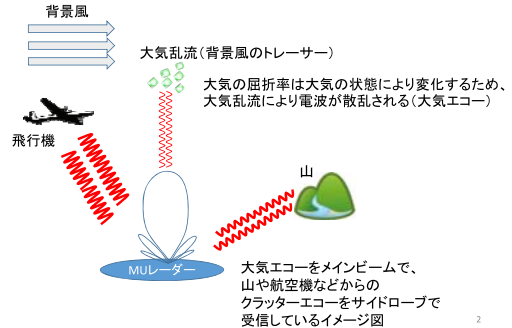


# MUレーダー実時間アダプティブクラッター抑圧システムの開発

橋口浩之<sup>1</sup>・万城孝弘<sup>1</sup>・久保田匡亮<sup>1</sup>・山本衛<sup>1</sup>・  
佐藤亨<sup>2</sup>・西村耕司<sup>3</sup>・橋本大志<sup>2</sup>  
1: 京都大学生存圏研究所  
2: 京都大学情報学研究所  
3: 国立極地研究所

## 研究背景

大気レーダーの観測対象: 大気エコー (<<クラッターエコー)



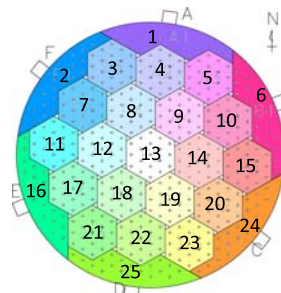
## MUレーダー (Middle and Upper atmosphere radar) 航空写真と主要諸元

475本のアンテナそれぞれに送受信機が取り付けられており、それらを個別に制御し、高速にビーム方向を変更できるアクティブフェーズドアレイアンテナ



Parameter	Value	Parameter	Value
Location	Shigaraki, Shiga, Japan (34.85° N, 136.10° E)	Transmitter	475 solid state amplifiers
Radar System	monostatic pulse radar, active phased array system	peak power	1 MW (maximum)
Frequency	46.5 MHz	average power	50 kW (duty ratio 5%) (maximum)
Antenna	circular array of 475 crossed Yagi's	bandwidth	3.5 MHz (maximum)
aperture	8330 m (103 m in diameter)	Range resolution	150 m
beam width	3.6° (one way/half power for full array)		
steerability	steering is completed in each IPP		
beam directions	1657, 0° - 30° off zenith angle		
polarizations	linear and circular		

## 超多チャンネル受信システム



475本の八木アンテナが19本ずつ25グループに分けられており、2004年に超多チャンネル受信システムを導入したことで、信号を独立に受信できるようになった

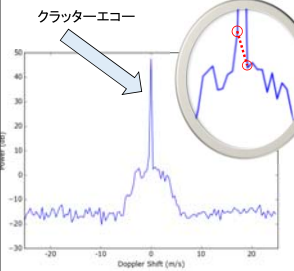
## 主な成果と発表内容

- ✓ 実時間 (リアルタイム) 処理としてクラッター抑圧システムを開発し、対流圏・下部成層圏標準観測モードに導入・運用開始 (2015/11~)
  - 実観測データを用いて2つのパラメータの決定
    - ノルム拘束値δ
    - 受信信号の自己相関行列の平均を求めるためのデータ数n
  - 実時間処理の実現
    - 160高度、5ビーム、128点時系列データに対して、要求時間: 8.2秒 → 0.2秒程度 (最悪でも1.4秒程度)
- ✓ 中間圏標準観測モードに導入・運用開始 (2015/11~)
  - 主に流星エコーの抑圧
  - 発表時間の関係で割愛

## 本研究の意義

- 実時間 (リアルタイム) 処理 (対流圏・下部成層圏標準観測モード、中間圏標準観測モード)
  - 信号処理の簡便化
  - 取得データ容量の削減
    - オフライン処理 数100 GB/日 → 数100分の1程度
    - HDD等の記憶装置の制約の少ない連続観測が可能に
- 用いる手法: NC-DCMP法 (DCMP法を改良した手法) (ノルム拘束付方向拘束付電力最小化法; Norm Constrained-Directionally Constrained Minimum Power)
  - ソフトウェアで実装可能
  - ハードウェアの変更を必要としない
  - 鉛直風の推定の改善
- 本研究の成果は、現在建設予定の赤道MUレーダーにも応用可能

