

# バイスタティックレーダを用いた 海洋観測の信号処理法の検討

川田 真志<sup>\*(1)</sup>, 藤井 智史<sup>(2)</sup>, 横洲 弘武<sup>(3)</sup>

(1)琉球大学大学院 理工学研究科

(2)琉球大学 工学部

(3)中部電力株式会社

# 目次

1. 研究背景
2. バイスタティックレーダの概要
3. バイスタティック受信実験
4. 信号処理
5. 測定結果
6. まとめと今後の課題

# 研究背景

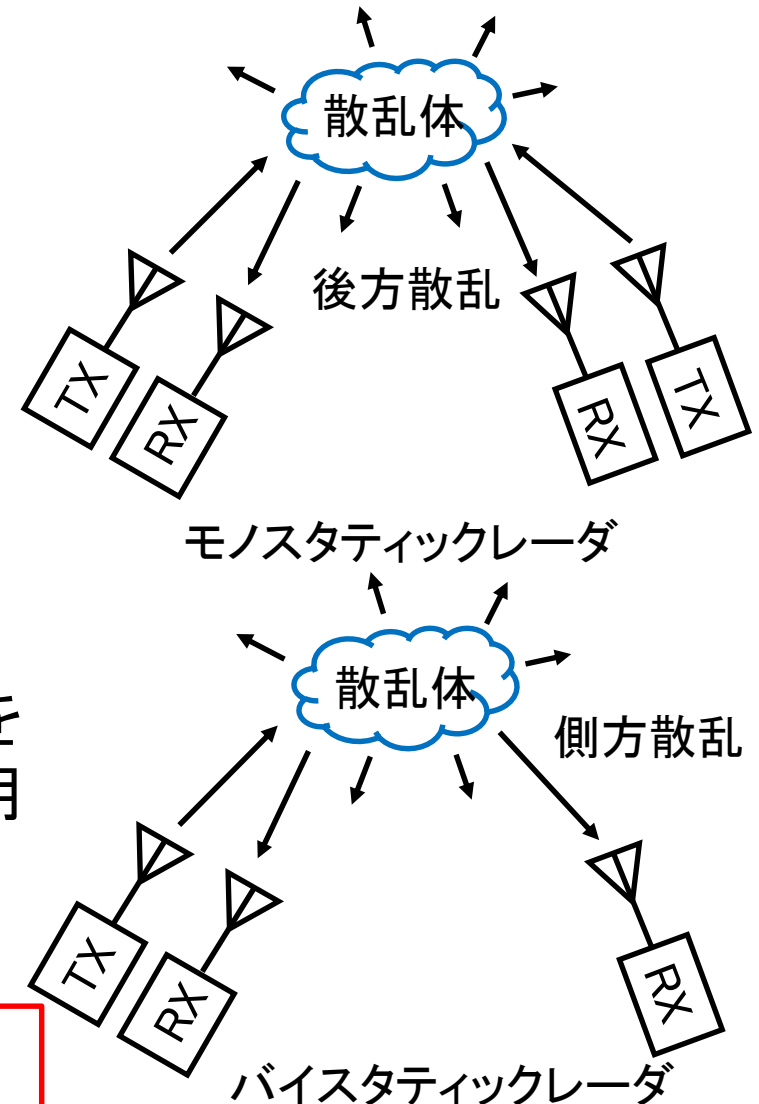
ドップラー速度ベクトルを算出するためにはモノスタティックレーダを複数台設置する必要がある

