

1051:1052 (メソ対流系; メソ気象; 豪雨; 豪雪)

2. 大規模気象観測プロジェクトとメソ気象

吉 崎 正 憲*

1. はじめに

タイトルの大規模気象観測プロジェクトとは、ここでは科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業「メソ対流系の構造と発生・発達メカニズムの解明」(以下、CREST「メソ対流系」と略す)のことである。研究対象のメソ対流系とは、水平スケール100 kmほどの大きさを持つ複数の積乱雲が組織化した降水系のことであり、豪雨・豪雪をもたらす実体でありまた大気にとって非断熱加熱源となるものである。

このプロジェクトは1998年12月から2003年11月まで5年間実施された。これによる特別観測は、梅雨期の九州・東シナ海で1999年、2001年、2002年の6、7月に行われ(X-BAIUと呼ばれる)、また冬季の日本海側で2001年、2002年、2003年の1、2月に行われた(WMO: Winter MCSs Observationと呼ばれる)。プロジェクト終了後すでに2年近くが過ぎて、解析および数値実験の集大成としては気象研究ノート「メソ対流系」に2006年7月にまとめられた。またより詳しい研究結果は気象集誌等の英文誌に10編近く報告されている。ここでは英文誌と気象研究ノートだけから引用する。さらなる引用はそれらからだとしてほしい。本稿では、メソ対流系を中心にこの観測プロジェクトの概要、理論・モデル研究へのインパクト、その科学的貢献・意義、若手研究者の活躍、データベースの作成公開、などの話題を紹介する。

2. 観測プロジェクトの概要

CREST「メソ対流系」では、従来のものよりは密

な高層ゾンデ網とドップラーレーダー網による特別観測が行なわれた。同時に境界層レーダー(1.3 GHz、気象庁 WINDAS と同じ)を2台、温度と水蒸気の鉛直プロファイルをマイクロ波で測る機器を1台購入して、最新の測器(境界層レーダー等)による観測網作りも目指した。

観測例として、X-BAIU と WMO をそれぞれ見てみる。まず第1図に1999年に行われた X-BAIU-99 の概要を示す。降水現象に関心のある多くの研究機関・大学(ほぼ全日本の研究チーム)に参加してもらい、高層ゾンデ、ドップラーレーダー、境界層レーダー、GPS 測器等による地上観測、気象庁観測船による高層ゾンデとレーダーによる海上観測、ドロップゾンデ、雲レーダーなどによる航空機観測が行なわれた。

この特別観測によって、鹿児島島の西方海上にある甌島列島から発する地形性降水バンド(甌島ラインと呼ばれる)(Adachi *et al.*, 2004)、移動する降水系、突然発生するメソ対流系などが観測された。

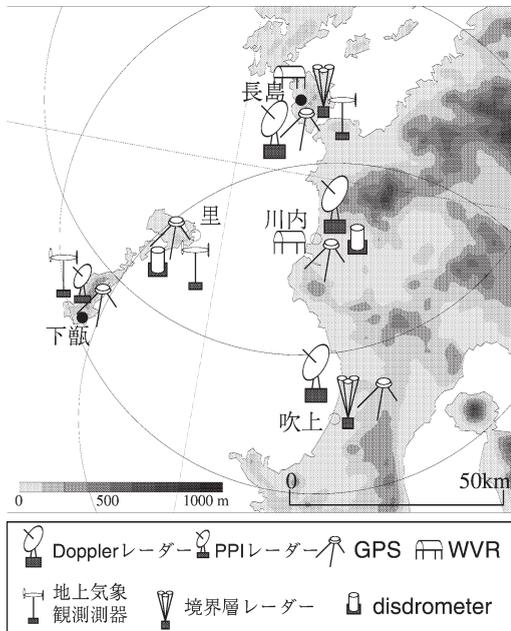
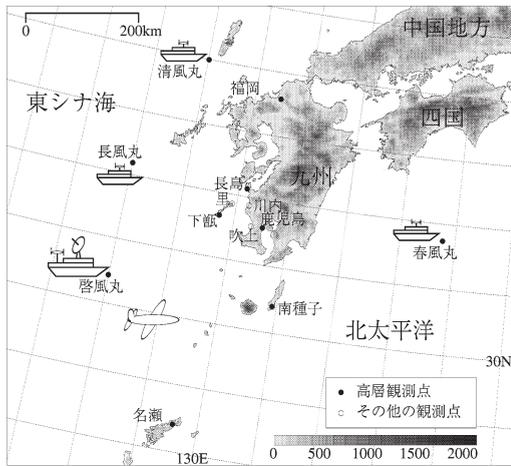
ここでは1999年6月29日に福岡付近で豪雨をもたらした総観規模擾乱に伴うメソ対流系を取り上げる。第2図に見られる線状降水帯は、東シナ海上を東進してくるメソ α スケール低気圧から伸びる寒冷前線に伴うものである。その前線が通過する1時間ほどの間に福岡付近で集中豪雨となった。この寒冷前線の階層構造をレーダーデータで詳しく眺めると、少なくとも3つの異なる動きが見られた(図略)。1つ目は南東へ動く寒冷前線、2つ目は早い速度で北東へ動く積乱雲、3つ目は遅い速度で北東へ動くメソ対流系である(Kato, 2006)。

