

内湾域の底質輸送パラメータ推定を目指した オイラー・ラグランジュ計測手法の検討

Eulerian-Lagrangian Measurements for Estimating the Sediment Transport Parameters in Estuary

西 敬浩¹・Charles Lemckert²・山田文彦³

Takahiro Nishi, Charles Lemckert, Fumihiko YAMADA

The novel instrument based on a Lagrangian Acoustic drogue (LAD) has developed for estimating the sediment transport parameters in the estuary. This instrument consists of GPS, ADCP and Nephrometer with Lagrangian drogue. The field experiments using LAD was conducted in Brisbane River, Australia on Dec. 7, 2006. Time-space distributions of the turbidity, horizontal current velocity and direction were obtained. The settling velocity is estimated by analyzing the temporal and spatial changes of the turbidity contour lines. The linear correlation was found to be existed between suspended sediment concentrations (SSC) and settling velocity. An Approximated equation using the method of least means squares agrees well with the results by Van Leussen (1999).

1. はじめに

浅海域での底質輸送や地形変化予測の数値モデルにおいて、沈降速度や巻き上げ係数などの底質輸送パラメータを推定することは、砂質土のみならず粘性土においても非常に重要である。しかしながら、これらのパラメータを決定する上で重要な浮遊物質の大きさや密度は、潮汐、波浪、河川流入、Suspended Sediment Concentration (SSC)、塩分、温度、化学的要因などの影響を受け、複雑な環境要因によって支配されている (Voulgaris・Meyers, 2004)。これらの複雑な環境を実験室で再現するのは、非常に困難であるため (Sternberg ら, 1999)、底質輸送パラメータの推定にあたっては、対象とする現地においてこれら環境要因データの取得が不可欠である。

内湾などの現地において、沈降速度を観測する手法として、これまでオーウェンチューブが使われてきた。しかし、Dyer ら (1996) は、この観測機器を使う場合、浮遊物質を採取する際に、フロックを破壊してしまい、沈降速度を精度良く推定できないことを指摘している。そこで、オーウェンチューブに代わる観測機器として、OBS などの光学式計測器 (Fugate・Friedrichs, 2002)、回折作用を利用した LISST-100 (Gartner ら, 2001)、音波を使った Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) (Holdaway ら, 1999; Hill ら, 2003) が開発され、様々な研究で現地観測に使われてきた。しかしながら、これらの観測機器を使った観測手法は、主に固定

点観測によるオイラー計測手法であり、現地で計測された濁度の上昇が局所的な底質の巻き上げによるものか、それとも、流れに伴って移流してきたものかの判別が困難である (Mikkelsen ら, 2006)。そのため、底質輸送パラメータを精度良く推定するためには、ラグランジュ計測手法との併用が必要である。

ラグランジュ計測手法として、Drifter または Drogue (ブイの一種) を使った現地観測が、主に外洋において行われてきた (Niller ら, 1995; Righi・Strub, 2001)。Johnson・Pattiaratchi (2004) は浅海域である磯浜帯において、GPS を搭載した Drifter による海浜流の現地観測を行った。また、Schacht・Lemckert (2005) は、Lagrangian Acoustic Drogue (LAD) を開発し、内湾における浮遊物質の輸送特性の現地観測を行った。LAD は、4 つのベーンを有したフロート式ブイに DGPS・ADCP・CTD センサーを搭載したものである。これは、流れと共に移動しながら、流速・濁度・水温・塩分の鉛直分布を計測し、それらの輸送フラックスの移流成分を算定するものである。本研究は、潮間帯を含む内湾浅海域でのオイラー・ラグランジュ計測手法の確立に向けた初段階として、LAD の改良を試み、現地実験を行い、その基本性能や沈降速度算定方法を検討した。

2. 観測機器の概要

本研究では、ラグランジュ計測手法を確立するための初段階として、Schacht・Lemckert (2005) のフロート式ブイを参考に、機器の開発を行った。この観測機器には、ブイの軌跡を計測するための GPS、浮遊物質の流速・流向を計測するための ADCP を搭載した。さらに、流速・流向と同時に濁度の鉛直分布を計測するために、5 台の比濁計をブイの下に吊るした。図-1 は、改良型 LAD の全体図を示している。この機器は、ベーンを有

1 学生会員 熊本大学大学院自然科学研究科環境土木工学専攻
2 Ph.D. グリフィス大学准教授
3 正会員 博(工) 熊本大学准教授大学院自然科学研究科社会環境工学専攻

