

CODAR社製SeaSonde海洋短波レーダーを用いた 短周期流動場の検出に向けて

中條 飛翔¹, 阿部 泰人², 金子 仁³, 佐藤喜暁³, 佐々木建一³

[1]北海道大学大学院水産科学院

[2]北海道大学大学院水産科学研究院

[3]JAMSTEC むつ研究所

目次

1. 研究背景
2. 使用するデータと手法
3. 結果と考察
4. 展望とまとめ

研究背景

- 津軽海峡における海洋観測
- SeaSondeの特徴
- トンガ火山噴火による気象津波の観測
- 特異的冷水現象の観測
- 釜谷付近への流れの変化について
- 本研究の目的

津軽海峡における海洋観測

- ・ CODAR社製SeaSondeが3基設置
(大畑、恵山、岩屋)
- ・ 係留系が設置 (釜谷、大森、古武井、銚子)

SeaSondeの特徴

- ・ Direction Finding型のため省スペースで設置可
- ・ Beam Forming型とは異なり方位探知を行う必要
→2つのLoopアンテナでの指向性の違いより予測



図2. SeaSonde

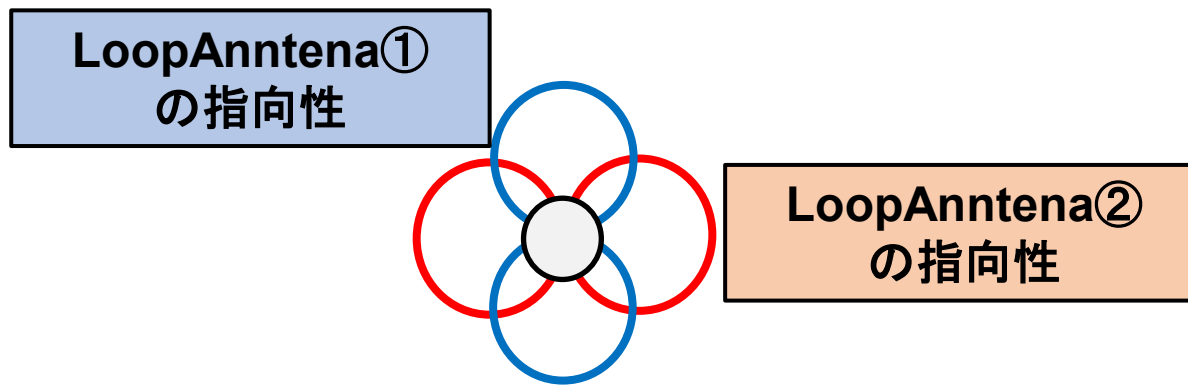


図3.

SeaSondeを上から見た際の指向性の様子

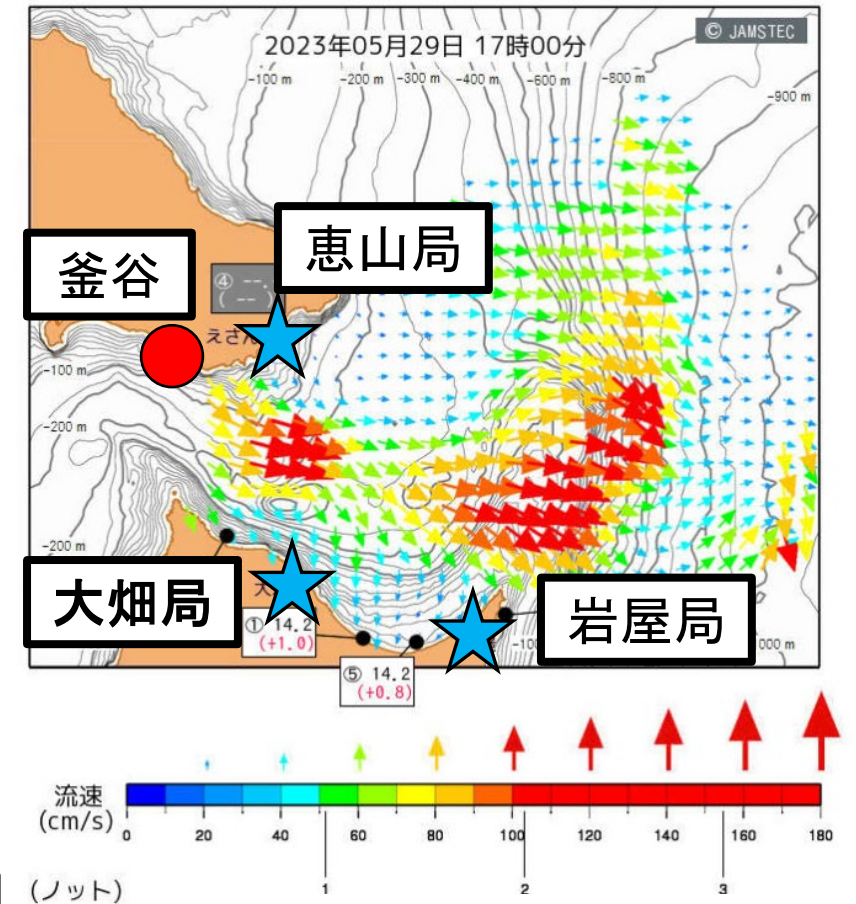


図1. 津軽海峡での流れ

<https://www.godac.jamstec.go.jp/morsets/j/top/index.html>

トンガ火山噴火による気象津波の観測

- ①2022年1月15日13時頃（JST）トンガ沖にて大規模噴火が発生し気象津波が発生
- ②同日21時頃日本各地に**津波第一波**が到来
- ③津軽海峡に設置された短波レーダーにより津波の捕捉
- ④**津波の早期観測への可能性を示唆**
(Wang et al.,2023)



図4. トンガ火山噴火の様子

<https://www.nationalgeographic.co.uk/science-and-technology/2022/01/the-volcanic-explosion-in-tonga-destroyed-an-island-and-created-many-mysteries>

