

## 中国華中域における大気境界層・降水システム研究の進展 ～GAME/HUBEX 特別集中観測からの10年～

篠田 太郎<sup>\*1</sup>・山田 広幸<sup>\*2</sup>・遠藤 智史<sup>\*1</sup>・  
田中 広樹<sup>\*1,\*3</sup>・上田 博<sup>\*1</sup>

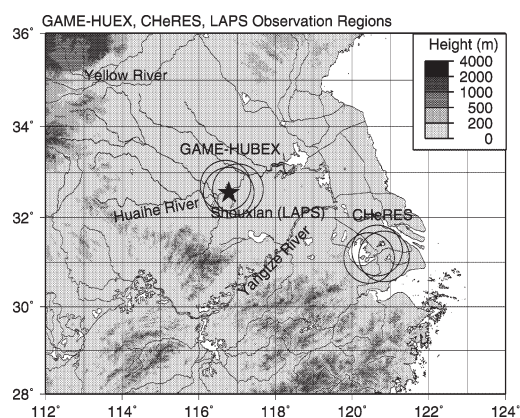
### 1. はじめに

中国華中域は長江下流域から淮河流域を中心とした地域であり、広大な平野が広がっている。長江や淮河の流域では梅雨前線によってもたらされる降水により、ときどき洪水が発生し、流域に被害をもたらす。このうち、2003年に淮河流域で発生した洪水についての現地調査の結果は山田・耿(2004)に詳しい。このような調査結果が日本に報告されるようになったのは Global Energy and Water Experiment (GEWEX) Asian Monsoon Experiment (GAME) / Huaihe River Basin Experiment (HUBEX) 特別集中観測(藤吉 1995; Zhao and Takeda 1998)以降の日本と中国との共同研究の継続による。

GAME/HUBEX 特別集中観測は、中国華中域における梅雨前線周辺の大気環境場や降水システムの構造を明らかにするために、中国安徽省の淮河流域を対象として計画され、1998年と1999年の梅雨期に実施された(第1図)。GAME/HUBEX 特別集中観測では、安徽省の寿县および鳳台に名古屋大学大気水圏科学研究所(当時)の2台のドップラーレーダを、同省の淮南に北海道大学理学部のドップラーレーダを設置し、3台のXバンドドップラーレーダによる降水システムの観測が実施された。また、同領域周辺において高層気象観測ネットワークにより1日あたり4回の連続観測を実施し、広域(200 km スケール)での降水システムによる大気中の熱・水収支解析を行った。さら

に、京都大学防災研究所のグループにより、様々な陸面(水田、畑地、森林、湖水)上において、移動可能なフラックス観測システムを用いて放射・熱・水収支の観測が実施された。これらの結果は Fujiyoshi and Ding (2006) に詳しい。

その後、2001年と2002年に中国江蘇省において梅雨前線帯の降水システムを対象とした観測プロジェクト China Heavy Rainfall Experiment and Study (CHeRES: Yamada *et al.* 2003; Geng *et al.* 2004) が実施された(第1図)。CHeRES では海洋科学技術センター地球フロンティア観測システム(当時)が中心となり、長江下流域の江蘇省蘇州近郊の呉県および周庄に名古屋大学地球水循環研究センターの2台のドップラーレーダを、同省の太湖沿岸の東山に北海道大学低温科学研究所のドップラーレーダを設置し、3



第1図 中国華中域の地形図。濃淡は標高を表す。GAME/HUBEX, CHeRES における3台のドップラーレーダの観測範囲(○)とLAPSにおける地上観測点(寿县・Shouxian: ★)も示している。

<sup>\*1</sup> 名古屋大学地球水循環研究センター。

<sup>\*2</sup> 海洋研究開発機構。

<sup>\*3</sup> 総合地球環境学研究所。

—2009年5月11日受領—

—2009年9月3日受理—

台の X-バンドドップラーレーダによる降水システムの観測が実施された。

2003年～2005年には、中国安徽省において Lower Atmosphere and Precipitation Study (LAPS: Tanaka *et al.* 2007) が実施された。LAPS では淮河流域の寿県にウィンドプロファイラレーダとフラックス観測装置を設置し、地表面フラックスと大気境界層の発達過程を対象とした連続観測を実施した (第 1 図)。

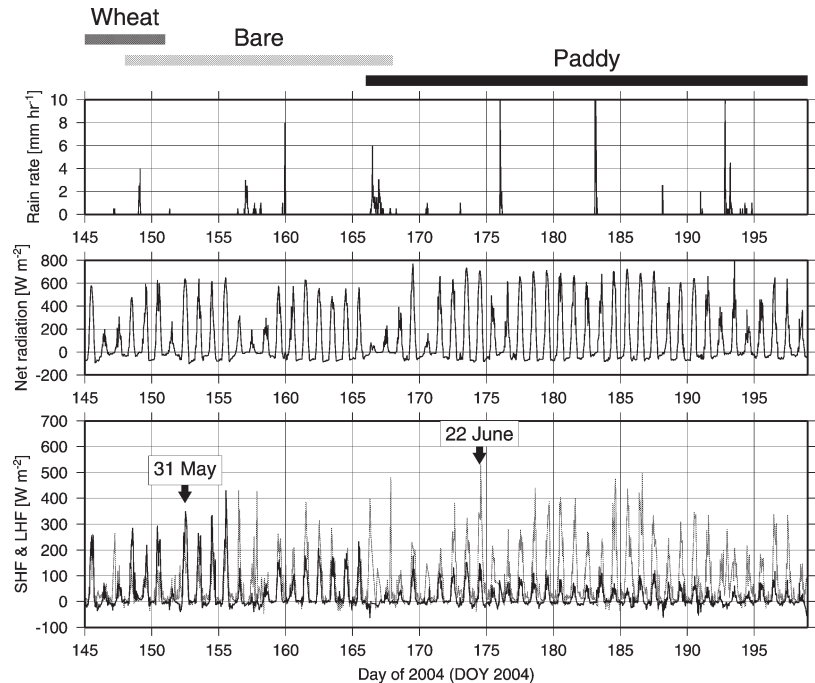
2008年 (昨年) は GAME/HUBEX の特別集中観測が行われてからちょうど10年目にあたる。本解説では、中国華中域で行われたこれらの観測プロジェクトの成果を中心に、大気陸面相互作用と降水システムについて、この10年間の研究の進展についてのレビューを行う。レビューを行うに当たっては、各観測プロジェクトの成果を羅列するのではなく、大きく理解が進んだ3つの項目に注目して記述を行う。3つの項目とは、「水田上の大気境界層の発達過程」、「梅雨前線の南側の大気境界層過程が梅雨前線帯の降水システムに与える影響」、「梅雨期の降水セルの特徴」である。