複数の送信周波数を使用することによって混信が発生する可能性

1台の送信機に対して複数の受信機を配置するバイスタティックレーダを使用



**コスト削減と周波数の有効利用**



# 研究背景

- ・バイスタティックレーダの問題点

- ✓ 距離の離れた箇所に設置されたレーダ同士の時刻同期と周波数同期が課題

本研究では

浜岡原子力発電所前面海域においてバイスタティック受信実験を実施

- ・自己相関法による時刻同期
- ・参照信号を使用した相互相関法による時刻同期

推定される風向の情報と、気象庁のデータから受信実験を実施した地域周辺の風向とを比較、検討を行う

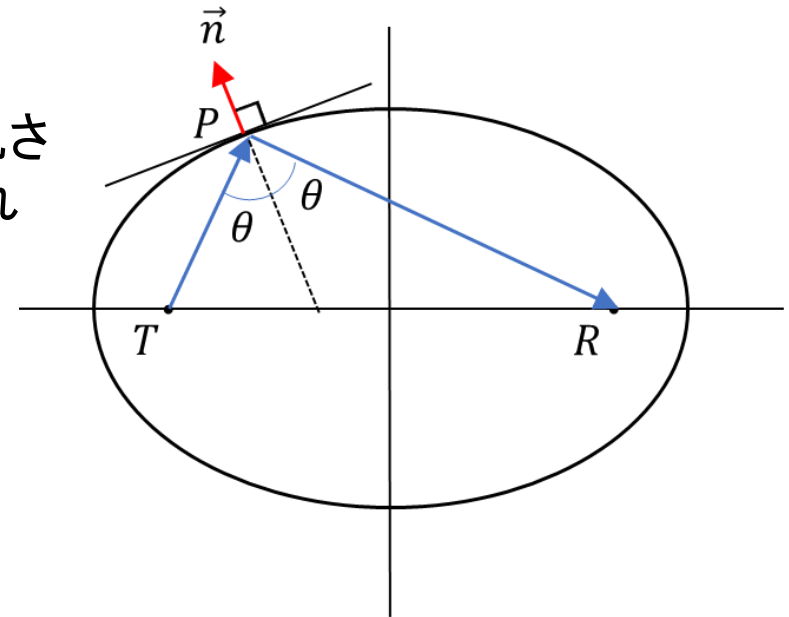
# バイスタティックレーダの概要

## ・バイスタティックレーダの幾何学

送信点Tから照射された電波が散乱点Pで散乱され、その散乱波が同時刻に受信点Rで受信されると仮定

受信点Rで受信されるエコーは経路長TPRが等しくなるような点Pにおける散乱波である。

その点Pの軌跡は、送信点Tと受信点Rを焦点とする楕円の軌跡となる

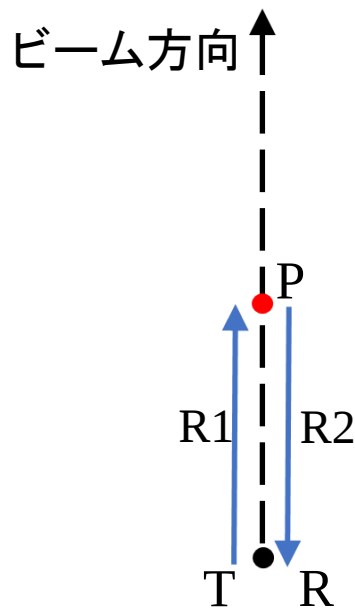


バイスタティックレーダにおける送信点(T)、受信点受(R)、散乱点(P)の位置関係

# バイスタティックレーダの概要

## ・モノスタティックレーダとの比較

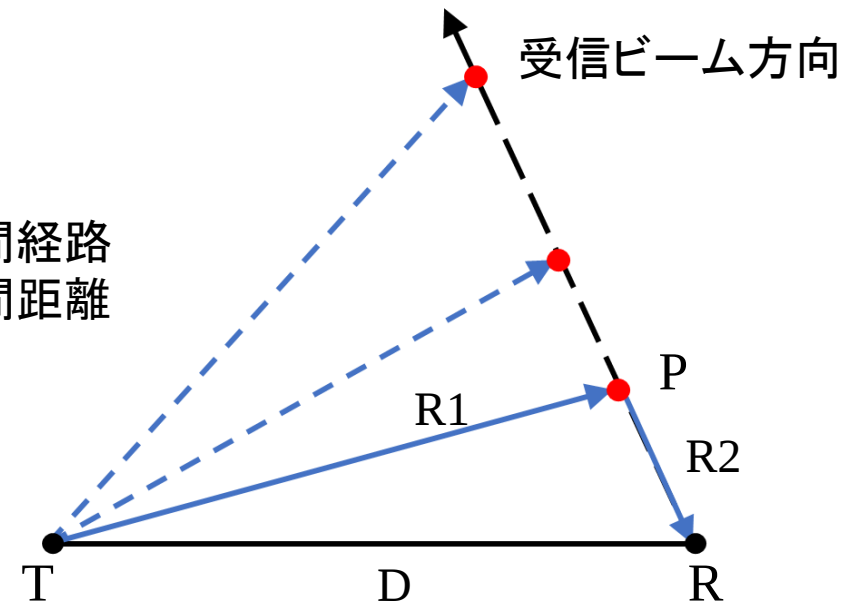
### 1. 送受信時間差と距離



モノスタティック配置

モノスタティック配置での受信ビーム方向での送受信時間差は散乱点までの距離 ( $R1=R2$ ) に比例

T:送信点  
R:受信点  
P:散乱点  
D:基線  
R1:送信点—散乱点間経路  
R2:散乱点—受信点間距離

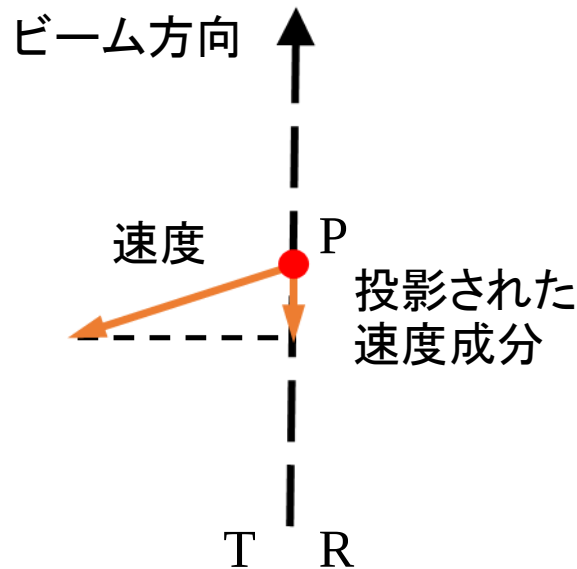


バイスタティック配置

バイスタティック配置では送信点—散乱点—受信点の経路長 ( $R1 + R2$ ) と基線長 ( $D$ ) との差に比例

# バイスタティックレーダの概要

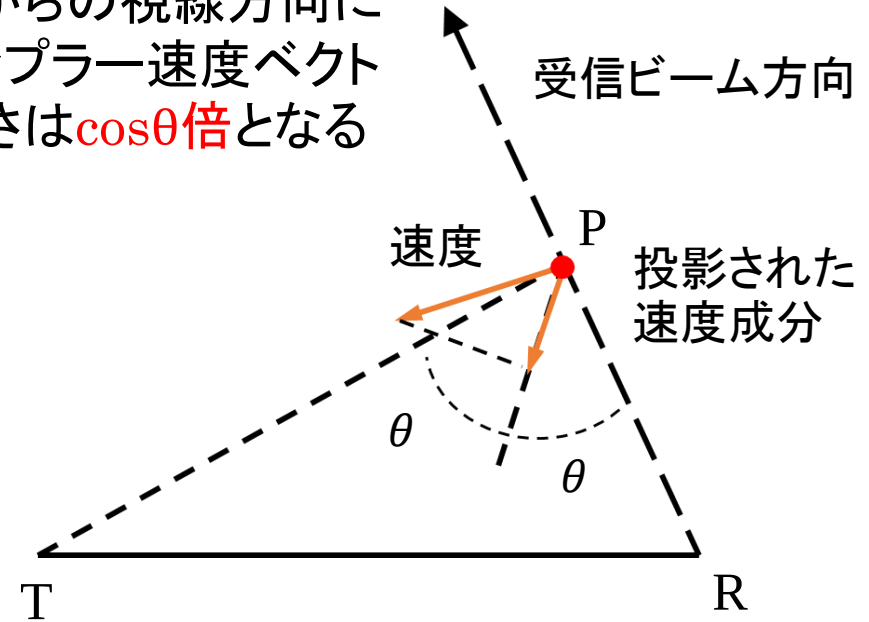
## 2. 速度投影方向



モノスタティック配置

受信ビーム方向に投影された速度成分がドップラー周波数シフト

受信点Rからの視線方向に対するドップラー速度ベクトルの大きさは $\cos\theta$ 倍となる

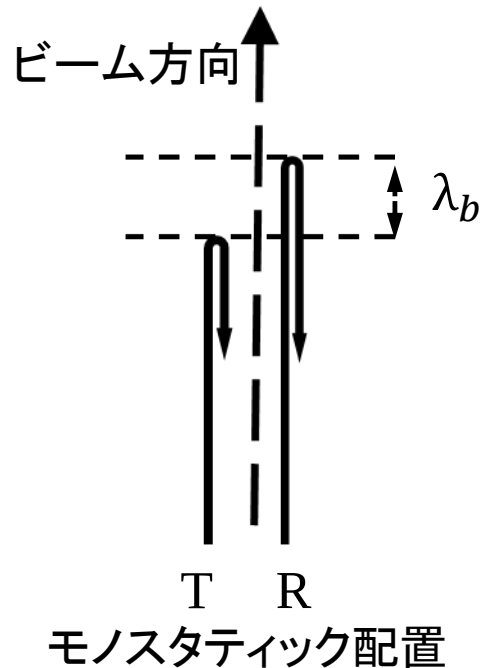


バイスタティック配置

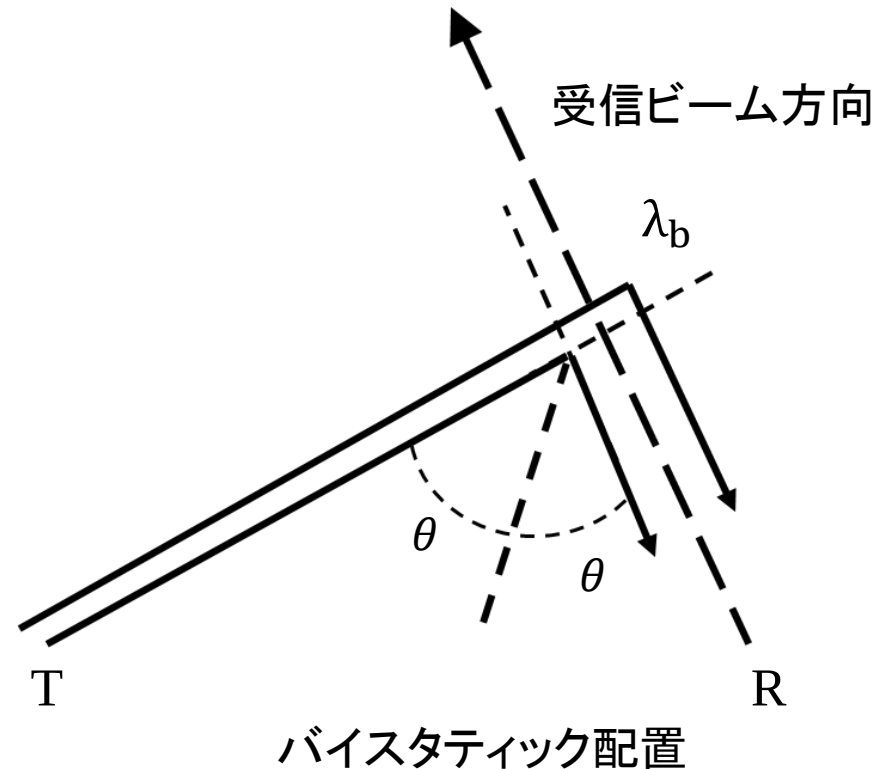
送信点—散乱点—受信点でなす角の2等分角方向に投影された速度に比例してドップラー周波数シフト

# バイスタティックレーダの概要

## 3. ブラッグ共鳴条件



モノスタティック配置ではどの距離でもブラッグ共鳴条件を満たす波浪の波長は電波の $1/2$ になる



バイスタティック配置では送信点—散乱点—受信点のなす角 $2\theta$ としたときブラッグ共鳴条件を満たす波浪の波長は電波の波長の $1/2 \times \cos(\theta)$ となる

# バイスタティックレーダの概要

## ・Bragg散乱の条件式

バイスタティック海洋レーダの場合における散乱波と送信電波の波長は、(1)式の条件下で位相がそろう。

$$\lambda_b = \frac{1}{2} \lambda \cos \theta \quad (1)$$

$\lambda$  : 電波の波長  
 $\lambda_b$  : 海洋波の波長  
 $\theta$  : 電波の入射角

## ・Bragg周波数

Bragg散乱に寄与する波の静止海面における位相速度に対応するドップラー周波数をBragg周波数と呼び、(2)式で表す。

$$f_B = \pm \sqrt{\frac{g \cos \theta}{\pi \lambda}} \quad (2)$$

$f_B$  : ドップラー周波数  
 $g$  : 重力加速度

# バイスタティック受信実験

## ・バイスタティック受信実験

2018年11月、静岡県磐田市福田海岸(N 34°39'44.8, E137°52'09.0)にてアレイアンテナを設置

垂直2エレメントの素子アンテナを8本で構成し直線配置

1時間ごとに10分間の時系列データを保存



設置したアレイアンテナ

# バイスタティック受信実験

## ・参照信号受信実験

参照信号(送信信号)は浜岡原子力発電所建屋内に設置しているアンテナの電力ケーブルにて受信

## ・受信機

micro telecom社Perseus  
500kHzサンプリング



Perseus受信機

(<https://www.aor.co.jp/receiver/product/perseus/>より)

