

南アジアにおける突発的メソ気象擾乱発生に関わる環境場の特徴について

山根悠介・林泰一

要 旨

南アジアにおいて発生する竜巻等の突発的メソ気象擾乱発生に関わる環境場の特徴について調べた。これら突発的なメソ気象擾乱の多くをもたらすとされる組織化した積乱雲（マルチセルやスーパーセル）の発生と発達に重要な大気の熱的安定度と風の鉛直シアーに注目し、これらをパラメーター化して定量的に評価し、その時間的・空間的分布を調べた。その結果、プレモンスーン期バングラデシュ付近で熱的不安定度と風の鉛直シアーが共に顕著に増大することが示され、積乱雲が組織化してより発達したものになりやすい環境場であることが示された。

キーワード：メソ気象擾乱，熱的不安定度，鉛直シアー

1. はじめに

インドを中心とする南アジアでは、モンスーン期の多雨、そしてサイクロンとそれに伴う洪水などが主な気象災害としてこれまでよく知られてきた（例えばKatsura (1992) など）。しかし、竜巻や降雹、ダウンバーストと思われる局所的な突風など突発的なメソ気象擾乱による被害も毎年発生している。例えば、2004年4月14日バングラデシュのマイメンシン地方で竜巻が発生し、約70人が死亡した（The Daily Star, 2004）。また、2004年5月23日バングラデシュのメグナ川で、局所的な突風によりフェリーが転覆、約16人が死亡した（The Daily Star, 2004）。このような突発的なメソ気象擾乱は、バングラデシュとその周辺インド北東部で、特に3月から5月のプレモンスーン期に多発することが古くから知られており、ベンガル地方ではNor'wester（ノルウェスタ、これらの擾乱が概して北西の方向（northwest）からやってくることに由来する）と呼ばれている。

メソ気象擾乱による被害は、サイクロンや洪水による死者数と比較しても小さいためその影に隠れてあまり注目されてこなかったように思われる。しかし毎年のように死者が発生し、農作物などへの甚大な被害から、近年、これらのメソ気象擾乱による被害に対する認識も高まってき

ている。しかしながら、南アジアにおけるメソ気象擾乱に関して、幾つかの気候学的な研究や総観スケールの事例解析はあるものの、詳細なメソスケールの発生・発達メカニズムや、より一般的な発生時大気環境場の特徴などは明らかにされていない。効果的な予報を確立するためにも、これらのメソ気象擾乱に関する特性を明確にすることは重要である。

南アジアにおけるメソ気象擾乱の中で、竜巻については幾つかの気候学的な研究がある。Peterson and Metha (1981) は、文献から調べた1835年から1978年までにインド亜大陸で発生した竜巻51例について、その地理的分布や季節変化などの気候学的特性を調べた。その結果、インド亜大陸で発生する竜巻の殆どは、バングラデシュ付近で発生しており、また4月をピークとした3月から5月のプレモンスーン期に集中して発生することを明らかにした。Peterson and Metha (1995)ではさらに事例数を73例に増やして同様の指摘をしている。またGhosh (1986)も同様の指摘をしている。また竜巻だけでなく、降雹や局所的な突風などの激しいメソ気象擾乱の多くが、プレモンスーン期バングラデシュやインド北東部に集中して発生することは、上述のようにこの地方でNor'westerと呼ばれ、よく知られている（Weston, 1972, Koteswaram and Srinivasan, 1958）。これらのことから、バングラデシュ付近でプレモンスーン期に竜

