

晴天時の乾燥・湿潤対流および物質輸送の高解像度シミュレーション

竹見 哲也 (京都大学 防災研究所)

1. はじめに

乾燥地域から飛散する鉱物性エアロゾル(ダスト)の大気中への輸送過程を把握することは、地球の気候系のメカニズムを解明する上で重要な課題のうちのひとつである。近年の複数の国際的な研究の取り組みにより、現地観測・リモートセンシング・数値モデリングといった様々な手法によって、ダストの輸送過程の理解が進んできた。ダストの発生源として重要な地域のひとつである東アジアにおいて考えると、中緯度帯に位置するという地理的な特性から、総観規模温帯低気圧や前線活動に伴うメソ気象擾乱がダストの発生と輸送に大きく関与している。

一方、境界層乱流や乾燥対流など微細規模の物理過程によるダストの輸送も無視できないことが最近の研究で指摘されている(e.g., Luo et al. 2004; Koch and Renno 2005; Holzer and Hall 2007)。また、このような微細規模現象による輸送の効果をGCMに取り込む研究も進められている(Cakmur et al. 2004)。我々は、以上の研究を念頭に置き、晴天時に乾燥地で発達する混合層の日変化とそれに伴うダスト輸送のプロセスを雲解像モデルにダストモデルを組み込んで数値的に調べてきた(Takemi et al. 2005; 2006)。

本研究では、我々のこれまでの研究を発展させ、混合層および積雲の日変化過程とこれら乾燥・湿潤対流による物質輸送過程をより高解像度で数値計算することによって調べる。初期時刻の安定度を二通りに変え、安定度と混合層の日変化や物質輸送の関係について議論する。

2. モデルと数値実験の設定

気象モデルとして用いたのは、オクラホマ大学により開発されたAPRSである。ダストの地面放出および輸送のモデルを組み込み(Takemi 2005)、気象場と輸送場を同時に計算する。

高解像度計算を行なうにあたり、乱流モデルとしてはLESで用いられるタイプのDeardorff(1980)モデルを採用した。その他必要な物理過程は含めたが、コリオリ力は除外した。計算領域は40 km(東西)×10 km(南北)×11 km(鉛直)とし、側面境界は周期条件、上部境界には固定端と減衰層を置いた。格子幅は水平100 m、鉛直には最下層20 mから徐々に240 mまで引き延ばした(高度2 kmで100 m、高度8 kmで130 m)。

計算対象としたのは中国ゴビ砂漠南部における地点で観測された晴天時の日変化の事例である(Yasui et al. 2005)。接地層で強い逆転層が存在しその上部に安定成層がある場合(2002年4月13日00Z=6地方時、以後時刻は地方時)のプロファイルを初期に設定した計算をEXP1とした。次に、このプロファイルを初期条件として同様の日変化パターンが再現されるまで3日間時間積分し、その結果得られた6:00の平均プロファイル初期プロファイルとする計算をEXP2とした。EXP2の場合、下層には接地逆転層、その上部には前日の混

