離岸流観測へのXバンドレーダ利用に関する検討

Use of X-Band Radar on Rip Current Observation

山川泰司1•武若聡2•桜井崇3•柳嶋慎一4

Taishi YAMAKAWA, Satoshi TAKEWAKA, Takashi SAKURAI, and Shinichi YANAGISHIMA

X-band radar measurements have been applied for rip current observation. Radar images were collected at research pier HORS on a straight sandy coast. Rader images capture wave propagation, breaking and run-up motions. Hourly averaged images have been processed, which frequently display characteristic cross-shore patterns that resemble to neck and head of a rip current. Floater experiments and radar measurements were done simultaneously to confirm rip current pattern and flow speed. Wave propagation speeds on rip channel were smaller compared to that of outside with same magnitude of the offshore-wards drift speed of floaters. Temporal variation of wave celerities at inside and outside of a rip current was measured for several tide cycles. The difference was large for low tides suggesting growth of rip current.

1. はじめに

離岸流は海難事故の主な原因の一つであり、その発生 を探知することは防災上重要である.本研究では、広範 囲の海面を連続的に観測できるXバンドレーダを用い、 離岸流を探知することについて検討する.これまでの研 究(山川・武若,2007)で、Xバンドレーダを用いて海 面を観測し、平均化処理した画像中に現れる岸沖方向に 伸びる筋状パターンの発達する海象条件が離岸流条件に 類似することを明らかにしている.しかしながら、パター ン周辺の流動状況,波浪の伝播状況などの詳細は明らか にされていない.

本研究では,離岸流観測実験,航空写真撮影,Xバン ドレーダ観測を同期して行い,それぞれの観測結果を照 合してレーダ画像中に現れるパターンと離岸流の関係を 確認する.また,レーダエコー画像を用いて波浪の伝播 速度を算定し,離岸流の速さを見積もることを検討する. 以上を通じ,離岸流観測にXバンドレーダを利用する可 能性を考える.

2. 観測の概要

Xバンドレーダは回転するアンテナからマイクロ波を 照射し海面からのエコーを捉える.得られたエコーデー タを画像化することで波浪場の状況を知ることが出来, 広範囲,高頻度の観測に適している(武若・Hasan, 2006).

Xバンドレーダ観測は茨城県鹿島灘に位置する(独法) 港湾空港技術研究所の波崎観測桟橋HORSで行っている. 後浜にある研究施設の屋上にXバンドレーダ(日本無線

1 学生会員	工揖	筑波大学大学院システム情報工学研究科
2 正 云 貝	工時	巩仮八子祖叙授シヘノム情報上子研九件
3		長野県庁
4 正 会 員		(独)港湾空港技術研究所主任研究員

(株)JMA-3925-9)を設置し,継続的にデータを収集している。沿岸方向約5.6 km,岸沖方向約2.8 kmの海面のエコー画像を2秒毎に収集し,約17分間のエコー画像を 平均化した平均画像を1時間毎に生成して保存する(図-1). 偶数時には2分間のエコー画像を保存している。

3. GPSフロートを用いた流況観測実験

(1) 観測実験の概要

2007年7月31日,GPSフロートを用いた離岸流の観測 実験をXバンドレーダ観測と同期して行った.**表**-1に本 観測実験の概要を示す.実験時の波高は約1.1 m,北方 より若干の斜め入射であった.風速はおおむね2m/sで 北東よりの風が吹いていた.海に投入されたフロートは 南方(銚子漁港方向)に流れ,同時に投入した染料の拡 散の状況と一致した.汀線付近では,砕波に伴う流れに 巻き込まれて浜に打ち上げられるフロートが多かった. 3回の実験機会のうち,11:00の実験ではフロートの準備 や回収に手間取り,得られた実験データが少なかったも のの,13:00と15:30の回では有効な実験データが多数得 られた.



