

衛星搭載ライダーCALIOPによる  
夏季タクラマカンダストの3次元構造の解析

3-D structure of summertime Taklimakan dust retrieved by NASA  
CALIOP

原由香里<sup>1</sup>, 鶴野伊津志<sup>2</sup>, 弓本桂也<sup>2</sup>, 田中真理子<sup>3</sup>, 清水厚<sup>1</sup>, 杉本伸夫<sup>1</sup>

Yukari Hara, Itsushi Uno, Keiya Yumimoto, Mariko Tanaka, Atsushi Shimizu, Nobuo Sugimoto

<sup>1</sup>国立環境研究所, <sup>2</sup>九州大学応用力学研究所, <sup>3</sup>(株)富士通FIP

<sup>1</sup>National Institute for Environmental Studies

<sup>2</sup>Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

<sup>3</sup>Fijitsu FIP Co. Ltd

## ABSTRACT

Vertical dust structures and meteorological conditions over Taklimakan Desert during the summertime periods (July to September) in 2006 and 2007 were investigated using satellite data including the CALIPSO lidar (CALIOP) measurements and the Weather Research and Forecasting (WRF) model simulation. Summertime convective velocity simulated by WRF was greater than 3 m/s, and the convective time scale was about 1000 s (ca. 15 min). We examined 42 CALIPSO paths (24 daytime and 18 nighttime paths) of data acquired under convective dusty conditions. The dust layer thickness derived from the CALIOP measurements reaches 3000–4000 m, which is approximately equal to the Tarim Basin depth, or the height of the Tibetan Plateau. This thickness shows a good correlation with the WRF simulated depth of the convective boundary layer (BL). The dust remains suspended during both daytime and nighttime; the CALIOP average dust extinction coefficients in the BL are respectively  $0.151 \pm 0.102 \text{ km}^{-1}$  and  $0.128 \pm 0.079 \text{ km}^{-1}$  for daytime and nighttime. Finally, we estimated the dust amount transported from the BL to the free atmosphere. Typically, 10–20 Gg/day of dust (assuming area of  $600 \text{ km} \times 300 \text{ km}$  as a main part of the Taklimakan Desert) is transported from the Taklimakan Desert by vertical mixing. The daily horizontal dust flux above the BL was estimated to be 40–50 Gg/day over the Taklimakan Desert.

## はじめに

タクラマカン砂漠起源のダストはグリーンランドやフレンチアルプスの氷床から採取されていることから(例えば, Bory et al., 2003; Grousset et al., 2003), その滞留時間は長く, 全球規模で飛来していると考えられる。そのため, 氷晶核としての作用や, 海洋への栄養塩としての役割など重要な気候影響を持つ。しかし, タクラマカン砂漠におけるダストの連続的・定量的観測は極めて少なく, 季節変動や3次元構造の把握, 定量的評価は未だ十分になされていない。

近年, NASA 衛星搭載ライダーCALIOPの通年データを用いたタクラマカンダストの季節変動に関する研究がなされ(Liu et al., 2008), 春季のみならず夏季においてもダスト発生頻度が高いことが明らかとなった。夏季におけるタクラマカンダストの発生メカニズムは春季の総観規模の擾乱に伴うものとは異なり, 熱対流によるダストデビルのような舞い上がりが重要な発生メカニズムとなっていると考えられる。本研究ではタクラマカン砂漠における夏季の熱対流によるダストと気象要素の3次元構造の解明と定量的評価を目的とし, CALIOPと領域気象モデルWRFを用いて解析を行った。

## モデル・データの概要

本研究で使用した領域気象モデルは Weather Research and Forecasting (WRF) Model Ver.2.1.2 である。WRF モデルには 2way ネスティング手法を用いており、計算領域はアジアの広域(100×90 格子,  $\Delta x = \Delta y = 45\text{km}$ )とタリム盆地の狭域(211×126 格子,  $\Delta x = \Delta y = 9\text{km}$ ), 鉛直解像度は 20km までを 31 層で分割した。WRF の気象場計算の初期条件・境界条件には NCEP の解像度  $1^\circ \times 1^\circ$  の FNL 全球データ (6 時間毎) を用いた(<http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/data>)。

