

# 赤道大気レーダー建設の意義と経緯

深尾昌一郎 (1967 年卒)

**背景：**西太平洋からインド洋にかけての赤道インドネシア域は「海大陸」と称され、地球大気大循環のエンジンで、グローバルな気候と気象変動の根源域とされている。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力学的・化学的に上下方向に強く結びついている（大気上下結合）。しかしながら現象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比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。赤道大気は我々大気科学者にとって魅力あふれる研究課題の宝庫なのである。

1984 年京都大学超高層電波研究センター（センター長・教授加藤進；以下敬称略）は独自技術で大型大気レーダー「MU レーダー」を開発。多くの研究実績により中層・超高層大気の力学に極めて有用であることが証明され、国際的に高い評価を受けてきた。1980 年代半ばから、同センター研究者を中心に、この重要で未知の赤道インドネシア域に日本の出資及び技術投入により、『赤道レーダー』を中核とする、準恒久的な国際共同利用研究施設『国際赤道大気研究センター (ICEAR)』を建設する構想が進められていた。大気上下結合がとくに顕著な赤道インドネシア域こそ大気レーダー観測の格好の場であった。この重要で未知の地に日本の出資および技術投入により、超大型の『赤道レーダー』を建設し、地表から高度 1,000 km までの大気を一気に精密科学の対象にしようというわけである。

**国際的支援：**本計画の発端は、1982 年 SCOSTEP が「国際赤道観測所 (IEO)」の議論を開始したことにある。米国が WCRP/TOGA にあわせて太平洋島嶼に大気レーダーをネットワークする構想 (Trans-Pacific Profiler Network; TPPN) を支援することが目的であった。1985 年、SCOSTEP は IEO を「新赤道観測所小委員会 (NIEO)」に改組、日本の赤道レーダー案を中心とした議論を始めた。とくに途上国との協同研究は SCOSTEP が高く評価するところであり、国際的な支持を広げることになった。SCOSTEP と URSI (国際電波科学連合) が赤道レーダー建設を支持する旨の勧告をそれぞれ 1990 年及び 1993 年に決議した。

**ハビビ大臣との遭遇：**赤道レーダー計画と呼称された本計画は、インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) との共同研究として、ゆるりとスタートした。LAPAN が本計画の将来性を見越して、これに組織の発展を掛けている意気込みが感じられたが、計画推進の進捗は決してスムーズではなかった。1980 年代末、思いがけず本国技術評価応用庁 (BPPT) 長官 (研究技術担当国務大臣) B. J. ハビビ (Habibie) と知り合ったことが転機となった。仲介役は日本・インドネシア科学技術フォーラム (JIF) 事務局長所澤仁。ハビビはそのインドネシア側議長を務めていた (日本側議長は元外務大臣大来多佐武郎)。1988 年 11 月、ハビビは信楽を訪問し MU レーダーの実物を目にして、強い感銘を受けた様子であった。彼は常々、途上国が先進国に追い付くには最先端技術の開発こそが必要と主張していた。それは先進国から使い古した技術の援助を受けているだけでは何時まで経っても追いつくのは無理で、最先端技術を自らのものにして初めて可能になる、という考えであった。赤道レーダーがそのような技術のひとつと考えた彼は私たちに力強い支援を惜しかなかった。

ハビビの信楽訪問を機にインドネシア側の受け入れ態勢は一気に進んだ。大臣の許可で我々は建設用地をインドネシア国内で自由に探すことができた。私たちは BPPT や LAPAN の関係者と各地を歩き回り、西スマトラ州ブキティンギ市郊外コトタバング (Kototabang; 南緯 0.2° , 東経 100.32° ) の丘陵に辿り着いた。インドネシア政府は日本に計画推進を熱く求めた。1990 年 5 月、訪イする海部首相にスハルト大統領 (当時) は赤道レーダー建設のための資金協力を直接要請、と日伊のマスコミが報じた。我々には予算化決定が間近く思われ、緊張して時の経過を待った。しかし何も起こらなかった。事態は翌年もかわりなかった。

順調に実現に至ると期待された本計画は、その後迷走を極めた。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。多くの支持者が去っていった。だが我々が諦めることは決してなかった。

**文部省新プログラムの発足:** 文部省が科学研究費補助金創成的基礎研究費（いわゆる新プロ）を立ち上げることになり、そのひとつに大気・海洋・生態分野で「アジア・太平洋域を中心とする地球環境変動の研究：地球環境科学の総合的展開」が取り上げられた。赤道レーダー関連研究も副計画「西太平洋域における大気・海洋結合系のダイナミックスの観測」が認められ、1990年から1994年にかけて5年間実施された。我々も初めて赤道域で本格的な研究ができることから力が入った。1992年にはジャカルタ郊外スルポンの国立研究科学技術センター・プスピテク（PUSPIPTEK）敷地内にレーダー観測所を開設し、大気最下層を対象とする境界層レーダー（BLR）と上部中層大気を観測する流星レーダーを稼働させた（Tsuda et al., 1995）。

