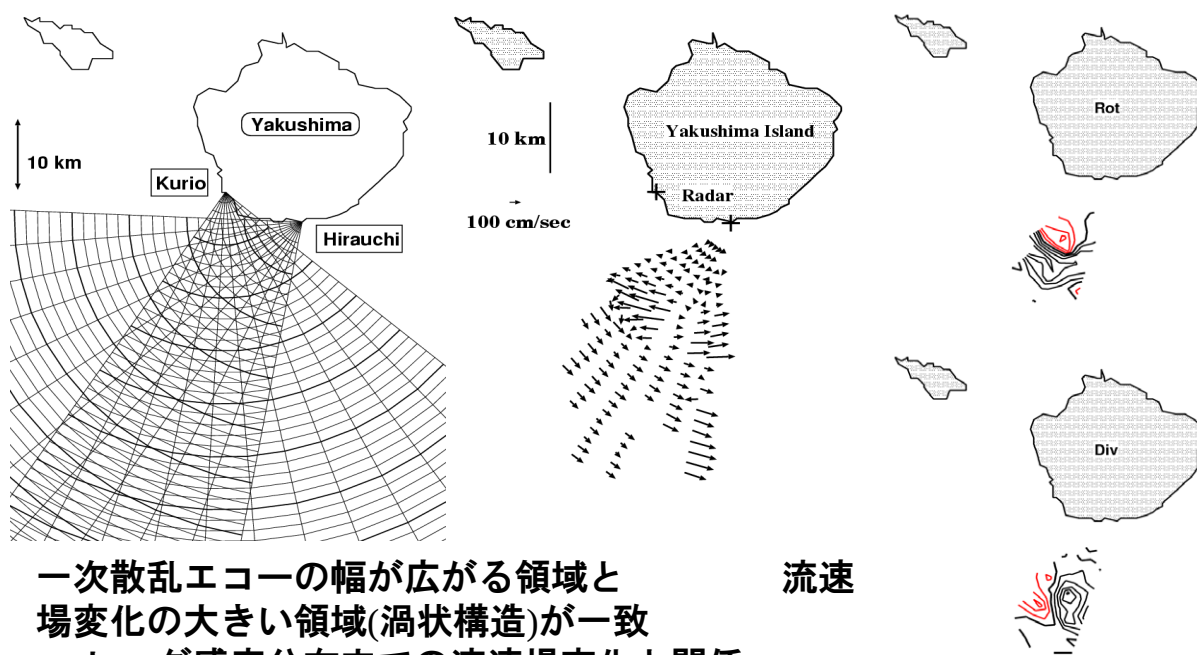


HFレーダによる 収束発散場および渦度場の観測

情報通信研究機構
灘井 章嗣

海洋流速場の空間変化により生じる
レーダ散乱断面積の空間非一様性が引き起こす
収束発散場・渦度場観測への影響

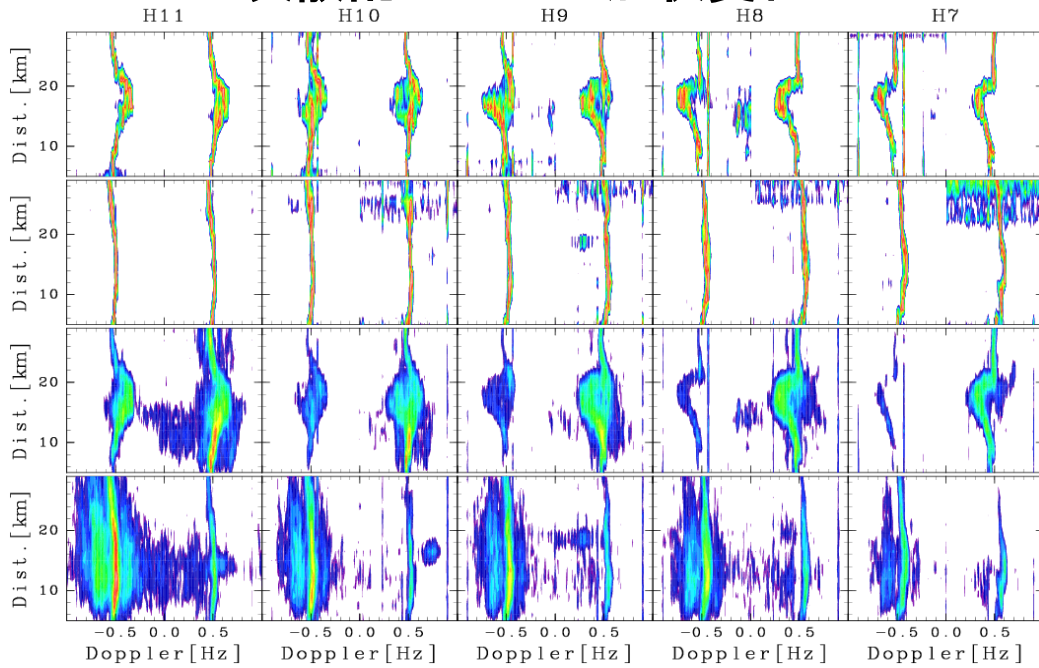
一次散乱エコー形状と流速場



一次散乱エコーの形状変化

分裂例

通常



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？

一次散乱エコースペクトル形状

● 一次散乱エコーのスペクトル

送信電力 P_t , レーダ感度分布 G , 感度範囲 S

レーダ位置 $\mathbf{r}_r$, ターゲット位置 $\mathbf{r}_t$

$$P_r(v_D, k_t, \mathbf{r}_t) = \frac{P_t}{16\pi k_t^2} \int_S \frac{G(\mathbf{r}') \sigma^0(v_D, \mathbf{k}_t)}{|\mathbf{r} + \mathbf{r}'|^4} d\mathbf{r}',$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_t - \mathbf{r}_r,$$

$$\mathbf{k}_t = k_t \frac{\mathbf{r} + \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} + \mathbf{r}'|}$$

