

海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用

海洋レーダによる海象観測と海洋監視の 実験報告

亀田 洋志 高橋 龍平 伊藤 聡宏※1
片岡 智哉※2 藤井 智史※3

※1 三菱電機株式会社

※2 愛媛大学大学院理工学研究科

※3 琉球大学工学部

2023年12月19日

 三菱電機株式会社

1. 実験の目的・概要

海洋レーダ多機能化を目的として、
海象観測(潮流と波浪、風況の推定)に資する受信信号鮮明化とその提供、
海洋監視：洋上船舶等の検出追尾(または海象観測で明確な物標認識と船舶信号の除去)、
に関する、レーダ信号処理/情報処理技術を開発中である。

これらの評価を目的として、高知県室戸岬周辺に設置中の海洋レーダデータの取得状況について説明します。

1. 実験の目的・概要

表 レーダサイト一覧

番号	レーダサイト名	目的	備考
1	高岡局	潮流解析等	琉球大保有レーダ
2	佐喜浜局	潮流解析等	番号1と同じ
3	行当局	信号処理方式評価 海象解析、洋上船舶の検知・追尾	弊社保有の Helzel社製海洋レーダ 24年1月より MIMO仕様新設
4	室戸港局	モノスタティック、バイスタティック監視評価	24年1月より 番号3の旧機を移設

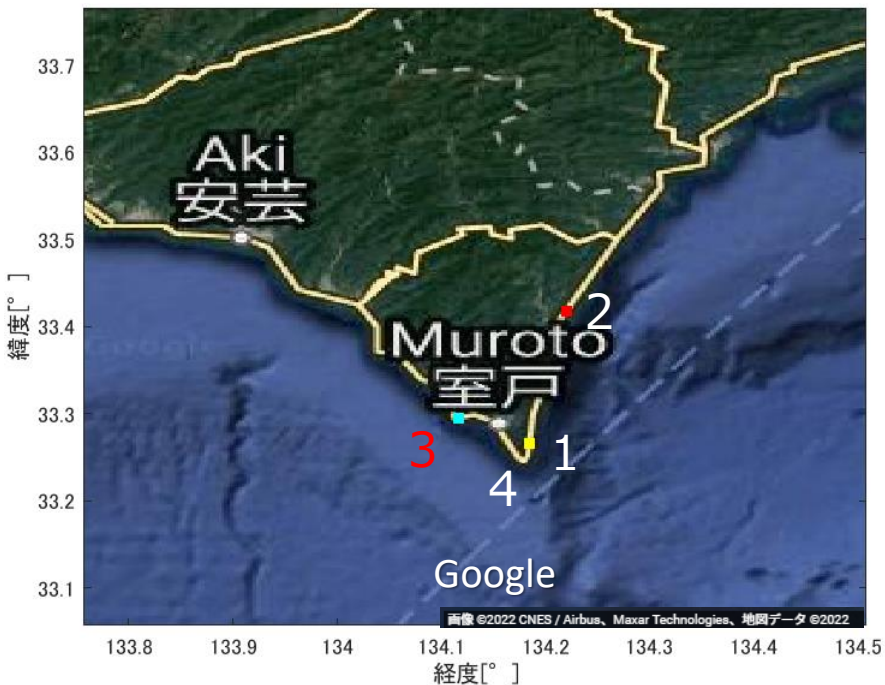


表 送信条件

項目	設定値	備考
送信出力	80[W]	最大出力80[W]
変調方式	FM-CW	
送信周波数	24.515[MHz]	
送信帯域幅	100[kHz]	距離分解能1.5[km]
掃引時間	0.2166[s]	
掃引内サンプル数	1840	
掃引数	4096	1観測 14分57秒 データレート20分

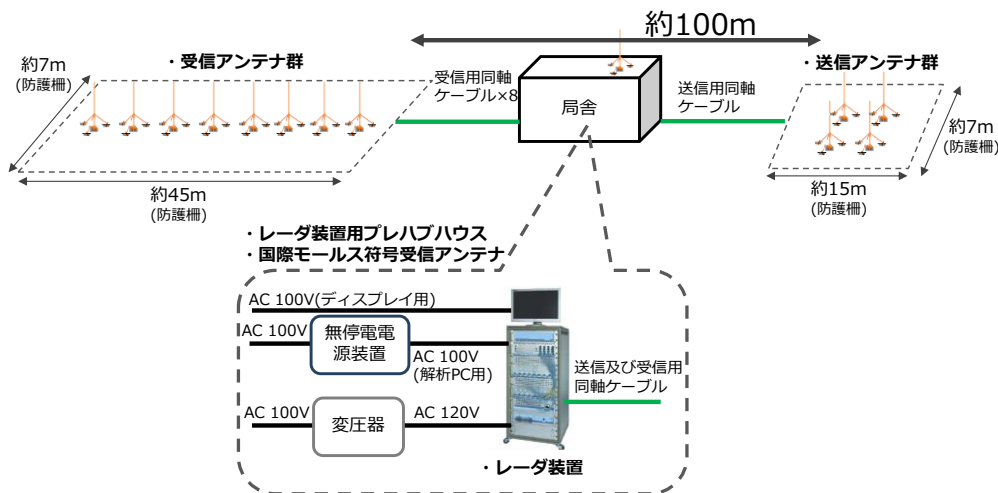
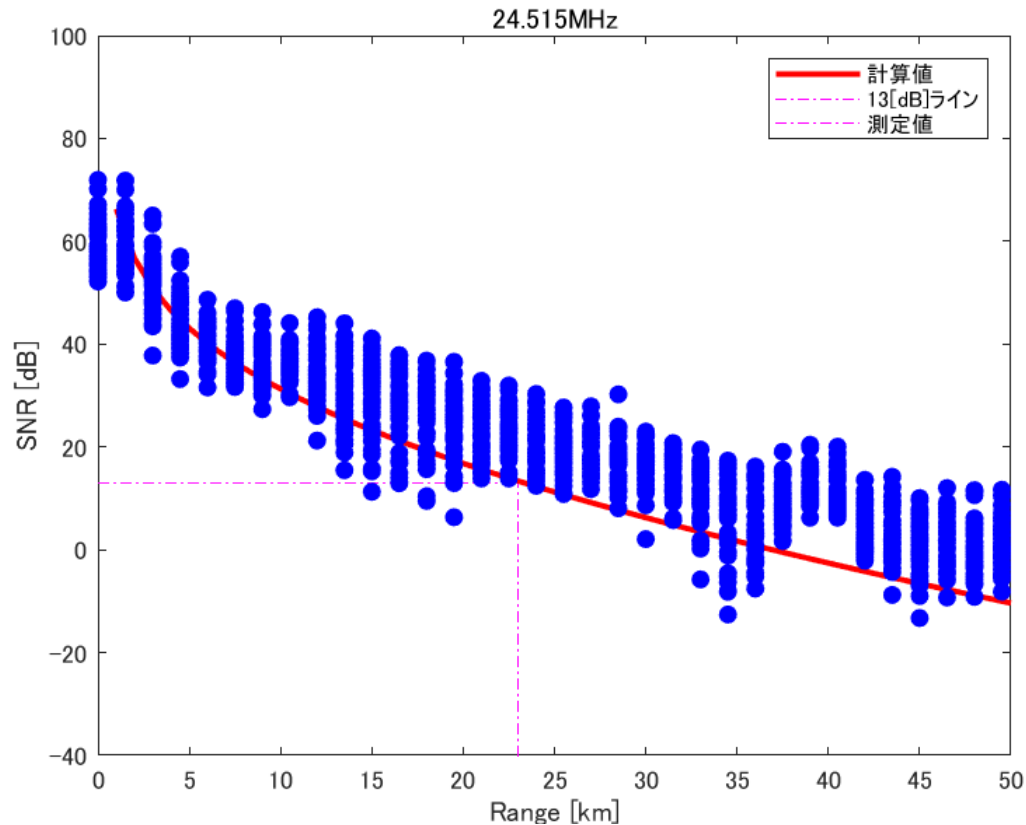


図 行当局の構成

2. 計測状況(行当局)

