

| | | | |
|--|--|----|---------------------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | Ginaldi Ari Nugroho |
| 論文題目 | Comprehensive Study of Cumulus Cloud Initiation Observed by High-Resolution BLR, Doppler Lidar, and Time Lapse Camera using Wavelet Approach (境界層レーダー・ドップラーライダー・タイムラプスカメラの高解像度観測を用いたウェーブレット解析による積雲の生成過程に関する多面的研究) | | |
| (論文内容の要旨) | | | |
| <p>本論文は、ゲリラ豪雨のタマゴが発生する前、すなわち積雲の発生過程を解明することを目的として、降水レーダーでは探知することができない早期段階の現象解明に資するものである。特徴的な点として、複数の高解像度センサー（境界層レーダー、ドップラーライダー、タイムラプスカメラ、雲レーダー、ひまわり 8 号）のデータを利用していることがあげられる。特に、最初の 3 つの測器に関して後述する新たな利用手法を提案しており、独創性が高い。また、防災利用の観点から、少しでも早期に豪雨発生の兆候を捉えることができないかという観点からも研究を実施している。</p> <p>ゲリラ豪雨災害に対して、生成メカニズムの解明への寄与、および、新たな観測機器を用いた危険な兆候の早期探知という防災への寄与、という両側面から、主に観測情報の解析をベースに研究が行われている。全 8 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ゲリラ豪雨とその災害の特徴を紹介し、早期探知のさらなる早期化が重要であることに触れながら、本研究の目的と論文の全体構成について記述している。</p> <p>第 2 章では、ゲリラ豪雨に関する既往研究についてレビューしており、様々な観測機器ごとにその測器の有効性について整理している。さらに、本研究の独自性が熱の上昇流や鉛直渦度と雲生成の関連に着目すること、および、様々な測器を統合して解析を行うこと、にあることを記述している。</p> <p>第 3 章では、本研究の対象となるスケールの小ささ（局所さ）に触れ、そのために必要となる観測機器である境界層レーダー、ドップラーライダー、雲レーダー、タイムラプスカメラ、ラジオゾンデ、ひまわり 8 号について説明している。特に本研究で用いた境界層レーダーはレンジイメージング技術による高分解能化、および、アダプティブクラッタ抑圧技術による高品質化という高性能なレーダーであることを述べている。また、解析対象となる神戸市における観測の方針について記述し、得られた観測データセットについて説明している。</p> <p>第 4 章では、本研究における多くの解析で用いているウェーブレット手法について、理論的な解説をしている。また、本研究におけるマザーウェーブレット形状の選択の考え方について述べている。</p> <p>第 5 章では、都市の熱の上昇流に関して、高分解能な境界層レーダー（8 秒毎に 30m 分解能）を用いて、夏季の神戸市を対象に、ウェーブレット解析を実施している。まず、下降気流から上昇気流へ転じる現象についてコヒーレント解析し、0～0.25 分、2～4 分、4～8 分の卓越した周期があることを明らかにした。また、大気安定な条件であれば上昇気流が</p> | | | |