### 研究背景: 大気エコーとクラッターエコー



**クラッターエコー**

**従来法**  
ゼロドップラーにのみクラッターエコーが存在すると仮定し、**中点で内挿**している

**問題点**  
フェージングにより地形性クラッターがスペクトルに広がりをもちつ場合に**クラッターの抑圧が不十分**となる。  
また、ゼロドップラーでの大気エコーを過小評価し、特に、**鉛直風の推定に悪影響を及ぼす**場合がある。

**先行研究**  
アンテナパターンを制御する**NC-DCMP法**が有効である(Nishimura et al., 2012)  
オフライン処理で行われている

**本研究**  
**オンライン処理化**

大気エコーがゼロドップラー付近に存在しゼロドップラーでの地形性クラッターが非常に大きい場合のドップラーズベクトル

### NC-DCMP法 (Nishimura et al., 2012)

$$\text{minimize } P = \frac{1}{2} w^H R_{xx} w \quad \rightarrow \quad w = \frac{(R_{xx} + \sigma I)^{-1} C}{C^H (R_{xx} + \sigma I) C}$$

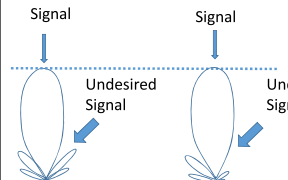
$$\text{subject to } C^T w^* = N \text{ and } |w^H w| \leq \delta N$$

$\delta$ : ノルム拘束値 (許容するSN損失)

DCMP法では、所望方向の電力をNに保ちつつ全体の電力を $|w^H w|$ 倍する。NC-DCMP法では、これを $\delta N$ 以下に制限することでSNの損失を保障している。

ノルム拘束のトレードオフ

ノルム拘束値 $\delta$	大	小
クラッター抑圧能力	○	×
大気エコーの損失	×	○



### NC-DCMP法 (Nishimura et al., 2012)

$$\text{minimize } P = \frac{1}{2} w^H R_{xx} w \quad \rightarrow \quad w = \frac{(R_{xx} + \sigma I)^{-1} C}{C^H (R_{xx} + \sigma I) C}$$

$$\text{subject to } C^T w^* = N \text{ and } |w^H w| \leq \delta N$$

When  $\sigma = 0$ , this is the solution to the DCMP.

オンライン観測システムに組み込むために検討すべきこと

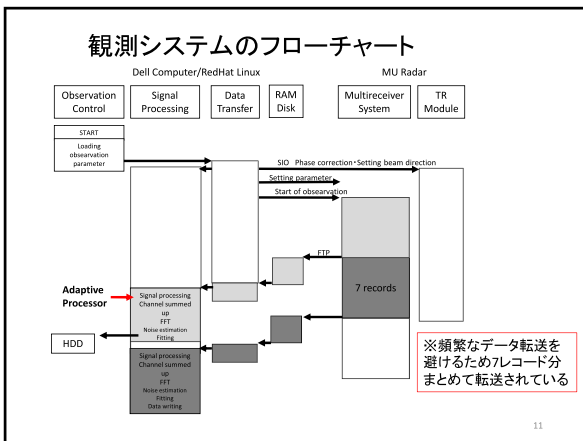
**検討項目1.**  
ノルム拘束値 $\delta$ を**実際の観測データを用いて適切な値**を決める必要がある(先行研究では数値計算により決めていた)

**検討項目2.**  
受信信号の自己相関行列 $R_{xx}$ は、受信信号の相関を低下させるため、一定の時間(一定の観測データ点数)を平均して求められる。その適切な**時間長(データ長)n**を決める必要がある

### 対流圏・下部成層圏観測モード : 観測パラメータ

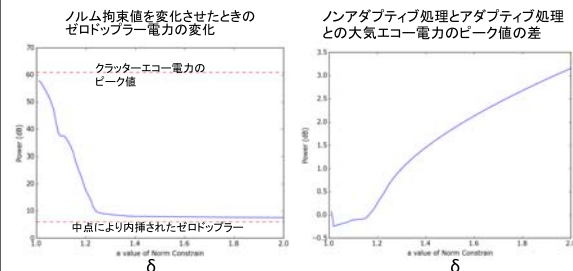
- ・ビーム数: 5(天頂、東西南北)
- ・コヒーレント積分: 32
- ・FFT: 128
- ・IPP: 400  $\mu$ s
- ・距離方向のサンプル数: 160
- ・距離分解能: 150 m

- ・観測データは**約8秒に1回(1レコード)**取得される
- ・信号処理をリアルタイムに行うためには1レコードあたり8秒以内にすべての処理を完了する必要がある
- ・観測データは全ての時系列データの複素信号を実部と虚部それぞれをfloat型で保存しているため1レコードあたりの容量は25チャンネルで20.5 MB程度になる。1日あたり200 GB程度になる。