特異的冷水現象の観測

16日に津軽海峡に面した釜谷にて**水温が急激に下がる現象を観測し**
津波との関係性を疑う

→ 海流に何かしらの変化が生じた？

釜谷での水温変化（2カ月）

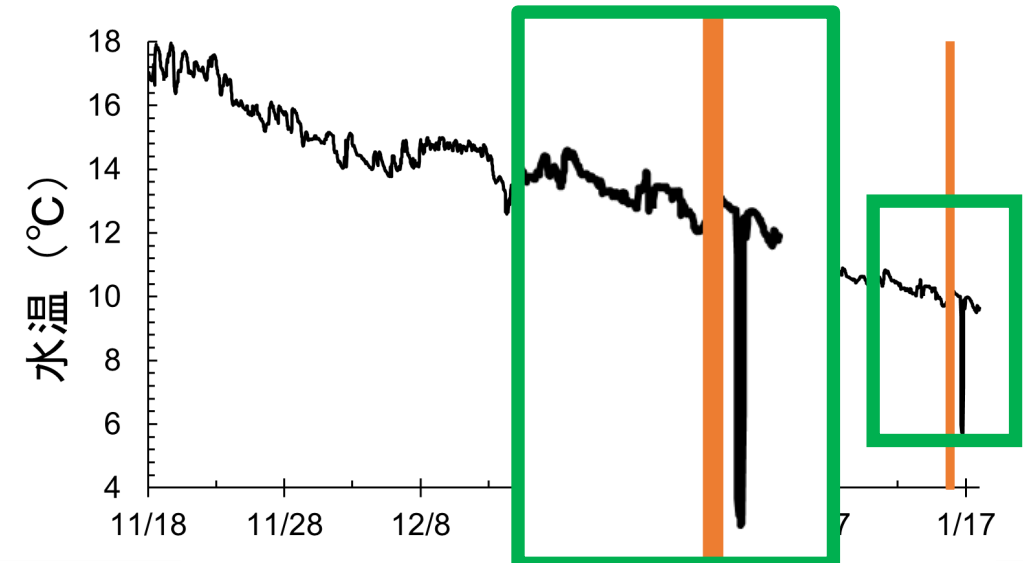


図5. 釜谷における特異的冷水現象
橙線は**津波第一波**の到達時刻を示す

釜谷付近への流れの変化について

22_01_15_0030

むつ研提供

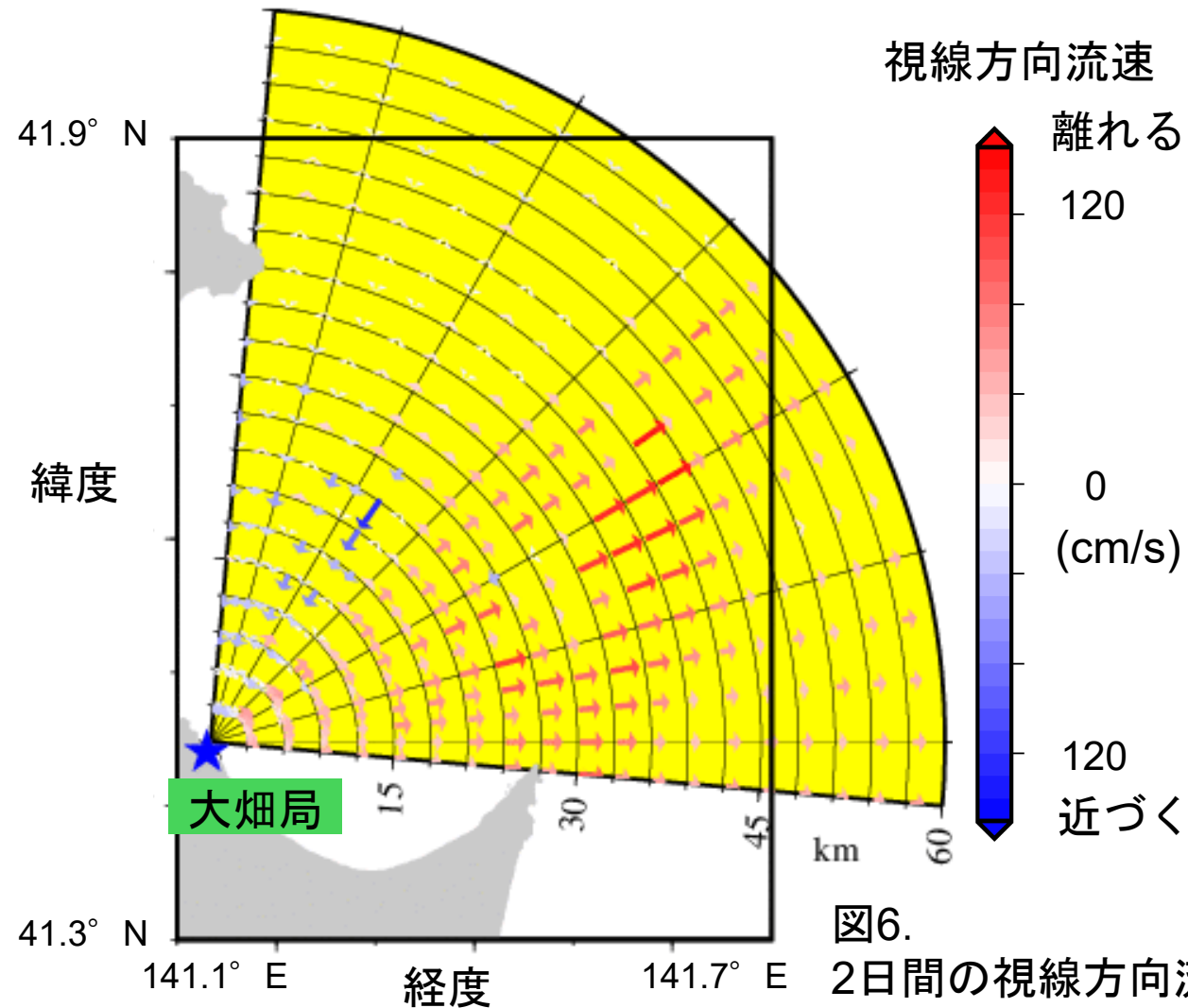


図6. 2日間の視線方向流速

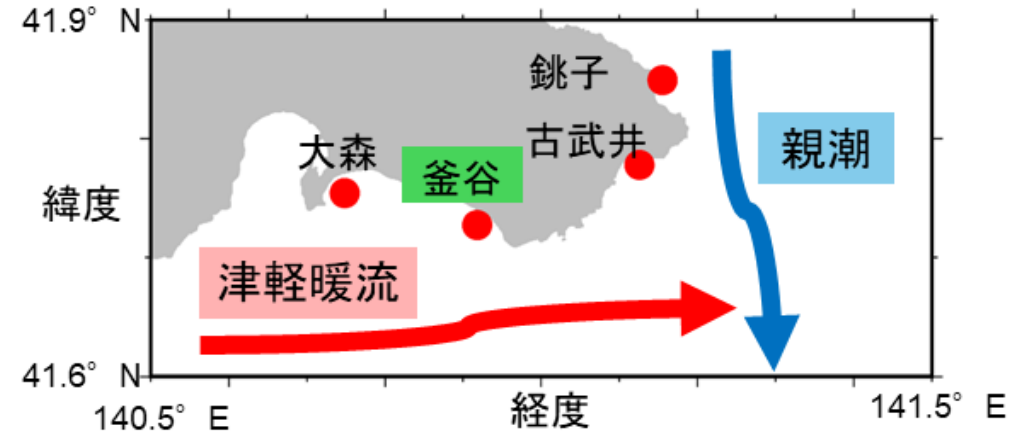
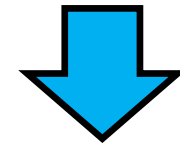
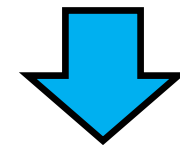


図7. 津軽海峡付近に卓越する海流

むつ研から提供されたデータでは
特筆した流れは見られない



データ処理の段階にて時間移動平均
を行っている



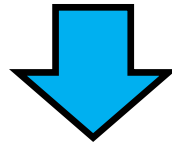
時間移動平均間隔を短くすることで
観測することができるのでは？

本研究の目的

- ・ 現状の解析手法では短周期流動場の検出には適していない
75分間の時間移動平均を使用し、30分ごとのデータとしている



- ・ 時間移動平均の間隔を短くすることで短周期流動場を検出したい
10分ごとにデータは存在するので20分や40分といった短い間隔へ



- ・ 特異的な冷水現象や津波といった短周期の流動を検出

使用するデータと手法

- ・使用するデータ
- ・短波レーダーでの観測データの処理
- ・処理方法の比較

使用するデータ

▪ 短波レーダーでの観測データ

観測項目 : レーダーでの受信電力 (μW)

データの種類 : self spectra, cross spectra

観測間隔 : 10分間隔

▪ 短波レーダーでの解析済みデータ

観測項目 : 視線方向流速 (m/s)

観測間隔 : 30分間隔

▪ 係留系による実測データ

観測項目 : 流速・流向、水温

観測間隔 : 30分間隔

設置場所 : 水深10m

使用する期間

2022年1月15日から16日の2日間

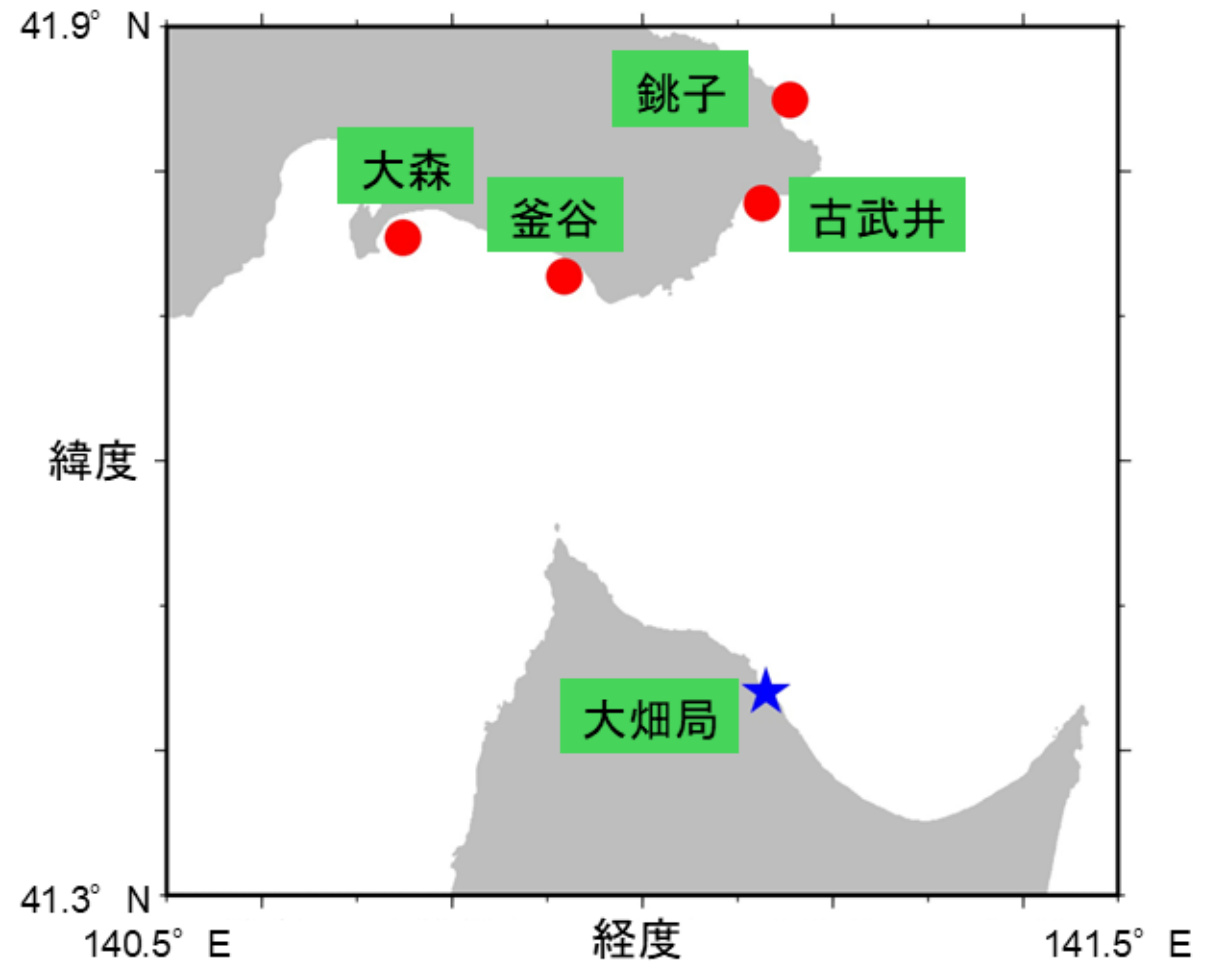


図8. 各種データの位置

青星 : 短波レーダー...大畑

赤丸 : 係留系...銚子、古武井、釜谷、大森

短波レーダーでの観測データの処理

- ①短波レーダーを中心とし同心円状に電波を海面に照射
- ②ある条件下で表面波にてブラッグ散乱が起こり
強い後方散乱が生じる
- ③短波レーダーが後方散乱を受信し強い受信電力が得られる

