

海洋レーダによる波浪方向 スペクトル推定手法の拡張

久木幸治

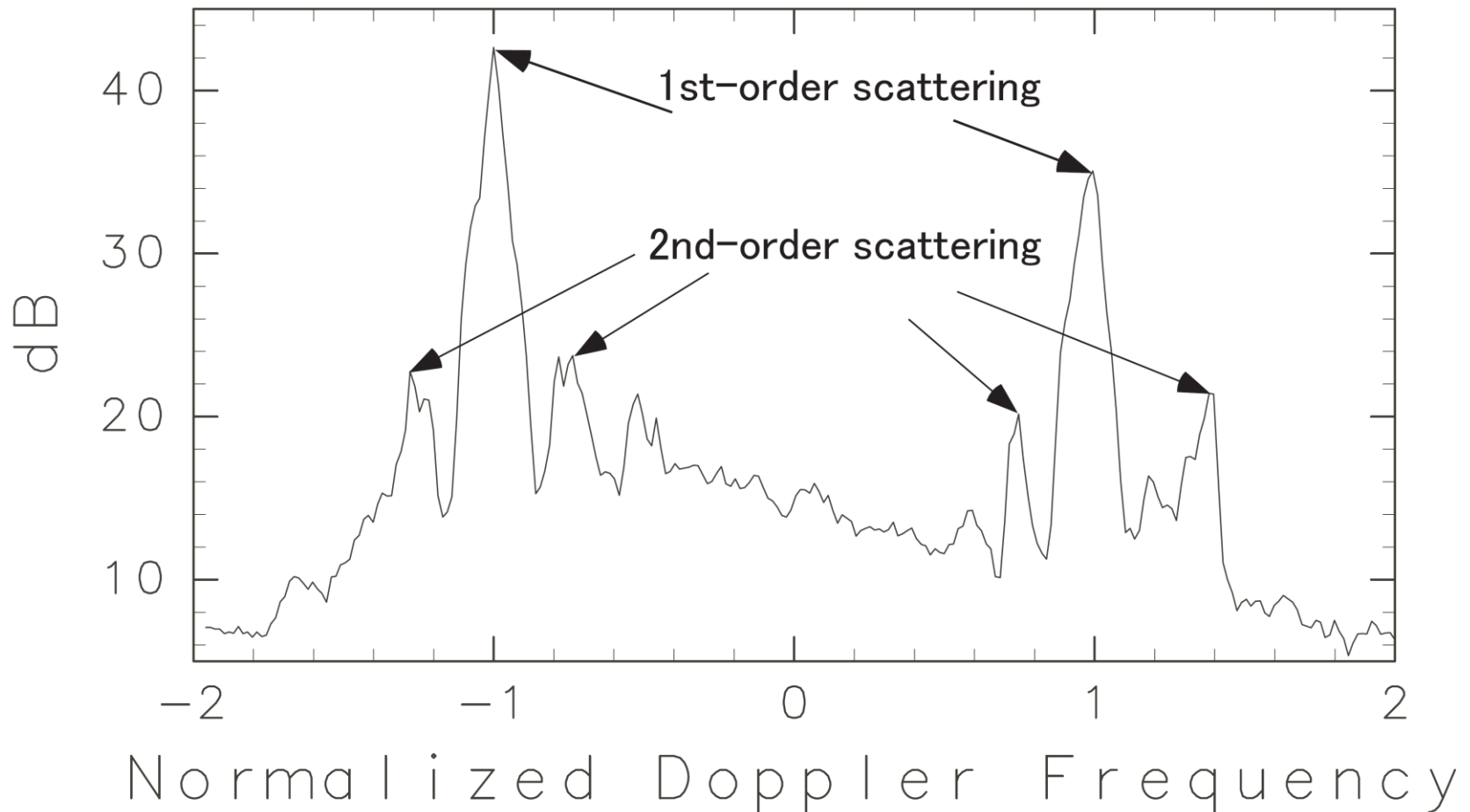
琉球大学理学部

目次

- 何故海洋レーダから波浪を計測出来るのか
- 背景
- 波浪スペクトル推定原理
- ドップラースペクトルの扱い
- 結果
- まとめと今後の課題

ドップラースペクトルの例

Doppler Spectrum



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:

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

$$\omega_D = \omega_B$$

ω_D : ドップラー角周波数, k_0 : 電波波数, ω_0 : 電波角周波数,
 c : 光速, ω_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,
 ω_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

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

ドップラースペクトルは
レーダ散乱断面積に比例

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

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

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

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:

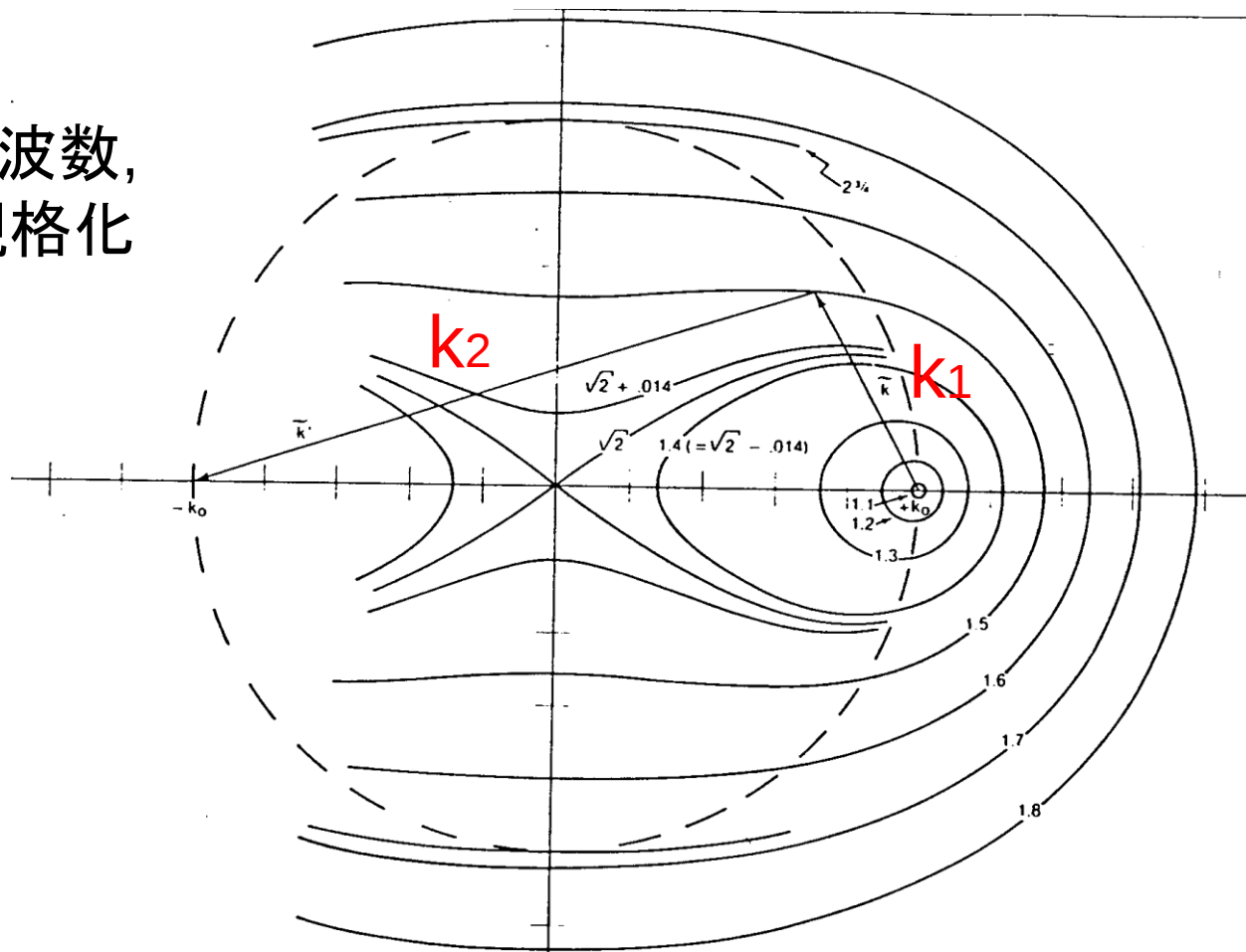
$$\mathbf{k}_1 = (p - k_0, q), \quad \mathbf{k}_2 = (-(p + k_0), -q)$$

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

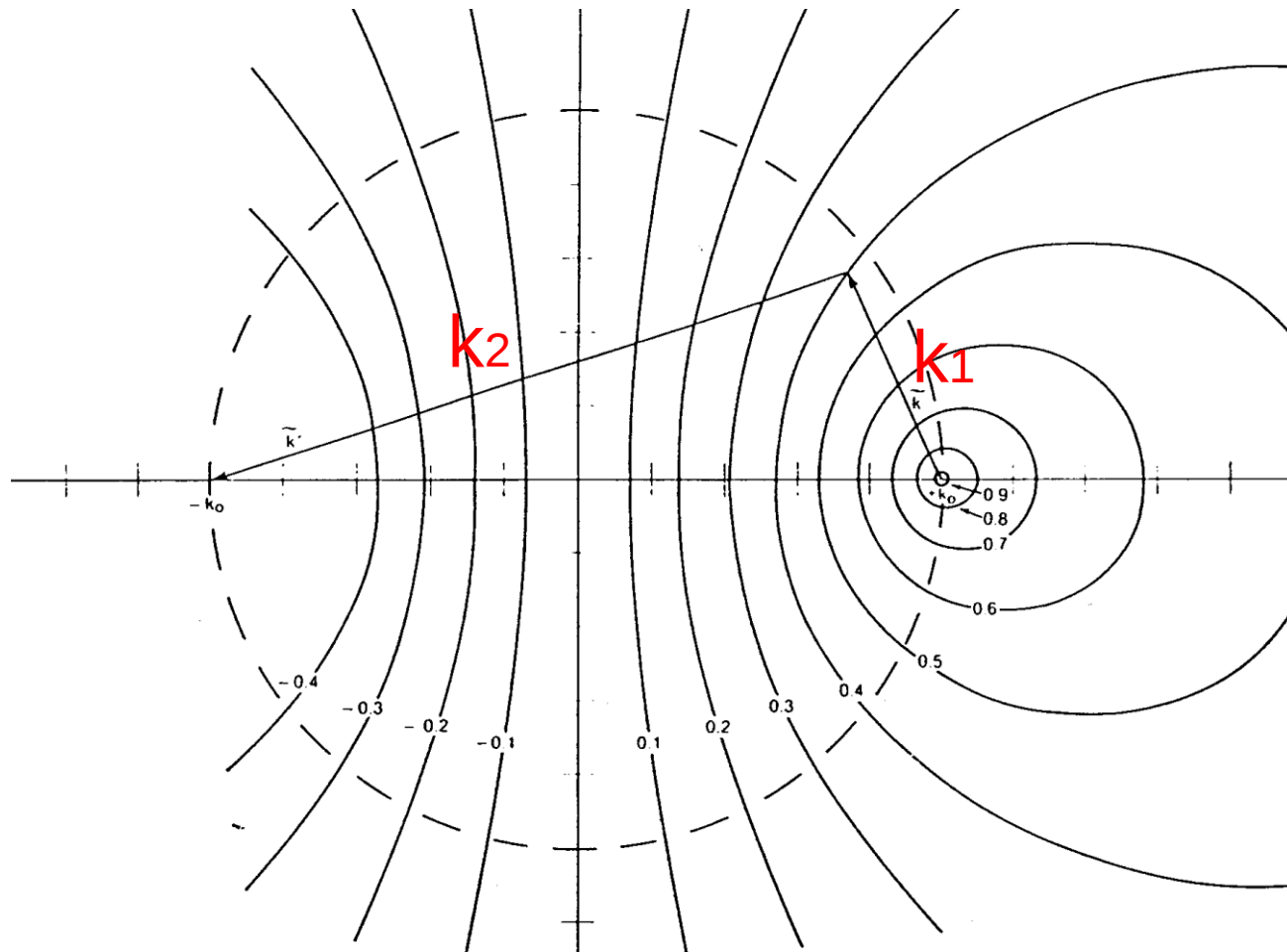
Γ : $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$ についての既知関数

p-q面上での,ベクトル k_1, k_2 と
等ドップラー周波数線(1以上)

Bragg周波数, 波数で規格化

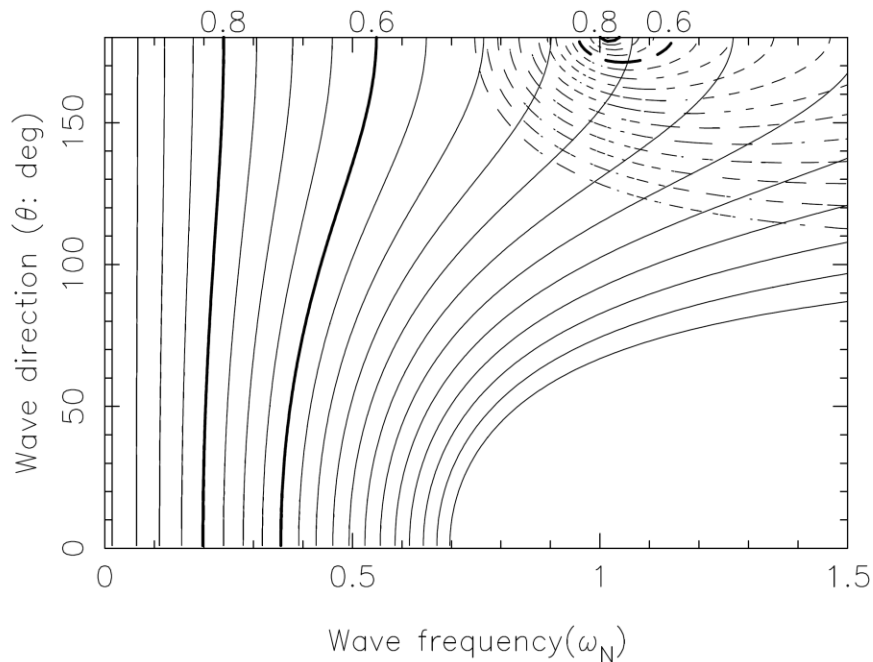


p-q面上での、ベクトル k_1, k_2 と等ドップラー周波数線(1未満)

