

波浪場 - 流速場相互作用が短波海洋レーダによる 流速場計測に与える影響に関する考察

情報通信研究機構

電磁波計測部門 環境データシステムグループ

灘井 章嗣

1. 短波海洋レーダによる流速観測
2. Wave-Current Interaction を考慮した一次散乱エコーの
Dopplerスペクトル形状シミュレーション
3. 計測流速場シミュレーション
4. 流速計測誤差の起因に関する考察

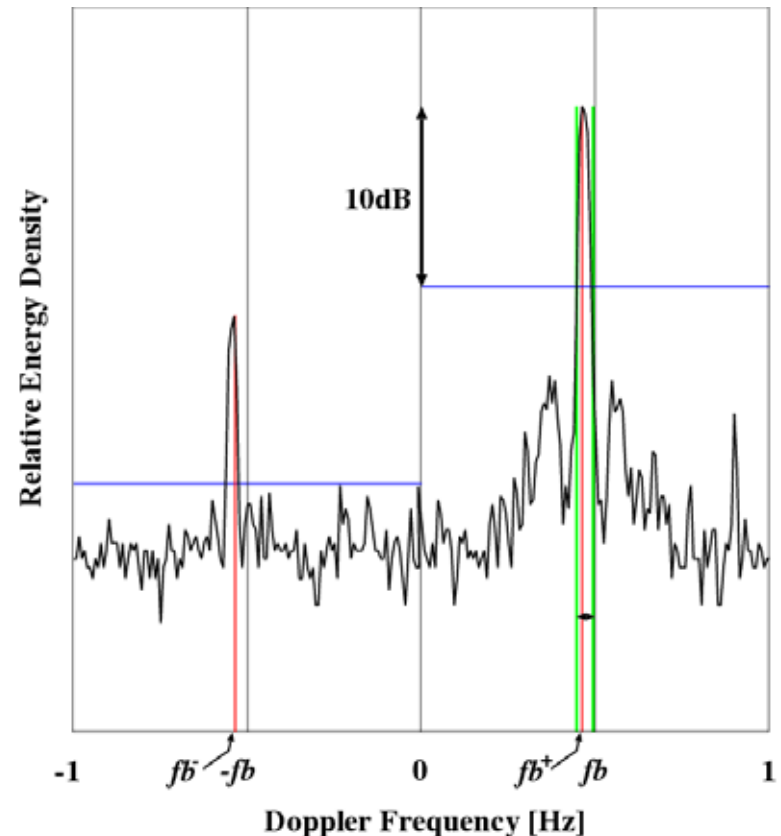
短波海洋レーダによる視線流速計測

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



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

→ 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

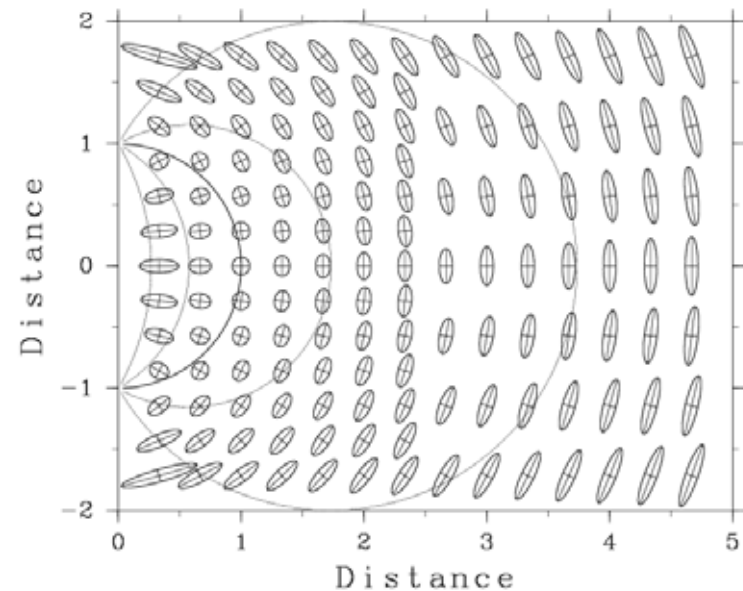
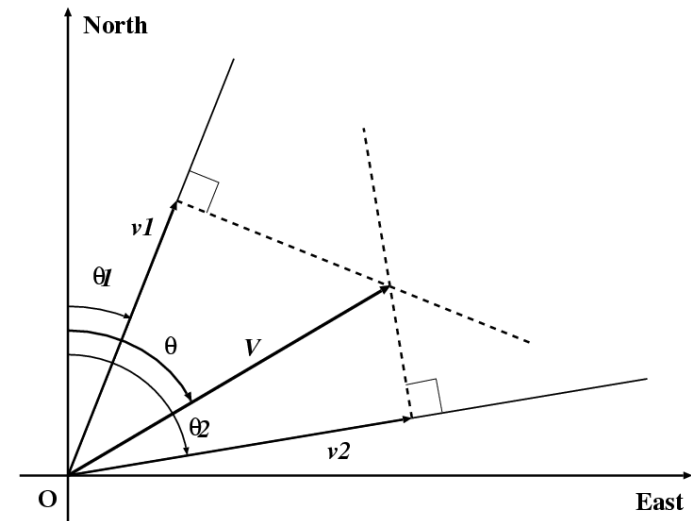
$$v_{ri} = \mathbf{V} \mathbf{e}_i. \quad (2)$$

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

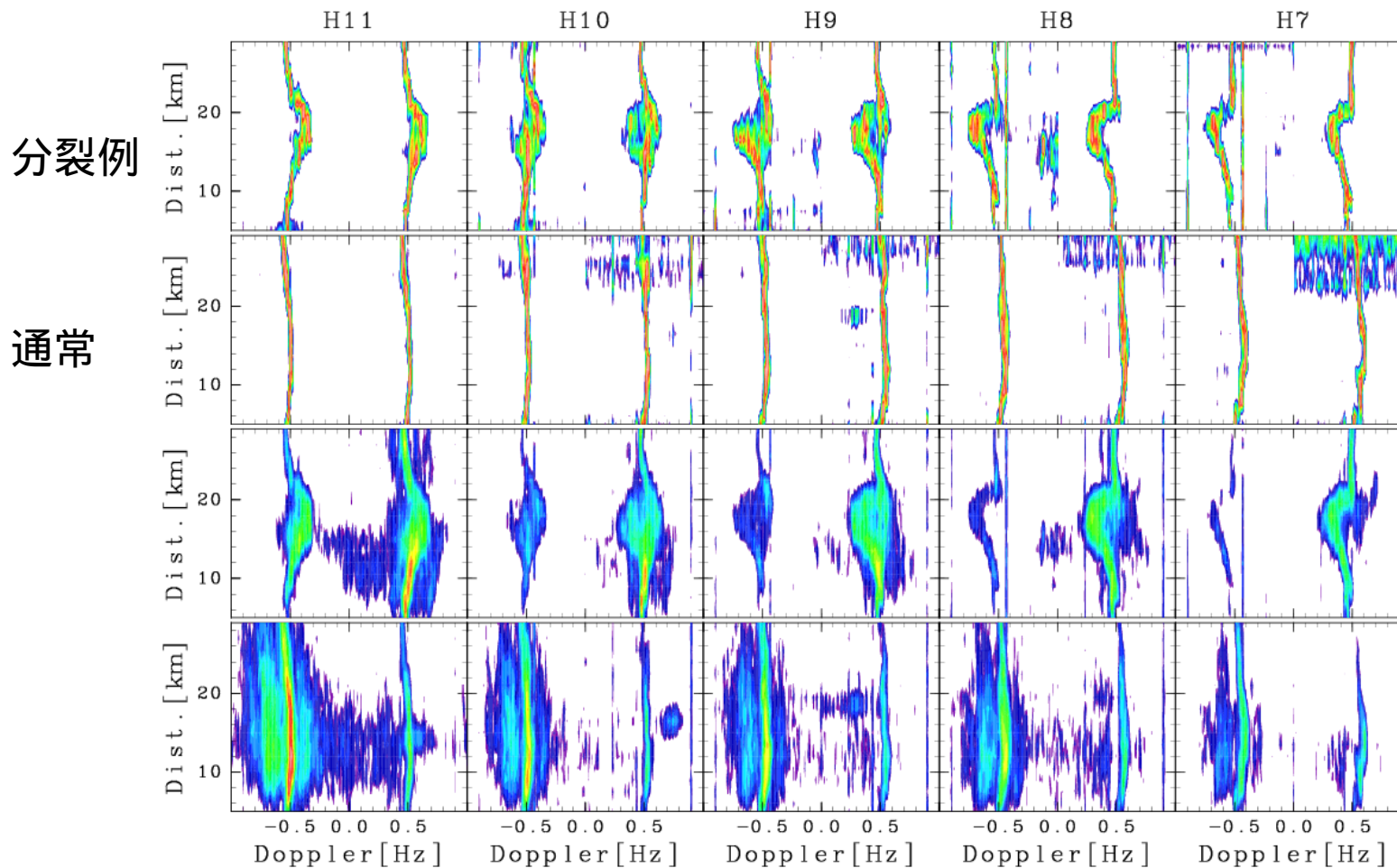
$$\mathbf{V}_r = \mathbf{V} \mathbf{R}. \quad (3)$$

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:

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



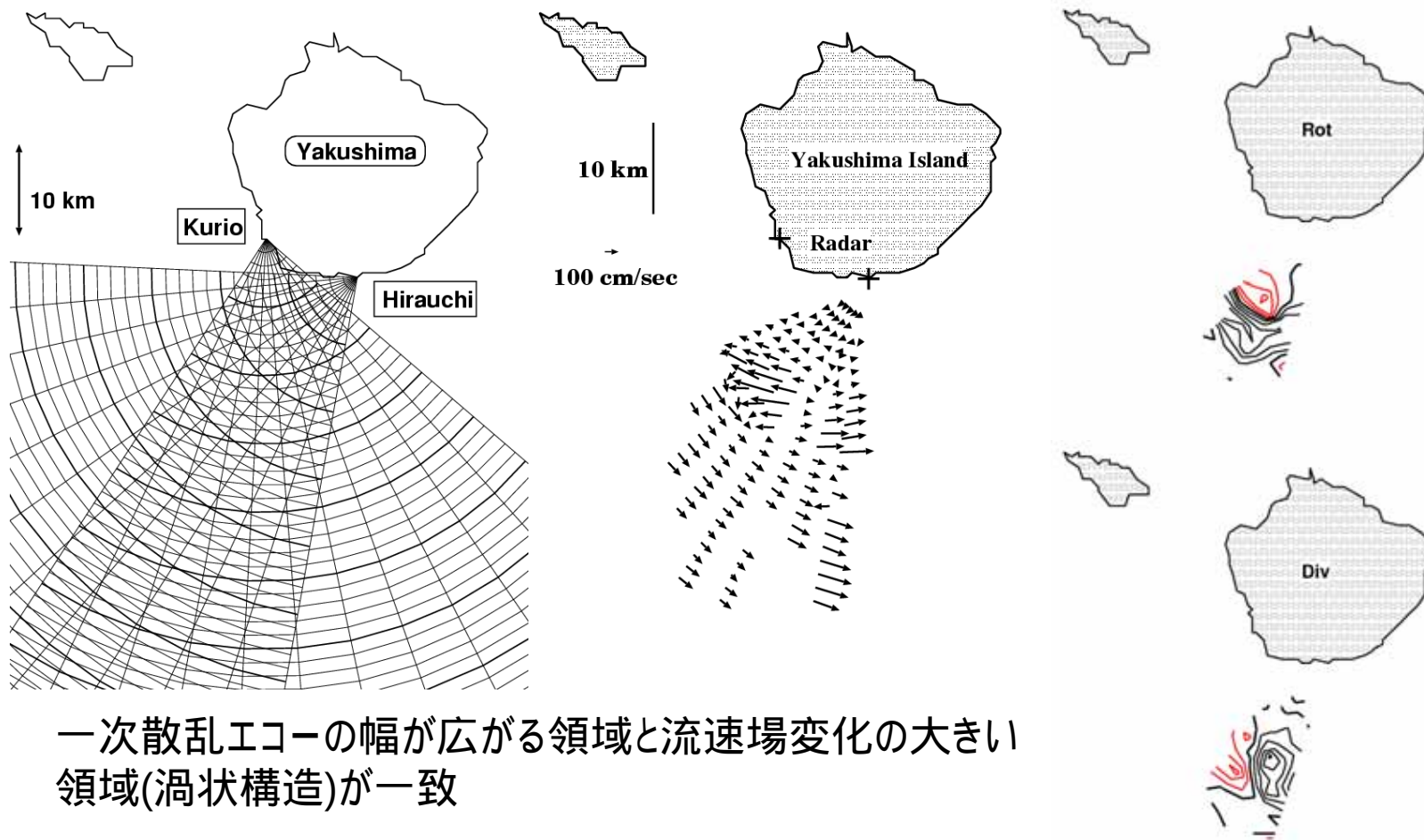
一次散乱エコーの形状変化



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

流速場と一次散乱エコー形状

- ・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が一致
 - 一次散乱エコー幅はレーダ感度分布内の視線流速分布を反映
- ・2つの一次散乱エコーで形状が異なる
 - 視線流速の単純空間平均ではない
 - 2つの一次散乱エコー海面散乱断面積に空間変化が存在？
 - Wave-Current Interactionの効果？

与えられた流速場による Wave-Current Interactionを考慮したシミュレーション

- 一次散乱エコーに対する海面散乱断面積の空間分布
- 一次散乱エコーのスペクトル形状
- 視線流速場
- 流速ベクトル場

一次散乱エコーのDopplerスペクトル形状

- 一次散乱エコーの受信スペクトル P_r

送信電力 P_t , レーダ感度分布 G , 散乱断面積 σ_0

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

$$P_r(v_D, \mathbf{r}_t; k_t) = \frac{P_t}{16\pi k_t^2} \int_S \frac{G(\mathbf{r}') \sigma_0(v_D, \mathbf{k}'_t)}{|\mathbf{r} + \mathbf{r}'|^4} d\mathbf{r}',$$

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

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

積分領域 S : 全平面

レーダ感度分布の広がりターゲット距離に比べて十分小さい場合、

$$P_r(v_D, \mathbf{r}_t; k_t) = \frac{P_t}{16\pi k_t^2 |\mathbf{r}|^4} \int_{S'} G(\mathbf{r}') \sigma_0(v_D, \mathbf{k}_t) d\mathbf{r}',$$

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

積分領域 S' : ターゲット周辺領域

- レーダ感度分布

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

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 σ_0

Bragg 共鳴条件 $\mathbf{k}_B = \pm 2\mathbf{k}_t$ (入射角 90 度)

レーダ送信波: 垂直偏波、波数ベクトル $\mathbf{k}_t$

散乱断面積の Doppler 速度 (v_D) スペクトル

$$\sigma_0(v_D, \mathbf{k}_t) = 64\pi |\mathbf{k}_t|^4 \{\sigma_0^+(v_D, \mathbf{k}_t) + \sigma_0^-(v_D, \mathbf{k}_t)\},$$

$$\sigma_0^\pm(v_D, \mathbf{k}_t) = S(\mathbf{k}_B^\pm) \delta(v_D - v_R(\mathbf{k}_B^\pm))$$

$S(\mathbf{k})$: 波浪スペクトル密度,

v_R : 相対位相速度

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

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

C_p : 位相速度, v_r 視線流速: g : 重力加速度

- それぞれの一次散乱エコーのスペクトル形状 $P'^\pm$

v'_D : Doppler 速度の流速寄与部分

$$P'^\pm(v'_D, \mathbf{r}; k_t) = \int_{S'} G(\mathbf{r}') \sigma_0^\pm(v'_D, \mathbf{k}_t) d\mathbf{r}'$$

$$= \int_{S'} G(\mathbf{r}') S(\mathbf{k}_B^\pm) \delta(v'_D - v_r) d\mathbf{r}'$$

局所波浪スペクトル密度

- 局所波浪スペクトル推定

- 背景波浪スペクトル S_s

$$S_s(\mathbf{k}) = \psi_s(k) G_s(\theta)$$

方向スペクトル: $G_s(\theta)$ は一様

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

- Wave action conservation

仮定: 波浪の生成消滅は無視できる

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

E : wave packet が持つエネルギー

A : wave packet の仮想的広がり

σ : wave frequency ($= \sqrt{g|\mathbf{k}|}$)

- 流速場の影響をうけた局所波浪スペクトル S_e

$$S_e(\mathbf{k}_e) = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_s}\right) \left(\frac{A_s}{A_e}\right) S_s(\mathbf{k}_s)$$

- 流速場による局所波浪スペクトルの変化 ΔS_e

$$\begin{aligned} \Delta S_e(\mathbf{k}_e) &= \frac{S_e(\mathbf{k}_e)}{S_s(\mathbf{k}_e)} \\ &= \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_s}\right) \left(\frac{A_s}{A_e}\right) \frac{S_s(\mathbf{k}_s)}{S_s(\mathbf{k}_e)} \\ &= \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_s}\right) \left(\frac{A_s}{A_e}\right) \frac{\psi_s(k_s)}{\psi_s(k_e)} \\ &= \Delta\sigma_k \Delta\sigma_A \Delta\sigma_\psi \end{aligned}$$

波数変化寄与:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_k &= \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_s}\right) \\ &= \left(\frac{k_e}{k_s}\right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

面積変化寄与:

$$\Delta\sigma_A = \frac{A_s}{A_e}$$

背景波数スペクトル寄与:

$$\Delta\sigma_\psi = \frac{\psi_s(k_s)}{\psi_s(k_e)}$$

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

正規化 Ray Equation

- 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^*

$$d\mathbf{x}^*/dt^* = \mathbf{u}^* + \mathbf{C}_g^*$$

$$d\mathbf{K}^*/dt^* = -\mathbf{K}^* \cdot (\nabla^* \mathbf{u}^*)$$

$$\omega_0^* = \omega^* + g^* \mathbf{K}^* \cdot \mathbf{u}^*$$

$$\omega^{*2} = g^{*2} |\mathbf{K}^*|$$

$$\mathbf{C}_g^* = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{|\mathbf{K}^*|}} \frac{\mathbf{K}^*}{|\mathbf{K}^*|}$$

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^*

⇒ 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: $\mathbf{u}$

$$d\mathbf{x}/dt = \mathbf{u} + \mathbf{C}_g$$

$$d\mathbf{K}/dt = -\mathbf{K} \cdot (\nabla \mathbf{u})$$

$$\mathbf{C}_g = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{|\mathbf{K}|}} \frac{\mathbf{K}}{|\mathbf{K}|}$$

$$\frac{A_e}{A_s} = \int_{t_s}^{t_e} (\nabla \cdot \mathbf{u}) dt$$

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 $v_p(r)$

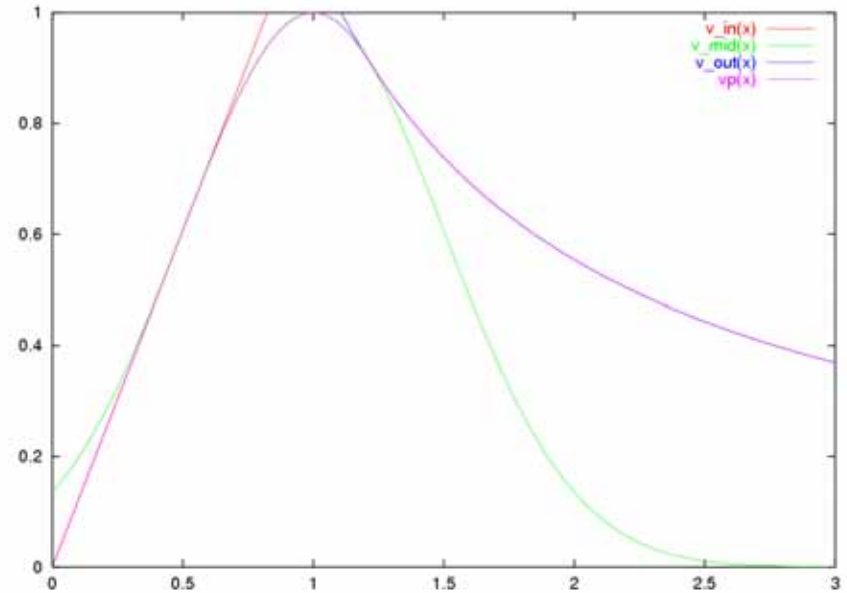
1階微分可能、 $\frac{\partial v_p}{\partial r} + \frac{v_p}{r}$ の符合不変

