



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)



海洋短波レーダーによって捉えられた 津軽海峡東部における前線波動

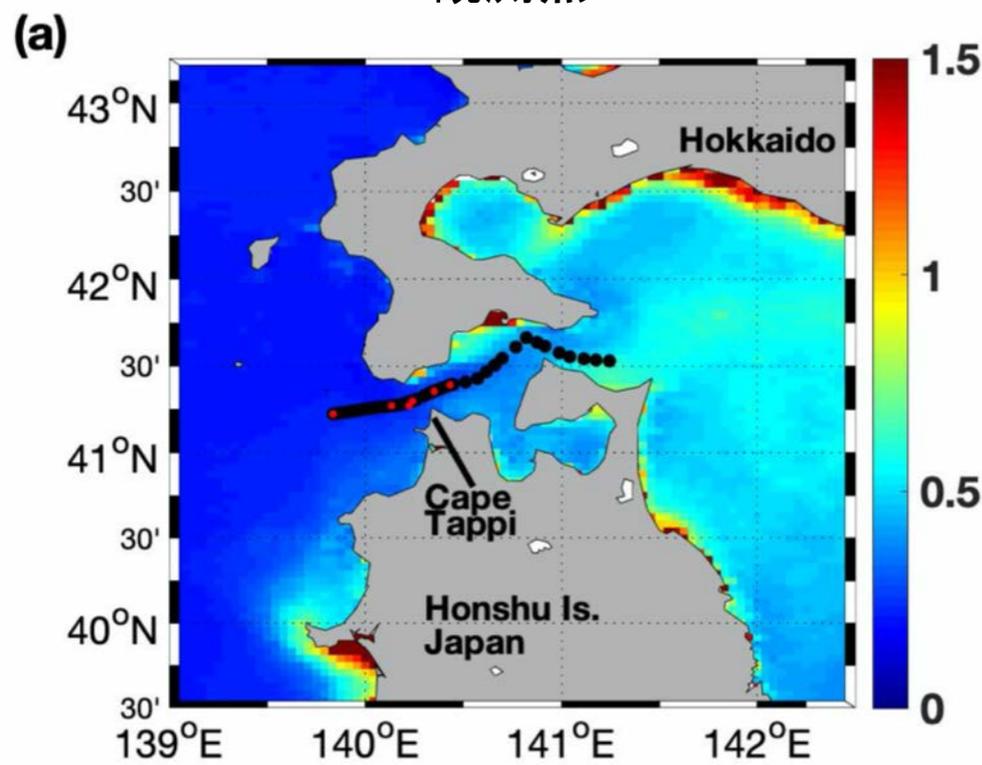
○ 金子 仁¹、佐々木建一¹、阿部泰人^{1,2}、脇田昌英¹、
奥西 武³、長谷川大介³、田中雄大³

1. 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) むつ研究所
2. 北海道大学 大学院水産科学研究院
3. 水産研究・教育機構 水産資源研究所(塩釜庁舎)

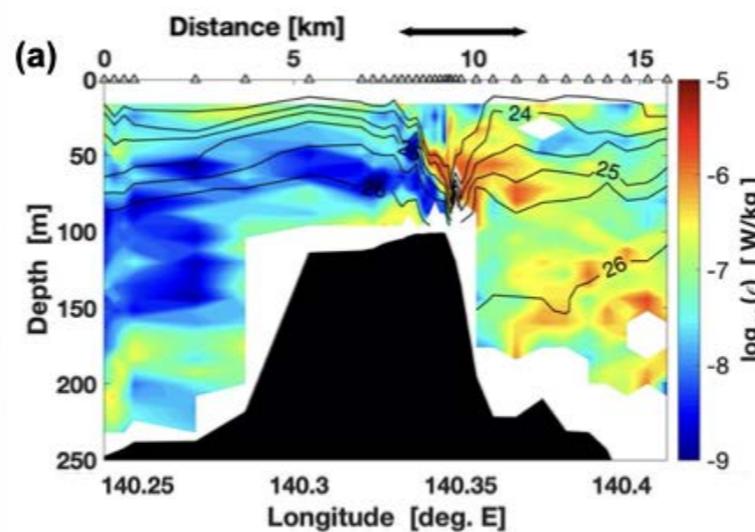
九州大学 応用力学研究所 研究集会
「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」(2020/12/16)

2020年10月よりむつ研赴任
 旧東北水研所属時に津軽海峡内の観測を実施
 今後も連携観測を計画中

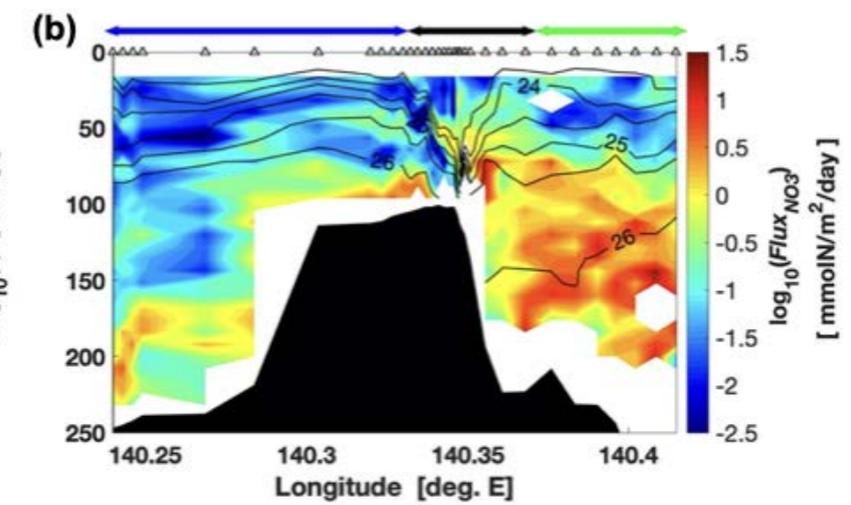
観測点



乱流強度



硝酸塩フラックス



Tanaka, Hasegawa, Okunishi, Kaneko, and Ono
 (Journal of Oceanography, OMIX special issue, in revision)

本日のアウトライン

- ・海洋短波レーダーを用いた津軽暖流の流軸解析
- ・津軽暖流の長期変動と黒潮緯度の関係について簡単に紹介

本日の発表の背景

津軽海峡:

日本海と太平洋を繋ぐ主要な海峡の一つ
黒潮系の津軽暖流が西から東へと流れる

世界的に見ても進行の速い海洋酸性化現象が存在
(Wakita et al., submitted)

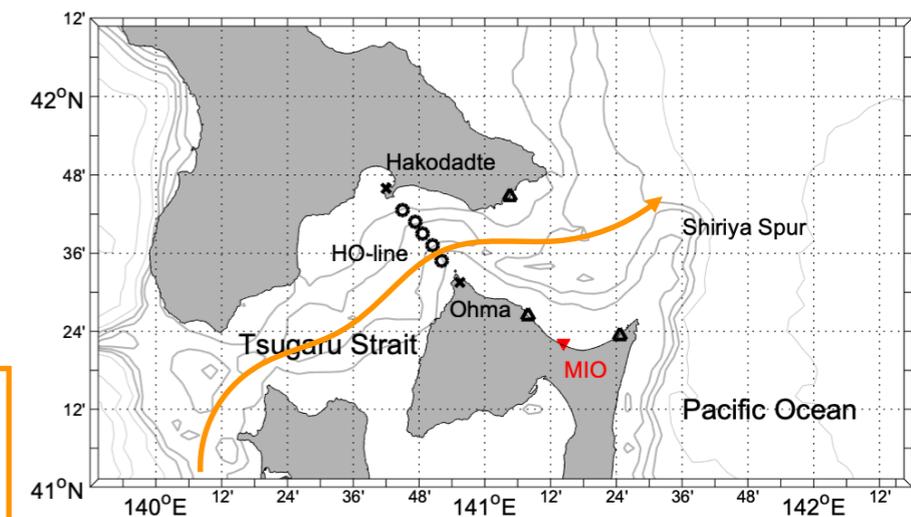
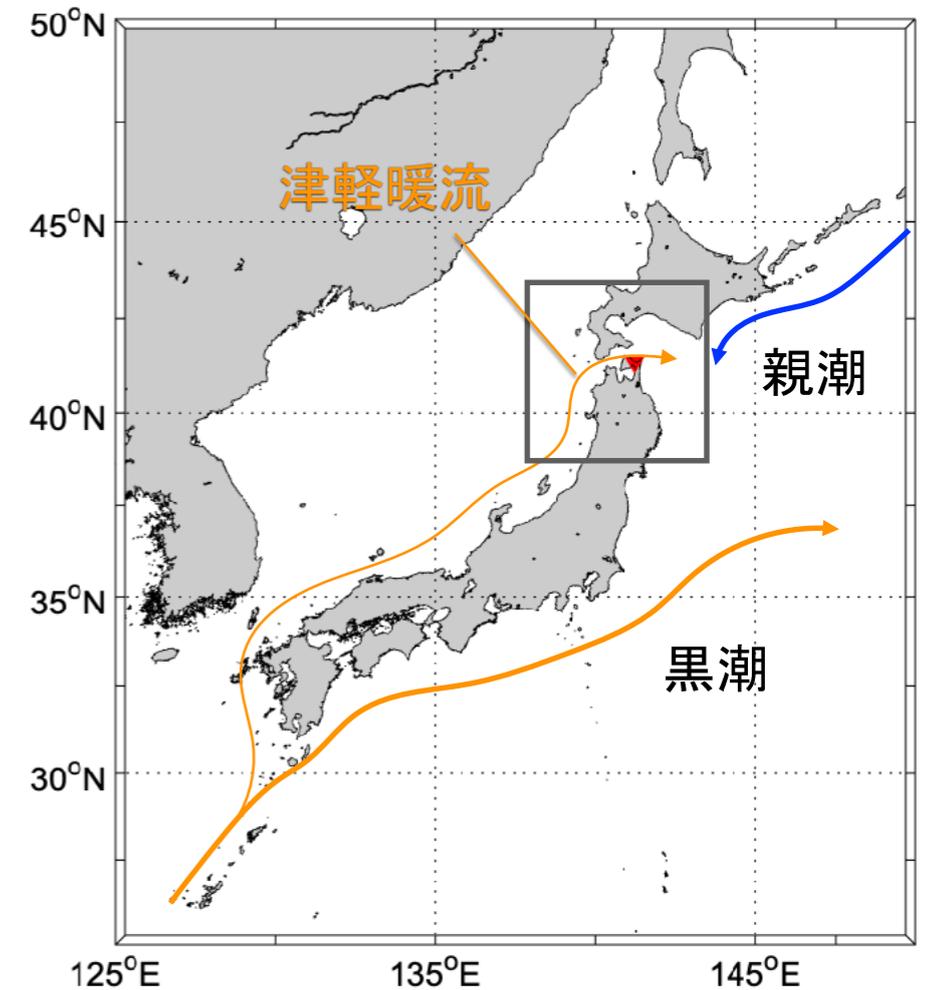
酸性化を引き起こす物理現象の解明が待たれる

津軽海峡東部: 海峡幅が広くなり、複雑な海底地形
津軽海峡通過流の流路に大きな季節変動

(Yasui et al., in prep.)

海峡通過流の変動特性については不明点が多い

海洋短波レーダー (HFR, High Frequency Radar) を
用いて、リアルタイムに広範囲を長期間モニタリング。
海峡東部における通過流の変動特性について明らかにする



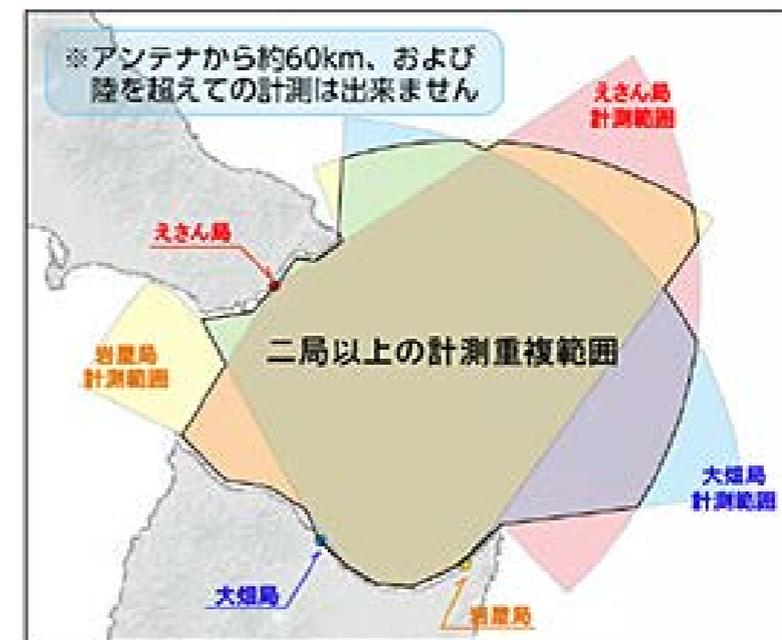
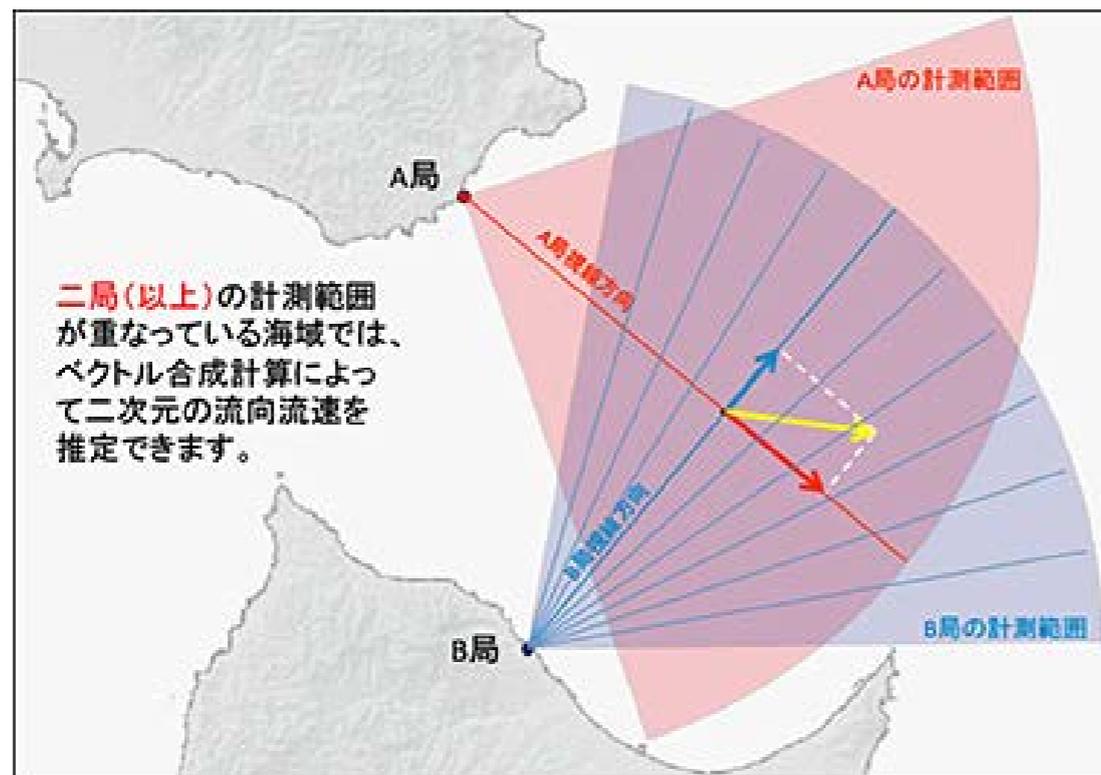
データ・方法 ①

津軽海峡東部 海洋レーダーデータサイト

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

*MIO: Mutsu Institute for Oceanography (<http://www.godac.jamstec.go.jp/morsets/j/top/>)

