

複数及び単一の海洋レーダ による波浪スペクトルの比較

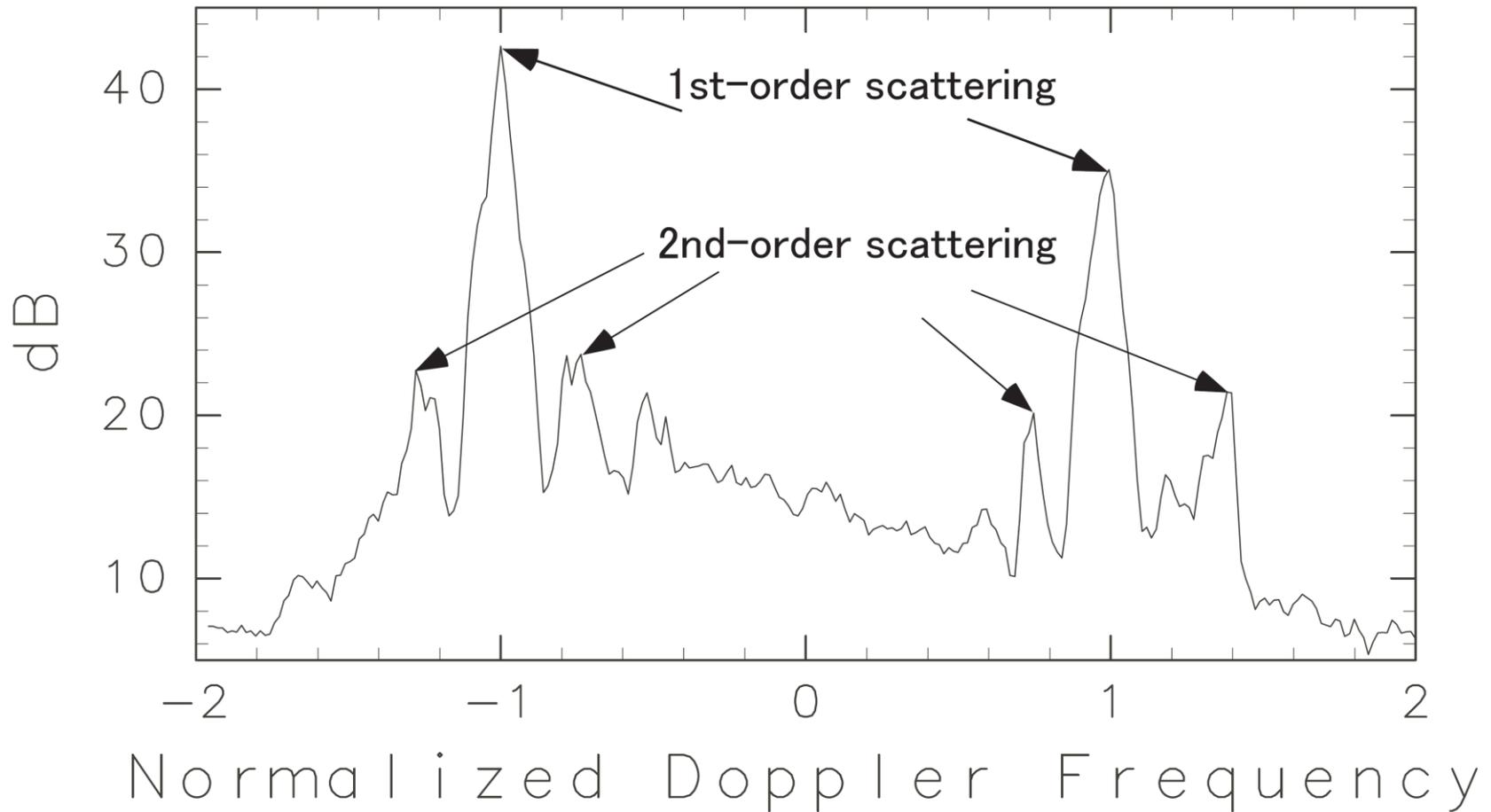
久木幸治
(琉球大学理学部)

はじめに:背景

- 海洋レーダ:二基使用
- 一基しか使えない場合もある。
- 一基のレーダによる波浪スペクトル推定の例
- de Valk, C.,他(1999), Hisaki(2005,2006, 2009, 2014):レーダを中心とする極座標格子点上:一基専用
- Hisaki(2015):一基でも複数基でも適用可能

ドップラースペクトル(DS)の例

Doppler Spectrum



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

ドップラースペクトル(DS)は
レーダ散乱断面積に比例

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

$$\sigma_2(\omega_D) = 2^6 \pi k_0^4 \sum_{m_1=\pm 1} \sum_{m_2=\pm 1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Gamma|^2$$

$$S(m_1\mathbf{k}_1) S(m_2\mathbf{k}_2)$$

$$\delta(\omega_D - m_1(gk_1)^{\frac{1}{2}} - m_2(gk_2)^{\frac{1}{2}}) dpdq$$

ω_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:

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

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

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

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. 波浪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)
- 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)

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

\implies minimize

F_K :制約条件式

\mathbf{q} :未知数(波浪スペクトル, 風速・風向): N_u 次ベクトル

N_t :制約条件式の個数

λ_{wM} ($M = 1, \dots, 6$):重み

$$\mathbf{F} = (\lambda_{w1}F_1, \dots, \lambda_{w6}F_{N_t})$$

$$\mathbf{d}_m = -\mathbf{H}^{(m)}\nabla U = -\mathbf{H}^{(m)}\mathbf{J}_F^T\mathbf{F},$$

$$\mathbf{q}^{(m+1)} = \mathbf{q}^{(m)} + \alpha_m\mathbf{d}_m,$$

$$J_F(K, L) = \lambda_{wM} \frac{\partial F_K}{\partial q_L^{(m)}}$$

$$(K = 1, \dots, N_t)$$

$$(L = 1, \dots, N_u).$$

m : 繰り返し数, $\alpha_m > 0$: $U(\mathbf{q}^{(m+1)}) < U(\mathbf{q}^{(m)})$ とする.

$\mathbf{q}^{(m)} = (q_1^{(m)}, \dots, q_{N_u}^{(m)})$: 繰り返し数 m における \mathbf{q}

J_F : Jacobian 行列,

$\mathbf{H}^{(m)}$: $N_u \times N_u$ 正定値行列.

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

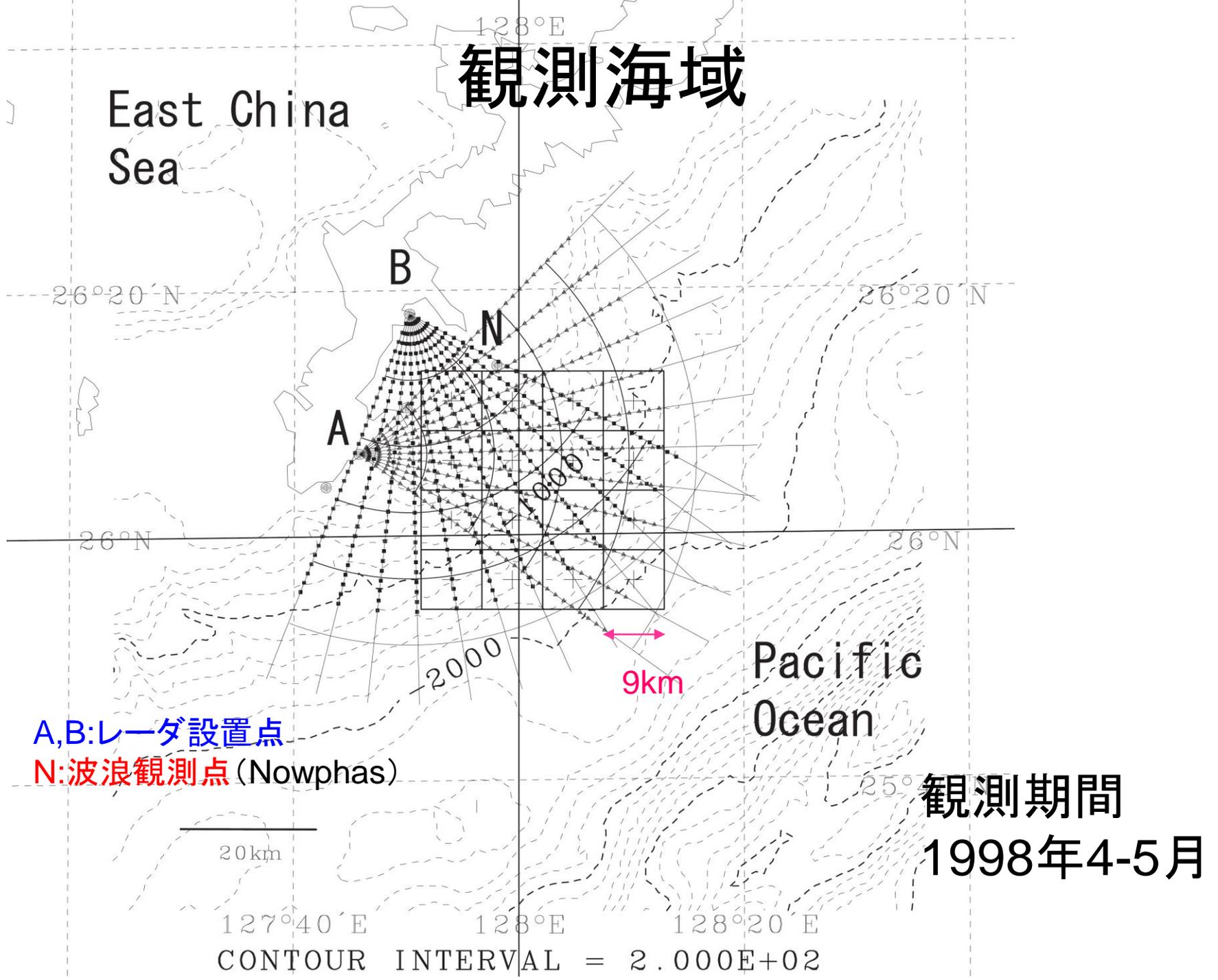
$$\mathbf{H}^{(m)} = [\text{diag}(\mathbf{J}_F^T \mathbf{J}_F) + \mathbf{I}]^{-1},$$

$$\mathbf{H}^{(m)} = \mathbf{I} \quad , (\text{最急効果法}).$$

\mathbf{I} : 単位行列. diag : 対角行列

観測海域

East China
Sea



A,B:レーダ設置点

N:波浪観測点 (Nowphas)

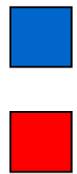
Pacific
Ocean

観測期間
1998年4-5月

127°40' E 128°E 128°20' E
CONTOUR INTERVAL = 2.000E+02

レーダA

レーダB



平均位置



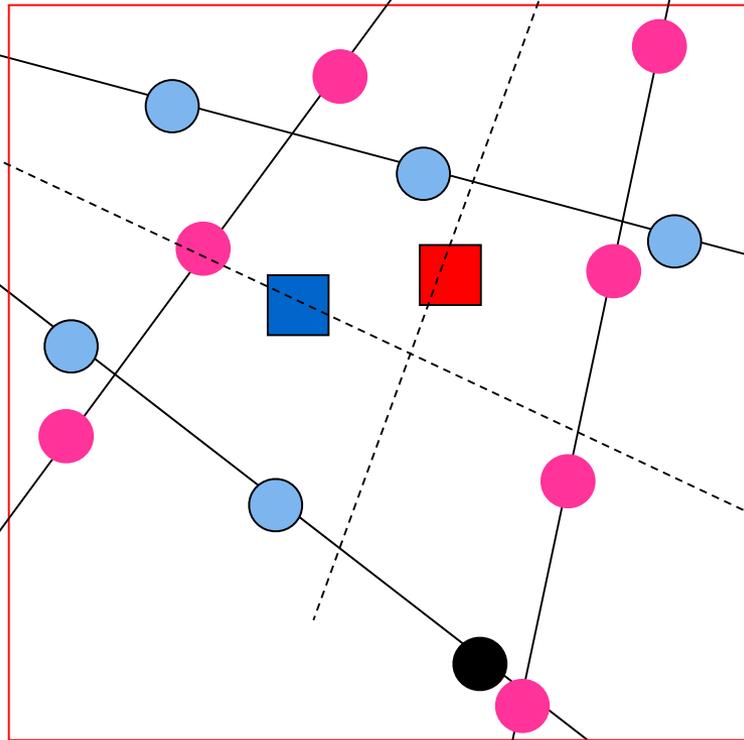
レーダAのDS



レーダBのDS(ドップラースペクトル)



