

海洋レーダによる
サブメソスケール現象の観測へ向け
て

NICT 灘井章嗣

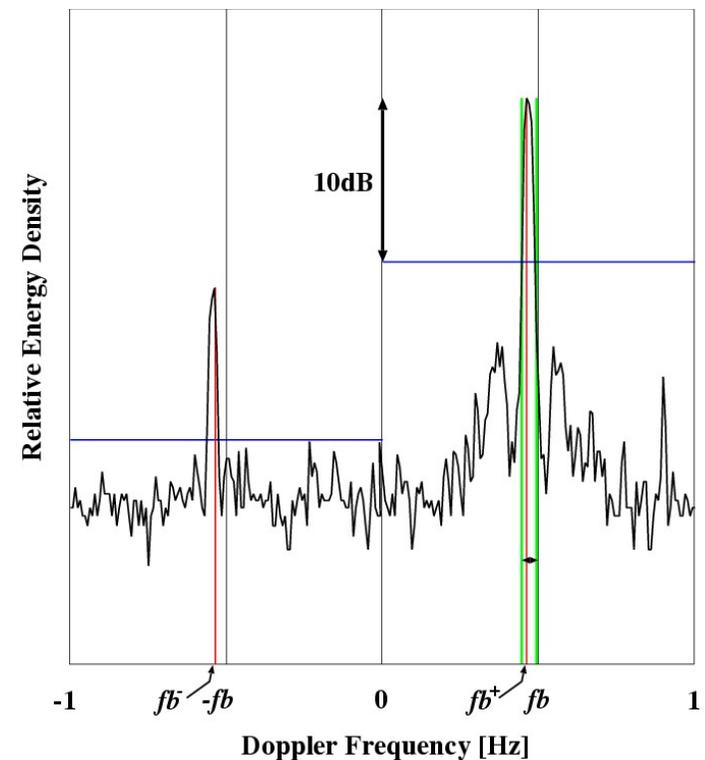
短波海洋レーダによる視線方向流速計測

短波帯電波を送信し、海面からの散乱波を受信

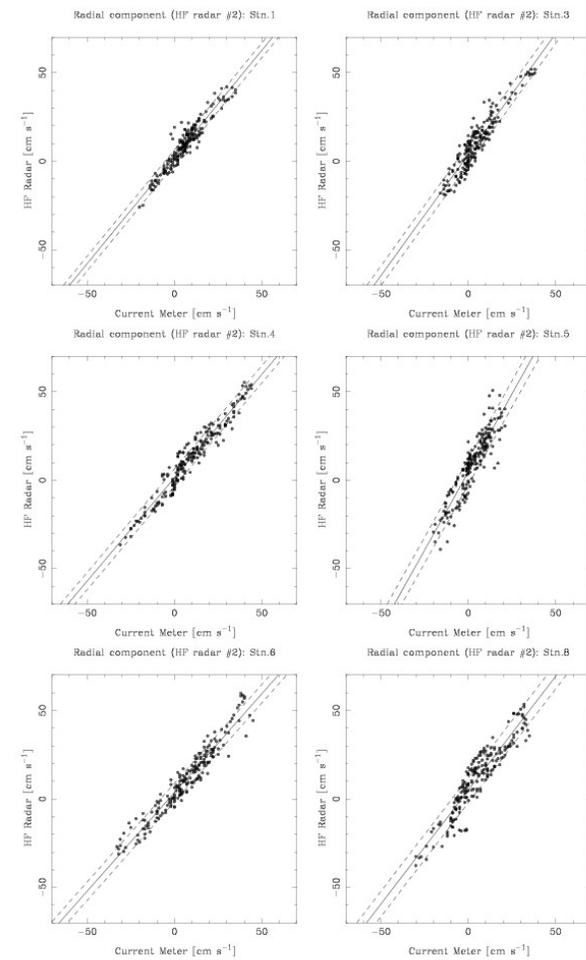
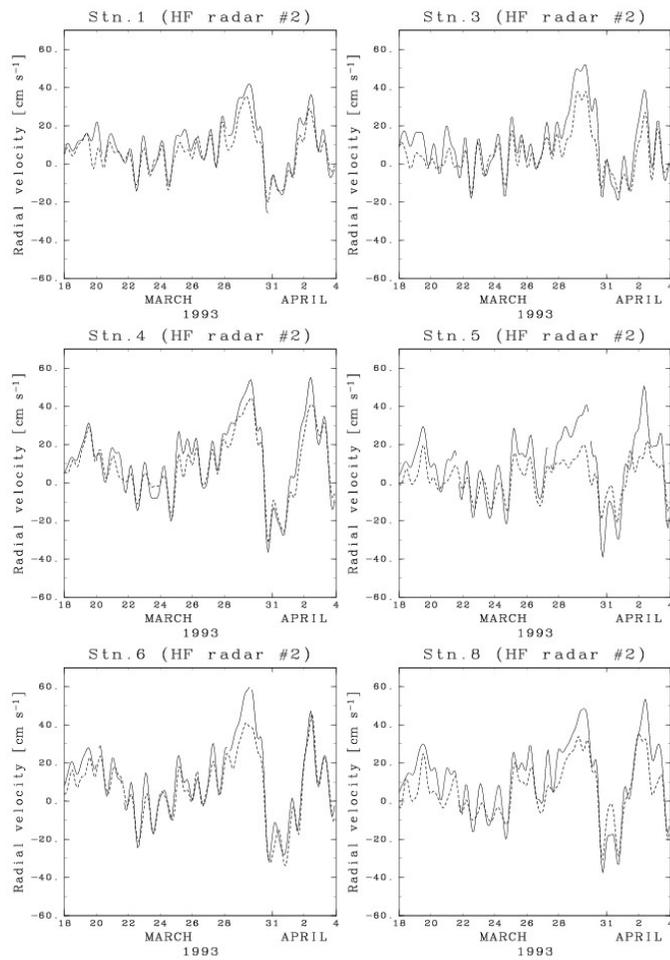
- ・ 位置情報: 距離、方向
- ・ 散乱体の視線方向速度 ← Dopplerスペクトル

海面での後方散乱(送信波 波数ベクトル k_t)

- ・ 一次散乱エコー: (一次元) Bragg共鳴散乱
鋭いピークを持つ2本のエコー
強度比: レーダビームに対する風向と関連
共鳴条件: 波数ベクトル $k_B = \pm 2k_t$
Doppler速度: 位相速度と視線方向流速の和
→ 視線流速成分計測
- ・ 二次散乱エコー: (二次元) Bragg共鳴散乱
緩やかな広がりを持つエコー
多重散乱、高調波成分による散乱
→ 海洋波浪全体の情報



視線方向流速計測精度



比較対象: 流速計 2m深 (短波海洋レーダ 0.5m深の流速を代表)

回帰分析: RMS誤差 4.2~7.3 cm/s 平均 5.7cm/s

短波海洋レーダによる流速ベクトル計測

1台の短波海洋レーダ
→ 流速の視線方向成分

2台以上のレーダを用いて観測
→ 流速ベクトルの合成

clockwise from the north. The radial component v_{ri} of the current vector measured by the $\#i$ radar is described by using the unit vector

$$\mathbf{e}_i = \begin{pmatrix} \sin \theta_i \\ \cos \theta_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

as

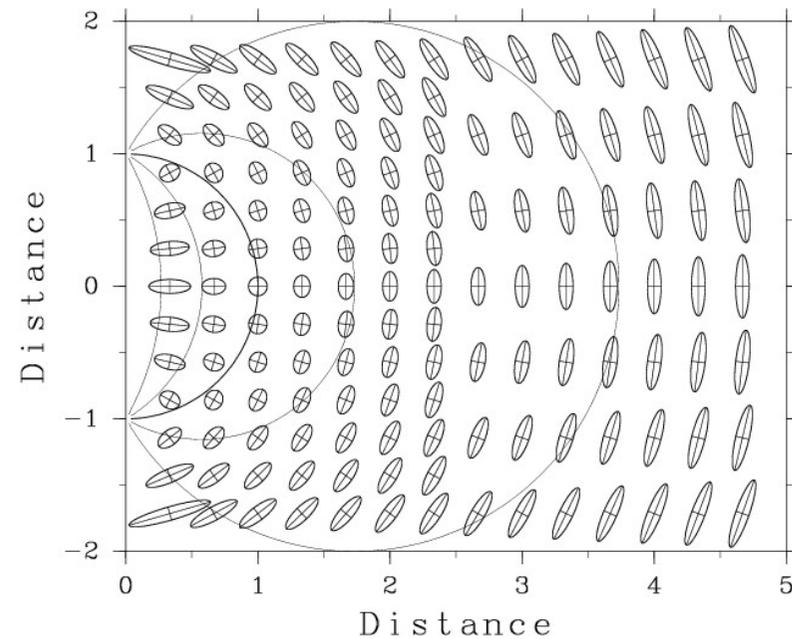
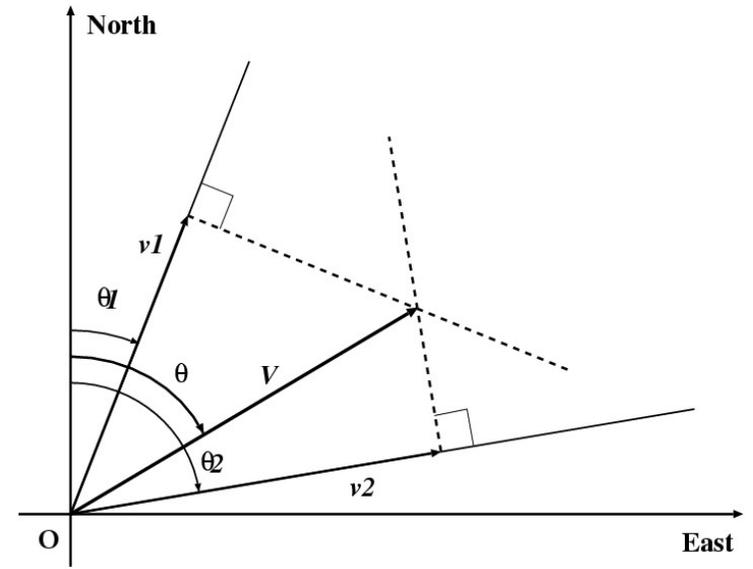
$$v_{ri} = \mathbf{V} \mathbf{e}_i. \quad (2)$$

The vector of the directional current component $\mathbf{V}_r = (v_{r1} \ v_{r2})$ is expressed in terms of the matrix $\mathbf{R} = (\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2)$ as

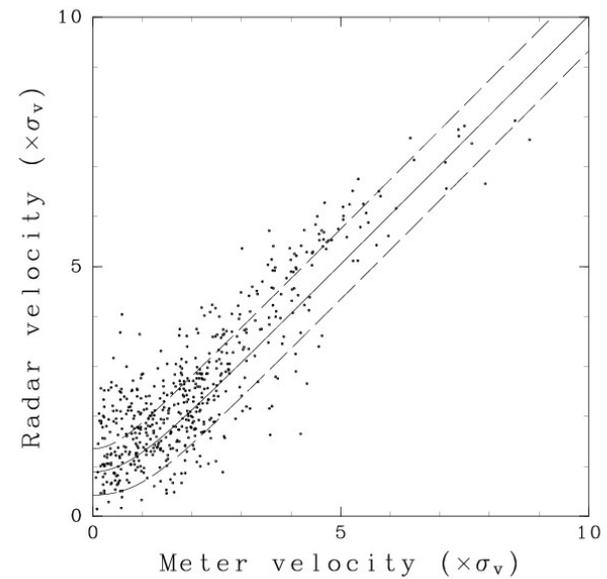
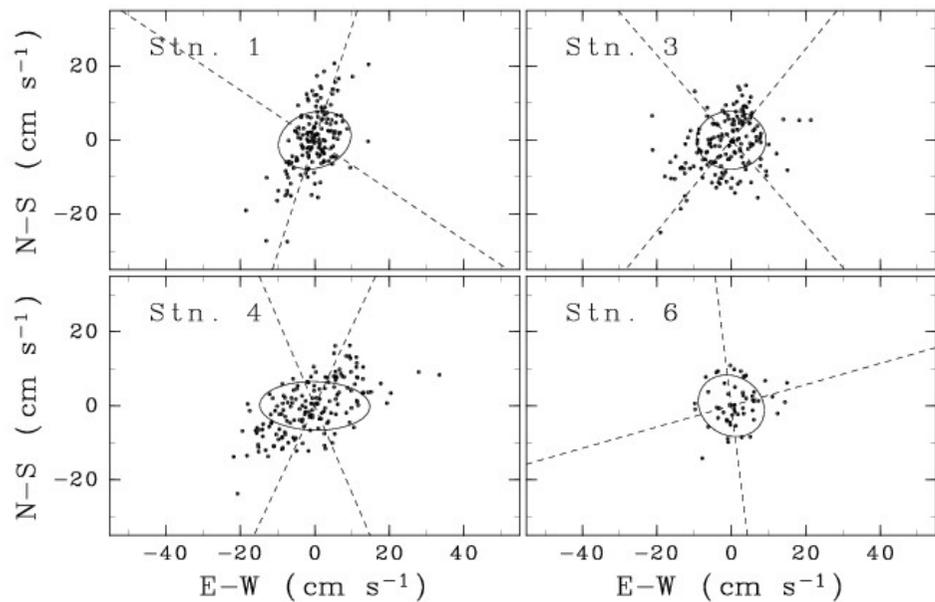
$$\mathbf{V}_r = \mathbf{V} \mathbf{R}. \quad (3)$$

