

# 遠距離海洋レーダアンテナの KR積拡張アレイ処理を用いた 方位分解能向上に関する検討

茶木硬四郎、藤井智史（琉球大学）、杉谷茂夫、岩井宏徳（NICT）、  
森本昭彦（愛媛大学CMES）、市川香（九州大学応用力学研究所）、  
滝川哲太郎（水産大学校）、久島萌人（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

# 発表内容

- ▶ 1. 研究目的
- ▶ 2. 遠距離海洋レーダ
- ▶ 3. Khatri-Rao積
- ▶ 4. 実験と観測データ
- ▶ 5. Khatri-Rao積のアレイ処理への適用
- ▶ 6. まとめと今後の課題

# 研究目的

## ▶ 背景

アレイアンテナ

遠方 距離分解能 方位分解能

Khatri-Rao積拡張アレイ処理

## ▶ 目的

アンテナ方位分解能の向上

遠方では 方位分解能 < 距離分解能

高い角度分解能

広い開口長

土地の問題

現用の状態で実効開口長の拡大

Khatri-Rao積拡張アレイ処理

Khatri-Rao積

観測データに適用

角度分解能の向上

# 遠距離海洋レーダ

- ▶ フェーズドアレイアンテナ DBF(Digital Beamforming)
- ▶ FMICWレーダ 周波数9.2485~9.2705[MHz]  
周波数掃引幅22[kHz]

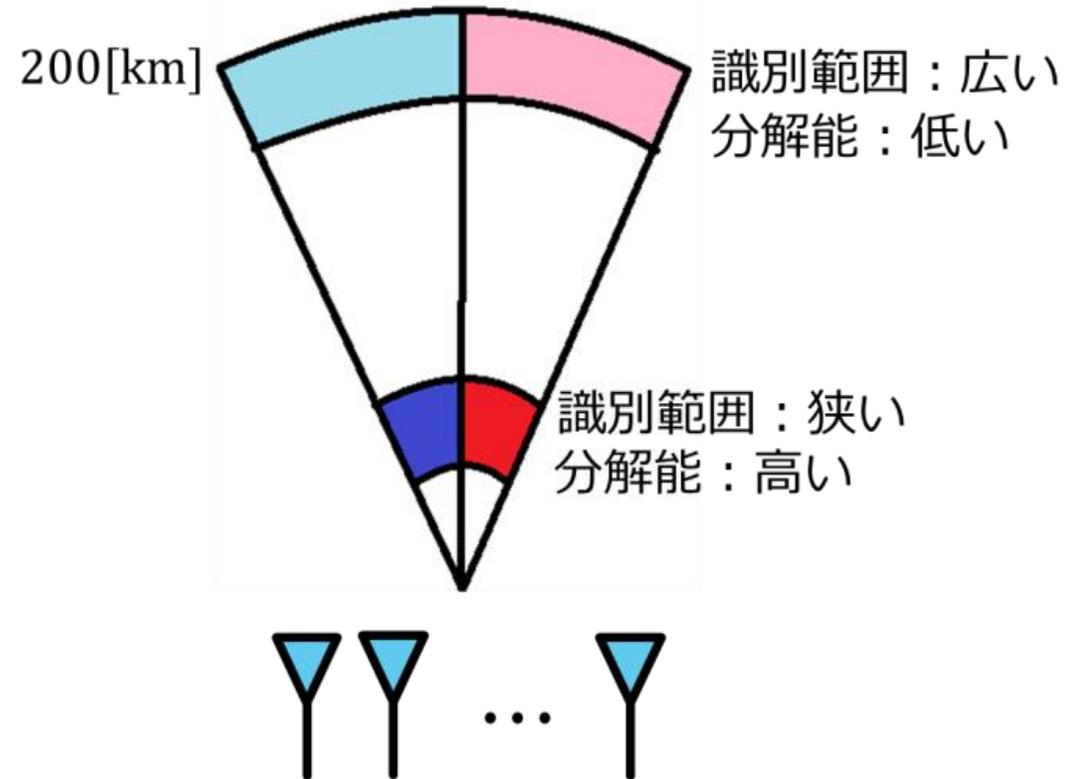
- ▶ 遠方 (200[km])

$$\text{距離分解能} \left( \frac{\text{光速}}{2 \times \text{周波数掃引幅}} = \frac{3.00 \times 10^8}{2 \times 22 \times 10^3} = \text{約} 7 \text{ [km]} \right)$$

