

## Bangladesh で2013年3月22日に発生した 竜巻の被害と発生環境場

村田 文 絵<sup>\*1</sup>・S. M. Quamrul Hassan<sup>\*2</sup>・Md. Abdul Mannan<sup>\*3</sup>・  
山 根 悠 介<sup>\*4</sup>・林 泰 一<sup>\*5</sup>

### 要 旨

Bangladesh 東部で2013年3月22日に発生した EF-2レベルの竜巻は死者36名の被害をもたらした。迅速に行われた被害調査の結果を示し、環境場の調査から発生原因を考察する。

#### 1. はじめに

Bangladesh を含むインド亜大陸北東部では、モンスーン季の前のプレモンスーンと呼ばれる3～5月に、シビアストームが多く発生する(例えば Ramaswamy 1956; Weston 1972; Karmakar and Alam 2006; Prasad 2006; Yamane *et al.* 2010)。これらは現地語でこの季節の災いを意味するカルバイシャキ、またストームが北西の方角から来ることから nor'wester と呼ばれる。その中には竜巻をもたらすものがあり、これまで Bangladesh では1989年5月26日に約1300名、1996年5月13日に約700名、2004年4月14日に約100名の死者を出している。米国ほど発生頻度は高くないものの、いったん発生すると甚大な被害をもたらす。

本研究では、 Bangladesh において2013年3月22日夕方に発生した竜巻について、被害調査の結果を記述し、竜巻発生時の気象状況について調査した。過去に Bangladesh で被害調査が行われたのは1996年5

月13日の竜巻が初めてと思われる(桂 1996; Schmidlin and Ono 1996; 林ほか 1997; Yamane *et al.* 2013 a)。しかし政情不安もあって、調査隊が現地に入ることができたのは発生から1ヵ月以上経過してからであった。一方、今回の竜巻は Bangladesh においてカメラ付携帯電話が普及して初めて生じた強い竜巻であり、また発生時刻が日没前であったため、複数の目撃者によって動画撮影が行われ、テレビやインターネット上で公開された。また、 Bangladesh 気象局(以下 BMD)の職員及び、南アジア地域協力連合気象研究センターの研究者が、それぞれ翌日と1週間後という早い時期に被害調査を行った。このように今回の竜巻は、これまでになく迅速に被害調査が行われ、気象資料も過去に比べて多く入手できた。

#### 2. 被害調査

竜巻が発生した場所は Bangladesh 東部の Brahmanbaria 県にあり、インド国境に近い地域である(第1図)。Ministry of Disaster Management and Relief 管轄下の Disaster Management Information Centre が発行した現況レポートによると、被害は死者36名、負傷者388名、全壊家屋2635棟、半壊家屋752棟に及んだ。

被害調査は発生日の翌日と1週間後に共著者が実施した。発生日の翌日に被害状況の把握を行い、1週間後に被害の分布の把握と住民への聞き取り調査を行った。聞き取り調査による竜巻発生時刻は1050～1110

