

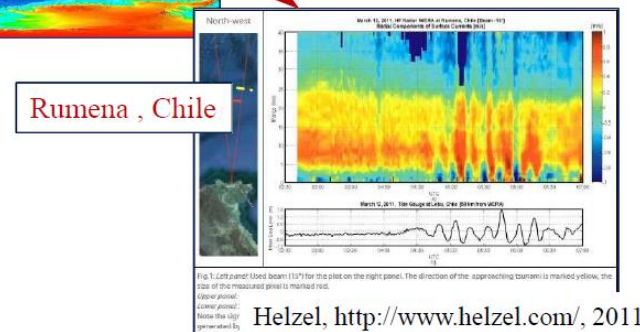
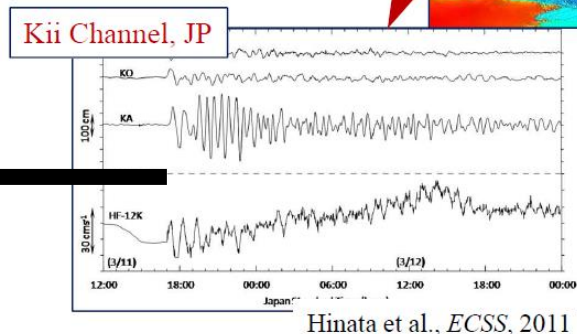
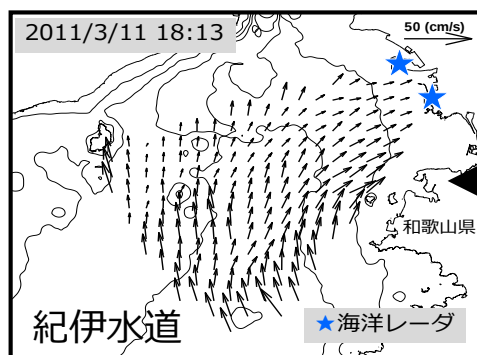
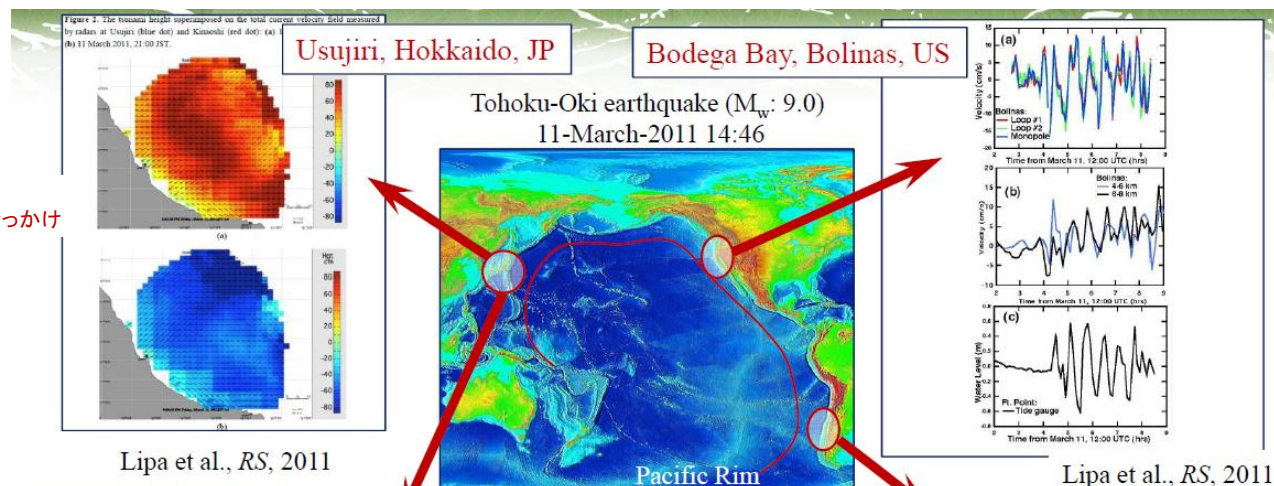
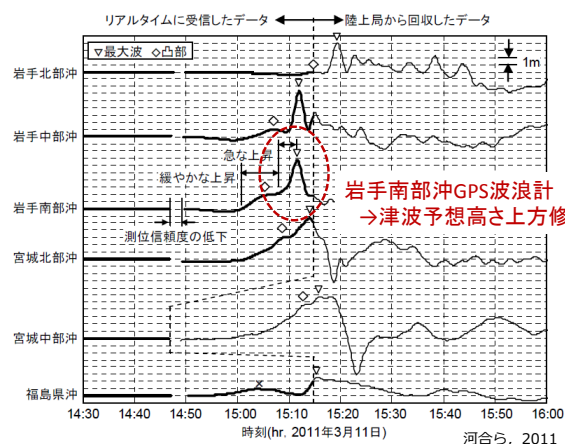
海洋レーダを利用した津波検知距離 の統計解析と測定精度の検証

2016/12/14

○藤 良太郎 (国際航業／愛媛大院理工)
日向 博文 (愛媛大院理工)

海洋レーダによる津波の観測例 (東北地方太平洋沖地震津波)

日本, 米国, ドイツ・チリの研究者が, 津波による流速変動を捉えることに初めて成功



南海トラフ地震津波では？

レーダは南海トラフ地震津波を検知できるか？ → Unknown

- レーダによる津波検知距離は，“SN比”や“津波流速”に依存
→ 統計的な解析による理解が必要
- これまでの観測例は2例のみ（3.11津波，2012インドネシア津波）
→ 解析用の津波データが不足
（地震の発生規模と頻度から，今後新たな観測データの取得は期待できない（グーテンベルク・リヒター則））



仮想津波観測実験を用いた統計解析

- ◎ SN比 → 実際にレーダが観測した受信信号を利用
（様々なSN比での検討を可能にする）
- ◎ 津波流速 → 数値モデルを利用
（あらゆる規模の津波波源を想定可能）

既往の研究

(レーダによる検知可能距離と予測精度は？)

[3.11津波]

- Hinata et al. (2011, 2012)→**紀伊水道**に伝播する津波流速と副振動を計測
- Lipa et al. (2011)→**北海道南東岸**および**アメリカ西海岸沖**で津波の流速変動を計測
- Dzvonkovskaya et al. (2011)→**チリ西岸**へ到達した津波による流速変動を計測

[2012年インドネシア津波]

- Lipa et al. (2012)→Lipa et al. (2011)の方法を応用して津波検知を検証

[モデル津波（数値津波）]

- Grilli et al. (2015)→同一レイ上でのブラッグ共鳴散乱によるHFレーダ受信信号の相関を利用した津波検知
- Gurgel et al. (2011)→**仮想津波**と統計的アルゴリズム（OS-CFAR algorithm）による津波検知
- 藤ら (2015)→ 2014年4月1日に津波が発生したと仮定, **仮想津波観測実験と視線方向流速の相関**による津波検知（和歌山県）

ある条件での検知判断のみ→統計的な議論が必要

目的

本研究 → 後解析により津波検知距離を検証
(地震発生後60分間の津波情報を用いる)

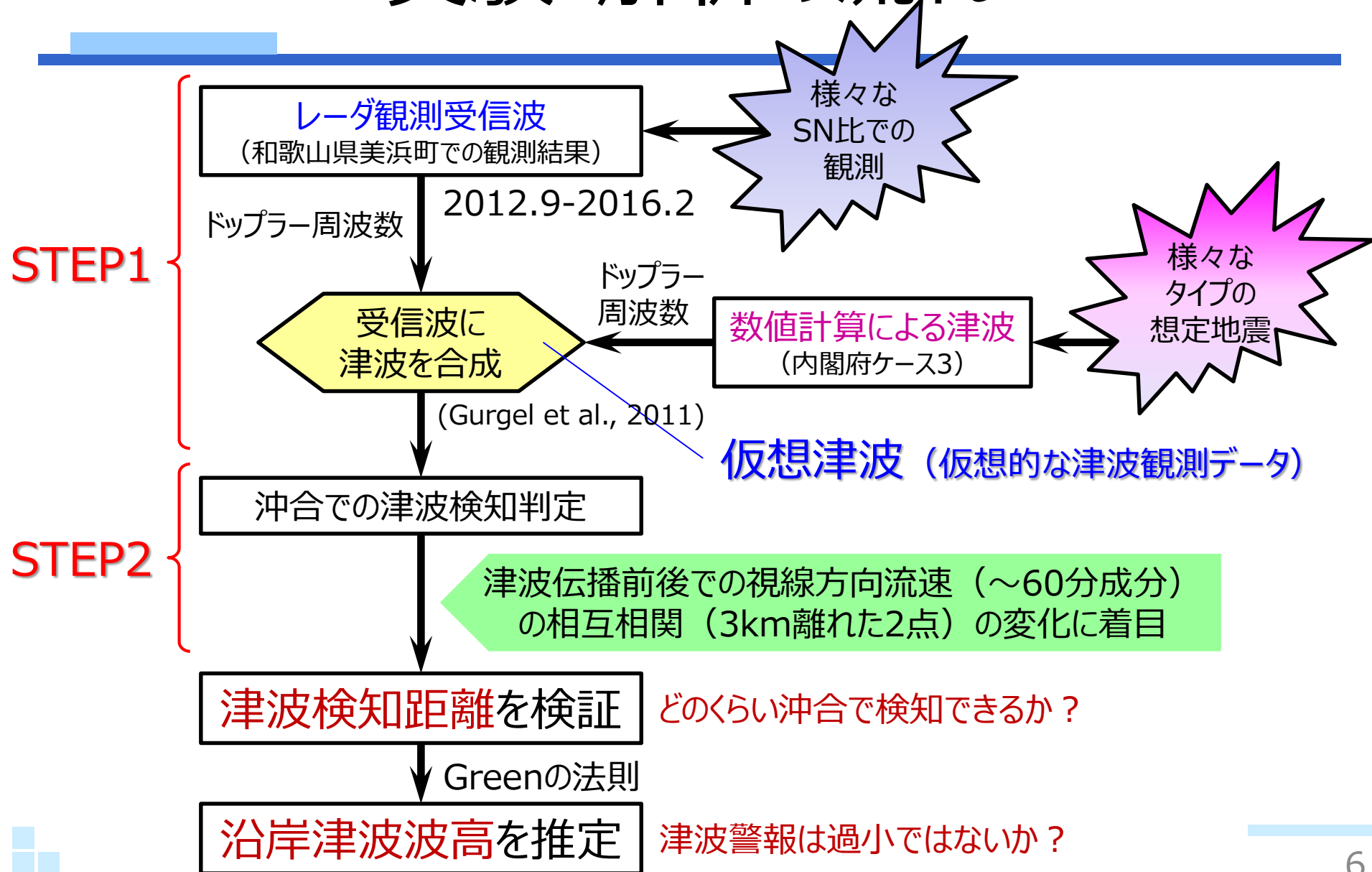


(美浜局レーダと南海トラフ地震の組み合わせによる)
最大の津波検知距離を明らかにする



リアルタイム検知における” 検知距離のターゲット”になる

実験・解析の流れ



STEP1 : 仮想津波作成

- 仮想的な津波受信信号（合成信号）を作成

$$\Theta(r, t) = a_x \exp\left(2\pi j \int_{t_0}^t f_{\text{tsu}}(r, \tau) d\tau\right)$$

アダマール積



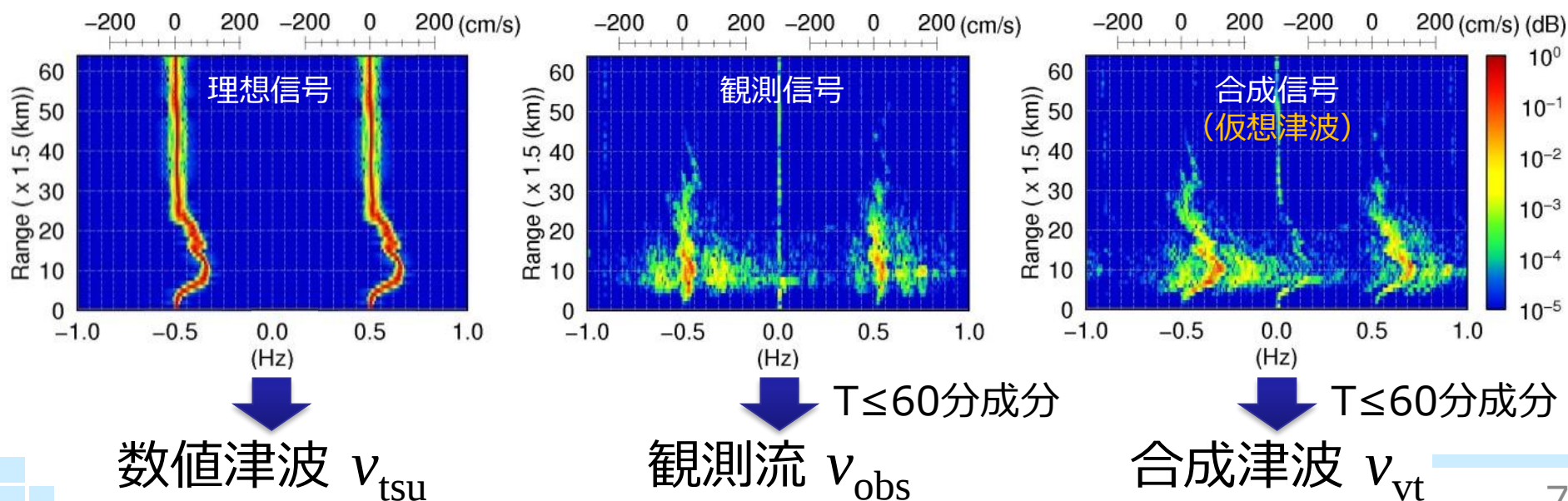
$$X(r, t) = S(r, t) \otimes \Theta(r, t)$$

(Gurgel et al., 2011)

$$f_{\text{tsu}}(r, t) = 2 f_0 v_{\text{tsu}}(r, t) / c$$

X	: 合成信号
S	: 観測信号
Θ	: 理想信号
f_{cal}	: v_{cal} によるドップラシフト
f_0	: 送信波周波数
c	: 電波の伝播速度
a_x	: 任意の振幅 (=1)
r	: レンジ
t	: 時間
t_0	: 津波到達時刻

