

## TOGA-COARE における NASA の航空機観測\*

早坂忠裕\*\*

### 1. はじめに

先日、1993年2月8日から2月12日にわたってオーストラリア、タウンズビルにある TOGA-COARE Operations Center を訪問し、NASA による熱帯大気海洋相互作用の航空機観測に接する機会を得た。筆者は、MAP (中層大気国際協同観測計画) や WCRP (気候変動国際協同研究計画) 等を通じて多少なりとも日本における大気関係の航空機観測に携わってきた者として、航空機そのものや観測機器はもちろんのこと、全体の組織や観測遂行の過程等も含め、様々な面で大変興味深く、また、今後益々必要になるであろう日本の航空機観測にとって参考にするべきところも多く感じられたので、ここに筆をとった次第である。

### 2. TOGA-COARE Operations Center

TOGA-COARE Operations Center は、TOGA (熱帯海洋と全球大気研究計画) の一環として、西部熱帯太平洋域で展開されている COARE (西太平洋大気海洋相互作用研究計画) の集中観測のとりまとめを行なうために、昨年11月から今年の2月末まで、タウンズビルのオーストラリア空軍基地内に設置されている。形式的には赤道上の155°E 付近を中心に展開されている地上 (島上)・船舶・航空機観測を統括する立場にあるが、実際には、このセンターと航空機観測を実施している NASA のグループが別々に活動している感じである。センター事務局のメンバーによるミーティングが毎日午前中に開かれ、お昼をはさんで午後2時から NASA のメンバーや気象予報関係者も含めて、最新の地上・船舶観測の状況や衛星画像を用いた観測領域での今後の対流活動の予報等に関する、大きな全体ミーティングが開かれる。また、具体的な航空機観

測の計画、実施に関するミーティングは NASA のグループが不定期に開催し、センター事務局の一部のメンバーがこれに参加するという形である。NASA の航空機観測は TOGA-COARE の機会を利用して衛星搭載センサーのシミュレーションを行いたいという意味も強いらしく、筆者が訪問した直前にも、TOGA-COARE 本来の目的とはあまり関係なく、タウンズビルの沖合い数百キロに停滞していたサイクロン (台風) の観測を独自に行なっていた。

滞在中は、上に挙げた様々なミーティングに参加すると共に、NASA の DC-8 と ER-2 に搭載されている観測用機器を見学し、それらの仕様および性能や現在までに得られている結果の一部について説明を受けた。また、今回の観測の NASA のプロジェクト・マネージャーの一人である J. T. Suttles 氏の計らいで、気象研究所の中沢哲夫氏と共に DC-8 の観測飛行に同乗する機会に恵まれた。

### 3. 航空機および観測機器

今回の TOGA-COARE 集中観測には第1表に示すように、全部で7機の航空機が使用されたが、滑走路や格納庫、その他の地上設備等の関係から NASA の DC-8 と ER-2、そしてイギリス気象局の C-130 はタウンズビルに、また、NCAR の L-188 エレクトラと NOAA の2機の WP-3D についてはガダルカナル島ホニアラに、そしてオーストラリアの Cessna-340 はパプアニューギニア、カビエンに配置された。筆者がセンターを訪れたときには、残念ながらイギリス気象局の C-130 は既に予定の観測を終了し、帰った後だったので、これに関する情報は得られなかった。従ってここでは、NASA の2機の航空機についてレポートする。

これら2機の航空機に搭載されている測器は、全体としては放射関係 (可視, 近赤外, 赤外, マイクロ波) のものが多く、この他、レーダーやライダー等も含め、今後の衛星観測のためのシミュレーターといった意味

\* NASA's aircraft observation in the TOGA-COARE.

\*\* Tadahiro Hayasaka, 東北大学理学部, 大気海洋変動観測研究センター.

