

## バングラデシュにおける夏季モンスーン対流活動と 循環場に見られる日変化の観測的研究

寺尾 徹\*・林 泰一・Md. Nazrul Islam\*\*・松本 淳\*\*\*・岡 太郎

\* 大阪学院大学情報学部

\*\* 秋田県立大学生物資源科学部

\*\*\* 東京大学理学系研究科

### 要 旨

夏季モンスーン期のバングラデシュにおける対流活動とそれに関連する循環場の日変化を解析した。昼間は国の南西部を中心に、夜間は北東部と南東部を中心に対流活動が活発となる。夜間に対流活動が活発となる領域は降水量も多い傾向がある。国の中央部上空では夜間に、対流圏下層では北東部の活発な対流活動に吹き込む、上層では逆に吹き出す風偏差が卓越する。対流圏の気温は午後に、水蒸気は夜間に極大となる。

キーワード：対流活動、降水量、日変化、バングラデシュ、レーウィンゾンデ

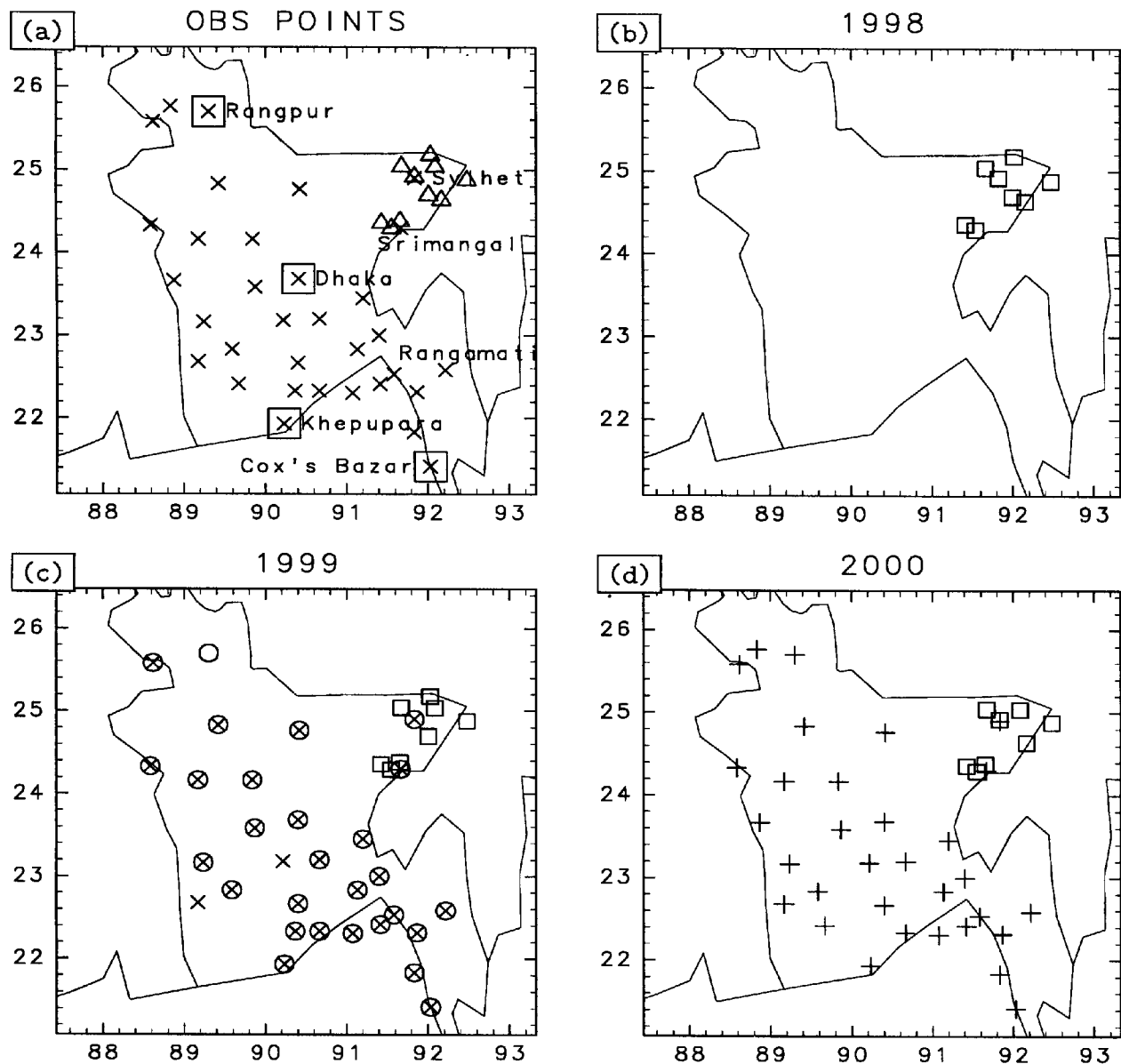
### 1. はじめに

夏季モンスーン期における南アジアは、世界的に見てもっとも降水量の多い領域の一つである。とりわけベンガル湾の北縁付近や Maghalaya 山脈・Assam 地域では、非常に大量な降水が見られることが知られている (Matsumoto, 1988)。この降水は巨大な非断熱加熱をこの領域の大気と与え、アジア夏季モンスーン循環の原動力となっている (Luo and Yanai, 1983; Li and Yanai, 1996)。したがって、この領域における降水メカニズムを調べることは重要である。

この領域における対流活動に見られる本質的な特徴の一つは日変化である。バングラデシュの降水量に見られる日変化に関する最近の研究としては、Ohsawa et al. (2001) をあげることができる。この研究では、アジアモンスーン域のいろいろな領域における、対流活動や降水量の日変化について調べている。バングラデシュに関しては、1995 年 6-8 月の期間について、バングラデシュ気象局 (以下 BMD) によって観測された 3 時間毎の降水量と、日本の国際協力事業団 (JICA) によるメグナ河護岸にかかわるプロジェクト (岡, 2000) によって導入された雨量計を用いて解析されている。解析の結果、バングラ

デシュ北東部や南東部では深夜から早朝にかけて、南西部では午後に、降水量の極大が見られることが示された。このような日変化をもたらすメカニズムに迫ることが課題となるが、これに関して Ohsawa et al. (2001) では、夜間の Meghalaya 山脈からの局地的な斜面下降流にともなう下層の収束が、重要な役割を果たしている可能性が指摘されている。

これらの成果を発展させるため、我々は新しいデータの収集を進めている。一つは地上観測データの収集で、BMD と JICA の協力を得て、長年にわたる地上観測データのデータベース化を進めている。また、2000 年になって、主に沿岸部をカバーする Khepupara と Cox's Bazar に加えて、国の中央部・北東部をそれぞれカバーする二つの新しいレーダーが、Dhaka と Rangpur に導入された。これらのレーダーは我々に、この領域における対流活動の時間発展についての良い情報を与えてくれており、研究成果も得られはじめている (Islam et al., 2001)。更に、対流活動の日変化をもたらすメカニズムを理解するためには、対流圏上層にわたる循環場の日変化を明らかにすることが不可欠である。そこで我々は 1999 年より、Dhaka において、1 日 4 回から 8 回のレーウィンゾンデによる高層気象観測を実施している (寺尾ら, 2000)。その他にも、バングラデシュ



**Fig. 1** Observation points used in the present study. (a) All observation points. BMD (Bangladesh Meteorological Department) observatories and JICA raingauges are shown by  $\times$  mark and  $\Delta$ , respectively. Precipitation radar sites are indicated by large squares. The rawin sonde observation was conducted at Dhaka. (b)-(d) Parameters used for analysis of summer 1998 to 2000. Utilized raingauges installed by JICA and BMD are represented by  $\square$  and  $+$ , respectively. Three hourly wind and temperature observations by BMD are shown by  $\times$  and  $o$ .

