

VHF 海洋レーダの表層流観測による潮目挙動の解析

徳田正幸* ・寺内 潔**・村崎定男***
村嶋陽一****・金津伸好*****

1. はじめに

海上のごみ回収作業の効率化を計るためには、図-1 に示したように、次の2つの課題を改善する必要がある。第1はごみの分布の正確な情報(ごみの初期分布)である。第2はごみの浮遊移動の予測精度の向上である。海上のごみは一般に潮目に集まると言われている。湾内でごみを集める潮目は規模が大きく持続性の高いもので、主に潮汐フロントによって出来る潮目と考えられる。本研究の目的は、VHF 海洋レーダによる表層流観測と潮目の目視観測を同時に行い、これらの観測からごみを集める潮目の挙動特性を解明し、上記の第2の課題の予測精度の向上(図-1の③~⑤)を図ることにある。

2. レーダ観測

使用したレーダは徳田ら(1997)(以後流れ観測論文と呼ぶ)が開発した VHF 海洋レーダである。

2.1 観測法

図-2において、レーダ局としてA局とB局そしてアンテナビーム及び観測領域(ハッチ状の領域)を示した。本論文で解析したレーダ観測データは、海域特性を調べるための15日間(1998年8月31日~9月14日)と、潮目の目視観測を行った10月9日のものである。今回の流れの観測方法は流れ観測の論文と同じで、1ビーム当たり約5分間の照射観測で、観測周期は1時間となる。

2.2 解析法

本節で述べる解析法は、流れ観測論文で使用した方法を発展させたものである。

1) ドップラスペクトルピーク周波数抽出法

表層流は徳田・永松(1999)で詳しく示されているように、ドップラスペクトルピーク周波数から求められる。今回の観測領域(図-2)においては照射したレーダビームが対岸に当たる場合があり、このような場合多重反射の危険性がある。図-3はあるビームで観測された、レン

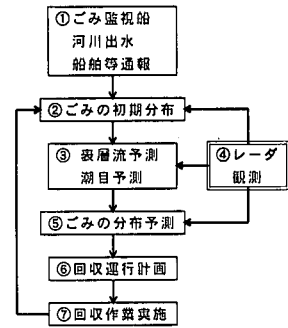


図-1 ごみ回収作業フロー図

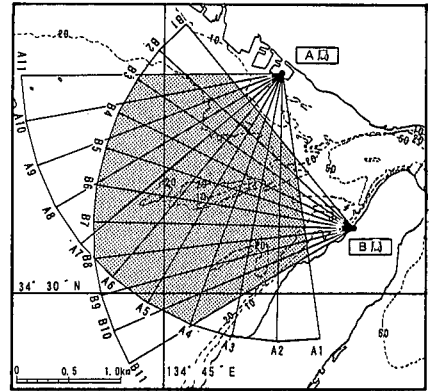


図-2 VHF 海洋レーダの観測海域

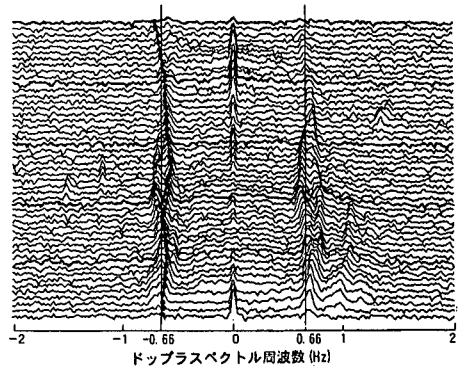


図-3 ドップラスペクトルピーク周波数のレンジ分布

* 正会員 理博 国際航業株式会社技術センター
 ** 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所
 *** 運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所
 **** 正会員 国際航業株式会社関西事業部
 ***** 国際航業株式会社技術センター

