

# 仮想アレーを用いた角度分解能向上による 二次元表層流速推定結果について

龍川卓也<sup>1</sup> 山田寛喜<sup>1</sup> 山口芳雄<sup>1</sup> 平野圭蔵<sup>2</sup> 伊藤浩之<sup>2</sup>

新潟大学大学院自然科学研究科<sup>1</sup>

長野日本無線株式会社<sup>2</sup>

# 研究背景

## 海表面観測

- 地上設置型海洋レーダ
- 波高計
- 流速計

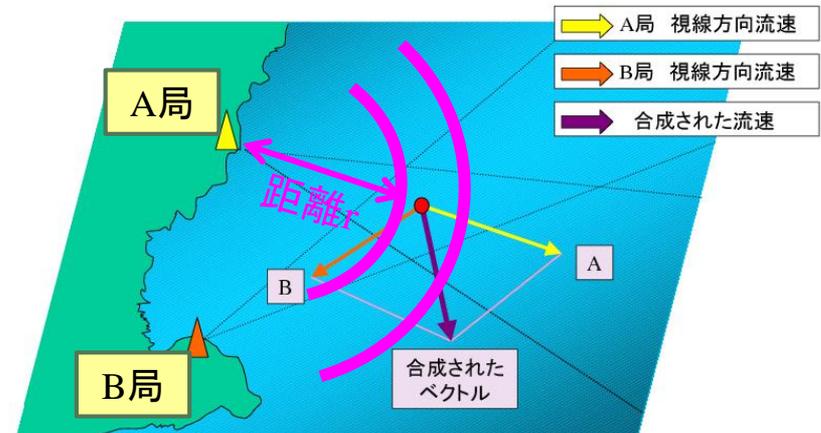
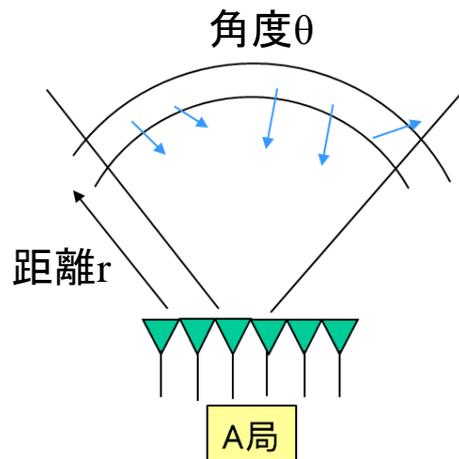
etc.

## 陸上設置型海洋レーダの利点

- 陸上に設置→海中への流失の危険がない
- 二次元的な海象情報の観測が可能
- リモートコントロールによる常時観測が可能
- メンテナンスが容易

## 陸上設置型海洋レーダで得られる情報

- 到来方向 : アレーアンテナを利用したDigital Beam Forming
- 距離, 流速 : FMICW(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave)レーダ方式
- 進行方向 : 2つのレーダを用いてビームを交差→ベクトル合成



# 研究目的

## 問題点

角度分解能の改善

→アンテナ素子数を増加, アレー開口長を拡大

➡ **用地の確保が困難**

(実例: 10m × 70m)



## Khatri-Rao (KR) 積拡張処理[1]

**仮想アレーを用いて高い角度分解能を実現する処理**

海洋レーダにより得られるアレーモードベクトルをKR積を用いて拡張

→**仮想的にアレー素子数を増加させ, 角度分解能を向上**[2]

## 目的

**陸上設置型海洋レーダの設置面積削減及び推定精度向上**

## 検討内容

海洋レーダへKR積拡張処理を適用し, 有効性を確認

➤実測データを用いた二次元表層流速推定

➤少ない素子数を用いた二次元表層流速推定

[1] W. K. Ma, T. H. Hsieh, and C. Y. Chi, "DOA estimation of quasi-stationary signals with less sensors than sources and unknown spatial noise covariance: A Khatri-Rao subspace approach," IEEE Trans. Signal Process., vol.58, no.4, pp.2168-2180, April 2010.

[2] 小沢直輝, 山田寛喜, 山口芳雄, "Khatri-Rao 積拡張アレー処理による海洋レーダ分解能特性改善に関する検討", 信学技報, Vol.SANE2012-136, Jan. 2013.

# 受信信号モデル

距離, 速度, 到来方向の情報が含まれる3次元データ



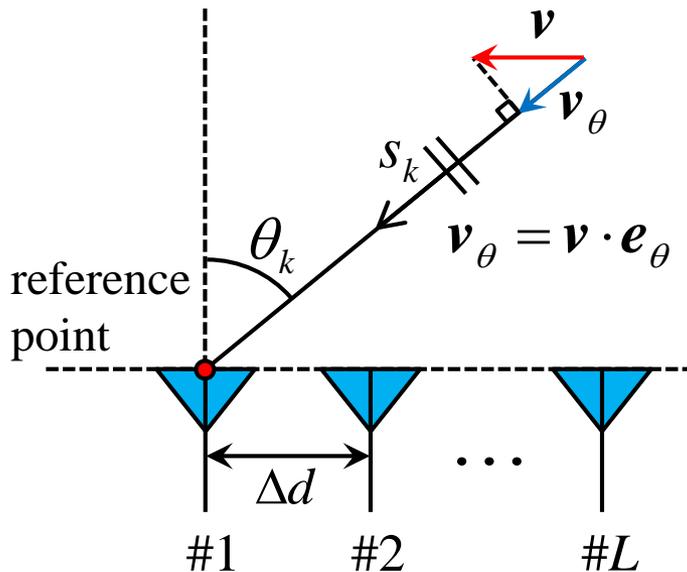
ビート信号毎にフーリエ変換 → 距離推定

距離毎に速度, 到来方向の情報が含まれる2次元データを作成



素子毎にフーリエ変換 → 速度推定

アレー受信信号を作成



移動するターゲットによる  
反射波の到来方向を推定

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \sum_{k=1}^K \mathbf{a}(\theta_k) s_k + \mathbf{n} \\ &= \sum_{k=1}^K \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \Delta d \sin \theta_k} \\ \vdots \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (L-1) \Delta d \sin \theta_k} \end{bmatrix} s_k + \mathbf{n} \\ &= \mathbf{A} \mathbf{s} + \mathbf{n} \end{aligned}$$

$L$ : 素子数

$\theta_k$ : 入射角

$\Delta d$ : 素子間隔

$\mathbf{v}$ : 実際の速度

$\mathbf{v}_\theta$ : アンテナ方向の速度

# 相関行列の対角要素平均化処理

KR積拡張処理・・・無相関波到来時にのみ適用可能

海洋レーダ

素子数に対し十分に多くの散乱点から反射波が到来

複素振幅がレイリー分布やワイブル分布に従い、互いの位相項成分を打ち消し合う

相関が低くなり、KR積拡張処理が適用可能[3]

さらに、相関行列の対角要素を平均してプリッツ行列に変換[3]

→残存する誤差を軽減

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$$

$$= \begin{bmatrix} x_1 x_1^* & x_1 x_2^* & \cdots & x_1 x_L^* \\ x_2 x_1^* & x_2 x_2^* & \cdots & x_2 x_L^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L x_1^* & x_L x_2^* & \cdots & x_L x_L^* \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{R}}_{xx}$$

$$= \begin{bmatrix} \bar{x}_{1,1} & \bar{x}_{1,2} & \cdots & \bar{x}_{1,L} \\ \bar{x}_{2,1} & \bar{x}_{1,1} & \cdots & \bar{x}_{1,L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{L,1} & \bar{x}_{L-1,1} & \cdots & \bar{x}_{1,1} \end{bmatrix}$$

$$\bar{x}_{m,n} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^L x_i x_i^*}{L} & (m = n) \\ \frac{\sum_{i=m}^{L-n+1} x_i x_{i-m+1}^*}{L-n+1} & (m > n) \\ \frac{\sum_{i=n}^{L-m+1} x_{i-n+1} x_i^*}{L-m+1} & (m < n) \end{cases}$$

[3] H. Yamada, N. Ozawa, Y. Yamaguchi, K. Hirano, H. Ito, "Angular Resolution Improvement of Ocean Surface Current Radar Based on the Khatri-Rao Product Array Processing," IEICE Trans. Commun., vol.E96-B, no.10, pp.2469-2474, Oct. 2013.

[4] 龍川卓也, 山田寛喜, 山口芳雄, 平野圭蔵, 伊藤浩之, "海洋レーダによる二次元表層流観測におけるKhatri-Rao積仮想アレーの効果について," 信学技報, Vol.SANE2014-62, pp.83-88, Aug. 2014.

# Khatri-Rao積拡張処理

## KR積拡張アレー処理

- ・仮想的にアレー素子数, 実効開口長, アレー自由度を増加させる信号処理
- ・ $L$ 素子等間隔リニアアレー(ULA)に用いた場合 $2L-1$ 素子ULA相当となる

### 受信相関行列からKR積拡張受信信号を作成

$$\begin{aligned}z &= \text{vec}(\mathbf{R}_{xx}) \\ &= \text{vec}(\mathbf{A}\mathbf{S}_r\mathbf{A}^H) + \text{vec}(\mathbf{R}_N) \\ &= (\mathbf{A}^* \odot \mathbf{A})\mathbf{s}_r + \text{vec}(\mathbf{R}_N)\end{aligned}$$

### 非重複要素の抽出

$$(\mathbf{A}^* \odot \mathbf{A}) \rightarrow \hat{\mathbf{A}} = \left[ e^{j(L-1)\omega}, e^{j(L-2)\omega}, \dots, 1, \dots, e^{-j(L-2)\omega}, e^{-j(L-1)\omega} \right]^T$$

### KR積拡張受信信号(重複要素削除後)

$$z' = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{s}_r + \mathbf{n}'$$

### KR積拡張相関行列を作成

$$\mathbf{R}_{zz} = E[z'z'^H] \quad \hat{\mathbf{R}}_{zz} = \sqrt{\mathbf{R}_{zz}}$$

$\odot$  : KR積の演算子, 列ごとのKronecker積  
 $\text{vec}[\cdot]$ : 引数の各列をスタックし, ベクトル化する演算  
 $[\cdot]^H$ : 複素共役

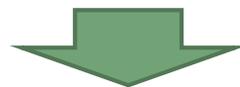
# 海洋の流速推定

短波帯海洋レーダ・・・電波と波浪成分を**ブラッグ共鳴**

→電波の1/2波長である波浪成分が後方へ強く反射 (第1次散乱)

海洋レーダによって観測されたドップラ周波数

= **ブラッグ共鳴した波浪成分波成分** + **視線方向の表層流速成分**



共鳴した第一次波浪成分波の位相速度成分を除き、  
**表層流速成分のドップラシフトを得る**

基地局の視線方向の表層流速

$$v_s = \frac{c(f_p \pm f_0)}{2f_c} \approx 6.12(f_p \pm 0.505)$$

$$\left( \begin{array}{l} f_p > 0 \rightarrow v_s = 6.12(f_p - 0.505) \\ f_p < 0 \rightarrow v_s = 6.12(f_p + 0.505) \end{array} \right)$$

$f_c$  : 中心周波数

$c$  : 光速

$f_p$  : ピークドップラ周波数

$f_0$  : 波浪成分波のドップラ周波数

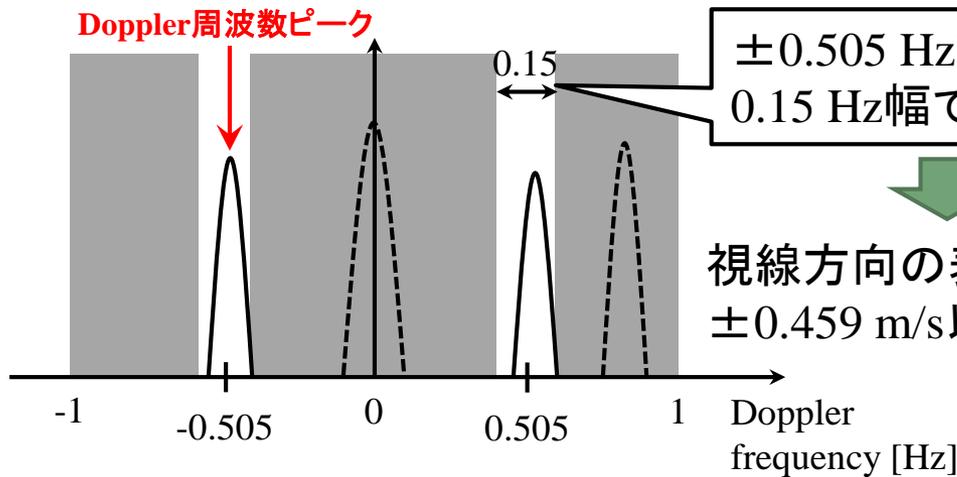
各基地局で視線方向の表層流速を算出→**ベクトル合成により二次元マップを作成**

# ピークドップラ周波数の推定とベクトル合成

ドップラ周波数スペクトル

ゼロドップラ成分等, 表層流速によるドップラシフト以外の成分が存在

➡ ±0.505 Hz付近のピークをピークドップラ周波数として利用

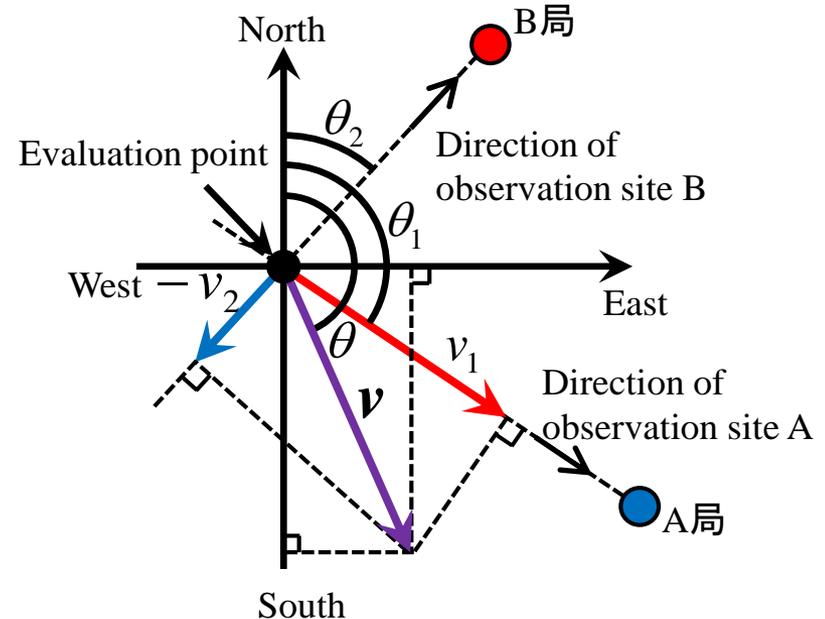


- $v_1$ : 基地局Aの視線方位表層流速
- $v_2$ : 基地局Bの視線方位表層流速
- $\theta$ : 表層流速の方位
- $\theta_1$ : 基地局Aのビーム視線方位
- $\theta_2$ : 基地局Bのビーム視線方位

海上の評価点における表層流ベクトル

$$v_x = -\frac{v_1 \cos \theta_2 - v_2 \cos \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$v_y = +\frac{v_1 \sin \theta_2 - v_2 \sin \theta_1}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$



# ドップラ周波数の補正について

海洋レーダにおけるピークドップラ周波数

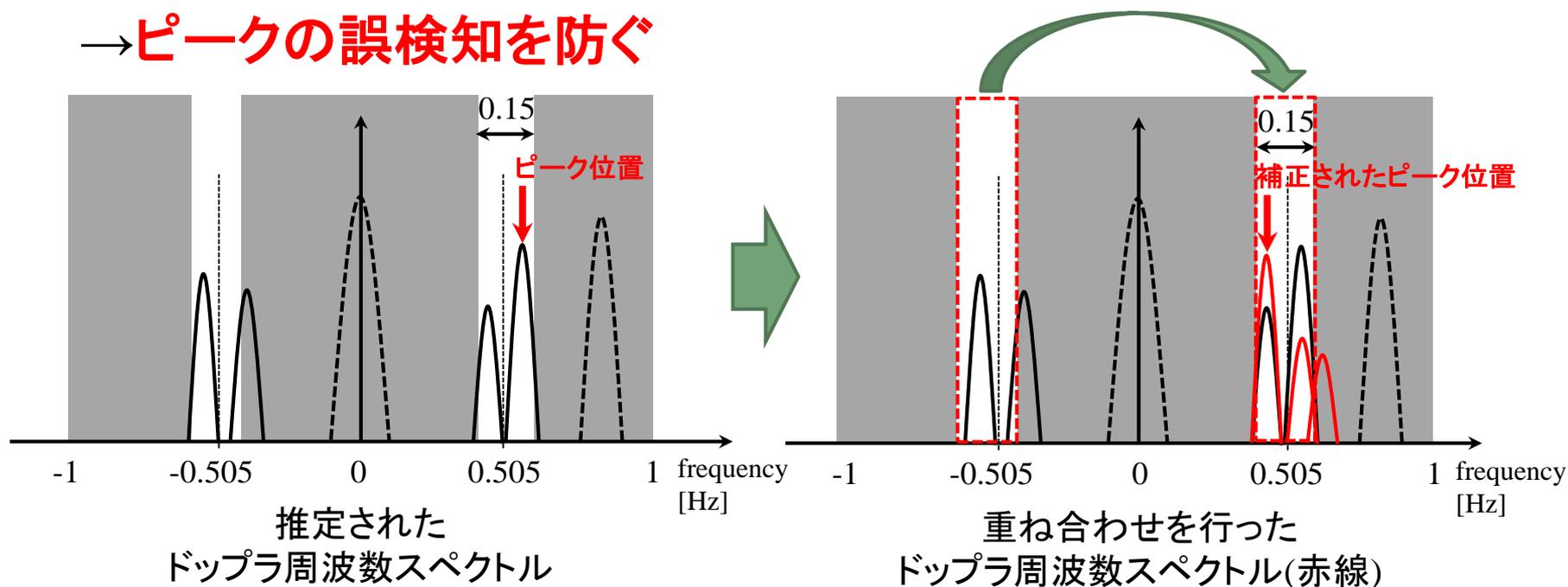
→ +0.505 Hz付近と-0.505 Hz付近に同様のピーク(周波数シフト)が存在

➡ 重ね合わせ法[5]アルゴリズムを適用

Doppler周波数スペクトルの正の領域と負の領域を重ね合わせ, 平均

↓  
正しいピークは強調され, 誤ったピークは弱め合う

→ **ピークの誤検知を防ぐ**



[5] 海岸工学委員会, 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, 土木学会, 2001年3月

