

アンサンブル予報に基づく気象災害軽減のための 判断支援システムの試作

大塚成徳*・余田成男*

* 京都大学大学院理学研究科

要 旨

気象災害軽減のための統合データベース・判断支援システムを試作した。本システムはアンサンブル数値天気予報データを気象災害軽減のために高度利用することを焦点としている。アンサンブル予報データの解析のためのスパゲティ図やブリューム図の描画機能を実装し、確率情報を利用できるようにした。サイクロンNargisのアンサンブル予報実験データを用いてシステム上での解析例を作成し、対話的に操作可能な解析画像集を用意してシステムの利用手引書とした。この利用手引を用いて、アンサンブル予報データの解析に関する学習を行うことができる。

キーワード: 判断支援システム, アンサンブル数値天気予報, 確率情報

1. はじめに

アンサンブル数値天気予報は、初期値の誤差や数値モデルの不完全性、大気のカオス的振る舞いによる不確実性を評価するために、複数の初期値やモデルを用いて予報を行う手法である（たとえばKalnay 2003）。今日では多くの予報センターでアンサンブル予報が実施されており、予報の不確実性を定量化するのに必要不可欠な手法となっている。

計算機能力の指数関数的向上により、パソコン等の小型計算機でも数値モデルが実行可能となってきたことで、東南アジア諸国においても、各地域に合わせた領域数値天気予報を独自に行うことが可能となってきた（余田ほか 2008）。東南アジア地域は、熱帯低気圧による洪水・強風・高潮や集中豪雨等の気象災害の危険にさらされており、これらの現象の影響を適切に予測し、対策を評価する必要がある。降水過程の不確実性の大きさを考えると、将来的には、東南アジア地域においても領域モデルによるアンサンブル予報の実施が必要と思われる。

アンサンブル予報では、決定論的な予報に比べて情報量が増えるので、そのままでは一般社会への情報提供には不向きであり、伝える相手に応じて事前によりわかりやすい表現への加工が必要となる。判断支援システムとは、数値天気予報を行う側から、受け

手となる社会的・経済的・日常的判断を行う側へ、適切に加工された情報を渡すためのシステムである。特に、社会的・経済的観点では、起こる確率が低いものの、起これば大きな経済的損失が生じる現象についての判断が求められるため、信頼できる確率論的予報が必要とされている(Palmar 2002)。従って、アンサンブル予報の結果を有効活用するには、予報システムの構築とともに、この判断支援システムの構築についても考えなければならない。

このような社会的要請に応えるべく、文部科学省科学技術振興調整費「東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究」(<http://www-mete.kugi.kyoto-u.ac.jp/project/MEXT/>)の一環として、気象災害軽減のための判断支援システムの試作を行ってきた。アンサンブル予報データを統合データベースに格納し、予報から得られた確率情報を、目的に応じて様々な形に加工するためのツールの開発を行ったので、ここではその概要を紹介する。

2. テストデータ

サイクロンNargisは2008年5月にミャンマーを襲った。死者は13800人以上、被害額は100億ドルと伝えられている。これはミャンマーにおける歴史上最悪の自然災害である(Webster 2008; Fritz et al. 2009)。ま



Fig. 1 Data finder on Gfdnavi. Left panel shows data tree. Right panel shows items in the selected folder.

ずはこの気象災害についての解析事例を示すことで、気象災害の発生が予測されるときに、どのように予報データを解析すれば災害軽減の判断に資するような情報を得られるかを提示する教材として利用できるようにした。

