

氷衛星における地質現象の 再現実験と理論研究

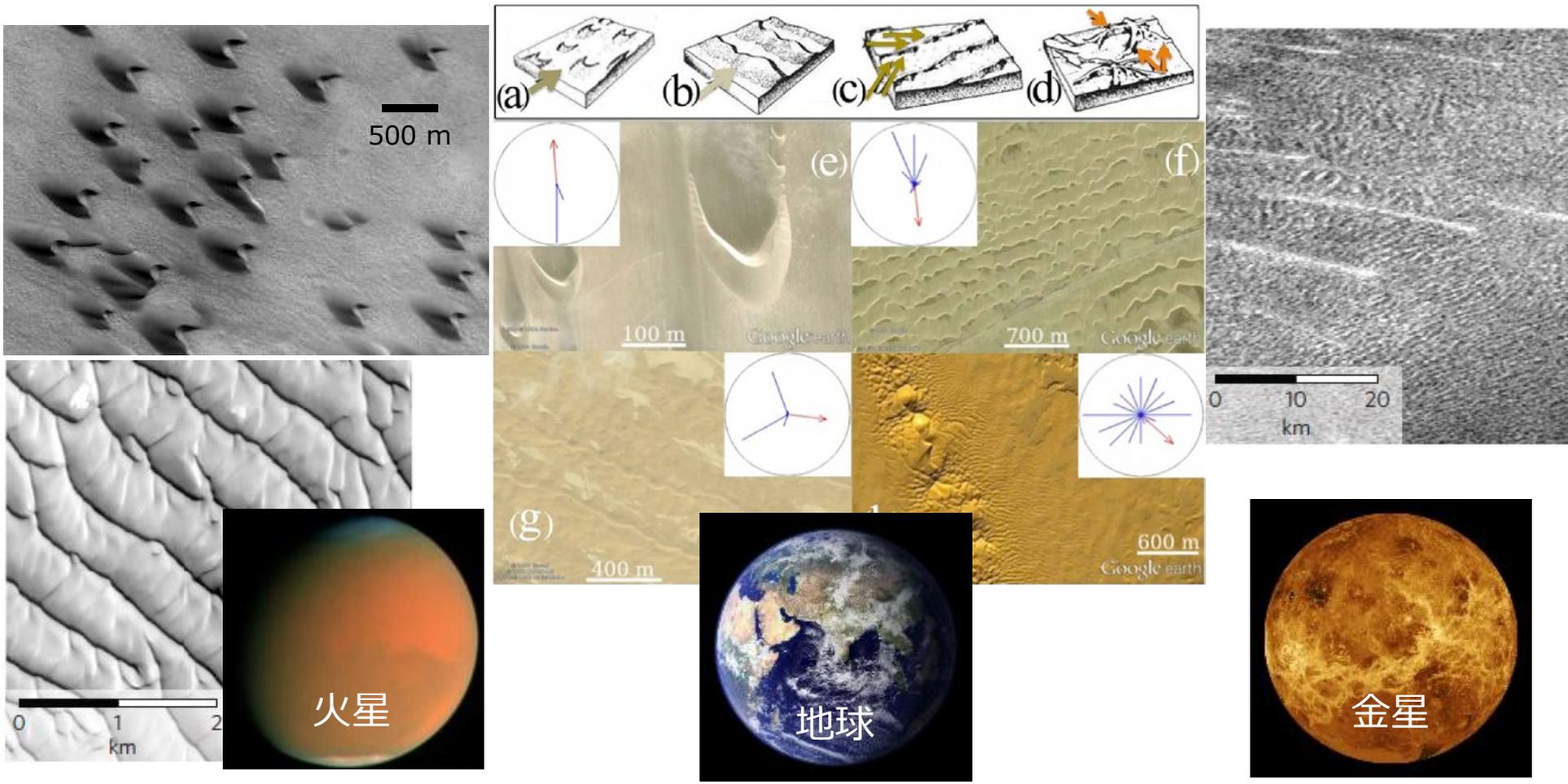
風成堆積物～砂丘形成に関するレビュー

関根康人

東京大学・地球惑星科学専攻

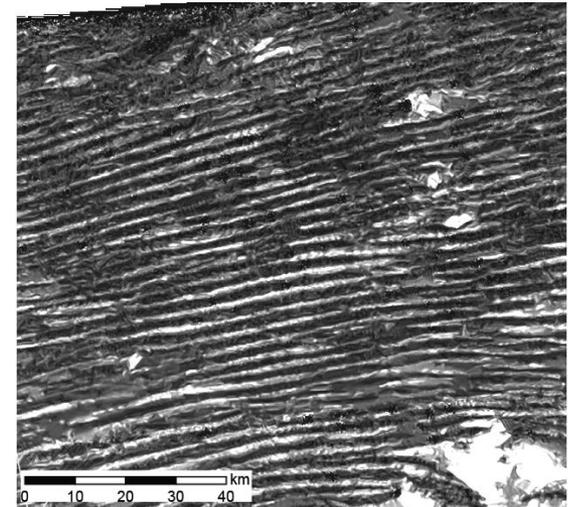
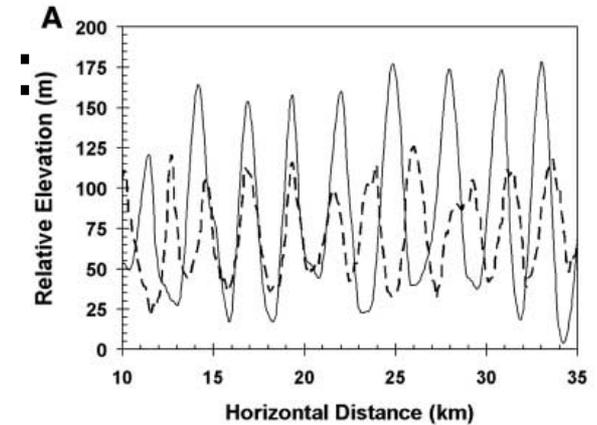
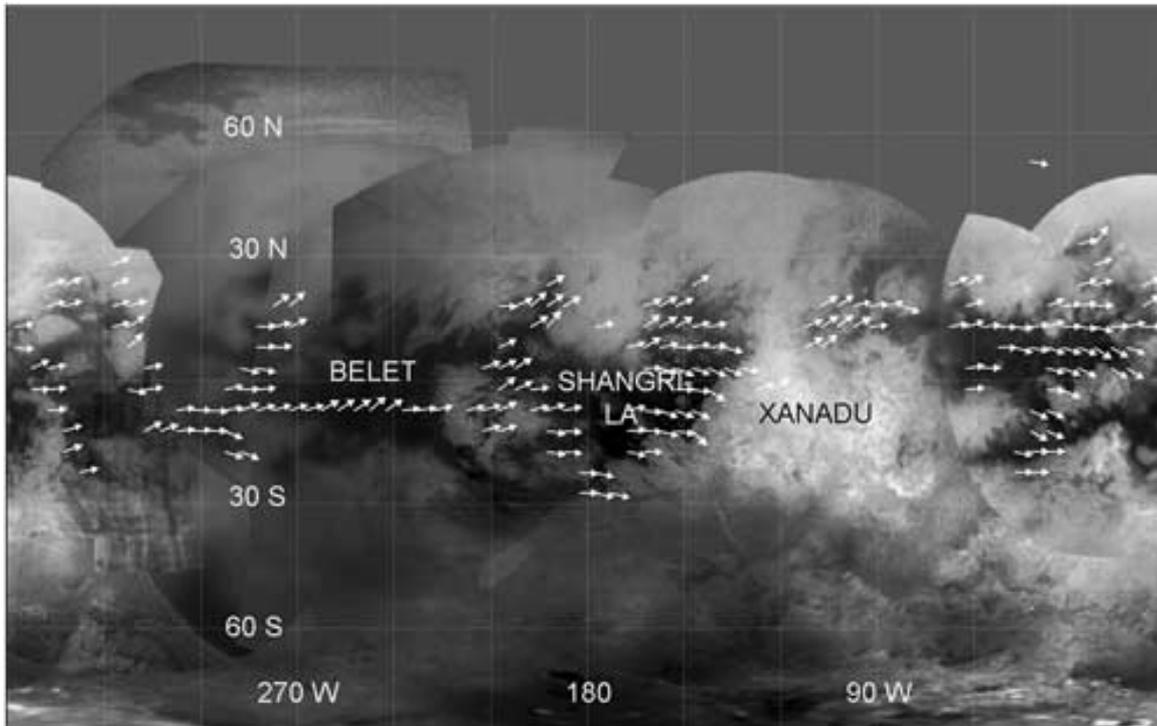
太陽系でユビキタスな地形：砂丘