CALIOP データについては Level 1B Ver.2.01 の減衰補正なし後方散乱係数から Felndald のインバージョン法(Felndald, 1984)によりエアロゾルの後方散乱係数を求めた。ライダー比は 35sr を用いた。Level 2 Ver.2.01 の CAD データは雲マスキングに使用した。また, OMI Aerosol Index (AI), MODIS Deep Blue AOT (Hsu et al., 2006), WMO SYNOP 視程・風速データを用いた。解析期間は 2006, 2007 年の 7 月から 9 月である。

## 結果と考察

図 1 に WRF によって計算されたタリム領域( $79-85^\circ \text{ E} \times 37.5-41^\circ \text{ N}$ )平均の気象要素(7-9UTC 平均混合層高さ  $Z_i$ , 3-9UTC 平均地表における顕熱フラックス HSF, 対流速度  $w^* = [H_{BL}g/\Theta \text{ HSF}]^{1/3}$ ), MODIS Deep Blue AOT, OMI Aerosol Index (AI), SYNOP 視程から計算された消散係数(1/km), タリム盆地内の SYNOP 地点平均風速の 2006, 2007 年 7-9 月の日変化を示す。図 1 より WRF でシミュレートされたタリム盆地内の混合層高さ  $Z_i$  は 2600-5300m と高く, タリム盆地を囲む山脈とほぼ同じスケールであることが分かる。SYNOP によるタリム盆地内の風速は概ね 2.5 m/s 以下であり弱い。一方, WRF シミュレーションから求められた自由対流の強さを表す変数である  $w^*$  は 2-3.2 m/s もの大きな値であった。混合層深さ  $H_{BL} = 3000\text{m}$ ,  $w^* = 3\text{m/s}$  の場合, 対流時間スケールは  $H_{BL}/w^* = 1000 \text{ s}$  (=約 15 分)程であり, 非常に対流混合が盛んで境界層(BL)内のダストは一様に分布すると考えられる。また, Deep Blue AOT, OMI AI, SYNOP の視程から計算された消散係数は概ね良い対応を示す。本研究では, 熱対流によるタクラマカンダストの構造に焦点を絞るため,  $WS < 2.5 \text{ m/s}$ ,  $w^* > 2.8 \text{ m/s}$ , CALIOP CAD 判定によりほぼ雲なし, タリム領域内を CALIPSO が通過する, 等の条件を満たす CALIOP 観測データを 2006 年と 2007 年 7-9 月から選出し, 熱対流的なダストデータを決定した。条件から日中 24 パスと夜間 18 パスが選出された。図 1 のシンボルはその様に選出した CALIOP データの  $0 < H_{BL} < 1.5$  のダスト光学的厚さ(AOT)である。CALIOP データから得られたダスト AOT の変動は Deep Blue AOT と良く整合する。

図 2 左カラムに上述の条件で選出した CALIOP データについて, タリム領域平均したダスト消散係数を混合層深さ  $H_{BL}$  と BL 以下の消散係数(Ext\_dust\_BL)の平均値で無次元化した日中(上段)と夜間(下段)の平均プロファイルを示す。BL 以下の平均値でスケールした WRF による風速と温位の平均プロファイルを右カラムに示す。図 2 の日中の平均プロファイルから,  $z/H_{BL} = 0.3$  でダスト濃度はピークを持ち, 上方に向かい徐々に濃度は減少してゆく。注目すべきは  $1 \leq H_{BL} \leq 1.5$  の高度においてもダストが存在していることである。次式でダスト量を求めると

$$D_{1-1.5} = \int_1^{1.5} [Ext\_dust / Ext\_dust\_BL] d(z/H_{BL}) \quad (1)$$

$D_{1-1.5} = 0.28$  となり, 混合層内の約 30% のダスト量が推定された。また, 夜間については日中よりも低い高度で濃度ピークを持つが,  $0.4 < z/H_{BL} < 1$  では等温位プロファイルを持つ遷移層となっており, ダストが日中同様 BL 内に滞留していることがわかる。夜間についても  $1 \leq H_{BL} \leq 1.5$  の高度において混合層内のダストの約 27% のダストが存在していた。BL 内の日中と夜間のダスト消散係数はそれぞれ  $0.151 \pm 0.102$ ,  $0.128 \pm 0.079 \text{ km}^{-1}$  と非常に高かった。

続いて、混合層の相似則を用いて BL から自由大気(FA)への鉛直ダストフラックスを見積もる。BL から FA への鉛直ダストフラックスは次式で近似される。

$$\overline{w'C}|_{z_i} = \overline{w'\theta}|_{z_i} dC/d\Theta = -\alpha \overline{w'\theta}|_0 dC/d\Theta \quad (2)$$