巻をはじめとした突発的でかつ激しいメソ気象擾乱が集中するということは重要な一般的性質と見てよいだろう。

ところで、このようなメソ気象擾乱は、積乱雲に伴って発生する。それでは南アジアにおける積乱雲の時間的・空間的分布はどのようになっているのだろうか？

Monohar and Kesarkar (2004) は、インド地域における雷雨の時間的・空間的分布について調べた。その結果によると、雷雨の発生はプレモンスーン期とモンスーン期を中心に、インド地域に割合広い範囲で見られる。すなわち、積乱雲自体はモンスーン期にも、そしてバングラデシュ付近以外でも比較的多く発生している。このことからプレモンスーン期のバングラデシュ付近では突発的なメソ気象擾乱をもたらすような、より発達した積乱雲が発生・発達しやすい環境場であると考えられる。近年、このような竜巻や降雹などの突発的なメソ気象擾乱をしばしばもたらす積乱雲として、組織化した積乱雲が注目されている。積乱雲のエネルギー源はその上昇流により下層から取り込まれた水蒸気が凝結する時に発生する潜熱であるが、通常の積乱雲は成熟期ごろ雲内に冷たい下降気流が形成されて、下層からの水蒸気が絶たれるためその寿命は30分から60分と短い。しかし組織化した積乱雲は、下層から水蒸気を取り込む上昇流と冷たい下降気流が共存できるような組織構造を有しており、通常の積乱雲よりも発達したものとなり、また寿命も長くなる。

積乱雲が組織化して発達する要因として、Weisman and Klemp (1982,1984) は、大気の熱的不安定度に加えて風向と風速の鉛直シア（以下、単に鉛直シアと呼ぶ）の重要性を指摘した。彼らは、3次元雲モデルを用いた数値実験から、熱的不安定度を一定にした条件下で、鉛直シアが弱い状況では短寿命の単一セル、中程度の鉛直シアではマルチセル、強い鉛直シアではスーパーセルが発生することを示した。マルチセルやスーパーセルは、しばしばしば降雹や突風などの激しいメソ気象擾乱をもたらす。特に、スーパーセルはしばしば竜巻やゴルフボール大の雹をもたらすなど極めて甚大な被害を発生させるので、これまで特に米国で注目されてきた。鉛直シアの重要性に関しては、幾つかの統計的な研究からも指摘されている。Rasmussen and Blanchard (1998) は、熱的不安定度と鉛直シアを結合したパラメーター（例えば後に詳述するVGPなど）は、竜巻などをもたらす積乱雲（sever storm）とそうでないもの（non-sever storm）をよく区別するという指摘をしている。

以上のことから、プレモンスーン期のバングラデシュでは、熱的な不安定度と共に鉛直シアが他の地域、そして他の季節に比較して顕著に増大しているのではないかと推測される。しかし、このことについて定量的に示した研究例は無い。

本研究では、熱的不安定度および鉛直シアの南アジア

における特性を定量的に評価するため、これらの要因をパラメーターで表現し、南アジアにおけるこれらのパラメーターの時間的・空間的分布を調べた。また、パラメーターの計算には時間的にも空間的にも一様に存在する客観解析データを用いた。この地域における長期間かつ広い範囲の観測データを入手することは現在困難な状況にある。よって客観解析データを用いることにより、長期間かつ広範囲の領域を対象とすることができ、より一般的な性質を導き出すことが可能となる。

2. 使用したデータとパラメーター

本研究で使用したデータはECMWF（ヨーロッパ中期予報センター）の40年再解析データである。空間解像度は2.5° 間隔であり、時間解像度は00UTC, 06UTC, 12UTC, 18UTCの1日4回である。また本研究で使用した期間は1992年から2001年の10年間である。

本研究で使用した熱的不安定度および鉛直シアを表すパラメーターは以下の通りである。

大気の熱的不安定度を表すパラメーターとしてCAPE（Convective Available Potential Energy: 対流有効位置エネルギー）を使用した。CAPEは(1)式で与えられる：

$$CAPE = g \int_{LFC}^{LNB} \frac{T_p - T}{T} dz \quad (1)$$

ここで g は重力加速度、 LFC は自由対流高度、 LNB は中立浮力高度、 T_p は地上から持ち上げる空気塊の気温、 T は環境場の気温である。CAPEは、地上から持ち上げられた空気塊が自由対流高度から中立浮力高度にいたるまで環境場から受ける浮力によって得る運動エネルギーの大きさと定義される。CAPEが大きいほど活発な対流活動が発生しやすい。本研究では、持ち上げる空気塊として地上10mから1kmまでの層を平均した、平均の空気塊を使用している。また積分の上限も中立浮力高度ではなく、地上10kmまでとしている。

