

対馬海峡西水道の 短周期変動解析

九大総理工
九州大学応用力学研究所
九州大学応用力学研究所

松尾俊弥
上原克人
広瀬直毅

1. 研究背景

1. 研究背景

西水道

<長期空間構造>

強流域は一年を通して対馬沿岸(西水道東部)の最深部に見られる。

<短期空間構造>

10月～3月に渦が発生しているが詳細な構造は明らかになっていない。



<研究目的>

HFレーダーと領域数値モデルDREAMS_Dを用いて西水道渦の時空間構造と発生メカニズムを解明する。

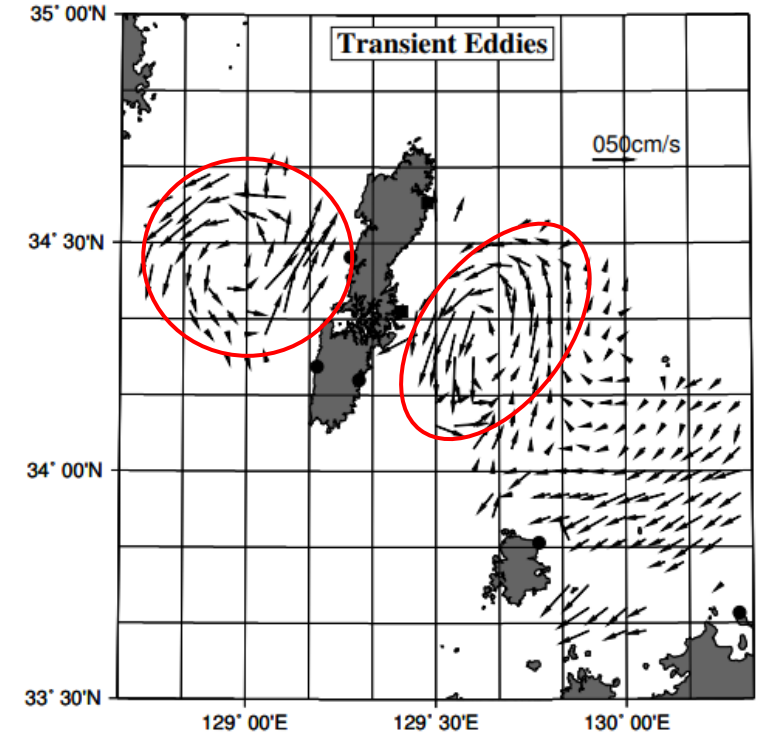
東水道

<長期空間構造>

夏～秋: 中央部(最深部)で北東流。その両側で南西向きの反流が発生。

<短期空間構造>

6月～11月に後流渦が発生。



東・西水道で観測された渦

西水道渦: 2004年3月14日22時
東水道渦: 2003年11月4日12時

HFレーダー解析期間
2002/2 ~ 2004/3 (2年間)

2. 解析データについて

西水道HFレーダーの種類と稼働期間

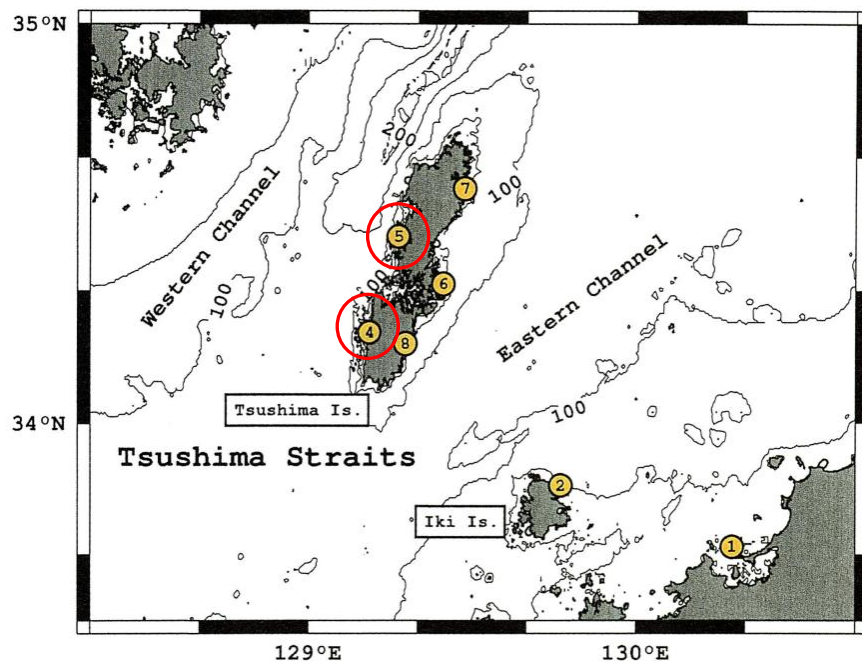
No	Name	Site Position	Radar Type	Observation Period
4	椎根	129.1863°E, 34.22908°N	Codar	2002/01/12 - 2018/10/03
5	青海	129.27910°E, 34.47308°N	Codar	2002/01/13 - 2017/10/04

2018年10月に観測終了

2.1 HFレーダーについて

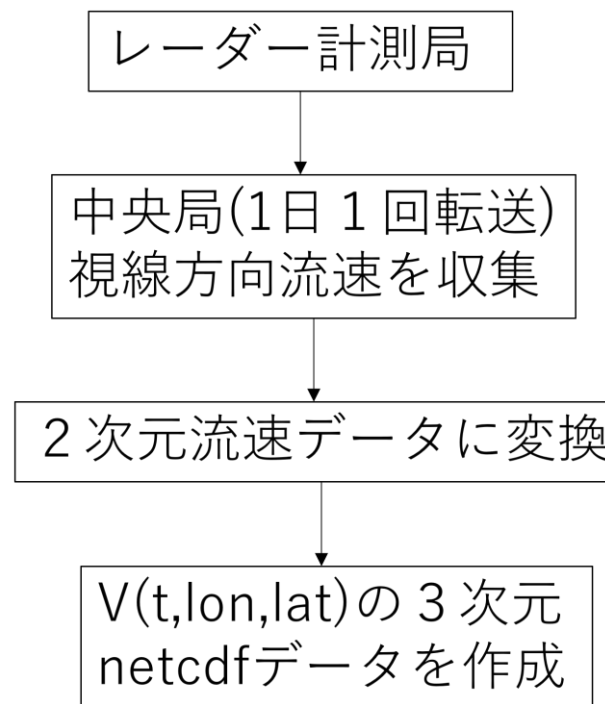
HFレーダーの解像度

- ・空間解像度: $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$
- ・時間解像度: 1h
- ・西水道観測範囲: $128.675^{\circ}E \sim 128.675^{\circ}E$
 $34.225^{\circ}N \sim 34.675^{\circ}N$
- ・解析期間: 2004年～2017年



海洋レーダーの設置場所(奥野ら,2005)

データ処理の流れ

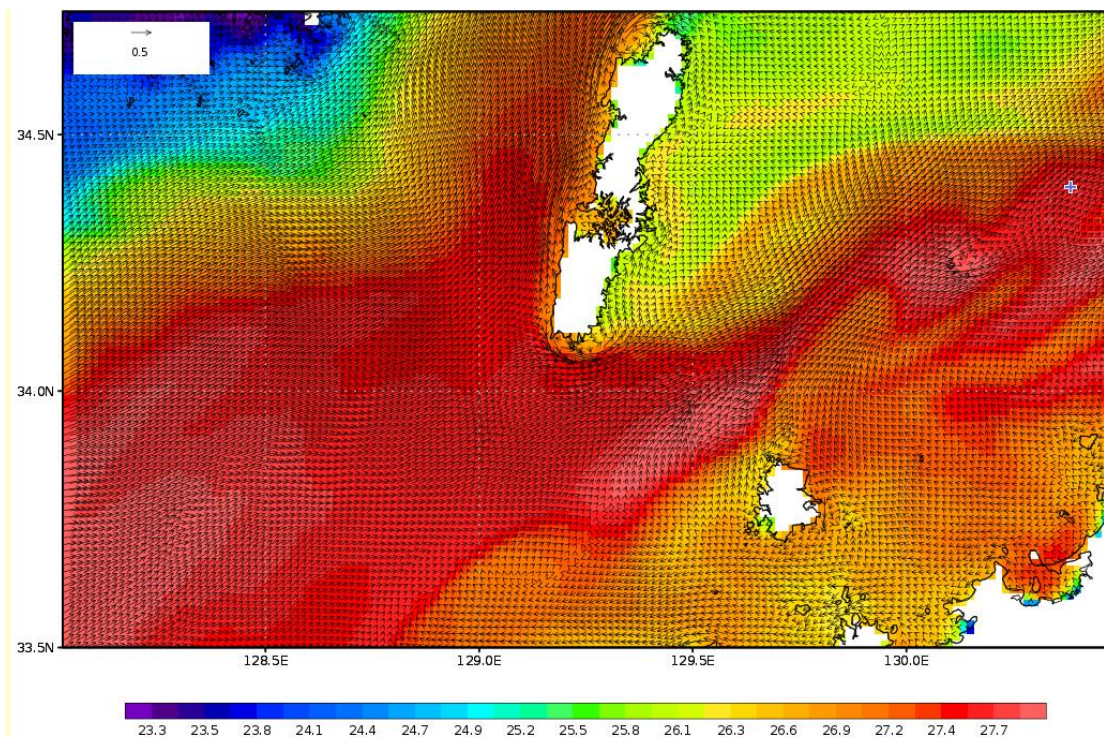


2.2 DREAMS Dについて

DREAMS_Dとは・・・

九州大学応用力学研究所が開発・運営している対馬海峡周辺の海況予報モデルであり、現実的な海況予報結果を得るために観測データをモデルに同化し、より精度の高い予報結果が得られる。(Hirose et al.,2021)

