

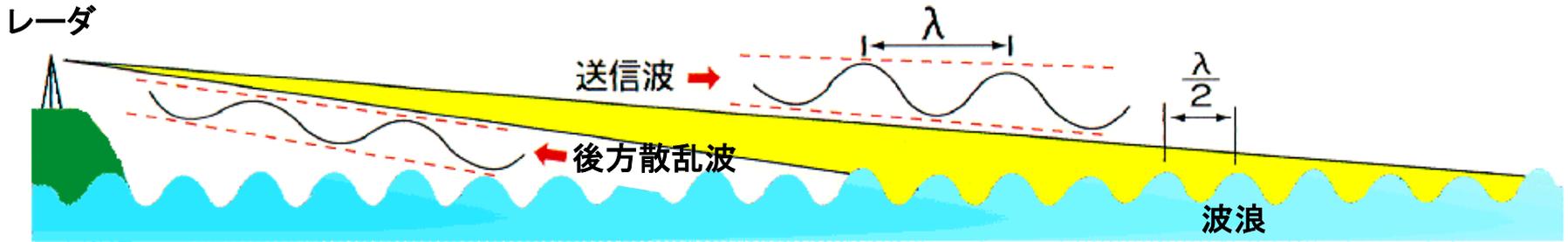
# バイスタティック短波海洋レーダにおける 流速ベクトルの計測誤差

---

佐藤健治、松岡建志、児島正一郎、藤井智史  
独立行政法人 通信総合研究所  
沖縄亜熱帯計測技術センター



# 短波海洋レーダ



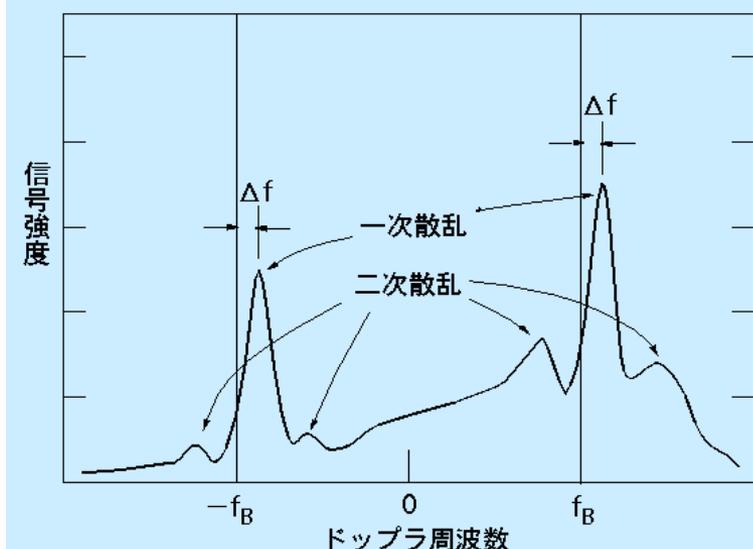
短波帯の波長 $\lambda$ の電波を海面に照射  
 ↓  
 波長 $\lambda/2$ の波浪によるブラッグ散乱により強い後方散乱波が生じる  
 ↓  
 後方散乱波を周波数解析することにより  
海流、波浪、海上風向等を求める

## 特徴

- ・ **広範囲**をほぼ**同時刻**に観測可能
- ・ **長時間**の連続観測が可能

## 問題点

- ・ 多数のレーダによる同一周波数帯の共用  
 → レーダ間の**相互干渉**
- ・ アンテナ開口長 数十～数百m  
 → **用地確保が困難**



$$f_B = \sqrt{\frac{g}{\pi\lambda}} \quad : \text{ブラッグ周波数}$$

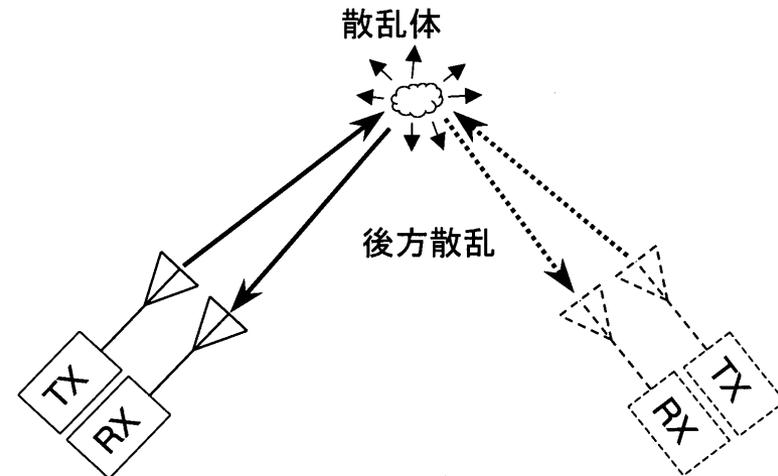
一次散乱エコー → 海流速、海上風向  
 二次散乱エコー → 波浪



# モノスタティックレーダとバイスタティックレーダ

**モノスタティック** = 送受信の位置が同一  
後方散乱を受信

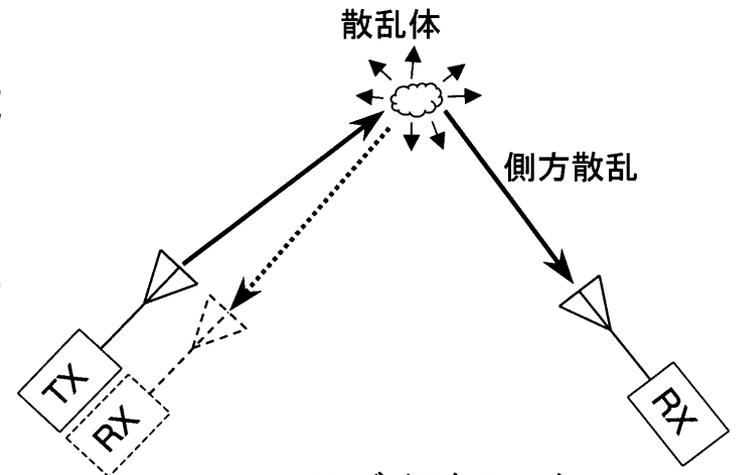
- ・ 通常的方式
- ・ 1 送信機に対し 1 受信機
- ・ 狭ビーム



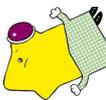
(a) モノスタティック

**バイスタティック** = 送受信の位置が異なる  
側方散乱を受信

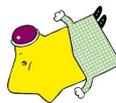
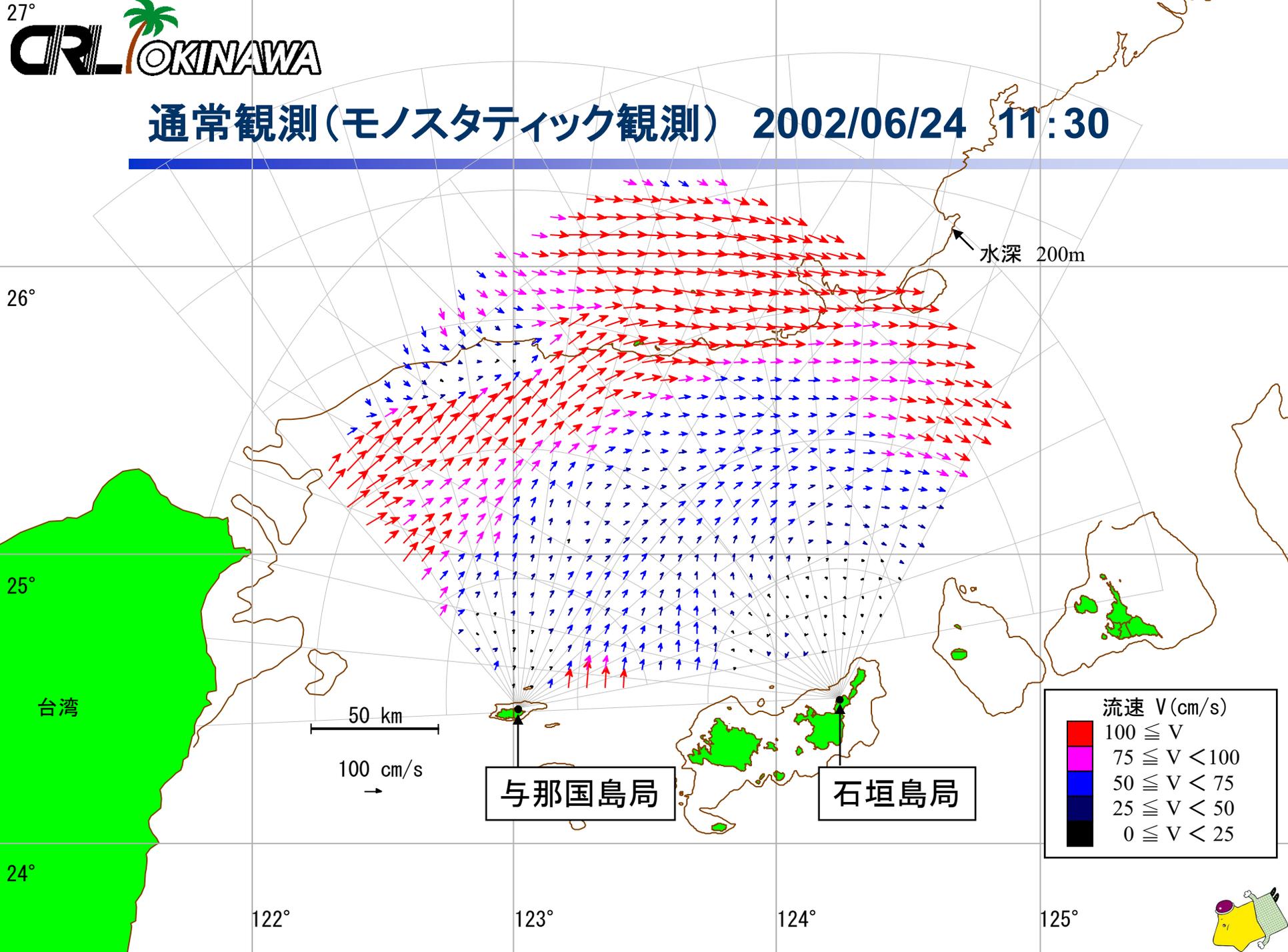
- ・ 1 送信機に対し複数の受信機を展開可能  
→ 少数の送信機でOK  
周波数資源の有効利用、コスト削減
- ・ 送信or受信の一方は狭ビーム化の必要無  
→ アンテナの小型化が可能
- ・ 時刻&周波数同期機能が必要
- ・ ドップラー速度の計測精度はやや劣化