レーダ感度分布の広がりがターゲット距離に比べて十分小さい場合、

$$P_r(v_D, k_t, \mathbf{r}) = \frac{P_t}{16\pi k_t^2 |\mathbf{r}|^4} \int_{S'} G(\mathbf{r}') \sigma^0(v_D, \mathbf{k}_t) d\mathbf{r}'$$

S' ターゲット周辺

レーダ感度分布

$$G(\mathbf{r}) = G_0 \exp\left(-\left(\frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_c|}{b_w}\right)^2 \ln 2\right)$$

G_0 最大感度

b_w 半値幅

● 一次散乱エコーのレーダ散乱断面積

Bragg 共鳴条件 $\mathbf{k}_B = \pm 2\mathbf{k}_t$

レーダ送信波:

垂直偏波、入射角 90 度、波数ベクトル $\mathbf{k}_t$

Doppler 速度: v_D

$$\sigma^0(v_D, \mathbf{k}_t) = 64\pi |\mathbf{k}_t|^4 \{S(\mathbf{k}_B^+) \delta(v_D - v_R(\mathbf{k}_B^+)) + S(\mathbf{k}_B^-) \delta(v_D - v_R(\mathbf{k}_B^-))\}$$

$$= \sigma^{0+}(v_D, \mathbf{k}_t) + \sigma^{0-}(v_D, \mathbf{k}_t)$$

$$v_R(\mathbf{k}_B^\pm) = C_p(\mathbf{k}_B^\pm) + v_r$$

$$= \pm \sqrt{\frac{g}{|\mathbf{k}_B|}} + \mathbf{V} \cdot \frac{\mathbf{k}_t}{|\mathbf{k}_t|}$$

$S(\mathbf{k})$ スペクトル密度, C_p 位相速度, g 重力加速度

それぞれの一次散乱エコースペクトルの形状

$$P^{+\pm}(v_D, k_t, \mathbf{r}) = \int_{S'} G(\mathbf{r}') \sigma^{0\pm}(v_D, \mathbf{k}_t) d\mathbf{r}'$$

レーダ位置 $\mathbf{r}_t = (0, -\infty)$ とする

ローカル海洋波浪スペクトル密度

- 波浪スペクトル推定

$$S(\mathbf{k}) = \psi(k)G(\theta)$$

流速場の影響を受ける前の波浪スペクトル

方向スペクトル $G_s(\theta_s)$ は一様

$$\text{波数スペクトル } \psi_s(k_s) \sim k_s^{-\frac{7}{2}} (\phi_s(f) \sim f^{-4})$$

仮定: 波浪の生成消滅は無視できる

wave action conservation が成立

$$\frac{E(k)}{\sigma} = \frac{\psi(k)A}{\sigma} = \text{const.}$$

E wave packet が持つエネルギー

A wave packet の仮想的広がり

$$\sigma = \sqrt{gk} \text{ wave frequency}$$

流速場の影響をうけた波数スペクトル $\psi_e(k_e)$

$$\psi_e(k_e) = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_s}\right) \left(\frac{A_s}{A_e}\right) \psi_s(k_s)$$

流速場による波数スペクトルの変化

$$\begin{aligned} \Delta\psi_e(k_e) &= \left(\frac{k_e}{k_s}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{A_s}{A_e}\right) \frac{\psi_s(k_s)}{\psi_s(k_e)} \\ &= \Delta\sigma_k \Delta\sigma_A \Delta\sigma_\psi \end{aligned}$$

$$k_s, \frac{A_s}{A_e} \rightarrow \text{ray equation による推定}$$

Ray Equation と正規化

- Ray Equation (Dimensional)

location of wave group: $\mathbf{x}^*$

wavenumber vector: $\mathbf{k}^*$

group velocity: $\mathbf{C}_g^*$

current velocity: $\mathbf{u}^*$

wave frequency: ω_0^*

intrinsic frequency: ω^*

$$\begin{aligned} d\mathbf{x}^*/dt^* &= \mathbf{u}^* + \mathbf{C}_g^* \\ d\mathbf{K}^*/dt^* &= -\mathbf{K}^* \cdot (\nabla^* \mathbf{u}^*) \\ \omega_0^* &= \omega^* + g^* \mathbf{K}^* \cdot \mathbf{u}^* \\ \omega^{*2} &= g^{*2} |\mathbf{K}^*| \\ \mathbf{C}_g^* &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{|\mathbf{K}^*|}} \frac{\mathbf{K}^*}{|\mathbf{K}^*|} \end{aligned}$$

modified wavenumber vector $\mathbf{K}^*$:

$$\mathbf{K}^* = \frac{\mathbf{k}^*}{g^*}$$

g^* : acceleration of gravity

- 正規化

— 長さ: 渦の半径 R_0^*

— 速度: Bragg 共鳴条件を満たす海洋波の位相速度 C_p^*

$$\Rightarrow \text{時間: } R_0^*/C_p^*$$

- Normalized Ray Equation

location of wave group: $\mathbf{x}$

modified wavenumber vector: $\mathbf{K}$

group velocity: $\mathbf{C}_g$

current velocity: $\mathbf{u}$

$$\begin{aligned} d\mathbf{x}/dt &= \mathbf{u} + \mathbf{C}_g \\ d\mathbf{K}/dt &= -\mathbf{K} \cdot (\nabla \mathbf{u}) \\ \mathbf{C}_g &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{|\mathbf{K}|}} \frac{\mathbf{K}}{|\mathbf{K}|} \\ \frac{A_e}{A_s} &= \int_{t_s}^{t_e} (\nabla \cdot \mathbf{u}) dt \end{aligned}$$

