

火星現象論: ダストストーム

地球流体電脳倶楽部

1996年5月24日

目次

1	ダストの特性と分布	2
2	惑星規模ダストストームの成長	2
3	惑星規模ダストストームの発生記録	3
4	ダストストーム発達メカニズム	4
5	ダストが巻き上げられる条件	9
6	参考文献	12

Abstract

ダストストームについて概観する.

1 ダストの特性と分布

ダストの特性については探査衛星の optical data と infrared data から得られる。ダストの特性をまとめると次のようになる (Leovy,1979)。

- 粒子の半径はおよそ $0.4 \mu\text{m}$
- 主成分は silicate で, magnetite, maghemite, clay mineral など含む。
- single scattering albedo はおよそ 0.75
- asymmetric factor はおよそ 0.5
- infrared opacity はおよそ $0.9 \mu\text{m}$ の領域で最大となる。
- 赤外域での波長について平均された opacity は可視光域での波長平均された opacity と同程度である。

全球的ダストストーム時のダストの分布の特徴は次のようになっている。

- 全球に一様に広がる。
- mixing ratio は鉛直方向に一様
- ダストは 50 km の高さまで達する。
- ダストストーム終了期には熱帯の方が最後までダストが残っている。

ダストストームとダストストームの間の期間ではダストの分布に緯度変化, 地形による変化が見られる。

2 惑星規模ダストストームの成長

バイキングが着陸した年に2つの global dust storm が起きた。図1にそのときの optical depth の観測結果を示す。図1の上の図がバイキング2号による観測結果で, 下の図がバイキング1号による観測結果である。図の横軸は時間を着陸船が着陸してからの日数で表してある。図の上には対応する L_s の値も示してある。図の縦軸は optical depth をあらわす。矢印でダストストームの開始時期を示してある。この図からダストストームの成長は非常に早いことがわかる。(2, 3日で optical depth が4倍になっている。) (Leovy,1979)

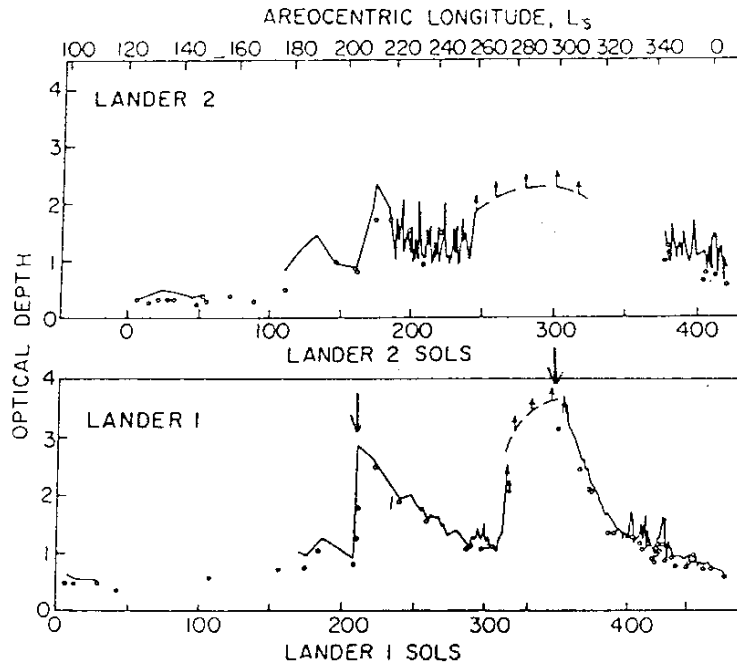


図1 opacity に与えるダストの効果 (Leovy(1979), fig 7)

global dust storm 時の地表面気圧の変化については、「火星大気の圧力場」を参照されたい。その 図2 地表面気圧の年変化 (Hess et al.(1980)) に記されているように、ダストストーム時は気圧の日変化が増大する。