## 2. 水田上の大気境界層の発達過程

GAME/HUBEX に先だて行われた観測結果から、Ikebuchi *et al.* (1998) は水田上における顕熱・潜熱フラックスの日変化を示した。正味の下向き放射量の日最大値 (およそ  $600 \text{ W/m}^2$ ) に対して、水が満たされた水田上における顕熱フラックスの日最大値はおよそ  $150 \text{ W/m}^2$ 、潜熱フラックスの日最大値はおよそ  $500 \text{ W/m}^2$ であった (正味の下向き放射量と顕熱・潜熱フラックスの収支が合わないのは、それぞれの最大値の時刻が異なるためである)。畑地における正味の下向き放射量、顕

熱・潜熱フラックスの日最大値は、それぞれおよそ  $500$ ,  $350$ ,  $200 \text{ W/m}^2$ であった。すなわち、水田上における潜熱フラックスの値は畑地上に比べて大きな値であった。地表面からの潜熱フラックスの値が水田上で大きいという結果は、GAME-Tropicsの領域を対象とした観測結果とモデルの比較 (Kim *et al.* 2001) や日本における研究 (Maitani and Kashiwagi 1992; Hiyama *et al.* 1995; Oue 2005) においても示されている。

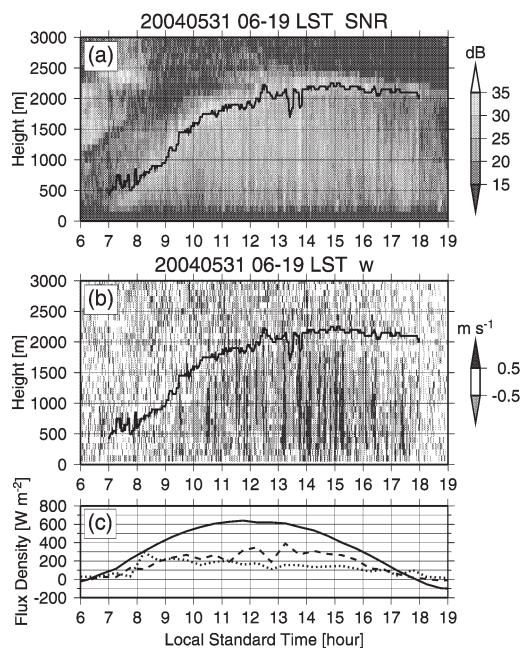
LAPS では、2004年と2005年の初夏に安徽省寿県において、ウィンドプロファイラレーダとフラックス観測装置を用いた連続観測を実施した。2004年の5月下旬から7月中旬にかけて、観測サイト周辺の地表面状態は収穫前の小麦畑から、小麦の収穫後に裸地へ、そして水を張った水田へと変化した。この間、観測測器が順調に稼動していたので、陸面状態の変化に伴う地表面フラックスと大気境界層の時間変化を捉えることに成功した。Tanaka *et al.* (2007) は、この地表



第2図 2004年5月24日 (DOY=145)～7月16日 (DOY=199)の寿県における地上降水量 (上図)、正味放射量 (中図)、顕熱フラックス (下図黒線)、潜熱フラックス (下図灰色線)の時間変化を示す。“Wheat”, “Bare”, “Paddy”は観測サイト周辺の土地利用状態が「成熟した小麦畑」から「裸地」,「水の張られた水田」へと変化した日付を示す。Endo *et al.* (2008)より抜粋。

面の変化に伴う顕熱・潜熱フラックスの時間変化を示した(第2図; Endo *et al.* 2008). 地表面が成熟した小麦畑もしくは裸地であった場合, 顕熱・潜熱フラックスの値はほぼ同程度であり, Ikebuchi *et al.* (1998) による畑地上の結果と一致していた. 地表面が水田に変わった場合に, 潜熱フラックスの値が大きくなるという変化も, Ikebuchi *et al.* (1998) の結果に等しかった. この結果から, 小麦畑もしくは裸地上と水田上の大気境界層の発達過程は大きく異なることが示唆される.

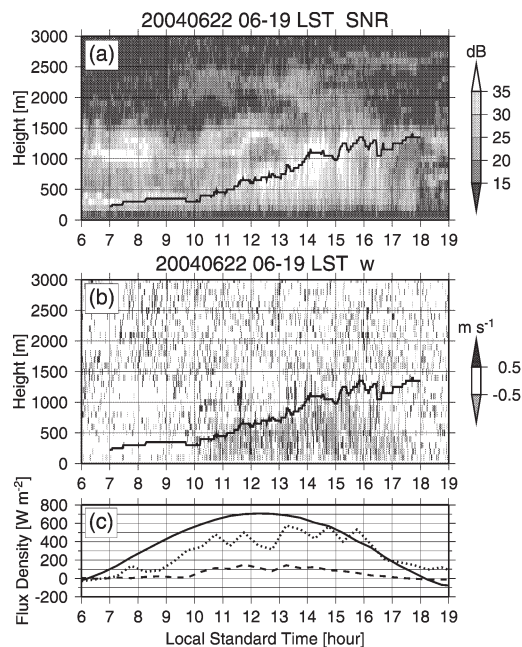
Tanaka *et al.* (2007) は, ウィンドプロファイラの観測結果を用いて, 静穏な晴天である場合の畑地上と水田上の対流混合層の発達過程を示した(第3図,



第3図 寿県において, 地表面が裸地であった2004年5月31日にウィンドプロファイラで観測された(a) SNR (エコー強度)の鉛直プロファイルの時系列, (b) 鉛直速度の鉛直プロファイルの時系列, (c) 地表面における正味の下向き放射量(実線), 顕熱フラックス(破線), 潜熱フラックス(点線)の時間変化を06LST~19LSTまで示す. 上図と中図における太実線は, Tanaka *et al.* (2007) で計算された対流境界層の上端高度の時間変化を示す. 中図における濃灰色は上昇気流, 淡灰色は下降気流を示す. Endo *et al.* (2008) より抜粋.