■ 海象に対する回線設計例と実測値

短波帯のレーダ方程式に運用中のレーダ諸元, 表面波伝搬損失を算出して距離毎の受信SNRを計算。
海象のクラッタ反射係数-23dB[1]を設定



測定値については
モーメント法前のBragg
一次散乱付近のピーク
値を取り出す

測定値が計算値より高
めに出る

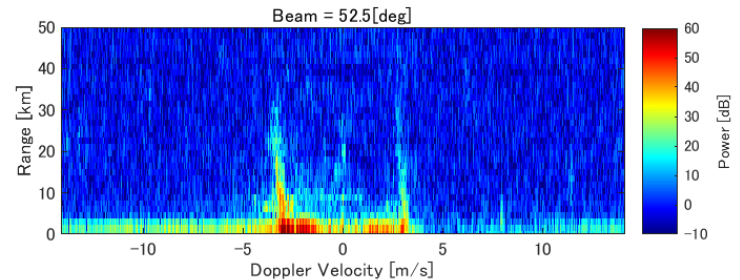
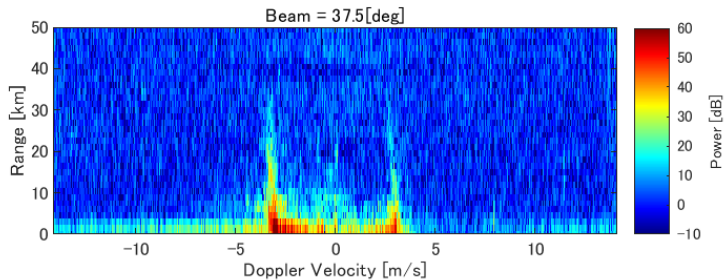
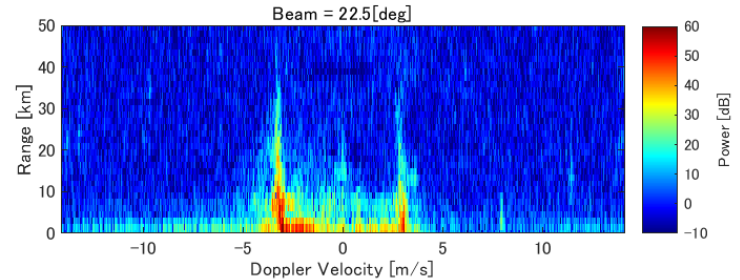
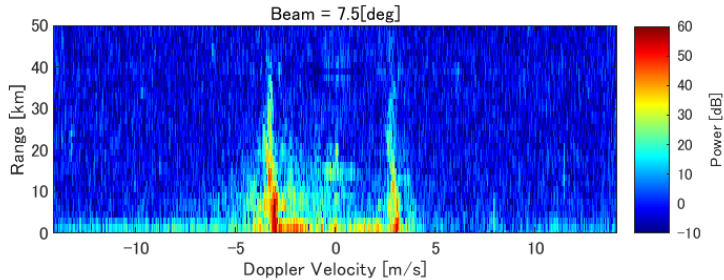
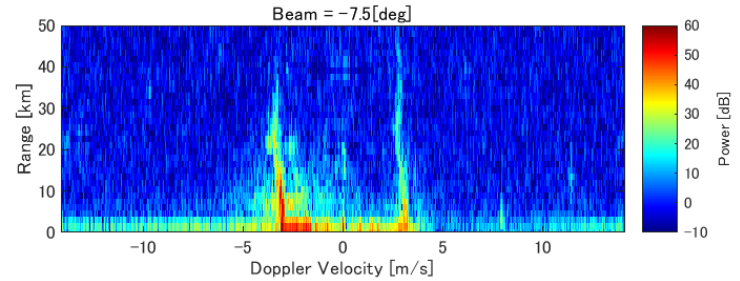
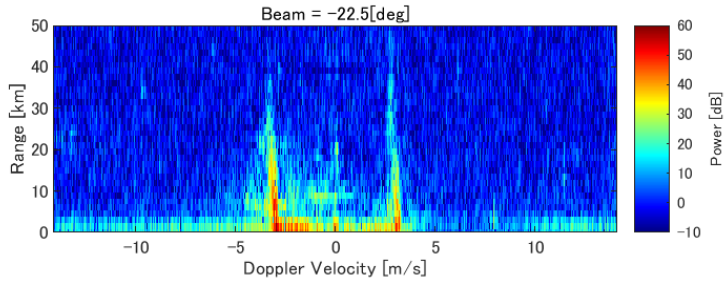
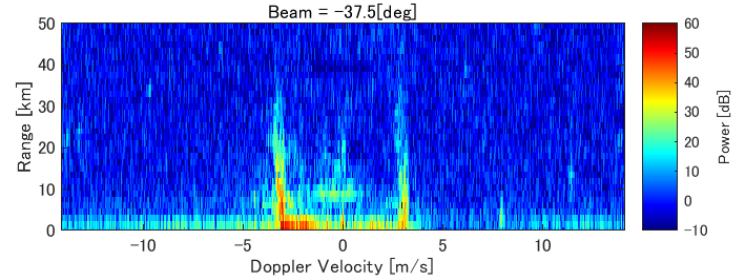
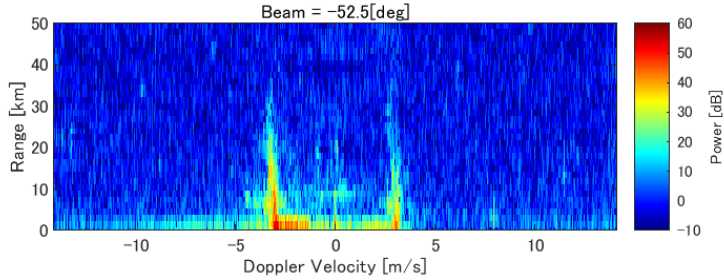
[1]J.D. Milsom, "HF groundwave radar equations," Seventh International Conference on HF Radio Systems and Techniques

2. 計測状況(行当局) 受信信号スペクトルの状況

2023/06/17 12:36

受信ビーム別のレンジドップラマップ(受信信号スペクトル)

受信信号スペクトルが電波干渉，船舶等の孤立点反射を受けるためその影響を取り除く



2. 計測状況(行当局) 受信信号スペクトル鮮明化への対策

1. 外乱, 干渉波信号の除去

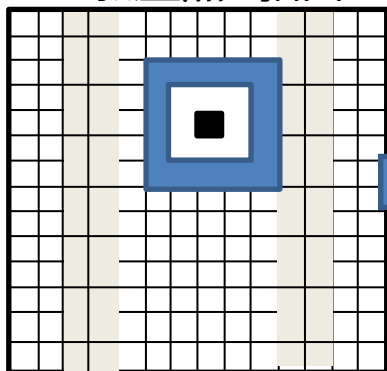
受信信号スペクトルを信号処理で除去(後述)

2. 孤立点の除去

スペクトルデータに部分的に存在する船舶等の孤立点反射除去のためCFAR処理さらにスペクトルデータから除去する(抽出した孤立点の距離, ドップラ速度の座標, 目標領域を考慮して逆フィルタかけてスペクトルを遮蔽)。若しくは孤立点の追尾処理により孤立点系列を遮蔽する。

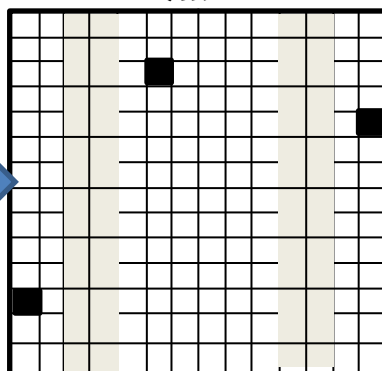
2. 孤立点の抽出・除去処理

2-1 孤立点の抽出



- ① 受信信号スペクトルにおけるブラッグ一次散乱エリアをマスク
- ② GO-CFAR処理を行い, 注目セルを中心に塗り潰し領域の最大電力 $\times K$ を閾値とする
- ③ 閾値を超える注目分解能セルを抽出
- ②③を全領域に適用する

2-2 孤立点の除去



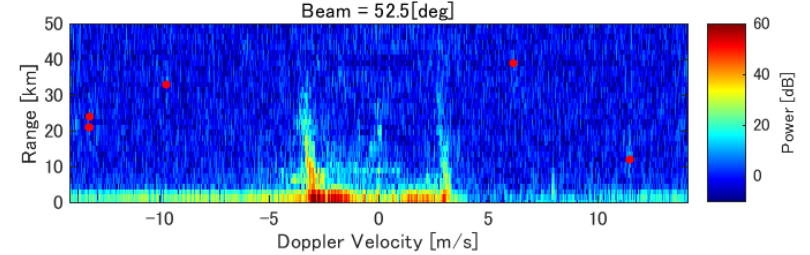
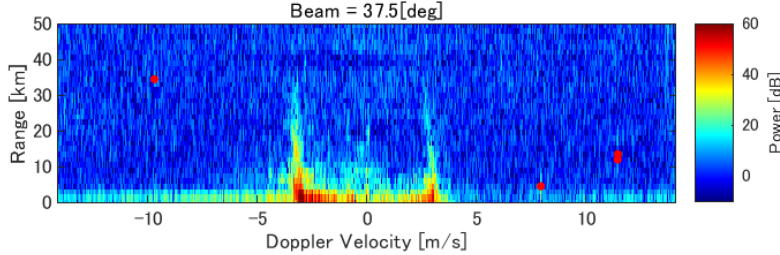
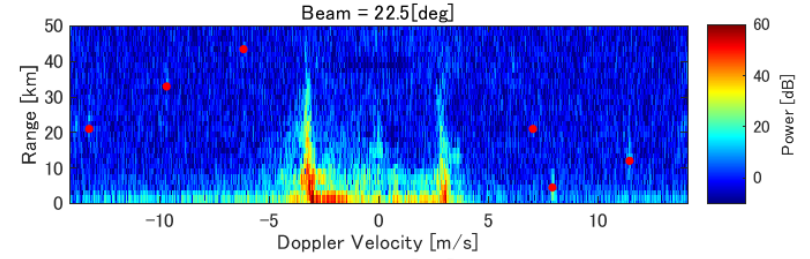
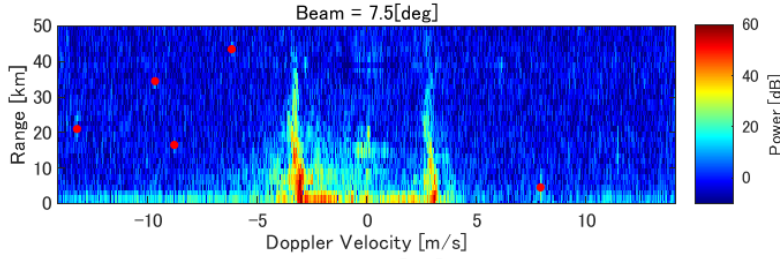
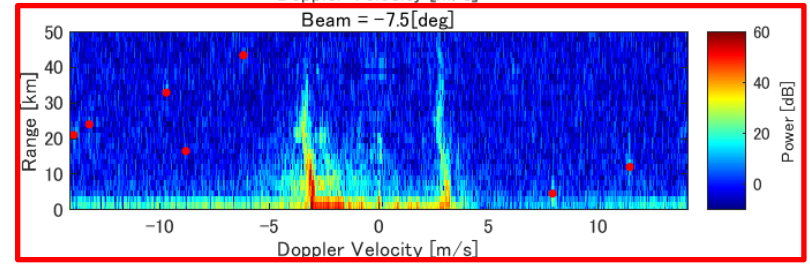
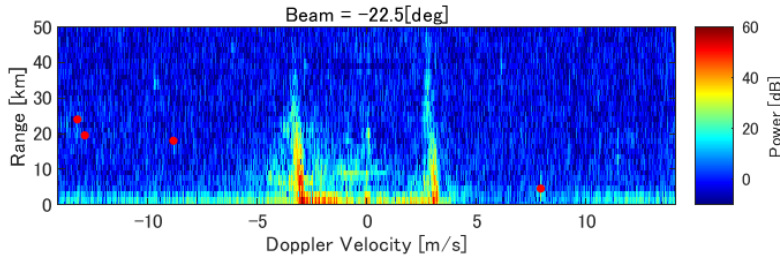
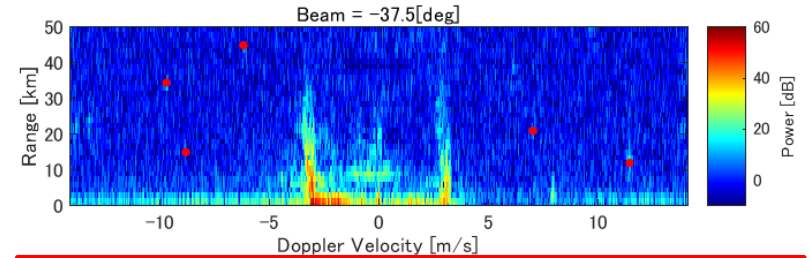
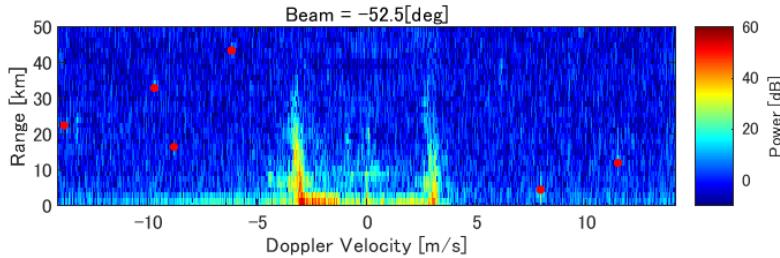
- ① 2-1で抽出した孤立点の座標(距離, ドップラ速度)に対して振幅抑圧処理をかけて受信信号スペクトルから消去
または,
② 時系列処理にかけて時間方向に繋がりのある孤立点を移動目標として追尾

