

湿潤・乾燥大気境界層の降水システムに与える影響の解明と降水予測精度の向上

名古屋大学地球水循環研究センター、中村健治

1. はじめに

本プロジェクトの目標は、降水システムの開始と大気境界層との関係である。降水システムのエネルギー源は下層の水蒸気であり、この水蒸気は主に大気境界層から供給される。このため、まず大気境界層の発達、そして水蒸気輸送の実態の把握が必要である。次に、実際の大気での乱れの把握が必要である。下層に水蒸気が存在してある強さの擾乱が無ければすぐには降水システムは発達しない、言い換えれば有限振幅擾乱であり、いわゆる inhibition を突破するだけのトリガーが必要である。このトリガーは総観規模擾乱、山などの地形、また大気境界層内の乱流、などである。これらの研究を通じて、特に中国域について、湿潤域の拡大・縮小を大気境界層と降水システムとの関係から見ることで、そしてそれを通じて降水予測モデルの向上に寄与することが目的である。本研究は名古屋大学地球水循環研究センター、そして岐阜大学、岡山大学、独立法人情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測研究センターとの間で、境界層観測班、降水観測班、広域解析班、モデル班を作って進めている。

大気境界層は大気下層で地・海表面の影響を直接受ける大気の層で、地・海表面と大気との熱や水蒸気などの交換を行う層である。図1はStevens et al. の論文の図である。熱帯海洋上の trade wind inversion の上に現れる降水システムの模式図である。降水システムが下の大気境界層に「根」を持っているように描かれている。このような描像が陸面でも描くことができるか、そしてこの「根」のあり方が乾燥期、湿潤期で異なるか、そしてそれが湿潤域の拡大の制御要因の一つとなっているのか、なっているとすればその機構は何か、が本研究の具体的目標の一つである。

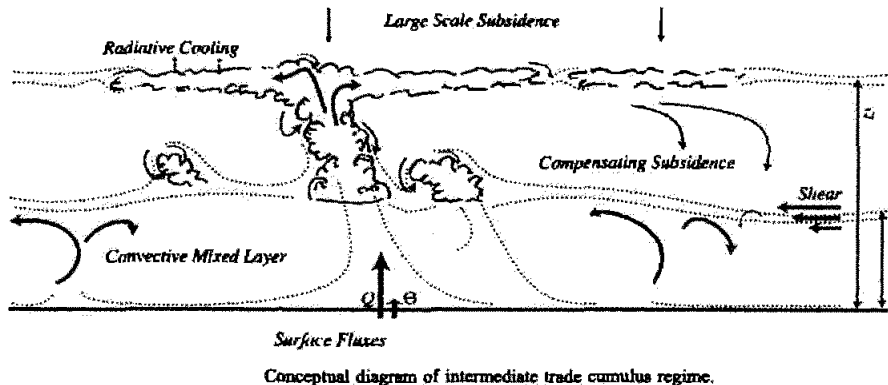


図1 Trade wind inversion の上の降水システムの模式図 (Stevens et al. 2001)

大気境界層の観測は、フラックスタワーなどにより長い歴史を持っている。また、自由大気まで含んだ観測も多く行われ始めている。特に、熱帯海上の trade wind inversion に伴う大気境界層、そしてその上部に立つ浅い対流雲は、放射によるエネルギー収支を研究する上で重要とされて研究が進んでいる。また熱・物質輸送に大きな寄与をなす大きな渦を頭わに表現する Large Eddy Simulation (LES) による研究もコンピュータの急速な発達とともに大きく進展しており、今や、標準的な研究方法の一つとなっている。しかしながら、湿潤過程を含んだ大気境界層の LES による研究は発表がされているものの未だ少ない。

雲解像非静水圧モデルは現在、メソスケール降水現象研究の主流の一つとなっており (e.g.: Tompkins and Craig 1998, Tompkins 2001a, 2001b, 2001c)、それによるシミュレーションには大気境界層と降水システムとの関係も再現されているのではないかと想像されるが、この関係には注目していない。WCRP/GEWEX では GABLS (GEWEX Atmospheric Boundary Layers Studies) ではモデル化のより困難な安定大気境界層の研究が主流となっている。

国内においては、大気境界層の観測は大きな研究グループとなっているが、降水システムと大気境界層との関係を目標とした自由大気を含めた観測研究は本プロジェクト以外には無い。また大気境界層全体を含

む LES による研究もほとんど無い。その一方、広域モデルでは、大気境界層のパラメタリゼーションは大きな課題の一つである。降水システムのパラメタリゼーションにおいても、雨の降りすぎる傾向があり、降水の開始についての研究が必要とされている。

本稿では主に大気境界層についての研究について述べる。本プロジェクトでは、本稿以外にも、客観解析データを用いた湿潤域の拡大期の広域水蒸気輸送の実態、沖縄域におけるメソ降水システムの観測、衛星搭載マイクロ波放射計とレーダによる降水分布の観測の精度の検討、電波の降雨減衰を用いた雨量計の開発、なども行っているが、ここでは割愛する。