- 地球、火星、金星、タイタン、(冥王星?)に存在
- 物理（重力、圧力、温度）・化学条件（粒子物性）が違うのに形状やスケールはよく類似



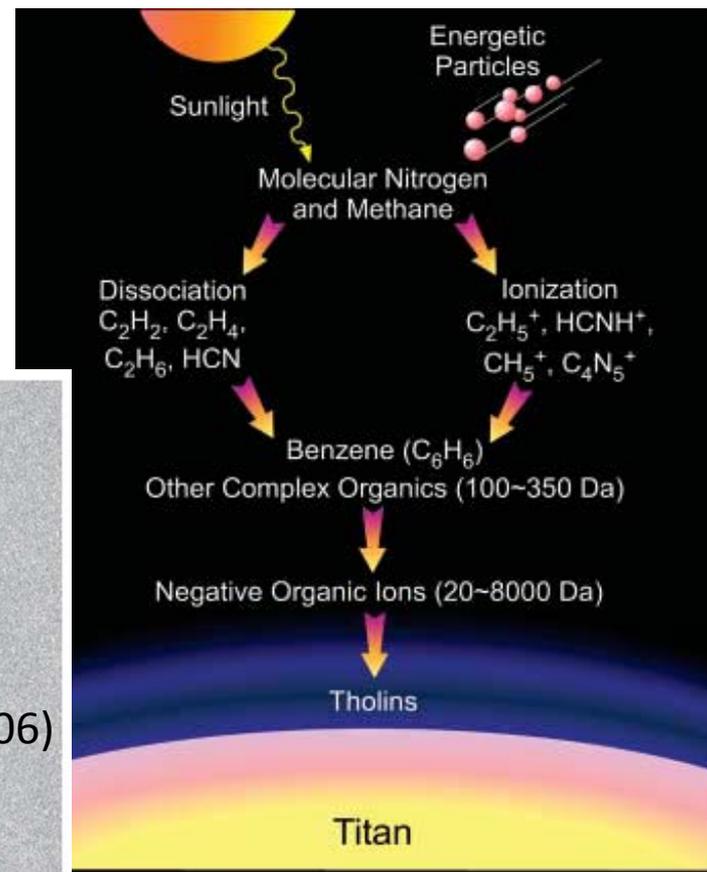
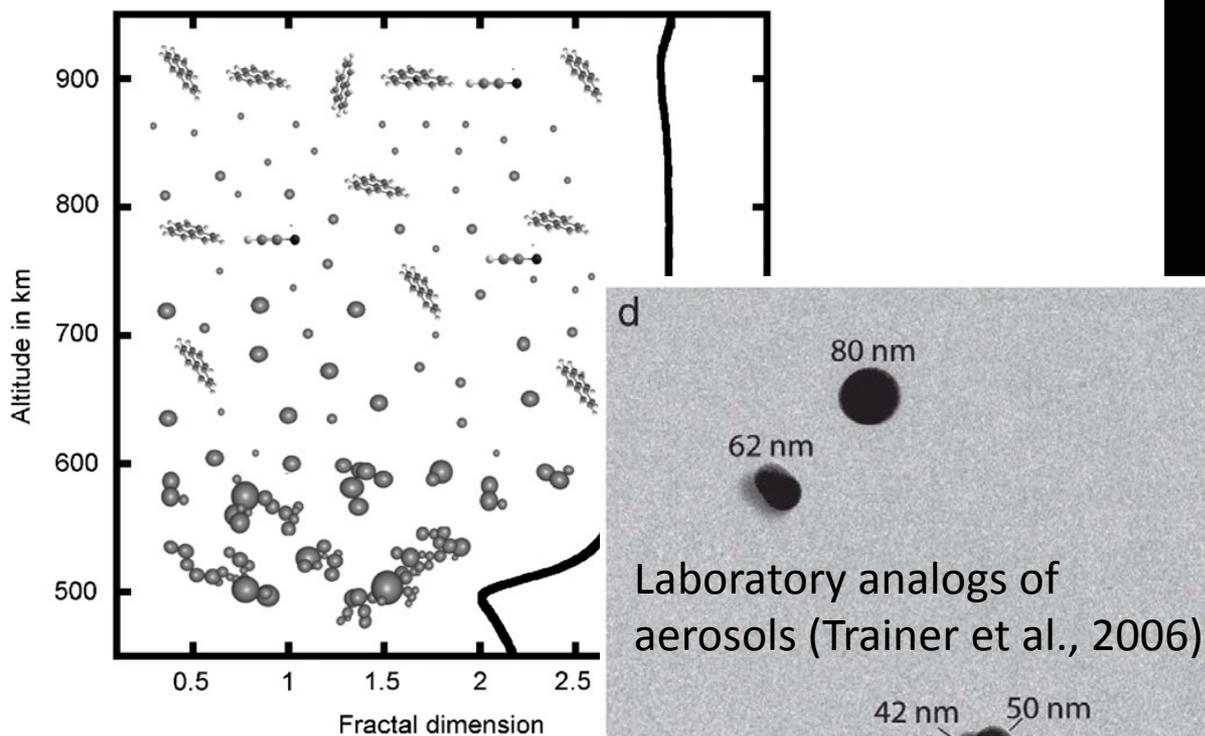
タイタンに見つかった線状砂丘

- **赤道域**のカッシーニ・レーダー画像 (Lorenz et al., 2006; 2009)
 - * レーダーで暗い領域 (緯度 $0 \pm 30^\circ$: 全球表面の $\sim 20\%$)
 - * **経度方向に沿う** : 間隔 4 km, 高さ 100 m, 長さ 50 km
 - * **黒い山 (有機物)** と **白い谷 (氷)**
- **最近の活動**



有機物の“砂粒子”