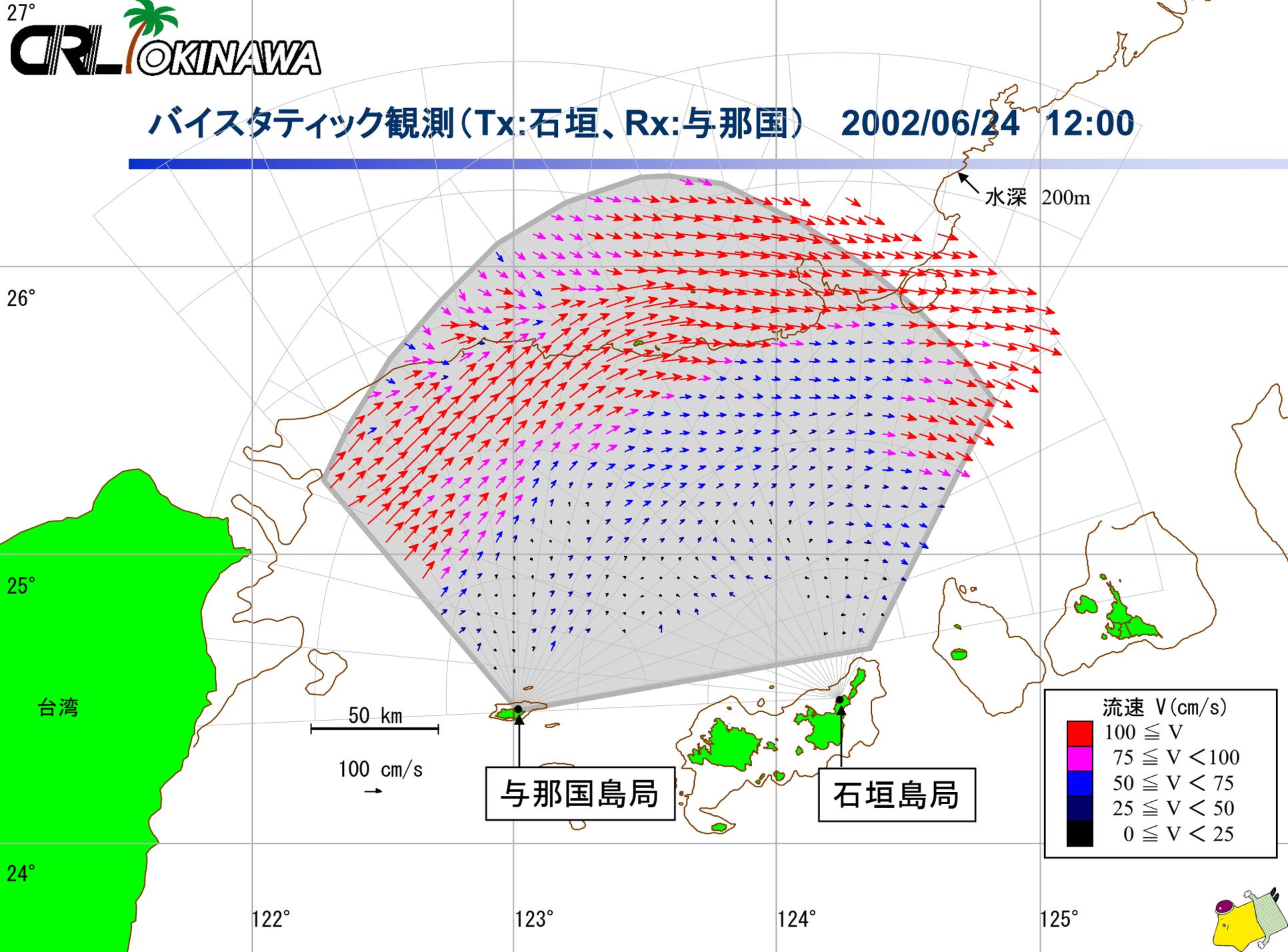
(b) バイスタティック



# 通常観測 (モノスタティック観測) 2002/06/24 11:30



# バイスタティック観測 (Tx:石垣、Rx:与那国) 2002/06/24 12:00



水深 200m

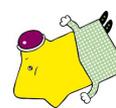
台湾

50 km  
100 cm/s  
→

与那国島局

石垣島局

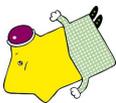
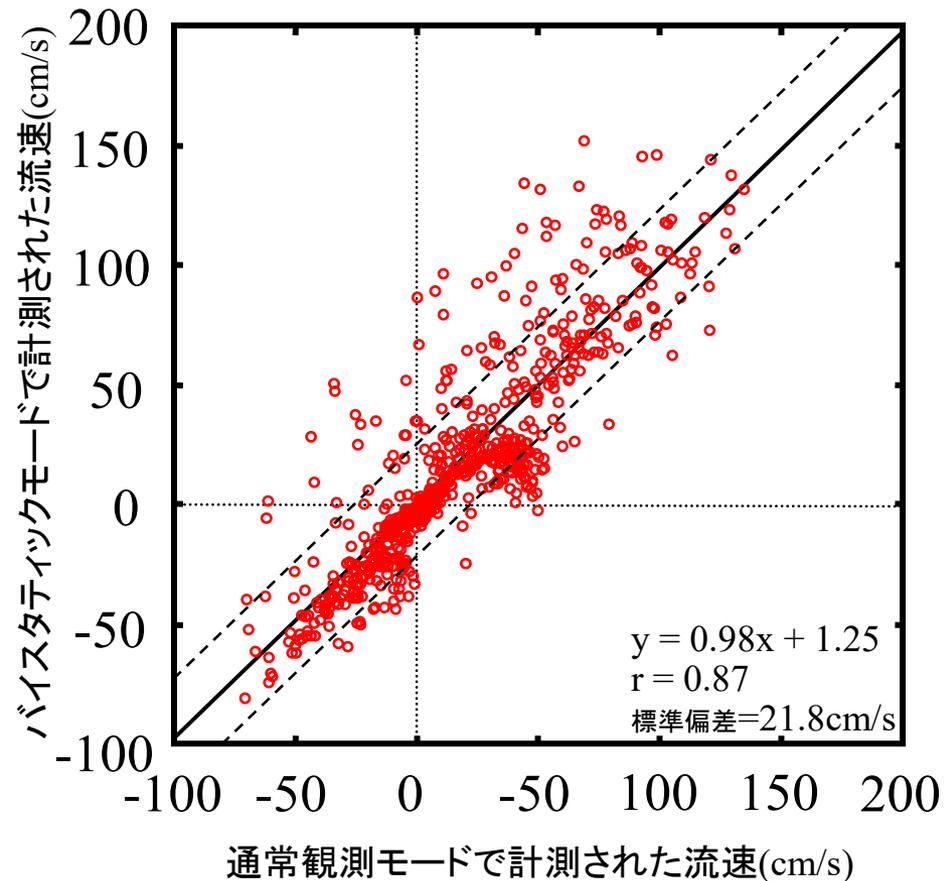
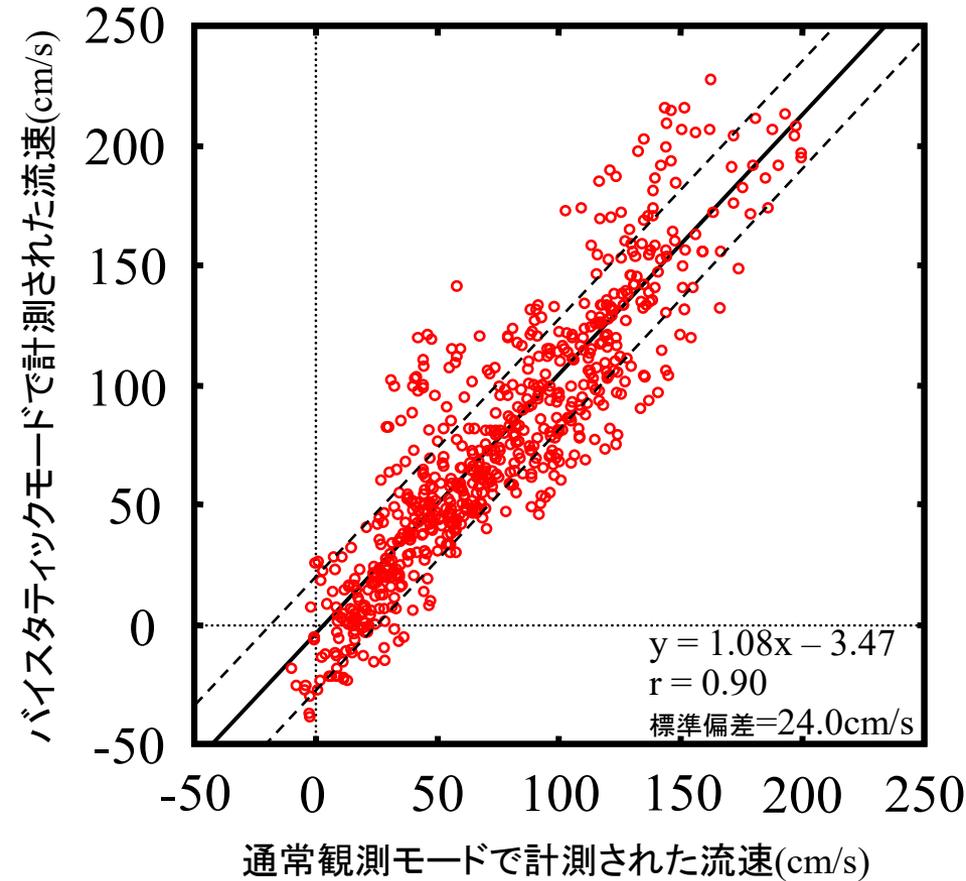
流速 $V$ (cm/s)	
Red	$100 \leq V$
Magenta	$75 \leq V < 100$
Blue	$50 \leq V < 75$
Dark Blue	$25 \leq V < 50$
Black	$0 \leq V < 25$



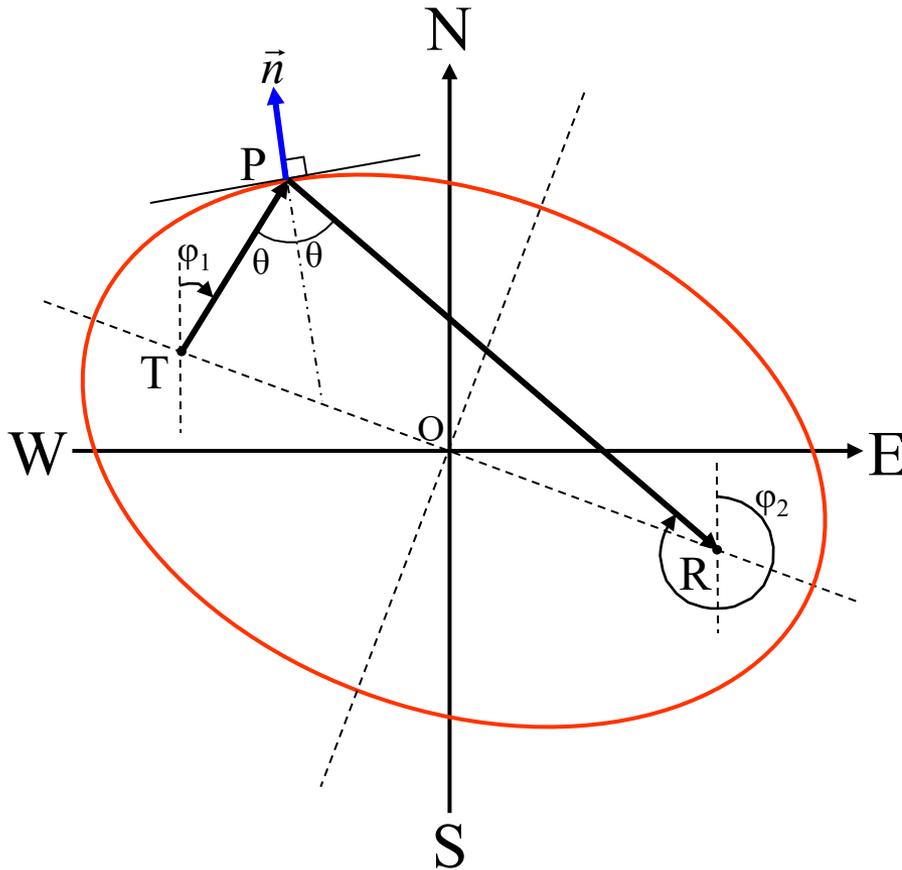
# 通常観測とバイスタティック観測の流速値の比較

E-W成分

N-S成分



# バイスタティックレーダ観測の基礎知識



T:送信点, R:受信点, P:散乱点

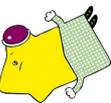
点Tから照射された電波が点Pで一度だけ散乱された後、点Rで受信



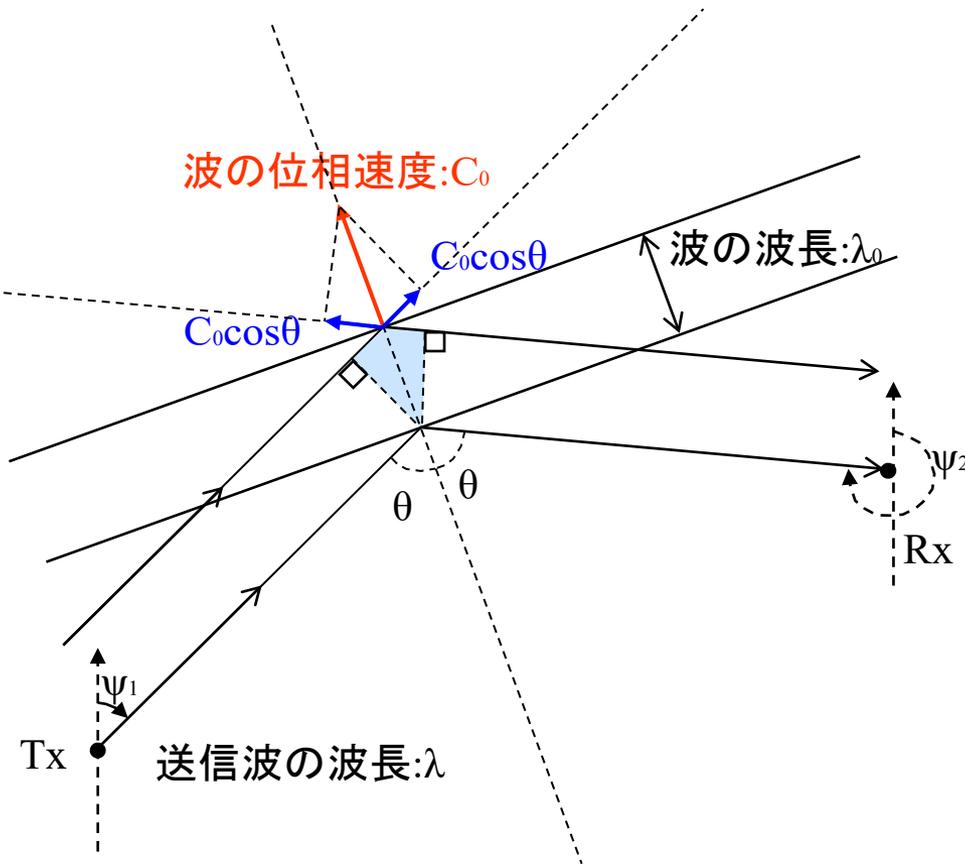
○同時刻に点Rで受信されるエコーに対する点Pの軌跡は 点Tと点Rを焦点とする楕円

