

変動の激しい潮流に影響される海域での浮標による プリューム追跡

Jeremy D. Bricker¹・中山昭彦²・青木千夏³
高田 誠⁴

潮流の変化の激しい海域で、比較的低い濃度でも影響を与える生態環境などの問題を扱う場合、汚染物質を含む河川水や汚水処理水などの混合物の流動と拡散を正確にとらえることが重要になる。本研究では、GPS を組込んだ浮標の追跡によるプリューム拡散場の観測と同時に、流速と水温、塩分濃度を計測することにより、ラグランジュ的計測とオイラー的計測の比較を行い、お互いの計測法の有用性と精度について調べた。潮流の変化の小さい時間帯で放流口近傍の拡散は従来の計測で精度よく計測できるが、潮流の変動の激しい時間帯のプリュームの挙動を正確にとらえるには、浮標を用いた軌跡のラグランジュ的追跡が有用であることが分かった。

1. はじめに

潮流の変化の激しい海域で、比較的低い濃度の混合物でも影響される生態環境などの問題を扱う場合、汚染物質を含む河川水や汚水処理水などの混合物の流動と拡散を正確にとらえることが重要になる。明石、垂水海域はわずかな温度や塩分濃度の変化が問題になる沿岸漁業やノリの養殖の盛んな場所で、また海釣りや海水浴などの施設もある。隣接する海岸には神戸市汚水処理場があり、また流量は少ないものの河川水の流入のある場所でもある。この海域は明石海峡を通る強い潮流と複雑な沿岸形状と海底地形の効果により時空間的変動の大きい複雑な流れ場を形成している (Fujiwara et al. 1994)。従ってこの海域に放流される汚水処理水の挙動については、放流初期の混合拡散状況とともに、複雑な流れ場での長時間にわたる移流と拡散を把握する必要がある。著者ら (Bricker et al. 2006) は同海域で、主に河川水の追跡のため観測船を用いた観測を行ったが、潮流による変動が観測結果にも影響を及ぼすことが分かっている。

本研究では、移動する観測船により流速、水温、塩分濃度の 3 次元分布の測定と同時に、GPS を内蔵した浮標を追跡することにより沿岸で放流された処理水プリュームの流動特性の計測を行った。GPS を組み込んだ浮標の追跡ではラグランジュ的追跡 (中辻ら, 1994) と、水温、塩分などのオイラー的計測より求められる拡散場との比較を行いお互いの計測法の有用性と精度を明らかにすることを目的とする。とくに潮流と地形の効果で流れが剥離し、渦流が発生するような場合の流れ場で移流

拡散するプリュームの時空間的変動を如何に精度よくとらえられるかが主題である。

2. 観測方法

観測は図-1, 2 に示す大阪湾西部の垂水沖海域で行われた。図-2 の拡大図に示すように福田川河口近傍に位置する神戸市下水処理場放流口 (sewage outfall) を中心とする東西約 2 km, 南北 1 km の海域で、西は垂水港とその防波堤沖、東は処理場と海釣り公園の沖を含む。放流水プリュームの拡散を調べるため、流速、水温、および塩分濃度を、観測船に取付けられた ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) と曳航する CT (Conductivity Temperature probe) により計測した。図-2 に示す観測線に沿って約 5 ノットの速さで移動することにより、ADCP は流速ベクトルの 3 成分の鉛直分布を、CT は水温、塩分濃度は水面から約 0.5 m の水平面での値を連続的に計測し、15 分から 30 分かけ観測域を一周した。水温、塩分濃度の鉛直分布は投入式の CT により計測されたがこれは放流口近傍のプリューム挙動の解析に用いられた。観測中放流口より約 1 m³/s の処理水が放流されていた。

以上のオイラー的計測に対し、放流水プリュームのラグランジュ追跡には GPS 機能付き携帯電話器を搭載した浮標が用いられた。処理水放流点に約 30 分毎に複数個投入し、投入後のそれぞれの位置を 5 分間隔で、携帯電話回線を通して送信し記録した。

