

論文の内容の要旨

論文題目 **An Application of Wavelet Transforms to
Automated Storm-Scale Vortex Detection**
(ウェーブレット変換の渦擾乱の自動検出への応用)

氏 名 劉 千 鳳

1 目的

ウェーブレット変換は、与えられたデータを位置と波数に関して分解し、局所化された波数解析を可能にする。本論文ではウェーブレット解析を気象用ドップラーレーダーによるデータに適用し、竜巻を伴うような強いメソサイクロンを効率良く検出する方法を開発する。ここで提案する方法は、10～200km程度の水平スケールを持つ強い渦擾乱(メソスケール渦擾乱)の自動検出を目的とする新しい数値アルゴリズムであり、連続ウェーブレット変換を応用して観測データからメソスケール擾乱を抽出した後、渦形状を仮定した上で変分法を用いてデータ処理を行なうものである。この結果、メソスケール渦擾乱の検出、位置検出精度の向上、渦擾乱規模の分離、大気の収束・発散の高度依存性など、従来の方法では困難であった解析が可能になる。

2 背景

気象用ドップラーレーダーによって観測されるメソスケール渦擾乱(メソサイクロン)の動径速度場は、半径数百 km のレーダー画像上(Plain Position Indicator (PPI) 画像上)において、近接した正負の極大の対から成る構造を持っている。メソサイクロンは10km規模の水平スケールを持つ大気渦であり、竜巻、ひょう、洪水などの激しい現象を伴って発生し災害をもたらすが、このような気象現象を捉え警報を出すことを主な目的として、アメリカでは1988年からNext Generation Weather Radars (NEXRAD)計画が開始された。この計画により1997年までに、アメリカ全土は約160台のドップラーレーダー(WSR-88D)によってカバーされ、自動検出アルゴリズムによってメソサイクロンを検出し観測情報が提供されている。このドップラーレーダーネットワークによって、メソサイクロンの検出

確率と精度が向上し、そこに発生する竜巻の警報のリードタイム (発生予測警報を出す時間と竜巻が発生する時間の差) が改善され災害が減少したことが報告されている (Polger et al. 1994, Bieringer and Ray 1996)。

現在 WSR-88D レーダー網データを用いる現業のメソサイクロン自動検出アルゴリズムは主に方位角方向のシアパターンを判断基準としている。しかし実際の大气渦は周囲の大規模流れや小規模の乱れなどの影響により、複雑な形状を備えているのが一般である。さらに、しばしば観測機械による信号ノイズも含まれるため、メソサイクロンを精度よく検出するためにはシアパターンに基づく手法では検出が困難な場合も少なくない。また検出された大气渦の位置についても誤差が発生しやすい。

そこで、これまでドップラー動径速度場を用いて2次元速度場の推定するさまざまな手法が提案されてきた。よく知られているのは局所線形性の仮定に基づき局所的最小2乗近似を行なって風速、渦度、発散場などを推定する手法 (Volume Velocity Processing (VVP)) である。しかしこの手法は、大規模な一般風の構造の解析には適しているが、線形風速を仮定するためにメソスケールにおける気象現象への応用は難しい。1989年 Sasaki et al. は Rankine 渦モデル近似に基づく変分法によるメソサイクロンの2次元速度場の推定する方法を提案した。この方法は、動径方向速度から2次元場を推定することを可能にするが、一様風や微小攪乱、またノイズの影響を受けるため、生データへの応用は必ずしも容易ではない。そこで、本論文では連続ウェーブレット変換を応用する新しい手法を提案し、メソスケール渦擾乱のドップラーレーダーデータを用いて一連の試験を行い、実際の観測データへの応用可能性を議論する。

3 数値計算法

本論文において提案する手法は、メソスケール渦擾乱の新しい自動検出アルゴリズムである。この手法は、I. 渦位置の検出、II. 渦の渦度と発散の推定、の2段階から成る。本手法の特徴は、渦の運動学的諸量を決定する前に、データを一旦連続ウェーブレット変換し、データに含まれるノイズの除去、および擾乱のメソスケール成分の抽出を行なうことである。

