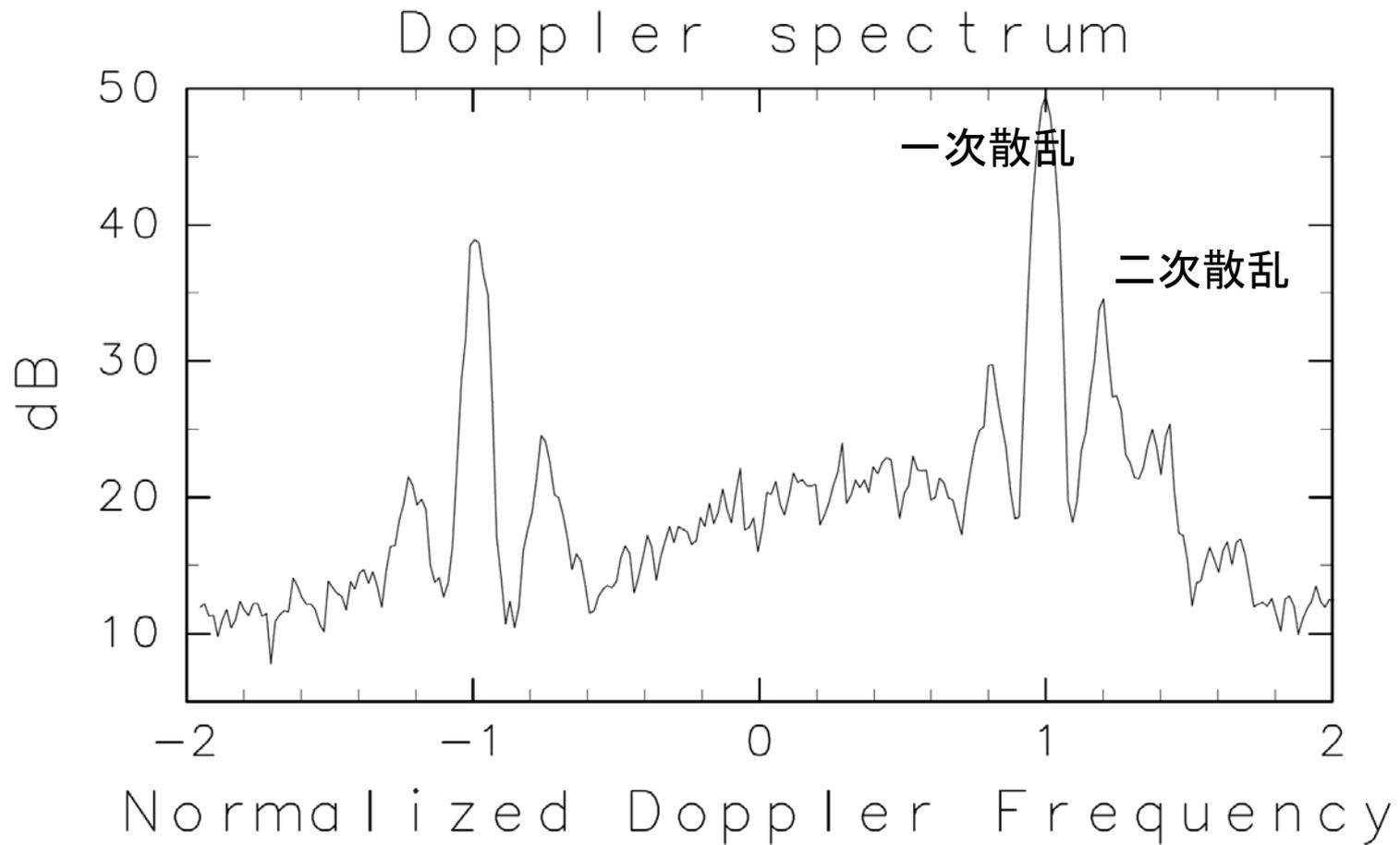


# 海洋レーダによる波浪研究の現状 と和歌山県沖観測の初期解析

久木幸治(琉球大理),  
片岡智哉(東京理科大理工)

# ドップラースペクトルの例



# 海面による短波の散乱

- ブラッグ散乱: 電波の波数ベクトル  $k_0$  に対して,  $\pm 2k_0$  の成分波によって散乱
- ドップラー周波数(周波数偏移)と, 散乱に関与する成分波の周波数は等しい。

Bragg散乱の場合:

$$\omega_D = \frac{2v_D}{c}\omega_0, \quad v_D = \frac{\omega_B}{2k_0}, \quad c = \frac{\omega_0}{k_0}$$

$$\omega_D = \omega_B$$

$\omega_D$ : ドップラー角周波数,  $k_0$ : 電波波数,  $\omega_0$ : 電波角周波数,  
 $c$ : 光速,  $\omega_B$ : Bragg 散乱に関与する波の角周波数

$$P(\pm\omega_D) \propto X(\omega_D, \mp 2\mathbf{k}_0)$$

$$X = X_1 + X_2$$

$$P_1(\pm\omega_D) \propto X_1(\omega_D, \mp 2\mathbf{k}_0) \quad \text{一次散乱}$$

$$P_2(\pm\omega_D) \propto X_2(\omega_D, \mp 2\mathbf{k}_0) \quad \text{二次散乱}$$

$X(\omega, \mathbf{k})$ : 波浪スペクトル,  $P(\omega_D)$ : ドップラースペクトル,  
 $\omega_D$ : ドップラー角周波数,  $\mathbf{k}_0$ : 電波波数ベクトル,

$X_1(\omega, \mathbf{k})$ : 分散関係が成り立つ

ドップラースペクトルは  
レーダ散乱断面積に比例

$$P(\omega_D) \propto \sigma(\omega_D)$$

$$\sigma_1(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m=\pm 1} S(-2m\mathbf{k}_0) \delta(\omega_D - m\omega_B),$$

$$\sigma_2(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1=\pm 1} \sum_{m_2=\pm 1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Gamma|^2 \\ S(m_1\mathbf{k}_1) S(m_2\mathbf{k}_2) \\ \delta(\omega_D - m_1(gk_1)^{\frac{1}{2}} - m_2(gk_2)^{\frac{1}{2}}) dpdq$$

$\omega_D$ : ドップラー角周波数,  $\mathbf{k}_0$ : 電波波数ベクトル,  $\omega_B = (2gk_0)^{1/2}$ : Bragg 角周波数

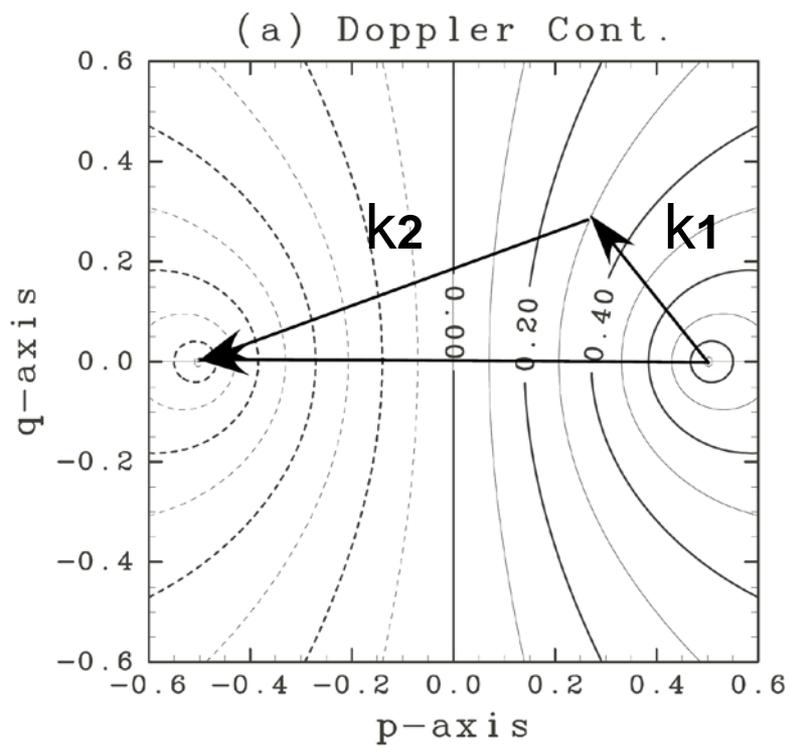
$S(\mathbf{k})$ : 波数ベクトル  $\mathbf{k}$  に対する波浪スペクトル,  $p$  軸: 電波進行方向,

$\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ : 散乱に関わる二つの自由波の波数ベクトル:

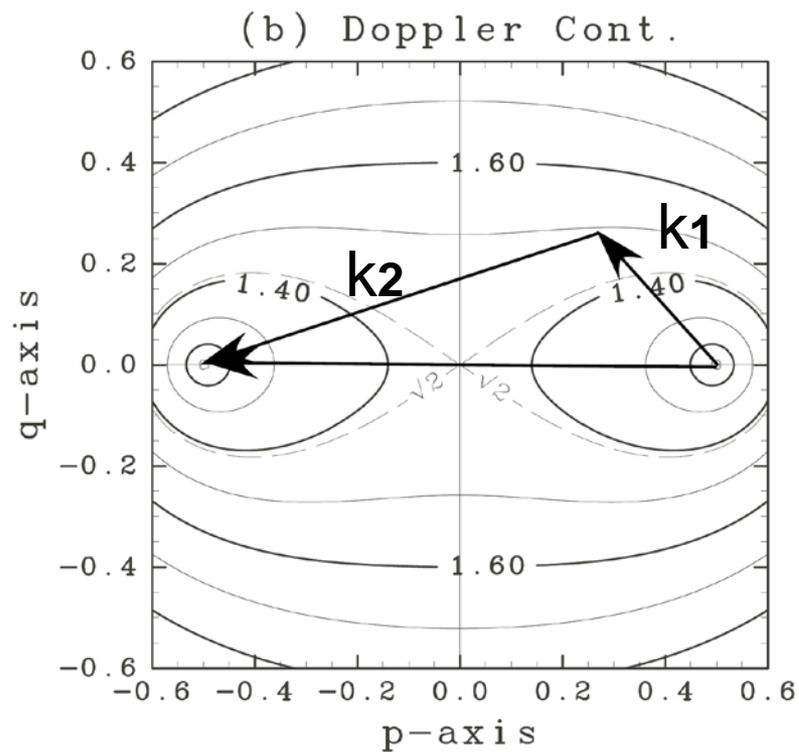
$$\mathbf{k}_1 = (p - k_0, q), \quad \mathbf{k}_2 = (-(p + k_0), -q)$$

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = -2\mathbf{k}_0$$

$\Gamma$ :  $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$  についての既知関数



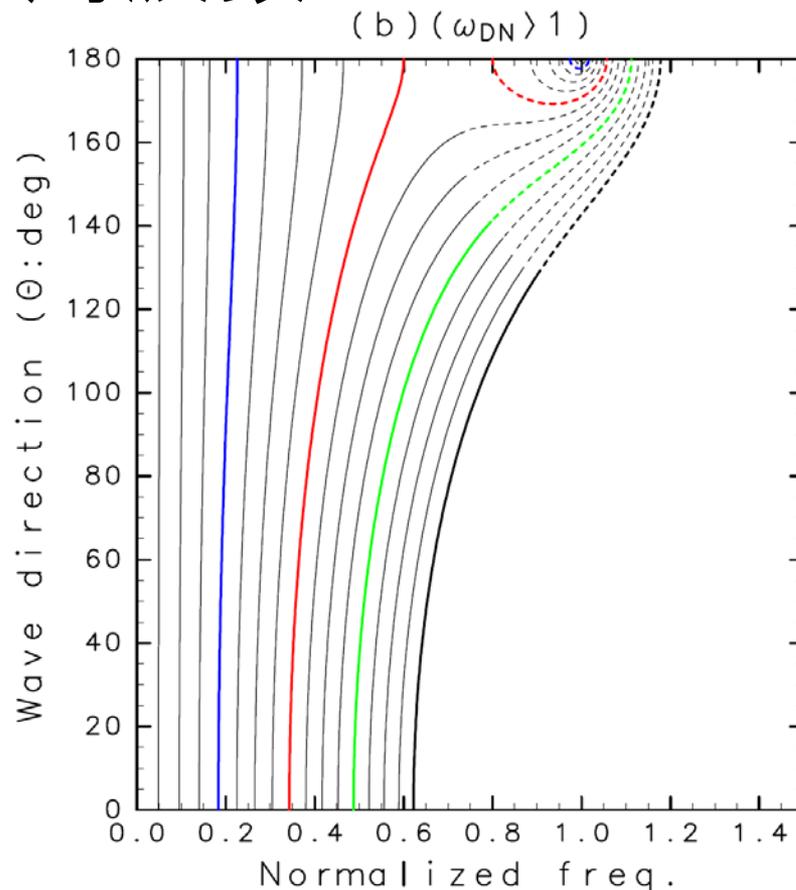
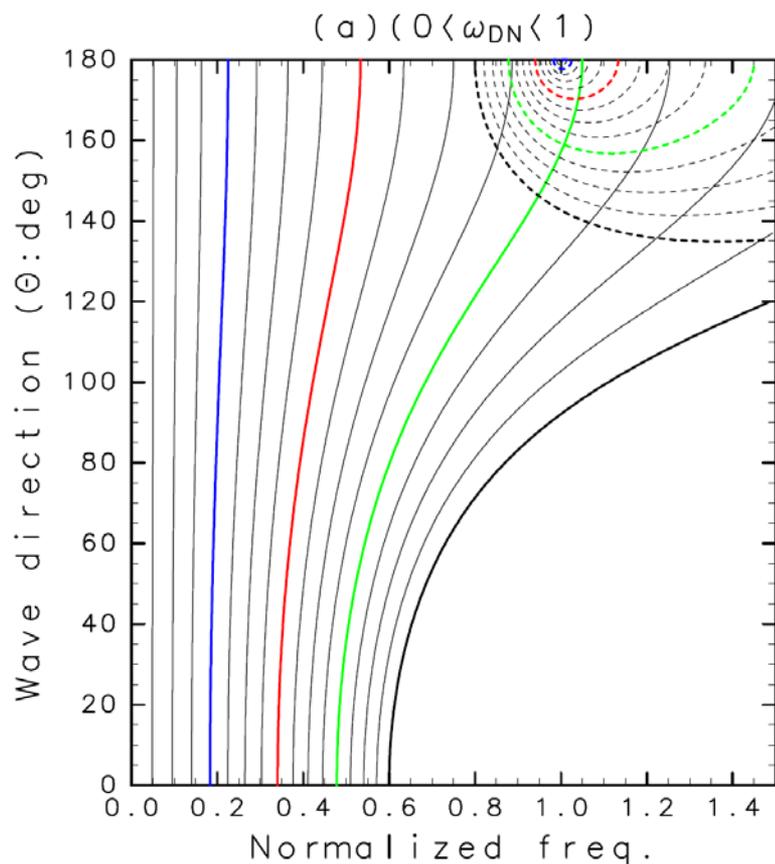
CONTOUR INTERVAL = 1.000E-01



