

シアの方々が暖かい心で、Koto Tabang 用地を驚くほど辛抱強く長期維持して呉れたことに対し深い感謝の気持ちを禁じ得ない。

さて EAR 建設は新しい赤道大気観測活動のスタートを意味する。この観測所が、将来、ICEAR に発展することを期待する。さらに、赤道、熱帯地域が大気、海洋物理学など無機地球環境研究課題の宝庫であるだけでなく、生物の種の宝庫であり、無機環境とも影響し合っている（塚谷，2001）と知るに及んで、この地域が地球環境研究の21世紀のフロンティアになること

を著者は想像している。

参考文献

- 加藤 進，1998：バンドウン工科大学 (ITB) での教師生活，*天気*，**45**，61-64。
 Maekawa, Y., S. Fukao, M. Yamamoto, M. D. Yamanaka, T. Tsuda, S. Kato and R. F. Woodman, 1993: First observation of the upper stratospheric vertical wind velocities using the Jicamarca radar, *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2235-2238.
 塚谷裕一，2001：植物のこころ，岩波新書，211pp.

始動した赤道大気レーダー：2. 期待と展望*

深尾 昌一郎**

1. はじめに

西スマトラ州パダン地方独特のテレポン (Telempong) という楽器がゆったりしたメロディーを奏でている。ざわめく開所式典の会場入口では民族衣装で美しく装った女性がペルセムパハン・ダンス (Tari Persembahan) で参列者を迎えていた。野外に設えた大きくきらびやかなインドネシア風テントの下には、長尾 眞京都大学総長、竹内行夫駐インドネシア大使、西田篤弘日本学術振興会監事 (前文部科学省宇宙科学研究所長)、廣田 勇日本気象学会理事長ら約40名の日本側参加者の顔があった。インドネシア側には、M. A. S. Hikam 研究技術担当国務大臣 (当時) はじめ、Mahdi K. 航空宇宙庁 (LAPAN) 長官、Gunawan I. 気象地球物理庁長官ら50名を越える関係者と優に100名を越す近郊村民が並んでいた。加えて海外から大型レーダーの原理を初めて提唱した W. E. Gordon 国際電波科学連合 (URSI) 名誉会長 (米国工学アカデ

ミー会員) や、大気レーダー研究の国際的リーダーである J. Roettger 独マックスプランク大気研究所研究主幹らがわざわざこの式典のために駆けつけてくれた (第1, 2図)。

1980年代半ばにスタートしたいわゆる赤道レーダープロジェクトは一時順調に発展すると期待されたが、その後は迷走を極めた。その経緯は先の加藤 進京都大学名誉教授の稿に詳しい。90年代後半になるとこのプロジェクトはもう死んだと言って憚らない人達も出てきた。しかしその間参列者はじめ多くの人達はそれぞれの立場からこのプロジェクトを支え続けてくれた。度々の現地調査や国際シンポジウムにも彼らがいち早く馳せ参じてくれた。これらの経緯の一部も既に随所で語られているので参照されたい (住, 1987; 山中, 1988; 山中ほか, 1989; 1990; 1994a, b; 1997; 加藤ほか, 1990; 津田ほか, 1991; 加藤, 1998)。開所式典は参列者がそれぞれ、会場横の直径110 mの円形敷地に整然と並ぶ560本ものアンテナ群を目にして「私の赤道大気レーダー」を懐古しながら感慨に耽った一時であった。

* First Light at the Equatorial Atmosphere Radar :
2. New Horizons Appearing at Sunrise.

** Shoichiro FUKAO, 京都大学宙空電波科学研究中心
ター. fukao@kurasc.kyoto-u.ac.jp

© 2001 日本気象学会

2. 赤道大気レーダー

一般に大気レーダーは大気の小な乱れ（乱流）による散乱を捉える。乱流の渦は背景の大気の流れ（つまり風）に乗って移動するので、この動きを測って背景風速を推定するのが大気レーダーの原理である（例えば、Fukao, 1991）。近年各地で大気レーダーの活躍はめざましく既に大気環境計測の強力なツールのひとつとして定着しているといつてよかろう。我が国でも気象庁が既に本（2001）年4月から小型大気レーダー25台で構成された「ウインドプロファイラ」ネットワークの運用を開始した（Hashiguchi *et al.*, 2001）。

