トルネードとハリケーン*

—正確な予測と有効な情報伝達の必要性—

佐々木嘉和**

Tornado and Hurricane

—Needs of Accurate Prediction and Effective Dissemination of Information—

Yoshi K. SASAKI

1. はじめに

国連防災十年 International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR) と称する、国際的な協力プロジェクトが今年で終わる。その間各国それぞれが経験した災害や防災対策を、数多くの会議や関係者同士の交流で、お互いに知り合ったことは、成果の一つであった。同時に幾つかの大事な教訓を教わった。その一つは情報伝達についてである。情報が間違っていて、不正確な情報が予期しない災害をもたらしたことを経験した。情報が正しくてもリードタイムが短かすぎたか、タイムリーでなかったために、災害を大きくした。それを解決するには、予報の精度を上げること、科学技術を更に進歩させること、そして効果のある情報伝達が出来ることが急務であり、Post-IDNDR の新しい国際協力プロジェクトと考えられるのではなかろうか。

最近のエピソードとしては、死者一万人以上も出したハリケーンミッチ 1998 がある。それは主に、進路予報が不正確で住民を不意打ちにしたうえに、ホンジュラスやガテマラの国内でハリケーンが異常に長く停滞し、降雨が継続したために起こった大洪水によると思われる。1998 年には中国でも大洪水がおきている。大洪水の起こるメカニズムは完全に解っているとは思われない。予報技術も防災に十分に貢献出来るほどになっていない。これらの基本的な科学や技術がしっかりしてなければ、効果的な情報伝達には限度がある。そして被害が軽減しない。トルネードの場合にも似たような状態を経験している。ただしトルネードの場合は、米国でオクラホマ大学構内を中心に新しい観測技術、予報技術、情報伝達技術などの進歩が防災に効果をあげて来ている。それと同時に防災には、新しく根本的な問題が潜在していることもはっきりした。

更に自然災害のみならず、人工的災害を含めて、地球で基本的な問題として共通した点がある。何をするに

も近代社会では経済的基盤、つまり必要な予算付け無しでは、成就しない。政府からの、つまり税金で出来ることには限度がある。民間の活力による「防災産業」の発展が期待される。その意味で民間企業のこれからの防災関連のビジネス展開を支援することを積極的に取り入れた、国際的な政策や将来の地球に関する全般的な科学技術政策を考えるべきと思われる。

2. ハリケーンミッチ 1998

Fig.1 はハリケーンミッチ 1998 の進路をしめす。ハリケーンミッチ 1998 は 10 月 25 日にはユカタン半島の沖、東南東約 200 km にあり、半島に向かって西北西の進路をとっていた。いつものコースである。数値予報も同様な進路予報であった。

Fig.2 は 13 個のモデルを選び、それらの 12 時間ごとの 72 時間の予測進路をしめす。

使ったモデルは：

OFCL ……米気象庁ハリケーンセンター 72 時間予報、12 時間毎位置

GFDI ……同モデルで 6 時間以前の初期値を使いなされた 72 時間予報から内挿した或いは外挿した位置

GFDL ……GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) model

AVNI ……同モデルで 6 時間以前の初期値を使いなされた 72 時間予報から内挿した或いは外挿した位置

LBAR ……バロトロピック model

OHPC ……米水理気象学センター

NGP ……米海軍全地球モデル

A 98 E ……統計と力学の融合モデル

CLIP ……気候学的定常状態値

UKMI ……英予報モデルで 6 時間前の初期値を使いなされた 72 時間予報から内挿や外挿した位置

BAM ……米気象庁ベータモデルと移流モデルの併用

* 原稿受付 1999 年 4 月 1 日

** オクラホマ大学、地球機構

cm で図では黄色（口絵 2 参照）で示されている。Fig. 3 と Fig. 4 の降雨量の違いはストームがそれらの降雨域を速く動いたか（Fig. 3）、或いはほとんど動かずに停滞して連続的に雨を降らせたか（Fig. 4）、による。

