

今村、小郷原

# 目次

- 火星におけるダストの役割
- 過去の観測で分かった火星ダスト
  - 時間平均
    - 水平分布、季節変化
    - 鉛直分布
  - ダスト循環
    - 地域間のダストの移動
    - 大気中へのダスト供給 (dust storm, dust devil, その他)
    - 現在の認識
- ダスト循環プロセスの理解
  - 「動いているダストは誰も見たことがない」
  - データの時空間カバレッジ問題
- ブレイクスルーへ
  - まずは環境モニタリング
  - モニタリングしてダストを輸送する素過程を推定
  - 素過程を推定して、モデルを改良して、データ同化

# 火星気候におけるダストの重要性



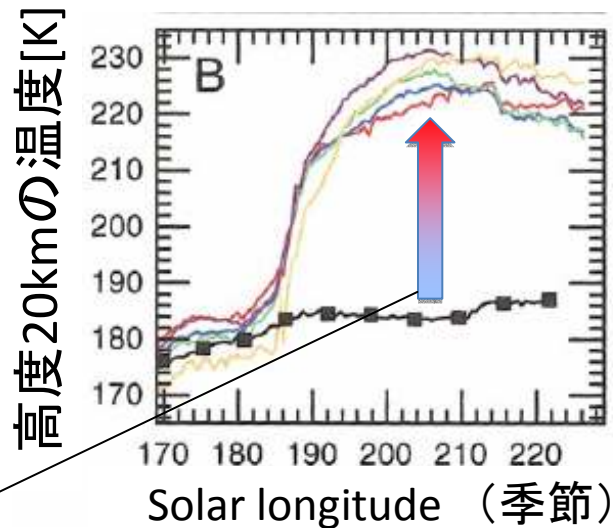
地球気候において水蒸気、雲、エアロゾルが担う役割の多くを、火星ではダストが担っている

水蒸気や雲の理解なくして現在の火星気候を理解できないのと同様、**ダストを理解せずして火星気候システムの理解はあり得ない。**

# (おまけ)現実的な動機

# 火星ダスト

大気中の加熱源(=大気運動のエネルギー源)である。



Smith et al. (2002)