\*1 (連絡責任著者) 高知大学教育研究部自然科学系理学部門。fumie@kochi-u.ac.jp

\*2 Bangladesh 気象局。

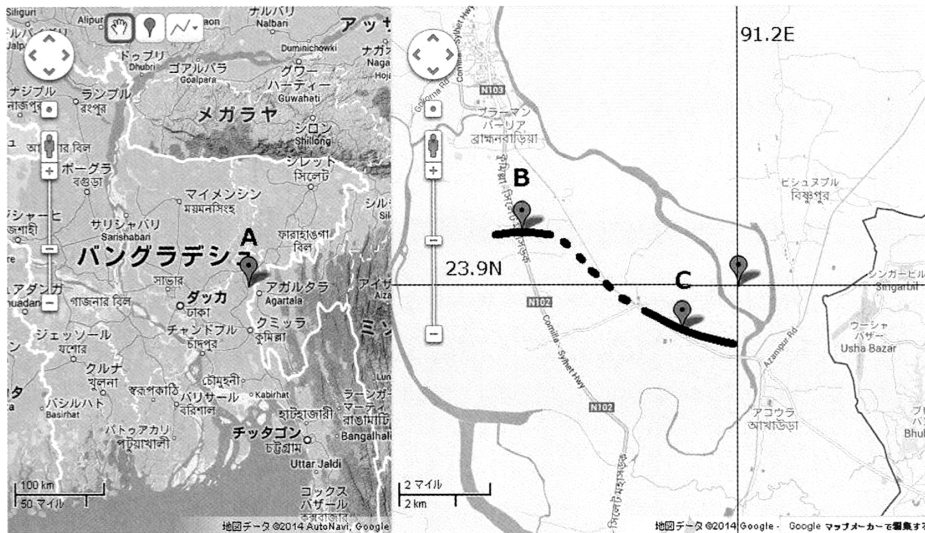
\*3 南アジア地域協力連合気象研究センター。

\*4 常葉大学教育学部。

\*5 京都大学防災研究所。

—2013年9月9日受領—

—2014年1月8日受理—



第1図 バングラデシュにおける竜巻発生場所(左図のA)と被害跡(右図の太線). 右図のBは被害を受けた刑務所(第2図a)の位置, Cは第2図cの写真撮影位置をそれぞれ示す. 被害跡の点線部分は顕著な被害が確認できなかったことを表す. Google マップを使用した.

あった. 第2図に主な被害状況を示す. 公共建物への顕著な被害として刑務所の2重の外壁の破壊があった(第2図a). 鉄筋の入った高さ×厚さが5 m×75 cmの壁が, 内側の壁が幅25 m, 外側の壁が幅8 mにわたって竜巻によって壊された. 被害地域は田園地帯であり, 15の村が被害を受けた. 全壊した住家は主にトタンの波板や植物を編んでつくった壁, レンガを積み上げてコンクリートで固めた壁(一部は鉄筋が入っている)等で構成されていた(第2図b). また樹木が多数ねじ切られ, またあるものは根ごと引き抜かれていた(第2図c). 飛散物の樹木や建築物への突き刺さり確認されなかった.

目撃情報として, コンクリートの屋根が300 m 飛ばされた, 池の水が1 mほど吸い上げられた, 家畜が5~100 m 飛ばされたなどがあった. また竜巻発生時には多くのトタン板や木々が空を舞い, あるものは樹木に絡まっている様子が被害跡にしばしばみられた(第2図d). 過去の被害調査(桂 1996; Schmidlin and Ono 1996)はこれらが多くの人命を奪う凶器となったことを指摘している. しかし被害後に新たに



第2図 竜巻によって生じた被害を示す. (a) 刑務所の2重の外壁の倒壊, (b) 全壊家屋が多い村の様子, (c) Brahmanbaria-Akaura 道路の街路樹の被害, (d) 木々に巻きついた飛散物.

UTC (現地標準時は UTC+6 時間であり, 現地時間の1650~1710) である. 竜巻の寿命は5~7分, 回転方向は反時計回りであった. 雷や降雹の報告はなかった.

被害跡は長さ約10 km, 幅100~150 m の線状で

建てられた家々にはまた, 多くトタン板が使われていた. Ono and Schmidlin (2011) はバングラデシュにおける竜巻シェルターの導入を検討している.

米国の改良藤田スケール (EF-scale, McDonald and Mehta 2006, 付録参照) を用いて竜巻の強さを見

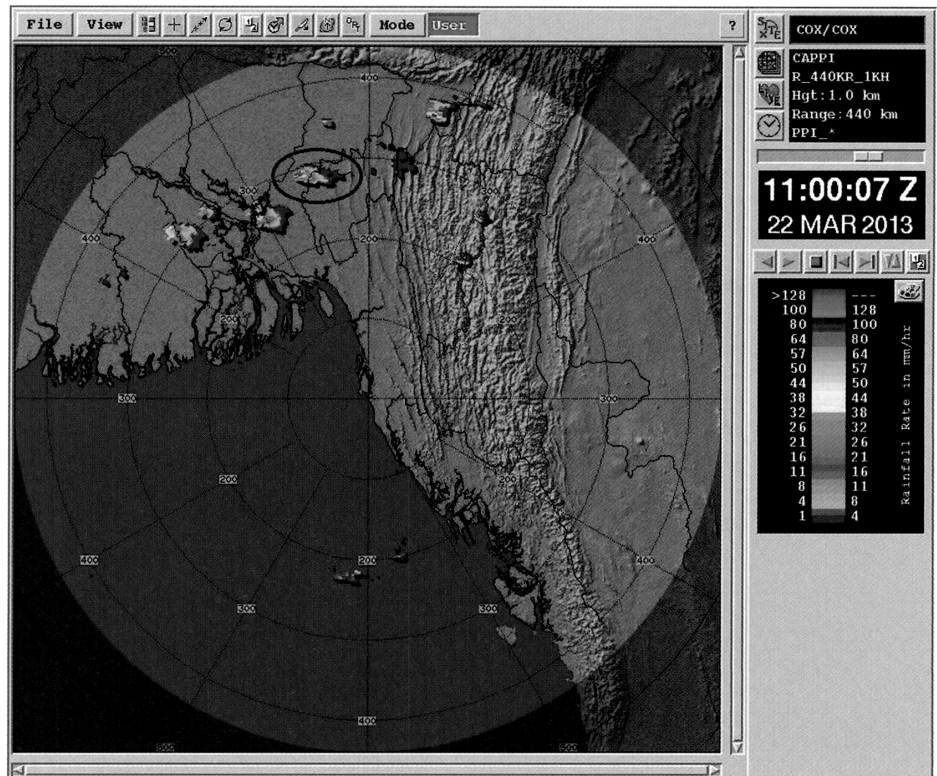
積った。被害地域は、EF-scaleの被害指標 (DI) のカテゴリ-1 (SBO) に相当する農家の納屋のように弱い建造物が多くを占め、全壊家屋が多数みられたことから被害の程度 (DOD) はレベル8であり、3秒平均の風速で90~130 mph (40~60 m/s) 以上であったと推定される。樹木の被害 (DIのカテゴリ-27及び28) において、ねじ切られたり、引き抜かれたりしている木があることから、DODはレベル3或いは4である。こちらについても3秒平均で90~130 mph程度の風速であったと推定される。これらのことから竜巻の強さをEF-2と判断した。

