

地球環境の心臓  
赤道大気の鼓動を聴く

# 地球環境の心臓 赤道大気の鼓動を聴く

主催—文部科学省科学研究費特定領域研究  
「赤道大気上下結合」総括班



東京国際交流館・プラザ平成  
国際交流会議場

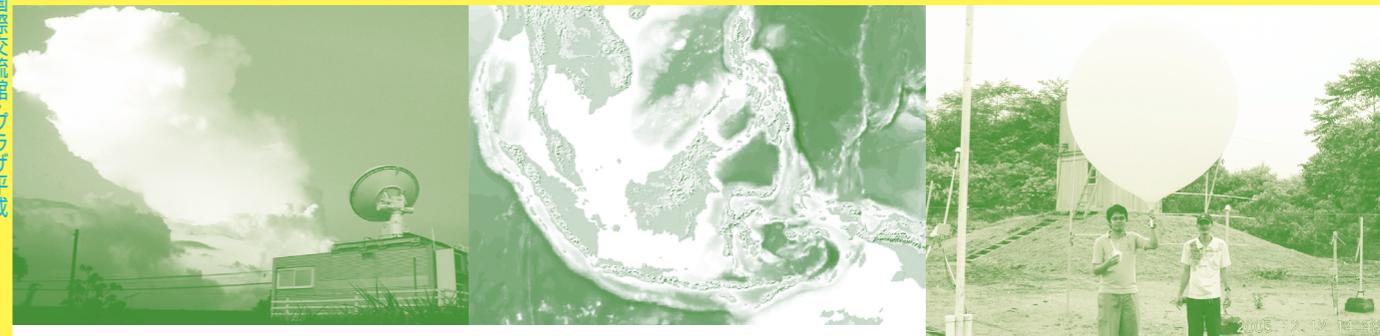
東京都江東区青海2-79

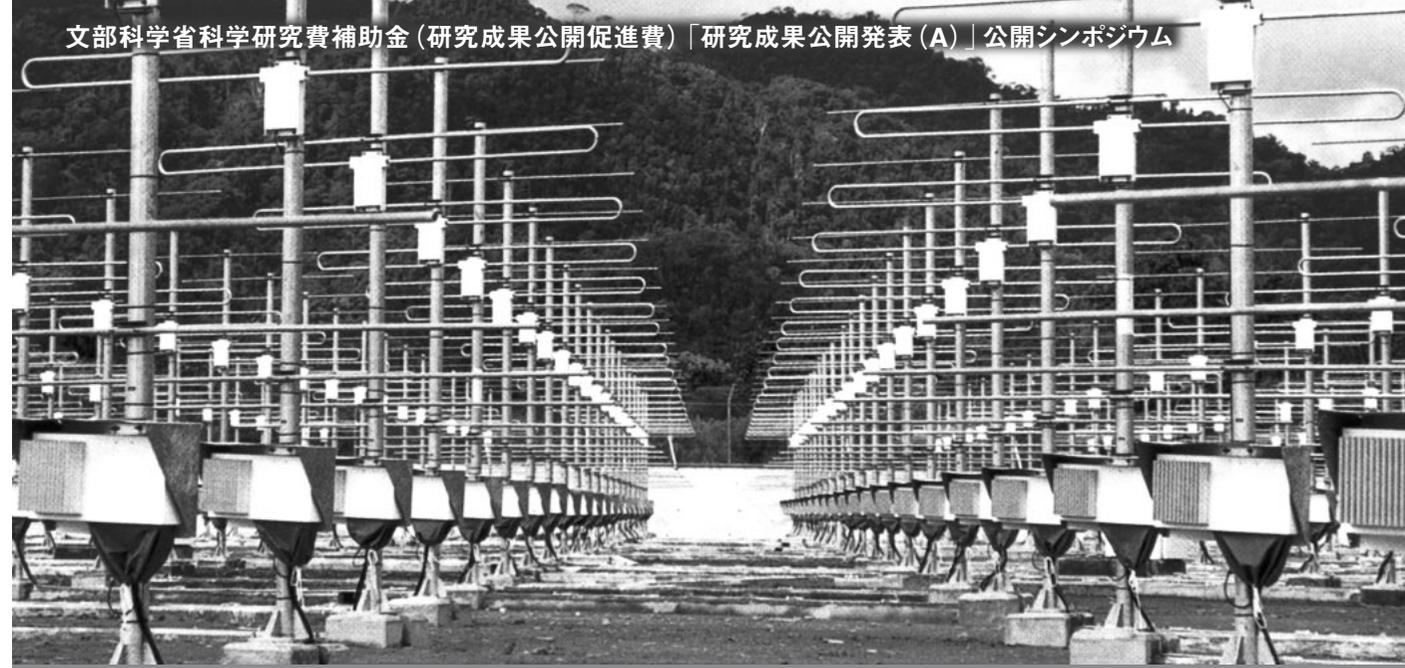
2007年9月20日[木] 21日[金]

予稿集

【制作】  
株式会社クバプロ内 シンポジウム事務局  
〒102-0072 千代田区飯田橋3-11-15 UEDAビル6F  
TEL : 03-3238-1689 FAX : 03-3238-1837  
E-mail : symposium@kuba.jp

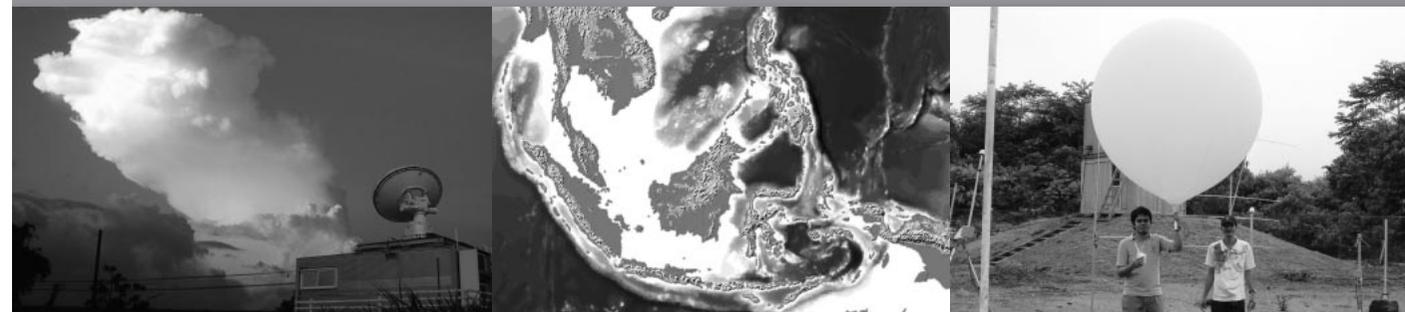
2007年9月20日(木) 21日(金)  
東京国際交流館・プラザ平成





# 地球環境の心臓 赤道大気の鼓動を聴く

予稿集



**【オープニングセッション】 特定領域研究「赤道大気上下結合」の概要**

13:00～13:50 開会挨拶／基調講演：赤道大気の鼓動を聴く—私達の挑戦 ●6  
深尾 昌一郎(京都大学名誉教授／東海大学総合科学技術研究所)

**【セッション1】 電波と光で赤道大気を測る**

13:50～14:30 赤道大気レーダーを使って大気波動を診る ●10  
山本 衛(京都大学生存圏研究所)

14:30～15:10 赤道大気解明に役立つレーザーレーダー ●12  
長澤 親生(首都大学東京大学院システムデザイン研究科)

15:10～15:20 質疑応答

15:20～15:35 — 休憩 —

**【招待講演1】**

15:35～16:15 インド洋に現れる大気海洋相互作用と地球環境のかかわり ●16  
山形 俊男(東京大学大学院理学系研究科)

**【セッション2】 赤道大気中の波**

16:15～16:55 赤道大気の長周期変動 津田 敏隆(京都大学生存圏研究所) ●20

16:55～17:25 並々ならぬ波の威力—上空に伝わる大気の波の主演 ●22  
中村 卓司(京都大学生存圏研究所)

17:25～17:35 質疑応答

**招待講演2**

●26 10:00～10:40 地球大気物質輸送と環境変動  
中島 映至(東京大学気候システム研究センター)

**セッション3：赤道域の風・雨・雲・雷**

●30 10:40～11:20 大気を動かす熱帯の雨  
高藪 縁(東京大学気候システム研究センター)

●32 11:20～12:00 単眼から複眼へ—分散レーダーで見る大気の微細構造  
佐藤 亨(京都大学大学院情報学研究科)

12:00～12:10 質疑応答

12:10～13:30 — 昼食 —

**招待講演3**

●36 13:30～14:10 点を線に、線を面に：東南アジアの大気観測ネットワーク  
山中 大学(海洋研究開発機構地球環境観測研究センター)

**セッション4：赤道域の超高層大気**

●40 14:10～14:50 大気の鼓動がつくる超高層プラズマの乱れ  
小川 忠彦(名古屋大学太陽地球環境研究所)

14:50～15:05 — 休憩 —

●42 15:05～15:35 カーナビを惑わす電離圏の変動  
齊藤 昭則(京都大学大学院理学研究科)

●44 15:35～16:05 スマトラ大地震が引き起こした“大気の波”  
大塚 雄一(名古屋大学太陽地球環境研究所)

16:05～16:15 質疑応答

**閉会挨拶**

16:15～16:25 閉会挨拶 山本 衛(京都大学生存圏研究所)

**【オープニングセッション】**  
**特定領域研究「赤道大気上下結合」の概要**

座長：津田 敏隆

開会挨拶/基調講演：赤道大気の鼓動を聴く—私達の挑戦  
深尾 昌一郎

# 赤道大気の鼓動を聴く 私達の挑戦

深尾 昌一郎 (京都大学名誉教授/東海大学総合科学技術研究所)

## 1. 鼓動する赤道大気

地球の放射収支は低緯度域で日射による加熱が宇宙への放熱を上回り、中高緯度域では逆に放熱が加熱を上回る。この放射収支の南北不平衡を緩和するのが地球規模スケールの大気(及び海洋)の大循環である。一方、地球に到達する太陽放射エネルギーの約7割は地表面(陸海面)で吸収される。低緯度域で大気の南北エネルギー輸送を担うのは南北の循環(ハドレー循環)である。このため地表面で受け取ったエネルギーを高度10数kmの対流圏上部まで運び上げることが必要となり、入道雲(積雲対流)がその役割を担っている。このため積雲対流活動は赤道域でことのほか活発となる。

一方、赤道域は海陸の分布とそれに伴う海面水温の東西の差違が大きい。活発な積雲対流活動域が東西に非一様に分布している。この東西分布は赤道大気の大規模な東西循環と結び付き、エルニーニョやラニーニャなど地球規模の気候変動の要因となっている。特に「海大陸」(Maritime Continent)と呼ばれる赤道インドネシア域では、地球上で最も暖かい海水が供給する豊富な水蒸気により地球上で最も強大な積雲対流が育まれている。

また、赤道域の積雲対流は多重構造になっていることが知られている。つまり個々には数kmスケールの積乱雲が、数10kmスケールの降水帯や100kmスケールの雲団を組織する。それらはさらに1,000kmスケールの大気擾乱と結びついた数日周期の大規模雲システム、そして10,000kmスケールの大気擾乱を伴う30～60日周期の季節内振動を組織している。

赤道大気は実に多様な周期とスケールの“鼓動”を発しているのである。そしてその活動に伴って大小各種規模の大気「波動」が生成され、それらの鼓動がまた広く大気中を縦横に伝搬して行く。

## 2. 上下につながる赤道大気

地球大気はその鉛直温度分布の違いに応じて、対流圏(地表～高度15km)、成層圏(高度15km～50km)、中間圏(同50km～90km)、及び熱圏(同90km以上)に分類される(図1)。このうち成層圏と中間圏を中層大気と総称し、一方電離した熱圏を超高層大気(あるいは電離圏)と呼ぶことも多い。中層・超高層大気は乾き切っており、もはや雲や雨など日常的な天気変化は起こらない。しかしそこは決して静寂の世界ではなく、風や温度が激しく揺らいでいる。その主役となっているのが上述の積雲対流により生成される各種の大気波動である。大気は上ほど軽いので、下層の発する小さな鼓動も上層では極めて大きな波動となってこだまする。これらの波動は南北・東西方向に伝搬し、最終的に赤道域のエネルギーを広く全地球に輸送する。いわば赤道大気は地球規模の気候変動をもたらす“心臓”の役割を担っているのである。

一般に大気波動は運動量やエネルギーを運ぶが、波動が減衰しないで伝わっている限り背景大気に何の変化も及ぼさない。しかしこの定常性が破れると蓄えられた運動量やエネルギーが放出され、背景大気の状態を変化させる。つまり下層大気起源の、もともと小さな振幅であった大気波動が上層大気の状態をも変化させる働きをする。これにより平均風や

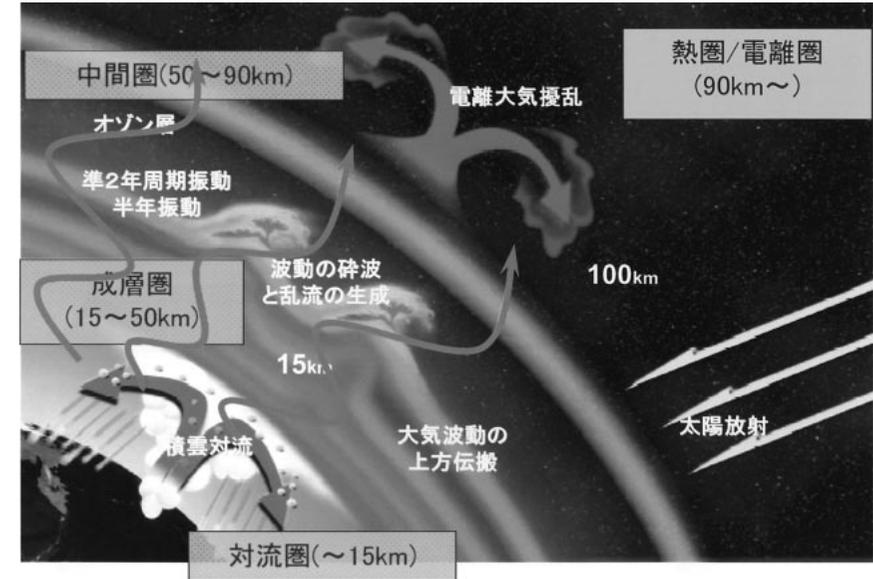


図1 赤道大気中の諸現象

温度分布・物質輸送も影響を受ける。このタイプの大気上下間の連動(結合)が、赤道域で特に顕著に現れる周期26ヵ月や6ヵ月の季節によらない気候変動(それぞれ成層圏準二年周期振動、及び中間圏半年周期振動と呼ばれる)を地球大気の隅々まで引き起こす要因となっているのである。