孤立点追尾処理へ

2. 計測状況(行当局) 受信信号スペクトル鮮明化への対策

2023/06/17 12:36

受信ビーム別のレンジドップラマップ(受信信号スペクトル), 赤丸が自動抽出した孤立点



2. 計測状況(行当局)

受信信号スペクトル鮮明化への対策

2023/06/17 12:36

受信ビーム別のレンジドップラマップ(受信信号スペクトル), 孤立点抽出後の抑圧処理

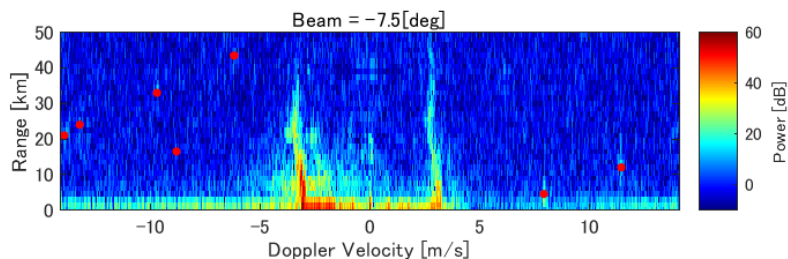


図 抽出された孤立点(前頁再掲)

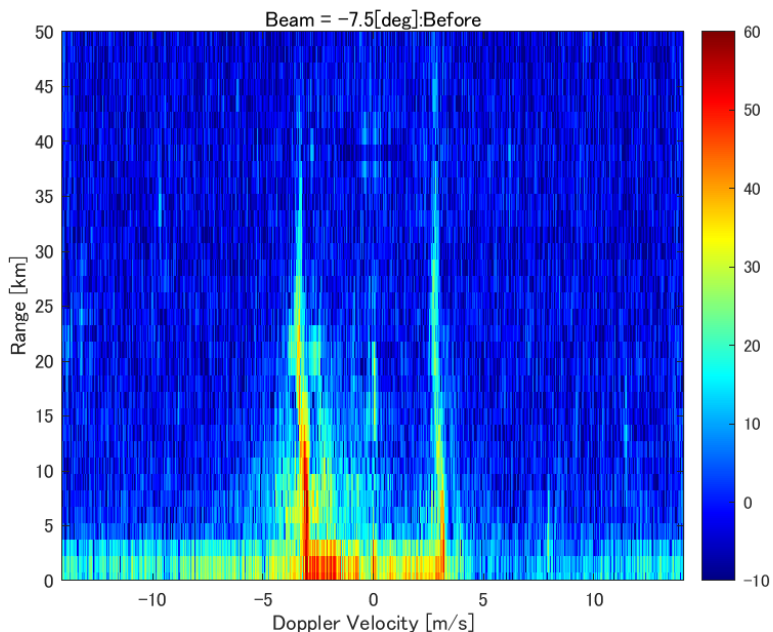


図 孤立点遮蔽前のレンジドップラマップ

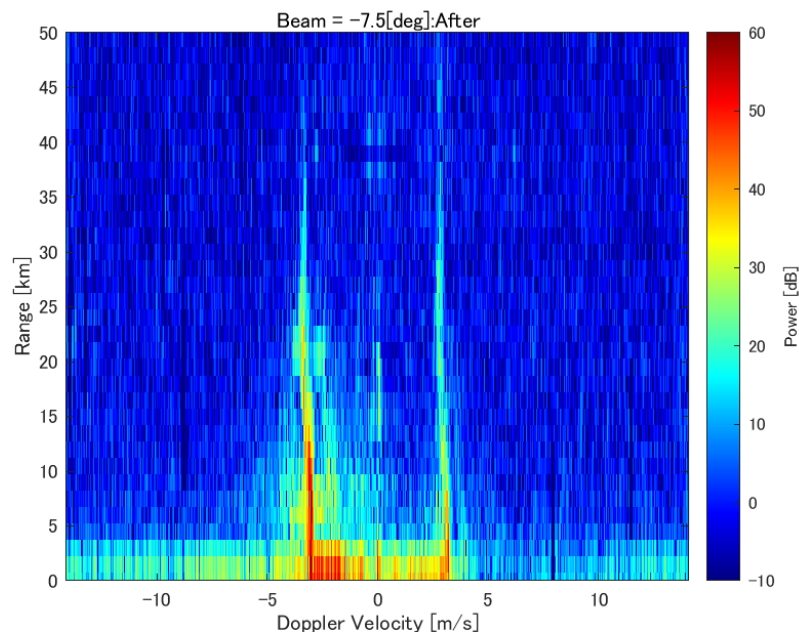
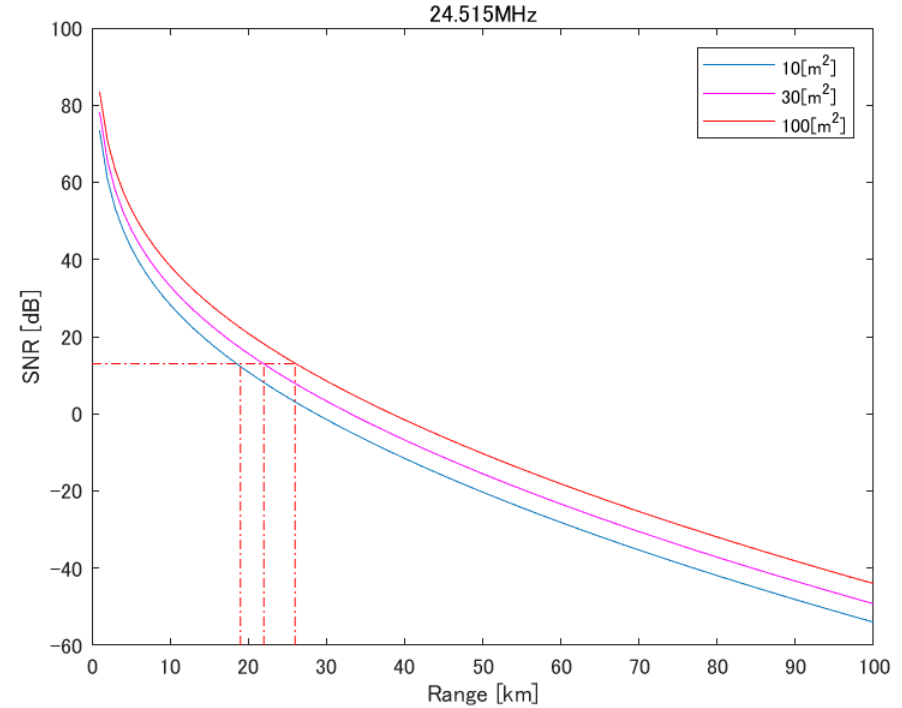
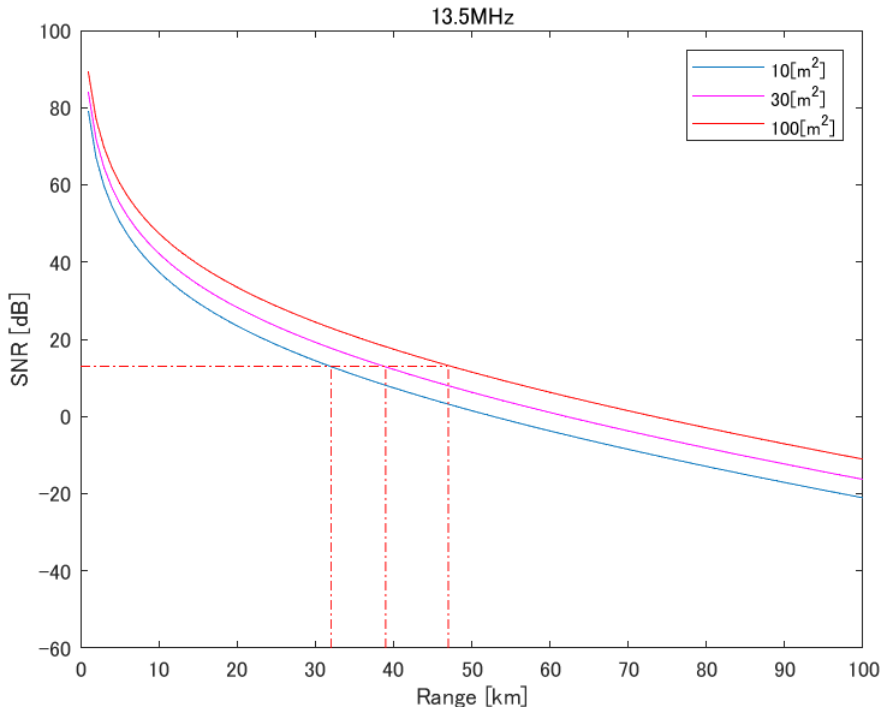


図 孤立点遮蔽後のレンジドップラマップ

3. 計測状況(行当局), 移動目標

■ 海上目標に対する回線設計例と実測値

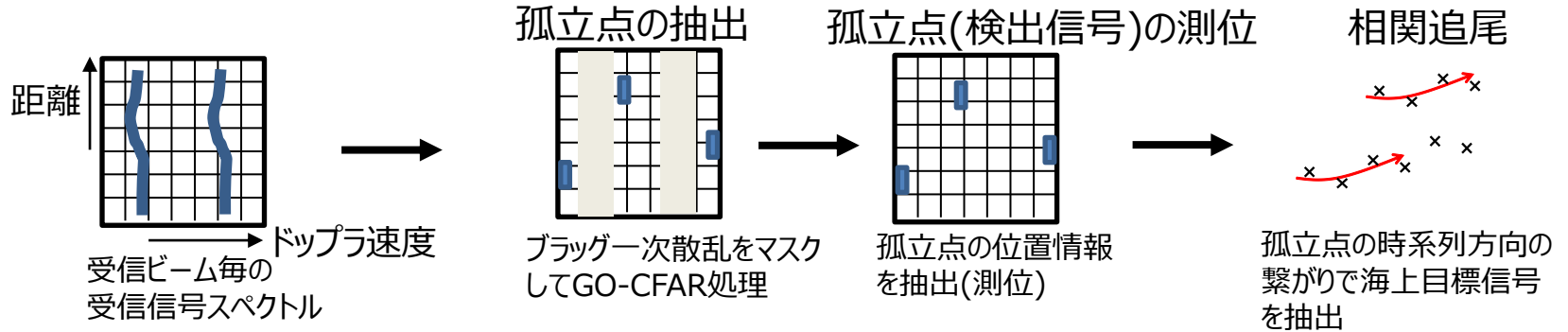
海象と同様な手順で距離に対する想定海上目標の受信信号SNRを算出。海上目標のレーダ反射面積を3ケース想定した。



