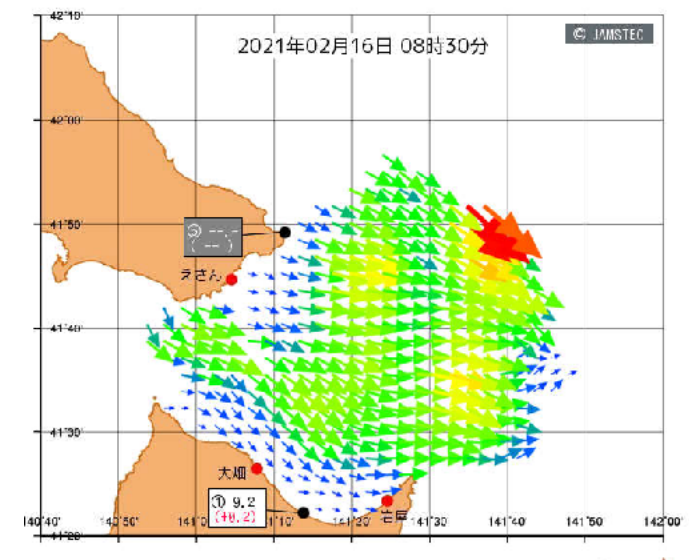
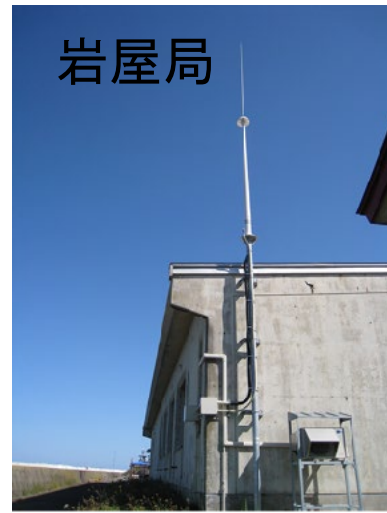


津軽海峡東部における 海洋短波レーダー表面流速と 係留観測の比較

金子仁・佐々木建一・佐藤喜暁 (JAMSTECむつ研)、橋
向高幸 (マリンワークジャパン)



2022年11月29日-30日 九州大学応用力学研究所 研究集会「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」

2022年11月30日 9:55-10:20

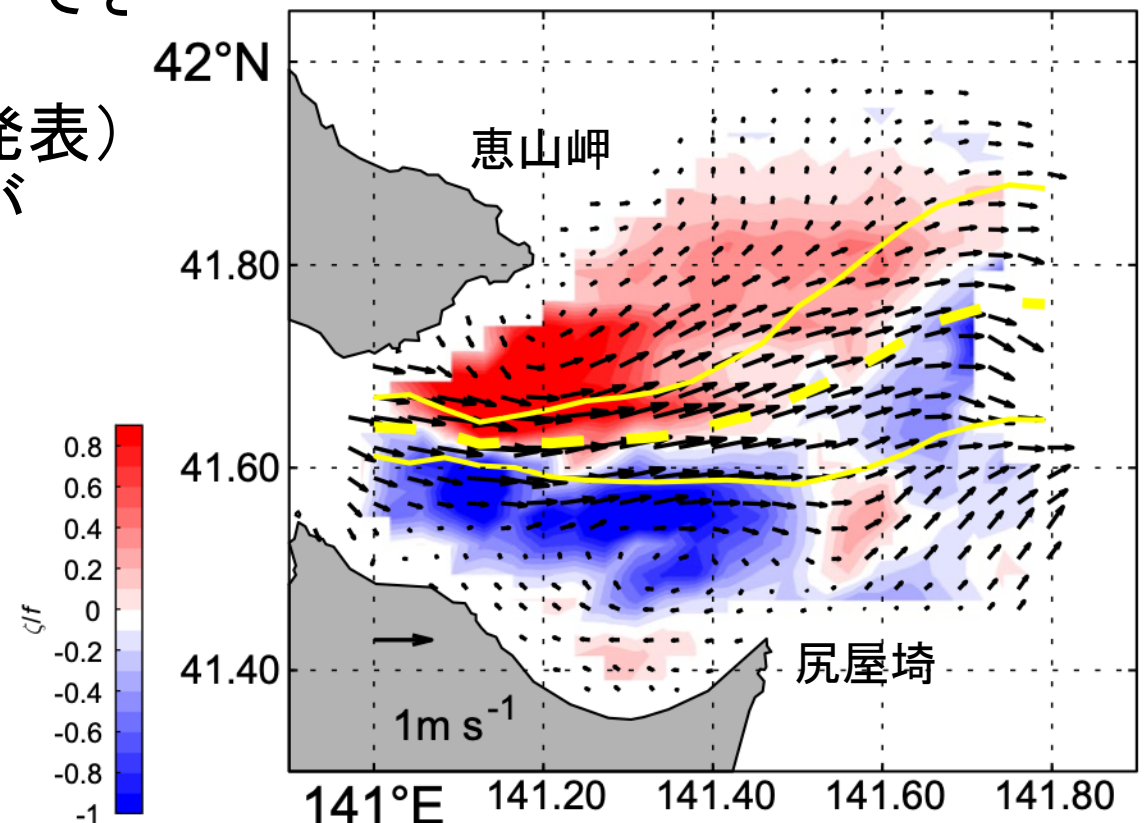
背景

- むつ研では 2014年から CODAR, SeaSonde, 13.9MHz 3 基で観測開始
- 流動場の特徴はだんだんわかってきたが
(Kaneko et al., 2021; 2022; Yasui et al., 2022)、
津軽海峡東部における HFR 流速精度の検証は継続的な課題

どこで検証するのが良いのか？

- 津軽海峡東部では相対渦度のレベルがかなり高い $Ro \sim O(1)$
- 夏季～秋季に下北半島北岸で時計回りの渦ができる
- 強い相対渦度は表層エクマン層を通じて
流速比較にも影響？（昨年度九大研究集会発表）
- 負の相対渦度側の方が鉛直的な流向の変化が
小さい可能性 → 時計回り渦内が良さそう

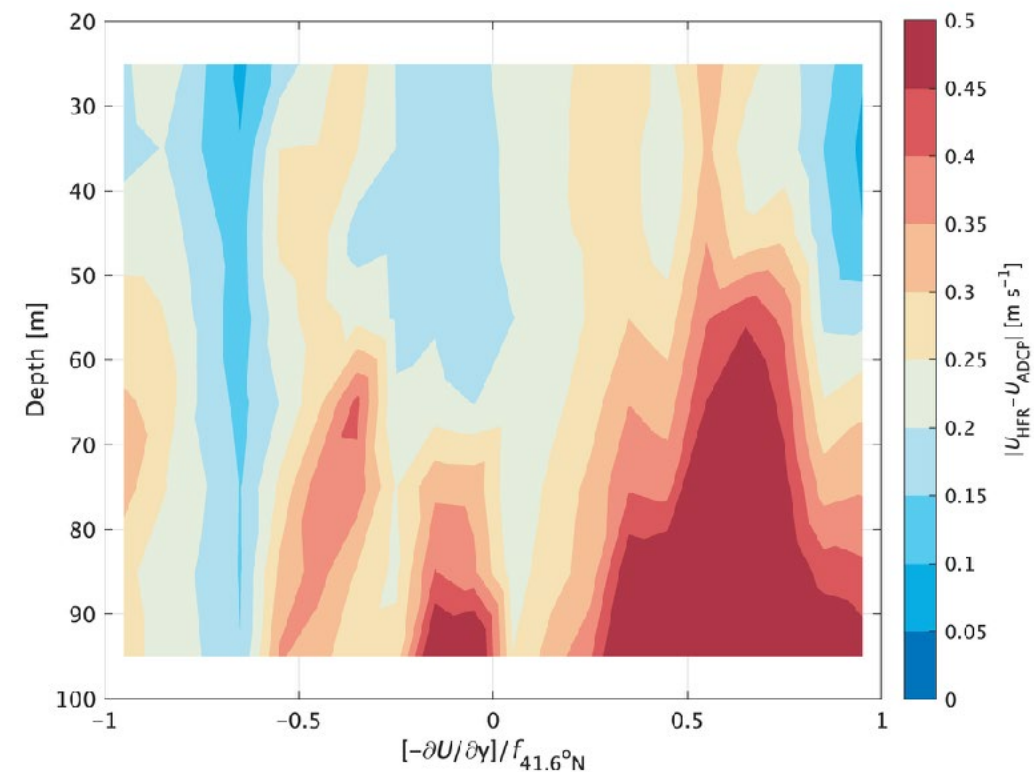
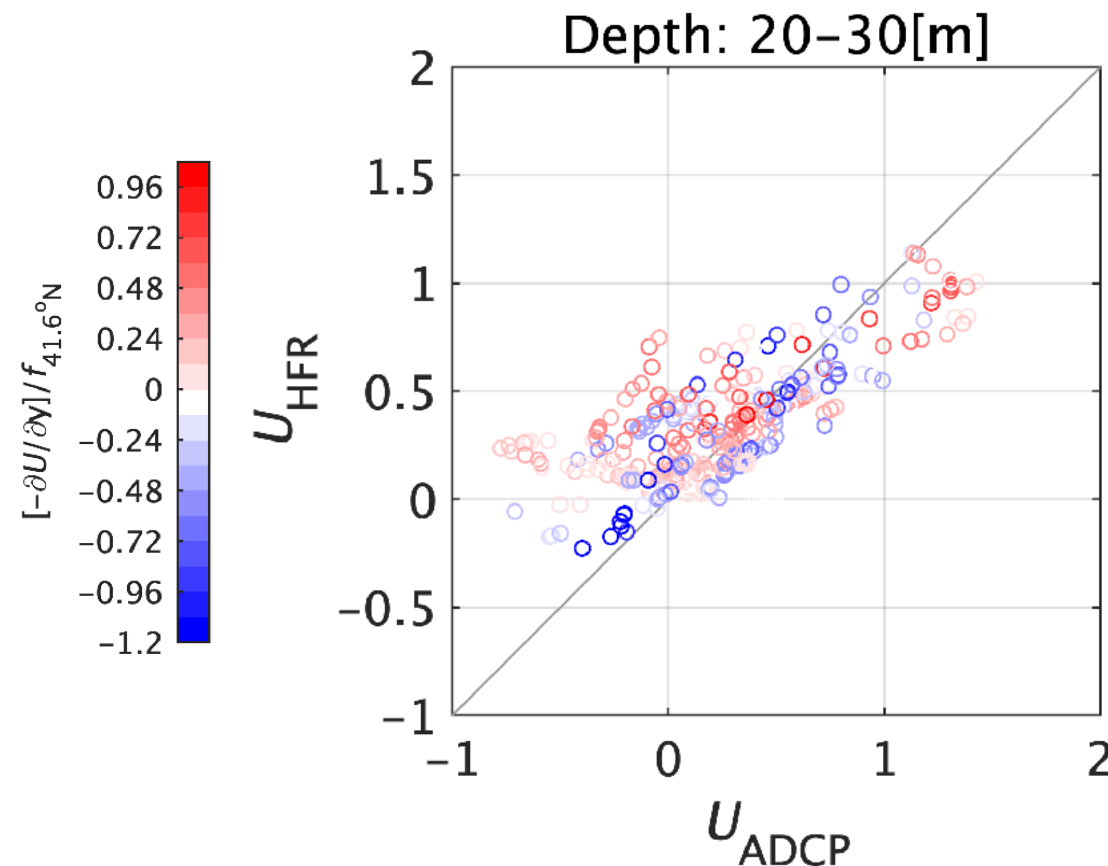
2016年の9–10月に係留観測
（流速計による鉛直多層計測）を
時計回り渦の中で実施していた。
その結果について紹介



夏季 (7–9月) の平均表面流速分布と相対渦度
Kaneko et al. (2022)

2021年の発表

海洋短波レーダーによる水平高解像度表面流速データ、船底 ADCP データ、乱流観測データから、海峡東部（SE ライン）における流速の鉛直構造と相対渦度、エクマン層の関係を検討