CONTOUR INTERVAL = 1.000E-01

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = -2\mathbf{k}_0$$

# 波の周波数及び方向に対する ドップラー周波数



実線: 波数ベクトル $m_1k_1$ に対応, 点線:  $m_2k_2$ に対応

青:0.8, 赤:0.6, 緑:0.4

青:1.2, 赤:1.4, 緑:1.6

# 二次散乱の近似

$$\sigma_2(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1=\pm 1} \sum_{m_2=\pm 1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Gamma_T^s|^2 S(m_1 \mathbf{k}_1) S(m_2 \mathbf{k}_2) \delta(\omega_D - m_1 \omega_1 - m_2 \omega_2) dp dq, \quad k_n = |\mathbf{k}_n|, \omega_n = (gk_n)^{1/2}$$

$$\mathbf{k}_2 \simeq -2\mathbf{k}_0, \quad \Gamma_T^s \simeq \overline{\Gamma_T^s} \quad (k_1 < k_2)$$

$$\sigma_2(\omega_D) \simeq 2^7 \pi k_0^4 S(-2m_2 \mathbf{k}_0)$$

$$\overline{|\Gamma_T^s|^2} \Psi(-m_1 m_2 \omega_B + m_1 \omega_D)$$

**Ψ: 周波数スペクトル**

$$\sigma_2(\omega_D) \simeq 2^7 \pi k_0^4 S(-2m_2 \mathbf{k}_0)$$

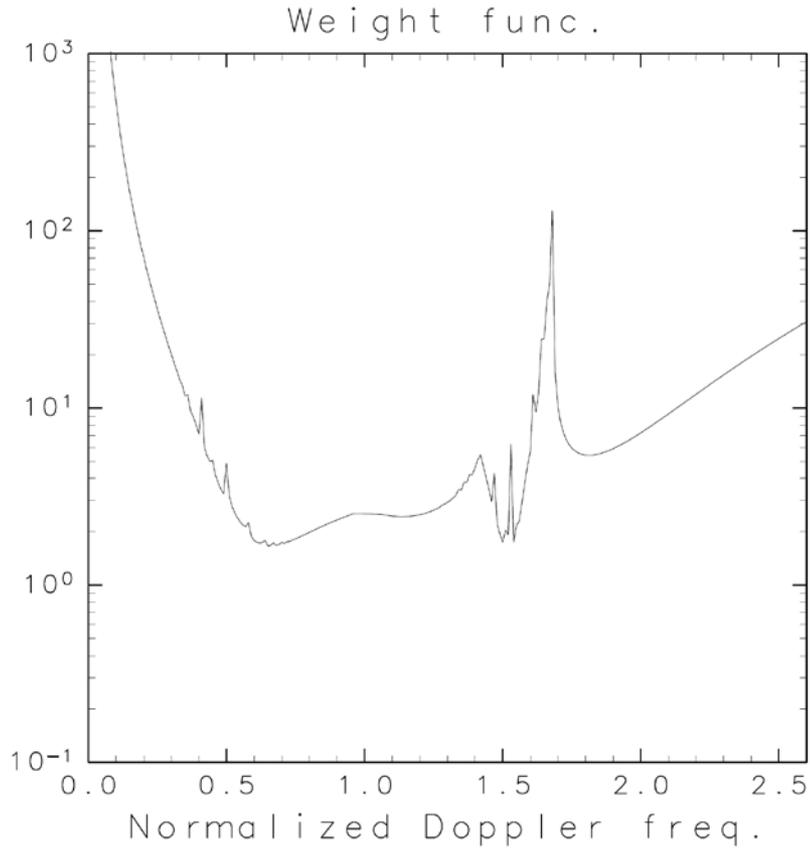
$$\overline{|\Gamma_T^s|^2} \Psi(-m_1 m_2 \omega_B + m_1 \omega_D)$$

$$\sigma_1(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_2=\pm 1} S(-2m_2 \mathbf{k}_0) \delta(\omega_D - m_2 \omega_B)$$

$$\Psi(\omega_B | \omega_{DN} - 1 |) \simeq \frac{4\sigma_2(\omega_D)/w(\omega_{DN})}{k_0^2 \int_0^\infty \sigma_1(\omega_D) d\omega_D}$$

$$H_s \simeq 4 \left[ \frac{2 \int_0^\infty (\sigma_2(\omega_D)/w(\omega_{DN})) d\omega_D}{k_0 \int_0^\infty \sigma_1(\omega_D) d\omega_D} \right]^{\frac{1}{2}}$$

**$\Psi$ : 周波数スペクトル,  $\omega_{DN}$ : Bragg周波数で規格化したドップラー周波数,  $w$ : 重み関数**



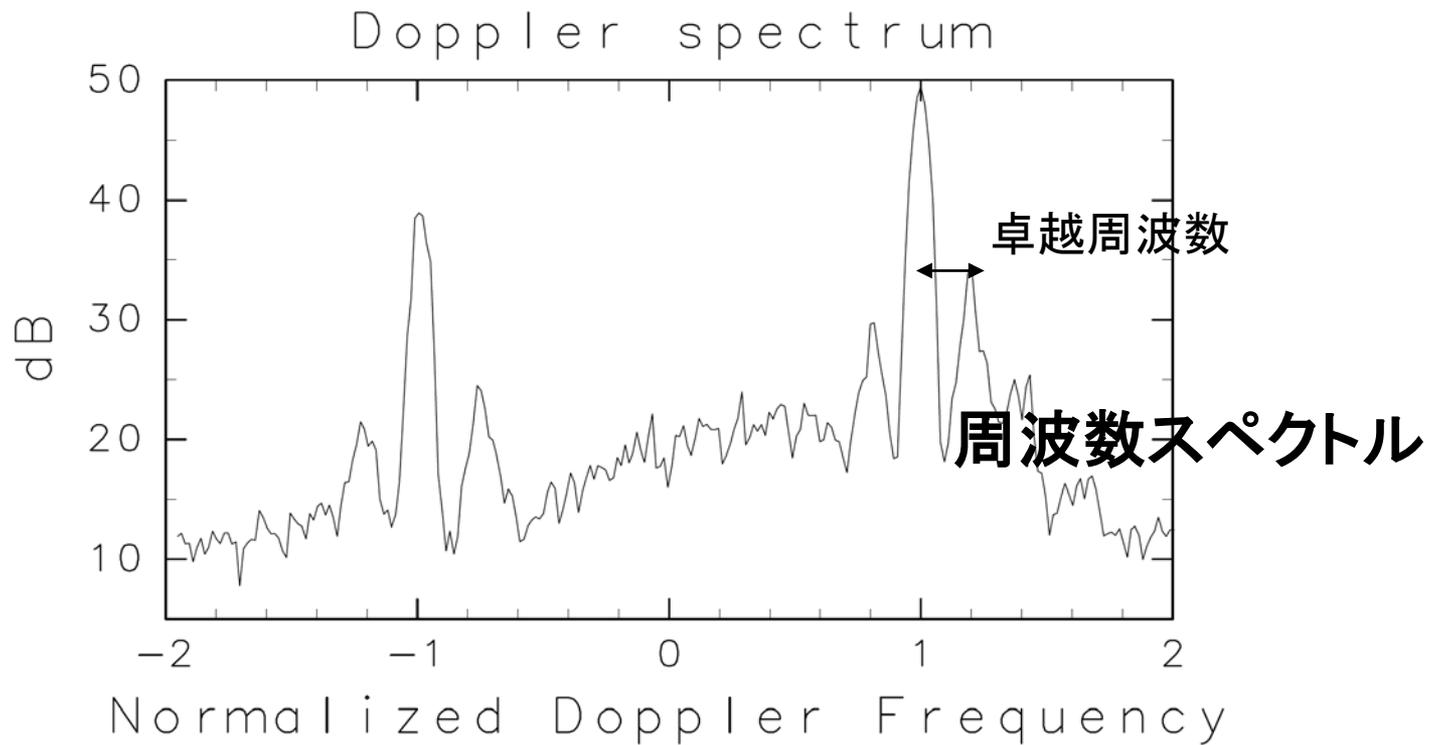
$$w(\omega_{DN}) = \frac{8}{k_0^2} \overline{|\Gamma_T^s|^2}$$

$$\overline{|\Gamma_T^s|^2} = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} |\Gamma_T^s(\omega_D, \alpha)|^2 d\alpha$$

$$\alpha = \text{Arctan}(k_2/k_1)$$

$$\sigma_2(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1=\pm 1} \sum_{m_2=\pm 1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Gamma_T^s|^2 S(m_1 \mathbf{k}_1) S(m_2 \mathbf{k}_2) \delta(\omega_D - m_1 \omega_1 - m_2 \omega_2) dpdq,$$

$$k_n = |\mathbf{k}_n|, \omega_n = (gk_n)^{1/2}$$



$$\Psi(\omega_B|\omega_{DN} - 1|) \simeq \frac{4\sigma_2(\omega_D)/w(\omega_{DN})}{k_0^2 \int_0^\infty \sigma_1(\omega_D)d\omega_D}$$

# 波浪推定手法のタイプ

- 簡易法(Barrick 1977)  $\Psi(\omega_B|\omega_{DN} - 1|) \simeq \frac{4\sigma_2(\omega_D)/w(\omega_{DN})}{k_0^2 \int_0^\infty \sigma_1(\omega_D)d\omega_D}$
- 多くの手法はこの手法の類型
- パラメータ適合法  
CODARレーダで採用
- 線形インバージョン法
- 非線形インバージョン法
- 主に日本国内

# 線形インバージョン法

$$\sigma_2(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1=\pm 1} \sum_{m_2=\pm 1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Gamma_T^s|^2 S(m_1 \mathbf{k}_1) S(m_2 \mathbf{k}_2) \delta(\omega_D - m_1 \omega_1 - m_2 \omega_2) dpdq,$$

$$S(m_2 \mathbf{k}_2) \text{ において, } S(\mathbf{k}) \propto k^{-4} \quad (\mathbf{k}_1 < \mathbf{k}_2)$$

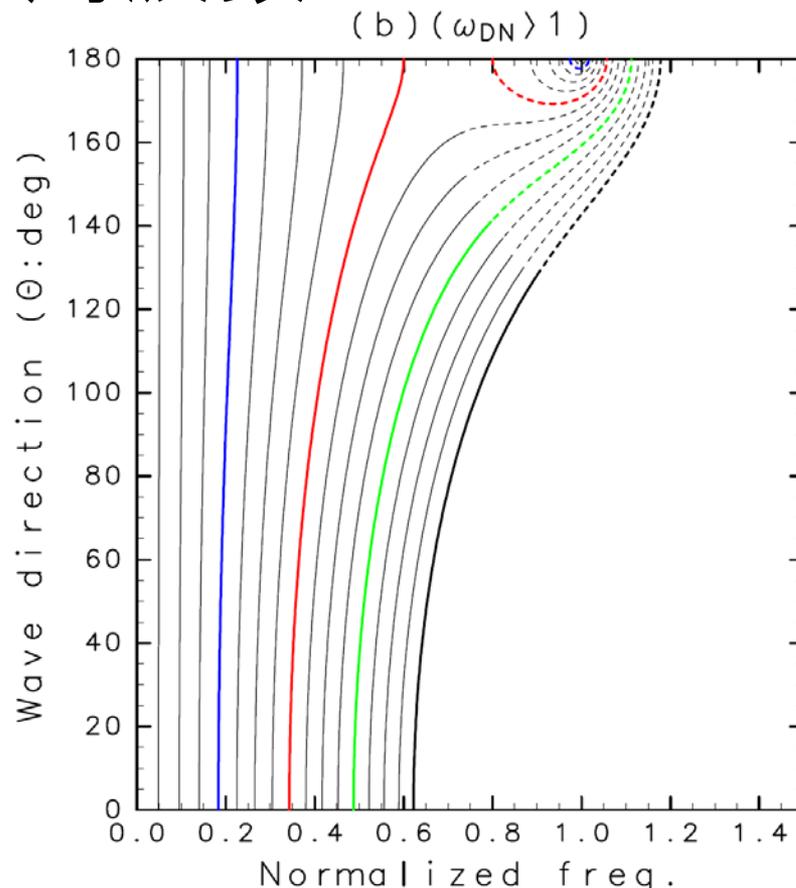
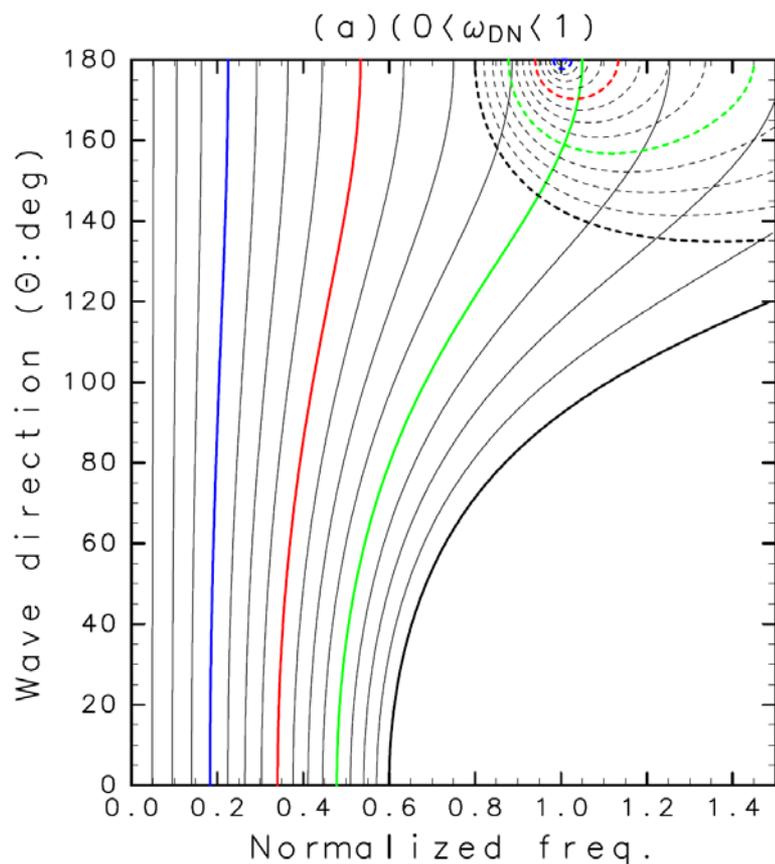
一次散乱で規格化した二次散乱  $P_{2N}(\omega_D) = \int_{-\pi}^{\pi} K(\omega_D, \theta) S(\mathbf{k}) d\theta$