# 4素子, 7素子ULAを用いた解析

$L$  素子ULAにKR積拡張処理を適用

→ $2L-1$ 素子ULA相当のアレー自由度, 角度分解能が実現可能

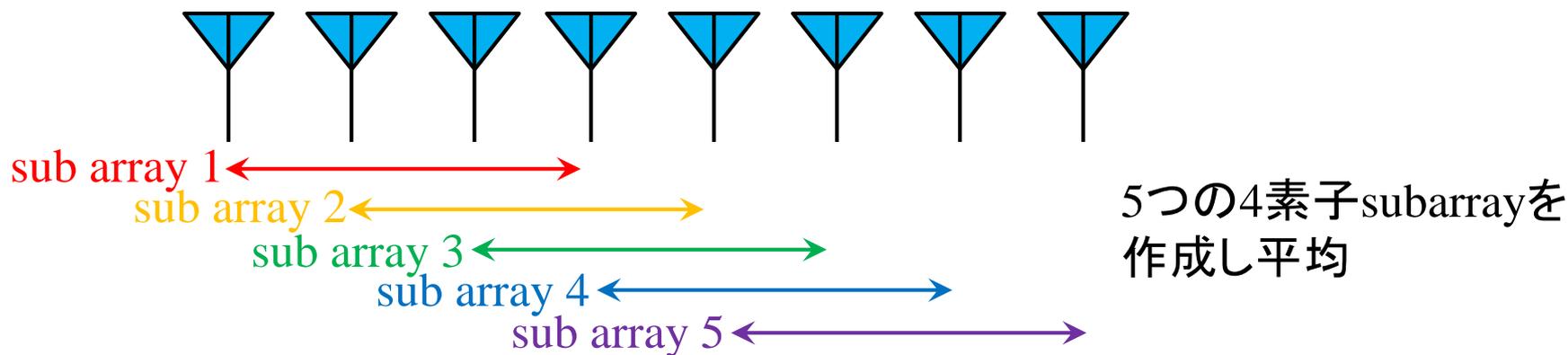


4素子ULA(KR積拡張処理有り)=7素子ULA

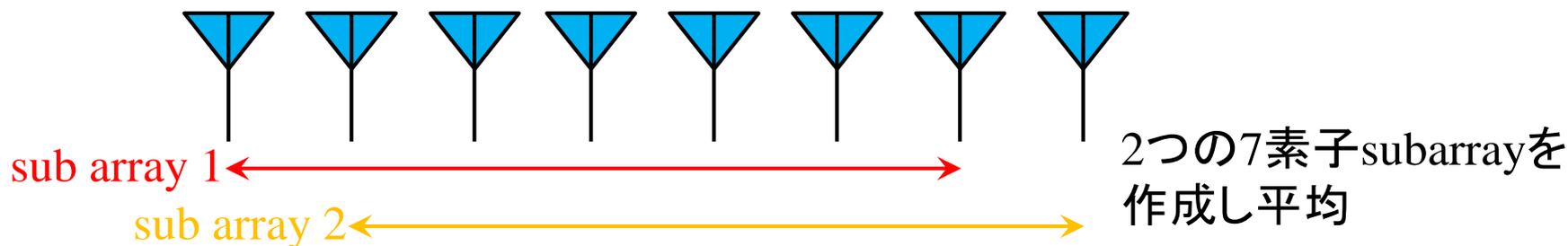
4素子ULAを用いた場合と7素子ULAを用いた場合の結果を比較

実測データは8素子アレーを用いているため, 以下のような平均化を行う

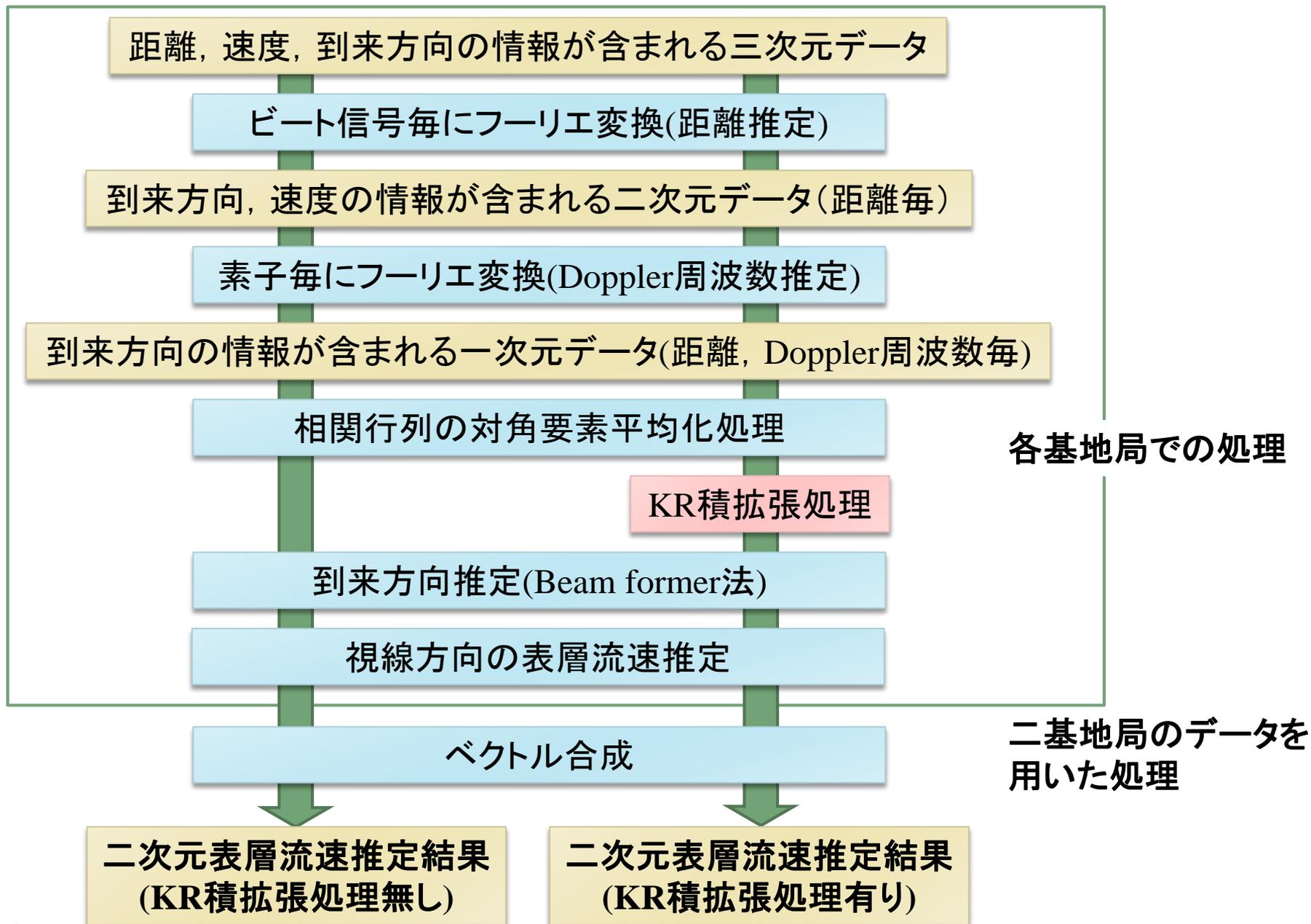
8素子受信信号から4素子受信信号を生成



8素子受信信号から7素子受信信号を生成



# 解析手順



# 実測データ諸元

観測日時, 場所	2007年12月5日16時, 東京湾
アレー形状	ULA
素子数	8
中心周波数	24.515 MHz
素子間隔	7 m (0.57 $\lambda$ )
掃引周波数	100 kHz
掃引時間	500 ms
総掃引回数	1024
レンジ分解能	1.5 km
角度分解能	7.5 °
Doppler周波数分解能	0.0017 Hz
最大探知距離	60 km

# 観測基地局

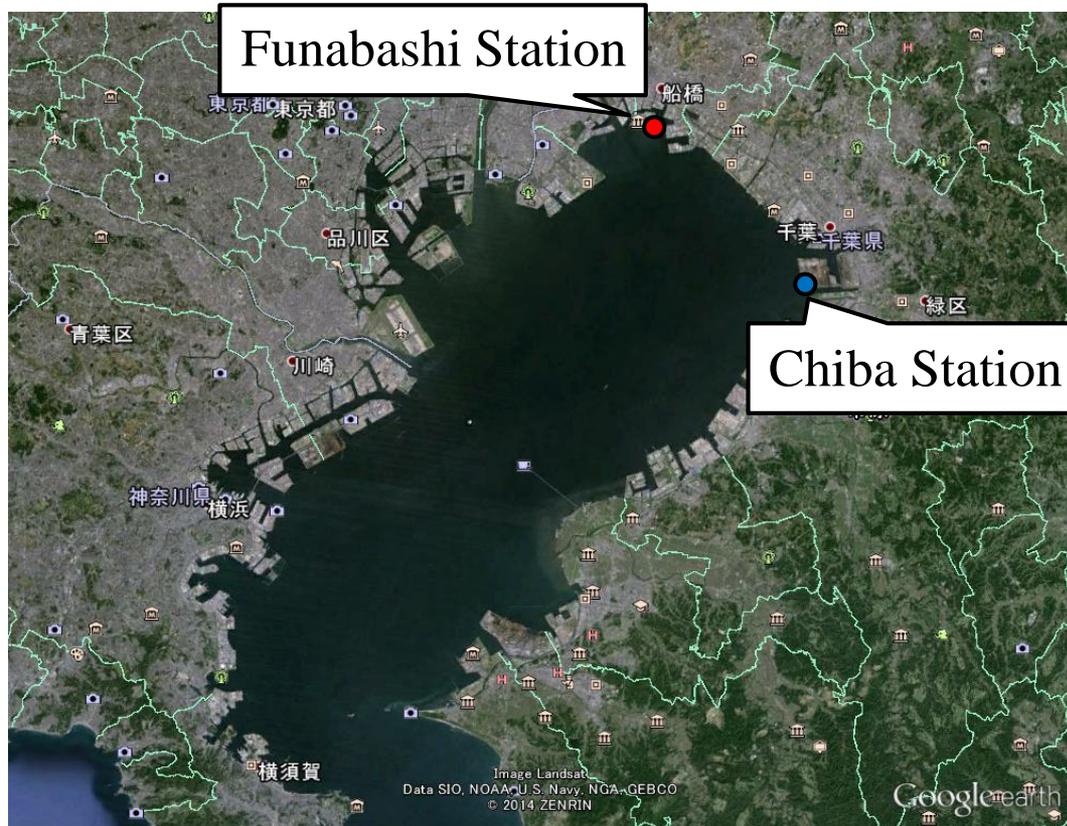


千葉局(視線方位:266.5°)

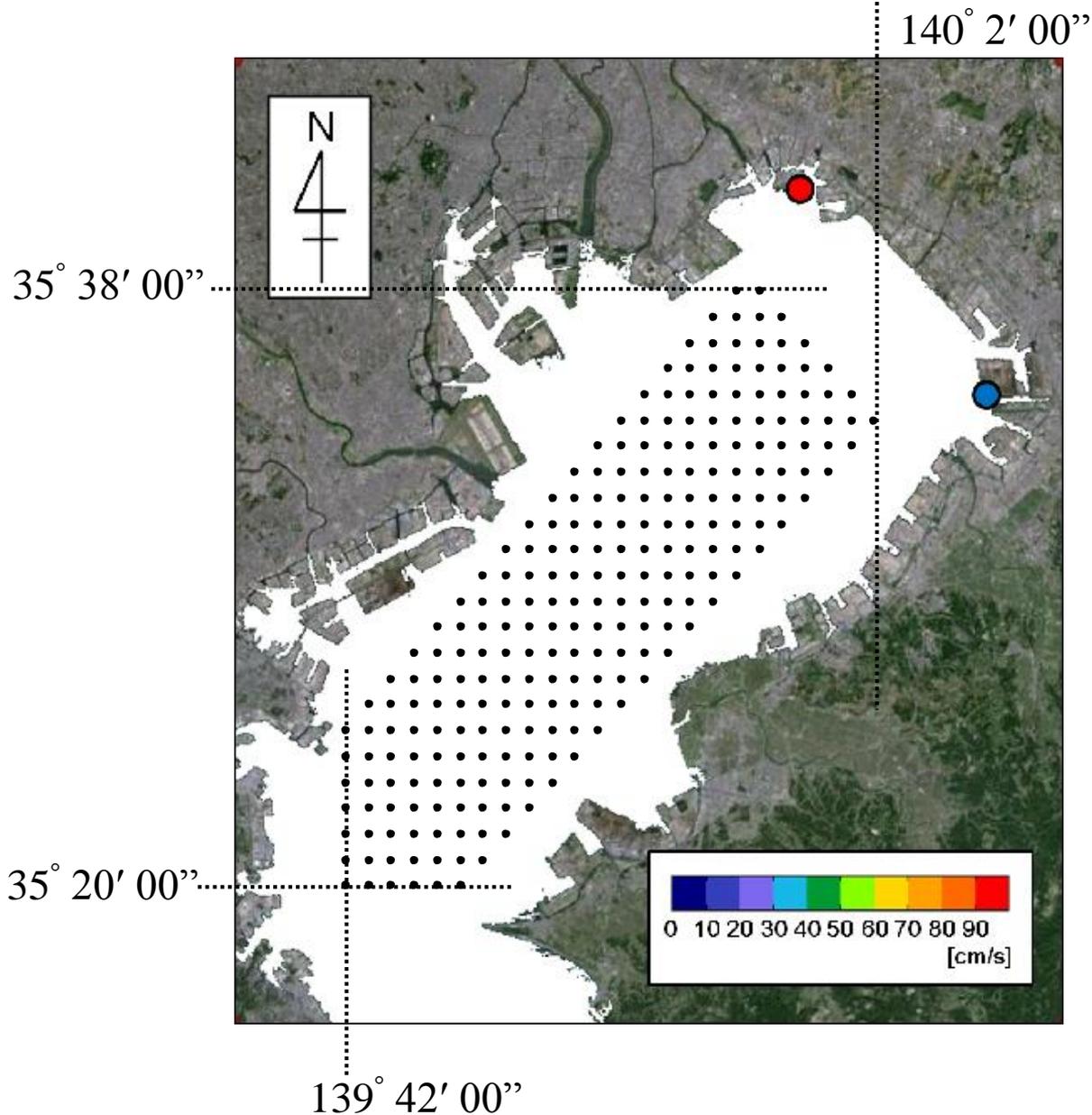


船橋局(視線方位:192°)

観測地点	緯度	経度
千葉局	35° 34' 12.3''	140° 05' 10.5''
船橋局	35° 40' 14.8''	139° 58' 29.3''
観測日時	2007年12月5日16時	
観測湾	東京湾	



# 表層流速推定を行う海上の評価点



緯度

35° 20' 00" ~ 35° 38' 00"

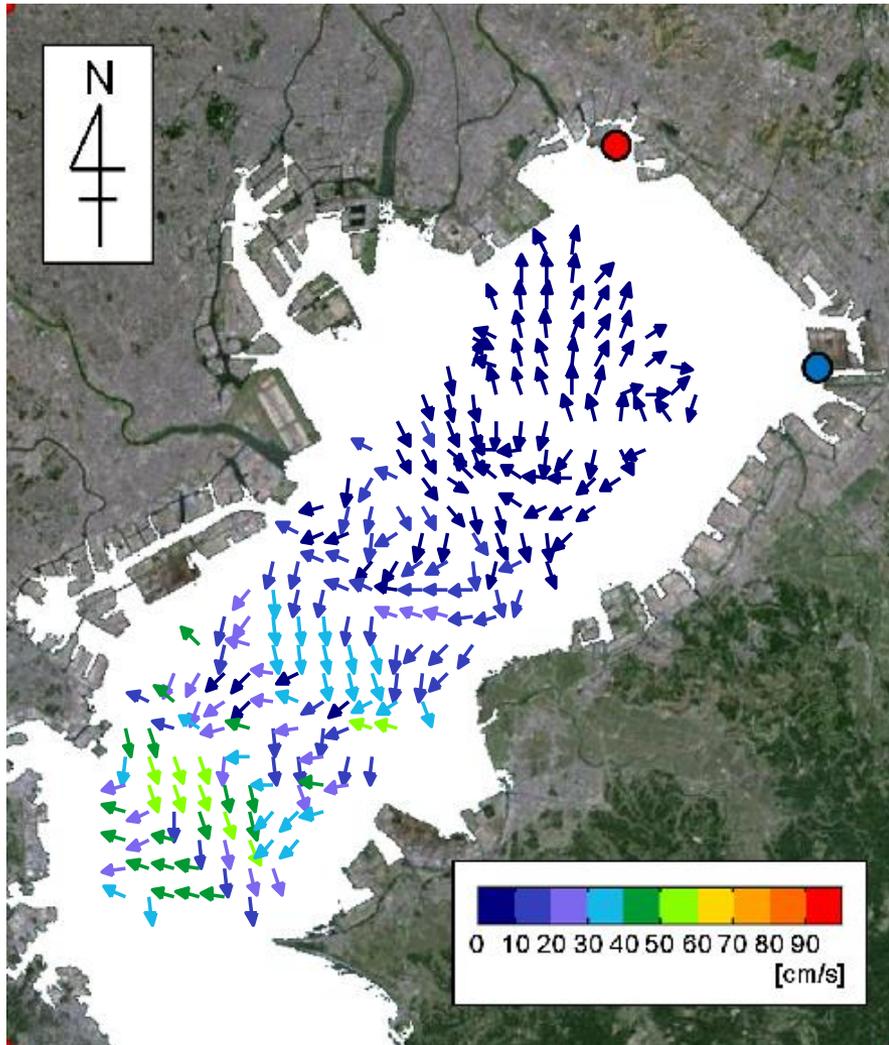
経度

139° 42' 00" ~ 140° 2' 00"

の範囲に評価点を作成

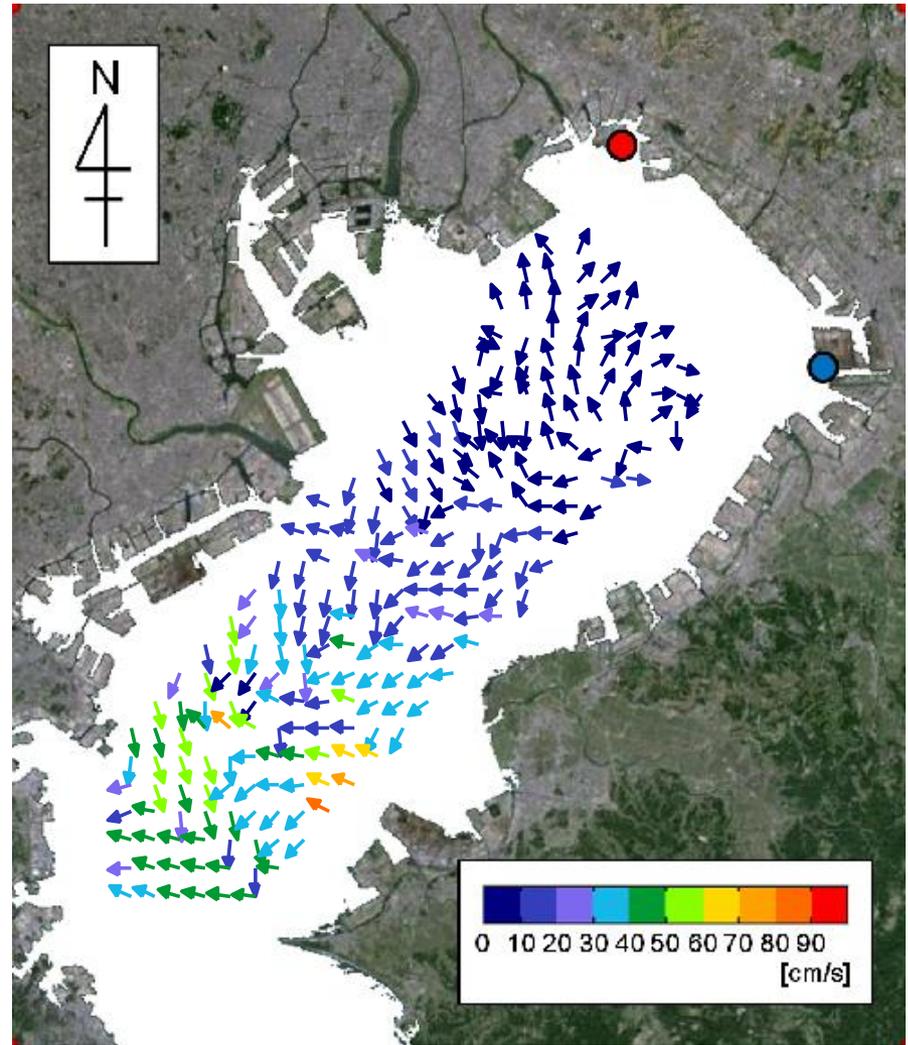
# 4素子を用いた場合の表層流速マップ

4e1. 2D Surface Current Velocity without KR Product Transform



4素子(KR無)を用いた場合の表層流速マップ

4e1. 2D Surface Current Velocity with KR Product Transform

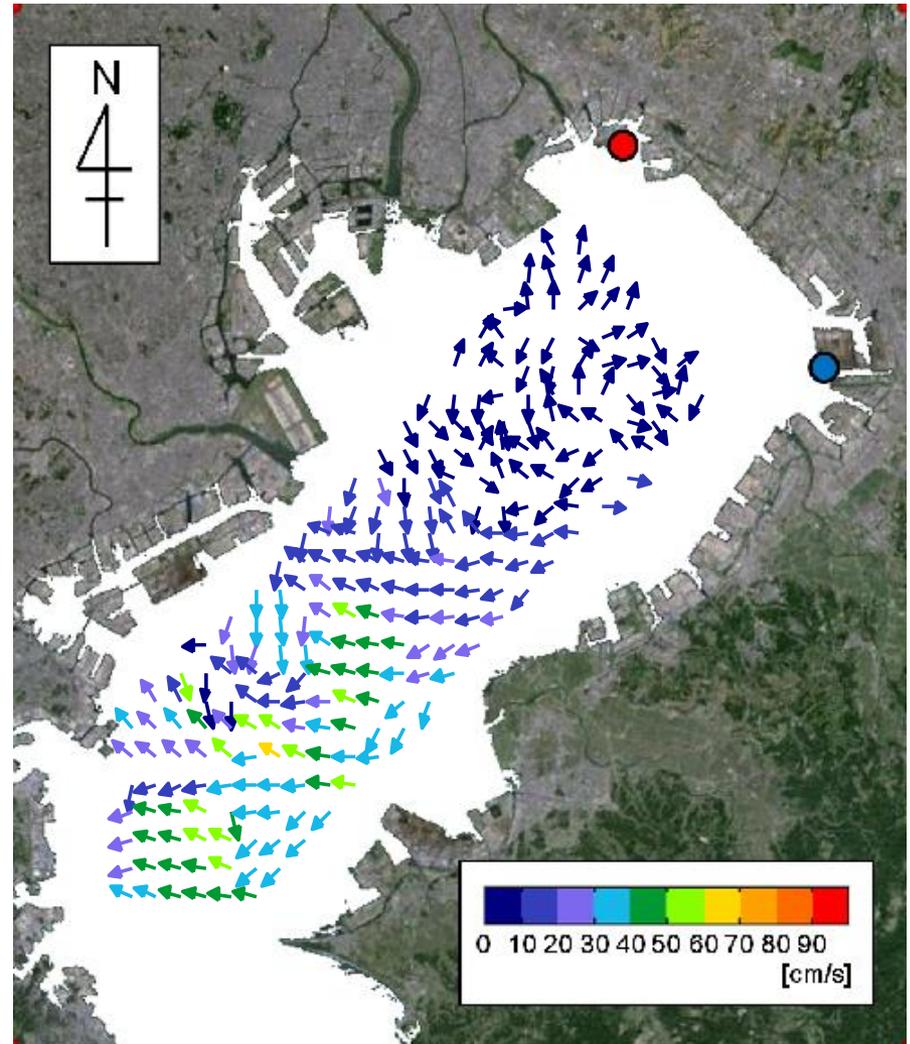
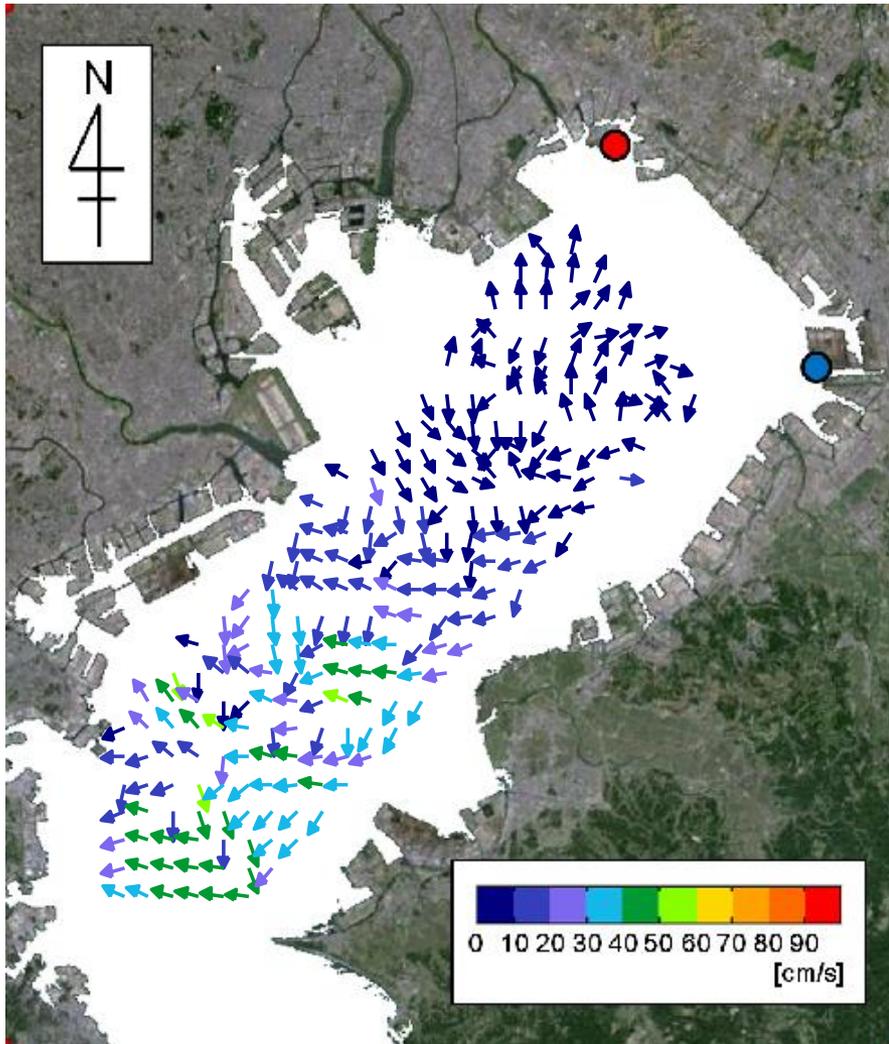


