

海洋レーダによる 沿岸海上風補正

久木幸治(琉球大理)

Hisaki Y.,2017: Sea-surface wind correction using HF ocean radar and its impact on coastal wave prediction. ***Journal of Atmospheric and Oceanic Technology***.
doi: 10.1175/JTECH-D-16-0249.1.

海洋レーダで推定できるパラメータ

- 流速：一次散乱
- 風向：一次散乱
- 波浪スペクトル（波高、周期、波向き）
- 風速

海洋レーダで推定できるパラメータ

- 波浪スペクトル(波高、周期、波向き)
 - 二次散乱を使用。 高いSN比要求
 - 精度は波浪推算と比べて？
- 風速

海洋レーダーで推定できるパラメータ: 風速

二次散乱から推定: 風波エネルギーをもとめる。
(Dexter and Theodoridis (1982); Heron et al.(1985); Green et al. (2009); Zeng et al. (2016))

- 一次散乱のみから求める: 校正必要 (Stewart and Barnum (1975); Shen et al. (2012); Kirincich (2016))
- 多周波数レーダー (Vesecky et al. (2004))
- データ同化による風ベクトル推定: Lewis et al.(1997); Barth et al.(2011) 表層流

波浪推算について

- 精度は風データに依存
- 風データ： 再解析データや予報データなど
- 波高について
 - 風速
 - 島嶼沿岸域など：吹走距離が風向に大きく依存

内容

- 海洋レーダから風向を求める。
- 再解析データの風速・風向を補正
- 島嶼沿岸（沖縄島）域の波浪推算への影響

風向推定原理

$$\sigma_1(m\omega_B) \propto S(-2m\mathbf{k}_0), \quad m = \pm 1,$$

$$R = \frac{\sigma_1(\omega_B)}{\sigma_1(-\omega_B)} = \frac{S(-2\mathbf{k}_0)}{S(2\mathbf{k}_0)} = \frac{D(\phi_B - \theta_w)}{D(\phi_B - \theta_w + \pi)}$$

$$F_q(\theta_w, \beta) = \log(D(\pi + \theta_w - \phi_B)) - \log(D(\theta_w - \phi_B)) - \log(R) = 0,$$

$$D(\theta) = \text{sech}^2(\beta \theta)$$

θ_w と β が未知数

σ_1 :一次散乱, $\mathbf{k}$:波数ベクトル

$S(\mathbf{k})$:波浪スペクトル, $\mathbf{k}_0$:電波波数ベクトル

θ_w :風向, ϕ_B :ビーム方向

ω_B :Bragg 周波数, $D(\theta)$:方向分布

風向推定手順

- 全てのドップラースペクトルから

$$\sum F_q^2(\theta_w, \beta)$$

が最小となるように、 $\beta_T = \beta$ 、 $\theta_T = \theta_w$ を求める。

- 一次散乱の値を格子点に補間し、一次散乱比Rを求める。
- 二基のレーダのRがあれば、 β 及び θ_w を求める。
- 一基のレーダのRしかない場合、 $\beta = \beta_T$ として θ_w を求める。

θ_w は θ_T に近い方を選ぶ。

- その他の格子点では、 θ_w を補間。解析対象領域の端では、再解析風向を使用

風速の補正

$$(V_c - V_r)^2 \longrightarrow \min,$$

$$(\nabla \cdot \mathbf{V}_c - \nabla \cdot \mathbf{V}_r)^2 \longrightarrow \min,$$

風速の補正が小さい

水平発散の補正が小さい

V_c : 補正風、 V_r : 再解析風

風速の補正

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i,j} (V_c(i,j) - V_r(i,j))^2 + \lambda_w \sum_{i,j} (\nabla \cdot \mathbf{V}_c(i,j) - \nabla \cdot \mathbf{V}_r(i,j))^2 \\ &= \sum_{i,j} \Delta_{i,j}^2 + \lambda_w \sum_{i,j} D_v(i,j)^2 \end{aligned}$$

$$\mathbf{V}_r(i,j) = V_r(i,j) (\cos(\theta_r(i,j)), \sin(\theta_r(i,j)))$$

$$\mathbf{V}_c(i,j) = ((V_r(i,j) + \Delta_{i,j}) (\cos(\theta_w(i,j)), \sin(\theta_w(i,j))).$$

Qが最小となるよう風速補正量 $\Delta_{i,j}$ を求める。

V_r : 再解析風、 V_c : 補正風、 λ_w : 重み

風速の補正

$$\partial Q / \partial \Delta_{i,j} = 0.$$

$$(1 + \lambda_w \Psi) \Delta_{i,j} = \lambda_w \left[\frac{\cos(\theta_w(i,j))}{2\Delta x} (D_v(i+1,j) - D_v(i-1,j)) \right. \\ \left. + \frac{\sin(\theta_w(i,j))}{2\Delta y} (D_v(i,j+1) - D_v(i,j-1)) + \Psi \Delta_{i,j} \right]$$

右辺は $\Delta_{i,j}$ によらない: GS法

$$\Psi = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2(\theta_w(i,j))}{\Delta x^2} + \frac{\sin^2(\theta_w(i,j))}{\Delta y^2} \right)$$

$\Delta_{i,j}$: 風速補正量、 $\Delta x, y$: 格子間隔

λ_w : 重み、 D_v : 補正風と再解析風の水平発散差の差分表現

波浪推算

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{C}_g F) = S$$

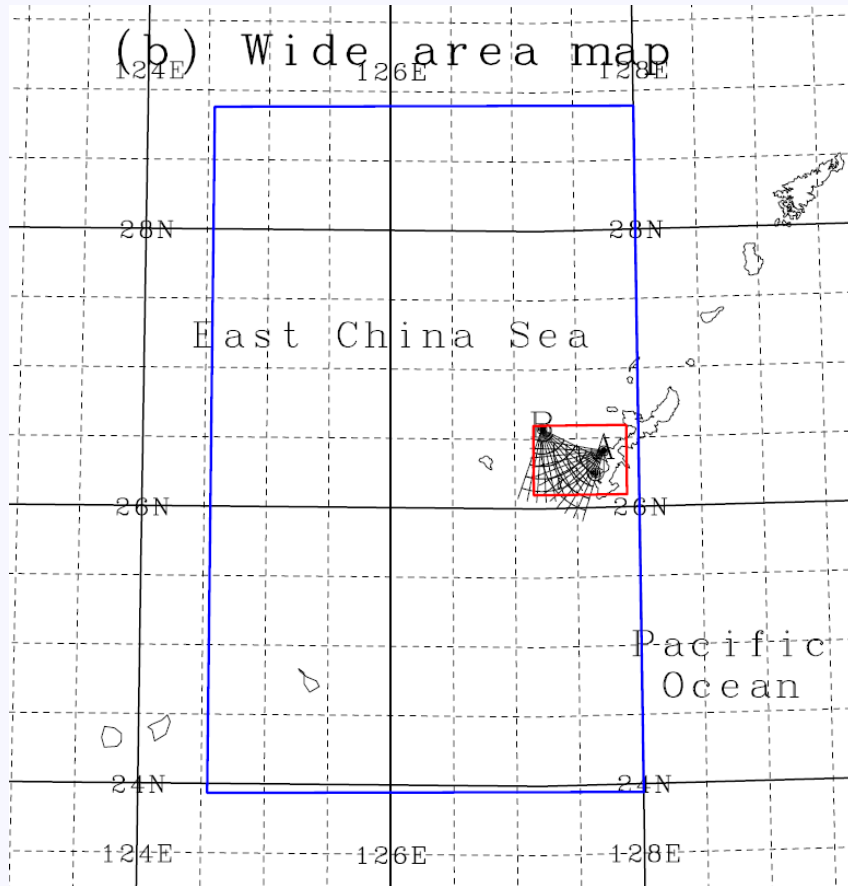
$$H_p = 4M_0^{1/2} \quad \text{波高}$$

$$T_p = M_0^{-1} M_{-1} \quad \text{周期}$$

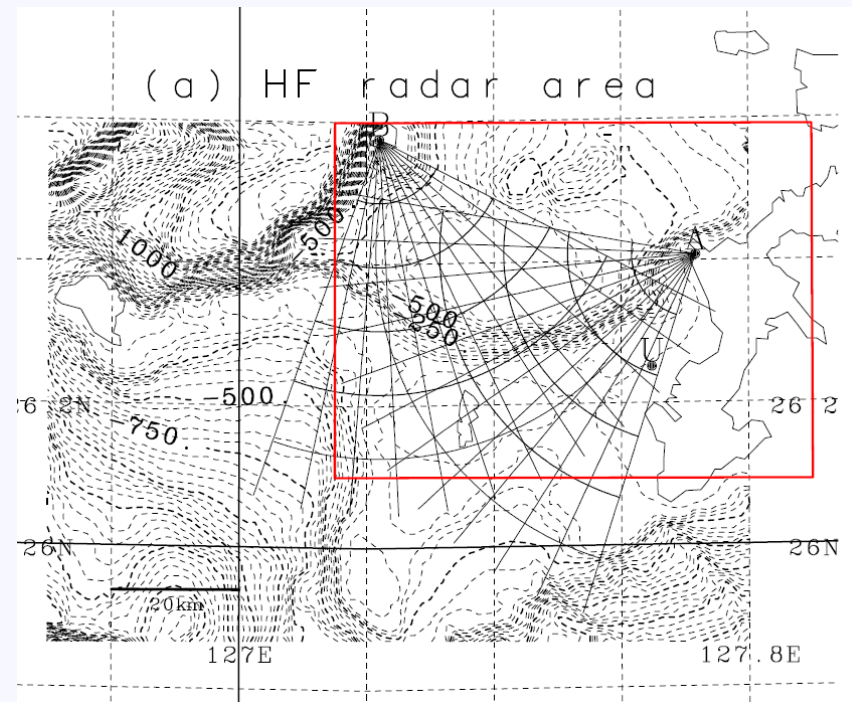
$$M_q = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^q F(f, \theta) d\theta df.$$

$F=F(f, \theta, x, t)$: スペクトル, t : 時間, x : 位置, f : 周波数, θ : 方向、
 $\mathbf{C}_g$: 群速度ベクトル, S : ソース関数:

波浪推算領域



0.05度

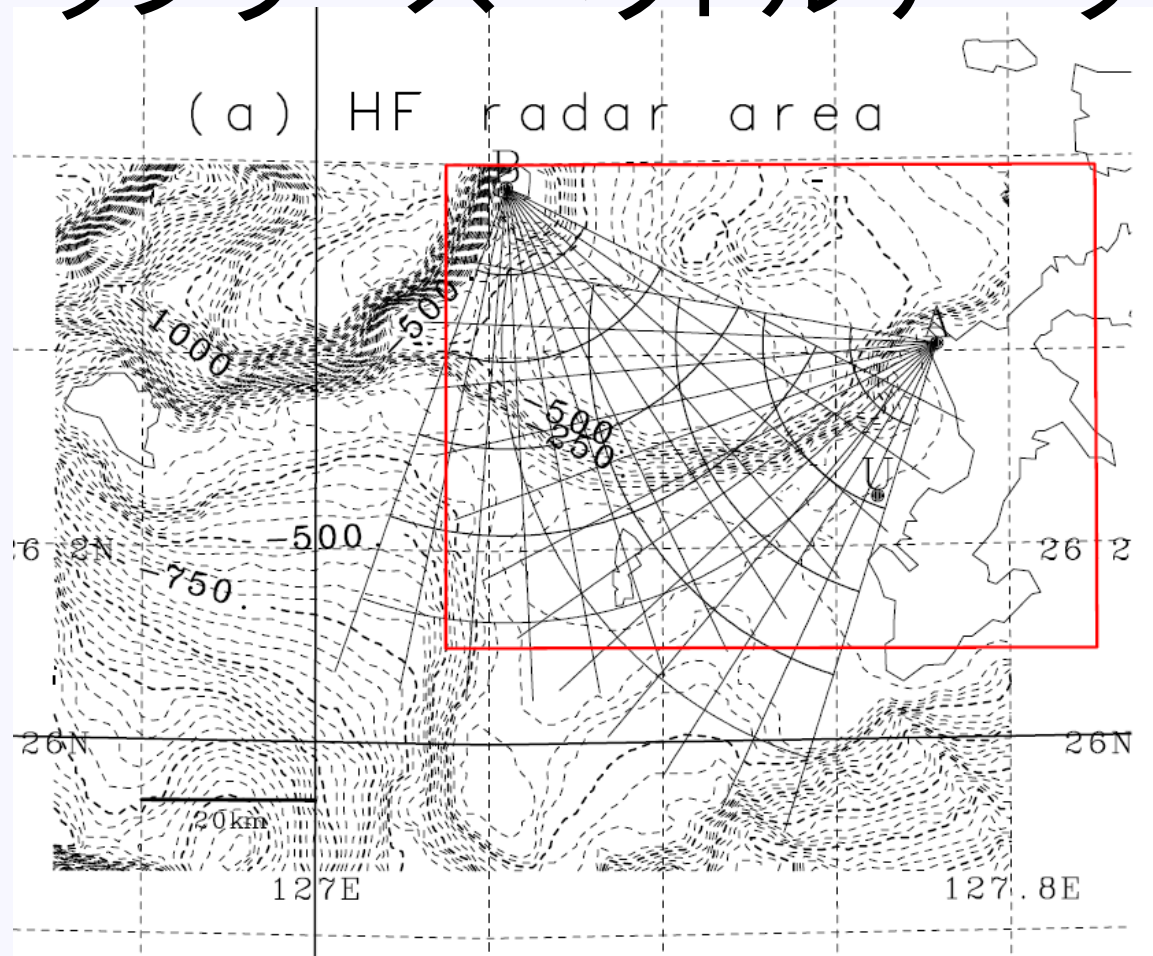


0.01度

使用データ

- 再解析データ:NCEP—CFS風
- 空間分解能:約0.3度
- 6時間ごとの解析値と1時間ごとの予報値
- 予報値の誤差を6時間ごとの解析値で補間し、1時間ごとの風データを作成
- ドップラースペクトル
- 解析対象期間:2001年5月26日から7月2日