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

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

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

$b = 0.7071067 \sim \sqrt{2}/2$ を採用
($R_1 \sim 0.5R_0$, $R_2 \sim 1.2R_0$)



- Velocity front model

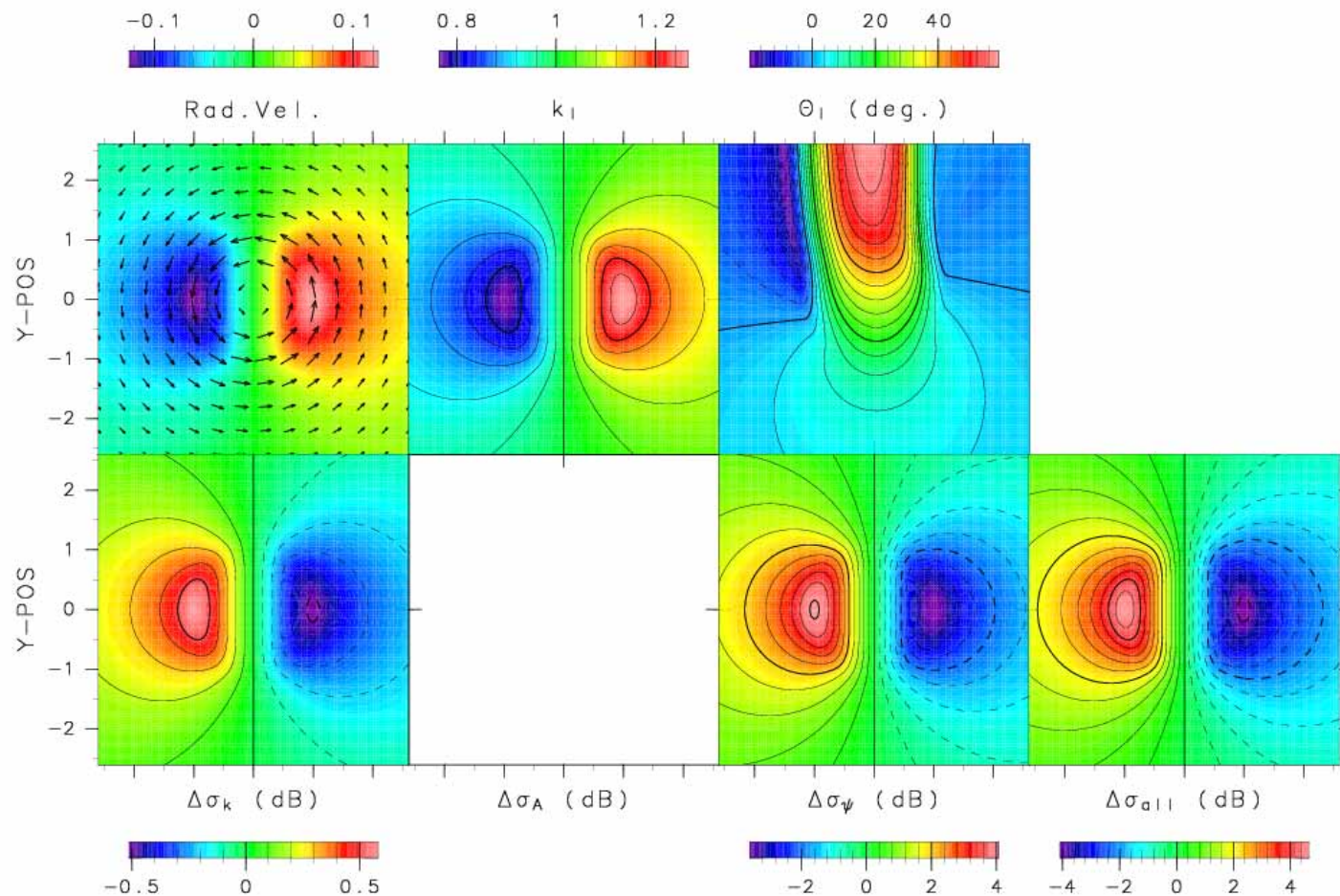
front 幅 D , 流速差 V_0 , front 方向 ϕ

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

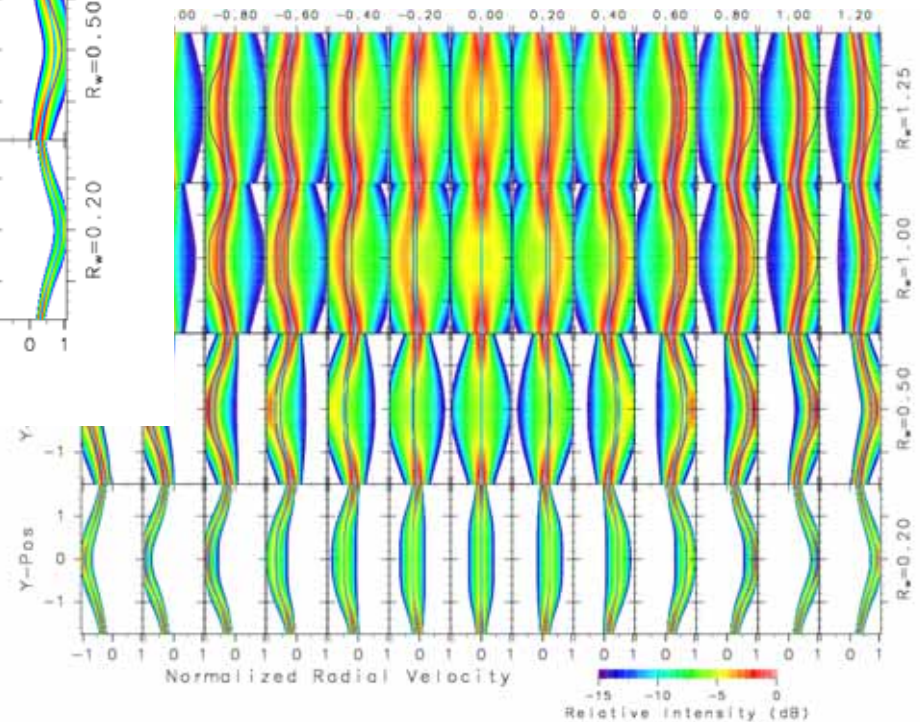
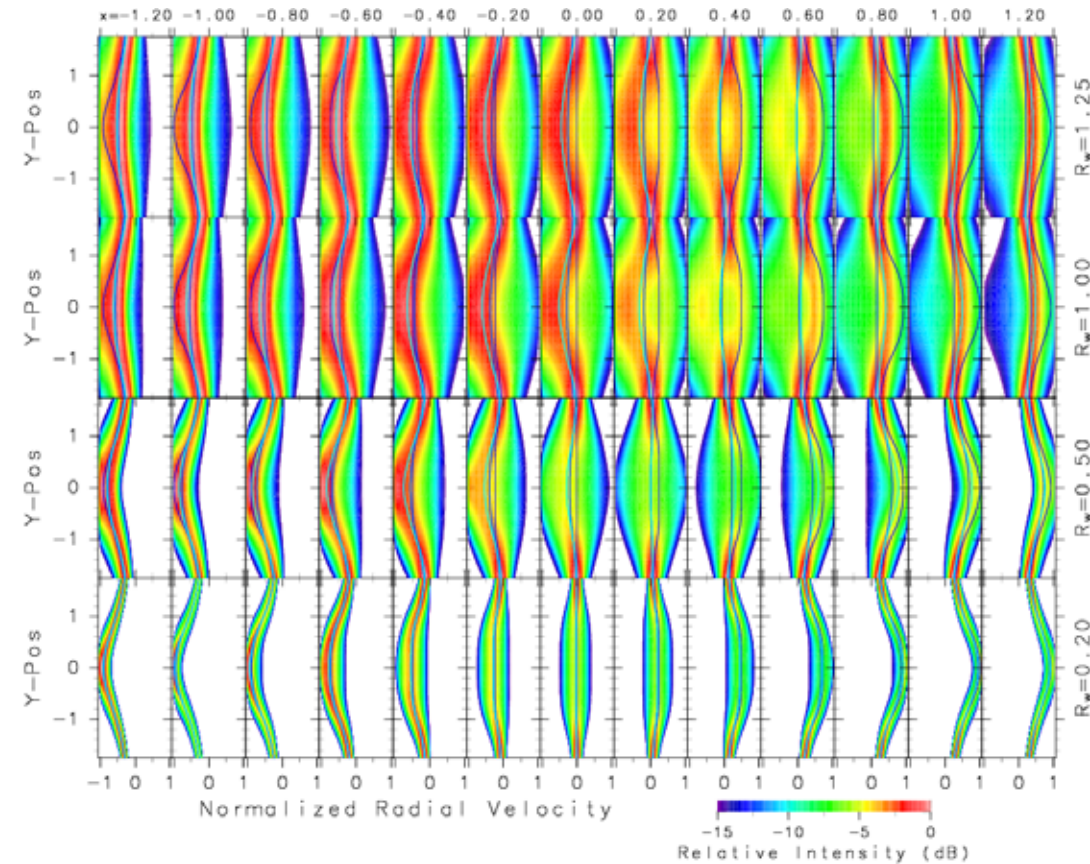
$$d = x \sin \phi - y \cos \phi$$