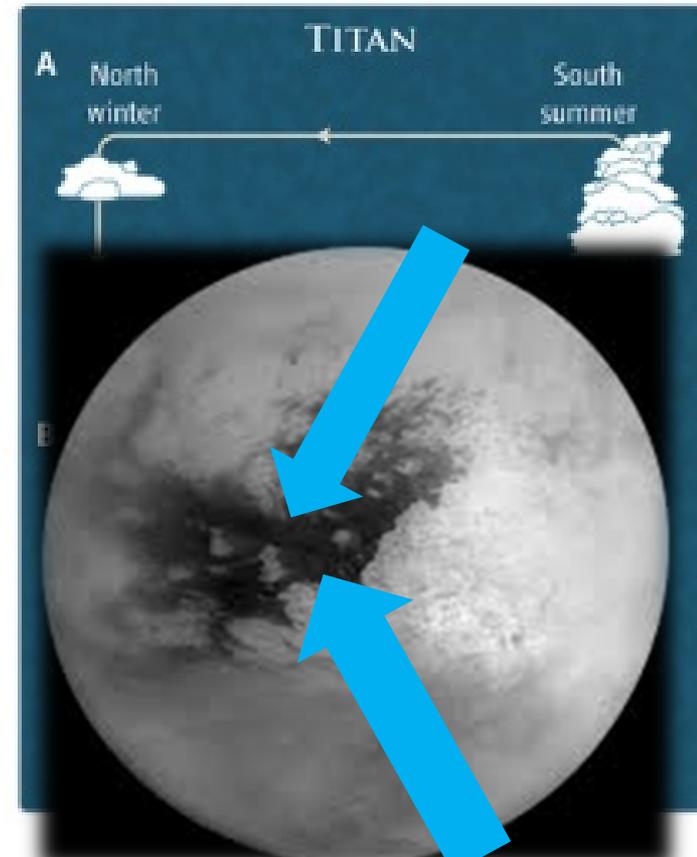
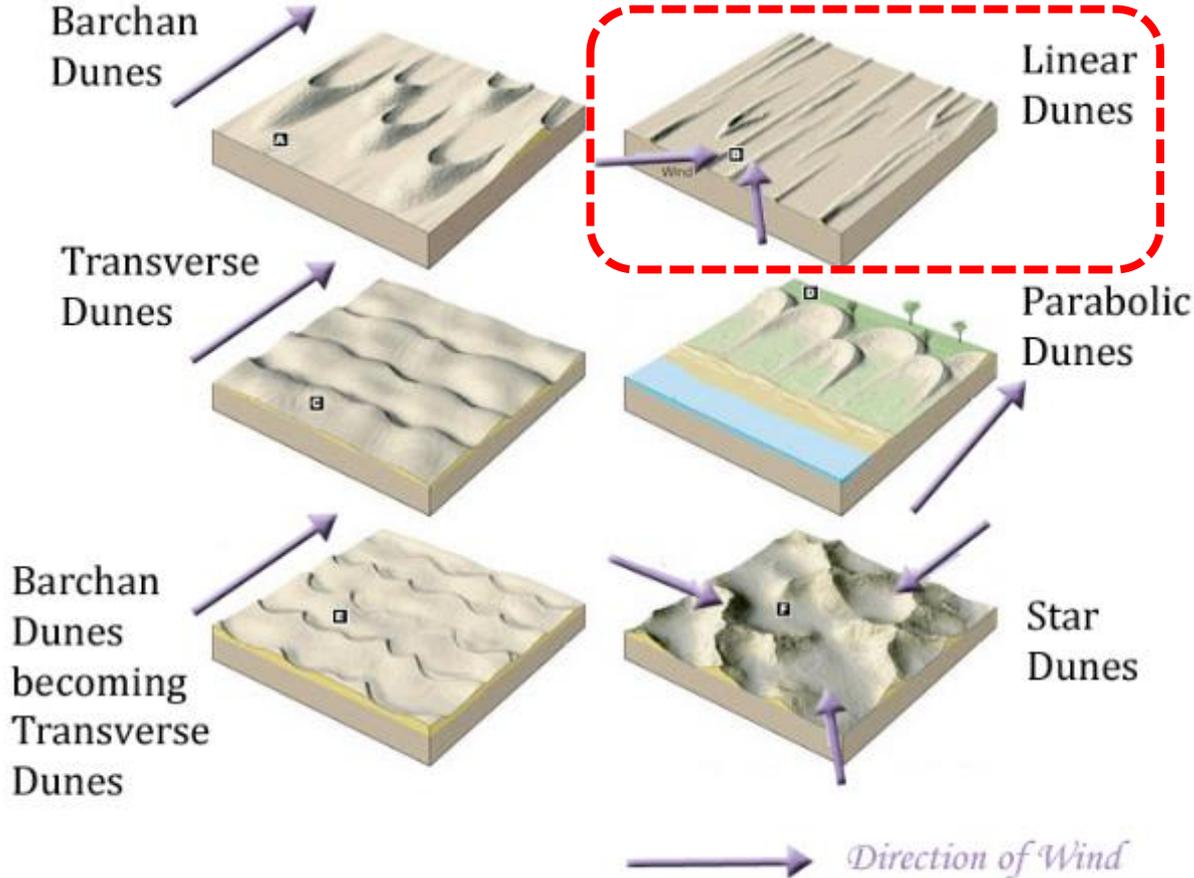
- 上層大気中 (高度 500-1000 km) での N_2 と CH_4 の光化学反応で生成 (分子量 数1000) (Waite et al., 2007)
- リム観測と放射伝達: 高度 500 km まで **50-100 nm** 粒子
- ホイヘンス着陸機: 対流圏で **~500** 粒子の **アグリゲイト** (Tomasko et al., 2005; 2008; Lavvas et al., 2011)



線状砂丘であるという意味

- 乾燥し、風が**十分**吹いている: 0.03-0.04 m/s ?
- 形状から**風向**を推定: **周期的**に変化する風向
→ 平均的には**西から東**への風 (⇔ GCM予想と逆)

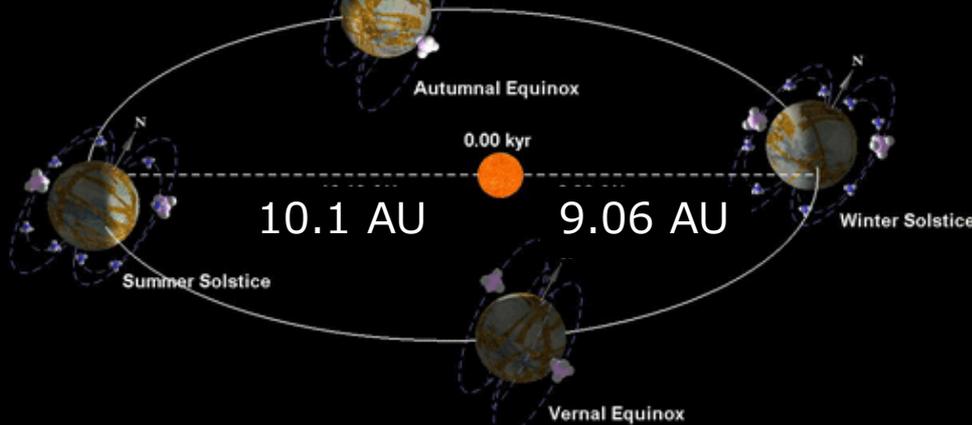
(Lorenz et al. 2009; Tokano 2010)



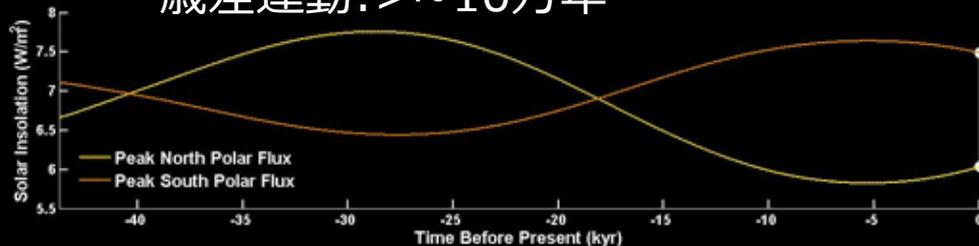
Key questions

- **必要な風速?** → 地球との条件の違いどう考える?
- **周期性の意味** → 日変化、季節変化、歳差運動?
- 気候モデルとの不一致は何を意味する?
- なぜ赤道に集中しているのか?

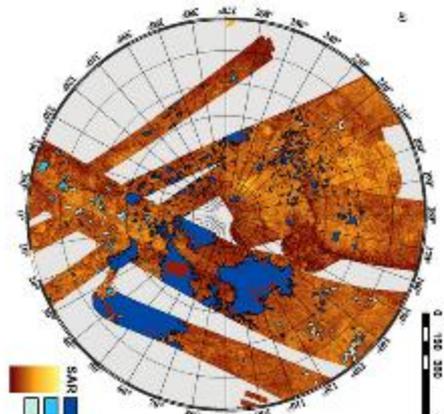
タイタンの公転周期: ~29.5年



歳差運動: > ~10万年

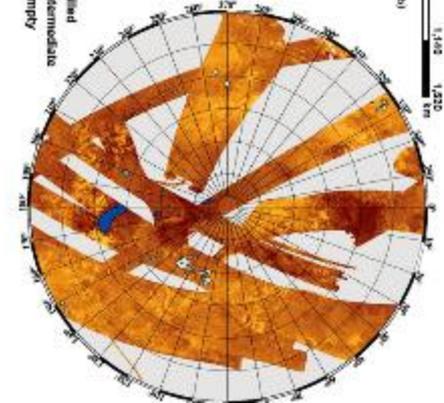


北半球



湖分布

南半球



必要な風速：跳動臨界風速

- 粒子が風で跳動する臨界の速度：風洞実験と力学解析 (e.g., Bagnold, 1941; 1951; Greeley & Iversen, 1985; Kok et al., 2012)
- 地球の実験データを火星、金星に応用 (Sagan & Bagnold, 1975; Iversen et al., 1976; 1987)

$$u_{*ft} = A_{ft} \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g D_p},$$