Howell & Walsh (1993): 方向分布をフーリエ級数で展開

後続研究なし  $F(\omega, \theta) = \sum_{n=0}^2 [a_n(\omega) \cos(n\theta) + b_n(\omega) \sin(n\theta)]$

Wyatt(1990) 緩和法: 等ドップラー周波数上の  
(周波数, 方向)における波浪スペクトル

# 波の周波数及び方向に対する ドップラー周波数



実線: 波数ベクトル $m_1k_1$ に対応, 点線:  $m_2k_2$ に対応

青: 0.8, 赤: 0.6, 緑: 0.4

青: 1.2, 赤: 1.4, 緑: 1.6

# 線形インバージョン法

$$\sigma_2(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1=\pm 1} \sum_{m_2=\pm 1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Gamma_T^s|^2 S(m_1 \mathbf{k}_1) S(m_2 \mathbf{k}_2) \delta(\omega_D - m_1 \omega_1 - m_2 \omega_2) dpdq,$$

$S(m_2 \mathbf{k}_2)$  において,  $S(\mathbf{k}) \propto k^{-4}$

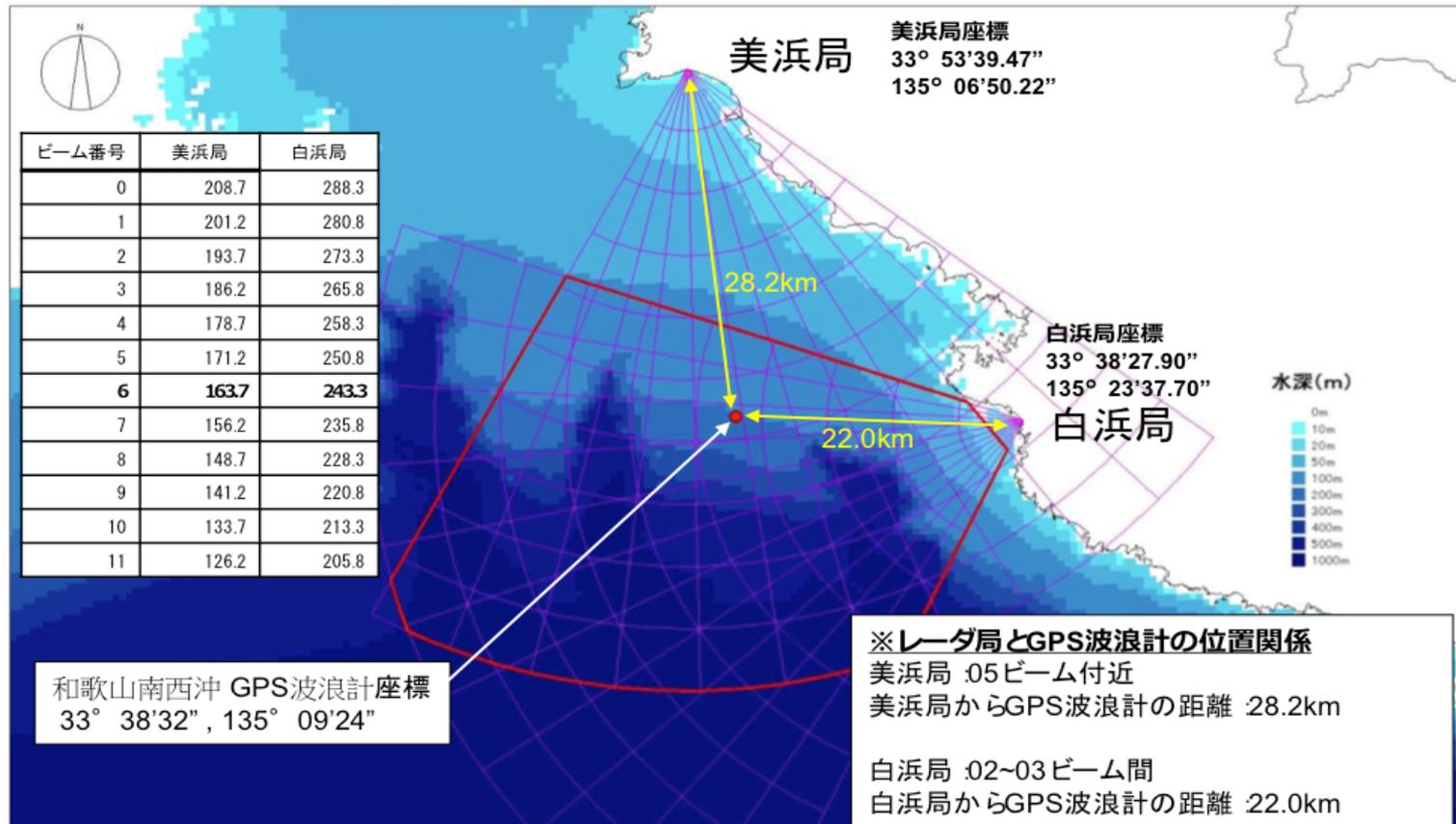
一次散乱で規格化した二次散乱  $P_{2N}(\omega_D) = \int_{-\pi}^{\pi} K(\omega_D, \theta) S(\mathbf{k}) d\theta$

Howell & Walsh (1993): 方向分布をフーリエ級数で展開

$$F(\omega, \theta) = \sum_{n=0}^2 [a_n(\omega) \cos(n\theta) + b_n(\omega) \sin(n\theta)]$$

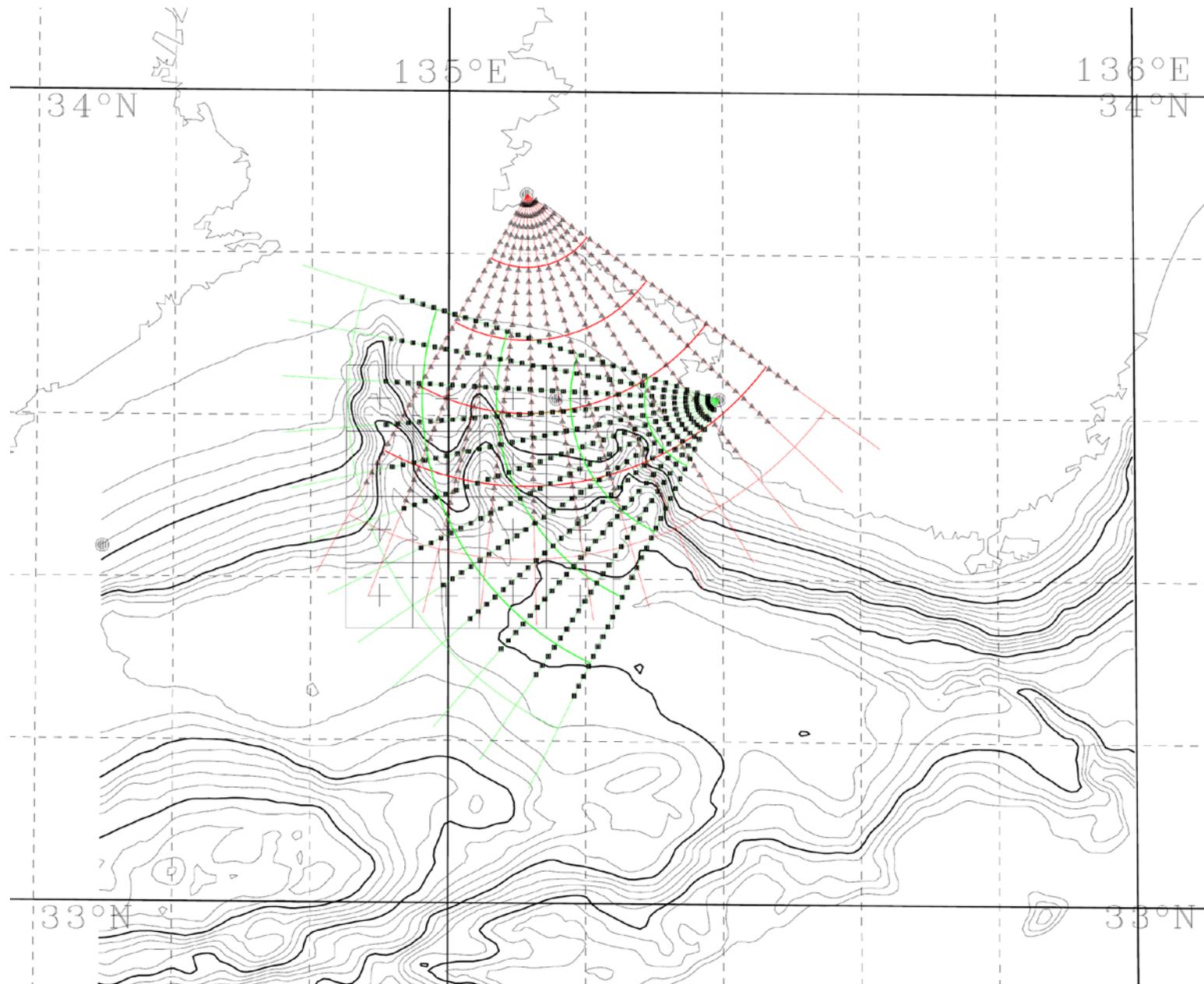
Wyatt(1990) 緩和法: 等ドップラー周波数上の  
(周波数, 方向)における波浪スペクトル: 適用例多数