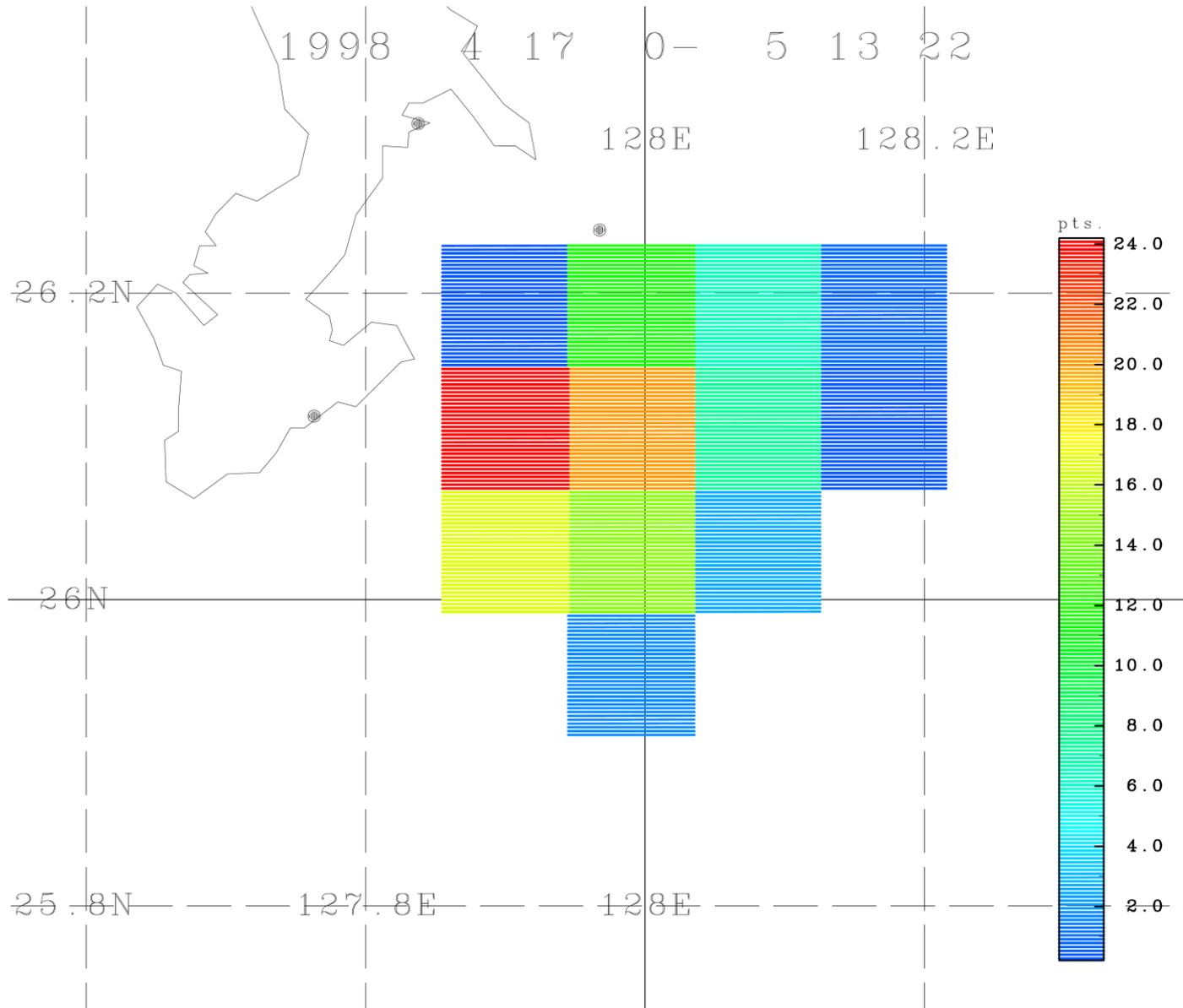
波浪推定に使わなかったDS



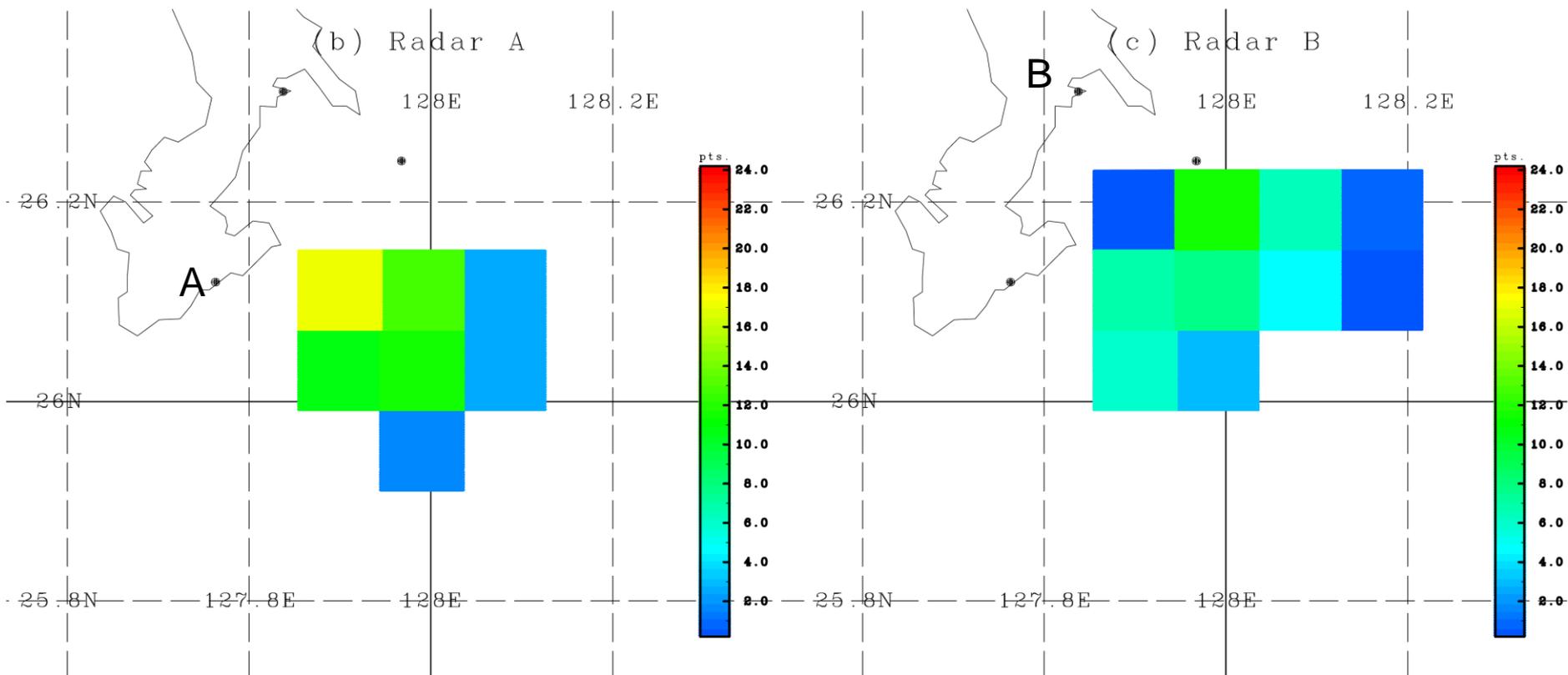
レーダA:5
レーダB:7

重みは平均した
DSの個数に比例

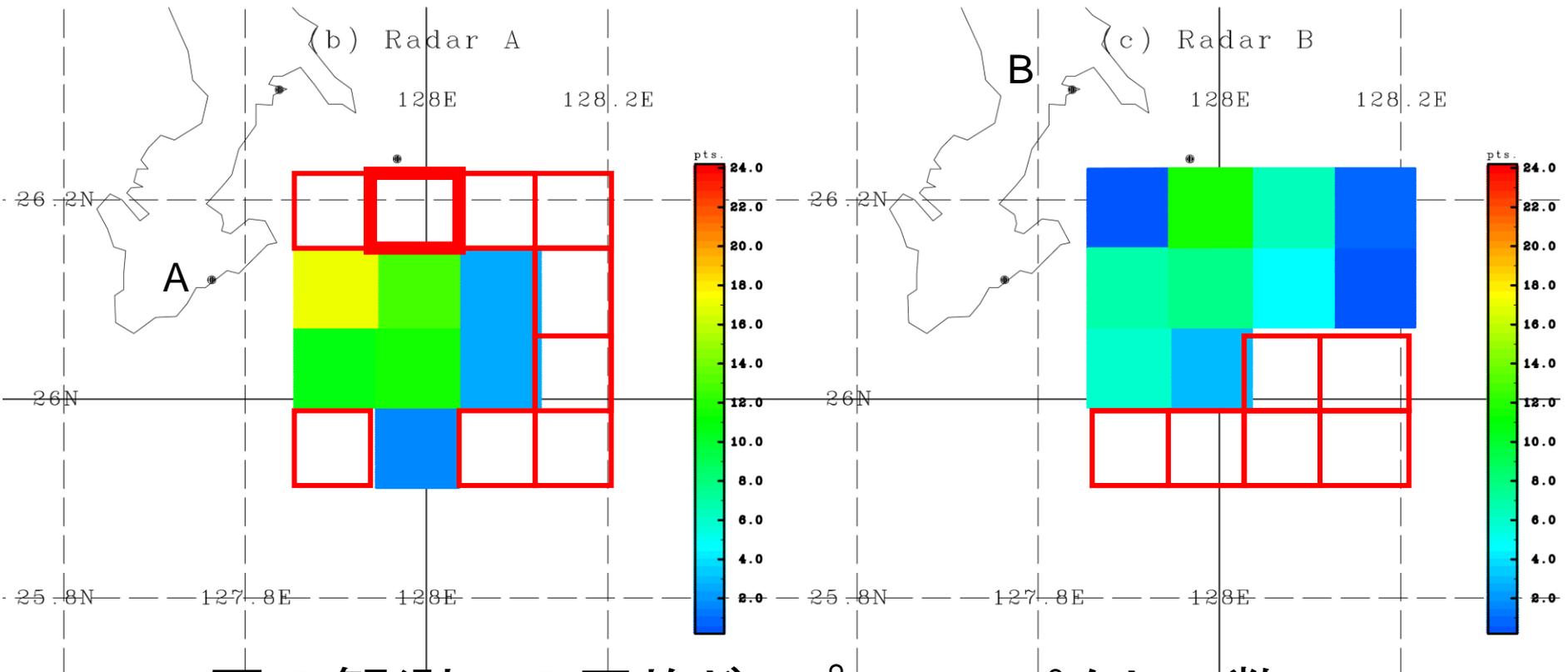
一回の観測における平均ドップラーズペクトル数



一回の観測における 平均ドップラースペクトル数 (レーダ A & B)



一回の観測における 平均ドップラースペクトル数 (レーダ A & B)



1回の観測での平均ドップラースペクトル数
A: 58.3: 集中 B: 48.1: 分散

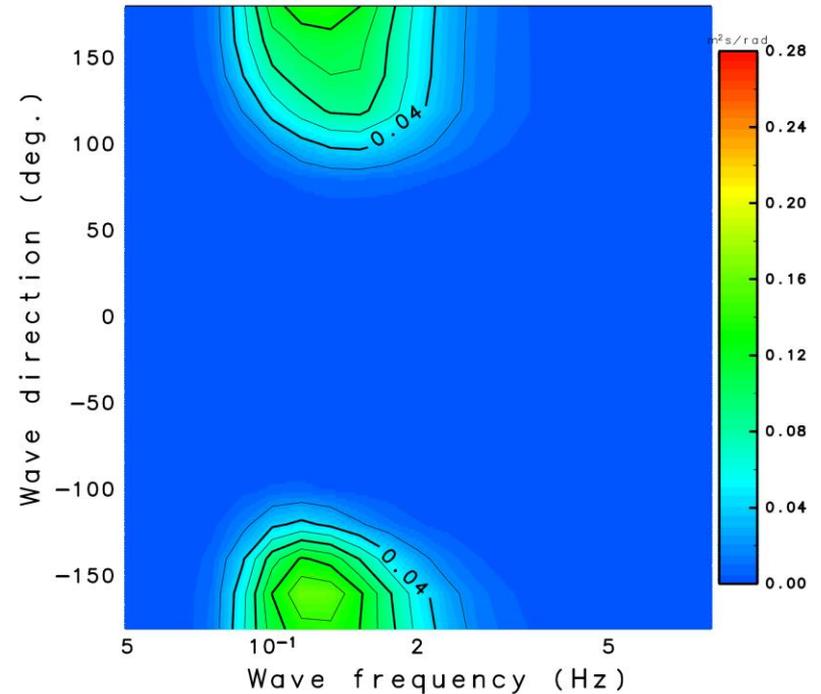
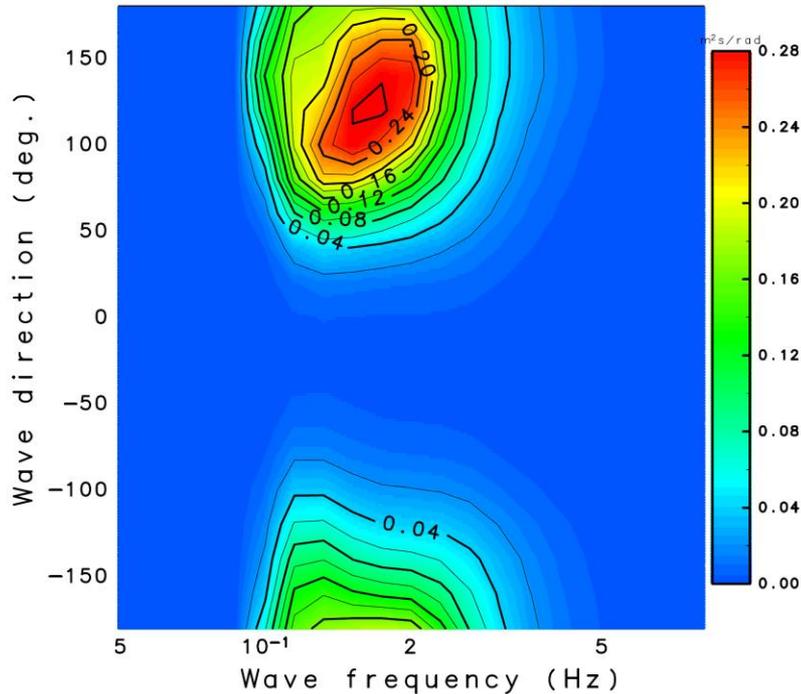
波浪スペクトルの例(2基)

北西向き

南西向き

(a) 06 JST 21 04 1998

(b) 22 JST 07 05 1998



CONTOUR INTERVAL = 2.000E-02

CONTOUR INTERVAL = 2.000E-02

波高: 左: 1.76m, 右: 0.96m
現場観測: 1.42m, 0.97m

方向は東向きを基準に
反時計回りを正

主な波浪パラメータ

$$H = 4E^{1/2} \quad \text{波高}$$

$$E = \int_0^{f_u} \int_{-\pi}^{\pi} F(f, \theta) d\theta df = \int_0^{f_u} P(f) df$$

$$T_m = E^{-1} \int_0^{f_u} f^{-1} P(f) df \quad \text{周期} \quad F(f, \theta) : \text{方向スペクトル}$$

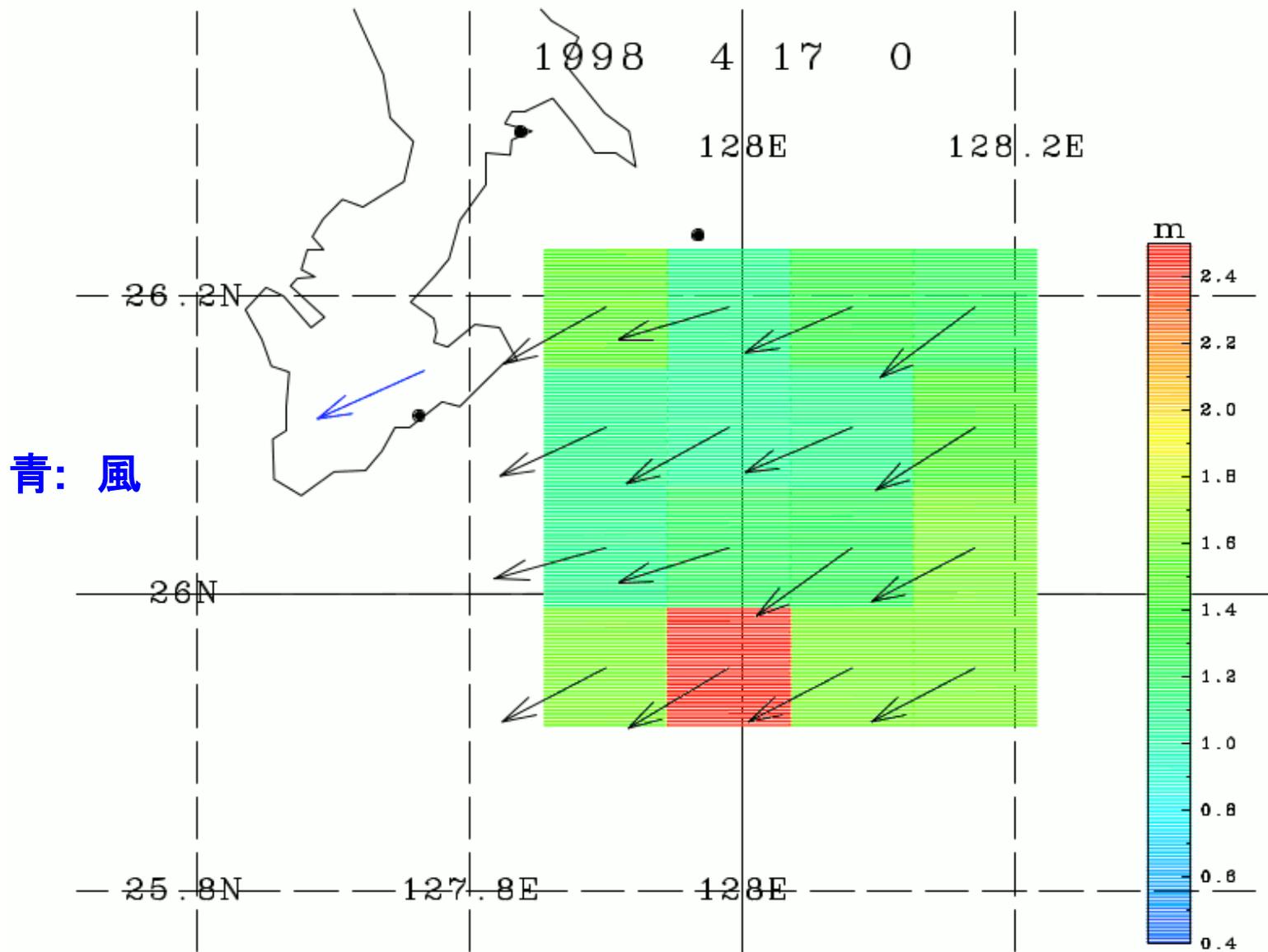
$$\theta_q(f_l) = \text{atan}(Q_s Q_c^{-1}) \quad \text{波向き}$$

$$Q_c = Q_c(f_l) = \int_{f_l}^{f_u} \int_{-\pi}^{\pi} \cos \theta F(f, \theta) d\theta df \quad f_l = 0. \\ \text{平均波向き}$$

$$Q_s = Q_s(f_l) = \int_{f_c}^{f_u} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \theta F(f, \theta) d\theta df, \quad f_l = 0.47 \text{ Hz}$$