2. 研究成果

2.1 大気境界層

大気境界層の実際の観測例を示そう。高感度の気象レーダにより大気乱流が検出できることは 1960 年代から分かっていたが (e.g. Konrad 1970) 乱流構造の観測は今まで余り行われてこなかった。情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センターには偏波ドップラ降雨レーダ (COBRA) が設置されている。本レーダは降雨観測を目的としているが、高い感度を持っており、大気乱流の観測も可能と考えられる。データを調べたところ、冬季はほとんど検出できないが、3 月のデータでは距離 15km 以内で一部検出できていることが分かった。本レーダにより境界層の乱流が観測できれば、乱流の立体構造が分かることになり本プロジェクトに大きな寄与を成す。

大気境界層の観測が有望であることが分かったので、本年 (平成 16 年) 9 月にもゾンデの集中観測、日中の雲状態のビデオ撮影を含む 1 週間弱の RHI 集中観測も行った。ここでは、初期結果ではあるが、そのデータを示す。

COBRA は volume scan や RHI など自由なアンテナ走査のできる C-バンドのレーダである。図2に設置場所等を示す。COBRA サイトの北東約 20km のところには 400MHz/1.3GHz のウィンドプロファイラまた雨量計などが設置されている大宜味サイトがある。また気象庁の定時 (00、12Z) 高層観測が那覇で行われている。弱い乱流エコーを検出するためには地面クラッタの影響を取り除く必要がある。これは降雨についてはエコーが強いため必要無いが乱流エコー検出のためには必要となっている。地面クラッタ除去には、ドップラ速度が約ゼロとなるピクセルを除去することによって行った。また天気状態は AMeDAS 地点の日照データを用いて判別し、晴天日を選んだ。

図3には 2004 年 3 月 15 日の那覇におけるゾンデデータの例 (9 時 JST) と反射強度の例 (9 時 24 分 JST) を示す。レーダは RHI モードである。反射強度では、距離 6-8km 高度約 1.5km に層状のエコーが見られるがこれが乱流エコーである。この高度はゾンデデータの気温逆転層に対応している。この気温逆転層では露点温度も急激に下がっており、混合層の上端であることを示している。

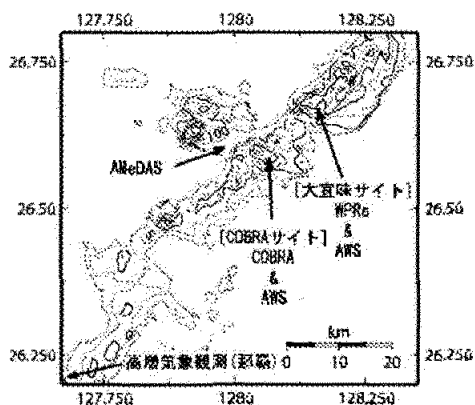


図2 沖縄本島の地形と各観測サイト・測器の位置

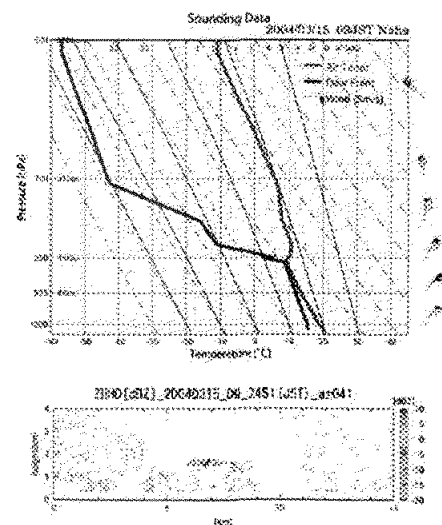


図3 上:ゾンデによる気温と露点のプロファイル
下:レーダ反射強度(RHI)の鉛直断面

図4は午後13時38分(JST)のデータである。まず乱流エコーが強くなっており、また高度も高くなっていることがわかる。乱流エコーは速度、偏波反射比、偏波間相関、偏波間位相差などにも現れており、乱流の偏波特性も調べることの可能性も示されている。このようなエコーは雲との関係が強いことも示されているが、エコーは雲粒子ではなく、水蒸気分布の乱れによる屈折率変動によるらしいことが確認されている。6月と9月の集中観測データには降水ケースもあり、降水システムと大気境界層の関係についても期待が持てる。

図5はこの日と別のエコー高度が低かった日の AMeDAS データによる地表での混合比、レーダエコーから求めた乱流の水平スケール、また高度の変化を示す。3月15日のデータは上側の線、点であり、日変化があり、また高度が上がると水平スケールが増大する傾向のあることが分かる。