角度分解能 (約10°)

$$\text{角度分解能の距離換算} \left( \text{円弧の長さ} = \frac{10}{360} \times 2\pi \times 200 = \text{約} 35 \text{ [km]} \right)$$

近傍と遠方 方位分解能対距離分解能比 差が大きい



# Khatri-Rao積

▶ Khatri-Rao積の定義

$A(n \times k$ 行列)  $B(m \times k$ 行列)

$$A \odot B = [a_1 \otimes b_1, \dots, a_k \otimes b_k]$$

$\odot$ : Khatri-Rao積演算子     $\otimes$ : クロネッカー積演算子

▶ クロネッカー積の定義

$a(n \times 1$ 行列)  $b(m \times 1$ 行列)

$$a \otimes b = \begin{bmatrix} a_1 b \\ a_2 b \\ \vdots \\ a_n b \end{bmatrix}$$

# Khatri-Rao積

## ▶ Khatri-Rao積の性質

$n \times k$ 行列 $A$ ,  $m \times k$ 行列 $B$ ,  $k \times 1$ 行列 $d$ ,  $D = \text{Diag}(d)$

$$\text{vec}(ADB^H) = (B^* \odot A)d$$

$\text{vec}(-)$ : 行列の各列を縦に並べてベクトル化する演算子

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_k]$$

$$\text{vec}(A) = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix}$$

# Khatri-Rao積

## ▶ 受信信号モデル

ULA(Uniform Linear Array)

## ▶ 受信信号: $\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{v}(t)$

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_N(t)]^T$$

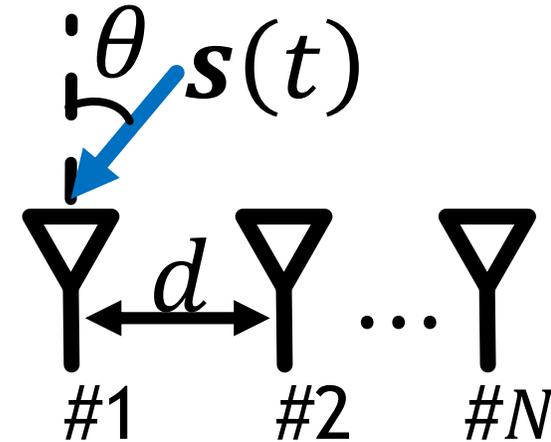
ノイズ:  $\mathbf{v}(t)$

波源行列:  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_K(t)]^T$

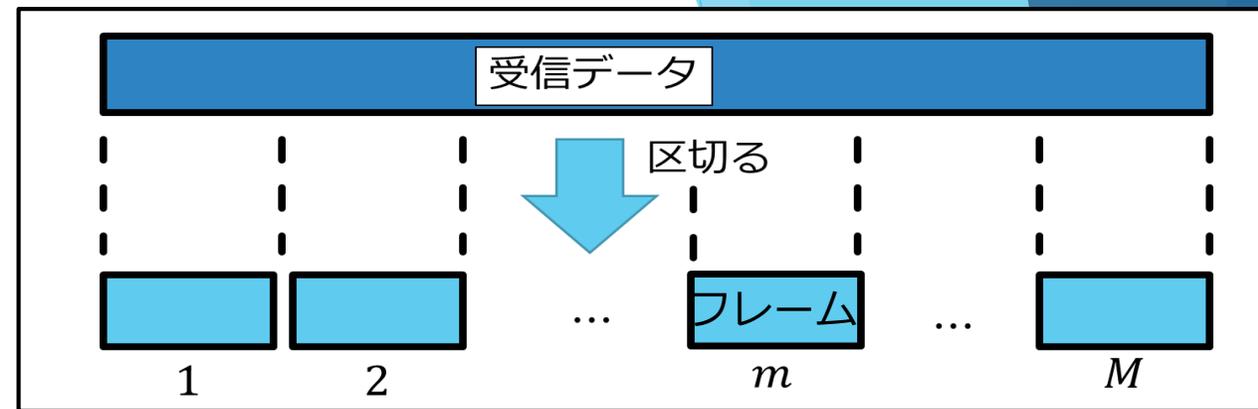
アレイ応答行列:  $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_K)]$