図-1 レーダエコー画像(上)と平均画像(下) (2007年3月16日22時)

表-1	離岸流観測実験の概要
14 1	

実験 目的	離岸流のパターンと速さの観測
使用 機材	GPS フロート(3 セット):携帯用 GPS 記録装置を 防水容器に収めてフロートに固定,フロートには回 収用のラインとリールを接続.海面着色用染料.
実験 方法	数十メートル間隔の3つの投入ポイントより,GPS フロートと海面着色用染料を観測海域に投入. 一定時間経過後にGPSフロートを回収し,記録され た位置データを読み出して軌跡と流速を求める.
実験 位置	測量結果からでリップチャネルと判断される地形の 周辺(図2下部点線内の海域)
実験 日時	2007 年 7 月 31 日 (大潮) の 11:00 (潮位 0.0 m, D.L.), 13:00 (潮位 0.24 m, D.L.), 15:30 (潮位 0.89 m, D.L.) の各回それぞれで 2~3 回の投入を行った.



図-2 GPSフロート実験海域の地形

(2) フロートの軌跡と離岸流の速さ

フロートを回収後,記録された位置データより得られ た軌跡のうち代表的なものを図-3 (a),(b)に示す.実験 で用いたGPS装置は3秒毎にGPS衛星からの信号受信を 試み,測定誤差は最大10m程度である.投入されたフ ロートは,全般的には入射波の下手(南方,銚子漁港方 向)に移動した.13:00の実験では沿岸位置x = 180 m付 近,15:30実験ではx = 200 m付近にてフロートが100 m 程度沖方向に流されており,汀線付近から離岸流が発達 していたことが確認された.離岸流により沖に流された フロートは沖合で移動方向を変え,向岸流に乗り岸方向 に移動した.その後,岸に近づき,沿岸流によって南方 に流されるもの,離岸流で再度沖合に流されるものがそ れぞれあった.以上は,離岸流周辺にセル状の循環的な 流れが発生していたことを示唆する.

GPS装置に記録された位置データと記録時間からフロートの移動速度を算定した.3秒毎の位置データから移動 速度を求めると大きくばらつきが生じたため、6秒から 12秒毎に移動速度を算定した.フロートの移動速度は 沿岸方向に移動する時には0.3 m/s 程度,離岸する区間 で0.5m/s 程度であった.

離岸流の発達の程度を,フロートの最大離岸距離,フ ロートの離岸時の平均速度で評価し,潮位変化との関係



図-3 (a) フロートの軌跡と速度(13:00観測)









図-5 (a)フロート軌跡と平均画像の対応(13:00)





を調べた(図-4).実験回数が十分に多いとは言えない ものの,潮位が上昇するにしたがってフロートの最大離 岸距離,離岸流速が小さくなる傾向がみられる.この実 験結果は,西ら(2004)が報告している離岸流は潮位が 低い時に発達しやすいという観測結果と整合する.

(3) フロートの軌跡と平均画像

GPSフロートの軌跡と同期観測したXバンドレーダ平 均画像を重ねて示した(図-5(a),(b)). 各図の上部が全 体の平均画像,離岸流の観測実験域の範囲を示し,下部 は実験を行った海域を拡大して示したものである. 図-2 中のx=160m付近のリップチャネル地形は,レーダ平 均画像中で輝度が低い領域として捉えられている. これ は、リップチャネルは周囲より深く波が小さいため,レー ダエコーが小さくなることが考えられる. また、フロー トが平均画像の明暗部の境界に沿って離岸していること,



図-6 航空写真(2007年4月12日15時頃)



上:平均化した航空写真 下:レーダ平均画像

リップチャネルから沖合にかけて、砕波帯を超える岸沖 方向に伸びる筋状のパターンが捉えられていることが図 より読み取れる.このような筋状パターンのリップチャ ネル地形と類似する低輝度領域からの発生は、他の多数 の平均画像においても頻繁に見られた.

以上のGPSフロートによる観測実験の結果から, リッ プチャネル近傍に離岸流があること, この離岸流の沖合 領域の平均画像中に筋状パターンの発生があることを確 認した. このパターンは離岸流が観測された位置から沖 合に伸びていたことから, レーダ平均画像中に現れる筋 状パターンは離岸流に起因しているものと考えられる.