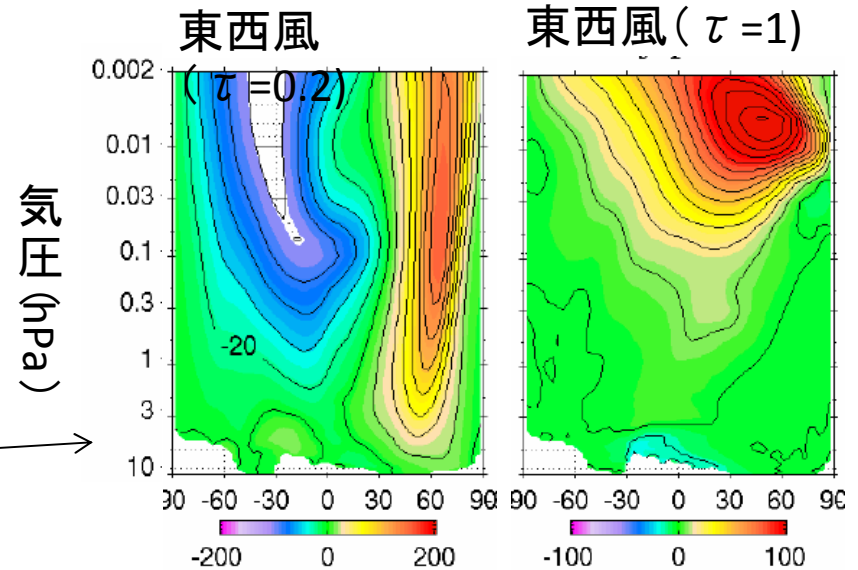
大量のダストが舞い上がったことによる温度変化

ダストが大気中に舞い上がると、どの緯度においても温度が40~50 K 上昇する。

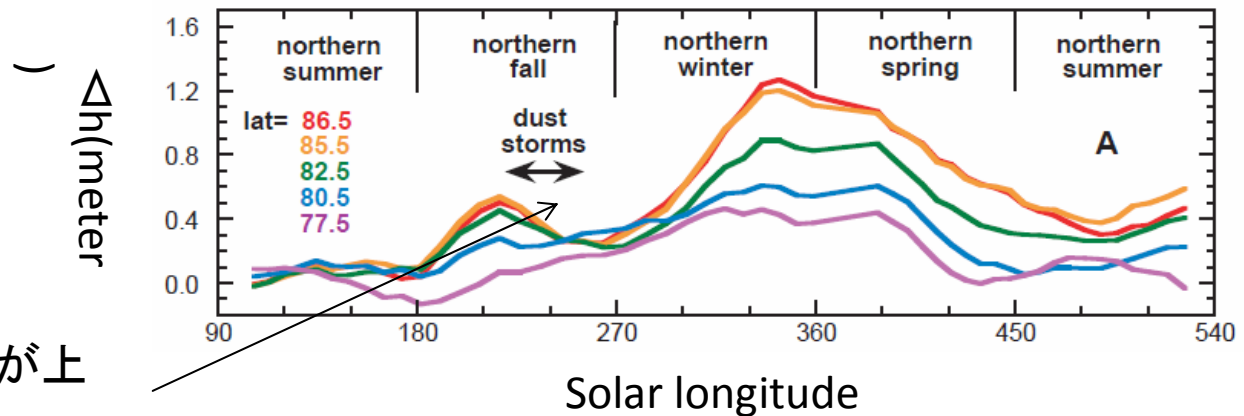
# 加熱源であること

- 風速(大気大循環、物質輸送)を変える。

MGCM inter-comparison (Wilson 2006)より  
高橋(芳)さんの計算



- 他の物質の分布、相を変える



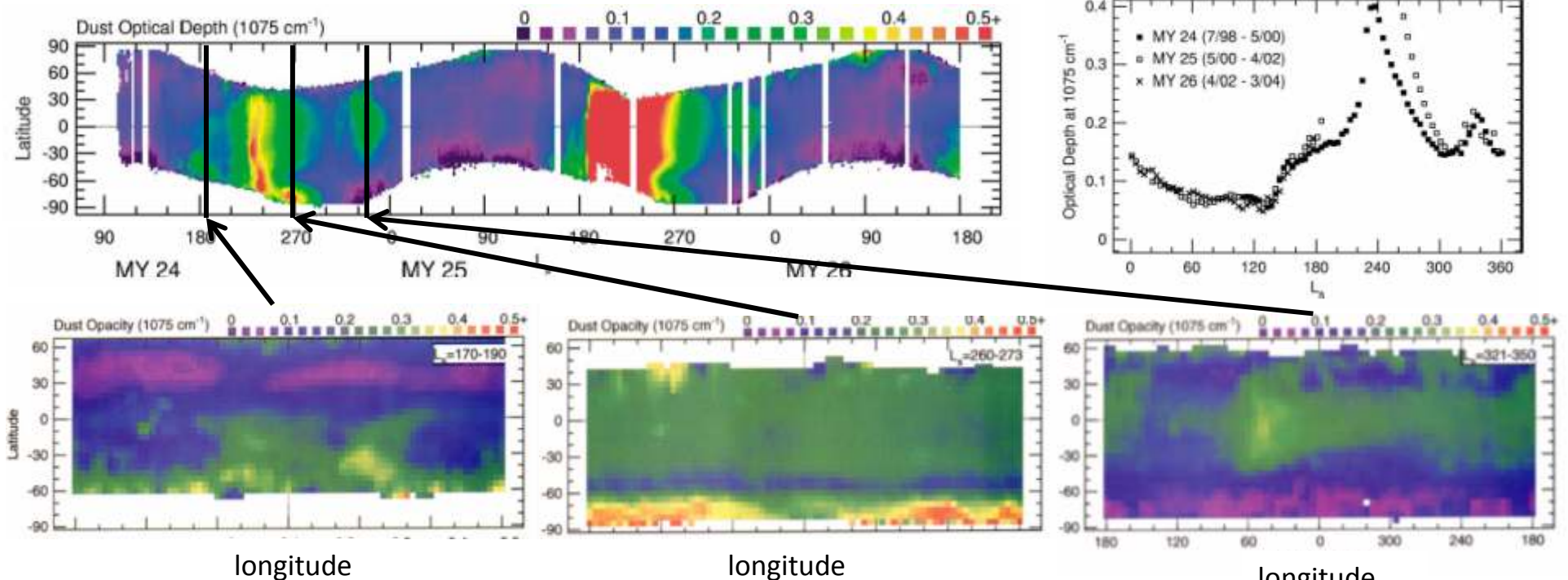
ダストストームで温度が上がり、極冠が減った。

# 目次

- 火星におけるダストの役割
- 過去の観測で分かった火星ダスト
  - 時間平均
    - 水平分布、季節変化
    - 鉛直分布
  - ダスト循環
    - 地域間のダストの移動
    - 大気中へのダスト供給 (dust storm, dust devil, その他)
    - 現在の認識
- ダスト循環プロセスの理解
  - 「動いているダストは誰も見たことがない」
  - データの時空間カバレッジ問題
- ブレイクスルーへ
  - まずは環境モニタリング
  - モニタリングしてダストを輸送する素過程を推定
  - 素過程を推定して、モデルを改良して、データ同化

# MGS/TES:ダストの空間分布、季節変化

Smith (2004)

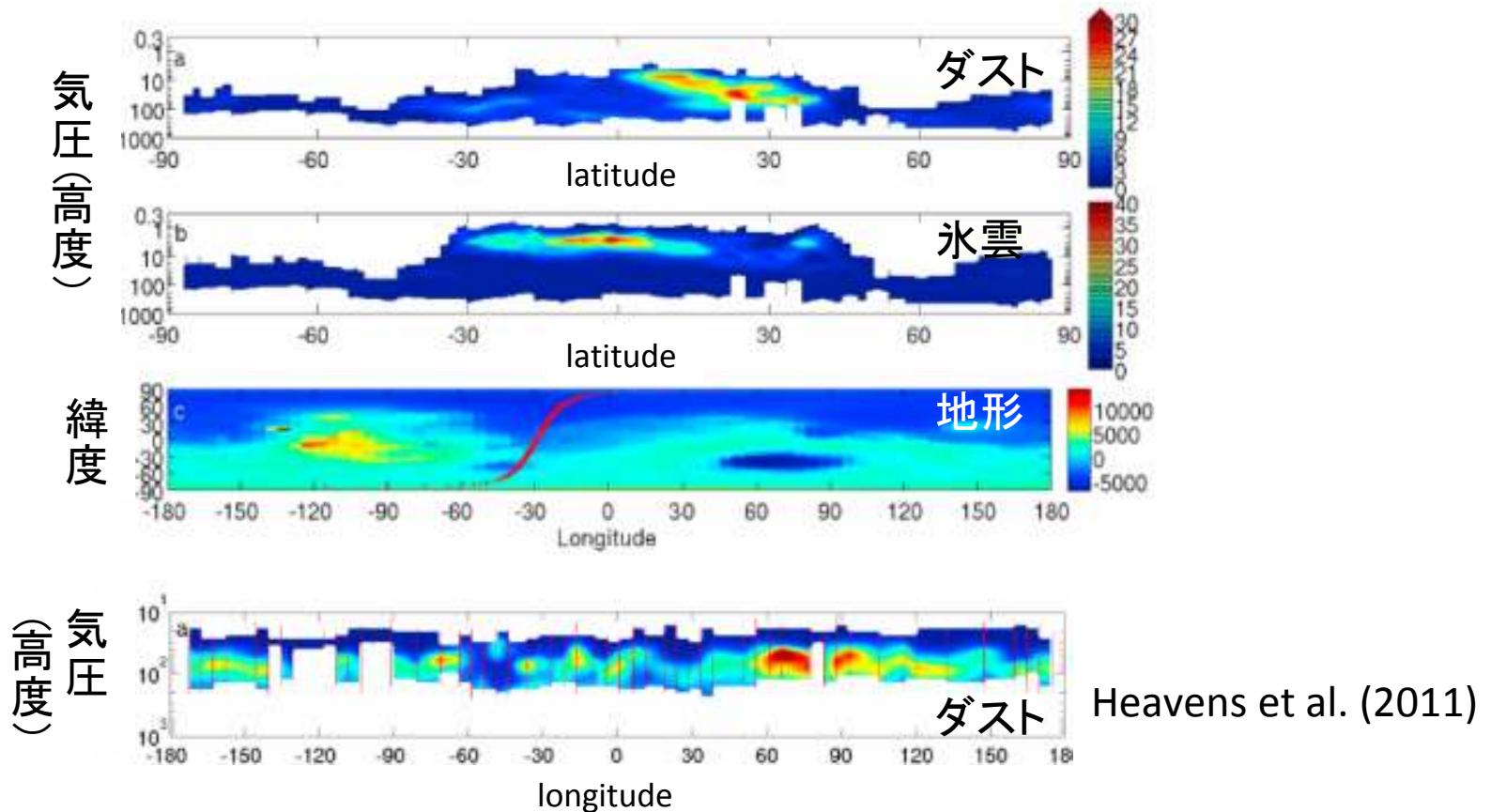


Smith et al. (2001)