第4図; Endo *et al.* 2008). 両者の結果から, 水田上では畑地上に比べて対流混合層の発達が遅い時刻から始まるが見取れる. また, 対流混合層の最大到達高度は, 畑地上では2.3 kmに達する一方, 水田上では1.4 km程度と低いことも見て取れる. さらに, Endo *et al.* (2008) は, 畑地上の対流混合層内のサーマルの最大鉛直速度はおよそ3 m/sであったのに対し, 水田上の対流混合層内のサーマルの最大鉛直速度は1.5 m/s程度と小さいことを示した.

Endo *et al.* (2008) は, 雲解像モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CRSS; Tsuboki and Sakakibara 2002) を水平解像度100 m で用いることにより, 畑地上と水田上の対流混合層の到達高度や時間変化, その内部のサーマルの構造(鉛直速度の最大値など)の再現に成功した. 数値実験の結果から, 浮力フラックス(鉛直速度と仮温位の共分散  $\overline{w'\theta'}$ ) の鉛直プロファイルと, 浮力フラックスに対する顕熱と水蒸気の寄与の鉛直プロファイルを示した(第5図; Endo *et al.* 2008). 乾燥した陸面(畑地)上の浮力フラックスは顕熱の寄与が大きい(水蒸気の寄与は極めて小さい)ことは先行研究(Stull 1988 など)と同様



第4図 第3図に同じ. ただし, 地表面は水の張られた水田となった2004年6月22日の時間変化を示している. Endo *et al.* (2008) より抜粋.

であった。この研究の注目すべき点は、水田上の浮力フラックスにおいて顕熱の寄与と水蒸気の寄与が同程度であることを初めて明らかにしたという点である。浮力に対する水蒸気の寄与は、水蒸気と乾燥空気の密度差（分子量の比）に起因するものである。

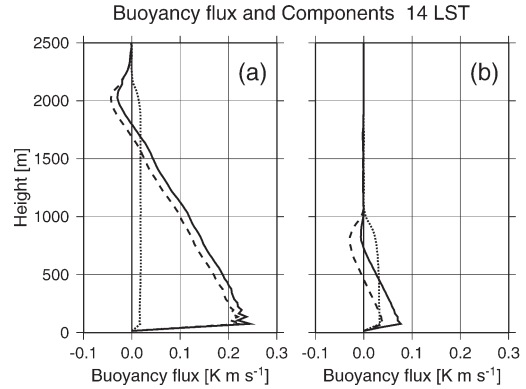
浮力フラックスにおいて水蒸気の寄与が大きいという点は、高い海面水温の海洋上の対流混合層の発達・維持過程として観測されている (Nicholls and LeMone 1980)。この点から、水田上の対流混合層の発達過程は、乾燥した陸面 (畑地) 上の対流混合層と、高い海面水温の海洋上の対流混合層の両者の特徴を併せもつものであると考えられる。

3. 梅雨前線の南側の大気境界層過程が梅雨前線帯の降水システムに与える影響

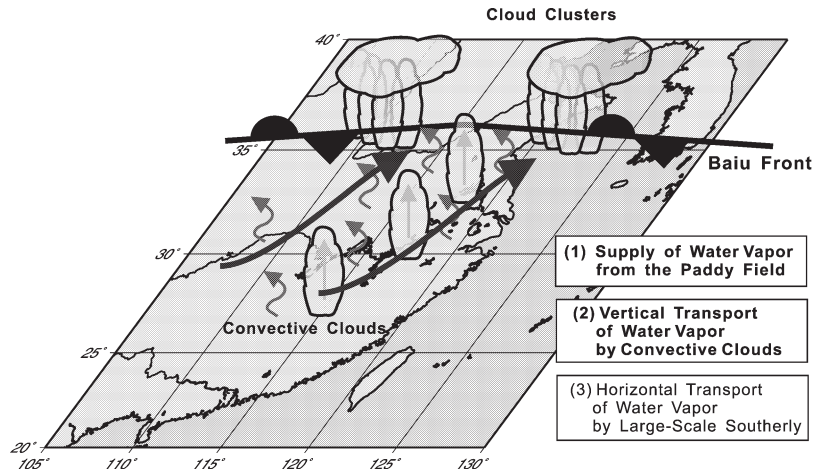
Shinoda and Uyeda (2002) は、梅雨前線帯の南側において発達した積乱雲を対象として、理想的な条件下での数値実験を行った。その結果、地表面からの水蒸気の供給が豊富である場合と、対流圏中層 (高度2~5 km) が湿潤である場合に、背の高い対流雲 (積乱雲) が発達しやすいことを示した。その上で、梅雨前線帯が華北まで北上した場合には、梅雨前線帯の南側にあたる淮河や長江流域の水田地帯からの蒸発散による大気への水蒸気供給が、この領域での対流雲 (浅い積雲や積乱雲) による鉛直混合を通じて厚い湿潤な気塊を形成し、この湿潤気塊が梅雨前線帯に水蒸気を供給するという作業仮説を提唱した (第6図)。

その後、Shinoda *et al.* (2005) は、GAME 再解析データ (山崎ほか 2000) を用いて、梅雨前線が華北まで北上した期間 (1998年7月4日~15日) を対象として、梅雨前線帯の南側における地表面からの顕熱・潜熱フラックス、可降水量、湿潤層の厚さなどを調べた。梅雨前線帯の南側の中国大陸上における日平均の顕熱フラックスは40~60 W/m<sup>2</sup>、潜熱フラックスは80~100 W/m<sup>2</sup>であり、相

対湿度が70%以上の厚さで規定した湿潤層の厚さは600 hPa に達していた。厚い湿潤層の存在により、可降水量は45~55 kg/m<sup>2</sup>と大きな値を示していた。さ



第5図 水平解像度100 m の雲解像モデル CReSS を用いて計算された浮力フラックス (実線)、浮力フラックスにおける顕熱の寄与 (破線)、浮力フラックスにおける水蒸気の寄与 (点線) の鉛直プロファイルを示す。(a) は地表面が裸地であった場合 (2004年5月31日を想定) の実験、(b) は地表面が水田であった場合 (同年6月22日を想定) の実験における、14LST の鉛直プロファイルを示している。Endo *et al.* (2008) より抜粋。



第6図 梅雨期の中国東部 (華中域) における水蒸気輸送の概念的モード図。(1) 水田が多く分布する地域での地表面からの水蒸気供給、(2) 積雲などによる水蒸気の鉛直輸送、(3) 大規模場の気流による梅雨前線帯への水蒸気の流入、そして梅雨前線帯における降水システムの発達を示している。Shinoda and Uyeda (2002) より抜粋。