Nargisに関するアンサンブル予報実験(Kuroda et al. 2010; Saito et al. 2010)データを気象庁気象研究所に提供頂き、判断支援システムのテストデータとして用いた。大気モデルは気象庁非静力学モデル(JMA-NHM, Saito et al. 2007)で、2008年4月30日12 UTCから5月3日12 UTCまでの期間、水平格子間隔10 kmで計算した。NHMによるアンサンブル予報の初期値・境界値は、気象庁全球客観解析・全球予報に気象庁週間アンサンブル予報の最初の10メンバから抽出した擾乱成分を加えて、または減じて作成し、21メンバで積分している。また、高潮の計算にはPrinceton Ocean Model (POM, Blumberg and Mellor 1987)を用い、POMへの入力にはNHMの出力(地上10 mの風、海面更正気圧)が用いられた。POMの水平格子間隔は3.5 kmである。詳細についてはKuroda et al. (2010)及びSaito et al. (2010)を参照されたい。

3. 判断支援システムの試作

3.1 統合データベース・可視化サーバ

判断支援システムの試作はGfdnavi (Horinouchi et al. 2010; Nishizawa et al. 2010)を用いて行った。これは、地球流体データをネットワーク上で配布・共有したり、個人でデータを管理したりするためのデータベースサーバで、ウェブブラウザ上で動作する可視化・解析ツールを備えており、無料で配布されている([http://www.gfd-dennou.org/arch/davis/gfdnavi/index.](http://www.gfd-dennou.org/arch/davis/gfdnavi/index.en.htm)

[en.htm](http://www.gfd-dennou.org/arch/davis/gfdnavi/index.en.htm))。Gfdnaviは一次元図や二次元図などの基本的な解析・可視化機能をあらかじめ備えており、数値天気予報データの基本的な解析、平均等の計算、可視化などを行うことが出来る。

データの選択は、Fig. 1のようにツリー表示を用いて行う。左側のパネルでデータセットを選択すると、右側のパネルに利用可能な物理量が表示されるので、その中から解析に用いる物理量を選んで解析・可視化画面に移る。

可視化は、Fig. 2のようにグラフィカルユーザーインターフェースを用いて行う。左側のパネルに描画のために必要なパラメータを決めるための選択肢が用意されている。まずは、作成したい図の種類を左下の選択肢から選び、描画に用いる次元を選んだ後に、左上のスライダーで座標軸の範囲を指定し、描画を実行する。詳細なパラメータは、画面を下方にスクロールすると現れるパネルの中で指定できる。解析結果の図は画面右側に現れる。

3.2 アンサンブル予報データの可視化

Gfdnaviの基本機能に加え、我々はアンサンブル予報データに特有の図を描画する機能を実装した。これにより確率情報を活用することが出来るようになる。以下でその機能について説明する。

(1) アンサンブル情報の一次元図

プリーム図とは、ある物理量の一次元図をすべてのアンサンブルメンバについて重ね描きしたものである。初期時刻には各アンサンブルメンバ間の差は微小であるが、時間とともに各メンバ間の差が開いていく(予報の信頼性が低下していく)ため、重ね描きした線が時間とともに広がっていく。この様

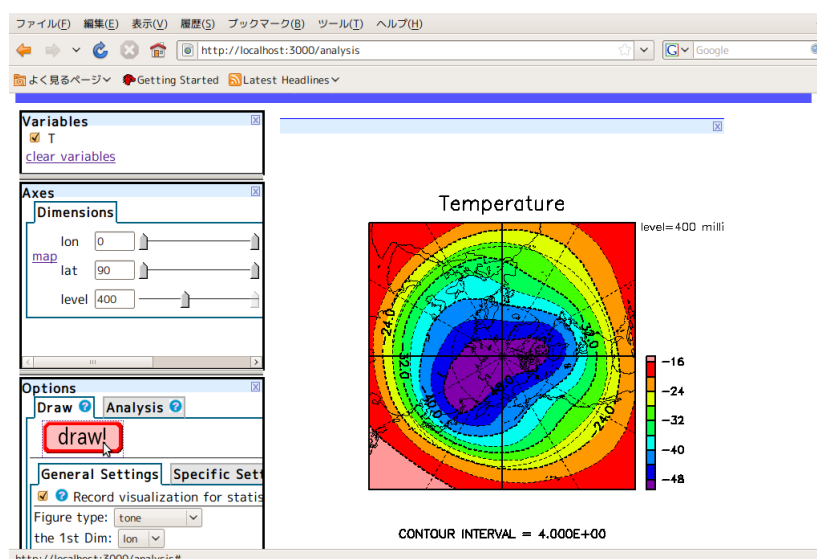


Fig. 2 Visualization window on Gfdnavi. Control panels are located in the left column. Right panel shows the results.