4. 航空写真とレーダ平均画像の比較

航空写真(可視光の反射)とレーダ平均画像(レーダエ コー)を比較し、レーダのイメージングメカニズムにつ いて検討した.2007年4月12日15時頃に撮影された波崎 桟橋の航空写真4枚(図-6)を、桟橋や周辺施設を基準点 に用い、単写真標定によりオルソ化した.その後、これ らを平均化して航空写真から平均画像を作成した.

図-7の上部に航空写真より作成された平均画像(可視 画像),下部にレーダ平均画像(2007年4月12日15時)を 示す.両画像中の桟橋周辺の高輝度位置,すなわち,水 際位置の分布形状・砕波帯内の分布はよく一致していた. レーダ平均画像上で輝度が高い領域は,砕波や泡立ちが 多く見られる領域であり,輝度が低い部分はリップチャ ネル地形など水深が大きく,砕波が見られない領域であ ることを確認した.

このことから, パターンの発生している位置では, 砕 波や泡立ちによりレーダエコーが強くなりやすい状態で あることが推察される. 離岸流が砕波帯を抜けたリップ ヘッド部で砕波や泡立ちを引き起こしていると考えてい る.

5. 波の伝播速度の解析

(1) 解析の概要

離岸流が発生している領域では,波浪の伝播速度が周 辺より遅くなっていると考えられる.2秒毎に記録され たエコー画像に映る波峰の移動状況を調べ,波の伝播速 度を推定し,その沿岸分布,時間変化から離岸流の発生 状況を推測する.

波の岸沖方向伝播速度は次の手順で求めた. 岸沖方向 の検査区間(岸沖距離:約100m)を設定し,区間両端 におけるエコー変動(記録長120秒)の時間遅れを相関 解析により求め,検査区間の距離と通過時間から平均の 岸沖方向伝播速度を推定した.検査区間は平均画像中に パターンが形成される砕波帯沖側の岸沖範囲に設定した.

この解析を,離岸流観測実験を実施した2007年7月31 日,および平均画像中に筋状パターンが連続して現れた 2008年3月15日の前後数日間のそれぞれに記録されたエ コー画像を用いて行った.

(2) 波の伝播速度の沿岸分布

離岸流が波の伝播に与える影響を調べるため,離岸流 観測実験時に記録されたエコー画像から,各沿岸位置で の波の岸沖方向の伝播速度を求めた.得られた波の伝播 速度の沿岸分布と同時間帯のレーダ平均画像を比較した (図-8). 図中の沿岸方向の破線内が検査区間を示す.

離岸流が観測された位置 (x=200 m) 付近では,周囲 と比較して波の伝播速度は大きく低下していた.伝播速 度の低下量は最大 0.5 m/s 程度と見積もられ,これは GPS フロートの離岸時の平均速度と同程度の大きさで ある.同様に,リップチャネルの沖合 (x=700,1000 m) でも波の伝播速度に大きな変動が見られた.

(3) 波の伝播速度の時間変化

レーダ画像中にパターンの発生が連続的にみられた 2008年3月15日から20日のデータを用い、潮位 η の変化 に伴う波の伝播速度の変化を求め、ここで提案する手法 の信頼性を確認した.

先に説明した方法で、沿岸2.2 km の範囲の各位置に おける伝播速度を求め、これらを沿岸平均した沿岸平均 伝播速度 Cを求めた.次に、対象期間中の潮位の24時 間移動平均値 η_0 、沿岸平均伝播速度の24時間移動平均 値 C_0 を求めた. C_0 は検査区間の平均水深に η_0 を足し た全水深より求めた長波の波速とほぼ同じ大きさであっ た.

沿岸平均伝播速度の変動成分 $C-C_0$ を求め,長波の 波速を用いこれの大きさを水深に換算評価し,潮位の変 動成分 $\eta-\eta_0$ と比較した(**図**-**9**).潮位の上昇・下降に 伴い平均的な波速が増加・減少することが捉えられてい る.推定した伝播速度の変動成分は潮位変化に相当して おり,銚子漁港で観測された潮位変動とのずれの平均は 7 cm であった.解析を行った期間は波高が1m以上あ り,レーダエコー画像に波浪が明瞭に捉えられていた. そのため,相関解析が良好になされ,推定精度が十分な ものとなったと考えられる.

