



JAMSTEC 国立研究開発法人
海洋研究開発機構
JAPAN AGENCY FOR MARINE-EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY

むつ研究所
MUTSU INSTITUTE for OCEANOGRAPHY (MIO)



相対渦度分布からみた津軽海峡東部における短波レーダ 表面流速と船底ADCP流速の比較

金子仁¹、佐々木建一¹、田中雄大³、阿部泰人^{1,2}、脇田昌英¹、奥西武³、
橋向高幸⁴、佐藤喜暁¹、畳指祥子¹、渡邊修一¹

1. 海洋研究開発機構 むつ研究所、 2. 北海道大学 大学院水産科学研究院 大学院水産科学院 水産学部、
3. 水産研究・教育機構 水産資源研究センター、 4. マリンワークジャパン



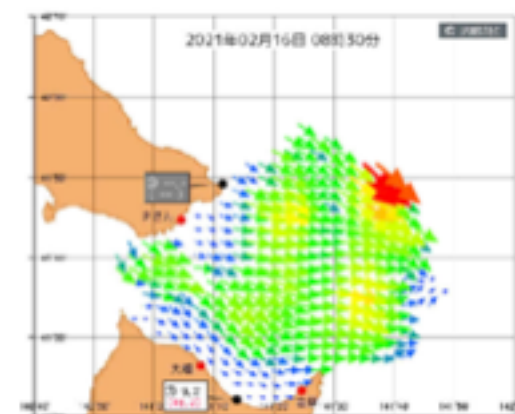
えさん局



岩屋局



大畑局



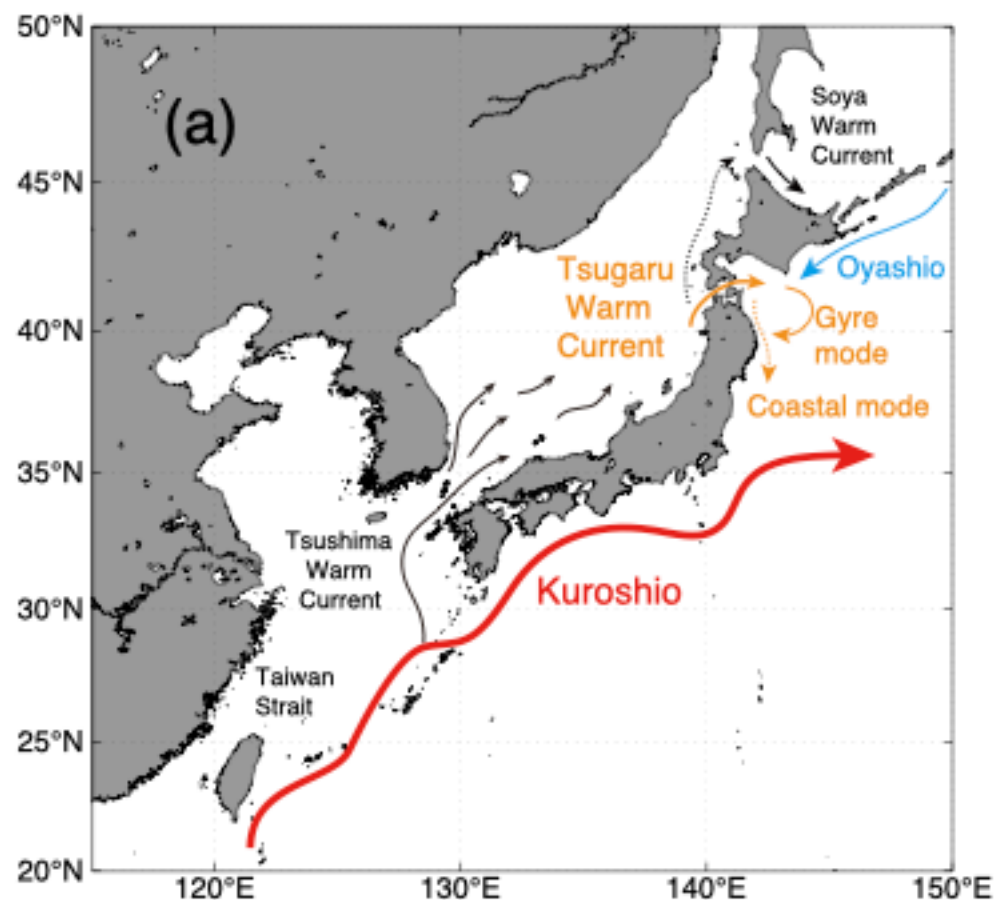
九州大学応用力学研究所 研究集会

「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」, 2021/12/6 (月) 16:25–16:50

背景

津軽暖流：

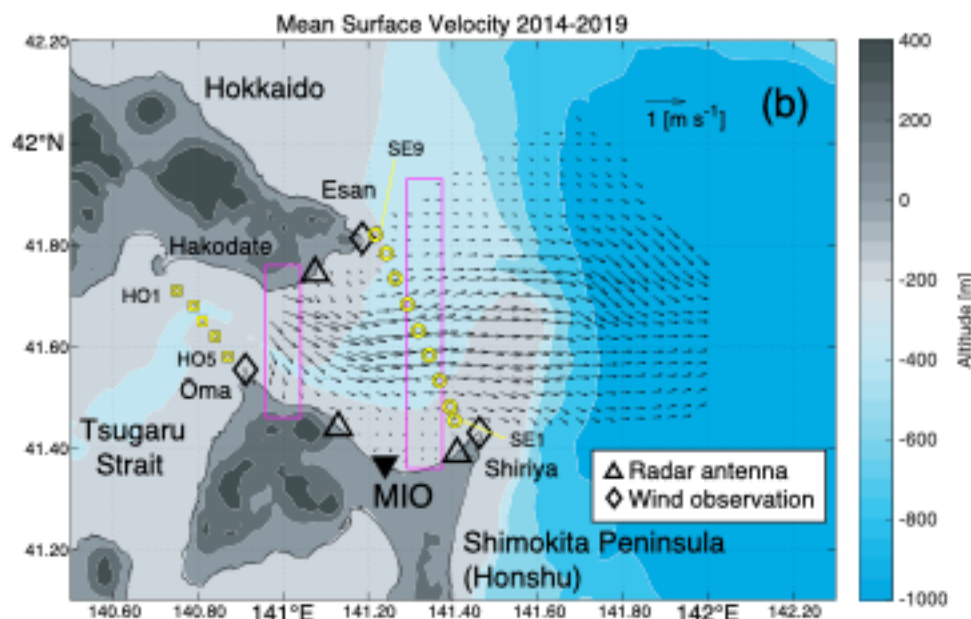
- ・ 津軽海峡を西から東へと通過
- ・ 海峡通過後の流路は顕著な季節変化
冬～春：沿岸モード、夏～秋：ジャイアーモード
(Conlon, 1972)



Kaneko et al. (2021)：

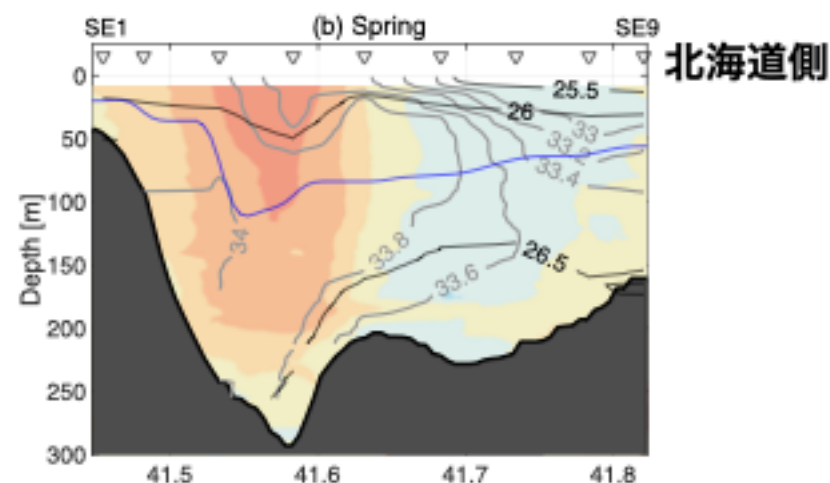
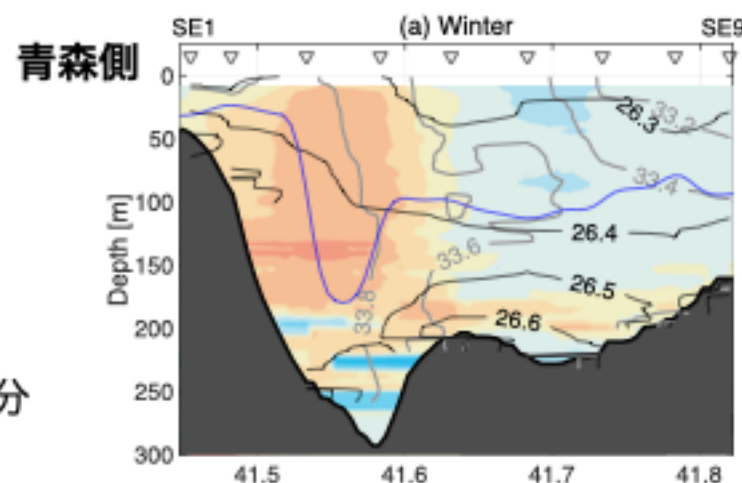
むつ研海洋短波レーダー (HFR)
船舶観測

