

京都大学	博士 (工学)	氏名	Fauziana Ahmad
論文題目	Investigation of Transition Signals from Single-Cell to Multicell Thunderstorms based on Vertical Vorticity and Polarimetric Structure Analysis using Polarimetric Doppler Radar Observation (偏波ドップラーレーダー観測による渦度・偏波パラメータ解析に基づくシングルセルからマルチセル雷雨への遷移シグナルに関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、複数の単一積乱雲（シングルセル）が併合してマルチセルを形成する過程について、偏波ドップラーレーダー観測による遷移シグナルを解析することを目的としている。一般的にマルチセルはシングルセルと比較して寿命が長く、面積が広いため、よりシビアな気象災害を引き起こしかねない。そのため気象レーダーを用いてシングルセルからマルチセルへの移行をリアルタイムに監視することは防災上極めて重要な課題である。既往研究においてシングルセルに関しての知見は多く蓄積されてきたが、マルチセル形成過程については知見が乏しく、本研究の独自性は高い。特に、鉛直渦度等の気流構造や、偏波レーダーによって観測される <math>Z_{DR}</math> カラム・<math>K_{DP}</math> カラムに着目している点に新規性がある。本論文は全 6 章から構成されており、詳細は以下の通りである。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の背景として豪雨災害の頻発化について述べ、マルチセル型豪雨の既往研究について紹介し、本研究の目的が鉛直渦度や偏波パラメータを用いてシングルセルからマルチセルへ遷移するメカニズムを解明しつつ、防災利用を考慮した遷移シグナルを捉えることにあることに言及している。加えて、渦度方程式を用いたスーパーセルのメカニズムに関する既往研究や、<math>Z_{DR}</math> カラムと <math>K_{DP}</math> カラムに関する既往研究のレビューを行い、本研究に必要となるこれまでの学術的な知見を整理している。</p> <p>第 2 章では、本研究で用いた偏波ドップラーレーダーである国土交通省 XRAIN の概要とそのデータを用いた解析手法について記述している。単一のレーダーを用いて疑似渦度を算出する手法と、複数機のレーダーを用いた変分法によるデュアルドップラー解析 (DDA) 手法についてそれぞれ解説し、疑似渦度とデュアルドップラー解析から求めた渦度 (DDA 渦度) の特徴や違いについて整理している。また、本研究で解析対象とした 3 つの豪雨イベントについて、大気安定度やホドグラフ等の気象学的な基礎解析を行っている。</p> <p>第 3 章では、疑似渦度解析を用いてシングルセルからマルチセルへの遷移に関する予備的な解析を行っている。疑似渦度の鉛直構造に着目し、シングルセルが併合してマルチセルへと移行していく際には、シングルセルの上部と下部で渦度の構造が不連続であることを示している。その解釈として、シングルセル発生時に形成された鉛直渦管が上空へと発達しながら他のセルと併合して渦度が強化する一方で、地表面近くの下部では別の新しい鉛直渦管が生成し、それらの 2 つの異なる鉛直渦管が同時に存在するためであると述べ、このような 2 層構造が見られることが遷移シグナルの 1 つであることを示している。加えて、解析の副産物として、セルの寿命と疑似渦度の関係を解析している。両者にそれほど大きな相関関係はなかったものの、<math>0.015s^{-1}</math> 以上の鉛直渦度があればセルの寿命が 1 時間以</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Fauziana Ahmad
<p>上であったことや、<math>0.0025\text{ s}^{-1}</math> 以下であればセルの寿命が極端に短かったことを述べている。また、マルチセルへと移行したセルの中には、通常のシングルセルではあまり見られない <math>0.03\text{ s}^{-1}</math> 以上の大きな鉛直渦度が確認されたことも述べており、その原因を解明することがマルチセルへの移行を解明する上で重要であることを提案し、次章への動機と位置づけている。</p> <p>第 4 章では、疑似渦度に加えてデュアルドップラー解析を併用して気流場を力学的に解析し、シングルセルからマルチセルへの移行時のメカニズムを詳細に解析している。先行する積乱雲とその近くで発生した新しい積乱雲における鉛直渦度の時間変化を解析し、それら 2 つのセルが併合するタイミングで新しい積乱雲の鉛直渦度が大きくなるという特徴的な遷移シグナルがあることを発見した。その傾向は、2 つのセルの距離が近いほど顕著に大きくなり、特に水平距離で 10 km 以内のときにその特徴が見られることを示している。また、鉛直方向に見たとき高度 4km 付近において最大の渦度を示すことが多く、それは主に tilting (立ち上がり) 効果によって渦度が大きくなっていることを明らかにした。一方で、下層においては渦管の伸縮、上昇気流、収束が渦度を強化しているとともに、そこでの収束は先行する積乱雲からの下降気流が寄与していることを明らかにした。</p> <p>また、防災の観点から、DDA 渦度を用いた危険予測には 13 分のリードタイムがあったことに対して、疑似渦度を用いた危険予測には 17 分のリードタイムがあり、疑似渦度がより早期にピーク降雨を探知できることを示しており、リアルタイム監視の観点からも大きな成果である。</p> <p>第 5 章では、偏波パラメータに着目し、融解層より上空における上昇流の存在を意味する <math>Z_{DR}</math> カラムおよび <math>K_{DP}</math> カラムの特徴を解析している。シングルセルからマルチセルへの移行時の特徴として、併合時に <math>K_{DP}</math> カラムが確認され始め、併合後も <math>K_{DP}</math> カラムの鉛直方向の長さ (深さ) が延びたことを示している。一方で、降雨減衰のため <math>Z_{DR}</math> カラムは明確には探知されなかった。いずれにしても、併合後も <math>K_{DP}</math> カラムの深さが大きくなったことは、併合後も上昇流が維持されていることを意味しており、また、上昇流と鉛直渦管の位置関係が妥当なものであることも確認した。</p> <p>第 6 章は結論であり、各章で得られた成果を総合的に解釈し、鉛直渦度強度の大きさ、鉛直渦度の鉛直構造の非連続性、<math>K_{DP}</math> カラムの深さの増大がいずれもマルチセルへの遷移シグナルであるとまとめている。また、疑似渦度と DDA 渦度の相違の観点からもシングルセルからマルチセルへの遷移シグナルをまとめており、基本的に渦度強度のオーダーが 1 桁弱ほど疑似渦度の方が大きいことや、疑似渦度の方がより早期に探知できることを述べている。さらに、併合前、併合時、併合後の 3 段階に分けて渦管形成プロセスを概念的に提示し、本研究がメカニズムの解明に貢献したこととして、1) 先行する積乱雲からの下降流が新しく生成する積乱雲の下層において鉛直シアを強化することとそれによって水平渦度が大きくなること、2) その下降流は環境場の暖湿流と収束して上昇流を作り、水平渦管が持ち上げられて渦度の大きな鉛直渦管となること、3) 先行する積乱雲の渦管と新しい積乱雲の渦管が大気中層で併合し、スケールが大きく、強度が強い渦管へと成長すること、を記述している。最後に、本研究成果の国際的な発展について今後の展望を述べている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文では、複数の単一積乱雲（シングルセル）が併合してマルチセルを形成する現象に対して、偏波ドップラーレーダー観測による遷移シグナルを発見している。メソ対流系に関する既往研究において、単一積乱雲や線状型に関する研究が数多く存在する中で、マルチセル型については知見が乏しく本研究の独自性は高い。シングルセルからマルチセルへの移行を気象レーダーによりリアルタイムに監視することは防災上の意義が大きく、得られた主な成果は次の通りである。