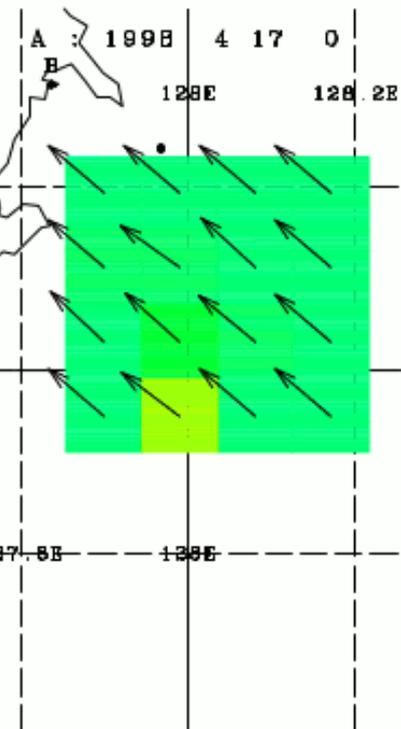
短波波向き: 一次散乱でほぼ決定

レーダ推定波高と波向き

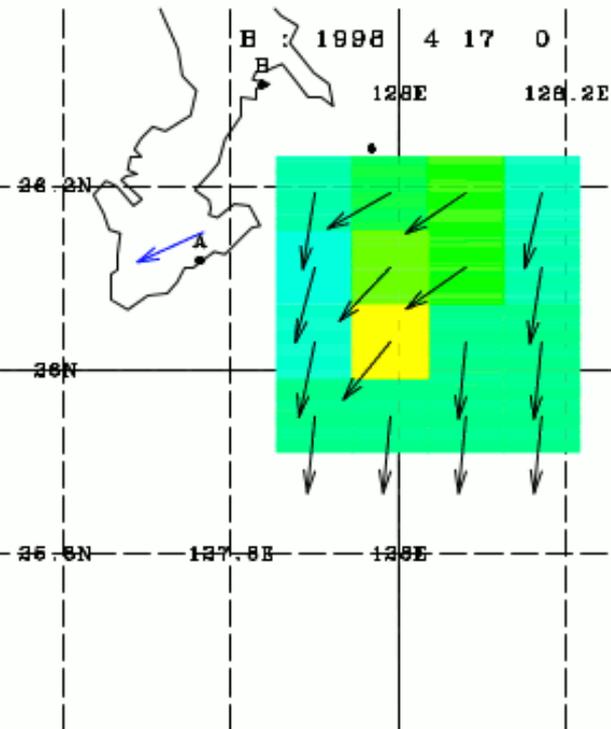


レーダ推定波高と波向き

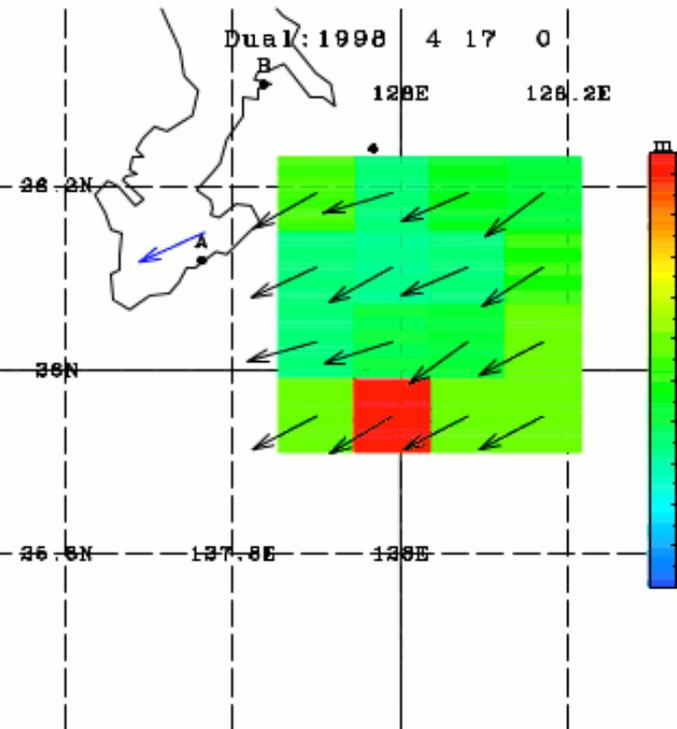
A



B



二基



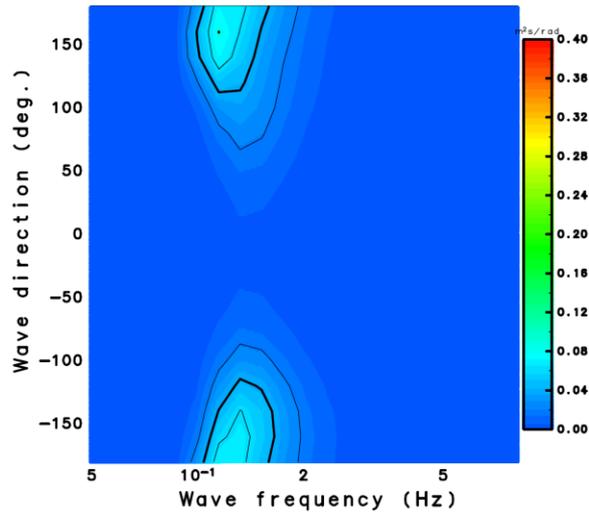
2基及び単一のレーダによる 波浪スペクトル推定例

2基のレーダ

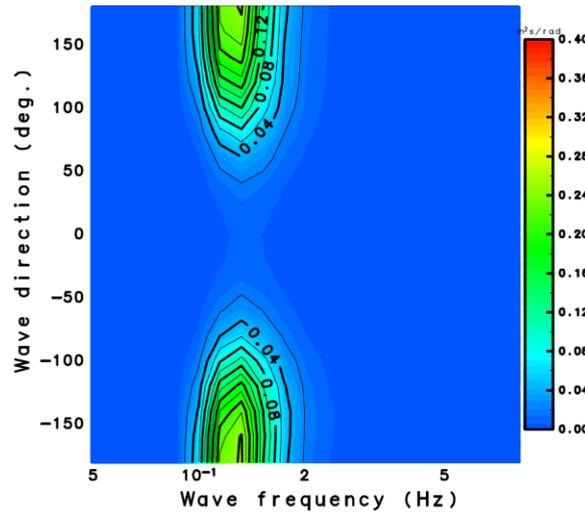
レーダ A

レーダ B

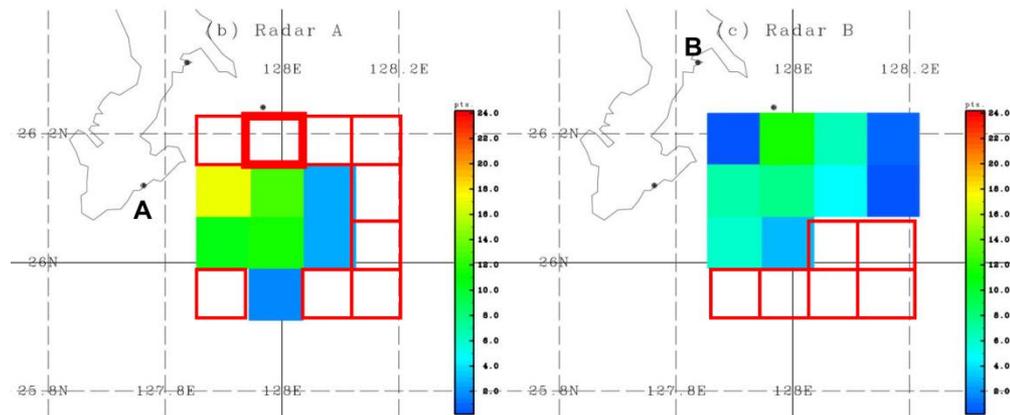
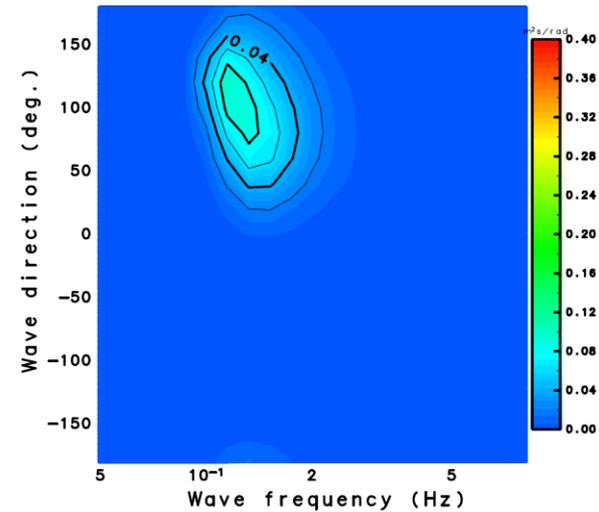
(a) 14 JST 26 04 1998



(b) 14 JST 26 04 1998

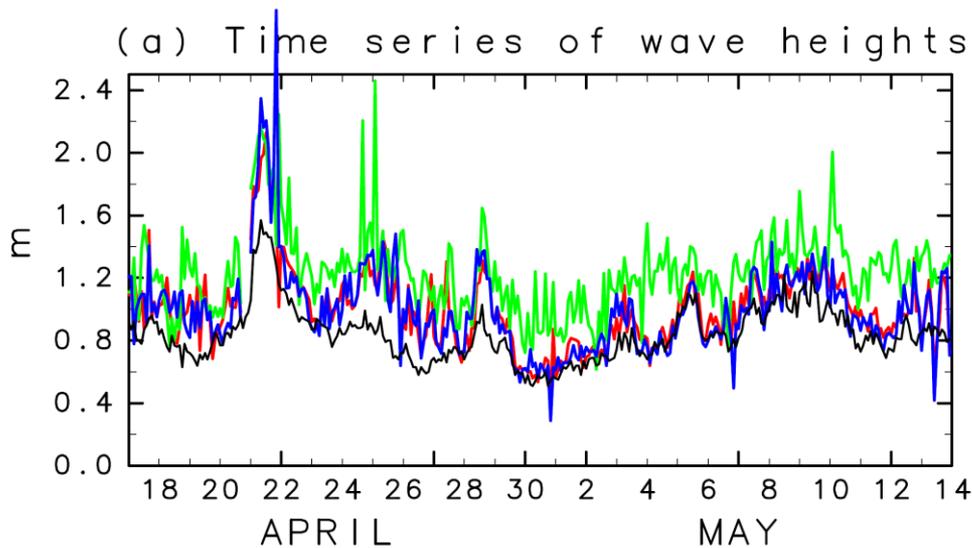


(c) 14 JST 26 04 1998



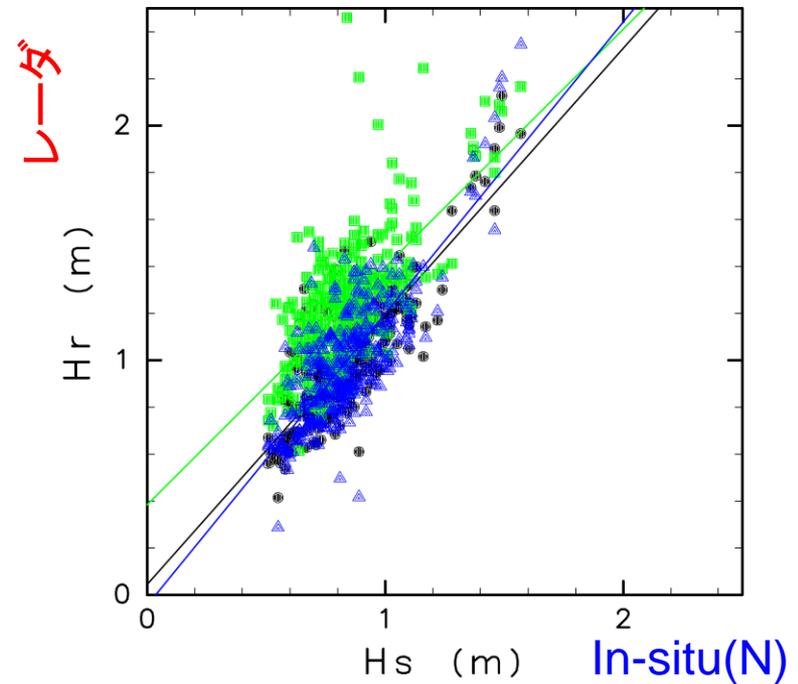
波高の比較

現場観測: 黒色,
2基のレーダ: 赤色,
レーダ A: 緑色,
レーダ B: 青色.



2基のレーダ: Cor.=0.82, rmsd=0.22m.
レーダ A: Cor.=0.68, rmsd=0.44m.
レーダ B: Cor.=0.76, rmsd=0.25m.

(b) Scatter diagram

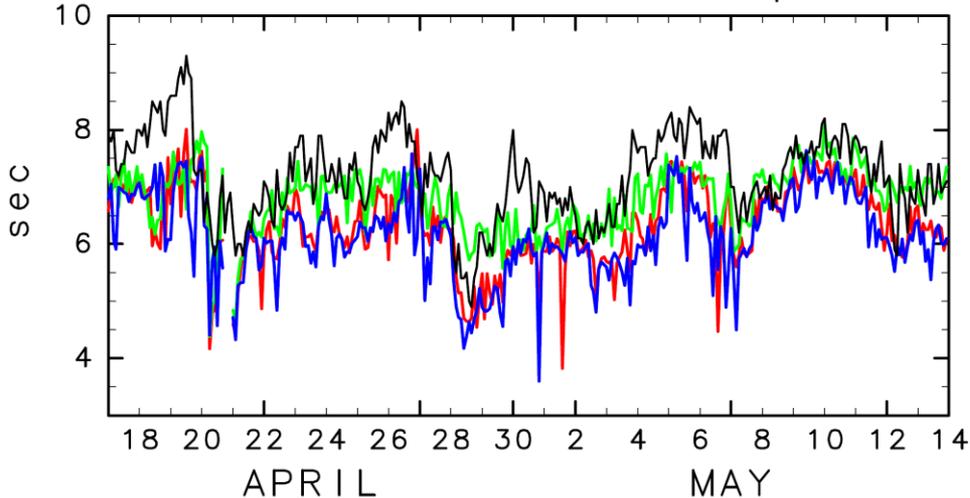


Scatter plots of in-situ observed
波高 with
2基のレーダ: 黒色,
single レーダ A: 緑色,
single レーダ B: 青色.