これらの大気波動は少なくとも下部熱圏までは到達することが知られている。赤道域では地球磁力線が重力と直交するという特殊な状況下にあることから、熱圏(超高層)の電離した大気は激しい擾乱を受けており、そのためGPSや衛星通信などが大きな影響を受けることが知られている。実はこれらの擾乱の生成にも大気波動が重要な鍵を握っているらしいことが、近年の研究で次々と明らかにされている。

## 3. 私達の挑戦

しかしながら赤道大気の観測研究は、現在でもまだ極めて不十分で、未解決の問題が数多く残されている。その中で最も根本的なものが、各種大気波動や電離圏擾乱の特性と生成機構である。それらの多くも多重構造をしているものと想定されるが、従来の観測には個々の小擾乱を分解し、かつ組織化した結果の全体を俯瞰し得るものはなかった。

私達は2001年3月、赤道直下に位置するインドネシア共和国西スマトラ州コトタバン(南緯0.20°, 東経100.32°)に『赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)』を建設した。構想から実に15年の歳月を経て漸く完成したものである。EARは、私達の独自技術で開発した大型レーダーで、大気からの極めて微弱な信号(エコー)を捉え、上層大気の時速と波動、並びに電離圏擾乱などを高精度かつ連続に観測する。EARは文字通り“耳”の意であるが、そこには赤道大気が発する鼓動を“耳を澄まして聴きたい”という私達の長年の熱い思いが込められている。

私達は、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究(2001～2006年度)により、(1)EARを中心に各種レーダー、光学、衛星、及び気象ゾンデなどの観測を有機的・組織的に行うことにより、上述の観測的制約を克服し、(2)謎の多かった赤道大気の振動・波動や擾乱の実態と生成機構を明らかにすることを目指した。その主な“舞台”は赤道インドネシア域EARサイトである。そこが赤道大気の上層結合を調べる上で最も重要な鍵を握る地域であることは上述の議論からも自明であろう。個々の観測対象

としては古典的な気象学や超高層物理学の範疇に属するものも含むが、それらを下層から超高層に至る全高度域の大気上下結合という視点で捉えようとするところがユニークである。私達はお来場の皆様に、本

シンポジウムを通して赤道大気の下から上までしっかりとつながっている姿をはっきりと見て頂けるのではないかと、秘かに、しかし強く期待している。

1日目 9月20日(木) 13:50—15:20

## 【セッション1】 電波と光で赤道大気を測る

座長：大塚 雄一

赤道大気レーダーを使って大気波動を診る

山本 衛

赤道大気解明に役立つレーザーレーダー

長澤 親生

深尾 昌一郎 (ふかお・しょういちろう)

京都大学名誉教授。東海大学総合科学技術研究所教授。京都大学工学博士。

1967年京都大学工学部電子工学科卒業。同大学院修士課程修了。

京都大学超高層電波研究センター助教授、同教授、同センター長、生存圏研究所教授を経て、2007年より現職。

専門は大気科学、特にレーダー大気物理学。80年代前半、京都大学が地球大気の運動や電離大気の構造などの観測が可能な『MUレーダー』を建設した際、技術開発の中心となって活躍した。各種大気レーダーの開発と、それをういた中層・超高層大気のリモートセンシングに関心をもつ。

06年大川出版賞、文部科学大臣表彰科学技術賞、04年志田林三郎賞、02年島津賞、94年日経地球環境技術賞など計7賞受賞。

共著に『気象と大気のリレーリモートセンシング』(深尾昌一郎・濱津享助著；491頁、京都大学学術出版会、2005年)などがある。



# 赤道大気レーダーを使って大気波動を診る

山本 衛 (京都大学生存圏研究所)

## 1. はじめに

2001年3月、インドネシアの赤道直下に赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar、略称EAR) が完成しました (図1) [1]。EARは、直径110mに及ぶ円形敷地に八木アンテナ560本を配列した巨大なアンテナシステムを持ち、強力な電波を大気にあてて遠隔観測する装置です。京都大学生存圏研究所は、インドネシア航空宇宙庁 (略称LAPAN) と密接に協力してEARを完成し、今日まで、6年間以上にわたって長期連続観測を続けてきました。この講演では、EARの観測原理、レーダーシステムの特徴を説明し、研究成果の一端を紹介します。

## 2. 赤道大気レーダーとは

レーダーというと、飛行機などを標的にするという印象があるかもしれませんが、「大気レーダー」は大気の動きを観測します。熱い地面の上の「かげろう」

を想像してください。空気の強い揺らぎによって、通過する光 (=電磁波と基本的に同じ性質があります) の伝搬方向が曲がる (屈折する) ため、景色が揺らいで見えます。透明に見える大気 (空気) には、これに似た揺らぎがいたるところにあります。電波を当てると、ごく一部が反射・散乱して元の方向に戻って来ます。これが大気乱流に起因するエコーであり、「大気レーダー」の標的のです。

EARの巨大なアンテナは、観測方向を絞り込み高い感度を得るためにあります。それぞれのアンテナから電子制御されて位相の揃った電波を放射することで、電波が発射される方向を特定の向きに集中することができます。さらに方向をすばやく変えることができます。直径110mのパラボラアンテナと同等の働きを電子的に実現しています。このためEARでは、各アンテナの基部に小型の半導体送受信器を備えた、

分散型のシステムをとっています。送受信される電波の波長は約6.4m (周波数47MHz) であり、VHFテレビの波長の2~3倍です。

EARから上空に発射された電波は大気中の揺らぎによって散乱され、微弱なエコーが元のアンテナに戻って来ます。電波は光速で伝わるので、送信から受信までの時間

差から観測点までの距離が決めます。大気乱流は風とともに流されますから、エコーの周波数はドップラー変移を受け、見かけの風速を知ることができます。風は南北・東西・上下の3成分を持ちますから、3以上のアンテナ方向のデータを組み合わせます。高度約20km以下の対流圏・下部成層圏の高度域では、このようにして観測が行われています。EARでは、高度100km以上に分布する電離圏を観測することも可能です。

## 3. 赤道大気の運営と研究成果

EARは、2001年6月から今日まで、長期連続観測を実施してきました。図2に観測状況を示します。2001年末から2ヶ月ほどの休止は、大きな雷による初めての故障でした。様々な問題に対して対策していった結果、徐々に連続性が良くなりました。EARと京都大学を直結する衛星回線を開設し、観測状況のリアルタイム監視とデータの転送が可能になっています。取得された膨大な観測データは、国内・国外の研究者によって広く利用されています。

我々は大気中にある様々な「波」の研究を進めてきました。ひとつの例としては、赤道ケルビン波が砕波し大気乱流が生成する様子を明らかにした研究があります [2]。また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ました [3]。これらは、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

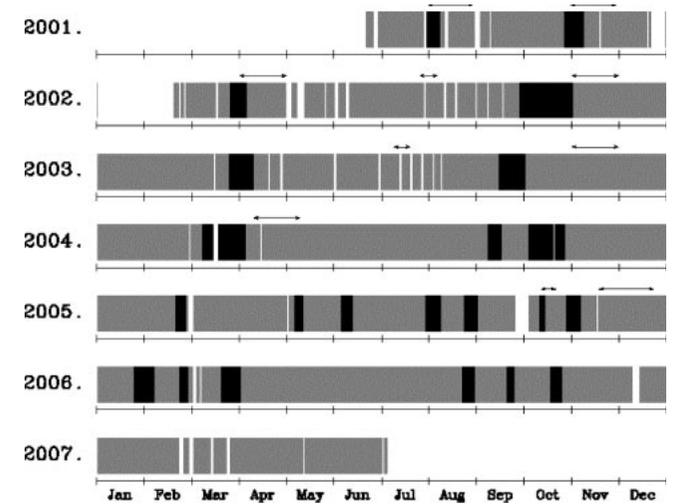


図2 赤道大気レーダーの観測状況。灰色あるいは黒色の期間に観測をしてきた。矢印はラジオゾンデ観測期間をあらわす

観測的にはじめて示したものです。一方電離圏に関しては、EARの多ビーム観測から、赤道スプレッドF現象の時変動と空間構造を分離観測することに成功し [4]、発生時刻が、EAR上空から磁気赤道にかけてのF領域高度の日没近くの時間帯に集中することを明らかにしました [5]。また空間スケール500~1000kmの東西波状構造が存在することを見出すなど [6]、多くの研究成果を挙げています。

### 参考文献

- [1] Fukao, S., *et al.*, *Radio Sci.*, **38**, 1053, 2003.
- [2] Fujiwara, M., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1171, 2003.
- [3] Yamamoto, M. K., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1476, 2003.
- [4] Fukao, S., *et al.*, *J. Geophys. Res.*, **109**, A02304, 2004.
- [5] Yokoyama, T., *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, **31**(24), L24804, 2004.
- [6] Fukao, S., *et al.*, *Ann. Geophys.*, **24**, 1411-1418, 2006.

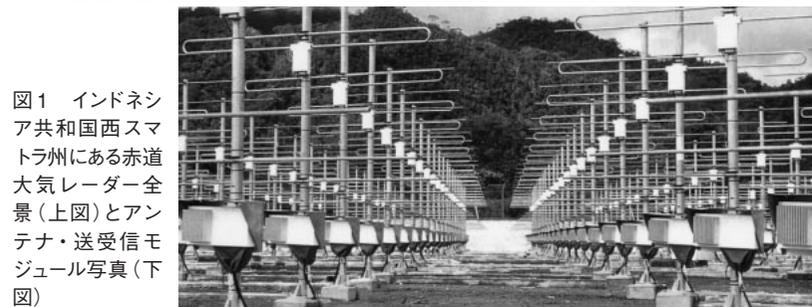


図1 インドネシア共和国西スマトラ州にある赤道大気レーダー全景 (上図) とアンテナ・送受信モジュール写真 (下図)

山本 衛 (やまもと・まもる)

京都大学生存圏研究所教授。京都大学工学博士。

1983年京都大学工学部電子工学科卒業。88年同大学大学院工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了。

京都大学超高層電波研究センター助手、助教授を経て、2007年より現職。(生存圏研究所は2004年の改組により発足した)

専門はレーダー大気物理学、超高層大気力学。現在は電離圏の擾乱現象に興味をもつ。

96年地球電磁気・地球惑星圏学会大林奨励賞、07年地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞受賞。



# 赤道大気解明に役立つレーザーレーダー

長澤 親生 (首都大学東京大学院システムデザイン研究科)

レーザーレーダーは、レーザーを用いたレーダーの呼称であるが、今日ではライダー (LIDAR-Light Detection And Ranging) と呼ばれることが多い。大気中にレーザーを照射すると大気中の成分による各種の散乱や吸収が発生する。レーザーレーダーでは、これらの散乱・吸収現象を利用することにより、大気中のエアロゾルや微量成分の測定だけでなく、風・気温などの空間分布測定を行うことも可能である。

今日では、レーザーレーダーは航空機や衛星にも搭載され多様な大気観測にも用いられているが、これを用いた赤道域での大規模な観測はこれまで皆無であった。



図1 赤道レーザーレーダー設置場所の写真

CPEA プロジェクトでは、赤道直下にレーザーレーダーサイトを建設し、世界的にも類を見ない規模の多種類のレーザーレーダーを設置することにより、地表付近から高度 100 km 近くの下部熱圏までの広い高度領域での大気観測に成功した。

## レーザーレーダーのしくみ

レーザーが大気成分やエアロゾルなどに散乱される過程は、レーザーの波長と散乱対象物の大小関係によりミー散乱とレイリー散乱に大別される。また、大気成分に特有な波長のレーザーを照射すると吸収現象も発生する。さらに、強いレーザー光を用いることによりラマン散乱のような非弾性的な散乱現象も起きる。吸収効果と同様にラマン散乱は、個別の大気成分の定量化に用いられる。この他、特有な波長のレーザーを照射すると強い蛍光を発生する共鳴散乱現象を利用することにより非常に遠方の微量成分を検出することも可能である。レーザーレーダーは、パルス光を発射した時刻を起点として、散乱光を受信するまでの時間を計測することにより距離分解能を得

表1 赤道レーザーレーダーの諸元

測定対象	レーザー波長	レーザーエネルギー	望遠鏡口径
成層圏・中間圏温度	532nm	500mJ	45cm x 4
水蒸気混合比	532nm	500mJ	35cm
ナトリウム原子密度	589nm	50mJ	45cm x 1
鉄原子密度	372nm	20mJ	45cm x 3
中間圏界面温度	372 /374nm	20mJ	45cm x 3
対流圏エアロゾルと雲	532nm	10mJ	20cm