鉛直シアを表すパラメーターとしては、(2)式で表される地上2mから3kmまでの平均シア（以下MSと呼ぶ）を用いた。

$$MS = \frac{\int_{2m}^{3km} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} dz}{3km} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{V}$ は各高度の風ベクトルである。通常は高度0km

からの積分で定義されるが、ECMWFのデータには高度0kmのデータは含まれておらず、地上2mの風データが含まれており、本研究ではこれを使用した。MSは hodographの先端を結んだ線分の長さを高度差で割ったものに相当する。

さらに、これら熱的不安定度と風の鉛直シアを結合したパラメーターとして(3)式のVGP (Vorticity Generation Parameter) を使用した：

$$VGP = CAPE \times MS \quad (3)$$

VGPは水平渦度の立ち上がりによる鉛直渦度の生成を示している。鉛直シアにより水平渦度が生成され、積乱雲に流入する上昇流によってこれが立ち上がり、鉛直渦度が形成される過程を示している。上昇流の強さを示すCAPEとMSの積でそのような鉛直渦度生成の度合いを見積もることができる。VGPはこうにして生成される鉛直渦度、すなわちスーパーセルに伴うメソサイクロンの発生を予測するために作られたものである。

本研究では、特にこれらのパラメーターに注目してその南アジアにおける時間的・空間的な分布について調べた。パラメーターを適用したのは以下のような理由による。まずパラメーターを用いることで熱的不安定度や鉛直シアの定量的評価が容易に行えるからである。そしてこれらのパラメーターは、ある一点の気球観測データがあれば比較的容易に計算できるものである。よってこれらのパラメーターは予報ツールとして極めて有用であるといえる。実際、米国ではこのようなパラメーターを用いた竜巻予報が日常的に行われている。しかしながらこれまでにこれらのパラメーターが南アジアで計算された例が無い。よって、客観解析データを使用しているゆえ、多少量的な精度の問題はあるものの、南アジア域でこれらのパラメーターがどのような値をとるのか、そのおおよその目安を提示しておくことは重要であろう。本研究では、このような理由から熱的不安定度と鉛直シアの定量的評価のために上記のようなパラメーターを用いた解析を行った。

3. 解析結果

南アジアにおけるVGP、CAPEおよびMSの時間的・空間的分布を調べるために以下のような解析を行った。まずVGP、CAPE、MSにそれぞれ $0.2\text{m}^2\text{s}^{-3}$ 、 1600Jkg^{-1} 、 0.005s^{-1} の閾値を設け、Table 1のように4つのカテゴリーを作る。この4つのカテゴリーは、Fig. 1のCAPEとMSの散布図上で4つの領域をそれぞれ表すことになる。ここでこれらの閾値は、後に示すバングラデシュ内のデータグリッドポイントの一つである東経 90° 北緯 22.5° におけるCAPEとMSの散布図において (Fig. 5) , これらの閾値を境にプレモンス

