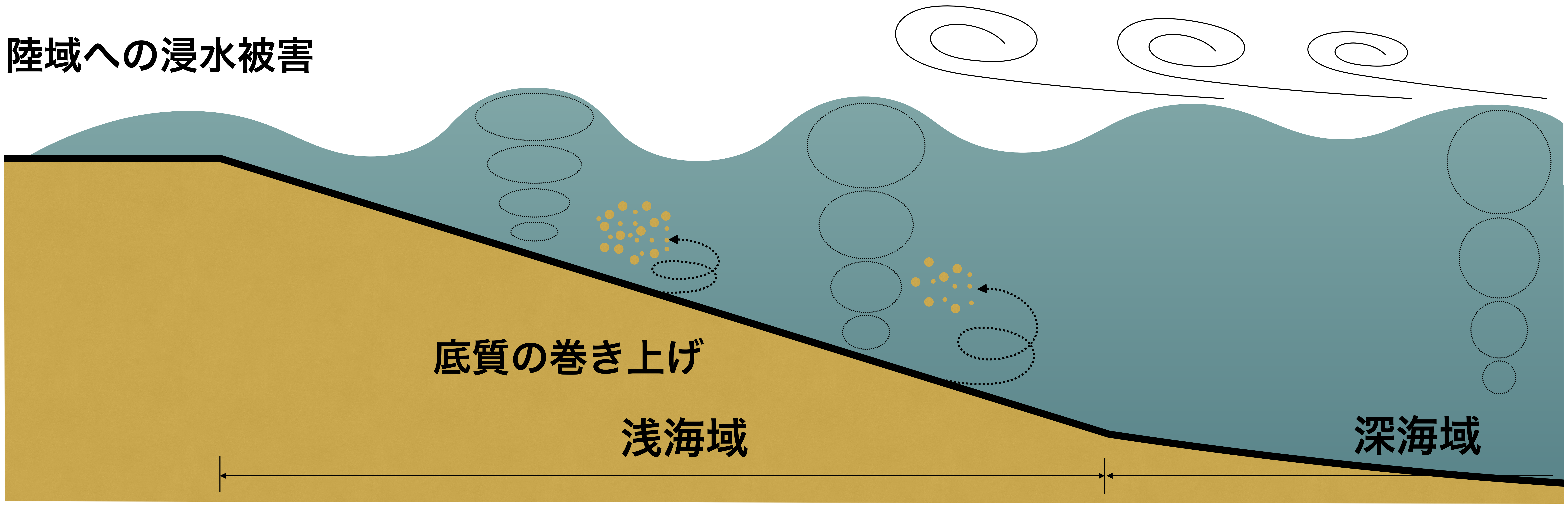
愛媛大学工学部附属社会基盤iセンシングセンター　2021年6月18日 17:00-17:30
第14回仕繰セミナー

汽水域における海洋レーダを用いた波浪計測性能の評価

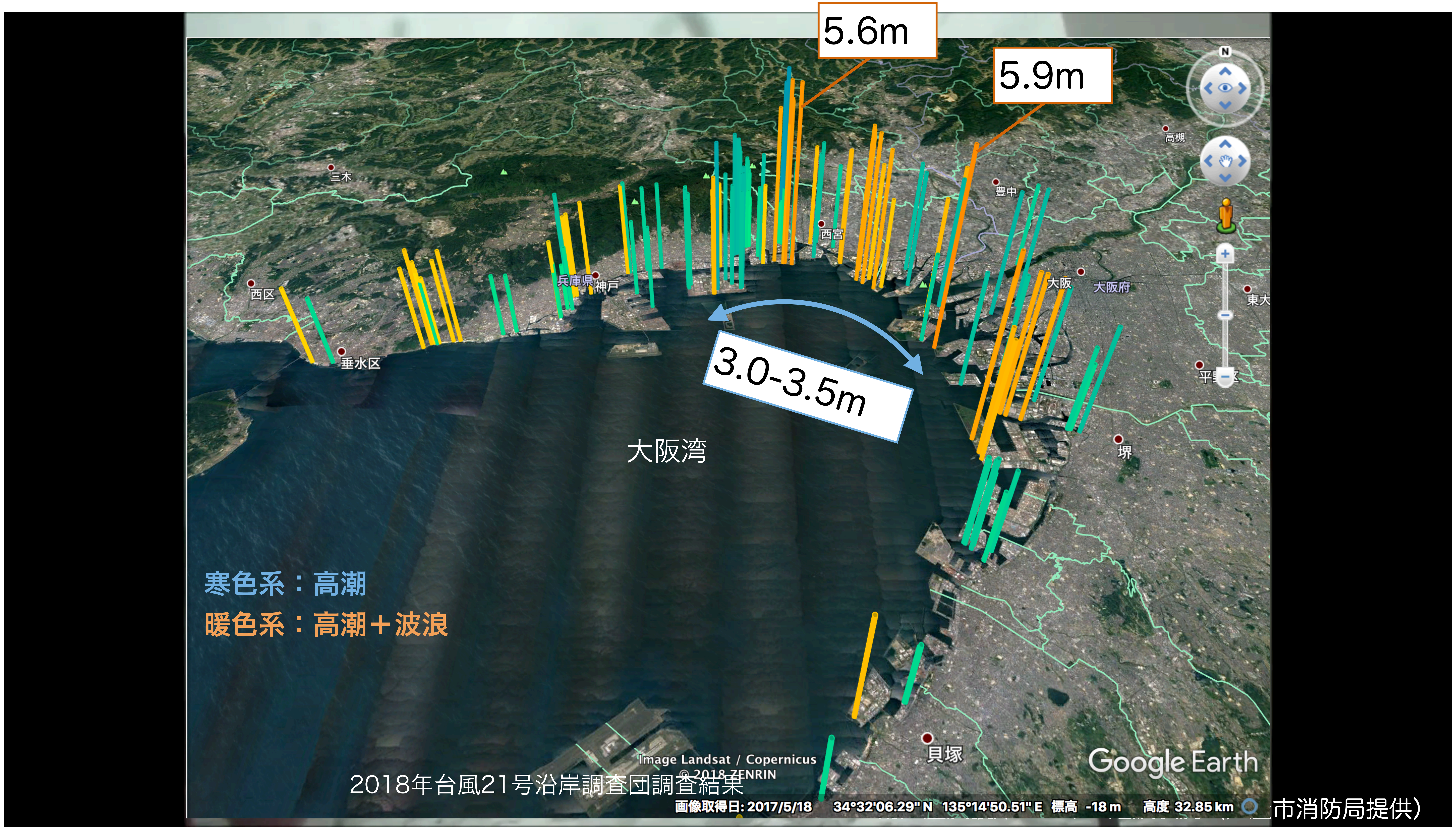
愛媛大学大学院理工学研究科　生産環境工学専攻
環境建設工学コース　准教授　片岡　智哉

沿岸波浪計測の意義

・沿岸環境面：底質の巻き上げによる底質環境の変化
・沿岸防災面：高潮と高波による沿岸域への浸水被害
・気候変動に伴う台風の大型化
➡安定的な沿岸波浪計測と波浪観測網の強化が必要

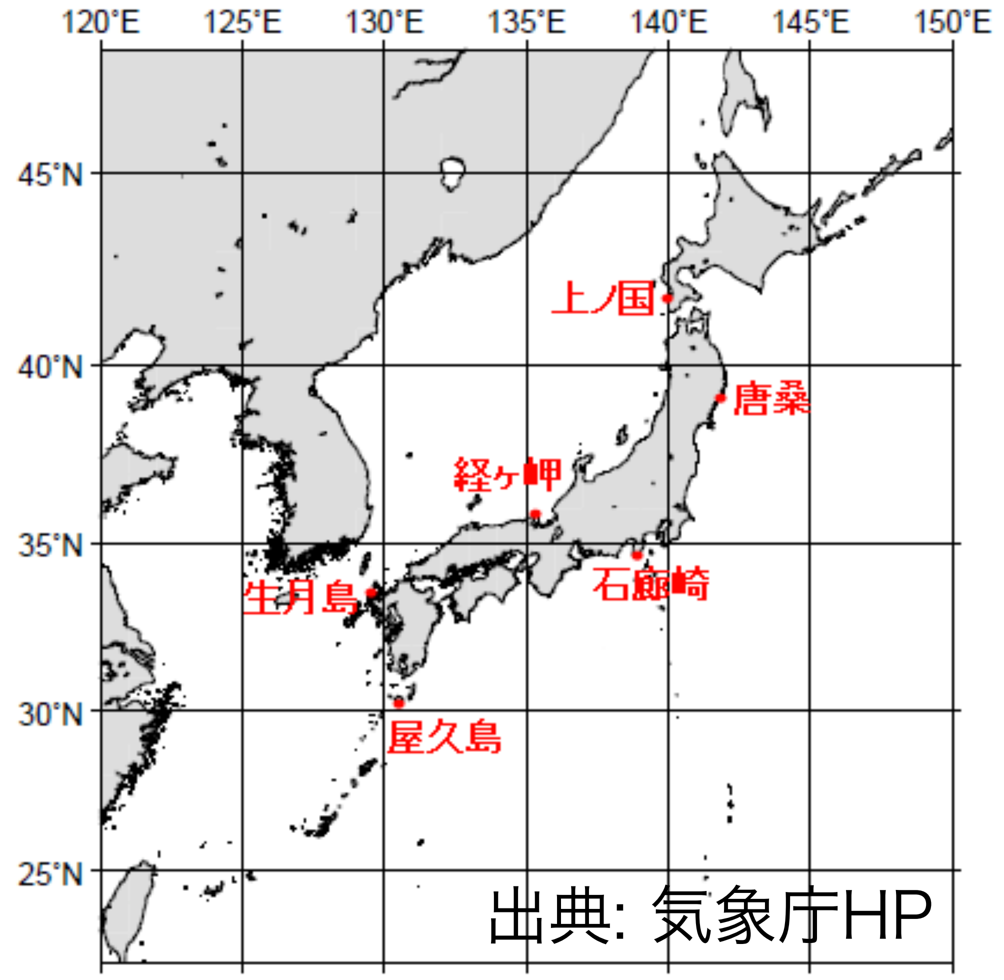


2018年台風21号による沿岸波浪

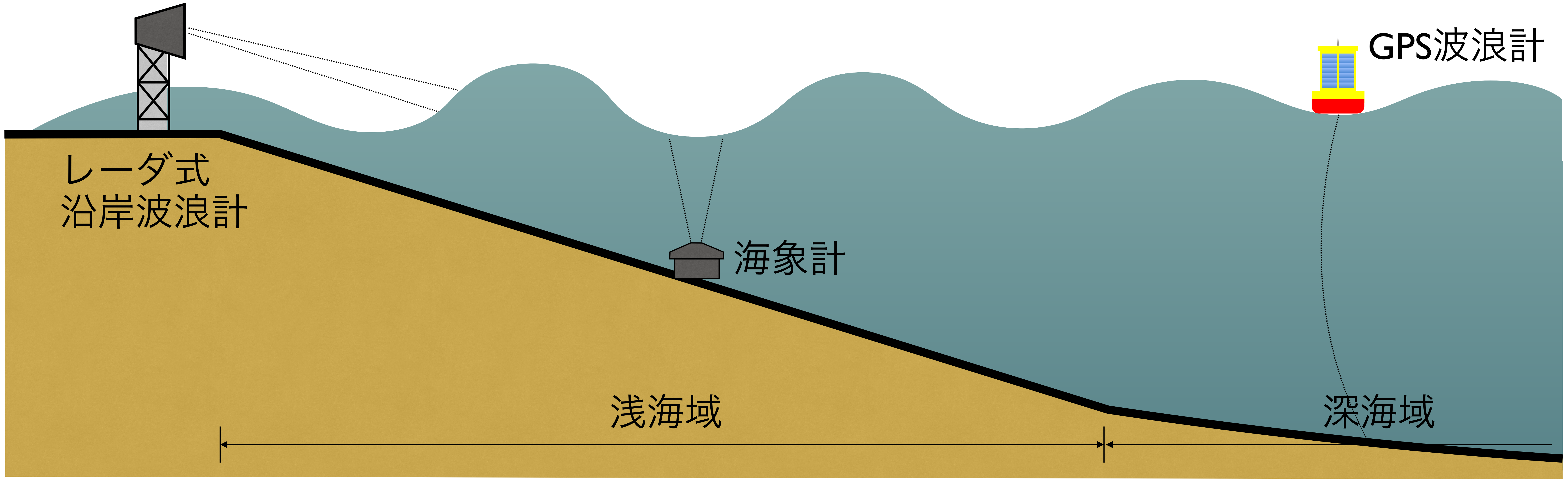


既存の沿岸波浪観測網

- 海象計やGPS波浪計（73地点）by 国土交通省
  - 海上設置のため，高コストかつメンテ難
  - 安定的かつ継続的な波浪計測に支障
- Cバンドのレーダ波浪計（6地点）by 気象庁
  - 点的観測
  - 空間的に伝搬する波浪現象を捉えることが難