しかし、大気レーダーの標的がレーダー電波が通過する大気そのものであることから、当然その散乱強度は極めて微弱である。このため高層大気を観測する大型大気レーダーには、アンテナ開口径100 m、放射電力数百 kW 以上という大規模な設備を必要とする。ちなみに高度数百 km の超高層大気までが観測可能な京都大学 MU レーダーの場合、放射電力は1,000 kW という巨大なものである。

今般完成した『赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar；EAR）』（第3、4図）のアンテナ開口径はMUレーダーより若干大きい、放射電力はその十分の一の100 kW である。当然感度は著しく劣る。しかしEARには我々がMUレーダーで培った独自の分散型送受信システム方式を採用している。これにより地表付近から下部成層圏迄の全高度域の風速ベクトルをはじめ、高度100 km 以上の電離圏擾乱など様々な物理量を高分解能・高精度で時間的に連続に観測しうる。運用はLAPANと昨（2000）年9月に締結した協定書に基づき共同で行われている。我が国の大学が海外で運用する初めての大型設備で、先駆的な学術的知見はもとより新しい形態の国際共同研究としてその成果が期待されている。

3. 赤道大気観測の意義

積雲対流は海陸分布や湿潤大気を持つ特性によって、個々の雲の寿命や広がりより遥かに長い時間かつ大きい空間スケールに組織化される。赤道域ではこのような雲に伴う気象変動が殆ど専一の観測対象となるので、そのための観測器は時間的に高分解能でかつ連続して観測できるものでなくてはならない。また地衡風・温度風の関係がそのままでは使えなくなるので、気圧・気温場から風速場を推定することもできない。そのようなスケールの難しさがあるにも拘らず、途

上国や海洋が大部分を占める赤道域では気象観測の密度は中緯度に比べて空間的にも時間的にも極めて低い。またたとえ各観測が十分に高精度で行われたとしても天気図にプロットできるような代表性のあるデータとなり得ない。気象衛星は確かに赤道域の雲分布や雲頂高度を毎時観測できるが、これに基く風速場の推定には高度分解能や精度面で本質的に限界がある。これらが赤道域の気象学、引いてはそこに端を発する様々の気候・大気環境変動を多く未解明としてきた最大の原因であり、EARのような大気レーダーを用いて初めて打破できるものと言える（深尾・山中, 1996）。

特に、西太平洋域からインドネシアにかけての「海洋大陸」と称される領域は積雲対流の励起が地球上で最も活発である。そこでは激しい上昇気流によって大気が成層圏に噴水のように噴き上げているとされている。一般に互いに混じりにくい対流圏と成層圏の大気がインドネシアの上空で混じり合っているわけである。オゾン層を破壊するフロンもここから入り込み成層圏内に広がって南極まで運ばれ、オゾンホールを作っていることがわかっている。またこの対流活動は、地表面の熱エネルギーを対流圏上層に輸送する熱エンジンの役割を果たしており、全地球規模の気候とその変動に大きな影響を与えている。そのためこの地域での積雲対流活動を理解することはインド洋モンスーンやエルニーニョ南方振動(ENSO)などの地球規模の気候・気象変動の解明に極めて重要な意味を持っている（Nitta *et al.*, 1992；Saji *et al.*, 1999）。

一方、第5図に示すように、対流圏における積雲対流により多種の大気波動が励起される。周期が数日～約20日の赤道波（ケルビン波、混合ロスビー重力波など）、周期が一日および半日の大気潮汐、および周期が数分から数十時間に分布する大気重力波などである。また赤道上ではコリオリ力の効果が消失するという特異性から、赤道域では上方伝搬可能な大気波動の周期帯域が極めて広がるのが特徴である。またこれらの大気波動は空間スケールでも数 km から数万 km という極めて幅広いスペクトル帯に分布している。赤道域は大気波動が最も豊富な領域であるといつてよいのである。

