

論文内容の要旨

A Numerical Study on Dust Devils (塵旋風に関する数値的研究)

伊藤 純至

晴天時の日中、砂漠などの裸地で、地表面が強い日射により熱せられ、対流混合層が形成される場合、Dust Devil(以下、DD)とよばれる鉛直軸周りの小スケールの渦が頻繁に発生することが知られている。渦のもつ強い接線風速と上昇気流によって、ダスト粒子を地表面から巻き上げると渦自身が可視化される(図1)。



図1 可視化された DD

DD に関しては観測的研究が行なわれると共に、近年は Large Eddy Simulation(LES)により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 DD に対応すると思われる鉛直渦が再現されることもわかってきた。しかし、1)日変化や一般風が存在する現実的な対流混合層での DD の発生や、DDが対流混合層の熱輸送に果たす役割、2)DD の生成機構、3)DD の渦度を定める物理量、4)一般風の弱い対流混合層において DD などの効果により舞い上げられるダスト粒子の量、5)DD のような強い渦の中での LES のサブグリッド乱流モデルの妥当性などは現在も解明されていない。本研究ではこれらの点について、乱流状態の大気境界層を最も信頼できる形で再現する LES を用いた数値的研究によって明らかに

することを試みた。

LES の設定としては、日中の高さ h が 1.5km 程度に達する対流混合層を再現可能な数 km × 数 km × 3km 程度の領域で、半径数 m ~ 100m の DD を解像できる水平、鉛直ともに一様な間隔の格子を用いた。領域サイズと格子間隔は各章の目的に応じて変えている。サブグリッド乱流モデルには Smagorinsky モデルを用いた。側面の境界条件は 2 重周期とし、地表面での熱フラックス Q は日中に最大値をとる sin 型の関数で与えた。大気は計算開始時(日の出; 7:00)には水平一様な安定成層をしており、日没(18:00)まで計算を行った。

初めに一般風があり日変化する対流混合層で、DD が発生しやすい環境を 50m 間隔格子の LES で調べた。結論として、地表面熱フラックスが大きく、一般風が弱い場合、かつ午後早い時間帯に最も DD が発生しやすいことがわかった。これは観測によるいくつかの先行研究とも整合的である。このとき DD の鉛直渦度は対流速度 w_c の単調増加関数となっていた。

次に 20m 間隔格子の LES で DD の構造をみた。渦のコアで上昇流をもつ one-cell 型と下降流をもつ two-cell 型の 2 種類の構造がみられ、対流混合層と DD を同時に再現する LES としては初めて、観測で見られる two-cell 型の渦の再現に成功した(図 2)。

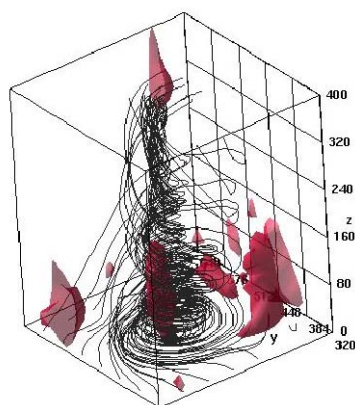


図 2 two-cell 型の渦の周りの流線。赤色の等値面は下降流が 0.2m/s 以上の領域を表す。

個々の DD は対流混合層における平均的な鉛直熱輸送の約 10 倍の熱を運ぶが、発生頻度が低いため、DD 全体が対流混合層の鉛直熱輸送に寄与する割合は 1% に過ぎないことがわかった。

一方、DD の生成機構、特に DD のもつ鉛直渦度の源に関しては、いくつかの先行研究で提案されているが、現在も解決しておらず、定量的に調べた例はない。

本研究では 5m 間隔の LES で DD を再現し(図 3)、そのデータを解析することで、DD の強い鉛直渦度の生成機構を定量的に考察した。ここでは一般によく使われる渦度は保存量でないことに鑑み、保存量である「循環」を解析に利用した。DD 内の高度 7.5m に配置した水平な物質面上の多数の点を逆トラジェクトリーによって追跡し(図 4)、物質面の変形とこれに伴う循環の変化を調べた。