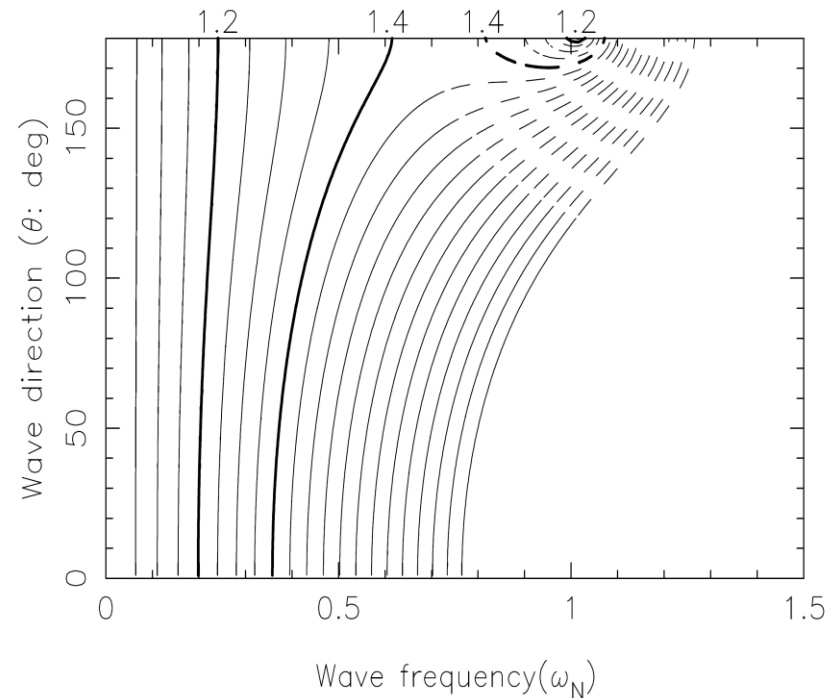


ドップラー周波数に対するベクトル m1k1及びm2k2に対応する周波数及び 方向

(a) Contour map of Doppler frequencies ($0 < \omega_{DN} < 1$)



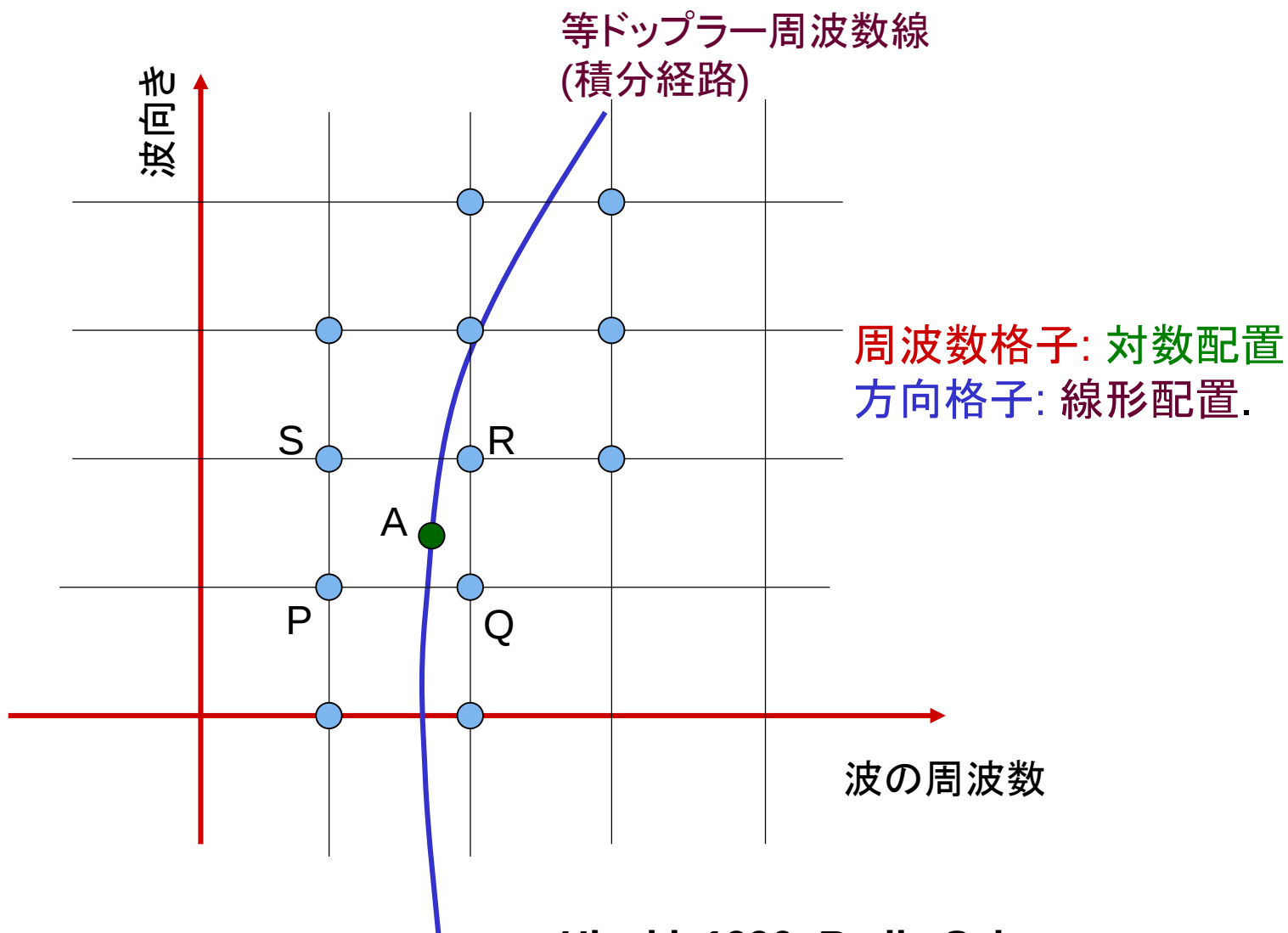
(b) Contour map of Doppler frequencies ($\omega_{DN} > 1$)



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

Hisaki (1996)

積分方程式の離散化



Hisaki, 1996: Radio Sci.

従来の手法

- 二つのレーダビームの交線における二つのドップラースペクトルから、波浪スペクトルを求める(Lipa & Barrick 1986; Wyatt 1990; Hisaki 1996; Hashimoto et al., 2003): 両方のドップラースペクトルが波浪推定に使用可能でなければならない。
- 単一のレーダから、レーダを中心とする極座標格子点上の波浪スペクトルを求める(Hisaki 2005, 2006, 2009, 2014)。
- CODARでは, PM型スペクトルを適合。ビーム方向には, 分解していない(Long et al., 2011)。

今回の手法

- 直交格子点上での, 波浪スペクトルを求める。
- 一基でも, 複数基でも, 適用が可能。
- 波浪の推定域を, ある程度自由に設定できる。

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)
- 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)

最適化問題

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

$\implies \text{minimize}$

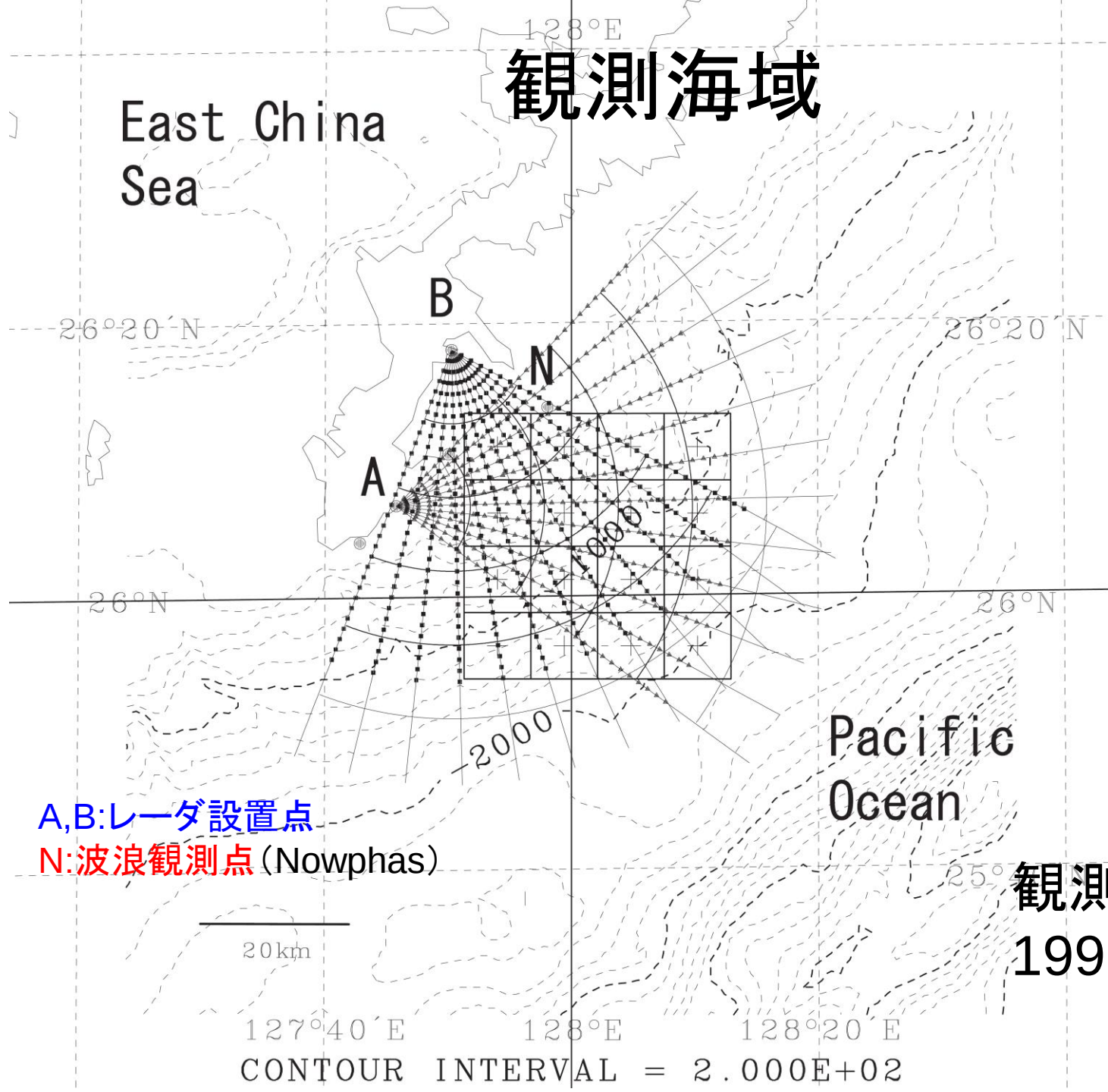
F_K : 拘束条件式

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

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

観測海域

East China
Sea



Pacific
Ocean

A,B:レーダ設置点

N:波浪観測点 (Nowphas)

