


 原著論文

階層結合された分解型ファジィモデルによる 台風の進路予測モデル†

前田 博*¹ 小澤 大三*² 生駒 哲一*¹ 垣内 忍*¹

本論文では、階層結合分解型ファジィモデル、周辺風速場情報、層別化を導入した台風の進路予測モデルを提案する。本モデルは、多入力1出力システムを複数のファジィ推論による1入力1出力に分解表現し、それらの出力を階層結合して記述することに特徴がある。入力として、従来用いられていなかった台風の周辺風速場情報を導入している。台風に関するデータは膨大なものであるが、重回帰分析や主成分分析を上手く用いて、本提案モデルの構築過程を示している。最後に、気象庁で用いられている時系列解析に基づくPC法とスーパーコンピュータを用いる台風モデルと比較し、本モデルが台風モデルには及ばないものの、PC法を上回る予測精度を有することを示す。

キーワード：分解型ファジィモデル、台風進路予測、階層結合、PC法、台風モデル

1. はじめに

台風は、大雨、暴風、高波、高潮などの自然災害を引き起こす巨大な大気の渦巻きであり、その規模や進路によってはわが国に大きな被害をもたらす。気象庁では、台風の強さや大きさなどの観測と共に、進路や暴風警戒域に対する予報を行っており、これらの情報は人々の生命と財産を守るうえで非常に重要なものである。そして、台風予報でもっとも重要なのが進路予報であり、台風の将来の位置を知ることができれば、災害に対する防備をより早急に行うことができる。

現在、気象庁で行われている代表的な台風の進路予測法^{1,2)}としては、天球を3次元格子に分割し、それぞれの格子内の大気のダイナミクスを流体力学や熱力学に基づく偏微分方程式で記述し、それを数値的に解いて台風の位置を予測する数値予測手法や、過去の台風の位置系列から統計的に予測する時系列予測手法などが挙げられる。

数値予測手法^{3,4,5)}には、格子の粗さの大きい順に全球モデル、アジアモデル、台風モデルなどがあり、スーパーコンピュータの発達に伴って格子の細密化が進み、その予測精度を向上させてきている。

時系列予測手法には、Aoki⁶⁾によって原型が開発され改良が加えられて現在に至っているPC (Persistence and Climatology) 法がある。これは、季節や領域によって台風を分類し、各分類に対して過去の位置の系列を説明変数、未来の台風の位置または速度を目的変数とする自己回帰モデルを用いる。いわゆる層別自己回帰モデルである。この方法は、ワークステーションやパーソナルコンピュータで実現できるが、予測精度の上では以下のような問題がある。PC法は台風の挙動を過去の運動傾向のみによって記述するため、ほとんど一律の軌跡を示す低緯度領域では数値予測手法も上回る非常に高い予測精度を示すが、台風の周辺因子の影響が強まり軌跡のばらつきがめだつ北緯30°以北の高緯度領域では、予測誤差が非常に大きくなる。気象庁による実際の進路予報は、これら二つの手法を統合し、さらに予報官の経験的知識を加味して提供されている。

他方で、気象に関する種々の観測データが一般に開放されるようになり、気象予報情報の提供がビジネスとして成り立つようになって来た。このようなニーズにこたえるために、ワークステーションやパーソナルコンピュータ上で稼動する台風予測システムが開発されている^{7,8)}。

このような背景を踏まえて、本研究の目的は、ワークステーションやパーソナルコンピュータ上に実装可能で、PC法の精度を上回る台風の進路予測モデルを開発することである。これを実現するために、本論文では、以下のようなアプローチを採用し、台風の進路予測モデルを開発する。

1) PC法の高緯度領域での予測精度を改善するために、

† A New Prediction Model of Typhoon Position Using Hierarchical Combination of Decomposed Fuzzy Model
Hiroshi MAEDA, Daizou OZAWA, Norikazu IKOMA, Shinobu KAKIUCHI

*1 九州工業大学 工学部 電気工学科 情報工学教室
Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

*2 日立ソフトウェアエンジニアリング㈱
Hitachi Software Engineering Co., Ltd.

台風の周辺風速場情報を新たに取り入れ、時系列解析手法と統合してモデルを開発する。

- 2) 周辺風速場情報と親和性のある新たな層別化基準を導入する。
- 3) 台風の複雑な動きを表現するために、非線形挙動の表現力に優れた階層結合された分解型ファジィモデル^{9,10)}を用いる。

進路予測モデルとして、1時点先(12時間先)予測モデル、2時点先(24時間先)予測モデルの2種類を開発する。1989年から1994年にかけての185個の台風に関するデータを用いて、モデル同定、モデル評価を行う。

2. モデル

不規則な進路をとる台風の移動現象を、離散時間モデルにより記述する。

2.1 進路モデル

台風の進路は、システムモデル

$$\begin{bmatrix} \nu_n \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_{n-1} \\ P_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \left(Z_{n-1}, \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} r_n \quad (1)$$

で表せるものとする。ここで、 P_n は時刻 n における台風の中心位置(緯度, 経度)を表し、 ν_n は時刻 n における台風の移動ベクトルで、速度に相当するものである。 Z_n は周辺風速場、 r_n はシステムノイズ(ベクトル)である。 1 , 0 はそれぞれ2次元の単位行列及び零行列を表す。 u は周辺風速場による効果を表す関数で、詳細は後述する。

台風の位置は観測モデル

$$y_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_n \\ P_n \end{bmatrix} + w_n \quad (2)$$

により観測されるものとする。ここで、 y_n は観測される台風の中心位置で、 w_n は観測ノイズである。

2.2 予測モデル

式(1), (2)の状態空間モデルに対し、観測誤差は小さく無視できるとの仮定をおき、

$$y_n = P_n$$

を得る。また移動ベクトルは、

$$\nu_{n-1} = P_n - P_{n-1} = y_n - y_{n-1} \quad (3)$$

と位置の差分より得られる。これらより式(1), (2)は、

$$\nu_n = \nu_{n-1} + u \left(Z_{n-1}, \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \end{bmatrix} \right) + r_n \quad (4)$$

$$P_{n+1} = P_n + \nu_n \quad (5)$$

と書ける。式(4)は移動ベクトルの変化を表し、関数 u により変化量(すなわち加速度に相当する)を算出する。式(5)より時刻 $n+1$ における台風の位置の予測値を算出する。

2.3 階層結合分解型ファジィモデル

式(4)は、観測 P_n , P_{n-1} , P_{n-2} が与えられれば、

$$u \left(Z_{n-1}, \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \end{bmatrix} \right) = (\text{既知の要素}) + r_n \quad (6)$$