ステアリングベクトル:  $\mathbf{a}(\theta) = \left[ 1, e^{-\frac{j2\pi d}{\lambda} \sin(\theta)}, \dots, e^{-\frac{j2\pi d}{\lambda} (N-1) \sin(\theta)} \right]^T$

遠方  $\left. \begin{array}{c} \circ \\ \text{波源1} \end{array} \right\} \begin{array}{c} \circ \\ \text{波源2} \end{array} \dots \left. \begin{array}{c} \circ \\ \text{波源K} \end{array} \right\} K \text{個}$



# Khatri-Rao積



- ▶  $m$ 番目のフレームの部分共分散行列 → 受信相関

$$\mathbf{R}_m = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\}$$

$E\{-\}$ : 期待値演算子

- ▶  $\mathbf{R}_m = \mathbf{A}\mathbf{D}_m\mathbf{A}^H + \mathbf{C}$

$\mathbf{C}$ : ノイズの共分散行列     $\mathbf{D}_m$ :  $m$ 番目のフレームの波源共分散行列

$$\mathbf{C} \triangleq E\{\mathbf{v}(t)\mathbf{v}^H(t)\}$$

$$\mathbf{D}_m = \text{Diag}(d_{m1}, d_{m2}, \dots, d_{mK})$$

$\text{Diag}(-)$ : 対角行列     $d_{mk}$ : 波源電力の2乗平均

$$E\{|\mathbf{s}_k(t)|^2\} = d_{mk}$$

# Khatri-Rao積

- ▶ 部分共分散行列 ( $\mathbf{R}_m = \mathbf{A}\mathbf{D}_m\mathbf{A}^H + \mathbf{C}$ ) → 性質の適用

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_m &\triangleq \text{vec}(\mathbf{R}_m) = \text{vec}(\mathbf{A}\mathbf{D}_m\mathbf{A}^H) + \text{vec}(\mathbf{C}) \\ &= \underbrace{(\mathbf{A}^* \odot \mathbf{A})}_{\text{Khatri-Rao product}} \mathbf{d}_m + \text{vec}(\mathbf{C})\end{aligned}$$

受信信号:  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{v}(t)$

$\mathbf{y}_m \rightarrow$  新たな受信信号

最大 $2(N - 1)$ 波まで 到来方向推定 可能

# 実験と観測データ

- ▶ 現用の遠距離海洋レーダ  
アレイアンテナ 受信アンテナ指向特性の調査
- ▶ 新青丸KS-14-9次航海（2014年6月13～22日）  
遠距離海洋レーダを用いた対馬・相島における対馬暖流分岐流観測実験



