

HFレーダーによる相模湾 表層流の分析

小林諒也・早稲田卓爾・小平翼(東大新領域)

研究背景

相模湾と黒潮流路

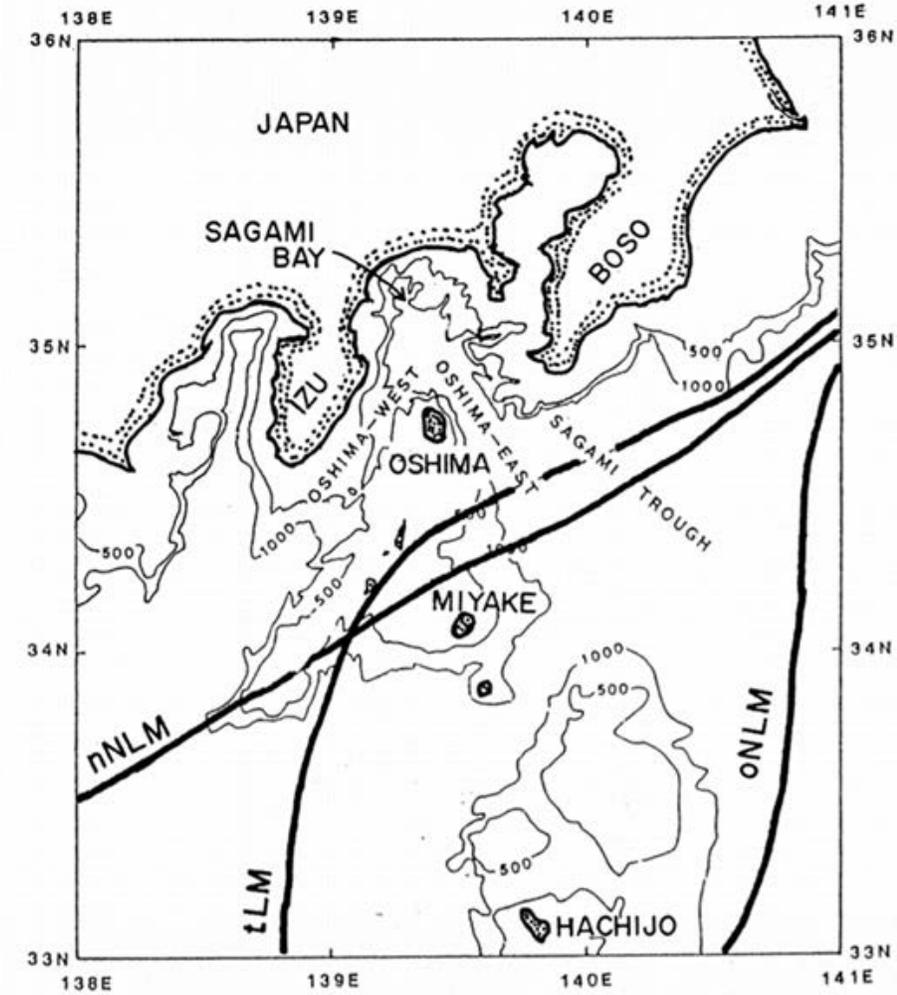
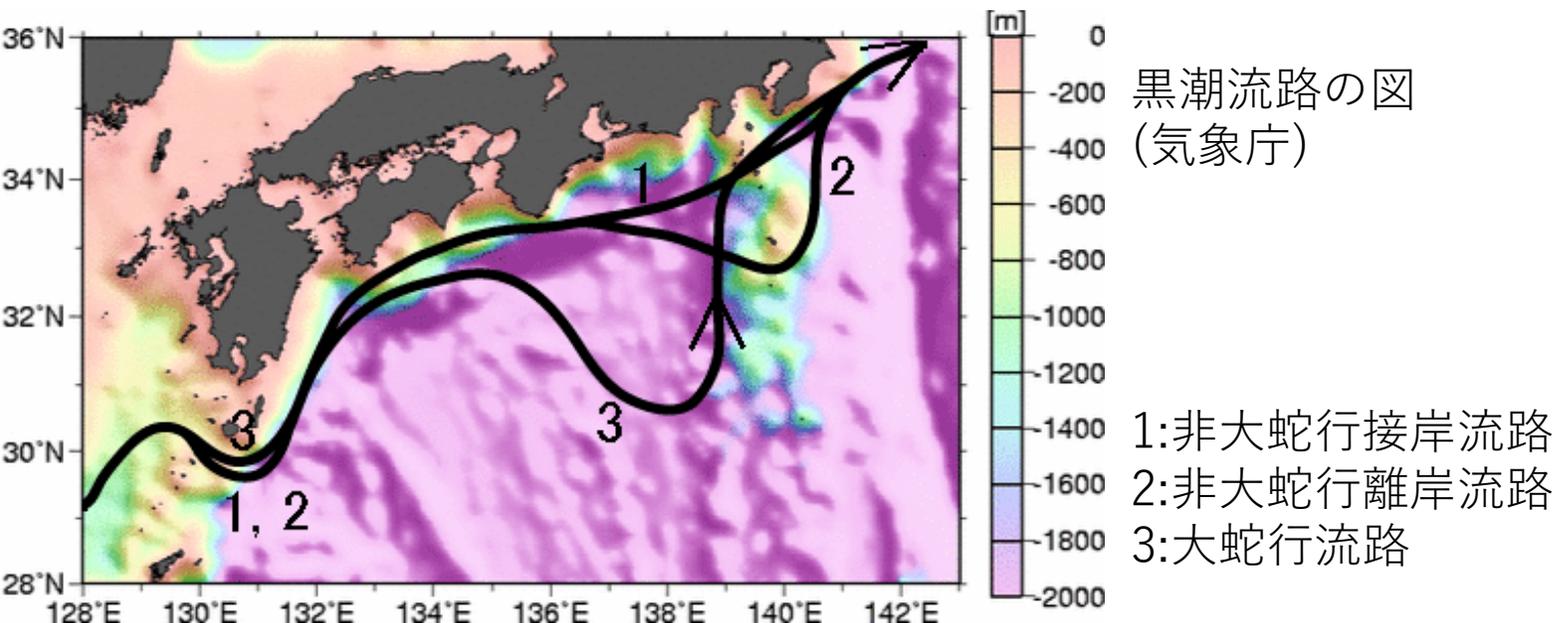
■ 相模湾の地理

- 南北方向に約60km、東西方向は約55kmの大きさを持つ
- 南部の湾口から北太平洋に面している為、湾の流況は黒潮からの影響を強く受ける

(Iwata and Matsuyama,1989)

■ 黒潮流路

- 日本における黒潮の流路には主に典型的な大蛇行流路、非大蛇行接岸流路、非大蛇行離岸流路が存在する



相模湾の位置と水深、黒潮流路(after Kawabe,1985)

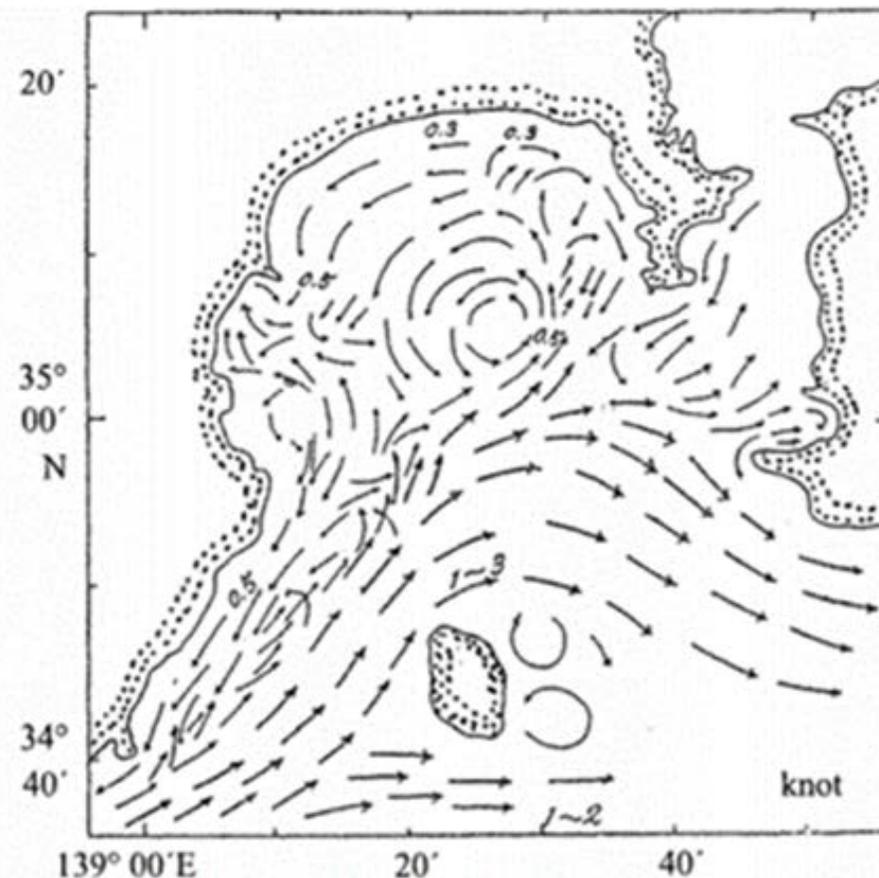
相模湾内の流況と黒潮の関係

■ 大蛇行期

- 大島北側に高気圧性の循環流が生まれ、一方相模湾内には低気圧性の循環が生まれる。その他の流路をとる場合には循環流は非常に弱まり、頻繁に向きが反転する(Kawabe and Yoneno,1987)
- 相模湾に黒潮流軸が近づくことで低気圧性循環が強化され、遠ざかると弱まる、あるいは向きが反転する(Iwata and Matsuyama,1989)

■ 非大蛇行期

- 接岸流路期には黒潮小蛇行の東進が20~30日程度の周期で生じ、それに伴って黒潮系水が湾内に流入し、低気圧性循環が強まる(Takahashi et al, 2011)
- 離岸流路期には湾中央部において水深200m付近で50~70日周期の流速変動が存在し、これが黒潮流軸変動に関係している可能性を指摘した。(高橋ら、2012)



相模湾内の低気圧性循環(after Uda,1937)



黒潮流軸の変動が強く影響

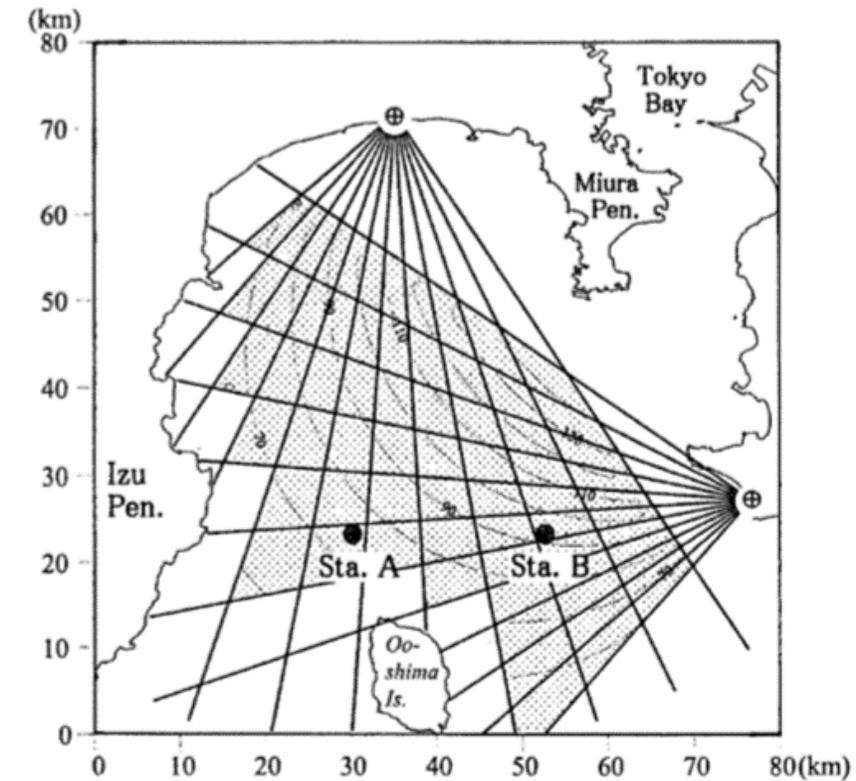
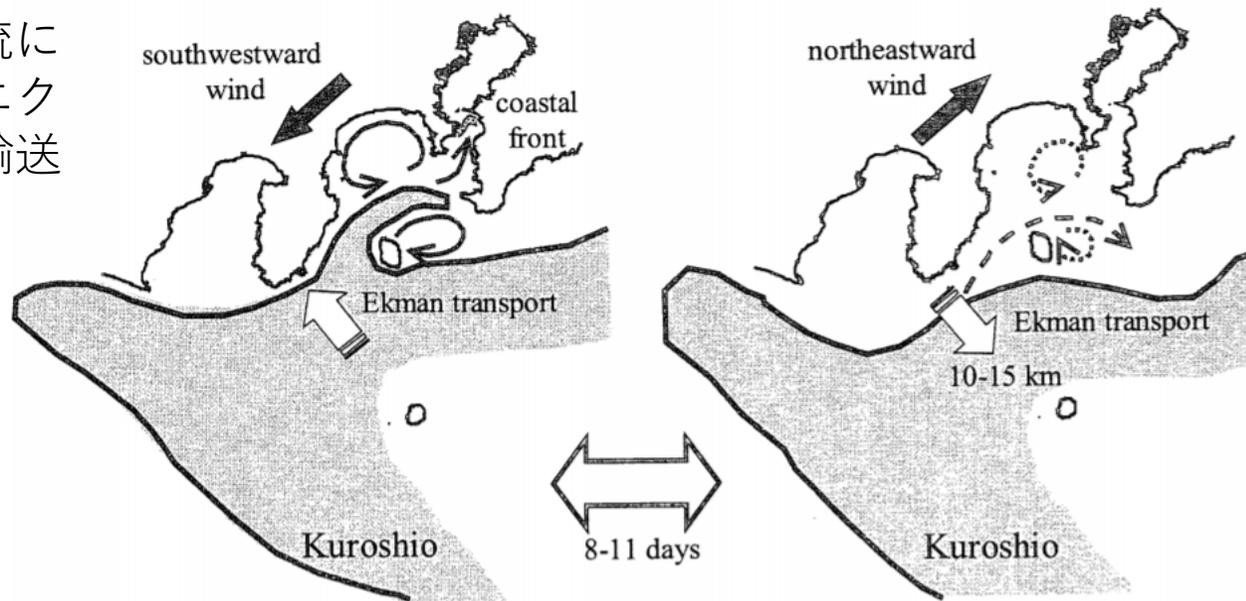
研究背景

