

3.5. 精度検証

3.5.1. 甕海峡におけるフェリーADCP

鹿児島県では、甕列島と九州本土を行き来する「フェリーニューこしき」による ADCP 観測 (CI-60G、古野電気社製) が行われている (<https://suigi.jp/fery/>)。観測海域と観測頻度を図 35-1 に示す。通常運行の場合、1 日に里一串木野間と長浜一串木野間をそれぞれ 3 航行と 1 航行している。データの特徴を表 35-1 に示す。本節では、2004 年 3 月 1 日～2021 年 11 月 15 日の間の長期蓄積データを用い、異常値データの除去、潮流調和分解結果、観測流速データの船速補正、同化モデル DREAMS_Ep との比較について報告する。

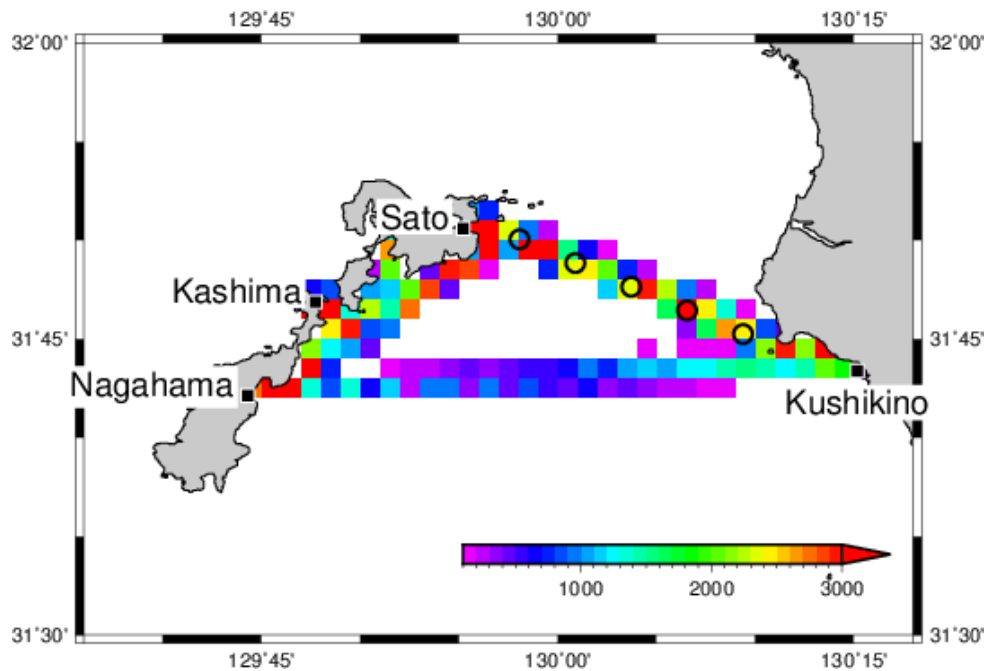


図 35-1 観測頻度 (2004 年 3 月 1 日～2021 年 11 月 15 日)。「フェリーニューこしき」の定期的な発着港は、長浜、鹿島、里、串木野である。丸印は設定した観測基準点を示す。

表 35-1 甕海峡フェリーの ADCP データの特徴。

通常船速	約 18 kt (約 9 m s^{-1})
船速・進路情報	2017 年まで記録、2018 年以降なし
流向・流速の観測層	3 層 (10 m, 35 m, 75 m 深)
データの記録・転送間隔	5 分
流速の分解能	0.1 kt (約 5 cm s^{-1})
流向の分解能	0.1°

3.5.1.1. 異常値データの除去

フェリーによって観測された流速ベクトルの生データの例を図 35-2 に示す。3 月 22 日や 25 日に不連

3. 高密度観測網

続な大きな流速を記録している。また、35 m 深の鹿児島県本土の串木野側に着目すると、同じ流向・流速のデータが連続していることが確認できる。この海域の水深は 35 m よりも浅い。このような異常値データを除去するため、以下の処理を施した（図 35-3）。

- ファイル名の日付とデータの日付が異なるデータを除去
- 同じ流向・流速を連続して記録しているデータを除去
- 連続した 3～5 個のデータを用い、 1σ （標準偏差）の誤差楕円内のデータを使用し、その他のデータは除去

