

# ドップラーライダーを用いて検出した都市域に発生する ダストデビルの構造をもつ鉛直渦と 気流の組織構造の観測的研究

## 学位論文内容の要旨

地表面から大気への運動量・熱・物質の輸送は、主に乱流によって行われている。近年、平原や森林などで行われた観測やLarge Eddy Simulation (LES) などの数値モデルを用いた研究から、乱流輸送の大部分は様々なスケールの組織的気流構造が担っていることが明らかとなってきた。しかし、大気境界層過程の改良に重要なこれらの組織的構造の発生条件、時空間変動や生成、発達、維持過程に関する研究は、従来の手法では観測的制限が多く、体系的な把握がなされていないのが現状である。特に都市域は、他の陸面(平原、海上、森林)に比べて観測が困難でかつ地表面形状が複雑であるため、組織的気流構造に関する体系的な研究がほとんどなされていない。そこで、都市における大気境界層中に発生する様々な組織的気流構造とその成因を明らかにするため、札幌の北海道大学構内に設置した三次元走査型のコヒーレントドップラーライダー(3D-CDL)を用いて、風の3次元分布観測を行った。

まず、2005年4月から2007年7月にかけて行った3D-CDLの長期間観測とLESを用いた計算結果との比較から、「網目状」と「ストリーク」などの組織的気流構造が、都市上空においても普遍的に存在することを明らかにした。また、網目状構造は日中の弱風時(高さ59.5 mでの風速が約 $2 \text{ m s}^{-1}$ 以下)に、ストリーク構造は比較的強風時(約 $5 \text{ m s}^{-1}$ 以上)に観測され、気流構造は主に風速に依存することが明らかとなった。

次に、これまで砂漠や平坦地などで観測されてきた、ダストデビルと呼ばれる小スケールの鉛直渦に酷似した構造を有する鉛直渦(Dust devil-like vortices; DDV)を、都市域で初めて多数(合計50個)検出することに成功した。DDVの特性は、直径30~120 m、最大鉛直渦度 $0.26 \text{ s}^{-1}$ 、反時計回りと時計回りの回転方向を持つDDVの個数比は2対1であった。DDVは、境界層高度が比較的高い日中の弱風時に観測され、網目状構造の収束線、また収束域の交差点で発生していた。都市域で検出されたDDVの特性、環境場及び発生時周辺の気流構造は、これまで砂漠や平坦地で観測されたダストデビル、及び、高顕熱・地表面一様条件下でLESによって再現されたダストデビルの構造と合致した。

網目状構造に伴うダストデビルには、時計回りと反時計回りの両方が同時に存在しうるが、DDVの全てが反時計回りという観測事例があった。この事例では、DDVの回転方向と環境場の風の回転方向とが一致していたことから、DDVの回転方向はメソスケールの環境場の影響を受けていることが示唆された。さらに、DDVの3次元構造とその時間発展の観測にも成功し、渦の

鉛直方向への発達と渦度の強化が一致していることが確認された。この事実から、DDV の鉛直渦度は、網目状構造の収束域に存在する上昇流によるストレッチング (引き伸ばし) によって強められていることが示唆された。

札幌では、上記の網目状構造とは異なった原因、すなわち、局地前線 (海風前線、フェーンなど) によってもDDV が発生しうることが明らかとなった。局地前線起源のDDV は、観測期間中に90個検出され、網目状構造に伴った事例と比較して直径および鉛直渦度ともに大きく、直径は40~220 m , 最大鉛直渦度は $0.43 \text{ s}^{-1}$ であった。DDVの回転方向は90%以上反時計回りであり、局地風と一般風の間で作られる環境場の回転方向と一致した。

海風前線に伴ったDDVの発生条件、及び海風前線の水平・鉛直構造を明らかにするため、DDVが発生した海風前線と発生しなかった海風前線に着目して詳細な解析を行った。その結果、以下の3つの条件が海風先端部でのDDVの発生に重要であることが分かった。

- (1) 前線の先端での水平シアが大きいこと ( $7.4 \text{ ms}^{-1}$ 以上)
- (2) 境界層高度が高いこと (900 m 以上)
- (3) 海風前線の前方下層の鉛直シアが、海風先端部の温度傾度により作られる水平渦度にバランスするような向きを持つこと

(1) の条件は、海風先端部での水平シア不安定による初期渦の発生において重要であり、(2)、(3) の条件は海風前線先端部における上昇流を強め、ストレッチングによる渦の強化を起す上で重要であると考えられる。これらの条件が満たされた場合、前線の先端部はほぼ直立して厚くなり、上昇流も強くなり、数100 m スケールの「Kelvin-Helmholtz波」あるいは「階段」状の水平構造が現れ、DDVが検出された。

以上のように、3D-CDLを用いた観測によって、DDV、網目状構造やストリークが、都市域においても普遍的に発生することを世界で初めて実証した。観測上の制約が大きい都市域で、大気中の運動量、熱、物質の輸送を担うとされる組織的な気流構造の長期間観測、時空間観測に成功し、その発生条件や発達過程を議論できた意義は大きい。今後、本研究の知見とタワーフラックス観測やLESと組み合わせることで、都市域の組織的な気流構造の力学的メカニズムや、組織的な気流構造による乱流輸送量の定量的評価の進展が期待される。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 吉 康 志  
副 査 教 授 渡 辺 力  
副 査 助 教 川 島 正 行  
副 査 准教授 竹 見 哲 也 (京都大学防災研究所)