- ・ 津軽海峡内の季節変動
- ・ ジャイアーモード発達に
対する顕著な海峡内渦の寄与



季節ごとの SE ラインの東西流速断面

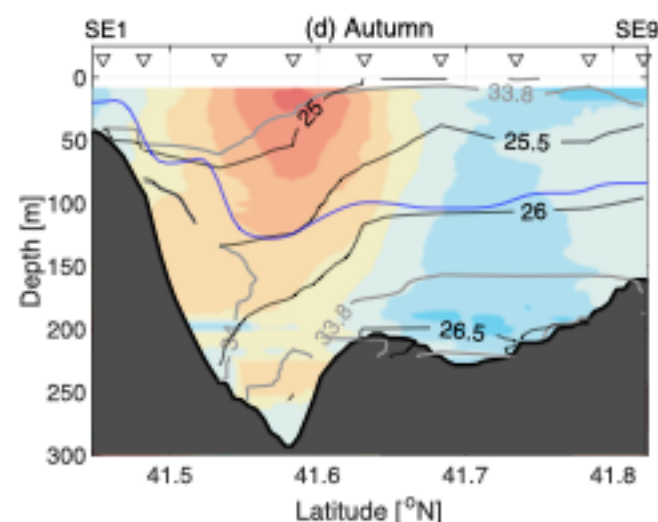
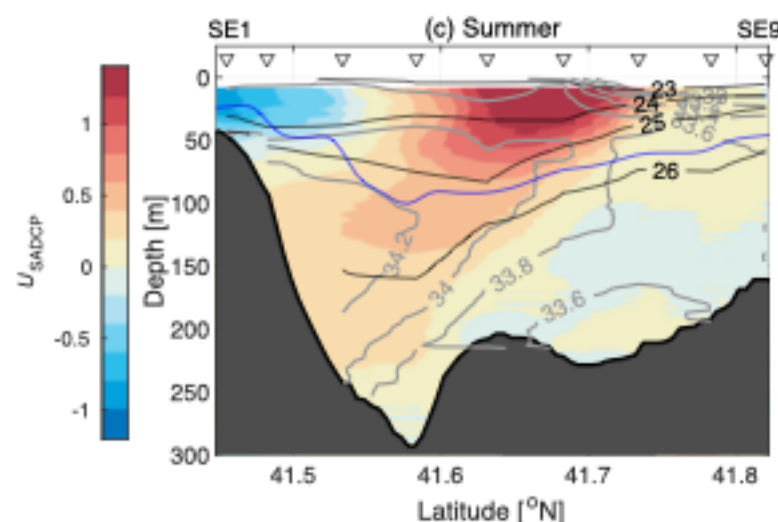
$U_{\text{SADCP}}(\text{SE})$



灰色線：塩分

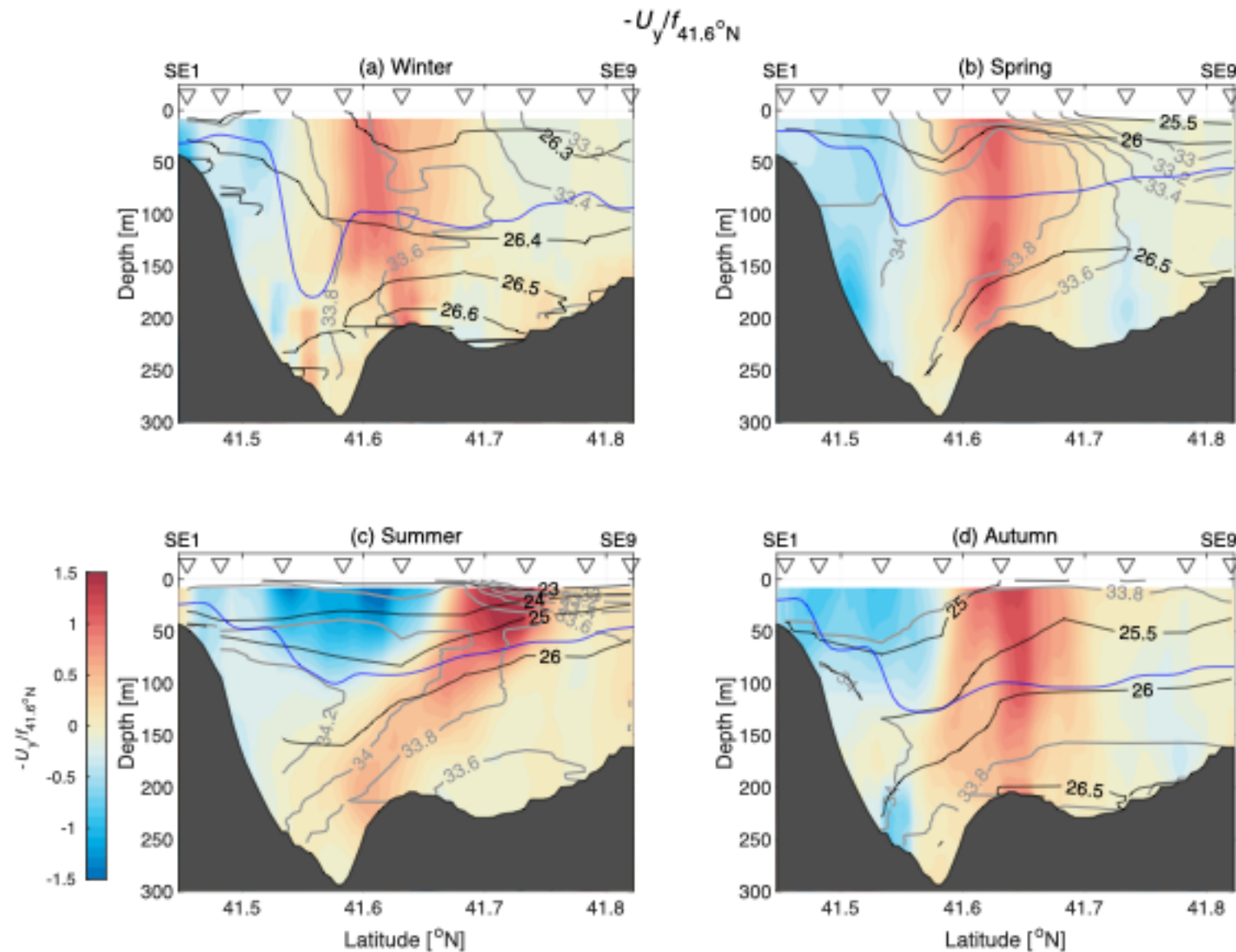
黒線： σ_θ

青線：上層深度 H_1



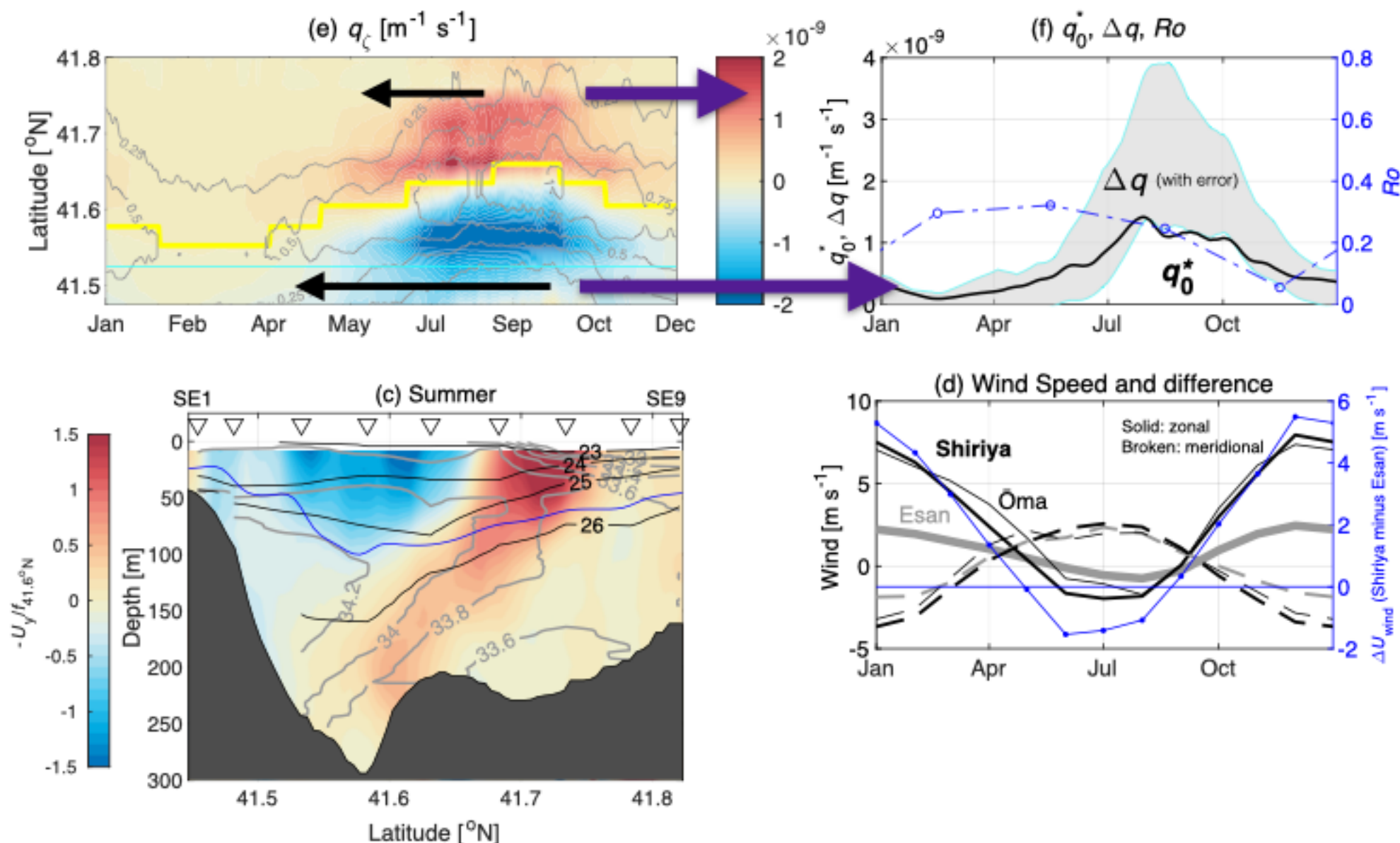
- ・ 秋季～春季は青森側境界付近に東向きの高塩分水コア → 津軽暖流水
- ・ 夏季は海峡中央部で顕著な東向き流 → 夏季に北側にシフトする傾向は HFR でも確認
- ・ 春季～秋季に顕著な密度成層、冬季は鉛直密度ほぼ一様 → 鉛直ノーマルモード解析

相对渦度断面 (SADCP)