ドップラースペクトルデータ



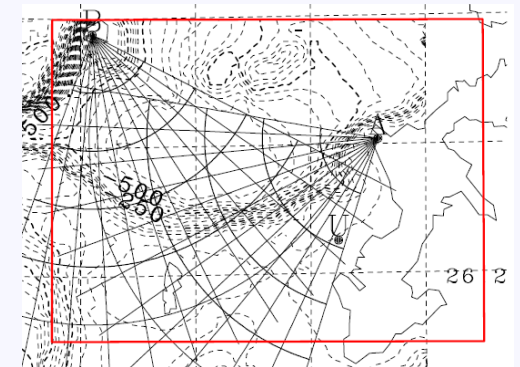
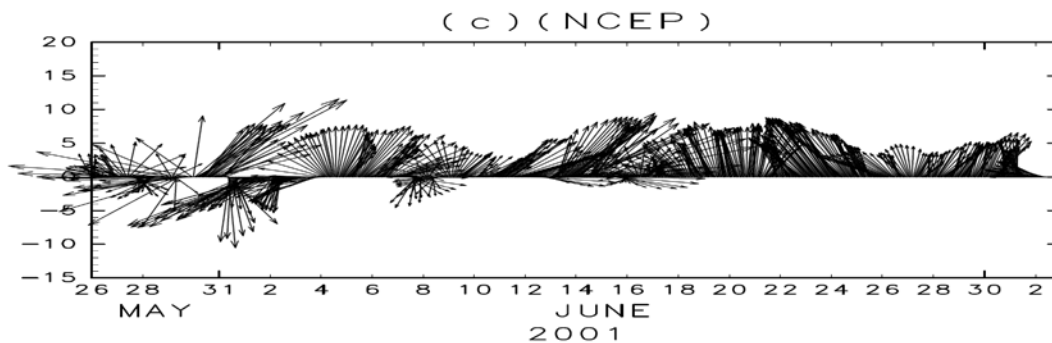
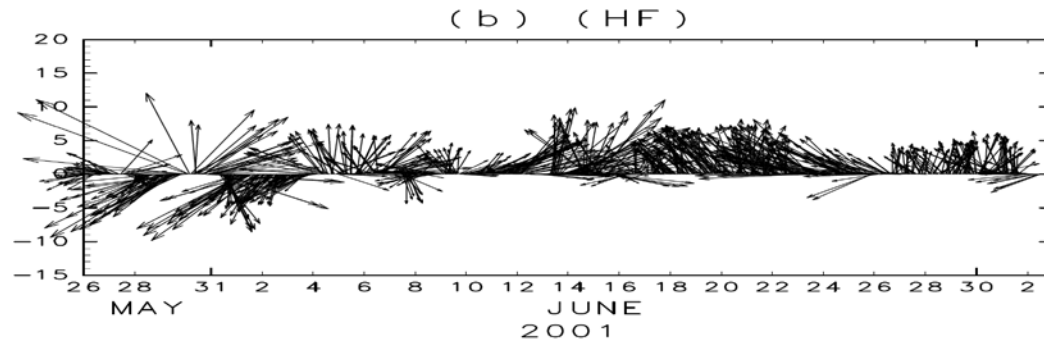
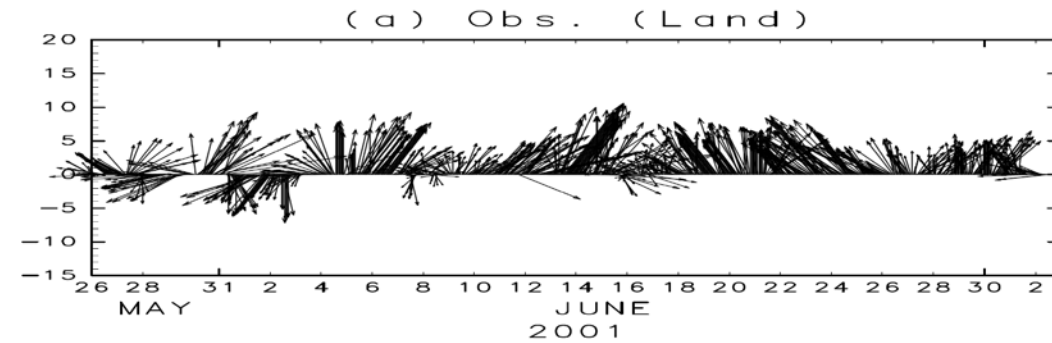
0.01度間隔格子点で風向推定

高分解波浪推算のみHFレーダ補正風使用

A,B:レーダ位置

U:波浪観測点:有義波高、有義波周期

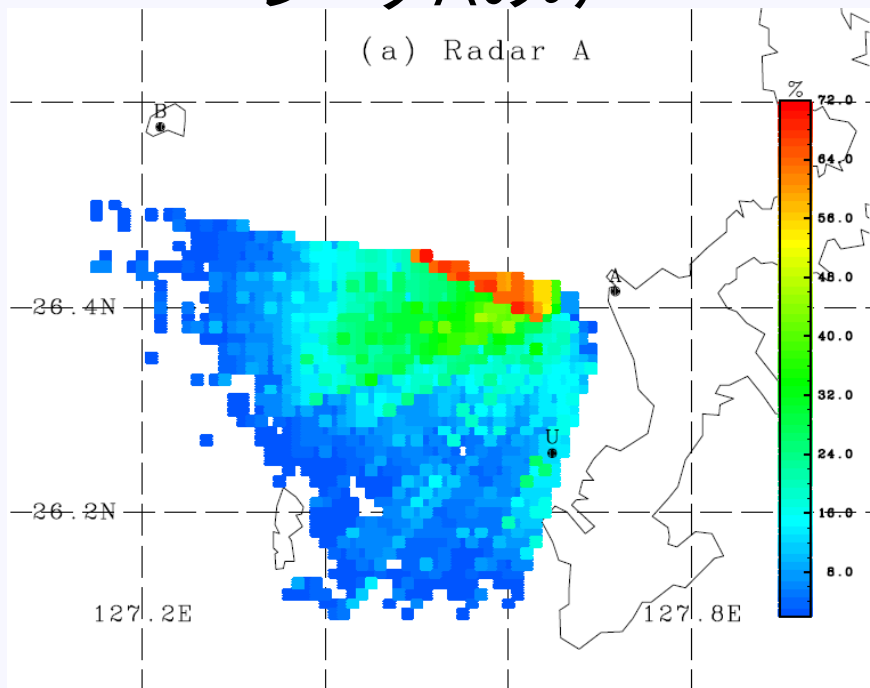
解析期間の風(上:アメダス,中:HF,下:NCEP)