- 南半球の春から夏:ダスト多、南半球の秋から冬:ダスト少
- 数十日の時間平均値としてしか空間分布は得られない。



# MRO/MCS:ダストの鉛直分布

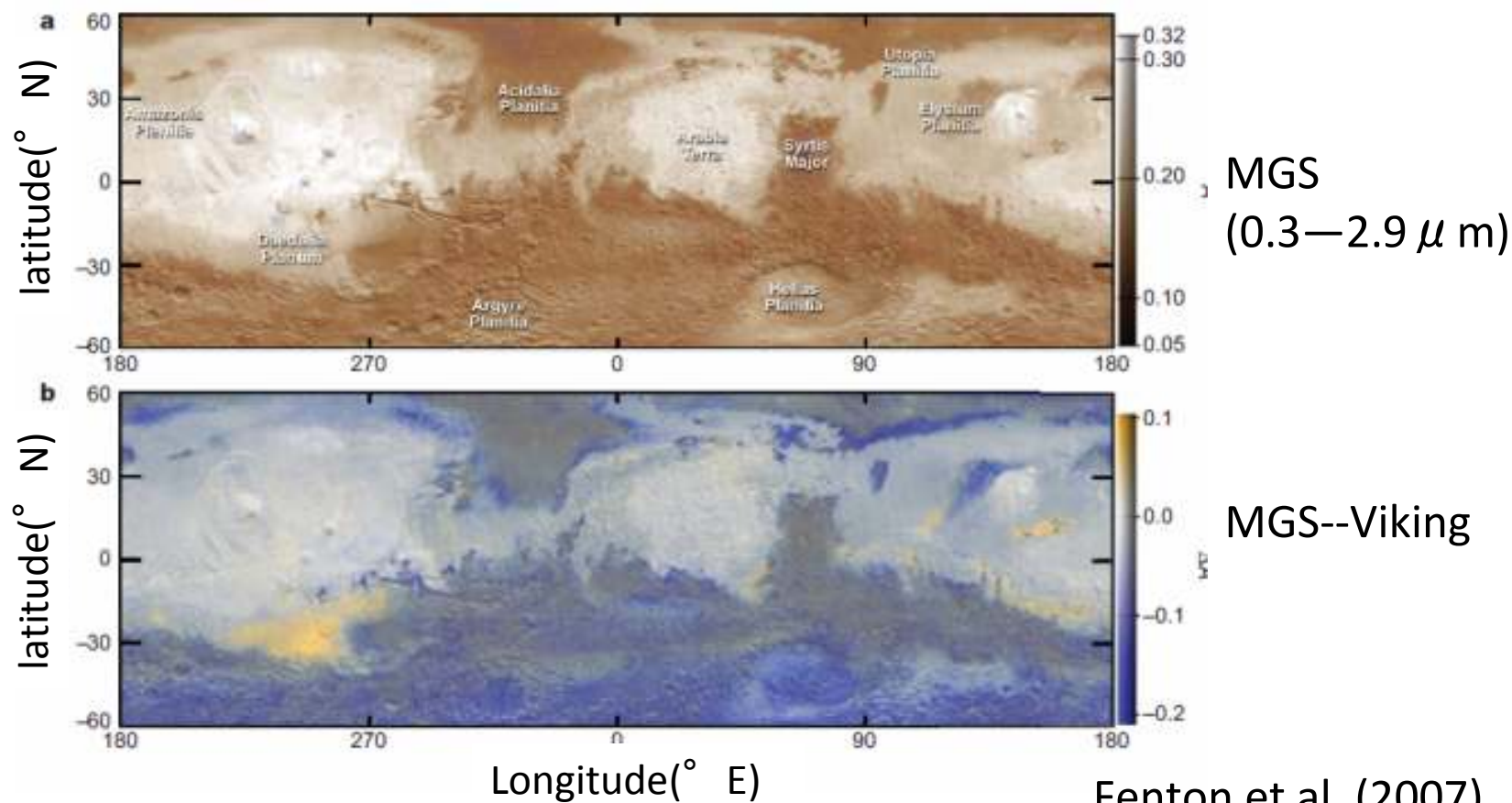


- 下層ほどダスト混合比が大きいわけではない。
- 空間的に激しく変動している。
- それなりの経度分解能を稼ぐには、やはり数日以上 の時間積分が必要

# 目次

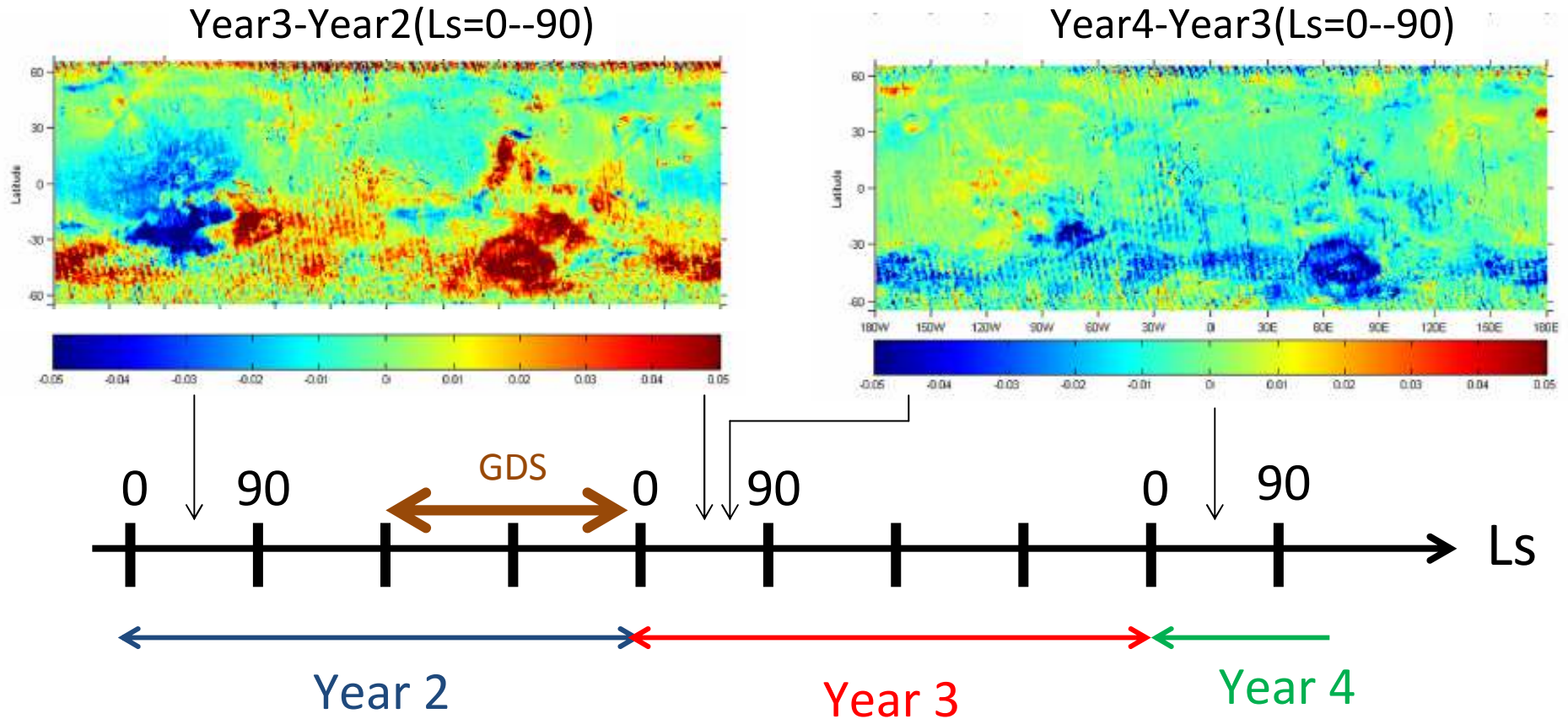
- 火星におけるダストの役割
- 過去の観測で分かった火星ダスト
  - 時間平均
    - 水平分布、季節変化
    - 鉛直分布
  - ダスト循環
    - 地域間のダストの移動