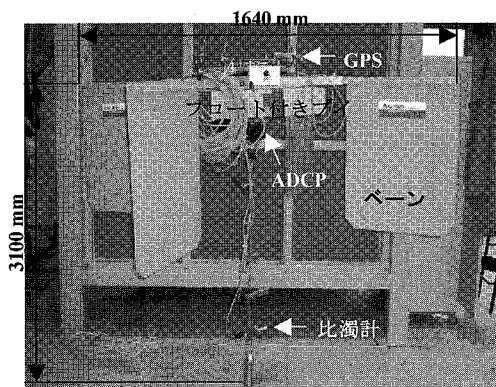


図-1 改良板 LAD

んだ全体の水平方向の長さは約 1.64 m であり、鉛直方向は比濁計を吊したワイヤーが約 3 m、フロートを含めると全体で約 3.1 m であった。また、全体の重量は約 20 kg であった。

また、浅海域でも使用可能にするために、既存の LAD を小型・軽量化する改良を行った。具体的には、ADCP と GPS は小型軽量器である Aquadopp Current Profiler (Nortek) と GPS 76 (GARMIN) に変更した。また、比濁計も小型軽量器である ANALITE 190 (McVAN Instruments) を使用し、さらに軽量化を図るために、記憶媒体は比濁計から分離し、各比濁計とリールを使って接続し、記憶媒体はフロートの上に、バッテリーと共に搭載した。さらに、記憶媒体とバッテリーについては、防水機能を有した箱に収納し、設置した。

GPS については防水バックの使用が不可欠であるのでそれによる位置精度の変化について検討し、誤差が小さい防水バックを選択した。防水バックとしては、カバー厚が異なる 3 種類、① WATERPROOF GEAR (WXtex)、② WATERTIGHT BAG SYSTEMS (blackWOLF)、③ PELICAN1060 Micro Case Series (PELICAN) について、位置情報の精度の検証を行った。検証方法としては、15 秒間隔で 10 分間、固定点に GPS を設置し、それぞれの防水バックに収納した状態で得られた緯度・経度について比較した。固定点の座標は、南緯 27 度 57 分 3.5 秒、東経 153 度 22 分 17.5 秒であった。図-2 は、計測された緯度の誤差の時系列を示している。図より、WATERPROOF GEAR (WXtex) による計測誤差は、0.09 秒であり、距離に換算すると約 2.8 m である。同様に、WATERTIGHT BAG SYSTEMS (blackWOLF) は、0.02 秒 (約 1.2 m)、PELICAN1060 Micro Case Series (PELICAN) は、-0.06 秒 (約 3.7 m) であった。また、図-3 は、計測された経度の誤差の時系列を示している。経度も経度と同様に誤差を求めると、WATERPROOF GEAR (WXtex) については、-0.43 秒

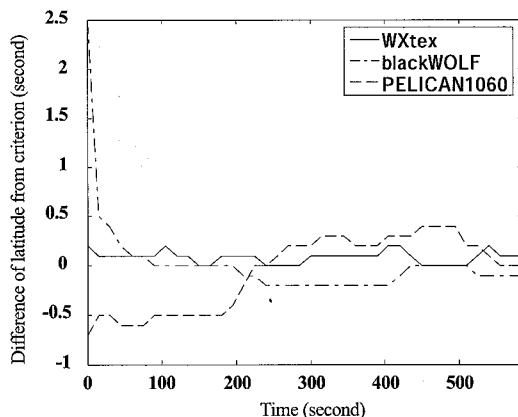


図-2 経度における固定点の座標からの誤差

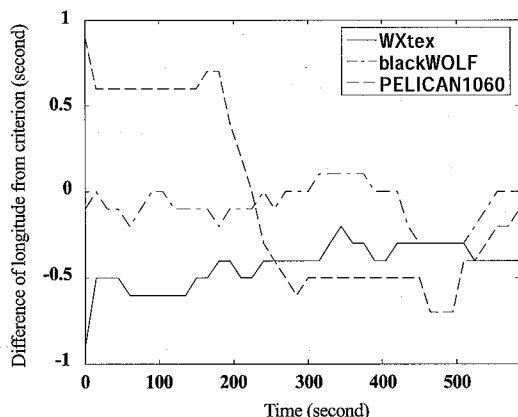


図-3 緯度における固定点の座標からの誤差

(約 26.6 m)、WATERTIGHT BAG SYSTEMS (blackWOLF) は、-0.08 秒 (約 4.9 m)、PELICAN1060 Micro Case Series (PELICAN) は、-0.05 秒 (約 3 m) であった。