水平グリッド間隔: $1/60^{\circ} \times 1/75^{\circ}$ (東西×南北、約1.5kmメッシュ) 時間間隔: 1h



解析に使用した領域の水温場と流れ場

使用モデルの詳細

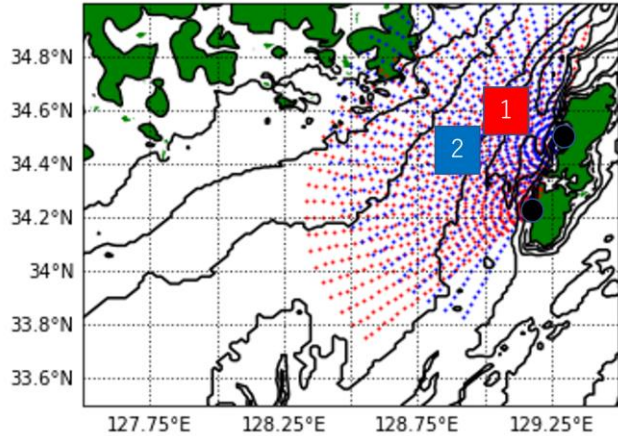
・解析範囲: $128.025^{\circ}E \sim 130.5^{\circ}E$
 $33.5^{\circ}N \sim 34.74^{\circ}N$

・使用した物理量: 流速 (u,v成分)
 水温
 塩分
 水深

3. DREAMS_DとHFリーダーの比較

3.DREAMS DとHFレーダーの比較

DREAMS_DとHFレーダー両方とも季節・場所問わず概ね一致



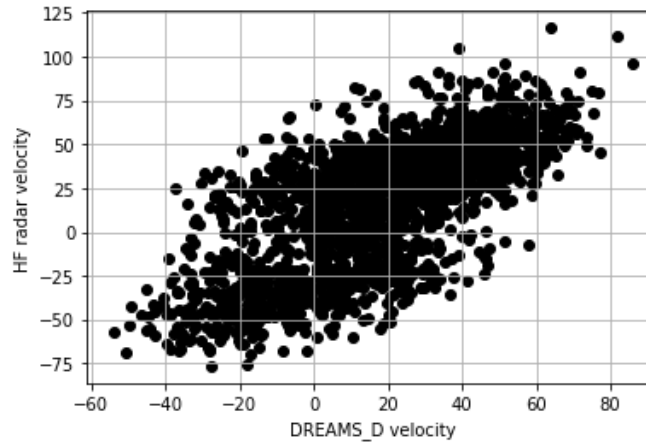
HFLレーダー
→表層1.72m

DREAMS_D
→表層1.0m

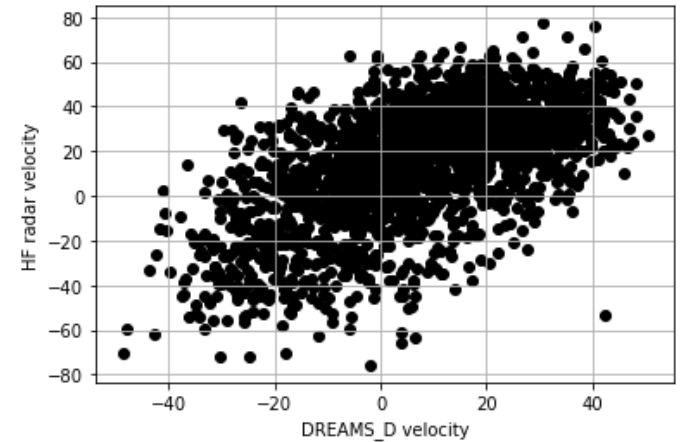
DREAMS_DとHFレーダーを比較した2エリア

2011年季節毎の表層流速U,V成分の相関

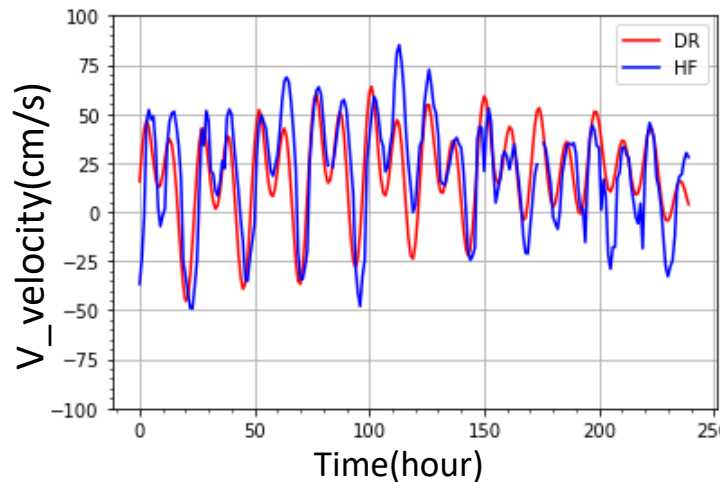
西水道 2011 R		U	V
Area1	spring	0.5997	0.705
	summer	0.6586	0.7505
	autumn	0.7249	0.7104
	winter	0.6642	0.7455
西水道 2011 R		U	V
Area2	spring	0.6968	0.5806
	summer	0.701	0.6797
	autumn	0.7176	0.6282
	winter	0.7219	0.7161



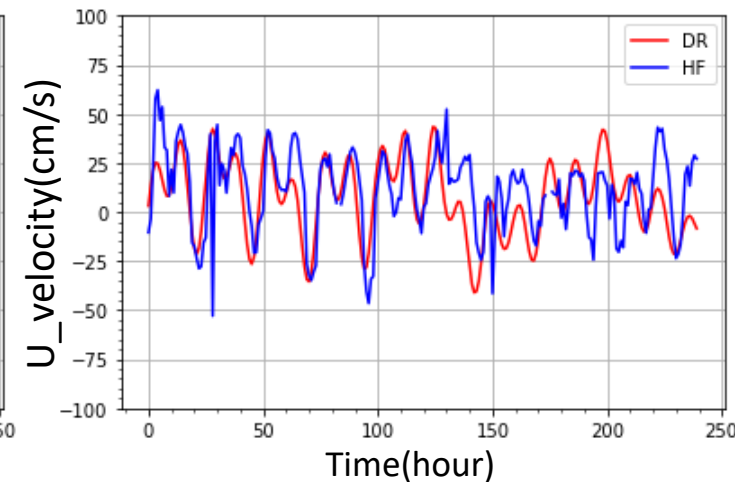
Area1でのV成分相関 (spring)



Area1でのU成分相関 (spring)