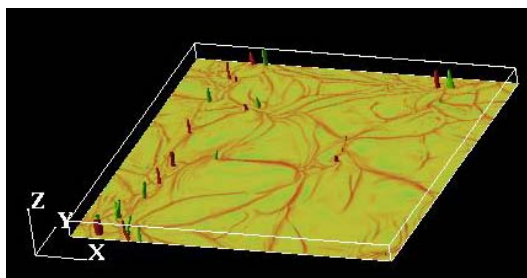


図 3 再現された DD(赤色の等値面は鉛直渦度 $>0.25s^{-1}$ 、緑色は鉛直渦度 $<-0.25s^{-1}$)と地表面近くの鉛直速度(カラーシェード)。水平 1.8km × 1.8km、鉛直 0.2m の領域を表示。

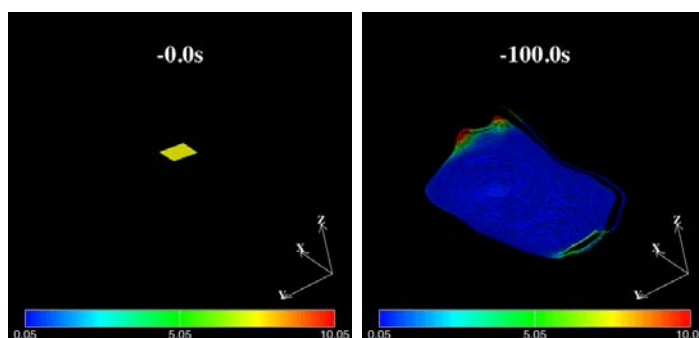


図4 追跡した物質面の変形の様子。左が初期時刻(DD のコアを横切るように水平に配置)、右が 100 秒間追跡を行ったときの物質面。シェードは高度を表す。

追跡の結果、DD からある程度離れたところでは、循環はほぼ保存しながら DD のコアに向かって流れ込んでいることがわかった。流入に伴い、物質面の面積は小さくなることから、DD の渦度は stretching によって大きくなっていることがわかる。水平渦度の立ち上げは直接 DD の生成と関連していなかった。DD 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り、 $h \times w_*$ でスケールされることもわかった。この循環の源は対流の作る水平渦度を対流の鉛直流で立ち上げたものと考えられる。

対流混合層については前述の w_* 、 h 、 Q に基づくスケーリングが可能であることが知られている。そこで DD の鉛直渦度についても同様のスケーリングを試みた。

鉛直渦度のスケールは一般に(速度スケール U) / (長さスケール L) で表される。速度スケールとしては w_* が有力だが、一方、長さのスケールは不明である。そこで鉛直渦度の様々なパラメータ(h 、 Q 、 w_* 、格子間隔 Δ) に対する依存性を調べることで、 U と L を与えるパラメータを突き止めることを試みた。

図5は $\Delta = 50\text{m}$ で、 Q を変化させたときの、鉛直渦度の高さ 75m での水平面の最大値の ζ_{max} と w_* の関係である。 ζ_{max} は w_* の単調増加関数であり、さらに点線で示すように Q に関わらず、 $\zeta_{max} \propto w_*/L$ という関係があるようにみえる。