- ドップラスペクトルを計算
- 津波，観測流を抽出（60分ハイパスフィルタで背景流を分離）



レーダ観測受信波

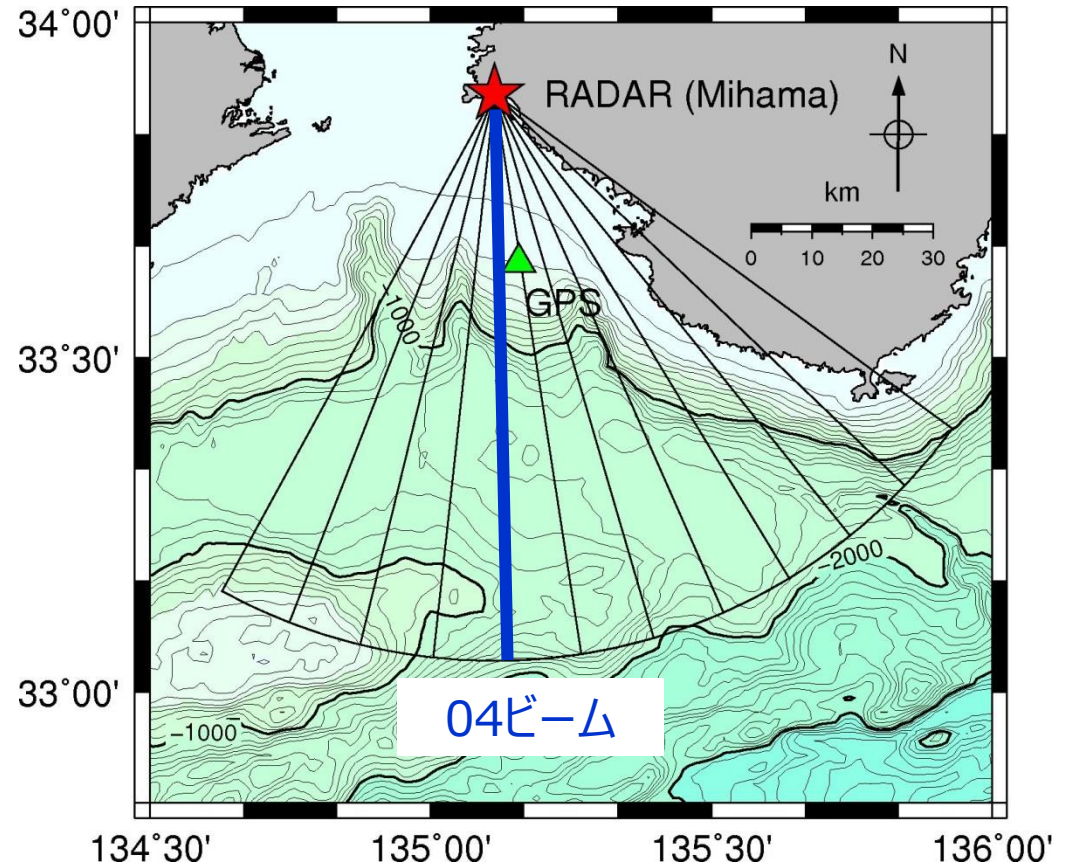
(和歌山県美浜町での観測：2012.9～2016.2)

解析期間：2014年2月の一ヶ月間



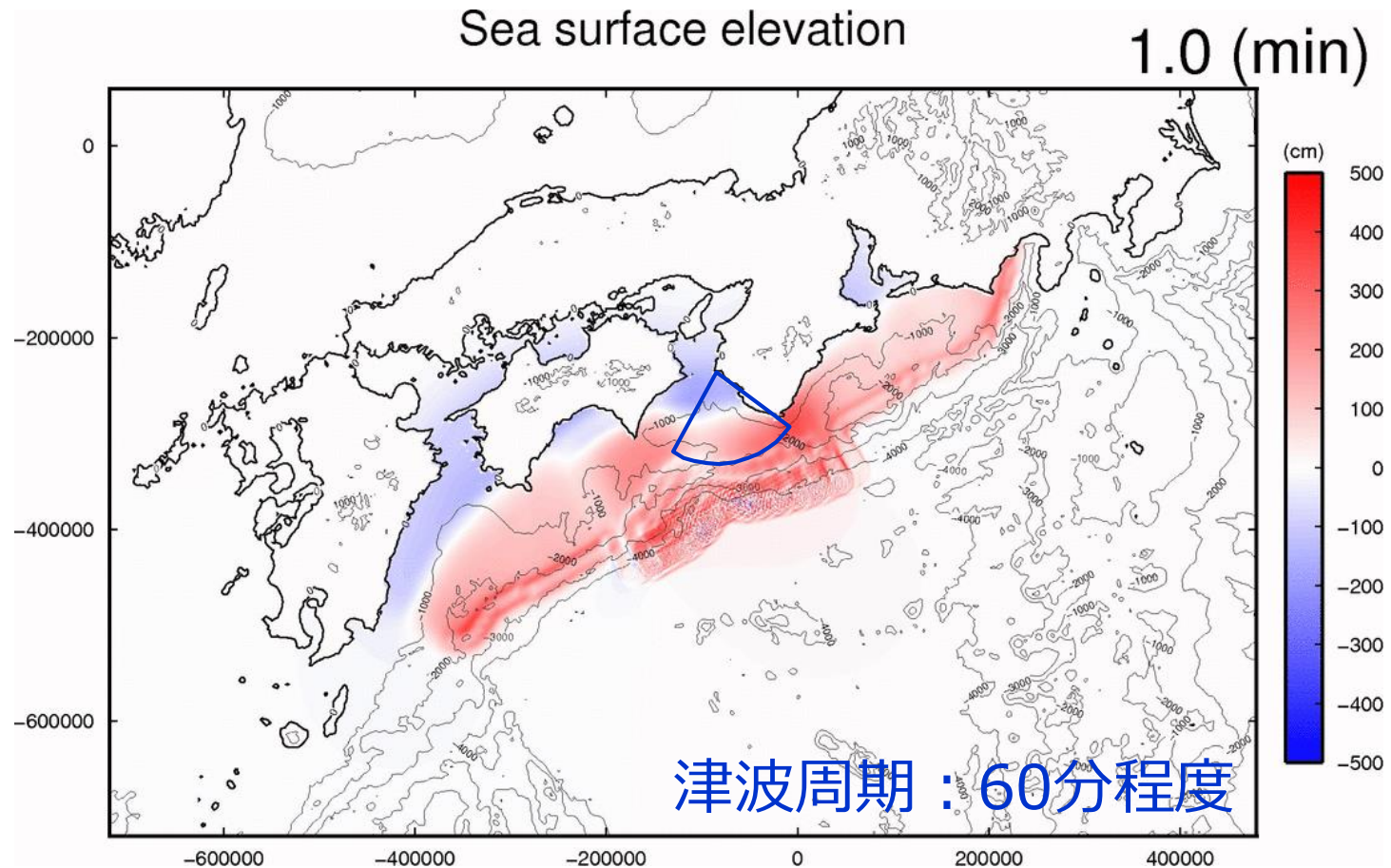
Radar (Mihama)

レーダタイプ	: FMICW
送信波中心周波数	: 24.515 MHz
周波数掃引幅	: 100 kHz
周波数掃引時間間隔	: 0.5 s
レンジ分解能	: 1.5 km
方位方向分解法	: 7.5°



数値計算による津波

(内閣府断層パラメータケース3：和歌山沿岸で最も水位が高い)

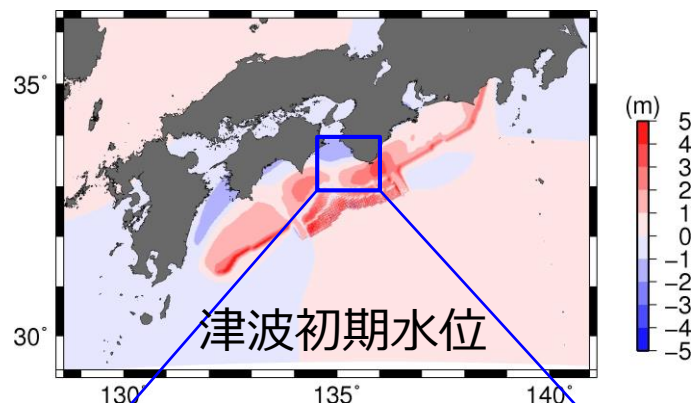


支配方程式 : 線形長波方程式
空間格子間隔 : 1 km × 1km
計算時間間隔 : 0.5 s

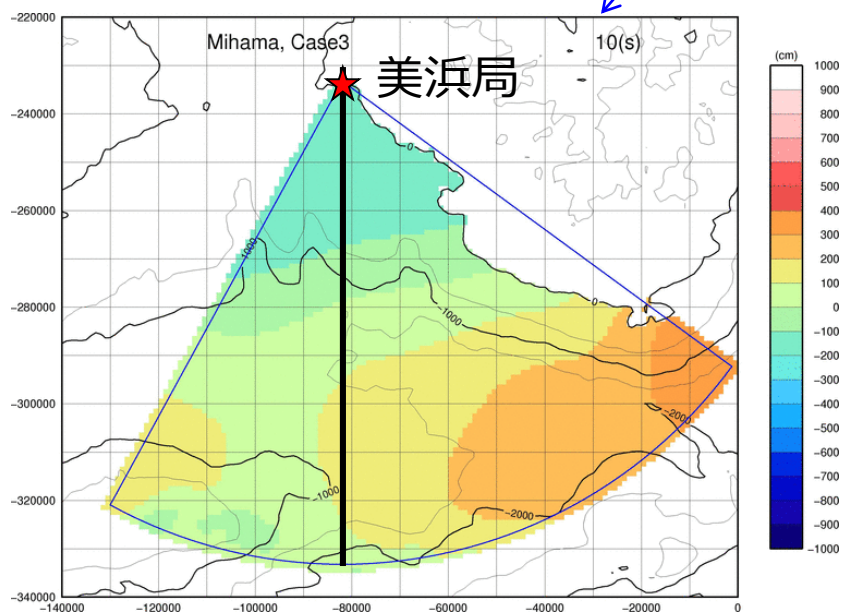
初期水位 : Okada(1992)の方法
破壊伝播 : 非考慮

数値計算による津波

(レーダ観測範囲内の水位と流速)

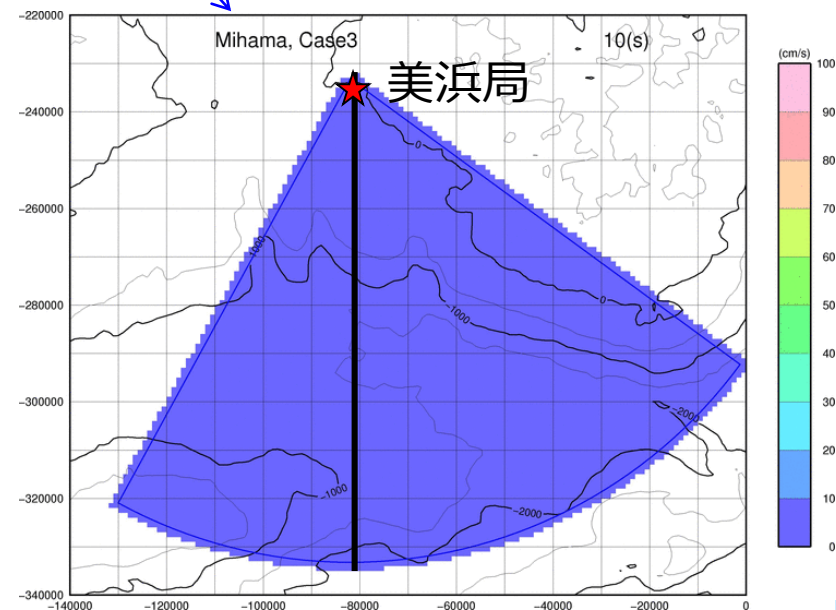


津波水位



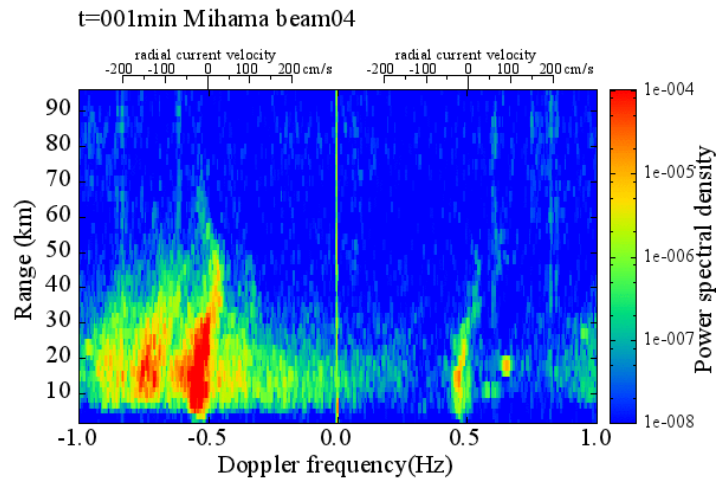
04ビーム

津波流速



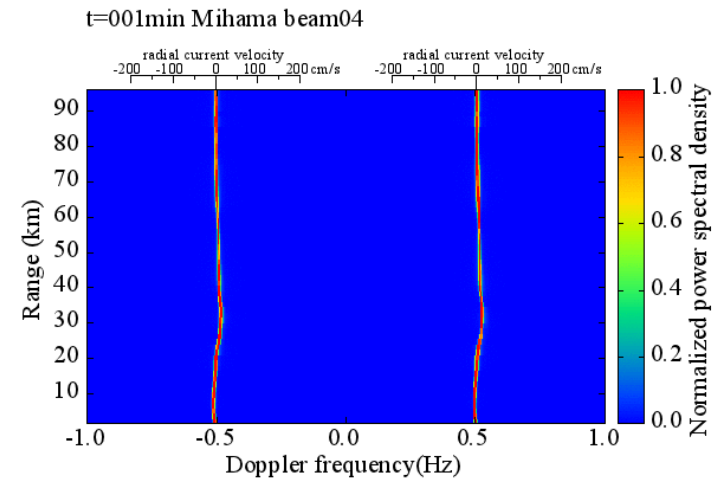
04ビーム

合成受信波の計算



×

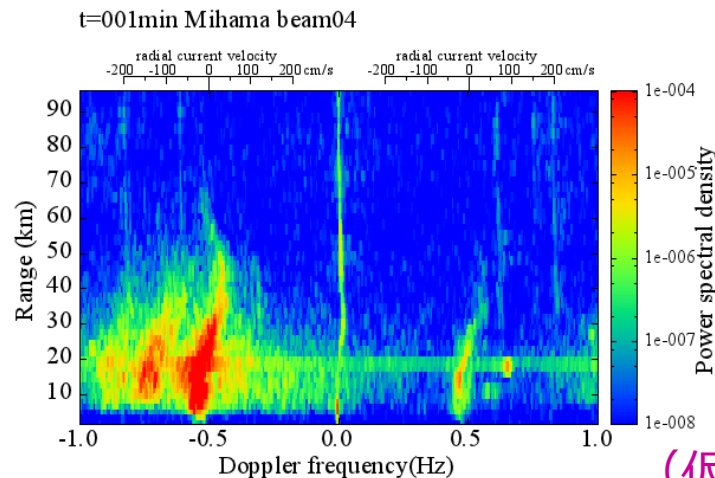
(Gurgel et al., 2011)



観測受信波 (背景流 + ノイズ)

理想受信波 (南海トラフ津波)