$V_0=0.125$ について発表

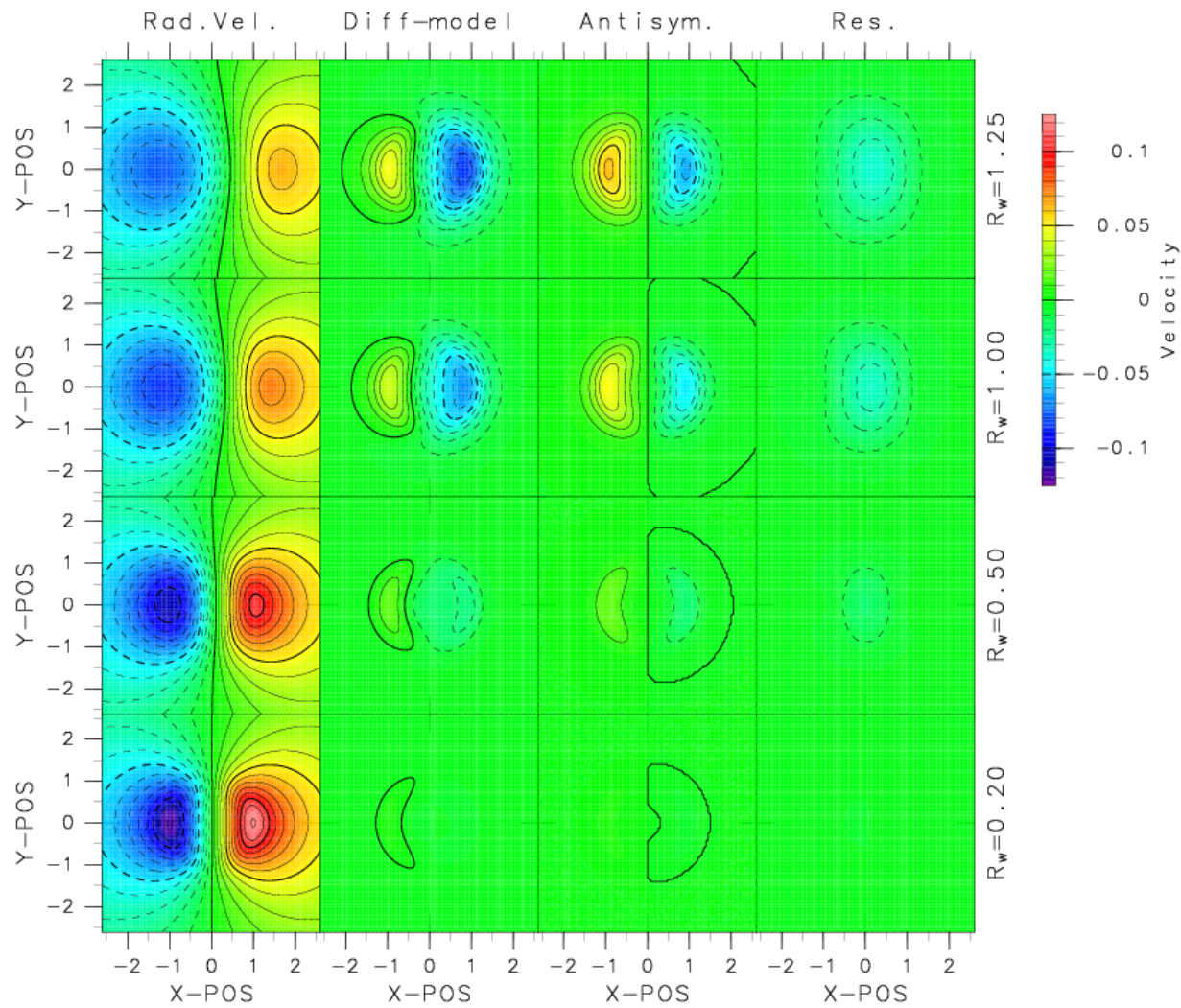
レーダ散乱断面積(NRCS)分布 ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg.}$, $K_B=(0, 1)$)



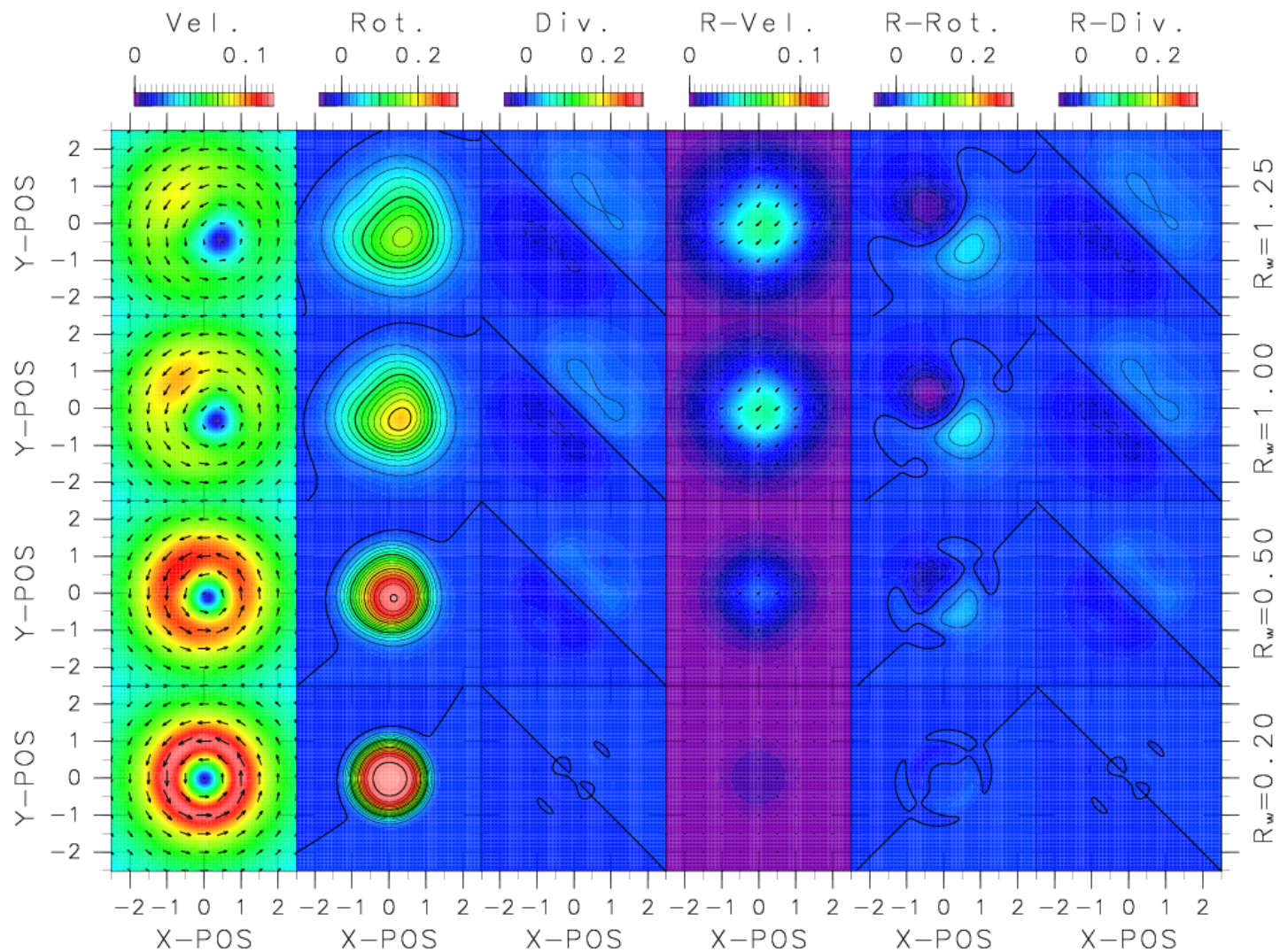
Dopplerスペクトル ($v_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg.}$, $K_B=(0, 1)$ and Uniform NRCS)



