのことですが、この速度は波飛沫や海潮流の変化により、影響を受けるのでしょうか。

石田廣史：レーダー海面反射信号のドップラーシフトの主な原因は波浪の伝搬によると考えられますが、同時に波飛沫や海潮流の影響も少しは含まれていると考えられます。しかし、それらの影響は小さいと考えます。また、解析に用いました気象状況の範囲が限られていたため、近似線の切片が1.8m/sになったとも考えます。観測時の気象状況の範囲が広がって解析データ数が増えたと、この切片も当然変化すると考えます。