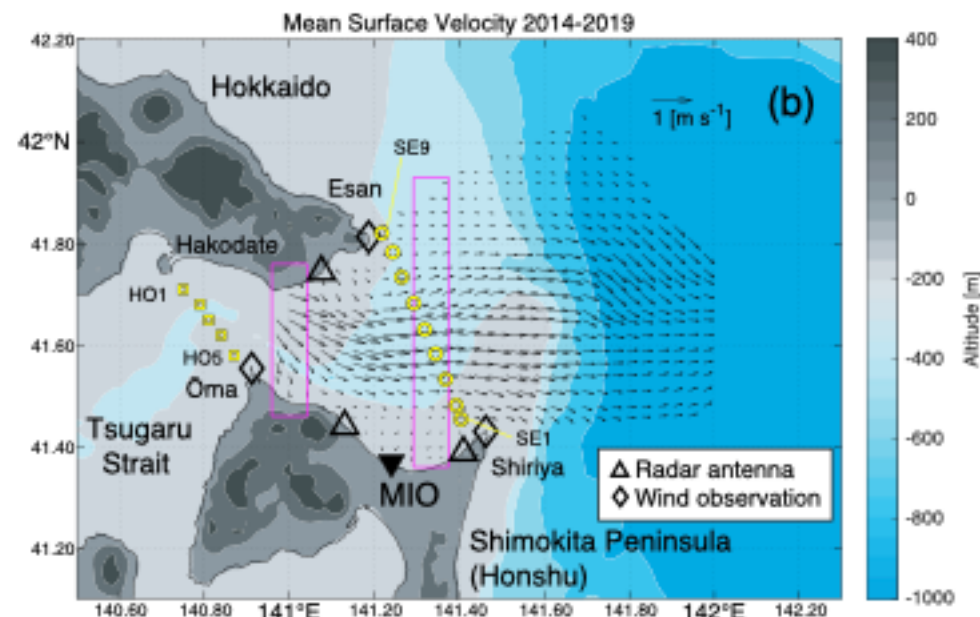
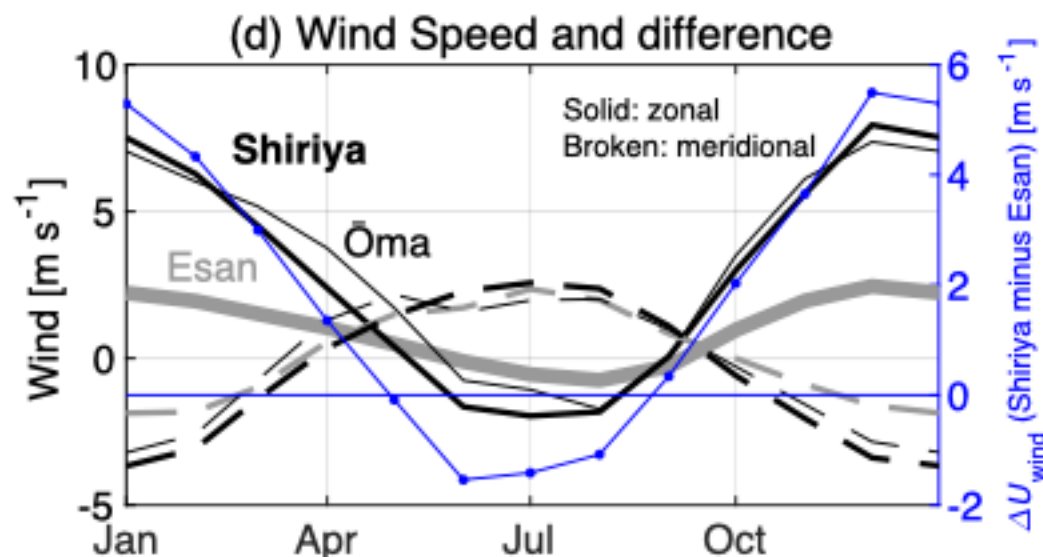
- ・ 東西流速成分 $\gg$ 南北流速成分 を仮定して相対渦度を計算
- ・ 夏季上層流軸～下北半島間に顕著な負の渦度（時計回り循環）

渦の発達は海峡東部の風の変化とよく対応



- ・ 海峡東部では春季～夏季には東風、青森側で強く負の相対渦度に対応
- ・ 9月中旬から北西風に切り替わる。同時期に Δq が急激に減少

風の影響を考えたものの...



- ・ 海峡東部では春季～夏季には東風、青森側で強く負の相対渦度に対応
- ・ 9月中旬から北西風に切り替わる。同時期に Δq が急激に減少

表層エクマン層の厚さはどうなのか？

表層エクマン層

厚さの代表スケール

$$h_e = (2A_z/f)^{1/2} \text{ (Ekman, 1905)}$$

h_e : エクマン層厚 A_z : 鉛直拡散係数 f : コリオリパラメータ

津軽暖流に伴う顕著な負の相対渦度は

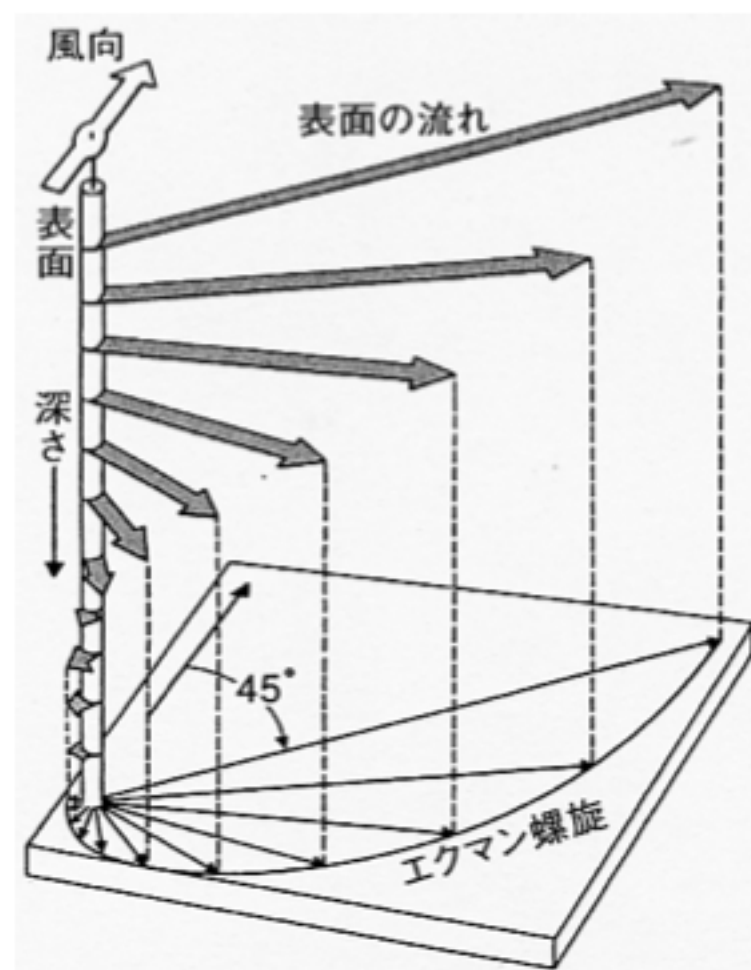
- ・ 実効コリオリ ($f_{\text{eff}} \sim f + \zeta/2$) ζ : 相対渦度
- ・ 近慣性周期内部波のトラップ (Kunze, 1985)

砕波を通じた乱流拡散の強化

で直接・間接にエクマン層を厚くしうる

**鉛直的な流速分布の対応に
相対渦度依存性があるのでは？**

船底 ADCP の鉛直流速分布と
短波レーダーの表層流速分布を比較



「地球学入門」、酒井治孝著、東海大学出版社、2003

http://www.cm.nitech.ac.jp/cho/earth_science/Lesson-11.pdf

負の相対渦度領域（時計回り渦など）における近慣性周期内部波のトラップ(&碎波)

(Kunze, 1985)

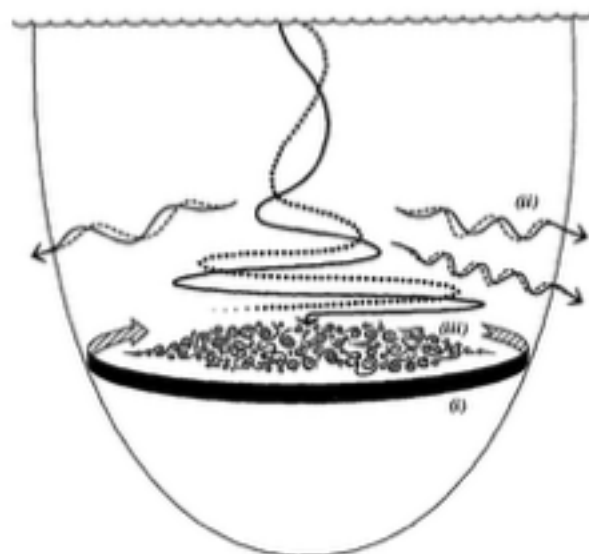


FIG. 1. Schematic illustrating the three hypothesized sinks for trapped near-inertial wave energy at a critical layer. A downgoing near-inertial wave has east (solid profile) and north (dotted profile) velocities 90° out of phase, so the horizontal velocity vector turns clockwise with depth. As the wave 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.