子が煙突の煙のように見えるので、プリューム図と呼ばれ、アンサンブル予報データの一次元時系列データの表示にしばしば用いられる。

箱ひげ図 (box plotもしくはbox and whisker plot) とはTukey (1977)が導入したグラフ表示方法である。5つの統計量を一度に示す手法で、基本形はひげで最大値・最小値、箱で75%値・25%値、線で中央値を示す。いろいろな派生がある。

ここでは試作した判断支援システム上でPOMによる潮位予報値の解析を行った例を示す。Fig. 3は全時間ステップ・全アンサンブルメンバー間での最高潮位の水平分布を示す。イラワジ川 (エーヤワディー川) 河口で潮位が最も高く計算されている。以下ではこの最高潮位を示したイラワジ川河口の東経95.07度、北緯16.1度における潮位の時間変化を見る。

Fig. 4左上はイラワジ川河口での潮位のプリューム図である。最高潮位を示したメンバを赤で示している。メンバ間で最高潮位の値や最高潮位を示す時刻に大きなばらつきがあることが分かる。Fig. 4右上は同じ情報をアンサンブル平均とスプレッド (アンサンブル平均に対する標準偏差) で表したものである。アンサンブル平均の潮位の高い時間帯にスプレッドが大きいことが分かる。Fig. 4左下は同じ情報を箱ひげ図で表したもので、ここでは最大値・最小値・スプレッドを示している。スプレッドだけでは見ることのできない極端値 (外れ値) の分布を見取ることができる。Fig. 4右下は同じ情報を確率密度として表したものである。例えば、5月2日00UTC頃はほとんどのメンバが潮位1 m程度である一方、一部のメンバが4 m近い潮位を示していることが分かる。一方、それ以降の時間は、高い潮位を示すメンバから低い

surface elevation (m)

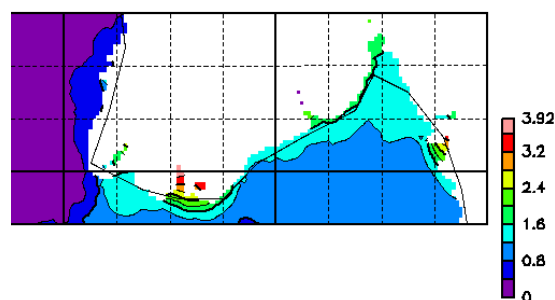


Fig. 3 Maximum sea surface height simulated by POM and computed using all the ensemble members and all the time steps.

潮位を示すメンバまで幅広く存在していることが分かる。このように、同じアンサンブル予報データの一次元図でも、複数の描画方法を用いることで、多くの異なる情報を読み取ることができる。

(2) アンサンブル情報の二次元図

アンサンブル情報の二次元作図機能としては、3種類の作図法を用意している。アンサンブル平均とスプレッドの図、スパゲッティ図、閾値を超える確率の分布図である。このうちスパゲッティ図とは、ある決められた等値線をすべてのメンバについて重ね描きする方法のことである。これにより、線がまとまっている部分は予報の信頼性が高く、線がばらついて皿の上のスパゲッティのように見える部分は信頼性が低いことを示すことができる。例えばKalnay (2003)の表紙絵では、500 mb面上でのジオポ