海洋流速場モデル

- Eddy model

流速関数 $v_p(r)$ 、動径方向に対する流速方向: φ

$$u(x, y) = v_p(r) \cos(\theta + \varphi)$$

$$v(x, y) = v_p(r) \sin(\theta + \varphi)$$

- 流速関数 $v_p(r)$

1階微分可能、 $\frac{\partial v_p}{\partial r} + \frac{v_p}{r}$ の符号不変

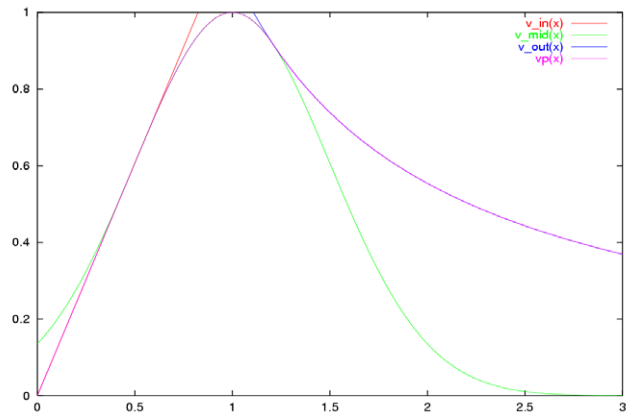
$$v_p(r) = \begin{cases} \frac{v_p(R_1)}{R_1} r & \text{if } 0 \leq r < R_1 \\ V_0 \exp\left\{-\left[\frac{(r-R_0)}{bR_0}\right]^2\right\} & \text{if } R_1 \leq r \leq R_2 \\ v_p(R_2) \frac{R_2}{r} & \text{if } r > R_2 \end{cases}$$

$$R_1 = \frac{1 + (1 - 2b^2)^{\frac{1}{2}}}{2} R_0 \leq R_0,$$

$$R_2 = \frac{1 + (1 + 2b^2)^{\frac{1}{2}}}{2} R_0,$$

$b = 0.7071067 \sim \sqrt{2}/2$ を採用

($R_1 \sim 0.5R_0$, $R_2 \sim 1.2R_0$)



- Velocity front model

front幅 D , 流速差 V_0 , front方向 ϕ

$$v(d) = \begin{cases} -V_0 & \text{if } d \leq -D \\ V_0 \sin(\pi \frac{d}{D}) & \text{if } |d| < D \\ V_0 & \text{if } d \geq D \end{cases}$$

$$d = x \sin \phi - y \cos \phi$$

$V_0=0.125$ について計算

流速場計測に影響を及ぼす 流速変化量・空間スケール

モデル計算

・流速場はレーダが観測する海洋波の位相速度で正規化

⇒ 流速場変化による影響の強度はレーダ周波数によって変化

レーダ周波数[MHz]	5.00	9.00	13.00	24.00	42.00
Bragg共鳴波位相速度[m/]	6.84	5.10	4.24	3.12	2.36
無次元速度 0.05 相当[m/]	0.34	0.25	0.21	0.16	0.12
無次元速度 0.10 相当[m/]	0.68	0.51	0.42	0.31	0.24
無次元速度 0.15 相当[m/]	1.03	0.76	0.64	0.47	0.35
無次元速度 0.20 相当[m/]	1.37	1.02	0.85	0.62	0.47

