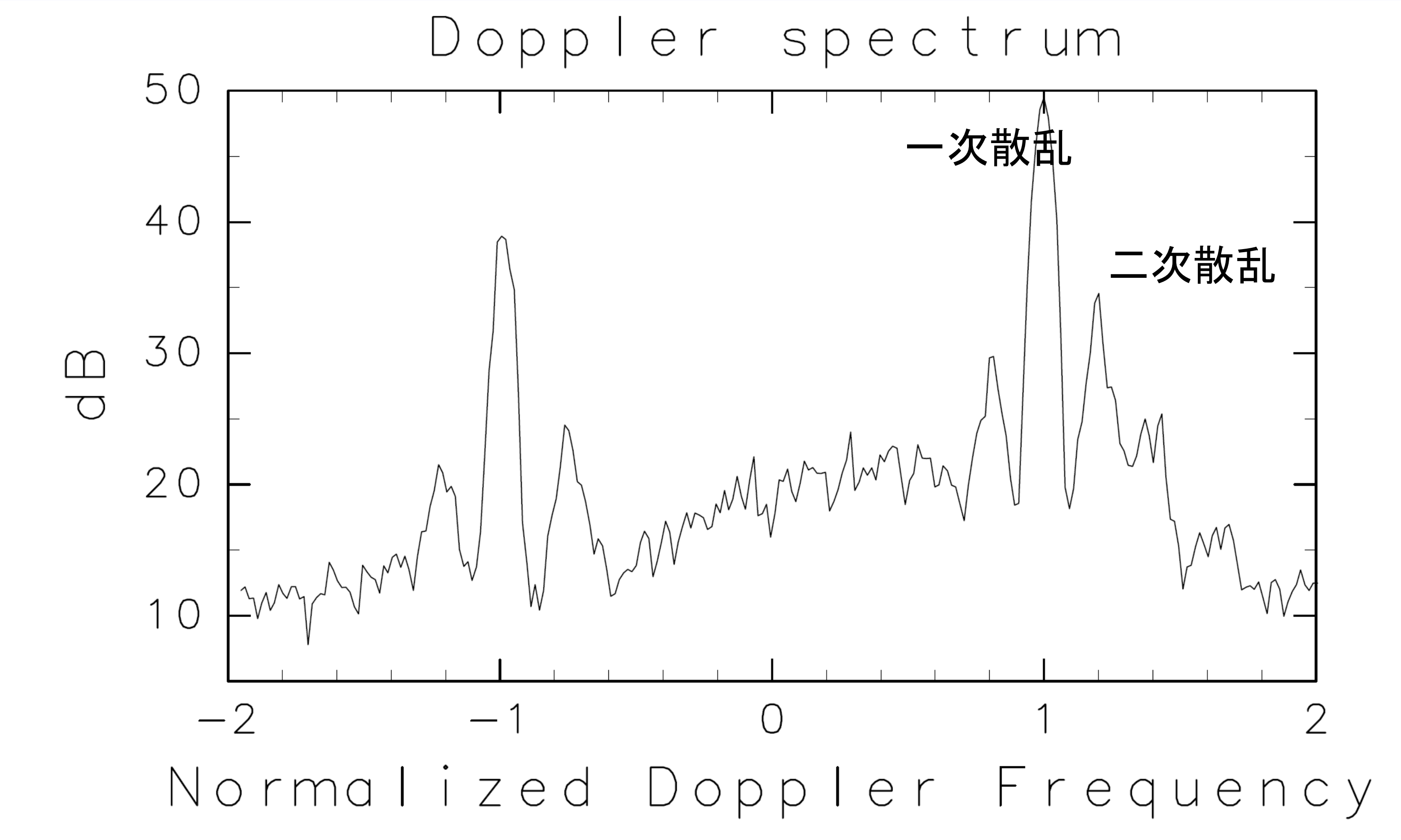
海洋レーダによる
和歌山県沖の波浪の
長期観測の初期解析

久木幸治
(琉球大学理学部),
片岡智哉
(愛媛大学大学院理工学研究科)

ドップラースペクトル(DS)の例



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

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

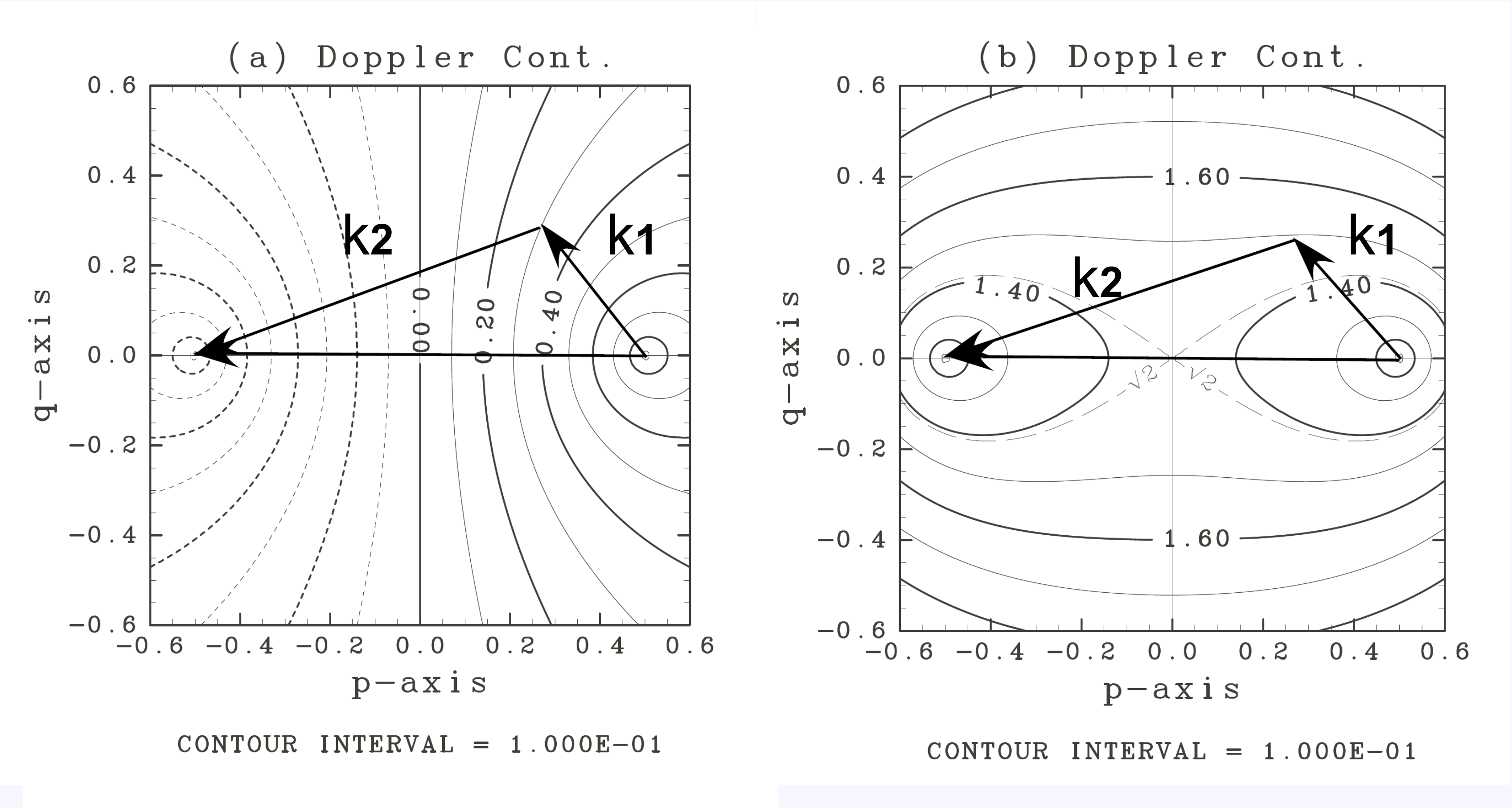
$S(\mathbf{k})$:波数ベクトル $\mathbf{k}$ に対する波浪スペクトル, p 軸:電波進行方向,

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

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

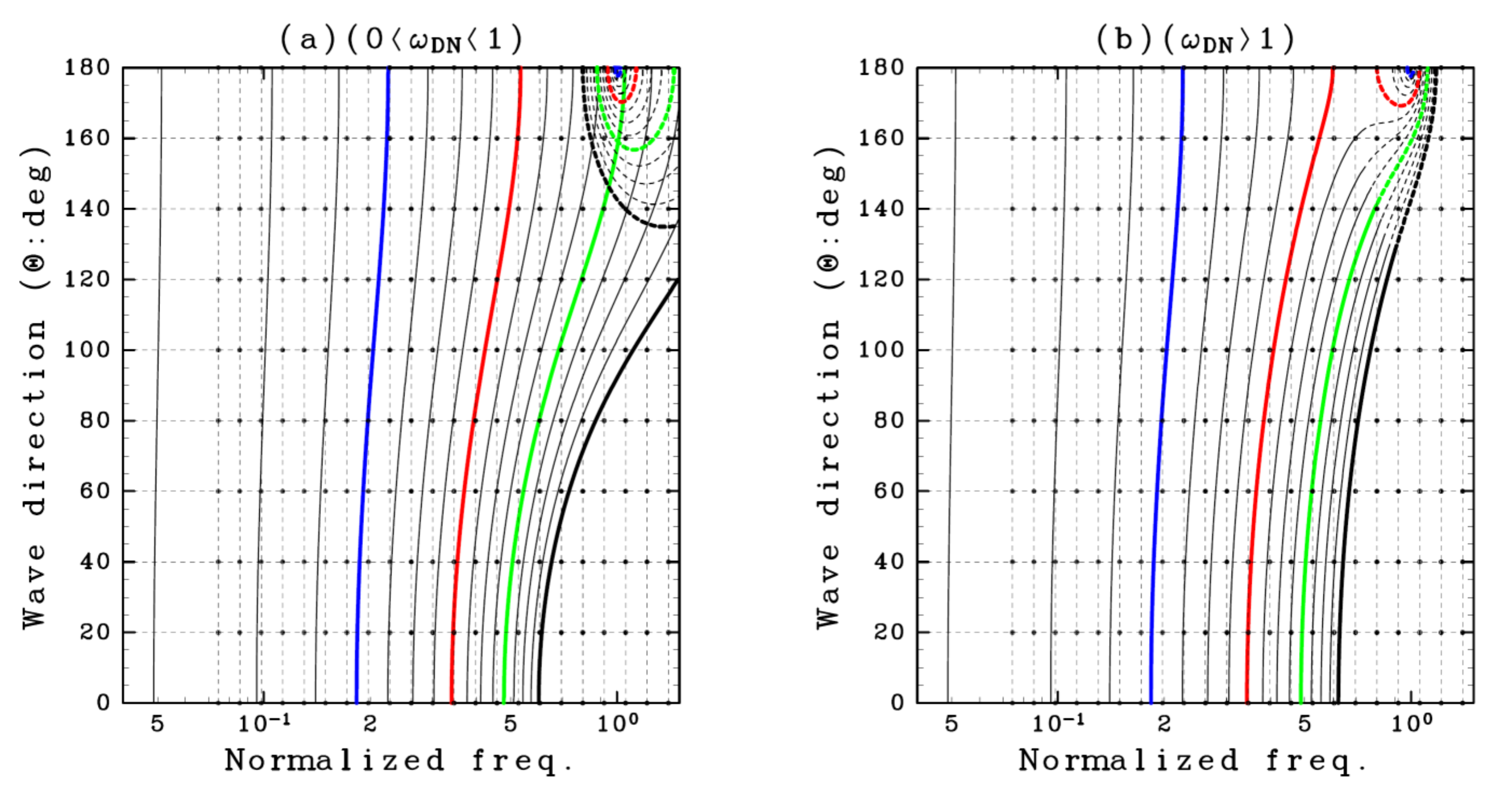
$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = -2\mathbf{k}_0$

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


(a) Doppler Cont.
0.6
0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
−0.6
q−axis
−0.6
−0.4
−0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
p−axis
0.00
0.20
0.40
k2
k1
CONTOUR INTERVAL = 1.000E−01
(b) Doppler Cont.
0.6
0.4
0.2
0.0
−0.2
−0.4
−0.6
q−axis
−0.6
−0.4
−0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
p−axis
1.60
1.40
1.40
1.60
√2
√2
k2
k1
CONTOUR INTERVAL = 1.000E−01

$$k_1+k_2=-2k_0$$

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

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：周波数ー方向平面上の格子点値）

最適化問題

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

$$\Longrightarrow \mathrm{minimize}$$

F_K:制約式
$\mathbf{q}$:未知数 (波浪スペクトル値, 風速, 風向)
未知数個数 N_u, N_t:制約式の個数
λ_{wM} $(M = 1, ..., 6)$:重み

周波数比 1.15, $M_f = 21$, $M_d = 18$
格子数 $N_g = 16$
$N_u = M_f M_d N_g + 2N_g = 6080$

未知数個数:6080

最適化アルゴリズム

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

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

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

$$\mathsf{J}_\mathsf{F}(K, L) = \lambda_{wM} \frac{\partial F_K}{\partial q_L^{(m)}}$$

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

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

m: ステップ数, ∇_q: 未知数 $\mathbf{q}$ についての勾配

$\alpha_m > 0$:ステップ m に対して $U(\mathbf{q}^{(m+1)}) < U(\mathbf{q}^{(m)})$.