本事例では目撃者によって撮影されインターネット上に公開された竜巻の動画が複数あった (例えば <http://www.youtube.com/watch?v=nm-13jNTN3s>, <http://www.youtube.com/watch?v=ac74GNYSbg0>, 2014.1.14閲覧)。それらの竜巻の映像からはメソサイクロンがあることを示唆する親雲の回転や強い竜巻にしばしばみられる多重渦構造は確認されなかった。投稿者と連絡が取れなかったため、画像の撮影場所は不明であり、詳細な画像解析には至らなかった。

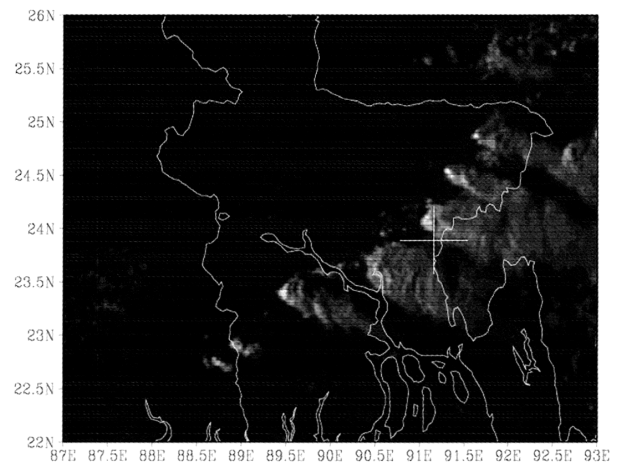
### 3. 発生環境場

解析に用いたデータはBMDによる気象レーダー、地上気象観測データの実況通報 (SYNOP)、米国NCEP/NOAAの客観解析データNCEP global tropospheric final analyses (NCEP\_FNL), 86.5Eにある中国の静止気象衛星FY-2Dの可視画像である。NCEP\_FNLの時間分解能は6時間、水平解像度は1°である。FY-2Dの時間分解能は1時間、可視画像の水平解像度は0.01°である。