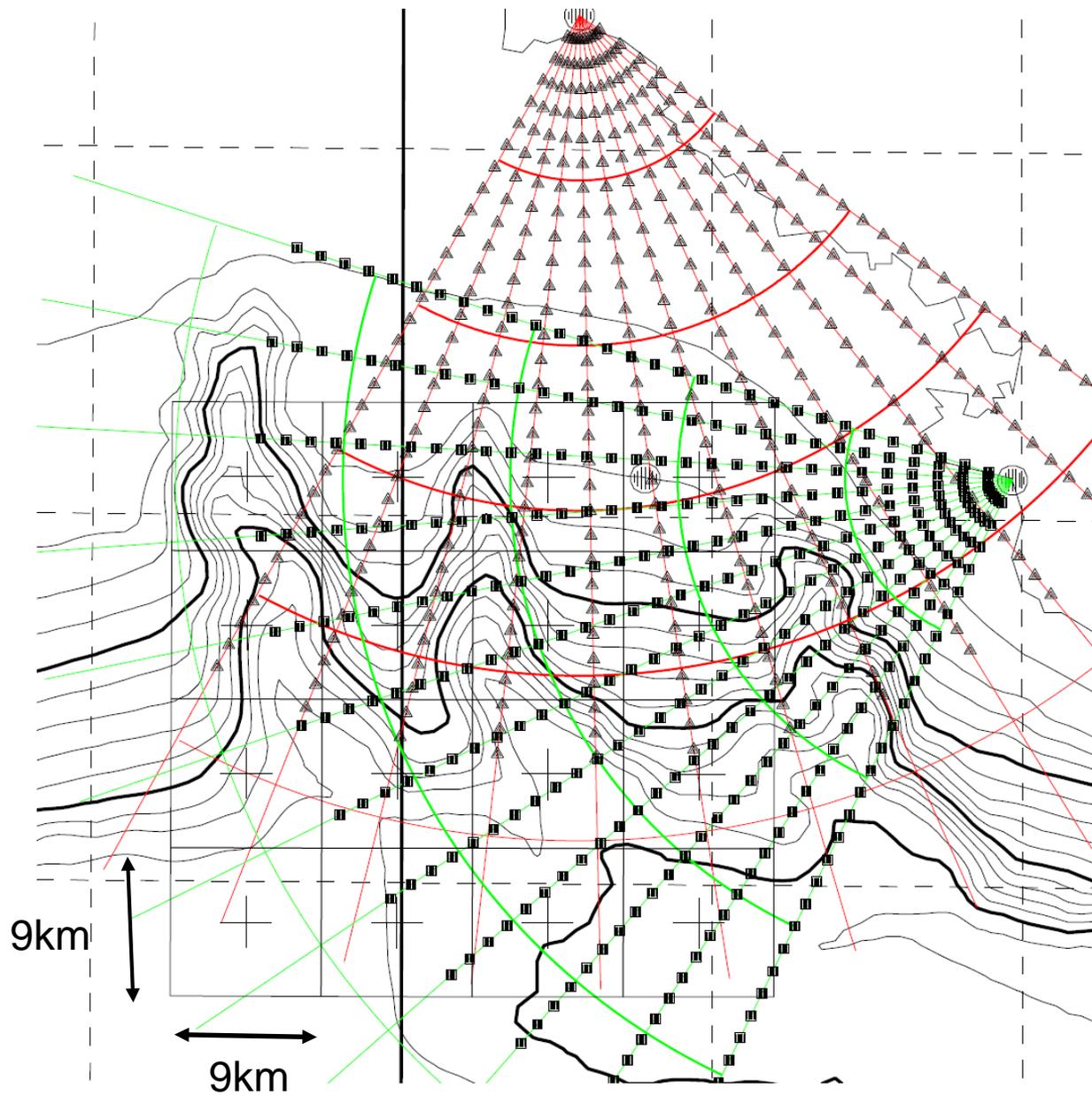
# 和歌山県沖海洋レーダ観測

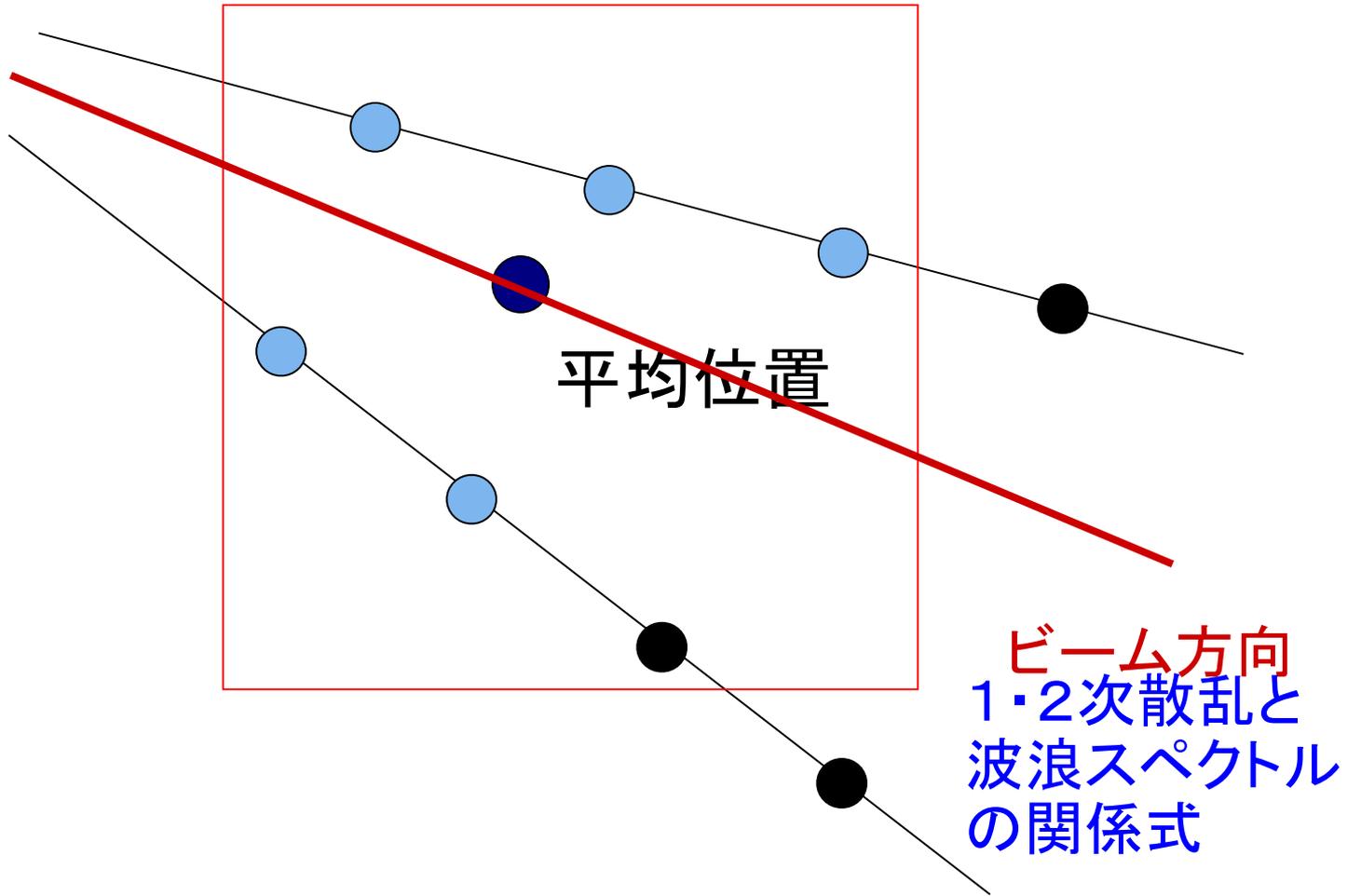


※ビーム番号は「反時計回りに00ビーム⇒11ビーム」

海洋レーダ:24.515MHz,  
15分毎:平均して1時間毎のドップラースペクトル  
初期解析:2014年4月4日から4月14日





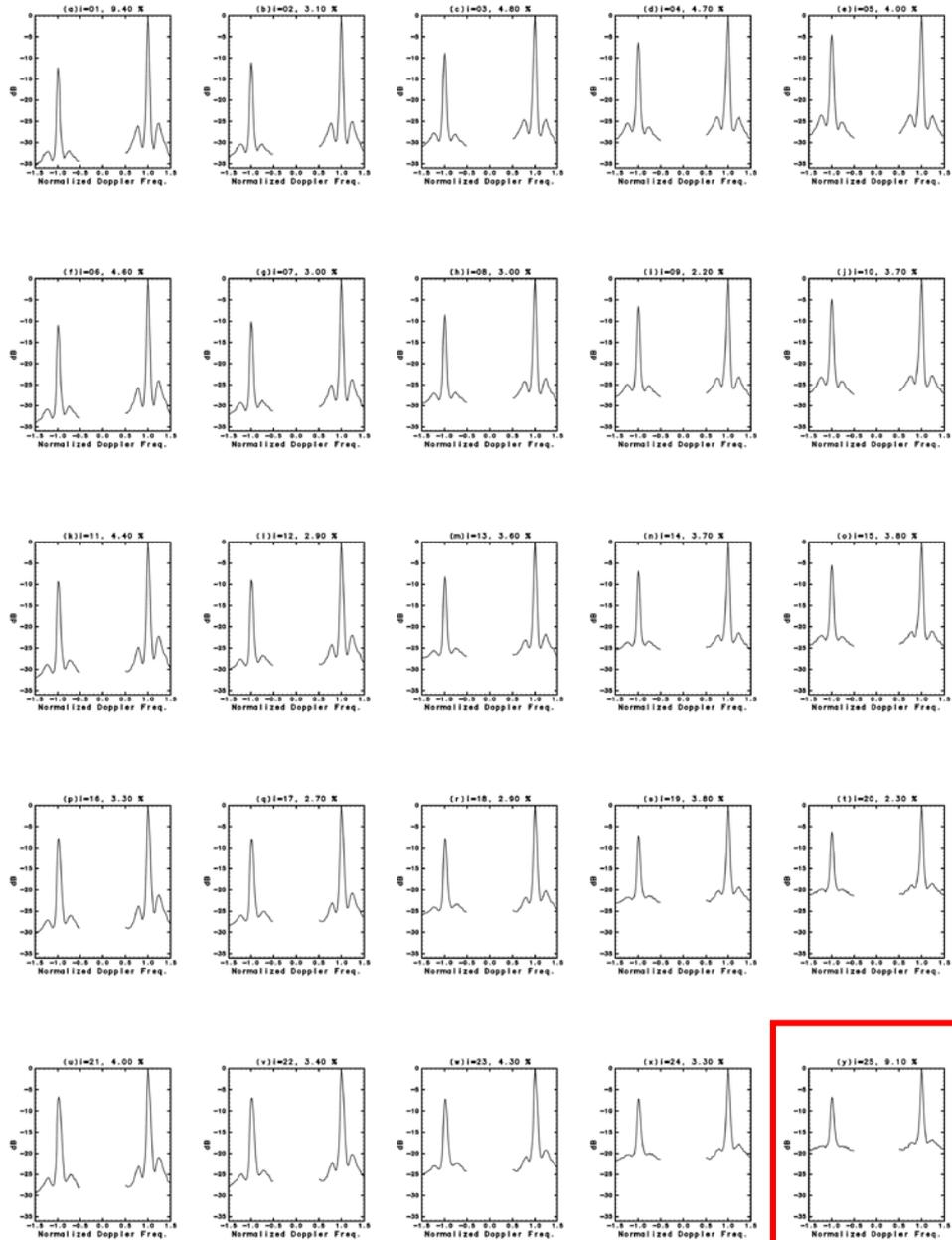


ドップラースペクトル選択(青色)  
ドップラースペクトルを平均

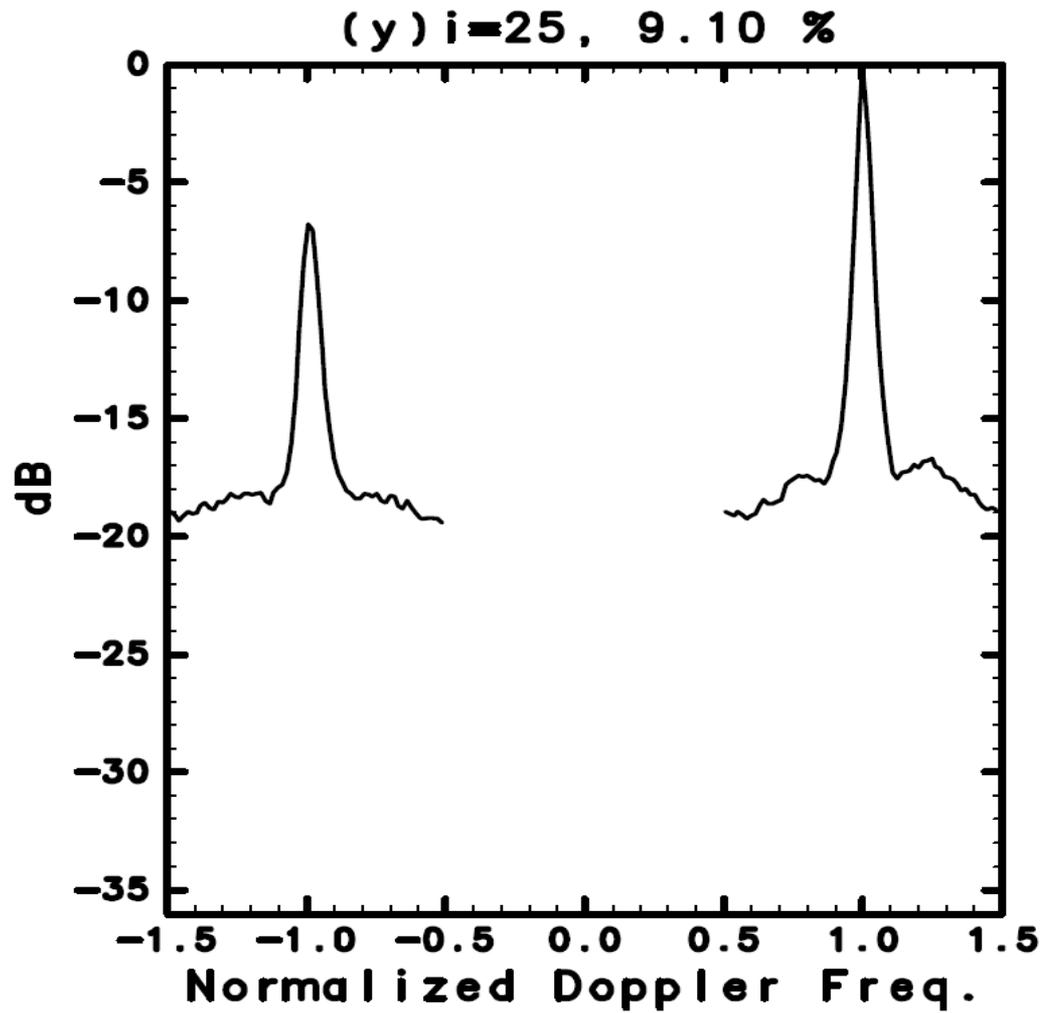
# ドップラースペクトル選択

- 探知距離を設定。
- 一次散乱が、ある程度の高いこと。
- 一次散乱域が同定できること。
- 自己組織化マップ(SOM)により,ドップラースペクトルの形を分類。
- 「二次散乱/一次散乱」比(簡易法)が,他のそれよりも,高いドップラースペクトルを除く。

# SOMにより,ドップラースペクトル分類



# グループ25



# 原理: 拘束条件

1. 1次散乱と波浪スペクトルの関係式
  2. 2次散乱と波浪スペクトルの関係式
  3. 波浪スペクトルエネルギー平衡方程式:  
スペクトル, 海上風速・風向
  4. 連続の式: 海上風速・風向
  5. スペクトル値が周波数-方向に対して滑らかに変化(正則化条件)
  6. エネルギー平衡方程式における伝搬項が小さい  
(正則化条件)
- (スペクトル: 周波数-方向平面上の格子点値)

# 最適化問題

$$U(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^{N_t} [\lambda_{wM} F_K(\mathbf{x})]^2$$

$\implies$  minimize

$F_K$ : 拘束条件式

$\mathbf{x}$ : 未知数(スペクトル+風向・風速)  $N_t$ : 方程式個数

$\lambda_{wM}$  ( $M = 1, \dots, 6$ ): 重み(拘束条件の種類等に依存)

未知数個数:6080

# 最適化アルゴリズム

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= (\lambda_{w1}F_1, \dots, \lambda_{w6}F_{N_t}) \\ \mathbf{d}_m &= -\mathbf{H}^{(m)}\nabla U = -\mathbf{H}^{(m)}\mathbf{J}_F^T\mathbf{F}, \\ \mathbf{x}^{(m+1)} &= \mathbf{x}^{(m)} + \alpha_m\mathbf{d}_m, \\ \mathbf{J}_F(K, L) &= \lambda_{wM}\frac{\partial F_K}{\partial x_L^{(m)}} \\ &\quad (K = 1, \dots, N_t) \\ &\quad (L = 1, \dots, N_u).\end{aligned}$$

$m$ : step number,  $\alpha_m > 0$ : as  $U(\mathbf{x}^{(m+1)}) < U(\mathbf{x}^{(m)})$ .