ここで、今回使用する GPS の精度は ± 15 m であるので、防水バックによる影響は比較的小さいと考えられるが、より位置精度への影響を抑えるために、WATERTIGHT BAG SYSTEMS (blackWOLF) を採用した。

3. 現地実験

(1) 実験対象地

現地実験は、オーストラリアのクイーンズランド州を流れるブリスベン川 (図-4) で行った。ブリスベン川の流量面積は 13560 km² で、実験対象地の水深は、最大で約 18 m であった (Eyre ら, 1998)。潮位は大潮時に平均海面から 0.2 ~ 1.9 m、小潮時に 0.5 ~ 1.4 m と変化する。今回、実験を行った 12 月 7 日は大潮で、実験期間中の潮位は、水圧計を川岸に設置して計測した。観測

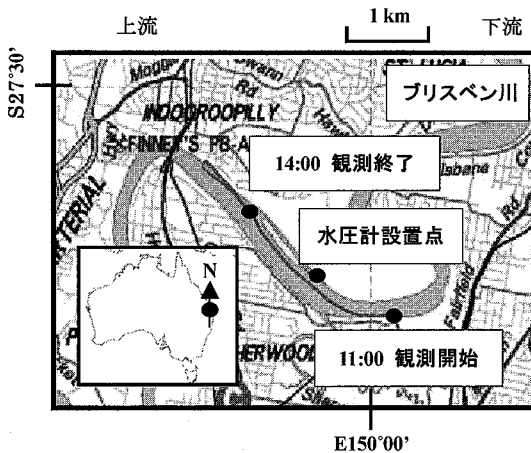


図-4 実験対象地と GPS による改良板 LAD の軌跡

結果より、潮位は河口から実験対象地までの約 20 km を約 1 時間半で移動することが確認できた。

(2) 実験概要

実験は、2006 年 12 月 7 日の上げ潮～満潮 (12:30) ～下げ潮の約 3 時間で行った。この日の気象条件は、晴れで、観測期間中の最大風速は、観測場所に近いブリスベンで 4.7 m/s であった。観測中は、船を用いて改良型 LAD から 10 m 程度離れた場所で、約 15 分ごとに電気伝導度・水温・塩分の鉛直分布を CTD センサーにより計測した。また、キャリブレーションのために、水面に最も近い比濁計の設置水深である 0.55 m 付近で採水サンプリングを行った。さらに、潮位の時系列を計測するために、水圧計の XR-420 TG (Richard Branker Research Ltd) を計測間隔 1 分とし、観測期間中、川岸に設置した (図-4)。

改良型 LAD に搭載した ADCP は、層厚 0.5 m で、30 層に設定し、1 分ごとに流速・流向を計測した。また、比濁計は、鉛直に約 0.55 m 間隔で 5 個設置し、5 分間隔で濁度の鉛直分布を計測した。GPS は、防水ケースに収納し、精度を向上させるために、約 45° 傾けて改良 LAD の上端に設置し、10 秒間隔でその軌跡を記録した。

4. 観測結果

実測した GPS の軌跡を図-4 に示す。この図から、改良型 LAD が、最初に上げ潮によって、上流方向に移動し、下げ潮になると、下流方向へと、潮汐と共に向きを変えることが確認できる。また、この時の総移動距離は 3.93 km であった。本研究では、憩潮時刻の定義を、Schacht・Lemckert (2005) と同様、GPS の位置情報から算出されるブイの移動速度が最小となる時刻と定義したため、憩潮時刻は 12:57 であった。水圧計から得られた潮位より、満潮時刻は、12:30 であったので、約 30

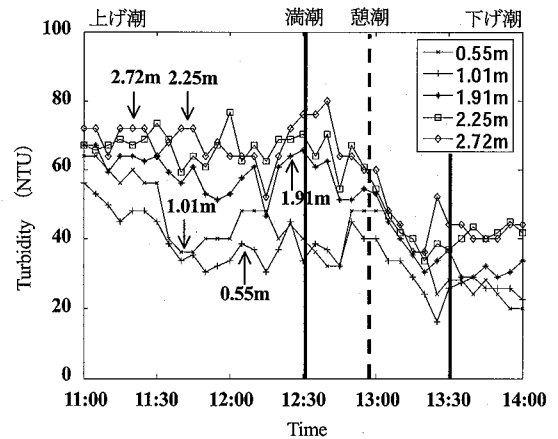


図-5 濁度の時系列 (実測値)