3 惑星規模ダストストームの発生記録

火星全体を覆うような大きなダストストームの主なものは次のとおり。

- 1956 年の storm
- 1971 年の storm
- 1977 年の storm

4 ダストストーム発達メカニズム

global dust storm の発生メカニズムについてはいくつかの仮説が出さされているが、ここでは Gierasch and Goody (1973) と Leovy, Zurek and Pollack (1973) を紹介する。

- Gierasch and Goody (1973)

- 基本思想

dust storm の成長メカニズムは地球におけるハリケーンメカニズムと同じであるという idea を出発点にする。そこで cyclonic な wind system と日射による加熱との正の feedback system が存在すると考え、以下に示すような数値モデルを作った。

その結果、初期に小さなダストストームが存在したとすればその feedback により storm が惑星規模にまで成長する可能性があることを示した。

- モデルの説明

Gierasch and Goody (1973) は dust storm のモデルとして図2のようなモデルを考案した。

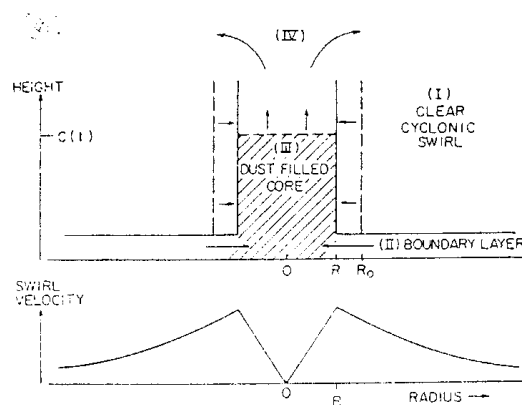


図2 モデルの概念図 (Gierasch and Goody (1973), fig 1)

これは地球のハリケーンのモデルをもとにして作ったものである。図2のモデルの特徴は以下のとおり。

- * 軸対称モデル
- * (I) から (IV) の4つの領域に分けて考える。
- * 接線方向の速度分布としては図2の下図のようなものを与える。

また, 鉛直方向の単位としてはスケールハイト (約 10 km) を使う. $C(t)$ はダストの巻き上げられた高さを示す.

初期条件は $t = 0$ で半径 R_0 の小さなダストストームが存在するという状況を与える. 放射や対流による heat transfer を計算して

- * 鉛直方向に平均した温度 $\bar{T}(t)$
- * ダスト層の高さ $C(t)$
- * 鉛直方向の速度 w
- * 接線速度 V

などを求める.

— 計算結果

昼の場合 (日射がある場合) と夜の場合 (日射がない場合) とに分けて解を求める. 図3には異なる初期値から初めた2つの計算結果が示してある. 図3は Region I と Region III との境界における接線速度 V , ダスト層の高さ $C(t)$, 鉛直速度 w , 鉛直平均温度 \bar{T} の時間発展を示したものである. 縦軸は時間を day であらわしてある. 縦軸は $V, C(t), \bar{T}, w$ をあらわす. 図の左側には V と \bar{T} と w の目盛が示してある. 図の右側には C の目盛が示してある. 図3の上図は初期値として

$$R_0 = 10^8 \text{cm}$$

$$C_0 = 0.4H$$

$$w_0 = 0$$

を与えたものである. 図3の下図は初期値として

$$R_0 = 10^8 \text{cm}$$

$$C_0 = 0.2H$$

$$w_0 = \frac{0.2}{\tau} H$$

を与えたものである. どちらの場合もダストが巻き上げられる高さは時間とともに高くなっていきダストストームが発達していく. この計算により, ここで考えたシステムは不安定であり, dust storm は成長できることが言えた.