となる。よって誤差を最小とるように u のパラメータを調整すれば、 u が得られる。

一般に、多入力1出力の複雑な非線形システムに対する統計的モデル化法として、ニューロモデル、GMDH、ファジィモデルなどがある。基本的には、ニューロモデルやGMDHが出力データへのフィッティングを重視しているのに対し、ファジィモデルはシステム構造記述の平易化や明確化に重きを置いていると考えられる。台風予報の現場では、予測モデルの構造の理解し易さも求められていることから、本研究では、多入力1出力ファジィモデルで u を表現し、さらに、そのファジィモデルとして階層結合分解型ファジィモデル^{9,10)}を用いている。代表的なファジィモデル^{11,12)}が全入力を前件部で同時に論理結合して出力するのに対して、このモデルは、1入力ごとのファジィ推論結果を入力数だけ求め、それらをKolmogorov-Gabor多項式によって階層的に結合し、出力とする。このモデルの考え方は、ファジィルールの前件部の単純化によって生じる非線形性の記述力の低下をGMDHの階層結合法によって補完しようとするものである。分解型の名前の由来は、前件部で論理結合された多入力を1変数ずつに分解して取り扱うことから来ている。これによって、ルールの単純化による構成のし易さ、ルール数の削減、複雑な動きに対するモデルの記述力の向上、などのメリットを与えている。反面、パラメータ調整はやや複雑になる。

これと類似のファジィモデルに拡張ネオファジィニューロンモデル¹³⁾やSIRMsファジィ推論モデル^{14,15)}がある。1入力1出力のファジィ推論部は共通しているが、出力の統合方法が異なっている。

入力では、各入力変数ごとに1入力1出力のファジィ推論が行われる。ファジィ推論は、前件部5分割三

角型ファジィ集合, 後件部 5 分割シングルトンの簡略型ファジィ推論である. 正の相関のある入出力に対するファジィルールは, 正規化された台集合上で, 標準的に

- NB(Negative Big) → NB(PB),
- NS(Negative Small) → NS(PS),
- ZE(Zero) → ZE(ZE),
- PS(Positive Small) → PS(NS),
- PB(Positive Big) → PB(NB),

と平易な形に設定される. ファジィルールの右辺の () は負の相関のある入出力に対する場合である.

調整パラメータは, 前件部が Fig. 1 に示すように, 隣接するメンバーシップ関数の交点座標 $c_i (i=1, \dots, 5)$

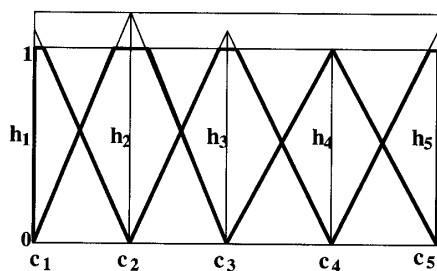


Fig. 1 前件部パラメータ

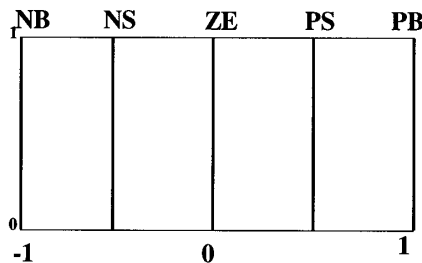


Fig. 2 後件部パラメータ

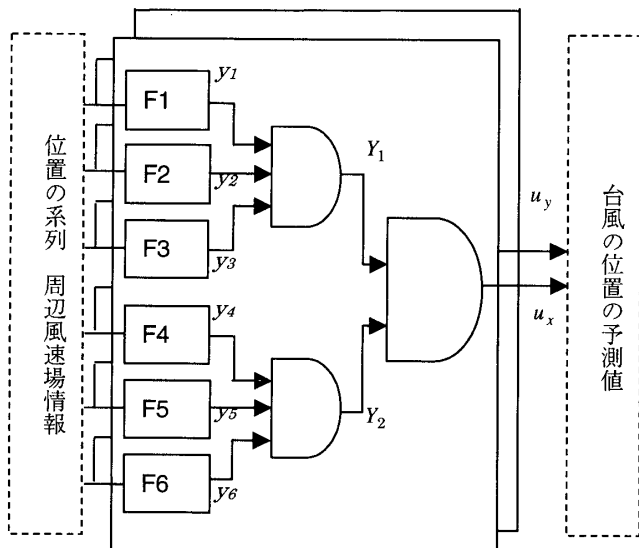


Fig. 3 階層結合分解型ファジィモデル

とファジィ集合を表現するメンバーシップ関数の高さ $h_i (i=1, \dots, 5)$, 後件部が Fig. 2 の各シングルトンの位置である. この時, 台集合は $[-1, 1]$ と基準化され, 前件部では $c_1 = -1, c_5 = 1$, 後件部では $NB = -1, PB = 1$ と固定されている. また, $h_i \geq 1$ であるが, $h_i > 1$ ならば台形型ファジィ集合として働く.

Fig. 3 は, 本予測モデルで用いる 6 入力 1 出力の階層結合分解型ファジィモデルを示している. F1 から F6 がファジィ推論部, その出力 3 変数または 2 変数ずつの結合を基礎ユニットとし, Kolmogolov-Gabor 多項式で結合する (式 (7), (8)).

$$Y_1 = k_1 y_1 + k_2 y_2 + k_3 y_3 + \quad (7)$$

$$k_{12} y_1 y_2 + k_{23} y_2 y_3 + k_{13} y_1 y_3 + k_{123} y_1 y_2 y_3,$$

$$Y_2 = k_4 y_4 + k_5 y_5 + k_6 y_6 +$$

$$k_{45} y_4 y_5 + k_{56} y_5 y_6 + k_{46} y_4 y_6 + k_{456} y_4 y_5 y_6$$

$$u_x = k_7 Y_1 + k_8 Y_2 + k_{78} Y_1 Y_2 \quad (8)$$

ここで, u_x は進行方向の加速度ベクトル u の進行方向に対する垂直成分, u_y は進行方向に対する平行成分, k は結合パラメータである.

ファジィ推論及び多項式の調整パラメータは, モデル出力と観測値の 2 乗平均誤差をエネルギー関数とするバックプロパゲーション学習則によって調整する.

2.4 層別ファジィモデル

予測モデルの説明変数に何らかの質的な要因が含まれる場合は, その要因によって層別化し, 層ごとに予測モデルを構築することが一般に精度の向上につながる. 気象庁の PC 法では, 台風の存在している場所 (3 領域) と季節 (1 年を 2 ないし 3 区分) の組み合わせによって層が定義され, 層別自己回帰モデルが構築されている. 本研究においても同様の層別化アプローチを取っている. 層の定義としては, 予測モデルの説明変数に台風の周辺風速場情報を用いることから, このことに関連した層別化が分かりやすい.

日本に関連する台風は, 大雑把に言えば, 南太平洋上で発生し, 北西方向に単調に進行するもの, 途中から速度を速めつつ北東方向に転向するもの, そしてそれ以外のものに分けられる. そこで, 周辺風速場が台風の概略の進行方向と速度を規定するという考え方の基に, 幾つかの試行錯誤の結果, 以下のような層別化を行った.