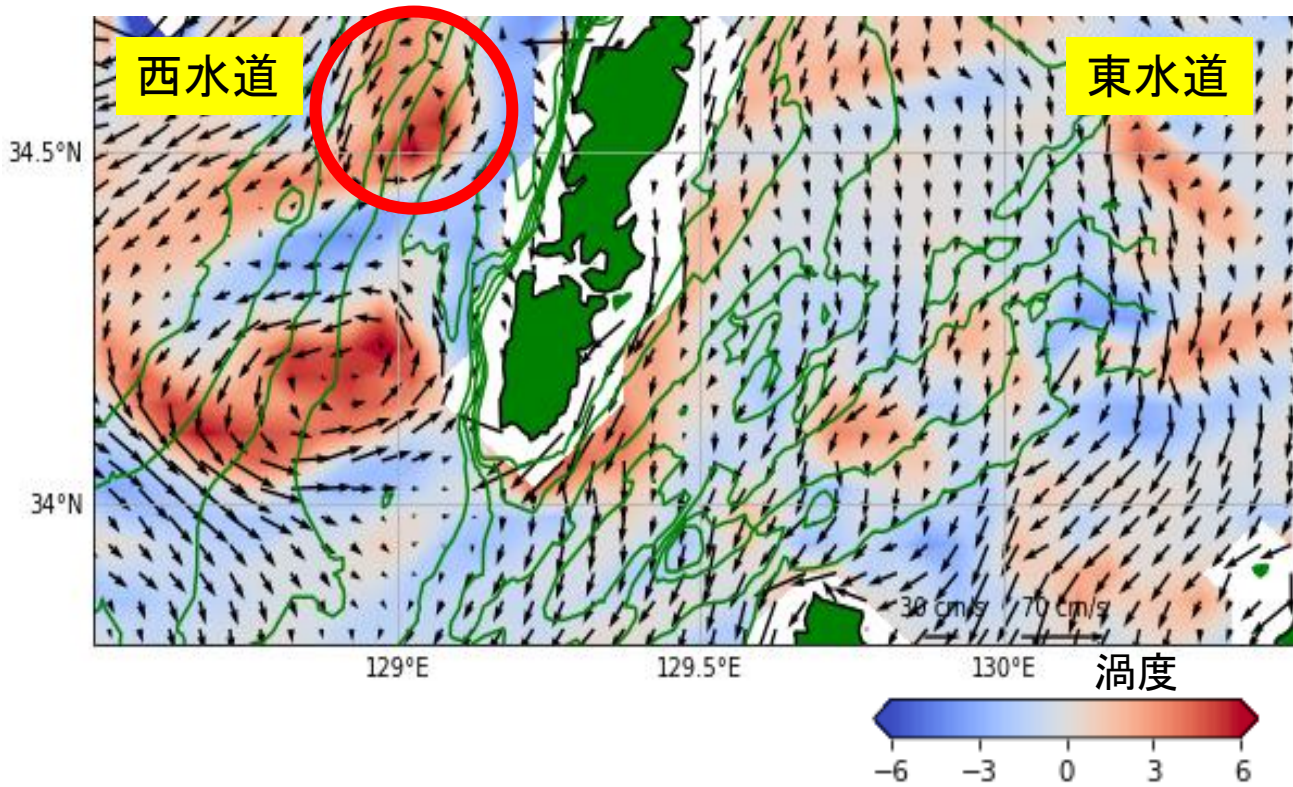
Area1でのV成分流速の一部



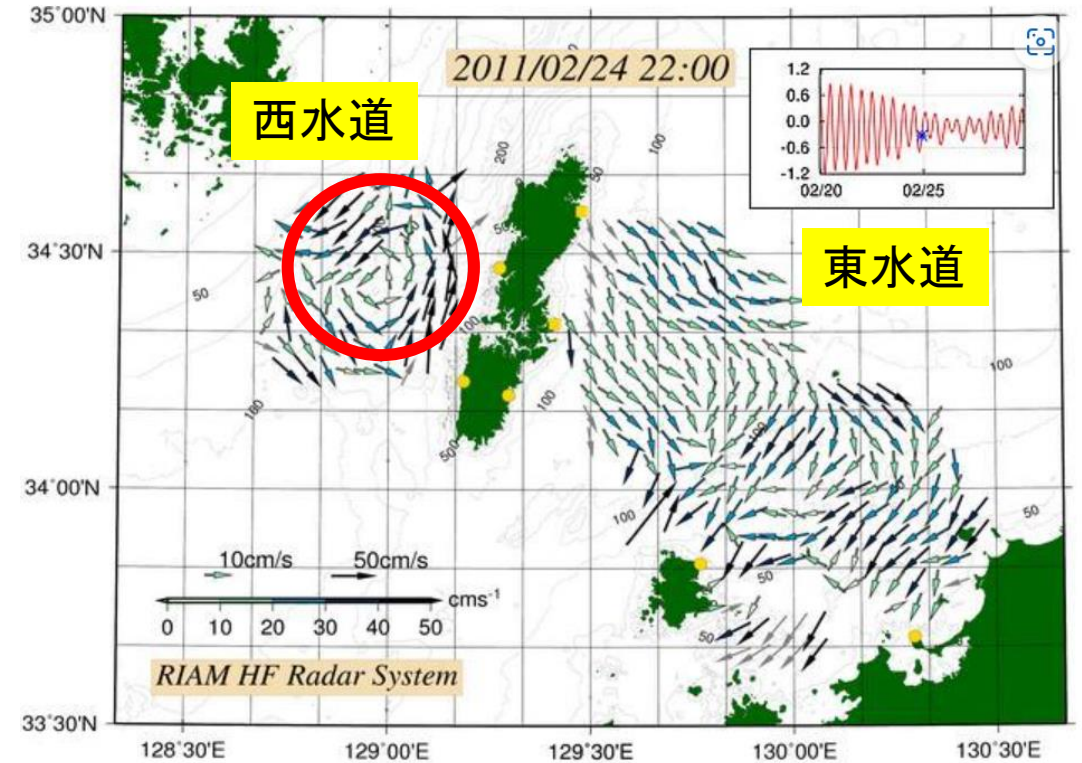
Area1でのU成分流速の一部

3. DREAMS DとHFレーダーの比較

DREAMS_D、HFレーダーともに西水道において短期的な反時計回りの渦の発生が確認される。
→HFレーダーは西水道の観測範囲が小さく、局所的なデータの欠損があるためDREAMS_Dを用いる。



DREAMS_Dによる2011年2月24日22時の流況 $1/s$



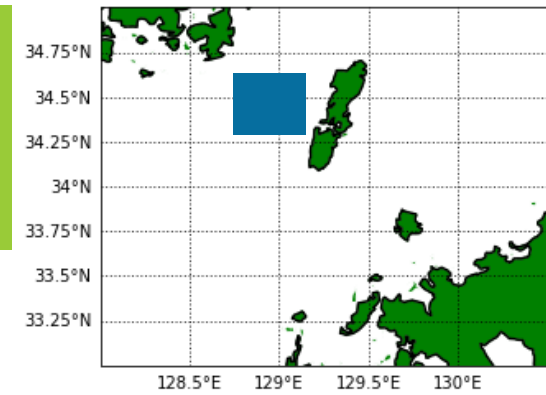
HFレーダーによる2011年2月24日22時の流況

4.渦の詳細

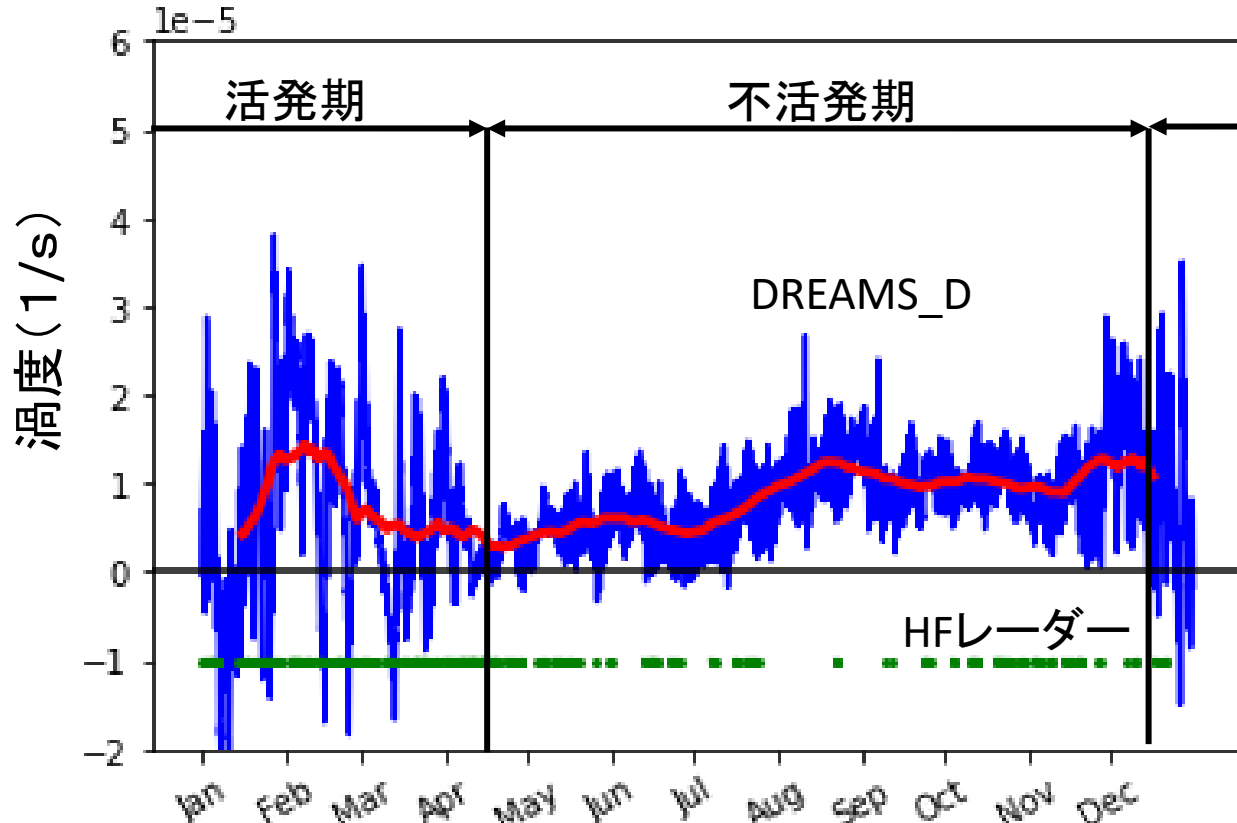
4.1西水道渦の短周期変動

○渦の時間構造

- DREAMS_Dから得られた渦度の時系列
- DREAMS_Dから得られた渦度の30日移動平均値
- HFLレーダーで観測された渦発生時期



渦度の領域平均を算出したエリア



2010年の西水道渦発生領域におけるDREAMS_Dから得られた平均渦度の時系列

渦度30日移動平均(赤)から渦度時系列値(青)

平均流による渦度の偏差を短周期変動(渦)の強さの指標とする。

(吉川ら,2005)