HFR: SeaSonde, 13.9MHz, CODAR Ocean Sensors, 大畑, 岩屋, えさんの 3局



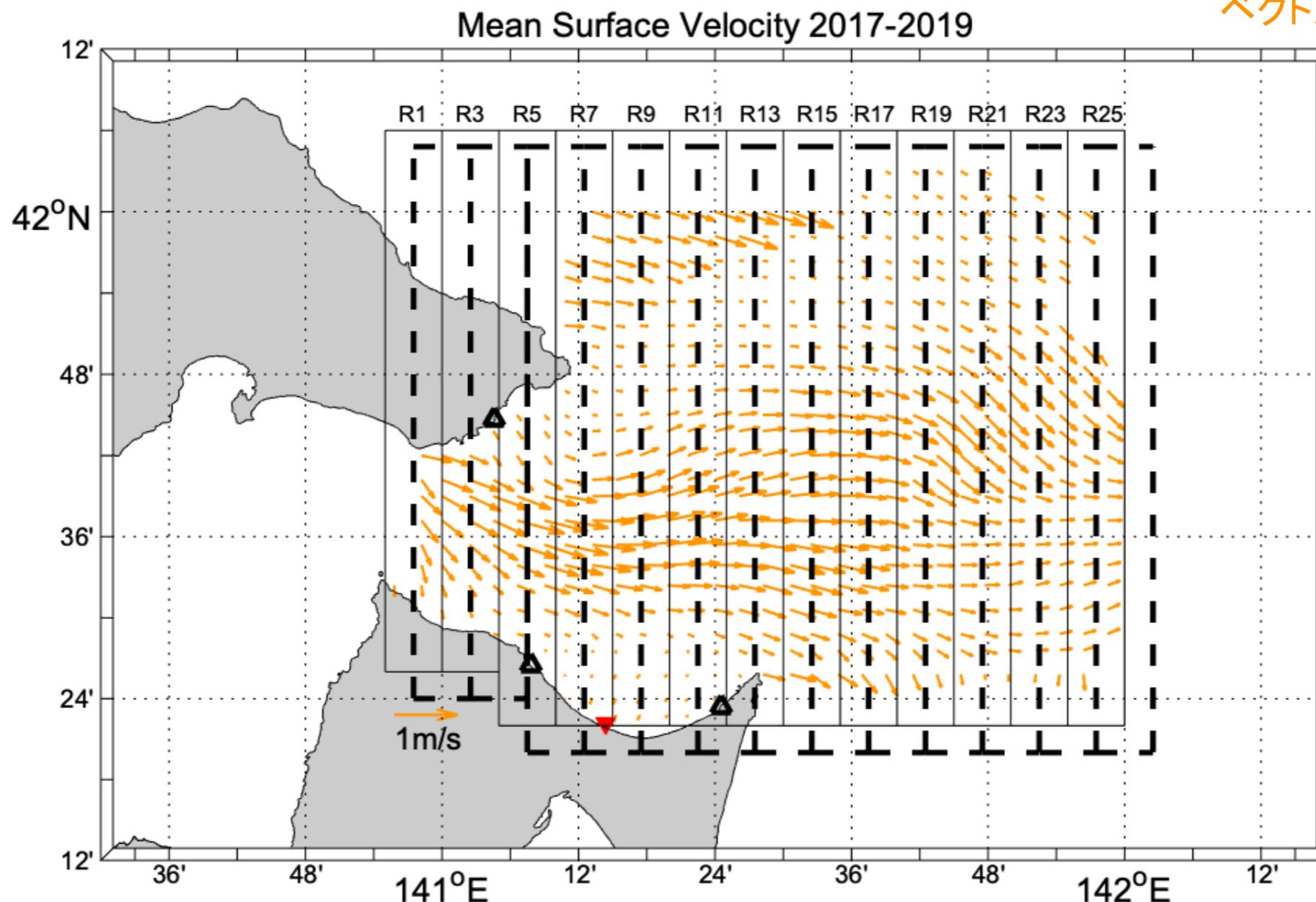
津軽海峡東部海洋短波レーダーによる表面流計測範囲

2014年4月より運用開始。本研究では3基体制で比較的安定してデータの取得がなされていた 2017-2019年のデータを使用。

水平約 3km。計測時間間隔 30分ごと。観測範囲 約60km

領域と流軸推定方法

ベクトルは平均流速

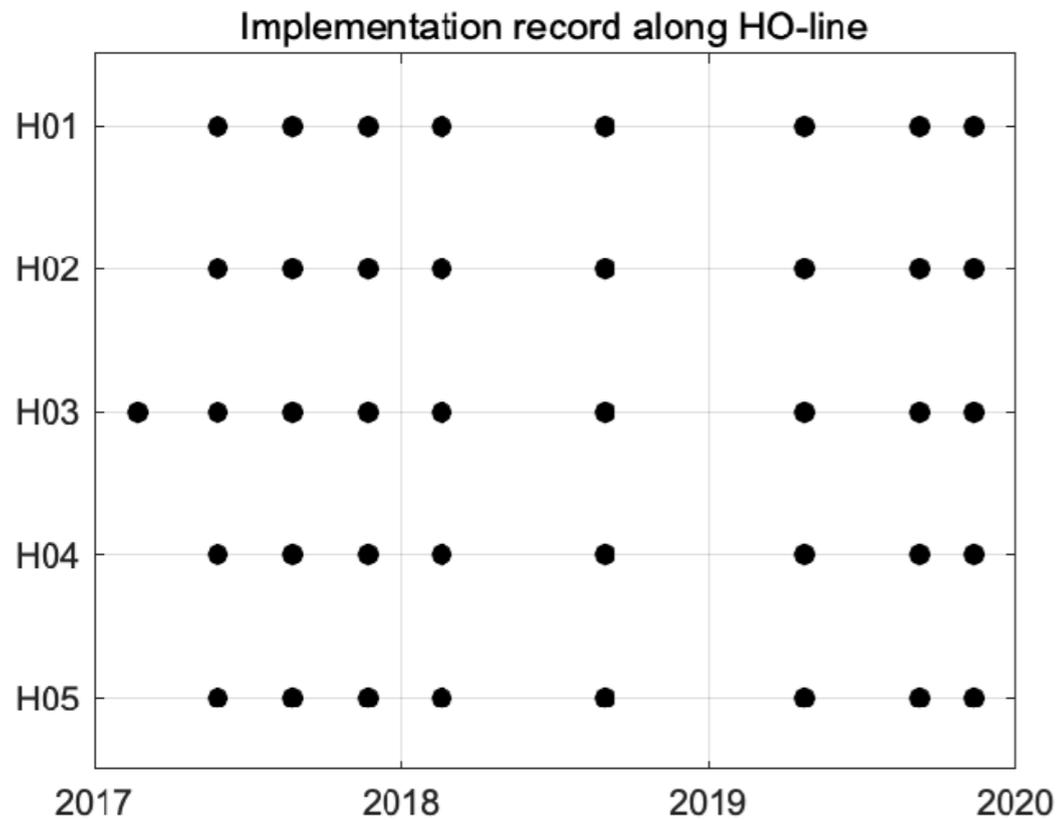


- ・各グリッドで 6時間ごとに1日幅で平均した時系列を作成
- ・経度方向に5度 (約7km) の幅で短冊状の領域を設定。ハーフオーバーラップで 26個
- ・東西方向の流速 u が最大となる緯度を短冊領域内で抽出し、領域ごとに東西平均
- ・日平均気候値を 1月1日から 12月31日まで 365日分作成
(例えば各年の 1月1日から 1月10日の流軸緯度を平均して1月5日の気候値とする)

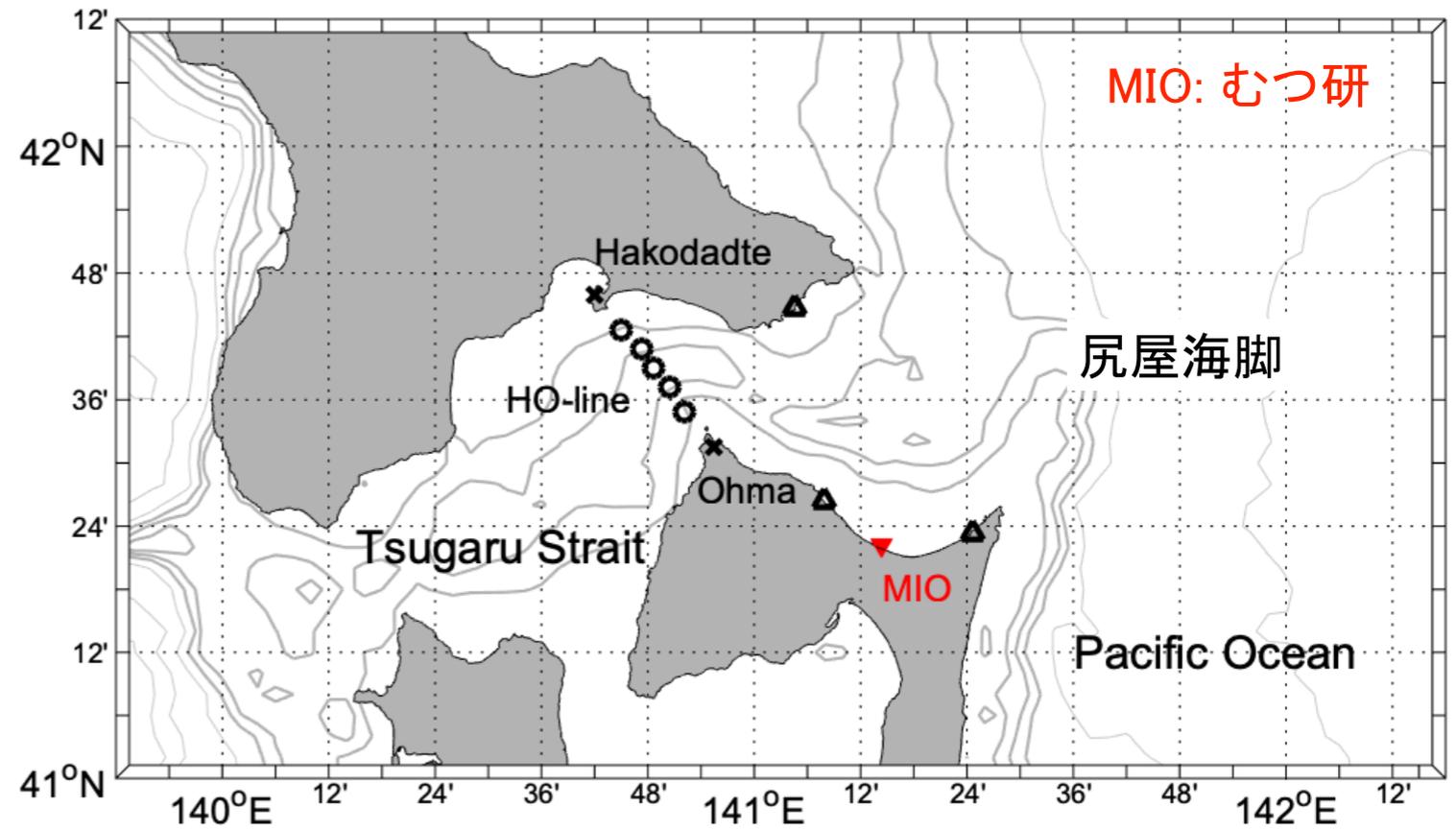
データ・方法 ② 船舶観測データ

2017-2019年、
HO定線 (年2~3回)

- ・うしお丸 (C382, C389, C394, C403, C410, C439, C454)
- ・若鷹丸 (WK1808, WK1909)