図-3 に観測日である平成 17 年 12 月 1 日の潮位変化と観測時間帯を示す。午前 8 時の満潮時直前 (図中の◇印) から午後 5 時半の満潮直前 (図中の○印) までの間はほぼ連続に流速、水温、塩分計測と浮標追跡が行われた。満潮時は明石海峡での潮流は西向きで干潮時は東向きの流れになる。海峡で東向き流れが強くなると、垂水の西で潮流が剥離し渦流が発生する。このとき須磨沖で流れは反転し観測海域では西流になる特性がある (Fu-

1 正会員 Ph.D. 神戸大学大学院助手地域空間創生科学専攻自然科学研究科
2 正会員 Ph.D. 神戸大学大学院教授地域空間創生科学専攻自然科学研究科
3 学生員 神戸大学大学院自然科学研究科建設学専攻
4 (株) 鴻池組

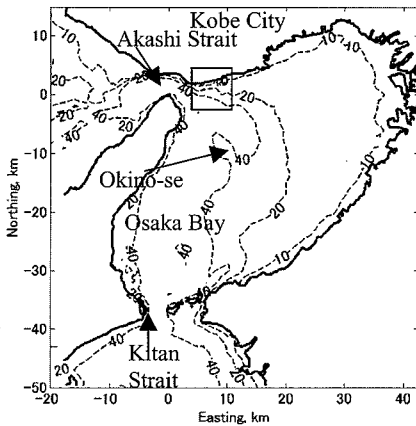


図-1 観測海域

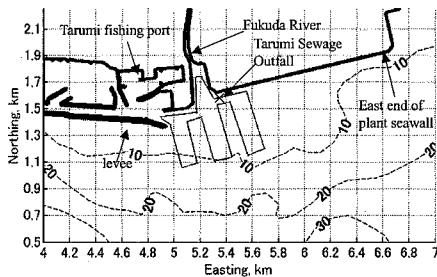


図-2 観測海域の詳細と測線

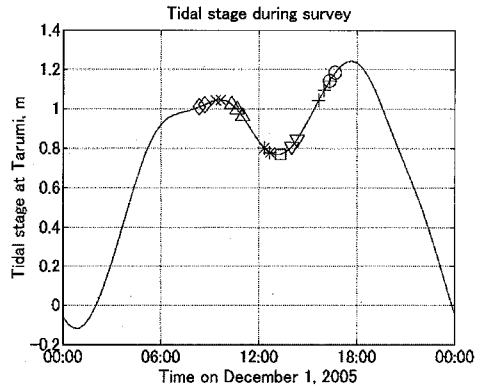


図-3 観測日の潮位と観測時間帯

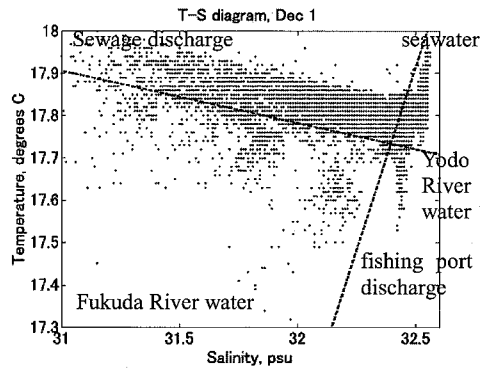


図-4 水温、塩分濃度データの T-S プロット

jiwara et al. 1994). 観測は西向きの潮流から始め、東に転流し、反流渦に影響される時間帯から西流にもどる周期にわたって行なわれた。

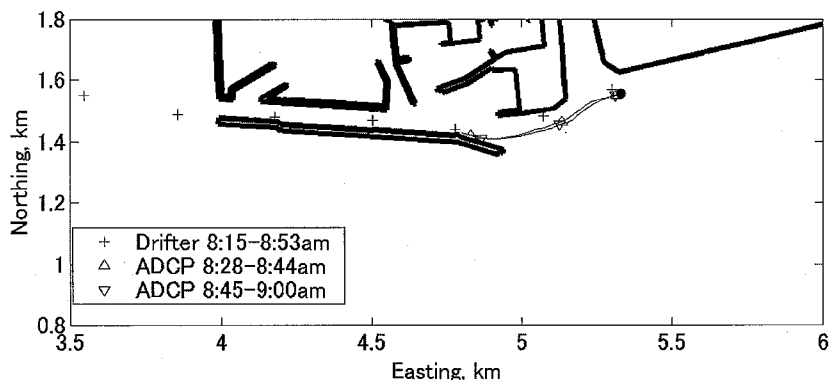
3. 計測結果

放流処理水プリュームの位置と分布形状は、放流水の混合濃度の分布から求められる。また放流口からの平均流跡線で定義されるプリューム中心の水平位置は計測された流速を積分することにより求めることができる。海水単位体積あたりの放流水の体積で定義される混合濃度は以下の方法で水温、塩分濃度データより求められる。まず図-4のような水温、塩分濃度計測結果の T-S プロットを作成し、放流水が混合する水塊の水温と塩分濃度を割り出す。