第1表 TOGA COARE Aircraft

Aircraft (Origin)	Schedule	Operations Base	Research Hours
Cessna 340 (AU/Flinders)	Jan-Feb 93	Rabaul	100
C-130 (UK/MRF)	Jan-Feb 93	Townsville	70
L-188 (US/NCAR)	Nov 92-Feb 93	Honiara	320
WP-3D (US/NOAA)	Nov 92-Feb 93	Honiara	220
WP-3D (US/NOAA)	Nov 92-Feb 93	Honiara	220
DC-8 (US/NASA)	Jan-Feb 93	Townsville	100
ER-2 (US/NASA)	Jan-Feb 93	Townsville	100

第2表 ER-2 Instrumentation

Instrument	PI/Institution	TOGA-COARE Discipline	Data Parameters
Cloud Lidar System (CLS)	Spinhirne/GSFC	Radiation	Cloud structure, boundaries and density
Electronic Optical Camera (EOC)	Spinhirne/GSFC	Radiation	Cloud optical thickness, droplet effective radius, brightness temperature
MODIS Airborne Simulator (MAS)	King/GSFC	Radiation	Optical properties of cloud and aerosol
Radiation Measurement System (RAMS)	Valero/ARC	Radiation	Radiation Fields, infrared flux, brightness temperature
Advanced Microwave Precipitation Radiometer (AMPR)	Spencer/MSFC Hood/MSFC	Convection	High resolution, multifrequency sampling of tropical rain system
Millimeter Imaging Radiometer (MIR)	Adler/GSFC Racette/GSFC	Convection	Cloud structure, rainfall, water vapor profiling, cirrus cloud ice content and particle size distribution
Light Instrument Package (LIP)	Blakeslee/MSFC	Convection	Components of electrical field and air conductivity

合が強い。事実、第2表および第3表に示すように、1990年代後半から末に打ち上げが予定されている TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) や EOS (Earth Observing System) 関係のものがめだった。

まず、ER-2 であるが、この航空機は偵察機である U-2 を改造したもので、高度 20 km というような熱帯の成層圏も観測できる性能を備えている。そのために機体の構造としては、戦闘機のような胴体にグライダーの翼を取り付けたようになっており、パイロットは1名しか乗ることができない。観測機器は胴体最先端のノーズの部分、パイロットの座席の直後の胴体、そして両翼にある円筒形の収容スペースに搭載されるようになってい。ノーズの部分には EOC (Electric Optical Camera) が搭載されている。これは、440 nm から 980 nm の波長域に6つのチャンネルを持ち、

CCD センサーを用いることによって可視から近赤外域の2次元画像を取ることができるようになっている。また、この他に可視および近赤外のセンサーとしては、パイロット席の後ろの胴体上下に RAMS (Radiation Measurement System) が取り付けられており、これは0.4~1.5  $\mu\text{m}$  の範囲7チャンネルで total と diffuse のフラックスを測定するようになってい。さらに可視、近赤外から赤外域にかけて感度を持つ MAS (MODIS Airborne Simulator) が右翼のケースに搭載されている。MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) は今世紀末にアメリカで打ち上げが予定されている EOS のコアセンサーの一つで、現在の予定では可視から赤外域にかけて36チャンネルの測定を行ない、雲、水蒸気およびエアロゾル等に関する観測を目指している。今回の MAS については、11チャンネルが選ばれていて、波長は 0.66, 0.87,