○点Rで計測されるドップラー速度ベクトルの向きは、点Pにおける楕円の法線ベクトル  $\vec{n}$  に等しい

○ドップラー速度ベクトルの大きさは  $\vec{n}$  の方向における速度成分の  $\cos \theta$  倍



# バイスタティック観測時のブラッグ散乱



## ブラッグ散乱の条件式

$$2\lambda_0 \cdot \cos \theta = \lambda \quad \left( \text{c.f. } 2\lambda_0 = \lambda \text{ for Monostatic} \right)$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{2 \cos \theta}$$

## ブラッグ散乱に寄与する波浪の位相速度

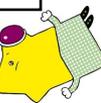
$$C_0 = \sqrt{\frac{g\lambda_0}{2\pi}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{4\pi \cos \theta}}$$

## ブラッグ周波数

$$f_B = \pm \frac{2C_0 \cos \theta}{\lambda} = \pm \sqrt{\frac{g \cos \theta}{\pi \lambda}}$$

ブラッグ周波数が入射角 $\theta$ に依存する  
 → 観測レンジ毎にブラッグ周波数が異なる

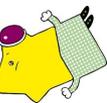
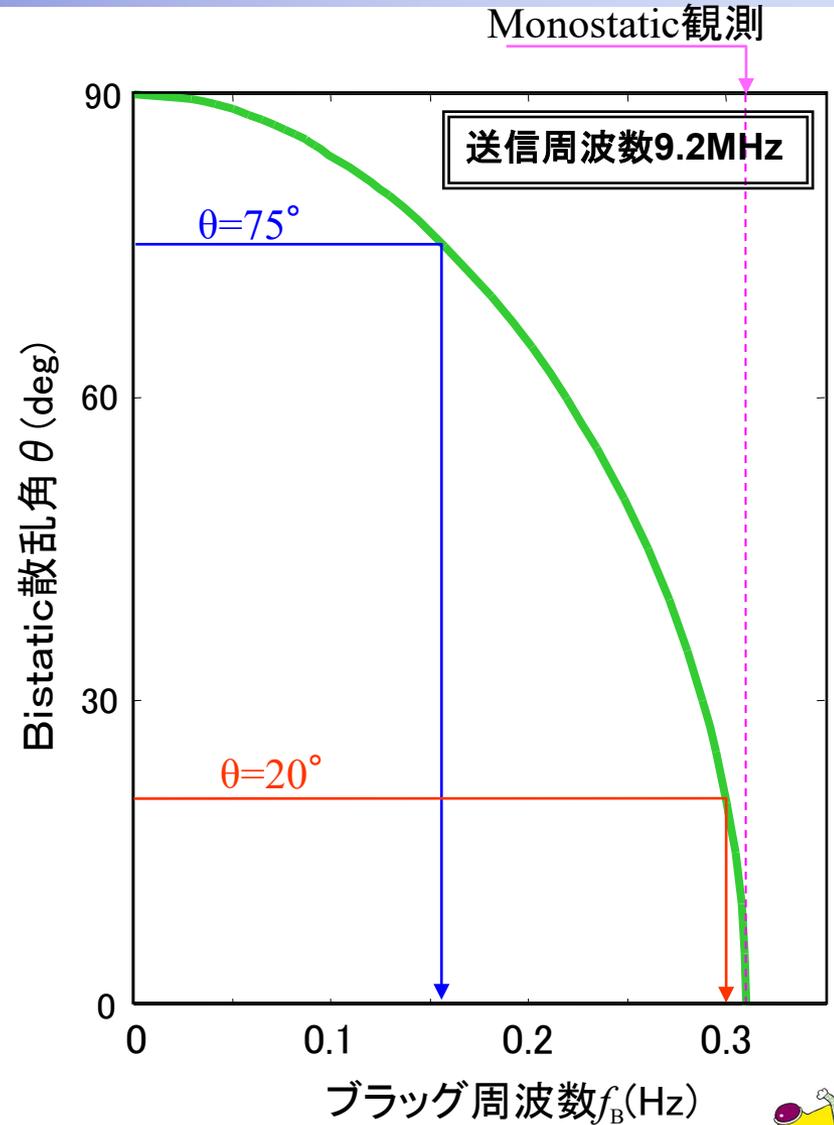
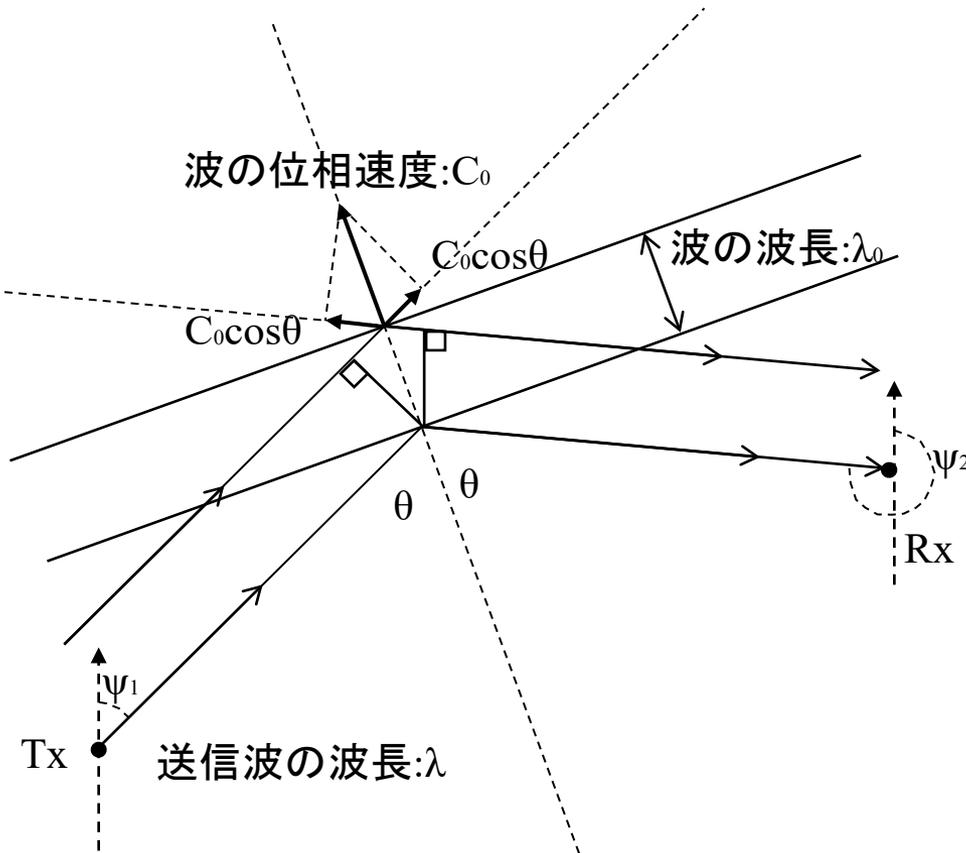
(c.f. レンジに依らず一定 for Monostatic)



# ブラッグ周波数の入射角依存性

ブラッグ周波数

$$f_B = \pm \frac{2C_0 \cos \theta}{\lambda} = \pm \sqrt{\frac{g \cos \theta}{\pi \lambda}}$$

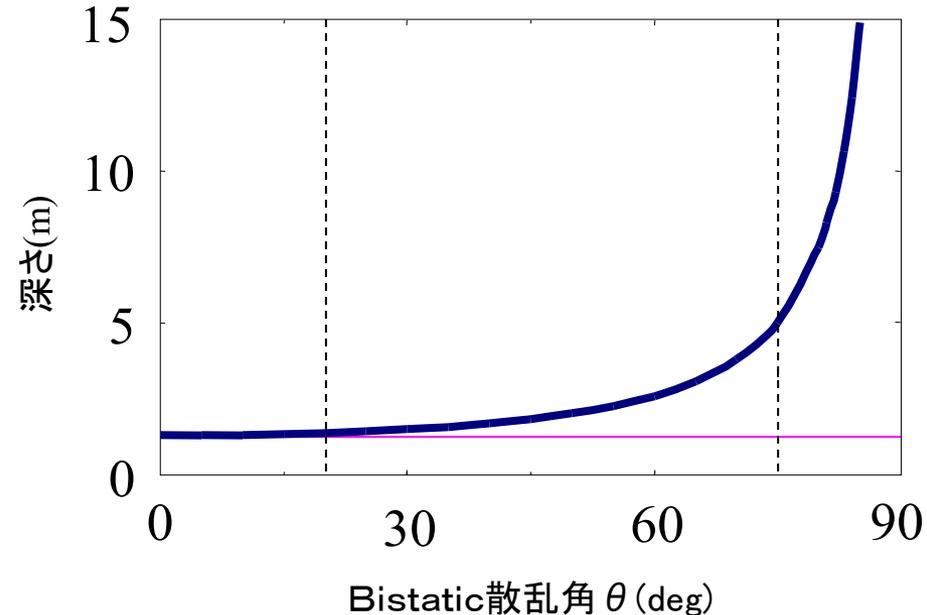
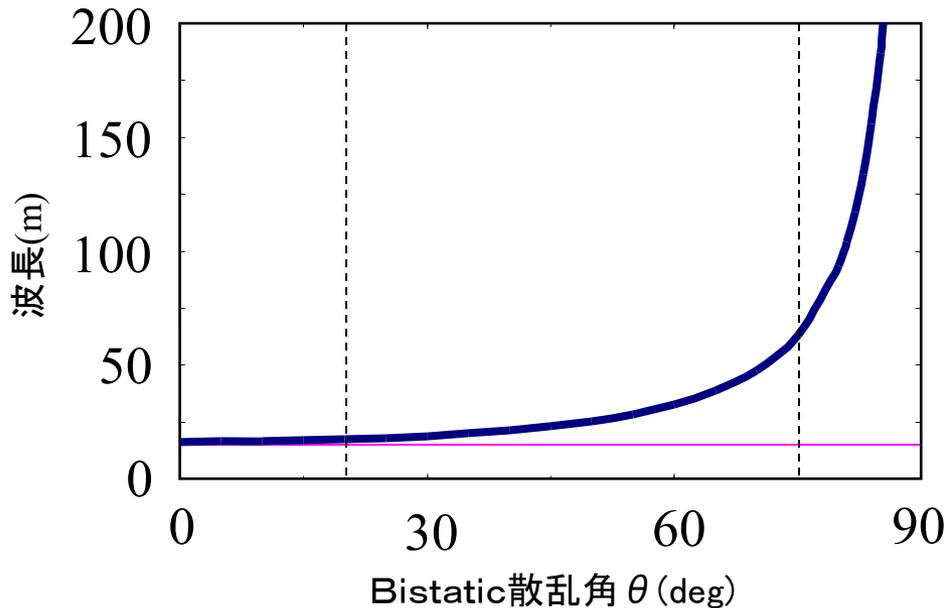


# ブラッグ散乱に寄与する波の波長と計測深度

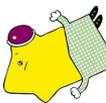
$\lambda$  : 送信波の波長、  $\lambda_0$  : 海洋波の波長  
 $\theta$  : Bistatic散乱角

Bragg散乱に寄与する波の波長  $\lambda_0 = \frac{\lambda}{2 \cos \theta}$

計測深度  $\frac{\lambda}{8\pi \cos \theta}$



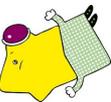
送信周波数9.2MHz



## モノスタティック観測とバイスタティック観測の比較

	モノスタティック観測	バイスタティック観測
ブラッグ散乱の条件式	$2\lambda_0 = \lambda$	$2\lambda_0 \cdot \cos \theta = \lambda$
測定深度	$\frac{\lambda_0}{4\pi} = \frac{\lambda}{8\pi}$	$\frac{\lambda_0}{4\pi} = \frac{\lambda}{8\pi \cos \theta}$
ブラッグ散乱に寄与する波浪の位相速度	$C_0 = \sqrt{\frac{g\lambda_0}{2\pi}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{4\pi}}$	$C_0 = \sqrt{\frac{g\lambda_0}{2\pi}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{4\pi \cos \theta}}$
ブラッグ周波数	$f_B = \pm \frac{2C_0}{\lambda} = \pm \sqrt{\frac{g}{\pi\lambda}}$	$f_B = \pm \frac{2C_0 \cos \theta}{\lambda} = \pm \sqrt{\frac{g \cos \theta}{\pi\lambda}}$
視線方向の速度分解能	$\Delta V$	$\frac{\Delta V}{\cos \theta}$

