

107:108:5012:02 (赤道大気; 上下結合; CPEA; 赤道大気レーダー)

## 4. 赤道大気上下結合

深尾 昌一郎\*

### 1. 歴史的経緯

赤道域は強い太陽放射のため積雲対流活動が地球上で最も活発であり、これによって励起される各種大気擾乱が地表近くから高度数百 km に至る広い高度域に強い上下結合を引起している。しかしながらこれまで観測の欠如または未蓄積のため多くの重要な物理過程が未解明のまま残されてきた。本特定領域研究『赤道大気上下結合 (Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere; 略して CPEA)』は、赤道域でも特にこの上下結合が顕著に発現すると考えられる海洋大陸・赤道インドネシア域でその観測的解明を目指している (Fukao, 2006)。

まず本特定領域研究 CPEA が決して唐突に立案されたものでないことを指摘しておきたい。京都大学を中心として長い期間に育まれた、いわば“学風”のようなものがその底流にあると言ってよい。それを特色付けるキーワードは、ユニークな研究視点、独創的な観測技術、及び国際協力の3つである。

CPEA が構想された端緒は、1970年代初めの『中間圏・電離圏大気力学研究会』にまで遡る。従来別個に研究されていた2つの大気圏を上下結合というユニークな研究視点で統合的に捉えようとしたもので、後の1980年代に盛んになった中層大気研究が既に世界に先駆けて推進されていたのである。1983~85年の間、国際太陽地球系物理学科学委員会 (Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics; SCOSTEP) は『中層大気国際共同研究計画 (Middle Atmosphere Programme; MAP)』を実施したが、同研究会の関係者は当然その国際計画の立案と推進に

主導的な役割を果たすことになった。我が国における MAP で特筆されるのは、京都大学超高層電波研究センター (当時) が独自技術で開発した MU (Middle and Upper atmosphere) レーダーであり、この画期的な観測技術の登場によって初めて、下層から超高層に至る大気圏が地上からの精密科学観測の対象となった。

大気中のエネルギー移動の主要部分是对流・移流で行われる。大気の子午面循環は中緯度域の強い偏西風と直接関係しており、台風や高低気圧など対流圏内の気象現象と密接にかかわっている。一方、中層大気への影響の点では、下層で発生した大気波動の伝搬によって運動量やエネルギーが持ち込まれる効果が大きい。1980年代に大気波動の力学的摩擦効果の発見という大発見があったが、これは、伝搬性大気波動がグローバルな大気循環を駆動していることの理論予想から始まり、その後観測的検証が行われた。この観測に MU レーダーをはじめとする大気観測用の大型レーダーが非常に大きな働きをしている (例えば Tsuda *et al.*, 1990)。一連の研究によって明らかになったことは、下層大気中のマイクロなプロセス (大気波動) が高層大気中の大規模スケールの大気状態 (平均流) を決定するという、大気上下結合の典型的な事実であった。

その後海洋大陸・赤道インドネシア域を中心とした、地球環境に関する文部省 (当時) 『新プログラム (創成的基礎研究: 1990~94年)』により、京都大学が独自に開発した小規模なレーダー (境界層レーダー; BLR, 並びに流星レーダー) やラジオゾンデなどを赤道インドネシア域に投入し、同国の関連機関 (科学技術評価応用庁; BPPT, 並びに航空宇宙庁; LAPAN) と共同で観測研究を実施、赤道域大気を貫

\* 京都大学生存圏研究所. fukao@rish.kyoto-u.ac.jp

© 2007 日本気象学会

いて伝搬する大気波動などの解明で成果を挙げた。ここで開発されたBLRは後に発展し、気象庁が全国展開した局地的気象監視システム(Wind Profiler Network and Data Acquisition System; WINDAS)の構成レーダーの基礎となった(Hashiguchi *et al.*, 2004)。

これらのプログラムが主に中層大気とそれより下方の大気を対象としたのに対し、中層大気より上方の熱圏・電離圏を主対象としたのが、1990~1995年の間、SCOSTEPが実施した『太陽地球系エネルギー国際協同研究計画(Solar Terrestrial Energy Program; STEP)』であった。STEPでは、観測データが乏しい赤道太平洋域の大気上下結合を研究対象とする「赤道域大気結合力学国際協同観測」(Coupling And Dynamics of Regions Equatorial; CADRE)や「国際中間圏下部熱圏観測」(Mesosphere-Lower Thermosphere Coupling Study; MLTCS)などが、現CPEAの中心メンバーが主力となって実施された(Fukao *et al.*, 2004)。