第3図に竜巻発生時付近の1100 UTCの気象レーダー画像、第4図に1031 UTCの衛星可視画像を示

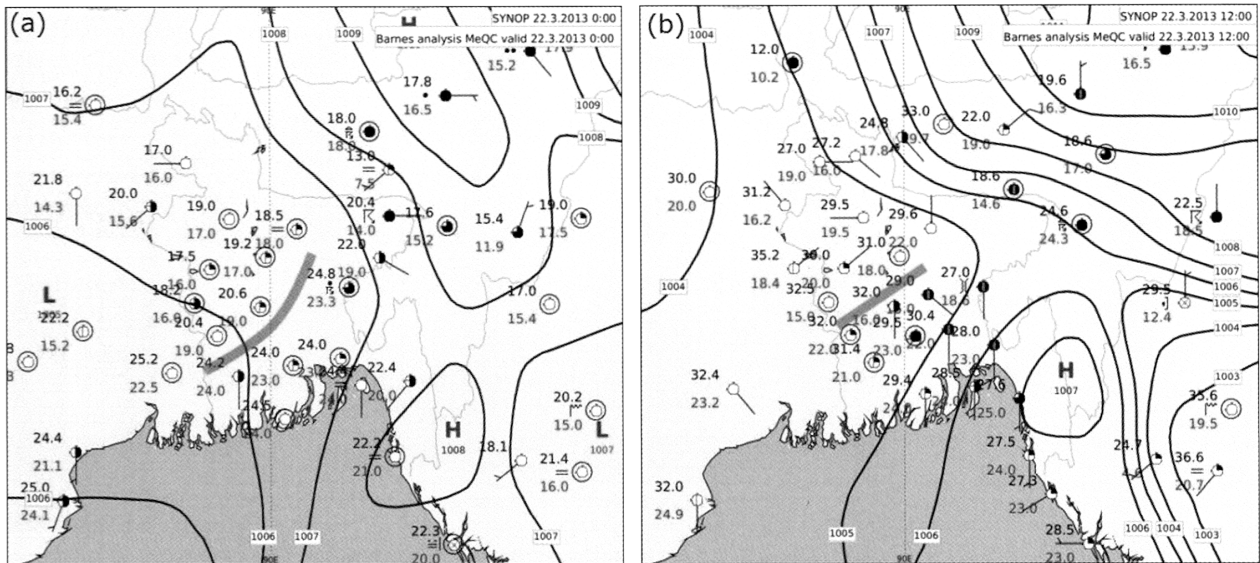


第3図 竜巻発生時刻付近のCox's Bazarレーダー画像 (1100 UTC)。降水強度がshadeで表されており、赤色は降水強度100 (mm/h) 以上の領域を表す。円の中心がレーダー位置であり、レーダーからの距離が100 km毎に円で示されている。太線の黒丸で囲った積乱雲が竜巻の親雲。

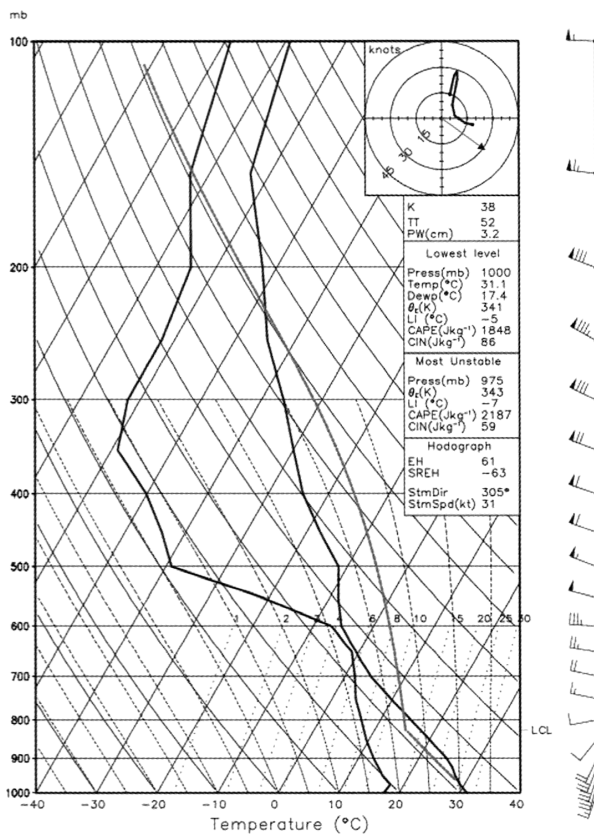


第4図 1031UTCの衛星可視画像 (91.2E, 23.9N) にある+印付近が竜巻発生位置。

す。複数の積乱雲が北東-南西の帯状域にわたって数十 km 程度の間隔で並んで発達していた。竜巻の親雲はその中のひとつであり、強いレーダー反射強度の領域の水平スケールは約10 kmである。レーダーは発生位置から約300 km離れており、ドップラー観測の範



第5図 (a) 00 UTC と (b) 12 UTC の SYNOP. コンターは海面気圧 (hPa) である. 地点毎に雲量, 気温 (°C), 露点温度 (°C), 風向風速 (長い羽根は10ノット, 1 ノット=0.51 m/s), 天気を表す. 太線はドライラインの推定位置を示す.