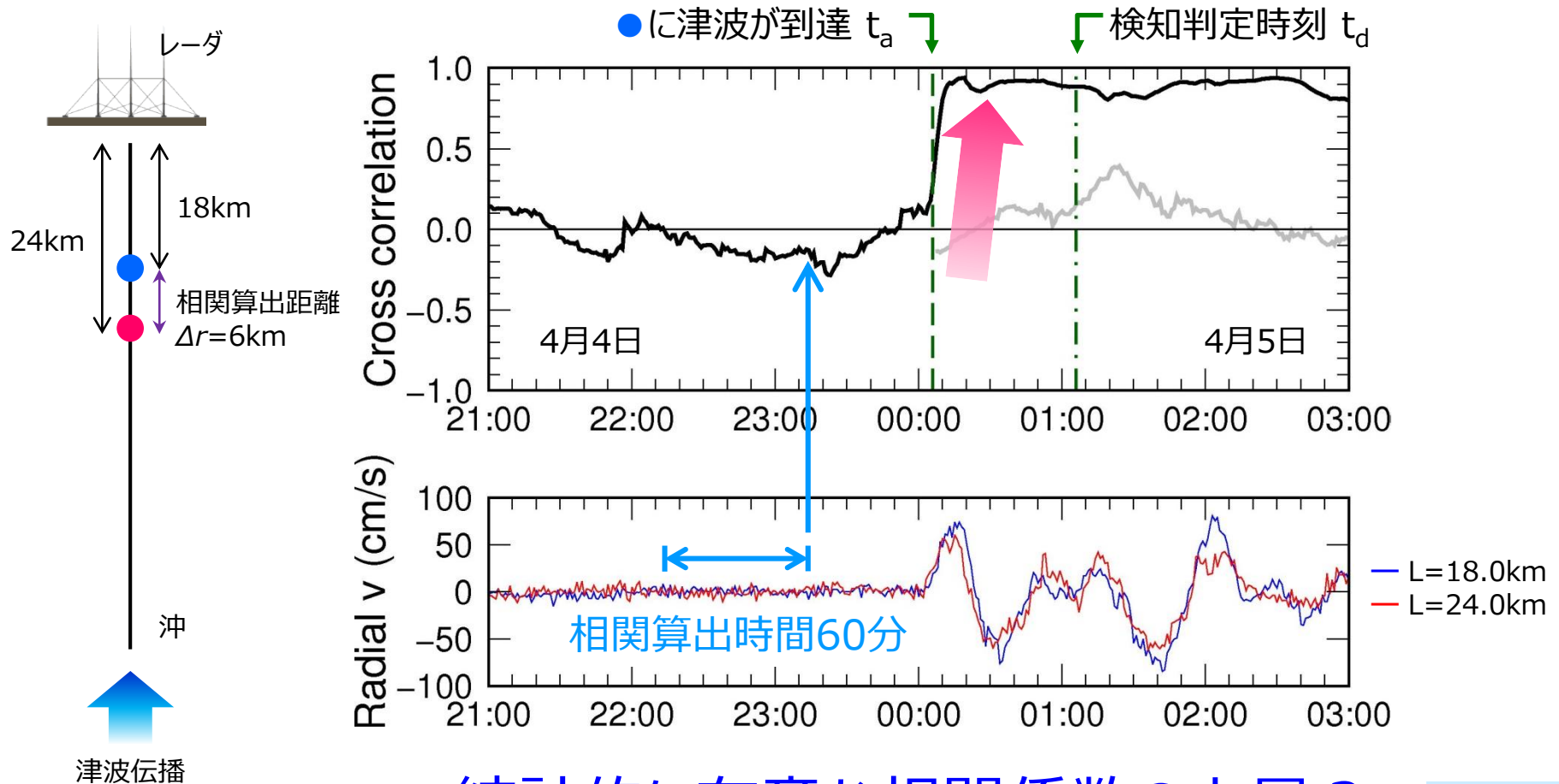
=



合成受信波
(仮想津波観測流)

STEP2：検知判定

- 津波通過前後のビーム上2点（●●）の流速の相関係数の変化

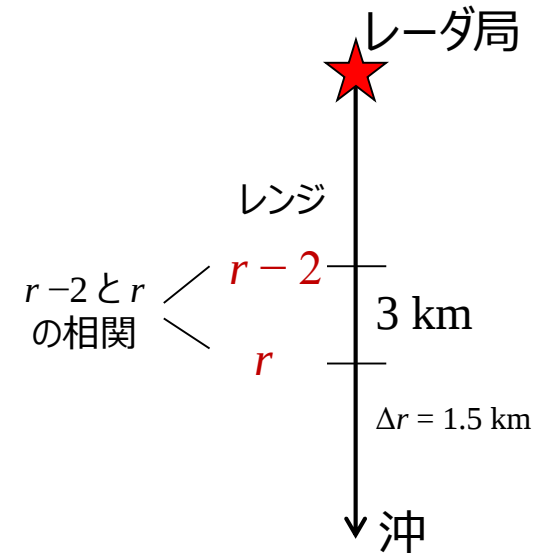
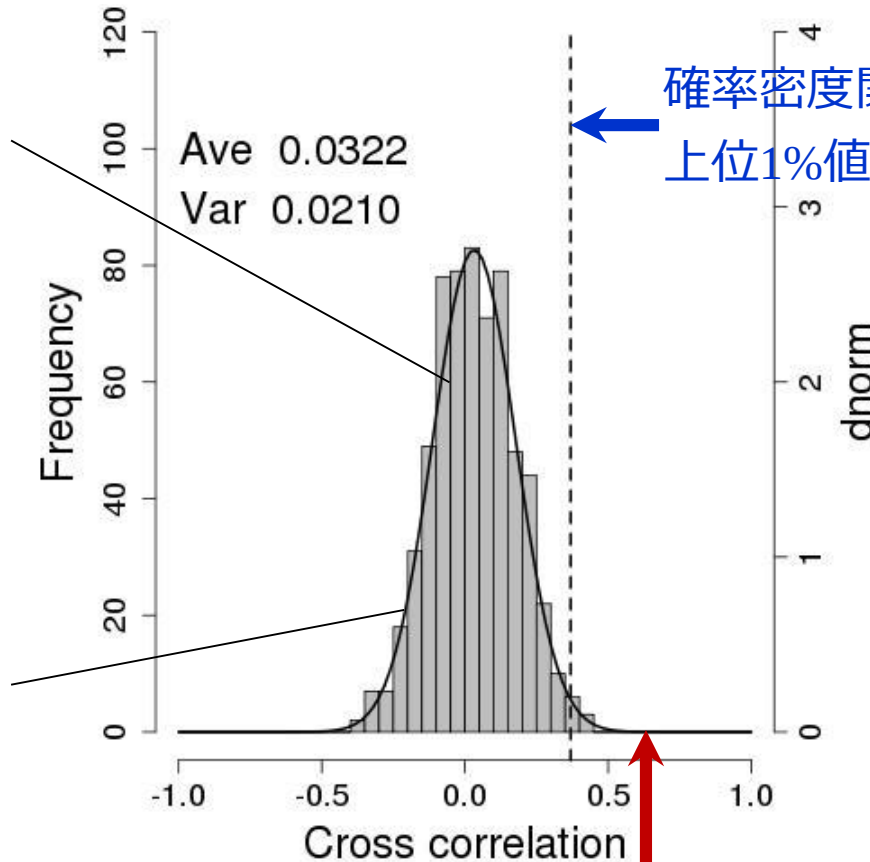


統計的に有意な相関係数の上昇？

相関係数の有意な上昇？

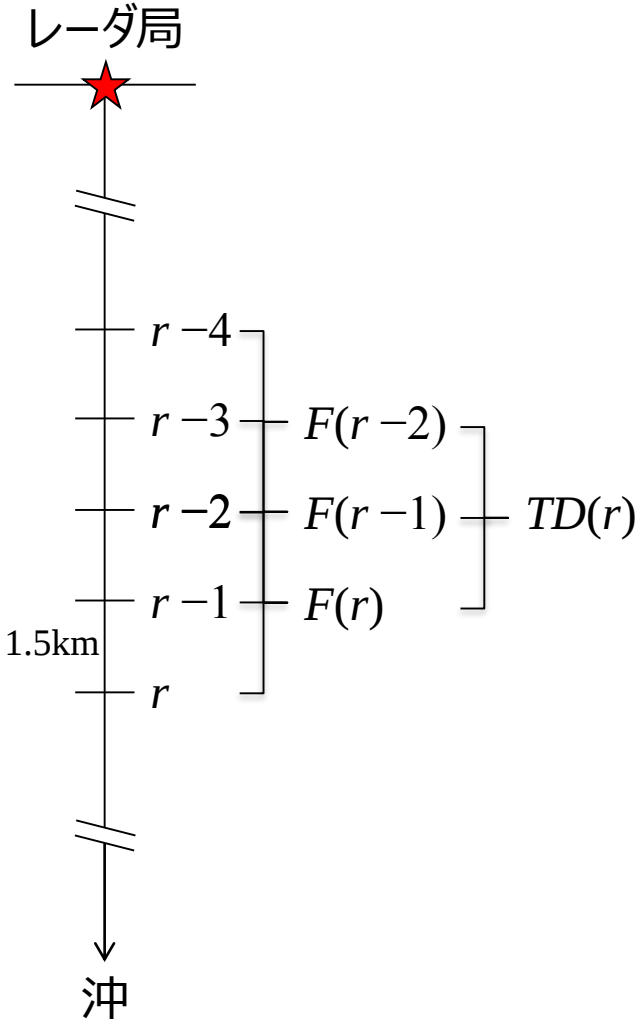
津波がない場合
(観測流 v_{obs})の
相関の頻度分布

正規分布で近似し
た確率密度関数



検知判定時刻の
相関係数値: $cor_{\text{vt}}(r)$

津波検知の判定



相関の有意差 $F(r)$

$$F(r) \begin{cases} = 1 & \text{for } \textcolor{red}{cor}_{vt}(r) \geq \textcolor{blue}{cor}_{obs1\%}(r) \\ = 0 & \text{for } \textcolor{red}{cor}_{vt}(r) \leq \textcolor{blue}{cor}_{obs1\%}(r) \end{cases}$$

検知判定指標 $TD(r)$

$$TD(r) = F(r) \cdot F(r-1) \cdot F(r-2)$$

隣接3レンジの結果を使って判定

[検知判定]

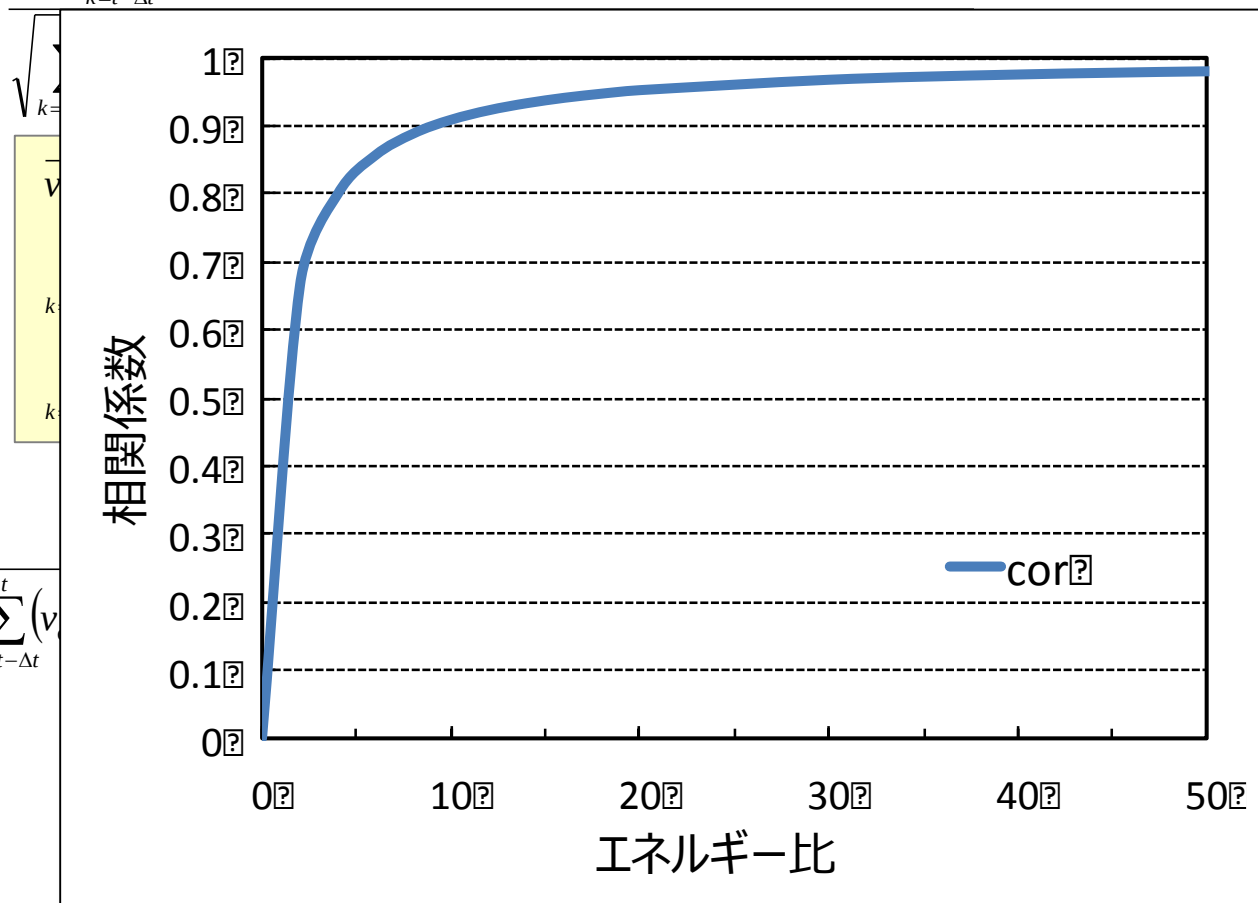
$$TD(r) \begin{cases} = 1 \Rightarrow \text{レンジ } r \text{ で検知} \\ = 0 \Rightarrow \text{非検知} \end{cases}$$

相関係数への影響要因

相関係数

$$cor_{obs,vt}(r,t) = \frac{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{obs,vt}(r-2,k) - \overline{v_{obs,vt}}(r-2)) (v_{obs,vt}(r,k) - \overline{v_{obs,vt}}(r))}{\sqrt{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{obs,vt}(r-2,k) - \overline{v_{obs,vt}}(r-2))^2} \sqrt{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{obs,vt}(r,k) - \overline{v_{obs,vt}}(r))^2}}$$

$$cor_{vt}(r,t) \approx \frac{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{obs,vt}(r-2,k) - \overline{v_{obs,vt}}(r-2)) (v_{obs,vt}(r,k) - \overline{v_{obs,vt}}(r))}{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{obs,vt}(r-2,k) - \overline{v_{obs,vt}}(r-2))^2 \sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{obs,vt}(r,k) - \overline{v_{obs,vt}}(r))^2}$$



$$k) \approx \sum_{k=t-\Delta t}^t v_{obs}^2(r, k).$$

波エネルギー

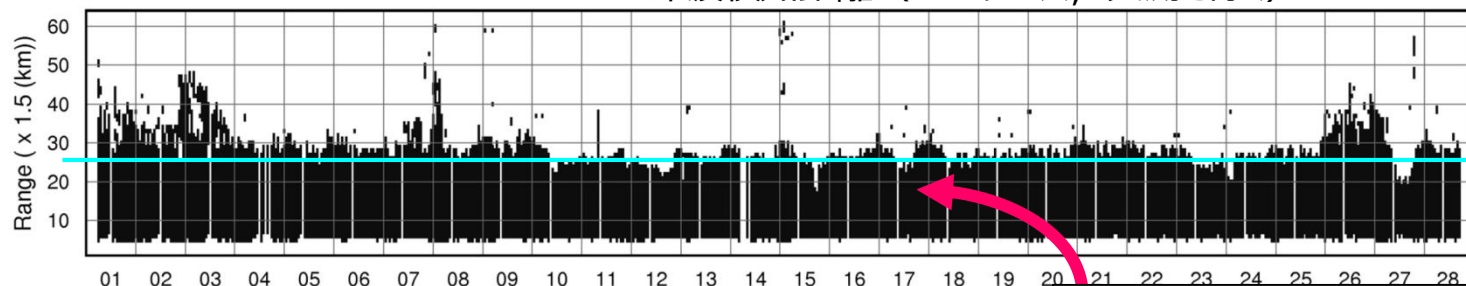
測流エネルギー

津波流速（エネルギー比）が大きい陸棚では検知可能と推定される

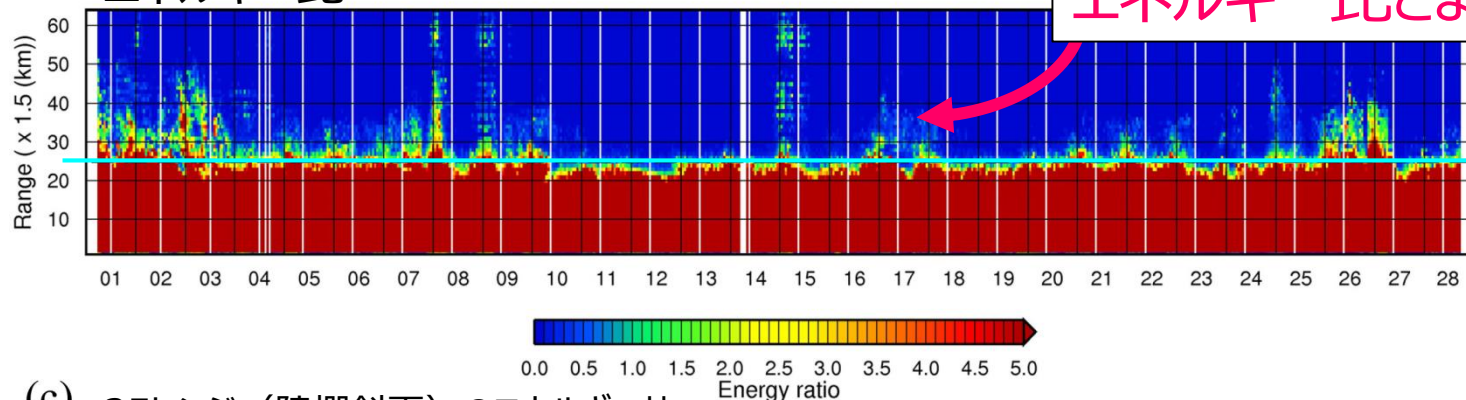
検知距離の変化 (2014年2月)

