定期船ADCPデータの調和解析による潮流推定に関する一考察

Study on The Estimation of Harmonic Analysis Method Using ADCP Data Measured by Regular Ferry

仁木将人¹・勝間田高明²・杉本隆成³

Masato NIKI, Takaaki KATSUMATA and Takashige SUGIMOTO

In order to estimate the quantification of the material flux or material circulation, it is necessary to separate the tidal flow from the observation raw data measured by Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). This study was carried out to examine a method of separating the discontinuous current data collected using shipboard ADCP. To apply a harmonic analysis to discontinuous data brings up some questions about separation of tidal and residual current. In this study, even if increase the number of the observation data, the harmonic analysis is that M2 and S2 constituents cannot be separated. Since internal wave was dominant in this study area, the analysis period affects the result of harmonic analysis.

1. はじめ

近年、定期航路を持つフェリーにADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) を搭載し、流向流速のモニタリングを広範囲に長期間行う事例が見られるようになった。こうした観測は、定期的なメンテナンスを行えば、観測継続に関する負荷が小さく、長期および広範囲に特定の海域のデータを蓄積できる利点があるため、一種のモニタリングポストとなり、突発的に生じた現象の検証を行う場合などにも有益となる (例えば仁木ら, 2009)。

そうして求められた流速データを物質循環過程の解明や生物資源量の推定に有益な情報とするためには、少なくとも潮流成分を推定し残差流成分を分離することが求められる。潮流成分の推定にはしばしば調和解析が用いられるが、1日から数日で1個程度のデータ密度をもつ場合には約1日周期の現象に対しエイリアシングの問題が生じることがよく知られている (例えばKizuら, 2001)。本研究で対象とするのは1日に数往復程度のデータ密度を持つ観測結果であり、こうしたデータの取り扱いに対する検討はあまり見られない。そこで本研究ではフェリー航路上近傍で比較対象が可能なADCPの係留観測を実施し、両者の調和解析を行い、比較することで1日に数回程度往復する定期船ADCPのデータからの潮流推定法に関して検討を行った。

2. 現地観測

(1) 現地観測の概要

清水と土肥間を一日4往復 (片道1時間5分) する駿河湾

図-1 観測地点の概要(左)と係留系(右)

フェリーにADCP (RDI社製ワークホース300kHz) とGPS (ベクター社製CrecentV100-DGPS) を2008年1月に取り付け、2月中旬より運用開始している。観測は海面下100～150mまでを鉛直層厚4mで計測している。比較対象としてフェリー航路上近傍でADCP (RDI社製ワークホース600kHz) の係留観測を行った。係留地点は35° 1.33' N, 138° 33.74' Eであり、水深425mの地点で水深165mより上向きに係留した。観測層厚はフェリーと同じ4mであり、観測時間間隔は20分である。係留作業は2009年6月25日に行い、2010年1月6日に回収した。図-1(左)にフェリーの航路と係留地点の関係図を、図-1(右)に係留の模式図を示す。フェリーおよび係留系の観測結果からADCPの測定の信頼性を示すパーセントグッドが70%以上のデータを使用した。

(2) 係留系観測結果のスペクトル密度

対象とする駿河湾は日本でも屈指の深い湾であるため、外部潮汐によって生じる潮流は微弱であり、一部の沿岸域を除くと1cm/s以下との見積もりもある (Ohwakiら, 1991)。しかし、実際にこれまで行われた観測では、表層で10cm/sを越える日周潮や、駿河トラフの底付近で10cm/sを越える日周潮と半日周潮が観測されている

1 正会員	博(工)	東海大学准教授 海洋学部環境社会学科
2	博(理)	東海大学非常勤講師 東海大学清水教養教育センター
3	理博	東京大学 名誉教授

(Inaba, 1981; 安田ら, 2001; Matsuyama ら, 1993). こうした潮流は内部潮汐によって生じたと考えられ、駿河湾での特徴として、半日周潮よりも日周潮が卓越する傾向がある。

図-2に、係留観測結果から得られた南北方向流速のスペクトル密度を示す。半日にあたる約12時間とともに24時間弱と25時間強にスペクトルのピークが見られる。M2分潮の周期にあたる12時間強のピークが大きく、K1分潮