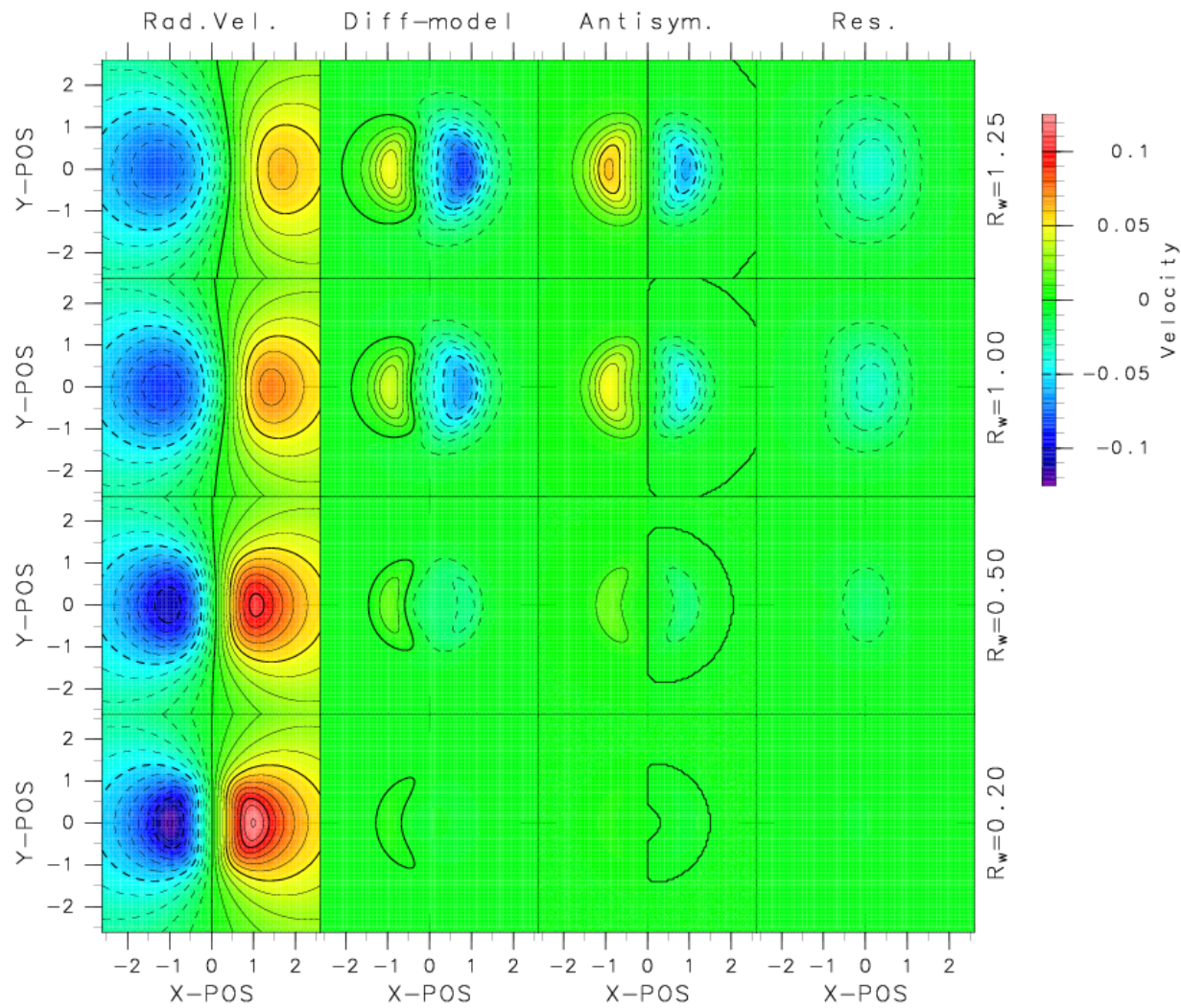
視線流速場 ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg.}$, $K_B=(0, 1)$)



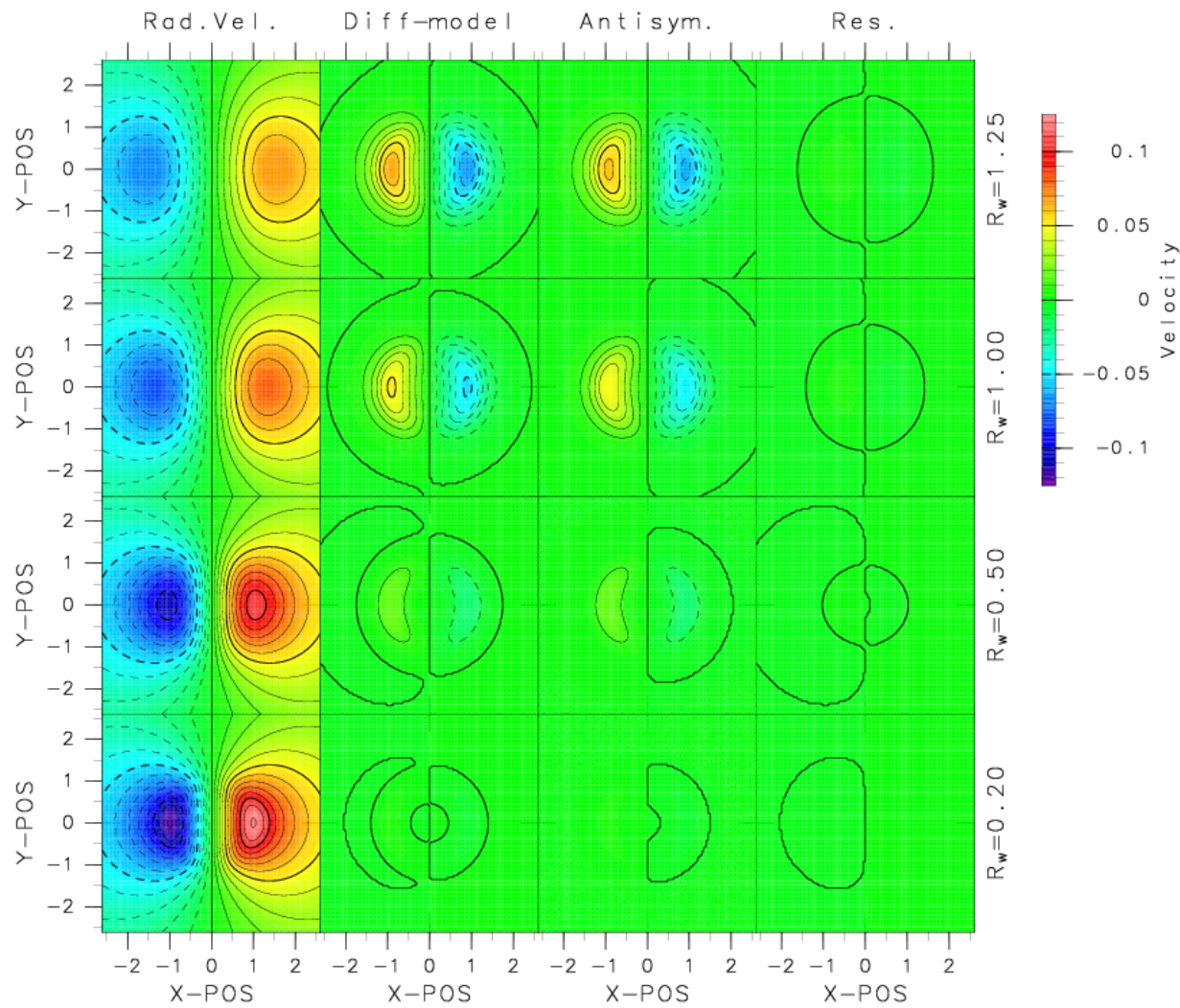
流速ベクトル場 ($V_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg.}$, $(K_{Bx}, K_{By})=((1, 0), (0, 1))$ and Uniform NRCS)



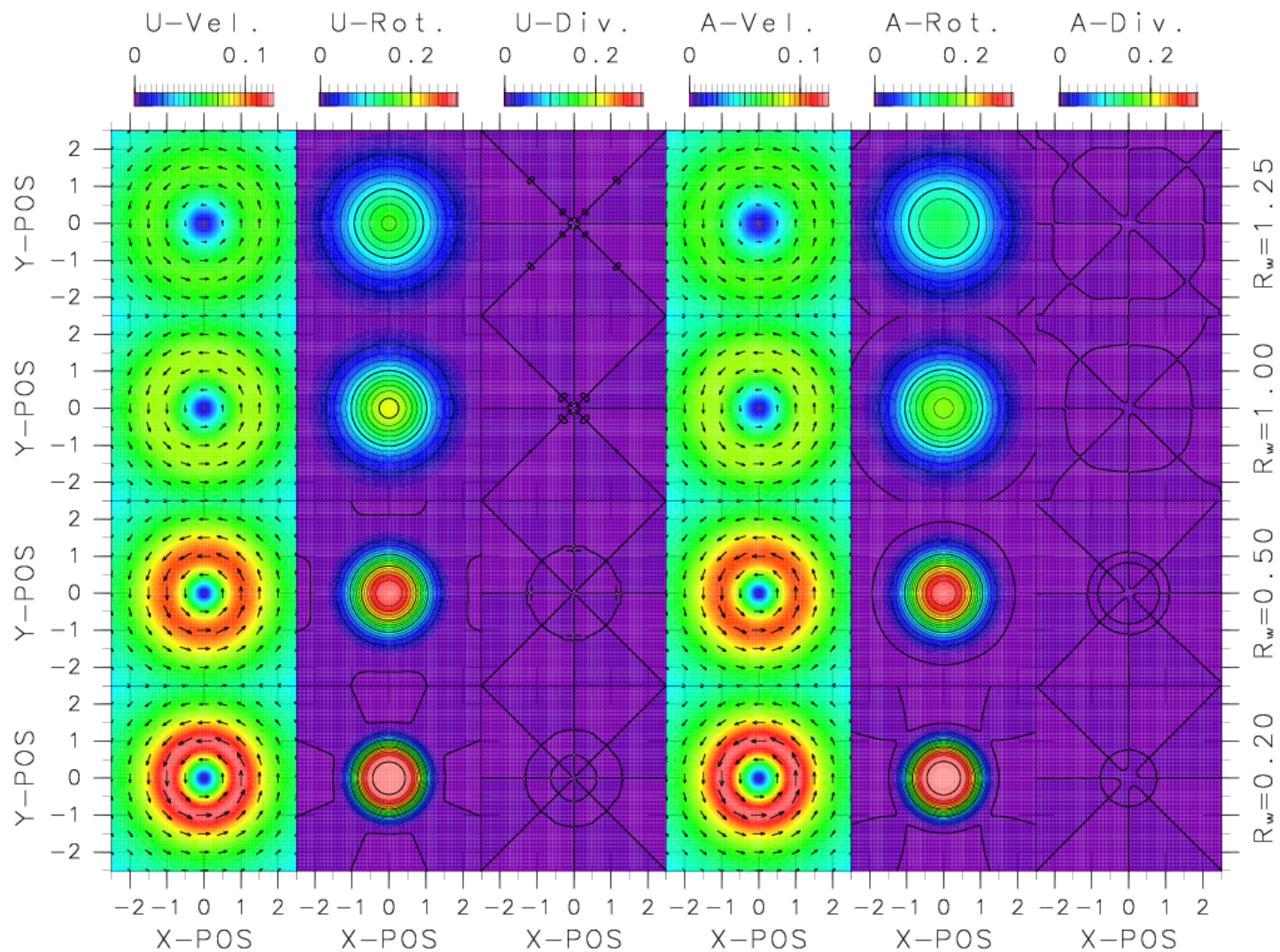
視線流速場 ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg.}$, $K_B=(0, 1)$)