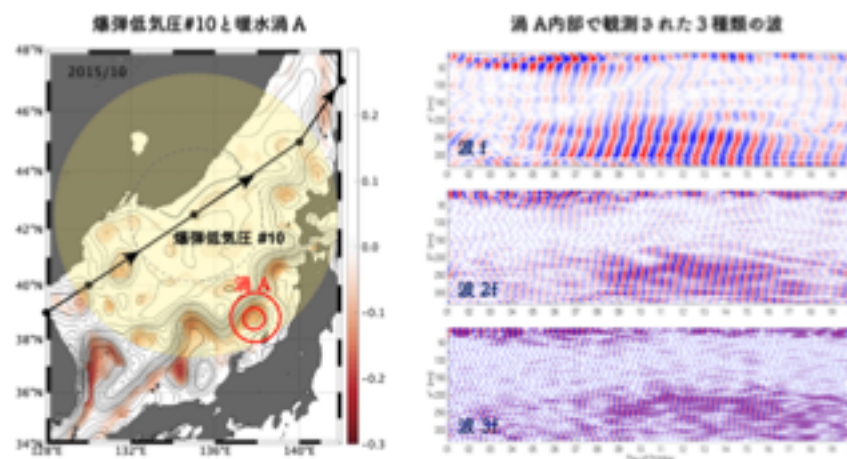
内部波の自由伝播可能な周波数帯領域

$$f < \omega < N \quad N: \text{浮力振動数}$$

時計回り渦内では鉛直伝播可能な

周波数帯が拡張 $f_{\text{eff}} < f < \omega < N$

日本海での観測例 (川口ほか)



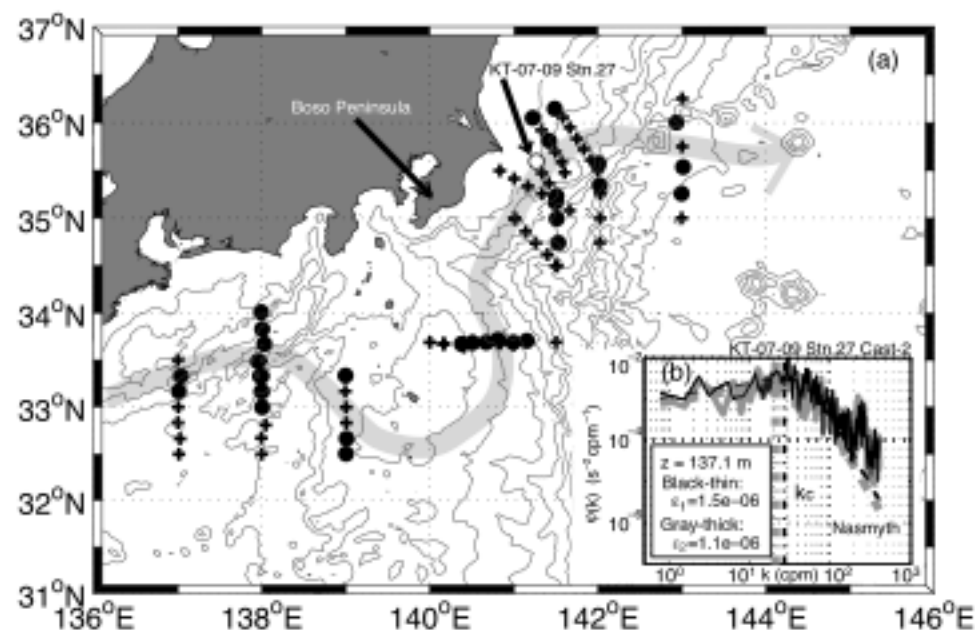
爆弾低気圧と渦のイメージ図

左図：爆弾低気圧がエネルギーを注入する日本海の渦の分布を赤色で示しています。右図：渦Aの内部で実際に観測された波です。エネルギーは、渦の中でより小さな波に分裂しながら消滅していきました。

© 2019 川口 悠介

ジェット流に伴う表層乱流強度

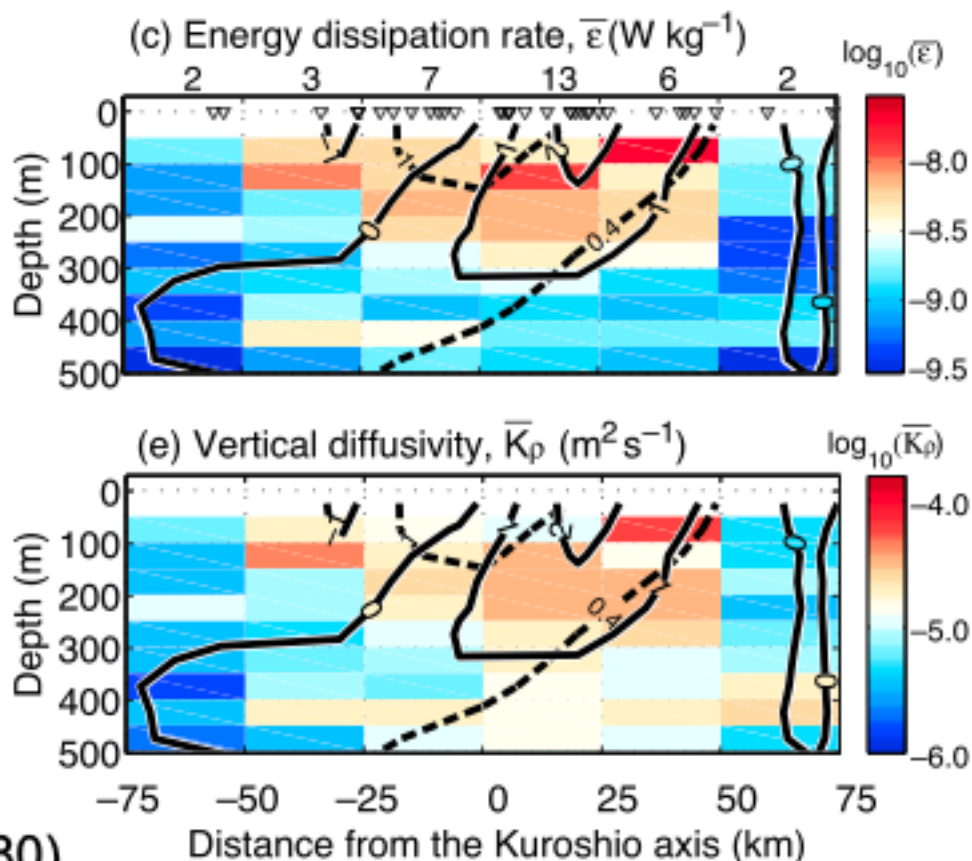
Kaneko et al. (2012)



拡散係数 $K_p = \Gamma \epsilon / N$

$\Gamma = 0.2$ (Osborn, 1980)

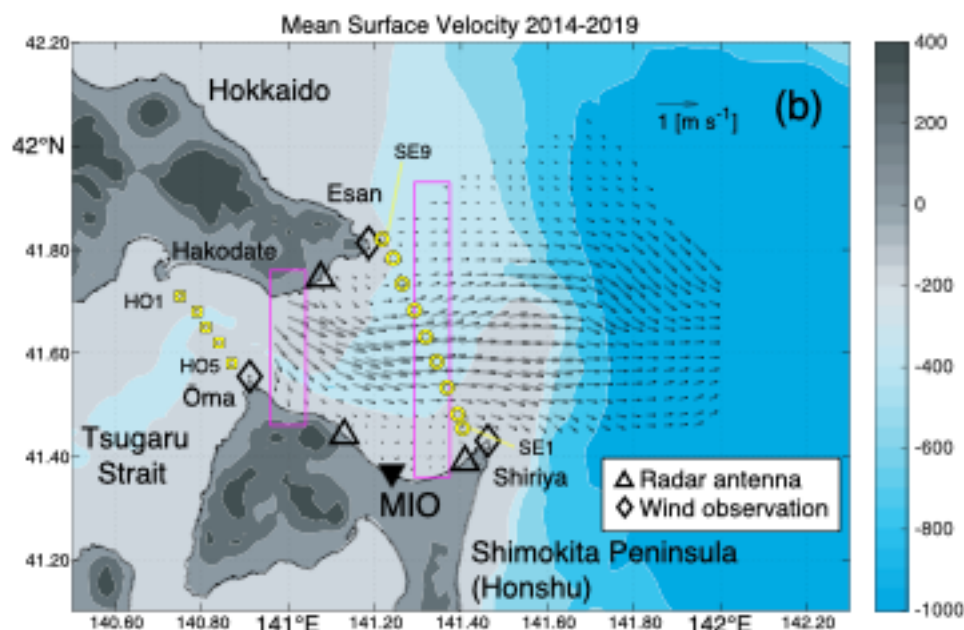
エネルギー散逸率 ϵ



流軸の軽い水側で乱流の強化が生じている。
 ジェットによる負の相対渦度の影響を示唆

津軽暖流でも、成層期の離岸時には同様のことが生じている可能性

データ・方法① 船舶観測（標準）



観測実施情報

Year	Winter			Spring			Summer			Autumn		
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2009											US 182	
2010		US 189			US 196			US 201			US 210	
2011		OS 225			US 228		US 232				US 242	
2012		US 251				US 260		US 264			US 271	
2013					US 284			US 289				
2014		US 304			US 308			US 316			US 322	
2015		US 326	US 329		US 333						US 348	
2016		US 355			US 360	US 363					US 376	
2017					US 389							
2018		US 410						WK 1808F				
2019				US 439					WK 1909F		US 454	