周期の比較

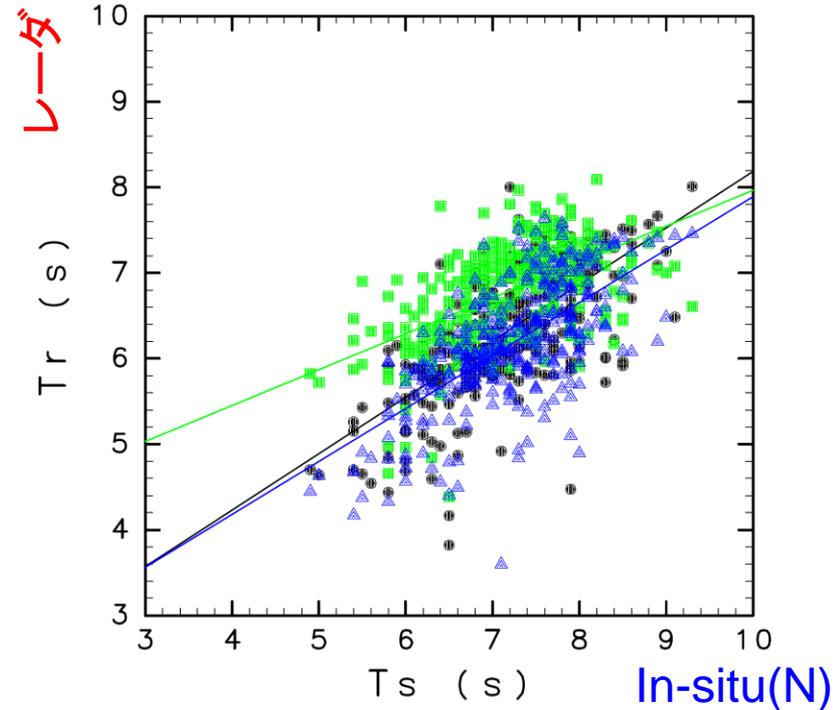
現場観測による有義波周期: 黒色,
2基のレーダ: 赤色,
レーダ A: 緑色,
レーダ B: 青色.

(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.

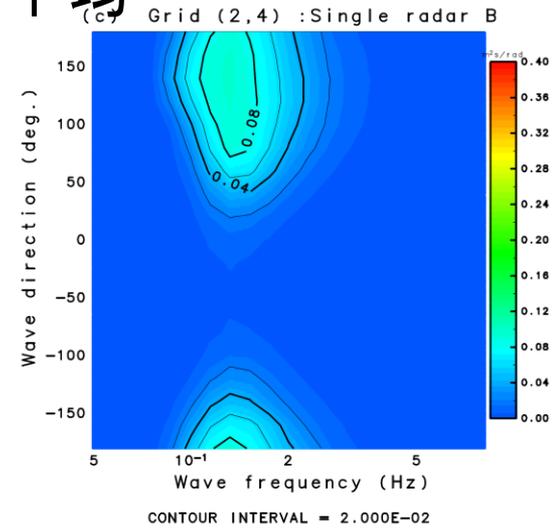
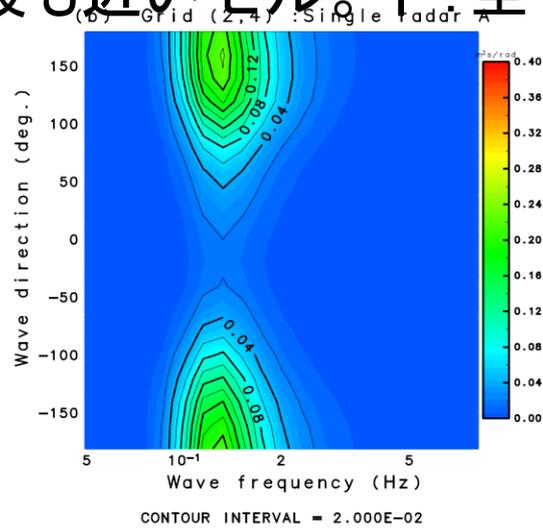
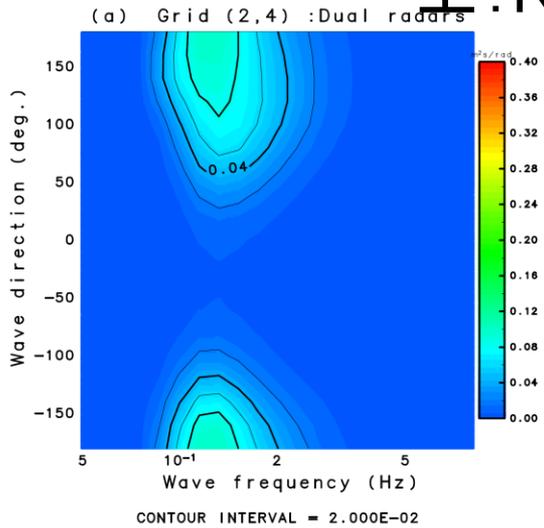
(d) Scatter diagram



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.

波浪スペクトルの観測期間平均

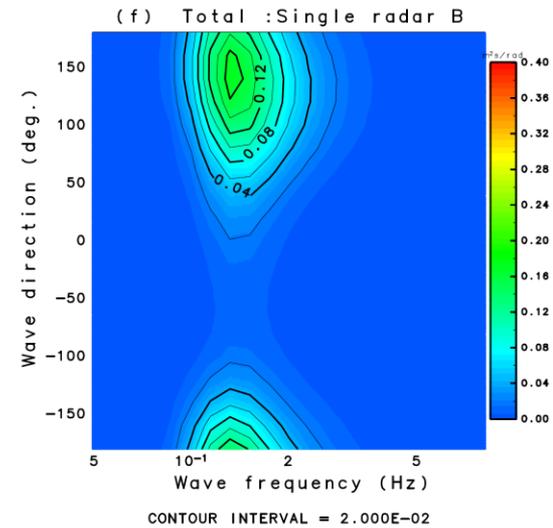
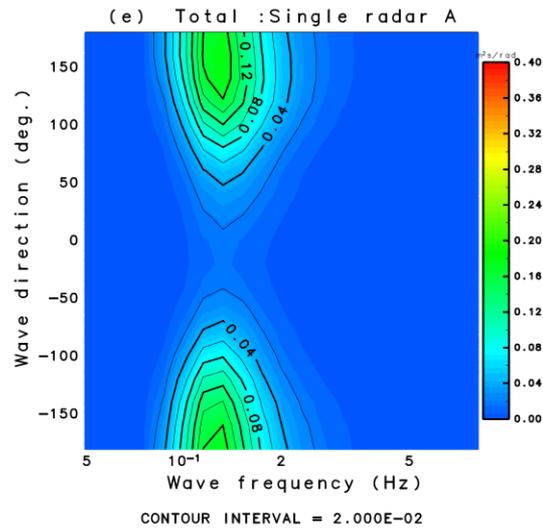
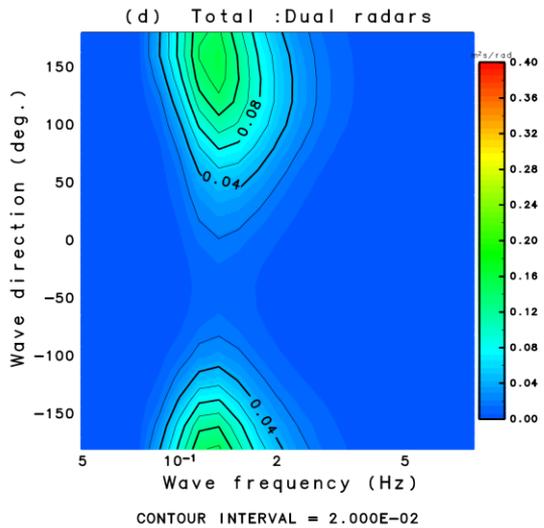
上: Nに最も近いセル。下: 全セル平均



二基

レーダA

レーダB



平均スペクトルからの波浪パラメータ比較

セル(2,4)の平均スペクトル

レーダ	波高	周期	平均波向き	短波向き
二基:	1.03m	6.35s	147.2度	148.4度
A:	1.26m	6.80s	166.2度	168.3度
B:	1.04m	6.16s	134.9度	141.9度

波高rms平均(現場観測):0.86m

波向きは東向きを0として,反時計回りを正、

平均スペクトルからの波浪パラメータ比較

全平均スペクトル

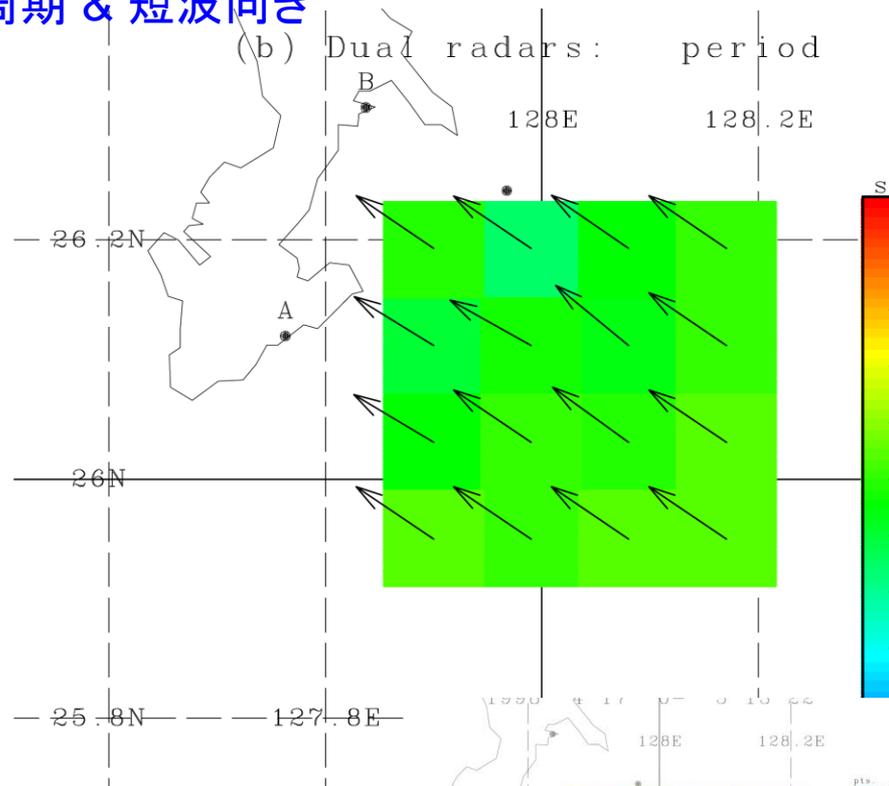
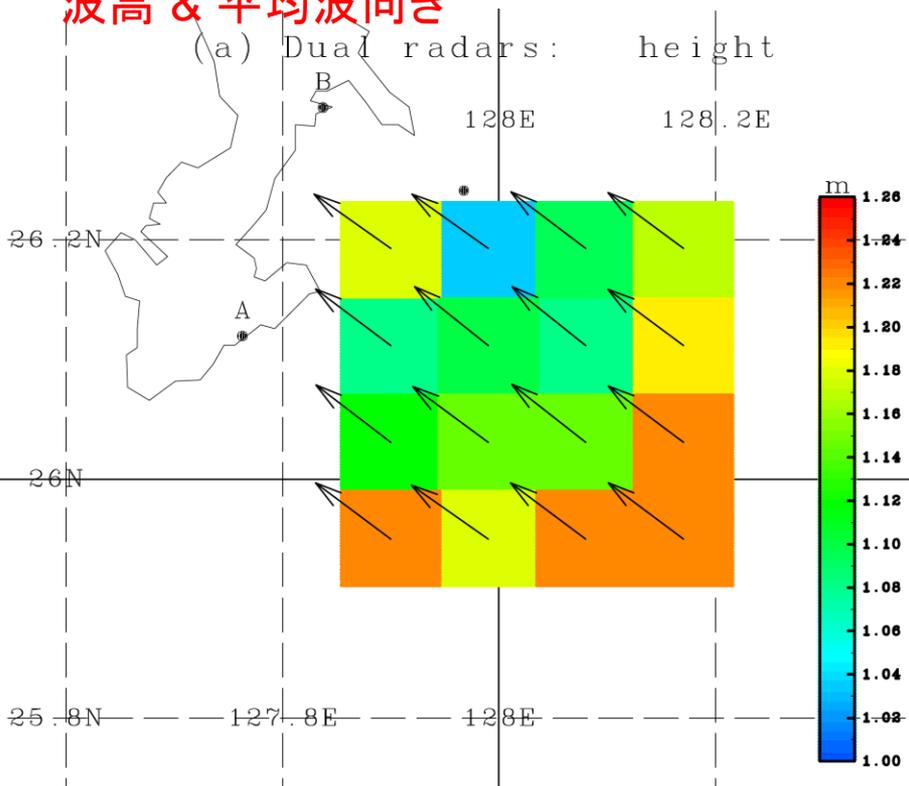
レーダ	波高	周期	平均波向き	短波向き
二基:	1.15m	6.49s	145.9度	148.9度
A:	1.22m	6.77s	165.6度	168.8度
B:	1.16m	6.21s	136.1度	140.5度

