

計画研究項目 A01

「赤道大気レーダー長期連続観測による赤道大気波動の解明」

1. 研究組織

研究代表者：山本 衛（京都大学生存圏研究所・教授）

研究分担者：深尾 昌一郎（東海大学総合科学技術研究所／京都大学名誉教授）

橋口 浩之（京都大学生存圏研究所・准教授）

山本 真之（京都大学生存圏研究所・助教）

2. 研究目的

赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)は、アクティブアレイアンテナの採用により、対流圏内の風速変動や電離圏内の電子密度擾乱を優れた精度で観測可能な特長を持つ。本計画研究項目(A01 班)の研究目的は、数メートル・数秒以下の微細な空間・時間スケールを持つ大気乱流から、全球規模・数年以上の空間・時間スケールを持つ赤道大気振動までの諸現象を明らかにすることである。そのため、EAR の長期連続観測を実施し、並行して全ての計画研究項目との研究協力を通じて EAR のみでは得られない大気パラメータの振舞いを調べ、赤道大気の総合的な理解を深めてきた。A01 班が計画当初に掲げた課題は次のとおりであった。

課題 1. EAR による赤道大気の長期連続観測

課題 2. EAR の多機能性を活かした赤道大気の短周期波動と乱流の研究

課題 3. 他の計画研究項目との連携による EAR 観測の実施

課題 4. 太平洋レーダーネットワークとの協同による赤道大気変動の解明

3. 主な成果

(1) 赤道大気レーダーの長期連続観測の実現

EAR の運営は現地協力機関(インドネシア航空宇宙庁)との密接な協力のもとで行われてきた。EAR 完成直後の 2001 年 6 月から現在まで、対流圏・下部成層圏観測をほぼ連続に実施し、赤道大気波動の長期変動の研究を推進した。また電離圏の赤道スプレッド F 現象などを対象とした多ビーム観測を、現象の発生頻度が大きい春分・秋分の時期を中心として実施し、それらの空間構造を明らかにしてきた。これらのため観測プログラムを整備・開発し、補修部品を購入、必要に応じて整備を行うなど不断の努力を傾けてきた。また EAR と京大を結ぶ衛星回線を開設し、観測状況のリアルタイム監視とデータの転送取得を実現し

た。取得された膨大な観測データは、本領域の各班のみならず国内・国外の関連研究者によって広く利用されている。

(2) 対流活動と季節内振動の関連の解明

熱帯域での対流活動に影響を与える主要な要因である季節内振動(Intra-Seasonal Variation; ISV)は、インド洋の東端に位置するスマトラ島の地形により大きく変調される。気象衛星・全球再解析データなどの総観スケール(1000 km 以上)で見られる気象場と、本研究領域によりスマトラ島に整備された EAR や気象レーダーなどの観測データを組み合わせて解析し、熱帯インドネシア域での ISV に伴う対流活動の変調を明らかにした[Seto *et al.*, 2006, 2004]。また、降水雲内の鉛直流や雨滴の特性を同時に観測できる EAR の特長を生かし、熱帯大気運動の駆動源である対流システムの理解に不可欠である降水領域内の鉛直流変動と雨滴粒径分布の詳細な構造を明らかにした[Nishi *et al.*, 2007; Renggono *et al.*, 2007]。

(3) 赤道大気波動と対流圏・成層圏の大気交換の実証

EAR の高時間分解能風速観測とラジオゾンデの温度観測により、赤道ケルビン波の砕波に伴う乱流強度を示した[Fujiwara *et al.*, 2003]。さらに、また、上部対流圏の卓越した東風と赤道ケルビン波の東西風変調から、対流圏界面付近に継続的な強い風速シアが存在し、シア不安定が発生することを示した[M. K. Yamamoto *et al.*, 2003]。これらの結果は、赤道ケルビン波が対流圏と成層圏の大気交換に大きく関与していることを観測的にはじめて示すものとして注目される。

(4) 上部対流圏の鉛直流と巻雲の観測

EAR は晴天時・降雨時を問わず鉛直流を高い鉛直・時間分解能で観測可能である。2004 年 4~5 月の観測キャンペーンで得られた鉛直流観測データより、総観スケール(1000 km 以上)の熱帯域対流活動に伴う対流圏中層から上層での鉛直流変動の詳細を観測的にはじめて示した[M. K. Yamamoto *et al.*, 2007]。この結果は、対流圏-成層圏間の物質輸送における鉛直流観測の重要性を示している。一方、熱帯域対流圏の広い領域を覆う巻雲は地球の放射収支に影響するため、巻雲内の力学・微物理過程の理解は地球温暖化の予測に重要である。EAR と巻雲の氷粒が観測可能な機器(ミリ波レーダー)の協同観測により、熱帯域巻雲内の鉛直流構造をはじめて示した[M. K. Yamamoto *et al.*, 2007a, b]。

(5) プラズマバブルの生成機構と大規模空間構造の解明

EAR の多ビーム観測機能を活かした赤道スプレッド F (Equatorial Spread-F;

ESF)及び E 領域イレギュラリティ(Field-Aligned Irregularity; FAI)の観測から、ESF の時変動と空間構造を分離観測することに成功し[Fukao *et al.*, 2004]、ESF の発生時刻が、ほとんどの場合 EAR 上空の F 領域高度の日没時刻より遅く、それと磁力線に沿って結合した磁気赤道における日没時刻までの時間帯に集中することを明らかにした[Yokoyama *et al.*, 2004]。また ESF が発生に伴う E 領域 FAI の消滅を見出し、低緯度電離圏における電界を通じた E 領域—F 領域相互作用を提唱した[Patra *et al.*, 2005]他、ESF に空間スケール 500~1000 km の東西波状構造が存在することを見出す等[Fukao *et al.*, 2006]、多くの研究成果を挙げた。

4. 達成度と波及効果

領域発足当初の 4 つの課題の達成度と本研究からの波及効果は以下のとおりと考える。

課題 1: 予定通りの長期連続観測を達成した上に、EAR 及び本領域の観測装置群の遠隔制御・データ取得を可能にした。達成度は 100%である。赤道大気における更なる諸過程解明・ならびに HARIMAU プロジェクト(後述)の進展のため、今後も EAR の継続的運用が必要である。

課題 2: 上部対流圏における大気波動に伴う乱流現象・熱帯対流圏の対流システムに関連した鉛直流変動・電離圏のスプレッド F 現象について多くの成果をあげたことから、十分な成果を得た(達成度 95%)。現在も複数の科研費を取得し、研究成果を深化・発展している。

課題 3: 観測キャンペーンの成功とともに、総括班会議やシンポジウム/ワークショップの開催による情報交換を通じて、効率よく EAR の観測データを他班へ提供し、また他班からの観測データを得るなど、協力状況は十分であった。達成度は 100%である。