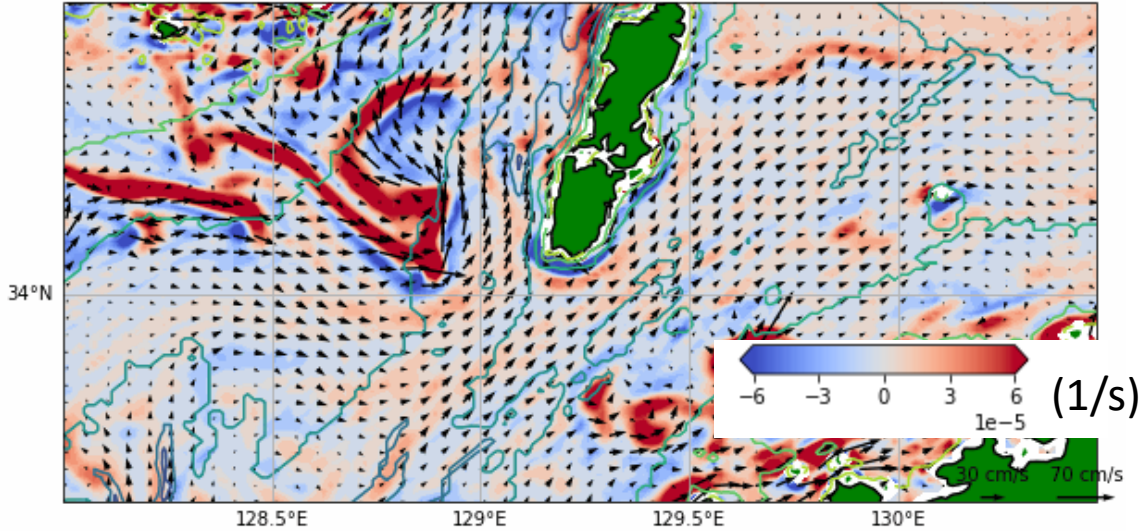


<渦発生時期>

12月中旬～4月中旬にかけて西水道で渦が発生

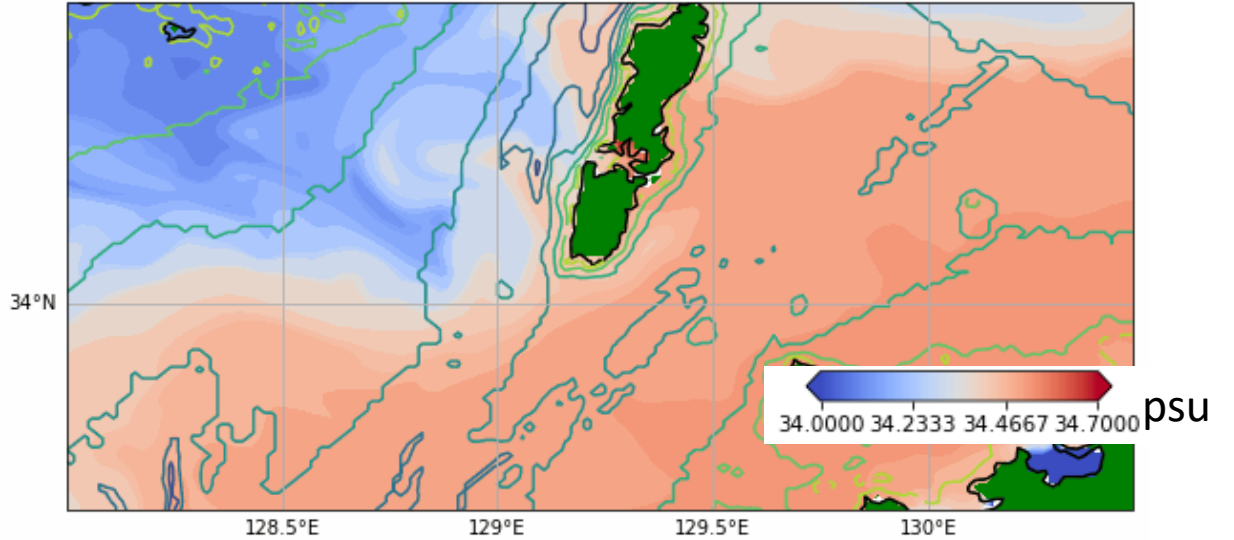
4.2 冬季における西水道渦の詳細構造

2011-02-01 00:00:00



2011年2月の流況(カラーは渦度)