まとめ

ブラッグ散乱により
強い受信電力が得られる



ブラッグ散乱が生じた
表面波の距離、方位角
が求められる

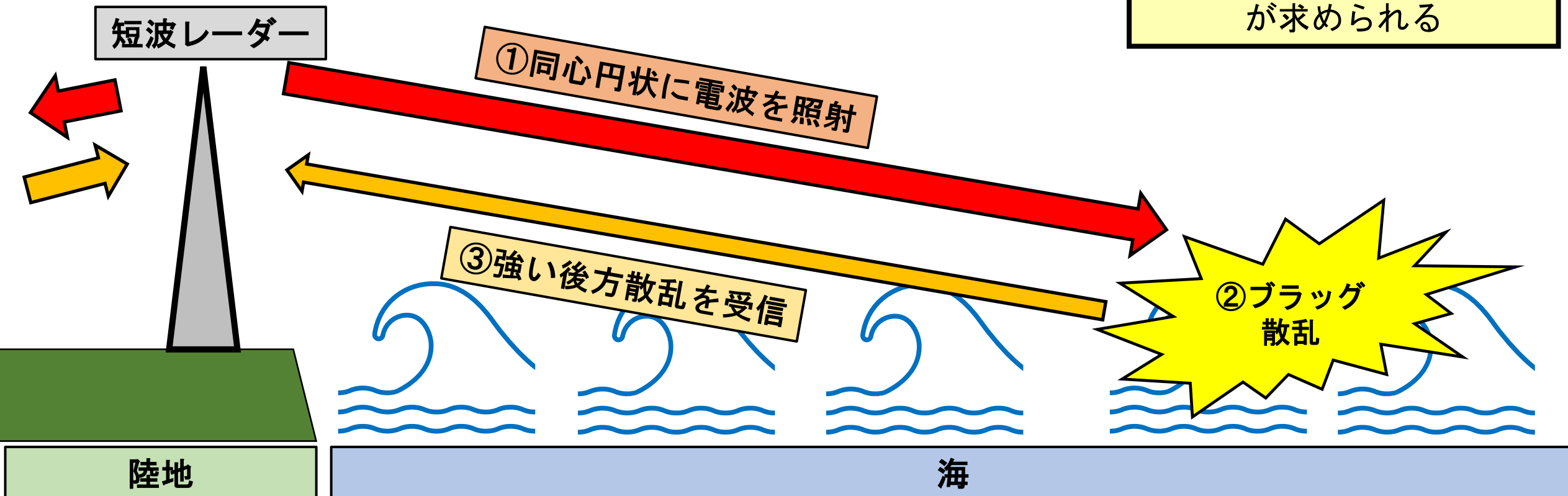


図9. 短波レーダーの仕組み

短波レーダーでの観測データの処理

- ④短波レーダー内のクロスループアンテナの指向性を基に表面波の流れている向きを求める

まとめ

各アンテナでの受信電力の違いより方位角を求める

短波レーダーを上から見た図

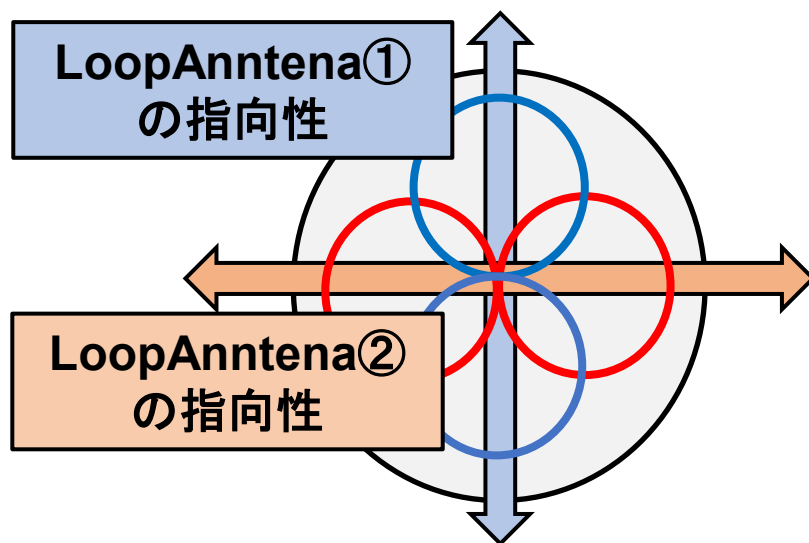


図10. 短波レーダーの指向性

短波レーダーによる指向性の一致を上から見た図

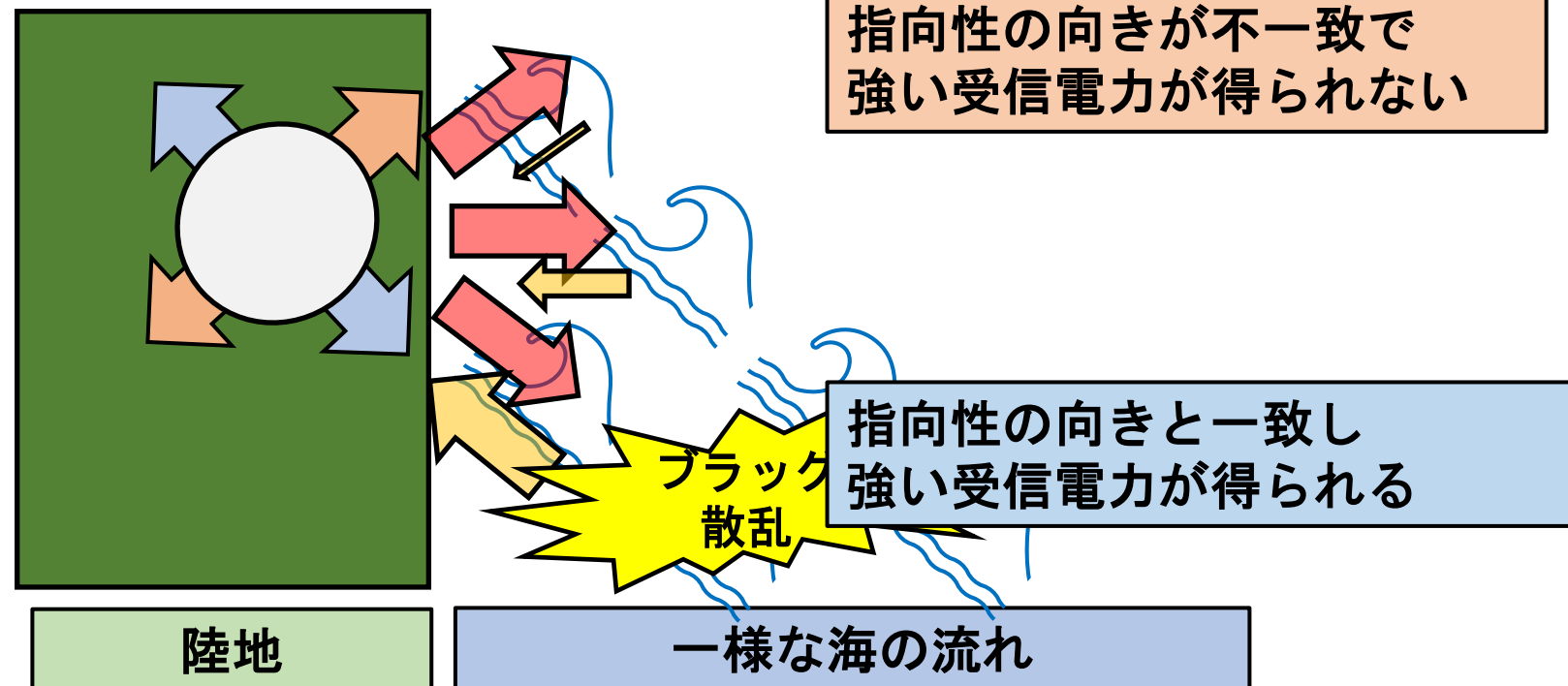


図11. 表面波によるドップラー効果

短波レーダーでの観測データの処理

⑤受信電力を利用し方位角を求める

閉形式アルゴリズム、最小二乗法、MUSICアルゴリズム
などが存在し今回は閉形式アルゴリズムを用いる

閉形式アルゴリズム
による方位角の導出

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

V_1 : クロスループ1の受信電圧

V_2 : クロスループ2の受信電圧

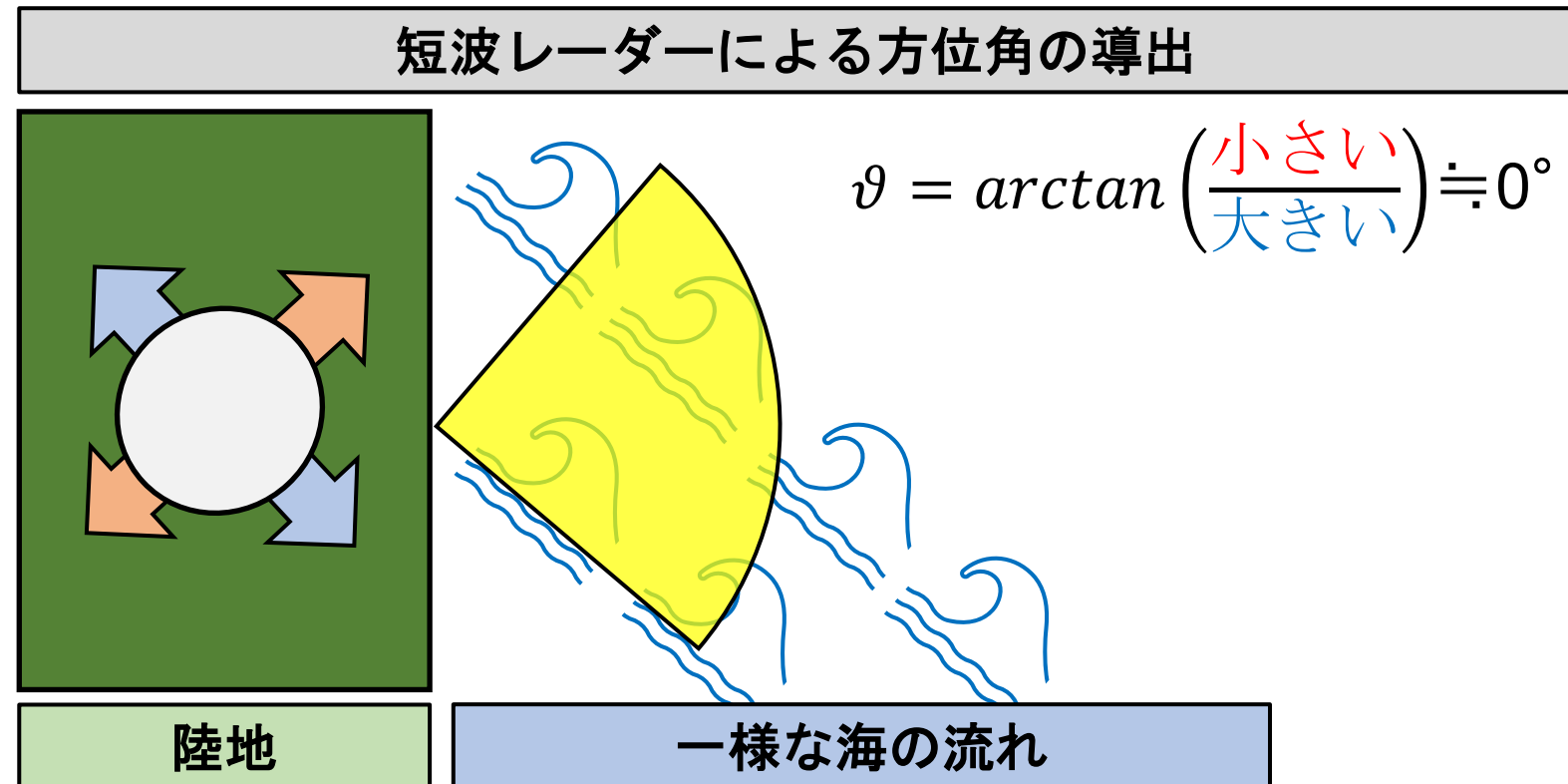


図12. 指向性を利用した方位角導出

短波レーダーでの観測データの処理

⑥閉形式アルゴリズムを利用し方位角の導出

レーダーから21kmにおける方位角の導出をドップラースペクトルから行う

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad V_1 > V_2 \text{ の時 : } 0 \sim 45^\circ \quad , \quad V_2 > V_1 \text{ の時 : } 45 \sim 90^\circ$$