次に、第3図に2001年に行われた WMO-01 における観測体制を示す。この時も高層ゾンデ、ドップラーレーダー、境界層レーダーなどによる地上観測、気象

* 気象研究所(現所属: 海洋研究開発機構)。

myoshiza@jamstec.go.jp

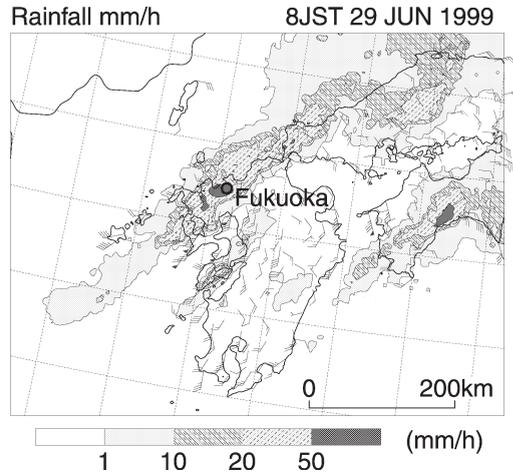
© 2007 日本気象学会



第1図 X-BAIU-99における(上)集中観測と(下)通常観測の期間における観測の概要(吉崎, 2005)。

庁観測船による高層ゾンデによる海上観測, ドロップゾンデ, 雲レーダー等による航空機観測が行われた。またロシア機によるロシア領域における境界層内の航空機観測も行われた (Inoue *et al.*, 2005)。

この冬は例年比べて寒冷であり多くのメソ対流系が見られ, 1月中旬には山陰～北陸にかけて日本海寒帯気団収束帯 (JPCZ: Japan-Sea Polar-Airmass Convergence Zone) やLモード (平行型筋状雲)・Tモード (直交型筋状雲) と呼ばれる降雪バンドが観測



第2図 1999年6月29日08JSTのレーダー・アメダス解析雨量分布。降水量は1時間積算値。矢羽はアメダスで観測された水平風 (Kato, 2006)。

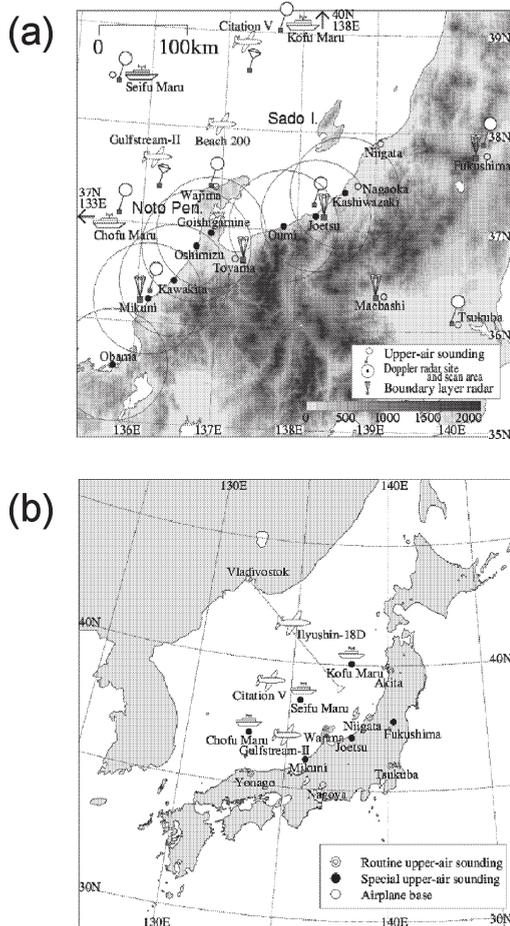
された。また日本海側の海岸線に停滞するような降雪バンドも観測された (Eito *et al.*, 2005)。第4図は1月14日に航空機と衛星で観測されたJPCZとその周辺の降雪バンドの様子をまとめたものである。鉛直断面図の水平方向は南西～北東であり, JPCZに直交する方向である。もっとも背が高い積乱雲はJPCZ付近で見られ, その北東側にはTモードがあり, またJPCZの南西側と離れた北東側にLモードがあった。航空機で観測された温度場は南西側ほど暖かかった。

