

第38回メソ気象研究会の報告

—熱帯観測研究・飛躍の20年 ～TOGA-COARE とその後～—

コンビーナー：城岡竜一*・米山邦夫

1. はじめに

エルニーニョなど気候変動に影響を与える現象の解明に鍵となる西部熱帯太平洋の大気海洋相互作用の研究を主題として、1992年11月から1993年2月の4か月間実施された国際共同研究計画 TOGA-COARE (Webster and Lukas 1992) から20周年を迎えた。TOGA-COARE には、日本は計画立案段階から積極的に参加しており、日本の研究者が主体的に参加した初めての国際プロジェクトの1つであると言える。主要な役割は当然マネジメントだけではなく、成果創出の観点でも大きいものがあつたなか、近年は TOGA-COARE を直接知らない世代も増えている。その一方で、2011年10月から2012年1月にかけて、TOGA 計画の跡を継いだ WCRP の CLIVAR 計画から正式承認を受けた国際集中観測 CINDY2011 (Yoneyama *et al.* 2013) がインド洋におけるマッデン・ジュリアン振動 (MJO; Madden and Julian 1994) に伴う対流発生メカニズム解明を目的として実施され、この CINDY2011の初期結果などを集めたスペシャルセッションが気象学会秋季大会にて開催された。そこで、この TOGA-COARE 実施から20周年という節目を迎える機会を利用し、TOGA-COARE 20周年記念研究会との合同企画として、TOGA-COARE とはいったい何だったのかを振り返り、そして CINDY2011に代表される現在の観測研究活動にどのように引き継がれ、今後は経験をどう活用していくべきかを議論する場として本研究会を開催した。講演は TOGA-COARE を牽引した住 明正氏によるレビューに始まり、パプアニューギニア・マヌス島での

観測の中心的役割を果たした藤吉康志氏、上田 博氏による当時の観測状況と現在の観測へのつながりの説明、高藪 縁氏による TOGA-COARE で得られた研究トピックスの紹介、森 修一氏によるインドネシア海大陸域における現在の観測活動の紹介へと続いた。

なお、研究会は気象学会2012年度秋季大会の前日にあたる2012年10月2日に北海道大学学術交流会館小講堂にて行われ、120名を超える参加者を得て盛況な会合となった。

2. TOGA-COARE 20周年をむかえて

住 明正 (国立環境研究所)

1992/93年に西太平洋赤道域で TOGA-COARE が行われてから20年が経過する。TOGA-COARE は、日本にとっては、1979年の FGGE に白鳳丸を赤道域に派遣して以来の大きな海外観測であった。

TOGA-COARE とは、1985年から1994年にかけて行われた TOGA 計画の中での国際的なプロセス研究のことである。TOGA 計画とは、WCRP の年々変動を扱う第2ストリームの研究計画であり、その目標は、(1) 数か月から数年にかけての予測可能性の基礎となる変動のメカニズムと諸過程を理解できるように、熱帯海洋と全球大気を時間変動する系として記述する (観測と理論)、(2) 数か月から数年にかけての変動を予測するために大気-海洋結合系のモデリングの可能性を研究する (数値モデリング)、(3) 大気海洋結合モデルによる予測を実現するための観測系の設計に資する科学的根拠を与える (実用可能なシステム)、というものである。

TOGA が実施された背景には、80年代にエルニーニョ・南方振動 (ENSO) などの年々変動スケールの現象に関する理解が深まったことがある。孤立熱源に対する応答としての Matsuno-Gill パターンや定常ロ

* (連絡責任著者) Ryuichi SHIROOKA, 海洋研究開発機構, shiro@jamstec.go.jp

© 2013 日本気象学会

スピー波の伝搬などの理論的枠組みもそろってきたし、静止気象衛星の画像を用いた解析によるスーパークラスターの発見など、新しい事実も積み重ねられた。また、日本でも熱帯域にブイを展開することになり、日米共同でTAO 繫留ブイシステムが展開されるなど観測面での強化も行われた（これが後に原子力船「むつ」の海洋地球研究船「みらい」への変換に伴いTRITON ブイを加えたTAO-TRITON ブイ網へと発展していく）。さらに、大気海洋結合モデルの開発が進み、ENSOの予報に関する実用性が増してきた。このような中で、西風バーストと双子渦などの擾乱の及ぼす影響に関心が集まり、単に、ゆっくりとした平均場のみでENSOを語ることは不十分で、短期的な擾乱の果たす役割に着目しなければならない、という認識が高まった。熱帯海洋域での対流システムに伴う大気海洋相互作用を解明する必要がある、ということで、メソスケールの研究者とも共同して研究が行われた。