分の時間差が生じている。また、CTD から得られた電気伝導度・塩分・水温より、実験期間中に顕著な成層化が生じていないことを確認している。

図-5 は、5 台の比濁計で計測した濁度 (単位: NTU) の時系列を示している。この中で、凡例は水面から各比濁計までの鉛直距離 (設置水深) を示している。図より、上げ潮から満潮にかけて、水面から 1.01 m までの表層付近の濁度は、約 60 NTU から 40 NTU と、時間の経過と共に減少している。一方、1.91 m 以深の濁度は、それぞれ、約 70 NTU 付近で、ほぼ一定の値を保ったままである。その後、全観測深度で濁度の急激な低下が見られる。これは、憩潮時刻の約 30 分前である満潮時刻付近から、憩潮時刻の約 30 分後に当たる 13:30 までの約 1 時間の間で生じており、この低下傾向は、設置水深が深いほど顕著であることが確認できる。これは、潮汐による水平方向流速の減少により、浮遊物質の沈降が生じたものと考えられる。その後、潮汐による水平方向流速の増加に伴って、13:30 頃から再び、下層の濁度が徐々に上昇しており、浮遊物質の (再) 巻き上げを捉えたものと推察される。

次に、比濁計で計測された濁度と、ADCP で計測された水平方向流速・流向との関係を検討した。これらの実測値の時空間変動を図-6 に示す。図中の流速は、GPS による表層流速との相対速度であり、同一平面内で北向き流速を $u(+)$ 、東向き流速を $v(+)$ とし、式 (1) による合成流速 V として表示した。

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \dots \dots \dots (1)$$

なお、流向は真北から時計回りの角度を表す。流速・流向については、水深 15.4 m まで計測を行ったが、比濁計で計測された水深 3 m までの時空間分布と比較するために、ここでは、水深 6 m までの実測値のみを示し