課題 4: 本研究の開始が太平洋での大気レーダー観測の終息時期と重なったため、直接のデータ交換は活発ではなかった。しかし、web サービスを通じた EAR 観測データの即時公開を実現した他、EAR とインドの MST レーダーを中核とした熱帯域における大気レーダー観測網(International Network of Tropical Atmosphere Radars; INTAR)の構築計画の発足などの成果を得ている(達成度 70%)。

波及効果: (独)情報通信研究機構による EAR を含む南北子午面にわたる電離圏観測ネットワーク(Southeast Asia Low Latitude Ionosphere Observation Network; SEALION)の構築により、本研究領域と相補的な電離圏研究が進展した。また、京都大学生存圏研究所は平成 17 年度後期から EAR の全国・国際共同利用を開始した。当初は日本・インドネシアのみに制限したが、平成 19 年度からは全世

界からの参加を可としている。これまで利用者・利用件数とも順調に増加中であり、EAR は赤道大気の良い観測装置としての評価を確立した。更に平成 17 年度より、地球観測システム構築プラン「海大陸レーダーネットワーク構築 (HARIMAU)」が発足し、インドネシア国内に大気レーダーネットワーク網の構築がいま進みつつあることも、特筆される波及効果である。

5. 研究成果の公表状況

学術誌論文： 60 編 (A01 班が主体となって発表したもの)
20 編 (他班の発表に協力したもの)

国際会議発表： 58 件
国内会議発表： 158 件

博士号取得者： 4 名 (横山竜宏、Findy Renggono、山本真之、西憲敬)

受賞： 大川情報通信基金大川出版賞(平成 18 年 11 月)
深尾昌一郎・濱津享助

文部科学大臣表彰科学技術賞(平成 18 年 4 月)
深尾昌一郎・橋口浩之・渡邊伸一郎

情報通信月間推進協議会会長表彰(総務省創設) 志田林三郎賞
(平成 16 年 6 月) 深尾昌一郎

米国学術情報会社トムソン ISI (Institute of Science Information)
『Highly Cited Researcher (地球科学部門)』(平成 15 年 2 月)
深尾昌一郎

島津科学技術振興財団島津賞(平成 14 年 2 月受賞) 深尾昌一郎

地球電磁気・地球惑星圏学会 田中館賞(平成 19 年 5 月) 山本衛

同上 大林奨励賞(平成 19 年 9 月) 横山竜宏

同上 学生発表賞(平成 18 年 11 月) 永田肇

新聞記事：「エルニーニョ解明へ 赤道レーダー完成」
2001 年 3 月 朝日新聞・毎日新聞他 6 社
「インドネシアに大型のレーダー」2001 年 6 月
日本経済新聞他 3 社
「島津賞に深尾京大教授」2001 年 12 月 京都新聞他 4 社
「雲を解明 新型レーダー」2004 年 2 月 読売新聞
「科学技術賞に京大から 4 件」2006 年 5 月 京都新聞

赤道大気レーダーのホームページ：<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>
(赤道大気レーダー観測データの公開を行っている)

計画研究項目A01 赤道大気レーダー長期連続観測による 赤道大気波動の解明

山本 衛 深尾昌一郎 橋口浩之 山本真之
(京都大学生存圏研究所)

目的

特定領域研究「赤道大気上下結合」の中心をなすEARの長期連続観測を実施し、数メートル×数秒と微細な空間・時間スケールを持つ大気乱流から、地球規模の空間スケールと数年間の時間スケールを持つ赤道大気振動までの諸現象の因果関係と成因を明らかにすることを目的とする。

- 課題1. EARによる赤道大気の長期連続観測
- 課題2. EARの多機能性を活かした赤道大気の短周期波動と乱流の研究
- 課題3. 他の計画研究項目との連携によるEAR観測の実施
- 課題4. 太平洋レーダーネットワークとの協同による赤道大気変動の解明

A01班の研究費の状況

平成13年度	39,900千円	
平成14年度	27,900千円	... 総括班に対して2,500千円の増額
平成15年度	24,400千円	... 中間ヒアリング(A評価)
平成16年度	26,900千円	(21,200千円 + 増額 5,700千円)
平成17年度	21,300千円	
平成18年度	21,100千円	

外国人ポスドク3名を短期間雇用
領域内の研究打合せ・ワークショップ旅費
必要な消耗品の追加購入

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



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°S, 100.32°E)



送信出力100kW, 八木アンテナ560本

赤道大気レーダーサイトと京大間の衛星通信

- ・観測のモニター
- ・データ転送
- ・IP電話 等

が可能になり、長期
観測の基盤となった。

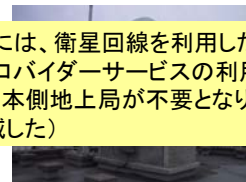
観測プログラム等の
開発・整備との相乗
効果による成果

スーパーバード

128kbps data link with
telephone communication



EAR in Indonesia

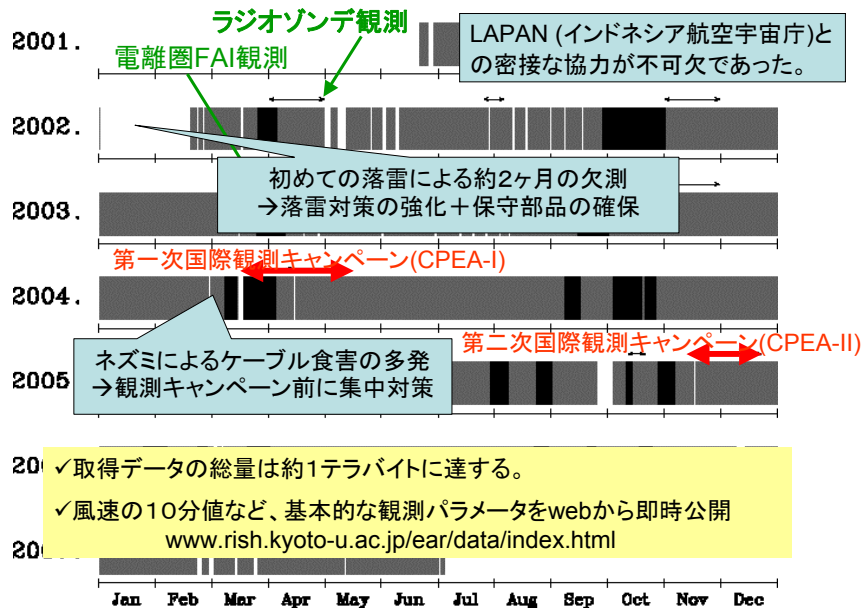


RASC in Japan

Installed in March 2002

平成18年度中には、衛星回線を利用した
ネットワーク・プロバイダーサービスの利用
に移行した。(日本側地上局が不要となり、
回線費用が低減した)

