



# レーダーを使って大気を測る --- 信楽とインドネシアからの研究紹介 ---

橋口 浩之  
(京都大学生存圏研究所)



京 都 大 学 生 存 圏 研 究 所

Research Institute for Sustainable Humanosphere Kyoto University



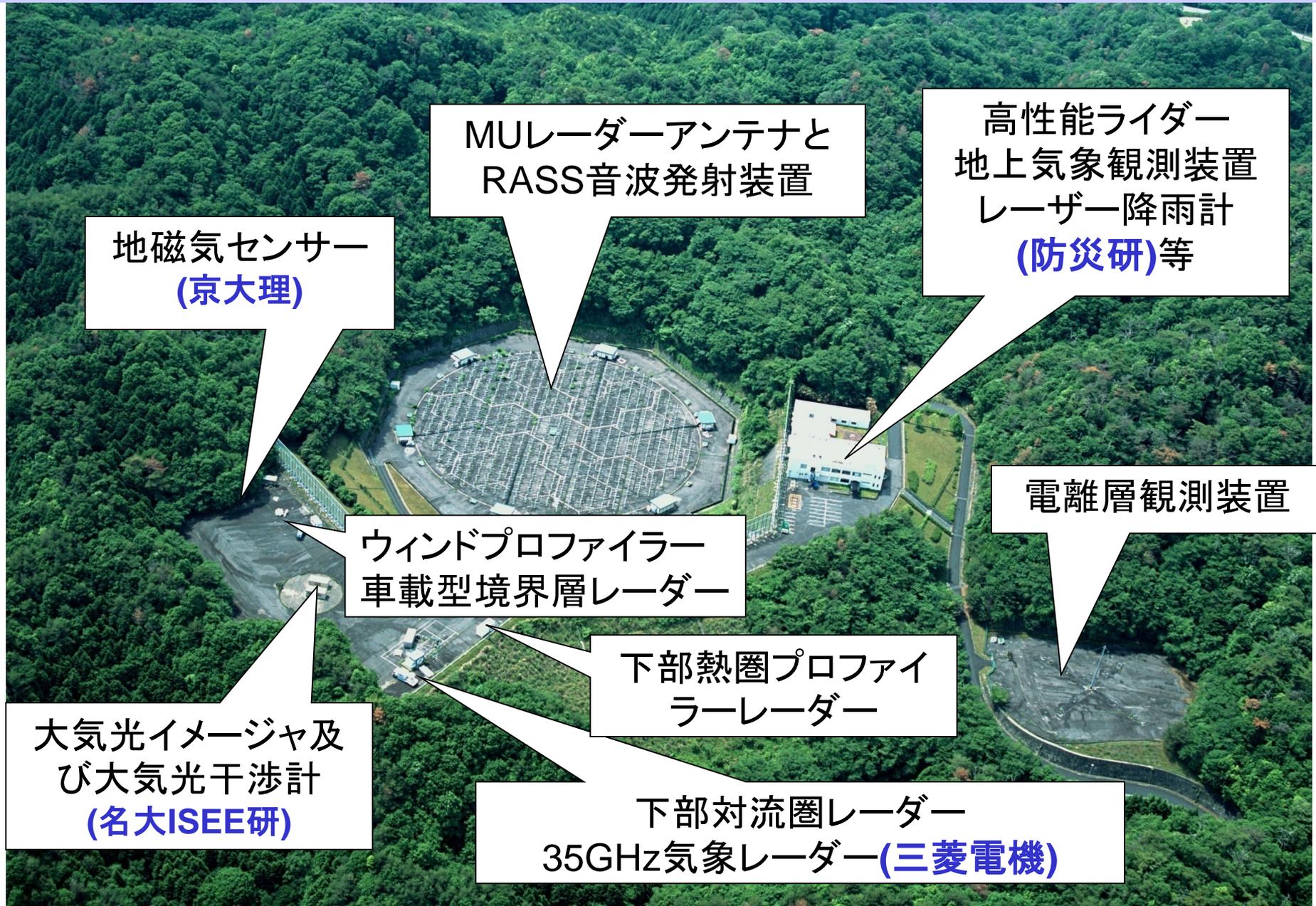
# MUレーダー

(滋賀県甲賀市信楽町)



1984年に完成した全国共同利用施設

# 信楽MU観測所の観測装置群



地磁気センサー  
(京大理)

MUレーダーアンテナと  
RASS音波発射装置

高性能ライダー  
地上気象観測装置  
レーザー降雨計  
(防災研)等

ウィンドプロファイラー  
車載型境界層レーダー

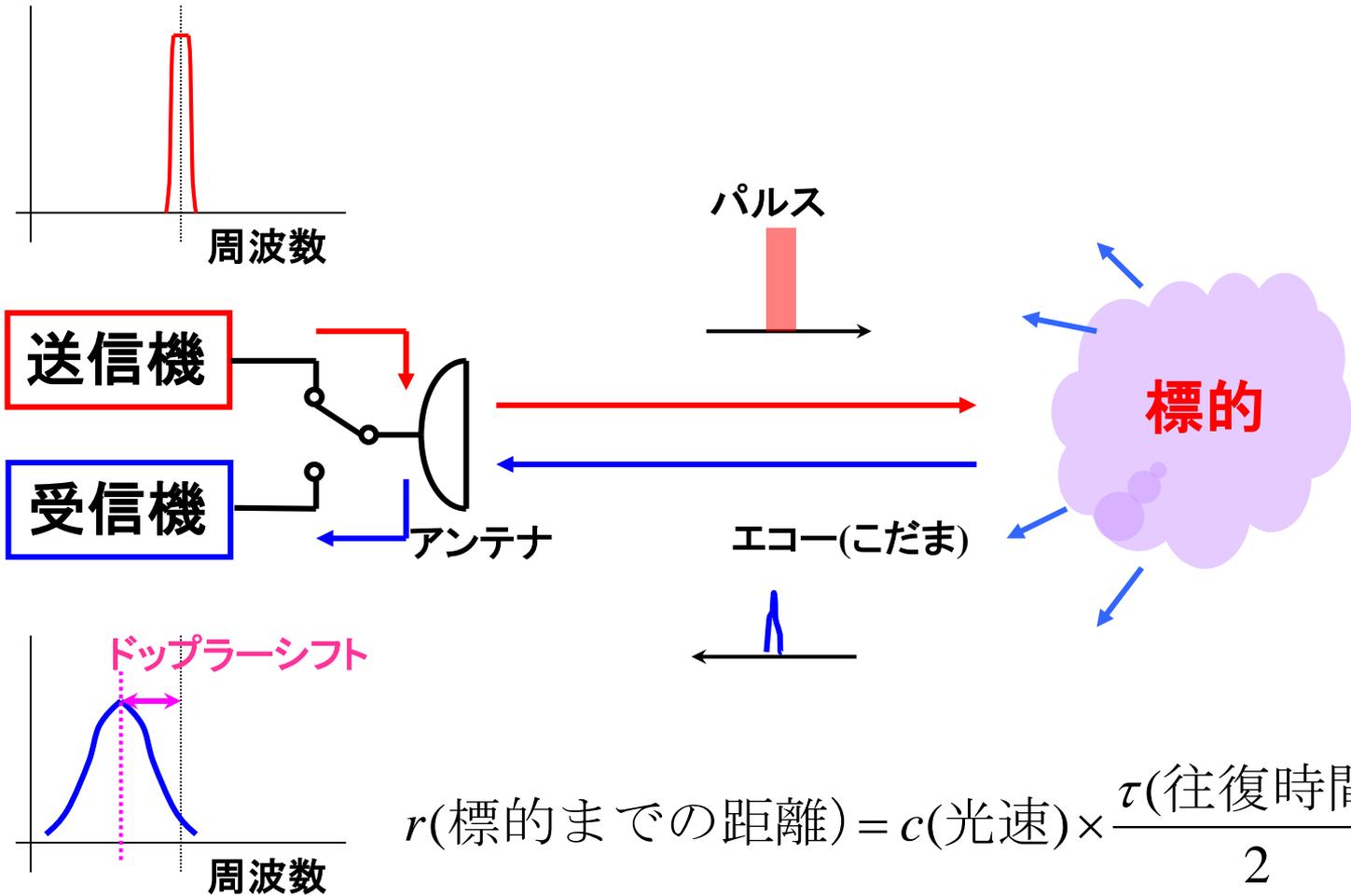
電離層観測装置

大気光イメージャ及び  
大気光干渉計  
(名大ISEE研)

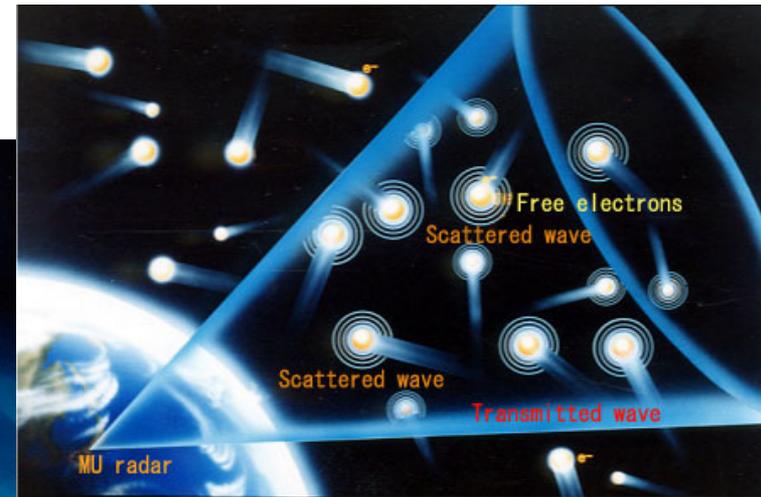
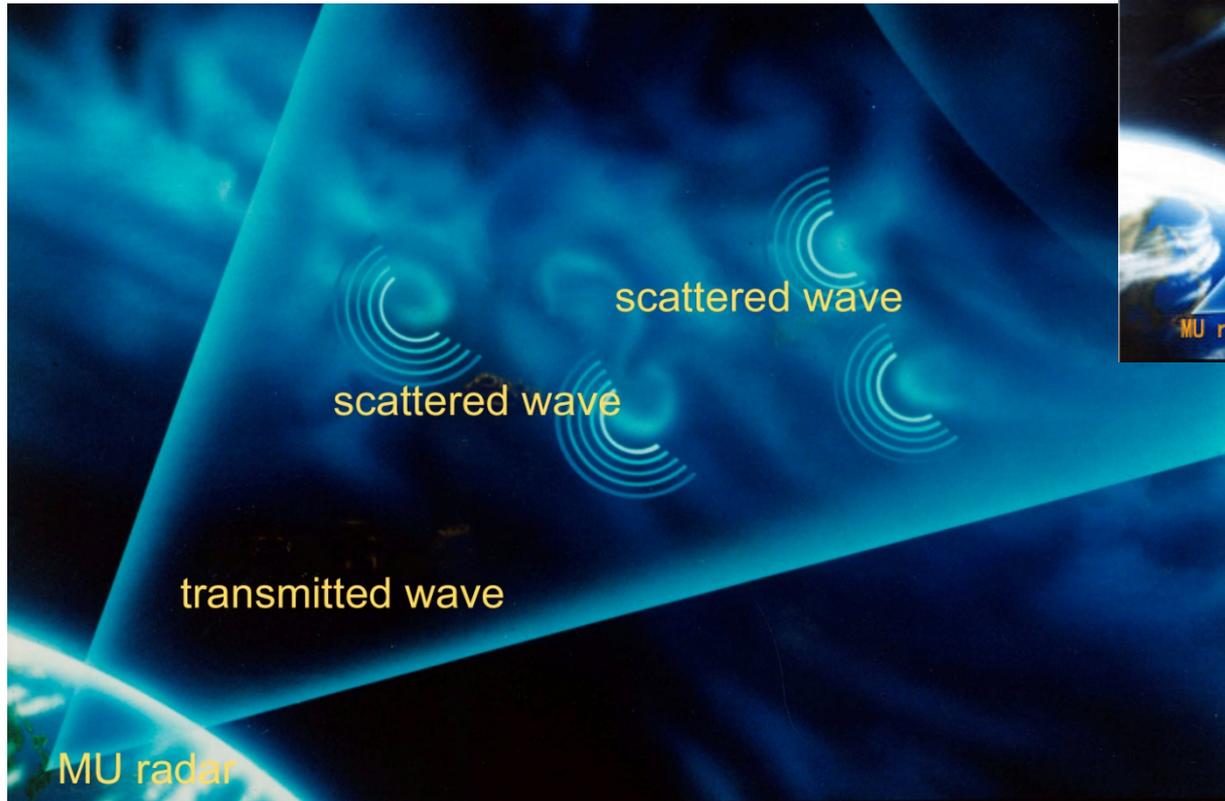
下部熱圏プロファイ  
ラーレーダー