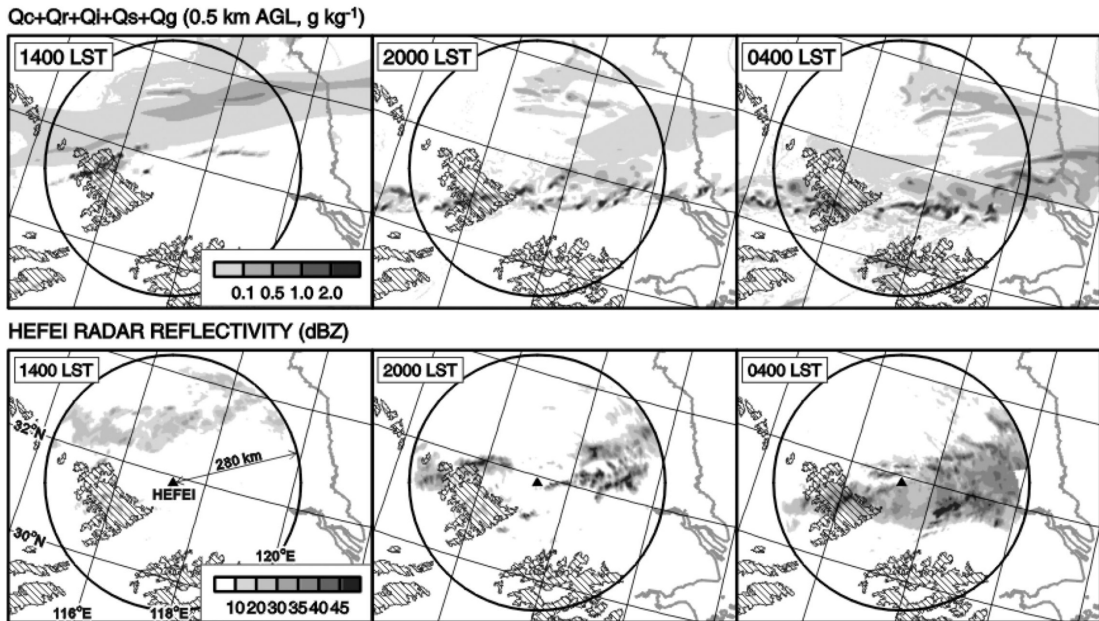
らに, Yoshimura *et al.* (2004) により提唱された色水解析を用いて梅雨前線帯における水蒸気の起源を推定した. 色水解析は蒸発地域ごとに区別した(色を付けた)水蒸気を大気水収支式に応じて移流させることにより, 水蒸気の起源を推定・可視化する手法である. この結果, 梅雨前線帯における水蒸気のおよそ15%が中国大陸南東部(華中域を含む領域)起源であることを示した.

厚い湿潤層の形成には対流雲による水蒸気の鉛直混合が重要である. Shusse and Tsuboki (2006) は, 梅雨前線帯の南側で発達した個々の積乱雲を対象として降水効率を計算した. 降水効率は「降水雲の発生から消滅までに雲底を通過する鉛直水蒸気フラックスに対する降水量」と定義されている. 雲底を通過する鉛直水蒸気フラックスの計算において, 水蒸気の混合比はラジオゾンデから観測された水蒸気量を, 鉛直速度はデュアルドップラー解析から得られた値を用いている. 計算結果から, 梅雨前線帯の南側で発達した積乱雲の降水効率は10%以下であることを示した. すなわち, 積乱雲の雲底を通過した水蒸気の90%以上が大気

中に蓄積されることを示している. このことから, 当該領域における積乱雲は, 水蒸気を対流圏中層ないし upper layer に輸送することにより, 大気の湿潤化に寄与していると考えられる.

Li *et al.* (2007) は, 梅雨前線周りで発達するクラウドクラスタが最も発達する時刻を調べ, その2/3以上が夜間に発達することを示した. 夜間のクラウドクラスタの発達, 下層における水蒸気フラックス収束が強化された結果であることを示し, その要因として下層風の南風成分の日変化(日中は南風成分が弱く, 夜間に強まる)を挙げている. 夜間の南風成分の強化に繋がる原因として, 非地衡風成分である東風が慣性振動により時計回りに変化して南風成分を強めることを挙げている. 夜間に慣性振動が卓越する要因として, 日中の対流混合層の発達時には大きかった地表摩擦が, 日没後の安定境界層の発達により小さくなるためであるとしている.

Li *et al.* (2007) は, 夜間のクラウドクラスタの発達が下層の水蒸気フラックス収束の強化という力学的な収束の効果によるものであると説明している. 一