上記の期間のレーダ平均画像中に認められたリップチャ



図-8 波の伝播速度の沿岸分布と平均画像中のパターンの関係(上:13:00下:15:00)







図-10 波の伝播速度変化を調べる領域



図-11 潮位と波の伝播速度差(領域A-B間)の変化

ネル地形・筋状パターンがある領域をA,隣接する領域 をBとして検査区間に設定し,波の伝播速度の時間変化 を調べた(図-10).領域Aの位置する同図のx=1000m 付近には複数のリップチャネル地形(矢印で示した位置) が見られる.この位置で離岸流が発生すれば,領域Aの 波の伝播速度は周囲より小さくなると考えられる.そこ で,領域Aと領域Bの波の伝播速度の差を求め,その推 移と潮位の関係を調べた(図-11).速度差が負の時間帯 は,領域Aを通過する波が領域Bより遅いことを表す. やや不鮮明ではあるが,潮位が低い時間帯に領域Aにお ける波の伝播が遅くなる関係がある.これは,領域A付 近に離岸流が発生し,その強度は潮位が低い時に増すこ とを示唆している.

6.結び

Xバンドレーダ観測と同期してGPSフロートを用いた 離岸流観測実験を行い,離岸流セルを捉え,0.3 m/s 程 度の沿岸流,0.5 m/s 程度の離岸流を観測した.離岸流は 潮位が低い時に発達しており,離岸流の観測された位置 と重なる位置においては、レーダ平均画像中に筋状パター ンの発生がみられた.筋状パターンの発生条件は,離岸 流の発達条件と一致すること(山川・武若,2007)を確 かめており,ここでの結果と合わせ、レーダ画像中のパ ターンが離岸流を捉えたものであることを確認した.

パターンのイメージングメカニズムの理解のため,航 空写真を平均化してレーダ平均画像と比較した結果,レー ダ画像の高輝度部は砕波や泡立ちなど,視覚的にも輝度 の高い部分に対応しており,離岸流がもたらす砕波や泡 立ちによるレーダエコーを根因として筋状パターンが形 成されることが推察できた.

2秒毎に記録されるレーダエコー画像で観測される波 峰の移動の様子から波の伝播速度を推算し,波速の差か ら離岸流の速さを推定することを試みた. 波の伝播速度 の推移は潮位と整合性があり,離岸流やリップチャネル の観測された沿岸位置で波が遅くなっていたことから, 波の伝播速度の解析より離岸流の速さの見積もりが可能 であると判断した. また,リップチャネル地形付近の領 域では,潮位が低い時に周囲より波の伝播速度が遅くな りやすいことが確認できた.

この解析をより発展させ,波の伝播速度の沿岸分布を 長期にわたり観測することで,離岸流の発生しやすい沿 岸位置や気象条件,海象条件などを明らかにできると考 えている.これに向けて,より多様な海象条件下で行っ た離岸流観測とレーダ観測の比較,一連の解析のシステ ム化,波高と波向を反映させた信頼性の高い波浪伝播速 度の解析手法の検討などが必要である.

謝辞:本研究の実施にあたり,(独)港湾空港技術研究 所漂砂研究室にはデータの提供などで多くの協力をいた だきました.ここに記して謝意を申し上げます.

参考文献

- 武若聡・Hasan, G. M. Jahid (2006):荒天時の屈折波浪場の 解析,海岸工学論文集,第53巻, pp.141-145.
- 西隆一郎・山口博・岩淵洋・木村信介・村井弥亮・徳永企世 志・古賀幸夫(2004):宮崎県青島海岸での離岸流観測, 海岸工学論文集,第51巻, pp.151-155.
- 山川泰司・武若聡 (2007): Xバンドレーダを用いた離岸流探 知に関する検討,海岸工学論文集,第54巻,pp.1436-1440.