

海洋短波レーダを活用した浮遊ゴミ回収技術について

榎原雅人*・根木貴史**・諸星一信***・小山内英雄****

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹

*** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 所長

**** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 調査課 課長

広域的な水域の流速を面的に観測できる海洋短波レーダは、海面の流れをリアルタイムかつ広域に観測することができ、環境モニタリングに活用可能なシステムとして、近年多くの海域において実験的に使用されている。

今回、東京湾の海洋環境整備のために運航している清掃兼油回収船「べいくりん」による作業の高度化を目的とし、海洋短波レーダで取得される流況データを活用した、浮遊ゴミ回収情報システムの高度化を図った。

キーワード：海洋短波レーダ、海洋環境整備船、高度化、潮目予測、ゴミ回収

1. はじめに

東京湾の環境整備を図るため、昭和48年から「海洋環境整備事業」により、湾内のゴミ回収が実施されている。一方、国土交通省では、海洋短波レーダ及び定点係留機器を用いて、東京湾における環境モニタリングを実施し、海面の流れをリアルタイムかつ広域に観測することができるシステムを開発している¹⁾。

そこで、東京湾の海洋環境整備のために運航している海洋環境整備船の作業の効率化、高度化を図ることを目的とし、国土交通省関東地方整備局所有の海洋短波レーダで取得される海面の表層流データから、潮目の発生位置及び浮遊物の移動経路の予測にかかる情報システムを開発するため、海洋短波レーダの観測データおよび気象・海象情報と浮遊物の移動経路との関係について検証・解析を行った。

なお、現在の東京湾の海洋短波レーダは、船橋・千葉・大黒埠頭の3局により、東京湾内の広域的な範囲の流況を観測している。設置位置及び観測範囲を図-1に示す。

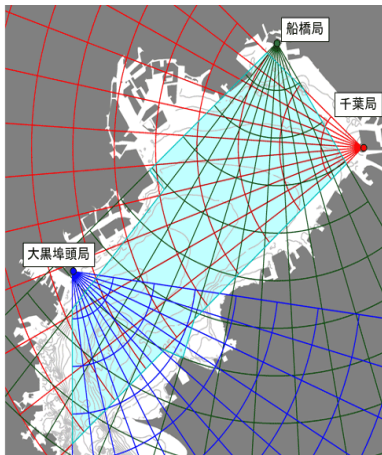


図-1 東京湾におけるレーダ観測範囲

2. 潮目及び浮遊物追跡に関する解析・検証

2.1 流れの収束・発散の算出方法

レーダで観測された流れは、東京湾内に配置された1.5km×1.5kmのメッシュ点毎に空間補間され、メッシュ点(i番目, j番目)毎に東西方向流速成分の u_{ij} 、南北方向流速成分 v_{ij} を持っている(図-2)。

これらの流速値を用いて、流れの集まり具合である各地点における流れの収束・発散(Div_{ij})を下式により計算する。

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

$$\frac{A}{2 \Delta s} = \frac{60 \text{ sec} \times 60 \text{ min} \times 24 \text{ hr}}{2 \times (1.5 \times 10^5 \text{ cm})}$$

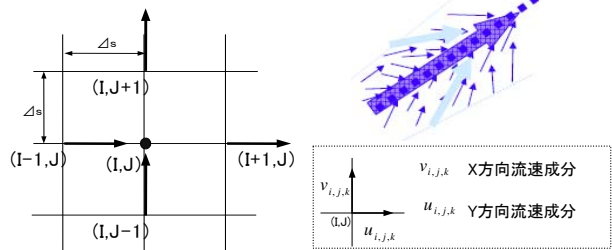


図-2 レーダ観測メッシュ点毎の収束・発散計算の概念図

2.2 潮目予測(推測)手法の検討

海上のごみは船舶の航行や漁業活動の障害となっており、より多くのゴミを効率的に回収することが求められる。ゴミ回収の効率化には、浮遊物の集積域となる潮目が出現する海域の予測、すなわち、浮遊物が集積する表層の収束域と浮遊物の移動を予測することが必要である。

