

地球と火星におけるダストデビル現象
の概要

～ DUST DEVILS ON EARTH
AND MARS のレビュー ～

An Overview of Dust Devils on Earth and Mars
～ A review of DUST DEVILS ON EARTH AND
MARS by Balme and Greeley (2006) ～

加藤 美和

Kato Miwa

北海道大学理学部地球科学科 地球物理学科目
惑星物理学研究室

Department of Earth Sciences,
Undergraduate School of Science, Hokkaido University.
Planetary Physics Laboratory.

2009/01/30

要旨

本論文は, Balme and Greeley (2006) のレビューを通して, 地球と火星で共通して起きるダストデビルという大気現象を調べたものである.

ダストデビルは多量のダストを含んだ螺旋状の上昇流であり, 日射によって地表付近の大気が暖められることで発生する. 地球と火星のダストデビルの発生メカニズムや構造は同じだと考えられているが, その発生数は火星の方が多く, 大きさや風速は火星の方がオーダーが1~2桁大きい. しかし, 大きいと言っても惑星の自転の影響を受けるほど大きいものではなく, 直径はオーダー100~1000mほどである.

また, ダストデビルは地表面のダストを巻き上げている. ダストデビルによって巻き上げられたダストが, 地球においても火星においても大気中のダスト循環で重要な役割を果たしていると言われている¹ そのため, 特に火星において全球規模のダスト循環のシミュレーション研究がされてきており, 近年ではシミュレーション結果が周回衛星やその場観測による観測値と一致してきている.

これから先火星探査を続けていく上で, ダストデビルがどれほど脅威となるかという評価はまだ完全ではなく, ダストデビルの軌跡の研究やダストデビルの全球規模の研究やその場観測の充実化, モデルの検証など, まだまだ多くの課題が残されている.

¹詳しくは Ruff and Christensen (2002) などを参照せよ.

目次

1	はじめに	1
2	導入部分	2
3	地球と火星のダストデビル	5
3.1	観測の背景	5
3.2	ダストデビルの具体的な測定方法	6
3.3	大きさと形	7
3.4	ダストデビルの発生条件	11
3.5	ダストデビルの発生率の日変化と寿命	13
3.6	回転方向の傾向	15
3.7	ダストデビルの風速構造	16
3.8	ダストデビル内部の温度と圧力変位	24
3.9	電氣的・磁氣的構造	25
3.10	ダストデビルによる地表面の物質の取り込み	26
4	ダストデビルの形成メカニズム	30
4.1	概略	30
4.2	渦度源	31
4.3	ダストデビルにおける熱力学とエネルギーバランス	32
5	火星の気候に対するダストデビルの効果	35
6	ダストデビルは火星進出の際脅威になるのか?	40
7	結論と将来の展望	41
8	まとめ	43

1 はじめに

地球と火星で共通して起きる大気現象にダストデビルというものがある。ダストデビルとは、地表面のダスト²を巻き上げた目に見える螺旋状の上昇流であり、主に乾燥地域で観測される。このダストデビルという現象は Baddeley (1860) から研究され始めた。それ以降 Sinclair (1965, 1969) や Carroll and Ryan (1970), Metzger (1999) によってその場観測が次々に行われ、ダストデビルは日射により勢力を増すことや、ダストの素となる岩石の多い地域でより発生しやすいという観測結果が得られた。また、1976年に打ち上げられた VO (この VO を含め、以下探査機などの略称は全て表 1 を参照せよ) の画像から、火星でもダストデビルが存在することが分かった。その後 MPF-IMP や MGS などの探査機の画像処理を行うことで、火星のダストデビルは地球のものより大きく、時間的・空間的により多く発生することが発見された。しかし火星の気象データは地球のものに比べて極端に少なく、ダストデビルの詳細な構造までは分からなかった。

このようにその場観測のみでダストデビルを研究するには限界がある。ゆえに、Greeley et al. (1981) や Renno et al. (1998) によって、ダストの巻きあがりやダストデビル形成のシミュレーションを用いた研究も多く行われてきた。しかし、これらのシミュレーションを用いた研究でも、巻き上げられたダストが気候にどのような影響を与えるのか、火星探査の際、ダストデビルがどのような影響を及ぼすのかという詳細な部分はまだ明らかになっていない。

本論文では、こうした問題点や解決の糸口を記述した Balme and Greeley (2006) を翻訳・解説することでダストデビル現象について深く学び、ダストデビルを研究する上で必要な知識についてまとめる。次の第二章から第七章までは Balme and Greeley (2006) をまとめたレビューである。第二章では導入部分を、第三章では地球と火星におけるダストデビルの観測結果を、第四章ではダストデビルの形成メカニズムとシミュレーション研究の紹介を、第五章ではダストデビルが火星の大気に与える影響を、第六章ではダストデビルが火星探査に与える影響を、第七章では Balme and Greeley (2006) の結論と将来の展望を記述する。

²ここでいうダストは塵のことをさし、厳密には砂と区別しているようである。粒形が 1/16mm ~ 2mm のものは砂と分類され、それ以下のシルトや泥がダストと分類されているものと思われる。また、これらの数値は地学団体研究会、新版地学事典編集委員会 (1999)、新版地学事典、株式会社平凡社、ISBN4-582-11506-3 Yaping Shao (2001), Physics and Modelling of Wind Erosion, Kluwer Academic Pub, ISBN 0-7923-6657-3 を参照した。

2 導入部分

地球 (図 1) と火星 (図 2) で共通に起こる大気現象に「ダストデビル」というものがある。ダストデビルとは、日射により地表面付近の空気が暖められることで発生した鉛直対流の渦であり、密集したダスト粒子、高速回転する風や大きい静電場、中心で減少する圧力や上昇する温度によって特徴づけられる現象である。地球のダストデビルは、ことによっては乾燥地域を除いて、ダストの循環における境界層風に付随し、社会的にはほとんど害を及ぼさない、単なる「迷惑程度」の現象でしかない。しかし火星では、ことによるとその高いダストの集積率や大きなポテンシャル勾配があるため、ダストデビルは大気の霽がしつこく残る原因の要因となったり、地表面に残す「軌跡」によって表面のアルベドに影響を与えたり、将来行われるだろう実地調査を危険にさらしたりするように思える。数値シミュレーションや熱力学的スケールモデルの解像度を高くすると、火星におけるダストデビルのような渦の記述は上手く表現されるが、火星の全球ダスト循環におけるダストデビルの活動に適合するにはまだまだ問題点がある。



図 1: 地球のダストデビルの観測例. (a) アメリカ・ネバダ州エルドラド渓谷発生した大きなダストデビルの遠景. 地表の物質が巻き上げられて、はっきりとした核 (core) とぼんやりとしたその周囲が作られていることがわかる. (b) 図 1a と同じダストデビルで、プラヤ (playa を訳したもので乾燥した平野のことを指す) で起こったもの. 直径のオーダーは 20m, ダストを大量に含んでいる. (c) アメリカ・アリゾナ州エロイで起きた、ダストを多く含んだダストデビルで、図 1a, 1b とは別物である. 直径は 2~3m である. このダストデビルも核がはっきりと見えており、核の形は地面付近ではおわん状となっている. (d) 構造がはっきりしないダストデビル. こういった類のダストデビルの方が円柱状のものよりも一般的だが、ほとんど写真には収められていない. これらの画像の引用元はそれぞれ (a) と (b) は S. Metzger/M. Balme/T. Ringrose, Planetary Science Institute, Tucson, and Open University, Milton Keynes, (c) は L. Neakrase, Arizona State University, Tempe, (d) は S. Metzger, Planetary Science Institute, Tucson である.

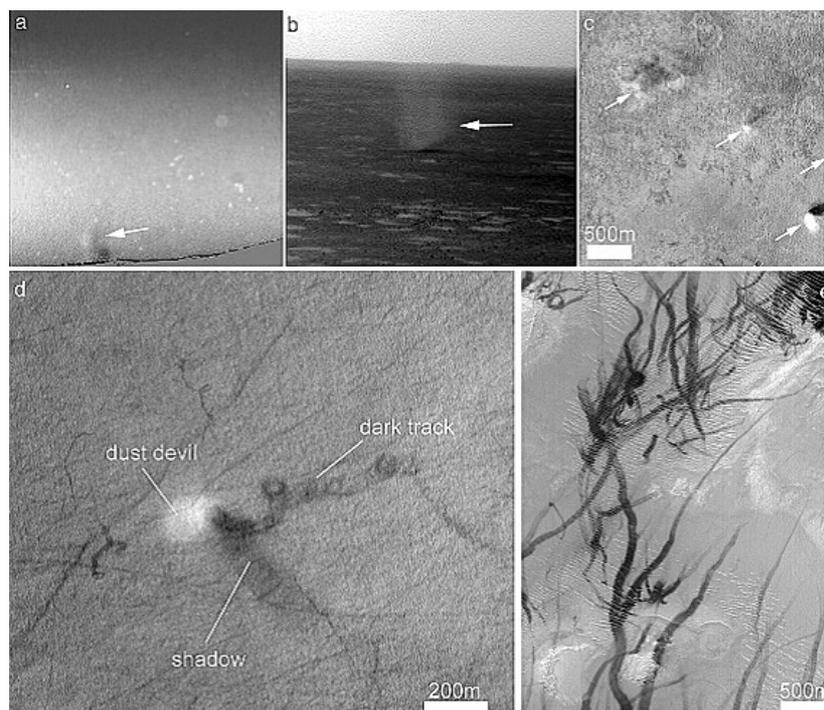


図 2: 火星におけるダストデビルの一例. (a)MPF IMP で観測された (矢印で指された) 色の不明瞭な円筒形ダストデビルのデータ. この直径 10 ~ 20m と見積もられた. 詳しい記述は Metzger et al. (1999) にあると思われる. 実際の画像処理は背景の霧からダストデビルを抜き出す手法を用いている. (b)MER Spirit Navigation camera 画像により地表で観察されたダストデビル. MER 画像の方が MPF 画像よりもずっと容易にダストデビルを見ることができ, また, より画像処理する必要がない. このダストデビルの直径はオーダー 10m である. (c) 軌道衛星から撮影された, 火星の地表面でのダストデビル. (矢印で指された) 鉛直のダストの円筒から直径はオーダー 100m と見受けられる. 光源は南西方向にある; 図 2c は北が上となっている. (d) このダストデビルの直径はオーダー 100m であり, その軌跡は MOC NA によって観測された M1001267 画像である. その軌跡は巻き取ったような形をしている. (e) 砂丘やリップル (風などの作用により, 粘性のない堆積物上にできる規則的な峰と谷からなる地形) のような地形上にできた多くのダストデビルの軌跡. このような MOC NA 画像の中には, 数百ものダストデビルの軌跡を含むものもある. なお, (a) は Metzger et al. (2000) より引用し, 著作権元は 2000 IEEE. 図 2a は NASA MPF 画像 165020033, 165020103, 165020173 である. (b) は NASA/Jet Propulsion Laboratory(JPL) より引用し, (c) は MOC NA で撮影された画像 R1104573(MOC2-600 日の Malin Space Science Systems 画像) であり, NASA/JPL/Malin Space Science Systems より引用した. (d) は NASA/JPL/Malin Space Sciences Systems より引用し, (e) は NASA Planetary Image Atlas 画像 PIA02376 であり, NASA/JPL/Malin Space Science Systems より引用した.

3 地球と火星のダストデビル

ダストデビルの研究は主にその場観測を用いた直接的な観測方法とモデルを用いた間接的な観測方法が用いられている。まず、この節ではその場観測に注目して、地球のダストデビルと火星のダストデビルの観測結果を比較していくことにする。

3.1 観測の背景

地球のダストデビルはその場観測に重点を置いており、火星のダストデビルは画像処理による観測に重点を置いている。

地球のダストデビルの研究は Baddeley (1860) の記述に始まり、現在まで 100 年以上にわたって続けられている。これらの研究の多くは他の気象現象に付随するものとして行われてきたが、中にはダストデビルに焦点を当てた研究もある。そういったものの中には、ダストデビルが周囲の対流に与える影響や乾燥地域の侵食、堆積物の輸送における渦の役割や、軽量の無動力飛行機に与える危険性を理解するために行われているものもある。

一方、火星のダストデビルは Thomas and Gierasch (1985) によってすでにその存在の仮説が立てられていたが、VO によって火星で最初に発見され、正式に火星にダストデビルが存在することが分かった。その画像には長く細まった影を持つ、小さな明るい雲として映し出されていた。その後の調査で何千ものダストデビルが VO 画像により発見されたが、より有効な解像度の高い MOC NA/WA の画像が用いられた後は、さらに多くのダストデビルが火星上で確認された (図 2c と 2d)。また、ダストデビルは MEX HRSC の画像によっても観測された。ダストデビルそのものに加えて、「渦の軌跡」という、のちにダストデビルの軌跡と判明する地表に残された線状の跡が MOC NA 画像により多く発見された。ダストデビルはまた、MPF IMP (図 2a) や MER Spirit (図 2b) などの着陸船によって火星の地表面からの直接的な画像を通して観測され、また Viking や MPF 着陸船上を通過するものは気象データから推測されてきた。地球上のダストデビルは何十年間も詳しく研究されてきたが、ダストデビルがどのように形成されるか、両惑星の気候にどのような影響を与えるかの一般的概観を記述する動機付けになったのは、このように VO, MPF-IMP, MGS, MOC, ODY, THEMIS などの火星探査機によって火星でそれが頻繁に起きているという発見や、近年の MER や MEX HRSC による画像である。

これからの数十年間は、火星のダストデビル現象を理解するために、これまでなかったようなロボットによる火星調査の時代となったり、人間による最初の探査が行われたりするだろう。Balme and Greeley (2006) はそのために、火星の環境についてよく理解することは重要であり、ダストデビルの形成過程の観察も必要なものであると提唱した。また彼らは、ダストデビルは火星の気候や地表 大気間の相互作用及び大地の侵食とダストの堆積の循環に関する科学的な疑問にも関係してい

ると提唱し、今こそが、地球と火星の両方で起きるダストデビルに関するこれまでの知識を精選してまとめ、将来行うべき研究に対する指針を与えるかっこの時期であると主張した。

表 1: 文中に出てくる略称の正式名称と日本語表記

略称	正式名称	日本語表記
GCM	general circulation model	大気大循環モデル
HRSC	High-Resolution Stereo Camera	高解像度ステレオカメラ
LES	Large Eddy Simulation	大規模渦シミュレーション
MER	Mars Exploration Rover	マーズ・エクスプロレーション・ローバー
MEX	Mars Express	マーズ・エクスプレス
MGS	Mars Global Surveyor	マーズ・グローバル・サーベイヤー
MOC	Mars Orbiter Camera	マーズ・オービター・カメラ
MPF-IMP	Mars Pathfinder-Imager for Mars Pathfinder	マーズ・パスファイダー画像
NA/WA	narrow angle/wide-angle	狭範囲/広範囲
ODY	Mars Odyssey	マーズ・オディッセイ
THEMIS (VIS/NIR)	Thermal Emission Imaging System (visible/near infrared)	熱放出画像システム (可視/近赤外)
ULF	ultralow frequency	超低周波
VO	Viking orbiter	バイキング・オービター
VL	Viking lander	バイキング・ランダー

3.2 ダストデビルの具体的な測定方法

ダストデビルの風速、圧力、温度、ダスト含有量の具体的な測定方法は、その場観測やリモートセンシングを用いて行われる。現在のリモートセンシング技術は、特に直径がオーダー 1~10m とした地球のダストデビルを捉えられるほどの解像度がないので、ほとんどのデータはその場観測で行われている。その場観測は同時にいくつものパラメータを得られるという点で有利であるが、一方で精密機械を傷つける可能性のある環境場やダストデビルの寿命の短さ、発生の予測ができないといった技術的な問題に対処しなければならない。その場観測では、強固で持ち運びできるサンプリングシステムが要求される。研究地域の選択もまた重要である。目に見えるダストデビルの活動が頻繁に起こって観測することができ、サンプリングシステムを持って速やかに移動できるような地表面でなければいけない。地球の場

合, さらにアクセスが容易であるという条件も加わる.

