

# 論文審査の結果の要旨

氏名 伊藤 純至

塵旋風は、晴天時の日中に砂漠などの裸地で地表面が強い日射により熱せられて対流混合層が形成される時に大気中に発生する強い鉛直渦で、ダスト粒子を地表面から巻き上げると渦が可視化される。このような塵旋風に関して、観測的研究が行われてきたが、近年になってようやく Large Eddy Simulation (LES) を用いて数値的研究も行われるようになり、一般風のないほぼ定常な対流混合層の中で塵旋風に対応すると思われる鉛直渦が再現されることがわかってきた。しかし、日変化や一般風が存在するような現実的な対流混合層での再現はなされておらず、塵旋風の構造や回転源、対流混合層の熱輸送に果たす役割などの基本的性質は数値実験によってほとんど調べられていない。

本論文は全 8 章から成る。第 1 章は導入部で、塵旋風の説明および上で述べたこの現象の研究に関する現状と問題点が具体的に述べられている。続く第 2 章では、この現象を再現する数値モデルとその設定について述べられている。

第 3 章では、50m 間隔の格子での LES を用いて、一般風がある環境下で日変化する対流混合層のシミュレーションを行い、塵旋風が発生しやすい環境を調べている。その結果、塵旋風が生じやすいのは地表面熱フラックスが大きくて一般風が弱い場合であり、そのような場合の午後の早い時間帯に多く発生する傾向にあるという、観測による研究と整合的な傾向が示された。また、対流速度が大きくなるほど塵旋風の鉛直渦度も大きくなるという関係があることも示された。さらに、格子間隔を 20m と細かくして旋風の内部構造までの再現を試み、対流混合層と塵旋風を同時に扱う LES シミュレーションとしてはじめて、渦のコアが上昇流となる 1 セル型の構造の塵旋風だけでなく、渦のコアで下降流となる 2 セル型の構造の再現にも成功した。この章の最後には、塵旋風が対流混合層の鉛直熱輸送において果たす役割の大きさを見積もっている。個々の塵旋風が輸送する熱量は大きいものの、塵旋風の占める面積割合が小さいため、平均的には 1% 程度の寄与しかしないことが明らかになった。

第 4 章では、5m 間隔の非常に細かな格子を用いて塵旋風を再現し、物質面を追跡するという手法により、塵旋風に伴う大きな鉛直渦度の起源の詳しい調査を行っている。このような強い渦の形成過程を調べるには、従来、渦度収支をもとに議論が行われることが多かったが、ストレッチやティルティング

など、渦の変形の過程を経ても保存する物質面に沿った循環を追うことにより根源的な起源を探っている。その結果、この強い渦の元となる循環は、対流混合層の組織的な構造に内在するものであることを明らかにした。

第5章では、塵旋風の鉛直渦度の大きさのスケーリングの議論を行っている。渦度のスケールは現象の渦の速度スケールをその長さスケールで割ることによって与えられるが、様々なパラメータに対する依存性を調べることによってそれぞれのスケールが何で決まっているのかの特定を試みた。速度スケールは対流速度で与えられ、長さスケールは地表面付近の対流セルに伴う上昇流域の幅で与えられ、しかし、シミュレーションの格子が粗い場合には格子間隔が長さスケールを規定してしまうことを示した。

第6章では、塵旋風によるダスト粒子の巻き上げ効果の大きさの見積もりを行っている。塵旋風は、一般風が弱い場合であっても地表面付近に局所的に強い風を起こすことによって粒径の小さなダスト粒子を巻き上げ、大気中に長時間滞留させる可能性がある。日変化する対流混合層のもとで塵旋風が生じる中をダストが舞い上げられる状況のシミュレーションを実行し、一旦舞い上げられたダストの多くが翌日にも大気中に留まってダストが累積していく可能性のあることを示した。

第7章では、さらに現実的な塵旋風をシミュレートするためには、どのような要素を考慮すべきかの考察を行い、第8章ではこれら全体の成果の意義がまとめられている。

以上のように、本研究は、日変化する対流混合層において塵旋風が形成される過程を初めてLESを用いた数値シミュレーションによって再現したという点だけをとっても非常に先駆的な研究である。のみならず、その計算結果を用いて、塵旋風の発生しやすい環境や渦の生成機構を明らかにし、鉛直熱輸送やダスト粒子舞い上がりに対する効果を見積もるなど、塵旋風に関して未解決であった数々の課題を明らかにしており、境界層の現象の研究に対して大きな貢献をする成果であると言える。

なお、本論文の第3章は新野宏氏(指導教員)、中西幹郎氏および田中亮氏との、第4~6章は新野宏氏および中西幹郎氏との共同研究に基づくが、論文提出者が主体となって数値実験および結果の解析を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

従って、博士(理学)の学位を授与できると認める。