河川水の流入によって生成される潮目等は、水温や塩分の変化により発生していると考えられるため、レーダ

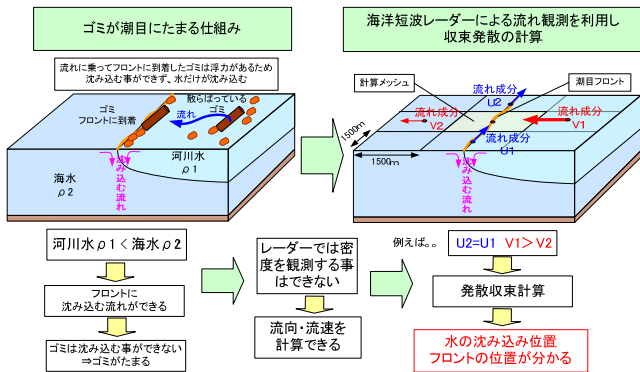


図-3 潮目における水質の変化、流れとレーダによる収束発散について

の観測データにより算出する収束発散分布と「べいくりん」の航走水温・塩分データとの比較及び検証を行った。

「べいくりん」は出航から帰港までの間、船体に取り付けられた“水質計”によって4秒間隔で水温、塩分等の水質を計測している。

一方、潮目ができているところは、図-3に示すように水質の異なる水塊が隣り合っていると考えられる。

潮目が形成されている箇所では“流れが収束している”ことから、レーダによる流れの収束位置と航走水質（水温・塩分）が変化している場所と照合することで、レーダで観測された流れのデータの潮目予測精度を比較した。

図-4は平成18年6月19日15:00におけるレーダによる流れの収束発散分布と航走水温・塩分データ時系列の

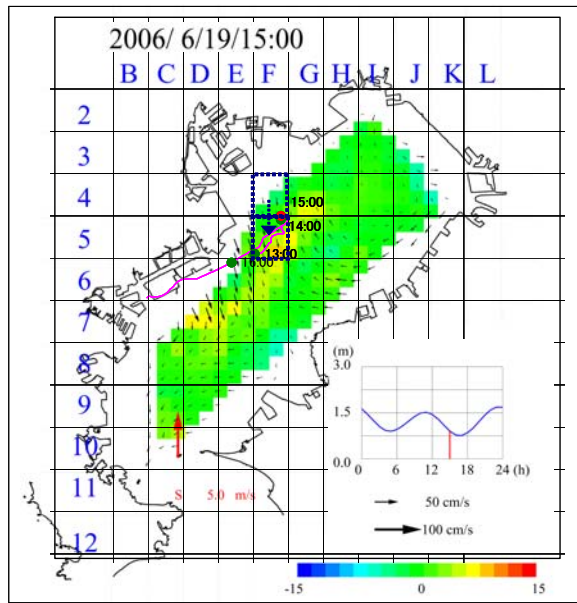


図-4 収束発散分布図と航走水温・塩分データ時系列の比較

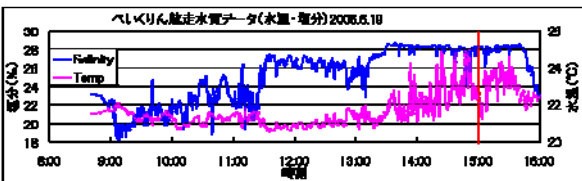


図-5 べいくりん航走水質データ(水温・塩分)2006.6.18

比較図である。

レーダによる流れの収束発散分布図(図-4 上図)は、緑、黄、赤となるにつれて流れが強く収束している箇所を表しているが、「べいくりん」の航跡上またその付近で黄色くなっており、比較的強い収束がみられている。また、その時間の航走水温・塩分データ(図-4 下図)も急激な変化が見られることから、潮目上を往き来していたと思われる。

レーダによる流れの収束位置は、水温・塩分が急激に変化する位置と比較的一致していた。

2.3 実海域における浮遊物の挙動

潮汐や風などの様々な状況下において浮遊物の移動特性を把握するため、10月20日の大潮期、10月30日の小潮期に、東京湾において、日の出後から日没前まで、漂流ブイの移動経路を追跡する現地調査を実施した。