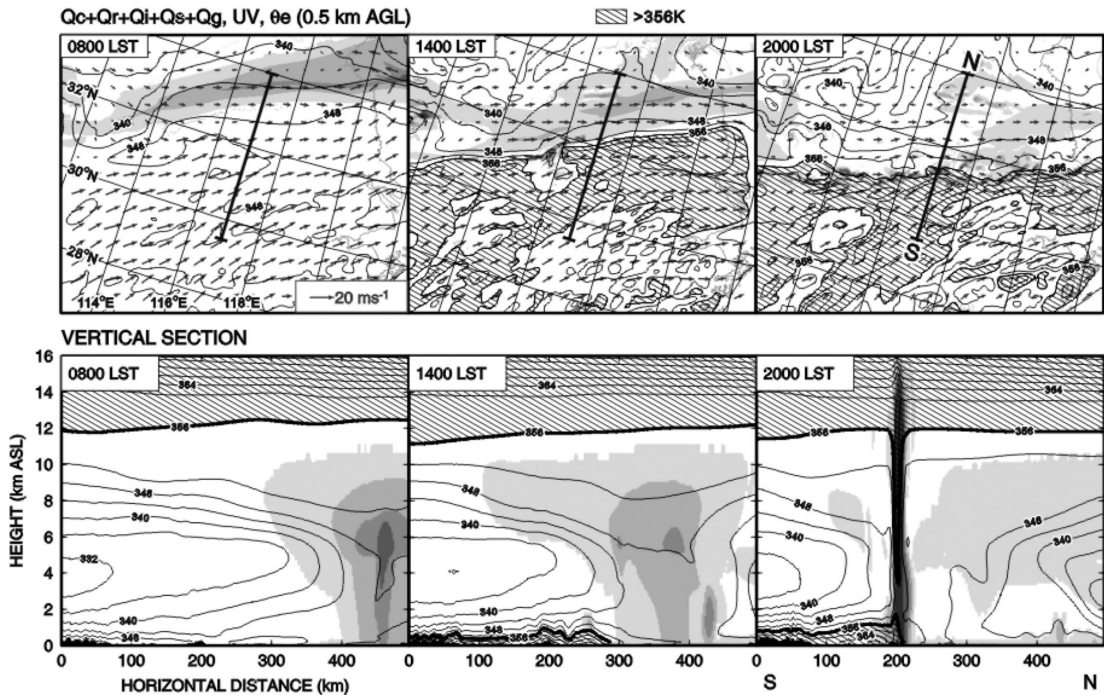


第7図 2003年7月4日～5日にかけて中国安徽省周辺に激しい降水をもたらした降水システムの時間変化. 上図は雲解像モデル CReSS を用いた数値実験の結果から, 高度0.5 km における凝結物(雲水, 雨水, 雲氷, 雪, 霰の総和)の水平分布(濃淡)の時系列を14LST, 20LST, 翌04LSTの順に示す. 下図は同じ領域の合肥レーダによる高度3 km における反射強度の水平分布(濃淡)の時系列を14LST, 20LST, 翌04LSTの順に示す. 円は合肥ドップラーレーダの観測範囲を, ハッチ部分は高度0.5 km における地形の存在を示している. Yamada *et al.* (2007 a) に示されている図を統合, 改変した.

方, Yamada *et al.* (2007 a, b) は, 下層への高相当温位気塊の流入が夜間のクラウドクラスタの発達の一因であると説明している. Yamada *et al.* (2007 a) は, 安徽省において集中豪雨が観測された2003年7月4日~5日のケースを対象として, 雲解像モデル CReSS を用いて再現実験を行った. 中国大陸全体の地表面が水田に近い (地表面からの潜熱フラックスが大きい) という条件を用いて, 2003年7月4日未明 (02 LST) から36時間にわたる数値実験を実施した. 数値実験の結果, 2003年7月4日の夜間 (20 LST) から7月5日の早朝 (04 LST) にかけて, 梅雨前線に沿って発達した降水域が出現した. 降水システムの発達過程は安徽省の合肥に設置されたドップラーレーダ観測の結果と整合的であった (第7図). 降水システムの発達に先立って, 7月4日の午後には梅雨前線の南側の晴天域において, 下層に高相当温位域が形成されていた (第8図). この高相当温位域は対流混合層の発達に伴うもので, 地表面からの潜熱と顕熱の

供給によって形成される (第8図1400 LST). なかでも特に潜熱の供給による影響が大きいと考えられる. この高相当温位気塊が夕方から夜にかけて梅雨前線帯に流入し, 梅雨前線付近で不安定成層を形成することで降水域の発達に寄与する (第8図2000 LST). すなわち, 梅雨前線帯において下層の水蒸気フラックス収束が強化される要因として, 流入する水蒸気量の増加の効果を示している.

梅雨前線帯の南側における対流圏下層の高相当温位気塊の形成と, 夜間の梅雨前線帯への流入による降水域の発達への寄与を検証するために, Yamada *et al.* (2007 a) は梅雨前線帯の南側の地表面フラックスを抑制した (下向き短波放射をカットした) 感度実験を実施した. その結果, 梅雨前線帯における降水量は激減した (第9図下図 NoSR 実験). また, Yamada *et al.* (2007 b) は, 地表面のアルベドを1.0に改変することで地表面フラックスを抑制する領域の広さを少しずつ変化させた感度実験を行い, 地表面フラックスを



第8図 上図は雲解像モデル CReSS を用いた数値実験の結果から, 高度0.5 km における凝結物 (雲水, 雨水, 雲氷, 雪, 霰の総和) の水平分布 (濃淡) の時系列を08LST, 14LST, 20LST の順に示す. また, 各時刻の高度0.5 km における相当温位が356 K を超える (高相当温位気塊が存在する) 領域をハッチで示している. 下図はそれぞれの上図の太い実線で示された線に沿う鉛直断面図を示す. 濃淡は凝結物の混合比を, ハッチが高相当温位域を示す. Yamada *et al.* (2007 a) に示されている図を統合, 改変した.

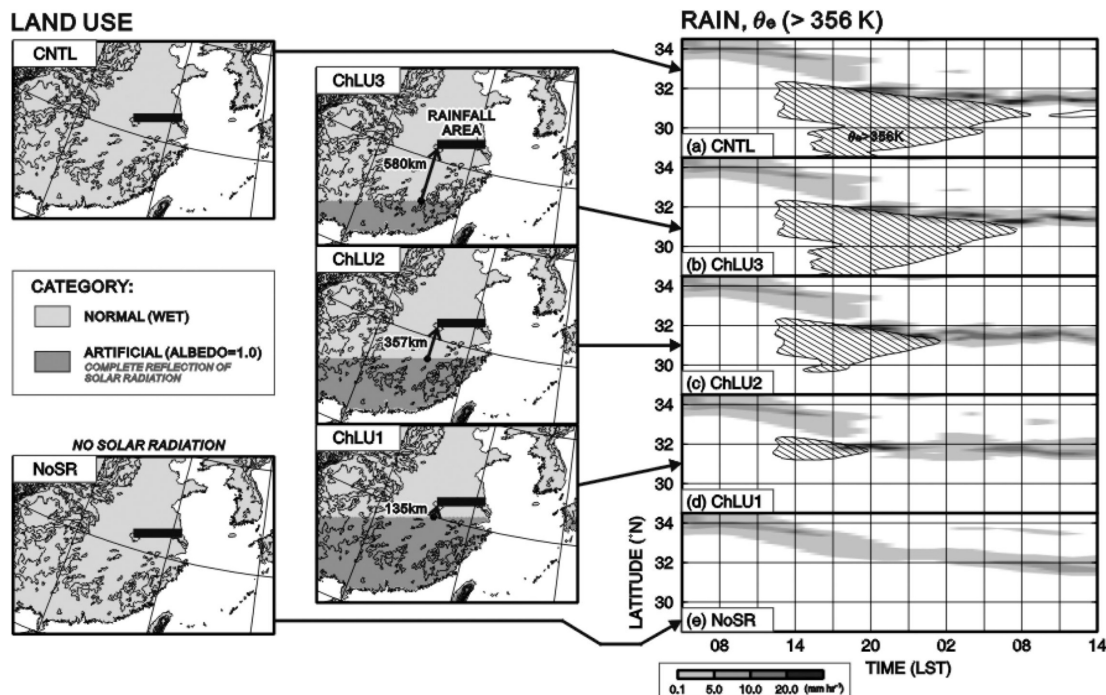
抑制した領域が広いほど梅雨前線帯における降水量が減少したことを示した（第9図 ChLU1~ChLU3実験）。このことから、梅雨前線帯の南側における地表面フラックスによる高相当温位気塊の形成が、梅雨前線帯における降水システムの発達に影響を及ぼすことが明らかにされたと考えられる。