水資源局 (BWDB) によって観測されている河川流量データや衛星データなど、多様なデータを収集している。

我々の今回の報告の主要な目的は、上記のような新しいデータを用いて、対流活動の日変化と、それに関連した循環場の変動を明らかにすることである。2. で今回用いたデータについて記述したあと、3.1 において、レーダー観測結果を用いたケーススタディーを通じて、降水パターンの日変化がどのよ

うな降水システムの変化と結びついているかについて考察する。続いて 3.2 で、最近の地上降水量データを用いて日変化の解析を行う。4. は循環場の鉛直構造にみられる日変化の解析にあてられる。最後に結果をまとめ、Ohsawa et al. (2001) の結果と比較する (5.)。

この研究では、基本的にはバングラデシュ地方標準時 (BST) を用いて時刻表示を行う。グリニッジ標準時 (GMT) との時差は 6 時間なので、00GMT

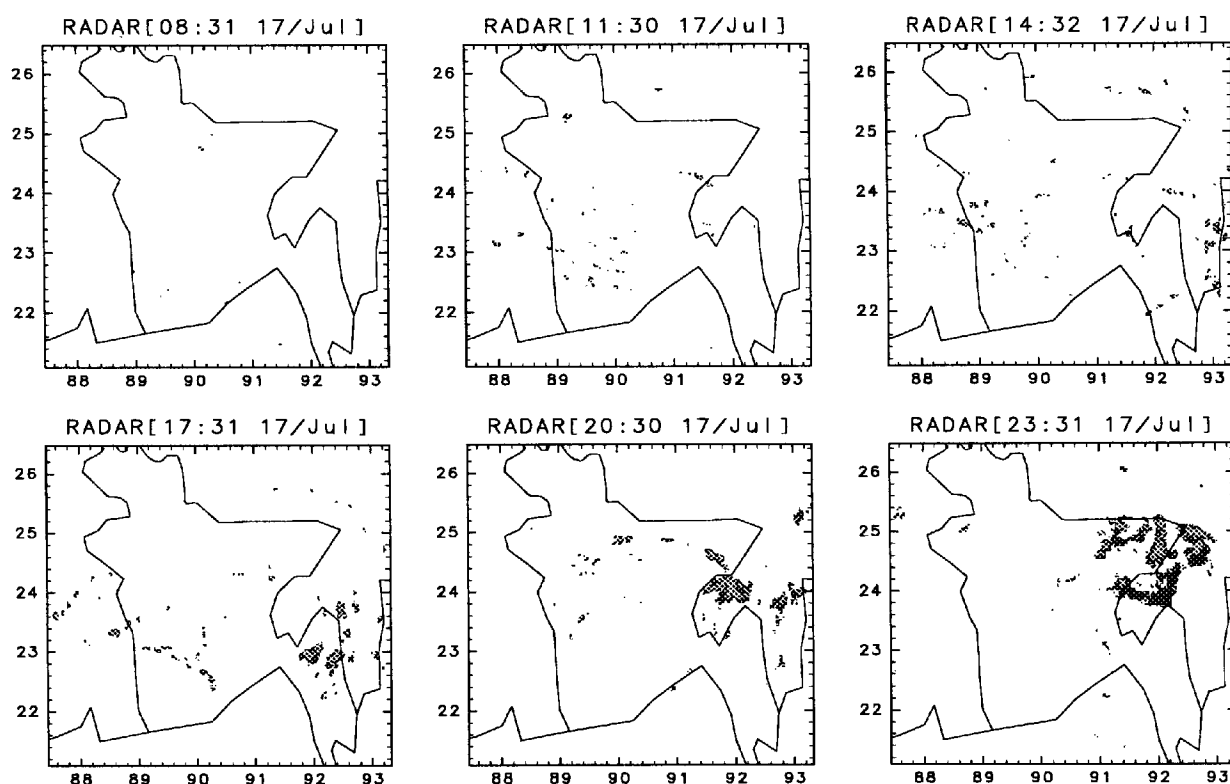


Fig. 2 Almost three-hourly BMD Dhaka radar images for 17 July 2001. Local times of observation are indicated on the top of each figure. Coast lines and border lines are indicated by thin lines. Vertical and Horizontal axes are the latitude and longitude, respectively.

は 06BST にあたることになる。

## 2. 観測とデータ

今回の解析に用いられているデータについて述べる。バングラデシュは、ベンガル湾の北岸に位置しており、Fig. 1 に示されたような領域を占めている。BMD は、34 点の地上観測点を持ち、気温、風、気圧をはじめとする物理量を 3 時間毎に観測している (Fig. 1a の ×)。また、JICA は、バングラデシュ国土の東部を流れるメグナ河にかかるメグナ橋付近の護岸に関するプロジェクトに資することを主要な目的として、多雨域として知られる国土の北東部にある Sylhet 付近の 10 か所に雨量計を導入し、自動連続観測を行っている (Fig. 1a の △)。首都である Dhaka はバングラデシュ中心部に位置している。気象局本部もここにおかれており、日々の高層気象観測もここで行われている。2000 年には新たに降雨レーダーも導入された。

今回は、日変化の研究を主要なターゲットに、以下のようなデータを利用した。

- JICA により収集された 1998 年から 2000 年までの 6-9 月の雨量計データ (Fig. 1b-d の □)。
- BMD より提供していただいた 1999 年の 6-9

月の 3 時間毎の地上観測データのうち、降水量と海面更正気圧 (Fig. 1c の ○ と ×)。

- JICA の援助により BMD より入手した 2000 年の 6-9 月の 3 時間毎の地上観測雨量データ (Fig. 1d の +)。
- BMD より提供していただいた 2001 年の Dhaka 降雨レーダーデータ。
- 科学研究費によるプロジェクトで BMD と共同で実施した Dhaka における 1 日 4-8 回の高層気象強化観測データ (今回は主に 2001 年の観測結果を用いる)。

用いられたデータの年次が不統一であるのは、それぞれのデータの入手のタイミングや条件の違いによっている。この報告では、基本的な日変化パターンについて考察する限り、どの年のデータを用いたかは大きな影響を与えないとの立場で行う。今後、より最近のデータを入手する予定であり、また、可能な限り過去のデータにも解析範囲をひろげたいと考えている。