3. 計測状況(行当局), 移動目標

■ 海上目標に対する検出と追尾(の構想)

受信信号スペクトルから孤立点を抽出, 時系列処理(相関追尾)によって海上目標の検出信号系列を航跡として取り出す



低データレート, 低分解能, 高誤警報条件の海洋レーダでの相関追尾においてはスキャン間の検出信号の相関が極めて困難となる。目標数管理、既存目標の仮説管理に優れたGLMBF※を適用する

※GLMBF: Generalized Labeled Multi-Bernoulli Filter

4. むすび

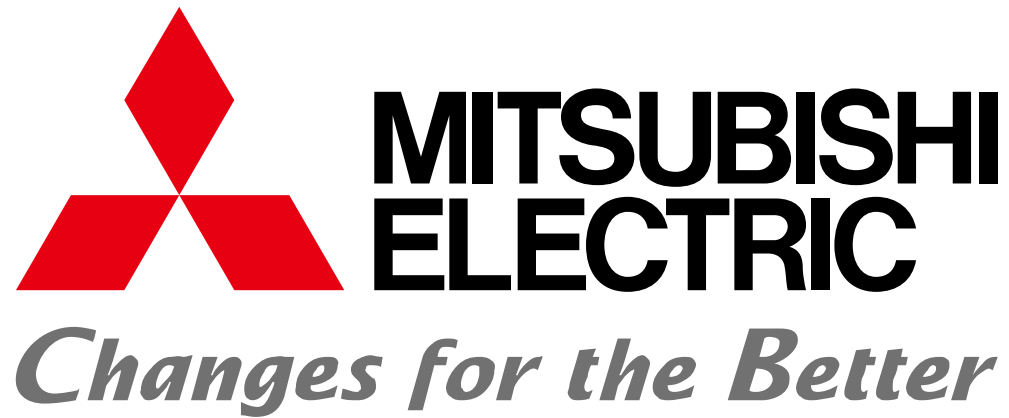
海洋レーダ多機能化を目的として、

海象観測(潮流と波浪、風況の推定)に資する受信信号鮮明化とその提供、

海洋監視：洋上船舶等の検出追尾(または海象観測で明確な物標認識と船舶信号の除去)、

に関する、レーダ信号処理/情報処理技術を評価のために計測を継続中である。

引き続き計測を継続し、取得データ評価からアルゴリズム性能向上につなげていく。



九州大学応用力学研究所 共同利用研究集会

「海洋レーダを用いた海況監視システムの開発と応用」 (2023年12月19日)

海洋レーダによる海象観測と海洋監視の実験報告 ~Bragg散乱ドップラスペクトルの改善~

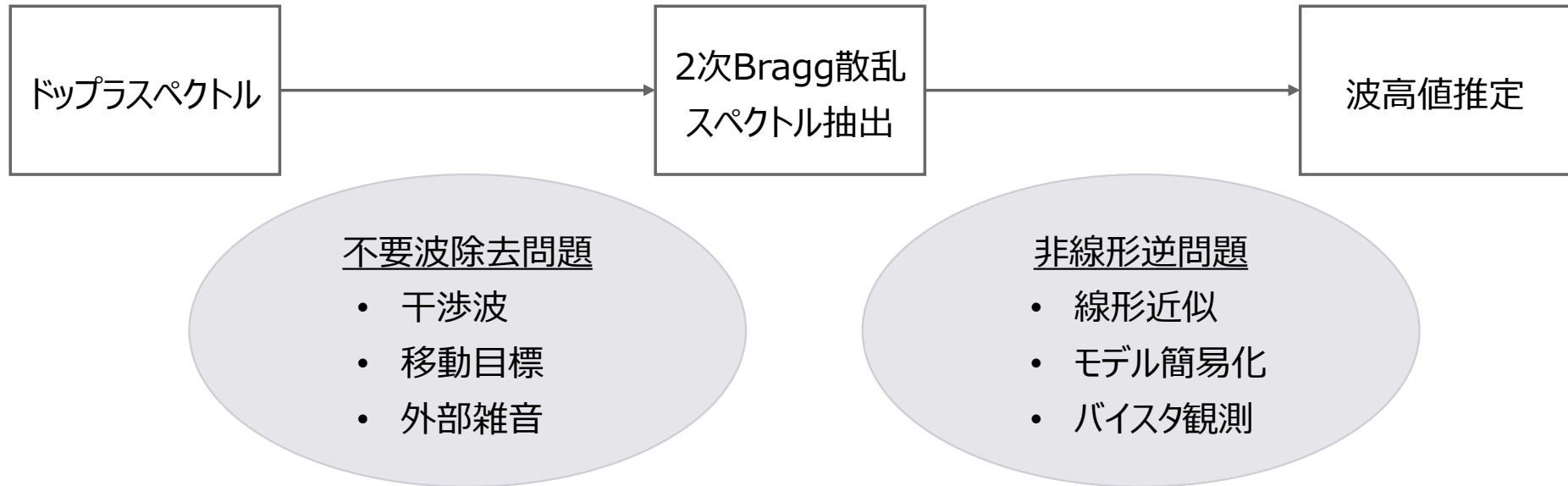
亀田洋志(*1), ○高橋龍平(*1), 片岡智哉(*2), 藤井智史(*3)

*1 三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科

*3 琉球大学 工学部

モチベーション



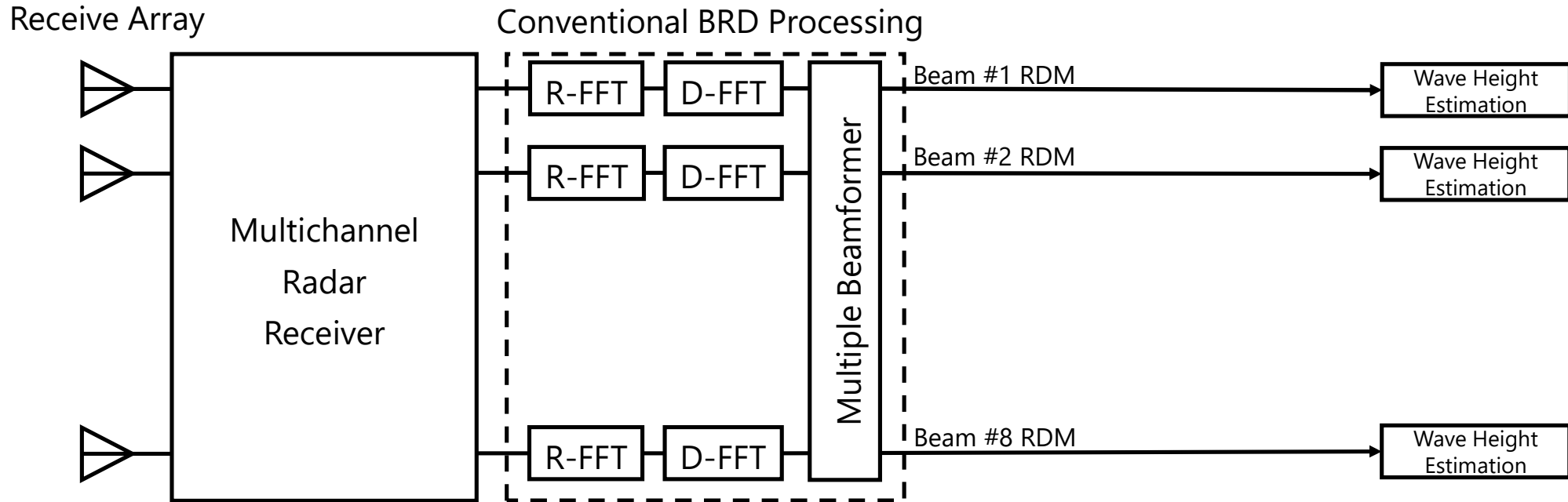
不要波除去問題への取組み

- 干渉波： アダプティブビームフォーミング（2018本研究会にて報告）等
移動目標： 移動目標追尾（本報告前半）、CFAR検出処理等
外部雑音： **本報告**

検討ゴール

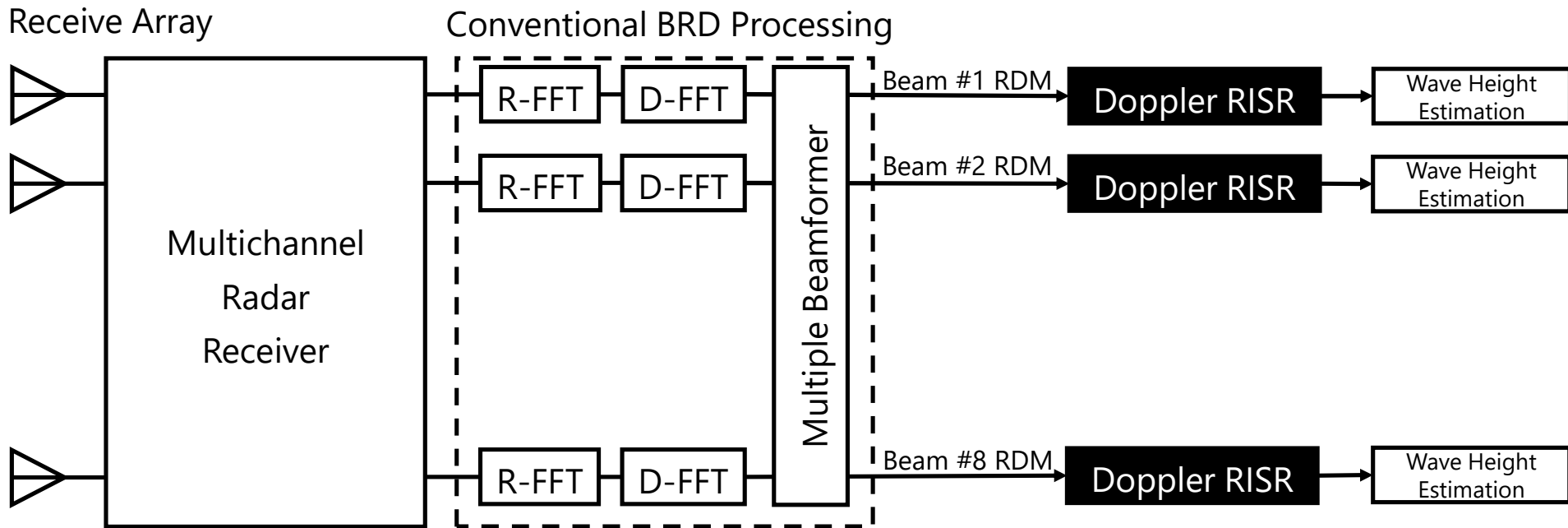
背景	波高推定の改善では、ドップラスペクトルに含まれる不要波を除去し、Bragg散乱スペクトルを抽出することが重要。とりわけ外部雑音除去は報告例が多くない。
目的	高分解能スペクトル推定法の1つであるRISRを用いた外部雑音抑圧／Bragg散乱スペクトル抽出法を定式化（Doppler-RISR）し、実データに適用する
ゴール	初期評価結果として、RISR波高値が、従来波高値に比べ改善を示し、リファレンス値（超音波式波高計）に近づくこと