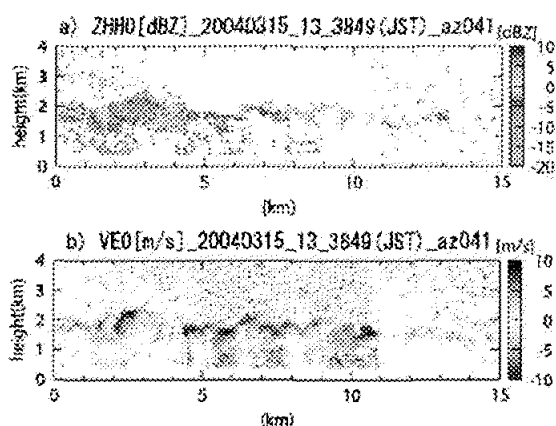


図4 clear echo が最も発達した時間の RHI スキャン
(a)反射強度,(b)ドップラー速度

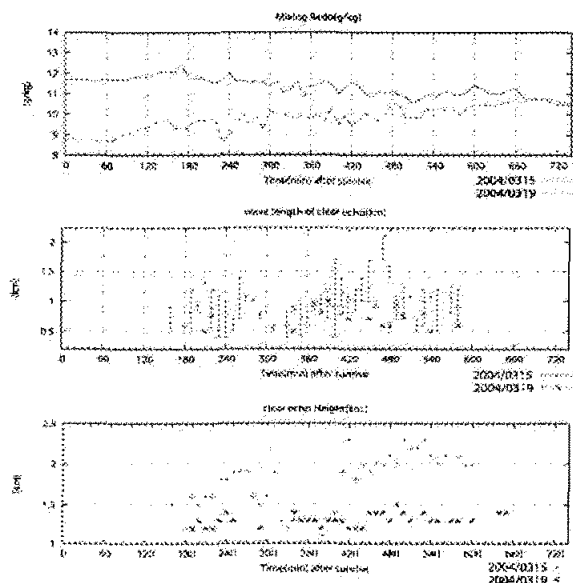


図5 日の出時刻からの(上)混合比,(中)echo の半波長,
(下)clear echo 高度

2.2 モデルシミュレーション

このような大気境界層の変動についてモデルによる結果を示そう。モデルは名古屋大学地球水循環研究センターの坪木助教授らが開発している非静力学モデル (<http://www.rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp/CReSS/>) であり LES による境界層のシミュレーションを行っている。CReSS は湿潤過程なども含んだフルモデルであるが、ここで示す我々の行った乱流シミュレーションはまだ初期段階であり、湿潤過程は含まず、また平坦な地表を仮定している。コリオリ力は無視している。

格子:水平 50m で 200 格子、鉛直は、地表で 10m で平均 20m 80 格子

領域 2km×2km×1.6km

境界条件:地表面は、水平一様で、水平方向に周期境界条件

粗度 0.017m、アルベド 0.2、蒸発効率 0.2 (粗度のみ観測値)

初期条件:琵琶湖におけるゾンデ実観測(2002年11月17日09JST)、主観的に平滑化して水平一様に与えた。擾乱の種として初期値の最下層に微弱なランダム擾乱を置く

計算:3時間分

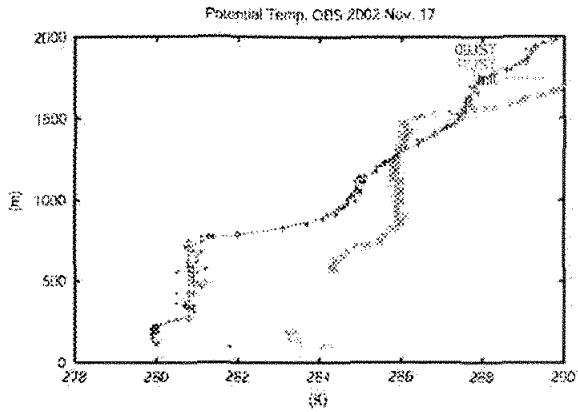


図6 ゾンデ観測値。
09JST, 12JST における観測値と、計算に用いた初期値を示す(100m が地表面である)

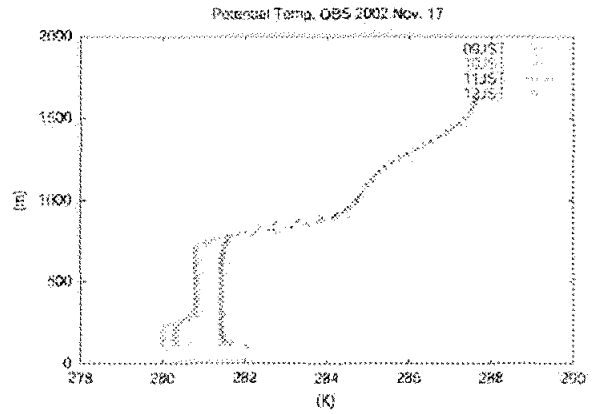


図7 CReSS を用いた計算結果。
(100m が地表面である)