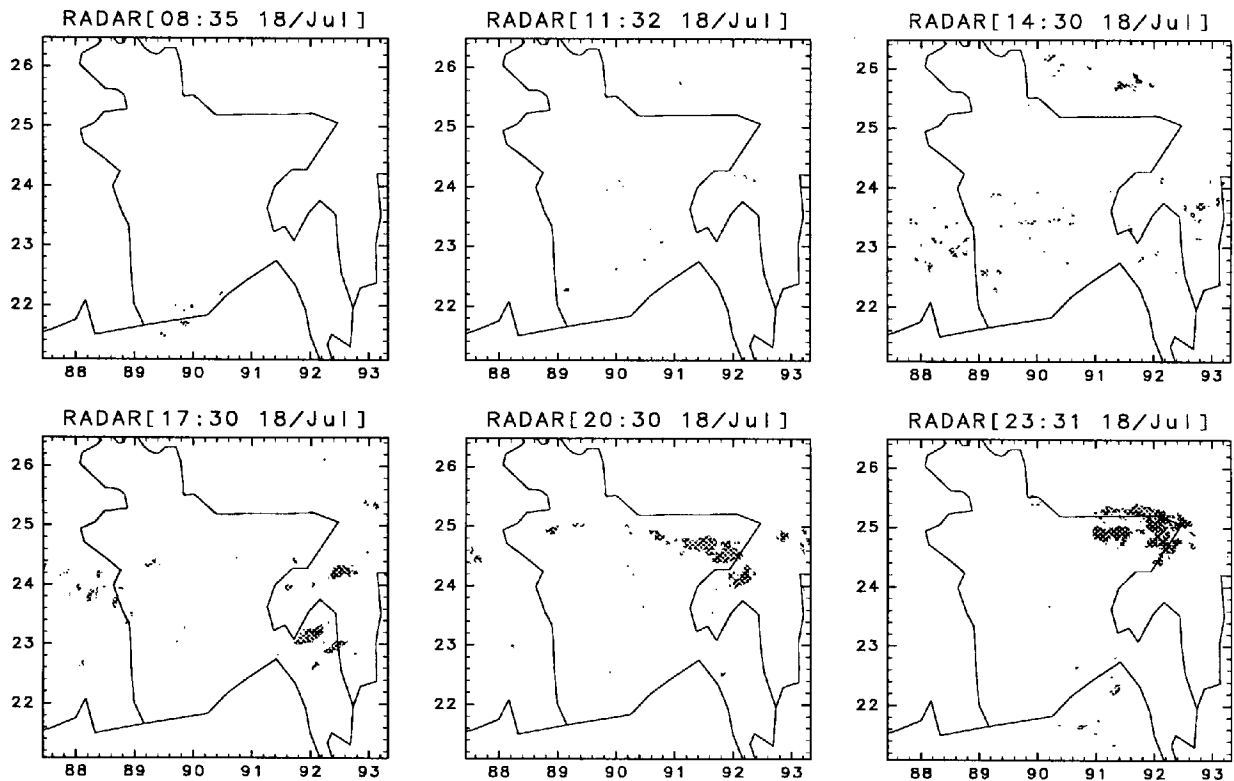


Fig. 3 Same as Fig. 2 except for 18 July.

### 3. 日変化パターン

#### 3.1 レーダーによる典型例の抽出

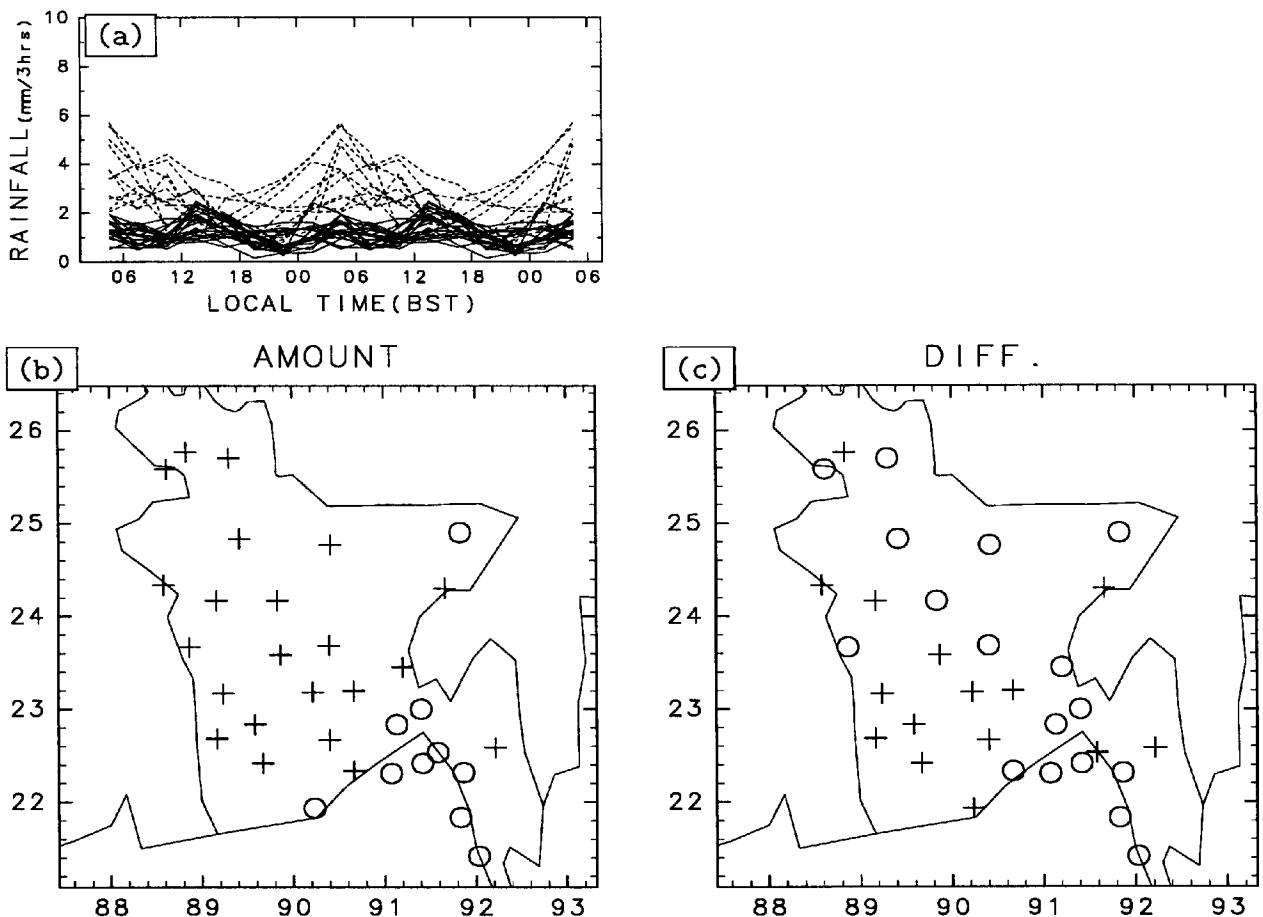
2000年に Dhaka に降雨レーダーが導入された。このレーダーは、北西部や南東部を除き、ほぼ国土の大部分を射程に納めている。したがって、2000年の夏以降、ほぼ全土にわたる時間的空間的に精度の高い降水量推定が可能となった。地上観測の雨量計によるデータは3時間毎であるのに対し、レーダーデータは数分毎の時間変化を解像することができる。現地における種々の制約から、実際には3時間につき1時間程度しか利用されていないのが残念であるが、空間的にも数 km の解像度を持っているので、降水システムの特徴をはっきりとらえている。

このようなレーダーの特徴を活用し、日変化の典型的なパターンの一つを事例解析として示したのが Fig. 2, 3 である。重要なことは、これらの2つの日について、レーダーエコー(降水システム)の変動パターンが非常によく似ていることである。以下これらの図に基づいて、典型的な対流活動の日変化についてまとめる。

朝 8:30 ころには、レーダー画像にはほとんど降水システムが見られない。11:30 から 17:30 ころにかけては、インドの西ベンガル州やバングラデシュの西部にかけての領域に、小さい離散的な多くの降水システムが現われる。これらは次第に組織化されるが、その後夕方 20:30 以前に弱まっていく。