波高推定処理系統（従来）



LPF: Low Pass Filter, ADC: Analog to Digital Converter,
R-FFT: Range FFT, D-FFT: Doppler FFT, RDM: Range Doppler Map
BRD: Beam-Range-Doppler, RISR: Re-iterative Superresolution

波高推定処理系統（提案）



LPF: Low Pass Filter, ADC: Analog to Digital Converter,
 R-FFT: Range FFT, D-FFT: Doppler FFT, RDM: Range Doppler Map
 BRD: Beam-Range-Doppler, RISR: Re-iterative Superresolution

ドップラRISR

■ 目的・課題意識

高分解能スペクトル推定アルゴリズムでは、複数散乱波の無相関性や散乱波数既知を前提とし、またサンプル相関行列や固有値分解が必要となることが多い

■ 実現できること/したこと

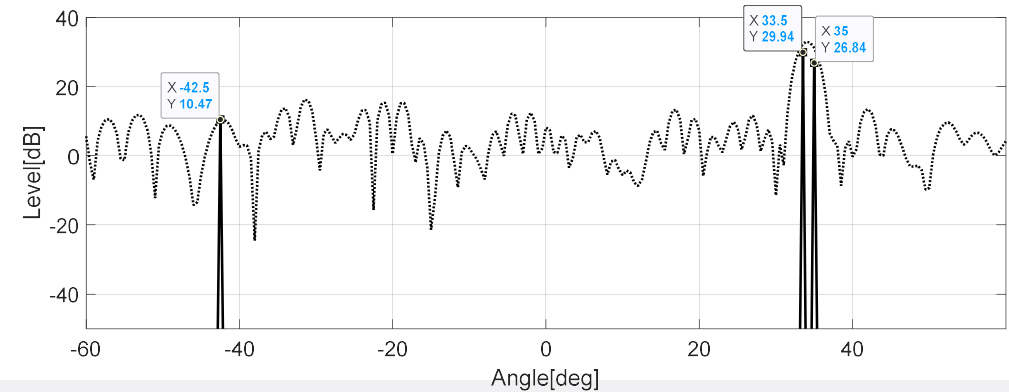
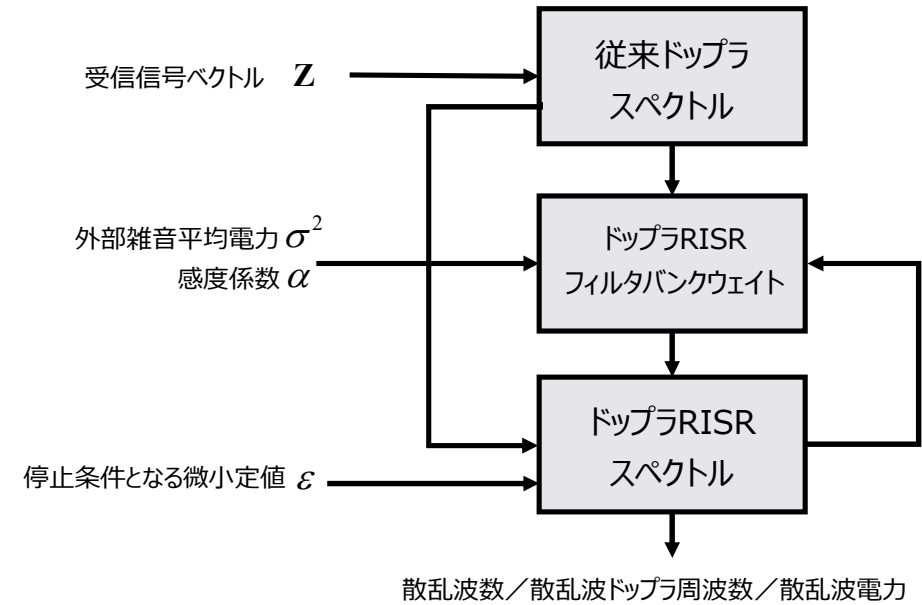
到来波方向推定向けに提案されたRISR(Blunt, TAES, 2011)をドップラスペクトル推定に適用すれば、上記課題を解決可能

■ 前提条件/制約事項

外部雑音レベルを事前情報とする

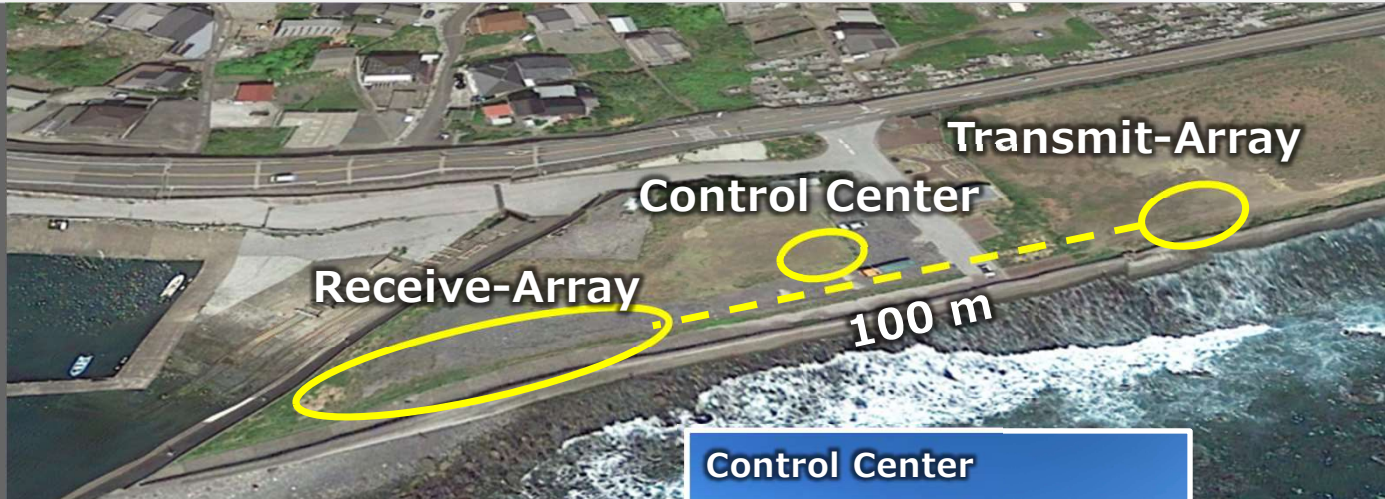
■ 解決手段

- 従来ドップラスペクトルを起点に、真のドップラスペクトルとのRMMSE（再帰的平均二乗誤差最小化）から高分解能スペクトルを求める
- 事前知識（外部雑音レベル）・仮定（無相関性）による構造的相関行列推定により、サンプル相関行列計算および固有値分解を回避



RISR: Re-Iterative Superresolution, RMMSE: Re-iterative Minimum Mean Square Error

高知県室戸市行当岬設置の海洋レーダ外観



Four Element – Single Channel Transmit Array Antenna



Control Center



Eight Element – Eight Channel Receive Array Antenna



高知県室戸市行当岬設置の海洋レーダ概要

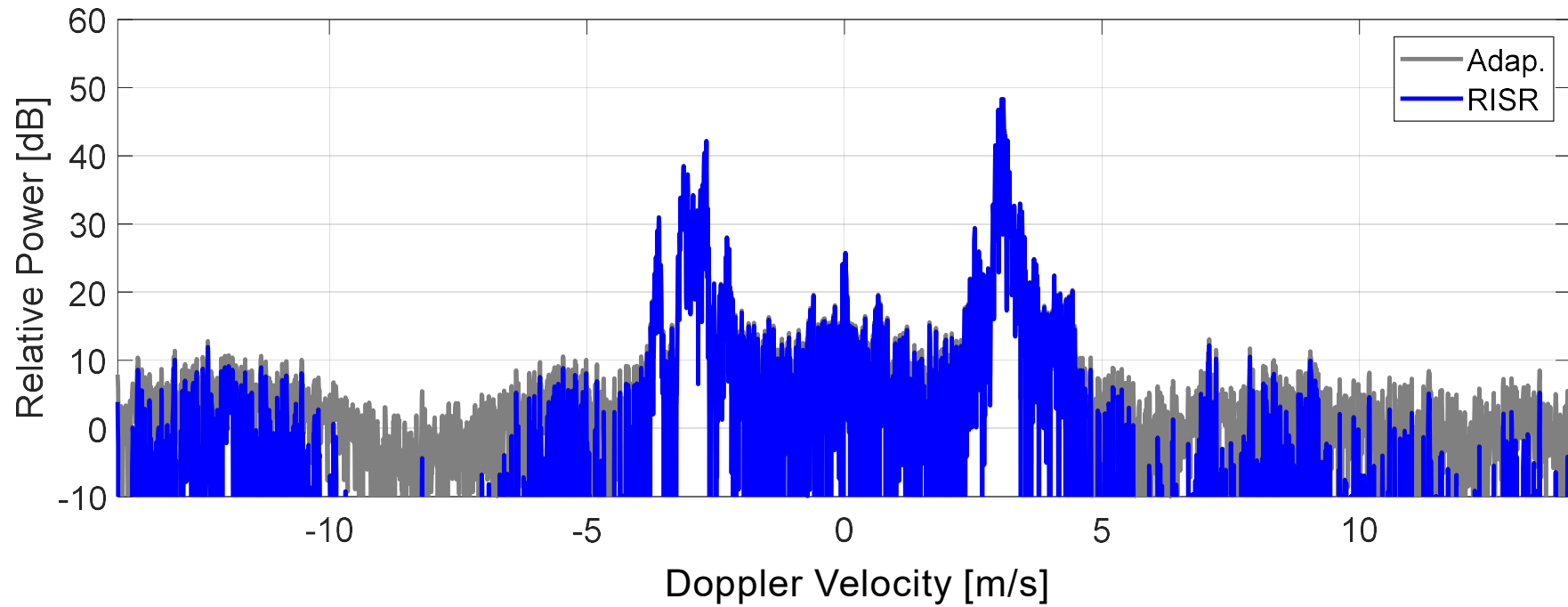
LN	設定項目	設定値	備考
1	送信出力	80 W	
2	変調方式	FMCW	送受アンテナを100m離し, アイソレーション確保
3	送信周波数	24.515 MHz	スイープ中心
4	送信帯域幅	100 kHz	距離分解能 1.5 km
5	スイープ時間	0.2166 s	
6	スイープ内レンジビン数	1840	
7	スイープ数	4096	観測時間 14分48秒
8	ビーム数	8	