観測では、最下層の標高 200m 以下に冷気の層が見られる。12JST では欠測があるので良く分からないが、その構造を残しつつ、09JST より 4K 程度の温位の上昇が、700m 以下の層で見られ、その上の安定層をはさんで 800m から 1600m 付近の等温位層が存在し、非常に複雑な構造が見られている(図6)。この構造は、周囲の山岳地形や局地循環の影響を受けているのではないかと考えられる。それに対して、水平一様な計算結果である図7は、単純な構造となっており、地表からの加熱により、再下層の冷気層が2時間程度で破壊され、800m 程度まで続く等温位層が形成されている。また、地上付近の昇温量は 2K 程度である。昇温の少なさは地表面パラメタのチューニングの不足の影響もあると考えられるが、得られた計算結果は、混合層が 800m 付近に安定な層があり、その下が混合層になっているなど、ある程度の類似を示している。11JST に相当する時間でのほぼ風向方向に切った温位の鉛直断面図を図8に示す。ここでは標高 800m 付近に混合層上端の安定層が見られ、地上からの高温気塊の上昇のうちのいくつかがそこまで到達していることが見られる。このモデルの結果は、実際に観測された大気境界層の様子に似ており、今後に期待を持たせるものである。

Ptp (007200 sec)

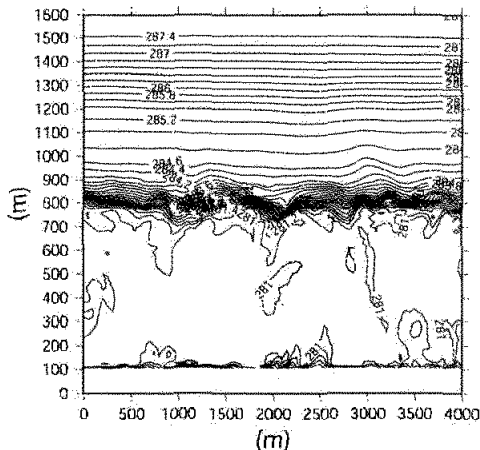


図8 シミュレーションによる温位の鉛直断面図

2.3 エアロゾンデで観測された亜熱帯高気圧下での大気境界層の構造

大気境界層は陸上と海上とでは大きく異なると考えられる。本プロジェクトでは海上は表面状態が均一であることからreferenceとして海上の大気境界層の観測を行った。この領域はまた、中国域の降水の水蒸気源としても重要である。さらに、亜熱帯高気圧下の海洋上における大気境界層の構造は、積雲による熱、水蒸気の鉛直輸送によって大気循環場に与える影響が大きい。大気境界層内の鉛直輸送に関わる乱渦の構造を明らかにするために 2002 年 8 月、南西諸島の下地島において、大気境界層の構造についての観測を実施した。島上でのフラックス観測なども行ったが、ここでは、無人気象観測機 (エアロゾンデ、

<http://www.aerosonde.com/>) により観測された乱渦の構造について、ラジオゾンデ観測の結果とあわせて考察した結果を示す。

観測が行われた領域を図9に示す。2002年8月20日00Zから8月27日00Zまでの期間、下地島の下地空港の敷地内において3時間毎のラジオゾンデ連続観測を実施した。エアロゾンデ観測は下地島西方のおよそ5kmの海上を南北およそ5kmのフライトパスで行われた。エアロゾンデは温湿度計と気圧計を搭載したラジコン飛行機(図10)で、1時間毎に高度100m、200m、400m、600m、700m、800m、900mの7高度を飛行しながら温位、比湿、気圧をおよそ10秒毎に連続して取得した。

図11に観測期間中のラジオゾンデの連続観測により取得された比湿の時間高度断面図を示す。観測期間中は高度1.5~2.5km付近に逆転層が存在しており、逆転層より下層は比湿が高い値を示す湿潤層となっている。温位の鉛直プロファイルと比湿の鉛直傾度のプロファイルの時系列(図11、12)より、湿潤層内は海面から高度500m付近までの等温位・等比湿層と、高度500m付近から逆転層までの対流不安定成層を区別することができる。図13はエアロゾンデにより観測された8月21日03Zの各高度における温位と比湿を示す。図より高度600m以上では、高(低)温位域では比湿の値が小さく(大きく)なる傾向がわかる。同時に取得された気圧値の変動から、高(低)温位域では下降(上昇)気流の存在が示唆されたことから、上空の自由大気と大気境界層内の空気塊の交換を行うような渦(entrainment)が存在すると考えられる。一方、高度200m以下の海面付近においては、高温位域で比湿の値も大きくなる傾向が見られる。同様に気圧値の変動から、高温位域では上昇気流の存在が示唆されたことから、海面付近の暖かく湿った空気塊を上層へ輸送するような乱渦(plume)が存在すると考えられる。

