

浮遊物の挙動予測に向けた海洋レーダーの適用性評価

中 辻 啓 二* ・ 西 田 修 三** ・ 清 水 隆 夫*** ・ 坂 井 伸 一****
松 山 昌 史***** ・ 坪 野 考 樹*** ・ 森 信 人*****

浮遊物の移動や集積問題等, ラグランジュ的挙動解析への海洋レーダーの適用性について, GPS 漂流ブイ等を用いた現地実験と粒子追跡シミュレーションによって, 評価・検討を行った。観測には時間分解能に優れた DBF 短波レーダーを用いた。漂流ブイの移動速度への追従性や漂流軌跡の再現性について評価を行った結果, 十分な精度を有することがわかった。また, レーダーにより得られた表層流速場を基に浮遊粒子の挙動シミュレーションを行ったところ, 流れ場の収束性が高い海域で粒子の集積傾向が認められ, 浮遊物の挙動解析へのレーダーの有用性が示された。

1. はじめに

近年, 沿岸域における流況モニタリングに向けて, 海洋レーダーの利用が試みられ, その有用性が認められるようになってきた(藤井, 2004)。表層流速ではあるが広域な流速情報を連続して得ることができる海洋レーダーは, リアルタイムモニタリングのみならず, 数値モデルにデータを同化させることにより, 流況の再現性と予測精度の向上をも期待できる(石塚ら, 2000)。また, 海上ゴミの集積や潮目の挙動予測に向けた海洋レーダーの応用も試みられている(徳田ら, 1999; 村嶋ら, 2001)。しかし, 潮目の発生・消滅過程の解明には至らず, 予測手法は未だ確立されていない。

本研究では, 表層流動に支配される, 流入濁質の移流拡散やゴミなどの浮遊物の移動や集積問題など, ラグランジュ的挙動解析への海洋レーダーの適用性について, GPS 漂流ブイ等を用いた現地実験によって, 評価・検討を行うことを目的としている。レーダー観測には, 最近開発された時間分解能に優れた DBF 方式の海洋レー

ダー(坂井ら, 2002)を用いた。

2. 現地観測

(1) レーダー観測

現地観測は 2003 年 10 月 18 日～12 月 17 日の約 2 ヶ月間, 大阪湾の湾奥部にて実施した。ただし, 本論文では, GPS ブイによる現地実験を実施した 12 月 3 日のデータを基に解析を行う。約 7 km 離れた 2 地点(夢洲と堺)に送受信アンテナを設置し, 視線方向約 20 km, 走査角約 90°で計測を行い, ほぼ湾奥部全域を計測範囲とした(図-1)。DBF 海洋レーダーは, 従来の海洋レーダーに比べて, 特に時間分解能に優れ, 15 分間隔の短時間計測が可能である。今回の観測でも 15 分間隔でデータの採取を行った。

(2) GPS ブイ観測

レーダー観測期間中の 2003 年 12 月 3 日には, レーダーによる流動観測にあわせて, 4 台の GPS 漂流ブイ(No. 4～No. 7)を用いた浮遊物の挙動に関する現地実験を行った。GPS 漂流ブイ(本体長約 60 cm, 外径 12 cm, アンテナ長約 30 cm, 重量約 5 kg: 写真-1)は今回の現