現在気象庁が設置している沿岸波浪計の位置図

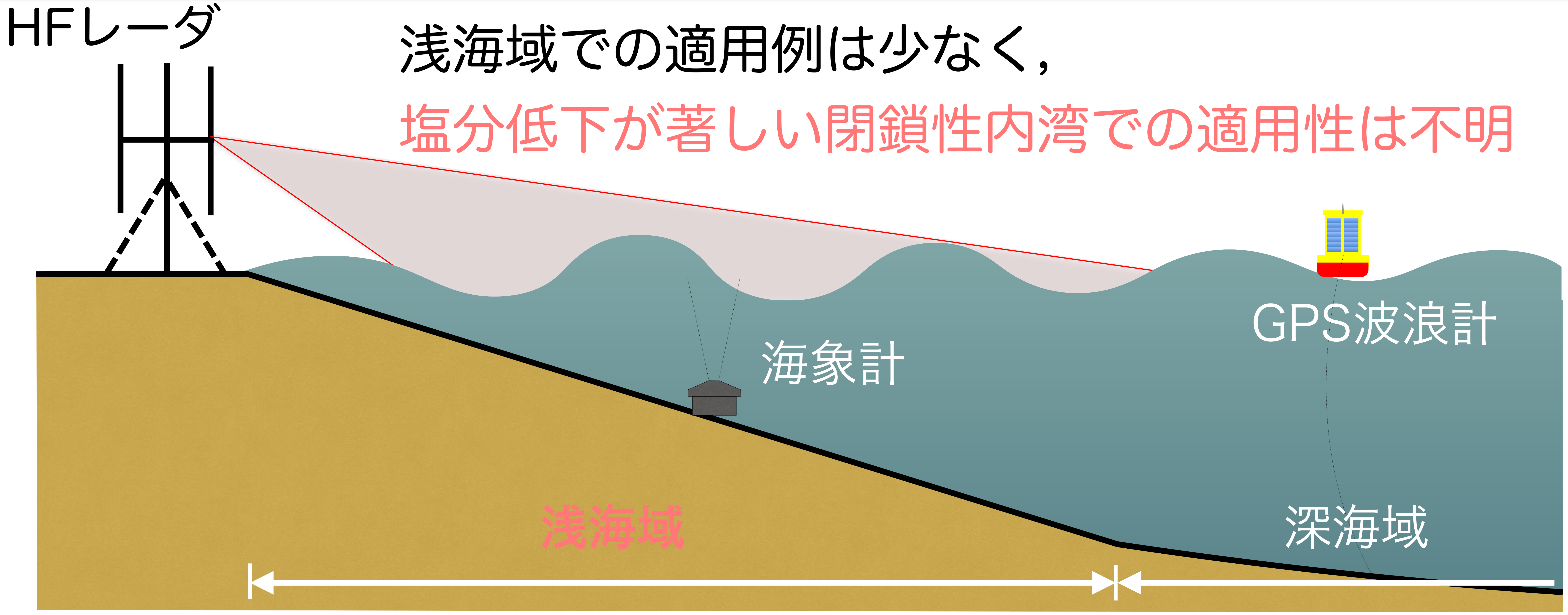


海洋レーダを用いた波浪監視システムの高度化

✓沿岸防災・減災及び沿岸環境において沿岸波浪監視が重要
✓海象計やGPS波浪計で点的に海上で沿岸波浪を計測

HFレーダを用いて面的に陸上で沿岸波浪を計測
→沿岸波浪監視の安定化と高度化

浅海域での適用例は少なく，
塩分低下が著しい閉鎖性内湾での適用性は不明



本研究の目的

- **浅海域における海洋レーダの波浪スペクトル推定法の構築**

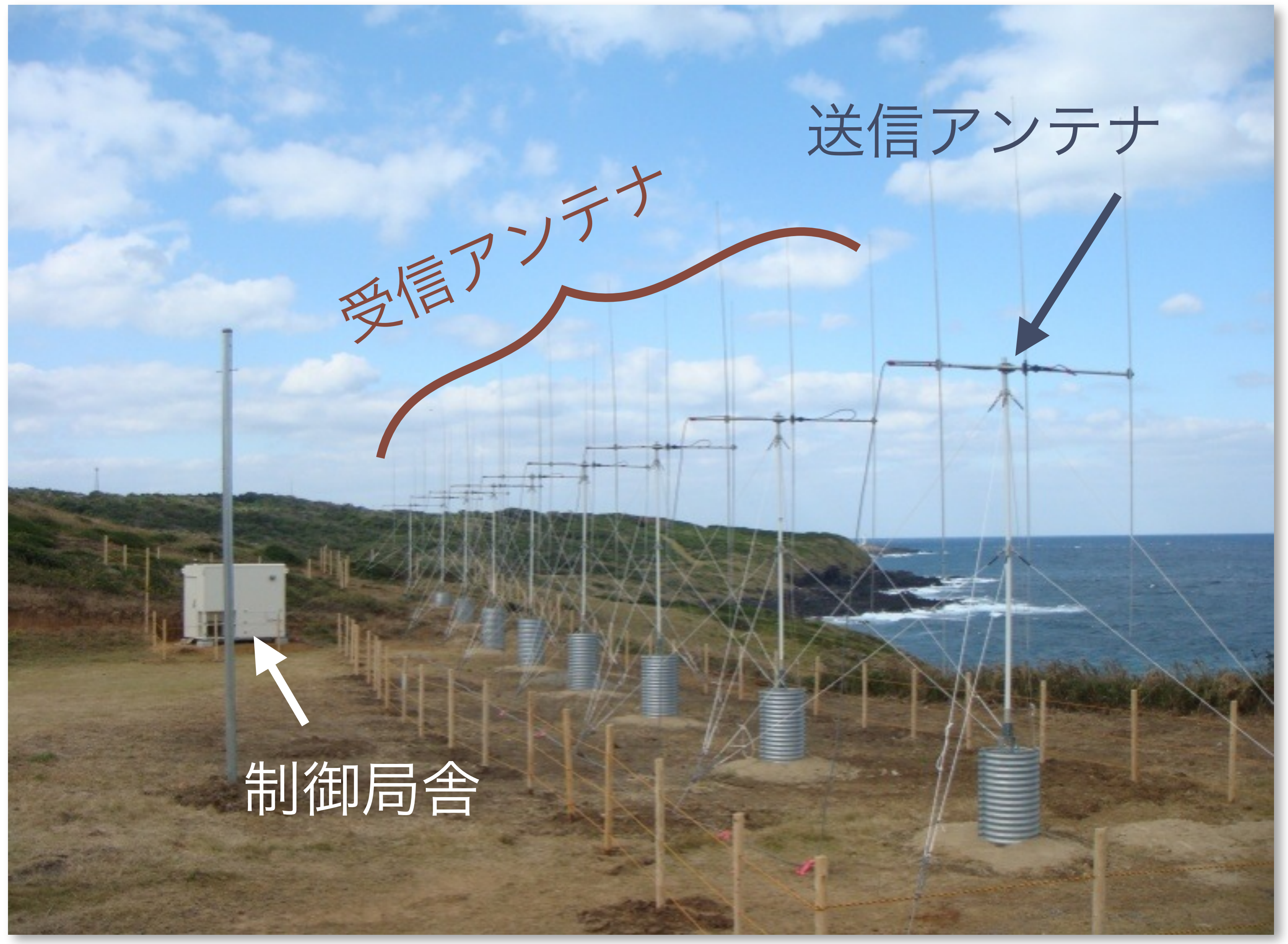
  ➡ 既往の波浪スペクトル推定法の浅海域への拡張

  ➡ 浅海域における波浪スペクトル推定法の適用性に関する数値実験

- **汽水域における海洋レーダを用いた波浪計測性能の評価**

  ➡ 伊勢湾における波浪計測性能の把握とそれに及ぼす影響評価

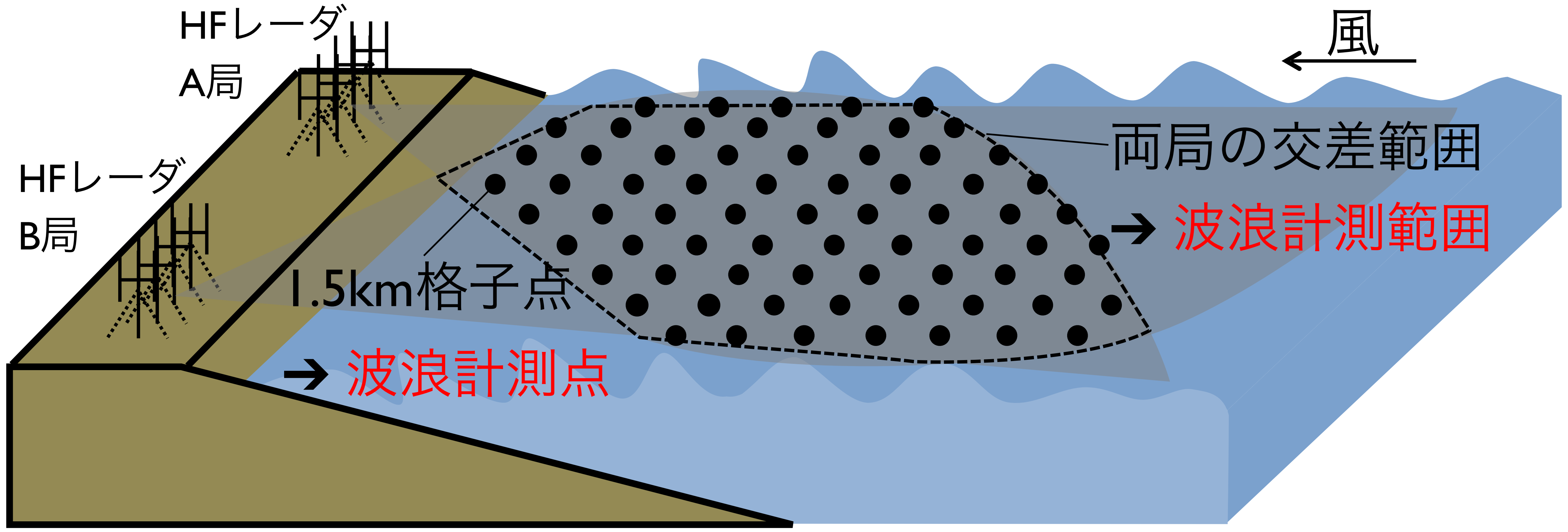
海洋レーダを用いた流況・波浪計測



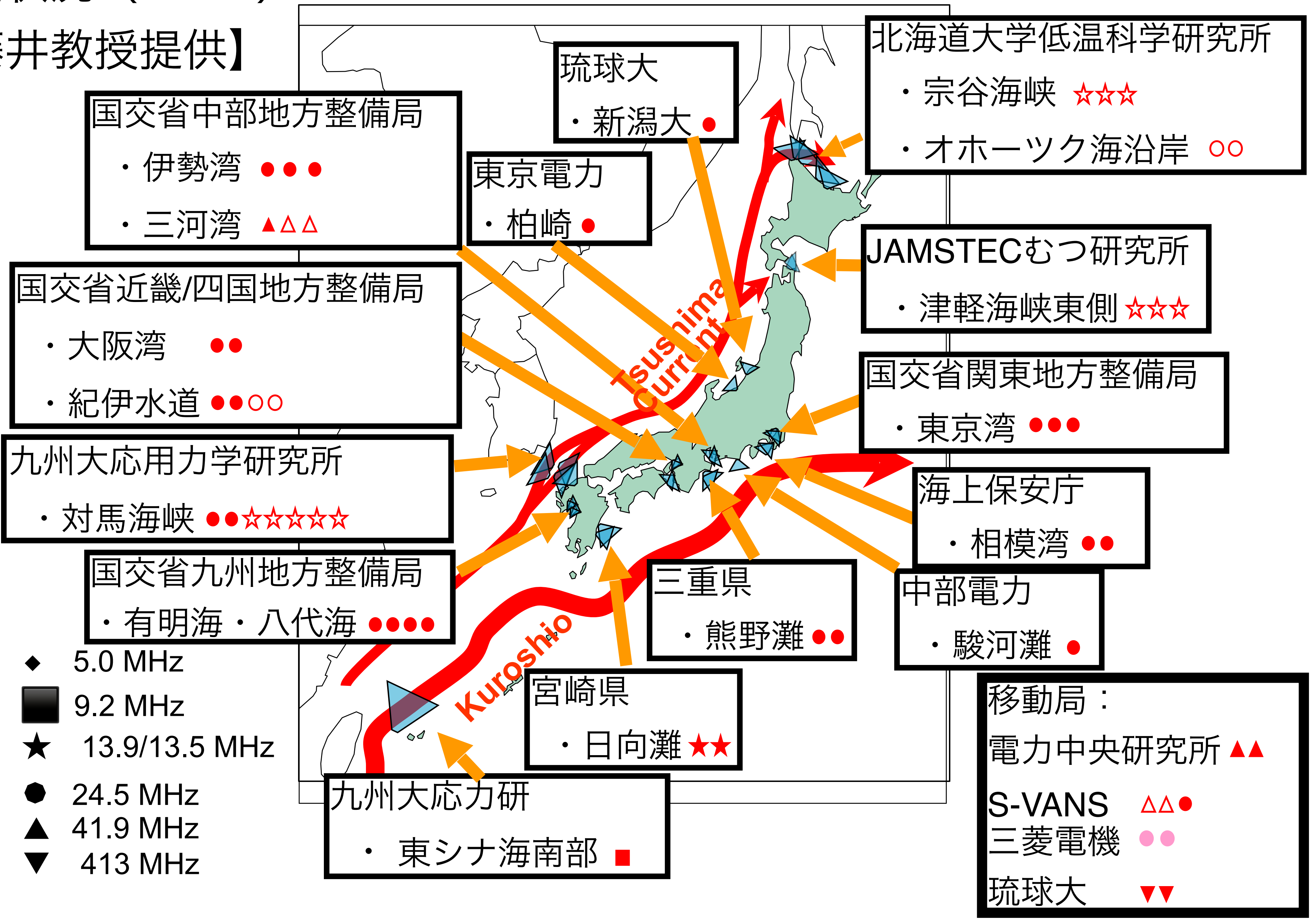
海洋レーダ: 陸から海に電波を放射して海表面の**流れ, 風, 波浪を広域に同時計測**できる測器

➡ 低コスト・メンテ易・面的

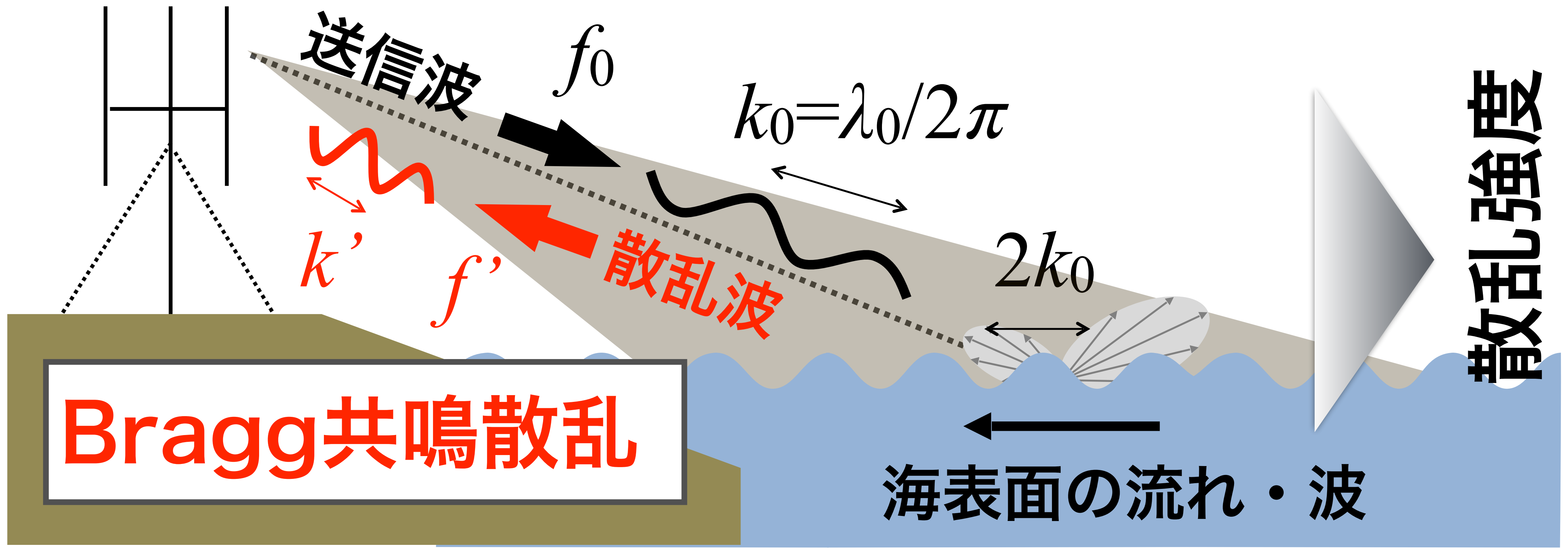
➡ 流況・波浪観測のため，国内の閉鎖性内湾（東京湾・伊勢湾・大阪湾・紀伊水道）を中心に沿岸44基常設