$\mathbf{q}^{(m)} = (q_1^{(m)}, \cdots, q_{N_u}^{(m)})$ と設定

J_F: Jacobian 行列,

$\mathsf{H}^{(m)}$: $N_u \times N_u$ の正定値行列,

$\mathsf{H}^{(m)} = (\mathsf{J}_\mathsf{F}{}^T \mathsf{J}_\mathsf{F} + \gamma \mathsf{I})^{-1}$, (Levenberg – Marquardt 法) **困難**

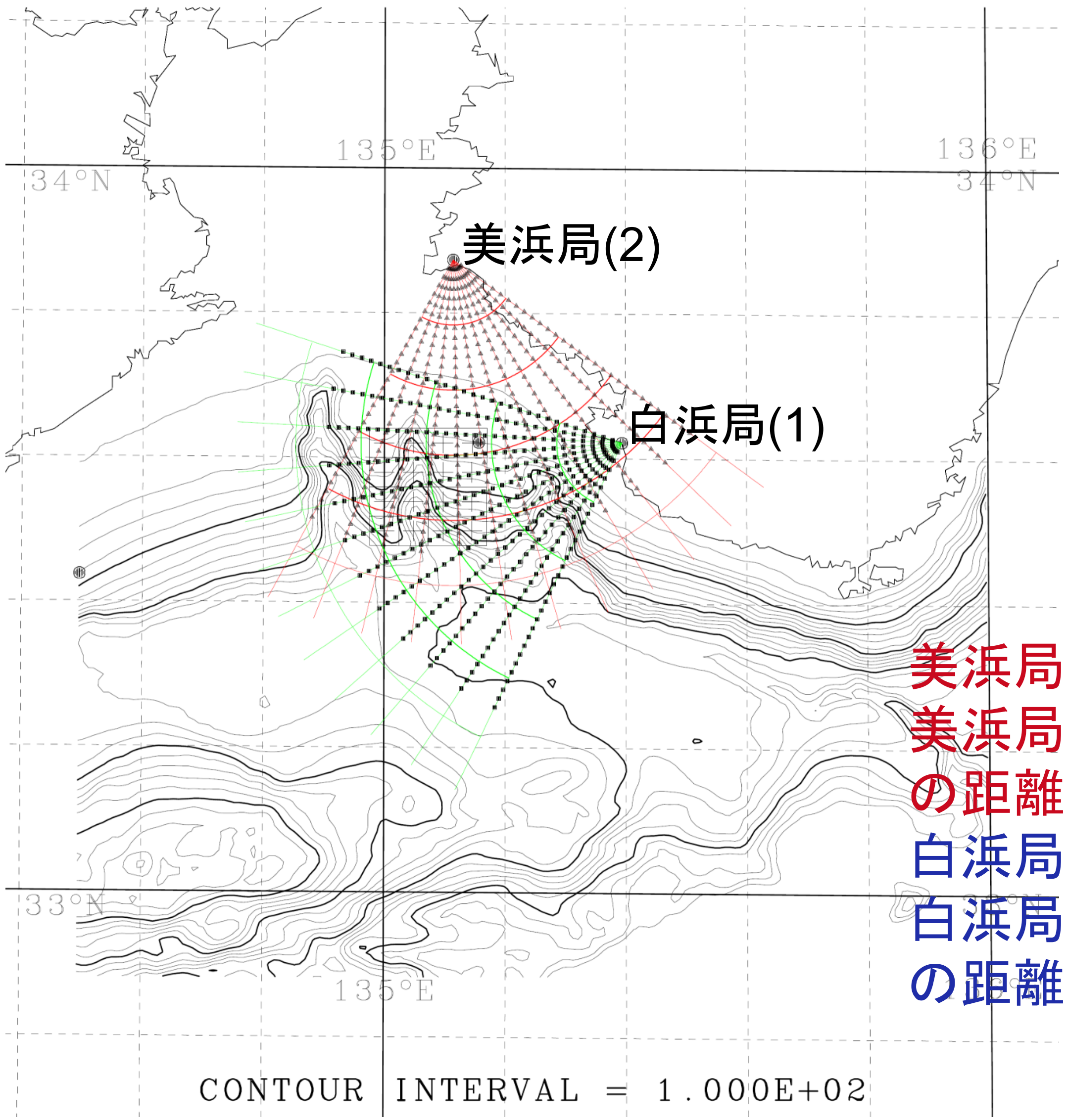
$\mathsf{H}^{(m)} = [\mathrm{diag}(\mathsf{J}_\mathsf{F}{}^T \mathsf{J}_\mathsf{F})]^{-1}$

$\mathsf{H}^{(m)} = [\mathrm{diag}(\mathsf{J}_\mathsf{F}{}^T \mathsf{J}_\mathsf{F}) + \mathsf{I}]^{-1},$

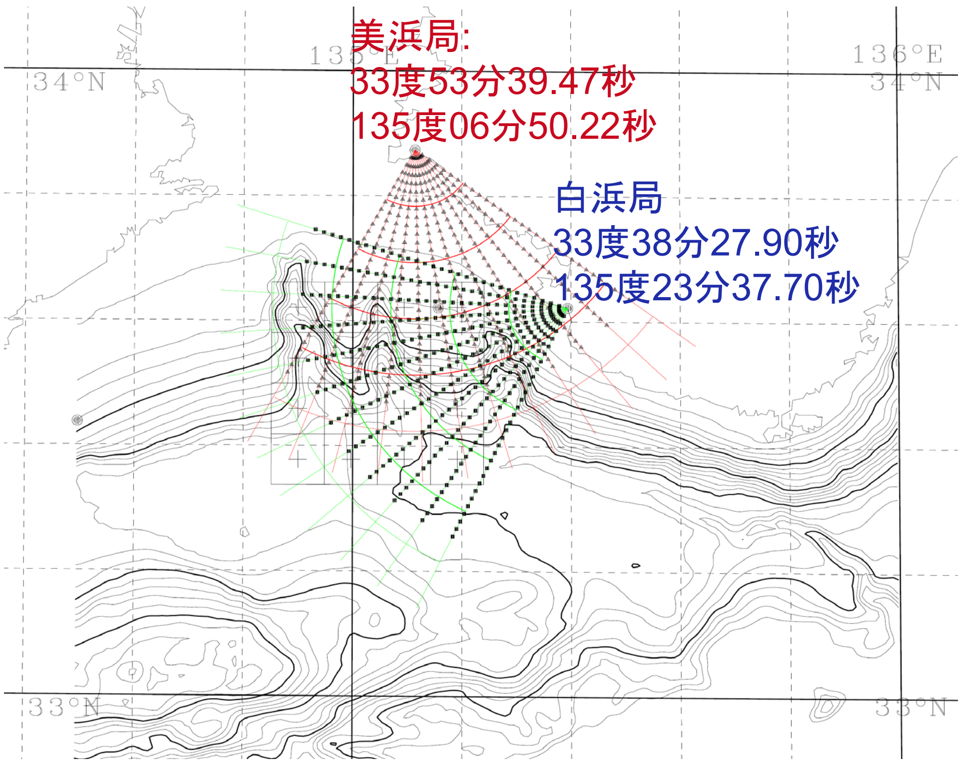
$\mathsf{H}^{(m)} = \mathsf{I}$, (最急降下法).

可能

diag:対角成分
I:単位正方行列



美浜局05ビームビーム付近
美浜局からGPS波浪計
の距離28.2km
白浜局02～03ビーム間
白浜局からGPS波浪計
の距離22.0km



	美浜局	白浜局
0:	208.7度	288.3度
1:	201.2度	280.8度
2:	193.7度	273.3度
3:	186.2度	265.8度
4:	178.7度	258.3度
5:	171.2度	250.8度
6:	163.7度	243.3度
7:	156.2度	235.8度
8:	148.7度	228.3度
9:	141.2度	220.8度
10:	133.7度	213.3度
11:	126.2度	205.8度

