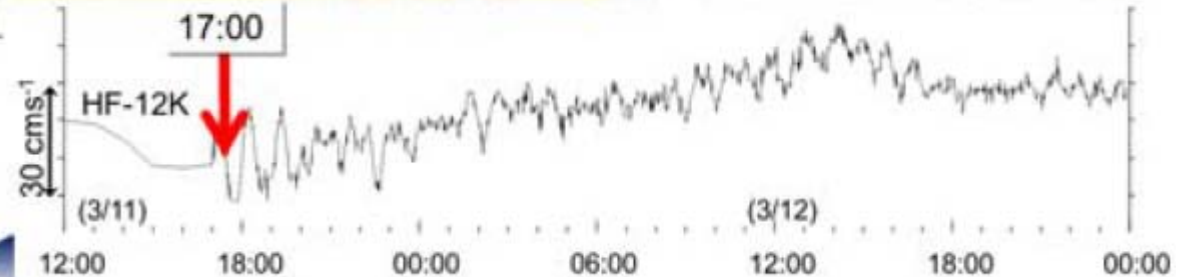
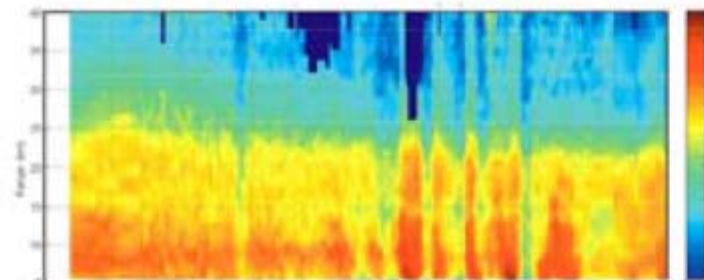
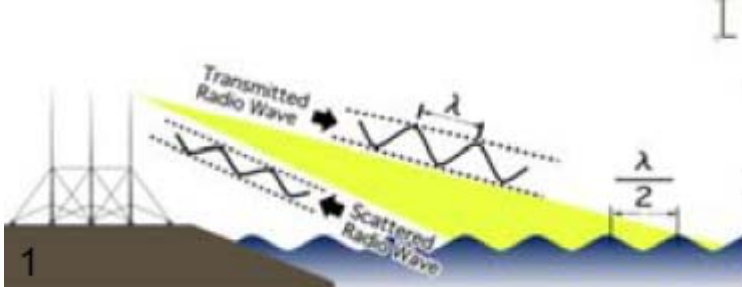




海洋レーダによる津波観測

藤井智史

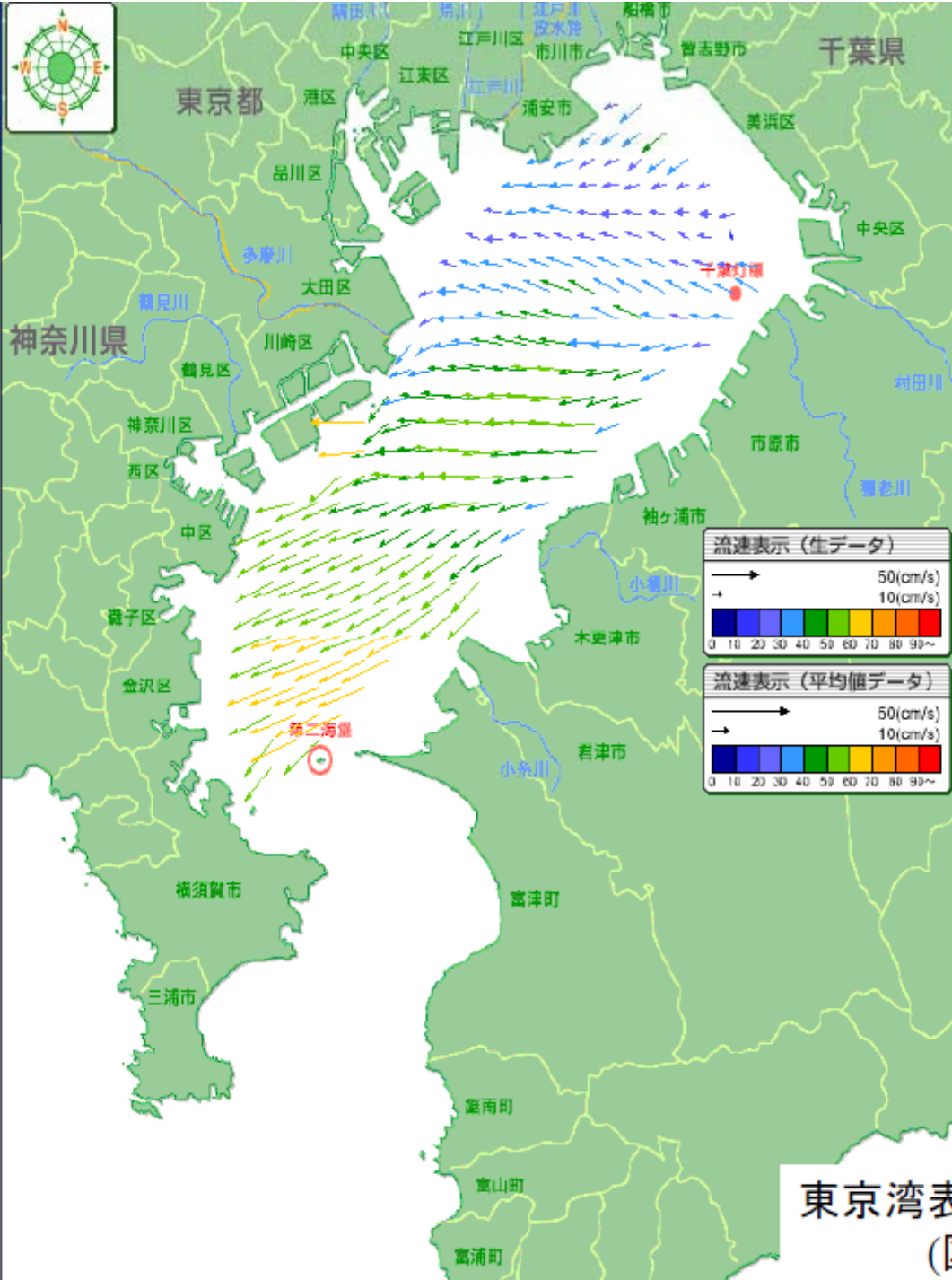
(琉球大学工学部)





海洋レーダの特徴

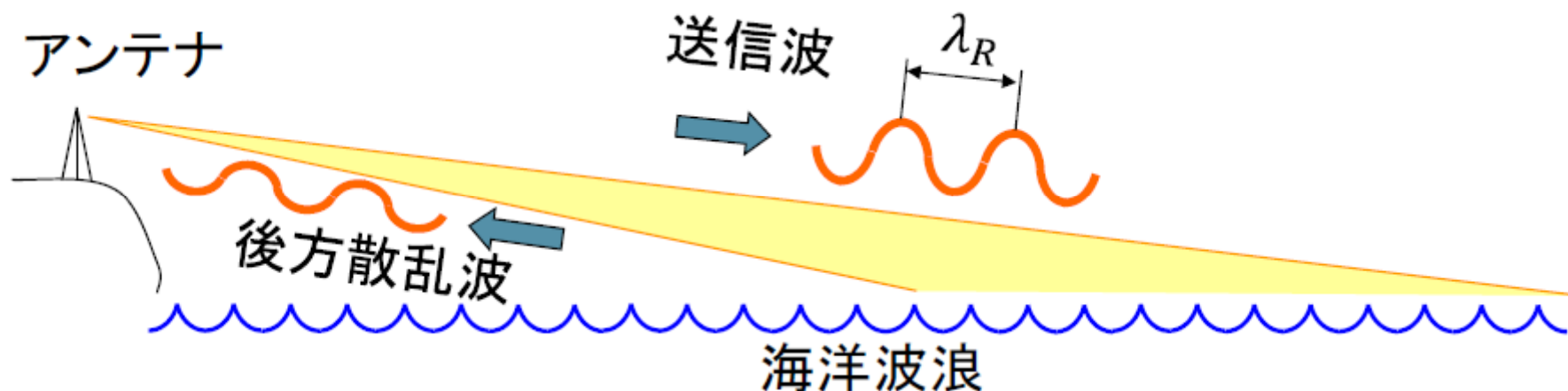
- ◆ **短波帯**（低VHF帯を含む）の電波を利用
 - ✓ 一般的なレーダはマイクロ波を使っている
- ◆ 受信信号は**ブラッグ共鳴条件**を満たした散乱波である
 - ✓ 対象波浪は**重力波**
- ◆ **ドップラーレーダ**である
 - ✓ **視線方向流速**の観測



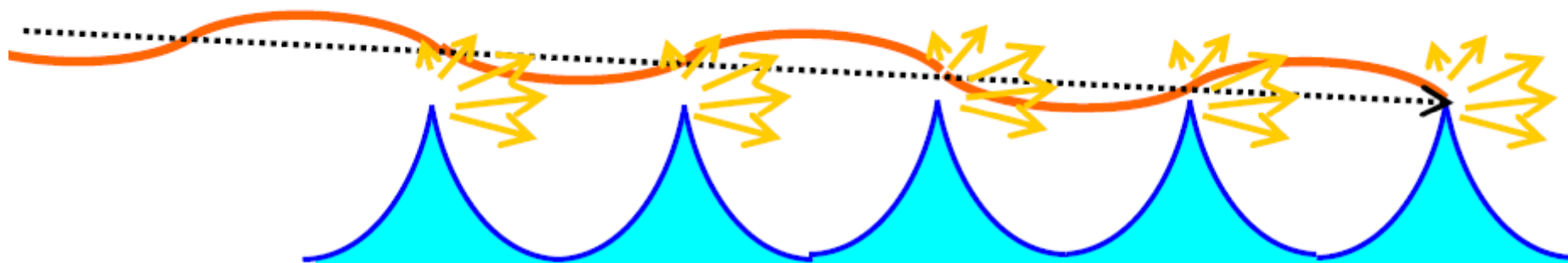
東京湾表層流況配信システムの観測
(国土交通省関東地方整備局)