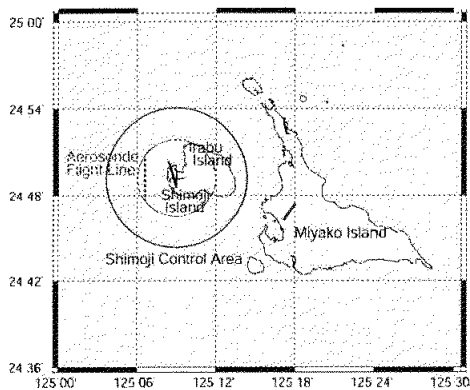


図9 観測が行われた下地島付近の地図
赤色で示された Aerosonde Flight Line がエアロゾンデの飛行線を示す。



図10 エアロゾンデの離陸前の様子。

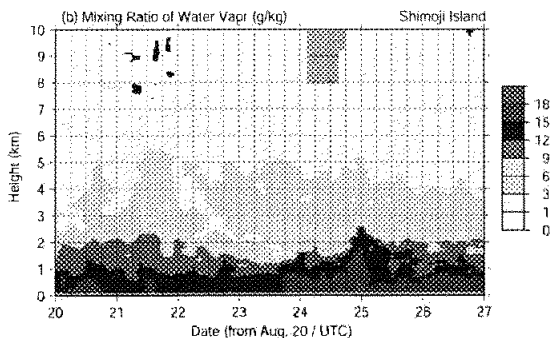


図11 2002年8月20日00Zから27日00Zの間、下地島におけるラジオゾンデ観測により取得された比湿の時間高度断面図

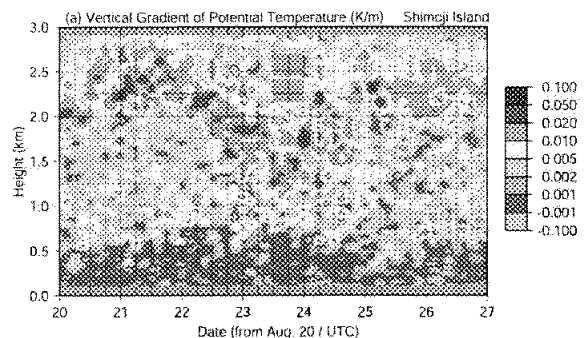


図12 下地島におけるラジオゾンデ観測により取得された温位の鉛直傾度の時系列。暖色系の色は安定成層を、寒色系の色は中立成層から不安定成層を示す。

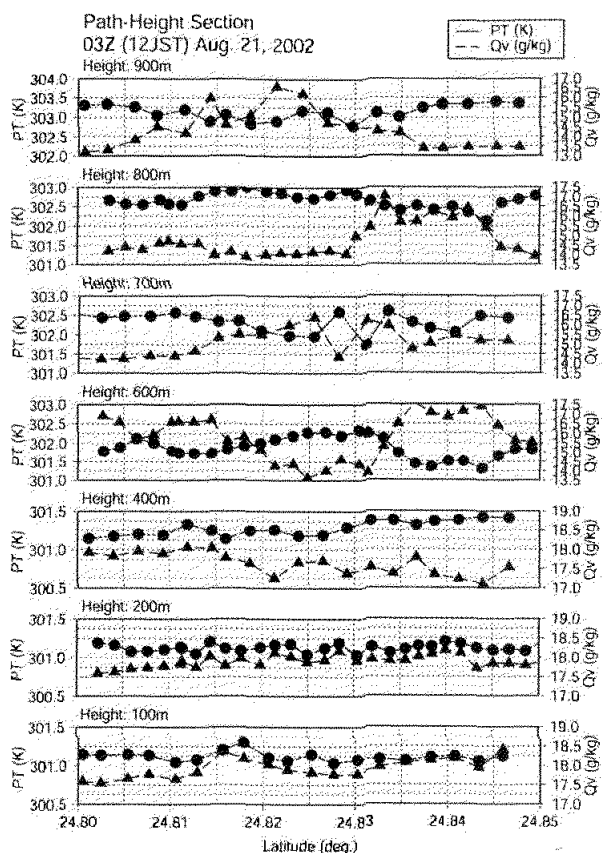


図13 エアロゾンデにより取得された2002年8月21日03Z(12JST)の各高度毎の温位(赤)と比湿(青)の緯度断面図を示す。

2. 4 宮古島集中観測時の大気循環場の構造

2002年8月下旬の宮古島で境界層観測のIOP期間の大気の大域構造についても若干記す。この期間は全体的に天気が良く下降流の場の中にあった。ラジオゾンデ観測により、IOP 前半にかけて対流圏中層から非常に乾燥した空気塊が下降する現象が確認された。ECMWFの40年再解析データ(ERA40)による解析から、この現象は周辺の対流活動との位置関係による大規模な収束発散場の影響を強く受けていることが分かった(図14)。ゾンデ観測から見積もられた乾燥空気塊の下降速度(2000m/day)は大規模場による沈降速度(数cm/s)のオーダーとほぼ一致する。また、放射冷却が原因の沈降速度(熱帯で約400m/day)より十分早く、またメソスケールの積乱雲等による下降速度(数m/s)よりも十分に小さい。さらに、中層にかけて発達した閉じた高気圧性循環の存在により、周囲からの水蒸気流入が抑制され、宮古島付近の大気は非常に乾燥した状態がもたらされものと思われる。また、IOP期間の宮古島周辺は沈降流により、850~700hPa 付近が6~8月の間で最も強い安定度を示した。それ故、IOPでは自由大気に強くキャッピングされている下での海洋上の大気境界層の特徴と維持機構が観測されていることが期待される。また、宮古島周辺は梅雨前線帯の南側の水蒸気供給源の一つであり、どのように周辺大気の水蒸気が維持され、輸送されるのかも興味深い課題である。ゾンデデータでは乾燥空気塊が塊(パーセル)状に下降しているように見えるが、ERA40では面的に下降しているように見える。大規模場として下降流が卓越する状態で、空気が塊状に下降することがありえるという事実は解釈も含め今後も解析が必要である。