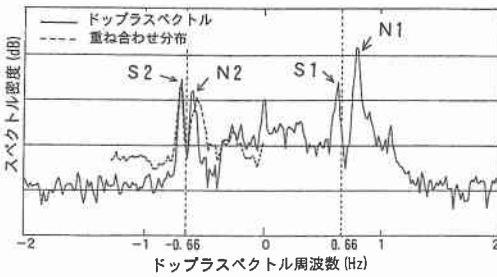


図-4 ドップラスペクトルピーク周波数抽出法

ジ方向 0.5 km 毎のドップラスペクトルを原点をずらして図示したものである。この図から分かるように、レンジ距離 5~15 km にわたって、2 つ山ピークの分布が見られる。図-4 は図-3 のレンジ距離 9 km のスペクトルを取り出したものである。この図で見られるように、多重反射による異常ピーク (N1 と N2) はブラッグ共鳴第 1 次散乱より大きくなることもある。異常なピークの検出において、私たちの今までのアルゴリズムではあるレンジ距離のみであれば可能であるが、レンジ距離に対して連続的に異常ピークの出現に対しては不可能となる。このために、ブラッグ共鳴の特性である、2 つの第 1 次散乱ピークはゼロ表層流の周波数 (± 0.66 Hz) に対して平行移動する特性を利用するアルゴリズムを考案した。すなわち、正と負の周波数領域のスペクトルをいずれかにゼロ表層流の周波数だけ移動して、2 つのスペクトルの合成を行えば、求めたいブラッグ共鳴のピークは強め合うが、多重反射による偽りのピークは逆に弱め合うことになる。図-4 の点線のスペクトルが上記の考えで合成されたスペクトルで、求めたいブラッグ共鳴のピークがノイズのピークより大きくなり、正常に抽出できることになる。

図-6 の凡例

発散・収束ランク (cm/day)	
発散 大 (DIV<-15)	
発散 中 (-15<DIV<-5)	
発散 小 (-5<DIV<0)	
収束 小 (0<DIV<5)	
収束 中 (5<DIV<10)	
収束 大 (10<DIV)	
渦度ランク (回転数/day)	
反時計回り 強 ($\omega<-2$)	
反時計回り 中 (-2< $\omega<-1$)	
反時計回り 弱 (-1< $\omega<-0.5$)	
時計回り 強 ($0<\omega<1$)	
時計回り 中 (1< $\omega<2$)	
時計回り 弱 ($\omega>2$)	

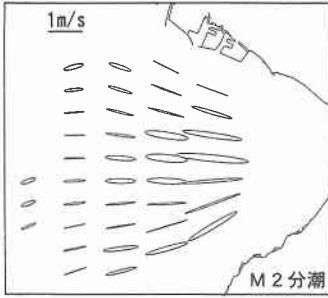


図-5 レーダ観測された M2 分潮流場特性

2) 潮流特性解析法

次の点を除いて、流れ観測論文の図-11 と同じ解析をする。本論文では周期変動の基準として明石の予測潮流の最強西流を用いたこと。すなわち、ある最強西流時から次の最強西流間を 1 周期と区分した。各区分の位相分割数を 12 個としたことである。

3) 発散と渦度の計算法

レーダは面的に表層流を観測し、その観測値を空間分解能 $\Delta s = 0.5$ km の格子点上で表すことができるので、1 時間毎に潮目の挙動に関する発散と渦度の分布を解析することが出来る。ここで格子点 (i, j) の X 軸方向と Y 軸方向の流速を u_{ij} と v_{ij} とする。発散 DIV と渦度 ω は次式で定義した。

$$DIV = \frac{A}{2\Delta s} (-u_{i+1,j} + u_{i-1,j} - v_{i,j+1} + v_{i,j-1}) \dots (1)$$

$$\omega = \frac{A}{2\Delta s} (u_{i,j+1} - u_{i,j-1} - v_{i+1,j} + v_{i-1,j}) \dots (2)$$

これらは空間的単位として中央差分の $2\Delta s$ で表現し、時間的単位としては 1 日分の変化量とした。これらの強度は図-6 の凡例で示したように、6 段階に分類し、それぞれ特性分布を示した。これらの分布は短時間の変動を消去するために 3 時間の移動平均を行った。後述する潮目の観測は約 20 分間毎に行った。これらの観測データと同期させる特性分布は、上記の移動平均した 1 時間毎の分布から、時間的に補間して求めた。