粒子にかかる力のつりあい
(Bagnold, 1941)

$$r_d F_d \approx r_g (F_g - F_l) + r_{ip} F_{ip},$$

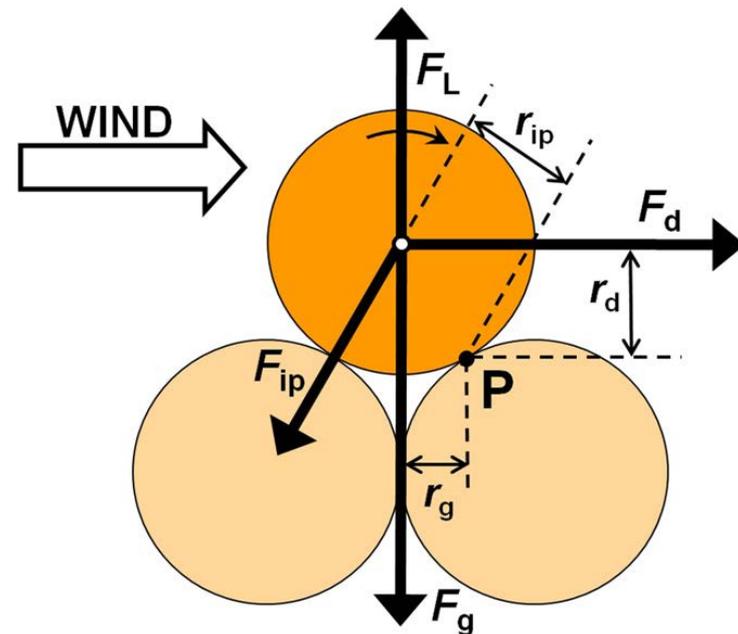
空力 重力 固着力

$$F_g = \frac{\pi}{6} (\rho_p - \rho_a) g D_p^3,$$

$$F_d = K_d \rho_a D_p^2 u_*^2,$$

$$\tau = \rho_a u_*^2.$$

ρ_a : 大気密度
 ρ_p : 粒子密度
 u_* : 臨界風速



→ A_{ft} : 固着力、流体の粘性、揚力の関数

必要な風速：跳動臨界風速

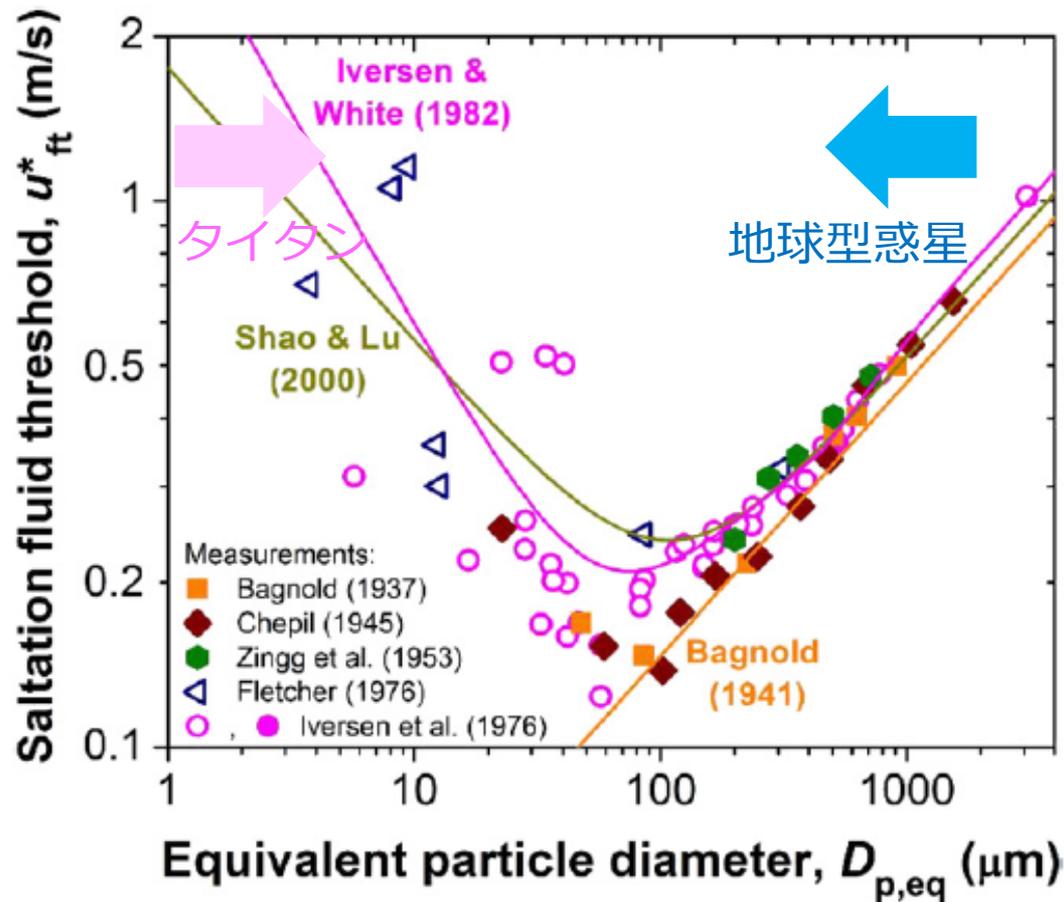
- 粒子が風で跳動する臨界の速度：風洞実験と力学解析 (e.g., Bagnold, 1941; 1951; Greeley & Iversen, 1985; Kok et al., 2012)
- 地球の実験データを火星、金星に応用 (Sagan & Bagnold, 1975; Iversen et al., 1976; 1987)

$$u_{*ft} = A_{ft} \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g D_p}$$

(A_{ft} : 固着力、流体の粘性、揚力の関数)

$$u_{*ft} = A_{ft} \sqrt{\frac{\overbrace{\left(\frac{1 + A_4 I_p / \rho_p g D_p^3}{f(\text{Re}_t^*) + g(\rho_p / \rho)} \right)}^{\text{固着力}}}{\underbrace{\rho_p g D_p}_{\text{粘性}} \underbrace{\rho}_{\text{密度比}}}} \rho_p g D_p$$

風洞実験に基づく半経験則



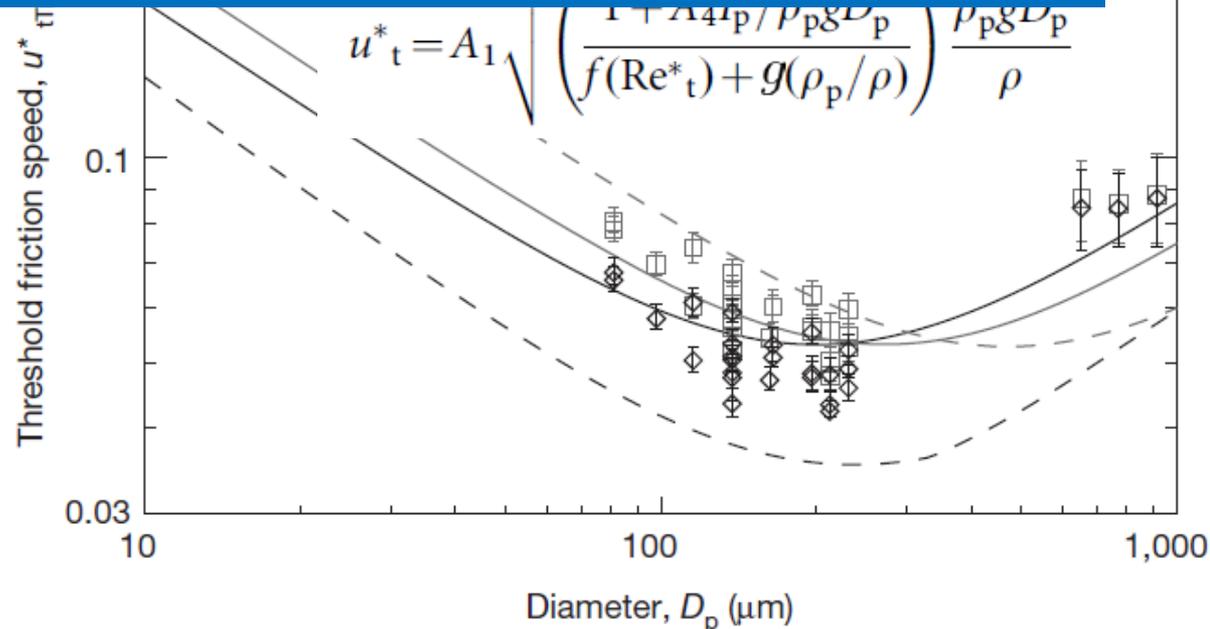
タイタンにおける跳動臨界風速

(Burr et al., Nature 2015, 517, 60)