まず, 1 時点前 (12 時間前) から現時点までに進んだ台風の方向を真東を 0° として測った角度を α とし, 進んだ距離も算出する. これらより, Fig. 4 のように 4 つの層に分けた. 層 1: 方向に関係なく速度がある値 r 以

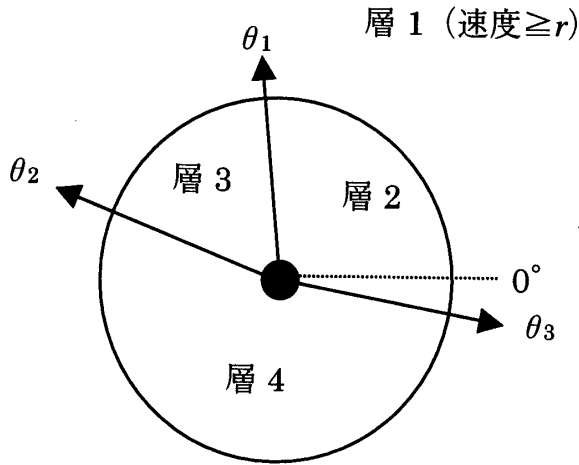


Fig. 4 概略進行方向と速度による層別化

上の速い台風, 層2: $0 \leq \alpha < \theta_1$ または $\theta_3 \leq \alpha \leq 2\pi$, 偏西風の影響を受けながらゆっくりと北東方向に進行する台風, 層3: $\theta_1 \leq \alpha < \theta_2$ 偏西風の影響を受けずゆっくりと北西方向に進行する台風, 層4: $\theta_2 \leq \alpha < \theta_3$ その他の方向の台風, とした. 日本に近づく台風のほとんどは層1か層2に属し, 速度が速いかまたは北東方向に進む. これらの台風に対するPC法の予測精度はあまり良くない.

さて, 概略の進行方向や速度を層とすることで層別化に極端な厳密さを必要としないことから, r, θ の値は, u として重回帰式を使用したときの予測誤差が最小となるもの, すなわち周辺風速場情報からの線形近似によって選定した. 以上のような層の定義によって各層におけるファジィモデル u は, 式(9)で表わされる. また, モデルで用いる説明変数 Z_{n-1} は周辺風速データの主成分(後述する)で, $[P_n, \dots]^T$ は台風の位置の時系列データである. これらの変数を各層によって異なる組み合わせで使用する. その変数選択には, u として重回帰式を用い, ステップワイズ法による重回帰分析結果の説明変数の F 値を基にした.

$$u \left(Z_{n-1}, \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \end{bmatrix} \right) = \begin{cases} u_1 \left(Z_{n-1}, \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \end{bmatrix} \right) \dots \text{Class1} \\ u_2 \left(Z_{n-1}, \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \end{bmatrix} \right) \dots \text{Class2} \\ u_3 \left(Z_{n-1}, \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \end{bmatrix} \right) \dots \text{Class3} \\ u_4 \left(Z_{n-1}, \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \end{bmatrix} \right) \dots \text{Class4} \end{cases} \quad (9)$$

3. データ

3.1 原データ

使用するデータは, 1989年から1994年にかけて発生した185個の台風の軌跡を表す緯度・経度の座標データ, 中心気圧, および周辺風速データである.

周辺風速データは, 格子間隔が緯度帯 ($60^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{S}$), 経度帯 ($80^\circ\text{E} \sim 160^\circ\text{W}$) とともに 2.5° (約275km) 間隔で, 気圧高度面については, 1000, 850, 700, 500, 300, 200, 100hPa の7段階となる3次元の風速ベクトルである. これらは, 観測データを元に気象庁によって生成されたものである. 周辺風速に関する原データは, 台風のある1時点において $24500 (= 35 \text{緯度区分} \times 50 \text{経度区分} \times 7 \text{高度区分} \times 2 \text{成分})$ という膨大な数であり, 予測モデルの説明変数として用いるには何らかの加工が必要となる.

3.2 データの加工

平面領域については, Fig. 5に示す台風の中心から内径 5° (約550km) 外径 10° (1100km) の間のドーナツ領域を8分割し, 各領域の平均風速ベクトルを生成した. これらの領域は台風自身の発生している渦状の気流を排除し周囲の気流の傾向を示すといわれている¹⁶⁾. さらに, 周辺風速ベクトルが台風の進行方向に及ぼす影響を直接表現するために, 各領域の平均風速ベクトルを台風の1時点前から現時点までの進行方向の平行成分 (V_y) と垂直成分 (V_x) に分解した(Fig. 6). 気圧高度方向については, 一般流と呼ばれる台風を流す風が観測される300hPa から850hPaの4高度面を用いた.

これによって, 周辺風速データは64次元 (2成分 \times 8領域 \times 4高度面) に圧縮されたが, これでもモデルの説明変数としては次元が大き過ぎる. 周辺風速デー

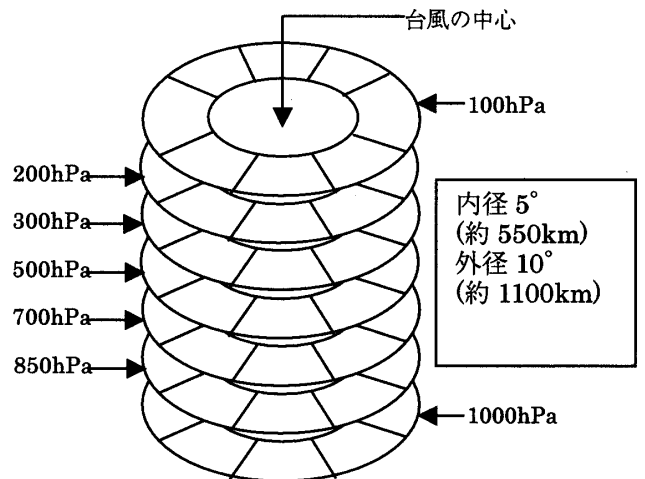


Fig. 5 周辺風速データの加工

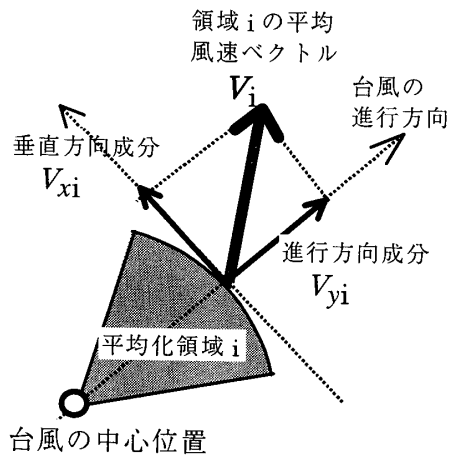


Fig. 6 周辺風速ベクトルの分解

タは、各次元が独立に存在しているのではなく、何らかの関連するまとまりとして風速場を形成し、台風移動に影響していることが知られている¹⁶⁾。そこで、これらのまとまりを主成分分析によって抽出すれば、さらにデータの次元を縮約することができる。