波向きは東向きを0として,反時計回りを正、

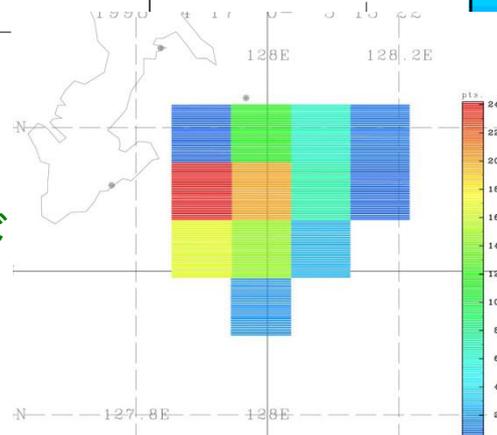
平均波浪スペクトルからの波浪パラメータ: 2基のレーダ

波高 & 平均波向き

周期 & 短波向き

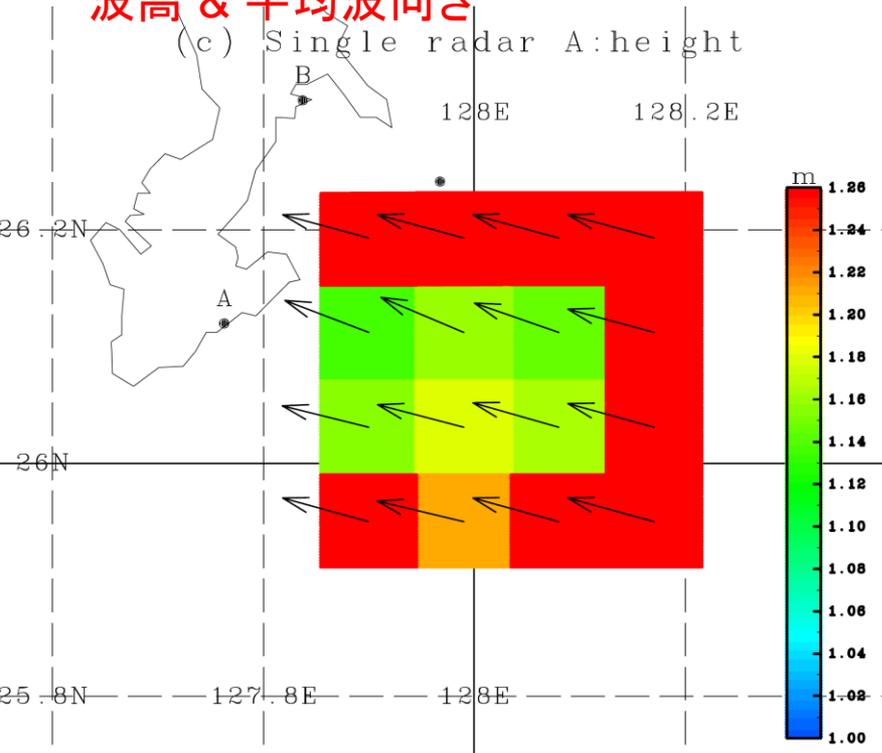


一回の観測における平均ド
ップラースペクトル数

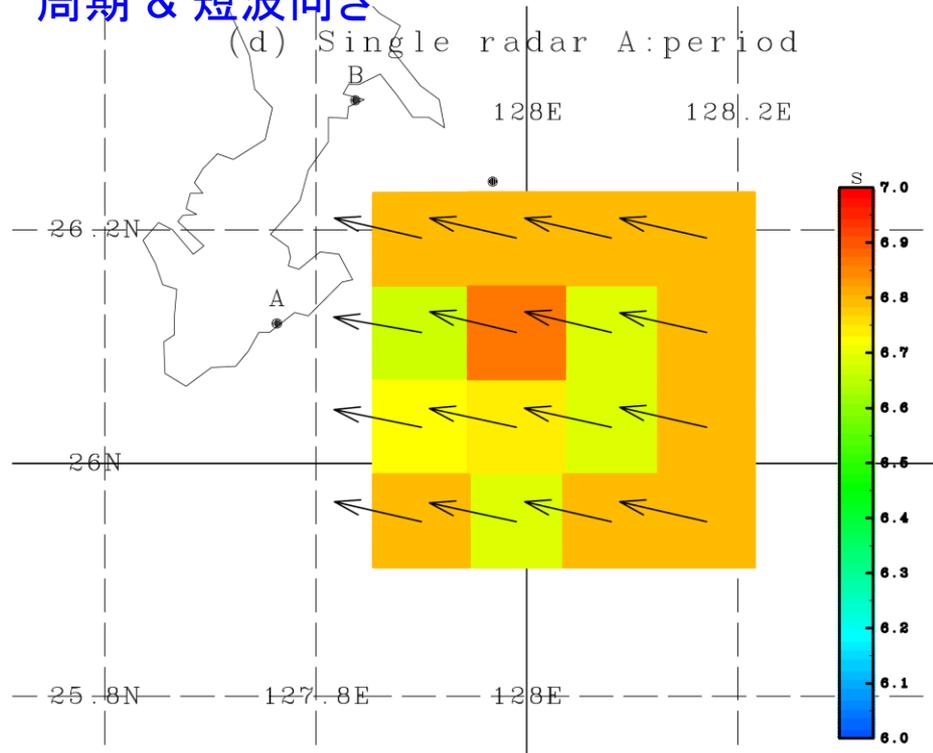


平均波浪スペクトルからの 波浪パラメータ：レーダ A

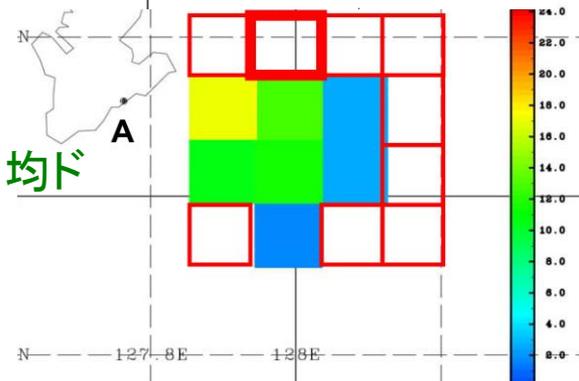
波高 & 平均波向き



周期 & 短波向き

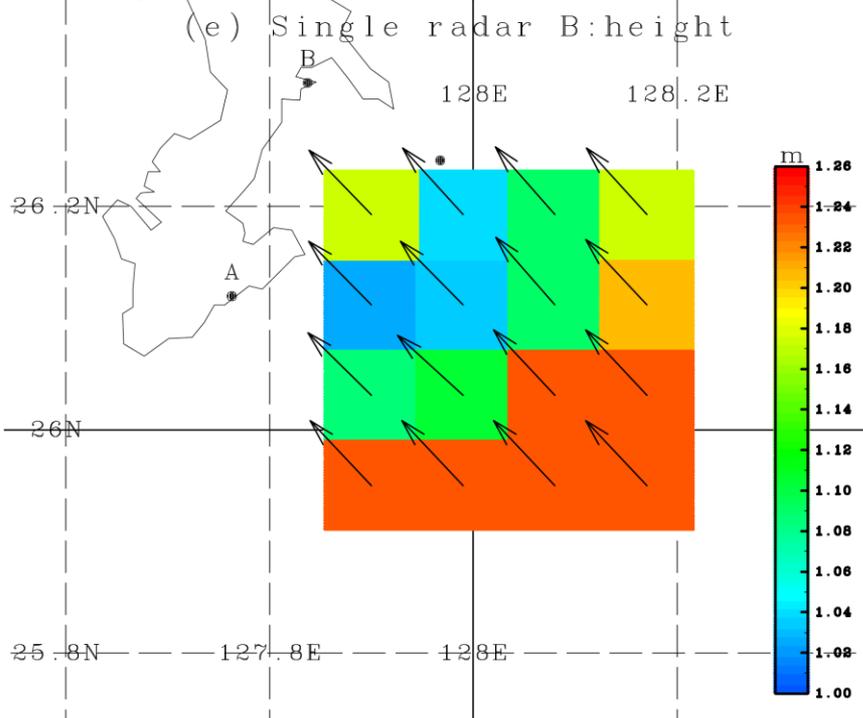


一回の観測における平均ド
ップラースペクトル数

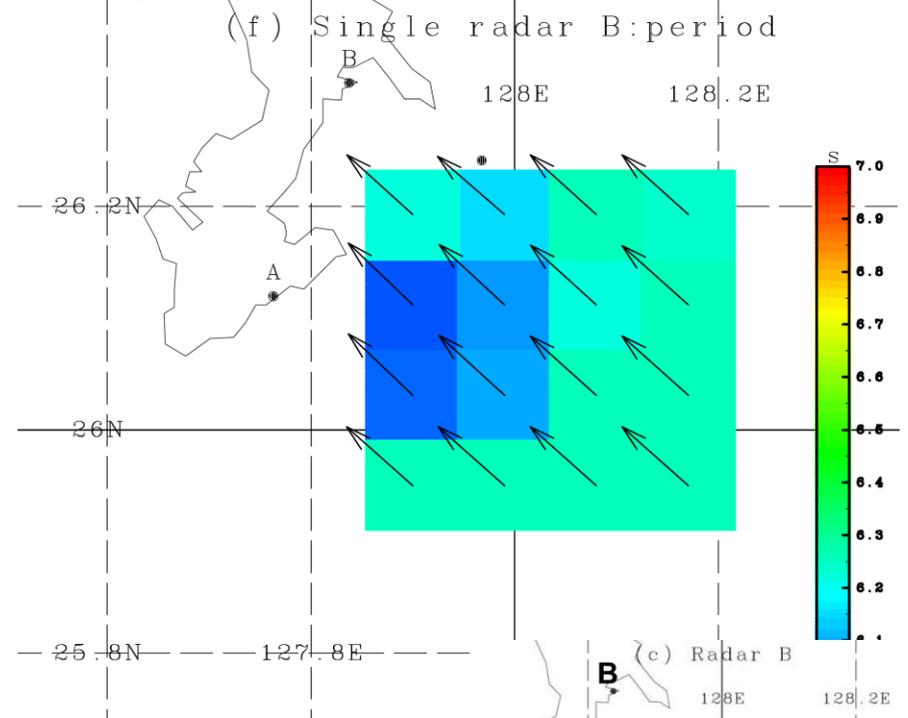


波浪平均波浪スペクトルからの 波浪パラメータ：レーダB

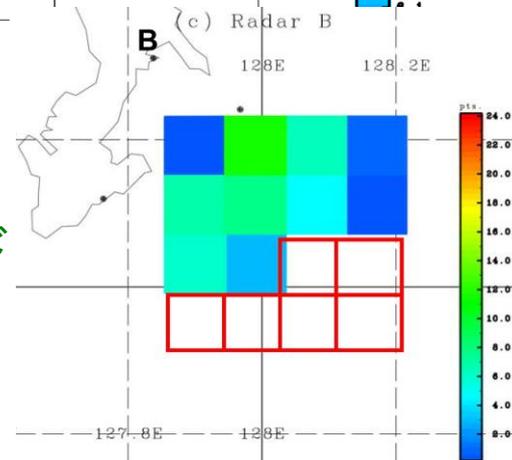
波高 & 平均波向き



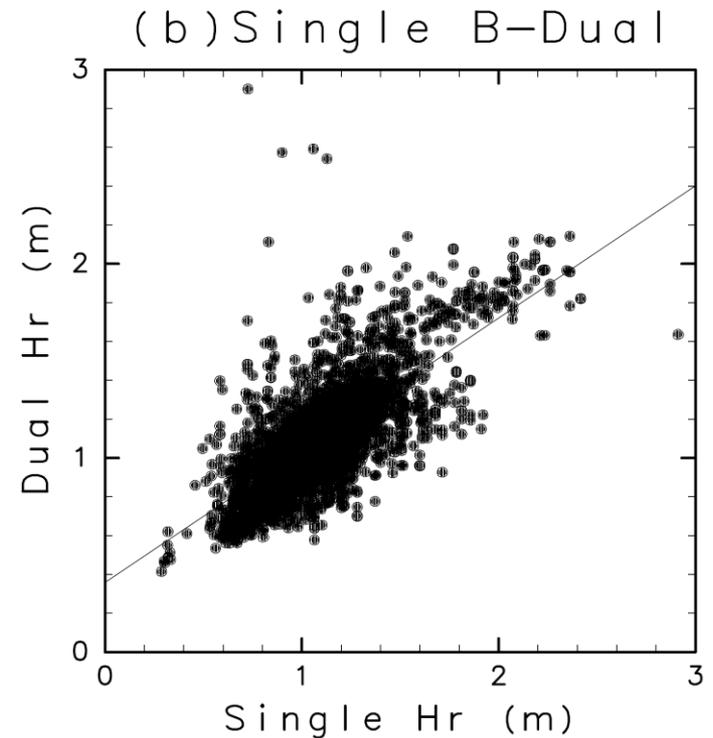
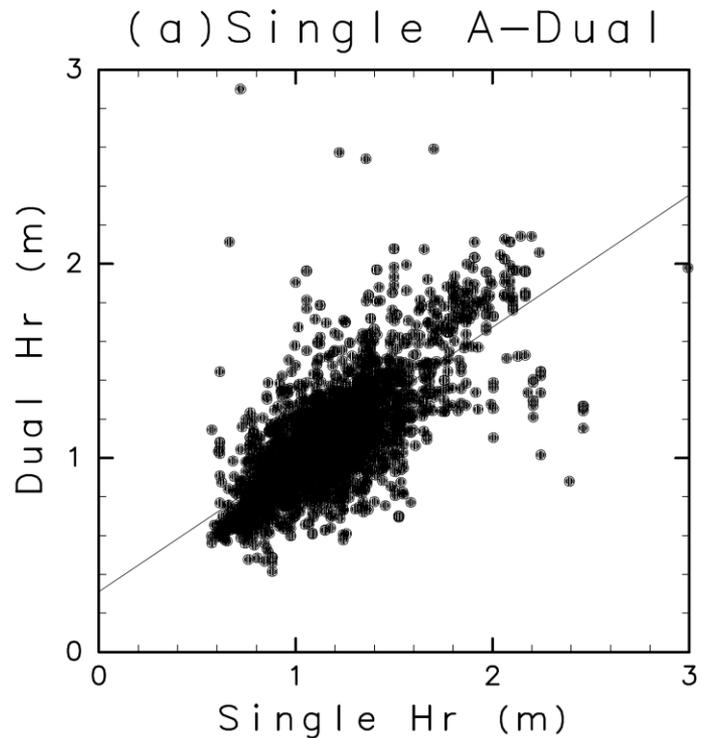
周期 & 短波向き



一回の観測における平均ド
ップラースペクトル数



全波高の比較



Aと複数レーダ

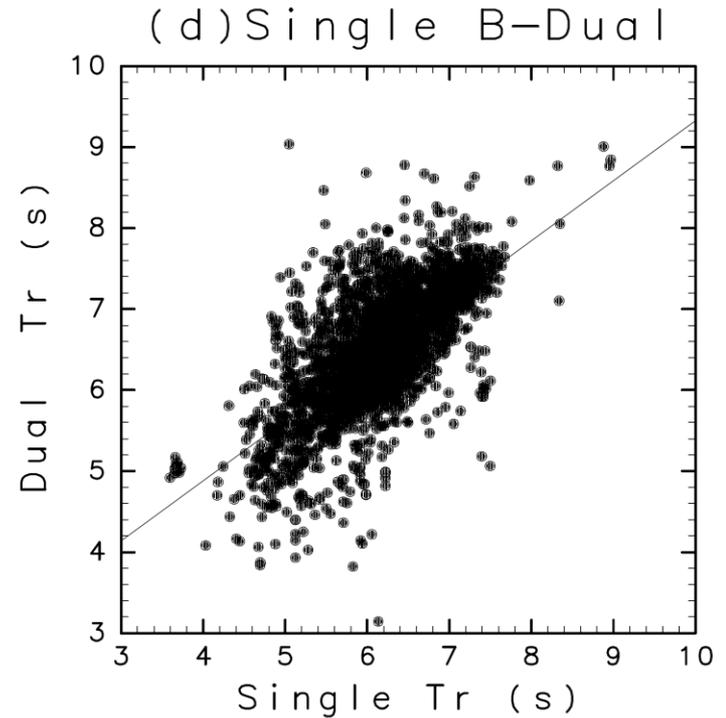
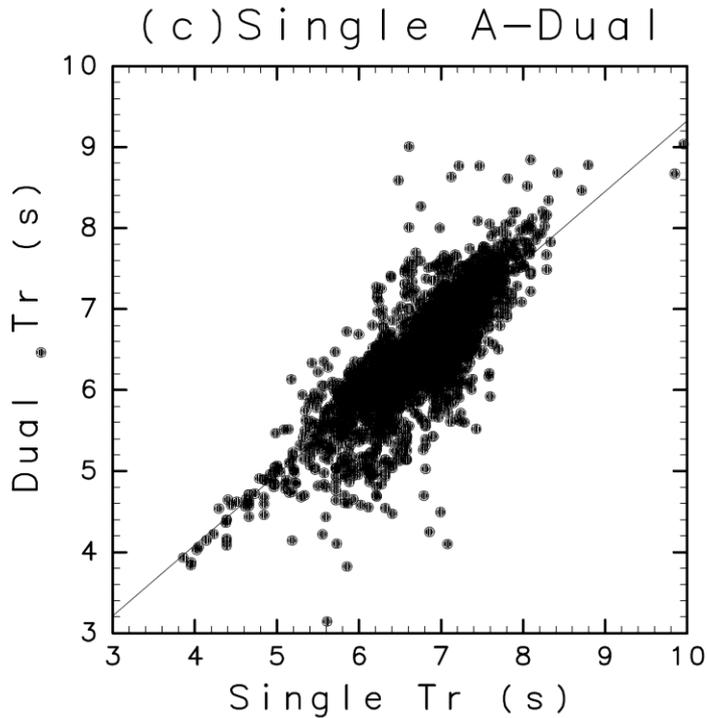
相関:0.71, rms差:0.22m, 平均差(A-複数):0.068m