下部対流圏レーダー  
35GHz気象レーダー(三菱電機)

# レーダーの原理



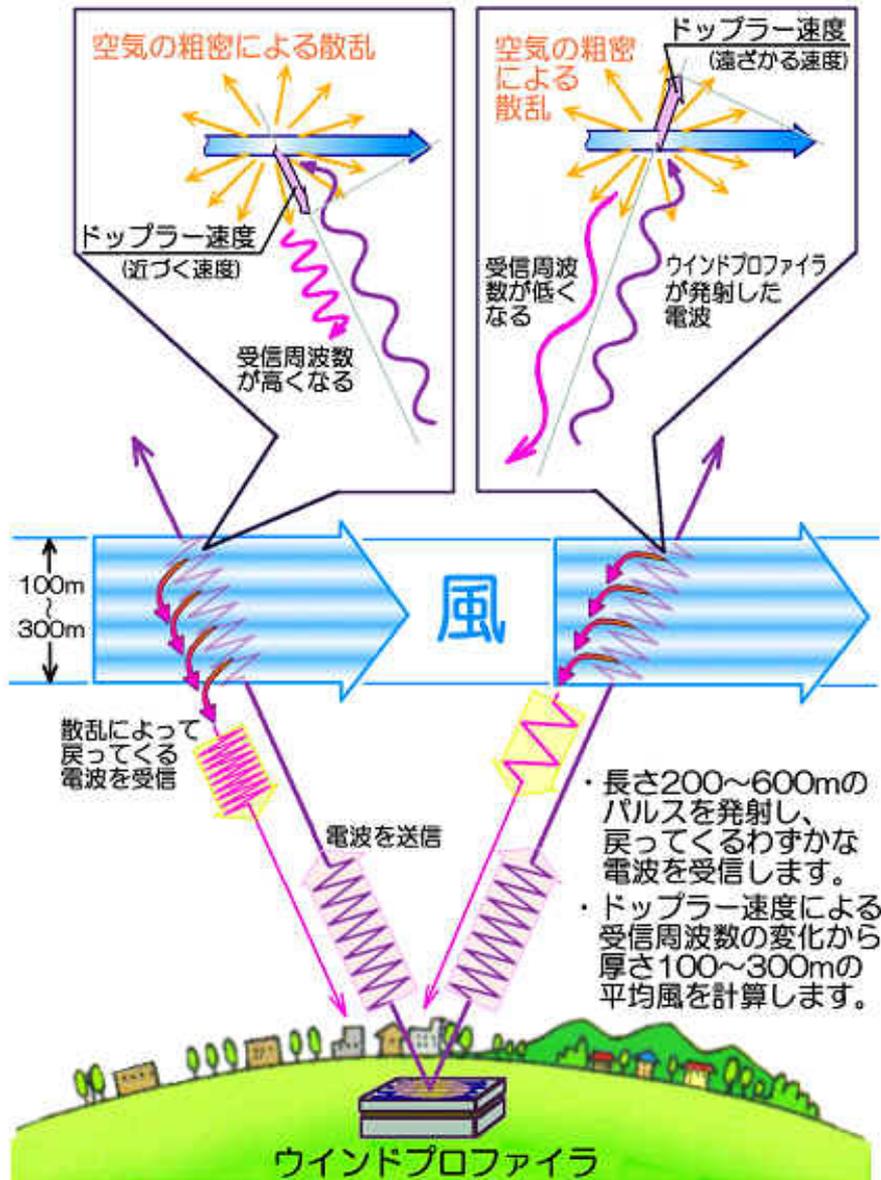
# 大気の標的——大気のゆらぎ (乱流)



自由電子からの散乱  
電離圏

大気乱流からの散乱  
対流圏/成層圏/中間圏

# レーダーによる風観測の原理



時速 60km だ!



ソ#ード  
ソ#ード

ソーシー  
ソーシー

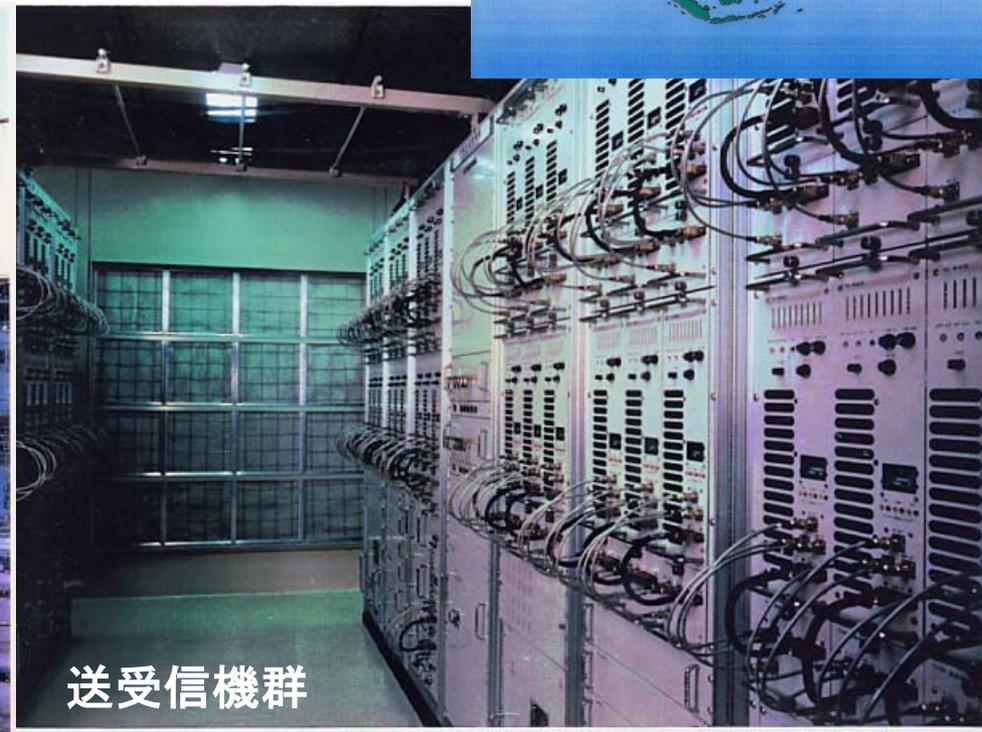
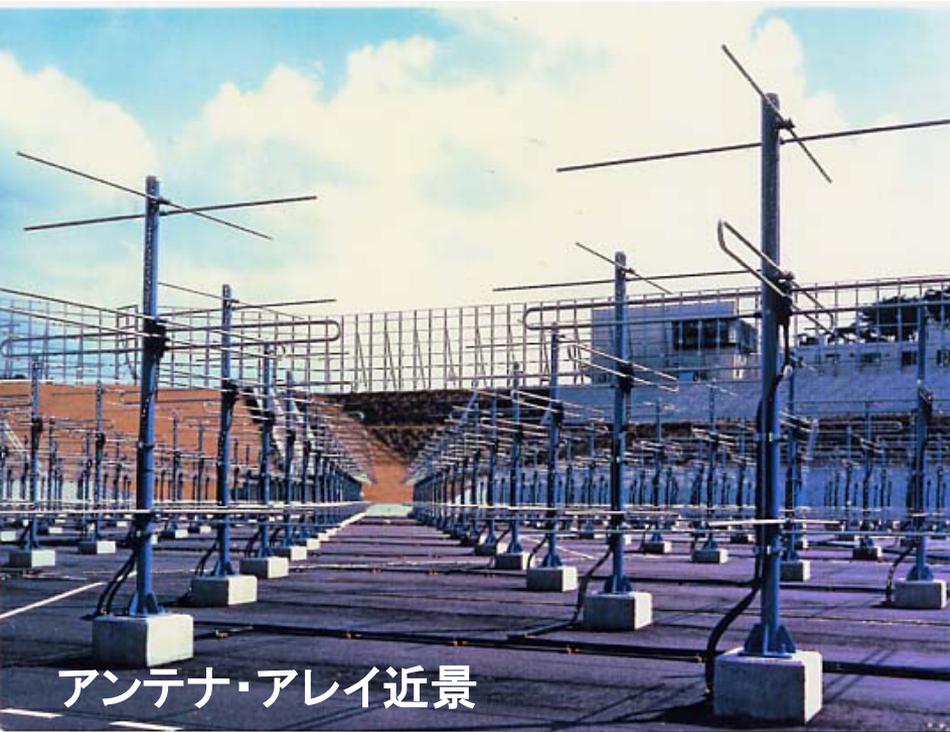
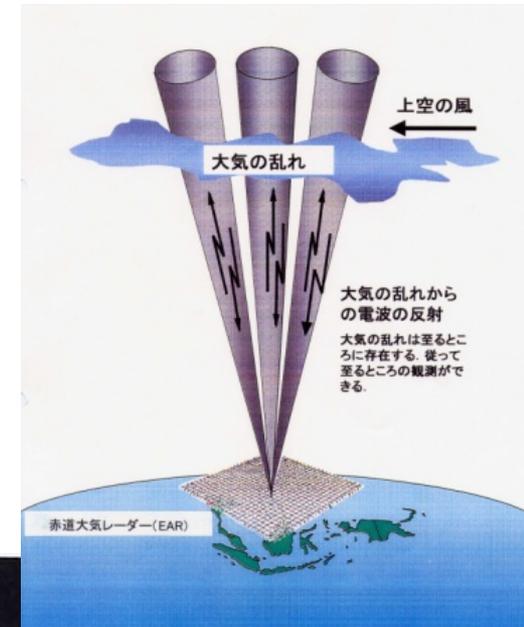