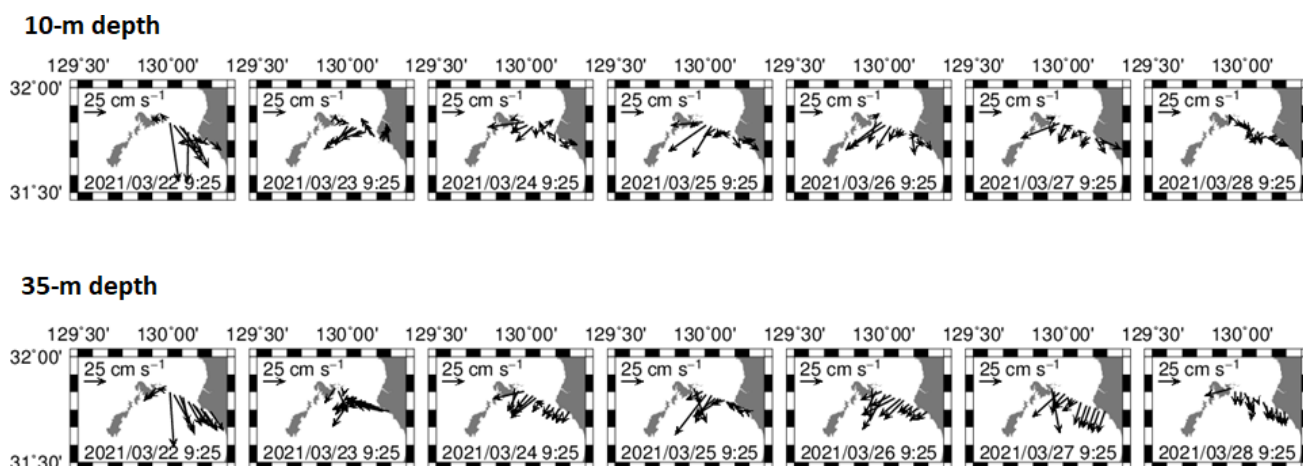


図 35-2 甕海峡横断フェリーによる ADCP 観測の生データの例。この例では、フェリーは、里港（上甕島）から串木野港（鹿児島県本土）に向けて航行している。各図に、里出港頃の日時を示す。

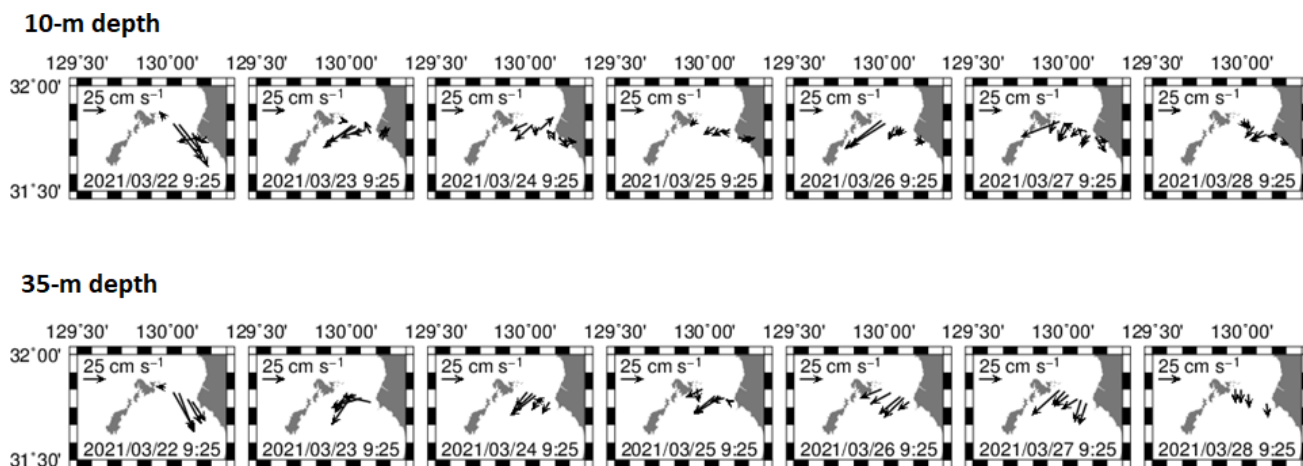


図 35-3 異常値データ除去後の流速ベクトル分布。図 35-2 と同じ日時の例である。

3. 5. 1. 2. 潮流成分

1 日に 3 航行している里－串木野間で潮流成分を見積もった。ここでは水平 5 km 間隔の基準点（図 35-1）でガウス補間したデータを用い（e-folding scale : 5 km, データ使用半径 : 10 km）、最小二乗法により平均流と 9 つの分潮（ S_a , S_{sa} , Q_1 , O_1 , K_1 , μ_2 , N_2 , M_2 , S_2 ）に分解した。図 35-4 に 4 大分潮（ M_2 , S_2 ,