観測期間

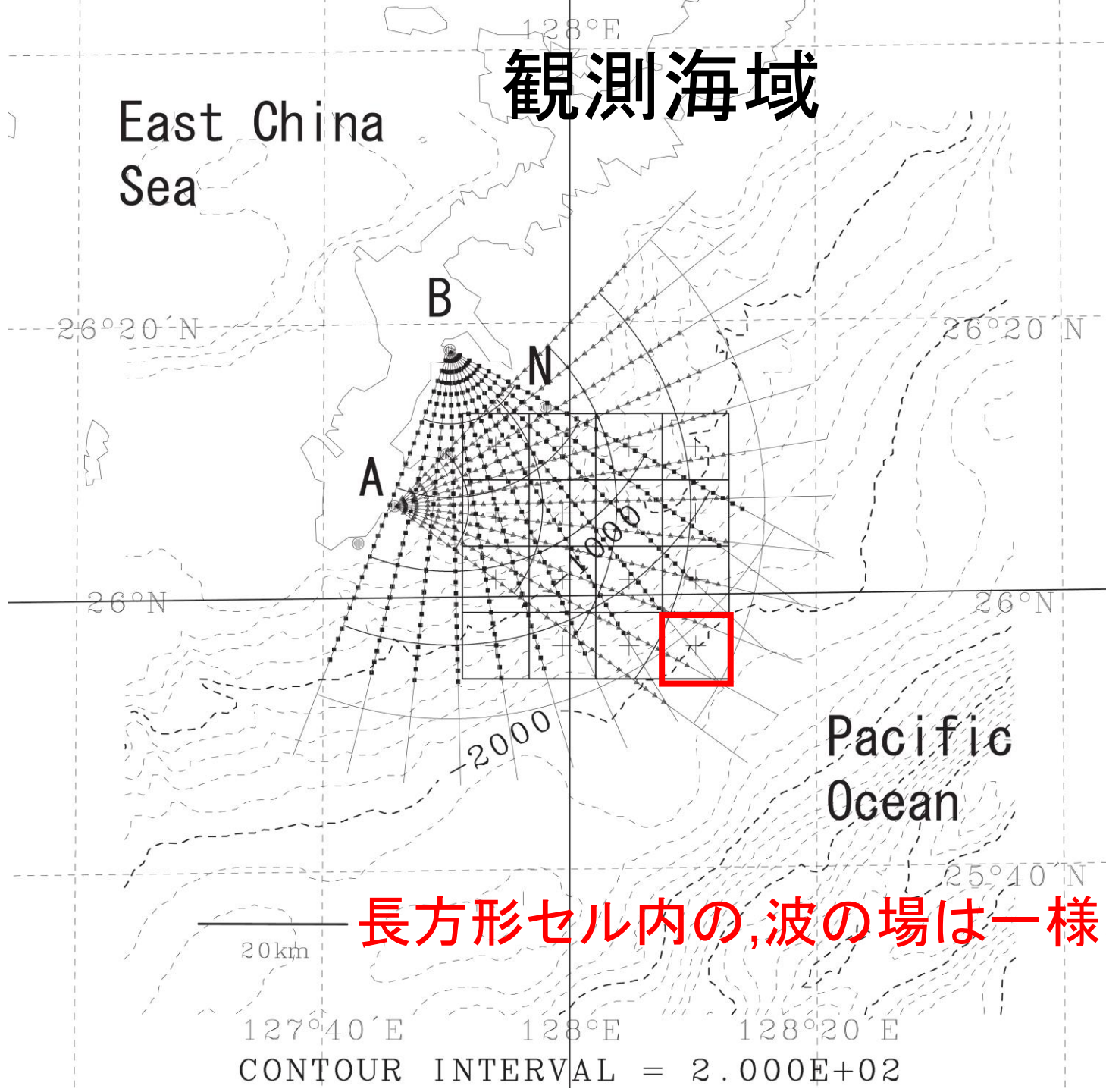
1998年4-5月

127°40'E

128°E

128°20'E

CONTOUR INTERVAL = 2.000E+02



長方形セル内の,波の場は一樣とする。

East China Sea

128°E

B

N

A

$$-2.6^{\circ}-20'-N$$

26°20'N

26°N

26°N

Pacific
Ocean

直交格子間隔
9km

20 km

127°40'E

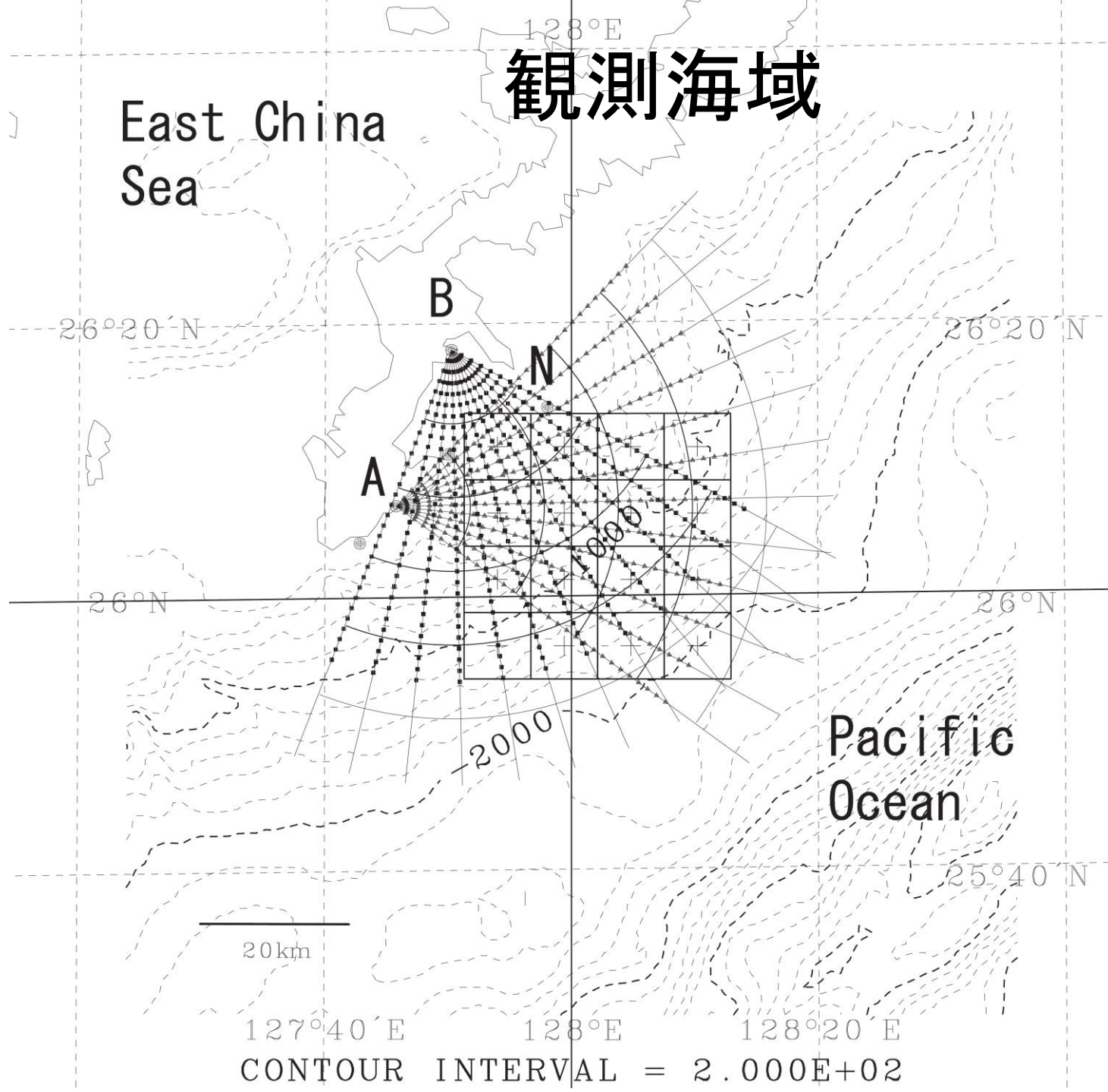
1280E

128°20'E

CONTOUR INTERVAL = 2.000E+02