広域的な観測

■ HFレーダーによる観測

- HFレーダーによる広域的な観測により非大蛇行離岸流路期に湾近くの風場によるエクマン輸送の働きにより10日前後の黒潮流軸の変動が起こり、流軸が湾に近づくことで湾内の低気圧性循環流が強化され、逆であれば弱められる変化が起こることを示した。(日向ら、2003)

吹送流によるエクマン輸送



日向ら(2003)の研究で使われたHFレーダーの図(日向ら、2003)

研究目的

■ 相模湾北東部の特徴

- 江ノ島が存在する
- ヨットやセーリング等マリンスポーツが盛ん(東京オリンピックの候補地にも)
 - 海難事故対策や競技支援
- 定置網などの漁業地域でもある
 - 急潮と呼ばれる突発的な強い流れによる漁業被害。
黒潮に関連するものも(石戸谷、2006)

➤ 短周期変動を調べたい

■ 研究目的

相模湾HFレーダーによる**広域的な観測**で、相模湾北東部(江ノ島付近)の、潮流を始めとした**短周期変動**を明らかにする。

調査海域にADCPを積んだブイを設置し、そこからのデータを取り扱うことで**HFレーダーの精度検証**も合わせて行う。

オリンピック候補地



研究概要

HFレーダーの概要

■ 相模湾HFレーダーの概要

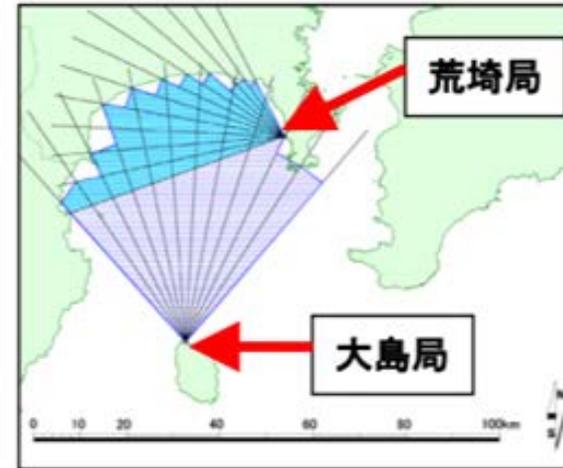
- 相模湾HFレーダーは、海難事故の防止や漁業の効率化等を目的として2012年に大島と荒崎に設置された
- 流速データは2014年の1年分と、2017年の7月～12月の半年分を用いた

■ 相模湾HFレーダーの性能

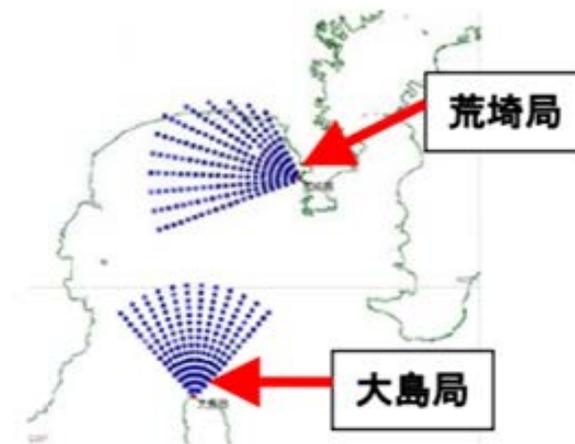
周波数	24.5MHz
掃引周波数	100kHz
観測距離	1.5~60km
分解能	1.5km(距離)、7.5° (方位)、3cm/s(流速)
送信時間	0~10分
更新頻度	1時間

相模湾HFレーダーのデータ取得範囲図(海上保安庁HP)

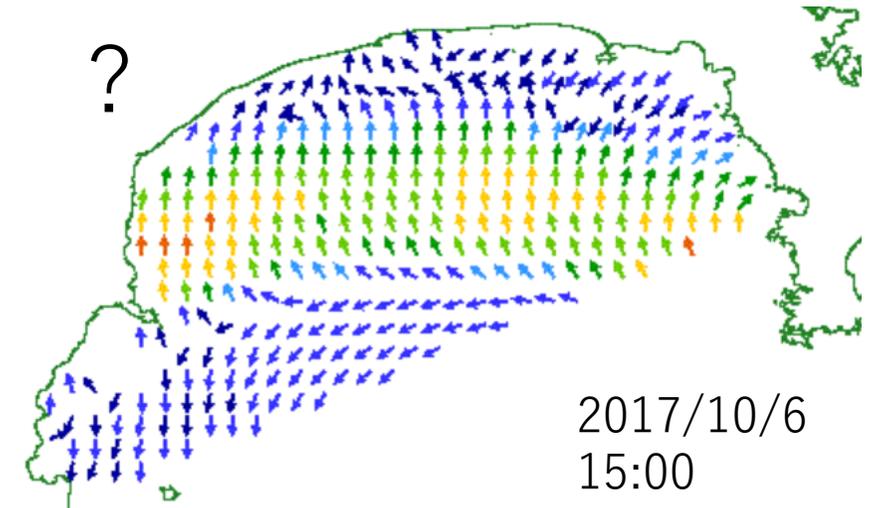
流速データ取得範囲図



波高のデータ取得範囲図



HFレーダーの流速図



2017/10/6
15:00

研究概要

係留ブイの概要

■ ブイの概要

- 計測期間： 2017年11月 1 日から12月18日
- ADCP搭載係留ブイによる計測
- ADCP測定： 30分ごとに1分間(60ping)のバーストモード
- 解析： **表層**(深度5m)から2mおきに20層の流速を測定
今回使用したのは表層の流速

