

塩分濃度・水温計を搭載した GPS 浮標による 垂水海域での移流・拡散の観測

Field Survey of Advection and Diffusion off Tarumi Coast Using GPS Drifters Equipped with Conductivity and Temperature Sensors

本田翔平¹・中山昭彦²・Jeremy D. Bricker³

Shouhei HONDA, Akihiko NAKAYAMA and Jeremy D. Bricker

The diffusion of effluent from an outfall in the Tarumi Coast of Kobe-City has been measured using drifters equipped with compact conductivity-temperature probes and a GPS cellular phone. The area is known for the strong tidal currents exceeding 3m/s, the complex flow pattern and swift changes in the directions and the strengths. The data from the drifters allowed determination of the spreading and the decay of the effluent concentration in all tidal phases. It showed that there is a large difference in the decay rates and the diffusivities depending on the tidal phase, particularly the decay is seen to be very slow when the current direction changes.

1. はじめに

沿岸域で放出される汚染水や下水処理水の挙動はその海域の潮流、地形、また混合する海水の成層特性などに大きく影響される。大阪湾西部、明石海峡東側に位置する垂水は明石海峡からの強い海流と、複雑な沿岸形状と海底地形により時間変動が大きく、複雑な流れ場となっている (Fujiwara et al. 1994)。また淀川などの大阪湾東部の河川水流出により成層化した部分と明石海峡の良く混合した海水との境界にフロントが形成され潮流に影響されながら須磨から垂水沖にかけ移動している (Nakatsuji et al. 1994)。こういった沿岸域で污水处理水などが放流された場合の拡散特性も複雑で、これまでも現地観測や模型実験によりその特性が調べられている。著者ら (Bricker et al. 2006a) は同海域に流出する福田川河川水の挙動を調べるため観測船を用い、流速、水温、塩分濃度の観測を行い、潮流の影響の大きい沿岸での小河川流出プルームの挙動を調べた。また同海域で污水处理場から放流される処理水の拡散挙動を調べるため、同様な観測を行い処理水の拡散特性を求めた (Bricker and Nakayama 2007)。これらの観測は移動する観測船により行われたが、潮流の急変する時間帯では変化が早く、広い範囲で正確な空間分布を求めるのは容易ではない。そこで GPS を搭載した浮標を追跡することにより、放流水の移流軌跡を長距離にわたり求めた (Bricker 2006b)。しかし少数の浮標の追跡では拡散場の時間変化を求めるのは難しい。

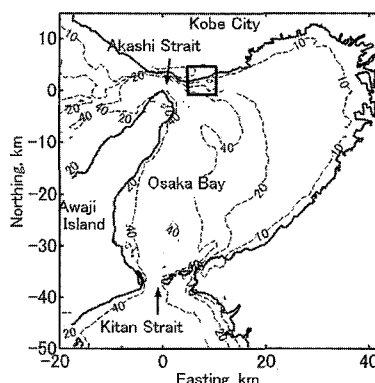


図-1 観測海域

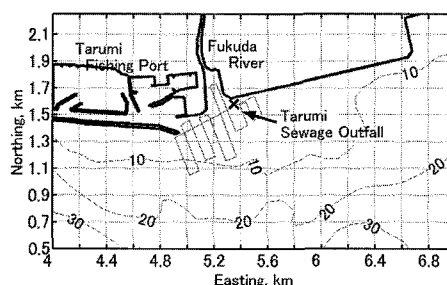


図-2 観測海域の詳細と観測経路

本研究では GPS 浮標に計器を搭載し、放流水の流動軌跡にそって水温、塩分濃度のラグランジュ的計測をおこない、拡散特性の詳細を求めることを試みた。放流水の水温と塩分濃度は周辺の海水の温度、塩分濃度と大きく異なっており、これらの測定によりその混合割合が算出できることがこれまでの観測結果より分かっている。従って主な計測量は水温と塩分濃度である。

1 学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻
2 正 会 員 Ph.D. 神戸大学大学院工学研究科
3 正 会 員 Ph.D. ハワイ大学海洋資源工学科