- 流体の動粘性と ρ_p/ρ_a をタイタンに合わせ実験
- ρ_p/ρ_a の効果を組み込んだこれまでの経験則適応可能
(Iversen et al. 1987) → 表層風速は予想より50%増が必要

エアロゾルは~50 nm粒子の sub- μm アグリゲイト

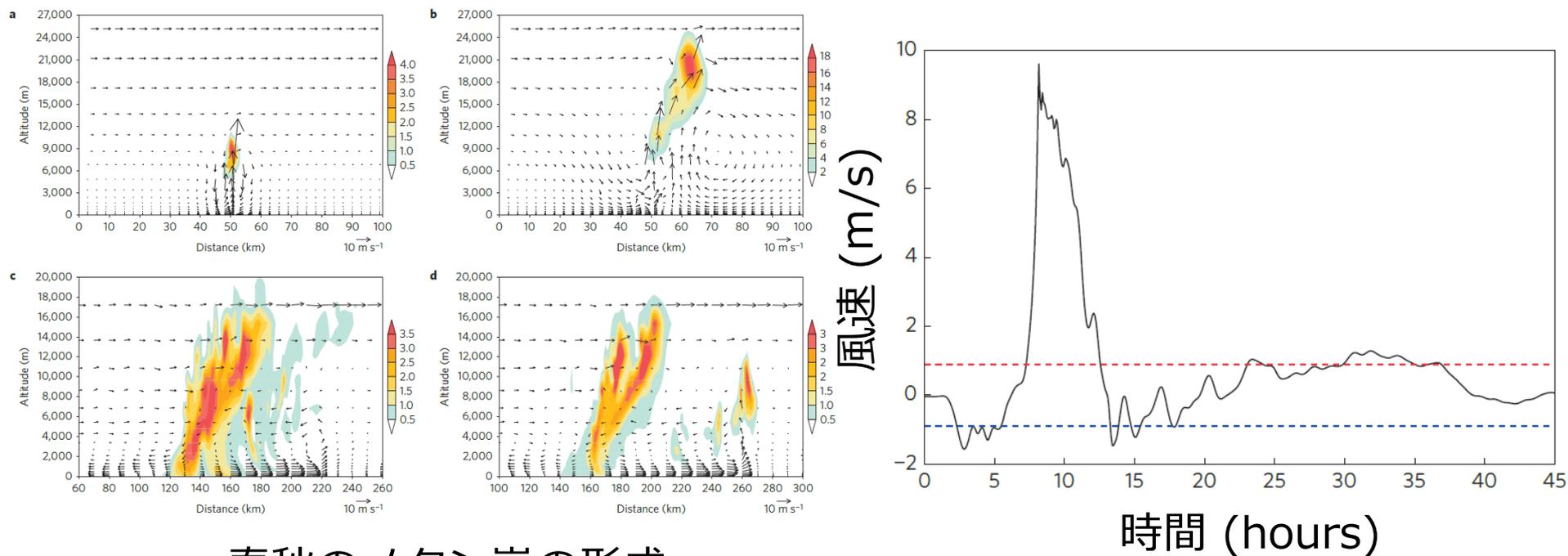
- 地表面での粒子成長 (液体を介した化学結合)?
- もっと強風が必要?



Key questions

- **必要な風速?** → 地球との条件の違いどう考える?
- **周期性の意味** → 日変化、季節変化、歳差運動?
- 気候モデルとの不一致は何を意味する?

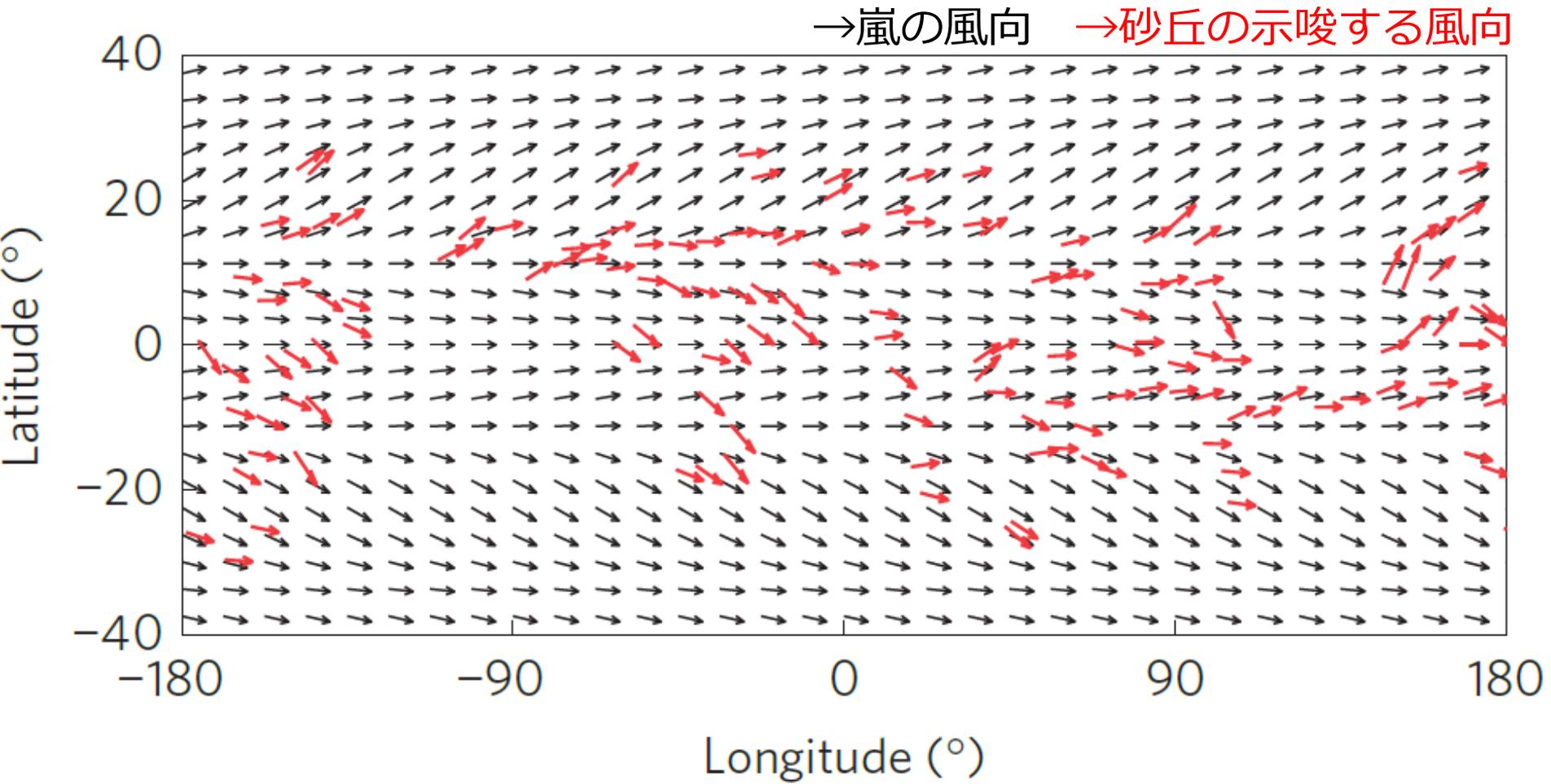
- GCMを使った春・秋季のメタン嵐の形成 (Charnay et al., 2015)



春秋のメタン嵐の形成

Key questions

- **必要な風速?** → 地球との条件の違いどう考える?
- **周期性の意味** → 日変化、季節変化、歳差運動?
- 気候モデルとの不一致は何を意味する?