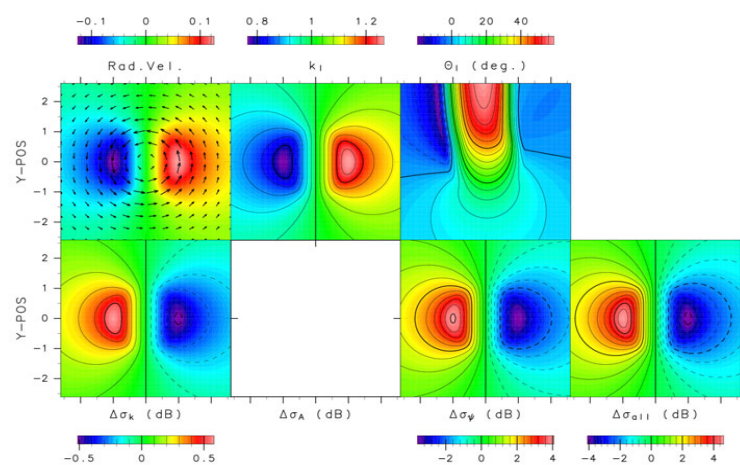
・空間スケールはレーダ感度分布の広がり正規化

⇒個々のレーダにより異なる

実際のレーダと厳密な比較を行うには極座標による評価が必要

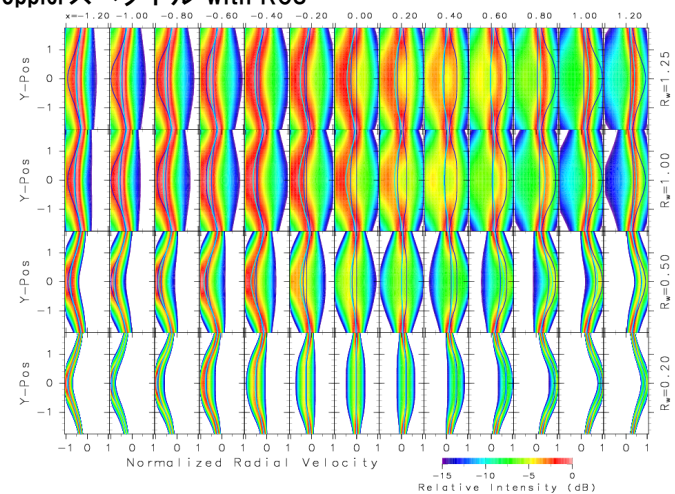
海洋渦のみ($V_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



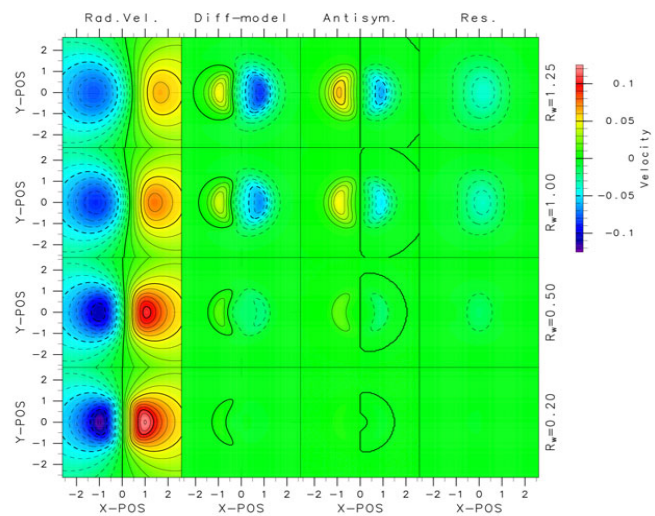
海洋渦のみ($V_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

Dopplerスペクトル with RCS



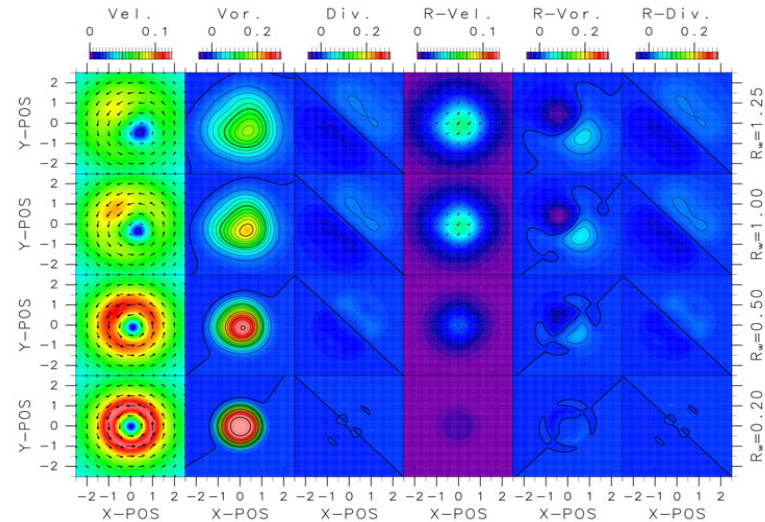
海洋渦のみ($V_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



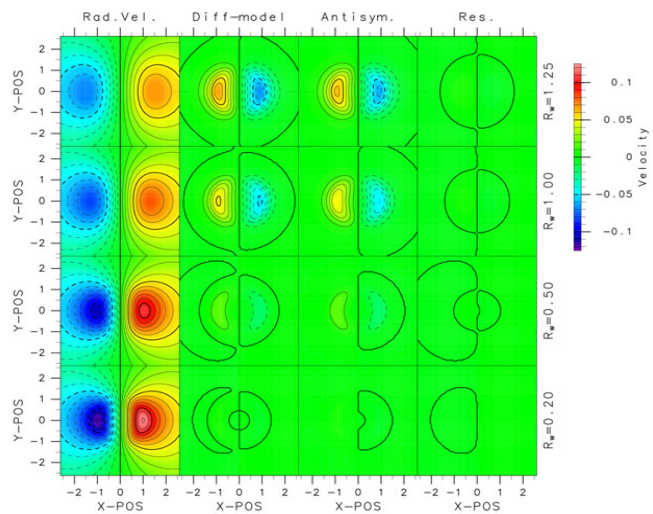
海洋渦のみ($V_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

流速ベクトル(交差角90度)



海洋渦のみ($V_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,\pm 1)$)