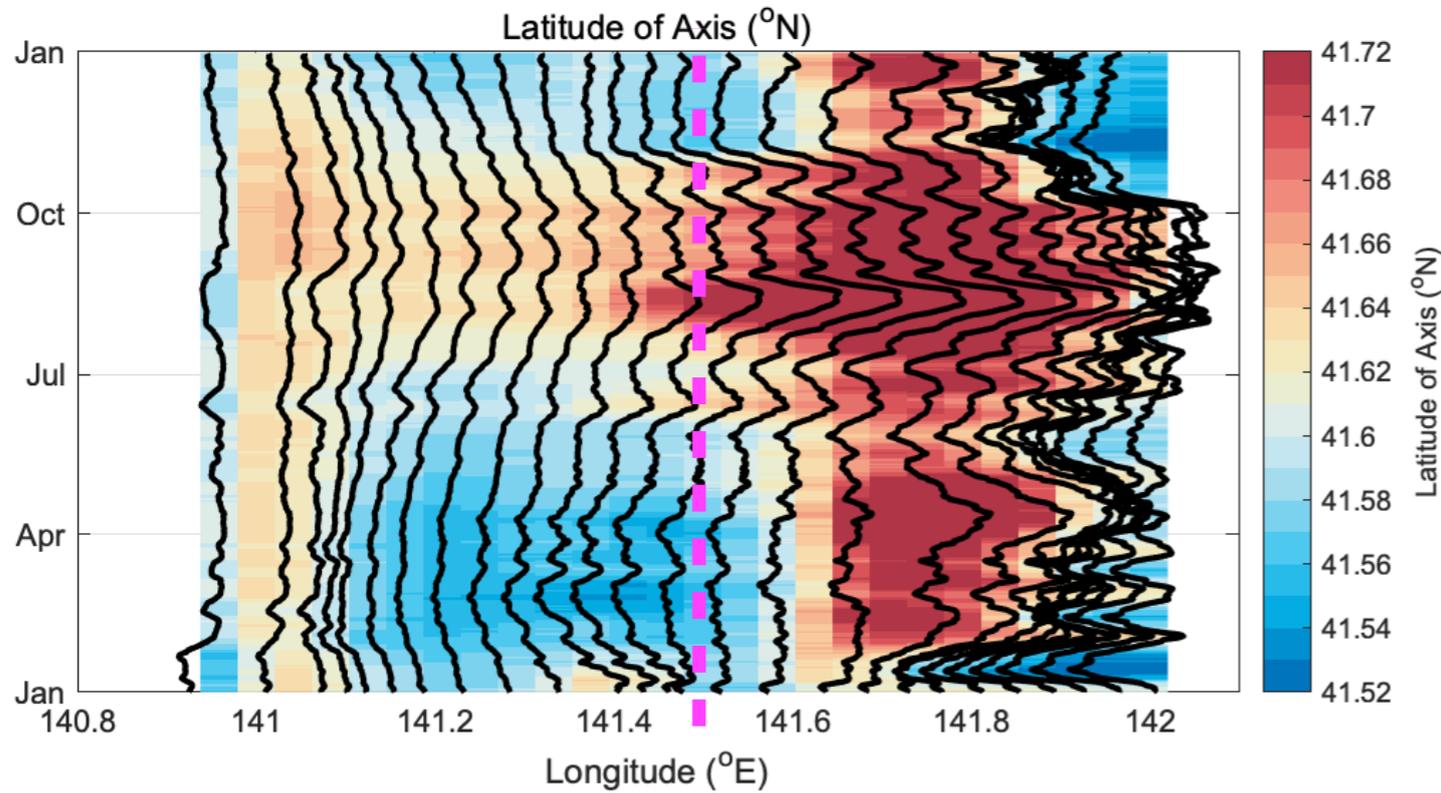
HO ライン観測実施情報



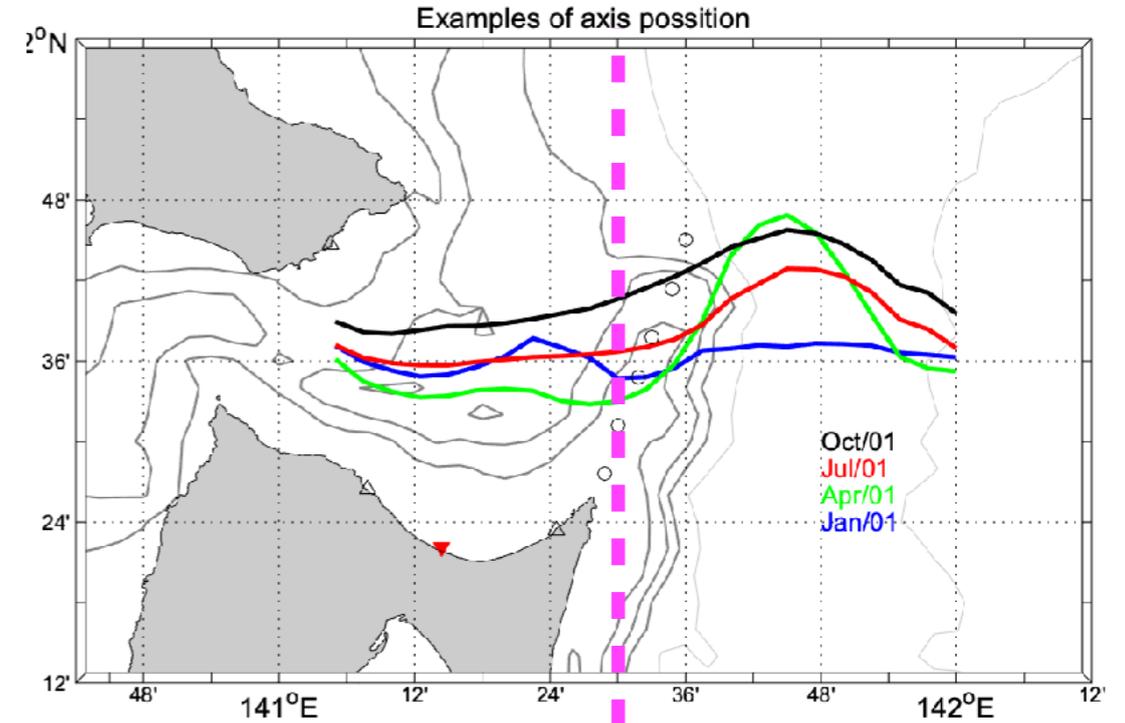
→ 海洋内部構造の把握に使用

【結果】流軸緯度の時間変化

各経度における流軸緯度の気候値*



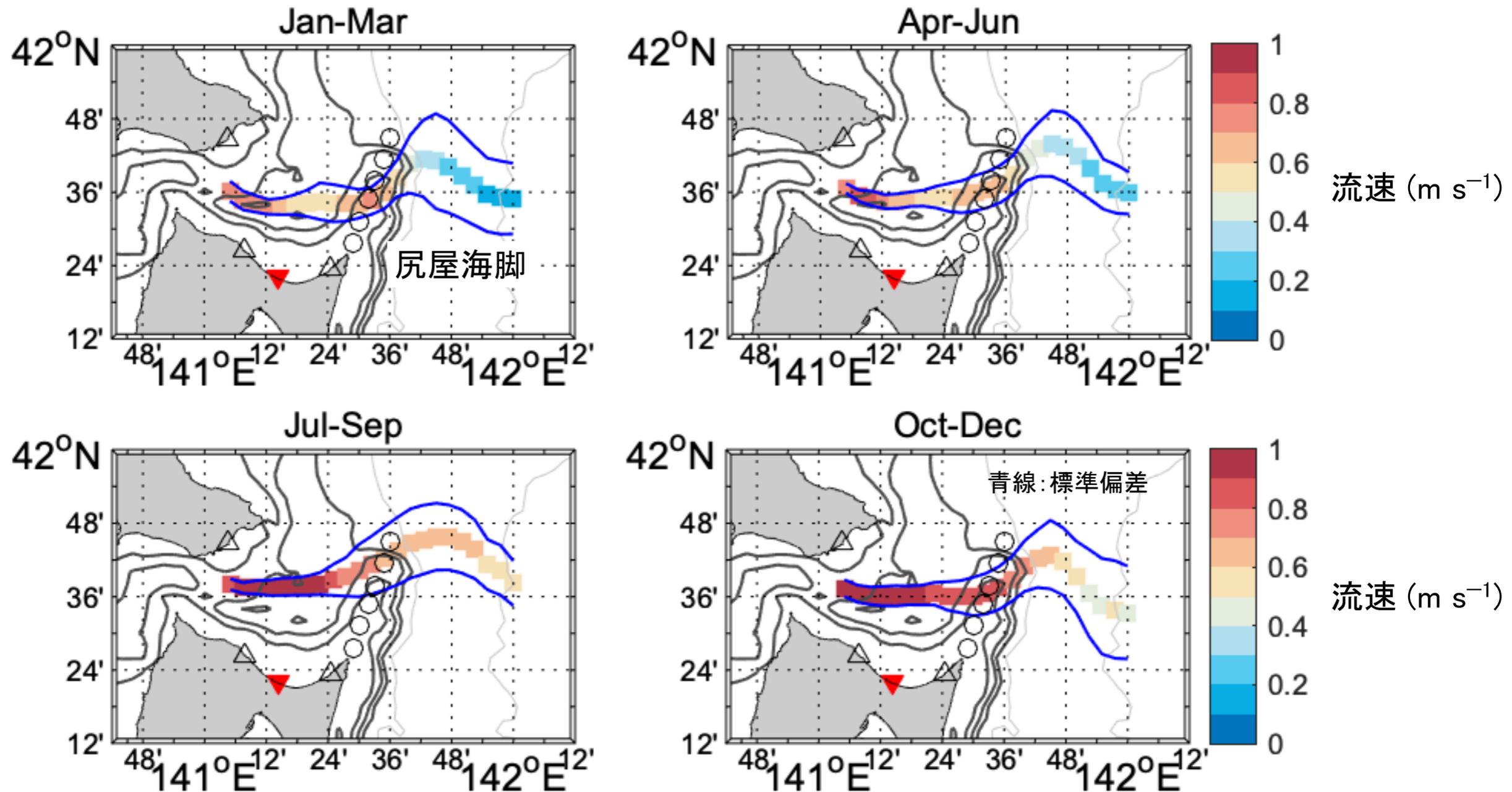
各季節における流軸位置(気候値)の例



* 例えば 2017-2019年の各年の 1月1日から 1月11日の流軸緯度を平均して 1月6日の気候値とする。これを 365日分作成

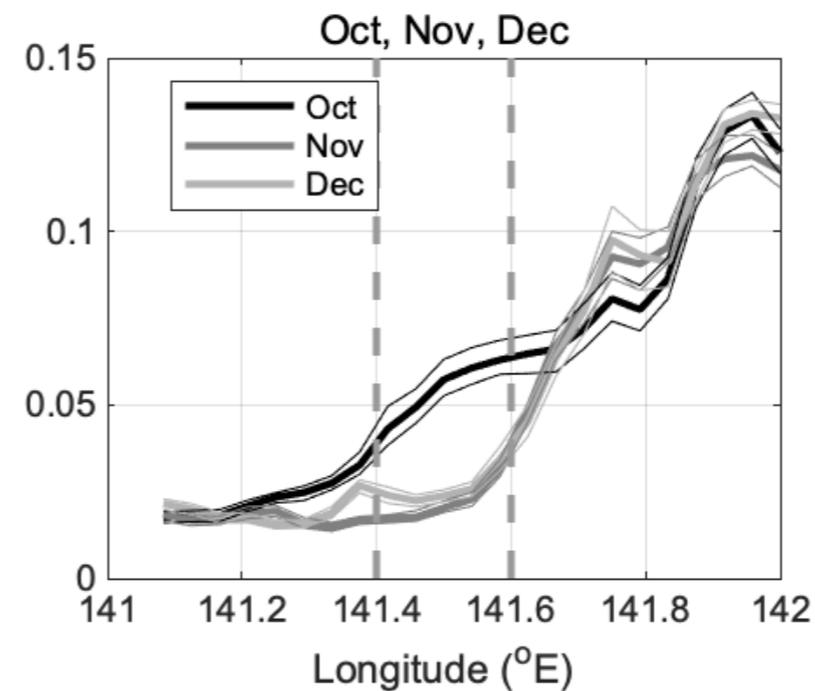
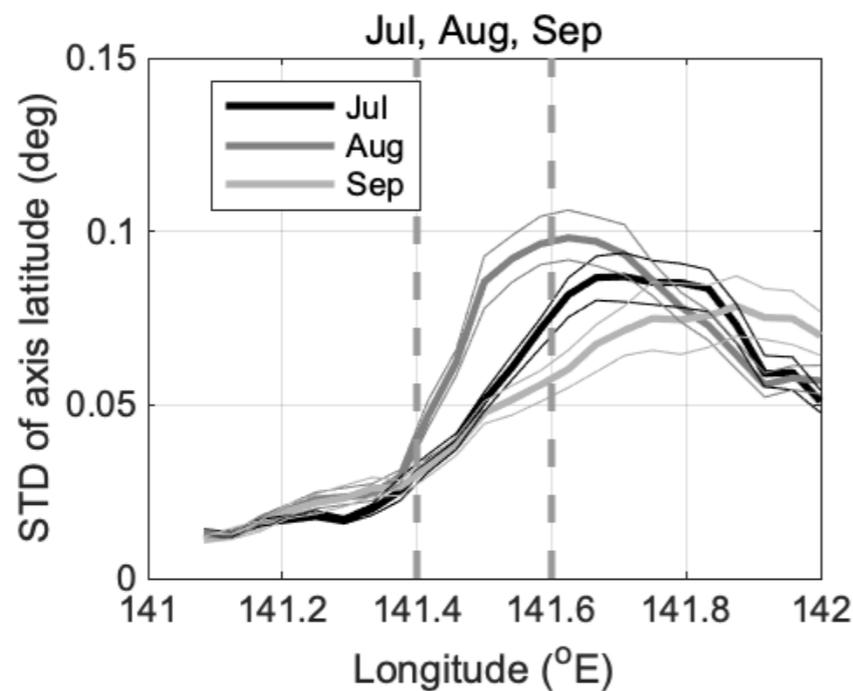
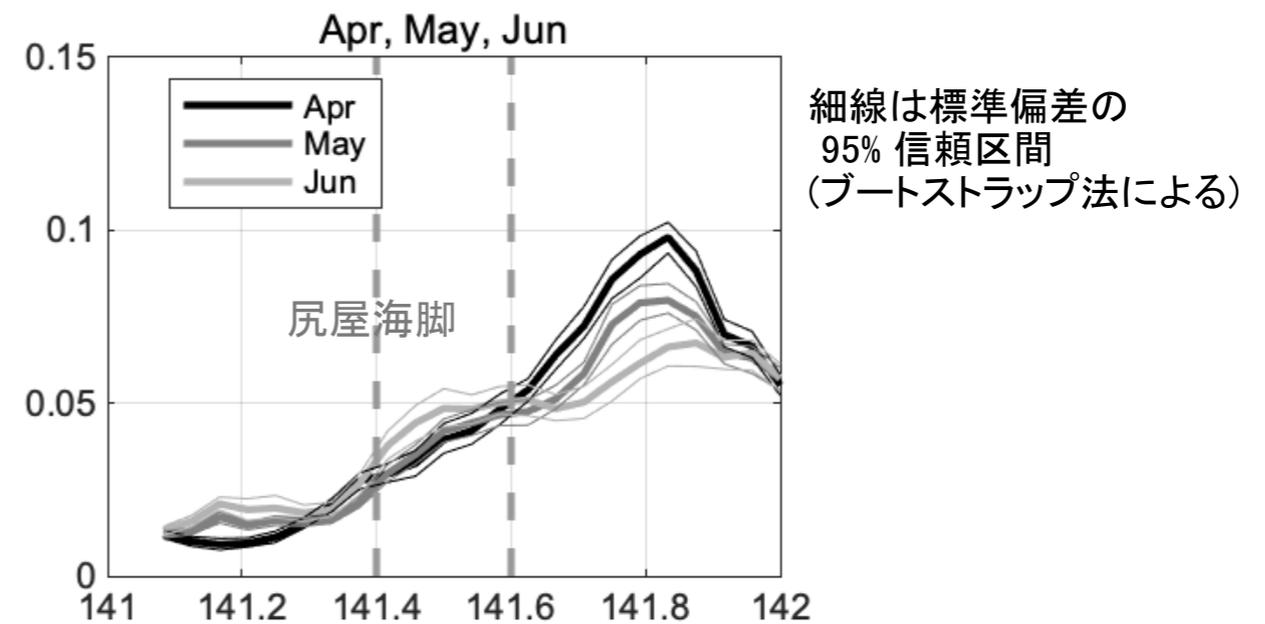
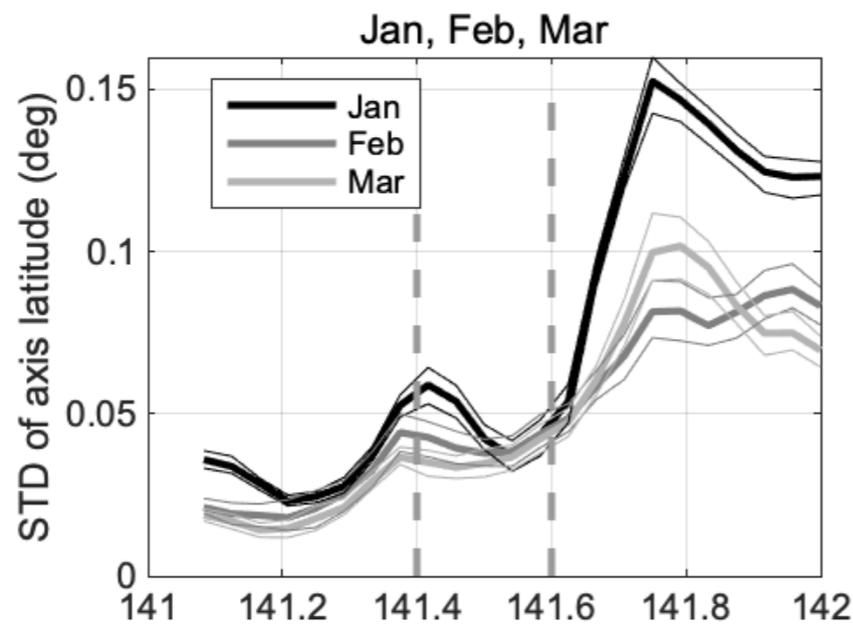
141-141.5 $^{\circ}$ E では、1月~7月の期間は南寄りに、7月から10月にかけては北寄りに流軸が移動。一方 141.6 $^{\circ}$ E よりも東側では、2月から7月にかけて一旦北寄りに移行したのち南下し、8月から10月ごろにかけて再び北上するという傾向を示す。

季節平均流軸緯度と流速、変動幅（標準偏差）



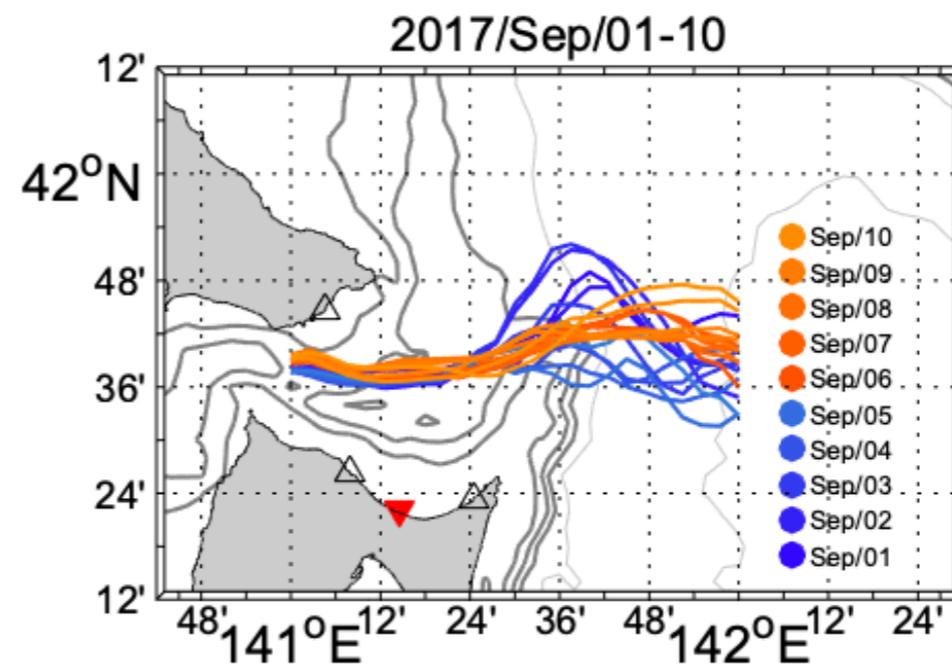
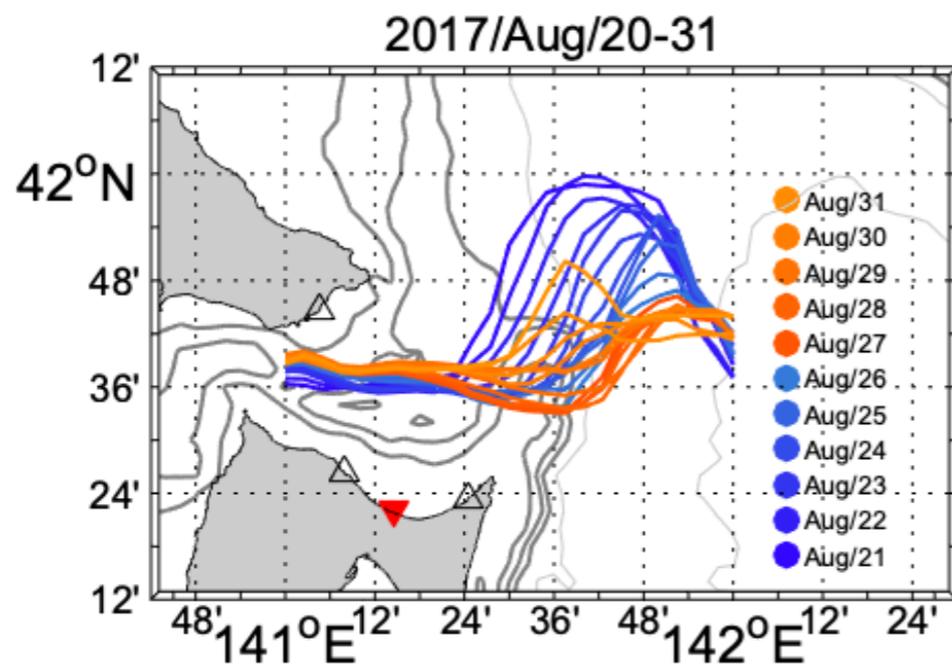
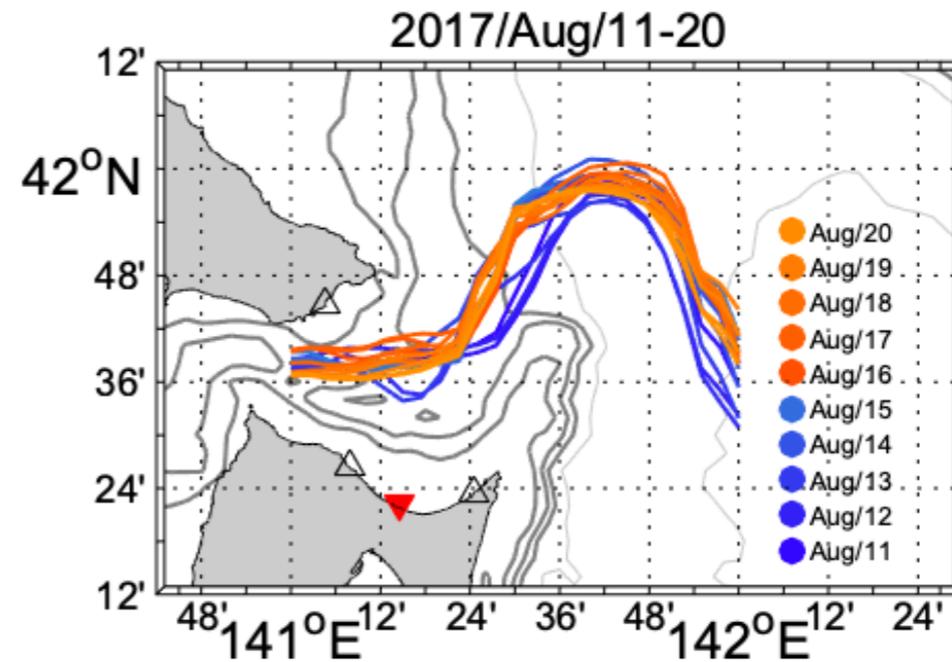
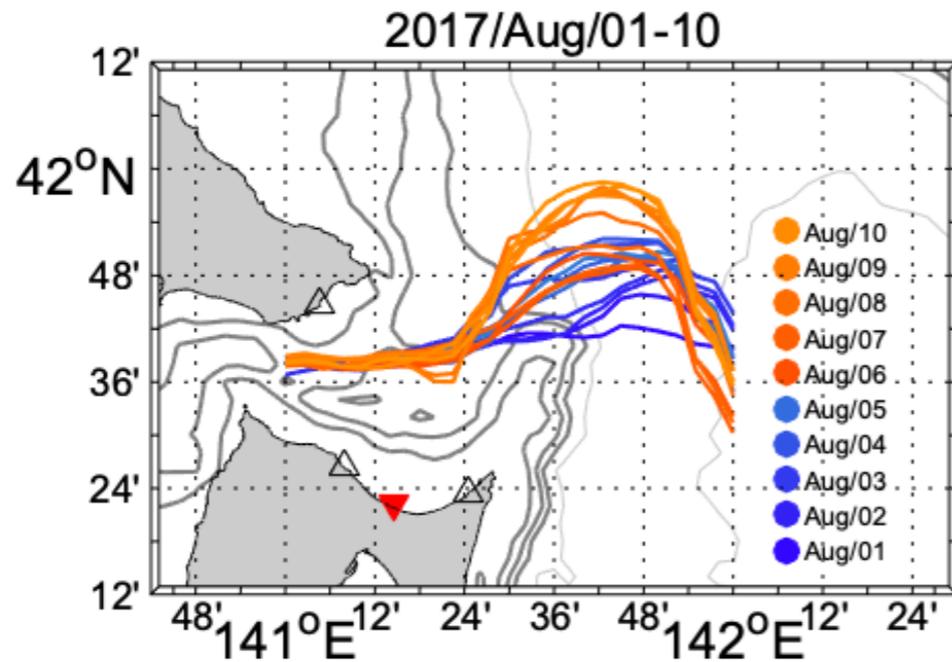
尻屋海脚以東の流速は 冬季・春季（1月-6月）には小さく、
夏季から秋季（7月-12月）にかけて相対的に速い