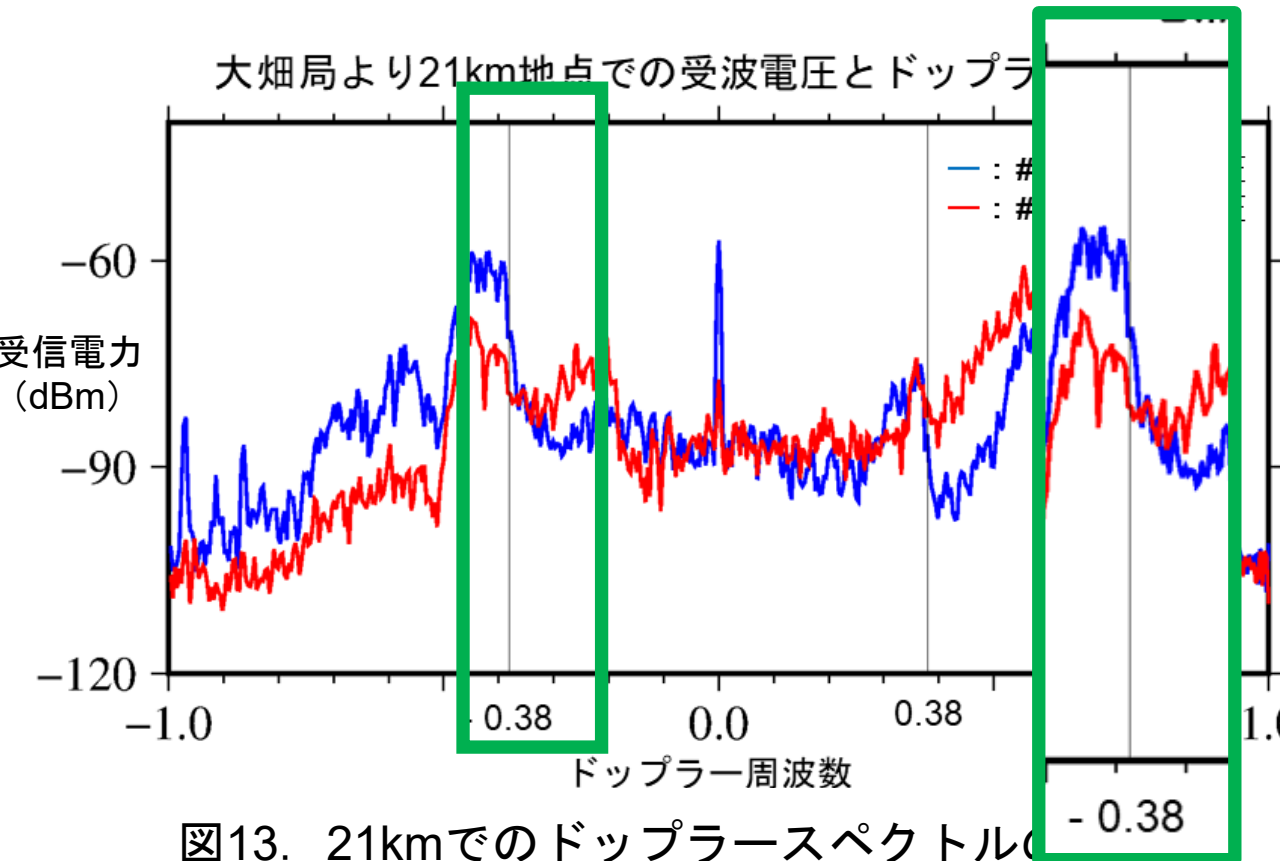


図13. 21kmでのドップラースペクトル

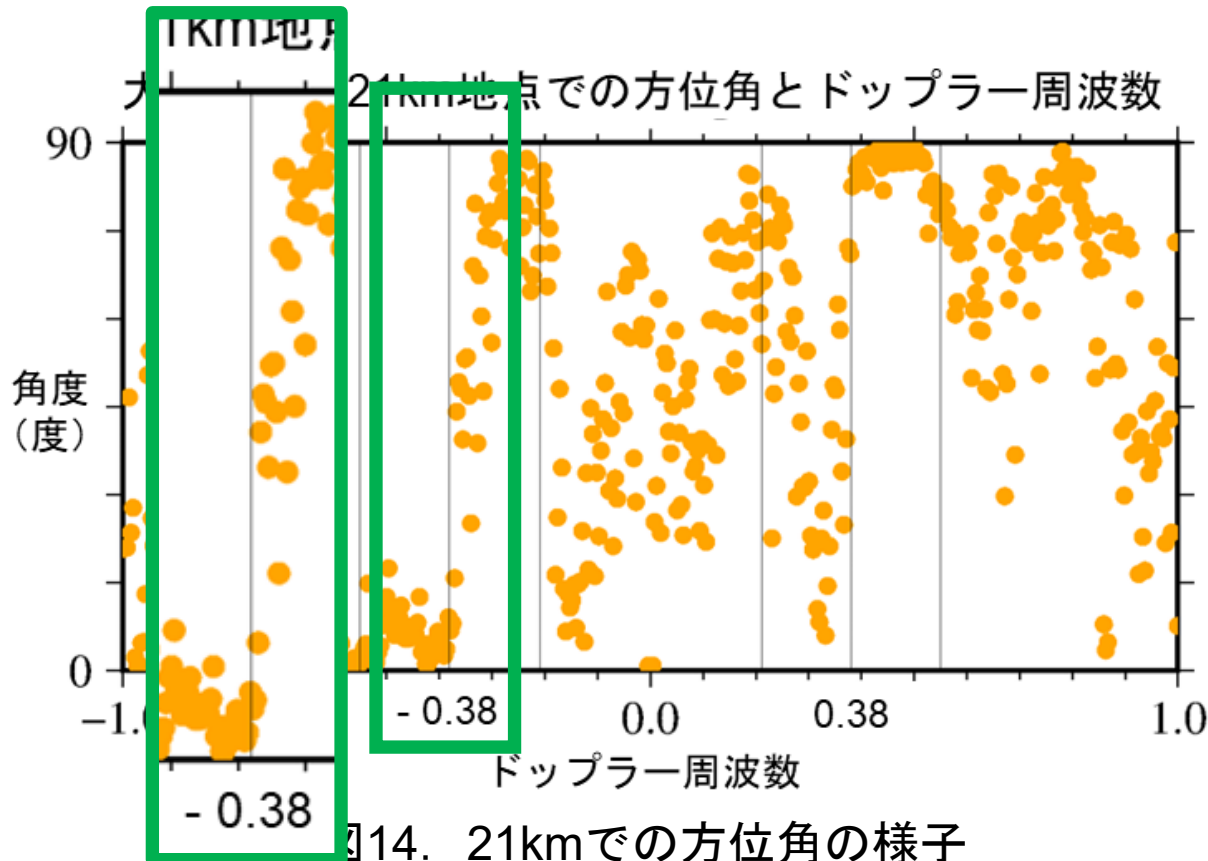


図14. 21kmでの方位角の様子

短波レーダーでの観測データの処理

- ⑦ブラッグ散乱によるドップラー効果を基に流速を求める
海に流れがない場合は $\pm 0.38\text{Hz}$ 位相が変化するが、流れがあるとさらにドップラー効果が生じる特性を生かす
- ⑧方位角、流速により視線方向流速の導出