視線方向流速



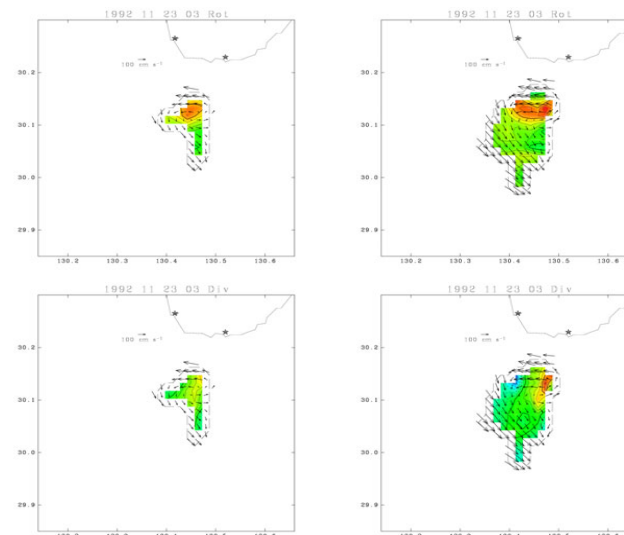
流速ベクトル場

一次散乱エコー平均

より強い一次散乱エコー

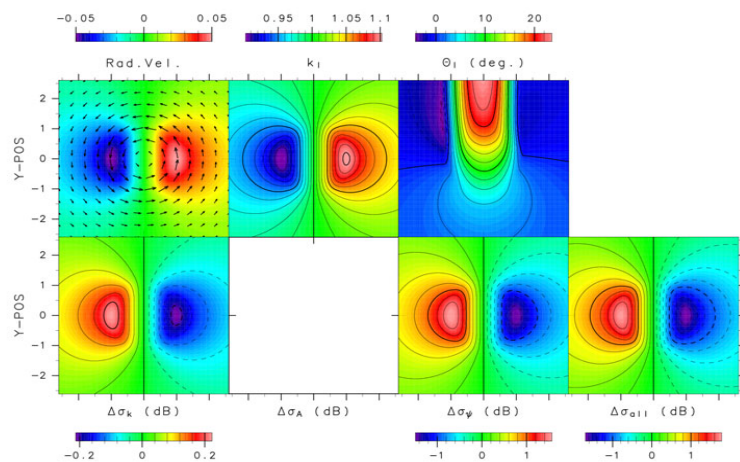
渦度

発散



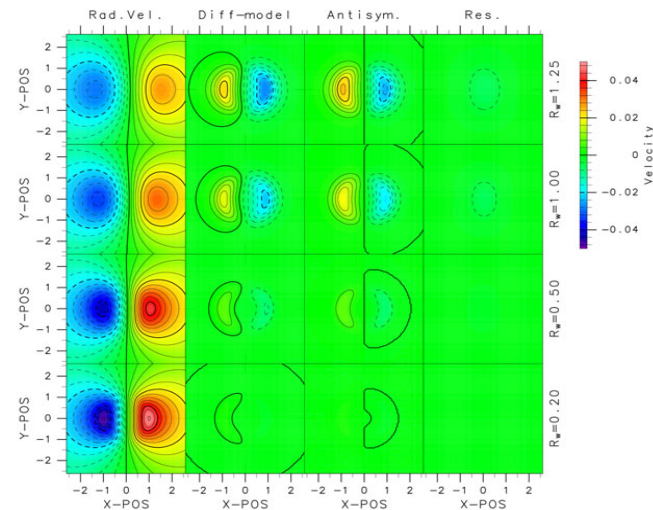
海洋渦のみ($V_0=0.050$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



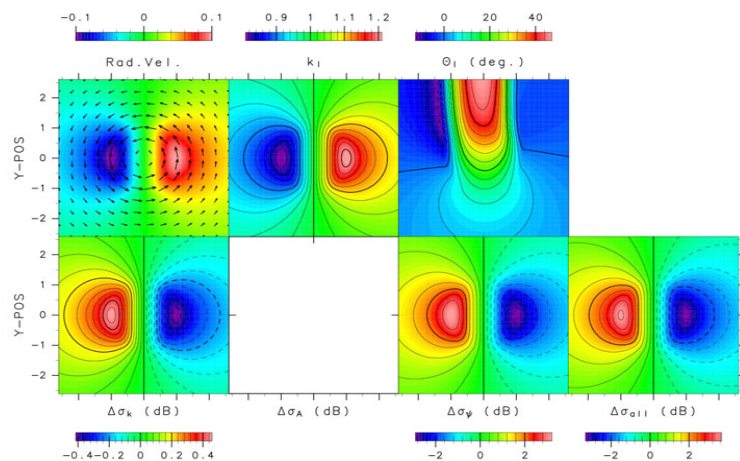
海洋渦のみ($V_0=0.050$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



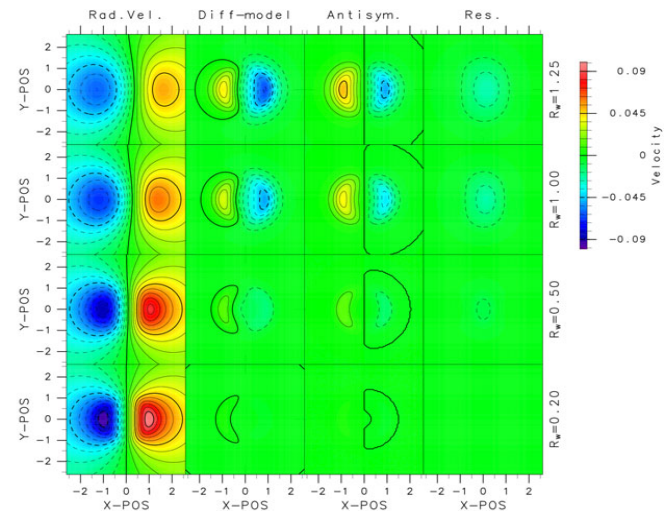
海洋渦のみ($V_0=0.100$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