しかし、実際の運営や解析には困難が伴った。メソスケールや海面フラックスでは、様々な観測が行われたが、ケースごとに多様であり、気候という観点でまとめるには、やはり4か月の観測期間は十分とは言えない、ということである。

日本としては、文部省の研究費と科学技術庁の振興調整費によるプロジェクトの代表を筆者が務めることにより、白鳳丸、啓風丸、なつしま、かいようなどの船舶の参加、北大理学部と低温研究所のドップラーレーダーのマヌス島への設置・観測など、大学と国立研究所を合わせたオールジャパンの体制を組むことができた。この経験が、その後のGAMEや観測フロンティアでの海外観測につながっていくことになる。また、多くの大学院生がマヌス島の観測に参加したことも、後の発展につながっていったと思っている。研究成果としては、衛星観測に基づく“2日波”や、雄大積雲の存在の重要性の確認や、0°C層の有効性など多くの知見が得られたと思う。しかし、何と言っても、これだけの海外展開プロジェクトを実施できた、という自信が重要であったと思う。この間の苦労については、http://www2.ir3s.u-tokyo.ac.jp/Akimasa_Sumi/J-COARE.pdfに掲載されているので、興味ある読者は参照してもらいたい。

3. TOGA-COARE 時およびそれ以降のメソ気象観測

藤吉康志（北海道大学低温科学研究所）

私が初めに経験した観測は1974年のAMTEXであり、Xバンドの垂直レーダーを名古屋から沖縄の宮古島に移設した。その後、輪島や尾鷲などの国内観測を経験した後、1970年代後半には北極圏カナダのイヌヴィックでPOLEX-Northに参加した。その際、名大の垂直ミリ波レーダーと北大のXバンドレーダーを海外に持ち出した。1980年代後半には九州熊本の高雨観測で気象研と北大でデュアルドップラーレーダー観測を行い、1992年1月から2月には北海道石狩湾の豪雪観測で北大と名大でトリプルドップラーレーダー観測を実施した。このような移動観測経験をスタッフ、技官、そして学生と共に積んだ後、1992年から1993年のTOGA-COARE観測に参加した。

パプアニューギニアのマヌス島でデュアルドップラーレーダー観測を実施できたのは、北大、筑波大、京大、名大のスタッフ・学生の協力の賜物であるが、最大の功労者は実施にあたって種々の事務的作業や現場監督として重責を果たし、少し怪我もされた上田博氏である。

少し、マヌス島滞在記を紹介する。当時はバスなどの公共交通機関は無く、身振り手振りでレンタカーを借りて一人で島内事前調査を行ったが、森の中でエンストを起こしとぼとぼと歩いて帰る途中、畑作業をしていた島民に助けもらった。彼とその家族とは観測中や帰国後、そして島を再訪問するまで交流が続き、いわゆる部落の集団生活を垣間見せてもらった。北大・低温研のドップラーレーダーは鉄条網で囲った空港の敷地内に設置され、日本から持参した発電機を使ったが、空港から調達した燃料は汚れがひどいため上澄みしか使えず、メンテナンスで油まみれになった。空港近くの住民に見回りを依頼したが、発電機のバッテリーやナイフ、時には財布なども一時的に無くなった。一方、世界で一番暖かい海でのプライベートビーチ、満天の星空で漕ぐボートが立てる波に乗って光るプランクトンなど風景はすばらしく、精神的なストレスは全く感じなかった。鳥が埋めた卵を掘りだして作ったスクランブルエッグ、果物はもちろんマーケットでは魚や伊勢海老など新鮮でおいしかった。半裸で過ごしたにもかかわらず誰もマラリアには罹患しなかったが、予防薬が効きすぎた学生さんもいた。島での生活は書きだすと行きが無いのでこのあたりで止め