対流混合層の熱フラックスの相似則から $\alpha=0.2-0.4$ と仮定し、日中の平均プロファイルから $1 \leq H_{BL} \leq 1.5$ のダスト消散係数と温位の勾配( $d[EXT\_dust]=0.04 \text{ km}^{-1}$ ,  $d\Theta=5 \text{ K}$ )を用い、質量/消散係数変換係数  $1.78 \text{ (mg/m}^3\text{)/km}^{-1}$ 、地表面熱フラックス  $300 \text{ W/m}^2$ の値を用いると、鉛直フラックス $\overline{w'C}|_{z_i} = \alpha \times 12.0 \text{ Kg/km}^2\text{/h}$ を得る。この値が終日一定であるとし、タクラマカン砂漠の面積を  $600 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ とすると、鉛直フラックスは

$$\overline{w'C}|_{z_i} = \alpha \times 51.8 \text{ Gg/day} = 10.4 - 20.7 \text{ Gg/day}$$

となる。よって、対流混合が盛んな状況下では、 $10-20 \text{ Gg/day}$ のオーダーのダストが鉛直混合過程により混合層から自由大気へと輸送されていることになる。

次に、タリム盆地上の水平輸送フラックスを見積もる。 $H_{BL}$ 以下のダストは盆地内に滞留するため、 $H_{BL}$ 上の自由大気でのダストの水平輸送を考える。水平輸送フラックス(HMF)は次式により見積もられ、

$$HMF = \int_1^2 [Ext\_dust \times (mass/extinc.conv.factor) \times WS] d(z/H_{BL}) \quad (3)$$

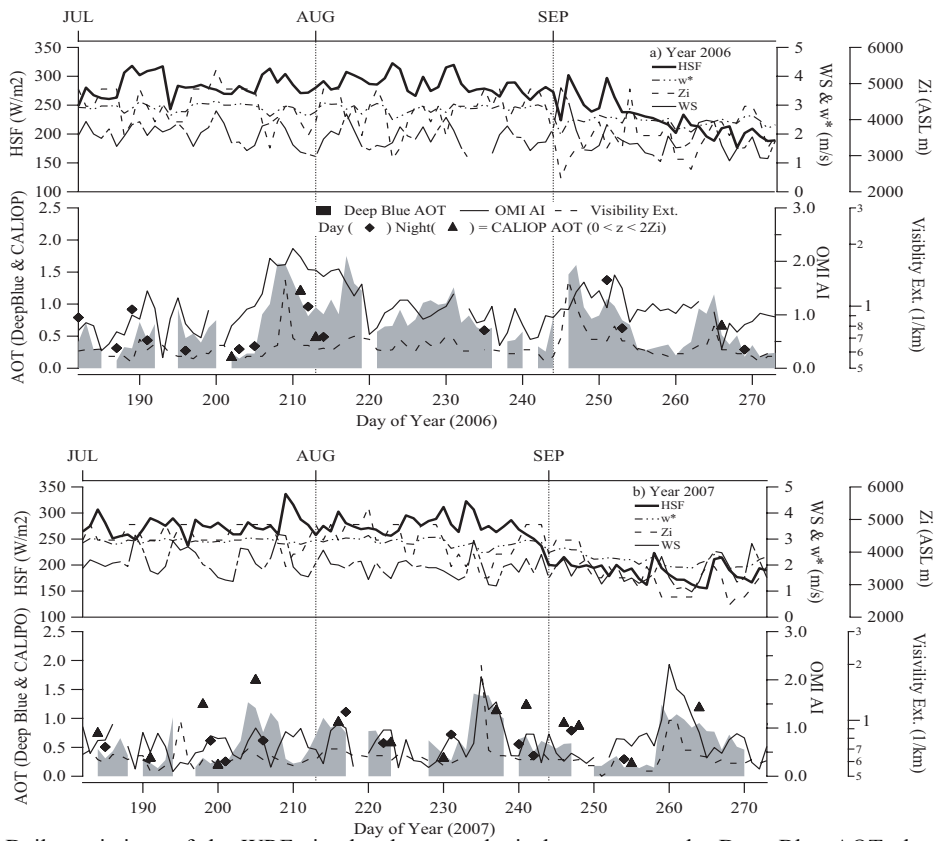
$300 \text{ km} \times 3000 \text{ m}$ の鉛直断面を仮定すると、

$$HMF_{\text{daytime}} = 52.9 \text{ Gg/day}, \quad HMF_{\text{nighttime}} = 38.7 \text{ Gg/day}$$

