

計画研究項目 A06
「赤道大気エネルギーによる熱圏変動の研究」

1. 研究組織

研究代表者：小川忠彦（名古屋大学太陽地球環境研究所・教授）
研究分担者：塩川和夫（名古屋大学太陽地球環境研究所・准教授）
大塚雄一（名古屋大学太陽地球環境研究所・助教）
齊藤昭則（京都大学大学院理学研究科・助教：平成 16 年度以降）

2. 当初の設定目標とその達成度

本研究課題の当初の設定目標は、(1) 赤道域対流圏に起源を持つ大気波動のエネルギーや運動量が熱圏高度に輸送されて散逸する過程と、(2) 散逸エネルギーが誘起する熱圏大気の変動と電離圏プラズマの応答過程を研究し、大気活動が世界で最も活発なインドネシア域に特有の赤道大気上下結合を解明することである。このため、インドネシア域の高度 80~500 km の熱圏・電離圏を探索する独自の装置(光・電波観測装置、VHF レーダー、磁力計)をスマトラ島コトタバンの赤道大気レーダー(EAR)サイトに設置して連続観測を実施するとともに、EAR を中心としたリージョナルネットワーク及び日本とオーストラリア内の観測拠点からなる広域ネットワークから得られる電離圏・熱圏データと併せて研究を行う。

達成度：EAR サイトの気象状況が予想以上に悪かったため、光学観測データの取得量が少ない。また、一部の光学観測装置に原因不明の不具合が生じた。一方、GPS 受信機やレーダー等の電波観測装置は順調に連続データを取得した。下記の通り、研究は順調に進展し、当初は予想されていなかった新事実の発見等もあり、上記の設定目標(1)と(2)は達成された。

3. 主な研究成果（予想を超えた成果も含む）

(1) 赤道熱圏・電離圏における大気波動の散逸

EAR サイトの全天カメラによる観測から、東西方向の波面と約 700 km の水平スケールを持ち、40 分程度の周期で繰り返し南方向（極方向）に伝搬する熱圏波動が新たに見つかった。この種の波動の出現率は、北半球が夏季では 50 % 以上（他の季節では 20 % 程度）であり、一般的な現象である。下層大気からの大気重力波がその成因に関与しているものと思われる。同じく全天カメラの観測データを用いて 100 km 以下の小スケールを持つ中間圏重力波の統計解析を行い、

下層大気中の対流活動との位置関係に依存して中間圏重力波の伝搬方向が左右されること、この小スケール重力波が中間圏の風系を左右する大きな運動量を輸送していることを明らかにした。

2004年12月26日にスマトラ島西方沖で発生した巨大地震(マグニチュード9.3)の14~30分後に、GPS受信機によって電離圏プラズマの変動が観測された(新聞報道)。この変動は、地表で発生した地震の音波が電離圏まで上方伝搬したことが原因と考えられ、音波による中性大気振動の振幅は電離圏において200 m/s以上に達していたことが明らかになった。スマトラ地震による電離圏変動に関する多くの研究発表がなされてきたが、われわれの研究はそれらの先駆けとなった貴重なものである。

(2) 赤道電離圏を介した南北中緯度電離圏の水平結合

2001年に、地磁気共役の関係にある日本(佐多)とオーストラリア(ダーウィン)に設置した全天大気光カメラで、巨大な電離圏プラズマバブルの同時観測に初成功した。この成果は、本研究課題項目の一つである「プラズマバブルの研究」の先駆けとなった。これに続いて、100~数百 kmの東西幅を持つ地磁気共役バブルは、南北赤道異常の大規模電子密度構造(~1,000 km スケール)の中に存在することを発見した。この構造の成因は下層からの大気波動であると考えられる。また、2002年には、地磁気共役性が非常に良い中規模伝搬性電離圏擾乱(MSTID)を両地点の全天大気光カメラで初めて捉えた。これらの成果は、赤道電離圏上空を通る地球磁力線を介して南北半球の夜間の中緯度電離圏が強く電磁氣的に結合していることを示している。特に、最後の観測結果はMSTID生成に関わる従来の理論(MSTIDは大気波動をそのまま具現する)の変更を迫るものであり、世界の注目を浴びている。

(3) 赤道電離圏の電子密度擾乱

2003年にEAR、全天大気光カメラ、GPSシンチレーション観測装置を用いたプラズマバブルの総合的観測に初成功した。観測結果から、1) 数m~数百mスケールの電子密度擾乱はバブル内全体に存在し、バブルと共に東へ移動すること、2) 時間と共にバブルはほとんど減衰しないが、数mスケール及びGPS衛星電波シンチレーションの原因となる数百mスケールの擾乱は真夜中過ぎには減衰することが判明した。従来にない高空間分解能の比較観測から、バブル内の複雑なプラズマ擾乱過程を解く重要な手掛かりが得られた。また、東南アジア域のVHF帯テレビ電波がバブル内の電子密度擾乱によって散乱され、日本にまで到達することが判明した。

VHFレーダー観測から、バブルに関係しない新種の電子密度擾乱が夏季の真

夜中以降に出現することを見出した。この擾乱は、今まで夏季の中緯度域でのみ観測されてきたものと類似しており、今後詳しい解析を進める。

2003年当初から4年半にわたるGPS電離圏シンチレーションの連続観測から、プラズマバブルは春秋期の2000~0100 LTに頻発すること、発生率は春に高いことや太陽活動低下とともに下がることが判明し、東南アジア・インドネシア域でのGPSシンチレーション発生特性が初めて解明された。また、GPS全電子数観測から赤道域近傍のプラズマバブルを簡易に検出する手法を開発し、GPS網データを用いてバブルの全球的な発生分布等を明らかにした。

(4) プラズマバブル発生と対流圏活動との関係

プラズマバブルの発生の季節変化や経度変化はよく研究されてきたが、その日々変化の理由は不明である。下層から伝搬してくる大気重力波の活動の日々変化がプラズマバブル発生の日々変化を決めている、とする考えがある。これを検証するため、EARサイトでのGPSシンチレーションのデータと気象衛星で観測される雲頂温度（対流圏活動の指標）や下部熱圏での重力波活動との比較を行った。その結果、これらのパラメータは数日~数十日の周期で変動しており、下層からのプラネタリー波がバブル発生に関与していることが明らかになった。バブルの発生を直接トリガーするのは水平波長が数百~1,000kmの重力波と考えられるが、このような波動が赤道熱圏内に存在することが九州大学GCMシミュレーションから示唆された。

(5) 他の班との連携状況

- ・ A01：EARによるE層/赤道スプレッドF/電子密度不規則構造の共同研究
- ・ A03：プラズマバブルと対流活動との関係についての共同研究
- ・ A04：熱圏下部中性風変動及び中間圏重力波の共同研究

4. 他の研究分野に与えたインパクト

- ・ 熱帯気象：赤道域対流圏活動が大気波動を介して種々の赤道域熱圏・電離圏擾乱（上部中間圏の風系変化、MSTID、プラズマバブル・シンチレーション、地震波音波）を誘発
- ・ 中緯度電離圏：夜間の南北中緯度電離圏間には磁力線を介した強い電氣的結合が存在
- ・ 電離圏中規模擾乱：夜間の中緯度MSTIDは大気波動を直接的には反映していないが、赤道域では大気波動によって電離圏擾乱が直接作られる。
- ・ GPS利用：東南アジア赤道域のGPSシンチレーション発生特性の初解明による貢献

- ・ 電波伝搬：プラズマバブルを介した、東南アジア域の VHF 帯テレビ電波の日本への伝搬
- ・ 名古屋大学 21 世紀 COE プログラム：「太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学」(平成 15～19 年度)に貢献

5. 研究成果公表の状況 (本研究課題に直接関係する成果； 関連発表を含めたリストは下記のホームページ参照)

学術誌論文： 34 件 (A06 班が主体となって発表したもの)
7 件 (他班の発表に協力したもの)

博士号取得者：1 名 (鈴木臣)

学位論文： Suzuki, S., Study of mesospheric gravity wave dynamics based on airglow imaging observations at middle and low latitudes, Ph.D thesis, Nagoya University, 2007.