$\mathbf{x}^{(m)} = (x_1^{(m)}, \dots, x_{N_u}^{(m)})$ :  $\mathbf{x}$  for the  $m$ th step.

$\mathbf{J}_F$ : Jacobian matrix,

$\mathbf{H}^{(m)}$ :  $N_u \times N_u$  positive definite matrix.

$$\mathbf{H}^{(m)} = (\mathbf{J}_F^T\mathbf{J}_F + \gamma\mathbf{I})^{-1}, \text{ (Levenberg - Marquardt Method)}$$

$$\mathbf{H}^{(m)} = [\text{diag}(\mathbf{J}_F^T\mathbf{J}_F)]^{-1} \quad \text{可能}$$

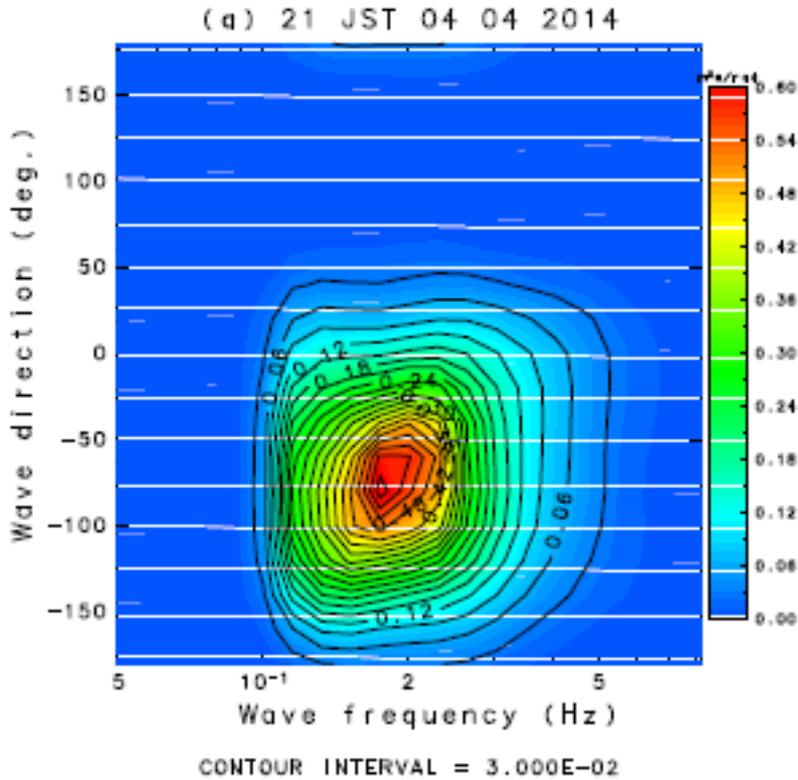
$$\mathbf{H}^{(m)} = [\text{diag}(\mathbf{J}_F^T\mathbf{J}_F) + \mathbf{I}]^{-1},$$

$$\mathbf{H}^{(m)} = \mathbf{I}, \text{ (steepest descent method).}$$

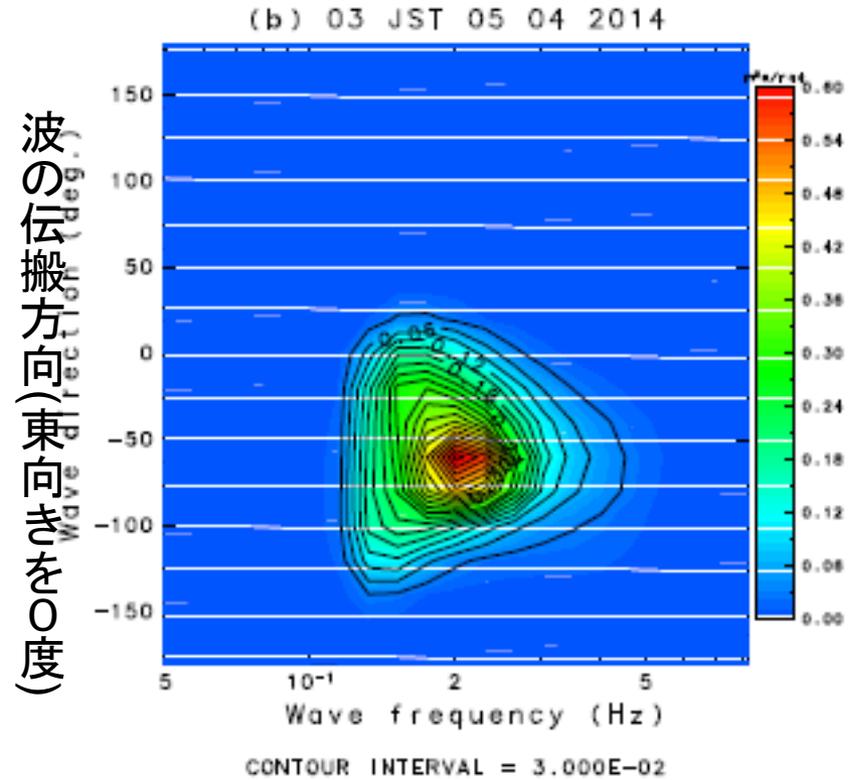
困難

$\mathbf{I}$ : Unit matrix.

# 波浪スペクトル推定例



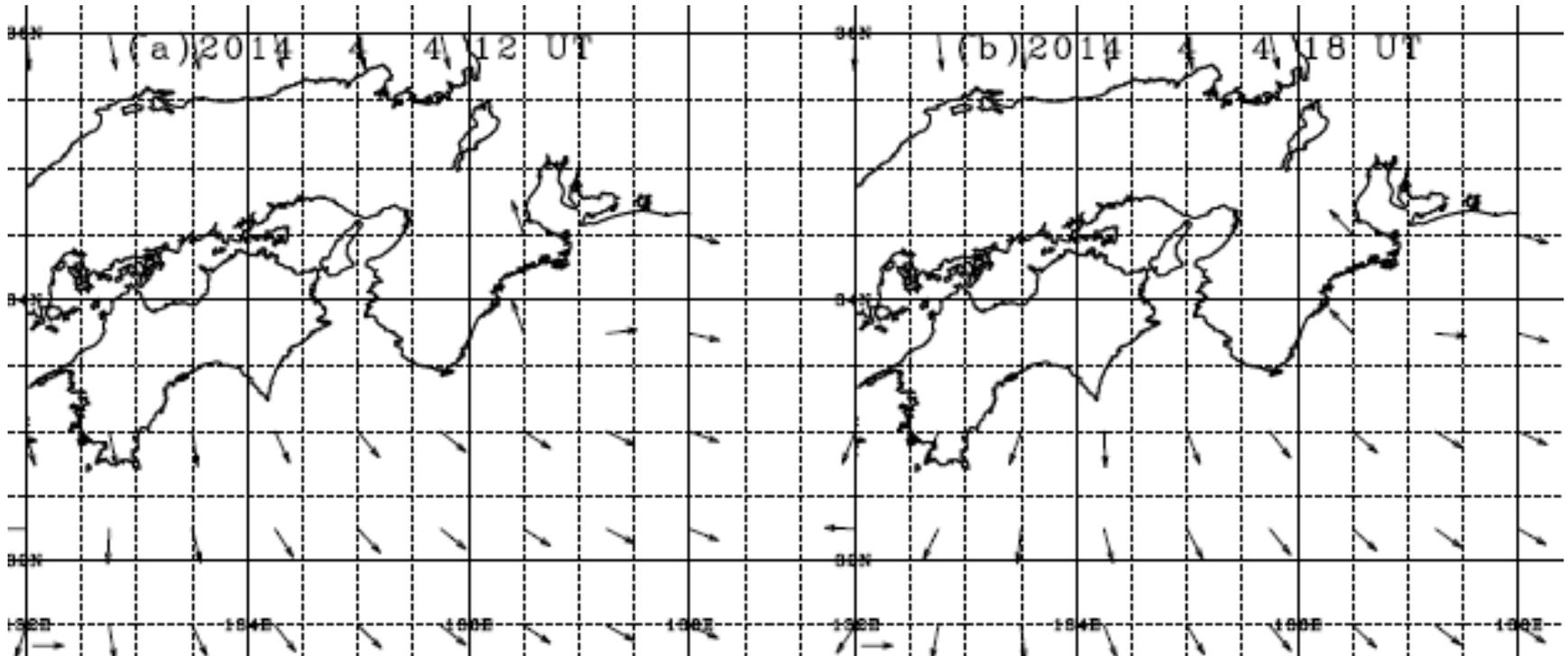
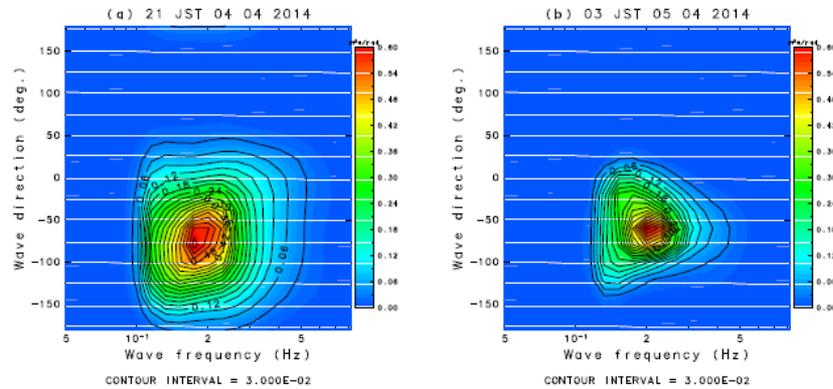
GPS=2.1m, Radar=2.68m