When two radar beams are not parallel, the unit vectors \mathbf{e}_1 and \mathbf{e}_2 are unique and the inverse matrix \mathbf{R}^{-1} can be defined. The current vector is then calculated as:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_r \mathbf{R}^{-1}. \quad (4)$$



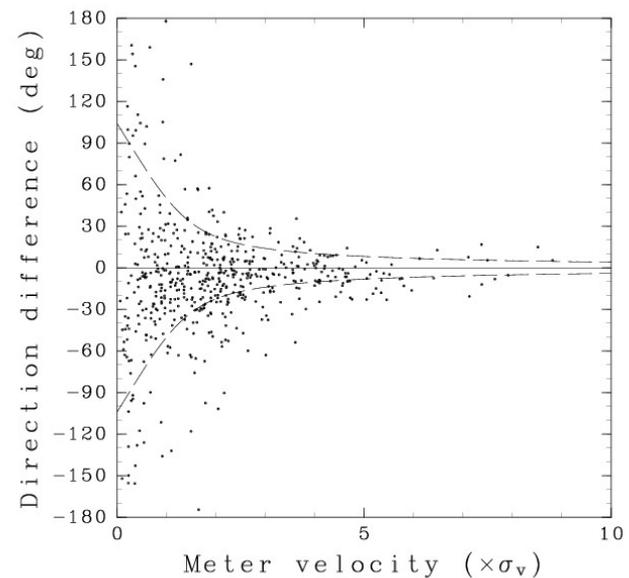
流速ベクトルの計測精度



流速ベクトル計測精度

- ・ ビーム交差角により誤差ベクトルの分布形状が変化
- ・ RMS誤差 10cm/s以下

比較対象: 流速計 2m深



遠距離海洋レーダ（与那国局・石垣局）



2015年度移管

与那国海洋観測施設



2010年9月レーダ設備撤去

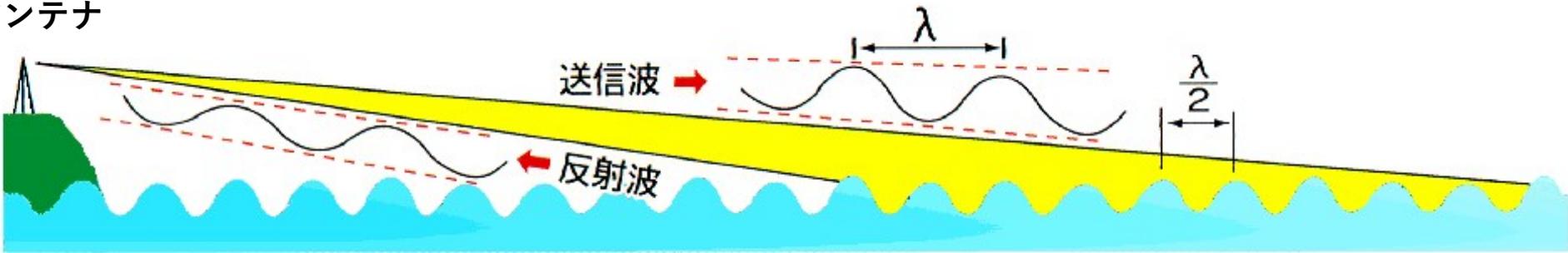
石垣海洋観測施設

海の表層の流れを測る

< 遠距離海洋レーダの主要諸元 >

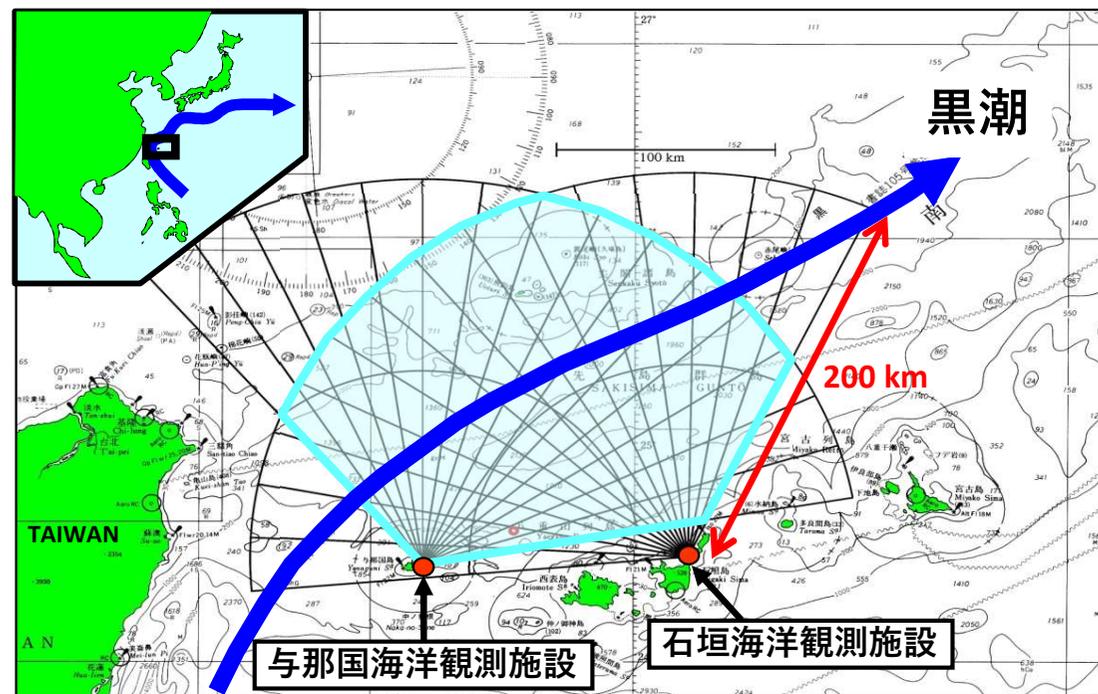
レーダ形式:	FMICW	アンテナ形式:	16素子アレイ
周波数:	9.2MHz (波長約33m)	ビーム幅:	8~10°
掃引帯域幅:	22kHz, 55kHz	観測範囲:	±60°
送信出力:	1kW (Peak)	距離分解能:	7km以下
観測距離:	200km	観測間隔:	30分

アンテナ

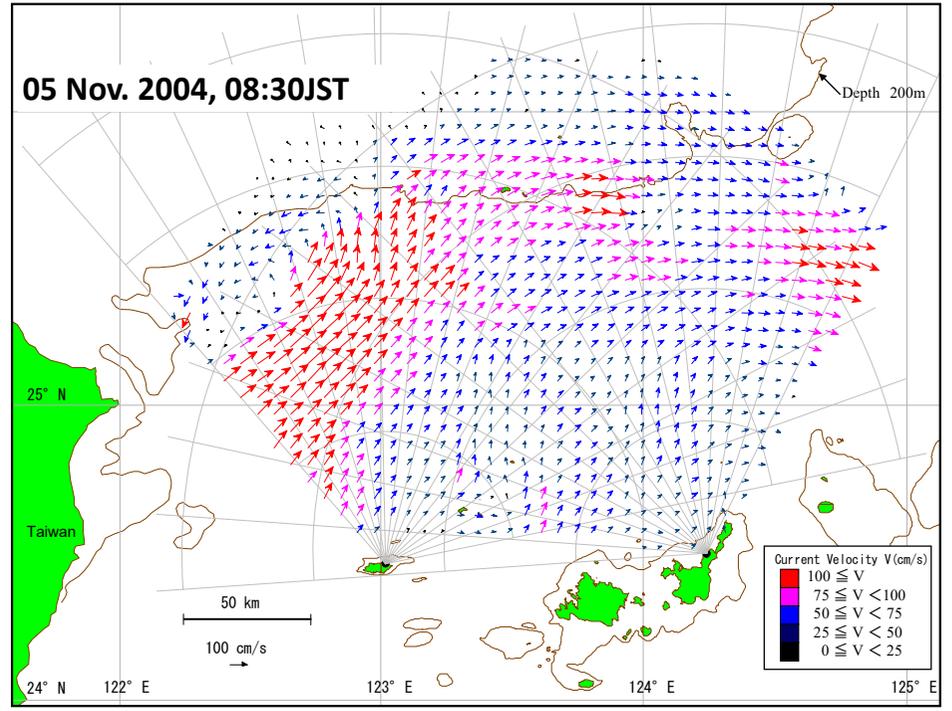
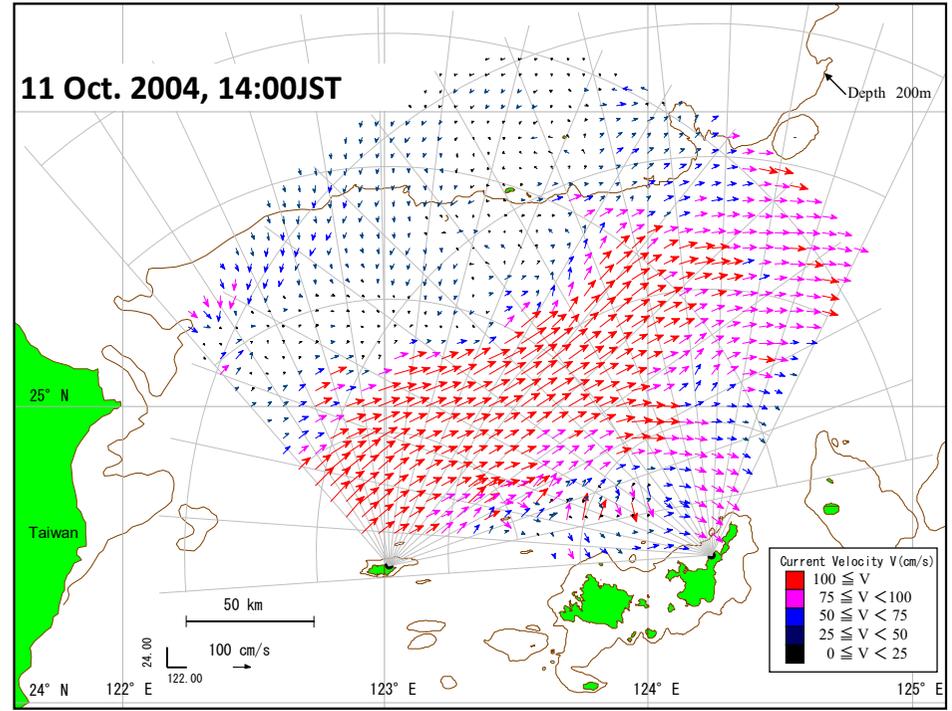