図-4より観測海域の水塊は、主に垂水沖の高塩分海水（図の右上にあるデータ点群）、淀川河川水を多く含む大阪湾東部の塩分水塊のやや低い水塊（図の右端に見られるデータ点群）の混合であるが、観測域近傍に流入する低塩分低温の福田川河川水、低塩分高温

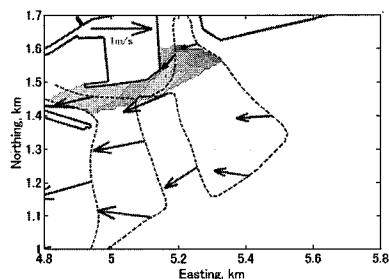
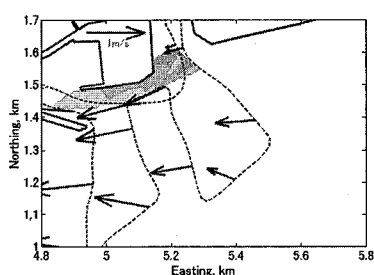
の汚水処理水、また垂水港の水と考えられる塩分はある程度あるが低温の水の混合であると解釈できる。このうち福田川と垂水港の水量は無視できるほどであるので、図の処理水と淀川を結ぶ線より下にあるデータと垂水漁港水塊と海水を結ぶ線の右のデータを除いたデータを解析し放流水の混合濃度を計算した。結果は図-5 から図-7 に示されてある。

上記の方法で処理放流水の混合濃度の空間分布の時間変化を調べることにより、放流水プリュームの移流と拡散が得られる。混合濃度分布は放流口近傍では正確にとらえられるが拡散が進み混合濃度が低くなる遠方ではデータのばらつきが大きくなり位置も不正確になる。これに対し複数の浮標を追跡すれば遠方でもプリュームの中心位置と拡がり精度良く得られる。

図-5 は 8:15 に放流された浮標の軌跡、8:15 から 9:00 の間に得られたデータより計算した放流口から放出された流体粒子の軌跡、および放流水混合濃度の分布を示す。図の太線は海岸線および垂水港の防波堤を示し



(a) 浮標位置と流速の積分より求めた流跡



濃淡は放流水混合濃度を表し破線は観測線を表す、等値線の間隔は 0.5 %

(b) 放流水混合濃度 (8:28-8:44 の観測データ)

(c) 放流水混合濃度 (8:45-9:00 の観測データ)

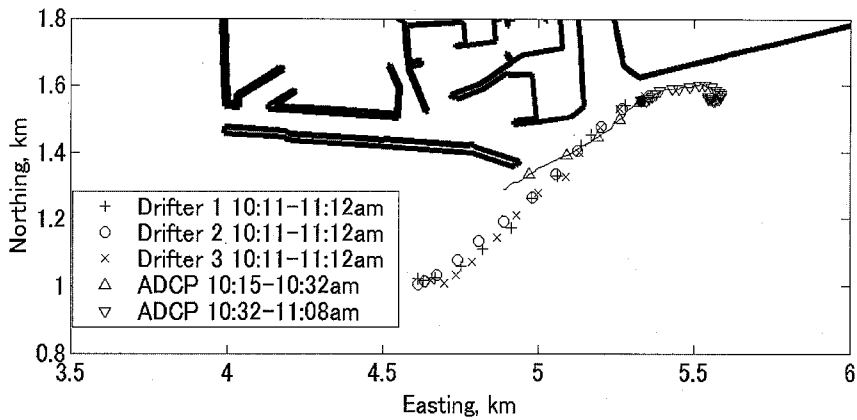
図-5 GPS 浮標軌跡, 流速積分による流跡線, および放流水混合濃度分布, 安定した西流時