図-5に浮遊物にみためた漂流ブイの姿図を示す。

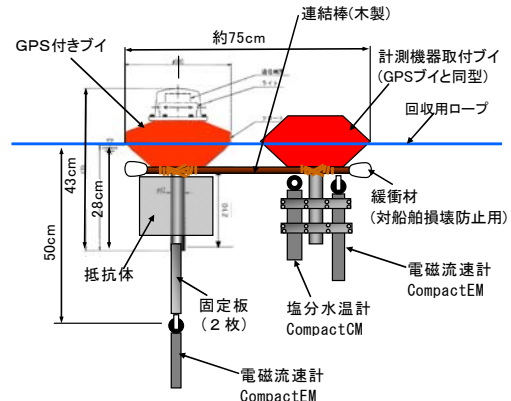


図-5 漂流ブイ姿図

漂流ブイ本体は小型のものでGPS携帯端末を装備しており、自らの位置情報が転送される仕組みとした。また、漂流時の水温・塩分およびブイの流速を計測するため、小型水温・塩分計および小型電磁流速計を取り付けた。

レーダが計測する流速は、表層からおよそ1mまでの層の平均的な流速であると言われていることから流速計は水面下0.2m および0.5mの位置に2基取り付けられた。

漂流ブイ追跡調査時は、ブイの漂流位置、風向・風速、自記式記録計による水温・塩分および流速について、20分毎に観測した。また、同じ時刻の東京湾の流況データを得るため、レーダについても通常1時間に1回の観測を、20分に1回の観測に変更して観測した。

2.4 流速分布とレーダによる流れの観測値との関係

今回行った浮遊物を追跡する現地調査結果から、観測された水深0.5mでの流速値と海洋短波レーダの観測による流速値との比較を行った。

図-6に海洋短波レーダの測定水深・観測流速と、今回の現地実験で検証した水深約0.2mと水深0.5mの流速分布の関係を示す。ここで、ブイの移動速度(V_b)は風の影響を受け表層流(V_{ω})との差が生じるが、深さ方向に流速

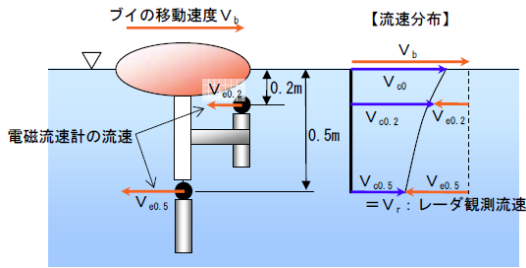


図-6 観測地と実測値の関係

値が減少し、レーダは理論上水深 0.5m 層の流速 ($V_{e0.5}$) を観測しているものとする。一方、現地実験時の電磁流速計は GPS ブイと共に同じ速度で移動したので、電磁流速計は深さ方向に流速が減少する分を補うような流速値 ($V_{e0.5}$) が観測されているはずである。

したがって、ブイの移動速度、レーダで観測される流速及び電磁流速計の流速は下式の関係となると仮定した。

$$\begin{cases} V_b = V_{e0.2} + V_{e0.2} = V_{e0.5} + V_{e0.5} \\ V_{e0.5} = V_r \end{cases}$$

ここに、 V_b : ブイの移動速度-20 分間の移動距離を 20 分で割った値 (cm/s)

V_{e0} : 海面の表層流速 (cm/s)

$V_{e0.2}$: 水面下 0.2m の流速 (cm/s)

$V_{e0.2}$: 水面下 0.2m に取付けた電磁流速計で観測した流速 (cm/s)

$V_{e0.5}$: 水面下 0.5m の流速 (cm/s)

$V_{e0.5}$: 水面下 0.5m に取付けた電磁流速計で観測した流速 (cm/s)

V_r : ブイの位置においてレーダで観測した流速 (cm/s)