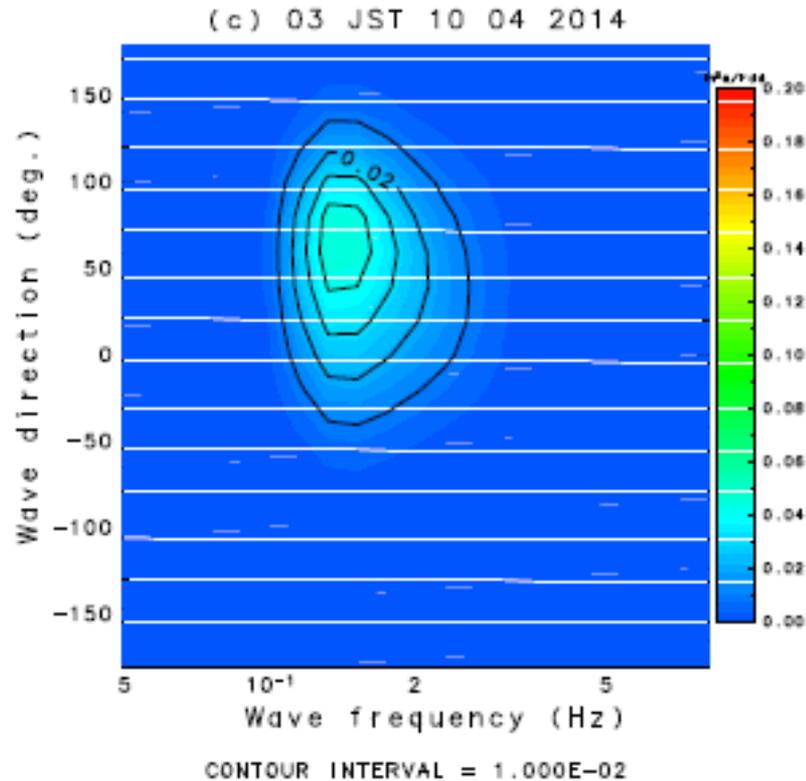
周波数

GPS=2.0m, Radar=1.81m

# ERA-Interim平均波向き

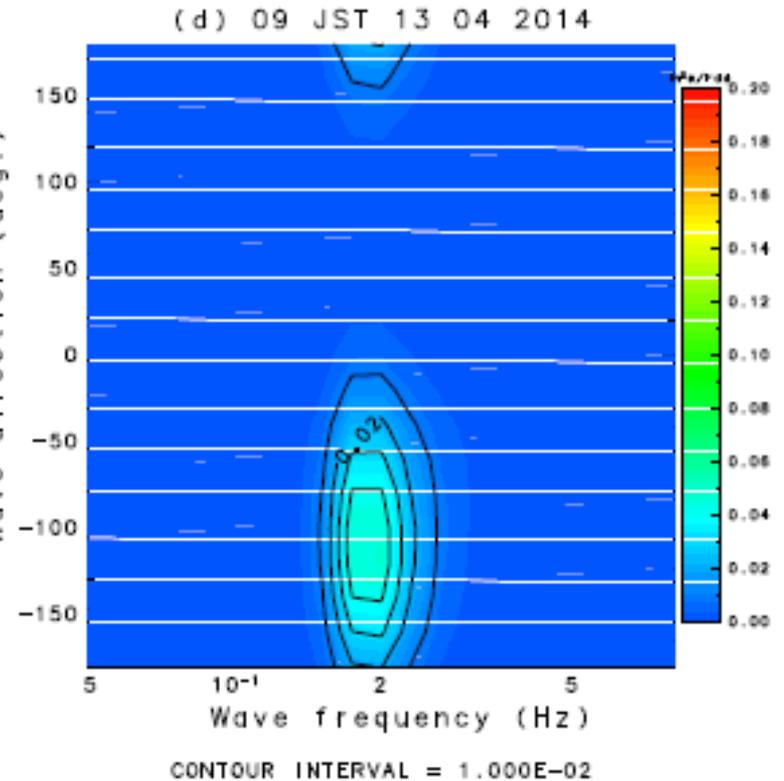


# 波浪スペクトル推定例



GPS=0.5m, Radar=0.57m

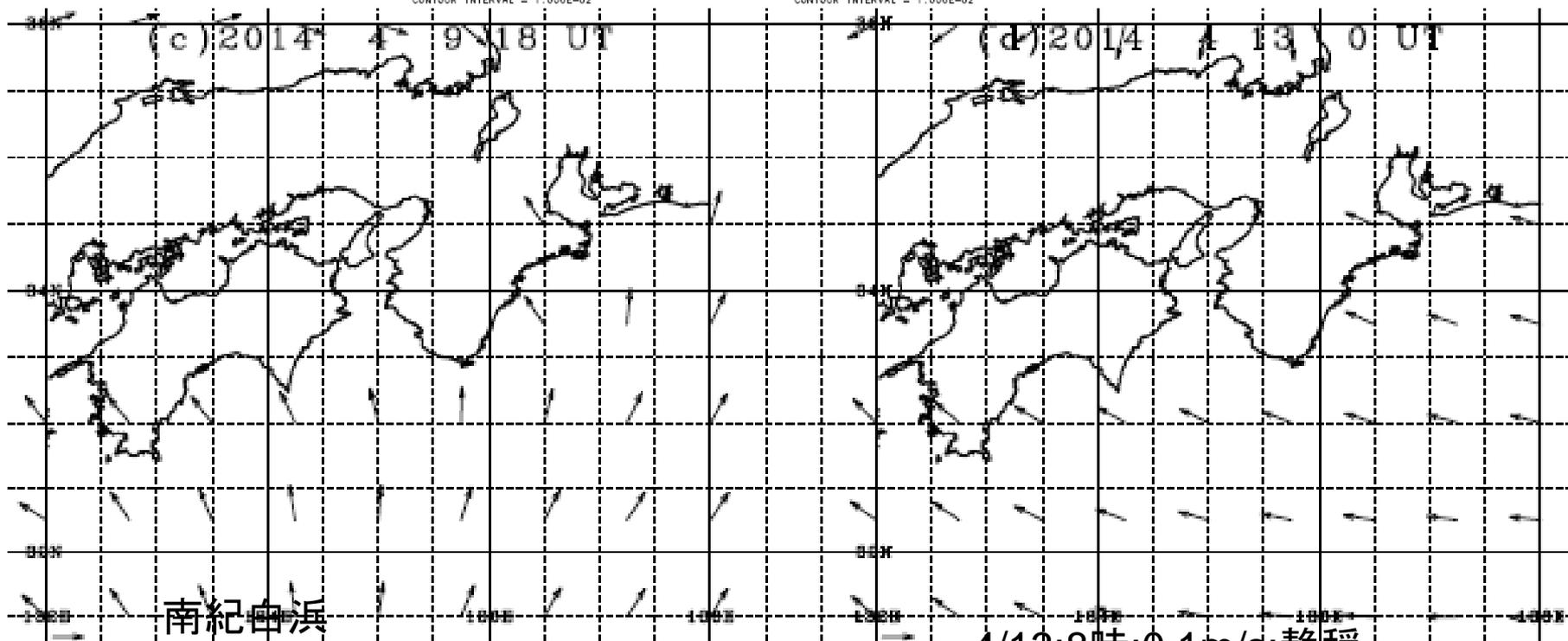
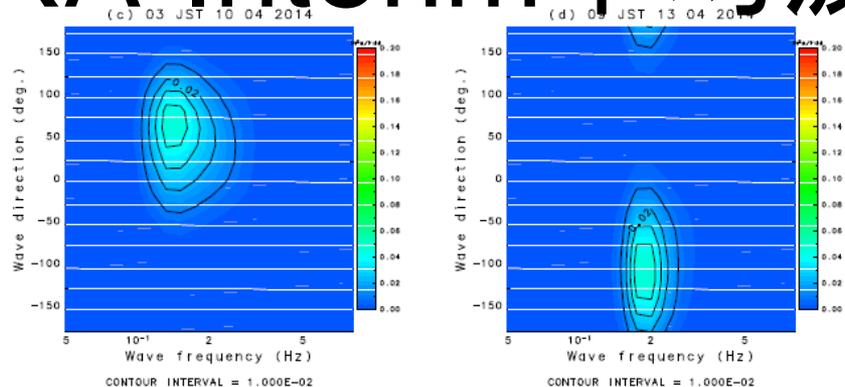
波の伝搬方向(東向きを0度)



周波数

GPS=0.5m, Radar=0.55m

# ERA-Interim平均波向き

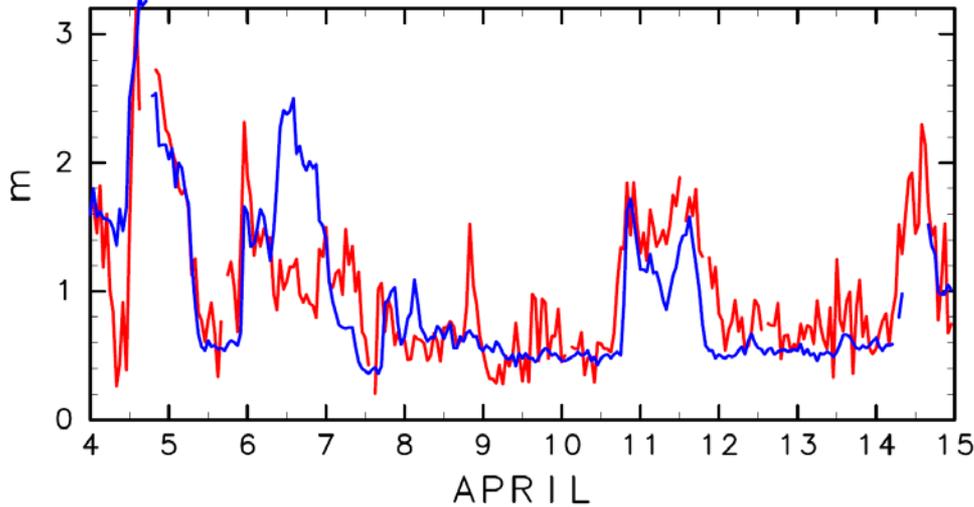


4/10:3時 0m/s:静穏  
4/10:4時 0.5m/s:南南西

4/13:8時:0.1m/s:静穏  
4/13:9時:2.4m/s:北東  
4/13:10時:0.5m/s:南南東

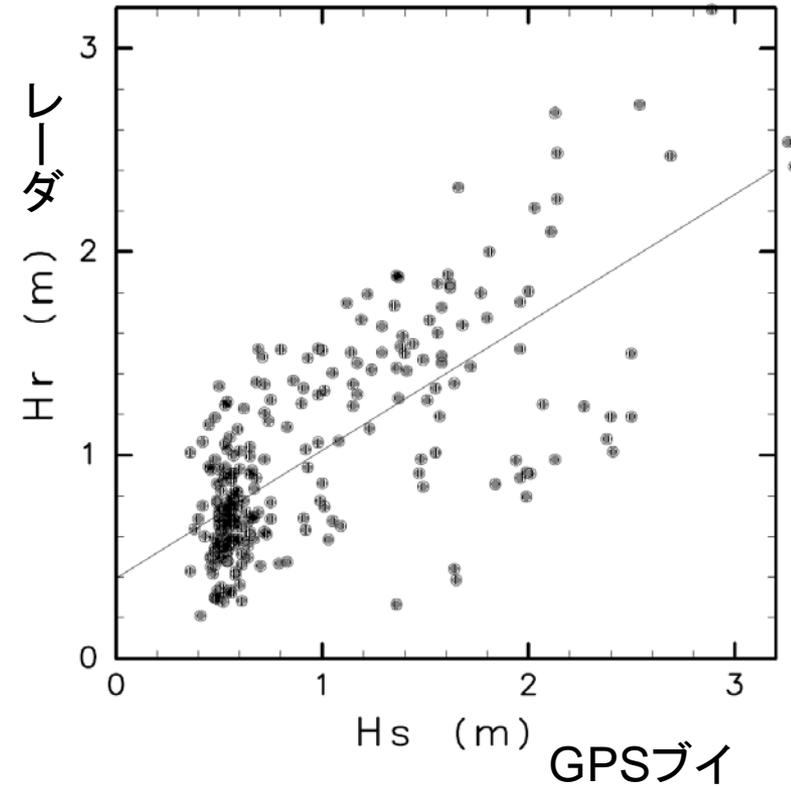
# 波高の比較

(a) Time series of wave heights



青:GPS, 赤:レーダ

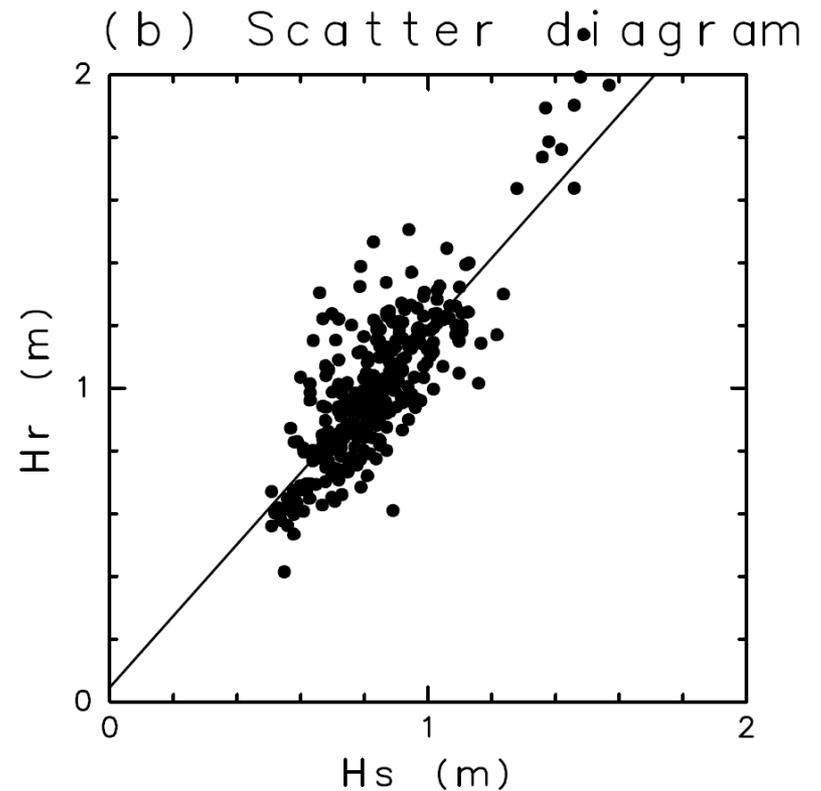
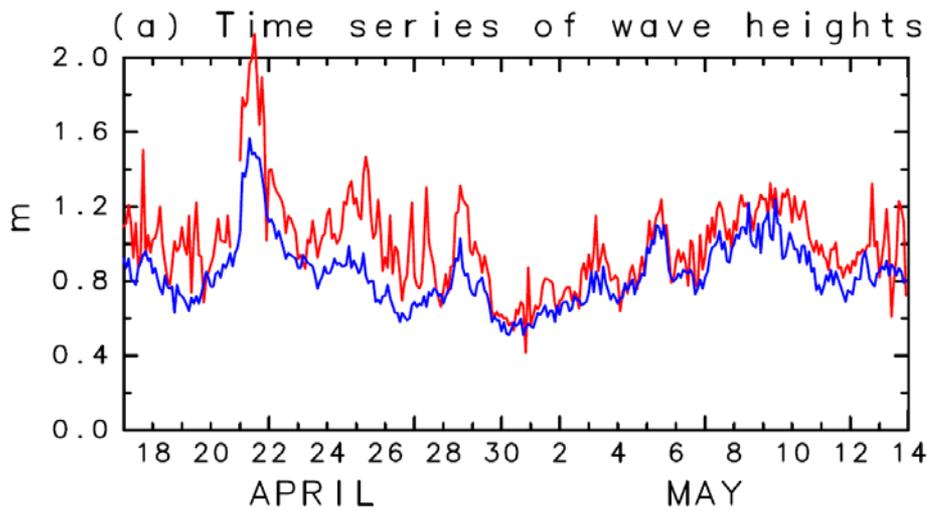
(b) Scatter diagram