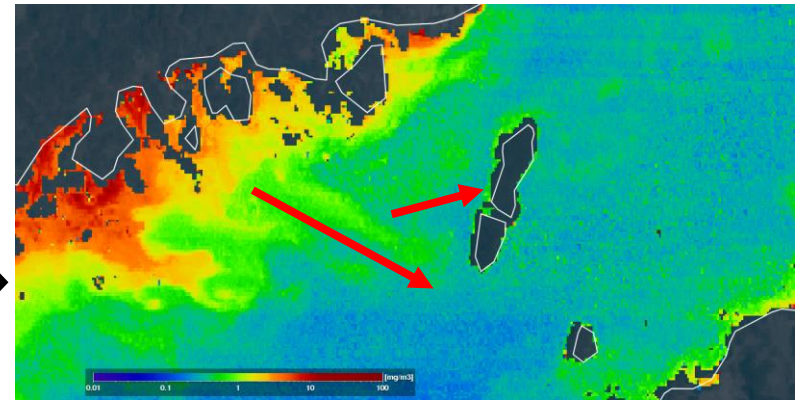
2011-02-01 00:00:00



2011年2月の塩分

朝鮮半島側から低塩分水が西水道に張り出す
→フロントでフィラメント状の渦に発達

衛星クロロフィル濃度aのデータからも朝鮮半島からの流入が見られる

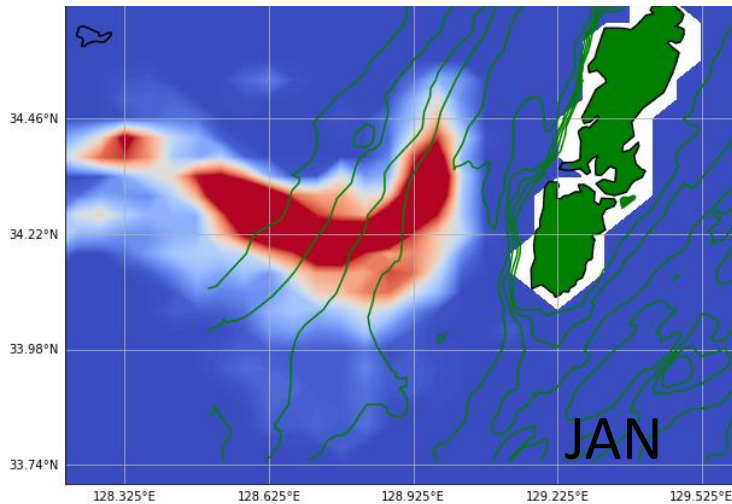


2019年2月のクロロフィルa濃度スナップショット

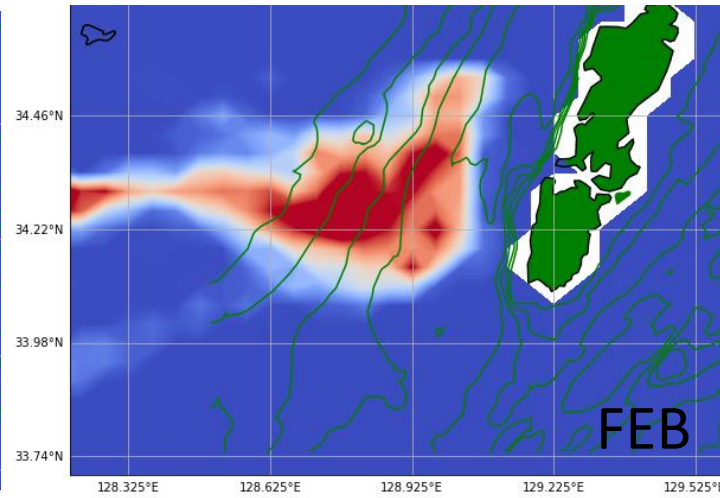
4.3 渦の発生海域

閾値 (5.0×10^{-5}) 以上の渦度を渦発生と定義する

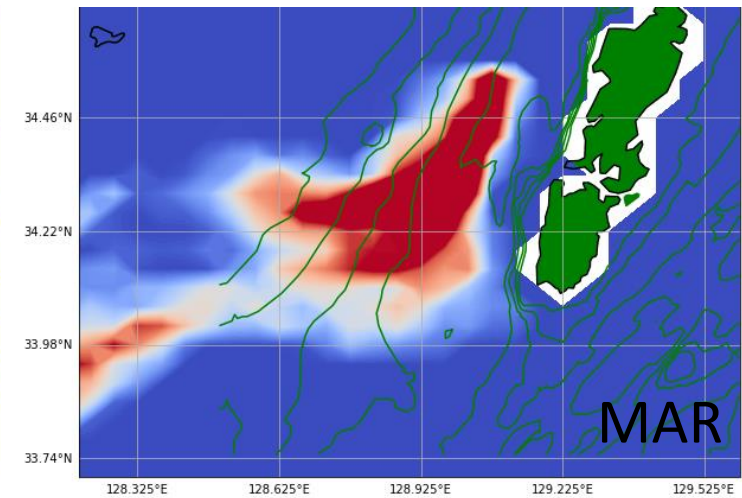
緑線は90mから10m毎の等深線



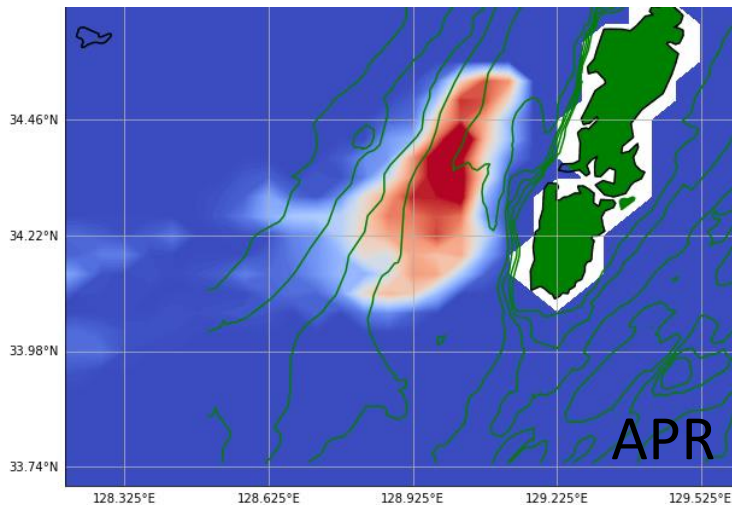
2011年1月の発生頻度



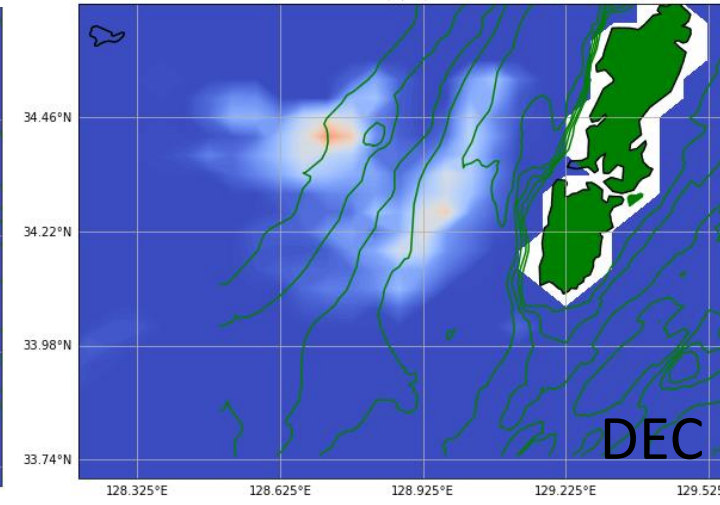
2011年2月の発生頻度



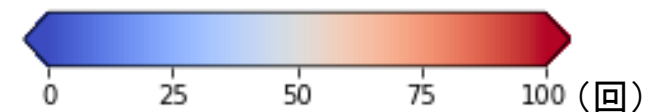
2011年3月の発生頻度



2011年4月の発生頻度



2011年12月の発生頻度



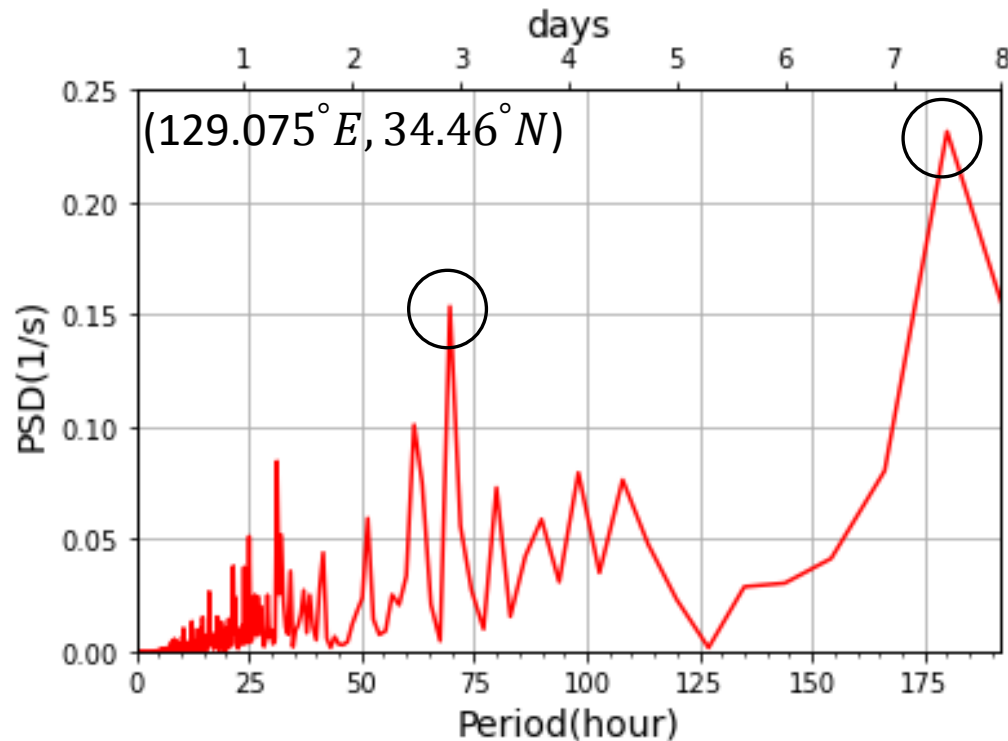
・西水道南西部～北東部の地形が急になっている地点で渦が頻繁に発生している
→地形が急になる地点が渦の軸となっている

4.4渦の周期

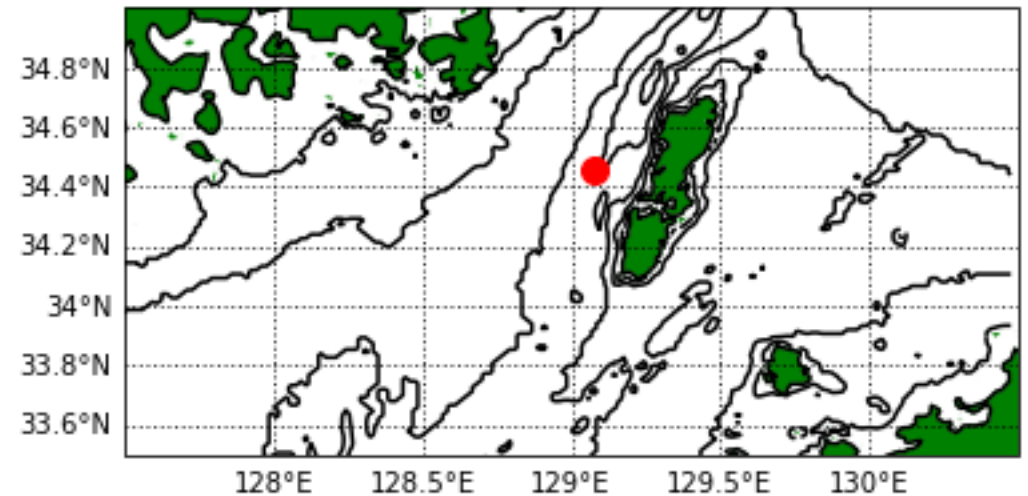
渦の周期を調査するために渦の通過点($129.075^{\circ}E, 34.46^{\circ}N$)の渦度に対しFFT解析を行った。



約3日周期成分もあるが約7.5日周期成分が卓越



2月の渦度のパワースペクトル密度

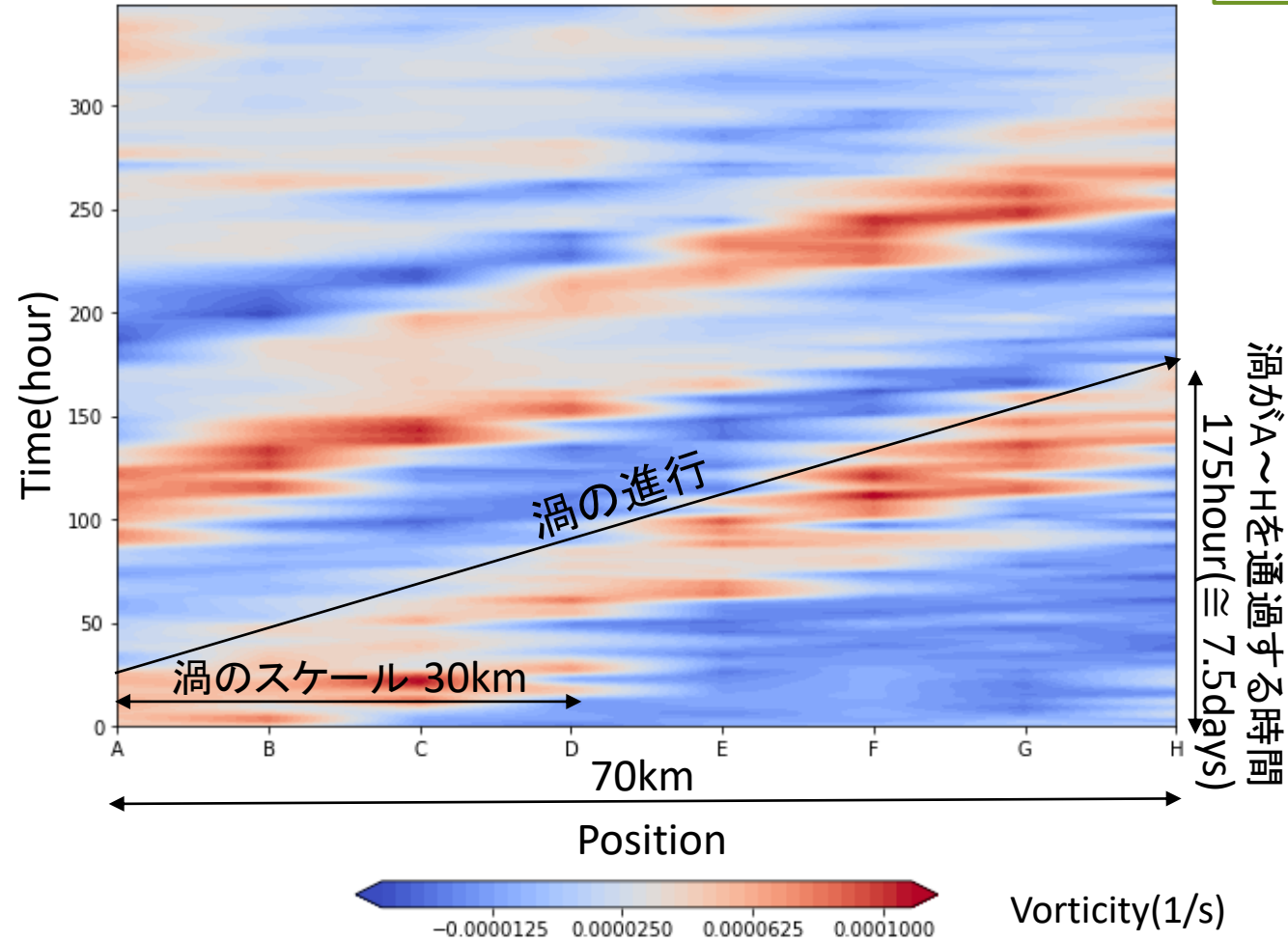


計算した地点($129.075^{\circ}E, 34.46^{\circ}N$)

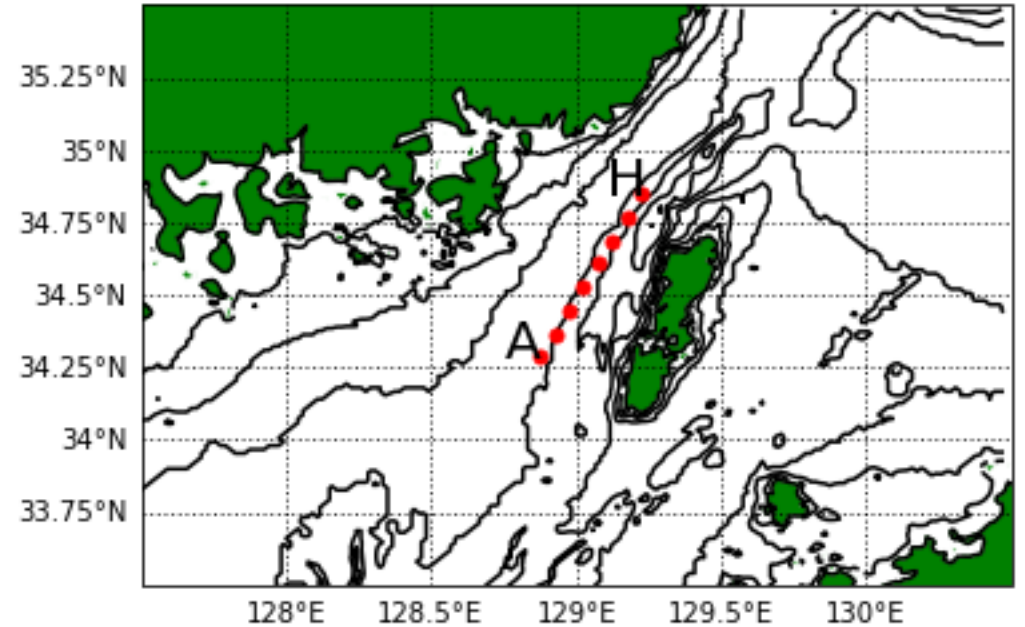
4.5 渦のスケール・移動速度

渦のスケール ▶ 20~30km

渦の移動速度 ▶ 約17cm/s



A~H地点の渦度時系列のスナップショット



計算場所8地点(A~H間)