流軸緯度変化(標準偏差)の月変動



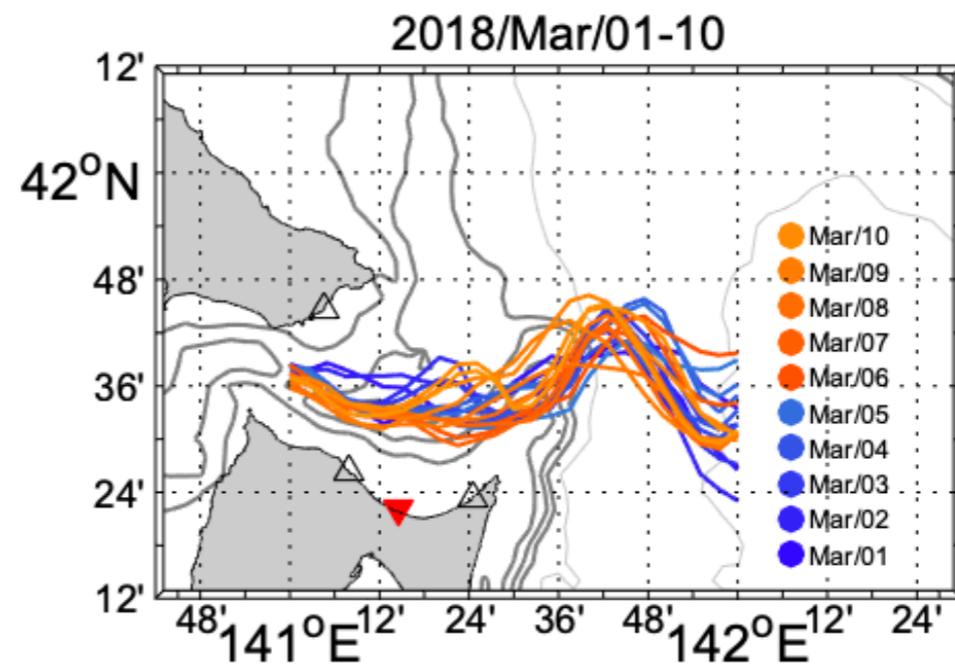
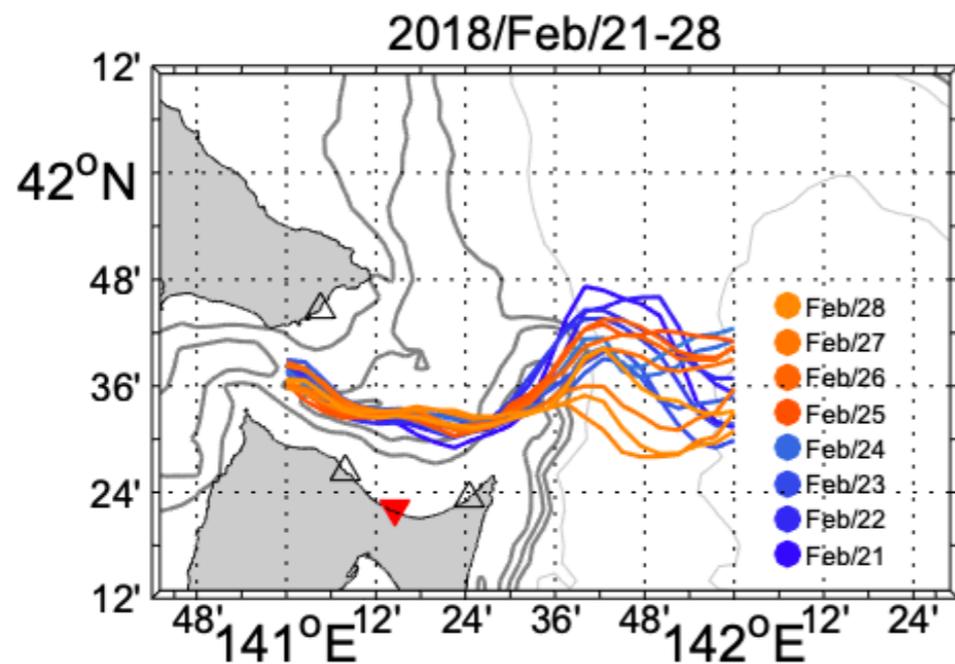
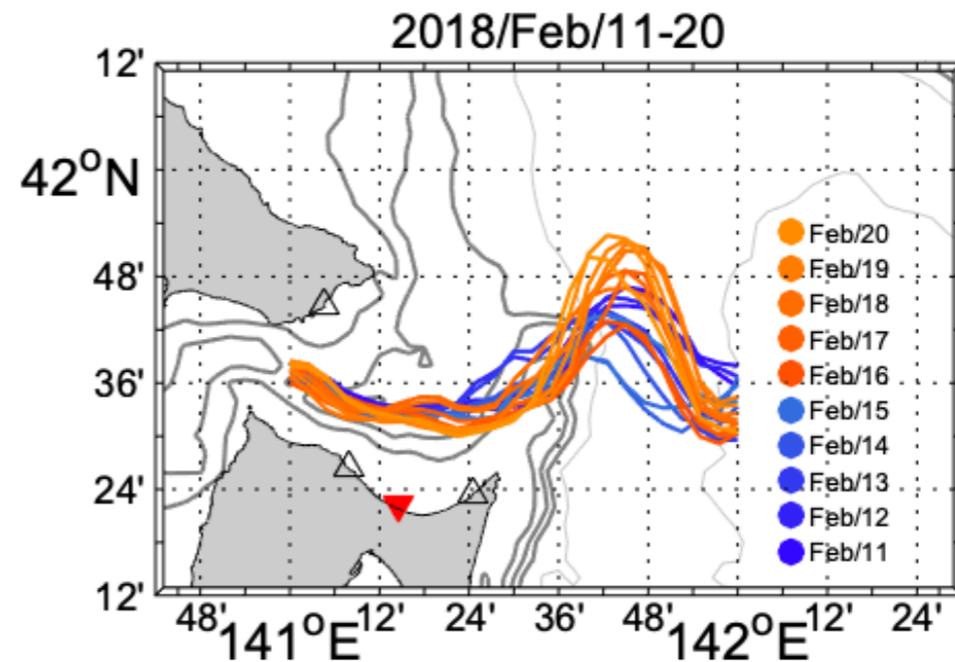
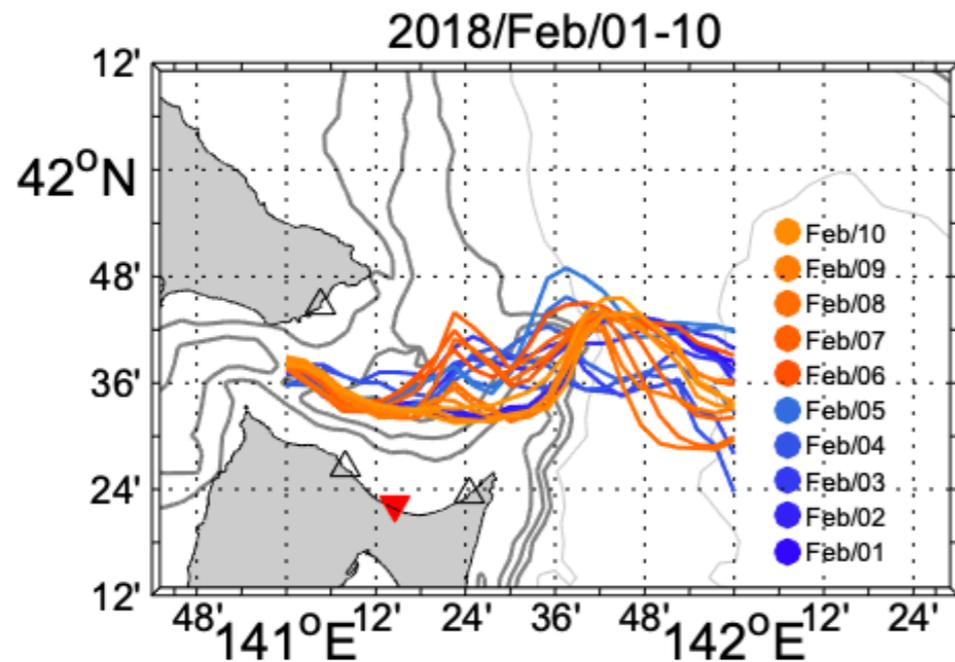
全季節において下流側で標準偏差が増大。尻屋海脚 以東で特に大きくなる傾向。
尻屋海脚上では 9月、10月に大きく、11月、12月に変動小さい

短期変動の例 (2017年夏季)



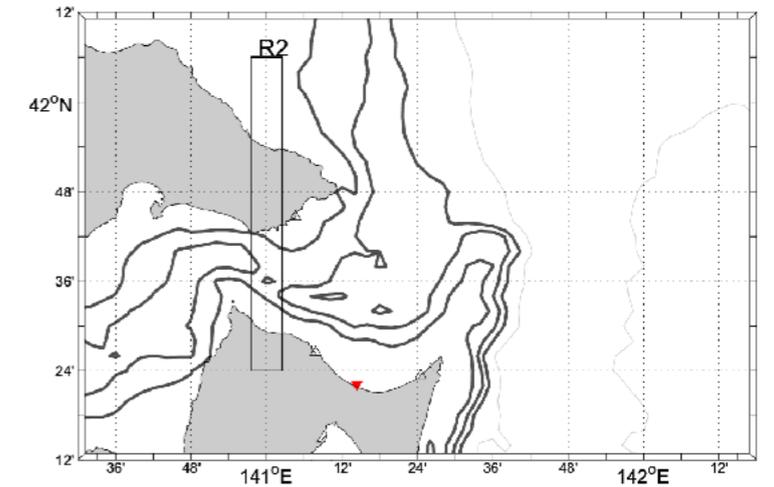
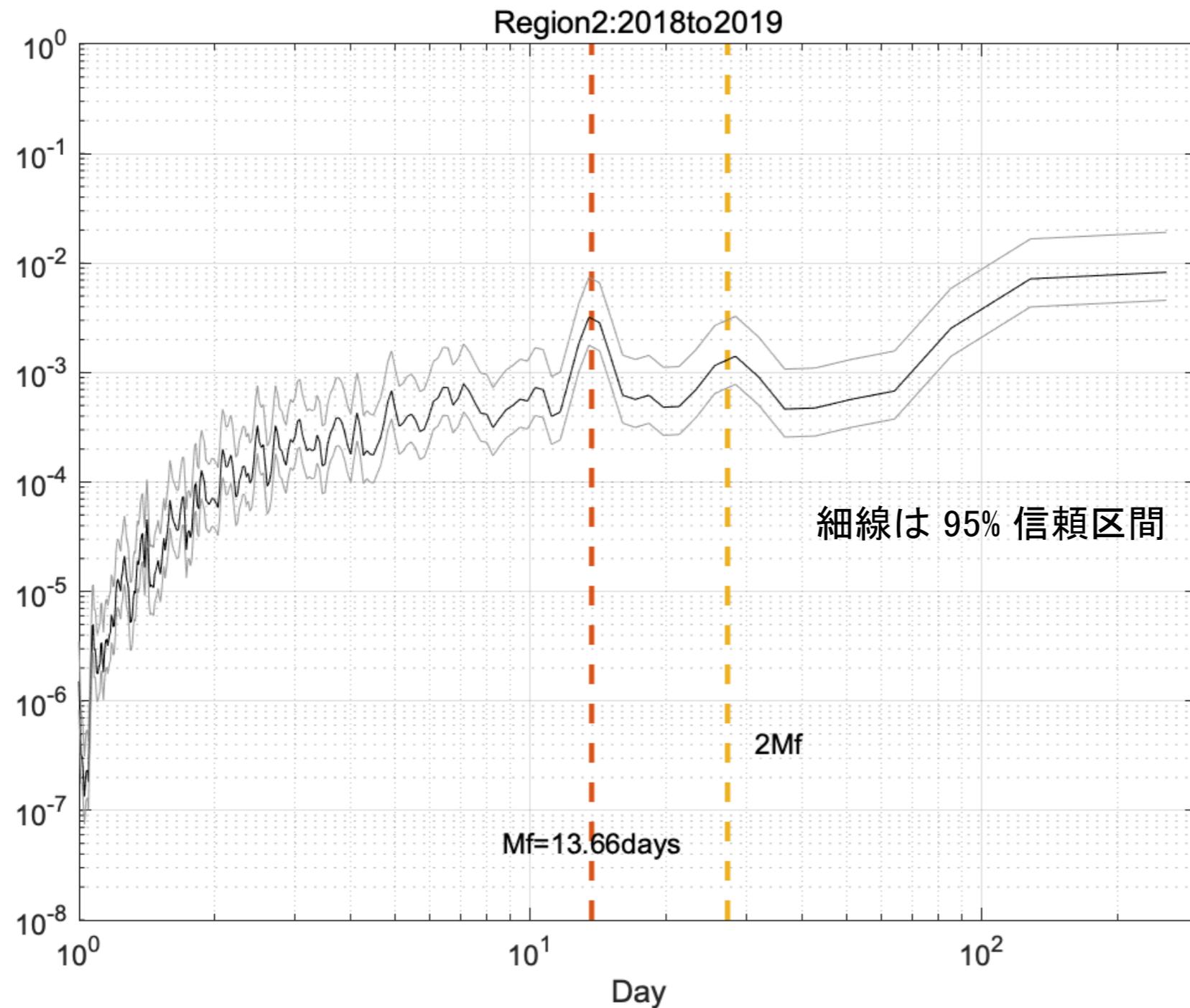
比較的短周期 (~10日オーダー) で顕著な変動がある

短期変動の例 (2018年冬季)