リファレンスポイント（ナウファス：室津港超音波式波高計）



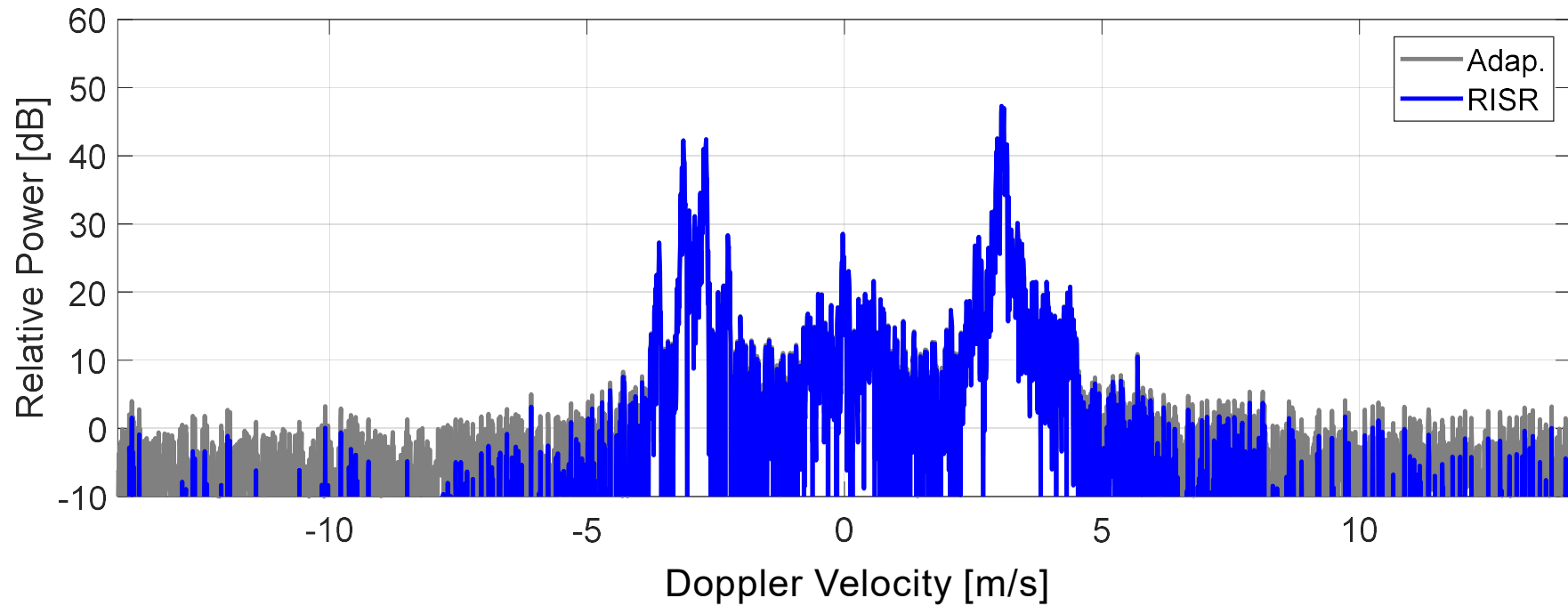
リファレンスポイント（室津超音波波高計）でのドップラスペクトル（20231310042_mur）

20231310042_mur
2023/05/11 9:56JST



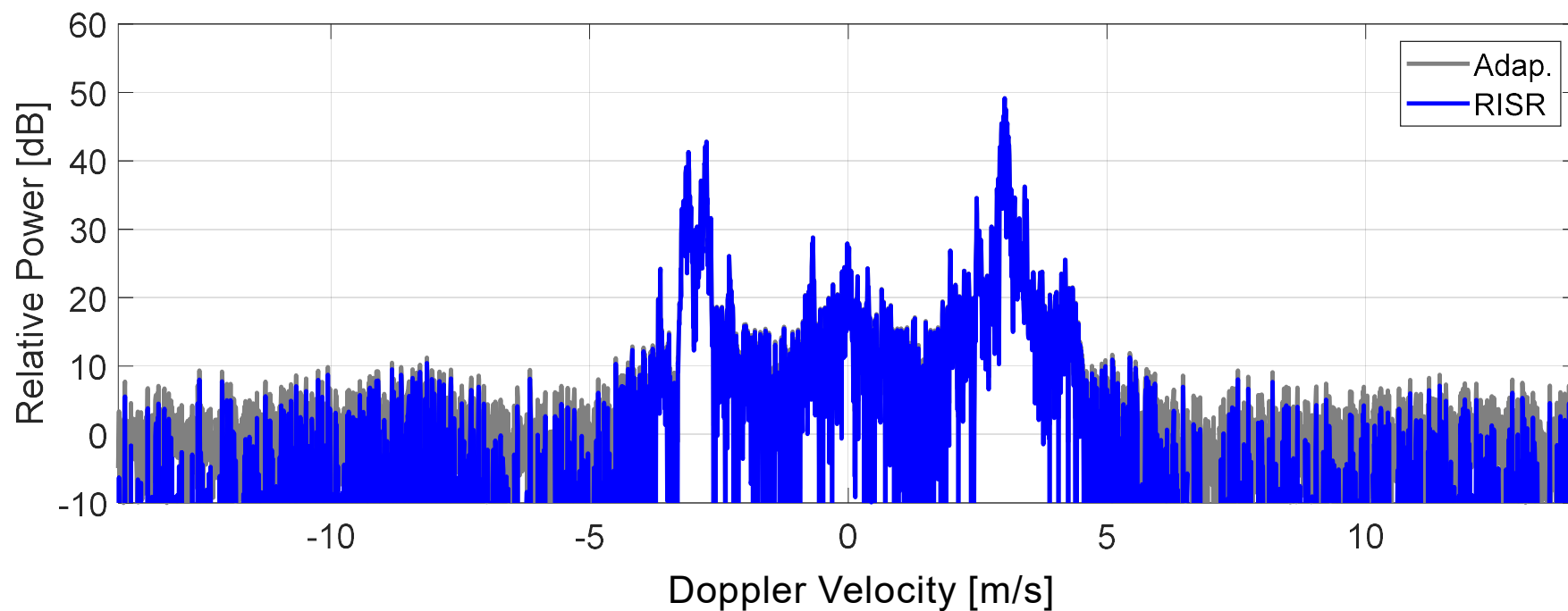
リファレンスポイント（室津超音波波高計）でのドップラスペクトル（20231310102_mur）

20231310102_mur
2023/05/11 10:16JST



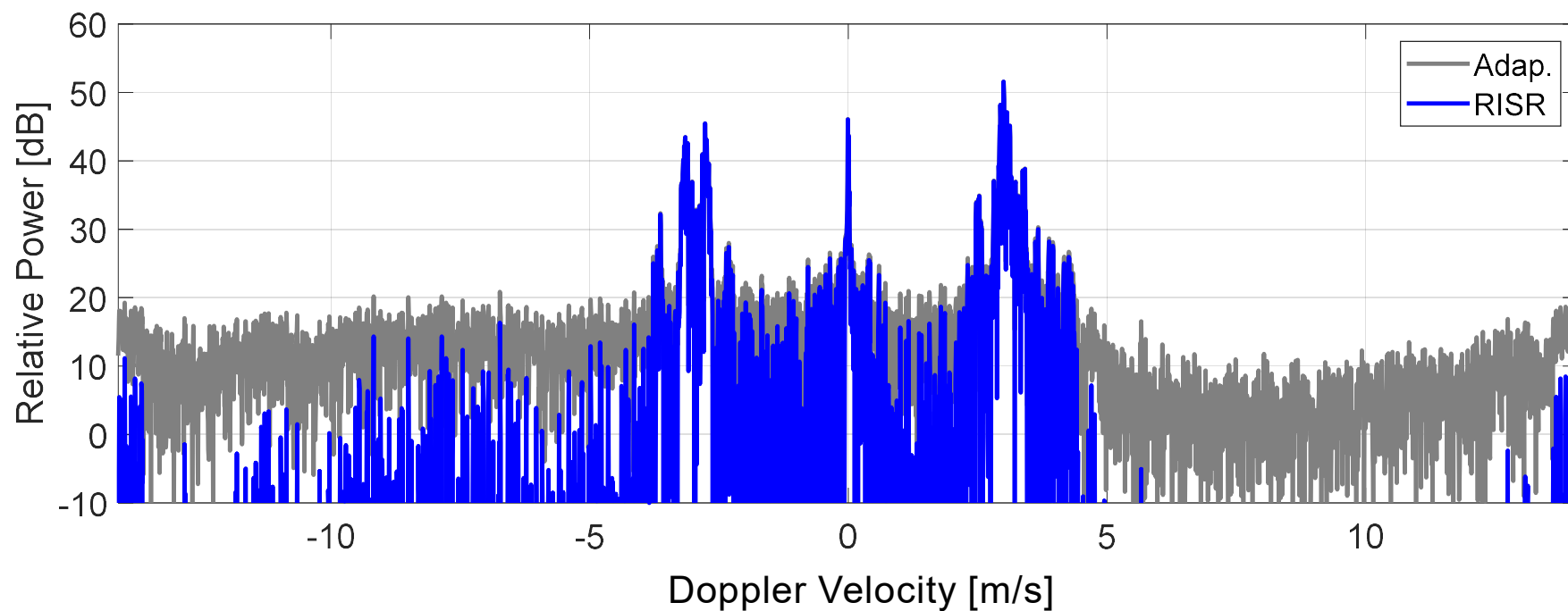
リファレンスポイント（室津超音波波高計）でのドップラスペクトル（20231310122_mur）