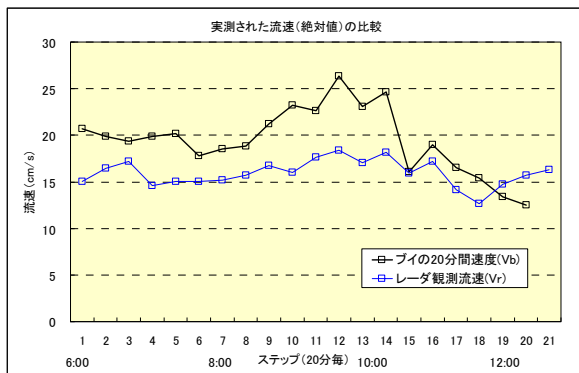


図-7 ブイ(表層)とレーダ観測値の絶対値の比較

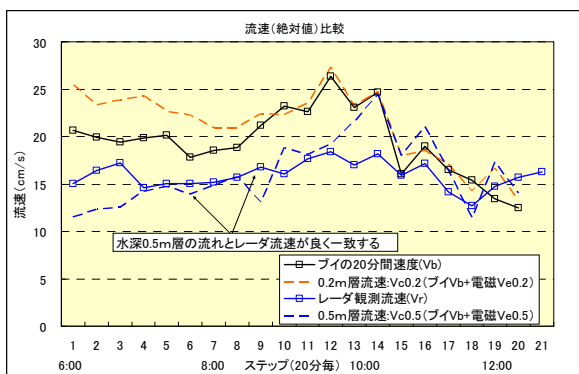


図-8 各層毎の流れの計測値との絶対値比較

この中で既知の流速値(速度)は、 V_b 、 $V_{e0.2}$ 、 $V_{e0.5}$ 、 V_r であり、それらの差し引きから各流速値の検討を行うことで検証を行った。

図-7 は、10月30日の小潮期の漂流ブイ追跡調査におけるブイの移動速度 V_b とレーダの観測流速 V_r の絶対値を比較したものであり、図-6の V_b と V_r の表示のように理論上0.5m層を観測しているとされるレーダ観測流速が小さくなっている。この V_r から V_b に補正できれば表層の漂流物の移動追跡・予測精度の向上につながる。

図-8 は電磁流速計の流速データ $V_{e0.2}$ 、 $V_{e0.5}$ を用いて、 $V_{e0.2}$ と $V_{e0.5}$ を計算したものを比較している。

$V_{e0.5}$ は V_r と良く一致しており、レーダの流れの観測値は実際の流れを表していることがよく分かった。

また、風速が5m/s以上と比較的大きいステップ3~8の流速は、表層の V_b と0.5m層の V_r や $V_{e0.5}$ との差が大きく、風速が4m/sと比較的小さいステップ15~20では V_b と V_r や $V_{e0.5}$ との差はほとんど無いと考えて良い。

2.5 追跡計算による検証

大潮時と小潮時に得られた浮遊物追跡調査から漂流ブイの軌跡を再現するため、同時に観測されたレーダの流れのデータだけでなく、ブイに取り付けた電磁流速計の流況データを加味し、追跡計算を行った。

小潮調査時はブイが調査区域から外れたため、ブイを船上に挙げ、再度作業区域内に投入し再追跡を行った。

大潮時、小潮時いずれの結果とも、6時以降17時までの11時間後まで再現した。

得られた漂流ブイの軌跡を追跡計算した結果のうち、小潮調査時の1回目の投入分(6:00~12:50)を図-9示す。

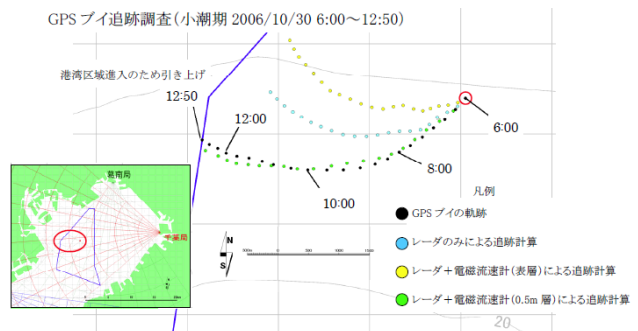


図-9 浮遊物(漂流ブイ)の軌跡(小潮調査)

図-9をみると、0.5m層の電磁流速計による流況データを加味した追跡が非常に良く再現できている。次いで良好なのはレーダの流況データのみで結果した結果、最後の時点で最も離れたのは0.2m層の電磁流速計を加味した追跡であった。

平成17年度業務において、浮遊物を目視確認できる距離は1.5km程度というヒアリング結果を得ている²⁾が、大潮、小潮調査いずれの結果も、最も離れた追跡結果でも1.5km程度と視界が利く範囲で追跡できており、比較的良く再現できたものと考えられる。

2.6 シミュレーションにおける風圧流について

流れの数値シミュレーションを正確に行うには、風の場合や、潮流、吹送流、密度流（河川流）などいくつかの要素を考慮する必要がある。海洋短波レーダでは理論上、“流れ（水面下 0.5m）を実測”していることから、観測結果から予測潮流成分を差し引くことで潮流以外の流れを求めることができる。