4素子(KR有)を用いた場合の表層流速マップ

# 7素子を用いた場合の表層流速マップ

7el. 2D Surface Current Velocity without KR Product Transform

7el. 2D Surface Current Velocity with KR Product Transform



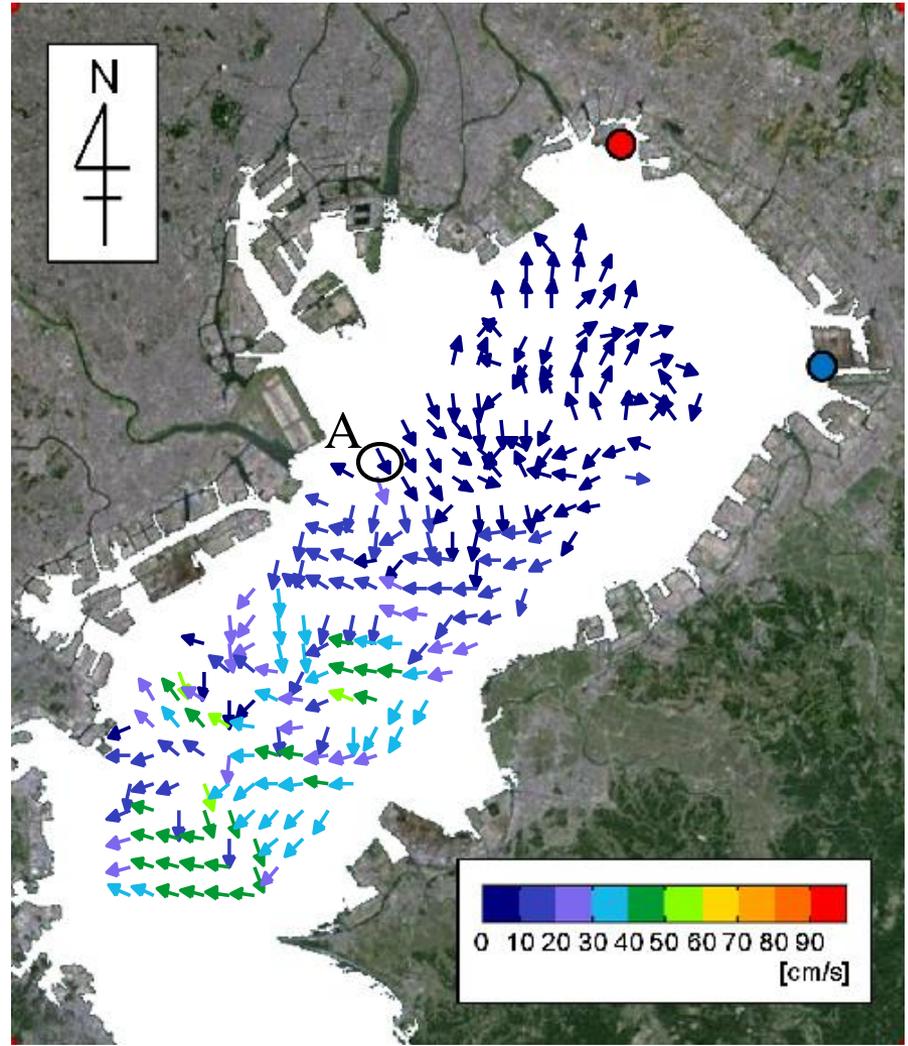
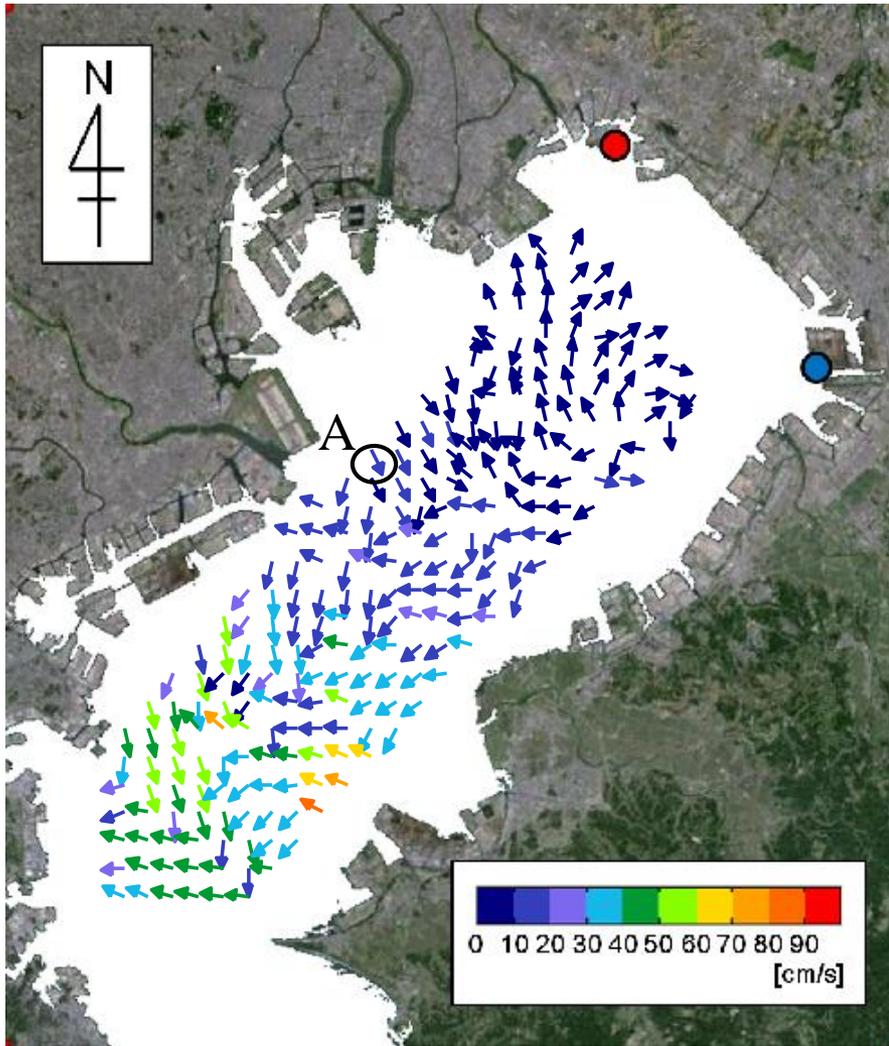
7素子(KR無)を用いた場合の表層流速マップ

7素子(KR有)を用いた場合の表層流速マップ

# 4素子(KR有)と7素子(KR無)の比較

4el. 2D Surface Current Velocity with KR Product Transform

7el. 2D Surface Current Velocity without KR Product Transform



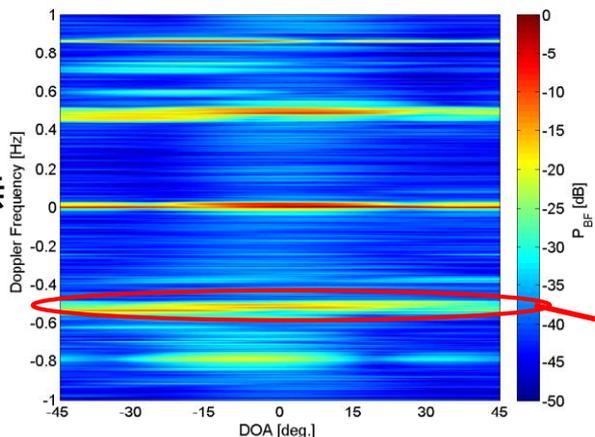
4素子(KR有)を用いた場合の表層流速マップ

7素子(KR無)を用いた場合の表層流速マップ

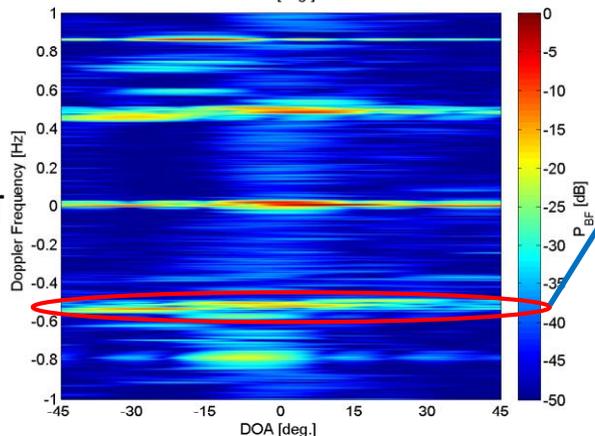
図中のAにおける到来方向, Doppler周波数の推定結果を確認

# A点における2D, DOAスペクトル(千葉局)

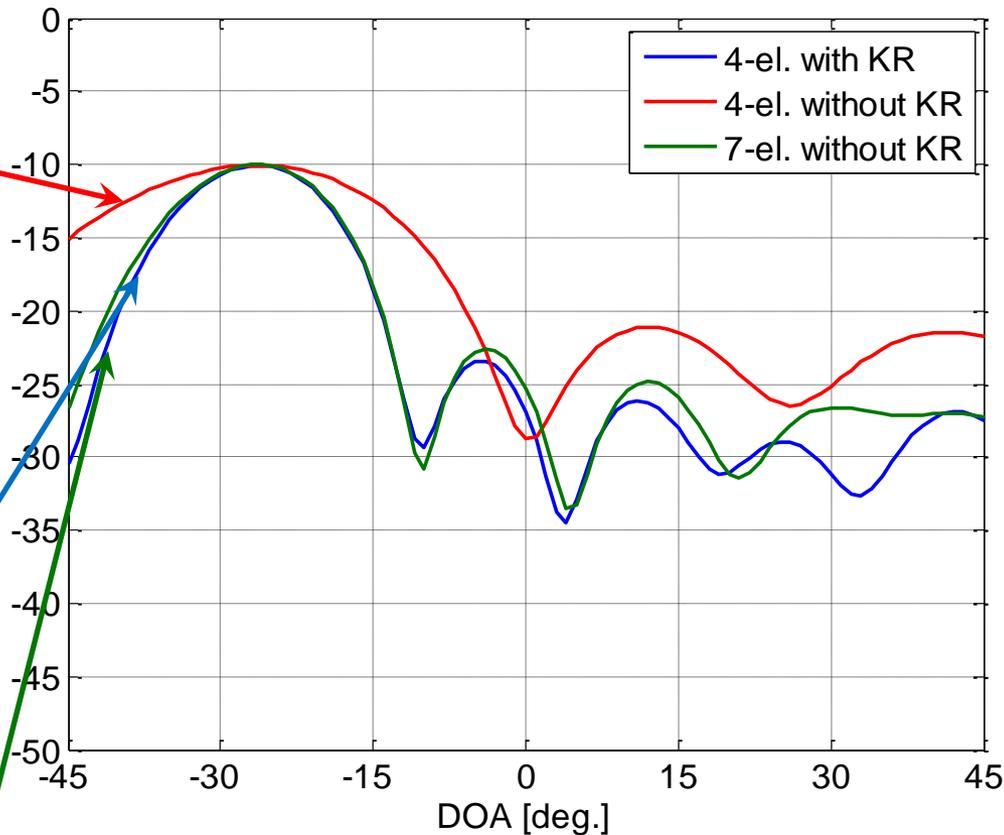
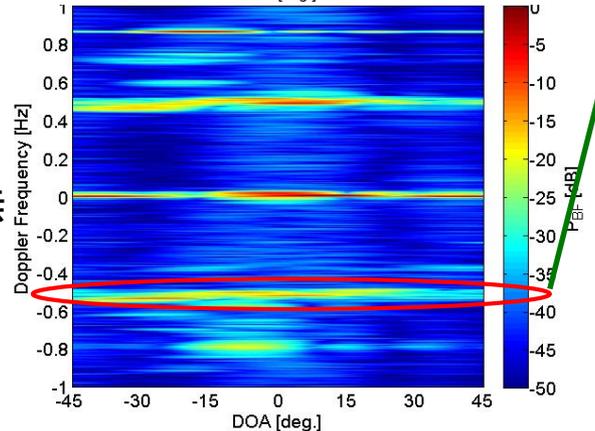
4素子KR無



4素子KR有

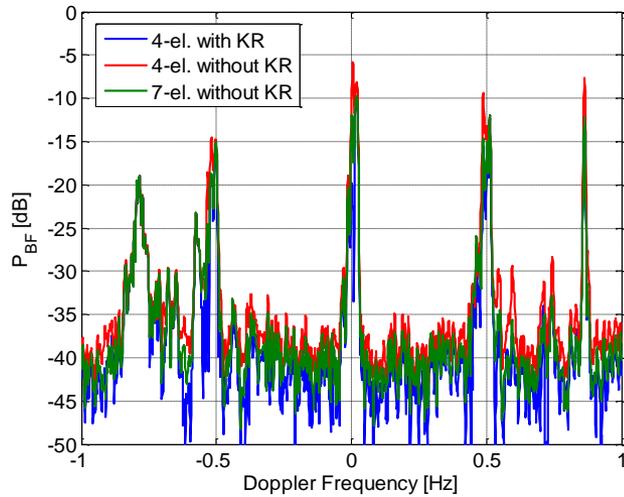


7素子KR無



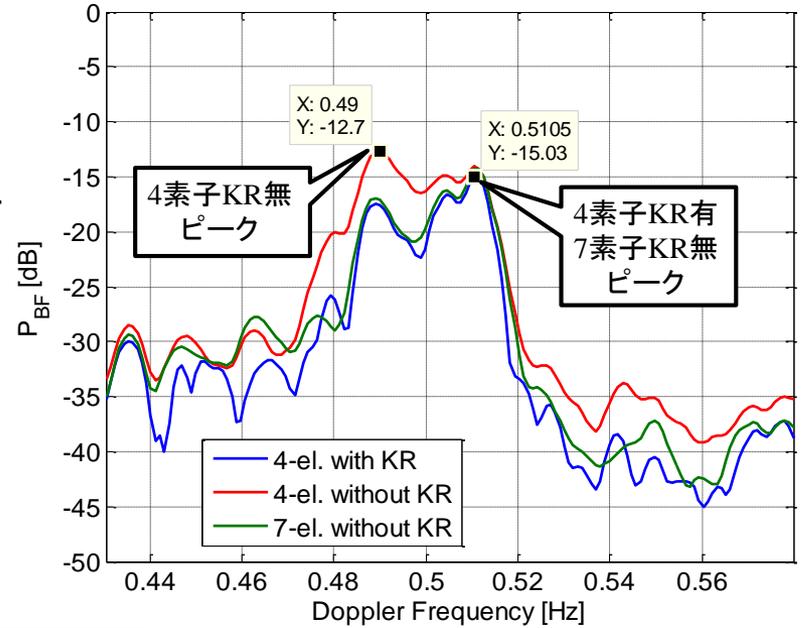
4素子ULAにKR積拡張処理を適用  
→7素子ULAと同等のメインビーム幅

# A点におけるDoppler周波数スペクトル(千葉局)

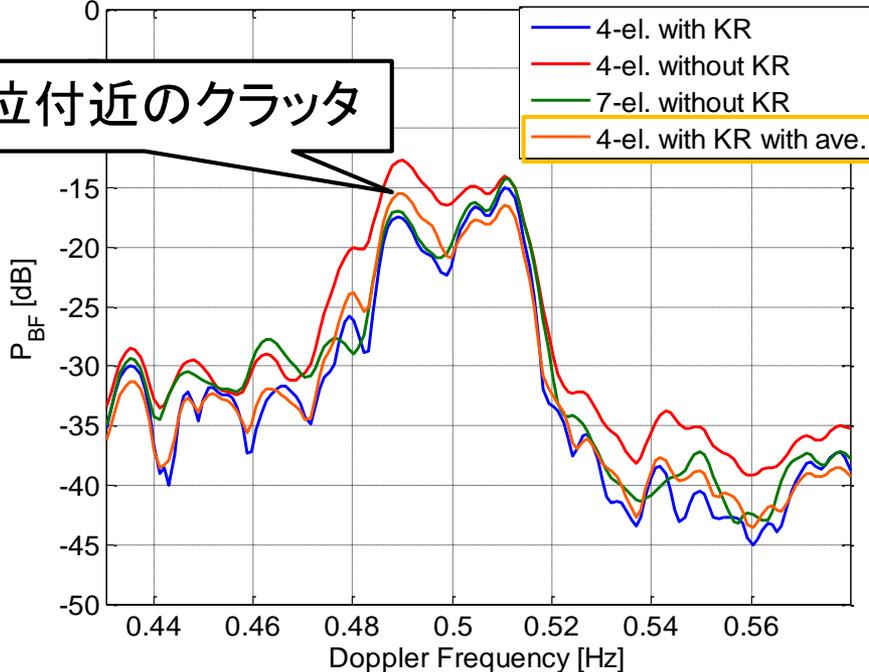


千葉局の視線方位 $-7^\circ$ における  
Doppler周波数スペクトル

正の領域と  
負の領域を  
重ね合わせ



視線方位付近のクラッタ



$-17^\circ \sim 3^\circ$ における  
Doppler周波数スペクトルを  
重ね合わせ, 平均(橙線)

KR積拡張処理による  
角度分解能の向上

視線方位付近の  
クラッタ抑圧効果

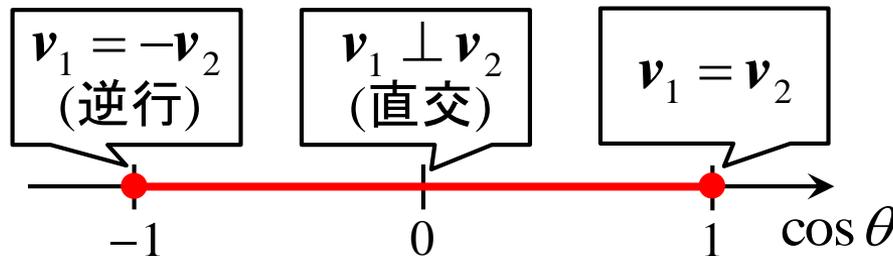
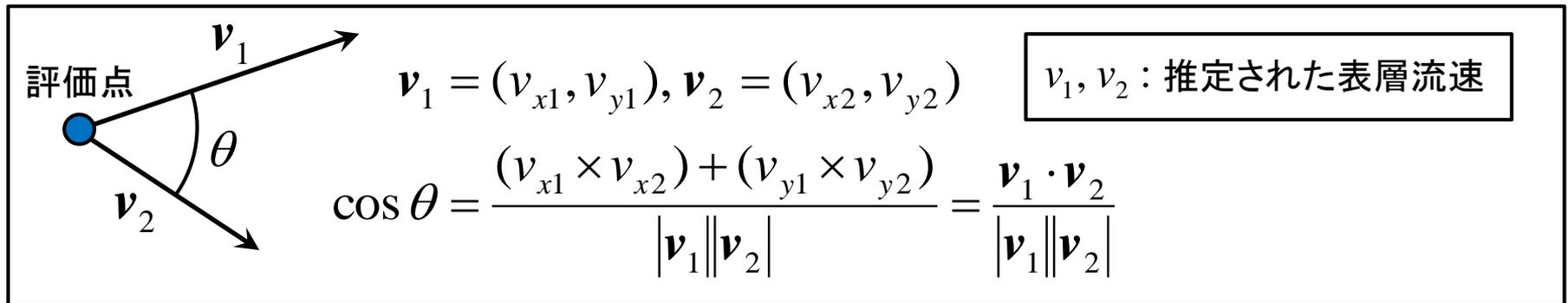
# 二次元表層流速マップ同士の角度相関(導出方法)

