

# 球面波モードベクトルを用いたMUSIC法による 有限距離からの波源推定の基本的検討

東京農工大学

秋元広幸 高橋応明 宇野亨

## 目的

回路基盤からの不要放射推定を目的とする

- ・波源の電力が極端に小さい場合
- ・より高分解能で測定したい場合
- ・測定において物理的制約を伴う場合



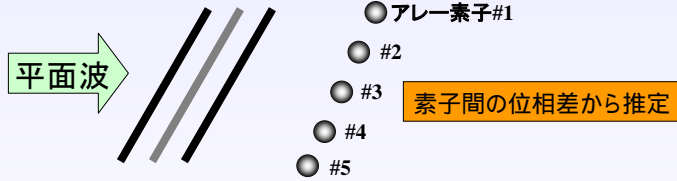
条件

**アレーと波源間距離(観測距離)が近い**

# 推定方法

## MUSIC法

- アレーアンテナを用いた超解像測角法
- 平面波(無限遠方からの入射)を入射波源とする



### 利点

- 高分解能特性
- 熱雑音に強い

# MUSIC法の計算方法

受信信号ベクトル $X$

相関行列を求める

$$R_{xx} = E\{X(t)X^H(t)\}$$

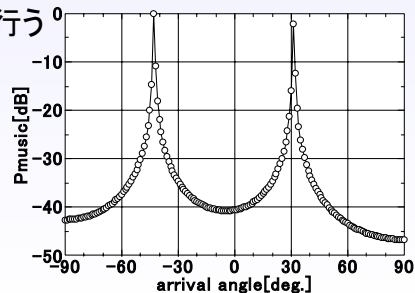
$R_{xx}$ に対して、固有値解析を行う

以下の評価関数で到来方向推定を行う

$$P_{music}(\theta) = \frac{v(\theta)^H v(\theta)}{\sum_{m=D+1}^N |e_m^H v(\theta)|^2}$$

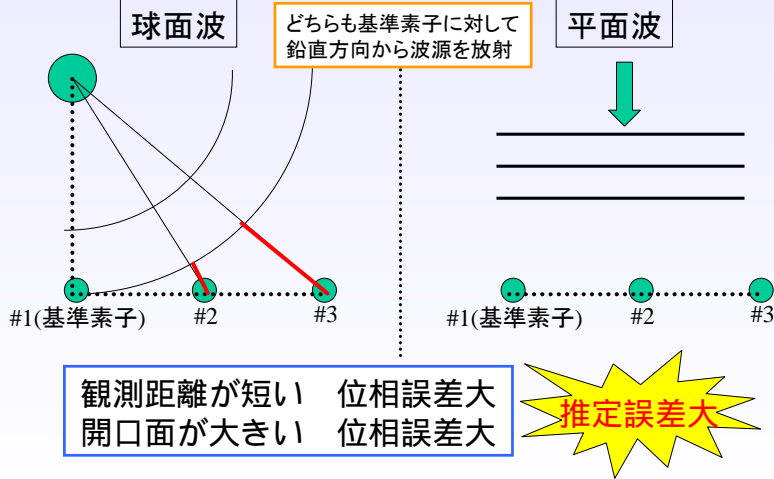
$e_m$ : 固有値展開で得られた固有値ベクトル

$v(\theta)$ : モードベクトル



# MUSIC法問題点

## ・平面波入射を前提



# 改良点

評価関数で到来方向推定を行う

$$P_{music}(\theta) = \frac{v(\theta)^H v(\theta)}{\sum_{m=D+1}^N |e_m^H v(\theta)|^2}$$

$e_m$ : 固有値展開で得られた  
固有値ベクトル

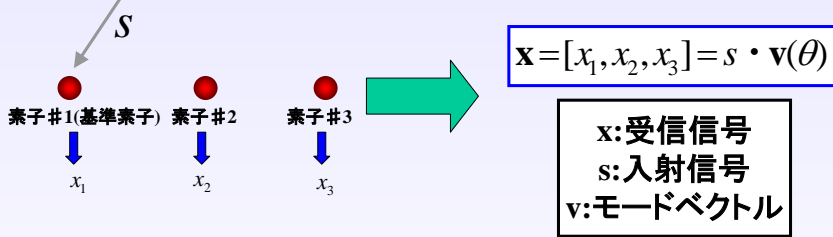
$v(\theta)$ : モードベクトル

工夫する

有限観測距離において高精度な推定を行う

# モードベクトルについて(平面波)

・アレー基準素子に対する位相差を表す



例: 3素子リニアアレーモードベクトル(平面波に相関)