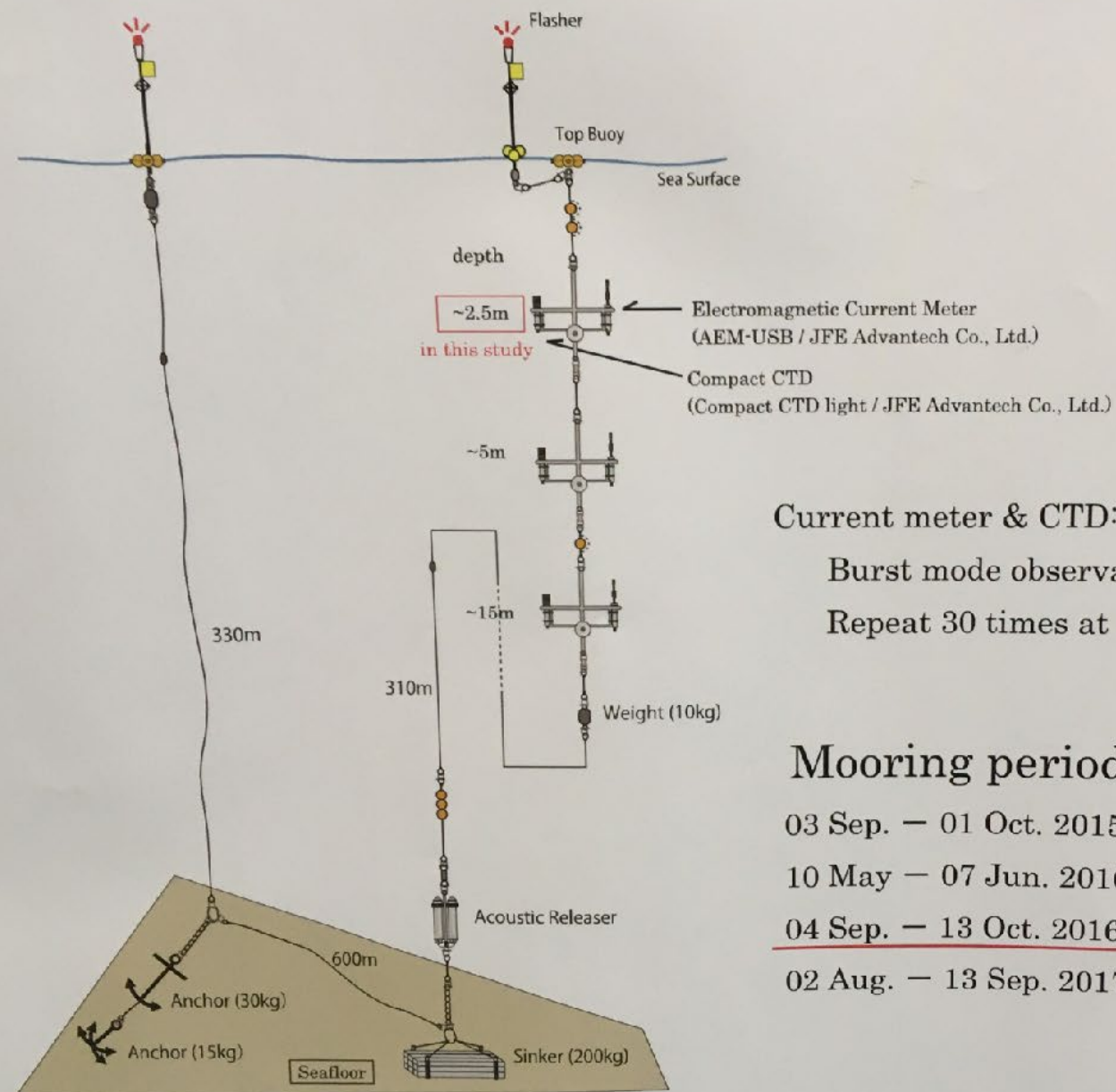


- 負 (正) の相対渦度領域では HFR と 表層船底 ADCP の差が小さい (大きい)
 - 季節的には秋から冬の差が大きい
- 相対渦度に影響を受けたエクマン層の特性と整合的に理解できそう

データと方法

St. CM2 (In-situ Observation)

2016年9月4日～10月13日



電磁流速系
AEM-USB
(JFE Advantech)
3層 : 2.5m, 5m, 15m
10分ごと1秒間隔
30秒バースト

Current meter & CTD:

Burst mode observation

Repeat 30 times at 1sec. interval everly 10min.

Mooring periods

03 Sep. – 01 Oct. 2015 @ CM2

10 May – 07 Jun. 2016 @ CM2

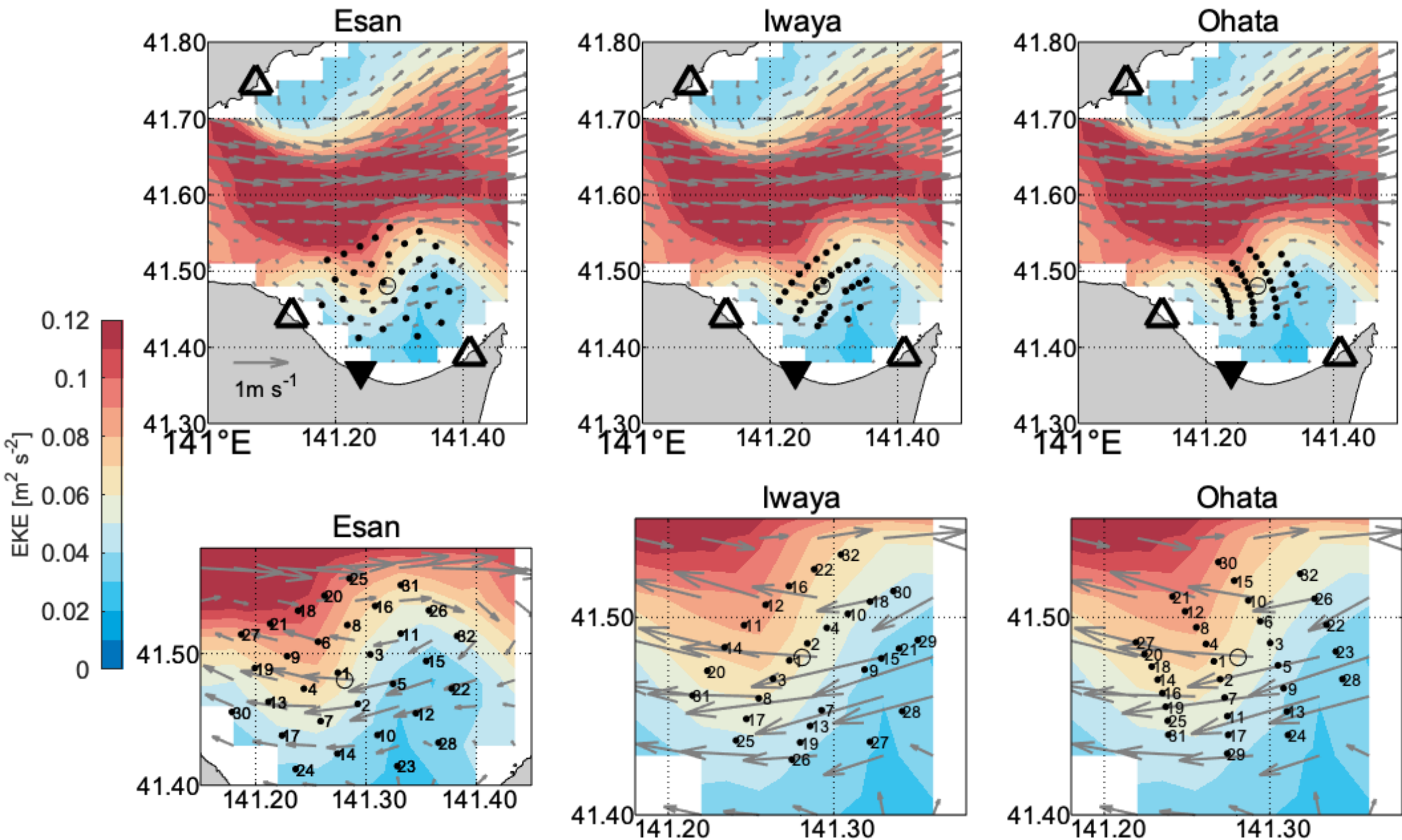
04 Sep. – 13 Oct. 2016 @ CM2 (used in this study)

02 Aug. – 13 Sep. 2017 @ CM3 (10km west of CM2)

Fig. 4 Mooring system for in-situ observation.

デフォルト設定の合成流表層流速場と各視線流グリッド&ブイ位置

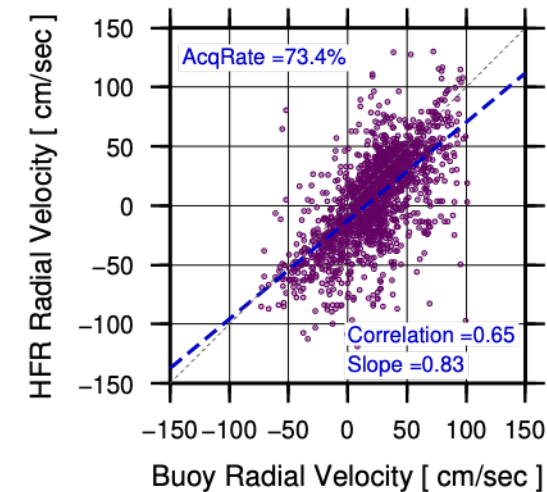
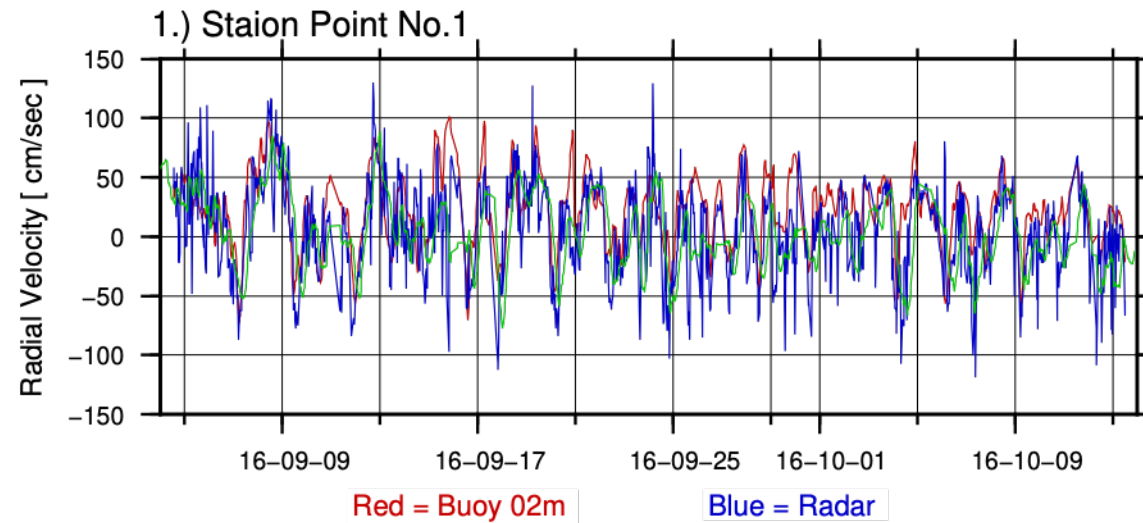
HFR temporal mean (default method): 2016/9/4 13:00 to 10/13 12:00



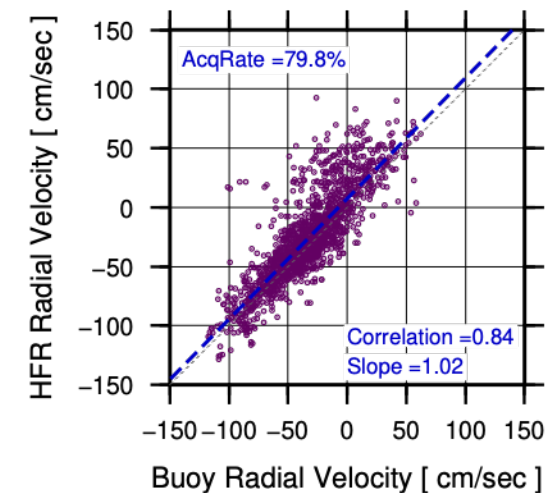
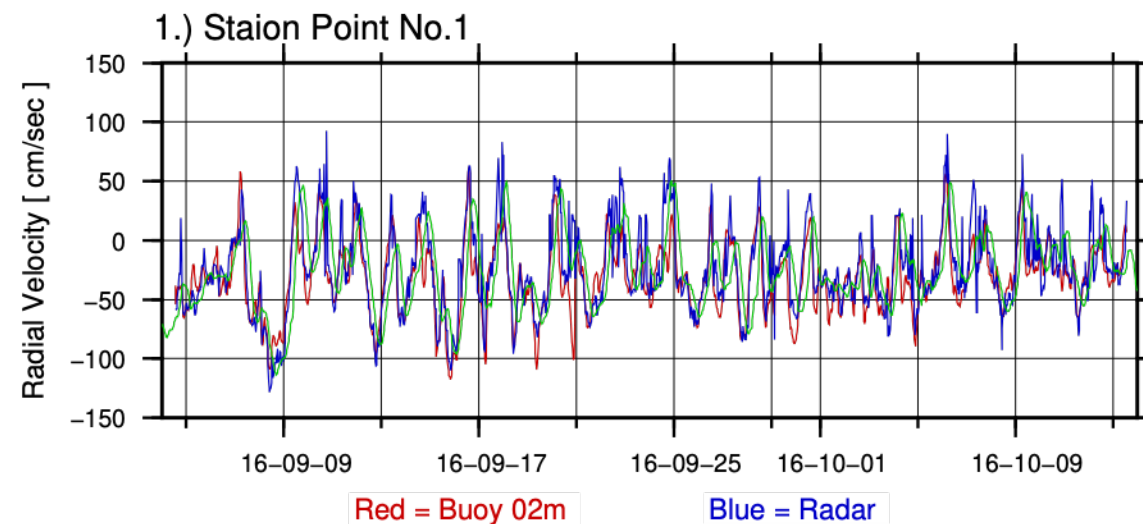
- ・ 夏季の下北沖の時計回り渦（のやや縁側）に設置。東西流に大きな南北変化がある
- ・ 恵山のデータはアンテナから遠いため、相対的にグリッド間隔が広い