相関係数= 0.721, RMSD= 0.428m, データ数=248

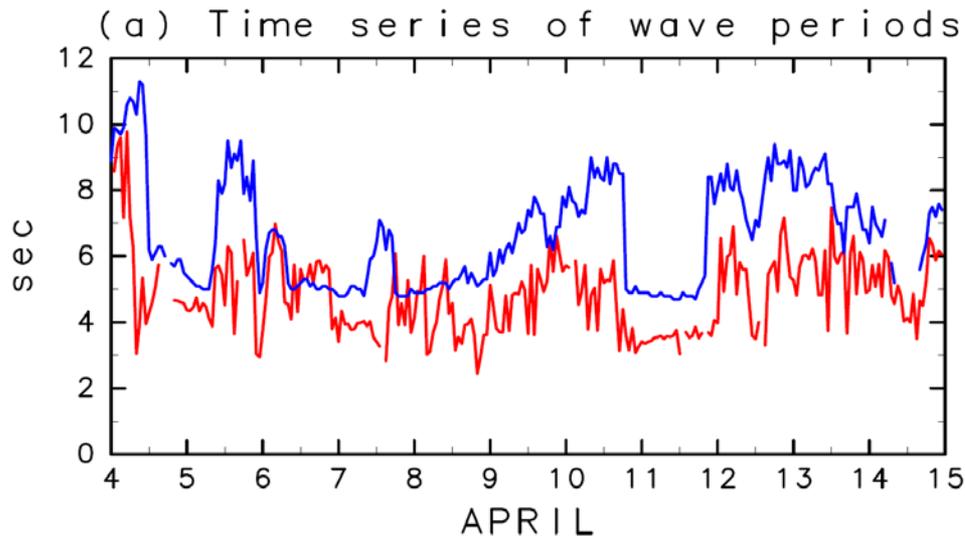
DS無し= 3, Outlier= 6, GPS欠測= 6, 計=15

# 過去の波高比較例(Hisaki,2015)



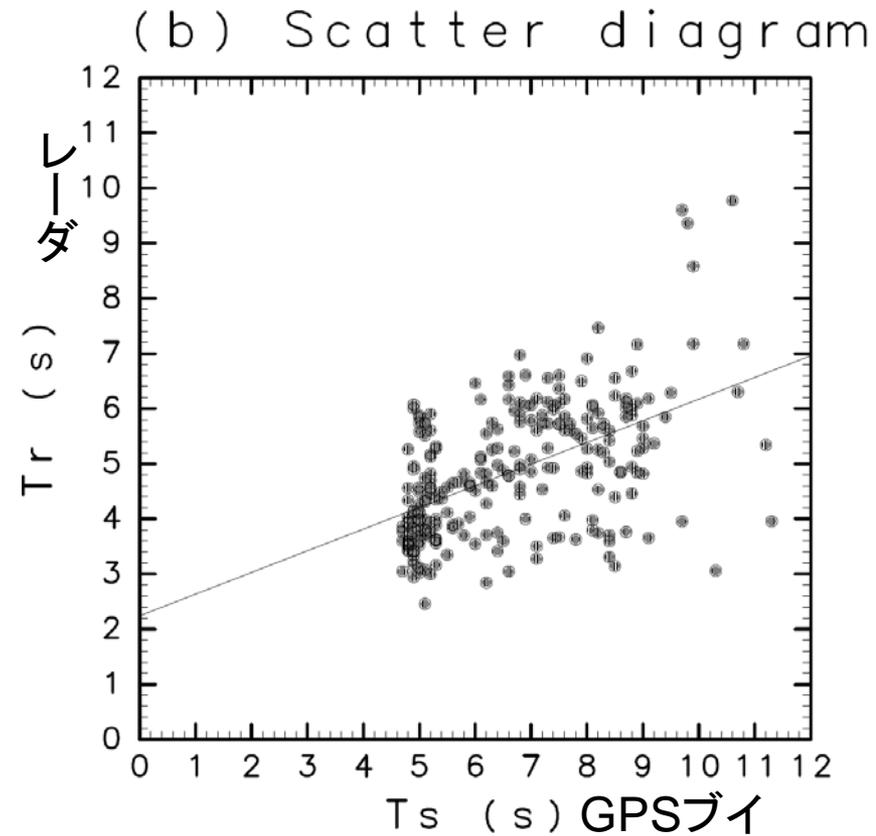
相関係数= 0.82,RMSD= 0.22m, データ数=321

# 周期の比較



青:GPS, 赤:レーダ

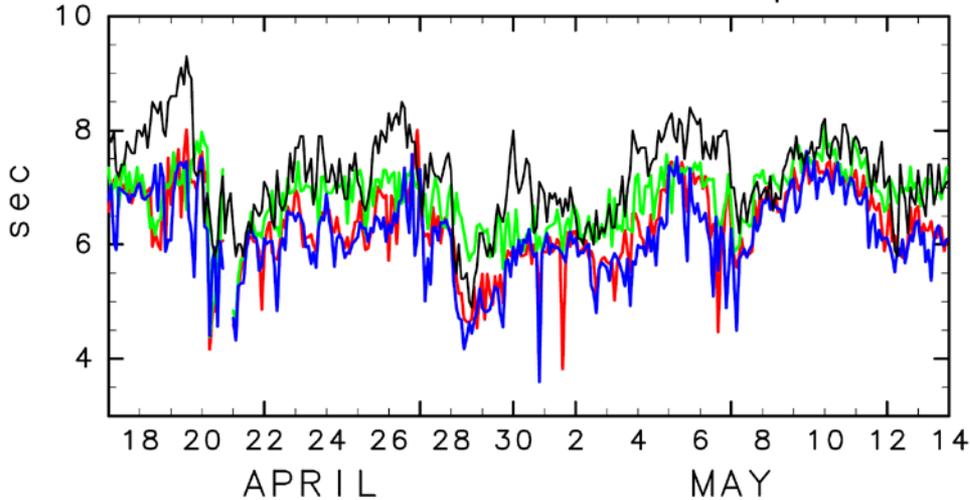
相関係数= 0.524



# 過去の周期比較例(Hisaki,2016)

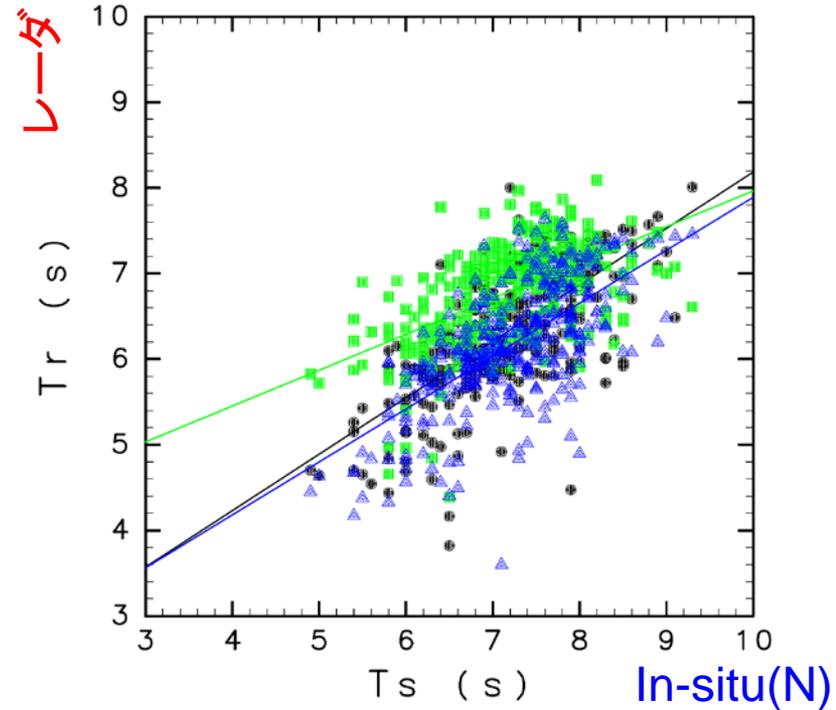
現場観測による有義波周期:黒色,  
2基のレーダ:赤色,  
レーダ A: 緑色,  
レーダ B: 青色.

(c) Time series of wave periods



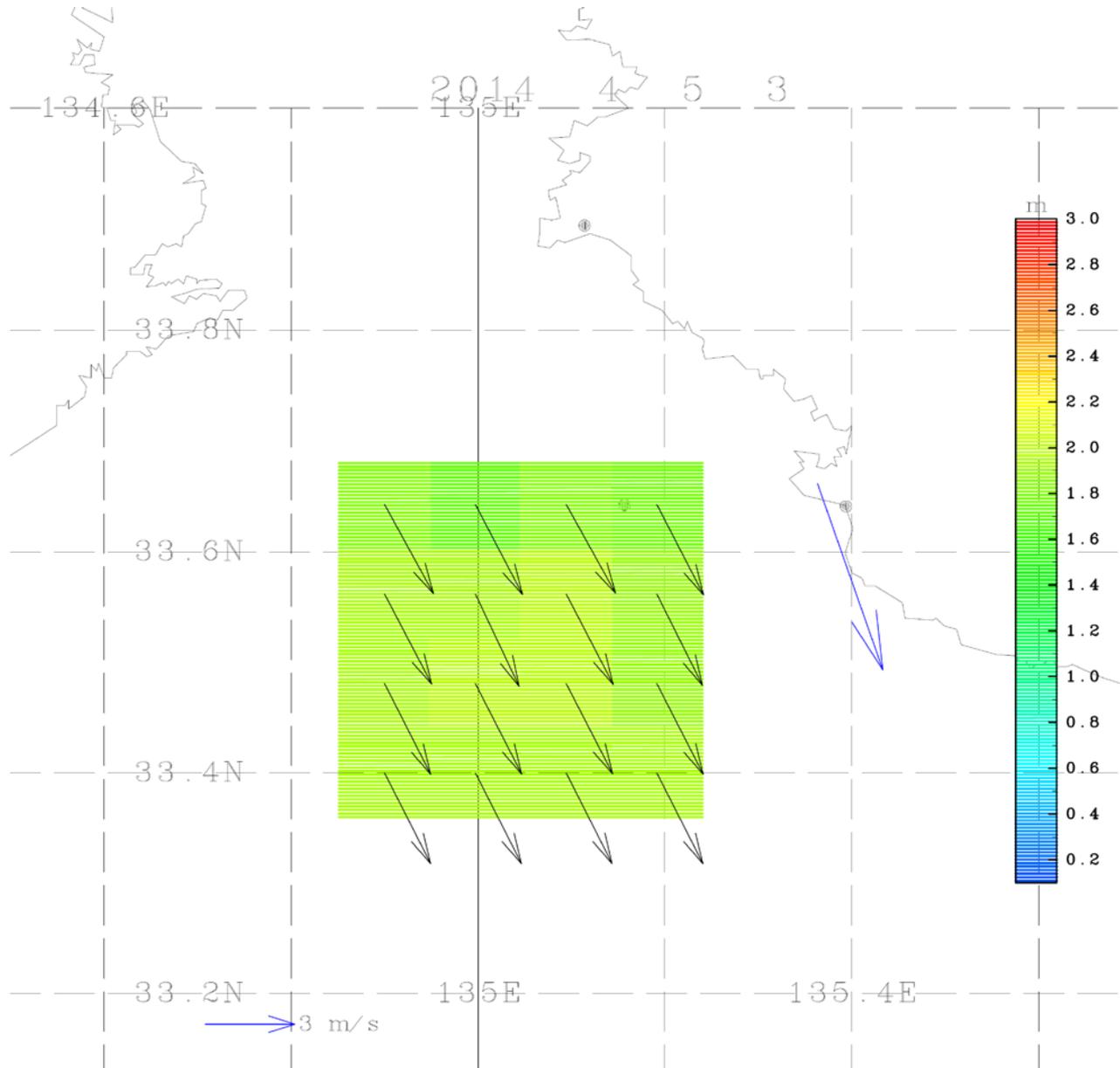
2基のレーダ: Cor.=0.69.  
レーダ A: Cor.=0.56.  
レーダ B: Cor.=0.66.