受賞： 地球電磁気・地球惑星圏学会 大林奨励賞 (2005 年 9 月) 大塚雄一
同上 学生発表賞 (2004 年) 鈴木 臣

新聞記事： 中日新聞他 9 社「スマトラ沖地震の振動 300 km 上空に影響」
(2005 年 5 月 20 日)

研究成果リスト：<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/ear-toku/happyou.html>
に掲載

6. 観測データの公開

EAR サイトの各観測装置で取得されたデータはデータベース化し、ホームページで公開している。

- ・ 全天カメラと分光温度フォトメータ：
<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/omti/>
- ・ GPS シンチレーション受信機：
<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/QL-S4/>
- ・ VHF レーダー：
<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/vhfr/>
- ・ 磁力計：
<http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/mm210/>



A06班

赤道大気エネルギーによる 熱圏変動の研究

研究代表：小川 忠彦（名大・太陽地球環境研究所）
研究分担：塩川 和夫（名大・太陽地球環境研究所）
大塚 雄一（名大・太陽地球環境研究所）
齊藤 昭則（京大・理学研究科）

➤ 研究達成状況

当初の設定目標

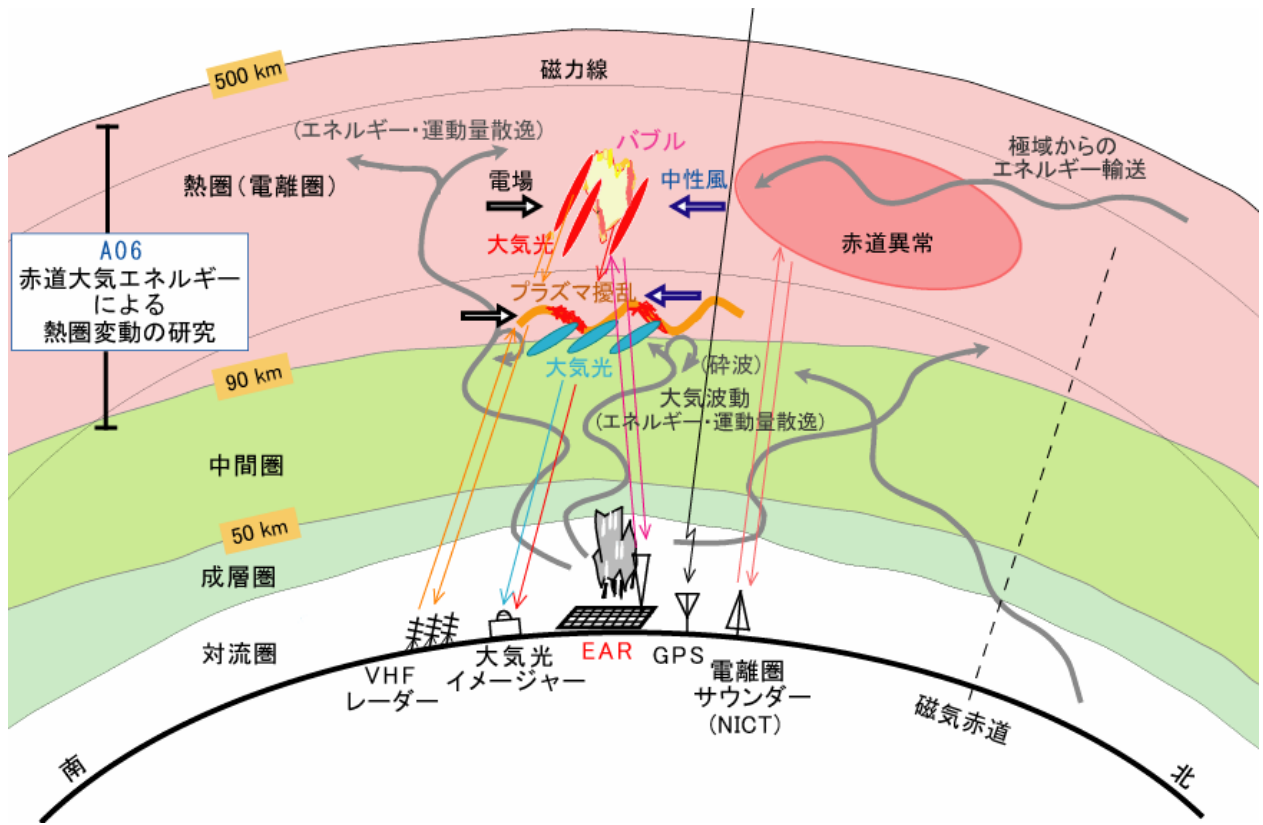
- 1) 赤道域対流圏に起源を持つ大気波動のエネルギーや運動量が熱圏高度に輸送されて散逸する過程
- 2) 散逸エネルギーが誘起する熱圏大気の変動と電離圏プラズマの応答過程

を研究し、大気活動が世界で最も活発なインドネシア域に特有の赤道大気上下結合の解明に貢献

観測装置

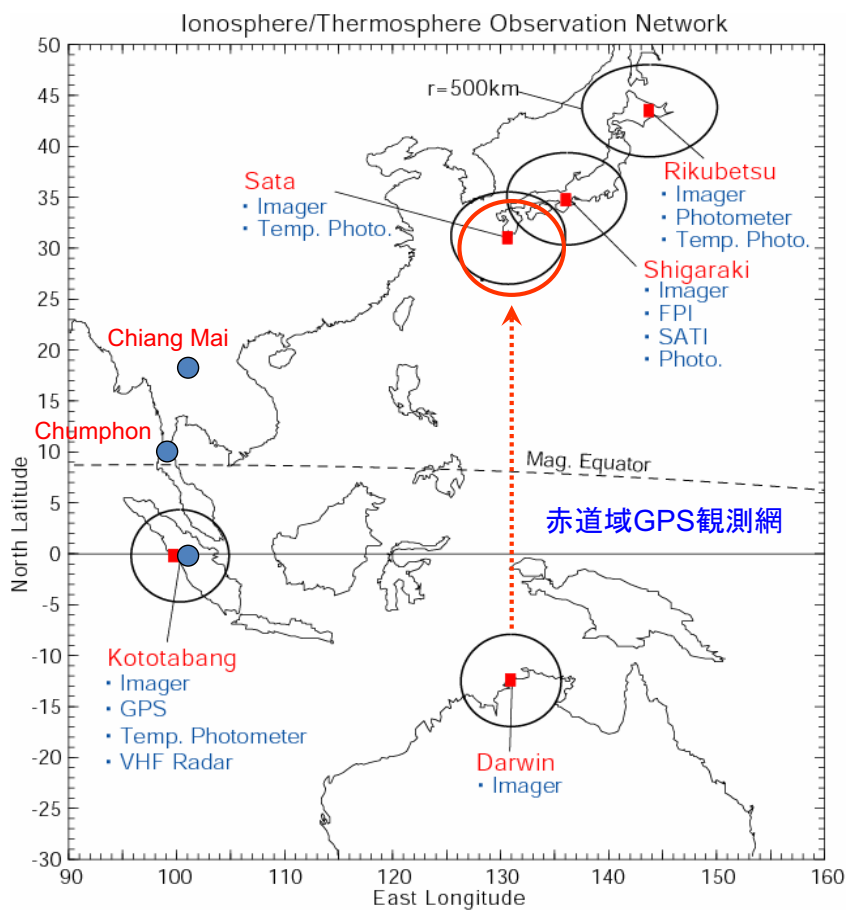
- ・ **EARサイト**：高度80～500 kmの光・電波観測（全天カメラ、GPS、VHFレーダー、磁力計）
- ・ **日本とオーストラリア**：高度80～300 kmの光学観測（全天カメラ）
- ・ **赤道域**：電離圏のグローバルGPS観測網

赤道域の上部中間圏・熱圏・電離圏の諸現象とEARサイトでの観測装置



CPEAのための
中緯度・赤道域
電離圏・熱圏観測
ネットワーク

● NICT アイオゾンデ

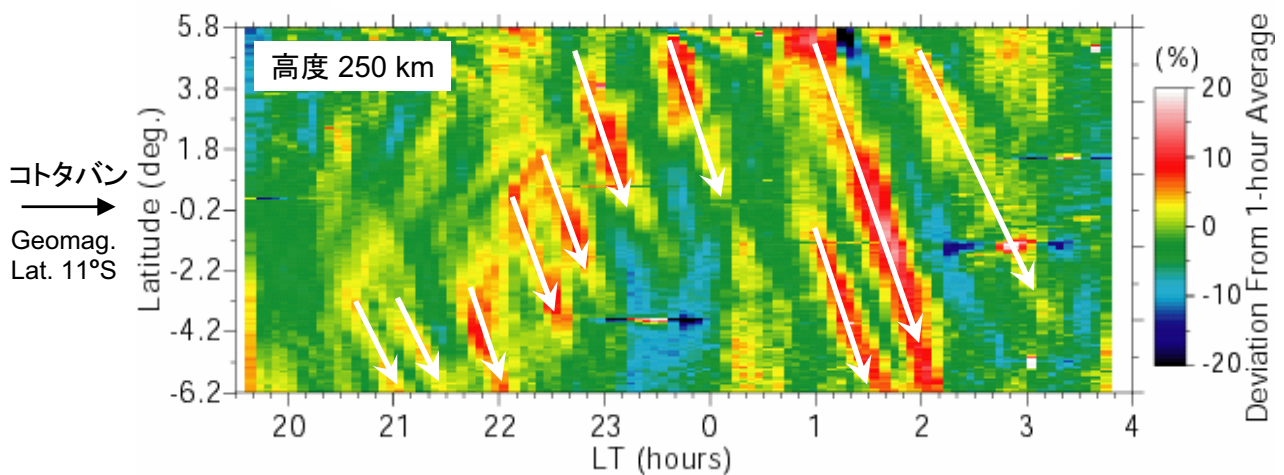


赤道熱圏・電離圏における 大気波動の散逸



赤道異常内の準周期的波動 (Shiokawa et al., 2006)