ドップラー効果

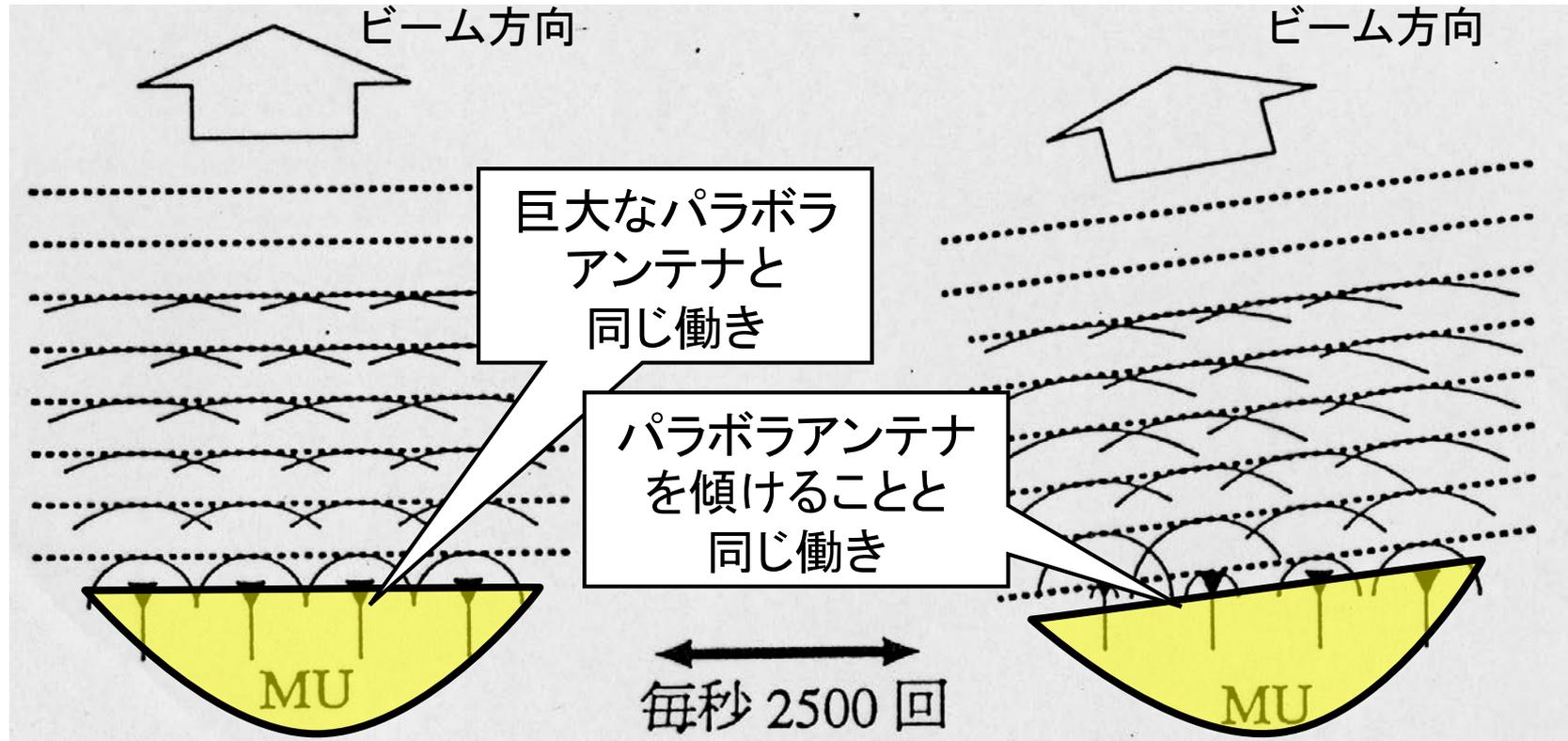
# MUレーダー (Middle and Upper atmosphere radar)

## 中層・超高層大気観測用 VHF帯大型大気レーダー

- 中心周波数46.5MHz、帯域幅3.5MHz
- 送信出力 50kW、**ピーク出力1MW**
- アンテナ開口面積: 8330 m<sup>2</sup> (**直径103m**)
- ビーム幅: 3.75度
- **アンテナビーム方向: 400μ秒毎に電子走査**