## ■海洋レーダにKR積拡張処理を適用

4素子アレー+KR積拡張処理 = 7素子アレー

- 到来方向推定・・・7素子相当のメインビーム幅が得られることを確認
- Doppler周波数推定・・・クラッタの抑圧効果を確認

➡ 二次元表層流速マップ同士の角度相関を確認  
→ 類似した結果が得られているかマップ全体で評価



各評価点において相関を算出

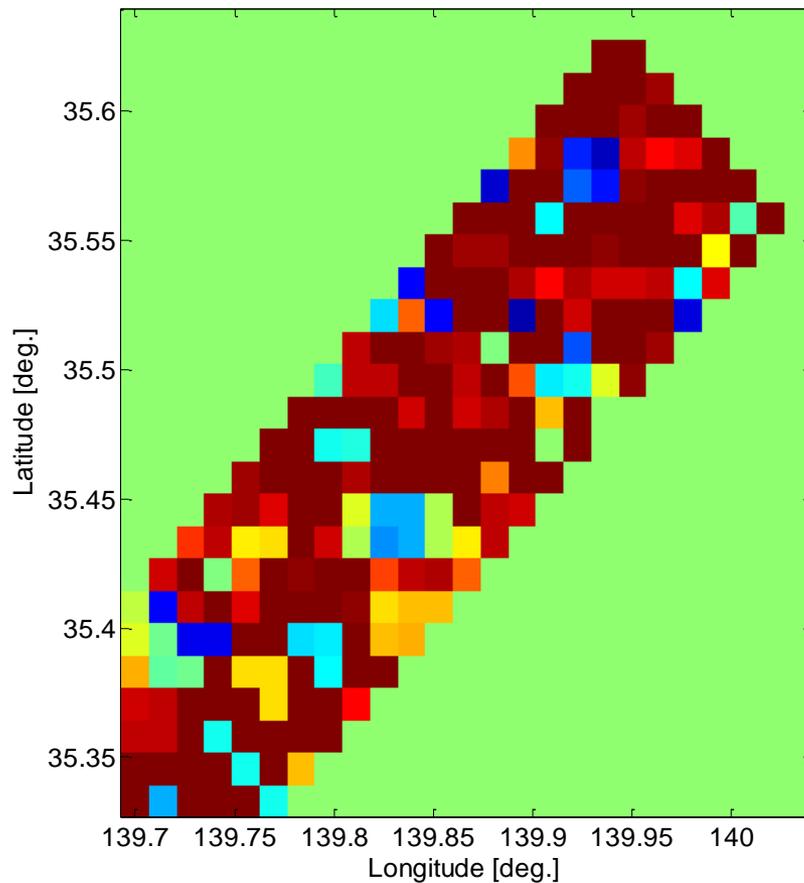
評価点数で平均

マップ同士の角度相関(-1~1)を確認

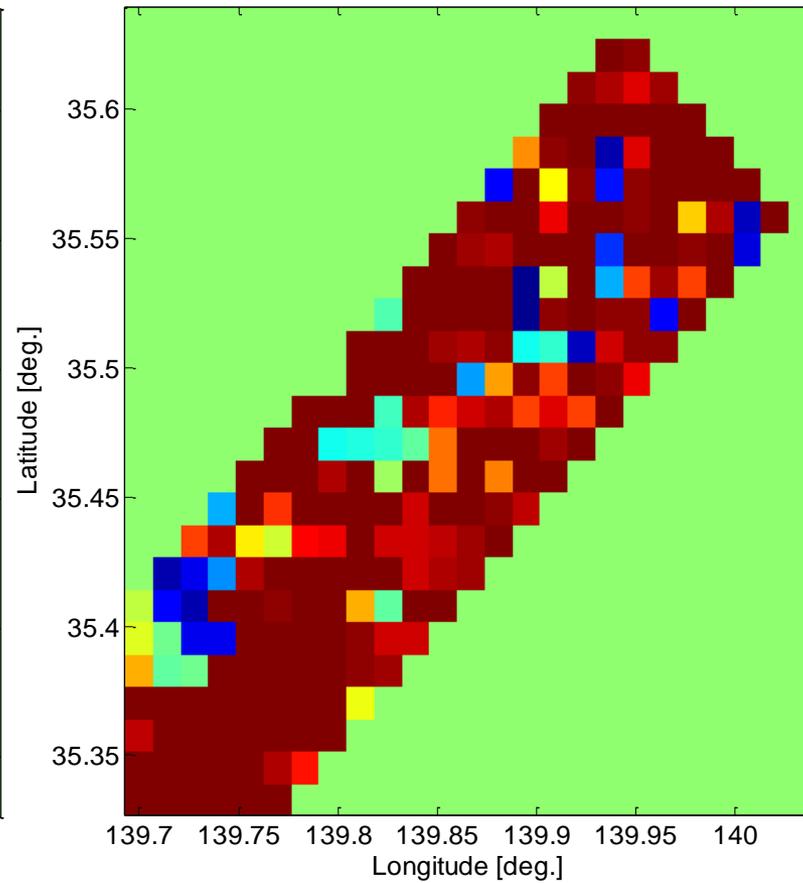
# 二次元表層流速マップ同士の角度相関(結果)

4素子(KR無, KR有)と7素子の相関

	4el. w/o KR	4el. w/ KR	7el. w/o KR
4el. w/o KR		0.652	0.647
4el. w/ KR	0.652		0.702
7el. w/o KR	0.647	0.702	



4素子KR無 vs 7素子KR無



4素子KR有 vs 7素子KR無

# まとめ

---

## ■陸上設置型海洋レーダへのKR積拡張処理の適用

- KR積拡張処理による角度分解能改善効果を確認
- ドップラ周波数推定結果がKR積拡張処理の有無で変化  
→ 角度分解能の改善により近接する角度のクラッタが抑圧され、ドップラ周波数の推定結果が変化
- 二次元表層流速マップ同士の角度相関を算出  
→ 4素子アレーにKR積拡張処理を適用することで7素子アレーと同等の結果が得られることを確認

## 今後の課題

- 速度の大きさも加味した相関の算出
- 他の領域における解析
- 他のアレー配置による検討

# 以下補足

---

# Khatri-Rao Product Array (Narrowband)

- ▶ Enlarge array aperture ***virtually*** by using KR-product [1],[2]

## L-el. array data vector

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_L(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^K \mathbf{a}(\theta_i) s_i(t) + \mathbf{n}(t)$$



## Correlation Matrix (L x L matrix)

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H + \sigma^2 \mathbf{I}$$



Assumption  
*Uncorrelated waves*

## The KR product array data

(extended array,  $L^2$  vector)

$$\mathbf{x}_e' = \text{vec}[\mathbf{R}_{xx}] = \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_{xx})_{1-col} \\ (\mathbf{R}_{xx})_{2-col} \\ \vdots \\ (\mathbf{R}_{xx})_{L-col} \end{bmatrix} = \underline{(\mathbf{A}^* \odot \mathbf{A})\bar{\mathbf{s}}} + \text{vec}[\sigma^2 \mathbf{I}]$$

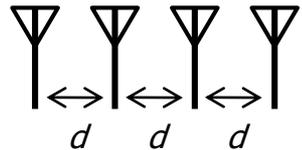
Khatri-Rao matrix product

- [1] W. K. Ma, T. H. Hsieh, and C. Y. Chi, "DOA estimation of quasi-stationary signals with less sensors than sources and unknown spatial noise covariance: A Khatri-Rao subspace approach," IEEE Trans. Signal Process., vol.58, no.4, pp.2168-2180, April 2010.
- [2] P. Pal and P. P. Vaidyanathan, "Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degree of freedom," IEEE Trans., Signal Processing, vol.58, no.8, pp.4167-4181, Aug. 2010.

# Khatri-Rao Product Array (Example)

Example

4-element ULA, **1 wave (K=1)**, No noise



Received data vector

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\omega} \\ e^{j2\omega} \\ e^{j3\omega} \end{bmatrix} s_1(t)$$

Data correlation Matrix

$$\mathbf{R}_{xx} \cong P_1 \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\omega} & e^{-j2\omega} & e^{-j3\omega} \\ e^{j\omega} & 1 & e^{-j\omega} & e^{-j2\omega} \\ e^{j2\omega} & e^{j\omega} & 1 & e^{-j\omega} \\ e^{j3\omega} & e^{j2\omega} & e^{j\omega} & 1 \end{bmatrix}$$

where  $\omega = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_1$

The KR product array data  
(extended array)

$$\mathbf{x}_e' = \text{vec}[\mathbf{R}_{xx}] \longrightarrow \mathbf{x}_e = \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_{xx})_{1,4} \\ (\mathbf{R}_{xx})_{1,3} \\ (\mathbf{R}_{xx})_{1,2} \\ (\mathbf{R}_{xx})_{1,1} \\ (\mathbf{R}_{xx})_{2,1} \\ (\mathbf{R}_{xx})_{3,1} \\ (\mathbf{R}_{xx})_{4,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j3\omega} \\ e^{-j2\omega} \\ e^{-j\omega} \\ 1 \\ e^{j\omega} \\ e^{j2\omega} \\ e^{j3\omega} \end{bmatrix} P_1 \propto \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\omega} \\ e^{j2\omega} \\ e^{j3\omega} \\ e^{j4\omega} \\ e^{j5\omega} \\ e^{j6\omega} \end{bmatrix}$$

7-element ULA data vector

L-el. array  $\rightarrow$  (2L-1)- el. array

Omitting repeated elements having the same value

# (補足)FMICWレーダについて

## 送信信号

$$s_{tr}(t) = A \cos\left(2\pi(f_0 t) + \frac{B}{2T_s} t^2\right)$$

## 受信信号

$$s_{rec}(t) = gA' \cos\left(2\pi(f_0(t-\tau)) + \frac{B}{2T_s} (t-\tau)^2\right)$$

$f_0$ : 中心周波数

$B$ : 掃引周波数帯域幅

$T_s$ : 周波数掃引時間

$\tau$ : 伝搬遅延時間

$f_b$ : ビート周波数

$A$ : 送信信号の振幅

$A'$ : 受信信号の振幅

$g$ : ターゲットの反射係数

$r_0$ : ターゲットまでの距離



送信信号と受信信号の  
周波数差を取る(ビート信号作成)

## ビート信号

$$s_b(t) = gAA' \cos\left(2\pi(f_0 \tau + \frac{B}{T_s} \tau t)\right)$$

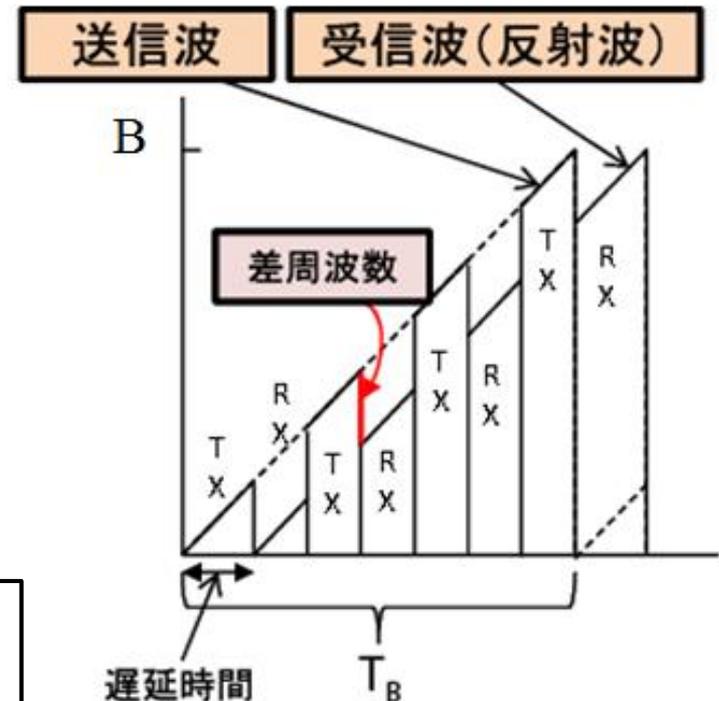
## ビートスペクトラム

$$S_b(f) = gAA'T_s \exp\left(j \frac{4\pi r_0}{\lambda_0}\right) \text{sinc}\left(\pi(f - f_b)T_s\right)$$

$$f_b = \frac{B}{T_s} \tau$$

周波数領域を時間領域に変換, 距離推定

$$S_b(r) = gAA'T_s \exp\left(j \frac{4\pi r_0}{\lambda_0}\right) \text{sinc}\left(\frac{2\pi B}{c}(r - r_0)\right)$$

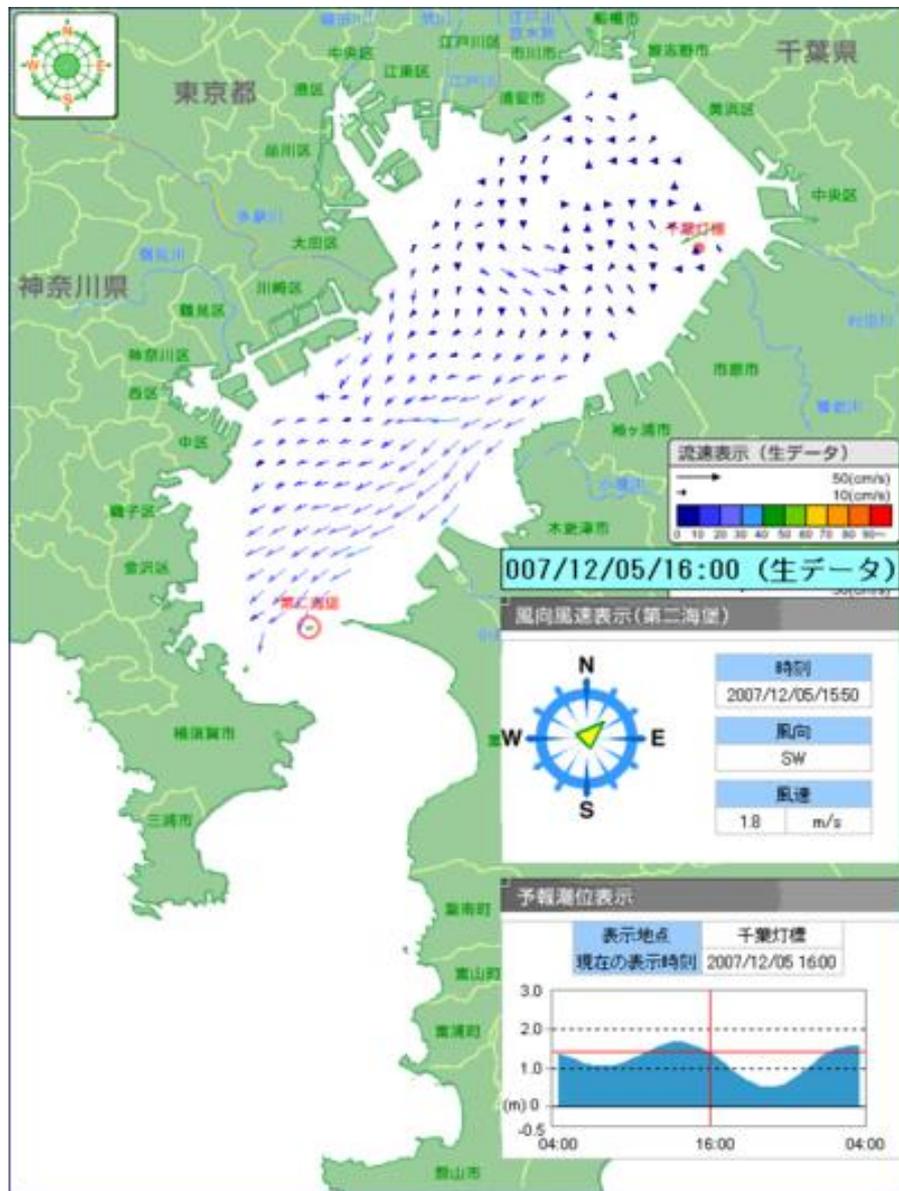


# (補足)観測範囲と使用レーダ諸元



- 周波数———24.515MHz±50KHz(HF帯)
- レーダ方式——FMICW(受信DBF方式型)
- ビーム方式——ナロービーム(DBF)型
- アンテナ——八木アンテナ
- 視程距離———60 km
- 分解能———距離1.5km、方位7.5度
- 設置面積———受信空中線:55m×7m  
———送信空中線:7m×9m
- 観測時間間隔——通常1時間毎

# (補足)当日の表層流の様子



本検討では物理的に不自然な  
(隣り合うベクトル同士が対向している等)  
流速の補正を行っていないため、  
左図のような自然な流速マップと  
なっていない

# (補足)海洋の流速推定(1/2)

**短波帯海洋レーダ**：電波と波浪成分を**ブラッグ共鳴**→後方散乱を受信

電波と波浪成分の共鳴条件・・・ $\lambda_r = 2\lambda_w$

➡ **電波の1/2波長である波浪成分が後方に強く反射(1次散乱)される**

$$\text{ドップラ効果による周波数シフト } \Delta f = \frac{2v}{c} f_r \quad \text{波浪成分波の位相速度 } v_w = \sqrt{\frac{g\lambda_w}{2\pi}}$$

↓

$$v = v_w$$
$$\Delta f = f_0$$

表層流速が無い場合のドップラ周波数

$$f_0 = \frac{2v_w}{c} f_r$$

表層速度が無い場合のドップラ周波数は波浪成分波の周波数に一致

$$f_0 = \frac{2v_w}{c} f_r = \frac{2v_w}{\lambda_r} = \frac{v_w}{\lambda_w} = f_w$$

基地局のビーム視線方向の表層流速成分  $v_s$  を考える

波浪の波形の移動速度  $v = v_s + v_w$   $\Delta f = f_d$  とすると

$$v_s = \frac{c(f_d \pm f_0)}{2f_r}$$

$g$  : 重力加速度  
 $f_r$  : 電波の周波数

## (補足)海洋の流速推定(2/2)

$f_r = 24.515$  [MHz]であるから,  $\lambda_r \approx 12$  [m]

よって, 波浪成分の波長は  $\lambda_w = \frac{\lambda_r}{2} \approx 6$  [m]

波浪の位相速度

$$v_w = \sqrt{\frac{g\lambda_w}{2\pi}} \approx 3.09 \text{ [m/s]}$$

表層流速が無い場合のドップラ周波数,  
すなわち波浪成分の周波数は

$$f_0 = f_w = \frac{2v_w}{c} f_r \approx 0.505 \text{ [Hz]}$$

以上より, 基地局のビーム視線方向の流速成分  $v_s$  は

$$v_s = \frac{c(f_d \pm f_0)}{2f_r} \approx 6.12(f_p \pm 0.505) \text{ [m/s]}$$

$$\begin{cases} f_p > 0 \rightarrow v_s = 612(f_p - 0.505) \\ f_p < 0 \rightarrow v_s = 612(f_p + 0.505) \end{cases}$$

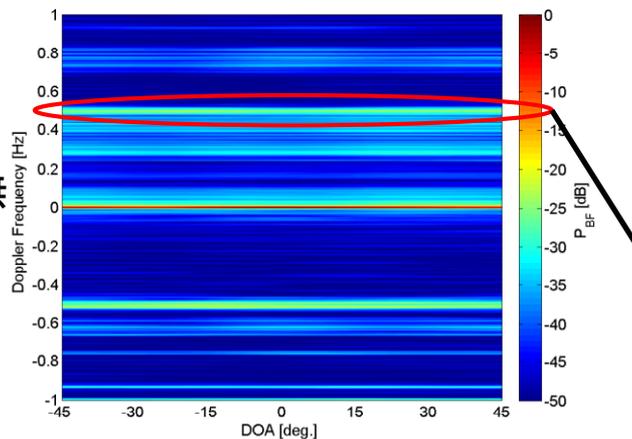
$f_p$ : 第一次散乱スペクトルピーク周波数



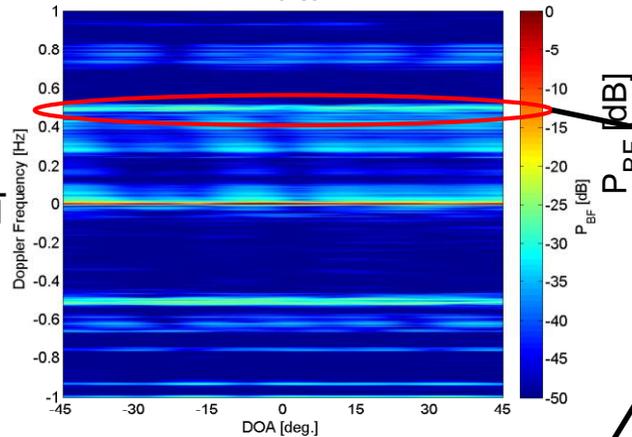
共鳴した第一次波浪成分波の位相速度成分を引き,  
**表層流成分のドップラシフトを得る**

# A点における2D, DOAスペクトル(船橋局)

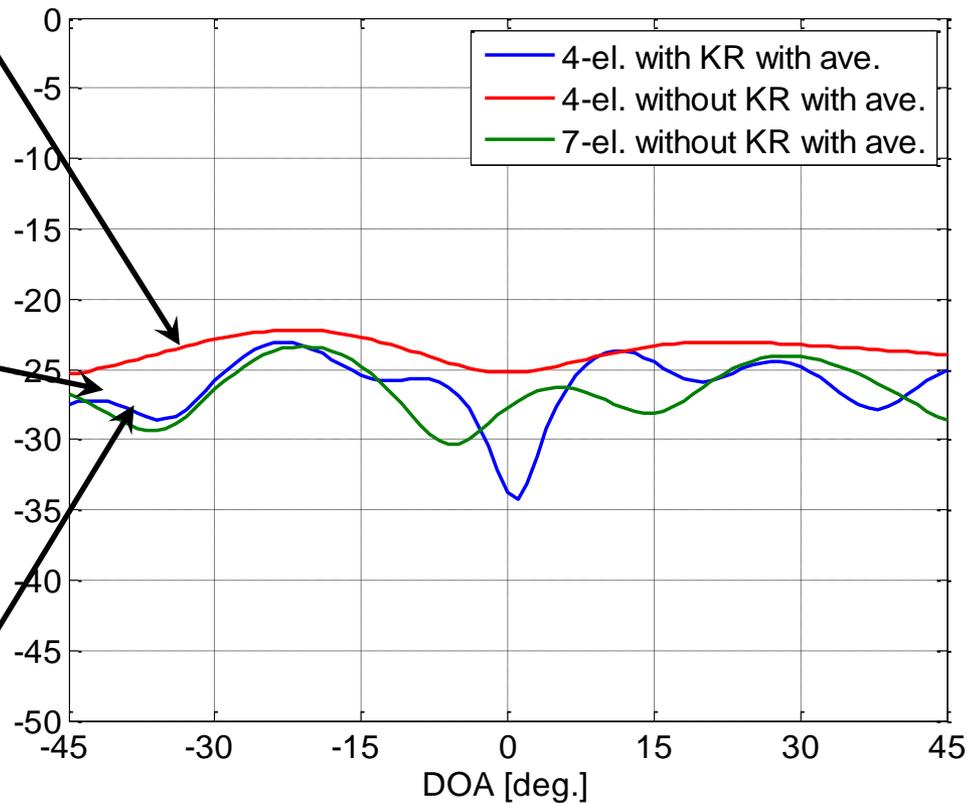
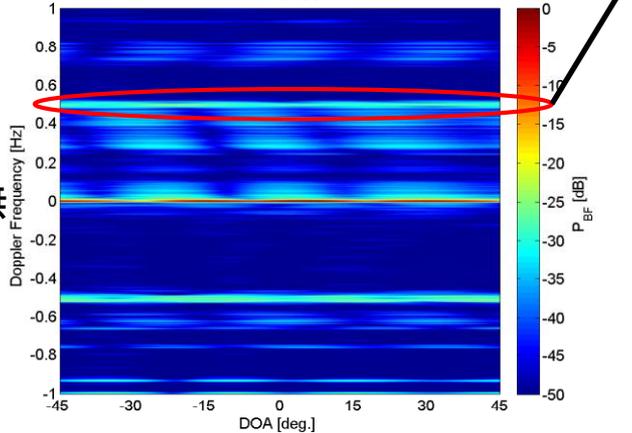
4素子KR無