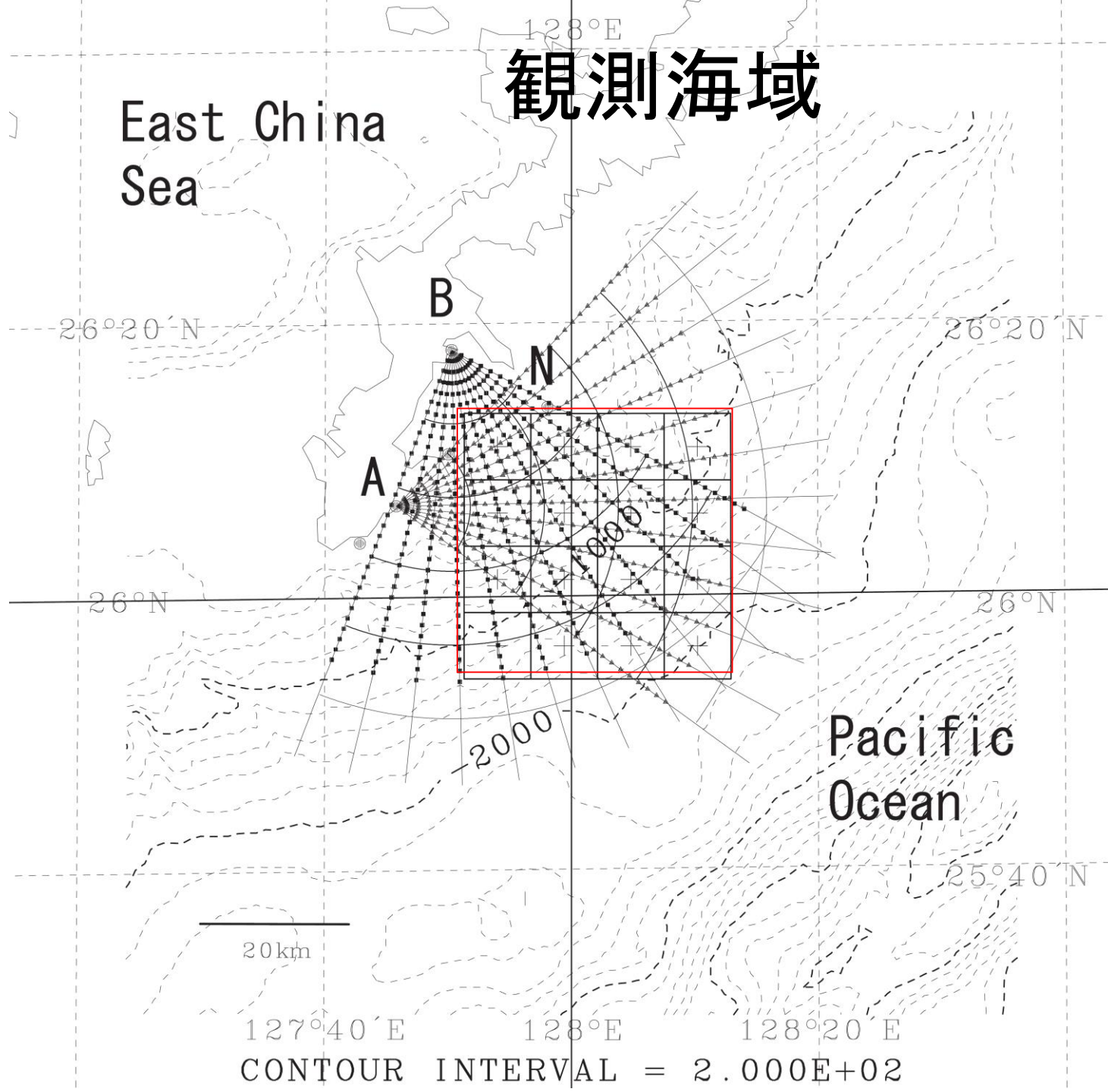
観測海域

East China
Sea

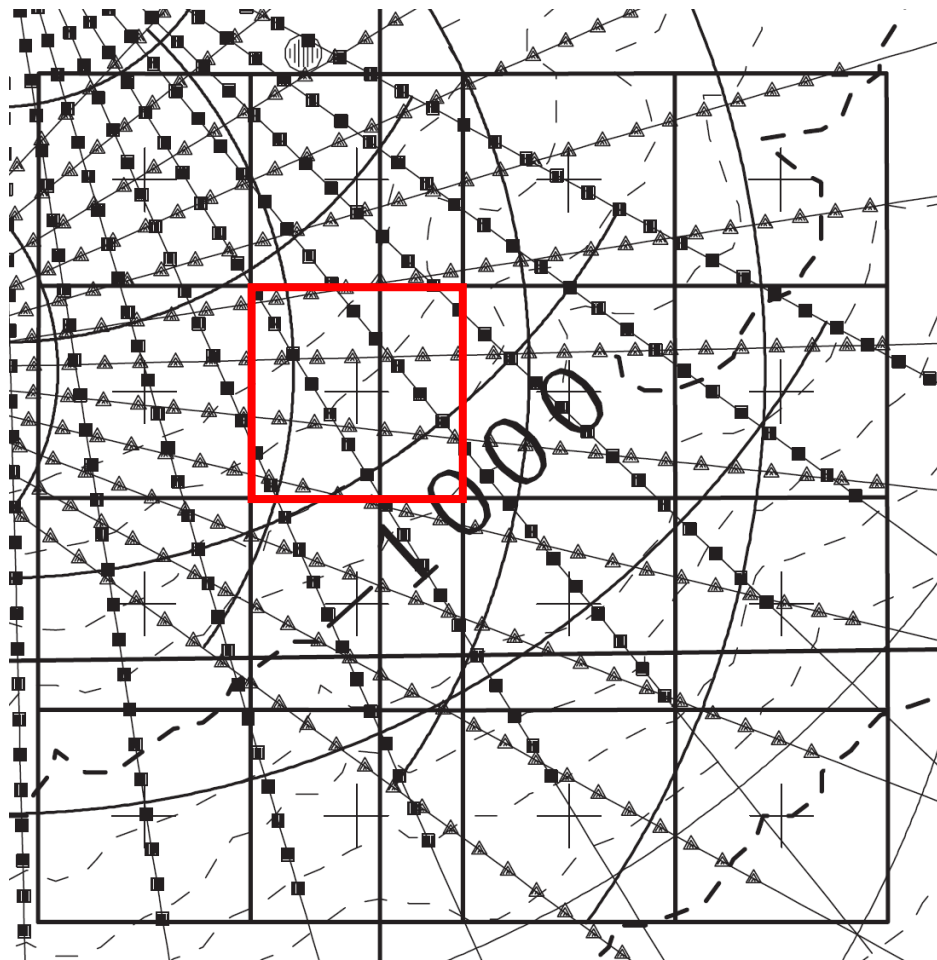


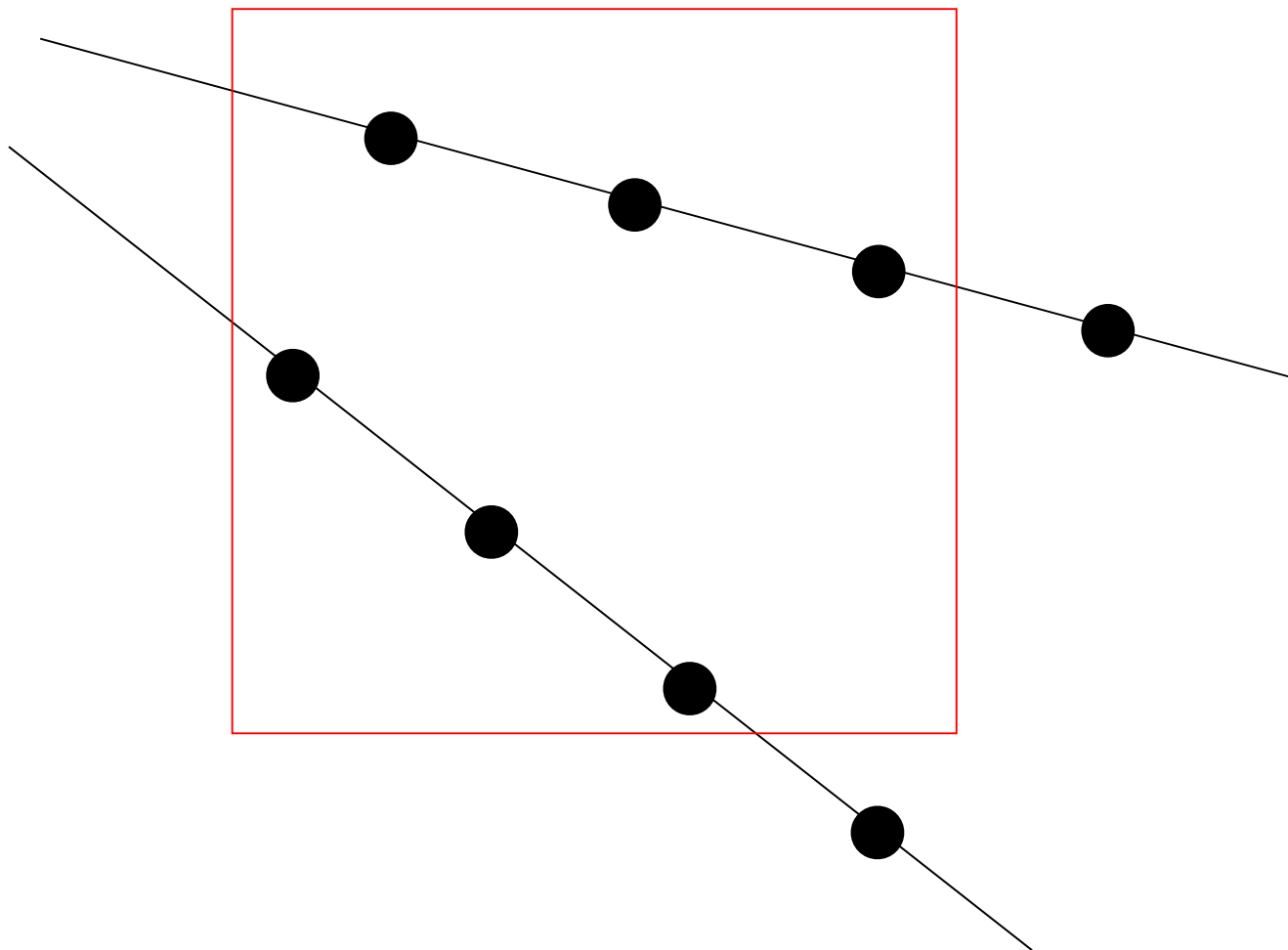
観測海域

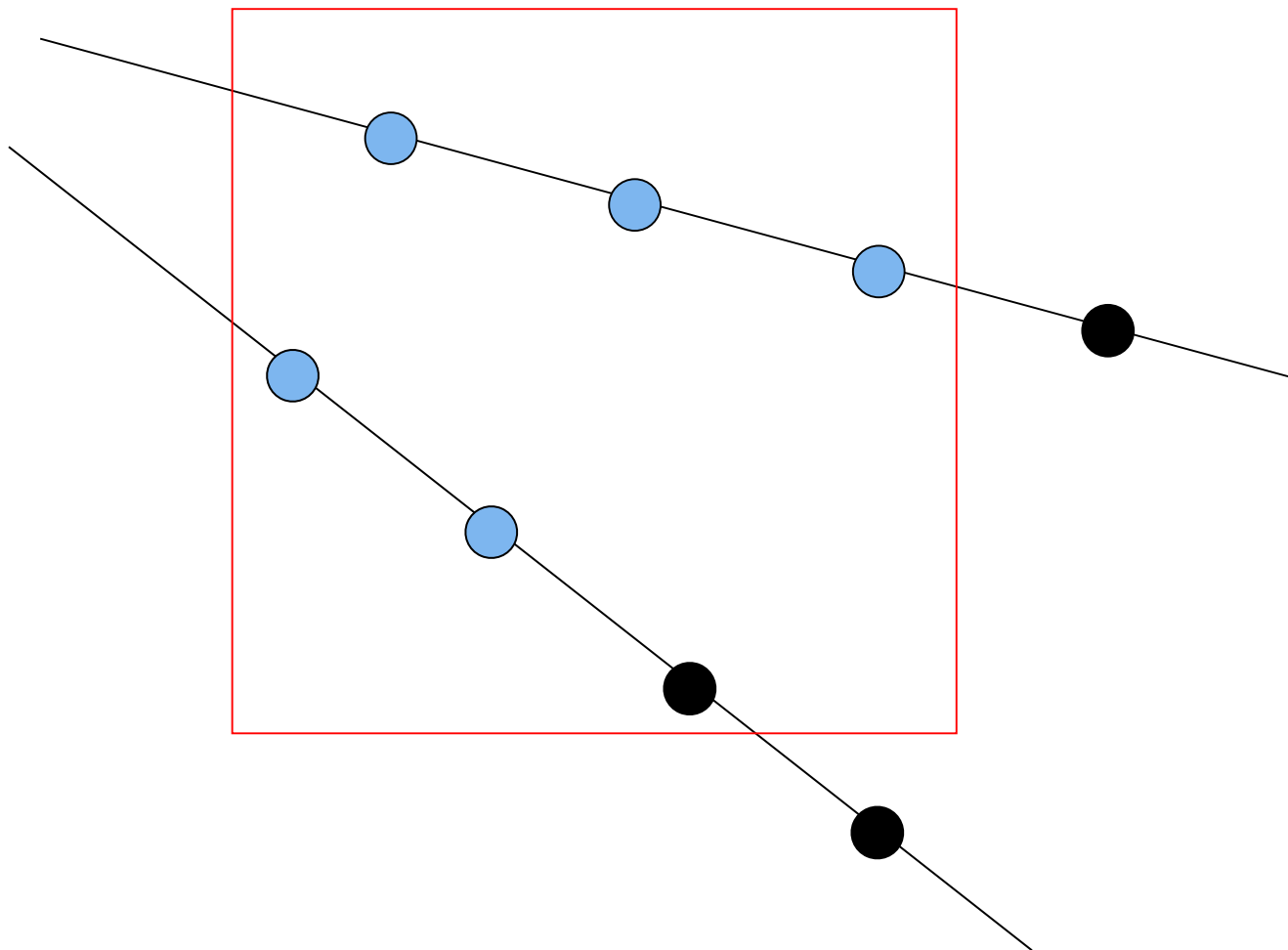
East China
Sea

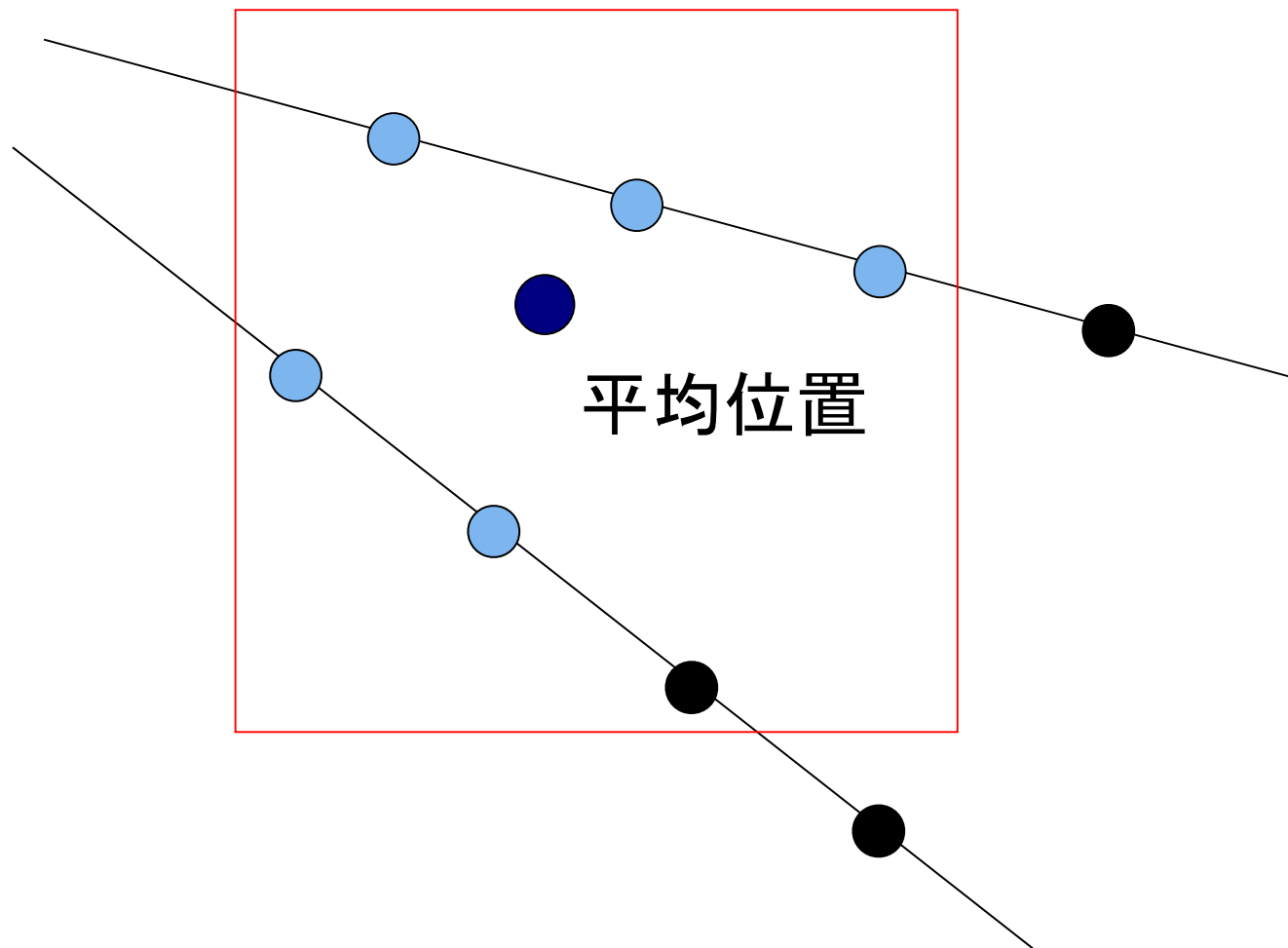


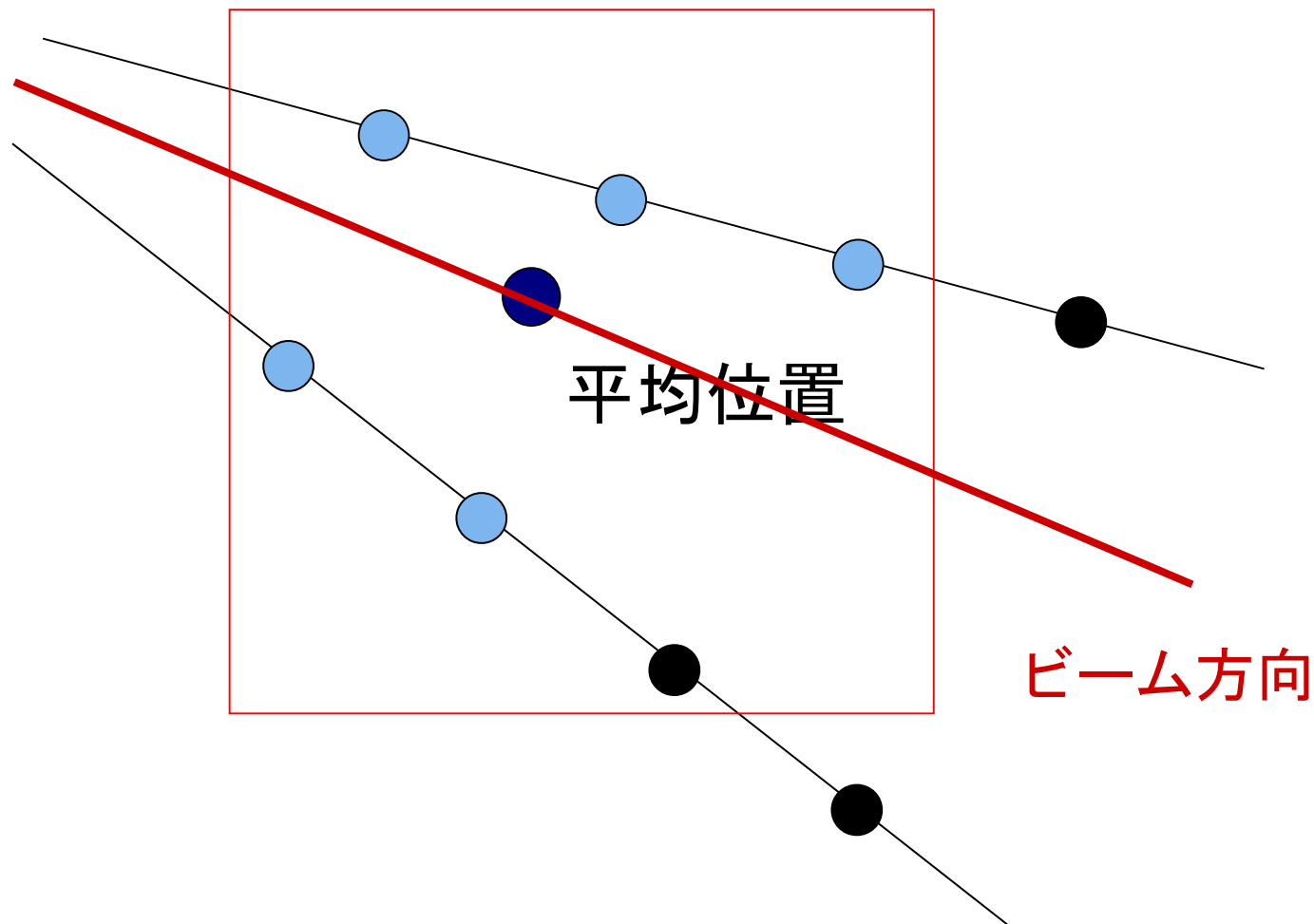
■及び▲
ドップラースペクトル
サンプル点

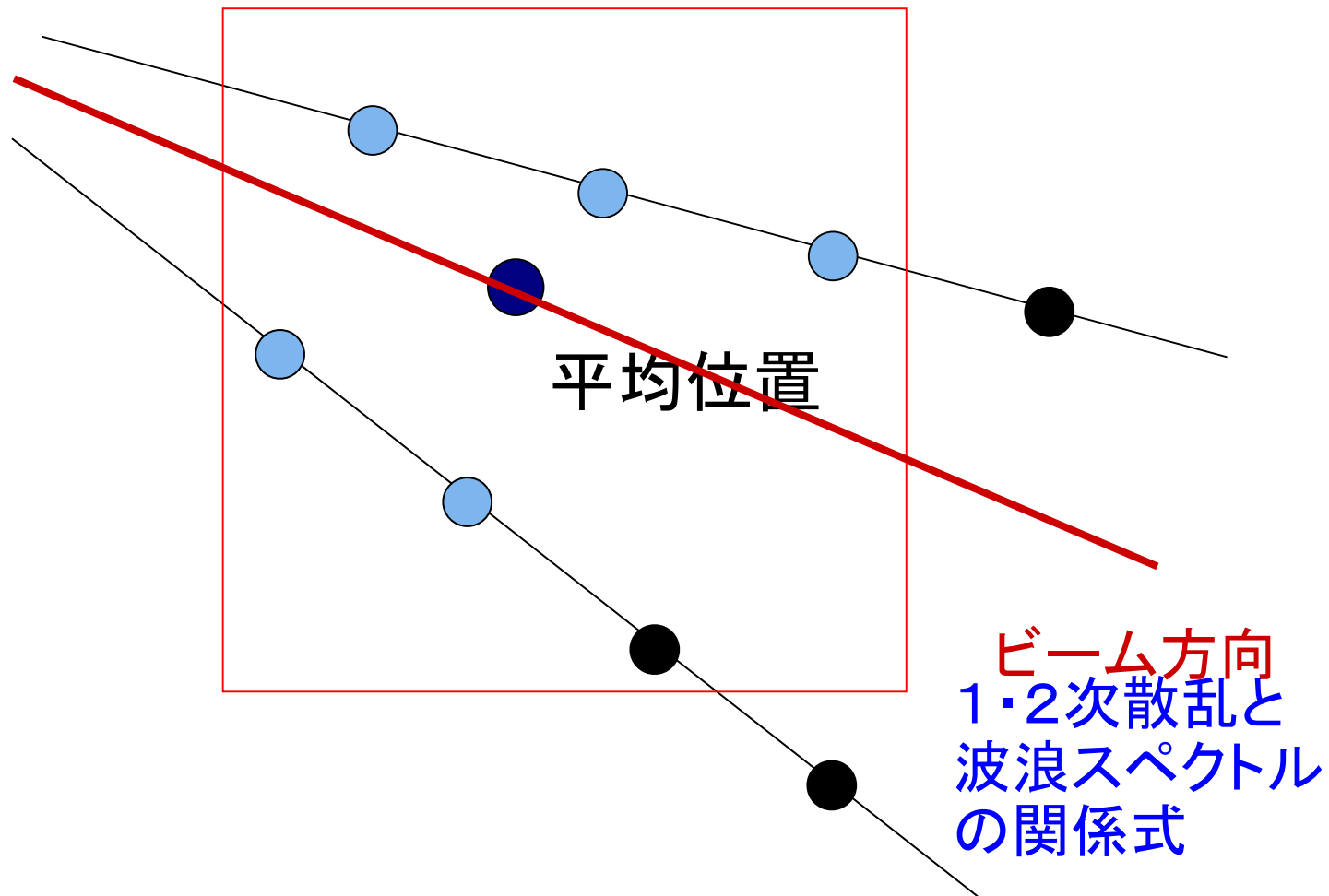