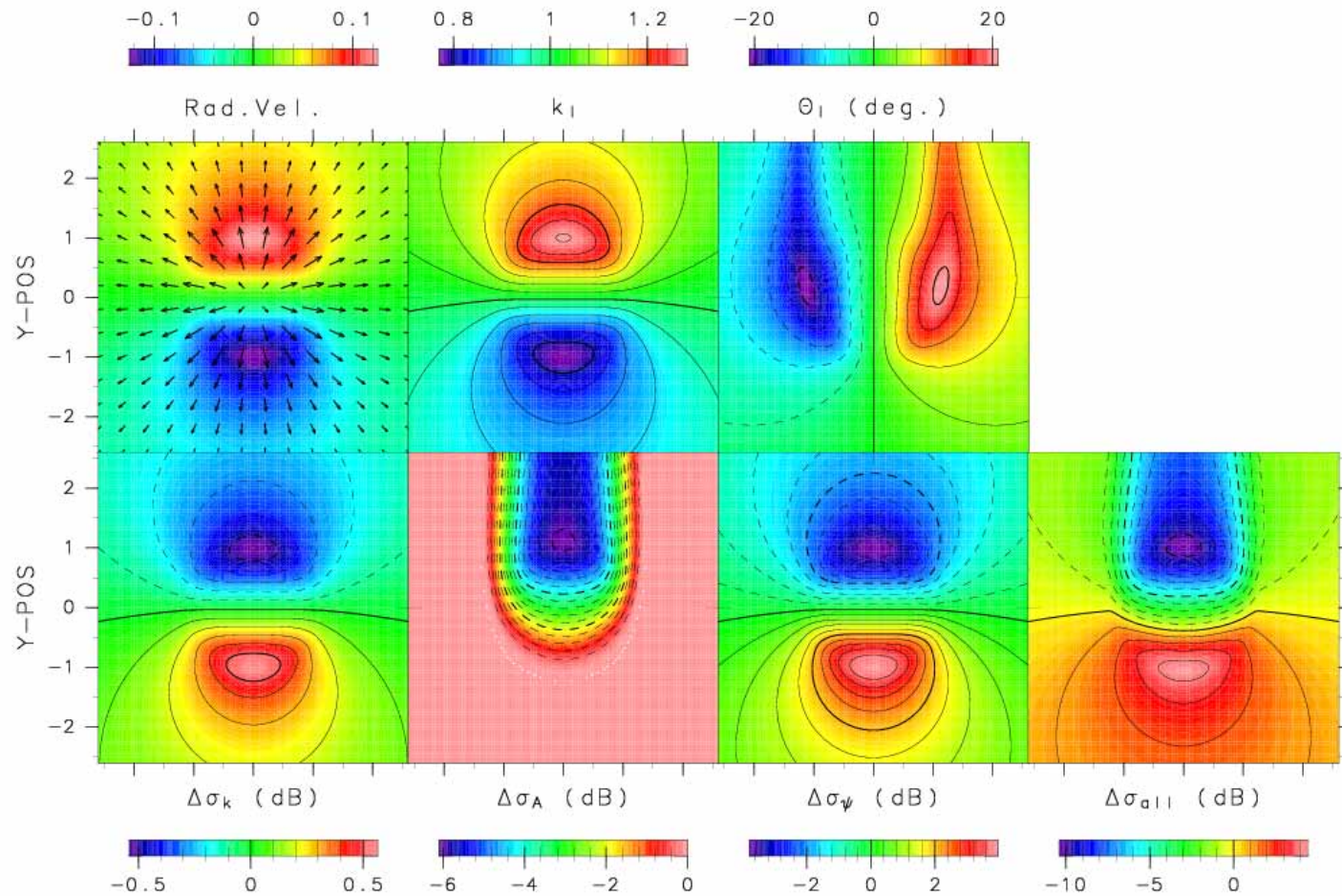
視線流速場 ($V_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg.}$, $K_B=(0, \pm 1)$)



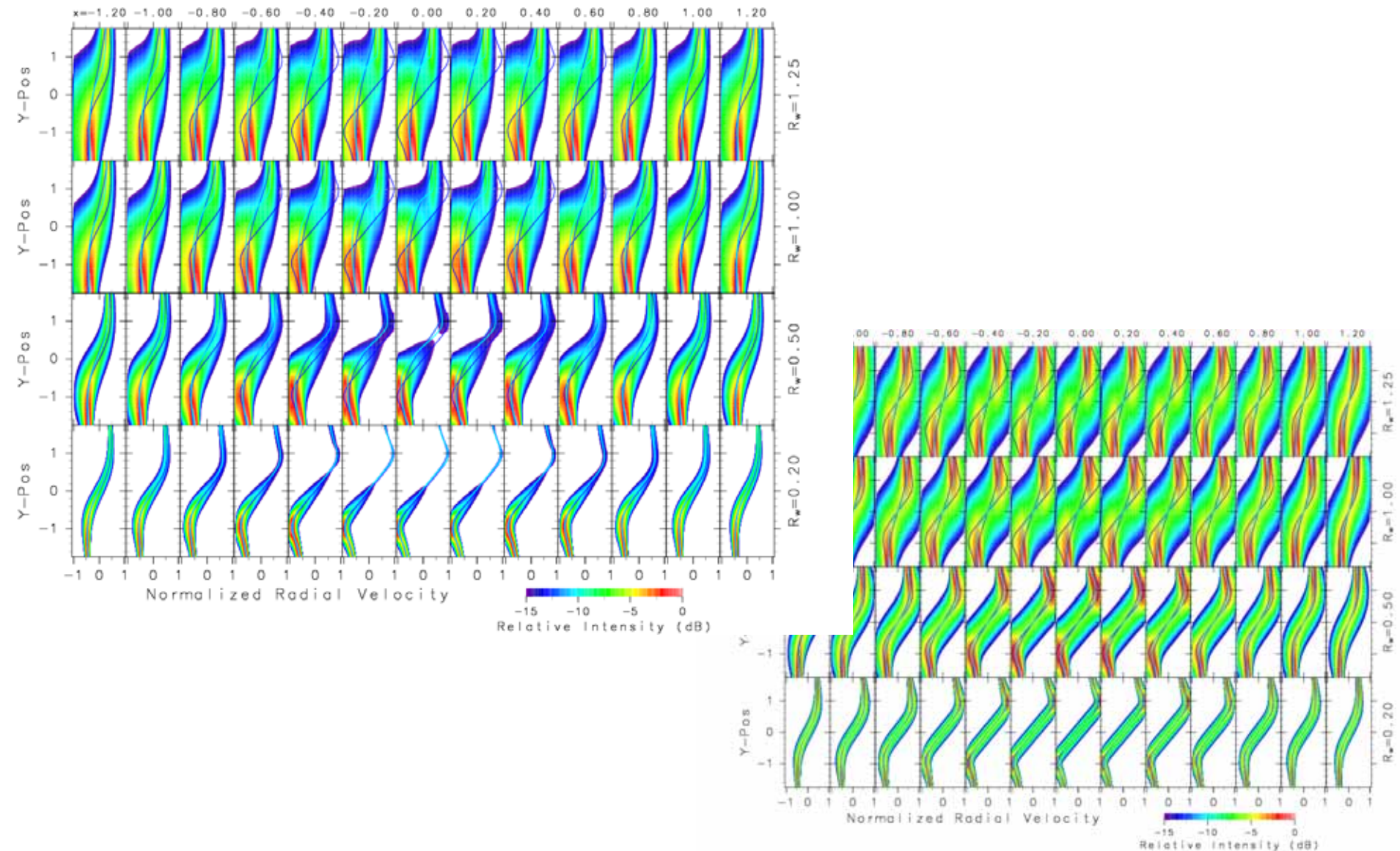
流速ベクトル場 ($V_0=0.125$, $\phi=90\text{deg.}$, Uniform NRCS and $(K_{Bx}, K_{By})=((\pm 1, 0), (0, \pm 1))$)