- ▶ 対馬受信測定  
船上送信アンテナパターン計測  
観測データ アンテナ素子毎 I/Q信号



# 実験と

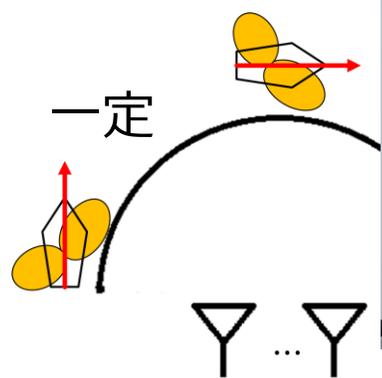
▶ 船上送信ア

受信アレイ

船から送信

相島沖の北

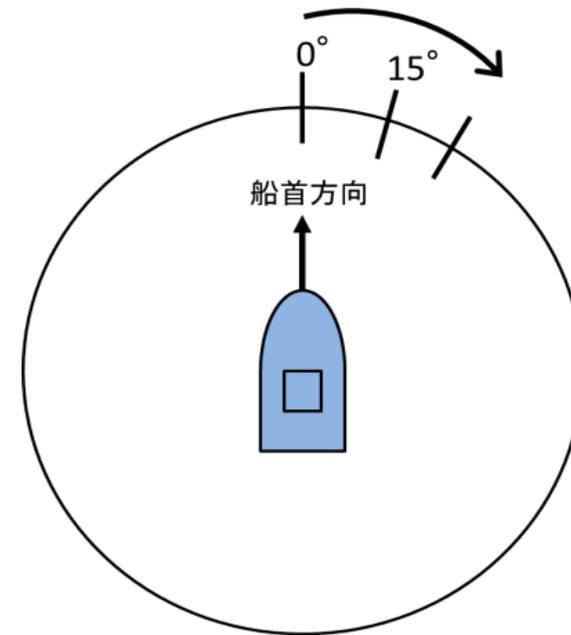
北から時計



旋回

首方向性

# 実験と観測データ



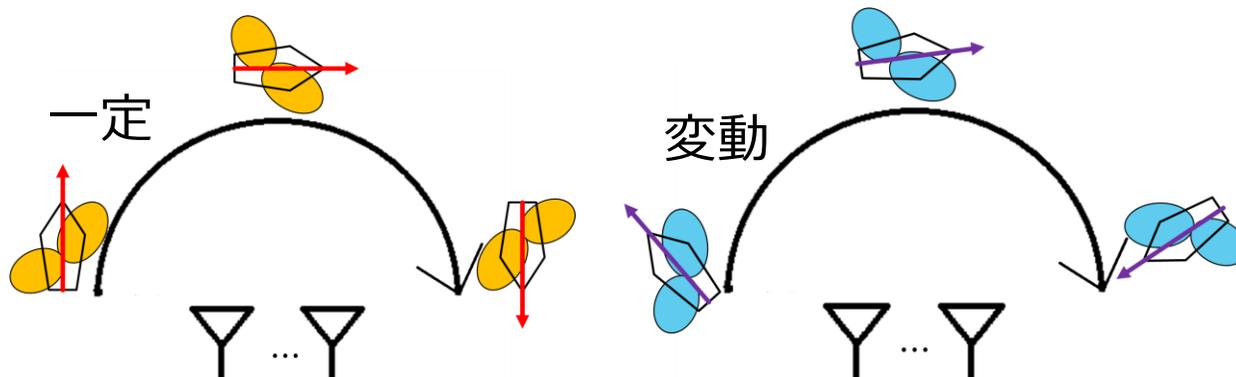
## ▶ 船上传信アンテナパターン計測

受信アレイに対する送信電力の方向依存性を補償するため

船から送信 相島レーダ局で受信

相島沖の北緯34°東経131°地点

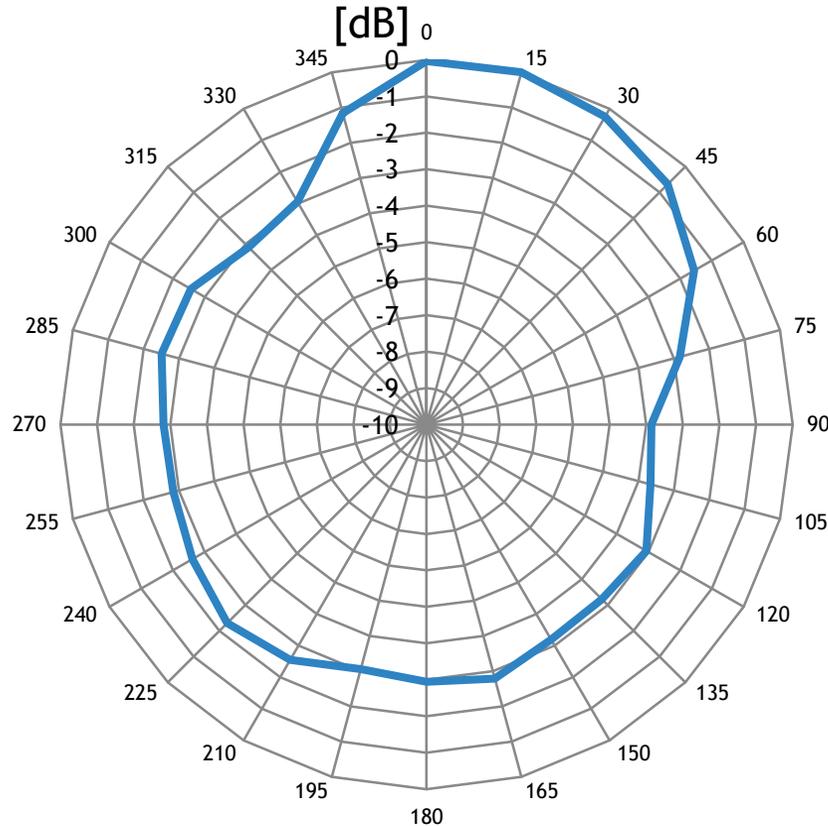
