ラグランジュ・ブイを用いた極浅海域での浮遊輸送特性の3次元計測

Lagrangian Measurements for Monitoring Suspended Sediment Dynamics in Shallow Water Regions

西敬浩¹ • Charles Lemckert² • Andres Payo³ • 外村隆臣⁴ • 山本浩一⁵ • 濱田孝治⁶ • 山田文彦⁷

Takahiro Nishi, Charles Lemckert, Andres Payo, Takaomi Hokamura, Koichi Yamamoto, Takaharu Hamada, Fumihiko Yamada

In-situ Lagrangian-Acoustic Drogue (LAD) has been developed for estimating the sediment transport parameters in intertidal regions with very shallow water. The new drogue is equipped with a Global Positioning System (GPS), Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) and nephelometers. The accuracy of a current profile measured using this instrument is verified in two different conditions; uni-directional flow and multi-directional flow. The field observation results support the conventional concept of suspended sediment as a vertical balance between downward suspended sediment settling and upward turbulent diffusion fluxes. The results may indicate that the new drogue is adequate for estimating the sediment settling velocity in the field.

1. はじめに

極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, 浮遊物質濃度 (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(Gever ら, 2004; Winterwerp, 2002; Yamada ら, 2008). これらの複雑な環境を室内実験で 再現するのは非常に困難であるため、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計測す る必要がある.しかしながら、従来の観測手法は、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 計測手法と組み合わせた計測手法を開発する必要がある.

内湾におけるラグランジュ計測手法として, Schacht・ Lemckert (2007) は, Lagrangian Acoustic Drogue (LAD) を開発し, 浮遊物質の3次元輸送特性の現地観測を行っ

1 正 会 員		(株)アルファ水工コンサルタンツ
2	Ph.D	グリフィス大学 准教授
3	Ph.D	熊本大学客員研究員 工学部
4正会員		熊本大学工学部 技術部
5 正 会 員	博(工)	佐賀大学講師 有明海総合プロジェクト
6正会員	博(工)	熊本大学教授 大学院自然科学研究科

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 極浅海域でのラグランジュ計測手法を開発するために、 最初にLADの改良を試み、その性能を調べるために一 方向流場で現地観測を行った(西ら,2007).その後、 外力要因が異なる波浪場へ適応させるために、改良した LADの流速分布測定精度の検証を、それぞれ一方向流 場・波浪場で行った.その結果、外力要因が異なる場所 でも流速を精度良く計測できることを確認できた.そこ で、現地観測で得られた浮遊輸送特性について物理的な 考察を行った結果、濁度の沈降・拡散に対し、運動エネ ルギーが重要なパラメータになり得ることが確認できた. 本論文は、最初に流速分布の精度検証、次に現地観測結 果の考察、最後にまとめという構成となっている.

2. 観測機器の概要

ラグランジュ計測手法では、計測機器を載せた
Drogue が周囲の水塊と同一速度で運動することが前提
条件となり、Water Tracking Ability (Niller ら、1995)
と呼ばれる. Schacht・Lemckert (2007) は水深4.5m までのWater Tracking Ability を保証できるような Drogue
の形状について検討し、濁度・流速の時空間分布を計測した.本研究では Schacht・Lemckert (2007)のLADの
Drogue の形状 (ブイの形状、ベーンの寸法など)を採用し、極浅海域の観測を可能にするため小型・軽量な計測機器を搭載するように改良した.改良型LADでは、
ADCP・GPS・比濁計として、Aquadopp Current Profiler



図-1 改良型 LAD

(Aquadopp-ADCP; Nortek), GPS76 (GARMIN), ANALITE190 (McVAN Instruments) をそれぞれ用いた. 図-1に,改良型 LAD の全景と寸法を示す(西ら,2007).

3. 流速分布の測定精度の検証

改良型 LAD では計測機器の小型・軽量化のため,流 速計は Bottom Tracking 機能を有していない Aquadopp-ADCP を採用した.流速分布の測定原理は,Drogue 上 面に設置した GPS の軌跡から表層流速を算定し, Aquadopp-ADCP で計測した相対速度を加算するもので ある.そこで,まず,本提案手法における流速分布の計 測精度に関して,一方向流場と波動場で検証を行った.

(1) 一方向流場

検証実験は熊本市上益城町のホテルエミナースが所有 する屋外流水プールで行った.流水プールの平面形状は 楕円状であり,全周長は160mである.断面は幅6m,水 深1mの矩形であり,3つの噴水口によって一方向流を 発生する.流速分布の検証として,電磁流速計(VE-10, ケネック)により,円周方向にほぼ等間隔の12ヵ所,ま た水深方向に0.2m間隔で6点,合計72点で計測を行った. その結果,3つの噴水口を使った場合の平均流速は0.29 m/sで,1つの噴水口を使った場合の平均流速は0.16m/s であった.また,流速分布はほぼ一様であった.

