

# 乾燥地におけるメソ対流系によるダスト輸送過程の雲解像シミュレーション

竹見 哲也 (東京工業大学 大学院総合理工学研究科)

## 1. はじめに

東アジア砂漠から放出される砂塵(ダスト)粒子の大気中での輸送過程は、ダスト粒子が放射への影響を通して地球の気候に大きなインパクトがあると考えられており、近年の国際的な共同研究において、地上観測網やリモートセンシング・衛星観測、数値モデリングといった手法によって幅広く研究が進められている。東アジアの砂漠は中緯度帯に位置し、低気圧が頻繁に通過する地域である。したがって、特に春季においては、低気圧の通過やそれに関連した前線活動に伴い、ダストストームなどのダストイベントが生じる (Takemi and Seino 2005)。これらダストイベントによって大量のダストが上空まで巻き上げられると、ダストが東アジアの天候に影響を及ぼすだけでなく、太平洋上空を長距離輸送されることで北米大陸にまで到達する。このような輸送過程の解析のために、領域気象モデルや全球モデルを用いた領域規模からグローバルな輸送過程の数値シミュレーションによる解析が活発に進められている。しかし、それらの計算格子サイズは10 kmのオーダーである場合が多く、前線活動に伴うメソ対流系の活動といった積雲の効果はパラメタライズされたものとなる。

そこで本研究では、積雲や雲微物理過程を陽に取り扱う雲解像シミュレーションを行なうことにより、積雲対流によるダストの輸送の力学過程の解析をすることを目的とする。積雲対流の力学的な効果に注目するため、数値シミュレーションは、なるべく条件設定を簡略化した理想系で行なうこととする。

## 2. モデルと数値実験の設定

用いた雲解像モデルは、オクラホマ大学により開発された ARPS である。計算領域を東西 650 km・南北 120 km・鉛直 18 km の 3 次元とし、格子間隔は水平 2 km・鉛直 20–810 m (下層から徐々に拡大) とした。雲微物理過程は Lin による氷相を含むスキームを用い、地表面フラックスは安定度の関数として決める定式を用いた。ここではメソ対流系(スコールライン)による力学的な効果に注目しているため、コリオリ効果や放射伝達の影響は除外することとした。

スコールラインは、南北方向に伸びるライン状のサーマルを初期擾乱により再現した。対象とするスコールラインは 1993 年 5 月 5 日にゴビ砂漠で発生したダストストームの事例とする (Takemi 1999; Takemi & Satomura 2000)。ダストの放出・輸送過程のモデル化は Liu & Westphal (2001) などを参考にした。ダスト量は混合比  $q_d$  で評価し、簡単のため粒径の違いは考慮しない。 $q_d$  は次式で予測する：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho q_d) = F_{adv} + F_{mix} + F_{flux} + F_{grav} + F_{wet} + F_{revap}. \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  は空気密度、 $F_{adv}$ ・ $F_{mix}$ ・ $F_{flux}$ ・ $F_{grav}$ ・ $F_{wet}$ ・ $F_{revap}$  はそれぞれ移流・混合・地表面フラックス・重

力落下・雨による捕捉・雨の蒸発による再生成を示す項である。また、雨により捕捉されたダストを混合比  $q_{dw}$  で表し、次式で予測する：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho q_{dw}) = F'_{adv} + F'_{mix} + F_{fall} - F_{wet} - F_{revap}. \quad (2)$$

ここで、 $F'_{adv}$ ・ $F'_{mix}$ ・ $F_{fall}$  はそれぞれ移流・混合・落下項を示す。式 (1) 及び式 (2) を ARPS に追加した。

まず最初に、ダスト計算をせずに ARPS を 6 時間まで時間積分し、スコールラインの再現を行なった。次に、再現されたスコールラインを初期擾乱として、ダスト計算を加えた上で ARPS を走らせ、雲解像シミュレーションを行ない、スコールラインの発達に伴うダストの輸送過程の解析を行なう。

