

ダストデビル (塵旋風)

伊藤 純至*・藤原 忠誠**

1. はじめに

晴天時の日中、砂漠など乾燥地帯の裸地ではダストデビル (塵旋風) と呼ばれる半径数 m から数十 m の激しい鉛直渦が生じる。強い接線風速と上昇流により、地表からダスト粒子が巻き上げられ、螺旋状の流れが可視化される (第1図)。寿命は数分で、持続とともに徐々に上空へ伸びるように見え、寿命の長い渦では高さ数百 m に達する。

大気中の小スケールで顕著な渦は、他に、竜巻、ガストネード (ガストフロント上で生じる鉛直渦) や火災旋風が挙げられる。ダストデビルは、それらと発生環境が異なり、晴天・弱風の穏やかな環境で発生する。竜巻は、上空の積乱雲内で力学的に生じた上昇流が渦を引き伸ばすが、ダストデビルは地表面加熱で浮力を得た上昇流が渦を引き伸ばす。

ダストデビルの典型的な接線風速は秒速10 m である。竜巻程の被害をもたらす突風ではないが、屋外活動や航空機の運用に支障を及ぼす。日本でも運動会でテントが飛ばされるなど、年数件のダストデビルによる突風被害が報告される。砂漠地帯では発生頻度が高いため、大気中のダスト収支や輸送にとって無視できないと考えられている (Koch and Renno 2005 など)。また地表面からの舞い上がり時にダスト粒子が帯電し、大気中の電荷分布にも影響する (Freier 1960 など)。ダストデビルは地球だけでなく火星でも発生する。ダスト輸送や放射過程を通じて、火星の気候への影響も示唆されている (Fenton *et al.* 2007)。

ダストデビルは一見、気象擾乱と無縁に思われる穏やかな環境下で発生する不思議な現象である。ここではダストデビルと、「ダストデビルのような渦」に関

する研究を通して得られた知見を紹介する。

2. ダストデビルの観測

夏季、気温が40°Cを超えるような砂漠の見渡しの良い地点では、ダストデビルは1日に数十個観られる。これまで、長期間の目視観測により、発生環境や頻度、それらの回転方向などの統計的性質が観測されてきた (Sinclair 1969 など)。それらの観測によると、強い地表面加熱により接地境界層が超断熱気温減率をもち、かつ一般風が弱く、地表面温度が極大となる午後早い時間帯に多く出現した。回転方向は時計回り・反時計回りほぼ同数であった。また、地上気象測器を用いた観測から、渦コア付近の圧力低下 (数 hPa) や温度上昇 (数 K) 等も検出された。



第1図 ポリビアの砂漠で生じたダストデビル (撮影 藤原)。

* (連絡責任著者) Junshi ITO, 東京大学大気海洋研究所. junshi@aori.u-tokyo.ac.jp

** Chusei FUJIWARA, 気象研究所.

© 2013 日本気象学会

近年では、火星のダストデビルの観測に関する論文が多く発表されている (Greeley 2010など)。火星大気は熱容量が小さく、日中はより活発な対流が生じるため、地球より巨大なダストデビルが発生する。総観規模のダストストームがみられない時期でも、火星大気ではダストが観測されるが、それはダストデビルによるものと考えられている。人工衛星が撮影した火星表面の画像には多くのダストデビルが通過した跡が確認される。火星に着陸した探査車では、ダストデビルの通過に伴う気圧降下が、1日約1回観測された (Murphy and Nelli 2002など)。

3. ダストデビルのような渦 (DDV) の観測と再現

地表面にダスト粒子が乏しい場合でも、活発な対流が生じる環境では、可視化されない、ダストデビルのような鉛直渦 (Kanak (2006) をはじめ最近の論文では、Dust devil-like vortices; DDV と呼ぶ) が存在する。札幌市内に設置されたドップラー・ライダーによる大気境界層のリモート・センシングでは、弱風時の日中、多角形型の対流セルの上昇流域で、DDV が多く発見されている (Fujiwara *et al.* 2011)。また、相対的に温かい湖の上で、霧によって鉛直渦が可視化されることがある (Lyons and Pease 1972)。これは、スチームデビルと呼ばれ、DDV の一つと言える。

ラージ・エディ・シミュレーション (LES) によって対流混合層を数値的に再現した時、上昇流が特に強い、多角形型の対流セルの頂点で、顕著な鉛直渦の出現がみられる。LES ではダストデビルを表現するのに十分な解像度が得られていないことや、ダスト粒子に関するプロセスの精度良いモデル化が依然困難なため、多くの論文は数値的に再現された鉛直渦を DDV と表現している。