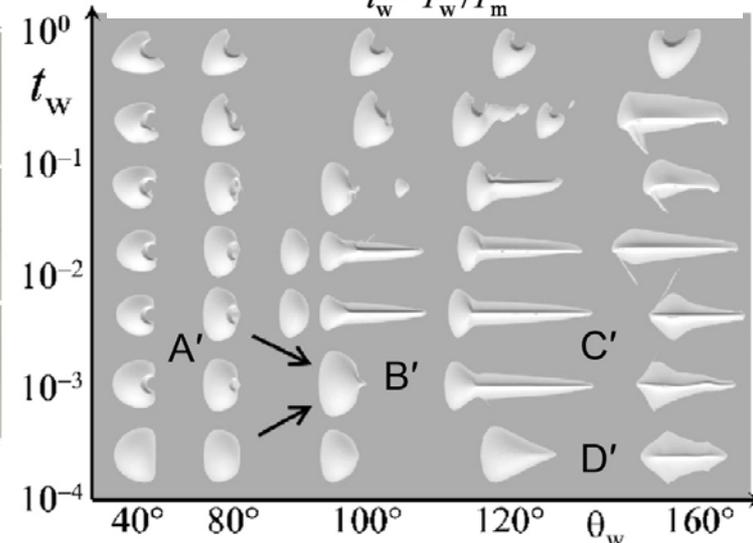
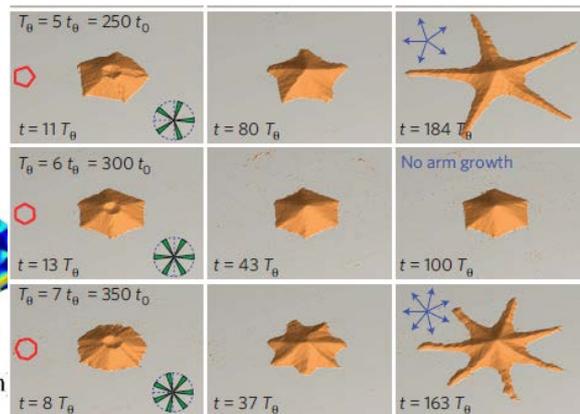
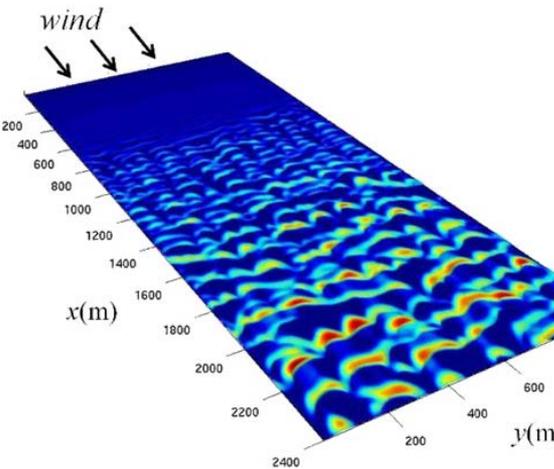
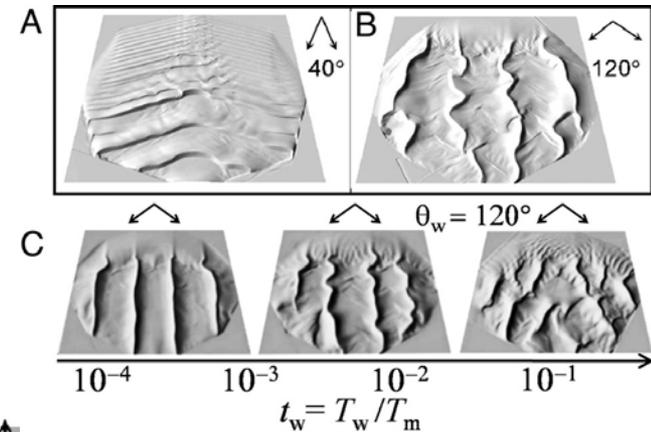
Key questions

- **必要な風速?** → 地球との条件の違いどう考える?
- **周期性の意味** → 日変化、季節変化、歳差運動?
- 気候モデルとの不一致は何を意味する?

- N体: 粒子-流体結合
数値シミュレーション (岩石砂)
⇒ **2方向(>120°)の風必要**

一方向だと横列砂丘

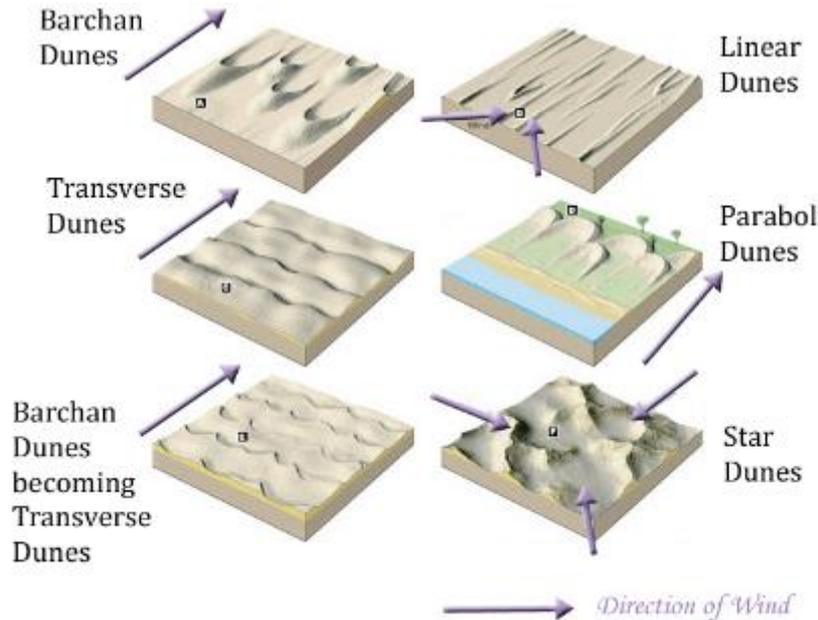
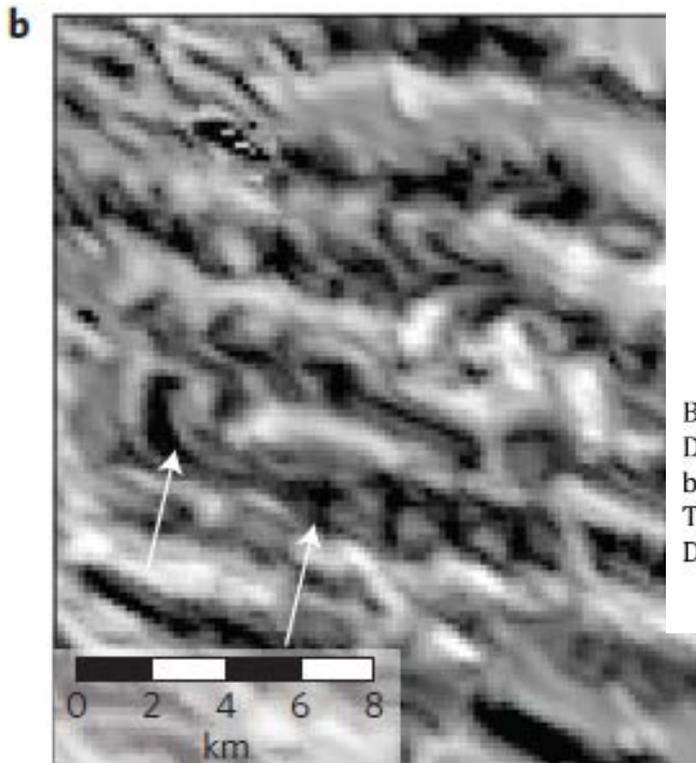
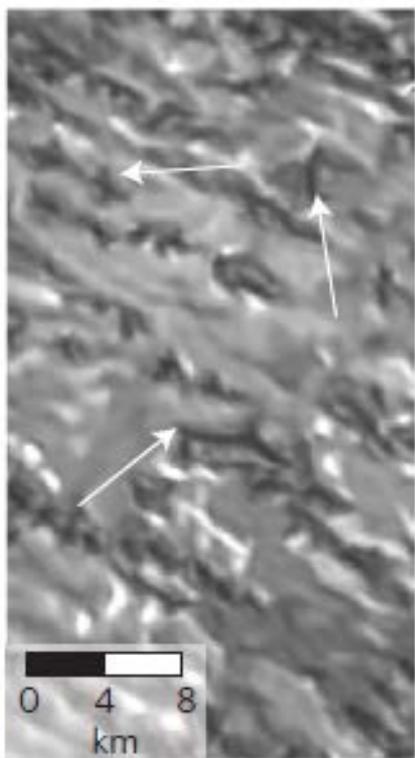
多方向だと星状砂丘



(Parteli et al., 2009; Duran et al., 2010; Luna et al., 2011;)