ブイ最近傍点の HFR 視線流とブイ流速の比較 (config 16)

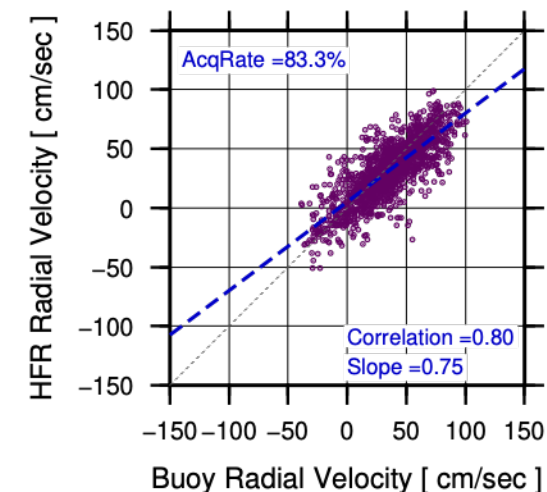
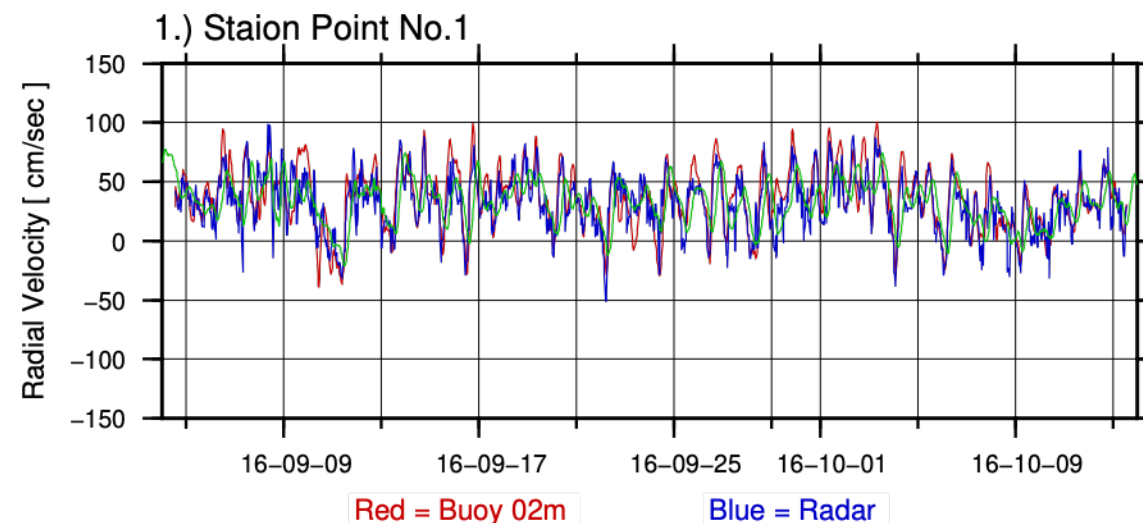
恵山



岩屋



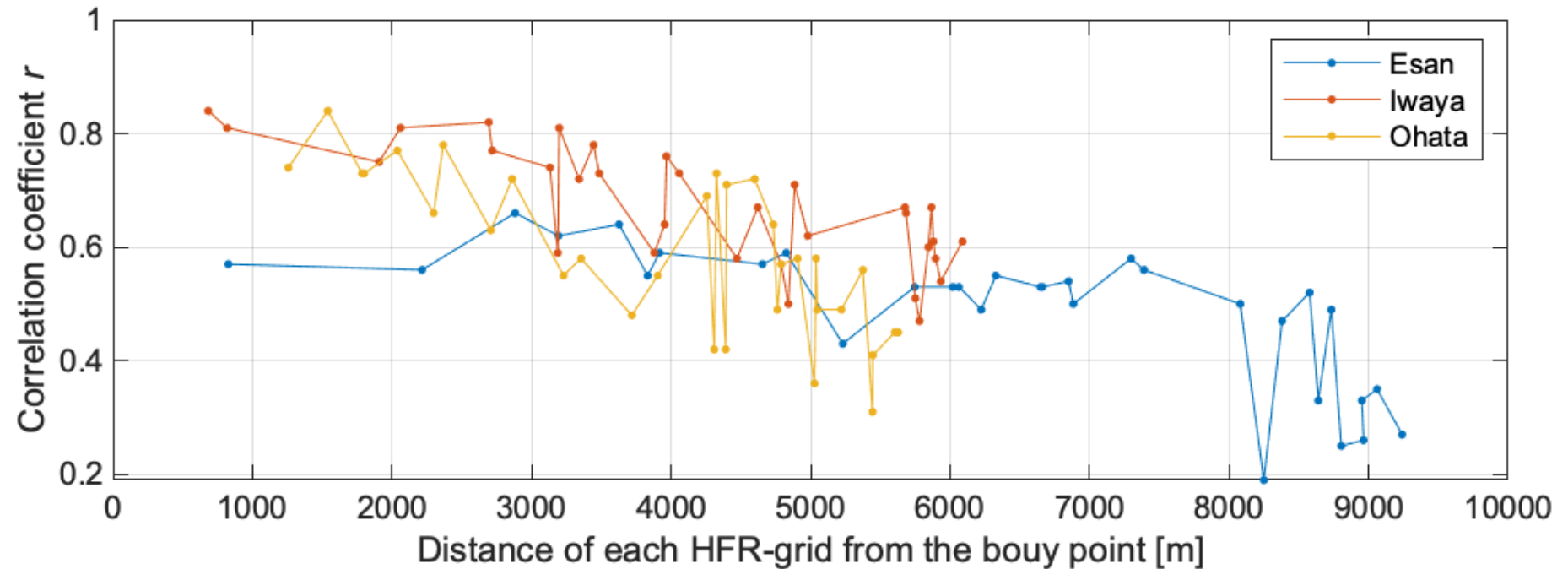
大畑



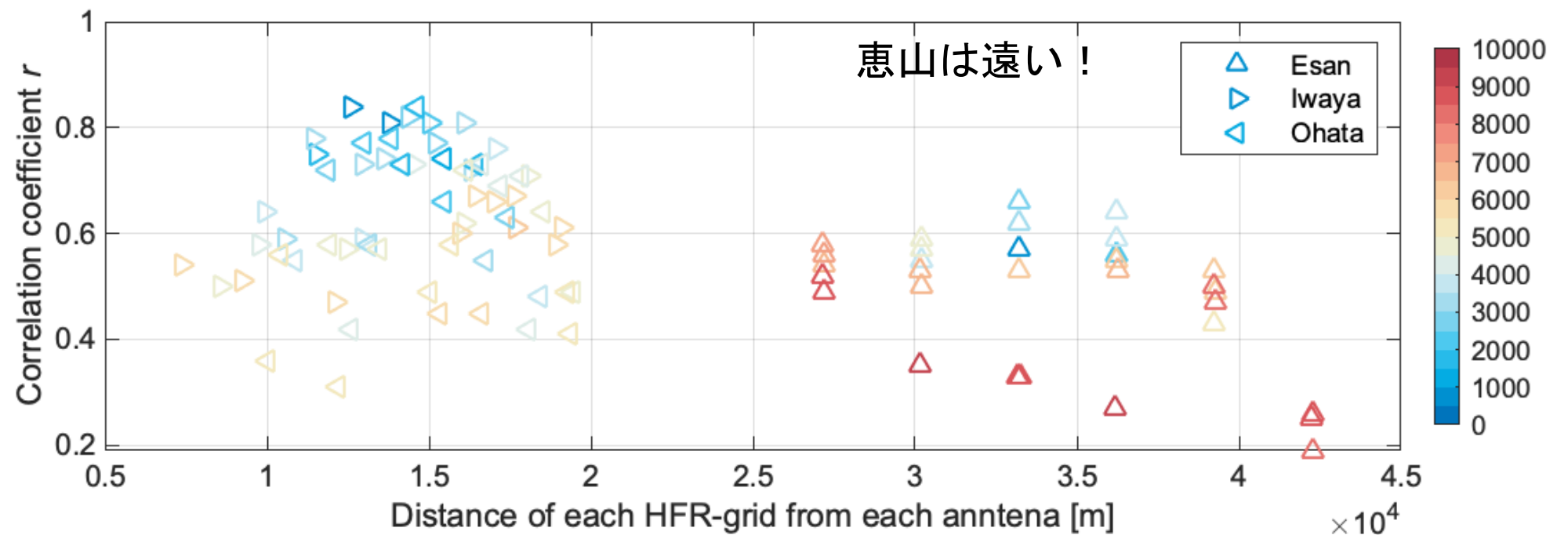
- Correlation は 岩屋、大畑が相対的に高く、恵山は低い
- Slope は岩屋が良い