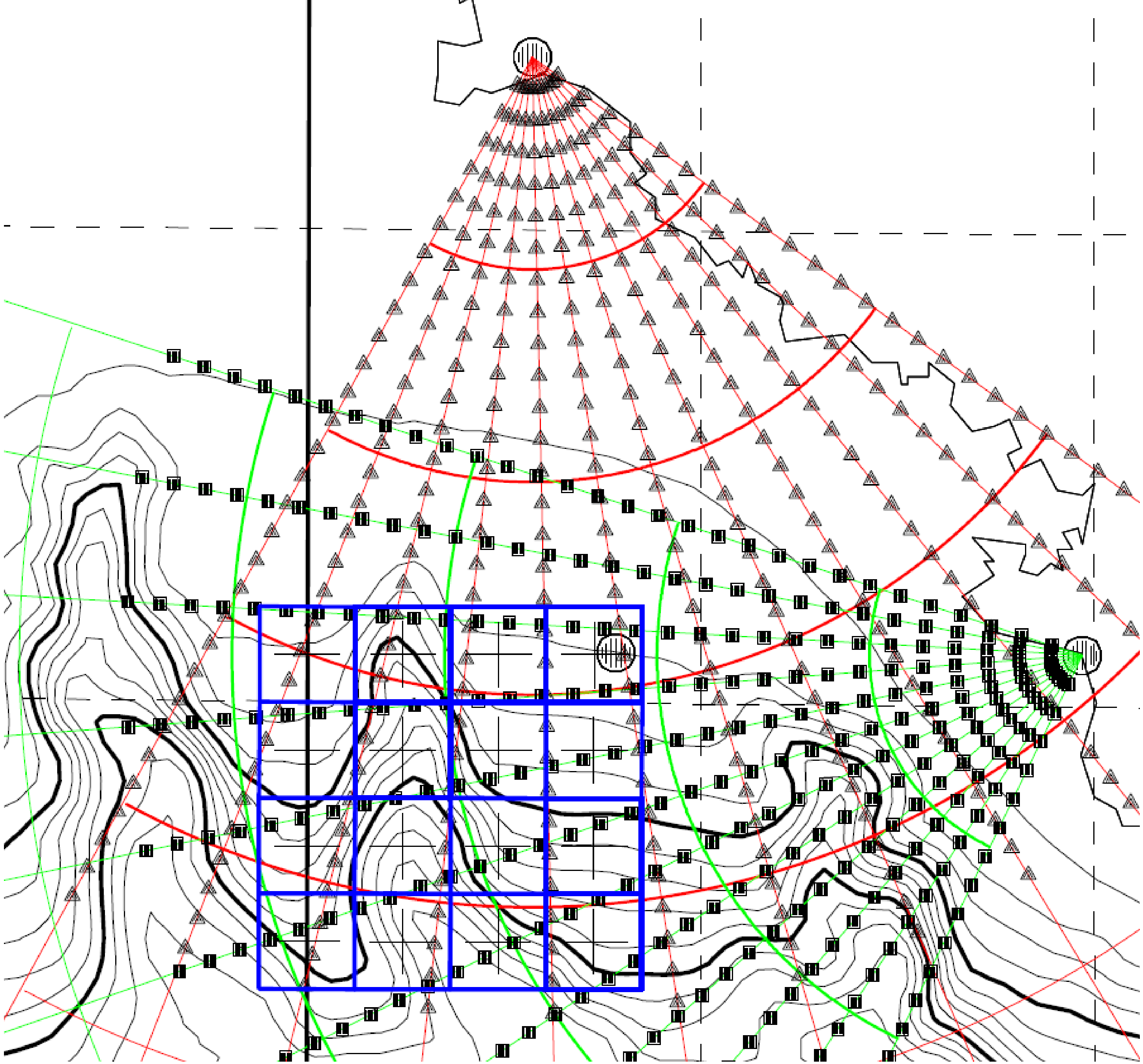
ビーム番号は反時計回りに
00ビーム⇒11ビーム

和歌山南西沖GPS波浪ブイ座標33度38分32秒,135度09分24分

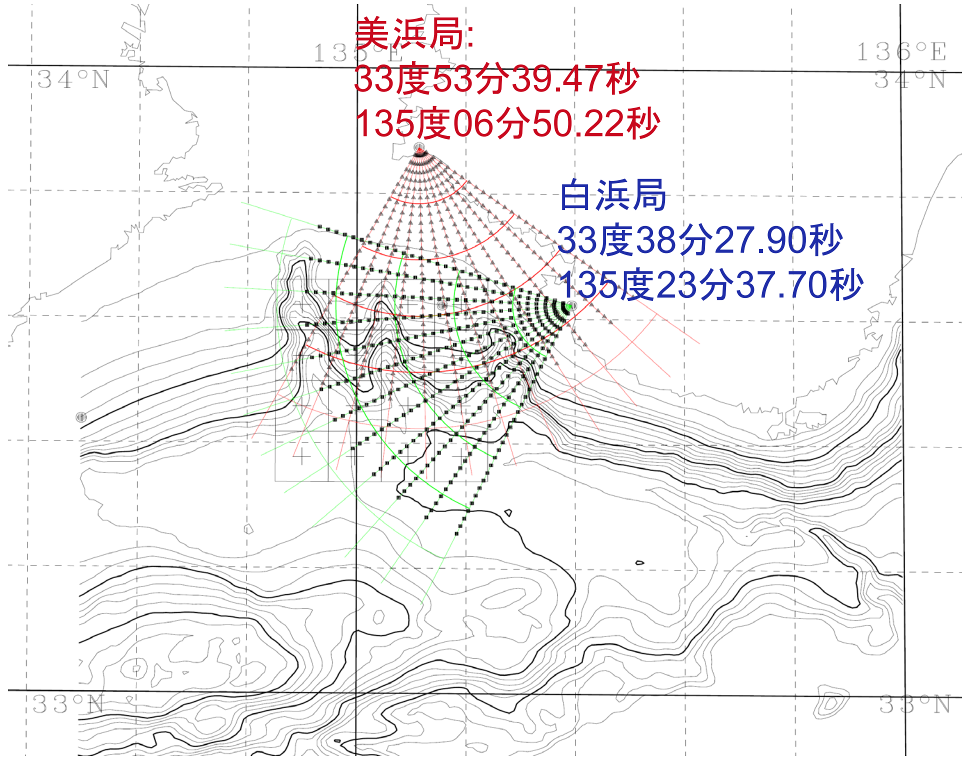
海洋レーダ:24.515MHz,

15分毎：平均して1時間毎のドップラースペクトル

解析：2014年4月1日1時から2015年12月31日23時



1辺9kmの格子



	美浜局	白浜局
0:	208.7度	288.3度
1:	201.2度	280.8度
2:	193.7度	273.3度
3:	186.2度	265.8度
4:	178.7度	258.3度
5:	171.2度	250.8度
6:	163.7度	243.3度
7:	156.2度	235.8度
8:	148.7度	228.3度
9:	141.2度	220.8度
10:	133.7度	213.3度
11:	126.2度	205.8度

ビーム番号は反時計回りに
00ビーム⇒11ビーム

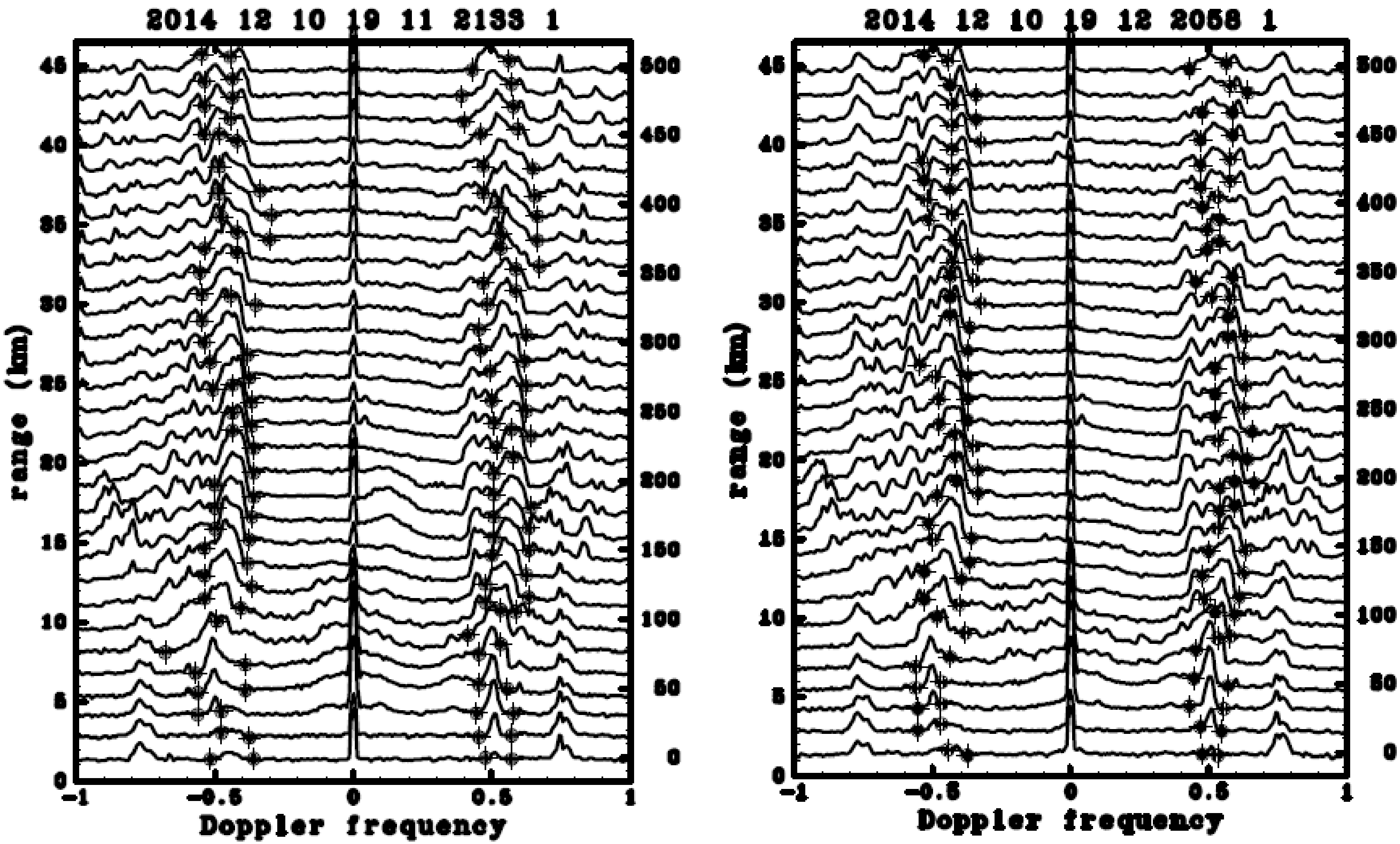
和歌山南西沖GPS波浪ブイ座標33度38分32秒,135度09分24分

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

解析：2014年4月1日1時から2015年12月31日23時

時系列数:15359, GPS欠測数:1024


2014 12 10 19 11 2133 1
2014 12 10 19 12 2058 1
range (km)
Doppler frequency
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
-1
-0.5
0
0.5
1

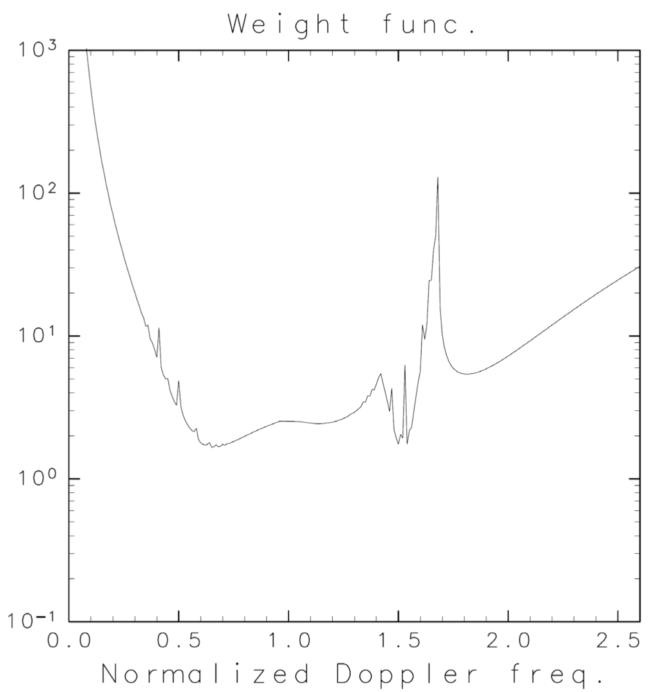
ドップラースペクトル(DS)選択

- 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。
- 「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。
- (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。)

簡易法(Barrick法)

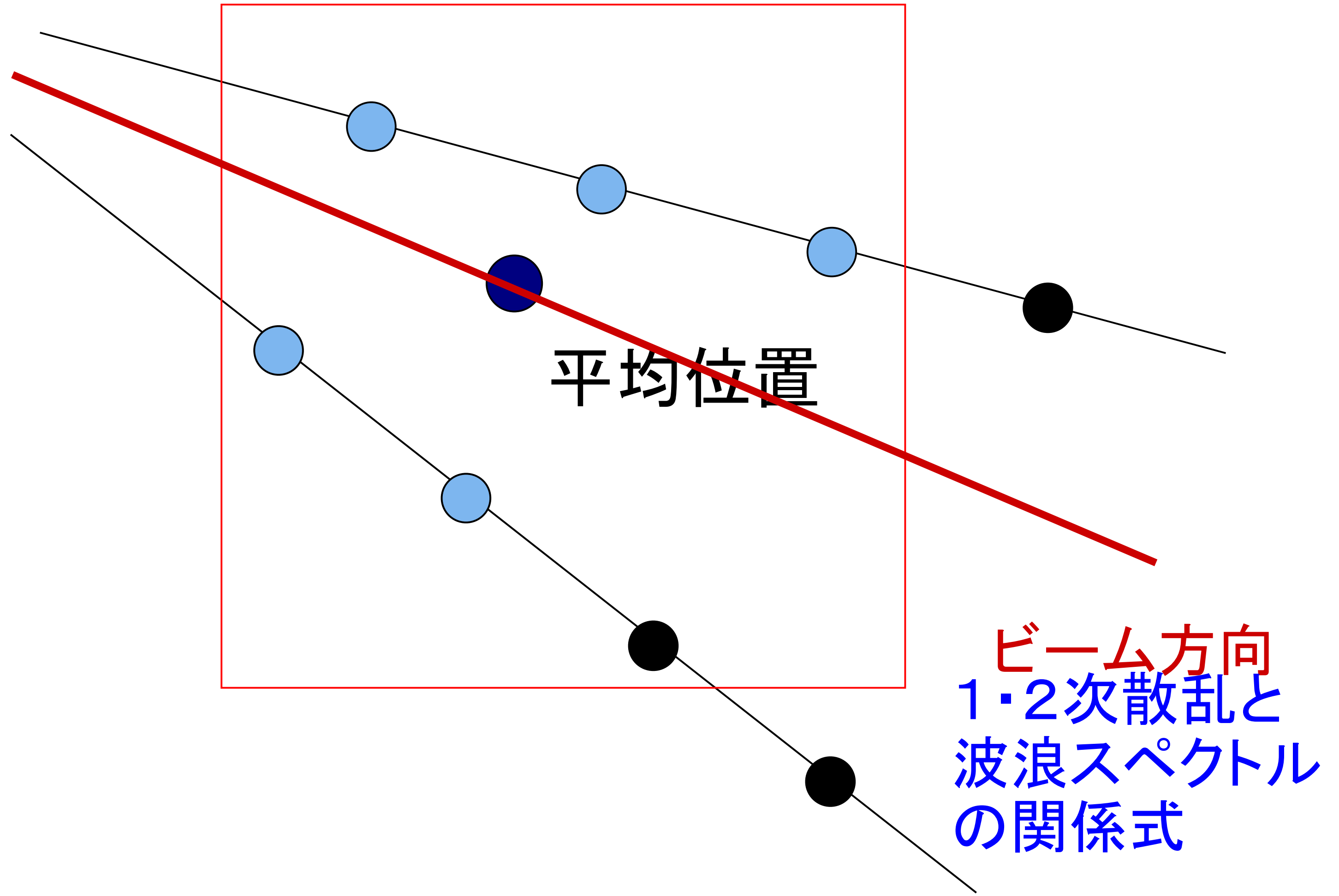
$$H_s \simeq 4\left[\frac{2\int_0^\infty (\sigma_2(\omega_D)/w(\omega_{DN}))d\omega_D}{k_0\int_0^\infty \sigma_1(\omega_D)d\omega_D}\right]^{\frac{1}{2}}$$