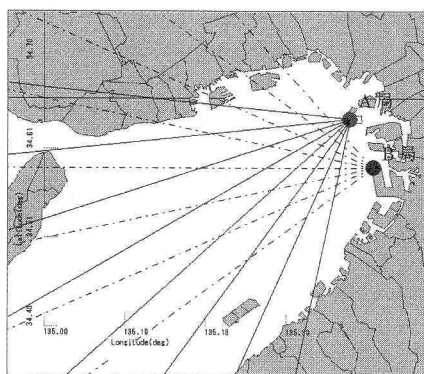


図-1 大阪湾奥部レーダー観測海域

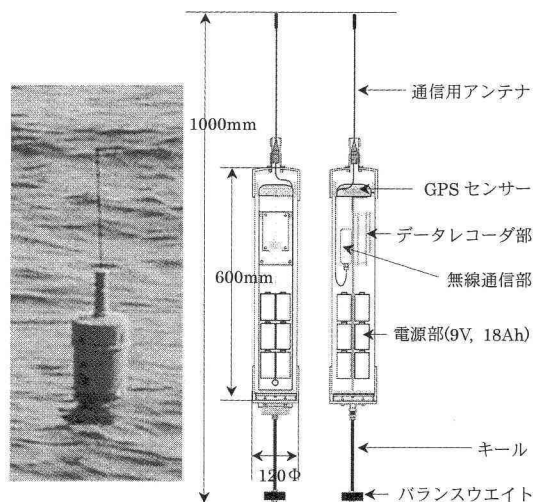


写真-1 GPS 漂流ブイ

* 正会員 工 博 大阪大学大学院教授 土木工学専攻
** 正会員 工 博 大阪大学大学院助教授 土木工学専攻
*** 正会員 工 修 (財)電力中央研究所 環境科学研究所
**** 正会員 博(工) (財)電力中央研究所 研究企画グループ
***** 正会員 工 修 (財)電力中央研究所 地球工学研究所
***** 正会員 博(工) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科

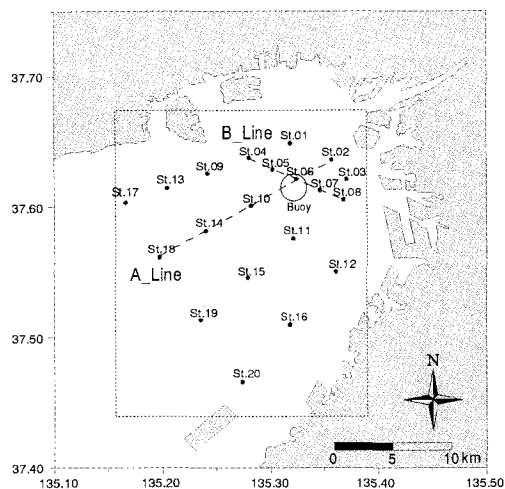


図-2 水質観測点と流速観測線 (○: ブイ投入域)

地実験に向けて試作したもので、内蔵された GPS アンテナでブイの位置情報を受信し、メモリーに記録するとともに、その位置情報とブイの計測状態を無線で基地局に送信する機能を有している。さらに、基地局より計測モードの設定等をリモート制御することが可能な双方向の通信機能を備えている。

(3) 船上観測

2003 年 12 月 3 日のブイ観測とあわせてレーダー観測域を縦横断する 2 測線 (A 測線, B 測線: 図-2) において ADCP を用いた断面流速の曳航観測を実施するとともに、観測域内 20 地点 (St. 1~20: 図-2) において多項目水質計を用いた水質構造と潮目の観測を実施した。

(4) 観測データの処理

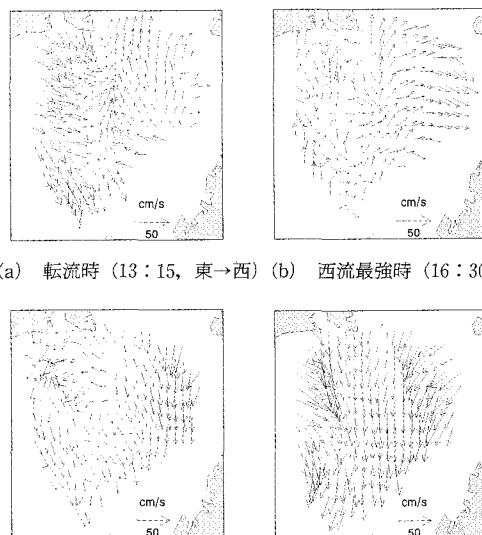
レーダーにより計測された視線方向流速を、格子間隔 500 m、時間間隔 15 分に時空間補間し、この補間データを基に、後述の仮想粒子の追跡シミュレーション等の解析を行った。得られた仮想粒子の軌跡と GPS ブイの移動軌跡を比較することにより、浮遊物の挙動に対する追従性を評価するとともに、流速場の発散や循環等の流動構造と浮遊物の挙動との関係についても解析を行った。