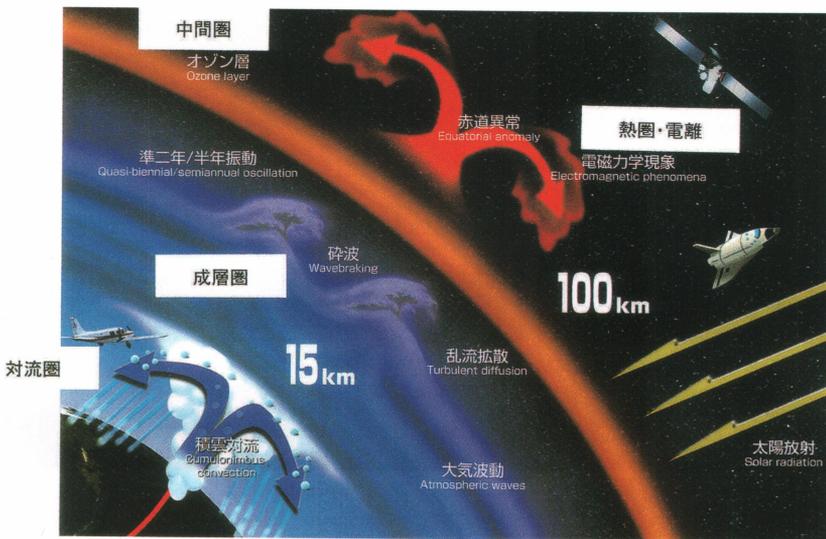
これらの大気波動は鉛直ならびに水平方向に伝搬し様々な過程を経て消滅する。その結果、波動エネルギーと運動量が励起源から遠く離れた場所と高度に輸送されることになる。その途上で異なる大気波動が互いに影響しあったり、また大気波動と背景風が相互に作用



第1図 赤道大気レーダー開所式典、挨拶をする筆者。



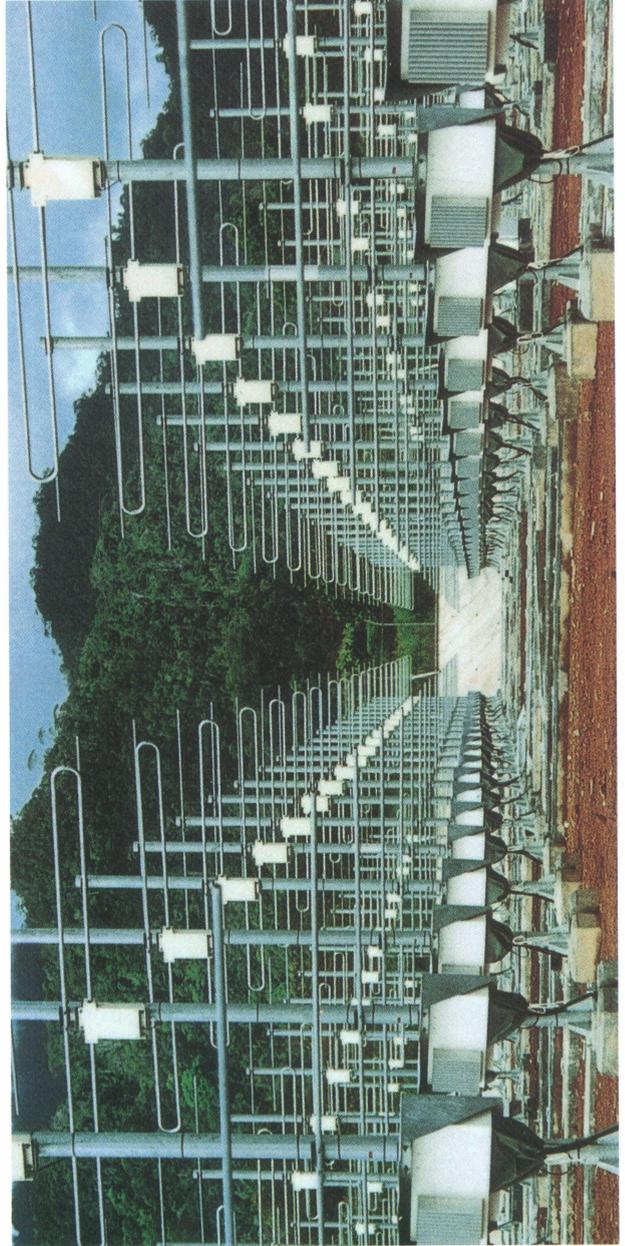
第2図 開所式典参加者。



第5図 赤道大気中の諸現象の模式図。



第3図 赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar ; EAR) の全景.



第4図 赤道大気レーダーの八木アンテナ群. 各アンテナの下方に受信モジュールが設置されている.