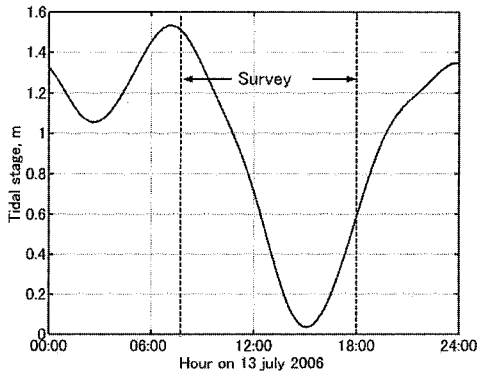


図-3 観測日の潮位時間変化

2. 観測海域及び観測方法

観測海域は図-1, 2 に示す大阪湾西部, 明石海峡東側位置する神戸市の垂水海域である。神戸市下水処理場の放流口を中心とし, 東西約 2 km, 南北約 1 km の範囲である。

観測は 2006 年の夏季と冬季それぞれ大潮時, と小潮時の約 10 時間ほど連続して行われた。本稿ではそのうちとくに 7 月 13 日満潮時の午前 8 時から干潮後の午後 5 時までに行われた観測の結果を報告する。図-3 にこの日の潮位を示す。観測日は大潮にあたり観測時間内に潮位は最大 1.5 m 変化している。明石海峡では満潮時には西向き, 干潮時には東向きに流速 3 m/s を越す強い潮流が存在する。観測域では午前 8 時から午前 11 時にかけては海峡と同様西流である。11 時から 12 時にかけて引き潮となり東流へと転流する。また, 12 時から海峡で東流が強くなり 14:00 以降垂水沖では逆流が生じるため沿岸部では再び西向きの流れとなる。観測日は西風 1.5 m/s で波も穏やかであった。うす曇りで NOAA, SEAWIFTS と赤外線データは欠落しているが, 7 月 14 日の NOAA のデータによれば明石海峡周辺の水温は 25.5℃, 大阪湾東部で最高 28.5℃であった。

観測は水温・塩分濃度計測用の小型 CT を二機および GPS 機能つき携帯電話を搭載した浮標を処理水放流地点より放流し, 追跡することにより行われた。計器は水深 0.1 m および 1 m の位置になるよう取付けられた。浮標は観測海域から出るか, 岸に打ち上げられるか, あるいは 1 時間経過した場合回収した放流点より投入することを観測時間内で 12 回繰り返した。また GPS は搭載しているが計器は搭載していない浮標も同時に放流し, 拡散状況も観測した。並行して, ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), および曳航式多目的水質計を設置した観測船で観測海域を航行することにより流速 3 成

分と水温, 塩分濃度, DO, クロロフィルの海面近傍 (水深 1 m) の分布を計測した。ADCP では水深方向分布を得ることができるが, 曳航式水質計 1 台では固定した水深での分布しか得られないので, 別途投入式水質計にて重要な地点での鉛直分布を計測した。

浮標の位置情報は 5 分間隔で, 水温と塩分濃度は 1 秒毎にサンプリングされ, 記録された。

これまでの観測より垂水沿岸ではフロントを境にして淀川河川水を多く含む湾東部の塩分濃度の低い水塊と明石海峡あるいは播磨灘の海水が存在し, これらがほぼ断熱的に混合していることが分かっている。夏季は大阪湾東部の水塊は水温が高い (観測当日は最大 28.5℃)。放流される処理水の水温 (27℃) と塩分濃度 (電気伝導度はほぼゼロ) は既知なので放流されたあとの処理水の濃度は水温と塩分濃度から算出できる。明石海峡の海水の水温, 塩分濃度を T_1 , S_1 , 大阪湾東部の海水の水温, 塩分濃度を T_2 , S_2 , 処理水の水温, 塩分濃度を T_3 , S_3 , に任意の観測点でのこれらの 3 種の水塊の混合比をそれぞれ f_1 , f_2 , f_3 とすると, 任意の観測点の水温, 塩分濃度 T , S は

$$T = T_1 f_1 + T_2 f_2 + T_3 f_3 \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$S = S_1 f_1 + S_2 f_2 + S_3 f_3 \cdots \cdots \cdots (2)$$