反射波のドップラー速度 ⇒ 波の移動速度（表層の流れ）

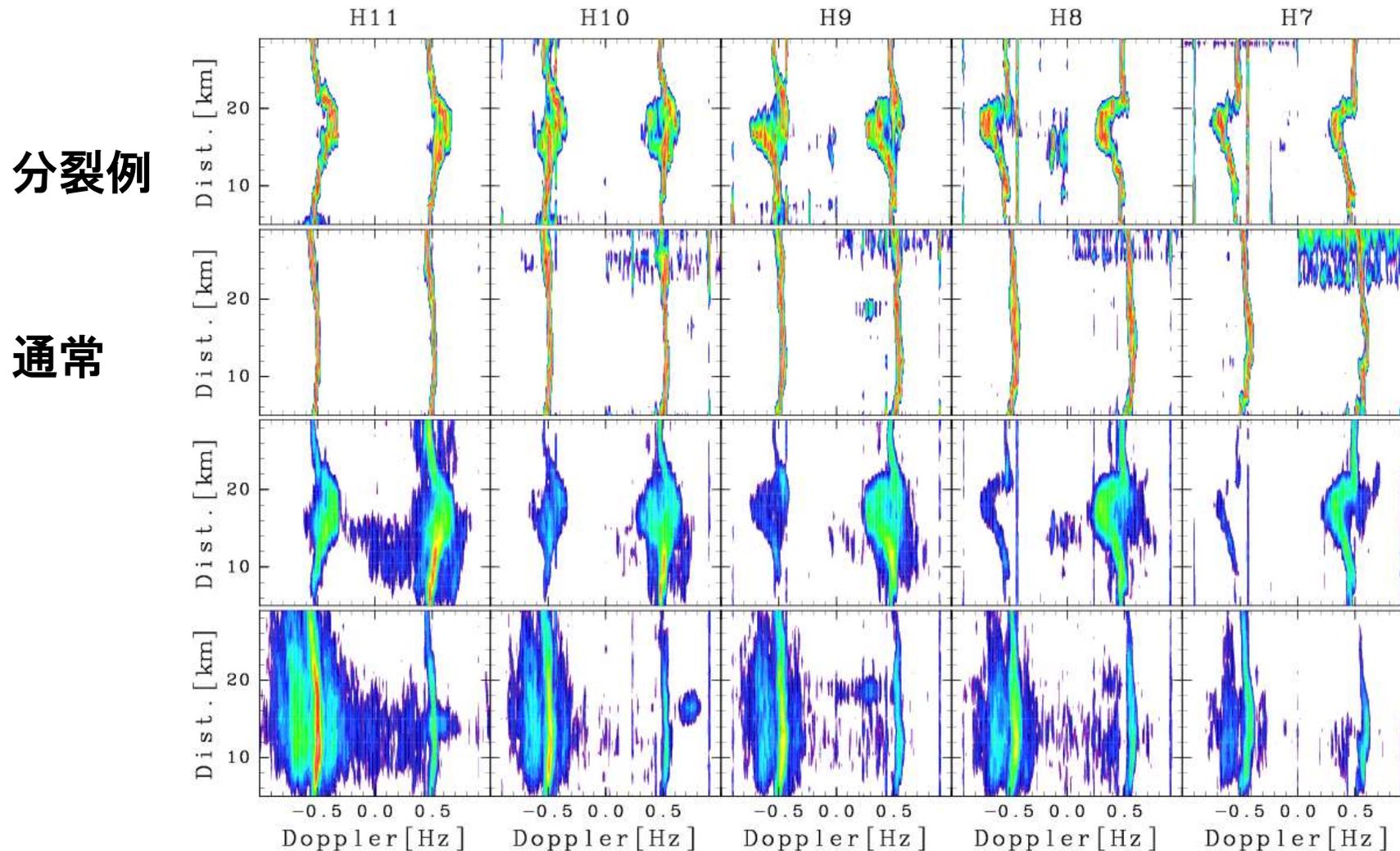
遠距離海洋レーダの観測範囲



黒潮が東シナ海の大陸棚に乗り上げている場合



一次散乱エコーの形状変化

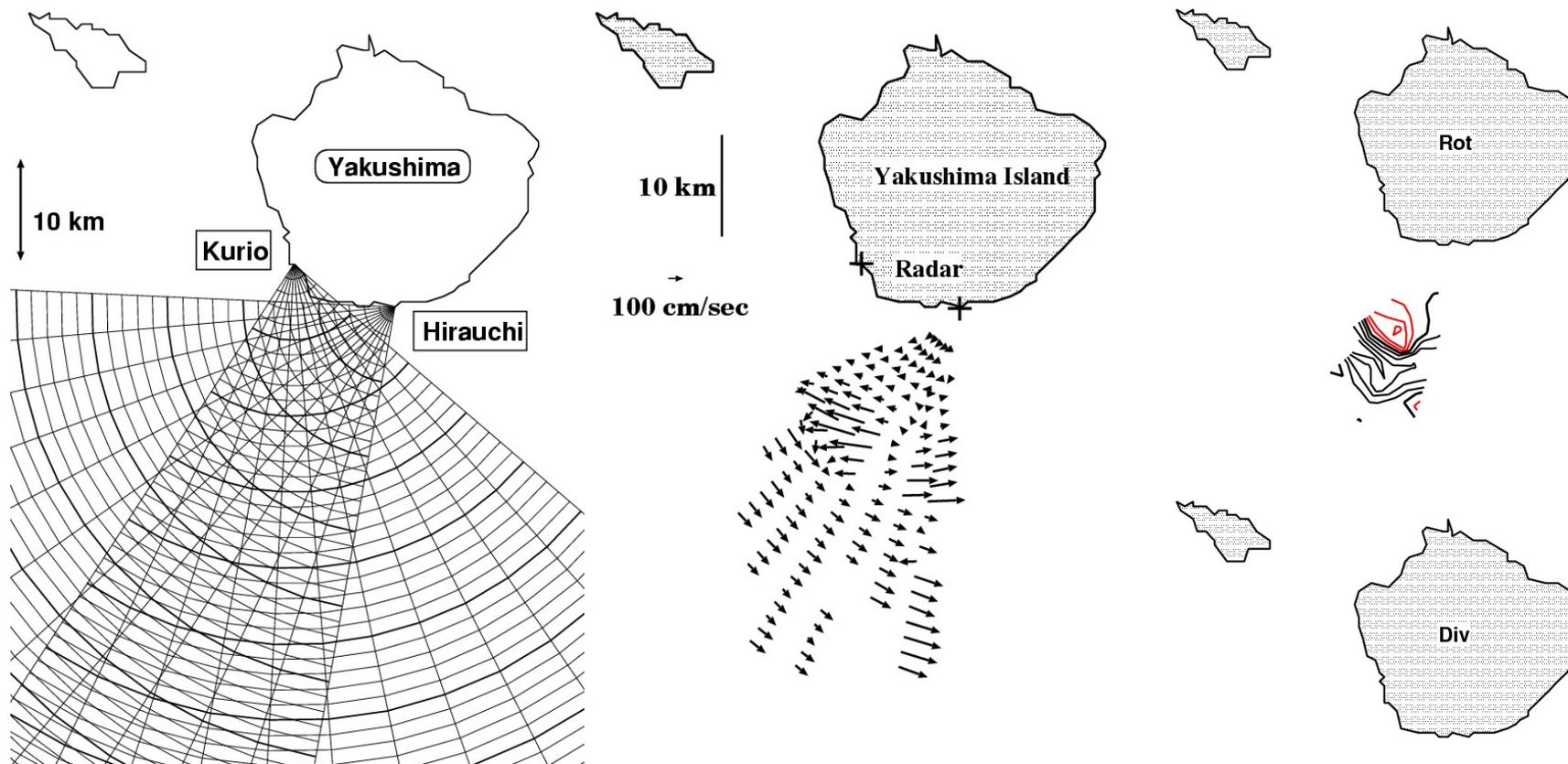


一次散乱エコーの広がり、分裂 → 時空間的に連続した領域で発生

2つのエコー間で形状に差がある

⇒ 成因は？

一次散乱エコー形状と流速場

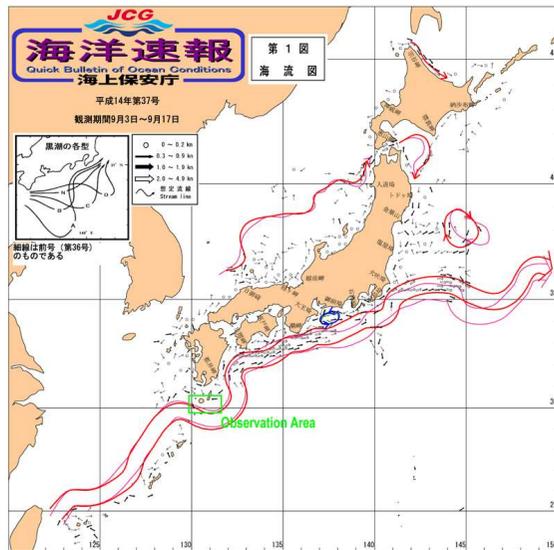
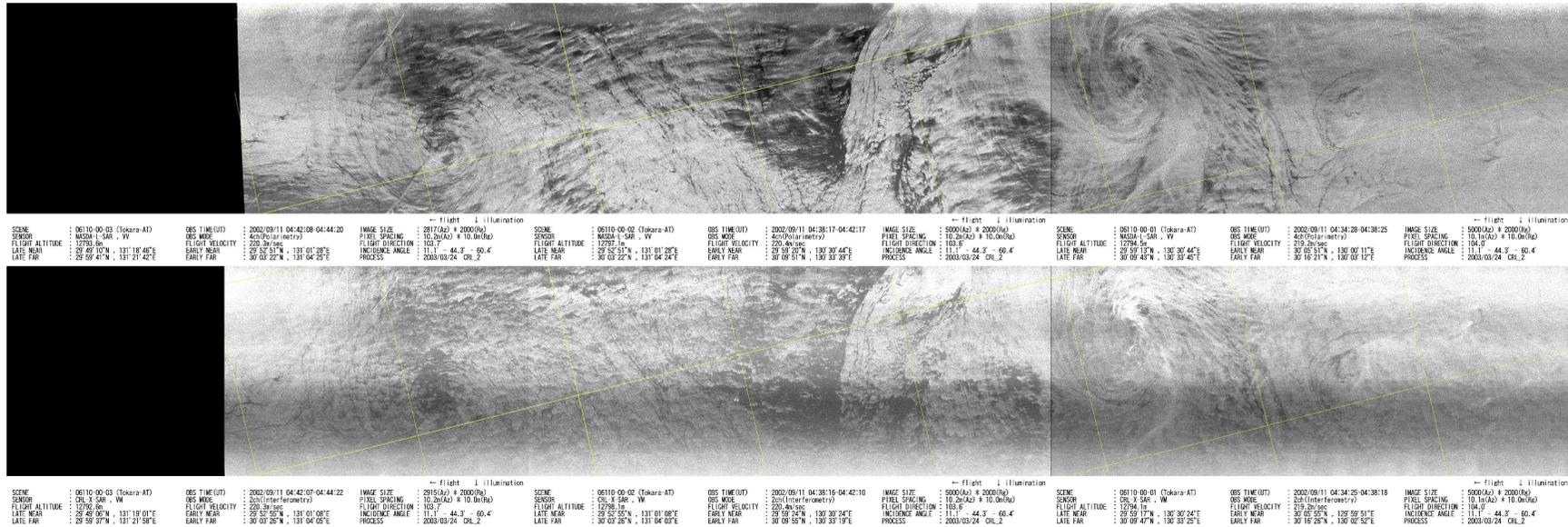