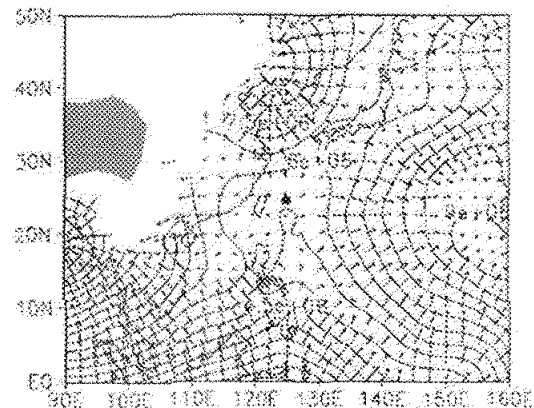


図14 8月22日925hPaにおける速度ポテンシャルと発散風。中央丸印は宮古島。ベンガル湾、西太平洋、韓国付近の下層収束は対流活動と一致している。宮古島周辺は大規模発散場の中心。

2.5 中国における大気境界層観測

本プロジェクトでは中国における観測が大きな柱である。中国大陸における湿潤域と乾燥域の南北境界域である中国淮河流域において、2003年8月および9月より、大気境界層構造の長期モニタリングを開始した。本モニタリング観測の中心として北緯 32.6 度、東経 116.8 度(寿县, Shouxian)に陸面大気境界層観測点を設け、北緯 31.8 度、東経 117.2 度(肥西, Feixi)、および、北緯 34.2 度、東経 117.0 度(淝県, Xiaoxian)の南北2地点に風速鉛直分布測定点を設けた(図15、16)。陸面大気境界層観測点では、ウインドプロファイラ、風速鉛直分布測定装置(ドップラーソーダ)、マイクロ波放射計(水蒸気プロファイラ)、陸面接地境界層観測システム(フラックスタワー)を設置した。それぞれ、高度 100~8,000 メートルの風速ベクトル(南北風、東西風、鉛直風)を高度 100メートル毎に(ウインドプロファイラ)、高度 20~420メートルの風速ベクトルを高度 40メートル毎に(ドップラーソーダ)、地表から高度 10,000メートルまでの気温および比湿を高度 250メートル毎に(水蒸気プロファイラ)、更に、地下 0.4メートル~高度 30メートルの水文・微気象要素(フラックスタワー)の継続的なデータが得られている。観測により得られた気象パラメータは相互に合理的な変化を示していた。また、ウインドプロファイラおよびドップラーソーダ観測からは日中の大気境界層の発達が明瞭に観測されている。

2004年の梅雨期前後の期間(5月24日~7月16日)に、寿县観測点において周辺植生の調査を含めた集中観測をおこなった。周辺植生の葉面積指数(LAI)、植生高度(草丈)、および、フラックスタワー30m部での日射の反射率(アルベド)等も調べている。周辺植生は、5月30日まではコムギが優占し、5月30日の刈り取り後、ムギワラの野焼き(6/1~4)が行われた。焼き灰の鋤き入れの後、6月14日に水入れ、および、田植えが行われ、6月14日以降はイネが優占した。ムギの刈り取りによるアルベドの上昇、野焼きによるアルベドの低下、鋤き込みによる上昇、田植え(水張り)による低下、および、イネの成長に伴うアルベドの上昇など、地表面特性の変化がタワー観測により良好に捉えられた。

地表面状態の変化は、地表面から大気境界層(ABL)へ供給される顕熱、および、潜熱の量(フラックス)に影響を及ぼし、ABLの構造に影響を及ぼすと考えられる。図17および18に晴天日の5月22日、5月31日、6月3日、6月22日、7月3日における顕熱フラックス、潜熱フラックスの変化、および、ウインドプロファイラによるエコー強度の変化を示す。ムギの刈り取り前後の地表面が乾燥した時期(5/22、5/31、6/3)には、日中、顕熱フラックスが大きく、対照的に田植え後の湿潤な期間(6/22、7/3)では潜熱フラックスが増大する。ABL内では、日中、局所的な上昇流(プルーム)によると考えられる乱流エコーが周期的に検出されている。顕熱フラックスの大きな乾燥した時期にはABL高度は、およそ2000メートルまで発達する。顕熱フラックスがほとんどみられない湿潤期にもABL高度はおよそ1500メートルにまで発達する。