### 検討項目1. 最適なノルム拘束条件 $\delta$ の検討

ノルム拘束値 $\delta$ の平面から見た場合



ノルム拘束値を変化させたときのゼロドップラー電力の変化

クラッターエコー電力のピーク値

ノンアダプティブ処理とアダプティブ処理との大気エコー電力のピーク値の差

$\delta$ を大きくすると、クラッターをより抑圧するが、 $\delta > 1.4$ の範囲では、 $\delta$ を大きくしてもクラッター抑圧能力に大きな差異が生じなくなる

- ・ $\delta$ の増加に伴い、劣化量が増加する。
- ・劣化量は、1/8とおおよそ一致する

### 計算時間の見積もり ( $\delta = 1.25$ )

#### NC-DCMP法 (Nohmura et al., 2012)

minimize  $P = \frac{1}{2} w^H R_{xx} w$   
 subject to  $C^H w = N$  and  $|w^H w| \leq \delta N$

NC-DCMP法の解説  
 手順1: DCMP法を解く  
 手順2: ノルム拘束条件を満たせば解  
 手順3: 類似雑音を加え、手順2へ

この繰り返し処理がNC-DCMP法の  
 律速段階となる

この繰り返し処理が律速段階

初期値のDCMP法による  
 ウェイトノルムが大きいと  
 ステップ数が増える。

Newton法を適用すると  
 高々6ステップ程度となった。  
 (中央値は1.5ステップ程度)

最悪の場合の計算時間  
 5 beam  $\times$  160  $\times$  6 steps  $\times$  0.3 (ms)  
 = 1.4 (s)

1レコードあたり8秒以内を十分に  
 満足できる。

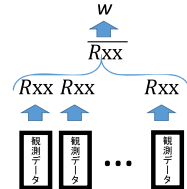
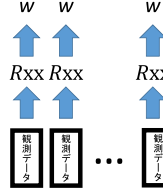
13

### 検討項目2. 用いるデータ長(時間長)の検討

受信信号の相関行列  $R_{xx}$  は、到来波の相関を低下させる  
 ため、一定の時間を平均したものが一般に用いられる。  
 従来、1レコード分(8秒)で十分とされていたが、より長時間  
 のデータを用いることを検討する。

1レコードに対し1つのウェイトベ  
 クトルを求めアダプティブ処理を行う

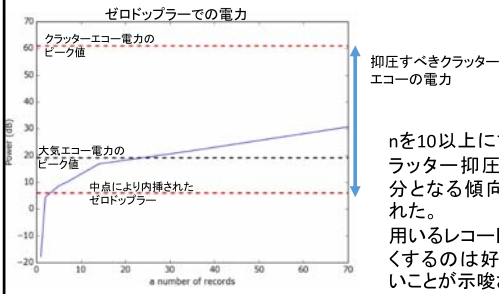
複数のレコードに対し、1つのウェイト  
 ベクトルを求めアダプティブ処理を行う



計算量を削減できる

14

### 用いるレコード数の検討: 検討結果(日中のデータ)

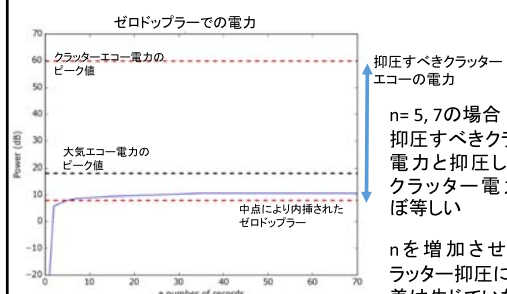


横軸: 受信信号の自己相関行列を  
 求めるために用いたレコード数  $n$

2015年11月11時55分から12時15分  
 に取得された、東方向・高度2.5 km  
 のデータを用いた

15

### 用いるレコード数の検討: 検討結果(深夜帯のデータ)



横軸: 受信信号の自己相関行列を  
 求めるために用いたレコード数

2015年11月18日2時16分から2時26分  
 に取得された東方向・高度2.5 kmのデータ  
 を用いた

16

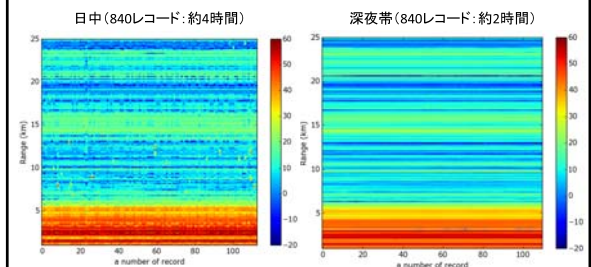
### 用いるレコード数の検討: 検討結果の考察

$n$	日中	日没後
1	過剰	過剰
2から7	適当	適当
14以上	不十分	適当

- 用いるレコード数
  - $n=2\sim7$ が適当
  - 実装の容易さの観点から  $n=7$ を採用することにした
    - 7レコードずつホストPCに転送されるため
- 観察された傾向
  - $n$ が増加するとクラッター抑圧が不十分となる傾向が見られた。
    - 特に日中において顕著である。
- 考えられる原因
  - MULレーダーからクラッター源までの空間の気温分布の変化によ  
 り、クラッターエコーの伝搬経路が変化しと考えられる