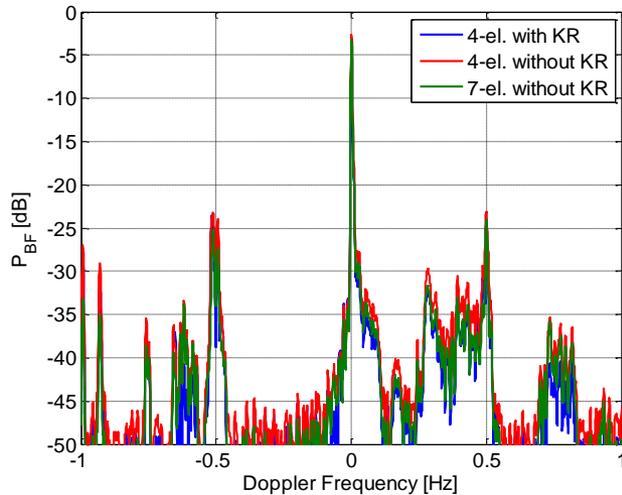
4素子KR有



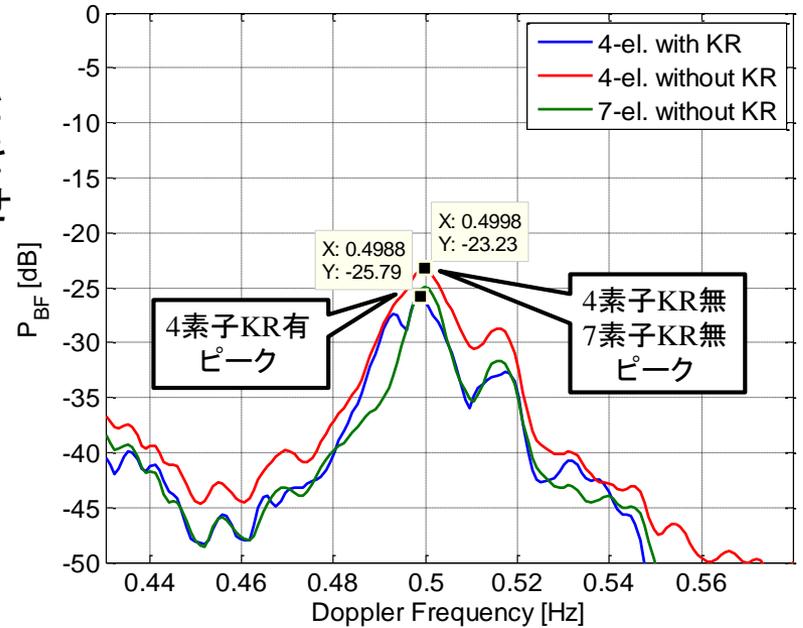
7素子KR無



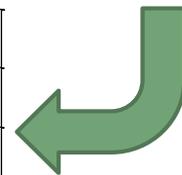
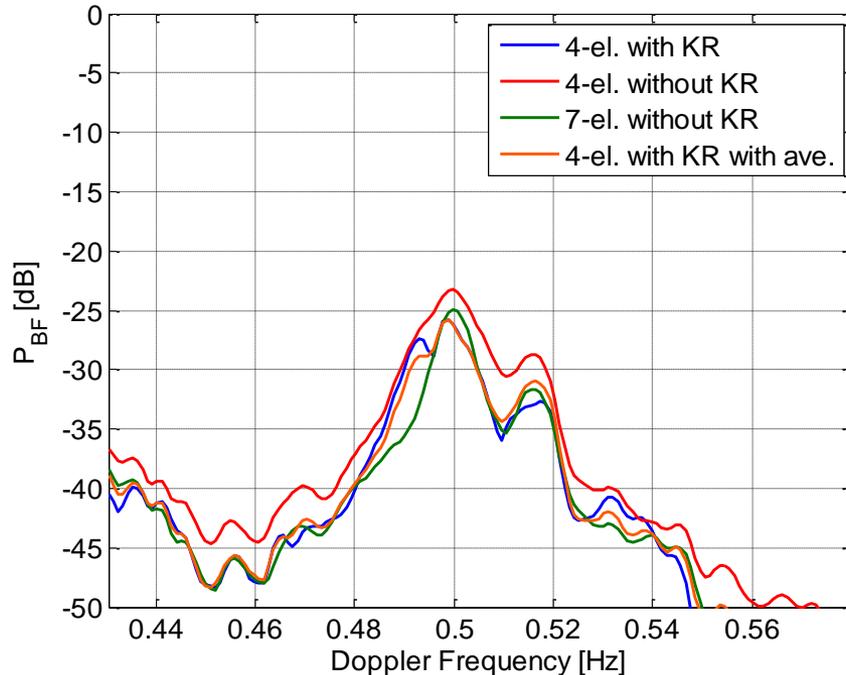
# A点におけるDoppler周波数スペクトル(船橋局)



正の領域と負の領域を重ね合わせ



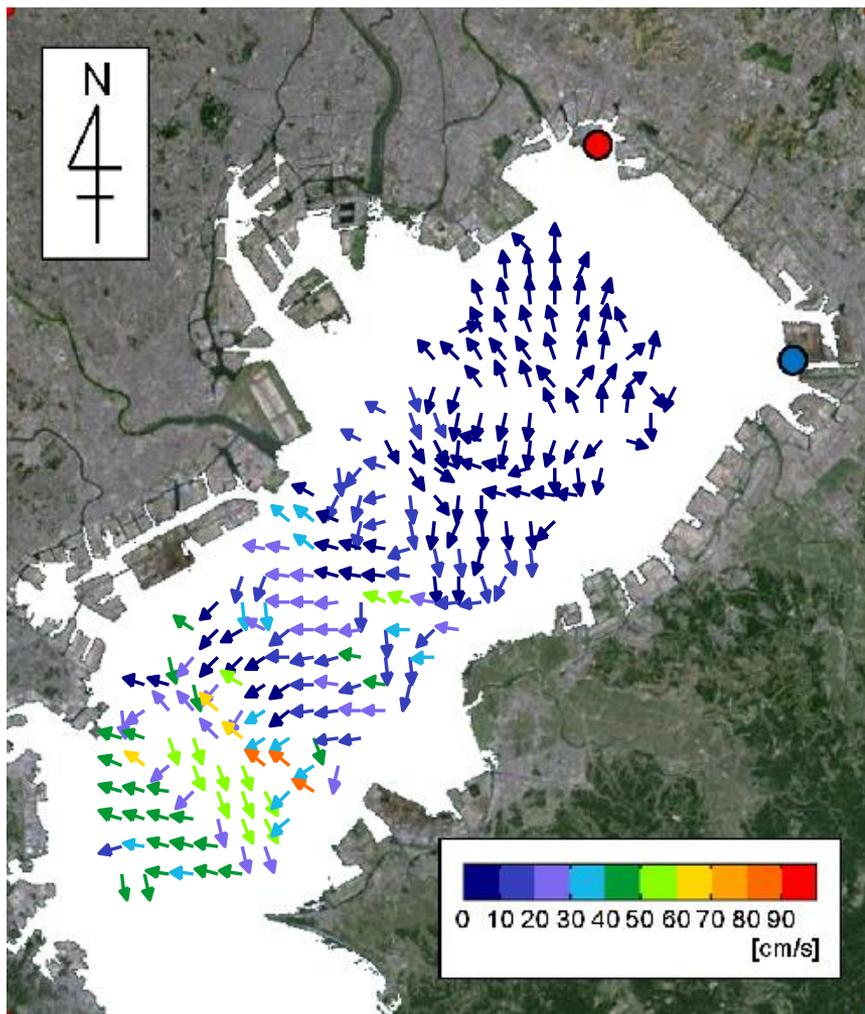
船橋局の視線方位27°における  
Doppler周波数スペクトル



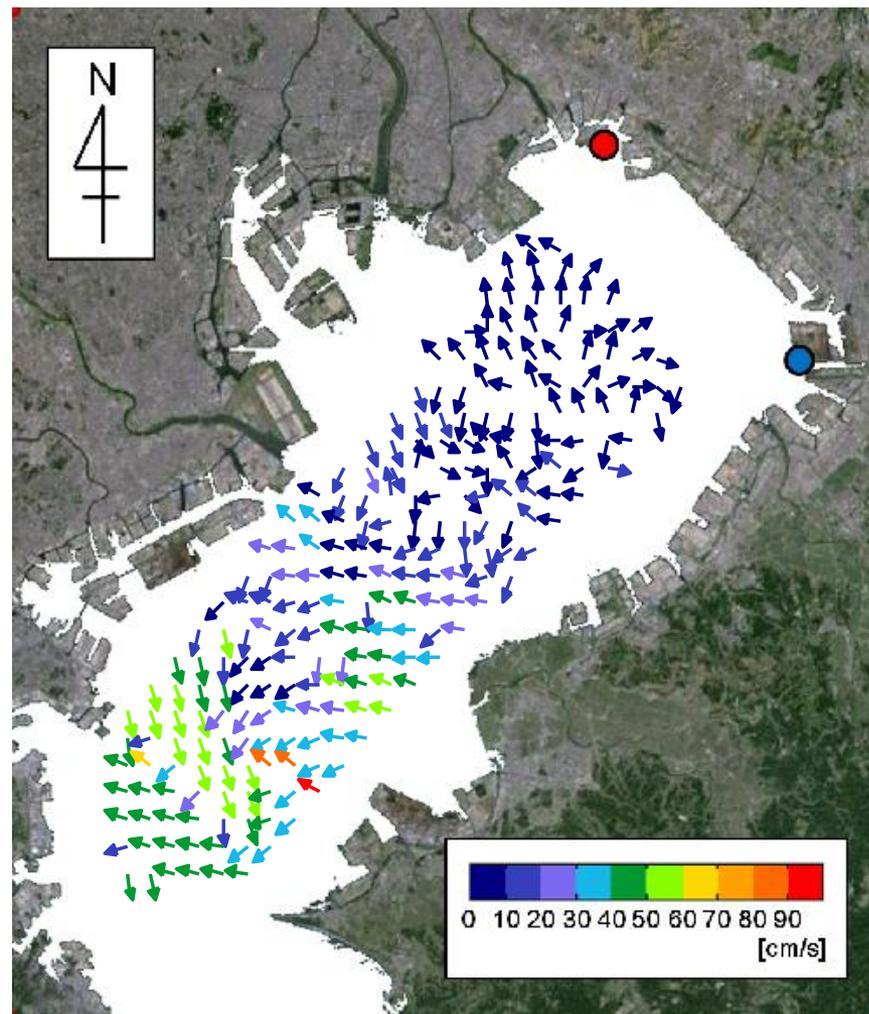
17°~37°における  
Doppler周波数スペクトルを  
重ね合わせ, 平均(橙線)