・ 2009–2019年観測のうち SEライン を
実施したものを利用

・ 船底設置型 ADCP

北海道大学水産学部附属練習船

「うしお丸 (US)」、 「おしよる丸 (OS)」

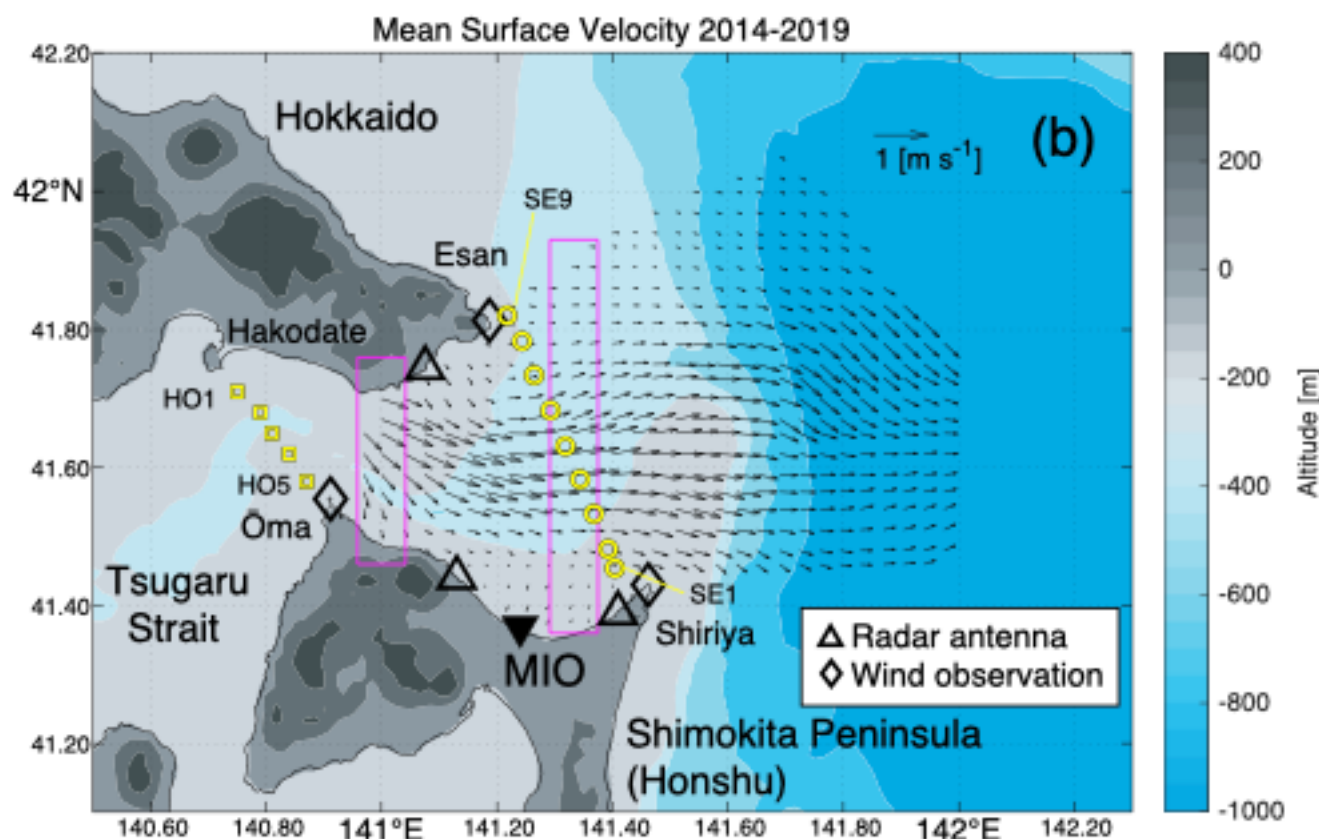
水産研究・教育機構 漁業調査船

「若鷹丸 (WK)」

→ SE ライン取り出し。Tanaka et al. (2021) のメソッド処理。

停船、針路による QC なし。HFR の平均スケールに合わせ 6km 空間平均

データ・方法 ② HFR表面流速



津軽海峡東部 海洋レーダーデータサイト *MIO: Mutsu Institute for Oceanography

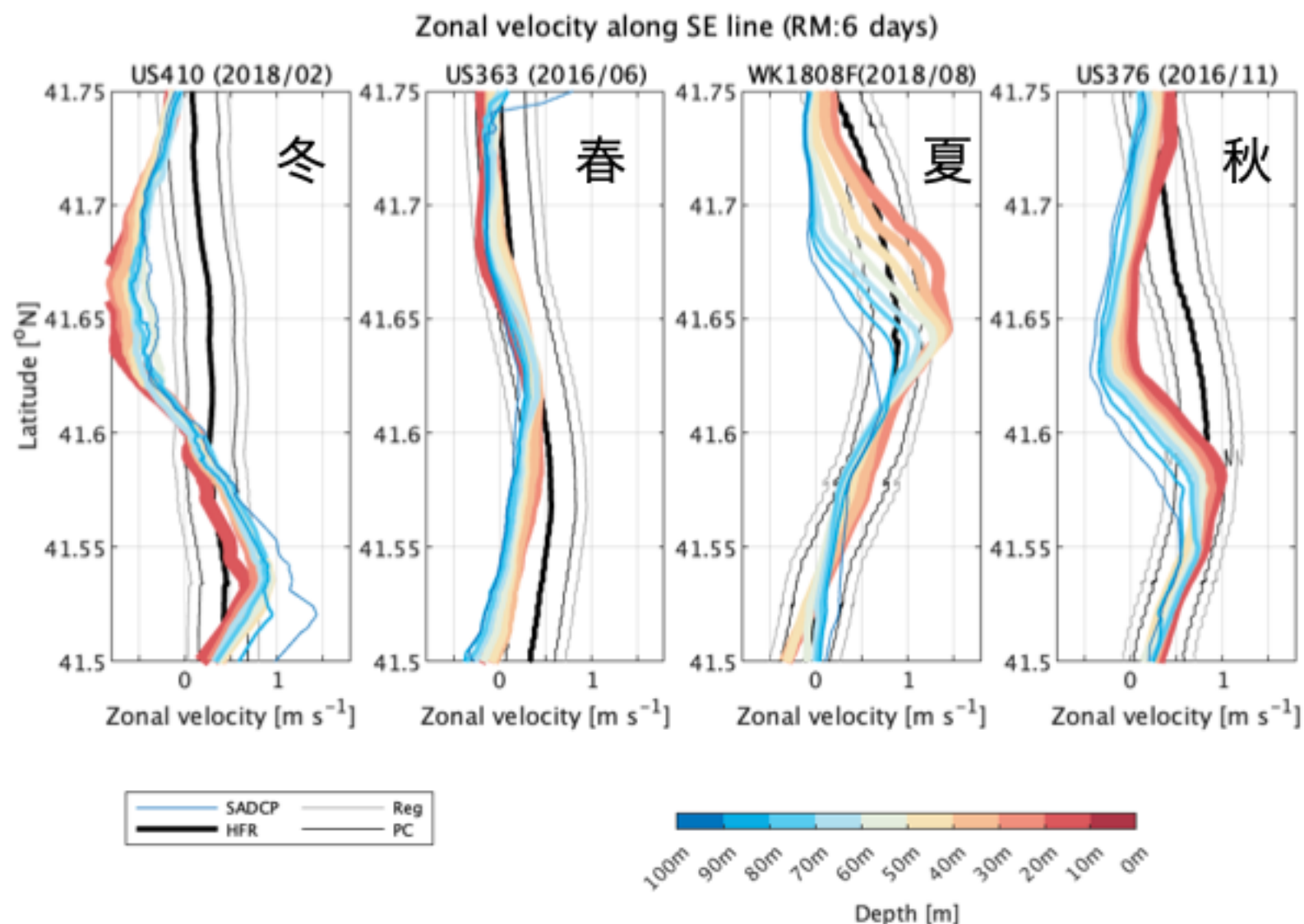
MORSETS (MIO* Ocean Rader data Site for the Eastern Tsugaru Strait)

水平グリッド 約3km。時間間隔約 30分ごと。観測可能範囲 3～60km 程度

SE ラインに線形内挿。船舶通過時刻を中心に任意の幅*で時間平均

*条件を変えて確認の上、本研究では 6日とした

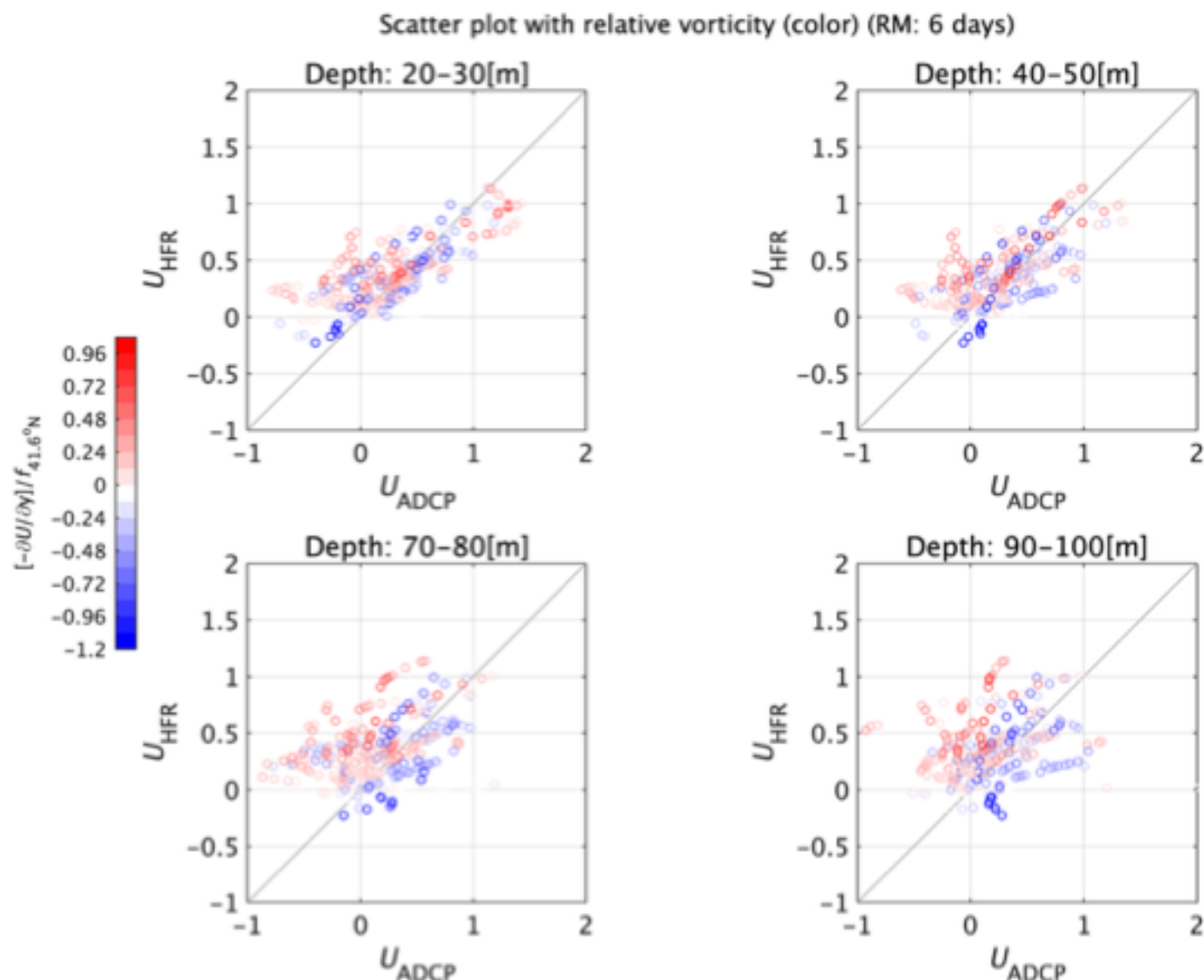
結果：SE ラインの東西流速比較例



季節では秋・冬、場所では流軸の北で大きくずれる傾向

相対渦度から見たSADCP と HFR の比較

色：41.6°N の f で規格化した相対渦度 (HFR, 東西成分のみ)