しあって赤道域特有の振動現象が生成されることが知られている。代表的なものとして平均東西流の半年周期振動や準2年周期振動などがある。近年これら主として中層大気で知られた変動が対流圏内の気候変動とも密接に関係していることが予想されている(例えば, Baldwin *et al.*, 2001)。

さらに赤道域電離圏(高度100 km以上)では、プラズマバブル(泡)と呼ばれる電子密度構造の顕著な乱れなど赤道域を特徴付ける多様な電離擾乱が発生する。この励起機構がまだ完全に説明されていないことから、そのきっかけ(seeding)に下方から伝搬してくる大気重力波の関与を指摘する研究者もいる。また電離圏は熱圏と重なって存在しており、太陽活動の変動を直接受ける領域であることから、まだ未解明の太陽変動・大気応答過程を理解する上でも極めて重要な高度領域である(Labitzke and van Loon, 1995)。

このように赤道域は地球大気全体にわたる諸現象の根源域であり、しかも地表付近から高度数百 kmにわたる広大な高度域が上下方向に密に結びついて存在している。しかしながら上述のスケールに対する観測的困難さと、そもそも赤道大気観測の歴史が中緯度にくらべて格段に浅いことが相俟って、現在でも数多くの問題が未解決のまま残されている。赤道大気はEARにとっても依然として魅力あふれる研究課題の宝庫なのである。

4. 国際協力

上述のとおり赤道大気の統一的理解には基本的に個々の小規模変動を分解しかつそれらが組織化した結果の大規模変動を俯瞰しうる観測が必要である。このためこれまでともすれば単地点観測が中心であった大気レーダーを多国間国際協力によりネットワークする準備が進められている。これは我々のEARを赤道域太平洋上からインド最南部にある米国・豪州・印の既存の大気レーダー網とネットワークし観測のスケールの制約を克服しようとするものである。

幸い先般、平成13年度科学研究費補助金特定領域研究(B)「赤道大気上下結合」(研究代表者：深尾昌一郎)が認められ6年間の計画でスタートした。これによりまずEARをはじめとする赤道インドネシア域の観測網を整備・拡充し、次いで上述の国際大気レーダーネットワークを構築する予定である。出来れば、数値モデリングも援用して観測空白域の補完と観測結果の物理的解釈を行いたいと願っている。

この多国間国際協力にはインドネシアは勿論周辺の東南アジア諸国も含まれる。赤道レーダー提案当初からEAR設置までの雌伏10数年の時間は、それらの諸国に気象学・大気科学の研究者を育成するという意味では十分に意義のある時間であった。またEAR設置場所には、WMOが東南アジア域唯一の全球大気監視(GAW)点を設置しており日本や豪州が様々な観測を既に実施あるいは現在実施中である。従ってEARは、単に大気レーダー観測の中核基地のみならず、過去にない本格的な国際的・学際的交流の拠点ともなると期待される。

5. 期待される成果と将来展望

EARと従来から赤道域で個別に展開されてきた各種観測との国際的な連携を図ることにより、上記のスケールの制約が克服され、謎の多かった赤道大気諸変動の実態と生成機構が明らかにされるものと期待される。またこれらの変動を下層から超高層(熱圏・電離圏)に至る全高度域の上下結合という視点で捉えることは我々が“発信”し、最近10年来独自に温めてきたものである(廣田ほか, 1992)。これによって赤道大気の統一的理解が進めば間違いなく関連研究分野の発展に大きなインパクトを与えるだろう。

EARが設置された本(2001)年の夏は日本では記録的な猛暑・少雨であったが、これとインド洋ダイポールモード、或いは次のエルニーニョとの関連について既に新聞などで報じられている(山形俊男氏ほか)。近い将来、既に刻々と取得されているEARデータからそれら重要な経年変動の解明や予測に繋がる知見が得られるのではないかと強く期待される。より基本的な赤道大気構造・力学に関する知見としては、高度6 km付近に存在する顕著な不連続面が既に確認されつつある。これは上方伝搬波動励起源(Tsuda *et al.*, 1994)、晴天日昼間混合層上端(Hashiguchi *et al.*, 1995)、森林火災起源エアロゾル・微量気体上限(Fujiiwara *et al.*, 2000)などとして過去に指摘された高度であるが、今EARで殆ど毎分、対流圏～下部成層圏を貫いて得られているデータから統一的理解と詳細な内部構造・時間的変動が得られる見込である。

なお、EARは我が国の地球科学分野で初めて赤道域で長期間運用に供される大型観測装置である。従来の科学研究費補助金などによる短期間に限られたキャンペーン的観測とは質的に異なった充実した継続観測が期待される。当然このためには現地の研究者や技術者

を我が国または現地で養成する体制の整備を急ぐ必要もあるだろう。しかしEARという半恒久的な設備を中核とする研究は、間違い無く我が国が21世紀に目指すべき本格的な海外観測の新しい形態を提起するものとなるだろう。