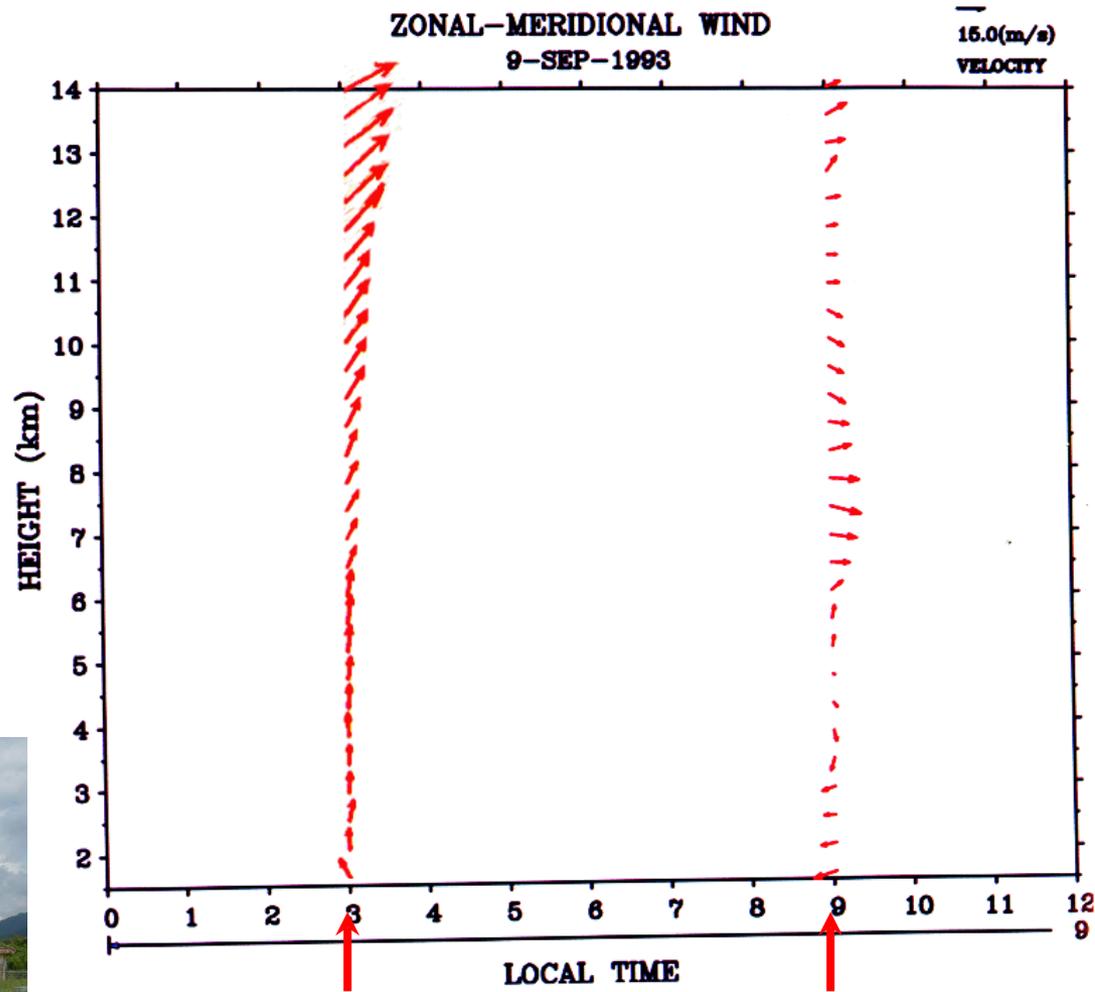
# MUレーダーのビーム走査



八木アンテナから出る電波の位相を電子的に制御することで、アンテナビーム方向を変えられる。

# 水平風

気象ゾンデ観測



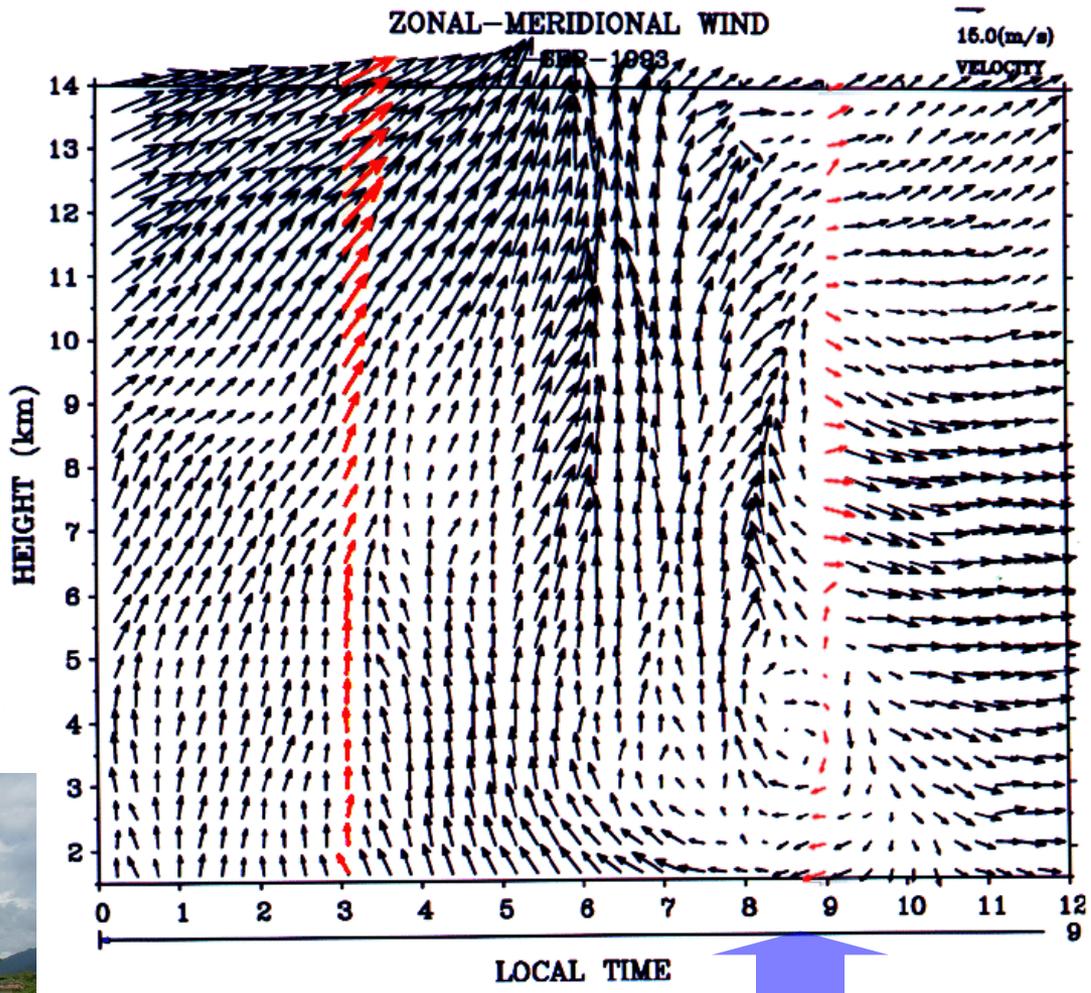
6時間間隔

大気レーダー：高層の風速を、比肩するもののない高い時間・高度分解能で測定

# 水平風

気象ゾンデ観測

大気レーダー観測



東

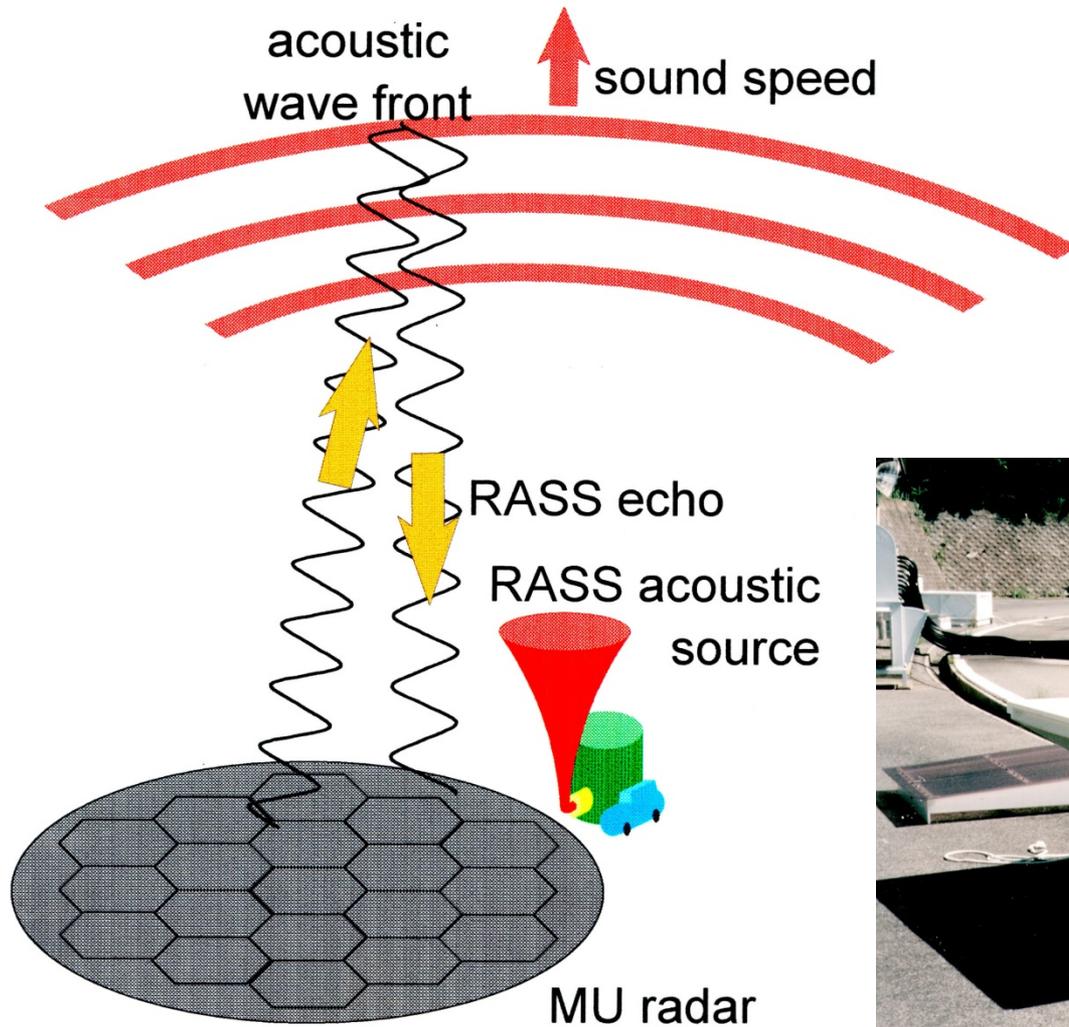
台風通過

西

気象現象は一般に西から東に移動するので、時間変化を空間変化として捉えることができる

# RASS法 - 高層大気の温度を測る

RASS: Radio Acoustic Sounding System

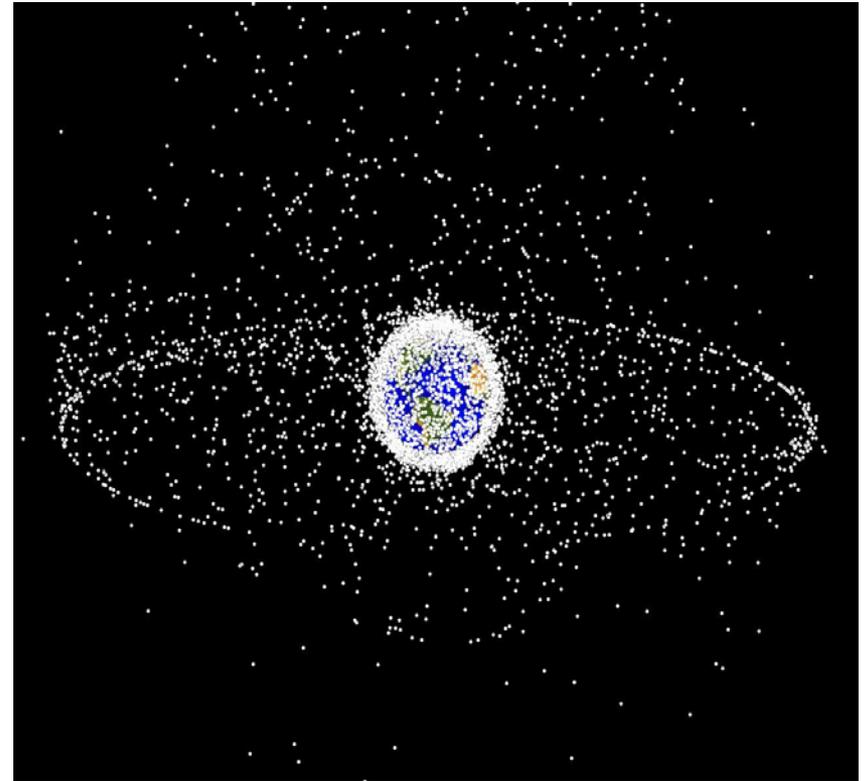
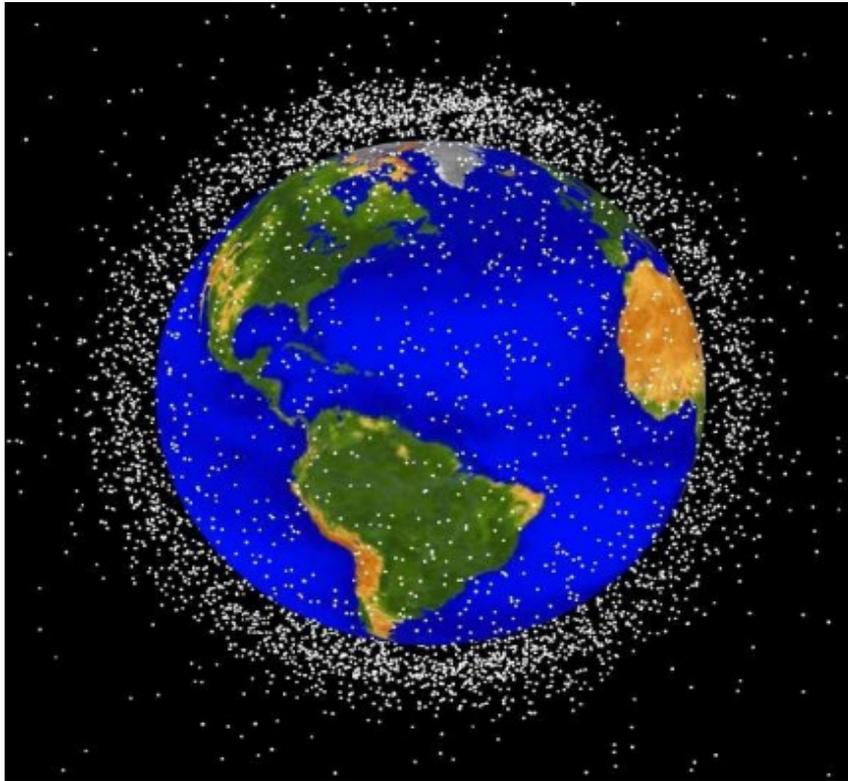


ホーンスピーカー



# MUレーダーによるスペースデブリの観測

(山川宏教授@京大RISH)



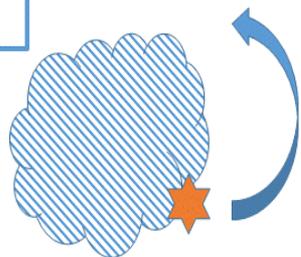
低軌道上のスペースデブリ分布(NASA) 静止軌道付近スペースデブリ分布 (NASA)

- ・スペースデブリの飛行速度は秒速8 km程度あり、わずか数cm程度の大きさでも運用中の国際宇宙ステーション、人工衛星などに大きな被害の可能性。
- ・現在は、10 cm以上のデブリ2万個程度が確認。
- ・MUレーダー観測により、スペースデブリのサイズ、スピン、形状等を推定する試み。

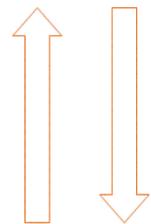
# シングル・レンジ・ドップラー・インターフェロメトリ(SRDI)法

デブリの回転に起因するドップラーシフトを利用して、時間周波数解析から大きさ・スピン・概形を推定。

スペースデブリの回転



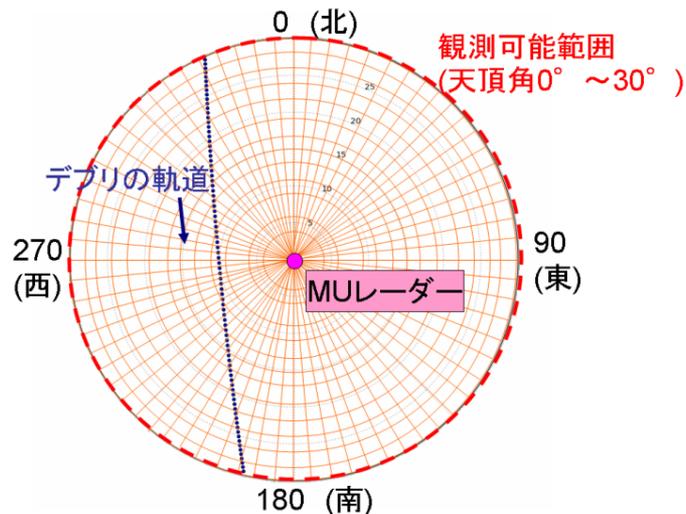
ドップラーのみ  
(相対速度情報)



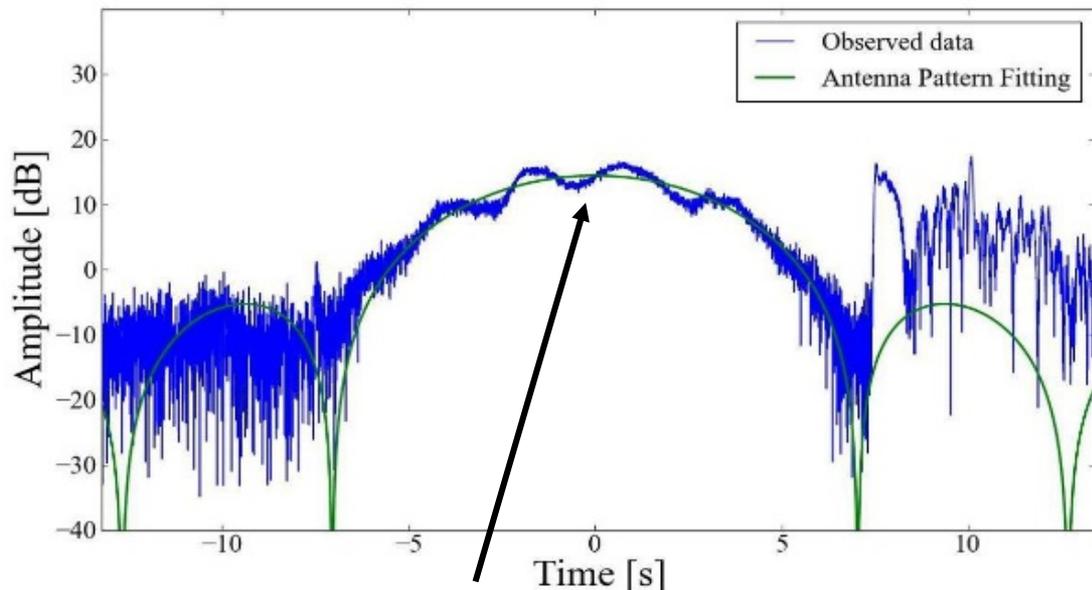
アンテナ



シングル・レンジ・ドップラー・インターフェロメトリ法(SRDI法)