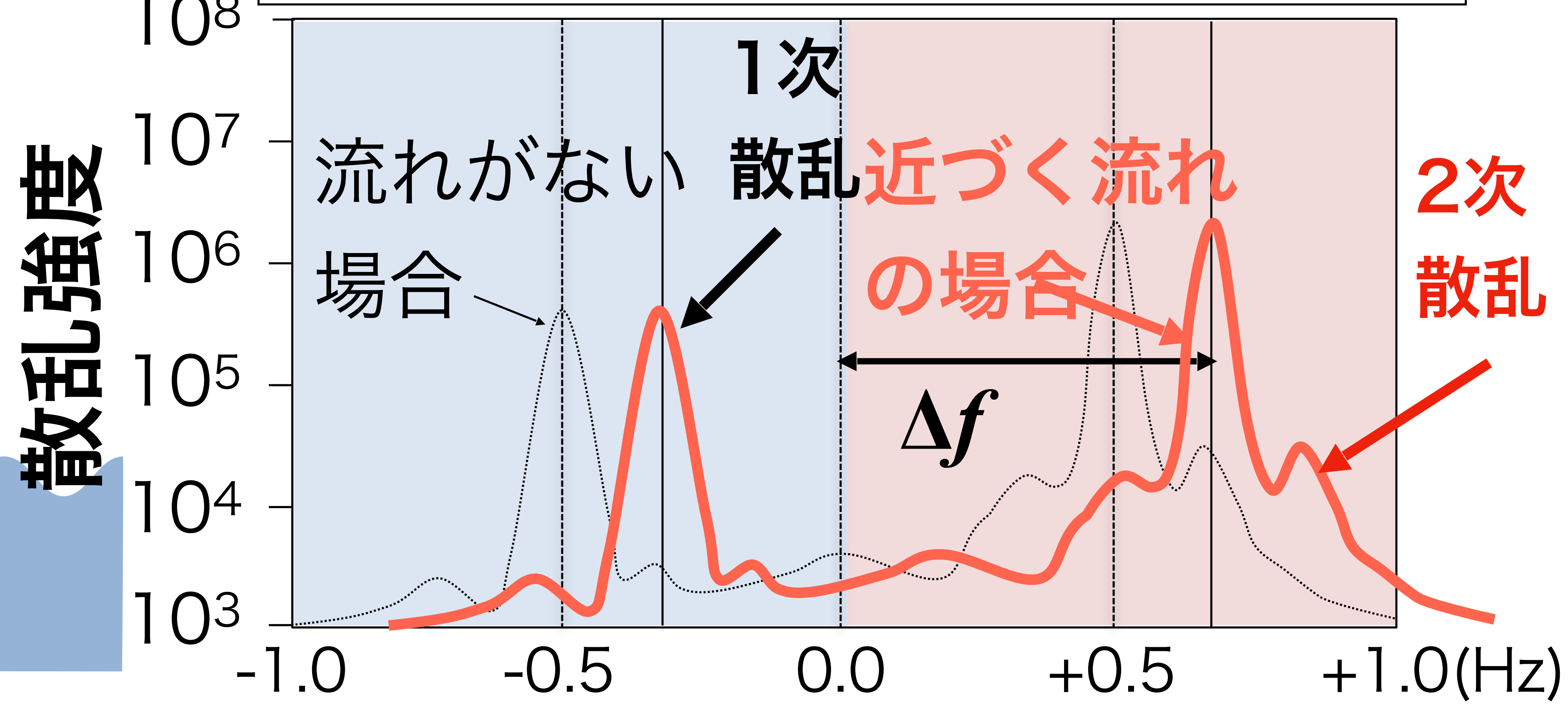
国内海洋レーダ配備状況（2021）
【出典：琉球大学藤井教授提供】



HFレーダによる流速計測と波浪計測



ドップラースペクトル（DS）



流速計測：1次散乱のドップラーシフト

ドップラーシフトΔfと

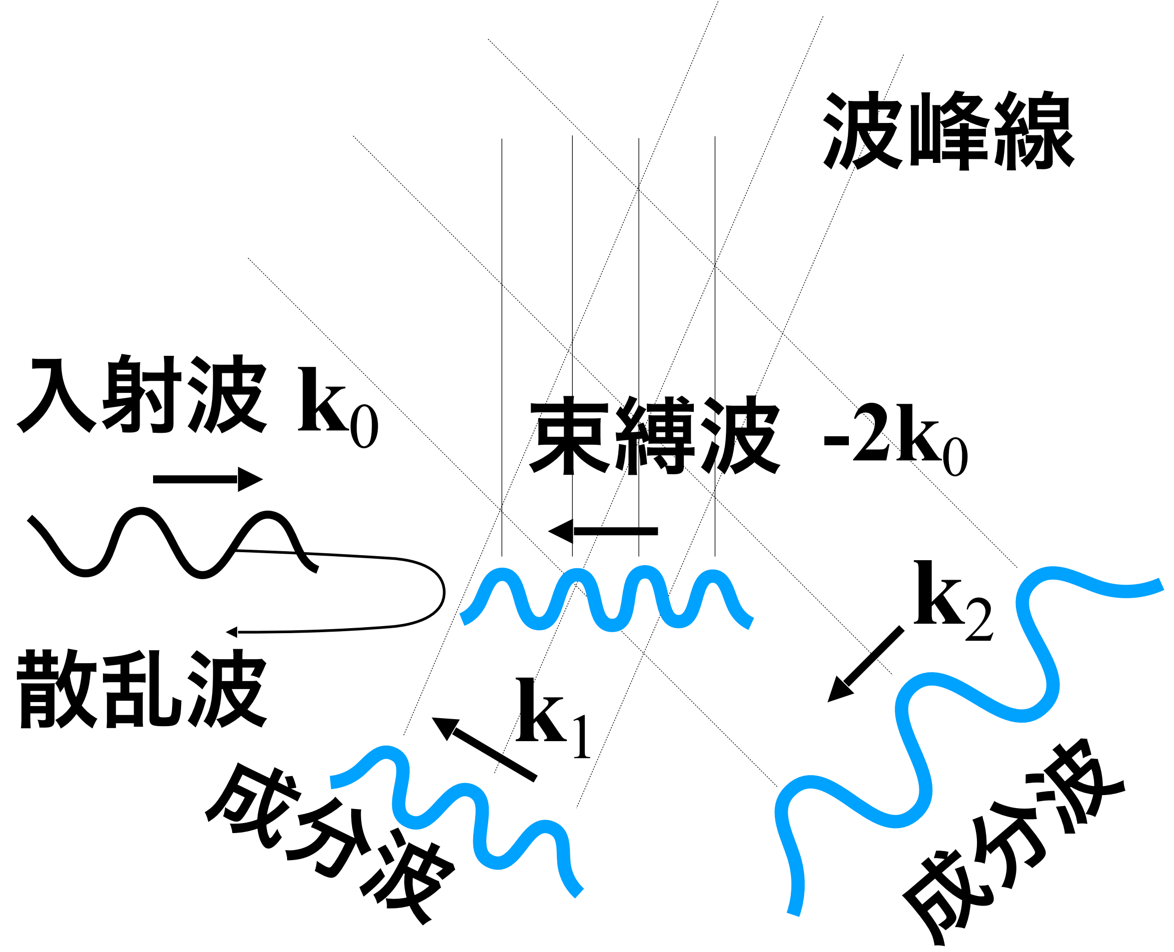
波の位相速度v_pから

表面流速v'を算出

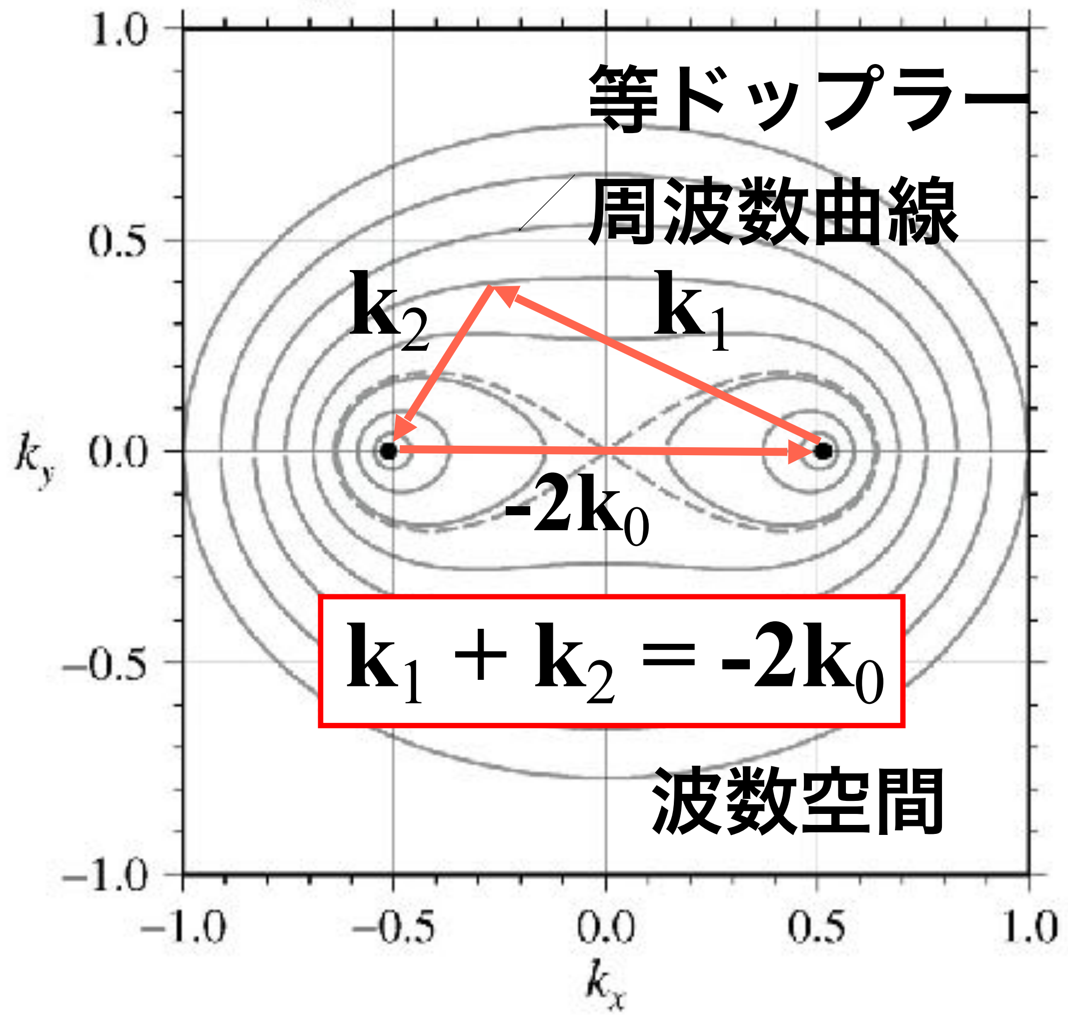
$$v' = v_p - \frac{V_0}{2f_0}\Delta f$$

波浪計測：2次散乱の散乱強度

流体力学的効果



2成分波の共鳴条件



片岡・永松, 海講, 2016

海洋レーダを用いた面的波浪計測

2次散乱断面積 $\sigma^{(2)}(\omega_D)$ の定式化*

* Barrick, Radio Sci., 1972

$$\sigma^{(2)}(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \boxed{\left|\Gamma_T\right|^2} \boxed{S(m_1\mathbf{k}_1)S(m_2\mathbf{k}_2)} \times \boxed{\delta(\omega_D - m_1\omega_1 - m_2\omega_2)} dk_x dk_y$$

Γ_T ：結合係数 $\left(=\Gamma_E + i\Gamma_H\right)$

$S(m_i\mathbf{k}_i)$ ：波数 k_i のスペクトル

$\delta(\cdot)$ ：デルタ関数

海洋レーダを用いた波浪計測

➔ 非線形積分方程式の逆問題を解き，波浪スペクトルを推定

電磁気学的結合係数

$$\Gamma_E = \frac{1}{2}\left[\frac{\left(\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{k}_0\right)\left(\mathbf{k}_2\cdot\mathbf{k}_0\right)/k_0^2 - 2\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{k}_2}{\left(\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{k}_2\right)^{1/2} - k_0\Delta}\right]$$

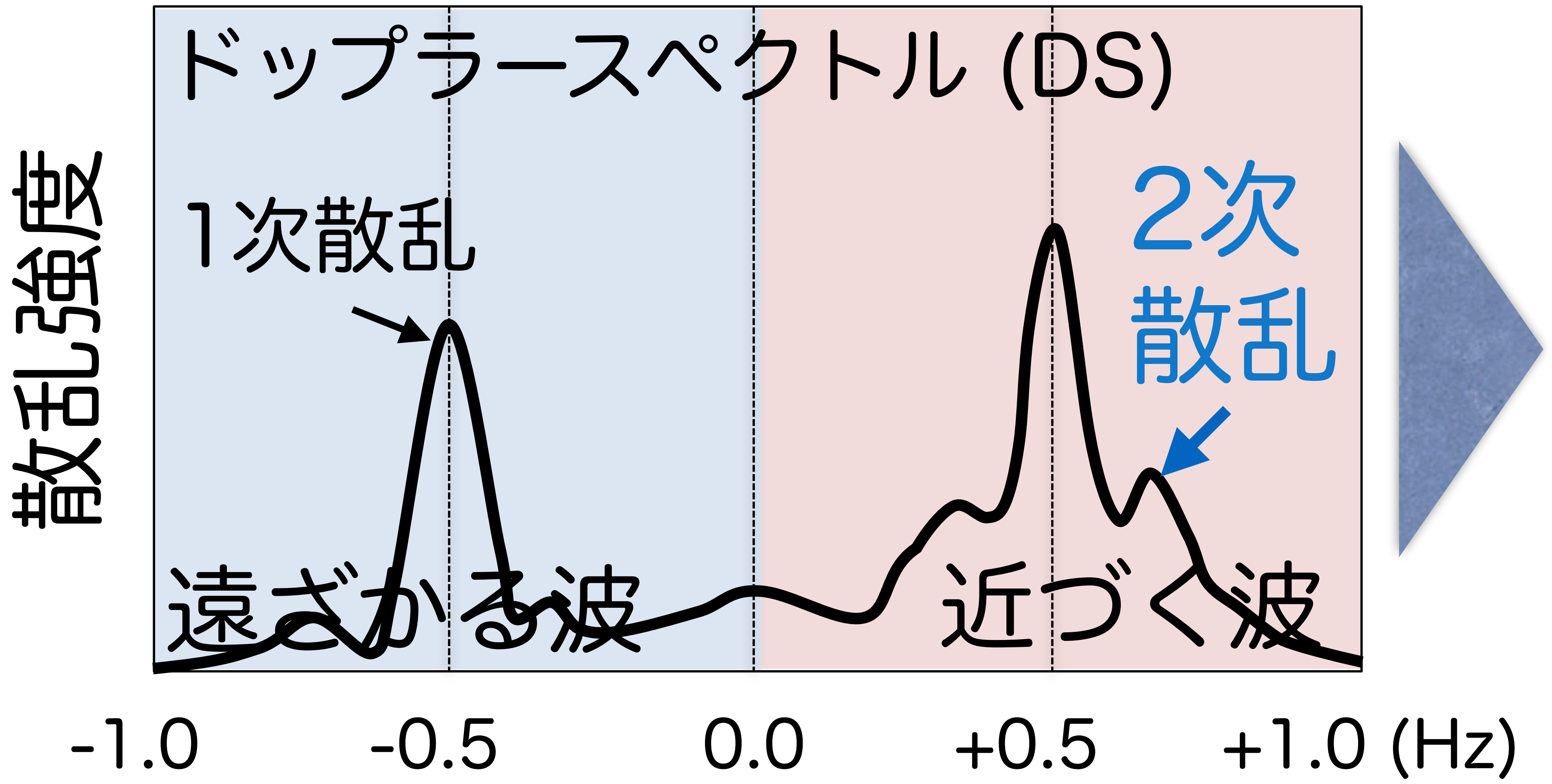
流体力学的結合係数

深海域の場合

$$\Gamma_H = -\frac{1}{2}\left\{k_{d1} + k_{d2} + \frac{\mathbf{k}_1\cdot\mathbf{k}_2 - k_{d1}k_{d2}}{m_1 m_2\left(k_{d1}k_{d2}\right)^{1/2}}\left(\frac{\omega_D^2+\omega_B^2}{\omega_D^2-\omega_B^2}\right) + \frac{\omega_D\left[m_1\left(gk_{d1}\right)^{3/2}\operatorname{csch}^2\left(k_1 h\right) + m_2\left(gk_{d2}\right)^{3/2}\operatorname{csch}^2\left(k_2 h\right)\right]}{g\left(\omega_D^2-\omega_B^2\right)}\right\}$$

浅海域の場合

ドップラースペクトルから波浪情報を抽出する手法



2次散乱の
観測値と
理論式から
波浪抽出

2次散乱の理論式（Barrick, RS, 1972）

$$\sigma_2(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1=\pm1} \sum_{m_2=\pm1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\Gamma_T|^2 S(m_1\mathbf{k}_1) S(m_2\mathbf{k}_2) \delta(\omega_D - m_1\omega_1 - m_2\omega_2) dk_x dk_y$$

【波浪抽出方法】→ここでは非線形インバージョン手法を適用

1.簡易手法 (Barrick, 1977など): DSに重み関数をかけて波浪統計量を推定

2.半経験的手法 (Gurgel et al. (2006), Toro et al. (2014), Lopez et al. (2016)など): 2次散乱と周波数スペクトルとの比例関係を用い，その比例定数を現地波浪データで回帰する.

3.線形インバージョン法 (Lipa (1977), Wyatt (1990), Howell and Walsh(1993), Lipa and Nyden (2005)など): 2次散乱の理論式を線形化して方向スペクトルを逆推定

4.非線形インバージョン法 (Hisaki (2015), Hashimoto and Tokuda (1999), 片岡・永松 (2016)など): 2次散乱の理論式にいくつかの先験条件を用いて方向スペクトルを逆推定

浅海域における波浪スペクトル推定のためのベイズ確率論を用いたの非線形インバージョン法（BIMshallow: 片岡・永松, 2016）

Hashimoto and Tokuda (1999)

→ 深海域における波浪スペクトル推定のためのベイズ確率論を用いたの非線形インバージョン法（BIMdeep）

波浪スペクトルを離散化して、$S(\omega,\theta)>0$ を満足する指数関数

$$S(\omega,\theta)=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\exp(x_{i,j})\boxed{\delta_{i,j}(\omega,\theta)}$$

← 方向スペクトルを離散化するためのデルタ関数

$$\begin{cases} x_{i,j}=\ln S(\omega_i,\theta_j) : \text{求めるべき未知数} \\ i=1,2,\cdots,I \quad : \text{周波数に関する格子番号} \\ j=1,2,\cdots,J \quad : \text{方向に関する格子番号} \end{cases}$$

$$\delta_{i,j}(\omega,\theta)=\begin{cases} 1:\omega_{i-1}\le\omega<\omega_i \text{ and } \theta_{i-1}\le\theta<\theta_i \\ 0:\text{otherwise} \end{cases}$$

離散化した方向スペクトルを2次散乱断面積に代入

BIMdeepの場合 $$\sigma^{(2)}(\omega_D)=2^6\pi k_0^4\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\boxed{\left|\Gamma_{T\infty}\right|^2}S(m_1\mathbf{k}_1)S(m_2\mathbf{k}_2)\boxed{\delta(\omega_D-m_1\sqrt{gk_1}-m_2\sqrt{gk_2})}dk_xdk_y$$

BIMshallowの場合 $$\sigma^{(2)}(\omega_D)=2^6\pi k_0^4\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\boxed{\left|\Gamma_T\right|^2}S(m_1\mathbf{k}_1)S(m_2\mathbf{k}_2)\boxed{\delta(\omega_D-m_1\omega_1-m_2\omega_2)}dk_xdk_y$$