短波海洋レーダの概念

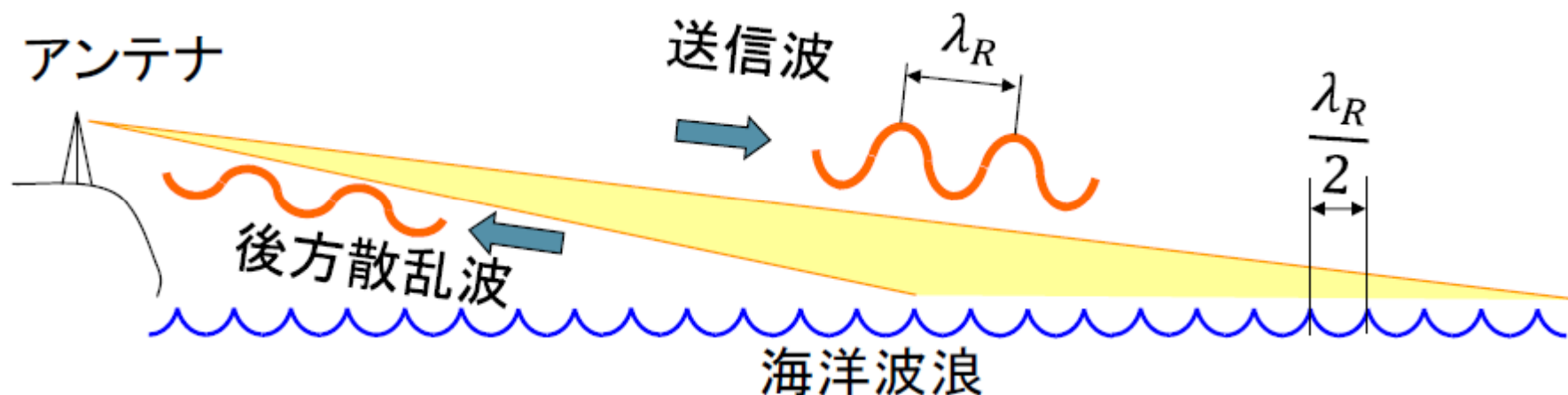


ほぼ水平入射 = 地表波伝播モード



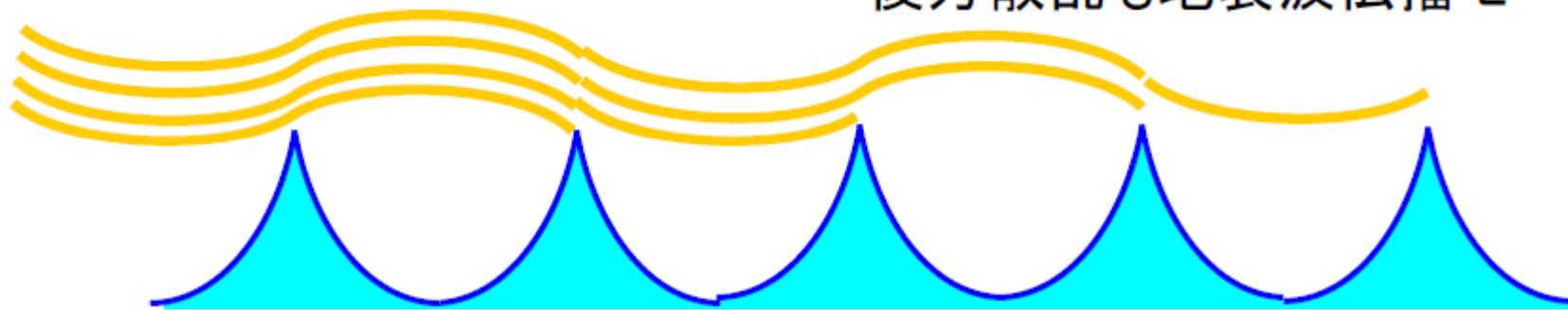


短波海洋レーダの概念



散乱波は同相 = Bragg 散乱共鳴

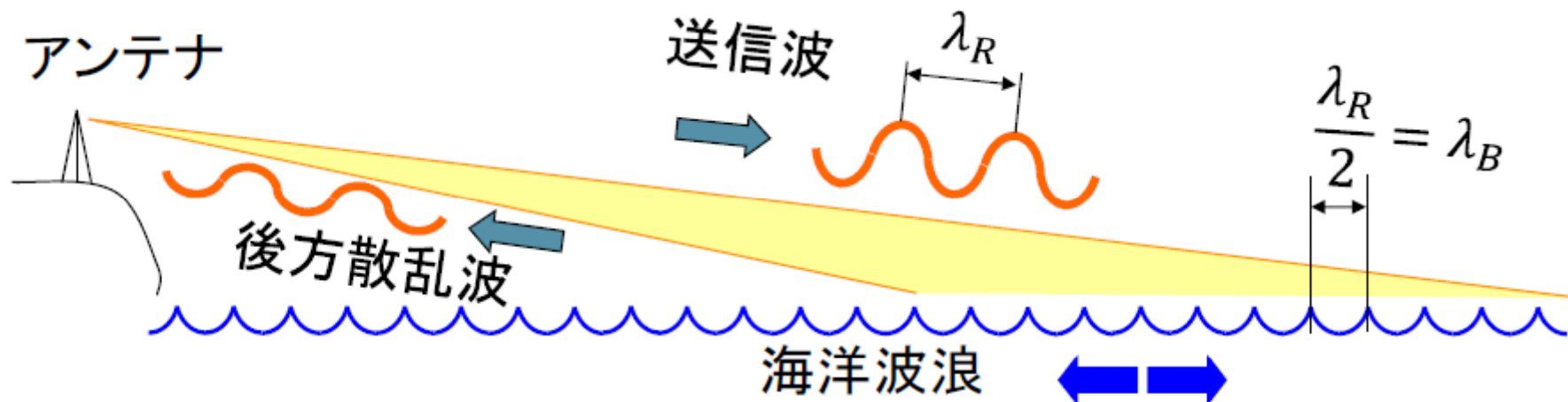
後方散乱も地表波伝播モード



選択的に1/2波長の波浪成分の情報を得ることになる



短波海洋レーダの概念



波長数10m～数10cm程度の波浪 = 重力波領域

HF帯～VHF帯電波の波長
(100m～1m)の1/2の領域
= Bragg共鳴条件に合致

⇒ 位相速度は波浪波長に依存する

$$V_B = \pm \sqrt{\frac{g\lambda_B}{2\pi}}$$

【24.5MHzの電波(λ_R : 12.2m) \Leftrightarrow λ_B : 6.1mの波浪】 $\Rightarrow V_B = \pm 3.09\text{m/s}$

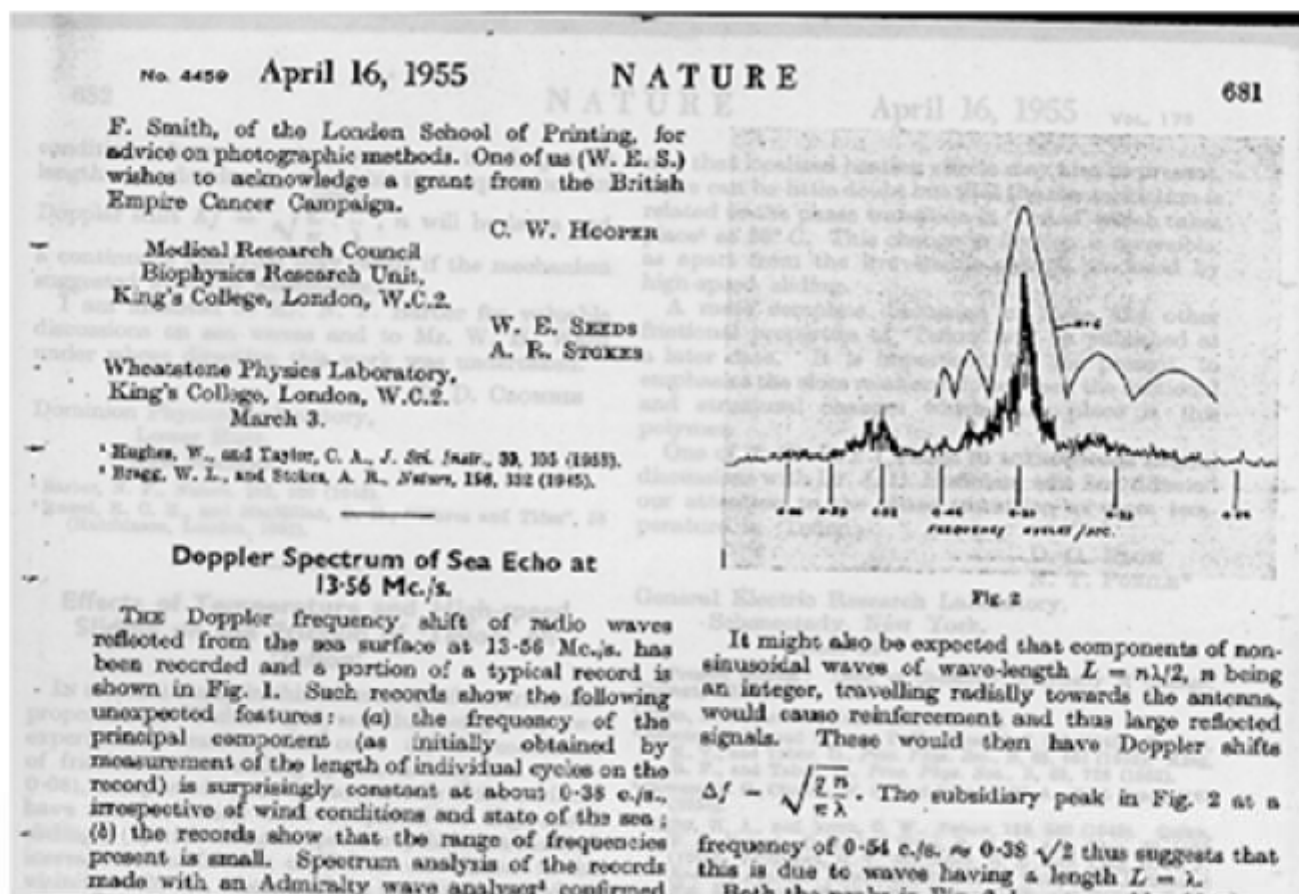
ドップラー周波数 $f_B = 2 \times V_B / \lambda_R = \pm 0.505 \text{ (Hz)}$