一方画像の東半分についてみると、午後から深夜にかけて、いくつかの大きな組織化されたシステムが発達する傾向がみられる。14:30 ころにはいくつかの離散的な降水システムが現われる。それは次第に発達し、17:30 ころには、バングラデシュの南東部の比較的標高の高い領域である Rangamati 付近 ( $23^{\circ}\text{N}$ ,  $92^{\circ}\text{E}$ ) の2つの大きな降水システムに組織化される。これら2つのシステムの場合と形は、7月17, 18日という異なった日について、ほとんど同じである。約3時間後(20:30)には、別の組織化された対流活動が国土の北から北東部に現れる。この擾乱は、Meghalaya 山脈 ( $25\text{--}26^{\circ}\text{N}$ ,  $91\text{--}93^{\circ}\text{E}$ ) の50kmほど南に、この山脈に沿った東西に延びた rain band 的構造で特徴づけられる。深夜(23:30)になると、降水システムは強化され、国土の北東部の大部分に広がっている。Meghalaya 山脈上では、午後14:30頃を中心にいくつかのシステムが発達する。

これはあくまでも事例に過ぎないが、これらの2つの日についてほぼ同一の時間発展を示していることから(図は示さないが、7月16日もほぼ同様の時間発展を示す)、このパターンが何らかの物理的必然性と普遍性を持っていることが示唆される。



**Fig. 4** Classifications of the BMD observatories by patterns of diurnal variations of precipitation using BMD 3hourly data in 2000. (a)Plots of diurnal precipitation variations at every BMD stations. Two clusters defined are indicated by solid (cluster C1) and dashed (cluster C2) lines. For convenience, same diurnal variation pattern is repeated two times. Horizontal and vertical axes indicate local time and rainfall rate in  $\text{mm} \cdot (3\text{hours})^{-1}$ , respectively. (b)Locations of two clusters classified by the amount of daily precipitation. Points less than and more than daily precipitation averaged over the country are indicated by + (cluster A1) and o (cluster A2), respectively. (c)Locations of clusters categorized by the difference of precipitation between 03-06BST and 12-15BST. Clusters B1 (+) and B2 (o) correspond with heavy precipitation in the midnight and early afternoon, respectively.

### 3.2 降水量日変化パターンの分類

降水量の日変化を客観的に分類するために、6-9月で平均した3時間ごとの降水量パターンに対するAverage-linkage method (群平均法)に基づくクラスター分析 (Wilks, 1995; Kalkstein et al., 1987)を行った。その際、降水量の対数に対してクラスター分析を適用した。これは、 $1\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ と $2\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ の間の「距離」と、 $2\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ と $4\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ の「距離」を等価として考えるということに対応する。

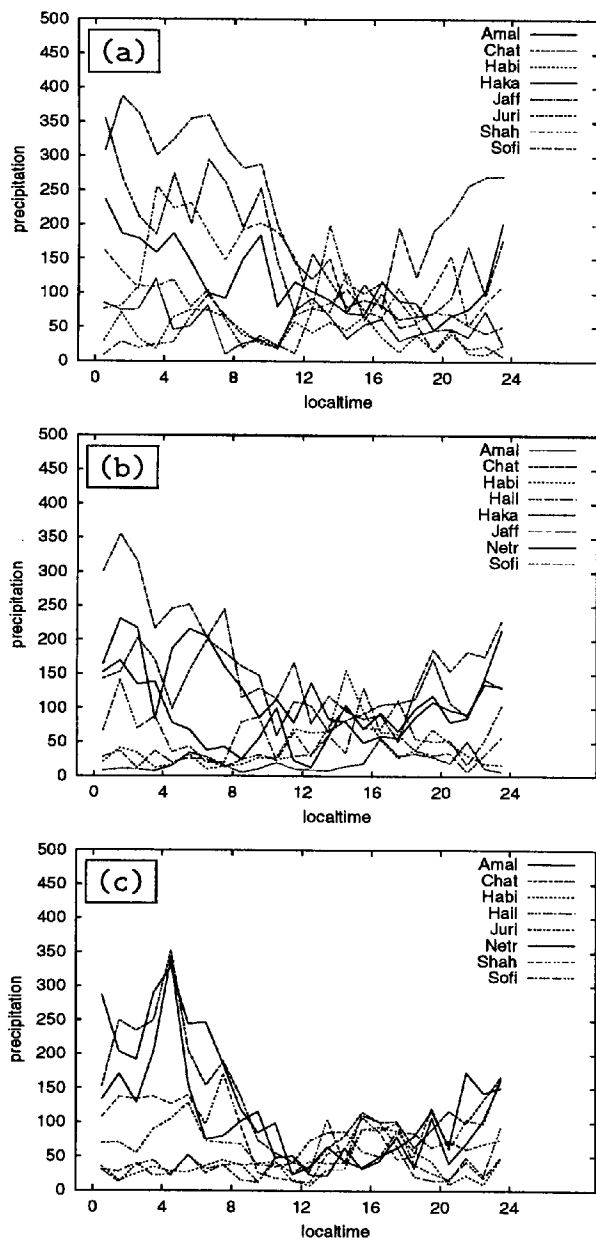
クラスター数2とした場合の結果を Fig. 4a に示す。この方法で定義したクラスターを C1, C2 と呼ぶことにする。クラスター C1 は、クラスター C2 と比較して全体的に降水量が少ない。それに加えて、クラスター C1 については、午後0-3時前後にピー

クを持つものが多く、クラスター C2 については午前3-6時前後に最大降水量が見られる傾向があり、この点でも大きな違いがある。しかし、クラスター C1 には、午前3-6時頃にピークがある地点も一部見られる。

以上の特徴を考慮して、以下の2つの基準にもとづくより単純なタイプ分けを行った。

**基準 A:** 午前3-6時の降水量と午後0-3時の降水量の差。前者が後者より少ないものをクラスター A1, 前者が後者より多いものをクラスター A2 と表記する。

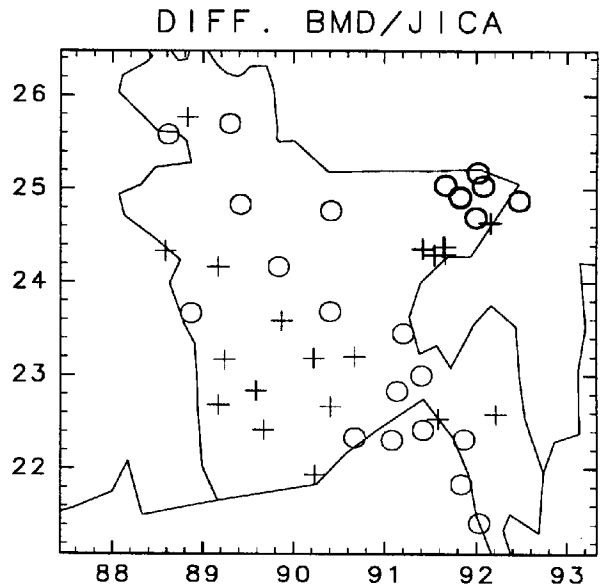
**基準 B:** 日平均降水量がバングラデシュ全国平均よりも多いかどうか。日平均降水量が全国平均よりも少ないものをクラスター B1, 多いものを



**Fig. 5** June to September averaged diurnal variation of precipitation at JICA raingauge stations (Fig. 1a) for (a)1998, (b)1999 and (c)2000. Horizontal and vertical axes indicate local time and 4-monthly accumulated precipitation (mm) for each hour, respectively.