HFR グリッドの距離特性による相関係数の変化

ブイと HFR 視線流
グリッドの距離



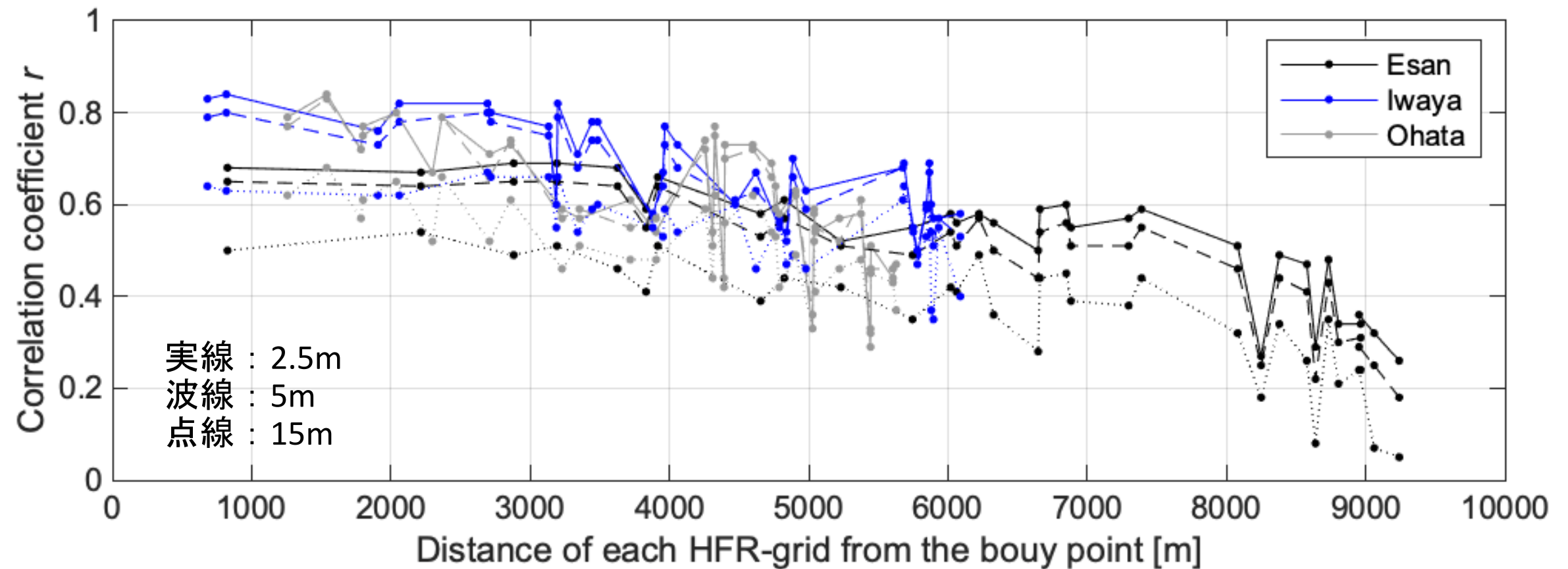
アンテナと HFR 視線流
グリッドの距離



色：ブイと HFR 視線流
グリッドの距離

- ① ブイからの距離が大きくなると相関は下がる → 誤差大
- ② アンテナからの距離が遠くても相関は下がる → 電波減衰の影響？

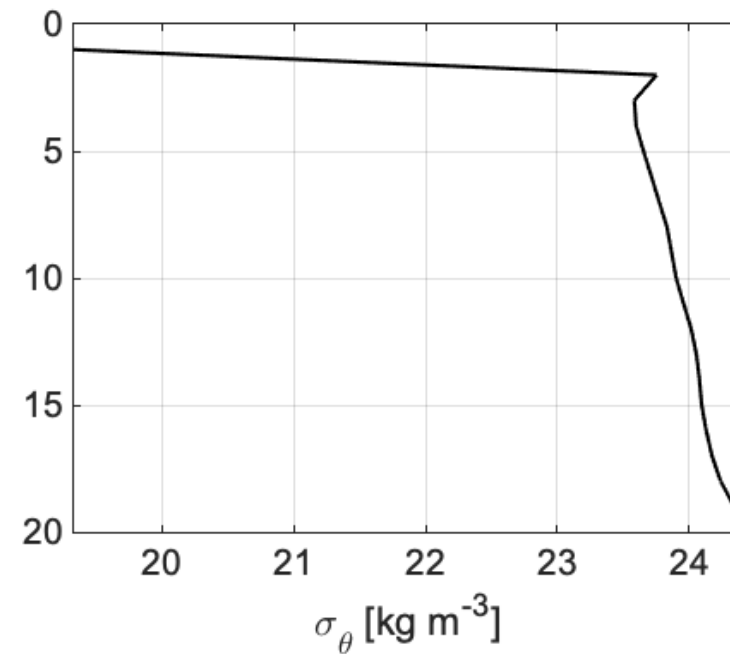
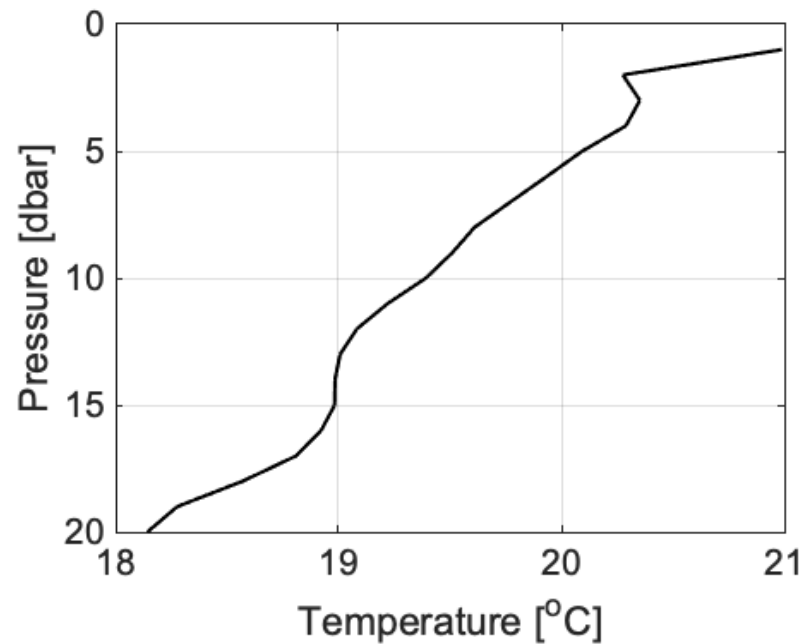
5m, 15m のデータ との比較



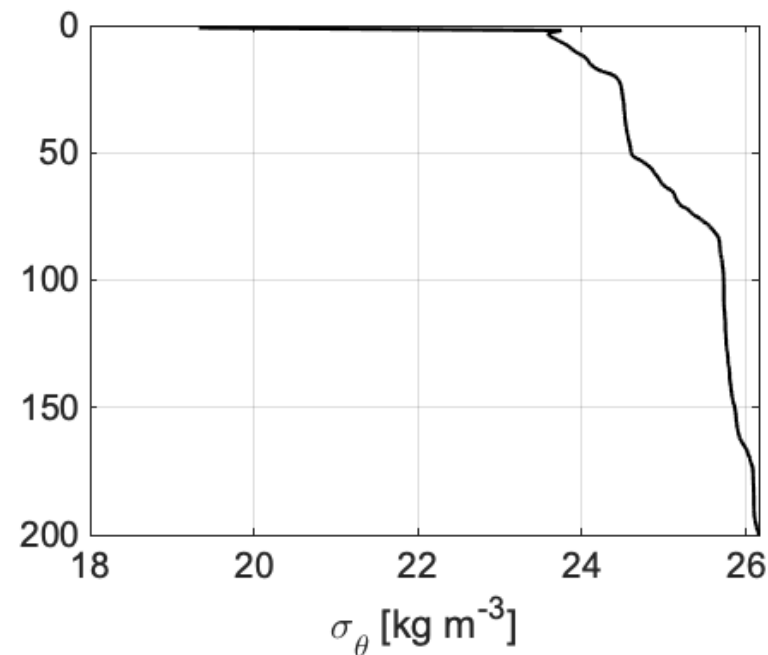
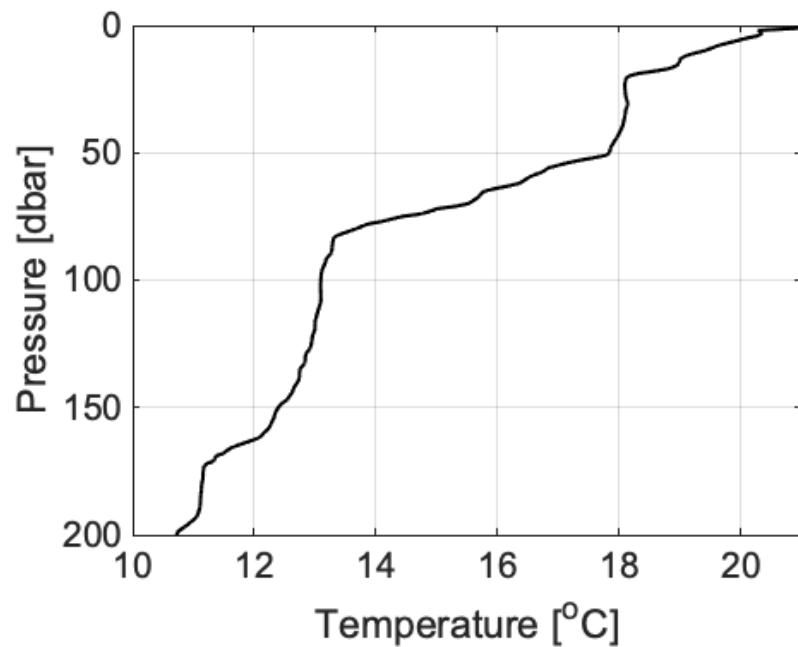
2.5m と 5m は同程度の相関係数。15m は相関が大分落ちる

投入時 CTD 観測 (US368, 2016/09/04)

0–20m 拡大図



0–200m

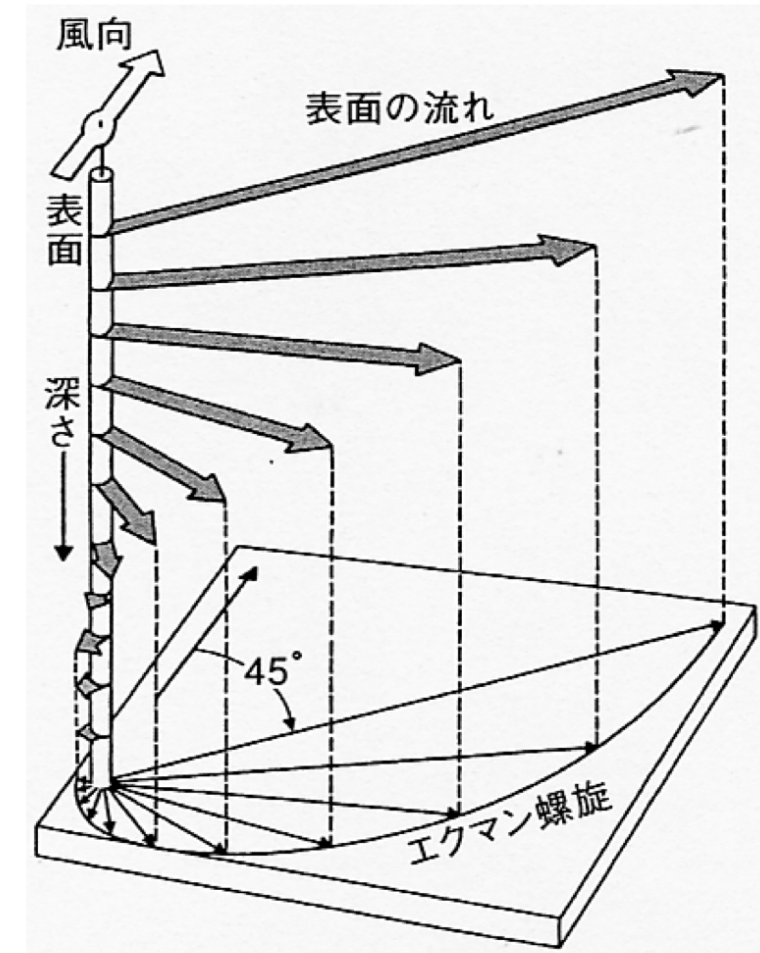
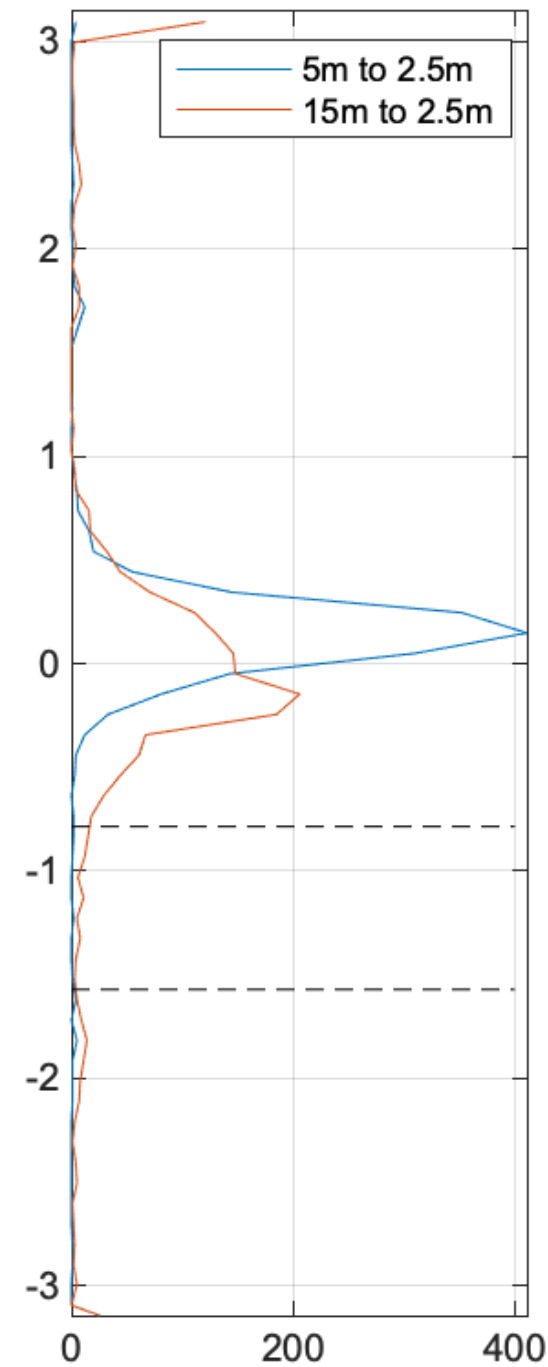
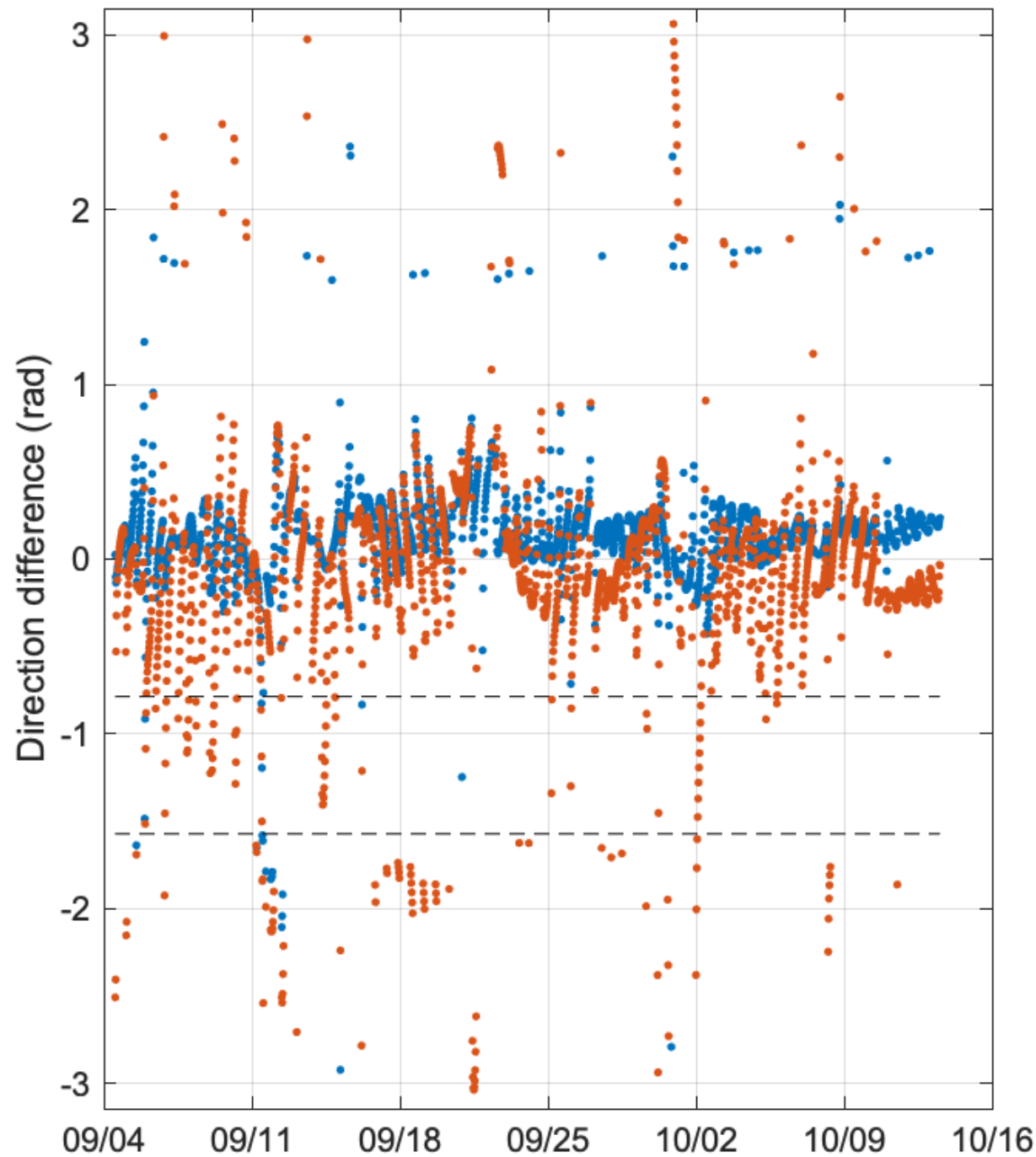