最初の海面散乱波の解析

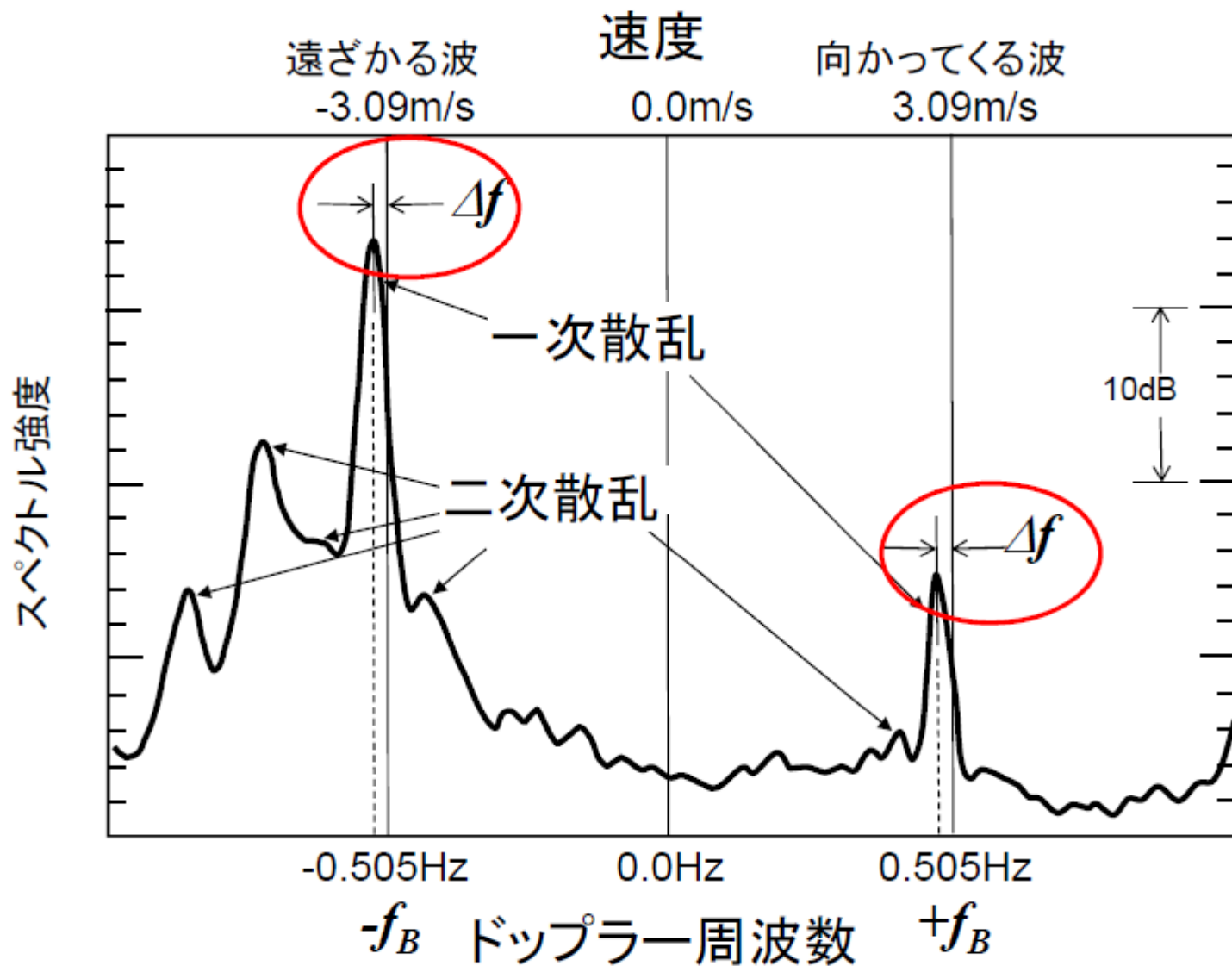
1955 D. Crombie (ニュージーランド)

±1Hz内に特異なピークを発見→海面でのブラッグ散乱



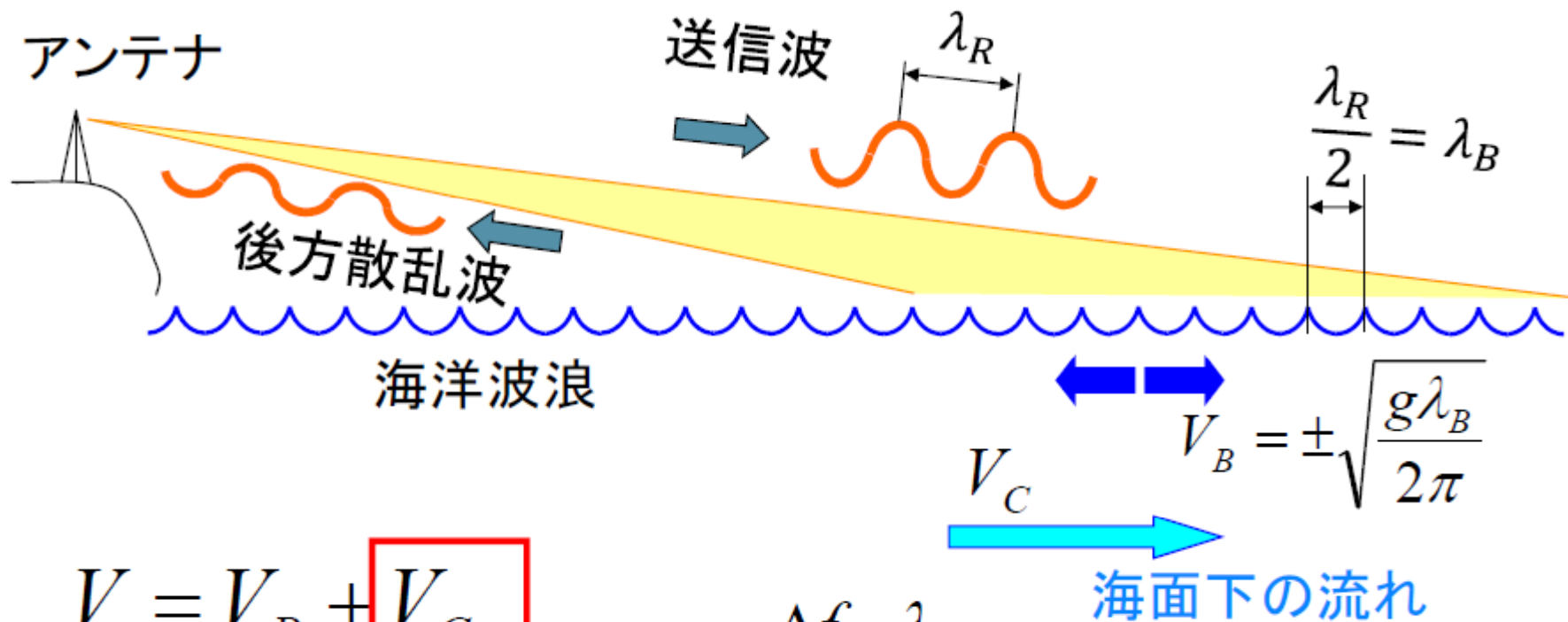


ドップラーズペクトル





短波海洋レーダの概念



$$V = V_B + V_C = V_C = \frac{\Delta f \cdot \lambda_R}{2}$$
$$f_d = f_B + \Delta f$$

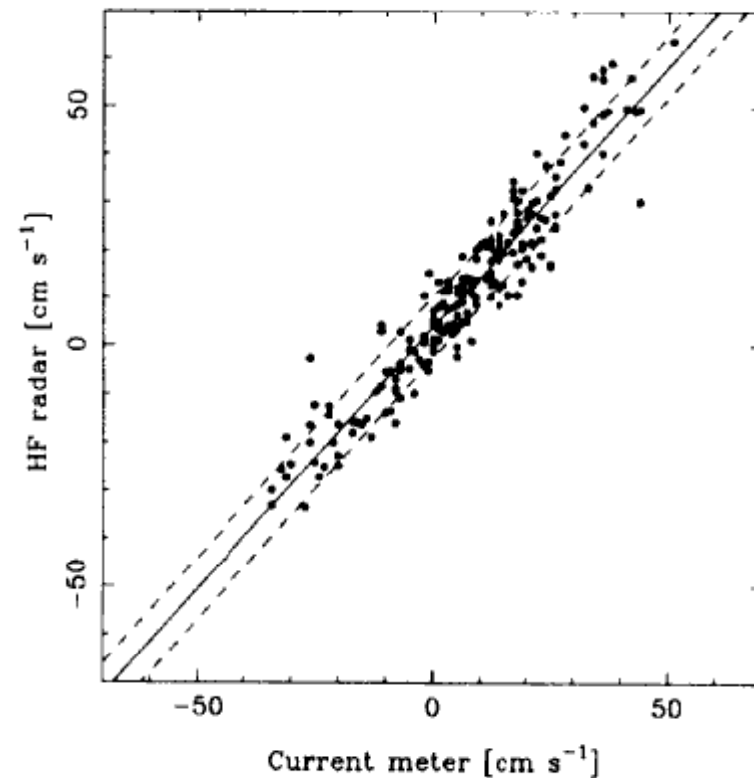
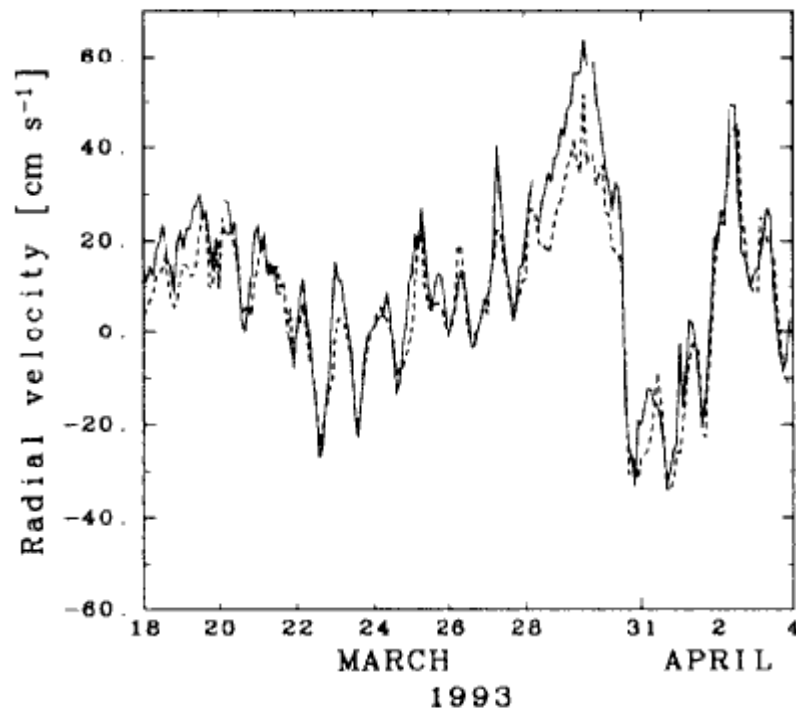
周波数差 Δf から海流速 V_C が測れる
(表層流)