まず,GPSの軌跡から算定した表層流速の精度検証 結果について説明する.検証方法としては,目視観測お よび電磁流速計による表層流速との比較を行った.図-2 (a)は,GPSで計測した表層流速の時系列とその平均値 (0.31m/s),さらに目視観測の結果を示している.GPS の軌跡から算定した表層流速と目視観測の相対誤差は8 %であった.また,電磁流速計で計測された平均値は 0.27m/sで,この時の相対誤差は12%であった.これら の結果から,GPSの軌跡(1Hz間隔)から精度良く表層 流速が算定できることが確認できた.

次に,改良型 LAD で計測した流速分布と,電磁流速

計の結果の比較を行った.改良型 LAD の内部流速の算 定方法は、まず Aquadopp-ADCP の計測結果(相対速度) を式(1)より合成流速vに換算する.ここで北向き流速 をu(+)、東向き流速をv(+)とする.次に GPS の軌 跡から求めた表層流速の方向の合成流速成分を算出し、 それと GPS による表層流速を加算することで算定する.

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \tag{1}$$

なお,流速分布の比較に先立って, ADCP 測定結果 (23Hz)の平均時間が計測精度に影響を及ぼす事が判明 したため、流水プールの平均流速と ADCP 測定結果の 平均時間の関係についても検討した。その結果、平均流 速が0.29m/sの時は ADCP 測定結果の平均時間を60秒, 平均流速が0.16m/sの時は90秒と設定することで、測定 精度が改善される事を確認した.図-2(b)・(c)は、図-2 (a)に示す GPS で計測された表層流速と, Aquadopp-ADCP で計測された相対速度を加算して算定した内部流 速の時系列を示している. このときの Aquadopp-ADCP の設定は、平均流速が0.29m/sで、計測間隔を60秒とし た. 流水プールの水深が1m だったため、ADCP で計測 できたのは水深0.6m と0.8m の2点であった. 電磁流速 計で計測した平均流速は、両方の水深で0.30m/s であっ た. 改良型 LAD で計測された水深0.6m の平均流速は 0.32m/s(相対誤差7%),また,水深0.8mの平均流速は 0.30m/s(相対誤差0%)であった.以上より、一方向流場 では、GPS の軌跡から算出される表層流速と Aquadopp-ADCP で計測する相対速度を加算することで、内部流速 を計測可能である.



図-2 改良型 LAD で計測された流速の時系列(一方向流場)

(2) 波浪場

波浪場での流速分布の測定精度の検証は,熊本市白川 河口域に広がる潮間帯上(図-3)で行った.現地におけ る大潮時の平均潮位差は3.86mで,平均有義波高は0.2m, 有義波周期は3秒である。検証実験は、2008年1月12日の 満潮(11:30a.m.)をはさんだ10:00a.m.~12:45p.m.の期 間で行った.この時の最大風速は7m/sで,主風向は南 西方向であった. Aquadopp-ADCP については、満潮時 の水深が3m以下であるため, 層厚0.2m とし, Yamada ら(2008)の結果より干潟底面上の平均流速が0.2m/s程 度であることを考慮し、平均時間は60秒とした。また、 精度検証用に Bottom Tracking 機能を有する ADCP (Workhorse, RD Instrument) を船に取り付け, 改良型 LAD から約5mの距離を保って追跡し、流速分布を計測 した(以下, Workhorse-ADCP). Workhorse-ADCPの設 定は, 層厚0.05m, 測定間隔を1秒, 平均時間を2秒とし た. さらに, 船上では LISST-100 (Sequoia Scientific, Inc)と, AAQ1183 CTD (Alec Electronics)を使って,水 深方向の粒径分布,水温,濁度,塩分の計測を30分毎に 行った. 観測中に,改良型 LAD は11:30p.m.付近で潮目 を通過した. 潮目通過前の GPS による表層流速 (0.2m/s)が、通過後に2倍程度に増加しており、白川流 入の影響を受けたものと考えられ、この期間のデータは 今回の検証から除外した.