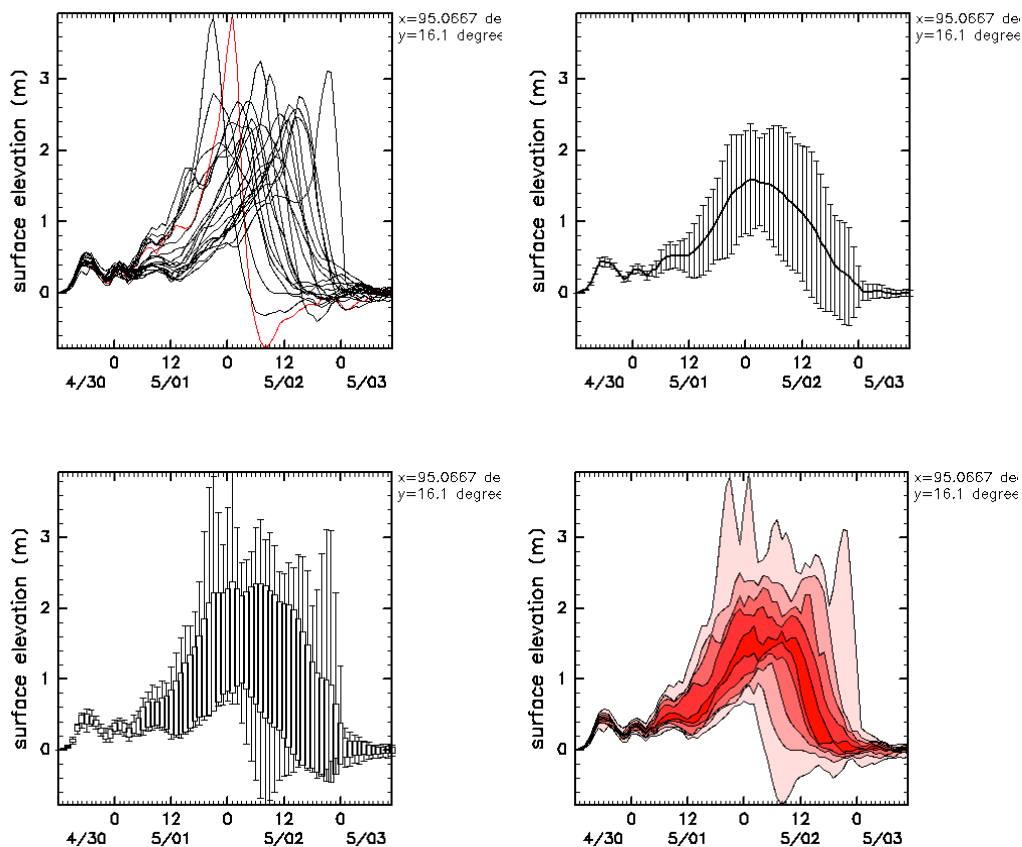


Fig. 4 Sea surface height at the mouth of river Irrawaddy (95.07E, 16.1N). Top left: plume diagram. Top right: mean and spread. Bottom left: box plot. Bottom right: percentile.

テンシナル高度56400 mの等高線を用いたスパゲティ図が示されている。

ここでは、試作した判断支援システム上で、NHMで予報した海面更正気圧のデータに適用した例を示す。Fig. 5は各アンサンブルメンバに対して1000 hPaの等値線を描いたスパゲティ図である。計算開始時刻、24時間後、48時間後を示す。時間とともにサイクロンNargisに対応する気圧の低い領域が拡大するとともに、メンバ間のばらつきが大きくなっていく様子が分かる。特に、サイクロンの東進が早いメンバと遅いメンバに分かれる様子が分かる。その違いが最高潮位やそれを記録する時刻の違いになる。