北から時計回りに方位15°毎におよそ1分間の観測を行いながら旋回



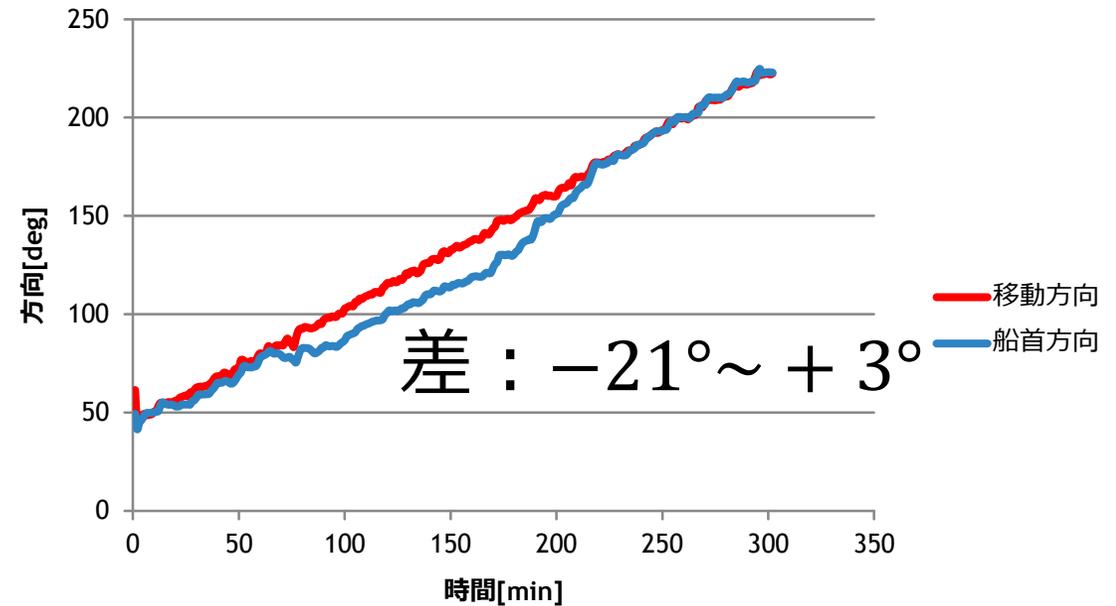
進行方向に対する船首方向  
とアンテナ指向性特性

# 実験と観測データ

## ▶ 計測結果



## 移動方向と船首方向の比較



## 船上送信アンテナ指向特性

方位角 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の利得が大きく、方位角 $90^{\circ}$ と $330^{\circ}$ の利得が小さい  
船のマストや船首アンテナ、船尾アンテナの影響

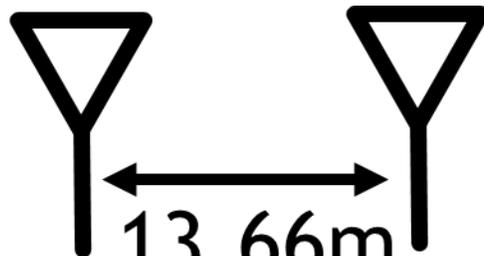
# 実験と観測データ

## ▶ 対馬受信測定



#15

...