2m 程度に躍層がある。200m 程度まで階段状の躍層（単純ではない）
1 回の瞬間的な観測値のため継続的なものとは考えにくい、
表層数m の躍層はあまり影響していない？
→ 常にある構造かわからないので継続的な検討課題

1層目に対する流向のずれ角度

(18時間-1.5日バンドパス)

Bandpass: 0.75-1.5day



「地球学入門」、酒井治孝著、
東海大学出版社、2003

15m 層では時計回りにずれる傾向
エクマン層の構造と整合的な結果

係留系の各層の東西流のスペクトル

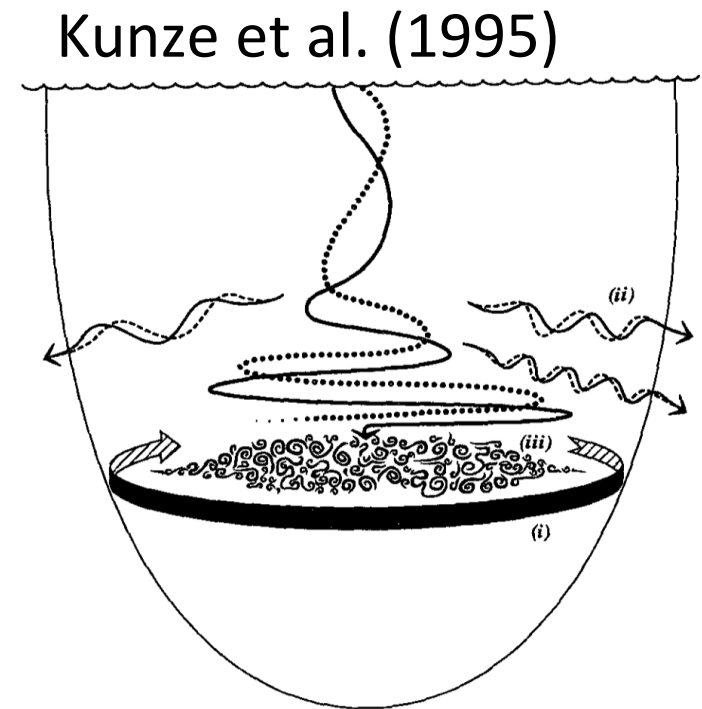
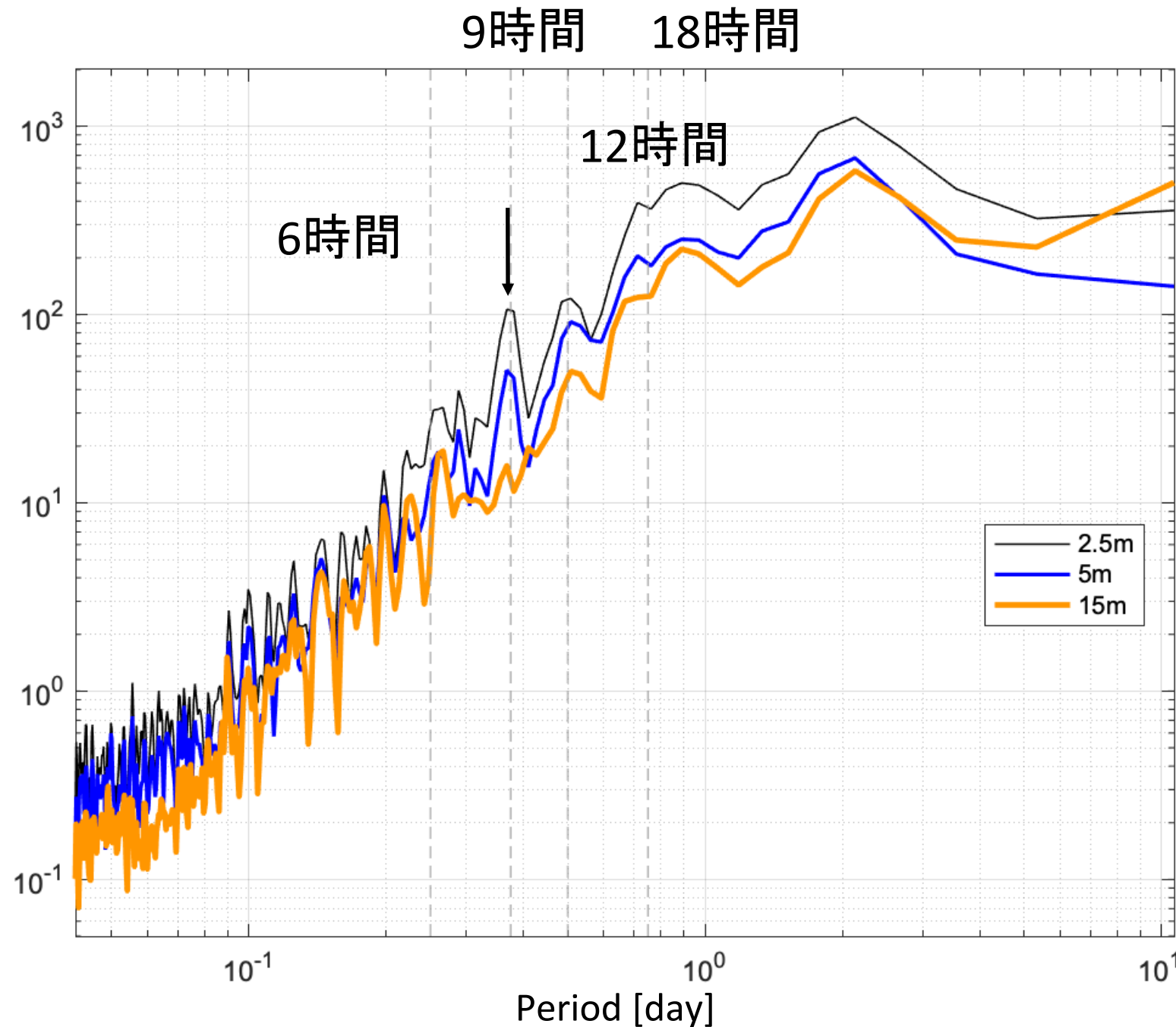


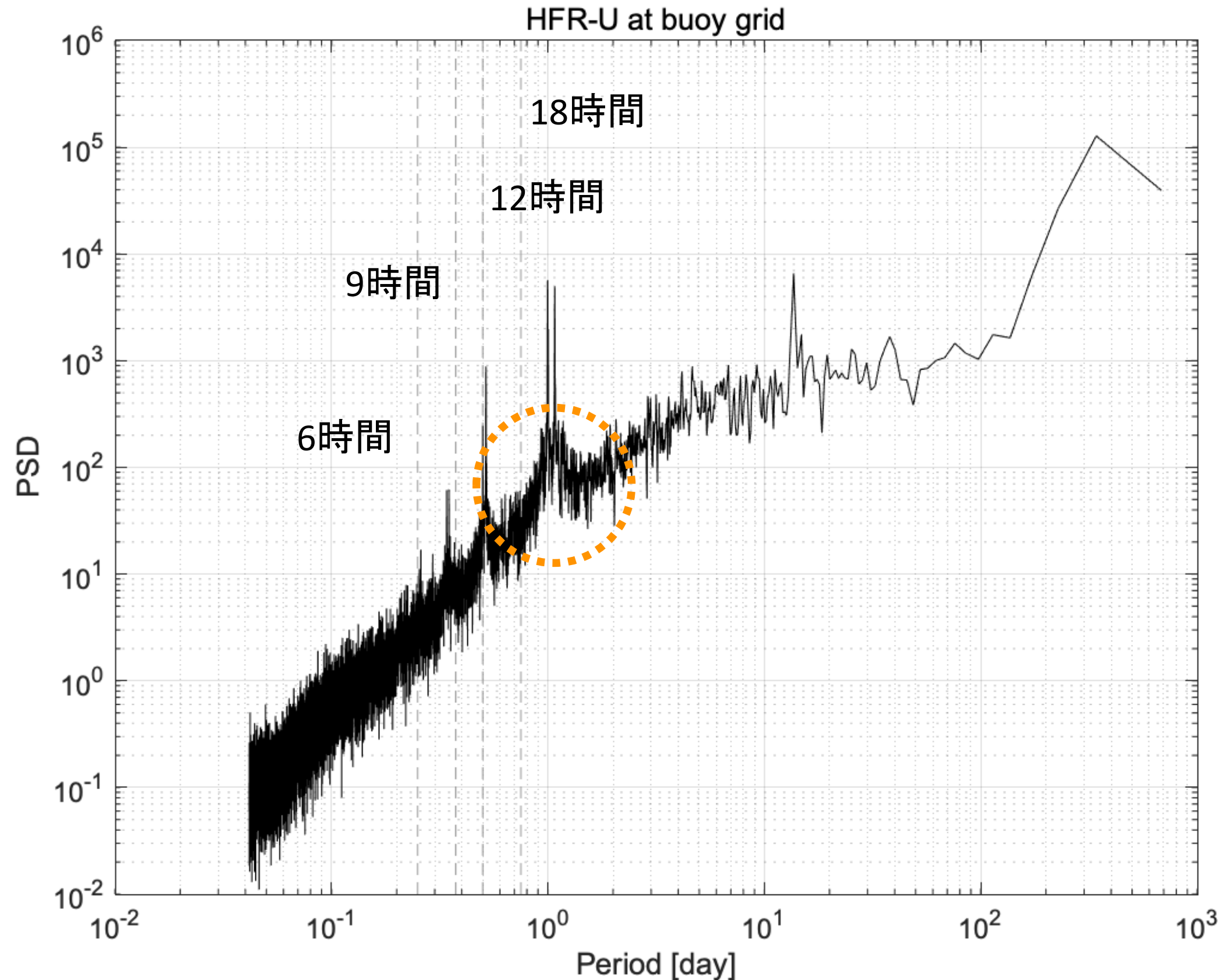
FIG. 1. Schematic illustrating the three hypothesized sinks for trapped near-inertial wave energy at a critical layer. A downgoing near-inertial wave has east (solid profile) and north (dotted profile) velocities 90° out of phase, so the horizontal velocity vector turns clockwise with depth. As the wave nears its critical depth, its vertical wavelength and group velocity shrink. Its energy builds up until it is lost to either (i) the mean flow, (ii) untrapped waves, or (iii) turbulence.