$\lambda$  : 送信波の波長、  $\lambda_0$  : 海洋波の波長  
 $g$  : 重力加速度、  $\theta$  : Bistatic散乱角



## バイスタティック観測における流速ベクトルの算出

レーダ#1を主局、レーダ#2をバイスタティック受信局とする。

求める流速ベクトルを  $\vec{V} = (u, v)$ 、レーダ # $i$  のビーム方位を  $\vec{e}_i = (\sin \phi_i, \cos \phi_i)$ 、

レーダ # $i$  で計測される海流  $\vec{V}$  に起因するドップラー速度を  $V_i$  とすると、このシステムで

計測できる2つの流速ベクトル成分  $\vec{V}_m$ 、 $\vec{V}_b$  は

$$\vec{V}_m = V_1 \vec{e}_1 \quad \vec{V}_b = \left| \frac{V_2}{\cos[(\phi_1 - \phi_2)/2]} \right| \vec{e}_b$$

と表せる。ただし、 $\vec{e}_b = (\sin[(\phi_1 + \phi_2)/2], \cos[(\phi_1 + \phi_2)/2])$  である。また、

$$|\vec{V}_m| = \vec{V} \cdot \vec{e}_1 = u \cdot \sin \phi_1 + v \cdot \cos \phi_1$$

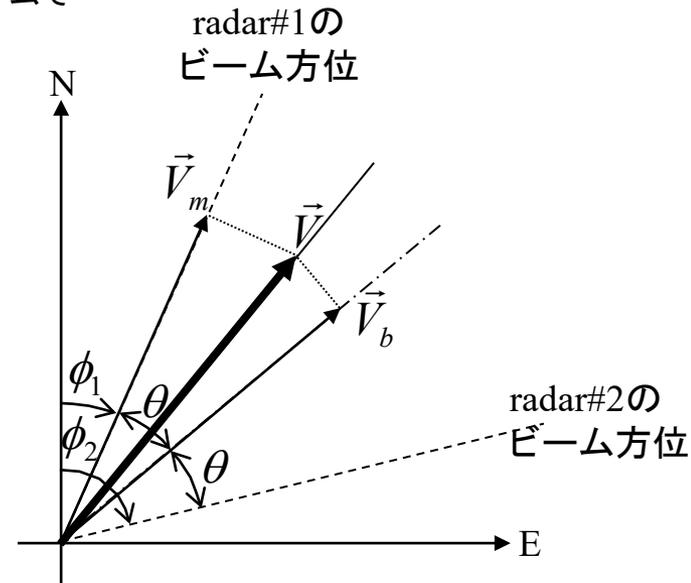
$$|\vec{V}_b| = \vec{V} \cdot \vec{e}_b = u \cdot \sin[(\phi_1 + \phi_2)/2] + v \cdot \cos[(\phi_1 + \phi_2)/2]$$

であるから、 $u, v$  と  $V_1, V_2$  の間には以下の関係が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2 \sin \phi_1 & 2 \cos \phi_1 \\ \sin \phi_1 + \sin \phi_2 & \cos \phi_1 + \cos \phi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$$

従って、

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin(\phi_1 - \phi_2)} \begin{pmatrix} \cos \phi_1 + \cos \phi_2 & -2 \cos \phi_1 \\ -\sin \phi_1 - \sin \phi_2 & 2 \sin \phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$



## 流速ベクトル計測における誤差ベクトルの確率密度関数

真の流速ベクトル  $\vec{V}_{true}$  と観測される流速ベクトル  $\vec{V}_{obs}$  との差である誤差ベクトルを  $\vec{V}_{err} = (u_e, v_e)$  とする。  
 $V_1, V_2$  の計測誤差  $V_{err1}, V_{err2}$  を用いて  $\vec{V}_{err}$  を表すと

$$\begin{pmatrix} u_e \\ v_e \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin(\phi_1 - \phi_2)} \begin{pmatrix} \cos \phi_1 + \cos \phi_2 & -2 \cos \phi_1 \\ -\sin \phi_1 - \sin \phi_2 & 2 \sin \phi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{err1} \\ V_{err2} \end{pmatrix}$$

各レーダの測定誤差  $V_{errN}$  ( $N=1,2$ ) は独立で、ともに平均値0、分散  $\sigma$  の正規分布に従うと仮定すると、

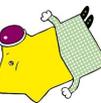
流速ベクトルの誤差ベクトル  $\vec{V}_{err}$  の確率密度関数  $P_V(V_{err})$  は

$$P_V(V_{err}) = \frac{|\sin(\phi_1 - \phi_2)|}{4\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{8\sigma^2} \{u_e^2 (5 \sin^2 \phi_1 + 2 \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \sin^2 \phi_2) + v_e^2 (5 \cos^2 \phi_1 + 2 \cos \phi_1 \cos \phi_2 + \cos^2 \phi_2) + 2u_e v_e (5 \sin \phi_1 \cos \phi_1 + \sin \phi_1 \cos \phi_2 + \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \sin \phi_2 \cos \phi_2)\}\right]$$

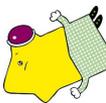
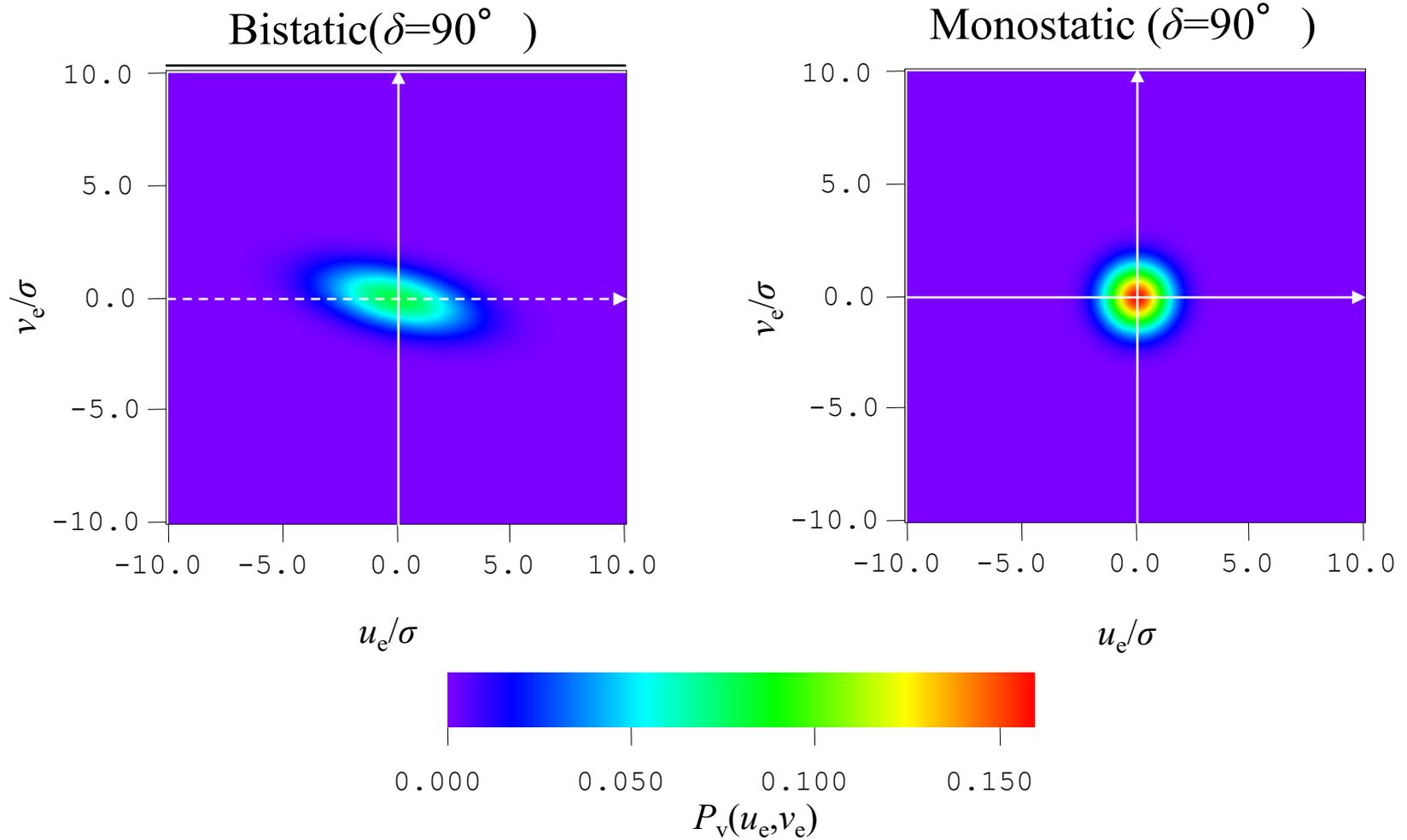
確率密度  $p$  の等値線は、

$$\begin{aligned} & u_e^2 (5 \sin^2 \phi_1 + 2 \sin \phi_1 \sin \phi_2 + \sin^2 \phi_2) + v_e^2 (5 \cos^2 \phi_1 + 2 \cos \phi_1 \cos \phi_2 + \cos^2 \phi_2) \\ & + 2u_e v_e (5 \sin \phi_1 \cos \phi_1 + \sin \phi_1 \cos \phi_2 + \cos \phi_1 \sin \phi_2 + \sin \phi_2 \cos \phi_2) \\ & = -8\sigma^2 \log\left(\frac{4\pi\sigma^2}{|\sin(\phi_1 - \phi_2)|} p\right) \end{aligned}$$