ハリケーンミッチ 1998 は、ホンジュラスやガテマラ地域で停滞して異常な降雨による大洪水を引き起こした。今年中国の中央平原で起きた歴史的な大洪水も梅雨前線が停滞して、前線のうでで次から次ぎへと同じ所で発達したストームによるとと思われる。

4. トルネード

今年（1998）5 月、NHK の取材チーム（ディレクター、カメラマン、音響主任）が、スเปนサー 1998 トルネードの学問的にも大変貴重な画像を収録した。その時には同時に最新の DOW（Doppler On Wheel）と呼ばれる移動型のドップラーレーダーでも、至近距離（1.5 km）からトルネードの発生・発達時の記録も同時にとらえている。（Wurman, 1998, Fig. 7, Fig. 8, 第 5 章参照）。その上に NHK チームは現地で防災関係者二人とインタビューしこれも切実で貴重な意見を記録した。

“これまでは、トルネード予報・警報のリードタイム（警報から現象が現れる迄の時間）は 1 分だったが、それが科学技術の進歩のおかげで 10 分になった。それでも今度のトルネード（スเปนサートルネード 1998）は予想外に突然発達した異常に強烈なトルネードだったので、数人の死者や数多くの怪我人も出て、全村の建物はほとんど崩壊した。正確な予報・警報をもっとはやくに出せたら被害もこれ程にならなかったであろう。” 1 時間前にでもよい、6 時間まえに、正確な予報・警報を出せたら、防災対策はし易くなるであろう。リードタイムを数時間にするためにも、トルネードの発生機構を正確に把握しなければいけない。ハリケーンの場合も同じと思われる。発達するメカニズムは当然のこと、迷走し、停滞するメカニズムを、正確に理解して予報モデルを開発しなければいけない。次にトルネードの発生論にふれる。

5. トルネード発生・発達論

Fig. 5 はこれまで一般的に認められてきたトルネード発生論を抽象化して示したものである（Rotunno, 1993 に秀れた Review がある）。地球表面の地上から 2-3 km の高さまで地表面の影響をうけている境界層があり、水平風速は高さとともに増す。その割合は 1 km 毎に約 30 m/秒である。つまり渦度（vorticity, 渦の強さ）が 0.03 (1/秒) の渦管が地表面に水平風の方向に直角に横たわっているのである。その渦管の渦度はだいたいトルネードの渦度の 1/2-1/10 (1/秒) である。その渦管の上でストームが発達すると、渦管のストームの下にある部分がストームに下方から流入し、収束し、そしてストームの中を上昇する風とともに、上の方に持ち上げられ垂直の

Fig. 5 Current model of tornado-genesis

渦管となる。同時に渦管は風とともに収束して、渦度は数倍に強められてトルネードと同じ強さの渦管となる。この発生論を渦管の“立上げ説” (tilting theory) という。これが従来認められたトルネードの発生論である。

ところが、この説には欠点がある。まず観測に合わない：

- (1) 観測されたトルネードはストームの南西部に出来、一般にプラスの回転（低気圧性の回転ともいう）をもっている。ところが、“立上げ説”によると、マイナスの回転であるべきである、
- (2) “立上げ説”ではトルネードはプラスの渦とマイナスの渦が対で同時に発生するはずであるが、観測ではトルネードはストームの南西部にプラスの渦が一つだけ出来るのが普通である、
- (3) 観測ではトルネードは地面に垂直になるが、“立上げ説”によるとトルネードは地面に平行であるべき、
- (4) “立上げ説”ではトルネードは地面近くから発生するはずだが、トルネードはストームの雲の中の雲底近くで発生している。