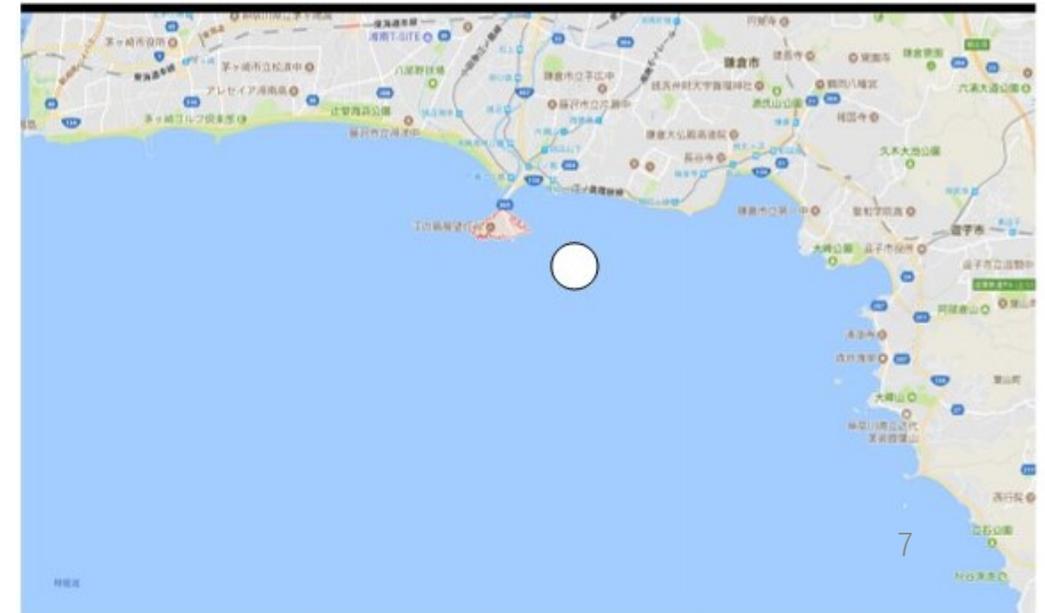
■ ブイの係留位置

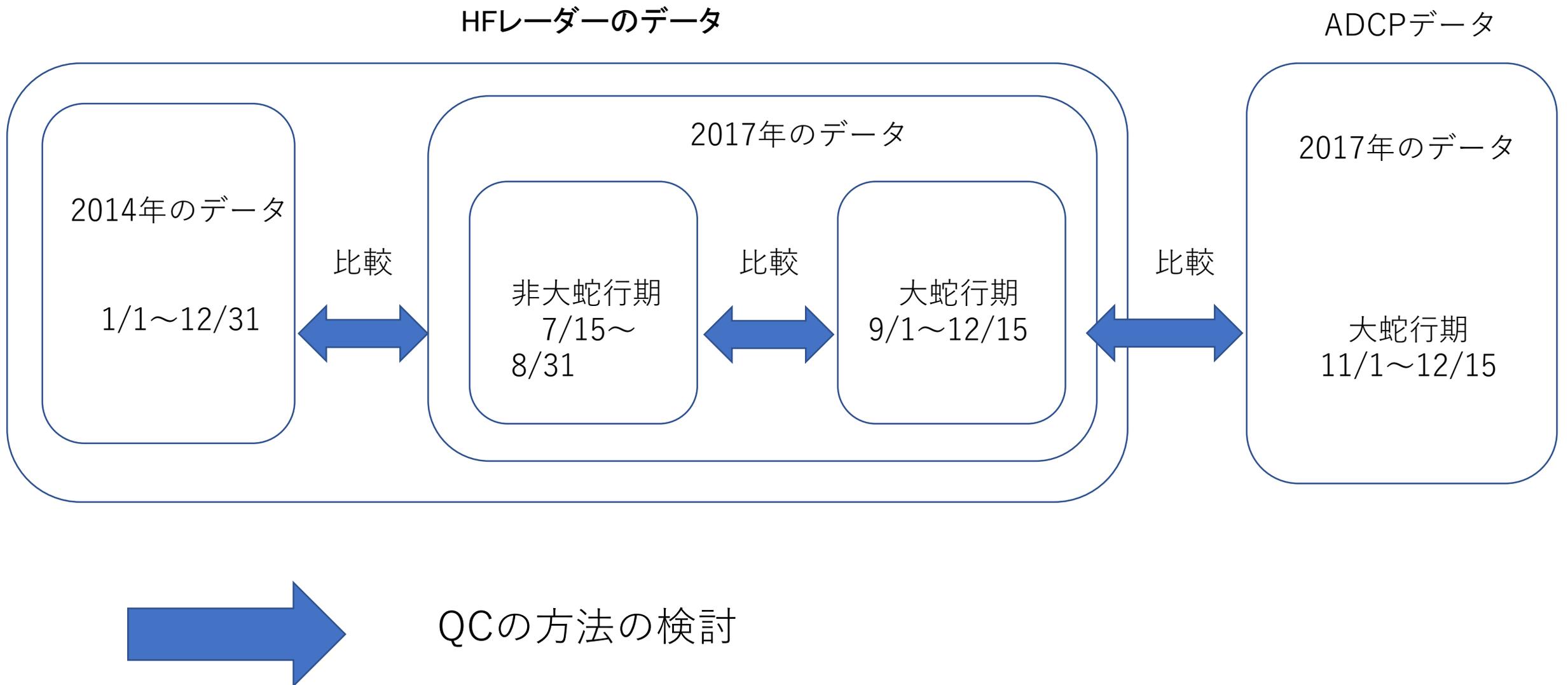
- 緯度35度16.5分、経度139度30.5分
- 水深45m

調査ブイの写真



ブイの係留位置

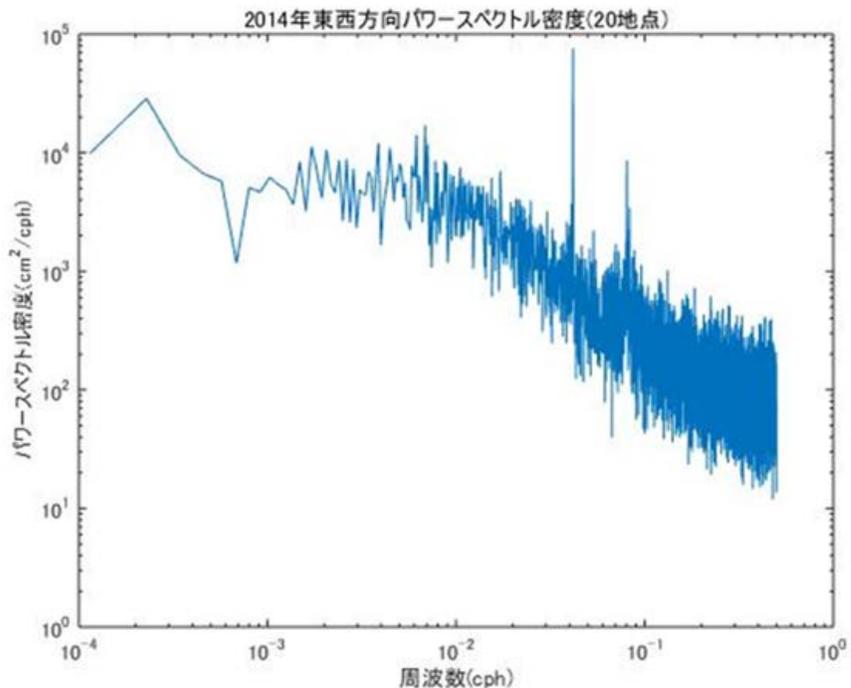




解析手法

解析手法

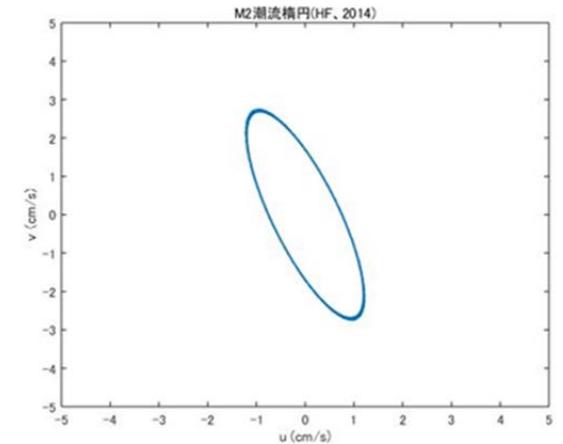
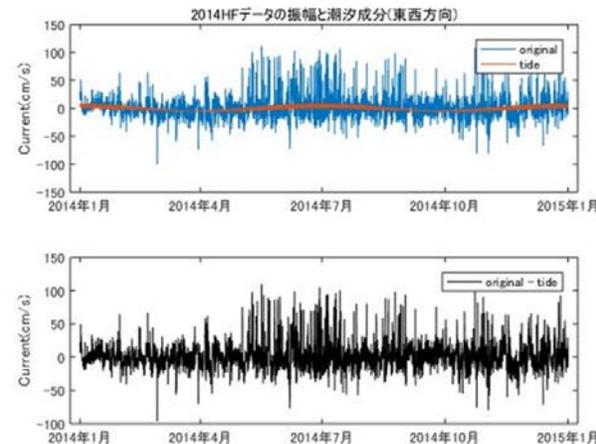
- スペクトル解析
 - FFTによるパワースペクトル密度



- 調和解析
 - 潮汐スペクトルはDFTでは正確にフィッティングできない(周波数の刻み幅が機械的に決まる)
 - 最小二乗近似

$$\text{潮汐} \quad \sum_k A_k \sin(2\pi f_k t + \varphi_k)$$

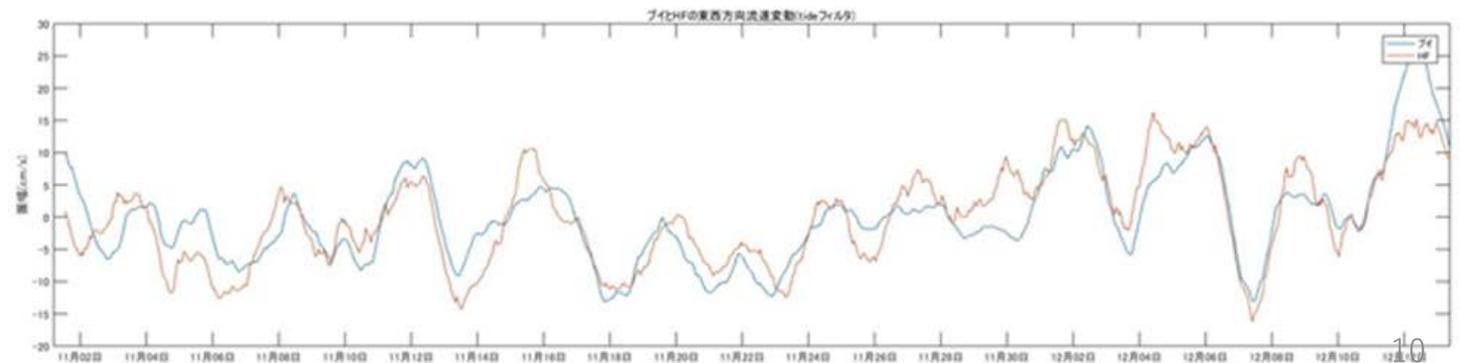
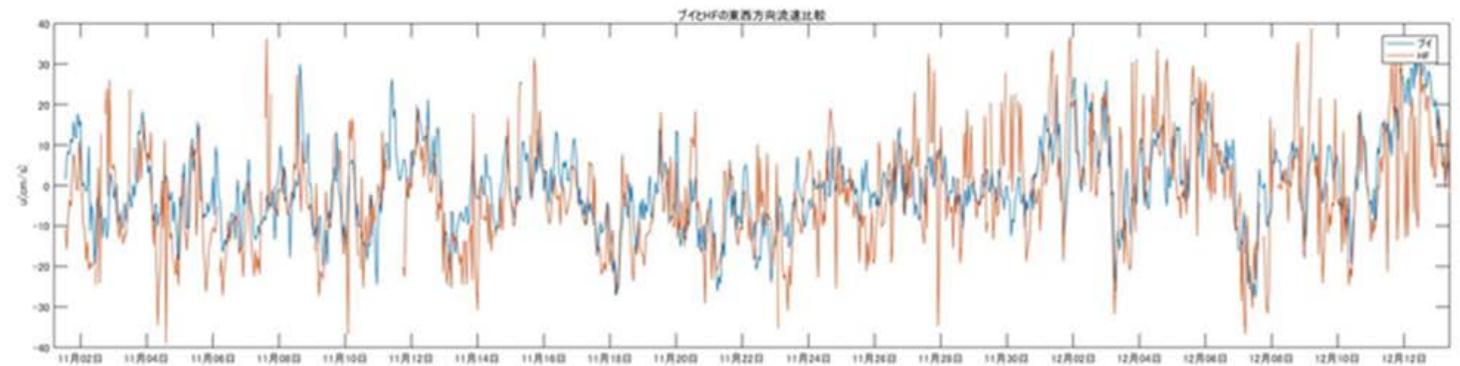
- 潮汐振幅と変動
- 潮流楕円



解析手法

■ データのQC

- HFレーダーにはノイズ大
 - しきい値を設けて異常値を除去
 - 移動平均によるローパスフィルタ
 - さらに空間方向にQC

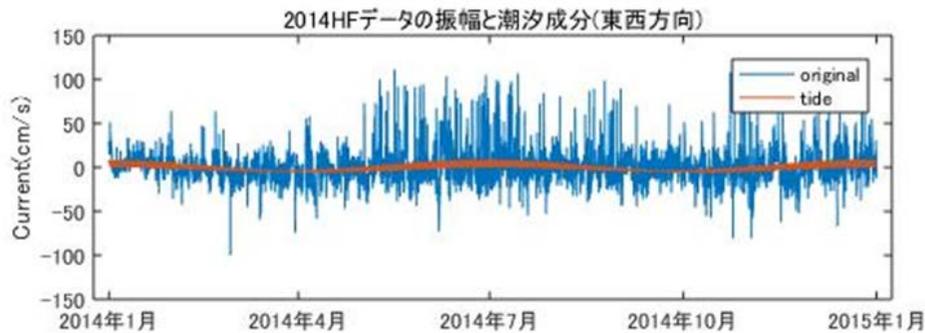


解析結果

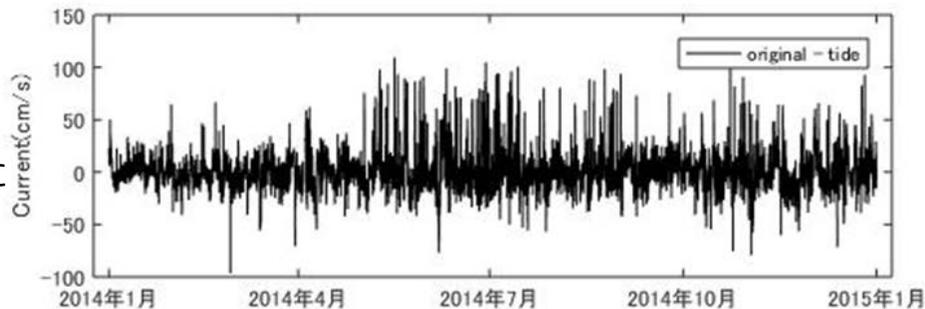
調和解析の結果

- 2014年と2017年のHFレーダーの振幅
- どちらも潮汐振幅がとても小さい(数cm/s程度)
- 潮汐の分散は全体の5%程度

2014年の東西方向流速変動

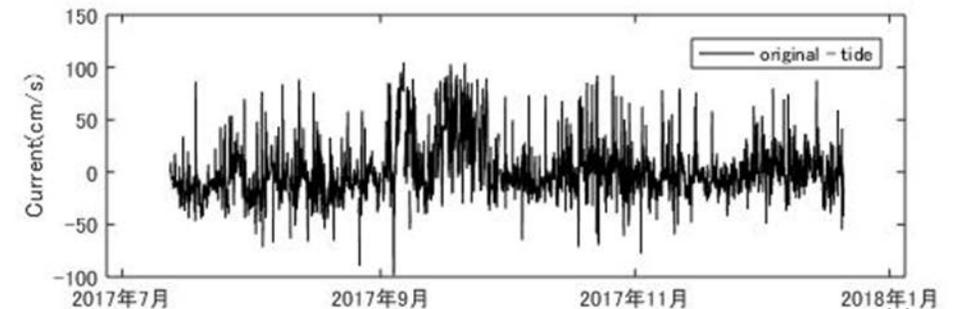
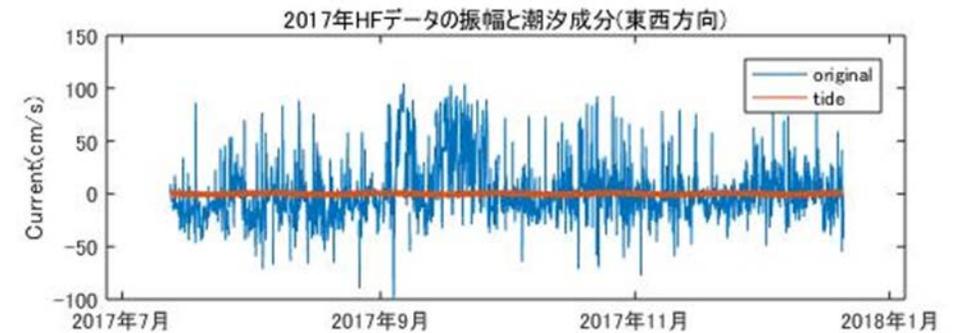


