

Dust Devil の発生環境と構造に関する数値的研究

田中 亮・*新野 宏 (東大・海洋研)・中西幹郎(防衛大学校)

1. はじめに

よく晴れた日の午後、砂漠などの乾燥地帯においては、Dust Devil と呼ばれる小スケールの渦がしばしば発生する。これまでの観測結果(Sinclair, 1966,1969,1973 ; Hess et al., 1988 ; Hess and Spillane, 1990)によると、Dust Devil(以下 DD)は(1)地表面付近に超断熱層があり、(2)一般風が弱いときに発生しやすく、(3)中でも午後の早い時間を中心に数多く発生することが知られている。DD の発生には浮力と鉛直渦度が必要であり、浮力の成因が超断熱層にあることは明らかであるが、鉛直渦度の成因についてはいくつかの説(Williams, 1948 ; Maxworthy, 1973;Kanak et al., 2000)があり、完全には理解されていない。また、一般風の影響や、なぜ午後の早い時間帯に発生しやすいかについても、理解されていない。本研究では、Large Eddy Simulation (LES)による数値実験により、なぜ一般風の弱い時、午後の早い時間帯に DD が多く発生するのかを理解することを試みる。

2. 数値モデルの概要

用いた数値モデルはブシネスク系の LES(Nakanishi, 2000)の乾燥大気版であるが、地表面の運動量 flux はモデル大気最下層の各格子点でバルク法で計算するように修正した。但し、日変化する地表面の顕熱 flux は強制的に与えた。subgrid のパラメタリゼーションには Smagorinsky-Lilly モデルを用いた。境界条件は、上端は free-slip、側面では周期条件とした。計算は7時から18時までの11時間行った。DD の発生環境を調べる実験では格子間隔 50m、90×90×60 格子の領域に対して 0.5, 5, 15m/s の3通りの一般風と最大値 280, 60W/m² の2通りの顕熱 flux の計6種類の実験を行った。現実的な DD の再現実験では格子間隔 20m、200×200×130 格子の領域で一般風 0.5m/s、顕熱 flux の最大値 280W/m² の条件で行った。

3. 発生環境に関する実験結果と考察

一般風と顕熱 flux を変えた実験の結果、対流混合層の対流構造は両者の兼ね合いに応じてセル状とロール状の2種類の形態をとることが確認され、このうち強い鉛直渦度が発生するのはセル状の対流が卓越する、一般風が弱く、顕熱 flux が強い場合の10-17時であることがわかった。

強い鉛直渦度は、対流に伴う水平渦度を対流の鉛直流で立ち上げ、続いて引き伸ばすことによって形成されているように見える。これらの過程はいずれも対流の代表的な速度が大きいほど大きくなると考えられる。実際、対流の代表的な速度 $w_* = [(g/\theta_0)Qz_i]^{1/3}$ (Willis and Deardorff, 1974) を調べたところ、 w_* が1.7m/s以上のときに、鉛直渦度 $0.1s^{-1}$ 以上の渦が発生していることがわかった。ここで、 g は重力加速度、 θ_0 は基準温位である。 w_* が大きくなるのは顕熱 flux Q が大きく、混合層の厚さ z_i が深くなる日中であるため、強い鉛直渦が発生するのも日中になると考えられる。

4. 現実的な Dust Devil の再現結果

一般風が弱く、顕熱 flux が強い場合について格子間隔を20mとして実験した結果、直径250m、鉛直スケール1km、鉛直渦度 $0.3s^{-1}$ 以上の現実的な DD を再現することができた。渦の中心付近では最大1.5Kの気温上昇と40Pa以上の気圧

降下が見られ、接線方向の最大風速は5m/s以上であった(図1)。さらに渦の中心で下降流、その周囲で上昇流という可搬式ドップラーレーダーによる観測(Bluestein et al., 2004)でも見つかったような明瞭な two-cell 構造(図2)が見られた。

5. まとめと今後の課題

高解像度の LES により、現実的な Dust Devil(DD)の再現に成功した。DD の形成には混合層内の対流運動が本質的な役割を演じており、一般風の鉛直シアの存在は重要でないように見える。DD の形成には一般風が弱く、顕熱 flux が大きく、対流混合層がある程度以上の深さに発達して、対流速度が大きくなることが重要である。今後、更に現実的な DD を再現するためには、地表面近くの超断熱勾配の層を更に良く解像する格子間隔5m程度のシミュレーションを行う必要がある。

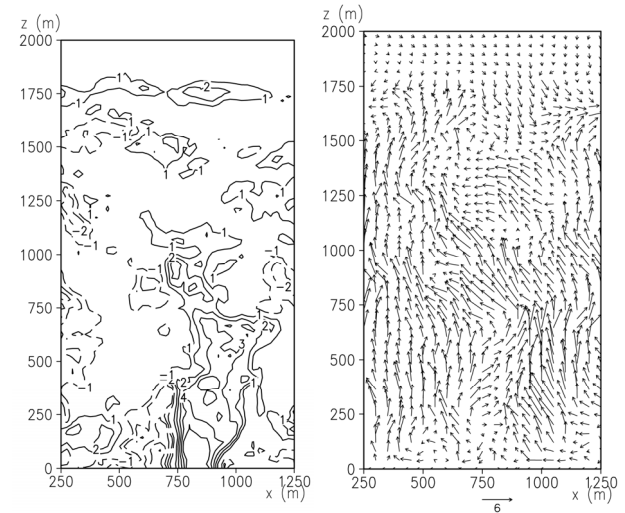


図1.DDの鉛直断面図。左:南北風速(等値線は1m/s毎)、右:風速ベクトル(m/s)。

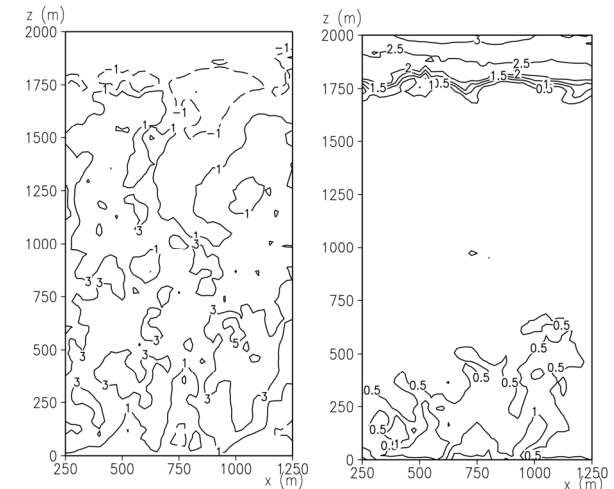


図2.DDの鉛直断面図。左:鉛直速度(等値線は2m/s毎)、右:温位偏差(0.5K毎)。