(a) 検知結果

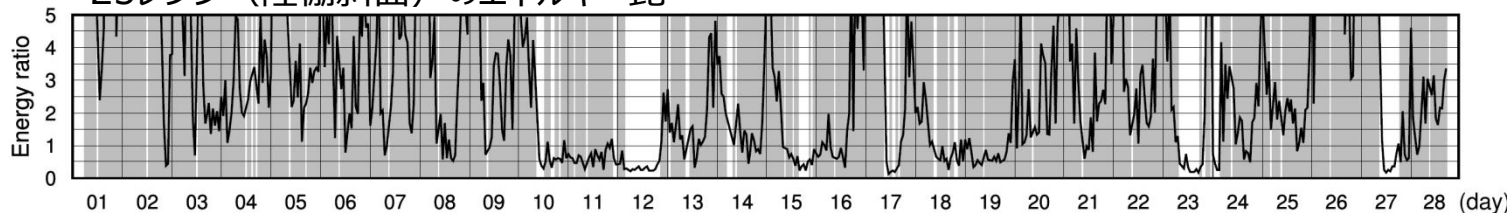
2014年2月の各時刻（1時間毎）に同じ津波（Case 3）が発生した場合の津波検知距離（627ケース、欠測を除く）



(b) エネルギー比



(c) 25レンジ（陸棚斜面）のエネルギー比



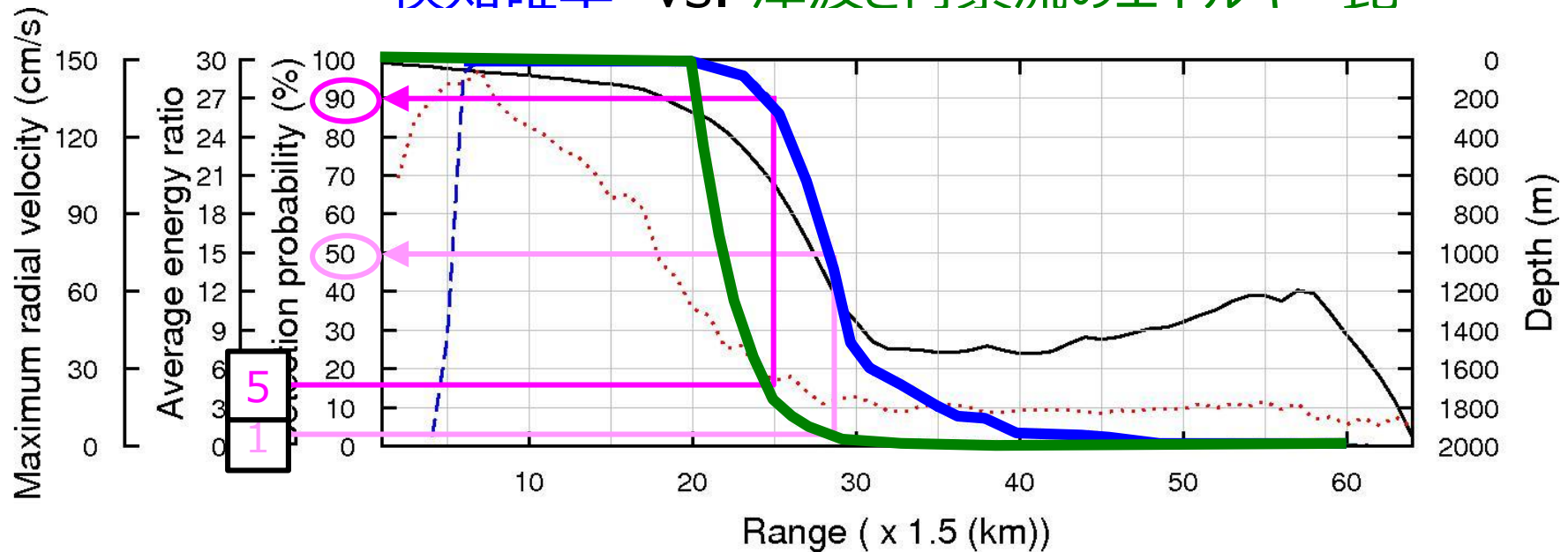
February 2014

エネルギー比は大きく変動，1以下では検知できていない

津波検知確率

(2014年2月の時間平均場)

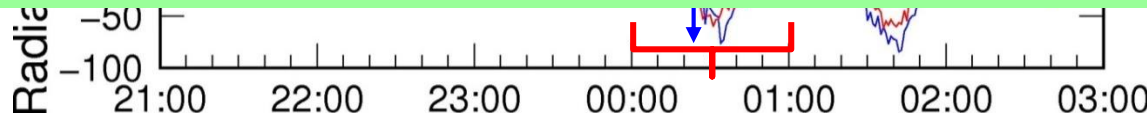
検知確率 vs. 津波と背景流のエネルギー比



エネルギー比は陸棚斜面（20-30レンジ）で大きく変化

→ 津波エネルギーが空間的（岸沖方向）に分布

→ エネルギー比の見積りにより、ラフに検知距離を推定可能



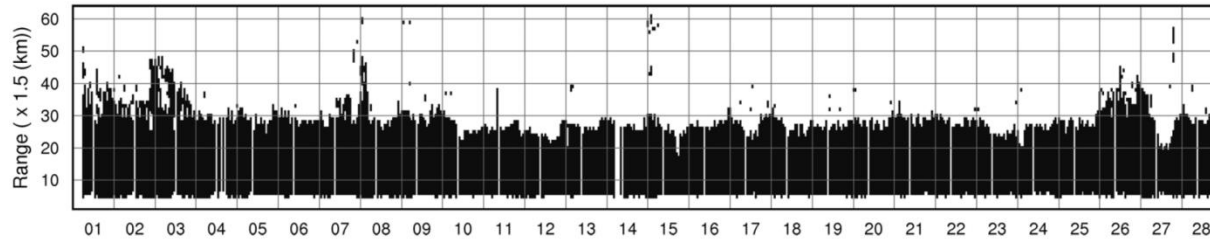
背景流エネルギー

(Fuji and Hinata, Submitted)

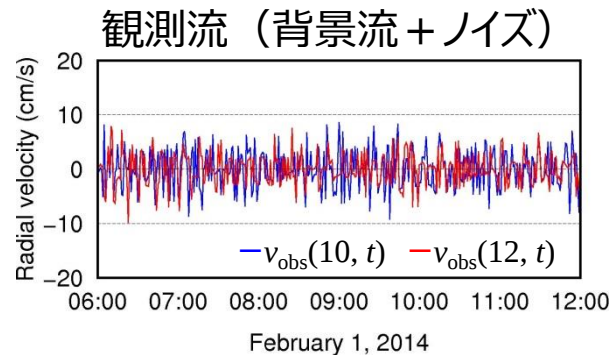
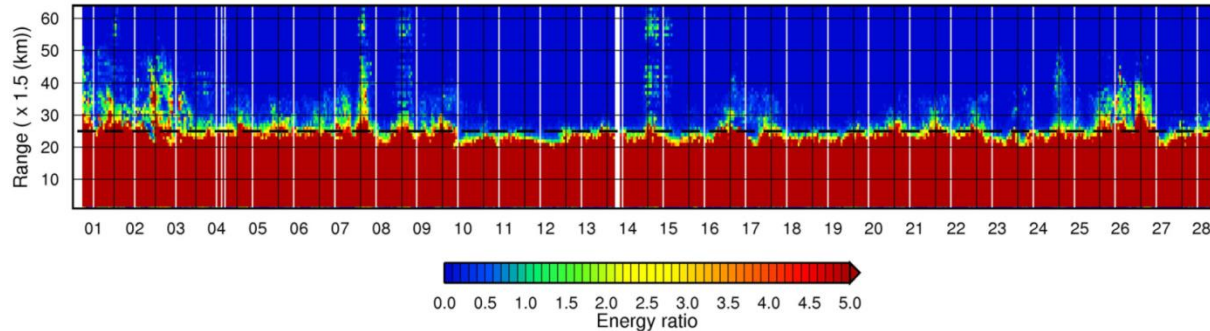
津波検知距離の変化

(2014/2/1 ~ 2014/2/28, 1時間毎)

検知結果

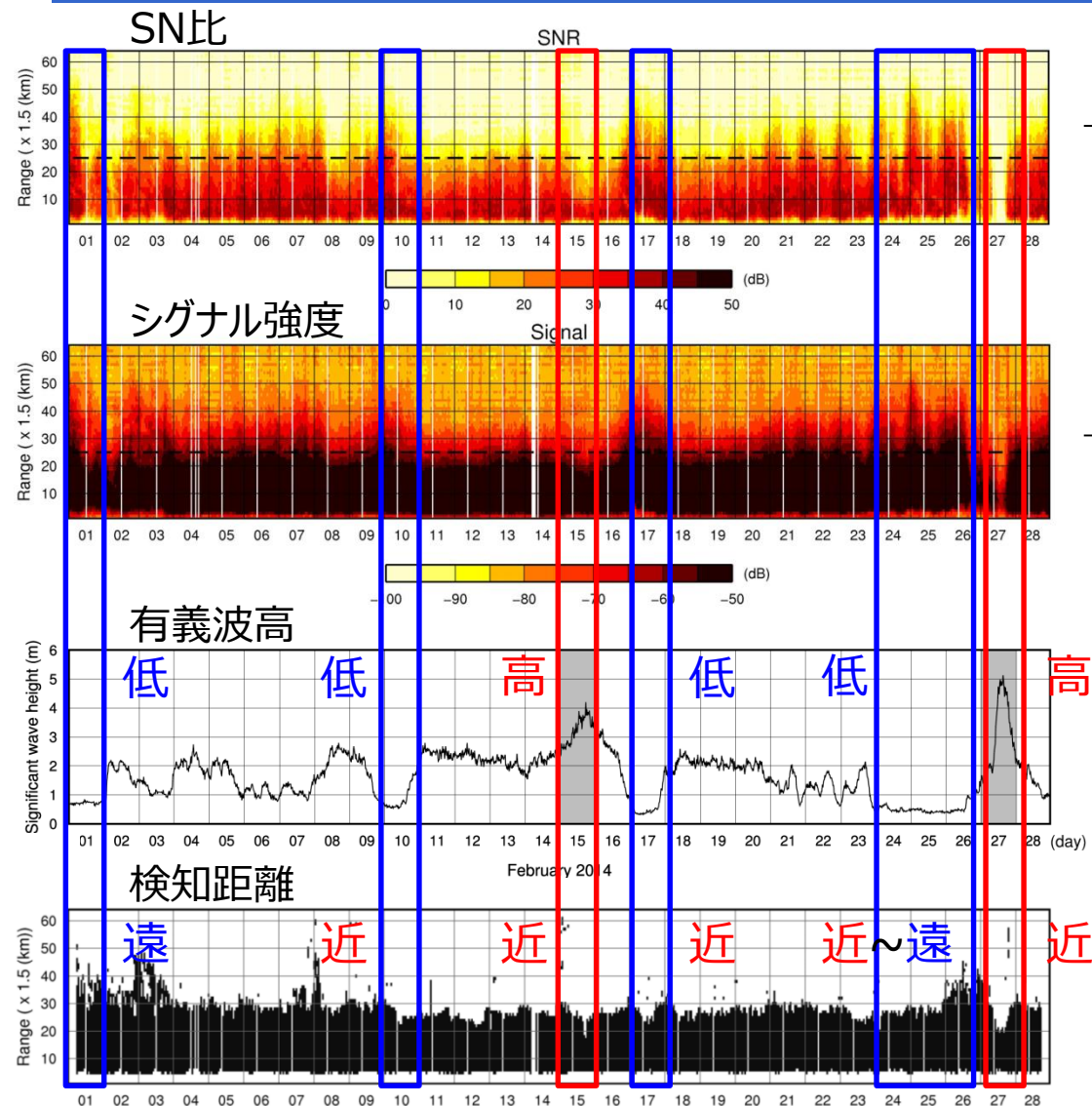


エネルギー比



観測流が時間的に変化している
→ 背景流の場が変化
→ SN比が変化

津波検知距離の変化 (波高との関係)



【SN比】

- ・シグナル強度と変動傾向とよく一致
- ・波高が第一義的に影響
高波浪→SN比低→検知距離短
(ただし逆は言えない)