## 3. 結果

図 1 に、8–14 時間後のスコールライン及びダスト濃度の鉛直断面(南北平均したもの)を示す。図で示されたのは、ダストの粒子半径を  $1 \mu\text{m}$  と仮定した場合の結果である。下層には強い冷気プール、その先端部では上昇流により対流セルが発達しており、乾燥域でのスコールラインの特徴を呈している。ダスト濃度は地上の冷気プール内で最も高く、高濃度域が雲内部から対流系後部、そして上空へと広がっている。スコールラインの発達に伴うダスト輸送の時間変化より、冷気プール内で活発にダストが混合される様子が見て取れ、上空のダスト濃度も系の前後(後方の量が多い)に広がっていることが分かる。

次に、ダストの水平・鉛直フラックスの高度別の分布について図 2 に示す。地表面では冷気プール内での強風を反映して、10–20 km の東西方向の広がりを持って高いフラックスの領域があるが、下層 0–1 km 及び 1–3 km で層平均したフラックスは、冷気プールの先端部付近に集中していることが分かる。これは、冷気プールの先端部において強い上昇流が集中していることと対応している。本研究で用いた基本場の鉛直プロファイルでは、下層 3.5 km が対流混合層と設定されており、図 2(b)(c) で見られる分布は、境界層内でのものである。一方、境界層より上空では、高い鉛直フラックスの領域は点在しており、これは個々の対流セルの上昇流域に対応している。セルから後方に発散するようにダストの水平輸送が認められる。

図 3 に対流セルの発達とダスト輸送の関係を示したものである。セルの発達に伴い、冷気プール内の高濃度のダストの一部が上昇流域に取り込まれ、境界層から自由対流圏に輸送される過程が分かる。

これらダスト輸送に係わる力学過程を解析した。その結果、以下のことが分かった。発達した冷気プール内で強風によりダストが地表面から巻き上げられ、高ダスト濃度の状態が冷気プール内で形成される。このダストの一部が、冷気プール先端部での乱流拡散により冷気プール外へと放出され、それが上昇流に取り込まれることで境界層から自由対流圏へと輸送され、雲

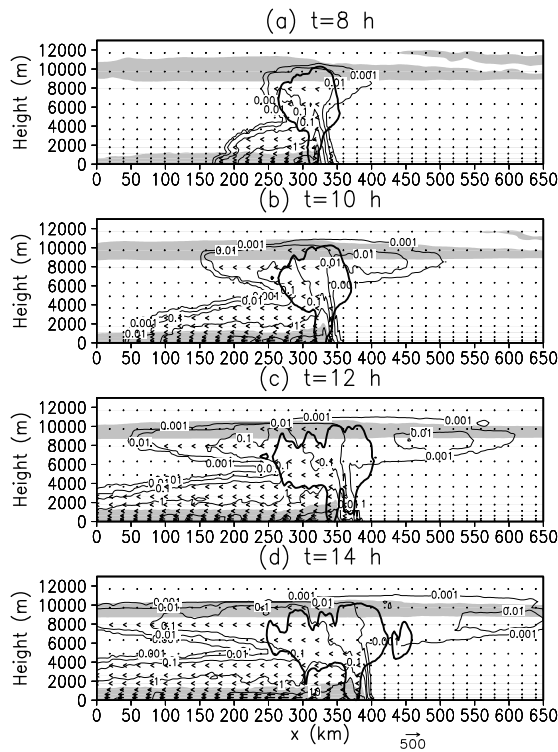


図 1: 8–14 時間後の南北平均したスコールラインの鉛直断面 (ベクトルは系に相対的なダストフラックス、太い実線は雲域、陰影部は冷気域) とダスト濃度 (細い実線等値線,  $\text{mg m}^{-3}$ ) の分布。

対流運動によって対流圏上部へと鉛直そして水平方向に輸送される。

#### 4. 結論

ダストの輸送過程及びダストの輸送量は、地上の冷気プールの発達程度によって大きくコントロールされる。冷気プールは、乾燥した状況において発達する降水系で世界各地で見られるものであるので、本研究で示した力学過程は降水系に伴って発生するダストストームにあてはまるものとも言える。また、レインバンドを伴う寒冷前線の場合も、スコールラインと似たような構造を持っているため、寒冷前線の通過によって発生するダストストーム時のダストの輸送過程についても、本研究で示した過程が支配していると考えられる。