4. 梅雨期の降水セルの特徴

最後に、梅雨前線周辺で見られる降水システムを構成する個々の降水セルの特徴について、最近の研究結果を示す。この研究テーマはこれまでに示した2つのテーマとは大きく異なるが、GAME/HUBEXやChERESにおける研究の重要な主題であった。

梅雨前線帯やその南側においては、上端高度が対流圏界面付近まで到達するような背の高い降水セルが存在する（Shinoda and Uyeda 2002; Shusse *et al.* 2005など）。一方、Maesaka (2003) は、梅雨前線帯の南側の亜熱帯気団内で発生する降水セルの一部が、

背の高い降水セルではないことを示した。Zhang *et al.* (2006 a) は、このような背の高くない、対流圏中層にエコー頂をもつ降水セルを convection of medium depth (CMD) と定義した。CMDは熱帯海洋上で発達する cumulus congestus (雄大積雲: Johnson *et al.* 1999など) と似ているが、Zhang *et al.* (2006 a) は、全ての発達段階において15 dBZeのエコー頂高度が8 kmを超えないこと、エコー域のコア(最大エコー域)とみなされる35 dBZeの上端高度が4 kmを超えないこと、という2つの条件によりCMDを定義している。Zhang *et al.* (2006 a) は、安徽省の合肥レーダを用いた3年分の梅雨期のレーダデータの解析結果から、CMDによる降水量への寄与率が梅雨前線帯の南側では49%と大きいこと、梅雨前線帯でも降水域がゆっくり移動する場合には16%と無視できない割合を占めることを示した。また、雲解像モデルを用いた数値実験の結果から、CMDの形成においては浮力のなくなる高度 (level of neutral buoyancy: LNB)



第9図 雲解像モデルCReSSを用いた感度実験の結果。一番上が制御実験、左下図が短波放射をカットすることにより地表面フラックスを抑制した実験である。中3枚の図は、地表面におけるアルベドを1.0とした領域(結果として地表面フラックスが抑制される)を逐次的に変化させた実験条件を示す。濃い灰色の領域が地表面におけるアルベドを1.0とした領域である。右図はそれぞれの実験において、左図の太い実線で示される経度帯における降水域(濃淡)と高相当温位気塊の存在域(ハッチ)の緯度時間断面図を示す。Yamada *et al.* (2007 a, b) に示されている図を統合、改変した。

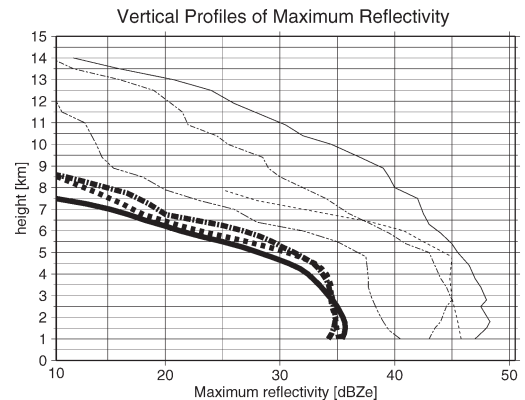
が低いことが、その要因であることを示した (Zhang *et al.* 2006 b).

これらの結果を受けて、真木ほか (2007) は梅雨期の降水セルの特徴を統計的に解析した。真木ほか (2007) では、降水セルを高度 2 km の断面において 30 dBZe よりも大きなただ一つの反射強度の最大値をもつかラム状の領域として定義している。1998年の GAME/HUBEX において寿県で観測された2978個の降水セル、2001年の CHeRES において周庄で観測された17529個の降水セル、2004年に沖縄県勝連町 (現・うるま市) で観測された5093個の降水セルを対象として、そのエコー頂高度の頻度分布を調べた。その結果、梅雨期に中国大陸内陸部の寿県周辺で発達した降水セルのうち、69%のエコー頂高度が0°C高度 (およそ 5 km) + 1 km よりも低いことを示した (第1表)。このことは Zhang *et al.* (2006 a) の結果と整合的であり、梅雨前線付近の降水セルの多くは背が高くないことを示している。

さらに、真木ほか (2007) は、降水セル毎、高度毎 (データセットの鉛直分解能は0.25 km) の最大反射強度を計算し、その中央値の鉛直プロファイルを示した (第10図)。この手法は先行研究である Zipser and Lutz (1994) に倣ったもので、それぞれの領域における降水セルの平均的な鉛直プロファイルの特徴を示すと考えられる。Zipser and Lutz (1994) では降水セルを大陸型と海洋型に分類し、海洋型の降水セルでは0°C高度よりも上部で反射強度が急激に減少することを示した。これは海洋型の降水セルの背が高くないことを示している。しかしながら、真木ほか (2007) では、中国大陸海岸部の周庄や内陸部の寿県においても、0°C高度よりも上部で反射強度が急激に減少している。0°C高度から+3 km の範囲における最大反射強度の中央値の減率は、沖縄だけでなく周庄や寿県においても大きな値を示している (第2表)。これらの点から、梅雨期の中国大陸上で発達する降水セルの鉛直プロファイルは、大陸性よりは海洋性に近い特徴を示すと考えられる。同様の特徴はモンスーン期のバングラデシュにおける TRMM 観測の結果からも得られており (Islam and Uyeda 2007)、湿潤なアジアモ

第1表 各観測領域においてレーダ観測により取得された降水セルのうち、エコー頂高度が0°C高度以下と0°C高度+1 km 以下の降水セルの割合を示す。沖縄は2004年梅雨期、周庄は2001年梅雨期 (CHeRES)、寿県は1998年梅雨期 (HUBEX) に取得されたデータである。

観測地点	解析セル数	0°C高度 (平均値) km	降水セル割合	
			0°C高度以下 %	0°C高度+1 km 以下 %
沖縄	5093	4.7	49.8	80.8
周庄	17529	5.0	37.4	74.1
寿県	2978	5.3	42.5	69.0