    - 大気中へのダスト供給 (dust storm, dust devil, その他)
    - 現在の認識
- ダスト循環プロセスの理解
  - 「動いているダストは誰も見たことがない」
  - データの時空間カバレッジ問題
- ブレイクスルーへ
  - まずは環境モニタリング
  - モニタリングしてダストを輸送する素過程を推定
  - 素過程を推定して、モデルを改良して、データ同化

## 地表ダストの移動に伴うと思われる、アルベドの変化



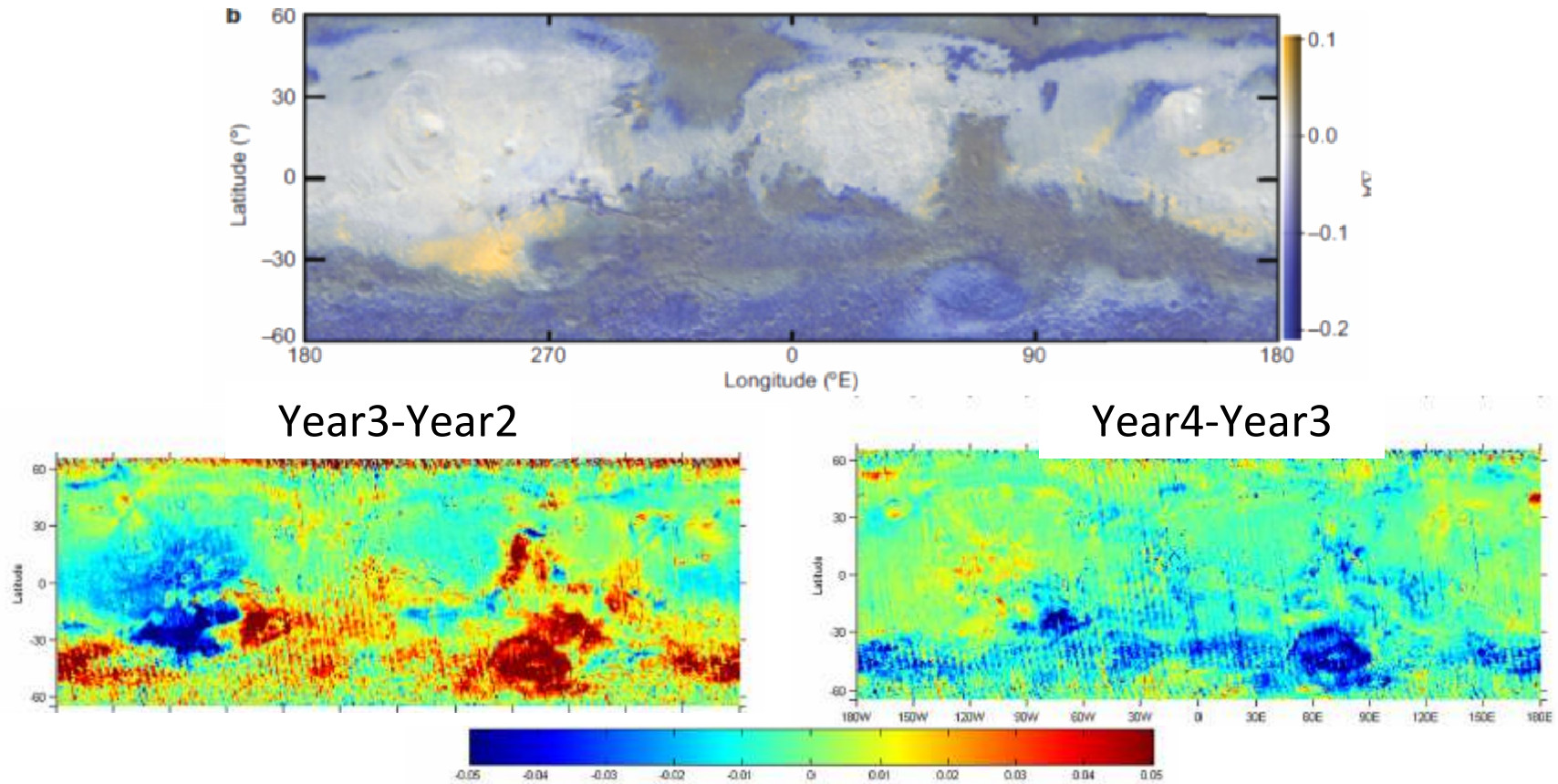
- Viking時代とMGS時代(2001 global dust storm前)ではアルベドが大きく異なる。(Fenton et al., 2007)
- どちらかと言うと、南半球のアルベドが下がった。