| | | | |
|--|---------|----|---------------------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | Ginaldi Ari Nugroho |
| <p>類似した構造をしており、逆に大気不安定な条件であれば上昇気流の構造にばらつきが大きいことを明らかにした。これらは、都市上空の個々の熱的上昇流に関する新たな知見である。</p> <p>第 6 章では、熱的上昇流と積雲活動に関してウェーブレットを用いたコヒーレント解析を行っている。前段として、タイムラプスカメラ観測によるカメラ画像から雲エリアのピクセル数をカウントし、雲量に相当するパラメータの推定を行った。また、2 台のタイムラプスカメラを用いて、ステレオ撮影による雲底高度の推定を行った。このように、タイムラプスカメラを用いて雲に関する利用価値の高い測量技術を開発している。その上で、熱的上昇流と雲量パラメータとのコヒーレントな構造について解析し、雲が発生したケースの 57%において、雲が生成されるよりも大気境界層の上部における熱的上昇流が 2 分間（位相にして 1/4 周期）ほど先行して発生していることを示している。すなわち、熱的上昇流を捉えることがいち早く雲生成を捉える可能性を持つことを示唆している。</p> <p>さらに、境界層レーダーで観測した水平風からその鉛直シアを算出し、ドップラーライダーから推定した鉛直渦度との関係を調べ、相関係数 0.5 程度の相関があることを示している。このことから、都市域における局所的なスケールの鉛直渦に対しても、水平風の鉛直シアが寄与していることを明らかにした。</p> <p>第 7 章では、ドップラーライダーと雲レーダーを用いた鉛直渦度解析に取り組んでいる。既往研究として、降水レーダーや雲レーダーを用いた気流渦解析がなされてきたが、本研究は雲が発生するよりも前の気流渦を対象としており、極めて新規性が高い。解析の結果、雲レーダーでファーストエコー（最初の雲検出）を検出する前に、その雲が発生する高度よりも地上に近い高度において、鉛直方向に延びる渦管構造の存在を捉えることに成功しており、それが積乱雲発生の新たな早期指標となる可能性があるため、学術的な価値が高い。加えて、雲が生成されるよりも 5~9 分前に鉛直渦管が形成されており、ドップラーライダーによる渦管探知という防災上の利用価値のポテンシャルを有することを示した。一方、ドップラーライダーから算出した鉛直渦度強度は、雲レーダーから算出した鉛直渦度強度の 10~50%程度と小さいものであることから、地表面近くで渦が形成されてから雲生成に至るまでの間に何らかの強化機構があることを示唆しており、この点は今後の課題としている。</p> <p>第 8 章は結論であり、各章で得られた成果について要約するとともに今後のさらなる発展への課題について整理している。ゲリラ豪雨発生のきっかけとなる現象について、2 つの成長ステージに分けてその成長過程を概念的にまとめている。1 つ目は熱的上昇流発生から積雲が生成されるまでのステージであり、熱的上昇流と積雲生成には強い関係性があり、少なくとも 2 分間以上継続する熱的上昇流の必要性について述べている。2 つ目は積雲の成長ステージであり、積雲の直下に存在する鉛直渦管の必要性について述べている。最後に、本研究成果の国際展開についての展望と期待を述べている。</p> | | | |

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、積乱雲の発生メカニズムの解明を目的として、複数の観測機器（境界層レーダー、ドップラーライダー、タイムラプスカメラ、雲レーダー、ラジオゾンデ、ひまわり8号）を用いて、水文気象学的、物理学的な側面から包括的な分析を行ったものであり、熱的上昇流と渦管の形成・発達に関する新たな知見を得ている。加えて、ウェーブレット手法を用いた周期特性に関する効果的な分析手法を構築している。得られた主な成果は次の通りである。

1. 世界で2機しかない30mという高い観測空間分解能を持つ境界層レーダーの水文気象学的な利用価値を開拓した。具体的には、ゲリラ豪雨発生のきっかけとなりうる熱的上昇流を対象として、下降気流の後に強い上昇気流が発生する現象パターンを解析し、環境場の違いによる熱的上昇流の卓越周期や不均一性に関する特徴を見出すことに成功した。このような、都市域の個々の熱的上昇流に着目した研究は少なく、高分解能の境界層レーダーによって初めて成し得たものである。
2. 既往研究では雨雲の発生以降について渦管形成等のメカニズムの解明が進められてきたが、本論文では雨雲が発生する前の段階におけるプロセス解明に寄与している。大気境界層内でも空間スケールの小さな渦管が形成され、その渦度は環境風の鉛直シアの大きさと相関があることを示している。また、大気境界層上端で雲が生成されることに約2分程度先行して、大気境界層の上部で熱的上昇流が存在することを示している。これらの一連のプロセスを積乱雲発生のきっかけのメカニズムとして取りまとめており、学術的な理解が大きく前進したと考えられる。
3. 雲レーダーによるファーストエコーの5~9分前に、ドップラーライダーにより鉛直方向につながる渦管の存在を確認している。このことは降水レーダーや雲レーダーで渦度を探知するよりもさらに早期に豪雨のきっかけとなる現象を探知できるポテンシャルを有することを示しており、防災の観点からも重要な成果である。
4. 上述までの多くの解析に関してウェーブレット手法を構築しており、単変数の周期特性を解析するだけでなく、2変数間のコヒーレントな周期特性を定量的に解析することも可能としている。積乱雲発生のきっかけとなる現象の解明を周期特性の観点から明らかにしようとする試みは、水文気象学と物理学の両観点から生まれた極めて効果的な分析手法である。

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、積乱雲発生のきっかけとなる現象を解明する上で、学術上、実際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。