赤色の正の相対渦度領域では傾きが 1 よりも小さい傾向

阿部ほか (2020) による東部広域観測

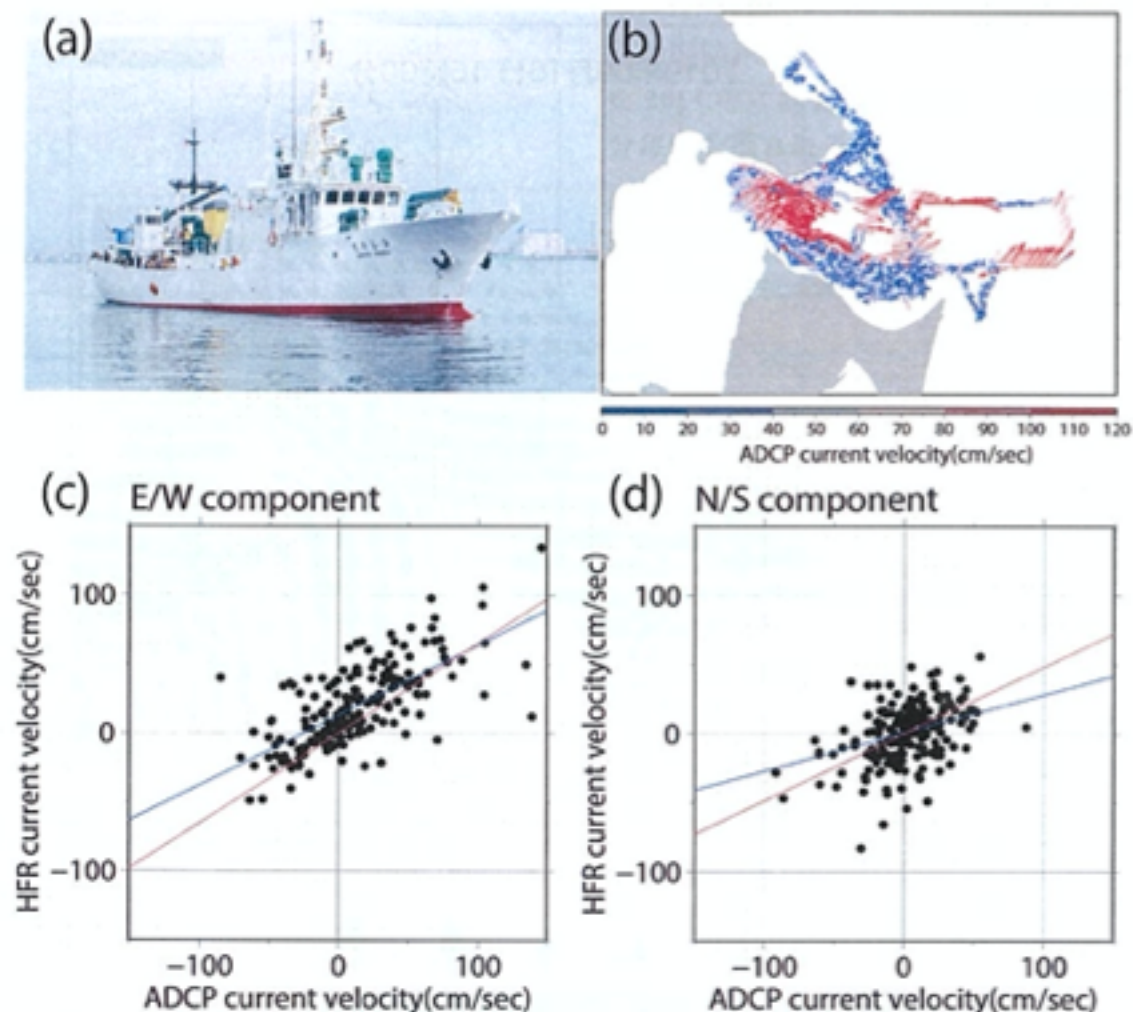


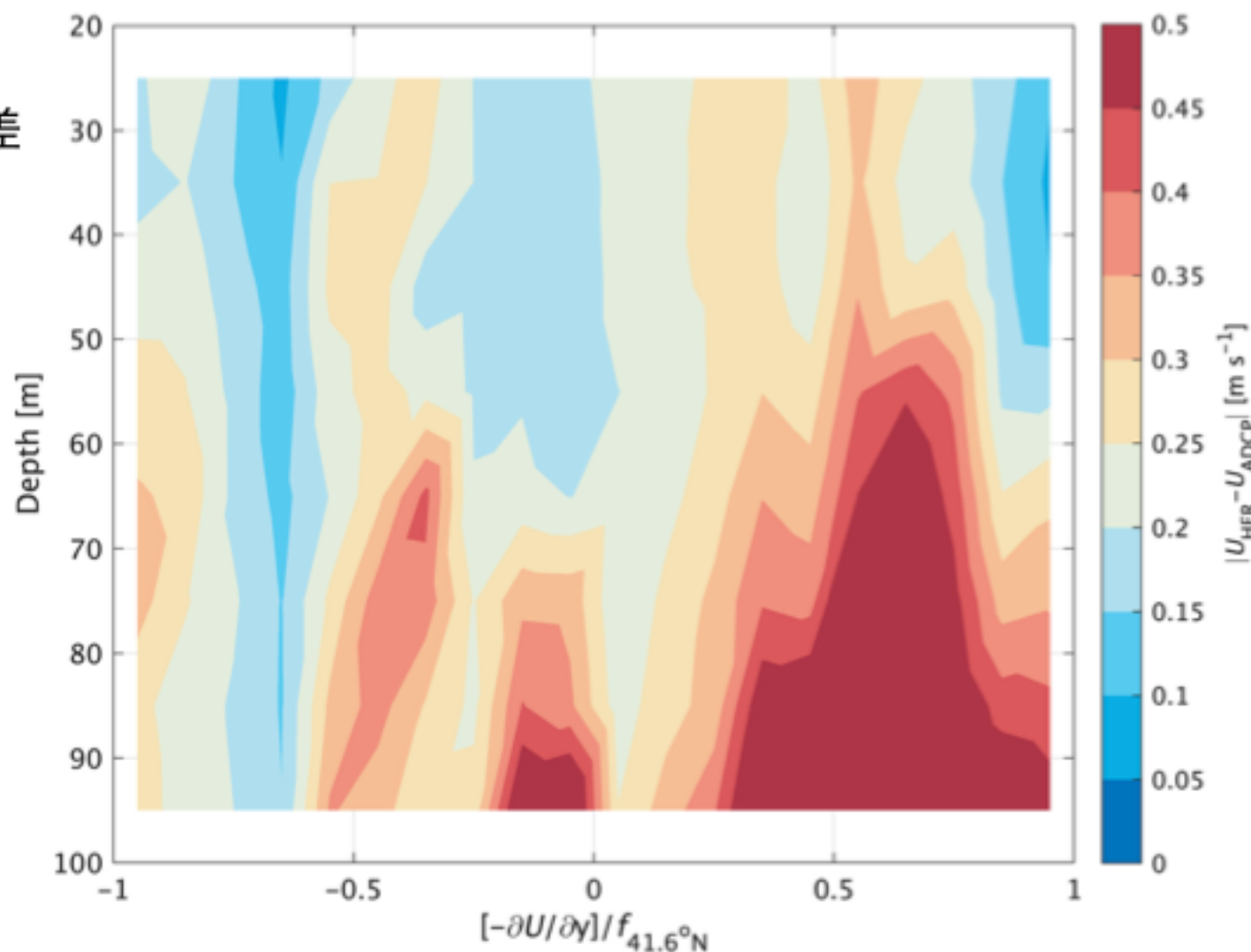
図2 (a) 北海道大学水産学部附属練習船・うしお丸 (学部ホームページから転載), (b) 船底ADCPによる津軽海峡東部の30m深1分平均流速 (2014~2018年における各季節年4回の観測), (c, d) レーダ表面流速と30分区分平均したADCP30m深流速の比較 (N=188) で, (c) は東西方向 (東向きが正), (d) は南北方向成分 (北向きが正), 青線は回帰直線を, 赤線は主成分分析より求めた傾きを表す。