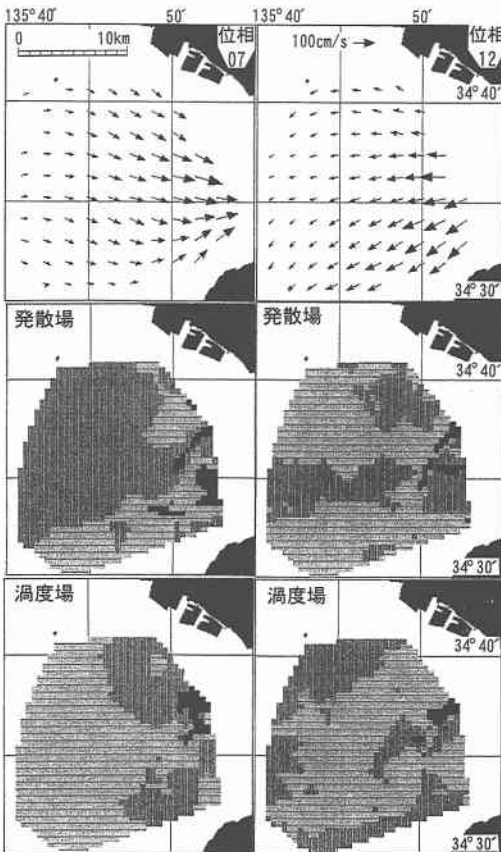


図-6 レーダ観測された流れ場特性

2.3 海域特性

図-2で示した観測海域の特性はすでに述べた15日間のレーダ観測データから議論する。図-5は調和解析法で解析されたM2分潮の潮流成分の結果である。図-6は発散・過度解析と潮流特性解析から得られたもので、最強の西流時と東流時の位相時の分布を代表的に示したものである。これらの結果から次のことが言える。

1) 播磨灘の東海域は潮流が卓越し、とくにM2分潮成分が明石海峡に近づけば近づくほど強くなり、流向はほぼ東西方向となる。

2) 発散場において、全体的にあまり特徴は見られないが、明石海峡に近い海域において、最強の東流では収束（堆積で水位上昇）海域が、最強の西流では発散（水位下降）海域が卓越する。

3) 過度分布において、強い時計回りと強い反時計回りの強い境界はとくに明石海峡に近い大きな流速域に存在する。また、比較的弱い境界は沿岸域にあり、とくに淡路島沿岸域に系統的に見られる。後述するように、ごみを集める潮目はマクロ的には発散場よりも過度場に強く関係する。

3. 潮流数値計算

湾内の浮遊物（ごみ、油等）の従来の移動予測は通常非定常な潮流数値計算の表層流に基づいている。よって、レーダ観測値と潮流の数値計算値の比較を行い、レーダ観測の有用性を明らかにする必要がある。比較は主に発散場、過度場及び潮目の挙動で行う。

使用した潮流数値計算の概略は徳田ら（1993）と同じ内容で、1層モデルとし、コリオリ係数0.00082、水平渦動粘性係数5.0 m²/sとした。計算条件は次の通りである。