K_1 , O_1) の潮流楕円を示す。半日周潮 M_2 と S_2 、日周潮 K_1 と O_1 の周期は、それぞれ 12.42 と 12.00 時間、23.93 と 25.82 時間である。潮流楕円が(直線に近い)扁平になるほど長軸方向の往復流となり、円形に近いと流向が時間とともに回転する成分が大きいことを意味する。

M_2 と K_1 分潮は海峡を通過する方向の往復流となり、それぞれの最大潮流(長軸長)は上甕島の近傍で 19.1 cm s^{-1} と 6.5 cm s^{-1} であった。 S_2 分潮流は海峡横断方向に大きくなり、フェリーの移動速度が影響を与えている可能性を示唆した。 O_1 分潮の大きさは、ADCP データの流速分解能(表 35-1) よりも小さかった ($< 5 \text{ cm s}^{-1}$)。

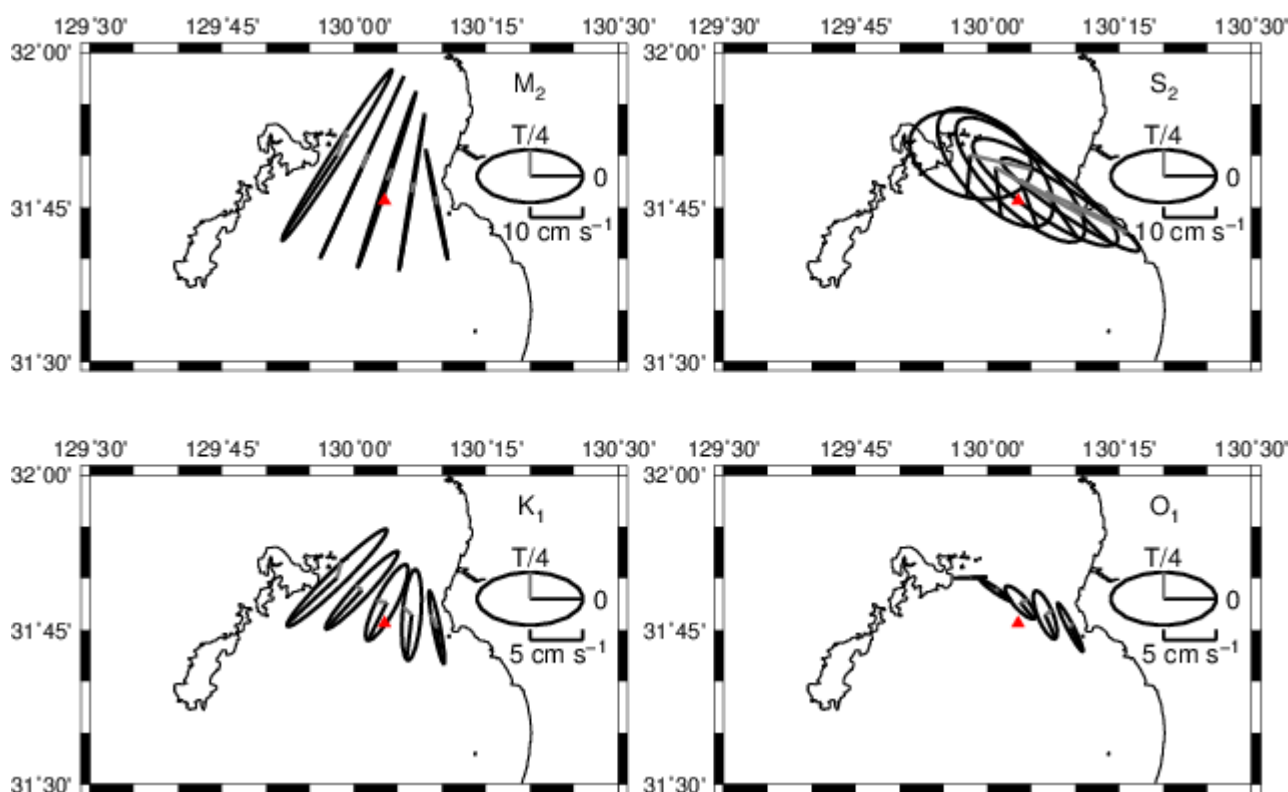


図 35-4 フェリーADCP データから見積もられた 10 m 深の 4 大分潮の潮流楕円。楕円内の黒線は、基準経度(東経 135 度)に各分潮の仮想天体が南中したときの流速ベクトルを示す。灰色線は、南中時刻から 1/4 周期だけ位相が進んだときの流速ベクトルである。赤三角は過去の流速計係留点を示す。

フェリーADCP から見積もられた潮流成分を精度検証するために、過去に甕海峡で行われた流速計係留観測結果と比較する(図 35-4 の赤三角の点: 北緯 31 度 45 分 37 秒、東経 130 度 03 分 28 秒、観測深度 18 m)。流速計データは海上保安庁海洋情報部の日本海洋データセンター(JODC: <https://www.jodc.go.jp>) にアーカイブされており、1989 年 6 月 26 日から 7 月 28 日(32 日間)まで 1 時間間隔のデータである。この係留系流速データを平均流と 7 つの分潮(Q_1 , O_1 , K_1 , μ_2 , N_2 , M_2 , S_2) に分解した。フェリーADCP の調和分解と異なり、年周期の Sa 分潮と半年周期の Ssa 分潮を除外している。この調和分解結果を係留観測点近傍のフェリーの潮流楕円と比較した(図 35-5)。最も卓越している M_2 分潮については、フェリーと係留観測で良い一致を示し、両者のベクトル差の RMSD は 2.5 cm s^{-1} であった。 S_2 分潮については、係留観測では海峡通過方向、フェリー観測では海峡横断方向に卓越しており、両者に大きな差があった。