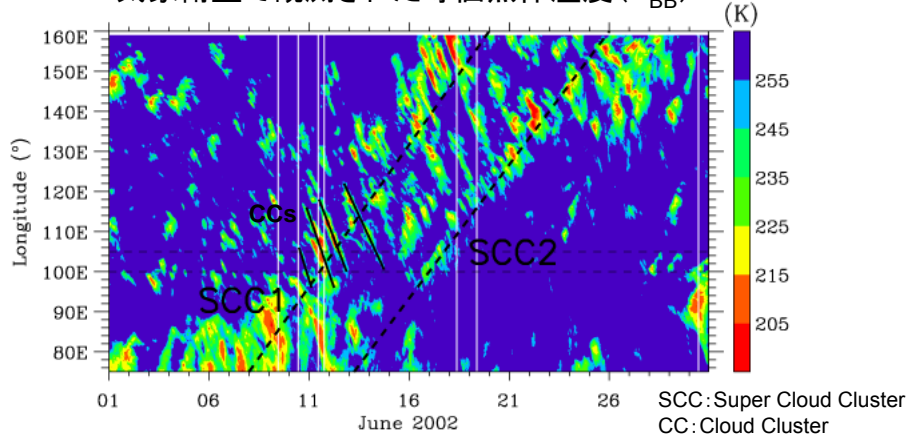
EARによる赤道大気の長期連続観測



対流活動と季節内振動の関連の解明

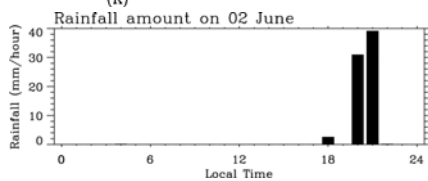
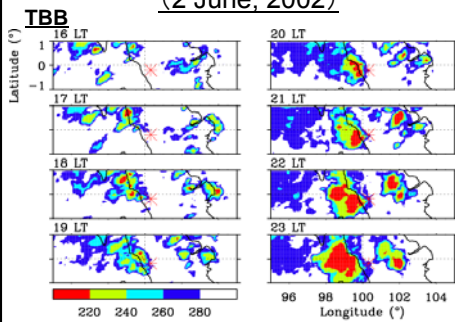
2002年6月に観測された季節内振動

気象衛星で観測された等価黒体温度 (T_{BB}) Seto et al. [2004]



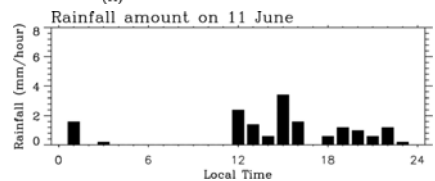
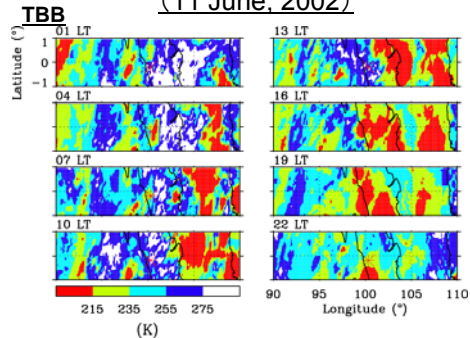
- インド洋で発達し、その後東進する総観規模(1000km)の超雲団(SCC1及びSCC2)が観測
- SCCのスマトラ島通過時(季節内振動の対流活発期)に、いくつかの西進する数100kmスケールの雲団(CC)が観測

季節内振動の不活発期 (2 June, 2002)



- 局地循環に伴う日周期の対流活動
- 短時間に強い降雨が観測

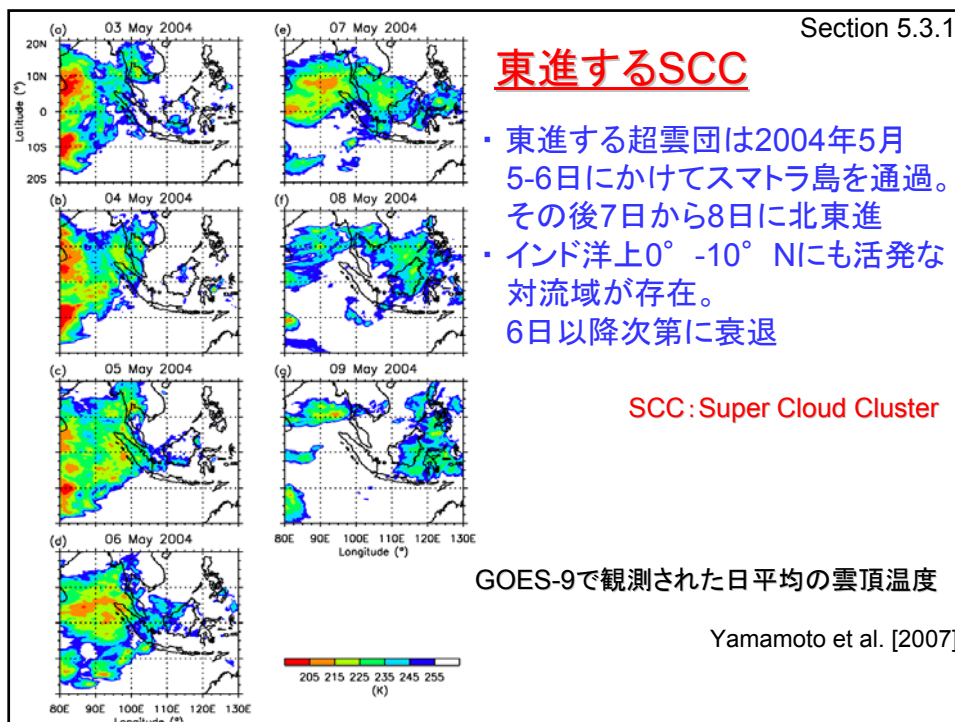
季節内振動の活発期 (11 June, 2002)



