

計画研究項目 A02

「赤道大気レーダー高度利用技術と環境計測の研究」

1. 研究組織

研究代表者：佐藤 亨（京都大学大学院情報学研究科・教授）

研究分担者：前川 泰之（大阪電気通信大学情報通信工学部・教授）

2. 他班との連携状況

当研究班は本領域の中核となる赤道大気レーダーを中心とした技術開発と検証を担当する。構成員は佐藤 亨（代表者）と前川 泰之（分担者）およびそれぞれの研究協力者である。赤道大気レーダーの運用に関して A01 班と連携する他、地上降雨観測データ、気象レーダーデータなどの関連測器のデータに関して A03 班より提供を受け、また当班で取得するデータの提供を行って相互に連携している。

3. 当初の設定目標とその達成度

1. 赤道大気レーダーのマルチスタティック化による高機能化

アレイアンテナを構成する個々の素子にデジタル信号処理ボードを接続し、直接 AD 変換してパソコンで分散処理することにより、安価かつ柔軟な構成の次世代受信システムを開発した。2004 年 9 月および 2005 年 11 月～12 月の 2 回にわたって、EAR から西および南にそれぞれ約 1km の 2 箇所はこの受信専用アレイを設置し、EAR における送受信と合わせて 3 地点で EAR 送信信号からの散乱波を受信して、送信ビームが照射する各点の風速 3 成分の時間・空間変化を観測した。降水を伴わない大気について世界で初めて、水平方向に 1km 程度の高い分解能で 3 次元風速場の連続的観測を実施した。いずれも計画通りに所期の目標を達成しており、達成度は 100% である。

2. 多次元パラメータ推定による高度データ処理手法の開発

京都大学生存圏研究所(RISH)と赤道大気レーダー(EAR)を結ぶ Ku 帯衛星通信回線の降雨減衰を、2003 年 1 月から 4 年 9 ヶ月にわたって両局における上下回線(14/12GHz)について測定し、降雨の微細な構造を連続的に観測した。このデータの解析に基づき、後述のように赤道域の降雨構造に固有の特性を見出すなどの成果を挙げた。ただし、当初予定した赤道大気レーダー観測にその結果を反映してデータ処理を高度化する目標は、期間内に具体的成果を得るに至っていない。このため、達成度は 50% と考えている。

なお、平成 14 年度の当初計画では、さらにウィンドプロファイラーネットワークデータベースを構築することを計画したが、他のレーダーのデータ入手が

困難となり、主にEARのデータベースのみを用いることとなった。そのためEARデータ整備を担当するA01班の研究テーマに含めることとした。よってA02班の達成目標から除外した。

4. 主な研究成果（予想を超えた成果）

(1) デジタル受信機アレイを用いたマルチスタティック風速観測

上述のマルチスタティック化赤道大気レーダーを用いた連続観測の結果、すでに山岳波によると考えられる極めて強い局所的擾乱が見出されており、しかもそれが数時間のスケールで大きく変動するなどの現象が発見されている。高度3km以上の領域において、水平方向にわずか1km程度の観測位置の違いで風速場に20m/sもの変動が数時間にわたって持続することは従来の予想を超えており、前例のない貴重なデータが得られている。

信号処理の面では、マルチスタティック風速推定において不可欠なアダプティブクラッタ抑圧に関して、従来の手法では効果が不十分であることが明らかとなり、独自の開発を行った。特に、送信ビーム方向によって受信アレイ上の素子間相互結合が変化することまでを考慮したのは、アンテナ技術の分野でも先例がない先端的手法であり、これによってはじめてクラッタのほぼ完全な自動除去が実現し、風速場データベースの効率的生成が可能となった。

(2) 降雨減衰観測

熱帯におけるEARでの降雨減衰に関して、強雨時においてもEARでは比較的小さな雨滴粒径分布が多く含まれることや、減衰量自体は大きいものの年間の月別統計の変動は温帯よりむしろ小さいなど、様々な統計的特徴が明らかになった。

特に、減衰量が10dB以上の強雨時に、雨域等価通路長が2km程度まで減少することが示されたことは、赤道直下にあるEARにおける降水雲特有の現象である可能性がある。この様に、EARにおける赤道直下の降水雲に対しては、温帯域では一般的な低仰角ほど雨域通路長が増すという基本的な性質とは異なる極めて特異な現象が存在することが分かった。この結果は今後赤道域、特に赤道直下の高地において、比較的low仰角においても十分周波数の高いKu帯以上の衛星回線が確保できる可能性を示すものとして、有用と考えられる。