で与えられる。また混合比の合計は

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \cdots \cdots \cdots (3)$$

であるので, 計測された T と S より処理水の混合比 f_3 が算定できる。3 種の水塊の水温あるいは塩分濃度が接近している場合 f_3 の算定精度が落ちる場合があるが, 本観測条件では混合する水塊の水温, 塩分濃度とも異なり混合比の算定誤差は 0.2% 以下であった。以下の結果はこの方法により算定されたものである。

3. 観測結果

図-4 に 8:52 に投入した浮標の観測結果を示す。同時に ADCP で得られた水面近傍の流速結果も示す。図-4 (a) は浮標の投入後 5 分間隔の位置, 図-4 (b) は同時間帯に ADCP により得られた水深 1 m での流速分布, 図-4 (c) は浮標に搭載された計器により計測された水深 1 m の水温と塩分濃度の経時変化, 図-4 (d) は前節で説明した方法により得られた処理水混合濃度の経時変化で, さらに図-4 (e) は観測日に得られた全てのデータの T - S ダイアグラムに当該浮標からのデータを太線で表したものである。

浮標は放流口から出る処理水が水面に湧き上った位置に投入されている。ここでの処理水濃度は約 9% で神戸市によるサンプリング試験結果の 2 倍弱と一致してはい

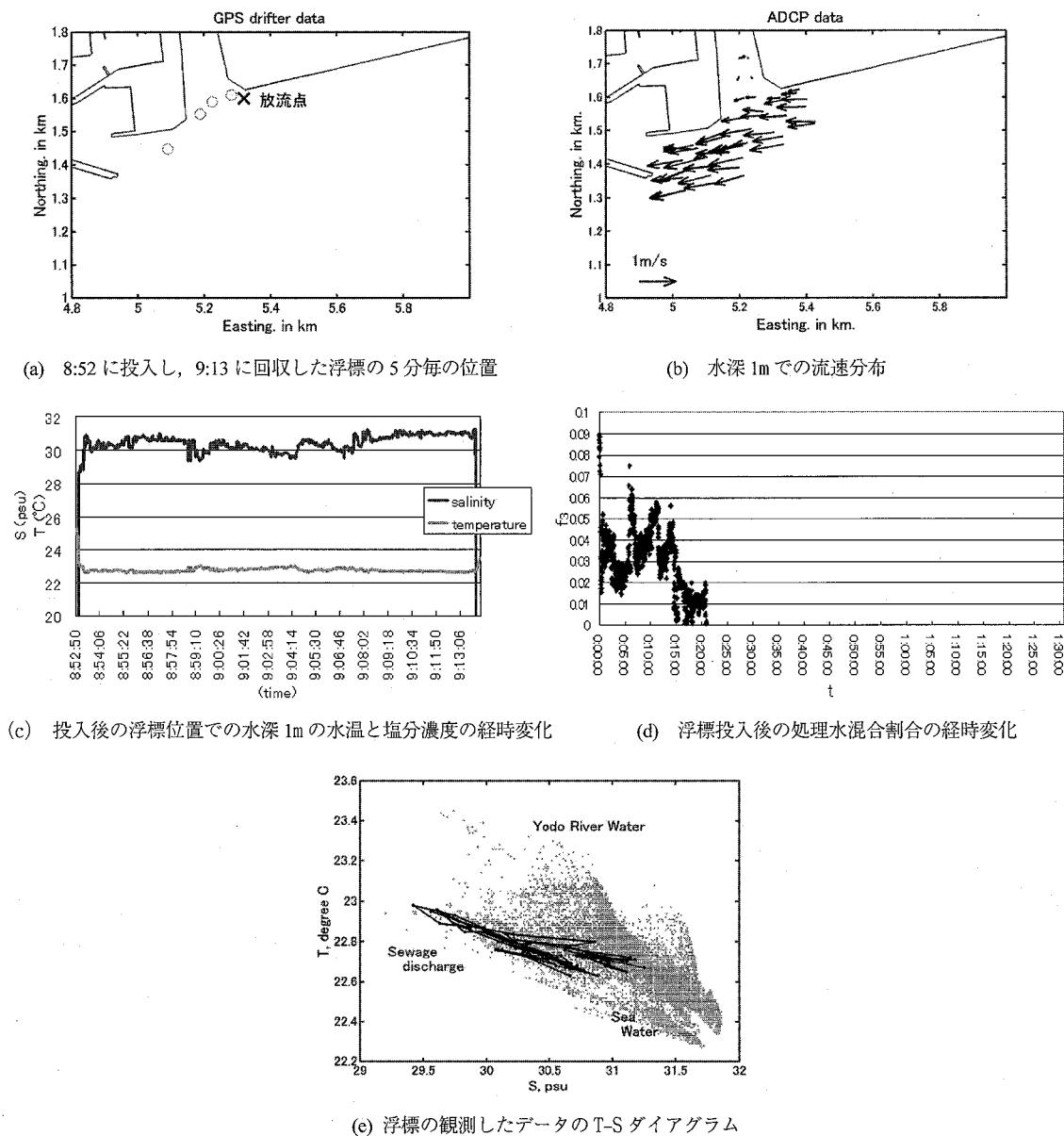


図-4 8:52 に投入した浮標の軌跡, 流速分布, 浮標位置での水温・塩分濃度の時間変化, 処理水混合割合の時間変化および T-S ダイアグラム

ないものの同じオーダーである。初期位置は放流水プリュームのほぼ中心であるがその後プリュームは鉛直方向にも移動拡散するので浮標は一次的にプリュームから外れることもある。この時間帯では明石海峡、垂水沖とも西向きの流れである。放流された処理水はこの西向きの潮にのり、海岸線に沿って西に移流する。まず福田川河口に近づくが、その流量は処理水放流量より小さく、この満潮時では海水が逆上するのでは影響は殆どない。約 20 分で 500 m 移動する間にほぼ 1/10 に減衰している。

図-4(c) から、放流後一時水温がやや上昇し、塩分濃度が下がっているがこれは大阪湾東部の水塊と混合していることを示唆する。図-4(e) の T-S ダイアグラムの軌跡は、明石海峡の海水と大阪湾東部の水と同時に混合していることを示している。

次に図-5 に 10:30 に投入した浮標によりえられた同様な結果を示す。ただし T-S ダイアグラムは省略する。この時間には海峡、観測域とも西から東向きの流れに転流する。浮標追跡図 (図-5(a)) から浮標投入後 50 分後