比較的短周期 (~10日オーダー) で顕著な変動がある

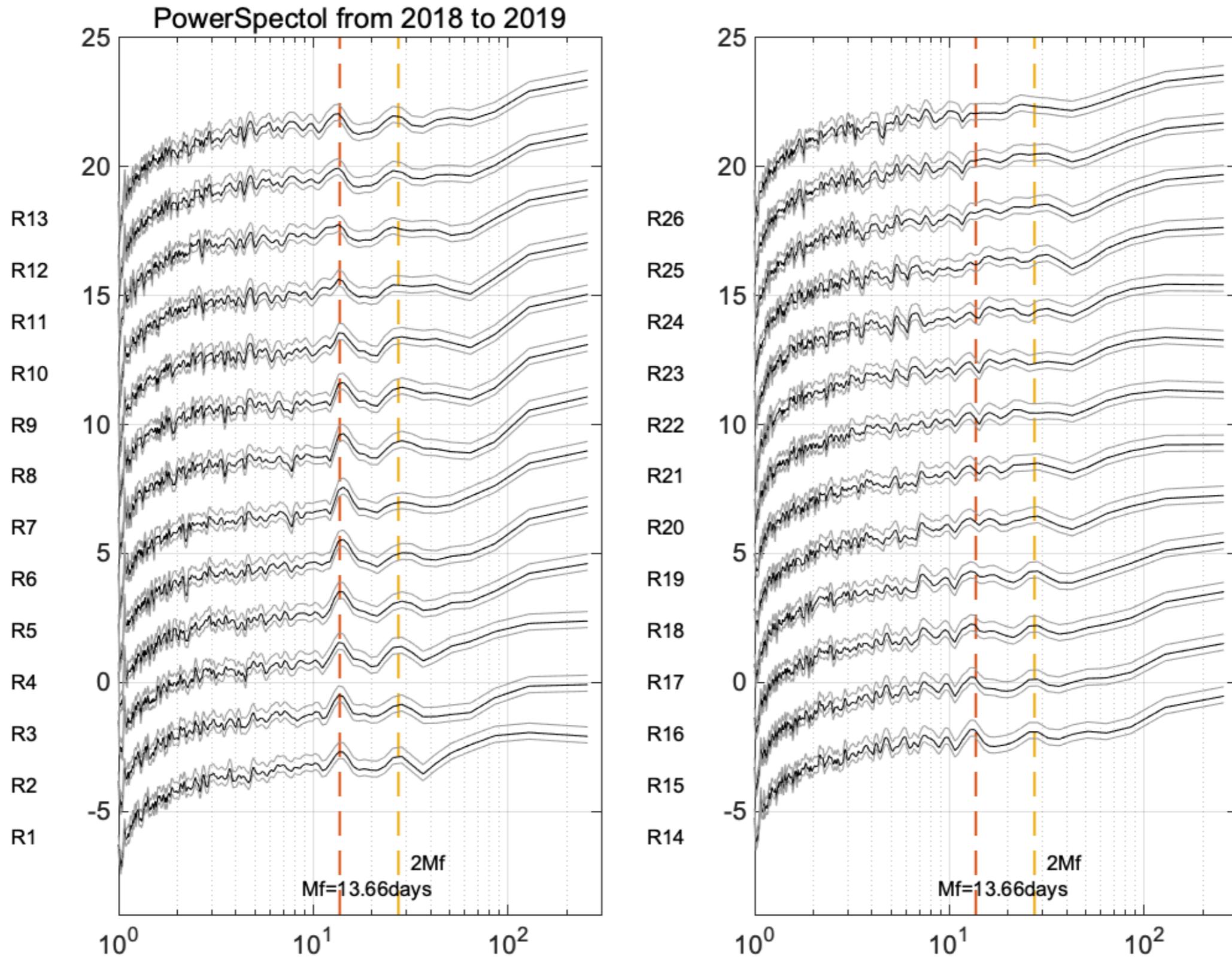
流軸緯度のスペクトル分布例（領域2）



Mf* (13.7日) にピーク

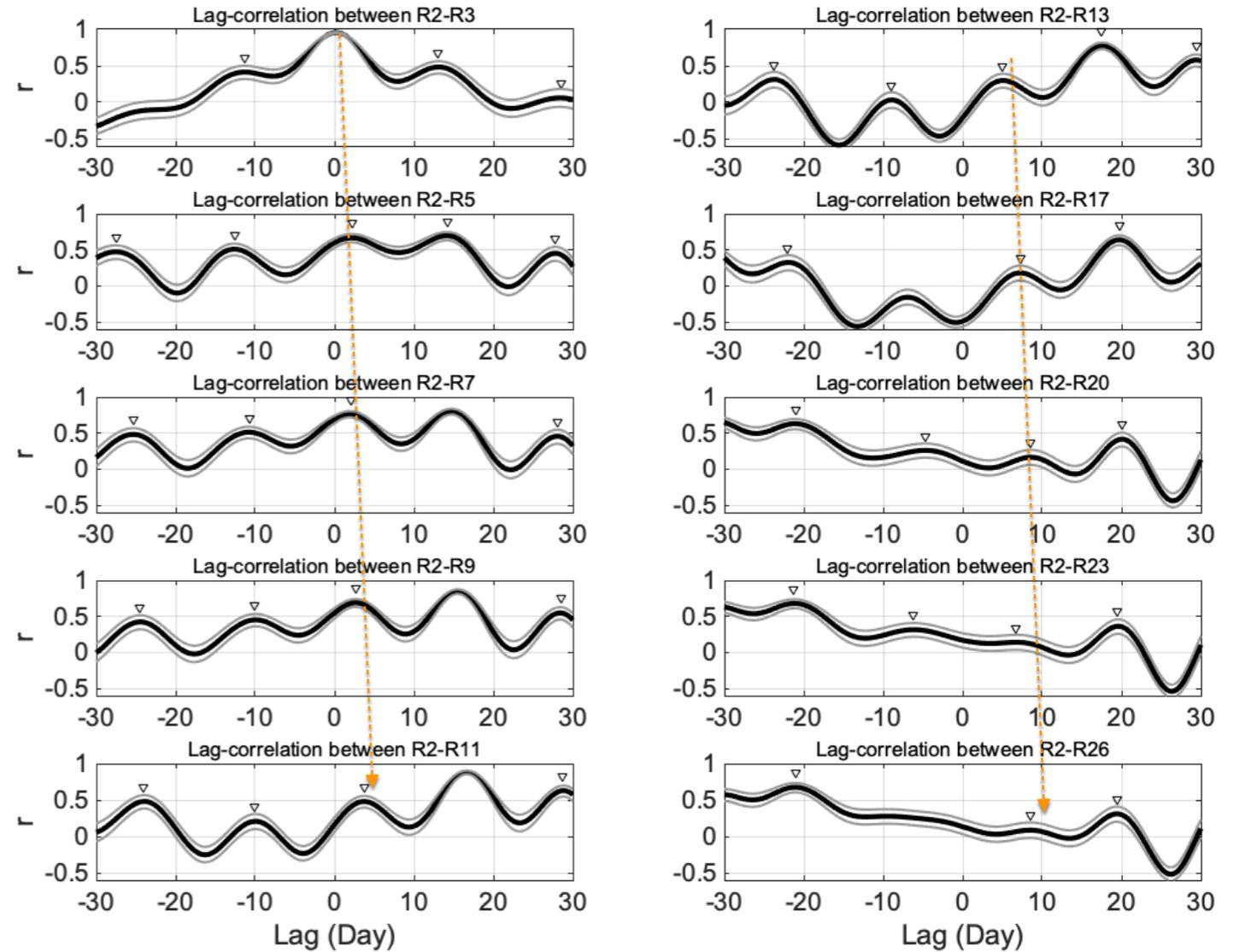
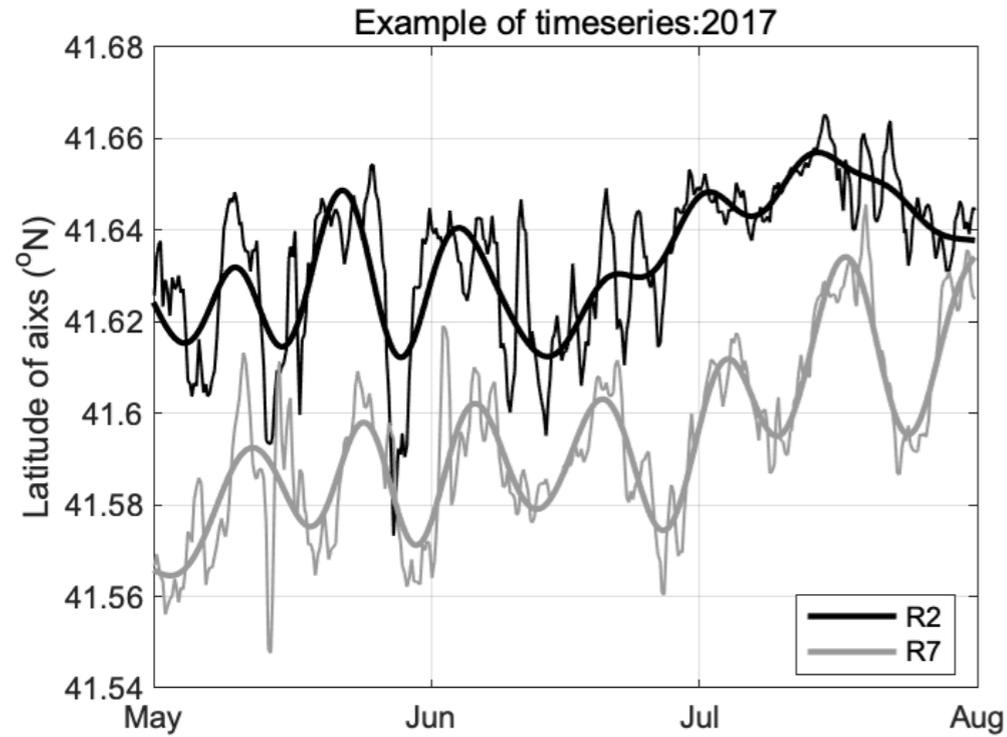
*津軽海峡で特徴的な周期。大西 (2004)、丹野ほか (2005)、太田ほか (2015)

スペクトル分布(全領域)



Mf (13.7日) にピーク。東側で Mf は弱まる

時系列分布とラグ相関の例 (2017年5-8月)



細線は 95% 信頼区間

5次バターワースフィルターによる
10日ローパス時系列について
基準領域 (R2) からのラグ相関を計算

ラグピークは約14日の周期変動を有し、下流側ほど遅れる傾向 (R26 で 10日近く)

平均流 ($0(1)\text{m s}^{-1}$) による移流時間スケール (数日) よりもかなり遅い

流軸変動の解釈

表層平均流の移流時間スケール（数日）よりもラグが遅い

強流を下流方向に伝播する前線波動の可能性

(e.g., Kouketsu et al. 2008, Itoh & Sugimoto, 2008)

2層流体における傾圧不安定波の伝播モデル (Pedlosky, 1987) に基づき

位相速度 c_r を推定。観測結果によるパラメタ値を用いて、ラグ時間スケールと比較

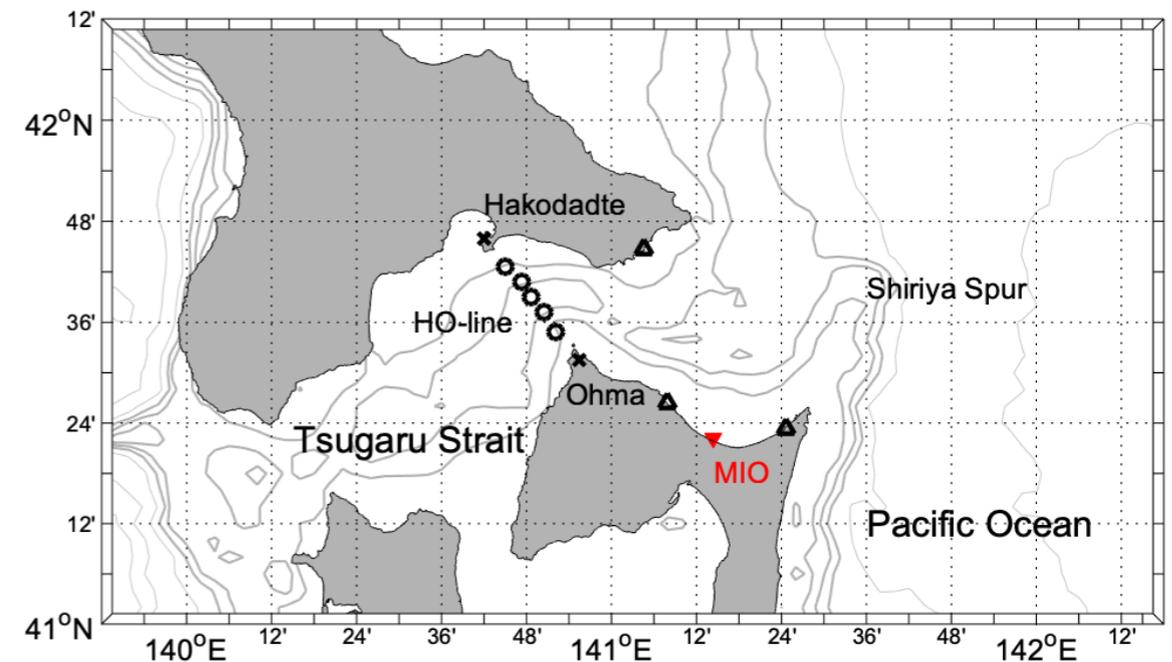
$$c_r = \frac{U_1 - U_2}{2} - \frac{(1 - \gamma)(U_1 - U_2)}{2(K^2 R^2 + \gamma + 1)}$$

U_1 : 上層流速, U_2 : 下層流速

K : 水平波数

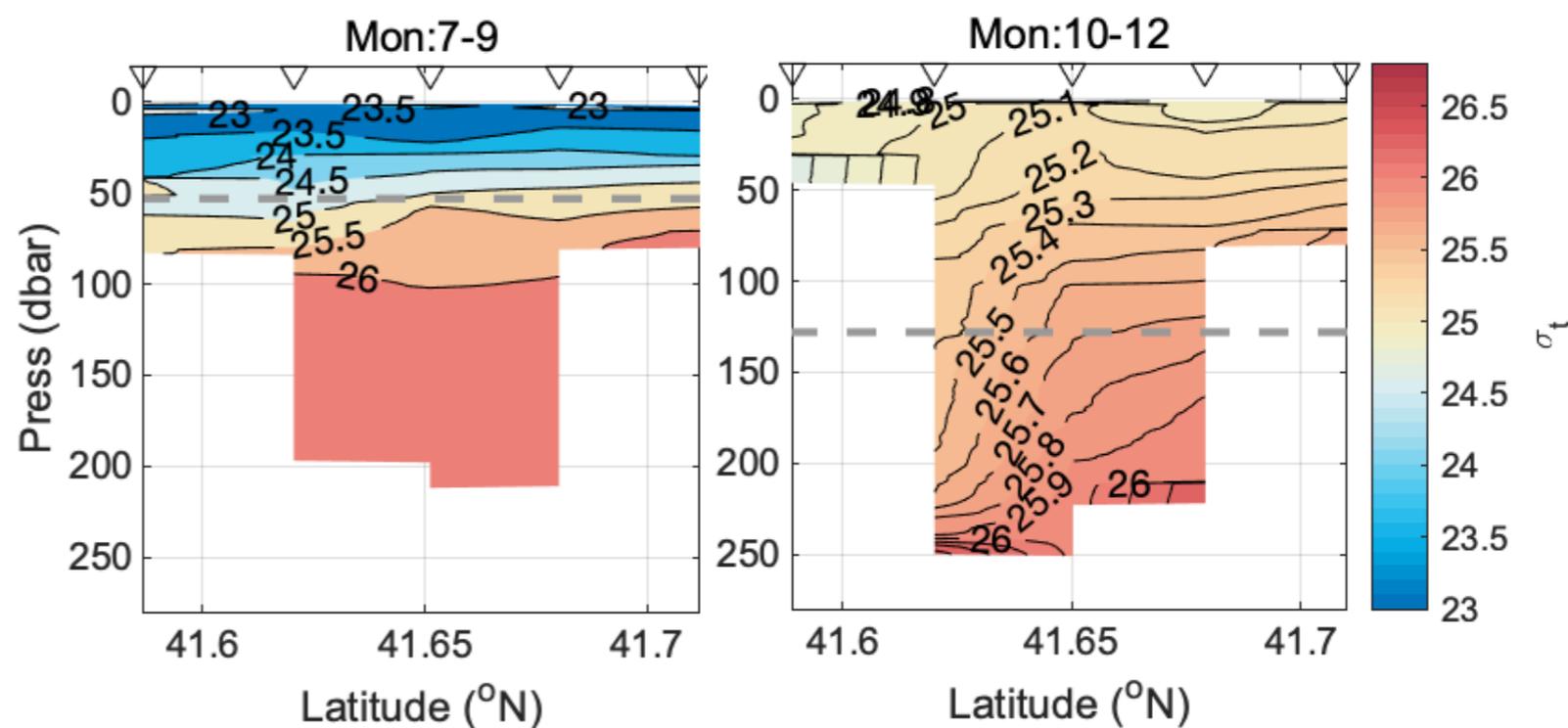
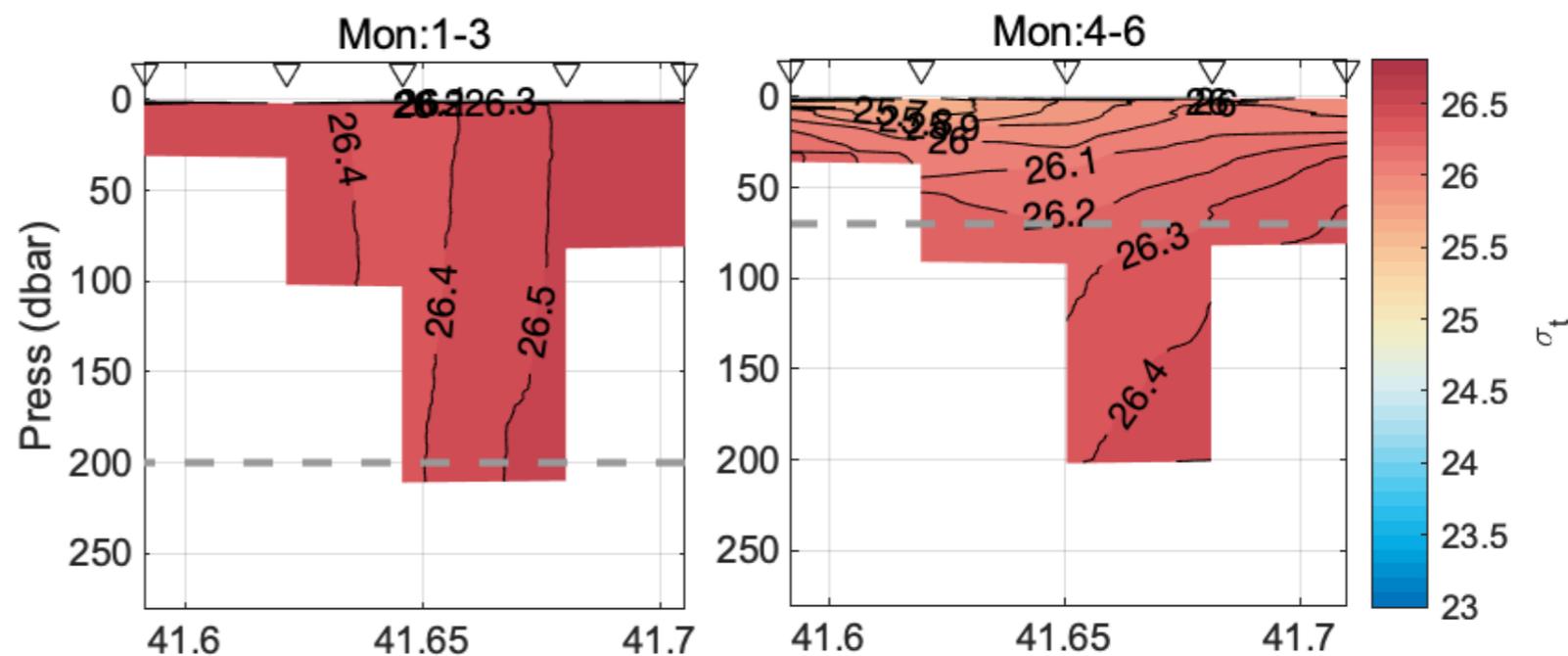
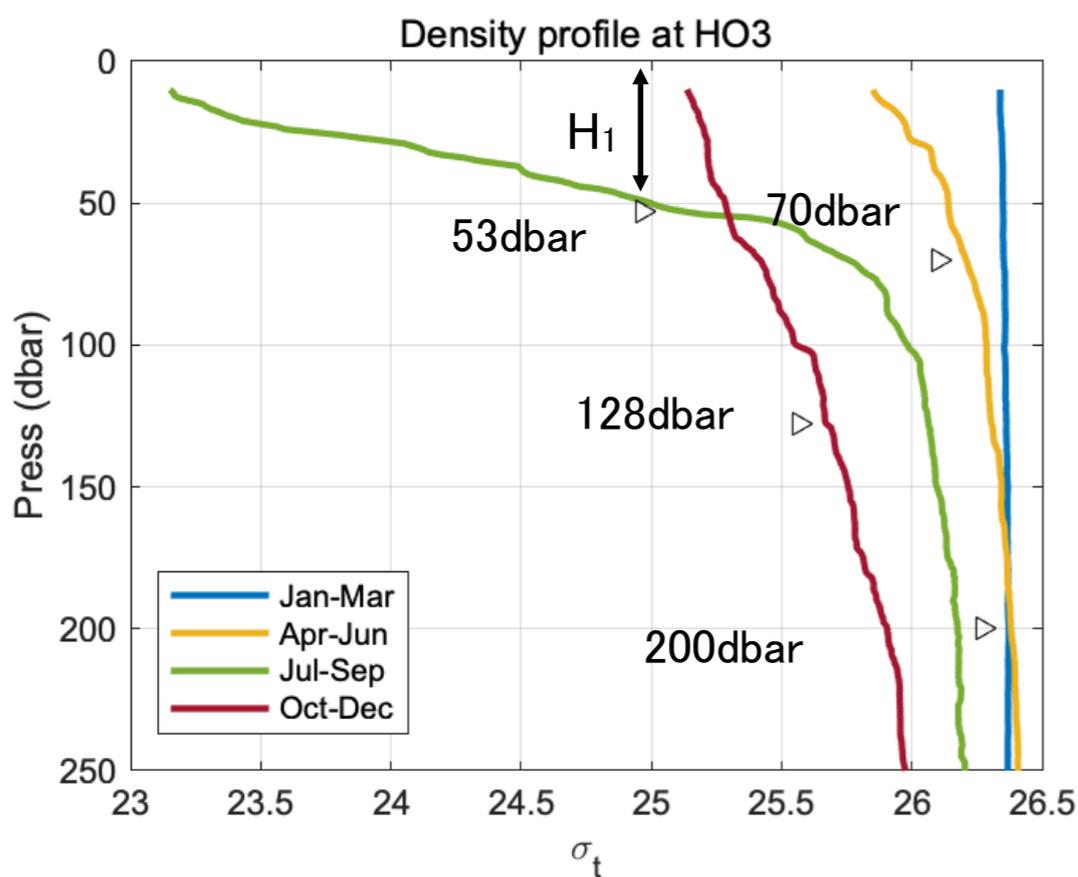
R : 内部変形半径

γ : 上層と下層の層厚比



→ HO 定線観測の CTD データから内部変形半径・層厚について推定
(流速データは未解析・今後加えて検討予定)

HO 定線における各季節の成層構造 (層厚分布)



HO3 における季節ごとの深度平均から
 表層 (10dbar) と 250 dbar の密度
 (それぞれ σ_1 , σ_2 とする) を用いて
 $\sigma = \sigma_1 + 0.125$ or
 $\sigma = \sigma_2 - (\sigma_2 - \sigma_1)/e$
 となる深い方の深度で上層層圧 H_1 を定義

→ 概ね各季節の上層下層の層厚の推定としては妥当

推定位相速度の算出

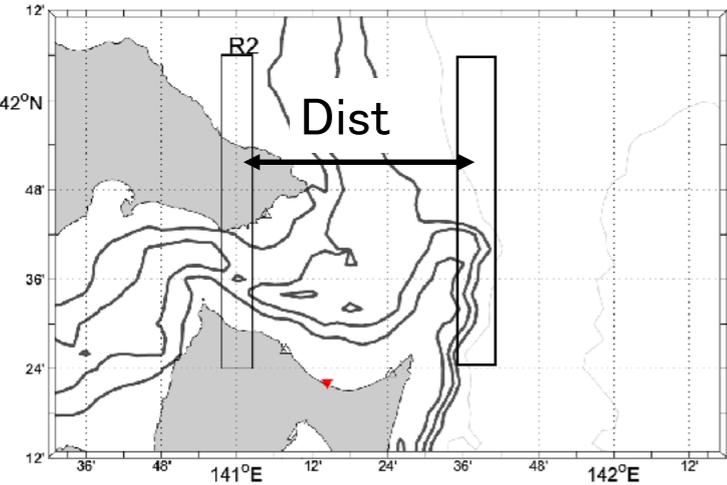
$$C_r = \frac{U_1 - U_2}{2} - \frac{(1 - \gamma)(U_1 - U_2)}{2(K^2 R^2 + \gamma + 1)}$$