一次散乱エコーの幅が広がる領域と
流速場変化の大きい領域(渦状構造)が一致
→ レーダ感度分布内での流速場変化と関係

渦度場と発散場の分布が一致しない

渦状構造の移流速度 約0.7m/s

航空機搭載合成開口レーダで観測された渦



短波海洋レーダ: 渦と潮汐の関連を示唆

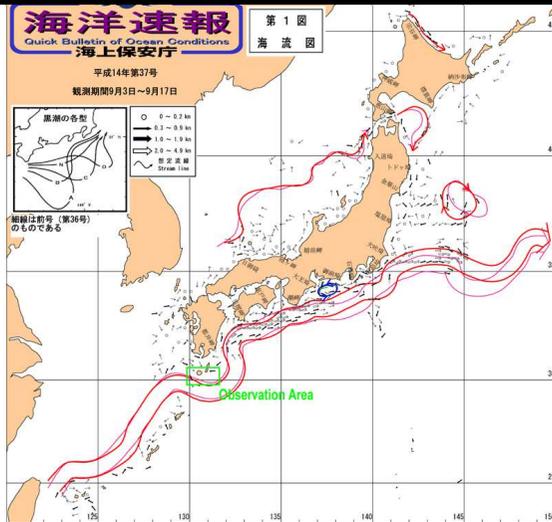
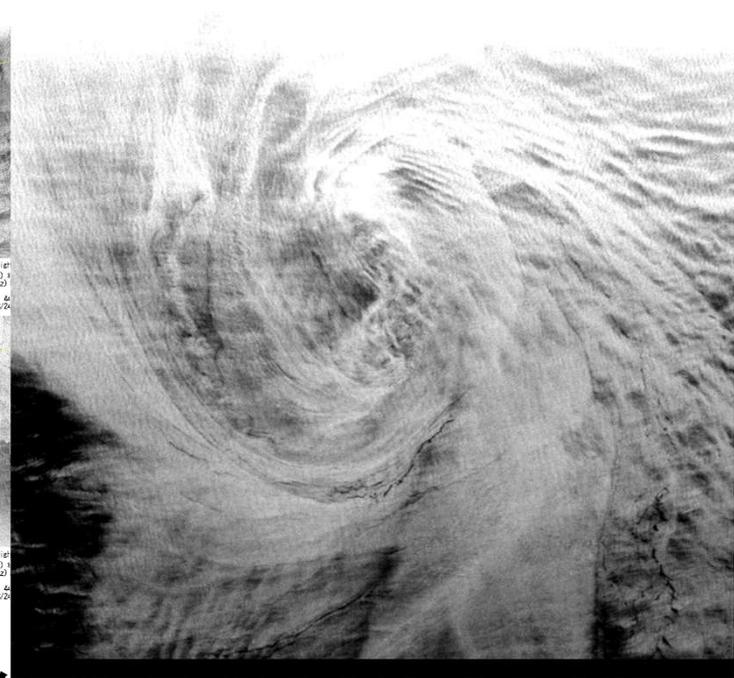
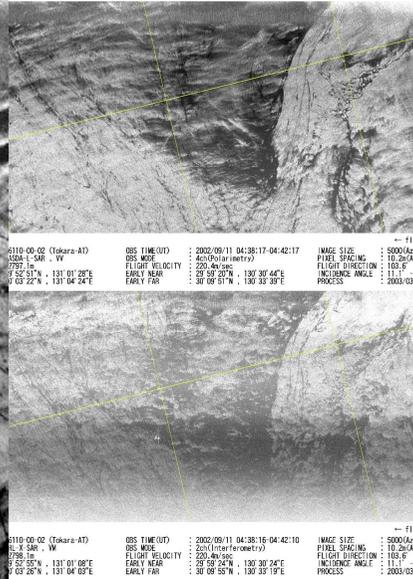
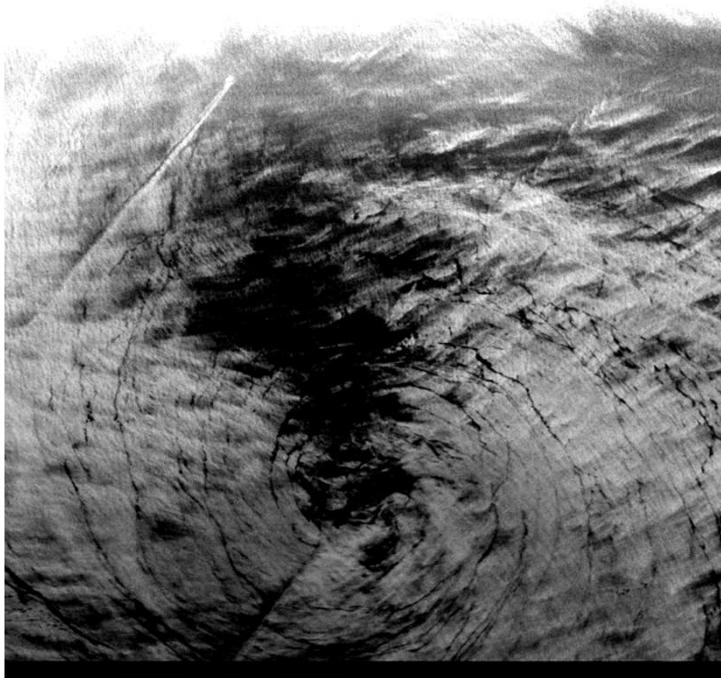
空間スケール 20km程度
 流速 0.8m/s (発生間隔25時間を仮定)

移

→ 短波海洋レーダ観測とほぼ一致

渦パターンから、発散は強くないと予想
 → 短波海洋レーダ観測と一致しない

航空機搭載合成開口レーダで観測された渦



短波海洋レーダ: 渦と潮汐の関連を示唆

空間スケール 20km程度
流速速度 0.8m/s (発生間隔25時間を仮定)

移

→ 短波海洋レーダ観測とほぼ一致

渦パターンから、発散は強くないと予想
→ 短波海洋レーダ観測と一致しない

Observed Wave Parameters

$$\mathbf{r}_B, \mathbf{k}_B, A_B$$

Time Integration

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}}{dt} &= \mathbf{V} + \mathbf{C}_g \\ \frac{d\mathbf{k}}{dt} &= -\mathbf{k} \cdot (\nabla \mathbf{V}) \\ \omega &= n + \mathbf{k} \cdot \mathbf{V} \\ n^2 &= g|\mathbf{k}| \\ \mathbf{C}_g &= dn/dk \\ \frac{dA}{dt} &= (\nabla \cdot \mathbf{V})A \end{aligned}$$

$$\text{Current Model: } \mathbf{V}$$

Initial Wave Parameters

$$\mathbf{r}_I, \mathbf{k}_I, A_I$$

Background Wave Spectra

$$S_B(\mathbf{k}) = S_0 |\mathbf{k}|^{-\frac{7}{2}}$$

Local Wave Spectra

$$S(\mathbf{k}_B, \mathbf{r}) = \frac{A_I}{A_B} \left(\frac{|\mathbf{k}_B|}{|\mathbf{k}_I|} \right)^{\frac{1}{2}} S_B(\mathbf{k}_I)$$

Local Radar Cross Section

$$\sigma^0(v_D, \mathbf{k}_t, \mathbf{r}) \sim S(\mathbf{k}_B, \mathbf{r}) \delta(v_D - v_r(\mathbf{r}))$$

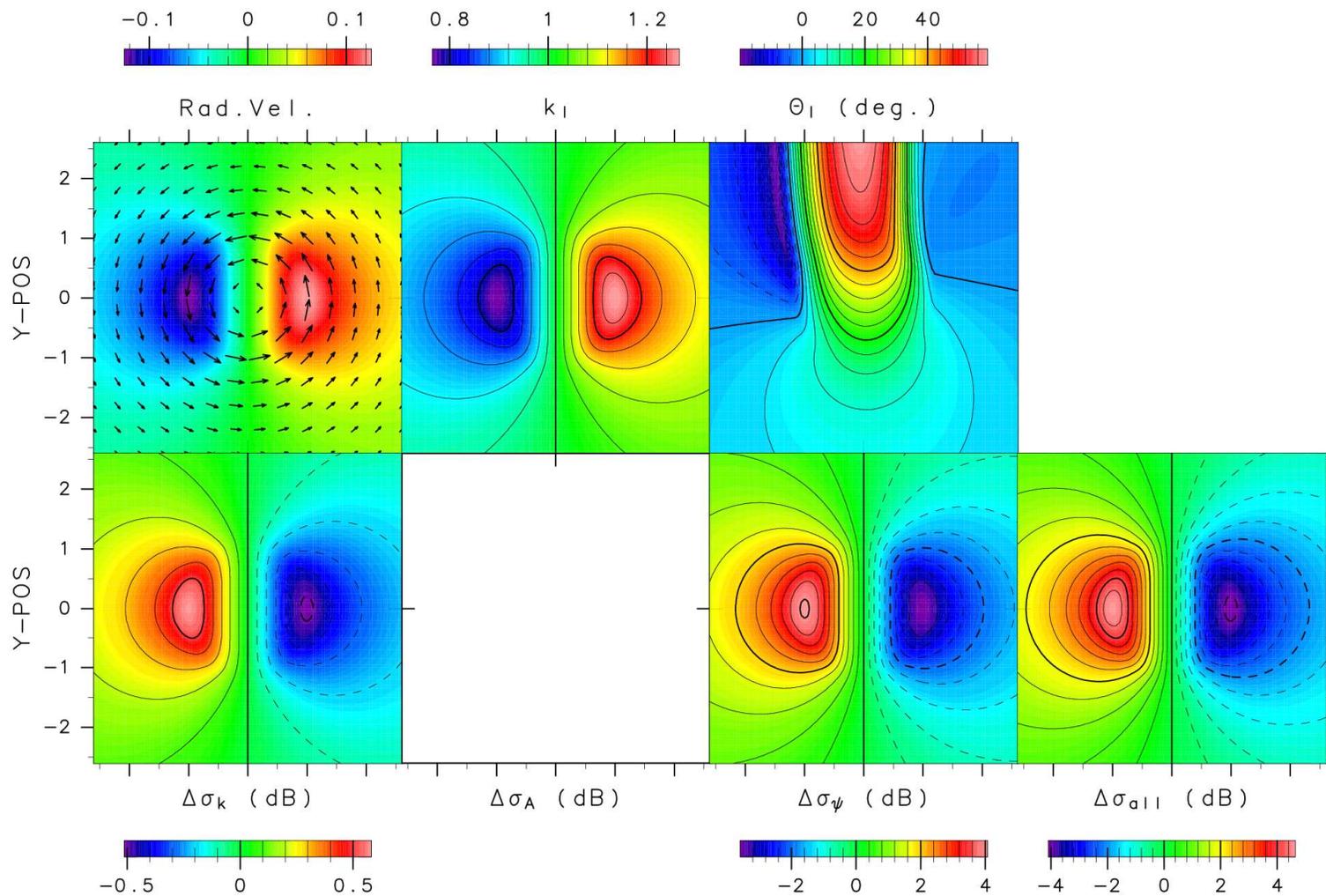
$$\text{Radar Sensitivity Distribution: } G$$