る。

その後、1990年代後半は中国でGAME-HUBEXを、2000年代はインドネシアのスマトラ島でCPEAとGEOSS、そしてMISMOの一環としてモルディブのガン島でドップラーレーダー観測を実施した。これらの国際観測プロジェクトのコストパフォーマンスは他の研究手法に比べて格段に悪いが、国内外の多くの若手が参加するため交流も盛んとなり良い教育の場であった。しかし最近、大学院改革、国立大学の法人化、偏った研究評価の影響で大学の観測基盤が極めて軟弱となり、現場で学生が育つ環境が失われつつある。メソ気象研究会の常であるが、「観測研究拠点」の設立を今回も強く要望する。

4. 現在のメソ気象・雲物理研究

上田 博 (名古屋大学地球水循環研究センター)

TOGA-COAREでは、日本の観測チームは、二重のラジオゾンデ観測網の外環であるOSA (Outer Sounding Array) の西端に位置するパプアニューギニア・マヌス島に2台のドップラーレーダーを持ち込んで観測を行った。北大理学部及び低温研の関係者の理解と協力によりレーダーを初めて海外に持ち出すことができた。レーダーの輸送にはJAMSTECの観測船及び運航部の方々の支援を得た。米国の調査隊の報告資料を基に各地の観測候補地を調査し、観測範囲、電源、居住性、及び港湾施設などを考慮してレーダー設置場所としてマヌス島を選択した。マヌス島では九大の高橋 劭教授による降水粒子のビデオゾンデ観測も行われた。観測にはパプアニューギニア気象局の協力があつた。

マヌス島では東進する擾乱の中の積乱雲の構造を最初に観測できると考えられ、2台のドップラーレーダー観測により熱帯の積乱雲内の3次元気流系の時間変化とその統計的な特性を明らかにできるのではないかと期待があつた。その期待に応えるまでには時間がかかったが、初期解析の結果は、観測の2年後に組まれた気象集誌特集号に報告された。積乱雲の融解層下と融解層の上での顕著な発達 (Uyeda *et al.* 1995) など、観測して初めてわかる知見が得られた。その後、Johnson *et al.* (1999) の研究などにより熱帯赤道域の積乱雲の発達過程が体系化された。

マヌス島でドップラーレーダー観測を行ったことは、GAMEにおける淮河流域に日本から3台のドップラーレーダーを持ち込んだ観測や、チベットにドッ

プラーレーダーを持ち込んで行った観測に繋がった。GAMEにおいて大気・陸面相互作用に関する国際的な観測研究をリードする素地はTOGA-COAREの観測に参加したことによって培われた。

次に期待される大気・海洋・陸面相互作用の観測プロジェクトにはアジア各国の研究者の参加が必要になるので、地道な研究を続け連携できる研究者の育成と協力関係の構築を行う必要がある。最近、ドップラーレーダーの機能を兼ね備える偏波レーダーの開発により、積乱雲内の3次元気流と降水粒子の種類判別が可能になり、降水粒子ゾンデや雲粒子ゾンデと組み合わせた観測により熱帯海上の積乱雲群の発達過程を明らかにすることが可能になった。将来を展望しつつ種々の観測研究を粘り強く積み重ね、今後の発展につなげることを期待したい。

5. TOGA-COARE とそれ以降に更新された熱帯対流に関する認識

高藪 縁 (東京大学大気海洋研究所)