3. 観測結果

(1) 表層流速構造

図-3 は、レーダーにより観測された代表潮時の表層流速を示したものである。図示した範囲は、図-2 の点線で囲まれた領域である。潮時は明石海峡の潮流を基準としており、この日の明石海峡の潮流と大阪港の潮位を図-4 に示す。

東流最強時に観測域の西域では明石海峡からの強い流入 (最大流速 75 cm/s) がみられ、その一方で湾奥部の淀



(a) 転流時 (13:15, 東→西) (b) 西流最強時 (16:30)

(c) 転流時 (19:30, 西→東) (d) 東流最強時 (22:45)

図-3 DBF 海洋レーダーの観測結果 (2003 年 12 月 3 日)

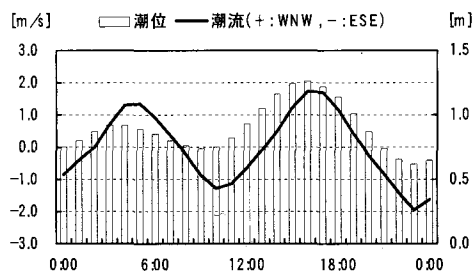


図-4 明石海峡の潮流と大阪港の潮位 (2003 年 12 月 3 日)

川河口域では南西流が発生している。観測域全体では南向きの流れが卓越し、東岸沿いの流れが認められる。明石海峡で東流から西流へ転流が生じて、観測域の西域では東向きの流れが残存し、湾奥部では北流が卓越している。西流最強時には、東流時ほど明瞭な流動構造はみられないが、東域では東向きの流れが、また北域の神戸港の南側では反時計回りの弱い循環がみられる。

今回使用した DBF 海洋レーダーは、15 分間隔という高い分解能を有するとともに、上述のように 20 km 以上に及ぶ広域な流動構造を十分な精度で把握しうることがわかる。

(2) 水質および流速構造

船上観測によって得られた A, B 測線の水質と流動の断面構造の一例を図-5 に、また、表層塩分のコンター図を図-6 に示す。図中の流動ベクトルは、北流と東流成分の合成ベクトルで示している。湾奥部では淀川河川水の影響により、表層約 1 m に低塩分水が存在している。

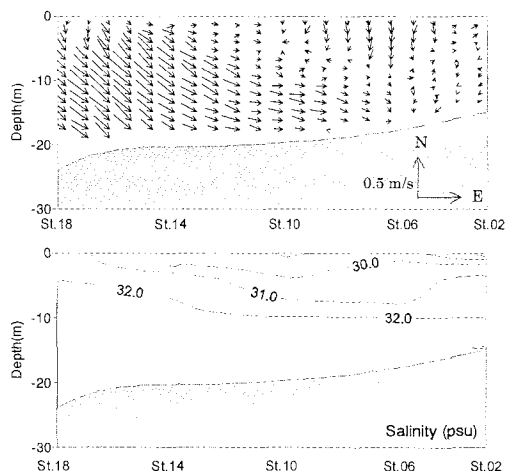
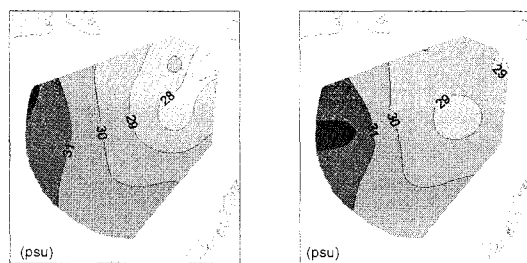