台風を4層に分類した後、64次元の周辺風速データに対し各層ごとに主成分分析を行い、各層とも第10主成分までを説明変数候補とした。この時の累積寄与率は、層で若干のばらつきはあるが、概ね80%前後であった。後に、実際に予測モデルの説明変数として採用された主成分について記述する。

4. 予測モデルの同定と評価

185個の台風を同定用に2/3、評価用に1/3をランダムに選定した。さらに、評価の偏りをできる限り小さくするために、同定用と評価用のランダムな選定を10回繰り返し、その平均値によって予測誤差の最終的な評価とした。

4.1 変数と記号の定義

ここでは、予測モデルの目的変数、説明変数を定義する。 t を現時点、 $t-m$ 、 $t+m$ を m 時点前、 m 時点先とする。1時点は12時間である。添え字 x 、 y は台風の1時点前から現時点までの進行方向に対する垂直成分、平行成分を意味する。

(1) 目的変数

台風の位置を予測するためには、台風中心の緯度と経度を直接予測する他に、速度、加速度などを予測しても良い。ここでは、誤差分布の分散の小ささと言う基準から、加速度ベクトルの x 、 y 方向成分を目的変数として採用した。具体的には、Fig. 7に示すように、

$Ax_{t,t-1}^{t+1,t}$ ：台風の現時点の進行方向に対する $A_{t,t-1}^{t+1,t}$ の垂直成分

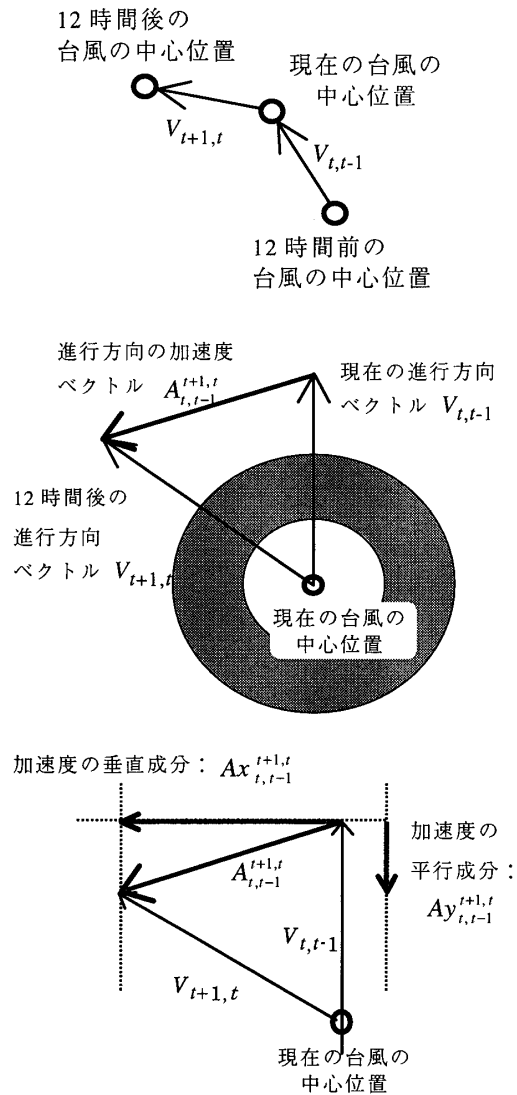


Fig. 7 予測モデルの目的変数

$Ay_{t,t-1}^{t+1,t}$ ：台風の現時点の進行方向に対する $A_{t,t-1}^{t+1,t}$ の平行成分
 である。ここで台風中心の位置ベクトルを P_t とすると、
 $A_{t,t-1}^{t+1,t} = V_{t+1,t} - V_{t,t-1} = (P_{t+1} - P_t) - (P_t - P_{t-1})$
 である。

(2) 説明変数

説明変数候補として用いたものは、

LAT_{t-m} ($m=1,2,3$)：台風中心の緯度

LOG_{t-m} ($m=1,2,3$)：台風中心の経度

$V_{x_{t-m,t-m-1}}$ ($m=0,1,2,3$)：台風の現時点の進行方向に対する台風の速度ベクトルの垂直成分

$V_{y_{t-m,t-m-1}}$ ($m=0,1,2,3$)：台風の現時点の進行方向に対する台風の速度ベクトルの平行成分

$|V_{t-m,t-m-1}|$ ($m=0,1,2,3$)：台風の速度ベクトルの大きさ

$\angle V_{t-m,t-m-1}$ ($m=0,1,2,3$)：台風の速度ベクトルの偏角 (真東を 0° とする)

$Ax_{t-m}^{t+1,t-m}$ ($m=1,2,3$): 台風の現時点の進行方向に対する $A_{t-m}^{t+1,t-m}$ の垂直成分

$Ay_{t-m}^{t+1,t-m}$ ($m=1,2,3$): 台風の現時点の進行方向に対する $A_{t-m}^{t+1,t-m}$ の平行成分

CP_{t-m} ($m=0,1,2,3$): 台風の中心気圧

Z_i ($i=1, \dots, 10$): 主成分スコア

である。

4.2 台風の層別化

層を決定するためには、2.4節で述べたように Fig. 4 の r , θ_1 , θ_2 , θ_3 を決定しなければならない。同定用データについて、台風の進行方向や進行速度の頻度分布を求めた所、層を明確に分離する境界を得るまでには至らなかった。そこで、頻度分布を手掛かりに、 $(r, \theta_1, \theta_2, \theta_3)$ の組を複数設定し、各設定に対して、4.1(2)の説明変数候補を用いて変数増減法による重回帰式を構成し、同定誤差が最小となる組を選択した。ここで、ファジィ予測モデルの同定誤差を層決定の規範とすることも当然考えられるが、同定に多くの時間を要すること、層境界付近の台風はその所属が全体の同定誤差に大きな影響を及ぼさないことなどから、計算効率の良い線形式を用いた。

その結果、

$$r=2.0^\circ, \theta_1=95^\circ, \theta_2=150^\circ, \theta_3=335^\circ$$

となった。層1は12時間の間に2.0°、約220km以上進んだ台風が所属することになる。

使用可能な台風の緯度経度データは、185個の台風について2495時点分ある。ランダムに選定された同定用、評価用データを層ごとに緯度分布にまとめたものを Table 1 に示す。最終的なモデルの評価は Table 1 のようなデータセットを10組設定し、その平均値で行っている。

データを見ると、層1の速度の速い台風は高緯度に多く、他の層では、層2が中緯度から高緯度、層3が低緯度から中緯度、層4が低緯度の台風が分布していることが分かる。

4.3 予測モデルの同定

各層に対して階層結合分解型ファジィモデルを同定する。そのために、まず、非線形モデルの十分な説明力を確保するためには、線形モデルにおいてもある程度の説明力を持たなければならないとの考え方に基づいて、入力変数を選定した。具体的には、4.2節の目的変数と説明変数候補にステップワイズ重回帰分析を適用し、その結果からF値の大きい変数を中心に、重相関係数が0.5以上となる説明変数候補を選定した。この時、階層結合分解型ファジィモデルと重回帰モデルの