第3表 DC-8 Instrumentation

Instrument	PI/Institution	TOGA-COARE Discipline	Data Parameters
Visible and Near IR Lidar (VIRL)	Spinhirne/GSFC	Radiation	Cirrus radiation characteristics, structure and boundaries
Radiation Measurement System (RAMS)	Valero/ARC	Radiation	Radiation Fields, infrared flux, brightness temperature
Microphysical Measurement Package (MMP)	Pueschel/ARC Heymsfield/ARC	Convection	Water budget of clouds ; portion of condensate transported to anvil
Airborne Rain Mapping Radar (ARMAR)	Li/JPL	Convection	Vertical profile of rainfall in convective system
Electronically Scanned Microwave Radiometer (ESMR)	Wang/GSFC Wilheit/Texas A&M	Convection	Two dimensional view of rainfall features-in conjunction with AMMS/AMMR
Airborne Multichannel Microwave Radiometer (AMMR)	Wang/GSFC	TRMM Algorithm	Dual polarized microwave signatures of precipitation
Light Instrument Package (LIP)	Blakeslee/MSFC	Convection	Components of electrical field and air conductivity

1.63, 1.82, 2.13, 3.75, 8.6, 11.0, 12.0, 13.3, 13.9  $\mu\text{m}$  である。もちろん、2次元の画像の形でデータが得られるようになっていて、観測直後にすぐその結果を見られるようになっていて、マイクロ波関係では、胴体下部にクロストラッキング方向にスキャンするための大きなミラーを持っている AMPR (Advanced Microwave Precipitation Radiometer : 10.7, 19.4, 37.1, 85.5 GHz) が搭載されている。これは明らかに TRMM のためのシミュレーターで、降雨量や雲水量等を測定するものである。空間分解能は 20 km の高度から地表面をみたときに各々 2.8, 2.8, 1.5, 0.8 km である。筆者が到着した日には、ちょうど前日の深夜から早朝にかけてサイクロンの観測を行なって来たところで、その結果をコンピューター画面に表示して、ここが雨の領域、こちらは水、というような議論をしていた。しかしながら、やはり、雨や雲の定量化についてはいろいろな点で難しいと言っていた。右側の翼の収納ケースには前半部分に MIR (Millimeter Imaging Radiometer : 150, 183 $\pm$ 1, 3, 7, 220, 325 $\pm$ 1, 3, 8.5 GHz) が搭載されており、これもミラーでクロストラッキング方向にスキャンすることにより、2次元の画像を取得できるようになっている。次に、左側の翼のケースには、CLS (Cloud Lidar System) が搭載されていて、これは 0.53 および 1.06  $\mu\text{m}$  の波長で雲頂の構造を調べるものである。ER-2 のように高高度を飛行する航空機に搭載することによって、熱帯の背の高い雲の雲頂の構造も楽々と観測できるのである。その

他、雷関係の観測を行なう LIP (Lightning Instrument Package) も搭載されているがよくわからなかったので省略する。これらの機器はいずれも着陸直後、機体からワンタッチで取りはずせるようになっていて、各々のグループ観測結果の検討や測器の調整を頻繁に行っていた。

一方、DC-8 関係であるが、こちらも TRMM 関係の測器が多い。ER-2 と異なる点は、まず、ARMAR (Airborne Rain Mapping Radar) があり、これは JPL の機材であるが、TRMM の関係で、NASA/GSFC の人たちも何人か参加していた。また、DC-8 は雲中の観測飛行も行なうので、FSSP 等の雲の微物理量を測定する機材も搭載されていた。ライダー VIRL (Visible and Near IR Lidar) は ER-2 よりも大型で、3 波長 (0.53, 1.06, 2.12  $\mu\text{m}$ )、かつ、レーザー光の射出口と受光ミラーを 180° 回転させることにより、航空機から上も下も観測できる構造になっている。マイクロ波関係では、ESMR (Electrically Scanned Microwave Radiometer), AMMR (Airborne Multichannel Microwave Radiometer), AMMS (Advanced Microwave Moisture Soundar) が搭載されており、降雨量や雲水量のリモートセンシングにおけるパッシブのマイクロ波放射計に対する期待度の大きさをうかがわせる。ESMR は 19.35 GHz の周波数で、ミラー等を動かすことなく、クロストラッキング方向に左右 50° ずつスキャンでき、降雨率の推定を主な目的としている。AMMR は ER-2 搭載の AMPR よりも 1 周波