図-5 流動と水質の断面構造 (A 測線)



(a) 海面下 0.5 m (b) 海面下 1.0 m

図-6 表層塩分分布

表-1 プイの投入時刻と投入位置

漂流ブイ	投入時刻	緯度	経度	回収時刻
4号機	7:39	34°37'13.8"	135°19'28.6"	16:09
5号機	7:52	34°37'34.4"	135°18'42.9"	16:03
6号機	8:42	34°36'57.6"	135°18'39.2"	15:55
7号機	8:10	34°36'48.7"	135°18'36.4"	15:49

(3) GPS ブイの漂流軌跡

図-7 に4台のブイの漂流軌跡を示す。投入時刻と投入位置は表-1 のとおりである。ちなみにこの時の風況は、北西寄りの風2~3 m/sの弱風であった。

投入から回収までの約8時間に、行程約5 kmの移動を示していた。

4. 解析および考察

(1) 漂流速度への追従性

時空間補間され500 m 正方格子上に求められたレーダーの流速とブイ (No. 4) の移動速度を比較したのが

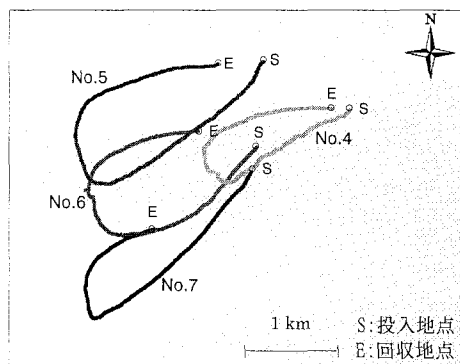


図-7 プイの漂流軌跡

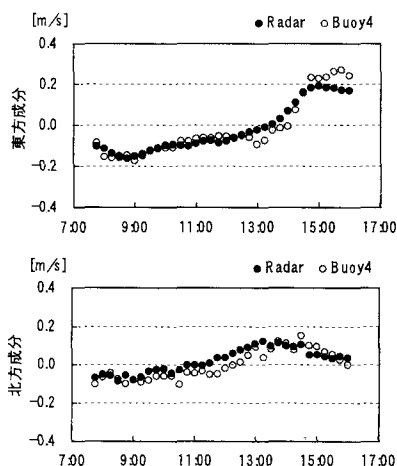


図-8 レーダー流速とブイ移動速度の比較

図-8 である。記録されたブイの位置と移動速度を15分間隔で抜粋し、ブイに近接する格子上的レーダー流速と比較している。移動速度の変動特性はよく再現されているが、レーダーはブイに比して流速を低く捉える傾向が見られる。他の3台のブイについても同様の傾向にあった。

(2) 漂流軌跡の再現性

15分間隔、500 m 正方メッシュに時空間補間されたレーダー流速を基に、ブイ投入地点に配置された仮想粒子の追跡シミュレーションを行った。粒子追跡の結果の一例を図-9 に示す。得られた仮想粒子の軌跡とブイの移動軌跡を比較することにより、ラグランジュ的挙動解析へのレーダーの適用性について検討を行う。

ブイの移動軌跡とレーダーの流速を用いた粒子追跡の結果は、ほぼ同様の移動傾向を示している。しかし、レーダー流速による粒子追跡の結果は、漂流ブイの移動軌跡に比べ、東西、南北方向ともに移動距離が短くなっており、最大到達距離に関しても500 m以上の差異が生じて