3.3 大きさと形

ほとんどのダストデビルはその幅より少なくとも5倍以上の高さを有しているが, 中には極端に背が高く細いものや, 高さより幅の方が大きいものもある. ダストデビルは地面付近で最も粒子が密集している. その粒子の密度が大きく, はっきりした円筒形の核³が存在しているとき, 核はしばしば進行方向に対して鉛直方向に約10°傾斜するが, 時にはせん断的な風の流れのせいで全く違う方向に曲げられることもある.

地球のダストデビルは一般的に高さがオーダー1mから1kmほどであり, その直径⁴は100mより小さい. Sinclair (1965), Flower (1936), Williams (1948) のデータによると, ダストデビルの約12%は高さ3m未満で, 300m以上の高さを有するものはわずか8%にすぎない. しかしながら, Bell (1967) が報告したところによると, ダストデビルは1000~2500m上空の大気でも観測されたという. ダストデビルの高さは大気の状態やダストデビルに含まれるダストの特徴によって最も左右されやすく, 視認できる高さはそのダストデビルがどのくらい多く高くダストを巻き上げることができるかによって支配される. Sinclair (1966) は「典型的な」ダストデビルの垂直構造を3つの領域に分けた. 領域1は表面界面領域で, 多量の粒子が詰まっている「渦境界層」⁵から成っている. ここでは乱流的な流れがダストデビル中心に向かって発生している. 領域2はダストデビルの主要部で, 回転するダストがほぼ垂直な円筒形を形作ることによって特徴づけられている. この円筒と周囲の空気間でのダストの交換はほとんど行われていない. 領域3はダストデビルの天頂部で, 回転が衰え, 核に含まれていたダストが周囲の大気に流され, 排出される場所である.

Sinclair (1965, 1969) や Ryan and Carroll (1970), Snow and McClelland (1990) は大きなダストデビルのサンプルから統計力学的に詳細な直径の計測法を確立した. 結果は図3に示したように平均で約7mの直径を持ち, その分布はより小さいものの方に偏る傾向にある. しかし, Snow and McClelland (1990) と Metzger (1999) は, 小さいダストデビルは観測点からの距離が離れているため, 「定点」観測では報告されないと主張した. だが, Carroll and Ryan (1970) の研究は小さいダストデビルがきちんと報告されている. 彼らの研究は図3dに示されるように500m × 300mの研究領域でしか行われていない. 彼らの研究領域は狭いので, その定点データは非常に信頼できるものであり, 発生の頻度は大きさに反比例の関係にあることが示された. Renno and Bluestein (2001) は有効な大規模な場の鉛直渦度は3節で述べるように, ダストデビルの直径を制御すると示唆している⁶.

³core を訳したもの.

⁴直径はダストデビルが最もダストを含んでいる核の内径と定義されている.

⁵ここでいう渦境界層とは, 狭い領域内で渦度が急激に変化している境界層と考えられる.

⁶恐らく, 接線速度 V を制御することで直径を制御できることだと考えられる.

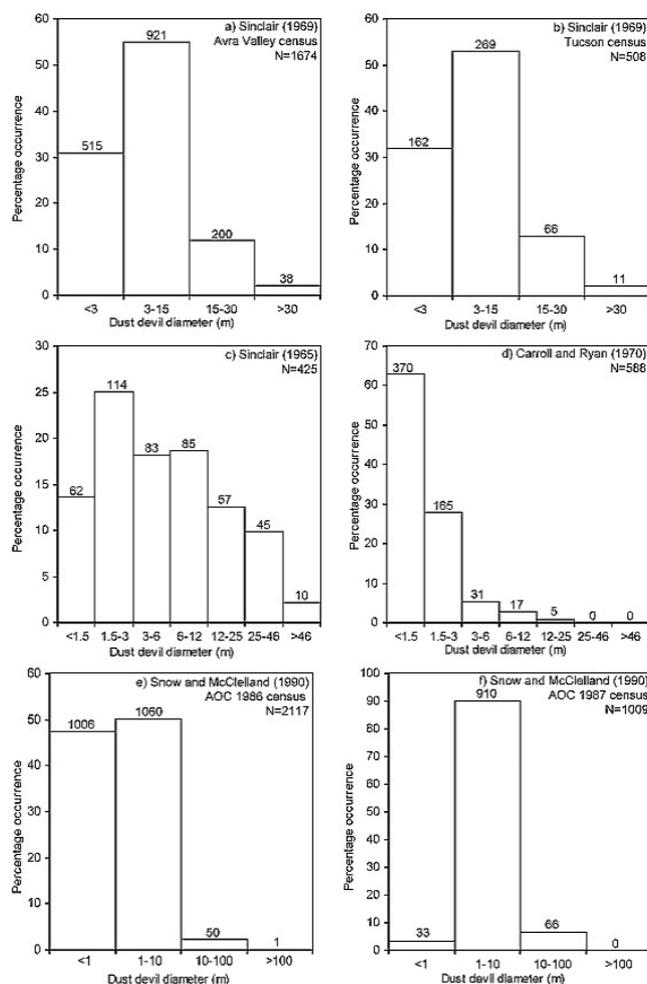


図 3: 6 つの研究から描いたダストデビルの直径の例. いずれも横軸はダストデビルの直径を, 縦軸はダストデビルの観測総数に対する発生率を表しており, N はダストデビルの観測総数を, 棒グラフ上の数字は観測されたダストデビル数の内訳である. (a)Sinclair (1969), 観測場所はアブラ峡谷, (b)Sinclair (1969), 観測場所はツーソン, (c)Sinclair (1965), (d)Carroll and Ryan (1970), (e)Snow and McClelland (1990), AOC 国勢調査 1986 一年間の記録, (f)Snow and McClelland (1990), AOC 国勢調査 1987 一年間の記録. この結果は, 図 3c を除いて, 観測プログラムによるものであり, また, Flower (1936), Williams (1948), Sinclair 独自の研究, そして Sinclair (1965) にあるようなツーソンでの大気物理学協会ダストデビル観測プログラムによるデータからの結果に結びつく物である. ダストデビルの直径は, ダストデビルの底辺で視認できるダストの雲の直径を参考にしている. ただし, 図 3e と 3f で示される Snow and McClelland (1990) の結果は例外である. Snow and McClelland (1990) は, ダストデビルの大きさを小, 中, 大, 巨大に高さと同様の両方を分類している. しかしながら, 直径の大きさは, ここでは大きさごとに分類する意味がさほど無く, ダストが持ち上げられた高さによってのみモデル化されていることを示している.

地球のダストデビルに対して火星のダストデビルは、周回衛星からの観測によると、高さがオーダー 1km、直径がオーダー 100m に及ぶことも多くある。また、その底辺は狭く、天頂部は広がっている傾向にあることも発見された。発生頻度も多く、最高で 10 個のダストデビルが 1 つの MOC WA 画像で観測された。表 2 は、火星のダストデビルは大きさのオーダーが地球のものより大きく、また、地表面の画像を直接見る限り、より小さい例もたくさんあることを示している。MER からの最近の (たとえば 2005 年 8 月 19 日 NASA MER Spirit 社発表の) 画像により、初期の IMP から観測ですでに発表されていたことだが、火星と地球のダストデビルは (図 2b と図 1a ~ 1c を比較して) 形態が似ており、かなり共通点があるという仮定が正しいことが確かめられた。

ダストデビルの軌跡の幅はダストデビルの直径として見積もられてきた。Edgett and Malin (2000), Malin and Edgett (2001), Blame et al. (2003b) は、ダストデビルの軌跡の多くは幅がオーダー 10m であり、その軌跡を残したダストデビルの直径はどうかその幅とほぼ同じ大きさであるらしいと記述した。観測された中で最大の軌跡は、ダストデビルの活動の画像により発見されたもので、その直径はオーダー 100m にも及ぶものであった。

ダストデビルの形態は (図 4 のように) 円筒形をなすものもあるし、逆円錐形をなすものや、乱れたダスト雲をなすものもあり、広く異なっている。Metzger (1999) はエルドラド渓谷地域で観測されたダストデビルの約 95 % は V 字型で、わずか 4 % ほどが厳密に円筒形と定義できることを発見した。また、彼はめったに起こらないが、構造らしいものがなく寿命が短い活動的な「ローブ状」の構造をもつ、周囲に広がって回転するダストの塊を観測した。「典型的な」ダストデビルの下層構造は、「頂点が地面に接する、または近づく逆さまの三角錐」や (図 1c に示すように) 地面上空のある点においてより円筒状になる傾向がある凸レンズ」として表現されてきた。これらの研究の中には、観測されたダストデビルのほとんどは中心にダストが存在しているが、他方で中心にダストがないものはめったにないとも言われている。Metzger (1999) は、ダストデビルの形の違いはもしかしたら地形の違いによって生じているかもしれないと提示している。円筒形の渦は滑らかなプラヤ⁷上でより一般的に見られ、V 字型のものは荒く、低木のある沖積平野上でより頻繁に発見される。このことから、ダストデビルの強度と渦度に加えて、粒子の大きさや密度の異なる様々な物質が存在することで、観測されたような様々な形態が生じるということが分かる。

最後に、地球での観測例だが、ダストデビルは準渦⁸を含んだり、その通った後を追う寄生型の渦をもったりすることが頻繁にある。Hallett and Hoffer (1971) は、準渦の消失、分割、再形成を描写した。Metzger (1999) は、個々のダストデビルは、特に異なる地形をまたぐように移動する時、その移動に伴って形を変えることがあり、また時には、再び形作られる前に消滅することがあると主張した。

⁷playa を訳したもので、乾燥した平野のことを指す。

⁸準渦とは、渦の構造をしているが、渦と呼ぶには小さすぎるものと考えられる。



図 4: 「典型的な」ダストデビルの異なる形態の例. (a) 細長く背の高い, はっきりとした円筒形. (b) ほとんどはっきりしない筒状の V 字型のダスト雲. (c) 内部に筒状の核が見えない, ほとんどはっきりしない V 字型. 図 4a は直径がオーダー 1m である; 観測場所はペルーのサバンキャヤ火山. 画像の引用元は S. Metzger, Planetary Science Institute, Tucson. 図 4b は (内部に円筒部分で) 直径がオーダー 10m である; 観測場所はネバダ州エルドラド溪谷. 画像の引用元は S. Metzger, Planetary Science Institute, Tucson. 図 4c は (地面に接した部分で) 直径がオーダー 50m である; 観測場所はネバダ州エルドラド溪谷. ダストデビルの観測装置がダストデビル前方に見える. 画像の引用元は S. Metzger, Planetary Science Institute, Tucson.

表 2: 火星のダストデビルの観測例

観測方法	論文名	観測機の名称	観測数	高さ [km]	直径 [m]
画像処理	Thomas and Gierasch (1985)	Viking(周回衛星)	~ 100	1 ~ 2.5	70 ~ 1000
	Wennmacher et al. (1996)	Viking(周回衛星)	~ 30	平均 1.3	100
	Edgett and Malin (2000)	MOC WA(周回衛星)	NA	≤6	NA
	Metzger et al. (1999)	MPF IMP(着陸船)	5	0.05 ~ 0.25	15 ~ 80
	Biener et al. (2002)	MOC WA(周回衛星)	NA	0.4 ~ 2.6	<1750
	Ferri et al. (2003)	MPF IMP(着陸船)	14	NA	15 ~ 550
	Fisher et al. (2005)	MOC NA(周回衛星)	≥20	0.17 ~ 1.8	28 ~ 509
	Fisher et al. (2005)	MOC WA(周回衛星)	≥14	3.8 ~ 8.5	NA
気象データ	Ferri et al. (2003)	MPF ASI/MET	19	NA	平均 ~ 200
	Ryan and Lucich (1983)	Viking 1 Lander Met	40	NA	10 ~ 700
	Ryan and Lucich (1983)	Viking 2 Lander Met	78	NA	10 ~ 950
	Ringrose et al. (2003)	Viking 2 Lander Met	8	NA	20 ~ 450

a ASI は atmospheric structure investigation, MET は meteorology experiment, Viking Met は Viking lander meteorology experiment の略称である。また、表中の数字の前の「~」はオーダーを、「NA」は観測機器の誤差や故障などにより有効な数値を観測できなかったことを意味表している。

b これらのデータは核のものか接近によるもののどちらかのみが含まれている。(この型は Ringrose et al. (2003) のタイプ 1, 2 で定義されているものである。)

3.4 ダストデビルの発生条件

地球のダストデビルは通常乾燥地域の夏最も発生しやすく、その発生地域としてアメリカ南西部やアフリカ、オーストラリア、南アメリカ、そして中東や中国、カナダの亜北極地域などがあげられる。中でも特に理想的な研究地域はプラヤとその

周囲の地形であり、特にネバダ州エルドラド盆地と南カリフォルニアのモジャヴェ砂漠の2つのプラヤはいくつかの研究の名所となっている。

Sinclair (1966) は、対流の渦とダストデビルはただ単に強い日射によって地面が暖められるだけでなく、大気が垂直方向に不安定になった末に発生し、顕著な大気の超断熱温度上昇率⁹や渦度源、砂やダスト、岩屑の供給があるところであればどこにでも発生すると記述した。これらは地球の夏の期間における暑い乾燥地域に共通して起こる状態だが、渦やダストデビルは暖かい地面の上空に冷たい空気が広がる冬や秋、あるいは亜北極の冷たく乾燥した状態でも発生する。

ダストデビルの発生頻度は多くの要因によって左右される。もっとも多くダストデビルが生じる地域は乾燥したプラヤや、干上がった川底のような熱い平らな地表面であり、特に新しく耕され、灌漑された畑周辺でもダストデビルは多く見られる。緩やかな傾斜ではダストデビルが生じやすい；山や丘では生じにくい。ダストデビルは、地表を植物や岩石が覆っている状態でも、活動を妨げられることはない。たとえば、Metzger (1999) は地表の40%以上を岩石で覆われたネバダ州ではダストデビルはほとんど存在しないが、17~25%を岩石で覆われた地域は多くのダストデビルが観測されていることを発見した。ペルーのアンデスでは、Metzger (2001) が火山地形の巨岩地域で熱流がまるで「繁殖地帯」のように生じ、一週間に数千個ものダストデビルが生じていることを観測した。地形によるダストデビルの活動の制御はWilliams (1948) や McGinnigle (1966), Hallett and Hoffer (1971), Hess and Spillane (1990) など、地域的な尾根に沿って平行に形成する線状のダストデビル群を報告した人々によって示され、観測されることもある。