#2

#1

13.66m

- 測定データにKhatri-Rao積拡張アレイ処

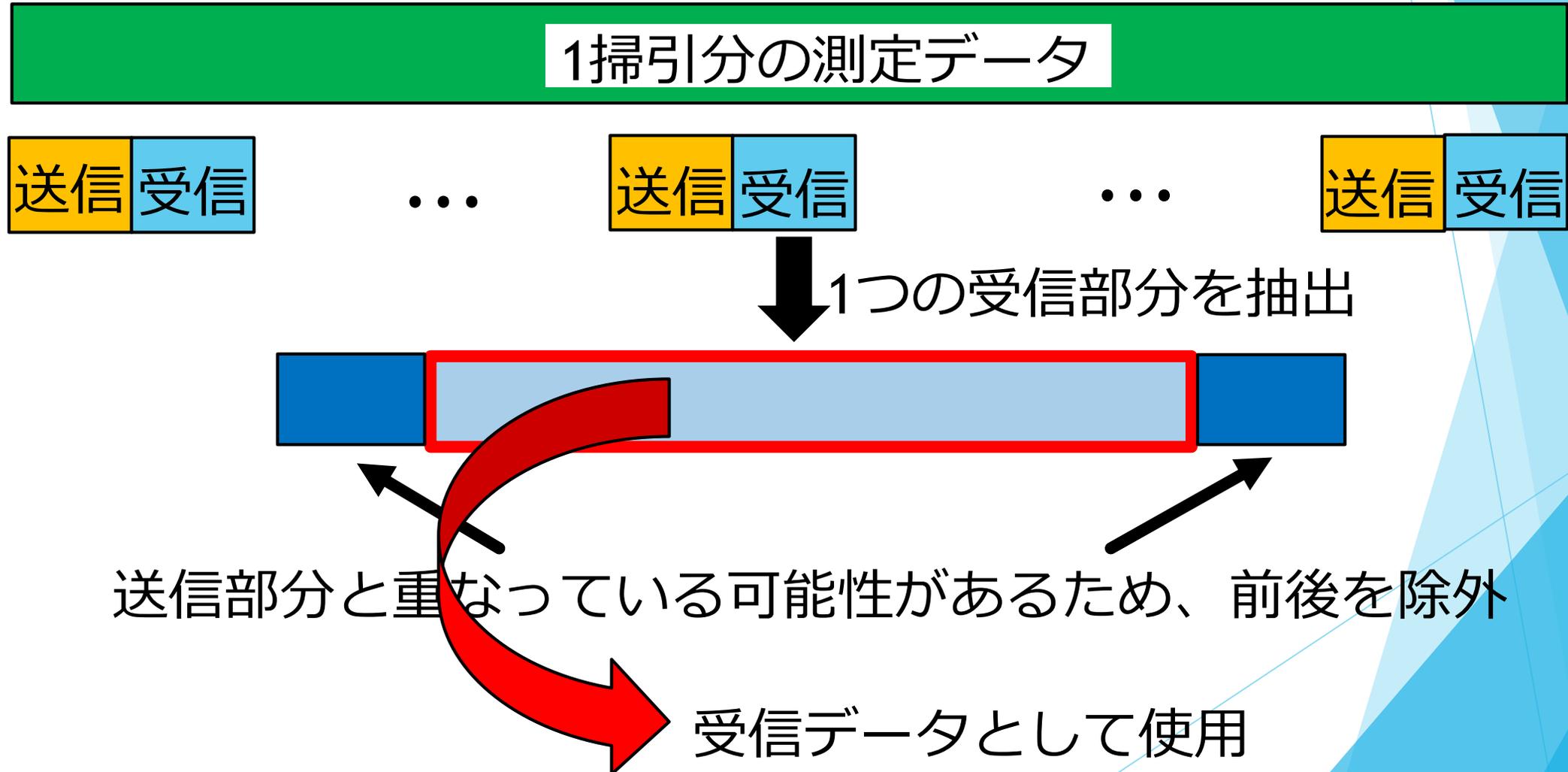


22'地点

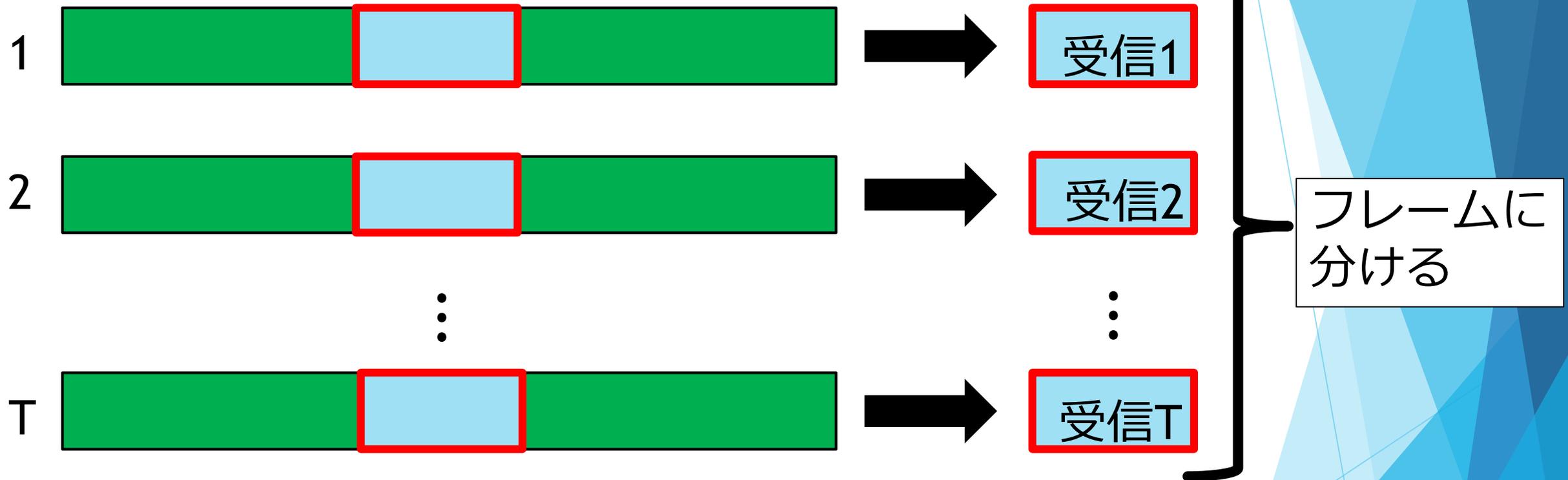
# Khatri-Rao積のアレイ処理への適用

- ▶ ULA
- ▶ 受信信号の拡張
- ▶ 実効開口長が2倍： $(N - 1)d \rightarrow 2(N - 1)d$
  
- ▶ Khatri-Rao積拡張アレイ処理の適用
- ▶ アンテナ合成パターン
- ▶ メインビーム幅の比較

# Khatri-Rao積のアレイ処理への適用

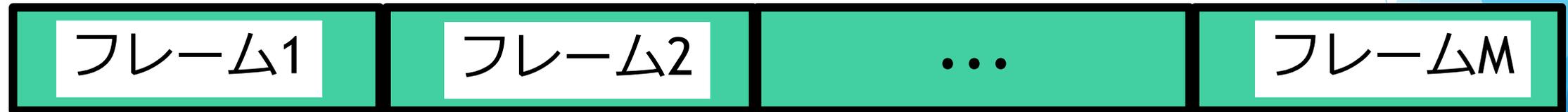