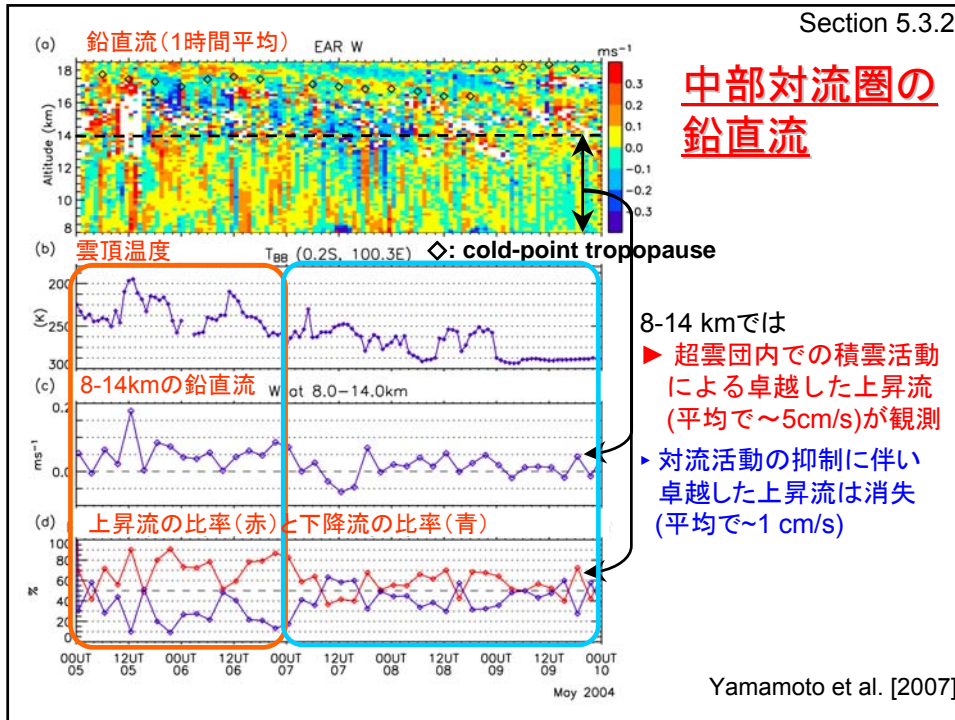
- 数100kmの組織化した対流システムが西進
- 弱い降雨が長時間継続

Seto et al. [2004]

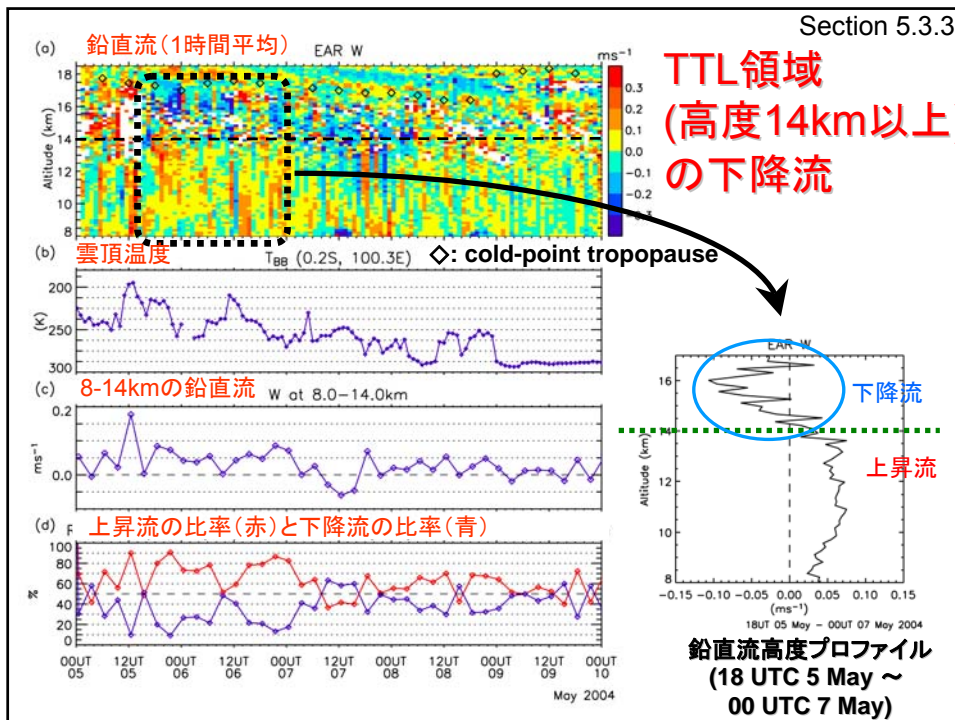
上部対流圏の鉛直流と巻雲の観測



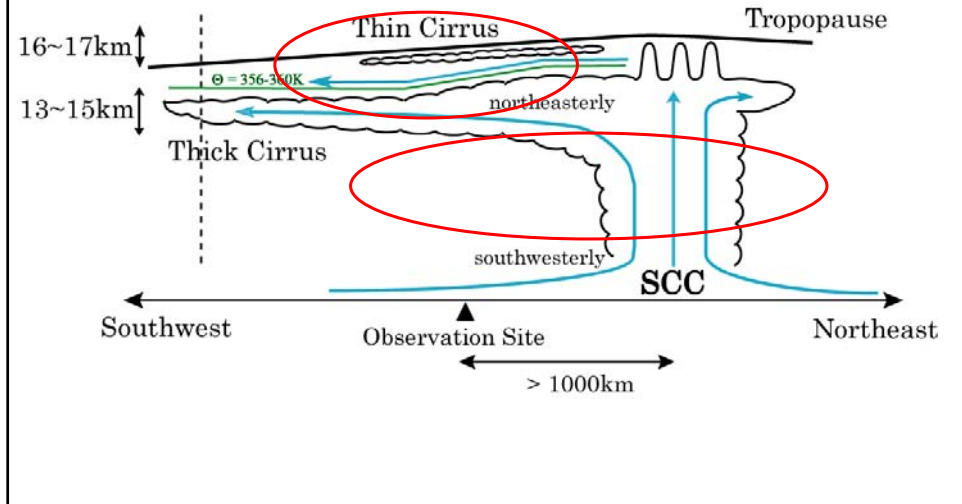
Section 5.3.2



Section 5.3.3



Schematic diagram of cloud system during 5/6-5/8 2004



情報通信研究機構(NICT) 95GHz雲レーダー (SPIDER)

- ・ ピーク出力1.6kW(最大デューティ比1%), アンテナ径約40cm、中心周波数95.04GHz(波長λ; 約3.15mm)のドップラーレーダー
- ・ 使用波長が短いため巻雲内の氷粒のレイリー散乱およびミー散乱を観測可能

レーダー反射因子

$$Z_e = \int N(D) \sigma(D) dD$$

粒径分布 散乱断面積

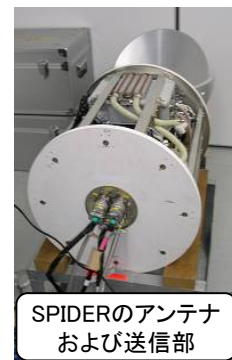
- ・ パルス間の位相差(θ)からドップラー速度を測定することにより氷粒の落下速度が測定可能