これは  $\phi_1 - \phi_2 = n\pi$  ( $n$  は整数) の時に平行な2直線、それ以外の場合は楕円である。



# 確率密度関数

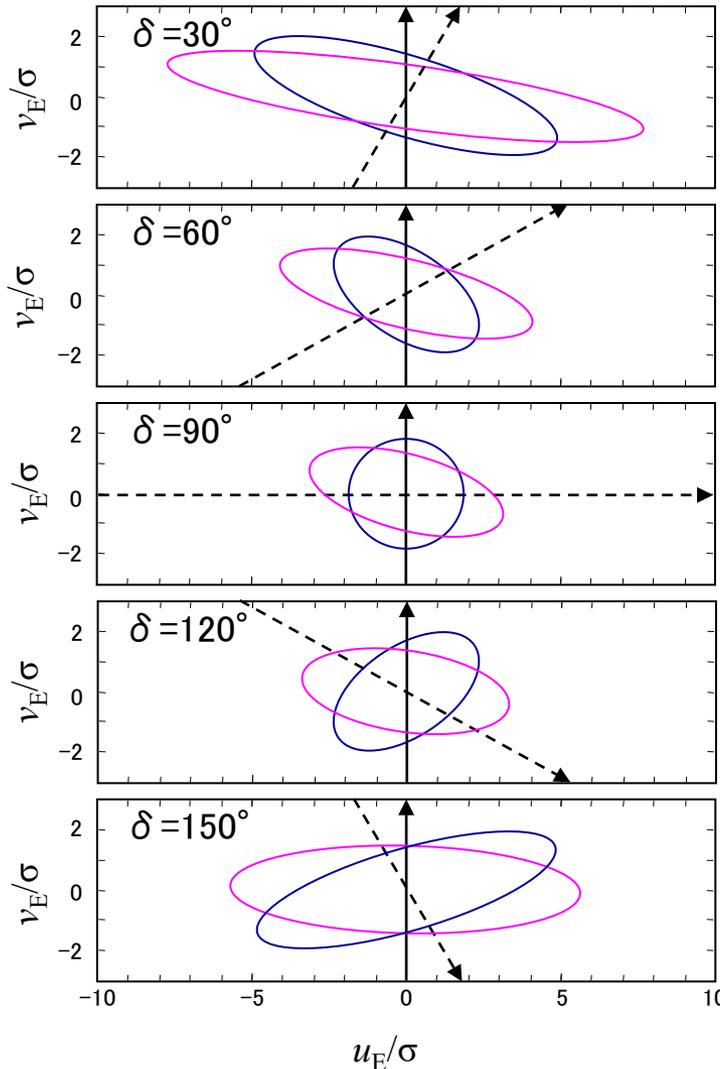


# 確率密度関数 $P_v(V_{err})$ の確率密度 $p_0 = \frac{|\sin \delta|}{4\pi\sigma^2 \cdot e}$ における等値線

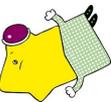
誤差ベクトル  $V_{err} = (u_E, v_E)$  の確率密度

$$P_v(V_{err}) = \frac{|\sin \delta|}{4\pi\sigma^2 \cdot e}$$

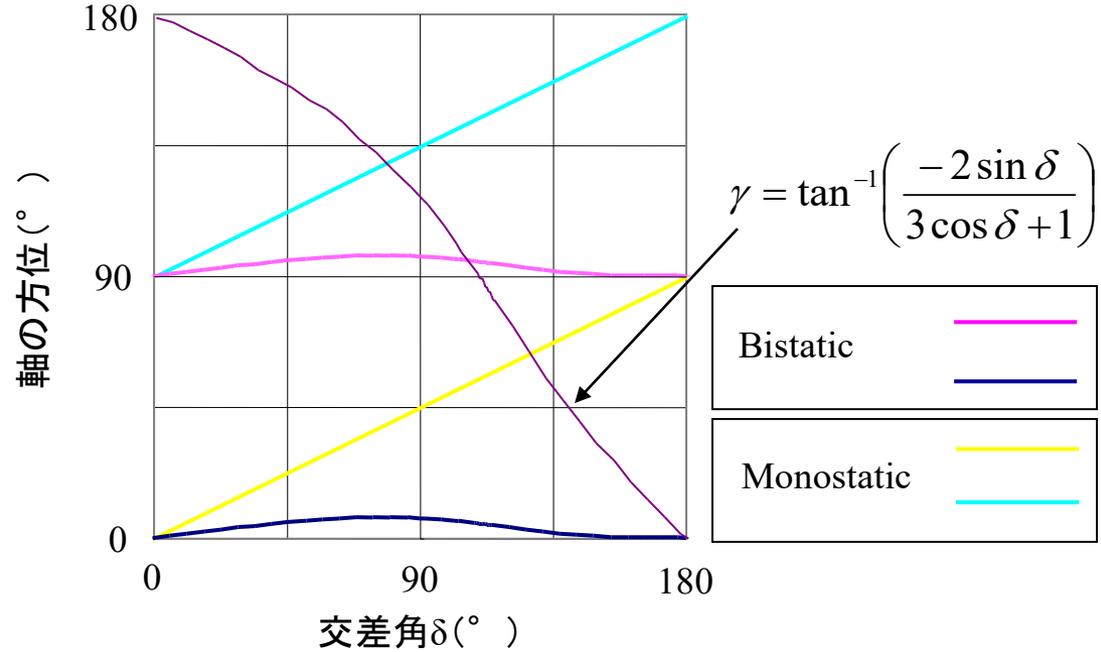
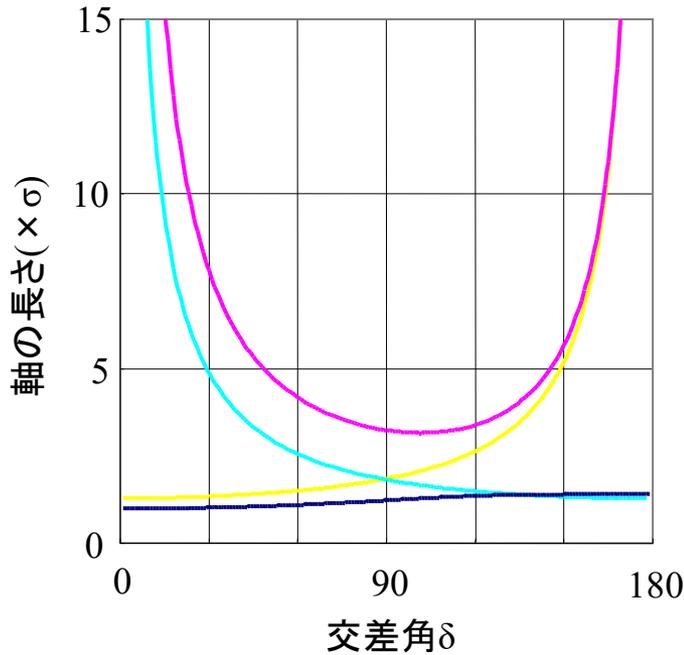
の軌跡、ただし  $\delta = \varphi_1 - \varphi_2$



- Bistatic
  - #1: Monostatic
  - #2: Bistatic
- Monostatic
  - #1: Monostatic
  - #2: Monostatic
- ← Radar #1 のビーム方位
- ←--- Radar #2 のビーム方位



# 確率密度 $p_0 = \frac{|\sin \delta|}{4\pi\sigma^2 \cdot e}$ の等値線(楕円)における軸長と軸方位



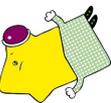
$$\text{長軸} = \sqrt{\frac{-8\sigma^2 \log\{4\pi\sigma^2 p / |\sin \delta|\}}{3 + \cos \delta - \sqrt{5 \cos^2 \delta + 6 \cos \delta + 5}}}$$

$$\text{短軸} = \sqrt{\frac{-8\sigma^2 \log\{4\pi\sigma^2 p / |\sin \delta|\}}{3 + \cos \delta + \sqrt{5 \cos^2 \delta + 6 \cos \delta + 5}}}$$

$$\begin{cases} \phi_y = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2 + \gamma) \\ \phi_x = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2 + \gamma) + \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

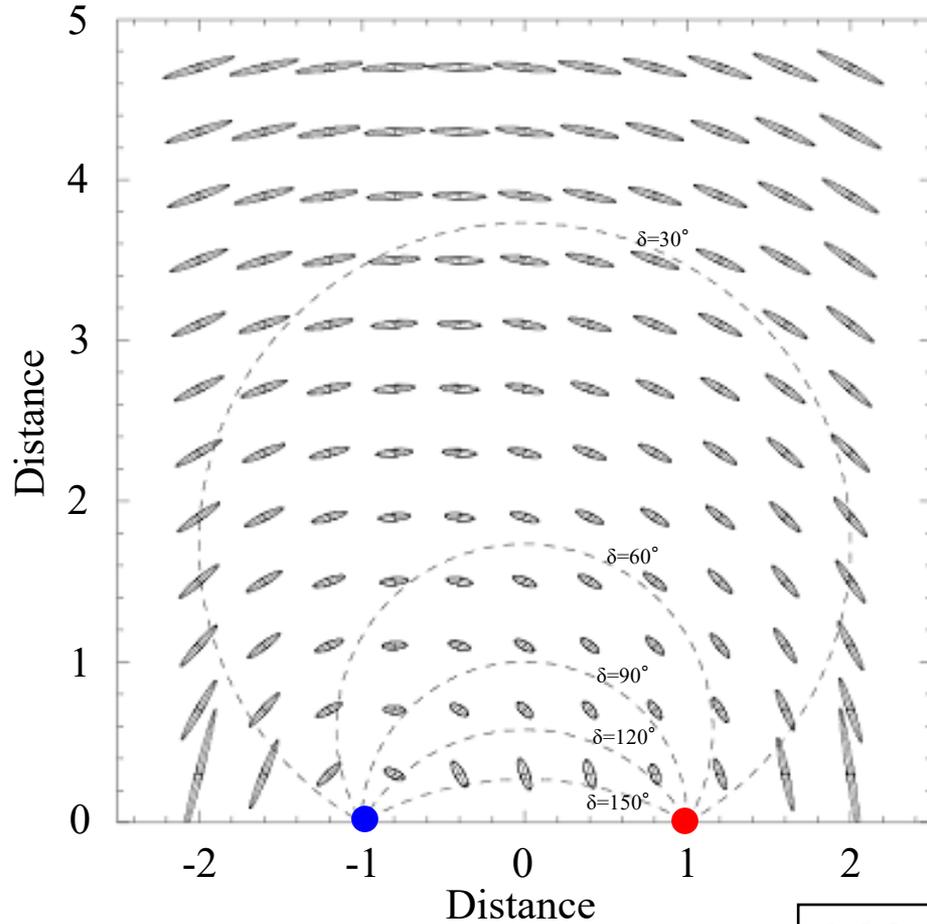
ただし、

$$\tan \gamma = \frac{-2 \sin \delta}{3 \cos \delta + 1}$$

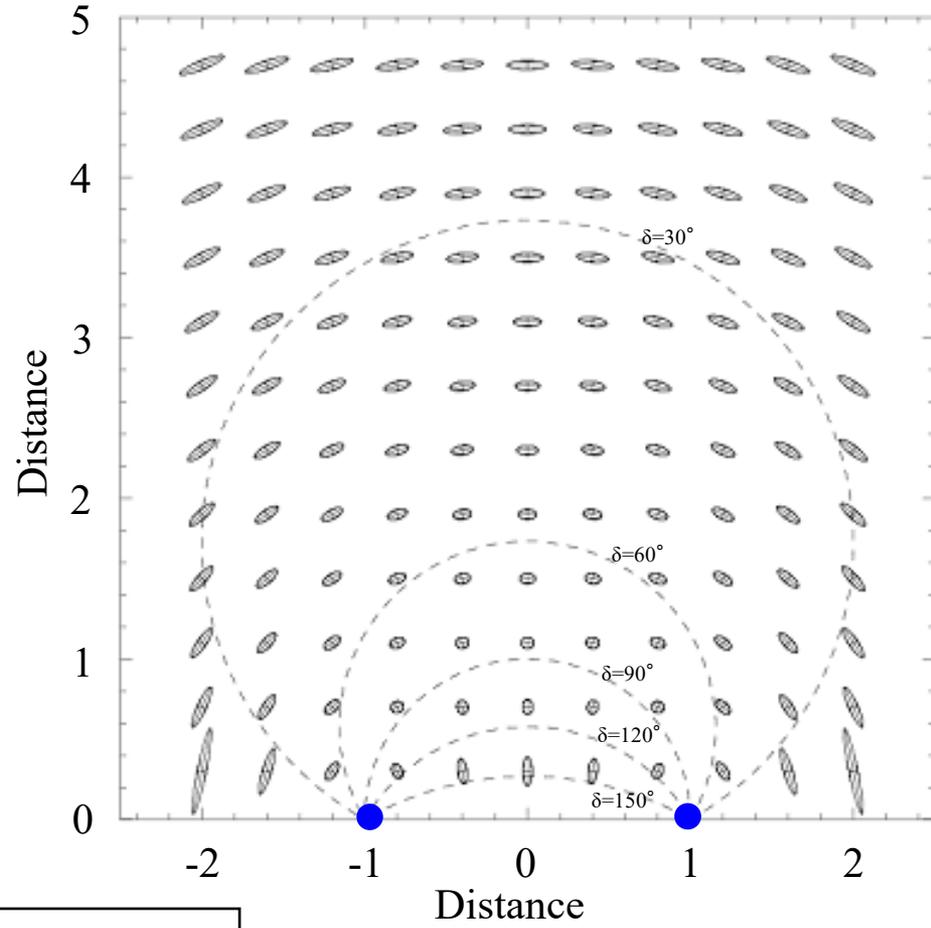


# 流速ベクトル計測範囲における誤差楕円の空間分布

Bistatic radar observation



Monostatic radar observation



- Monostatic radar
- Bistatic receiver



# 誤差ベクトルの大きさ

バイスタティック観測における誤差ベクトルの大きさの分散を $\sigma_v^2$ とすると

$$\sigma_v^2 = \int |V_{err}|^2 P_v(V_{err}) dV_{err} = \frac{2 \cos \delta + 6}{\sin^2 \delta} \cdot \sigma^2$$

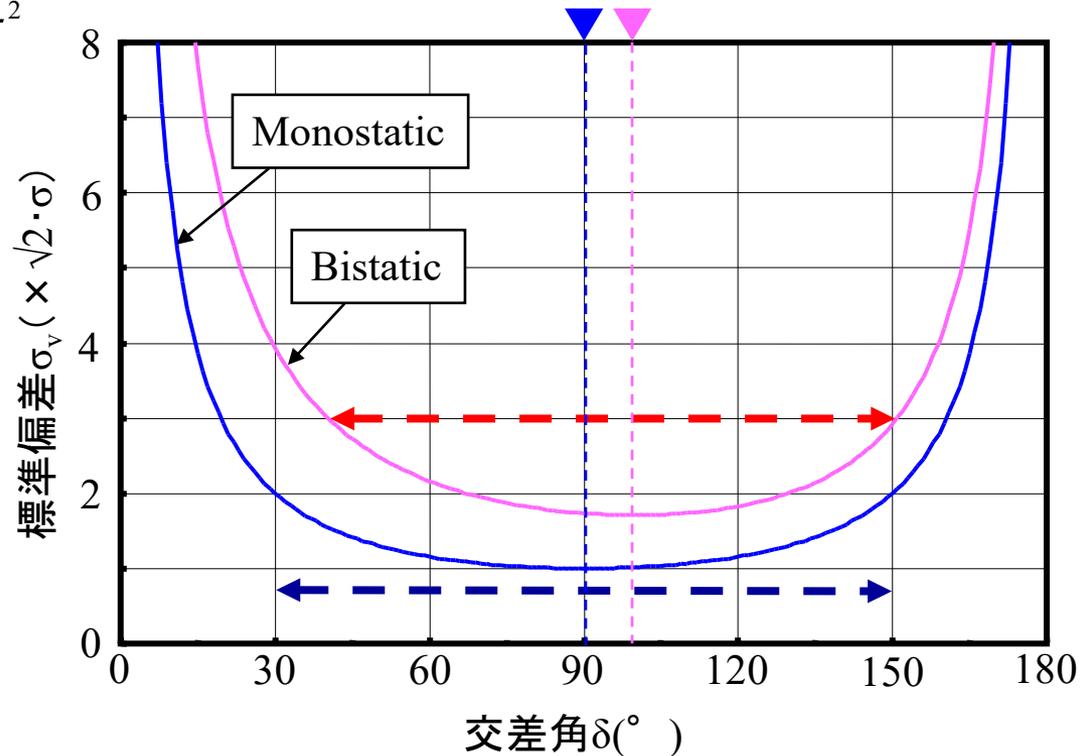
であるから、標準偏差 $\sigma_v$ は

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{2 \cos \delta + 6}}{|\sin \delta|} \cdot \sigma = \frac{2\sqrt{\cos^2 \theta + 1}}{|\sin(2\theta)|} \cdot \sigma$$