流速測定の精度

福島沖実験(1993) 2m深の流速計との比較

坂井ほか(1994)より



$\lambda_B / 4\pi$ の深さに相関が高い: Stewart and Joy(1974)

24.5MHzで48.5cm深に相当

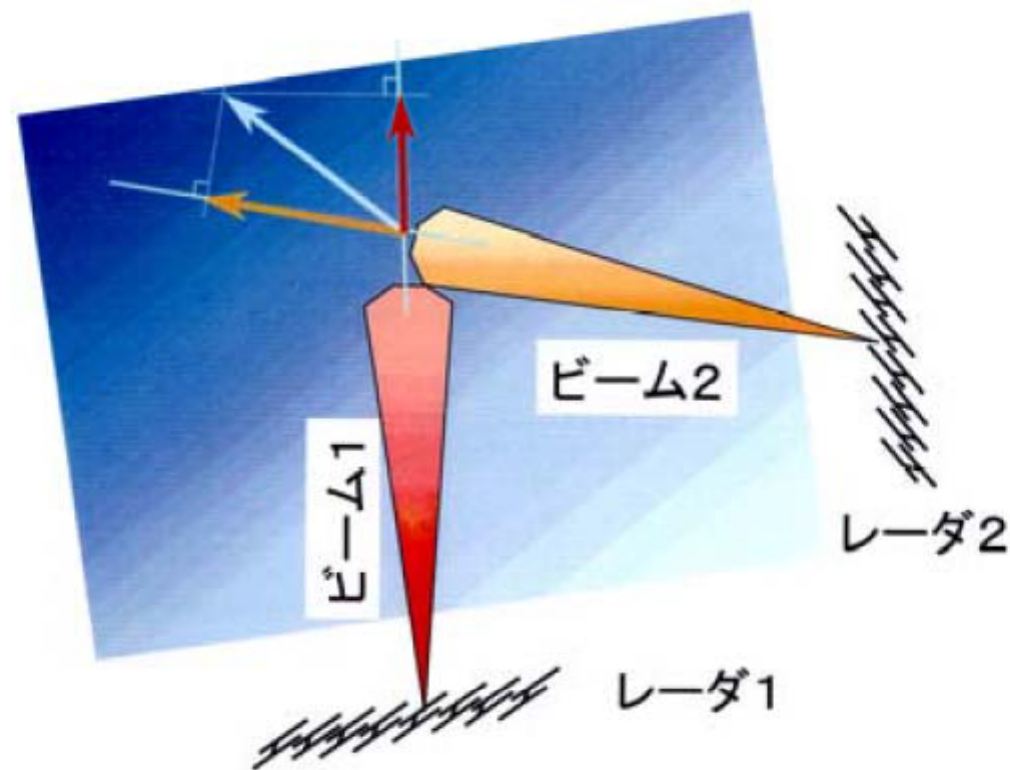
cor. = 0.946

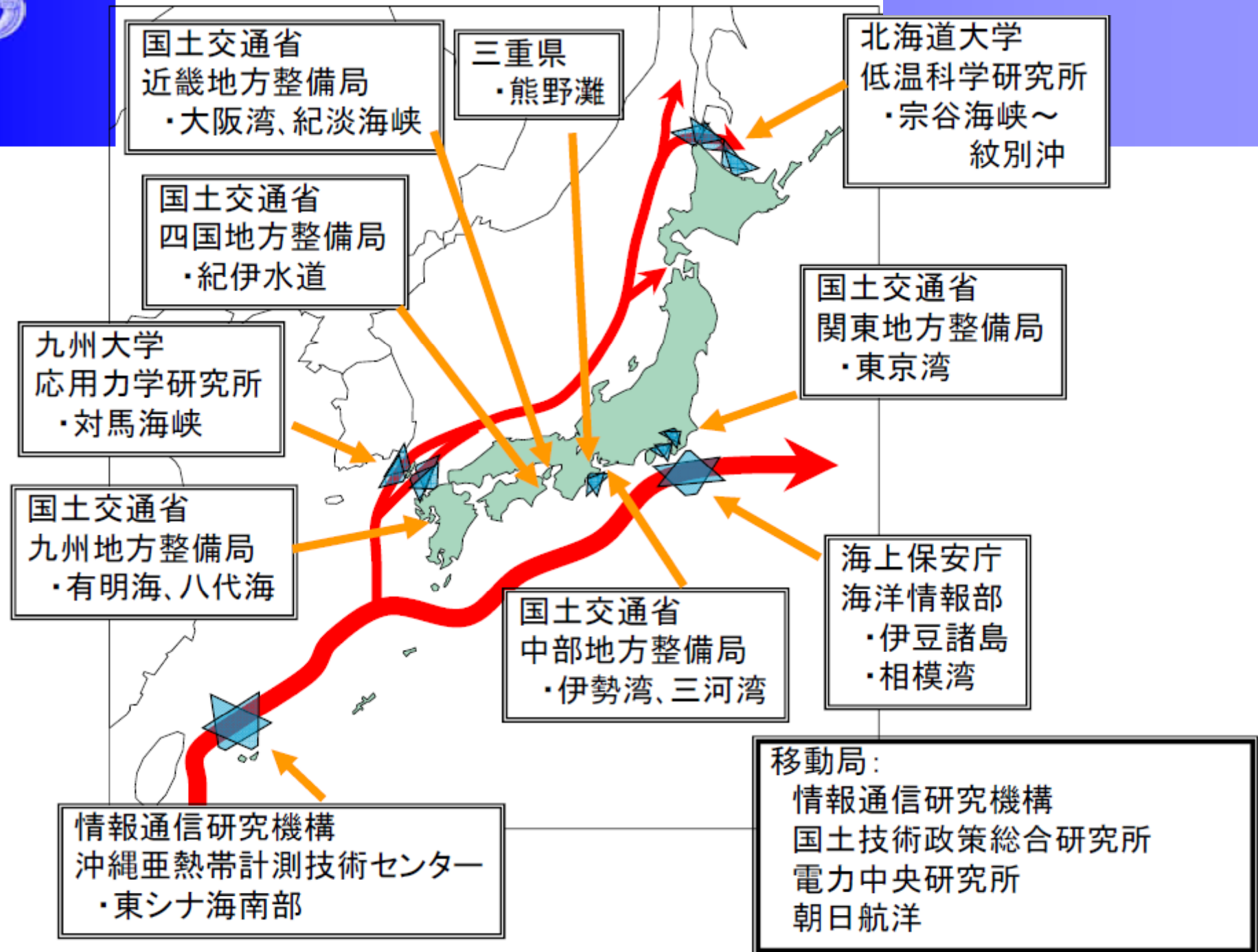


ベクトル量計測(2ビーム合成)

2次元流速場などの2次元ベクトル量を得る

- 2レーダによるベクトル合成
一般的方法







海洋レーダの現状(世界では)

- 全世界で300基以上 → 500基程度
 - US 約200
 - National HFRadar Network (HFRnet)
 - 162 sites, 31 organizations
 - 欧州 約30? 米州(米国以外) ~10
 - 英、独、仏、伊、メキシコ、チリ、カナダ
 - アジア・太平洋
 - 豪 14
 - 中国 15
 - 韓国 25
 - 台湾 15
 - 香港 2
 - インドネシア 2 → さらに導入
 - タイ 6 → 20基以上
 - ベトナム 3 → 10基以上
 - インド 4 → 約10基



米国IOOS <http://cordc.ucsd.edu/projects/mapping>

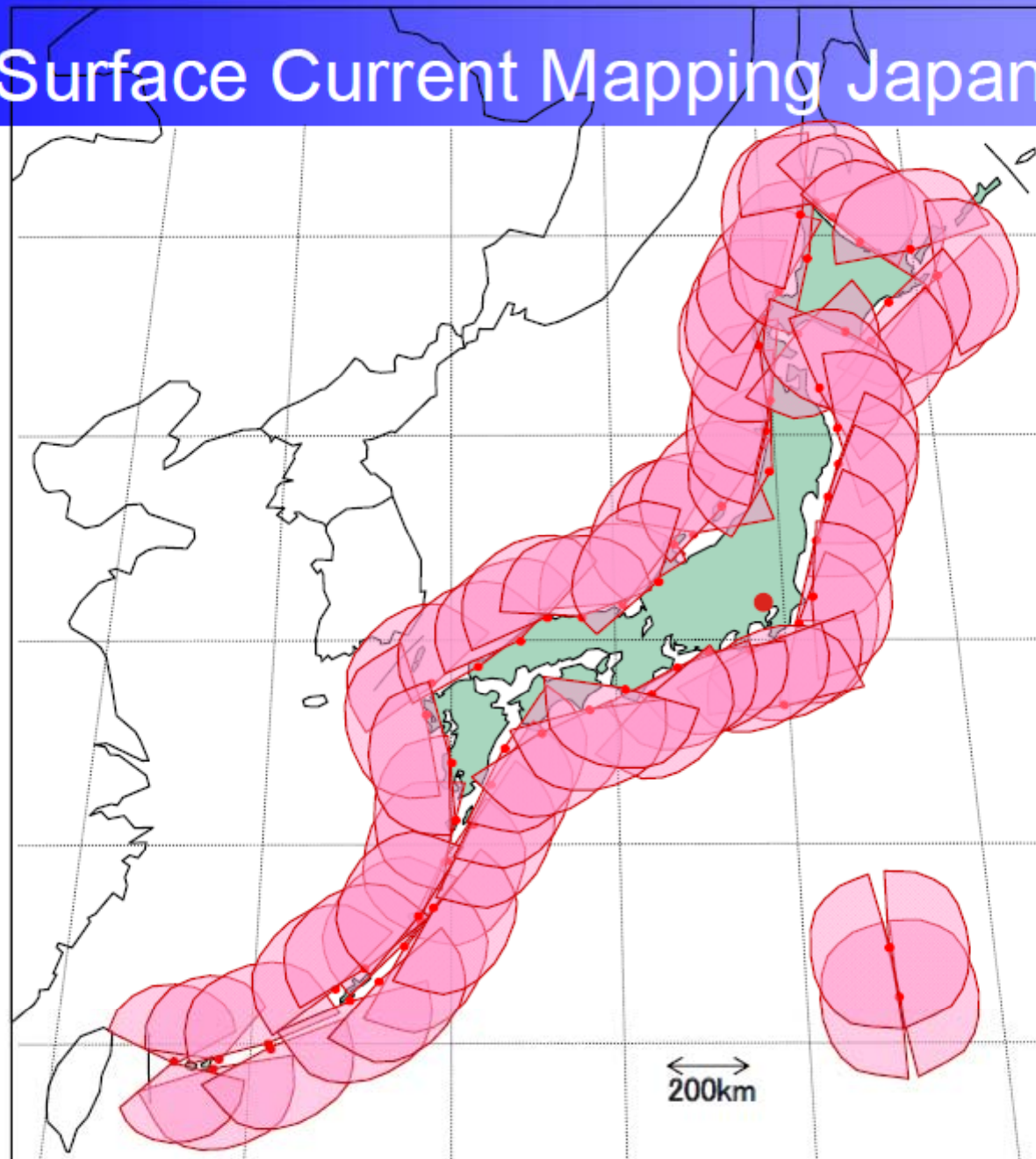


161 sites (2013/3/15)