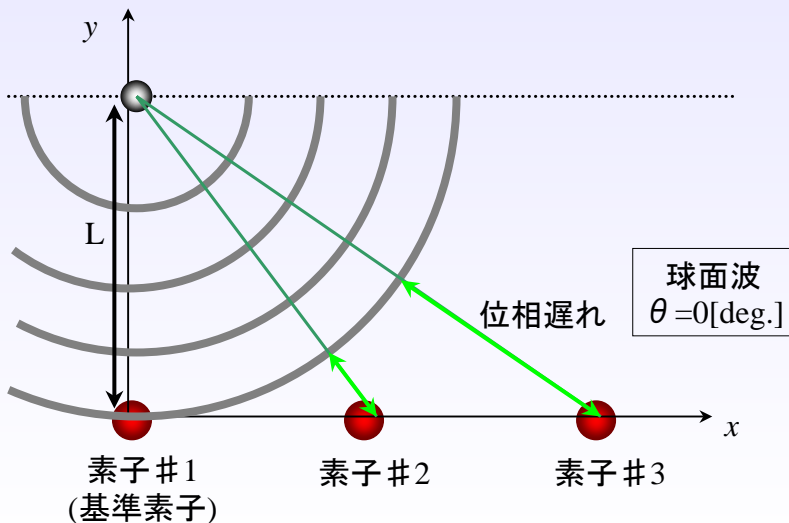
$$v(\theta_i) = [1 \quad e^{-j(2\pi d/\lambda)\sin\theta_i} \quad e^{-j2(2\pi d/\lambda)\sin\theta_i} \quad e^{-j3(2\pi d/\lambda)\sin\theta_i}]^T$$

$\theta = 0[\text{deg.}]$

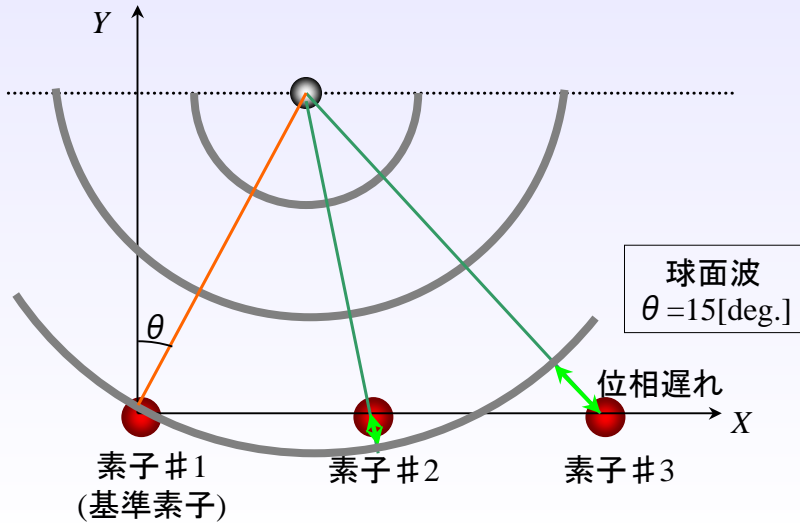
$$v(\theta_i) = [1 \quad 1 \quad 1 \cdots 1]^T$$

全て等位相

# 球面波モードベクトル①



## 球面波モードベクトル②



## 球面波モードベクトルMUSIC法

波源とアレー間の距離が近い 球面波状に伝播

等間隔リニアアレーのモードベクトル(平面波モードベクトル)

- ・アレー開口が広い
  - ・観測距離が短い
- 位相誤差大

推定誤差大

# 球面波モードベクトルMUSIC法

波源とアレー間の距離が近い 球面波状に伝播

等間隔リニアアレーのモードベクトル(平面波モードベクトル)

球面波位相を考慮したモードベクトル(球面波モードベクトル)

- ・アレー開口が広い
- ・観測距離が短い



位相誤差小(球面波)

推定精度良

# 球面波モードベクトルMUSIC法

波源とアレー間の距離が近い 球面波状に伝播

等間隔リニアアレーのモードベクトル(平面波モードベクトル)

球面波位相を考慮したモードベクトル(球面波モードベクトル)



MUSIC法で計算

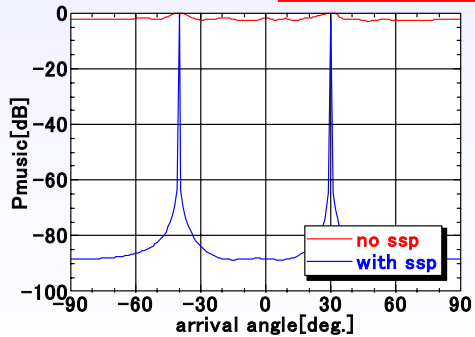
# コヒーレント波対応

相関の強い波が入射  
(代表的なものは反射, 回折, 散乱などによる波)