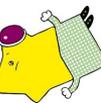
ここで $\theta(=\delta/2)$ はバイスタティック散乱角。

モノスタティック観測の場合、誤差ベクトルの標準偏差 $\sigma_v$ は

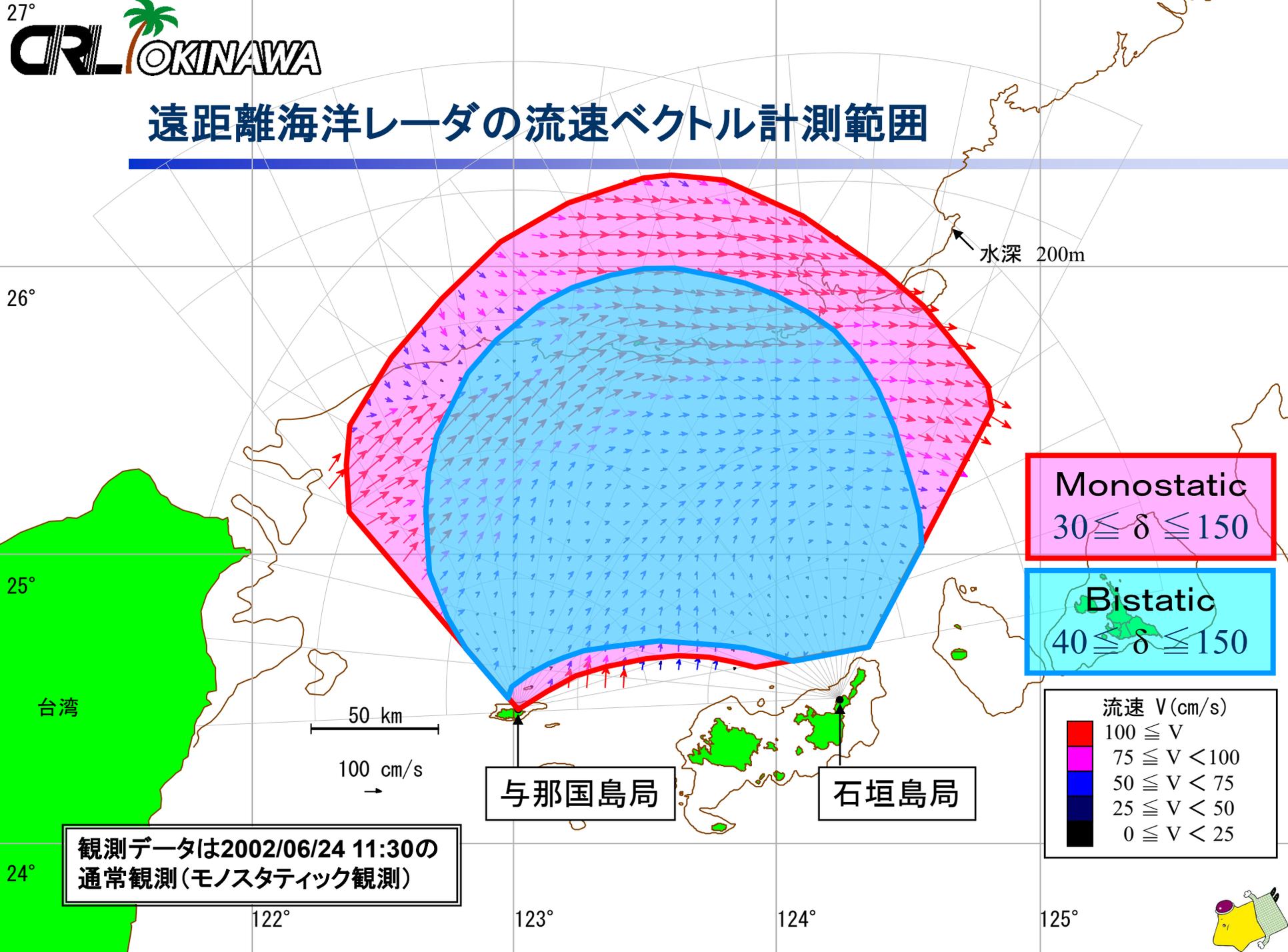
$$\sigma_v = \frac{\sqrt{2}}{|\sin \delta|} \cdot \sigma$$



バイスタティック観測の場合、誤差は**ビームの交差角が約100°の時に最小**



# 遠距離海洋レーダの流速ベクトル計測範囲



水深 200m

**Monostatic**  
 $30 \leq \delta \leq 150$

**Bistatic**  
 $40 \leq \delta \leq 150$

流速  $V$  (cm/s)

- 100  $\leq V$
- 75  $\leq V < 100$
- 50  $\leq V < 75$
- 25  $\leq V < 50$
- 0  $\leq V < 25$

50 km  
 100 cm/s  
 →

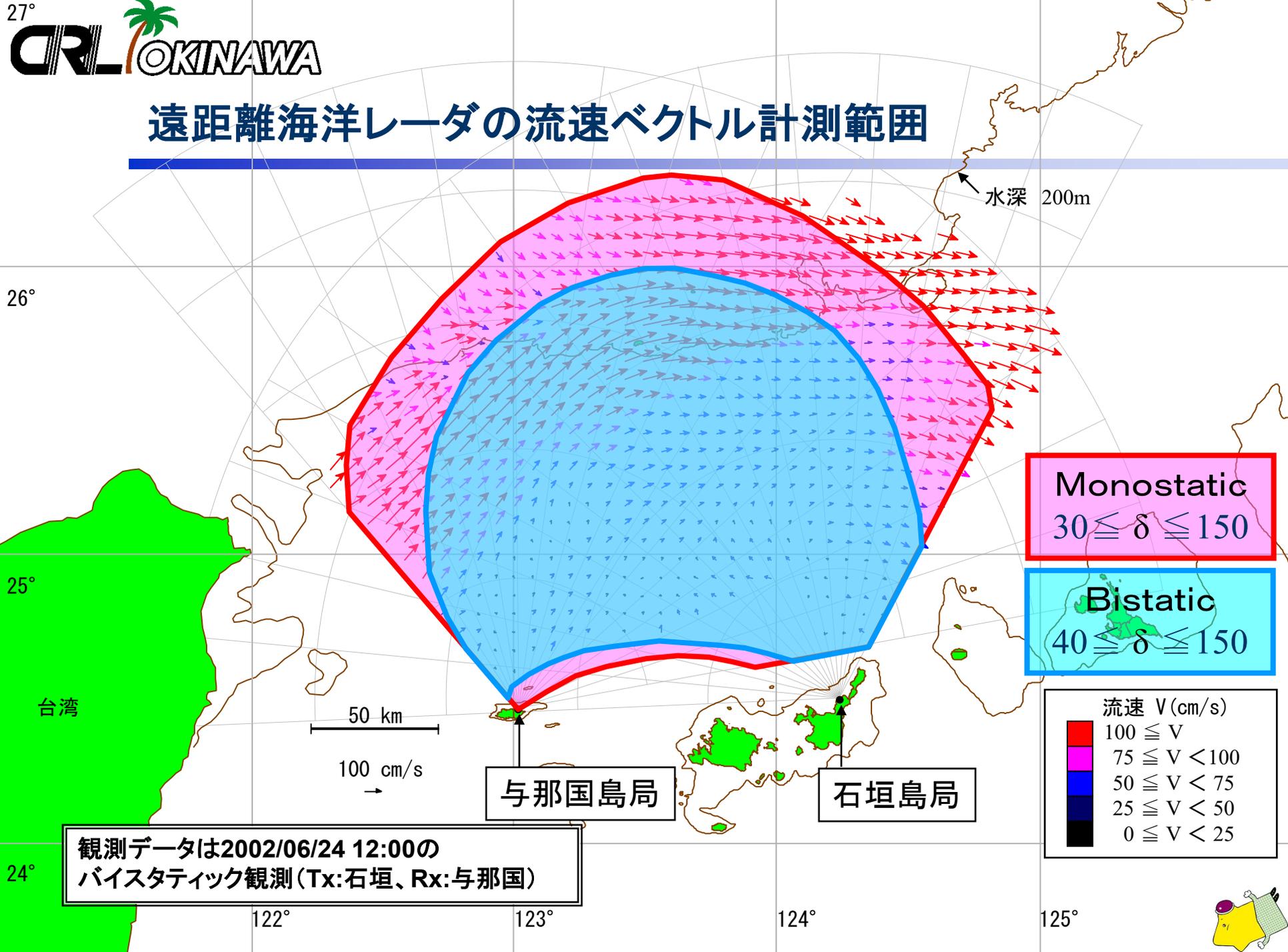
与那国島局

石垣島局

観測データは2002/06/24 11:30の  
 通常観測(モノスタティック観測)



# 遠距離海洋レーダの流速ベクトル計測範囲



水深 200m

Monostatic  
 $30 \leq \delta \leq 150$

Bistatic  
 $40 \leq \delta \leq 150$

流速  $V$  (cm/s)

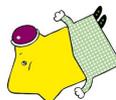
- $100 \leq V$
- $75 \leq V < 100$
- $50 \leq V < 75$
- $25 \leq V < 50$
- $0 \leq V < 25$

50 km  
 100 cm/s  
 →

与那国島局

石垣島局

観測データは2002/06/24 12:00の  
 バイスタティック観測 (Tx:石垣、Rx:与那国)



# 流速・流向の計測誤差

○流速の計測誤差

$$V_E = |V_{true} + V_{err}| - |V_{true}|$$

○流向の計測誤差

$$\theta_E = \arg(V_{true} + V_{err}) - \arg(V_{true})$$

流速の計測誤差の平均値

$$\overline{V_E} = \int V_E P_v(V_E) dV_E$$

流向の計測誤差の平均値

$$\overline{\theta_E} = \int \theta_E P_v(V_E) dV_E$$

流速の計測誤差の分散

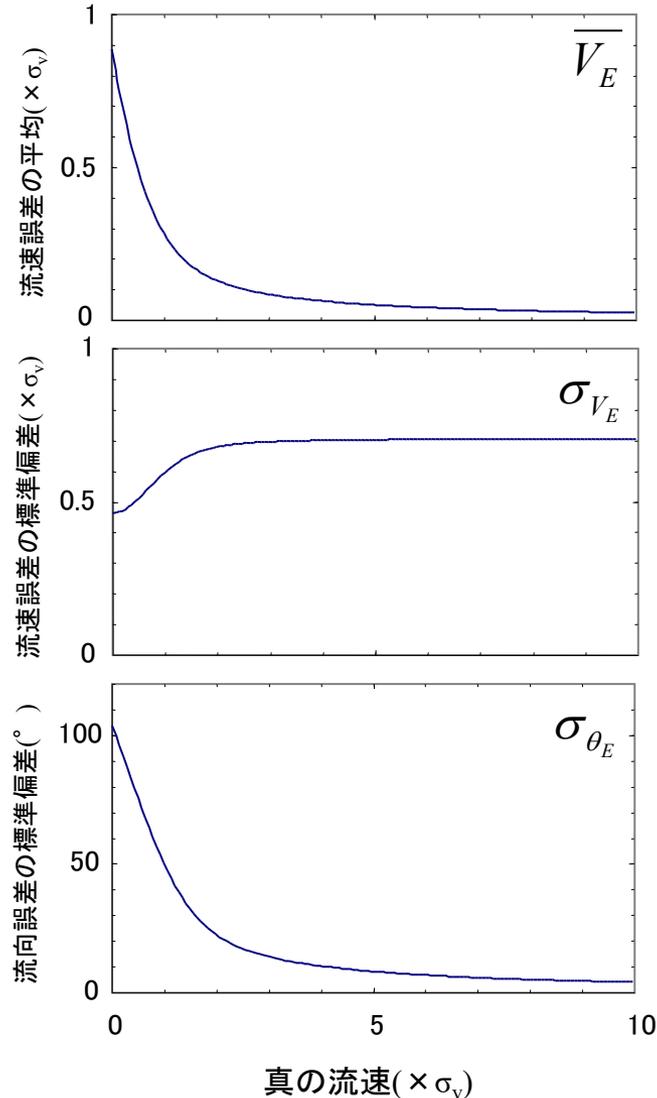
$$\sigma_{V_E}^2 = \int (V_E - \overline{V_E})^2 P_v(V_E) dV_E$$