Surface Current Mapping Japan

(by S.Fujii)



- 遠距離レーダ
- 200km
- 約100km間隔
- ベクトル合成
- 70基配置



沿岸EEZの
ほぼ半分
をカバー



津波防災への応用

- ▶ 洋上での広域な2次元観測
 - より正確な津波の把握
 - ⇒ 警報発出
 - ⇒ 災害予測精度の改善



海洋レーダを用いた津波検知の検討

- ◆ Barrick(1979, Remote Sensing of Environment)
 - 検知可能性の提起 → 早期警報システムに
 - ◆ 藤井・徳田(1997, 特許2721486)
 - シミュレーションによる検知可能性検証
 - 津波観測モードの提唱
- ← スマトラ沖地震津波(2004)
- ◆ 泉宮・今井(2005, 海岸工学論文集)、泉宮・中島(2006, 海岸工学論文集)
 - 流速データからの水位予測
 - ◆ Lipa, Barrick, Bourg, and Nyden(2006, J. Oceanography)
 - 簡単なシミュレーションでの検討
 - ◆ 渡辺・富田(2007, 海岸工学論文集)、渡辺・富田(2009, 港空研資料)
 - 吹送流除去方法の提案
 - ◆ Heron et al.(2008, Int. J. Remote Sensing)
 - 観測条件の検討
 - ◆ Murata, Nagakura, and Kokai(2010, Proc. Conf. Coastal Eng.)
 - STFTを使った速度検出の高速化
 - ◆ Gurgel et al.(2011, Ocean Dynamics)
 - より詳細な津波シミュレーションによる検討



いままで

海洋レーダで津波検知できなかった理由

- そもそも津波の発生頻度が低い
- 海洋レーダの配備が不十分だった

原理的な課題

▲ Bragg散乱を用いたドップラレーダ

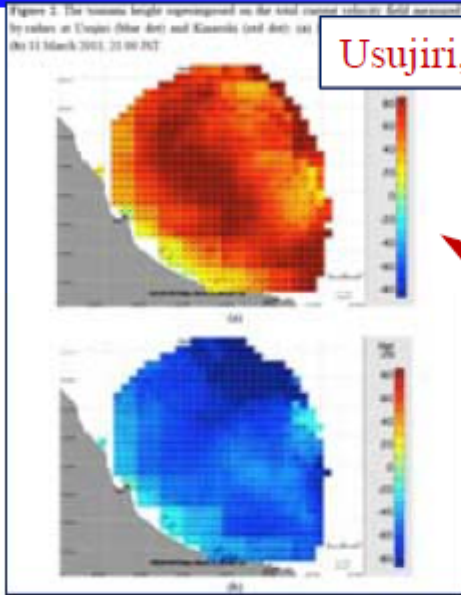
- ✓ Bragg散乱する波が流速変化する程度の津波
- ✓ 流速変化によるドップラ遷移は0.1~0.01Hz程度
= 速度分解能を得るための観測時間が必要

▲ 水平入射する電波の後方散乱波

- ✓ 信号とノイズの分離 ⇒ 積分時間を長くとる
= 通常観測での所要時間は10分から1時間



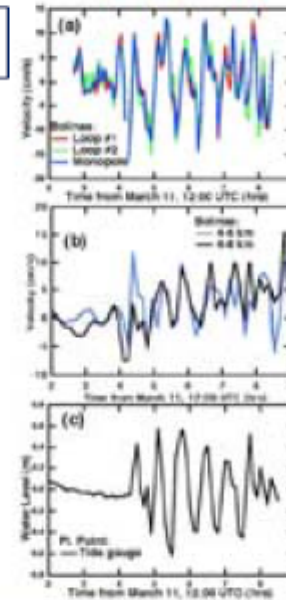
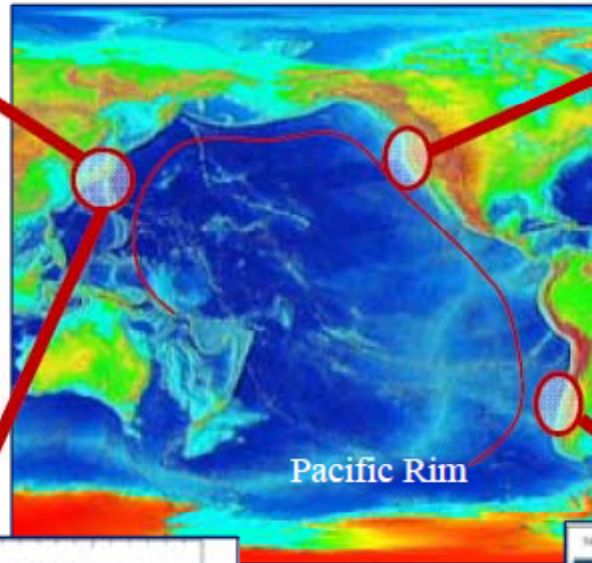
海洋レーダで観測された 東北地方太平洋沖地震津波



Usujiri, Hokkaido, JP

Bodega Bay, Bolinas, US

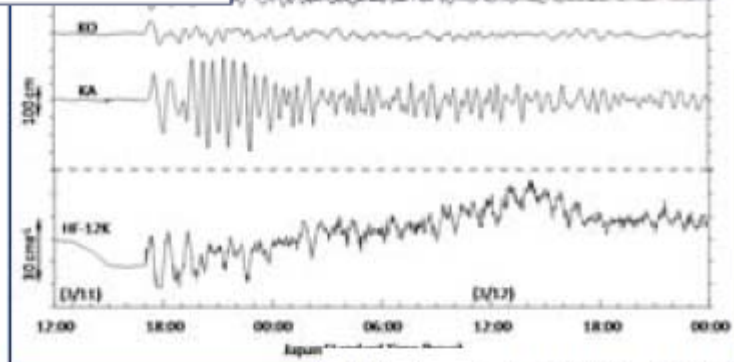
Tohoku-Oki earthquake (M_w : 9.0)
11-March-2011 14:46