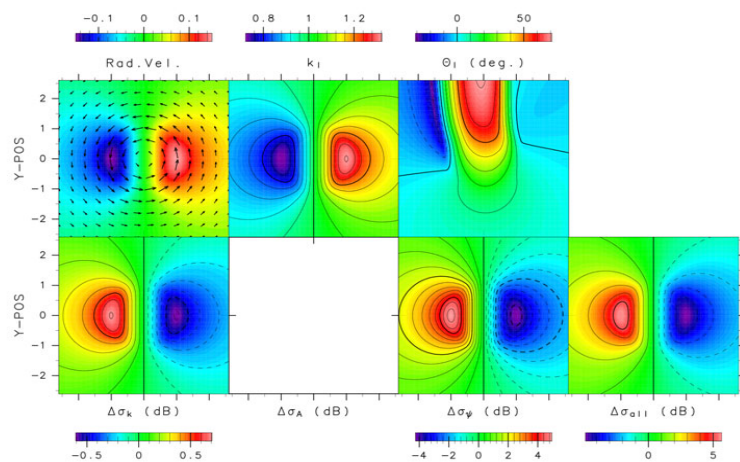
海洋渦のみ($V_0=0.100$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



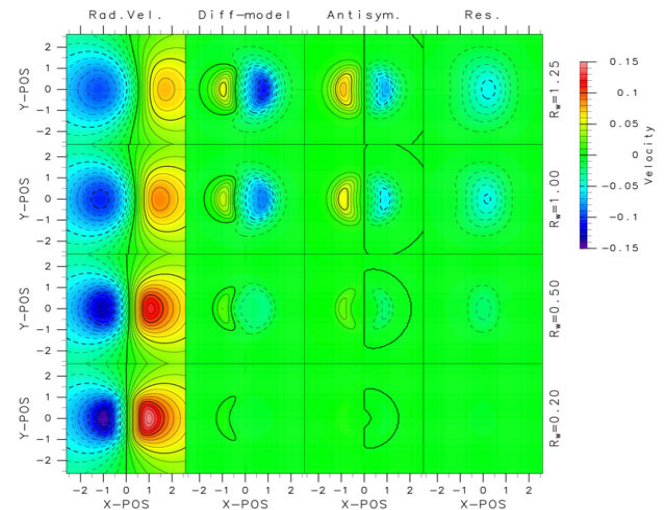
海洋渦のみ($V_0=0.150$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



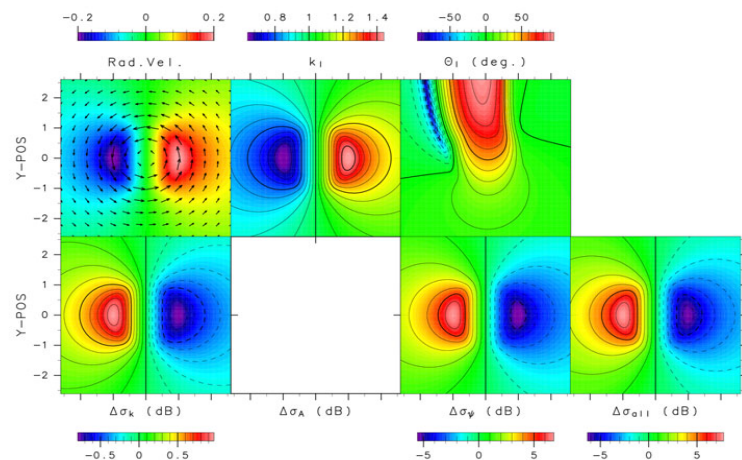
海洋渦のみ($V_0=0.150$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



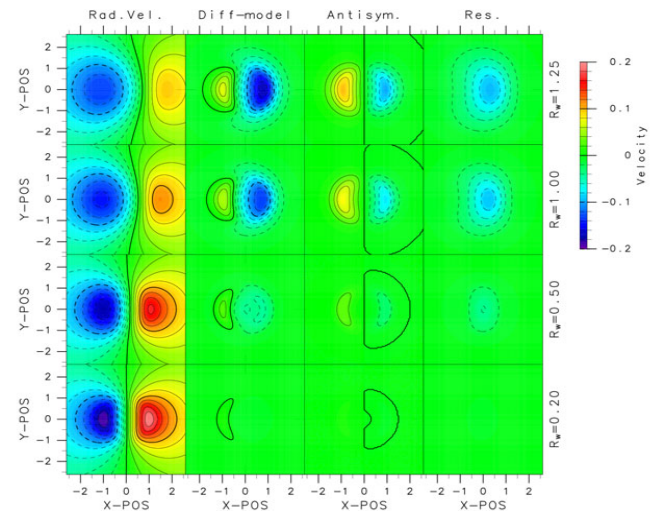
海洋渦のみ($V_0=0.200$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