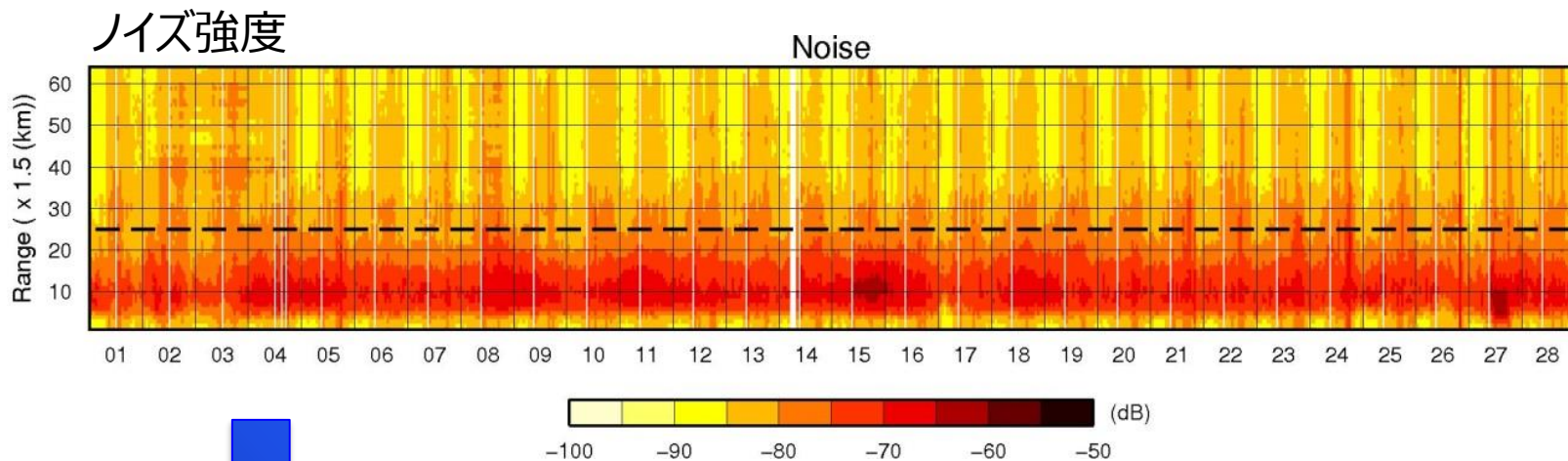
【波高】

- ・高波浪ほど海面の凹凸が大きい
→電波の減衰大 (Barrick, 1971)
→SN比低

【検知距離】

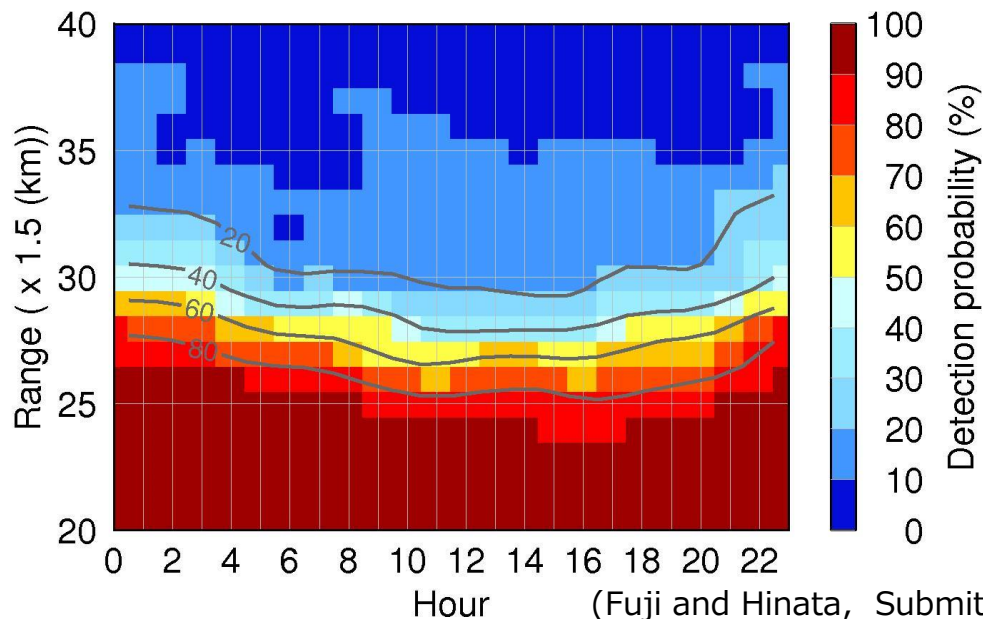
- ・波高が高いと近くまでしか見えない
(低くても遠くまで見えるとは限らない)

津波検知距離の変化 (日周変動)

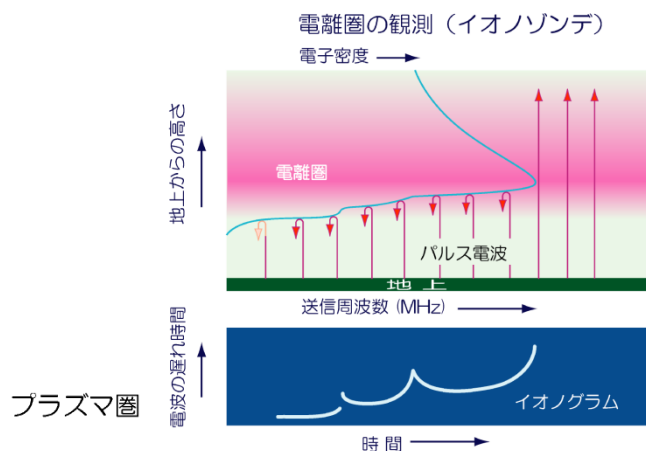
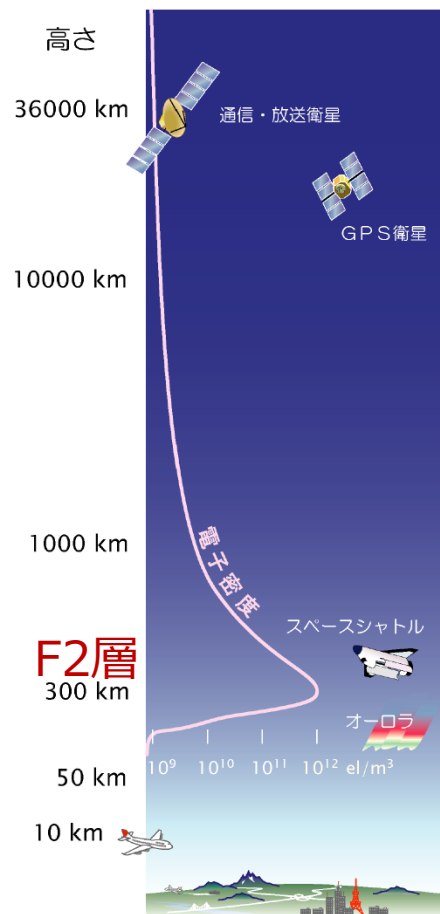


明確な日周変動
(夜中小・日中大)

電離層の影響により
日中は深夜に比べて
平均で3-4レンジ見えない



電離層観測結果 (2014年2月)



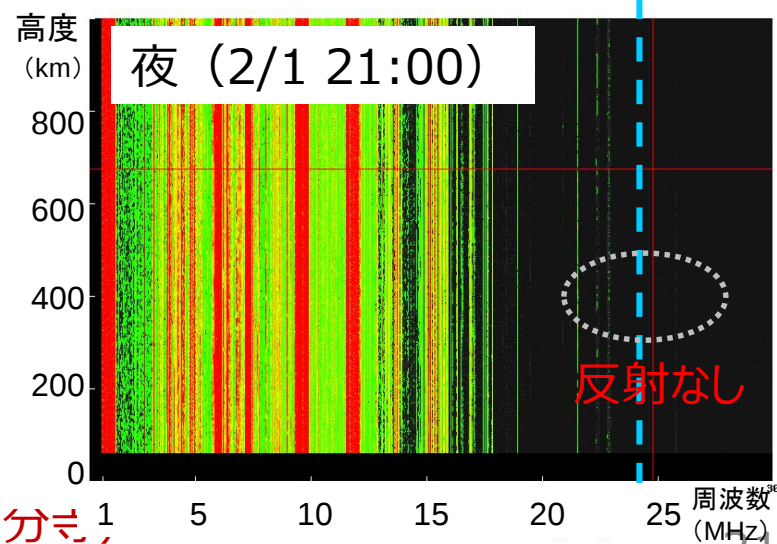
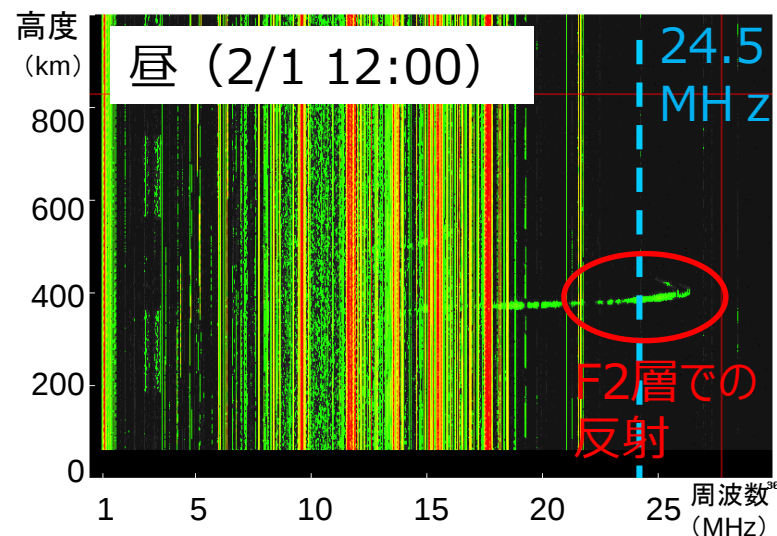
(熱圏)

電離層

(中間圏)

(成層圏)

(対流圏)

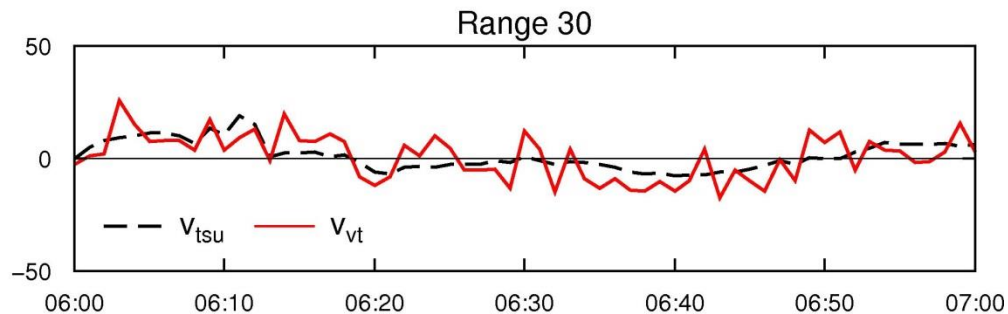
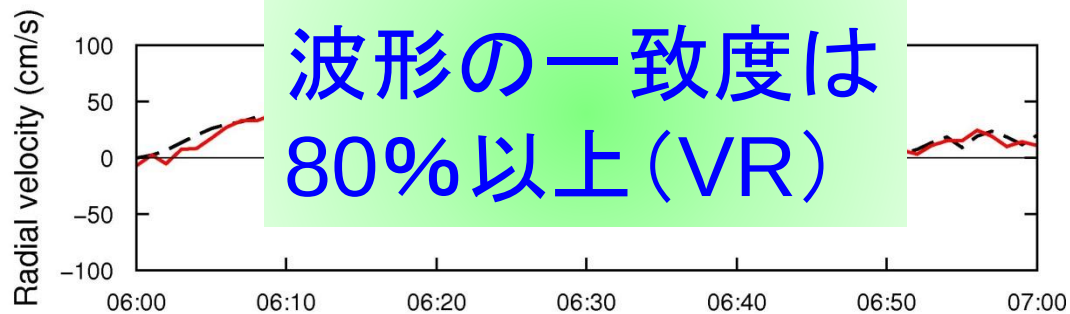
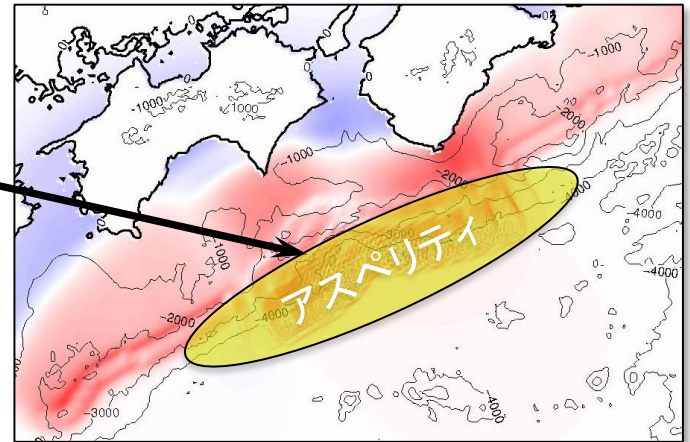
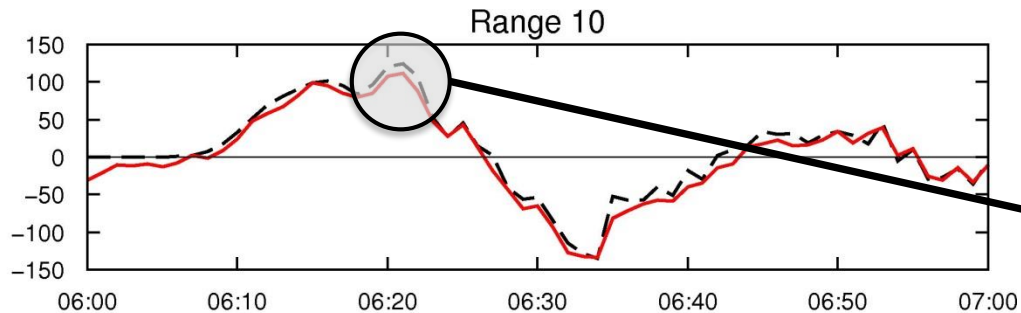


(<http://wdc.nict.go.jp/IONO/index.html>)

斜め反射観測結果 (沖縄→国分寺, 2014年2月)

津波の計測精度 (波形の一致度)

2014/2/7 06:00に津波が発生した場合

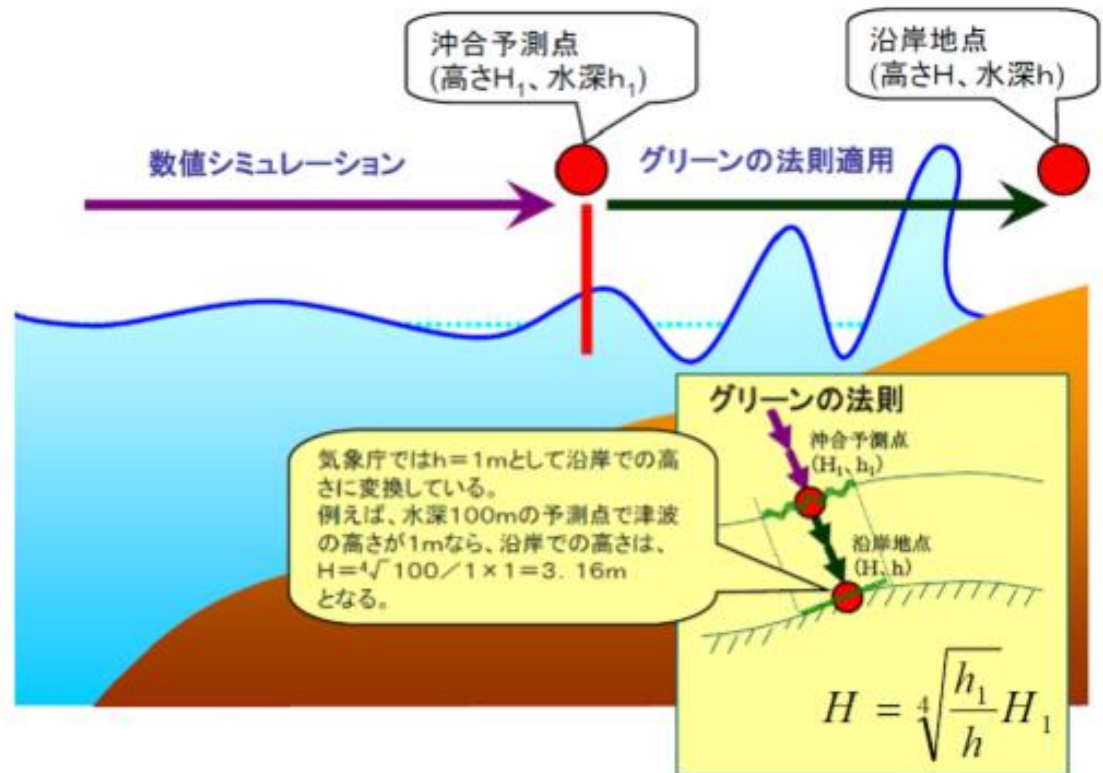
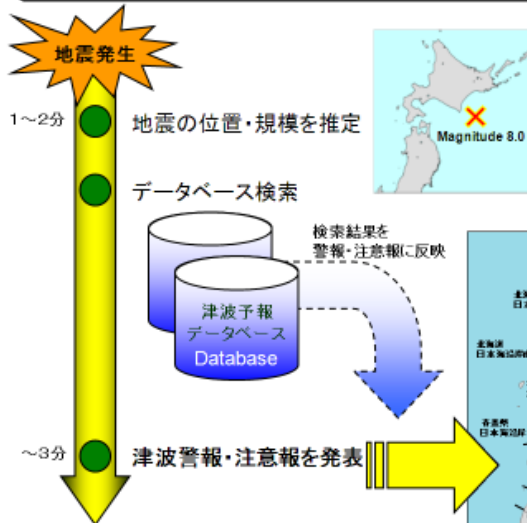