Tモードは, その降雪バンドが一般風の方向と直交するように並ぶためにその構造や成因に関して多くの議論がなされてきた。そこで, 清水・坪木 (2005) はデュアルドップラーレーダーを用いて, 北陸沖で観測されたTモードの解析を行ってその形成過程を調べた。その結果, Tモードの並ぶ方向に鉛直シアが見られ, そのアップシア側に収束域ができて新たな積乱雲の発生が見られた (図略)。

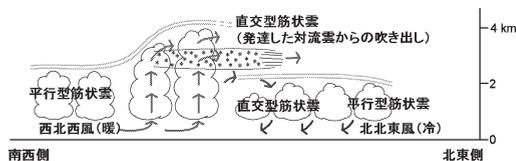
このように大規模な観測を行い新しい測器を用いることで, 今まで分からなかった構造が明らかになった。

3. 理論・モデル研究へのインパクト

CREST「メソ対流系」の特別観測によって, メソ対流系の構造はかなり理解されるようになった。しかし, 従来に比べて密な観測網を利用して, 観測データの空間的・時間的な制約はまだ大きい。また新たに



第3図 WMO-01の観測体制。(a) 通常観測におけるドップラーレーダー網、境界層レーダー網と高層ゾンデ地上網。航空機と観測船は強化観測時だけ実施。(b) 強化観測時における高層ゾンデ網。航空機およびロシア機による日本海境界層観測も含む (Yoshizaki *et al.*, 2004)。



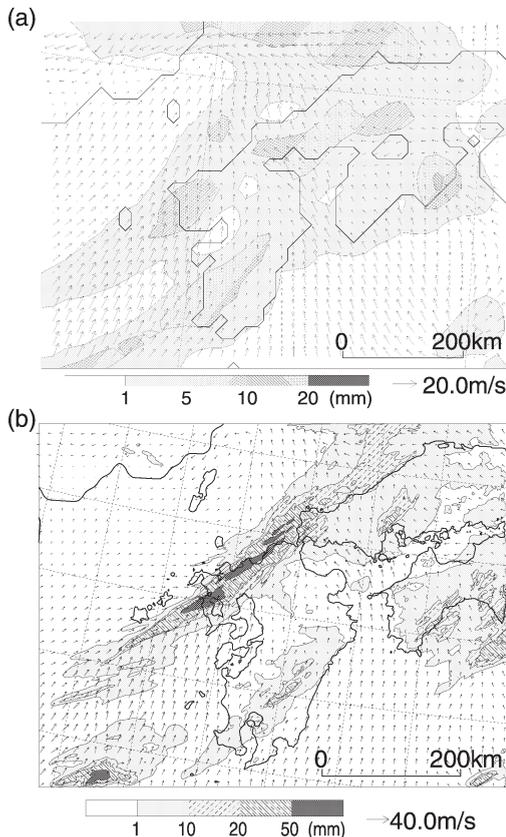
第4図 帯状降雪雲のメソスケール構造の概念図 (村上ほか, 2005)。

観測測器を利用して、観測できる要素は限られる。では、このプロジェクトではメソ対流系の発生・発達メカニズムをどのように解明しようとしたのだろうか

か？ CREST「メソ対流系」では、空間的・時間的な不十分さを補うために水平解像度数 km の非静力学雲解像モデル (NHM: NonHydrostatic Model) を使って、メソ対流系の発生・発達のメカニズムを解明しようとした。このプロジェクトの実施までは NHM の開発状況はまだ予備的な実験段階であったが、プロジェクト中に本格的実験を実行できる段階になった。これにより、実際にメソ対流系が発生・発達する事例を対象に NHM の予測実験を行い、降水強度など定量的な比較ができるようになった。また NHM でメソ対流系が再現できると、雲物理過程における雨滴の蒸発の有無などの感度実験ができるようになり、メソ対流系の発生・発達等のメカニズムを特定することができるようになった。