ている。図-5(a)の+印は8:15に●で示されている位置から放流したGPS浮標の5分間隔の位置である。曲線は流速計測より求めた流線に沿って流体粒子の位置を積分して求めた軌跡である。軌跡線上の記号はGPS浮標の位置と同じ時刻に対応する。△印は8:28から8:44の16分間に得られた流速データを積分したもので、▽印は8:45から9:00の15分間に得られた流速データを積分したものを示している。GPS追跡位置と流速積分軌跡はよく一致している。この時間帯の潮流はほぼ定常な西流で変動が小さい。図-5(b)と(c)は同じ時間帯に得られた水温、塩分濃度から算定した水面下0.5mの位置での放流水の混合濃度の分布である。矢印は曲線で示されている観測線に沿って計測された水面下1.0mでの流速である。この時間帯では混合濃度分布から推定されるブリュームの位置と浮標軌跡あるいは流速積分の軌跡全て良く一致していることが分かる。

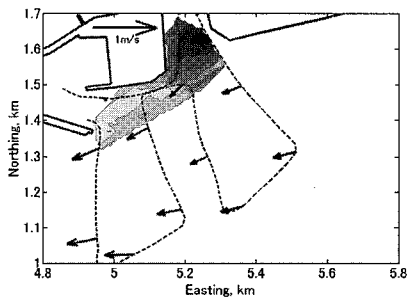
次に同様のデータを明石海峡での潮流が減速する10:00以降の観測・解析結果を示す。図-6は10:11に放流された3個の浮標の軌跡(図の+, ○, ×), 10:15か

ら11:08の間に得られたデータより計算した放流口からの流体粒子の軌跡(図の△, ▽), および放流水混合濃度分布を示す。3個の浮標の軌跡からブリュームの中心位置と分散の程度がよく分かる。混合濃度分布は浮標軌跡に比べ分散が大きいのを示している。分布を求めるための計測に時間がかかっているため、見かけの分散の効果も入っていると考えられる。図-6(b), (c)には水面近傍の流速ベクトルもプロットしてあるが、流速がやや遅くなり方向もやや南にずれてきているのが見てとれる。10:32以降では放流口近傍での流速が非常に遅くなり一部東向きになっているところもある。こういった状況では、わずかの時間のずれが解析結果に影響することになる。前半の10:15-10:32のデータからの軌跡は浮標軌跡より西にずれ、10:32以降の流速データを用いた粒子軌跡は逆方向の東側になっている。図-6(b), (c)の混合濃度分布の図から、最大混合濃度は図-5の場合最大4%と大きくなっている。

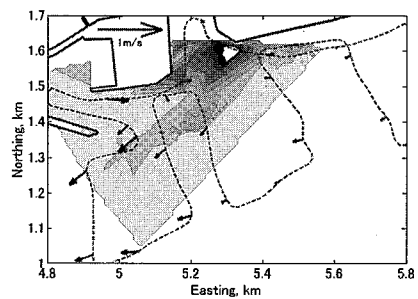
次に明石海峡での東向き潮流が強くなり、観測域の流れが海峡を通る潮流による噴流の渦に大きく影響される



(a) 浮標位置と流速の積分より求めた軌跡



(b) 放流水混合濃度 (10:15-10:32 の観測データ)



(c) 放流水混合濃度 (10:32-10:08 の観測データ)