Variance reduction

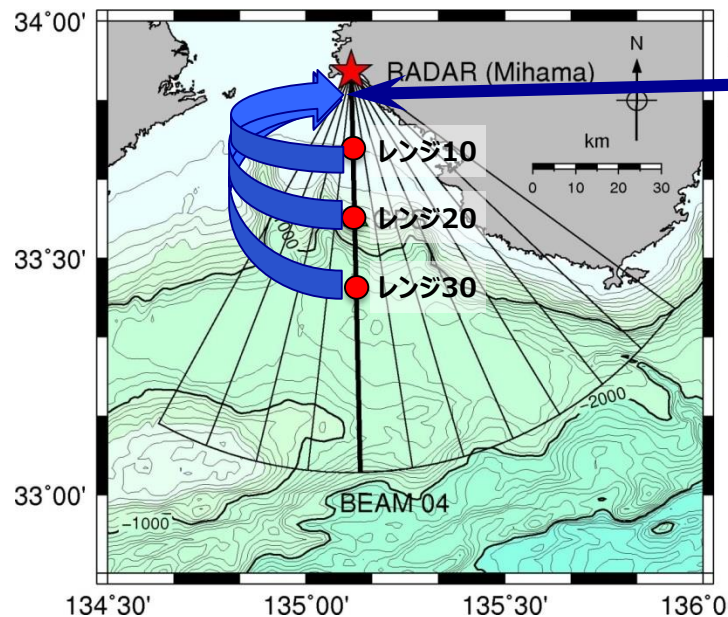
$$VR(r) = \left\{ 1 - \frac{\sum_{t=t_a}^{t_d} (v_{vt}(r, t) - v_{tsu}(r, t))^2}{\sum_{t=t_a}^{t_d} v_{tsu}^2(r, t)} \right\} \times 100(\%)$$

津波の計測精度 (沿岸水位の予測)

津波予報データベースを用いた津波警報・注意報の発表手順



津波の計測精度 (沿岸水位の予測)



沿岸地点の最大水位（正解）

6.8 m → 大津波警報



レーダで計測した沖合の流速から
線形長波近似+グリーンの法則
を使って沿岸水位を推測

レンジ	水深(m)	(h=10m) 数値計算による 津波水位(m)	警報レベル	推定誤差			(h=10m) 最大津波 水位(m)	警報レベル
				(沖合) 最大津波 流速(cm/s)	(沖合) 最大津波 水位(m)	(h=10m) 最大津波 水位(m)		
10	80	6.8	大津波警報	-12	-0.34	-0.58	6.01	大津波警報
20	270	6.8	大津波警報	-8	-0.42	-0.96	5.63	大津波警報
30	1350	6.8	大津波警報	7	0.82	2.80	9.38	大津波警報

ただし、統計的な解析はこれから

まとめ

- レーダ流速を使って津波を検知する手法を開発し、仮想津波実験を用いて統計的に津波検知確率を評価した

- 陸棚 (<20レンジ)

津波流速大→エネルギー比大→100%検知

津波検知にはエネルギー比が第一義的に影響する

- 陸棚斜面 (20-30レンジ)

→津波流速小→エネルギー比小→検知距離が変化

エネルギー比の変化のうち、ある程度はSN比で説明できる

- SN比は波高が第一義的に影響

→波高が大きい→SN比低→検知距離短い (ただし必ずしも逆は言えない)

- 電離層強度も影響

電離層強度：春～夏にかけて高い

- エネルギー比は津波規模にも依存



Backup Slides



波高と電波減衰の関係

20 MHz

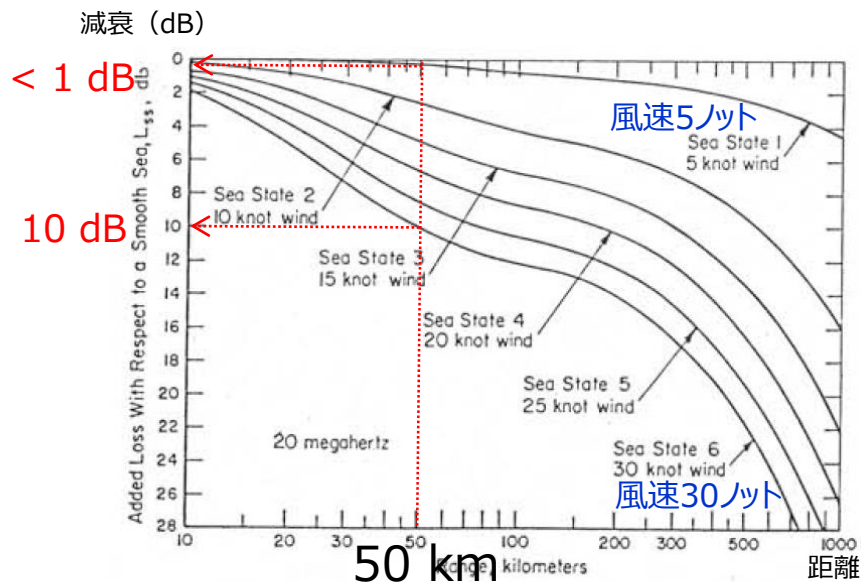


Fig. 8. Same as Figure 5, except added transmission loss due to sea state at 20 MHz.

50 MHz

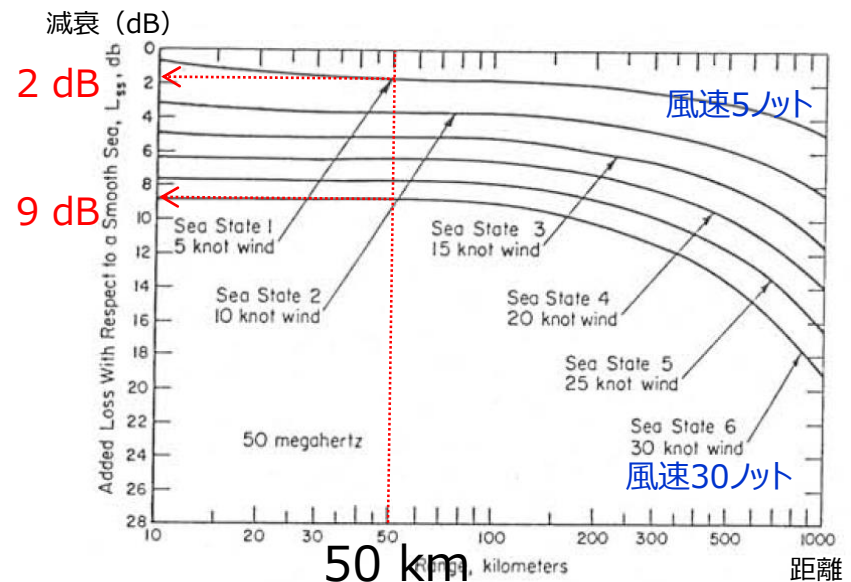
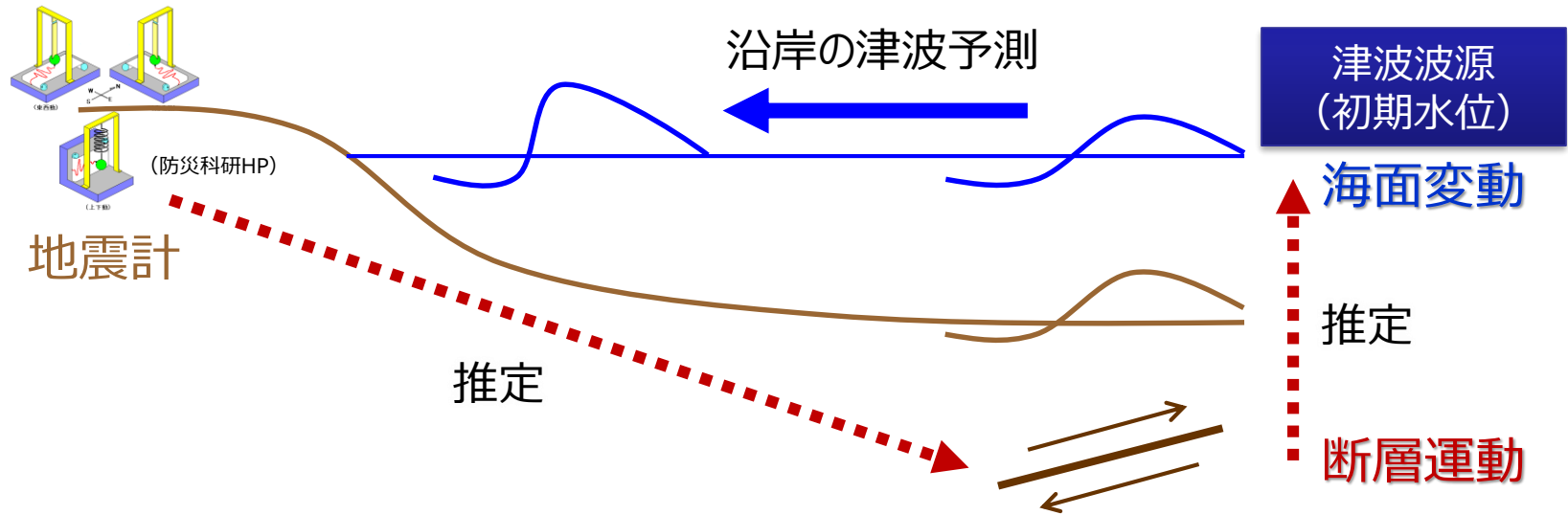


Fig. 9. Same as Figure 5, except added transmission loss due to sea state at 50 MHz.

(Barrick, 1971)

風速大 (→波高大→海面のインピーダンス大) →電波減衰大

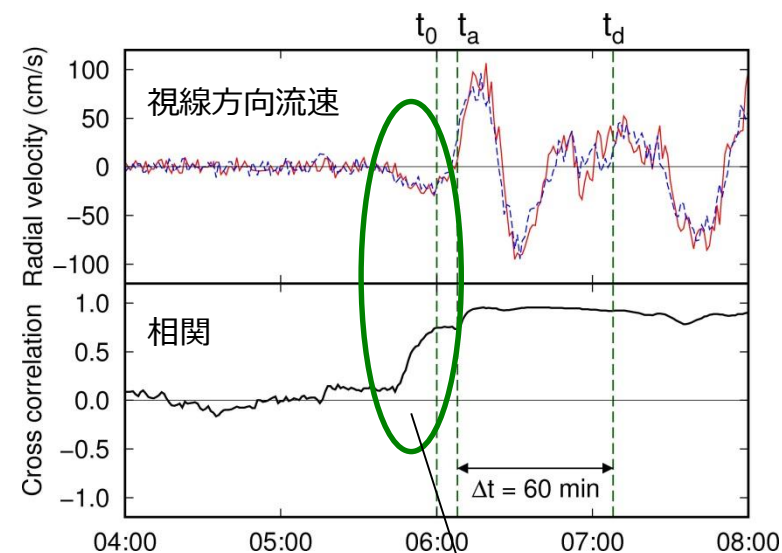
現在の津波予測の課題



- 現在の予測手法：地震波→断層運動→海面変動→沿岸の津波予測
- 超巨大地震，津波地震，波源不均一性の高い地震
→津波を過小評価する危険性が指摘されている（高橋・小沼，2007）

定量的な観測情報に基づいた津波警報の検証（重要）

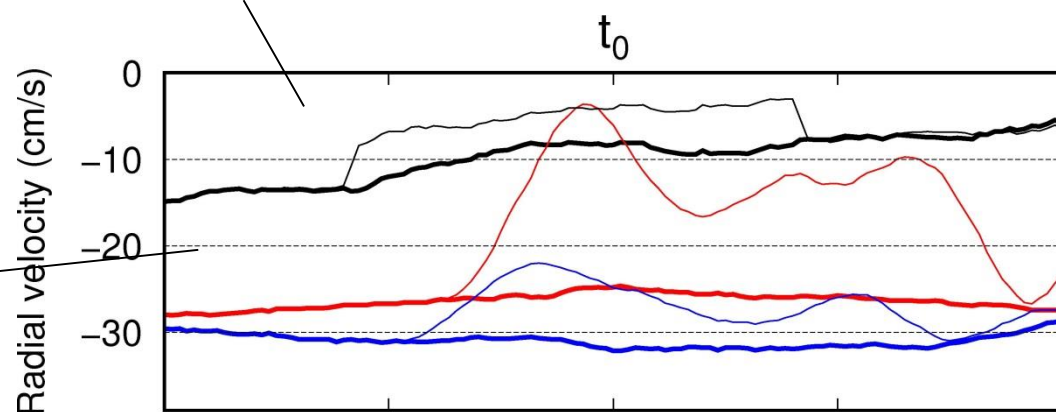
背景流の推定誤差の影響



背景流の推定誤差

太線：真の背景流（＝レーダ観測値）

細線：推定背景流（＝仮想津波の60分移動平均）



赤：10レンジ 青：20レンジ 黒：10レンジ

沖合の津波流速（2ケース）

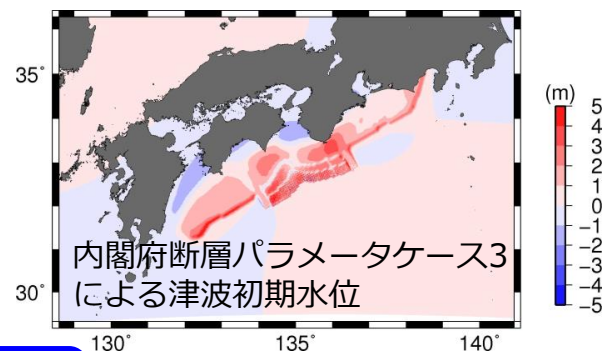
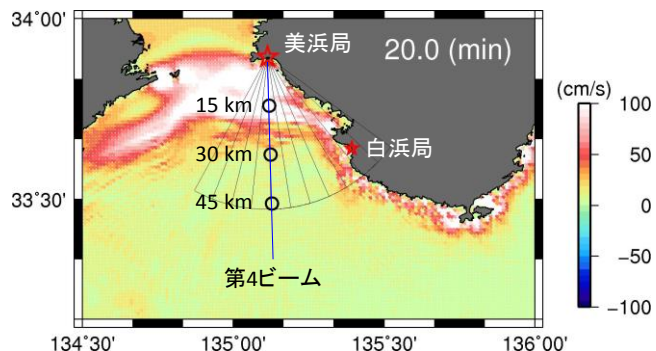
→線形長波を仮定して水位に変換

→グリーンの法則で沿岸（水深10m）での津波高を推定

まとめ

- 仮想津波実験を用いて統計的に津波検知確率を評価
- 検知確率はエネルギー比に顕著に依存
 - 1で50%程度, 5以上で90%以上
 - エネルギー比の見積もりにより, ラフに検知距離を推定可能
- 背景流の場合, SN比の変化により検知距離が変化する
 - SN比には波高が第一義的に影響 (電離層も影響)
 - 電離層は春～夏にかけて高く, 有義波高も季節変動がある
- エネルギー比は津波規模にも依存する
- 沿岸水位推定精度の統計解析が必要 (他の季節, 他の海域での同様な解析が必要)

仮想津波観測データ作成の流れ



美浜局の受信波 (観測受信波)
(観測ノイズが入った背景流)