TOGA-COAREにおける熱帯気象学上の大きな発見の一つは、熱帯対流活動における雄大積雲 (cumulus congestus) の卓越性、及び、深い積雲対流に対する対流圏中層湿度の重要性を指摘したことであつた。Johnson *et al.* (1999) は、従来 shallow と deep の2層構造として把握されていた熱帯積雲対流の降水量にして約28%が雄大積雲によるものと見積もり、熱帯積雲対流の3層構造の認識を広めた。また、中層湿度の抑制時に深い対流が抑えられる観測が示されたこと (Numaguti *et al.* 1995; Yoneyama and Fujitani 1995; Brown and Zhang 1997)、MJOに shallow, congestus, deep の卓越する3段階の発達が観測されたこと (Kikuchi and Takayabu 2004) など、TOGA-COARE観測からの成果であつた。近年では、熱帯降水が中層の湿度に大きく依存していることが、KWAJEXの観測 (Bretherton *et al.* 2004) などによって認識されるようになってきた。熱帯降雨観測衛星 TRMM による熱帯全域の観測からは、雄大積雲による雨は海面水温に依存して増えるのに対し、深い対流による雨は大循環下降流による対流圏中層乾燥域において、広く抑制されることが統計的に示された (Takayabu *et al.* 2010)。これらは、積雲対流パラメタリゼーションにエントレインメントをより効果的に導入することによって熱帯対流分布が改善するという最近の気候モデルの改良、解析について (Chikira

and Sugiyama 2010; Hirota *et al.* 2011), 現実の観測からそのメカニズムを裏付けるものである。

6. インドネシア海大陸域におけるメソ観測研究

森 修一 (海洋研究開発機構)

TOGA-COARE 以降の約20年間にわたり継続しているインドネシア海大陸域におけるメソ観測研究活動を概観すると共に、海外大型プロジェクトの現状や研究アプローチの変遷について紹介した。

① 1990年代まで：先駆的 (探検的) 熱帯陸上メソ気象研究の幕開け

TOGA-COARE の一環として、京都大学がジャワ島ジャカルタ近郊に境界層レーダー等の観測拠点を整備し、1地点における鉛直観測のみではあるが、非常に深い対流混合層の発達過程発見や、スーパークラウドクラスター東進に伴う東西風の交代と雨季到来の関係など、熱帯陸上メソ対流系に関する先駆的な研究が始められた。また、後年の EAR 建設に向け、道なき熱帯雨林を分け入る長期間の候補地調査など、まだまだ探検的性格も有していた研究揺籃期と言える。一方、相手国内に測器等を展開する海外陸上観測では、相手国の法令や宗教規範の遵守、相手国との政府間調整など、公海上の船舶観測とは異なる面倒な課題も有していた。

② 2000年代：大型プロジェクト主導によるメソ気象研究の進展

京都大学により EAR がスマトラ島に設置されると共に CPEA が始まり、境界層レーダーや X バンド気象レーダー、2DVD など、多種多様な観測装置が開発され、EAR のスーパーサイト化が進んだ。また、JAMSTEC による JEPP-HARIMAU では、ドップラーレーダー2地点 (スマトラ島、ジャワ島)、ウィンドプロファイラ3地点 (カリマンタン島、スラウェシ島、ピアク島) が展開され、メソ気象観測機材の整備が大きく進展した。特に両プロジェクトによるキャンペーン観測では、2台の X バンドドップラーレーダー観測により熱帯沿岸メソ対流系の3次元構造や動態の詳細を捉えることができ、これらの日周期変動や季節内変動との関係、スケール間相互作用など新しい研究成果が次々と発表されてきた。一方、各プロジェクト終了と共に「伸び過ぎた戦線」とも言える観測網の維持も容易ではなくなり、後継プロジェクト (予算) の獲得に追われる自転車操業となるなど、大型プロジェクト観測の収拾方法も課題となった。

③ 2010年代：研究成果の社会応用要求に対する取り組み

地球温暖化に代表される気候変動問題など、メソ気象研究においても地球規模課題に対する貢献が求められる時代となった。また、例えばレーダーによる降雨監視と観測データのリアルタイム配信や、洪水などの防災対策、水資源管理や農業応用等への貢献も求められており、定量的降水量推定/予測研究に対する期待が高い。一方、長期間埋もれていた歴史的気象観測のデータレスキュー進展に伴い、ENSO や IOD など短期気候変動に伴う豪雨や寡雨など、局地的な極端現象の監視とメカニズム理解に対しても期待が寄せられている。さらに、近年では相手国の経済発展に伴い、単に日本人が現地で観測研究を行うだけの活動は困難になりつつあり、相手国の気象技術者や研究者の指導および育成 (キャパビル活動) がワンセットとなっているプロジェクトも多い。これまで熱帯アジアにおける観測研究は、「現地の人に手伝って貰いながら、自らが出張って欲しいデータを取ってくる」スタイルが基本であったが、現在では「現地社会にも貢献可能な研究テーマを設定し、現地の若い人材を育成しながら、共に研究観測に協同して貰う」ことが求められる時代となったのであろう。