17

### ゼロドップラー電力(ノンアダプティブ処理)の高度時系列変化



それぞれの高度でのゼロドップラーの電力の時系列変化を示す。  
 深夜帯に比べ日中は時系列変化が大きい。  
 日射により、クラッター伝搬経路が変化していることが示唆された

18

対流圏・下部成層圏標準観測モードへの  
NC-DCMP法の実装方法

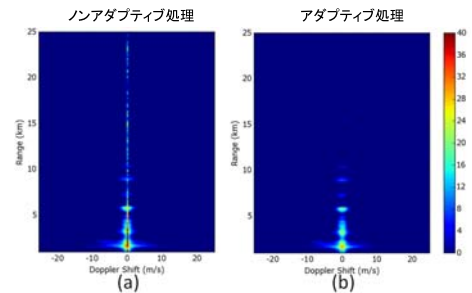
- 検討項目1. ノルム拘束値
  - $\delta = 1.25$ と決定した
- 検討項目2. 受信信号の自己相関行列の求め方
  - 7レコードで平均処理し、1つのウェイトベクトルを求め、それぞれのレコードでアダプティブ処理を行う

2015年11月より  
アダプティブクラッター抑圧処理システムを  
実時間処理として運用を開始。  
安定に動作している。

※現在は、ノンアダプティブ処理、アダプティブ処理両方のデータを残している

19

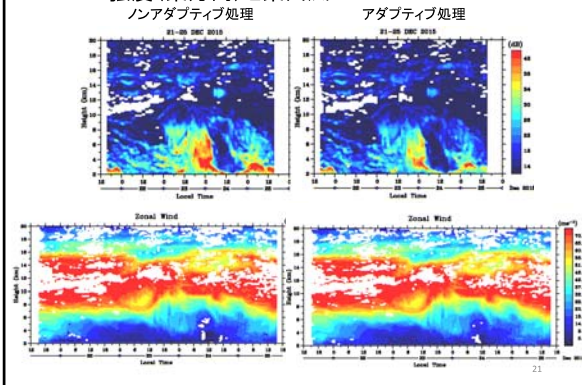
オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ



2015年12月22日0時0分49分から3時29分42分までの観測  
データをインコヒーレント積分し得られたドップラースペクトル

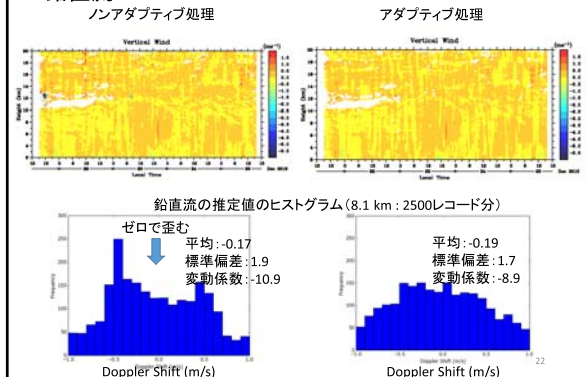
20

オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ  
エコー強度(東方向)と東西風



21

オンライン観測システムへの実装と取得できたデータ  
鉛直流



22

まとめ

- MULEーダーの対流圏・下部成層圏標準観測モードに、NC-DCMP法による実時間アダプティブクラッター抑圧処理を実現した。
- アダプティブ処理を適用する最適な時間長(データ長)やノルム拘束値 $\delta$ を検討し、決定した。
- 実環境に実装し、2015年11月から運用を開始した。
- アダプティブ処理により、風速データに悪影響を及ぼしていないこと、特に弱い鉛直流の推定が改善されていることを確認した。
- 同様の検討を行い、中間圏標準観測モードにもアダプティブ処理を実施した。クラッターエコーだけでなく、流星エコーの抑圧にも効果がある。

23

今後の発展

- 最適なノルム拘束値 $\delta$ は、各ビーム・各高度において時々刻々と変化する可能性が高い。アダプティブに最適な $\delta$ を決めることで、SN劣化の小さい、クラッター抑圧を実現できる。
- MULEーダー超多チャンネルデジタル受信システムに、4つの受信チャンネルが余っている。天頂付近に感度の低い受信専用アンテナを導入して、グラウンドクラッターをより積極的に抑圧する。
- 現状でも、航空機エコーの軽減効果はあるが、十分ではない。ADS-B信号による、現在位置・高度・速度などの情報も利用することで、航空機エコーの抑圧が期待される。