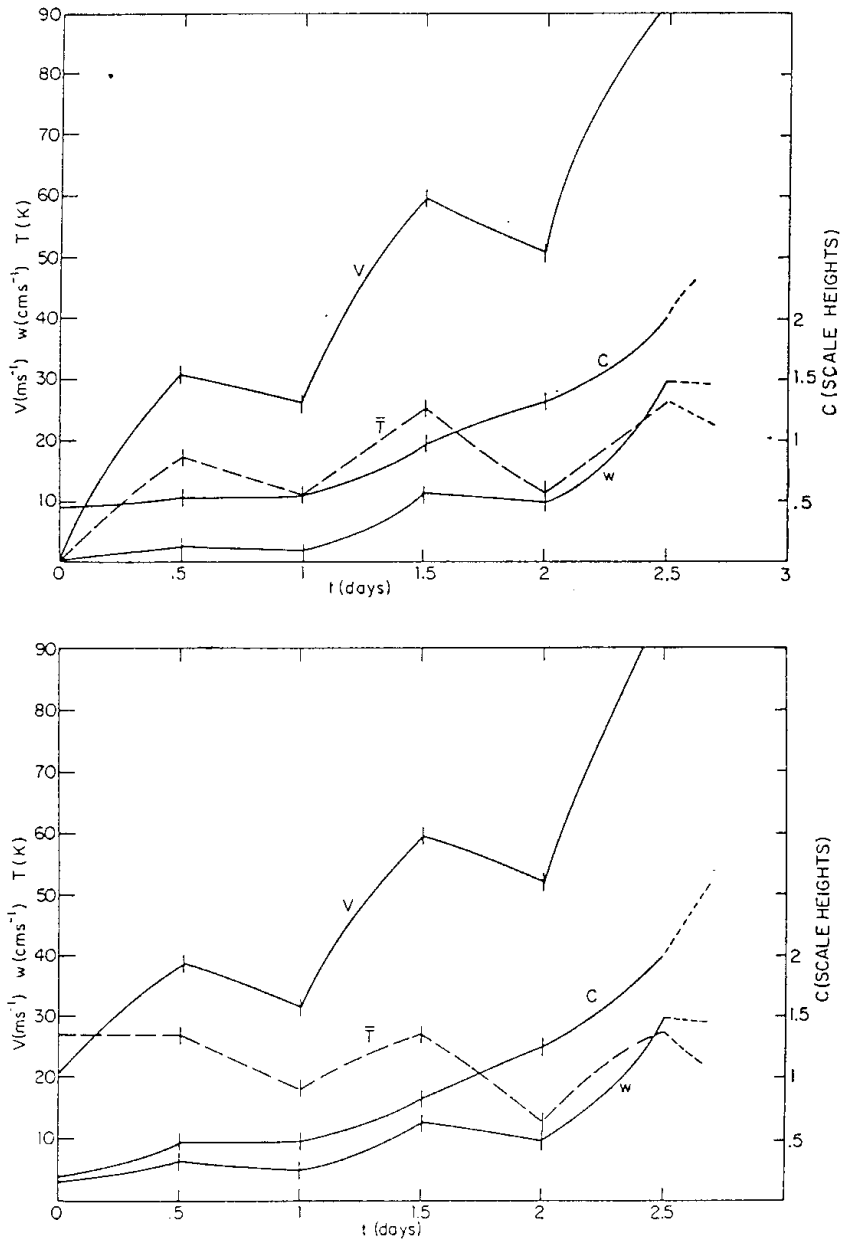


図3 計算結果 (Gierasch and Goody(1973), fig 2)

- Leovy, Zurek and Pollack(1973)