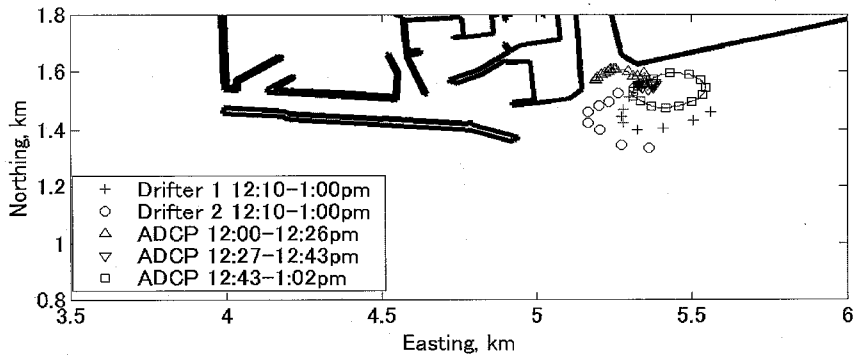
濃淡は放流水混合濃度を表し破線は観測線を表す、等値線の間隔は 0.5%

図-6 GPS 浮標軌跡, 流速積分による流跡線, および放流水混合濃度分布, 西流減速時

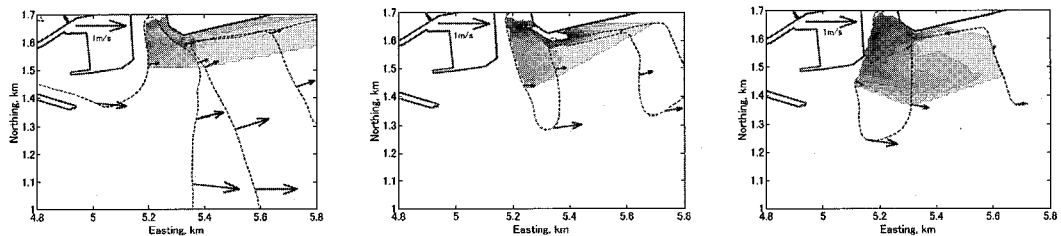
時間帯の結果を示す。図-7がこの時間帯の図-5、図-6に相当する図である。図-7(a)は同時に放流された2個の浮標の軌跡とこの時間帯に3回流速マッピングが行われた結果からの軌跡を示す。この場合浮標軌跡と流速積分軌跡とは大きくずれているのが見られる。この時間帯の初めは図-7(b)からわかるように観測域全体で東向きの流れであるが、12:43 1:02の間に放流口近傍では反時計回りに回転する渦流が生じている。この場合は流れ方向の変化が大きいだけでなく、流速が遅いため拡散効果が大きい。浮標軌跡と流速計測結果とはかなりずれているのが見られる。ADCPによる流速計測には約30分かかっているの、積分値に誤差がでている。

4. 結 論

潮流変動の激しい神戸市垂水沖で放流水プリュームの観測を行った。潮流の時間的変化が小さい場合や放流口近傍の拡散は従来の計測で精度良く計測できる。しかし潮流の変動の激しい時間帯では、航行する観測船からの観測では変化する潮流についていけず、流速や水温などの時間空間分布を正確に求められない。従ってこの結果から得られるプリュームの挙動には観測時間の時間差のため誤差が避けられない。これに対し浮標を用いたラグランジュ的追跡では、軌跡を精度良く求める事ができることが分かった。水温、塩分濃度の計測計器を複数の浮標に搭載することにより、遠方拡散場のさらに詳しいラグランジュ的計測が有効になると考えられる。



(a) 浮標位置と流速の積分より求めた軌跡



濃淡は放流水混合濃度を表し破線は観測線を表す, 等値線の間隔は 0.5%

(b) 放流水混合濃度 (12:00-12:26) (c) 放流水混合濃度 (12:27-12:43) (d) 放流水混合濃度 (12:43-1:02)

図-7 GPS 浮標軌跡, 流速積分による流積線, および放流水混合濃度分布, 渦流発生時

謝辞: 本研究を進めるにあたり神戸市環境局および神戸市建設局の援助を得, 観測機器については神戸大学内海域環境教育研究センターおよび(株)エス・イー・エーの協力を得た, ここに謝意を表す。

参 考 文 献

Bricker, D.J., Okabe, I. and Nakayama, A. (2006) : Behavior of a

small pulsed river plume in a strong tidal cross-flow in the Akashi Strait, Env. Fluid Mechanics, Vol.6, pp. 203-225.
 Fujiwara, T., Nakata, H., and Nakatsuji, K. (1994) : Tidal-jet and vortex-pair driving of the residual circulation in a tidal estuary, Continental Shelf Research, Vol.14, n9, pp. 1025-1038.
 中辻啓二, 末吉寿明, 山根伸之, 藤原建紀(1994) : 三次元粒子追跡による流動構造の解明, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 326-330.