数多く、10, 18, 21, 37, 90 GHz の各チャンネルを持ち、ほぼ SSM/I や TRMM Microwave Imager (TMI) に準拠したものになっている。AMMS は水蒸気のサウンダーで、 $183.3 \pm 2.5, 9 \text{ GHz}$  および  $92 \text{ GHz}$  のチャンネルを持っている。これらのほか、LIP と RAMS に関しては ER-2 と同様の測器である。各測器は、雲の微物理量関係のものについては翼端に、また、放射計関係については胴体に取り付けられており、機体の窓や穴などを利用して観測するようになっている。ER-2 とは違って、DC-8 の場合には観測飛行後に測器をはずしてデータ処理や調整を行うことはできないので、それらは着陸後、外部電源をもらって行うことになる。その他、ドロップゾンデも搭載されていたり、それから、観測機器とはいえないが、DC-8 には NOAA 衛星の受信設備があるので機内で飛行中に最新の衛星画像を見ることができるとのこと。

#### 4. 支援体制

航空機そのものに対するサポートは空軍基地内にあるためになんか良いように見えた。筆者が帰る直前にも、ホニアラを基地としている NCAR のエレクトラがコンプレッサーの故障で、部品交換のために来ていた。

ところで、観測飛行領域の状況をできるだけ詳しく把握することは極めて重要で、筆者らが1991年1月に南西諸島海域で実施した寒気の吹き出しに伴う層積雲の観測においても、名古屋大学の GMS 受信設備がかなり威力を発揮したが、ここタウンズビルではウィスコンシン大学の McIDAS (正式名称はよく分からない) というシステムが置かれていて、GMS の画像を連続的に表示して、いわばアニメーションのように観測領域の雲の変動を見ることができるとのこと。また、このシステムはかなり広い領域から集中観測が行われている領域まで何段階かのクローズアップが可能で、非常に使い勝手が良さそうに見えた。このアニメーションのような熱帯の雲画像を見ていると、温泉の湯気が立ち昇る情景が思い出され、熱帯域においてそのような蒸発、凝結過程が極めて大きな時空間スケールでおこっていることを実感させられた。その他、様々な定常気象観測データ (ゾンデ観測による大気鉛直プロファイルや天気図等) に関する情報が揃っているのはいままでのこと。

#### 5. 観測遂行のプロセス

さて、2月10日から11日にかけて、8時間におよぶ DC-8 の観測飛行に同乗して、実際の観測飛行も体験したので、そのプロセスを記すことにする。まず、この日は一応、あらかじめ ER-2 が夜中の1時30分 (ER-2 は DMSP の SSM/I との同期観測を行うため、このような予定が立てられている)、DC-8 が早朝5時に離陸という予定が立てられ、ER-2 および DC-8 両方を含めた NASA のミーティングが午後7時30分より開かれた。初めは気象データや McIDAS がある予報センターの部屋で、観測領域の状況に関する情報収集と検討が行われ、そうこうしているうちにホニアラの方と連絡をとっていた。ホニアラの NCAR や NOAA のグループ、またタウンズビルの NASA のグループ各々でいろいろな思惑があるらしく、電話を通してかなり長い時間 (20分以上?) にわたり議論が続いた。そして、このやりとりが変わった後、8時30分頃ほぼ全員が NASA の部屋に移動して、テーブルを囲んでの議論となった。そこで30分程度いろいろと議論した後、ER-2、DC-8 とともに予定通り観測を行なうことが決定された。このミーティングの直後、DC-8 の搭乗許可を言い渡され、DC-8 については夜中の2時から最終の打ち合せを行うので集まるように言われた。