ーン期とモンスーン期の分布がおおよそ分かれるという主観的判断に基づいて設定された。次に、各データグリッドポイントにおいて、解析期間である1992年から2001年までにそれぞれの領域に入るデータ数の月ごとの割合(%)を調べた。例えば、4月は1日4回のデータが1ヶ月に30個、これが10年分で合計1200 ($4 \times 30 \times 10$) あり、この内それぞれのカテゴリーに入るデータ数を数え、割合で示すというわけである。この結果についてプレモンスーン期の4月、そしてモンスーン期の8月におけるCATEGORY 1の頻度分布をFig. 2に示す。Fig. 2から4月にCATEGORY 1、つまりVGPが 0.2 以上となる頻度の高い領域が、バングラデシュからインド東海岸に沿ってスリランカまで南西に延びていることがわかる。特に頻度の大きな領域 (13% 以上) がバングラデシュ付近にある。このようなCATEGORY 1のバングラデシュ付近における極大は、5月にも見られた (図省略)。また、8月のCATEGORY 1の頻度分布を見ると、ベンガル湾上や、インド北部に数%程度の領域があるものの、南アジアの殆どの領域で頻度はほぼ 0% である。概して、南アジアの全域ではプレモンスーン期のバングラデシュ付近を除いてCATEGORY 1の頻度は 0% から数%程度である。Fig. 3にはCATEGORY 3の4月と8月における頻度分布を示す。4月にはバングラデシュ付近でCATEGORY 1の頻度が増大することから、他の地域と比較して相対的に低い割合となっているものの、南アジアの殆どの領域で頻度が約 90% となっている。8月においてもインド半島の内陸部で相対的に低い頻度 (約 60%) の領域があるが、概して約 90% 程度の高い頻度となっている。このようなCATEGORY 3の高い頻度は年間をとおして南アジアの広い領域で見られる。これはプレモンスーン期のバングラデシュ付近の環境は、他の地域、他の季節と比較してVGPが相対的に高い状態にあるということを示唆している。しかしながら、VGPがCAPEとMSの積であるためこのhigh-VGPにCAPEとMSがそれぞれどのように効いているのか、この解析だけではわからない。バングラデシュ付近でのCAPEとMSの詳細な動向を見るため、バングラデシュ内に存在するデータグリッドポイント (東経 90° 北緯 22.5°) における月ごとのCAPEとMSについての散布図を作成した。これらをFig. 4に示す。Fig. 4には冬期の1月、プレモンスーン期の4月、モンスーン期の8月についてそれぞれ示してある。また図

Table 1 Summary for four categories for analysis

CATEGORY 1	$VGP \geq 0.2$
CATEGORY 2	$VGP < 0.2$ $CAPE < 1600$ $MS \geq 0.005$
CATEGORY 3	$VGP < 0.2$ $CAPE < 1600$ $MS < 0.005$
CATEGORY 4	$VGP < 0.2$ $CAPE \geq 1600$ $MS < 0.005$