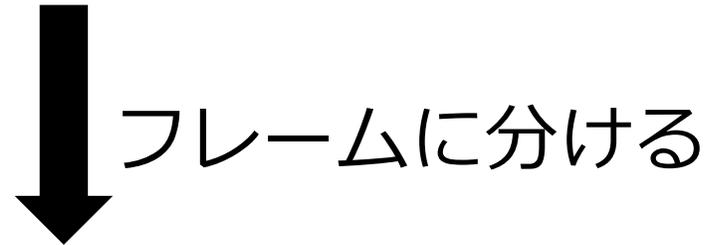


# Khatri-Rao積のアレイ処理への適用



※T = 88 (1分間に存在する測定データの数)  
1分間の船の移動は方位角 $1^\circ$ 未満に納まるので、  
その間の移動による方位の変化を考慮しないこととする

# Khatri-Rao積の阵列処理への適用



拡張受信データを得る  
→アンテナ合成

# まとめと今後の課題

## ▶ まとめ

- ・ 船上传信 アンテナのアンテナ指向特性  
船のマストや船首アンテナ, 船尾アンテナの影響  
船上传信アンテナ指向性による受信強度の補償

## ▶ 今後の課題

- ・ Khatri-Rao積拡張アレイ処理の検証
- ・ アレイアンテナ指向性の方位特性の確認

ご清聴、ありがとうございました