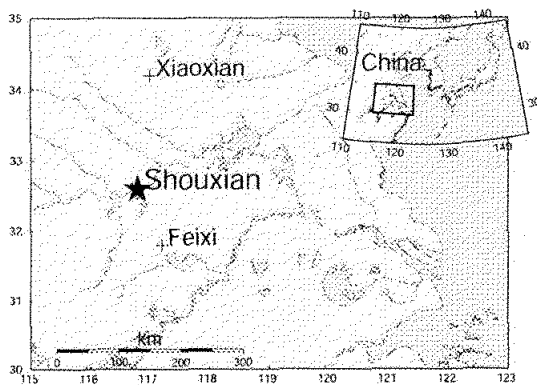


図15 中国における観測サイト

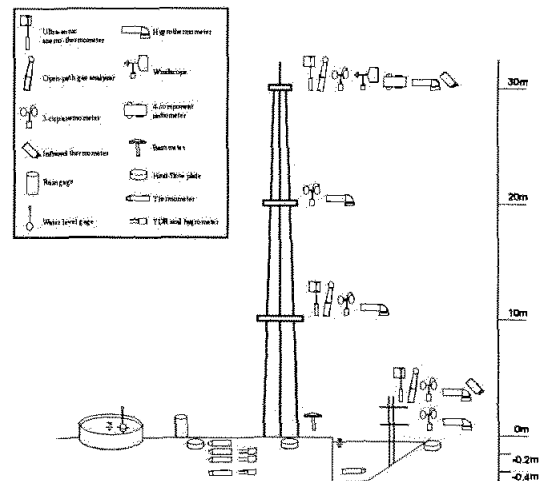


図16 観測タワーの測器

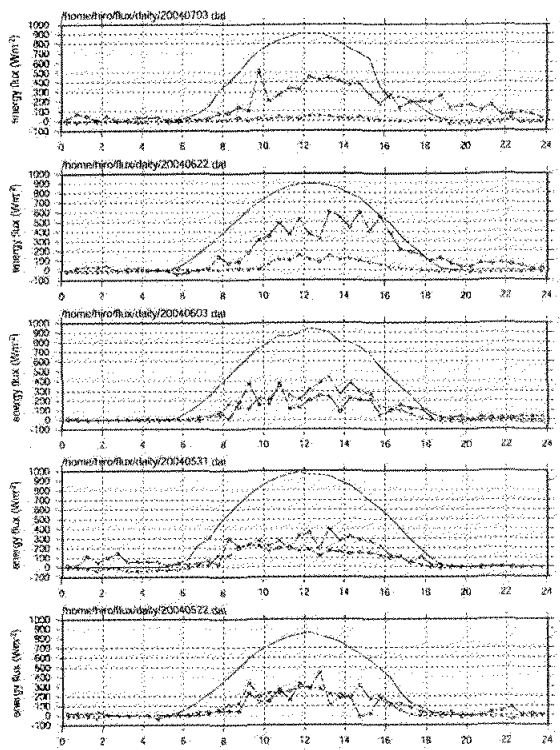


図17 日射(黒線)、顕熱フラックス(赤)及び潜熱フラックス(青)の日変化

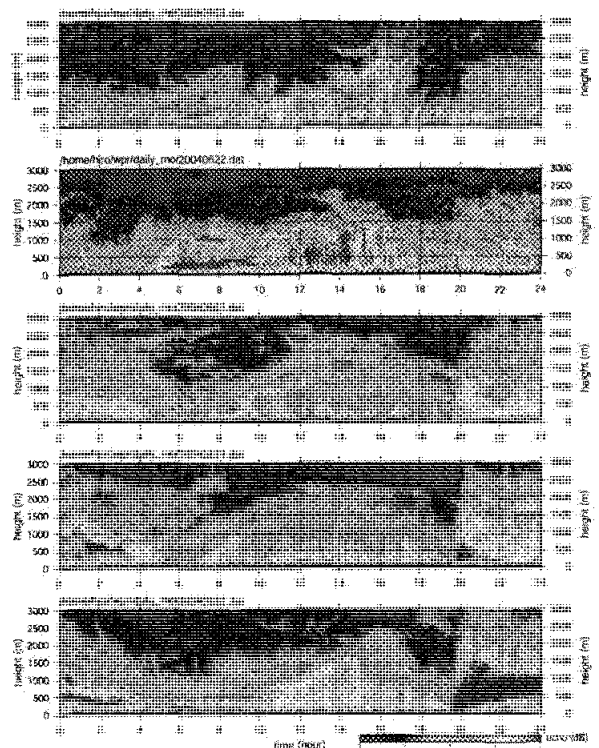


図18 ウィンドプロファイラのエコーの時間高度断面図

3. 今後の課題

3.1 中国観測

フラックスタワーによる観測は順調で、またウィンドプロファイラによる観測も一応満足できるものである。しかしながら、ドップラソダはデータの解釈が十分ではない。また水蒸気ラジオメータは測器不具合がある。さらに最近、突風被害、落雷被害があり観測は停止している。これらから、フラックスタワーとウィンドプロファイラによる鉛直・時間連続観測はかなりのデータ蓄積が行われているが、他は不十分である。

今年度(平成16年度)のデータから、地表面変化によるフラックス変化等が実際に観測されており成果となっているが、解析は未だ不十分である。降水システムとの関連については中国側ゾンデデータ、現業レーダデータの解析はこれからである。