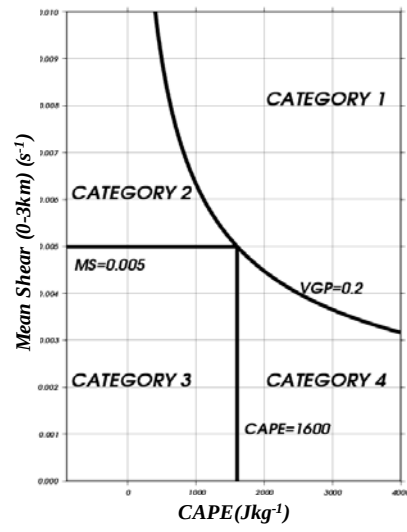


Fig.1 Schematic figure of analysis

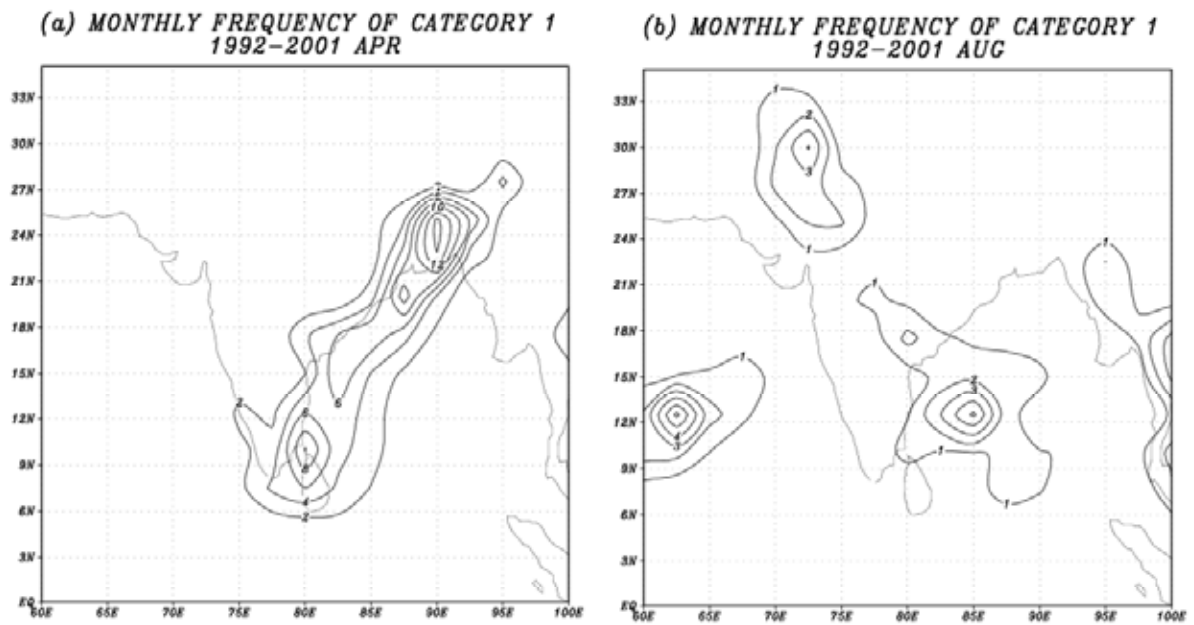


Fig. 2 Distribution of monthly frequency of CATEGORY 1 (a) April (b) August

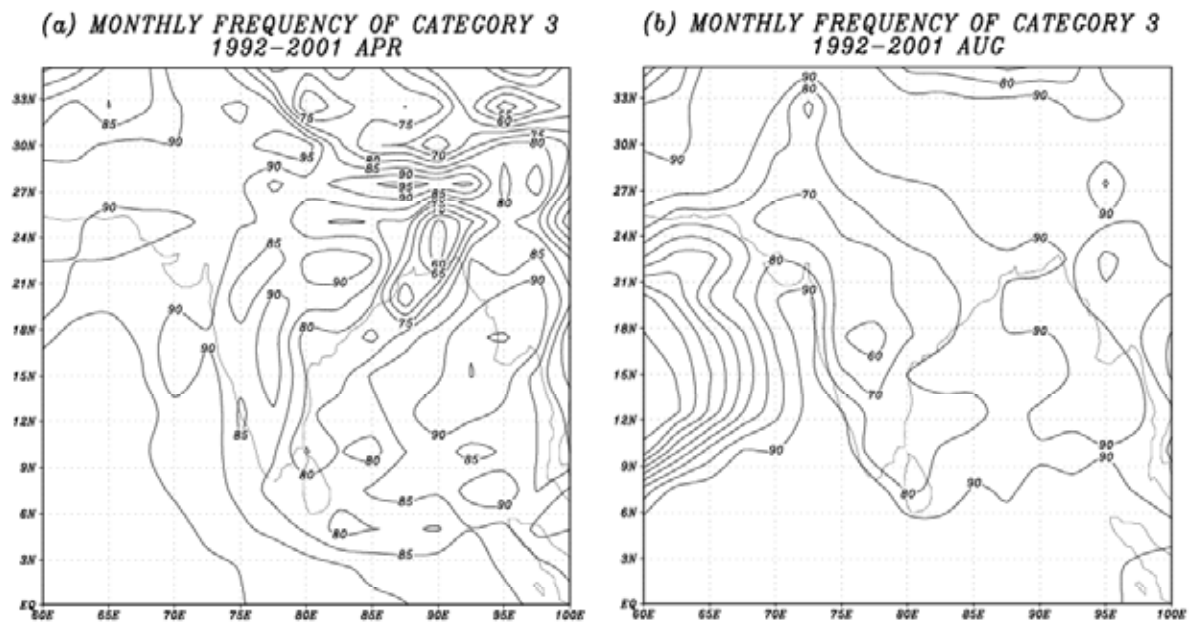


Fig. 3 Distribution of monthly frequency of CATEGORY 3 (a) April (b) August

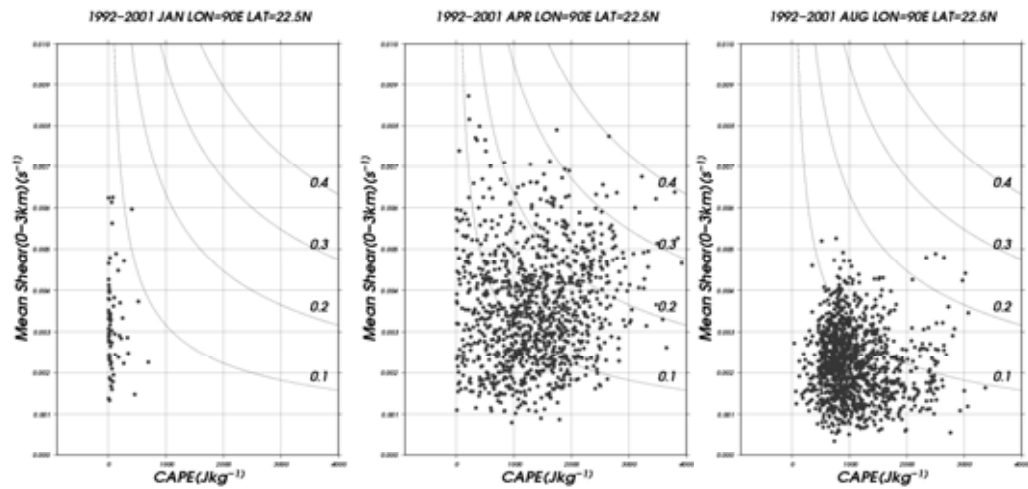


Fig. 4 Scatter diagram of CAPE and MS at 90 ° E 22.5 ° N
Left: January Middle: April Right: August

中の双曲線はVGPがそれぞれ0.1, 0.2, 0.3, 0.4の等値線である。ここには1日4回分(00UTC, 06UTC, 12UTC, 18UTC)全てのデータが含まれているが、CAPEが 0 Jkg^{-1} のデータについては散布図から省いてある。バングラデシュ内にはもう一つデータグリッドポイントが存在するが(東経 90° 北緯 25°)、傾向は同じなので割愛する。Fig. 4を見ると、冬期の1月にはCAPEが 0 Jkg^{-1} である場合があり大多数であり、よって散布図上のデータ数は少ない。鉛直シアは広い範囲に分布している。注目すべきはプレモンスーン期の4月で、CAPEとMSが共に増大してVGPが0.2以上となるデータ数が顕著に増大していることがわかる。