ベイズ確率論を用いた
浅海域における波浪スペクトルの非線形インバージョン法（片岡・永松, 2016）

ドップラースペクトル
の観測値ベクトル →

$$\boxed{\mathbf{d}} = \boxed{\mathbf{s}(\mathbf{x})} + \boxed{\mathbf{e}}$$

← 誤差ベクトル

未知数ベクトル$\mathbf{x}$（次元:$L = I \times J$）を
含む非線形代数方程式

<u>ベイズの定理</u>

$$p(\mathbf{x},\alpha^2,u^2|\mathbf{d}) \propto p(\mathbf{d}|\mathbf{x},\alpha^2)\,p(\mathbf{x}|\alpha^2,u^2)$$

<u>尤度関数</u>

$$P(\mathbf{d}|\mathbf{x},\alpha^2) = (2\pi\alpha^2)^{-K/2}\exp\left\{-(2\alpha^2)^{-1}|\mathbf{d}-\mathbf{s}(\mathbf{x})|^2\right\}$$

尤もらしさ

<u>事前確率分布（先験条件）</u>

$$p(\mathbf{X}|u^2,\alpha^2) = u^L(2\pi\alpha^2)^{-L/2}\exp\left\{-(2\alpha^2)^{-1}u^2|\mathbf{D}\mathbf{x}|^2\right\}$$

波浪スペクトルの
滑らかさ

<u>事後確率分布</u>

$$p(\mathbf{x},\alpha^2,u^2|\mathbf{d}) = z^{-1}u^L(2\pi\alpha^2)^{-(K+L)/2}\exp\left\{-(2\alpha^2)^{-1}\left[|\mathbf{d}-\mathbf{s}(\mathbf{x})|^2 + u^2|\mathbf{D}\mathbf{x}|^2\right]\right\}$$

ドップラースペクトルから波浪スペクトルを推定する逆問題
➜ 事後確率分布の指数部の最小化問題に帰着

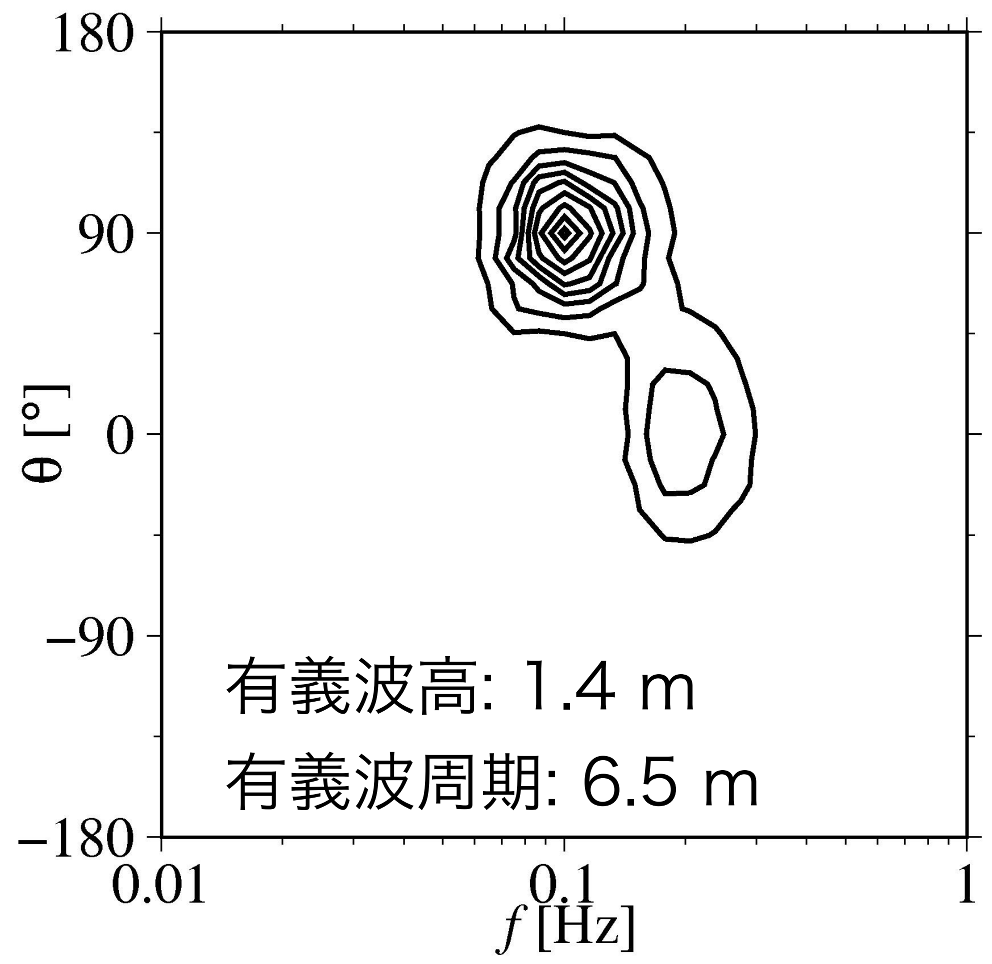
$$\left|\mathbf{d}-\mathbf{s}(\mathbf{x})\right|^2 + u^2\left|\mathbf{D}\mathbf{x}\right|^2$$
$$\to min$$