非常に理想化された条件 (側面周期境界, シア・地形なし・地表面摩擦なし) での LES であっても DDV が生成される。これまで、地形や建物の影響で生じた水平シアや、地表面摩擦による鉛直シアの立ち上げが、鉛直渦のもとになるという提案もあったが、それらは渦の強化に繋がるとしても、必要条件ではないことを LES の結果は示す。Ito *et al.* (2013) は、対流混合層内の対流セルに伴って地表面付近の半径数百 m の広範囲にわたって分布した弱い鉛直渦度を、対流の上昇流が引き伸ばし DDV が生じることを、LES の後方流跡線解析で確かめた。対流混合層

の中層でバロクリニックに生じた水平渦度が傾けられ、下降流で地表面近くに移流されたものが、対流セルに伴い分布する鉛直渦度であると示唆された。

対流が生じている日中、DDV と比較してごく弱い、ヒートアイランド効果によるメソスケールの低気圧性の環境場の回転が、DDV に影響し、時計回りと比べて反時計回りの DDV の発生数が増えるという観測結果 (Fujiwara *et al.* 2012) も、広範囲にわたる弱い鉛直渦度を、上昇流が引き伸ばすことを示す。

これまでに、地球、火星をそれぞれ想定した LES による DDV の再現が行われているが (例えば Kanak 2006)、DDV を生ずるメカニズムは地球でも火星でも共通であるとみられる。LES でも一般風が弱い場合に DDV が生じやすく、実際のダストデビル発生の物理的本質を捉えている。

4. まとめ

ダストデビルは地球・火星の砂漠で頻繁に発生する。観測に適した砂漠がない日本国内では、ダストデビルの発生はグラウンドなどで稀にしか見られないが、可視化されない DDV は日中の大気境界層に普遍的に存在している。

火星大気では、ダストが気候に与える影響が大きいため、火星大循環モデルではダストデビルによる大気へのダスト供給がパラメタライズされる (Kahre *et al.* 2006など)。時空間変動が激しいダストデビル内のフラックスを観測で精度よく見積もることは未だ困難であり、高解像度の数値実験による見積もりが望まれる。LES が DDV でなく「ダストデビル」を定量的に正しく再現するためには、大型計算機の利用により解像度のさらなる向上を図ること合わせて、ダスト粒子の舞い上がりを含めた接地境界条件やダストの放射などの素過程を観測・数値実験を通してより深く理解する必要がある。

参考文献

- Fenton, L. K., P. E. Geissler and R. M. Haberle, 2007: Global warming and climate forcing by recent albedo changes on Mars. *Nature*, **446**, 646-649.
- Freier, G. D., 1960: The electric field of a large dust devil. *J. Geophys. Res.*, **65**, 3504.
- Fujiwara, C., K. Yamashita, M. Nakanishi and Y. Fujiyoshi, 2011: Dust devil-like vortices in an urban area detected by a 3D scanning Doppler lidar. *J. Appl.*

- Meteor. Climatol., **50**, 534-547.
- Fujiwara, C., K. Yamashita and Y. Fujiyoshi, 2012: Observed effect of mesoscale vertical vorticity on rotation sense of dust devil-like vortices in an urban area. *SOLA*, **8**, 25-28.
- Greeley, R. *et al.*, 2010: Gusev Crater, Mars: Observations of three dust devil seasons. *J. Geophys. Res.*, **115**, E00F02, doi:10.1029/2010JE003608.
- Ito, J., H. Niino and M. Nakanishi, 2013: Formation mechanism of dust devil-like vortices in idealized convective mixed layers. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1173-1186.
- Kahre, M. A., J. R. Murphy and R. M. Haberle, 2006: Modeling the Martian dust cycle and surface dust reservoirs with the NASA Ames general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **111**, E06008, doi:10.1029/2005JE002588.
- Kanak, K. M., 2006: On the numerical simulation of dust devil-like vortices in terrestrial and Martian convective boundary layers. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L19S05, doi:10.1029/2006GL026207.
- Koch, J. and N. O. Renno, 2005: The role of convective plumes and vortices on the global aerosol budget. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18806, doi:10.1029/2005GL023420.
- Lyons, W. A. and S. R. Pease, 1972: Picture of the month: "Steam Devils" over Lake Michigan during a January Arctic outbreak. *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 235-237.
- Murphy J. R. and S. Nelli, 2002: Mars Pathfinder convective vortices: Frequency of occurrence. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2103, doi:10.1029/2002GL015214.
- Sinclair, P. C., 1969: General characteristics of dust devils. *J. Appl. Meteor.*, **8**, 32-45.
-