ドップラー速度

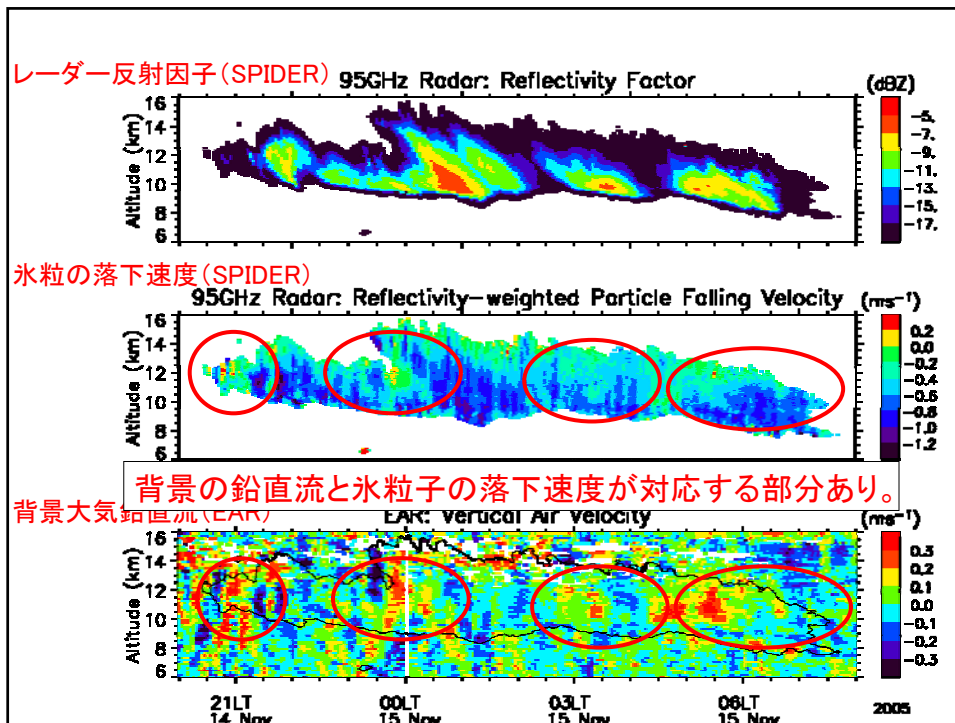
$$v_d = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\theta}{2\pi} f_{ipp}$$

パルス繰り返し周波数

SPIDER; Special Polarimetric Ice Detection and Explication Radar



SPIDERのアンテナおよび送信部

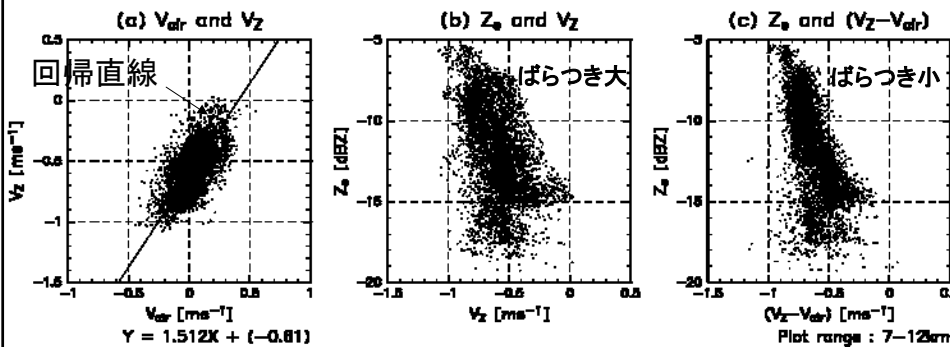


散乱断面積で重み付けした氷粒の落下速度 V_z とレーダー反射因子 Z_e の関係

鉛直流と地面に対する氷粒の落下速度

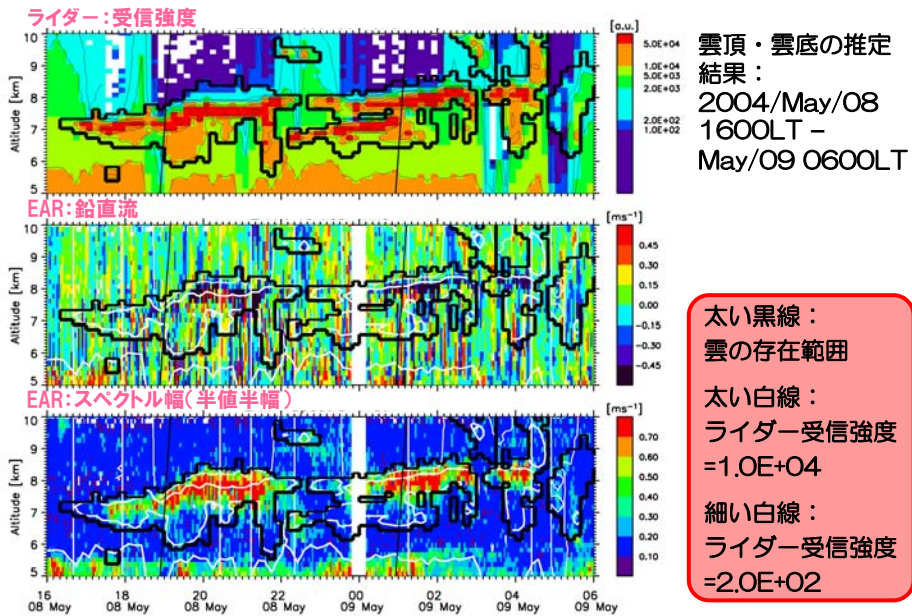
Z_e と地面に対する氷粒の落下速度

Z_e と背景大気に対する氷粒の落下速度



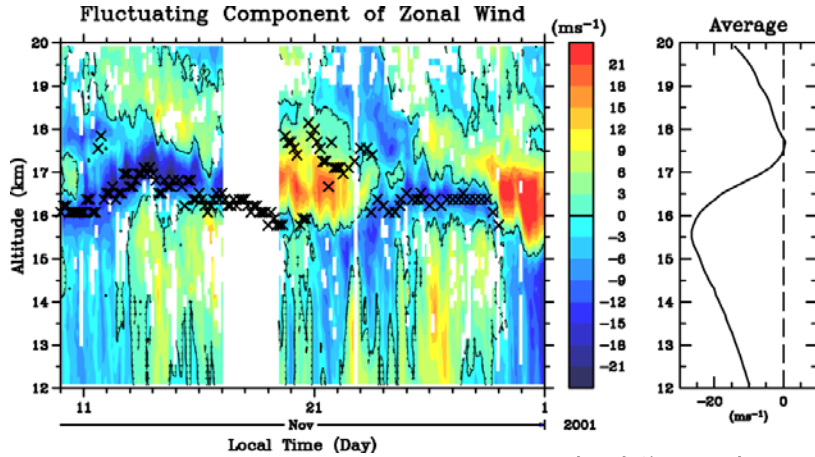
- 鉛直流変動と氷粒子の落下速度が良く対応 (左図)
- レーダー反射因子に対する氷粒子の落下速度のばらつきは背景大気の影響を除去することにより減少 (中図・右図)