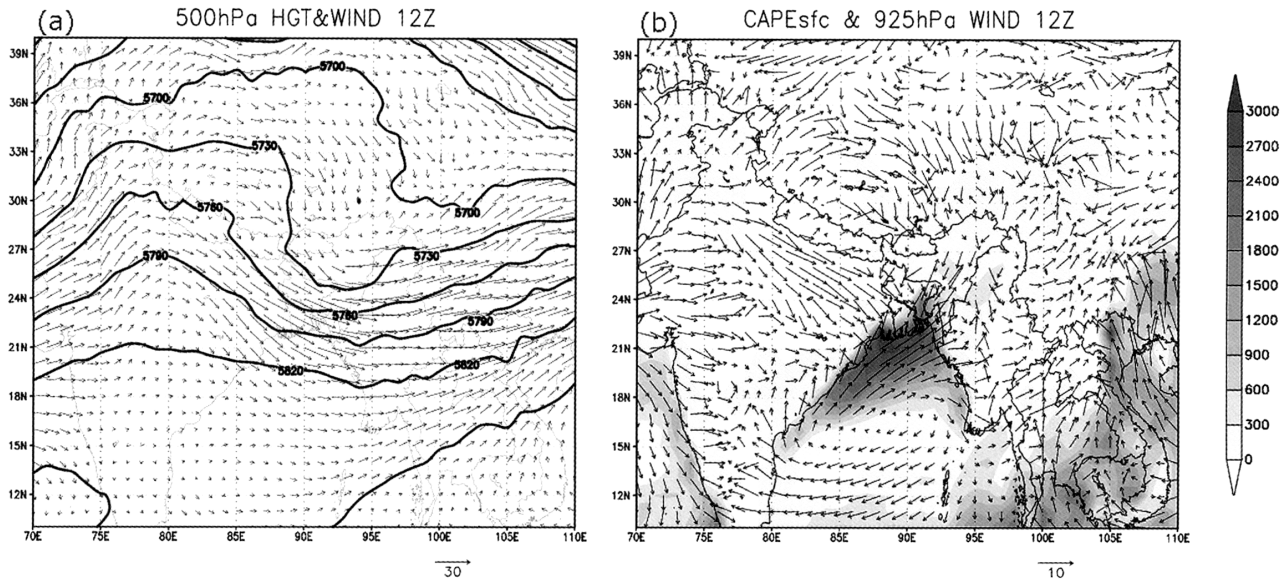


第6図 2013年3月22日12 UTC の NCEP\_FNL データの (91E, 24N) における熱力学図とホドグラフ. 図中 1 mb=1 hPa, knots, kt はノットを表わす.

圏外であった. またこの時刻より前のレーダー観測は2時間前, この時刻より後の観測は15分後であり, 親雲のメソスケール構造とその変化は解析できなかった.

プレモンスーン季の降水システムは, インド・ジャルカンド州の高原 (Chotta Nagpur plateau) 付近, 或いはヒマラヤ山脈の南縁で発生して, 東或いは南東に移動する弧状や線状のスコールライン型の降水システムがよくみられる (Mukhopadhyay *et al.* 2005, 2009; Ghosh *et al.* 2008; Rafiuddin *et al.* 2010; Dalal *et al.* 2012). 一方 Islam and Uyeda (2007) は, バングラデシュ東部は相対的に湿っており, 乾燥したバングラデシュの西で発達した対流雲と比べて特徴が異なり, 対流雲の背が低く降水強度が弱いことを示している. 本事例の竜巻の親雲は移動してきた降水システムではなく, 竜巻発生位置付近で発達した積乱雲であった.

第5図に SYNOP による 00 UTC と 12 UTC における地上気象場の分布を示す. 露点温度をみると, バングラデシュの南東部はベンガル湾から南風が流入して相対的に高く湿っている一方で, 西の内陸部は低く乾燥している. 気温は朝方 (00 UTC) 湿った南東部に対して乾いた西部において相対的に低い一方で, 日中 (12 UTC) においては逆に乾いた西部が高い. 推定される湿潤空気と乾燥空気の境界 (ドライライン) を太線で示す. ドライラインを境として最大 5°C 程度



第7図 NCEP\_FNL による2013年3月22日12 UTCにおける (a) 500 hPa のジオポテンシャル高度 (m) と風 (m/s) 及び (b) 地表付近の空気塊を持ち上げた CAPE (J/kg) と925 hPa の風 (m/s).