説明変数が必ずしも1対1に対応するものではないので、複数の説明変数候補の組を設定する。実際には、6変数の説明変数の組が複数組設定された。最終的には、各組に対してファジィモデルを同定し、その同定誤差が最小となる組を説明変数とした。選定された説明変数を Table 2 (1時点先予測モデル)、Table 3 (2時点先予測モデル) に示す。

同定パラメータ値の1例として、層1の加速度垂直成分 $Ax_{t-1}^{t+1,t}$ の予測モデルの場合を付録1に示す。また、説明変数として用いられている主成分の因子負荷量を絵的に表したものを寄与率も含めて Fig. 8 に示す。

層1は、高緯度帯に多い速度の速い台風の集まりである。因子負荷量を見てみると、 Z_1 , Z_2 は台風の進行方向に押す風、 Z_3 , Z_4 は右方向に回転させる風、 Z_5 は左方向に回転させる風を表しているものと見られる。層1に属する台風が、途中から速度を速めながら北東方向に転向する特徴を持つことをうまくとらえた主成分といえる。

Table 1 各層のデータ分布 (同定用/評価用)

緯度帯	層1	層2	層3	層4
35°>	162/70	73/33	2/1	7/3
30-35°	70/27	38/19	15/8	21/7
25-30°	66/28	61/27	51/22	60/25
20-25°	45/22	67/30	95/39	111/51
15-20°	24/10	63/26	117/45	258/112
<15°	6/4	15/4	53/24	266/112
全体	373/161	317/139	333/139	723/310

Table 2 1時点先予測モデルの説明変数

層	目的変数	説明変数
1	$Ax_{t,t-1}^{t+1,t}$	$Ax_{t-2,t-3}^{t-1,t-2}, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$
	$Ay_{t,t-1}^{t+1,t}$	$ V_{t-1,t-2} , Ax_{t-2,t-3}^{t-1,t-2}, Z_1, Z_2, Z_3, Z_{10}$
2	$Ax_{t,t-1}^{t+1,t}$	$Vx_{t-1,t-2}, Ay_{t-1,t-2}^{t-1,t-2}, Z_2, Z_4, Z_5, Z_7$
	$Ay_{t,t-1}^{t+1,t}$	$ V_{t,t-1} , LAT_{t-2}, (CP_{t-1} - CP_{t-2}), Ay_{t-1,t-2}^{t-1,t-2}, Z_2, Z_5$
3	$Ax_{t,t-1}^{t+1,t}$	$Vx_{t,t-1}, \angle V_{t,t-1}, Ax_{t-1,t-2}^{t-1,t-2}, Z_2, Z_4, Z_6$
	$Ay_{t,t-1}^{t+1,t}$	$ V_{t-1,t-2} , Z_1, Z_3, Z_4, Z_8, Z_{10}$
4	$Ax_{t,t-1}^{t+1,t}$	$Vy_{t-1,t-2}, Z_3, Z_5, Z_8, Z_9, Z_{10}$
	$Ay_{t,t-1}^{t+1,t}$	$ V_{t,t-1} , \angle V_{t,t-1}, Z_2, Z_3, Z_4, Z_6$

Table 3 2時点先予測モデルの説明変数

層	目的変数	説明変数
1	$Ax_{t,t-\frac{1}{2}}^{t+2,t}$	$LAT_t, \angle V_{t,t-1}, \angle V_{t-1,t-2}, Vy_{t-1,t-2}, Z_1, Z_3$
	$Ay_{t,t-\frac{1}{2}}^{t+2,t}$	$ V_{t-1,t-2} , Z_1, Z_2, Z_6, Z_7, Z_9$
2	$Ax_{t,t-\frac{1}{2}}^{t+2,t}$	$Vx_{t-1,t-2}, Vy_{t-1,t-2}, Ay_{t-1,t-2}^{t-1,t-2}, Z_2, Z_4, Z_5$
	$Ay_{t,t-\frac{1}{2}}^{t+2,t}$	$ V_{t,t-1} , V_{t-1,t-2} , (\angle V_{t,t-1} - \angle V_{t-1,t-2}), Ax_{t-1,t-2}^{t-1,t-2}, Z_1, Z_3$
3	$Ax_{t,t-\frac{1}{2}}^{t+2,t}$	$\angle V_{t-1,t-2}, Ax_{t-1,t-2}^{t-1,t-2}, Ay_{t-1,t-2}^{t-1,t-2}, Z_0, Z_1, Z_2$
	$Ay_{t,t-\frac{1}{2}}^{t+2,t}$	$ V_{t,t-1} , V_{t-1,t-2} , Z_1, Z_4, Z_5, Z_8$
4	$Ax_{t,t-\frac{1}{2}}^{t+2,t}$	$\angle V_{t,t-1} - \angle V_{t-1,t-2}, Vy_{t-1,t-2}, Ax_{t-1,t-2}^{t-1,t-2}, Z_2, Z_3, Z_9$
	$Ay_{t,t-\frac{1}{2}}^{t+2,t}$	$Vx_{t,t-1}, V_{t-1,t-2} , Z_1, Z_3, Z_4, Z_9$

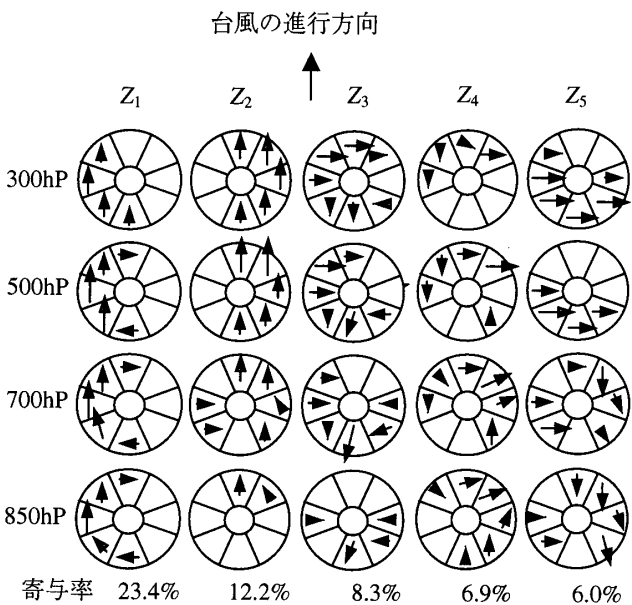


Fig. 8 層1の主成分の因子負荷量

4.4 同定誤差と評価誤差

Table 1に示した同定用データを用いて同定された予測モデルの出力値と実績値との差の絶対値の平均を同定誤差と呼ぶことにする。同様に、評価用データに対するものを評価誤差と呼ぶ。同定用、評価用10組のデータの層別、緯度帯別分布の延べ時点数を付録2に示す。これら点数で平均した同定誤差、評価誤差を Table 4(1時点先予測モデル)、Table 5(2時点先予測モデル)に示す。