BIMdeepとBIMshallowの比較のための数値実験

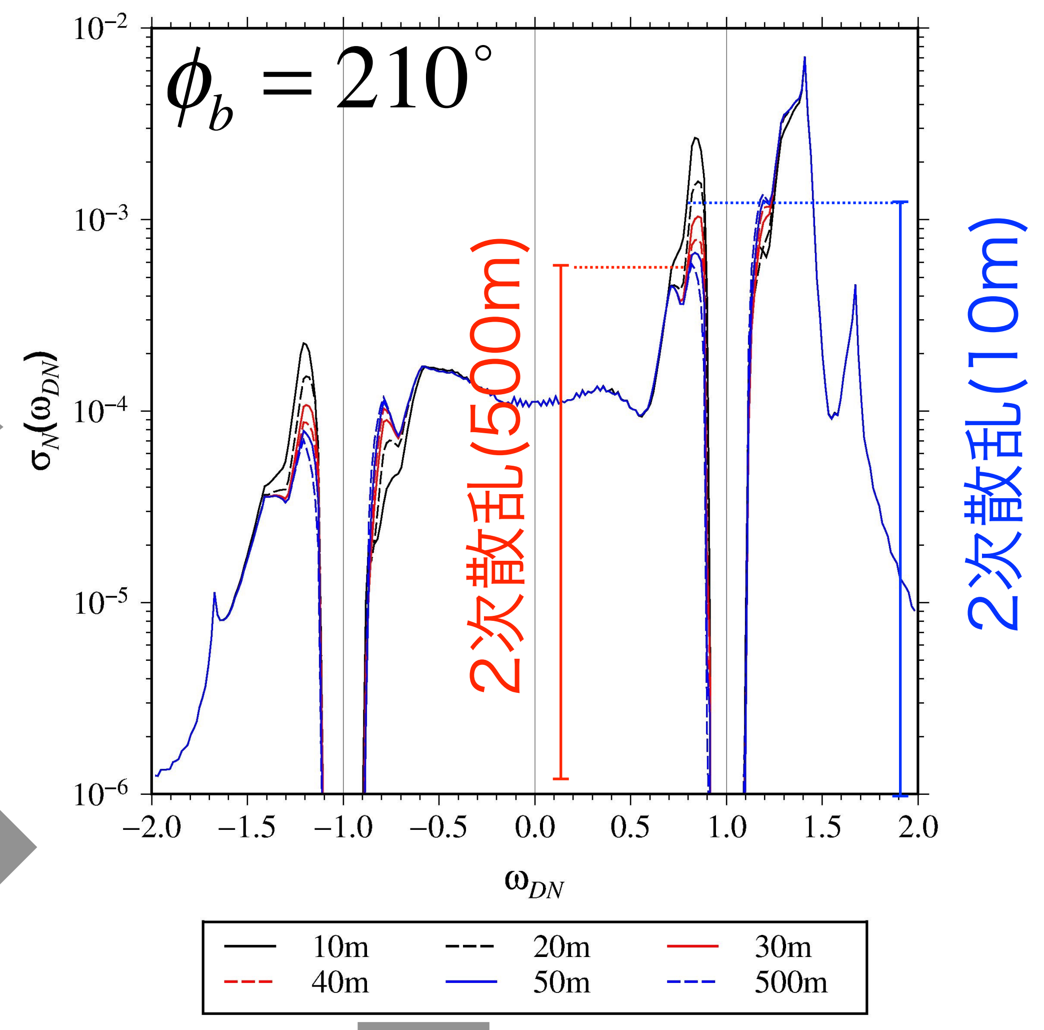
モデル波浪（波浪スペクトル）の作成
→ **波浪スペクトルの真値**

ドップラースペクトル（２次散乱断面積）の作成
→ **ドップラースペクトルの観測値**

BIMdeepとBIMshallowを用いた波浪スペクトルの推定
→ **推定値と真値の比較**

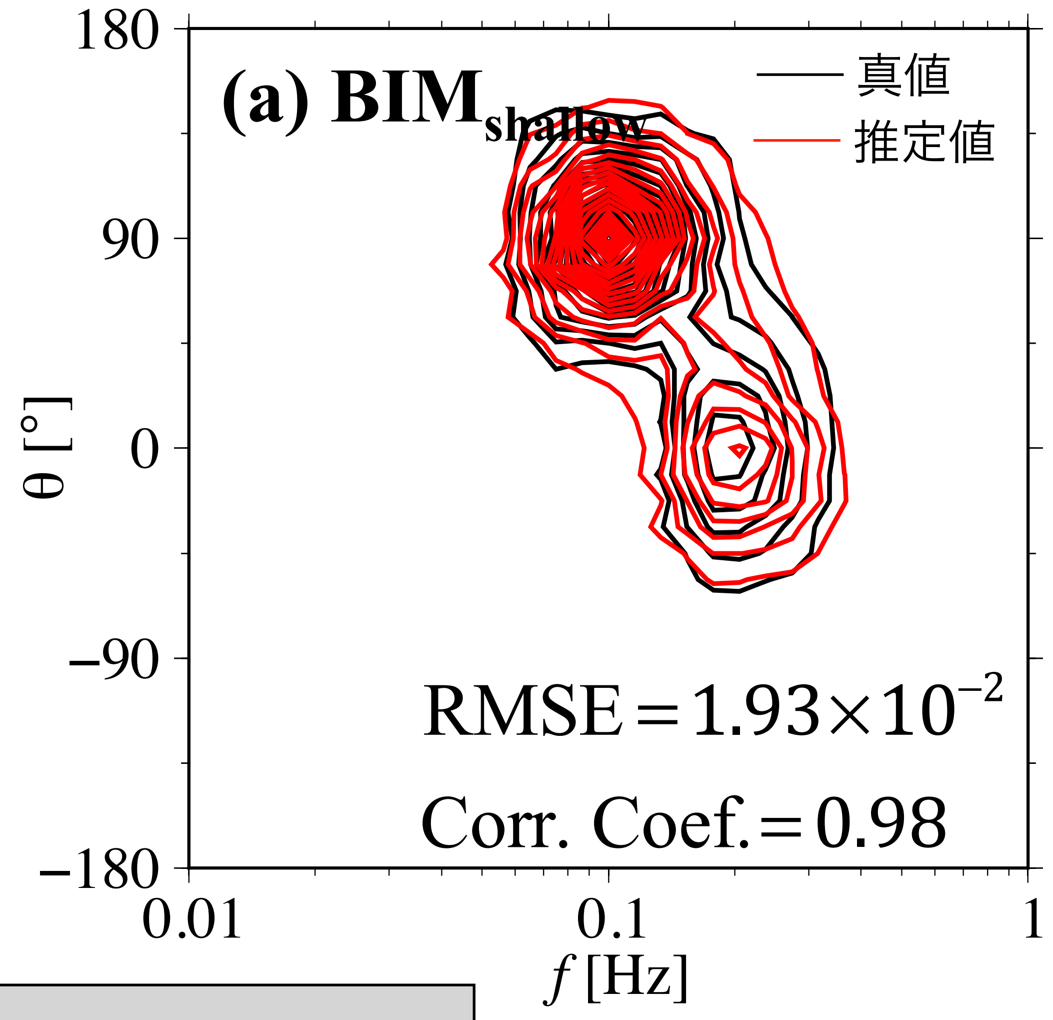


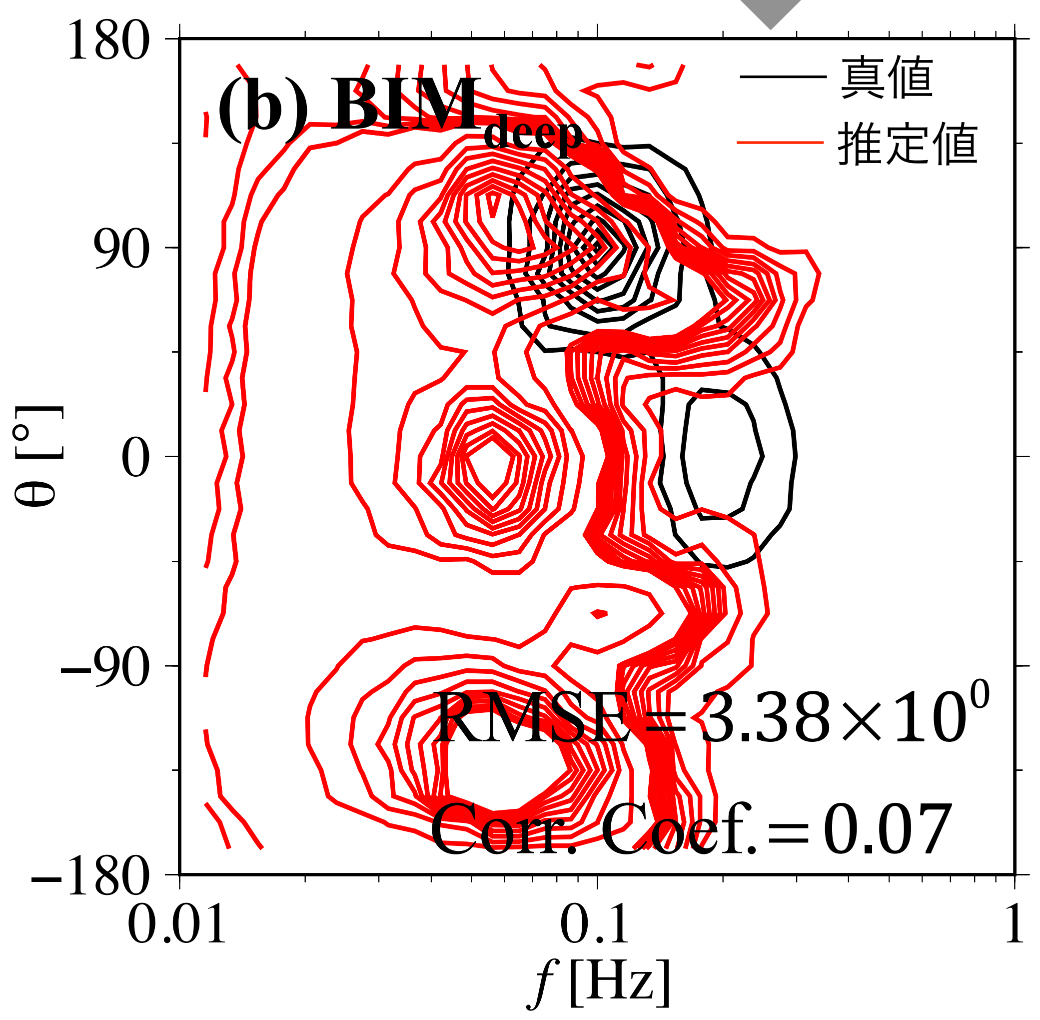
$$\sigma^{(2)}(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} |\Gamma_T|^2 S(m_1\mathbf{k}_1) S(m_2\mathbf{k}_2) \times \delta(\omega_D - m_1\omega_1 - m_2\omega_2) dk_x dk_y$$