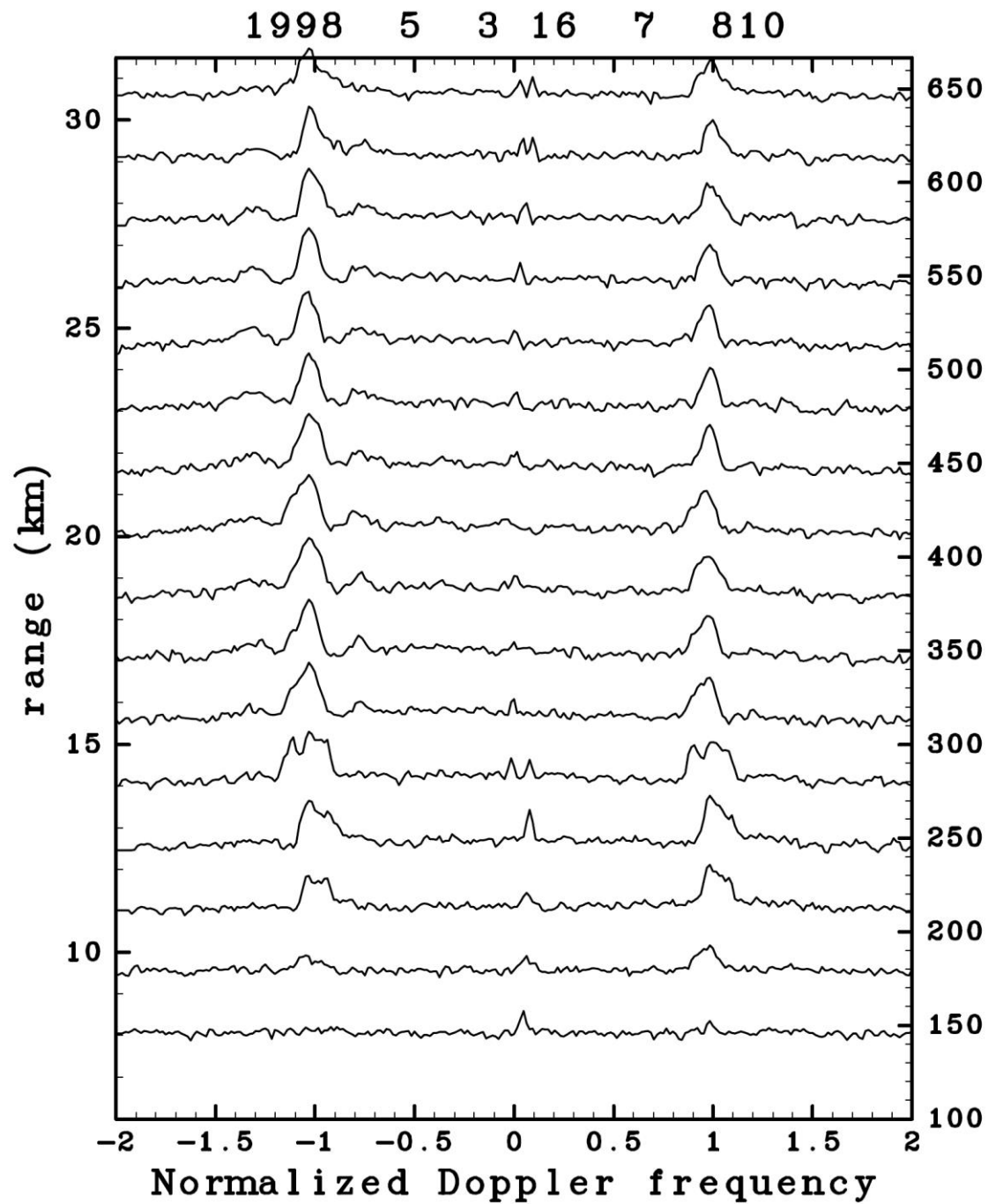


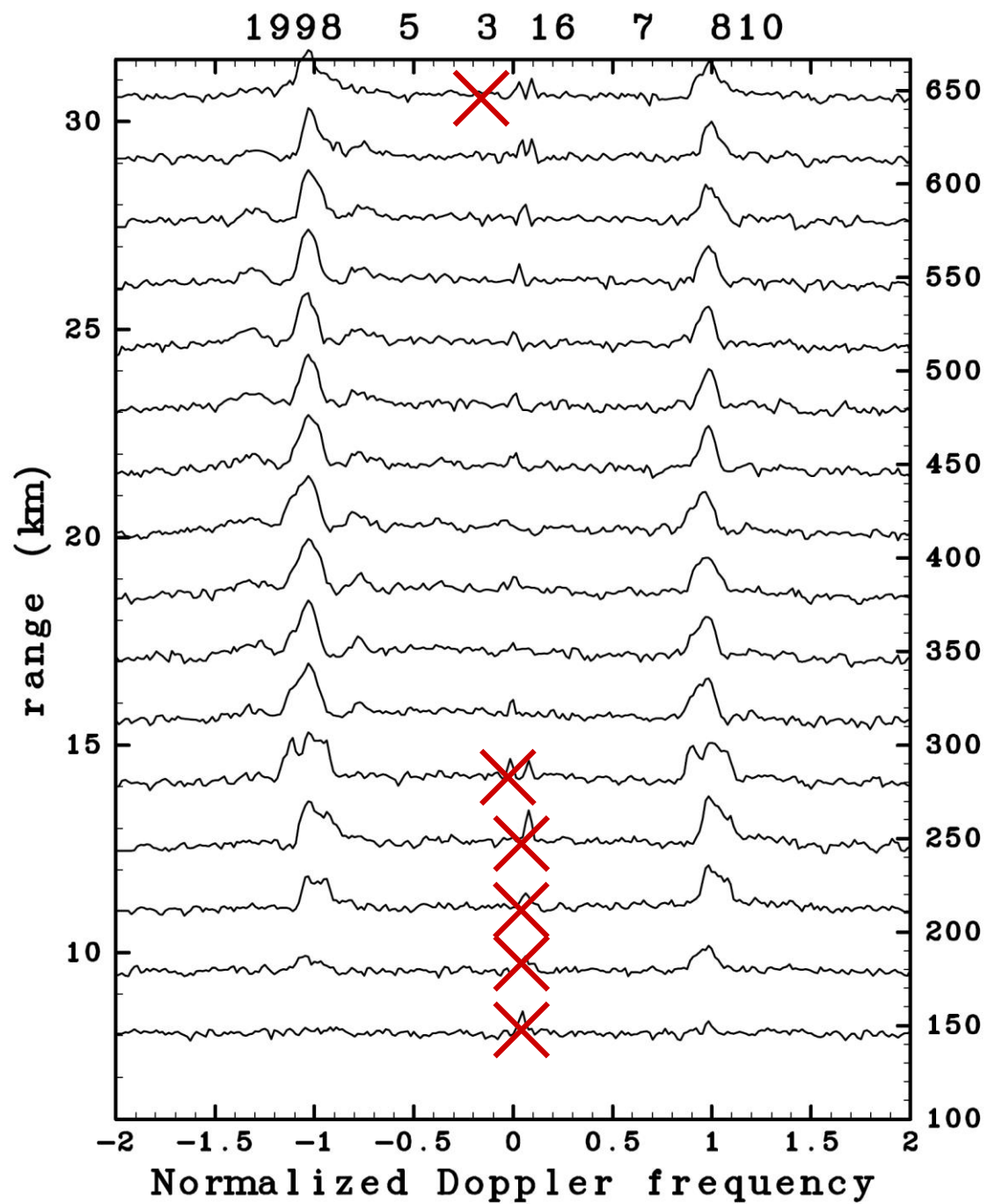












ドップラースペクトル選択の基準

- マニュアルによる判定。
- 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」 比が,他のそれよりも,高いドップラースペクトルを除く。

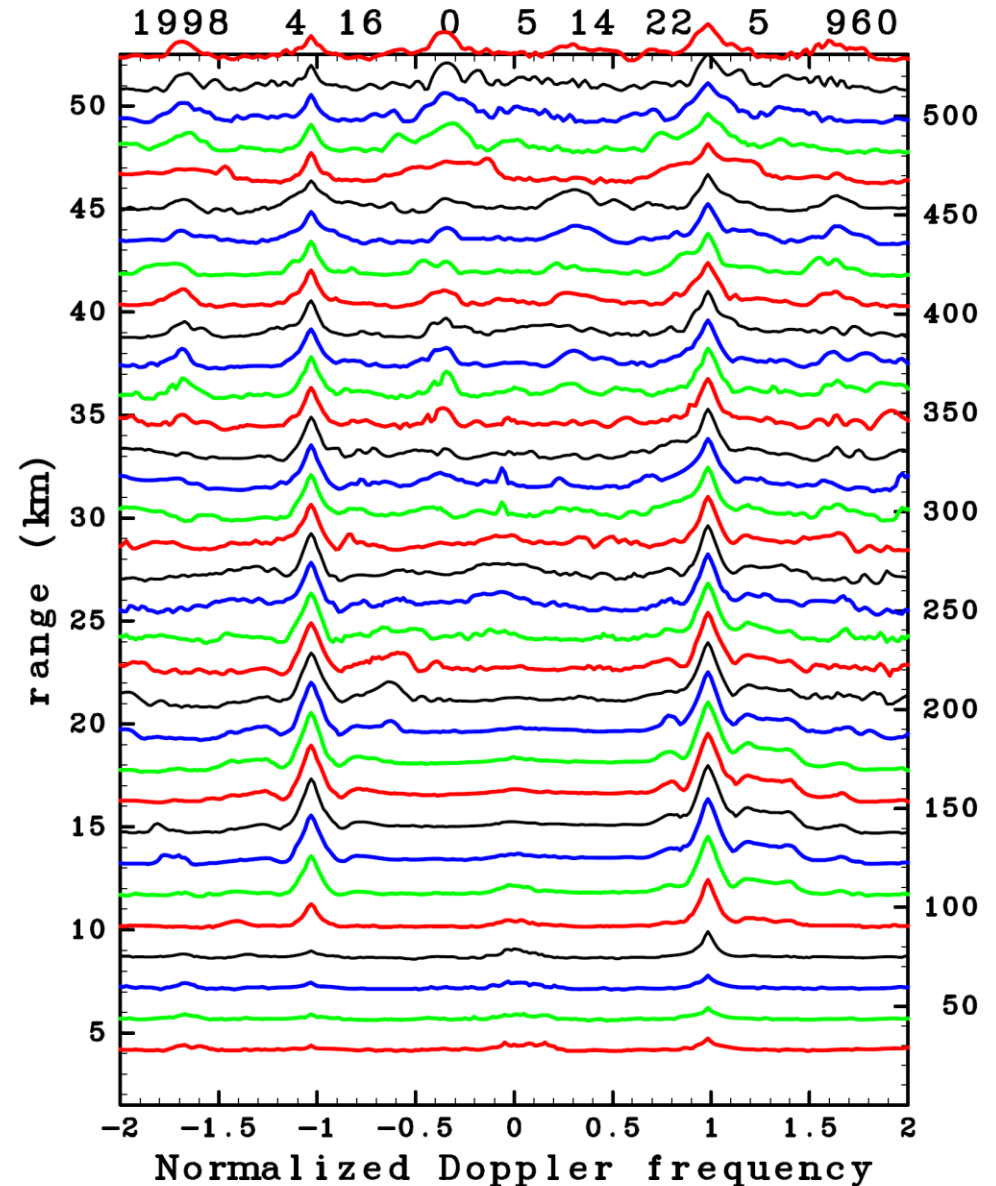
ドップラースペクトル選択の基準

- マニュアルによる判定。
- 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」 比が,他のそれよりも,高いドップラースペクトルを除く。