データ取得率

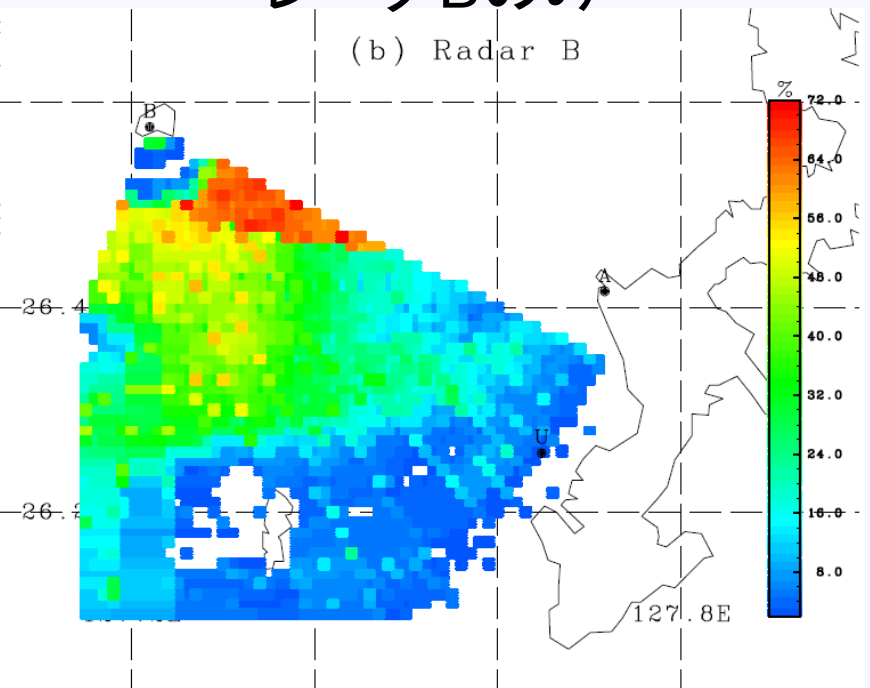
レーダAのみ

(a) Radar A



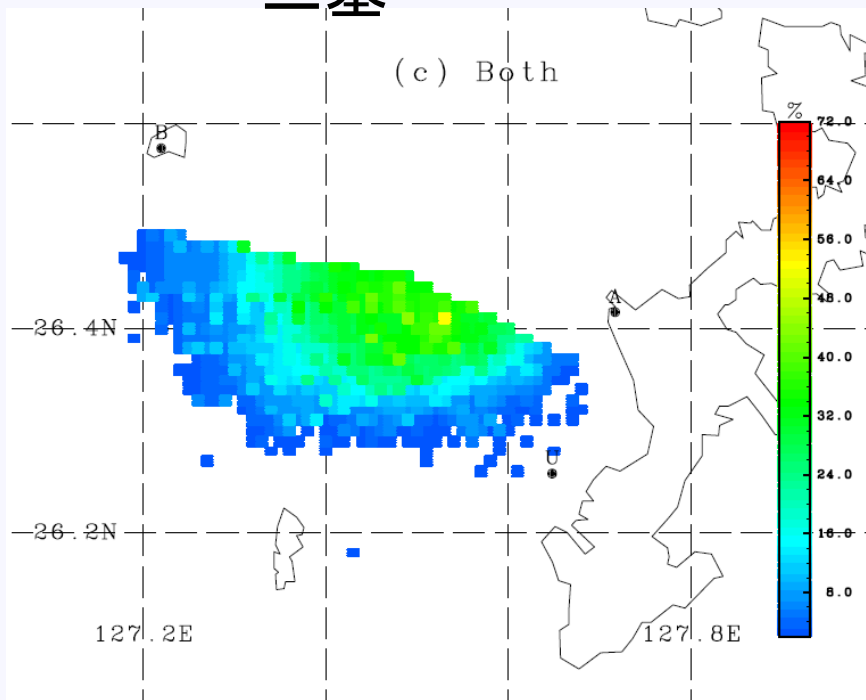
レーダBのみ

(b) Radar B

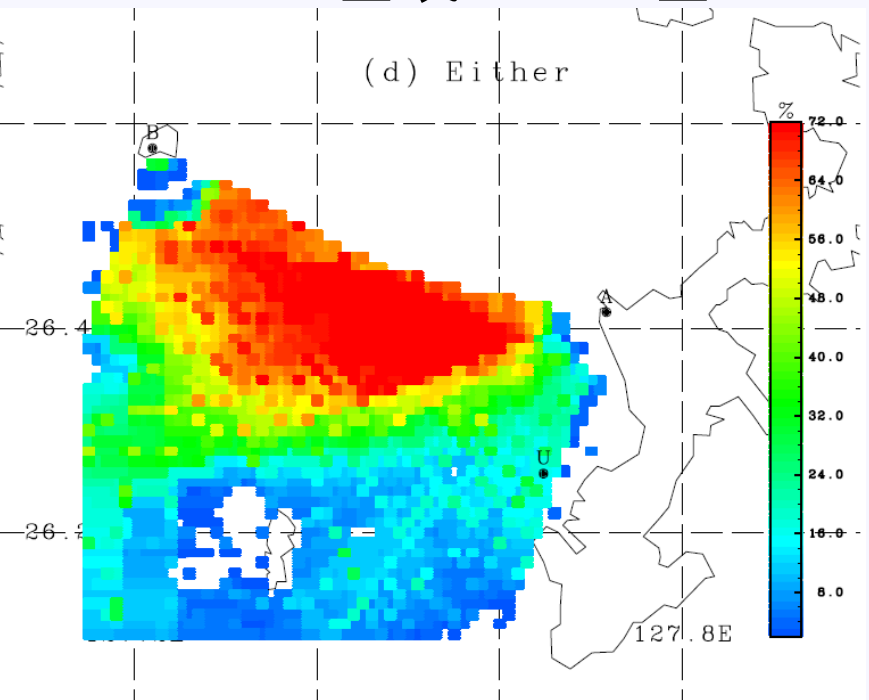


データ取得率

二基

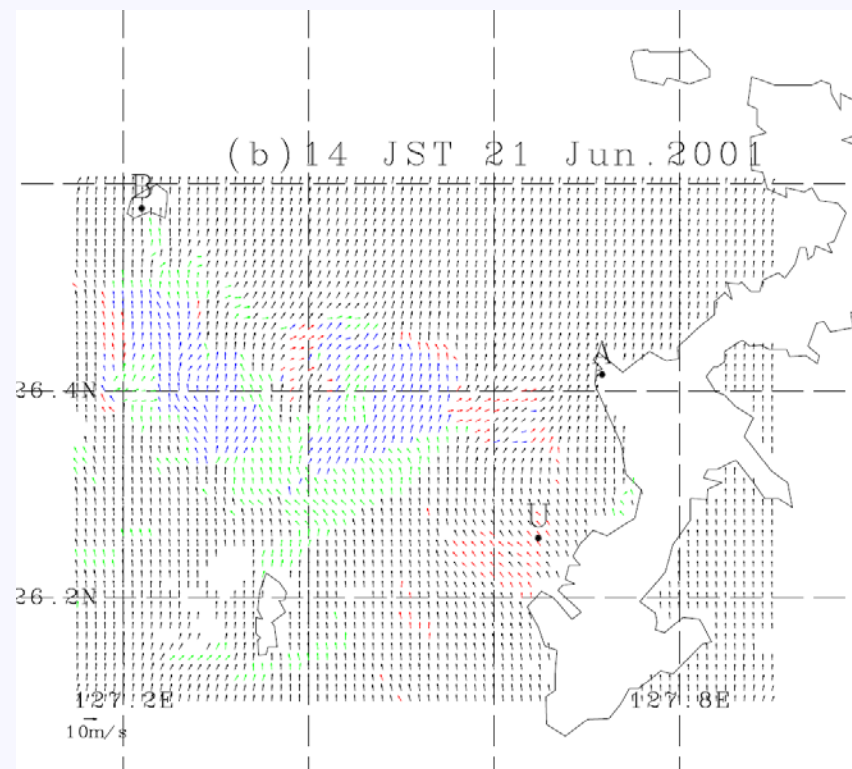
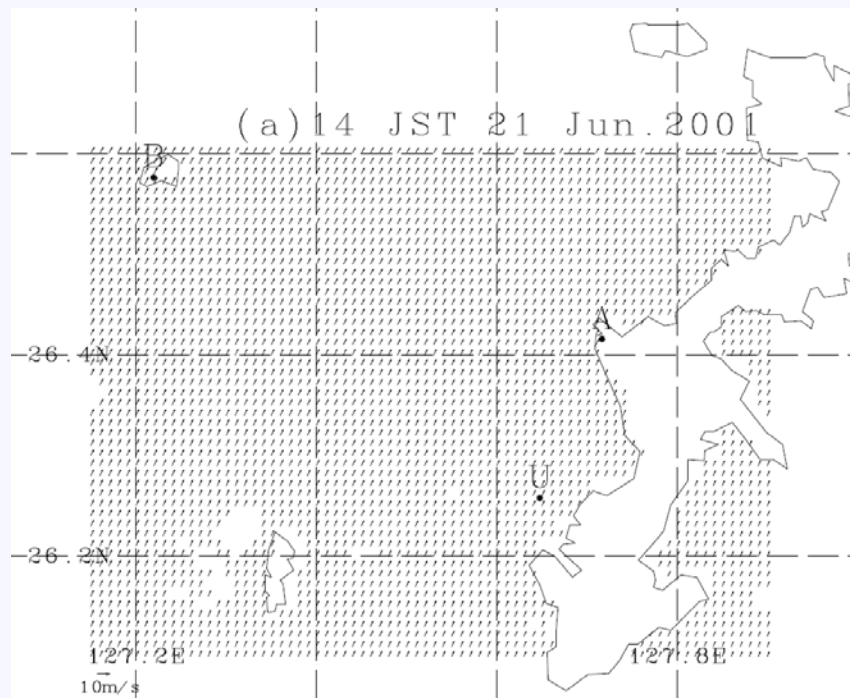


二基或いは一基



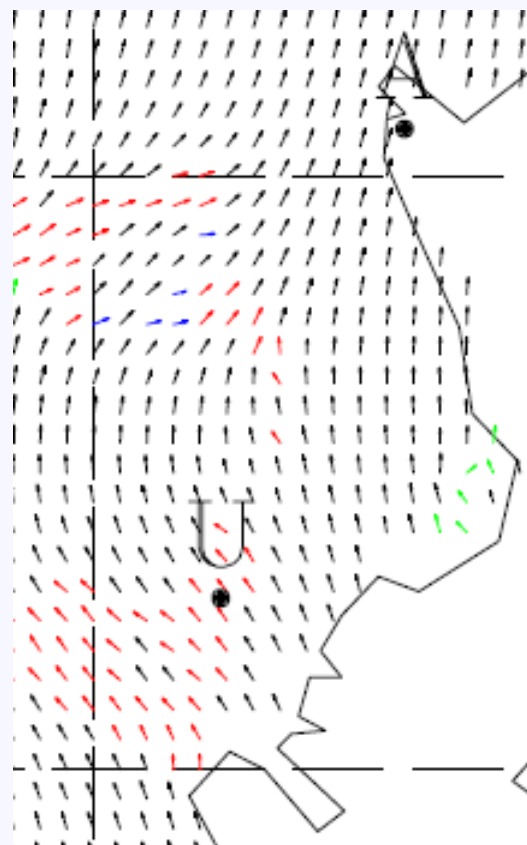
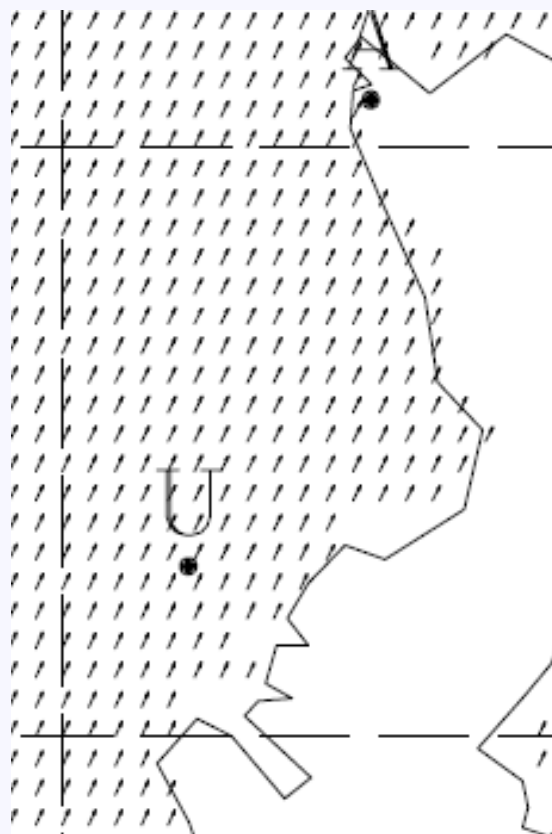
風速ベクトルの例

(左:NCEP-CFS風, 右:HF補正風)