630 nm 夜間大気光のケオグラム May 16, 2004

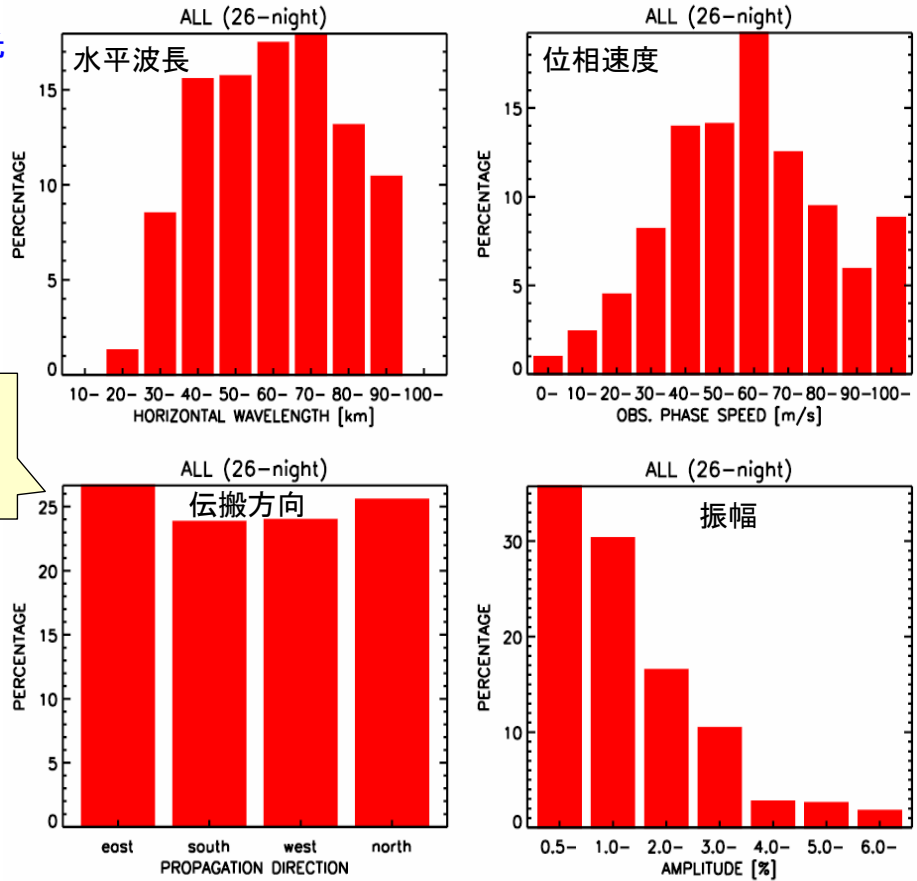


2年間の観測結果:

- ・ 準周期的に赤道異常域から高緯度方向へ伝搬。ほぼ年中出現するが、6月がピーク
- ・ 位相速度=約 310 m/s、周期=約40分、等位相面は東西方向
 → 中緯度での中規模伝搬性電離圏擾乱に酷似
- ・ 下層からの大気重力波が原因?

高度 96 km 付近の短周期重力波 (Suzuki, 2007)

OH(720-910 nm) 大気光
2002 - 2005年の 26 晩



Kototabang上空には
常に高い雲が存在し、
重力波は全方位に伝搬

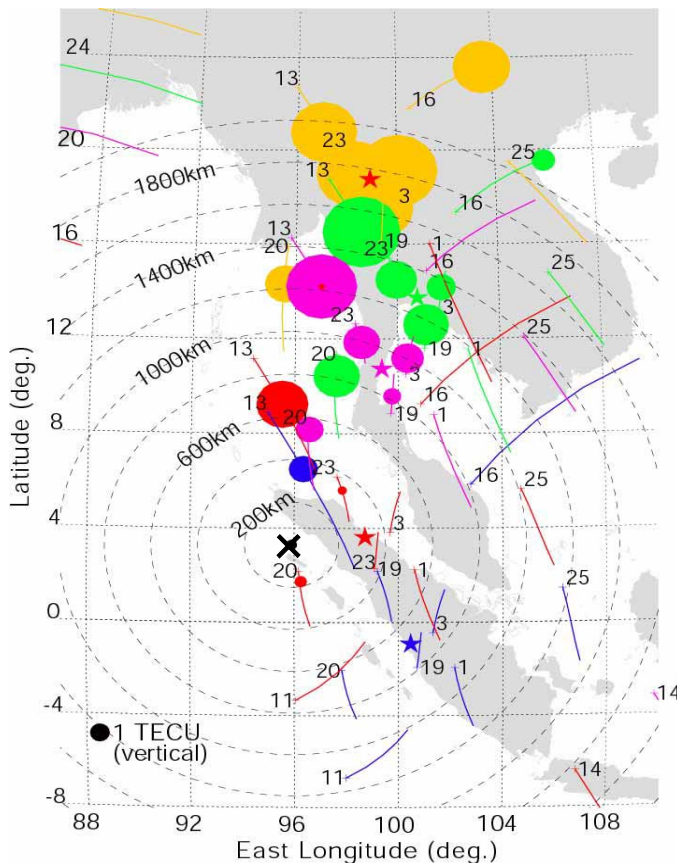
平均運動量フラックス:
 $3.3 \pm 8.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$

加速: $\sim 27 \text{ m/s/day}$



中間圏の風系に影響

スマトラ巨大地震による電離圏擾乱 (Otsuka et al., 2006)



・ 2004年12月26日 0058 UT
マグニチュード = 9.3

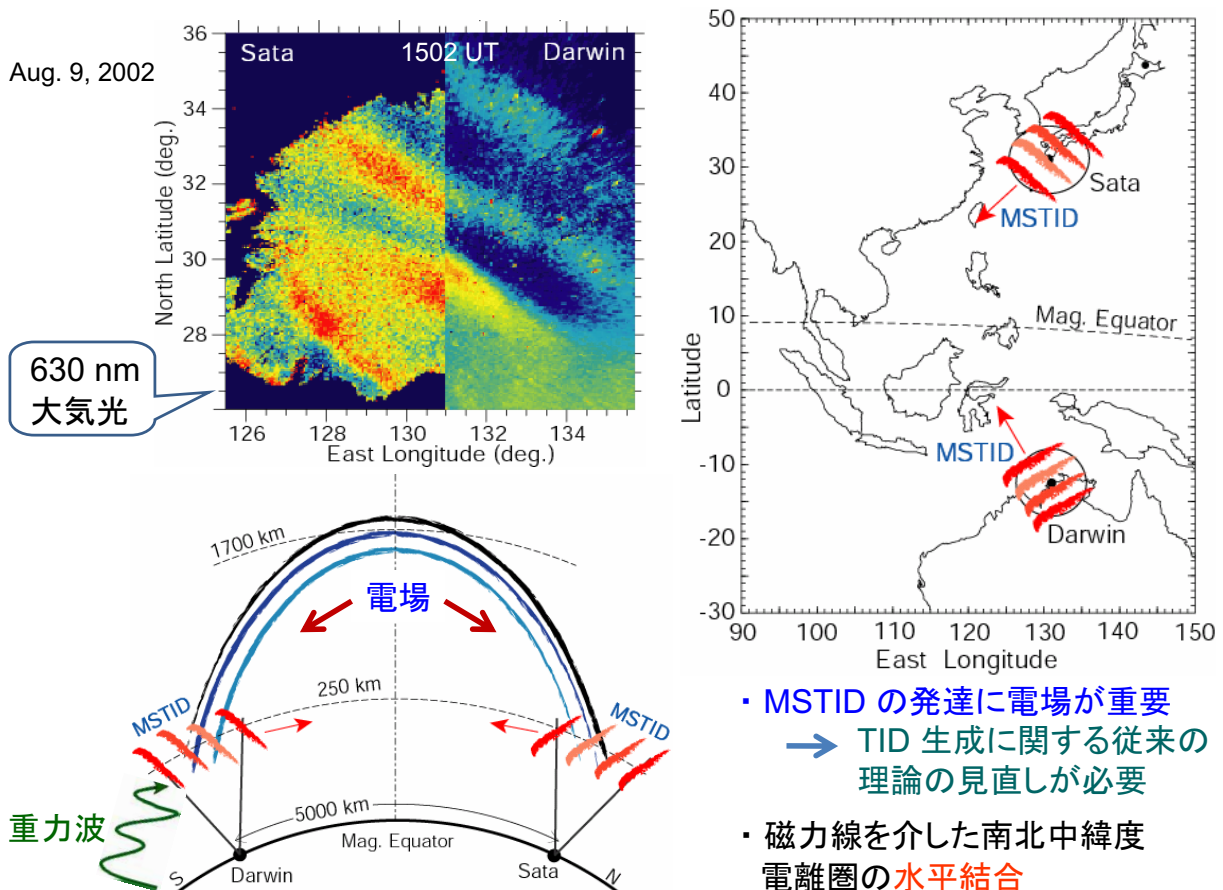
・ 1.6 - 6.9 TECU の全電子数(TEC)
増加域が震央から北へ伝搬
(1 TECU = 10^{16} electrons/m²)