午前2時から最終の打ち合せが15分ほどあり、予定通り観測を行なうので搭乗者は3時30分までに DC-8 に乗るようにとの指示があった。筆者は3時過ぎに乗り込んだが、一つの測器にだいたい2~3人が付いている感じで、筆者らオブザーバーを含めて搭乗者は総勢約40名である。飛行機上ではミッション・マネージャーが指揮を取るようにしており、すべて彼を通じて事が運ぶようになっている。搭乗後セイフティブリーフ (飛行中の注意事項の説明) があり、NASA の係員からこの日のオブザーバー4名が集められて行われた。機体の後部にはお茶やコーヒー、お菓子、サンドイッチ等が用意されていて、自由に食べられるようになっている。

いよいよ離陸30分前になると、電源切り替えのために一度パワーダウンを行うが、このときも、ミッション・マネージャーが各測器のグループにスイッチを切ったかどうかヘッドフォンとマイクを通じて確認していた。その後4時30分過ぎにドアが閉められ、エンジンがスタートした。そして、再びパワーオンになり、ミッション・マネージャーの指示で各機器のスイッチが入れられた。

5時に離陸。各測器のグループの座席の前のラックにはオペレーション用のコンピューター等が並んでいるほか、さらに航空機のフライトの様々な情報が画面上で見られるようになっている。すなわち、ディスプレイのチャンネルを切り換えることにより、航空機の飛行経路、進行方向のレーダーの画像、外気温・高度・気圧・速度等が数字で表示されるほか、航空機の前下方・および横方向のビデオカメラの画像がいつでも見られるようになっている。観測データの記録に関しては、エクサバイトを利用しているものが多く記録容量が大きいので、トラブルがない限り観測飛行中のオペレーターは暇そうである。今回の観測は高度 30000 FT のレベルフライトで数百キロスケールの雲がある地点 (159° E, 4° S) まで行き、高度はそのままでの付近を何回か往復するパターンをとって雲中の観測を行った。飛行中は NASA/GSFC の J. Simpson 女史が同乗していたが70歳(?)とは思えない元気で、窓から写真をたくさん撮りながら航空機の位置や方向等を頻りにミッション・マネージャーに問い合わせていたのが印象的であった。予定の観測を終えた後、タウンズビルに向かった。着陸前にはミッション・マネージャーから各グループに着陸後のデータ処理、調整に伴う電源の需要等についての問い合わせが行われていた。

航空機は午後1時、予定通りタウンズビルに着陸。ちょうど8時間のフライトであった。降りた後は、測器の後始末や調整に関わる一部の人を除いて NASA のミーティングルームに移り、直ちにブリーフィングが行われた。

この1機だけでも、おもなものだけで11種類の観測

機器、総勢40名以上の人達をまとめてゆく NASA のシステムとプロジェクト・マネージャーおよびミッション・マネージャーのリーダーシップには学ぶべき点も多く、大変勉強になった。

## 6. おわりに

今後、気象学のみならず様々な分野で航空機を利用するケースが増えてゆくものと考えられるが、今回の経験が日本における航空機観測、あるいは大規模な野外観測を計画、実施する際に役立つようにしたい。また、ADEOS や TRMM 等、日本でも自前で衛星観測を行うようになりつつあるが、NASA の場合には、衛星センサーやそのアルゴリズム開発において航空機の利用は当然のことと考えられており、今回の訪問でも、その重要性を実感した次第である。日本ではこの点に関してはその認識レベルが非常に低く、航空機によるシミュレーションを十分行わずに打ち上げに至るケースも少なくないように思えるので、今後は十分考慮する必要があると考えられる。

## 謝 辞

今回のタウンズビル訪問を勧めてくださった東京大学気候システム研究センターの住明正教授にこの場を借りて御礼申し上げます。また、現地でお世話になった TOGA-COARE Operations Center の黒田芳史氏、D. Carlson 局長、また、NASA の J. T. Suttles 氏に感謝の意を表します。最後に、タウンズビル滞在中、様々な面でアドバイスを頂いた気象研究所の中沢哲夫氏に御礼申し上げます。