## 2. 研究の意義

以上の歴史的経緯を踏まえてCPEAでは、地球大気変動の根源域である赤道大気を地表から熱圏・電離圏まで一体の研究対象として取り扱っている。赤道域を中心に地球に降り注ぐ太陽放射エネルギーの再配分に関して、従来は対流圏を中心とした子午面大気循環、および赤道から中高緯度に向かう海流が重要であるとされてきたが、CPEAではこれらに加えて、赤道域の大気圏全高度域で普遍的に見られる各種大気波動による三次元輸送が重要であることに着目した。高高度の大気状態に直接影響を与えうるのは、高度方向に伝搬する大気波動のみだからである。これは従来のように、異なる高度層を個別に研究するのでは解明できないプロセスであり、本特定領域研究CPEAが取り組む意義と必然性がある。

大気波動の特性と生成機構は赤道大気に残された未解決課題の中で最も根本的なもののひとつである(e.g., Andrews *et al.*, 1987)。それらの大部分は、究極的には下層の対流圏や下部成層圏大気の、個々としては比較的小規模・小振幅の擾乱が上方へ伝搬して、何らかのメカニズムで組織化することに起因するものと想定される。しかしながら、従来の観測的研究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。京都大学宇宙電波科学研

究センター(同超高層電波研究センターが平成12年4月に改組された。現生存圏研究所)は、平成13年3月にMUレーダーと同方式の大型高機能の『赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)』を赤道直下のインドネシア共和国スマトラ島ブキティンギ市郊外コトタバン(Kototabang; 0.2°S, 100.32°E)に完成させ、同年7月より本格的な観測を開始した(Fukao *et al.*, 2003)。CPEAは赤道大気上下結合が特に卓越すると目される海洋大陸・赤道インドネシア域でその過程の観測的解明を目指すものである。アプローチの特色は、EARを中心として多様な観測装置を集積し、対流圏から成層圏・中間圏を経て熱圏・電離圏へと至る赤道大気の高高度域を一気に観測する観測ネットワークを構築、赤道大気の力学的上下結合の定量的理解を得ることにある。個々の観測対象としては古典的気象学、並びに超高層物理学の範疇に属するものも含むが、これを下層から超高層(熱圏・電離圏)に至る大気圏全高度域の上下結合という視点で捉え、それによって地球大気環境全体の変動の根源と想定される赤道大気について、新しい統一的研究法と解釈の確立を目指すものである(Fukao, 2006)。

## 3. 研究計画の概要

CPEAは6か年計画として平成13年度に発足した。6研究班構成となっている(第1図)。全体計画は「1. 機器開発フェーズ」、「2. 個別研究フェーズ」及び「3. 総合研究フェーズ」からなる。発足当初の平成13年度から17年度にかけて、第2図に示す各種の新観測装置の開発と現地設置を進める一方、赤道大気レーダー(Equatorial Atmosphere Radar; EAR)など当初から個別に展開されてきた一部の既設観測装置による長期観測も並行して開始した。

これまでにEARサイトとその周辺に整備された観測装置には以下のものがある：Xバンド降雨レーダー、Xバンド気象ドップラーレーダー、EAR受信専用システム、EAR/RASS(Radio Acoustic Sounding System)温度観測装置、流星レーダー、全天大気光カメラ、高感度分光フォトメーター、GPS(Global Positioning System)シンチレーション受信機、大気観測用大型高機能ライダー、水蒸気ラジオメータ、マイクロレインレーダー、及び地上気象観測装置など。またMFレーダーをポンティアナ(カリマンタン島西部)とパムプク(ジャワ島南部)に設置・整備して赤道インドネシア域観測ネットワークを

完成した。同時に観測装置の運用・監視とデータ取得のため、EAR サイトと京都大学（宇治市）を結ぶ衛星データ回線も整備した。これに加えてインドネシア・マレーシア・シンガポールの計7か所にラジオゾンデ打ち上げ拠点を整備した。何れもCPEA関係者が現地の政府・研究者技術者と共同して運用している。これにより我々は赤道インドネシア域コトパンを中心とした、赤道大気に関する世界屈指の観測拠点を構築することに成功した。