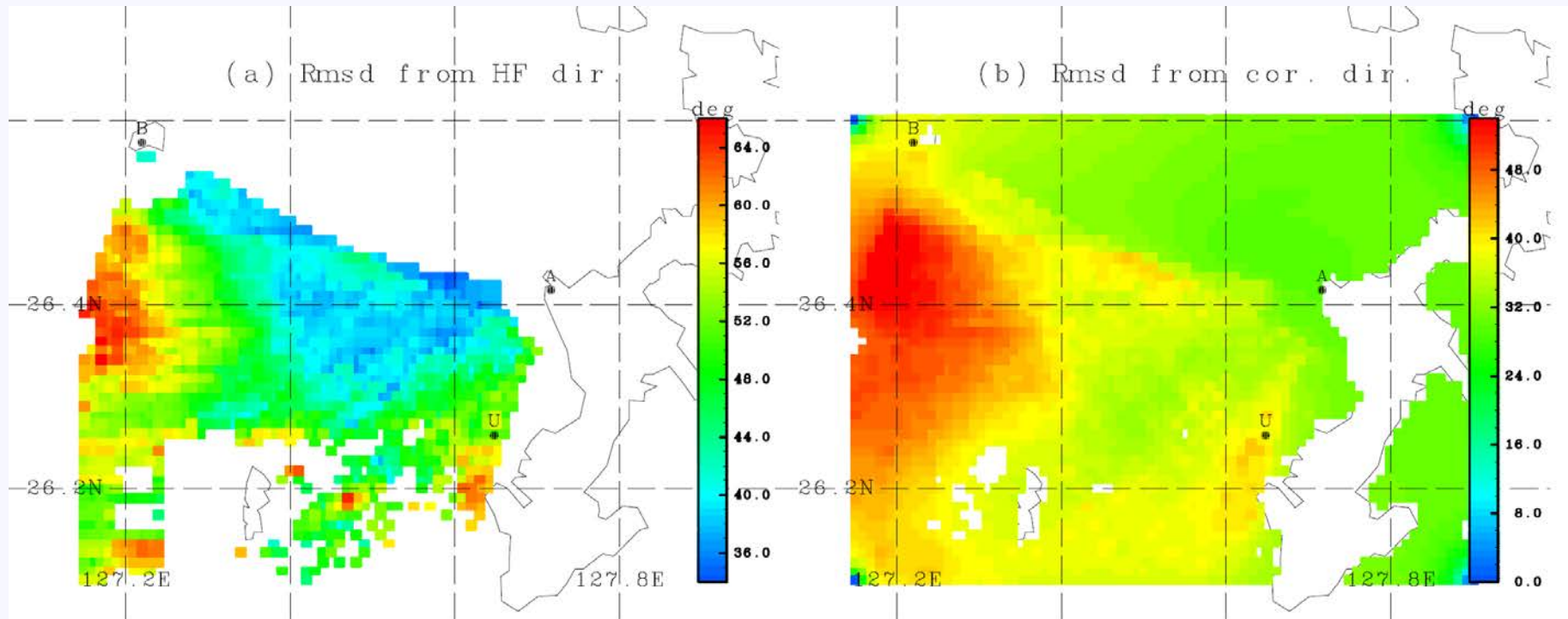


青:2基のレーダから風向推定
赤:レーダAのみから風向推定
緑:レーダBのみから風向推定
黒:風向補間

波浪観測点付近を拡大



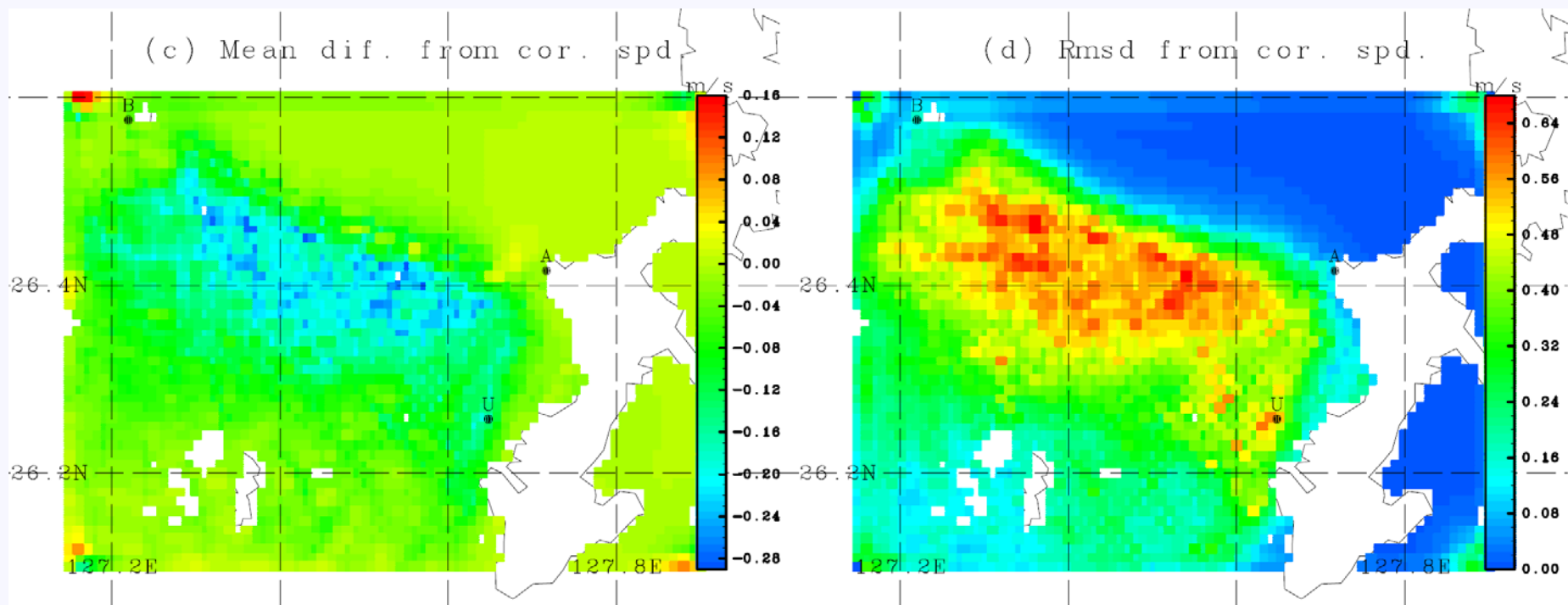
風向の比較(RMSD)



HFとNCEP風。一次散乱比からHFの風向が得られたものに限定

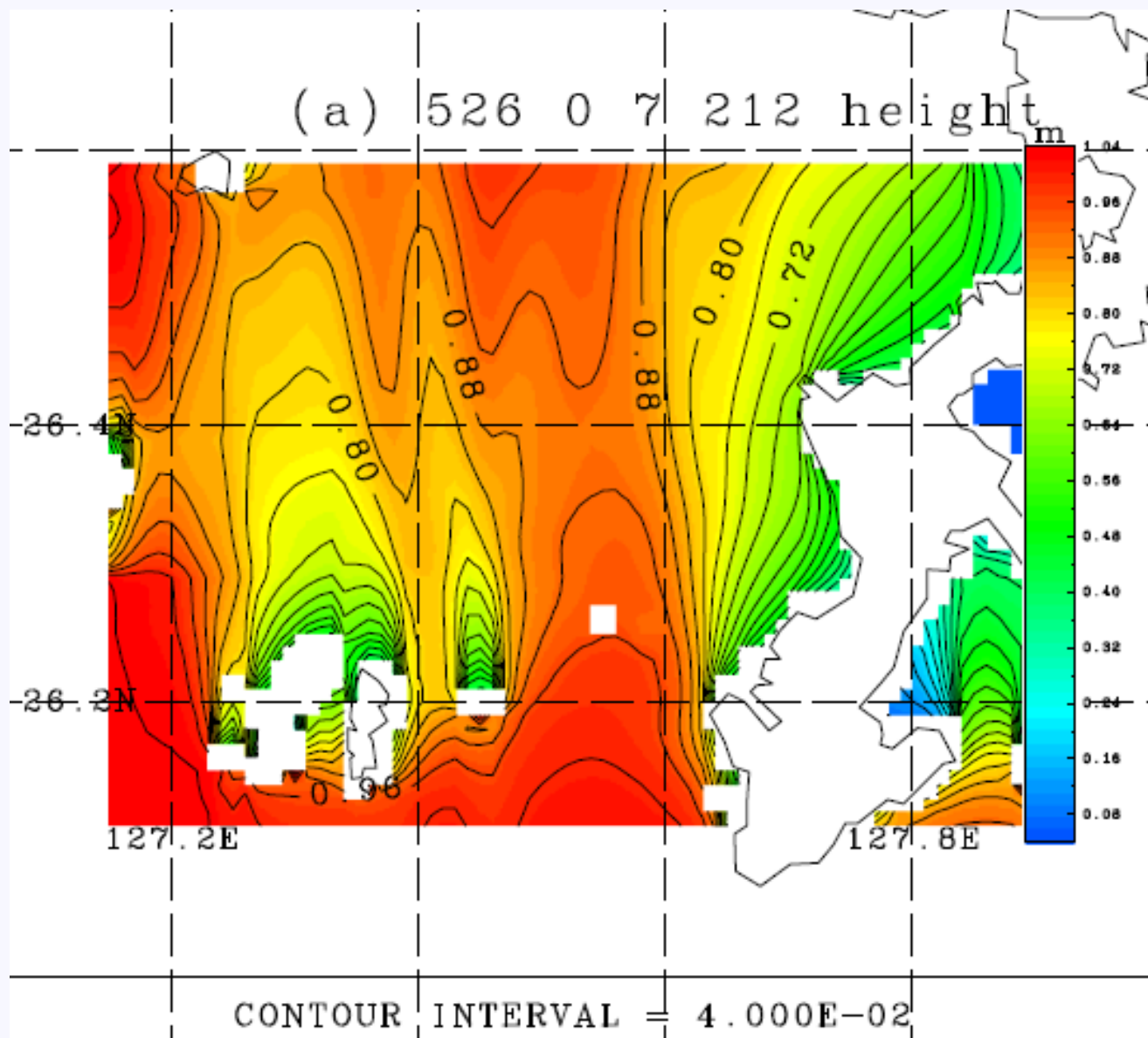
HFデータから補正した風向とNCEP風向のRMSD

風速の比較(左:平均, 右:RMSD)

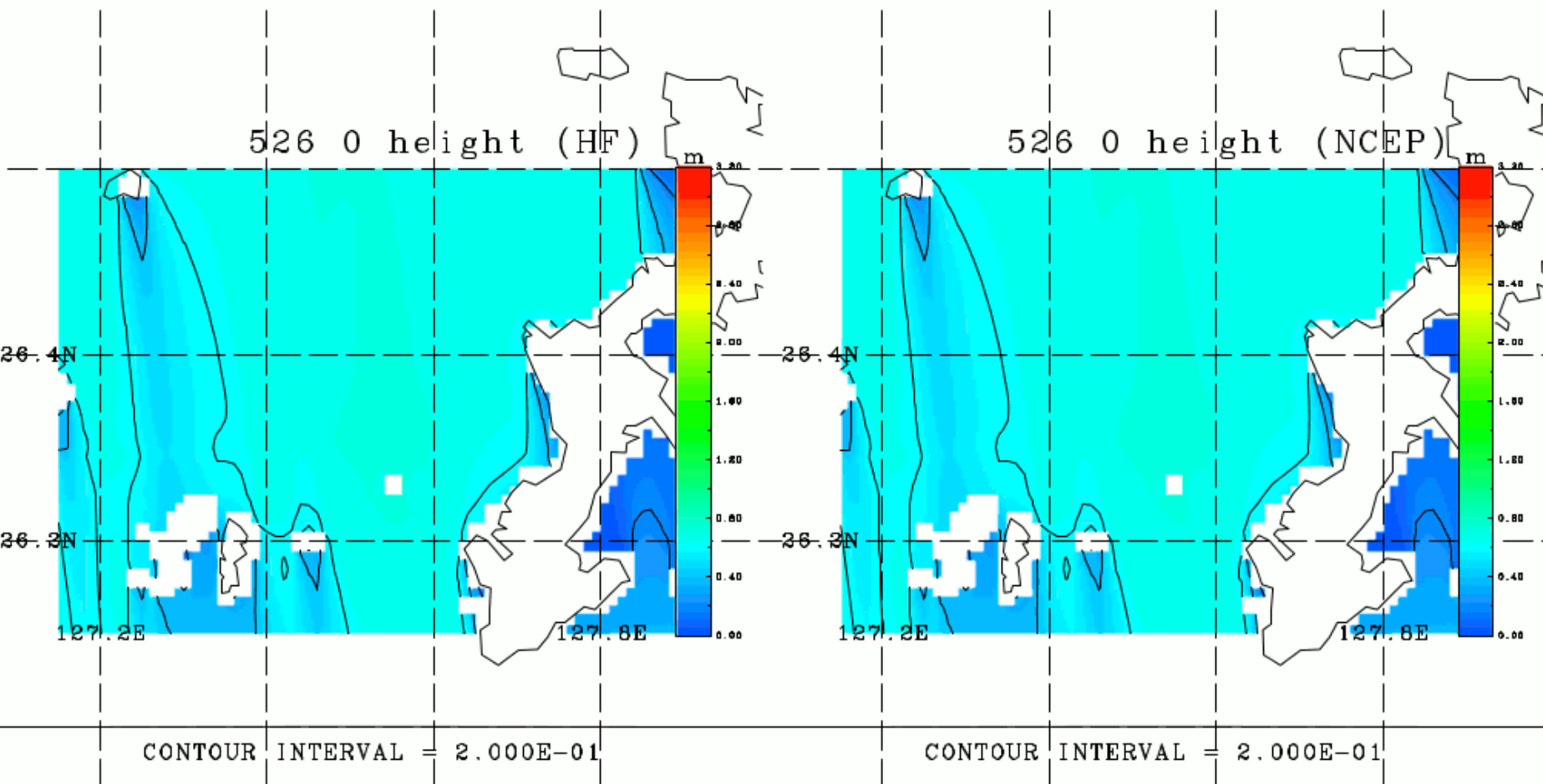


HF補正風速-NCEP風速

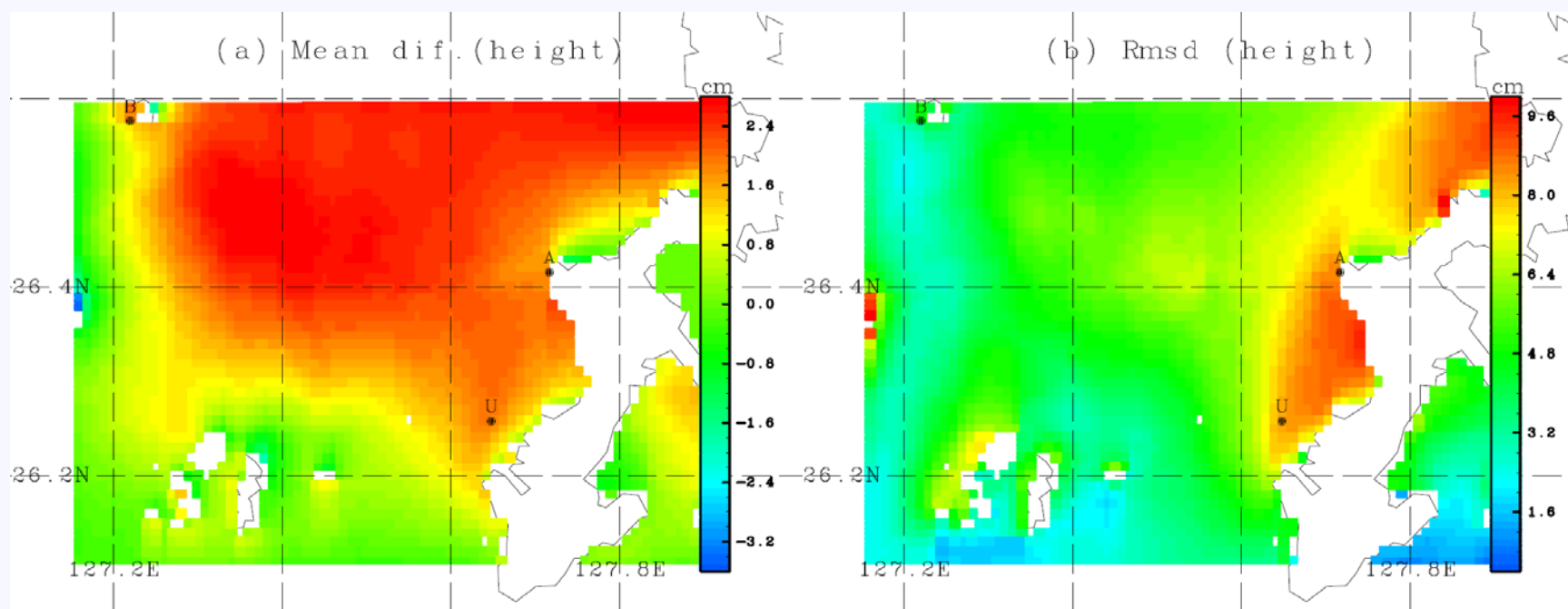
平均波高



波高(左:HF, 右:NCEP)