(d) Scatter diagram

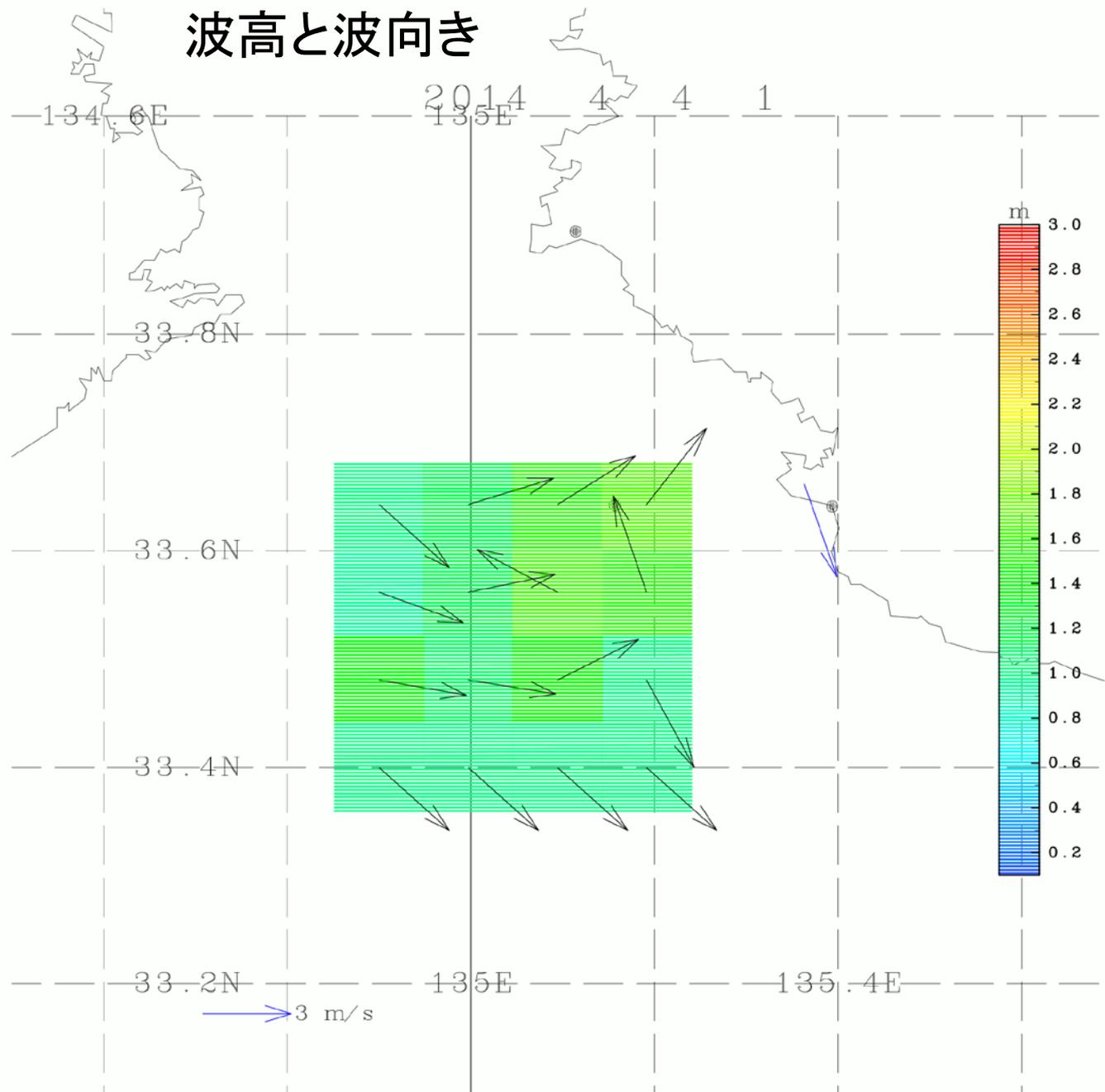


現場観測による有義波  
周期との比較:  
2基のレーダ: 黒色,  
レーダ A: 緑色,  
レーダ B: 青色.

# 波高と波向き

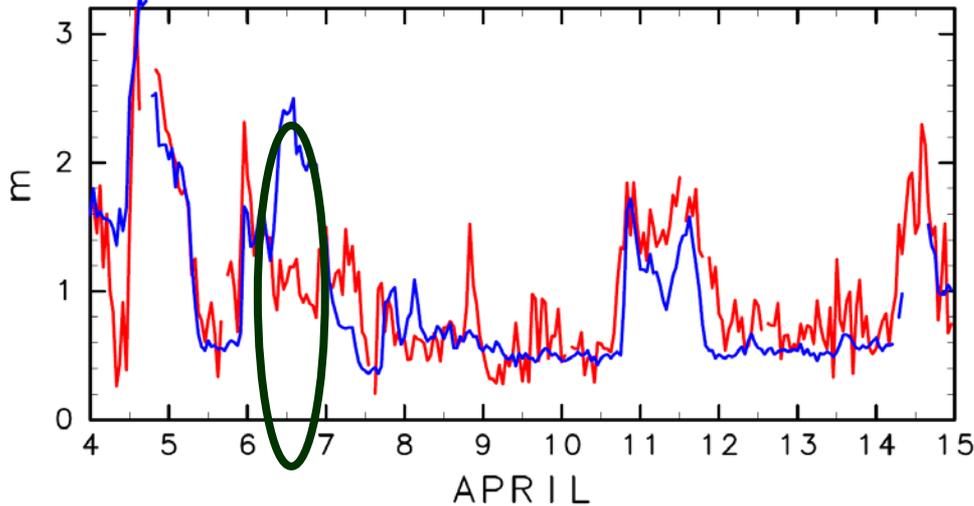


# 波高と波向き



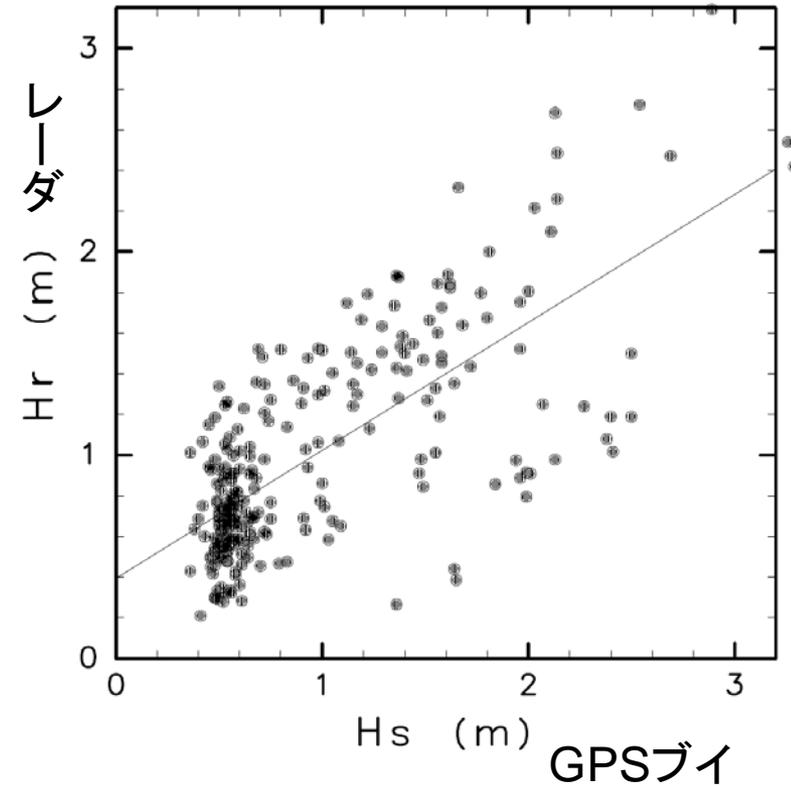
# 波高の比較

(a) Time series of wave heights



青:GPS, 赤:レーダ

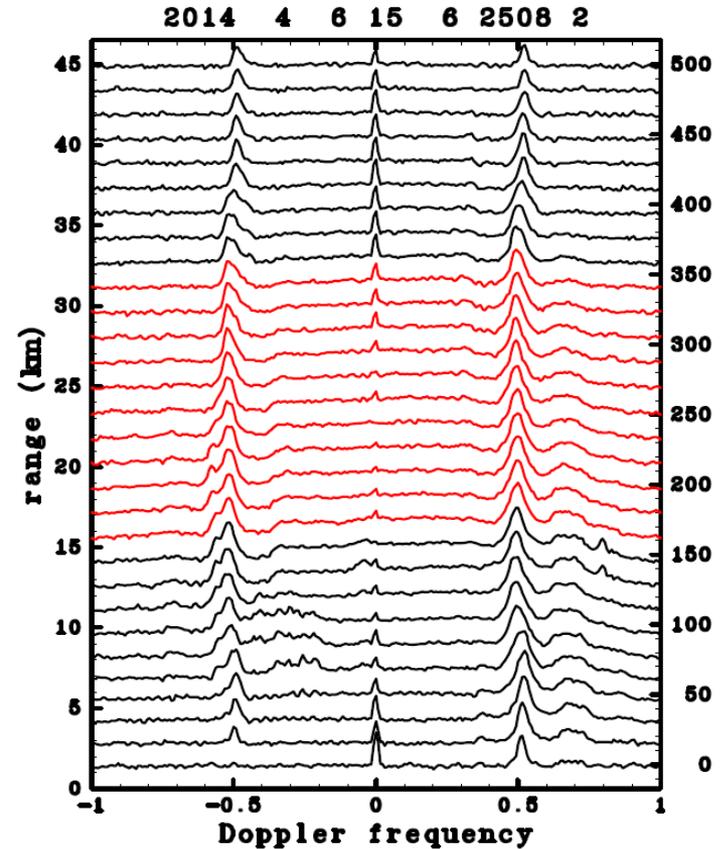
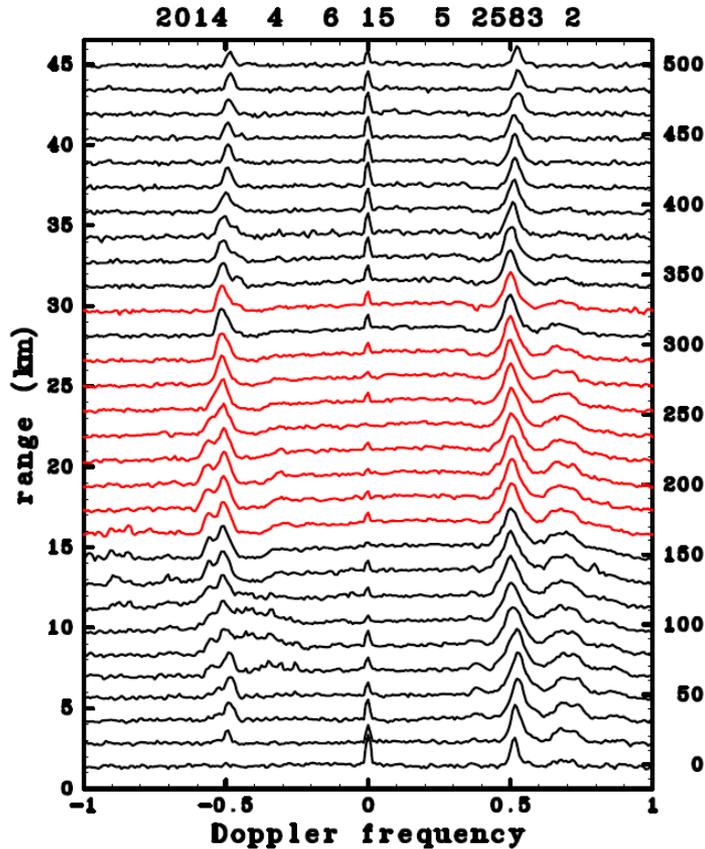
(b) Scatter diagram



相関係数= 0.721, RMSD= 0.428m, データ数=248

DS無し= 3, Outlier= 6, GPS欠測= 6, 計=15

# 選択ドップラースペクトル(赤)の例

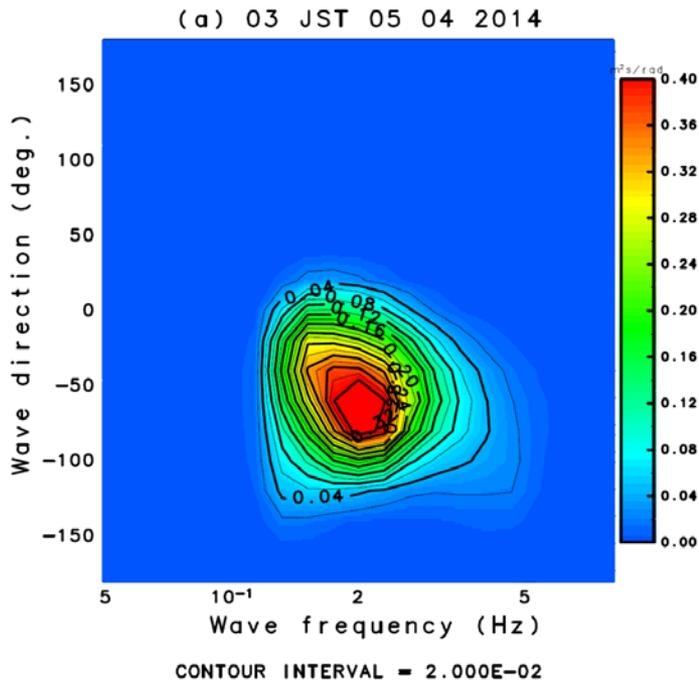


# まとめと今後の課題

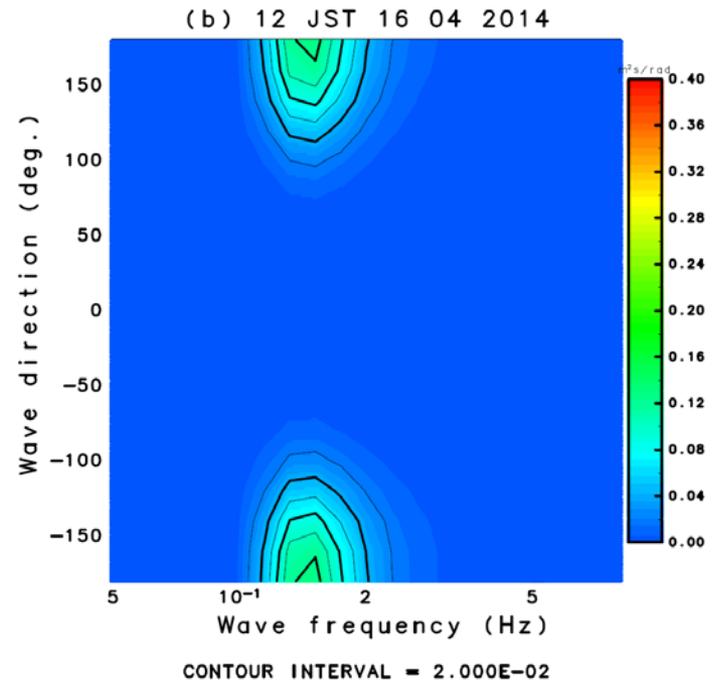
- 波浪推定手法には4つのタイプがある。
- 前回(Hisaki,2015,2016)と同じパラメータで波浪スペクトル推定を行った。
- GPSブイ波高と概ね一致。ただ精度は前回より低い。
- ドップラーズスペクトル選択方法の改良。
- 解析期間拡大
- 分解能の向上。

終わり

# 波浪スペクトル推定例



波の伝搬方向(東向きを0度)



周波数

Radar=1.82 m GPS=1.62 m

# ERA-Interim平均波向き