Simulated Doppler Spectra

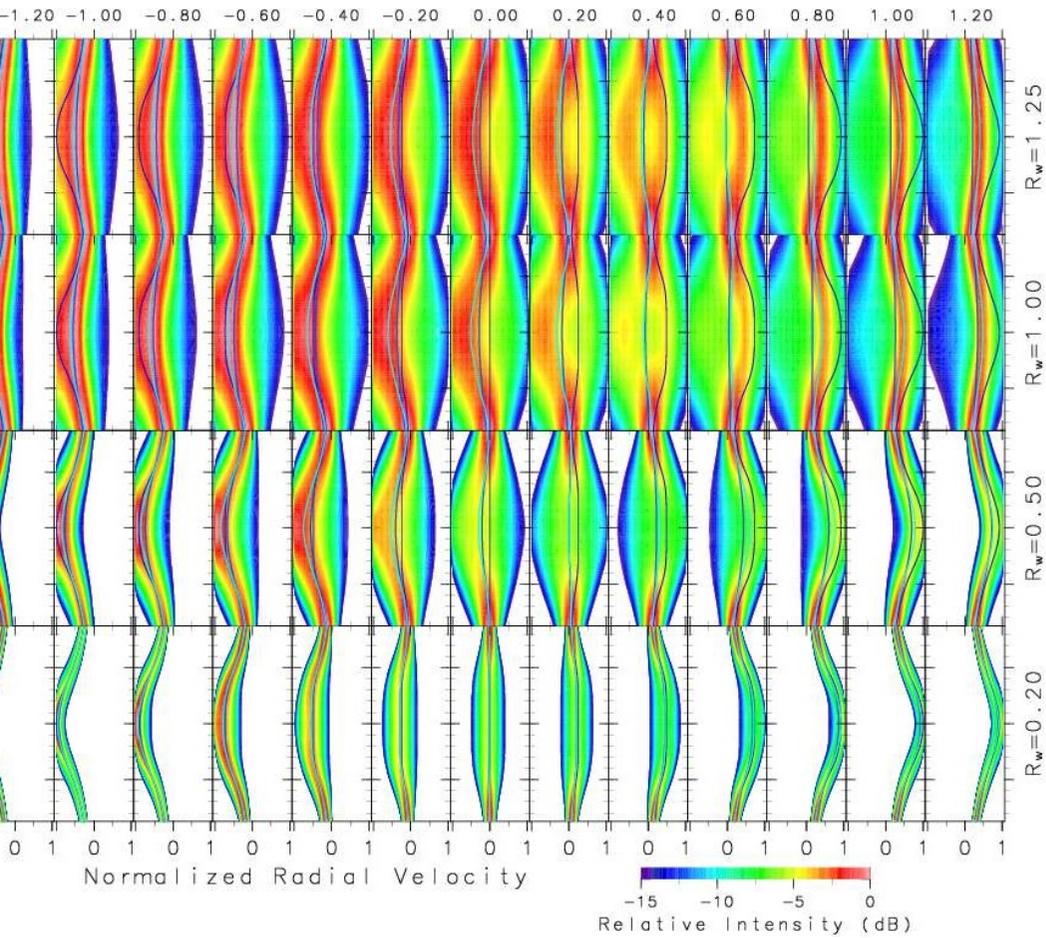
$$P'(v_D, \mathbf{k}_t, \mathbf{r}) \sim \int_{S'} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_c) \sigma^0(v_D, \mathbf{k}_t, \mathbf{r}) d\mathbf{r}'$$

Eddy ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

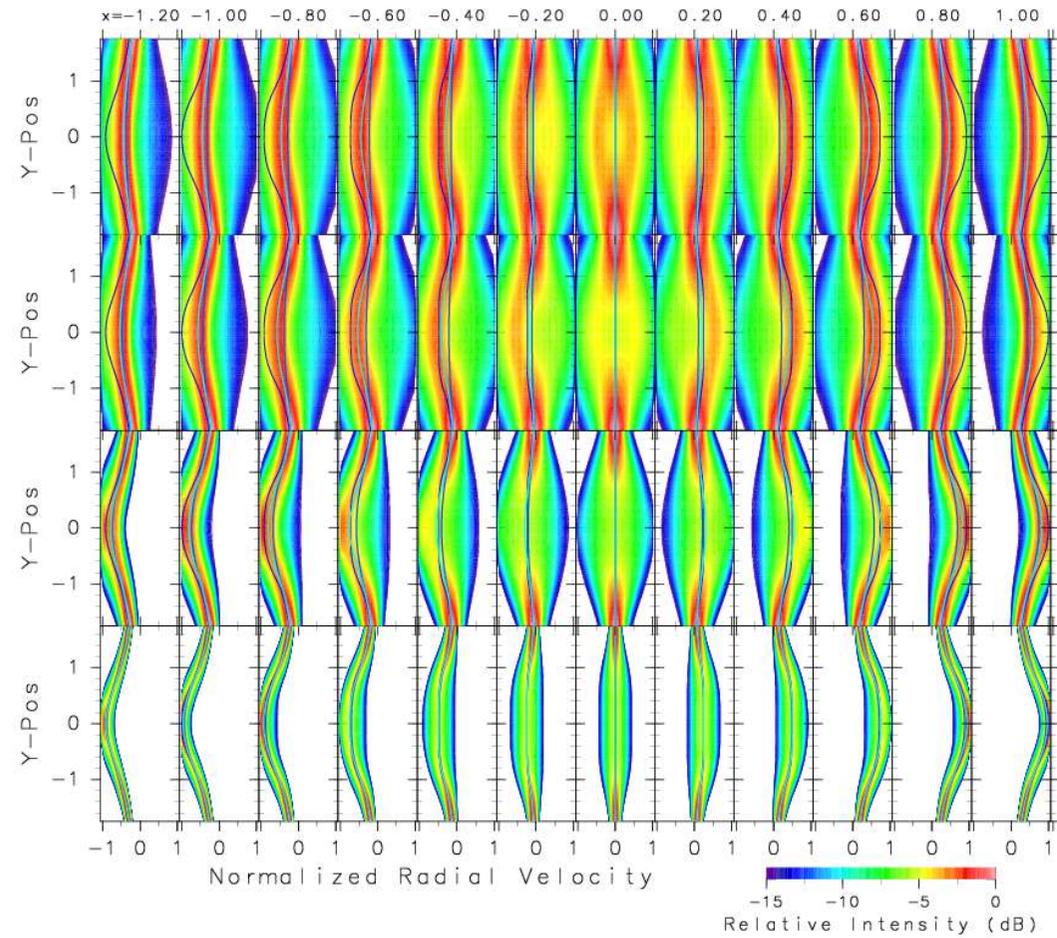
NRCS



Eddy ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)



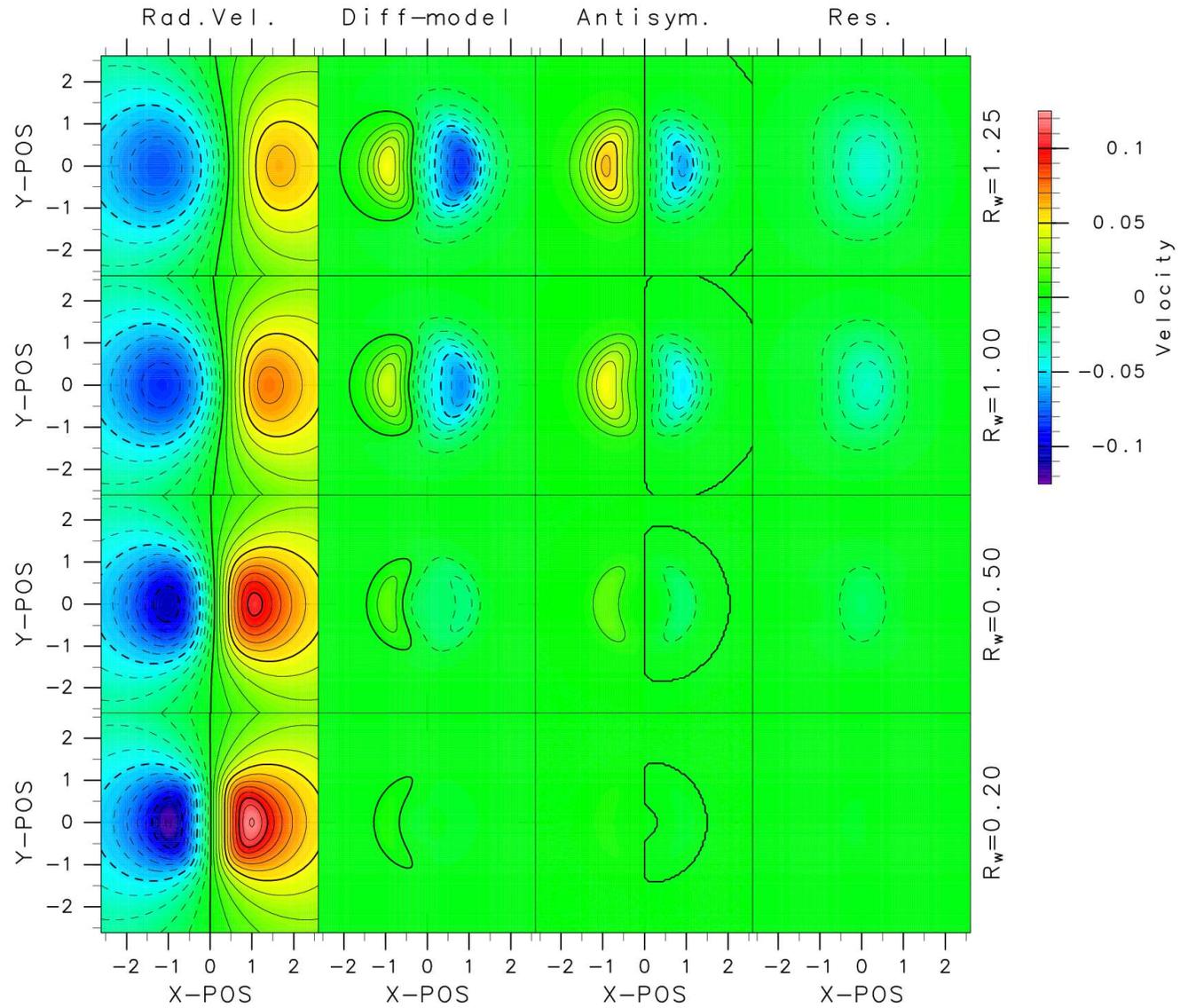
Doppler spectra with NRCS



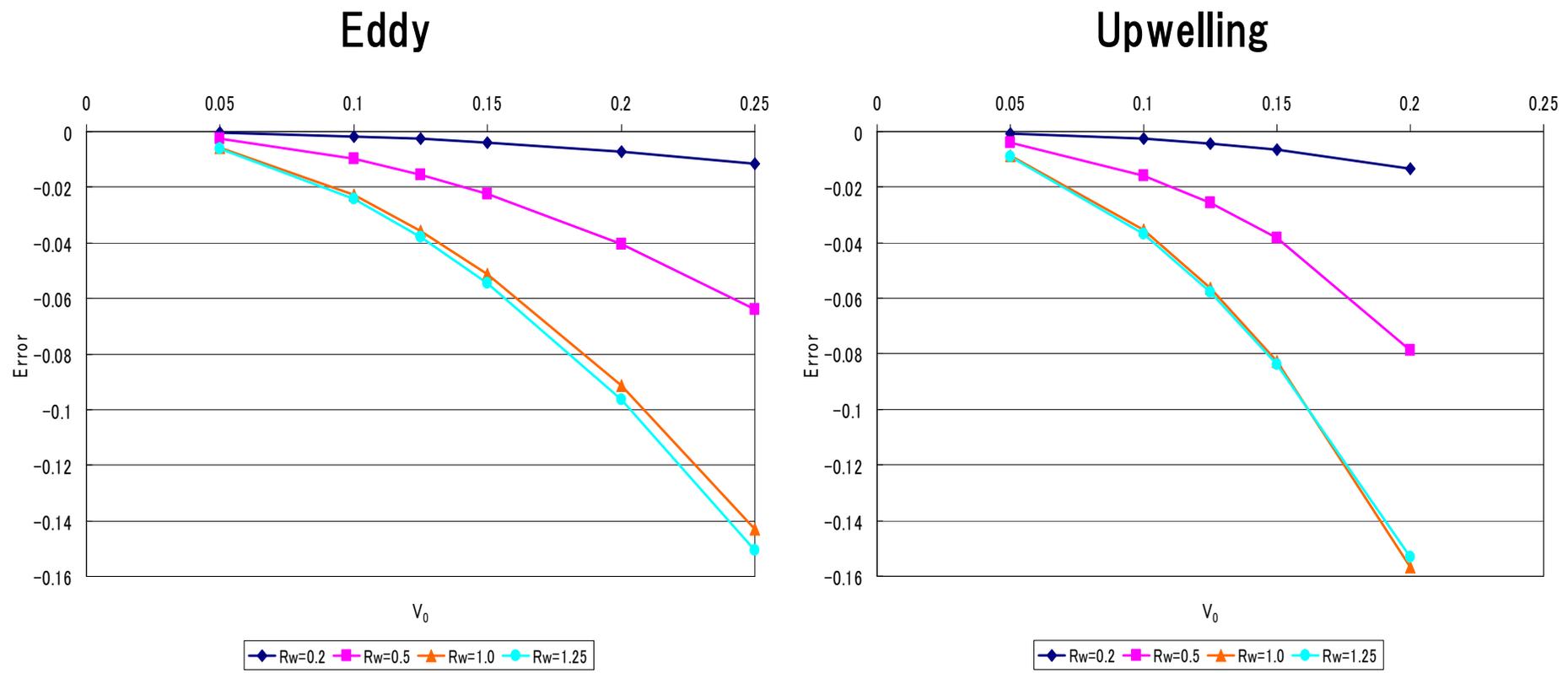
Doppler spectra without NRCS

Eddy ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

Radial velocity



Measurement error vs. Strength of current phenomena



Measurement error of radial velocity by HFOSR increases with the intensity of current phenomena.