3. 高密度観測網

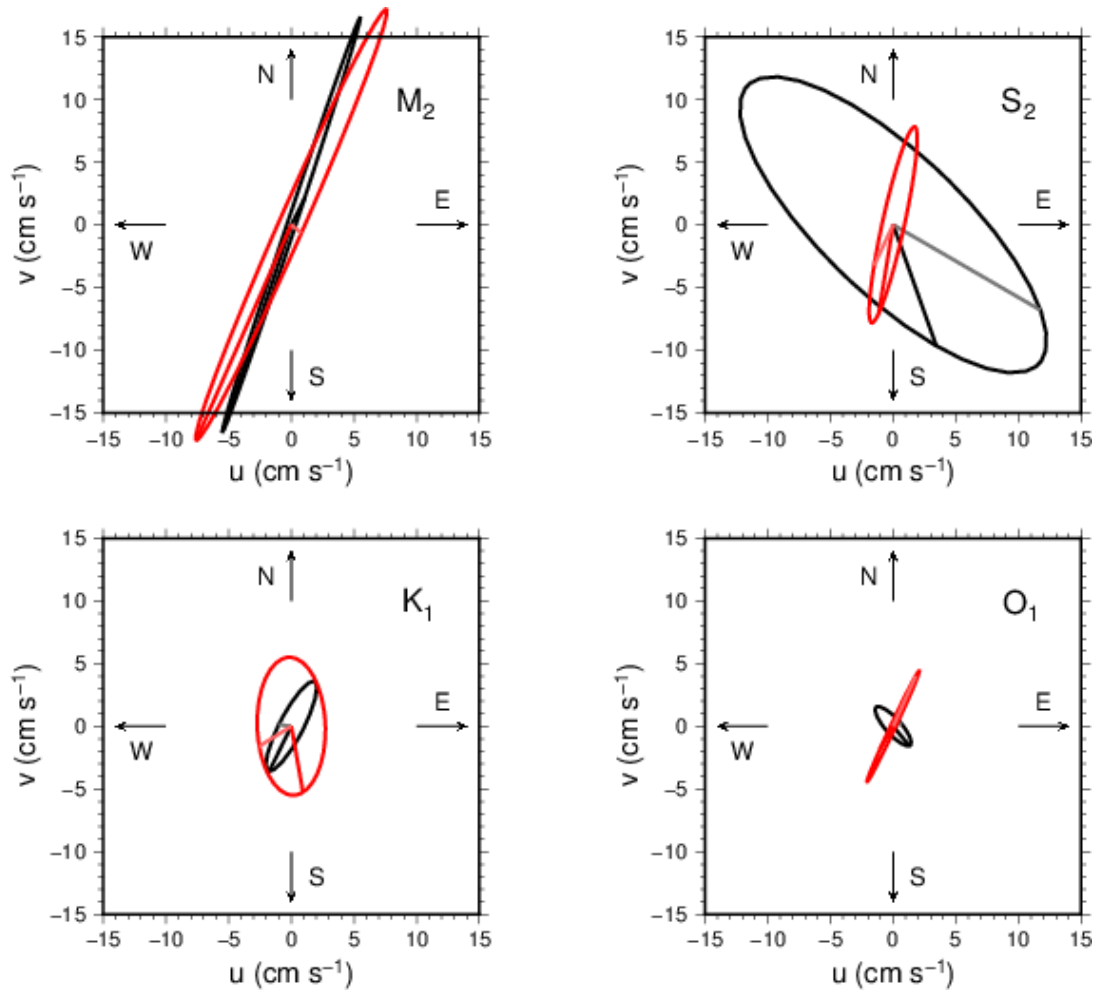


図 35-5 係留観測（赤、18 m 深）とフェリー-ADCP（黒、10 m 深）の流速データから見積もられた潮流楕円（ M_2 , S_2 , K_1 , O_1 ）の比較。楕円内の黒線（または赤線）は、基準経度（東経 135 度、明石市）に各分潮の仮想天体が南中したときの流速ベクトルを示す。灰色線（または薄赤線）は、南中時刻から 1/4 周期だけ位相が進んだときの流速ベクトルである。

3. 5. 1. 3. フェリー-ADCP データの船速補正

3. 5. 1. 2 節から、フェリーの ADCP データは船速の影響を受けていると考えられた。この節では、ADCP 流速から船速の影響を取り除く。表 35-1 に示すように、2018 年以降のデータにはフェリーの移動速度・進路の情報が含まれていない。そこで、時間 5 分ごとに記録されている位置情報（緯度・経度）から、フェリーの移動速度ベクトル $\boldsymbol{v}_S$ を見積もった。この船速ベクトルの影響を取り除いた流速ベクトル $\boldsymbol{v}$ を

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_{\text{ADCP}} + r\boldsymbol{v}_S$$