Bと複数レーダ

相関:0.74, rms差:0.20m, 平均差(B-複数):-0.001m

サンプル数:5136個

全周期の比較



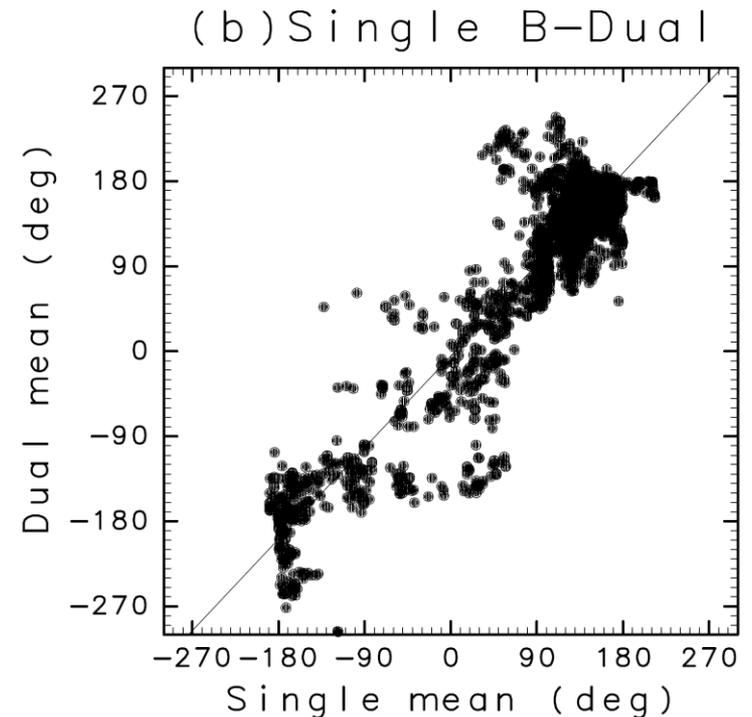
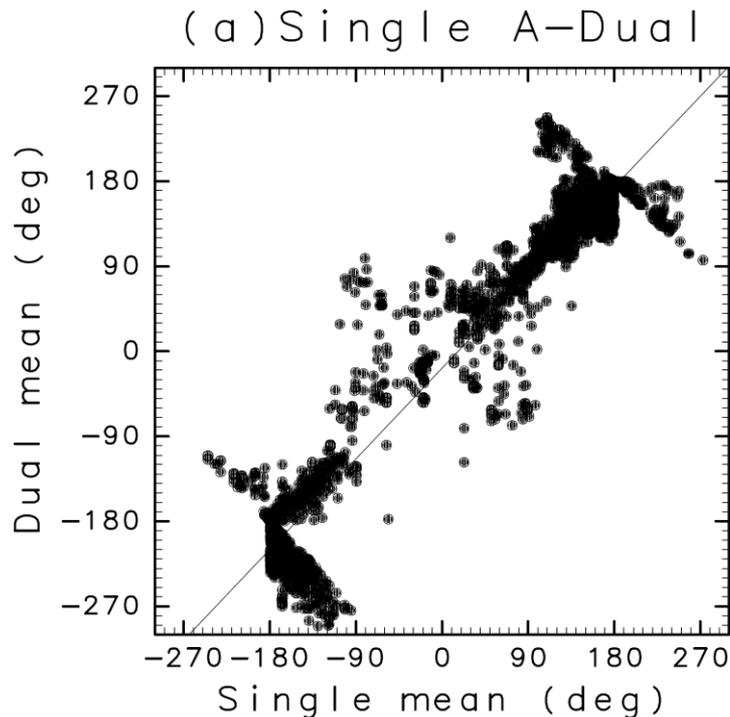
Aと複数レーダ

相関:0.82, rms差:0.47s, 平均差(A-複数):0.26s

Bと複数レーダ

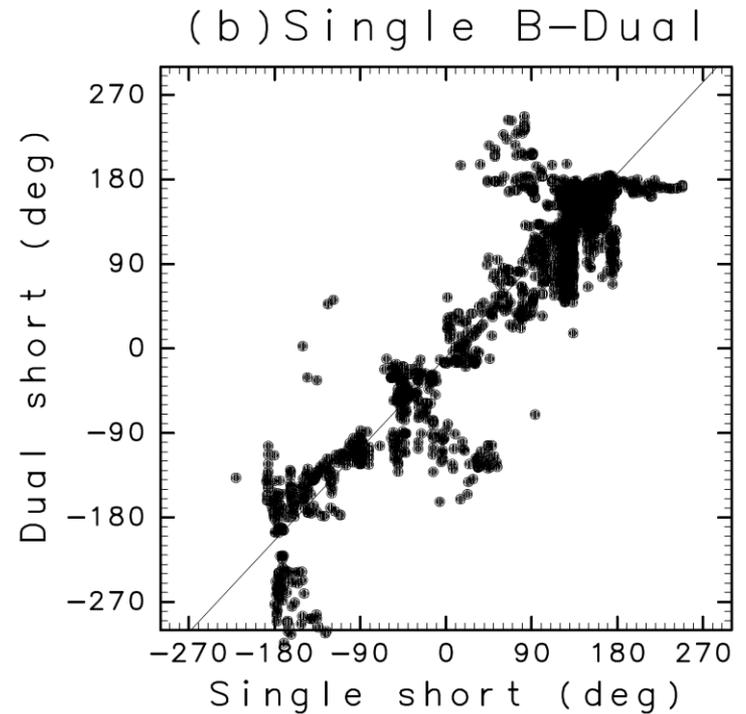
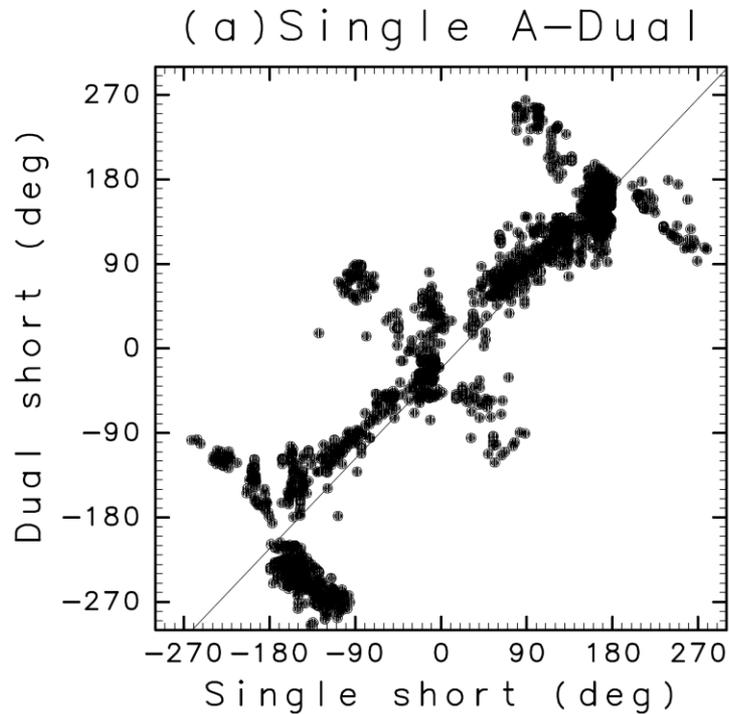
相関:0.69, rms差:0.59s, 平均差(B-複数):-0.31s

全平均波向きと比較



A-複数:rms: 45.9 度,平均:15.1 度
B-複数:rms: 38.8 度,平均: -2.2度
サンプル数:5136個

全短波向きと比較



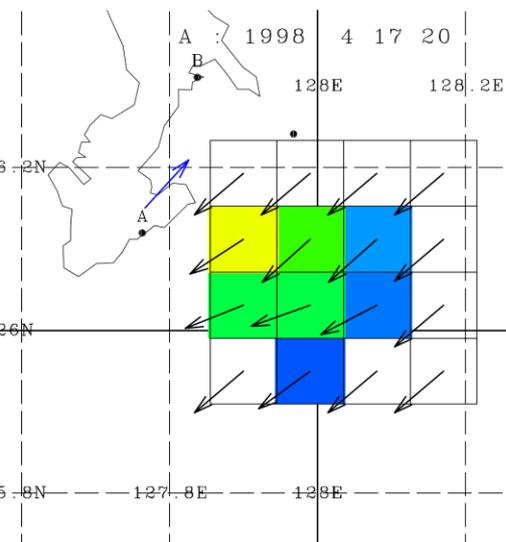
A-複数:rms:51.0 度,平均:16.6 度

B-複数:rms:38.1 度,平均: 1.2度

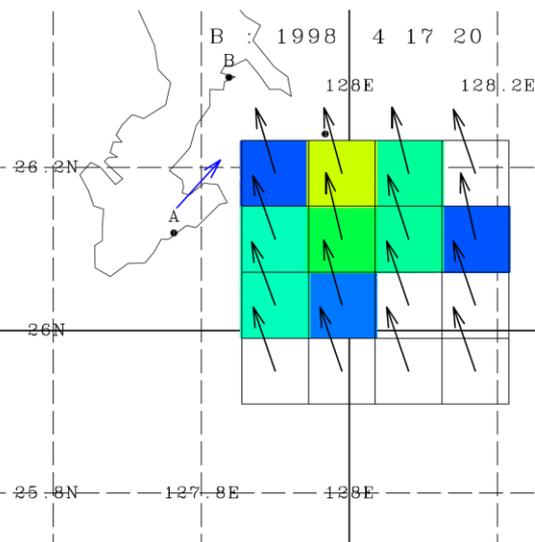
サンプル数:5136個

レーダ方向に対して左右の波を区別 できなかった例(A)

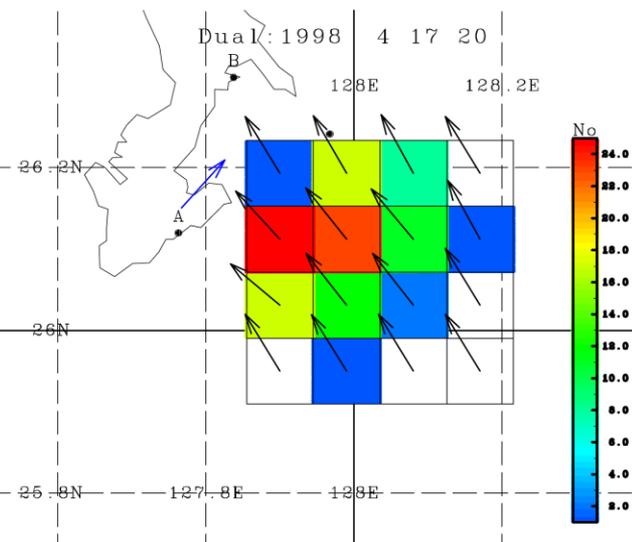
A



B



二基



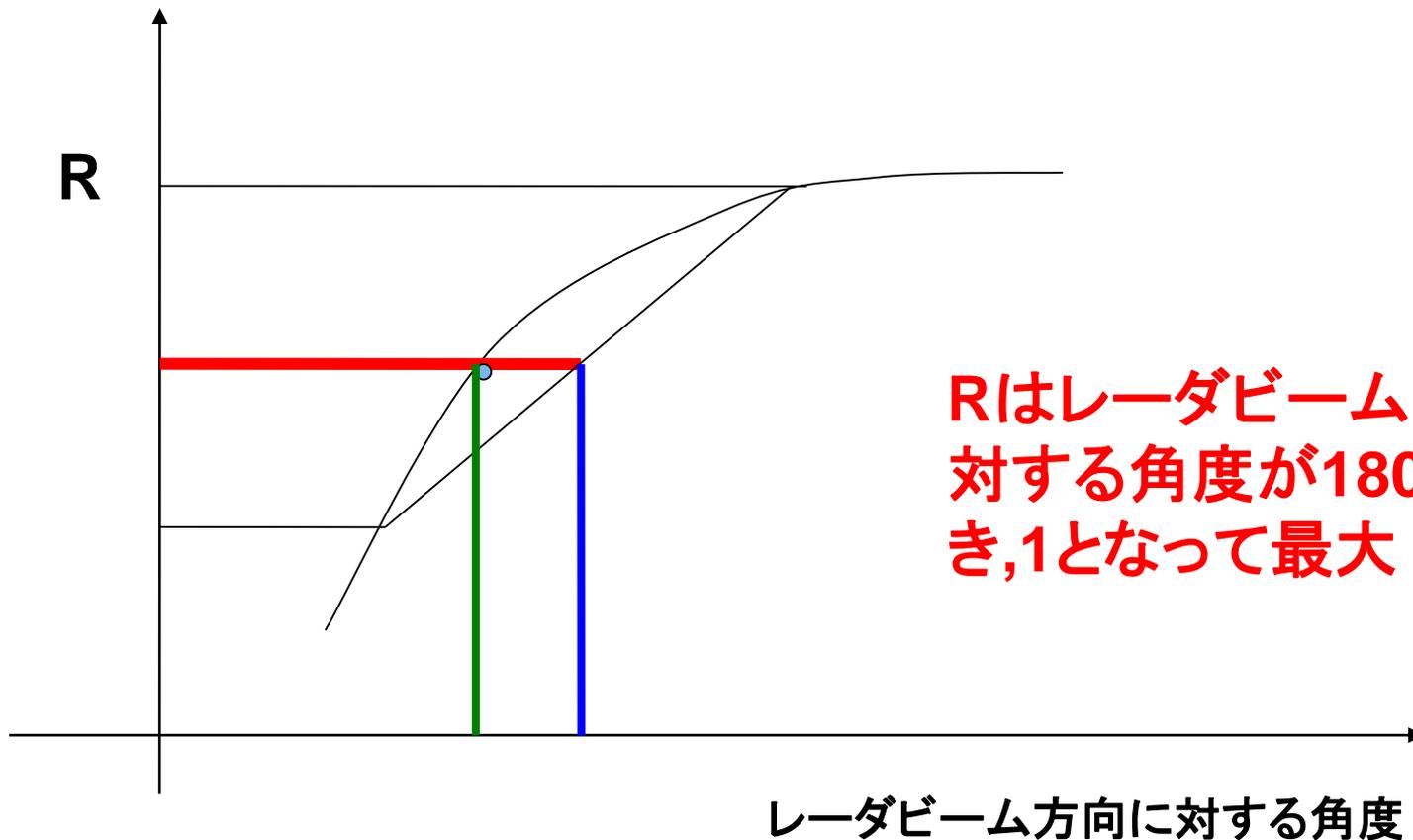
セルの色は、使用されたドップラースペクトル(DS)
数を示す

波高と周期の比較について

- AはDS数がBより多いが,一部のセルに集中。
- 二基との相関は波高はBの方が高く,周期はAの方が高い
- 波高 (2基のレーダ推定値)
- 空間標準偏差の時間平均= 0.116 m
- 時間平均偏差の空間平均= 0.256 m
- 比=2.20
- 周期 (2基のレーダ推定値)
- 空間標準偏差の時間平均= 0.205 s
- 時間平均偏差の空間平均= 0.652 s
- 比= 3.18
- 波高の方が周期より,空間変動の,時空間変動への寄与が大きい。