Comparison with the dimensional velocity

In simulation model,

the current velocity is normalized by the phase velocity of ocean waves causing the first-order echo.

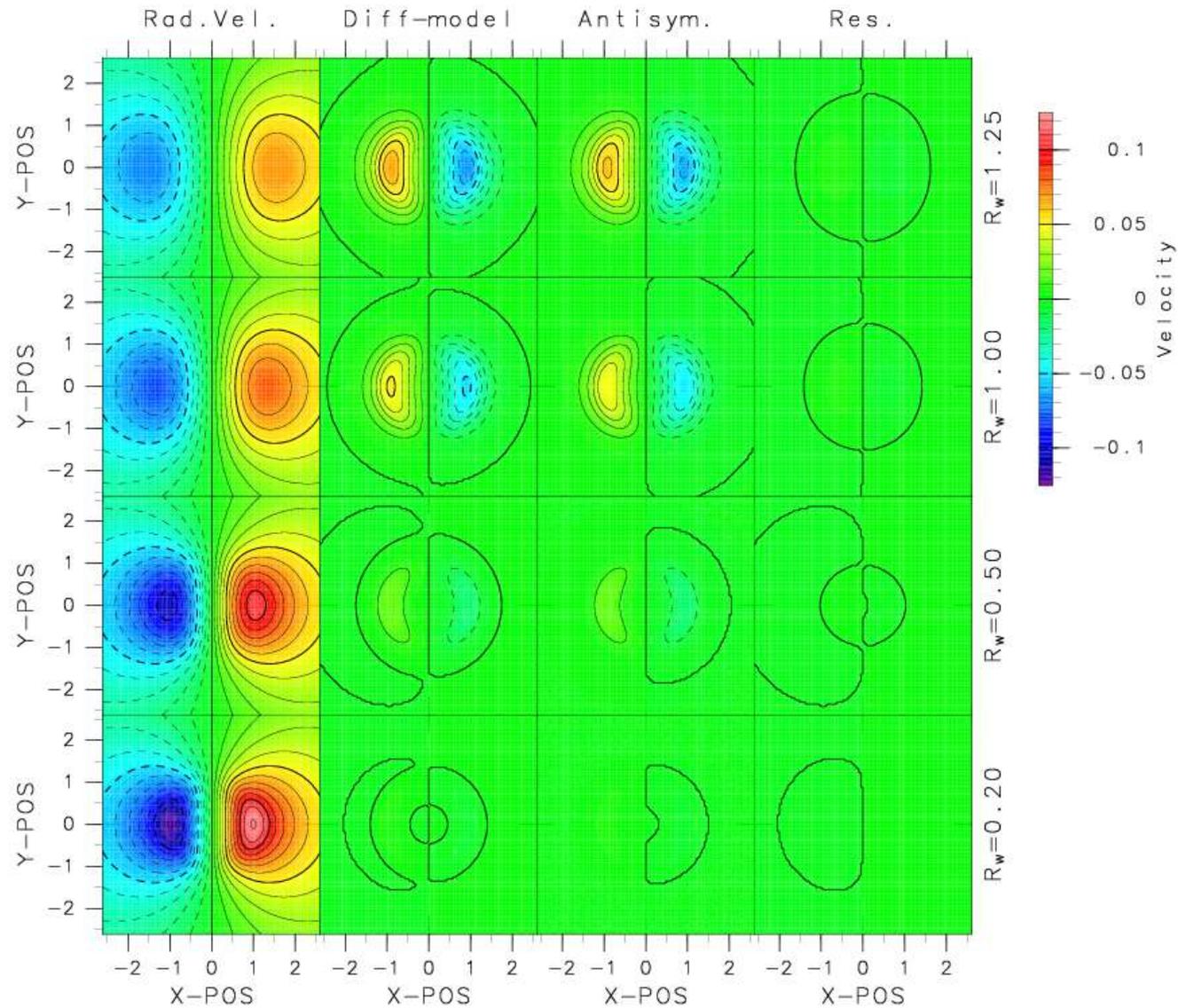
Radar frequency [MHz]		5.00	9.00	13.00	25.00	42.00
Phase velocity of causal ocean waves [m/s]		6.84	5.10	4.24	3.06	2.36
Normalized velocity	0.05	0.34	0.25	0.21	0.15	0.12
	0.10	0.68	0.51	0.42	0.31	0.24
	0.13	0.86	0.64	0.53	0.38	0.30
	0.15	1.03	0.76	0.64	0.46	0.35
	0.20	1.37	1.02	0.85	0.61	0.47

Distance is normalized by the spatial scale of targeting ocean phenomena.

Radar sensitivity distribution is defined as Gaussian.

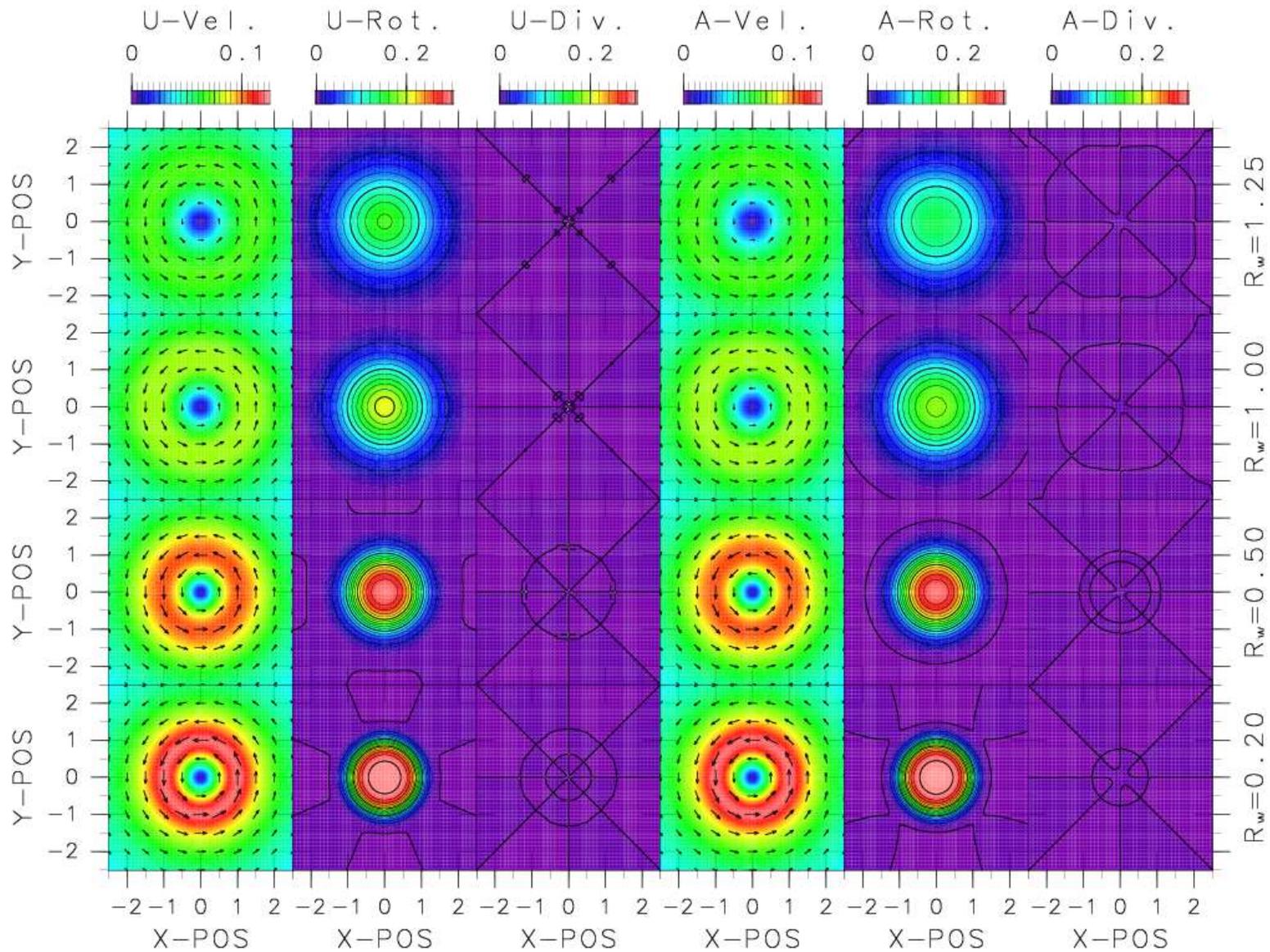
Eddy ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg}$. $K_B=(0, \pm 1)$)

Averaged radial velocity with two first-order echoes

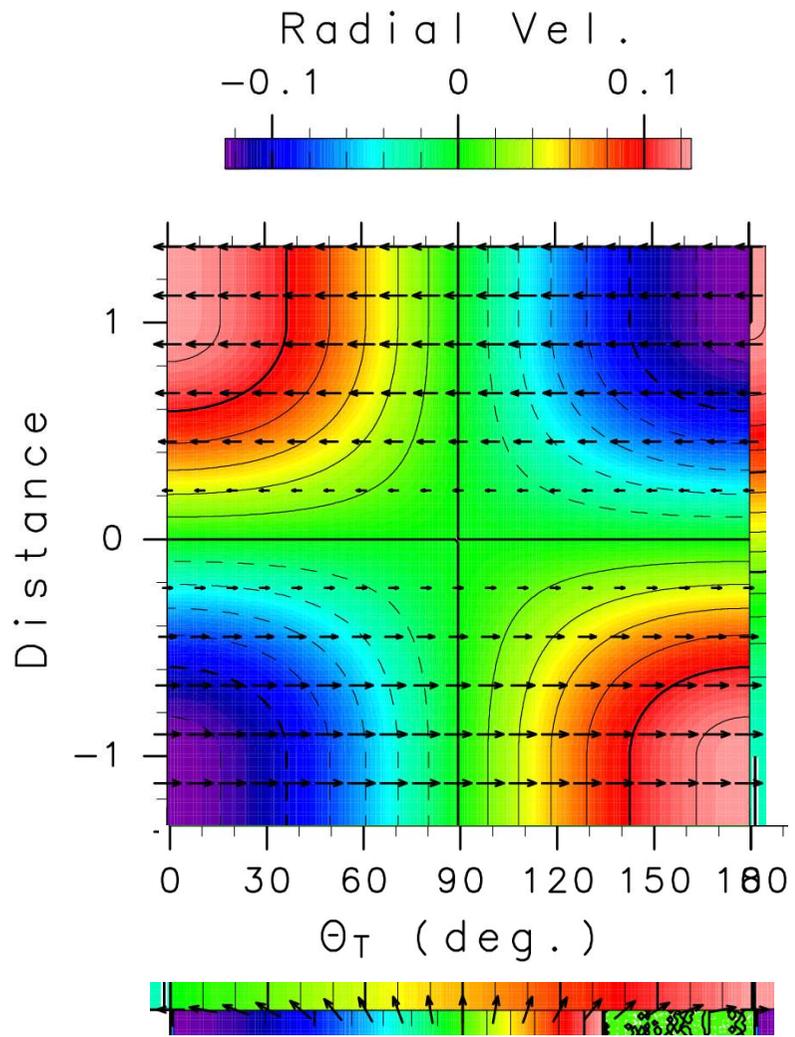


Eddy ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg}$. $K_B=(0, \pm 1)$)