北緯30°までの領域では、どの層も良好な予測結果を示しているが、北緯30°以北になると誤差が大きくなり、特に35°以北ではそれが顕著になる。前述したように、

Table 4 1時点先予測モデルの緯度帯別誤差 (km)

緯度帯	<15	15-20	20-25	25-30	30-35	<35
層1	96.9	113.9	109.9	112.8	125.3	136.4
	133.7	128.9	118.9	122.6	149.8	170.2
層2	82.6	78.7	86.0	88.8	103.6	116.0
	78.5	79.1	96.5	98.7	126.3	166.0
層3	61.4	64.4	70.7	69.6	67.0	96.8
	77.2	80.0	87.0	88.4	78.2	113.1
層4	61.9	62.3	76.6	85.2	71.2	76.6
	65.2	67.0	86.3	99.0	75.7	132.8
全体	63.3	67.8	81.6	90.4	105.5	128.3
	69.2	74.9	93.6	103.1	125.0	167.7

上段：同定誤差，下段：評価誤差

Table 5 2時点先予測モデルの緯度帯別誤差 (km)

緯度帯	<15	15-20	20-25	25-30	30-35	<35
層1	277.6	276.9	273.1	282.7	269.3	287.5
	438.4	329.5	301.1	322.0	334.0	363.3
層2	177.3	196.2	192.6	188.2	189.0	242.5
	169.0	219.5	225.4	218.6	276.2	373.3
層3	135.2	133.0	142.3	138.9	149.2	180.9
	163.3	167.4	180.1	177.2	180.2	318.8
層4	128.0	132.3	156.6	180.3	155.9	210.1
	141.0	143.0	185.1	280.5	164.8	292.5
全体	133.8	148.7	177.7	201.9	220.2	271.8
	153.1	169.2	211.1	235.1	280.8	364.8

上段：同定誤差，下段：評価誤差

北緯35°以北は速度の速い台風が多く存在するため、わずかな進行方向のずれも誤差の拡大につながる。従って、そのような台風が多く属している層1の誤差が大きくなっており、同定誤差と評価誤差間の乖離も大きい。層1の分類基準は台風の速度の大きさであるが、さらに木目細かい層別化の必要性を示唆しているものと考えられる。他の層については、同定誤差と評価誤差間の大きな乖離もなく良好な結果を示している。

4.5 他手法との比較

本論文で提案している予測モデルの評価のために他手法との比較を行った。比較の対象は、現在、気象庁で用いられているPC法と、代表的な数値予測手法の1つである台風モデルを用いたものである。台風モデルは気象庁で開発され、1988年から進路予測に用いられてきている台風専用の数値予測モデルである。24時間先予測まででは、アジアモデルや全球モデルよりも

良い予測精度を示す¹⁷⁾。なお、モデルのパラメータ数は、提案モデルが圧倒的に多く、層数4、各層でファジィ推論部66（(後件部3 + 前件部8) × 6変数）と式(7)、(8)の結合パラメータ数17個であり、PC法は層数7、各層で3から5である。

評価用データに対する提案したファジィモデルによる予測誤差と同じデータに対するPC法と台風モデルの予測誤差を比較した。PC法と台風モデルの予測結果は、全ての台風の軌跡データと共に気象庁から直接提供されたものである。1時点先予測結果をTable 6, Fig. 9に、2時点先予測結果をTable 7, Fig. 10に示す。予測方法は、現時点の観測位置から1、2時点先を予測し、1時点経過した後、再び新たな現時点の観測位置から1、2時点先を予測するものである。

(1) 1時点先予測

Table 6の平均予測誤差を見ると、提案したファジィモデルは、PC法を上回り、台風モデルとほぼ同等の精度を示している。この表の台風モデルによる予測結果は1995年に提供されたものであるが、気象庁の最近の数値予測モデルにおいても12時間先予測の平均予測誤差は100km前後である¹⁸⁾。本モデルの予測結果はこれに匹敵している。予測誤差を緯度帯別に見ると、北緯30°以南では、本論文の予測モデルはPC法を大きく上

Table 6 1時点先予測の予測誤差の比較 (km)

緯度帯	ファジィモデル	PC法	台風モデル
<15	69.2	91.2	99.6
15-20	74.9	93.0	91.4
20-25	93.6	109.4	87.7
25-30	103.1	121.7	93.7
30-35	125.0	129.5	99.8
35>	167.7	170.7	122.0
平均	98.5	113.7	97.6

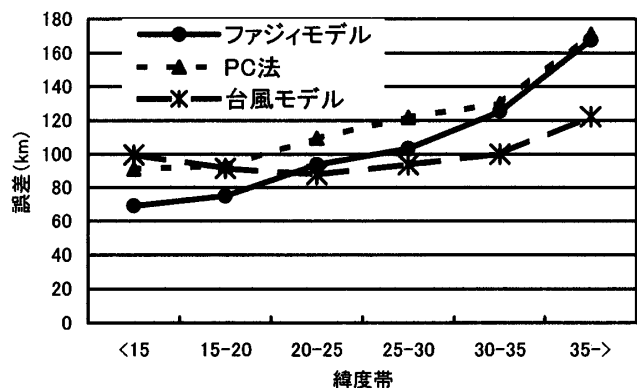


Fig. 9 1時点先予測の予測誤差の比較

Table 7 2時点先予測の予測誤差の比較 (km)

緯度帯	ファジィモデル	PC法	台風モデル
<15	153.1	172.5	173.2
15-20	169.2	187.5	166.5
20-25	211.1	241.3	156.3
25-30	235.1	274.3	169.0
30-35	280.8	308.1	172.8
35>	364.8	420.3	206.3
平均	215.7	244.7	171.5

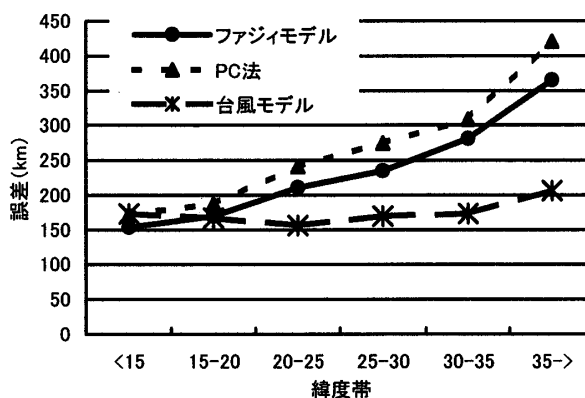


Fig. 10 2時点先予測の予測誤差の比較

回り、台風モデルによる数値予測手法とも遜色ない結果を示している。30°以北になると台風モデルには劣るものの、PC法よりは良い結果を示している。

(2) 2時点先予測

Table 7を見ると、提案したファジィモデルの予測誤差はどの緯度帯においてもPC法よりも大幅に良好な結果を示している。しかし、台風モデルに対しては、比較の土俵が異なるとは言え、大きく劣る結果となった。台風の過去の動きと周辺風速場を用いた統計的予測モデルでは、中長期の台風の進路予測には限界があるこ