露点温度に差がみられる。第3図と比較すると、積乱雲の発生位置はドライラインにほぼ沿っていた。

米国では、暖候期にメキシコ湾からの湿った海洋性の気流と、大平原からの乾いた大陸性の気流の間にしばしばドライラインが形成され、その境界に沿って対流が発達し、しばしばシビアストームに発達する (Fujita 1958; Rhea 1966; Schaefer 1986; Ziegler and Rasmussen 1998)。バングラデシュ周辺では Weston (1972) がドライラインの存在とシビアストームとの関係を議論しており、最近インド気象局の予報官のために導入された予測ツールとしてドライラインの検出機能が取り入れられている (Lefort 2013)。ドライラインに沿った露点温度差は米国の事例と比べて大きくないが、米国における詳細な観測では、湿度差の大きさと対流の発生には関係がないとされる (Wakimoto and Murphey 2010)。

第6図に NCEP\_FNL データを用いた発生位置付近 (91E, 24N) における熱力学図 (Skew-T diagram) とホドグラフ、主要な熱力学/力学パラメータの値を示す。風は1 km 以下で南西風、それより上は北西風へと変化しており、下層に鉛直シアアがある。地上付近は気温が高く相対的に湿潤だが、上層は気温が低く600 hPa より上が非常に乾燥した潜在不安定な大気であり CAPE も大きい。このような環境場の特徴はバングラデシュのプレモンスーン季に特有の気候学的特徴である (Yamane and Hayashi 2006)。一方ストームに相対的なヘリシティ (SReH) は小さく

スーパーセルの発達に好ましい環境場とは言えない。

第7図 a に12 UTC の NCEP\_FNL による500 hPa のジオポテンシャル高度と風を示す。バングラデシュ上空には顕著なトラフが発達しており、強化しながら東に移動していた。このトラフは300 hPa においても顕著であり (図略)、対流圏中層から上層にかけて存在していた。このような環境場は Ramaswamy (1956) においてシビアストーム発生時にみられる特徴的な型の一つとされている。また Yamane *et al.* (2013b) も、シビアストーム発生時の平均場は非発生時に比べて550 hPa のトラフが深まることを示している。

第7図 b は12 UTC における地表空気を持ち上げた場合の CAPE と925 hPa の風を示す。ベンガル湾の西岸に沿って非常に CAPE が大きい状況にある一方で、インド北部からバングラデシュ西部にかけてヒマラヤの南に沿って北西風が卓越しており、バングラデシュにはその境界が位置する。CAPE がベンガル湾の西岸に沿って大きい特徴はプレモンスーン季の気候学的特徴である (Yamane and Hayashi 2006; Bhowmik *et al.* 2008)。

#### 4. 考察

今回の竜巻がスーパーセル竜巻かどうかを直接判定できるレーダー資料はなかった。しかし被害調査及び環境場の調査において、親雲がスーパーセルであることを示唆する資料はなかった。ノンスーパーセル竜巻

から EF-2スケールの被害が生じることもある (Wakimoto and Wilson 1989). バングラデシュのプレモンスーン季の特徴は、地上付近は南風がベンガル湾から流入し高温湿潤である一方で、上層は非常に乾燥した西風が吹いており、下層の鉛直シアと CAPE が共に大きい、シビアストームの発生に適した環境場にある。さらにこの日の環境場の特徴として、地上にドライライン、中上層の偏西風中には深いトラフが解析された。ドライライン付近の収束によって生じた上昇流がトラフによって強化され、強い積乱雲が発達しやすい条件がそろっていたといえる。一方、米国のドライライン付近の境界層内には小スケールの鉛直渦がしばしば観測されている (Marquis *et al.* 2007; Buban *et al.* 2012)。従って、そのような鉛直渦の積乱雲の上昇流による引き延ばし (Wakimoto and Wilson 1989) によって竜巻が発生したと考えられる。

## 5. まとめ

バングラデシュにおいて2013年3月22日夕方に発生した竜巻は死者36名、負傷者388名の被害をもたらした。被害調査による被害の程度は EF-2と判断される。高度 1 km 以下に湿った南風がベンガル湾から流入する一方、上空は冷たく非常に乾燥した西風が吹くこの時期特有の環境場の中で、偏西風中の深いトラフがバングラデシュ上空を通過していた。また地上気象場はバングラデシュ中西部と南東部の間にドライラインの存在を示唆した。竜巻の親雲はドライラインに沿って発達した複数の積乱雲の1つであった。

多数の死者をもたらした原因として、日本や米国と比べて住居の強度が弱いこと、また強風で飛散しやすい凶器となりうる建材が多く使われていることが挙げられる。バングラデシュにおいてはこの時期毎年シビアストームが発生している。いったん強いシビアストームが生じると被害が大きいため、シビアストームの発生予測・警報発令に関して、また教育や避難など様々な視点から対策が行われる必要がある。

## 謝辞

中国の静止気象衛星 FY-2D のデータは千葉大学環境リモートセンシング研究センターより入手しました。熱力学図はフロリダ州立大学の Bob Hart 氏が作成したプログラムを用いて作成しました。論文作成にあたり名古屋大学の上田 博氏、高知大学の佐々浩司氏、編集委員の柳瀬 亘氏、査読者の方より有益な助