## ・送信信号に関して

中心周波数: 24.515 MHz

レーダ方式: FMICW

周波数掃引幅: 100 KHz

掃引時間: 0.5s

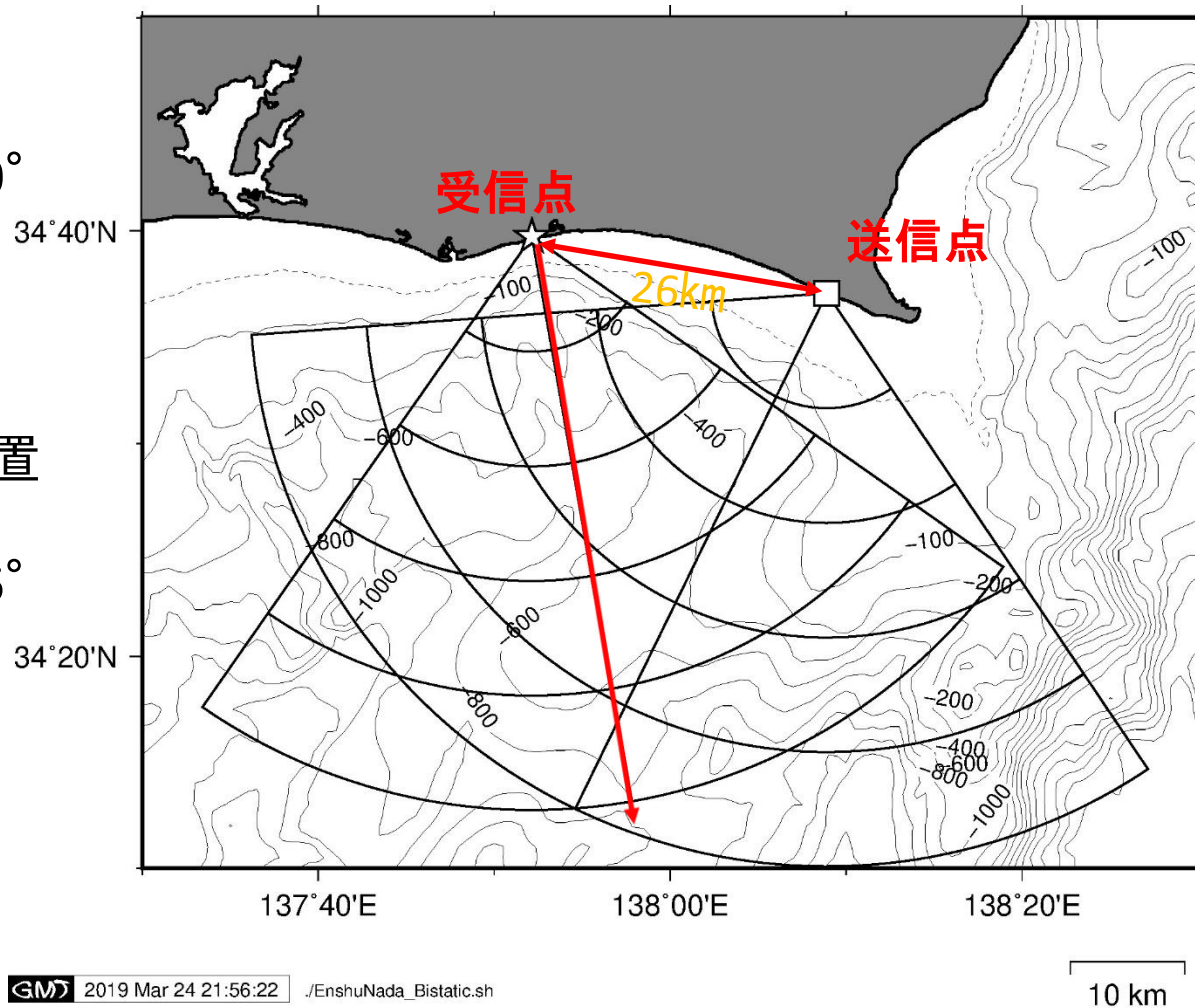
## ・送受信点間距離は約26km



# バイスタティック受信実験

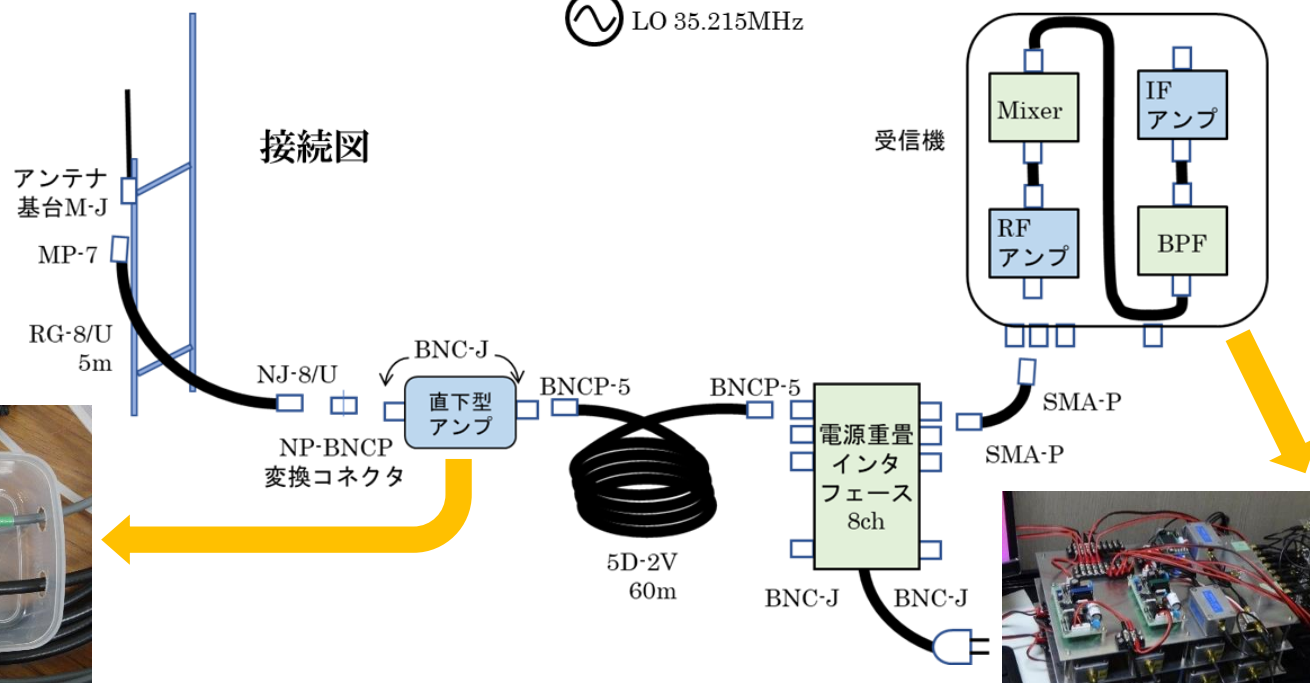
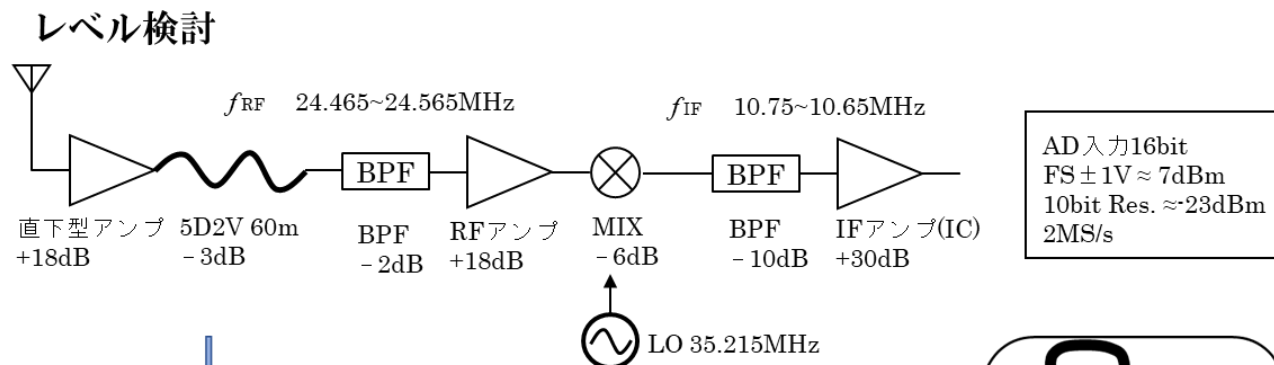
・受信実験アレイアンテナ  
ボアサイト方向: 北から $170^\circ$