Lipa et al., *RS*, 2011

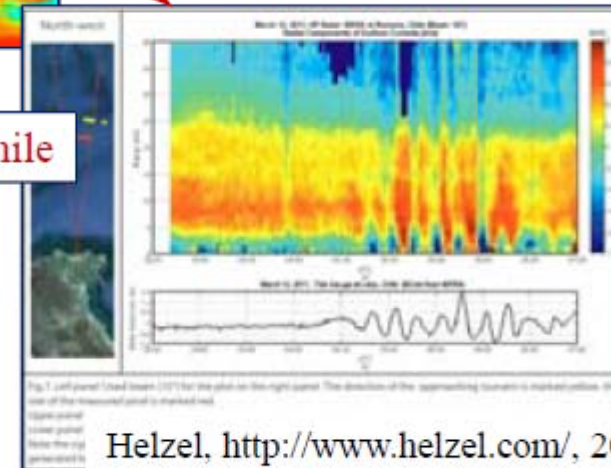
Lipa et al., *RS*, 2011

Kii Channel, JP



Hinata et al., *ECSS*, 2011

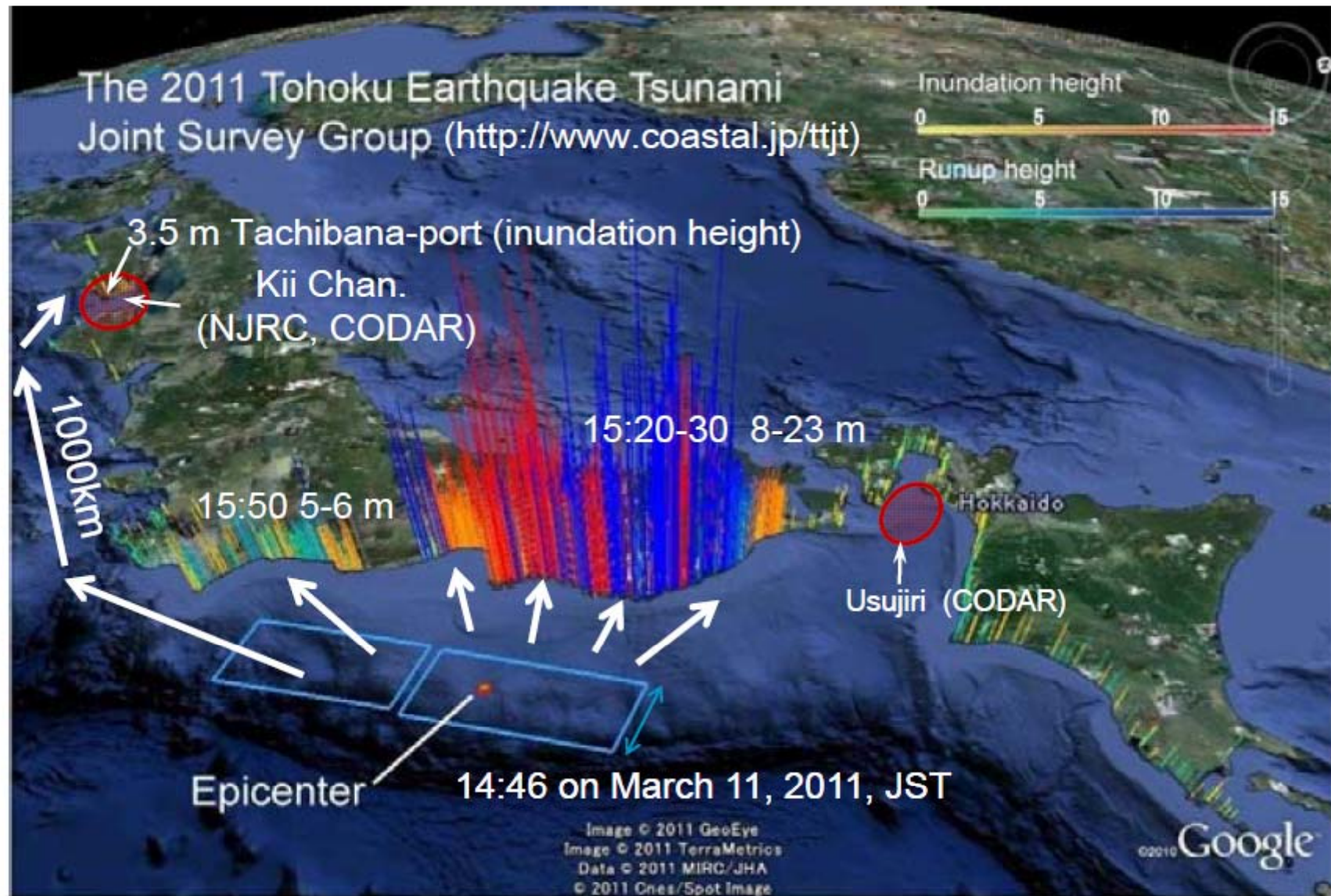
Rumena, Chile

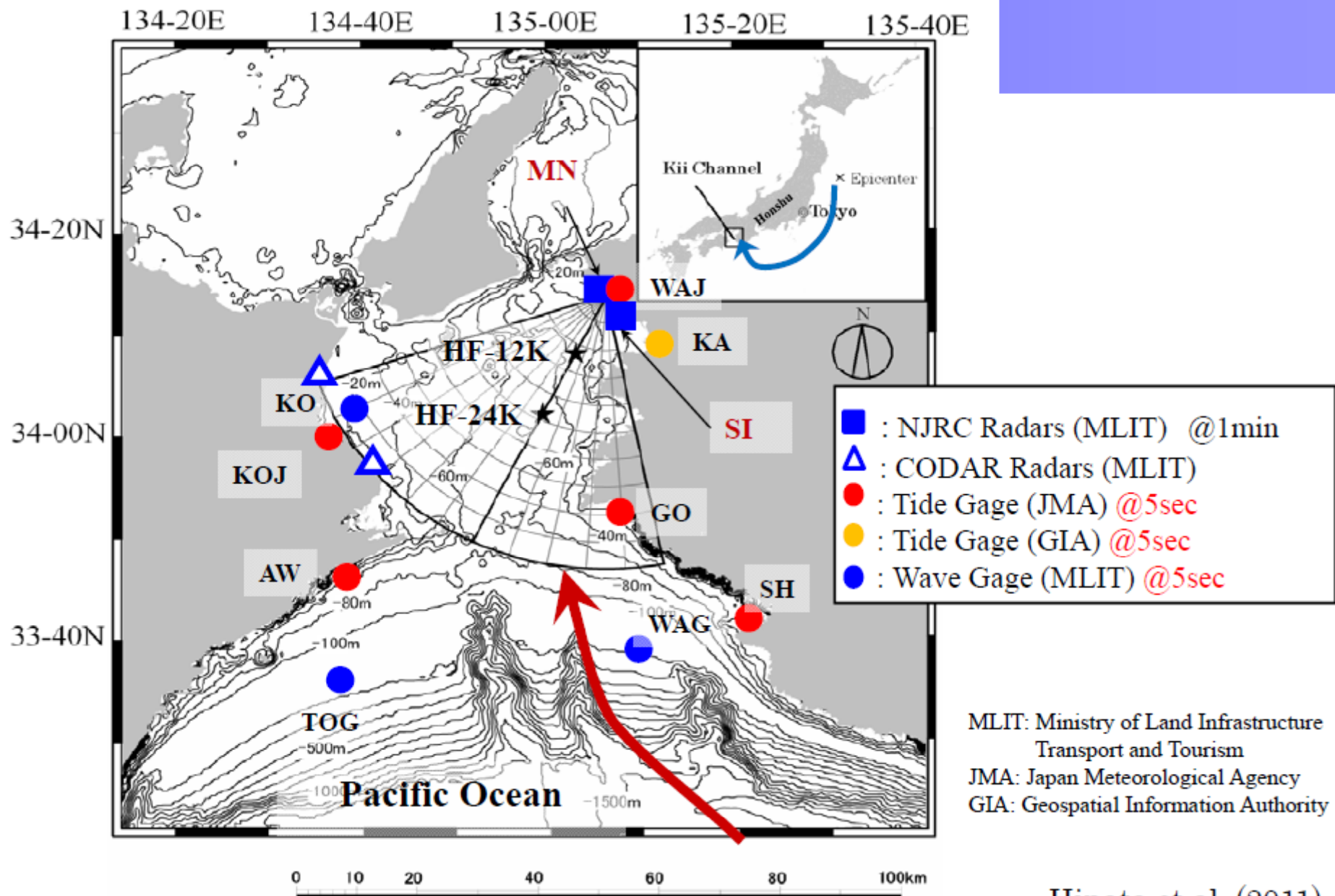


Helzel, <http://www.helzel.com/>, 2011



東北地方太平洋沖地震津波

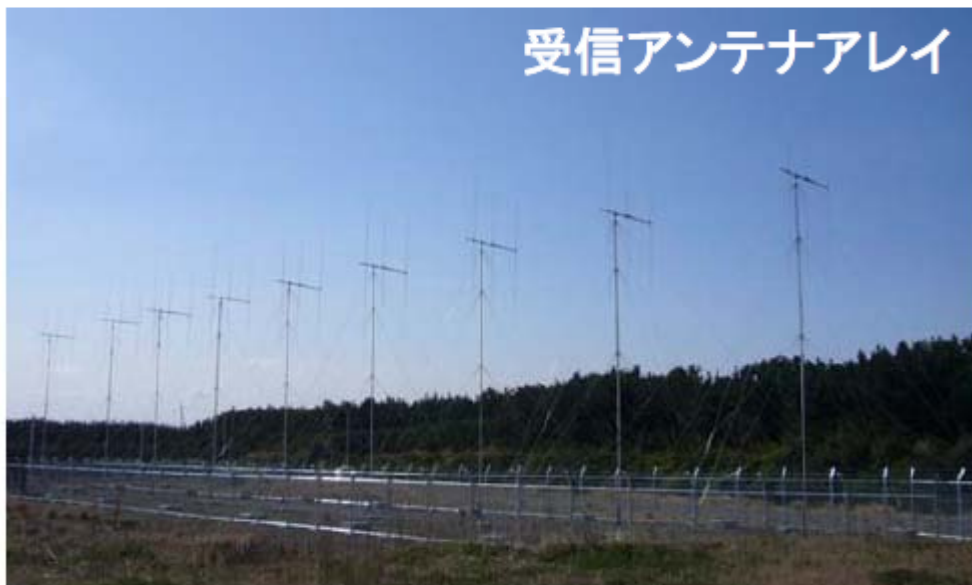




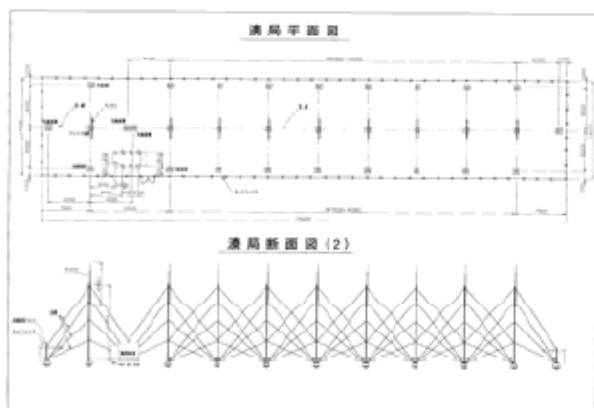


海洋レーダ(湊局)