謝 辞

本稿の各部分で神戸大学山中大学教授と京都大学宇宙電波科学センター関係者に夥しいご教示を賜った。謝して記す。

参 考 文 献

- Baldwin, M. P., L. J. Gray, T. J. Dunkerton, K. Hamilton, P. H. Haynes, W. J. Randel, J. R. Holton, M. J. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, D. B. A. Jones, J. S. Kinnerson, C. Marquardt, K. Sato and M. Takahashi, 2001: The quasi-biennial oscillation, *Reviews of Geophysics*, **39**, 179-229.
- Fujiwara, M., K. Kita, T. Ogawa, S. Kawakami, T. Sano, N. Komala, S. Saraspriya and A. Suropto, 2000: Seasonal variation of tropospheric ozone in Indonesia revealed by 5-year ground-based observations, *J. Geophys. Res.*, **105**, 1879-1888.
- Fukao, S., 1991: (Ed) International School on Atmospheric Radar: Lecture Notes, MAP Handbook (ICSU Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics), **30**, 364 pp.
- 深尾昌一郎, 山中大学, 1996: 地球環境科学における大気水圏観測技術, 学術月報 (日本学術振興会), **49**, 1379-1386.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, T. Tsuda, M. D. Yamanka, D. L. Tobing, T. Sribimawati, S. W. B. Harijono and H. Wiryosumarto, 1995: Observations of the planetary boundary layer over equatorial Indonesia with an L-band clear-air Doppler radar: Initial results, *Radio Sci.*, **30**, 1043-1054.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama, and S. Watanabe, 2001: A lower troposphere radar: 1.3-GHz active phased-array type wind profiler with RASS, submitted to *J. Meteor. Soc. Japan*.
- 廣田 勇, 深尾昌一郎, 山中大学, 1992: 地球惑星科学関連学会1992年合同大会共催シンポジウム「赤道大気上下結合」の報告, *天気*, **39**, 457-458.
- 加藤 進, 1998: バンドウン工科大学(ITB)での教師生活, *天気*, **45**, 61-64.
- 加藤 進, 山中大学, 山形俊男, 上田 博, 岩坂泰信, 高橋 劭, 1990: 「インドネシア地域における赤道大気観測に関する国際シンポジウム」の報告, *天気*, **37**, 477-482.
- Labitzke, K. and H. van Loon, 1995: Connection between the troposphere and stratosphere on a decadal scale, *Tellus*, **47A**, 275-286.
- Nitta, Ts., T. Mizuno, and K. Takahashi, 1992: Multi-scale convective systems during the initial phase of the 1986/87 El Nino, *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 447-466.
- Saji, N. H., B. N. Goswami, V. Vinayachandran and T. Yamagata, 1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, **401**, 360-363.
- 住 明正, 1987: ポンティアナック訪問記, *天気*, **34**, 723-724, 699.
- 津田敏隆, 塩谷雅人, 中村健治, 宮原三郎, 竹内謙介, 1991: 「インドネシア域における赤道大気観測に関する第3回国際シンポジウム」の報告, *天気*, **38**, 747-755.
- Tsuda, T., Y. Murayama, H. Wiryosumarto, S. W. B. Harijono and S. Kato, 1994: Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia .2. Characteristics of gravity waves, *J. Geophys. Res.*, **99**, 10507-10516.
- 山中大学, 1988: ポンティアナ訪問記 (その2), *天気*, **35**, 687-688.
- 山中大学, 中村卓司, 1989: バダグン・ブキティンギ訪問記, *天気*, **36**, 650-652.
- 山中大学, 山本 衛, 廣田 勇, 福西 浩, 近藤 豊, 田中 浩, 1990: ブキティンギ訪問記(その2), *天気*, **37**, 308-310.
- 山中大学, 村上勝人, 萩野和彦, 新田 勲, 小川忠彦, 1994a: 「インドネシア地域における赤道大気観測に関する第4回国際シンポジウム」の報告, *天気*, **41**, 47-53.
- 山中大学, 柳井迪雄, 松本 淳, 丸山 隆, 1994b: 「インドネシア地域における赤道大気観測に関する第5回国際シンポジウム」の報告, *天気*, **41**, 385-392.
- 山中大学, 余田成男, 橋田 元, 鶴田治雄, 1997: 「インドネシア地域における赤道大気観測に関する第6回国際シンポジウム」の報告, *天気*, **44**, 35-41.