5. 他の研究分野に与えたインパクト

当初から予定されていたように、上記の成果はいずれも期間の後半になって明らかになったものである。特にマルチスタティック大気レーダー観測については、連続的なデータ解析は、アダプティブクラッタ抑圧の新手法が確立され

た平成 18 年度末にようやく可能となり、特定領域の期間内には他分野への顕著なインパクトは現れていない。しかし、技術面と物理現象の両面においていずれも過去に例のない成果が得られており、今後アダプティブアンテナ技術と大気観測の両分野において寄与しえると考えている。降雨減衰観測についても、衛星通信の設計基準に関する実用的貢献をなす成果が得られている。

6. 研究成果公表の状況（論文数など、博士号取得者数、受賞状況、新聞発表）

学術誌論文：7 編（A02 班が主体となって発表したもの）

2 編（他班の発表に協力したもの）

査読付き国際会議論文：12 編

国内学会発表：13 件

博士号取得者：1 名（西村耕司）

受賞状況：2006 年 12 月 15 日: Koji Nishimura,

11th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar,

Young Scientists Paper Award 受賞

A02班: 赤道大気レーダー高度利用技術と
環境計測の研究

代表者: 佐藤 亨(京都大学)
分担者: 前川泰之(大阪電気通信大学)

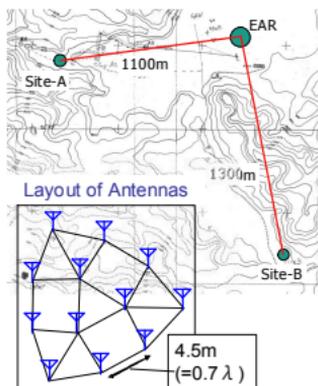
主な研究成果

- ・デジタル受信機アレイを用いた
マルチスタティック風速観測
- ・降雨減衰観測

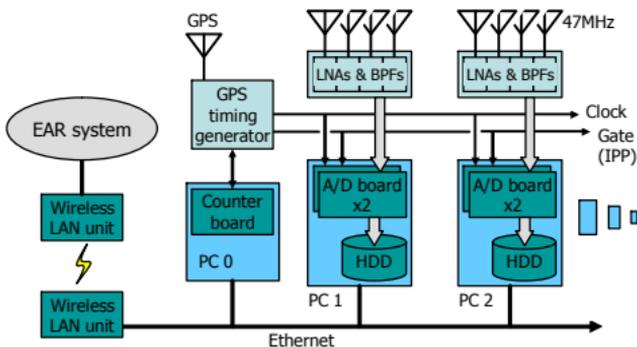
1. デジタル受信機アレイを用いた マルチスタティック風速観測

[研究目的]
 マルチスタティック観測
 アダプティブアレイアンテナ技術
 高空間分解能3次元風速場の推定

赤道大気レーダー (EAR)
 による送受信に受信サイトA,B
 (デジタル受信機アレイ)を追加



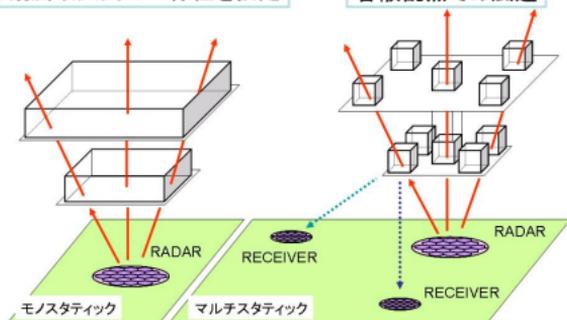
デジタル受信機アレイシステム



マルチスタティック観測

観測域大気の一様性を仮定

各散乱点での風速



アダプティブ処理

ノルム拘束付DCMP

- ・所望波到来方向の利得を固定、出力電力を最小化(DCMP)
- ・ウェイトノルムに上限を設定、感度を抑える(DCMP-CN)

$$\text{minimize}_{\mathbf{w}} \left(P_{out} = \frac{1}{2} \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \right)$$

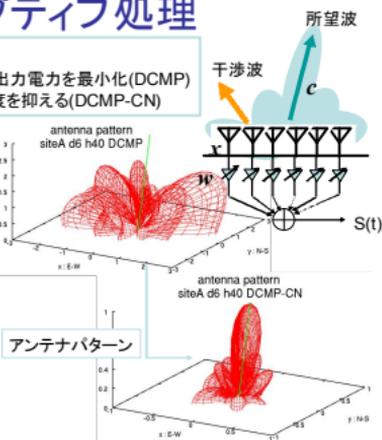
$$\text{subject to } \mathbf{w}^H \mathbf{c} = 1, \mathbf{w}^H \mathbf{w} \leq U$$