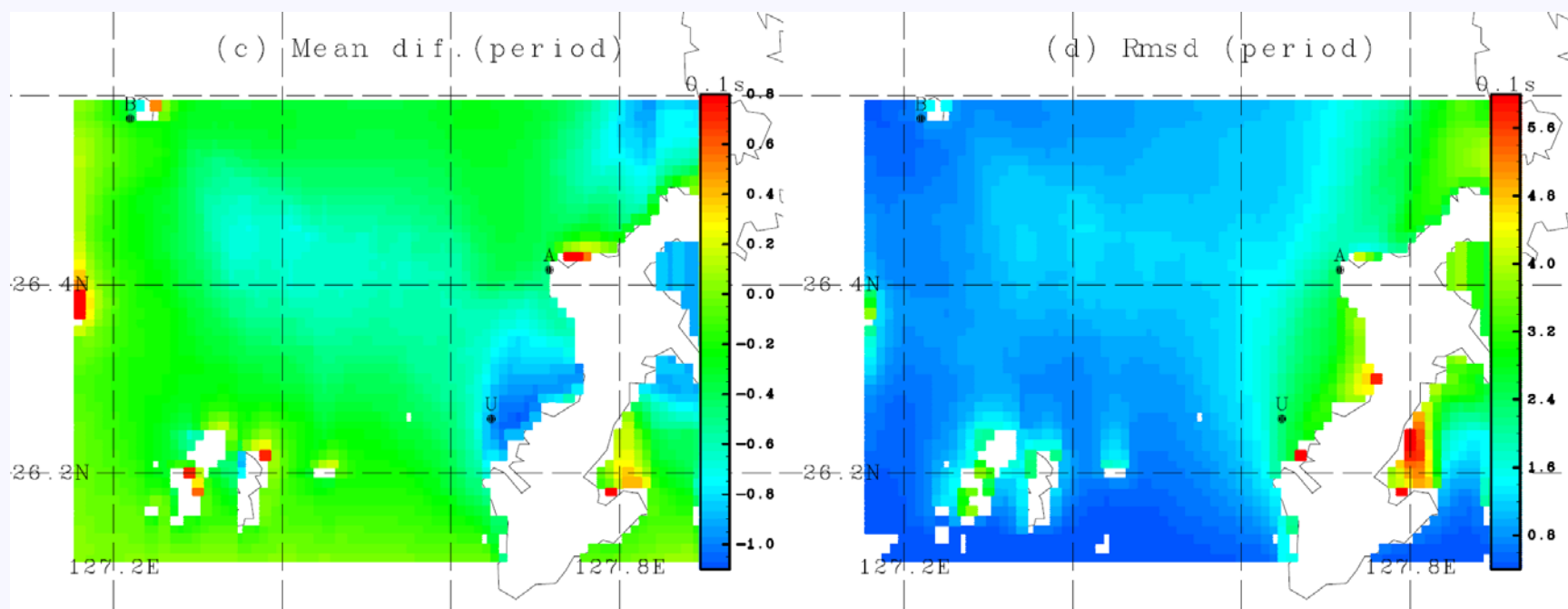
波高の比較(左:平均, 右:RMSD)



NCEP風—HF補正風

(cm)

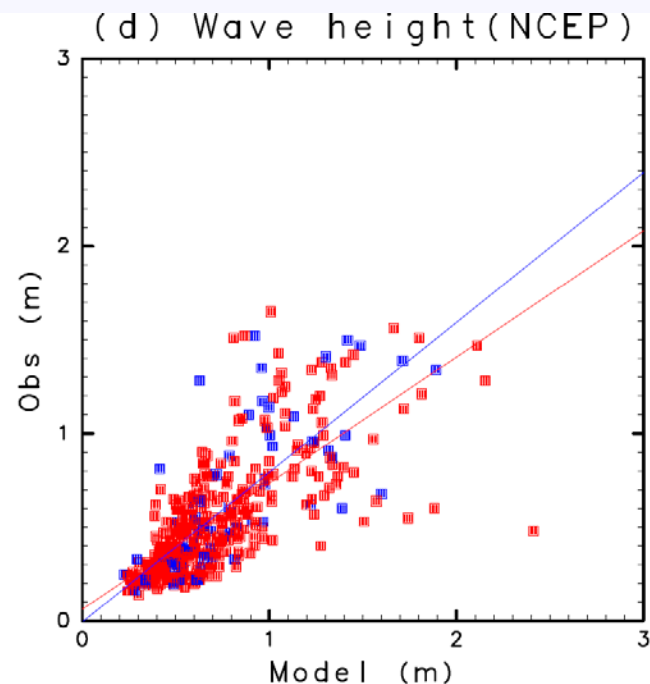
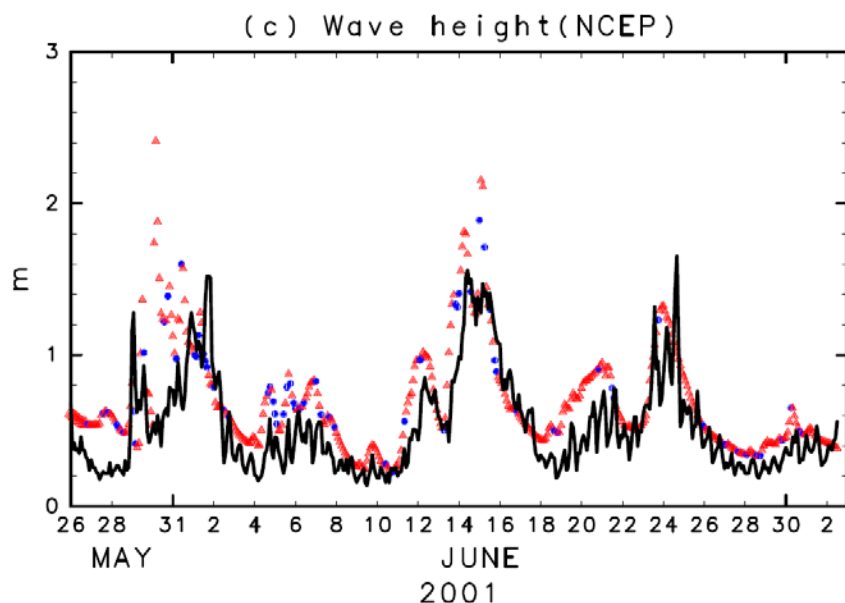
周期の比較(左:平均, 右:RMSD)



NCEP風—HF補正風

(0.1秒)

波高の比較(NCEP)



相関:0.73 ,rmsd=0.30 m

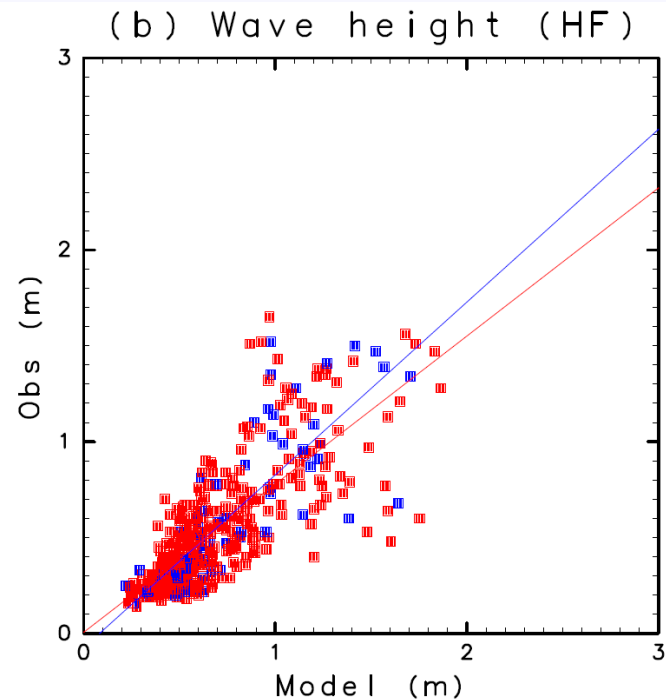
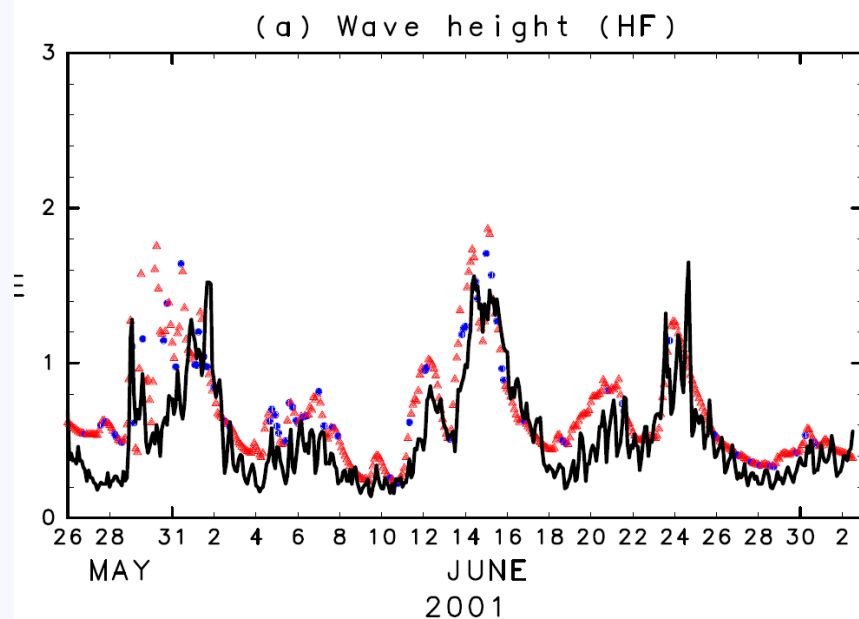
相関:0.76 ,rmsd=0.31 m

黒:観測値(451個)

青:推算値(HF風向は一次散乱比Rより推定:74個)

赤:推算値(HF風向は補間値)

波高の比較(HF補正)