# 地表ダストの移動に伴うと思われる、アルベドの変化



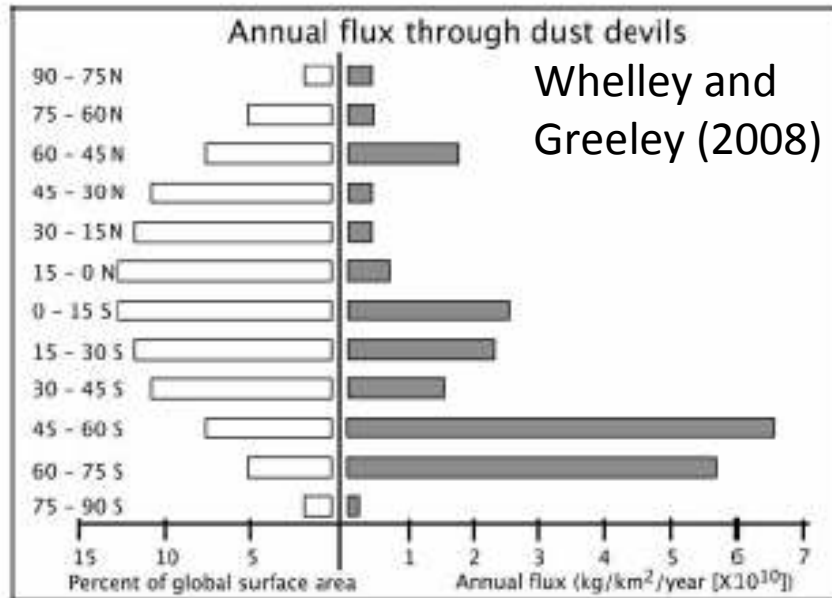
- Global dust stormの前後でアルベドが変化する。(Szwast et al., 2006)
- 次の年には、アルベドが元に戻っていく。(Szwast et al., 2006)

# 火星ダスト循環のイメージ



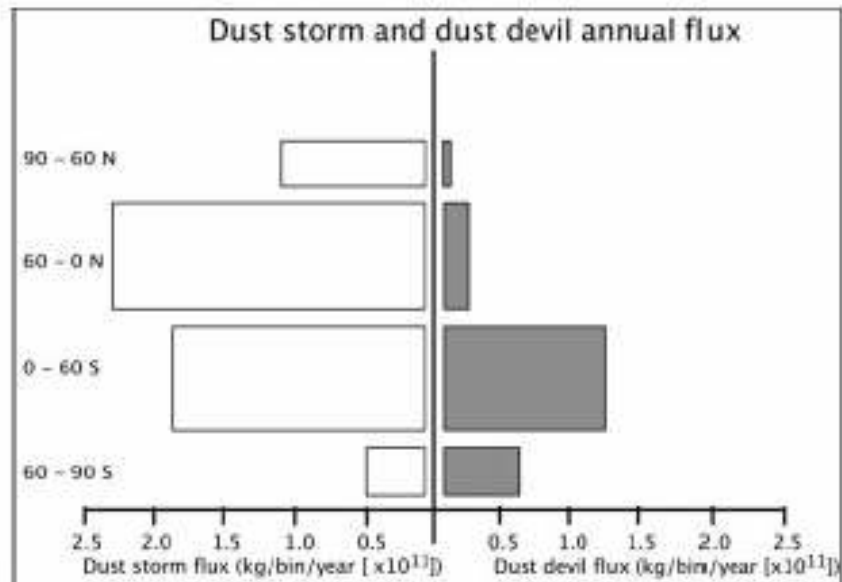
- 平年は“Year4-Year3”のように輸送。
  - Regional, local dust storm, dust devil, その他で巻き上げ。
  - 様々なメカニズムで、大気中を移流拡散。
- 大きなダスト現象で元に戻そうとする (Year3-Year2)。

# Dust devilによるダスト供給(写真)



- ダストデビルによるダスト巻き上げは南半球が支配的 (Whelley and Greeley 2008)
  - Cantor et al. (2006)は両半球とも同程度と主張。
- ダストデビルによる巻き上げ総量は、
  - $2.3 \times 10^{11}$  kg/year (Whelley and Greeley 2008)
  - $5.8 \times 10^{11}$  kg/year (Cantor et al., 2006)
- Global dust storm 1つとコンパラ。(Martin 1995)

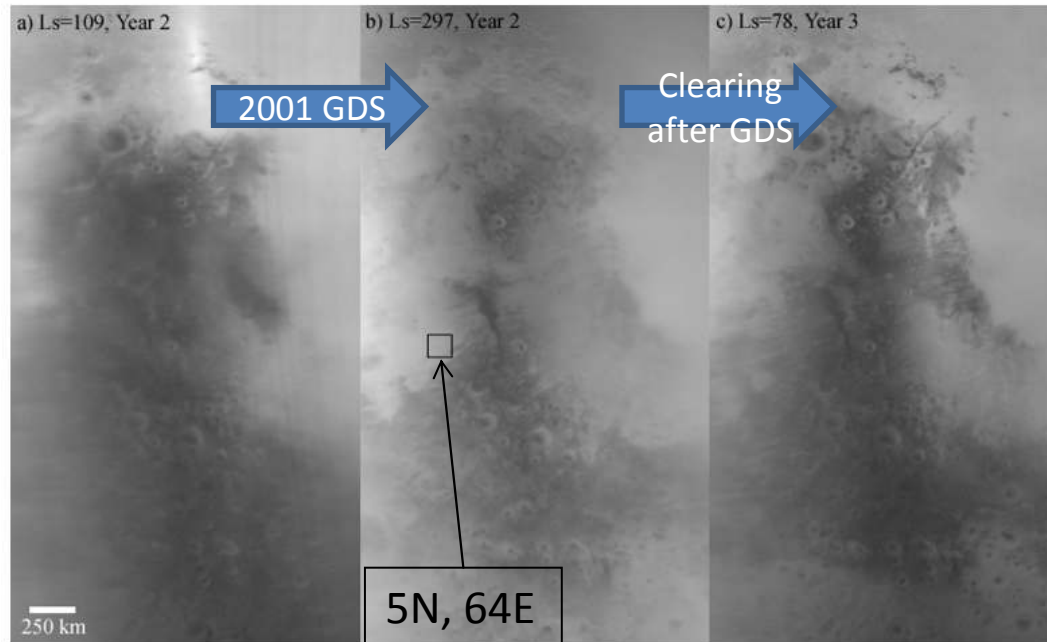
# Dust storm (local & regional) によるダスト供給