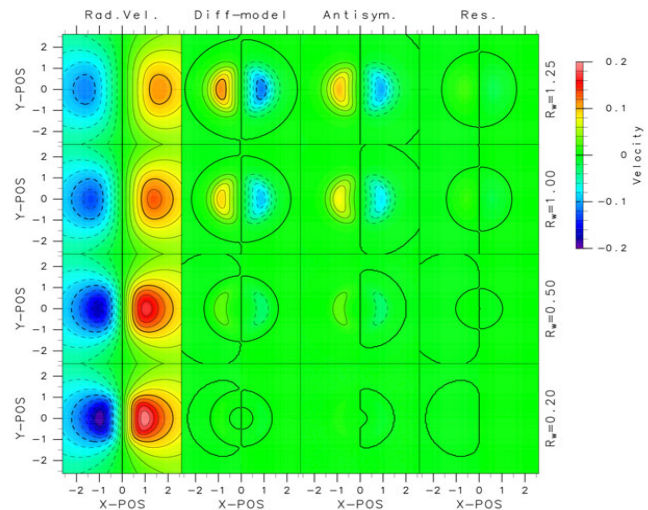
海洋渦のみ($V_0=0.200$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



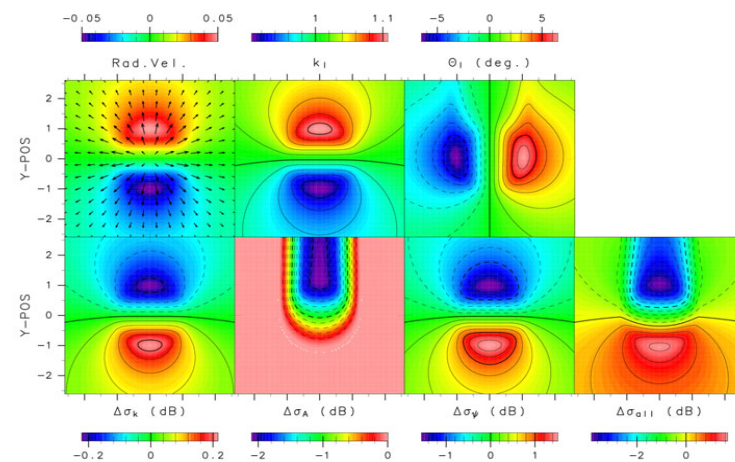
海洋渦のみ($V_0=0.200$, $\varphi=90\text{deg}$. $K_B=(0,\pm 1)$)

視線方向流速



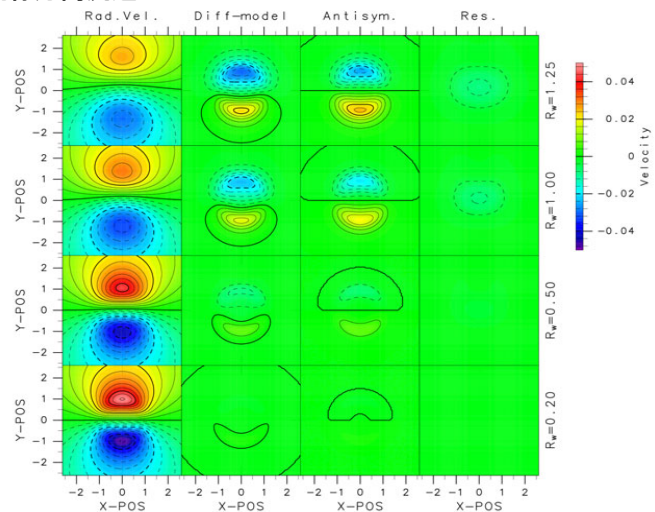
湧き出しのみ($V_0=0.050$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



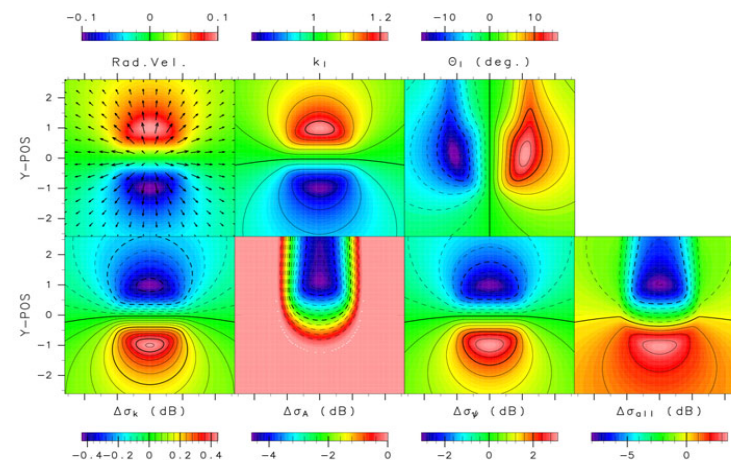
湧き出しのみ($V_0=0.050$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



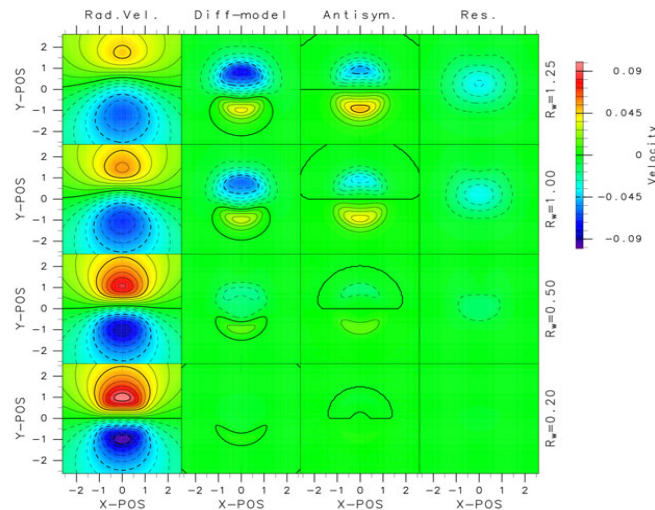
湧き出しのみ($V_0=0.100$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