1. マルチセル型豪雨に対して、鉛直渦度構造の時間変化を解析することでシングルセルからマルチセルへの遷移シグナルをいくつか発見している。具体的には、セル同士が併合するとき鉛直渦度強度が増大すること、また、その強さは疑似渦度で  $0.03 \text{ s}^{-1}$  以上であり、周囲の併合しないシングルセルよりも大きな値であること、さらに2つのセルの距離が近いほど顕著に大きくなり、水平距離 10 km 以内のときにその傾向が大きいことを示している。加えて渦度分布の鉛直方向の非連続性が新しい渦管の生成を意味しており、マルチセルの特徴であることにも言及している。これらの遷移シグナルはマルチセル型豪雨に対する危険予測の現業手法としての利用可能性が高く、防災利用の観点から極めて大きな貢献である。
2. 上述の遷移シグナルが気象学的にどのようなプロセスで作られたのかを明らかにするために、デュアルドップラー解析により気流の3次元構造を解析することでマルチセル形成におけるメカニズムの解明に大きく寄与している。具体的には、先行する積乱雲がもたらす下降気流が新しい積乱雲の近くで下層収束を生み出し、上昇流が強化され渦管の伸縮効果および立ち上がり効果によって鉛直渦度が大きくなるというプロセスを明らかにしている。さらに、高度 2~5km まで持ち上げられた渦管は、先行する他のセルの渦管と併合し、渦管のサイズと強度が大きくなるプロセスがあることを示している。この併合プロセスはマルチセルの形成メカニズムの解明に寄与する新しい考え方である。
3. 渦度解析に加えて、偏波レーダーであることの特徴を利用して、融解層より上空における上昇流の存在を意味する  $Z_{DR}$  カラムおよび  $K_{DP}$  カラムを解析し、カラムの鉛直方向の長さ（深さ）と鉛直渦度強度の間に高い相関関係があることを示しており、さらにマルチセルへの移行時に  $K_{DP}$  カラムが深くなるという遷移シグナルがあることも示している。
4. 上記の全ての解析において、3次元構造を強く意識した解析を行っており、早期かつ精度良く遷移シグナルを捉えるためには、偏波ドップラーレーダーの3次元観測が現業監視においても極めて重要であることを明らかにしており、現業観測のあり方を問うている。

本論文は、上記の様に社会基盤工学と水文気象学を融合した論文であり、マルチセル型豪雨の発生メカニズムを解明する上で、学術上、寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年8月1日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。