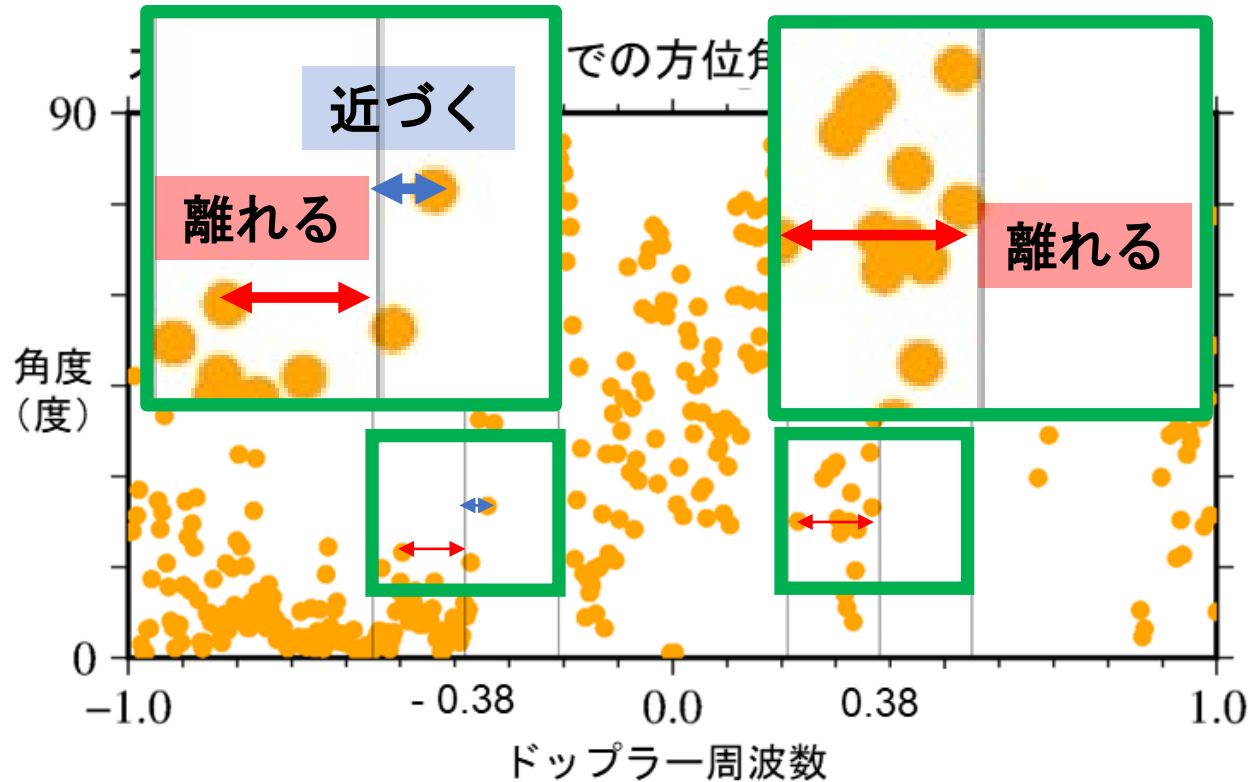


図15. ドップラー周波数を基に流速の導出

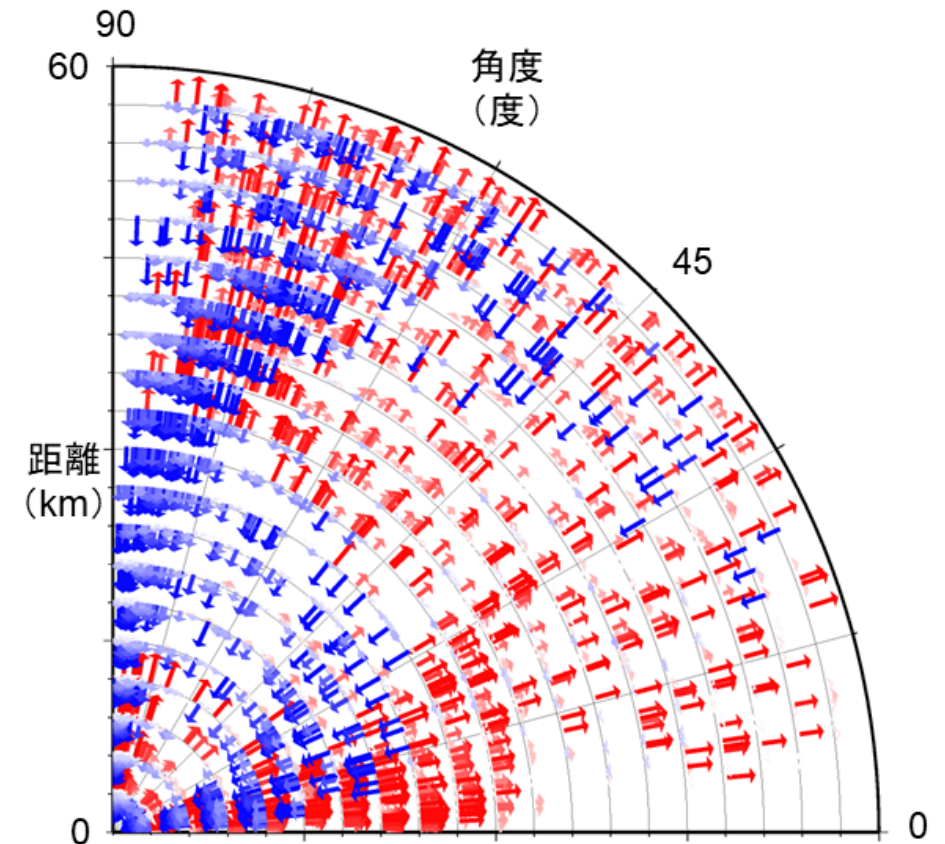


図16. 方位角・流速による視線方向流速

処理方法の比較

短波レーダーでの観測データの処理

受信電力データ
(10分間隔)

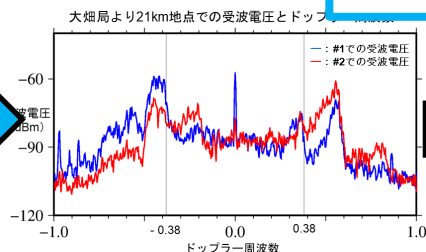
観測データ

閉形式アルゴリズム
(方位角)
ドップラー効果
(流速)

時間移動平均
(60、40、20分)

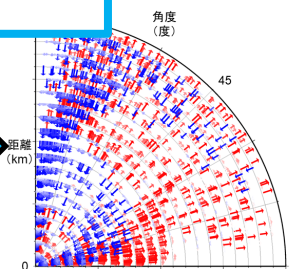


解析



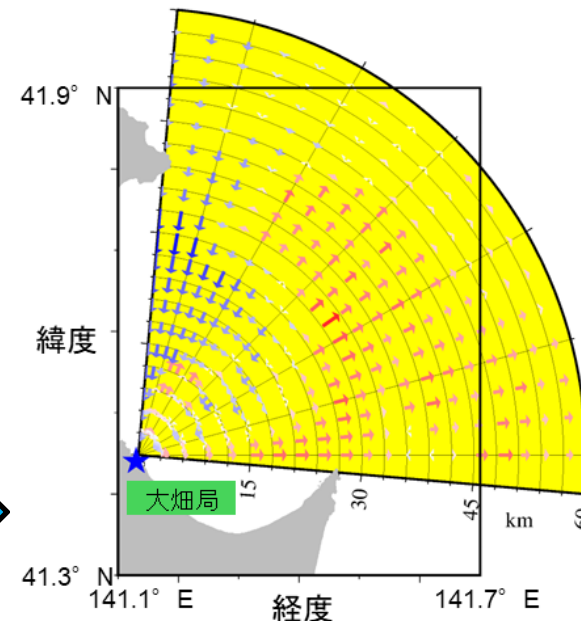
ドップラースペクトル
(10分間隔)

解析



視線方向流速データ
(10分間隔)

解析



視線方向流速データ
(30分間隔)
解析済みデータ

MUSICアルゴリズム
(方位角)
ドップラー効果
(流速)

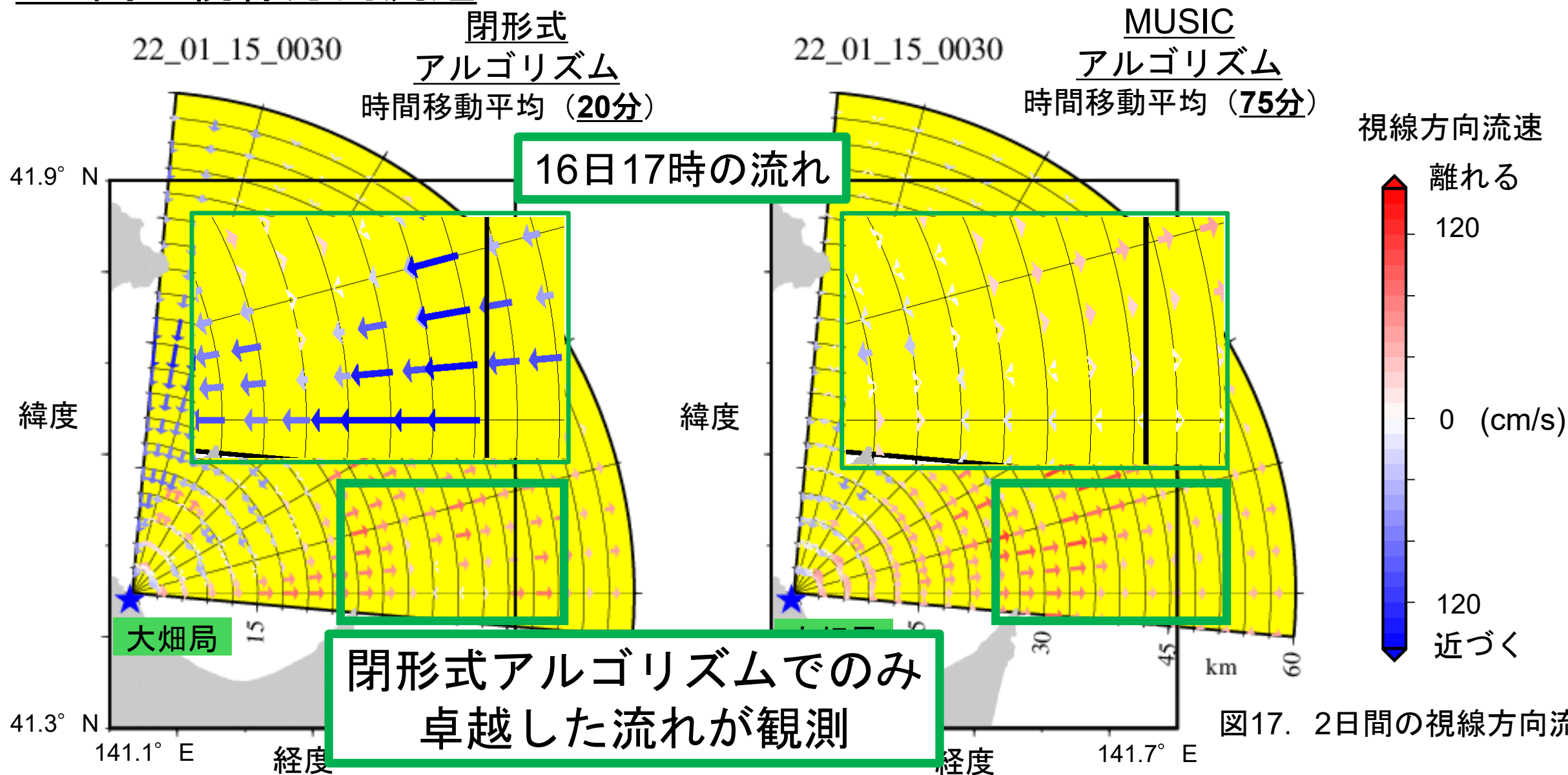
時間移動平均
(75分)

短波レーダーでの解析済みデータの処理

結果と考察

- ・ 2日間の視線方向流速
- ・ 短周期的な観測による流れ
- ・ データの精度比較

2日間の視線方向流速



短周期的な観測による流れ

- ・ 16日13時頃から21時頃まで
津軽海峡に流入する卓越した流れ
- ・ 同日16時頃から19時頃まで
釜谷では特異的冷水現象
- ・ **津軽暖流**は 10°C 、**親潮**は 5°C 前後