図-2 係留系測流データのパワースペクトル密度

とO1分潮に相当する周期に2つの強いピークが現れており、その値もK1やO1分潮の値がM2分潮よりも大きく、駿河湾の特徴をよく表している。また、半日周期付近のピークは約12.42時間でありM2分潮に相当していて、S2分潮に相当する12時間付近のスペクトル値は明瞭ではなく、M2分潮より小さい。

(3) 係留系データとフェリーデータの空間的な差違

駿河湾フェリーに限らず定期航路を航行するフェリーは、航路が当日の天候や他船の往来に左右される。そのため、こうした船舶を活用する観測では、観測位置を厳密に固定するとデータ数が少なくなる。影響が小さいと判断できる場合には標準航路に投影させる場合もある(例えば、鈴木ら, 2006)。まずは係留系との比較により空間的なフィルタリング範囲を決定することとした。

まず、係留地点に近い東経138.560~138.565度(0.005度の範囲)でデータを抽出し、緯度に関して①何も操作しない②35.012~35.032度(0.02度の範囲)③35.020~35.025度(0.005度の範囲)の3ケースについてフィルタ

図-3 フェリーデータと係留データの比較散布図

(右列が東西方向流速, 左列が南北方向流速 上: ①の条件 中: ②の条件 下: ③の条件)

リングした。図-3に44m層におけるフェリーデータと係留系データの比較散布図を示す。なお、時間的にはもっとも近い時間（20分以内）を対応させている。

湾口を南に開く駿河湾では、潮流が南北方向で卓越する。そのため南北方向流速は東西方向のそれに比べ流速値が2倍程度大きく、係留系とフェリーとの間で流速の一致も高い。これに対して東西方向流速はフェリーでの計測結果が係留系でのものに比べ2倍程度大きく相関係数も低くなっている。緯度に関して空間的に範囲を絞ると、相関の強さが高くなり、南北方向流速では強い相関が見られるが、対象になる観測数がかなり少なくなる。

係留系の観測地点は三保半島に近く、清水港への入り口付近に位置しており、西側にある地形の影響を強く受けると考えられ、東西方向流速で空間的な差違により流速値にばらつきが見られる。しかし潮流が卓越する南北方向流速はフィルターを掛けない場合でも相関がみられるため、東西方向流速の結果が多少改善している②の緯度に関して0.02度の範囲でフィルタリングしたものを使用することとした。

3. 調和解析とその考察

(1) 調和解析結果

係留系とフェリーの測流結果について、最小自乗法による調和解析を行った。調和解析に用いた分潮は主要8分潮であり、係留系観測では24m層で8577個、44m層で11401個、フェリー測流では832個のデータを使用している。調和解析結果から得られた潮流楕円を図-4に示す。図-4(a)と(b)はその解析結果から24m層、44m層に関して示している。どちらの層についても日周潮についてはフェリーと係留系データの解析結果が良い一致をしている。しかしながら半日周潮に関してフェリーは係留系に比べてM2分潮を過小評価し、反対にS2分潮を過大評価している。係留系データのパワースペクトル密度の考察から、駿河湾ではS2分潮は明瞭ではなく、半日周期には1つのピークしか見られていない。また、1日から数日に1往復するフェリーにおける観測では、フェリーの運航時間が太陽時に準拠して決まっており、24時間周期および12時間周期ではサンプリングの日周期が変化しないためS2分潮の見積もりが困難であるという指摘がある

(a) 24mでの主要4分潮

(b) 44mでの主要4分潮

(c) 44mでの主要8分潮のうち(b)で示していない4分潮

図-4 係留系およびフェリー測流の潮流楕円

図-5 フェリーデータを1年に延伸した44m層での係留系およびフェリー測流の潮流楕円

表-1 係留系データの加工条件

	条件	データ数
Case1	日中10時間観測し夜間14時間欠測 観測は1時間に3回 (0,20,40分) 観測	4321
Case2	日中10時間観測し夜間14時間欠測 観測は1時間に1回 (00分) 観測	1418
Case3	日中14時間観測し夜間10時間欠測 観測は1時間に1回 (00分) 観測	2067
Case4	10時間観測7時間連続欠測1時間観測 7時間欠測 (1時間1回観測)	1613
Case5	6時間間隔 観測時は1時間に3回観測	1897