受信アンテナアレイ



送信アンテナ



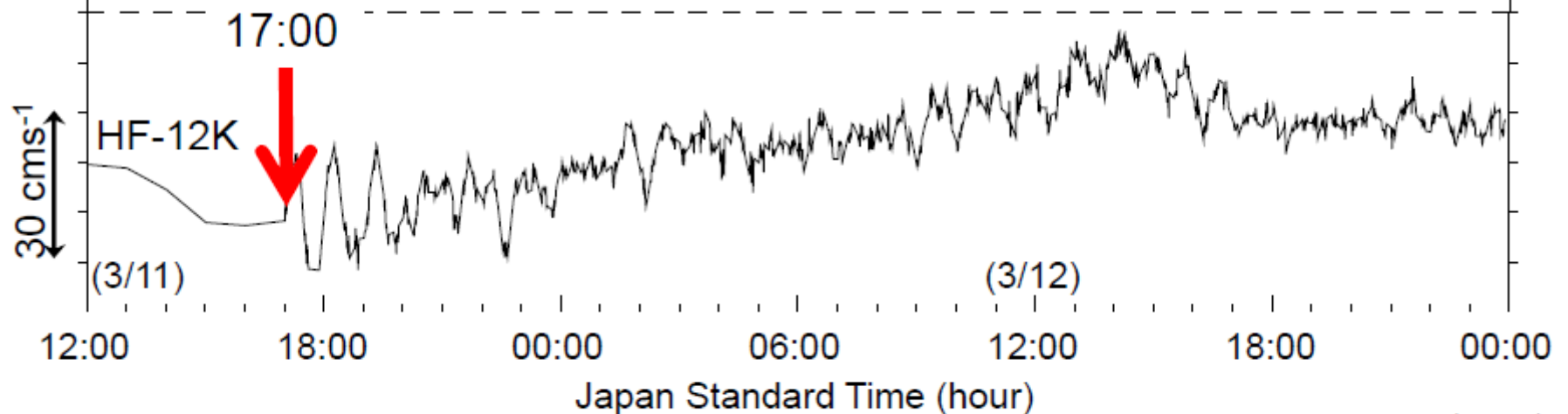
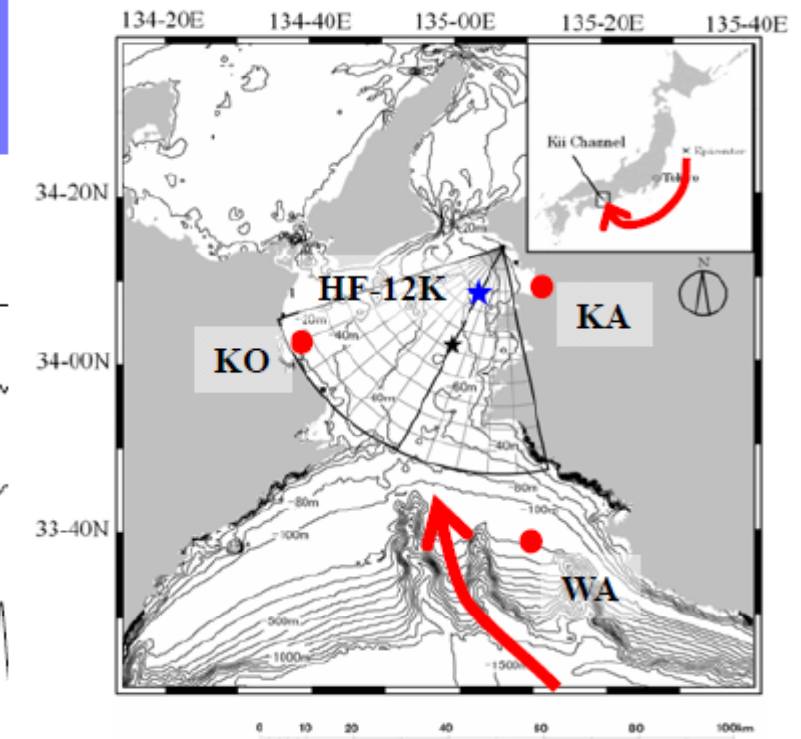
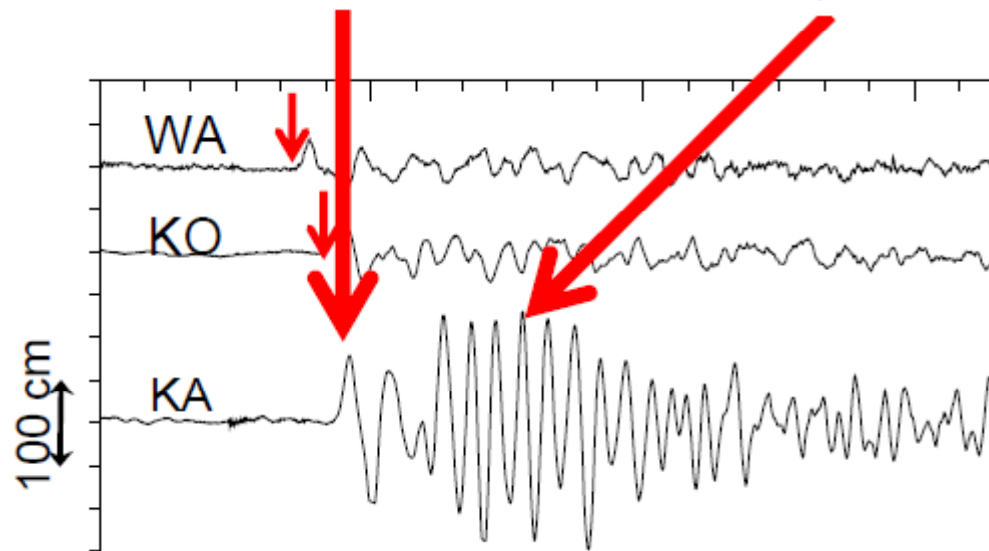
- 受信アレイ: 3エレ八木×8
 - ・ 方位分解能: 7.5 deg.
 - ・ 観測範囲: ±45 deg.
- レーダ方式: FMICW
- 中心周波数: 24.515 MHz
- 掃引周波数幅: 100 kHz
 - ・ 距離分解能: 1.5 km
- 送信電力(ピーク): 200 W
- 観測距離: 50 km



津波の伝搬

17:13, 1.7 m

21:30, 2.6 m



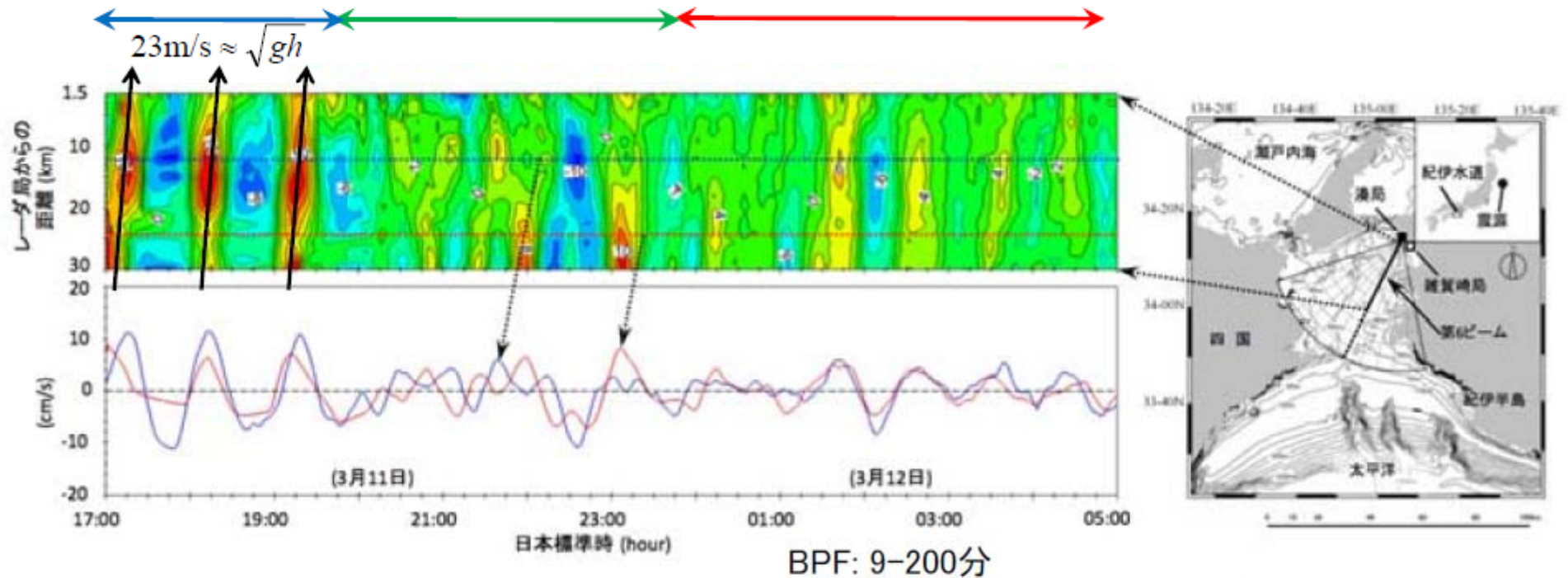


津波の伝搬→副振動の発生

副振動: 高次モード? 周期約30分

進行波: 周期60-70分

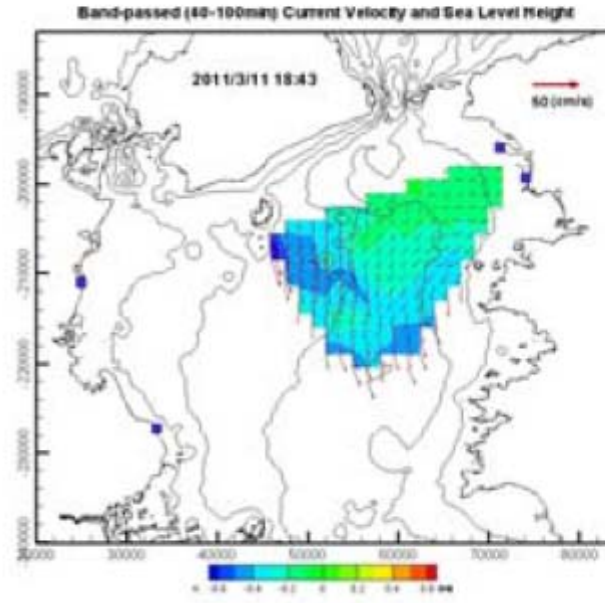
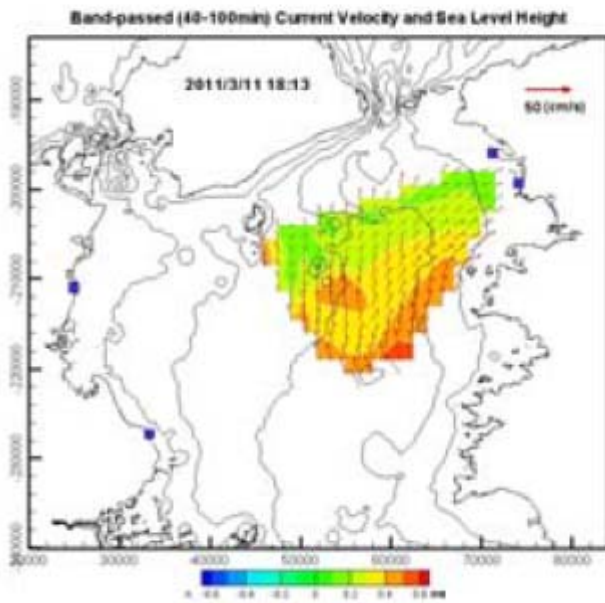
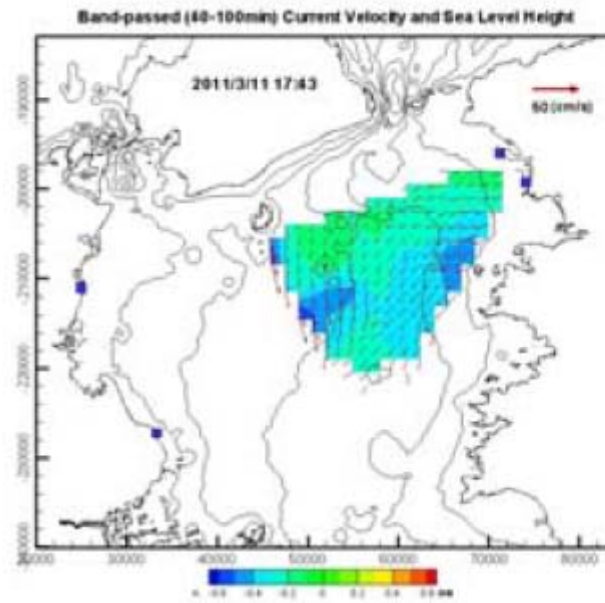
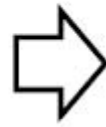
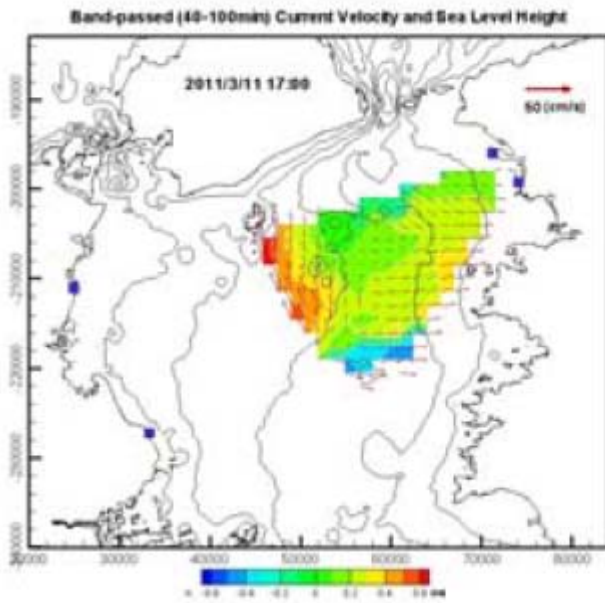
副振動: 高次モード+低次モード? 周期約60分