20231310122_mur
2023/05/11 10:36JST



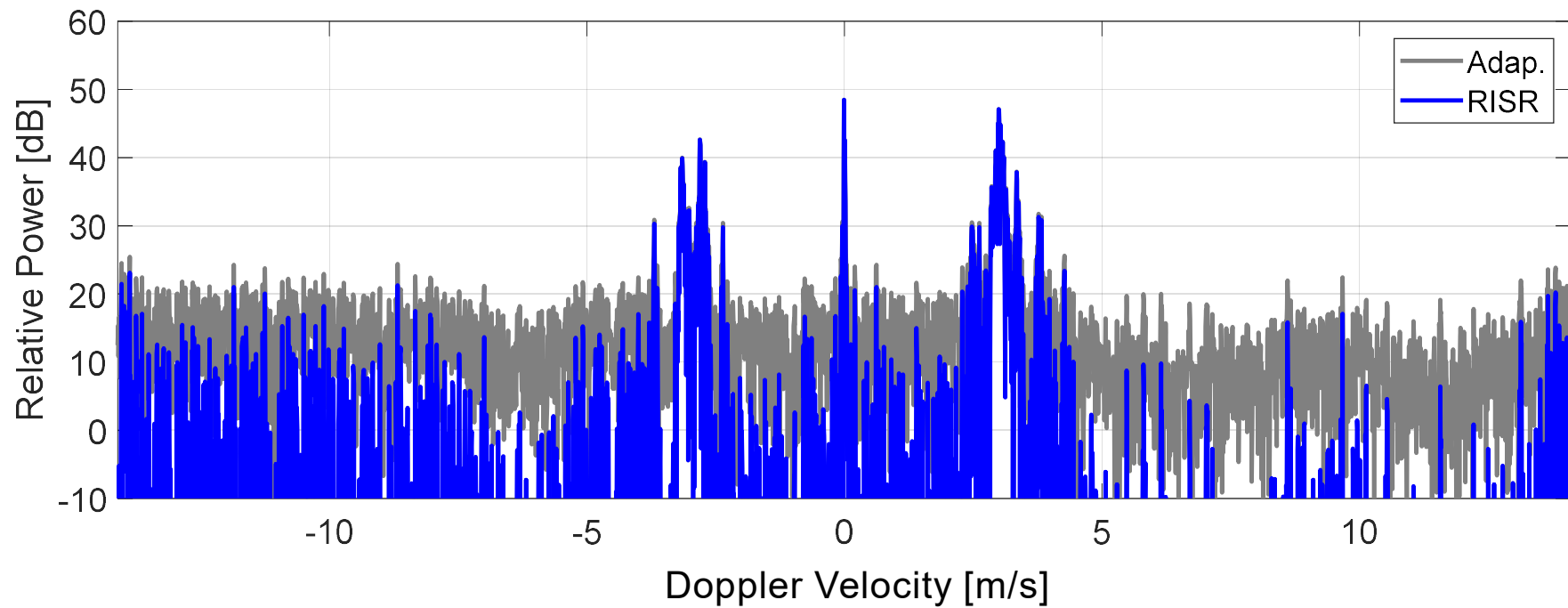
リファレンスポイント（室津超音波波高計）でのドップラスペクトル（20231310142_mur）

20231310142_mur
2023/05/11 10:56JST



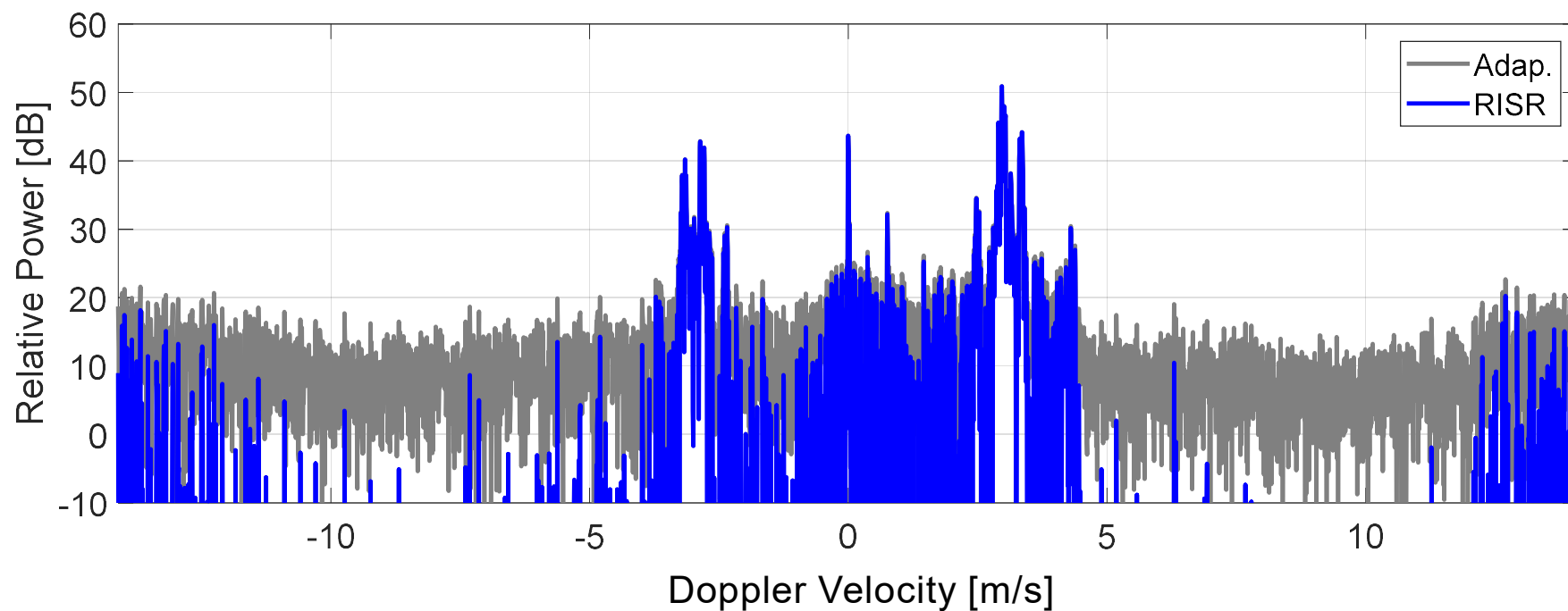
リファレンスポイント（室津超音波波高計）でのドップラスペクトル（20231310202_mur）

20231310202_mur
2023/05/11 11:16JST



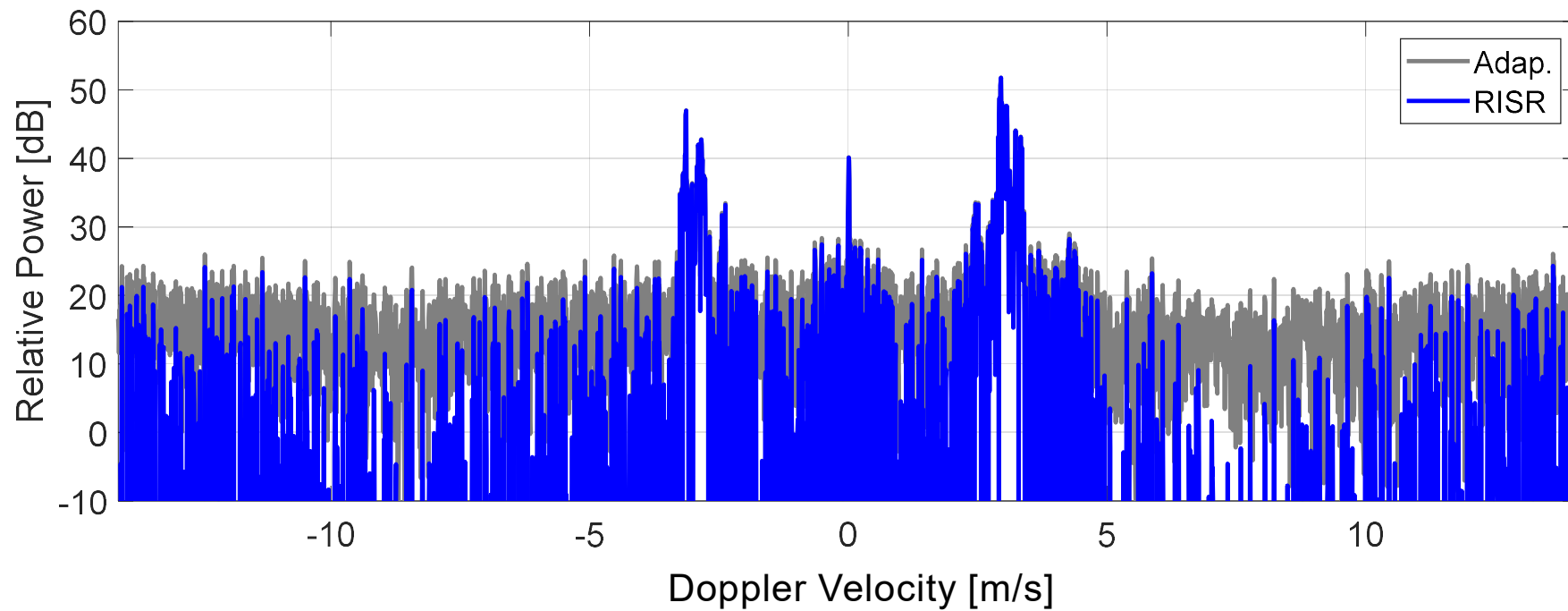
リファレンスポイント（室津超音波波高計）でのドップラスペクトル（20231310222_mur）