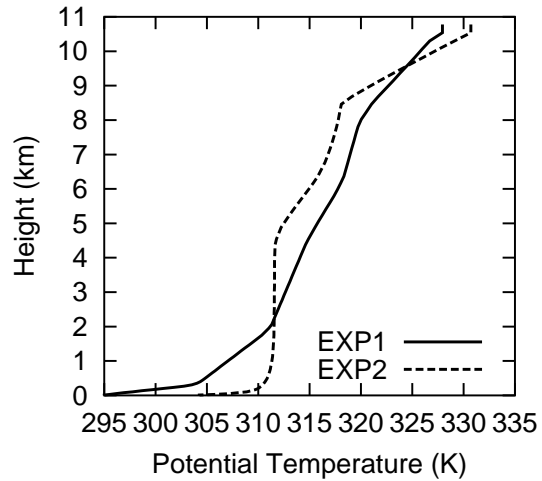


図1: 数値計算の初期の温位の鉛直プロファイル。

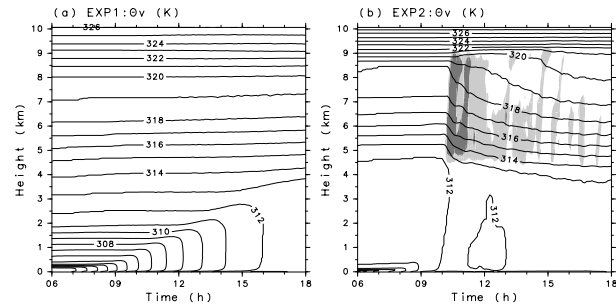


図2: 仮温位(等値線)の平均鉛直構造の日変化。灰色部は雲の領域を示す。

合層の名残りの構造が存在する。これらの初期プロファイル(温位・水蒸気混合比・東西風速)を水平一様に与えて、3次元の初期状態を作成した。初期状態の温位の鉛直プロファイルを図1に示す。初期擾乱として下層1 kmにランダムな温位摂動を与え、日の出前の6:00から計算を開始し18:00までの時間積分を行なった。

3. 結果

図2はEXP1およびEXP2それぞれのケースにおける大気構造の日変化を示す。初期に強い安定成層がある場合(EXP1)には、混合層は安定層を少しずつ壊しながら徐々に発達し、3 km程度の高度にまで達する。混合層の高さは、下層の仮温位が上空の仮温位に一致する高度として見積もられる。一方、EXP2においては、接地安定層の上にほぼ中立な残余の混合層があるため、接地安定層が破壊されると、上空の残余層と結合することによりさまざま深い混合層が形成される。この混合層の上部が自由対流高度を超えるため、対流圏界面にまで達する積乱雲が発達する。このように、晴天時の混合層の発達は、初期の安定度の構造に大きく

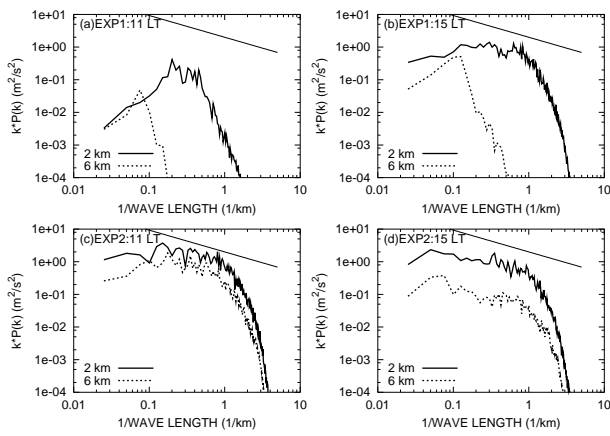


図 3: EXP1 および EXP2 の場合の鉛直速度の x 軸方向変動のパワースペクトル分布。11:00 および 15:00 について示す。

左右されることが分かる。

対流による乱れの空間構造を調べるため、高度 2 km および 6 km における鉛直速度の x 軸方向の空間変動についてパワースペクトル密度を計算した。時刻 11:00 および 15:00 のスペクトル分布を図 3 に示す。EXP1 の場合には、境界層内の乾燥対流が日中を通して卓越しているため、高度 2 km のパワーが顕著である。11:00 では 3–5 km スケールの擾乱が卓越しており、15:00 になるとより大きなスケールの擾乱も形成されているように見える。EXP2 の場合には、乾燥対流と湿潤対流の両者がともに発達しているため、パワーに違いがあるもののスペクトルの形状がお互いに似ている。乾燥対流のスケールは、EXP1 の場合よりも大きく、湿潤対流の影響を受けていることが示唆される。また、時刻が経過するにつれ、卓越スケールが大きくなっていくように見える。