青:全ての変動
赤:潮汐



黒:潮汐を除いた
変動

2017年の東西方向流速変動



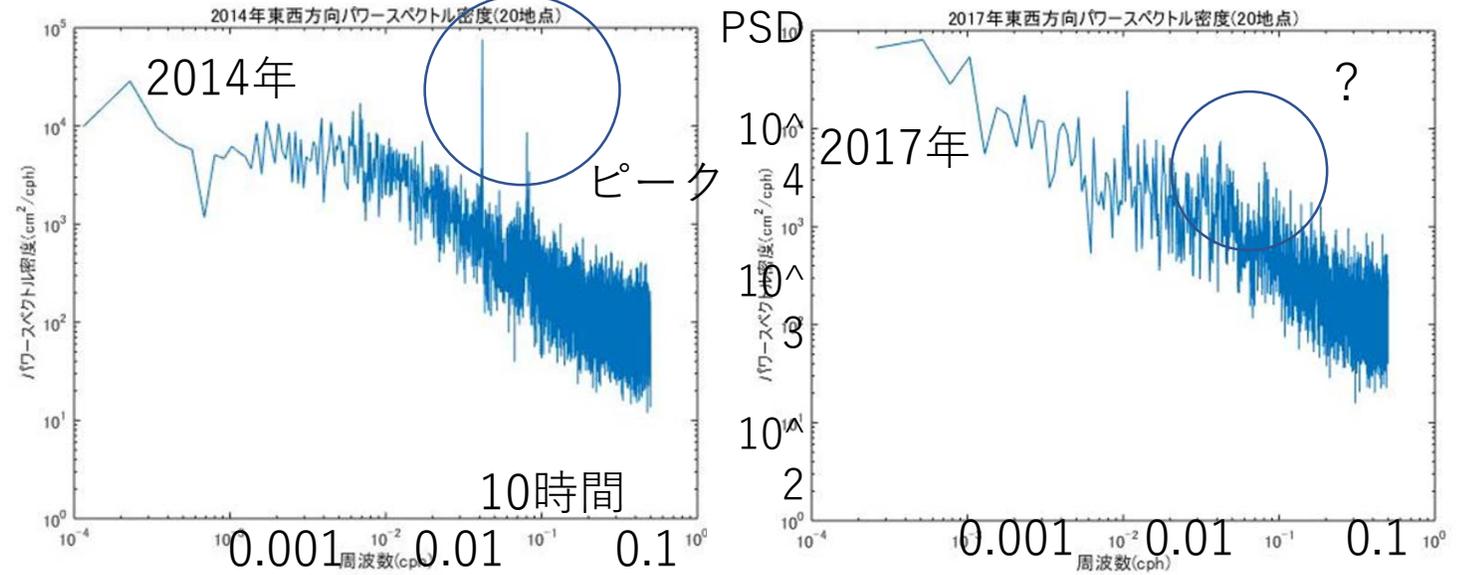
解析結果

スペクトル解析の結果

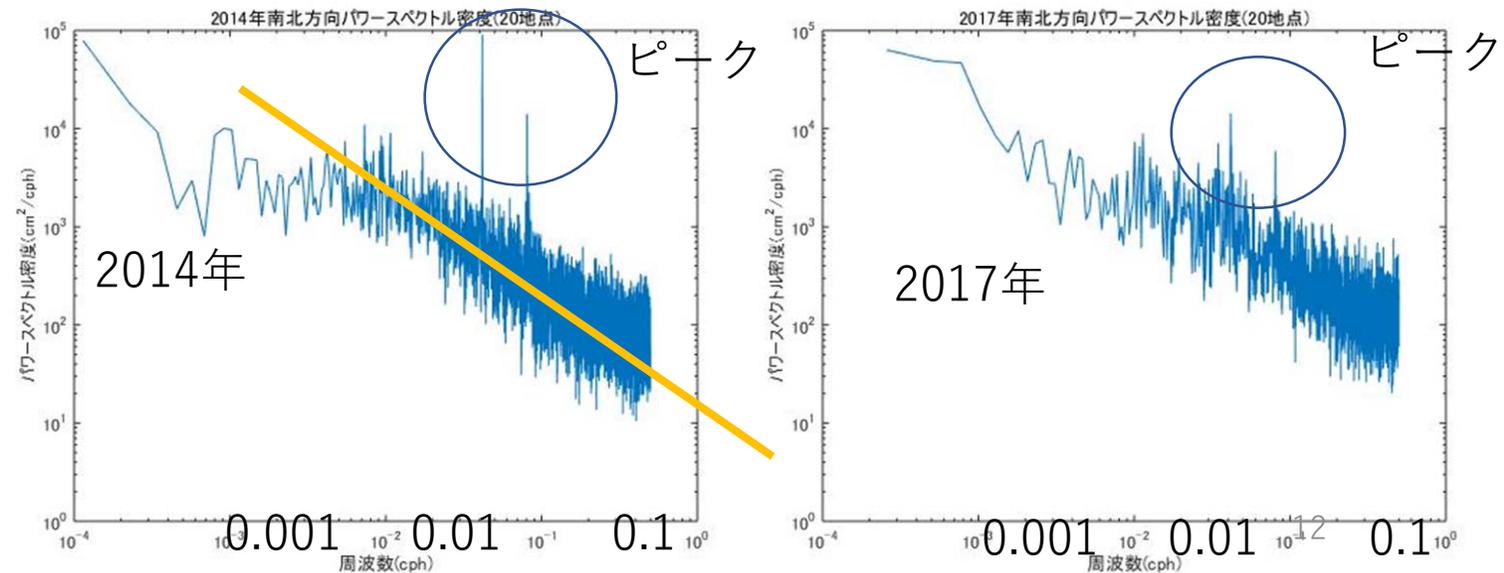
■ 2014年と2017年のHFレーダーの比較

- 2014年は東西、南北方向共に潮汐のスペクトルが表れている。
- 2017年は東西方向は潮汐スペクトルがノイズに埋もれている
- 南北方向はスペクトルが表れている
- $1/f$ ゆらぎに見えるノイズスペクトルが表れている

HF東西流速PSD



周波数(cph) HF南北流速PSD



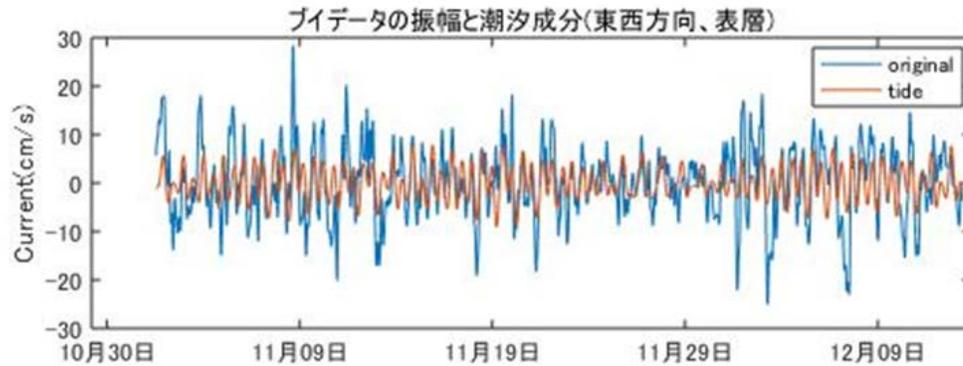
解析結果

調和解析の結果(2)

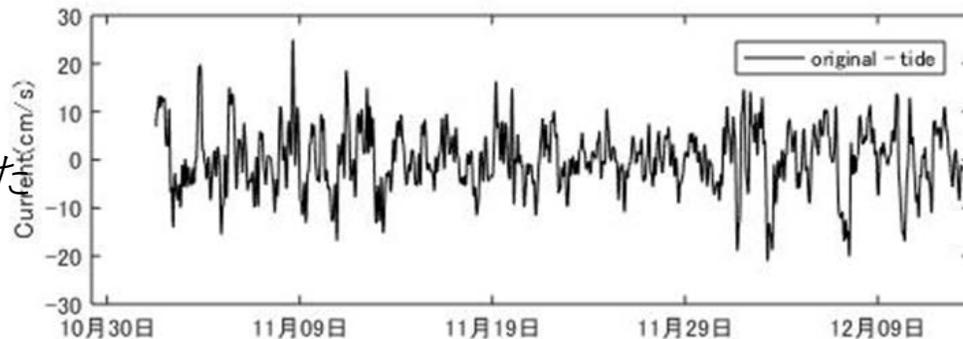
■ ADCPデータの振幅

- HFレーダーのデータと比べると東西、南北成分でともに潮汐振幅が強く出ている。
- 一方ADCPデータからも潮汐以外の変動が大きいことが分かる。

2017年のADCPデータの東西方向流速変動

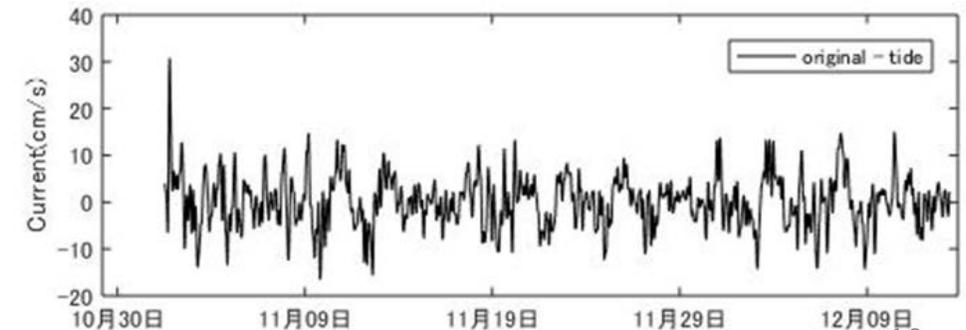
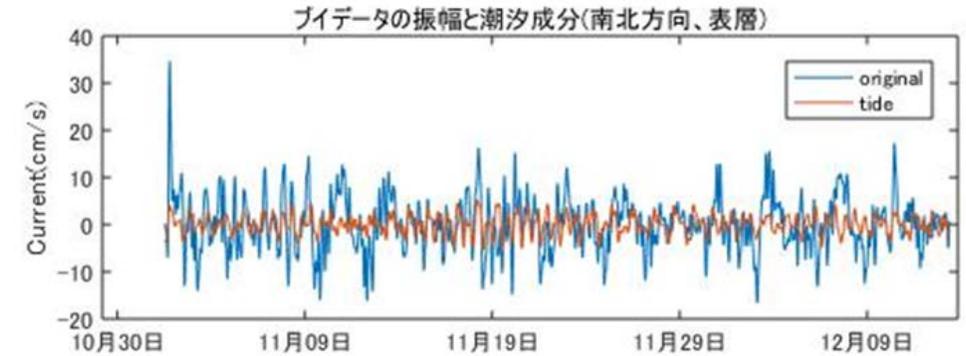


青:全ての変動
赤:潮汐



黒:潮汐を除いた
変動

2017年のADCPデータの南北方向流速変動

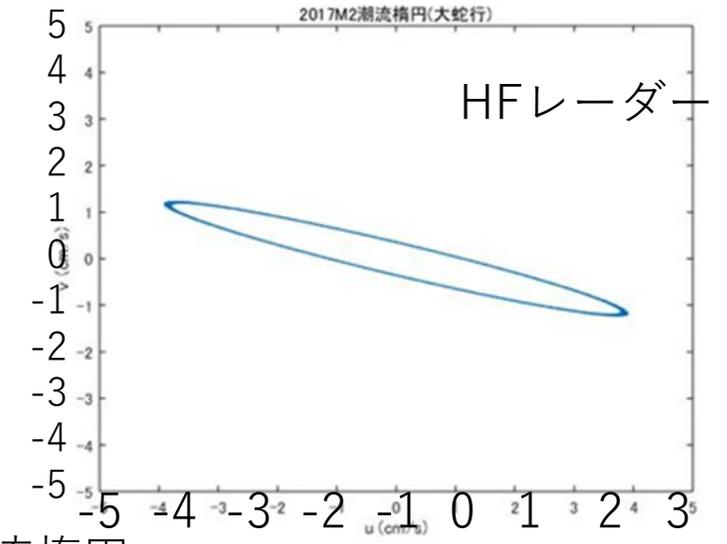
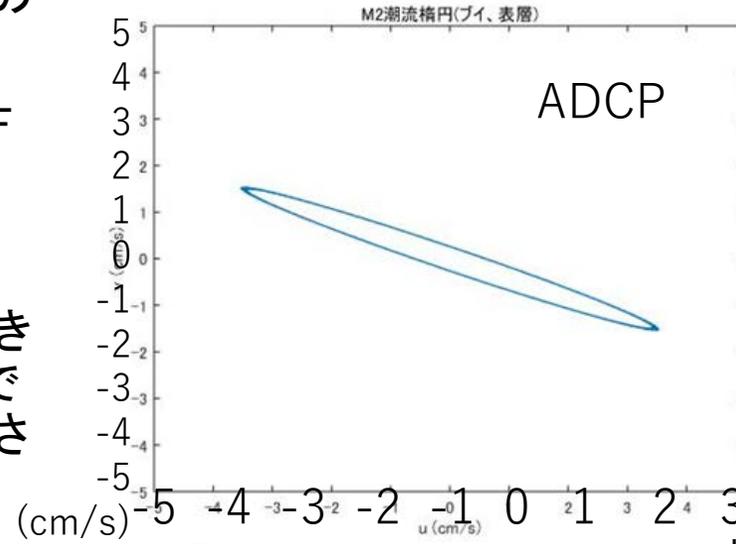


解析結果

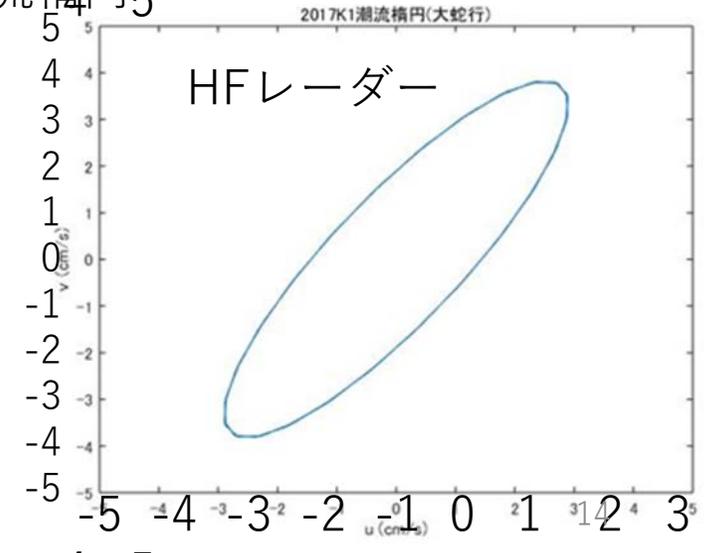
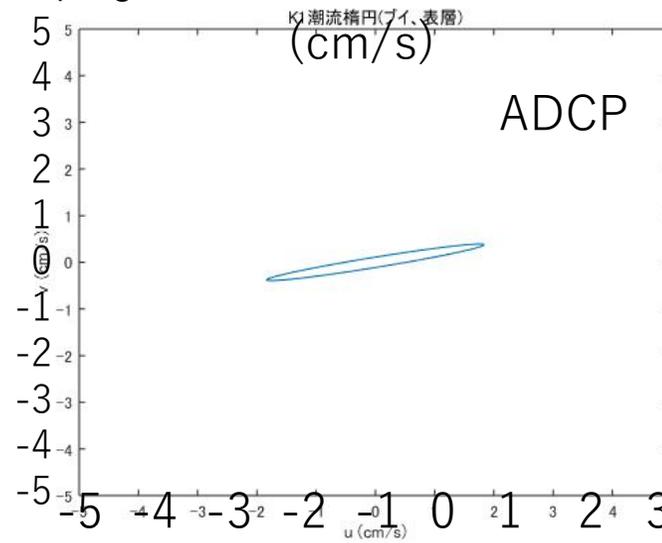
潮流楕円

- ADCPデータと大蛇行期のHFレーダーのデータの潮流楕円の比較
- M2楕円はADCPデータと大蛇行期のHFレーダーのデータでおおよそ一致した。
- K1楕円はADCPとHFレーダーで形も大きさも大きく異なっていた。(ADCPデータではK1楕円は振幅1cm/s程度ととても小さい)
- 1日周期の変動に関しては、風による吹送流の影響の可能性もある