EARとライダー(A05班)との共同による巻雲の同時観測



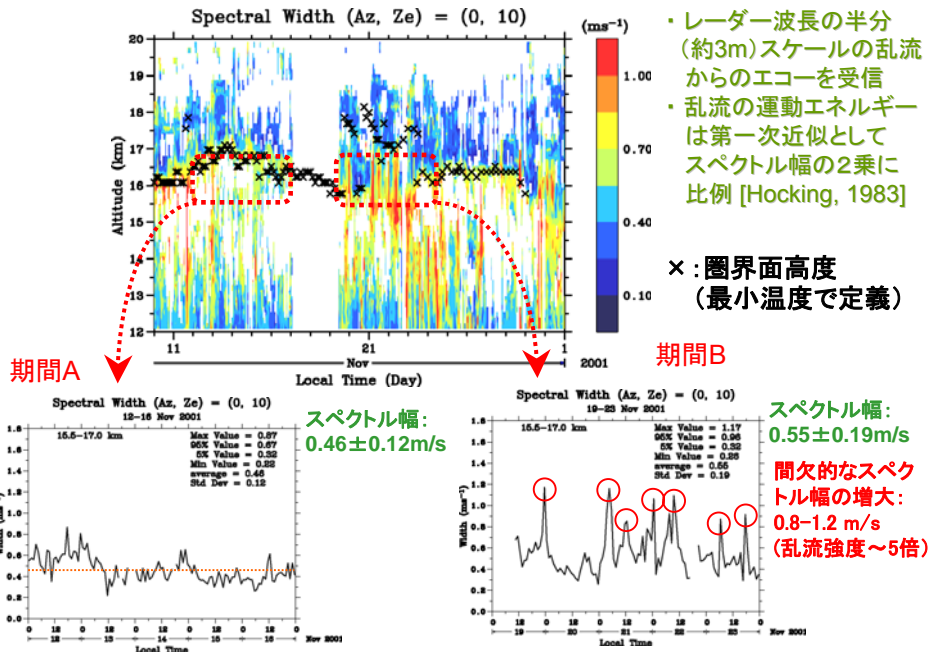
赤道大気波動と対流圏・成層圏の大気交換

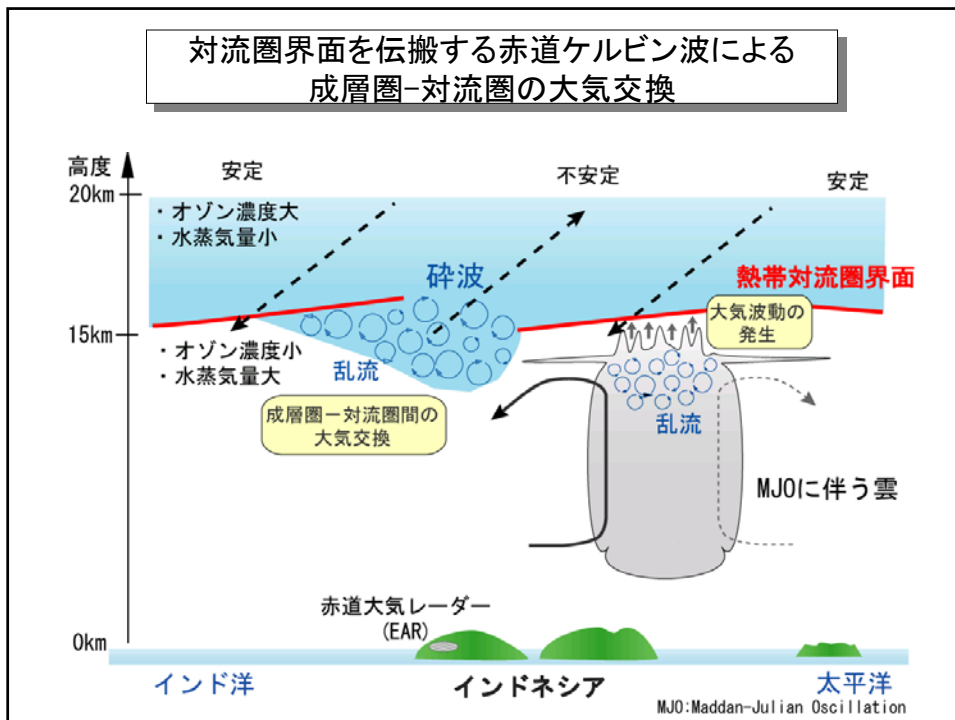
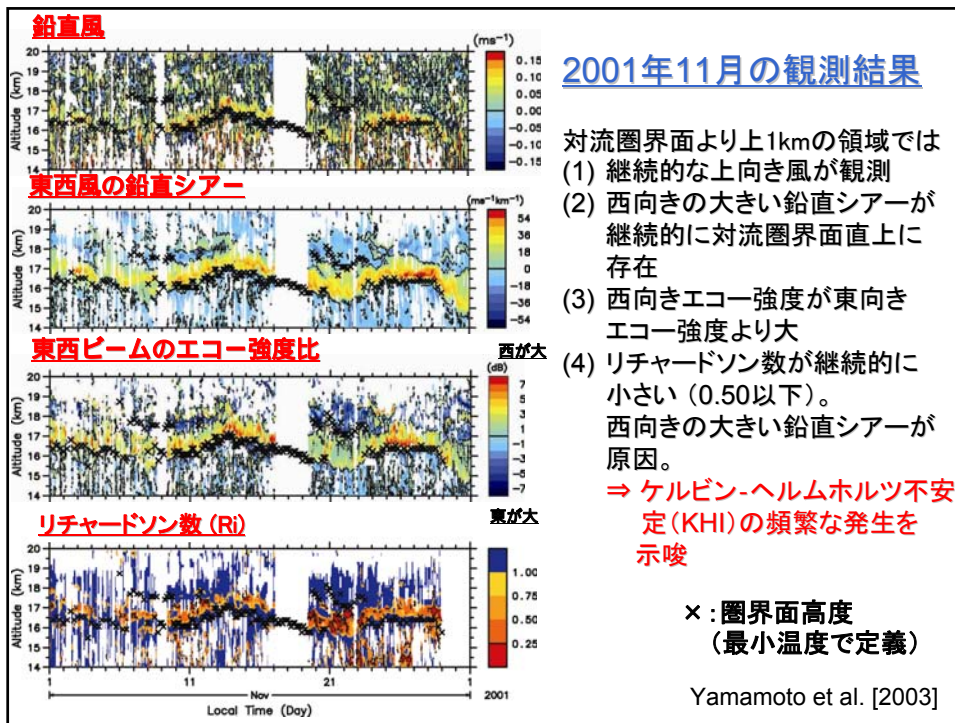
EARで観測された赤道ケルビン波(東西風の変動成分)