・ TEC 増加は、地震で発生した
音波が電離圏高度に伝搬し
(中性大気振動の振幅 $\sim 200 \text{ m/s}$)、
これに電離圏プラズマが非等方
応答したもの

・ 赤道大気上下結合の典型例
新聞報道(10社)

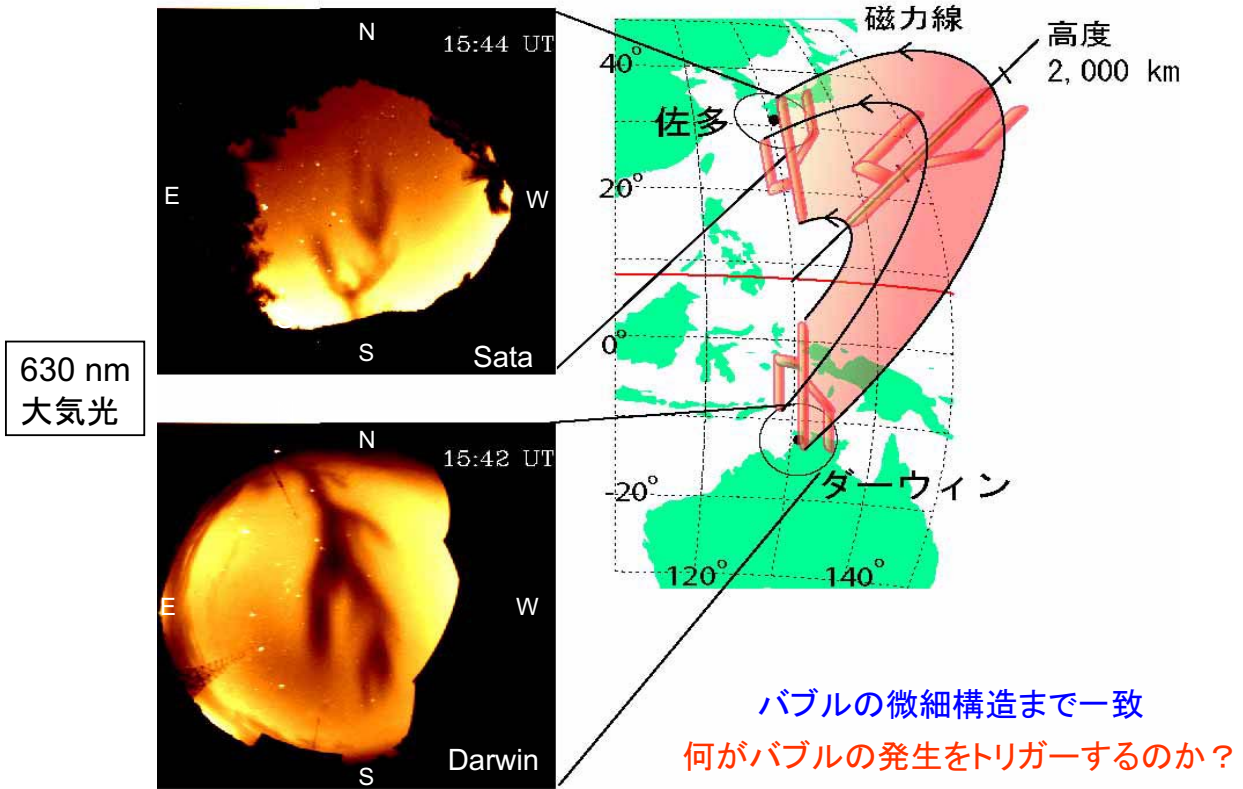
赤道電離圏を介した 南北中緯度電離圏の水平結合

地磁気共役性を持つ中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) (Otsuka et al., 2004)

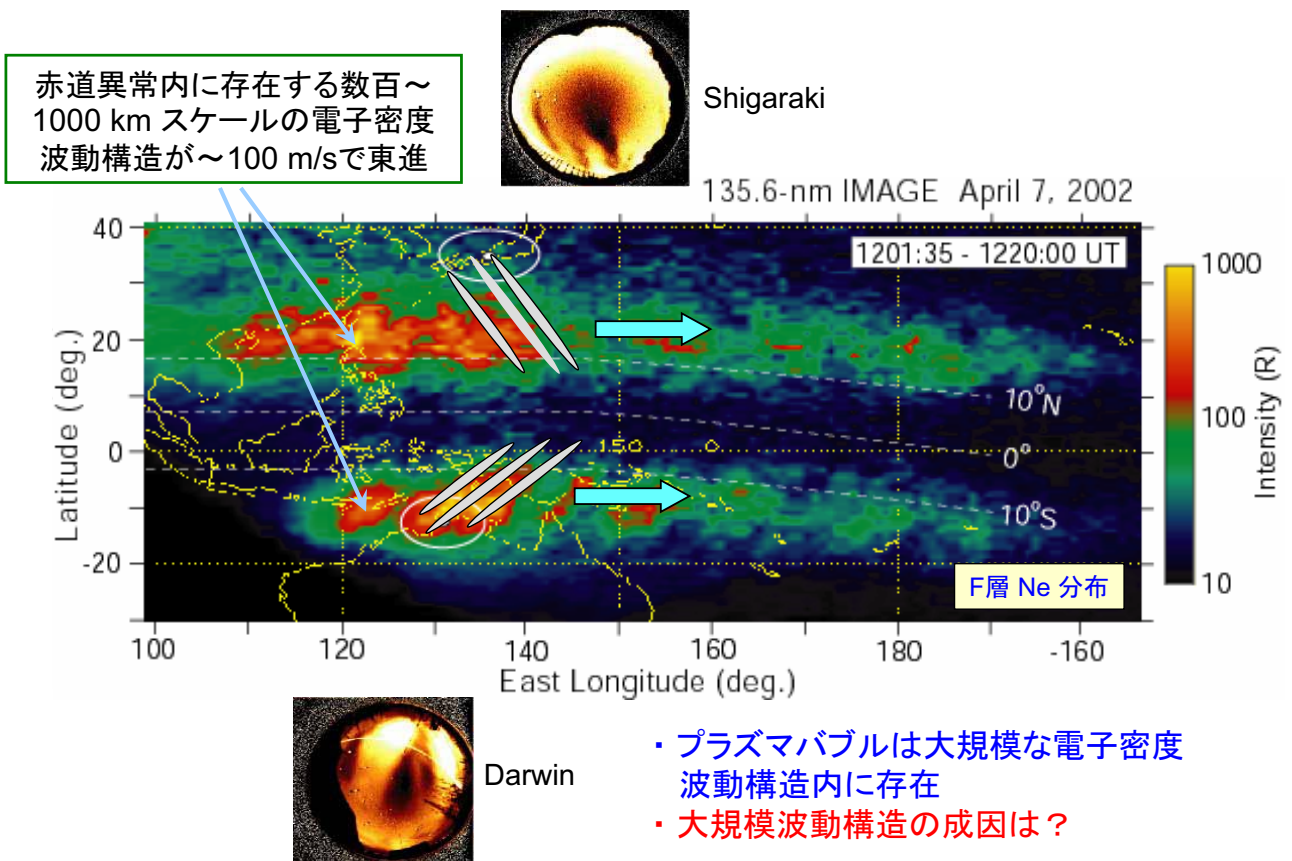


巨大な地磁気共役プラズマバブル (Otsuka et al., 2002; Shiokawa et al., 2004)

Nov. 12, 2001



大規模電子密度波動構造と地磁気共役プラズマバブル (Ogawa et al., 2005)