図-3 改良型 LAD の軌跡(波浪場)

図-4は改良型 LAD で計測した流速分布と Workhouse-ADCP の計測結果を水深方向に比較した結果の一例であ る. Workhouse-ADCP の結果は,改良型 LAD の結果と 合わせるために,60秒毎に平均と標準偏差を再計算した 値である.計測期間中の Workhouse-ADCP による計測 結果の平均標準偏差は0.05m/s程度と小さく,流速分布 の顕著な3次元構造は見られず,南向きの流速が水深全 般で卓越した.これは図-3に示すGPS で計測した改良 型 LAD の軌跡と一致する.次に,GPS の軌跡から算定 した表層流速と Aquadop-ADCP による相対速度分布を 加算した流速分布は,観測期間中,常に Workhouse-ADCP より大きな値を示した.一方,Aquadop-ADCP のみの流速については Workhouse-ADCP の計測結果と 類似した分布を取ることを今回の観測で確認できた.そ こで, Workhouse-ADCP と Aquadopp-ADCP の結果を定 量的に比較するために,式(2)を用いて水深方向に積分 して求めた一様流速を算出し,比較を行った.

$$\widetilde{U} = \frac{1}{(h+\eta)} \int_{-h}^{\eta} u(z) dz, \ \widetilde{V} = \frac{1}{(h+\eta)} \int_{-h}^{\eta} v(z) dz \quad (2)$$

ここで、hは水深、 η は静水深から水表面までの距離、 \tilde{U} 、 \tilde{V} はそれぞれ北向き(+)、東向き(+)の水深方向に一 様な流速を示している.式(2)から求めた Workhouse-ADCP と Aquadopp-ADCP の流速の相対誤差は3.5%であ り、波浪場では、一方向流場と異なり、Aquadopp-ADCP のみを用いて流速分布を計測可能であることが確 認できた。



図-4 流速(絶対値)の鉛直分布の精度検証の一例

なお,波浪場では Aquadopp-ADCP のみで流速分布を 計測可能な理由として,質量輸送速度が一方向流場と異 なることが一因と考えられる.そこで,線形波動理論を 用いて,式(3)より波浪場における質量輸送速度を算出 した.

$$\overline{U} = \frac{1}{8}k\sigma H^2 \cdot \frac{\cosh 2k(h+z_0)}{\sinh^2 kh}$$
(3)

ここで、 \overline{U} は質量輸送速度、kは波数、 σ は角周波数、Hは波高、 z_0 は底面からの距離を示す.本研究では、波 長11.3m、周期3秒、波高0.2m、水深2m をそれぞれ用い た(Yamada・Kobayashi、2004).その結果、水表面に おける質量輸送速度は0.01m/s 程度となり、一様流場に 比較して1オーダー小さな値を取り、現状の GPS の検出 限界以下である.また、この程度の流速であれば、 Aquadopp-ADCPの計測中もほぼ固定点で計測している ことと同等と見なせるため、Bottom Tracking 機能の有 無が計測精度に影響を与えていないものと解釈できる.

4. 浮遊輸送特性の現地計測

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-5)で,2006年12月7日の大潮 時に行った(西ら,2007). Mehta(1986)やWinterwerp (2002)は憩潮時付近で浮遊物質が沈降することを示し ている.本研究の目的は,底質輸送特性の3次元構造を 解明することであるため,上げ潮~満潮(12:30p.m.) ~下げ潮の3時間で観測を行った.この日の気象条件は 晴れで,観測期間中の最大風速は,4.7m/sであった.観 測中は,船を用いて改良型LADから10m程度離れた場 所で,約15分毎に電気伝導度・水温・塩分の鉛直分布を 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0.55m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 Brancker Research Ltd)を測定間隔1分とし,川岸に設置した.



図-5 実験対象地と GPS による改良型 LAD の軌跡

Aquadopp-ADCP は, 層厚0.5m に設定し, 測定間隔を 20Hz, 計測間隔を1分と設定した.また,比濁計は,水 深方向に約0.55m 間隔で5個設置し,5分間隔で濁度を計 測し,GPS は10秒間隔でブイの軌跡を計測した.

実測した GPS の軌跡を図-5に示す. この図から,改 良型 LAD が,上げ潮によって上流方向に移動し,下げ 潮に変わると下流方向へと,潮汐と共に向きを変えるこ とが確認できる. この時の総移動距離は3.93km であっ た.本研究では,憩潮時刻の定義を,Schacht・Lemckert (2007)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 12:57p.m.であった.水圧計から得られた潮位より,満 潮時刻は,12:30p.m.で,約30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 た.