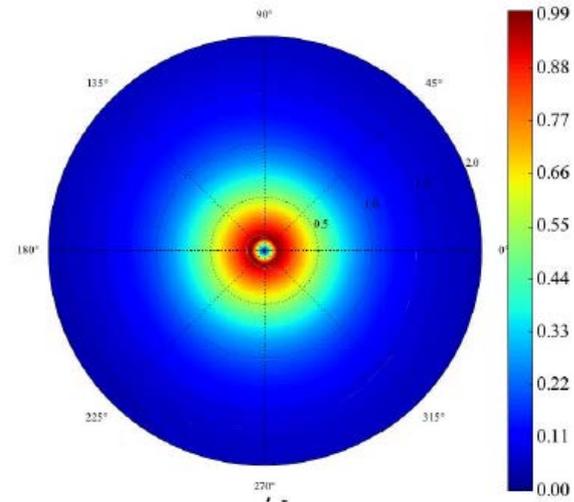
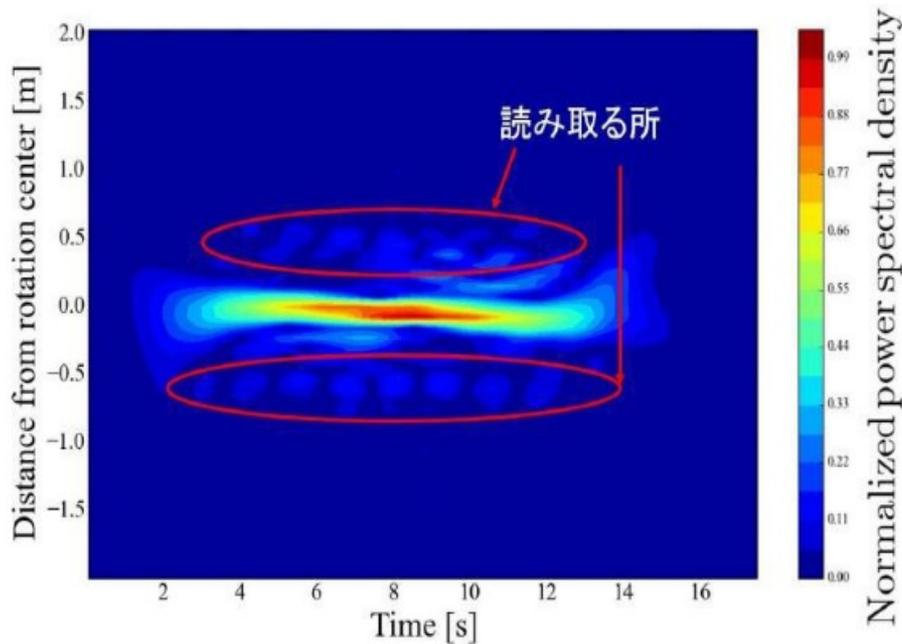


高度826 kmにおけるエコー(信号)強度の時間変化



デブリの回転に起因するエコー変動  
姿勢回転の影響を抽出し、スピン周期(約5.6秒)を導出

# MUレーダーデータの解析結果の一例



さらに、マイグレーション法という信号処理を行った結果でも、円形を示唆

周波数解析により得られた、デブリの自転軸と電波が散乱される点（外周）との相対距離の時間履歴

ドップラー信号が20-70cmの領域に現れているため、サイズが40-140cm程度の円筒形のロケットの衛星アダプタと推定

MUレーダー(波長6.45m)で観測可能なデブリは低軌道で1mクラス  
S帯やX帯(波長10~3cm)のスペースデブリ専用レーダー開発前の実証実験や手法開発として利用

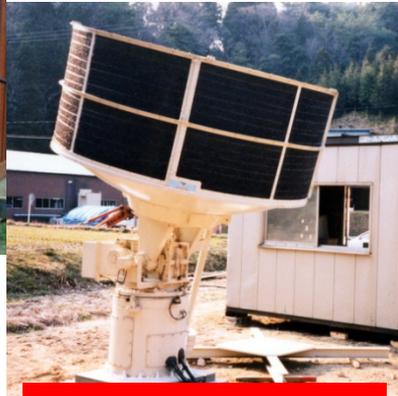
# 小型大気レーダーの開発

## (天気予報への応用)

# 小型大気レーダーの開発



Lバンド境界層レーダー1号機



1号機(改良版)



Lバンド境界層レーダー2号機



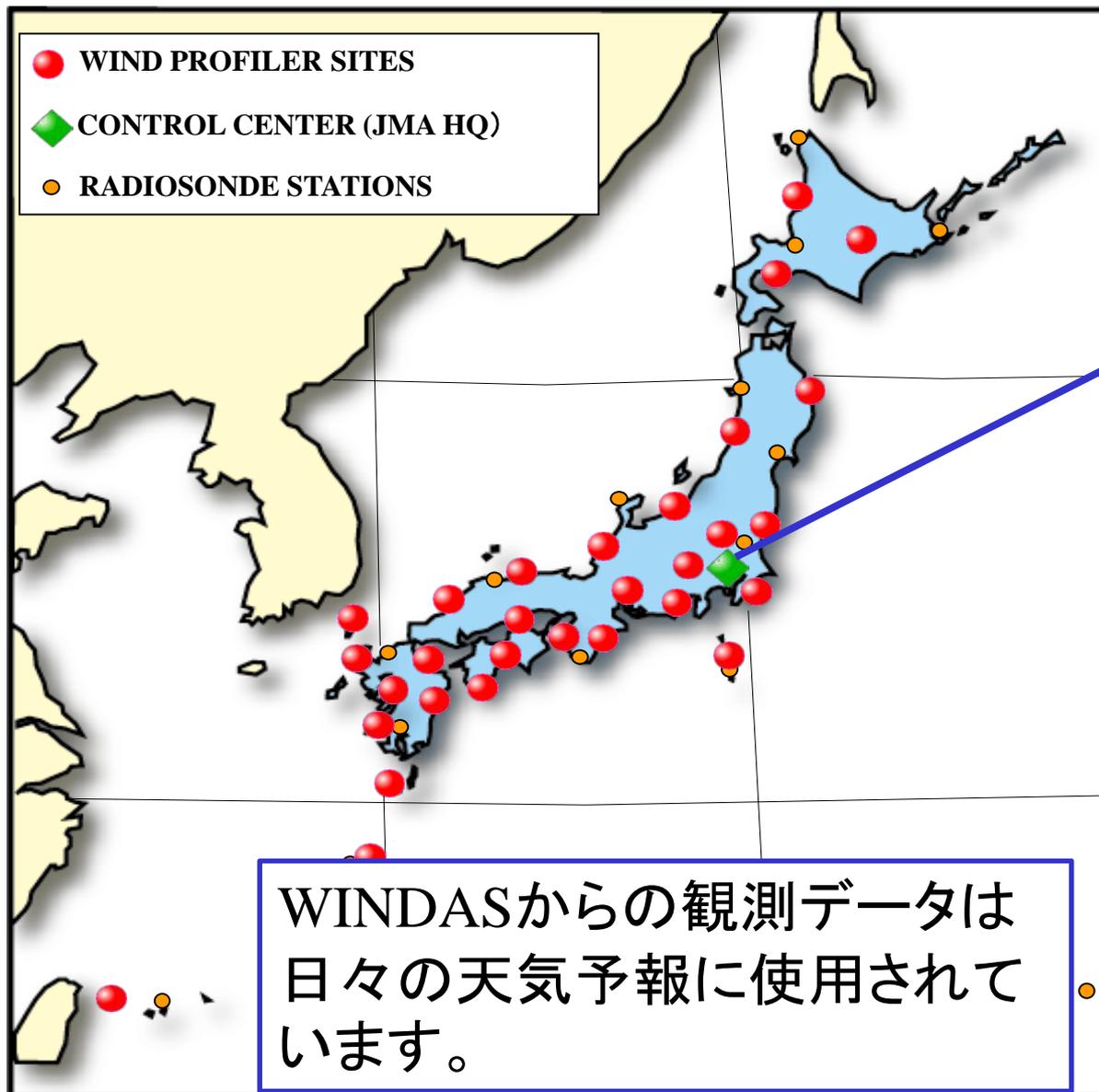
Lバンド下部対流圏レーダー



Sバンド境界層レーダー

# 気象庁のウィンドプロファイラーネットワーク

## WINDAS: Wind Profiler Network and Data Acquisition System



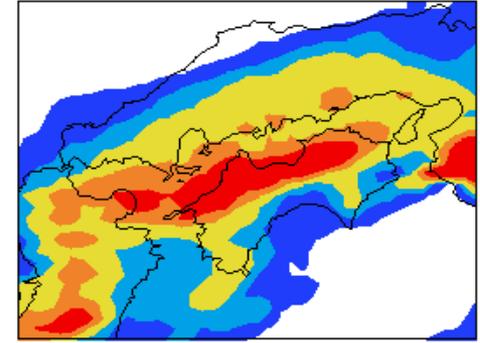
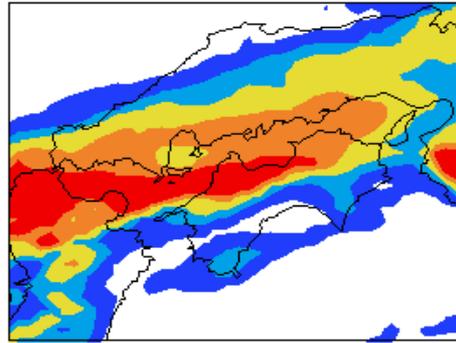
中央監視局



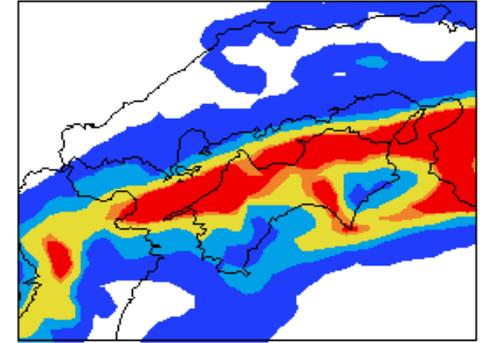
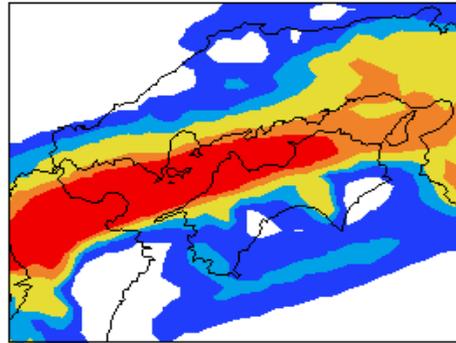
予報モデル計算

# 気象庁の天気予報 モデルによる降雨量 の予報結果

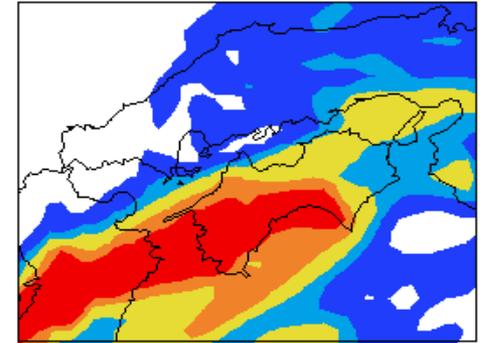
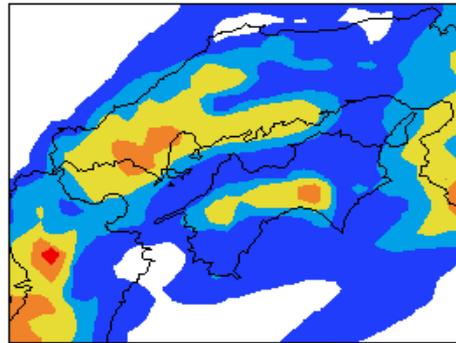
実際に降った降雨量



WINDASのデータを使  
った場合の予報



WINDASのデータを使  
わない場合の予報



3時間後の予報

6時間後の予報

[mm]