**学術協力:** 我々は落胆こそしたが決して絶望していなかった。赤道レーダー計画の「筋の良さ」を自負していたし、信楽のMUレーダーからは次々と新しい成果が出ていた。安心して大計画に打ち込めた。しかしJIFがやったような組織的な取り組みはもはや望むべくもなかった。むしろ空いた時間を地味な研究活動に注げたことは幸いであった。SCOSTEPは国際共同研究（Solar-Terrestrial Energy Program; STEP; 1990-97）事業を立ち上げた。我々は新プロにありながら、求められてSTEPの大気関係課題も担当した。

1989年3月、ハビビの提案を受けてジャカルタで開催した「インドネシアと世界の気候」シンポジウムは名称を「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」（通称ハビビ・シンポジウム）と代えて、ジャカルタやバンドンで、1990年代半ばまで都合6回開催した。この会には世界各国から著名な研究者が多数出席し、水準の高いシンポジウムと評価された。またIAMASやCOSPAR、IAGA、IUGGなどの国際会議でたびたび関連シンポジウムやセッションを開催した。また1995年3月にはほぼ4年に1度毎に開催されてきた「赤道超高層物理学に関する国際シンポジウム（ISEA）」の第9回をバリ（Bali）島で開催した。

一方、SCOSTEPは大規模な国際共同研究を終えると、次の大規模研究をスタートするまでの間小規模な国際プロジェクトを走らせてきた。1997年にSTEPを終了すると、5つの小プロジェクトを稼働したが、そのひとつ「赤道大気上下結合（EPIC）」を深尾が提唱、採択されて1998年から2002年にかけて実施に移された。

以上の研究活動は、インドネシア側のLAPAN・BPPT・BMGらと共同で実施した。またこれらの研究所やバンドン工科大学（ITB）などから、大勢の研究者や留学生の受け入れも行って学術協力関係の発展を図った。幸い、このような努力は国内外から高い評価を受けた。

**路線変更:** そもそも赤道レーダー計画は地理的特異点における準恒久的な観測という意味では我が国の南極事業と似ており、基礎科学としての最先端に行く大型観測施設の建設という意味では国立天文台のハワイ大型望遠鏡「スバル」と似ている。しかし研究基盤や保安などが脆弱な途上国での建設という点が根本的に異なっており、これまでにないユニークで難しい計画であった。これをJIFの手を借りずに大学だけでやるにはいかにも大き過ぎた。この際身の丈にあった計画に縮小して、少し規模の小さいレーダーを建設するのが現実的ではないか。まず赤道域に我々の足跡の第一歩を画すべきではないかと考えた。

1990年代半ばになって、規模の小さい可搬型の『赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar; EAR）』案が固まった。文部省（当時）の中にこの構想に理解を示してくれる人もいた。その後紆余曲折があったが、我々は辛抱強く好機到来を待った。チャンスは思い掛けないところにあった。

**ミレニアム補正予算:** 1999年夏、首相（当時）小渕恵三は景気振興策として大規模な「ミレニアム」補正予算を組んだ。思いがけずEARがこれに採択されたのである。早速科学技術大臣ヒカムからEAR受入れ歓迎の文書が届き、対応機関をLAPANにしたいと言ってきた。現地で建設工事が始まったのは翌年夏からである。2001年3月EARは完工した（図1）。EARのアンテナ開口径は110mとMUレーダー並みではあるが、送信電力はその10分の一の100kWである。当然レーダーの感度は著しく劣る。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、560本の各アンテナに送受信モジュールを設置している。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100km以上の電離圏擾乱なども高分解能・高精度で時間的に連続に観測しうる（Fukao et al., 2003）。EARの運用はLAPANと協定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

ての準恒久的な大型観測設備で、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将来が期待されている。

2001年6月26日EAR開所式典が現地で挙行された。廣田勇（当時日本気象学会理事長）のほか、京都大学総長長尾眞、駐インドネシア大使竹内行夫（後外務次官、現最高裁判事）、日本学術振興会監事（当時、元文部科学省宇宙科学研究所長）西田篤弘ら約40名の日本側参加者の顔があった。インドネシア側には、ヒカムはじめ、LAPAN 長官マハディ、BMG 長官グナワンら50名を越える関係者と優に数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国際電波科学連合（URSI）名誉会長（米国科学アカデミー会員）W. E.ゴードンらがわざわざこの式典のために駆けつけてくれた。