MUSIC法では正しく推定できない

ランク回復処理  
(空間平均法など)

完全相関の波を30, -40[deg.]  
方向から入射



# 球面波モードベクトルMUSIC法

……位相間隔が素子毎に異なる  
→実際は等間隔リニアアレーであるが,  
等価的に不等間隔リニアアレーになる

#1 #2 #3 不等間隔リニアアレー

補間MUSIC法

B.Friedlander and A.J.Weiss, "Direction finding using spatial smoothing with interpolated arrays," IEEE Trans.Aerospace & Electronic Systems, vol.28,no.2, April 1992

#1 #2 #3 等間隔リニアアレー

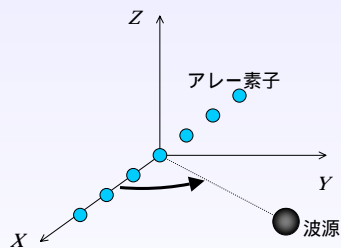
空間平均法の適用

# シミュレーション結果

## シミュレーション(球面波1波推定)

### 検討条件

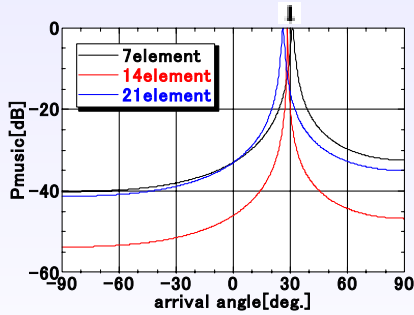
リニアアレー数	7, 14, 21素子
ランク回復処理	補間MUSIC法(5素子空間平均法適用)
波源周波数	600[MHz]正弦波
観測距離	$\lambda$
アレー間隔	$0.45 \lambda$
雑音	無し
スナップショット数	100





# 1波推定結果①(30[deg.]方向から1波)

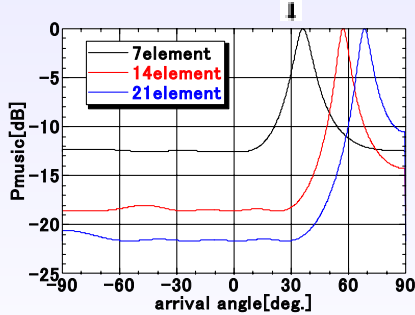
球面波モードベクトル



球面波モードベクトル

素子数の増加; 良(依存なし)  
スペクトルのピーク; 鋭

平面波モードベクトル

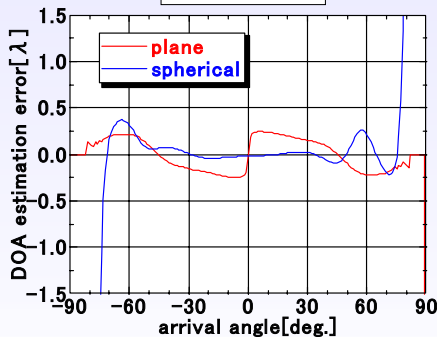


平面波モードベクトル

素子数の増加; 誤差大  
スペクトルのピーク; 鈍

# 1波推定結果②(各到来方向における誤差)

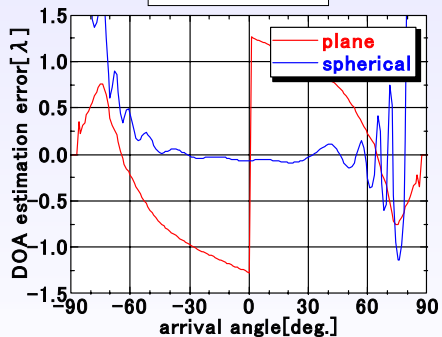
7素子推定



球面波モードベクトル

精度; 正面方向(-60~60[deg.])で良い  
素子数の増加; 良(依存なし)