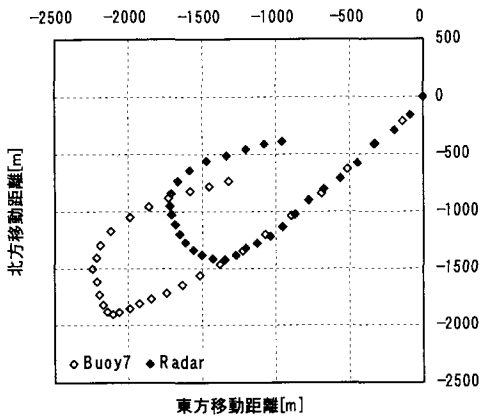


図-9 ブイの軌跡とシミュレーション結果

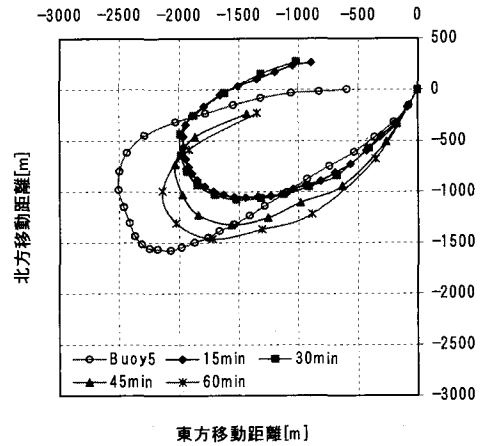


図-11 時間分解能の影響

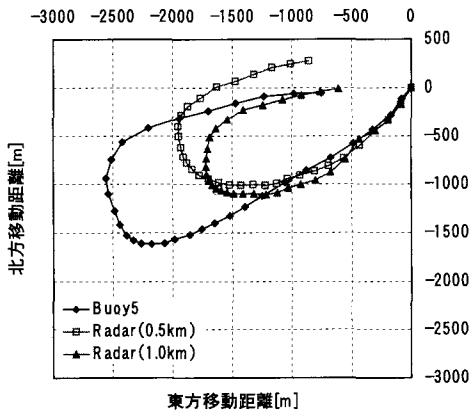


図-10 空間分解能の影響

いる。粒子追跡の計算では、流速誤差が軌跡に蓄積されるため、ブイの軌跡と合致するにはかなりの時空間分解能を有する精度の高いデータが必要となる。

そこで、時空間分解能の影響を見るために、空間補間を 1000 m に低下させた計算も行った。その一例を図-10 に示す。流速が低下する転流時に軌跡に差異が生じはじめ、最終的な到達位置にも大きく影響が及んでいることがわかる。

また、時間分解能を変化させた場合の計算結果を図-11 に示す。空間分解能は 500 m のままで、時間間隔を 15 分、30 分、45 分、60 分と変化させて同様の計算を行った。分解能が 15 分の場合を基準に考えると、データの時間間隔が 30 分、45 分、60 分と大きくなるにつれて、粒子の軌跡がずれていくことがわかる。とくに、45 分間隔を超えると、粒子の軌跡が大きく変化してしまう。この結果より、この湾奥部の海域においては、物質拡散や浮遊物の挙動等の解析を行ううえで、少なくとも 30 分程度の時間分解能を有することが望ましいと言える。

(3) 流れ場の構造と浮遊物の集積

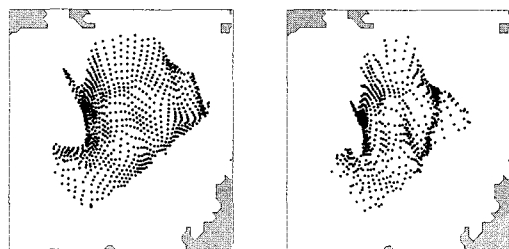
徳田ら(1999)は、播磨灘で実施した VHF レーダーによる潮目の挙動解析において、「ゴミを集める潮目は、マクロ的には発散場よりも渦度場に強く関係する」と述べている。本研究においても、レーダーの流速データを用いて循環と発散の解析を行ったが、明瞭かつ特徴的な分布特性を見いだせなかった。