と仮定する。ここで、 $\boldsymbol{v}_{\text{ADCP}}$ は、フェリー-ADCP によって観測された流速ベクトルである。係数 r を 0 から 0.01 まで 0.0001 間隔で変化させ、以下の手順で r を見積もった。ここでは、欠測が少ない 10 m 深のデータを用いた。

- (1) 3.5.1.1 節の方法で異常値を除去したのち、 $\boldsymbol{v}$ を求めた。
- (2) $\boldsymbol{v}$ から 3.5.1.2 節の方法で潮流成分を見積もった。
- (3) $\boldsymbol{v}$ から潮流成分を除去した。
- (4) 1日3航行している里一串木野間のデータを用い、1日平均流速ベクトルを求めた。
- (5) 潮流除去流 (3) と 1日平均流 (4) のベクトル差の二乗平均が最小になるように係数 r を決定した。

この結果、 $r = 0.0064$ と見積もられた。フェリーの船速は約 18 kt (約 9 m s^{-1}) であるため (表 35-1)、ADCP 流速に 6 cm s^{-1} 程度の影響が含まれていると考えられる。

図 35-6 に船速補正後の S_2 潮流楕円を示す。船速補正後の調和分解には、長崎大学水産学部練習船「鶴洋丸」の ADCP データ (2021 年 7 月 6 日と 7 月 7 日の 2 航行) を加えたが、結果に大きな差はなかった。その他の分潮についても、図 35-4 と 35-5 と大差ないため省略する。 S_2 潮流も、甕海峡通過方向に卓越する流れとなった。係留観測との RMSD は 2.8 cm s^{-1} であった。