・浜岡原子力発電所建屋設置  
のレーダ  
ボアサイト方向: 北から $206^\circ$



# バイスタティック受信実験

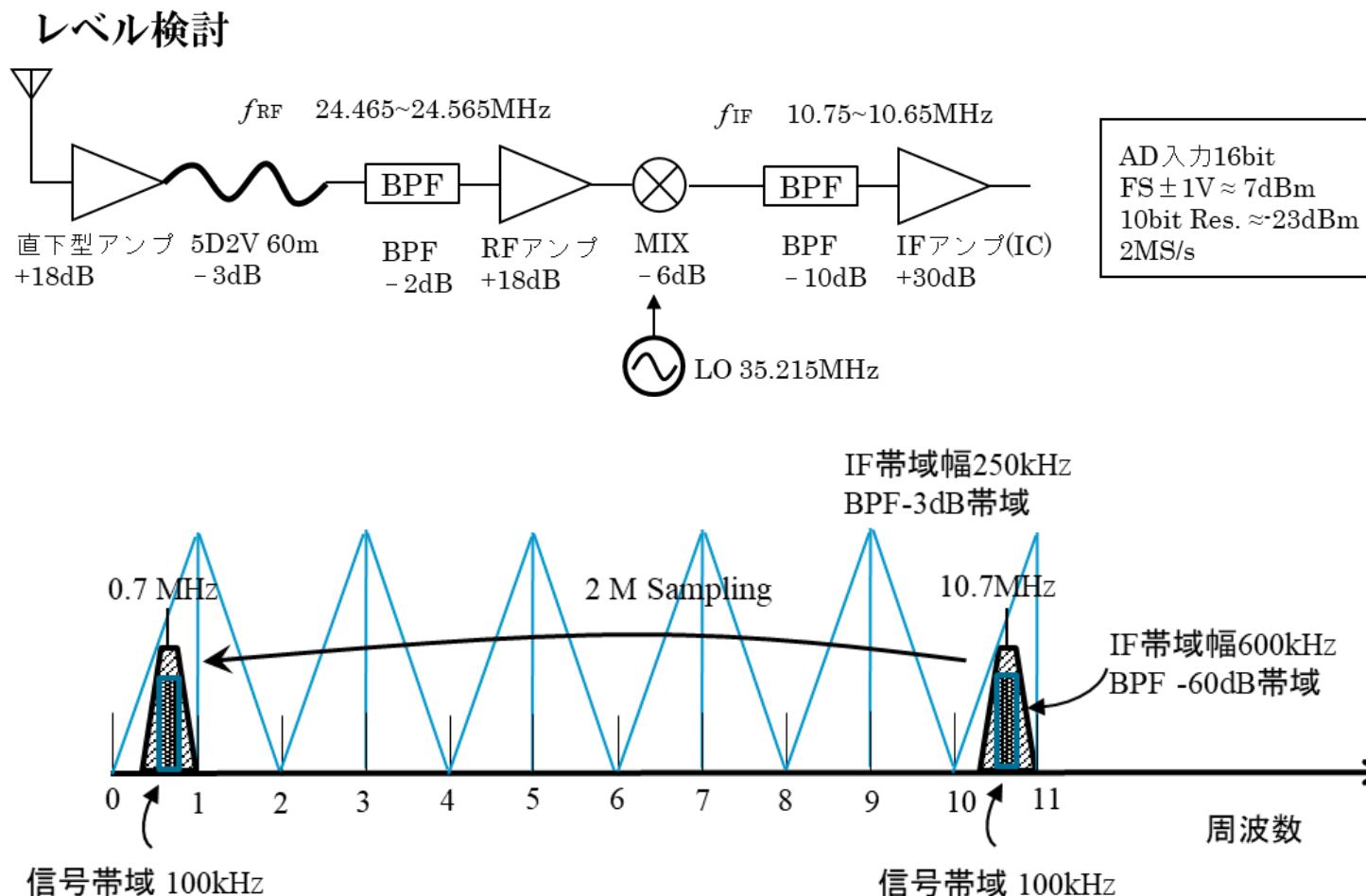
## ・製作した受信機



レベルダイアグラムと接続図

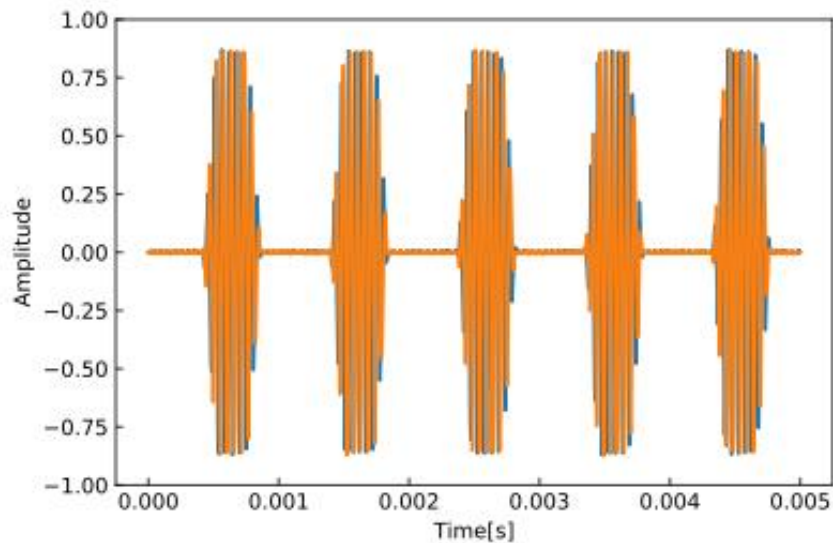
# バイスタティック受信実験

## ・サンプリング周波数

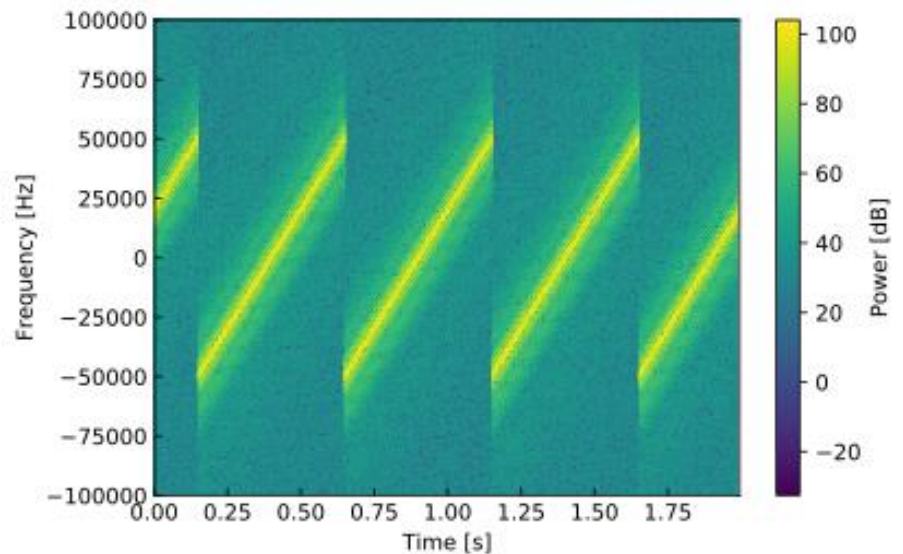


# バイスタティック受信実験

## ・送信信号波形とスペクトル図



信号波形



スペクトル

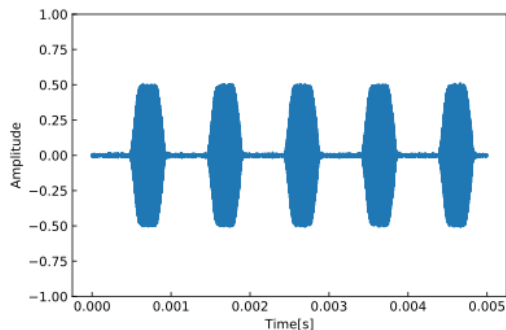


参照信号として用いる

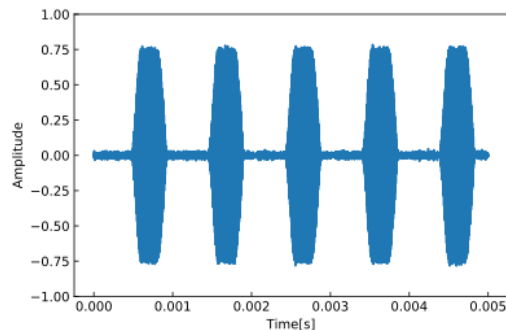
# バイスタティック受信実験

## ・バイスタティック受信信号波形

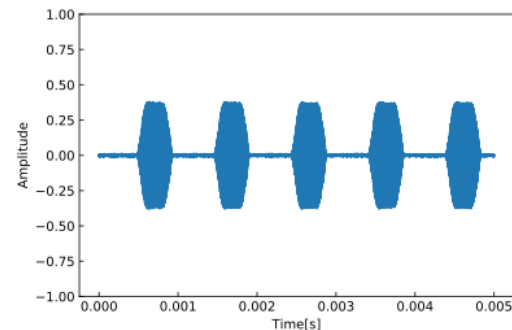
1ch



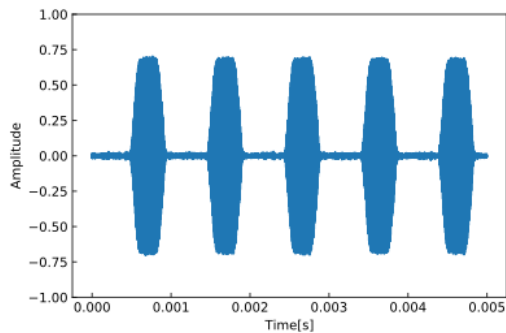
2ch



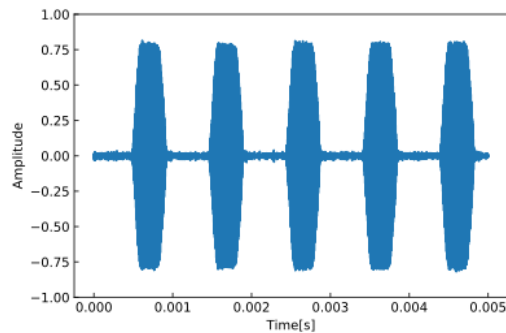
3ch



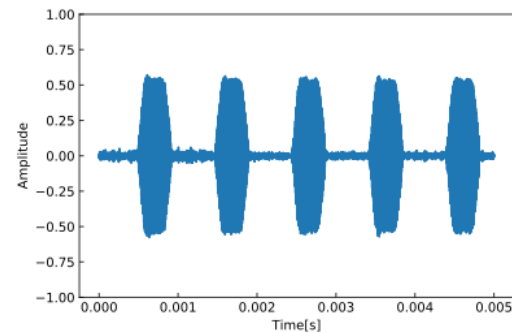
4ch



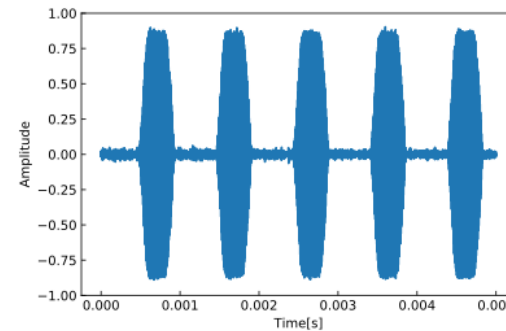
5ch



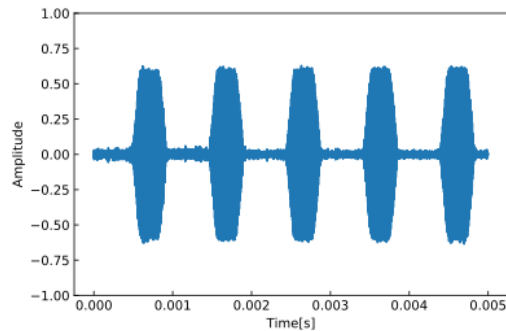
6ch



7ch



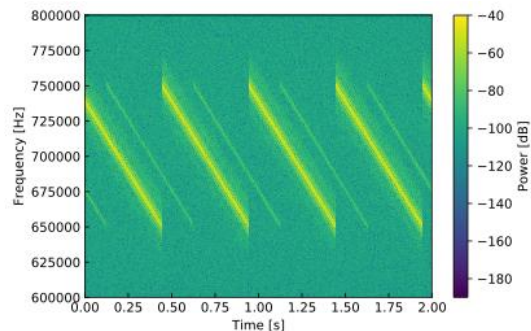
8ch