ダストデビル頻発地域の理想的な地域の特徴は、[1] 恒常的に強い日射がある地域で、[2] 木々や建造物、草がほとんどなく、いくらか岩石で覆われた乾燥地域であり、[3] かつ緩やかな傾斜地形であることだ。Sinclair (1969) は、理想的にダストデビルを形成する地域的条件として以下のものを記述した。[1] もろい地表面上の物質の膨大な供給があり、[2] 「ホットスポット」¹⁰や土壤温度が異常に高い地域で、[3] 小さな渦巻を生み出せる風の流れの局所的障害がある、もしくは反対に渦を局所的に集めることができ、[4] (灌漑地域や乾燥した砂漠のような) 熱的に強い水平勾配が起こりうる、特徴的に異なる地形の境界があること。

一方、火星で最も頻繁にダストデビルが形成される場所を決定づけるのは困難であるといわれている。それは観測されたデータ数が非常に多く、火星の地域ごとでまとめることは困難だからである。ただし、その過程は現在自動にできるほど進歩している部分もあるようだ。ダストデビルの本体の代わりとしてダストデビルの軌跡の調査が行われてきたが、その研究データは未だに一部の地域に限られている。それらの軌跡のほとんどは火星の春と夏にあたる地域の画像で発見されていると

⁹超断熱温度上昇率とは、大気の高さによる断熱温度上昇率がよりきつい温度勾配をもつことをいう。

¹⁰ここでいうホットスポットとは、土壤温度が非常に高いため、空気が急激に上昇しやすい地域という意味だと考えられる。

いう共通性がある。特に活動的なダストデビルの活動が発見されてきた地域の中には、アマゾニス平原 (30 °N, 190 °E 付近) やカシウス (40 °N, 90 °E 付近) のような北半球の低層地域や、アルギュレ平原 (50 °S, 340 °E 付近) を含んだ南半球の広大な領域がある。Fisher et al. (2005) は、アマゾニス平原で多くのダストデビルの活動を観測したが、それはダストデビルの軌跡にはほとんど関係がなく、またカシウスで発見された多くのダストデビルの軌跡もダストデビルの活動には関係なかったと提唱した。このことから、ダストデビルの軌跡はダストデビルの活動にほとんど関係ないのではないかと推測している研究者もいる。しかし、Geissler (2005) は、より多くのダストデビルの軌跡が周囲の地表面の明るさに関係なく、ニロシルチス (45 °N, 85 °E 付近) の暗い地域である 45 °~60 °N 間で発見され、またファエトンティス (50 °S, 210 °E 付近) の 45 °~60 °S 間でダストデビルの軌跡の数が増えていることを見つけた。また、Grant and Schultz (1987) と Balme et al. (2003b) は、ダストデビルの軌跡が 50 °~60 °S 間に最も多く存在することを発見した。

Balme et al. (2003b) は、ダストデビルの軌跡の構造は地表面に豊富にあるダスト¹¹によって左右されていると示唆している。ダストがより多くあるところには、より多くの軌跡が生じる。しかしながら、これまで行われてきたあらゆる領域の研究を見ても、軌跡とダストとの間に明確な相関関係はなく、領域の範囲がより広くなるほど、軌跡はより緯度に関係していると考えられる¹²。これらのデータは網羅的なものではないが、これらは両半球の緯度 30 °~60 °内におけるダストデビルによる侵食の増加を示しているが、しかしまたダストデビルの活動は地域によって非常に変わりやすいことを示している。

3.5 ダストデビルの発生率の日変化と寿命

ダストデビルはそのほとんどが午前の終わりから午後の始まりにできる。地球のダストデビルは現地時間の 10:00 以前および 17:30 以降ではほとんど発生しない。Sinclair (1969) と Metzger (1999) は、ダストデビルの大きさは一日を通して一定でないとして記述している。Sinclair (1969) は小さなダストデビルは大きなものより早く活動のピークを迎えることを発見し、また、これは超断熱温度分布が大気の下層で形成されるのにかかる時間に反映している¹³と提唱している。しかしながら、Metzger (1999) は、最も背の高いダストデビルは現地時間の 11:00 付近に発生しており、1 日の後半にはその高さはオーダー 150m で安定すると報告している。

それに対して火星では、MPF により観測された約 80 個の対流渦の解析から、ダストデビルの日変化の運動においてある顕著な傾向を示していることがわかった:

¹¹ダストデビルが地表面から細かいダストを巻き上げるため、ダストデビルの軌跡の表面はより粗い砂粒で構成されることになる。つまり、それはダストデビルの軌跡部分のアルベドが周囲の地表面よりも小さいこととなり、Balme et al. (2003b) は、アルベドを観測することで火星表面のダストを観測しようとしたものと考えられる。

¹²原文にはこう書かれているが、なぜこう言えるのかはわからない。

¹³大気下層で超断熱温度分布が形成されるとき、その厚さによってダストデビルの大きさが支配されているが、その厚みが形成されるまでにはある程度時間がかかる、という意味だと考えられる。

ほとんどの渦は地球のダストデビルで見られるように、現地時間の 12:00 から 13:00 の間に発生している。Ringrose et al. (2003) が行った Viking 2 着陸船のデータ分析はほとんど明確な傾向は示さなかったが、直径が最大級のダストデビルはやはり現地時間で最も日射の多い 12:00 に発見された。

ダストデビルは、まず静的な期間があった後「突然形成」し、1 時間前後の強い活動を起こすことが頻繁にある。Carroll and Ryan (1970) は、短い時間スケール (5~15 分) のものではあるが、ダストデビルが似たようにふるまうと記述し、そのデータを大気対流の時間スケールがダストデビルの活動を支配することを示すものだと解釈した¹⁴。Sinclair (1969) は、特にダストデビルの活動が強いとき、その活動によって超断熱境界層が「かき回される」と示唆し、また、その活動はダストデビルの形成を抑制するように働き、ダストデビル自身が再形成するにはある程度時間を要すると示唆した。彼らの研究は地球で行われていたものだったが、火星においてもまれにこの現象が確認されている。

地球上のダストデビルは一時的な現象でそのほとんどが数分間しか続かないが、Snow and McClelland (1990) と Metzger (1999) は、移動に伴い成長・衰退するような小さいダストデビルにおいて特にその寿命は短すぎるかもしれないと記述している。Metzger (1999) や Ives (1947), Mattson et al. (1933) は、大きなダストデビルが 30 分から数時間の寿命を持つという珍しい発生を報告している。Ives (1947) は、4 時間以上存在した大きく動かないダストデビルや、ユタ州で 7 時間以上の寿命を持ち、オーダー 60km も移動した大きい移動性のダストデビルを報告した。Ives (1947) や Sinclair (1969), Metzger (1999) は大きなダストデビルは小さいものより長い寿命を持つことを発見し、Ives (1947) は 300m 高くなる毎に持続時間は 1 時間伸びると、ダストデビルの高さや寿命を経験上関係づけられると提唱している。

一方、火星のダストデビルの寿命は地球のものほど詳しく調査されていない。しかし、長寿命の Viking 着陸船や周回衛星、MGS のミッションにより、火星のダストデビルの活動は上空と地表面の両方からの観測・測定を数年にわたって行うことができた。これらの観測によって火星の 1 年よりずっと短い時間スケールで軌跡が「消える」ことが示された。また、これらの研究により、ダストデビルの活動は季節変化による日射量の大きさに依存することが判明した。

以上のように、ダストデビルの発生頻度は季節や時間、地域に強く依存していると言われているが、ほとんどの研究は広範囲を網羅していない。なぜなら、必然的に調査はダストデビルが頻繁に形成される地域に集中しているからだ。1 日に観測されるダストデビルの数は、表 3 で表されるような研究領域の大きさに依存しており、小さいダストデビルはしばしば無視するという事実が問題となっている。Carroll and Ryan (1970) は、地球では 750 個以上のダストデビルが 1km^2 、1 日当たり発生する可能性があることを発見した。

¹⁴大気対流の時間スケールが大きいほどダストデビルの活動が活発になり、対流の期間スケールが小さいほどダストデビルの活動も弱まるということだと考えられる。

表 3: 地球のダストデビルの発生頻度の観測例

論文名	観測期間	観測日数	観測総数	観測範囲 [km ²]	平均活動個数 [/day/km ²]
Fitzjarrald (1973)	Jul-Oct	12	156	0.15	86.67
Carroll and Ryan (1970)	Apr-Sep	10	1151	0.15	767.33
Snow and McClelland (1990)	May-Aug	61	2117	64.50	0.54
Snow and McClelland (1990)	Apr-May	36	1017	33.80	0.84
Sinclair (1969), Tucson	Jun	11	610	500.00	0.11
Sinclair (1969), Avra Valley	Jun-Jul	22	1663	388.00	0.19

3.6 回転方向の傾向

長年論争上の問題となってきたが、ダストデビルにはどちらの向きに回転しやすいという傾向があるのだろうか。表 4 は地球のダストデビルの回転方向を観測した例で、右回りと左回りの割合はほぼ等しいことを示しているが、観測された中で最大級のダストデビル (直径 25m 以上) は右回りになる傾向にある (65 % が右回りの渦である)。Brooks (1960) は観測されたダストデビル 100 個すべてが右回りであることを発見したが、彼はまた、しばしば観測者がその回転方向を見分けるのは難しいと記述した。観測上の問題を克服するために、Sinclair (1965) は、2 人の別々の観測者が同じ方向と判断したもののみを取り出した。彼のデータはどちらの回転方向が多いかを明確に示していたわけではなく、Brooks (1960) のデータは依然例外として残っている。結論として、ダストデビルには回転方向の傾向はなく、これは理論ともよく一致している。その理論とはすなわち、最大級のダストデビルでさえ、コリオリ力が無視でき、地球の自転による影響を受けないほどとても小さいものであるということである。最終的に、そして不思議なことに、ダストデビルの観測例の中には、その回転方向を全く逆方向に捉えられているものもある。

一方火星のダストデビルの回転方向は、その場観測により得られた典型的な風のデータを用いて推測された。すでに提唱されているものに、火星のより大きなダストデビルは地球のものよりも惑星自転による影響を受けやすいだろうというものがあるが、しかしながら Ryan and Lucich (1983) も Ringrose et al. (2003) も、回転の方向になんらかの規則性を見出すことはできなかった。

表 4: 地球のダストデビルの回転方向の観測例

論文名	ダストデビルの総数	右回りの数	左回りの数	備考
Durward (1931)	29	30	0	高さ 1m 未満のとても小さい渦
Flower (1936)	374	199	175	
Williams (1948)	21	9	12	
Brooks (1960)	100	100	0	
Sinclair (1965)	144	60	84	Sinclair 独自のデータ
J. E. McDonald (1960)	38	9	29	Sinclair (1965) による報告
CDOP	88	53	35	Sinclair (1965) による報告
Carroll and Ryan (1970)	588	314	274	
Fitzjarrald (1973)	154	86	68	Carroll and Ryan (1970) と同じ観測場所
Total	1536	860(56 %)	677(44 %)	

a CDOP は Cooperative Dust Devil Observation Program の略称である。

3.7 ダストデビルの風速構造

風速の測定には、多くのデータから一般的な傾向を見る方法が、もしくは特定のダストデビルをいくつか選択してその詳細を見る方法が用いられている。風速は普通ダストデビルの中心を原点とした円筒座標系として引用され、動径速度 U 、接線速度 V 、鉛直速度 W を含んでいる。また、風速の全水平成分の大きさ $V_h = \sqrt{V^2 + U^2}$ は、方向を重要視しない場合にしばしば用いられる。Sinclair (1964, 1973) になって多くのダストデビルの観測はほとんど高さ約 2m で行われるが、ダストデビル研究の中には地面にごく近い場所で行ったり、約 23m の高所で行ったりするものもある。

表 5 は地球のダストデビルの「一般的な」風速の観測データをまとめている。 V は普通 5 ~ 10m/s であり、その最高値はオーダー 20m/s にまで及ぶ。 V_h はオーダー 25m/s の値をとり、その場観測によるこの値は 11m/s や 22m/s のライダー¹⁵を用いたりモートセンシング観測による V_h の値とほぼ一致している。鉛直速度は一

¹⁵特殊なドップラーレーダーのこと。ダストデビル内のある成分を遠方から決めるときに用いられる。ダストデビルにあるレーザー波を当て、ダストデビルに含まれるダストに当たり、跳ね返ってきた波の波長の変化を測定する。これにより風速が求められるが、成功例は少ない。また、11m/s や 22m/s という数値はレーダー波の位相速度だと考えられる。

表 5: その場観測による地球のダストデビルの風速データ

論文名	観測 総数	V_{mean}	V_{max}	V_{hmean}	V_{hmax}	W_{mean}	W_{max}
Sinclair (1964)	4	NA	NA	9.3	13	NA	NA
Ryan and Carroll (1970)	80	4.2	9.5	NA	NA	0.7	2
Fitzjarrald (1973)	11	7.3	11.5	NA	NA	1.3	4.25
Sinclair (1973)	3	10.8	11.5	NA	NA	13.3	15
Metzger (1999)	5	13.6	22	NA	NA	5.2	7
Balme et al. (2003a)	10	NA	NA	17.0	25	NA	NA
Tratt et al. (2003)	3	NA	NA	8.8	11.0	3.3	3.5

- a) Tratt et al. (2003) 以外のデータは全て高さ約 2m での観測したものであり, Tratt et al. (2003) のみ約 3.5m の高さで観測したものである. また表中の「NA」は観測機器の誤差や故障などにより有効な数値を観測できなかったことを表している.

一般的にその最大値の 1/4 程度である. W がより大きな値をとると示唆しているのは, Sinclair (1973) と, 定性的な見積もりを行った Ives (1947), Hallett and Hoffer (1971) のみである. 典型的に, 地球のダストデビルの水平成分の風速は 25m/s 未満で, 垂直成分の風速は 10m/s 未満である.

Ryan and Carroll (1970) は (地球のダストデビルを 80 例以上観測し, 同じ研究地域における高さ 2m での V , W の測定及び直径を同時に見積もった) 数が多く, 速度や直径に矛盾のないデータセットを備えた. その結果, より大きなダストデビルはより大きな回転風速を持ち, より大きな回転風速を持つダストデビルはまた, より大きな鉛直風を持つ傾向にあることが示された (図 5).