3.3 判断支援システムの利用手引

試作した判断支援システムをどのように利用してアンサンブル予報データから防災に必要な情報を抽出するかを示す、対話的に操作可能な利用手引を作成した。

利用手引は、システム上での作図法全般に関する系統的な解説から構成される。一般的な作図法のう

ち、一次元図としてはライン・マーカー・棒グラフ、二次元図としては等値線図・塗り分け図・ベクトル矢羽根図、統計図としては散布図・頻度分布図が用意されており、それぞれの描画方法についての記述を行った。特に、緯度・経度・高度・時間・アンサ

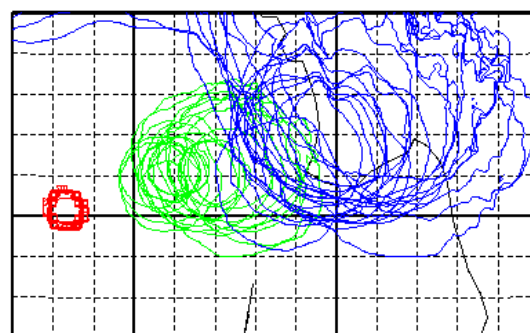


Fig. 5 Spaghetti diagram of sea level pressure of NHM. Each contour shows 1000 hPa in each ensemble member. Red: initial time. Green: $t=24$ h. Blue: $t=48$ h.



GFDNAVI

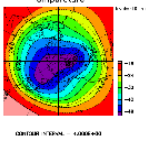
[Top](#) [Finder](#) [Explorer](#) [Analysis](#) [Knowledge](#) [Login](#)

Layout : figures under text. size of figure: height 30 % ▼
input the number of figures in a row 6 change layout

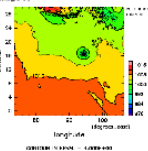
Examples

Category: examples
Examples

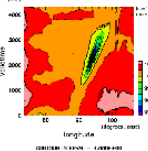
Author:



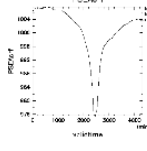
[<Redraw this image>](#)
[<Get the URL>](#)
Fig. 1.



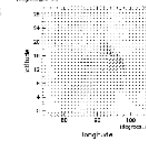
[<Redraw this image>](#)
[<Get the URL>](#)
Fig. 2.



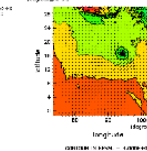
[<Redraw this image>](#)
[<Get the URL>](#)
Fig. 3.



[<Redraw this image>](#)
[<Get the URL>](#)
Fig. 4.



[<Redraw this image>](#)
[<Get the URL>](#)
Fig. 5.



[<Redraw this image>](#)
[<Get the URL>](#)
Fig. 6.

Fig. 6 Examples of the diagrams in the interactive document on the decision support system.

ンブルメンバという5つの座標軸を持つデータが与えられたとき、どの座標軸に沿ってデータを切り出すかにより、どのような情報が得られるかを系統的に例示した。

アンサンブル予報に特有の作図法としては、前節で示したプリューム図等の一次元図、スパゲッティ図等の二次元図について解説している。また、簡単な数学演算を伴う作図としては、アンサンブル平均・スプレッド等の計算方法について解説している。

これらの手引の中で示した作図例は、Gfdnaviの大きな特徴でもある知見情報データベースを利用し、対話的に操作可能なサンプル作図集としても用意した（Fig. 6）。これを用いることで、例えば、作図例を見ながら、自分で描画パラメータを変更して再描画できる。また、作成した図を自分でデータベースに保存し、保存した図に解説を加えることができる。この機能を用いることで、予報データの解析・解釈に必要な知識の蓄積・共有が可能であり、多くの解析事例を蓄積すれば、アンサンブル予報データを取り扱う専門家の解析ツールとして、あるいは非専門家のための学習教材として使えるようになる。

4. まとめ

統合データベース・可視化ツールのGfdnaviを基に気象災害軽減のための判断支援システムを試作し、アンサンブル予報データの可視化・解析を簡単にを行うことができる機能を実装した。サイクロンNargis