第10図 各観測領域における降水セル内の最大反射強度の中央値の鉛直プロファイルを示す。太い実線は沖縄 (2004年梅雨期)、太い点線は周庄 (2001年梅雨期 CHeRES)、太い一点鎖線は寿県 (1998年梅雨期: HUBEX) における鉛直プロファイルを示している。細線は Zipser and Lutz (1994) により示された鉛直プロファイルで、細実線はオクラホマ (大陸性)、破線が台湾 (海洋性)、一点鎖線がオーストラリアのダーウィン (大陸性)、二点鎖線がダーウィン (海洋性) を示す。真木ほか (2007) より抜粋。

ンスーン域に共通する特徴である可能性が示唆される。

## 5. 今後の研究課題

GAME/HUBEX 特別集中観測からおおよそ10年が経過した。この10年間で中国華中域の大気陸面相互作用や降水システムについての理解はかなり進んだと考えられる。本解説では、「水田上の大気境界層の発達過程」、「梅雨前線の南側の大気境界層過程が梅雨前線帯の降水システムに与える影響」、「梅雨期の降水セルの



第2表 第10図に示された最大反射強度の鉛直プロファイルの中央値から、各観測領域における0°C高度+3kmの範囲における反射強度の減少率を示す。

観測地点		反射強度減率 (dBZe km <sup>-1</sup> )
沖縄	海洋上	6.8
周庄	海岸部	5.9
寿県	大陸上	5.5
オクラホマ	大陸性	2.0
ダーウィン	大陸性	3.5
ダーウィン	海洋性	6.0
台湾	海洋性	6.5

特徴」についてこの間の研究の進展をまとめた。

しかしながら、理解が進んだことによって新しい疑問も提示されている。水田上の大気境界層の発達過程においては、大気境界層上部に発生する浅い積雲の影響が未解明の問題である。先行研究において示されている大陸上で発生する積雲の特徴 (Brown *et al.* 2002 など) との比較を行うとともに、浅い積雲の発生・発達を規定する大気環境場との関連や、積雲による対流圏下層から中層への水蒸気の輸送、蓄積過程を示していく必要がある。この点については、遠藤ほか (2008) がこの領域における大気環境場と積雲の相互作用や、forced cumulus から active cumulus への遷移過程について数値実験を用いた結果を示している。

また、今回紹介した Endo *et al.* (2008) は、陸面過程を表現する手段として Louis *et al.* (1981) によるバルクモデルを採用している。このモデルでは水田の影響を地表面の熱容量や熱伝導度、アルベド、蒸発効率などで表現しているに過ぎず、実際の水田における土壌上の水体を表現できていない。このため、地表面フラックスの時間変化や対流混合層の発達の様子が、観測結果と数値実験の結果の間で若干異なる。この時間変化などの相違が大気境界層の変化だけに留まるのか、もしくはより大規模なスケール (当該領域における降水雲の発生・発達過程、もしくは梅雨前線帯の降水システムなど) にまで影響を及ぼすのかという点についての研究は未だ行われていない。この点を明らかにするためには、より詳細に水田の効果を取り入れた陸面モデル (例えば Tanaka (2004) による SiBUC) と雲解像モデルを組み合わせて、数日以上にわたる実験を行い、その結果に対する水収支解析の比較を行っていく必要がある。

一方、梅雨前線帯の南側における高相当温位気塊の形成と梅雨前線帯における降水システムの発達に関連については、より多くのケースを対象とした解析的研究や数値実験を用いた研究が必要であろう。Yamada *et al.* (2007 a) の水収支解析は、梅雨前線帯の南側における高相当温位気塊の形成が、全ての前線帯での降水の強化に結びつく訳ではないことも示している。すなわち、総観規模の水蒸気収束を伴う低気圧の中心付近では、降水の強化に対する梅雨前線帯の南側での高相当温位気塊の形成による寄与は副次的であった。今後、梅雨前線帯を対象として、総観規模の現象における陸面過程の効果を検証し、予報業務に役立つような知見を提供していく必要がある。

さらに、梅雨前線帯で観測される多くの降水セルのエコー頂高度が低い (融解層をわずかに超える高度までしか到達しない) 理由はまだ明らかにされていない。Kato *et al.* (2007) は梅雨期の中国大陸上における LNB を統計的に調べ、対流圏界面付近だけでなく 700 hPa 付近 (対流圏中層) にも LNB の出現頻度のピークが存在することを示した。そして、対流圏中層に LNB が存在する環境場において発達する対流雲が CMD である可能性を示唆している。これらの融解層をわずかに超える高度までしか到達しない降水セルは局所的な非断熱加熱の変化を通じて、日々の予報や気候システムの精度にも影響を及ぼすと考えられる。今後、観測や数値実験を用いたさらなる研究が必要であろう。

## 謝 辞

本解説の執筆に当たり、名古屋大学地球水循環研究センターの坪木和久准教授、檜山哲哉准教授、出世ゆかり博士より有益なコメントをいただきました。また、東京大学の中村 尚准教授と2名の査読者の方からも有益なコメントをいただきました。ここに記して感謝いたします。

## 参 考 文 献

- Brown, A. R., R. T. Cederwall, A. Chlond, P. G. Duynkerke, J.-C. Golaz, M. Khairoutdinov, D. C. Lewellen, A. P. Lock, M. K. Macvean, C.-H. Moeng, R. A. J. Neggers, A. P. Siebesma and B. Stevens, 2002: Large-eddy simulation of the diurnal cycle of shallow cumulus convection over land. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128, 1075-1093.