クラスター B2 とする。

なお、クラスター B1, B2 は結果的にクラスター C1, C2 と完全に一致した。結果を Fig. 4b, c に示した。降水量が少なく、午後に降水量極大が現れる傾向のある地点 (クラスター A1, B1 に所属する地点) は、国土の西部から南西部にみられる。これを以後 Type I と呼ぶ。東部の山間部にも同様の特徴のある点が散在している。一方、降水量が多く、深夜



**Fig. 6** Classification of diurnal rainfall pattern for both BMD and JICA data (Fig. 1a). Stations with midnight rainfall peak are indicated by o. The other stations are by +.

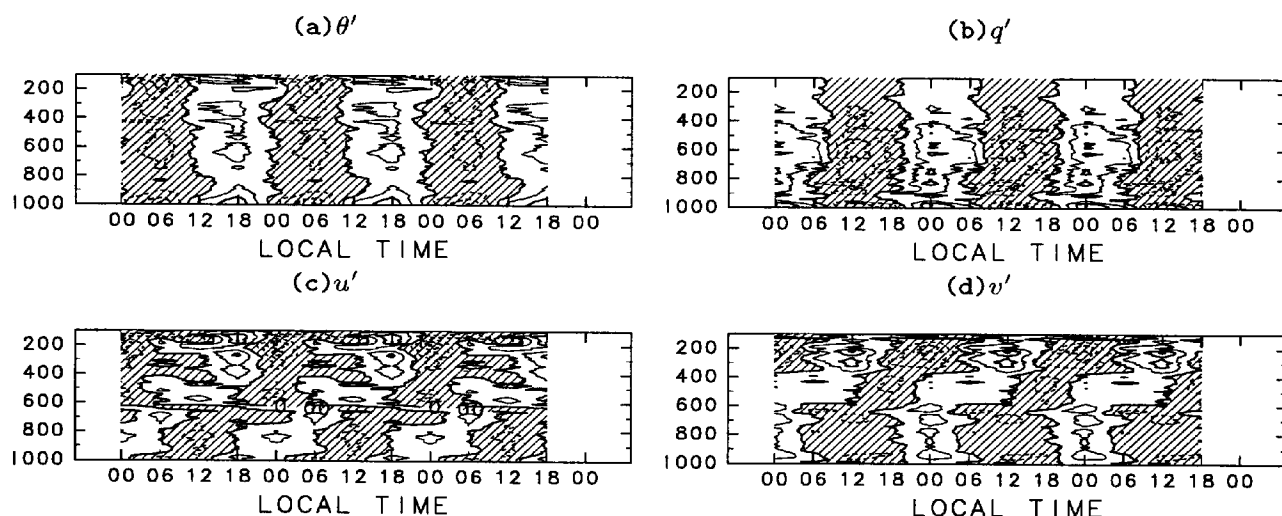
に降水量極大が現れる傾向のある地点 (クラスター A2, B2 に所属する地点) は、国土の北東部 (Sylhet) と、南東部の沿岸沿いに集中して現れている。これを以後 Type II と呼ぶ。北部には、降水量の極大が深夜に見られるが、降水量そのものはそれほど多くない地点 (クラスター A2, B1 に分類される地点) がみられる。これを Type III とする。

特に大量の降水の見られることで有名な国土の北東部には、Sylhet しか Type II に分類される地点は見られなかった。Sylhet はこの地域の降水特性を代表しているものと考えられるが、Matsumoto (1988) に示されているように、Meghalaya 山脈に近づくにつれて降水量は急激に多くなる傾向がある。特にその南側斜面は降水量が非常に多い (Prasad, 1970)。すなわち、降水量の空間的変動が極めて激しい地域にあっている。しかし、残念ながら BMD の観測地点はこの領域については比較的まばらで、降水量分布を詳細に調べるのは困難である。そこで、JICA によって導入された雨量計の記録を解析した。

Fig. 5 に、1998 年から 2000 年にかけての 3 年間について、データが利用可能な各地点における降水量の日変化を示した。1998 年は記録的な洪水を記録した年であるが (松本, 1999)、この降水量データから、バングラデシュの北東部でも他の年に比べて大量の降水があったことが分かる。一方、日変化パターンには、年によるばらつきはあるものの、明瞭な傾向が見られる。日平均降水量の多い観測点では、夜間から早朝にかけて特に大量の降水が見られ

**Table 1** List of 4-times daily rawin sonde observations conducted in 2000 and 2001 summer at Dhaka. Asterisks (\*) denotes that in these days some of the wind observation data were not obtained. Therefore, we did not use these data for calculation of the diurnal variation of the wind. The numbers of 4-times daily observation are indicated for each year. Those of days for which we could calculate wind diurnal variations are shown in parentheses.

| year | month  | day                                             |                          |
|------|--------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| 2000 | June   | 29*                                             | total:<br>12days(4days)  |
|      | July   | 6*, 8*, 12, 13*, 14, 18, 19*, 20*, 25, 26*, 27* |                          |
| 2001 | June   | 28, 29                                          | total:<br>18days(14days) |
|      | July   | 4, 9*, 10-11, 17*-18, 21-22, 26-27, 30-31*      |                          |
|      | August | 1, 5, 14*-15                                    |                          |



**Fig. 7** Time-pressure cross sections showing averaged diurnal variations of vertical profiles for (a) potential temperature, (b) specific humidity, (c) zonal and (d) meridional wind velocities in 2001 summer. Anomalies from the daily averages are shown, and negative values are shaded. Horizontal and vertical axes indicate local time and pressure, respectively. Contour intervals are 0.4K, 0.2g/kg, 0.8ms<sup>-1</sup> and 0.8ms<sup>-1</sup>, respectively.

る。この時間帯については地点による違いが非常に大きい。一方、午後の時間帯については地点間の違いはそれほど大きくない。夜間にあまり多くの降水が見られない地点でも、この時間帯にある程度の降水が見られるため、結果としてこの時間帯が降水の極大となる。

このような降水量の日変化について、Fig. 4b と同様の視点から分類するために、1998 年から 2000 年について、午前 3-6 時、午後 0-3 時について平均した降水量の差を計算した。結果を BMD の観測点についての 2000 年の結果とあわせて Fig. 6 に示す。この図から、Sylhet 付近だけを見てもはっきりとした地域差が見られることが分かる。24°40′ 付近を境に北側では夜間に、南側では午後に、降水量の極大が現れる傾向がある。BMD のデータ (Fig. 4b) だけからははっきりしないが、JICA のデータを加え

て考察することで (Fig. 6)、北東部の夜間降水量極大域 (Type II) と、北部の夜間降水量極大域 (Type III) との間には、午後に降水量が極大となる Type I 的な領域が存在していることが明瞭となる。

バングラデシュの国土全体としてみると、西部から南西部では午後に (Type I)、北部～北東部では夜間に (Type III, Type II)、対流活動が活発化する傾向がある。特に北東部で多量の降水が見られる (Type II)。また、南東部の海岸沿いにも、多量の降水と、夜間の対流活動活発域が確認できる (Type II)。

#### 4. 上空の循環場の解析

対流活動の日変化のメカニズムを明らかにするためには、地上のデータだけではなく、上空の大気状

態の日変化データも必要であることは明らかである。しかし、Dhaka における通常の高層気象観測は 00GMT(06BST) に限られる。これでは、日変化を解像することは不可能である。一方、上空のデータとして利用可能なものとしては、客観解析データも存在するが、日変化を解像できる高層気象観測が近くには存在しないため、そのまま正しいものとして受け入れることは到底できない。まず直接観測を行った上で比較するのでなければ、信頼できる議論をすることはできない。