# 4素子を用いた場合の表層流速マップ(補正無)

4el. 2D Surface Current Velocity without KR Product Transform

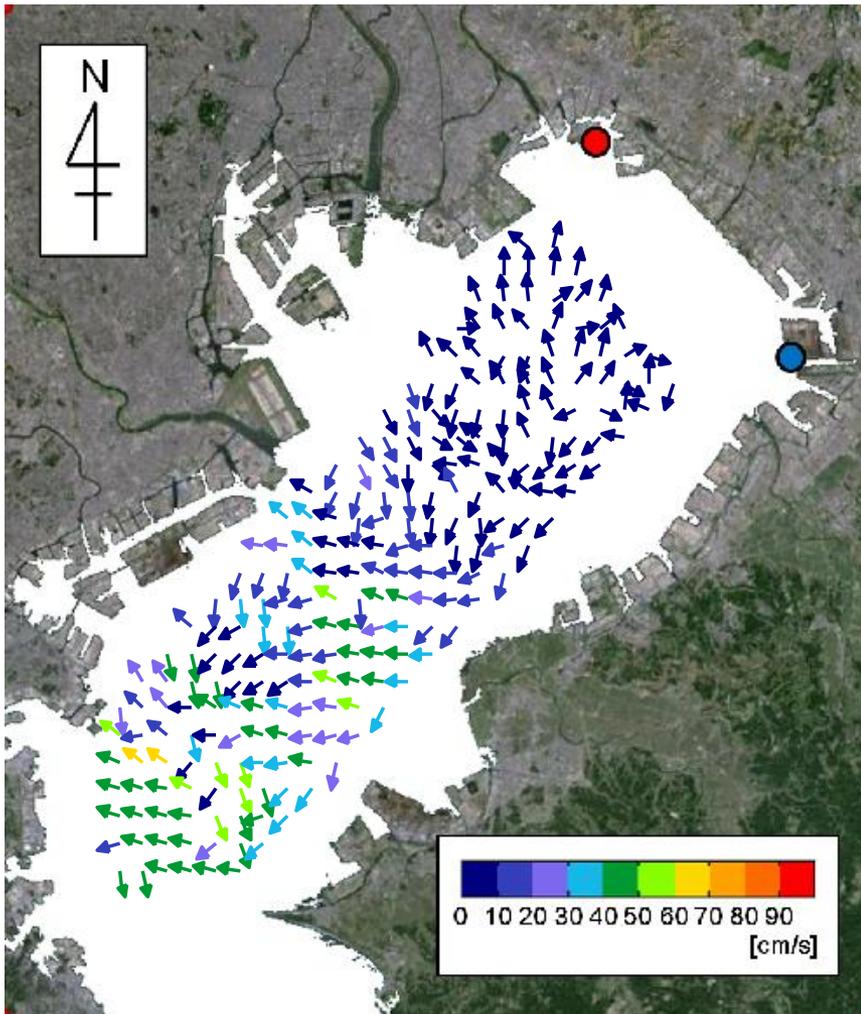


4el. 2D Surface Current Velocity with KR Product Transform

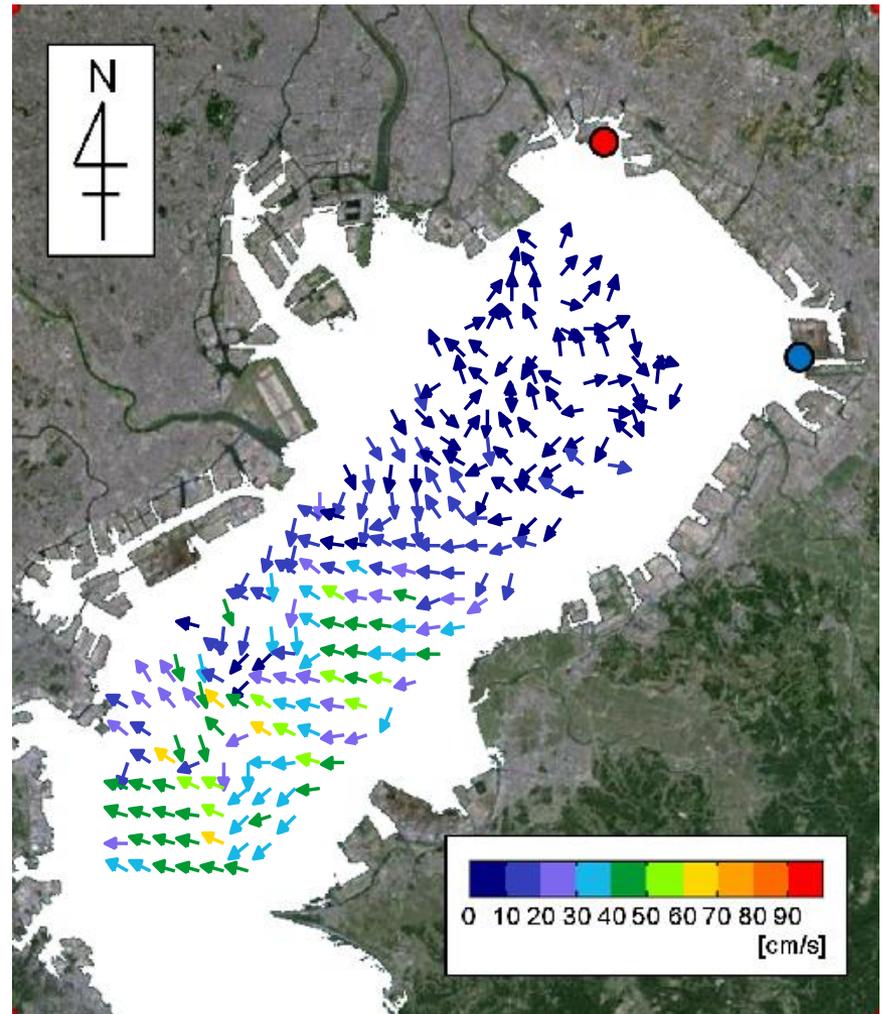


# 7素子を用いた場合の表層流速マップ(補正無)

7el. 2D Surface Current Velocity without KR Product Transform

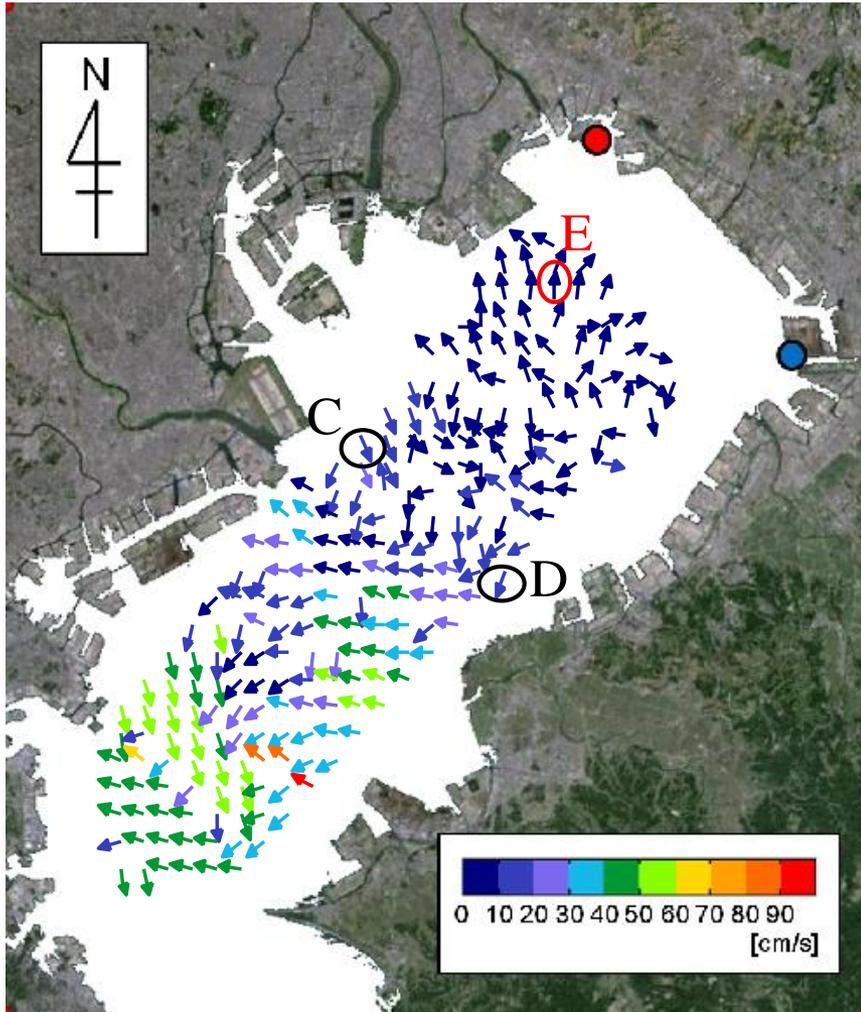


7el. 2D Surface Current Velocity with KR Product Transform

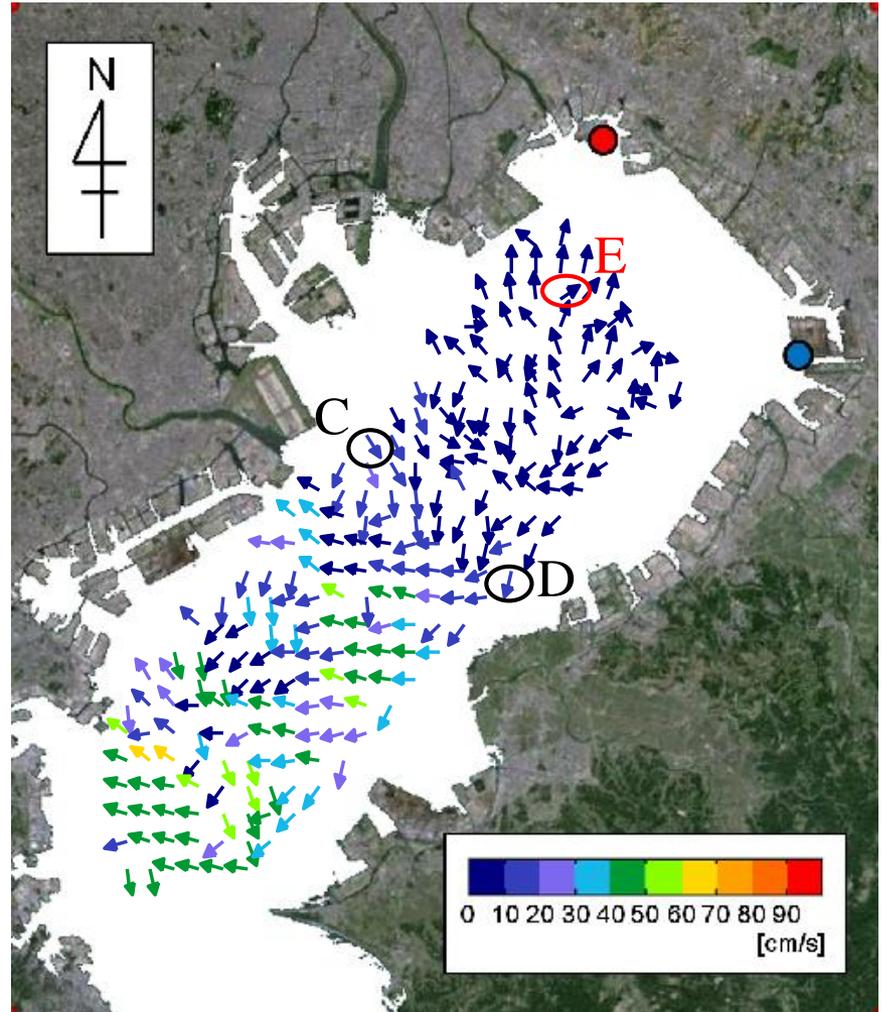


# 4素子(KR有)と7素子(KR無)の比較(補正無)

4el. 2D Surface Current Velocity with KR Product Transform



7el. 2D Surface Current Velocity without KR Product Transform



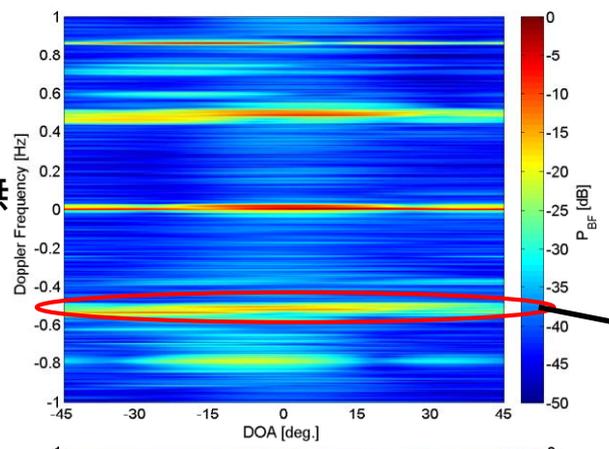
C, D, Eにおいて

- 2Dスペクトル(DOA-Doppler)
- DOAスペクトル
- Doppler周波数スペクトル

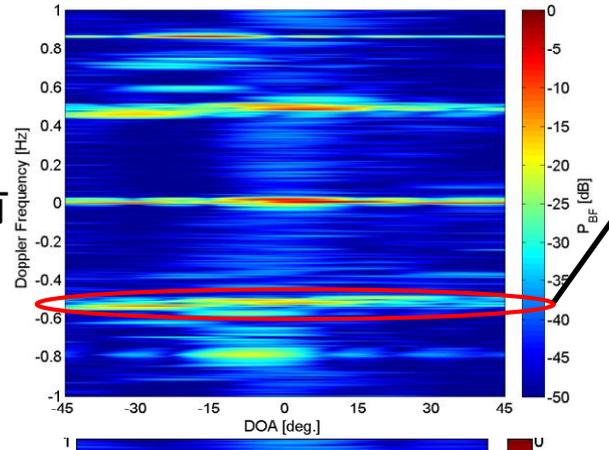
を基地局毎に比較

# C点における2D, DOAスペクトル(千葉局)

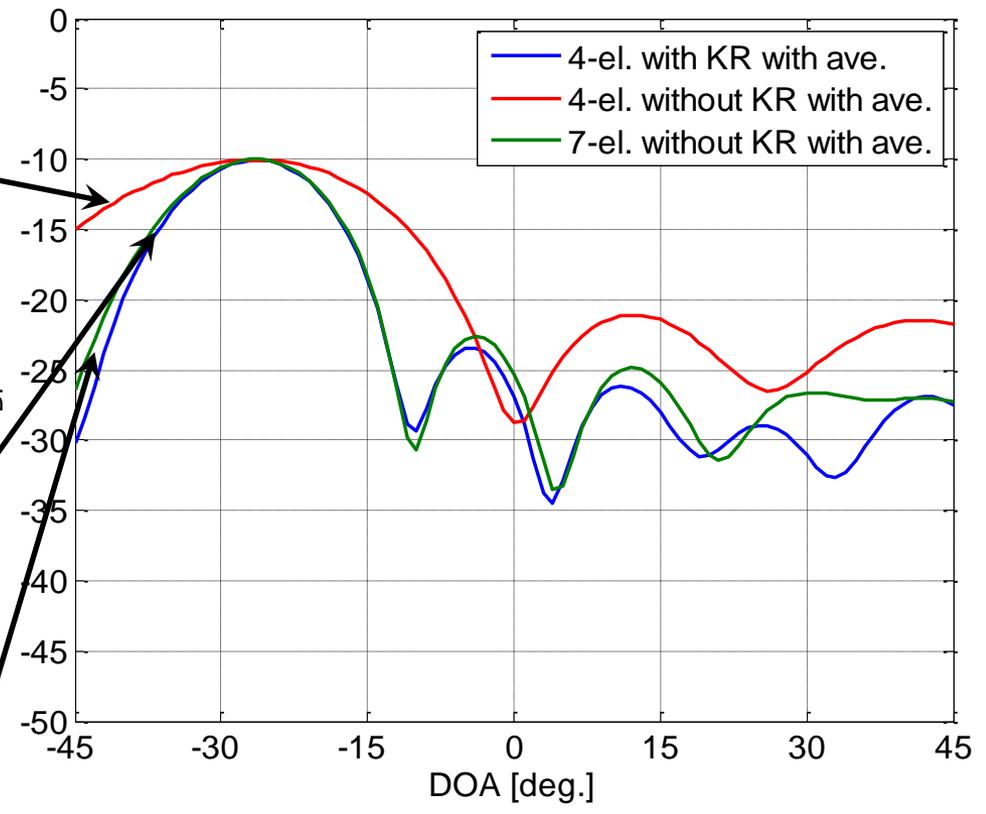
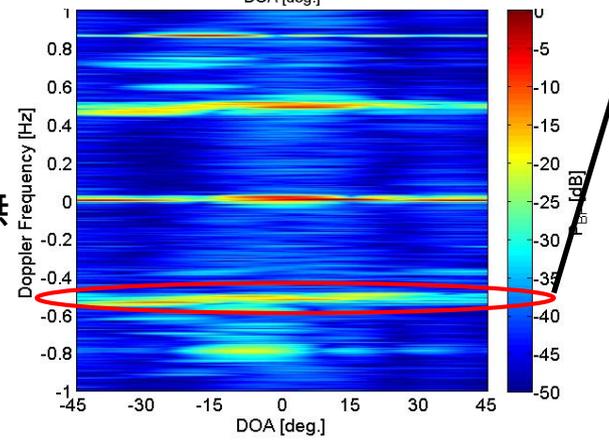
4素子KR無



4素子KR有

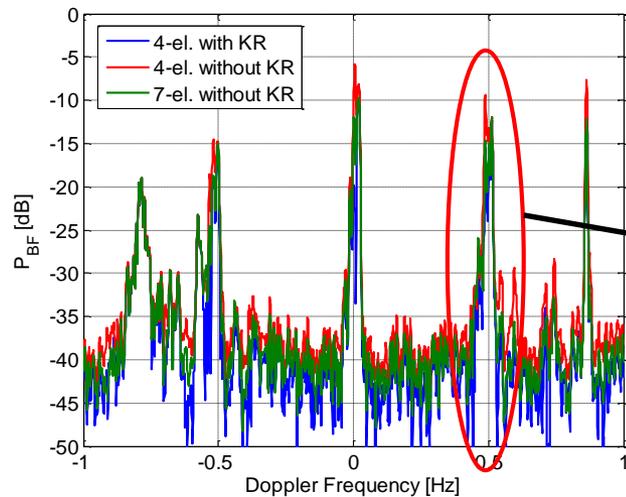


7素子KR無

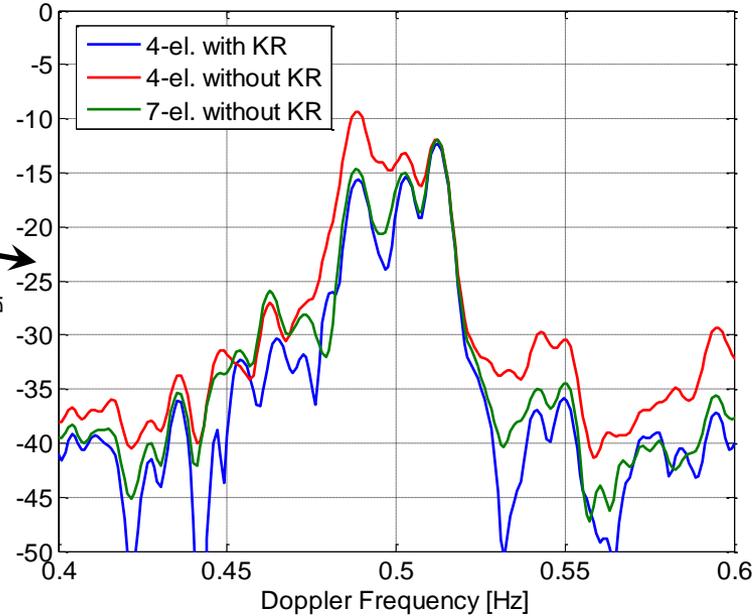


4素子ULAにKR積拡張処理を適用  
→7素子ULAと同等のメインビーム幅

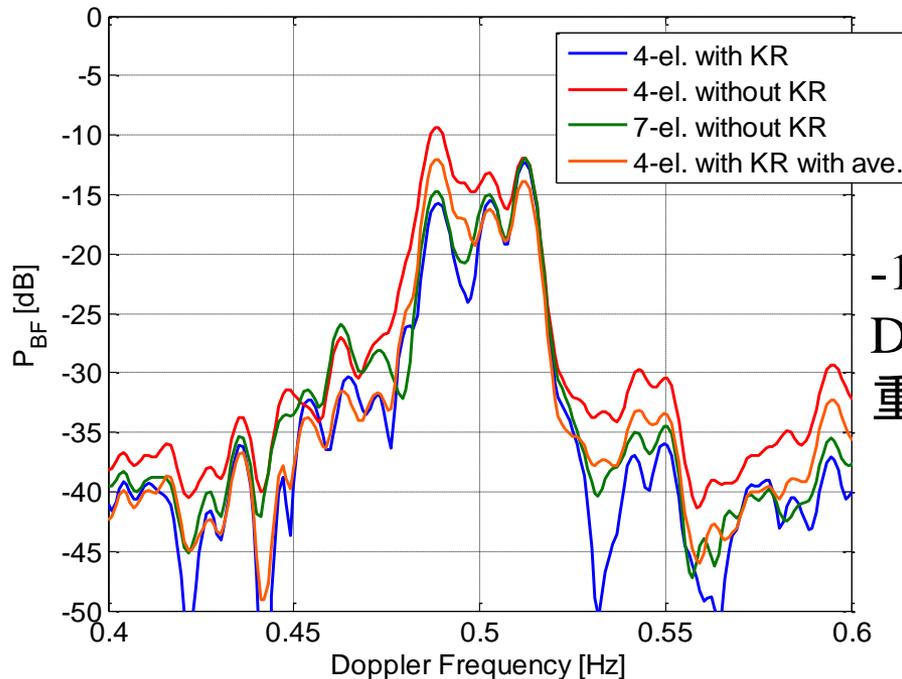
# C点におけるDoppler周波数スペクトル(千葉局)



拡大



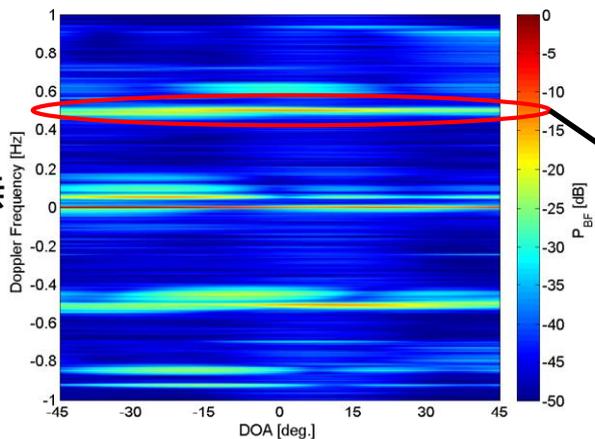
千葉局の視線方位 $-7^\circ$ における  
Doppler周波数スペクトル



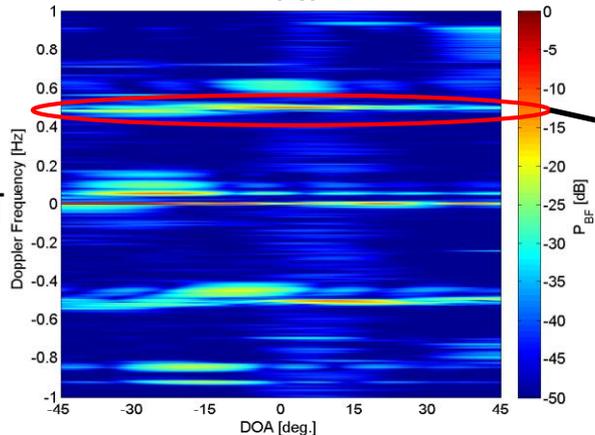
$-17^\circ \sim 3^\circ$ における  
Doppler周波数スペクトルを  
重ね合わせ, 平均(橙線)

# D点における2D, DOAスペクトル(千葉局)

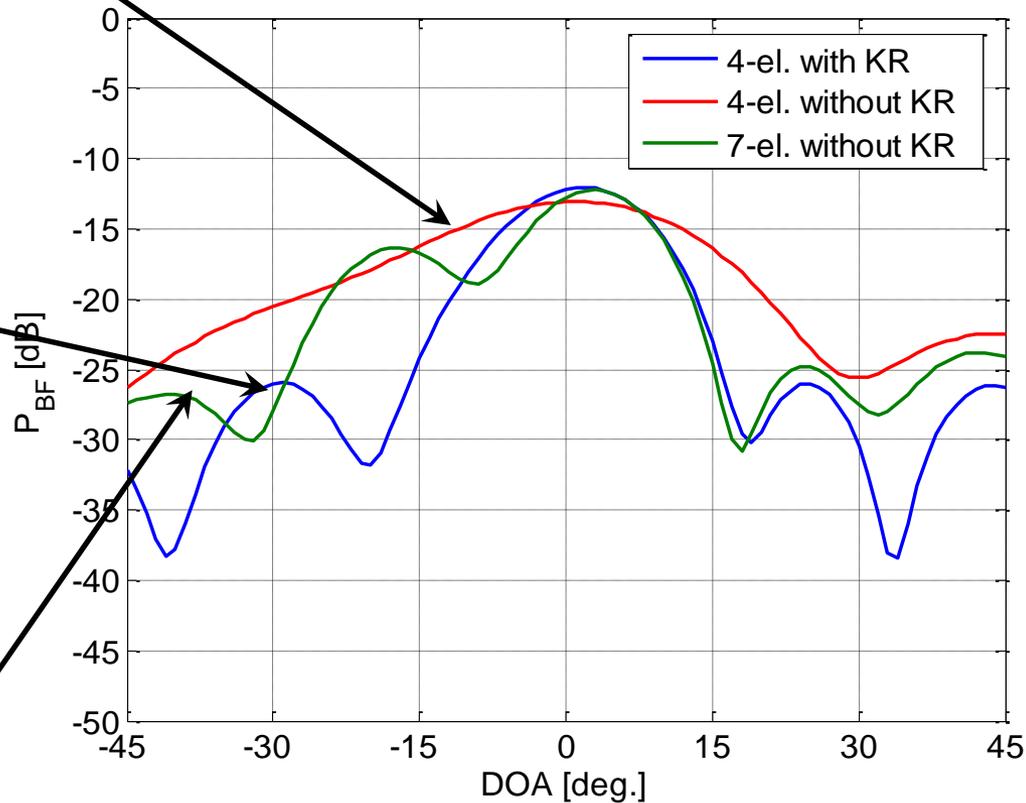
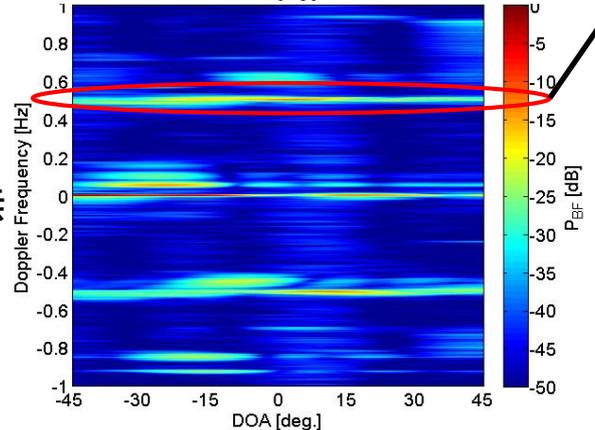
4素子KR無



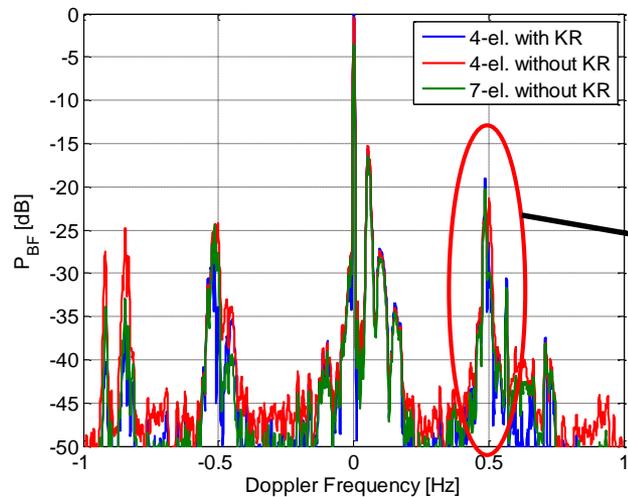
4素子KR有



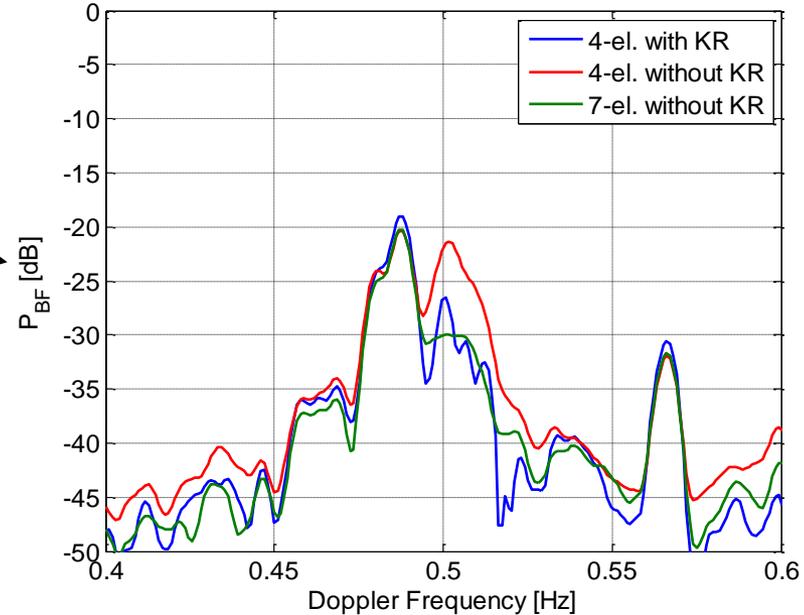
7素子KR無



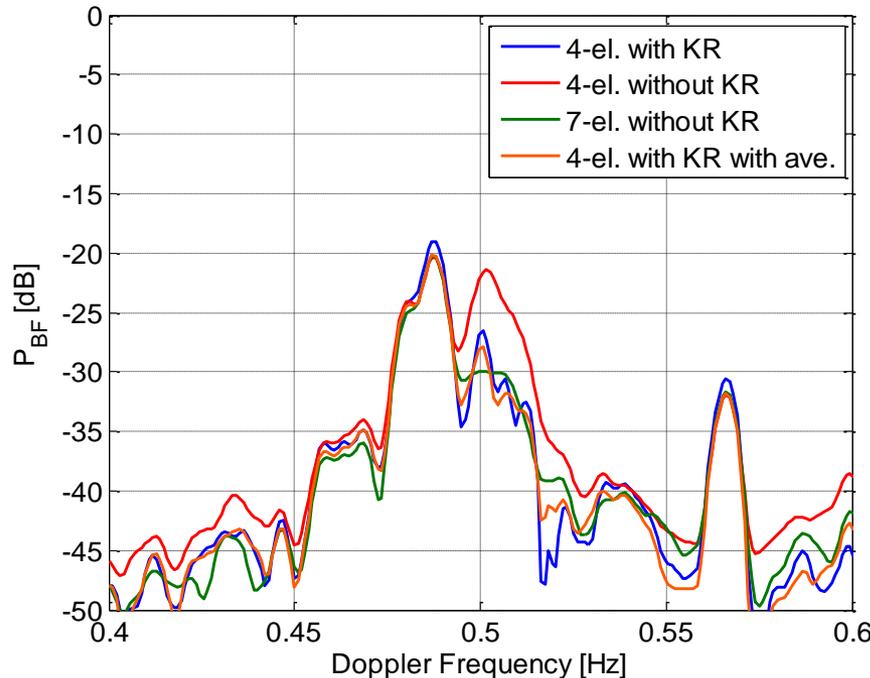
# D点におけるDoppler周波数スペクトル(千葉局)