流向の計測誤差の分散

$$\sigma_{\theta_E}^2 = \int (\theta_E - \overline{\theta_E})^2 P_v(V_E) dV_E$$

$P_v(V_E)$  の代わりに同じ分散を持つ下記の等方性  
二次元ガウス分布  $P_{iso}(V_E)$  を用いて計算した結果  
が右図。

$$P_{iso}(V_E) = \frac{1}{\pi\sigma_v^2} \exp\left(-\frac{V_E^2}{\sigma_v^2}\right)$$

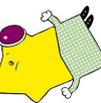


Monostatic radar

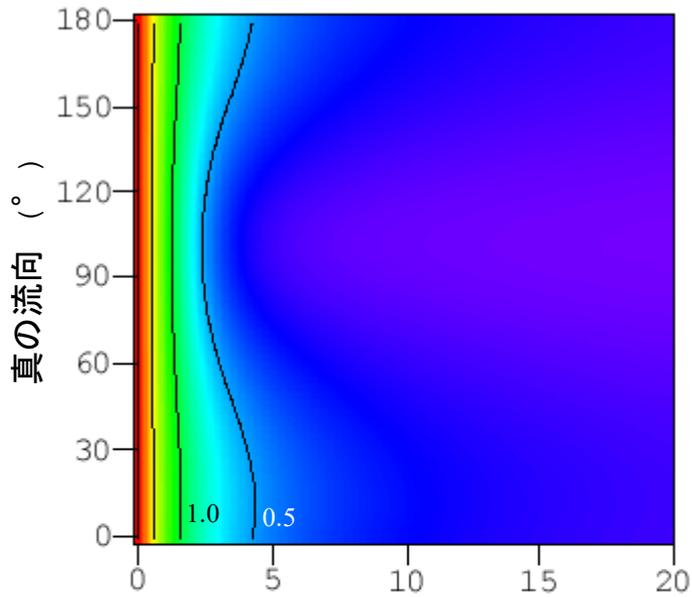
$$\sigma_v = \frac{\sqrt{2}}{|\sin \delta|} \cdot \sigma$$

Bistatic radar

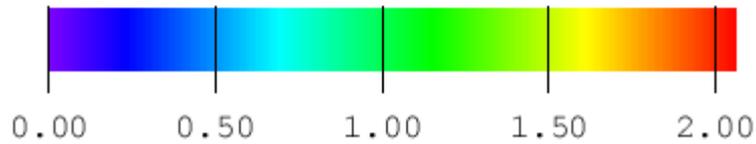
$$\sigma_v = \frac{\sqrt{2 \cos \delta + 6}}{|\sin \delta|} \cdot \sigma$$



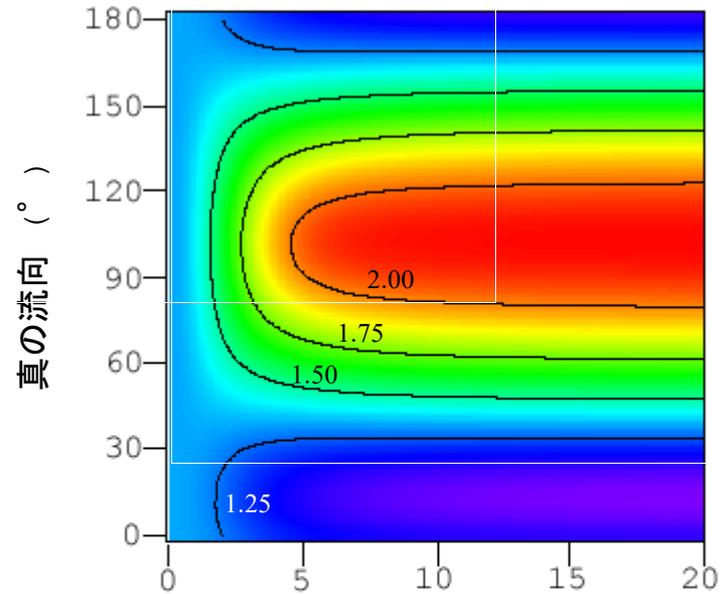
# 流速の計測誤差 (Bistatic観測, $\delta=100^\circ$ )



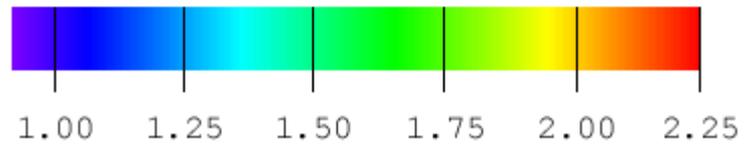
真の流速 ( $\times \sigma$ )



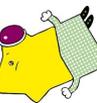
流速誤差の平均値  $V_E$  ( $\times \sigma$ )



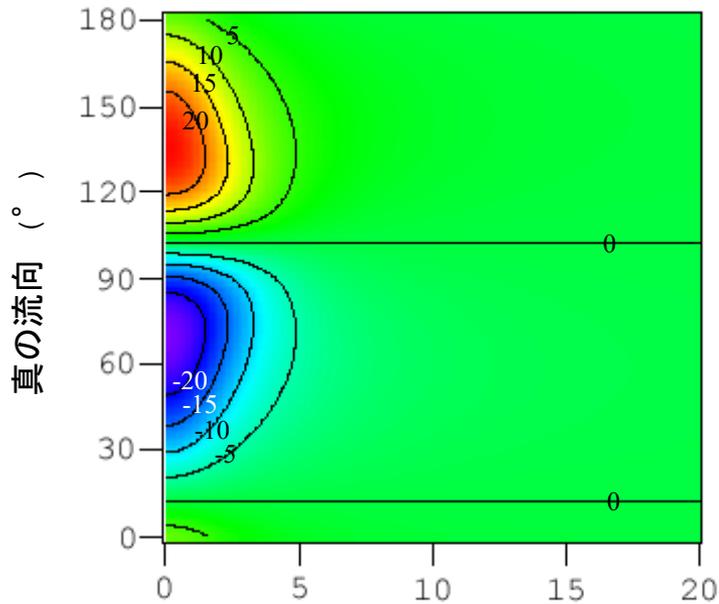
真の流速 ( $\times \sigma$ )



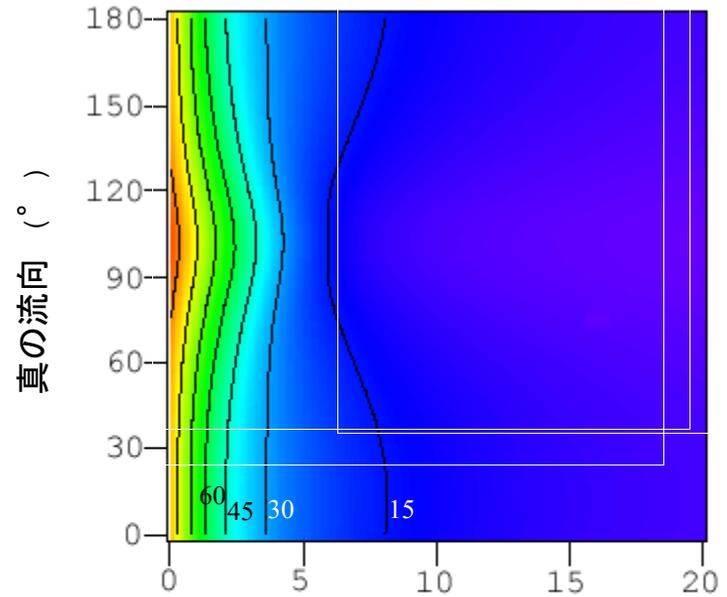
流速誤差の標準偏差  $\sigma_{VE}$  ( $\times \sigma$ )



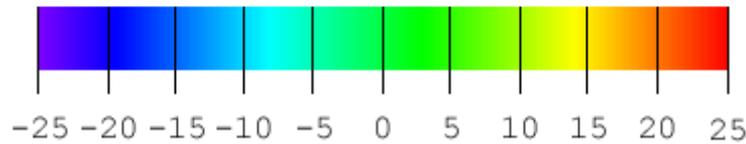
# 流向の計測誤差 (Bistatic観測, $\delta=100^\circ$ )



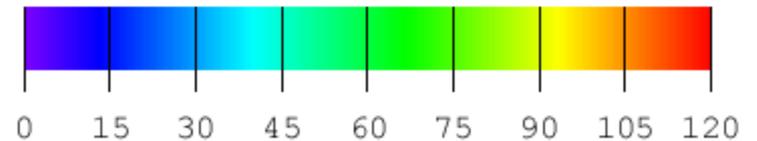
真の流速 ( $\times \sigma$ )



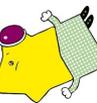
真の流速 ( $\times \sigma$ )



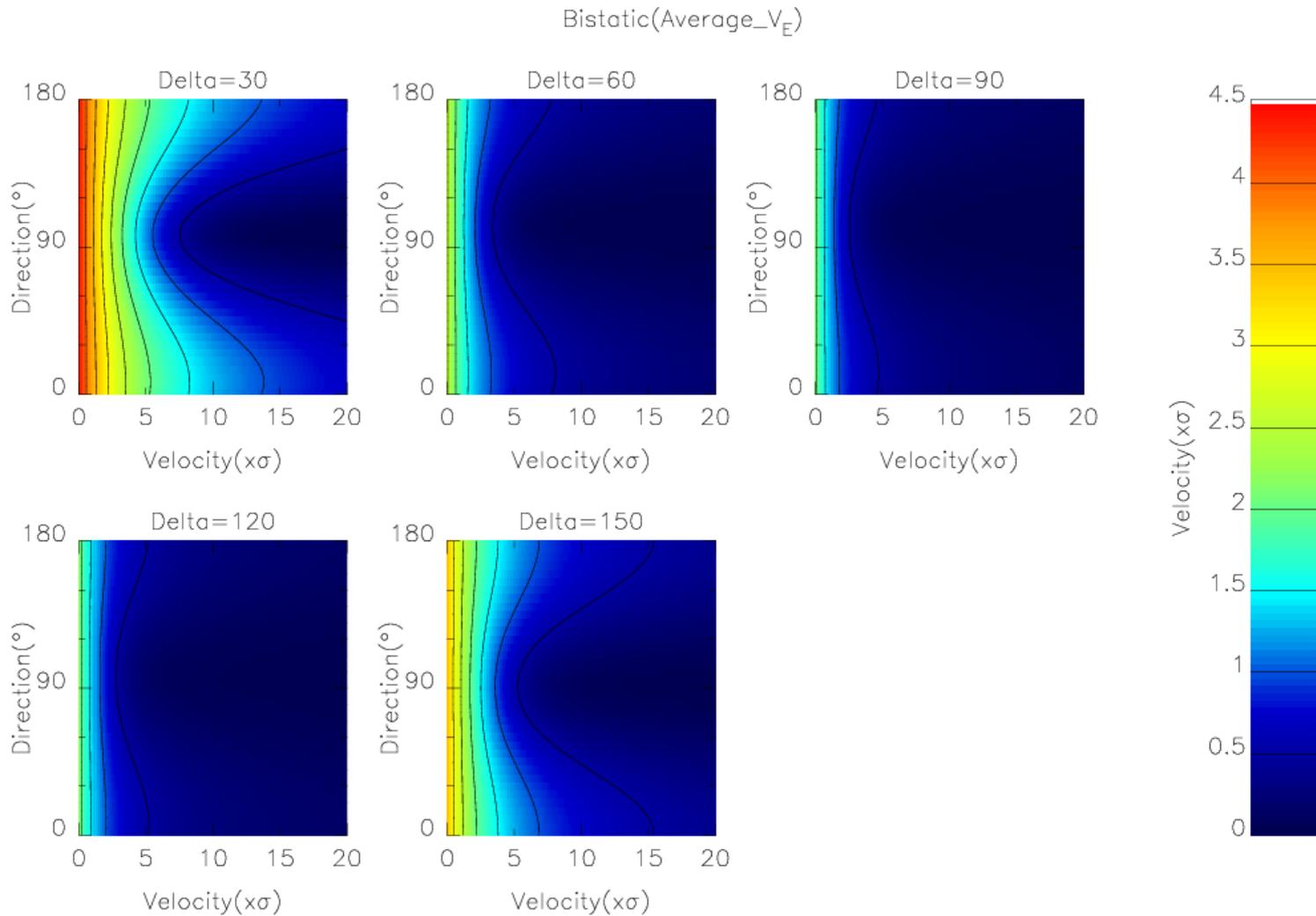
流向誤差の平均値  $\theta_E$  ( $^\circ$ )