Current field (crossing angle: 90 deg)with averaged radial velocity



Velocity Front Model



$U_0/C_p=0.125, \varphi=0^\circ$

1D Velocity Front

$$\begin{aligned}
 U(y) &= -U_0 \cos(\varphi) & (y > 1) \\
 &= -U_0 \cos(\varphi) \sin(\pi y/2) & (-1 \leq y \leq 1) \\
 &= U_0 \cos(\varphi) & (y < -1) \\
 V(y) &= -U_0 \sin(\varphi) & (y > 1) \\
 &= -U_0 \sin(\varphi) \sin(\pi y/2) & (-1 \leq y \leq 1) \\
 &= U_0 \sin(\varphi) & (y < -1)
 \end{aligned}$$

U_0 : Maximum velocity

φ : Divergence/Shear parameter

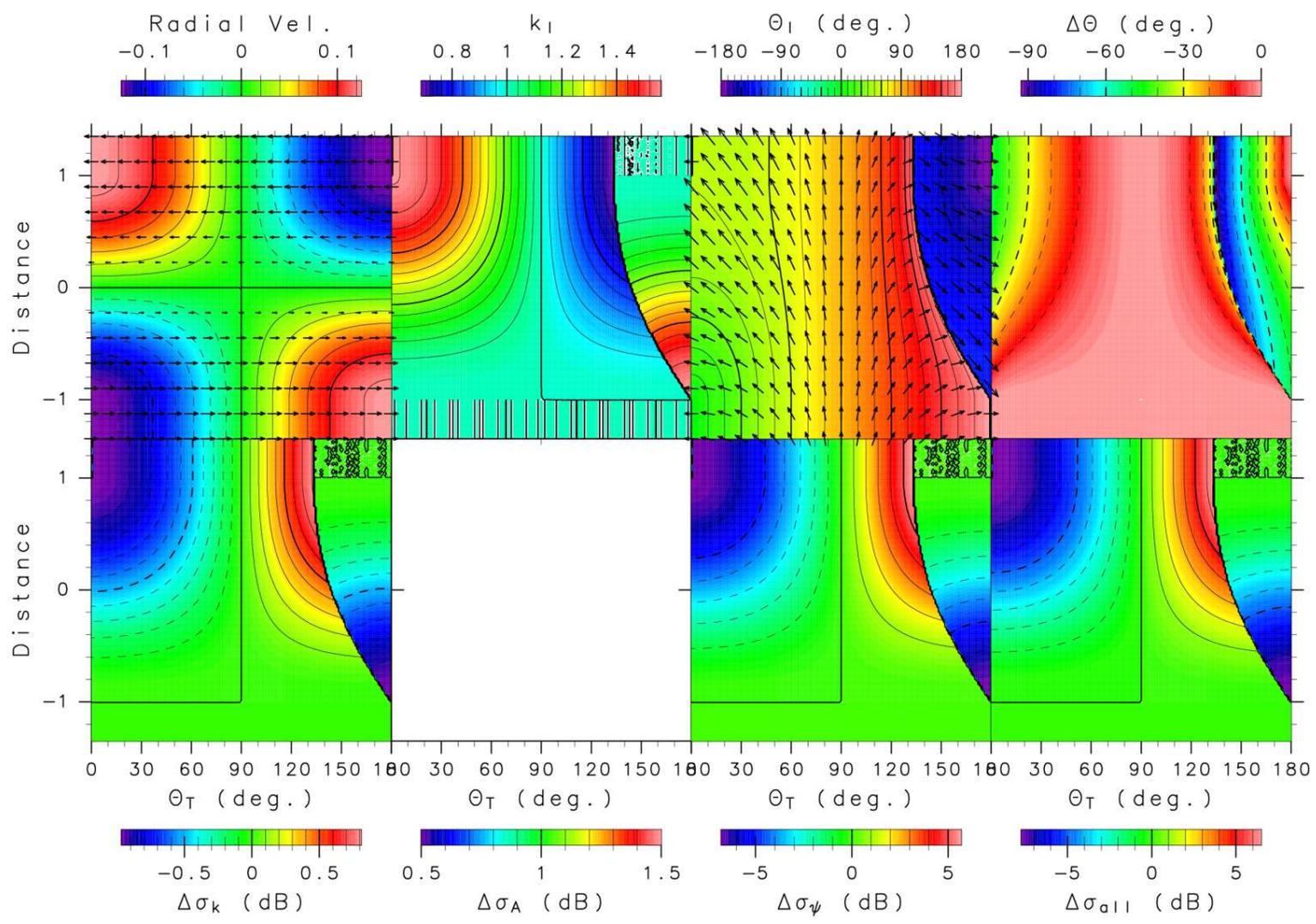
$\varphi = 0^\circ$: Pure shear

$\varphi = 90^\circ$: Divergence

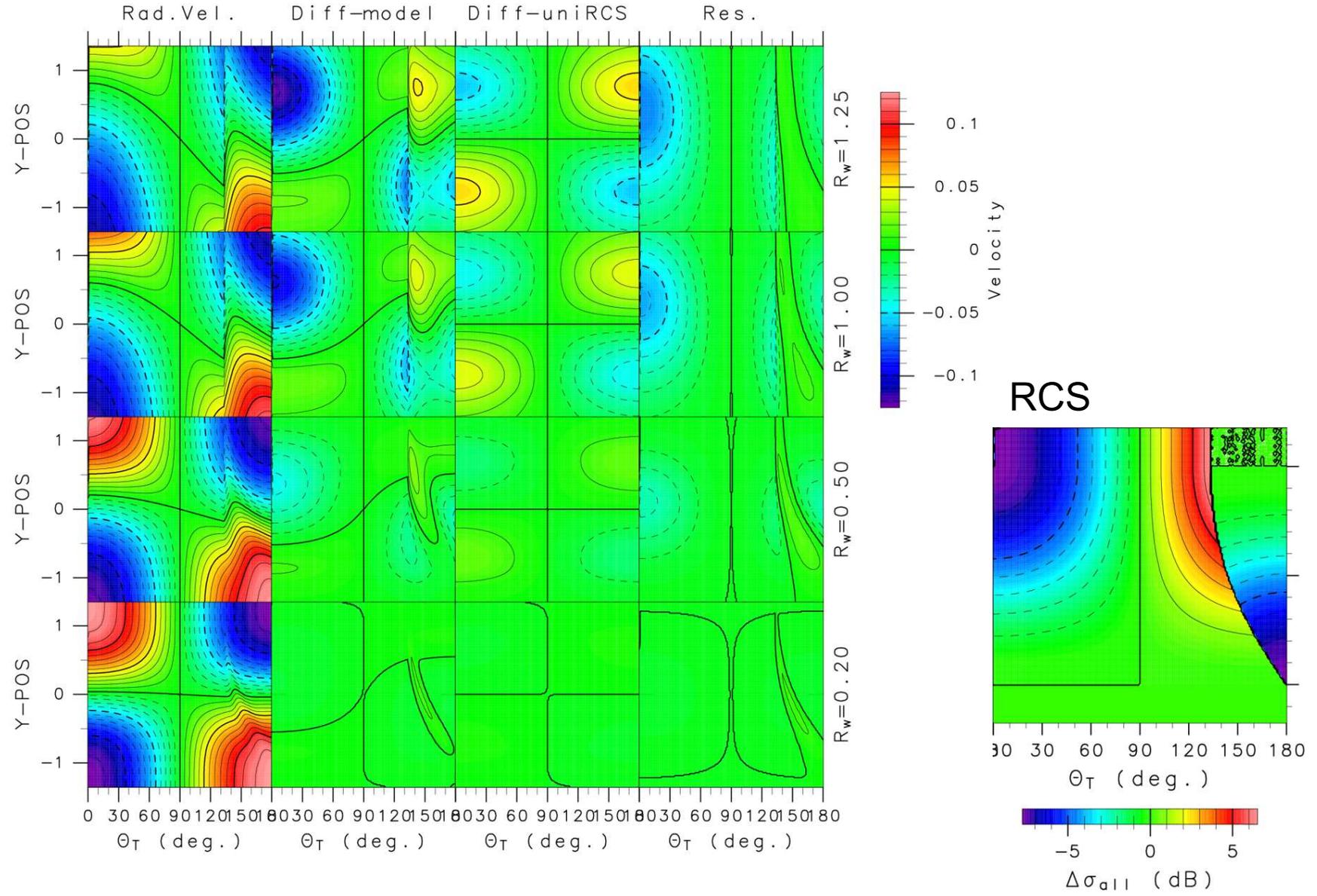
$\varphi = -90^\circ$: Convergence

ϑ_T : Angle between the velocity axis and the propagation direction of the causal ocean waves of the first-order echoes

Radar Cross Section ($U_\theta/Cp = 0.125, \varphi = 0^\circ$)

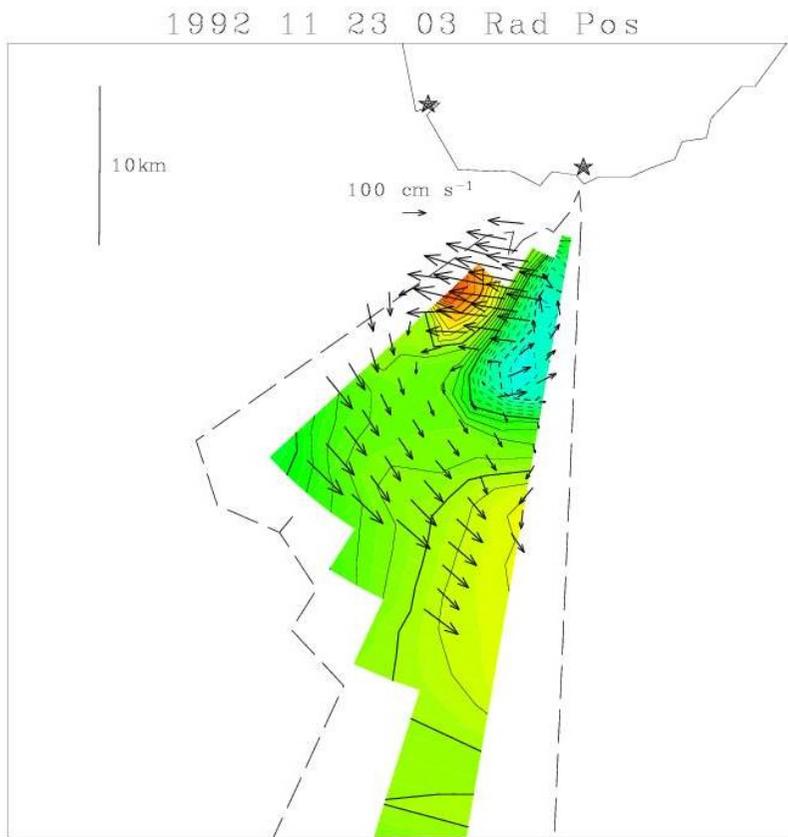


Radial Current ($U_\theta/C_p = 0.125, \varphi = 0^\circ$)