BIMshallow

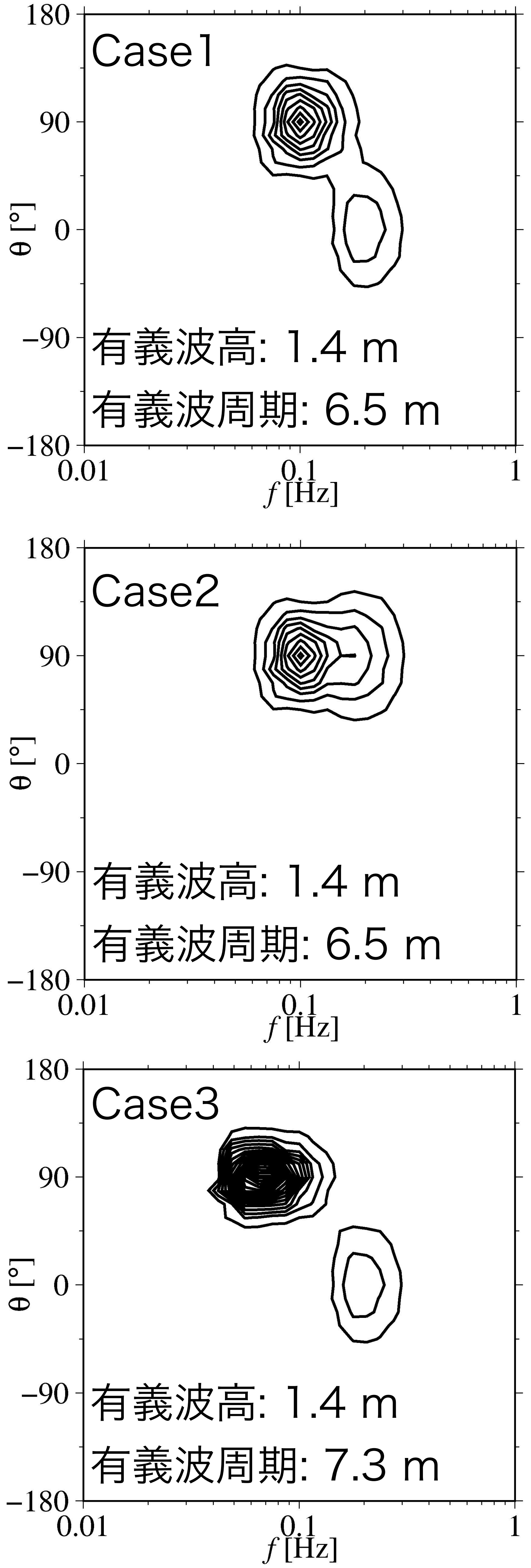
BIMdeep

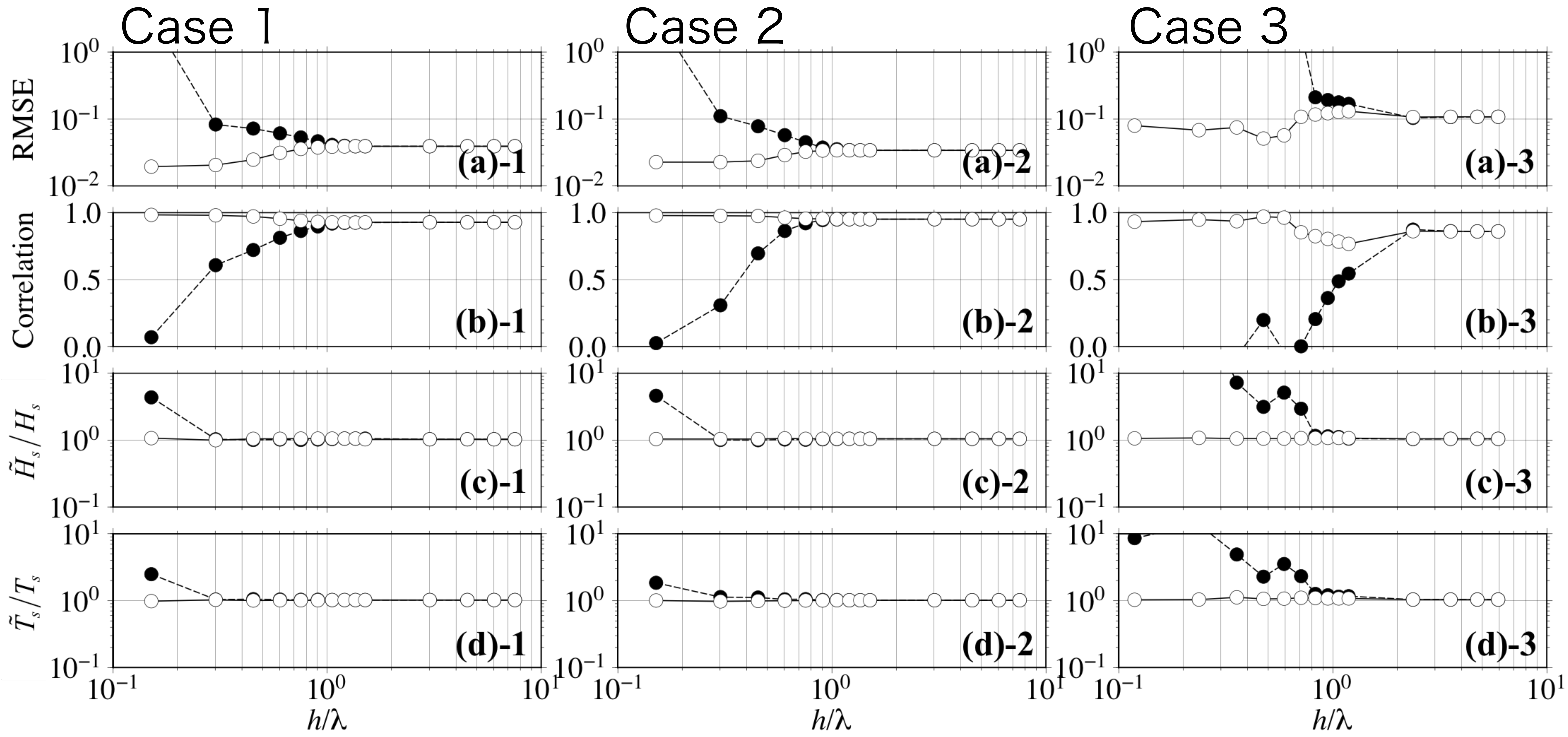




１．浅海域でのBIMshallowの適用性の検証
２．浅海域でのBIMdeepの推定精度と適用範囲の把握

BIMdeepとBIMshallowの波浪スペクトル推定精度の相対水深依存性





● BIMdeep ○ BIMshallow

注）λは有義波周期から計算した深海波の波長

本研究の目的

- **浅海域における海洋レーダの波浪スペクトル推定法の構築**

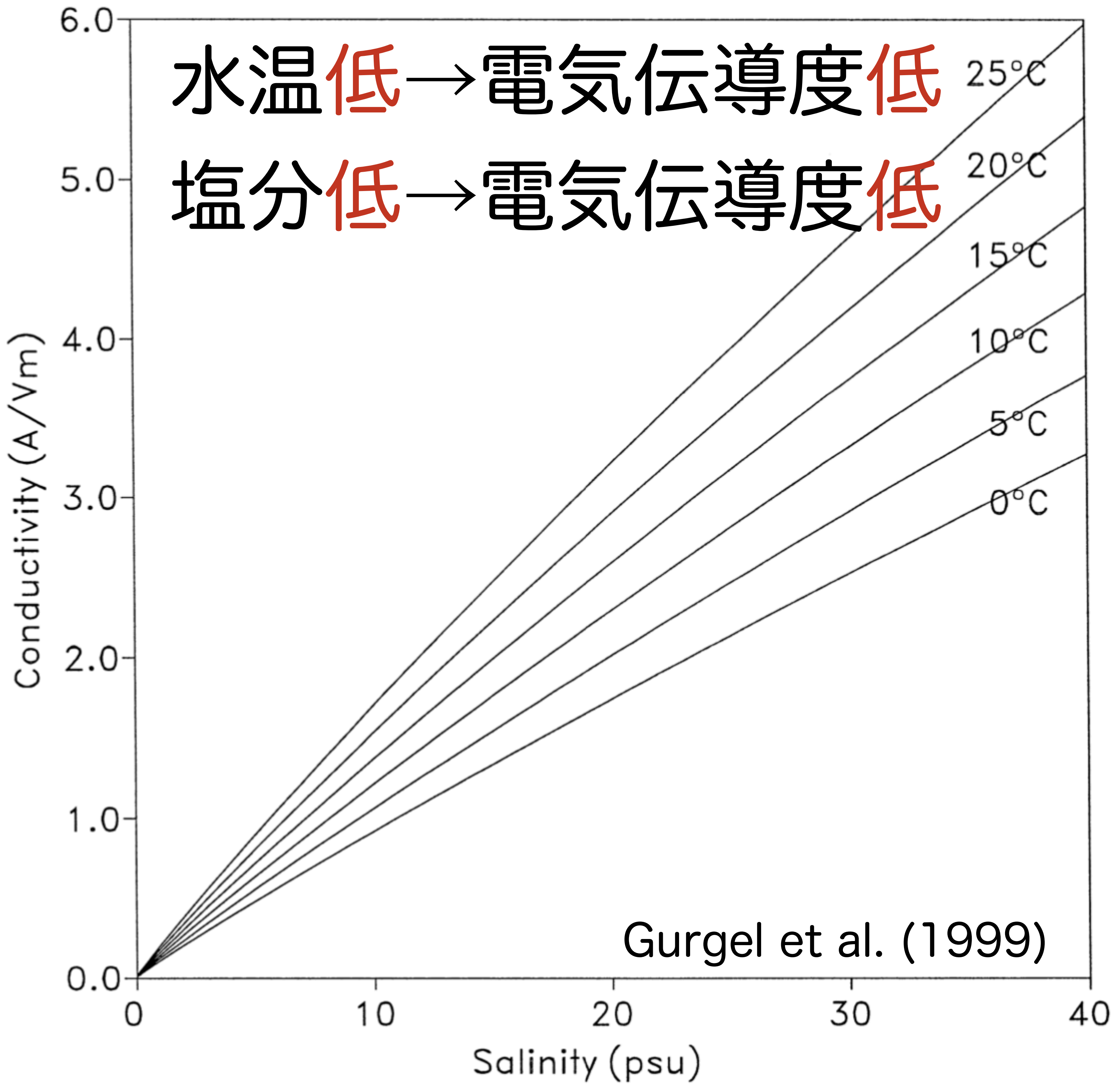
  ➡ 既往の波浪スペクトル推定法の浅海域への拡張

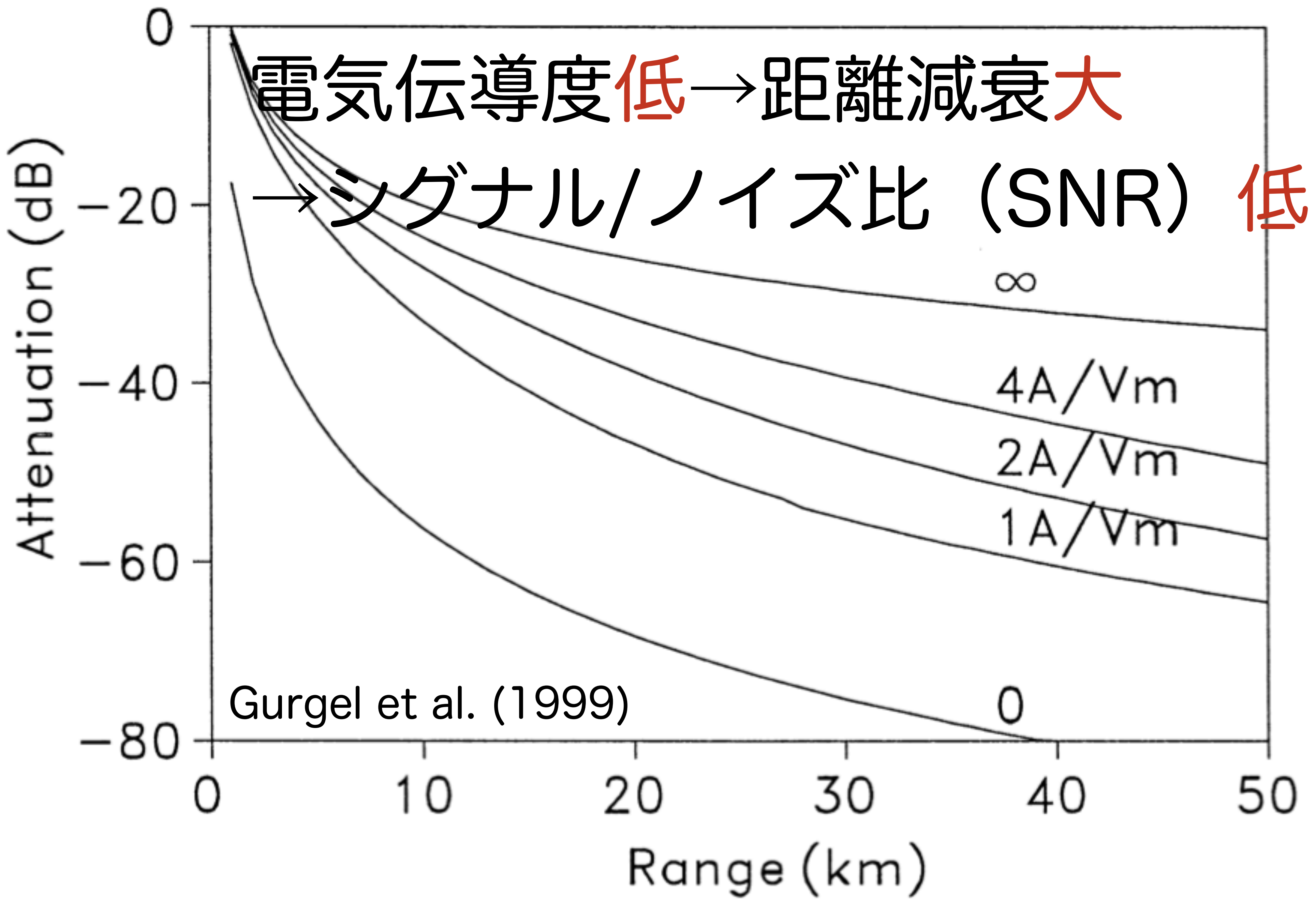
  ➡ 浅海域における波浪スペクトル推定法の適用性に関する数値実験

- **汽水域における海洋レーダを用いた波浪計測性能の評価**

  ➡ 伊勢湾における波浪計測性能の把握とそれに及ぼす影響評価

汽水域におけるHFレーダ波浪計測の適用性の課題





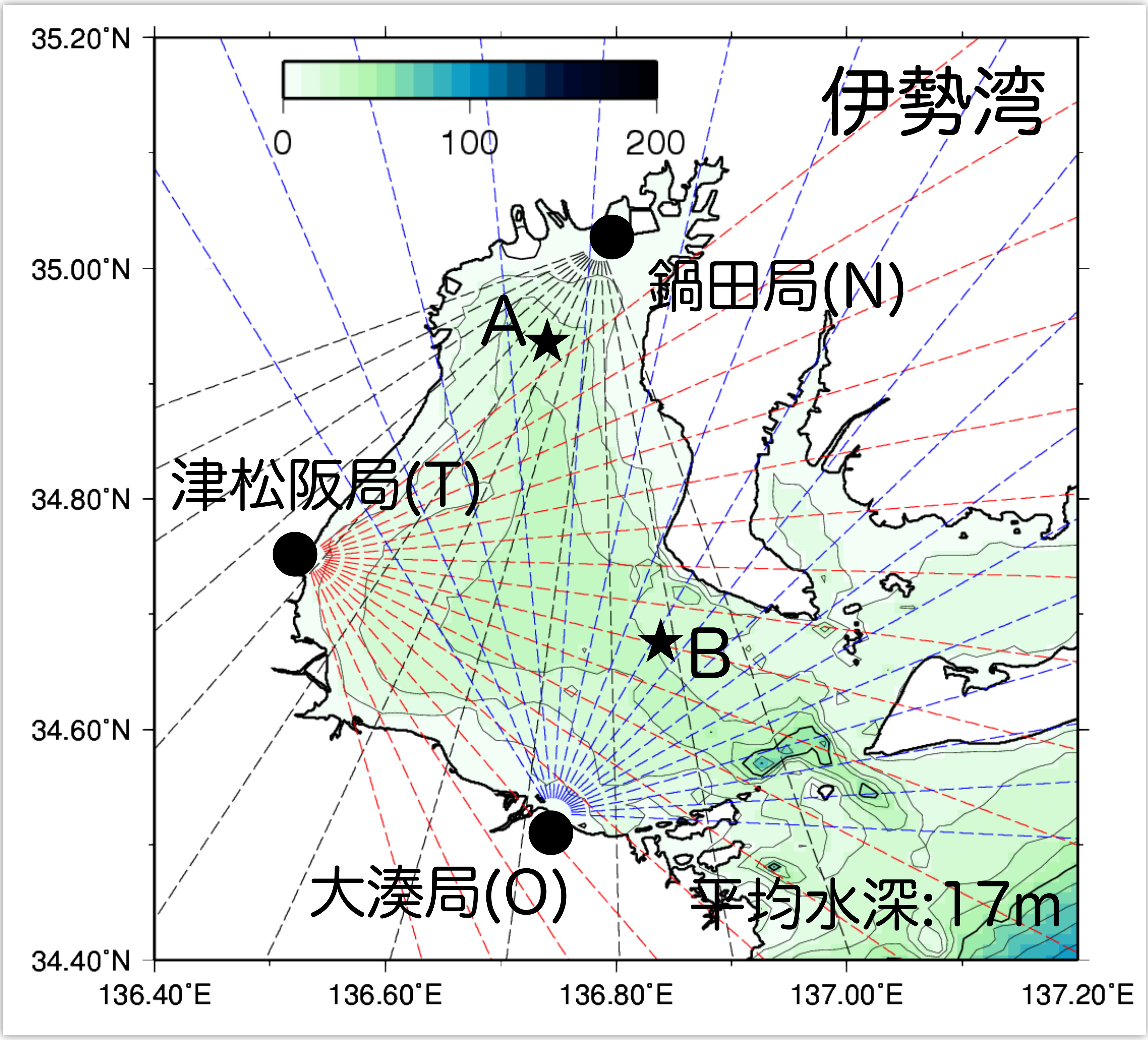
25MHzレーダの電気伝導度による距離減衰の違い

電気伝導度（Conductivity）と塩分・水温の関係