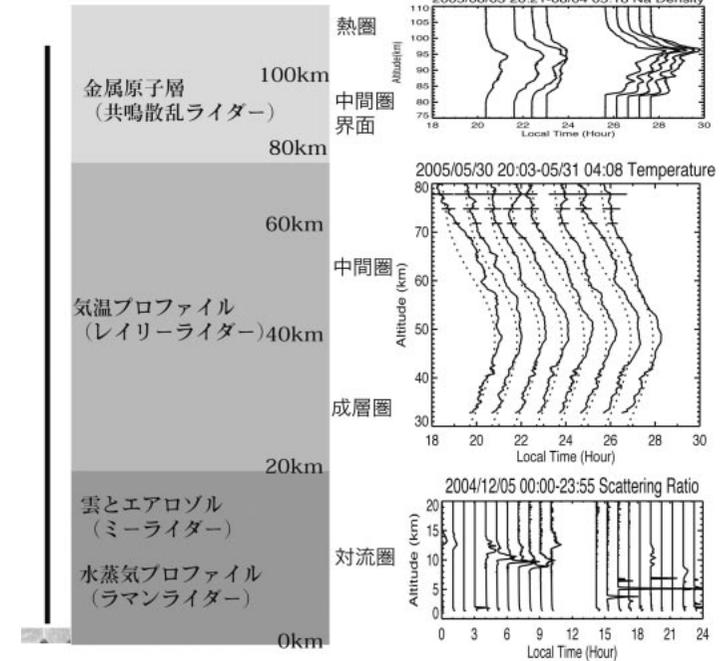


図2 赤道レーザーレーダーの観測高度

ることができる。

## 赤道直下に設置したレーザーレーダー

赤道直下のコトタバ (0° S, 100° E) に図1のようなレーザーレーダーサイトを建設した。測定対象とレーザーレーダーの諸元を表1に、またこれら観測高度領域と観測例を図2に示す。基本的にレーザーレーダーの操作は、日本からインターネットを通して遠隔制御を行った。

## レーザーレーダーでみた赤道大気

赤道大気レーザーレーダー観測から得られた、いくつかの興味深い成果を述べる。

赤道上空の熱帯対流圏上部には、日常的に巻雲が発生し発生高度には季節変動が存在することが分かった。巻雲は地球温暖化の議論において重要な役割をなす放射収支に大きな影響を及ぼすことが知られている。

火山噴火などにより成層圏へ注入されたエアロゾルは、成層圏に長期間滞留することにより太陽放射を遮蔽する効果がある。赤道成層圏エアロゾルは、中緯度の成層圏エアロゾルより高い高度の40km付近

まで存在することが判明した。その赤道成層圏エアロゾルの最高高度は、成層圏準2年振動に関連した動きをすることが分かった。赤道成層圏エアロゾルは、高緯度へ移送されることが知られているが、その挙動には未解明な部分も多い。

また、赤道において対流圏エアロゾルと成層圏エアロゾルは、中高緯度での観測と異なり連続的に存在することがたびたび観測された。これは中高緯度域では物質交換が難しいとされている対流圏界面において、赤道域では対流圏エアロゾルが容易に成層圏へ注入されることを示唆していると思われる。

レーザーレーダーによる中間圏気温分布の観測から、大気重力波の伝搬状況や高度70~80km付近に赤道上空に特有な気温の逆転層が頻発していることを突き止めた。

中間圏界面付近には、流星起源と考えられる金属原子層が存在する。中高緯度のレーザーレーダー観測で時折、通常の金属層に極めて狭い金属層 (スポラディック金属層) が重畳される現象が観測されてきた。これは中高緯度では、中間圏界面の風向の変

## 【招待講演1】

座長：深尾 昌一郎

る高度に集まる金属イオンとの関連で説明されてきたが、赤道域でのレーザーレーダーの観測結果は、赤道域のスホラディック金属層は中高緯度と異なる成因を示唆した。

このように、レーザーレーダーにより赤道大気に関連する多くの新しい現象が観測され、赤道においてもレーザーレーダーは、極めて有効な大気観測機器であることが実証された。

インド洋に現れる大気海洋相互作用と地球環境のかかわり

山形 俊男

長澤 親生 (ながさわ・ちかお)

首都大学東京大学院システムデザイン研究科・教授。理学博士。

1974年九州大学理学部物理学科卒業。同大学大学院理学研究科物理学専攻博士課程修了。東京都立大学工学部助教授、教授を経て、2005年より現職。

専門は光リモートセンシング。特に大気中の微量成分や気象要素のレーザーレーダー(ライダー)計測に興味をもつ。共著に『光エレクトロニクス』(オーム社、2004年)などがある。



# インド洋に現れる大気海洋相互作用と地球環境のかかわり

山形 俊男 (東京大学大学院理学系研究科)

## 1. 気候変動の起源

地球の気候システムは太陽から短波として受ける熱エネルギーを長波の形で宇宙空間に放出し、全体として熱平衡の状態にある。緯度別に見るならば年間を通して低緯度では過剰な太陽エネルギーの供給を受け、高緯度では過剰に宇宙空間に熱エネルギーを放出しているため、これを補償すべく大気と海洋の循環が低緯度から高緯度に熱を運んでいる。地軸の傾きは太陽からの熱エネルギーの供給の緯度分布に

季節変化を与えているが、これは水の相変化による潜熱放出を伴う大気海洋結合システムの正のフィードバック機構により増幅され、大気と海洋の循環に強い季節性をもたらす。海洋や海水、氷床の熱容量は大きく、熱力学的には季節性は単年度では地域的に解消せず、残差が残るために、これを解消すべく大気海洋システムには経年変動やより長期的の変動が生まれる。こうした変動のなかで最も著しいものが熱帯太平洋の鼓動というべきエルニーニョ現象である。

## 2. インド洋にもエルニーニョ

私たちは1999年にインド洋にもエルニーニョ現象に似た大気海洋相互作用現象が存在することを見だし、これを(正の)ダイポールモード現象と命名した(図1)。この現象では、まず5月頃に南東の貿易風がインド洋東南部で異常に強まるために、ジャワ沖に冷たい海水が湧いてくる。また強い風は海水の蒸発を活発化するので、さらに海面水温を下げる。赤道を南半球から北西方向によぎる南半球からの南東貿易風は赤道に沿う方向の成分を持つために暖水を西方に運ぶ。同時に暖水を赤道から離れた方向に吹き払うために、ブーメランのような形の海面水温異常のパターンを生む。こうして東西に海水温の傾度が生じ、これに呼応して海面気圧差が生じるために東風成分がますます強まるのである。

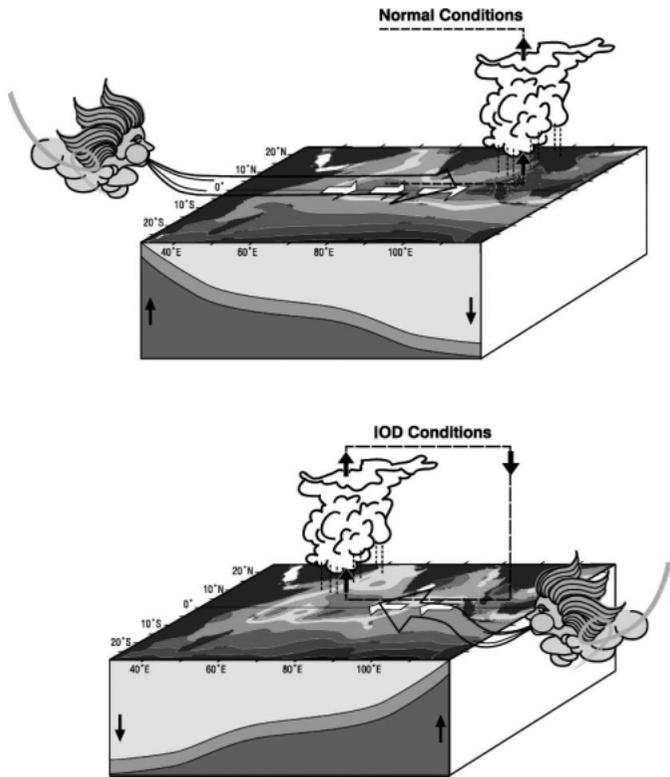


図1 負のダイポールモード現象(上)と正のダイポールモード現象(下)の模式図

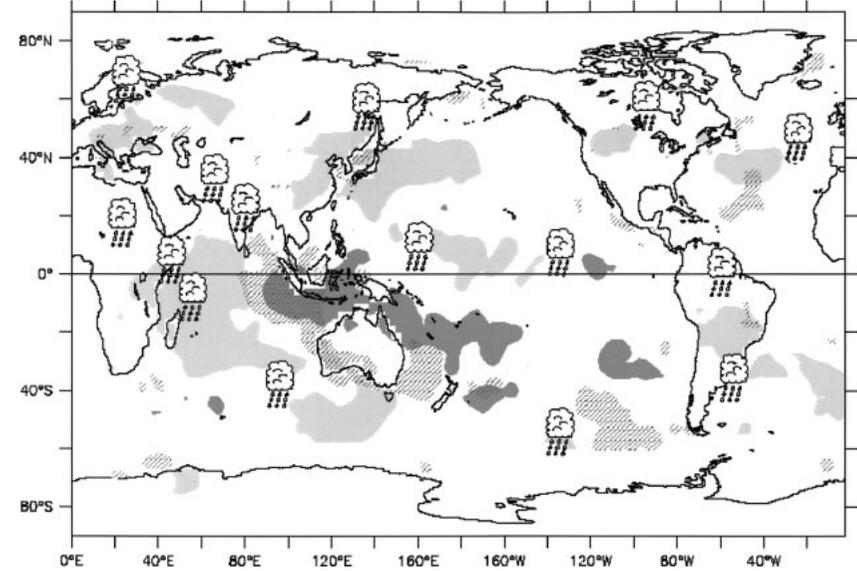


図2 正のダイポールモード現象が世界各地に及ぼす影響

## 3. ダイポールモード現象と世界の異常気象

東インド洋で供給された水蒸気はケニア周辺で収束し上昇して、ダイポールモード現象の最盛期である10月頃に赤道域東アフリカに異常な大雨を降らせる(図2)。一方、北方に運ばれる水蒸気はヒマラヤやインドシナの山岳地帯で上昇し、特に夏のモンスーンの季節にインド北部周辺から東南アジア地域にも大雨をもたらす。ここで上昇した大気の一部は大気の波動(長いロスビー波)として西進し、地中海からアフリカ北部周辺で下降して、下層の高気圧を強化し、ヨーロッパに猛暑や干ばつを引き起こすこともわかってきた。この南アジアと地中海周辺を結ぶプロセスは「**モンスーン-砂漠>メカニズム**」と呼ばれている。アジアの夏のモンスーンが活発化するとヨーロッパは乾燥するという興味深い関係が明らかになりつつある。インド北部や東南アジアに大雨をもたらした大気の一部はさらに北上して中国や日本付近で降下し、極東地域に猛暑や干ばつを引き起こす。西日本の猛暑や早魃は正のダイポールモード現象と密接に関係しているようである。

現在、世界の海洋関係者はEOS/GEOSの枠組みのなかでダイポールモード現象とそのテレコネクショ

ンの予測を目指して、インド洋の熱帯域に係留ブイのネットワークを展開している。私たちのグループでは2006年のダイポールモード現象の発生を2005年11月の時点で予測していたが、インド洋の観測システムの充実はさらに正確な長期予測を可能にするであろう。

## 4. 地球温暖化と気候変動現象

この100年の間に地上気温は10年あたりで0.06度の割合で上昇した。注目すべきことは、1976年以降にこの上昇率が2倍に増大していることである。これが昨今の地球温暖化の警鐘につながっている。この1976年は気候のレジームシフトが起きた年としてよく知られており、この年を境に熱帯太平洋は全体としてエルニーニョ的になり、また大型のエルニーニョ現象が頻発するようになった。インド洋ではダイポールモード現象が頻発するようになった。最近の地上気温の上昇はエルニーニョ的な現象やダイポールモード現象の頻発による大気への熱放出によってもある程度説明できる。熱帯域太平洋の島嶼における水位上昇も直接的にはエルニーニョ的な現象の頻発によるものである。

一方で、地球温暖化傾向によりエルニーニョ的な

現象（エルニーニョもどき現象も含む）やダイポールモード現象が頻発するようになったのではないかと考えることもできる。興味深いことは温暖化気体を増やした気候モデルシミュレーションに熱帯域太平洋は

多年（永年）エルニーニョ現象とも言うべき状況が出現していることである。温暖化現象とは熱帯海洋に巨大な湯たんぽを抱えることなのかもしれない。

1日目 9月20日（木） 16:15—17:35

## 【セッション2】 赤道大気中の波

座長：古津 年章

赤道大気の長周期変動

津田 敏隆

並々ならぬ波の威力—上空に伝わる大気の波の主役

中村 卓司

山形 俊男（やまがた・としお）

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻教授。理学博士。

1971年東京大学理学部地球物理学科卒業。同大学大学院理学系研究科地球物理学専攻博士課程中退。

九州大学応用力学研究所助手、助教授、東京大学理学部地球惑星物理学科助教授を経て、94年より現職。

76年米国ウッズホール海洋研究所GFDフェロー、81年日本海洋学会岡田賞、87年日本気象学会賞、89年米国ウッズホール海洋研究所パー・シュタインバッハ学者、97年日本海洋学会賞、2004年米国気象学会スベルドラップ金メダル賞、同学会フェロー、04年トムソン・サイエンティフィック・リサーチフロント・アワード、05年紫綬褒章。共著に岩波講座地球惑星科学『気候変動論』（岩波書店、1996年）などがある。



古津 年章（こづ・としあき）

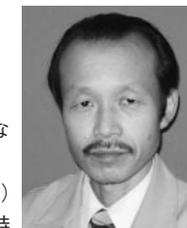
島根大学総合理工学部教授。博士（工学）。

1977年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。

郵政省電波研究所（現・情報通信研究機構）、宇宙開発事業団（現・宇宙航空研究開発機構）などに勤務後、99年より現職。

専門はマイクロ波リモートセンシング、特に降雨観測技術の研究。熱帯降雨観測衛星（TRMM）搭載降雨レーダおよびデータ処理アルゴリズムの開発に従事。文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「赤道大気上下結合」では、赤道域対流圏研究課題のとりまとめを務めた。現在は水域環境の衛星リモートセンシングにも関心をもつ。

99年第31回市村学術貢献賞受賞。共著に『Spaceborne Weather Radar』（Artech House、1990）、分担執筆に『地球環境計測』（オーム社、1999年）などがある。