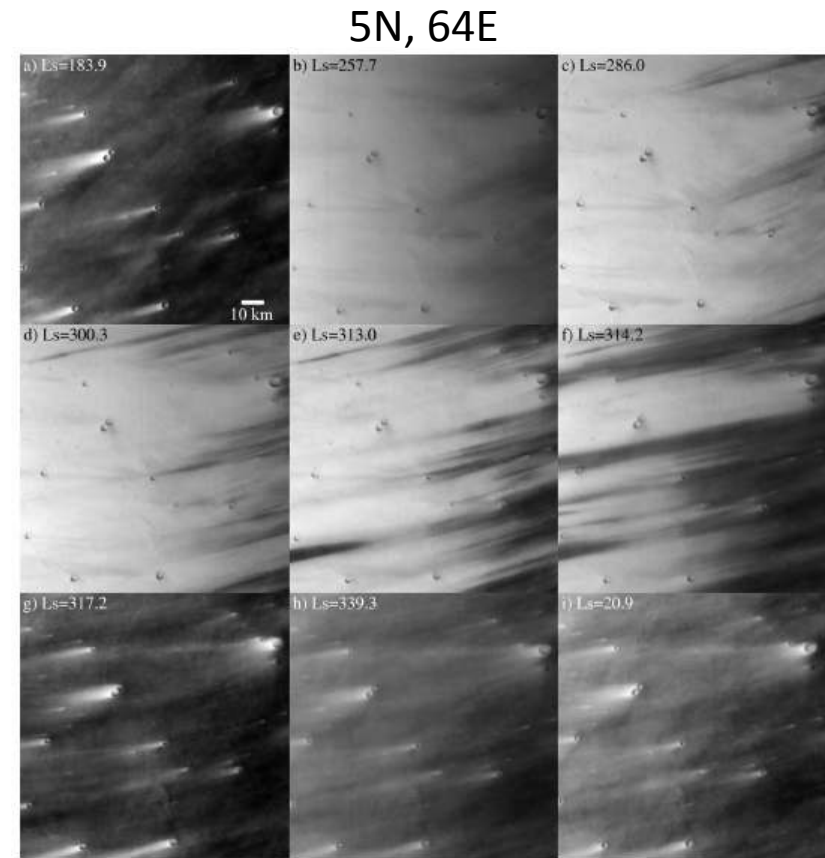
Whelley and Greeley (2008)

- 両半球にそれほど大きな差はない。
- Dust devilによる供給と比べると、同程度かやや多い。

# Stormでもdevilでもないもの

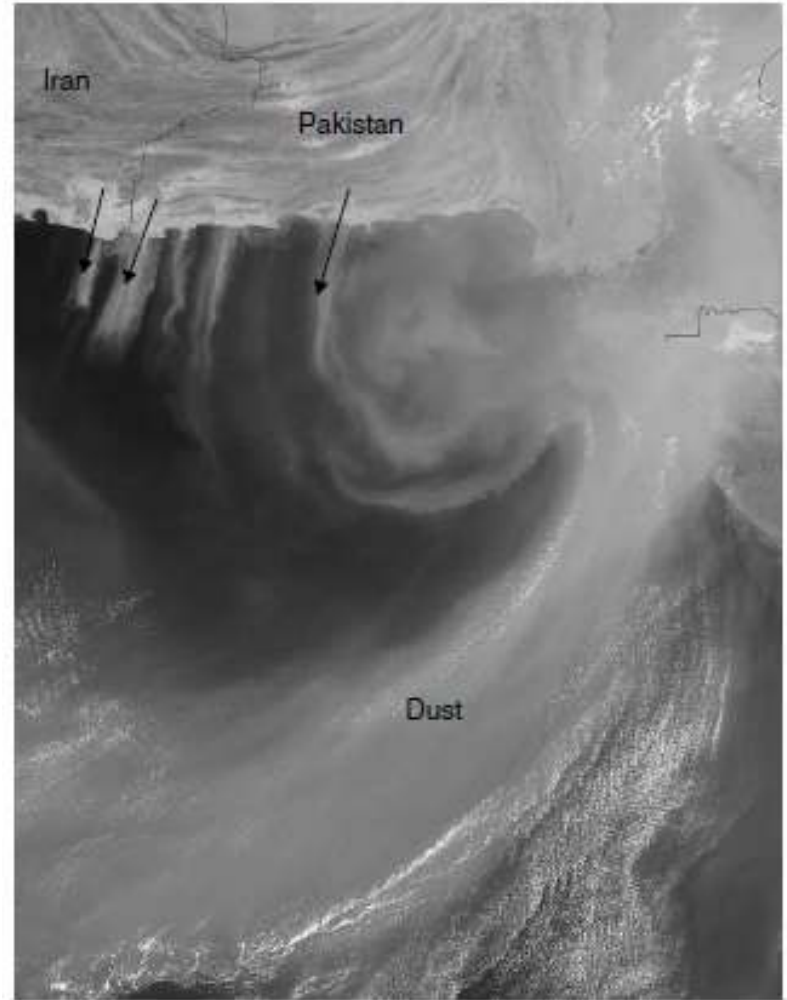


Szwast et al. (2006)