7. 総合討論

米山邦夫 (海洋研究開発機構)

総合討論では、その議論のきっかけの1つとして、2011年度に行われた国際集中観測 CINDY2011を実施していく上で見えた TOGA-COARE の実態や CINDY2011との違いを紹介した。

そもそも CINDY2011とは、インド洋における現場観測を通して、MJO 対流発生メカニズムの解明を目指し、MJO のシミュレーション及び予測技術の改善を最終目標とする国際プロジェクトで、米国の DYNAMO プロジェクトとともに2009年に CLIVAR より正式承認を受けた国際集中観測キャンペーンである。CINDY2011の成り立ちが TOGA-COARE と根本的に違うのは、MJO という1つの現象が目標に設定されており、その解明に向けての計画立案・調整が行われた点にある。最終的には16の国・地域の60以上の大学、研究・実業機関から参加を得て、2011年10月から2012年1月までモルディブ諸島を含む熱帯中部インド洋において島、船舶 (4隻) や航空機 (2機)、係留系などを用いて実施し、MJO 対流の発生を捉え

ることに成功している。過去20年の間に当然個々の観測測器に進展は見られるが、TOGA-COARE 当時に比べて大きな違いは、1) 既に同海域には表層・中層ブイからなる観測網 (McPhaden *et al.* 2009) が展開されておりそれらを活用することができる状態にあったこと、2) 数値モデルのハード・ソフトの進展により、現業・研究機関による準リアルタイムの予報や解析結果を確認しながら観測を実施できる体制にあったこと、を挙げることができる。当然インターネットの普及により、船上であってもこれらの最新情報を入手しながら観測にあたることができている。この他には、米国の動きが結局大勢となってしまう状況は変わっていないが、20年前よりもさらにそれを印象付ける理由の1つに米国大気研究センターにある地球観測研究所の存在がある。研究者が全米科学財団から当該予算を確保すれば、経理を含む観測の管理・ロジから現地調査、実際の観測、データ処理、Webの管理に至るまでこなす、いわば“集中観測を渡り歩く熟練集団”が構築されている点である。その一方で、米国がTOGA-COAREで感じた日本に対する脅威の1つが、集中観測終了から2年で出版された気象集誌特集号のような早期の成果創出であったことも、今後のあり方を考える上で興味深い。

その後の討論では、「発表の多くは熱帯観測の重要性や知見の蓄積に関するもので、TOGAの“GA”、つまり熱帯海洋とのカップリングを始めとする全球大気への影響や知見、もしくはその後の研究にどう影響を与えたかの点についてコメントが欲しい」との指摘に対して、「まさにMJO研究がそれで、MJOに対して、熱帯での影響だけではなく、全球の気候変動にインパクトを与える現象との認識につながった」、「TOGAで目指した赤道ブイ網の構築・完成が、現在のエルニーニョ予測を始めとして全球の現業予報や気候変動研究・予測に貢献している」、「観測船「みらい」へのドップラーレーダー搭載という“大気”観測のツールとなるユニークな点も生まれた」などのコメントがあった。その他に、現在でも積雲対流のパラメタリゼーションが不十分である点など、熱帯におけるメソ気象観測の重要性は以前にもまして(モデル研究が進めば進むほど)増している点も指摘された。さらに、時間を割いて議論されたのは、「(日本における)観測の弱体化」という点で、予算・人員削減もあり、例えば大学の研究室レベルでの観測維持は難しい状況にあるとの認識である。弱体化そのものについては、

拠点化などで観測の柱を立てそれに参加する形で強化していくことが現実的であるとの意見が出された。また、観測そのものも荒天海域でのデータ欠損などが研究進展の妨げになっているので、このような点を今後カバーするなど「頑張り方・頑張りどころの見極め」次第で観測に元気も出るとのエールが送られた。