- Endo, S., T. Shinoda, H. Tanaka, T. Hiyama, K. Tsuboki, H. Uyeda and K. Nakamura, 2008 : Characteristics of vertical circulation in the convective boundary layer over the Huaihe River basin in China in the early summer of 2004. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 2911-2928.
- 遠藤智史, 篠田太郎, 坪木和久, 上田 博, 2008 : 湿潤な陸域における対流境界層と積雲の数値実験. 日本気象学会2008年度秋季大会予稿集, (94), P355.
- 藤吉康志, 1995 : GAME 観測計画 II : 淮河流域日中共同研究観測計画 (Huaihe River Basin Experiment ; HUBEX). *水文・水資源学会誌*, **8**, 134-137.
- Fujiyoshi Y. and Y. H. Ding, 2006 : Final Report of GAME/HUBEX. GAME/HUBEX Project Office, 610 pp.
- Geng, B., H. Yamada, K. K. Reddy, H. Uyeda and Y. Fujiyoshi, 2004 : An observational study of the development of a rainband on a Meiyu front causing heavy rainfall in the downstream region of the Yangtze River. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1095-1115.
- Hiyama, T., M. Sugita and I. Kayane, 1995 : Variability of surface fluxes within a complex area observed during TABLE 92. *Agric. For. Meteor.*, **73**, 189-207.
- Ikebuchi, S., M. Shiiba, Y. Tachikawa and K. Tanaka, 1998 : Observation and modeling of land-surface fluxes in HUBEX. Preliminary research report on Japanese GAME/HUBEX, 364-388.
- Islam, M. N. and H. Uyeda, 2007 : An analysis to classify pre-monsoon and monsoon rainfall in and around Bangladesh using TRMM 2 A25 data. 日本気象学会2007年度秋季大会予稿集, (92), B104.
- 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.
- Kato, T., S. Hayashi and M. Yoshizaki, 2007 : Statistical study on cloud top heights of cumulonimbi thermodynamically estimated from objective analysis data during the Baiu season. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 529-557.
- Kim, W., T. Arai, S. Kanae, T. Oki and K. Musiaka, 2001 : Application of the Simple Biosphere Model (SiB2) to a paddy field for a period of growing season in GAME-Tropics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 387-400.
- Li, Z., T. Takeda, K. Tsuboki, K. Kato, M. Kawashima and Y. Fujiyoshi, 2007 : Nocturnal evolution of cloud clusters over eastern China during the Intensive Observation Periods of GAME/HUBEX in 1998 and 1999. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 25-45.
- Louis, J. F., M. Tiedtke and J. F. Geleyn, 1981 : A short history of the operational PBL parameterization at ECMWF. Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization, 59-79.
- Maesaka, T., 2003 : Study on the formation process of precipitation systems in the Meiyu front on the China continent. Doctoral dissertation, Hokkaido Univ., 122 pp.
- Maitani, T. and Y. Kashiwagi, 1992 : Turbulent transports and turbulence characteristics of sensible heat, water vapor and carbon dioxide above and within rice plant canopies. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 749-756.
- 真木 亮, 篠田太郎, 清水慎吾, 坪木和久, 上田 博, 2007 : 梅雨期に東アジアで観測された降水セルの統計的特徴. 日本気象学会2007年度春季大会予稿集, (91), B301.
- Nicholls, S. and M. A. LeMone, 1980 : The fair weather boundary layer in GATE : The relationship of sub-cloud fluxes and structure to the distribution and enhancement of cumulus clouds. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2051-2067.
- Oue, H., 2005 : Influences of meteorological and vegetational factors on the partitioning of the energy of a rice paddy field. *Hydrol. Process.*, **19**, 1567-1583.
- 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.
- Shinoda, T., H. Uyeda and K. Yoshimura, 2005 : Structure of moist layer and sources of water over the southern region far from the Meiyu/Baiu front. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 137-152.
- Shusse, Y. and K. Tsuboki, 2006 : Dimension characteristics and precipitation efficiency of cumulonimbus clouds in the region far south from the Mei-yu front over the eastern Asian continent. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1942-1953.
- Shusse, Y., K. Tsuboki, B. Geng, H. Minda and T. Takeda, 2005 : Structure and evolution of deeply developed convective cells in a long-lived cumulonimbus cloud under a weak vertical wind-shear condition. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 351-371.
- Stull, R. B., 1988 : An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, 666 pp.
- Tanaka, K., 2004 : Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model. Doctoral dissertation, Kyoto Univ., 292 pp.

- Tanaka, H., T. Hiyama, K. Yamamoto, H. Fujinami, T. Shinoda, A. Higuchi, S. Endo, S. Ikeda, W. Li and K. Nakamura, 2007: Surface flux and atmospheric boundary layer observations from the LAPS project over the middle stream of the Huaihe River basin in China. *Hydrol. Process.*, **21**, 1997-2008.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator. H. P. Zima *et al.*, Eds., High Performance Computing, Springer, 243-259.
- 山田広幸, 耿 驃, 2004: 中国の淮河 (ホワイホー) 流域で12年ぶりに発生した洪水被害の見聞録. *天気*, **51**, 421-426.
- Yamada, H., B. Geng, K. K. Reddy, H. Uyeda and Y. Fujiyoshi, 2003: Three-dimensional structure of a mesoscale convective system in a Baiu-frontal depression generated in the downstream region of the Yangtze River. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 1243-1271.
- Yamada, H., B. Geng, H. Uyeda and K. Tsuboki, 2007a: Thermodynamic impact of the heated landmass on the nocturnal evolution of a cloud cluster over a Meiyu-Baiu front. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 663-685.
- Yamada, H., B. Geng, H. Uyeda and K. Tsuboki, 2007b: Role of the heated landmass on the evolution and duration of a heavy rain episode over a Meiyu-Baiu frontal zone. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 687-709.
- 山崎信雄, 釜掘弘隆, 谷田貝亜紀代, 高橋清利, 植田宏昭, 青梨和正, 隈 健一, 竹内義明, 多田英夫, 福富慶樹, 五十嵐弘道, 藤波初木, 梶川義幸, 2000: GAME再解析データの公開. *天気*, **47**, 659-663.
- Yoshimura, K., T. Oki, N. Ohte and S. Kanae, 2004: Colored moisture analysis estimates of variations in 1998 Asian monsoon water sources. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1315-1329.
- Zhang, C.-Z., H. Uyeda, H. Yamada, B. Geng and Y. Ni, 2006 a: Characteristics of mesoscale convective systems over the east part of continental China during the Meiyu from 2001 to 2003. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 763-782.
- Zhang, C.-Z., H. Uyeda, H. Yamada and B. Geng, 2006b: Characteristics of convections of medium depth to south of the Meiyu front analyzed by using numerical simulation. *SOLA*, **2**, 160-163.
- Zhao, B. and T. Takeda, 1998: Huaihe River Basin Experiment (GAME/HUBEX). Beijing University, 24 pp.
- Zipser, E. J. and K. R. Lutz, 1994: The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1751-1759.

---

Review of a Research Progress on the Boundary Layer and Precipitation System on the Eastern Part of Mainland China  
—10 Years since the GAME/HUBEX IOP—

Taro SHINODA\*<sup>1</sup>, Hiroyuki YAMADA\*<sup>2</sup>, Satoshi ENDO\*<sup>1</sup>,  
Hiroki TANAKA\*<sup>1,\*3</sup> and Hiroshi UYEDA\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> *Hydrospheric Atmospheric Research Center, Nagoya University, F3-1 (200) Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan.*

\*<sup>2</sup> *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan.*

\*<sup>3</sup> *Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto 603-8047, Japan.*

(Received 11 May 2009 ; Accepted 3 September 2009)

---