相対渦度により自由伝播できる
内部波周波数が変化

$$f < \omega < N \rightarrow f_{\text{eff}} < \omega < N$$

- 半日付近に弱いピーク。1日～慣性周期も不明瞭だが、ブロードな盛り上がり
→ 負の相対渦度が実効コリオリ (f_{eff}) として効いているかもしれない。
→ 係留点の HFR データの季節性を確認

係留点近傍の HFR 合成流速（東西流）のスペクトル

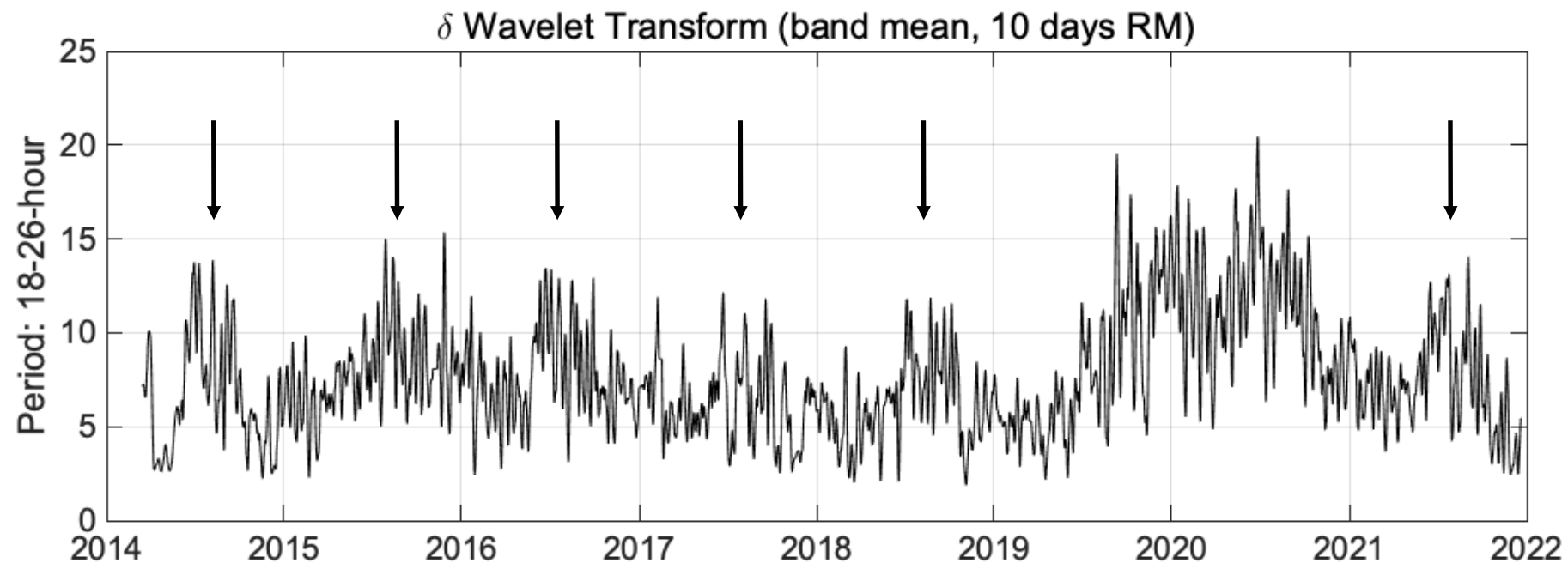
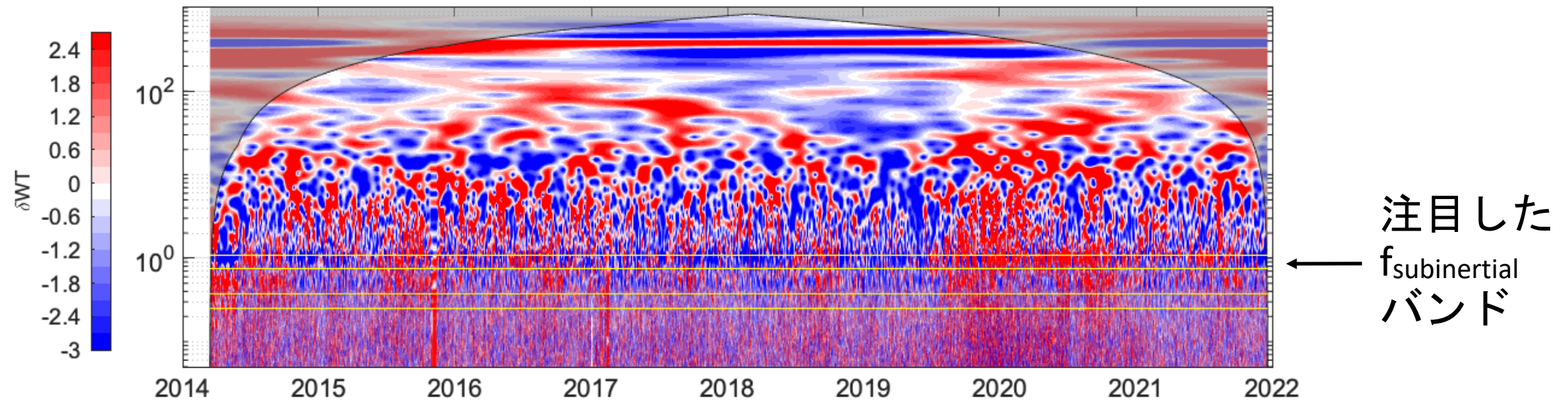


慣性周期 (~18時間) よりも長周期側に盛り上がりがある

HFR 東西流ウェーブレット変換の 2014–2022 時間平均からの偏差

ブイ観測点 周期 (日)

Point: 41.48N 141.29E



流軸南側ブイ観測点では、夏～秋に亜慣性周波数帯 ($f_{\text{subinertial}}$) が増加傾向
→ 負の相対渦度の発達と整合的

係留系の各層の東西流のスペクトル

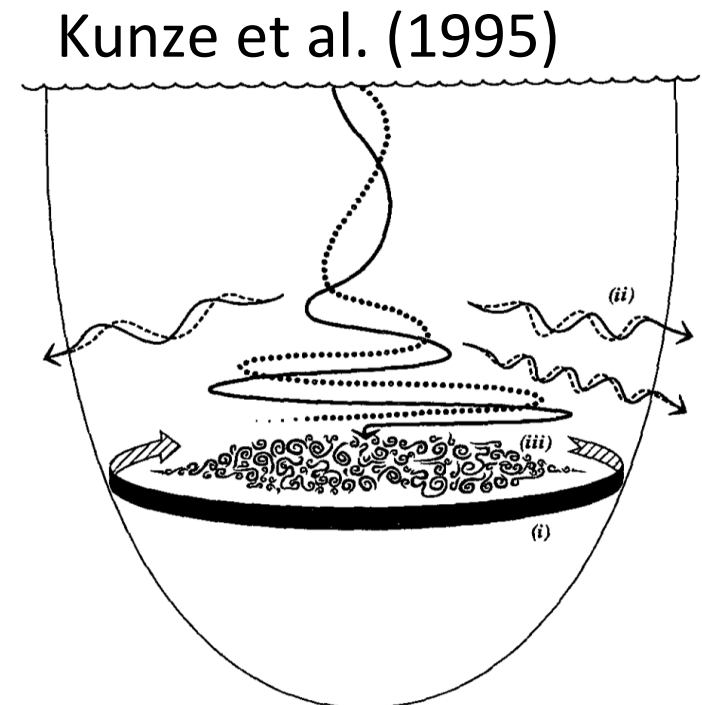
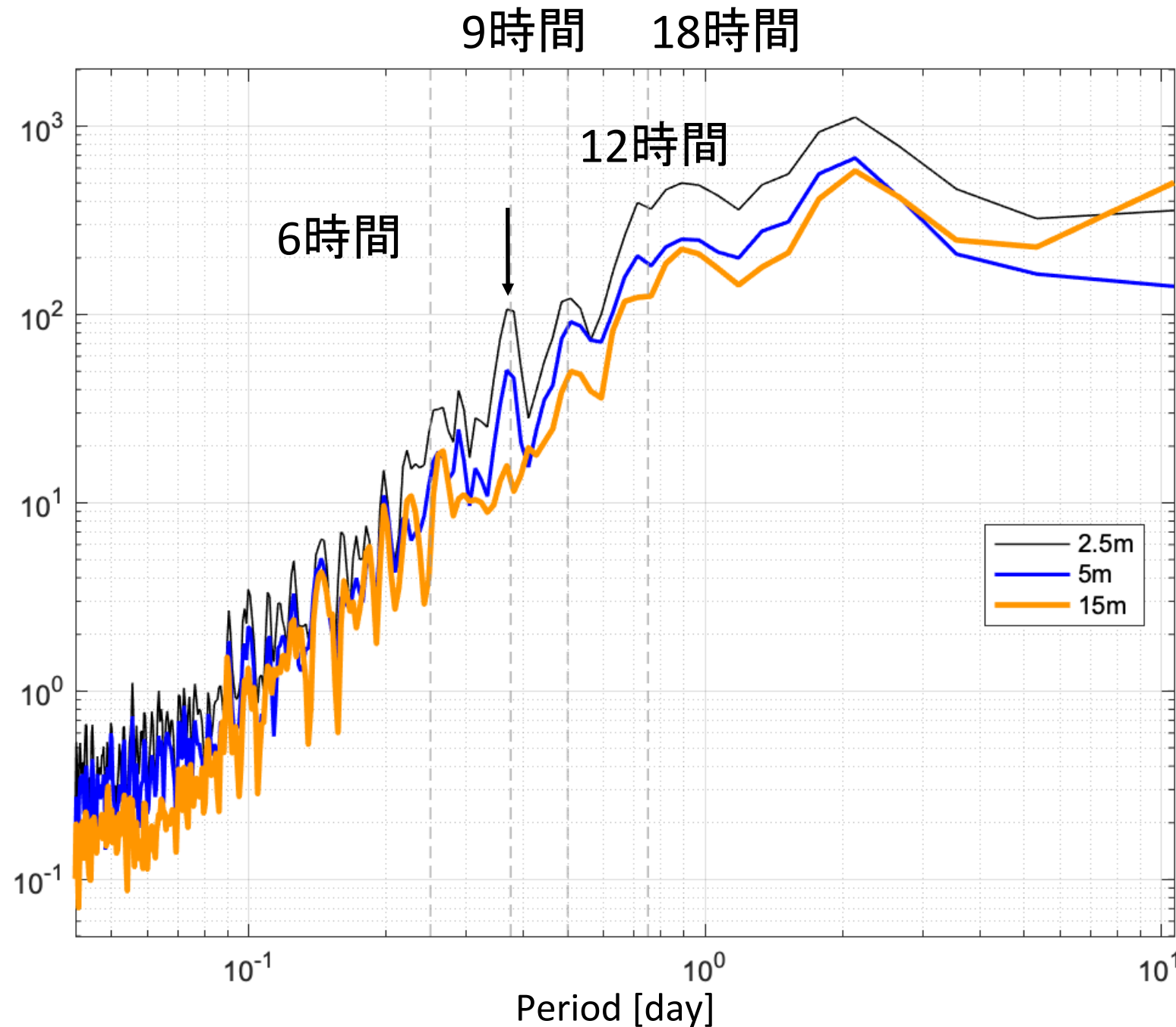


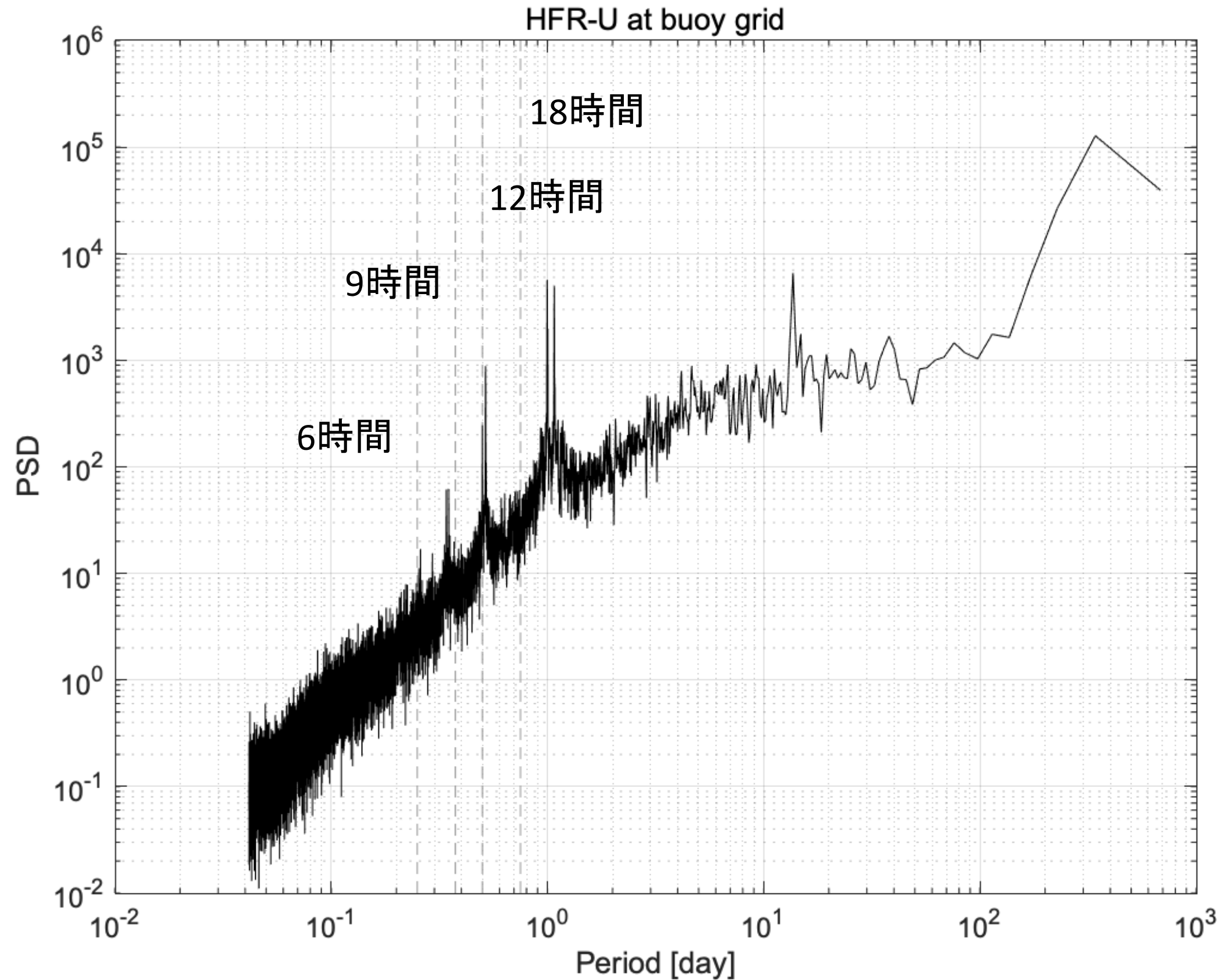
FIG. 1. Schematic illustrating the three hypothesized sinks for trapped near-inertial wave energy at a critical layer. A downgoing near-inertial wave has east (solid profile) and north (dotted profile) velocities 90° out of phase, so the horizontal velocity vector turns clockwise with depth. As the wave nears its critical depth, its vertical wavelength and group velocity shrink. Its energy builds up until it is lost to either (i) the mean flow, (ii) untrapped waves, or (iii) turbulence.