時刻、流向、水温において一致するため
親潮の流入があったと考えられる

一方で

- ・ 潮位計では目立った潮位は見られない
(17日朝に大潮)
- ・ 釜谷でのみ水温低下が生じた理由は不明

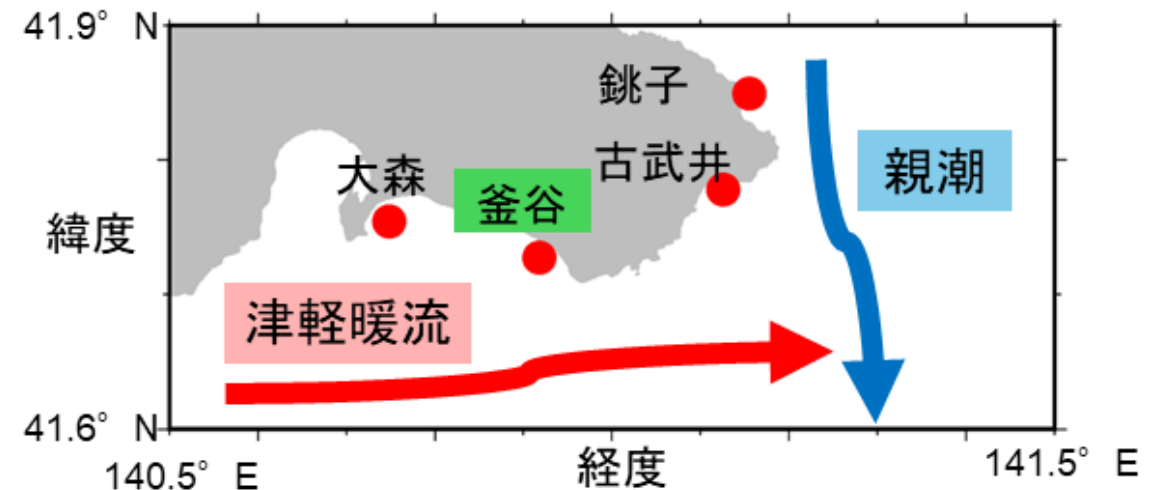


図18. 津軽海峡付近に卓越する海流

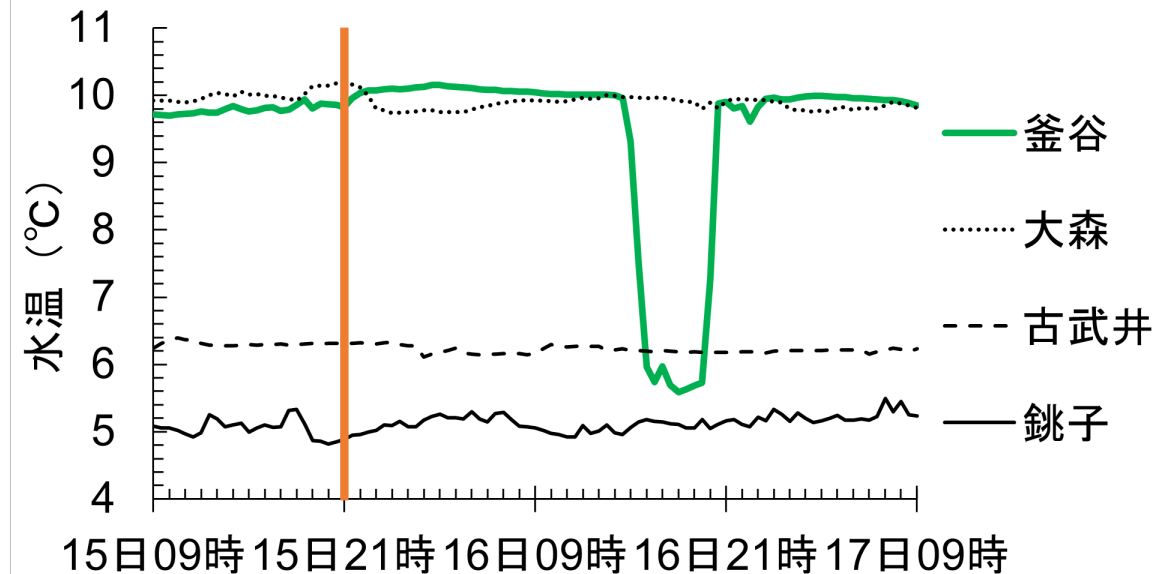


図19. 各係留系での水温変化 (2日間)
橙線は津波第一波の到達時刻を示す

データの精度比較

比較方法

- ・ 双方のアルゴリズムで得られた視線方向流速を係留系での実測値と比較を行う
- ・ 絶対平均誤差（MAE）を用いる

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

P_i : 短波レーダーによる視線方向流速(cm/s) (青丸)

O_i : 係留系による実測値(cm/s) (赤丸)

比較結果

- ・ MUSICアルゴリズムの方が精度が良い
- ・ 閉形式アルゴリズムでは時間移動平均を短くすると精度が落ちるが誤差の範囲
- ・ 時間移動平均による誤差よりも方位角の導出方法の違いによる誤差が大きいと考えられる

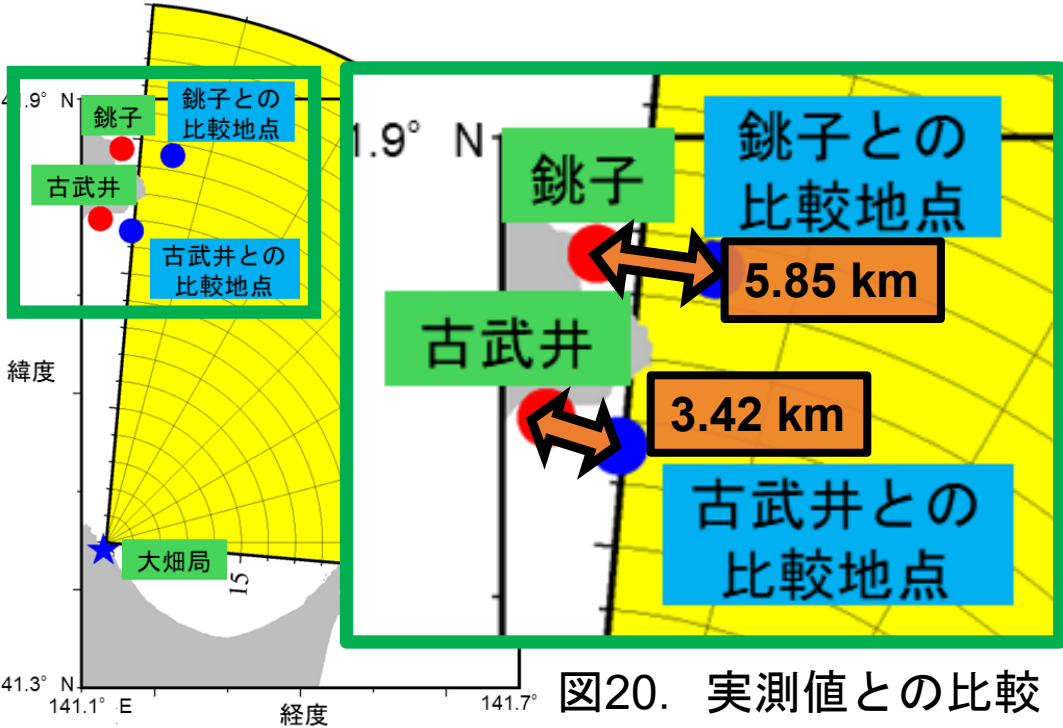


図20. 実測値との比較

表1. 各アルゴリズムにおけるデータの比較

観測地	解析方法			
	MUSIC アルゴリズム	閉形式 アルゴリズム		
	時間移動平均	時間移動平均		
	75分	60分	40分	20分
鉾子	16.07	41.01	40.8	41.2
古武井	19.07	39.97	40.54	40.69

展望とまとめ

- ・ 閉形式アルゴリズムについて
- ・ MUSICアルゴリズムについて
- ・ アンテナ補正を行った論文
- ・ 各種解析アルゴリズムについて
- ・ 高度な方位角導出法の利用にあたり
- ・ 他の論文とのスペクトル図の比較
- ・ まとめと展望

閉形式アルゴリズムについて

- ・ self spectra（信号成分）のみで導出
- ・ アンテナパターンの補正ができない
- ・ 一様な海の流れしか分らない

短波レーダーによる指向性の一致を上から見た図

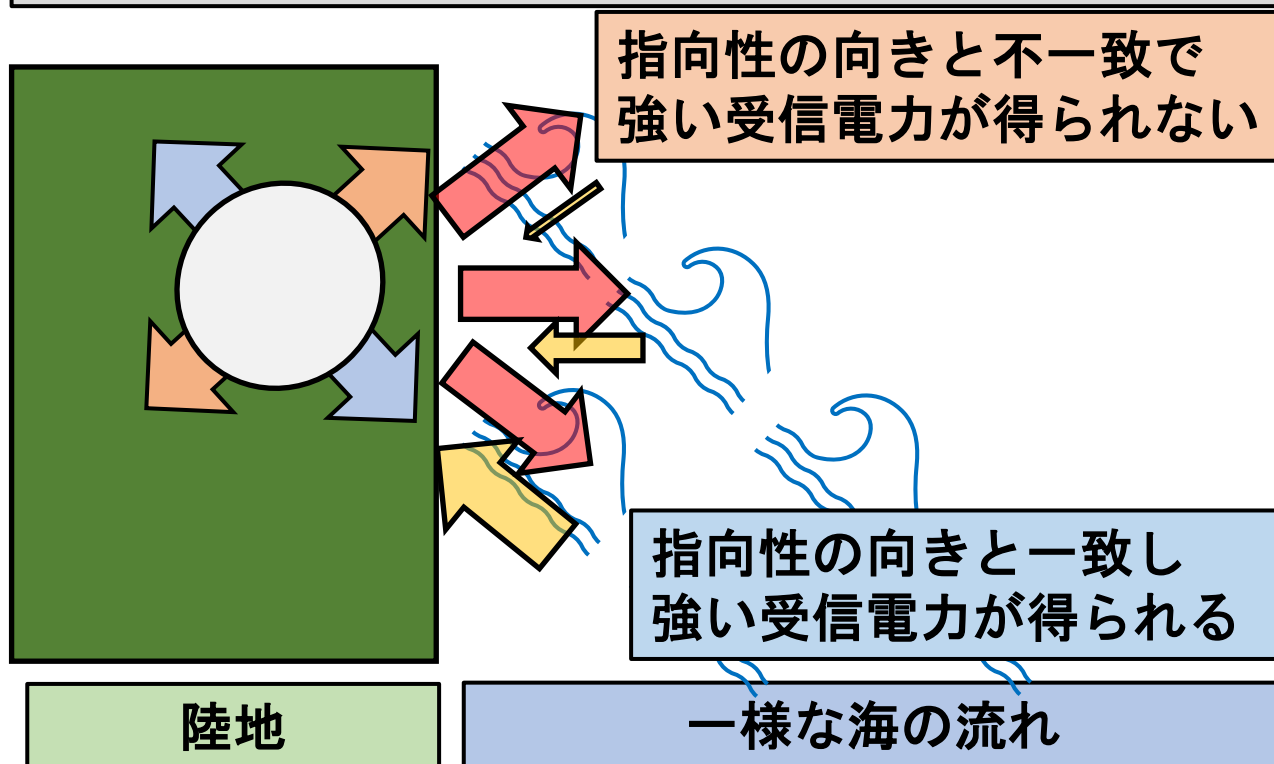


図21. 表面波によるドップラー効果

理想形としての式

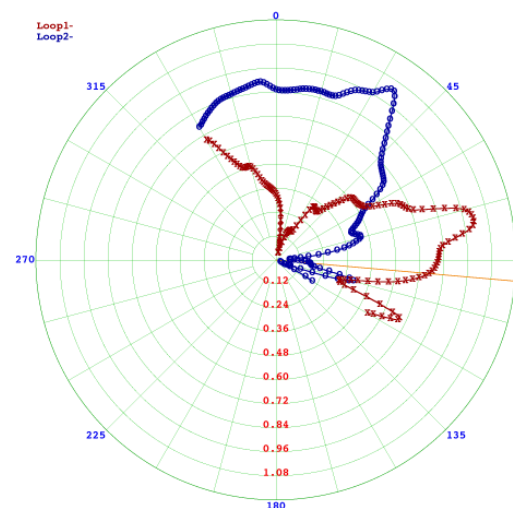
$$g_1(\theta) = \cos(\theta) : \text{Loop1}$$