20231310222_mur
2023/05/11 11:36JST

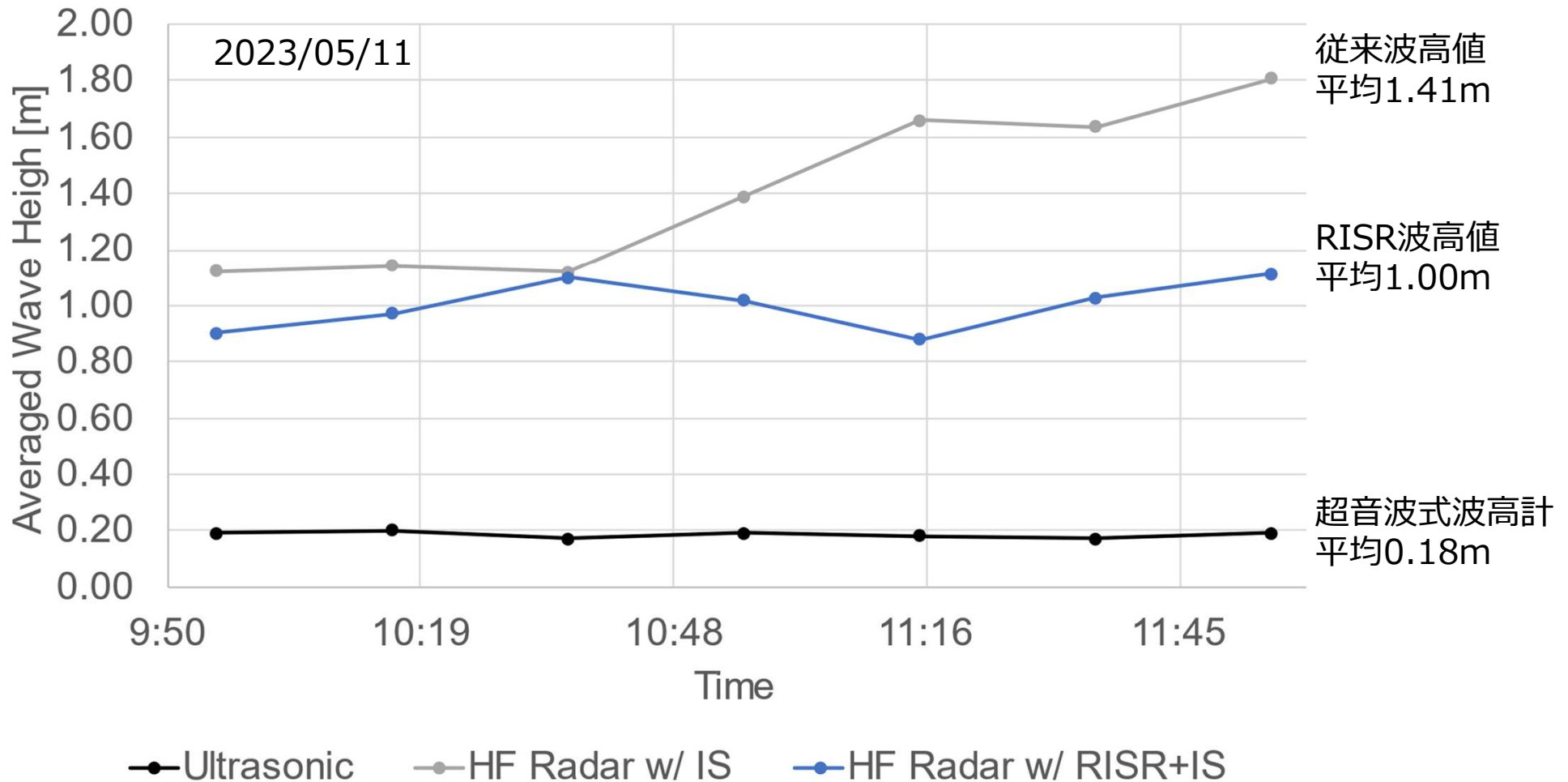


リファレンスポイント（室津超音波波高計）でのドップラスペクトル（20231310242_mur）

20231310242_mur
2023/05/11 11:56JST

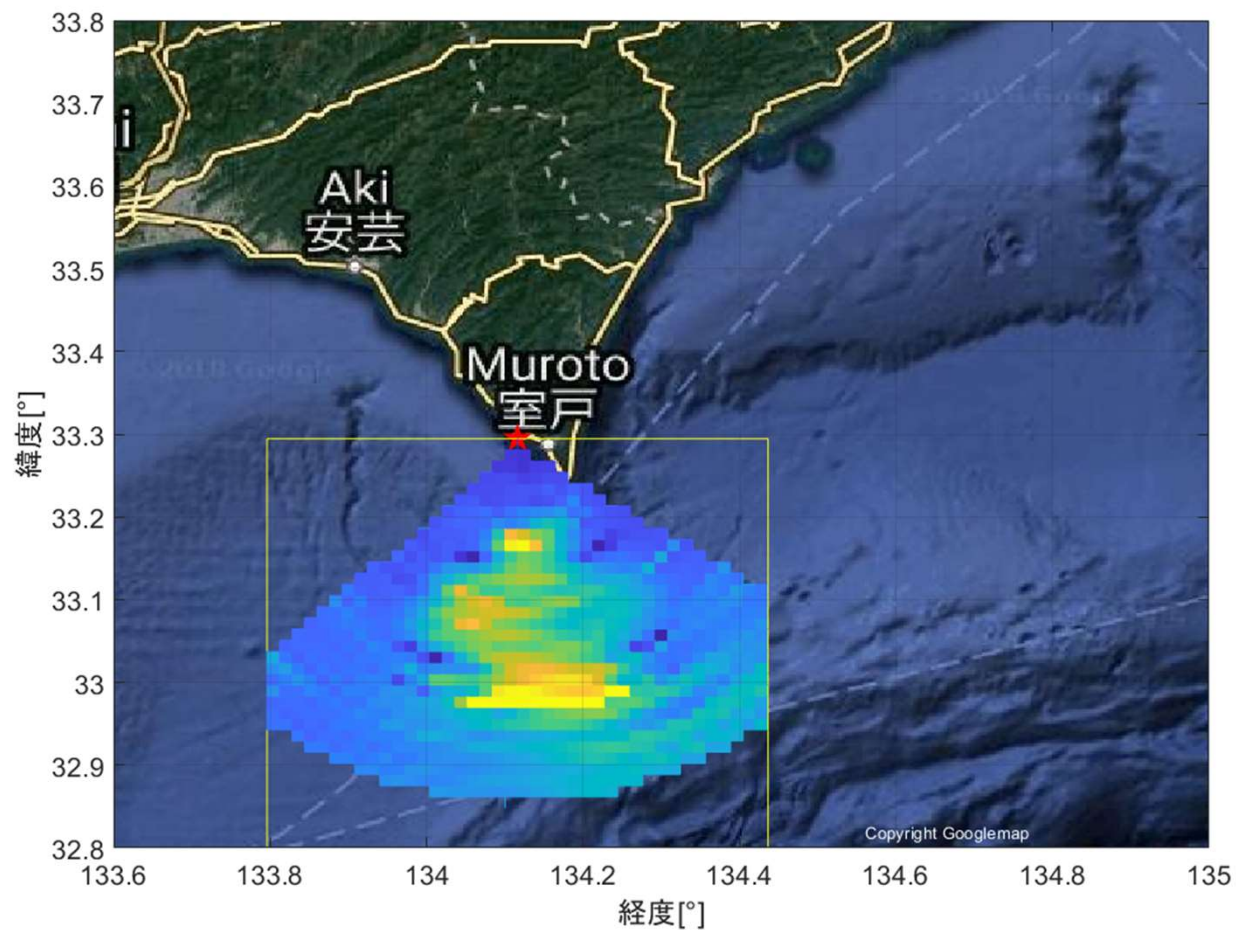


リファレンスポイント（室津超音波波高計）での波高推定結果



波高推定結果（従来）

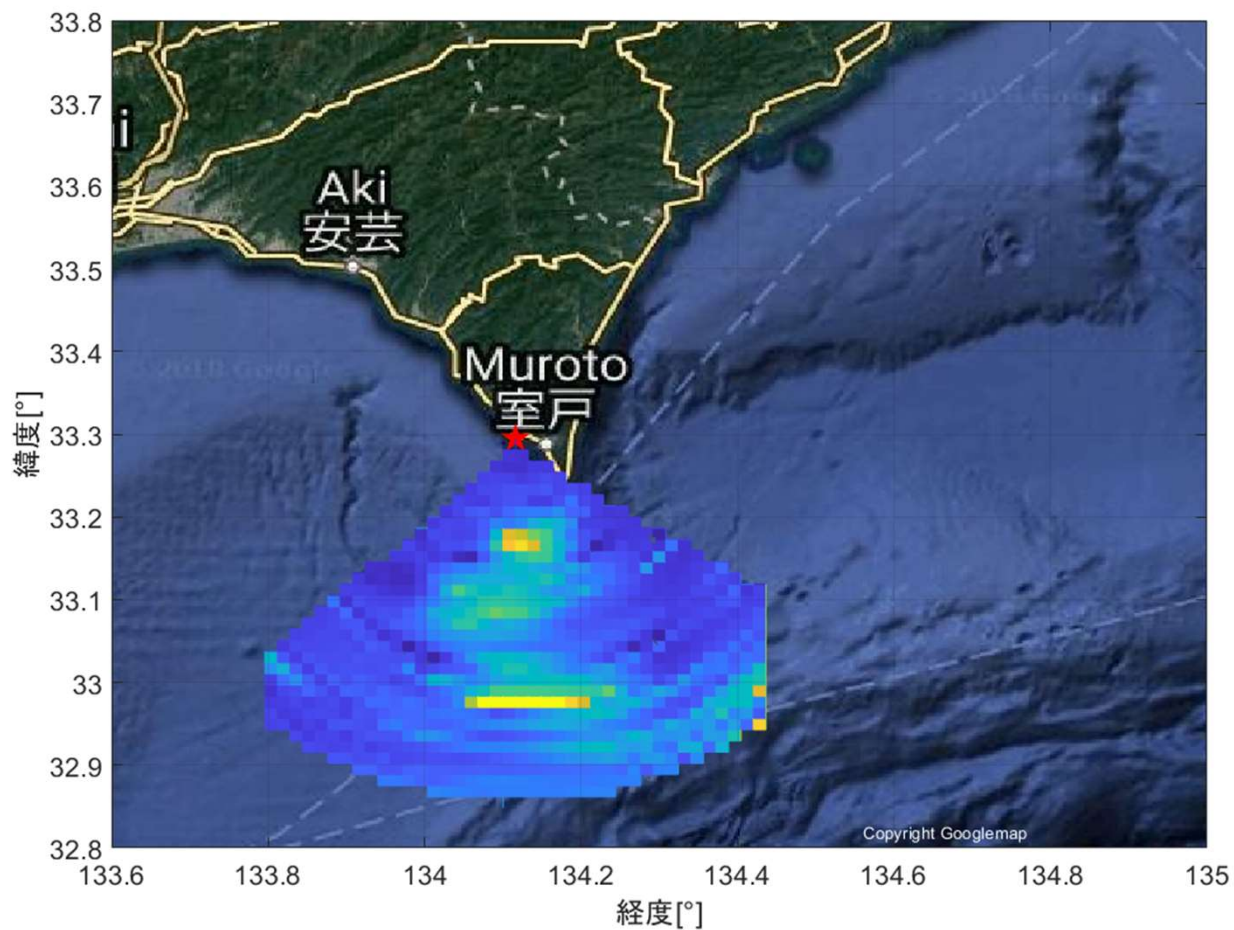
20231310042_mur
2023/05/11 9:56JST



従来波高値
平均4.66m

波高推定結果 (提案)

20231310042_mur
2023/05/11 9:56JST



RISR波高値
平均2.93m

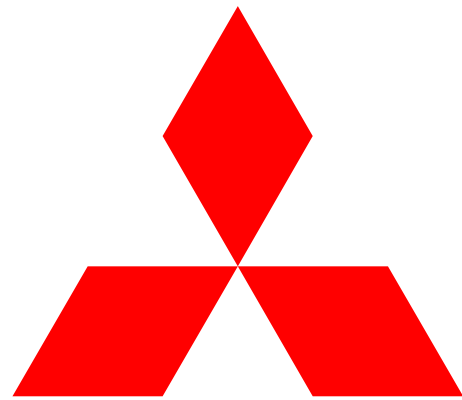
差異1.74m

むすび

外部雑音を抑圧した1次／2次Bragg散乱ドップラスペクトルを復元し、波高値を改善することを試みた。

- ドップラRISRにより、1次／2次Bragg散乱のみのドップラスペクトルを復元できることを確認できた。
- RISR波高値は平均100cm、従来波高値は平均141cmとなり、平均41cmの改善となった。超音波式波高計は平均18cmで、平均82cmのバイアスが残留した。

ドップラRISRのパラメータ（外部雑音平均電力および感度係数）はノミナル値を用いた。今後パラメータ最適化チューニングで、波高値が改善する余地が残っている。



**MITSUBISHI
ELECTRIC**

Changes for the Better