何が砂丘形成の周期を決めている？

- 半月型砂丘、星型砂丘の発見：砂丘の再配列 (Ewing et al., 2014)



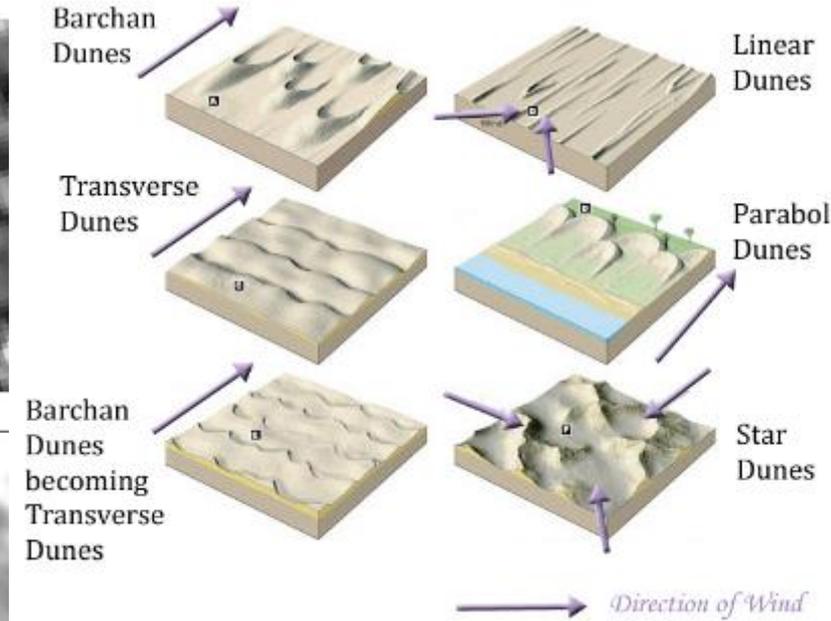
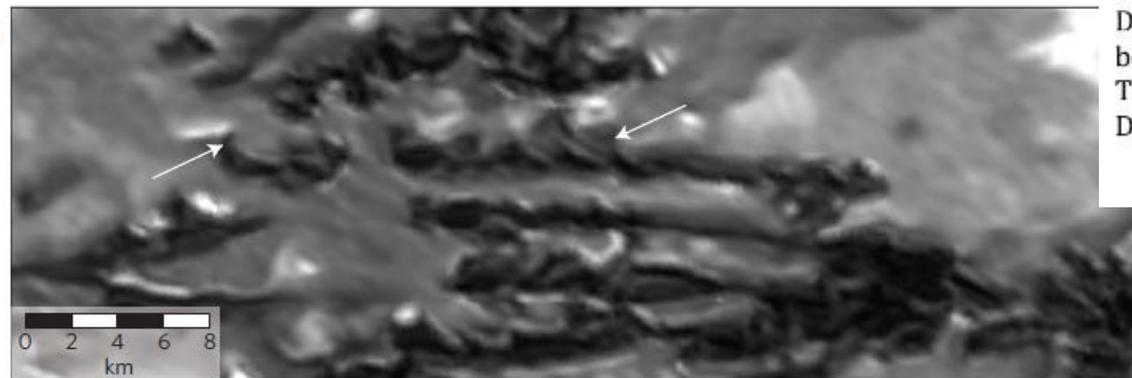
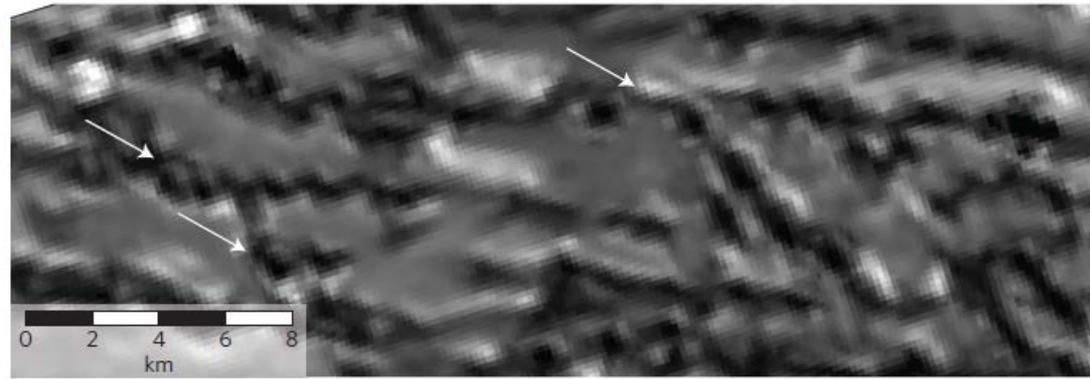
タイタンの砂丘

地球の砂丘



何が砂丘形成の周期を決めている？

- 半月型砂丘、星型砂丘の発見：砂丘の再配列 (Ewing et al., 2014)



タイタンの砂丘

地球の砂丘



何が砂丘形成の周期を決めている？

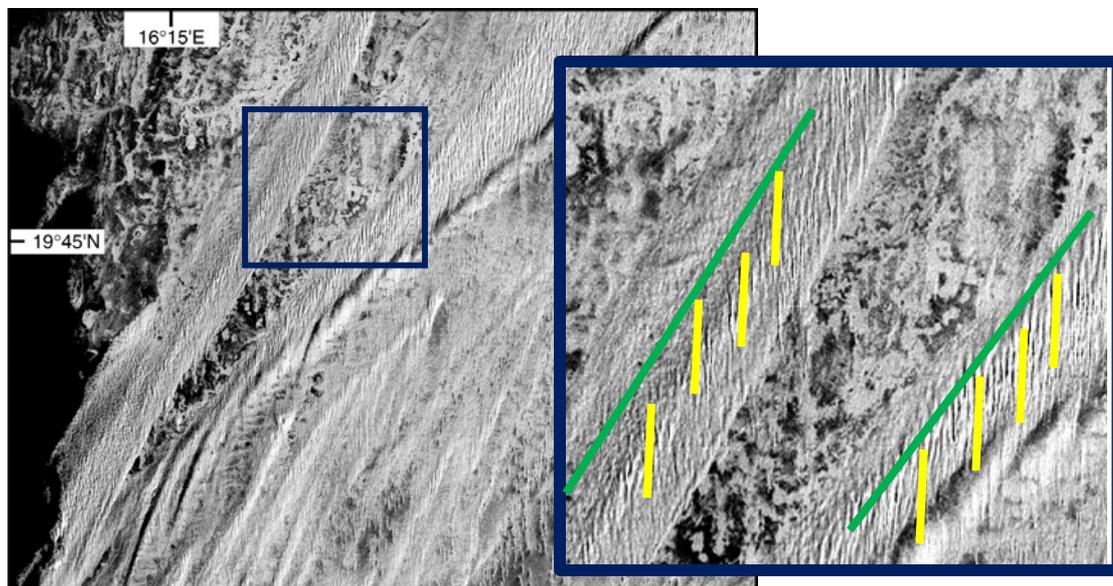
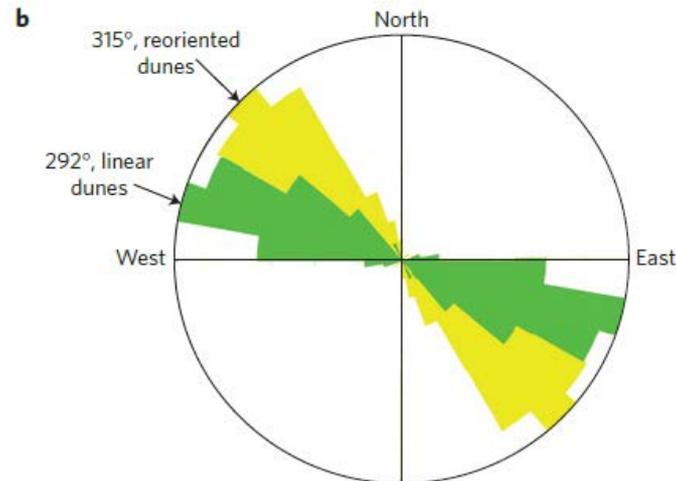
- 大きな砂丘：長周期の変動
- 小さな砂丘：短周期の変動