これらの矛盾を解決するために、筆者は、次の様に発生機構を考えてみた。ビヤルクネスの循環定理と云うのがある。循環は渦度をその面積で積分したものである。その定理から“渦度の時間的変化は傾圧ベクトルに比例する”という結果が得られる（栗原, 1997）。傾圧ベクトルは（比容傾度或いは温度傾度）と気圧傾度が主成分である。この二つの傾度が直角に交わると傾圧ベクトルは最大になり、それが平行になるとゼロになり、消滅して定常状態となる。この定常状態を表すのがケルビン循環定理である。

渦が発達するのはこのビヤルクネスの循環定理で表現出来るかも知れない。渦の安定度がここで問題になる。不安定な条件の下で渦が発達して最盛期に近くなるに従い傾圧ベクトルが段々小さくなり（温度傾度と気圧傾度が同じ方向になり）、消滅してしまう。つまり循環が

Fig.6 Proposed model of tornado-genesis

時間とともに変化しなくなり、ケルビンの循環定理で表されることになる。“ビヤルクネス状態”から“ケルビン状態”に移ったと見てよいであろう。私はメソサイクロンやトルネードがケルビン状態、つまり定常状態に近いことに注目し、渦と場の量との間に面白い関係があることが解った。しかもその関係式はケルビン状態のみならずビヤルクネス状態でも適用できて、理想流体なら一般に成り立つ関係であると解った。それが次に述べる渦とエントロピーと流れの速度の回転成分との間の関係である。

Fig. 6はその模型図である。回転している雲は長く存続することが知られている。始めに緩く回転しているストームを考える。ストームは水蒸気の潜熱による対流で出来た積乱雲という雲で、その回転の軸は上下方向であり、プラスつまり低気圧性である。渦度は $1.E-04$ (1/s)、或いは 0.00001 (1/秒)、つまり一万秒に一回転する速さのことである。南のメキシコ湾からやってくる湿った気流と、北西からロッキー山脈を越えてやってくる乾いた気流とが合流する米国中部の大草原で出来る積乱雲にはその位の渦度を持つものがある。積乱雲に南方から流入し上昇した気流の水蒸気は凝結し潜熱を放出するために、その空気は暖められてエントロピーが増える。凝結した水滴、更に凍った氷晶はオーバーシュートし積乱雲が低気圧性の回転をしているために積乱雲の西南部に落下して蒸発しエントロピーがそこでは減少する。この様にしてエントロピーの差が発生する。すると

$$\begin{aligned} \text{渦度} &= (\text{エントロピーの差}) \times \\ &(\text{水平風速の回転成分}) / \\ &(\text{エントロピーの増大(+)と減少(-)間の距離}) \end{aligned}$$

であることが示されている。この式は理想流体である限り成り立つもので、元の形は流体速度のクレブシュ変換 (Lamb, 1932; Sasaki, 1955) から求められた。クレブシュ変換は観測に直接にはかからない数学的に定義されただけの変数を含むので、それを観測にかかる物理

量だけの表現に直したのが上の式である (Sasaki, 1998)。代表的な数値を使って計算してみると、距離が1 kmのときは強いトルネードの渦度、つまり約1.0 (1/秒)、距離が大きくなると渦度は距離に反比例することが解る。

Fig. 7とFig. 8はスペンサー 1998トルネードを Wurman たちが2-5 kmの至近距離から撮ったドップラー速度と反射強度で、それぞれトルネードの強さが比較的弱いときと強いときである。前者では前述の距離は少なくとも5 km以上であるが、後者の強いトルネードでは1 km位になっている。つまり距離が少なくなると、渦度が大きくなったことを示している。

また、トルネードの発生・発達メカニズムが解明されると、発生や発達を伝えることが可能になるかもしれない。

6. 防災(情報)産業

これまでの防災は、国連や各国がたいへんな努力をはらってきた。特に災害が起こったあとは災害を受けた人々の救済や復旧に。ところが、災害が起こる前の正確な予報を出すための基礎的な研究開発と実際面で正確な情報の伝達の大事さは考えられても、十分に予算面でも人的な面でも取り上げられていない。正確な予報が出来て初めて人々は信用する。充分なリードタイムをもって早く、解り易い正確な情報を個人のレベルで人々に伝達することで効果的な防災が出来る。国連の防災十年(IDNDR)は今年で終わる。その後つまりPOST-IDNDRに課された大事な課題としては：