回帰直線の傾きが1より小さい傾向はよく似ている。秋冬の影響？

相対渦度から見た流速鉛直構造の特徴

深度 10m ごと、規格化相対渦度 0.1 ごとに平均

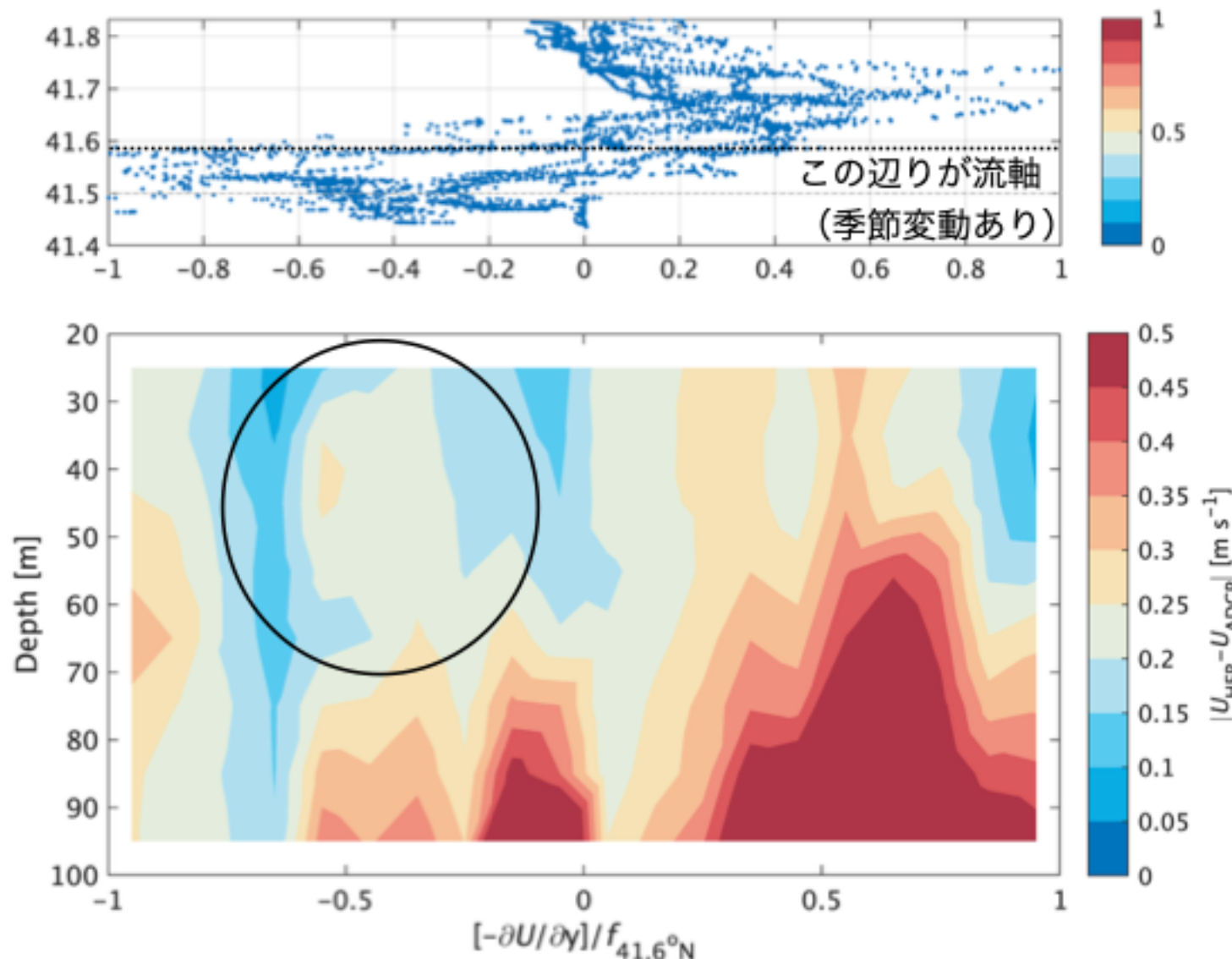
HFR 東西流速と
ADCP 東西流速の差



負の渦度領域 $-0.5-0$ では 70m ぐらいまで HFR と ADCP 流速の差が小さい
対照的に正の相対渦度領域では差が大きい

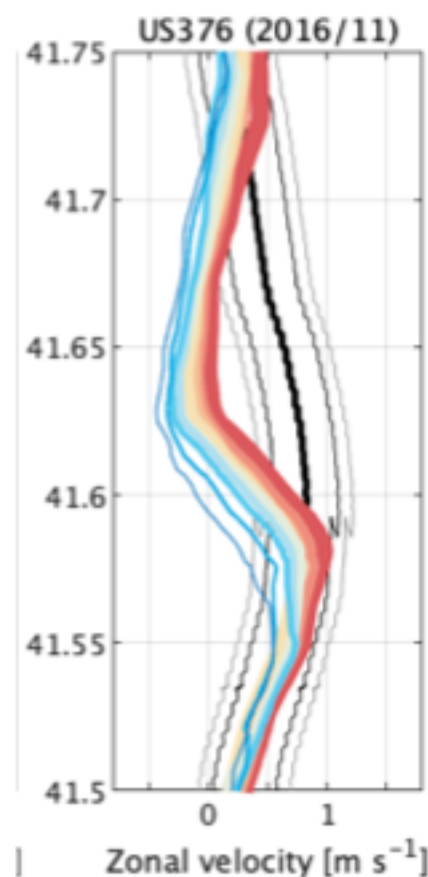
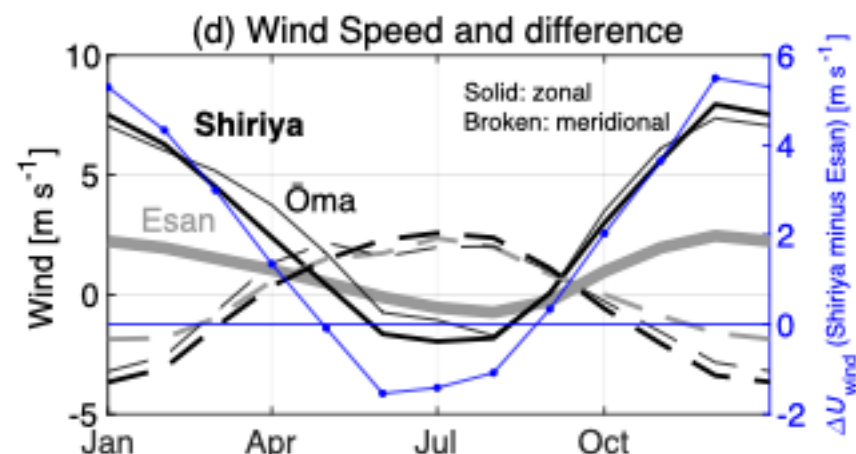
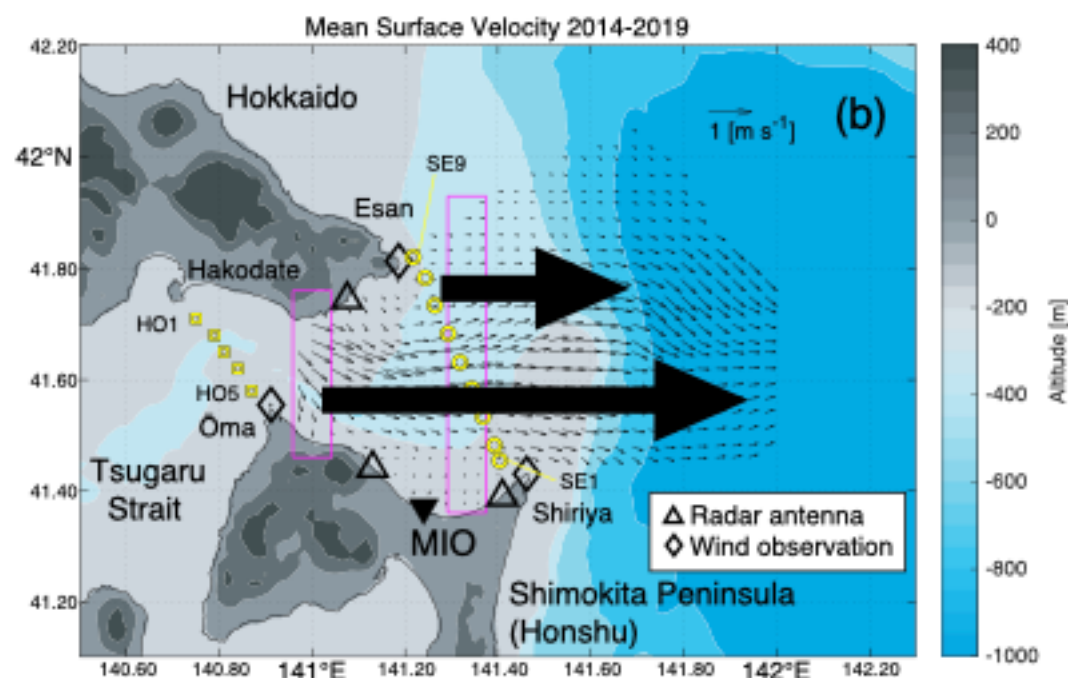
南側境界を除いたケース (>41.5°N)