言を頂きました。本研究は高橋産業経済研究財団からの助成を受けて行いました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- Bhowmik, S. K. R., S. S. Roy, and P. K. Kundu, 2008: Analysis of large-scale conditions associated with convection over the Indian monsoon region. *Int. J. Climatol.*, **28**, 797-821.
- Buban, M. S., C. L. Ziegler, E. R. Mansell and Y. P. Richardson, 2012: Simulation of dryline mesovortex dynamics and cumulus formation. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3525-3551.
- Dalal, S., D. Lohar, S. Sarkar, I. Sadhukhan and G. C. Debnath, 2012: Organization modes of squall-type mesoscale convective systems during premonsoon season over eastern India. *Atmos. Res.*, **106**, 120-138.
- Fujita, T. T., 1958: Structure and movement of a dry front. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **39**, 574-582.
- Ghosh, A., D. Lohar and J. Das, 2008: Initiation of Nor'wester in relation to mid-upper and low-level water vapor patterns on METEOSAT-5 images. *Atmos. Res.*, **87**, 116-135.
- 林 泰一, 桂 順治, M. Salehin, M. F. Qayyum, 1997: 1996年5月13日, バングラデシュ, タンガイル県で発生した竜巻. *日本風工学会誌*, (71), 9-10.
- Islam, M. N. and H. Uyeda, 2007: Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh. *Remote Sens. Environ.*, **108**, 264-276.
- Karmakar, S. and M. Alam, 2006: Instability of the troposphere associated with thunderstorms /nor'westers over Bangladesh during the pre-monsoon season. *Mausam*, **57**, 629-638.
- 桂 順治, 1996: バングラデシュの'96竜巻災害調査記. *日本風工学会誌*, (69), 23-32.
- Lefort, T., 2013: Dry-line, nor'westers and tornadic storms over east India and Bangladesh: An operational perspective through synergic, the new IMD forecaster's workstation. *Mausam*, **64**, 517-530.
- Marquis, J. N., Y. P. Richardson and J. M. Wurman, 2007: Kinematic observations of mesocyclones along boundaries during IHOP. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1749-1768.
- McDonald, J. and K. Mehta, 2006: A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-scale). Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 111pp.
- Mukhopadhyay, P., H. A. K. Singh and S. S. Singh, 2005: Two severe nor'westers in April 2003 over Kolkata,

- India, using Doppler radar observations and satellite imagery. *Weather*, **60**, 343-353.
- Mukhopadhyay, P., M. Makahur and H. A. K. Singh, 2009: The interaction of large scale and mesoscale environment leading to formation of intense thunderstorms over Kolkata. Part I: Doppler radar and satellite observations. *J. Earth Syst. Sci.*, **118**, 441-466.
- Ono, Y. and T. W. Schmidlin, 2011: Design and adoption of household tornado shelters for Bangladesh. *Nat. Hazards*, **56**, 321-330.
- Prasad, K., 2006: Environmental and Synoptic Conditions Associated with Nor'westers and Tornadoes in Bangladesh —An Appraisal Based on Numerical Weather Prediction (NWP) Guidance Products. 14<sup>th</sup> report of SAARC Meteorological Research Center, 89 pp.
- Rafiuddin, M., H. Uyeda and M. N. Islam, 2010: Characteristics of monsoon precipitation systems in and around Bangladesh. *Int. J. Climatol.*, **30**, 1042-1055.
- Ramaswamy, C., 1956: On the sub-tropical jet stream and its role in the development of large-scale convection. *Tellus*, **8**, 26-60.
- Rhea, J. O., 1966: A study of thunderstorm formation along drylines. *J. Appl. Meteor.*, **5**, 58-63.
- Schaefer, J. T., 1986: The dryline. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. P. S. Ray, Ed., Amer. Meteor. Soc., 549-572.
- Schmidlin, T. W. and Y. Ono, 1996: Tornadoes in the districts of Jamalpur and Tangail in Bangladesh. Quick response report 90. Natural Hazards Center, Boulder, CO., USA. <http://www.colorado.edu/hazards/research/qr/qr90.html> (2013.9.6 閲覧).
- Yamane, Y. and T. Hayashi, 2006: Evaluation of environmental conditions for the formation of severe local storms across the Indian subcontinent. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L17806, doi:10.1029/2006GL026823.
- Yamane, Y., T. Hayashi, A. M. Dewan and F. Akter, 2010: Severe local convective storms in Bangladesh: Part II. Environmental conditions. *Atmos. Res.*, **95**, 407-418.
- Yamane, Y., M. Kiguchi, T. Hayashi, A. M. Dewan and T. Terao, 2013a: Characteristics of damages of severe local storms based on field surveys in Bangladesh. *J. Disaster Res.*, **8**, 1052-1060.
- Yamane, Y., T. Hayashi, M. Kiguchi, F. Akter and A. M. Dewan, 2013b: Synoptic situations of severe local convective storms during the pre-monsoon season in Bangladesh. *Int. J. Climatol.*, **33**, 725-734.
- Wakimoto, R. M. and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1113-1140.
- Wakimoto, R. M. and H. V. Murphey, 2010: Analysis of convergence boundaries observed during IHOP\_2002. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 2737-2760.
- Weston, K. J., 1972: The dry-line of Northern India and its role in cumulonimbus convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **98**, 519-531.
- Ziegler, C. L. and E. N. Rasmussen, 1998: The initiation of moist convection at the dryline: forecasting issues from a case study perspective. *Wea. Forecasting*, **13**, 1106-1131.