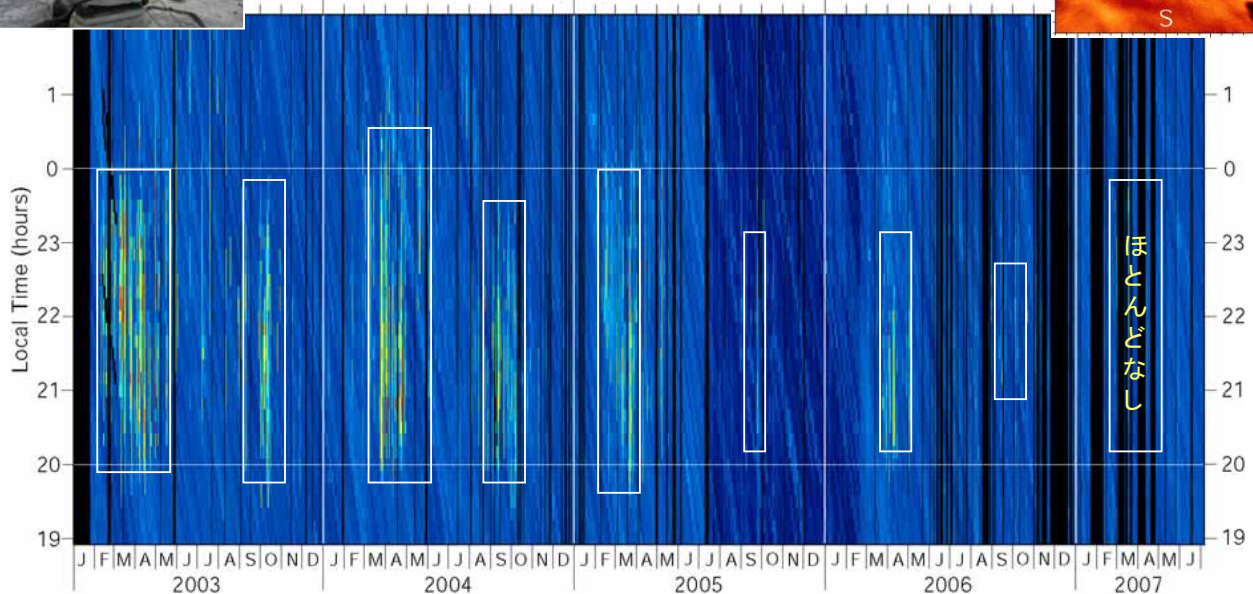


赤道電離圏の電子密度擾乱、 プラズマバブル発生と 対流圏活動との関係



コタババン GPS シンチレーションの長期変化

Kototabang, Sumatra (0.2°S , 100.3°E ; dip. lat. = 10.4°S)
 S4 指数 Elevation Angle $\geq 30^{\circ}$



→
太陽活動低下

- ・春秋期の 20 - 01 LT、春秋非対象
- ・インド・西太平洋域のバブル発生傾向と一致
- ・非常に大きな日々変化 → なぜ？

VHFレーダー F層エコーと GPS シンチレーションの比較

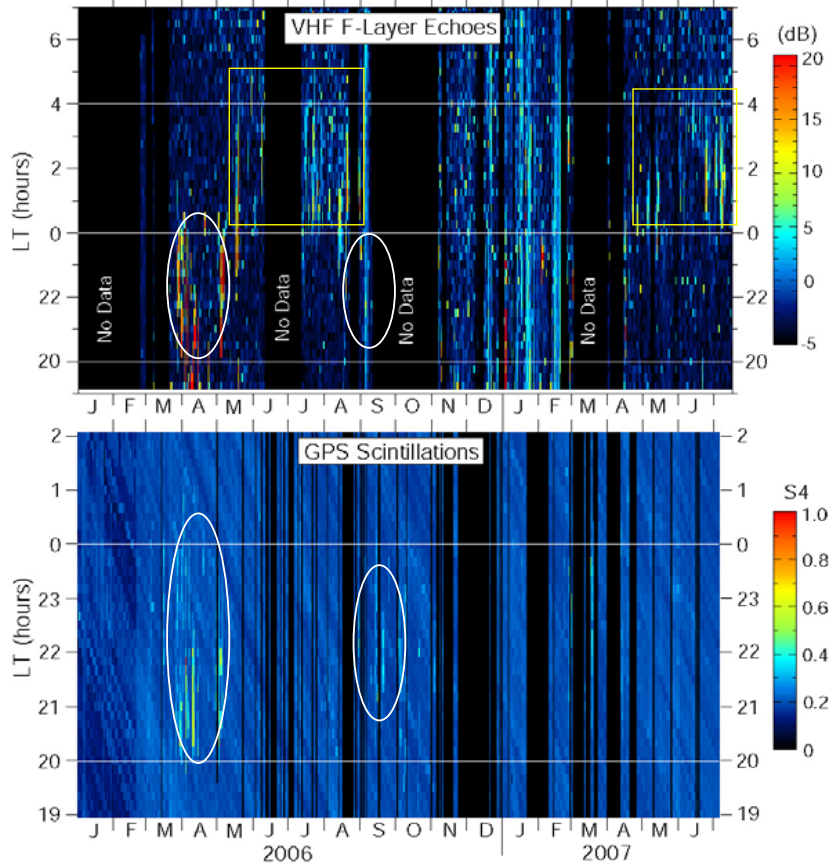
VHFコヒーレントレーダー



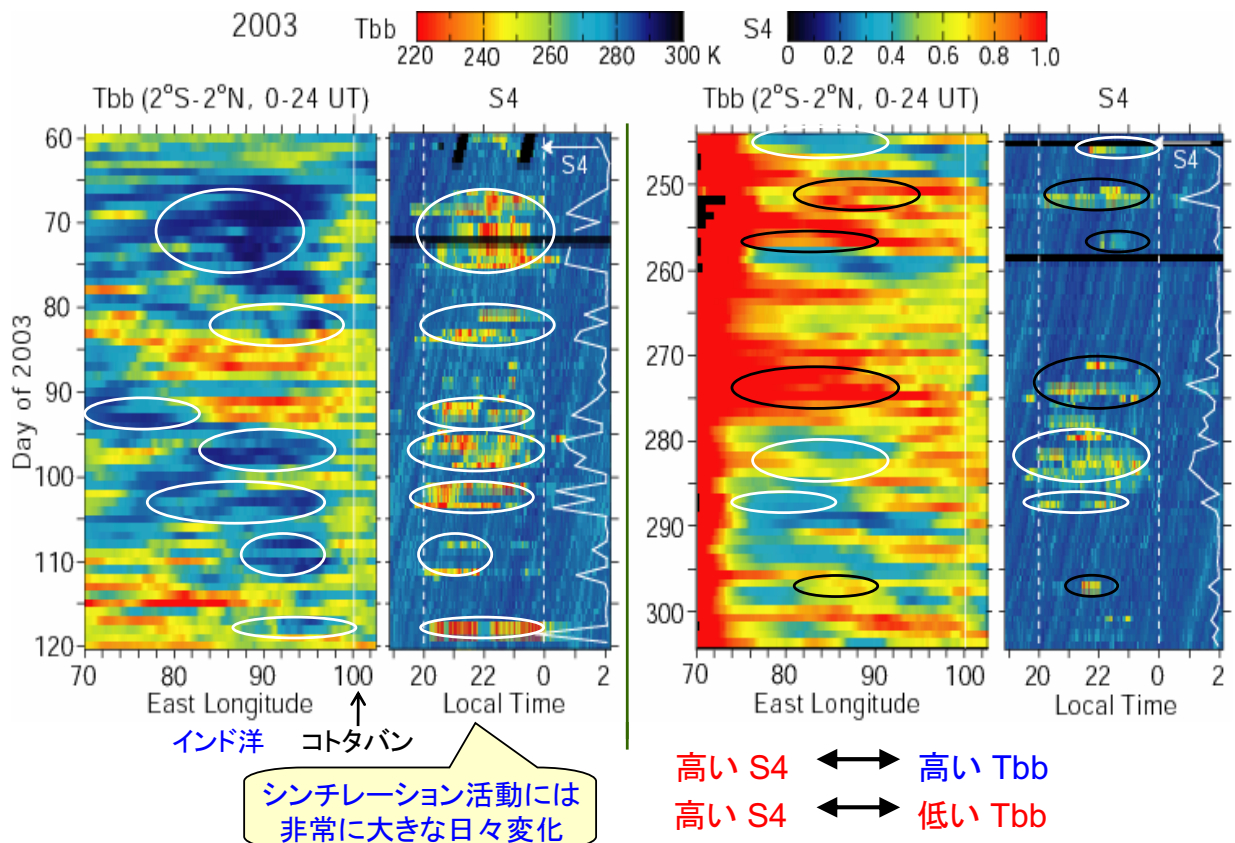
- 30.8 MHz, 20kW
- 3素子×18 八木アンテナ(仰角 70°)
全長 130m
- ビーム方向：9方位