そこで我々は、1999 年以來、日変化を解像できる 1 日 4-8 回の高層気象強化観測を Dhaka において行っている。1999 年の結果については寺尾ら (2000) にまとめた。ここでは、主に、2000 年と 2001 年の結果を検討する。まず Table 1 に、これら 2 年間についての観測日を示す。2000 年については、1 日 4 回以上の観測を 12 日にわたって行っているが、風のデータに多くの欠測が含まれており、そのうちで全ての回にわたってデータを利用できたのは、4 ケースのみであった。そこで今回は、2001 年についてのみ結果を示す。近く 1999, 2000 年の結果も含めて報告する予定である。

Fig. 7 に、高層気象観測の結果得られた大気状態の日変化を示す。日変化はいずれも、一日平均値からのずれをあらわす。気温の日変化については、夕方 18BST に全層にわたって正のアノマリが卓越している (Fig. 7a)。一方、水蒸気量の日変化は気温に対してちょうど 6 時間ほど遅れており、夜間 00BST に全層にわたって正のアノマリが卓越している (Fig. 7b)。風の日変化を見ると、下層 (700hPa 以下) では 00BST に南西風アノマリが顕著である。特に、南北風にはっきりとしたアノマリがあらわれており、上空 (400hPa より上) に下層とちょうど反対の符号を持つアノマリがみられる。

これらの日変化のうち南北風アノマリについてどの程度信頼できるか調べるために、より詳細な解析結果を示す。Fig. 8 は、個々の観測値と平均値、双方についての 200hPa と 850hPa の南北風を示している。日によっていずれも多少のばらつきはあるものの、00BST における下層の南風アノマリ、上層の北風アノマリの存在はいずれも有意である。上空と下層の傾向が逆相関を持ちながら良く対応していることから見ても、この結果は十分信頼できるものといえる。

このような風の鉛直分布について、対流活動の日変化についての結果と比較して考察してみると、北東部や北部における夜間の活発な対流活動 (Type II と Type III) に吹き込む方向の下層風アノマリが 00BST にあることが示唆される。水蒸気量と下層風は明瞭な正相関を持っており、循環場変動の日変化成分は、水蒸気を内陸へと運び込む役割を果たしていることを示している。

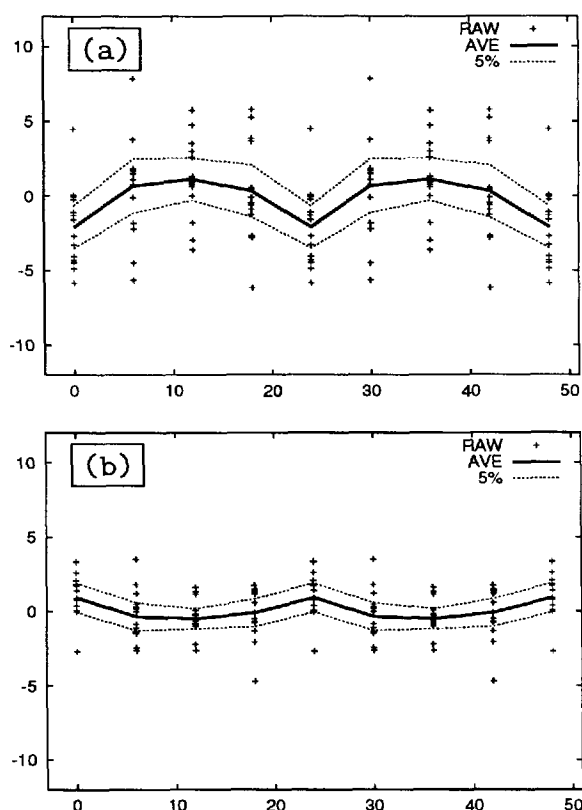


Fig. 8 Diurnal variations of (a)200hPa and (b)850hPa meridional wind ( $\text{ms}^{-1}$ ) over Dhaka. Individual observations are indicated by dots. Averages and 95% confidence levels are plotted by thick solid and thin solid lines, respectively.

上記のような下層風変動をより広い領域について調べるために、Fig. 9 に、地表風の日変化成分を示した。しかし、結果は Fig. 7 や Fig. 8 から予測されるものと大きく異なっている。バングラデシュ中央部の風向を見ると、昼間には南風アノマリが見られ、夜間にははっきりとしたアノマリは見られず、朝方になるとむしろ北風アノマリが卓越している。この点については、Fig. 11 を用いて後ほど論じたい。一方、南東部の沿岸付近には、午後から夕方にかけて内陸向き、深夜から朝方に海向きの海陸風に対応すると見られる風系が見られる。海陸風は、海岸から 100km ほど侵入している。

次に、北東部の夜間の降水と下層の風の関係について考察するために、Fig. 10a に海面更正気圧の日変化を示す。全ての地点について半日周期が卓越した大気潮汐がはっきりと見られる。同時に、この大気潮汐には、場所による振幅の違いが見られる。振幅の違いは特に 1 日周期成分に卓越しており、図は示さないが、緯度が高いほど振幅が大きい傾向がある。ここで、午前 3-6 時頃と午後 0-3 時頃の海