まず、ドップラーレーダー観測によって得られた動径風速成分 $\hat{u}(x, y)$ の2次元ウェーブレット変換は次式によって行なう。

$$\begin{aligned} W_a[\hat{u}](b_x, b_y) &= \iint \hat{u}(x, y) \psi\left(\frac{x - b_x}{a}, \frac{y - b_y}{a}\right) dx dy \\ &\simeq r_0 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \hat{u}(r_i, \theta_j) \times \\ &\quad \psi\left(\frac{r_i \cos \theta_j - \bar{r} \cos \bar{\theta}}{a}, \frac{r_i \sin \theta_j - \bar{r} \sin \bar{\theta}}{a}\right) \Delta r \Delta \theta \end{aligned}$$

ここで実観測のデータを前提として、 $\Delta r = 0.25$ km、 $\Delta \theta = 0.25^\circ$ とする。 a はウェーブレットのスケールパラメータ、 (b_x, b_y) は位置パラメータであり、 r_j, θ_j は (離散的な) 観測データが与えられる位置の極座標である。

I. 渦位置の検出

メソスケール渦擾乱は Rankine 渦で良く近似されることが知られている。そこで観

観測データに近い Rankine 渦を求め、その中心位置をもってメソスケール渦擾乱の中心とみなすことにする。この方針を精度良く実現するため、ノイズ除去などの効果を考慮し、まず観測データ $\hat{u}(x, y)$ と Rankine 渦の動径方向成分 $u_r(x - \bar{x}, y - \bar{y})$ を各々連続ウェーブレット変換したものを用意し、それらを畳み込んだ関数

$$\begin{aligned} f_W(\bar{x}, \bar{y}) &= \iint_{\Omega} W_a[\hat{u}](x, y) W_a[u_r](x - \bar{x}, y - \bar{y}) dx dy \\ &\simeq r_0 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W_a[\hat{u}](r_i, \theta_j) W_a[u_r](r_i - \bar{r}, \theta_j - \bar{\theta}) \Delta r \Delta \theta \end{aligned}$$

を計算する。ここで (\bar{x}, \bar{y}) は Rankine 渦の中心である。渦擾乱が存在する場所では畳み込み関数は正の極大値をとる。一方、渦擾乱の存在していない場所付近では被積分関数は正負のペアとなり積分によりほぼ打ち消し合うので畳み込み関数の値は相対的に小さくなる。

II. 渦度と発散の推定

I で推定された渦擾乱の位置に基づき、観測された渦擾乱と (一様収束流を伴う) Rankine 渦との 2 乗誤差

$$\begin{aligned} J &= \iint \{W_a[\hat{u}](x, y) - W_a[u_r](x, y)\}^2 dx dy \\ &\simeq r_0 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{W_a[\hat{u}](r_i, \theta_j) - W_a[u_r](r_i, \theta_j)\}^2 \Delta r \Delta \theta \end{aligned}$$

を最小化し、Rankine 渦の発散と収束を決定しそれを渦擾乱の発散・収束の代表量とみなす。

これらの作業においては、物理的および数値的なさまざまなパラメータの選択が要求され、実際の応用に際してはそれらの現実的な値と作業手順の決定が必要である。本研究では、アメリカの National Severe Storms Laboratory (NSSL) から提供された NEXRAD ドップラーレーダーによる観測データを使用して、これら実際の作業におけるパラメータ値や作業手順の決定を行なった。

4 模擬実験とその結果

観測データへの適用に先立ち、一般風などを想定した模擬実験を行い本論文の手法の誤差評価を行なった。人工的に次の 3 種類のデータを作成し、渦位置と渦度、発散の推定を行ない、誤差は、渦検出の場合では推定位置と真の位置との距離として、また渦度・発散推定の場合はそれぞれの量の相対誤差で評価した。