$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_N]^T$ 入力信号

$\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_N]^T$ 重みベクトル

$\mathbf{c} = [c_1, \dots, c_N]^T$ 拘束ベクトル

$R = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$ 相関行列



アレーアンテナの位相補正

アンテナ固有位相

- アンテナ素子に固有の位相オフセット
原因: アンテナ給電部、アンプ等のコネクタ
ケーブル長の違い
- 大気エコーを利用して推定

$\varphi_{\text{obs}}^{ij}$; アンテナ i , 散乱点 j

$$\varphi_{\text{obs}}^{ij} = \mathbf{k}^j \cdot \mathbf{r}^i + \varphi_{\text{int}}^i$$

アンテナ・散乱点の座標は既知

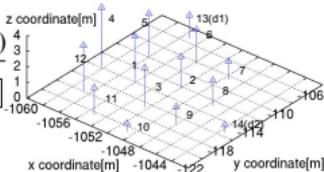
実際には
相互結合・遮蔽効果の影響が加わる

サイトAアンテナ配置

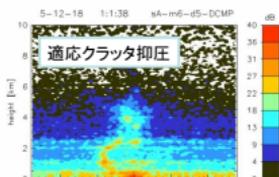
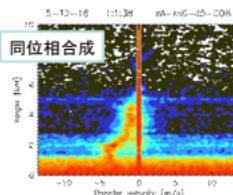
$$\varphi_{\text{obs}}^{ij} = \mathbf{k}^j \cdot \mathbf{r}^i + \varphi_{\text{int}}^i + \varphi_{\text{coup}}^i(\theta^j, \phi^j)$$

アンテナ素子毎に散乱点方向に依存する量

$\varphi_{\text{coup}}^i(\theta^j, \phi^j)$ を含めた形で補正
すべき位相を決定する必要

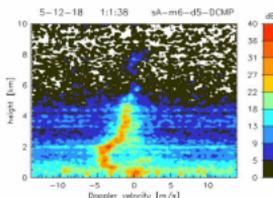


相互結合効果の補償



相互結合効果を補償

クラッタ、雑音成分のみを抑圧



3次元風速の計算

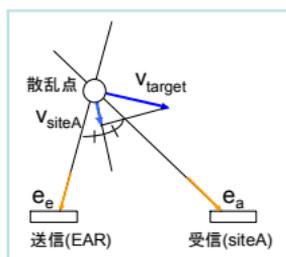
EAR、サイトA及びBの視線方向速度から
散乱点の風速を推定

$$\mathbf{v}_{\text{EAR}} = \mathbf{e}_c^T \mathbf{v}_{\text{target}}$$

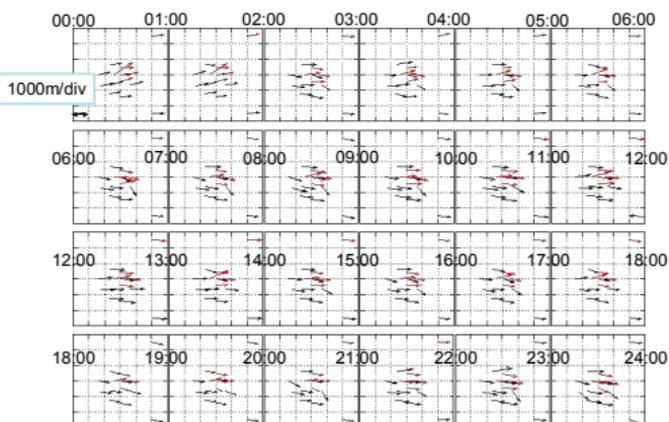
$$\mathbf{v}_{\text{siteA}} = \frac{\mathbf{e}_c^T + \mathbf{e}_a^T}{2} \mathbf{v}_{\text{target}}$$

$$\mathbf{v}_{\text{siteB}} = \frac{\mathbf{e}_c^T + \mathbf{e}_b^T}{2} \mathbf{v}_{\text{target}}$$