謝 辞

今回のメソ気象研究会を開催するに当たり、会場の準備・運営、学会における調整・広報等をご担当くださった講演企画委員会の皆様、北海道大学関係者の皆様に感謝致します。

略語一覧

2DVD : 2-Dimensional Video Disdrometer
 AMTEX : Air Mass Transformation Experiment
 CINDY2011 : Cooperative Indian Ocean experiment on intraseasonal variability in the Year 2011
 CLIVAR : Climate Variability and Predictability
 CPEA : Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere
 DYNAMO : Dynamics of the MJO
 EAR : Equatorial Atmosphere Radar
 FGGE : First GARP (Global Atmospheric Research Program) Global Experiment
 ENSO : El Niño / Southern Oscillation
 GAME : GEWEX (Global Energy and Water cycle Experiment) Asian Monsoon Experiment
 GEOS : Global Earth Observation System of Systems
 HARIMAU : Hydrometeorological Array for Intraseasonal variability — Monsoon Automonitoring
 HUBEX : Huai-he River Basin Experiment
 IOD : Indian Ocean Dipole
 JEPP : Japan EOS (Earth Observation System) Promotion Program
 KWAJEX : The Kwajalein Experiment
 MISMO : Mirai Indian Ocean cruise for the Study of the MJO-convection Onset
 MJO : Madden-Julian Oscillation
 POLEX : Polar Experiment
 TOGA-COARE : Tropical Ocean and Global Atmosphere — Coupled Ocean and Atmosphere Response Experiment
 TAO-TRITON : Tropical Atmosphere-Ocean / Triangle Trans-Ocean buoy Network
 TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission
 WCRP : World Climate Research Programme

参 考 文 献

- Bretherton, C. S., M. E. Peters and L. E. Back, 2004: Relationships between water vapor path and precipitation over the tropical oceans. *J. Climate*, **17**, 1517-1528.
- Brown, R. G. and C. Zhang, 1997: Variability of midtropospheric moisture and its effect on cloud-top height distribution during TOGA COARE. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2760-2774.
- Chikira, M. and M. Sugiyama, 2010: A cumulus parameterization with state-dependent entrainment rate. Part I: Description and sensitivity to temperature and humidity profiles. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 2171-2193.
- Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Watanabe and M. Kimoto, 2011: Precipitation reproducibility over tropical oceans and its relationship to the double ITCZ problem in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Climate*, **24**, 4859-4873.
- Johnson, R. H., T. M. Rickenbach, S. A. Rutledge, P. E. Ciesielski and W. H. Schubert, 1999: Trimodal characteristics of tropical convection. *J. Climate*, **12**, 2397-2418.
- Kikuchi, K. and Y. N. Takayabu, 2004: The development of organized convection associated with the MJO during TOGA COARE IOP: Trimodal characteristics. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L10101, doi:10.1029/2004GL019601.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1994: Observations of the 40-50-day tropical oscillation — A review. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 814-837.
- McPhaden, M. J. *et al.*, 2009: RAMA — The Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 459-480.
- Numaguti, A., R. Oki, K. Nakamura, K. Tsuboki, N. Misawa, T. Asai and Y.-M. Kodama, 1995: 4-5-day-period variation and low-level dry air observed in the equatorial western Pacific during the TOGA-COARE IOP. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 267-290.
- Takayabu, Y. N., S. Shige, W.-K. Tao and N. Hirota, 2010: Shallow and deep latent heating modes over tropical oceans observed with TRMM PR spectral latent heating data. *J. Climate*, **23**, 2030-2046.
- Uyeda, H. *et al.*, 1995: Doppler radar observations on the structure and characteristics of tropical clouds during TOGA-COARE IOP in Manus, Papua New Guinea: Outline of the observation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 415-426.
- Webster, P. J. and R. Lukas, 1992: TOGA COARE: The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **73**, 1377-1416.
- Yoneyama, K. and T. Fujitani, 1995: The behavior of dry westerly air associated with convection observed during the TOGA-COARE R/V Natsushima cruise. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 291-304.
- Yoneyama, K., C. Zhang, and C. N. Long, 2013: Tracking pulses of the Madden-Julian Oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, in press.