期間平均したドップラースペクトル

マニュアルによる判定:
個々のドップラースペ
クトルについては,不可能。

平均値から,どの距離
(レンジ)の,ドップラー
スペクトルを除くかを
決める。

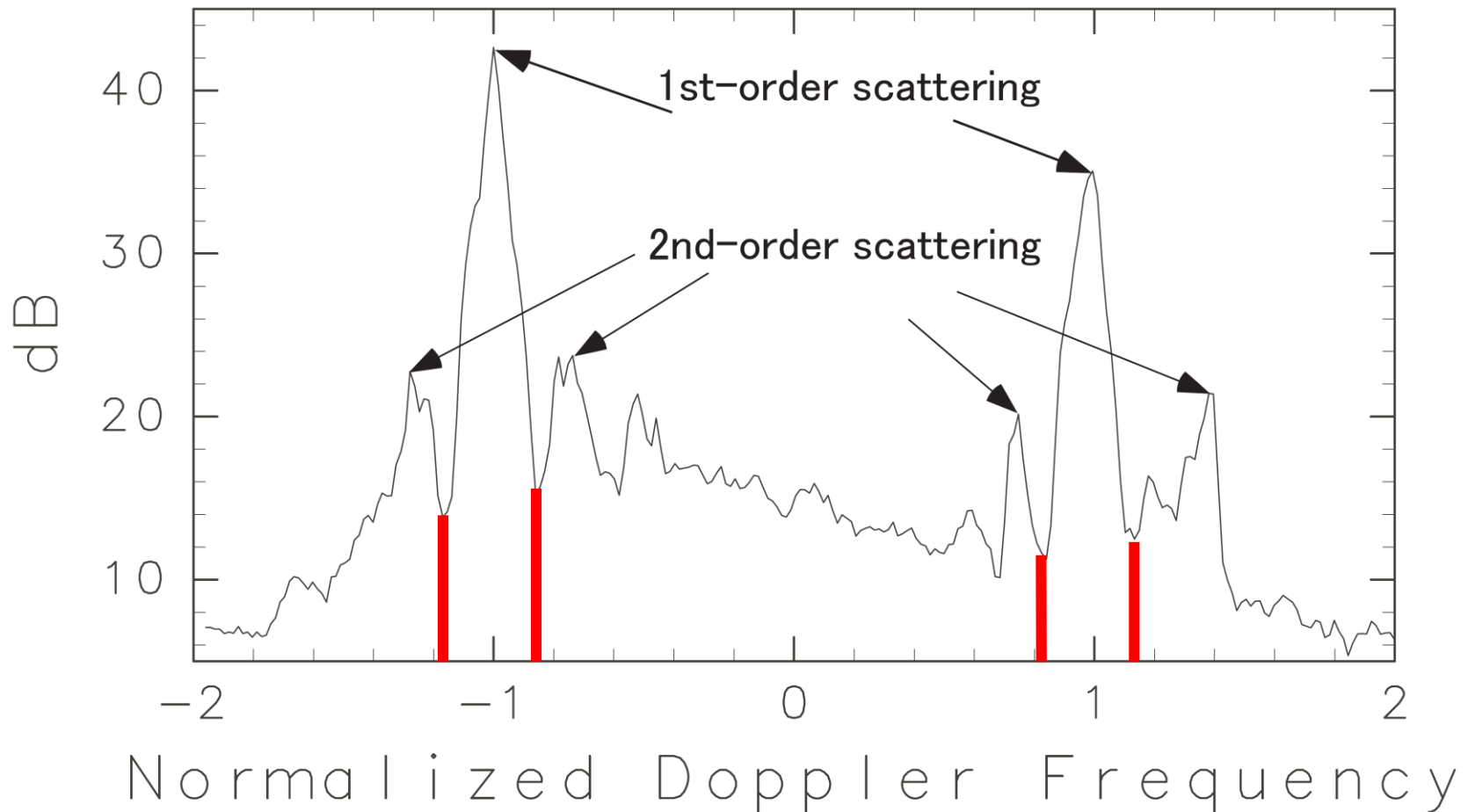


ドップラースペクトル選択の基準

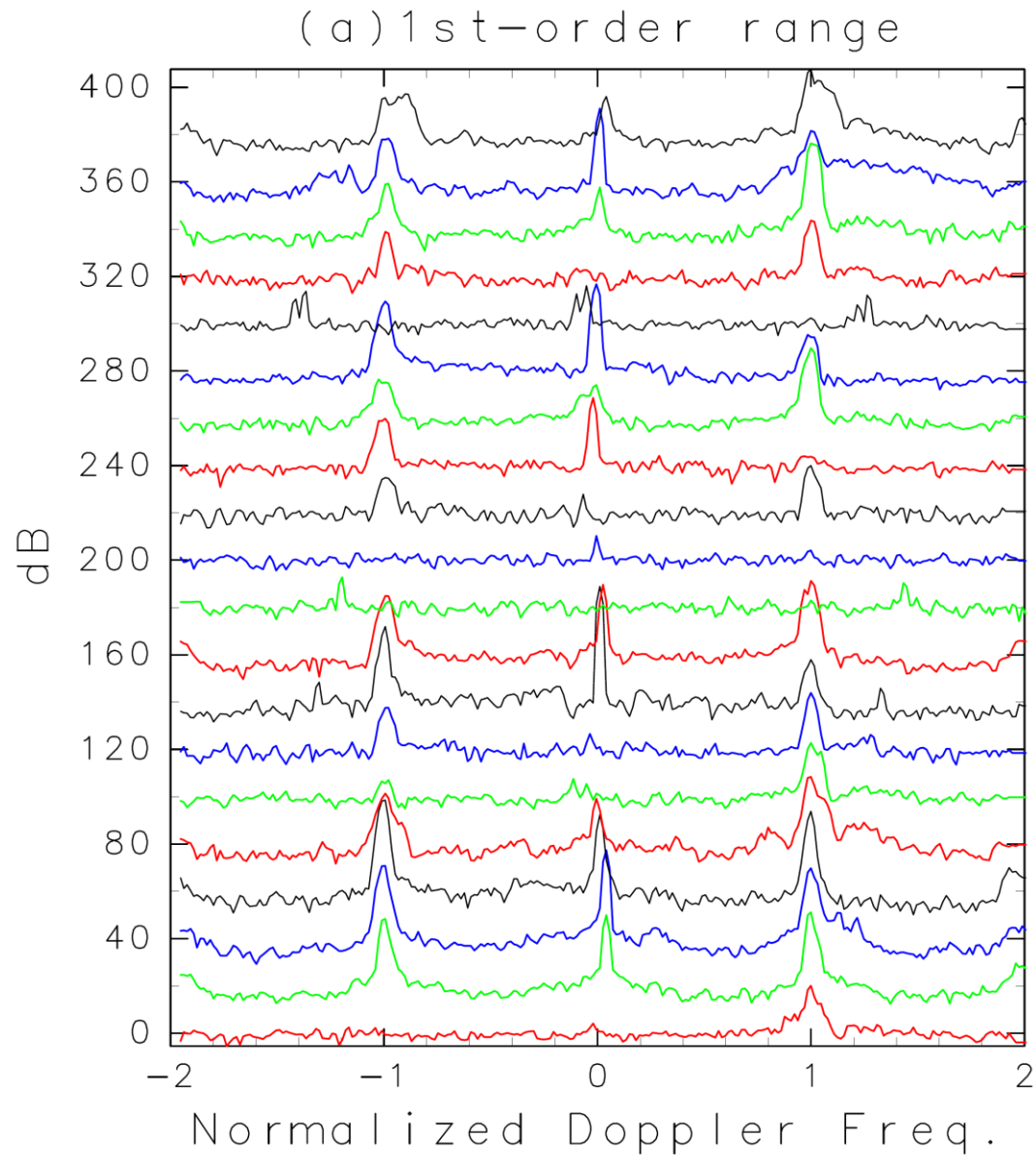
- マニュアルによる判定。
- 一次散乱が、ある程度の高いこと。
- 一次散乱域が同定できること。
- 自己組織化マップ(SOM)により,ドップラースペクトルの形を分類。
- 「二次散乱/一次散乱」 比が,他のそれよりも,高いドップラースペクトルを除く。