バブルによるエコー

真夜中以降のエコー
の原因は？



雲頂温度 (Tbb) とGPS シンチレーション (S4) (Ogawa et al., 2006)



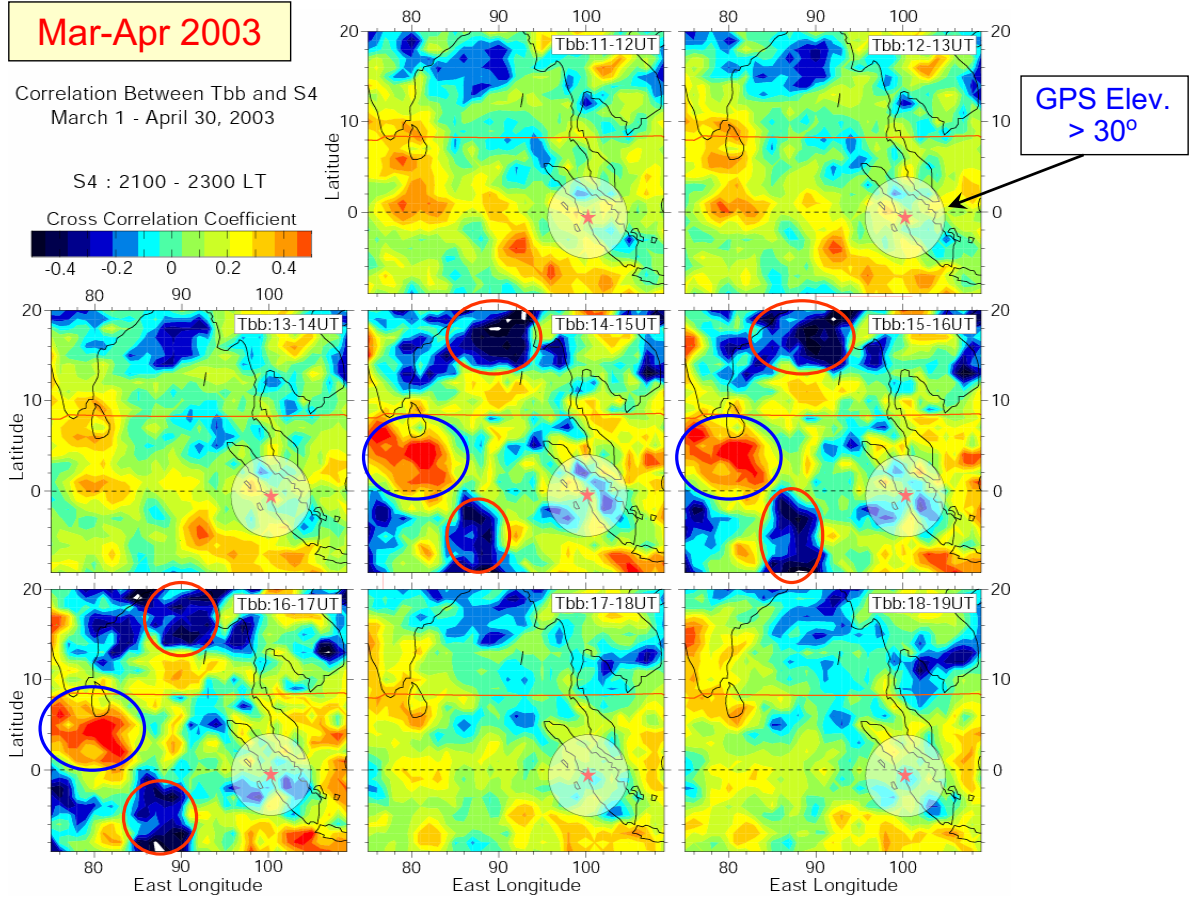
Tbb と S4 との相互相関

Mar-Apr 2003

Correlation Between Tbb and S4
March 1 - April 30, 2003

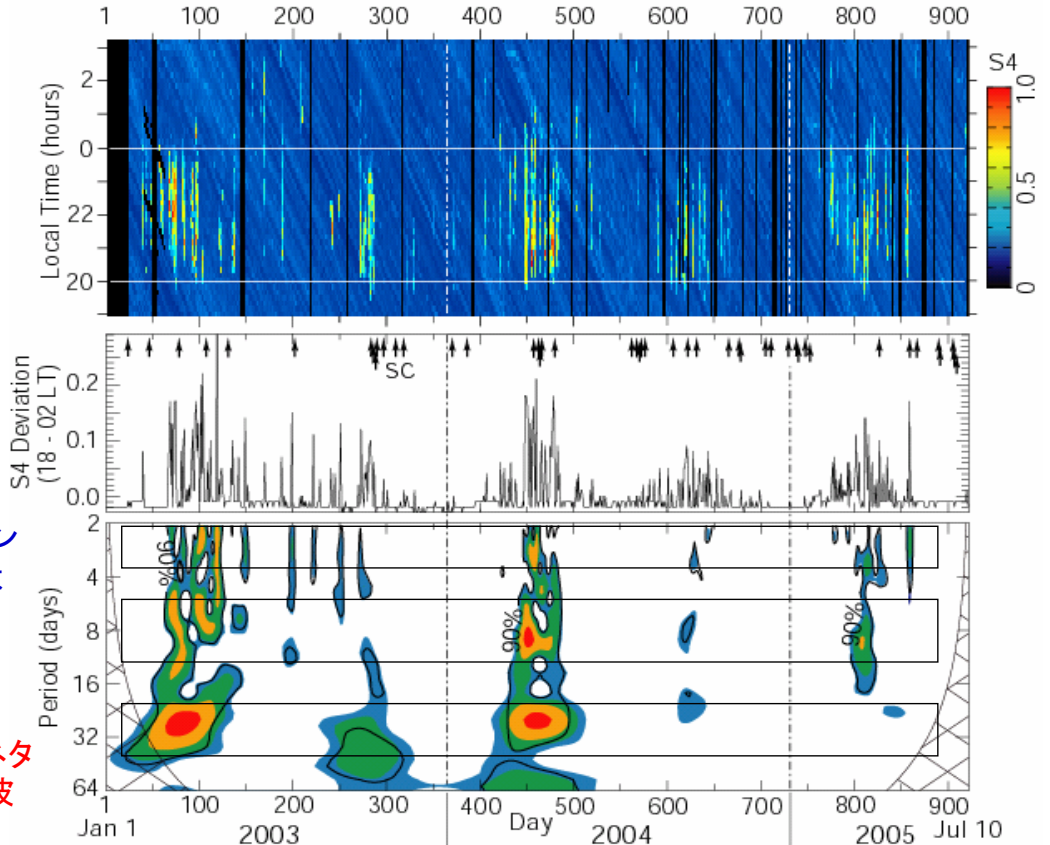
S4 : 2100 - 2300 LT

Cross Correlation Coefficient



シンチレーション指数 S4 のWavelet スペクトル