#### 謝辞

本研究は、文部科学省科学技術振興調整費「風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する研究」の補助を受けました。関係各位に感謝いたします。

#### 引用文献

- Takemi, T.: *Mon. Wea. Rev.* 127 (1999) 1301.  
 Takemi, T., & N. Seino: *J. Geophys. Res.* (2005) in press.  
 Takemi, T., & T. Satomura: *J. Atmos. Sci.* 57 (2000) 1718.

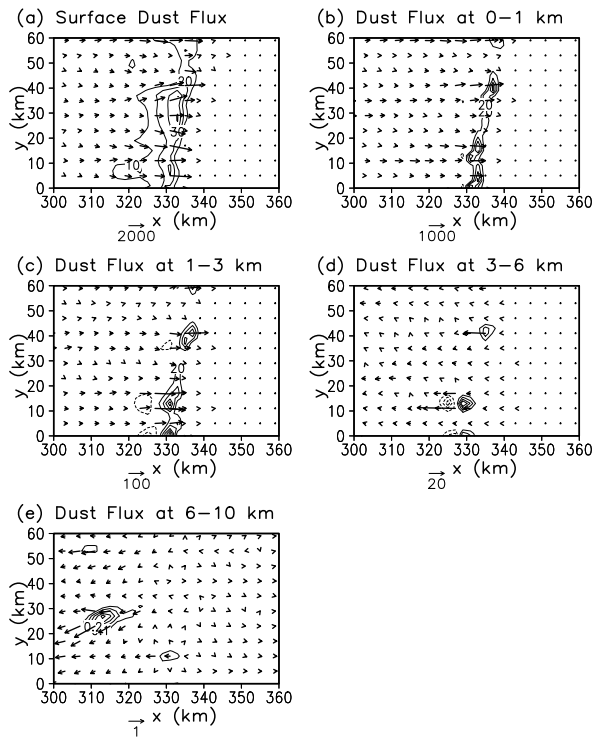


図 2: 地表面及び各層毎のダストフラックス (ベクトルは水平方向、等値線は鉛直方向、単位  $\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) の 10 時間後の水平断面。フラックスは、(a)–(c) では地上に相対的、(d) と (e) では系に相対的な向きで示される。

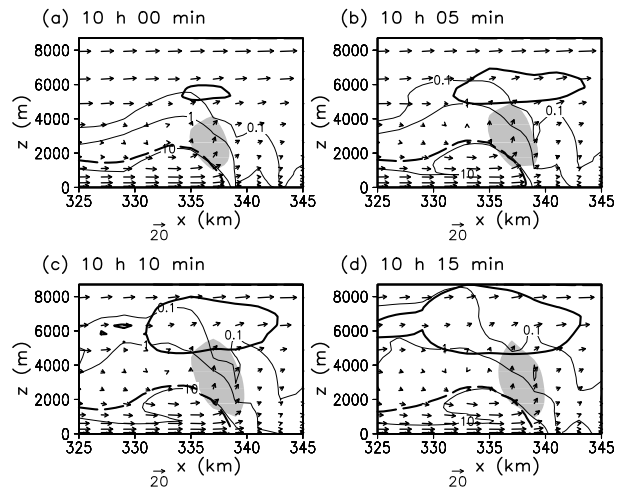


図 3:  $y = 35\text{--}45 \text{ km}$  で南北平均したダスト濃度 (細い線の等値線、単位  $\text{mg m}^{-3}$ )・雲の境界 (固液相の水混合同比  $0.1 \text{ g/kg}$  の等値線)・冷気プール境界 (温位擾乱  $-2 \text{ K}$  の等値線)・風 (地上に相対的なベクトル)・上昇流 (陰影部、 $6 \text{ m/s}$  以上) の鉛直断面。10 時間後から 5 分間隔の変化を示す。