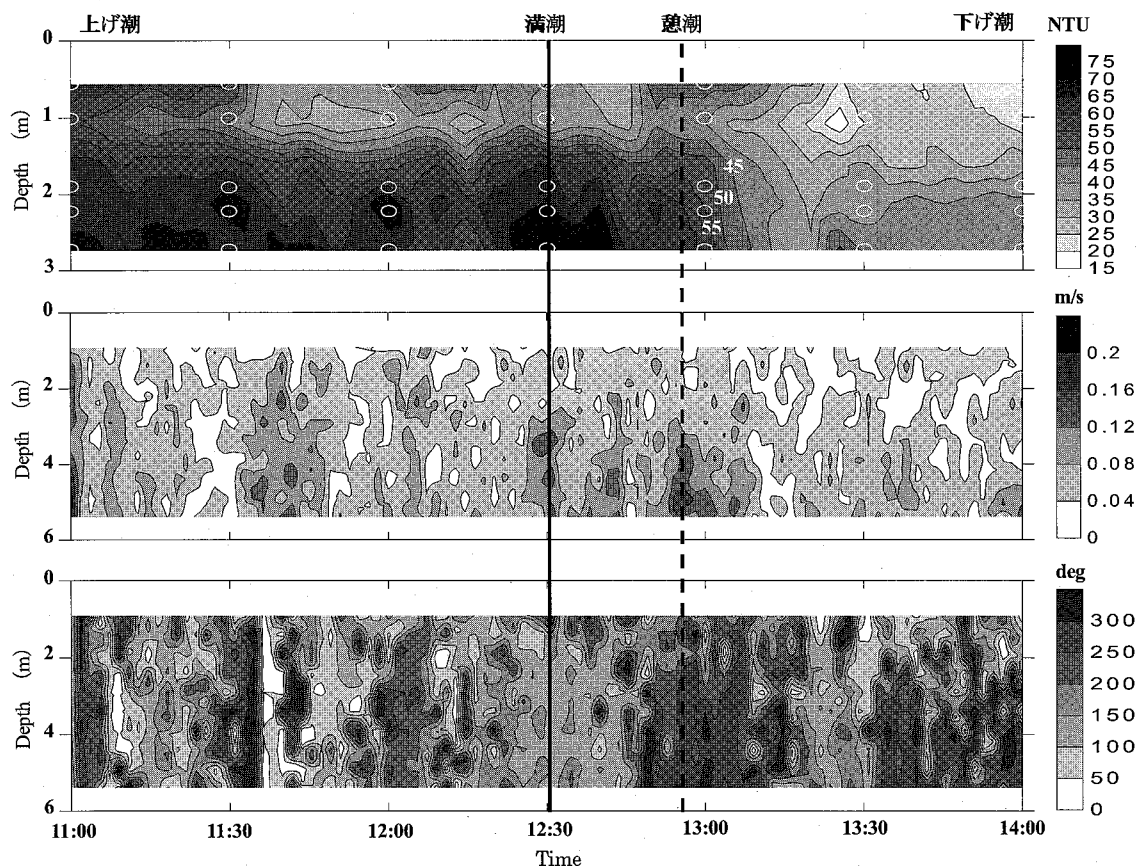


図-6 改良版LADによる (a) 濁度・(b) 流速・(c) 流向の時空間分布

ている。

図-6(a)は濁度の時空間分布を示しており、図中の白円は、各濁度計の設置水深を30分毎に示したものである。濁度の時空間分布は、5点での実測値を時空間方向に補間する事で算出した。図より、各比濁計の濁度の時系列(図-5)が示す傾向と同様に、観測開始から憩潮時刻前まで濁度が減少し、憩潮時刻後には、特に底面付近で濁度が再び増加していることが確認できる。また、図-6(b)が示す水平方向流速の実測値からは、憩潮時刻前では、水深が約4mの地点で、最大で0.16 m/s以上の流速が観測されているが、憩潮時刻後には、全水深で、最大で0.08 m/s程度の流速しか観測されておらず、潮汐の変化に伴い流速が減少していることが確認できる。さらに、図-6(c)が示す流向の実測値からは、憩潮時刻前に150°～200°だった流向が、憩潮時刻後には、300°～360°に変化していることが確認できる。このことから、潮汐に伴い内部の流速も方向を変えていることが確認できた。これらの結果は、本研究で開発した改良型LADは、潮汐変動に伴う浮遊物質の流動場特性を、ラグランジュ場において計測可能であることを示唆してい

る。また、潮汐が憩潮時刻に差しかかると、水平流速が減少し、それと同時に浮遊物質が沈降し、さらに憩潮時刻を過ぎ、再び水平流速が卓越してくると、浮遊物質が再び巻き上がるという特徴を計測可能であることが確認された。

5. 沈降速度の検討

Dyerら(1996)やVan Leussen(1999)はオーウェンチューブなどの機器を使って、内湾における現地観測から、式(2)に示すSSCと沈降速度の関係式を算出した。

$$W_{bs} = kC^n \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 W_{bs} は沈降速度(mm/s)、 C はSSC(mg/l)、 $k \cdot n$ は実測値から得られる現地に依存した定数を示している。その中で、Van Leussen(1999)は n については一般的に0.5～3.5の範囲にあること示している。

本研究でも、同様に、SSCと沈降速度の関係式を求めるために、比濁計で計測した濁度(単位:NTU)を、採水サンプリングによって得られたSSC(mg/l)を使ってキャリブレーションを行った。その結果、濁度と

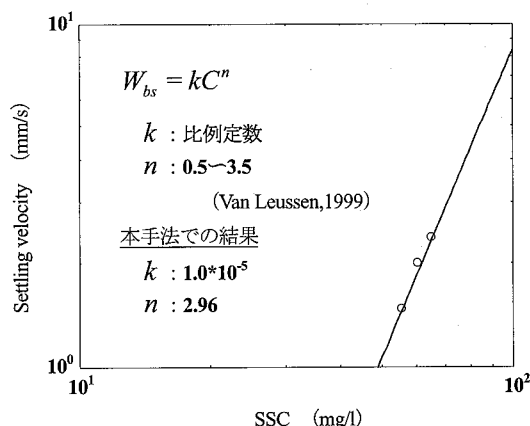


図-7 濁度の時空間分布から算出した沈降速度と近似曲線

SSCの相関は比較的高く(相関係数0.75)、両者の関係式は式(3)で近似できる。

$$SSC = 0.80NTU + 6.41 \dots\dots\dots (3)$$

沈降速度を算定する手法として、Schacht・Lemckert (2005)は濁度の時空間分布を示す等値線を使って算出する独自の手法を提案している。その手法は、濁度が低下し始める地点と、濁度が再び上昇する地点、または、観測終了地点までを直線近似し、その傾きを沈降速度と定義するものである。本研究でも、同様の手法を45・50・55 NTUの濁度の等値線(図-6(a))に適用した。