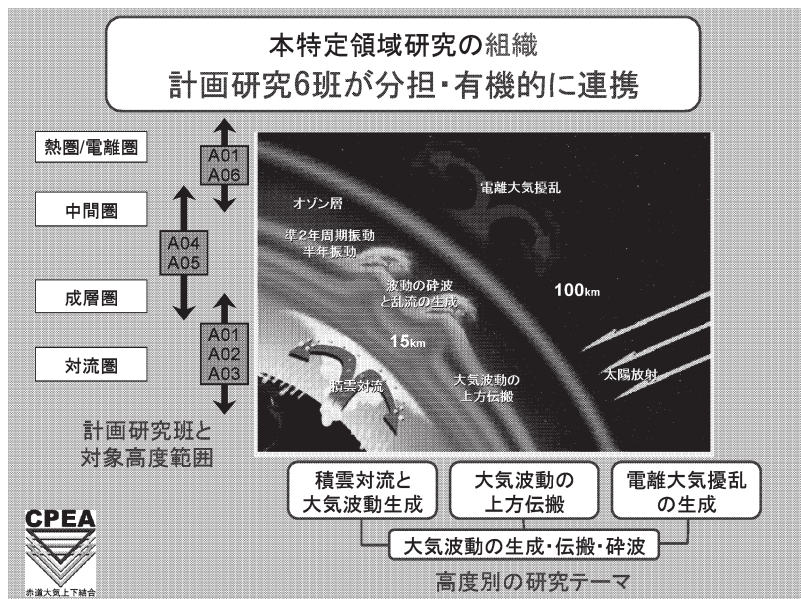
これら最新の観測装置の集積が完了するのを待つ

て、機器開発フェーズと個別研究フェーズの1つの集大成として、平成16年3～5月に第1次国際観測キャンペーン（CPEA-I）を成功裡に実施、引き続き平成17年11～12月には第2次国際観測キャンペーン（CPEA-II）が実施される予定になっている。かくて今、CPEA研究者はかつてだれも手にしたことがないほどの夥しい量のデータを手にしている。

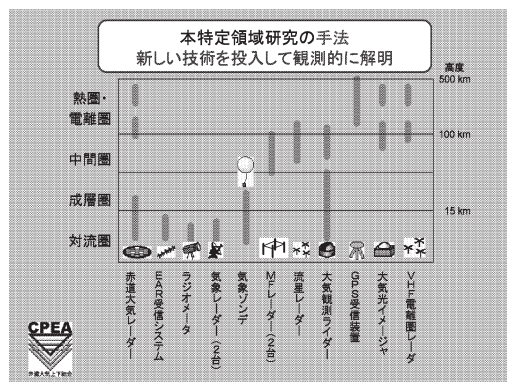
これに加えて、CPEA研究者の周辺には、計算機シミュレーションによって大気波動の励起・伝播・砕波や、中性大気と電離圏プラズマの結合を研究する研究協力者がおり、多様な観測成果の定量的解釈に参画している（例えば Horinouchi *et al.*, 2002）。

#### 4. これまでの成果

上述のようにCPEAが目指すところは、海洋大陸・赤道インドネシア域で大気波動の発生の様子を明らかにし、それが上層に与える影響を調べることである。大気は対流圏・成層圏・中間圏・熱圏・電離圏と呼ばれるいくつかの層に分類される。そのため、まず離れた大気層の同時観測から大気層間の運動量・エネルギーのやり取りを明らかにする必要がある。一方、大気層の境界面（圏界面）における大気塊の相互作用を調べることも重要である。以上を踏まえて、これまでの研究成果から特筆すべきものを数例挙げる。いず



第1図 特定領域研究『赤道大気上下結合（CPEA）』の研究概要と6研究班の対象課題・高度域。



第2図 赤道大気レーダー（EAR）サイトとその周辺に整備された観測装置と観測高度域。

れもまだ断片的な結果ではあるが、従来の古典的な描像を越えるものである。

##### 4.1 OLR と対流活動の対応

一般に衛星高度から観測されるOLR（Outgoing Longwave Radiation；外向長波放射）は背の高い活発な積雲対流活動の指標とされている。しかし地上に設置された降雨レーダー観測との対比により、OLRは海洋大陸・赤道インドネシア域では必ずしも背の高い降水システムの指標になっていないことが分かってきた。つまり降雨レーダーで観る積雲対流の背高は、

OLRで観る対流活発期に対応して高くならず、むしろ対流不活発期の方が高くなるのである。これは前者では組織化された層状性雨の割合が比較的大きくなり、一方後者では局地的な激しい対流活動が卓越するためと考えられる。降雨粒径分布にもこの差異が明瞭に現れている (Kozu *et al.*, 2005)。特に雲頂が10 kmを越える背の高い積雲対流はOLRで観た対流不活発期に多く、発雷数とも良い相関を示している (Morita and Takayabu, 2004)。