渦が頻繁に通過する8点を選定

4.6 渦エネルギー—EKE

調和解析を行うことで3つに分解(Foreman et al,2009)

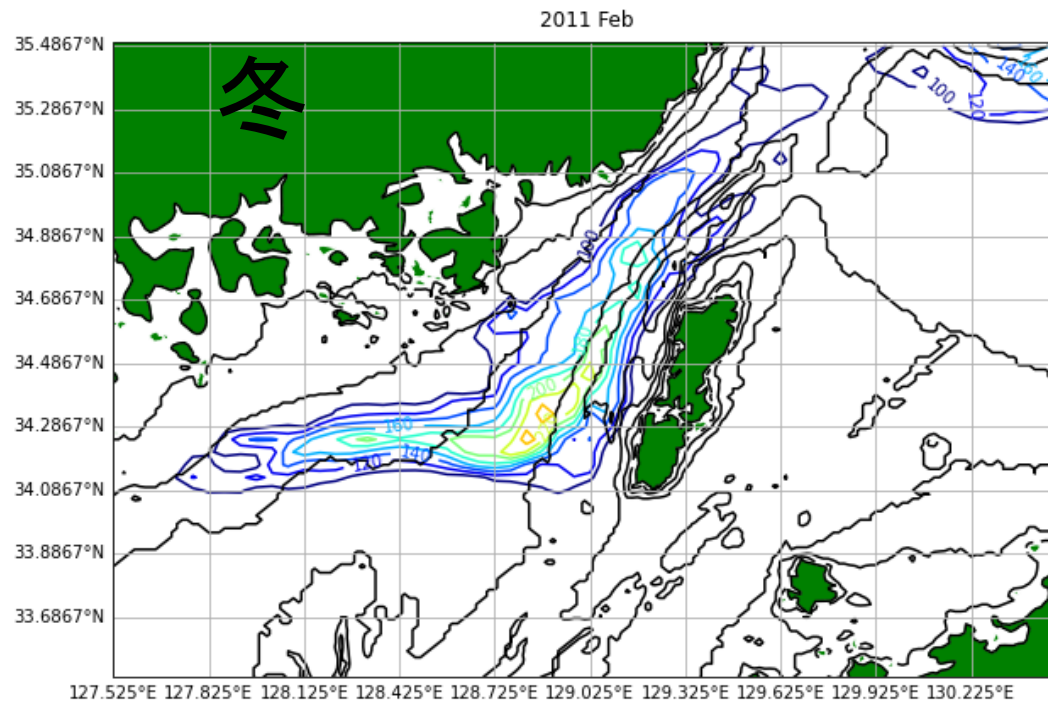
$$V = \bar{V} + V_{tide} + V'$$

生流速 平均成分 潮流成分 擾乱成分

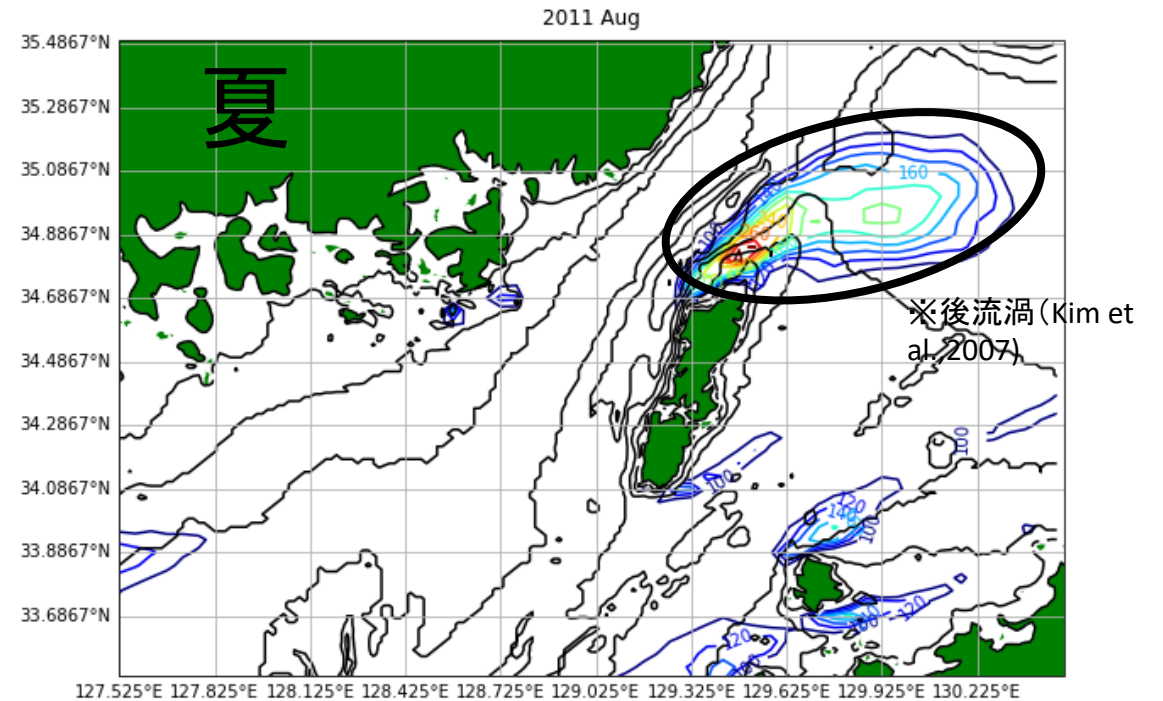


$$EKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2)$$

冬：西水道全域でEKEが高い→流れの変動が活発
夏：西水道全域でEKEが低い→流れの変動が不活発



2011年2月の月平均EKE(コンター間隔20(cm/s)²)



2011年8月の月平均EKE(コンター間隔20(cm/s)²)

4.7エネルギー分配

<2月(冬)>

①に対する②～④の運動エネルギーの寄与率を算出

$$V = \bar{V} + V_{tide} + V'$$

①

②

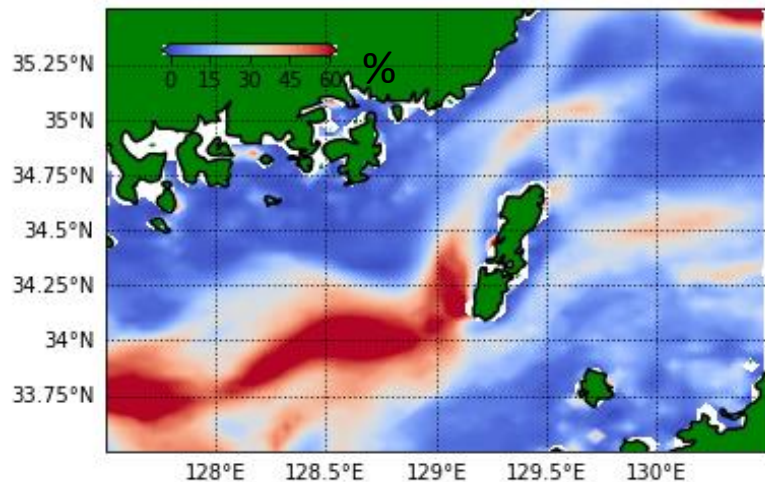
③

④

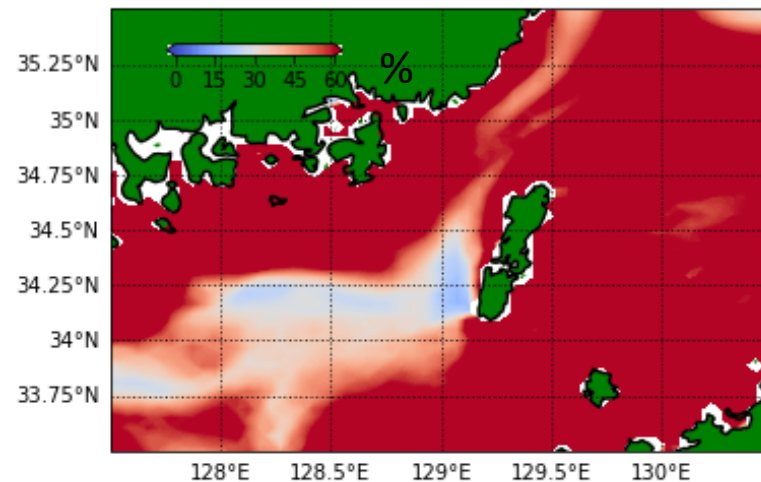
- ・パターン1: $KE②/KE①$
- ・パターン2: $KE③/KE①$
- ・パターン3: $KE④/KE①$