のアンサンブル予報実験データをテストデータに用いて、本システムを用いた解析例を示し、対話的に操作可能なサンプル作図集を含む利用手引書を作成した。今後、コンテンツの拡充を行い、さまざまな気象災害の解析事例を集めることで、さまざまなレベルで災害軽減のための判断を行う人にとって有益な情報を提供できるシステムにしたいと考えている。

謝 辞

気象庁気象研究所の斉藤和雄博士・黒田徹博士には、サイクロンNargisの予報実験データを提供いただきにあたり、大変お世話になった。また、アンサンブル予報データの取り扱いに際し、西澤誠也博士の作成したプログラムを元に開発を行った。本研究は科学技術振興調整費（科学技術協力の戦略的推進）「東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究」の下で行われた。

参考文献

- 余田成男・斉藤和雄・竹見哲也・西澤誠也（2008）: 東南アジア地域の気象災害軽減に資する国際共同研究の新展開, 天気, 第55巻, 8号, pp. 705-708.
- Blumberg, A. F. and Mellor, G. L. (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, Three-Dimensional Coastal Ocean Models, American Geophysical Union, pp. 1-16.

- Fritz, H. M., Blount, C. D., Thwin, S., Thu, M. K., and Chan, N. (2009): Cyclone Nargis storm surge in Myanmar, *Nature Geoscience*, Vol. 2, pp. 448-449.
- Horinouchi, T., Nishizawa, S., Watanabe, C., Tomobayashi, A., Otsuka, S., Koshiro, T., and GFD Dennou Club (2010): Gfdnavi, web-based data and knowledge server software for geophysical fluid sciences, part I: web application, *Lecture Notes in Computer Science*, in print.
- Kalnay, E. (2003): *Atmospheric Modeling, Data Assimilation, and Predictability*, Cambridge University Press, 341 pp.
- Kuroda, T., Saito, K., Kunii, M., Kohno, N. (2010): Numerical simulations of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge part I: forecast experiment with NHM and simulation of storm surge, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 88, pp. 521-545.
- Nishizawa, S., Horinouchi, T., Watanabe, C., Isamoto, Y., Tomobayashi, A., Otsuka, S., and GFD Dennou Club (2010): Gfdnavi, web-based data and knowledge server software for geophysical fluid sciences, part II: RESTful web services and object-oriented programming interface, *Lecture Notes in Computer Science*, in print.
- Palmer, T. N (2002): The economic value of ensemble forecasts as a tool for risk assessment: From days to decades, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 128, pp. 747-774.
- Saito, K., Ishida, J., Aranami, K., Hara, T., Segawa, T., Narita, M., Honda, Y. (2007): Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 85B, pp. 271-304.
- Saito, K., Kuroda, T., Kunii, M., Kohno, N. (2010): Numerical simulations of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge part II: ensemble prediction, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 88, pp. 547-570.
- Tukey, J W. (1977): *Exploratory Data Analysis*, Reading, Mass: Addison-Wesley Publishing Co., 688 pp.
- Webster, P. J. (2008): Myanmar's deadly daffodil, *Nature Geoscience*, Vol. 1, pp. 488-490.

Development of Decision Support System for Prevention and Mitigation of Meteorological Disasters Based on Ensemble NWP Data

Shigenori OTSUKA* and Shigeo YODEN*

* Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

A unified database and decision support system for prevention and mitigation of meteorological disasters is developed. The decision support system focuses on how to utilize ensemble numerical weather prediction (NWP) data for prevention and mitigation of meteorological disasters. We implemented specific functions for ensemble NWP data such as spaghetti diagrams and plume diagrams, with which we can utilize probabilistic information. We produced an interactive document on how to use those functions to extract required information from ensemble NWP data for prevention and mitigation of meteorological disasters, using an experimental ensemble NWP on cyclone Nargis. This document can be used for training of experts of disaster prevention and mitigation.

Keywords: decision support system, ensemble numerical weather prediction, probabilistic information.