- あまり注目されていないが、それは実物が映っていないから。
- ダスト供給メカニズムとしての重要性もまったく未知。





## 現在のダスト循環の認識

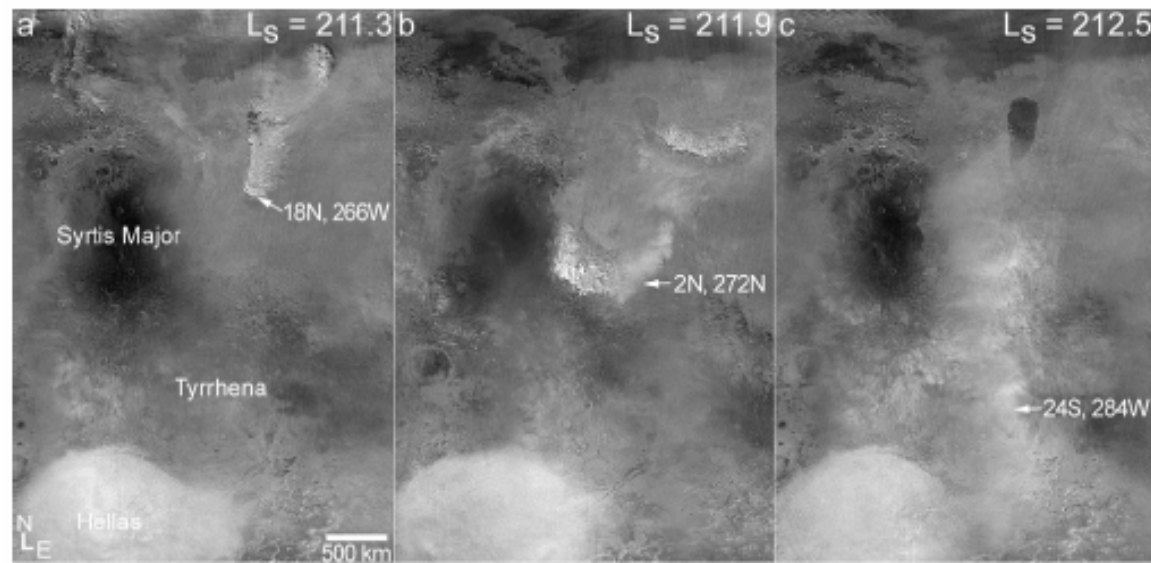
- 平年は、いくつかの領域にダストが降り積もり、その他の領域からダストが除去される。
  - Local & regional dust storm, dust devil, その他
- 何年かに一度（定期的に、ではない）、逆が起こる。
  - Regional & global dust storm
- 平衡状態なのか、それとも変化の途中なのかは不明。
- 大気にダストを供給するメカニズムは複数あり、確認されていないものもある。どれもそれなりに重要。

# 目次

- 火星におけるダストの役割
- 過去の観測で分かった火星ダスト
  - 時間平均
    - 水平分布、季節変化
    - 鉛直分布
  - ダスト循環
    - 地域間のダストの移動
    - 大気中へのダスト供給 (dust storm, dust devil, その他)
    - 現在の認識
- **ダスト循環プロセスの理解**
  - 「動いているダストは誰も見たことがない」
  - データの時空間カバレッジ問題
- ブレイクスルーへ
  - まずは環境モニタリング
  - モニタリングしてダストを輸送する素過程を推定
  - 素過程を推定して、モデルを改良して、データ同化

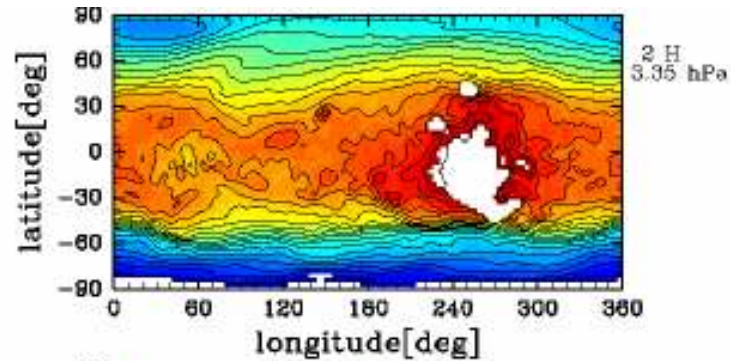
# ダストの輸送プロセスはどう理解されているか？

- 理解されているとは言い難い。
- **誰もダストが動いているところを見たことがない。**
  - ほとんど全て太陽同期軌道からの地方時固定観測 (e. g. 02:00 & 14:00)
  - 2時間後に経度で30度ずれたところを観測
  - →→時空間分解能不足(次ページ)
  - そもそもダストと気付かない可能性もある。(次々ページ)
- 専ら数値シミュレーションによる研究。

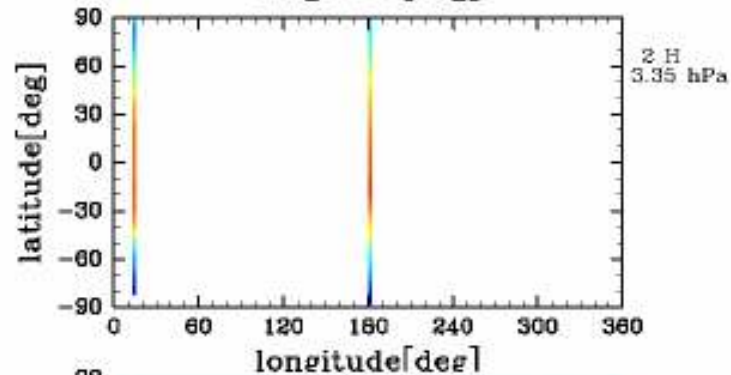


Cantor (2007)