ω_{DN}: Bragg周波数で規格化したドップラー周波数,
w:重み関数



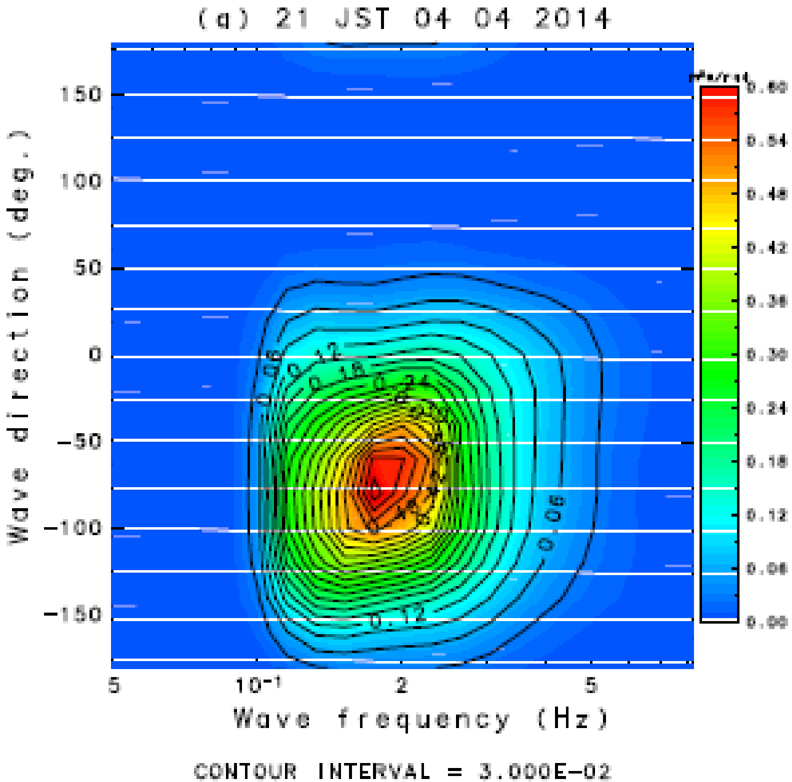
ドップラースペクトル(DS)選択

- 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。
- 「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。
- (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。)

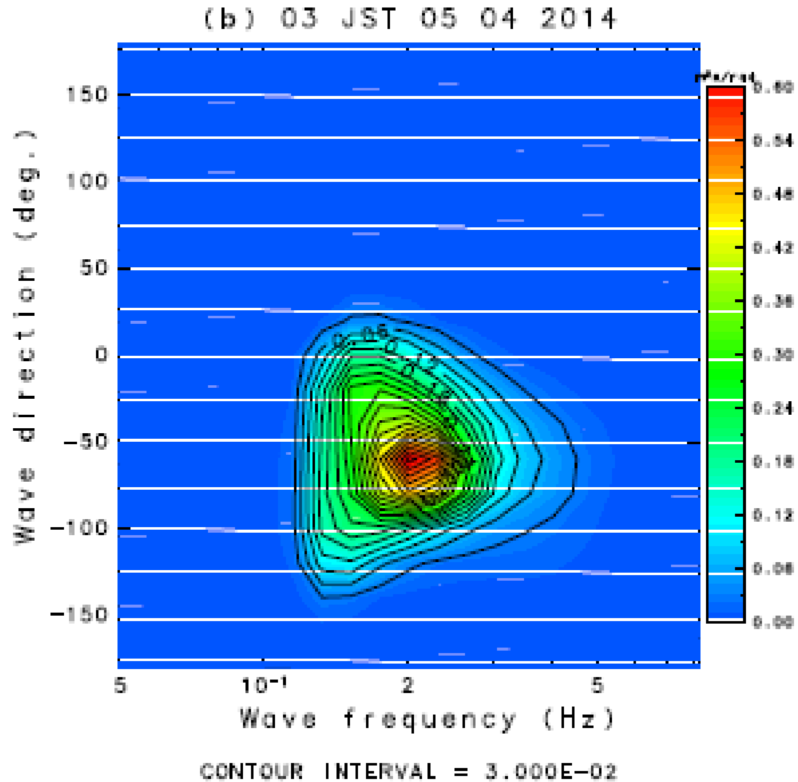


ドップラースペクトル選択（青色）
ドップラースペクトルを平均

波浪スペクトル推定例



波の伝搬方向(東向きを0度)