3.2 沖縄観測

沖縄観測は、平成14年夏の宮古島周辺における無人小型飛行機などによる観測は、海上の大気境界層について予測された結果を与えている。またフラックスマストによるフラックス測定ももつともな結果を与えている。これらは現在論文を進めている。降水システムの観測は、過去の実績も踏まえて、良い観測がなされ、また解析も進んでいる。

情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センターの偏波ドップラ降雨レーダによる大気境界層の観測は、初期解析の段階であるが、新しい成果が期待できる。本レーダでは、沖縄本島における大気境界層の空間構造が観測されている。沖縄本島における大気境界層の実態解明のみならず、ウィンドプロファイラでは鉛直方向の観測しかできないという制限があるが、沖縄本島ではウィンドプロファイラによる観測もなされており、データ比較から、中国におけるウィンドプロファイラによる観測の解釈に大きな寄与が期待される。

3.3 広域データ解析

沖縄域を含む広域の大気循環の様相、Meiyu の活動と水蒸気輸送との関係、また衛星による降水分布の推定の精度検討など、以前からの研究の延長上にある研究ではあるが、着実な成果が挙がっており、論文文化も進んでいる。

3.4 モデル研究

モデル研究はもっとも遅れている。中国観測の立ち上げに大きな努力が払われ、その結果モデルへ労力を多くは割けなかった。中国観測の立ち上がってきた後に、モデル研究の遅れを認識し、立ち上げに努めた。この結果、単純地表面上の湿潤過程をふくまない LES はある程度の結果が出てきている。

4. 引用文献

- Konrad, T. G., 1970: The dynamics of the connective process in clear air as seen by radar. *J. Atmos. Sci.*, 27, 1138-1147.
- Stevens, B., and D. H. Lenschow, 2001: Observations, experiments, and large eddy simulation. *Bul. Amer. Meteor. Soc.*, 82(2), 283-294.
- Tompkins, D. M. and G. C. Craig, 1998: Radiative-convective equilibrium in a three-dimensional cloud-ensemble model. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 124, 2073-2097.
- Tompkins, A. M., 2001: Organization of tropical convection in low vertical wind shear: The role of cold pools. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6), 1650-1672.
- Tompkins, A. M., 2001: Organization of tropical convection in low vertical wind shear: The role of water vapor. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6), 529-545.
- Tompkins, A. M., 2001: On the relationship between tropical convection and sea surface temperature. *J. Climate*, 14, 633-637.

5. 主要な成果報告等

(1)論文発表

- Minda H. and K. Nakamura, 2004: High temporal resolution path-average rain-gauge with 50 GHz band microwave. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (American Meteorological Society)* (accepted)
- 玉川一郎、田中賢治、石田祐宣、樋口篤志、松島 大、浅沼順、小野圭介、多田毅、林泰一、石川裕彦、田中広樹、檜山哲哉、岩田徹、田中健路、中北英一、CAPS 観測グループ, 2004: 琵琶湖プロジェクト 2002 年フラックス面的集中観測(Catch A Plume by SATs: CAPS: その概要). *水文・水資源学会誌* Vol.17, No.4, pp.392-400
- Shinoda, T. and H. Uyeda, 2002: Effective factors in the development of deep convective clouds over the wet region of Eastern China during the summer monsoon season, *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 1395-1414.
- Zhang, Y., Q. A. Ma and K. Kato, 2002: Meteorological characteristics during the second Meiyu episode in 1998. *Acta Meteorologica Sinica*, 16, 282-292.
- Furuzawa F. A. and K. Nakamura, 2004: Differences of rainfall estimates over land by tropical rainfall measuring mission (TRMM) Precipitation Radar (PR) and TRMM Microwave Imager (TMI) - Dependence on storm height. *J. Applied Meteor.* (accepted)
- Fujinami H. and T. Yasunari, 2004: Submonthly variability of convection and circulation over and around the Tibetan Plateau during the boreal summer. *J. Meteor. Soc. Japan*. (in print)

(2)口頭発表

学会:国内35件、海外34件、その他:国内3件、海外1件

(3)特許出願:国内 1件

(4)その他:

LAPS publications

- No. 1: Proceedings The First Lower Atmosphere and Precipitation Study (LAPS) Workshop, 60pp.
No. 2: Lower Atmosphere and Precipitation Study (LAPS) Implementation Plan, 41pp.
No. 3: ABL Experiment at Miyako & Shimoji Islands, 375pp.
No.4: Proceedings The Second China-Japan Joint Workshop on Lower Atmosphere and Precipitation Study (LAPS) Workshop, 99pp.

新聞発表:

平成14年8月に行った南西諸島観測について宮古島での観測マストによる観測及び下地島空港でのエアロゾンデ観測、ラジオゾンデ観測についての記事

- ・ 平成14年8月25日宮古新報 朝刊7面 「大気境界層のメカニズム探る」
- ・ 平成14年8月27日宮古毎日新聞 朝刊6面 「気球で大気観測」