$$g_2(\theta) = \sin(\theta) : \text{Loop2}$$

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

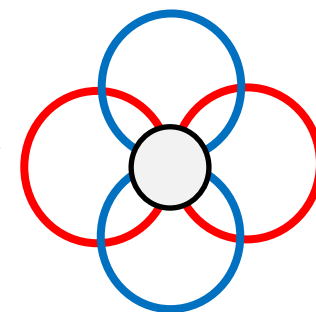
V_1 : Loop1の受信電力
 V_2 : Loop2の受信電力

実際



補正
しない

理想形



MUSICアルゴリズムについて

Charles, A.G. et al. (2021)

- self spectra（信号成分）と cross spectra（ノイズ成分）にて導出
- アンテナパターンの補正が可能
- 詳細な海の流れを観測できる

$$g_1(\theta) = \rho_1 \cos(\theta - \theta_1) e^{i\phi_1}$$

$$g_2(\theta) = \rho_2 \sin(\theta - \theta_2) e^{i\phi_2}$$

補正する

理想形としての式

$$g_1(\theta) = \cos(\theta) : \text{Loop1}$$

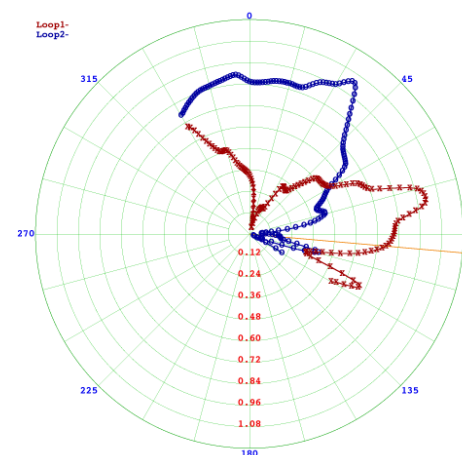
$$g_2(\theta) = \sin(\theta) : \text{Loop2}$$

振幅や位相等を調整することができる。
これらの係数を求めるのにcross spectra
により得られる複素成分が必要。

$$\text{Re } g_n(\theta) = a_n \cos \theta + b_n \sin \theta$$

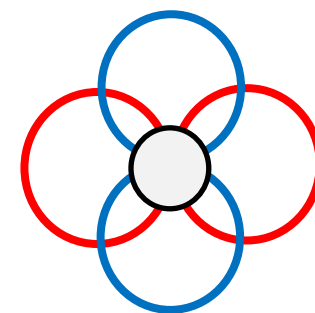
$$\text{Im } g_n(\theta) = a'_n \cos \theta + b'_n \sin \theta$$

実際



理想形

補正
できる



アンテナ補正を行った論文

High-Frequency Radar Measurements with CODAR in the Region of Nice:
Improved Calibration and Performance

Charles, A.G. et al. (2021)

黒線：漂流ブイ

赤点：理想形（補正無し）

緑点：自己修正

青点：観測修正

MUSICアルゴリズムを用いた
修正（緑点・青点）での
精度が良い

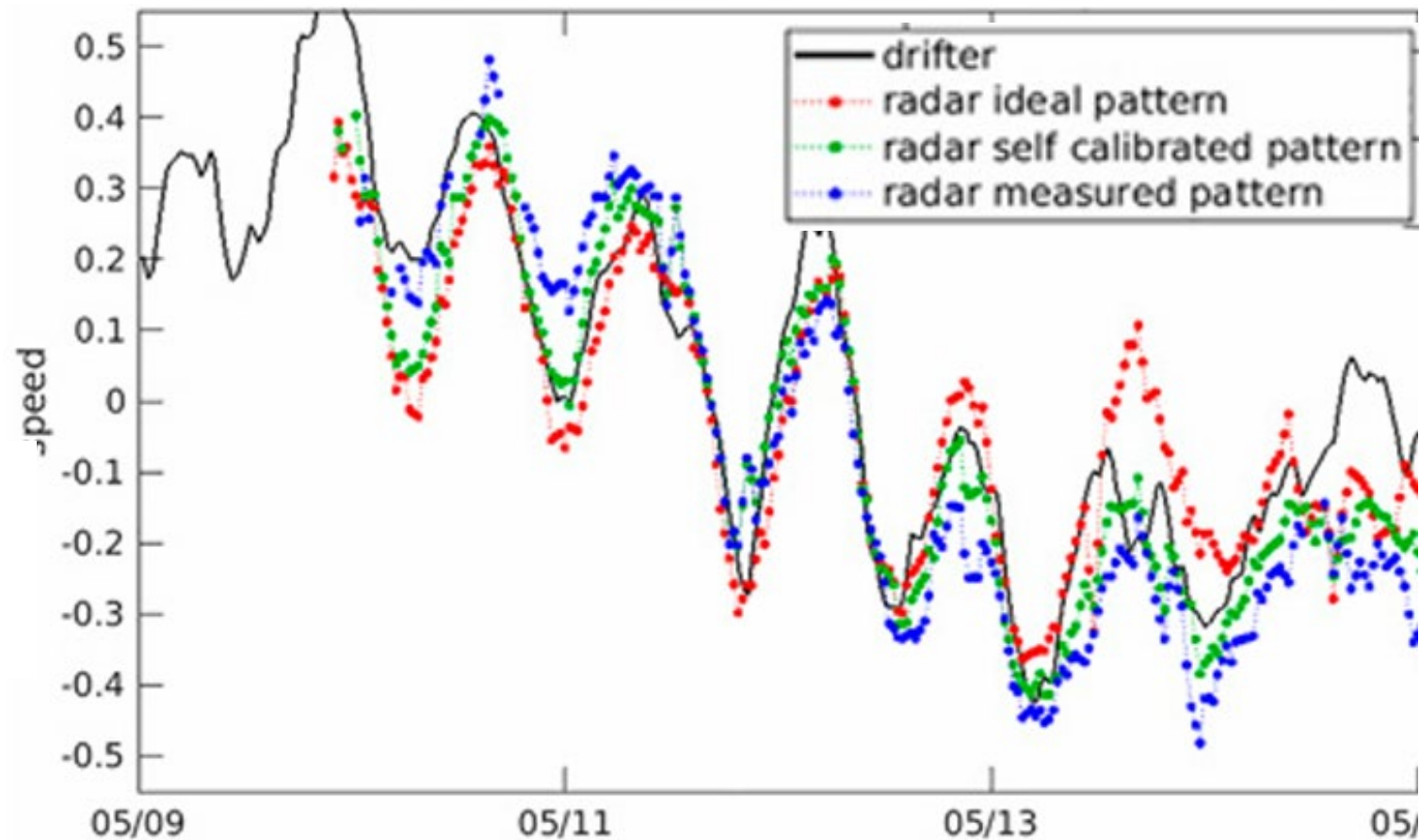


図22. アンテナ補正による効果

各種解析アルゴリズムについて

閉形式アルゴリズム

- self spectra（信号成分）のみで導出
- アンテナパターンの補正ができない

理想形としての式

$$g_1(\theta) = \cos(\theta) : \text{Loop1}$$

$$g_2(\theta) = \sin(\theta) : \text{Loop2}$$

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \begin{array}{l} V_1 : \text{Loop1の受信電力} \\ V_2 : \text{Loop2の受信電力} \end{array}$$

MUSICアルゴリズム

- self spectra（信号成分）と cross spectra（ノイズ成分）にて導出
- アンテナパターンの補正が可能

$$g_1(\theta) = \rho_1 \cos(\theta - \theta_1) e^{i\phi_1}$$

$$g_2(\theta) = \rho_2 \sin(\theta - \theta_2) e^{i\phi_2}$$

$$\text{Re } g_n(\theta) = a_n \cos\theta + b_n \sin\theta$$

$$\text{Im } g_n(\theta) = a'_n \cos\theta + b'_n \sin\theta$$

そのため、MUSICアルゴリズムのような高度な解析手法を用いたい

高度な方位角導出法の利用にあたり

self spectra

- FirstOrderが分かる

voltage(dBm)