相関:0.78 ,rmsd=0.26 m

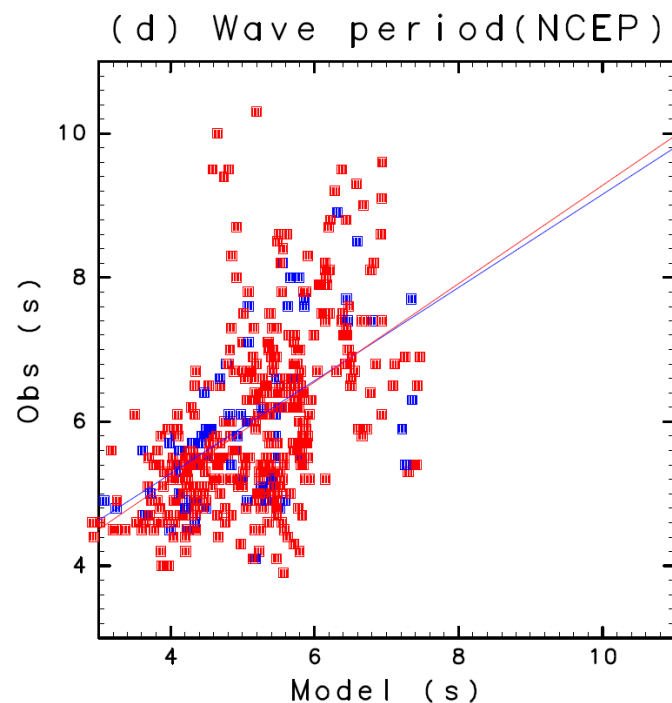
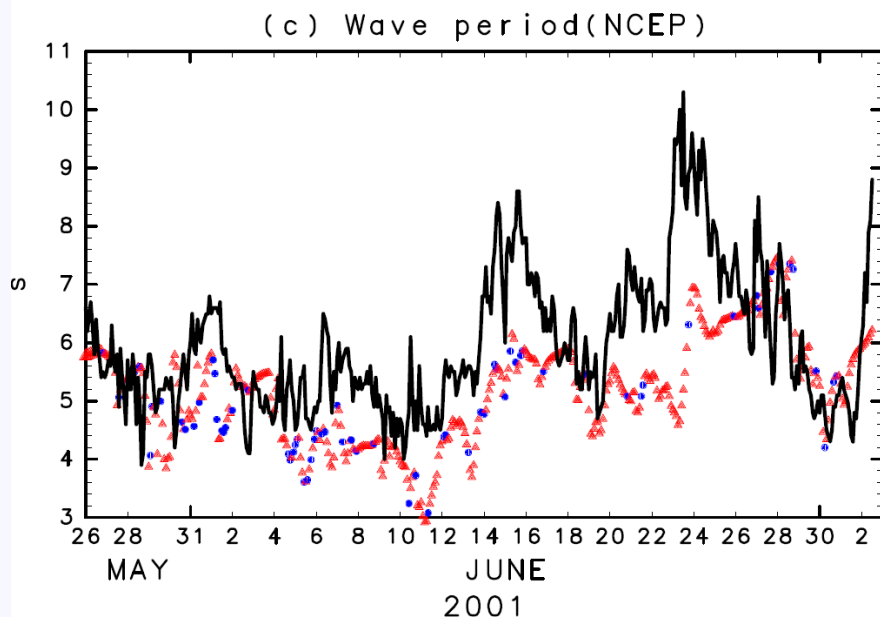
相関:0.82 ,rmsd=0.27 m

黒:観測値(451個)

青:推算値(HF風向は一次散乱比Rより推定:74個)

赤:推算値(HF風向は補間値)

有義波周期とスペクトル平均周期の比較(NCEP)



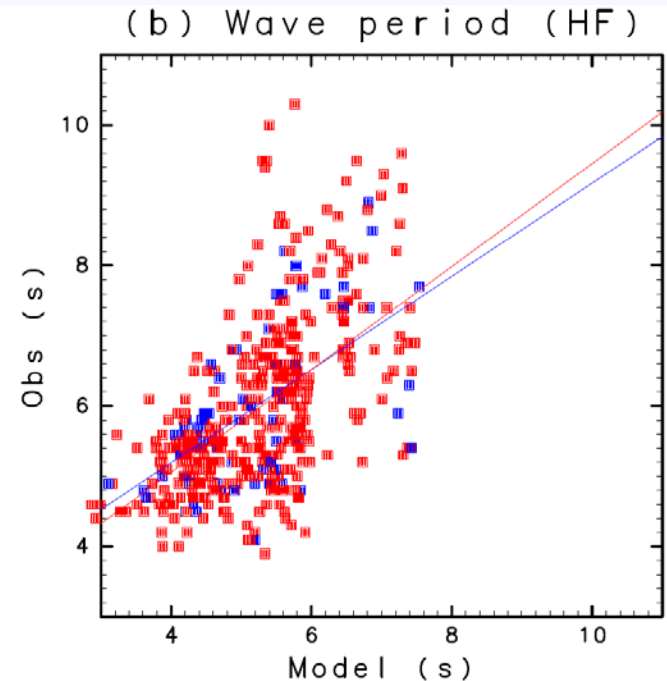
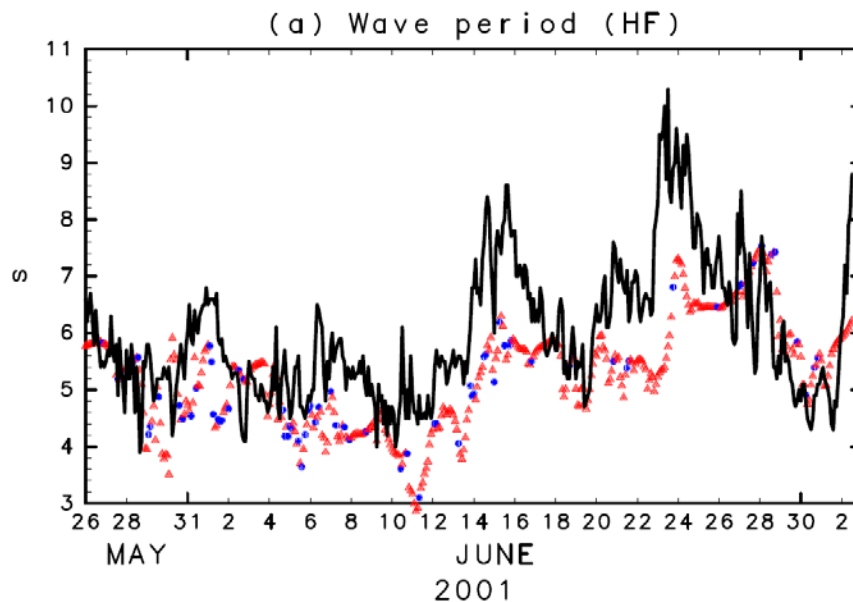
相関:0.52, 0.56

黒:有義波周期観測値

青:推算値(HF風向は一次散乱比Rより推定)

赤:推算値(HF風向は補間値)

有義波周期とスペクトル平均周期の比較(HF)



相関: 0.57, 0.58

黒: 有義波周期観測値

青: 推算値(HF風向は一次散乱比Rより推定)

赤: 推算値(HF風向は補間値)

波浪パラメータ比較の重み依存性

a_w	風速差 $\langle V - V_r \rangle$ (m s ⁻¹)	波高相関	波高 rms 差 (m)	周期相関
4	-0.17	0.78	0.26	0.57
N/A	0	0.73	0.30	0.52
1	-0.06	0.78	0.26	0.57
16	-0.37	0.78	0.26	0.57
4 (F)	0.08	0.77	0.31	0.59
N/A (F)	0.27	0.74	0.35	0.54

$$\lambda_w = \frac{a_w \Delta x^2 \Delta y^2}{\Delta x^2 + \Delta y^2},$$

$\Delta x, y$: 格子間隔

N/A: NCEP風

Fは予報値による波浪推算

風速の補正

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i,j} (V_c(i,j) - V_r(i,j))^2 + \lambda_w \sum_{i,j} (\nabla \cdot \mathbf{V}_c(i,j) - \nabla \cdot \mathbf{V}_r(i,j))^2 \\ &= \sum_{i,j} \Delta_{i,j}^2 + \lambda_w \sum_{i,j} D_v(i,j)^2 \end{aligned}$$

$$\mathbf{V}_r(i,j) = V_r(i,j) (\cos(\theta_r(i,j)), \sin(\theta_r(i,j)))$$

$$\mathbf{V}_c(i,j) = ((V_r(i,j) + \Delta_{i,j}) (\cos(\theta_w(i,j)), \sin(\theta_w(i,j))).$$

Qが最小となるよう風速補正量 $\Delta_{i,j}$ を求める。

V_r : 再解析風、 V_c : 補正風、 λ_w : 重み

波浪パラメータ比較の重み依存性

a_w	風速差 $\langle V - V_r \rangle$ (m s ⁻¹)	波高相関	波高 rms 差 (m)	周期相関
4	-0.17	0.78	0.26	0.57
N/A	0	0.73	0.30	0.52
1	-0.06	0.78	0.26	0.57
16	-0.37	0.78	0.26	0.57
4 (F)	0.08	0.77	0.31	0.59
N/A (F)	0.27	0.74	0.35	0.54

$$\lambda_w = \frac{a_w \Delta x^2 \Delta y^2}{\Delta x^2 + \Delta y^2},$$

$\Delta x, y$: 格子間隔

N/A: NCEP風

Fは予報値による波浪推算

目的関数

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i,j} (V_c(i,j) - V_r(i,j))^2 + \lambda_w \sum_{i,j} (\nabla \cdot \mathbf{V}_c(i,j) - \nabla \cdot \mathbf{V}_r(i,j))^2 \\ &= \sum_{i,j} \Delta_{i,j}^2 + \lambda_w \sum_{i,j} D_v(i,j)^2 \end{aligned}$$

Estimate speed correction $\Delta_{i,j}$ to minimize Q .

V_r : reanalysis wind, V_c : Corrected wind, λ_w : weight

Error-permitted wind direction method (EPWDM)

$$\begin{aligned} Q_p &= \sum_{i,j} (V_W \sigma_\theta)^{-2} [\mathbf{n}_\theta(i,j) \cdot \mathbf{V}_c(i,j)]^2 + \sigma_u^{-2} |\mathbf{V}_c(i,j) - \mathbf{V}_r(i,j)|^2 \\ &\quad + \sigma_D^{-2} [\nabla \cdot (\mathbf{V}_c(i,j) - \mathbf{V}_r(i,j))]^2 \end{aligned}$$

$\mathbf{n}_\theta = (-\sin(\theta_w(i,j)), \cos(\theta_w(i,j)))$: unit vector orthogonal to the HF radar-derived wind direction

$\mathbf{n}_w = (\cos(\theta_w(i,j)), \sin(\theta_w(i,j)))$,

σ_θ^2 : error variance of HF radar-derived wind direction,

V_W : parameter

σ_u^2 : error variance of NCEP wind components.

$\sigma_D^2 = (\Delta x^2 + \Delta y^2) / [2(\Delta x^2 \Delta y^2)] \sigma_u^2$.

Error-permitted wind direction method (EPWDM)

$$Q_p = \sum_{i,j} (V_W \sigma_\theta)^{-2} [\mathbf{n}_\theta(i,j) \cdot \mathbf{V}_c(i,j)]^2 + \sigma_u^{-2} |\mathbf{V}_c(i,j) - \mathbf{V}_r(i,j)|^2 \\ + \sigma_D^{-2} [\nabla \cdot (\mathbf{V}_c(i,j) - \mathbf{V}_r(i,j))]^2$$

$$\partial Q_p / \partial \mathbf{V}_c = \mathbf{0}$$

Linear Equation

$\mathbf{V}_r$: reanalysis wind, $\mathbf{V}_c$: Corrected wind, λ_w : weight

$\mathbf{n}_\theta = (-\sin(\theta_w(i,j)), \cos(\theta_w(i,j)))$: unit vector orthogonal to the HF radar-derived wind direction