14素子推定



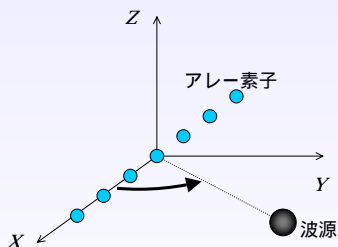
平面波モードベクトル

精度; ±90[deg.]方向で良い  
素子数の増加; 誤差大

# シミュレーション(球面波2波推定)

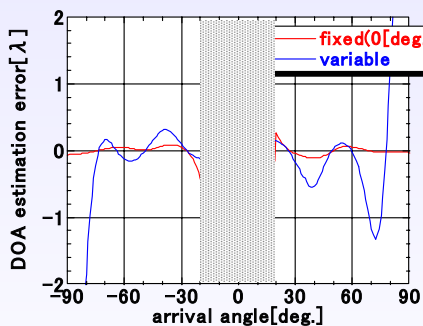
## 検討条件

リニアアレー数	7, 14, 21素子
ランク回復処理	補間MUSIC法(5素子空間平均法適用)
波源周波数	600[MHz]正弦波
観測距離	$\lambda$
アレー間隔	$0.45\lambda$
雑音	無し
スナップショット数	100
波源到来方向	1波目: 0[度]固定 2波目: -90~90[度]

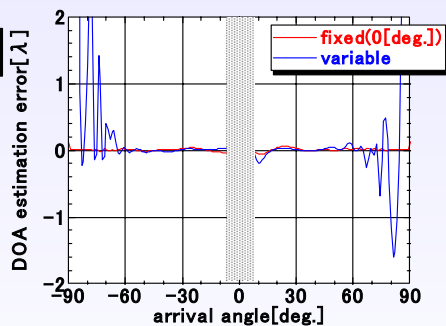


## 2波目推定結果

各到来方向における誤差(7素子)



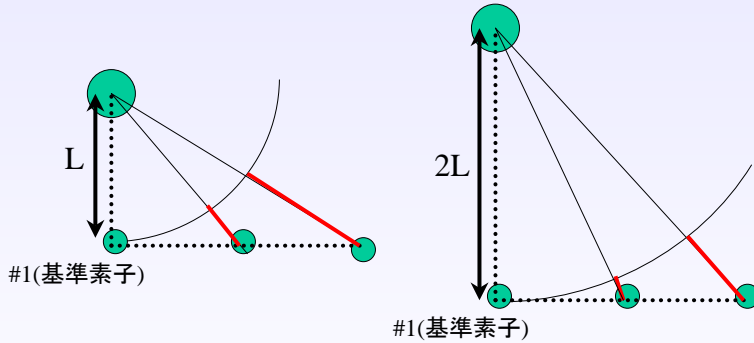
各到来方向における誤差(14素子)



分解能: 素子数増加に比例  
精度: 正面方向(-60~60[deg.])で良

# 観測距離検討について

実際の距離が $1.5L$ の場合に対して、



・観測距離が異なると基準素子に対する位相差が異なる



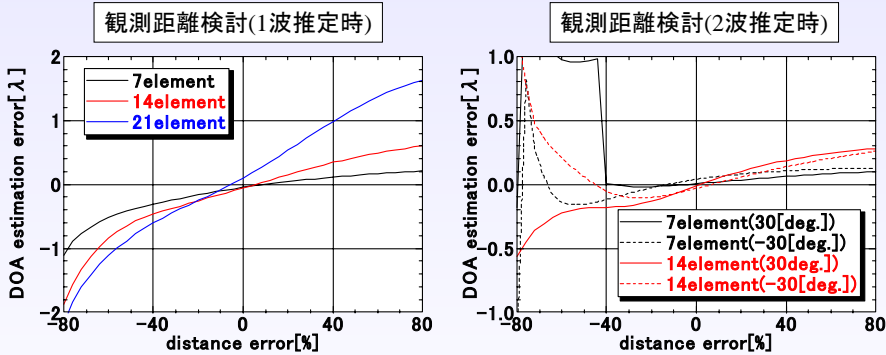
推定誤差

# 波源観測距離検討

## 検討条件

リニアアレー数	7, 14, 21素子	雑音	無し
ランク回復処理	補間MUSIC法(5素子空間平均法適用)	スナップショット数	100
波源周波数	600[MHz]正弦波	波源到来方向	1波: 0[度]固定
アレー面波源間距離	$\lambda$		2波: -30, 30[度]固定
アレー間隔	$0.45 \lambda$	推定における観測距離	$\lambda \pm 0.8 \lambda$