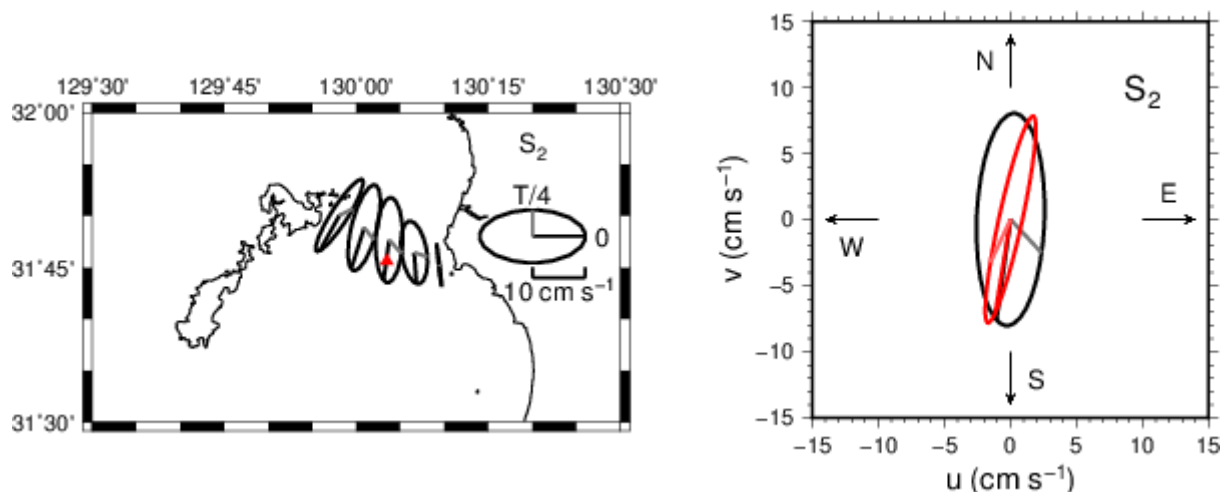


図 35-6 フェリーの船速補正後の S_2 潮流楕円。左図は図 35-4 と同様に里一串木野間のフェリー航路上の分布であり、右図は図 35-5 と同様に係留観測結果との比較である。

3.5.1.4. 海洋同化モデル DREAMS_Ep との比較

フェリーADCP データを海洋モデルに同化する前処理として、3.5.1.1 節の異常値の除去に加え、3.5.1.3 節の船速補正を行うことを提案する。ここでは、これらの処理を施した ADCP データと海洋同化モデル DREAMS_Ep との比較結果を示す。ただし、DREAMS_Ep にはフェリーADCP データを同化していない。フェリーADCP データには 3.5.1.2 節と同様の空間補間を施している。

図 35-7 では、海峡中央部の基準点 (図 35-1) でフェリーADCP と DREAMS_Ep の南北流を比較した。2021 年 4 月や 7 月下旬～8 月上旬には、フェリーで観測されていない南下流が DREAMS_Ep で顕著に現れている。5 月下旬のフェリーで観測された南下流は DREAMS_Ep で再現されていない。一方、7 月上旬から中旬にかけての南下流から北上流への変化や、8 月中旬以降の変動は、両者とも類似している。両者を散布図で比較した結果は図 35-8 左となった。

3. 高密度観測網

次に、潮流などの1日以下の変動を比較する。DREAMS_Epの流速の25時間移動平均からの偏差を求めた。フェリーADCPデータについては、1日3回のデータから得られた日平均流からの偏差を用いた。両偏差の比較結果を図35-8右に示す。フェリーデータを同化しなくても、DREAMS_Epは1日以下の潮流の変化を再現していた。同化を行うことにより、数日～数週間スケール変動の再現性の向上が期待される。