- (1) 正確な予報と正確な情報
- (2) 効果のある情報伝達

これ以外に、IDNDR期間のみならず、各国で、特に災害の後に強調されてきたことは：

- (3) 効果のある防災システム
- (4) 災害時の有効な対応システム
- (5) 災害を受けた後の効果的な復旧と救済メカニズムである。

(3), (4), (5)の重要さは勿論であるが、特に今回指摘したい事は(1)と(2)である。これらは、十分な予算と人的資源を持ち、科学技術面での進歩があり、その成果を実際面で活用して、やっと理想的防災に一步近くなったと言えるだろう。

今まで、主に自然災害を対象にしたが、人工災害でも同じ様なことがいわれる。炭酸ガスなどの大気成分が増えることで地球の温暖化の可能性が指摘され、炭酸ガスの発生源として自動車からの排気制御が自動車の製造会社で真剣に取り組まれつつあるのもその一例であろう。温暖化による気候の変化のみならず、異常降雨、豪雪、干魃、台風、ハリケーン、トルネードなどストームの異常発生、など異常気象が心配されている。

自然災害や人工的災害の対策にはこれまでに述べた様なことの他、心理的な面、社会的な面、政策上の面など

Fig.7 Doppler On Wheel data on 31 May '98 01:03:36 LCT weaker tornado (also Fig.7, in courtesy of Wurman)

Fig.8 DOW data on 31 May '98 01:01:28 LCT stronger tornado

いろいろあるが、何時でもつきまってくるのは、経済的な面である。レーダーを製造する資金、設置し運用する費用、また運用に関する専門家を訓練する資金などの経済面をいやでも考えなくては行けない。地球上のどこの国でも政府に充分な防災予算が用意されている話は聞かない。この点でも民間の活力に期待したい。

また地球の気候変動は、特に温暖化についても、まだそのメカニズムは十分に解明されているとはいえない。まだまだ解らないことが多い。それで、もっと基礎研究が必要であることが認識され先進国の各国で予算も組まれ研究プロジェクトが走っている。一方で観測データの解析によると、地球は温暖化の傾向にあることがいわれている。それに関連して、世界の幾つかの自動車製造会社が新しいエンジンの研究開発に取り組み、排気ガスが温暖化を圧え、しかも経済的にマケッタブルなエンジンを製作しようとしている。ガソリンモーターと電池駆動のモーターを能率的に組み合わせハイブリッドカーを造ると、温暖化を起こす物質や汚染物質の排気減少するのみならずモーターとしての効率が良くなることが期待されている。これは新しい防災のための産業の一例ではなかろうか。

前の章で、トルネード時に民間のテレビ局数局が競って人々に情報を流しているのを見た。そして人々は最も正確で解りやすい情報を流しているテレビ局を選ぶようになる。そしてテレビ局自体が自分のドップラーレーダーをもって必要な情報を自分で探し出す様になった。しかも科学技術の進歩に合わせて、何台目かに更新している。最近では、携帯電話は普通になり、携帯ラジオでなく携帯テレビを持つ人が出てきた。将来は、それらが超小型化されて、日常、人々が腕時計の一部として携帯するようになって欲しい。人々からも防災救助要請を発信できるように。ということは防災に関連した一つの産業、つまり「防災情報産業」もっと一般的に「防災産業」が出現したと見て良いのではなかろうか。防災産業の基礎は科学技術の進歩と政治と社会のインフラストラクチャーの整備である。防災産業という単語は1990年代のはじめに、国連防災十年が始まった頃、京都大学防災研究所の年次総会で私が招待講演のとき使った。防災の政策的な面、社会的な面や経済的な面の具体的な将来のあるべき傾向を考えたとき、防災産業の更なる発展が望ましい。