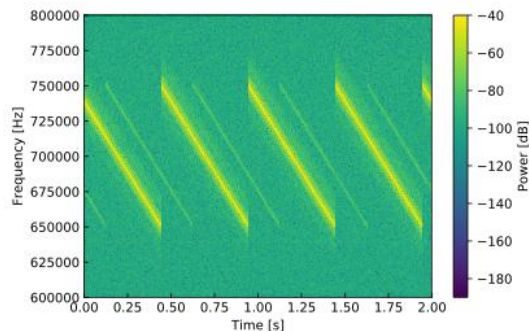
# バイスタティック受信実験

## ・バイスタティック受信信号のスペクトル図

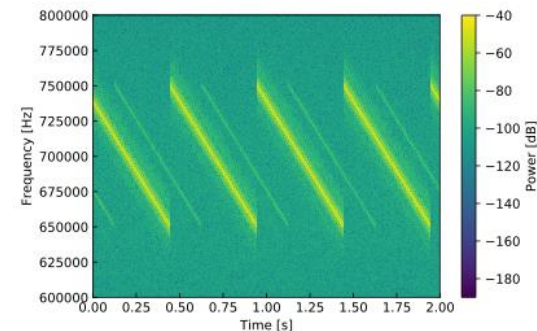
1ch



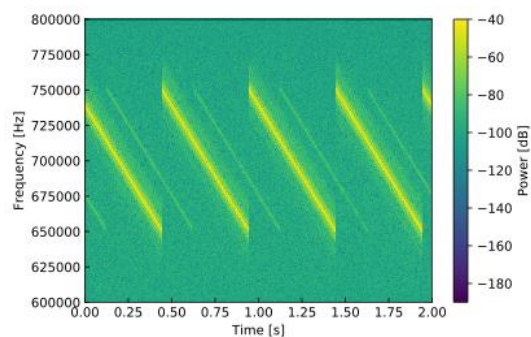
2ch



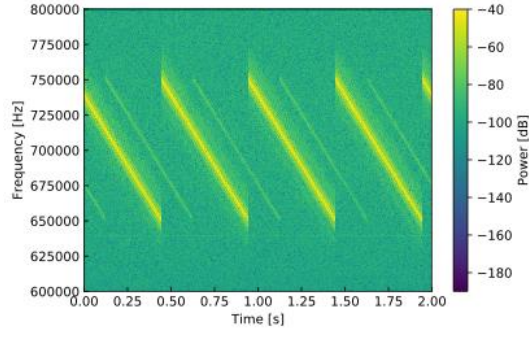
3ch



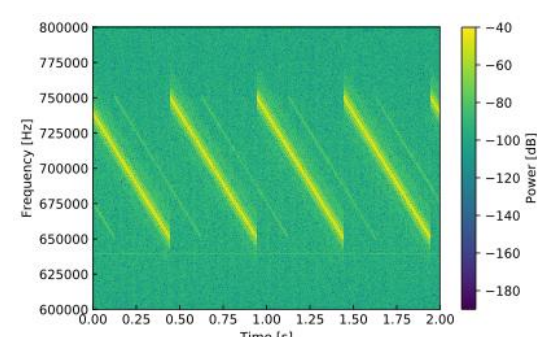
4ch



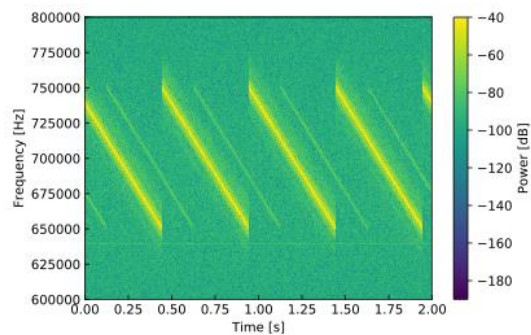
5ch



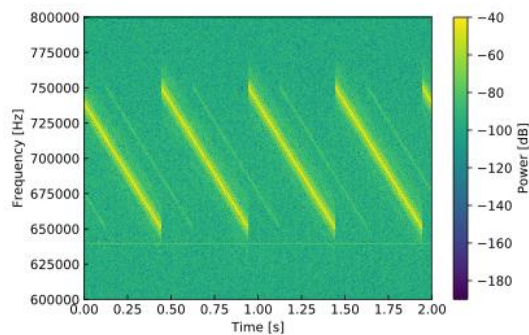
6ch



7ch



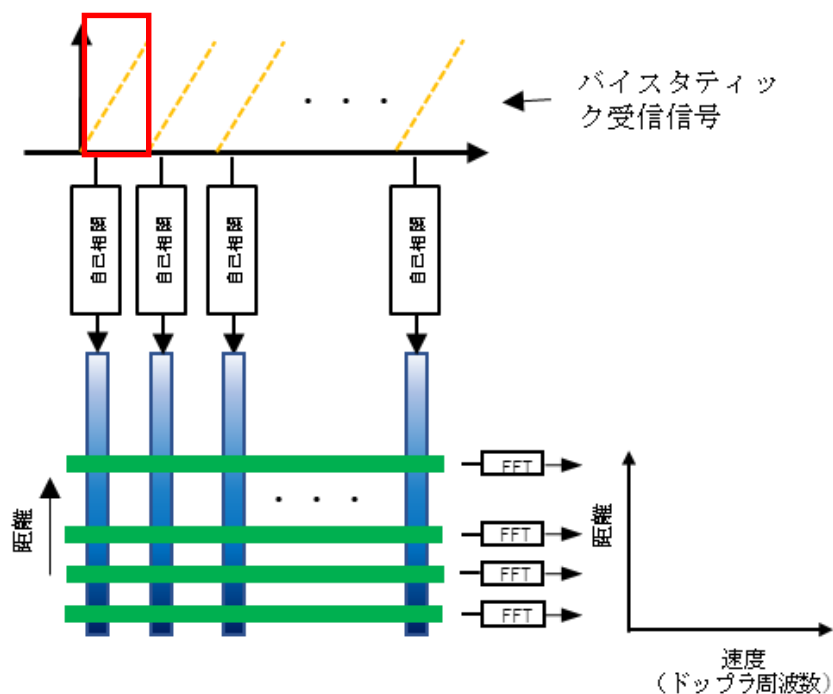
8ch



# 信号処理

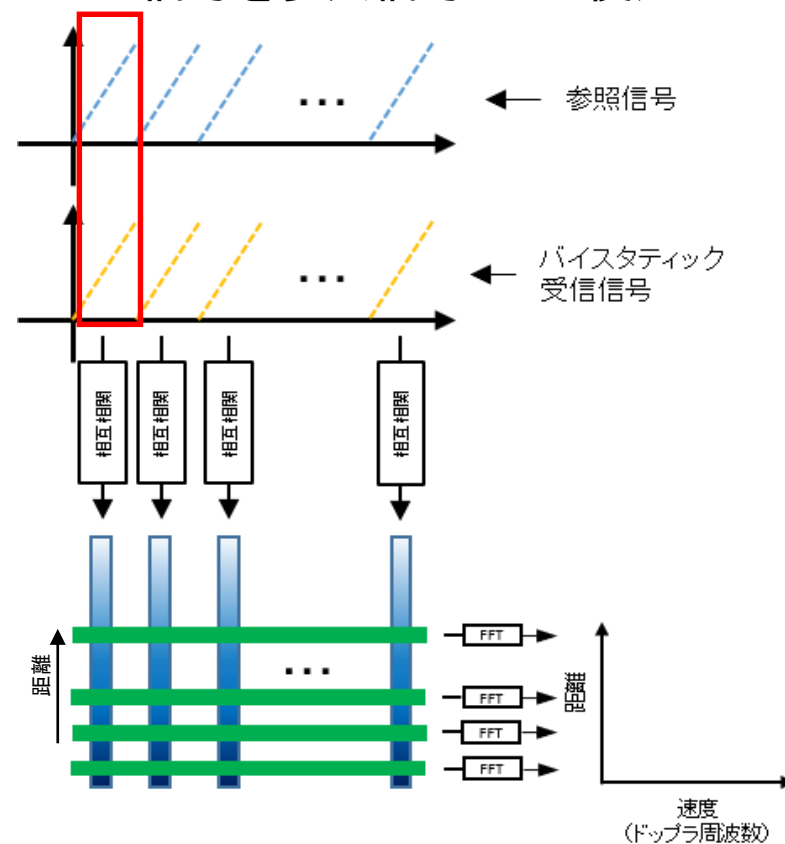
## ・自己相関

バイスタティック受信信号のみを使用



## ・相互相関

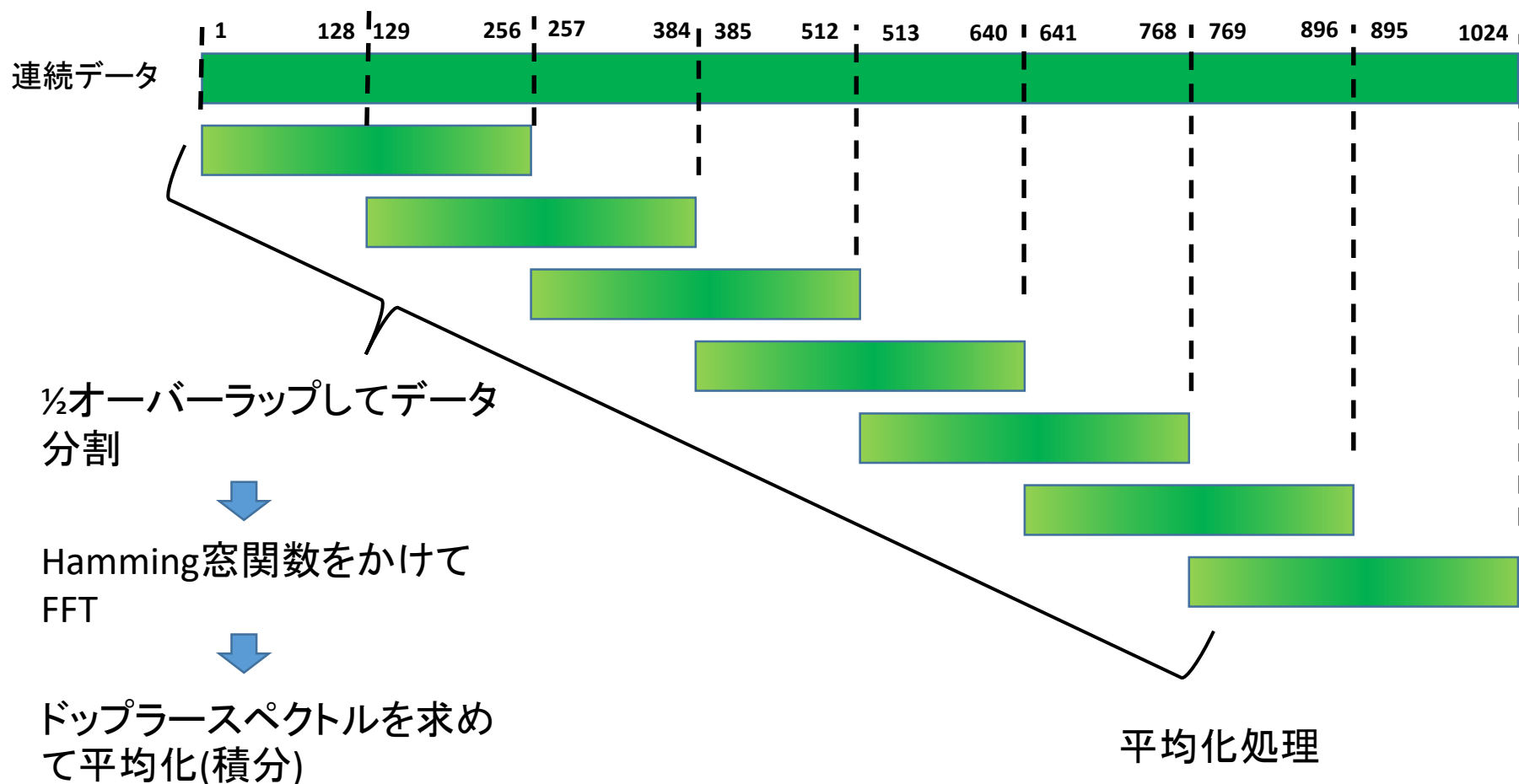
送信機近傍にて受信した送信信号を参照信号として使用



FMICWレーダにおけるドップラースペクトル算出のための信号処理

# 信号処理

## ・ランダムノイズの影響の削減

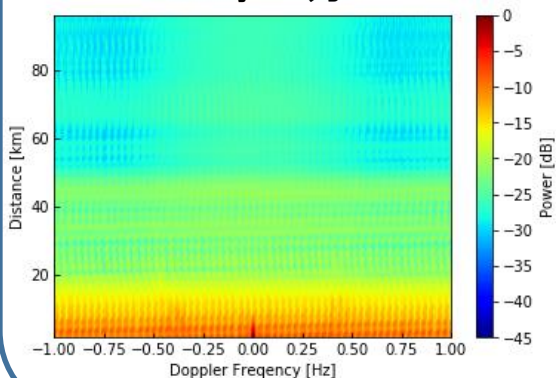


# 信号処理

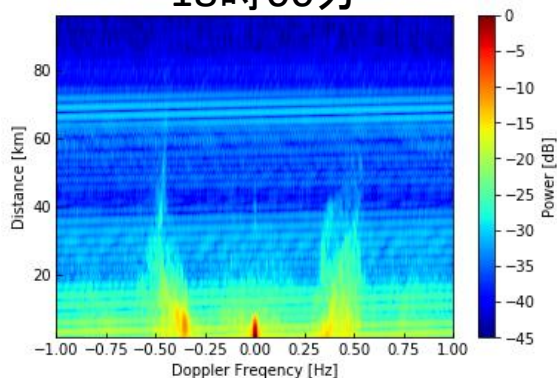
・2018年12月21日の17時から19時

## 自己相関

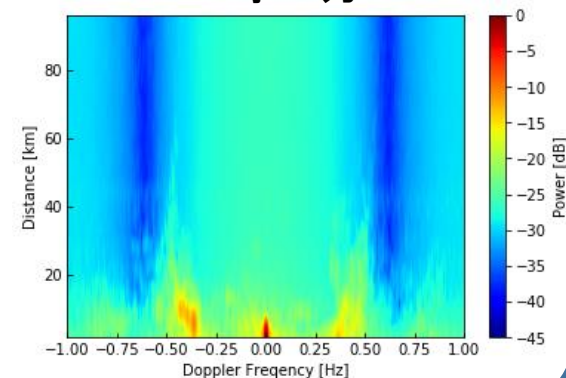