Gierasch and Goody(1973)では初期に小さなダストストーム (local dust storm) が存在するという仮定のもとに議論を進めたが, Leovy et al(1973)では初期の小さなダストストームが形成されるメカニズムについて次のような story を作った. local dust storm を作り出すメカニズムとして極冠からの吹き出しを考える. 南半球の春先には極冠と裸地との間で激しい温度勾配が生じる. また, 同じ時期に極冠の CO_2 が昇華する. この2つの現象により, 極冠から強い吹き出しが起きると想像される. その結果, dust が巻き上げられ local dust storm が起きると考えられる. 実際に, 極冠からの吹き出しを計算した結果が図4である. (具体的にどのような計算をしたのかはまだ良く調べていないのでわからない) 図4は極冠からの吹き出し量の年変化を示したものである. 横軸は時間軸であり, Heliocentric longitude (図の下に示してある) と L_s (図の上に示してある) で表したものである. この計算より, 吹きだし量が最も多いのは冬の南半球の極冠であることがわかる. よって, 冬の南半球の極域では強い吹き出しのために dust が巻き上げられ, 小さなダストストームが起こってもよさそうだという事が言えた.

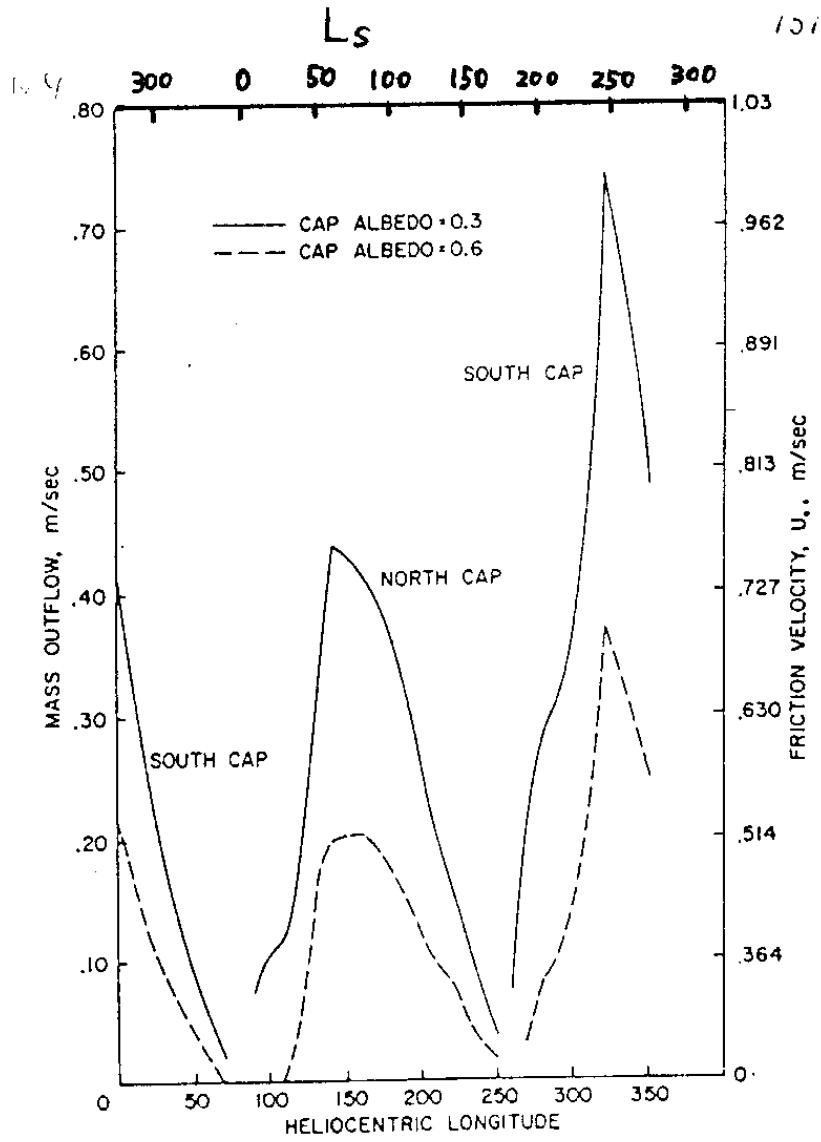


図4 極冠からの吹き出し (Leovy,Zurek,Pollack(1973), fig 10b)