#### 4.2 圏界面における赤道ケルビン波の砕波

EARとラジオゾンデの組合せ観測により、海洋大陸・赤道インドネシア域の対流圏界面の直上で赤道ケルビン波を検出し、それが不安定(砕波)を引起す過程を詳細に追うことが出来た。砕波の発生と共に対流圏界面における大気乱流強度が著しく増強していることから、対流圏・成層圏の非可逆的な大気混合が発生していることが明らかとなった (Fujiwara *et al.*, 2003)。また、EARの長期連続観測から、対流圏界面において風シアによる不安定現象 (Kelvin-Helmholtz不安定) が準定常的に発生し、薄い大気乱流層が存在していることが明らかにされた (Yamamoto *et al.*, 2003)。

#### 4.3 中間圏界面高度にまで及ぶ対流活動

積雲対流活動の影響が中間圏界面高度域82~88 kmの力学にまで及んでいる証拠も見つかった。例えば、ジャカルタの流星レーダーで長期間観測された東西風速、特にその一日周期潮汐波の季節内振動と海洋大陸・赤道インドネシア域のOLRの季節内振動には準2年周期が卓越し、その両者により相関がある (Isoda *et al.*, 2004)。また同OLRが、インドネシアやインド南部の中間圏界面高度域における一日周期潮汐波と相関の良い年々変動 (El Niño-Southern Oscillation; ENSO) を示すことも明らかになっている (Gurubaran *et al.*, 2005)。海洋大陸・赤道インドネシア域の活発な対流活動で励起された波動が広い経度にわたって運動量やエネルギーを上方へ伝えている証拠と言える。

#### 4.4 赤道電離圏を介した南北中緯度電離圏の結合

導電性の良い地球磁力線でつながった(地磁気共役の位置関係にある)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(高度250 km付近からの放射光を撮像)で巨大な電離圏プラズマバブルの同時観測に成功、両者が完全に南北対称な形状となることを初めて実証した (Otsuka *et al.*,

2002; Shiokawa *et al.*, 2004)。また、両地点で同時に、際立って地磁気共役性がよい中規模伝播性電離圏擾乱 (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances; MSTID) が初めて観測された (Otsuka *et al.*, 2004)。元来、同擾乱はHines (1960) がそれを引起す要因として大気重力波を着想したものであるが、実態は中性大気と電離圏プラズマ間の強い結合を示唆するものであることが判明した。これらの結果から、赤道電離圏を貫く地球磁力線を介して、南北の中緯度電離圏が電磁氣的に強く結合していることが予想される。

なおCPEA開始当初からCPEA-I終了時までの主な学術成果はJournal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 84A (Fukao *et al.*, 2006) にまとめられている。

### 5. 国際協力

我々の研究はMAP以降、絶えず、国際協力を意識して遂行されてきた。CPEAもSCOSTEPが現在進めている国際共同研究計画『Climate And Weather of the Sun-Earth System; CAWSES (2004~2008年)』と相補的な連携を保ちつつ実施中である。ここでは太陽地球系で生起する様々な現象の変動タイムスケールを指標として、比較的短い時間変動 (Space Weather) と長い時間変動 (Space Climate) の研究を行い、太陽地球系全体の物理の理解を深化させることを目指している。CPEAの国際観測キャンペーンCPEA-I及び-IIはその計画の一環として正式に位置付けられている。CPEA-Iには、我が国の他、米国、ペルー、ブラジル、オーストラリア、台湾、インドが参画した。

### 6. まとめ

EARのような大型装置を用いたプロジェクトを海外で展開するには、当然国内と違った様々な困難がある。例えば、装置の保守や大掛かりな修理も研究者が自ら出向いてやらねばならない。装置を日本から現地を持ち込むに際して分厚い書類の作成を求められることもある。当然観測に自ら出向いてデータを取得したり、現地研究者や技術者の支援を得たりすることも必要である。さらにカウンターパートとして現地研究者・技術者の育成も求められる。また諸々の交渉にも多くの時間を割かねばならない、等々。研究者として“サイエンス”だけやっているわけには行かない。

しかし決して誰も“潰れて”はいけない。このために、必要なプロジェクトマネジメントを関係者で上手く分担し、かつ各自がそれぞれの分野で国際級の学術成果を出せる仕組みを持つことが絶対に必要である。