# 赤道大気の長周期変動

津田 敏隆 (京大生存圏研究所)

## 1. 赤道大気研究の重要性

赤道域では強い太陽放射を駆動源として活発に積雲対流が生成されている。この大気擾乱はさらに多種多様な大気波動を励起する。大気波動の一部は水平に伝播すると同時に上方にも伝わり、励起源から遠く離れた領域に力学的エネルギーと運動量を輸送し再配分している。

この赤道大気の動態を解明するために、我々は1990年にインドネシアにおいて気球やレーダーを用いた赤道大気の現地観測を開始し、足掛け18年にわたって国際共同研究を継続している。観測対象とする高度領域は下から対流圏(高度0~15km)、成層圏(15~50km)および中間圏・下部熱圏(50~150km) [MLT領域とも呼ばれる] に広がっている。

我々の研究により、大気波動を介して異なる高度の大気層間が密接に関係していることが分かった。この講演では、その例として、対流圏の影響が高度100km付近のMLT領域にも及んでいる事例、および、地球温暖化の影響とも思える長期トレンドがMLT領域の風系に認められたことを報告する。

## 2. インドネシアでの長期観測

1990年に東ジャワのスラバヤ郊外にあるインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)の観測所で気球観測(ラジゾンデ)を行ったのを嚆矢に、様々な観測機器を持ち込んで赤道大気の国際協同観測を進めてきた。首都ジャカルタ郊外のサイエンスパーク(PUSPIPTEK、6S, 107E)に1992年に流星レーダーと境界層レーダーを設置し、さらに、LAPANおよび豪州・アデレード大学と共同で1995年に西カリマンタンのポン

チアナ(0N, 109E)で中波帯(MF)レーダーの観測を開始した。その後、2001年には西スマトラのコクタバン(100E, 0S)に赤道大気レーダーが建設され、2台目の流星レーダーも2002年に設置された。続いて、ジャワ島南岸のパムンプク(7.5S, 107.5E)で2004年にMFレーダー観測を開始した。この間に何度か気球キャンペーン観測を行った。こうして地上付近から高度約100kmまでの赤道大気の振舞いを観測してきた。

## 3. 背景風の長周期振動と大気波動

大気波動による風速・気温変動には数分から数日、数十日にもおよぶ幅広い周期成分が含まれている。例えば、対流圏における対流活動に伴い、周期数日(5~8日)で東進するケルビン波と西進するロスビー波が同時に生成される。また、ケルビン波には周期が10~20日で赤道に沿って経度波数1~2で東向きに伝播する成分もあり、特に対流圏界面付近(高度約15km)で振幅が大きくなり温度構造を大きく変化させる。これらのように周期がほぼ特定される波動以外に、数分から数日までの周期に連続スペクトルとして現れる波動として大気重力波があり、赤道域では積雲対流により励起される。

一方、赤道域の東西平均風は成層圏下部では準2年(QBOと呼ばれる)、成層圏上部およびMLT領域では半年周期振動(SAOと呼ばれる)が現れる特徴がある。これらの風系の生成・維持には大気波動と平均風との相互作用が重要であり、特に大気波動による力学的加速効果が重視されている。

我々の流星・MFレーダー観測により、MLT高度において東西風SAOの西向き最大風が2年ごとに急増することが明らかになった。しかし、この2年間隔が1997~2000年には3年に延びるという不規則な事例が起こった。同時期に成層圏QBOの間隔も約3年に延びており、相互の関係が示唆された。MLT領域のSAOは対流圏起源の大気波動が駆動していると考えられるが、その大気波動がMLT領域に到達するまでに通過する成層圏の背景風(QBO・SAO)がある一定の条件を満たす場合に波動によるエネルギー輸送が大きくなるようである。

## 4. 高度100kmまで及ぶエルニーニョの影響

大気波動の中には、1日周期およびその高調波である半日周期で規則正しく風速が変動する現象があり、大気潮汐と呼ばれている。海洋潮汐が月の引力で励起されるのに対して大気潮汐は主に太陽加熱で生成される。つまり、対流圏の水蒸気が太陽放射を吸収して発熱することで大気潮汐が起こる。赤道域の水蒸気分布には大きな経度依存性があるため、大気潮汐の励起にも経度依存性が現れる。例えば、エルニーニョなどにより太平洋域の水蒸気量分布に異常があると、大気潮汐も変調を受けると考えられる。

ジャカルタでの流星レーダーおよびインドのティル

ネルベリ(8.7N, 77.8E)でのMFレーダー観測から、低緯度MLT領域でもっとも顕著な1日周期大気潮汐波の年々変動を明らかにした。その結果、MLT領域の1日潮汐の南北風振幅の年々変動と、経度120度付近の積雲分布(OLR)との間に強い対応関係があり、特に1997年のエルニーニョの影響が明らかに認められた。大気潮汐が生成される対流圏において、エルニーニョによって水蒸気の水平分布に不規則変動が加わったことが原因と考えられる。

一方、MLT高度では夏半球から冬半球に向かう1年周期で向きが逆転する子午面循環がある。これは赤道対流圏を起源とする大気を中緯度さらに極域に輸送する役割を果たしており、例えばオゾンホールにかかわる微量成分の分布に大きな影響を与える。この南北風について1993~2006年に得られた長期間レーダー観測結果を解析したところ、2000~2003年にかけて南北風が非常に弱くなっていた。また、特に、夏季の南北風に10年以上時間スケールの長期トレンドが認められた。これはグローバルな地球温暖化の影響がMLT高度(100km)まで及んでいることを示唆している。

今後とも赤道域での現地観測を続け、未解明の大気現象の解明を目指したい。

津田 敏隆 (つだ・としたか)

京大生存圏研究所教授。京都大学工学博士。

1975年京都大学工学部電子工学科卒業、77年同大学大学院工学研究科修士課程修了、82年同大学工学博士(論文)。

77年京都大学工学部助手、87年同大学超高層電波研究センター助教授、95年同教授を経て、04年同大生存圏研究所教授、開放型研究推進部・部長。05年同・副所長。

専門は電波・光を用いた大気計測で、力学過程のレーダー観測、GPS電波による大気観測を推進。90年にインドネシアで現地観測を開始し、赤道大気のさまざまな変動特性を解明。

85年地球電磁気・地球惑星圏学会・田中館賞、94年日本気象学会・堀内賞、03年日本気象学会・学会賞を受賞。日本気象学会・理事、地球電磁気・地球惑星圏学会・副会長、日本学術会議・連携会員(地球惑星科学)。国際大気気象学協会(IAMAS)・中層大気分科会・幹事、国際太陽地球系物理学委員会(SCOSTEP)・理事などを歴任。



# 並々ならぬ波の威力 上空に伝わる大気の流れの役割

中村 卓司 (京都大学生存圏研究所)

## 1. はじめに

地球大気は重力による密度成層のために上空ほどどんどん希薄になるとともに層状の構造をしています。対流で雲が起こったり、雷雲・降雨といった気象現象は高度10～15kmまでの対流圏で起こります。その上の成層圏(高度50km付近まで)ではオゾン層での紫外線吸収で加熱され、上層ほど高温になっています。さらにその上の中間圏(高度85～100kmまで)では上層ほど低温になります。中間圏の上端(中間圏界面)では大気の密度は、地上よりも10の6乗から7乗ほど小さくなっています。さらに上層の熱圏では、極紫外線(EUV)の吸収で上層ほど温度が上がります。なお、これらの加熱は同時に太陽放射中のエネルギーの大きな短波長成分が地上に届くことを防いでおり、我々を含む地上の生物を守る働きをしている点が重要です。

## 2. 上空に伝わる大気の流れ

大気は上空ほど極めて薄くなるので、大気の振動すなわち大気の流れ(大気波動)が上空に伝わると、波のエネルギーが保存される下では、下層での微小な振動が、極めて大きな振幅をもつ振動になります。大気の流れは、温度、密度、圧力、風速などの変動として観測されますが、たとえば地上で0.1度の温度変動、0.1m/sの風速変動が中間圏界面あたりでは、100度、あるいは100m/sといった巨大な変動を作る波になります。振幅が大きくなりすぎた波は崩れて(砕波)、そのエネルギーや運動量を回りの大気に放出します。すなわち、砕波により上空の大気を加熱したり、あるいは一方向に推す(加速)ような働きを

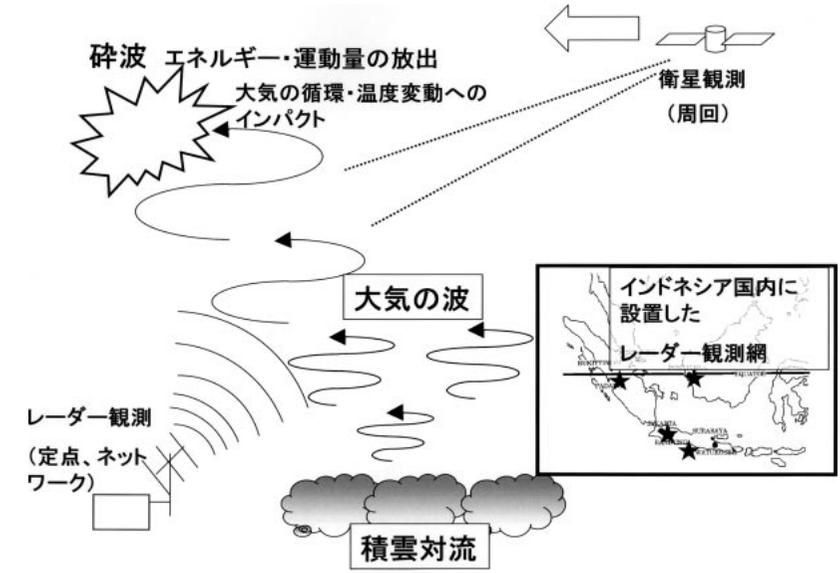
します。このような波の働きによってはるか上空にいたる地球大気の大循環や温度構造までが支配されています。

## 3. 赤道域での大気波動

赤道域では強い太陽放射による活発な対流、さらにコリオリ力が弱いのため上方に伝搬できる波の周波数が広いことなどのために中高緯度にくらべて多くの種類の大気波動が存在すると考えられ、また観測されてきました。周期が5分から数日間までの大気重力波、太陽熱による加熱を励起源とする24時間周期、12時間周期の大気潮汐波、周期3日、7日、15日などのケルビン波、準2日周期波、西向きに伝搬するロスビー波などが挙げられます。中間圏の上部では、流星レーダー、中波レーダーなどのレーダー観測でこれらの種々の波動の多くが検出されることがわかってきました。

## 4. 地上リモートセンシング、人工衛星による複合的な観測

これらの波動のうち赤道大気の上下結合に深く関わる波動すなわち、下から上まで伝搬してエネルギーや運動量の運び屋になる波動はどのような役割をしているか気になります。すなわち波の励起、伝搬、砕波を総合的に観測することが必要になります。ところが地面から高度100kmまでをもれなく観測する手段はありません。上空80～100kmの大気はレーダー観測で詳しく観測されてきました。地表から対流圏・成層圏下部までは気球(ラジオゾンデ)をはじめとする気象観測が世界の多くの地点で行なわれています。とくに、静止衛星からの赤外画像からは、対流の指



地上観測と衛星観測による大気の流れ(大気波動)の観測の概念図

標である長波放射(OLR)と呼ばれる赤外放射量が毎時間全球で観測されており、さまざまな波を励起する対流の様子を知ることができます。しかしながら成層圏上部から中間圏にかけての観測は極めて限られています。我々は米国NASAのTIMED衛星が上空600kmを周回しながら観測する赤外線による温度観測など低軌道衛星のデータを用いることで、高度20kmから120kmまでの温度データを用いて、下層および上層の衛星観測・気象観測、レーダー観測と複合的に解析することで対流圏から成層圏・中間圏を経て超高層大気に伝搬する波の全貌を捉えることを試みました。

## 5. 下から上まで伝わる波

一つの例として、上空80～100kmにおいてレーダー観測で顕著に観測される5日～8日の周期の波を取り上げます。

赤道大気上下結合(CPEA)のプロジェクトでインドネシアに設置した3つのレーダー観測、それにインドにあるレーダーのデータを見るとこの波は西向きに伝わるのが分かります。しかし、気球観測で見られる高度30km以下では、同じ周期の波が観測されませんが東向きに伝わる波が顕著です。これはどう説明で

きるのでしょうか? この両者の間の高度を埋めるTIMED衛星観測を見ると、成層圏の中ほどを境に、その下では東向きに伝わる波が、その上では西向きに伝わる波が顕著になることがわかります。静止衛星からのOLR観測を解析すると、対流圏内の対流活動に同様の周期の変動があり、これらは西向きと東向き対応する成分があることがわかりました。すなわち、赤道域の対流活動が源になって東西両方向に進む波が作られ、これらが上方に伝搬する際に減衰あるいは増大を受けて波の役割が高度とともに入れ替わることが見いだされました。

中間圏から熱圏にかけては1日周期、半日周期の波(大気潮汐波)が最も顕著になりますが、インドネシアでのレーダー観測では中緯度とは極めて異なる季節変化などの振る舞いを見せています。これらも赤道域の対流活動に起因するものが多く存在することが見出されてきており、地球大気の大循環は赤道域を源にする種々の波によって大きく変動していることが明らかになってきました。

## 6. おわりに

以上のように複数の観測手段で観測したデータをつき合わせて解析することは、複雑な大気の変動、上

下結合を全球的に知る上で極めて重要です。温暖化や地球環境変動が気になる今、国際協力観測体制のもとに我々を包む地球大気の変動の詳細を解明して行きたいものです。

2日目 9月21日(金) 10:00—10:40

## 【招待講演2】

座長：小川 忠彦

地球大気物質輸送と環境変動  
中島 映至

中村 卓司 (なかむら・たくじ)