ドップラースペクトルの例: 一次散乱領域

Doppler Spectrum



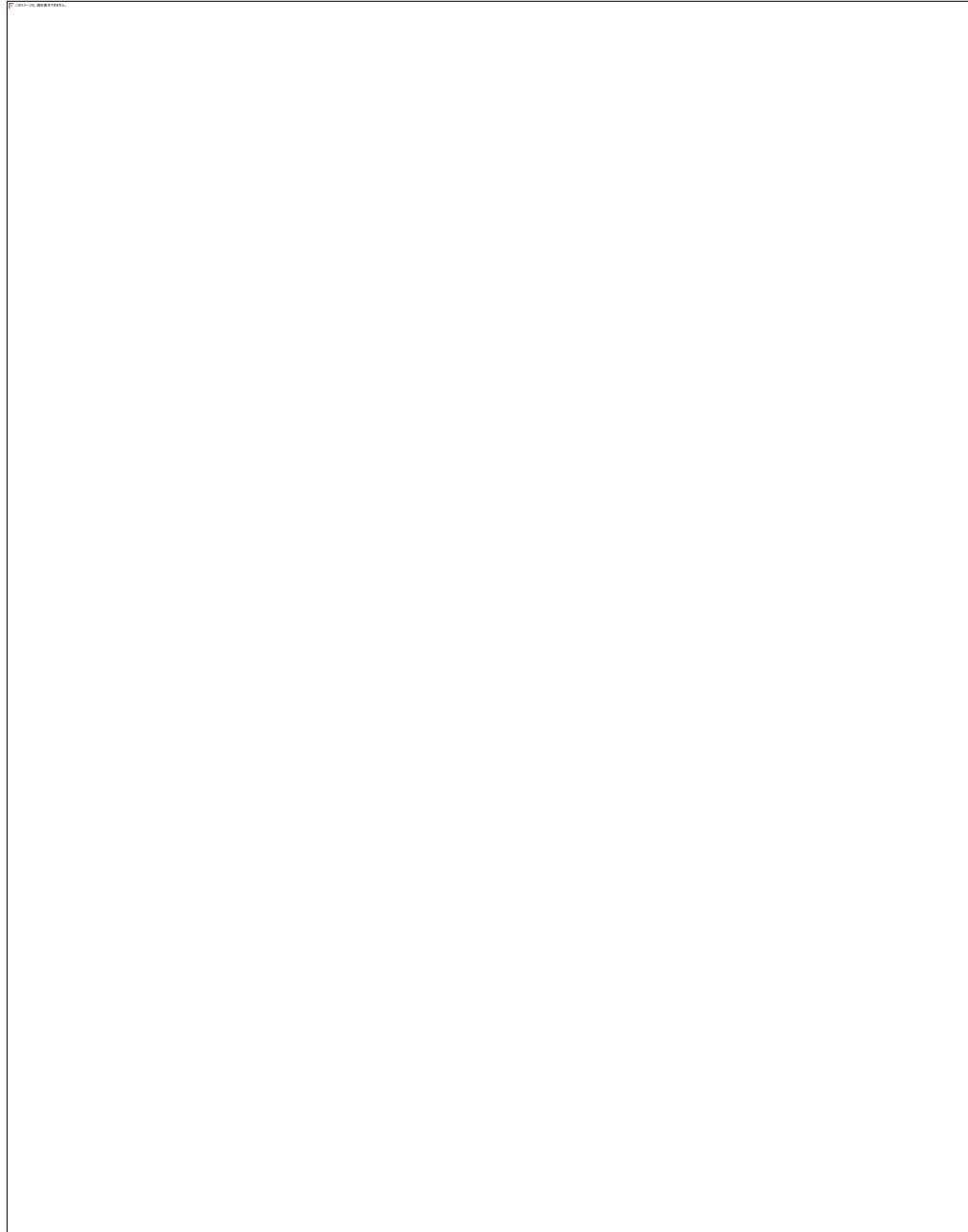
一次散乱域が同定できなかった例



ドップラースペクトル選択の基準

- マニュアルによる判定。
- 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。

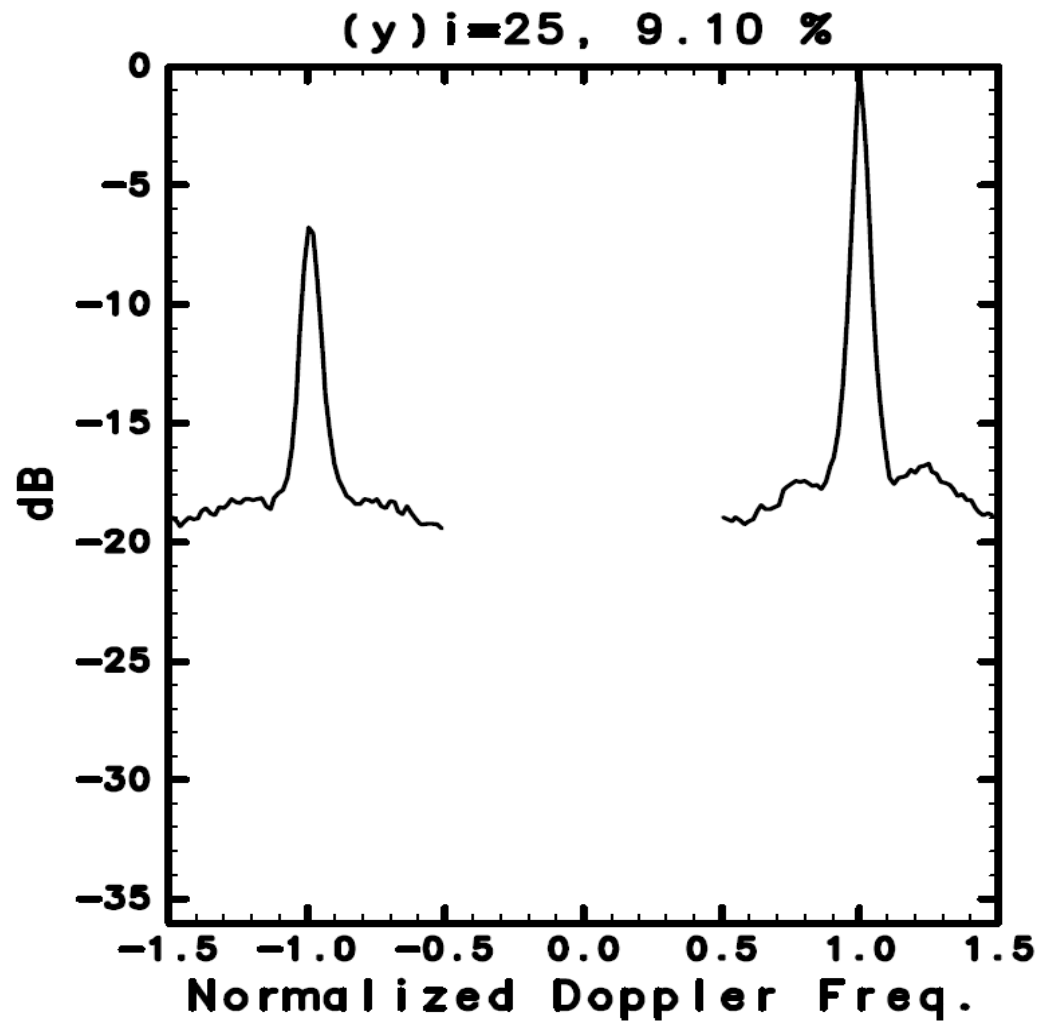
SOMにより,ドップラースペクトル分類



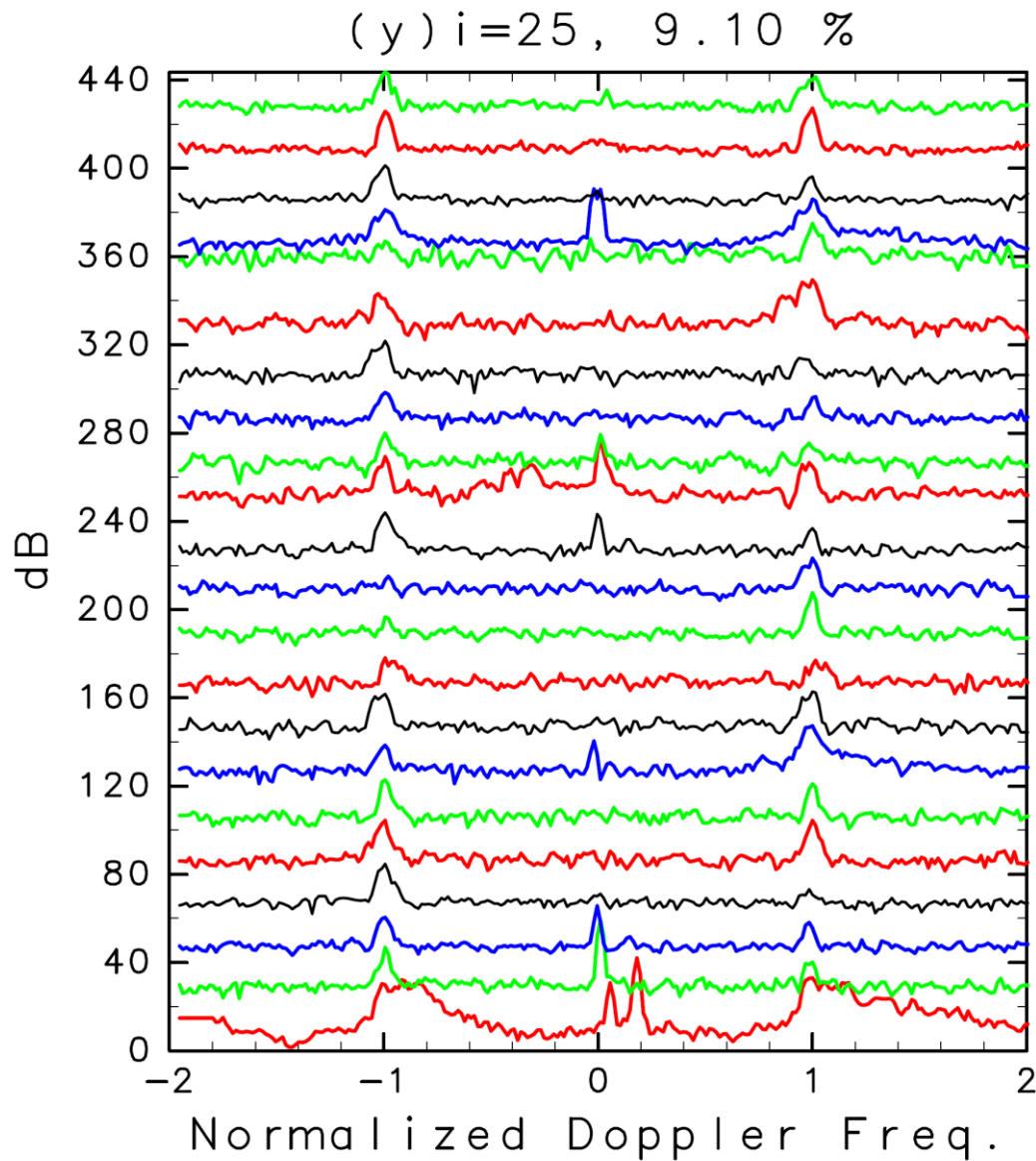
SOMにより,ドップラースペクトル分類



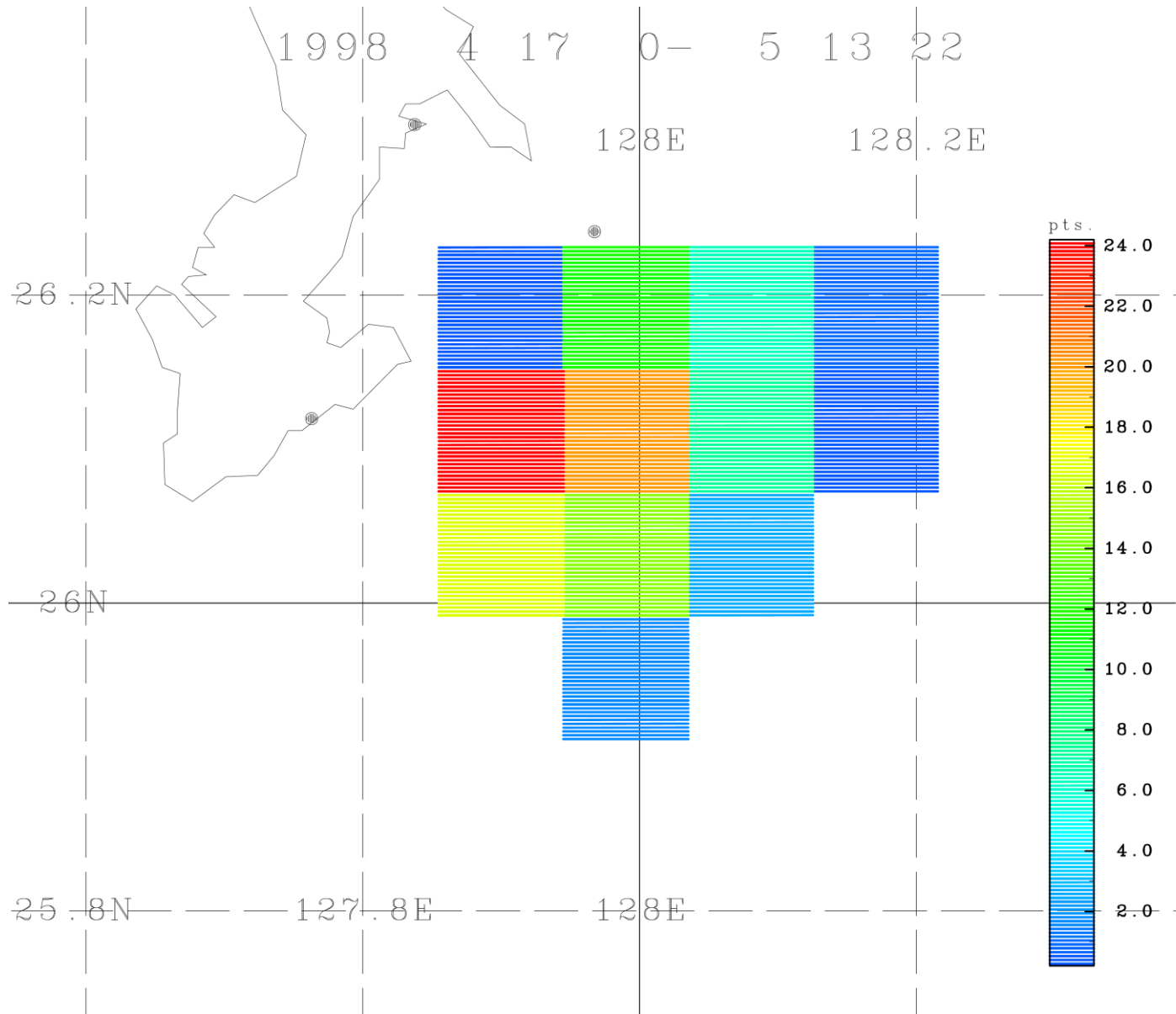
グループ25



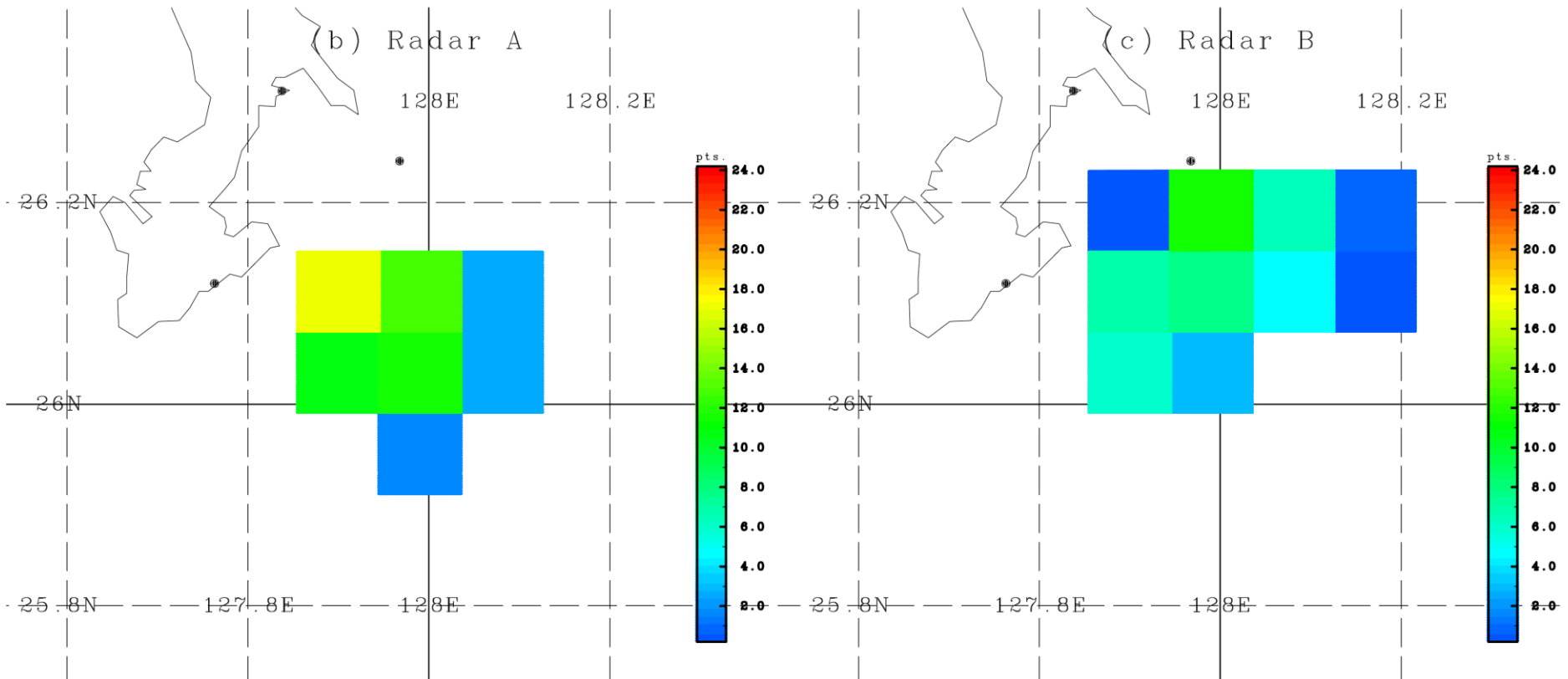
グループ25のドップラースペクトルの例



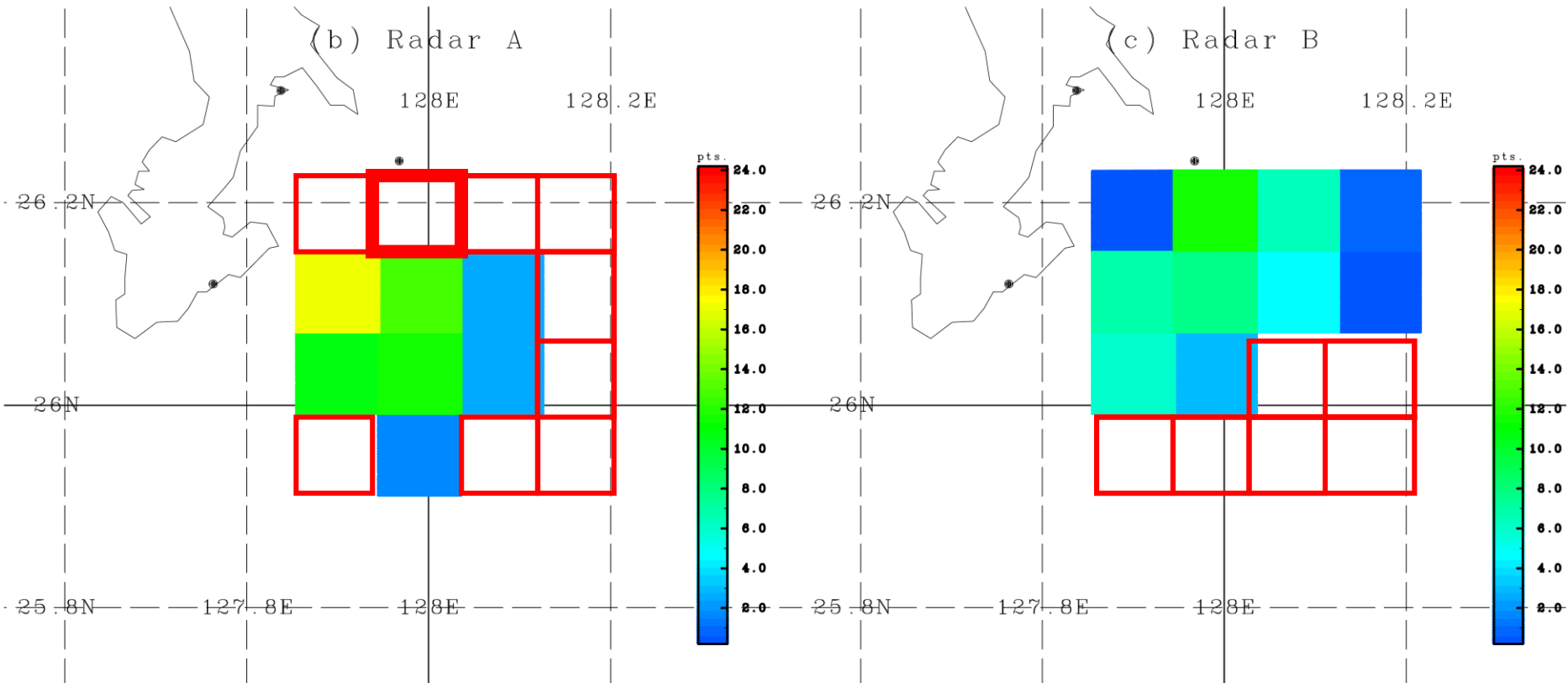
一回の観測における平均ドップラーズペクトル数



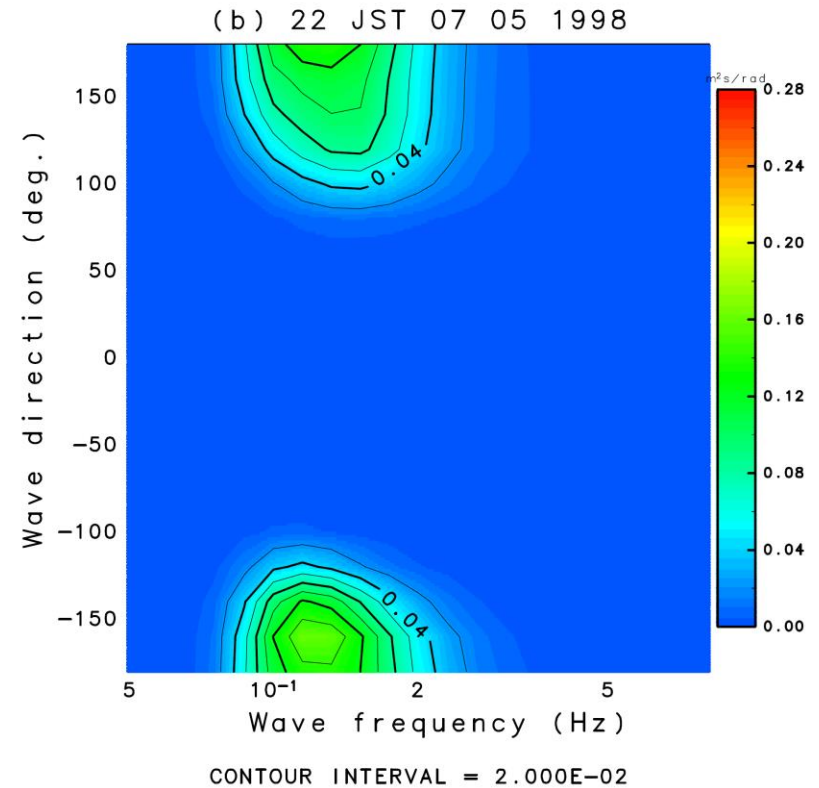
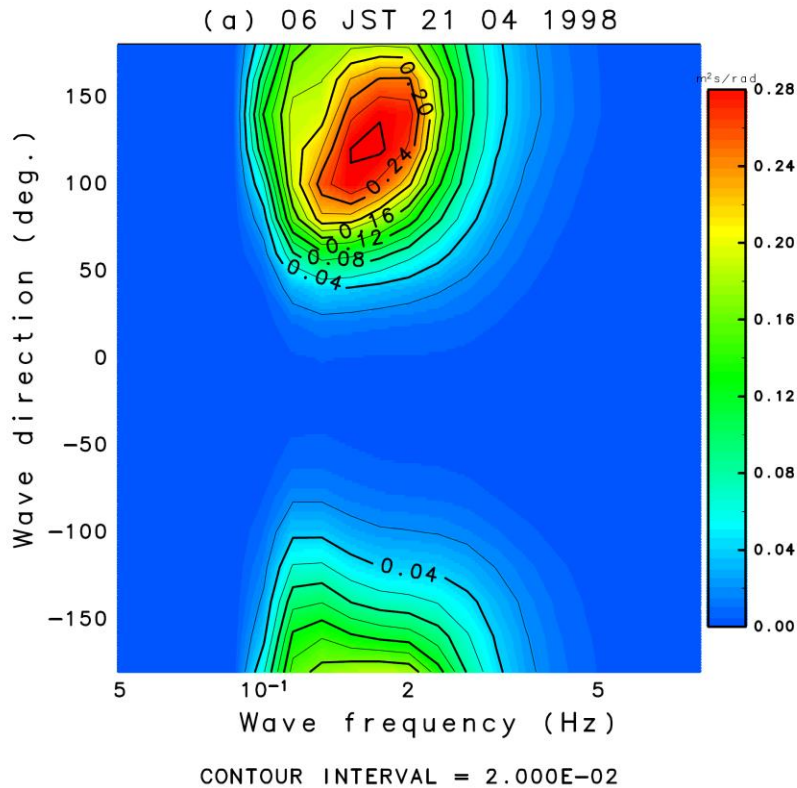
一回の観測における 平均ドップラースペクトル数 (radar A & B)



一回の観測における 平均ドップラースペクトル数 (radar A & B)