(1) 計算範囲と格子

計算範囲は図-7で示した範囲で、レーダ観測との比較は、この図のAの部分を取り出し使用した。格子間隔とタイムステップはそれぞれ1kmと15秒とした。

(2) 初期条件と境界条件

初期条件は必要とする結果の2日前で、すべての格子点で静止状態の条件とした。境界条件は外

力である潮位変化(16成分の調和定数を使用)を図-7の西側と南側の境界で与えた。

(3) 潮目の挙動の数値計算

潮目の形状を粒子群で近似し、2つの流れ場を基に60秒毎にその移動計算を行った。使用した流れ場はレーダ

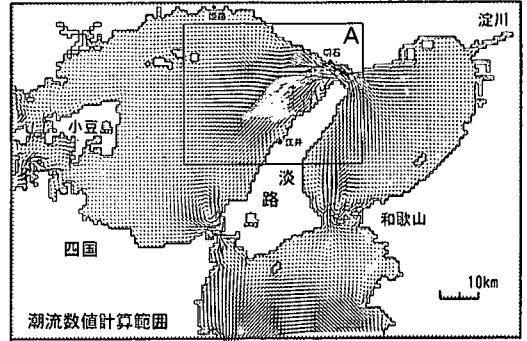


図-7 潮流数値計算範囲

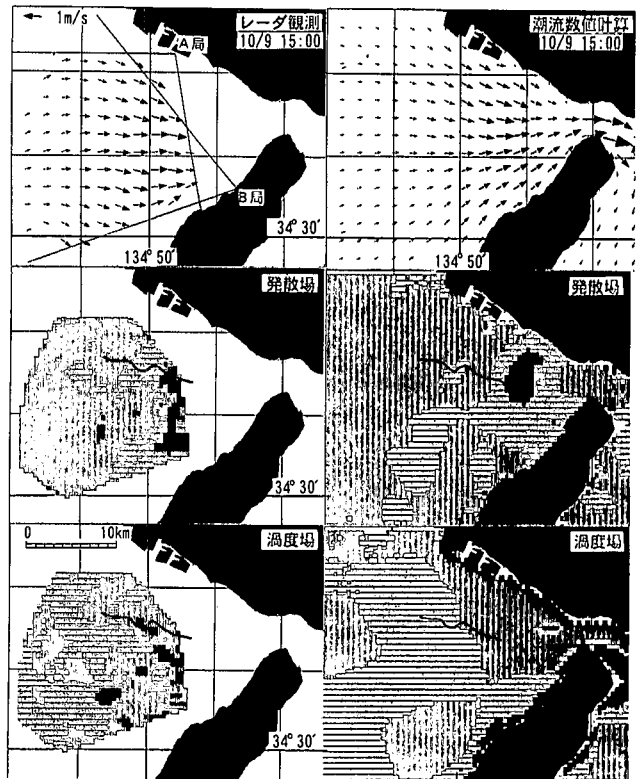


図-9 レーダ観測と数値計算の流れ場の比較

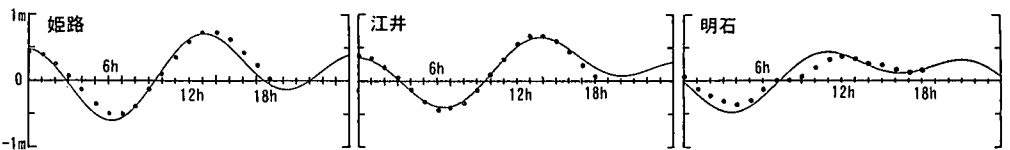


図-8 数値計算された潮位特性

で観測された場と潮流計算された場（1時間毎）を基に60秒毎の内挿計算で求めた。粒子はこれらの流れ場の0.7の移動速度で移動すると仮定した。

使用した数値計算の精度の検証は計算範囲内の代表的な3点(姫路, 江井, 明石)の潮位で行い, 図-8を得た。この図において数値計算からの値(点)は予想潮位の値(実線)とよく一致し, 数値計算の精度は十分であることが示された。

4. レーダ観測と潮流数値計算の流れ場の相違

両者の流れの比較は, 後述する潮目の目視観測期間(1998年10月9日12時~15時)で行った。図-9は最強時の東流の代表的な流れ場の比較例を示した。発散場と渦度場の実線は, 観測された潮目を同時に示した。この図から, 次のことが言える。

- (1) 流れ場(上図): 両者は類似した流れパターンであるが, 東経134度45分~50分の海域において, レーダ観測の方が全体的に大きい流速分布である。
- (2) 発散場(中図): 全体的に両者は類似した分布である。明石海峡の手前の海域で, 数値計算場も強い収束領域が存在する。しかしその位置は(1)と関連して数値計算場の方が海峡により近い位置となる。
- (3) 渦度場(下図): パターンは非常に異なる。数値計算場は岸に隣接した沿岸域以外に強い渦分布は存在しないが, レーダ観測場は岸から十分に離れた海域で系統的な渦度分布が存在する。