17時00分



18時00分

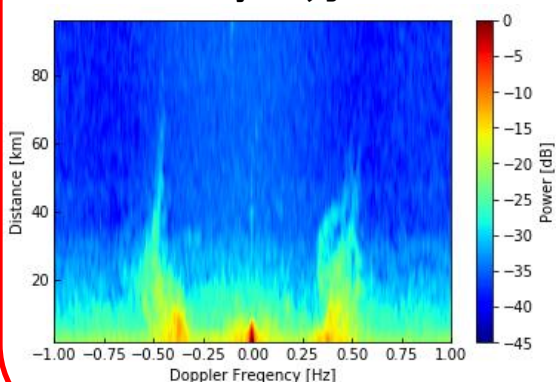


19時00分

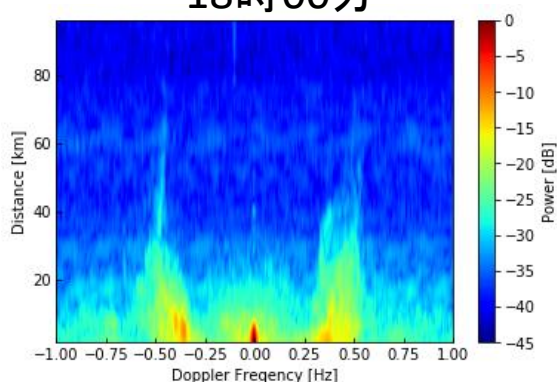


## 相互相関

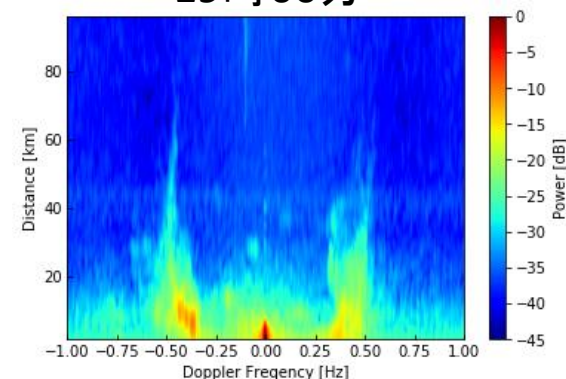
17時00分



18時00分



19時00分



# 測定結果

○2018年12月21日11時00分の観測データ

スペクトルピークの

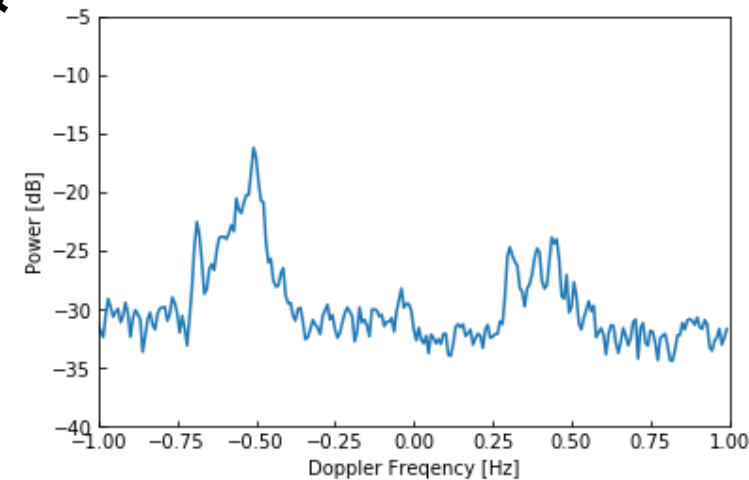
- ・正の値が大きければレーダに対して近づく風
- ・負の値が大きければレーダに対して遠ざかる風
- ・同じ大きさなら横風

・21km地点ではレーダに対して遠ざかる風ということが確認できる

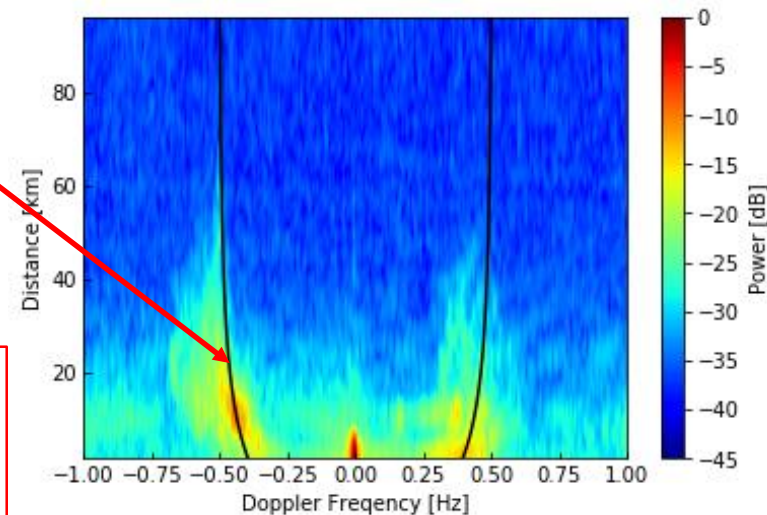
距離が近いほどBragg周波数が小さくなる

$$f_B = \pm \sqrt{\frac{g \cos \theta}{\pi L_0}} \quad (2)$$

・約60kmまでBragg周波数付近にピークが現れており、このピーク周波数とBragg周波数の差から、表層流速を求めることができる



21km地点でのドップラースペクトル



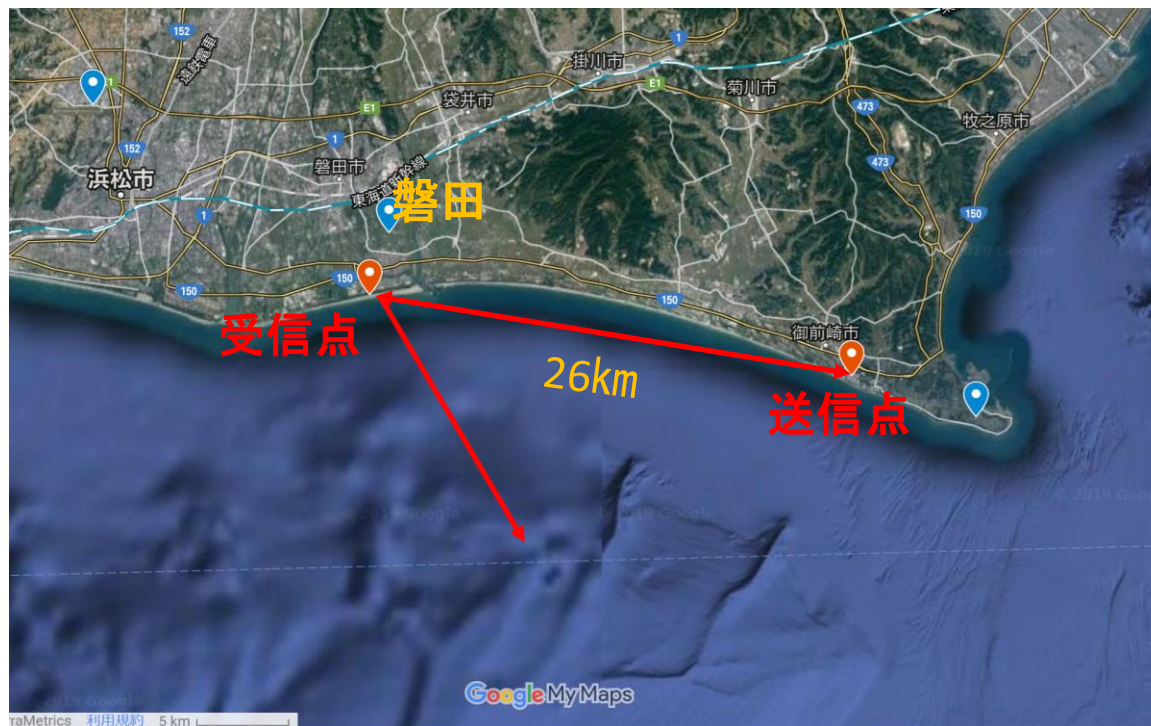
ドップラーマップ

# 測定結果

- ・浜岡原子力発電所前面海域に観測ブイがない



磐田市に設置しているアメダスにより観測された風向データとドップラーマップから推定される風向とを比較



(<https://www.google.com/maps/?hl=ja>より)