ダストデビル内部の渦構造を理解するために必要な詳細なデータは, その場観測において解像度を高くすることが困難なため, 限られている. 水平成分の風速をダストデビルの中心から外側に向かって見ていくと, 中心では最小値をとり, 半径 (目に見えるほど多くダストを含んだ領域) では最大値をとり, そこから外側の回転がなくなる領域へと遠ざかるにつれて連続的にゼロに近づくことが分かった. これは特に図 6 で観測され, 風速の測定がダストデビルを通る垂直断面図によって示されている. 一般的に, 風速の水平成分はおおよそランキン渦で示される (図 7). Sinclair (1973) は約 2m および約 10m の高さでのランキンモデルにおけるダストデビルのデータの高精度な近似値を発見していた. また彼は近年の観測法から, 中心より外側のダストが回転している領域における風速の分布は $\frac{1}{r}$ より $\frac{1}{\sqrt{r}}$ の分布に近いと示した. これは, 地表付近の摩擦損失によって角運動量が保存されないことが理由だと考えられる. このことから, ランキン構造は地表面の影響が無視できる,

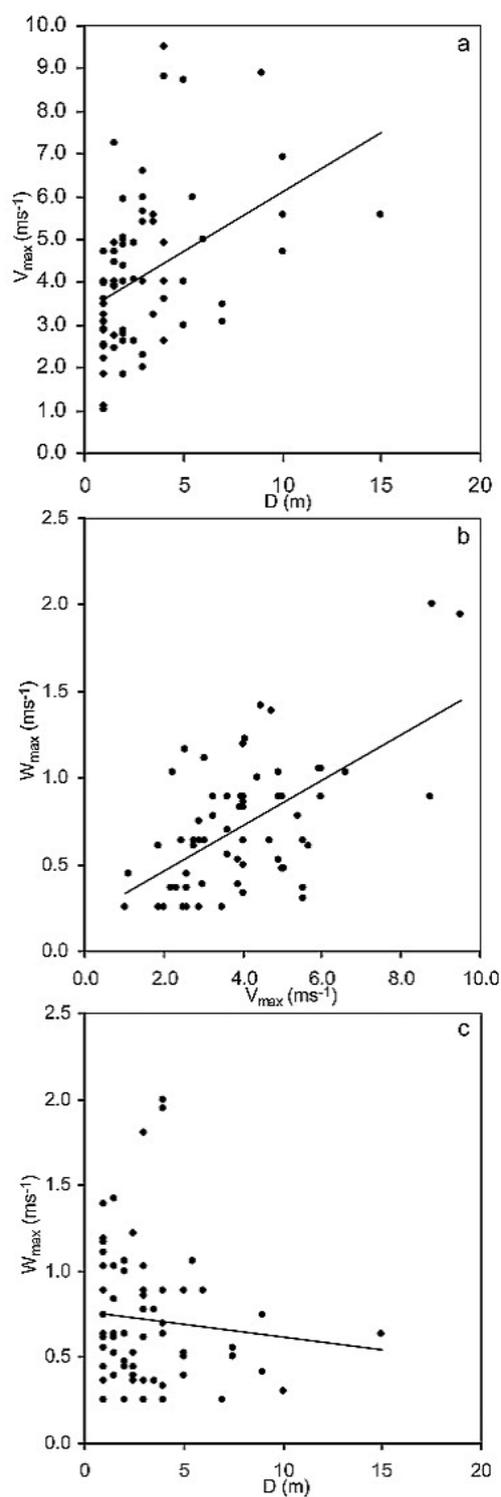


図 5: Ryan and Carroll (1970) による風速のデータ. (a) 横軸は観測されたダストデビルの直径 (D), 縦軸は接線速度の最大値 (V_{max}), (b) 横軸は接線速度の最大値, 縦軸は鉛直速度の最大値 (W_{max}), (c) 横軸はダストデビルの直径, 縦軸は鉛直速度の最大値. 直線は最小二乗法による直線である.

ダストデビルのより高度の高い領域で適用できる。

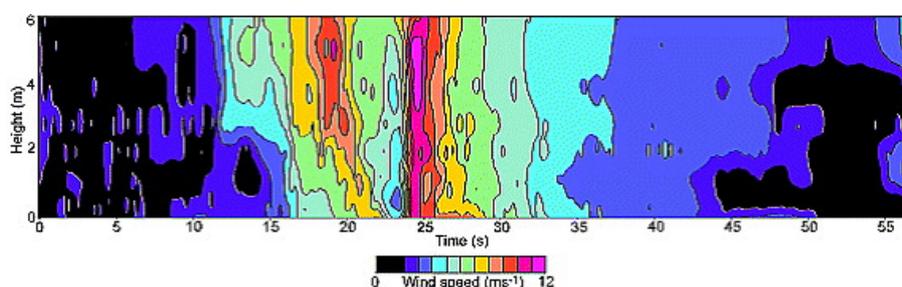


図 6: 2004 年 8 月にアメリカのモジャヴェ砂漠で観測された直径 2m のダストデビルにおける風の水平成分全体の時間変化のデータ。このダストデビルは左に向かって移動しており、ここで水平方向座標の代わりに用いた時間軸は鉛直座標の長さのスケールと合うように調節されている。(接線速度と動径速度をあわせた) 風速の最大値は目に見える核のすぐ外側で観測され、その観測場所は渦の前方の高さ約 4m のところだと記述されている。また、大きい風速がダストデビル後方の地面付近に広がっていると記述されている。図は Metzger et al. (2004a) より引用した。

ダストデビルの核でほとんど組織だった動径方向に対称な流れはなく、その代わりに核直下の地上付近では放射状の流入があり、その放射風が最大となるところはダスト円筒のすぐ外側の部分である。流入は、ダストデビルが地表を移動するとき、その進行方向の前後両方に発生する。目に見えるダストデビルの円筒は放射状の流入量のより大きい領域に取り囲まれるようにして現れる。Balme et al. (2003a) は、約 0.05 ~ 1.90m 間の高さの対数で表される水平風が線形的に増加することを発見し、その放射流入の層は少なくとも 2m の深さがあると提示している¹⁶。

研究者の中には、ダストデビルの中心付近に下降流を発見した者もいる。下降流は、ダストデビル内部の地面に近いところの方がある程度高いところよりも弱い(あるいは、地面付近では発生しない)。Metzger (1999) は、もっともダストデビルの中央で下降気流が存在しなくなるところは高さ 2m のところだと報告している。これは、地面から 2, 3m の高さには、渦のよどみ点と鉛直方向の流れの逆転があることを意味している(図 8)。

準渦や周囲の風、局地的突風はダストデビルが非定常であるという特徴をダストデビルに加えている。しかしながら、定常である単純なダストデビルは以下のように特徴づけられる。[1] 地表付近での放射状の流入(ダスト円筒のすぐ外側で最大流入速度を持つ)、[2] ダスト円筒内部の上昇流(中心で下降流の可能性もある)、[3] おおよそランキン渦であり、目に見えるダスト円筒の同じ半径上で最大値をとる接線風速。ダストデビルの中心では鉛直流が支配している。それはダスト円筒にあ

¹⁶この「水平風が線形的に増加すること」と「放射状の流入層の深さ」の関係が、どちらかが原因・結果という関係なのか、それとも併記の関係なのかはよくわからない。

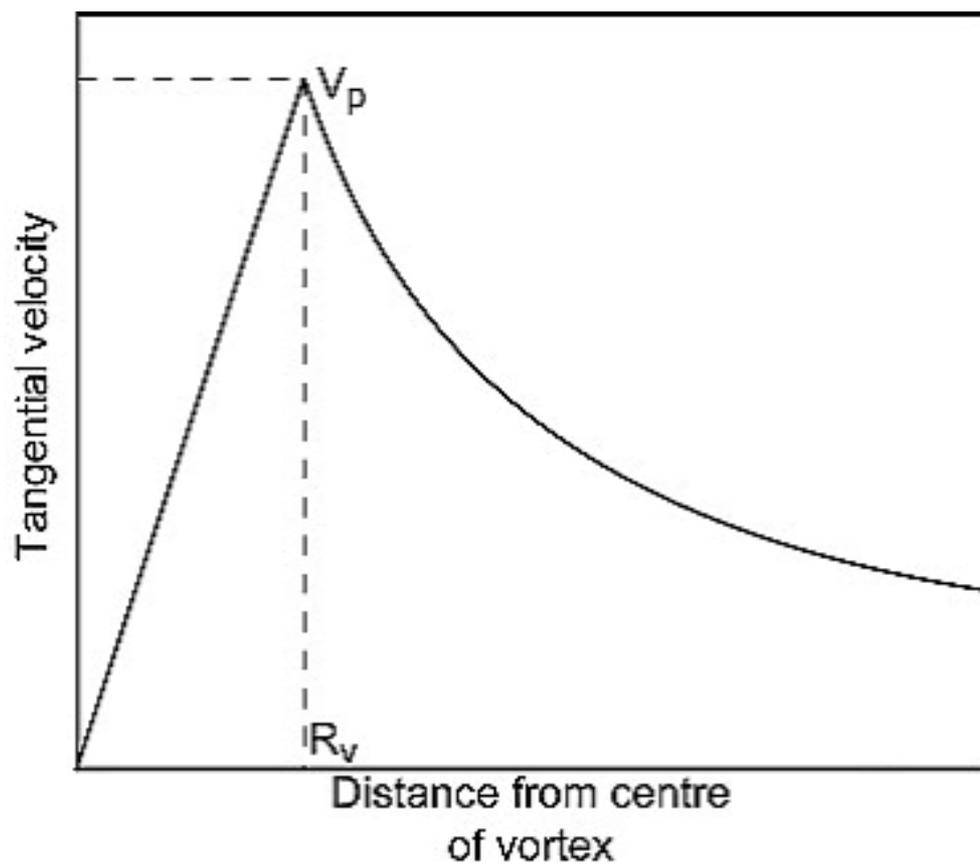


図 7: ランキン渦の垂直方向の構造. この渦は, (接線成分が半径の比例関数として上昇している) 中心領域の固体の回転と, (接線成分が半径の反比例関数として減少している) 外側領域のポテンシャル流で構成されている. 接線成分は, ダストの回転領域の端にあたる半径 R_v で最大値 V_p をとる.

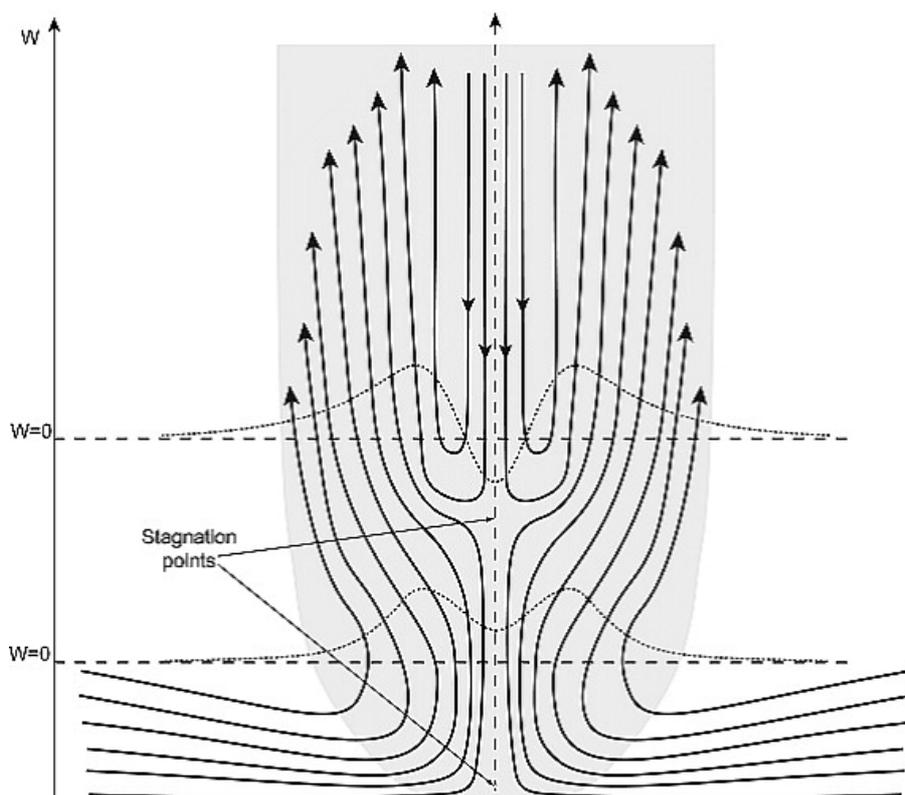


図 8: ダストデビル内の正の鉛直流の概略図. 矢印のついた実線は流れの方向を表している. 点線は, ダストデビルの速度場のデータをとったとき, その高さで観測された鉛直方向の速度を表している. 地表からすぐ上のよどみ点の存在により, なぜ下降流がダストデビルの中心において, 地表近くではなく地表からある程度の高さのところで見られているのかが説明できる. これはまた, なぜダストデビルの核内部で下降流を持つものと持たないものが存在するのかをも説明するだろうと言われている. 流れの逆転は, (ここで示されている通り) 地表から高い位置や, 地表近傍の位置で起き, あらゆるところで生じるわけではない.

り、回転と鉛直流が支配している。円筒のすぐ外側では流入と回転が支配している。ダストデビルにより影響を受ける領域のうちもっとも遠方にある領域のほとんどでは、ダストデビルに向かう弱い流入風のみであり、他とは異なっている。この構図は図9で示される。

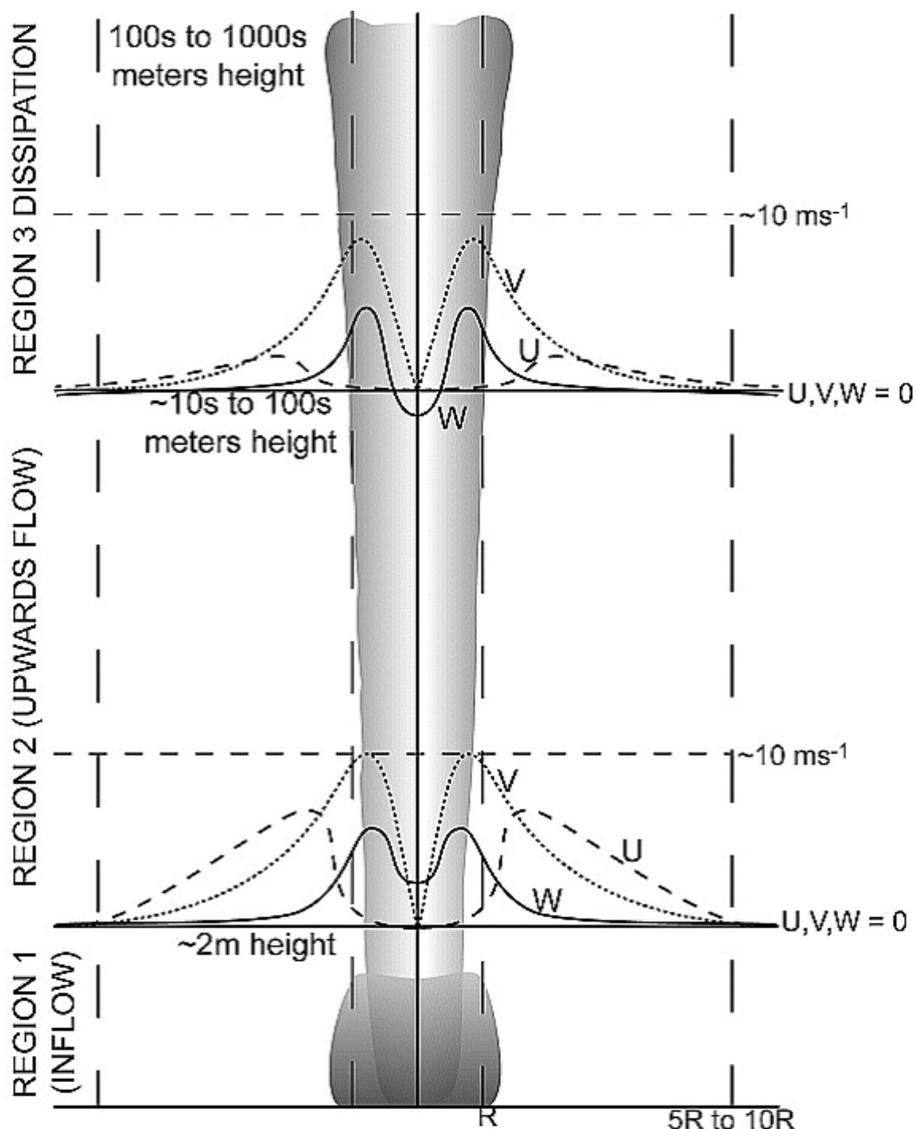


図9: ダストデビル内部の風速の概略図。 R はダスト円筒の半径であり、 U 、 V 、 W はそれぞれ動径、接線、鉛直方向の風速である。 W はここでは高所で負の値を取っているが、これがほとんどのダストデビルで生じているのか、それともほとんど生じていないのかは分かっていない。最大値は多くの典型的なダストデビルではオーダー 10m/s で与えられるが、 25m/s にまで跳ね上がることもある。図の左側にある領域 (Region1 ~ 3) は、Sinclair (1966) の定義を基にして描かれている。