Hinata et al. (2011)



レーダから推測した水位変動(進行波)



線形長波方程式

$$u = \frac{C}{h} \eta$$
$$= \sqrt{\frac{g}{h}} \eta$$



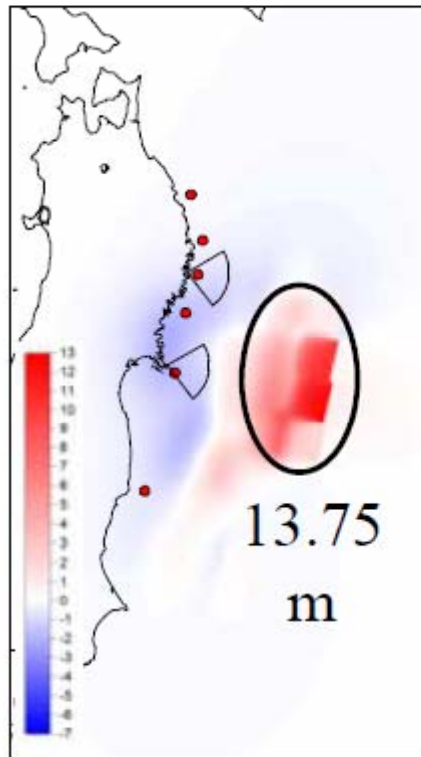
40_100min_vec_hgt.avi

日向ほか (2012)

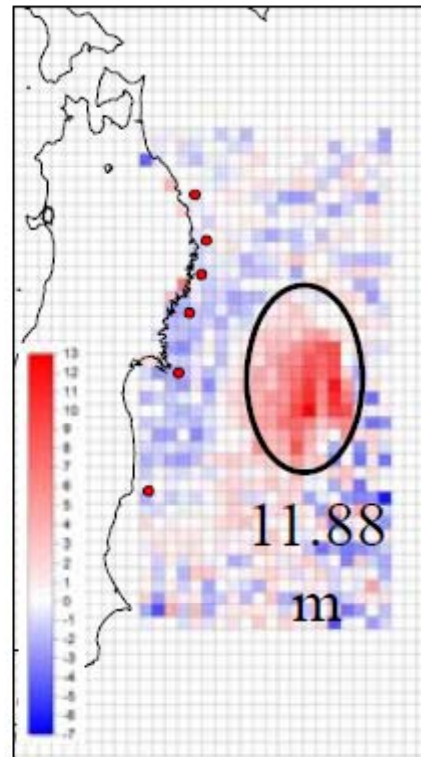


津波初期水位のインバージョン

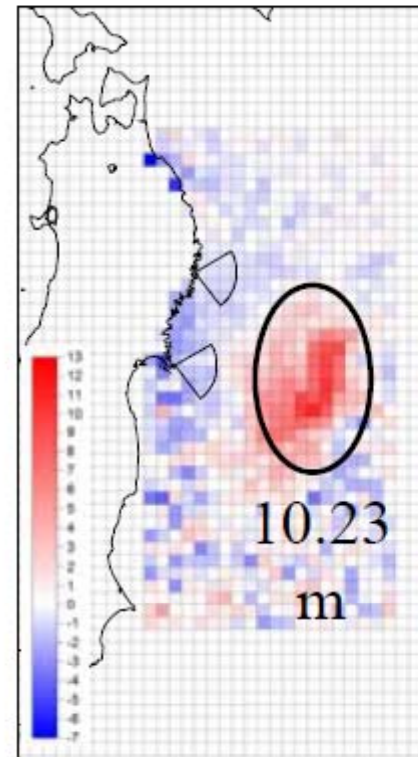
観測値(モデル津波)



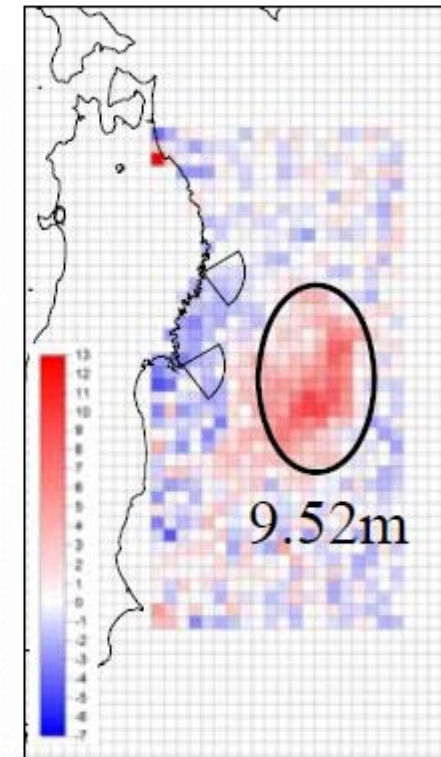
GPS水位
・サンプリング10秒



レーダ流速
・観測時間2分
・サンプリング1分
・流速分解能4.78cm/s



レーダ流速
・観測時間34分
・サンプリング1分
・流速分解能0.30cm/s



RMSE

0.99m

1.07m

0.99m

RMSE比率*

7.2%

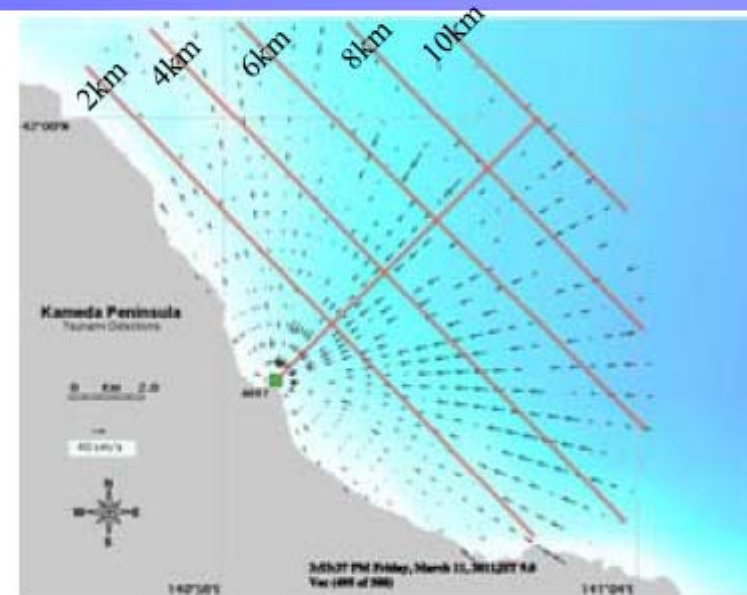
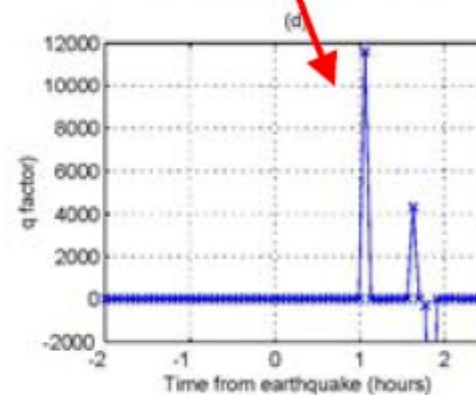
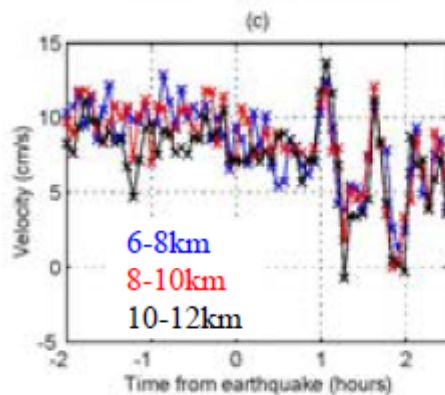
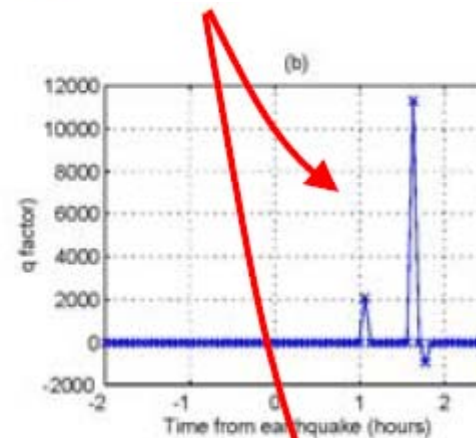
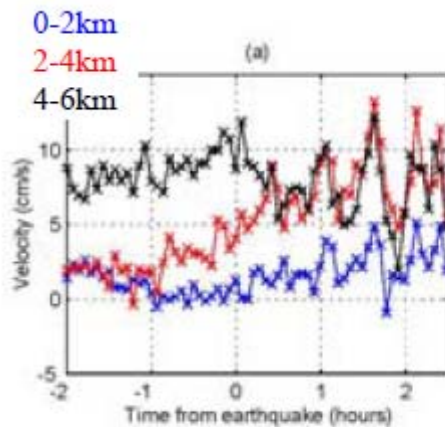
7.8%

7.2%



海洋レーダデータを用いた津波到来検知

q-factorが大きく変化



距離帯内の平均流速(直交方向)

- ① 先行1時間の平均からの偏差 $D(t)$
- ② 2観測間隔前との差分 $\Delta V(t)$
- ③ 隣接2距離帯との相関 $C(t)$

$$q(t) = C(t) \cdot \Delta V(t) \cdot D(t)$$

流速観測: 4.5分間隔
距離帯幅: 2km

Lipa et al. (2011)