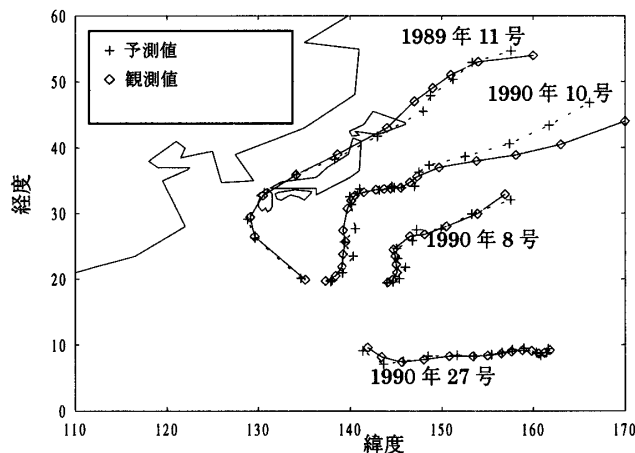


Fig. 11 台風の進路予測軌跡

とを示しているかもしれない。

最後に、本モデルを用いた台風の1時点先予測の1例を Fig. 11に示す。1989年台風11号は、初期には層3に属し、途中から速度を速め北東方向に転向して層1に属するという日本に近づく典型的な台風である。良好な予測を示した例である。1990年台風10号は、初期には層2に、途中から速度を速めて層1に属し、層1での予測が上手く行かなかった例である。1990年台風8号は層2から層1に属し、良い予測を示した例である。1990年台風27号は層4、層3に属し、良い予測を示した例である。

5. おわりに

本論文では、台風の進路予測に関して、ワークステーションやパーソナルコンピュータ上に実装可能で、気象庁で用いられているPC法を上回る予測モデルの開発を目的とした。階層結合分解型ファジィモデル、周辺風速場情報、新たな層別化などの導入によって、この目的は達成できた。しかし、日本周辺に当たる北緯30度以北の領域では、本進路予測モデルの予測精度はPC法を上回っているものの物足りない。層1の速度のみによる分類基準に検討の余地がある。ただし、余り細かい層別化はデータ不足と言う問題が生じる。

全体の予測精度の改善策として、周辺風速場を取得するドーナツ領域が固定されている点の検討が挙げられる。このような領域は台風の大きさ、強さに応じて変動するはずであるから、このような変動機構を予測モデルに組み込むことができれば精度向上につながるのではないかと考えている。しかし、これを実現するにはかなりのデータ解析が必要であり、今後の課題としたい。参考のために、スーパーコンピュータを用いた数値予測手法の代表として、台風モデルによる予測結果と比較して見たが、1時点先予測の北緯30°以南では遜色ない結果を示したが、北緯30°以北、2時点先予測では太刀打ちできなかった。

謝辞

本研究を行うに際し、台風データのご提供や台風進路予測に関する気象知識をご教示頂いた気象庁の山田信吾氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 大西晴夫, 台風の科学, 日本放送出版協会, 1992
- 2) 鈴木和史, 元木敏博編, 台風—解析と予報—, 気象研究ノート, Vol. 197, 日本気象学会, 2000
- 3) 木田秀次, 我国の数値予報システムの現状 (1) 概要, 天気 Vol. 37, No. 9, pp. 591-602, 1990
- 4) 佐藤信夫, 我国の数値予報システムの現状 (2) 全球解

析予報システムの過去・現在・未来, 天気, Vol. 38, No. 1, pp. 11-31, 1991

- 5) 瀬上哲秀, 我国の数値予報システムの現状 (3) 狭領域モデルの概要, 天気, Vol. 38, No. 2, pp. 93-102, 1991
- 6) Takashi Aoki, A Statistical Prediction of the Tropical Cyclone Position Based on Persistence Climatological Factor in the Western North Pacific (the PC method), Geophys., Mag., Vol. 38, No. 4, pp. 17-27, 1979
- 7) R. J. Miller, A. J. Schrader, C. R. Sampson, and T. L. TSUI, Computer Techniques - The Automated Tropical Cyclone Forecasting System (ATCF), WEATHER AND FORECASTING, Vol. 5, No. 4, pp. 653-660, 1990
- 8) C. R. Sampson and A. J. Schrader The Automated Tropical Cyclone Forecasting System (Version 3.2), BULLETEN of the AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, Vol. 81, No. 6, pp. 1231-1240, 2000
- 9) 前田博, 垣内忍, 山本大輔, 桑野和雄, 分解型多次元ファジィモデルとその逆問題解を用いた景観の感性的評価, 日本ファジィ学会誌, Vol. 11, No. 4, pp. 593-604, 1999
- 10) H. Maeda, Y. Kobayashi, N. Ikoma, and D. Yamamoto, Inverse Problem of Hierarchical Combination of Decomposed Fuzzy Model and Its Application to Building Exterior Design, the Proceedings of the Fourth Asian Fuzzy Systems Symposium, 317-322, 2000
- 11) E. H. Mamdani, Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588, 1974
- 12) T. Takagi and M. Sugeno, Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control, IEEE, Trans. on Systems, and Man, and Cybernetics, Vol. SMC-15, No.1, pp. 116-132, 1985
- 13) 山川烈, 内野英治, 久保孝行, 拡張ネオファジィニューロンモデルとその応用, 第10回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 459-462, 1994
- 14) 湯場崎直養, 易建強, 廣田薫, 複数入力ファジィ制御のための単一入力ルール群結合型ファジィ推論モデルの提案, 日本ファジィ学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 511-520, 1997
- 15) 湯場崎直養, 易建強, 廣田薫, 動的重視度を用いたSIRMsファジィ推論モデル, 日本ファジィ学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 522-531, 1998
- 16) Johnny. C. L. Chan, William. M. Gray, Tropical Cyclone Movement and Surrounding Flow Relationships, Monthly Weather Review, Vol. 110, October, 1982
- 17) 上野充, 我国の数値予報システムの現状 (4), 天気, Vol. 38, No. 3, pp. 141-147, 1991
- 18) C. C. Wu, M. A. Bender, Y. Kurihara, Typhoon forecast with the GFDL hurricane model: Forecast skill and comparison of predictions using AVN and NOGAPS global analysis, JOURNAL OF THE

METEOROLOGICAL SOCIETY OF JAPAN, Vol. 78, No. 6, pp. 777-788, 2000

(2002年6月8日 受付)