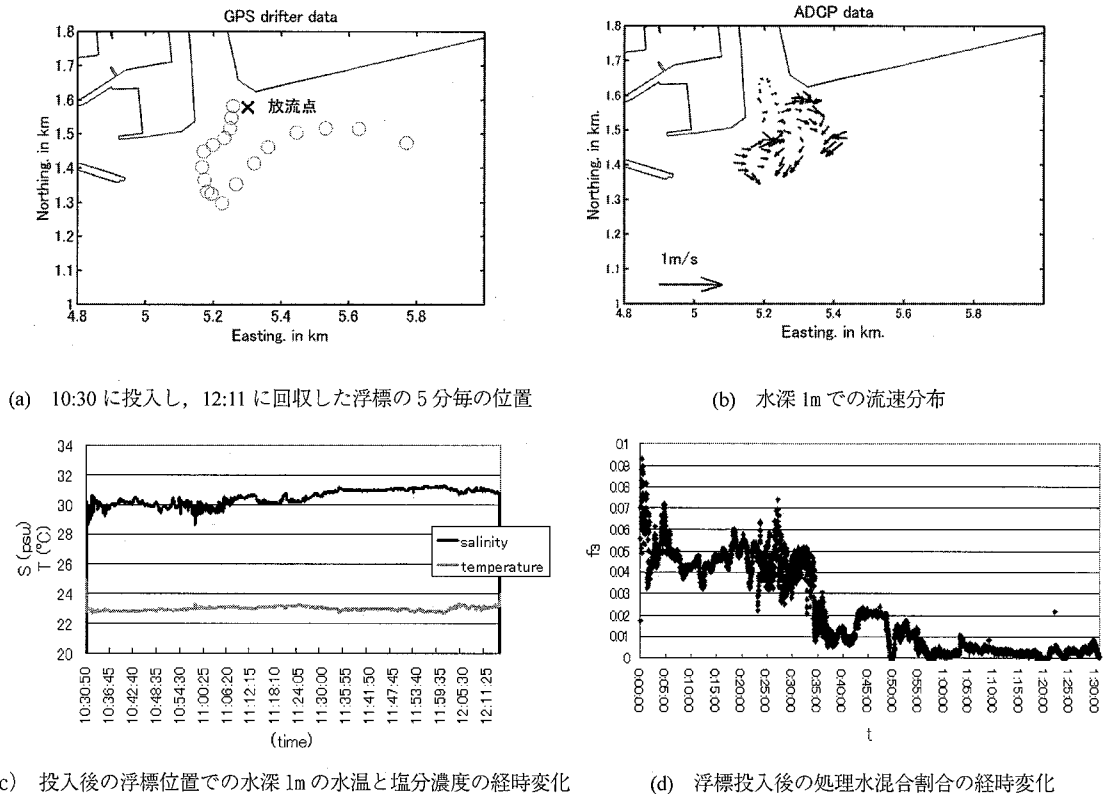


図-5 10:30 に投入した浮標の軌跡, 流速分布, 浮標位置での水温・塩分濃度の時間変化, 処理水混合割合の時間変化

位から東向きに転じるのが分かる。これ以降明石海峡からの噴流の影響で北東に押し上げられる形になる。この場合一旦南西に流された後もとの放流口方向にもどるので、拡散速度は遅く、処理水混合割合が1/10に減衰するのに西流時8:52投入の場合に比べ3倍の約1時間かかっている。図-5(c)からは、塩分濃度はほぼ単調に増加し、水温は殆ど変化がなく、主に海峡の海水との混合している。

次に図-6には海峡で東流が最強になった後、須磨・垂水沖では反流が起き西向き流れになっている時間帯に放流された浮標からのデータである。浮標は放流後南西に流れればまっすぐ海峡に向かう。処理水混合濃度は一旦減少しその後激しく変動する。これは図-6(e)のT-Sダイアグラムの軌跡からわかるように、海峡からの低温、高塩分の海水と激しく混合するからと考えられる。処理水混合割合は放流後約20分で1/10に減衰している。

本稿では大潮時のみの場合を報告したが、小潮時はまた異なる傾向を得ている。潮流に大きく影響される沿岸域での拡散特性は異なる潮流条件での調査が重要である。

4. 結 論

GPS 浮標に計器を搭載し、放流水の流動軌跡にそって水温、塩分濃度のラグランジェ的計測を行い、拡散特性の詳細を求めた。放流水の水温と塩分濃度は周辺の海水の温度、塩分濃度と大きく異なっていることより、これらの測定によりその混合割合を算出し、その減衰特性と潮流との関係を調べた。

満潮時、明石海峡および垂水沖で西流が卓越している時間帯では流速、拡散とも早く、明石海峡で東向き流れに転流する時間帯では拡散は1/10以下になり福田川河口域に停滞する。海峡で東流が最強になった後、須磨、垂水沖で反流が生じている時は放流水は海峡の海水と直接混合し拡散も早い。

以上はこれまでの移動する観測船に固定した計器で得られた結果と対応しているが、本方法により効率が良く、精度も良い結果が得られた。今回は主に水平方向拡散に注目したが、今後複数個の計器を搭載し鉛直分布も計測すれば鉛直混合も得られると期待される。