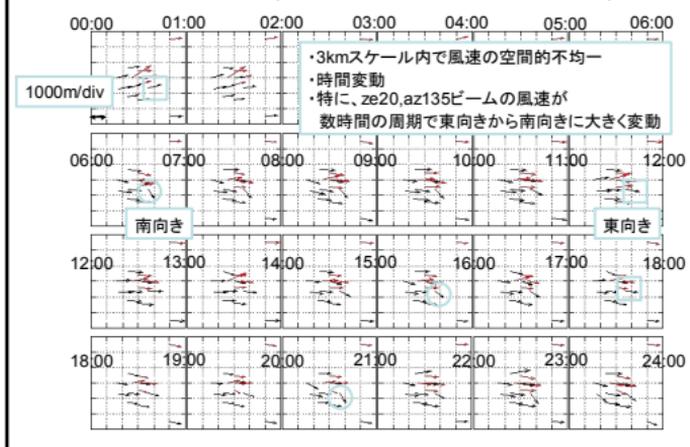
$$\mathbf{v}_{\text{target}} = 2 \begin{pmatrix} 2\mathbf{e}_c^T \\ \mathbf{e}_c^T + \mathbf{e}_1^T \\ \mathbf{e}_c^T + \mathbf{e}_2^T \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_{\text{EAR}} \\ \mathbf{v}_{\text{siteA}} \\ \mathbf{v}_{\text{siteB}} \end{pmatrix}$$



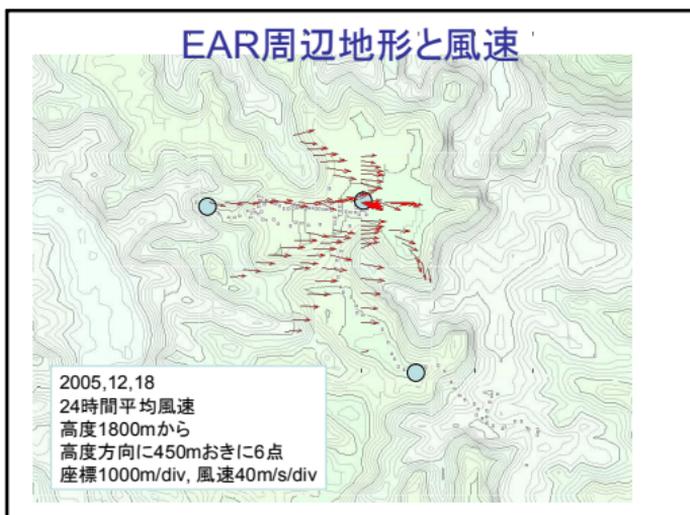
風速水平断面(2005/12/18, 高度2400m)



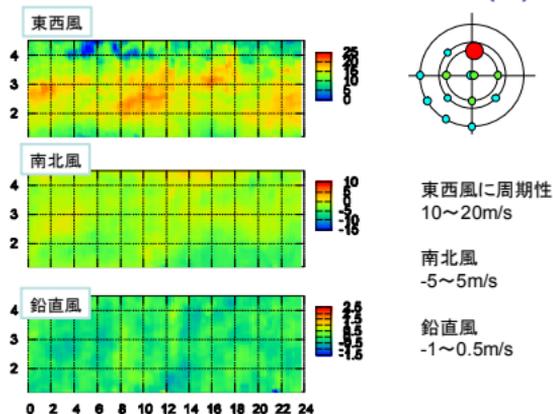
風速水平断面(2005/12/18, 高度2400m)



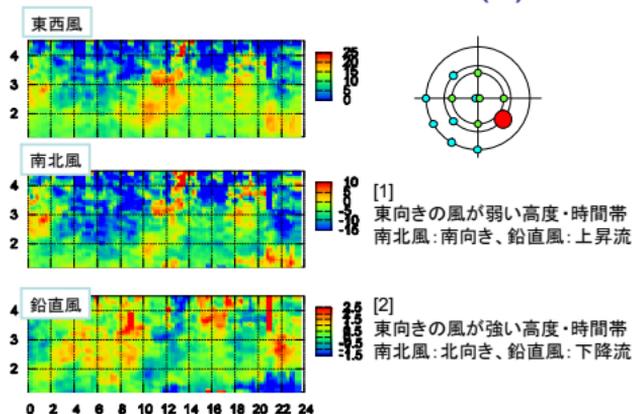
EAR周辺地形と風速



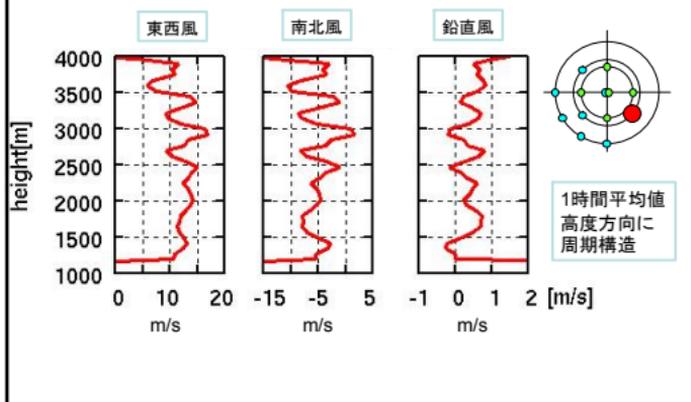
時間・高度プロフィール(1)