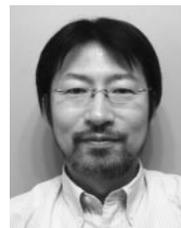
京都大学生存圏研究所准教授。博士(工学)。

1984年京都大学工学部電子工学科卒業。同大学大学院工学研究科修士課程修了。

京都大学超高層電波研究センター助手、助教授を経て、2004年より現職。

専門は地球大気計測。超高層物理学。光・電波を用いた種々のリモートセンシングとその開発・応用に関心をもつ。

97年地球電磁気・地球惑星圏学会大林奨励賞受賞。著書(監修)に『流星電波観測ガイドブック』(CQ出版社、2002年)がある。



# 地球大気物質輸送と環境変動

中島 映至 (東京大学気候システム研究センター)

本論文では、地球気候の形成に大きな影響を与える大気中の物質輸送現象のうち、大気上下結合に深く関わるいくつかについて論じる。特に、雲が引き起こす著しい放射強制はこのような大気上下結合と密接に結びついている複雑な問題であるので、その周辺について検討したい。このような研究は、温室効果ガスの増加や全球規模の大気汚染が引き起こす地球環境と気候の変動現象を理解する上で非常に重要である。

## 1. 気候形成に影響を与える物質輸送と大気上下結合

大気中のガス組成や粒子組成は、地球気候の大きな決定要因であり、その変化は著しい気候変化を引き起こす可能性がある。特に、大気組成の鉛直成層状態が異なると、発生する温室効果や反射率が異なるために気候変化を引き起こし易い。従って、このような物質循環と気候変動の因果関係に関する研究では、大気上下結合の観点を忘れることはできない。早くから注目された問題として、エルチチョンやピナツボ火山噴火による噴出物の成層圏への注入と、それが引き起こす顕著な日傘効果の例が挙げられる。成層圏の一般風の影響や、生成される硫酸エアロゾル層の光学的厚さの長期変化などについては、SAGE衛星など、一連の衛星データによって詳細に調べられている。最近の話題は、20世紀の気候変動再現実験において、このような火山噴火起原エアロゾルが果たす役割が大きいことが明らかになってきた点である。それによると、大規模火山の噴火頻度とエアロゾルの成層圏からの除去速度が、十年スケールの気

候変化にも影響を与えており、IPCC第4次報告書でも取り上げられている。

赤道域や中緯度域における対流圏界面での微量気体や水蒸気の輸送過程についても80年代頃からSAGE-II衛星等によって詳細に調べられている。最近では、このようなデータをTOVSサウンダー、CLOUDSAT、CALIPSO衛星データと組み合わせることによって、特に赤道域の対流システムとの関係が調査され始めた。これらの知見は、温暖化に伴うハドレー循環等の対流システムの変化とアイリス効果の大きさの評価に利用されている。

## 2. エアロゾルと雲に関わる問題

短寿命ガスや対流圏エアロゾルが作り出す気候変化も、大気上下交換過程と重要な関連がある。エアロゾルが雲核となって雲場を変える間接気候効果は、近年の温暖化議論のなかで注目されるようになってきたが、IPCC第4次報告書の段階でも、全球規模の把握は十分ではない。IPCC第4次報告書によると、人為起原エアロゾルが作り出す直接効果の放射強制は $-0.5 \text{ W/m}^2$ 程度であるがその不確定性は大きい。不確定性要因のひとつとして、エアロゾル層の鉛直分布のモデル依存性が挙げられる。すなわち、雲層よりも高いエアロゾルは、高い雲の反射率を下げるために、エアロゾルがどの高さまで輸送されるかによって、放射強制力は異なる。このような要因によるモデル不確定性は $0.5 \text{ W/m}^2$ に達する。従って、エアロゾルの直接効果が間接効果に匹敵するか、ほとんど0であるかという問いにははっきりと答えることができない。しかし、最近では全球規模のライダー

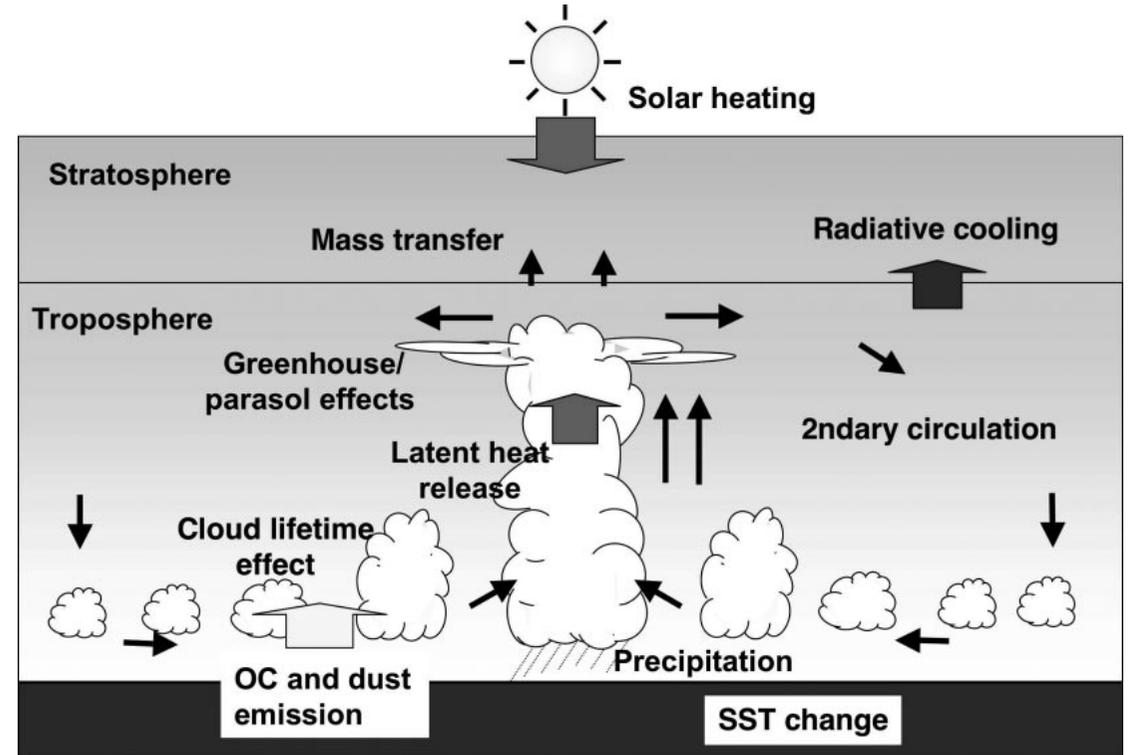


図1 大気上下結合に関わる物質循環と気候強制

ネットワークやライダー衛星が運用され始めており、エアロゾル層の高さに関するモデル改良は今後、急速に進むと思われる。もちろんエアロゾルの放射強制力は、同時にエアロゾルの光学的特性に強く依存するので、その把握も必要である。

このようなエアロゾルの光学特性が問題になったのは、湾岸戦争に伴うクエート油田火災起原エアロゾルの輸送に関してである。当初は、エアロゾル層が加熱されるために大規模な対流現象が起こり、エアロゾルが成層圏まで輸送されて大きな気候影響が起ることが懸念された。しかし、実際にはエアロゾルの吸収係数が非常に大きかったために、地表面が著しく冷却されたために、むしろ安定成層が形成されてそのようなことは起らなかった。むしろ、1997年のインドネシア森林火災で見られたように、中程度の光吸収を起こす厚いエアロゾル層の方が対流を助長して高高度、広域に輸送される可能性がある。

二酸化炭素倍増実験における大気上端での雲の放

射強制力のモデル依存性は、IPCC第4次報告書でも第3次報告書に比べてあまり小さくなっていない。また、人為起原エアロゾルの放射強制の内訳も、直接効果よりも雲場を変える間接効果の方が大きいことがモデルや観測結果から示唆されるようになった。これらのことから、温室効果ガスと大気汚染物質が増加する過程において、雲に関わる放射強制の把握が未だに不十分であることがわかる。

モデリングが難しい雲形成過程には深い対流雲の形成の問題がある。これに関しては、ライダーや雲レーダー衛星などの観測技術の発達、計算機の発展に裏付けられた全球非静力雲モデルやビン型粒子成長モデルなどの発展によって、雲群を含む広領域の応答に関していくつかのキーとなる知見が得られつつある。すなわち、エアロゾルが引き起こす寿命効果とその結果起る上層での潜熱放出による雲頂高度の増大と、降雨と日射量減少による対流の抑制効果が複雑に現れる。また各高度の雲量は、大循環スケール

では晴天域の放射冷却が関与するアイリス効果と、  
地表面の温度低下によって起る二次大循環によって  
さらに変化する。これまでの衛星観測によると海上雲

はエアロゾルの増加とともに増加する傾向が、陸域雲  
は減少する傾向が報告されているが、今後、全球平  
均の放射強制力への影響評価を行う必要がある。

2日目 9月21日(金) 10:40—12:10

## 【セッション3】 赤道域の風・雨・雲・雷

座長：山本 衛

大気を動かす熱帯の雨  
高藪 縁

単眼から複眼へ—分散レーダーで見る大気の微細構造  
佐藤 亨

中島 映至(なかじま てるゆき)

東京大学気候システム研究センター長、教授、理学博士。

1977年東北大学理学研究科地球物理学専攻博士課程単位修得退学。

東北大学理学部助教授、東京大学理学部助教授等を経て、2004年より現職。

専門：気候物理学、大気放射学、特にエアロゾルと雲の気候影響に関する研究。

87年から90年までNASAゴダード宇宙飛行センター上席研究員。

日本学術会議連携会員、IAMAS国際放射委員会長、日本気象学会常任理事、韓国気象学会誌編集委員。

IPCC航空機影響特別報告書執筆委員、第3次報告書執筆委員、第4次報告書レビューエディター  
95年度日本気象学会賞、2000年第7回日産科学賞受賞。



# 大気を動かす熱帯の雨

高藪 縁 (東京大学気候システム研究センター)

対流圏の積雲対流は、成層圏以上の高層大気で観測される波の重要な波源のひとつと考えられている。中でもインドネシアを中心とする海洋大陸とよばれる赤道域は、非常に背の高い積雲対流が発生する。本講演では、我々の観測域である海洋大陸域を中心とした熱帯の積雲対流についての研究を紹介する。

## 熱帯の雲と雨の役割

気象衛星の雲画像では、中緯度の雲は大きく蛇行し水平に広がるが、赤道近くで熱帯では、雲が湧き上がっている様子が見える。地球は太陽エネルギーを熱帯の地球表面で多く受け取り、地球全体の大气から赤外放射で熱を宇宙に返すため、放射収支では熱帯表層で入力過剰、中高緯度大気で出力過剰となっている。そのため、中緯度の気象では南北の気温差を水平方向にかき混ぜる温帯低気圧が、熱帯では地球表面から大気にエネルギーを持ち上げる積雲対流が主役となっている。

海面水温の高い熱帯では大気への蒸発が盛んである。海水が蒸発するとき、エネルギーは水蒸気の潜熱の形で海面から大気に移動する。従って、熱帯大気の最下層はいつも高いエネルギーを持つ。水蒸気をたっぷり含んだ海面近くの空気が持ち上げられると、断熱冷却に伴って水蒸気は凝結し雲粒となる。その際、水蒸気の潜熱は大気に放出され、大気を加熱する。この雲が再び蒸発してしまうと、熱はまた使われるので大気中に残らない。逆に雲粒が集まり雨となって降ってしまうと、解放された潜熱は大気中に残される。つまり雲は地球表面からエネルギーを上空に持ち上げ、雨はそのエネルギーを大気に確実に渡

す役割を担う。雨量は、地球表面から大気に渡されたエネルギー量に換算できる。

## 熱帯の雲降水システムの階層構造と波

次に波について考える。静かな水面に石を投げると、石は水面にへこみを作り、そこから同心円状に波が広がり、やがて水面はもとどおり静かになる。波は外から与えられた「へこみ」、つまり周囲の場と釣り合っていないエネルギーを遠くに運び去る仕組みである。雲と雨が海面から大気に持ち上げたエネルギーは、水面に石が作ったへこみに当たる。バランスするまでエネルギーを運び去るために大気中に波動が生じる。

熱帯の積乱雲は、地球表面からまるで無秩序に湧き上がっているように見えるがそうではない。ひとつひとつが数 km スケールの積乱雲は、寄り集まって数百 km スケールの雲クラスターという集合体を作り、さらに数千 km スケールの大気擾乱と結合する。時にはマッデン・ジュリアン振動 (MJO) と呼ばれる地球を一周するような大規模大気循環と結合して動くことが知られている。このように、熱帯の雲降水システムはマルチスケールの階層構造を持って大気を加熱するので、それぞれの様々なスケールをもつ波を四方八方に放射し、大気を揺り動かす。

ひとつの積乱雲から出る重力波は、次の積乱雲を発生させるきっかけを作る。雲クラスターの動きを調べると、数千 km の赤道波の規則性が見つかる。台風もこのような波動擾乱から生まれてくる。MJO は数万 km の大規模大気循環を伴い、モンスーンやエルニーニョにも影響する。また、大規模で定在的な

積雲対流の熱源は、地球の大気を伝播する定在的な波を発生し、中緯度の気候に影響を及ぼす。

積雲対流からの波は、上方へも伝播する。私たちの住む対流圏では、大気は対流活動で鉛直によく混ぜられ気温は上ほど低い。その上方には上に昇るほど気温が高く安定な成層圏が存在する。対流圏と成層圏の境目は (対流) 圏界面と呼ばれ、気温が極小値をとる。圏界面の高さは中緯度で約 11km であるが、熱帯では 16 ~ 17km にもなる。熱帯の激しい積雲対流は圏界面の高さに達し、安定な成層圏を持ち上げる。加熱の中心から発生する波と持ち上げから発生する波のどちらが波源としてより有効か、明確には分かっていない。赤道域成層圏に伝播していった波は、成層圏の平均風を変化させる (例: 成層圏準 2 年振動) などの大きな仕事をする。