U_1 : 上層流速, U_2 : 下層流速
 K : 水平波数
 R : 内部変形半径
 γ : 上層と下層の層厚比

船舶観測から 上・下層層厚, 内部変形半径を見積もり
HFR から表層流速 U_1 を推定, U_2 は想定される範囲で代入

水平(東西)波長 λ_1 は
ロスビー変形半径 R より $\lambda_1 = 3.93 R$ (Eady の最大成長波数)
で推定。 $K = 1/\lambda_1$

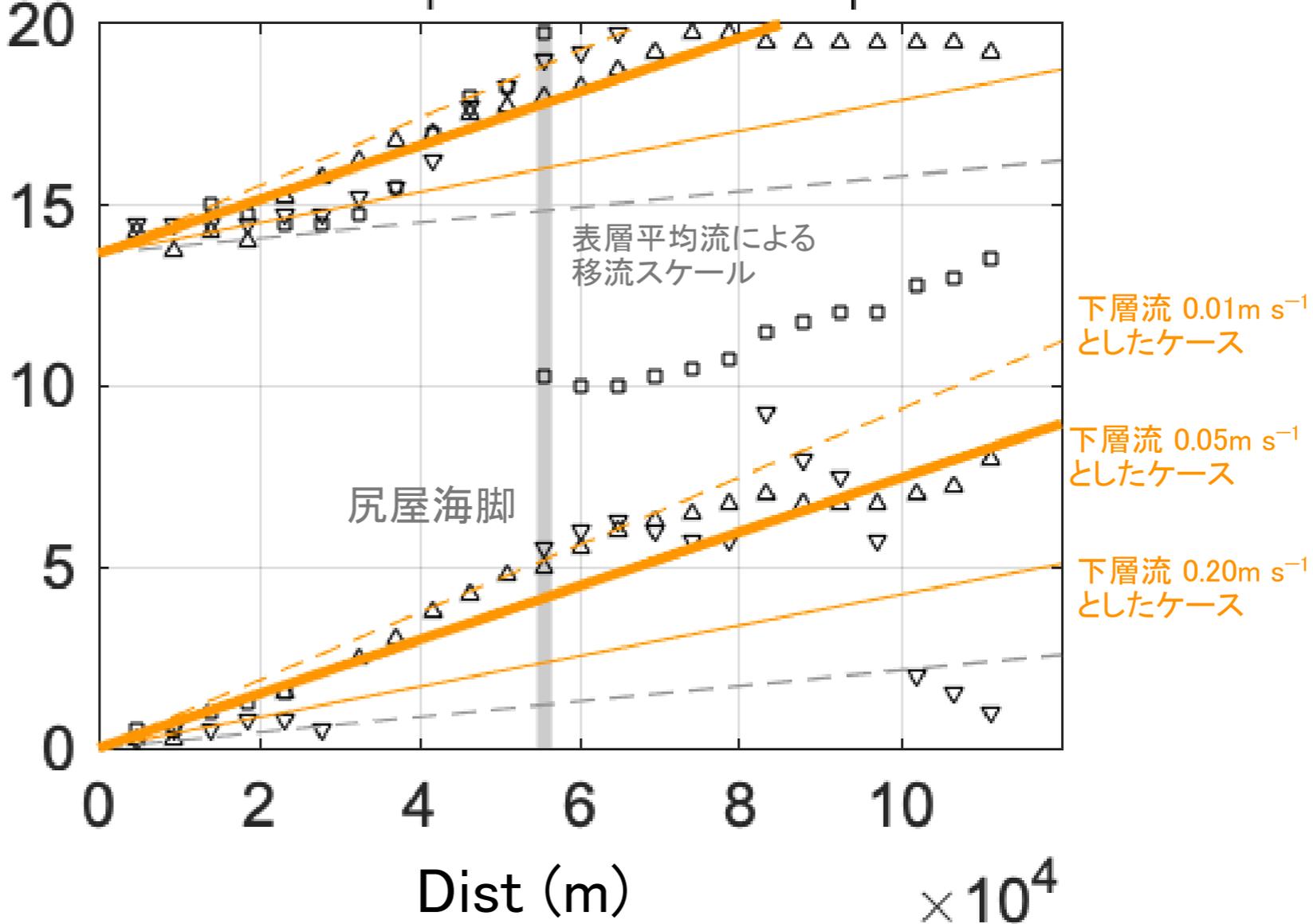
基準位置 (R2) からの距離とラグピークの分布例 (4-6月)



Lag (Days)

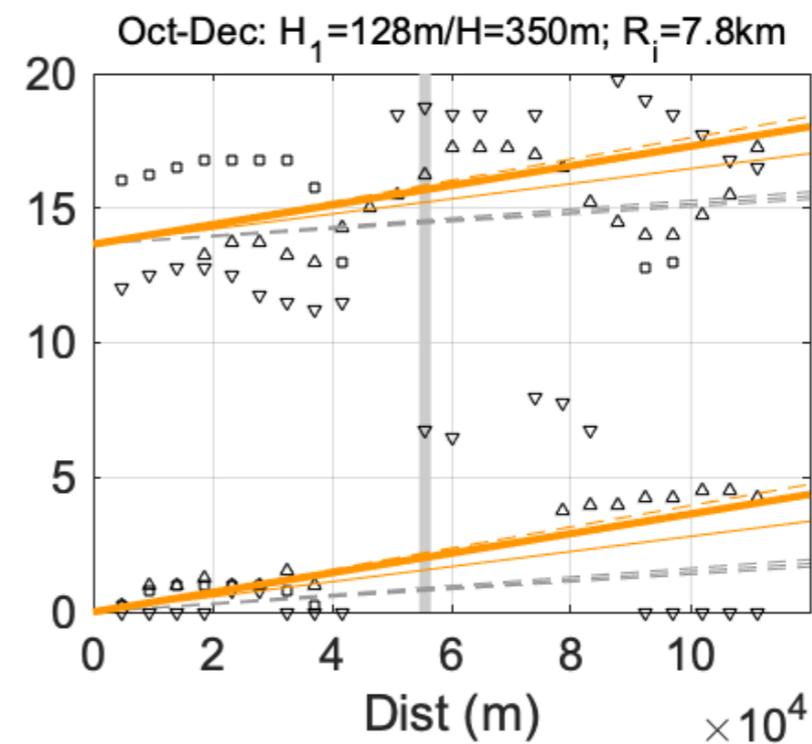
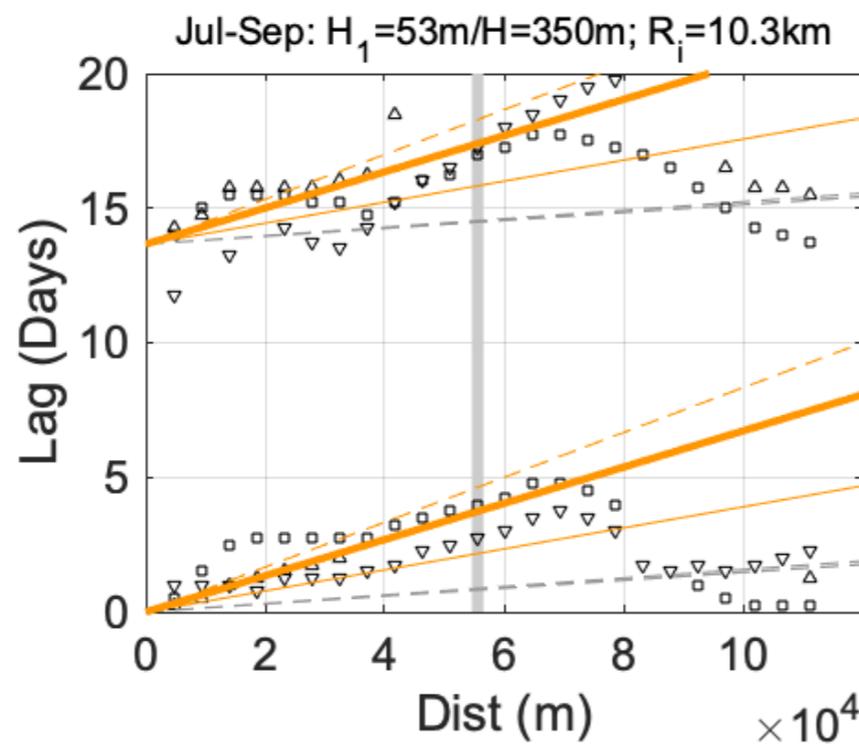
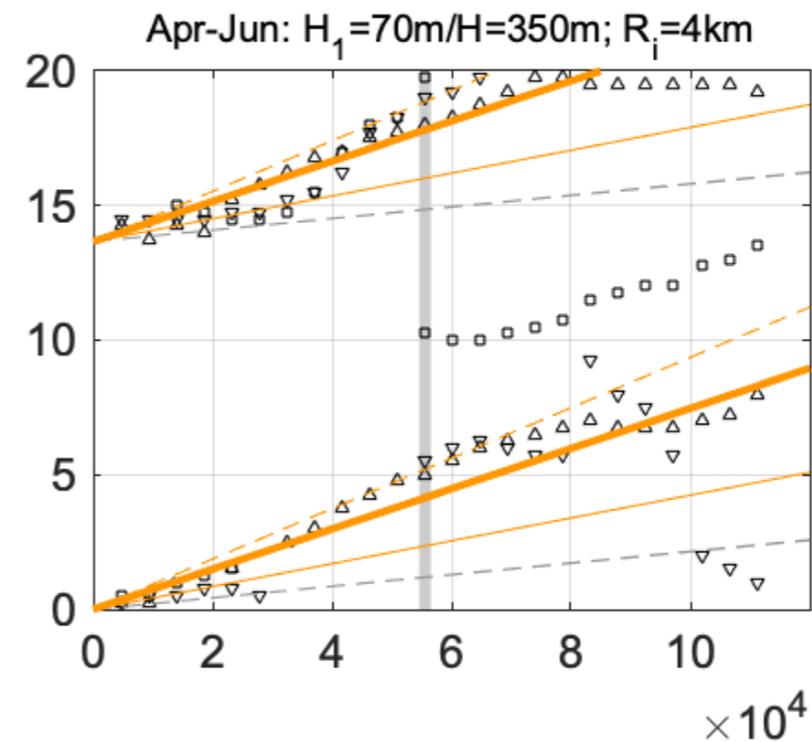
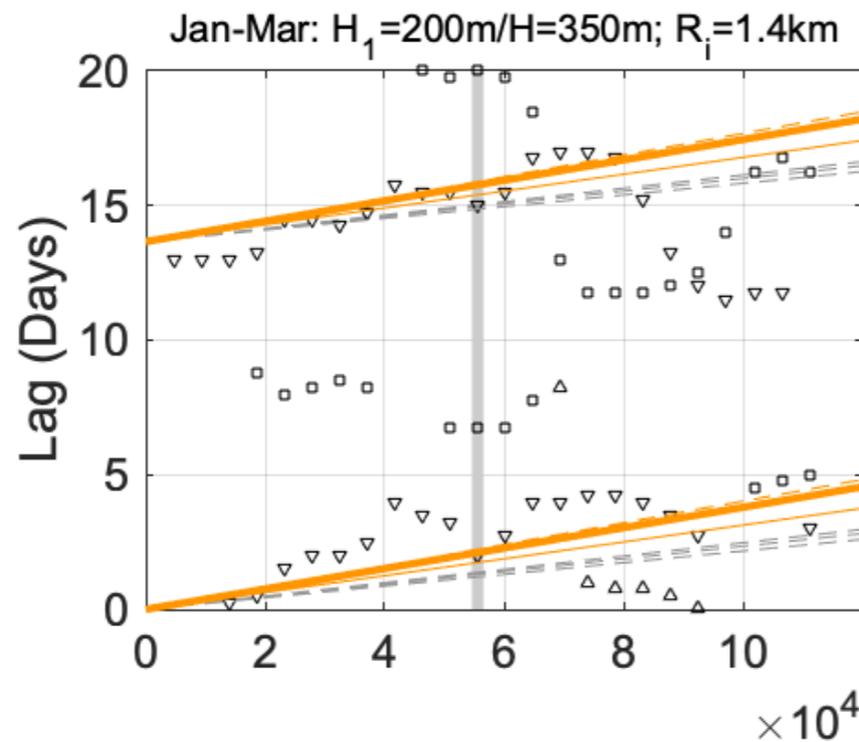
R2 からの各領域の東西距離 Dist として推定移送速度 c_r で割ってラグを算出

Apr-Jun: $H_1 = 70\text{m}/H = 350\text{m}; R_i = 4\text{km}$



ラグ相関の遅れをよく説明できる。約14日周期も比較的明瞭に検出できている
 → 下流に伝播する前線波動(傾圧不安定波動)を示唆

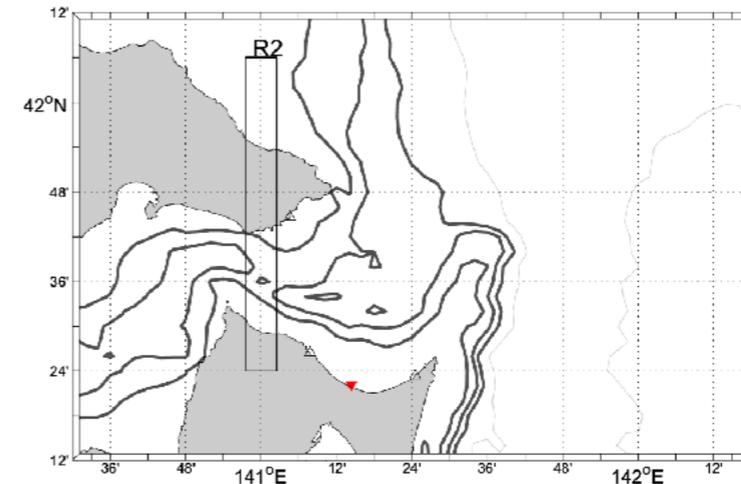
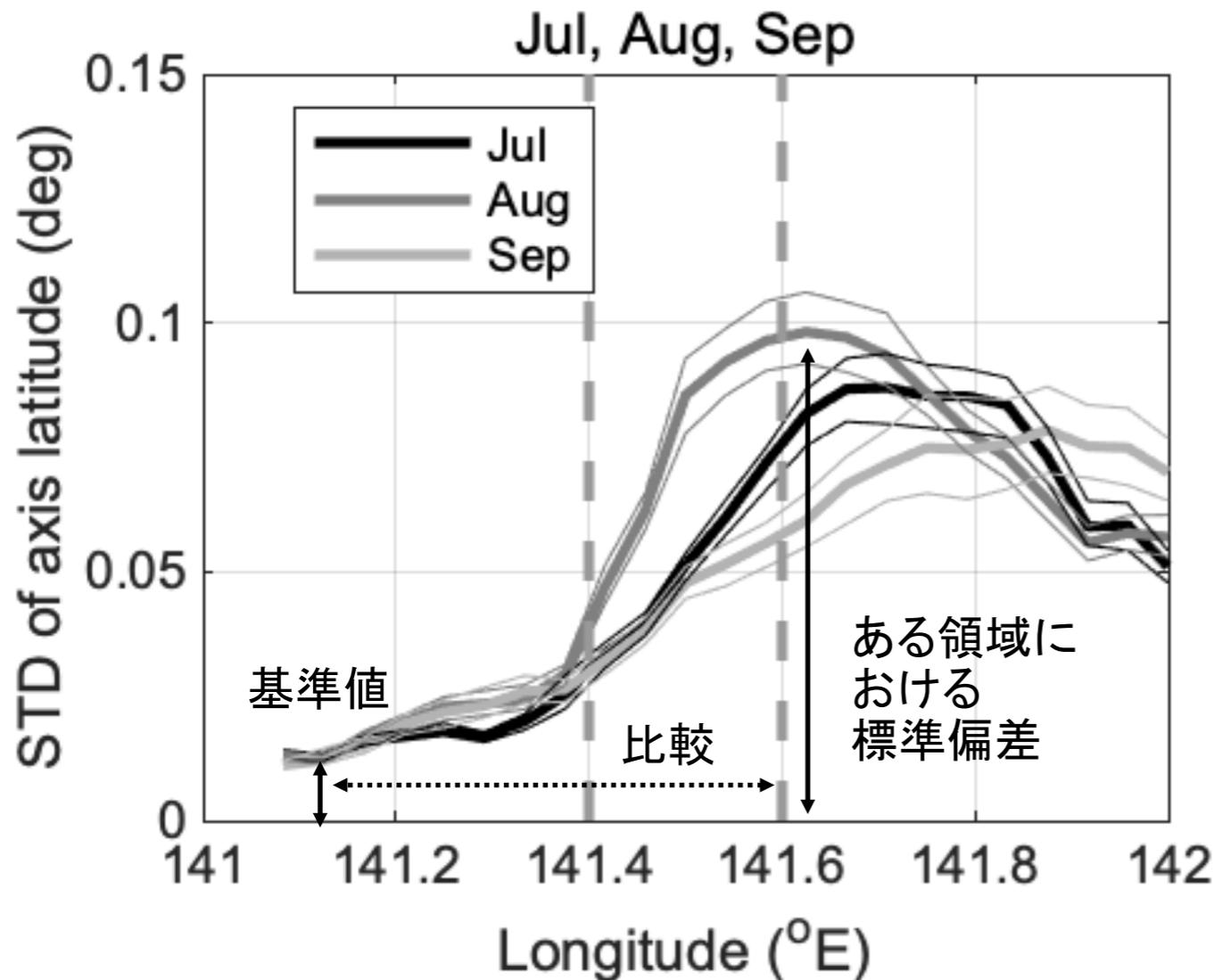
基準位置 (R2) からの距離とラグピークの分布 (各季節)



表層平均流は夏季の方が速いが、成層が強いので前線波動の伝播スピードは遅くなる
冬季よりは成層期の方がシグナルは明瞭に見える

位相伝播のラグ時間 → 2層成層系での傾圧不安定波動の下流伝播を示唆

振幅の成長率についても傾圧不安定を想定して検証 (Eady 型モデルを使用)
→ 各領域の流軸緯度の標準偏差を用いて振幅増幅率を推定



R02 における流軸標準偏差を基準として、各領域の標準偏差をこれで割ったものを振幅増幅率とする (3ヶ月毎の標準偏差を使用)