Jan 2003 - Jul 2005



シンチレーション
の発生周期は
数日~数十日



下層からのプラネタ
リー波/ケルビン波

S4、重力波、Tbb の Wavelet スペクトル

2003

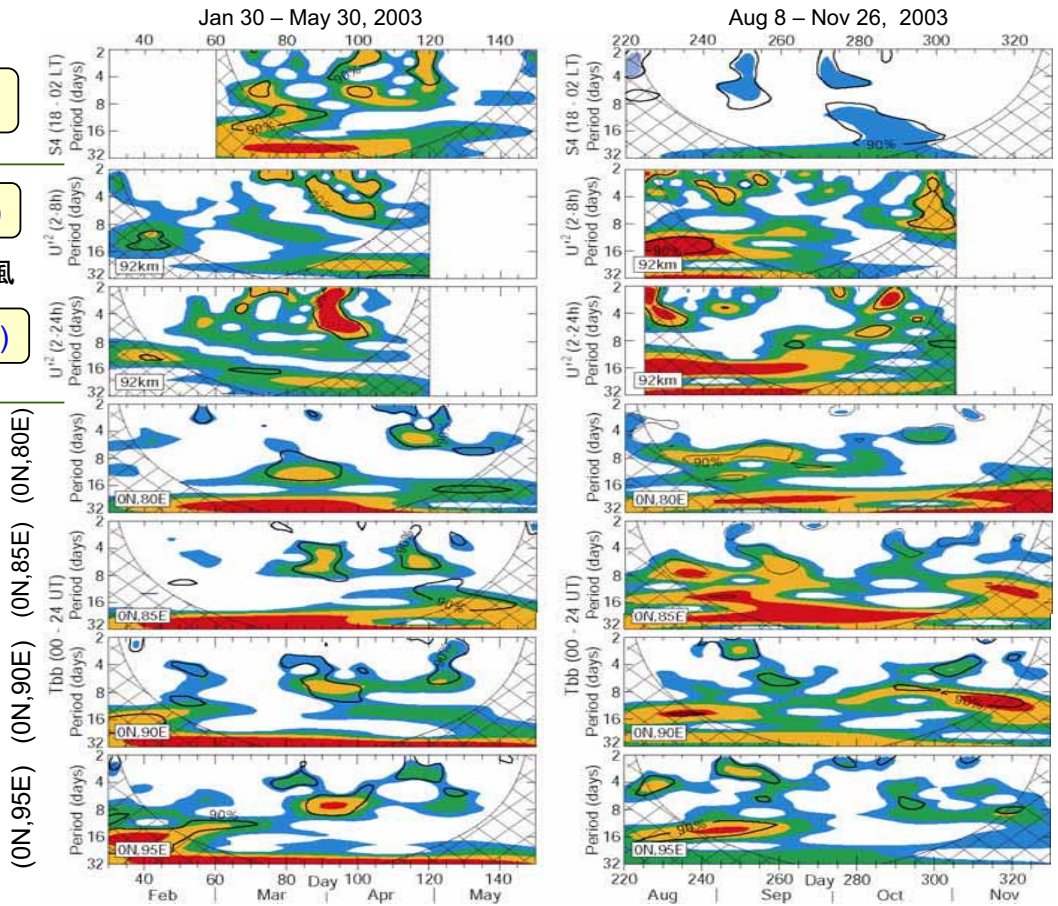
S4

GW (2-8h)

92km中性風

GW (2-24h)

インド洋
Tbb
(雲頂温度)



S4、重力波(高度92km)、Tbb の Wavelet 周期

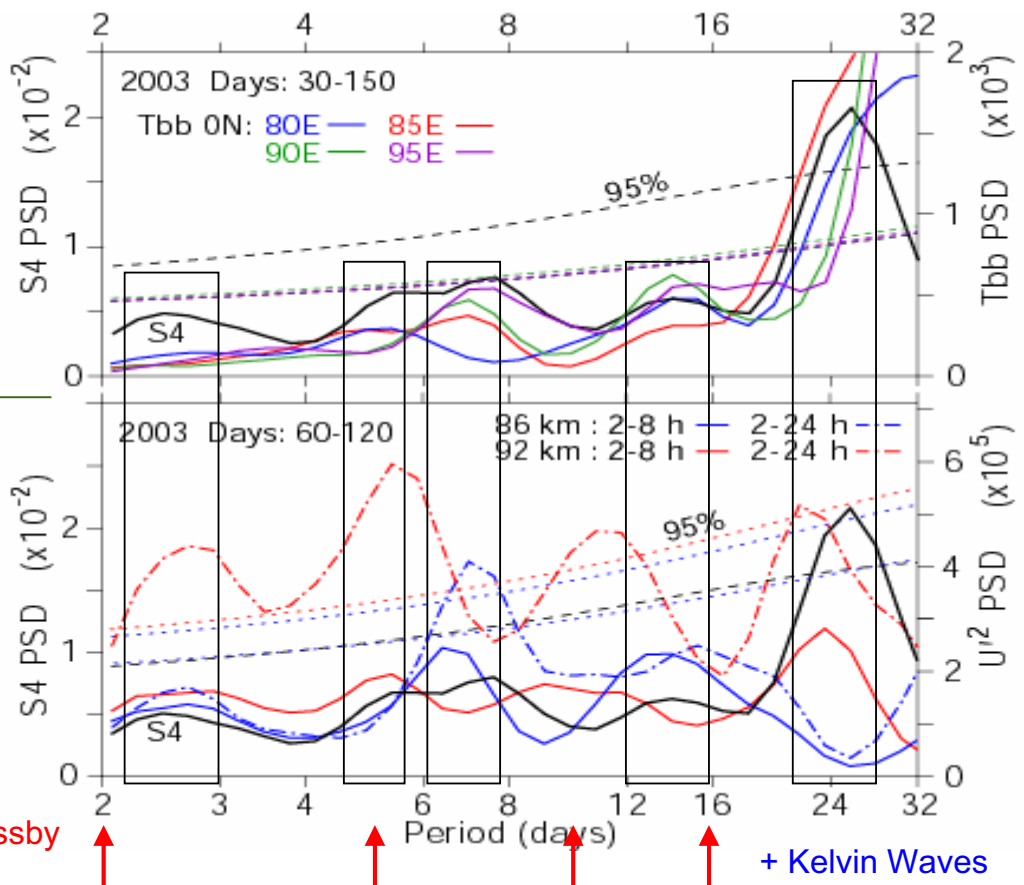
2003年

S4 & Tbb

(2-5月)

S4,
GW (2-8h) &
GW (2-24h)

(3-4月)