砂丘移動速度 0.1–1 m / 30年

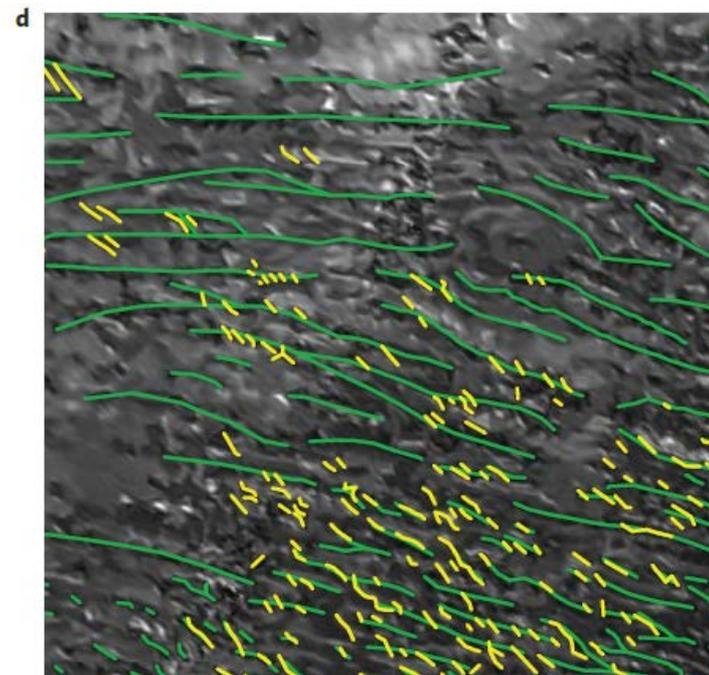
⇒ 再配列 $\sim 0.1 - 1$ Myrs

歳差運動の周期を反映??

(Ewing et al., 2015; Charnay et al., 2015)



モーリタリアのAzefal砂丘
(Lancaster et al., 2002)



砂丘移動の時間スケール

- 砂丘の移動質量フラックス Q (kg/m/s)

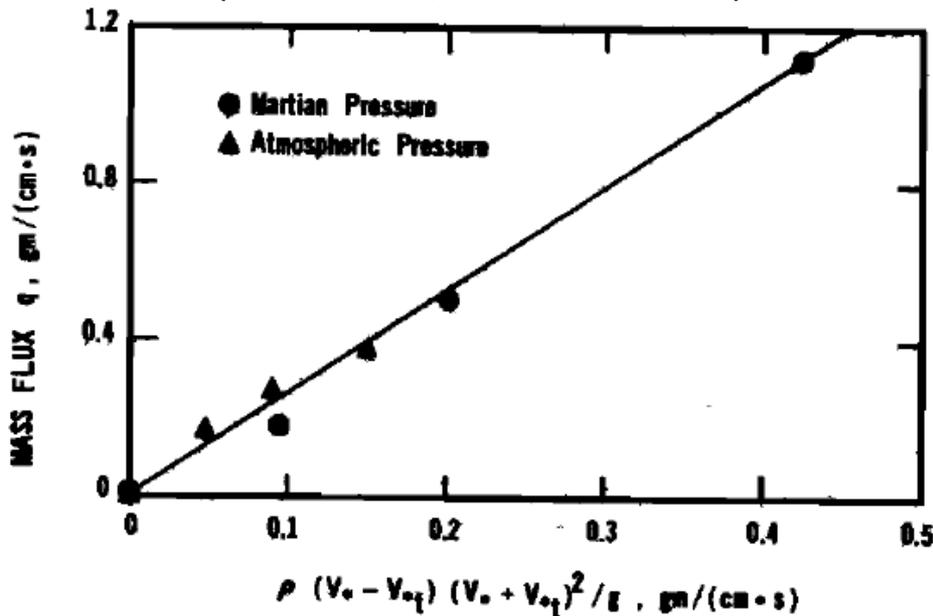
Saltation層上と層内の大気の運動量の差: $\rho_a (u_*^2 - u_{*it}^2)$

跳動粒子全体の運動量: $m (v_{imp} - v_{st}) / t \times \{Q / (mL/t)\}$

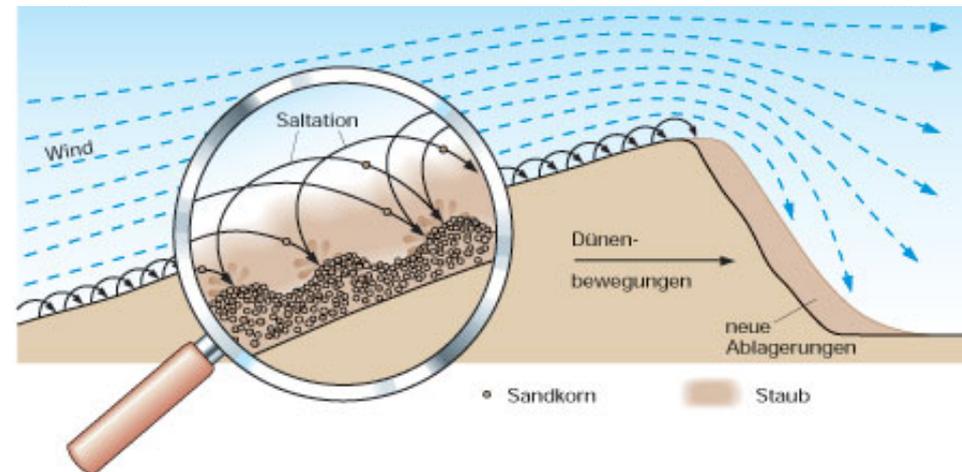
$$\Rightarrow Q = \rho_a (u_*^2 - u_{*it}^2) L / \Delta v$$

$$\left[\begin{aligned} L / \Delta v &\propto u_* / g \quad (\text{Kawamura 1951}) \\ &\propto u_{*it} / g \quad (\text{Namikas 2003}) \end{aligned} \right]$$

200 μ m砂粒子の風洞実験
(White 1979; Kawamura 1951)



ρ_a : 大気密度、 L : 跳動距離、 m : 1粒子の質量
 ρ_p : 粒子密度、 t : 跳動時間、 v_{st} : 粒子の跳動速度
 u_* : 臨界風速、 g : 重力加速度

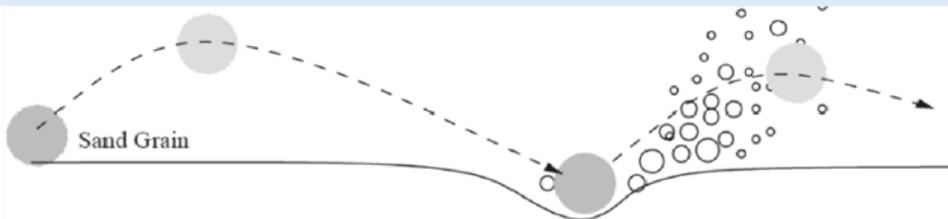


まとめと課題

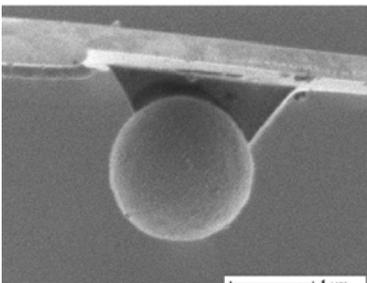
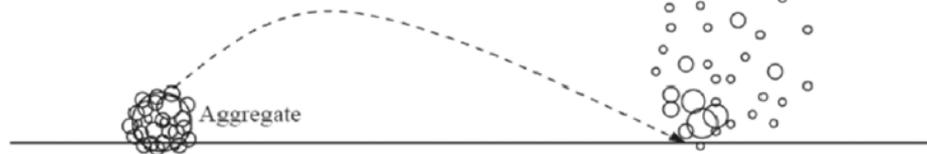
- タイタンの砂丘形成にはいくつか問題が残る

- アグリゲイト有機物粒子の跳動臨界速度？
- 砂粒子形成プロセス (⇒小：地球、小⇒大：タイタン)
- 砂丘の形成移動時間が長すぎる (~0.1 – 1 Myrs)
⇔ エアロゾル堆積率 (厚さ 1 - 10 cm for ~ 0.1 – 1 Myrs)

エアロゾル模擬物質の物性 ⇒ 粒子-流体シミュレーション



(c) Saltating aggregate disintegration



ナノ〜マイクロ粒子の
粒子間力測定
(Kani et al. 2007)