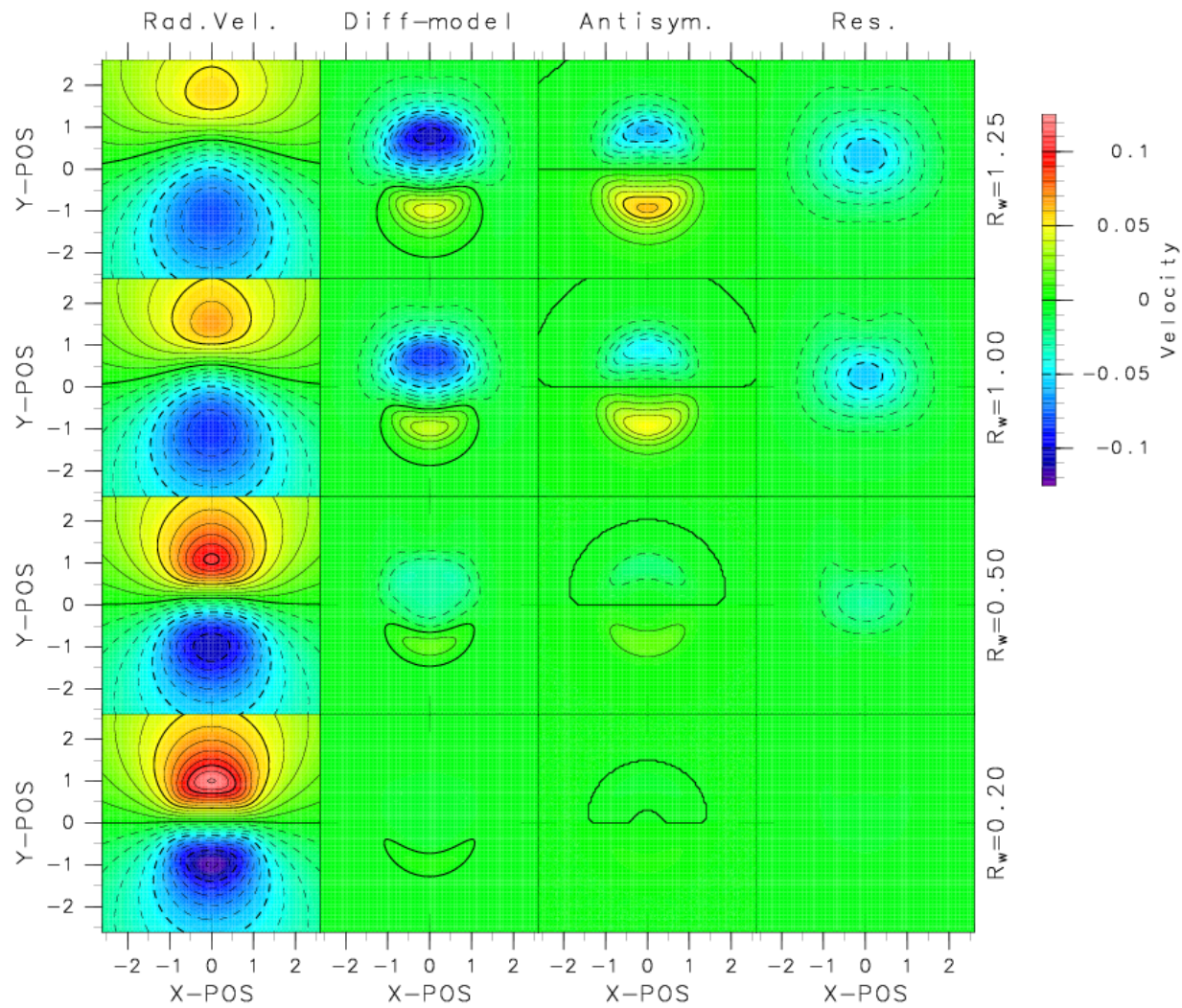
レーダ散乱断面積(NRCS)分布 ($V_0=0.125$, $\varphi=0\text{deg.}$, $K_B=(0, 1)$)



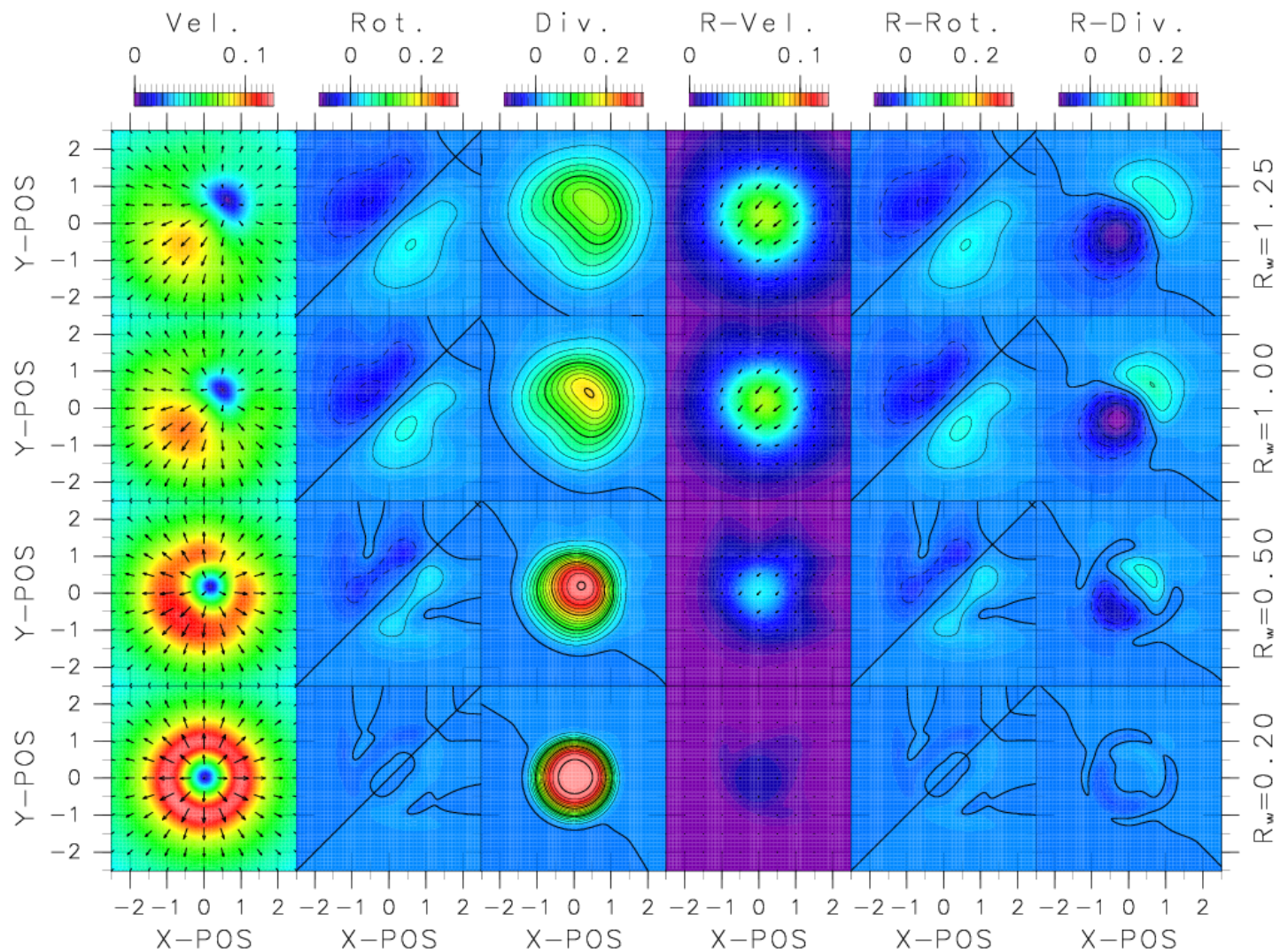
Dopplerスペクトル ($v_0=0.125$, $\phi=0\text{deg.}$, $K_B=(0, 1)$ and Uniform NRCS)



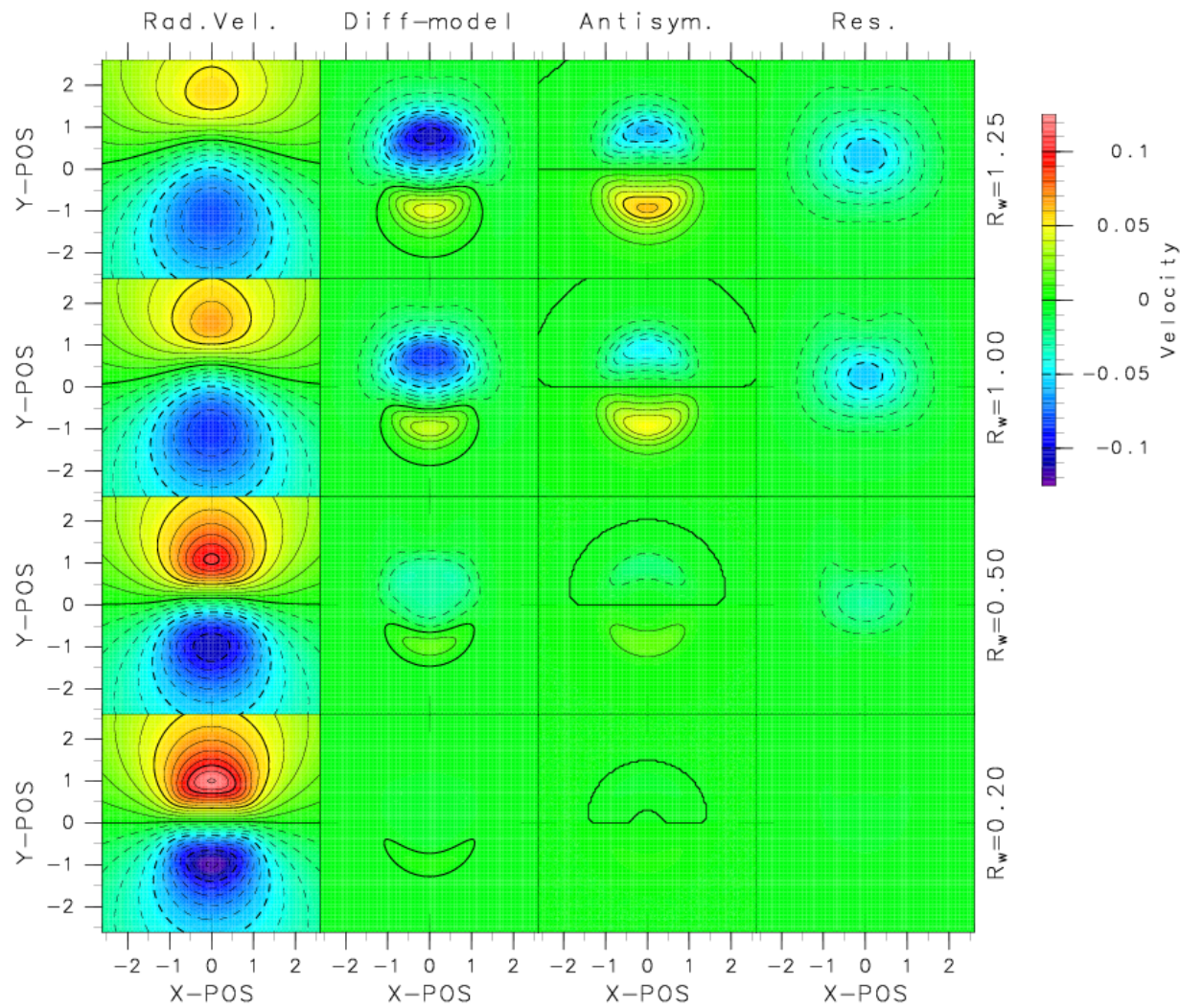
視線流速場 ($V_0=0.125$, $\varphi=0\text{deg.}$, $K_B=(0, 1)$)