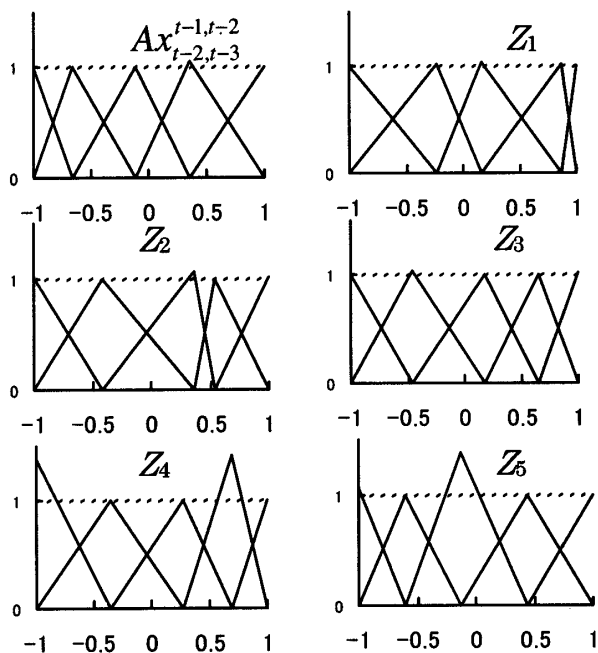
(2003年3月21日 採録)

付録 1 同定されたパラメータ値

層1 目的変数: $Ax_{t,t+1}^{t,t+1}$

説明変数: $Ax_{t-2,t-3}^{t-1,t-2}$, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5

1. 前件部



付図1 同定された前件部のメンバーシップ関数

2. 後件部

付表1 同定された後件部のシングルトン値

	NB	NS	ZE	PS	PB
$Ax_{t-2,t-3}^{t-1,t-2}$	1.00	0.37	-0.12	-0.76	-1.00
Z_1	-1.00	-0.79	0.19	0.06	1.00
Z_2	-1.00	-0.56	-0.35	0.56	1.00
Z_3	-1.00	-0.49	-0.34	0.41	1.00
Z_4	-1.00	-0.46	-0.31	0.14	1.00
Z_5	-1.00	-0.75	0.16	0.89	1.00

3. 結合係数

付表2 同定された結合パラメータ値

$k_1, k_2, k_3,$ $k_{12}, k_{13}, k_{23}, k_{123}$	0.631, 0.437, 0.299 -1.011, 0.102, -0.199, 0.743
$k_4, k_5, k_6,$ $k_{45}, k_{46}, k_{56}, k_{456}$	1.011, 0.474, 0.141, 0.046, 0.339, -0.125, -0.885
k_7, k_8, k_{78}	0.168, 0.669, 0.163

付録 2 同定用, 評価用データの分布

付表3 1時点先予測のためのデータ分布

緯度帯	<15	15-20	20-25	25-30	30-35	35<
層1	55	238	454	657	699	1618
	35	102	216	283	271	702
層2	147	627	665	612	382	728
	43	263	295	268	188	332
層3	534	1165	945	506	154	16
	236	445	391	224	76	4
層4	2657	2582	1110	598	211	71
	1123	1118	510	252	69	29
全体	3393	4612	3174	2373	1446	2433
	1437	1928	1412	1027	604	1067

上段: 同定用, 下段: 評価用

付表4 2時点先予測のためのデータ分布

緯度帯	<15	15-20	20-25	25-30	30-35	35<
層1	55	230	454	618	662	1300
	35	100	216	262	258	570
層2	147	604	626	585	320	548
	43	256	274	255	160	252
層3	527	1136	887	468	154	16
	233	434	363	212	76	4
層4	2551	2467	1001	573	181	45
	1079	1073	469	237	59	15
全体	3280	4437	2968	2244	1317	1909
	1390	1863	1322	966	553	841

上段: 同定用, 下段: 評価用

[問い合わせ先]

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1
九州工業大学工学部 電気工学科情報工学教室
前田 博
TEL: 093-884-3248
FAX: 093-884-3248
E-mail: hmaeda@comp.kyutech.ac.jp

著者紹介



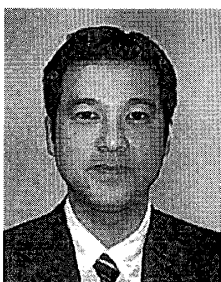
まえだ ひろし
前田 博 [正会員]

九州工業大学工学部電気工学科情報工学教室
1973年九州工業大学工学部制御工学科卒業, 同年4月いすゞ自動車(株)入社, 大型車の振動耐久性の研究に従事. 1977年九州工業大学工学部助手, 1987年同助教を経て, 1995年同教授, 現在に至る. 工学博士(大阪大学). この間, 1993年10月から1994年8月まで, Aachen 工科大学客員研究員. システムモデリング, シナジェティクスを用いたステレオ画像処理などの研究に従事. 日本知能情報ファジィ学会, 計測自動制御学会, 日本オペレーションズ・リサーチ学会の正会員.



おざわ だいぞう
小澤 大三 [正会員]

日立ソフトウェアエンジニアリング(株) 2000年九州工業大学工学部電気工学科卒業, 2002年同大学院工学研究科博士前期課程電気工学専攻修了, 同年4月日立ソフトウェアエンジニアリング(株)入社, 公共社会システム事業部所属, 現在に至る. 電力関連のシステム基盤設計に従事. 日本知能情報ファジィ学会会員



いこま のりかず
生駒 哲一 [正会員]

九州工業大学工学部電気工学科情報工学教室
1989年法政大学工学部電気工学科卒業, 91年同大学院修士課程修了, 95年総合研究大学院大学博士課程修了. 博士(学術). 同年広島市立大学情報科学部助手を経て98年より九州工業大学工学部講師, 現在に至る. この間, 2002年7月から2003年4月までケンブリッジ大学客員研究員. モンテカルロフィルタによる時系列解析, ソフトコンピューティングの研究に従事. 日本知能情報ファジィ学会, 日本統計学会, 日本応用統計学会, 日本神経回路学会, IEEE 各会員.



かきうち しのぶ
垣内 忍 [非会員]

九州工業大学工学部電気工学科情報工学教室
1989年 鹿児島県立鹿屋工業高等学校卒業, 同年4月九州工業大学工学部技官, 現在に至る. 画像処理, 感性情報処理などの研究に従事. 計測自動制御学会正会員.

A New Prediction Model of Typhoon Position Using Hierarchical Combination of Decomposed Fuzzy Model

by

Hiroshi MAEDA, Daizou OZAWA, Norikazu IKOMA, Shinobu KAKIUCHI

Abstract :

This paper proposes a new prediction model of typhoon position introducing a hierarchical combination of decomposed fuzzy model, peripheral wind fields around typhoon, and categorization. This model has the feature that a multiple inputs-single output system is expressed by the hierarchical combination of multiple single input-single output fuzzy reasoning units. This produces the merits of less number of fuzzy rules and simplicity of rule construction. We describe a model construction process, applying principal component analysis and multi-regression analysis skillfully to a bulky data of wind field data and time series data of typhoon track. Finally, the prediction performance of the proposed model is compared with the PC method and Typhoon model, which are developed by Japan Meteorological Agency. It is shown that the proposed model is superior to the PC model but inferior to Typhoon model.

Keywords : Decomposed fuzzy model, Fuzzy model, Typhoon track, Prediction, Hierarchical combination,

Contact Address : **Hiroshi MAEDA**

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

1-1 Sensuicho Tobata Kitakyushu 804-8550, Japan

TEL : 093-884-3248

FAX : 093-884-3248

Email : hmaeda@comp.kyutech.ac.jp