即ち4月のバングラデシュ付近でみられたCATEGORY 1の高い頻度は、CAPEとMSが共に増大することによりhigh-VGPとなる割合が高くなったことによるものである。モンスーン期の8月になると、CAPEとMSは共に顕著に減少する。とくにCAPE,MSともにある範囲に集中して分布しているのがモンスーン期の特徴である

以上の解析から、プレモンスーン期のバングラデシュ付近では環境場の熱的不安定度と鉛直シアが共に顕著に増大することが定量的に示された。よってプレモンスーン期のバングラデシュ付近の環境場は、マルチセルやスーパーセルといった組織化した積乱雲が発生・発達しやすい状況にあるといえる。これはプレモンスーン期バングラデシュ付近で竜巻などの突発的なメソ気象擾乱が集中して発生する環境場の重要な要因の一つと推測される。

4. まとめと今後の課題

南アジアにおける竜巻等の突発的なメソ気象擾乱の発生に関わる環境場の特徴が調べられた。このような甚大な被害をもたらす突発的に激しいメソ気象擾乱の多くが、マルチセルやスーパーセルといった組織化した積乱雲によってもたらされ、このような積乱雲の組織化には環境場の熱的不安定度と風速・風向の鉛直シアが重要であることから、これらを表現するパラメーターを導入し、その時間的・空間的分布を調べた。またパラメーターの計算には空間的にも時間的にも一様に存在する客観解析データが用いられた。

解析の結果、プレモンスーン期バングラデシュ付近で熱的不安定度と風向と風速の鉛直シアが共に顕著に増大し、組織化した積乱雲が発生しやすい状況にあることが定量的に示された。これは南アジアの中でも竜巻や降雹、局所的な突風の発生がプレモンスーン期バングラデシュ付近にほぼ限られるという気候学的性質を説明する環境場の要因の一つであると推測される。