M2 潮流楕円



K1潮流楕円



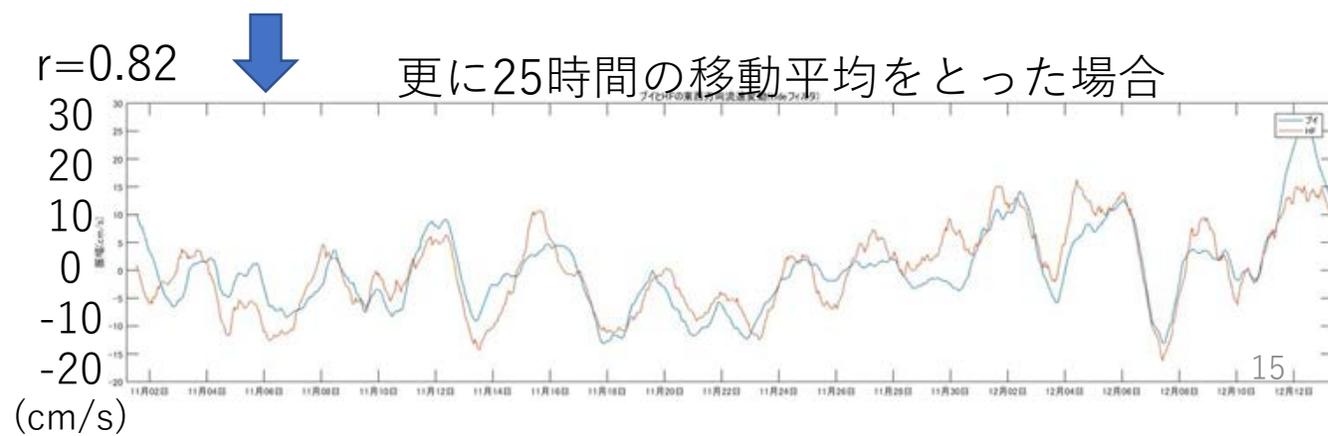
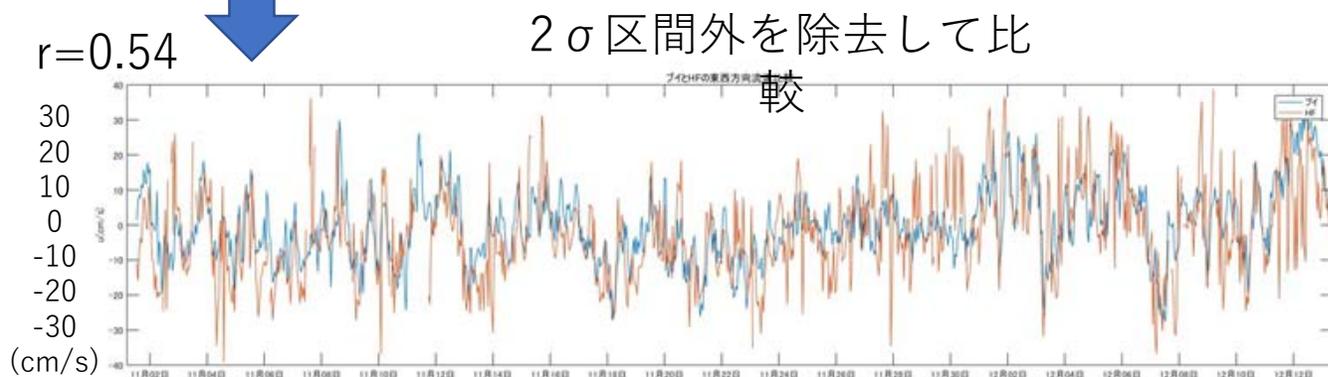
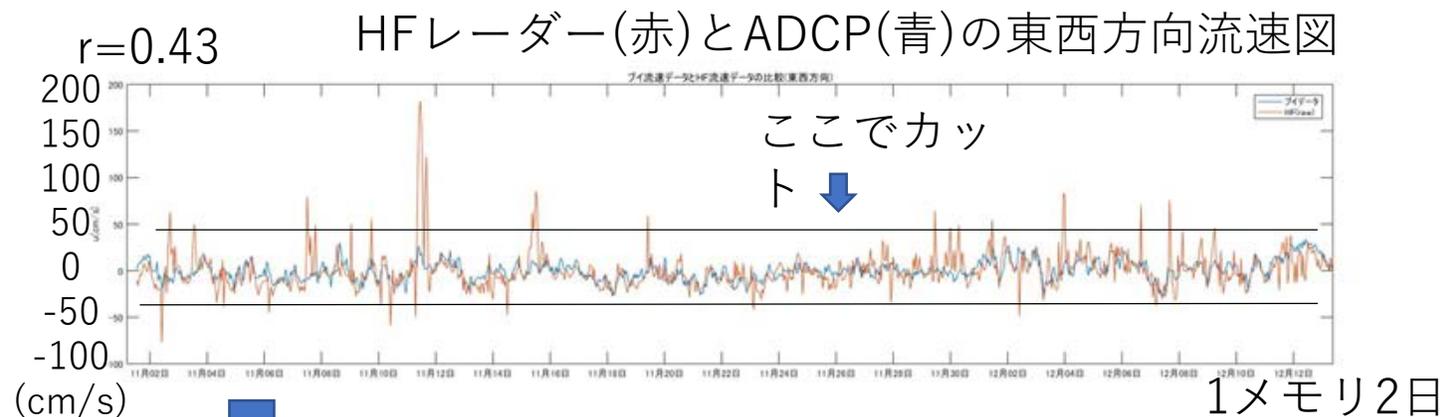
解析結果

HFレーダーとADCPの流速比較とQC

潮汐スケールの変動では相模湾 HFレーダーの信頼性は低い

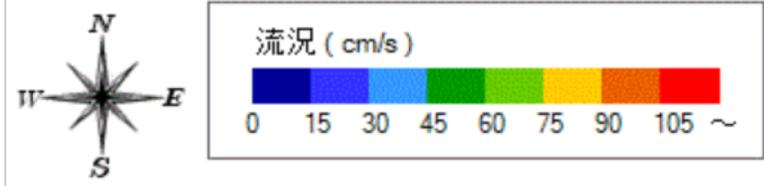
- HFレーダーには不自然に大きな値が表れるため、QCを行った
- レーダーの流速データの分布を正規分布と仮定して、 2σ 区間外のデータを除去した
- さらに25時間の移動平均をかけたところ、ADCPデータとの高い相関が得られた