津波数値計算による美浜局の
距離毎の視線方向流速

複素積により合成

距離毎の観測受信波

理想受信波

合成受信波

合成受信波の
ドップラスペクトル

仮想津波観測流

$$\Theta(x, y, t) = a_x \exp(2\pi j \int_0^t f_{tsu}(x, y, \tau) d\tau).$$

$$f_{tsu}(x, y, t) = 2 f_0 v_{tsu}(x, y, t) / c.$$

x, y : 緯度経度

v_{tsu} : 津波数値計算による視線方向流速成分

f_{tsu} : v_{tsu} によるドップラーシフト量

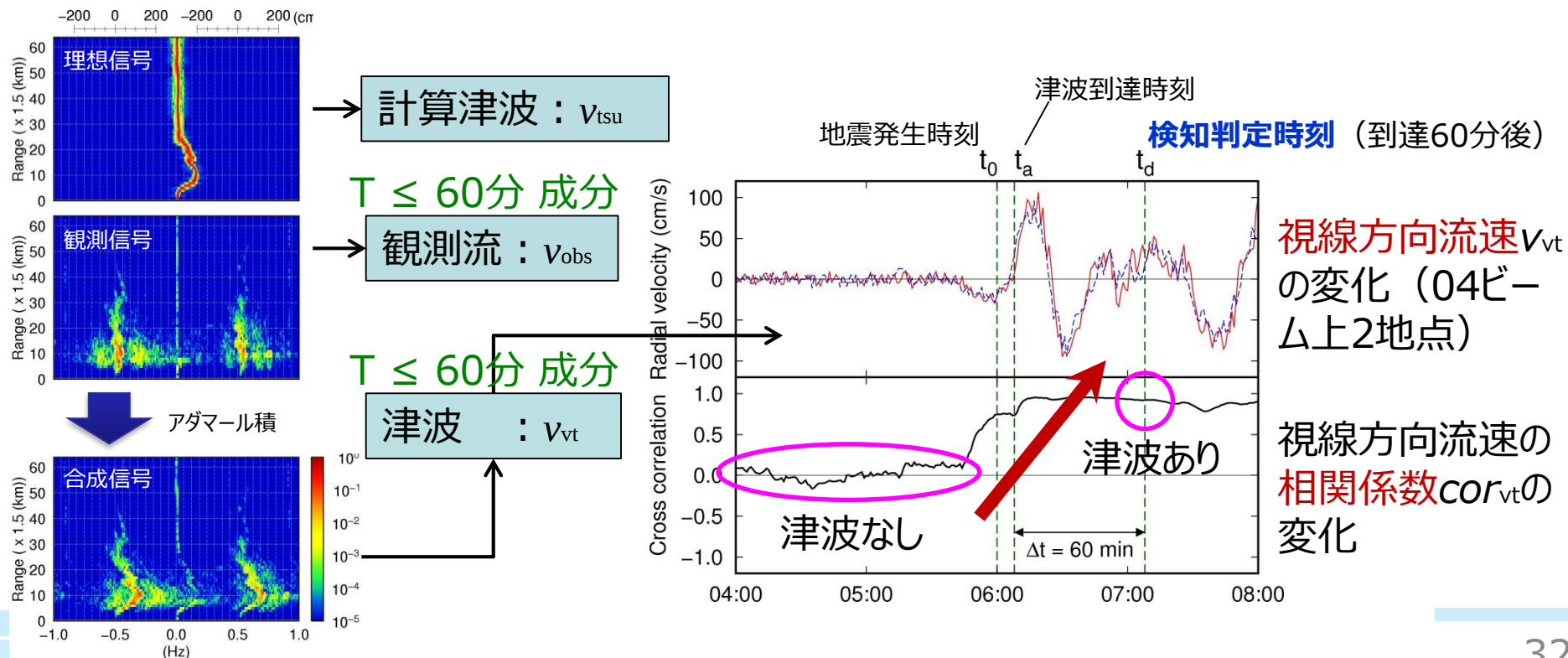
f_0 : 送信波の周波数

c : 電波の伝播速度

a_x : 任意の振幅 ($a_x = 1$)

解析手法

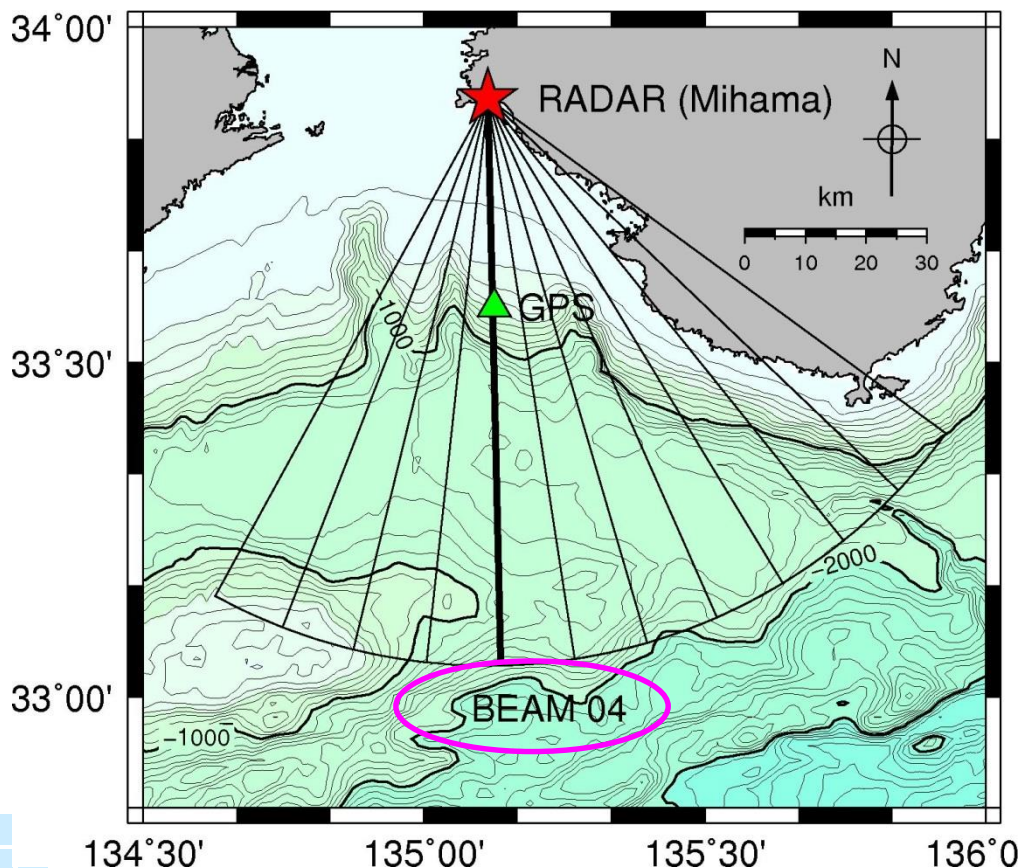
- ① 仮想的な津波受信信号（合成信号）を作成（Gurgel et al., 2011）
- ② 津波，観測流を抽出（60分ハイパスフィルタで背景流を分離）
- ③ 流速の相関係数の変化に着目して津波検知を判定



検討条件

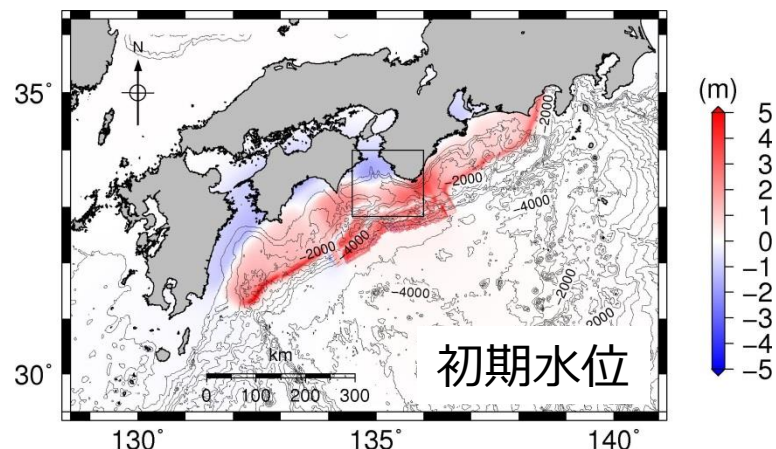
[レーダ]

- ・解析対象：美浜局04ビーム
- ・解析期間：2014年2月の1ヶ月間
- ・レンジ分解能：1.5km

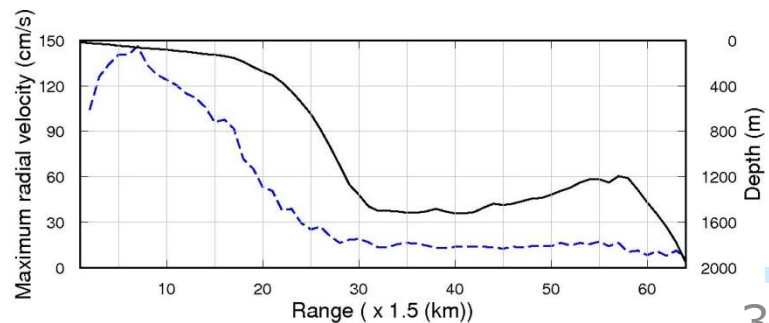


[津波]

- ・内閣府断層モデルケース3



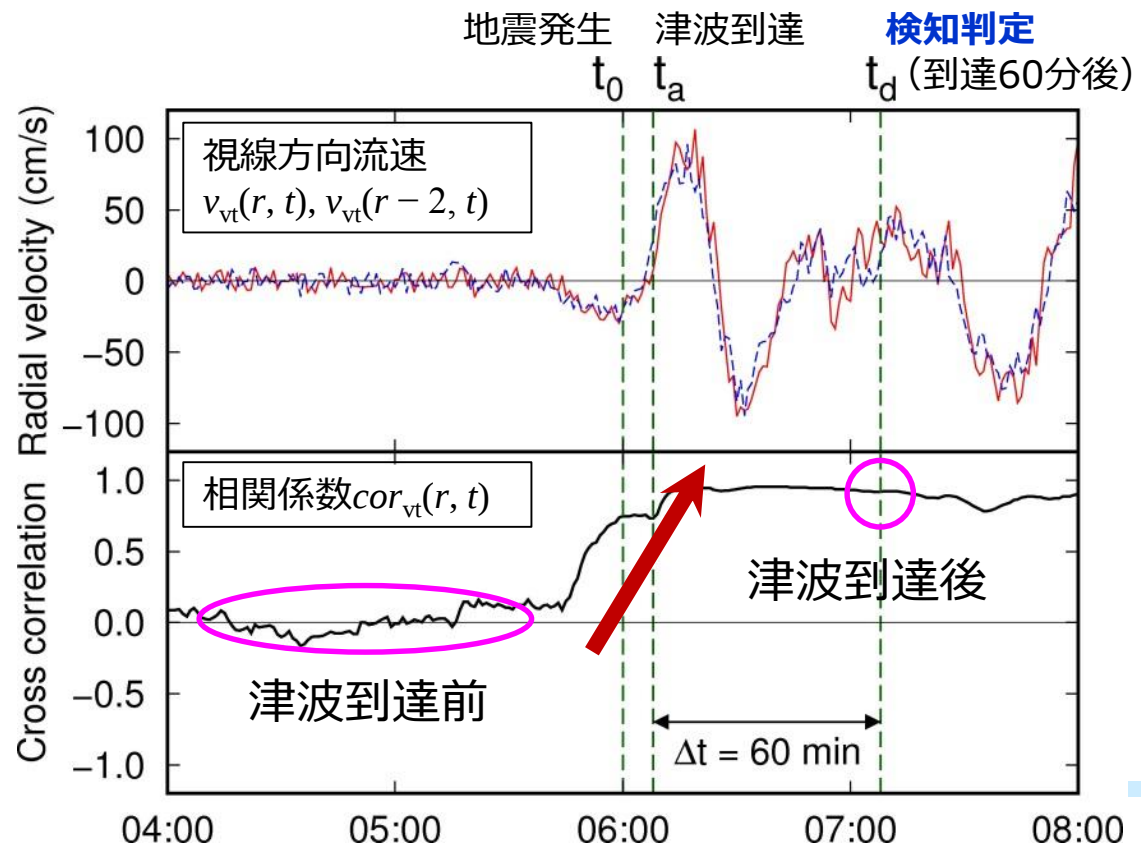
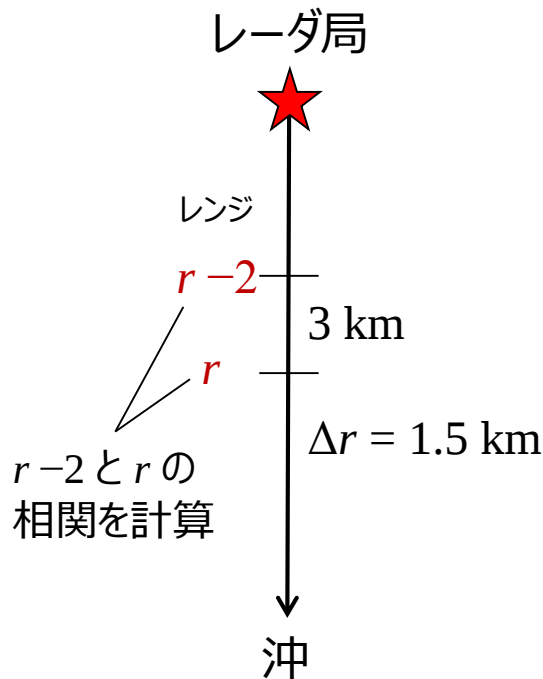
- ・支配方程式：線形長波
- ・空間格子間隔：1km
- ・計算時間間隔：0.5秒 (=掃引時間)



STEP2 : 検知判定

- ・ビーム上2点の流速の相関係数を計算

$$\text{相関係数 } cor_{vt}(r, t) = \frac{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{vt}(r-2, k) - \overline{v_{vt}(r-2)}) (v_{vt}(r, k) - \overline{v_{vt}(r)})}{\sqrt{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{vt}(r-2, k) - \overline{v_{vt}(r-2)})^2} \sqrt{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{vt}(r, k) - \overline{v_{vt}(r)})^2}}$$



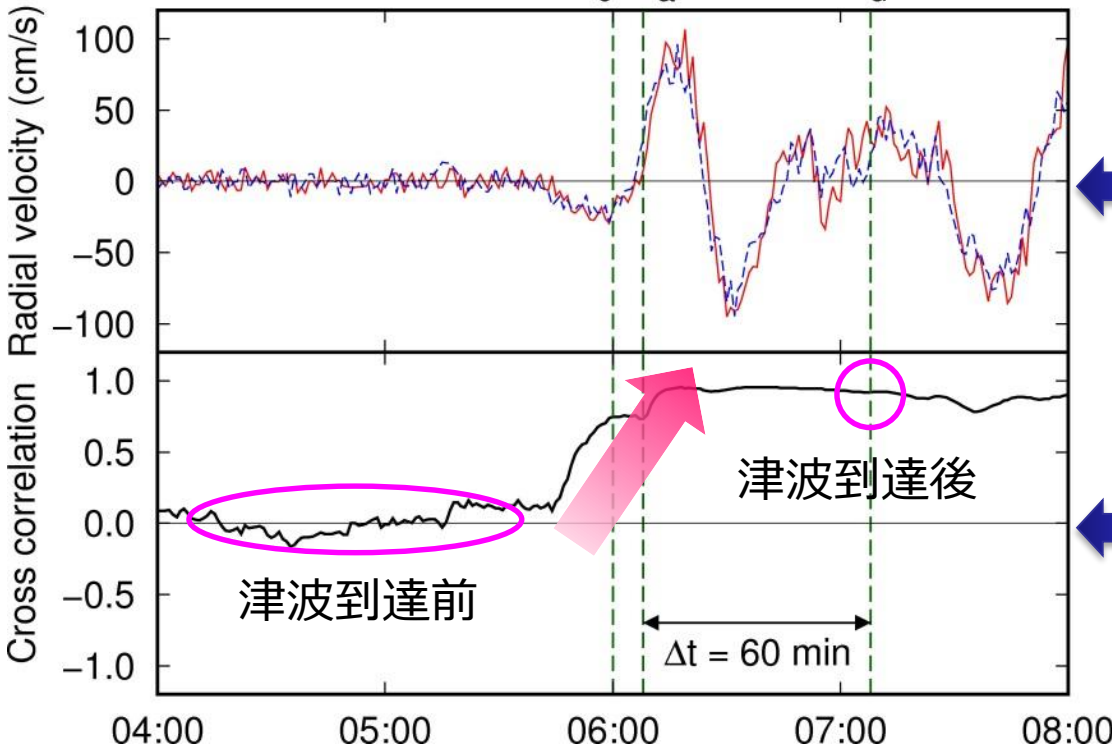
STEP2 : 検知判定

- ・ビーム上2点の流速の相関係数を計算

相関係数

$$cor_{syn}(r, t) = \frac{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{syn}(r-2, k) - \overline{v_{syn}(r-2)})(v_{syn}(r, k) - \overline{v_{syn}(r)})}{\sqrt{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{syn}(r-2, k) - \overline{v_{syn}(r-2)})^2} \sqrt{\sum_{k=t-\Delta t}^t (v_{syn}(r, k) - \overline{v_{syn}(r)})^2}}$$