また、今後の課題は以下の通りである。本研究では、プレモンスーン期バングラデシュ付近の大気環境場の特徴として、熱的不安定度と風向・風速の鉛直シアが顕著に増大することが示された。しかしこれらの環境場の中で実際にメソ気象擾乱が発生しているのかどうか確かめられていない。す

なわち、多くの事例解析を通してこのような環境場の特徴が実際の現象発生時に顕著に見られるのかどうか確かめる必要がある。またこのようなメソスケール気象擾乱の直接の発生・発達のメカニズムは、当然ながらメソスケールのものである。本研究で明らかになったより大きなスケールの環境場を背景にしつつも、より直接的にはこのようなメソスケールメカニズムも重要である。このようなメソスケールのメカニズムを明らかにするためにも、やはり実際の事例を多く解析する必要がある。また近年盛んに使用されているメソ気象モデルを用いた研究は必須である。南アジアのメソ気象擾乱に対してメソ数値モデルを適用した研究例は無く、モデルを用いた研究は、現象の理解を飛躍的に進めるものと期待される。

5. 参考文献

- Ghosh, K. S. (1986): Tornadoes and Hailstorm; Proc. Seminar on Severe Local Storm, pp. 95-113.
- Katsura, J., Hayashi, T., Nishimura, H., Isobe, M., Yamashita, T., Kawata, Y., Yasuda, T. and Nakagawa, H. (1992): Storm Surge and Severe Wind Disasters Caused by the 1991 Cyclone in Bangladesh, Research Report on Natural Disasters, Supported by the Japanese Ministry of Education, Science and Culture (Grant No.03306020), Japanese Group for the Study of Natural Disaster Science, pp.102.
- Koteswaram, P. and Srinivasan, V. (1958): Thunderstorms over Gangetic West Bengal in the pre-monsoon season and the synoptic factors favorable for their formation., Indian Jour. Met. Geophys., Vol. 9, No. 4, pp.301-312.
- Manohar, K. G. and Kesarkar, P.A. (2003): Climatology of Thunderstorm activity over the Indian region: II. Spatial distribution, Mausam, Vol. 55, No.1, pp.31-40.
- Peterson, R. E. and Mehta, C. K. (1981): Climatology of tornadoes of India and Bangladesh, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser.B, 29, pp. 345-356
- Peterson, R. E. and Mehta, C. K. (1995): Tornadoes of Indian subcontinent, Proc. 9th, Intl. Wind Eng. Conf., New Delhi.
- Rasmussen, N. E. and Blanchard, O. D. (1998): A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters, Wea. Forecasting, Vol.13, pp. 1148-1164.
- The Daily Star Web Edition (2004), Vol.4, No.313.
- The Daily Star Web Edition (2004), Vol.4, No.349.
- Weisman, L. M. and Klemp, B. J. (1982): The dependence of numerically simulated convective storms on vertical shear and buoyancy, Mon. Wea. Rev., Vol.110, pp.504-520.
- Weisman, L. M. and Klemp, B. J. (1984): The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shear, Mon. Wea. Rev., Vol.112, pp.2479-2498.
- Weston, J. K. (1972): The dry-line of North India and its role in

An Environmental Characteristics Related to the Outbreak of Meso-scale Meteorological Disturbances in the South Asia

Yusuke YAMANE and Taiichi HAYASHI

Synopsis

The environmental characteristics related to the outbreak of meso-scale meteorological disturbances such as tornado are investigated. The thermodynamic instability and vertical shear which are important for the occurrence of an organized cumulonimbus cloud (multicell and supercell) that often causes severe meso-scale disturbances are noticed and the spatial and temporal distribution of them in the South Asia is quantitatively investigated. It is shown that the thermodynamic instability and vertical shear are considerably increasing in and around Bangladesh during the pre-monsoon season. This indicates that the organized cumulonimbus cloud tends to occur in and around Bangladesh during pre-monsoon season. This result is consistent with the climatological fact that severe meso-scale disturbances (tornado, hail, gust and so on) concentrate in Bangladesh and adjoining north east India.

Keywords: meso-scale meteorological disturbance, thermodynamic instability, vertical shear