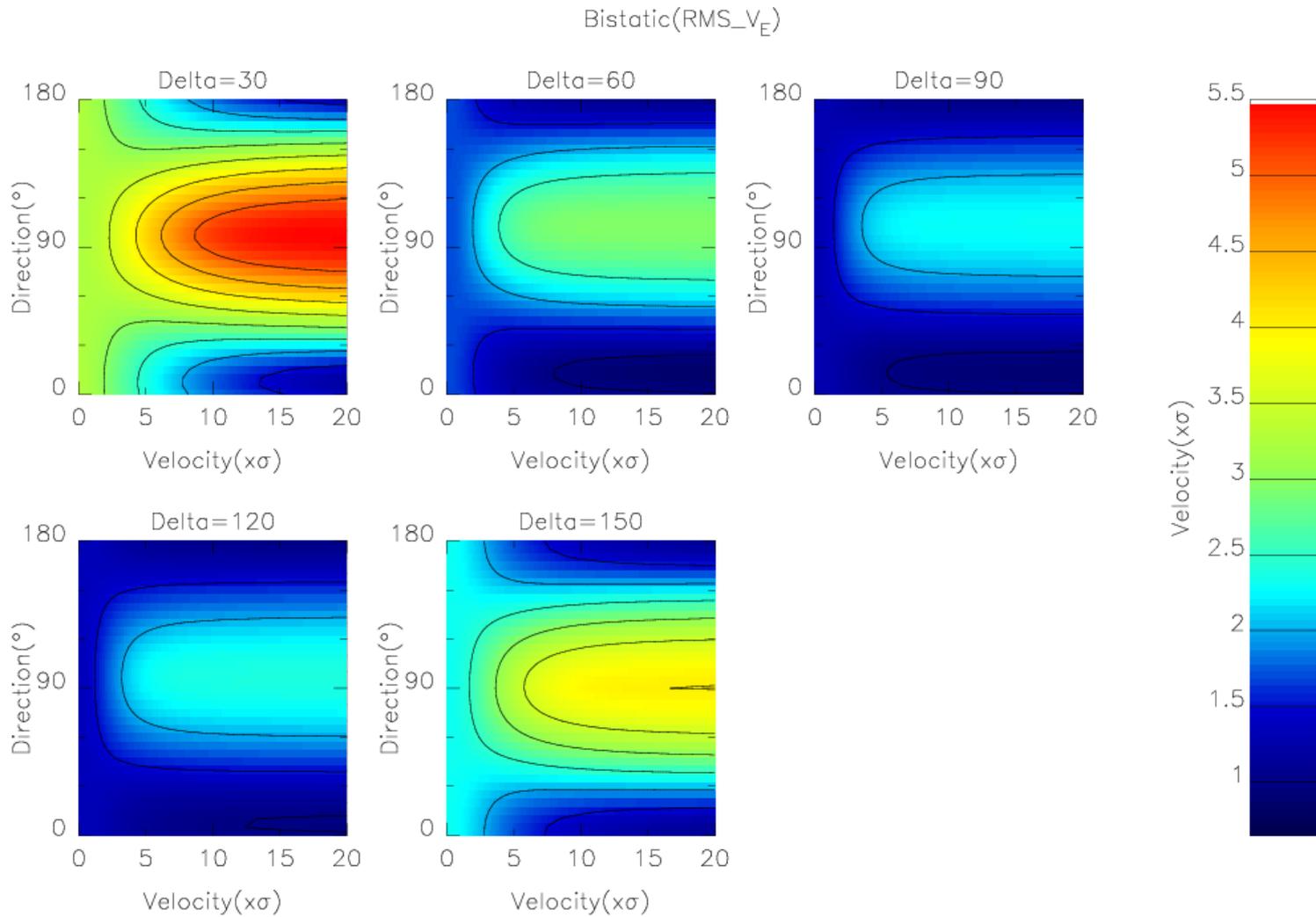
流向誤差の標準偏差  $\sigma_{\theta_E}$  ( $^\circ$ )



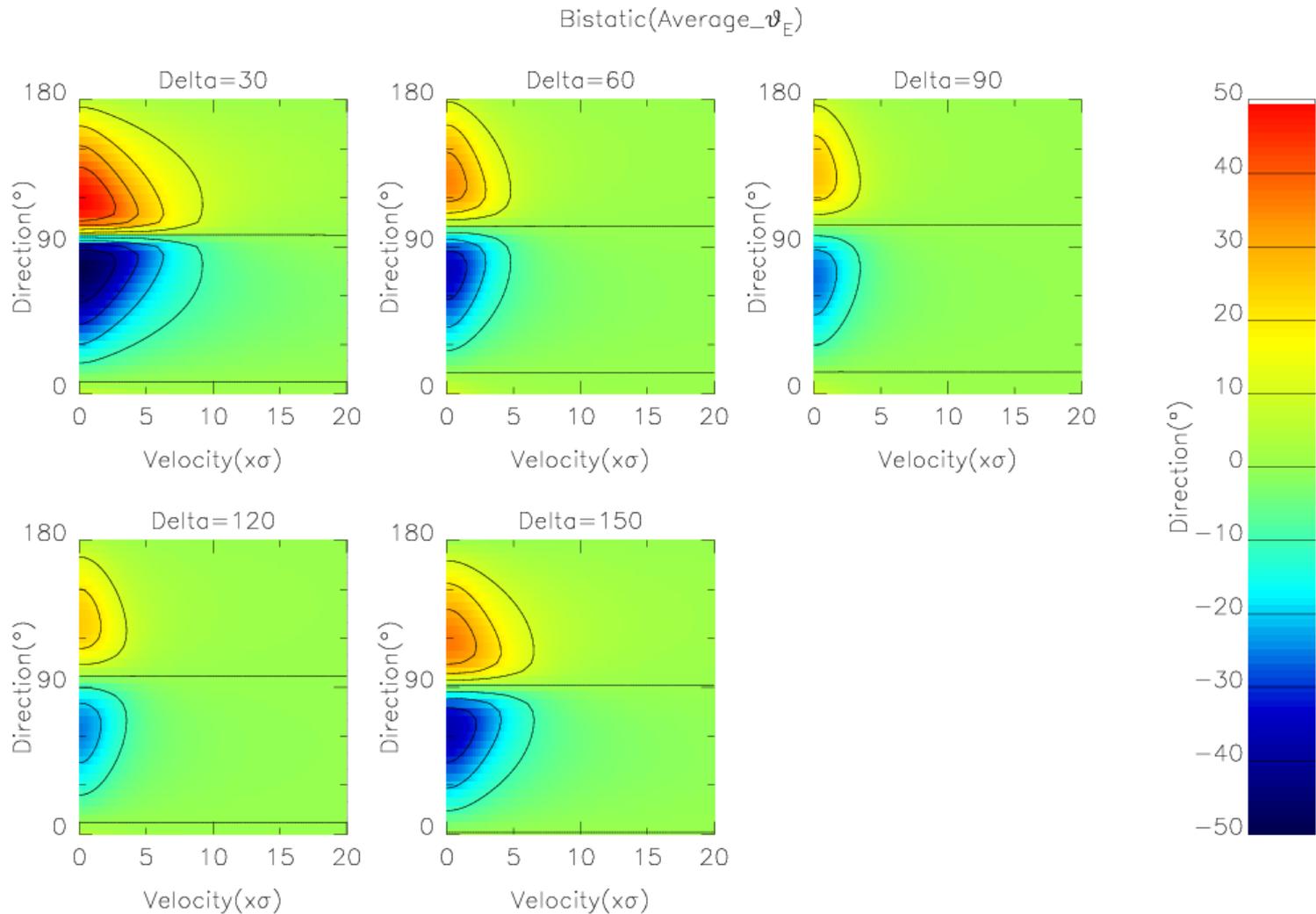
# 流速の計測誤差( $\overline{V_E}$ , Bistatic)



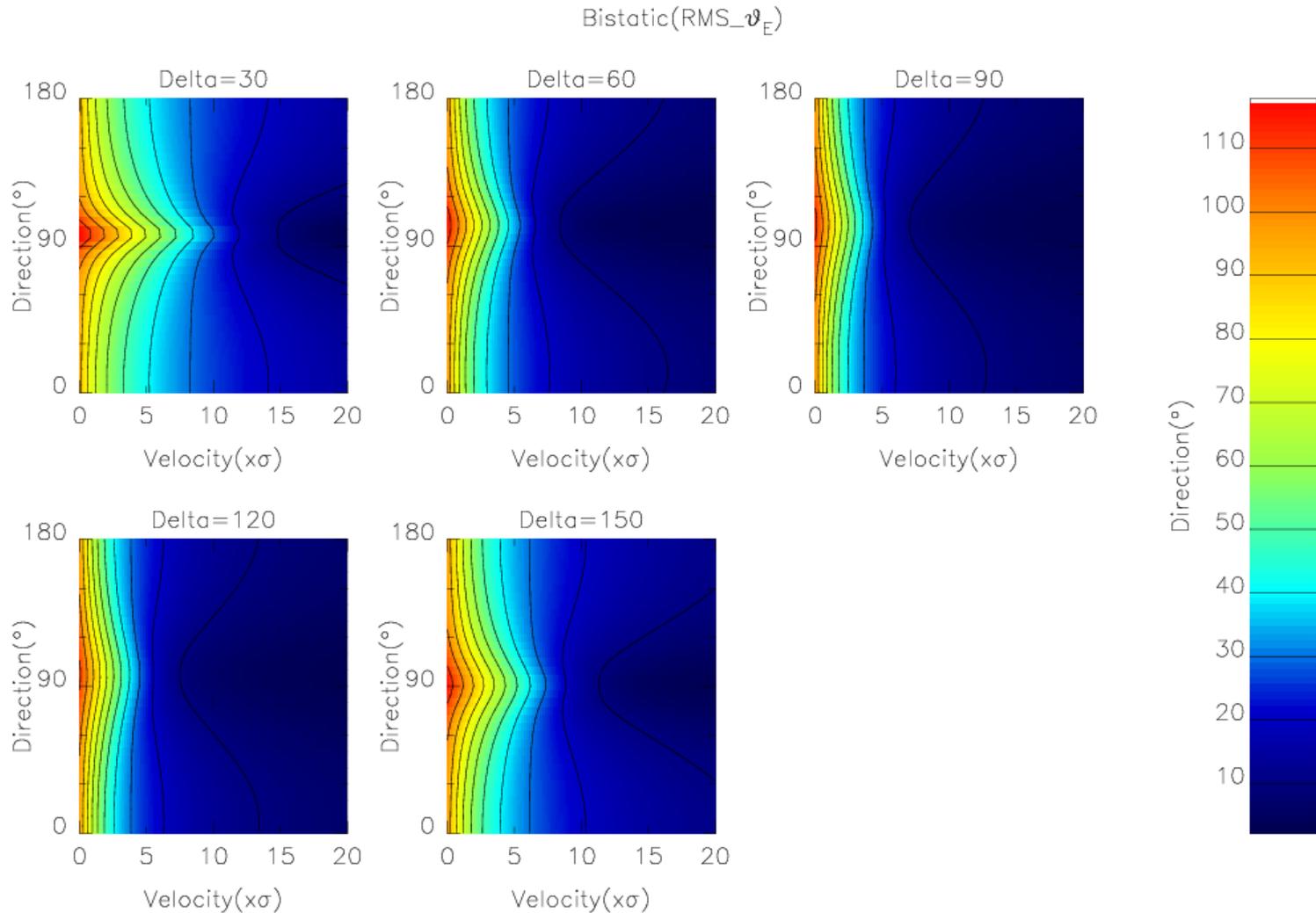
# 流速の計測誤差 ( $\sigma_{VE}$ , Bistatic)



# 流向の計測誤差( $\overline{\theta_E}$ , Bistatic)



# 流速の計測誤差 ( $\sigma_{\theta E}$ , Bistatic)



## まとめ

---

- バイスタティック短波海洋レーダによる流速ベクトル計測に関して計測精度の検討を行なった。
- ・ ビーム交差角 $\delta \sim 100^\circ$  の場合に誤差は最小
- ・ 流速ベクトル計測範囲の目安は  $40^\circ \leq \delta \leq 150^\circ$
- ・ 通常の一スタティックレーダに比べて計測精度は劣る。