(a) 一様風の誤差評価

メソサイクロンより遥かに大きな空間的スケールの一般風が、メソサイクロン検出に与える影響を評価するため、1 個の Rankine 渦の速度場に 10 m/s から 20 m/s の一様速度場を加えた模擬データを用いる。

(b) ノイズ攪乱の誤差評価

メソサイクロンよりも小さい空間的スケールの乱れやノイズの影響を評価するため、1個の Rankine 渦の速度場に分散 2 m/s と 4 m/s の正規乱数を加えた模擬データを用いる。

(c) 複数個渦の分離実験

現実のメソサイクロンは、大小さまざまな複数の渦が重なる状況で出現している。そのような場合、スケール毎に渦を分離して位置特定を行なうことの可能性を評価するため、空間的スケールの異なる2つの Rankine 渦を重ねた模擬データを用いる。

これらの実験の結果、連続ウェーブレット変換処理を行なう場合は行なわない場合と比較して、位置推定の平均誤差が、(a)では約1/8に、(b)では約1/4に、(c)では1桁以上、それぞれ減少することを見出した。また発散の推定においては、連続ウェーブレット変換によって(a)と(c)では2桁以上の精度の向上が得られた。以上の結果は連続ウェーブレット変換を用いた前処理法が、従来の方法に比べ、精度を大幅に改善することを示している。

5 観測データへの適用

本手法を、1992年5月にアメリカ・オクラホマ州 Norman において得られたメソサイクロンのドップラー速度場へ応用し、手法の有効性を検証した。地上観測によればこの観測の間、F1 から F4 の規模の竜巻が23個が発生したことが報告されている。ここではメソサイクロン検出の本来の目的である竜巻の検出、および、ドップラーレーダによるメソサイクロンの鉛直構造検出を試みた。

(1) 竜巻の検出

本手法により検出されるメソサイクロンとそれを特徴づけるパラメータを利用して、竜巻の発生判定基準を作成し、それによる検出確率を評価する。使用するパラメータは、曇み込み関数値、渦度、発散、の3つである。また竜巻発生判定の成績評価法として、ここでは critical success index (CSI) 評価指数を用いた。これは検出確率と誤警報の両方を考慮にいたった成績評価法である。また手法比較のため、現業で使用されている判定基準である WSR-88D mesocyclone detection algorithm (MDA) についても同時に成績評価を行なった。この結果それぞれの手法におけるパラメータ調整を行なった後の CSI の値は、WSR-88D MDA の場合 0.21、本手法の場合は 0.25 まで上昇した。この結果は、本手法がメソサイクロン検出精度に有利であるのみならず、検出されるパラメータが竜巻発生判定においても効率のよい基準を与えることを示している。

(2) メソサイクロンの鉛直構造

ドップラーレーダーは、仰角を変化させることによって、異なる高度の動径風速を観測することが可能である。本論文では、この観測データを用いてメソサイクロンに伴う渦度と発散の垂直分布の推定を試みた。これは本手法を、メソサイクロン検出の

実際の業務のみならず、メソサイクロンの構造研究に使用することを企図している。この結果、渦度と発散の高度分布を連続ウェーブレット変換処理を用いて推定したものは、ウェーブレット処理を行わない場合に比較して、安定な推定を与えることを見い出した。これは、ウェーブレット処理によってメソサイクロン周囲の流れの付加的影響を除去することができるためと考えられ、特に強いメソサイクロンのように大きな風速を問題とする場合に有利な特徴である。またこのような処理の結果得られた鉛直構造は、竜巻発生前に中層(約5 km)で強い渦度が、竜巻の発生時には下層(約1 ~ 2 km)で強い渦度が現れることを示している。また収束は下層で強く、中層以上では発散になることを示している。これらの結果が単一のドップラーレーダーの観測データから検出可能であることは、本手法の有効性を支持している。