5 ダストが巻き上げられる条件

ダストストームが発生するためには砂が巻き上げられなければならない。地表から大量の砂を巻き上げるためには saltation と呼ばれる現象が重要であると言われている。saltation と呼ばれる現象の概念図を図5に示す。saltation(躍動)というのは水中または空中を砂泥粒子がバウンドしながら運ばれる現象である。saltation が起きると輸送されている粒子が地表に衝突するたびに他の粒子を巻き上げる(これは suspension と呼ばれる)ので効率良く砂が空中に巻き上げられることになる。saltation が起きるために必要な風速の最小値は何人かの人々により estimate されている。以下にその例を示す。

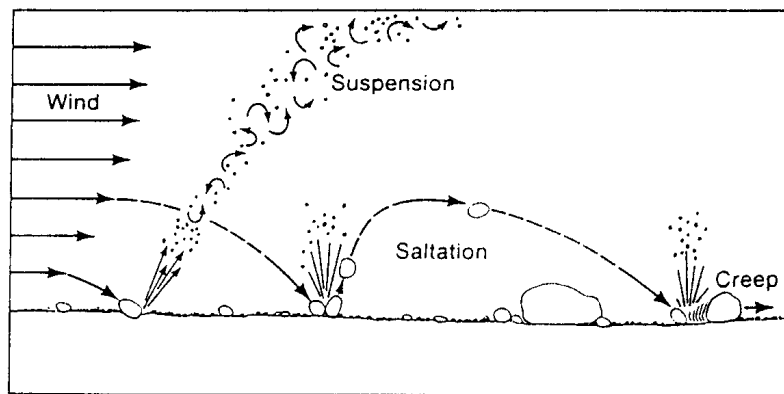


図5 砂の輸送過程 (Earthlike planet)

- Iversen et al(1976) による実験

Iversen et al(1976) は風洞実験の結果から saltation が起きるのに最低限必要な friction velocity: U_{min}^* の式を次のように求めた。

$$U_{min}^* = A \times \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho)gD_p}{\rho}}$$

ただし, A は

$$B \equiv \frac{U_{min}^* D_p}{\nu}$$

の値によって次のように決められる。

$$A = 0.266 \sqrt{\frac{1 + \frac{0.055}{\rho g D_p^2}}{1 + 2.123B}} \quad \text{if } B \leq 0.22$$

$$A = \left(0.108 + \frac{0.0323}{B} - \frac{0.00173}{B^2}\right) \left(1 + \frac{0.055}{\rho_p g D_p^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{if } 0.22 \leq B \leq 10$$

$$A = 0.11 \quad \text{if } B \geq 10$$

ここで, D_p は砂の直径, g は重力加速度, ρ は空気の密度, ρ_p は砂の密度, ν は同粘性係数を, それぞれあらわす. この結果を図にしたのが図6である. 図5の横軸は砂の直径 (μm) を縦軸は U_{min}^* (cm/sec) をあらわす. 地球, 火星, 金星の3つの場合について示してある. また参考のために水中の中の粒子の場合についての結果も示してある. この図から最も saltation の起こりやすい粒径が存在することがわかる.