地球のダストデビルのより高度の高い領域の詳細なデータは、リモートセンシングや航空機によってのみ知ることができる。Sinclair (1966) は装置を取り付けたセールプレーンを用いて大きなダストデビル上部の「熱的」鉛直方向の風速を測定した。高度 2000 ~ 4000m では、鉛直方向の風速が約 2 ~ 4m/s の、周囲よりオーダー 0.01 ~ 0.1K 暖かい上昇流が大きなダストデビル上部の直径 1 ~ 5km の領域を覆っていた。この鉛直方向の風速はしばしば流れの中心部で減衰し、中には中心に下降流が存在することをほのめかすものもある。Sinclair (1966) はまた、これらの上昇流の内部には下降流の領域があり、この構造は時間的に一定であると記述している。このことは大きなダストデビルは下降流に転じる前に高さがオーダー 1km にまで伸び、上昇流の直径がオーダー 1km にまで広がる、より大きく断続的な空気の流れにつながることを示している。この流れの逆転もまた、熱の中心であるダストデビルの核を通して、いくつかのダストデビルの地表付近で観測された下降流に関係づけられるかどうかは分かっていない。

一方、火星における Viking 1, 2, および MPF 着陸船による気象データのサンプルは、その場観測によって火星のダストデビルの活動を観測する唯一の方法である。近年の MER などの着陸船には気象データサンプル採取が専用のものはない¹⁷。MPF の風センサーに測定上の問題があったため、風速のデータ数は特に少ない。また、どの着陸船によるデータも、それが果たして本当に対流渦や目に見えるほど多く粒子を含んだダストデビルを表すのかどうかはわからない。なぜなら (MPF では、太陽電池力の低下を関係づけさせることで通過した渦がダストを含んでいると想定してはいるが)、その渦がダストを含んでいるかどうかを推測することは難しいからである。高度 1.6m の地点で 42m/s もの最大風速を観測した Ryan and Lucija (1983) の気象データから、これは Viking 1, 2 着陸船上を通過する対流渦だと計算された。彼らは、火星の地表面の物質を持ち上げるためには 30m/s 以上の風速が必要であり、このため発見された渦のうち風速が 30m/s を超えた 7 割がダストデビルだと見積もった。奇妙なことに、観測された最大風速のほとんどは冬の間に起きている。これらのデータを再調査した結果、Ringrose et al. (2003) は Viking 2 着陸船上を通過したダストデビルの例を 7 つ発見し、また、渦が「ニアミス」¹⁸したときの風速の測定や直径のデータの計算方法を改良した。高度 1.6m における 46m/s に及ぶ風速は着陸船機器の上を直接通過した渦から計算されるが、オーダー 100m/s に至る風速は (図 7 で表されたランキン渦接近を用いて)、無線センサーからダストデビルがその直径の 5 倍以内の距離を通った渦で予測される。Ringrose et al. (2003) は、渦がダストを含んでいるかどうか調べるために摩擦風速の閾値の基準¹⁹を用いて調査し、その結果、わずかに数個程度「ニアミス」したと予測される例のうち数個程度が、物質を巻き上げるのに十分に強い風であったことを発見した。

¹⁷火星着陸船の多くは、火星の地質調査を主な目的としている。

¹⁸接近遭遇ともいう。

¹⁹ダストを地表面から引き剥がすのに必要な水平風の大きさだと考えられる。

3.8 ダストデビル内部の温度と圧力変位

ダストデビルは普通、核に向かって小さい正の温度変位を有する。これらの観測方法の概略は表 6 に示している。オーダー 10K 未満の温度変位は一定に見えるが、観測率が高くオーダーの大きいダストデビルの核は温度の変化は 20K にまで及ぶと示されている。温度変位は高さ約 3m の地点でかなり安定しているように見えるが、核から遠くなるにつれてより不安定になる。暖かい核の周囲に冷たい空気の輪があると報告されているが、有効なデータが少なすぎて細かな温度構造を知ることはできない。

一方、Viking や MPF 着陸船により観測された火星のダストデビルの正の温度変位は最大で 5~6K だった。これらの大きさは地球で観測されたものと同様である。しかしながら、火星での温度差の観測はかなりサンプル率が低く、今後の火星探査でサンプル率が向上すると、地球で観測されたような高い温度のピークを持っていることが発見されるかもしれない。

表 6: その場観測による地球のダストデビルの中心での温度変位

論文名	観測装置	高さ [m]	観測数	温度差 [K]	温度変位 [K]
Sinclair (1964)	熱抵抗装置	4	2	~ 1	+4 ~ +8
Sinclair (1973)	熱抵抗装置	3	~ 2	~ 1	+3.5 ~ +5
Metzger (1999)	音波風速計	~ 20	2	~ 10	+8 ~ +22

a 表中の数字の前の「~」はオーダーを表している。

正の温度変位に加えて、ダストデビルの中心には一般的に負の圧力変位、すなわち「圧力の井戸」²⁰があると Ives (1947) によって最初に記述され、表 7 で示されている。Ringrose (2003) は、地球のダストデビルにおいて地表面から 0.04, 1.0, 1.8m の高度において圧力の井戸を観測したが、圧力変位の最大値と高さの間には特に関係性は見つけられなかった。ダストデビルにおける圧力の井戸観測のほとんどは周囲からたったオーダー 1mbar 程度だったが、Metzger (1999) と Ringrose (2003) はどちらもより大きなオーダーの圧力の井戸をいくつか観測した。(Ringrose (2003) は渦が強ければ強いほどより大きな圧力変位を持っていると示唆しているが) 例外的に大きい圧力の井戸を持つダストデビルはほとんど存在しないことや、ほとんどのダストデビルでの圧力変位は高度の低い限定領域にしか存在しないことを示唆したり、ほとんど観測例はないが、細い中心の貫入²¹を示したりする。

²⁰ダストデビルの中心がその周囲よりも圧力が低いことのたとえだと考えられる。

²¹中心の貫入とは、ダストデビルの核における圧力の井戸が低い領域のみならず高い領域まで貫通するように存在していることを表していると考えられ、これが存在しているが、その幅が細すぎて観測できていないという状態を意味している。

表 7: その場観測による地球のダストデビルの圧力変位

論文名	観測数	圧力変位 [mbar]
Ives (1947)	1	-15 ~ -80
Sinclair (1964)	4	-2.5 ~ -4.5
Sinclair (1973)	3	-2 ~ -7.0
Metzger (1999)	~ 20	0 ~ -15 未満
Ringrose (2003)	10	-1.5 ~ -10
Tratt et al. (2003)	5	-0.3 ~ -1

- a Ives (1947) のデータは水銀を用いて観測したもののなので数値が他のものよりも大きいですが、水で測定したと仮定して計算し直すと他のデータと整合するようだ。また、数字の前の「~」はオーダーを表している。
- b Ringrose (2003) のデータは観測数 10 個のダストデビルのうち 9 個は約 1.5mbar の値で、うちひとつだけが -10mbar の値を観測した。

火星における圧力変位の観測は主に MPF 圧力センサーによるデータから得られた²²。Murphy and Nelli (2002) はそのデータから 79 個のダストを含む可能性のある対流渦を発見し、約 0.005 ~ 0.05mbar(火星大気に対して約 0.075 ~ 0.75 %) の圧力差を観測した。これらの例の半分以上は圧力差が 1Pa より小さいものであり、そのほとんどは「大きく」なく、あるいは強度が強くない(ダストを含んでいるであろう)渦に関連したものだった。

3.9 電氣的・磁氣的構造

ダストストーム²³はダスト粒子同士の接触のため、一般的に巨大な電場を持ちうる。この過程は摩擦による電氣的影響として知られており、ダストデビルで数十回観測されている。表 8 はダストデビルの内部および近傍での地球のダストデビルの電氣的観測が行われていることを表している。ダストデビルは常に負の電場を持った状態で現れ、電子密度が $10^5 \sim 10^7$ 個/cm³ におよぶこともまれではない。Farrell et al (2004) は、負に帯電する小さなダスト粒子によって勾配は負となる傾向にあり、ダストデビル及び周囲の地表はダスト粒子の大きさに依存した成層を成しながら帯電し続けると記述した。ダストデビル内部の正味の流れは、より大きな砂サイズのダスト粒子よりも、より小さな粒子の方が優先的に上へと巻き上げられるため、上向きに負のポテンシャル勾配が観測される。Farrell et al (2004) は、ある特定

²²これは、MPF 圧力センサーの方が Viking の装置よりもより渦観測に適したものだからである。このことは Ryan and Lucich (1983) に詳しい記述があると思われる。

²³ここでいうダストストームとは、ダストデビルのような渦状の構造を持たない単なる嵐も含んでいると考えられる。

のダストデビルにおいてポテンシャルの違いは0.8MVにも及ぶと見積もった。

表 8: 地球のダストデビルの電場観測

論文名	観測数	最短距離 [m]	ポテンシャル勾配 [kVm ⁻¹]	電子密度 [e ⁻¹ cm ⁻³]	直径 [m]
Freier (1960)	1	30	-0.4	NA	8
Crozier (1964)	1	450	-0.06	~ 1 × 10 ⁶	20
Crozier (1970)	17(53)	250	-0.04 ~ -1.6(<-4)	10 ⁵ ~ 10 ⁷	10 ~ 60
Farrell et al. (2003)	1	0	<-20	NA	30
Farrell et al. (2004)	NA	0	<-4.35	10 ⁶	7

- a 表中の数字の前の「~」はオーダーを, NA は観測機器の誤差や故障などにより, 観測結果として有効な値がでなかったことを表しており, 観測数の括弧内の数字は, より詳細なデータは17個であるが, 総データ数は53個であることを表している。

Houser et al. (2003) は, 電場に加えて地球のダストデビルの周囲と内部における交流磁場を測定した. 彼らはダストデビルが装置に近づいた時, ごく低周波 (3 ~ 30Hz) の放射を測定し, ダストデビルがセンサーを通過するときに磁場の最大値を記録した. 興味深いことに, その大きさは, ダストデビルが通過したあと12秒間は高いまま維持され, さらにその後30秒の時間をかけてダストデビル通過前の状態に戻った. Houser et al. (2003) は, この振る舞いはダストデビル全体の ULF 放射²⁴によるものだと考えた. ULF 放射の発見によって, この電磁波は将来ダストデビル活動のリモートセンシングに用いられ, 他のセンサーを用いて発見された渦の不明瞭な部分を解決に導くことが期待されている. 一方, 火星のダストデビルについては, 今のところ電氣的・磁氣的な観測は行われていないようである. 今後の調査によっては, 地球と火星のダストデビルの新たな相違点がみつかるかもしれない.

3.10 ダストデビルによる地表面の物質の取り込み

ダストデビルには浸食作用がある. つまり, 単純な事実として, 地表面から物質をはぎ取ることで, ダストデビルは目に見えているということを意味している. たとえば, 周回衛星画像はダストデビルが砂丘上を通過することによってできたその軌跡を発見した. これらの砂丘はダストの大きさのピークを2つ持つような分布を持っており, そしてこれはより細かい砂が取り除かれることにより, ダストデビル

²⁴ULF 放射とは波長の長い電磁波の一種で, 周波数がオーダー 10Hz 以下の ULF 帯に属するものをいう.

が通らなかった場所と比べてアルベドが変化すると考えられている²⁵。しかしながら、ダストデビルによる砂の移動はとても局地的に起こる(典型的に小さなダストデビルは長距離を旅することはなく、ダストデビル内部に持ち上げられた砂は中心からオーダー 10m ほど離れた地表に戻る)。しかし、ダストデビルによる ($25\mu\text{m}$ 未満の) 小さなダスト粒子の移動と保存は、気候や大気状態、ダスト粒子の移動状態にとって重要なことである。ダストデビルは、数時間あるいは数日間の局地的な風によってダストを垂直に持ち上げ、ダストを効率的に保存し、移動させる。Mattson et al. (1993) は、北アフリカのダストデビルは大気中のダストの巻き上げと、ヨーロッパへと移動するダストのメカニズムを解き明かすことになるだろうと提唱している。

ダストデビルのダストフラックスは、航空機を用いてダストデビル内部の鉛直成分の風速と粒子密度を測定することによって見積もられてきた。オーダー 140m の高さで $3.0 \times 10^{-3}\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ におよぶフラックスは超巨大ダストデビルで測定されてきたが、($25\mu\text{m}$ 未満の) 細かく小さなダスト粒子は全体のわずか 5% ほど ($1.6 \times 10^{-4}\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) しか構成していない。より小さいダストデビルは、大きさをほとんど測定できないほど小さなオーダーのダストを巻き上げると発見された。また、ダスト含有量のライダー観測はこれまでダストフラックスをも見積もってきた。たとえば、Renno et al. (2004) は、地表面上空 100m で $1.0 \times 10^{-3}\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ の粒子フラックスを見積もり、Metzger (1999) はダストデビルの低い領域で $0.6 \times 10^{-3} \sim 4.4 \times 10^{-3}\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ のフラックスを測定した。これらの量はオーダーが似ており、大きく長寿命なダストデビルはその大きさと寿命から、その一生の間に地表からオーダー 100 ~ 1000kg もの物質を移動させようと提唱された。Gillette and Sinclair (1990) は、アメリカ全土で風により巻き上げられる、粒子の大きさが $25\mu\text{m}$ 未満のダスト全体のうち 2/3 はダストデビルが原因だと見積もっており、特にアメリカ南西部やその他の乾燥地域では、ダストデビルは大気の汚れの大きな原因だと示唆した。ダストデビルの形成過程を含んだ局地的・世界的規模モデルの改良の努力は、ダストデビルが小さく、ほとんどのモデルの解像度を下回っているという事実によって妨げられている。Cakmur et al. (2004) は世界規模の気候モデル内において、地域循環によって持ち上げられるパラメータ化されたダストの研究を立ち上げたが、その多くは未だやり残されたままである。

また、ダストデビルのフィールド研究を完全なものにするため、大気状態を制御するシミュレーションや実験も行われている。渦シミュレーションが数十年に渡って竜巻とダストデビルの力学モデルに用いられ、主に流れの励起と力学に焦点を当てて行われているが、研究の中にはダスト粒子の持ちあがりに重点を置いているものもある。渦発生プログラムを用いた研究は、Greeley et al. (1981) と Greeley and Iverson (1985) によって報告された。彼らは、ダストデビル渦と仮定した圧力の低い核による「掃除機」のような吸い込みから生じた、渦を巻く風による水平方向の力