相対渦度により自由伝播できる
内部波周波数が変化

$$f < \omega < N \rightarrow f_{\text{eff}} < \omega < N$$

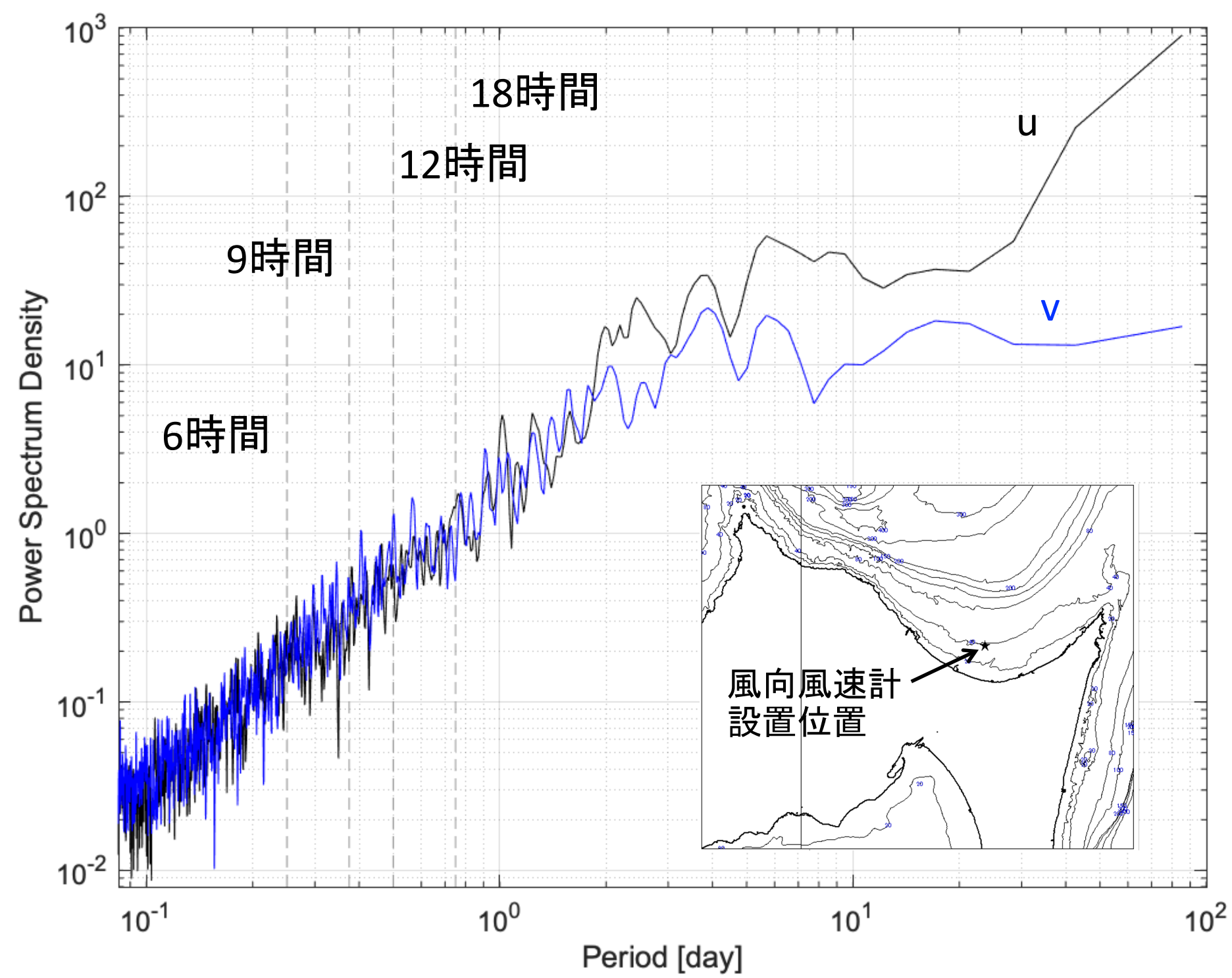
- 半日付近に弱いピーク。1日～慣性周期も不明瞭だが、ブロードな盛り上がり
→ 負の相対渦度が実効コリオリ (f_{eff}) として効いているかもしれない。
- 浅い方で9時間程度にピーク → HFR でも見えるのか？

係留点近傍の HFR 合成流速（東西流）のスペクトル



6～9時間にピークは見える

2021年秋季 (9月9日ー10月15日) の風向風速計のスペクトル



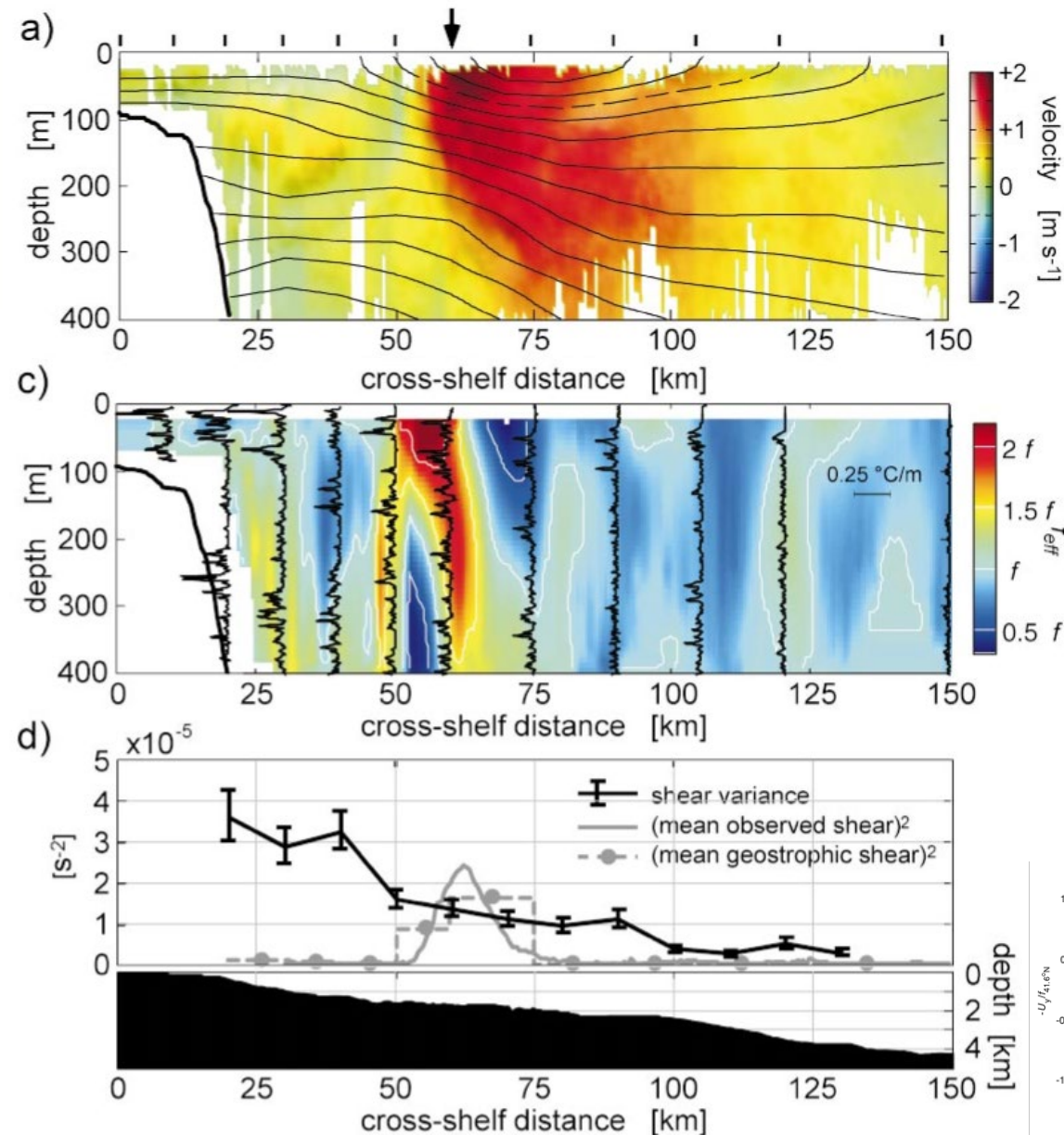
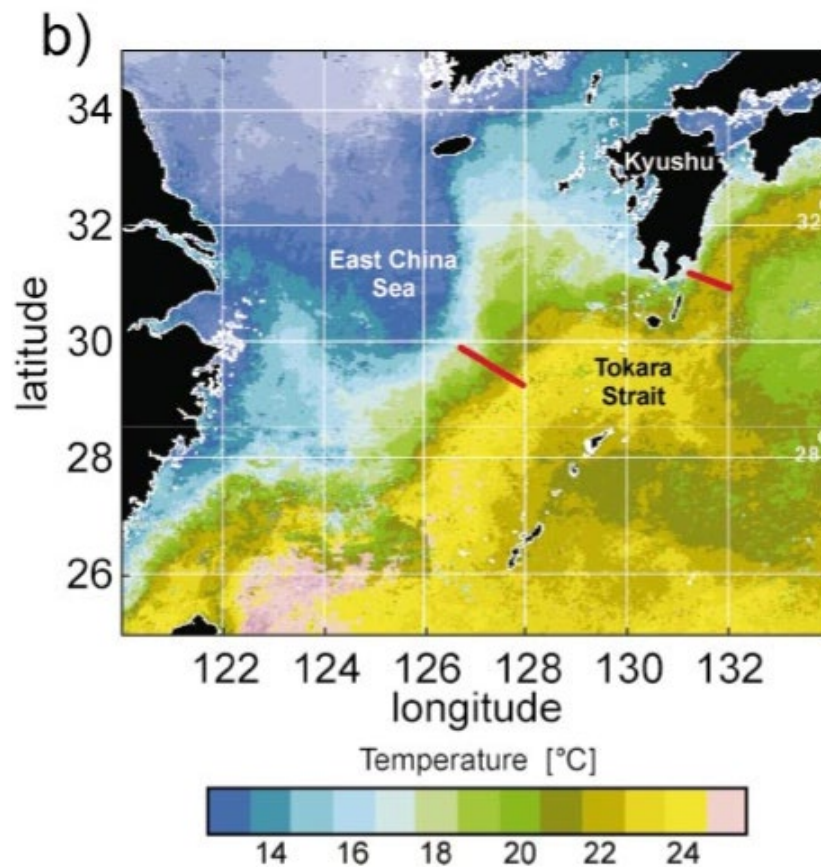
観測期間が係留系とは一致しない点には注意が必要だが、必ずしも風のほうに特徴的なピークではなさそう