## 熱帯の雨を測る

波源としての積雲対流の加熱量や高さを知るためには、雨量の他に雲や雨の鉛直構造などの特性を知る必要がある。雨の 3 次元構造の研究には降雨レーダー観測が利用される。そのため、積雲対流が最も盛んなインドネシアに、大規模な大気観測基地が建設された。一方、グローバルな把握のためには、衛星観測が必須である。1997 年末に打ち上げられた熱帯降雨観測計画 (TRMM) 衛星は、初めてかつ唯一降雨レーダー (PR) を搭載した衛星であり、まもなく 10 年にも及ぶ長期観測を実現している。TRMM 衛星は、PR の他に 4 つの降雨に関する測器を搭載し、

高藪 縁 (たかやぶ・ゆかり)

東京大学気候システム研究センター教授。博士 (理学)。

1983 年東京大学理学部地球物理学科卒業。85 年同大学大学院修士課程修了。85 年凸版印刷株式会社勤務、87 年国立公害 (現 国立環境) 研究所研究員、93 年博士 (理学) 号取得、2000 年東京大学気候システム研究センター助教授を経て、07 年より現職。専門は熱帯気象と全球気候。最近の課題は気候変化にともない気象がいかに変化するかという問題。98 年日本気象学会賞受賞。07 年猿橋賞受賞。



雨量のみでなく、降雨の高さ、対流性層状性、雷頻度など、降雨システムの特性について大変多くの情報を与えてくれる。

ところで雨量は潜熱加熱量を表すが、必ずしも積雲対流の激しさを表さない。ここで激しさとは、雨や上昇流の強さや高さを指す。熱帯の平均的な降雨量分布を描くと、大陸やインドネシア域の多雨帯と熱帯収束帯と呼ばれる海上の多雨帯とがほぼ連続して分布し、雨量について海陸差はさほど見られない。一方、積雲対流の激しさには非常に大きな海陸コントラストが見られる。熱帯海上の雨は、大部分が雲クラスターから降る。熱帯陸上の雨は日変化する夕立性の雨が主要である。雲クラスターは、数十 km スケールの対流性の雨域が数百 km スケールの層状性雨域を支える組織化したシステムである。雲クラスター内の対流性の雨も高い積乱雲ではあるが、陸上の雷雲の方がさらに背が高く、上昇流も遥かに強い。

これらのことは、TRMM データを利用した雨量と雷の関係や、コトタバンなどの地上観測データを利用した降雨の構造や雨の粒径分布などの解析結果から明らかになってきた。また、陸上でもモンスーンの雨季には降雨特性が海的になることや、MJO の対流抑制期にかえて雷が多くなることなど、時間変化を含めた興味深い結果も得られた。講演では具体的な成果を示しながら、大気を動かす赤道域の雲と雨の様子を紹介したい。

# 単眼から複眼へ 分散レーダーで見る大気の微細構造

佐藤 亨 (京都大学大学院情報学研究科)

## 1. 大気レーダーによる風速測定

気象レーダーは雨粒からの散乱信号強度によって降雨の分布を測定します。これに対して大気レーダーは、大気の流れ(乱流)による微弱な散乱を強力なレーダーで受信することで、雨や雲のない空の観測を行います。このとき、風によって大気の流れも同様に流されるため、ドップラー効果によって受信される信号にはわずかな周波数の変化が生じます。これを測定することで上空の大気の流れを知ることができます。ただし、このとき測定できるのは、レーダーのビームを向けた方向に沿った速度だけです。風速の東西、南北、鉛直の3つの成分をすべて知るためには、**図1**の左に示すように、アンテナビームを異なる3つの方向に向けて速度を調べ、大気が一様に運動していると仮定して風速の各成分を求めます。このように、1つのアンテナを送受信に用いて観測する「単

眼」のレーダーをモノスタティックレーダーと呼びます。

## 2. 「複眼」レーダーの構成

大気レーダーは、非常に微弱な大気による散乱を受信するため、直径100mにも及ぶ巨大なアンテナと強力な送信機を必要とします。そのため、これを多数配置することは困難です。しかし、散乱された電波を受信するだけなら、地上波テレビの受信に使われるのと同様の八木アンテナを並べただけの、比較的簡単な設備でも可能です。最近のデジタル信号処理技術の進歩によって、大気レーダーに用いられるVHF帯の信号であれば、高価な専用受信機を使わずに直接パソコンに取り込んで処理することも可能です。私たちはこのような受信システムを開発し、赤道レーダーから1km程度離れた山中に配置することで、**図1**の右のように複数の方向から上空の同じ場

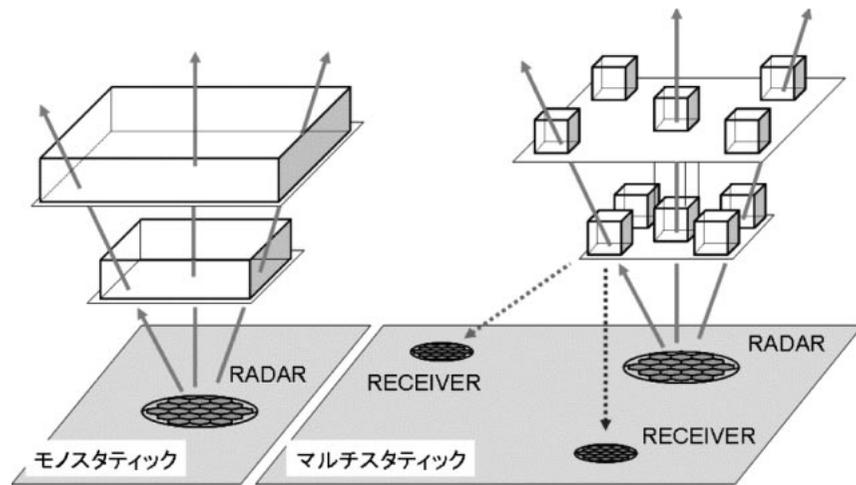


図1 「単眼」アンテナ(左)と「複眼」アンテナ(右)の構成

所を観測する分散配置(マルチスタティック)レーダーを構成しました。特に、受信システムを構成する個々のアンテナ素子の信号を個別に記録することで、観測後に信号を合成し、異なる方向を同時に観測することが可能となりました。

## 3. 分散レーダーによる高分解能観測

この設備を用いると、赤道レーダーの送信ビームが照射するそれぞれの場所における風速の3成分を調べることが可能となります。

**図2**はそのような観測の例を示します。図中の矢印は、高度2~4kmの上空の風速の水平成分を地上に投影したものです。赤道レーダーの周辺は落差100mもの切り立った崖に囲まれた地形ですが、その上空で風向が激しく変化していることがわかりま

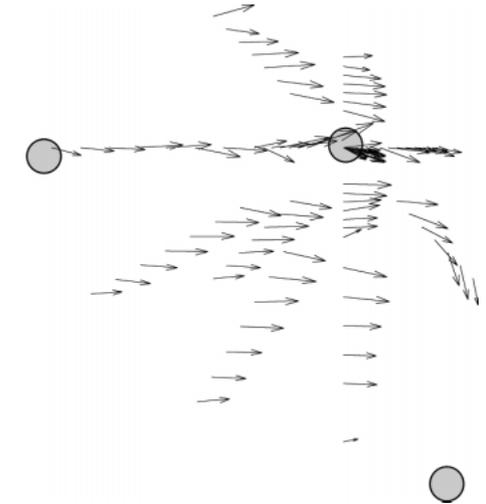


図2 水平風速分布の高分解能観測例(○印は約1km間隔で配置された送受信点)

す。これまで障害物のない上空の風はほぼ一様と考えられていたのとは大きく異なる結果で、このような例を詳細に調べることで、雲の構造や、大気中を伝わる重力波などの生成についての新しい知見が広がると期待しています。

佐藤 亨(さとう・とおる)

京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻教授。工学博士。

1976年京都大学工学部電気工学第二学科卒業。同大学大学院博士課程修了。

京都大学超高層電波研究センター助手、工学研究科講師・助教授を経て、98年より現職。

専門は電波工学。特にレーダー信号処理。現在はレーダーによる室内環境計測に関心をもつ。

07年電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞受賞。共著に『宇宙における電波計測と電波航法』(コロナ社、2000年)などがある。



**【招待講演3】**

座長：長澤 親生

点を線に、線を面に：  
東南アジアの大気観測ネットワーク  
山中 大学

# 点を線に、線を面に： 東南アジアの大気観測ネットワーク

山中 大学 (海洋研究開発機構地球環境観測研究センター)

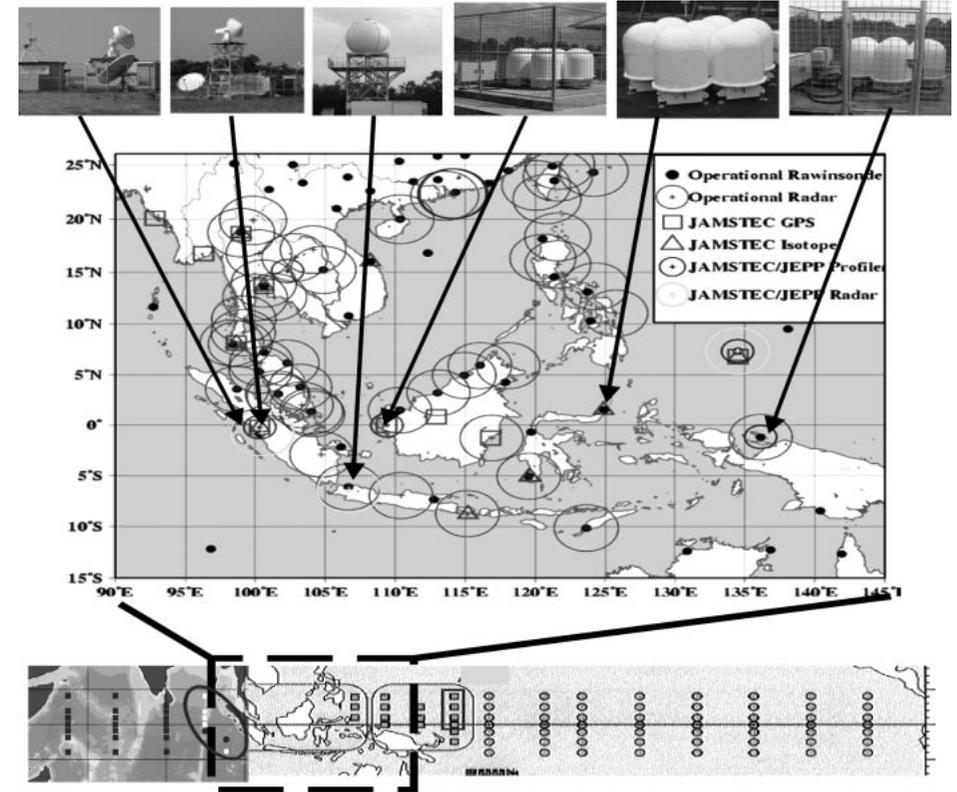
## 地球史および人類史における東南アジア「観測」

地球は、誕生後45億年を経てもなお変動し続けているため、常に「観測」が必要な惑星です。その内部の流動に伴い大陸も海洋も数億年ごとに離合集散を繰り返しており、5千万年前以降は大陸が引きちぎられていく時代で、南北米大陸間の中米地峡や、日本など大洋沿岸部の弧状列島が形成されてきました。引きちぎられた陸地（インド亜大陸）が他の大陸（ユーラシア）と衝突してせり上がったのが世界の屋根ヒマラヤですが、その東隣の東南アジアは、少し先に引きちぎられたオーストラリアとは繋がらず、途中まで伸びた地峡の地形（インドシナ～マレー半島）と巨大島嶼が散在する「海大陸」となっています。この海陸混在する地形が、貿易風（偏東風）に吹き動かされて太平洋からインド洋へと流れる海流にかかるダムとなり、強い日射で温められた海水を多量に堰き止めています。

一方、インド洋の対岸アフリカで、700万年前以来30種以上の人類が現れては地球上に拡散し（1種を除き）絶滅することを繰り返してきました。この拡散の過程で、今の類人猿たちと同様な原始的「観測」活動が創始されたと考えられます。東南アジアは100万年ほど前からアジア大陸へ拡散する人類の拠点となり、10万年ほど前に現れた最新の1種が、氷期による海面低下を利用して2万年前までにほぼ全陸地に広がりました。数千年前からは船とモンスーン「観測」により、ギリシャ人やアラビア人が東南アジアへの海路開拓、インドネシア人は逆にマダガスカルへの植民に成功しました。これら東西双方向の海

路は、600年ほど前からヨーロッパ人や中国人がさらに大々的に用い、風向きに関係なく船を動かせる今も日本の石油輸入や自動車輸出にとって重要な航路となっています。

東南アジアでの科学的な大気観測は、植民地時代に宗主国が整備したものに始まります。インドネシアではオランダが18世紀に今のジャカルタにバタヴィア学芸協会を設立し、19世紀末で既に2000点に達する雨量観測網を全土に設けていました。20世紀初頭頃のバタヴィア気象台長ファン・ベンメレンはクラカトア火山島噴煙観測や高層気象気球観測などを精力的に行い、その半世紀後に再発見される成層圏準2年周期東西風変動、モンスーンと雨季の関係、大気潮汐、海陸風などを見出しています。また旧英領マレーシアでは19世紀半ばから、旧仏領インドシナでは20世紀初頭から組織的な気象観測を開始しました。第二次大戦、独立戦争、内戦による観測断絶やデータ紛失、諸外国からの援助による官署観測網の整備を経て、最初に発展を遂げたシンガポールは赤道域全体を代表する観測点となり、1997～8年の東南アジア経済危機克服後には防災・環境への国民的要求もあって各国とも自力での観測網の整備に力を入れてきています。2004年末に起きたスマトラ大地震津波は、災害を生む自然現象の観測・警報・教育網の必要性をこの地域の住民全員（仕事や観光で滞在する常時数万人もの日本人も含む）に強く認識させ、国際援助は気象観測を含めてあらゆる防災の前進に活用されています。日本ではほとんど報道されませんが、毎年あちこちで起きる洪水など気象災害で