²⁵ 地表面のより細かいダストが巻き上げられることでその下の粗い砂の層が地表面に表れ、ダストデビル通過場所が他の地表面に比べてアルベドが低くなることを意味していると考えられる。

が、ダスト粒子の巻き上げを補助するかもしれないと提唱した。のちに、地球と火星におけるダストデビルのダスト粒子の持ち上げをシミュレートするコンピュータを用いて、Greeley et al. (2003) は、ダストデビル渦は風だけが原因だと考えるよりも、ダスト粒子の大きさを考えた方がより効果的だということを確認した。彼らは (ΔP 効果と呼ばれる) 圧力の井戸効果が原因だろうと示唆している。Neakrase et al. (2004) は、同じコンピュータを用いてこれらの実験的な渦の地表面からダストを移動させることで、すでに (Metzger (1999) によって $0.6 \times 10^{-3} \sim 4.4 \times 10^{-3} \text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) のフィールド観測と比較して、実験では $0.2 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3} \text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ だと報告されていたフィールドデータにきわめて精度の良い近似ができることを発見した。この研究は継続して行われているが、ダストデビルは大気中のダストの運搬を支配しており、乾燥地域での大気の性質を劣化させているかもしれないというフィールドワークの結果を促しているにすぎない。

一方、火星でも地球と同じように、ダストデビルの活動と軌跡の観測はダストデビルが地表面の物質を巻き上げることで発見される。ダストデビルの軌跡のうち、ダストが地表面を約 50 % 覆った領域において、少なくともアルベドが 15 % 減少していることが観測されている。他に用いることのできる、ダストデビルが局地的に大気中の物質を大量に含む指標として、ダストによる大気の不透明さの日変化と近似したものがあ、これはダストデビルが最も活発になる (日中から午後の中ほどにかけての) 時間に MPF によって観測されたものである。

その場観測を用いずにダストと砂の含有量を測定しようとしたとき、火星のダストデビルがどれほど多くの物質を巻き上げることができるか定量的に見積もることは難しい。また、ダストデビルの軌跡そのままの通りにダストの層が移動しているのか、砂に満ちた地表面とその地下の領域でダストの浸透と「突き上げ」²⁶が存在するのかどうかは分からず、これらを軌跡の観測から見積もるのは難しい。にもかかわらず、ダストの筒状の核における光学的深さはその軌道と地表観測から考えることができるため、そのダスト粒子の含有量は見積もられてきた。Thomas and Gierasch (1985) は Viking の画像から、粒子の大きさ $10 \mu\text{m}$ 、自由行程の長さ 250m、ダスト粒子 $3.0 \times 10^{-5} \text{kg}/\text{m}^3$ と仮定したダストを含んでいるダストデビルの光学的深さは、光源である太陽に沿って 0.3 ~ 0.5 であると計算した。MPF IMP 画像に似た技術を用いて、Metzger et al. (1999) はダストデビルの筒状の核がダストデビルのない大気よりも光学的に約 3 ~ 4 % 暗いことを発見した。彼らは、ダスト含有量を $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{kg}/\text{m}^3$ と見積もったが、これは Thomas and Gierasch (1985) の結果に似ている。

これらのフラックスの見積もりに関係するダスト含有量を推測することは、いくつかの不確定な要素があるせいで理解しにくくなっている。[1] 火星のダストデビルの渦内部で起きる風の鉛直成分の見積もりは地球の類似させた環境 (オーダー 7m/s)

²⁶ダストデビルの風によって火星の地表面のダストが地表面の粗い砂より地表下に浸透したり、あるいは細かく軽いダストが巻き上げられたりすることをさすのだと考えられる。

や火星大気の第一近似モデル(オーダー 20m/s)²⁷にのみ基づいていると言える。[2] 観測されたダストの筒全体が上部に移動しているのか、また時には地球のように中心の核内部に生じる下降流が存在するのかわかっていない。[3] 地表面から巻き上げられる物質のうちどれくらいの量がダストデビルの頂上から吐き出されるのか、また吐き出されたうちのどれくらいがダストデビルにすぐさま「再利用」されて再び上昇するのかわかっていない。[4] どの地域でダストの筒が活発に物質を巻き上げるのかわかっていない。したがって、これらのデータが火星のダストデビルひとつ当たりのダスト移動フラックスの測定に用いられたとしても、観測における対流の見積りの誤差はオーダーが約 2~3 程度である。

ダストデビルの軌跡からフラックスを見積もろうとすると、さらに不確定な部分も存在する。観測地域と移動フラックスの軌跡構成の頻度を変えると、その場観測において装置による時間の長さとともに、ひとつの軌跡あたりどれくらいの物質が運ばれるかを知る必要がある。これらのデータは地球と火星両方の惑星のダストデビルで利用することはできない。近年の MER Spirit Microscopic Imager 観測によって、(ダストデビルの軌跡の可能性もある) 暗い線状の中にある砂粒が、その外側表面と比べて細かいダスト粒子をよりきれいに掃いていることが判明した。Metzger (2005) は、MER Gusev による観測から、大気中に巻き上げられたダストの約 50% は、風化した岩から生じたダストがダストデビルによって移動してできたものだと見積もったが、その全質量が実際にどれくらいの時間で移動するのを見積もることは困難であると認めた。

渦発生装置を用いた実験によるダスト上昇モデルは火星の表面圧力を示してきた。Greeley et al. (2003) は、火星の渦の粒子巻き上げ能力が地球の大気状態シミュレーションに似て、境界層風によってすぐさま $100\mu\text{m}$ より大きい粒子だとは決められないことを発見し、渦がダスト巻き上げのメカニズムにより大きな影響を与えていると考えられている。さらに言うと、火星の圧力についてこの装置を用いた実験には、人工的な渦によるダスト移動フラックスの測定が必要である。予備実験の結果によると、未確定ではあるが渦はオーダー $1.0 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$ の粒子を圧力全体の 0.7% の ΔP 量から得ることができ、これは火星の観測から見積もられることが分かった。

²⁷この第一近似モデルが何を近似したものなのか分からない。

4 ダストデビルの形成メカニズム

4.1 概略

ここまではその場観測や画像処理などの観測結果に重点を置いてきたが、そもそもダストデビルはどのようなメカニズムで形成されるのだろうか。

ダストデビルは、地表面の日射によって大気が不安定になり、強い対流が起きる原因となる「超断熱減率」²⁸が大きくなったときに形成される。見た目のよく似た竜巻は、筒状の核内部の潜熱を解放することによって力を得ているのだが、ダストデビルはそれとは対照的に日射のみからエネルギーを得て発生している。特に、地表から高度約 0.3 ~ 10m の領域における超断熱減率の大きさはダストデビルの形成頻度と大きさを支配しており、超断熱減率が大きいほどより多く、より大きなダストデビルを作り出すと考えられている。形成率の「急激な上昇」は、断熱層の過剰な擾乱によって発生した一時的に強い対流がダストデビルを形成していることを示している。ダストデビルは対流現象として単独では現れず、局地的な対流システムの一部を担っている。大きなダストデビルのオーダー 1km 上空の熱上昇流の観測²⁹は、ダストデビルが螺旋を描きながら上昇する空気塊のうち、地表付近のダストを巻き上げる一部分にすぎないことを示している。また、これはより大きなダストデビルでは対流境界層全体の深さを広げる可能性があるものだと示されている。しかしながら、何がダストデビルの構成においてその大きさ、風速、圧力、温度差や頻度を支配しているのか、なぜこれらの粒子対流要素が、ほとんど、あるいはまったく回転しない熱上昇流を形作ったとき、ダストデビルほどの強い渦を形作るのかははっきりわかっていない。

地球と火星の両方における大気力学の数値シミュレーションは近年進歩しており、それまでは前例がなかった空間・時間の解像度においての対流現象の調査を可能にするようになった。地球と火星の中規模 LES 大気モデル³⁰では(これらのモデルの渦がダストを含んでいるかどうかは推定できないが)、自発的に生み出されるダストデビルと同様のスケールを持つ対流の渦を記述できるほど十分細かい解像度が利用され始めてきた。その渦モデルは、圧力差や直径がその場観測のものによく合致する、ダストデビルに似た渦の構造を持っている。このように、近年のモデルはあらゆる渦の特性にすぐさま通用するように進歩しており、将来のダストデビル研究は数値シミュレーションがより重要になるだろうと言われている。

²⁸超断熱減率とは、勾配の急な断熱とみなせる大気の層の中における温度勾配を表したものである。

²⁹熱上昇流とは thermal plumes を訳したものである。またこの観測は、ダストデビルの上昇流に伴い地表付近の熱がどれだけ上空に移動したかを赤外線などを用いて観測するものだと考えられる。

³⁰LES とは Large Eddy Simulation の略で、大小さまざまな渦の流れをフィルターに通すなどしていくつかの成分に分離し、直接解く部分とモデル化する部分に分けて行うシミュレーションである。

4.2 渦度源

ダストデビルの中には地形によって回転方向が変わるものがあることは疑う余地もないが、ダストデビルの多くは全体的に風の弱い平らな地域で形成されている。このため地形のほかにも渦を発生させる源が他にもあるはずだと考えられる³¹。そういった源には、惑星の自転やダストデビルとは呼べない中規模の小さな渦、垂直面内でのスケールがオーダー 1km の水平渦 (すなわち水平境界層渦) の流れや傾斜を形作る渦の密集が含まれている。ダストデビル自身には回転方向を決める要因はないので、惑星の自転は、以下のロスビー数 R_o の考察で見られるようにダストデビルの渦度源ではないようだ。 R_o は、慣性の比率と流れシステムのコリオリ力によって

$$R_o = \frac{V}{2\Omega L} \quad (1)$$

で与えられる。ここで V は流れの速さ (接線速度の最大値)、 L は流れの特徴的長さ (この場合ダストデビルの直径)、 Ω は惑星の自转角速度の鉛直成分を表している。表 9 は地球と火星のダストデビルにおけるロスビー数の大きさの観測例を表している。超巨大ダストデビルでも、ロスビー数のオーダーは 1 より大きく、これはコリオリ力が大きすぎて、渦が惑星の自転に直接依存するわけではないということを暗に意味している。

表 9: 地球と火星におけるダストデビルのロスビー数の観測例

ダストデビルの大きさ	接線速度の最大値 [m/s]	2Ω	直径 [m]	R_o
地球 (典型的)	10	10^{-4}	10	2×10^3
地球 (超巨大)	20	10^{-4}	100	5×10^2
火星 (典型的)	30	10^{-4}	100	4×10^2
火星 (超巨大)	100	10^{-4}	2000	1×10^2

a 一部の数値は Ryan and Lucich (1983), Ferri et al. (2003), Ringrose et al. (2003), Biener et al. (2002) のものを使用した。

Carroll and Ryan (1970) と Fitzjarrald (1973) は、ダストデビルの形成頻度と回転方向を同時に観測したある局地的な渦のフィールド研究を行い、渦の変動の水平スケールがオーダー 100mであることを発見した。また、Carroll and Ryan (1970) は、しばしば回転方向が同じダストデビルが集団で発生し、そのダストデビルの風速の大きさや回転の方向、観測された渦は頻繁に一致していることも発見した。Carroll and Ryan (1970) には、ダストデビルは地域の地形的障害や観測された中規模現象によって形成されるわけではないと記述されている。また Carroll and Ryan (1970) には、ダストデビルは分単位の時間スケールとオーダー 100m の空間スケール

³¹地形がなだらかなだけでは渦を発生させるだけの要因はないからである。

ルで、時間によって符号と大きさを変える局地的な渦度源により形成されると記述されている。Renno et al. (2004) は、ダストデビルが灌漑された地形の境界付近で頻繁に生じるという観測から、互いに逆向きに流れる冷・暖気流の対流のねじれによって生じた水平方向の大気の渦が、ダストデビルの鉛直対流の渦度源になるかもしれないと提唱した。似たようなことに、ダストデビルの形成における水平方向の渦の曲がりの重要性は、極めて解像度の高い LES 数値シミュレーションで検証されており、渦が対流セル³²の集まった束の中で形成されると示されている。これらのモデルは、風や風のシア、地形に関係なく環境をシミュレートする。ダストデビルにスケールや構造に似せた渦は、対流活動を通して単純に発生している。ダストデビルに似た渦は火星大気の LES モデルで表現され、対流の垂直面内における水平の渦の傾斜は、火星でダストデビルが形成されるメカニズムとして表現されている。

以上から、ダストデビルの発生元となる渦度源の種類はいくつか存在しているようだが、ほぼ無風状態下の平らな地域では、渦度源は(中規模大気循環や惑星の自転といった)大きなスケールや(障害物によるスピンオフなどの)小さなスケールにより起こるものではないと考えられている。その代わりに、対流による水平の渦の中規模スケールの傾きはより組織的に表すことができる。

4.3 ダストデビルにおける熱力学とエネルギーバランス

熱力学的「Renno」モデル³³は、ダストデビルを熱機関として表している。「循環的」平衡における渦度の安定状態は、以下のように仮定してモデル化された。熱流入は地表面から感じ取れる熱フラックスであり、熱流出が渦の外への空気塊の熱の放出であり、熱の損失は地表面で物理的な摩擦によるものである。このため、渦の強度は(熱流入の一部は仕事(η)に変換され、全力学的エネルギーの一部は地表面近くの摩擦(γ)によって消費される)熱力学的影響と大気の熱特性によって表現することができる。このモデルを完全に理解するために読者は Renno et al. (1998) を参照すべきだが、重要な点だけ述べると、このモデルは地球と火星の両方に適用することができるという一点に集約される。Renno et al. (2004) は対流循環の大部分の圧力変位は以下のように記述した。

$$\Delta p \equiv (p_\infty - p_0) \quad (2)$$

$$\simeq p_\infty \left(1 - \exp\left[\frac{\gamma \eta}{\gamma \eta - 1} \frac{c_p \Delta T}{R T_\infty} \right] \right) \quad (3)$$

ここで p_0 は対流循環の中心における地表面圧力、 T_∞ と p_∞ は循環作用上空の温度と圧力、 R は気体定数、 c_p は大気の定圧モル比熱、 ΔT は一様な地表面のにある対流上昇に対する温度摂動を表しており、特に ΔT は Renno and Ingersoll (1996) に

³²対流セルとは、生物の細胞のようにセルがいくつか並んで対流している様子をいう。

³³Renno et al. (1998), Renno and Bluestein (2001), Renno et al. (2004) に詳しい記述がある。

よって以下のように与えられている.

$$\Delta T \simeq \frac{c_p \eta F_{in}}{8 \varepsilon \sigma_R g H T_c^2} \quad (4)$$

ここで F_{in} は地表面の熱フラックス, ε は大気の放射, σ_R はステファン・ボルツマン定数, g は重力加速度, H は対流圏界面の高さ, T_c は対流圏界面 (上昇する暖かい空気が対流システムから離脱しているとみなせる高さ) における温度を表している.