X-BAIU と WMO について、NHM を使ってそのメカニズムまで言及した実例を見てみる。まず X-BAIU では、第2図のケースを取り上げる。当時現業モデルであった RSM (気象庁領域静力学モデル；水平解像度約20 km) と 2 km-NHM (非静力学雲解像モデル；水平解像度2 km) による29日08JSTの前1時間積算予想降水量分布を第5図に示す。RSM では寒冷前線に伴う降雨域を九州北部に予想はしているものの、予想された降雨域は観測より広く前1時間降水量は10 mm に満たなかった。この結果からは九州北部に豪雨を予報することはできない。一方、2 km-NHM による降水量分布は、第2図の寒冷前線に伴う線状の降雨域をよく再現していた。最大1時間降水量も123 mm を予想し、観測に匹敵するものであった。また 2 km-NHM の1分間隔の予報結果を用いて前線付近で降水量の南北・東西-時間断面を作成すると、積乱雲とメソ対流系の移動速度・方向および時間・水平スケールは気象レーダーによる観測結果とよく一致することが分かった (図略)。さらに、東西方向における積乱雲の発達高度別頻度分布から、寒冷前線の西側にあたる長さ約150 km の領域では積乱雲は高度5~7 km 程度にしか発達しないのに対して、前線の中央部分では圏界面 (約14 km) 近くまで発達した背の高い積乱雲が多く見られた (図略)。興味深いことに、中央部分には約14 km 以外にも高度5~7 km にピークがあった。

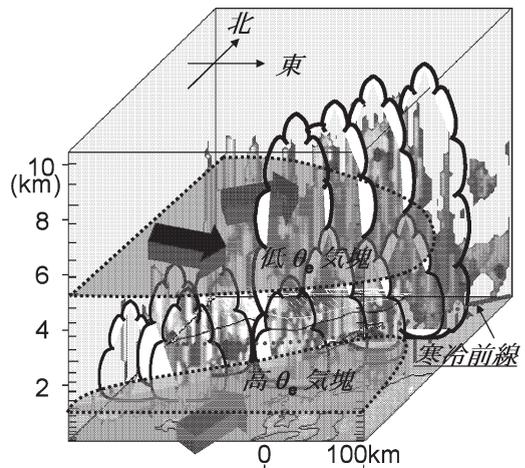
福岡付近で豪雨が発生した理由は、第6図のようにまとめられる。対流活動が維持できたのは、南西風による高相当温位気塊が下層に流入してまた西風による低相当温位気塊が中層に流入したためである。これに



第5図 (a) RSM と (b) 2 km-NHM で予想された1999年6月29日08JSTの前1時間積算降水量分布。地表付近の水平風をベクトルで表示 (Kato, 2006)。

よって、対流が繰り返しも対流不安定の成層状態は持続できた。また寒冷前線上では下層の高比湿気塊を自由対流高度まで持ち上げてくれる下層収束があった。これらが複合して豪雨を発生させたのである。

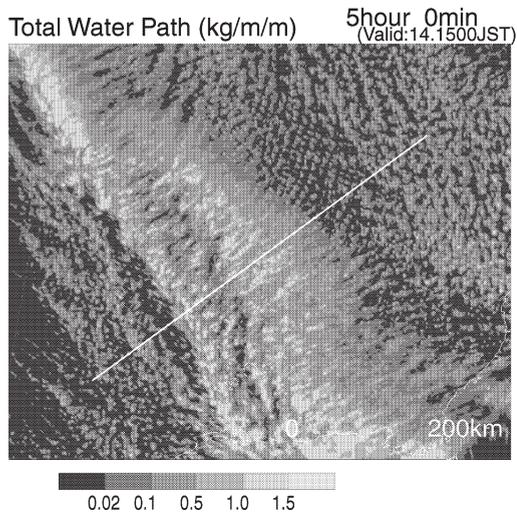
次に、WMO-01に関する数値実験として、第4図で示したJPCZとLモードやTモードの降雪バンドの再現実験を見てみる。第7図は1月14日のJPCZ付近を拡大したもので、全水物質の鉛直積算量の水平分布を示す。JPCZやそれぞれの走向の降雪バンドの特徴が良く再現された。白線に沿った方向の雪と温位の鉛直断面図を第8図に示す。温位の分布から、南西側ほど温位が高いのが分かる。また雪の分布から、背が最も高い積乱雲はJPCZ付近に存在して、そのまわりの雲の構造も良く実況と合った。またLモードに関しては、北東側が背の低いことが分かった。さらに