X:最低温度で定義した対流圏界面

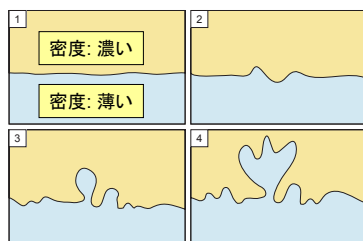
EARの北向きビームで観測されたスペクトル幅



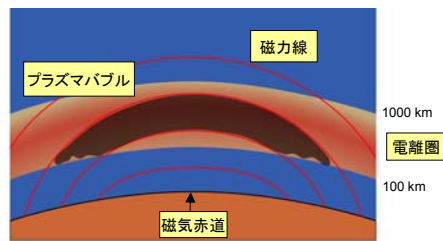


プラズマバブルの生成機構と大規模空間構造の解明

プラズマバブル



プラズマバブルの発生過程



プラズマバブルの南北断面

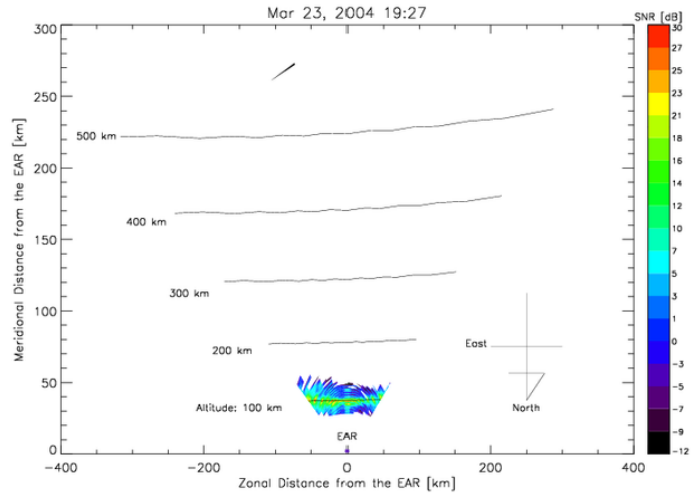
- 電離圏下側で発生した電子密度の局所的な減少領域が、短時間で電離圏上側まで広がる現象である。
- Rayleigh-Taylor不安定により成長する。
- 主に日没後に**磁気赤道付近**で発生する。
- 磁力線に沿ってチューブ状に南北に広がる。
- 電子密度の**不規則構造**(イレギュラリティ)を伴う。

Rayleigh-Taylor不安定の成長率

$$\gamma = \left(\frac{E}{B} - \frac{g}{v_{in}} \right) \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y}$$

電場 高度 密度勾配

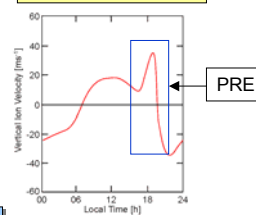
プラズマバブル・エコーの多ビーム観測



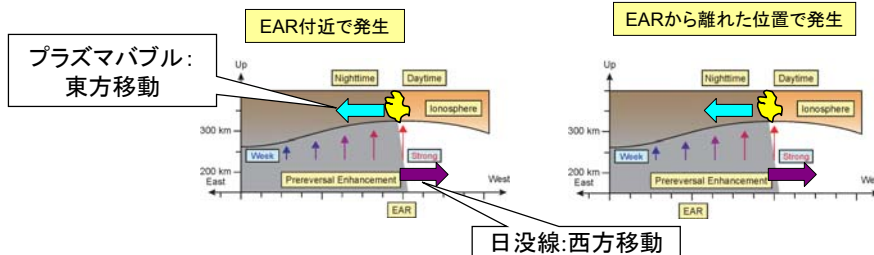
Prereversal Enhancement (PRE)

- 電離圏の高度が日没前後の数時間に上昇する現象である。
- 高度上昇によってプラズマバブルの成長率が上昇し、発生を左右すると思われる。

上向きドリフトの変動

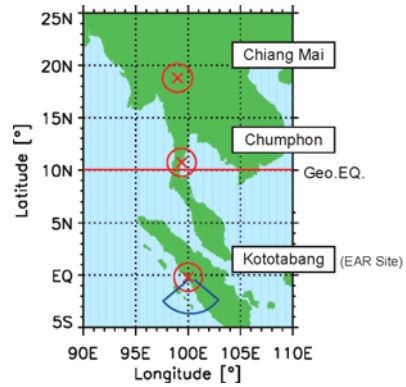


発生を左右する要因としてPREの経度変動が考えられる



EARとNICTのイオゾンデ網

- EAR
 - 地磁気緯度: 南緯約10度
 - 多ビーム観測機能から空間構造と時間発展の分離が可能である。
- SEALION (Southeast Asia Equatorial Ionospheric Network)
 - 情報通信研究機構(NICT)によってタイ~インドネシアに設置されたFM-CWレーダー・イオゾンデ観測網
 - 観測地点
 - Kototabang (100.32 °E, 0.2 °S)
 - Chumphon (99.38 °E, 10.72 °N)
 - Chiang Mai (98.98 °E, 18.79 °N)



EARとの位置関係

FM-CWレーダーの高度約300kmのビームの範囲を赤丸、EARのビームの範囲を青線で示す。

磁気赤道域と磁気対称点での同時観測が可能

F層の高度変動とプラズマバブルの発生

F層の最大上昇高度

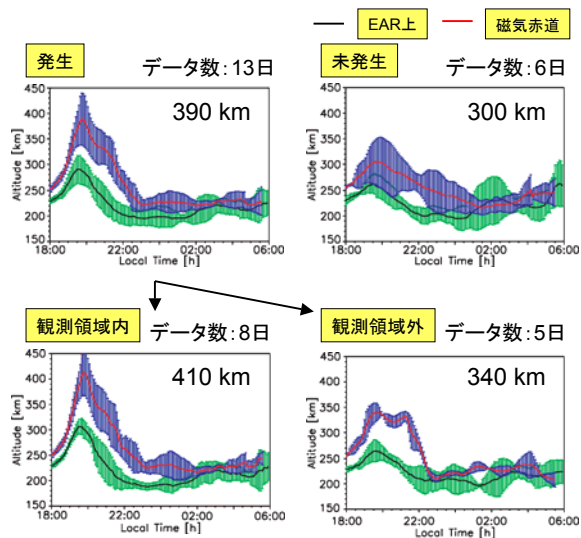
発生: 390 km
未発生: 300 km

プラズマバブル発生時は上昇高度が高い。

観測領域内・外で分類

観測領域内: 410 km
観測領域外: 340 km

上昇高度に経度変動が存在する。



プラズマバブルの発生間隔

2004年3月24日の観測例

推定結果

間隔: 約500km (平均)