# IEEEマイルストーンとは

- IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)
  - 電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会。
  - 本部は米国。
  - 会員数431,000名以上。日本の会員数14,000名以上。
- IEEEマイルストーン
  - IEEE創立100周年を記念して、前年の1983年に創設。
  - 基本要件
    1. 人類の発展に寄与した IEEE 分野の卓越したイノベーションまたは業績であること
    2. 地域の発展、ひいては社会の発展に貢献したこと
    3. 発明・開発の時点から 25 年以上経過していること

# IEEEマイルストーン 認定例 (海外)

案件名 (達成年)	認定時期	認定組織等
コンピューターENIAC (1946)	1987年	米国
ボルタの電池の発明 (1799)	1999年	イタリア
エジソン研究所 <電球、蓄音機等の発明> (1876)	2006年	米国
大西洋横断海底ケーブルシステム (1956)	2006年	米国、カナダ、英国
マクスウェルの方程式 (1861-1870)	2009年	英国
最初のIC集積回路 (1958)	2009年	米国
インターネット発祥の地 (1969)	2009年	米国
電線による最初の音声通信 <電話> (1876)	2009年	米国
ベル研でのトランジスターの発明 (1947)	2009年	米国
マルコーニ無線電信通信実験 (1895)	2011年	イタリア
白黒方式と両立性のあるカラーテレビジョン方式 (1946-1953)	2011年	米国
最初の光ファイバーレーザーと増幅器(1961-1964)	2012年	米国

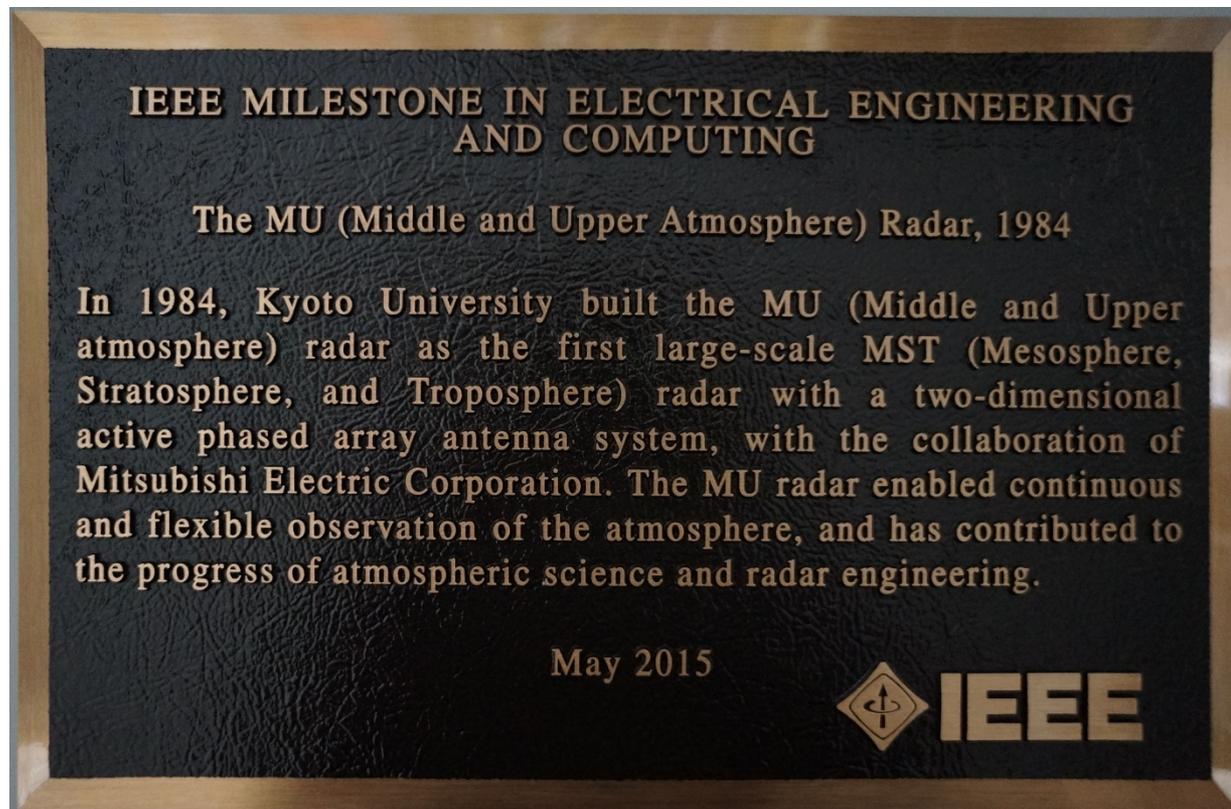
総認定数は154件(2015年4月1日現在)

出典 [http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/Milestones:List\\_of\\_IEEE\\_Milestones](http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/Milestones:List_of_IEEE_Milestones)

# IEEEマイルストーン 認定 (国内)

案件名 (達成年)	認定時期	認定組織等
1 指向性短波アンテナ <八木・宇田アンテナ> (1924)	1995年	東北大学
2 富士山頂レーダ (1964)	2000年	気象庁
3 東海道新幹線 <弾丸列車> (1964)	2000年	JR東海
4 電子式水晶腕時計 (1969)	2004年	セイコー
5 電卓の先駆的開発 (1964-73)	2005年	シャープ
6 VHSの開発、家庭用ビデオの世界標準 (1976)	2006年	日本ビクター
7 鉄道自動改札システム (1965-71)	2007年	オムロン、近鉄、阪急、大阪大学
8 最初の日本語ワープロ (1971-78)	2008年	東芝
9 依佐美送信所 <超長波の送信施設> (1929)	2009年	刈谷市依佐美送信所
10 フェライト開発・応用 (1930-45)	2009年	東京工業大学、TDK
11 電子式テレビジョンの開発 (1924-41)	2009年	静岡大学
12 最初の衛星による太平洋横断テレビジョン信号受信 (1963)	2009年	KDDI
13 黒部川第四発電所 (1956-63)	2010年	黒四ダム、黒四発電所
14 太陽電池の商業化 (1959-83)	2010年	シャープ
15 最初の直接衛星放送サービス (1984)	2011年	NHK
16 電界放出形電子顕微鏡 (1972-84)	2012年	日立製作所
17 G3ファクシミリ国際標準化(1980)	2012年	NTT、KDDI
18 東芝T1100、ラップトップパソコン開発における先駆的貢献(1985)	2013年	東芝
19 日本の一次・二次電池産業の誕生と成長(1893)	2014年	屋井乾電池、GSユアサ、パナソニック
20 音声符号化の基本技術「LSP(線スペクトル対)方式」(1975)	2014年	NTT
21 TV向け14インチTFT液晶ディスプレイ(1988)	2014年	シャープ
22 電力用酸化亜鉛形ギャップレス避雷器(MOSA) (1975)	2014年	明電舎
23 20 インチ光電子増倍管(1979)	2014年	浜松ホトニクス
24 第1太平洋横断ケーブルシステム(TPC-1) (1964)	2014年	KDDI、ハワイテレコム
25 MUレーダー	2015年	京都大学、三菱電機
26 高品質光ファイバの量産製造技術「VAD 法」	2015年	NTT、古河電工、住友電工、フジクラ
27 緊急警報放送	2016年	NHK
28 ハイビジョン	2016年	NHK

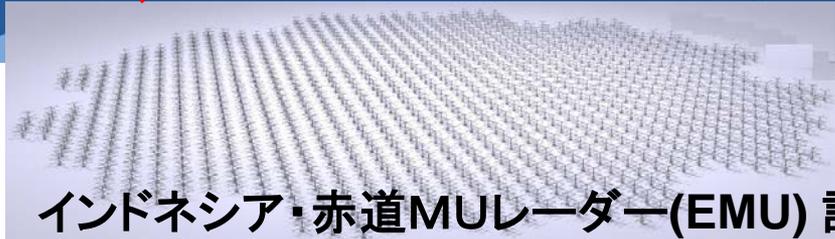
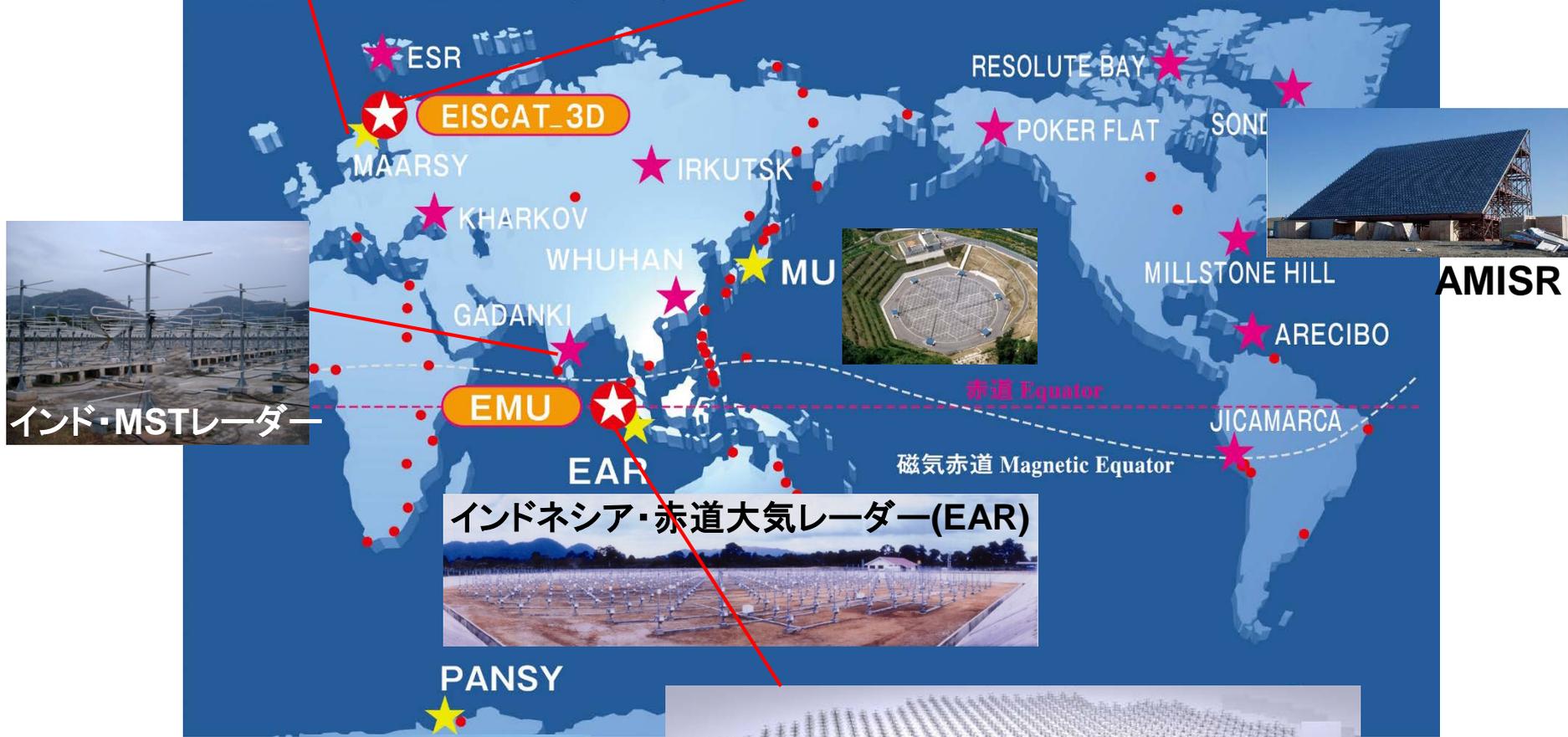
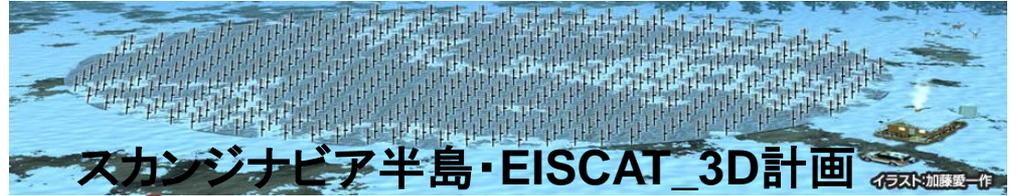
# IEEEマイルストーン銘板 (信楽MU観測所に展示)