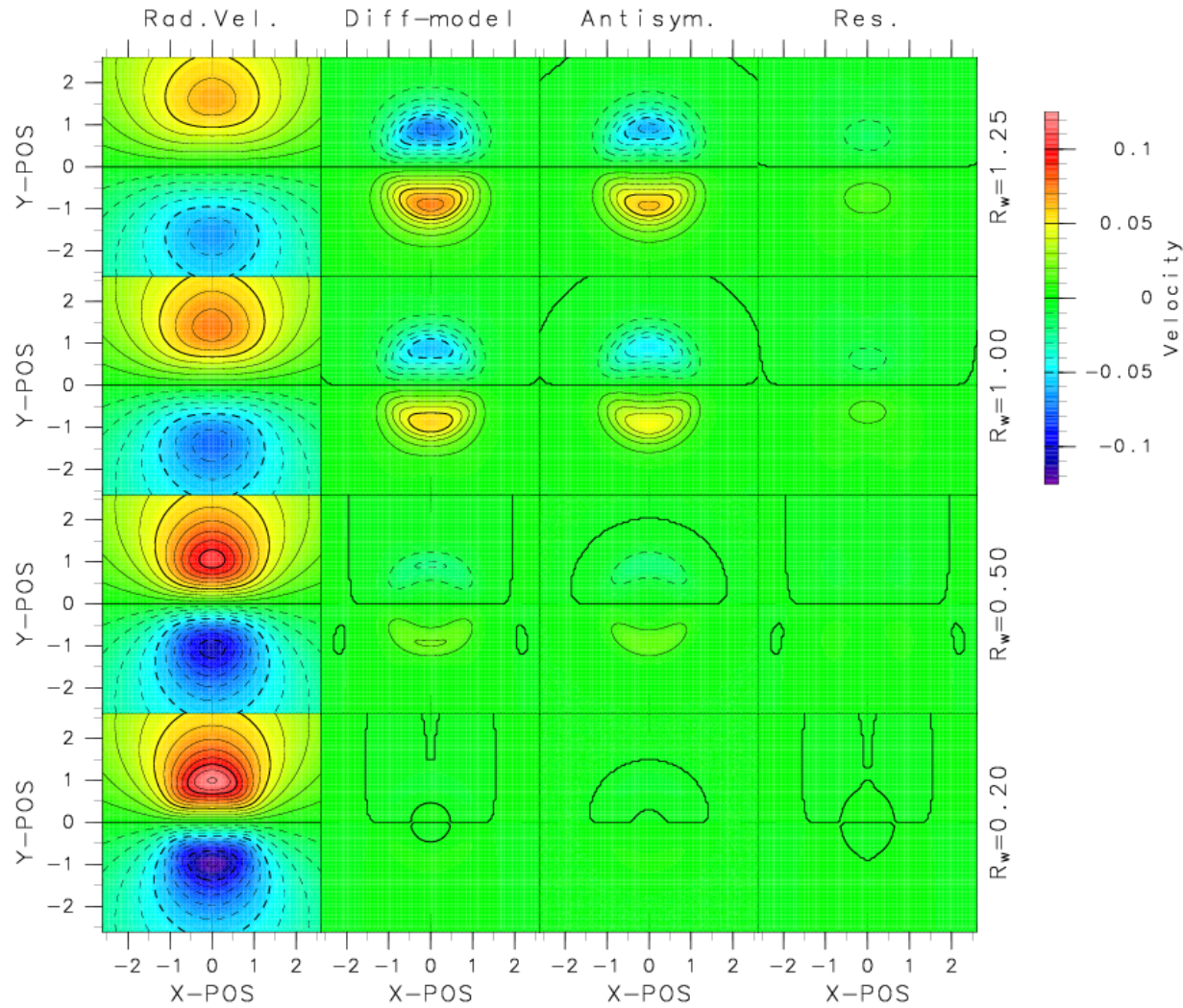
流速ベクトル場 ($V_0=0.125$, $\varphi=90\text{deg.}$, $(K_{Bx}, K_{By})=((1, 0), (0, 1))$ and Uniform NRCS)



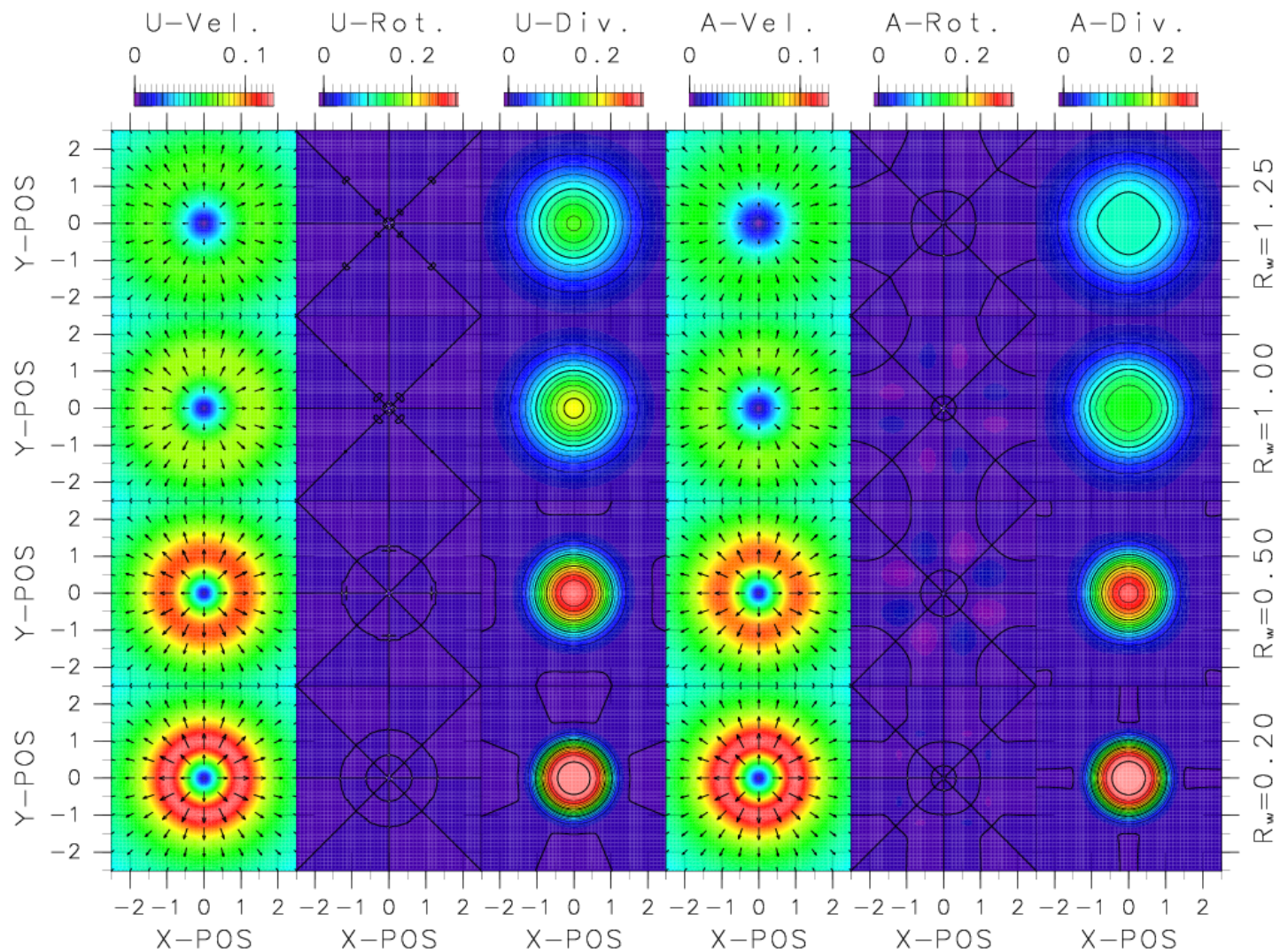
視線流速場 ($V_0=0.125$, $\varphi=0\text{deg.}$, $K_B=(0, 1)$)



視線流速場 ($V_0=0.125$, $\phi=0\text{deg.}$, $K_B=(0, \pm 1)$)



流速ベクトル場 ($V_0=0.125$, $\phi=0\text{deg.}$, Uniform NRCS and $(K_{Bx}, K_{By})=((\pm 1, 0), (0, \pm 1))$)



まとめ

A. 視線流速誤差の成因

1. レーダ散乱断面積の空間的不均一

- ・Wave-Current Interactionによる波浪スペクトル密度の局所的変化から発生
- ・一次散乱エコーに寄与する海洋波成分の伝搬方向と逆の方向成分を持つ流速誤差を生成
- ・流速誤差分布は流速現象存在域とほぼ一致

視線流速場の歪み(変形)

2. レーダ感度分布

- ・レーダ感度分布内で流速平均化
- ・海洋波の伝搬方向とは無関係

視線流速場の平均化

B. 2つの視線流速の平均操作

- ・2つの一次散乱エコーは寄与する海洋波の伝播方向が逆
- ・レーダ散乱断面積の空間不均一性による視線流速場の変形を軽減
- ・レーダ感度分布による視線流速場の平均化には効果なし

レーダ散乱断面積の空間的不均一に起因する、視線流速場の歪みを軽減

- 計測誤差の軽減度は流速場に依存

レーダ感度分布による視線流速場の平均化には効果なし