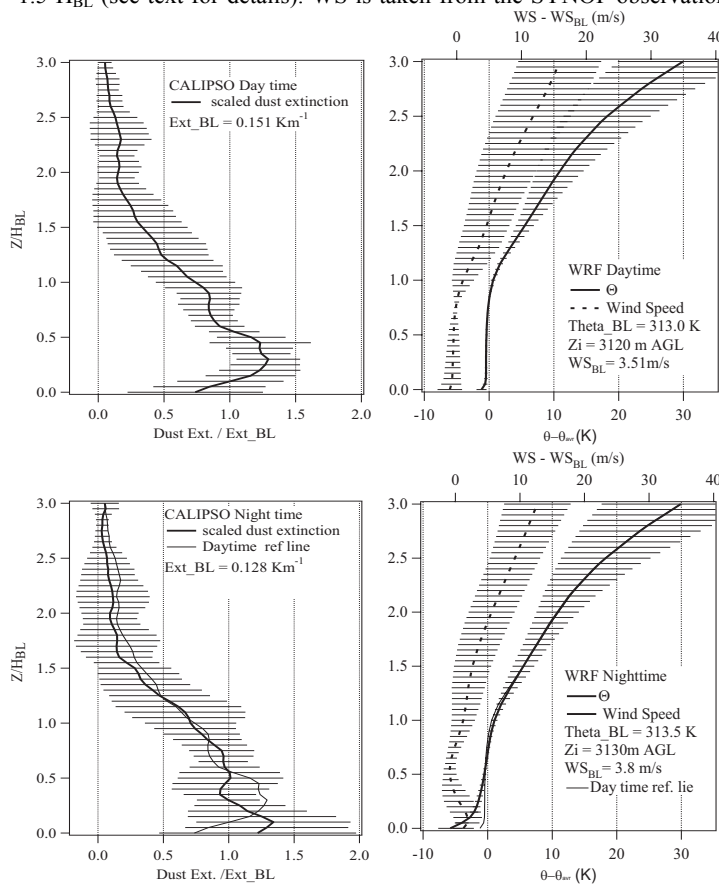
となり、夏季タクラマカン砂漠上において  $40-50 \text{ Gg/day}$ の水平ダスト輸送フラックスが推定された。夏季タクラマカン砂漠においてはこのような熱的対流によるダストの自由大気へのエントレイメントと偏西風による流れ出しが頻繁に起こっている可能性があり、バックグラウンドダストとしての重要性が示唆される。

## 参考文献

- Bory, A. J.-M., P. E. Biscaye, and F. E. Grousset (2003), Two distinct seasonal Asian source regions for mineral dust deposited in Greenland (NorthGRIP), *Geophys. Res. Lett.*, *30*(4), 1167, doi:10.1029/2002GL016446.
- Fernald, F. G. (1984), Analysis of atmospheric LIDAR observations: Some comments, *Appl. Opt.*, *23*, 652–653.
- Grousset, F. E., P. Ginoux, A. Bory, and P. E. Biscaye (2003), Case study of a Chinese dust plume reaching the French Alps, *Geophys. Res. Lett.*, *30*(6), 1277, doi:10.1029/2002GL016833.
- Hsu, N. C., S. C. Tsay, M. D. King, and J. R. Herman, 2006: Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, *44*, 3180–3195.
- Liu, Z., D. Liu, Huang, J. et al. (2008), Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and sounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations, *Atmos. Chem. Phys.* (in press)



**Figure 1** Daily variations of the WRF simulated meteorological parameters, the Deep Blue AOT, the OMI Aerosol Index (AI) and the SYNOP visibility report base extinction (Vis\_Ext) for July, August and September of the years 2006 and 2007. Solid symbols indicate the corresponding CALIOP AOTs over 0 - 1.5  $H_{BL}$  (see text for details). WS is taken from the SYNOP observations within the Tarim Basin



**Figure 2** Scaled profiles of dust extinction coefficients and other meteorological parameters for daytime (upper row) and nighttime (lower row). Horizontal bar indicates the  $\pm$  one sigma.