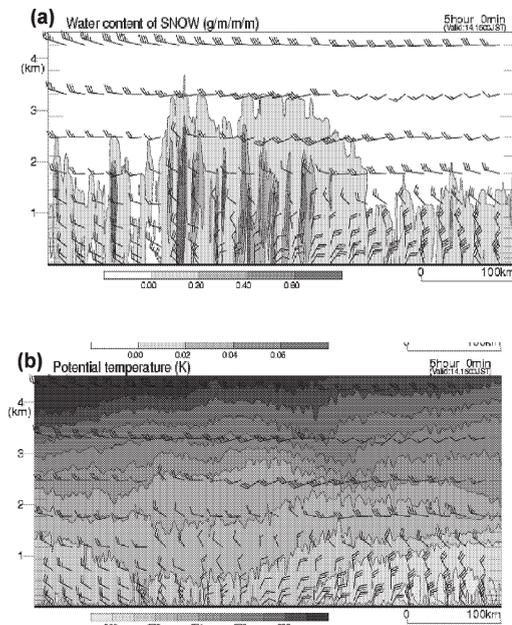
第6図 集中豪雨をもたらした寒冷前線の構造と対流不安定度を強化した下層の高相当温位気塊と中層の低相当温位気塊の流入 (Kato, 2006)。

Tモードの雲を眺めると、対流雲のように見えた。実際Tモードが存在する領域の風の鉛直構造を眺めると、地表付近では北風、高度2 km ぐらいでは西風であり、風の鉛直シアはほぼ南西風の方向でありまさにTモードのバンドの走向と一致した。つまり、NHMの結果から、Lモードと同様に、Tモードも風の鉛直シアに平行な対流モードであることが分かった。この事実は清水・坪木 (2005) の観測事実と矛盾しない。

ほかにもNHMで良く再現された例として、X-BAIUでは1999年6月27日の水蒸気前線・梅雨前線による降水 (Moteki *et al.*, 2004a, b) や2001年6月21日の降水の事例がある。またWMOでは、JPCZ風下の渦列、停滞性の降雪バンド、移動性の降雪バンド (Yoshihara *et al.*, 2004)、ポーラーロー等の事例がある。NHMでよく再現された擾乱をまとめると、階層構造する擾乱のうちメソ α スケール以上の大きさの擾乱に伴うものが多かった。一方、水平解像度数kmの雲解像モデルを用いても予測できない擾乱ももちろんある。例えば、甌島ラインのような地形性降水 (Umamoto *et al.*, 2004) や2001年6月23日南九州に突然発生した降水系 (Kato *et al.*, 2003) などがそうである。いくら細かい解像度を持つ雲解像モデルであっても、擾乱の水平スケールが小さすぎる場合や風上に高層データがない場合は初期場に正しく擾乱を入れることができなくてやはり予測できないことにな



第7図 1 km-NHMでシミュレートされた凝結した全水物質の鉛直積算量の水平分布(永戸, 2005).



第8図 第7図の白線に沿った(a)雪と(b)温位の鉛直断面図(永戸, 2005). 図の左端が南西端にあたる. 矢羽根は水平風を表す.

る。しかしながら、現在でも予測精度を上げるために、THORPEX（観測システム研究・予測可能性実験計画）などによる最適観測法を用いた観測，データ同化手法，新しい測器の開発など，新しい試みが行わ

れている。

4. 科学的貢献・意義

実況とNHMの出力を比較すると，後者の情報量が圧倒的に大きい。もしNHMの出力が観測データ（例えば，降水量強度や降水分布等）と良く一致すると，NHMの計算はかなり真実に近いものと思われる。そうなるに次いでどの物理過程がもっとも効いたかなど感度実験を行うことによって，それまでわからなかったメソ対流系—大きくいえばメソ気象—の発生・発達メカニズムが特定できることになる。CREST「メソ対流系」ではそういう手法を多く試みて，メソ対流形の理解は大きく進んだ。このプロジェクトはこの分野では大きなブレイクスルーとなった。