失われる人命を積算すると、まれにしか起きない地震や津波によるものよりはるかに大きいからです。

## 大気・海洋・陸面相互作用を踏まえた「海大陸」とその周辺での観測

本シンポジウムを企画された特定領域研究はその名の通り赤道域の大気を「上下」に観測するものですが、私たちの方は東南アジア域の下層大気を「水平」に観測することを試みつつあります。大気は三次元的ですから、科学的には両方とも必要で、この特定領域研究の方々と私たちは実際密接に連携しつつそれぞれの「観測」を進めて参りました。

日本など中緯度では例えば東京から札幌まで南北800キロほどの間で気温は随分変化しますが、赤道周辺の熱帯では例えばフィリピンのマニラからジャカルタまで南北2000キロ以上離れても気温は殆ど変わりません。また中緯度では気圧だけ観測しても天気図が描ける、つまり低気圧が上昇気流と雲を作り、ほぼ等圧線に沿って風が吹きますが、こういう性質が

赤道周辺ではありません。日本に南方からやってくる台風は熱帯低気圧と呼ばれますが、これは赤道近くでは発生しません。場所による気温や気圧の差が小さい赤道域で、いつどこにどうやって雲やその集団が生じるかについてはまだ謎が多く、「観測」をどこでどういう時間間隔で展開すべきか、ということも、ホットな研究テーマなのです。

赤道海洋上での雲集団の発生を支配する「大気・海洋相互作用」については山形氏、津田氏、高藪女史などが講演された通りですが、この地域では海と混在している半島や島嶼の「陸面」の作用も重要で、その一つの例は中島氏が述べられた物質の発生源です。また固体の陸面は、同じ日射を浴びても液体の海面より先に高温となり、午後から夜半にかけては陸上で雲ができてそこへ向けて海風が吹きます。夜半から日出前には陸面が海面より先に冷え、海上で雲ができて陸風が吹きますから、熱帯の陸上では1日周期の天候変化が大変顕著です。さらに陸上では山

## 【セッション4】 赤道域の超高層大気

座長：佐藤 亨

大気の鼓動がつくる超高層プラズマの乱れ

小川 忠彦

カーナビを惑わす電離圏の変動

齊藤 昭則

スマトラ大地震が引き起こした“大気の波”

大塚 雄一

岳を越えて吹く風は上下に振動し、津田氏や中村氏が講演された大気波動の原因となるとともに、曇の発生にも関与します。以上のように陸面の作用の結果である雲は雨を降らせ、雲の原因であった海陸間の温度差を解消する作用を行います(そのため、熱帯には熱帯夜はありません)。このような「大気・海洋・陸面相互作用」が東南アジア域の気象・気候の本質で、これを踏まえた「観測」が必要となります。海上と陸上の両方、つまり地球上を全てカバーするには衛星観測があり、雲の分布などは毎時撮像されています。しかし降雨強度はムラが大きく時間的強弱も激しいので、雲の下での陸上・海上での観測を行わねばなりません。陸上では長い歴史を持つ雨量観測がありますが、時間間隔の細かい自記式のものに変えていくとともに、気象レーダー(間接的推定)で面的にカバーすることが必要です。風については、気象レーダーに雨滴の運動を測定できる機能を付加するか、晴天域や上昇気流も測れる(赤道大気レーダーと同原理で小型の)ウィンドプロファイラーを用います。また海上ではブイを用いた観測網のほか、レーダー搭載の観測船を用いて特定の航路上・海域・期間の集中観測も行われています。

地上での観測網の展開には、科学的意義のみなら

ず、東南アジア現地、財源の日本納税者、そして地球人類全体のため社会貢献が要請されます。2004年東京での「地球観測サミット」第2回会合において小泉首相(当時)が温暖化、水循環、地震火山に関する地球上の観測的空白を埋めるべきと提唱し、翌年2005年ブリュッセルでの第3回会合で「地球観測10年計画」(GEOSS)の実施が国際的に決定されました。本年11月ケープタウンでの第4回会合では、来年洞爺湖で開催の先進国首脳会議(いわゆるサミット)へ提示されるGEOSS初期成果が集約されます。このGEOSSの一環として、今私たちは東南アジア各地での観測活動を維持するとともに、「海大陸」域にレーダー・プロファイラ網を構築する計画(HARIMAU)を進めています。これは、科学的には世界気候研究計画(WCRP)の一副計画として松本淳首都大教授(海洋研究開発機構兼務)らが進めているモンスーンアジア水文気候研究計画(MAHAS-RI)の一部でもあります。今後は、ジャカルタ「海大陸センター」(仮称)に観測網のデータを集め、国際的な学界・社会両面での利用を推進するとともに、当特定領域研究の方々が先鞭をつけられた「観測」を担う人材の育成(キャパシティ・ビルディング)にも努めたいと考えています。

山中 大学(やまなか・まなぶ)

海洋研究開発機構地球環境観測研究センター水循環観測研究プログラム・主任研究員。神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻・教授(兼任)。理学博士。

1979年大阪教育大学教育学部特別教科(理科)教員養成課程卒業。85年名古屋大学大学院理学研究科博士後期課程大気水圏科学専攻修了。

日本学術振興会奨励研究員(名古屋大学水圏科学研究所)・特別研究員(文部省宇宙科学研究所)、山口大学教育学部講師、京都大学超高層電波研究センター講師・助教授、神戸大学大学院自然科学研究科教授を経て、2006年より現職。

専門は大気水圏科学、特に地球型惑星における気候変動の物理に関心をもつ。

共著書(分担執筆)に『Dynamics of the Middle Atmosphere』(D.Reidel社、1982年)、『気象学のみかた』(朝日新聞社、1996年)、『東南アジアのモンスーン気候学』(日本気象学会、2002年)、『天文学大事典』(地人書館、2007年)など。

# 大気の鼓動がつくる 超高層プラズマの乱れ

小川 忠彦 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

地球大気中には“超高層”と呼ばれる領域があり(図1)、その高度範囲の明確な定義はないが、ここでは80~1000kmとする。地球大気は高度とともにどんどん希薄になり、高度100kmの密度は地上の約百万分の一、300kmでは約一十億分の一である。超高層は中性の気体からなるが、主として太陽紫外線放射のために、ごく少量(高度100kmで約十億分の一)の気体が電離した状態、すなわち“プラズマ”の状態になっている。したがって、超高層は“電離圏”とも呼ばれる。超高層大気中のプラズマ密度は高度100kmと300kmで極大になる。温度は高度とともに増加し、高度100km付近では絶対温度で約300度であるが、300km以上では1000度を超える。このような高温であることから、超高層は“熱圏”とも呼ばれる。宇宙基地や多数の人工衛星は過酷な超

高層環境の中を飛翔している。超高層プラズマは、太陽活動の影響を受けて様々に変動することはよく知られているが、これらとは別の原因で大なり小なり乱れていることが近年の研究から明らかになってきた。その原因の一つは対流圏(高度0~10km)で発生する気象現象(雨、雲、気圧前線、台風、ジェット気流、山岳波など)による大気の乱れであるが、大地震や火山爆発も原因となる。これらにより地上の空気が揺さぶられるため、様々な周期と波長を持つ大気の波動(“大気波動”)が作られる。この波動は上方に伝搬してエネルギーや運動量を輸送する。伝搬する際、高度が高くなるにつれて大気密度が急激に減少するため、波動のエネルギー保存則を満たす必要性から、波動の振幅は高度とともに急増する。従って、対流圏では微小な振幅が超

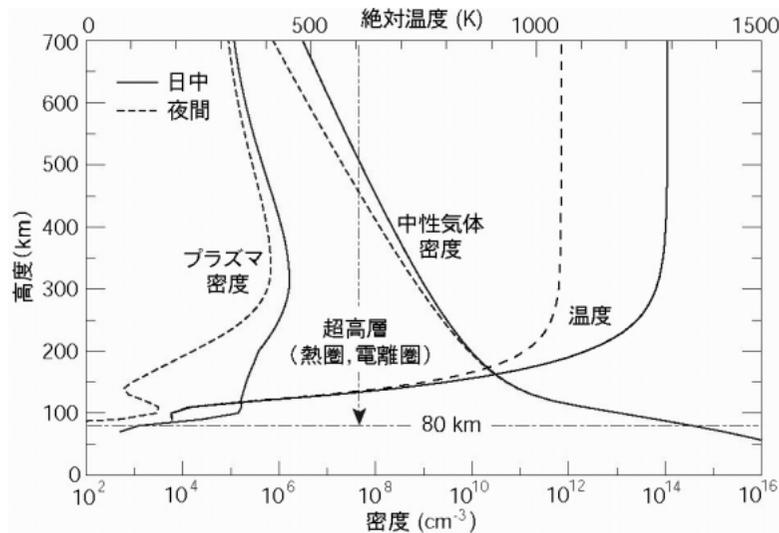


図1 超高層の日中と夜間における温度、中性大気密度とプラズマ密度の高度分布

高層では非常に顕著になる。しかし、ほとんどの波動は高度50~90kmで消滅(“碎波”)し、高度100kmを超えてさらに上方に伝搬するものは少ないと考えられている。超高層では中性ガスとプラズマとが複雑に衝突して、エネルギーや運動量をやり取りしている。したがって、高度100km以上の高度に達した一部の大气波動によって揺さぶられる中性ガスは、必然的にプラズマの時間的・空間的変動を誘発する。これが“大気の鼓動がつくる超高層プラズマの乱れ”である。熱圏の大气波動がプラズマの乱れを作る、という理論は1960~70年代に確立され、ある種の電離圏プラズマ変動の観測結果をこの理論で説明することが試みられてきた。しかし、対流圏現象と、それに起因する大气波動による電離圏プラズマの変動とを観測的に明確に対応づけることは現在でも容易ではない。

赤道域の電離圏では、他の緯度帯では見られない不思議な現象が発生する。その典型例は“プラズマバブル”(プラズマの泡)と呼ばれるものである。これは、日没時の高度250km付近においてプラズマ密度が周囲よりも低い小さな空間域が発生し、これがさらに密度を減じながら泡ようになって高々度へと発達し、かつ東へ移動する現象である。バブルの最高々度が1700kmを超えると、日本でも地上から観測できる。バブル内部のプラズマは時間的・空間的に激しく変動しており、そこを通過する電波の振幅や位相が変動(“電離圏シンチレーション”と呼ぶ)するため、衛星-地上通信、GPS測位、航空機管制な

どに悪影響を与える。小さな泡が大きな泡へと成長する基本過程はほぼ解明されているが、なぜ最初の小さな泡が生まれるのかは謎である。私達は、その原因は赤道域対流圏にあり、そこで作られた大气波動が超高層へと伝搬して大気を揺する結果、小さなプラズマの泡が生まれる、と考えている。事実、赤道直下のスマトラ島コトタバンでのGPSシンチレーション観測のデータを詳しく解析した結果、バブルは数日から数十日の周期で発生し、これには惑星波(プラネタリー波)が関係していること、初期のプラズマ泡は周期が数時間以下、波長が数百~1000kmの大气波動で作られる可能性を見出した。

下層からの大气波動は、バブル発生以外にも、様々なプラズマ擾乱を引き起こす。磁気赤道を挟んだ南北両半球の磁気緯度10~20度の電離圏にはプラズマ密度が高い領域が存在しているが、ここに大气波動によるものと思われる東西波長が数百~1000kmの大規模波動構造が現れ、プラズマバブルはこの波動構造内に存在していることが分かった。また、周期が約40分、位相速度が約300m/sで極方向に伝搬する波動も共存していることが見つかった。中緯度の日本上空にも大气波動による中規模のプラズマの乱れが頻発することが私達の観測から明らかになっている。興味ある点は、この乱れの空間構造がオーストラリア上空のそれと見事に一致することである。

以上のように、対流圏の大气の鼓動が大气波動として上方の超高層に伝搬し、そのプラズマを乱している様相が次第に明らかになってきた。

小川 忠彦 (おがわ・ただひこ)

名古屋大学太陽地球環境研究所教授。工学博士。

1967年京都大学工学部電気工学科卒業。72年同大学大学院工学研究科博士課程修了。

郵政省電波研究所研究員、同研究室長、同研究部長を経て、95年より現職。

専門は超高層物理学。特に電波・光技術を用いた超高層の観測的研究に興味をもつ。

81年地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞受賞。



# カーナビを惑わす電離圏の変動

齊藤 昭則 (京都大学大学院理学研究科)

## 1. GPSのしくみ

カーナビなどに使われているGPSは、高度約2万kmを飛んでいる20数機のGPS衛星からの電波を使って、場所を正確に決めるシステムです。その仕組みは、電波が衛星から送信されて受信機に伝わるまでにかかる時間を正確に測ることで、衛星と受信機間の距離を測ります。すると、受信機はそのGPS衛星を中心としてその距離を半径とした球面上のどこかにいることが分かります。例えば、0時0分0秒にGPS衛星を出た電波が受信機に0時0分0.1秒に着いたとすると、電波は0.1秒間に光速で3万km進むので、そのGPS衛星を中心とした半径3万kmの球面上のどこかに受信機があることが分かります。そ