<特徴>

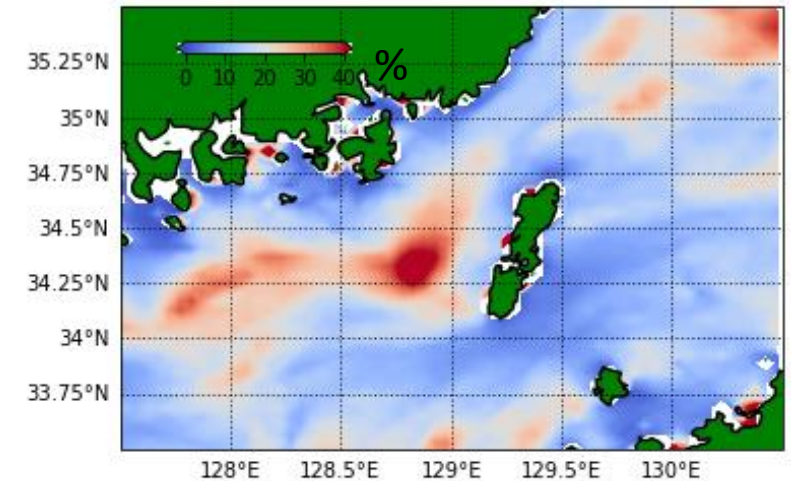
- ・東水道、韓国沿岸は潮汐成分が卓越
- ・西水道は主流上部で擾乱成分が卓越



パターン1: 平均成分の寄与率



パターン2: 潮流成分の寄与率



パターン3: 擾乱成分の寄与率

4.7エネルギー分配

<8月(夏)>

①に対する②～④の運動エネルギーの寄与率を算出

$$V = \bar{V} + V_{tide} + V'$$

①

②

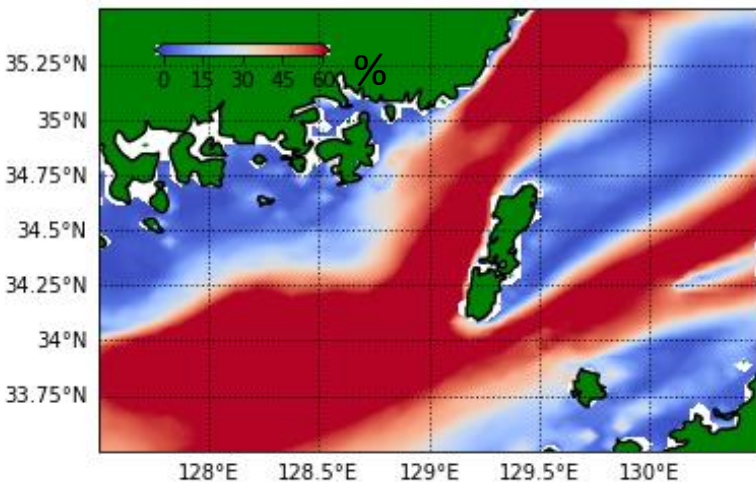
③

④

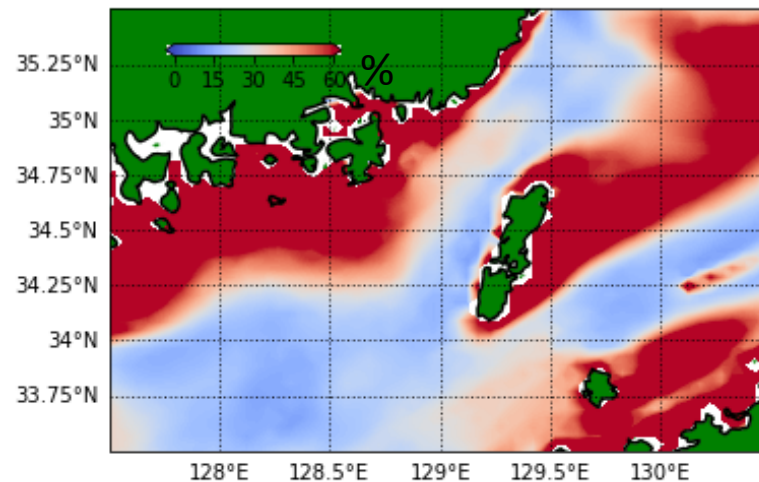
- ・パターン1: KE②/KE①
- ・パターン2: KE③/KE①
- ・パターン3: KE④/KE①

<特徴>

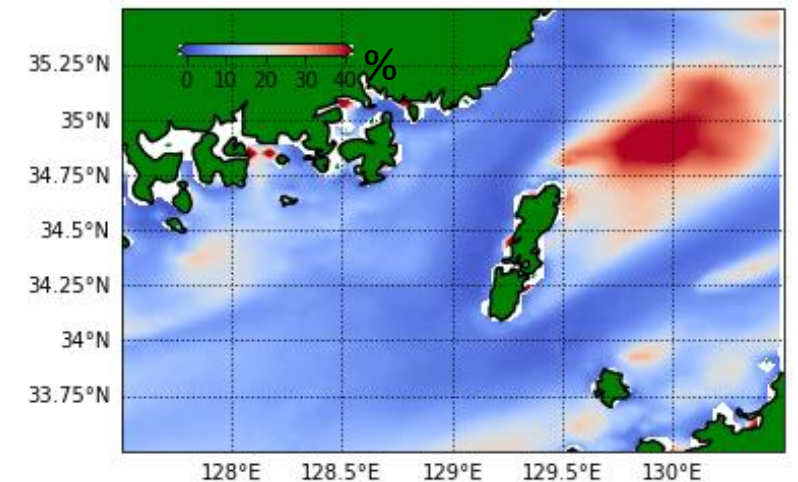
- ・東水道沿岸、韓国沿岸は潮汐成分が卓越
- ・夏よりも平均流が卓越している海域が東水道中央部まで拡大
- ・西水道上部島陰で擾乱成分が卓越



パターン1: 平均流の寄与率



パターン2: 潮流の寄与率



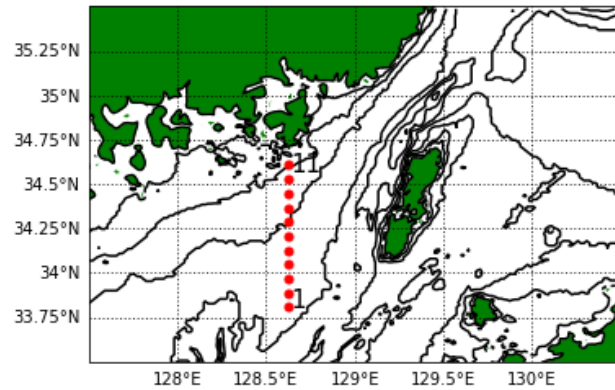
パターン3: 擾乱成分の寄与率

4.8渦の発生要因

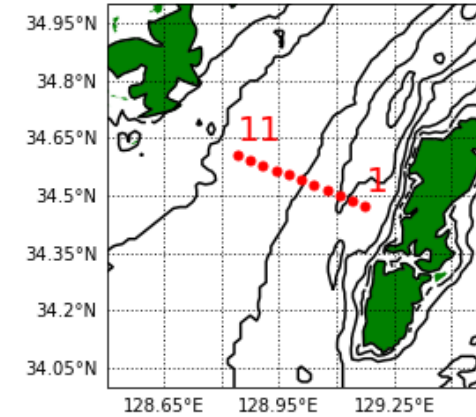
冬の西水道は流れのシアが大きく、成層も弱いため順圧不安定発生の可能性在り



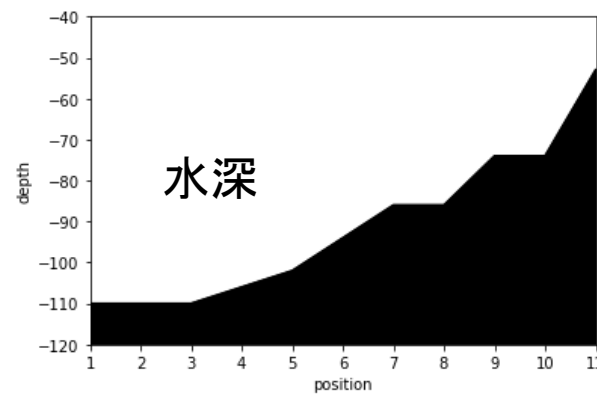
渦が通過する断面を2つ(A,BLine)での流速を用いて順圧不安定の必要条件を満たすか調査



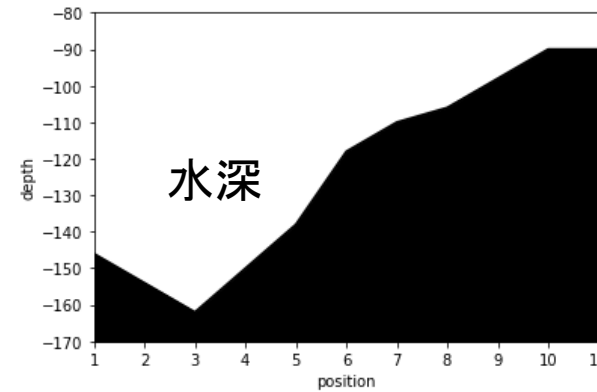
A_line(1~11)



B_line(1~11)