前項の追跡による小潮の再現計算結果では、レーダによる流れのみで再現計算するケースと、これと電磁流速計の流況データ（風の影響による吹送流）をあわせて作用させて再現計算したケースを比較したところ、後者の結果の方が実際のブイの軌跡とよく一致した。

これは、海面の漂流物には図-10に示すような海の流れによる力と、大気の吹き寄せによる風圧力が作用し漂流しているためであり、前項の追跡解析において小潮調査で良い再現性が得られたのは、漂流ブイに対する風圧力による影響を補正できたためと考えられる。

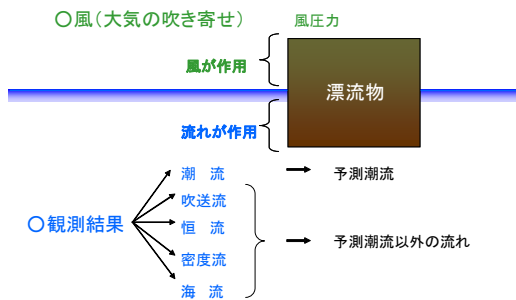


図-10 漂流物(漂流ブイ)にかかる外力

2.7 予測による解析・検証

小潮調査で得られた漂流ブイの軌跡を予測解析した結果のうち、1回目の投入分(6:00~12:50)を図-11に示す。

小潮調査の当日は、5m/s程度の北東の風が吹いていた。

図-11をみると、恒流を考慮しない予測結果は、実際の軌跡と逆方向に漂流すると予測した。一方、恒流を考慮した場合は、実際のブイの軌跡と同じ方向に流れ始めることは表現できているが、その後、北に曲がる軌跡までは表現できていない。恒流を考慮した中では、風圧力を考慮した場合は、考慮しない場合より若干移動速度が速かった。

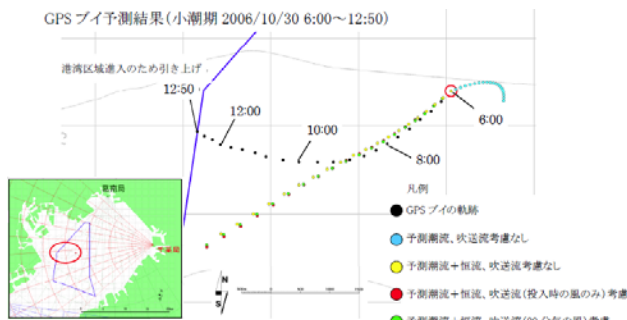


図-11 浮遊物(漂流ブイ)の予測結果(小潮調査)

実際の軌跡は、観測当時の風が北東～東北東からの風であったにも係わらず、ブイは西～西北西方向に移動した。レーダによる流れでは、これを比較的正確に表現できており、この海域での実際の流れは、潮汐による流れや風以外に何らかの影響を受けているものと考えられる。このような場合でも、5～6時間程度は1.5km以内で軌跡を予測できると考えられる。

3. 成果と今後の課題

本調査の成果として以下の内容があげられる。

- 1) 海洋短波レーダによる流れの収束位置は、水温・塩分が急激に変化する位置(潮目)と比較的一致している。
- 2) 海洋短波レーダにより観測された流速データは、水深0.5m程度の流速と概ね一致する。
- 3) 浮遊物追跡・予測機能の解析・検証については、追跡、予測ともに2,3時間後に目視確認できる距離約1.5km以内という仕様は満足できる検証結果であった。
- 4) 海洋短波レーダにより観測されたデータに、電磁流速計の流況データを加味して再現計算した結果の方が実際のブイの軌跡とよく一致した。

また、レーダの観測精度や解析技術の向上も今後の課題であるが、潮目には必ずゴミが集積しているわけではないことから、ゴミが集積している潮目を判別する技術の開発や、予測精度をより向上させるため、潮流や吹送流以外の流れの影響がシミュレーションに再現できれば、システムの更なる高度化に寄与するものと考えられる。

4. 謝辞

本稿は国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所発注による「海洋環境整備船高度情報システム技術確立業務」での検討の一部を取りまとめたものである。検討に際しては、関係者の方々から貴重なご意見、ご指導頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所・国際航業株式会社：海洋短波レーダを利用した浮遊物追跡システム開発のための基礎的検討業務 報告書，平成18年3月
- 2) 国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所・(財)沿岸技術研究センター：平成17年度海洋環境整備船高度情報システムの開発 報告書，平成18年3月