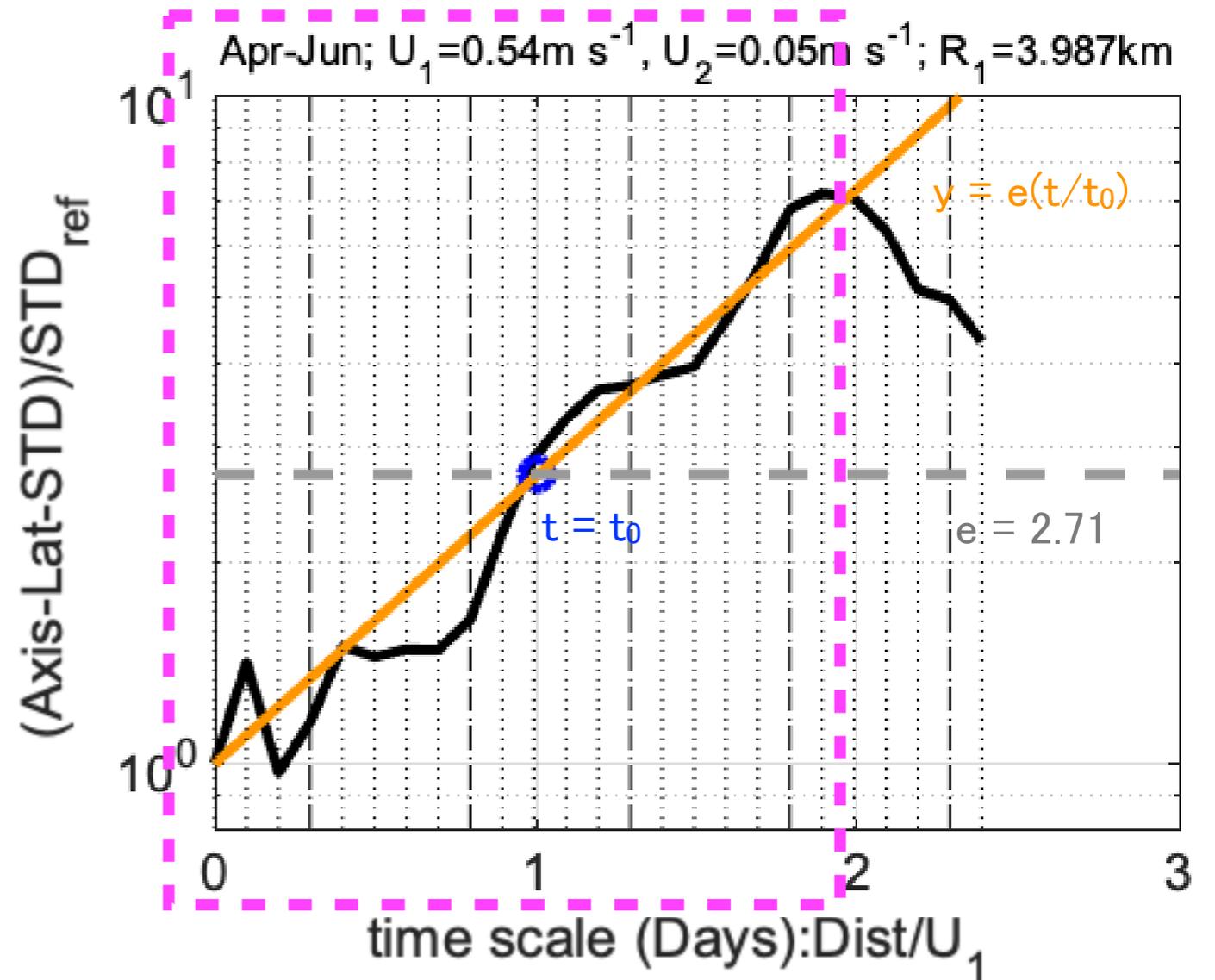
Eady 型モデルに基づく振幅増幅の検証例

Eady 型モデル:
傾圧不安定の最大成長率 ω (s^{-1}) は
 $\omega = 0.31U/R$
(U : 代表流速, R : 内部変形半径)
と表される (e.g., Gill, 1982)

故に振幅が e 倍となる
時間スケール $t_0 (= 1/\omega)$
として

各領域 (R02~R26) を粒子が
表層流 U に乗って通過する
時間スケール (横軸: Dist/U) と比較
(横軸が1 で e 倍に増幅)
 $U = \langle U_1 \rangle$ (HFR 観測流速) として計算

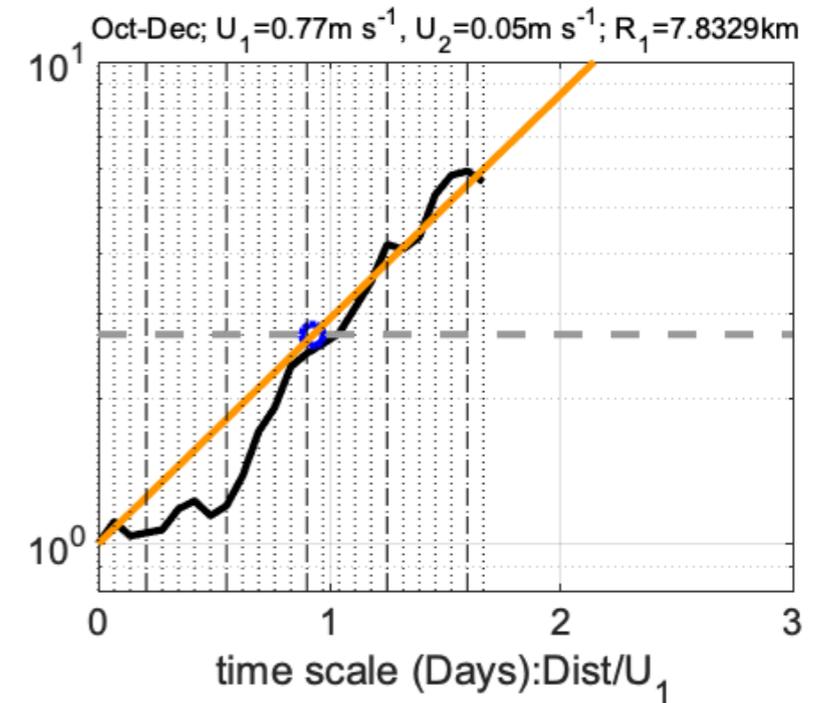
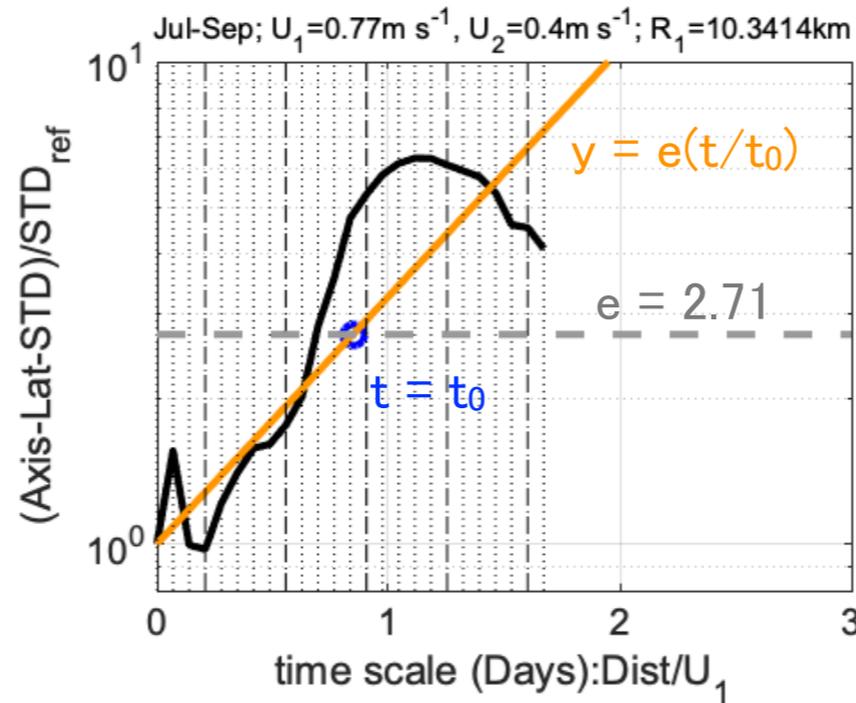
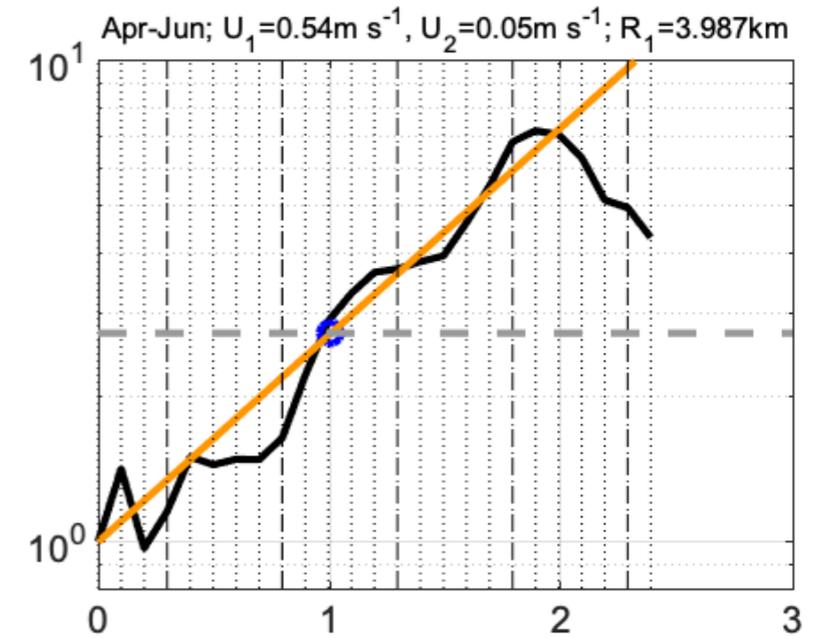
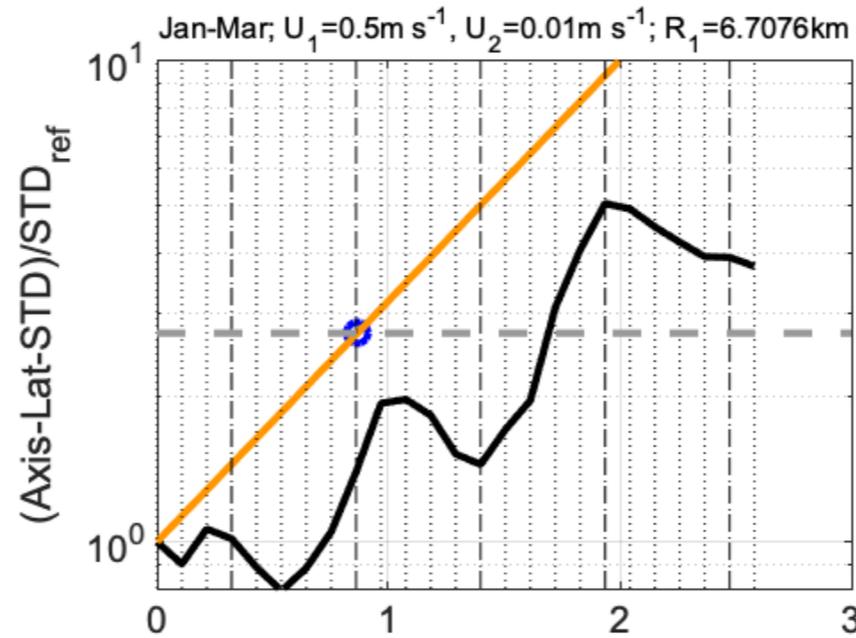
春季 (4月-6月) の例



振幅 (標準偏差) の流下方向への増大は傾圧不安定の理論的発達と比較的よく一致する
(ただし $141^\circ 48' \text{ E} = \text{R20}$ 以東の太平洋側海域を除く)

各季節の検証

冬季の変形半径のみ
 $R = (0.125g / \rho H)^{1/2} / f_{41.5}$
 で与えた ($H=350\text{m}$)
 ただしそれでもそれほど良くは
 合わない



冬季を除き、他の季節でも比較的よく一致。発達時間スケールは外洋*に比べかなり早い
 (* 外洋で $U \sim 0.1\text{m s}^{-1}$, $R \sim 30\text{km}$ とすると 11日程度)

まとめ

海洋短波レーダーによる 水平高解像度・高頻度の表面流速観測の
経年観測から津軽海峡通過流の動態を解析

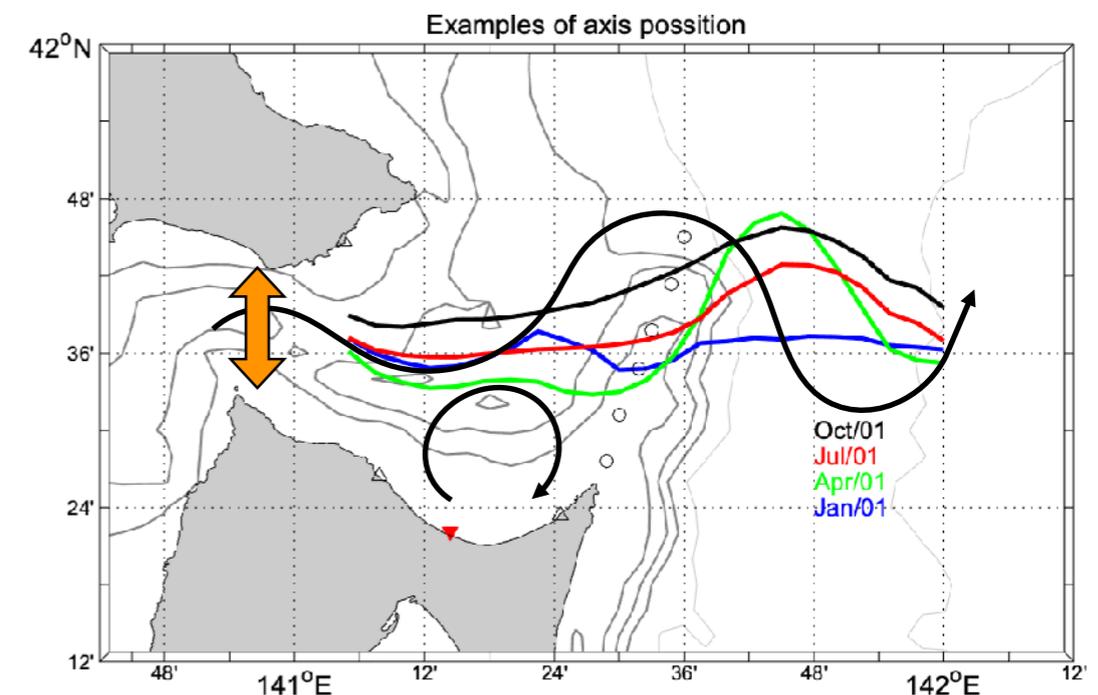
【新規知見】

- ・上流域での潮汐による振動(約13.6日周期)が下流に伝播する過程で傾圧不安定により発達、強流域を南北に移動させる
- ・太平洋側に抜けるまで夏季でおよそ 10日程度

【示唆・インパクト等】

- ・擾乱発達に伴う南北水塊交換・鉛直混合の強化を示唆 → 高速酸性化への影響
- ・夏季の下北半島北側の渦流発達の原因？
- ・強流域変動や渦発達の予報に寄与

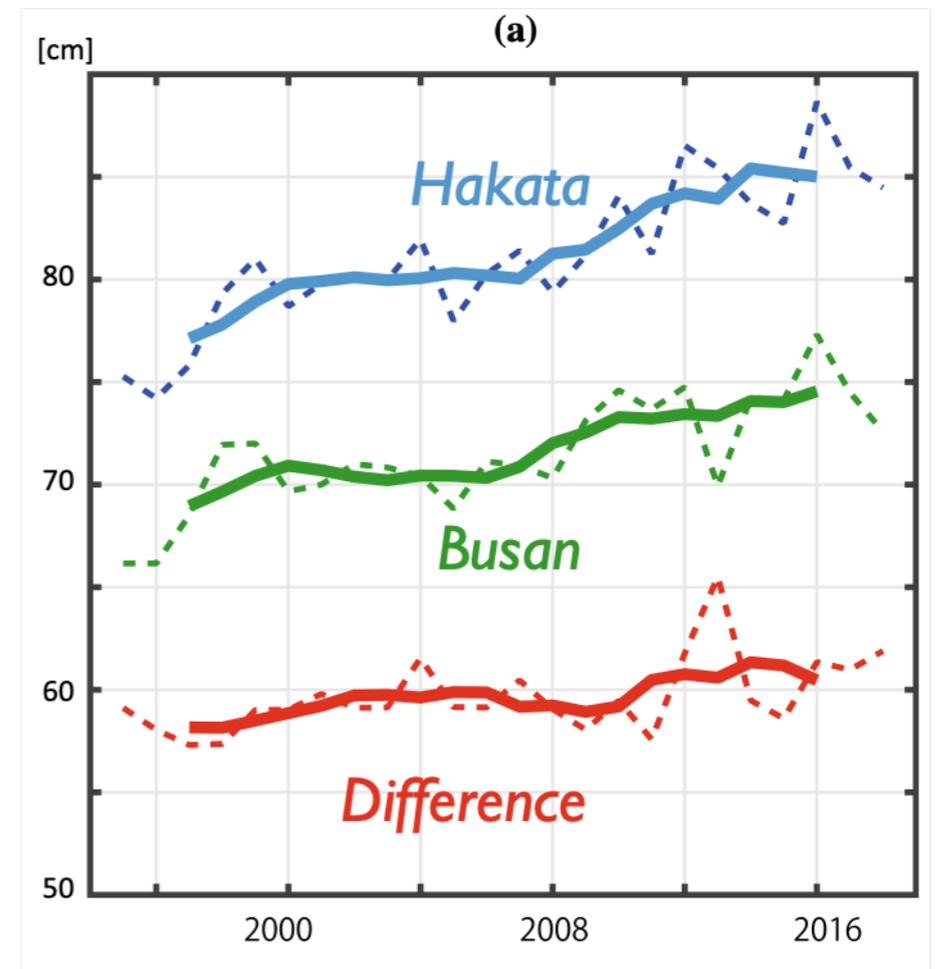
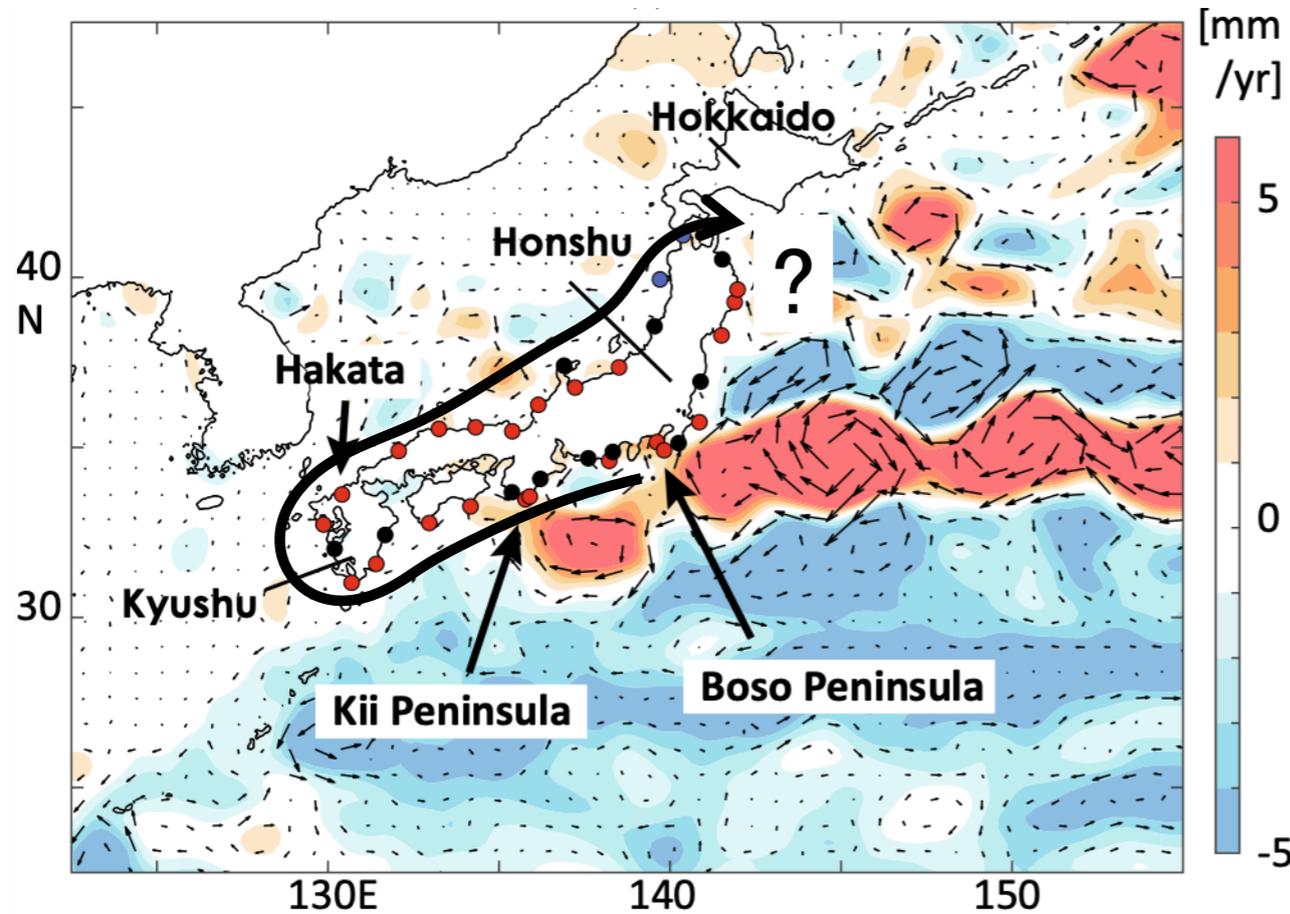
【今後の課題】係留系による内部構造の
時系列観測、尻屋海脚を通過した後の挙動