A_line断面

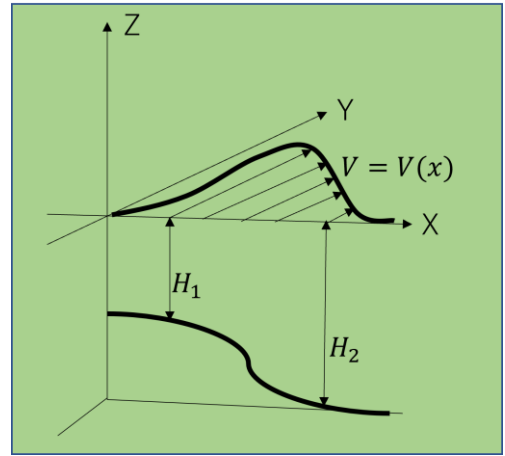


B_line断面

4.8渦の発生要因

<順圧不安定の必要条件 $q_x = 0$ >

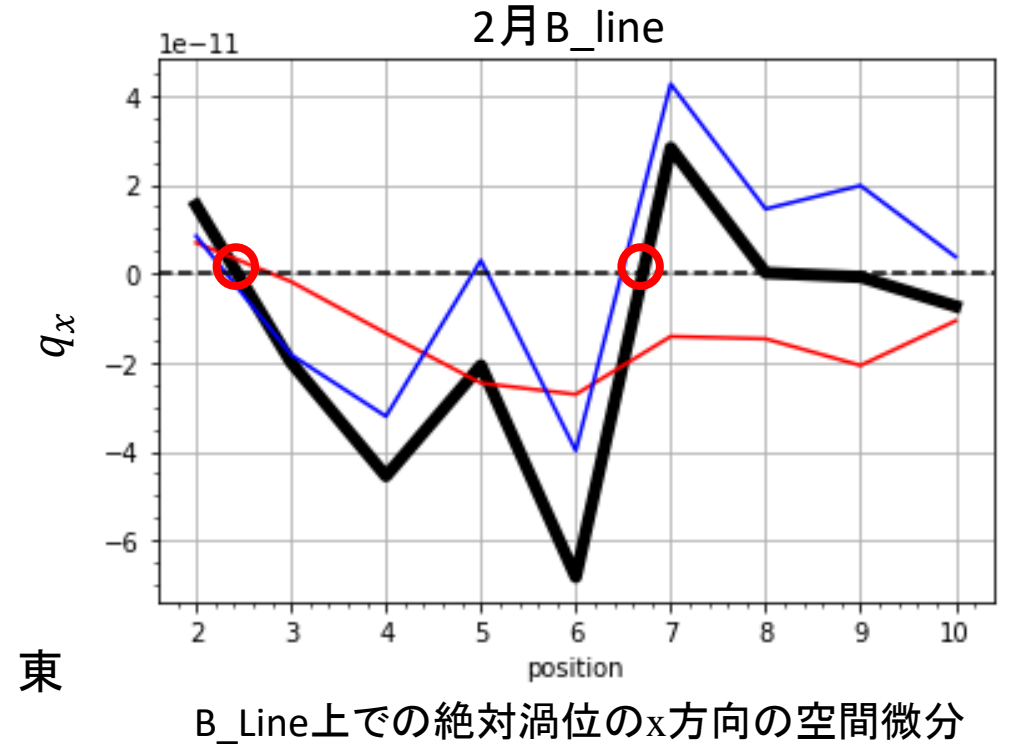
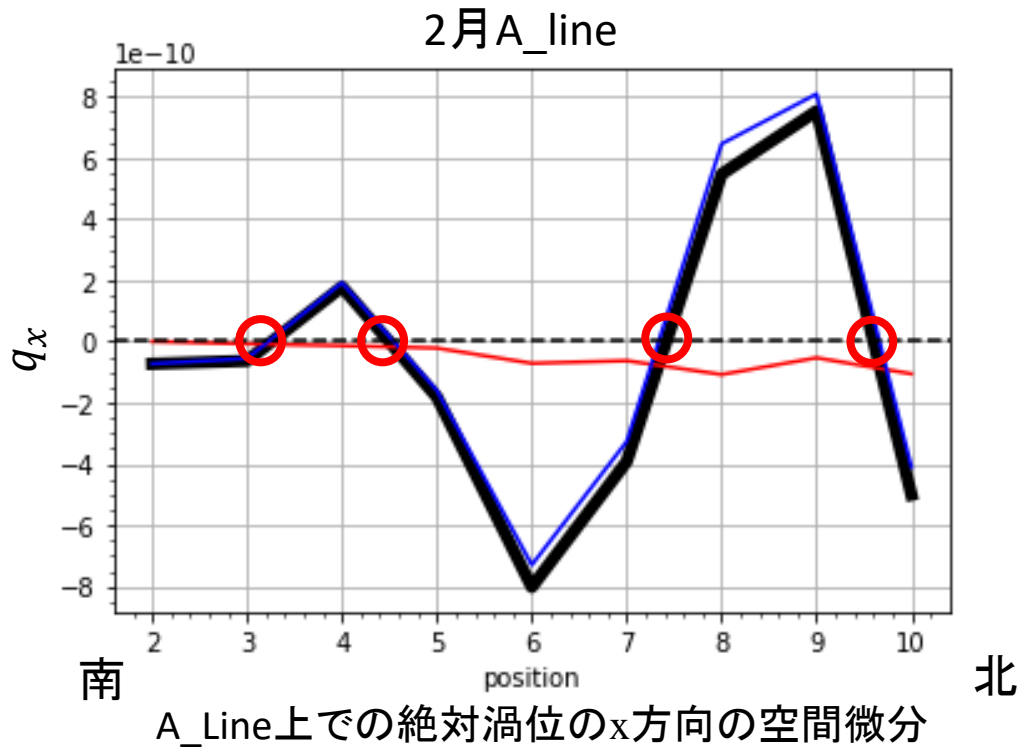
$$q_x = \underbrace{\left(\frac{f + \frac{V(x)}{dx}}{H} \right)}_{\text{PVの空間微分}} \cdot \underbrace{x}_{\text{流速シア項}} + \underbrace{\left(f + \frac{V(x)}{dx} \right) \cdot \left(\frac{1}{H} \right)}_{\text{海底地形項}} \cdot x$$



・A_Line、B_Line上で順圧不安定の必要条件を満たしている

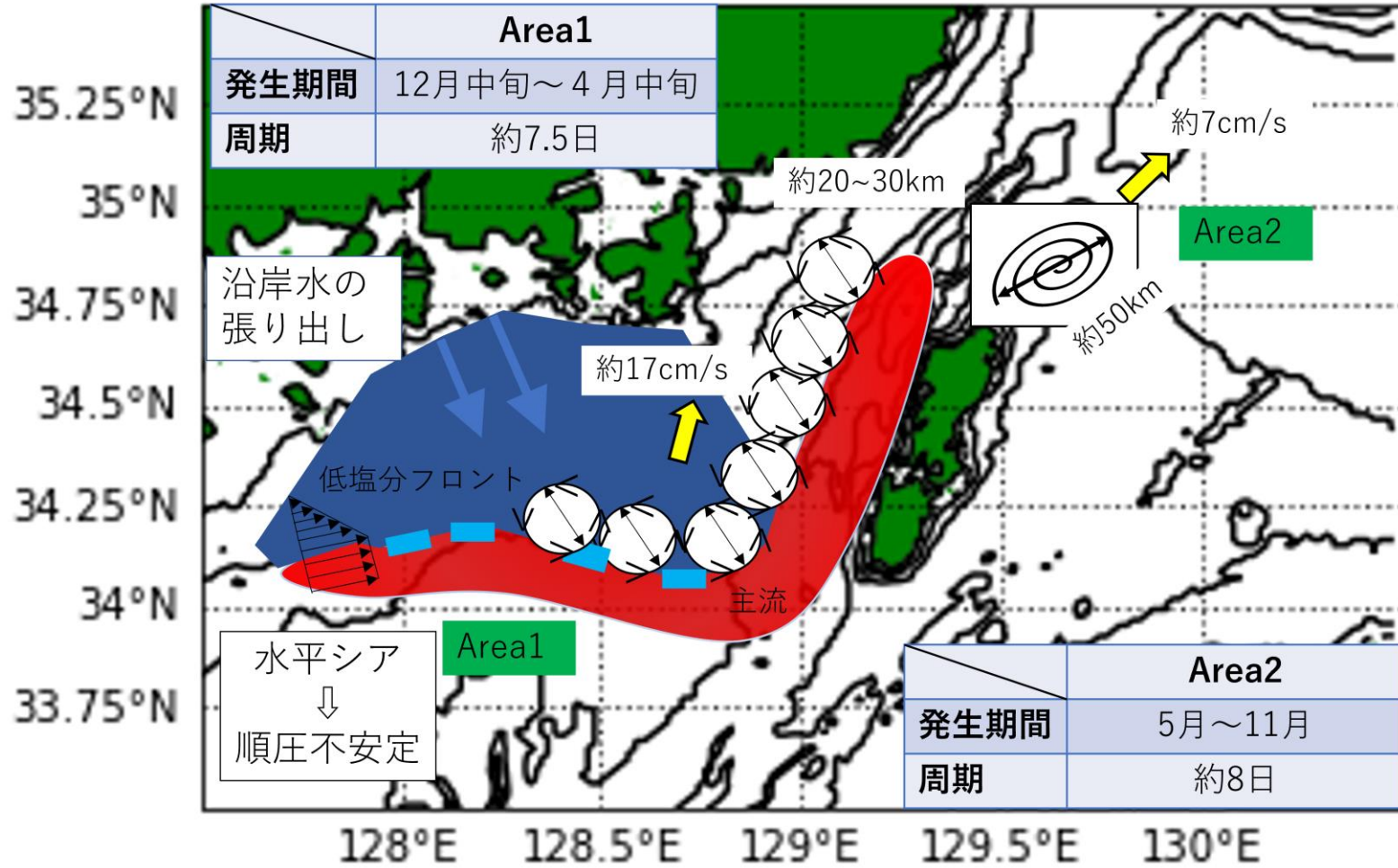
・A_LineよりB_Lineの方が地形効果が効く

順圧不安定の模式図



5.まとめ

5.1西水道渦MAP



<2つの渦は発生要因が異なる>

- Area1 ▶ 順圧不安定による渦
- Area2 ▶ 島陰にできる後流渦

西水道で発生する渦の特徴

5.2まとめ

まとめ

- ✓ DREAMS_D、HFレーダーともに西水道において短周期反時計回りの渦の発生が確認された。
- ✓ 西水道の渦発生時期は12月中旬～4月中旬である。
- ✓ 西水道の渦が韓国沿岸からの低塩分水を対馬海峡内に運び対馬西方の地形が急な場所を約7.5日で北上する。
- ✓ 衛星データより、冬季に朝鮮半島からの低塩分水の流入が対馬海峡内に栄養塩を運搬していることが確認された。
- ✓ 西水道を通過する渦の移動速度は約17cm/sで渦の水平スケールは約30kmある。
- ✓ 西水道は夏より冬の方が流速の水平シアーが大きく、発生する渦は順圧不安定による可能性が示唆された。