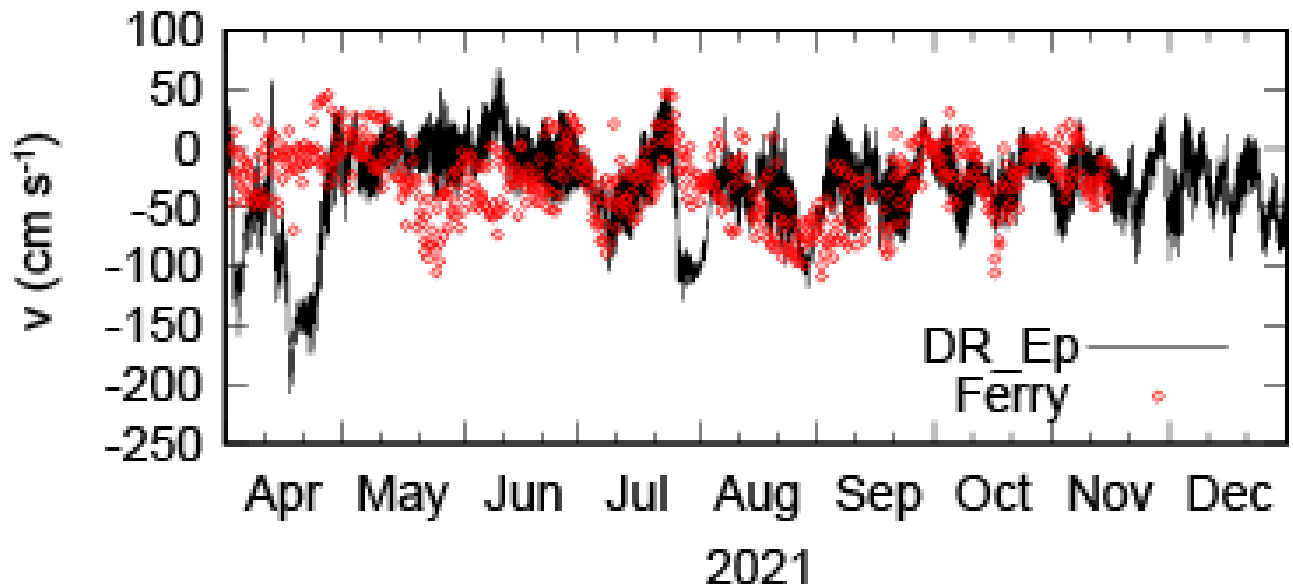


図 35-7 甕海峡中央の基準点 (図 35-1) における南北流の時系列 (正: 北上流、負: 南下流)。黒線と赤丸は、それぞれ DREAMS_Ep とフェリーADCP の流速を示す。

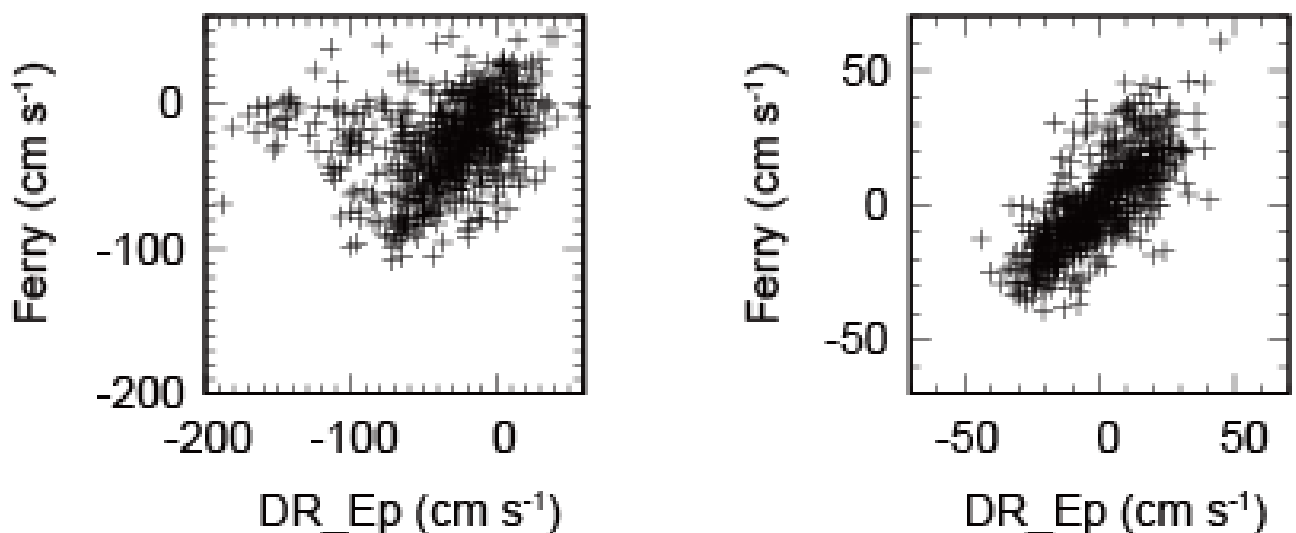


図 35-8 甕海峡中央の基準点 (図 35-1) における DREAMS_Ep とフェリーADCP の南北流 (正: 北上流、負: 南下流) の散布図 (左図)。右図は、1日以下の変動成分を比較した散布図である。