$\mathbf{n}_w = (\cos(\theta_w(i,j)), \sin(\theta_w(i,j)))$,

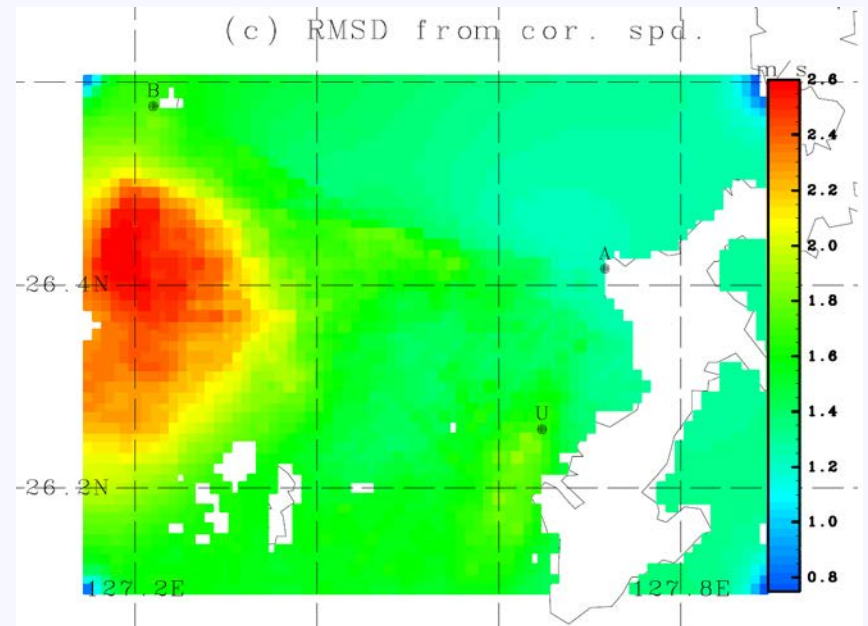
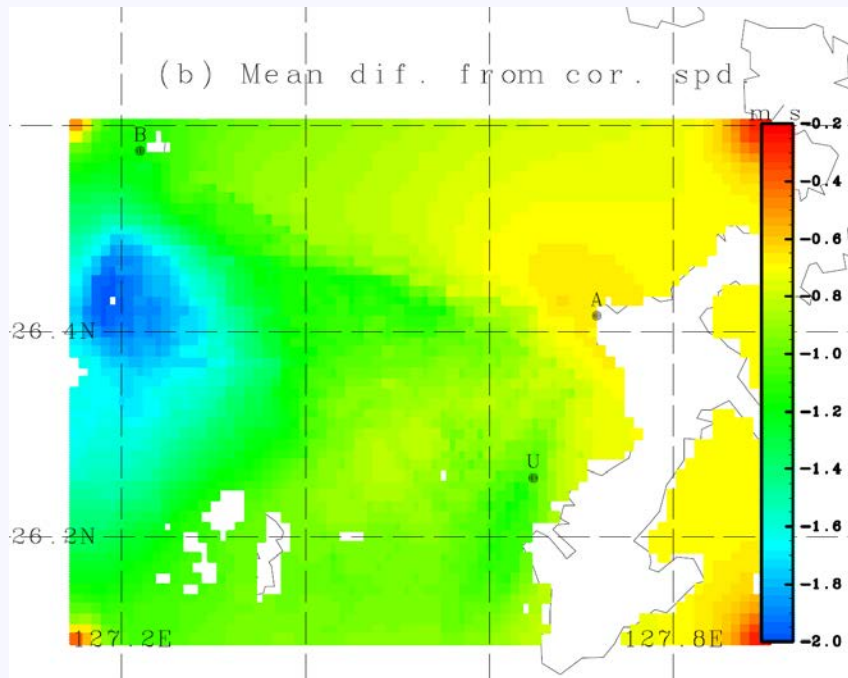
σ_θ^2 : error variance of HF radar-derived wind direction,

V_W : parameter

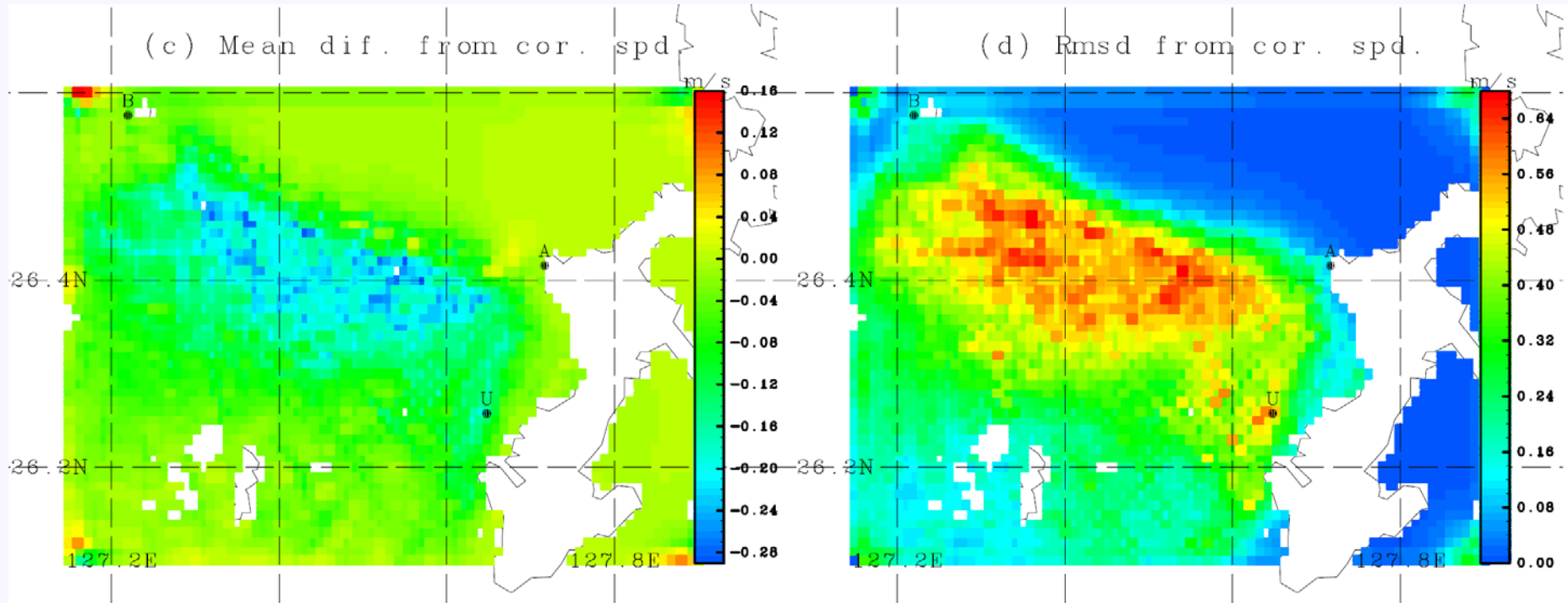
σ_u^2 : error variance of NCEP wind components.

$\sigma_D^2 = (\Delta x^2 + \Delta y^2) / [2(\Delta x^2 \Delta y^2)] \sigma_u^2$.

風速の比較(左:平均, 右:RMSD)

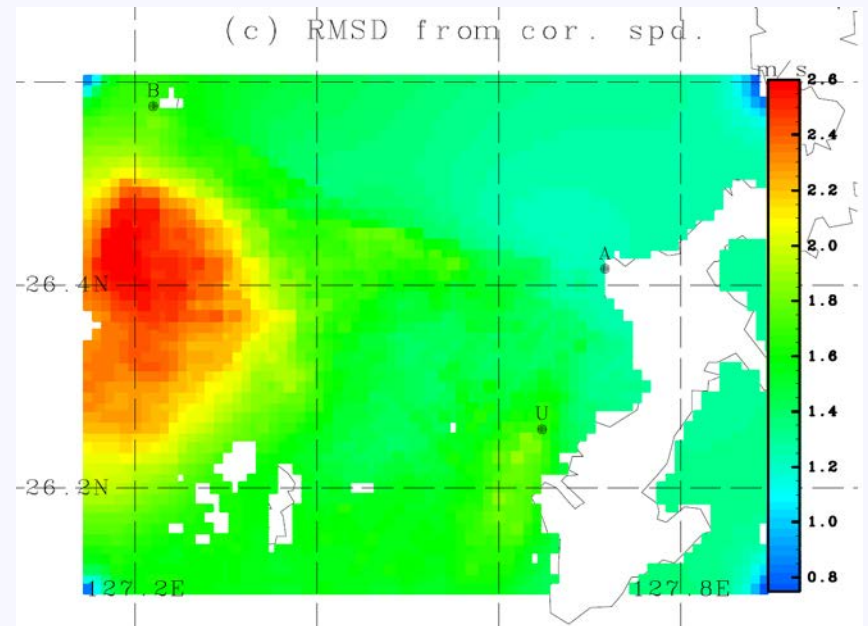
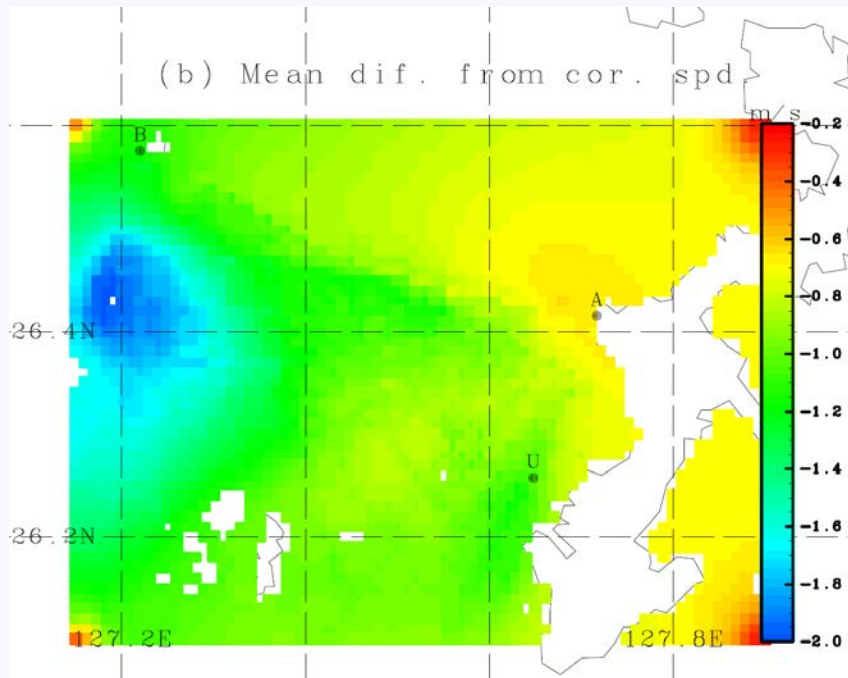


風速の比較(左:平均, 右:RMSD)



HF補正風速-NCEP風速: 前のスライド

風速の比較(左:平均, 右:RMSD)



EPWDMとの比較

	V_w (m s^{-1})	Wind speed dif. $\langle V - V_r \rangle$ (m s^{-1})	Cor. of waveheight	Height RMSD(m)	Period Cor.
Case 2-1	1	-0.92	0.76	0.25	0.58
Case 2-2	4	-0.25	0.74	0.28	0.54

	Weight a_w	Wind speed dif. $\langle V - V_r \rangle$ (m s^{-1})	Cor. of waveheight	RMSD of waveheight (m)	Cor. of wave period
Case 1	4	-0.17	0.78	0.26	0.57
Case 2	N/A	0	0.73	0.30	0.52
Case 3	1	-0.06	0.78	0.26	0.57
Case 4	16	-0.37	0.78	0.26	0.57
Case 5	4 (F)	0.08	0.77	0.31	0.59
Case 6	N/A (F)	0.27	0.74	0.35	0.54

Case 2,6:NCEP winds F:from forecasted winds

Error-permitted wind direction method (EPWDM)

$$Q_p = \sum_{i,j} (V_W \sigma_\theta)^{-2} [\mathbf{n}_\theta(i,j) \cdot \mathbf{V}_c(i,j)]^2 + \sigma_u^{-2} |\mathbf{V}_c(i,j) - \mathbf{V}_r(i,j)|^2 \\ + \sigma_D^{-2} [\nabla \cdot (\mathbf{V}_c(i,j) - \mathbf{V}_r(i,j))]^2$$

$$\partial Q_p / \partial \mathbf{V}_c = \mathbf{0}$$

Linear Equation

$\mathbf{V}_r$: reanalysis wind, $\mathbf{V}_c$: Corrected wind, λ_w : weight

$\mathbf{n}_\theta = (-\sin(\theta_w(i,j)), \cos(\theta_w(i,j)))$: unit vector orthogonal to the HF radar-derived wind direction

$\mathbf{n}_w = (\cos(\theta_w(i,j)), \sin(\theta_w(i,j)))$,

σ_θ^2 : error variance of HF radar-derived wind direction,

V_W : parameter

σ_u^2 : error variance of NCEP wind components.

$\sigma_D^2 = (\Delta x^2 + \Delta y^2) / [2(\Delta x^2 \Delta y^2)] \sigma_u^2$.