#### 付 録

改良藤田スケール (Enhanced Fujita scale) はテキサス工科大学において開発された藤田スケールの改良版であり、2007年より米国の竜巻の強さを表す等級として用いられている。これまでの藤田スケールには被害の指標が少ない、建造物の質が考慮されていない、被害と風速の明確な相関が示されていないという欠点があった。EF-scale では28の被害指標 (DI) が設定され、各 DI には被害の程度 (DOD) 毎にその被害をもたらす風速の範囲が示されている。ただし Bangladesh に適用する際、類似した建造物でも材質や造りが違う、また樹木の種類が異なることにより、被害をもたらす風速に差異がある可能性がある。

## Bangladesh Tornado on 22 March 2013 —Its Damage and the Atmospheric Condition—

Fumie MURATA\*<sup>1</sup>, S. M. Quamrul HASSAN\*<sup>2</sup>, Md. Abdul MANNAN\*<sup>3</sup>,  
Yusuke YAMANE\*<sup>4</sup>, and Taiichi HAYASHI\*<sup>5</sup>

\*<sup>1</sup> (*Corresponding author*) Faculty of Science, Kochi University, 2-5-1 Akebonocho, Kochi 780-8520, Japan.

\*<sup>2</sup> Bangladesh Meteorological Department.

\*<sup>3</sup> SAARC Meteorological Research Center.

\*<sup>4</sup> Faculty of Education, Tokoha University.

\*<sup>5</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.

(Received 9 September 2013; Accepted 8 January 2014)

### 外部団体が主宰する賞への候補者推薦について

気象学会では、学会外の団体が主宰する学術賞等について部外表彰等候補者推薦委員会を設け、学会としての候補者を選考しています。特に、気象学との関連等を考慮して下記の賞に重点を置いています（五十音順）。

- (1) 朝日賞（朝日新聞文化財団, <http://www.asahi.com/shimbun/award/asahi/suisen> 参照）
- (2) 井上学術賞（井上科学振興財団, 「天気」61巻5号掲載予定および <http://www.inoue-zaidan.or.jp/> 参照）
- (3) 猿橋賞（女性科学者に明るい未来をの会, 「天気」61巻7号掲載予定および <http://www.saruhashi.net/> 参照）
- (4) 島津賞（島津科学技術振興財団, 「天気」61巻4号掲載予定および <http://www.shimadzu.co.jp/SSF/> 参照）
- (5) 東レ科学技術賞（東レ科学振興会, 「天気」61巻4号掲載予定および <http://www.toray.co.jp/tsf/index.html> 参照）

- (6) 日本学術振興会賞（独立行政法人日本学術振興会, <http://www.jsps.go.jp/jsps-prize/index.html> 参照）
- (7) 日本学術振興会育志賞（独立行政法人日本学術振興会, <http://www.jsps.go.jp/j-ikushi-prize/index.html> 参照）
- (8) 三宅賞（地球化学研究協会, 「天気」61巻3号掲載および <http://www-cc.gakushuin.ac.jp/~e881147/Geochem/index.html> 参照）

部外表彰等候補者推薦委員会における選考の参考にさせて頂くため、候補者としてふさわしい方をご存じでしたら下記までお知らせ下さい。なお気象学会としての最終的な候補者決定は、委員会の判断にお任せいただきます。

連絡先：〒100-0004

東京都千代田区大手町1-3-4 気象庁内  
日本気象学会 部外表彰等候補者推薦委員会