そのほかの話題提供

Kida et al. (2020): 日本海通過流の長期変化は黒潮流軸位置でコントロール

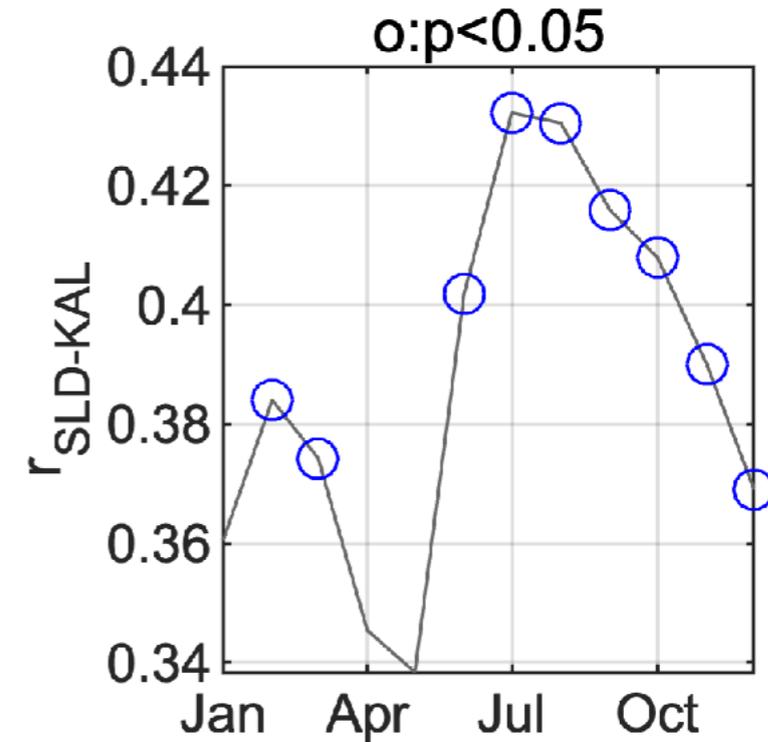
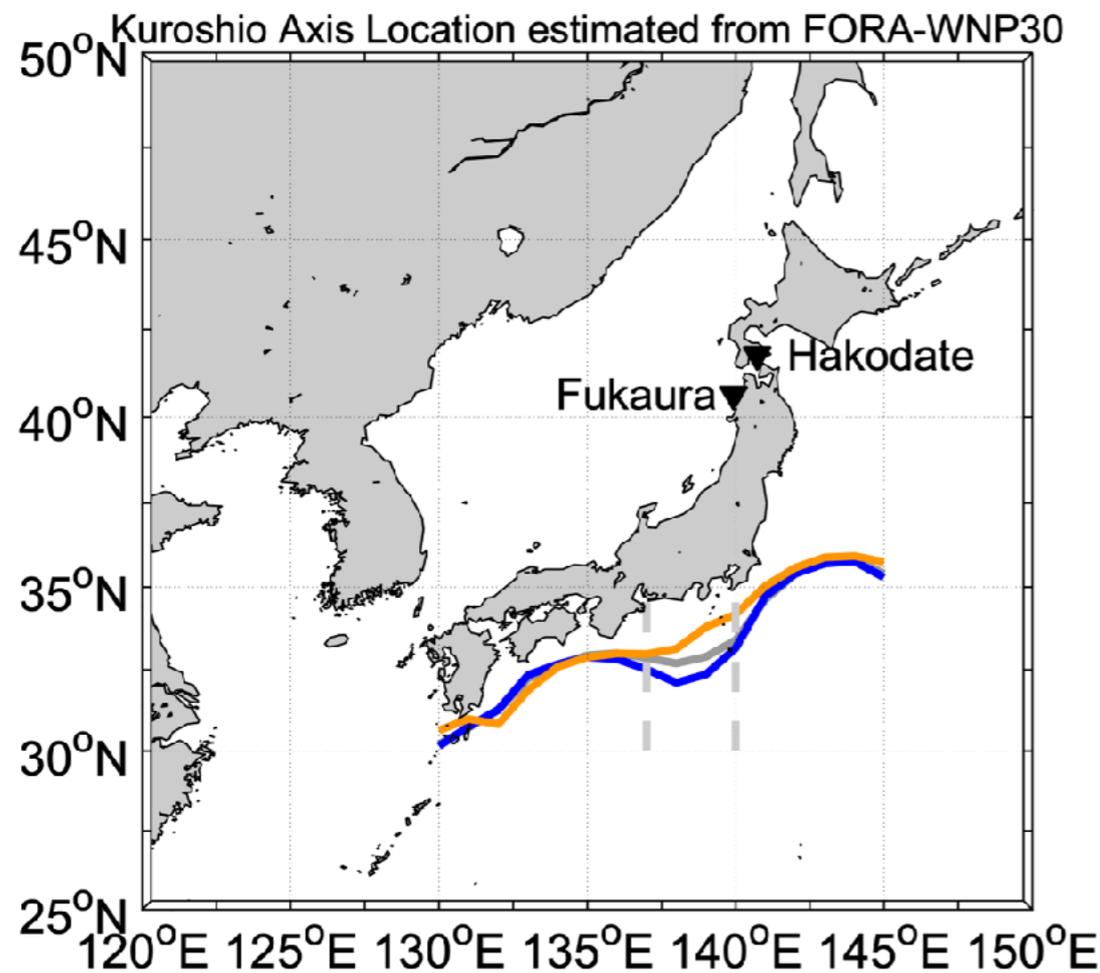
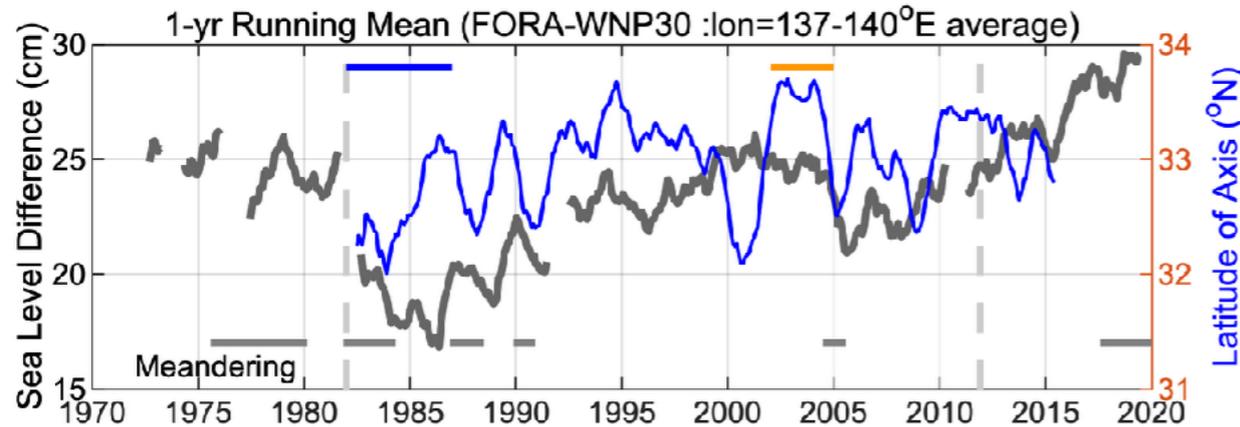
海面高度トレンド (色) と各検潮所における相関 (赤が正、青が負)



宗谷暖流の流量の長期変化はむしろ減少傾向 (江淵さん、海洋学会)
→ 津軽暖流長期変動精査の重要性

Wakita et al. (submitted), 永野私信 → 津軽暖流流量は増加傾向

津軽暖流の長期変動は黒潮と同期？

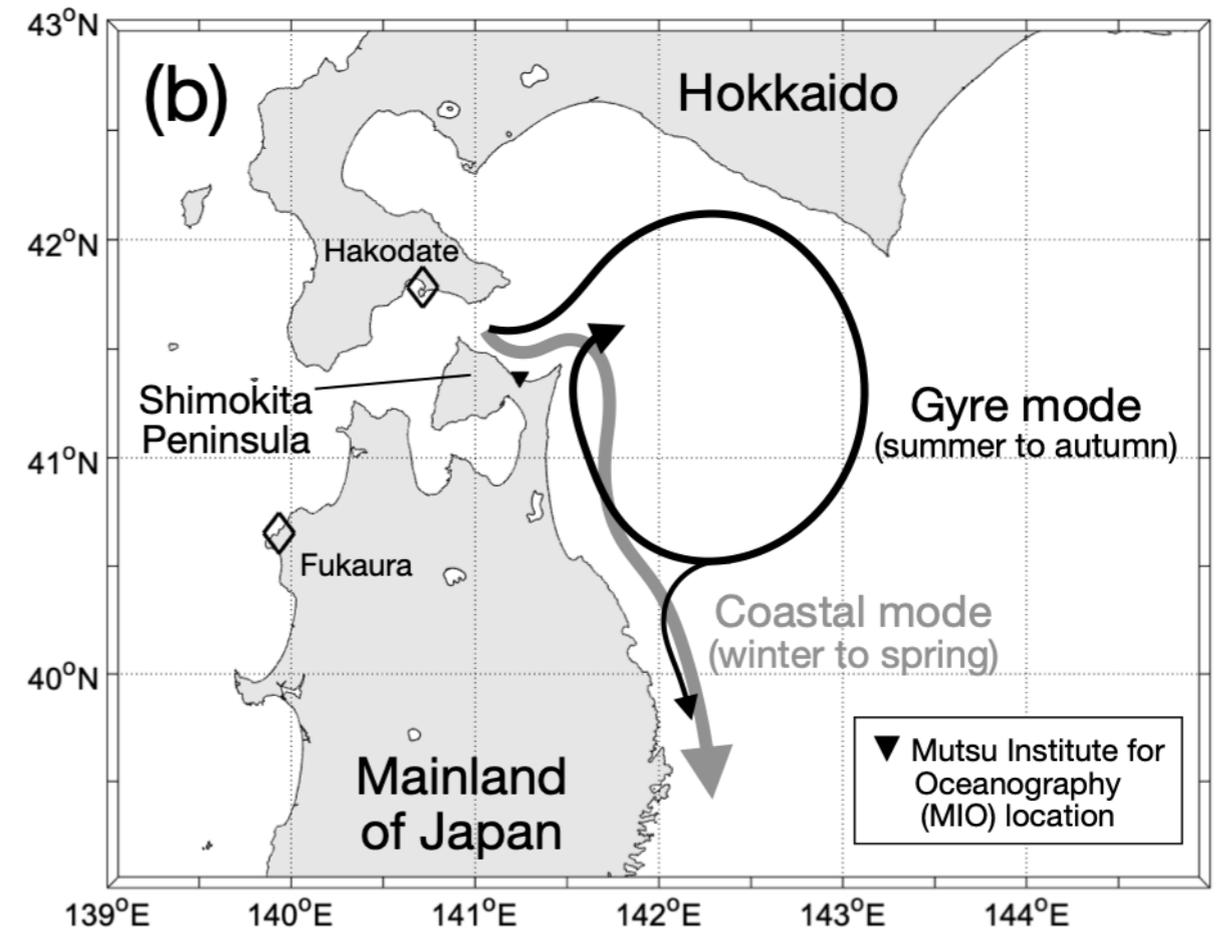
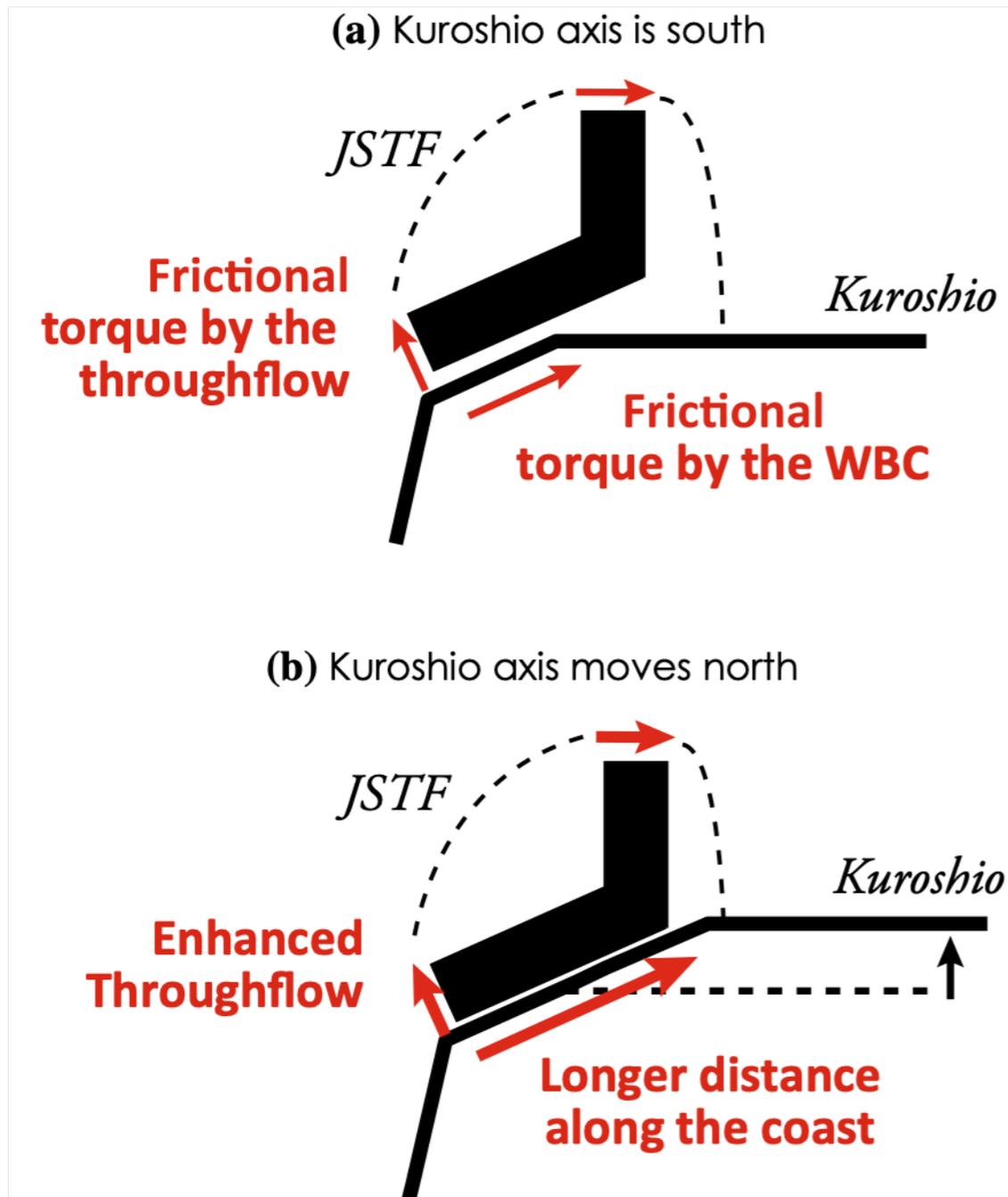


深浦-函館の水位差は
FORA-WNP30 から見積もった
137-140° E の黒潮流軸変動に対して
正相関傾向
海上保安庁の過去データ (1967-2012年)* でも確認
* ただし近年 (2010年代) はこの経度では合わない
房総半島よりも東側の変動と対応？

伊豆～遠州灘での蛇行の
津軽暖流流量への影響を示唆

蛇行は経路積分に影響？

Kida et al. (2020)



津軽暖流のモード変化は
積分に対してどのような影響？

長期変動に対する
亜寒帯含む風の影響は？

→ 今後の検討課題

$$0 = \oint_C (K_H \nabla \cdot \nabla u) dl,$$

ご清聴ありがとうございました