拡大



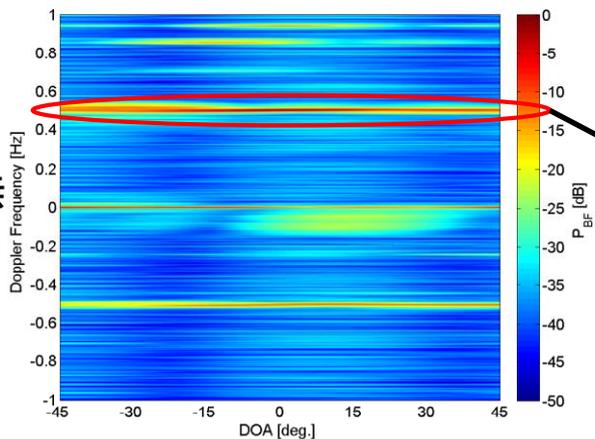
千葉局の視線方位-33°における  
Doppler周波数スペクトル



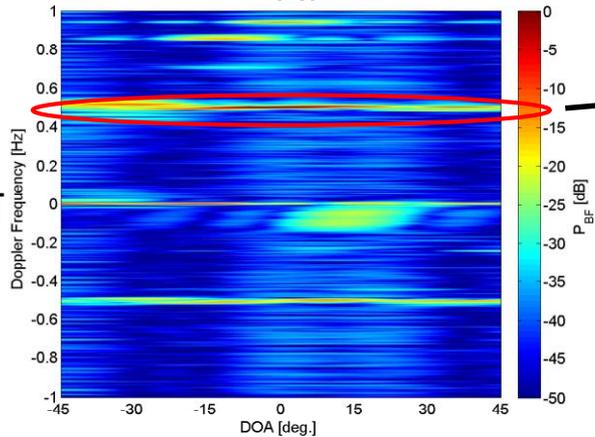
-43° ~ 23°における  
Doppler周波数スペクトルを  
重ね合わせ, 平均(橙線)

# E点における2D, DOAスペクトル(千葉局)

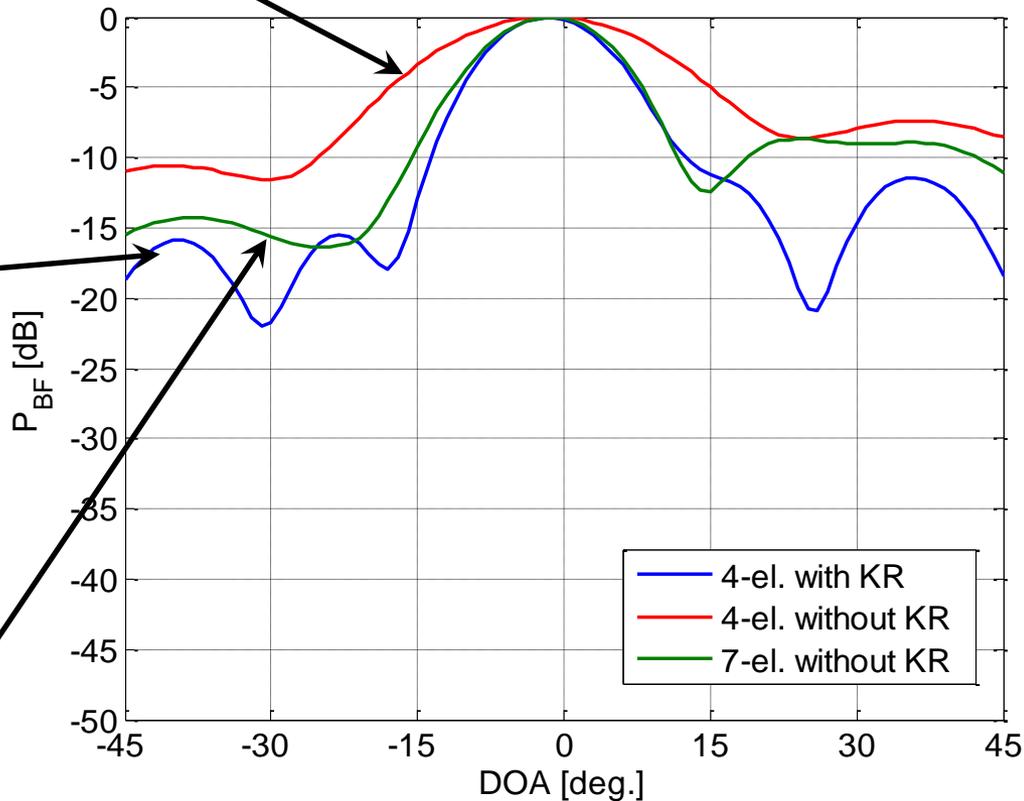
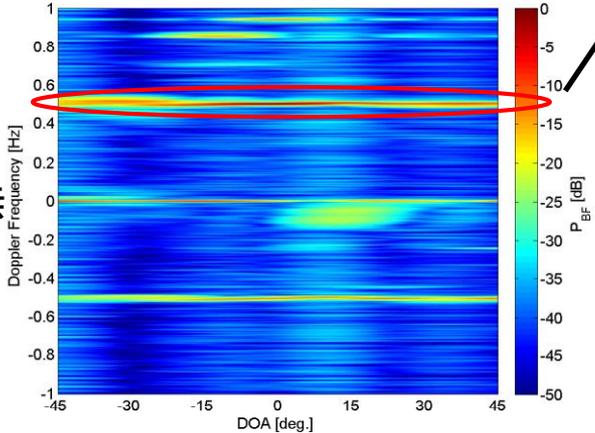
4素子KR無



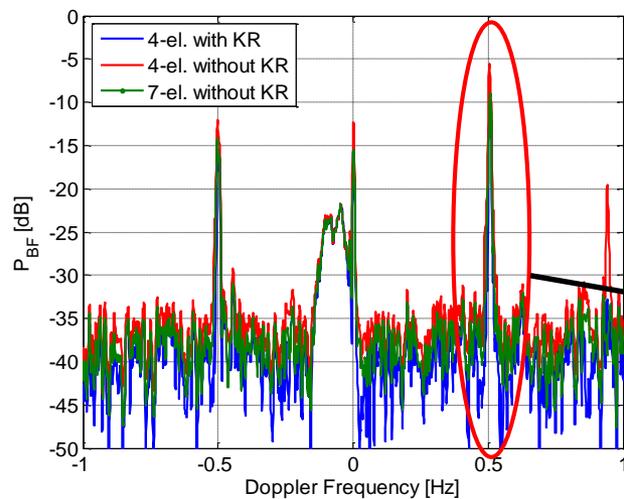
4素子KR有



7素子KR無

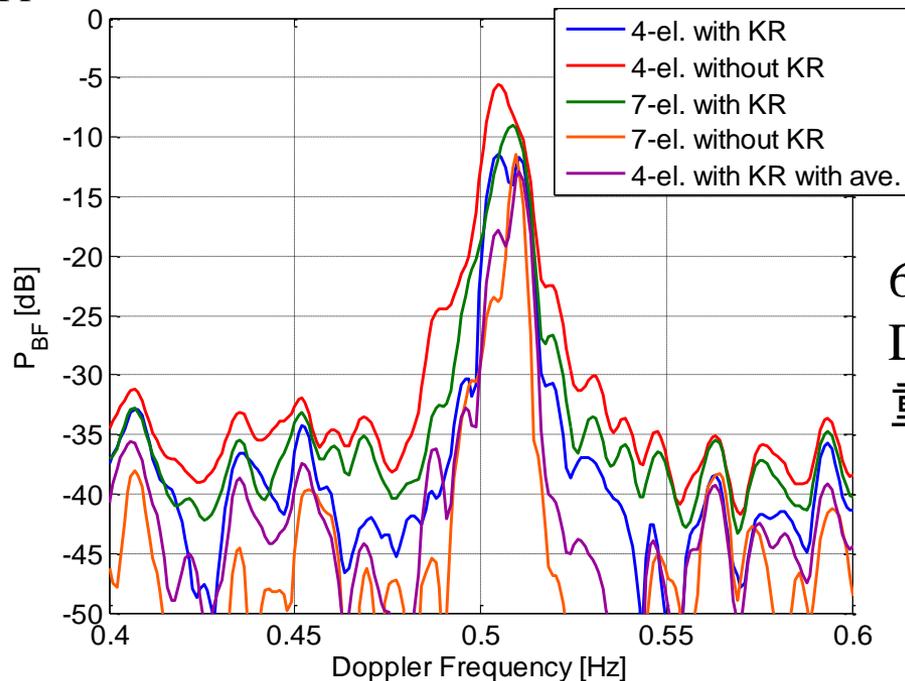
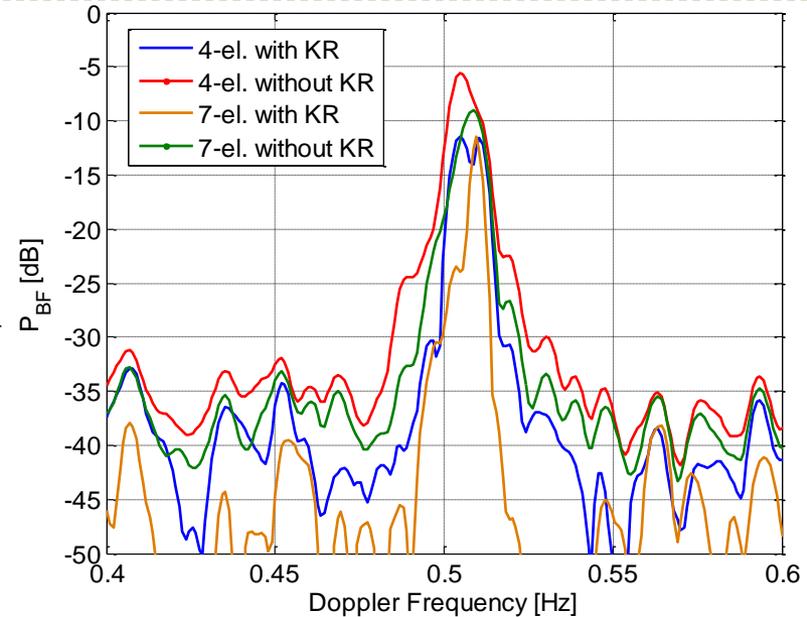


# E点におけるDoppler周波数スペクトル(千葉局)



千葉局の視線方位 $16^\circ$ における  
Doppler周波数スペクトル

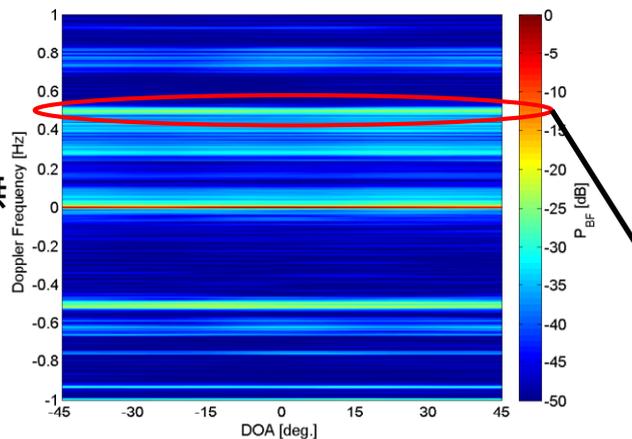
拡大



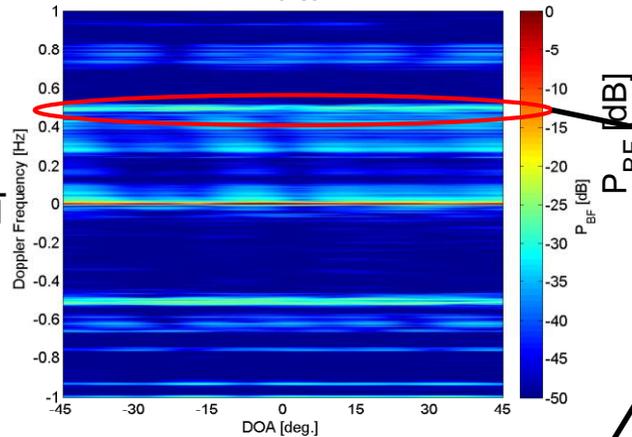
$6^\circ \sim 26^\circ$ における  
Doppler周波数スペクトルを  
重ね合わせ, 平均(紫線)

# C点における2D, DOAスペクトル(船橋局)

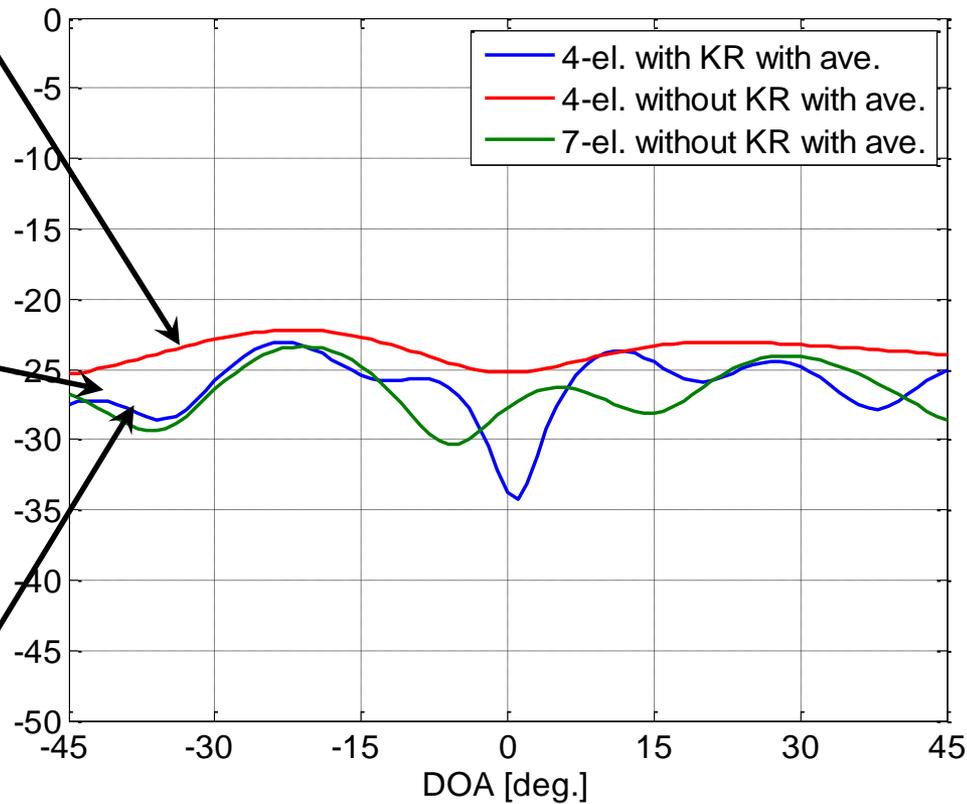
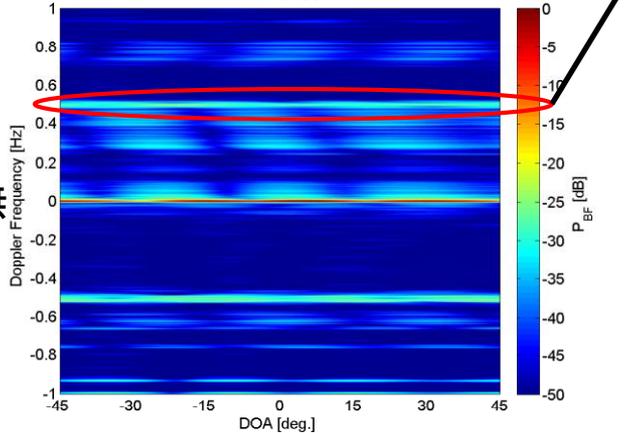
4素子KR無



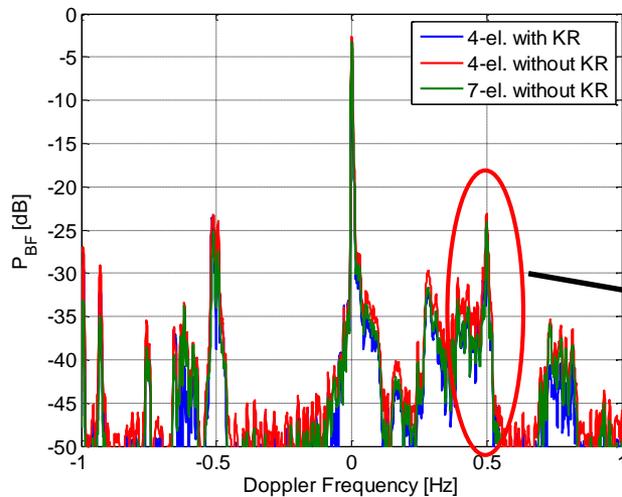
4素子KR有



7素子KR無

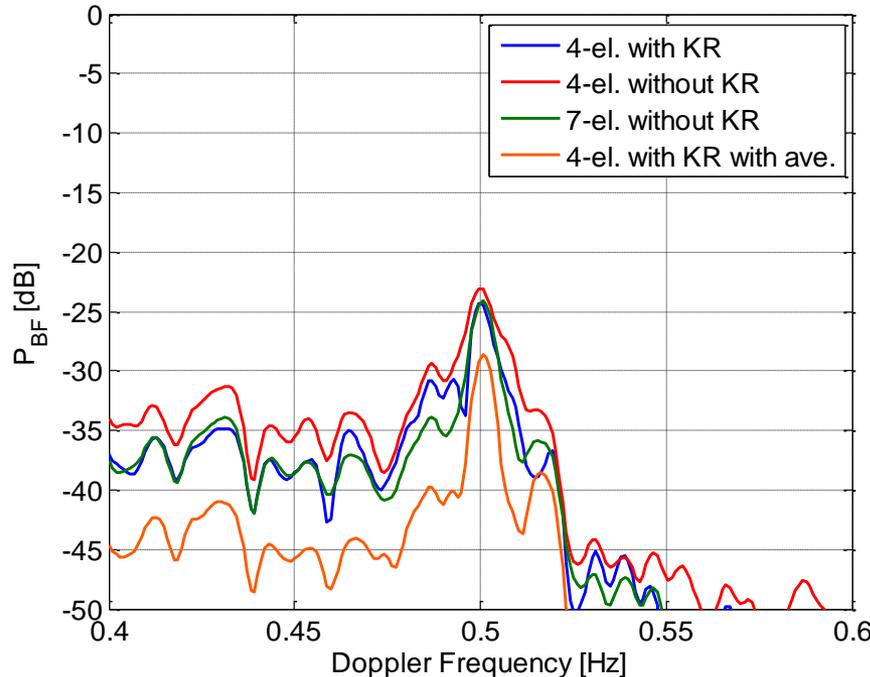
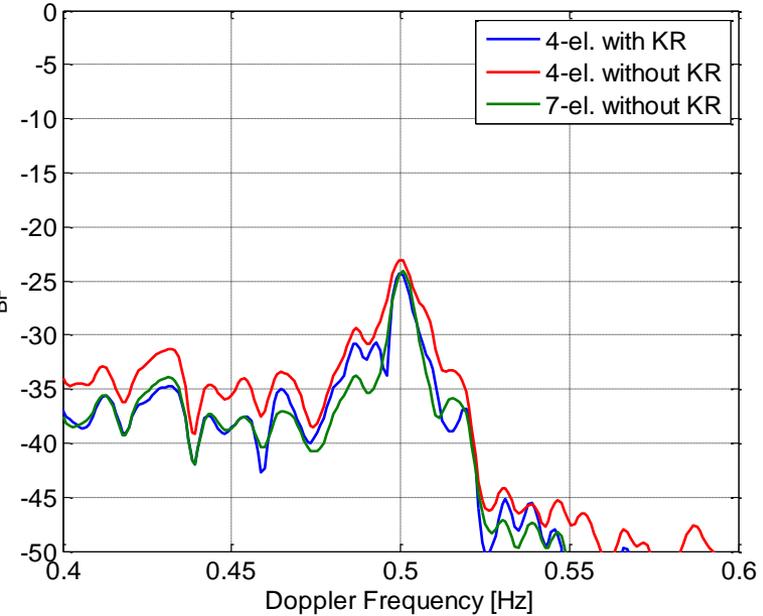


# C点におけるDoppler周波数スペクトル(船橋局)



拡大

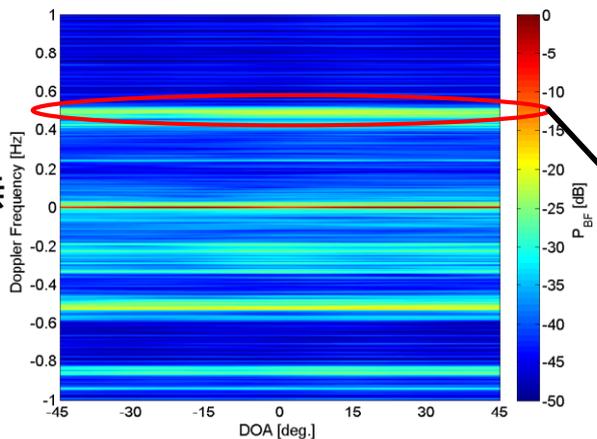
船橋局の視線方位27°における  
Doppler周波数スペクトル



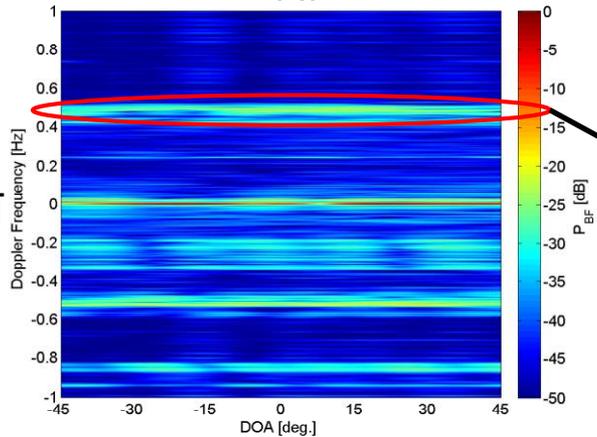
17°~37°における  
Doppler周波数スペクトルを  
重ね合わせ, 平均(橙線)