以上のことにより, レーダ観測と潮流数値計算の流れ場の大きな相違は, 渦度分布に見られる。

5. 潮目観測

観測の目的はごみを集める潮目(写真-1)を目視観測し, その特性を明らかにする。また, 潮目移動データはレーダ観測場と数値計算場の照合データに利用することにある。潮目観測期間の流況ははじめに弱い西流期(12時), 転流期(13時), 東流期(14時以降)である。東流の最強時は16時である。

5.1 観測法

小型船で以下の観測を行った。ごみを集める潮目の目視観測を行い, その位置は約20分毎にGPSで計測した。潮目の特性を調べるために, 木片を投下して潮目近辺の流れ場の観測及び潮目を挟んで水塊の相違を調べるSTDの観測を行った。また風向風速計による海上風の観測を行ったが, 潮目観測期間中は最大風速が3m/s以下で, ほとんど無風状態と言える。

5.2 潮目の挙動

図-10と表-1が目視観測された潮目の挙動である。潮目の東西方向の分布は, 観測船が1隻であったために十分観測できなかった。よって, 図-10の点線部分は推定した形状である。この結果から, 次のことが言える。



写真-1 目視観測された潮目

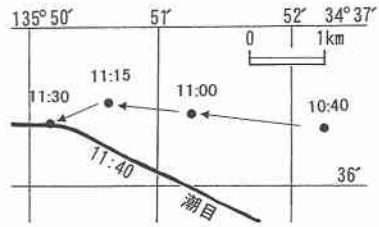


図-11 木片による潮目付近の流れ場

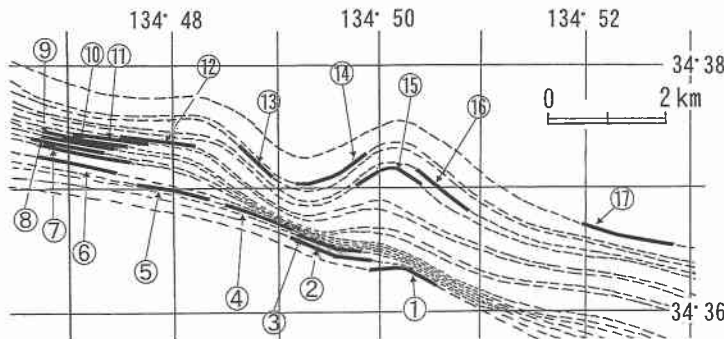


図-10 目視観測された潮目の挙動

表-1 潮目の目視観測点の位置

観測番号	潮目の目視観測点の位置		
	時刻	北緯	東経
①	11:30	34°36.47'	134°50.24'
②	11:45	34°36.49'	134°49.51'
③	12:00	34°36.48'	134°49.84'
④	12:16	34°36.86'	134°48.97'
⑤	12:18	34°37.16'	134°48.00'
⑥	12:20	34°37.37'	134°47.20'
⑦	12:30	34°37.42'	134°47.23'
⑧	13:20	34°37.53'	134°47.09'
⑨	13:30	34°37.52'	134°47.14'
⑩	13:45	34°37.52'	134°47.29'
⑪	14:00	34°37.55'	134°47.47'
⑫	14:15	34°37.48'	134°47.71'
⑬	14:36	34°37.32'	134°48.79'
⑭	15:00	34°37.14'	134°49.55'
⑮	14:26	34°37.18'	134°50.04'
⑯	14:26	34°37.02'	134°50.69'
⑰	15:35	34°36.62'	134°52.37'