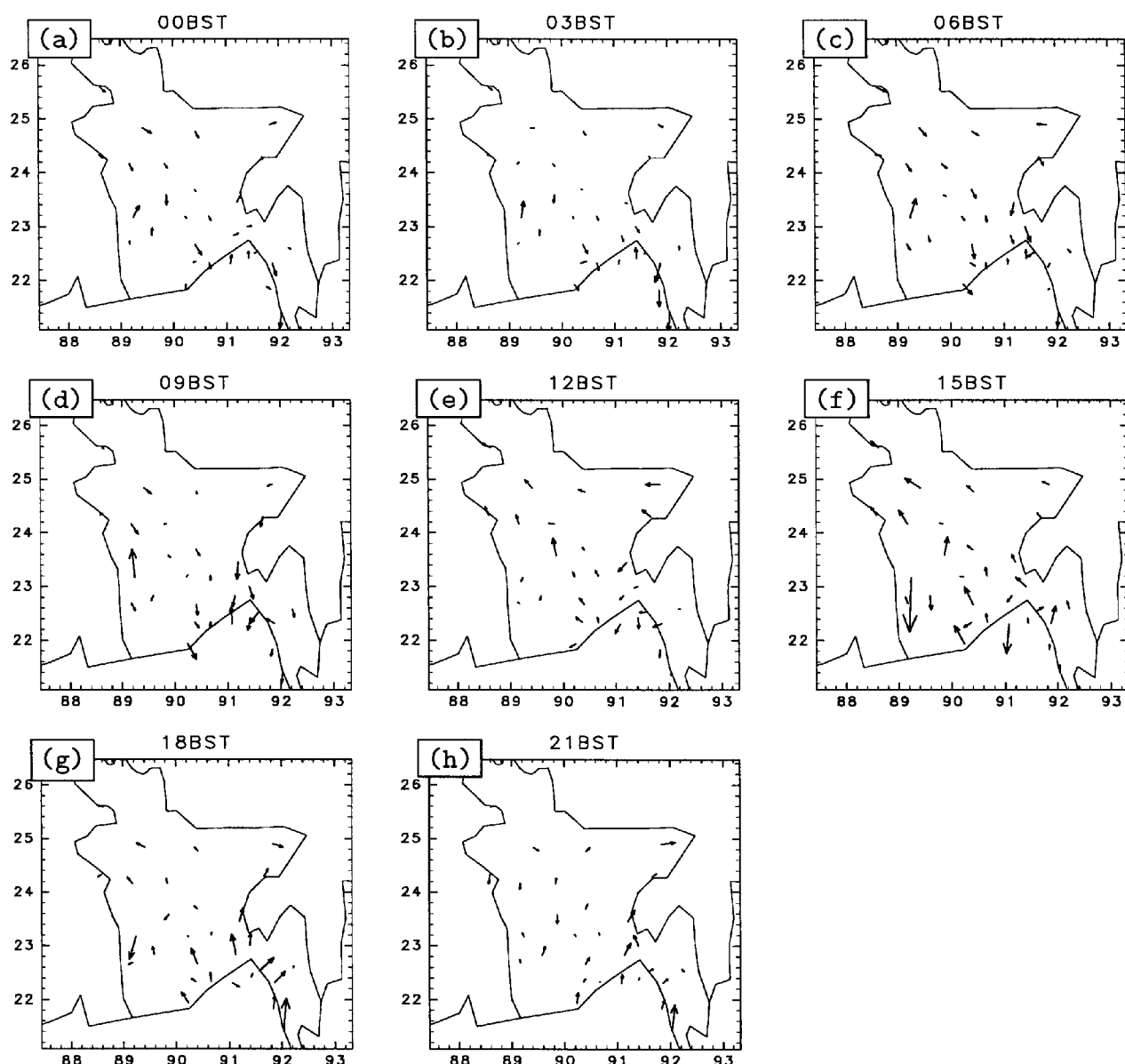


Fig. 9 Diurnal variations of surface wind for every three hours. Only the BMD surface observation data in 1999 are used. Anomalies from daily averages are shown.

面更正気圧の差を  $\Delta p$  と定義し、その緯度依存性を Fig. 10b に示す。もし北東部の夜間の降水が、Dhaka 付近の下層の南風アノマリを引き起こしているとする、北東部は  $\Delta p < 0$  となることが予想される。すなわち、降水量の多い夜間は北東部の気圧が相対的に低くなり、下層の風の吹き込みを促すものと考えられる。ところが Fig. 10b は、海面更正気圧の日変化は夜間に南に行くほど気圧が相対的に低くなるという傾向を示している。特に北東部の観測点である Srimangal と Sylhet では、 $\Delta p$  が高くなっている (それぞれ 1.1hPa と 0.6hPa で全国第1位と第3位)。00BST の海面更正気圧の日変化成分を見ても、この傾向には大きな違いはみられない。

このことを考慮すると、北東部の対流活動への風の吹き込みによって Dhaka 付近の下層の南風アノマリを説明するのは難しい、ということになる。しかしながら、下層の海面更正気圧の日変化に見られる北東部の相対的な高気圧は、その領域における下層の気温低下と関係している可能性もあり、今後、上空の気温構造を含めた観測と解析が必要である。

高さ毎の風の日変化を示すために、Fig. 11 に各気圧レベルでの風の日変化を示した。上空に行くにしたがって風向が南から東南東へと変化している様子がわかる。日変化については、いずれも 18BST から 00BST の間に風速値を増加させ、風向も時計回りに大きく変化していることがわかる。この変化

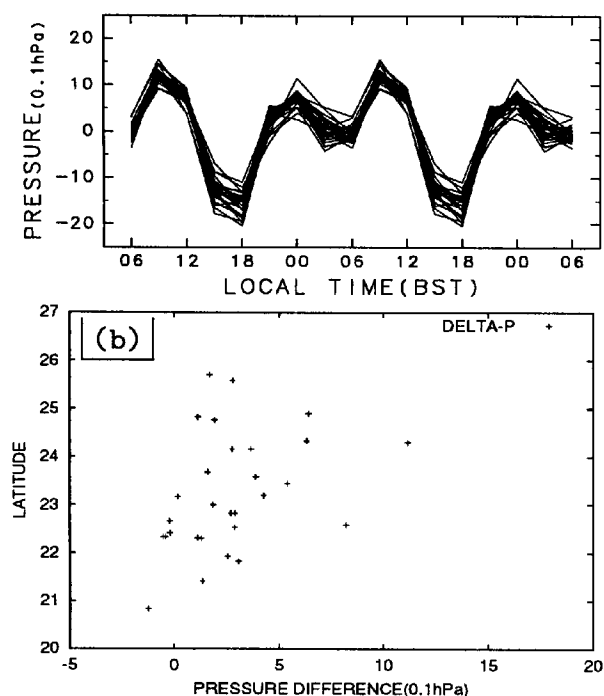


Fig. 10 (a)Diurnal variations of sea-level pressure at BMD stations calculated from data from June to September 1999. Values of vertical axis is in pressure (0.1hPa). (b)Variations of pressure difference ( $\Delta p$  defined as the differences of sea-level pressures between 03-06BST and 12-15BST) associated with latitudes.

は、夜間に活発化する北部・北東部の対流活動に向けて下層の風が吹き込んでいることを示している。しかし、Fig. 10で考察したように、このことが北東部の活発な対流活動への吹き込みとして説明できるという、直接の証拠はない。別の可能なメカニズムとして、昼間に対流活動によって維持される渦運動量輸送による摩擦効果が、夜間になって失われることによって、南風アノマリが形成されるということも考えられる。Fig. 11の結果はこの仮説と整合的であるが、仮説の検証に取り掛かるためには、より踏み込んだ観測と検討が必要である。

一方、地表風速は上空と比較して極めて弱い。00BSTにも特に強い南風強化は見られない。06BSTにはむしろ風の抑制が見られる。これは、地表風を見る際には、境界層の安定度の変化とあわせて考察する必要があることを示している。すなわち、下層風の変化は必ずしも地表風にそのまま顕われるとは限らない。Fig. 9のような結果は、夜間から早朝にかけての境界層の安定化による風速抑制効果などもあわせて理解しなければならない。これはかなり困難であり、地上風だけによる解析には限界がある。

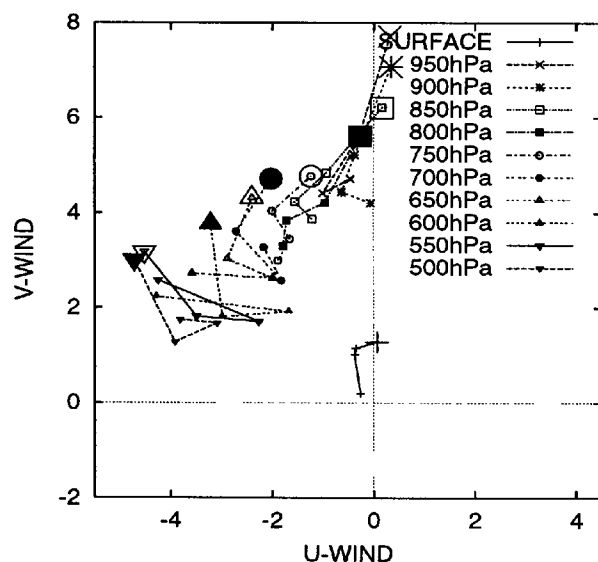


Fig. 11 Diurnal variations of wind vectors at surface and every 50 hPa pressure levels between 950hPa and 500hPa calculated from data of rawin sonde observations conducted in 2001. Averaged wind vectors at 06BST, 12BST, 18BST and 00BST for each level are plotted by marks and they are connected by lines. Data for 00BST are indicated by big marks.