謝 辞

下記の方々にたいへんお世話になりました。ここで、あらためてお礼申し上げます：

Arai, M., and Sato, N. (TV 朝日/Telecom Staff Inc./Gazetta USA Inc.) トルネードのドキュメンテーション
Arulmany, C. (The University of Oklahoma) 衛星データ

Droegemeier, K. and Jahn, David (The University of Oklahoma) ストーム予報とシミュレーション

England, G. (TV Channel 9, Oklahoma City) トルネード情報伝達

Fukuhara, K., Ishida, M. and Takagi, Y. (NHK/jan/Cosmo Space America) トルネードの歴史的な映像記録とドキュメンテーションフィルム

Okawara, Y., (former Ambassador to USA) 国連防災十年後 先進国と開発途上国間の防災での国際協力

McCarthy, D., Purpula, D., and Kuckenbarn, T. (National Weather Service, Oklahoma, USA) 洪水予測と警報

Morgan, M., Shreskeld, D., (TV Channel 4, Oklahoma City) トルネードの情報伝達

Nakamoto, S. (Earth Science Technology Organization, Japan) 色々の献身的な手伝い

Sheets, R. (retired) and Pasch, R. (National Hurricane Center, USA) ハリケーンミッチ 1998

Vieux, B. (The University of Oklahoma) 洪水シミュレーション

シ ョ ン

Wurman, J. (The University of Oklahoma) スペンサー 1998 トルネード

Yamamoto, K. (Vice President, Toyota) ハイブリッド自動車

Yamamoto, S. (National Space Development Agency) TRMM などの衛星政策

Yonetani, T. (National Research Center for Disaster Prevention) 国連防災十年後のプログラム

参 考 文 献

栗原宣夫 1979 : 大気力学入門, 岩波書店, 244 pp.

Lamb, H. 1932 : Hydrodynamics 2nd ed., Cambridge Univ. Press, Dover Publ., 738 pp.

Rotunno, R 1993 : Supercell thunderstorm modeling and theory. Tornado: its structure, dynamics, prediction, and hazards (eds. Church, C., Burgess, D., Doswell, C. & Davies-Jones, R.) 57-73 (Geophys. Monogr. 79, Am. Geophys. Union, Washington D. C.).

Sasaki, Y.K. 1955 : A fundamental study of the numerical prediction based on the variational principle. Journ. Meteor. Soc. Japan, 33, 262-275.

Sasaki, Y.K. 1998 : Vortex and entropy: Theory with examples of qualitative and semi-quantative application. Manuscript prepared for publication.

Wurman, J., Straka, J. & Rasmussen, E. 1996 : Fine-scale Doppler radar observations of tornadoes. Science, 272, 1774-8.

追記：この原稿を校正する直前、1999年5月3日、50年に1度という超巨大なトルネードがオクラホマ州 Moore 市の人口が密集している中心部を襲った。Moore 市はオクラホマ大学から約 10 km の所にある。進路上の建物はほとんど全壊した。しかし、その時の予報や警報は正確で適切であったため死者は約 38 人に収まったという。というのは、40 年前だったら約 700~900 人の死者が出ただろうと米気象庁の推定であるので。また、テレビの活躍は大いに賞賛された。建物が無傷で、死者 0、負傷者 0 であることが理想である。そのためには、第 5 章で論じたトルネード発生・発達のメカニズムが十分に解明されると、トルネードを弱めたり消滅させたりする糸口が見出されて、関連技術の発達とともに、それが可能になるかも知れない。

口絵1 通常のストーム全降水量
(National Weather Service 提供)

口絵2 異常なストーム全降水量
(National Weather Service 提供)

口絵3 移動型ドプラレーダーの記録 (弱いトルネード, Wurman 提供)

口絵4 移動型ドプラレーダーの記録 (強いトルネード, Wurman 提供)