このため, (3) 式から, もし $\eta \ll 1$ かつ, $\frac{\Delta p}{p_\infty} \ll 1$ であれば, 圧力変位は以下のように近似できる.

$$\Delta p \simeq \frac{\gamma \eta c_p p_\infty \Delta T}{R T_\infty} \quad (5)$$

そして, もしその渦が循環的に均衡しているなら, 以下のように表せる.

$$V_{max} \simeq \sqrt{\frac{\gamma \eta c_p \Delta T}{p_\infty}} \quad (6)$$

ここで V_{max} は風速の接線成分の最大値を表している³⁴.

このため, ダストデビルの圧力変位と風速の最大値は, この熱機関の熱力学にのみ依存しており, これは環境場の状態によって支配されている. Renno and Bluestein (2001) によると, 渦の大きさはその環境場の渦度に比例しており, 切り離して考えなければならない.

このモデルは簡素で, ほとんどすべての環境に適用するという点で影響力があり, 個々のダストデビルの鍵となる測定可能なパラメータ間におけるスケールの相互関係を表現している. また, 測定できる全体のパラメータは, (4), (5), (6) 式から局地的なダストデビルの特性をいくつか予測することができる. (6) 式からの予測はダストデビルの活動の予想測定値によく一致するが, ある有効な実地測定の統計上有効な数は一致せず, 詳細な場の測定は (4) 式の有効なダストデビルの例として利用できるほど十分時間的空間的に近い値をとっているわけではない. それにもかかわらず, このモデルは火星でうまく評価されている. Renno et al. (2000) は, このモデルは MPF による圧力変位の測定に適応できるとき, 現実的な温度変位と風速を発生させると示しており, Toigo et al. (2003) は (Renno et al. (2000) で用いられている高度のより高い 45km までの地点よりむしろ高度より低い 5 ~ 6km までの擾乱層の深さをを用いるとより観測値と一致すると記述しているが), このモデルにより予測された圧力変位は数値モデルによく一致すると示している.

赤外画像を用いた Lorenz and Myers (2005) による最近の観測の一例によると, ダストデビルの筒内部のダストが日射によって強く暖められ, そのことがさらにダストを支える空気を暖めていると示された. もしこれが本当ならば, 従来価値が低いと思われていたダストデビルの最も低層で, 最もダスト粒子が密集した領域にお

³⁴なぜこの式のように表せるのかはよく分からない. 詳しくは Renno et al. (1998) に記述されている.

ける日射によるシステムのエネルギー流束が重要であるということになる。また、このメカニズムは、(ダストデビルの強度が強いほどより多くのダストを含むため、より太陽光を和らげ、そのためダストデビルの強度がさらに強くなるという) 正のフィードバックシステムによってダストを多く含んだ超巨大ダストデビルが長寿命であることの理由を説明するのに役立つだろうと考えられている。

5 火星の気候に対するダストデビルの効果

火星の大気は、火星表面での圧力約 5.2mbar と地球表面の圧力オーダー 1000mbar を比べてわかるように、地球のものより薄い。このため、火星表面の砂やダストは風によってずっと高い高度まで持ち上げられる。風洞実験により、地球のように直径 80 ~ 100 μm の (砂粒程度の) 小さな粒子が最も動きやすく、最下層に静的な境界摩擦渦をなしやすく、それよりも大きいもしくはより小さい粒子が浮き上がるためにはより強い風が必要だと示されてきた (図 10)。しかし、火星大気に含まれるダストのほとんどは 2 μm 以内ととても小さく、そのようなダストをよく含んだ境界層の風速は地表面で観測されたり気候モデルによって予測されたりすることで求められてきた。にもかかわらず、そういった細かいダストはどういうわけか観測された靄を維持したり、(Kahn et al. (1992) と Zurek et al. (1992) により再調査された) 局地的・全球的なダストストームを生じさせたりするように大気中に注入されている。Greeley et al. (1992) は、境界層風によるダスト上昇による直接的な持ち上がりか正しいものかどうかを再調査したが、これは (より動かしにくいダストの中で容易に動かされる砂粒の) 急激な衝撃が近年までずっと重要な代用品と考えられ、GCM のダスト上昇案として使われてきたからだった。

ダストデビルは、地球で頻繁にダストを効果的に輸送するということが観測されている。このことから、ダストデビルはダスト上昇メカニズムによって、ことによると以前 Thomas and Gierasch (1985) による Viking の観測画像で確認されていた火星上の全球ダストストームの引き金となる可能性があるとして提唱されていた。しかし、MGS によるダストデビルの観測数の増加からは、ダストデビルと巻き上げられたダストが火星の気候にどのような影響を与えるのかという研究がより多く行われるようになった。また、近年の火星大気の温度を毎年繰り返して行われた観測によると、全球規模のダストストームによるダストは、むしろ靄の源のようにゆっくり降りてくるのを妨げることが分かった。これは、ダストデビルや小さな対流のダストストームが主要なダストの背景の代わりにある役割を担っているからだとして主張されている。

火星の表面で観測された大気の靄を支えるためには、約 $2.0 \times 10^{-2} \text{kg}/(\text{m}^2 \text{yr})$ のダストが動かされなければならないと MPF 着陸船による観測で確かめられたが、以下の疑問も残った。果たしてダストデビルはこれほどのダストを巻き上げることができるのか? Balme et al. (2003b) は、アルギュレ平原とハラス盆地で観測されたダストデビルの軌跡の密度を火星表面全体の平均と見積もると、ダストデビルは単独ではこのフラックスを満たすことはできないことを発見した。しかし一方で、ダストデビルの何%が軌跡を残すかは分かっていない。またある研究では、ダストデビルの軌跡の密度が大きい地域とダストデビル活動が頻繁な地域の間に関係性はないという観測結果も示された。Ferri et al. (2003) は、MPF からわかった局地的ダストデビルの移動フラックスのオーダーが、背景の靄を維持すると仮定されていた数値よりも大きいと見積もった。また Fisher et al. (2005) は、アマゾニ

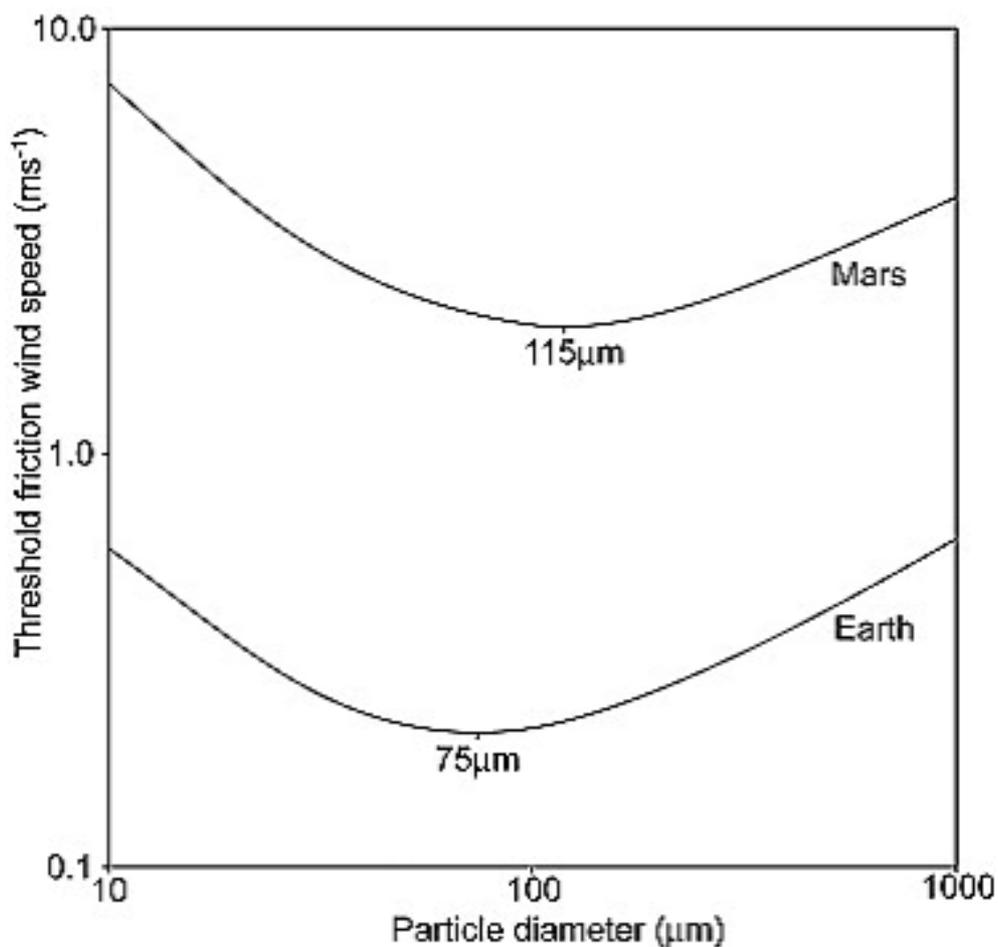


図 10: 火星と地球の地表面にある粒子の直径に対する境界層の摩擦速度の曲線. 縦軸は摩擦速度を, 横軸はダスト粒子の直径を表している. 摩擦速度は流体密度に対するせん断応力の比の二重根で表される. 地球と火星両方で最も簡単に持ち上がりやすい粒子の大きさは, 軽い砂粒 (直径のオーダー $75 \mu\text{m}$, もしくはオーダー $15 \mu\text{m}$) であり, 摩擦速度が大きいほど地表面のダストは動かされやすいと記述されている. 図は Greeley and Iverson (1985) より引用.

ス平原でのダストデビルフラックスのオーダーも同じく、仮定された数値より大きいと見積もった。

これらの軌跡とフラックスの研究結果が食い違っているのは、限定的・地域的なデータから全球的なデータを導く際の問題点を浮き彫りにするものであり、全ダストフラックスの見積もりは周回衛星によるダストデビルの軌跡の観測と活動の観測のみから得られていると考えられている。その2つのアプローチはダストデビルの活動として式(6)によって表され、ダストデビルの軌跡は式(7)で表される。ダストデビルの軌跡の観測のため、以下のようにして D を定める。

$$D \simeq N\overline{FLA} \quad (7)$$

ここで D は一年間のうちダストデビルによって動かされるダストの総量、 N は火星で一年間に起きるダストデビルの総数、 \overline{F} は火星のダストデビルの平均移動フラックス、 \overline{L} は火星のダストデビルの平均寿命、 \overline{A} はダストデビルが活動する平均同時発生地域の面積を表している。この式のおもな長所は、ダストデビルの活動の観測に用いることができるということと、周回衛星の画像から観測されたダストデビルの数が同じ場所の着陸船画像によって誤差の修正ができるということである。もうひとつの長所として、ある与えられた条件における地表面のダストで有効とされる閾値やフラックスの経験値、データから得られた結果と Renno モデルと組み合わせることで、 \overline{F} の見積もりが可能になるということである。逆にこの方法の短所は、解像度が低く、画像の時間・空間の適用範囲を限定しているということと、状態の悪化を導き、ことによると、より小さな、おそらく最も一般的であろうダストデビルを観測しそこねるかもしれないということである。火星における詳細なサンプリングシステムがないシミュレーションやその場観測からダストデビル個々のフラックスを見積もることは難しい。ダストデビルの軌跡の観測は以下のように定める。

$$D \simeq \frac{N_t \overline{A_t} \overline{m_t}}{\alpha} \quad (8)$$

ここで α はダストデビル総数に対する軌跡を残したダストデビルの比、 N_t は火星上で一年間に形成される軌跡の数、 $\overline{A_t}$ はダストデビルの軌跡の平均面積、 $\overline{m_t}$ は単位面積あたりに移動される軌跡を形作るダストの平均質量を表している。この技術の最も大きな課題は、平均的な軌跡でどれくらいの量のダストが運ばれるのかを見積もり、与えられた地域や季節から α を見積もることである。また、(近年の観測はいくつかの試験的データを供給しているので) その場観測はここでは重要であるように見えるが、仮想的な表面における渦の影響を表す実験的シミュレーションもまた重要となってくるだろう。

実験による測定では、ダストの平均移動量やダストデビル総数に対する軌跡の存在率が具体的にどれほどの値かという従来の疑問を解決するような重要な計算はできていないので、従来とは違うモデルを用いる必要がある。中でも最近、GCM の

ダストデビルフラックスモデル案が発展している³⁵。これらの案において、ダストデビルによるダストフラックスは、GCM で決められる大気パラメータの作用として、気候モデルの解像度下のスケールで計算されている。このダストデビルのパラメータの側面としてあるのは、ダストデビルを引き起こす急激な要因に依存した境界層モデルである。

Newman et al. (2002) と Basu et al. (2004) はどちらも、(日射による) 顕熱フラックスのみに基づいたダストデビル活動 Λ ³⁶ や、境界層の深さ、調和した「効率的なパラメータ」の量を引き出すために Renno 熱力学モデルを使った。Newman et al. (2002) は、2 つのパラメータを用いた。ひとつはダストデビル妨害フラックスが Λ に単純に比例していること、もうひとつは初期の実験におけるダストデビル境界経験から求められた境界の基準である。Basu et al. (2004) は空間的ダストの境界の基準を使わなかった。Newman et al. (2002) は彼らの案を光学的深さに合わせるように調節し、彼らの結果を任意の単位のフラックス³⁷ で提出した。それに対して Basu et al. (2004) は彼らの自由パラメータを年間通した大気温度に合わせるよう調節し、定義された Λ の「最適な」量を用いた。

Newman et al. (2002) は、ダストデビルの活動が両半球の夏の \pm 約 30 ° の緯度で最も大きくなることを発見し、よりダストを含んだ大気ではよりダストデビルの活動が起きにくいことを発見した。ダストの上昇は、両半球の 40 ° の緯度より極の方ではほとんど起きなかった。Newman et al. (2002) も Basu et al. (2004) も、アマゾニス平原におけるダストデビルの極めて大きな侵食が観測結果と一致すると発見した。Basu et al. (2004) はまた、夏の中・低緯度の活動のピークをも発見した。加えて、北半球におけるダストデビルフラックスの平均から、彼らのモデルが MPF のダストデビルフラックス測定によく一致するか立証する必要も出てきた。Basu et al. (2004) は、自分たちのダストデビル案は単独でダストストームを起こせないが、境界層案はダストストームを起こせないと同時に霧を想定できないと記述している。また、ダストデビルの活動と軌跡の最近の観測は、ダストデビルの軌跡がダストストームの引き金であるという証拠はないと示している。モデルはダストデビルが全球ダストストームの引き金ではないが、ことによると霧を維持することに関係しているかもしれないという観測を証明する傾向にある。

両方のモデルで発見されたダストデビルの活動の緯度別の記述は 3.4. 節で議論されたダストデビルの軌跡の記述の観測と一致しなかった。これがダストデビルの軌跡の観測データの不足によるものなのか、それともモデルの欠点によるものなのかはわかっていない。しかしながら、どのモデルも実際地表面におけるダストに有効な評価はなく、ことによると Ruff and Christensen (2002) によるダスト・カバー・インデックス³⁸ から得られたパラメータの要因がモデルと観測を一致させる

³⁵Newman et al. (2002), Basu et al. (2004) に詳しい記述がある。

³⁶Newman et al. (2002) によると、この Λ は顕熱フラックスに比例するパラメータのようだが、詳しいオーダーや単位は分からない。

³⁷これは arbitrary units of flux を訳したものだが、これが何を意味するのかわからない。

³⁸dust cover index を訳したもの。気象学における雲量のように、大気中でダストが占める割合

かもしれない。観測とモデルをまとめた結果から、ダストデビルが火星の靄を維持するために必要な過程であると提唱されているが、その確証を得るにはダストデビルの活動や軌跡の研究を全球規模で行う必要があると分かった。