5. 若手研究者の活躍

CREST「メソ対流系」では，観測データをいち早く公開してまたNHMに関心のある若手研究者にはNHMの研修を行うなどその宣伝に努めた。その結果，気象集誌等に多くの研究成果がまとまった（まとめつつある）。中でも，茂木耕作さん（海洋研究開発機構）はX-BAIU-99において6月27日の水蒸気前線と梅雨前線による降水事例を解析・数値実験して，水蒸気前線という概念を確立した。現在もさらにその研究を推進しているが，今回山本・正野論文賞を受賞されることになった。この受賞はわれわれのグループの成果でもあり，大いに喜んでいるところである。確実にメソ擾乱に関心のある若手研究者は増加しているといえる。

6. プロジェクト成果の活用，データベースの作成公開

気象研究所でまとめられた研究成果は，気象庁現業非静力学モデル（JMANHM，水平解像度10 km）にも反映して，2006年3月には水平解像度が5 kmになっている。

CREST「メソ対流系」の研究成果はCDにまとめあり公開している。コンタクトは吉崎までお願いしたい。

謝辞

本稿を求めるにあたって，加藤輝之氏（気象研究所）より多くのコメントをいただいた。心より感謝します。

参 考 文 献

- Adachi, A., T. Kobayashi and T. Kato, 2004 : Dual wind profiler observations of a line-shaped convective system in southern Kyushu, Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 725-743.
- Eito, H., T. Kato, M. Yoshizaki and A. Adachi, 2005 : Numerical simulation of the quasi-stationary snowband observed over the southern coastal area of the Sea of Japan on 16 January 2001, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 551-576.
- 永戸久喜, 2005 : NHM による日本海寒帯気団収束帯と帯状雲の高解像度数値実験, *気象研究ノート*, **208**, 265-276.
- Inoue, J., M. Kawashima, Y. Fujiyoshi and M. Yoshizaki, 2005 : Aircraft observations of air-mass modification upstream of the Sea of Japan during cold-air outbreaks, *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 189-200.
- Kato, T., M. Yoshizaki, K. Bessho, T. Inoue, Y. Sato and X-BAIU-01 observation group, 2003 : Reason for the failure of the simulation of heavy rainfall during X-BAIU-01-Importance of a vertical profile of water vapor for numerical simulations-, *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 993-1013.
- Kato, T., 2006 : Structure of the band-shaped precipitation system inducing the heavy rainfall observed over northern Kyushu, Japan on 29 June 1999, *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 129-153.
- Moteki, Q., H. Uyda, T. Maesaka, T. Shinoda, M. Yoshizaki and T. Kato, 2004a, b : Structure and development of two merged rainbands observed over the East China Sea during X-BAIU-99 : Part I. Meso- β -scale structure and development processes. Part II. Meso- α -scale structure and build-up processes of convergence in the Baiu frontal region, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 19-44, 45-65.
- 村上正隆, 星本みずほ, 折笠成宏, 高山陽三, 黒岩博司, 堀江宏昭, 岡本 創, 亀井秋秀, 民田和久, 2005 : 航空機による日本海寒帯気団収束帯帯状降雪雲の内部構造観測, *気象研究ノート*, **208**, 251-264.
- 清水健作, 坪木和久, 2005 : 2000年12月26日に北陸沖で観測されたトランスバースモード降雪バンドの形成過程, *気象研究ノート*, **208**, 243-250.
- Umemoto, Y., M. Teshiba, Y. Shibagaki, H. Hashiguchi, M. D. Yamanaka and S. Fukao, 2004 : Combined wind profiler-weather radar observations of orographic rainband around Kyushu, Japan in the Baiu season, *Annales Geophysicae*, **22**, 3971-3982.
- Yoshihara, H., M. Kawashima, K. Arai, J. Inoue and Y. Fujiyoshi, 2004 : Doppler radar study on the successive development of snowbands at a convergence line near the coastal region of Hokuriku district, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1057-1079.
- Yoshizaki, M., T. Kato, H. Eito, S. Hayashi and W.-K. Tao, 2004 : An overview of the field experiment "Winter Mesoscale Convective System (MCSs) over the Japan Sea in 2001", and comparisons of the cold-air outbreak case (14 January) between analysis and a non-hydrostatic cloud-resolving model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1365-1387.
- 吉崎正憲, 2005 : X-BAIU-99の野外観測, *気象研究ノート*, **208**, 22-25.