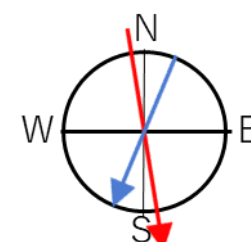
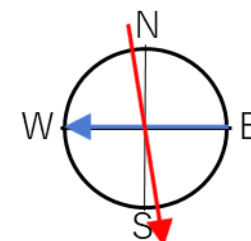
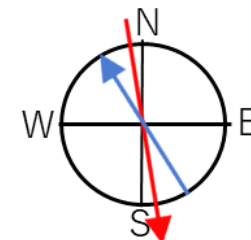
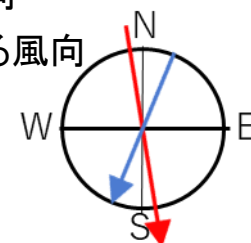
# 測定結果

## 2018年12月21日における磐田市での時間別の風向風速データ

| 年月日            | 磐田      | 磐田       |
|----------------|---------|----------|
|                | 風速(m/s) | 風速<br>風向 |
| 2018年12月21日10時 | 1.4     | 北北東      |
| 2018年12月21日11時 | 3.2     | 北北東      |
| 2018年12月21日12時 | 2.3     | 東南東      |
| 2018年12月21日13時 | 3.4     | 南東       |
| 2018年12月21日14時 | 2.1     | 南東       |
| 2018年12月21日15時 | 1.9     | 東南東      |
| 2018年12月21日16時 | 2.4     | 東        |
| 2018年12月21日17時 | 1.9     | 東        |
| 2018年12月21日18時 | 1.6     | 北        |
| 2018年12月21日19時 | 2.0     | 北北東      |
| 2018年12月21日20時 | 1.2     | 北北東      |
| 2018年12月21日21時 | 1.7     | 北北東      |