# 波源観測距離検討結果



素子数増加: 推定結果への影響大

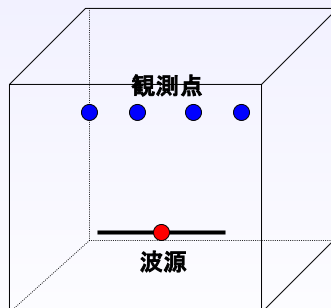
# 実際問題検討

・FDTD法により観測点を定め, 放射界を計算

※受信アンテナのモデル化は行っておらず, カップリング考慮なし



・MUSIC法により計算



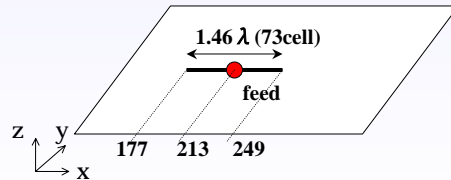
# ダイポール推定

## 観測点

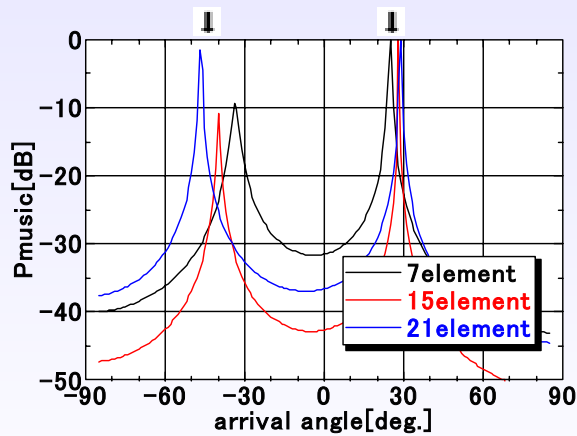
観測点数	7, 15, 21素子
観測方向	X軸方向
観測成分	EX成分
観測点間隔	$0.45\lambda$
観測距離	$\lambda$
到来予想方向	-43.8, 25.6[deg.]

## FDTD検討条件

解析領域	$450 \times 80 \times 80$ [cell]
セルサイズ	$0.01 \times 0.01 \times 0.01$
給電	デルタギャップ給電 (600MHz)
吸収境界	PML10層



# ダイポール推定結果



素子数増加 : スペクトル鋭い  
誤差 : 素子数に依存せずに伴う

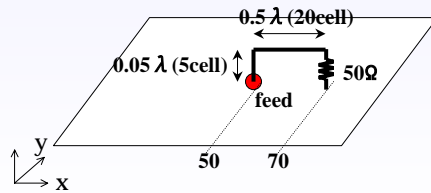
# ストリップライン推定

## 観測点

観測点数	7素子
観測方向	X軸方向 Y軸方向
観測成分	EX成分
観測点間隔	$0.45\lambda$
観測距離	$\lambda$
到来予想方向	0[deg.](Y軸方向) 0, 45[deg.](X軸方向)

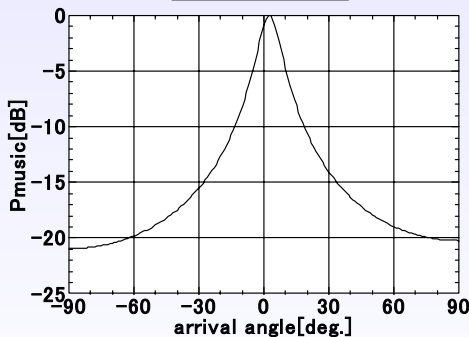
## FDTD検討条件

解析領域	$100 \times 100 \times 150$ [cell]
セルサイズ	$0.025 \times 0.025 \times 0.01$
給電	デルタギャップ給電 (600MHz)
吸収境界	PML10層

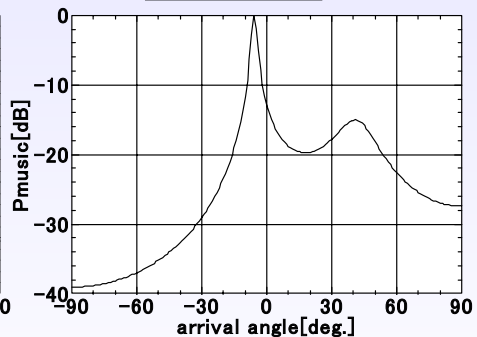


# ストリップライン推定結果

YZ平面(7素子)



ZX平面(7素子)



連続波源：推定できる可能性有り

(他のモデルで検討中)

## まとめ

- ・球面波モードベクトルを用いることで観測距離が近い場合でも精度良く推定が可能

→素子数増加;高分解能, 精度良(正面方向)

※素子数増加に伴い, 球面波モードベクトル計算時の観測距離が結果に大きく影響するため注意が必要

- ・ダイポール, ストリップライン放射界に対して推定可能(但し連続的な波源に対しては現在検討中)

## 今後の予定

- ・ MUSIC法の2次元化(平面による推定)
- ・ FDTD法を用いて受信アンテナをモデル化(アレー素子の指向性やカップリング考慮)
- ・ 他モデルについて検討