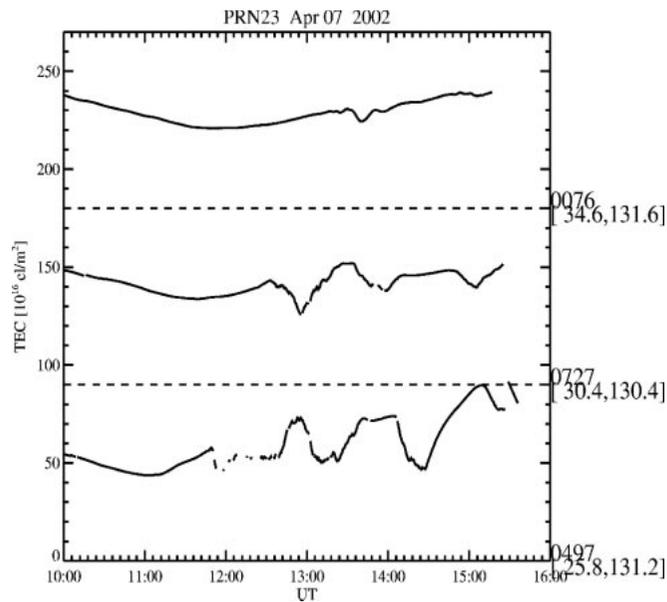


図1 国土地理院GPS受信機網GEONETによって観測された電離圏全電子数変動

こで、少なくとも3つのGPS衛星からの距離を測ると、それらの球面が交わる点が受信機の位置となります。実際には受信機の時計が正確でないので、その推定も行うため、最低4つのGPS衛星からの電波を同時に受信することが必要です。10mの違いを検出するには、到達時間の0.000000033秒の違いを検出しないとイケないのですから、簡単に思えるGPSですが、とても繊細な測定を行っているのです。

## 2. 電離圏のGPSへの影響

繊細な測定をしているGPSは、電波の伝わり方による影響を敏感に受けます。高度100kmから1000kmに広がる電離圏は、地球大気の一番外側で太陽の紫外線によって大気がイオンと電子に分かれたプラズマが作られている領域ですが、このプラズマの中を電波が通り抜けるときに、伝わる速度がほんの少し遅くなります。0.00000001秒程度の遅れですが、GPSにとっては測定の大きな誤差になります。科学観測に使われている高精度なGPS受信機では2つの周波数の電波の遅れ方が異なることを用いてこの誤差を打ち消していますが、カーナビなどの簡便なGPSではこの遅れは位置を推定する誤差になっています。また、電離圏のプラズマに細かい擾乱構造があると、電波の伝わり方が乱されて干渉を起こし、電波の強度が激しく変動するため、時にはGPS衛星からの電波が受信できなくなります。特に赤道域は太陽からの

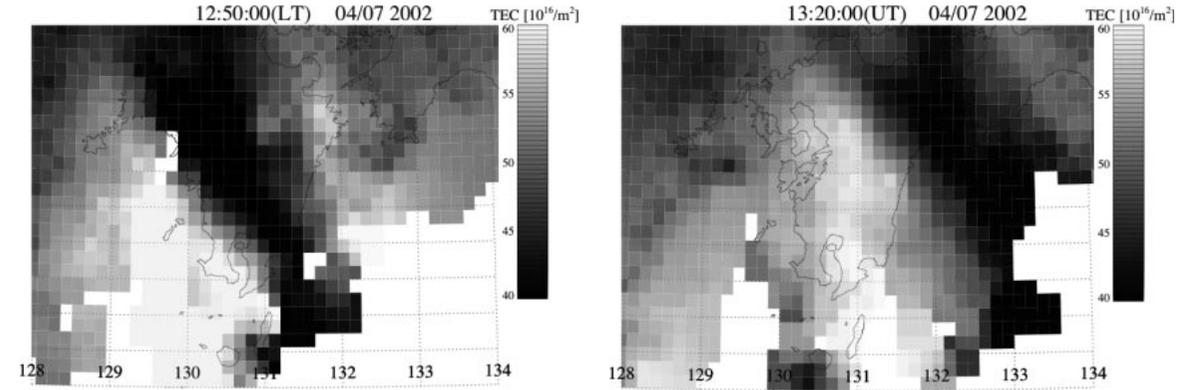


図2 全電子数の2次元分布。12:50UT (左図)、13:20UT (右図)

放射を強く受けているために電離圏のプラズマの密度が高く、擾乱も激しい領域です。

## 3. GPSを惑わす電離圏の変動

赤道域で発生した電離圏の変動は、時には日本上空まで移動してきます。図1は国土地理院のGPS受信機網GEONETで観測された電離圏プラズマの総数 (Total Electron Content: TEC) です。GEONETは科学観測用の高精度のGPS受信機を用いているため、電離圏による電波の伝搬遅れを正確に測定でき、電離圏内のプラズマの測定が出来ます。ほぼ同経度で緯度の異なる3地点の全電子数の変動を示していますが、一番下のもっとも緯度の低い地点 (緯度25.8度) の観測で、全電子数が激しく変動している事が分かります。11:50 - 12:40 UT, 13:00 - 13:40 UT, 14:10 - 15:00 UTに減少が見られ、これはプラズマ・バブルと呼ばれている赤道域で発生する現象です。特に最初の減少は激しく、GPSデータが切れ切れになっているのは、電離圏内の擾乱によってGPS

の受信が不安定になっているためと思われます。緯度が高くなるにつれて、変動が小さくなっており、日本の南部はこのような赤道の影響を受けますが、北部は影響が少ないことが分かります。図2はこの時の全電子数の2次元分布を表したもので、左図が12:50 UT, 右図が13:20 UTです。12:50 UTに九州南西部上空にあった全電子数 (TEC) の低い領域が、30分後に九州の北東に移動していることが分かります。このように電離圏の擾乱領域は時速300km程度の速度で移動していきます。

## 4. 赤道大気の上層部

赤道域は高度100km以上の大気最上部の電離圏においても激しい変動をみせ、日本上空の様な中緯度域にも影響を与えています。また、電離圏の変動は、高精度化する現代の衛星電波の利用に大きな影響を与えています。インドネシアなどのアジア域では、さまざまな測定手段を用いてこの変動や影響の解明に向けて観測が進められています。

齊藤 昭則 (さいとう・あきのり)

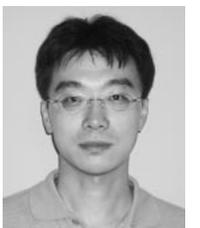
京都大学大学院理学研究科・助教。京都大学博士 (理学)。

1992年 京都大学理学部卒業。97年同大学大学院理学研究科博士課程修了。

京都大学宇宙電波科学センター (現: 生存圏研究所) COE 研究員、京都大学理学部教務職員を経て、99年より現職。

専門は超高層大気物理学、特に中低緯度域電離圏物理学。

02年地球電磁気学・地球惑星圏学会大林奨励賞、05年 Earth, Planets and Space 誌 EPS 賞。



# スマトラ大地震が引き起こした“大気の波”

大塚 雄一 (名古屋大学太陽地球環境研究所)

2004年12月26日、インドネシア・スマトラ島の西方沖でマグニチュード9.3の巨大な地震が発生した。ご存知のように、この地震によって起った津波は、周辺諸国の沿岸域で多大な被害をもたらし、地球の反対側にまで到達した。本講演では、この地震によって引き起こされた“大気の波”が高度300km上空の電離圏まで届いていることを示した研究を紹介する。

高度約2万kmを飛翔するGPS (Global Positioning System; 汎地球測位システム) 衛星から送信された電波は、地上に届くまでにプラズマ密度の濃い電離圏を通るため、伝搬遅延が起る。この遅延量から電離圏プラズマの量を測定することができる。このプ

ラズマの量は、衛星から受信点までの電波の通り道に沿ったプラズマ密度の足し合わせ(積分値)であることから、全電子数 (Total Electron Content; TEC) と呼ばれている。

我々は、インドネシアのスマトラ島の2ヶ所とタイの3ヶ所に設置されたGPS受信機のデータを解析し、スマトラ沖地震直後の全電子数の変動を調べた。その結果、地震が発生した00:58 UTの14分後から30分後までの間に10分から30分程度の時間スケールをもった全電子数の変動が起ったことが明らかになった。この全電子数の変動は、震央の位置(北緯3.3度、東経95.9度)から秒速2kmで広がり、2,000km以上離れたタイ上空まで伝わった。図1に、

地震の震央と観測された全電子数変動の大きさを表す地図を示す。図中の星印はGPS受信機の位置を表し、実線は01:00から01:30 UTの間にGPS電波で観測できる電離圏の位置を示す。一台の受信機によって同時に9基のGPS衛星からの電波が受信されており、5台の受信機によって約40個所が同時に観測された。また、図中の円の大きさは、観測された全電子数変動の振幅を示す。図から、震央

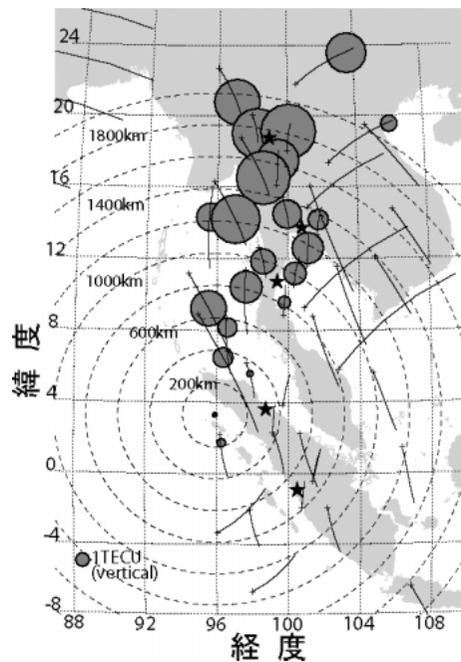


図1 震央の位置(3.3°N, 95.9°E)とGPSで観測された全電子数変動の位置を示す地図。同心円の点線は、震央からの距離を示す。5ヶ所のGPS受信機の位置は、星印で示す。図中の曲線は、地震発生直後の1:00から1:30UTの間にGPSによって観測される位置を示す。この時、各受信機において9基の衛星からの電波が受信されていた。曲線上にある円の大きさは、全電子数変動の大きさを表す

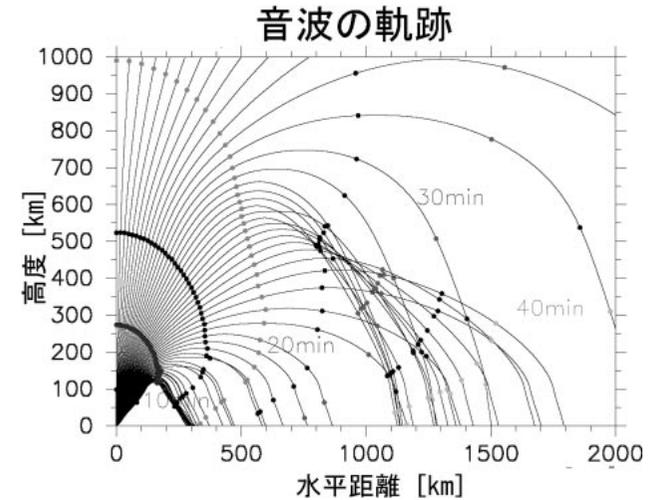


図2 音波の伝わる軌跡を示す水平距離-高度の断面図。水平距離0kmの位置にある点波源から音波が発生したと仮定し、大気の実験モデルを使って計算した。各線は、音波が出る仰角を30度から90度まで1度ずつ変えた場合の軌跡

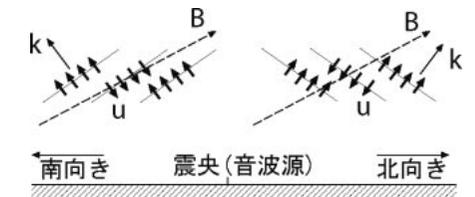


図3 南向き(左)及び北向き(右)に伝搬する音波の模式図。Bは磁力線を表し、uは音波によって大気が振動する方向を表す。北向きに進む音波によって、磁力線とほぼ平行に大気が振動するため、電離圏中のプラズマが動かされやすい。一方、南向きに進む音波は、大気の振動方向が磁力線とほぼ直交するためプラズマは動かされにくい。このため、図1に示したように震央の南側で全電子数の変動が小さく、北側で大きいという異方性が起こると考えられる

よりも北側では、2-7TECU (1TECU=10<sup>16</sup>/m<sup>2</sup>) の全電子数の変動が見られ、震源の近くよりも2,000km以上離れたタイ上空の方が変動の振幅が大きいくことが分かる。一方、震央の南側では、震央の近くで1TECU程度の小さな変動が見られたが、さらに震央から距離が離れた場所では全電子数の変動は観測されなかった。また、震央の東でも全電子数の変動は見られなかった。

このようにGPSで観測された全電子数の変動は、地震によって発生した津波が大気を動かすことによって大気の振動(音波)が発生し、その音波が高度300km付近の電離圏にまで伝わったことが原因と考えられる。図2に、地表から上空に音波がどのように伝わるかを計算した結果を示す。音波の進む速度(音速)は、大気温度の平方根に比例する。温度が急激に上昇する中間圏界面(高度90km付近)より上では、音速が高度とともに大きくなり、電離圏では秒速800mほどになる。このように高度によって音速が異なることにより、音波の進む方向は曲げられ、図2から分かるように、音波源から離れた上空の電離圏(高度300km付近)では音波はほぼ水平に進む。また、このような音波の屈折から、音波が

震央から1,000km以上離れた上空の電離圏まで伝わるのが分かる。さらに、この計算結果から震央の真上でも音波が地上から電離圏に到達するには十数分かかると分かった。この時間差は、地震発生時刻からGPSによって最初に全電子数の変動が観測されるまでの時間差とよく一致している。

ところで、図1に示したように、震央の北側では大きな全電子数の変動が見られたが、南側では殆んど変動がみられなかった。どうしてこのような全電子数変動の異方性があるのでしょうか? 我々は、モデル計算を行うことにより、この異方性が地球の磁力線の傾きと関係していることをつきとめた。音波は、空気のうち薄い部分と濃い部分が交互に伝わる波(疎密波)であり、空気が振動する方向は音波の伝わる方向と平行である(図3に模式図を示す)。また、電離圏中のプラズマは、大気との衝突によって磁力線平行方向にのみ動かされる。よって、大気振動の振幅が同じ場合でも、音波の伝搬方向と磁力線が平行に近いほど全電子数の変動は大きく表れる。震央(北緯3.3度、東経95.9度)付近は、地理的には北半球であるが、地軸と地球の磁場の軸がずれているために地磁気的には南半球になり、磁力線は水平から約15