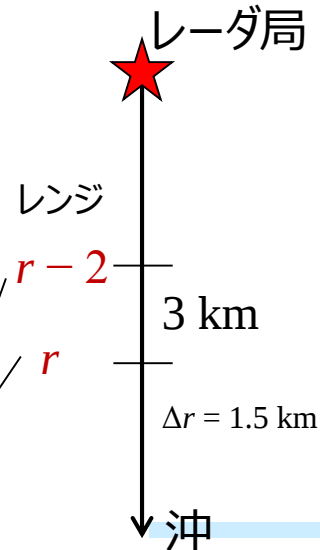
地震発生時刻 t_0 津波到達時刻 t_a 検知判定時刻 (到達60分後) t_d



視線方向流速
 $v_{vt}(r, t)$,
 $v_{vt}(r-2, t)$ の変化

相関係数
 $cor_{vt}(r, t)$ の変化

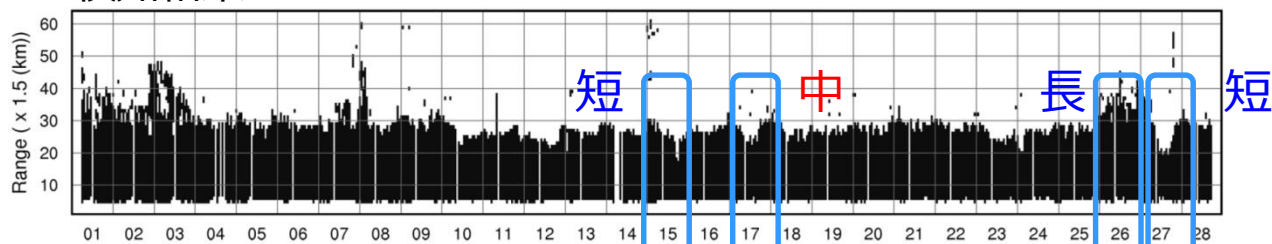
$r-2$ と r の相関



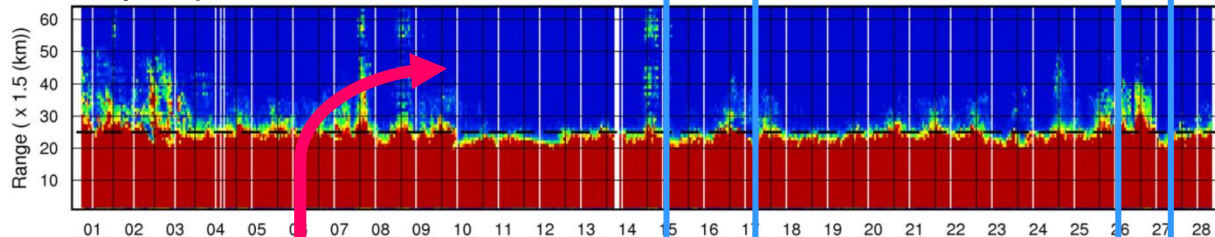
津波検知距離の変化 (SN)

(2014/2/1 ~ 2014/2/28, 1時間毎)

検知結果

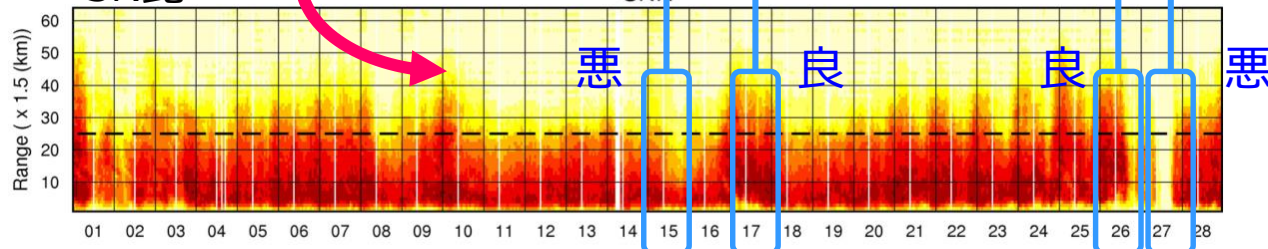


エネルギー比

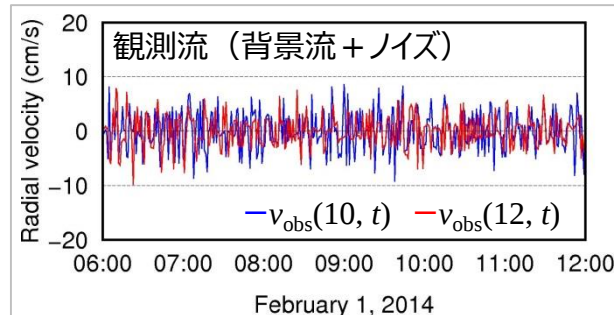


概ね対応

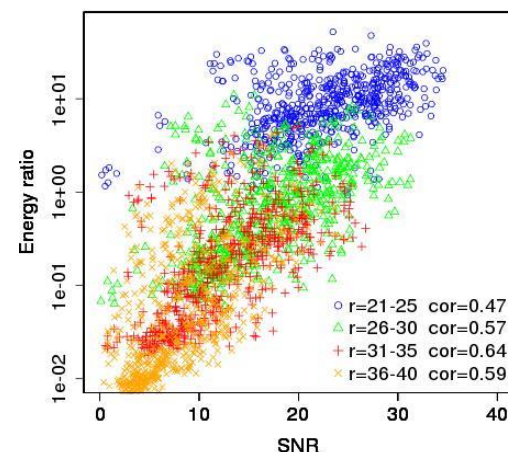
SN比



0 10 20 30 40 50 (dB)



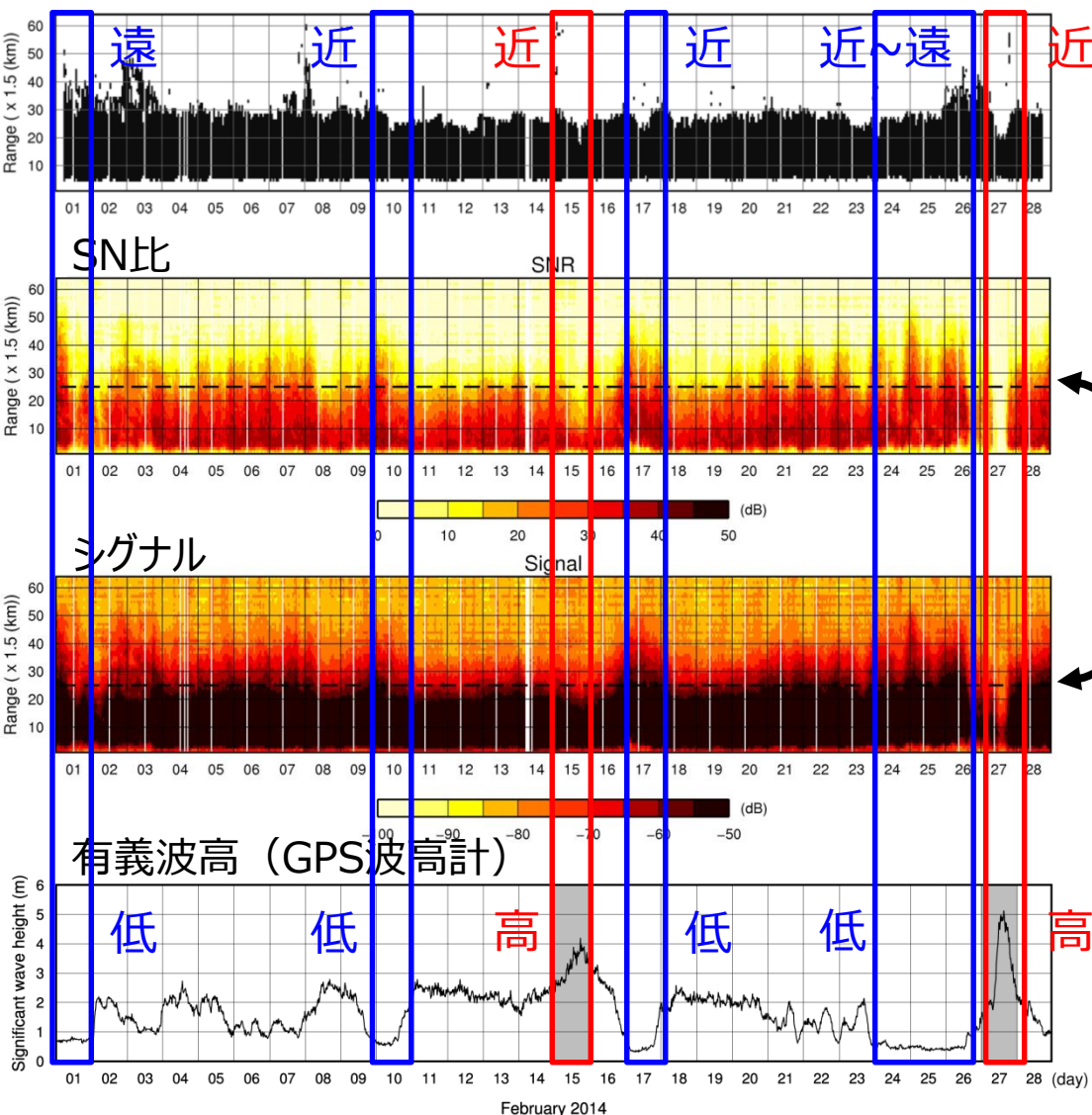
時間的に変化している
→ 背景流の場の変化
→ SN比の変化



陸棚斜面から沖合 (>20レンジ) で検知確率は顕著に低下
→ 高くはないが相関は有意

SN比とエネルギー比の相関
(20レンジ以遠)

津波検知距離の変化（波高）



検知距離

- ・波高が高いと近くまでしか見えない
- ・低いからといって遠くまで見えるとは限らない

【SN比, シグナル】

- ・変動パターンよく一致

SN比 には,

- ・波高が第1義的に影響

高波浪 → SN悪 → 検知距離：短

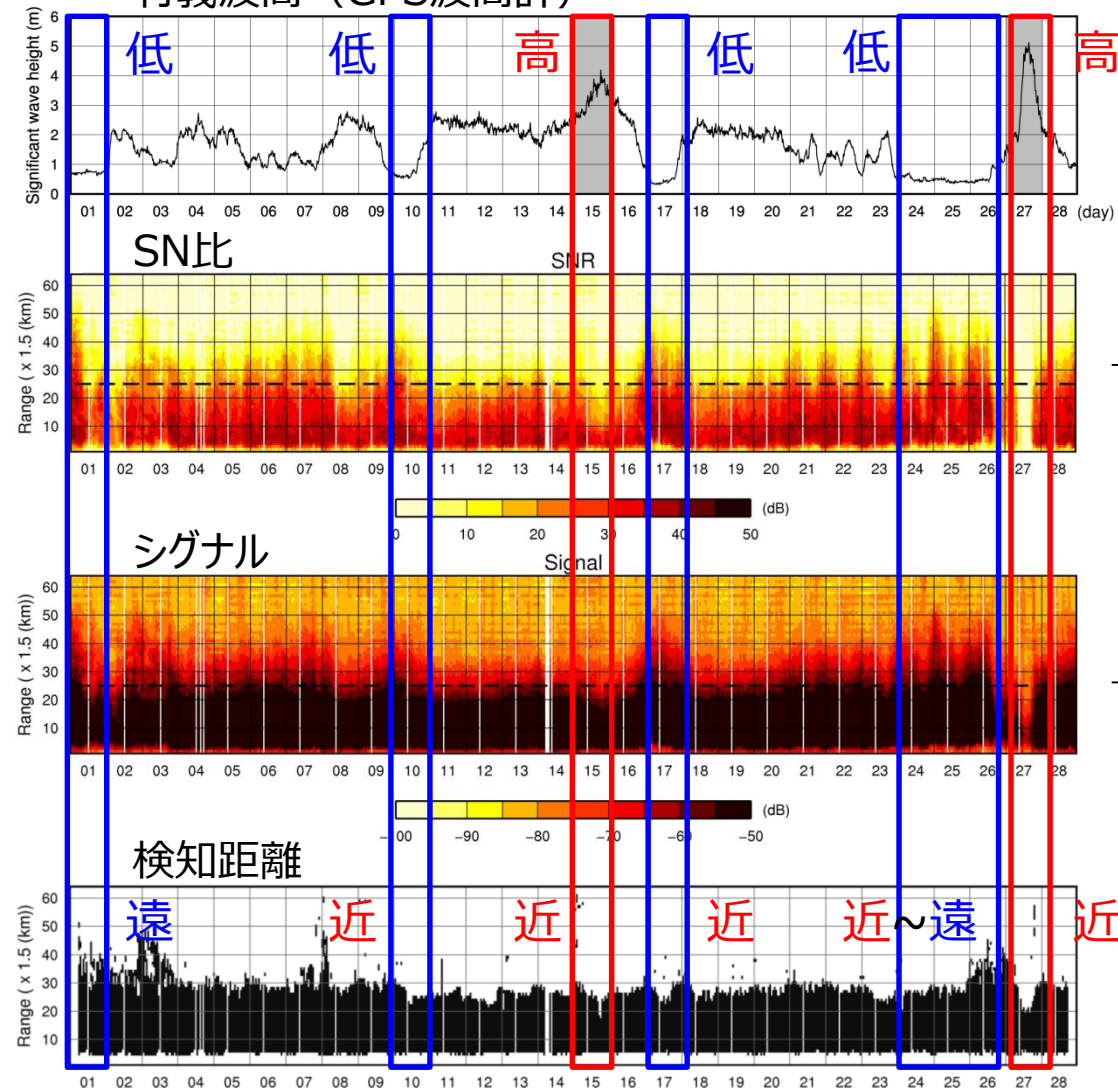
低波浪 → SN良 → 検知距離：中～長

【波高】

- ・高波浪ほど海面の凹凸が大きい
- ・電波の減衰大 (Barrick, 1971)
- ・SN比低

津波検知距離の変化 (SN比・シグナル, 波高との関係)

有義波高 (GPS波高計)



【波高】

- ・高波浪ほど海面の凹凸が大きい
→電波の減衰大 (Barrick, 1971)
→SN比低

【SN比】

- ・シグナルと変動傾向とよく一致
- ・波高が第一義的に影響
高波浪→SN比低→検知距離短
(ただし逆は言えない)

【検知距離】

- ・波高が高いと近くまでしか見えない
(低くても遠くまで見えるとは限らない)