過去3年間(16日)の発生間隔

平均: 690 km、標準偏差: 180 km

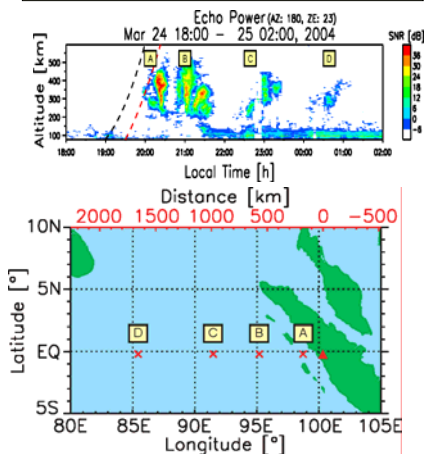
最短: 370 km

最長: 1000 km

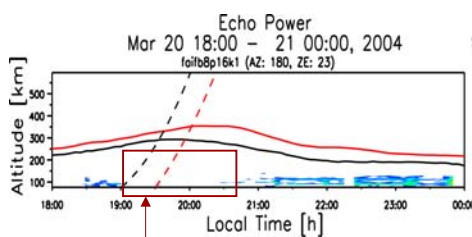


発生間隔を左右する要因として重力波等が考えられる。

20時から翌1時にかけてA、B、C、Dの4つのプラズマバブルを観測。



PREとE領域FAIの消滅との関連



F層の高度上昇と共にE領域FAIが消滅。

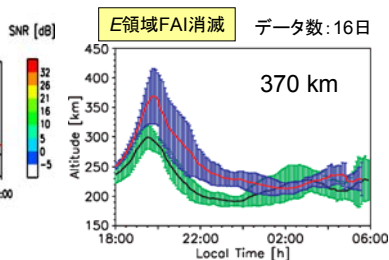
F層の最大上昇高度の平均

E領域FAI消滅: 370 km

E領域FAI存続: 280 km



E領域FAIは東向き電場による上向きドリフトによって消滅した可能性がある。



E領域FAI存続 (E-region FAI persistence) データ数: 13日

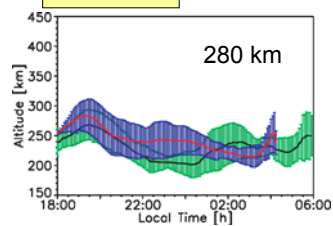
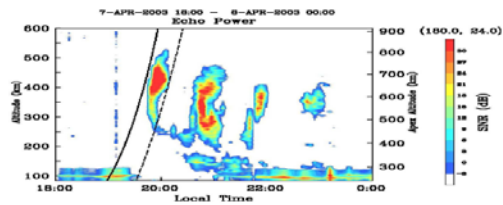
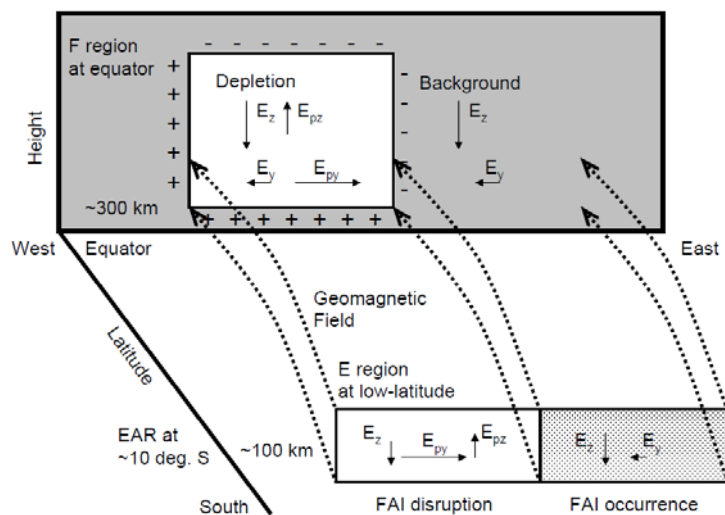
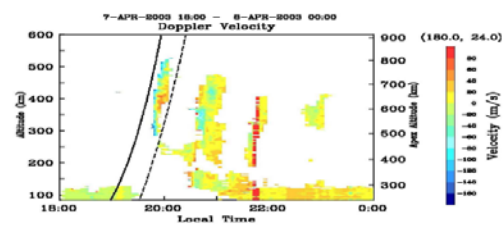


Figure-1
(a)



(b)



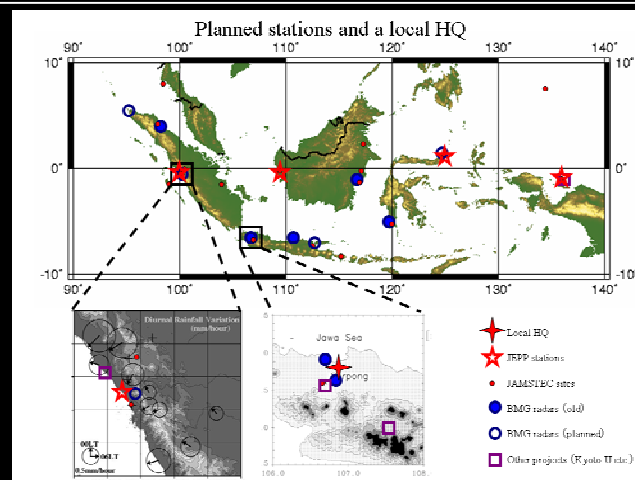
本研究項目からの波及効果

- 観測ネットワークの充実
 - SEALION:NICTIによる、EARを含む赤道・低緯度のイオノゾンデ観測網
 - HARIMAU:地球観測システム構築プランの一環
- EAR利用者の増大
 - 平成17年度からの全国・国際共同利用の開始

Japanese EOS Promotion Program (JEPP) Hydrometeorological Array for ISV-Monsoon Automonitoring (HARIMAU)

IORGC/JAMSTEC, TISDA/BPPT, RISH/Kyoto U, LAPAN, ILTS/Hokkaido U, BMG

地球観測システム構築プラン「海大陸レーダーネットワーク構築」



まとめ

課題1. EARによる赤道大気の長期連続観測(達成度100%)

- 予定通りの長期連続観測を達成
- EARの遠隔制御・データ取得を実現

課題2. EARの多機能性を活かした赤道大気の高周波波動と乱流の研究(達成度95%)

- 赤道大気波動と乱流現象、熱帯対流圏の滞留システムの研究成果
- 電離圏のプラズマバブルに関する多くの研究成果
- CPEA以後も科研費他を取得して研究成果を深化・発展中である

課題3. 他の計画研究項目との連携によるEAR観測の実施(達成度100%)

- 1次・2次の国際観測キャンペーンを成功させた
- 他班のEARデータの供給し、他の観測データを受け取るなど、協力状況は充分

課題4. 太平洋レーダーネットワークとの協同による赤道大気変動の解明(達成度70%)

- 太平洋域の大気レーダー観測の終息時期に重なった→直接のデータ交換は不発
- しかしながら、EARの観測データ公開はweb上を実現した
- EARとインドMSTレーダーを中核とするINTAR計画が発足した等、一定の成果はある

A04班を中心とする国際的なMF/流星レーダーネットワークの活用や、2007年3月の国際シンポジウムの盛り上がり等を考慮すれば、課題4に相当する活動は、領域全体としては充分にあったと考えている。