Winterwerp (2006) は、3次元の底質輸送モデルを考 える上で、乱流運動エネルギーが重要なパラメータの1 つであることを指摘している.乱流運動の計測には、高 周波数で流速を計測する必要があるが、本研究で使用し た ADCP では低周波数で平均的な流速のみ計測可能な ため、乱流運動エネルギーに影響を及ぼす平均流の運動 エネルギーについて検討した.図-6に5台の比濁計で計 測した濁度の時空間分布,平均流の運動エネルギーおよ びその変化率の時系列を示す.今回の実験場所は河川で あったため、一方向流場と同様の方法で内部流速を算定 した.運動エネルギーについては、水平方向流速と鉛直 方向流速から、式(4)を用いて算定した.

$$E = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$$
(4)

ここで, Eは平均流の運動エネルギー, wは鉛直方向流 速(上向き+)を示している.図-6から,濁度は水表面 付近で低下しているのが見られるが,運動エネルギーは 水深方向に大きな違いは見られなかった.また,満潮時 刻前(12:30p.m.)では濁度は各水深で一定値を保ってお り,運動エネルギーは 0.05m²/s²以上の値を取っている ことが確認できる.一方,憩潮時付近の13時直前から濁 度が急激に低下しており,その時,運動エネルギーも 0.05m²/s²以下の値へ減少し,時間変化率もほぼ0となっ ており,憩潮時刻付近で,運動エネルギーについて時間 的な変化が見られない.

この濁度と運動エネルギーの計測結果を物理的に解釈 すると、満潮時刻前(11:00a.m.~12:00p.m.)までは、 水深方向に、式(5)に示す乱流拡散(右辺)と沈降フラッ クス(左辺)が釣り合っている状態と見なす事ができる.

$$w_s \cdot \overline{C} = -\varepsilon_z \cdot \frac{\partial \overline{C}}{\partial z} \tag{5}$$

ここで、 \overline{C} は一波長の浮遊物質の平均濃度、 w_s は沈降速度、 ε_s は鉛直方向の拡散係数を示している.

一方, 憩潮時刻付近になると, 平均流の運動エネルギー が低下することによって, 乱流状態を維持できなくなり, 満潮時付近まで沈降フラックスを下支えていた乱流拡散 が相対的に小さくなる. その結果, 式(6)のように沈降 フラックスが支配的となり, 浮遊物質が憩潮時刻付近で 沈降したものと解釈できる.

$$w_s \cdot \overline{C} > -\varepsilon_z \cdot \frac{\partial \overline{C}}{\partial z} \tag{6}$$

5. まとめ

今回は、底質輸送パラメータの推定を目指した研究の 初段階として、極浅海域でのラグランジュ計測手法の開 発を行った.改良型 LAD を用いる事で、水深3m 程度 の極浅海域でも流速分布・濁度の時空間分布をラグラン ジュ的に計測可能であることが確認できた.また、一方



図-6 改良型 LAD による(a) 濁度の時空間分布,(b) 運動エネルギーの時系列,(c) 運動エネルギーの時間変化

向流場において現地観測を行った結果,沈降速度を求め るため指標として,運動エネルギーとその時間変化率が 重要なパラメータの1つになり得ることを示した.

今後は,波浪場において濁度の時空間分布を取得し, 運動エネルギーとの関係を調べるとともに,オイラー計 測手法と組み合わせた手法の開発を目指す.

参考文献

- 西 敬浩, Charles Lemckert, 山田文彦 (2007):, 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, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1421-1425.
- Geyer, J.W., Cheng, R.T., Wang, P.F. and Richter, K (2004): The transport, transformation and dispersal of sediment by coastal flows, Continental Shelf Research, 24, pp. 927-946.
- Mikkelsen, O.A., Hill, P.S. and Milligan, T.G. (2006): Singlegrain, 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, I, 45, pp. 1951-1964.

- Schacht, C. and Lemckert, C. (2007): A new Lagrangian-Acoustic Drogue (LAD) for monitoring flow dynamics in an estuary: a quantification of its water-tracking ability, Journal of Coastal Research, SI50, 420-426.
- Winterwerp, J.C. (2002): On the flocculation and settling velocity of estuarine mud, Continental Shelf Research, 22, pp. 1339-1360.
- Winterwerp, J.C., Manning, A.J., Martens, C., de Mulder, T. and Vanlede, J. (2006): A heuristic formula turbulence-induced flocculation of cohesive sediment, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 68, pp. 195-207.
- Yamada F and Kobayashi, N. (2004): Annual variations of tide level and mudflat profile, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 130, pp.199-126.
- Yamada F., Kobayashi, N., Sakanishi, Y. and Tamaki, A.: Phase averaged suspended sediment fluxes on intertidal mudflat adjavent to river mouth, Journal of Coastal Research. (印刷 中)