そこで、浮遊物の集積や潮目の形成過程を明らかにするために、レーダーの観測域に様に仮想粒子を配置し、観測された流速データを用いて粒子群の挙動解析を行った。図-12 は 6 時間毎の粒子の残存状況を示したものである。領域外に流出した粒子は除去している。また、比較のために 24 時間の平均流速分布と、その循環および発散の平面分布を図-13 に示す。仮想粒子の残存分布から明らかに収斂箇所が認められる。この残存状況と図-13 に示した平均流場の循環と発散の分布特性を比較すると、発散が負値を示す箇所、例えば観測域の西域で流速ベクトルの収斂と仮想粒子の集積が生じていることがわかる。集積した粒子群は南向きの流れに乗り、集積位置が南方に移動している。

浮遊物の集積位置や潮目の挙動を、流れ場の渦度や発散から予測することは、レーダーの空間分解能を考えるとかなり難しいと言える。しかし、前述の漂流軌跡の再現性の結果とあわせて考えると、レーダーによってモニタリングされた表層流速を基に粒子追跡シミュレーションを行うことにより、その海域の浮遊物の集積予測がある程度可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた主たる結果は、以下のようにまとめられる。



(a) 6時間後

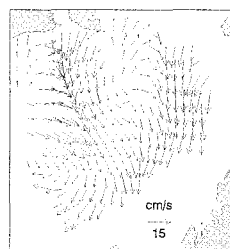
(b) 12時間後



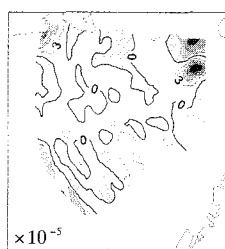
(c) 18時間後

(d) 24時間後

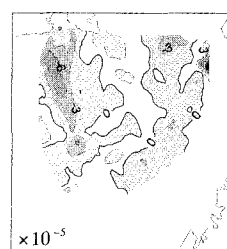
図-12 粒子の残存状況



(a) 日平均流速



(b) 循環



(c) 発散

図-13 日平均流速と循環・発散の分布

(1) 時空間補間されたレーダーの流速は、時々刻々空間位置を変えて移動するブイの速度に良く追従しており、高い相関を示した。

(2) しかし、時空間補間されたデータより計算された仮想粒子の追跡シミュレーションの結果と、実際のブイの移動軌跡は、その軌跡形状に関しては良い一致を見たが、約 2500 m の移動距離に対し 500 m 以上の差異が生じていた。

(3) レーダーのデータの時空間分解能を変化させて同様の粒子追跡シミュレーションを実施した結果、対象海域での再現性の確保には、少なくとも 30 分程度の時間分解能が必要であることがわかった。

(4) レーダーの観測域に一樣に仮想粒子を配置し、粒子群の挙動解析を行った結果、粒子群の集積箇所が明瞭に現れ、浮遊物の集積等の挙動予測がある程度可能であると考えられる。

謝辞： 本研究を進めるにあたり、大阪大学水システム工学研究室の学生の多大な助力を得た。また、大阪市港湾局ならびに大阪府環境農林水産部にはレーダー設置

においてご高配いただいた。記して感謝の意を表する次第である。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A) (No. 14205073) および基盤研究(C) (No. 16560447) によってなされたことを付記する。

参考文献

- 石塚正秀・中辻啓二・松田真人・西田修三 (2000): 沿岸海洋研究における海洋レーダーの有効利用, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1346-1350.
- 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・松岡建志 (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ーの開発, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1511-1515.
- 徳田正幸・寺内 潔・村崎定男・村嶋陽一・金津伸好 (1999): VHF 海洋レーダーの表層流観測による潮目挙動の解析, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1346-1350.
- 藤井智史 (2004): 海洋レーダーの技術と歴史, 沿岸海洋研究, 第 41 巻, pp. 73-82.
- 村嶋陽一・徳田正幸・福田幸司・茂崎慎治・大利桂子・藤 良太郎 (2001): VHF 海洋短波レーダーを用いた潮目予測への適用可能性の検討, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1451-1455.