図-7は、濁度の時空間分布から算出した沈降速度(図中の○)とその近似曲線を示している。今回は濁度が100 mg/l以下の範囲を対象としており、近似式としては式(4)が得られた。

$$W_{bs} = 1.0 \cdot 10^{-5} C^{2.96} \dots\dots\dots (4)$$

なお、相関係数は、0.99である。今回の現地観測で入手できた推定値は3点と少なかったが、近似式の指数部分($n = 2.96$)は、Van Leussen (1999)が示した指数の範囲($n = 0.5 \sim 3.5$)にあることが確認できた。

6. ま と め

本研究では、潮間帯を含む内湾浅海域でのオイラー・ラグランジュ計測手法の確立に向けた初段階として、LADの改良を試み、現地実験を行い、その基本性能などの検討を行った。観測結果から、改良型LADは、潮汐と共に移動し、浮遊物質の輸送特性を調べるための濁度・水平流速・流向を計測できることを確認することが出来た。また、実験的ではあるが、取得した濁度の等値線から沈降速度を算出することができた。さらに、その近似式がVan Leussen (1999)が示した指数の範囲($n =$

0.5 ~ 3.5)にあることが確認できた。

しかしながら、本計測機器やデータ解析手法に関しては、まだ改良・検討の余地が残されており、さらなる改良や検証実験を実施し、精度検証を実施する予定である。

参 考 文 献

- Dyer, K.R., Cornelisse, J., Dearnaley, M.P., Fennessy, M.J., Jones, S.E., Kappenberg, J., McCave, I.N., Pejrup, M., Puls, W., Leussen, W.V. and Wolfstein, K. (1996): A comparison of in situ techniques for estuarine floc settling velocity measurements, *Journal of Sea Research*, 36, pp. 15-29.
- Eyre, B., Hossain, S. and McKee, L. (1998): A suspended sediment budget for the modified subtropical Brisbane River estuary, Australia, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47, pp. 513-522.
- Fugate, D.C. and Friedrichs, C.T. (2002): Determining concentration and fall velocity of Estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST, *Continental Shelf Research*, 22, pp. 1867-1886.
- Gartner, J.W., Cheng, R.T., Wang, P.F. and Richter, K. (2001): Laboratory and field of the LISST-100 instrument for suspended particle size determinations, *Marine Geology*, 175, pp. 199-219.
- Hill, D.C., Jones, S.E., and Prandle, D. (2003): Derivation of sediment resuspension rates from acoustic backscatter time-series in tidal waters, *Continental Shelf Research*, 23, pp. 19-40.
- Holdaway, G.P., Thorne, P.D., Flatt, D., Jones, S.E. and Prandle, D. (1999): Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration, *Continental Shelf Science*, 61, pp. 539-545.
- Johnson, D. and Pattiaratchi, C. (2004): Application modeling and validation of surfzone drifters, *Coastal Engineering*, 51, pp. 455-471.
- Mikkelsen, O.A., Hill, P.S. and Milligan, T.G. (2006): Single-grain, microfloc and macrofloc volume variations observed with a LISST-100 and a digital floc camera, *Journal of Sea Research*, 55, pp. 87-102.
- Niller, P.P., Sybrandy, A.S., Bi, K., Poilain, P.M. and Bitterman, D. (1995): Measurement of the water following capability of holey-sock and TRISTAR drifters, *Deep-Sea Research*, 42(11/12), pp. 1951-1964.
- Righi, D.D. and Strub, P.T. (2001): The use of simulated drifters to estimate vorticity, *Journal of Marine Systems*, 29, pp. 125-140.
- Schacht, C. and Lemckert, C. (2005): A new Lagrangian-based Acoustic Drogue (LAD) for monitoring flow dynamics in an estuary: a quantification of its water tracking ability, *Flow Measurement and Instrumentation* (投稿中)
- Sternberg, R.W., Berhane, I. and Ogston, A.S. (1999): Measurement of size and settling velocity of suspended aggregates on the northern California continental shelf, *Marine Geology*, 154, pp. 43-53.
- Van Leussen, W. (1999): The variability of settling velocities of suspended fine-grained sediment in the Ems estuary, *Journal of Sea Research*, 41, pp. 109-118.
- Voulgaris, G. and Meyers, S.T. (2004): Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek, *Continental Shelf Research*, 24, pp. 1659-1683.