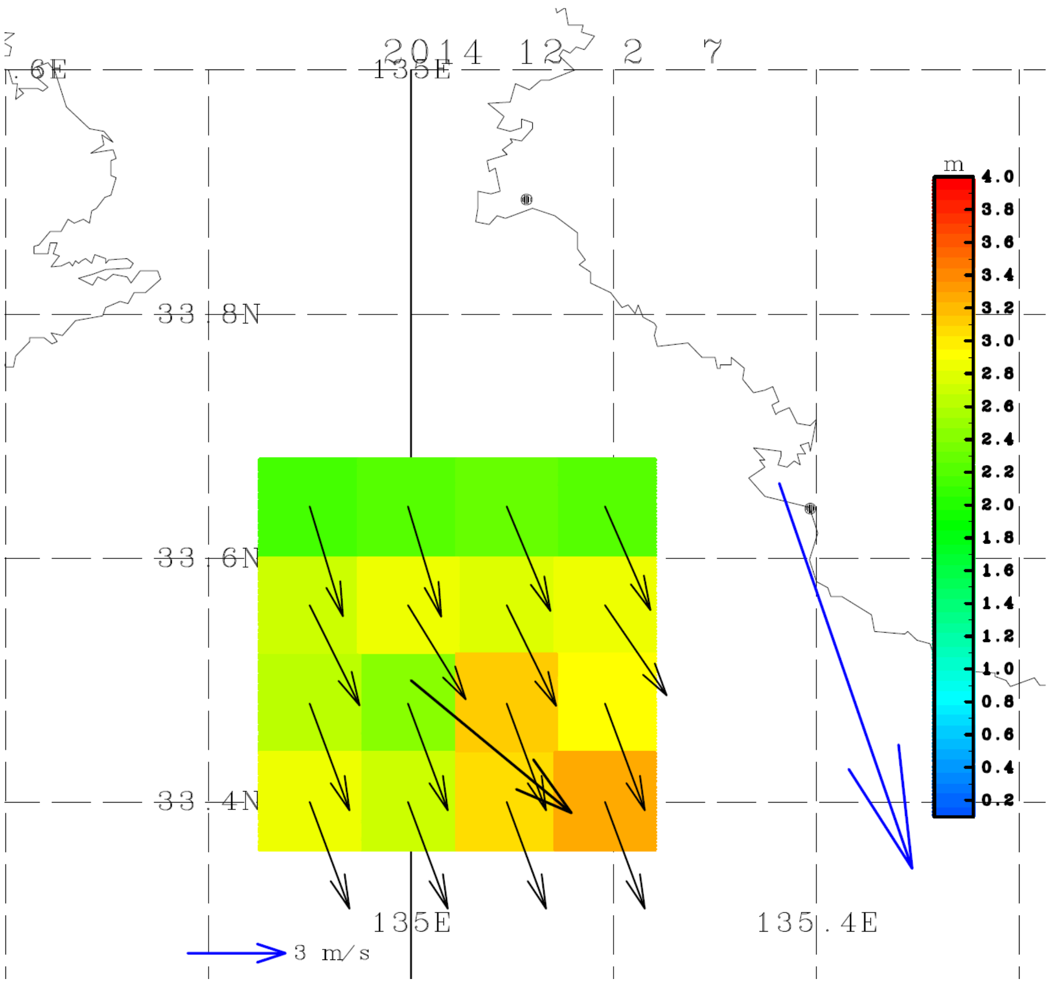


周波数

GPS=2.1m, Radar=2.68m

GPS=2.0m, Radar=1.81m

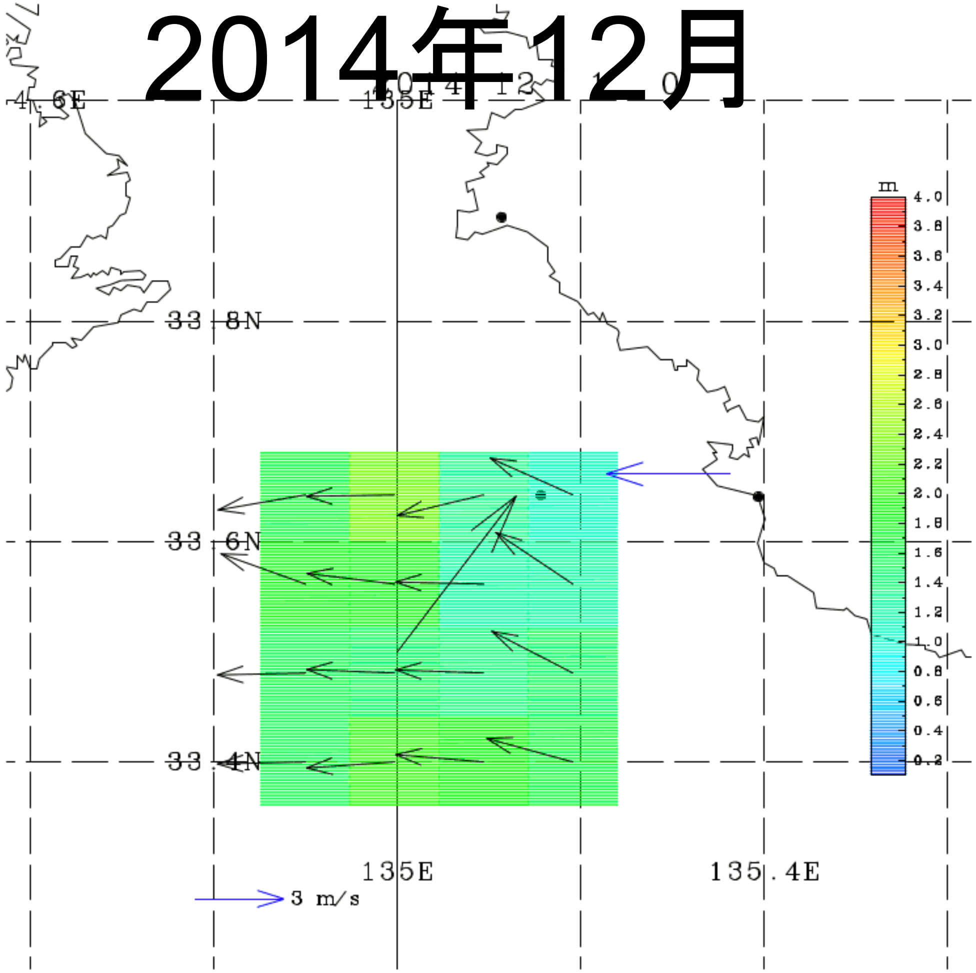
波高推定例



長い黒矢印:ERA5平均波向き

青い矢印:風ベクトル

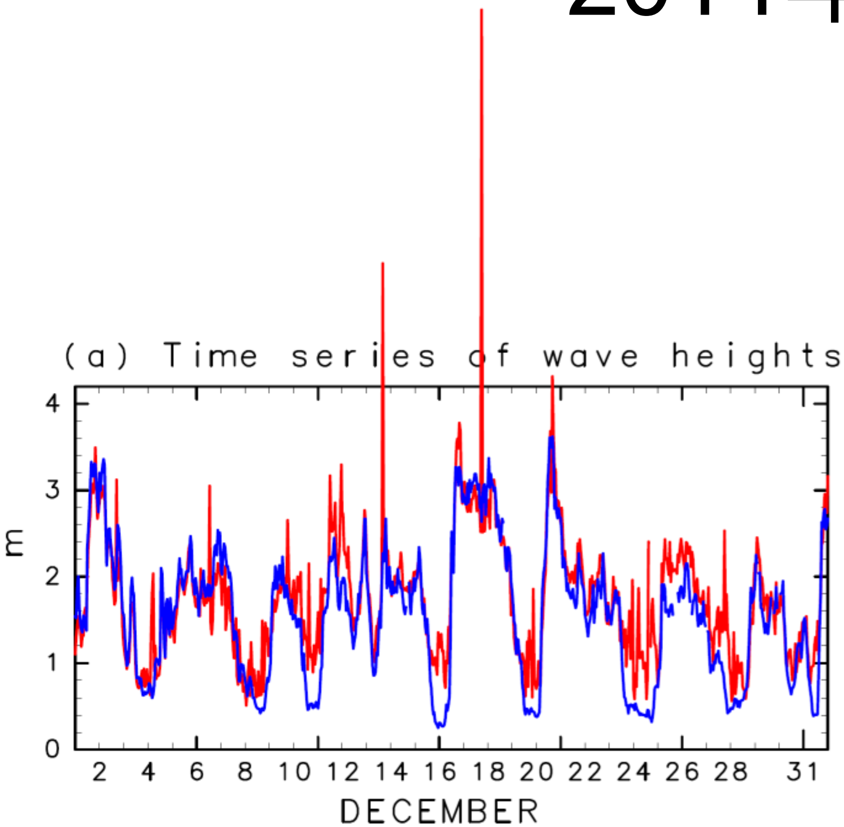
波高推定例
2014年12月

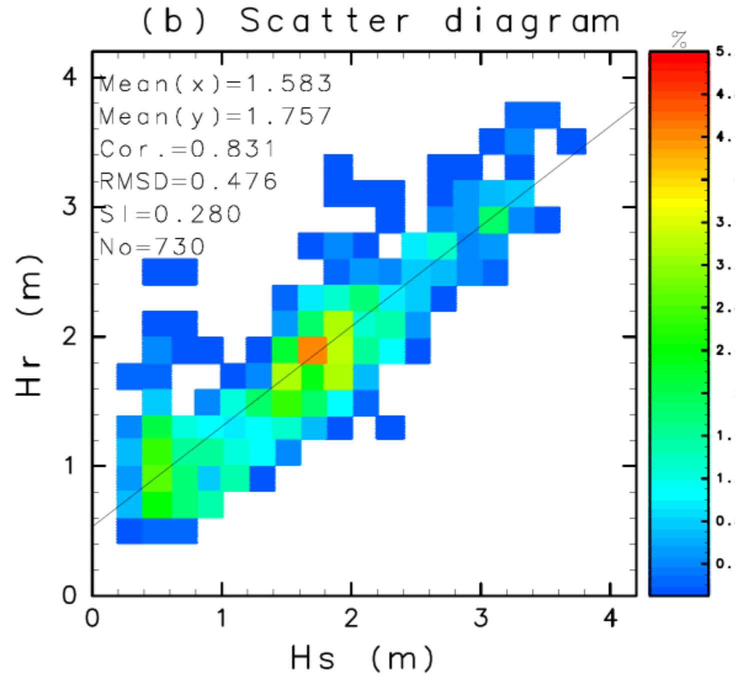


長い黒矢印:ERA5平均波向き

青い矢印:風ベクトル

波高比較例(青:ブイ,赤:レーダ)
2014年12月

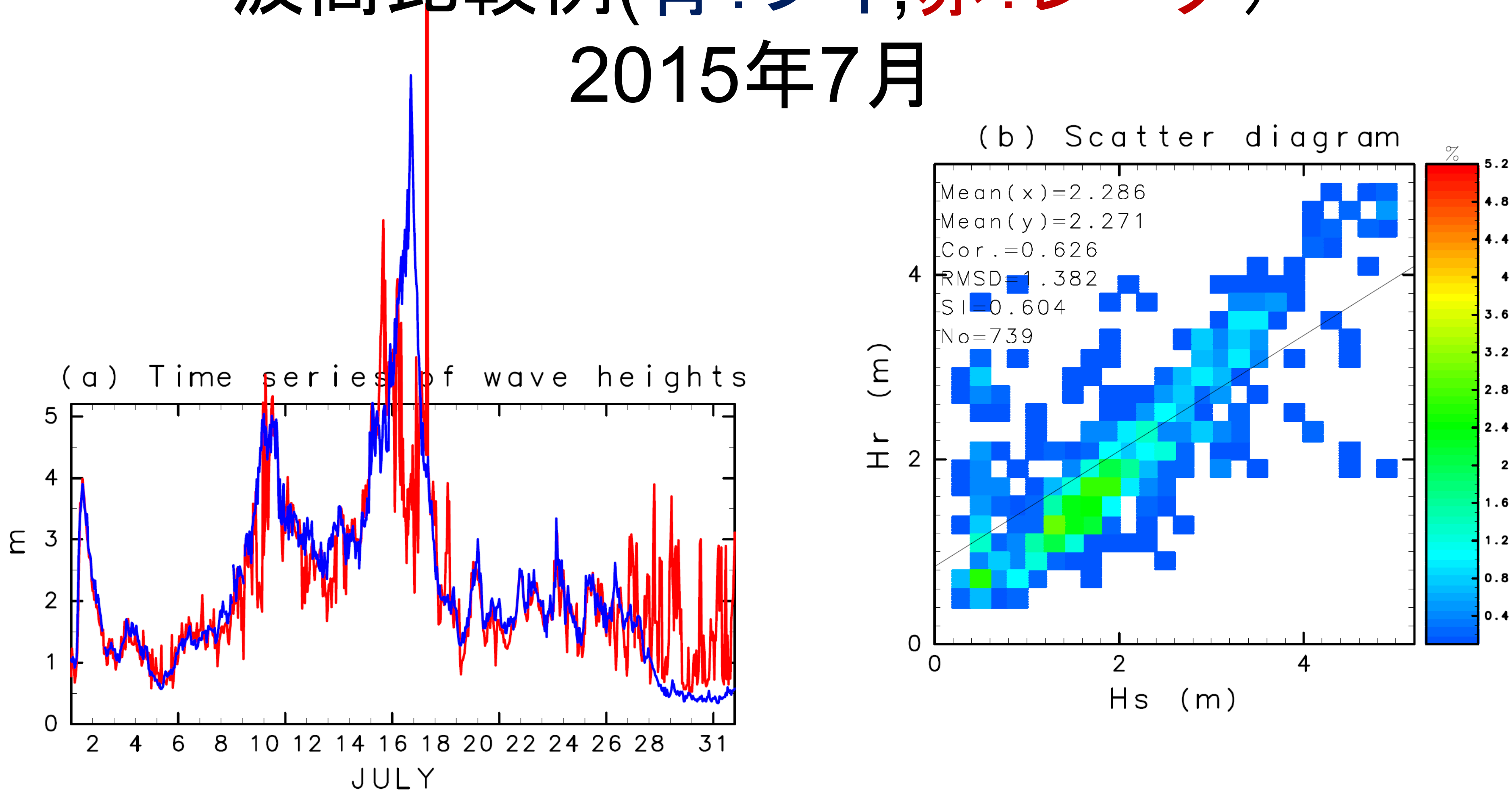




平均値= 1.757 , 1.583 ,平均差= 0.174
相関係数= 0.831,RMSD= 0.476,データ数 730

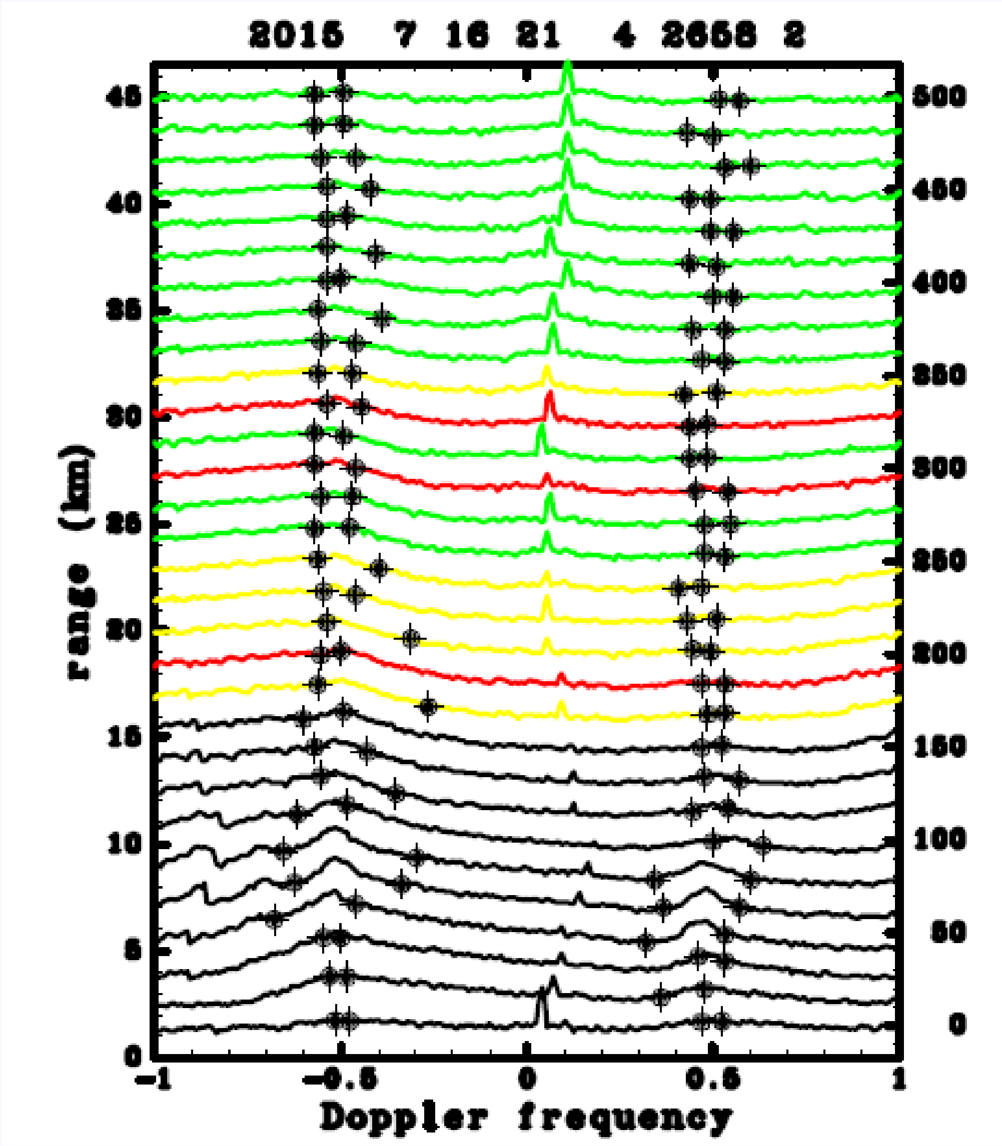
使用DS無= 2,DS除外= 0 ,Outlier= 0 ,GPS欠測= 13 ,計= 15