図-6 連続する欠測期間を変化させたときの振幅の変化

(黒田・磯田, 2004). 本フェリー測流では, サンプルング間隔が最短で1時間よりも短く, 欠航がなければ最大のサンプルング間隔が14時間と不等間隔である. 一般に不等間隔のサンプルングではサンプルング密度の高い部分の平均ナイキスト周波数が重要になるが, 本観測で見積もられる測定可能な解像度は4時間周期程度であり, 半日や1日の周期帯は測定可能である.

図-4 (C) に調和解析で求めた主要8分潮のから図-4 (b) で示さなかった残りの4分潮を示す. P1分潮に関しては比較的良好一致が見られるが, S2分潮に周期の近いK2分潮でフェリー観測結果は係留系に比べて過大評価が見られる. 本観測データからは半日周潮における1時間弱の

周期の違いを上手く分離できていないようである.

少ないデータに対して, 観測期間を長く取ることで推定精度を向上させる手法がしばしばとられる. そこで約半年程度データ数を増やし調和解析を実施した. 図-5に係留系データの調和解析結果と1年間のフェリーデータの調和解析からM2, S2, K1の結果を示す. 図より期間を延ばしてもM2分潮の潮流楕円が係留系に近づかない. これに対しS2分潮やK1分潮の振幅が小さくなっている事が分かる. 係留系を投入していた時期は6月末から翌年1月上旬であるため, その比較のために解析した半年のフェリーデータは成層期を多く含む. データを延伸した時期は1月中旬から6月中旬であり非成層期をより多く含むようになる. そのため, 後者は成層期に発達する内部潮汐の評価が相対的に小さくなったため潮流振幅が減少したと考えられる. これまで潮流の調和解析において, 精度を高めるため潮位の調和解析と同様にサンプルング期間を可能な限り長く取っていたが, そうした場合成層時期の潮流をかえって過小評価する可能性がある. 潮流推定ではサンプルング時期による影響について注意が必要なが分かる.

(2) サンプルング間隔による影響

フェリー測流のサンプルング間隔が対象とした主要8分潮を分解する時間分解能をもつのか検証するため, 係留系調和定数を用いて作成した潮流を, フェリー測流のサンプルング間隔でデータ取得し調和解析を行った. その結果, ほぼ与えた8分潮の振幅, 遅角に分離した (振幅で元の振幅の0.96~1.05倍の範囲, 遅角は最大で3.8度の誤差). さらにホワイトノイズを加えて行ったが, 元々の振幅が小さかった東西成分で誤差が増加したが, 振幅の大きい南北成分はそれほど変化しなかった. どのような周期帯の運動がデータを汚染しているのか検討するため, 係留系データから得られる調和定数を増加させ潮流を作成し同様な解析を行ったが, MK3, SK3やSO3といった複合潮の周期を加えた場合にM2潮の振幅を若干減少しS2潮の振幅を若干増加させる傾向を見せたが, 元々の20%程度の変化であり, 今後検討が必要である.

サンプルングのどの部分が影響を与えているかを見積もるため, 係留系観測データをフェリー測流に合わせ表-1に示した条件で連続的な欠測期間を設け調和解析を行った. 調和解析結果から潮流楕円の各長軸振幅を元々の調和解析結果で除し振幅の増幅率を見積もった (図-6). フェリー同様に10時間観測し14時間欠測した場合, S2分潮で特に過大評価が見られる. その他の半日周潮に関しても影響が見られるが, M2分潮に関しては0.8倍程度であるので影響は小さい. 連続する観測期間を延伸し連続する欠測を10時間に短くしてもあまり改善は見られず (case3), 連続する欠測時間の中間に当たる時間に1回