数日より長周期では信頼性向上

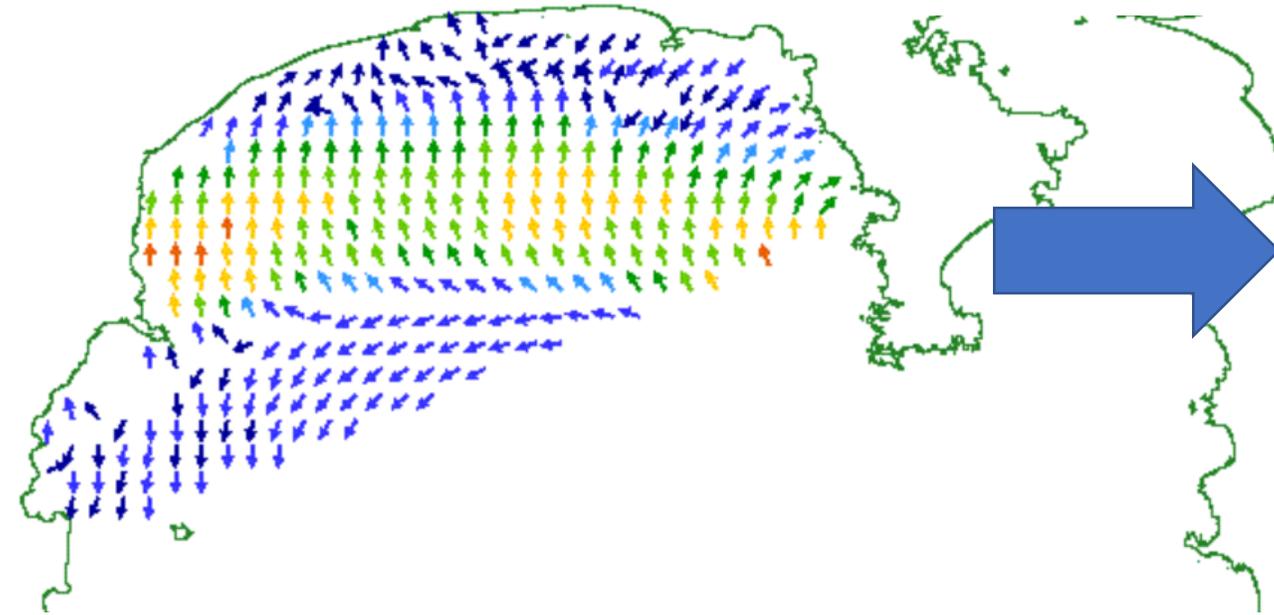


解析結果

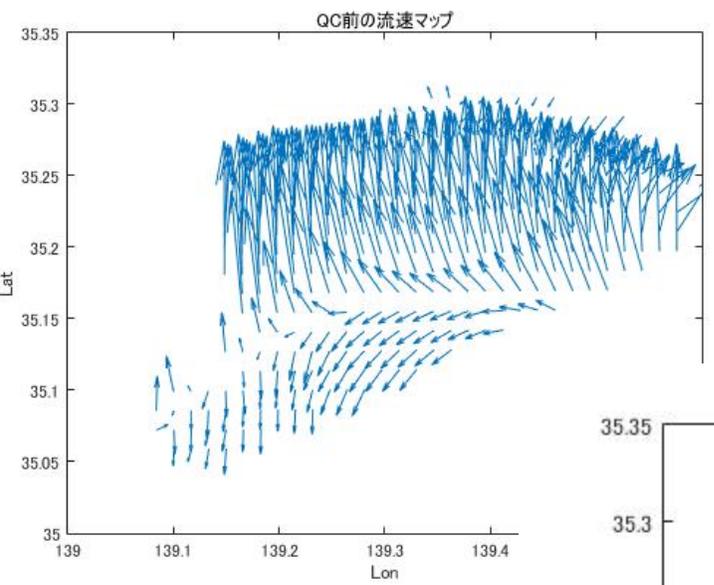
QC前と後のマップの比較



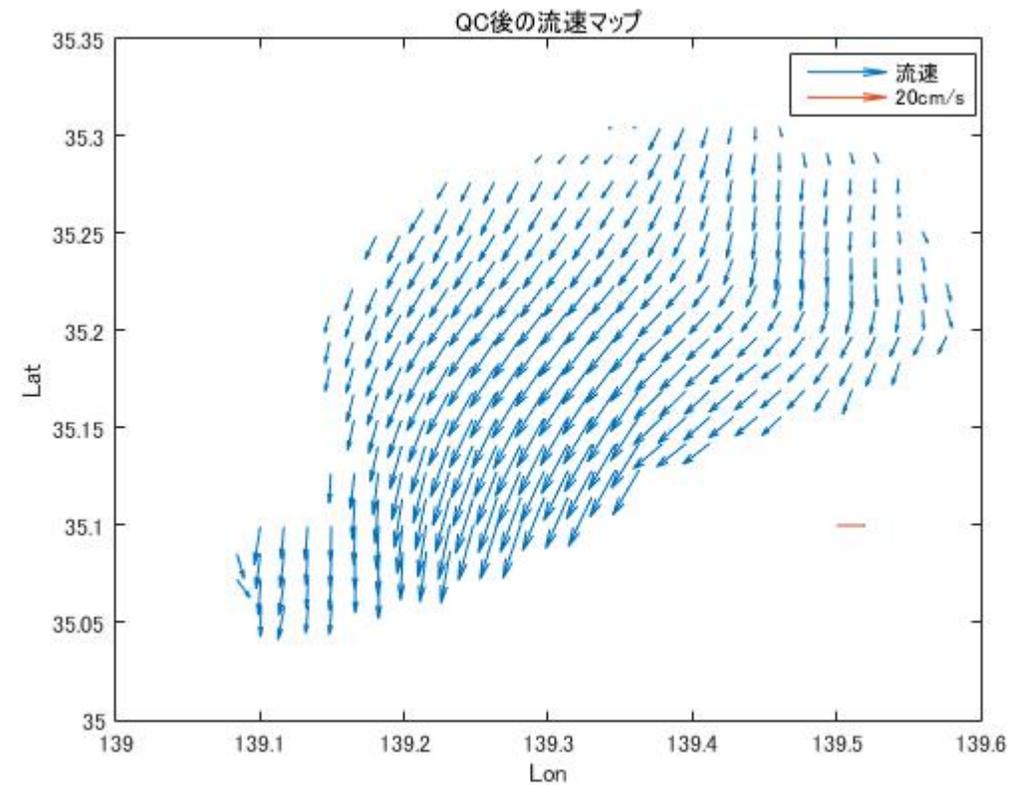
相模海域
2017/10/06 15:00



QC前

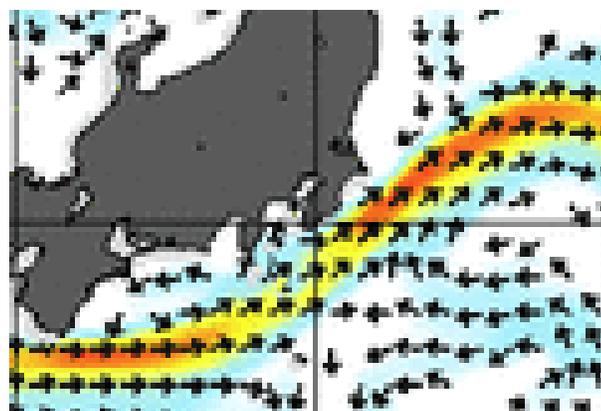
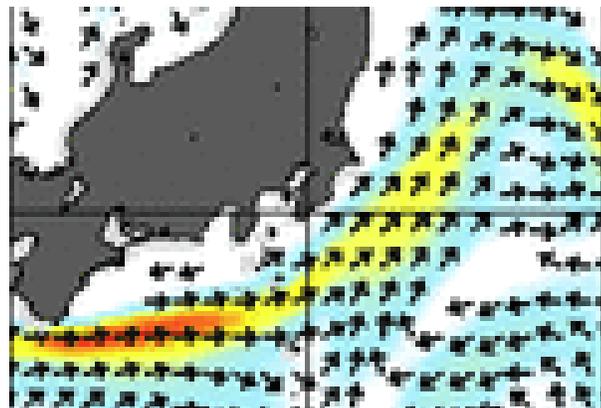
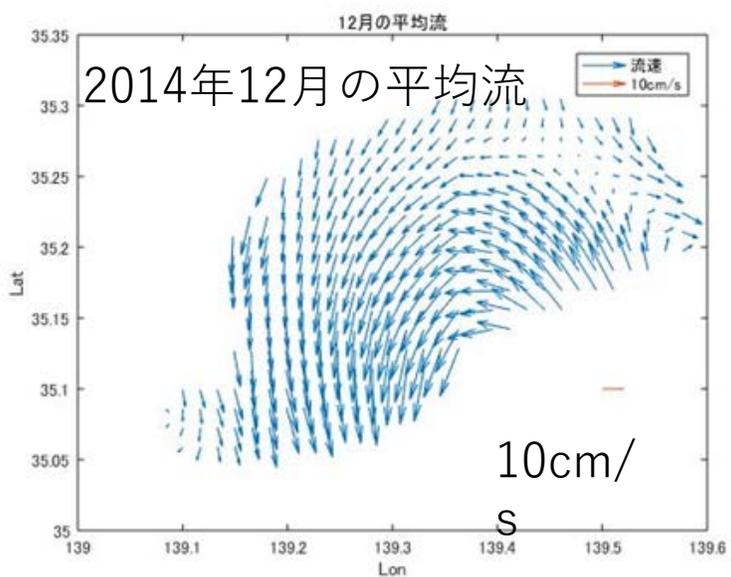
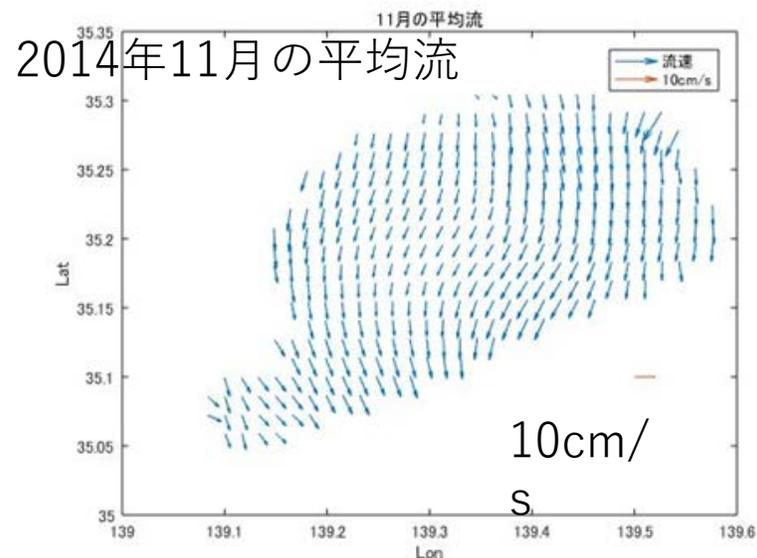


QC後



解析結果

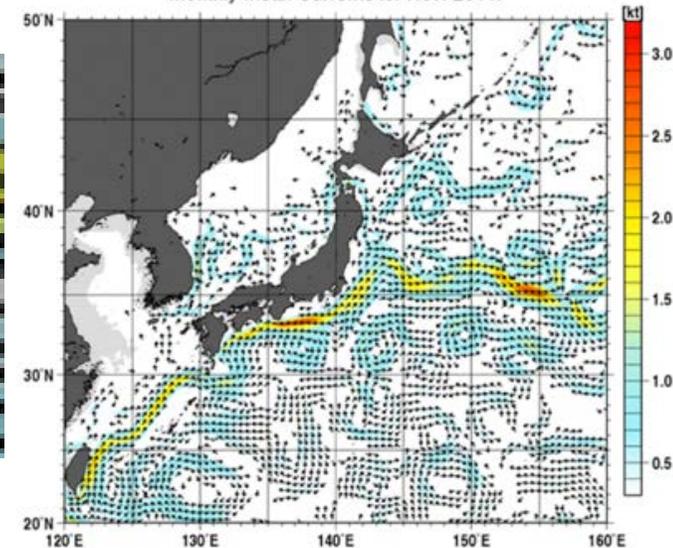
黒潮流軸変動とHFレーダー



黒潮流軸が近づくと、湾内の循環流が強化された

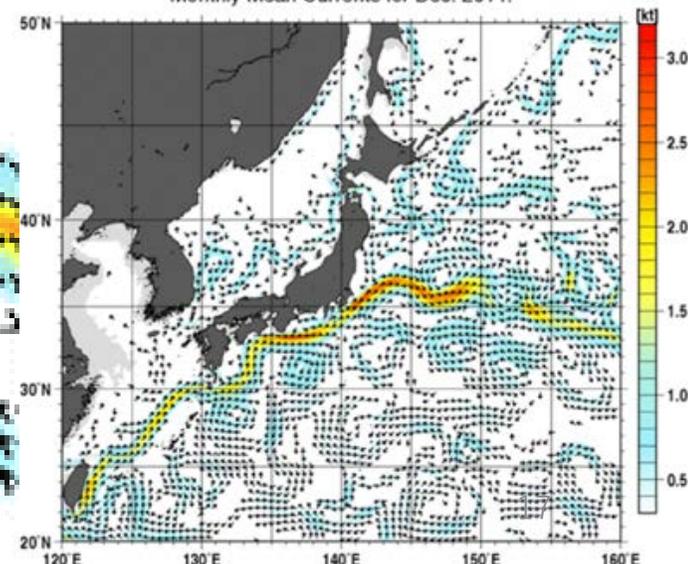
2014年11月の黒潮流路

Monthly Mean Currents for Nov. 2014.



2014年12月の黒潮流路

Monthly Mean Currents for Dec. 2014.

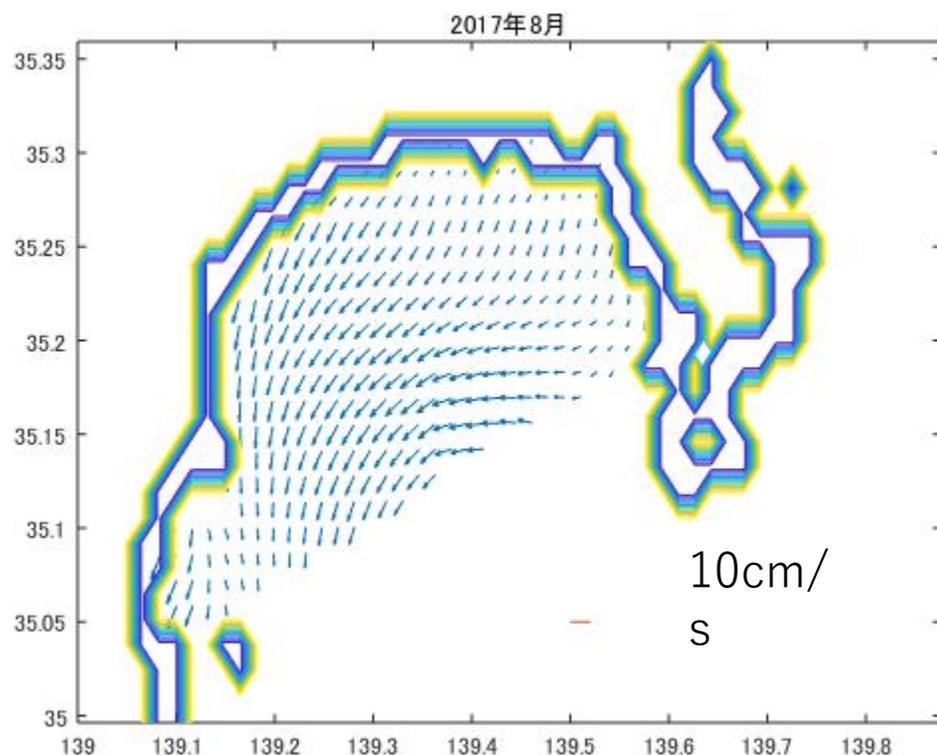


大蛇行期と非大蛇行期のHFレーダーの流速図

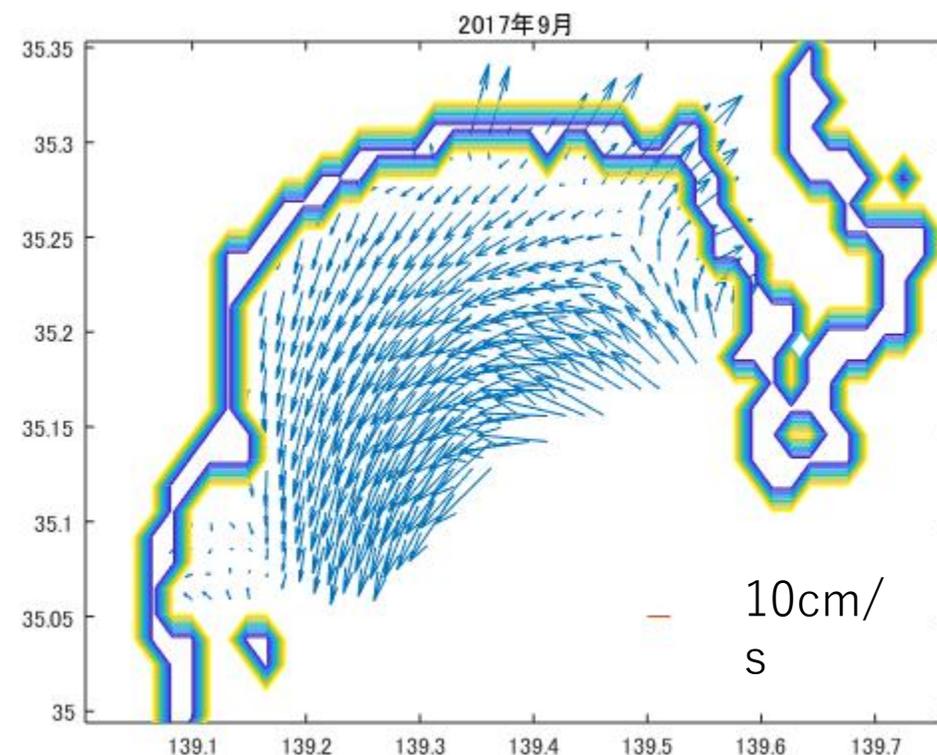
■ 2017年の大蛇行期と非大蛇行期の流速比較

- 大蛇行期に低気圧性循環が卓越し、非大蛇行期にはそれが弱まるという結果がHFレーダーからも得られた。

2017年8月の流速図



2017年9月の流速図



時系列分析とQCのまとめ

■ まとめ

- 湾北東部では潮汐による変動はとても小さいことが分かった
- QC後の数日以降の変動に関してはADCPデータとの相関が高く、HFレーダーは有用なデータとなる
- 黒潮流軸と湾内の循環流の関係や、大蛇行期の循環流の卓越もHFレーダーで確認することができた

■ 課題

- 湾北部の岸に近い部分ではレーダーでは発散が生まれるような不自然なデータが取れることが多く、時系列QCだけでは不十分
- 異常値の除去では急潮などの突発的な現象も弾いてしまう可能性があるため、レーダーの異常と実際に大きな値が出た時とを見分ける方法を考えたい

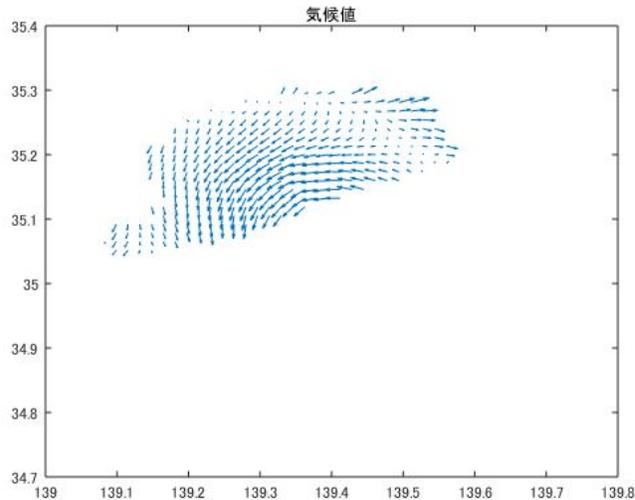


空間方向のQC

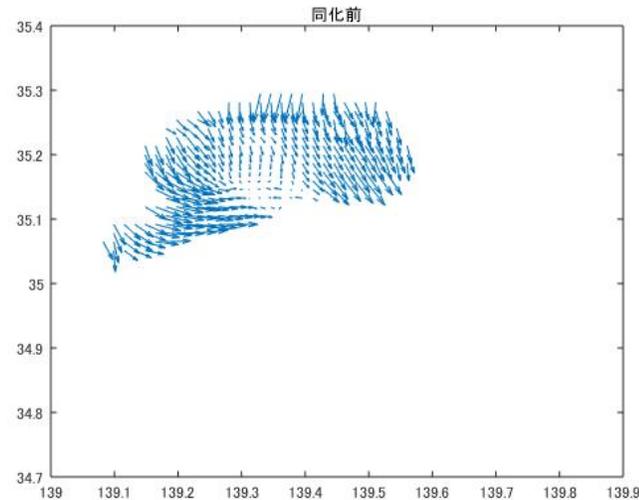
■ 変分法によるQC

- 時系列でのQCを行うことで異常値の除去をある程度行うことができたが、沿岸部で流れ場が発散するようなおかしい値が出るのが未だに確認された
- その為2次元的に収束発散を起こさないことを拘束条件とした空間的なQCを行った
- モデルと観測値の同化ではなく、レーダーのみから同化するため、第一推定値はレーダーから得られた年度平均値を用いた