学 位 論 文 題 名

## ドップラーライダーを用いて検出した都市域に発生する ダストデビルの構造をもつ鉛直渦と 気流の組織構造の観測的研究

地表面から大気への運動量・熱・物質の輸送は、主に乱流によって行われている。近年、平原や森林などで行われた観測やLarge Eddy Simulation (LES) などの数値モデルを用いた研究から、乱流輸送の大部分は様々なスケールの組織的気流構造が担っていることが明らかとなってきた。しかし、大気境界層過程の改良に重要なこれらの組織的構造の発生条件、時空間変動や生成、発達、維持過程に関する研究は、従来の手法では観測的制限が多く、体系的な把握がなされていないのが現状である。特に都市域は、他の陸面 (平原、海上、森林) に比べて観測が困難かつ地表面形状が複雑であるため、組織的気流構造に関する体系的な研究がほとんどなされていない。そこで、都市における大気境界層中に発生する様々な組織的気流構造とその成因を明らかにするため、札幌の北海道大学構内に設置した三次元走査型のコヒーレントドップラーライダー (3D-CDL) を用いて、風の3次元分布観測を行った。

まず、2005年4月から2007年7月にかけて行った3D-CDLの長期間観測とLESを用いた計算結果との比較から、「網目状」と「ストリーク」などの組織的気流構造が、都市上空においても普遍的に存在することを明らかにした。また、網目状構造は日中の弱風時 (高さ59.5 m での風速が約 $2 \text{ m s}^{-1}$  以下) に、ストリーク構造は比較的強風時 (約 $5 \text{ m s}^{-1}$  以上) に観測され、気流構造は主に風速に依存することが明らかとなった。

次に、これまで砂漠や平坦地などで観測されてきた、ダストデビルと呼ばれる小スケールの鉛直渦に酷似した構造を有する鉛直渦 (Dust devil-like vortices; DDV) を、都市域で初めて多数 (合計50個) 検出することに成功した。DDVの特性は、直径30~120 m, 最大鉛直渦度 $0.26 \text{ s}^{-1}$ , 反時計回りと時計回りの回転方向を持つDDV の個数比は2対1であった。DDVは、境界層高度が比較的高い日中の弱風時に観測され、網目状構造の収束線、また収束域の交差点で発生していた。都市域で検

出されたDDVの特性、環境場及び発生時周辺の気流構造は、これまで砂漠や平坦地で観測されたダストデビル、及び、高顕熱・地表面一様条件下でLESによって再現されたダストデビルの構造と合致した。さらに、DDVの3次元構造とその時間発展の観測にも成功し、渦の鉛直方向への発達と渦度の強化が一致していることが確認された。この事実から、DDVの鉛直渦度は網目状構造の収束域に存在する上昇流によるストレッチング(引き伸ばし)によって強められていることが示唆された。

札幌では、上記の網目状構造とは異なった原因、すなわち、局地前線(海風前線、フェーンなど)によってもDDVが発生しうることが明らかとなった。網目状構造に伴った事例と比較して直径および鉛直渦度ともに大きく、直径は40~220 m、最大鉛直渦度は $0.43 \text{ s}^{-1}$ であった。DDVの回転方向は90%以上反時計回りであり、局地風と一般風の間で作られる環境場の回転方向と一致した。

海風前線に伴ったDDVの発生条件、及び海風前線の水平・鉛直構造を明らかにするため、DDVが発生した海風前線と発生しなかった海風前線に着目して詳細な解析を行った。その結果、以下の3つの条件が海風先端部でのDDVの発生に重要であることが分かった。

- (1) 前線の先端での水平シアが大きいこと
- (2) 境界層高度が高いこと
- (3) 海風前線の前方下層の鉛直シアが、海風先端部の温度傾度により作られる水平渦度にバランスするような向きを持つこと

(1)の条件は、海風先端部での水平シア不安定による初期渦の発生において重要であり、(2)と(3)の条件は海風前線先端部における上昇流を強め、ストレッチングによる渦の強化を起す上で重要であると考えられる。これらの条件が満たされた場合、前線の先端部はほぼ直立して厚くなり、上昇流も強くなりDDVが検出された。

以上のように、3D-CDLを用いた観測によって、DDV、網目状構造やストリークが、都市域においても普遍的に発生することを世界で初めて実証した。観測上の制約が大きい都市域で、大気中の運動量、熱、物質の輸送を担うとされる組織的な気流構造の長期間観測、時空間観測に成功し、その発生条件や発達過程を議論できた意義は大きい。今後、本研究の知見とタワーフラックス観測やLESと組み合わせることで、都市域の組織的気流構造の力学的メカニズムや、組織的気流構造による乱流輸送量の定量的評価の進展が期待される。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士(環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。