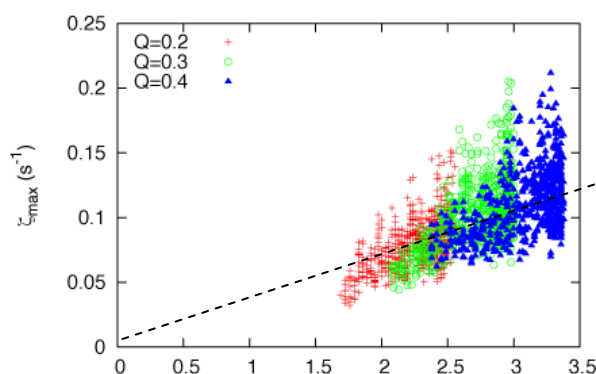


図5 Q を変化させたときの ζ_{max} と w_* の関係

これから、速度スケールは $U \sim w_*$ であり、長さスケール L は時間に依存しない量と考えられる。解析の結果、 L は格子間隔 Δ が粗い場合は Δ で与えられ、細かい場合は、地表面近くの対流セルに伴う上昇流域の幅で与えられることがわかった。観測される DD の鉛直渦度の長さスケールは後者が担っていると考えられる。ただし上昇流域の幅がどのように決まるのか理解を深めることは今後の課題である。

ここまで述べたように、対流混合層では一般風が無い場合でも、対流や DD が強い水平風速を地表面付近で生成する。このため DD によって粒径数 μm の小さいダスト粒子は舞い上がり、

滞留する可能性がある。しかしその実態はこれまでほとんど調べられていない。そこで、本研究で行った日変化する対流混合層の LES(20m 間隔格子)に、ダスト粒子の地表面フラックス(本研究では resuspension の定式化を利用)と粒径毎の重力落下などを導入し、一般風がない環境下でのダスト粒子の分布の日変化をみた(図6)。その結果、日没時に地表面付近では $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ のオーダーのダスト濃度が生ずることがわかった。これは、タクラマカン砂漠での観測と整合的である。さらに夜間は終端速度で落下すると仮定して、2 日目のダスト粒子の舞い上がりも計算すると、2 日目の日没時は 1 日目の日没時の 1.8 倍のダスト濃度になっていて、滞留によって高いダスト濃度が出現しうることがわかった。

強い渦が存在するときの LES のサブグリッドモデルや境界条件はまだまだ多くの検討課題を抱えている。特に水平一様に熱フラックスを与える場合と比較して、熱フラックスの地表面付近の水平風速への依存性を比較的容易に導入する「擬バルク法」を利用すると、渦が強化され、渦コアでの圧力降下や最大風速は、観測でみられる強い渦での値に近づいた。強い渦の出現においては、水平風速に依存する地表面熱フラックスによるフィードバックが重要な役割を果たしていることが示唆される。またサブグリッドモデルにおいて渦の中心で回転の効果によって渦粘性が抑制される効果を便宜的に導入すると、やはり強い渦の出現がみられた。

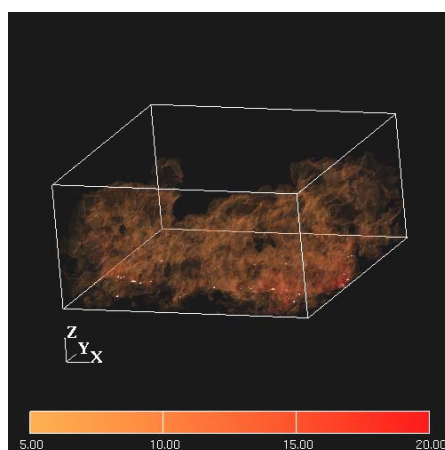


図6 ダスト粒子の空間分布(15:00)。領域は $5.1\text{km} \times 5.1\text{km} \times 2.6\text{km}$ 。シェードはダスト濃度で単位は $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

以上のように、DD に関して未解決であったいくつかの課題について、LES を用いた数値的研究により明らかにした。まず、現実的な対流混合層において DD の発生しやすい環境やその詳細な構造、DD が対流混合層の熱輸送に果たす役割を明らかにした。また、DD の生成機構を初めて定量的に明らかにした。また DD の鉛直渦度のスケールリングを提案した。更に、一般風の弱い対流混合層における微小粒径のダスト粒子の舞い上がりを調べ、観測と整合的な結果を得た。ただし DD の LES による再現において、数々の課題があることも明らかになった。高解像度化を図る必要があるだけでなく、バルク法が有効でない時間および空間スケールでの地表面熱フラックスの与え方や、サブグリッドモデルの検討も今後に残された重要な課題である。