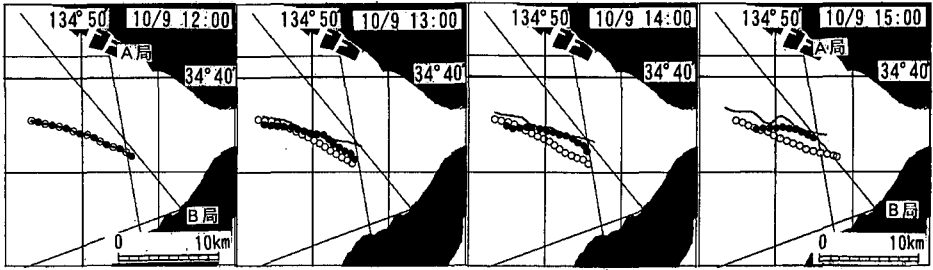


図-12 観測と数値計算の流れ場に対して潮目挙動の比較 —：観測された潮目，●：レーダ観測場，○：潮流数値計算場

(1) 目視観測によれば、潮目は時間とともに北上し、転流時からごみを集める力が徐々に弱まった。東向きの潮流になると、潮目の形状は波打ち始め明確でなくなり、減衰・短縮する傾向である。このことから、ごみを集める強い潮目は西流期に発達することである。これはすでに述べたように、大阪湾の水塊が播磨灘に流入することにより、潮汐フロントが形成され、それによって生じた潮目である。この水塊の相違は12時近くの潮目を挟むSTD観測から裏付けされた。

(2) 潮目は、図-9の渦度分布からも示唆されるように、第2.3節で述べた渦度の境界に発達する傾向がある。このように、潮目は発散場より渦度場に関係することである。

5.3 潮目付近の流れ場

ごみを集める強い潮目の付近の流れを調べるために、図-11に示すように、木片を人為的に投下し、目視観測およびGPSによる位置計測し、ごみの取り込み速度を調べた。

表-2 潮目付近のごみの取り込み速度

時刻	10:40~ 11:00	11:00~ 11:15	11:15~ 11:30
観測値			
ごみの取り込み速度	150 cm/s	122 cm/s	88 cm/s
レーダの観測値	77 cm/s	74 cm/s	38 cm/s

表-2から、取り込み速度は同時観測されたレーダ観測値に比べて、倍以上大きい。これにより潮目付近のレーダ空間分解能に比べて狭い範囲で強く吸引する強い速度場があり、ごみを集める力となっていると推定できる。

6. 潮目の挙動と流れ場の関係

観測された潮目の挙動を照合データとして、レーダ観測と潮流の数値計算の流れ場はどちらがより現実の流れに近いのかを確かめることができる。すなわち、観測された潮目の初期の位置を初期条件として、これらの流れ場を用いて潮目の数値計算を行い、観測された潮目の挙動にどのくらい一致するかを調べれば良い。注意すべきことは、レーダ観測場はすでに示したように限られた海

域であるために、潮目を形成する粒子が観測範囲外に出る場合がある。その場合はその粒子は消去した。その結果は図-12に示し、次のことが分かる。

(1) 観測された潮目の挙動はレーダ観測場と非常によく一致するが、潮流数値計算場に対して系統的な相違が示された。

(2) 東流期で、レーダ観測場による潮目の挙動においても観測値と必ずしも一致しない。これはすでに述べたように、東流期で弱い潮目となり、その挙動が明確でなくなったことによる。

以上のことにより、レーダ観測場が潮流数値計算場に比べて、より正確に実際の表層流を表していると結論できる。

7. まとめ

本研究はごみを集める潮目の挙動を明らかにするために、レーダ観測と潮目目視観測を同時に行い、次のことを明らかにした。

(1) レーダ観測された表層流場は、従来の潮流数値計算結果に比べて、より実際に近いこと。

(2) レーダ観測場と潮流数値計算場の相違は、流速の分布ばかりでなく、とくに渦度分布において大きい。

(3) ごみを集める潮目は潮汐フロントで形成され、レーダで観測された場の渦度分布と強い相関を有することが推定されること。

今後の課題として、(1)について数値計算との融合を図ること、(2)と(3)について、潮目と渦度の分布の相関を実証し、ごみの集まりやすい海域の予測を試みていく必要がある。

参考文献

- 徳田正幸・久木幸治・大野裕一 (1993): 短波海洋レーダによる流れと波浪の計測, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.126-130.
 徳田正幸・村上和男・榎美奈彦・永松 宏 (1997): VHF沿岸海洋レーダの開発と流れ観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1276-1280.
 徳田正幸・永松 宏 (1999): 短波海洋レーダの表層流の自動抽出法の開発, 海洋調査技術, 第11巻, 第1号, pp.1-9.