電気電子情報通信工学分野におけるIEEEマイルストーン  
「MURレーダー(中層超高層大気観測用大型レーダー), 1984」  
1984年に建設された京都大学のMURレーダー(中層超高層大気観測用大型レー  
ダー)は、**二次元アクティブフェーズドアレイアンテナシステムを用いた世界初の大  
規模大気レーダー(MST/ISレーダー(中間圏・成層圏・対流圏観測/非干渉散乱  
レーダー))**で、三菱電機(株)との共同で開発されました。MURレーダーにより、連続  
的で柔軟な大気観測が可能となり、**大気科学、レーダー技術の発展に大きく貢献  
しました。**

2015年5月

# MUレーダーがその後の大気レーダー開発に与えた影響

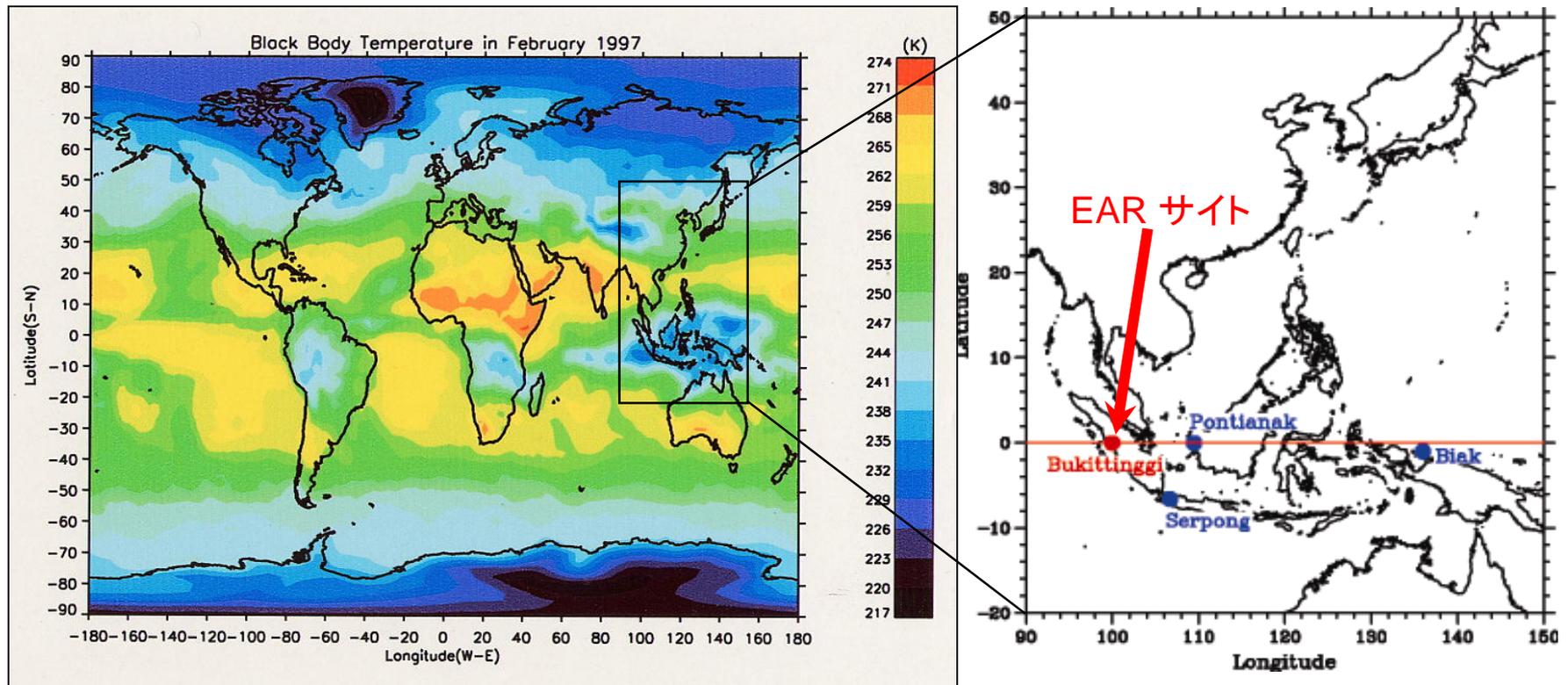


# 赤道大気レーダー

(赤道大気研究へのとりくみ)

# 赤道インドネシア域の特徴とEARの位置

- 「海洋大陸」 → 水蒸気量が豊富
- 積雲活動が地球上で最も活発
- 地球規模の大気循環のエンジン  
→ 上層大気へのエネルギー注入が特に顕著



衛星観測による雲頂温度の分布(1997年2月の例)  
—— 赤道付近の青い色の部分は雲頂高度が高い

# 赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) (2001年3月23日完成)



アンテナ全景(直径110m)

設置場所:

インドネシア共和国

スマトラ島中西部の赤道直下

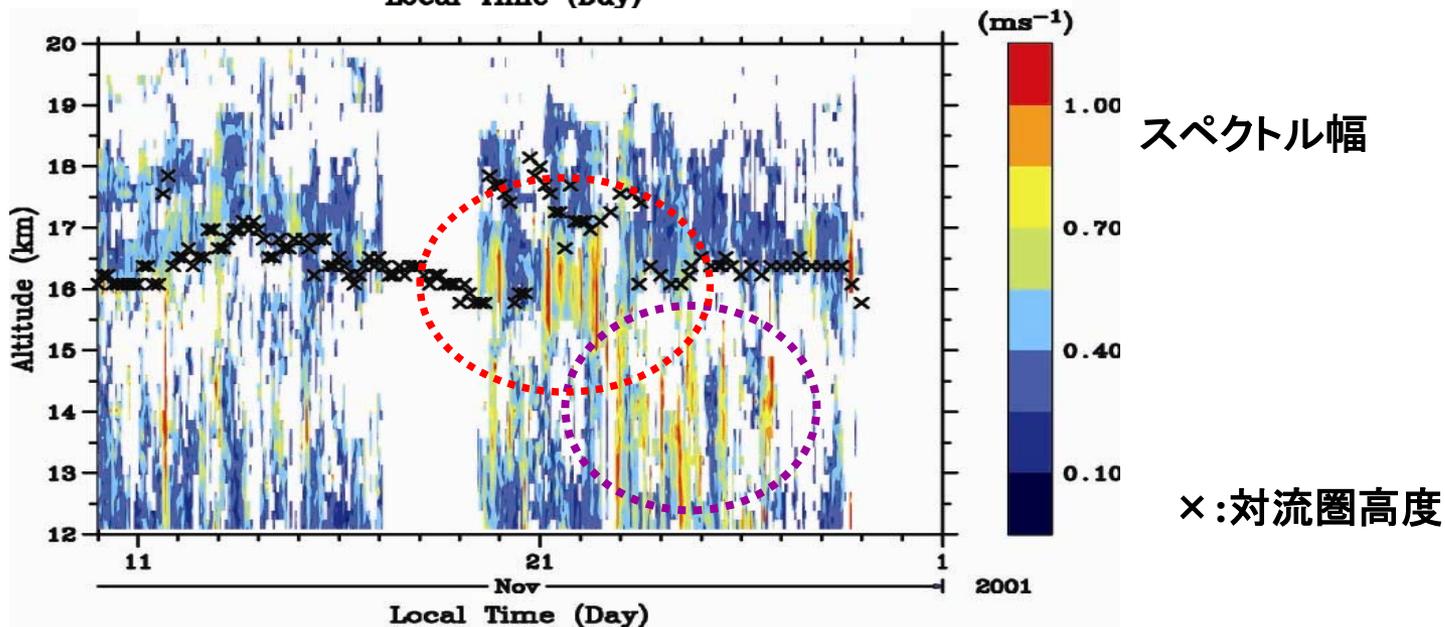
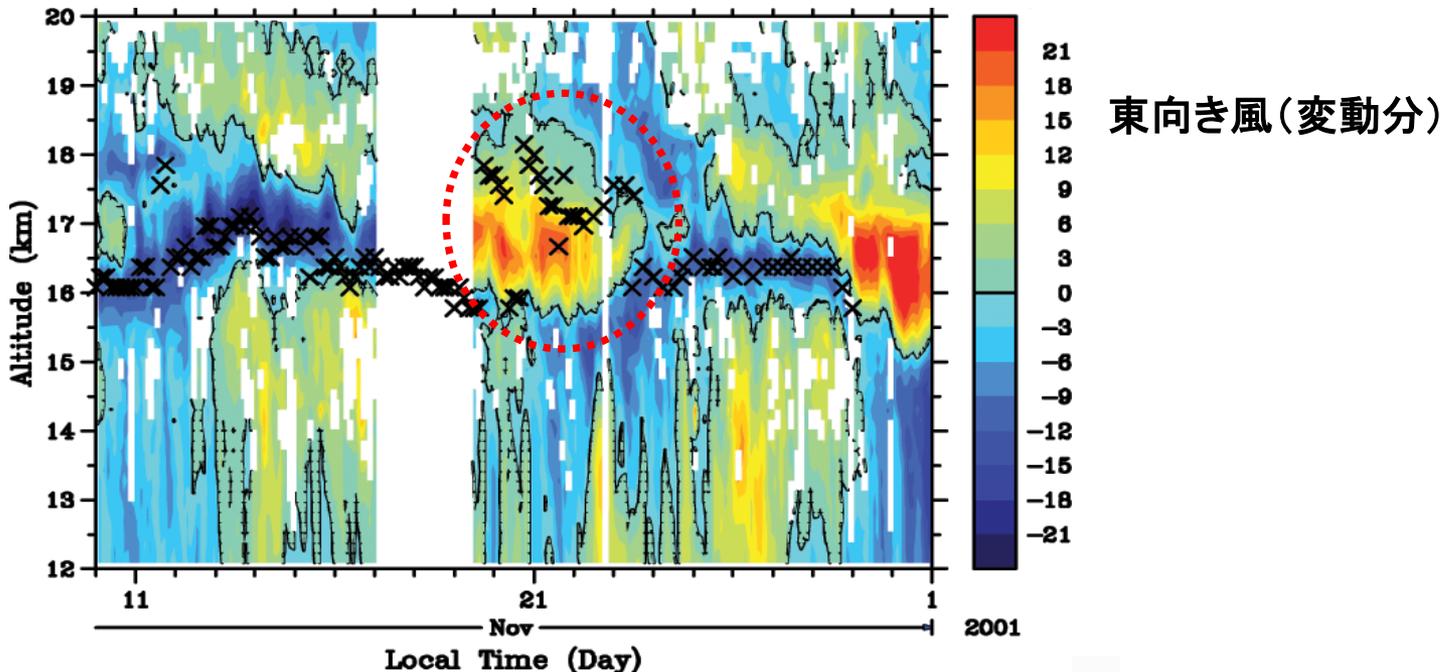
( $0.20^{\circ}$  S,  $100.32^{\circ}$  E)