波向きがレーダ方向に向く理由の考察

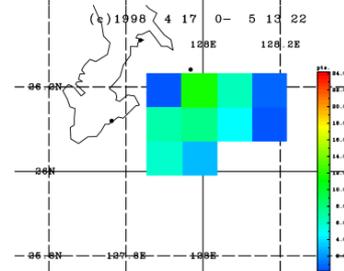
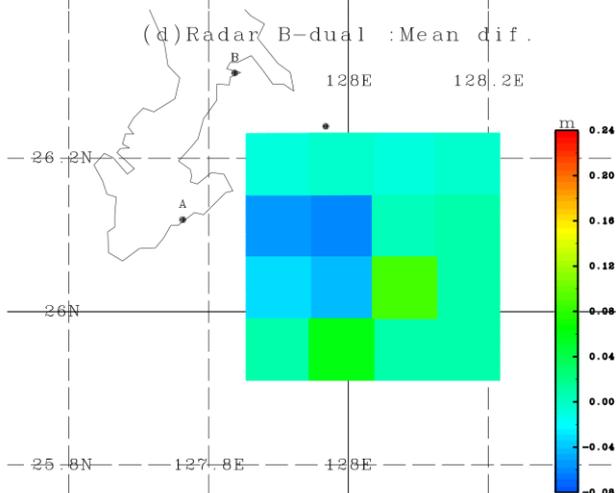
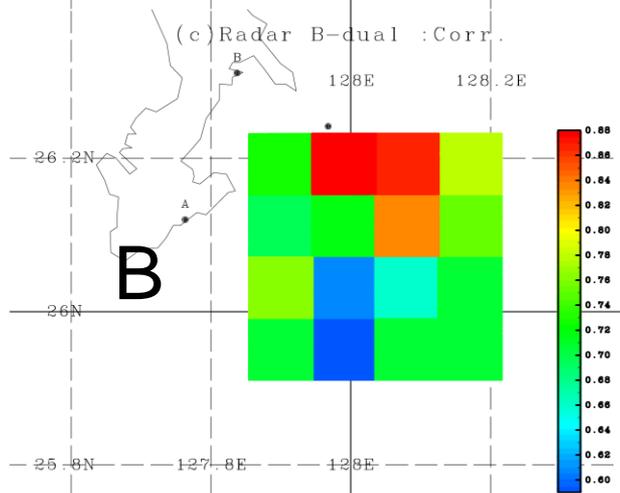
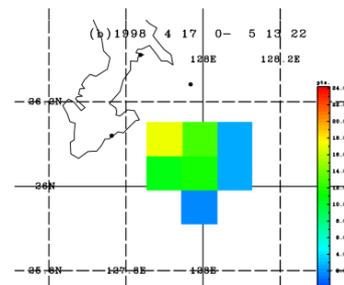
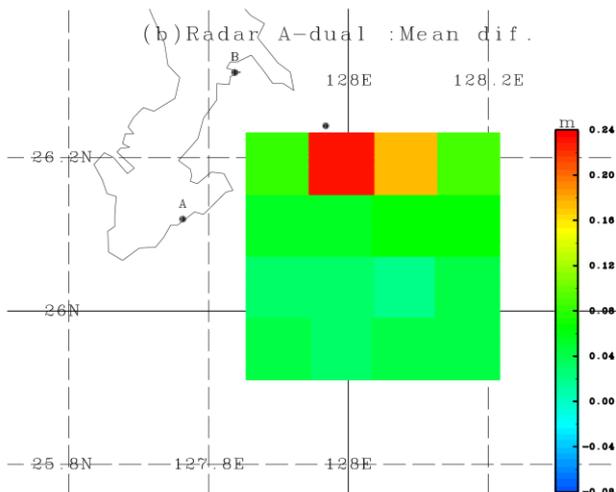
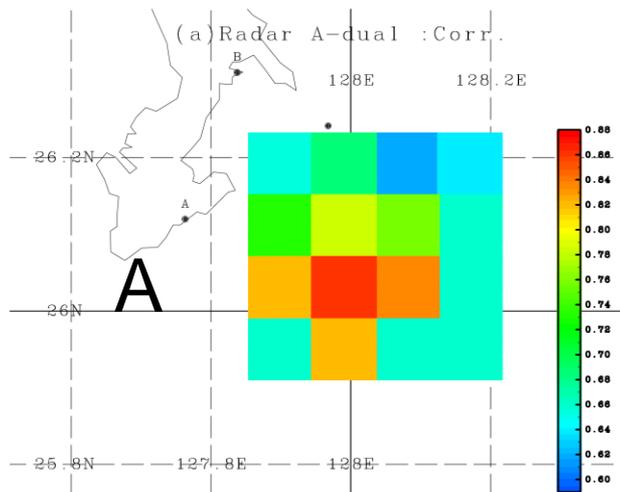
$R: (\text{One of 1st-order scattering}) / (\text{Sum of 1st-order scattering})$



- レーダAでは,DSが一部のセルに集中しているため,レーダ方向に対して左右の波を区別できなかつた場合が多い。
- レーダ方向を向くバイアス:レーダBの短波向きが,平均するとレーダ方向を向いていなかつたのは,風速が小さくて,風向が変動する影響(平均波浪スペクトルから求めた短波向きは,レーダBも,レーダ方向を向く)

波高の比較:

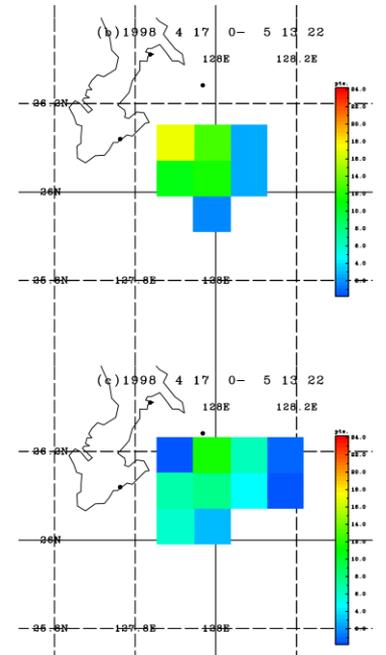
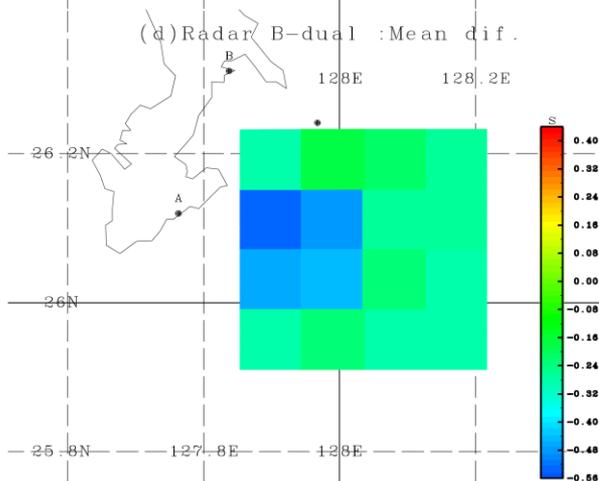
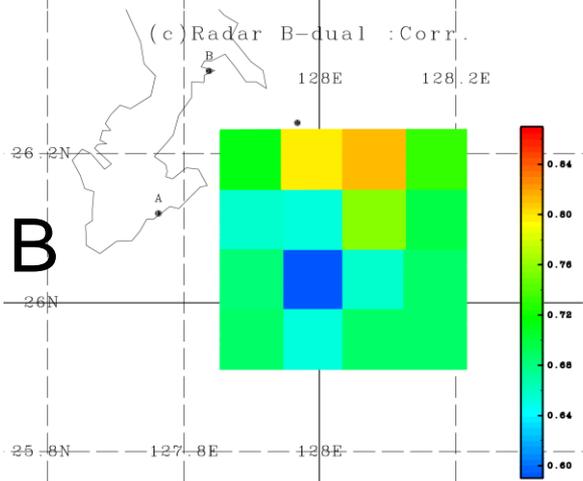
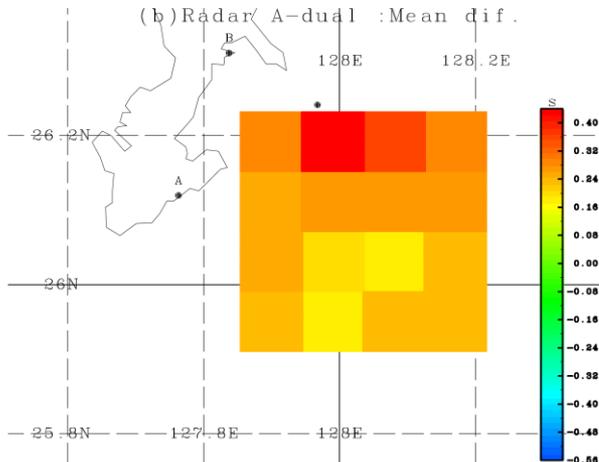
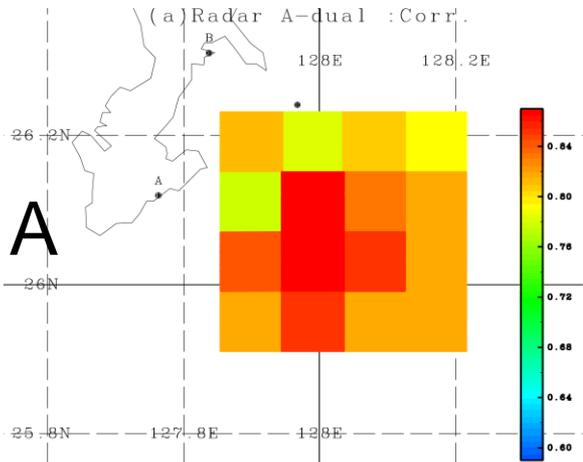
左: 相関, 右: 平均差(1基-2基)



一回の観測における平均ドップラースペクトル数

周期の比較:

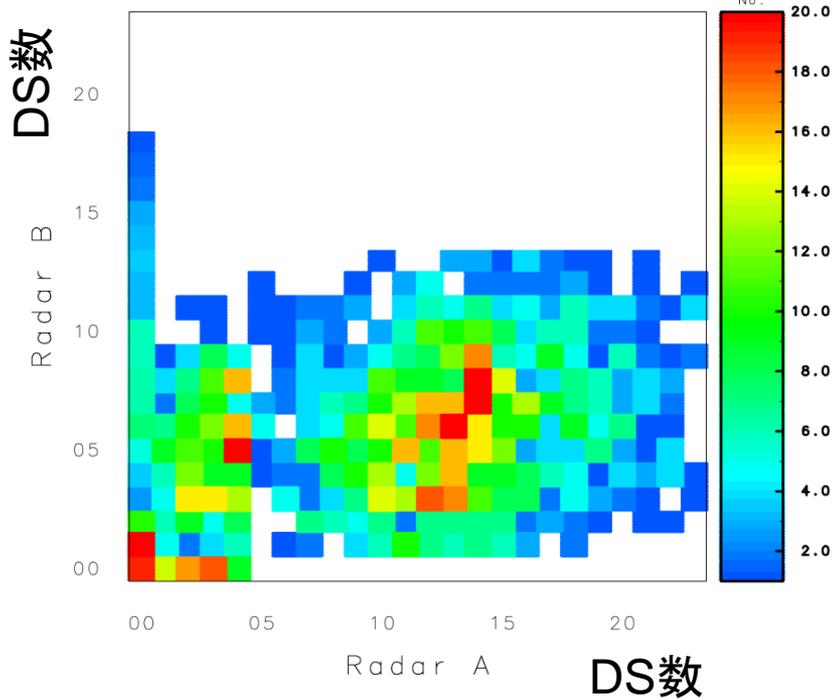
左: 相関, 右: 平均差(1基-2基)



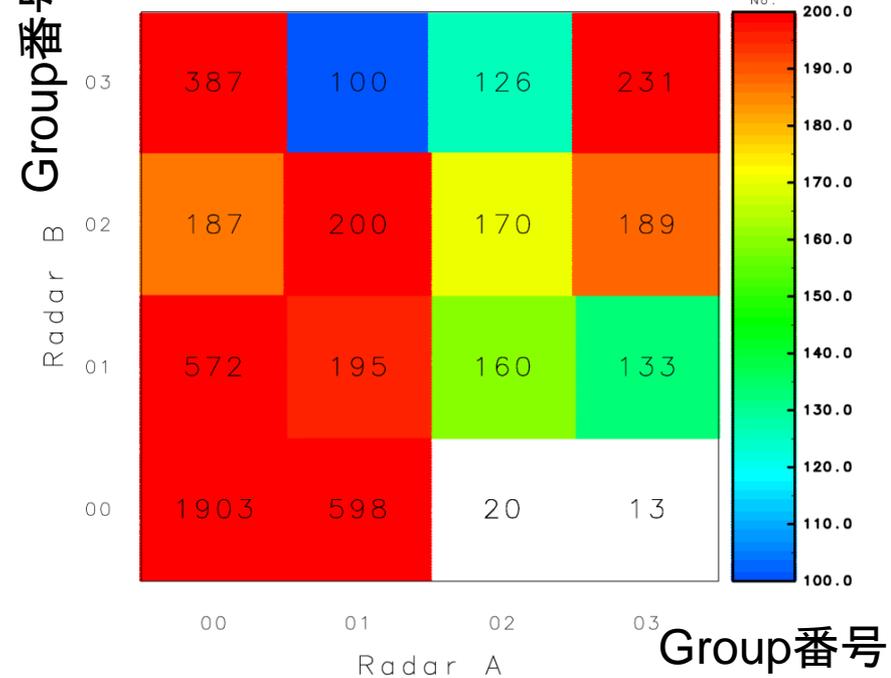
一回の観測における平均ドップラースペクトル数

セルにおけるDS数(左)とグループ分け(右)