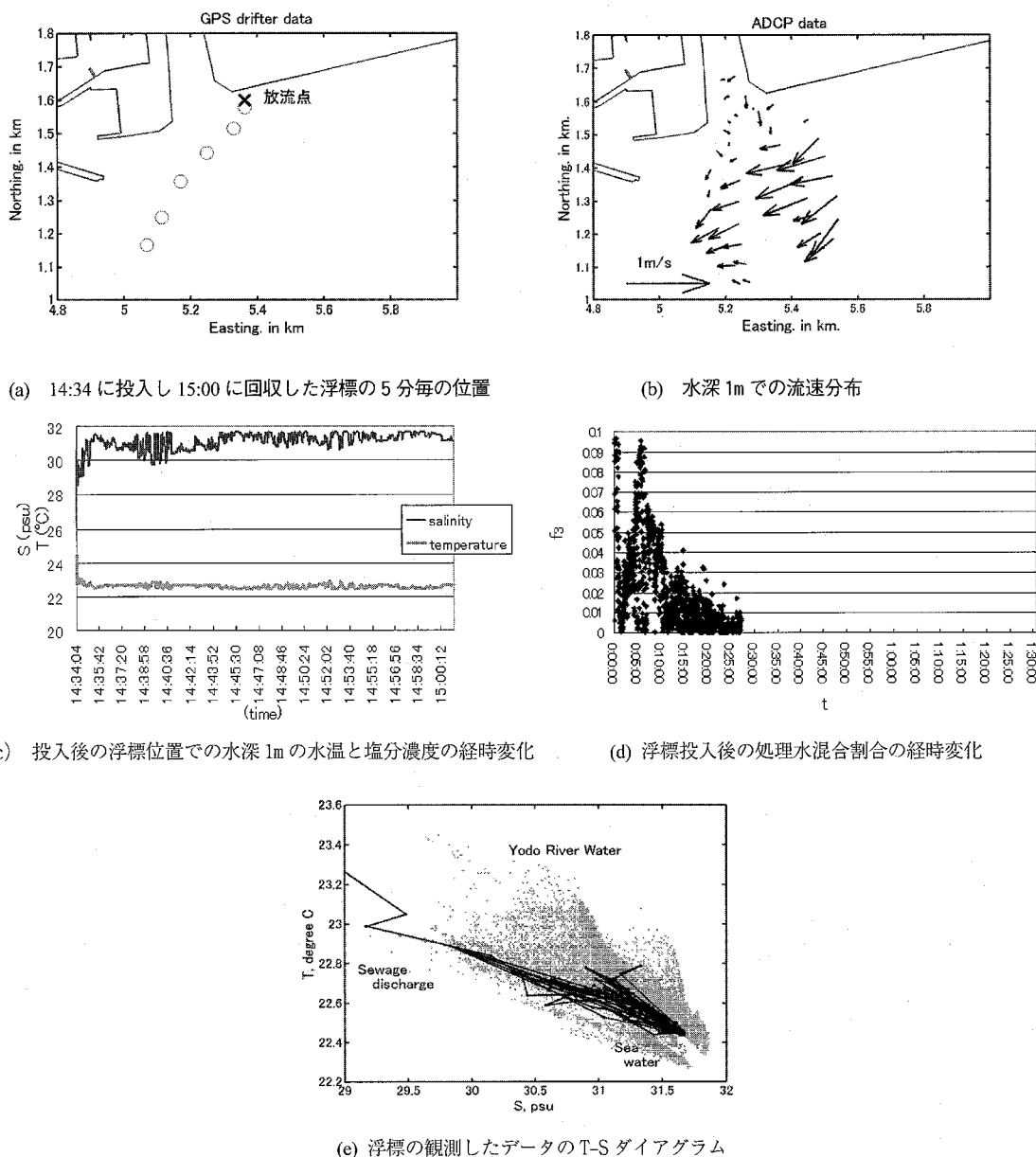


図-6 14:34 に投入した浮標の軌跡, 流速分布, 浮標位置での水温・塩分濃度の時間変化, 処理水混合割合の時間変化および T-S ダイアグラム

謝辞：本研究を進めるにあたり神戸大学内海域環境教育研究センター，神戸市環境局，神戸市建設局，株エス・イー・エーの協力を得た。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- Bricker, D. J., I. Okabe and A. Nakayama (2006a) : 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.
- Bricker, D. J., 中山昭彦・青木千夏・高田 誠 (2006b) : 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, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 346-350.

- Bricker, D. J. and A. Nakayama (2007) : Behavior of a small pulsed river plume in a strong tidal cross-flow in the Akashi Strait, *Env. Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 203-225.
- Fujiwara, T., H. Nakata, and K. Nakatsuji (1994) : Tidal-jet and vortex-pair driving of the residual circulation in a tidal estuary. *Continental Shelf Research*. Vol. 14, n9, pp. 1025-1038.
- Nakatsuji, K., Muraoka, K. and Murota, K. (1994) : The Yodo River plume spreading in Osaka Bay, Japan., *J. Hydrosci. Hydr. Eng.*, Vol. 12(1), pp. 27-4.