観測を入れると (case4) 先の例よりもデータ数が減少しても結果は大幅に改善した。単純に6時間のサンプリング間隔で実施した例 (case5) でもS2分潮やK2分潮で1.5~2倍程度の増幅があるが総じて影響は小さく、M2やそれ以外の半日周潮を分離しているようである。ただし長軸の傾きに関してcase5以外は振幅の小さいK2やN2分潮を除くと総じて影響が小さく概ね10度以内で変化していたが、case5は最大40度程度の変化があった。以上から、S2分潮の過大評価は連続する欠測時間が影響を与えているようである。

(3) 調和解析結果から求めた残差流

係留系およびフェリー観測から2種類の調和常数が求められている。それを使い2種類の潮流を求めフェリー観測結果からの残差流を推算した。図-7に比較の散布図を示す。散布図を見ると、潮流楕円を各分潮で見た場合、M2とS2潮を上手く分離できていなかったが、合成潮にすることで打ち消し合い、残差流は概ねよく一致しているようである。

4. まとめ

本論は沿岸定期船のように1日数回程度往復し日中に運行時間が偏る船舶にADCPを取り付けた場合の潮流推定について、係留観測結果との比較からその問題点を検討した。その結果得られた主要な結論は以下の通りである。

(1) 潮流の調和解析において、内部潮汐波が卓越する海域では、計算対象期間が調和解析結果に影響を与えていた。そのため、例えば、残差流を求める場合には、成層期、非成層期で分離して潮流成分を求めておかないと、成層期の潮流を過小評価する可能性がある。

(2) 観測頻度が1日数回程度であり、半日の間に観測が集中するような定期航路を利用したADCP測流結果を調和解析する場合には、半日以上連続する欠測期間が影響し、分潮の分離を困難にしている可能性がある。これは観測期間を増やし観測データ数を増やした場合でも解決しなかった。

(3) しかし、合成潮で見た場合には今回の事例では比較的再現性がよく、係留系から求めた残差流ともよく一致していた。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤研究 (B) (代表者：杉本隆成、課題番号：18380119)・東海大学連合後援会研究助成・東海大学総合研究機構研究奨励補助計画および駿河湾プロジェクト (代表者：久保田雅久) の補助、さ

図-7 係留系とフェリー測流から得られた調和常数を用いて求めた残差流の散布図 (上24m層, 下44m層)

らに駿河湾フェリー株式会社および東海大学船舶運航課の皆様から多大なる協力を戴いた事に感謝します

参 考 文 献

- 黒田 寛, 磯田 豊 (2004) : 定期船ADCPのsemi - regularサンプリングデータを用いて年周期変動成分を調和解析する際の問題点, 海の研究, Vol.13, No.2, pp.151-161.
- 鈴木高二朗・竹田 晃・橋本典明・下司弘之・佐藤義博 (2006) : フェリー ADCPデータからの連続的な残差流成分の推定, 海岸工学論文集, 第53号, pp.916-920.
- 仁木 将人・勝間田高明・杉本隆成・萩原直樹・古島靖夫 (2009) : 夏季における急潮の進入にともなう大振幅内部波の発生, 海岸工学論文集, 第56号, pp.431-436.
- 安田訓啓・稲葉栄生・川畑広紀・守谷 洋・勝間田高明 (2001) : 駿河湾口東部海域において係留式ADCPにより観測された内部潮汐流, 東海大学紀要海洋学部, 51, pp. 63-88.
- Inaba, H. (1981) : Circulation pattern and current variations with respect to tidal frequency in the sea near the head of Suruga Bay. J. Oceanogr. Soc. Japan, 37, pp. 149-159.
- Kizu, S., T. Taneda and K. Hanawa (2001) : Estimation of Tidal Current in Tokyo-Ogasawara Area using TOLEX-ADCP Data, Tohoku Geophys. J., 36, pp. 1-23.
- Matsuyama, M., S. Ohta, T. Hibiya and H. Yamada (1993) : Strong Tidal Currents observed near the Bottom in Suruga Trough, Central Japan. J. Oceanogr., 49, pp. 683-696.
- Ohwaki, A., M. Matsuyama and S. Iwata (1991) : Evidence for predominance of internal tidal currents in Sagami and Suruga Bays. J. Oceanogr Soc. Japan, 47, pp. 194-206.