-180 -170 -160 -150 -140 -130 -120 -110 -100 -90 -80 -70

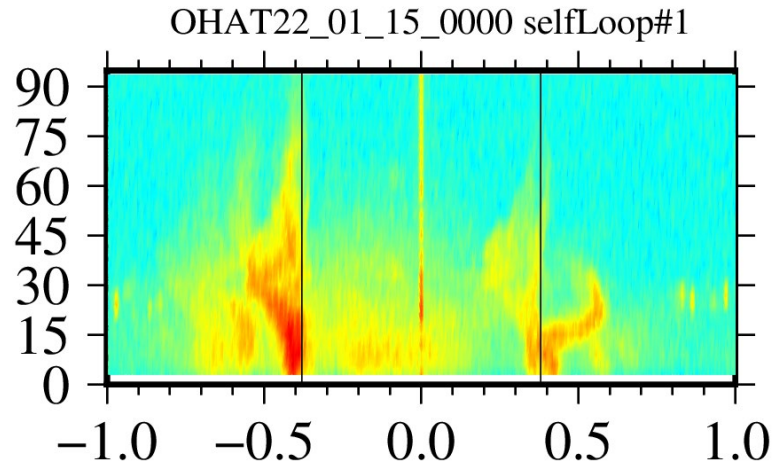
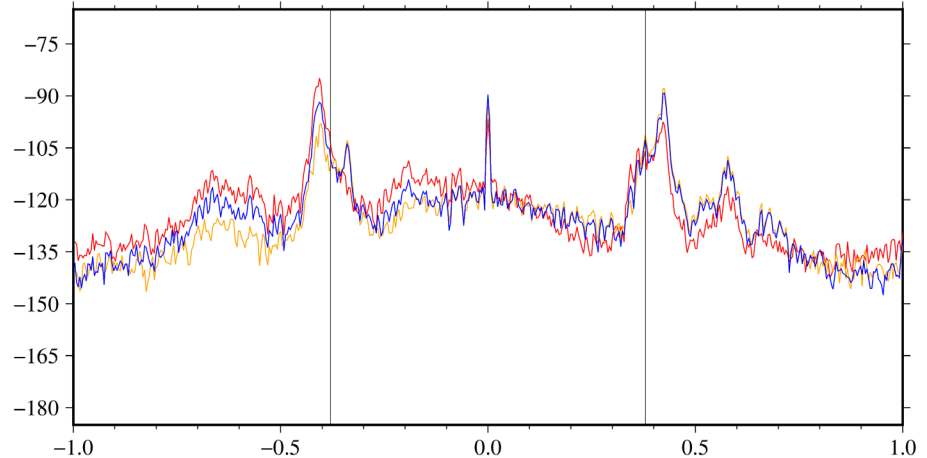


図23. Anntena1 (self spectra) のスペクトル図と3kmにおける受信電力の強さ



cross spectra

- FirstOrderが分からない

voltage(dBm)

-250 -240 -230 -220 -210 -200 -190 -180 -170 -160 -150 -140



※カラスケール調整済み

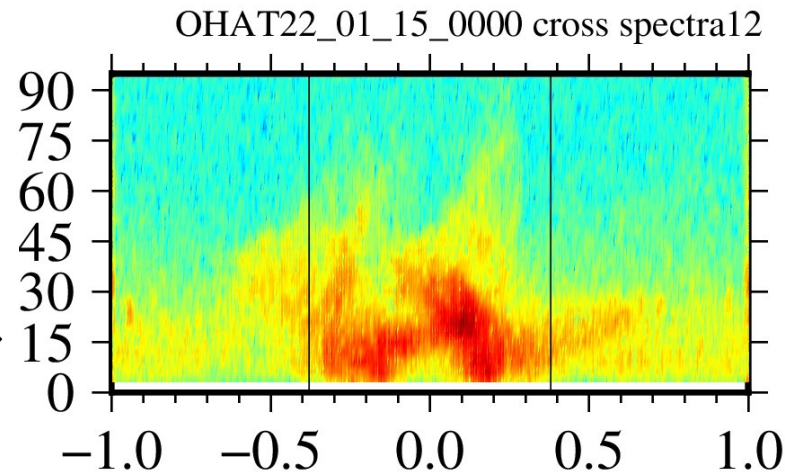
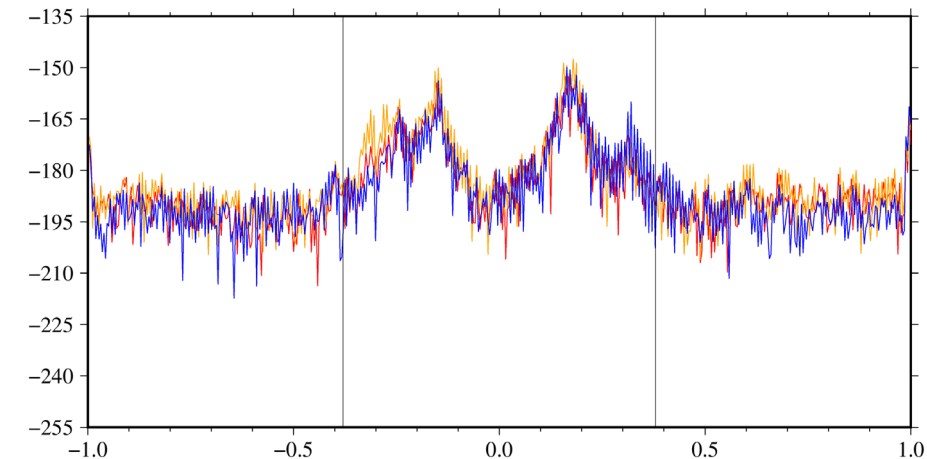


図24. Anntena12 (cross spectra) のスペクトル図と3kmにおける受信電力の強さ



cross spectraの解析方法の誤りが生じている可能性

他の論文とのスペクトル図の比較

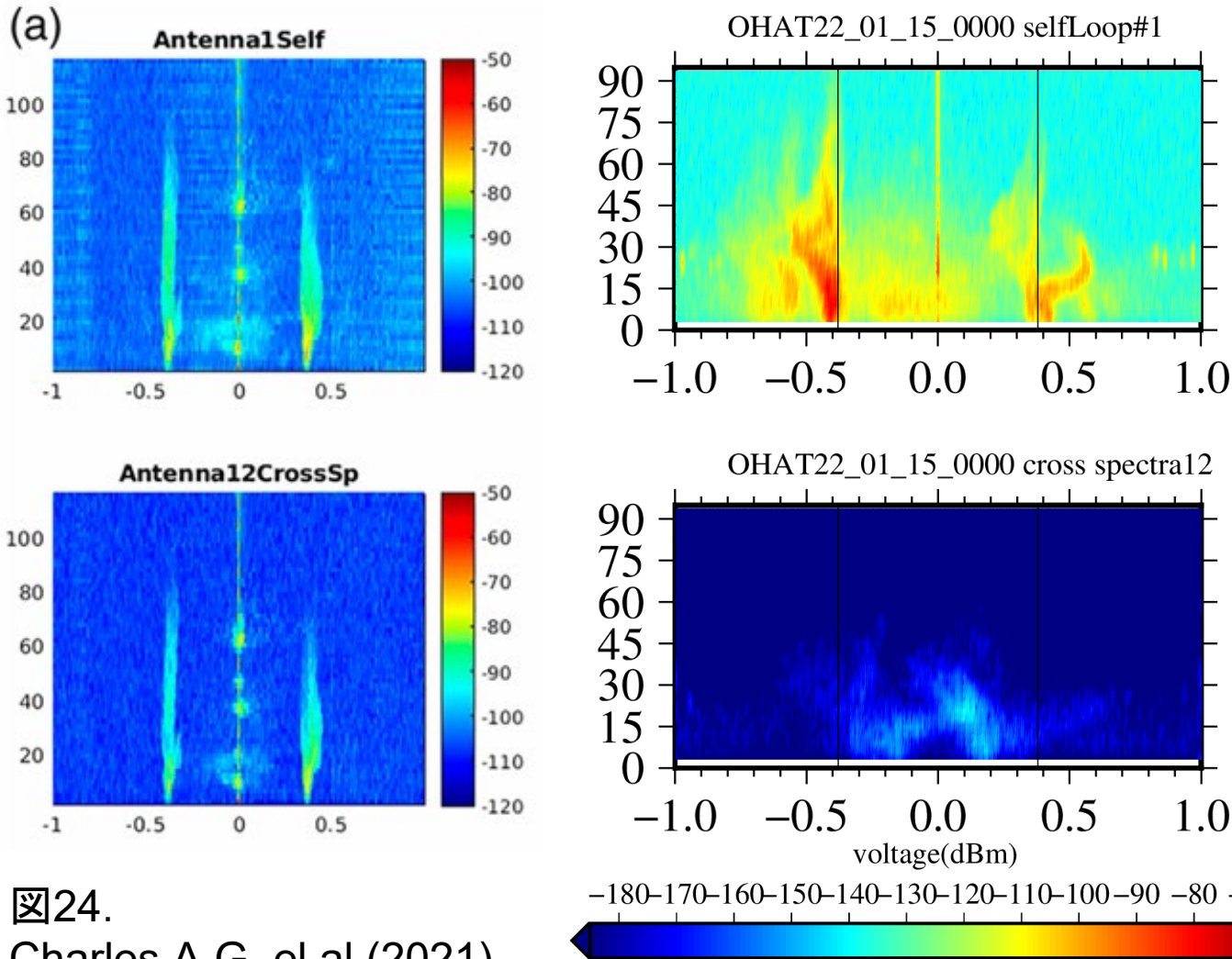


図24.
Charles,A.G. et al.(2021)
によるself spectraと
cross spectraの図

図25. 大畑局における
self spectraとcross spectraの図

self spectraとcross spectraの比較

- ・ カラースケールがほぼ同じのはず
- ・ どちらもFirst Orderは見られるはず

カラースケール
の調整

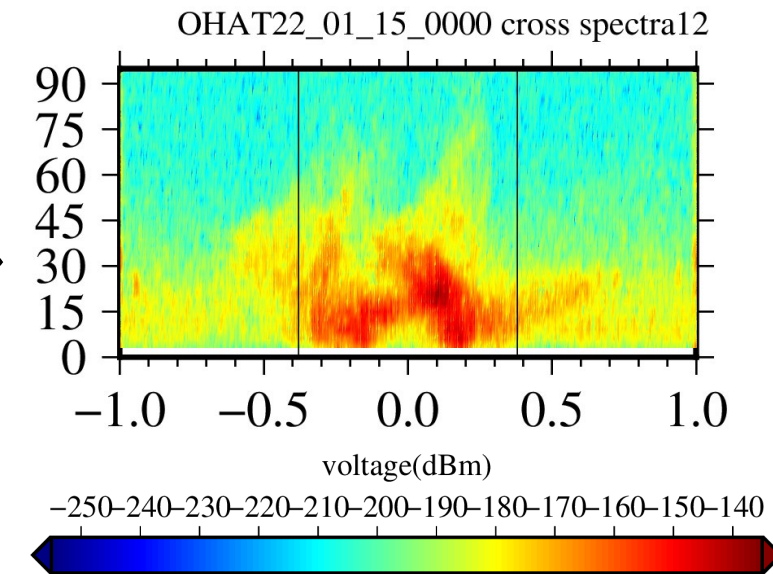


図26. 大畑局における
self spectraとcross spectraの図
(カラースケール調整済み)

まとめ

- ・ 短周期の現象の観測を行うために、短周期で観測データを処理することで、従来とは異なる視線方向流速を確認することができた

今後の展望

- ・ 最小二乗法、MUSICアルゴリズムに向けたcross spectraの解析
- ・ 方位角導出精度の向上による短周期流動場の導出