→ レーダ視線方向

→ 磐田市における風向

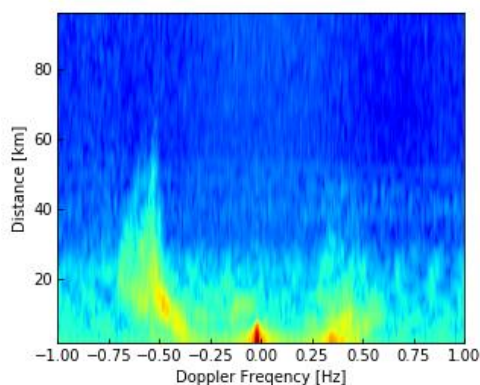


# 測定結果

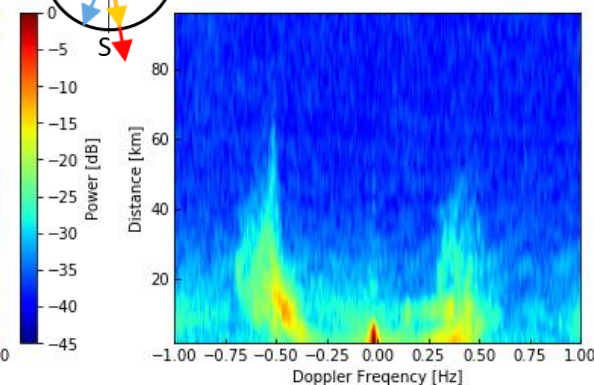
## ・12月21日の観測データ

- レーダ視線方向
- 推定される風向
- 磐田市における風向

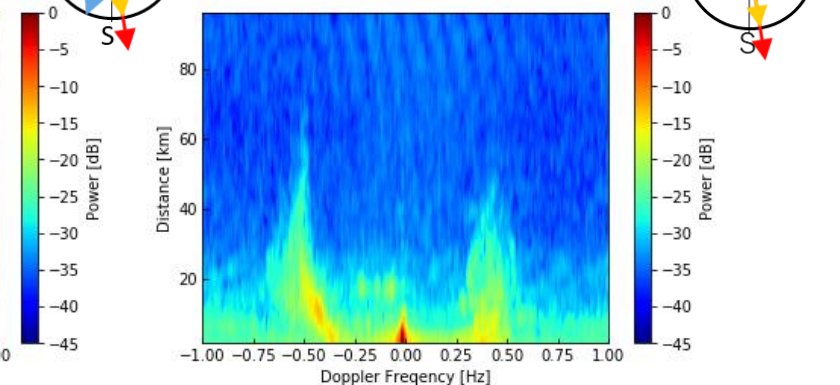
10時00分



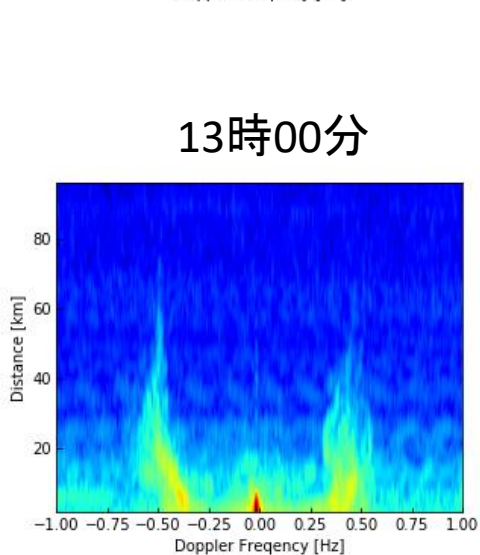
11時00分



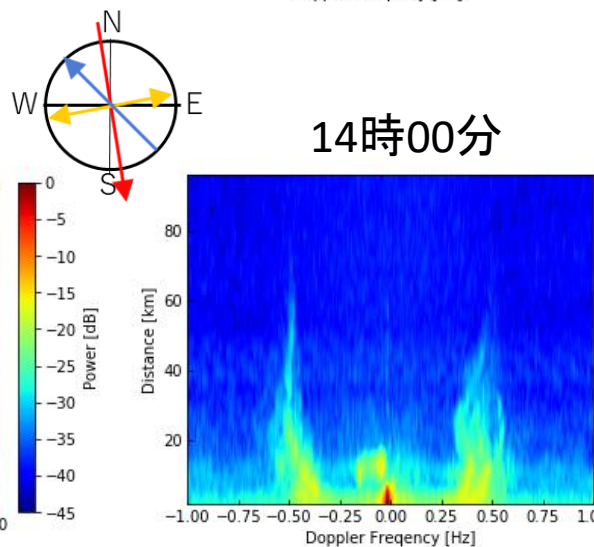
12時00分



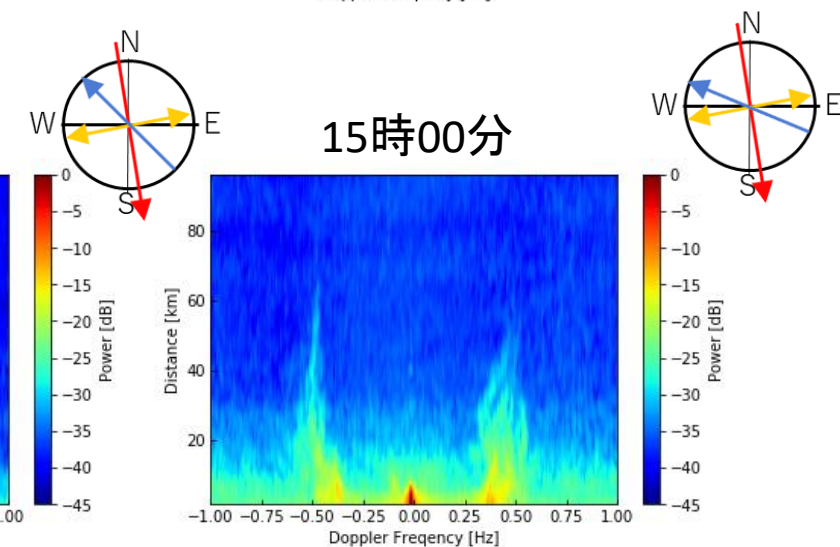
13時00分



14時00分



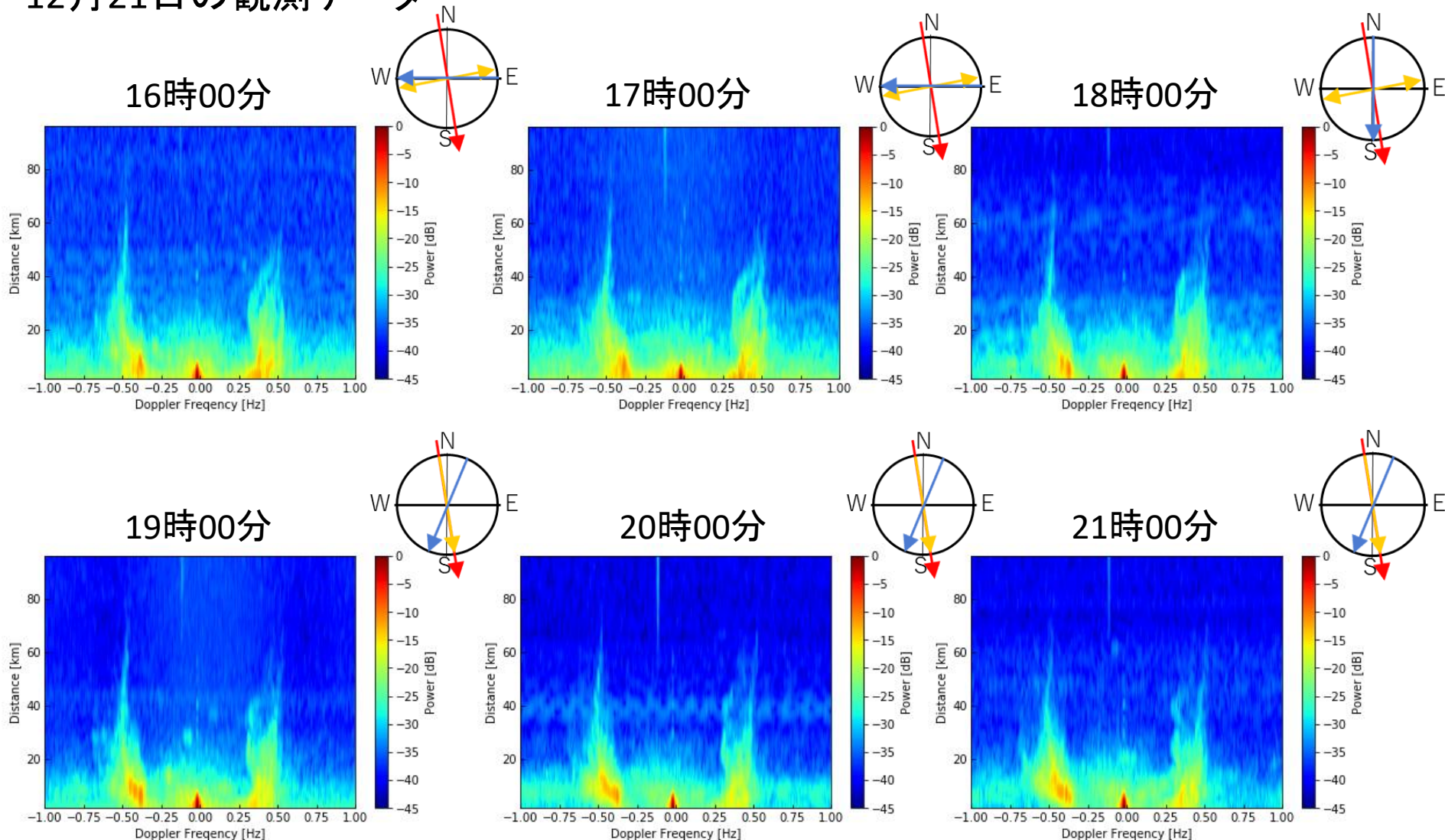
15時00分



2018年12月21日の10時から21時にかけてのドップラマップ

# 測定結果

## ・12月21日の観測データ



2018年12月21日の10時から21時にかけてのドップラーマップ

# 測定結果

## まとめ

- ・時刻同期の手法として自己相関を用いるより相互相関を用いた場合のドップラースペクトルの方が良好
- ・約60kmまでBragg周波数付近にドップラー周波数のピークが現れていることが確認できた
- ・時間別のドップラーマップから風向を判断できることが確認できた

## 今後の課題

- ・ドップラースペクトルのS/N比を改善するような信号処理法の検討を行う
- ・ボアサイト方向のみでの観測結果であるため、位相調整を行った場合の確認
- ・ドップラースペクトルから表層流速を算出する