CPEAの推進に当っては、インドネシア共和国の政府研究機関、研究者技術者から多大な協力を得ている。特にインドネシア航空宇宙庁(LAPAN)は、京都大学生存圏研究所との間にMOUを締結しEARの運営を共同で行っている。LAPANはEARサイトの隣に独自に観測所を建設し、常駐のオペレータを雇い入れてEARの共同運用に当たっている。またCPEAの推進に関しても広範な協力を得ている。さらに同国の科学技術応用評価庁(BPPT)や気象庁(BMG)とも密接な関係を保ち、特に観測キャンペーンの実施に関して研究協力を仰いでいる。一方、CPEAの活動は、インドネシア側にも好影響を与えており、2004年度から、LAPANを中心に自前で比較的規模の大きな研究費を獲得し、日本側の真のカウンターパートとして研究活性化を果たしつつある。

#### 参 考 文 献

- Andrew, D. G., J. R. Holton and C. B. Leovy, 1987 : Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press, Inc., San Diego, Calif.
- Fujiwara, M., M. K. Yamamoto, H. Hashiguchi, T. Horinouchi and S. Fukao, 2003 : Turbulence at the Tropopause due to Breaking Kelvin Waves Observed by the Equatorial Atmosphere Radar, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1171, doi : 10.1029/2002GL016278.
- Fukao, S., 2006 : Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA) : A Project Overview, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84A**, 1-18.
- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio and Y. Yabugaki, 2003 : Equatorial Atmosphere Radar (EAR) : System Description and First Results, *Radio Sci.*, **38**, 1053, doi : 10.1029/2002RS002767.
- Fukao, S., T. Tsuda, M. Yamamoto, T. Nakamura, H. Hashiguchi and M. D. Yamanaka, 2004 : Middle atmosphere response to forcing from above and below, *Advances in Solar-Terrestrial Physics*, Ed. H. Oya, TERRAPUB, Tokyo, 213-267.
- Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, S. Mori, Y.-M. Kodama and Y. Ohno (eds.), 2006 : Special Issue on CPEA-Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere-, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84A**, 1-351.
- Gurubaran, S., R. Rajaram, T. Nakamura and T. Tsuda, 2005 : Interannual variability of diurnal tide in the tropical mesopause region : A signature of the El Nino-Southern Oscillation (ENSO), *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L13805, doi : 10.1029/2005GL022928.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama and S. Watanabe, 2004 : A Lower Troposphere Radar : 1.3-GHz Active Phased-array Type Wind Profiler with RASS, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 915-931.
- Hines, C. O., 1960 : Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, *Can. J. Phys.*, **38**, 1441-1481.
- Horinouchi, T., T. Nakamura and J. Kosaka, 2002 : Convectively generated mesoscale gravity waves simulated throughout the middle atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2007, doi : 10.1029/2002GL016069.
- Isoda, F., T. Tsuda, T. Nakamura, R. Vincent, I. Reid, E. Acmad, A. Sadewo and A. Nuryanto, 2004 : Intraseasonal oscillations of the zonal wind near the mesopause observed with MF and meteor radars in the tropics, *J. Geophys. Res.*, **109**, D21108, doi : 10.1029/2003JD003378.
- Kozu, T., T. Shimomai, Zainul Akramin, Marzuki, Y. Shibagaki and H. Hashiguchi, 2005 : Intraseasonal variation of raindrop size distribution at Koto Tabang, West Sumatra, Indonesia, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L07803, doi : 10.1029/2004GL022340.
- Morita, J. and Y. N. Takayabu, 2004 : Analysis of rainfall characteristics of the Madden-Julian Oscillation using TRMM satellite data, Paper presented at 2<sup>nd</sup> TRMM International Science Conference, Jpn. Aerospace Explor. Agency, Nara, Japan.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa and P. Wilkinson, 2002 : Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029/2002GL015347.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa and P. Wilkinson, 2004 : Geomagnetic conjugate observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances at midlatitude using all-sky airglow imagers, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L15803, doi : 10.1029/2004GL020262.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, T. Ogawa and P. Wilkinson, 2004 : Time evolution of high-altitude plasma bubbles imaged at geomagnetic conjugate points, *Ann. Geophys.*, **22**, 3137-3143.
- Tsuda, T., Y. Murayama, M. Yamamoto, S. Kato and S. Fukao, 1990 : Seasonal Variation of Momentum Flux in the Mesosphere Observed with the MU Radar, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 725-728.

Yamamoto, M. K., M. Fujiwara, T. Horinouchi, H. Hashiguchi and S. Fukao, 2003 : Kelvin-Helmholtz instability around the tropical tropopause observed with the Equatorial Atmosphere Radar, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1476, doi : 10.1029/2002 GL016685.

---