波浪スペクトルの例



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

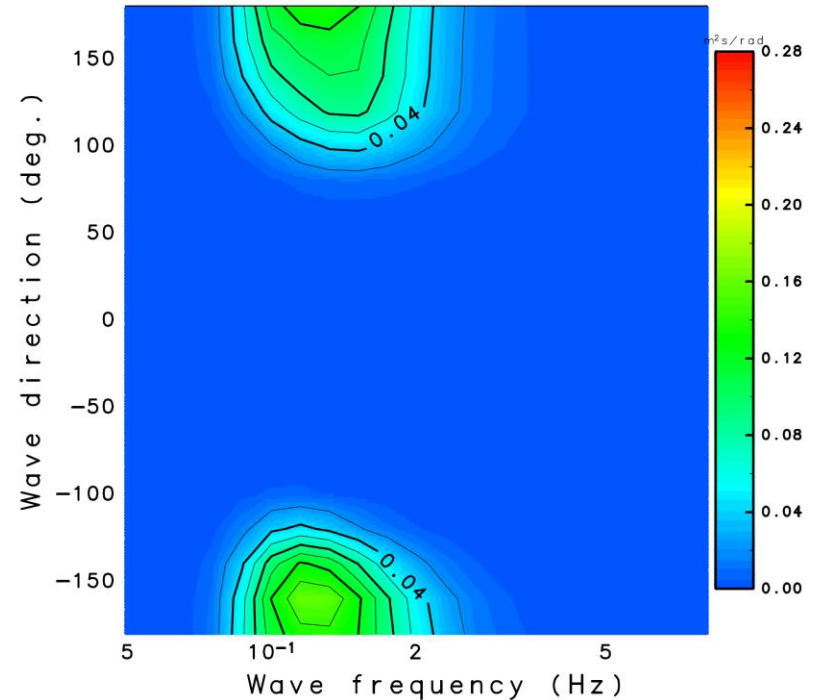
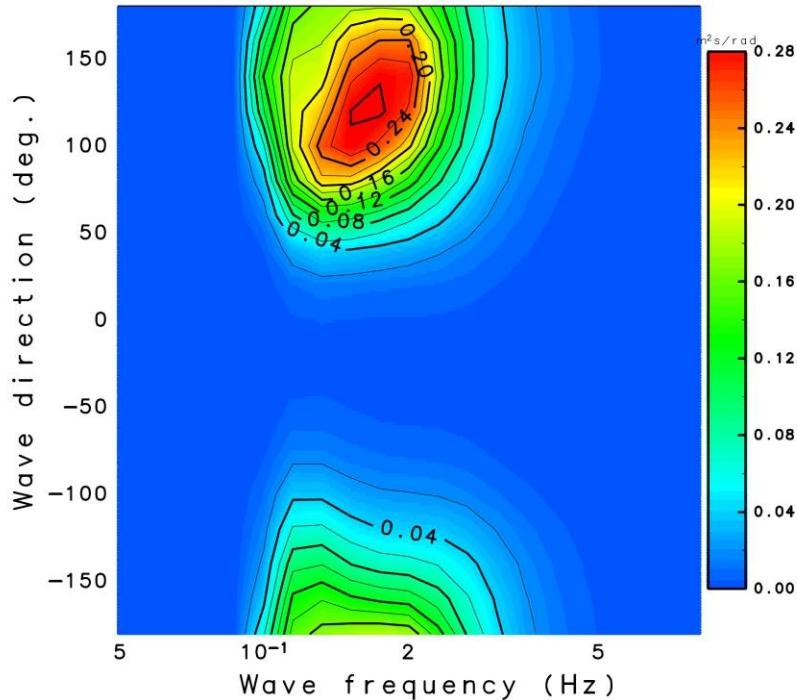
波浪スペクトルの例

北西向き

南西向き

(a) 06 JST 21 04 1998

(b) 22 JST 07 05 1998



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

波高の比較

レーダ

現場観測(N)

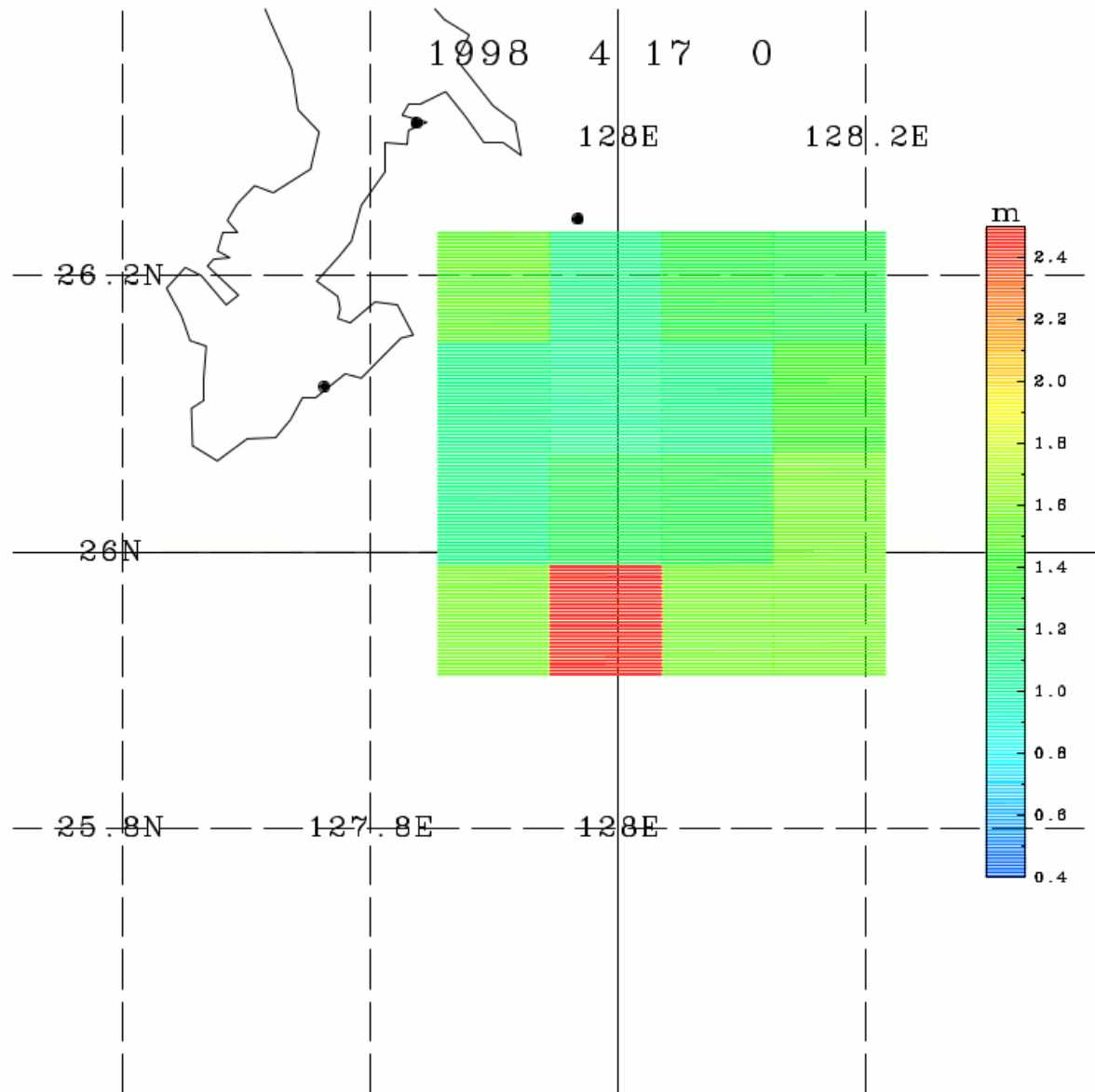
青:現場観測(N),赤:レーダ

相関:0.82, rms差: 0.22m

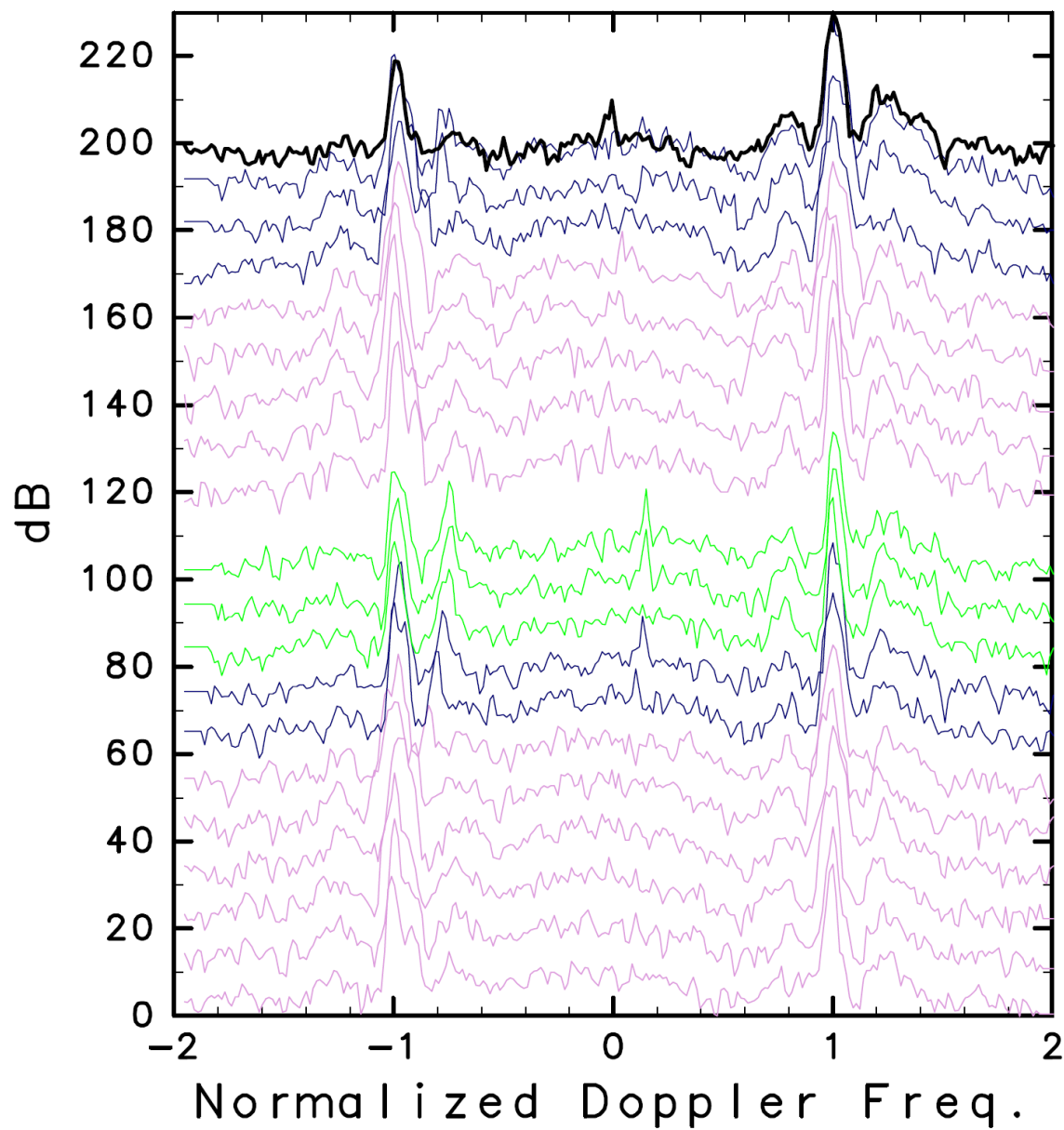
観測期間平均波高



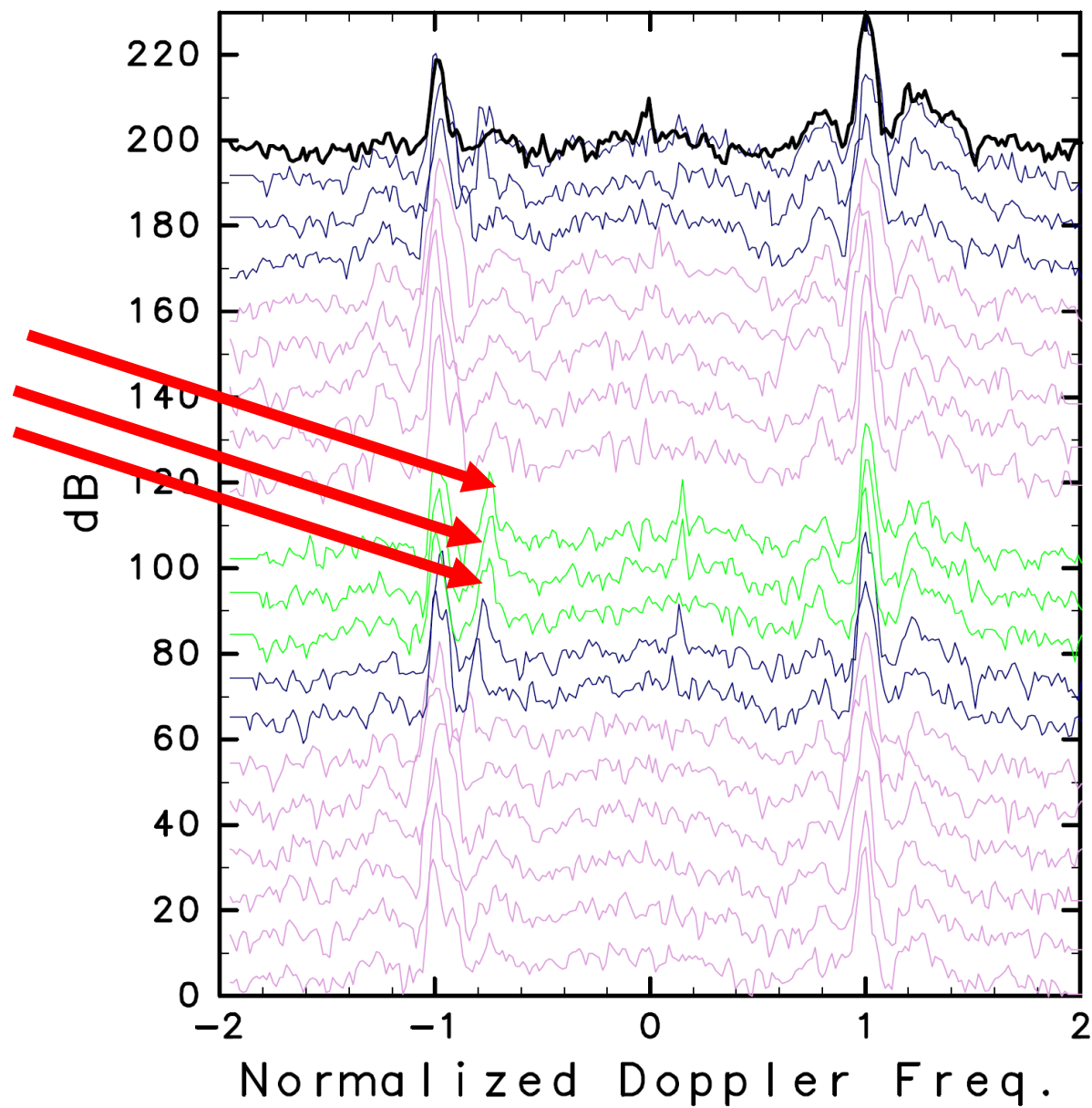
レーダ波高分布



(a) 1998 4 17 0



(a) 1998 4 17 0



波高の比較 (radar A)

レーダ

現場観測(N)

青 : 現場観測(N), 赤 : レーダ

相関: 0.73, rms差: 0.37m

波高の比較 (radar B)

レーダ

現場観測(N)

青 : 現場観測(N), 赤 : レーダ

相関: 0.78, rms差: 0.22m

まとめと今後の課題

- 海洋レーダから波浪スペクトルを推定する手法を開発した。
- 従来の方法に比べて、推定領域、レーダの数などを、自由に設定できる。
- 波高精度について検証した。
- 波浪推定に使うドップラースペクトルの、選択方法については、さらに改善する必要がある。
- 重みを適切に設定する必要がある。

終わり

終わり

終わり

終わり