河川水流入による水温・塩分変化がHFレーダ波浪計測に及ぼす影響は？

→本研究では出水期を対象に，伊勢湾HFレーダを用いた波浪計測を行い，
汽水域における水温・塩分変化による影響を明らかにし，HFレーダによる波浪計測の有効性を検証する

伊勢湾におけるHFレーダ観測



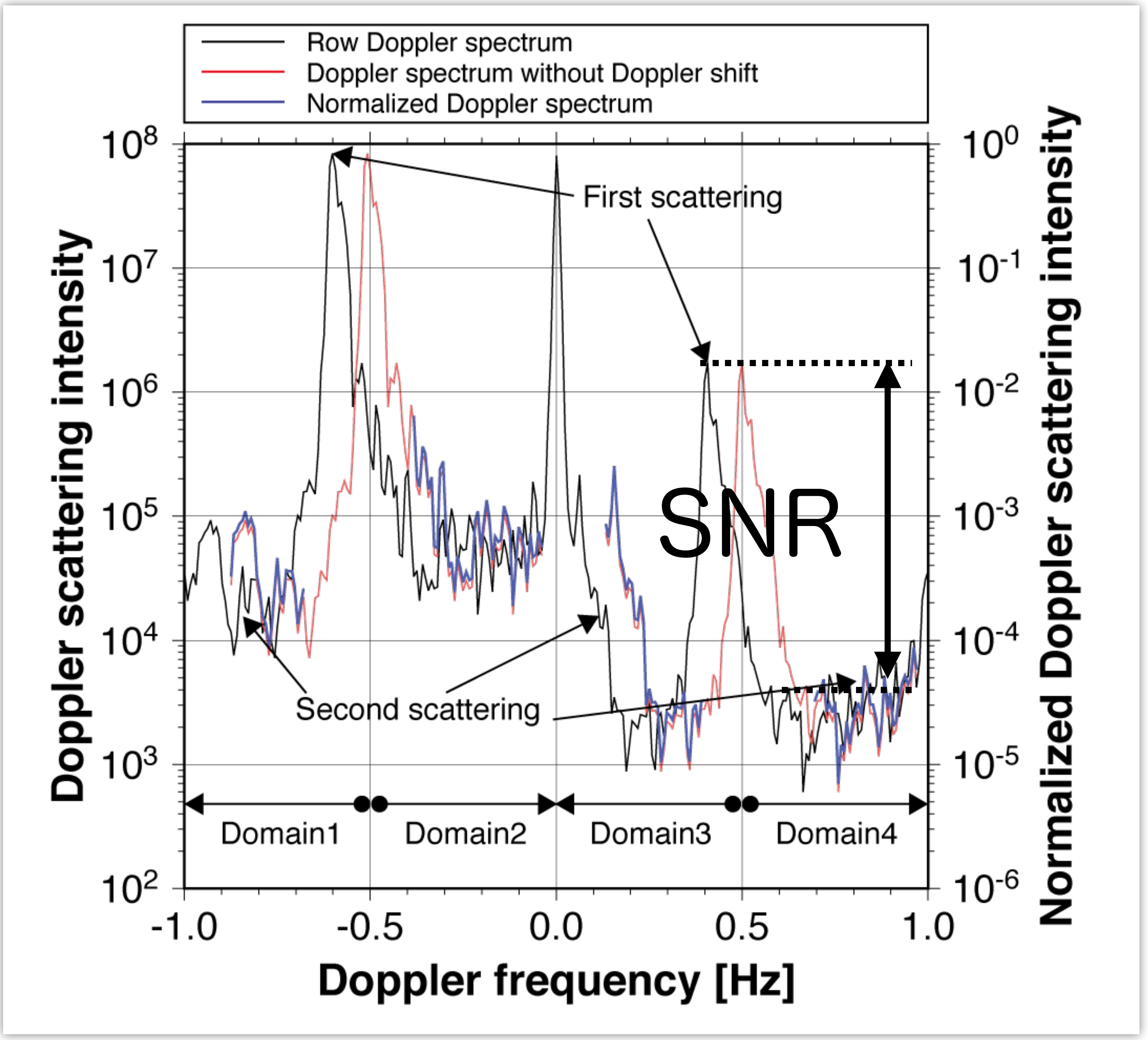
伊勢湾HFレーダの仕様

Radar type	FMICW
Center Frequency	24.515 MHz
Sweep Bandwidth	100 kHz (24.465 – 24.565 MHz)
Frequency Sweep Interval	0.5 s
Maximum Transmission Power	200 W (peak)
Range Resolution	1.5 km
Velocity Resolution	> 4.78 cms^{-1}
Antenna Type	1 transmission antenna 8 receiving antennas (3-elemnt Yagi)
Directionality Synthetic Method	Reception DBF
Beam Width	12°
Bearing Resolution	±45º in steps of 7.5º (Stn. N) ±60º in steps of 7.5º (Stn. T, Stn. O)