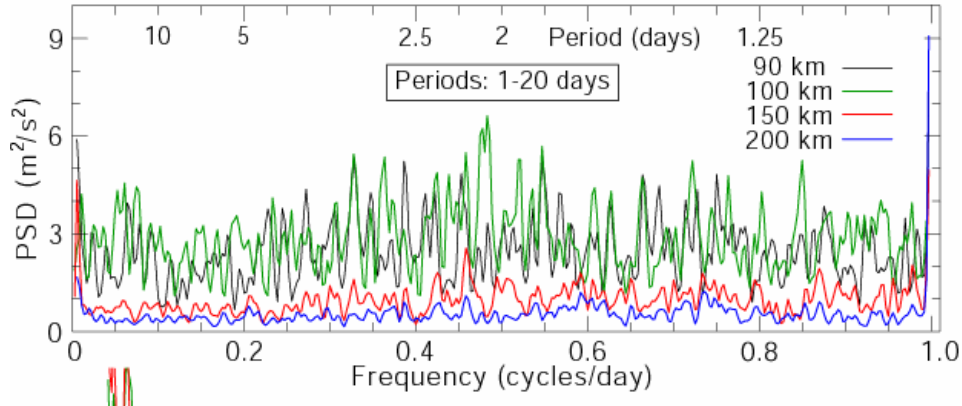
九大 GCM モデル： 数十分～数十日周期の東西波のパワースペクトル

高分解能モデル

周期：1～数十日

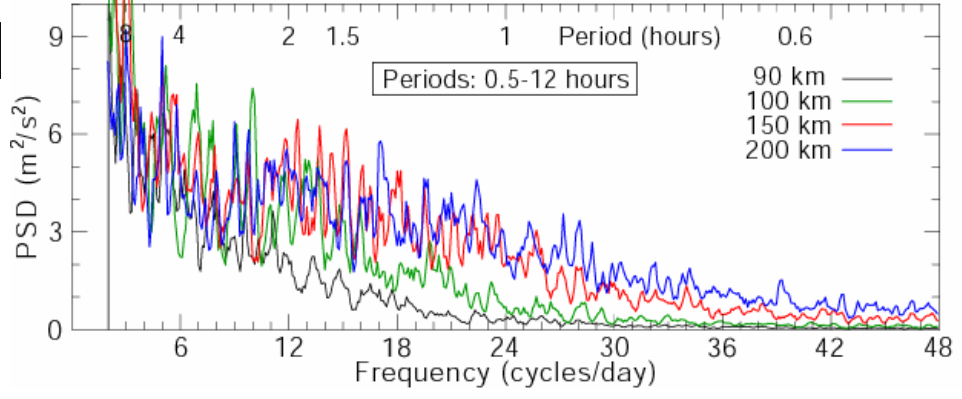
高度と共に急減衰

Zonal Waves (0.4°N, 0°-360°E) 10 Days in Late March



周期：0.5～12 時間

数時間以下の成分が高度共に顕著になる

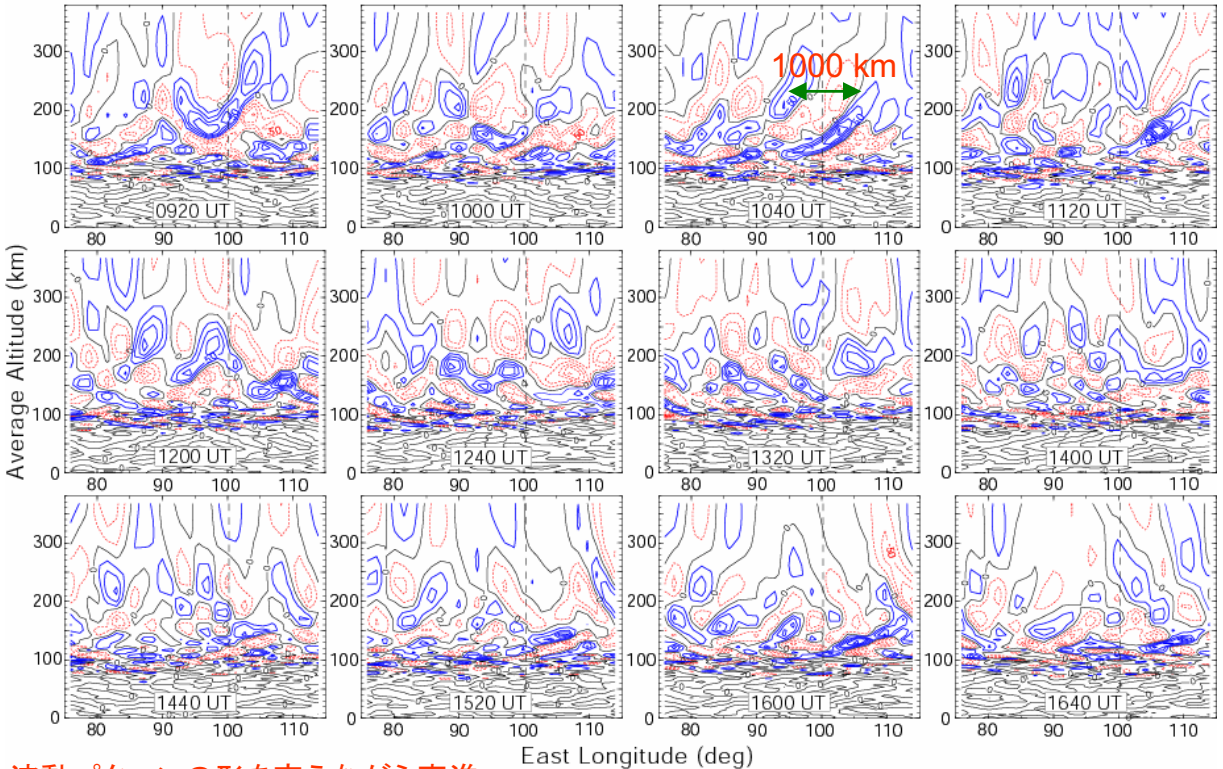


九大 GCM モデル： 短周期の東西波

周期：1～4 時間

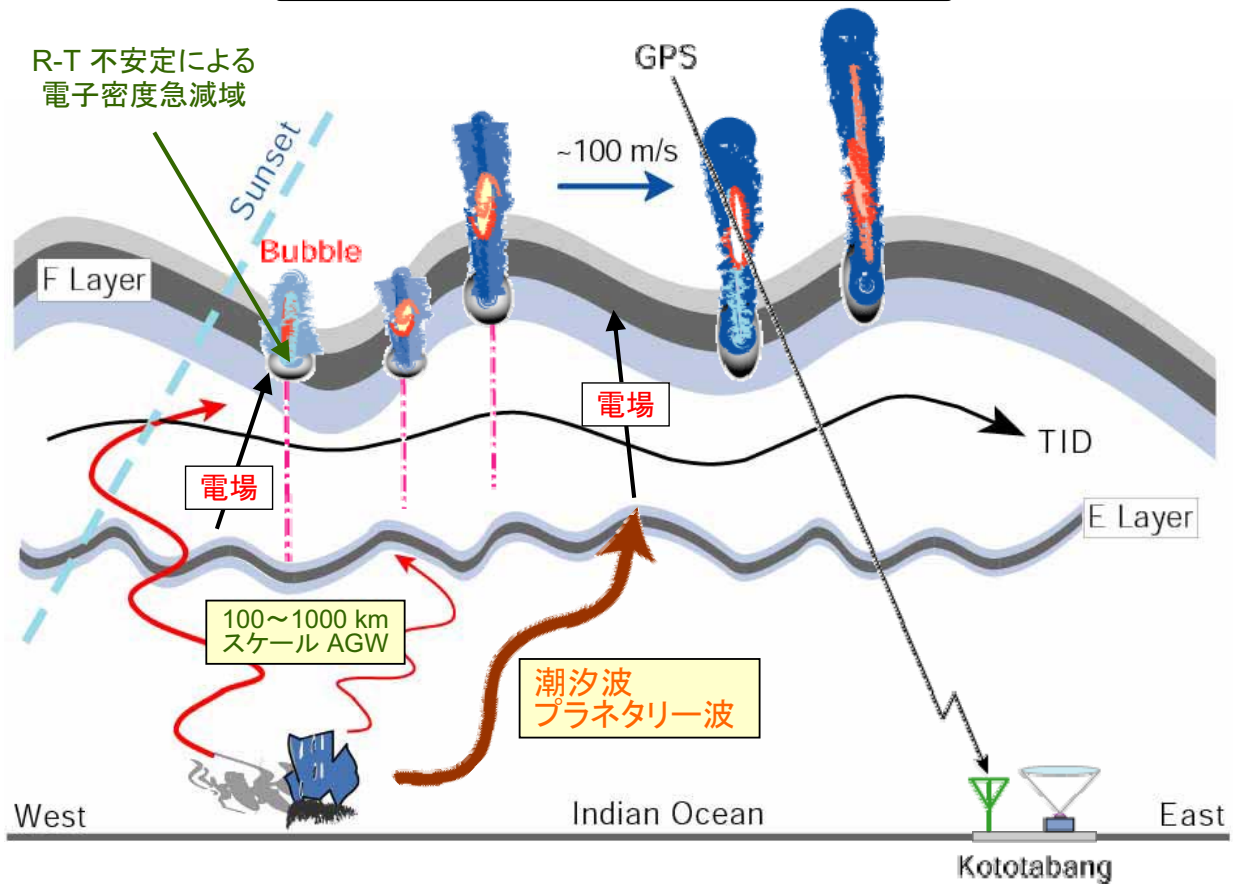
Zonal Wind (0.4°N) Period : 1 - 4 h March 21

Eastward Westward (Contour Interval = 25 m/s)



波動パターンを変えながら東進

大気波動とプラズマバブル・シンチレーションの関係



他の班との連携

- A01: EARによるE層 / 赤道スプレッドF / 電子密度不規則構造の共同研究
- A03: プラズマバブルと対流活動との関係についての共同研究
- A04: 熱圏下部中性風変動及び中間圏重力波の共同研究

他の研究分野へのインパクト

- ・**熱帯気象**: 赤道域対流圏活動が大気波動を介して種々の赤道域熱圏・電離圏擾乱を誘発
- ・**電離圏**: 夜間の南北中緯度電離圏間には磁力線を介した強い電気的結合が存在
- ・**中規模電離圏擾乱**: 夜間の中緯度 MSTID は大気波動を直接的には反映していないが、赤道域では大気波動によって電離圏擾乱が直接作られる。
- ・**GPS利用**: 東南アジア赤道域の GPS シンチレーション発生特性の初解明
- ・**電波伝搬**: プラズマバブルを介した、東南アジア域のVHF帯テレビ電波の日本への伝搬
- ・**名古屋大学21COE**: 「太陽・地球・生命圏相互作用系の変動学」(H16~19年度)に貢献

本課題に直接関係する研究成果

- ・**論文誌上发表**: 18 件(2002年~現在) 学位論文: 1 件(2007年3月)
- ・**受賞**: 地球電磁気・地球惑星圏学会 大林奨励賞(2005年9月) 大塚雄一
同上 学生発表賞(2004年) 鈴木 臣
- ・**新聞記事**: 中日新聞含む10紙「スマトラ沖地震の振動300km上空に影響」2005年5月20日

まとめ

初期の設定目標を達成

1. 赤道熱圏・電離圏における大気波動の散逸

- ・ 赤道異常内を伝搬する準周期的波動の発見 → 下層からの大気波動？
- ・ 中間圏界面付近の短周期重力波の特性解明 → 下層からの運動量輸送
- ・ 巨大地震が引き起こした電離圏擾乱 → 下層からの大振幅音波の伝搬

2. 赤道電離圏を介した南北中緯度電離圏の水平結合

- ・ 地磁気共役性を持つ夜間のMSTIDの発見 → 従来のMSTID理論の見直し
- ・ 地磁気共役性を持つ巨大プラズマバブルは赤道異常の大規模電子密度構造内に存在 → 大規模構造の成因は下層からの大気波動？

3. 赤道電離圏の電子密度擾乱、プラズマバブル発生と対流圏活動との関係

- ・ m-スケール電子密度擾乱はバブル内に存在し、バブルと共に東進
- ・ 夏季真夜中以降のm-スケール電子密度擾乱の発見 → 成因は？
- ・ バブル内の 350-m スケールの擾乱によりGPSシンチレーション発生
- ・ 東南アジア・インドネシア赤道域の電離圏シンチレーション長期発生特性の初解明
- ・ バブル発生の大きな日々変動の一因は下層からのプラネタリー波
- ・ バブル発生をトリガーする "種" は下層からの短周期重力波？