以上のような対流の発達過程の違いが物質輸送にどのように影響しているのかを見てみる。図 4 は、EXP1 の場合のダスト濃度と鉛直輸送量の日変化を示す。ダストが空中に放出されるのは 12:30 からであり、混合層の発達にしがたって濃度が境界層内に一様に分布しつつ高度が徐々に上昇している。平均ダスト濃度は最大で $0.37 \mu\text{g m}^{-3}$ に過ぎないが、局所的には 4.3 g m^{-3} に達していた。一方 EXP2 の場合には (図 5)、混合層の発達と積雲対流の発達が継続的に生じることで、ダストの鉛直輸送が活発に起こっており、濃度分布も境界層内にとどまらず自由対流圏にまで広がっていることが分かる。濃度は平均で 0.2 mg m^{-3} 以上と EXP1 より 3 桁大きな数値であった。両実験ケースでのコラム量の最大値を計算すると、EXP1 では $1.24 \times 10^{-3} \text{ g m}^{-2}$ 、EXP2 では 0.634 g m^{-2} となり、両者に大きな違いが現れた。

4. 結論

晴天時の混合層の発達は、日の出前の安定度の構造に大きく影響を受ける。接地逆転層は比較的浅いが、その上部の成層の安定度は前日の混合層の発達状況に左右され、残余層として翌日早朝まで残る場合がある。本研究では、このような履歴を持った境界層の構造を把握することによって、日中の混合層の発達や積雲形成の有無、さらには物質輸送の診断が可能になることを

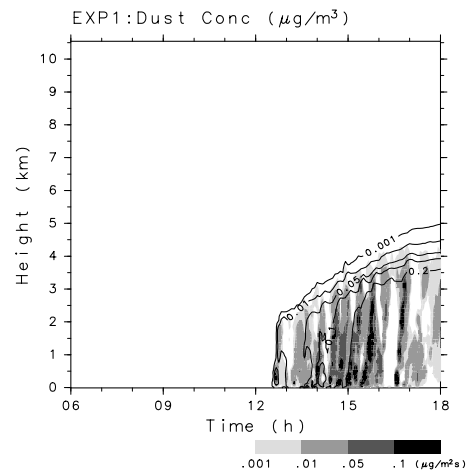


図 4: EXP1 の場合のダストの濃度 (等値線) と鉛直フラックス (灰色部) の水平平均値の日変化。

高解像度シミュレーションによって示した。

引用文献

- Cakmur, R. V., R. L. Miller, and O. Torres: *J.Geophys.Res.*, 109 (2004) D07201.
 Deardorff, J. W.: *Bound.-Layer Meteor.*, 18 (1980) 495.
 Holzer, M., and T. M. Hall: *J.Geophys.Res.*, 112 (2007) D09103.
 Koch, J., and N. O. Renno: *Geophys.Res.Lett.*, 32 (2005) L18806.
 Luo, C., N. Mahowald, and C. Jones: *J.Geophys.Res.*, 109 (2004) D20202.
 Takemi, T.: *J.Meteor.Soc.Japan*, 83A (2005) 187.
 —, M. Yasui, J. Zhou, and L. Liu: *SOLA*, 1 (2005) 157.
 —, M. Yasui, J. Zhou, and L. Liu: *J.Geophys.Res.*, 111 (2006) D11203.
 Yasui, M., J. Zhou, L. Liu, T. Itabe, K. Mizutani, and T. Aoki: *J.Meteor.Soc.Japan*, 83A (2005) 149.

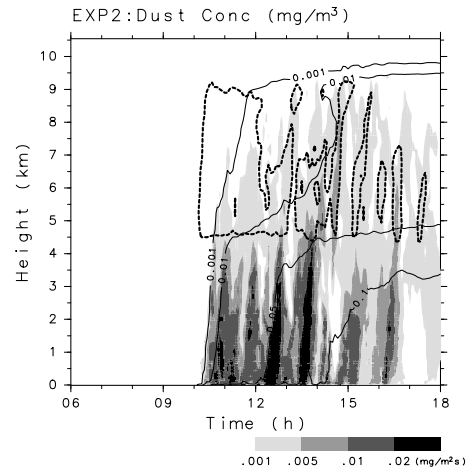


図 5: 図 4 と同様。ただし EXP2 の場合。点線は雲域を示す。