波高比較例(青:ブイ,赤:レーダ)
2015年7月



平均値= 2.271 , 2.286 ,平均差=-0.015
相関係数= 0.626,RMSD= 1.382,データ数 739

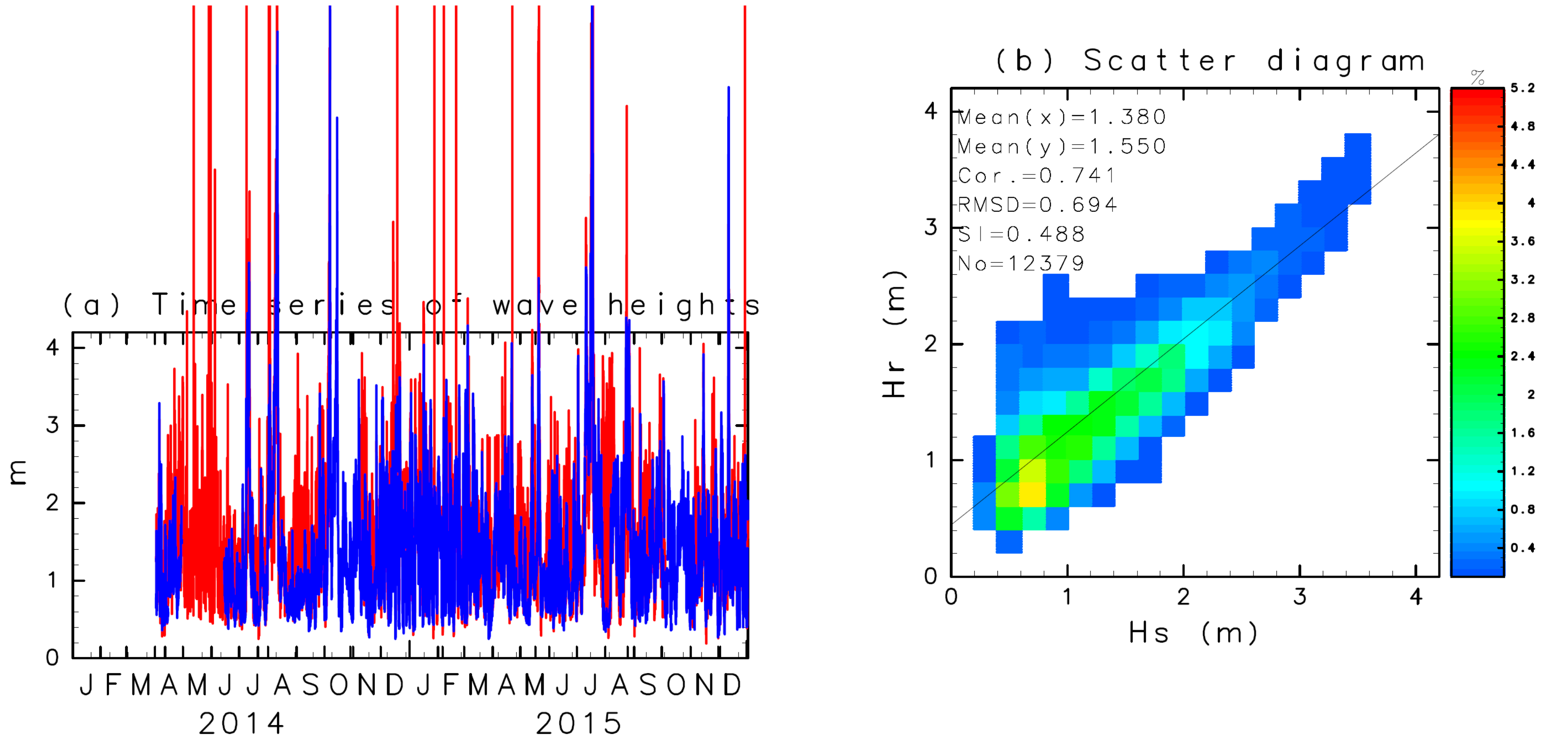
使用DS無= 1,DS除外= 0 ,Outlier= 0 ,GPS欠測= 5 ,計= 6



2015年 7月16日21時
レーダ:4.06m
GPS：10.54m

緑:平均値とDSpeak値を比較.DSpeak値が閾値以下の場合.
黄:一次散乱範囲決定せず(移動平均),
黒：領域外

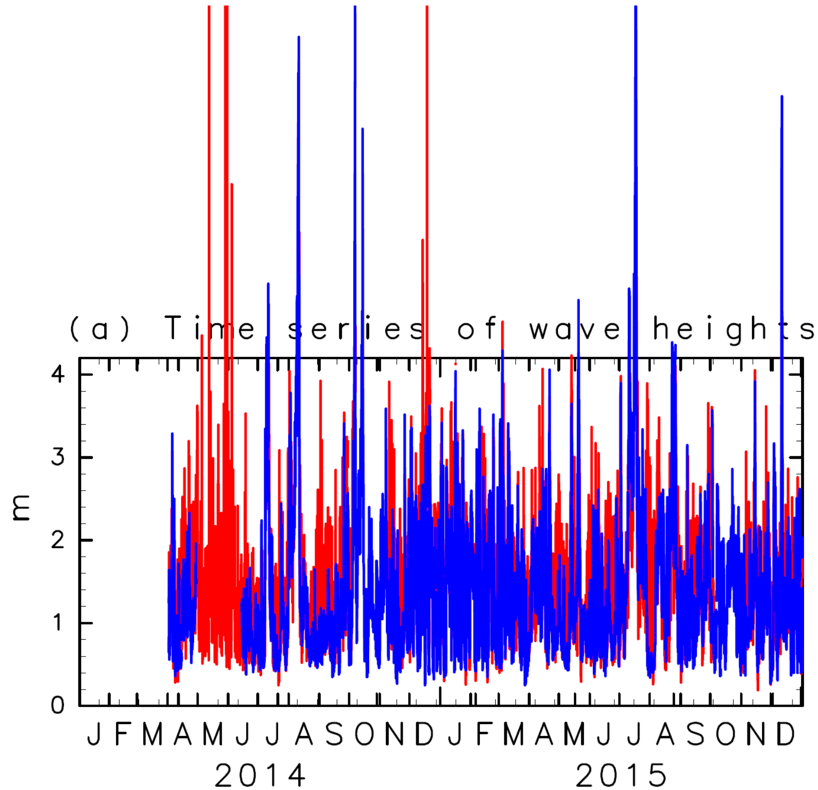
波高比較例(青：ブイ,赤：レーダ)
2014－2015年

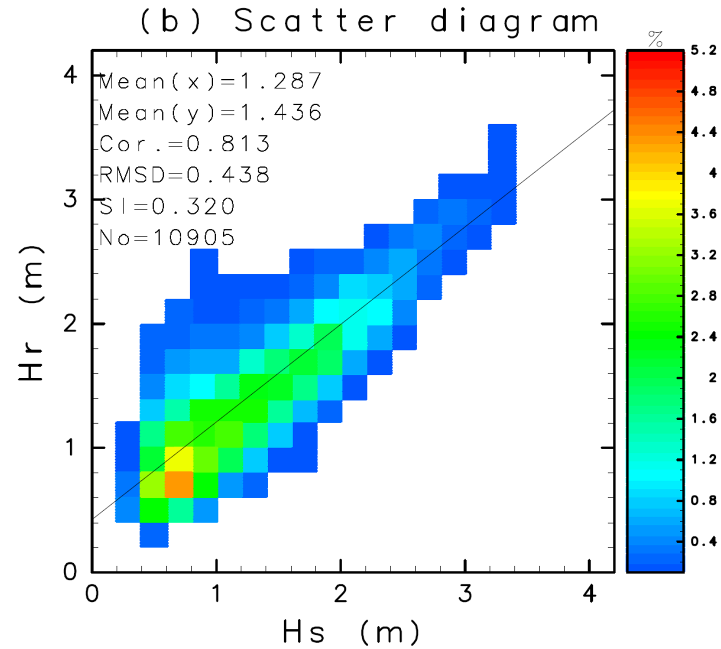


平均値= 1.550 , 1.380 ,平均差= 0.170
相関係数= 0.741,RMSD= 0.694,データ数12379

使用DS無=1692,DS除外=　0 ,Outlier=　44 ,GPS欠測=1245 ,計=2981

波高比較例(青：ブイ,赤：レーダ）
2014－2015年



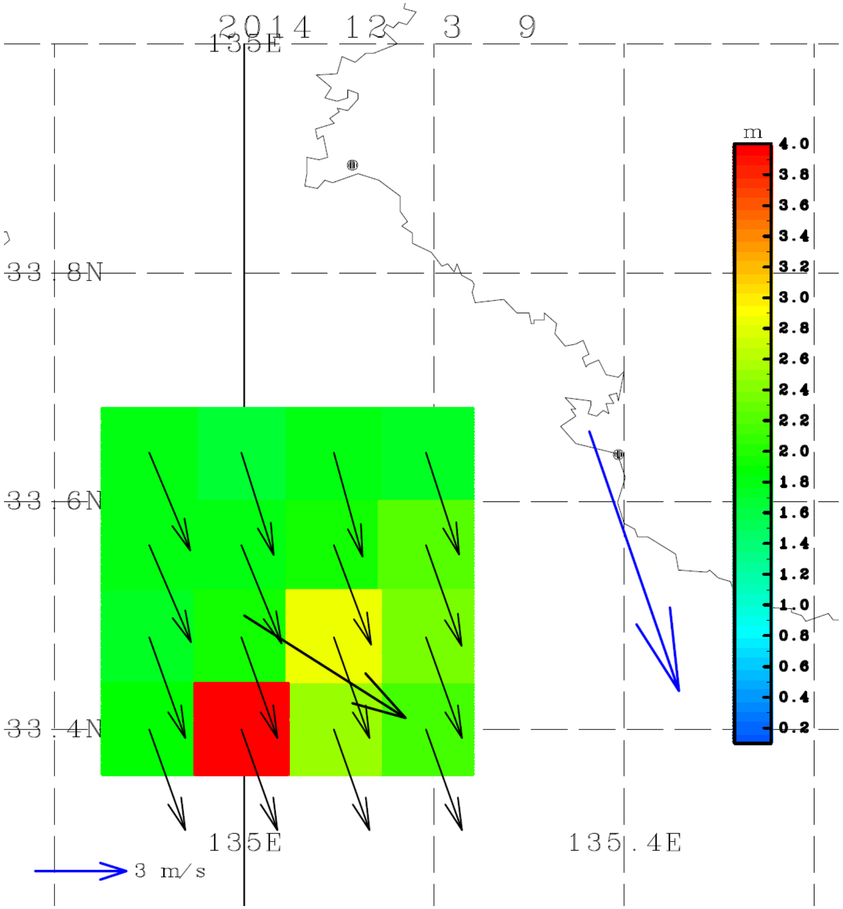


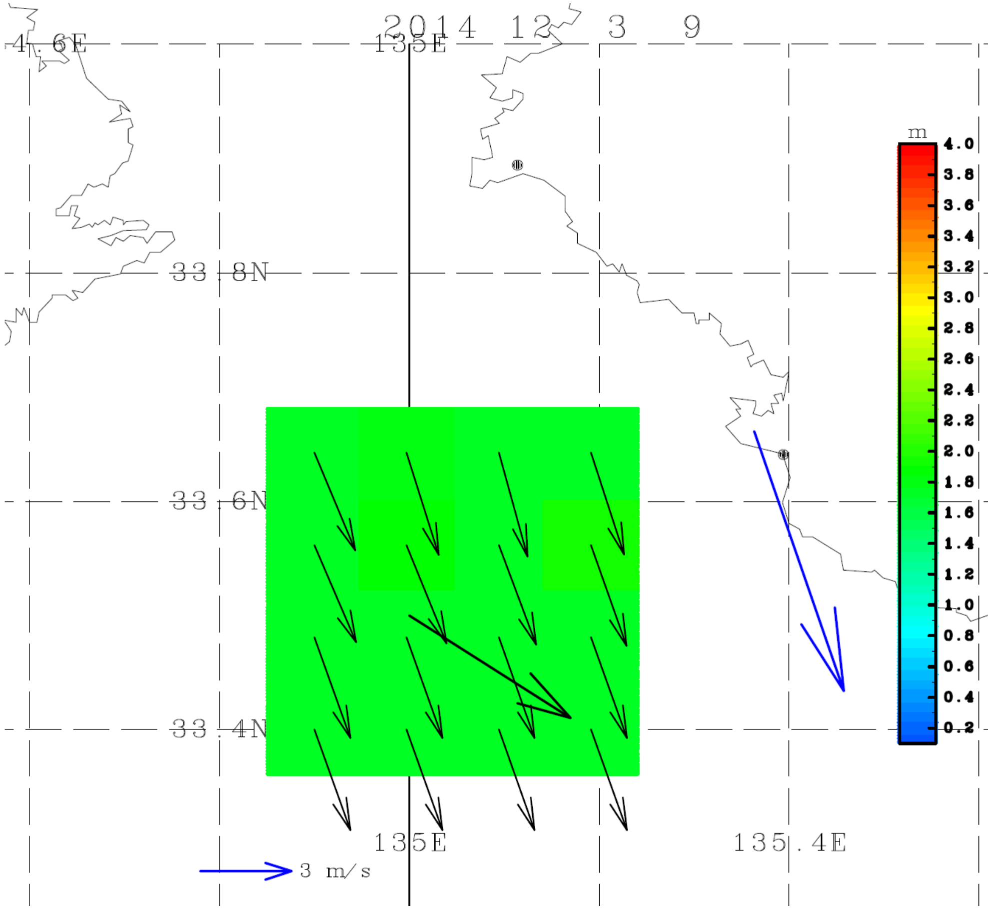
平均値= 1.436 , 1.287 ,平均差= 0.150
相関係数= 0.813,RMSD= 0.438,データ数10905