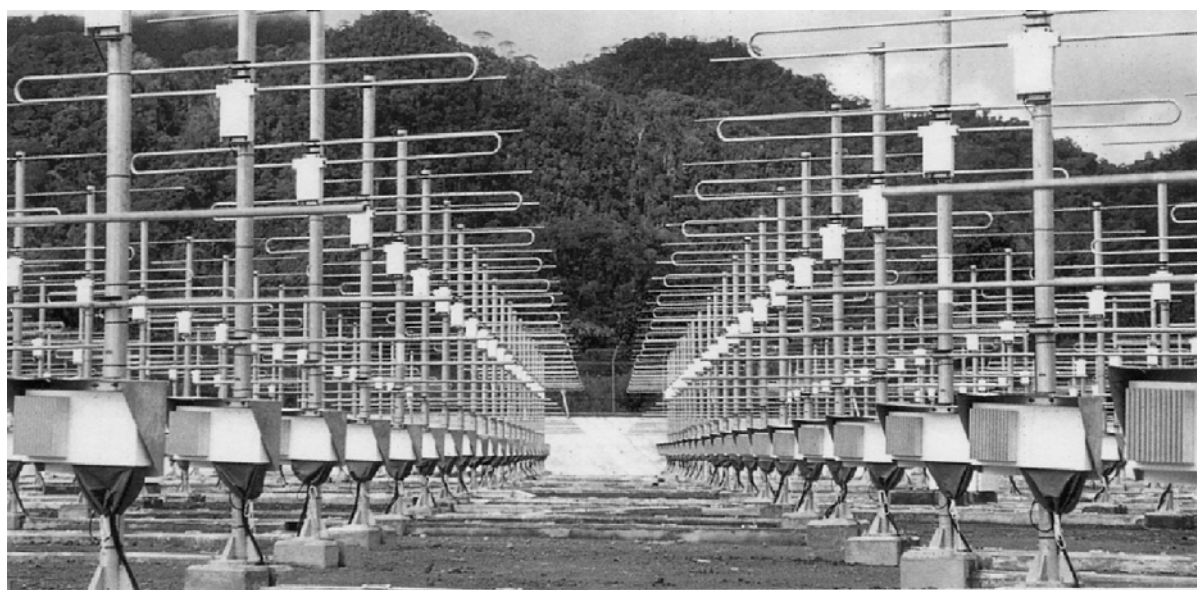


図1 (上) インドネシア西スマトラ州コタババンに建設された赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar; EAR) の全景。(下) 赤道大気レーダーの560本の八木アンテナ群。各アンテナの下部に送受信モジュール (箱状) が設置されている。

赤道大気上下結合研究：2001年（平成13年）9月に文部省科学研究費補助金特定領域研究『赤道大気上下結合(Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere; CPEA)』（平成13～18年度）が採択された（Fukao, 2006）。

CPEAでは、謎の多かった赤道大気諸変動を下層から超高層に至る全高度域の上下結合という視点で捉えた（Fukao, 2009）。これは我々が発信し、最近10数年来独自に温めてきたものである。これによって赤道大気の統一的な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。

幸い、所期の狙いどおりCPEAはインドネシア域赤道大気の上層結合に夥しい新鮮な知見を齎した。積雲対流の影響は遠く高度100 km近傍の下部熱圏大気にまで様々なかたちで届いていることが分かった。

種類が特定された波も沢山ある。一般には混じり難い対流圏と成層圏大気が混合する不安定現象のひとつを初めて捉えることにも成功した。また赤道超高層大気中に中緯度起源らしい擾乱があり、しかもそれが南北対称になっていて赤道に向かって伝搬しているらしいことが半明した。赤道大気は予想以上にしっかりとしかも大規模に結合していることが明らかとなったのだ。これらの成果の一部は *Journal of the Meteorological Society of Japan* (Fukao et al., 2006) や *Earth, Planets and Space* (Fukao et al., 2009) などの特集号に掲載されている。

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た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できる。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今後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になるだろう。

## 参考文献

- Fukao, S., What we have learnt from CPEA (Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere): A review, *Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium*, Eds. T. Tsuda, R. Fujii, K. Shibata, and M. A. Geller, 295 - 336, TERRAPUB, Tokyo, 2009.
- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, *Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System description and first results*, *Radio Sci.*, 38, 1053, doi:10.1029/2002RS002767, 2003.
- Fukao, S., H. Hashiguchi, and others, Eds., *CPEA - Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere*, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 84A, Special Issue, 351 pp., Meteorological Society of Japan, 2006.
- Fukao, S., M. Yamamoto, S. Gurubaran, N. Balan, and T. Nakazawa, Eds., *Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA)*, *Earth, Planets and Space*, Vol. 61, No. 4, 383 - 549, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences (SGEPSS), 2009.
- Tsuda, T., S. Fukao, M. Yamamoto, T. Nakamura, M. D. Yamanaka, T. Adachi, H. Hashiguchi, N. Fujioka, M. Tsutsumi, S. Kato, S. W. B. Harijono, T. Sribimawati, B. P. Sitorus, R. B. Yahya, M. Karmini, F. Renggono, B. L. Parapat, W. Djojonegoro, P. Mardio, N. Adikusumah, H. T. Endi, and H. Wiryosumarto, *A Preliminary Report on Observations of Equatorial Atmosphere Dynamics in Indonesia with Radars and Rawinsondes*, *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 393-406, 1995.