緯度



負の渦度領域 -0.5 で少々差が大きかったが、下北半島沿岸を除くとやや軽減
→ 浅い地形（深海波近似の妥当性）、側面境界が影響？ → 今後の課題

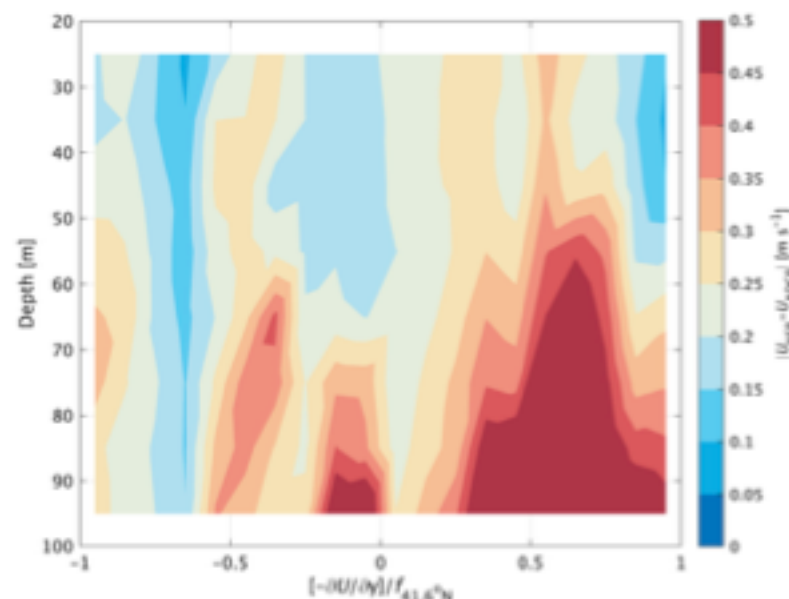
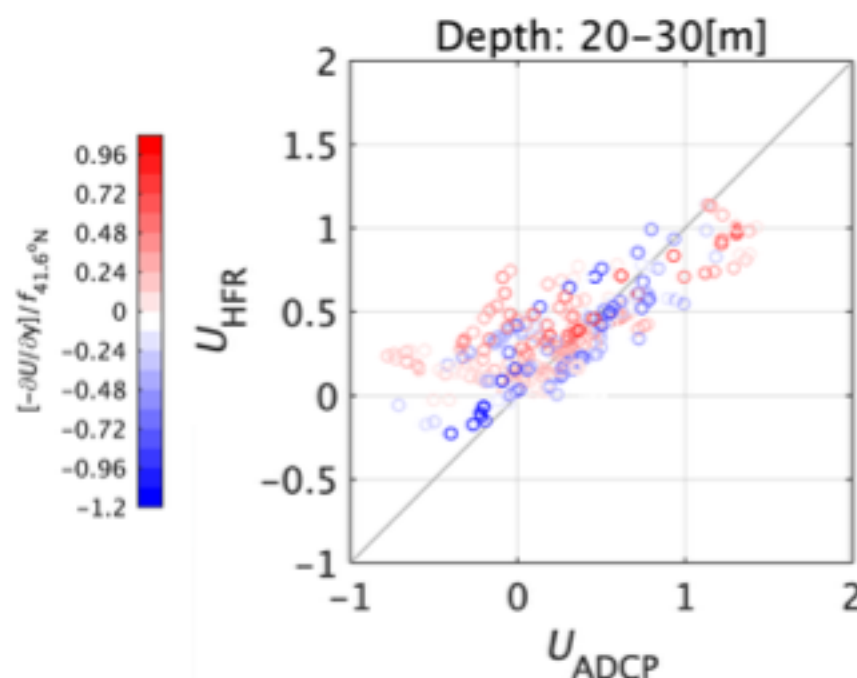
【考察】 秋・冬が合わない理由



1. 秋口から北西の季節風が卓越
海洋のごく表面は風の影響で西向き流 → HFR
2. 恵山側は北西風が相対的に弱め（地形遮蔽？）
海峡東部では風による正の渦度注入
エクマン層と内部流の解離が（特に流軸の北で）
大きくなるのではないかと

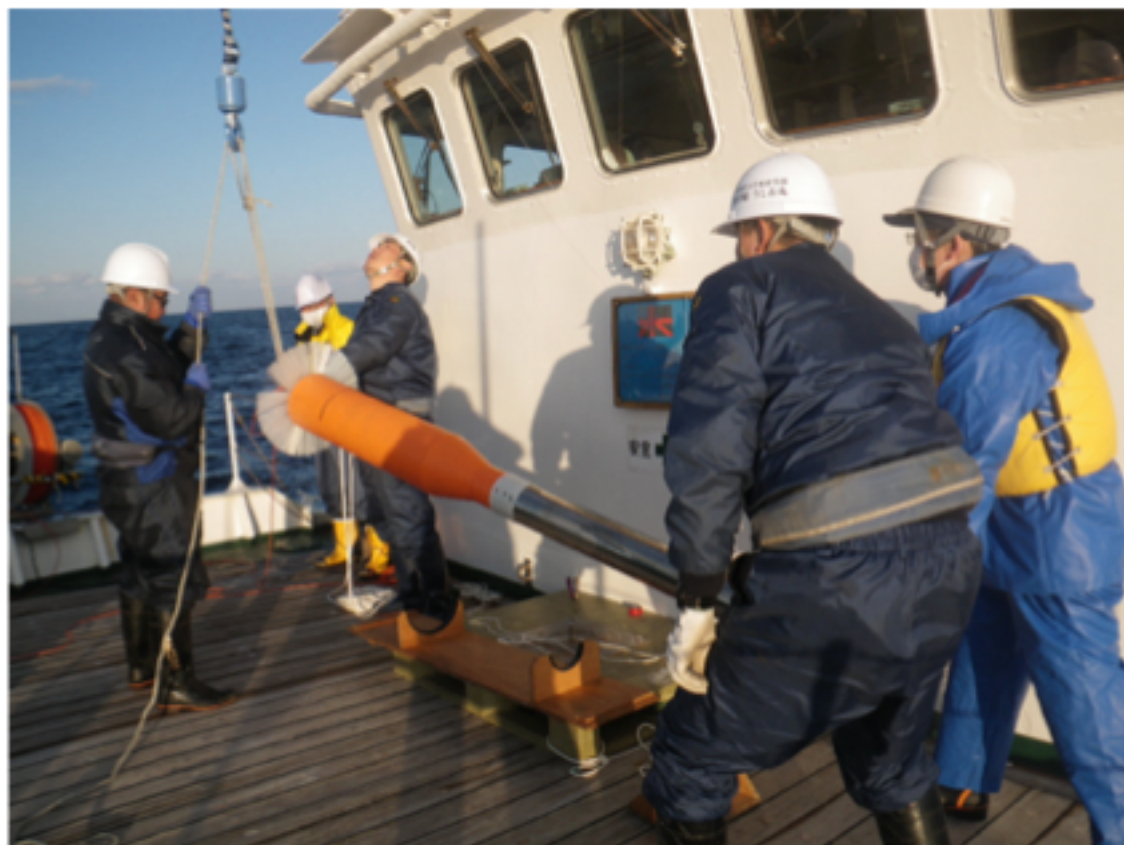
まとめ

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

「うしお丸」でも乱流観測を開始



令和4 (2022) 年は航海を各シーズン 4回予定。
流軸南北での乱流コントラストが確かめられるか
天候・海況・マンパワー...

「みらい」等機構船舶による ADCP 観測

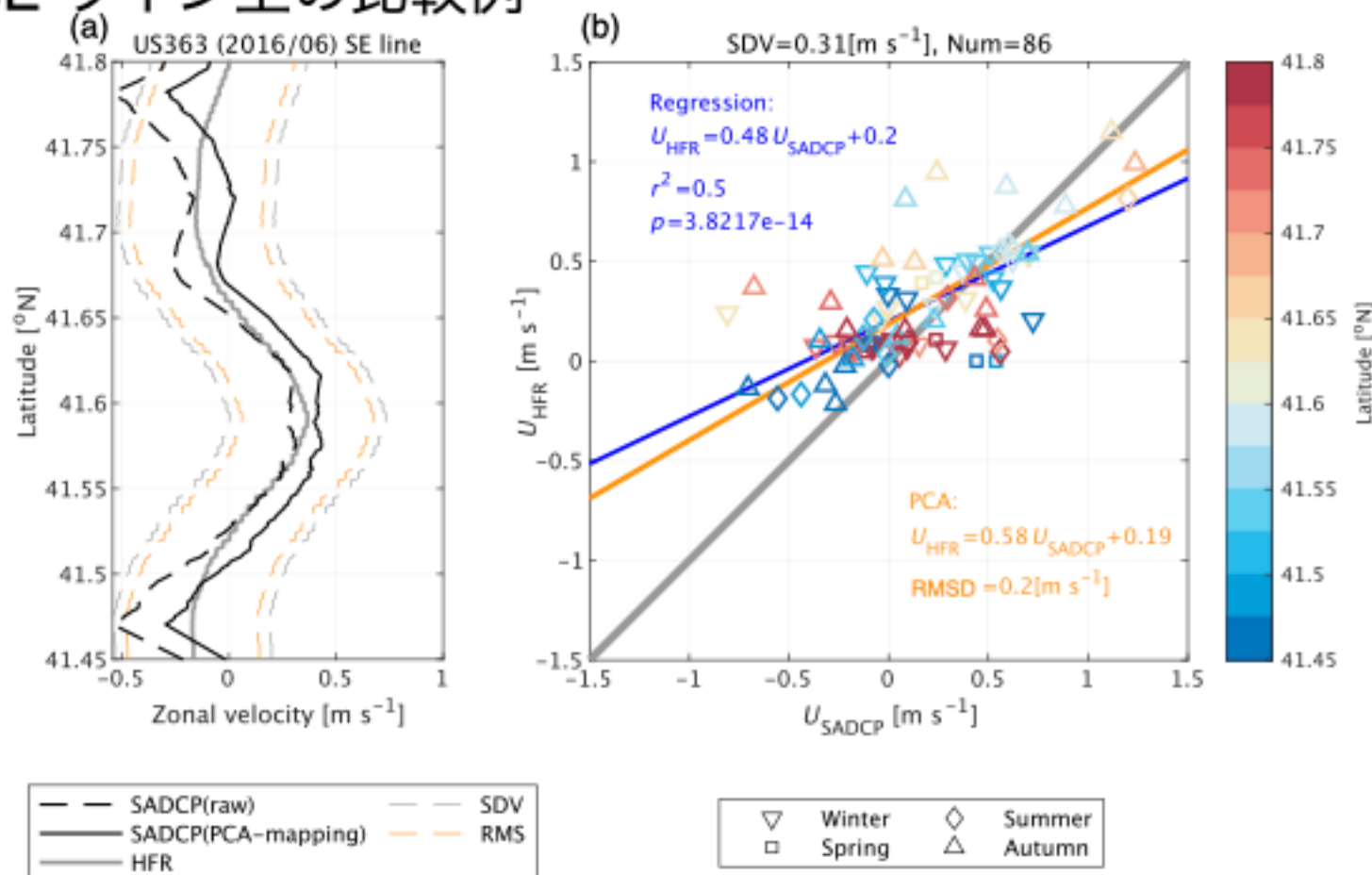
東部津軽海峡における流向流速観測を通じた
海洋短波レーダデータの精度向上と
船底設置型流向流速データの時間高解像度化の取り組み

	出航		入港	
みらい	2022/04/16	清水	2022/05/20	清水
かいめい	2022/05/28	横須賀	2022/06/19	横須賀
みらい	2022/06/15	清水	2022/06/30	清水

今後比較領域を拡大して検討していく予定

HFR vs S-ADCP

SE ライン上の比較例



- ・主成分分析による比較 (Yoshikawa et al., 2006; 阿部ほか 2020) では RMSD は 0.20 m/s 程度
- ・精度（誤差）が季節変動？ズレの大きい秋を除くと 0.16 m/s 程度