時間・高度プロフィール(2)



風速高度変化 (2005/12/18 17:00-18:00 ze20,az135)

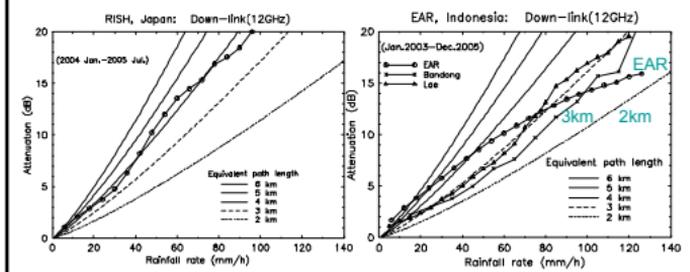


2. 降雨減衰観測

- RISHとEAR間に設置した衛星通信回線(上り14GHz、下り12GHz)の降雨減衰量を4年間にわたって記録
- EARやX帯降雨レーダー観測と統合して赤道域降雨の空間構造を解析

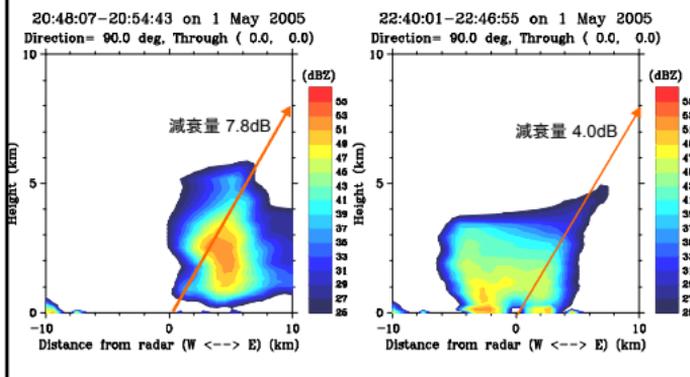
降雨強度と減衰量・等価通路長

- EARでは減衰量10dB以上のとき、等価通路長が2~3kmと短くなる → 局所的降雨の影響が強い



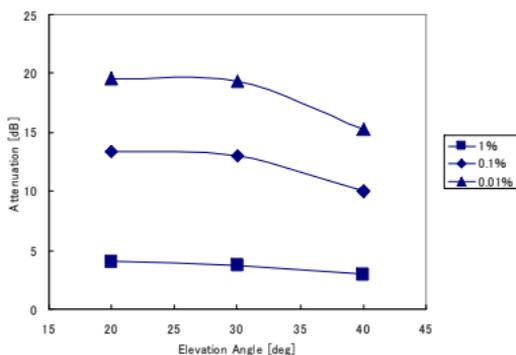
衛星伝搬路における降雨減衰推定例

×帯気象レーダー観測による降雨分布に基づく減衰量とよく一致



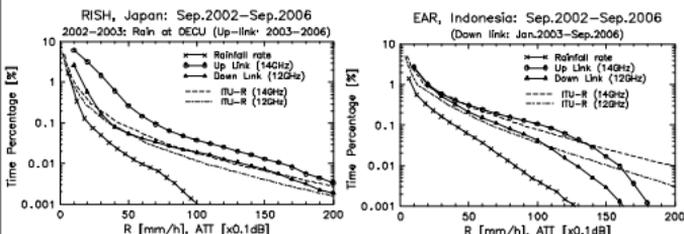
衛星仰角と減衰量の関係

30度以下の低仰角で減衰量が増加しない



降雨減衰と上下回線減衰量の累積時間率分布とITU-R予測値との比較

- RISHおよび弱雨時のEARにおける観測値は、ITU-Rモデルによる予測とよく一致
- EARにおいては減衰量10dB以上で急激に低下



まとめ

- デジタル受信機アレイシステムを新規に開発
- EAR周辺の2地点に展開し、マルチスタティック観測を実施
- アダプティブ信号処理によりクラッタを効率的に抑圧
- 3次元風速の空間・時間変化: **強い局所性の発見**

- 衛星通信電波の降雨減衰を4年間連続観測
- EARやX帯気象レーダーデータと統合して解析
- **赤道域固有の局所降雨の影響を発見**