今後、別の地点における高層気象観測や、パイロットバルーンの観測結果を収集することなどが必要である。

## 5. まとめと議論

バングラデシュにおける対流活動の日変化について調査した。大きく見ると、国の西部から南西部では午後0-3時頃に、北部から北東部では深夜から早朝にかけて(午前3-6時頃)、対流活動の極大が見られる。国の南東部の沿岸域にも、深夜から早朝にかけての対流活動極大が見られる。一般的に深夜から早朝にかけての対流活動極大域は降水量も多い傾向があるが、国の北部では降水量自体は必ずしも多くはない。これらの結果から、降水量の日変化パターンとして、

- 降水量が全体として少なく午後に対流活動の極大が見られるような領域 (Type I)
- 降水量が全体として多く夜間から早朝にかけて対流活動の極大が見られるような領域 (Type II)
- 降水量が全体として少ないが夜間から早朝にかけて対流活動の極大が見られるような領域 (Type III)

に分類できた。なお、基本的に Type II に属すると見られる国の北東部についても、詳細に見るとその南部には Type I に属する領域が見られることがわかる。一方、このような日変化の典型的事例を、レーダーデータから見出すことができた。

昼間と夜間についての、南西部と北東部の対流活動のシーソーが、日変化の主要な成分であるので、この視点から、Dhaka 上空の風と地上観測に基づく海面更正気圧の日変化について考察した。Dhaka 上空では、00BST を中心に、下層 (600hPa 以下) で北向き、上層 (400hPa より上) で南向きの風アノマリがみられた。海面更正気圧の日変化成分を検討すると、北東部は夜間に相対的に気圧が高くなっており、下層の風アノマリを説明するためには、対流活動への吹き込みとは異なるメカニズムの検討が必要かもしれない。

バングラデシュ中央部では、対流圏全層にわたって気温の極大は 18BST に、水蒸気量の極大は 00BST に見られた。下層の南北風と水蒸気量の極大はよく一致しており、循環場の日変化は、水蒸気を北向きに輸送する役割を果たしていることが示された。

ここで、この研究において明らかになったことを、Ohsawa et al. (2001) との対比で議論する。対流活動の日変化パターンについては、より新しい他の年のデータからも、Ohsawa et al. (2001) の結果が支持されることを示した。補強点としては、降水量は必ずしも多くないが深夜から早朝にかけて降水量の極大が見られる領域 (Type III) が見出されたことである。また、新しく導入されたレーダーデータを用いることにより、対流活動の日変化をもたらす降水システムの事例を示すことができた。大気鉛直構造の解析からは、Ohsawa et al. (2001) の示した深夜から早朝にかけての北東部の対流活動に対応して、下層でそれに吹き込み、上層で吹き出すような方向の風が卓越していること、この風は水蒸気の輸送も行っていることを示すことができた。Ohsawa et al. (2001) で特に課題として示された、北東部の深夜から早朝にかけての降水システムのメカニズムについては、南側の風系もこの発達に寄与し得るものであることがわかったが、Meghalaya 山脈からの斜面下降流の効果など、今後より詳細に観測・議論すべき問題が残されている。北部における大気鉛直構造の日変化の詳細な観測が求められていることが浮き彫りとなっている。

この研究では更に、地上風を用いることの限界について議論した。パイロットバルーンの観測結果など、上空のデータの収集が重要である。

## 謝辞

図の作成に当たり、地球流体電脳ライブラリを利用しました。バングラデシュ気象局の皆様には、Dhaka における高層気象強化観測に全面的に協力

していただくとともに、さまざまな観測データを提供していただきました。感謝致します。

この研究は、科学研究費補助金基盤研究「バングラデシュ国における氾濫湖の消長に関する気象・水文学的研究」(代表・岡太郎京都大学防災研究所教授) および「バングラデシュ国の洪水など気象災害の発生原因となる降雨過程に関する調査・研究」(代表・林泰一京都大学防災研究所助教授)、同奨励研究「夏期モンスーン季のバングラデシュにおける大気鉛直構造形成過程の研究」(代表・寺尾徹大阪学院大学講師)、による補助を受けて行われたものです。また、国際協力事業団による「メグナ橋護岸の中長期対策の立案」の下で行われたバングラデシュ国への専門家派遣事業の一環として行った、現地科学者等との技術協力の成果も反映されています。

## 参考文献

- 岡 太郎 (2000) : バングラデシュの洪水に関する調査と考察, 京都大学防災研究所水資源研究センター報告, 第 20 号, pp. 125-134.
- 寺尾 徹・林 泰一・岡 太郎 (2000) : 夏季モンスーン期のバングラデシュにおける大気鉛直構造の観測, 京都大学防災研究所年報, 第 43 号 B-1, pp. 211-220.
- 松本 淳 (1999) : 大洪水の歴史と気候変動, 科学, 第 69 巻, pp. 619-626.
- Islam, M. N., T. Terao, T. Hayashi, J. Matsumoto and T. Oka (2001) : Estimation of monsoon rain and the use of BMD radar data, The 3rd international symposium on Asian monsoon system, pp. 298-303.
- Kalkstein, L. S., G. Tan, and J. A. Skindlov (1987) : An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification, J. Clim. Appl. Meteor., vol. 26, pp. 717-730.
- Li, C. and M. Yanai (1996) : The onset and inter-annual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast, J. Climate, vol. 9, pp. 358-375.
- Luo, H. and M. Yanai (1983) : The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part I: Precipitation and kinematic analysis, Mon. Wea. Rev., vol. 111, pp. 922-944.
- Matsumoto, J. (1988) : Synoptic features of heavy monsoon rainfall in 1987 related to the severe floods in Bangladesh, Bull. Dept. Geog., Univ. Tokyo, vol. 20, pp. 43-56.

Ohsawa, T., H. Ueda, T. Hayashi, A. Watanabe and J. Matsumoto (2001) : Diurnal variations of convective activity and rainfall in tropical Asia, J. Meteor. Soc. Japan, vol. 79, pp. 333-352.

Prasad, B. (1970) : Diurnal variation of rainfall in India, Indian J. Meteor. Geophys., vol. 21, pp. 443-450.

Wilks, D. S. (1987) : Statistical methods in the atmospheric sciences, Academic Press, 467pp.

## **Observational Study on the Diurnal Variations of Convective Activity and Circulations over Bangladesh in the Summer Monsoon Season**

Toru TERAOKA\*, Taiichi HAYASHI, Md. Nazrul ISLAM\*\*, Jun MATSUMOTO\*\*\* and Taro OKA

\* Faculty of Informatics, Osaka Gakuin University

\*\* Department of Biological Environment, Akita Prefectural University

\*\*\* Department of Geography, University of Tokyo

### **Synopsis**

The diurnal variations of convective activities and associated circulation anomalies over Bangladesh in summer monsoon season are investigated. Active convections are seen mainly in the midnight in the northeastern and southeastern parts of country. This region coincide with heavy rainfall area. On the other hand, over the south-western part of country, convections are active in the daytime. In the midnight over the central part of this country, wind anomalies toward the active convection prevails in the lower troposphere and opposite in the upper layer. Tropospheric temperature and specific humidities are maximum in the afternoon and midnight, respectively.

**Keywords:** Convective activity, Precipitation, Diurnal variation, Bangladesh, Rawin sonde