使用DS無=1692,DS除外=1474 ,Outlier= 44 ,GPS欠測=1245 ,計=4455

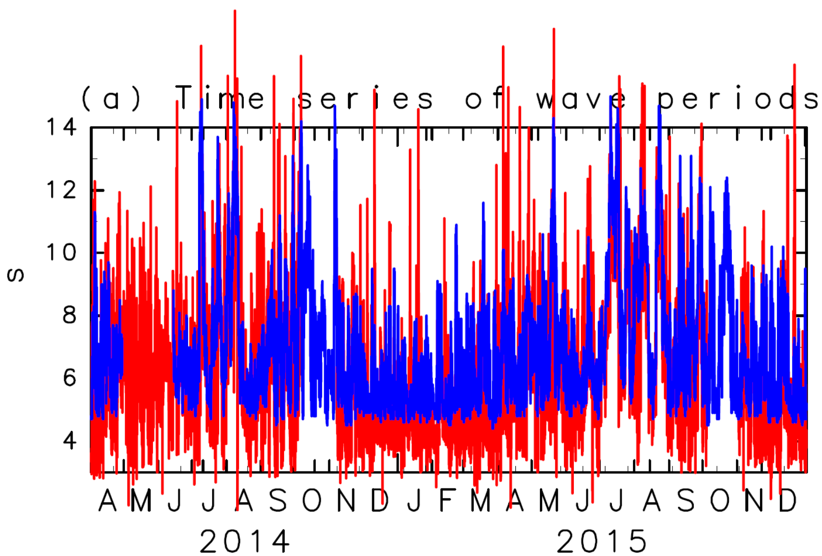
二次DSと計算値との差の大きいのを除外

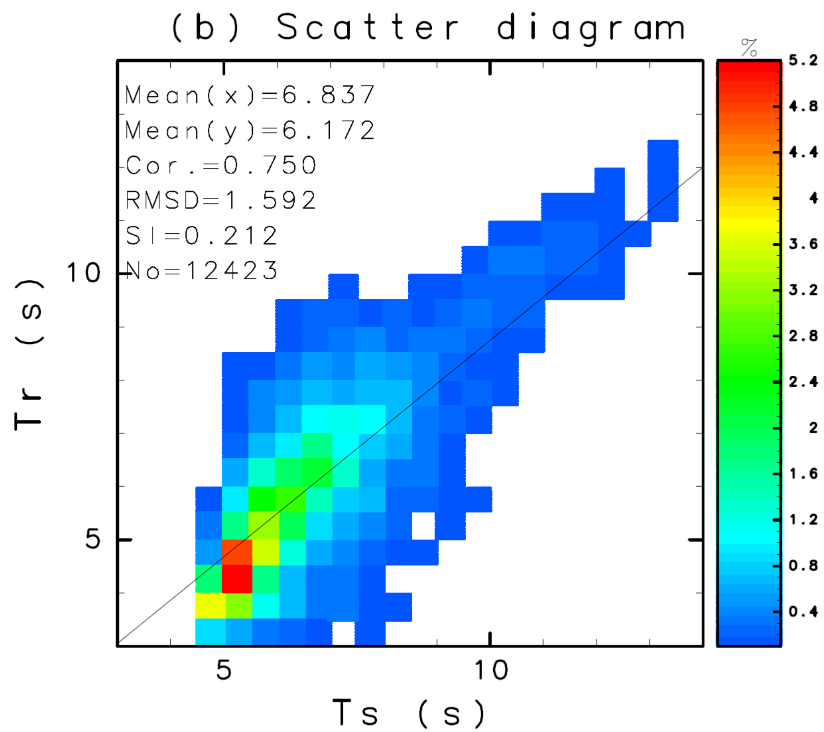
DS選択による波高比較例





周期の比較(青:ブイ,赤:レーダ)