(a) Cell Number

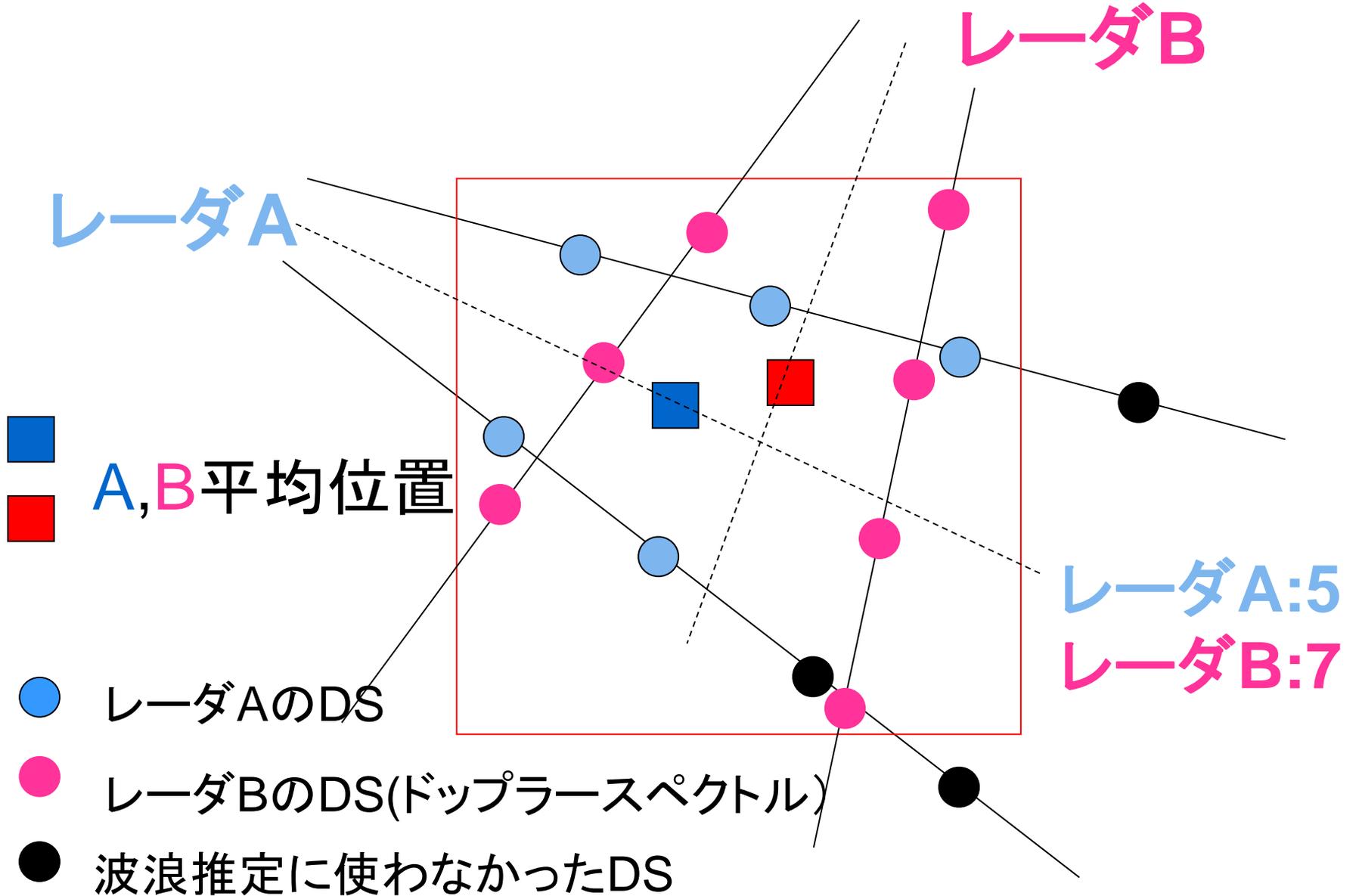


(b) Cell Number



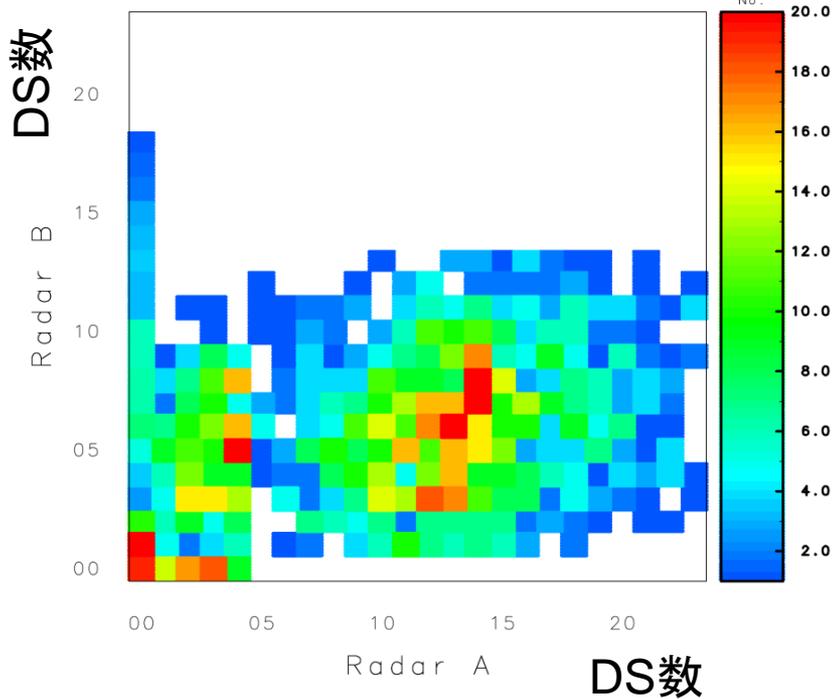
Group番号	DS数(A)	DS数(B)
0	0	0
1	1-9	1-4
2	10-13	5-7
3	14-23	8-19

左:(0,0)は0.01倍,それ以外の方が
DS(ドップラースペクトル)数0の組については、
0.1倍で表示

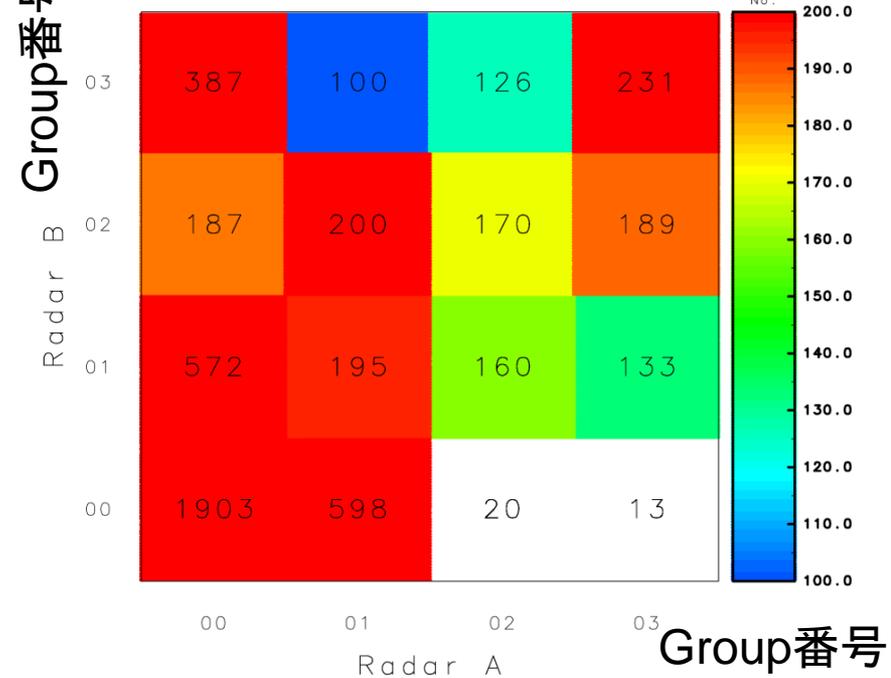


セルにおけるDS数(左)とグループ分け(右)

(a) Cell Number



(b) Cell Number

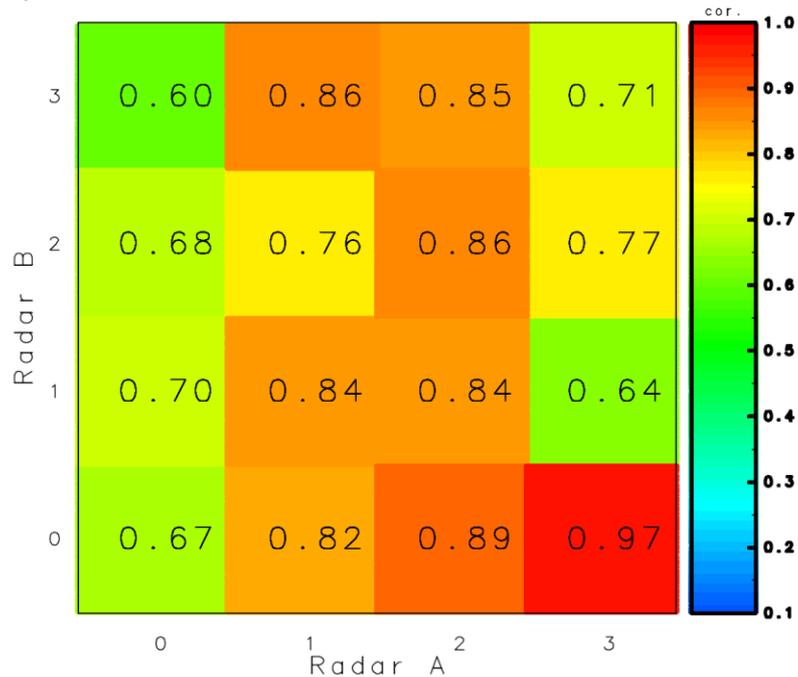


Group番号	DS数(A)	DS数(B)
0	0	0
1	1-9	1-4
2	10-13	5-7
3	14-23	8-19

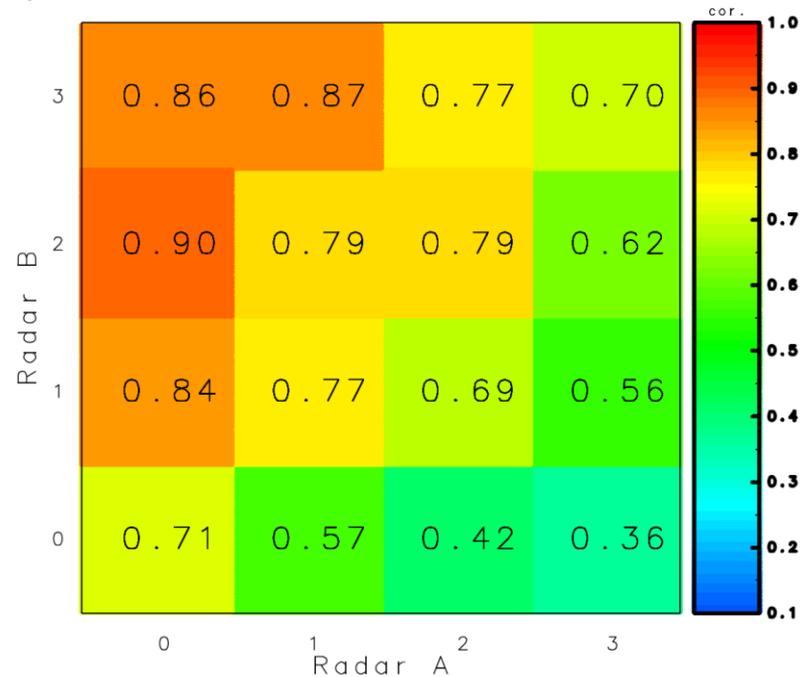
左:(0,0)は0.01倍,それ以外の方が
DS(ドップラースペクトル)数0の組については、
0.1倍で表示

単一と二基による波高の相関を DS数のグループ毎に表示

(a) Cor. coef. Radar A-dual

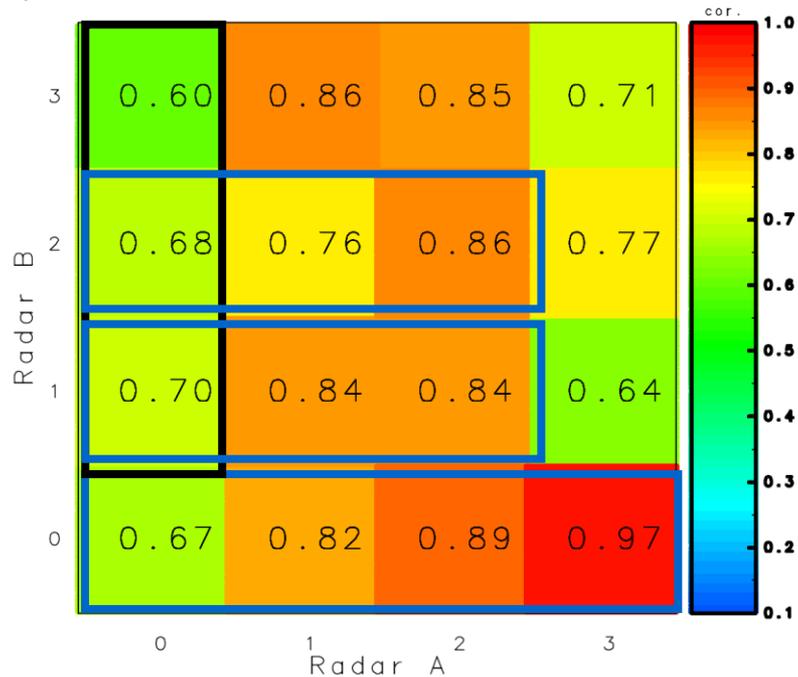


(b) Cor. coef. Radar B-dual

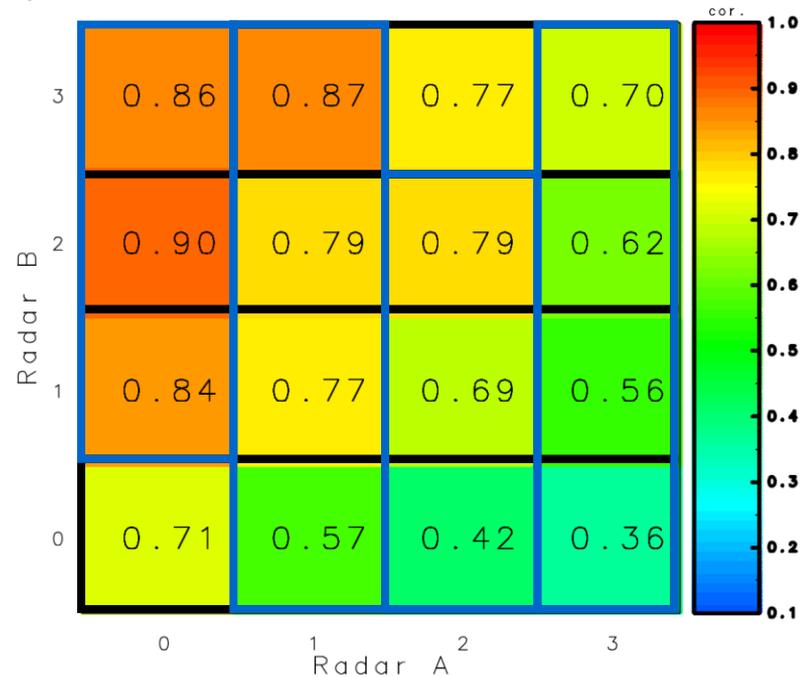


単一と二基による波高の相関を DS数のグループ毎に表示

(a) Cor. coef. Radar A-dual



(b) Cor. coef. Radar B-dual



A(B)と二基の相関は,A(B)のセル数が増えると,増加
A(B)と二基の相関は,B(A)のセル数が増えると,減少

まとめと今後の課題

- 一基及び二基のレーダいずれにおいても、適用できる波浪スペクトル推定手法を開発した。
- 現場観測との比較において、精度は二基、レーダBのみ、レーダAのみの順番であった。
- 単一のレーダにおいては、波向きが、二基の場合に比べて、レーダ方向を向く傾向がある。
- 周期を除いて、Aのみの場合の方が、二基の場合に近かった。
- 一基及び二基のレーダ波高の比較において、両者の差の、セル内のDS数依存性については、レーダBの方が、はっきりと現れていた。

AはDS数がBより多いが、一部のセルに集中。現場観測近くではDS数はゼロ。

今後の課題

- 一基のレーダによる波向き推定において、レーダビーム方向の、左右対称性の不確かさの解消: 一次散乱についてのみならず、より多くのDSを使用。
- 波浪推定に使用するドップラースペクトルの選択方法の改良。

終わり