気候値



観測値



■ 計算

- 連続の式を満たした上で、コスト関数を最小化するように u_e, v_e を変化させる

$$J = \sum_i \sum_j (u_{e(i,j)} - u_{o(i,j)})^2 + (v_{e(i,j)} - v_{o(i,j)})^2 + \lambda \left(\frac{u_{e(i,j+1)} - u_{e(i,j-1)}}{2\Delta x} + \frac{v_{e(i+1,j)} - v_{e(i-1,j)}}{2\Delta y} \right)^2$$

J : コスト関数 u_e, v_e : 推定値 u_o, v_o : 観測値

第一推定値には年度平均値を使用

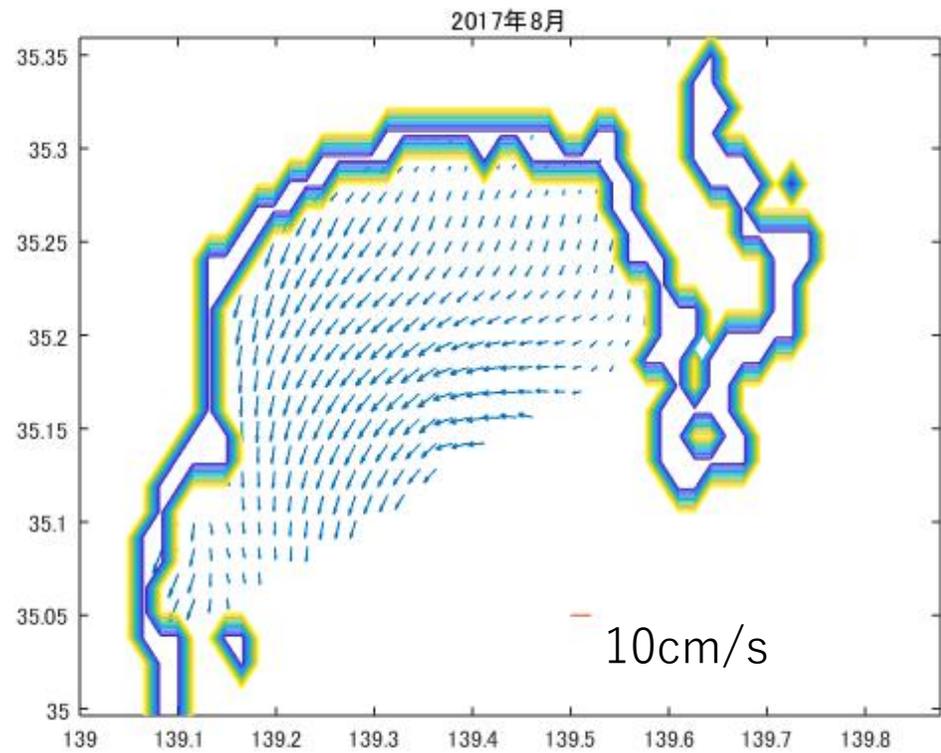
■ 探索手法

- 最急降下法を用いた

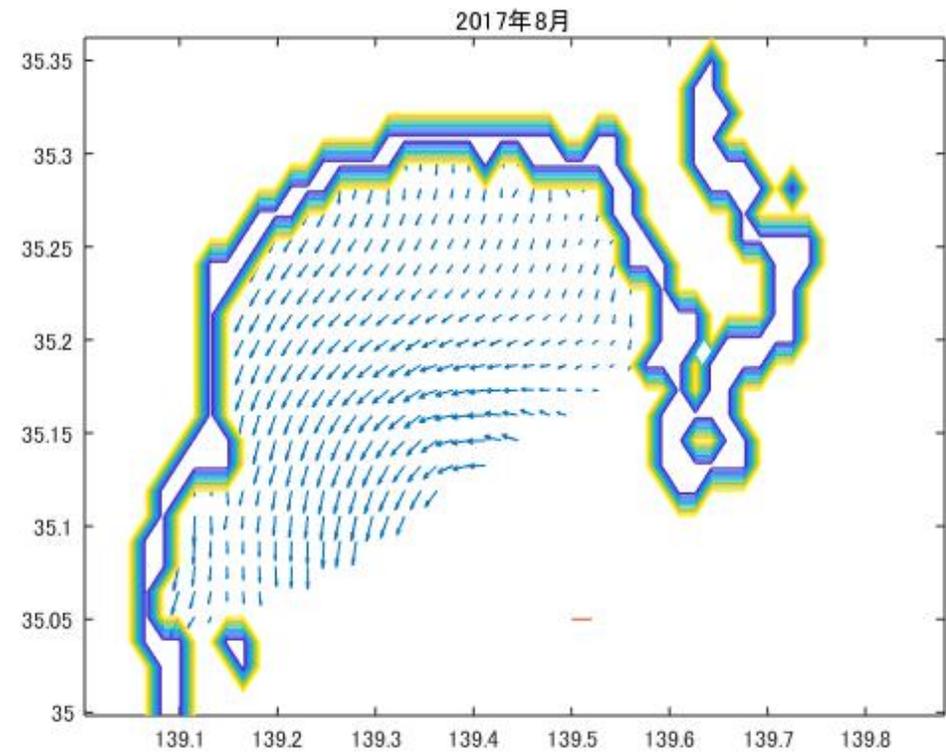
$$u_{e(i,j)}^{(k+1)} = u_{e(i,j)}^{(k)} - \alpha \frac{\partial J}{\partial u_{e(i,j)}^{(k)}} \quad (\text{各 } v_e \text{ についても同様})$$

■ 結果

変分QC前



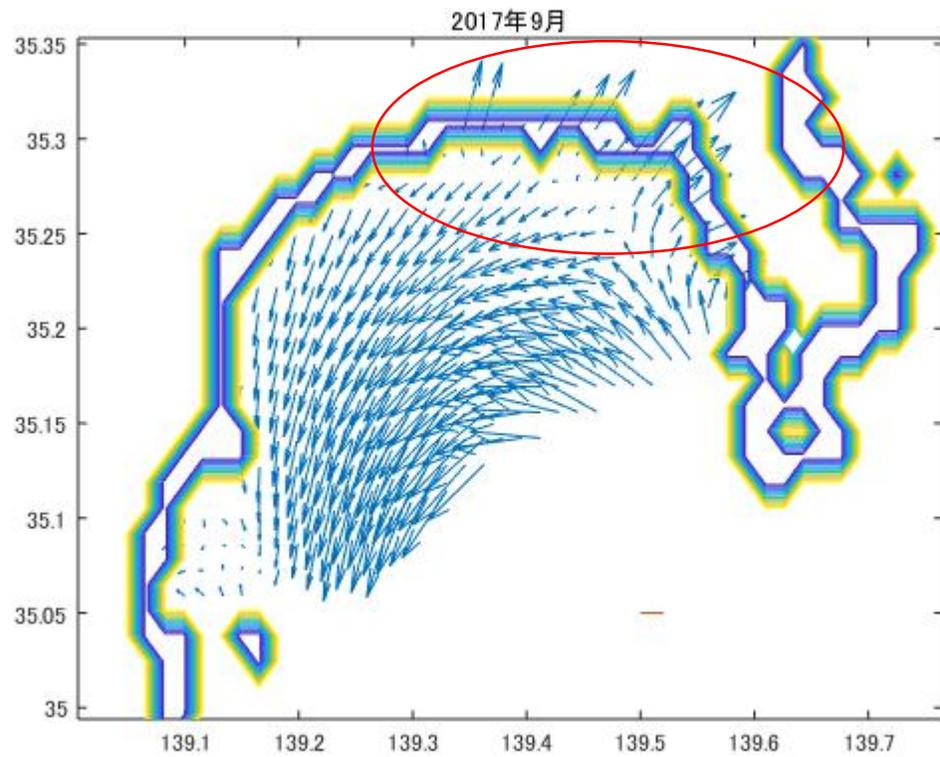
QC後



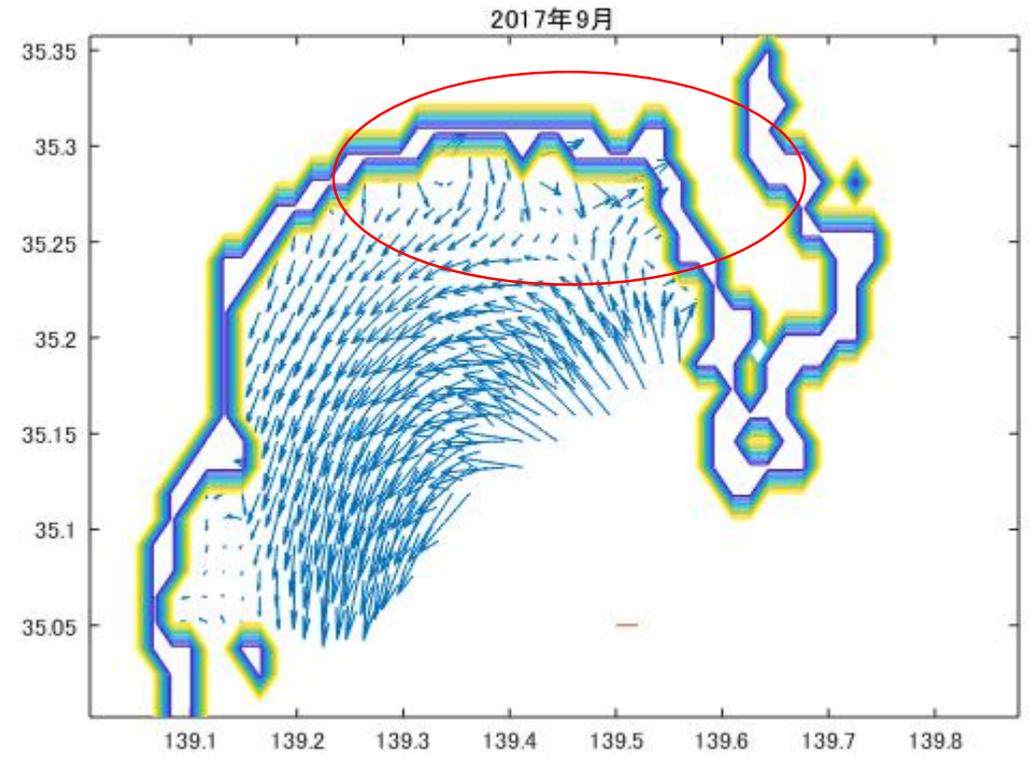
2017年8月平均流速

■ 結果

変分QC前



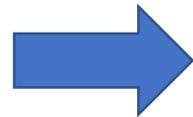
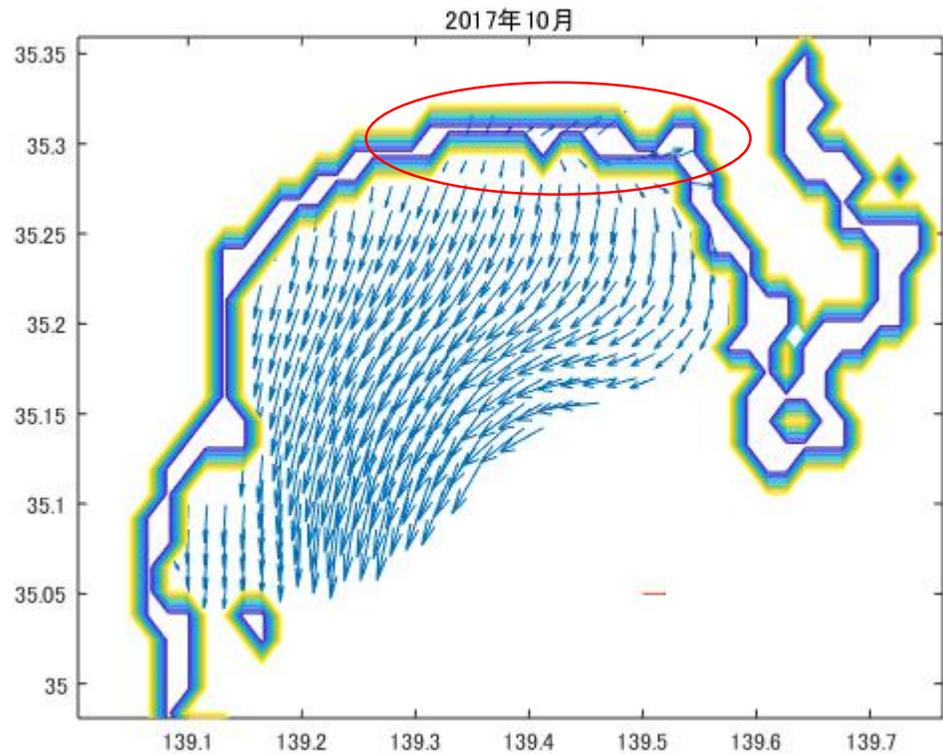
QC後