を表した一種の指標だと考えられる。

6 ダストデビルは火星進出の際脅威になるのか？

地球では、ダストデビルは社会的な大災害とはならない。ダストデビル被害は仮設建築物や測候所、屋外倉庫などあちこちでの報告がある程度で、それらは確かに無動力飛行機が離着陸する時の障害にはなりうるが、一般的にダストデビルの主な脅威は乾燥地域の気象状態にある。

火星では、ダストデビルはしばしばとても大きくなるが、大きな物理的脅威になるわけではない。しかし、その風速は大きく、オーダー 100m/s にまでなる。地球でそのような速さになったら土地を荒らしてしまうだろうが、火星の気象は薄いいため、火星のダストデビルは地球のものより脅威にはならないと予想されている。ダストデビルの MER 画像のその場観測は、強い風を受けて浮き上がった地球のダストより大きい(小石程度の大きさをもつ)火星のダストの形跡の有無を調査することで、ダストデビルはより危険だと提唱する可能性もある。ダストデビル内部のダスト粒子含有率が高ければ、それが着陸船の太陽電池パネルを劣化させる原因になると考えられてきたが、MER の結果から、観測器上を通過するダストデビルや突風の通過が実際には太陽電池パネルに積もったダストを取り除き、このためその出力は改善されたことがわかった。しかしながら、ダストデビル内部のダスト含有率の高さは、摩擦によって蓄積される電気による電氣的障害といった危険性をもたらすかもしれない。Farrell et al. (2004) は地球のダストデビルは巨大なポテンシャル勾配を持ちうるが、より同じことが火星で起きていると考え、これは着陸船への電氣的障害の深刻な原因となるだろうと示している。MPF や MER どちらの上をダストデビルが通過するときもそれにより生じる損害は報告されていないが、詳細な測定をすることは未だに貴重である。災害としてのダストデビルに対抗するもうひとつの統計は、地域的に関与していないことである。Ferri et al. (2003) は、ダストデビル活動の同時発生によって一時的に大気に巻き上げられるダストのオーダーはたった $2.0 \times 10^{-4} \text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ だと見積もっている。しかしながら、MOC 画像の中にはこれよりより大きなオーダーをもったダストデビルが多く発生する地域を示すものがあるように、将来開発場所を選択するとき重要になってくるため、ダストデビルの活動はまだまだ観測されなければならない。

7 結論と将来の展望

ダストデビルは幅広く共通に起きる現象であり、地球では特に乾燥地域で起きやすい傾向にある。ダストデビルは浸食作用の効果を有しており、環境風が予測された閾値を超えたときダスト程度の小さな粒子を大量に持ち上げる。気候にダストデビルがどのように効果を及ぼすかは今までほとんど研究されていなかったが、予想された結果によると、ダストデビルがダスト循環において重要な役割を果たしているだろうと示されている。

また火星のダストデビルは、ダストの霧を補充しうる唯一のメカニズムであるため、地球のダストデビルよりも全球のダスト循環に対するダストデビルの効果をより集約するよう努力がなされてきた。近年のモデルの多くは周回衛星やその場観測による観測値と一致しており、ダストデビルは日々のダスト循環の主要なメカニズムであると提唱されている。ダストデビルはまた、表面のアルベドが局地的な領域で変化することに関与しており、これは季節によって地表面の温暖効果が変化する状態下において長期間その効果を及ぼすかもしれない。ダストデビルが全球ダストストームの引き金になっているという証拠はない。ダストデビルが将来人類が火星に探査機や有人ロケットで進出したときどれほど脅威となりうるのかはまだ完全に評価されていない。この研究の解決の鍵は、地球と火星のダストデビルが多くの点で似ているということである。すなわち、地球と火星のダストデビルは似たような構造を持ち、(大気場において)似たような圧力や温度変位を持っている。数値的・実験的モデルは、両惑星でのダストデビルは大きな対流システムを形作り、地表面では似たような強い浸食作用を有すると示している。

Renno 熱力学モデルは、地球と火星の個々のダストデビルを GCM のダストデビルのダスト上昇モデルの基礎として表現するために使われてきた。そのモデルは、ダストデビルの強さが日射による地表面の熱フラックスの作用によるものであり、惑星の境界層の深さであると提唱している。地球において将来ダストデビルのフィールドワークを行うにあたって重要な課題のひとつに、十分に発達したダストデビル内部の詳細な圧力と渦を観測すると共に、あらゆる気象条件における観測を通してこの理論を検証しなければならないということがあり、中でも特に式 (3), (4), (5) を検証する必要がある。他に重要な地球の調査は、以下のものが挙げられる。[1] ダストデビルのダスト運搬能力を見積もるために、ダストデビル上空のある高度でのダスト円筒内部におけるフラックスの水平成分を観測するフィールドワークを行うこと、[2] ダストデビル内部の小さな粒子が上昇する力学をより抑制する働きをもつダストデビルの最下層において、地表面のせん断応力やダストデビルに含まれる粒子の大きさをより多く観測すること、[3][2] に概略されている観測方法を支持するため、可能な限り適切で理想的なフラックスと渦境界層の室内実験をすること、そして [4] どれくらいのダストデビルの軌跡が形成され、また、視認できる軌跡を作るのにどのくらいの量のダストが動かされるのかを定義するため、(地球上で唯一ダストデビルの軌跡の例が知られている) ニジェールでのフィールドワー

クを行うことである。

火星でのダストデビルの将来の研究には以下のものが挙げられている。[1] ダストデビルの活動と、有効な GCM モデルの重要な部分があり、ある規定の地域の被害状況を評価するのに重要なダストデビルの軌跡の観測による支持からのデータを得るため、ダストデビルの記述するための全球規模の研究を行うこと、[2] 電気とダストの災害ポテンシャルを定義するため、より多く火星でその場観測をすることや、周回衛星画像から同じ地域でのダストデビルの数の「修正」や大きさの日変化率を求めること、そして[3] あらゆる状態と Renno モデルを検証するため、そして火星におけるダストデビルの粒子の持ち上げ能力を抑制するために、ダストデビル内部の風速、圧力差、温度を観測することである。火星ではその場観測を行うことは困難なため、リモートセンシング技術と火星上に設置する装置の技術進歩が重要である。

最後に、解像度の高い数値モデルだけが、今後ダストデビルの構造を完全に理解する手助けになると予測されており、そのようなモデルは GCM モデル内に集約されるべきである。局地的 LES モデルと GCM モデル間の解像度の差を乗り越えることは、より計算の速いコンピュータを用いるだけで短期間に解決できるわけではないようだ。活動パラメータがある程度必要になってくる。同様に、経験上の実験によると、フラックスと渦による粒子上昇の境界は、有効なダスト上昇モデルを発展させるために唯一有効な選択であるようだとの結論付けられており、それらはまた数値モデル内に集約されるべきである。地表面の物質の種類と有効性において、良好なリモートセンシングとその場観測データを伴ったダストデビル形成のパラメータとダスト上昇能力を含んだ最近の GCM は、火星と地球の全球規模の気候とダストデビルの表面との相互作用を理解する力強い手段となることだろう。

8 まとめ

ダストデビルは地球と火星の両惑星において全球を通して幅広く共通に起きる現象であり、地球では特に乾燥地域で起きやすい傾向にある。その大きさは、火星で発生したダストデビルの方が一般的に地球のものよりオーダーが1桁大きく、その発生率は一日の中では日射が最も強い午前の終わりから午後の初めにかけて、一年の中では夏の季節に最も大きくなる。ダストデビルの渦の回転方向は惑星の自転の影響を受けず、何が渦の回転方向を決めているのかは分かっていない。

ダストデビルの内部及び周囲で発生する風の大きさは火星で発生したものの方が大きい。しかし、温度変位や圧力変位は地球と火星でほぼ同じオーダーであり、また内部の風や温度、圧力の構造も地球と火星でほぼ同じだろうと推測されている。

ダストデビルは浸食作用の効果を有しており、環境風が予測された閾値を超えたときダスト程度の小さな粒子を大量に持ち上げる。ダストデビルが気候にどのように効果を及ぼすかは今までほとんど研究されていなかったが、予想された結果によると、ダストデビルがダスト循環において重要な役割を果たしているだろうと示されている。ダストデビルが全球ダストストームの引き金となっているという証拠はない。しかし、火星においてダストデビルはダストの靄を補充する唯一のメカニズムであり、全球規模のダスト循環に対するダストデビルの効果のシミュレーション研究がなされてきた。近年では多くのモデルが周回衛星やその場観測による観測と一致しているという事実がある。また、ダストデビルは地表面のアルベドがごく狭い領域で変化することにも関係している。つまり、ダストデビルは季節によって地表面の温暖効果を変化させる可能性がある。

これから先火星探査を続けていく上で、ダストデビルがどれほど脅威となるかの評価はまだ完全ではない。それを完全なものとするには、以下の点に注目してダストデビルの観測・研究を続けることが必要である。主にダストフラックスやダストデビルに含まれるダスト粒子の大きさの観測、フラックスや渦境界層の室内実験、ダストデビルの軌跡の研究が挙げられる。また火星においては、ダストデビルの全球規模の研究やその場観測の充実化、リモートセンシング技術と火星上に設置する装置の技術進歩、周回衛星での画像処理からダストデビルの総数や大きさの日変化率の算出、そして Renno モデルと火星におけるダストデビルのダスト粒子の持ち上げ能力を検証することが必要である。

今後これらの研究が進み、よりダストデビルのメカニズムが解明されると、ダストデビルの環境への影響や大気中のダスト循環など、将来火星探査を行う際にどのような障害が起こるか予測することができるようになるだろう。

参考文献

- Balme, M. R. and R. Greeley(2006); Dust devils on Earth and Mars, *Rev.Geophys.*, **44**, RG3003, doi:10.1029/2005RG00018.
- Balme, M. R., P. L. Whelley, and R. Greeley (2003); Mars: Dust devil track survey in Argyre Planitia and Hellas Basin, *J. Geophys.Res.*, **108(E8)**, 5086, doi:10.1029/2003JE002096.
- Basu, S. M. I. Richardson, and R. J. Wilson (2004); Simulation of the Martian dust cycle with the GDFL Mars GCM, *J.Geophys.Tes.*, **109**, E11006, doi:10.1029/2004JE002243.
- Biener, K. K., P. E. Geissler, A. S. McEwen, and C. Leovy (2002); Observations of dust devils in MOC wide angle camera images, *LunarPlanet.Sci.* [CD-ROM], **XXIII**, Abstract 1048.
- Crozier, W. D. (1964); The electric field of a New Mexico dust devil, *J.Geophys.Res.*, **105**, 9553-9572.
- Crozier, W. D. (1970); Dust devil properties, *J.Geophys.Res.*, **75**, 4583-4585.
- Durward, J. (1931); Rotation of 'dust devils', *Nature*, **128(3227)**, 412-413.
- Farrell, W. M., G. T. Delory, S. A. Cummer, and J. Marshall (2003); A simple electrodynamic model of a dust devil, *Geophys.Res.Lett.*, **30(20)**, 2050, doi:10.1029/2003GL017606.
- Ferri, F., P. H. Smith, M. T. Lemmon, and N. O. Renno (2003); Dust devils as observed by Mars Pathfinder, *J.Geophys.Res.*, **108(E12)**, 5133, doi:10.1029/2000JE001421.
- Fitzjarrald, D. E. (1973); Afield investigation of dust devils, *J.Appl.Meteorol.*, **12**, 808-813.
- Freier, G. D. (1960); The electric field of a large dust devils, *J.GeophysTes.*, **65**, 3504.
- NASA Photojournal(<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>)
- Newman, C. E., S. R. Lewis, P. L. Read, and F. Forger (2002); Modeling the Martian dust cycle: 1. Representations of dust transport processes, *J.Geophys.Res.*, **107(E12)**, 5123, doi:10.1029/2002JE001910.

- Paul Raeburn(1999); 火星 解き明かされる赤い惑星の謎、日経ナショナルジオグラフィック社
- Ringrose, T. J., M. C. Towner, and J. C. Zarnecki (2003); Convective Vortices on Mars: A reanalysis on Viking Lander 2 meteorological data, sols 1-60, *Icarus*, **163**, 78-87.
- Renno, N. O., A. A. Nash, J. Lunine, and J. Murphy (2000); Martian and terrestrial dust devils: Test of a scaling theory using Pathfinder data, *J.Geophys.Res.*, **105**, 1859-1865.
- Renno, N. O., V. J. Abreu, J. Koch, P. H. Smith, O. K. Hartogensis, H. A. R. De Bruin, D. Burose, G. T. Delory, W. M. Farrell, C. J. Watts, J. Garatuza, M. Parker, and A. Carswell (2004); MATADOR 2002: A pilot field experiment on convective plumes and dust devils, *J.Geophys.Res.*, **109**, E07001, doi:10.1029/2003JE002219.
- Ryan, J. A., and R. D. Lucich (1983); Possible dust devils, vortices on Mars, *J.Geophys.Res.*, **88**, 11,005-11,011.
- Schofield, J. T., J. R. Barnes, D. Crisp, R. M. Haberle, S. Larson, J. A. Magalhaes, J.R. Murphy, A. Seiff, and G. Wilson(1997); The Mars Pathfinder atmospheric structure investigation meteorology experiment, *Science*, **278**, 1752-1758
- Sinclair, P. C.(1969); General characteristics of dust devils, *J.Appl.Meteorol.*, **8**, 32-45
- The Mars Orbiter Laser Altimeter Image Gallery; JPL/NASA
(<http://mola.gsfc.nasa.gov/images.html>)
- Tratt, D. M., M. H. Hecht, D. C. Catling, E. C. Samulon, and P. H. Smith (2003); In situ measurements of dust devil, *Lunar Planet.Sci.* [CD-ROM], **XXXV**, Abstract 1259.
- 伊藤宏記 (2008); 地球と火星のダストデビル, 神戸大学理学部地球惑星科学科卒業論文
- 奥村晴彦 (2008); LATEX 2 美文書作成入門, 株式会社技術評論所
- 気象学会 (2004); 気象科学事典, 東京書籍株式会社
- 地学団体研究会, 新版地学事典編集委員会 (1999); 新版地学事典, 株式会社平凡社, ISBN4-582-11506-3 Yaping Shao(2001), Physics and Modelling of Wind Erosion, Kluwer Academic Pub, ISBN 0-7923-6657-3

東京工科大学・札幌市立大学デザイン学部・自然科学研究機構国立天文台・宇宙航空研究開発機構; 月探査情報ステーション (http://moon.jaxa.jp/ja/index_fl.shtml)

日本惑星協会 (<http://www.planetary.or.jp/top.html>)(1999)

財団法人横浜市青少年育成協会 (2005); はまぎんこども宇宙科学館ホームページ (<http://www.ysc.go.jp/ysc/ysc.html>)

早川正士/伊田裕一/武藤史弥; 地震に伴う電磁気現象と地震予知の研究, 第7章 ULF 帯電磁放射, VHF 帯見通し外伝搬, VLF/LF 帯送信局電波を使った研究など (<http://www.rf-world.jp/bn/RFW04/samples/p064-065.pdf>)