# D点における2D, DOAスペクトル(船橋局)

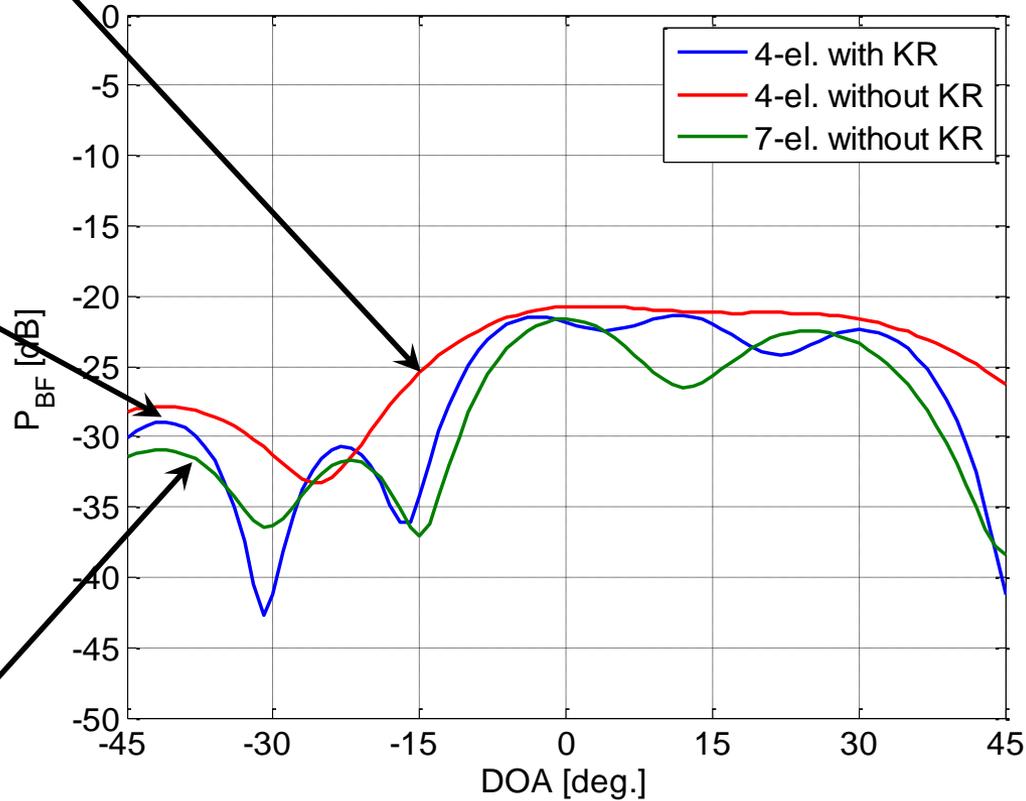
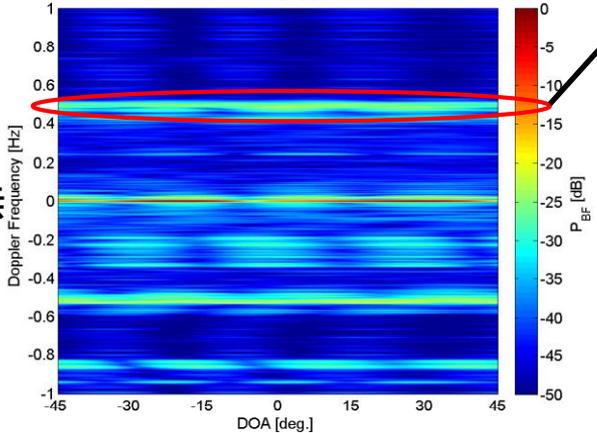
4素子KR無



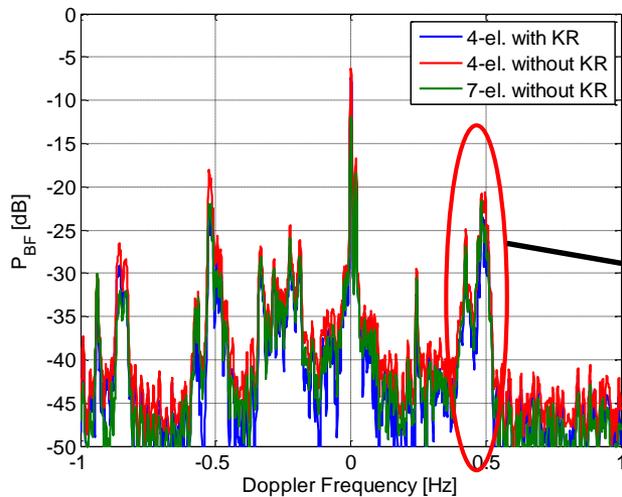
4素子KR有



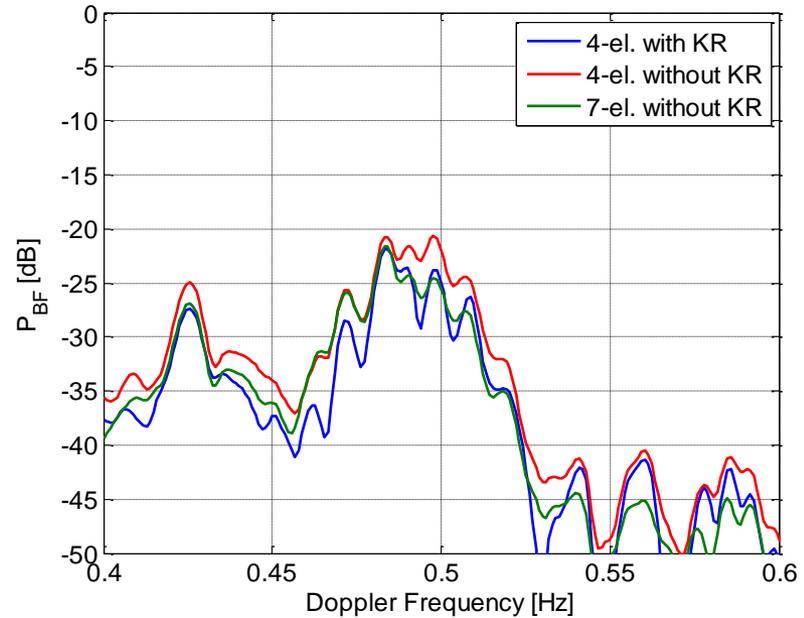
7素子KR無



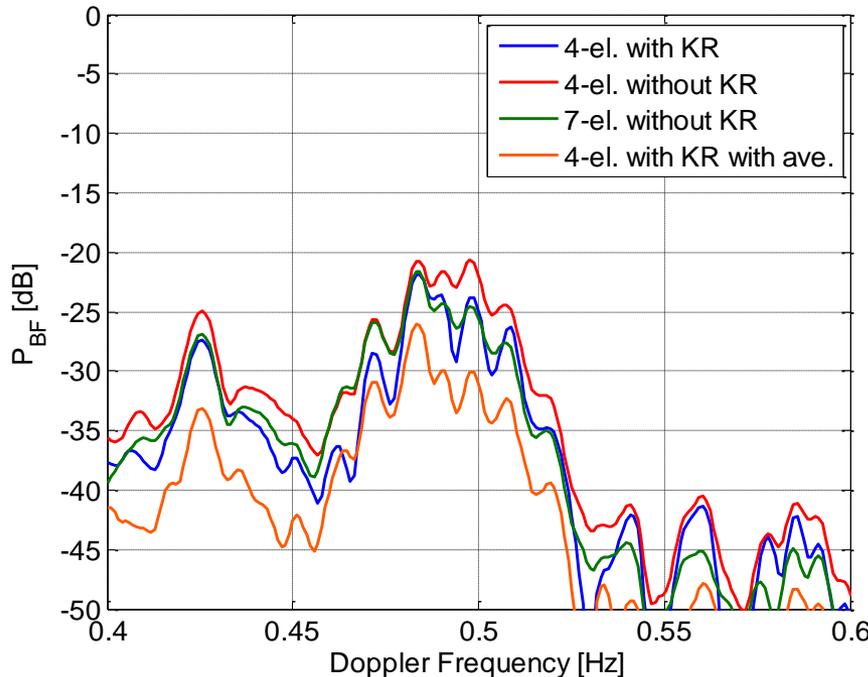
# D点におけるDoppler周波数スペクトル(船橋局)



拡大



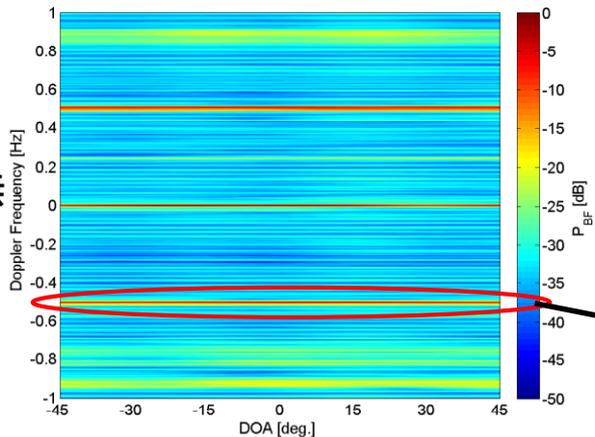
船橋局の視線方位 $0^\circ$ における  
Doppler周波数スペクトル



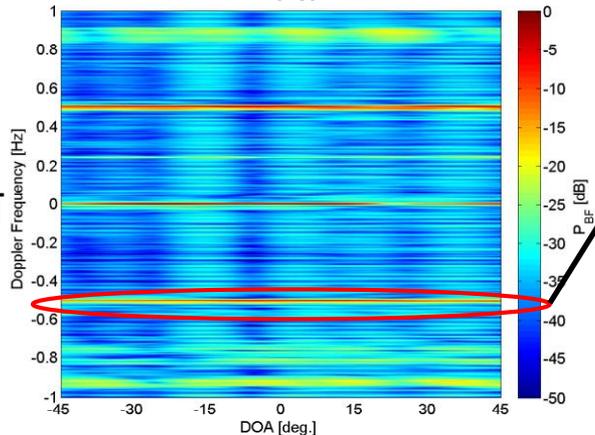
$-10^\circ \sim 10^\circ$ における  
Doppler周波数スペクトルを  
重ね合わせ, 平均(橙線)

# E点における2D, DOAスペクトル(船橋局)

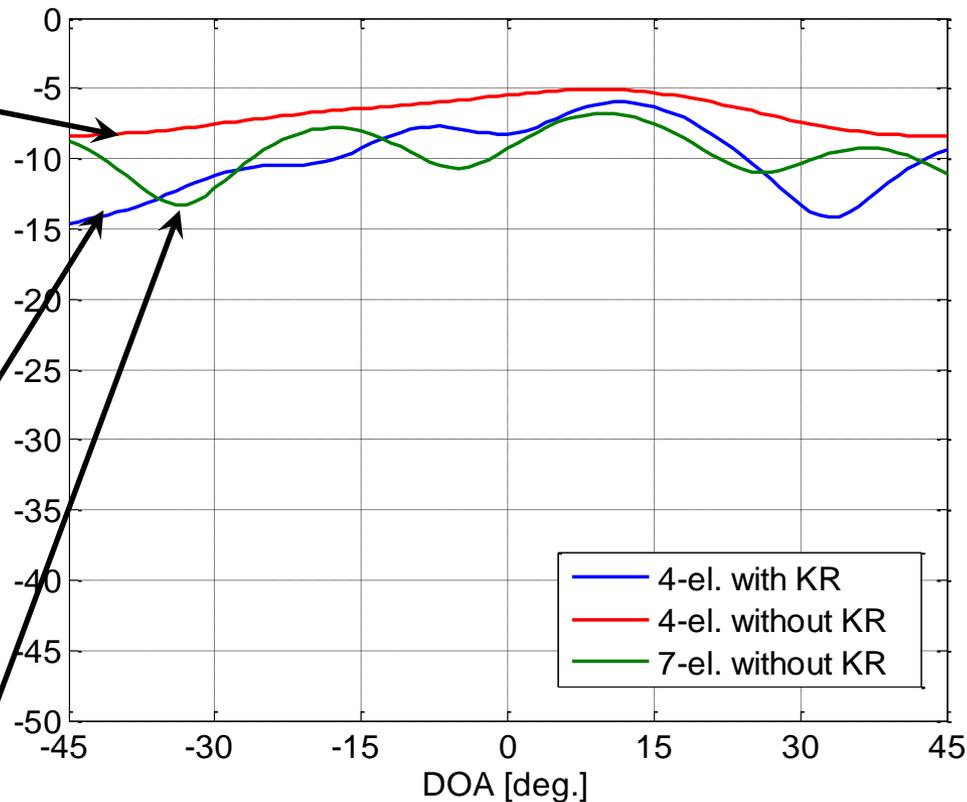
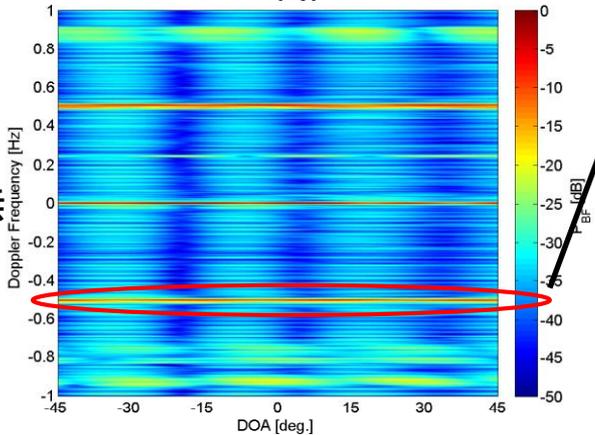
4素子KR無



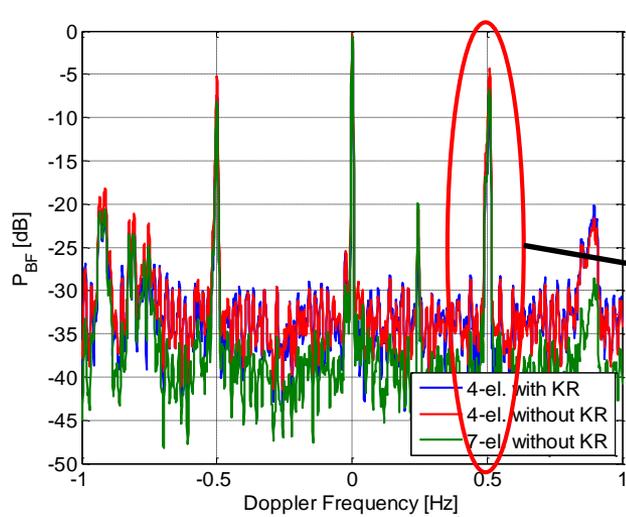
4素子KR有



7素子KR無

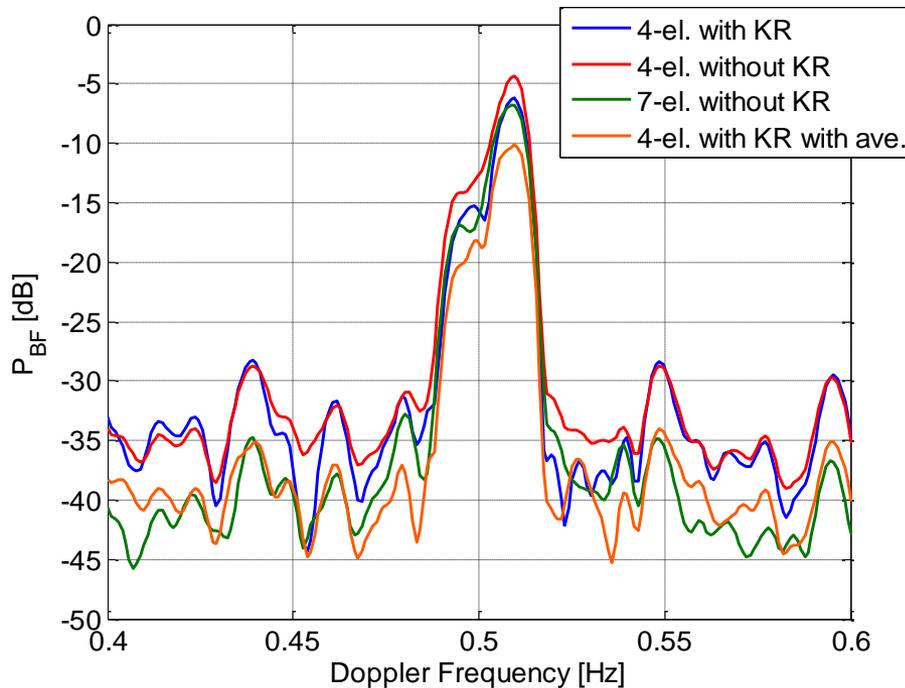
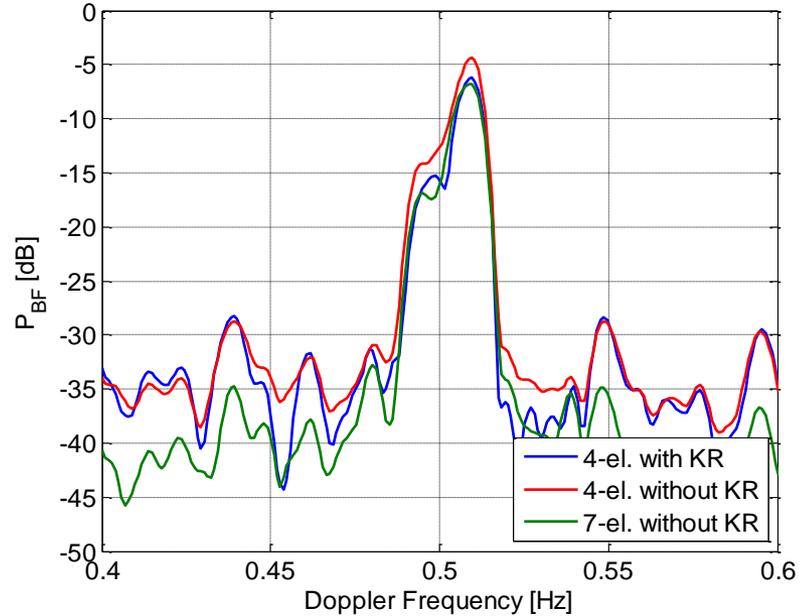


# E点におけるDoppler周波数スペクトル(船橋局)



船橋局の視線方位3°における  
Doppler周波数スペクトル

拡大

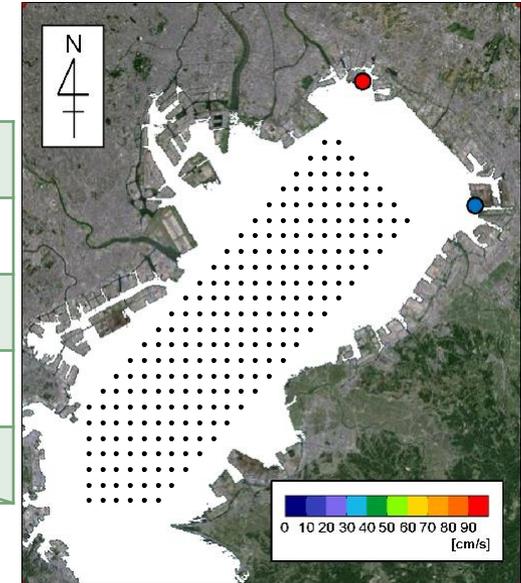


-7°~13°における  
Doppler周波数スペクトルを  
重ね合わせ、平均(橙線)

# 二次元表層流速マップ同士の相関(補正無)(1/2)

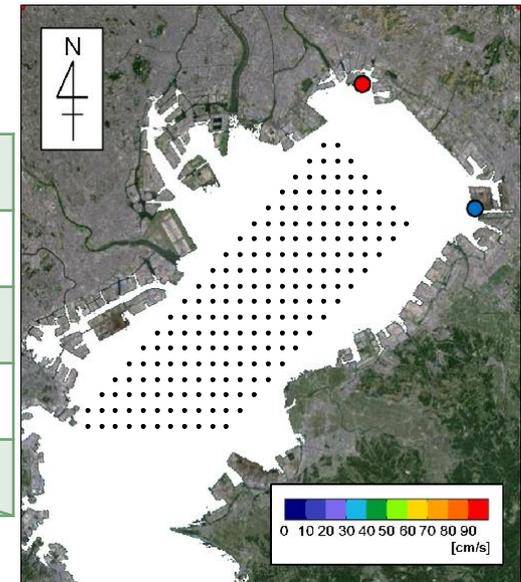
## ■全ての評価点を用いて相関をとった場合

	4el. w/o KR	4el. w/ KR	7el. w/o KR	7el. w/ KR
4el. w/o KR		0.7175	0.7468	0.5175
4el. w/ KR	0.7175		0.7114	0.5742
7el. w/o KR	0.7468	0.7114		0.7045
7el. w/ KR	0.5175	0.5742	0.7045	



## ■下から5行評価点を除いて相関をとった場合

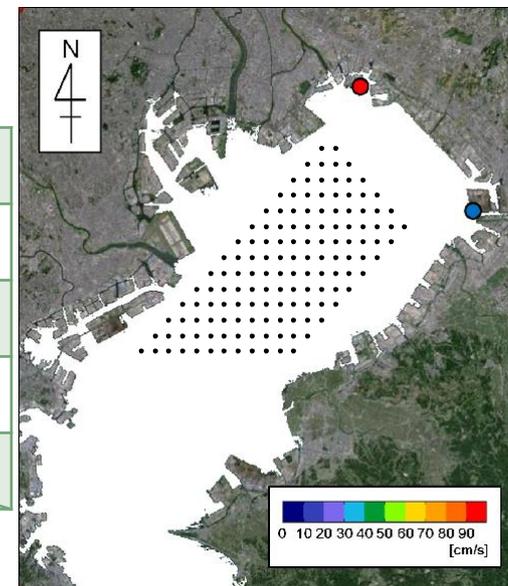
	4el. w/o KR	4el. w/ KR	7el. w/o KR	7el. w/ KR
4el. w/o KR		0.7197	0.7271	0.5059
4el. w/ KR	0.7197		0.6861	0.5498
7el. w/o KR	0.7271	0.6861		0.6684
7el. w/ KR	0.5059	0.5498	0.6684	



# 二次元表層流速マップ同士の相関(補正無) (2/2)

## ■下から10行評価点を除いて相関をとった場合

	4el. w/o KR	4el. w/ KR	7el. w/o KR	7el. w/ KR
4el. w/o KR		0.6634	0.7233	0.4241
4el. w/ KR	0.6634		0.7219	0.5576
7el. w/o KR	0.7233	0.7219		0.7042
7el. w/ KR	0.4241	0.5576	0.7042	



## ■下から15行評価点を除いて相関をとった場合

	4el. w/o KR	4el. w/ KR	7el. w/o KR	7el. w/ KR
4el. w/o KR		0.6564	0.6634	0.3660
4el. w/ KR	0.6564		0.6573	0.4940
7el. w/o KR	0.6634	0.6573		0.6796
7el. w/ KR	0.3660	0.4940	0.6796	