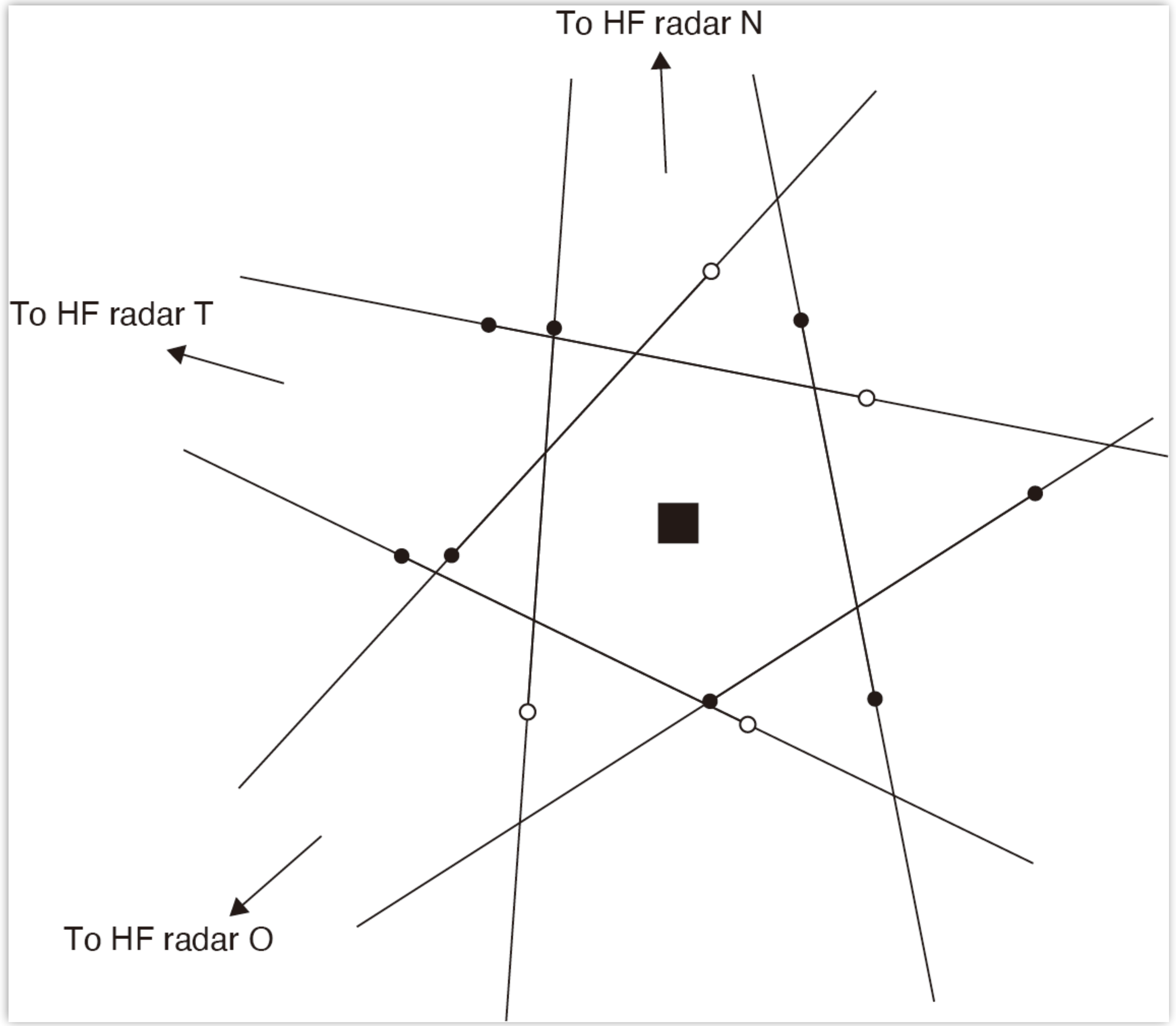
計算期間: 2016年〜2018年までの5つの出水イベントを対象
①2016年9月16日〜24日，②2017年10月18日〜26日
③2018年8月19日〜27日，④2018年8月31日〜9月8日
⑤2018年9月26日〜10月4日

HFレーダによる波浪計算手順

1. ドップラーシフトの除去（生データ：左図黒線，シフト除去：左図赤線）
2. 1次散乱と2次散乱の分離（2次散乱のみ：左図青線）
3. 1.5km格子点周りにある12点（4点/局×3局）のドップラースペクトル（DS）を利用（但し，SNR<10dB（右図白丸）は除く）
4. DSから波浪情報を抽出して，有義波高を計算



ドップラースペクトル計算処理



ドップラースペクトルの選定方法

BIMshallowを用いた推定した波浪スペクトルから有義波高の計算方法

$$\sigma_2(\omega_D) = 2^6\pi k_0^4 \sum_{m_1=\pm1}\sum_{m_2=\pm1}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \boxed{|\Gamma_T|^2}\boxed{S(m_1\mathbf{k}_1)S(m_2\mathbf{k}_2)}\boxed{\delta(\omega_D - m_1\omega_1 - m_2\omega_2)}dk_x dk_y$$

Γ_T: 結合係数$(=\Gamma_E + i\Gamma_H)$, $S(m_i\mathbf{k}_i)$: 波数$\mathbf{k}_i$の波浪スペクトル, $\delta()$: デルタ関数

波浪スペクトル$S(\omega_i, \theta_j) = \exp(x_{i,j})$を代入

$$\boxed{\mathbf{d}} = \boxed{\mathbf{s}(\mathbf{x})} + \boxed{\mathbf{e}}$$

ドップラースペクトルの観測値ベクトル → $\mathbf{d}$

$\mathbf{e}$ ← 誤差ベクトル

$\mathbf{s}(\mathbf{x})$ ← 未知数ベクトル$\mathbf{x}$（次元:$L = I \times J$）を含む非線形代数方程式

波浪スペクトルが滑らかという先験条件を導入してベイズの定理を適用する

ドップラースペクトルから波浪スペクトルを推定する逆問題

➜ 事後確率分布の指数部の最小化問題に帰着 $(|\mathbf{d} - \mathbf{s}(\mathbf{x})|^2 + u^2|\mathbf{D}\mathbf{x}|^2 \rightarrow min)$

➜ 赤池ベイズ情報量基準(ABIC)を用いて最適解を決定

➜ $\mathbf{x}$の最適解から有義波高を計算 $\left(H_s = 4.0\sqrt{\int\int S(\omega_i, \theta_j)d\omega d\theta}\right)$

電気伝導度の評価手法

SSSとHFレーダの波浪計測精度が低下
→電気伝導度が低下したことが要因と考えられるため，以下のPoisson(1980)の実験式を用いてStn.AのSSSとSSTから電気伝導度を推定

$$C(T,S) = 0.042933R_c(T)(S/35) + S(S-35)\times$$
$$(\alpha_0 + \alpha_1 S^{1/2} + \alpha_2 T + \alpha_3 S + \alpha_4 S^{1/2} T + \alpha_5 T^2 + \alpha_6 S^{3/2} + \alpha_7 ST + \alpha_8 S^{1/2} T^2)$$

$$R_c(T) = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 T^3 + \beta_4 T^4$$

上記の多項式の回帰係数

$$\alpha_0 = -8.647\times 10^{-6}, \alpha_1 = 2.752\times 10^{-6}, \alpha_2 = -2.70\times 10^{-7}, \alpha_3 = -4.37\times 10^{-7},$$
$$\alpha_4 = 5.29\times 10^{-8}, \alpha_5 = -1.08\times 10^{-9}, \alpha_6 = 2.61\times 10^{-8}, \alpha_7 = -3.9\times 10^{-9}$$

$$\beta_0 = 0.6765836, \beta_1 = 2.005284\times 10^{-2}, \beta_2 = 1.110990\times 10^{-4},$$
$$\beta_3 = -7.26684\times 10^{-7}, \beta_4 = 1.3587\times 10^{-9}$$

既往研究との計測精度の比較

Research	Field	Radar product	Radio Frequency [MHz]	Algorithm	Bias [m]	RMSE [m]	*R*
This study	Ise Bay, Japan	NJRC	24.5	Barrick (1977a, 1977b) Kataoka and Nagamatsu (2016)	-0.07–0.10	0.34–0.54	0.41–0.72
Ramos, Graber, and Haus (2009)	the eastern coast of Virsinia and North Carolina, USA	CODAR	25.4	Barrick (1977a, 1977b)	-0.33–0.09	0.21–0.70	0.68–0.96
Long et al. (2011)	the western coast of California, USA	CODAR	12-13	Lipa and Nyden (2005)	-	0.46–0.77	0.85–0.91
Chen et al. (2013)	the East China Sea	CODAR	7.5–25	Barrick (1977a, 1977b)	-	0.19–0.38	0.70–0.85
Lopez, Conley, and Greaves (2016)	the northern coast of Cornwall, UK	WERA	12	Gurgel et al. (2006)	-0.06–0.22	0.26–0.52	0.88–0.96
Atan et al. (2016)	Galway Bay, Ireland	CODAR	25	Lipa and Nyden (2005)	0.03–0.09	0.18–0.30	0.78–0.90
Saviano et al. (2019)	the Gulf of Naples, Italy	CODAR	25	Lipa and Nyden (2005)	-	0.20–0.66	0.50–0.75
Lopez and Conley (2019)	the northern coast of Cornwall, UK	WERA	12	Gurgel et al. (2006)	-	0.30–0.45	0.87–0.94
Basañez et al. (2020)	the northwestern coast of Galicia, Spain	CODAR	4.86	Lipa and Nyden (2005)	0.00	0.81	0.78

電気伝導度が>4$[1/\Omega m]$のとき，既往研究とほぼ同等精度で計測可能

→伊勢湾のような汽水域においてもHFレーダによる波浪計測が有効

まとめ

- **浅海域における海洋レーダの波浪スペクトル推定法の構築**

➡ Hashimoto and Tokuda(1999)によるベイズ確率論を用いた波浪スペクトル推定法（BIM_{deep}）を**浅海域にも適用可能にした**（$BIM_{shallow}$）.

➡ BIM_{deep}の適用範囲は$h/\lambda > 1$であり，$h/\lambda \leq 1$**では$BIM_{shallow}$を適用する必要**がある.

➡ 一方，有義波波高と有義波周期の推定精度は**相対水深に対する依存性が低い**.

- **汽水域における海洋レーダを用いた波浪計測性能の評価**

➡ 汽水域における有義波高の計測精度は，河川水流入によって海表面塩分（SSS）が低下するため，**電気伝導度に強く依存**する

➡ 電気伝導度が低くなるほど，波浪の計測精度は悪化するが，河口から遠い海域では，河口近くにあるレーダ局（Radar N）を除いてシグナル/ノイズ比（SNR）が高いため，**SNRが高いDSを適切に選定することで高精度に波浪計測可能**

➡ 既往研究の計測精度と比較したところ，電気伝導度が>4$[1/\Omega m]$では同等の計測誤差であることから，河川水流入の影響が少ないDSを用いれば，**汽水域においてもHFレーダによる波浪計測は有効**