EPWDMとの比較

	V_w (m s^{-1})	Wind speed dif. $\langle V - V_r \rangle$ (m s^{-1})	Cor. of waveheight	Height RMSD(m)	Period Cor.
Case 2-1	1	-0.92	0.76	0.25	0.58
Case 2-2	4	-0.25	0.74	0.28	0.54

	Weight a_w	Wind speed dif. $\langle V - V_r \rangle$ (m s^{-1})	Cor. of waveheight	RMSD of waveheight (m)	Cor. of wave period
Case 1	4	-0.17	0.78	0.26	0.57
Case 2	N/A	0	0.73	0.30	0.52
Case 3	1	-0.06	0.78	0.26	0.57
Case 4	16	-0.37	0.78	0.26	0.57
Case 5	4 (F)	0.08	0.77	0.31	0.59
Case 6	N/A (F)	0.27	0.74	0.35	0.54

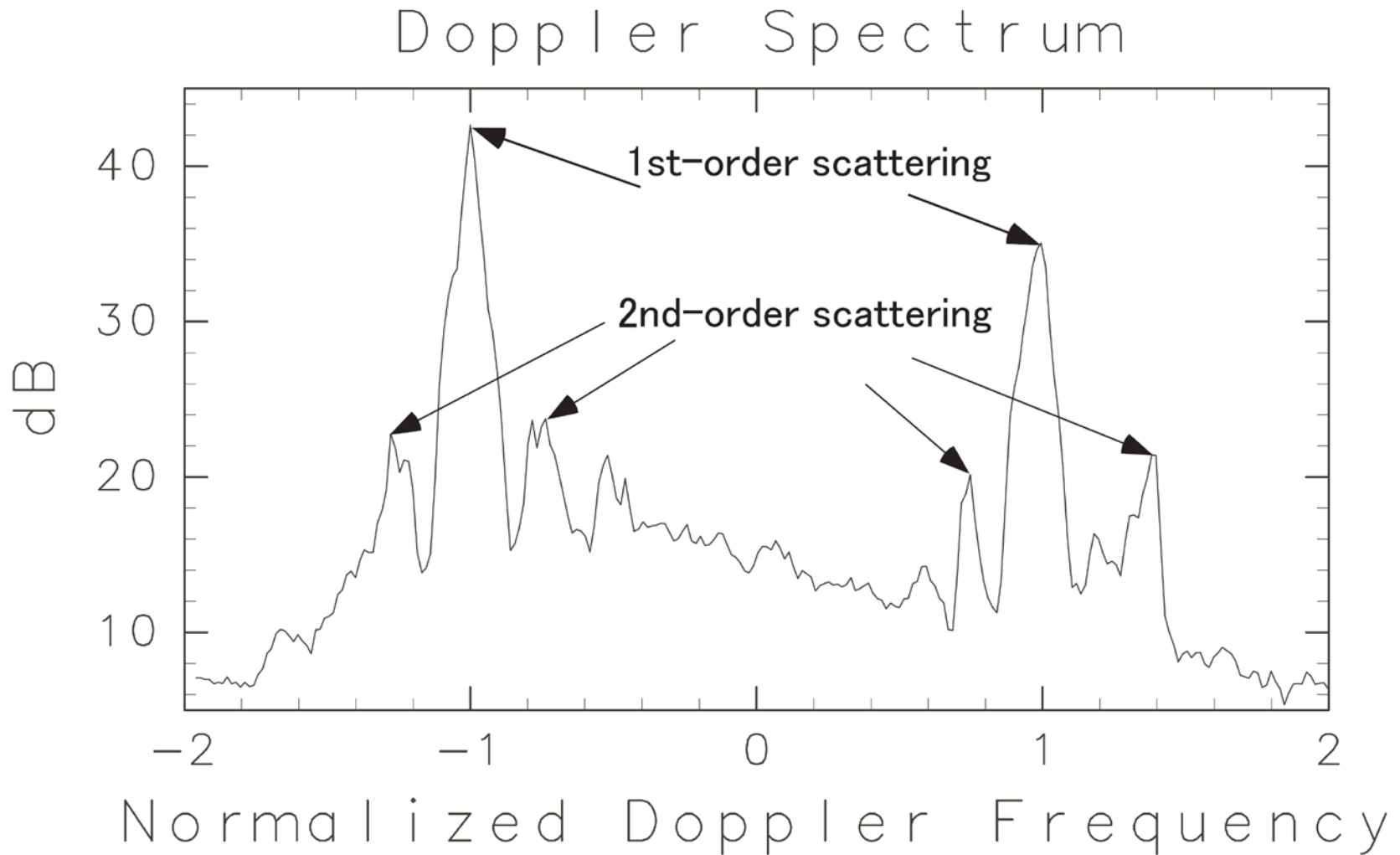
Case 2,6:NCEP winds F:from forecasted winds

まとめと今後の課題

- 海洋レーダから得られた風向を用いて、再解析風データを補正する手法を開発した。
- 海洋レーダから得られた風向の活用は、島嶼沿岸域のような、吹走距離が風向によって大きく変化する海域の波浪推算に有効である。
- 補正した風速の現場観測の比較
- 表層流による検証
- 風向の空間補間方法の改良
- 目的関数の改良

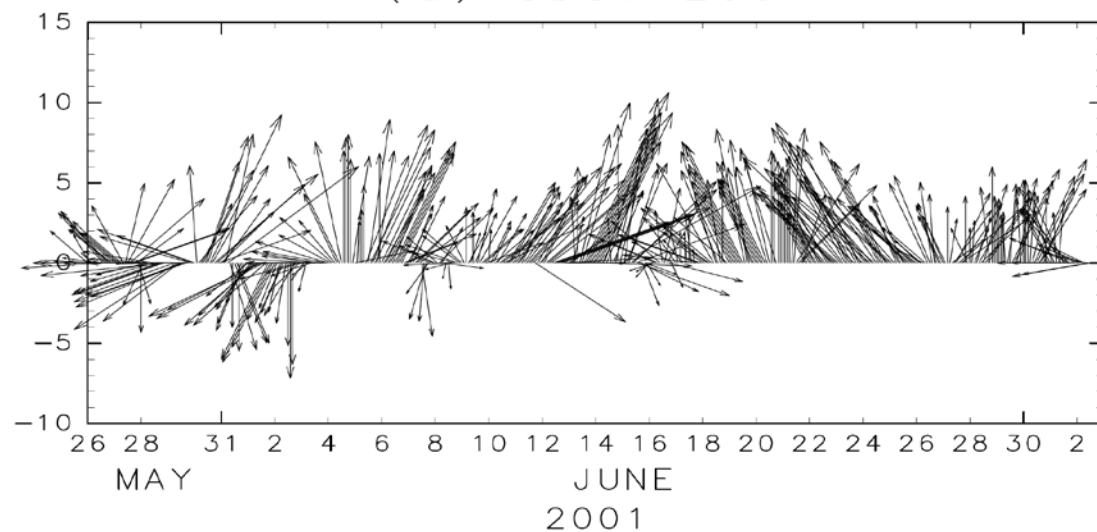
終わり

Example of Doppler spectra(DS)

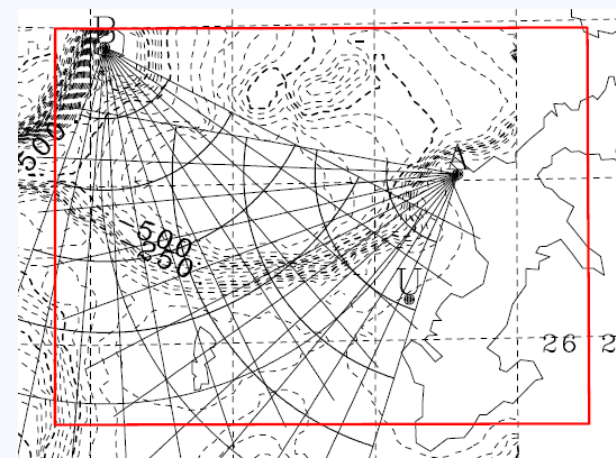
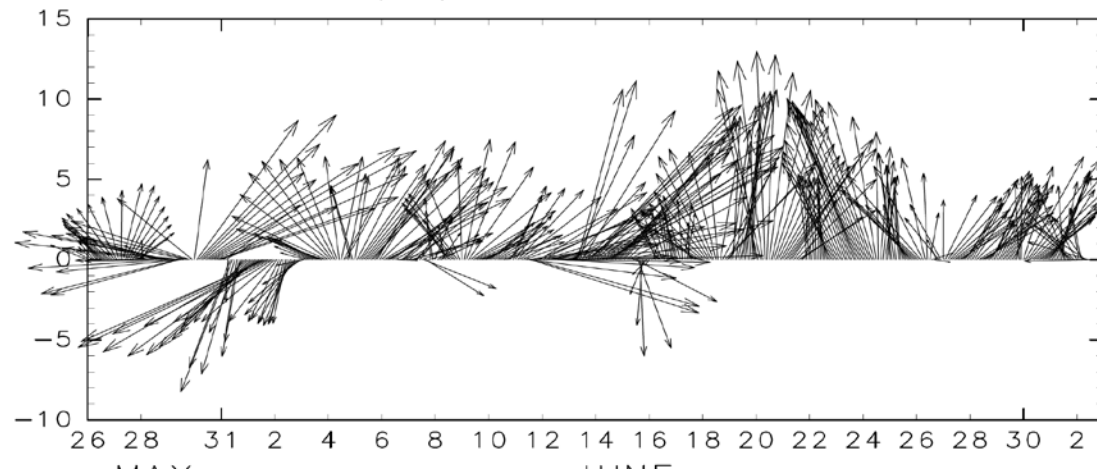


解析期間の風(上:アメダス,下:NCEP)

(a) Obs. 2001

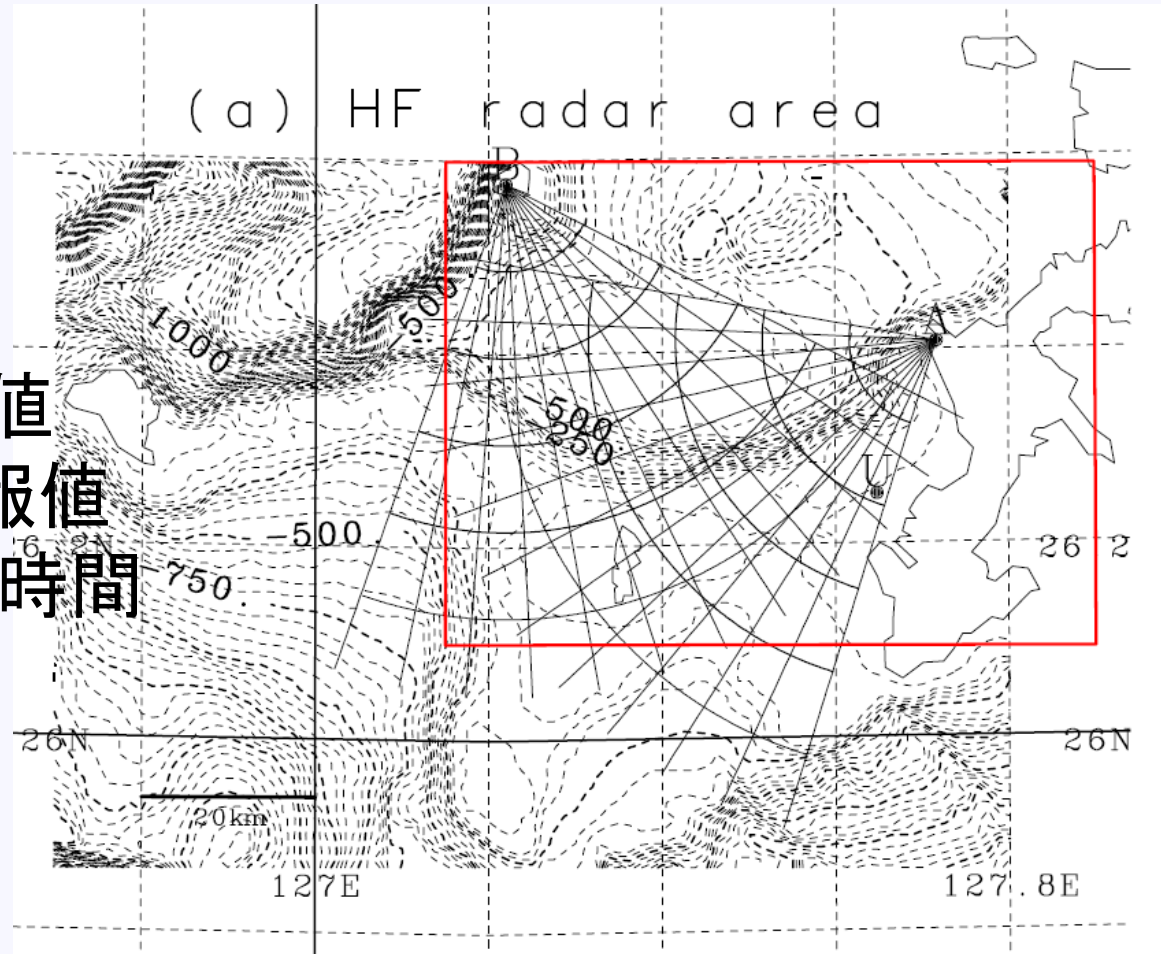


(b) Model 2001



使用データ

NCEP—CFS風
分解能：約0.3度
6時間ごとの解析値
と1時間ごとの予報値
予報値の誤差を6時間
ごとの解析値で



0.01度