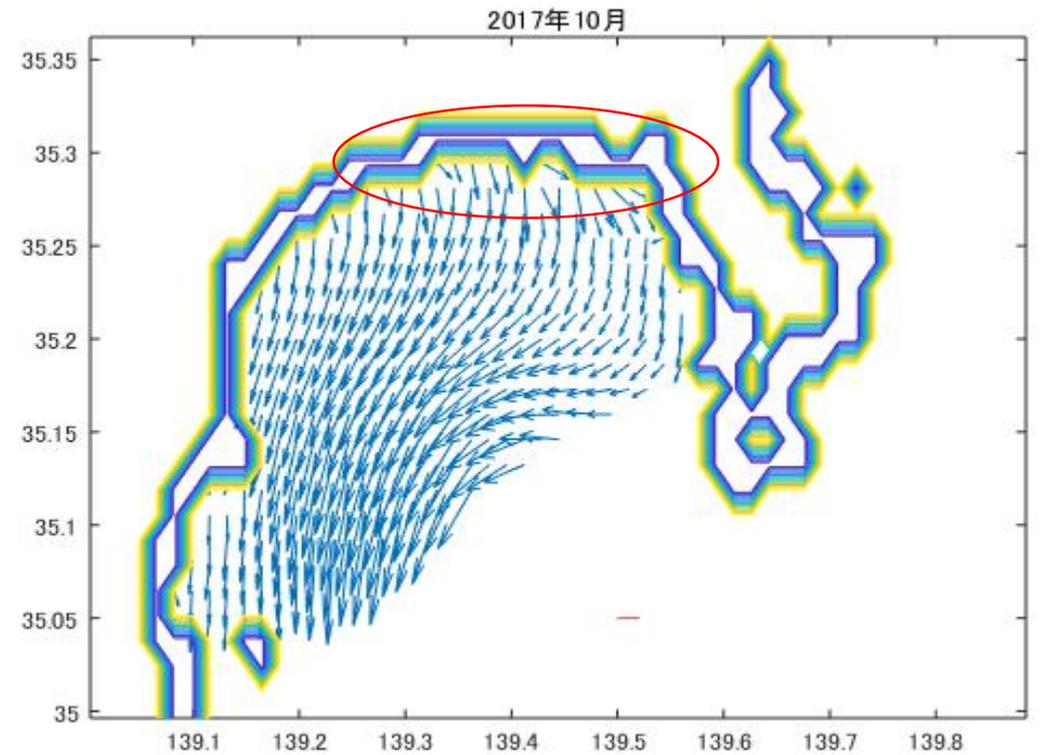
2017年9月平均流速

■ 結果

変分QC前



QC後

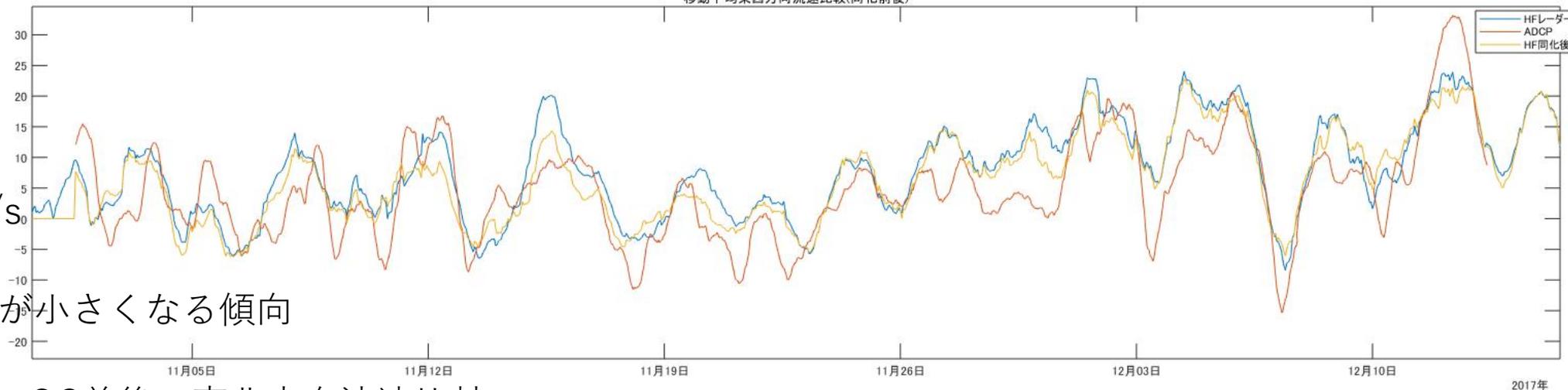


2017年10月平均流速

■ 結果

QC前後の東西方向流速比較

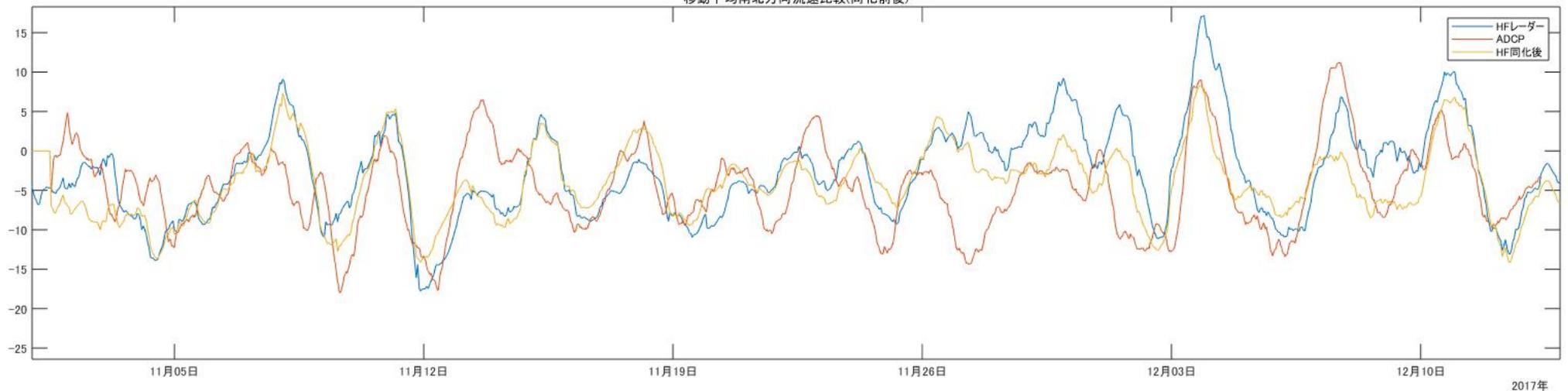
移動平均東西方向流速比較(同化前後)



QC後は流速が小さくなる傾向

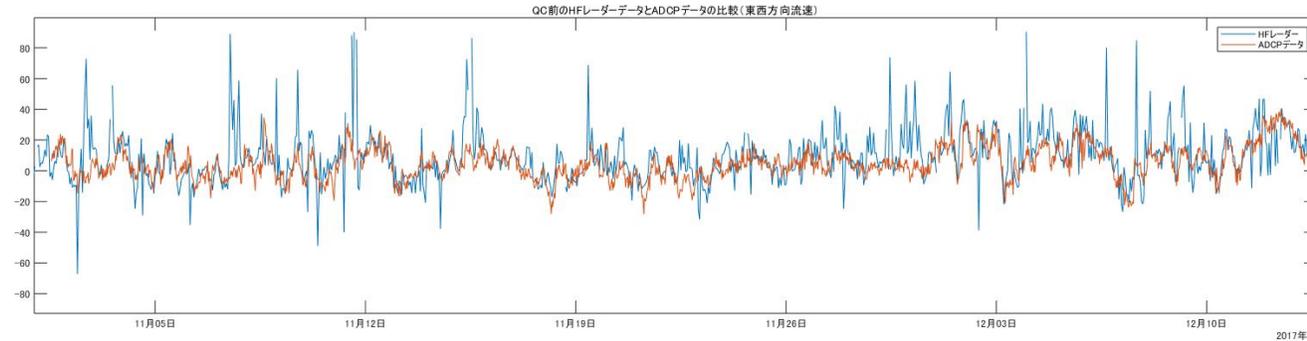
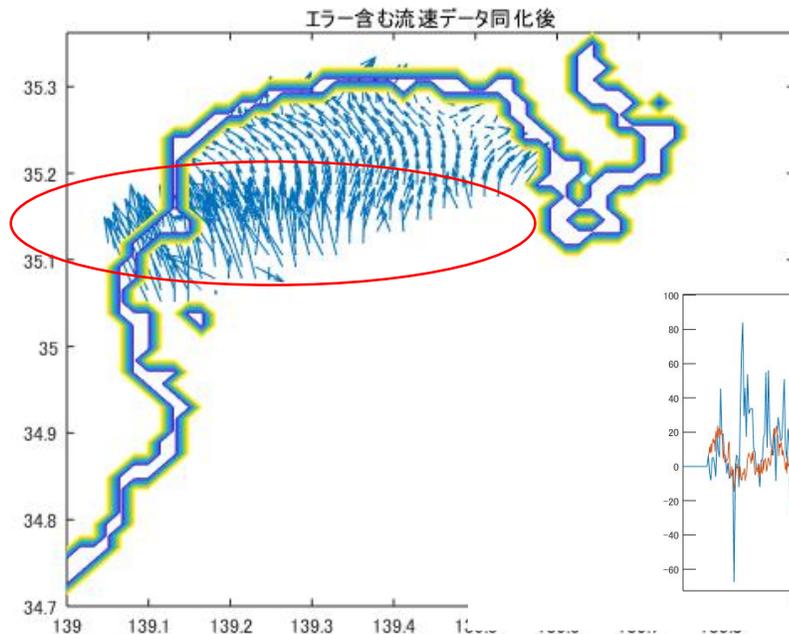
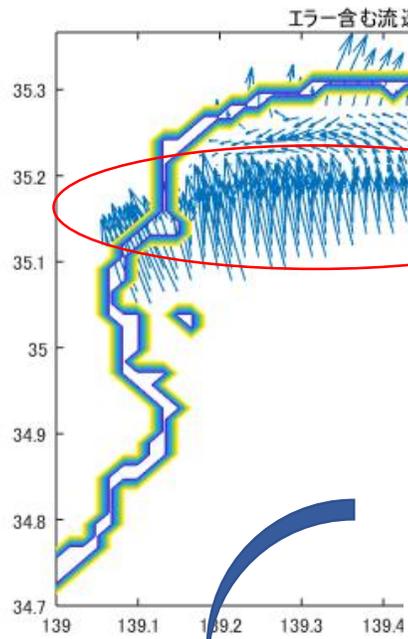
QC前後の南北方向流速比較

移動平均南北方向流速比較(同化前後)

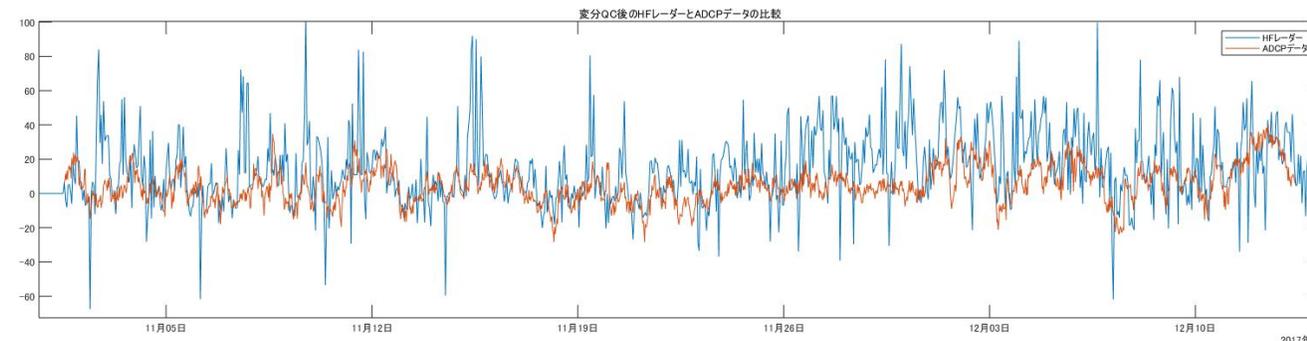


■ 結果

- 時系列処理の前に行うと



スパイクはむしろ増える



- 結論
 - 岸向きの発散を生むような流れを減らすことはできたが、きれいな流速図をかけたとは言えなかった(特に境界に近い場合)
 - ADCPデータとの比較を行ったところ変分QCを行ったあとの方が、行う前よりも相関が小さくなるという結果になった。一方流速値自体は小さくなり、ADCPの値と近づくこともあり、その結果RMSEは u,v ともに小さくなった。
 - 時系列QCを行う前に変分QCを行ったところ、エラーの除去は難しく、むしろ異常値に引っ張られて値が悪くなってしまったようになった。
- 改善のためには
 - 観測誤差の扱いを同化の時に反映する(大きさや分散、性質など)
 - 境界値を考慮する(現在は1次精度に落とした差分を使用、岸に沿うような方向にすることは考慮していない)
 - より精度のよい探索手法を用いる
 - NS方程式を拘束条件にするなど時間を考えて行う