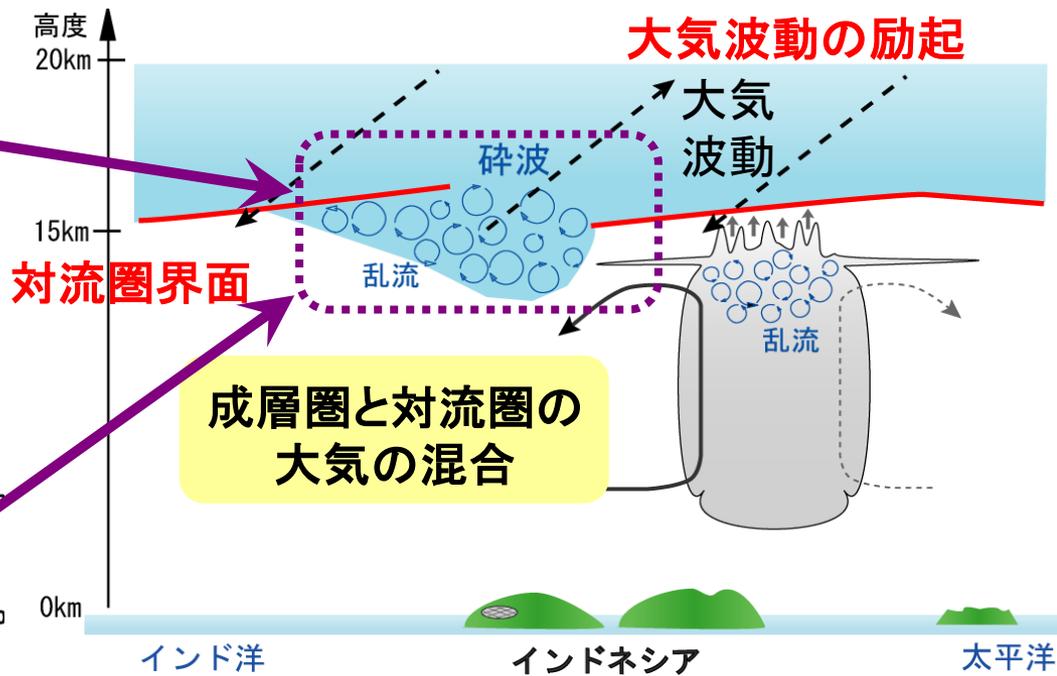
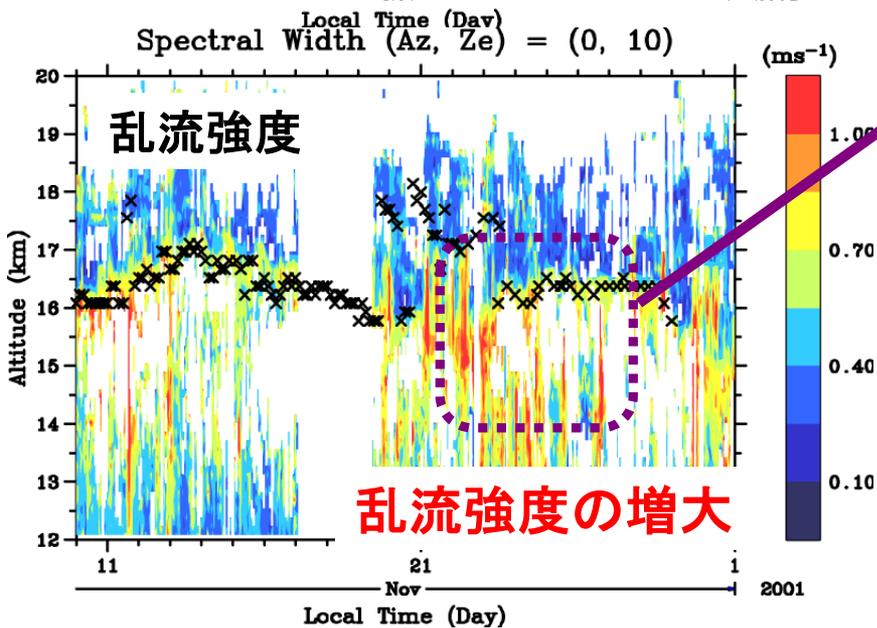
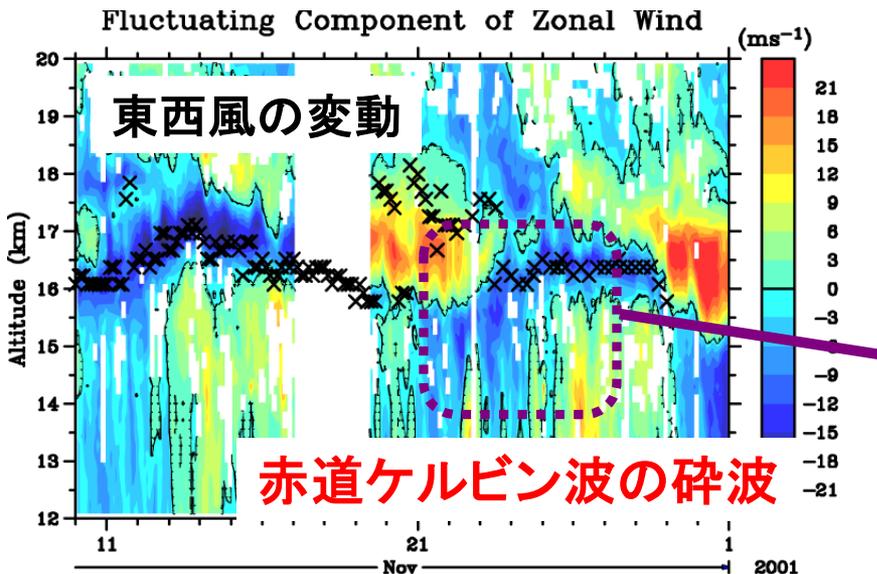
送信出力100kW, 八木アンテナ560本

# 赤道ケルビン波の碎波と乱流生成

## 赤道大気レーダーによる東西風(上)とスペクトル幅(下)の分布



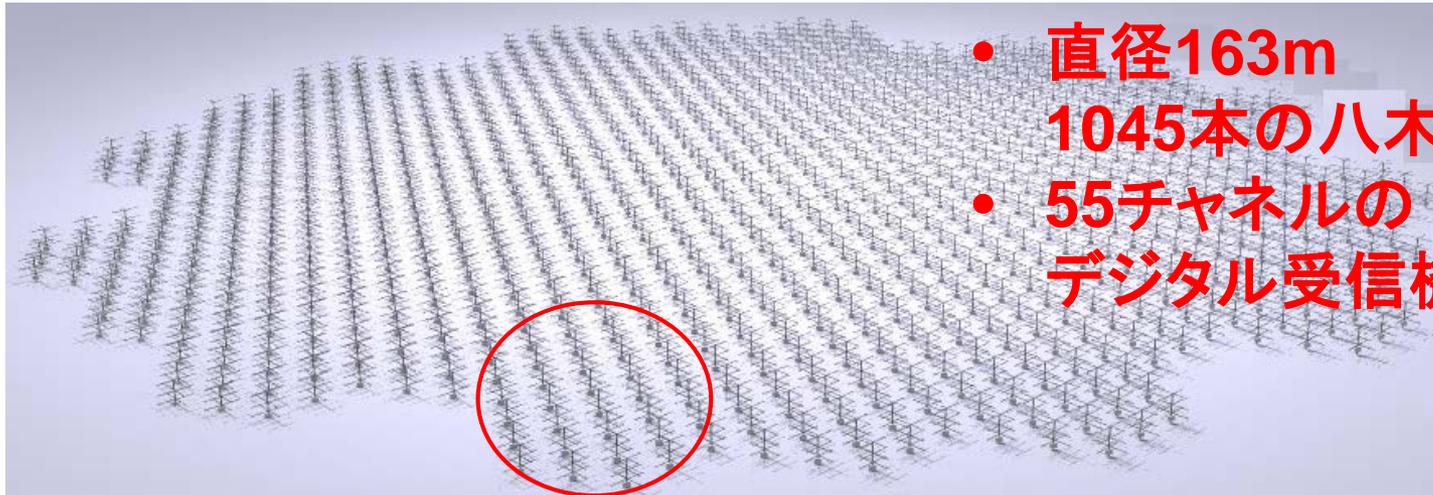
# 赤道ケルビン波が砕波，成層圏・対流圏の大気が非可逆的に混合



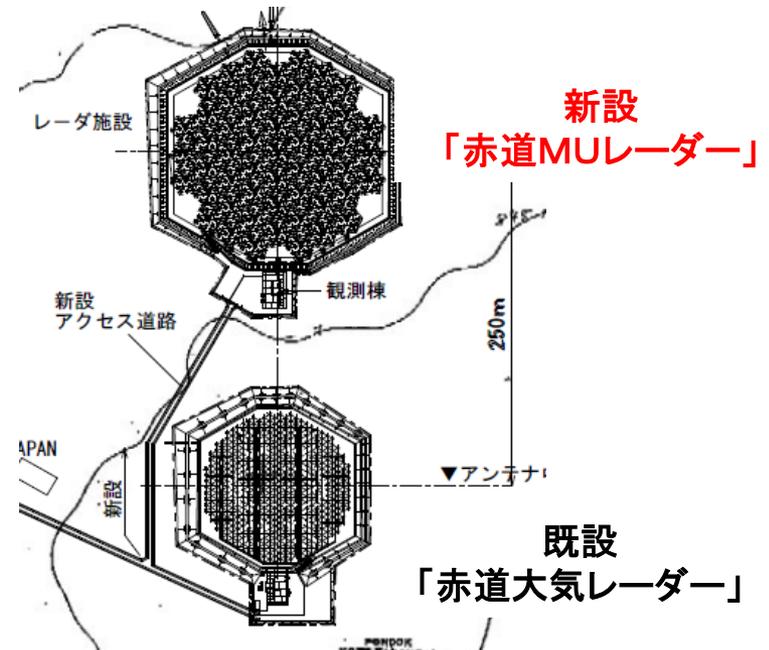
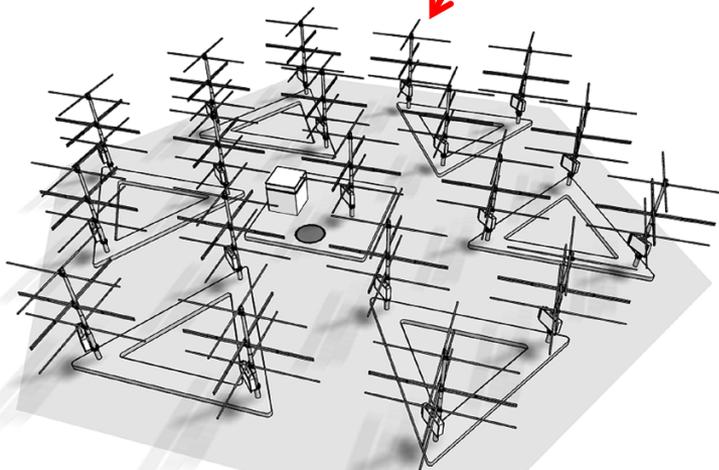
季節内振動に伴う大規模対流システム

× : 対流圏界面

# 赤道MULレーダー 計画



- 直径163m
- 1045本の八木アンテナ
- 55チャンネルのデジタル受信機



周波数: 50MHz帯  
開口面積: 約16,000m<sup>2</sup> (MULレーダーの2倍)  
ピーク出力: 500kW (MULレーダーの半分)

# まとめ

- 雨も雲もない大気に電波を当てて、大気を観測することができる。それが大気レーダー。
- 京都大学生存圏研究所は、MUレーダーをはじめとする多くの大気レーダーを開発し、大きな成功を収めてきた。
- 小型レーダーの開発はWINDASに繋がり、日々の天気予報に実用化されている。大きな社会貢献を果たしている。
- MUレーダー技術を応用し、インドネシアに赤道大気レーダーを設置して赤道域の大気を推進している。
- 現在、赤道大気レーダーの高性能化に向けて努力を続けている。(赤道MUレーダー)