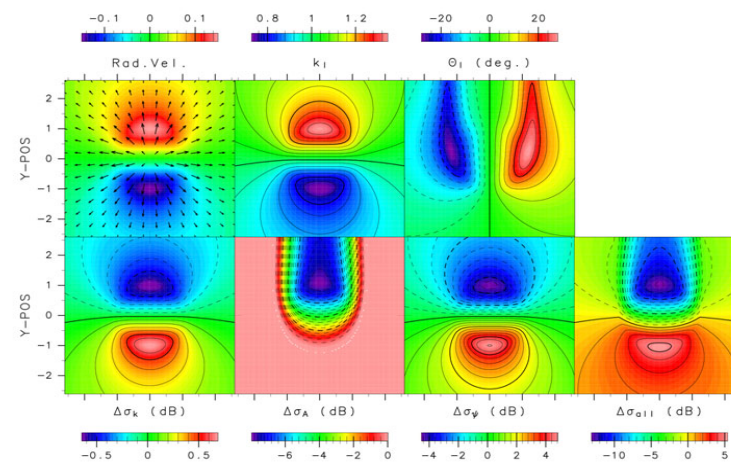
湧き出しのみ($V_0=0.100$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



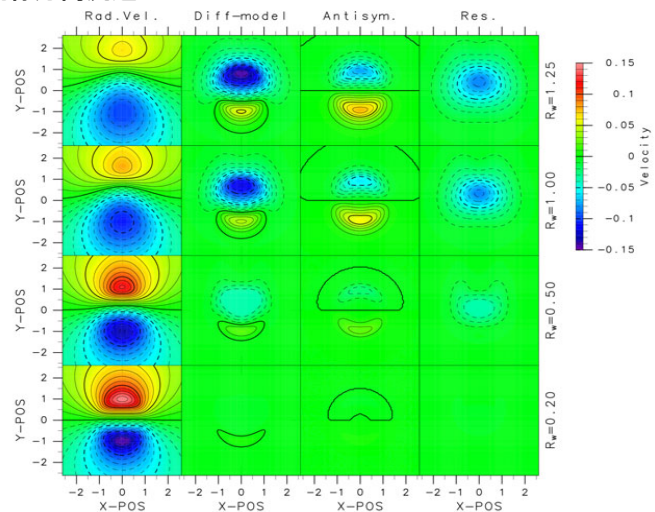
湧き出しのみ($V_0=0.150$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



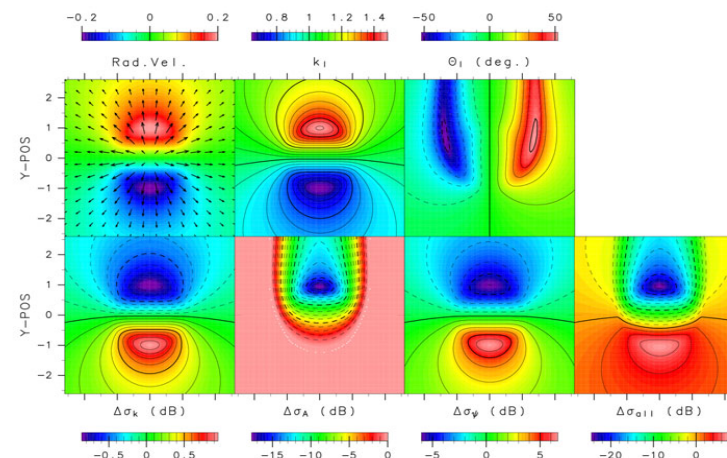
湧き出しのみ($V_0=0.150$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



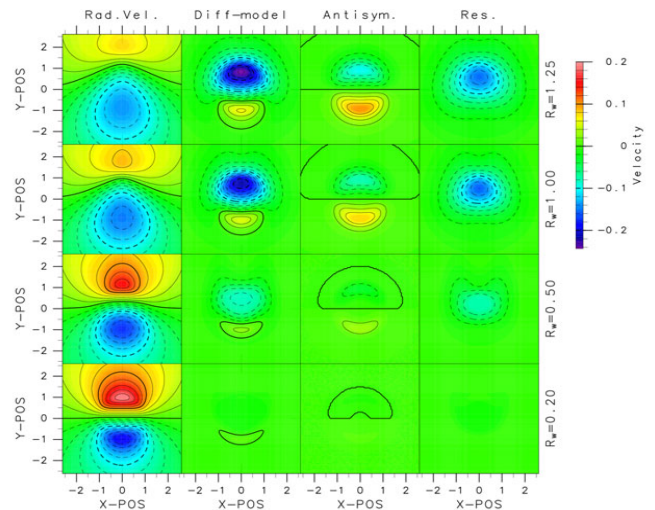
湧き出しのみ($V_0=0.200$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

RCS空間分布



湧き出しのみ($V_0=0.200$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,1)$)

視線方向流速



湧き出しのみ($V_0=0.200$, $\varphi=0\text{deg}$. $K_B=(0,\pm 1)$)

視線方向流速