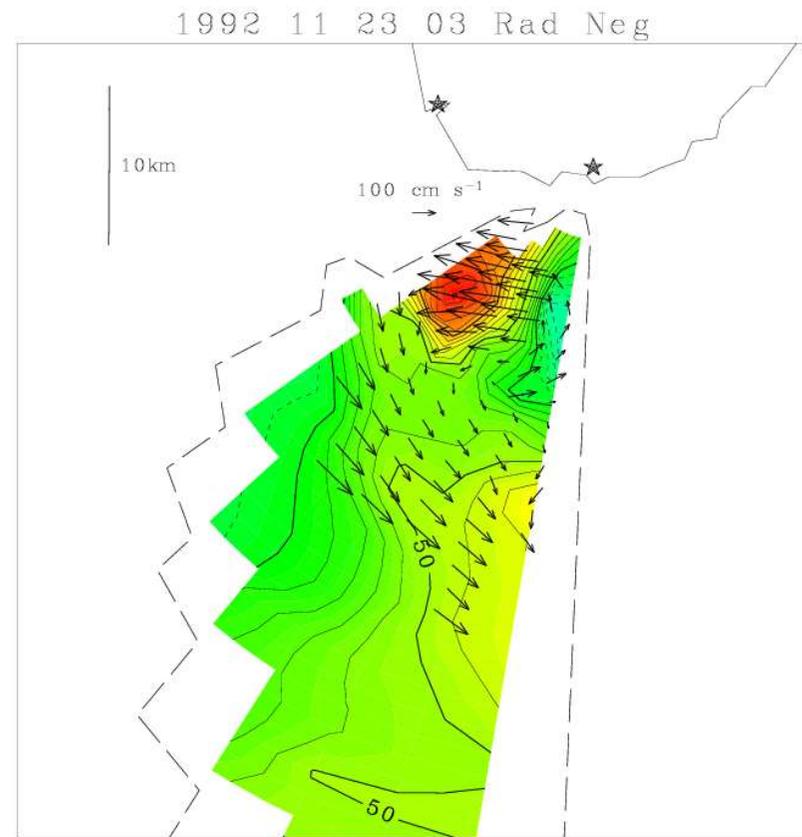


Hirauchi Radar – Radial current velocity

Extracted from k_B^+

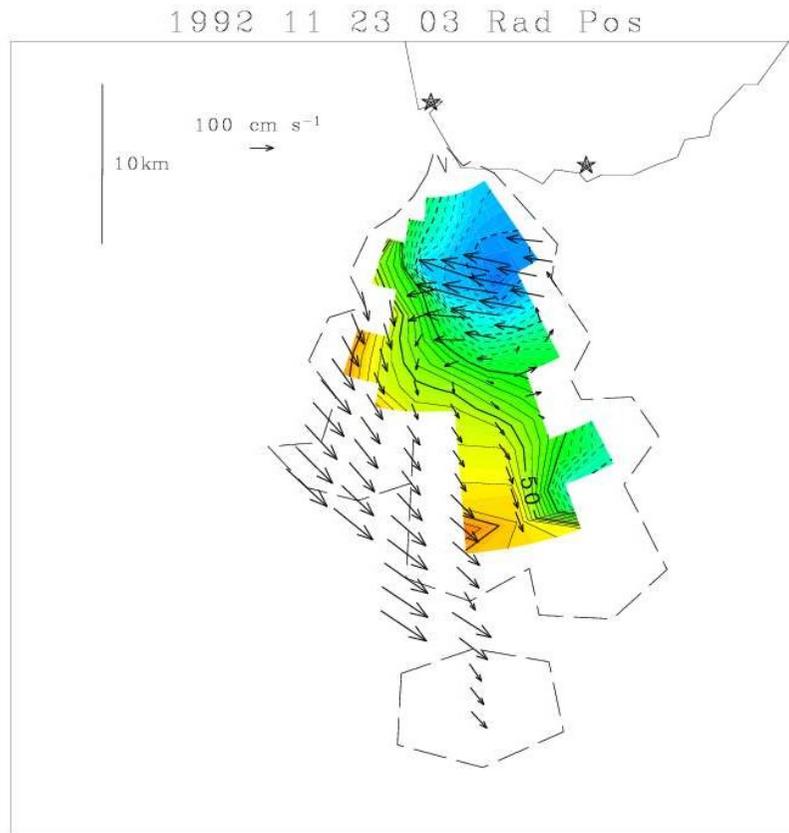


Extracted from k_B^-

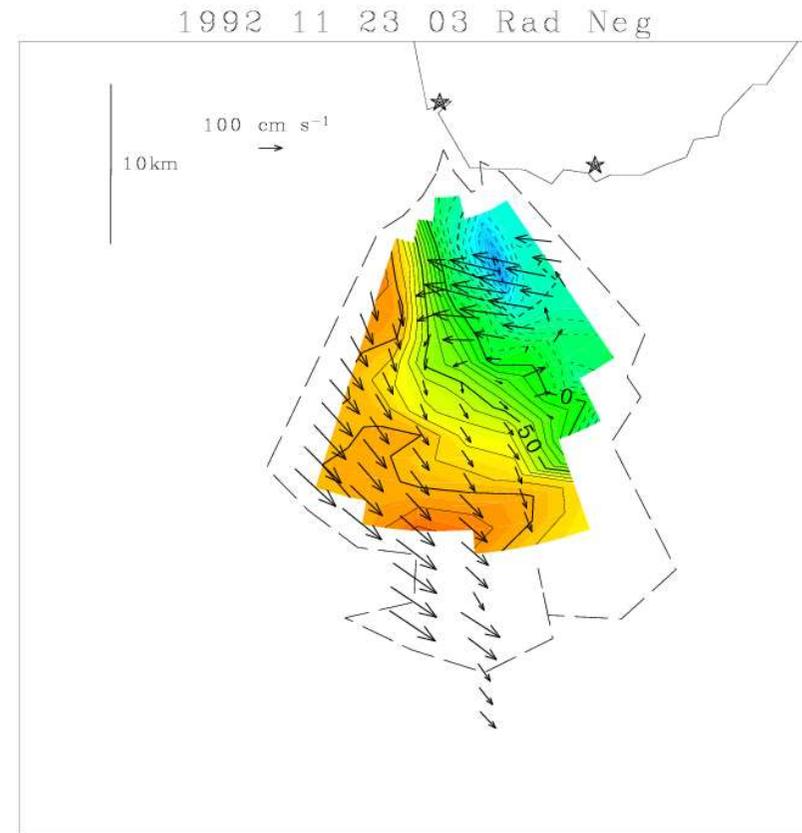


Kurio Radar – Radial current velocity

Extracted from k_B^+

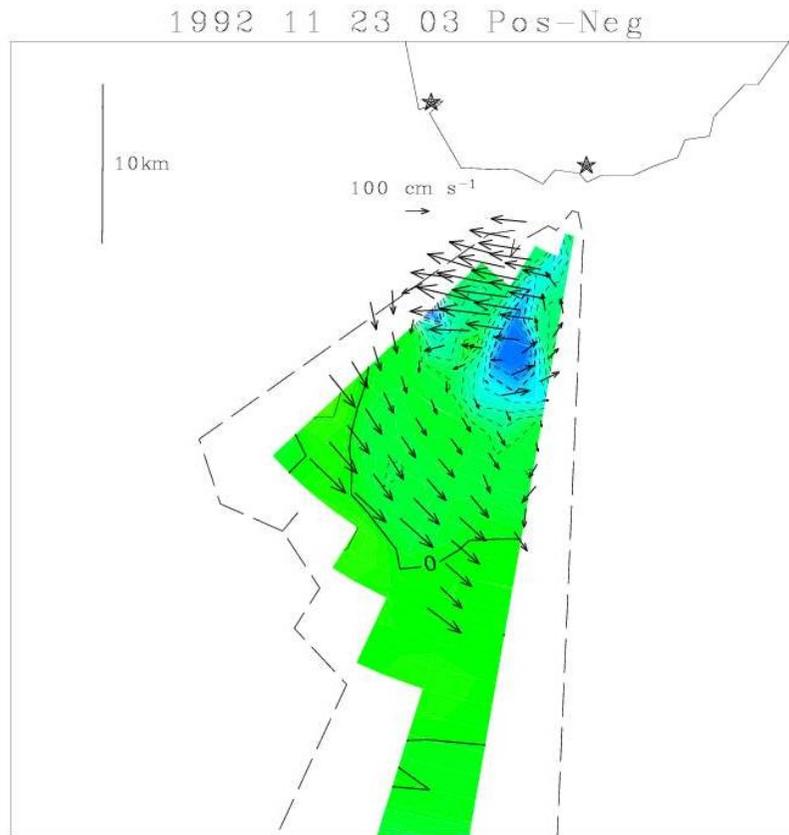


Extracted from k_B^-

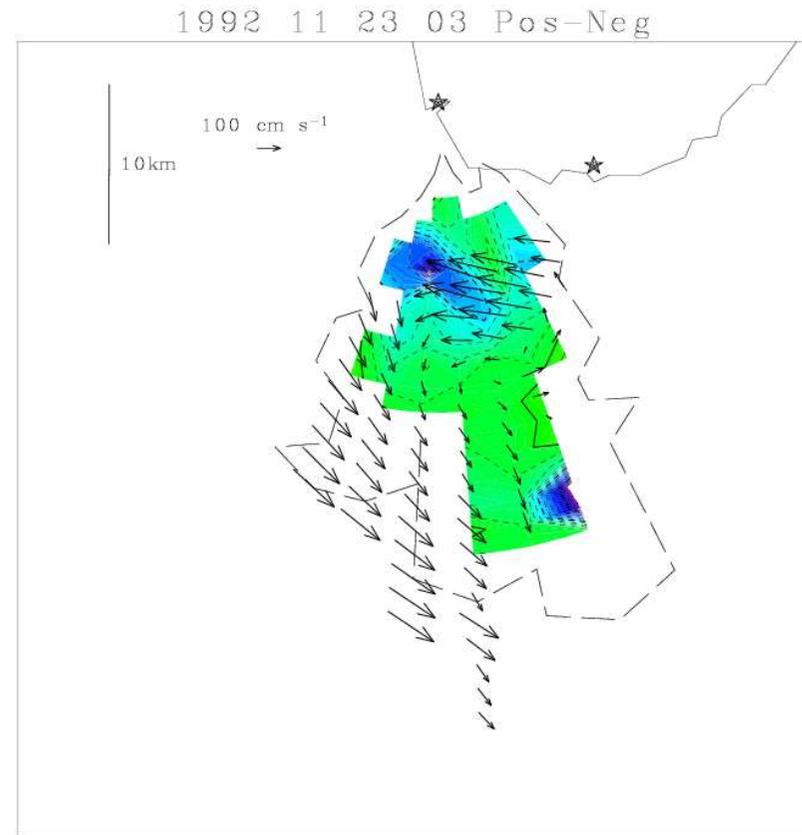


Difference of Radial current velocities

Hirauchi



Kurio



$$V(k_B^+) - V(k_B^-) < 0$$

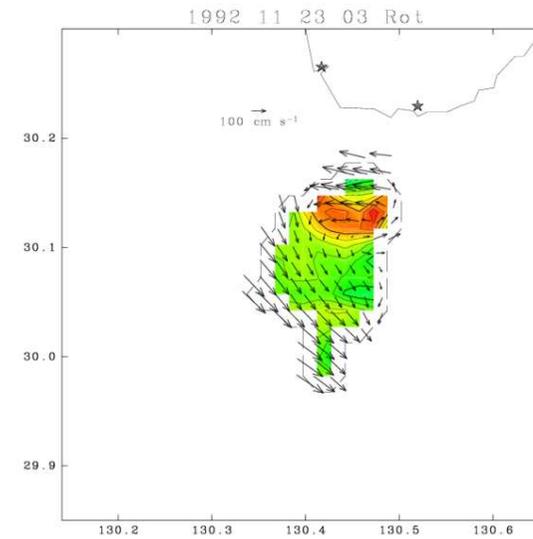
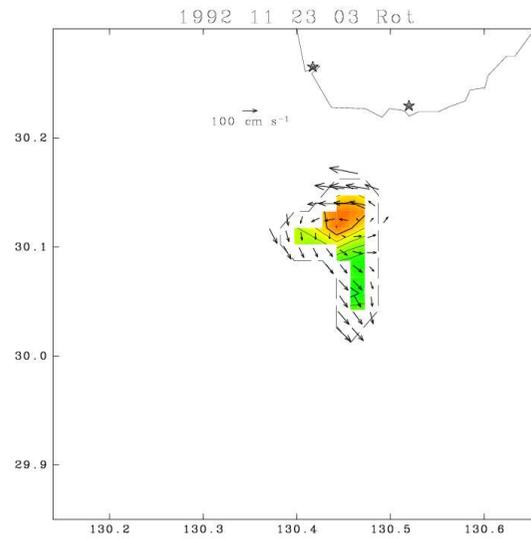
Agree with simulation results

Current field

Averaged radial current velocity

Non-averaged radial current velocity

Rotation



Divergence