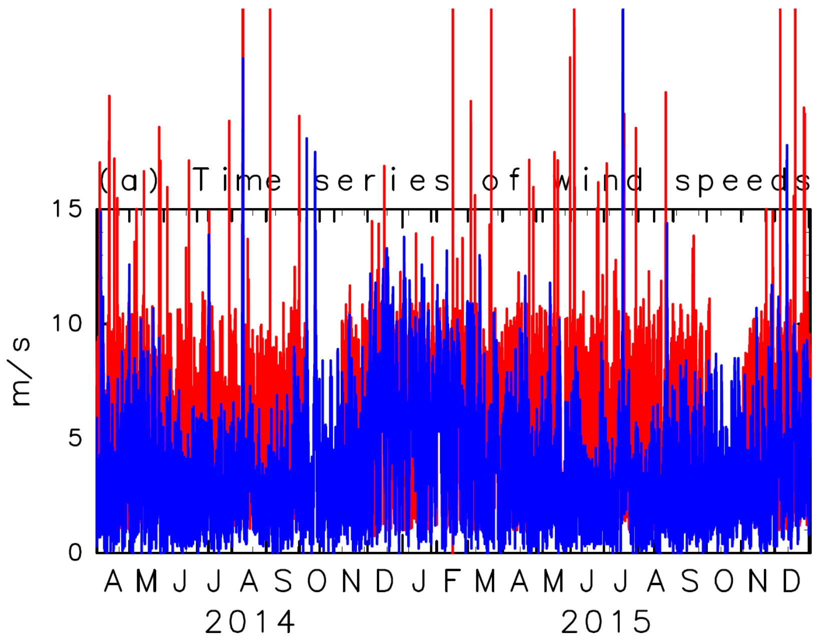


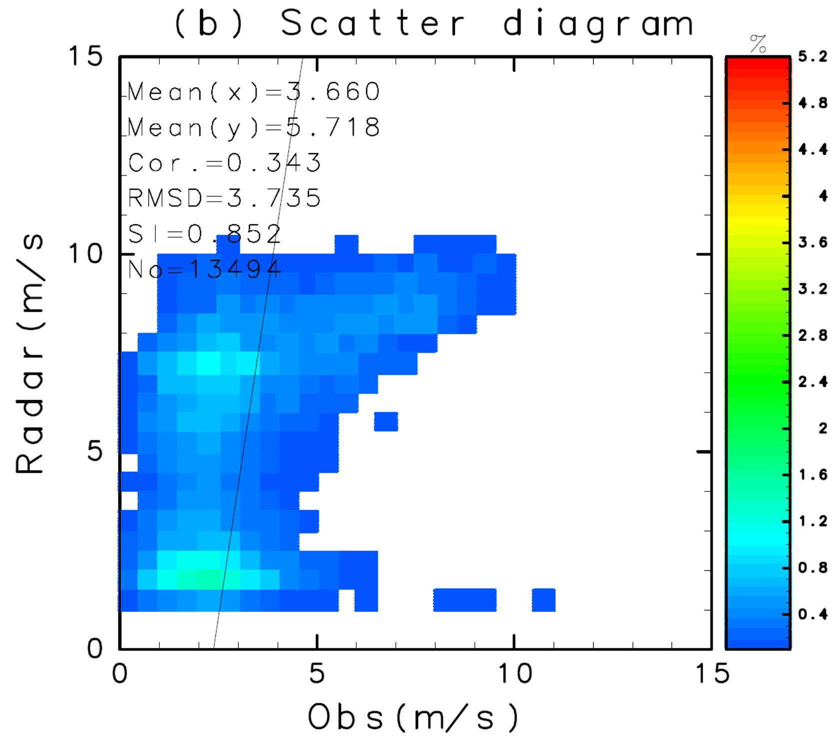


平均値= 6.172 , 6.837 ,平均差=-0.665
相関係数= 0.750,RMSD= 1.592,データ数12423

使用DS無=1691,DS除外= 0 ,Outlier= 0 ,GPS欠測=1245 ,計=2936

アメダス風速との比較

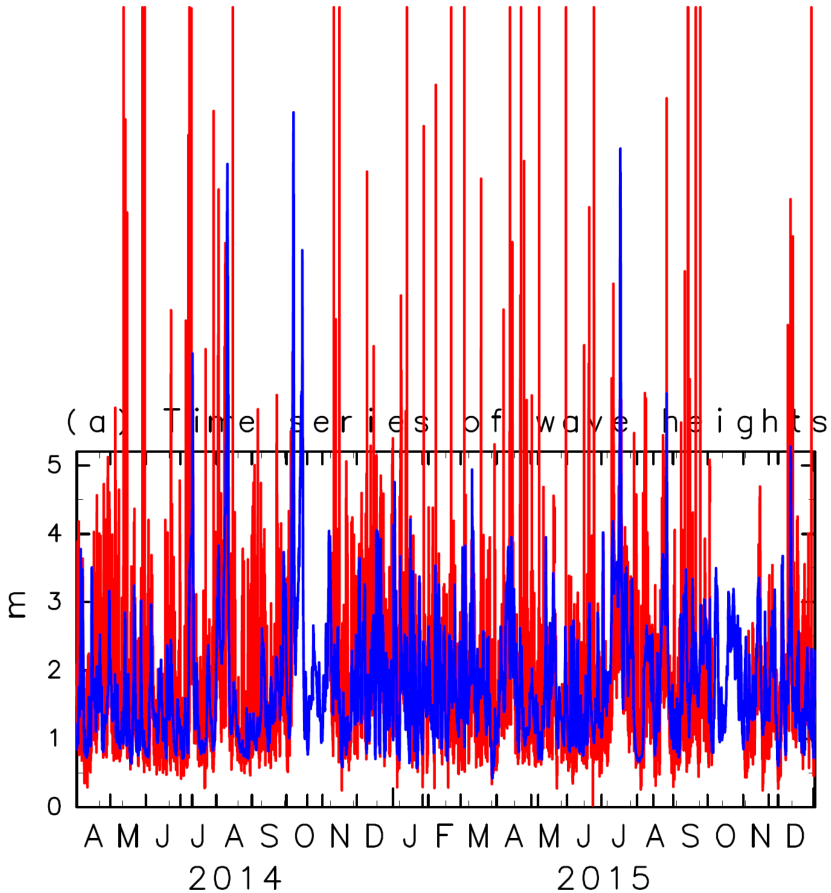


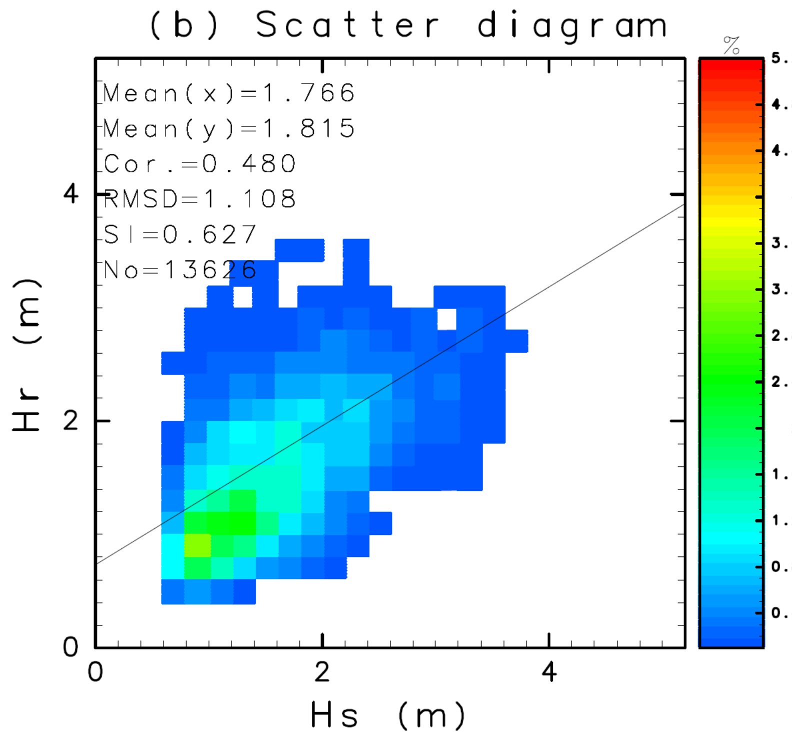


平均値= 5.718 , 3.660 ,平均差= 2.058
相関係数= 0.343,RMSD= 3.735,データ数13494

使用DS無=1725,DS除外=　0 ,Outlier= 108 ,アメダス欠測=　26 ,計=1859

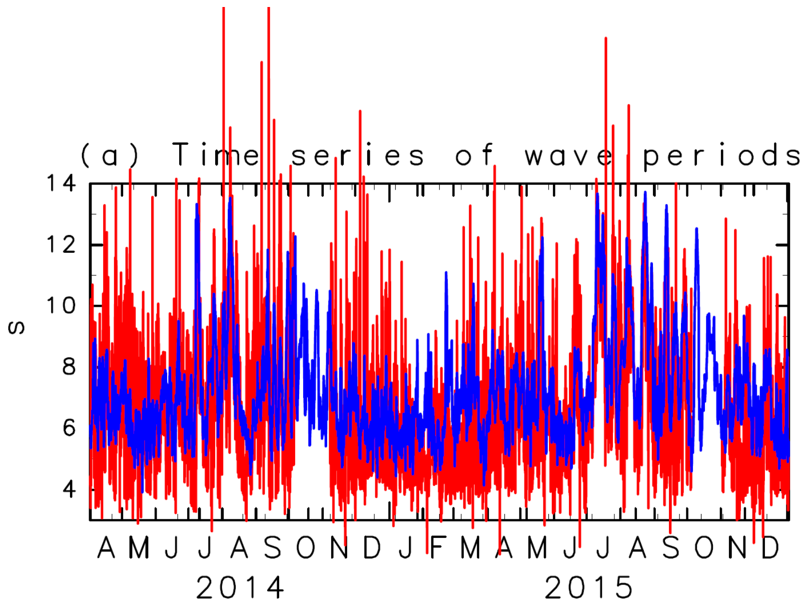
ERA5波高との比較

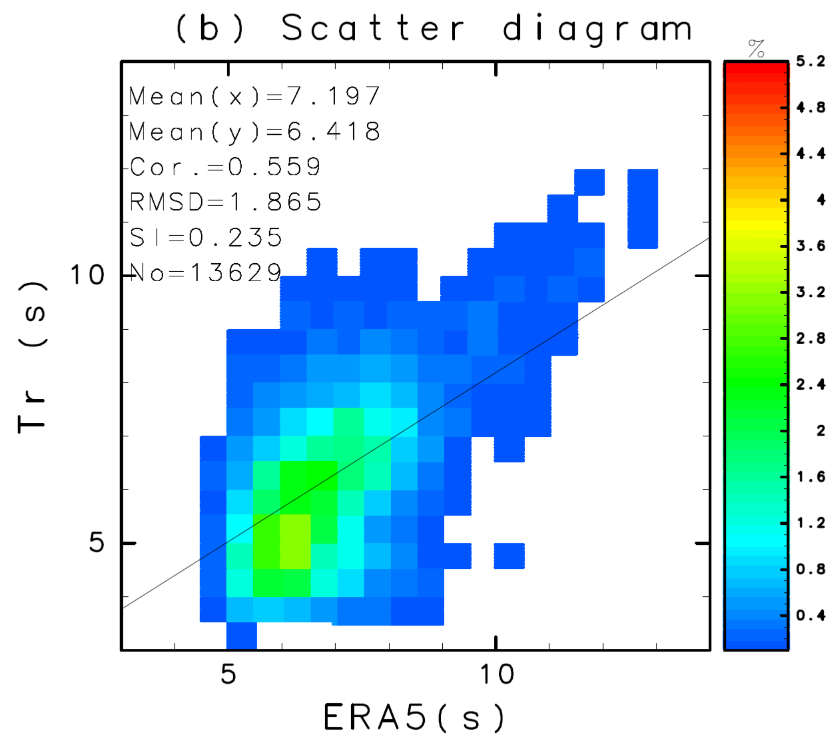




平均値= 1.815 , 1.766 ,平均差= 0.049
相関係数= 0.480,RMSD= 1.108,データ数13626
使用DS無=1730,DS除外= 0 ,Outlier= 3 ,欠測= 0 ,計=1733

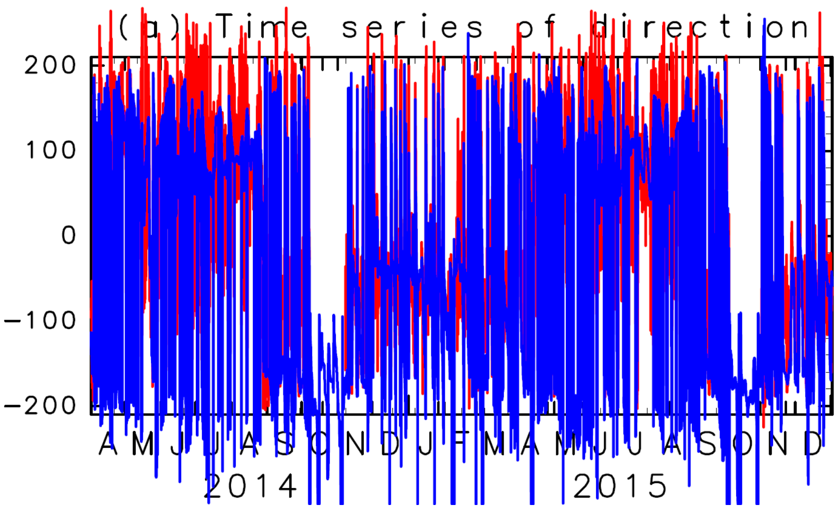
ERA5周期との比較

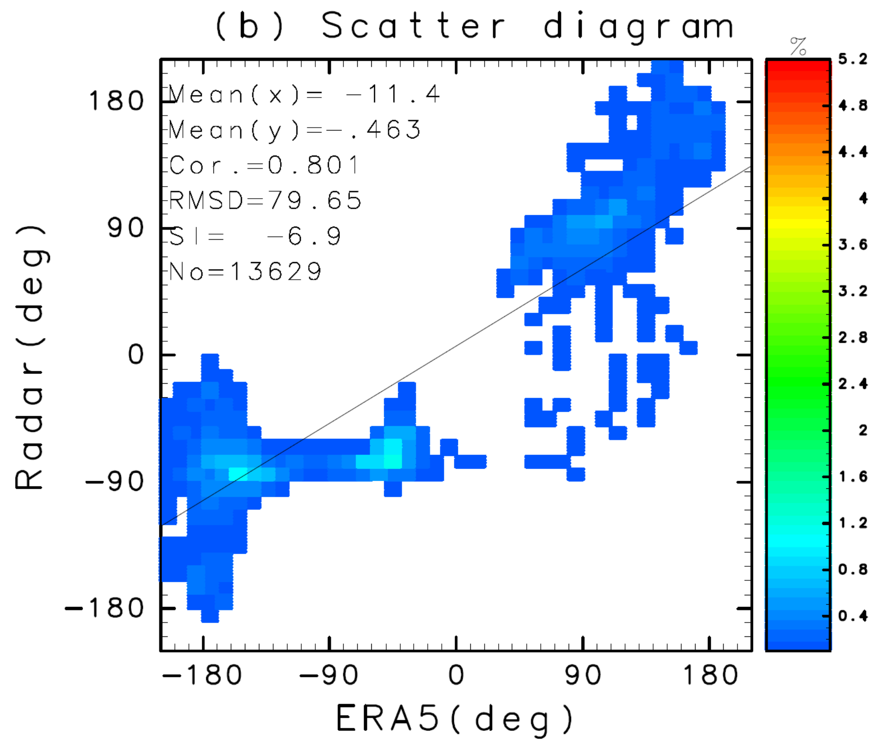




平均値= 6.42， 7.20 ,平均差= -0.78
相関係数= 0.56,RMSD= 1.87,データ数13629
使用DS無=1730,DS除外= 0 ,Outlier= 0 ,欠測= 0 ,計=1730

ERA5波向きとの比較





平均値= -0.46 ,-11.41 ,平均差= 10.95
RMSD= 79.65,データ数13629
使用DS無=1730, DS除外= 0 ,Outlier= 0 ,欠測= 0 ,計=1730

まとめと今後の課題

- 長期(2014年4月から2015年12月まで)にわたる海洋レーダ波浪データとGPSデータとの比較
- 波高はずれ値の検出:
- 目的関数
- 空間分布(最大値と最小値の差など)
- (時間変化)

まとめと今後の課題

- 波高はずれ値の検出：
- 目的関数
- 空間分布
- （時間変化）
- 検出された場合
- 重みパラメータの変更
- ドップラースペクトルの選定を変更

- これらを取り入れて欠測及びはずれ値の減少
- 最適化手法の改善：高分解能化

終わり

終わり

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

$$\mathbf{C}_g \cdot \nabla G(\omega, \theta, x, y) - S_t = 0$$

$\mathbf{C}_g$: 群速度ベクトル,　$G(\omega, \theta, x, y)$: 位置 (x, y) の波浪スペクトル,
∇: 水平勾配,　S_t: ソース関数

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

原理:　拘束条件

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）

- （スペクトル：周波数―方向平面上の格子点値）

$$\log(G_N(k+1,l)) + \log(G_N(k-1,l)) + \log(G_N(k,l-1))$$
$$+ \log(G_N(k,l+1)) - 4\log(G_N(k,l)) = 0 \qquad \text{for} \quad 1 < k < M_f$$
$$\log(G_N(k,l-1)) + \log(G_N(k,l+1))$$
$$-2\log(G_N(k,l)) = 0 \qquad \text{for} \quad k = 1, M_f.$$

$k = 1, ..., M_f,\ l = 1, ..., M_d.$

(k,l): 周波数・波向き番号

M_f, M_d: 周波数・波向き分割数

$G_N(k,l)$: 規格化した波浪スペクトル

$$\mathbf{C}_a \cdot \nabla G(\omega, \theta, x, y) = 0$$

最適化問題

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

$$\Longrightarrow \text{minimize}$$

F_K:制約式
$\mathbf{q}$:未知数 (波浪スペクトル値, 風速, 風向)
未知数個数 N_u, N_t:制約式の個数
λ_{wM} $(M = 1, ..., 6)$:重み

未知数個数:6080

最適化アルゴリズム

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

m: step number, $\alpha_m > 0$:as $U(\mathbf{x}^{(m+1)}) < U(\mathbf{x}^{(m)})$.
$\mathbf{x}^{(m)} = (x_1^{(m)}, \cdots, x_{N_u}^{(m)})$:$\mathbf{x}$ for the mth step.
J_F: Jacobian matrix,
$\mathsf{H}^{(m)}$: $N_u \times N_u$ positive definite matrix.

$$\mathsf{H}^{(m)} = (\mathsf{J_F}^T\mathsf{J_F} + \gamma\mathsf{I})^{-1} \quad ,(\text{Levenberg} - \text{Marquardt} \quad \text{Method})$$

困難

$$
\begin{aligned}
\mathsf{H}^{(m)} &= [\mathrm{diag}(\mathsf{J_F}^T\mathsf{J_F})]^{-1} \\
\mathsf{H}^{(m)} &= [\mathrm{diag}(\mathsf{J_F}^T\mathsf{J_F}) + \mathsf{I}]^{-1}, \\
\mathsf{H}^{(m)} &= \mathsf{I} \quad ,(\text{steepest} \quad \text{descendent} \quad \text{method}).
\end{aligned}
$$

可能

I : Unit matrix.

最適化問題

$$U(\mathbf{x}) \;=\; \frac{1}{2}\sum_{K=1}^{N_t}\left[\lambda_{wM}F_K(\mathbf{x})\right]^2$$
$$\Longrightarrow \text{minimize}$$

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

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

未知数個数:6080