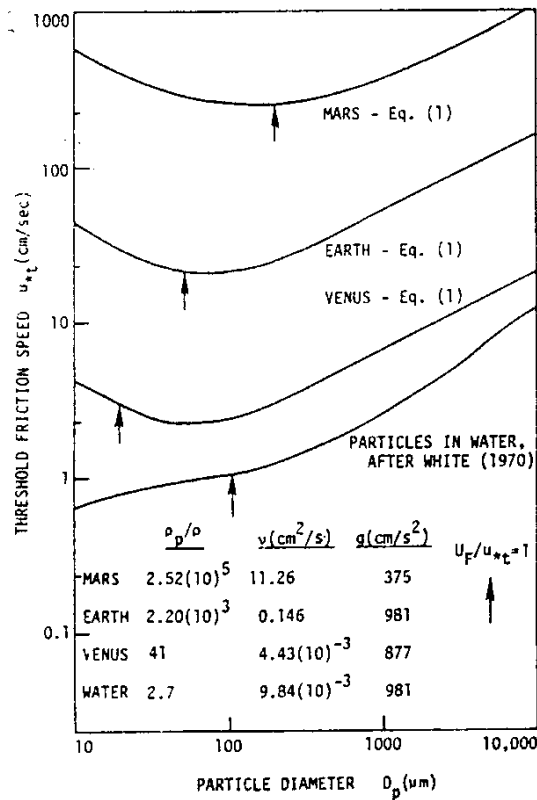


図6 砂を巻き上げるのに必要な風速 (Iversen et al(1976), fig 6)

- Gierasch and Goody(1973) による議論

Bagnold(1941) の考察によると saltation が起きるのに最低限必要な friction velocity: U_{min}^* は

$$U_{min}^* = 1.2 \times 10^{-2} \times \frac{\rho_p g \nu}{\rho}$$

で与えられる. 変数の定義は上と同じ. これを火星の場合 (200K, 6mb) に計算すると

$$U_{min}^* = 180 \text{cm/sec}$$

となる.

参考までにこの friction velocity に対応する地衡風の速度を求めてみる. Csanady(1967) によれば

$$\left(\frac{U^*}{U_g}\right)^2 = C_d$$

となる. ただし, U_g は geostrophic free-stream velocity であり, C_d は抵抗係数 (drag coefficient) である. Leovy and Mintz(1969) は C_d を次のように推定した.

$$\sqrt{C_d} = 3 \times 10^{-2} : \text{stable}$$

$$\sqrt{C_d} = 6 \times 10^{-2} : \text{unstable}$$

$\sqrt{C_d} = 6 \times 10^{-2}$ の値を使うと, 砂を巻き上げるのに必要な U_g は

$$U_g = 30 \text{m/sec}$$

と求まる. これで火星で砂を巻き上げるのに必要な地衡風速度が求まった. 地衡風の速度として, 30 m/sec という値は火星では決して大きいものではない. よって, 火星で頻繁にダストストームが起きるのも納得できる (Gierasch and Goody, 1973).

6 参考文献

- Gierasch, P.J. and Goody, R.M., 1973: A model of a Martian great dust storm, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 169-179.
- Iversen, J.D. *et al.*, 1976: Windblown dust on Earth, Mars, Venus, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2425-2429.
- Leovy, C.B. *et al.*, 1973: Mechanism for Mars dust storm, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 749-762.
- Leovy, C.B., 1979: Martian Meteorology, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **17**, 387-413.
- Murray, B.C., 1981: *Earthlike planets*. Freeman and Co., 387pp.

謝辞

本稿は 1989 年から 1993 年に東京大学地球惑星物理学科で行われていた、流体理論セミナーでのセミナーノートがもとになっている。原作版は石渡正樹による「火星現象論」(1989/05/19)であり、林祥介によって地球流体電脳倶楽部版「火星現象論」として書き直された(1996/06/23)。構成とデバッグに協力してくれたセミナー参加者のすべてにも感謝しなければならない。

本資源は著作者の諸権利に抵触しない(迷惑をかけない)限りにおいて自由に利用していただいて構わない。なお、利用する際には今一度自ら内容を確認することを願う(無保証無責任原則)。

本資源に含まれる元資源提供者(図等の版元等を含む)からは、直接的な形でのWEB上での著作権または使用許諾を得ていない場合があるが、勝手ながら、「未来の教育」のための実験という学術目的であることをご理解いただけるものと信じ、学術標準の引用手順を守ることで諸手続きを略させていただきます。本資源の利用者には、この点を理解の上、注意して扱っていただけるようお願いする。万一、不都合のある場合には

dcstaff@gfd-dennou.org

まで連絡していただければ幸いです。