6-9時間帯 ($f_{\text{superinertial}}$) のピーク

必ずしも風のほうに特徴的なピークではない → 海洋側の要因が大きい？

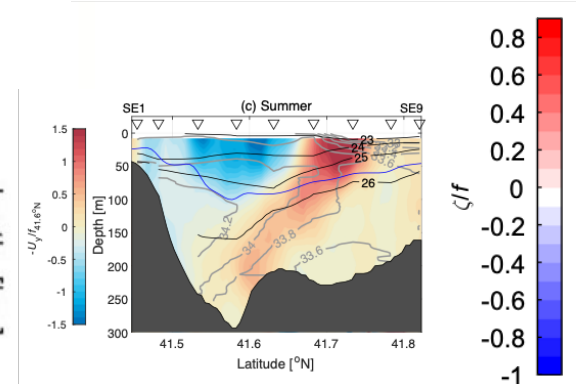
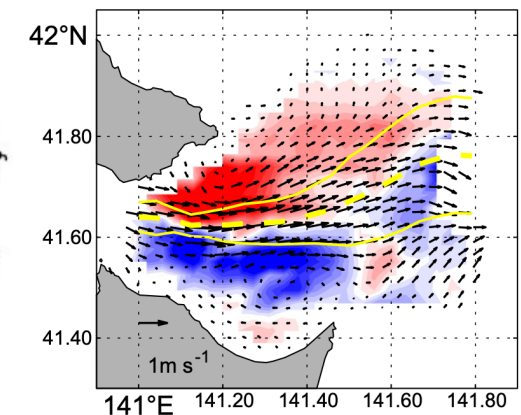
Rainville & Pinkel (2004)

東シナ海 黒潮の研究



$f_{\text{eff}} = f + 1/2\zeta$
 ζ : 相対渦度
 $\zeta \sim 2$ とすると
 9時間程度になる

Kaneko et al. (2022)

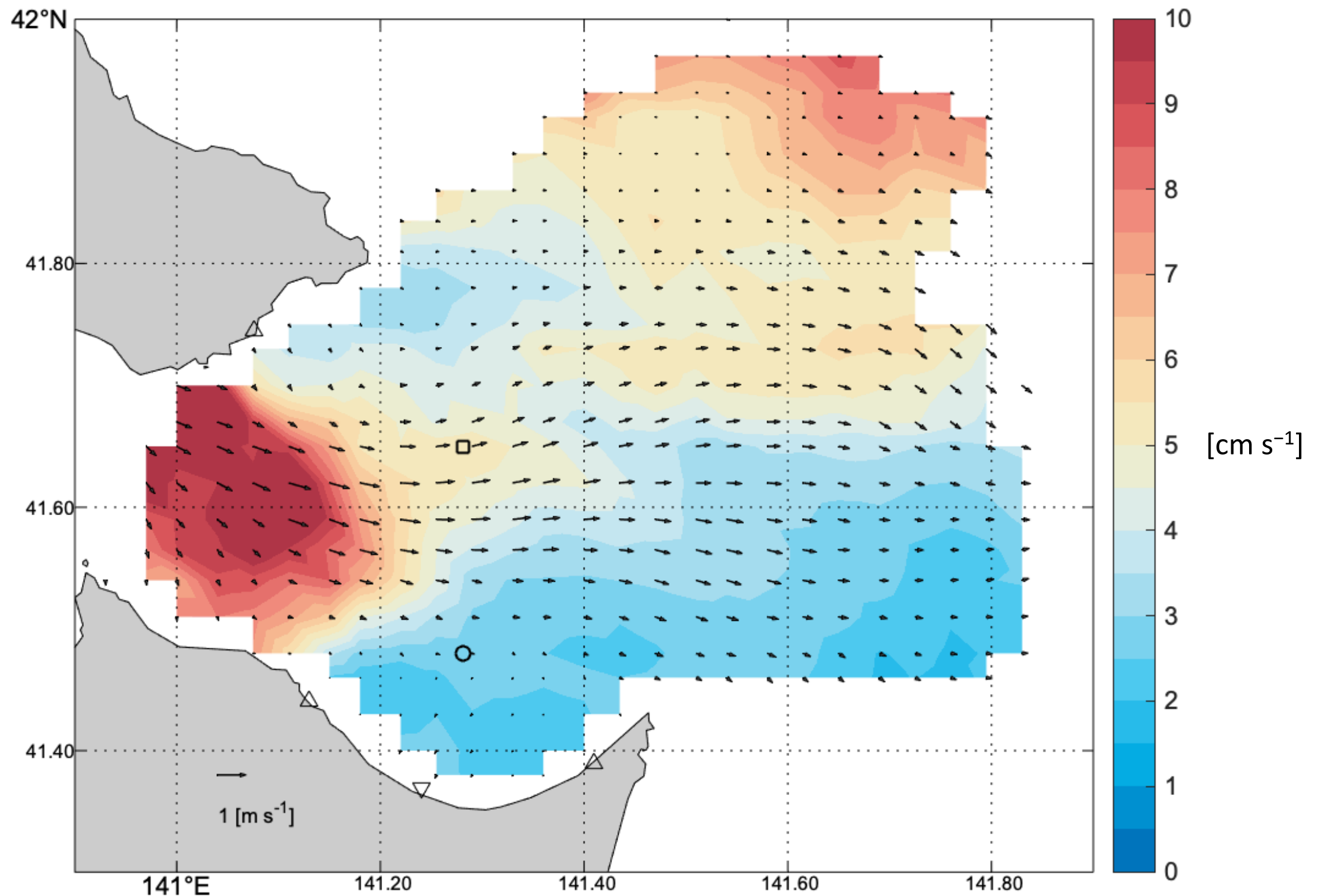


Kaneko et al. (2021)

FIG. 7. Section across the Kuroshio during the Kyushu cruise showing (a) the along-shelf velocity and (b) the along-shelf vertical shear. The isopycnals are shown as black contours, and the stations locations are indicated on the top panel (arrow shows yo-yo station). (c) Effective inertial frequency along with the temperature gradient profiles at the location of each station. (d) The black line shows shear variance vs distance based on shipboard ADCP (20–400-m-depth range, $\lambda_z \geq 50$ m). The solid gray line is the square of the observed mean along-shelf shear, and the dotted gray line is the square of the 25–400-m-depth-averaged geostrophic shear (computed between pairs of stations). Depth is plotted on the lower panel.

強いジェット流に伴う相対渦度によって伝播できる内部波の周期が変調
 → 時計回りの渦巻内では伝播できる内部波の限界周期が短くなる

6-9時間バンドパスした HFR 合成東西流の標準偏差

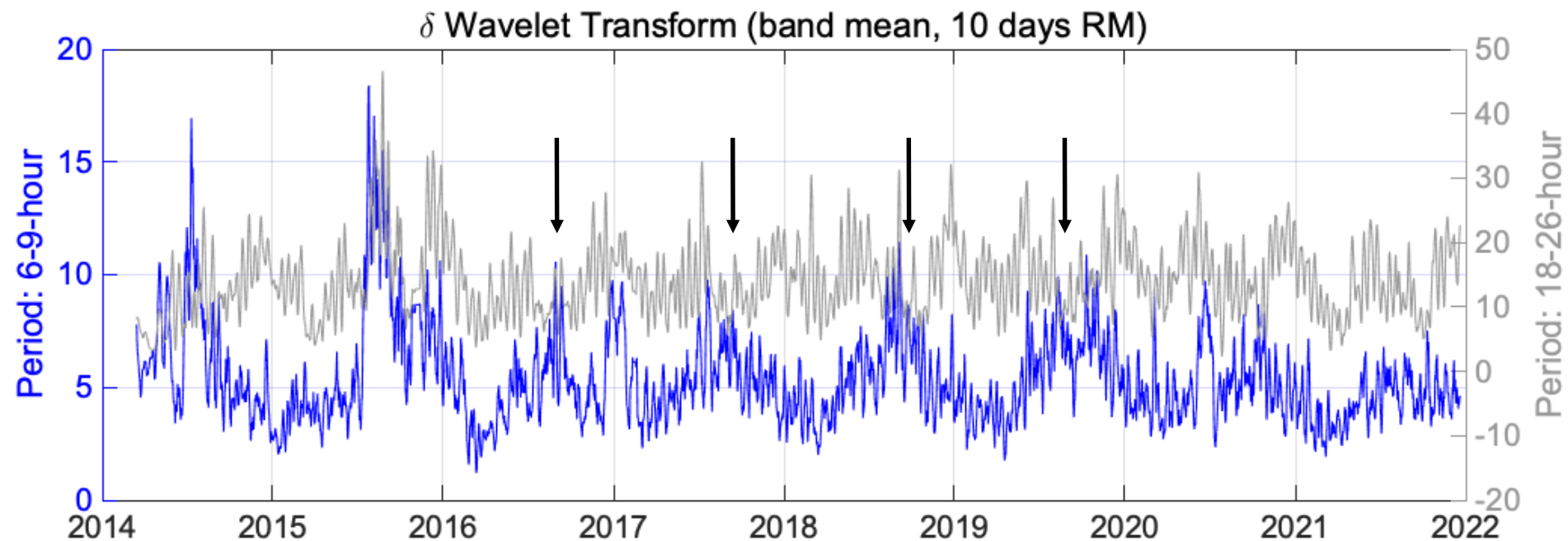
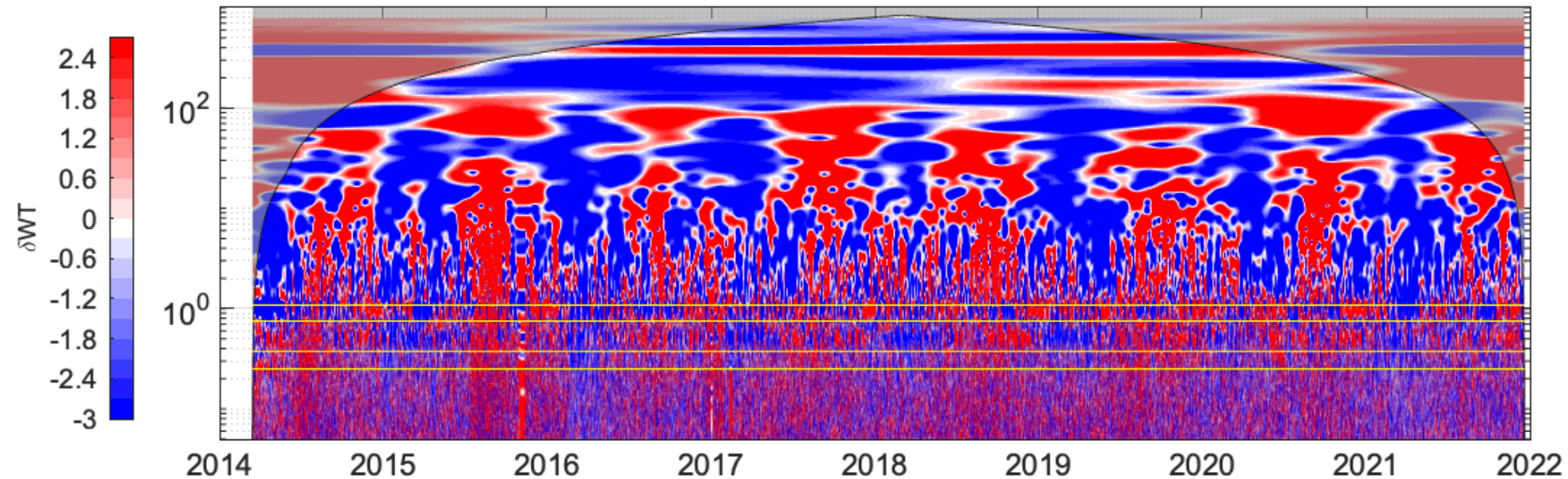


係留点付近はあまり強くないが、汐首岬付近から 41.6°N 以北の領域でこの周期帯の変動が大きい → ジェット左手側と対応

ウェーブレット変換の 2014–2022 時間平均からの偏差

流軸北側点 周期 (日)

Point: 41.65N 141.29E



流軸の北側では、夏季に6–9時間帯の値*が増加、 $f_{\text{subinertial}}$ が減少
→ (正の) 相対渦度の発達と矛盾はない *超慣性周波数 ($f_{\text{superinertial}}$)

まとめ

2016年秋季に下北半島側の時計回り渦内で多層流速観測、HFR 流速と比較

- 2.5m と視線流は最も良いケースで相関係数 0.84 程度でよくあう
- レーダーと観測点の距離は精度に影響
- 本ケースでは鉛直 2.5m, 5m は比較的良い対応。15m ではややずれ
→ 今後その他の係留観測との比較（距離の違いによる変化など）

流速精度の検証は継続的な課題

【科学的知見への貢献】

- 津軽暖流の北側で 6–9 時間程度の周期帯変動 ($f_{\text{superinertial}}$) が卓越
- この周期帯の変動は表層にコンファインされた構造を持っている
- 流軸北側（成層期に $\zeta > 0$ ）では $f_{\text{subinertial}}$ ($f_{\text{superinertial}}$) 変動が成層期に減少（増加）
- 津軽暖流の北側で船底 ADCP との差が大きいという結果と矛盾はしない
→ 現業ナウキャスト等の改善のための情報提供

【今後の課題】本当にこういう構造があるのか？

- 津軽暖流の北側で多層流速観測を行いたいが、実際に入れるのは大変
- 電波長の異なる可搬式レーダーなどで観測？