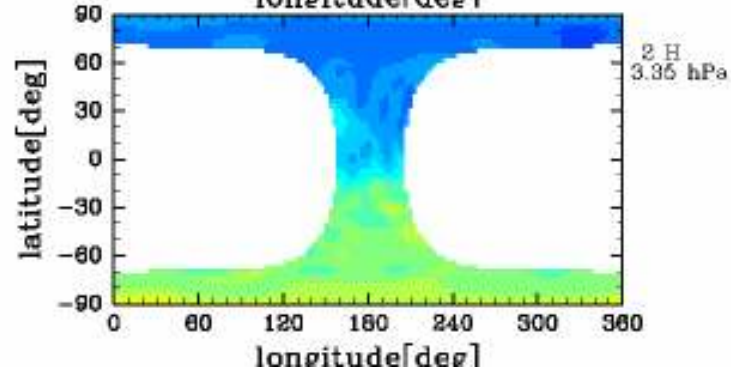
# 過去の太陽同期軌道衛星から得られる データカバレッジ



仮想的な  
温度データ



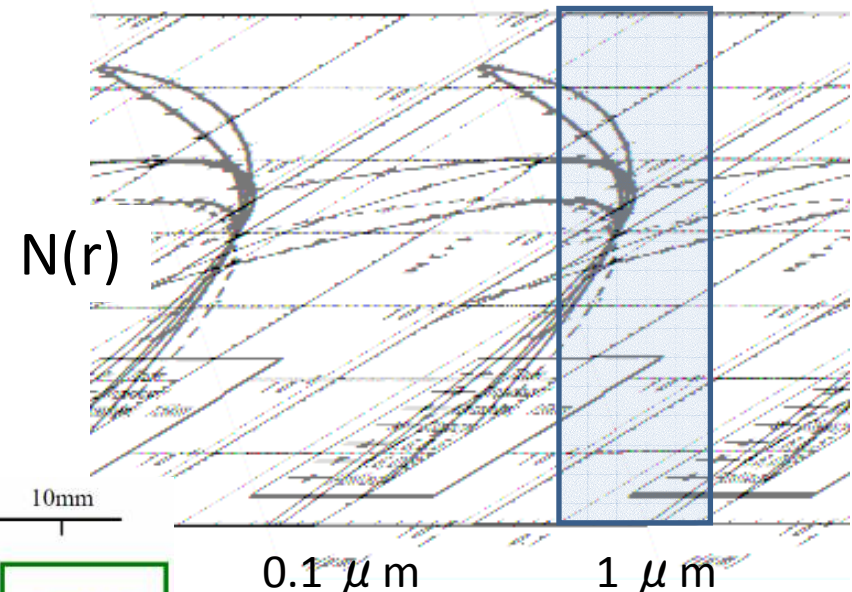
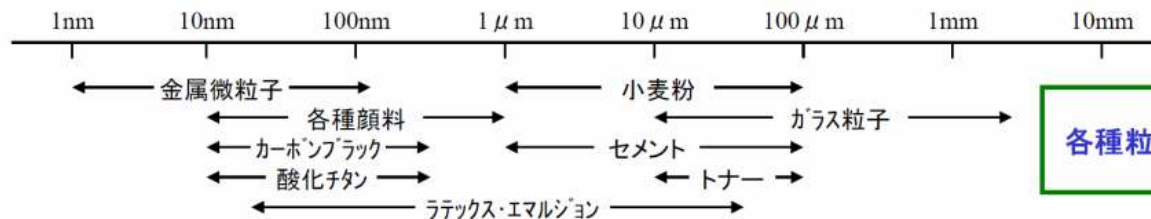
温度観測



可視カメラ  
(陰影は地形)

# ダスト観測の難しさ

- ダストと地面の区別がつきにくい。
  - ダストストームのような光学的に厚い現象は認識できる。
  - ダストデビルのような細くて影ができる現象も認識できる。
  - 薄いもやのようなもの (haze) はあるのかないのか、規模はどれくらいか、判断しにくい。
- ダストが小さいかもしれない。
  - $O(0.1 \mu m)$ – $O(1 \mu m)$
  - 3ケタほど不確定性がある。
  - コロイド？



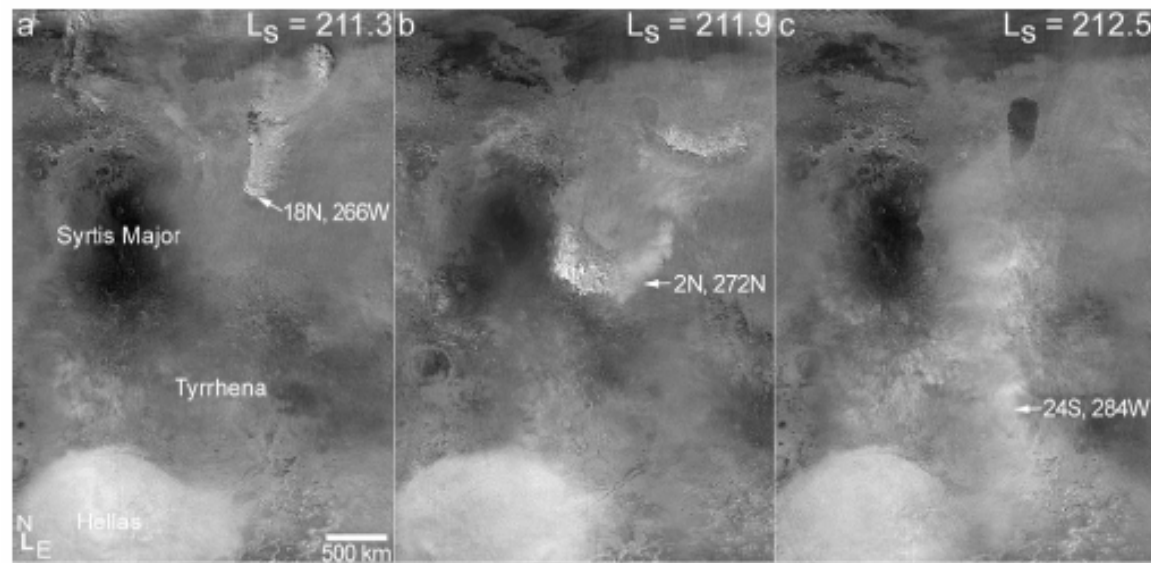
従来研究では正しい粒系分布を特定できていない。

(株)ニッテクリサーチ

Tomasko et al. (1999)

# ダストの輸送プロセスはどう理解されているか？

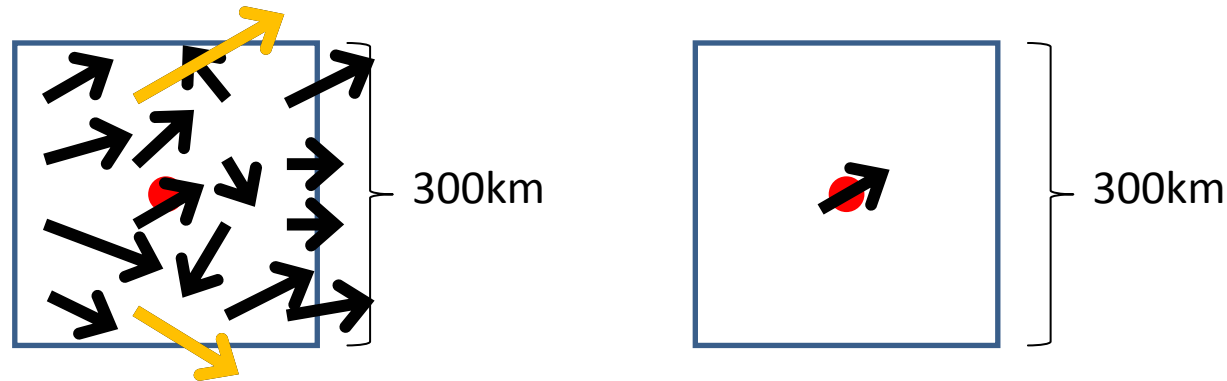
- 理解されているとは言い難い。
- **誰もダストが動いているところを見たことがない。**
  - ほとんど全て太陽同期軌道からの地方時固定観測 (e. g. 02:00 & 14:00)
  - 2時間後に経度で30度ずれたところを観測
  - →→時空間分解能不足(次ページ)
  - そもそもダストと気付かない可能性もある。(次々ページ)
- 専ら数値シミュレーションによる研究。



Cantor (2007)

# ダスト循環シミュレーション

- ダスト巻き上げパラメタリゼーション(wind stress)



格子内の風速は、現実にはいろいろな値を取る。小さなスケールでダストは巻き上がる。

格子点値としては平均値になる。  
→現実にはある格子内の強風による巻き上げが0と見積もられる。

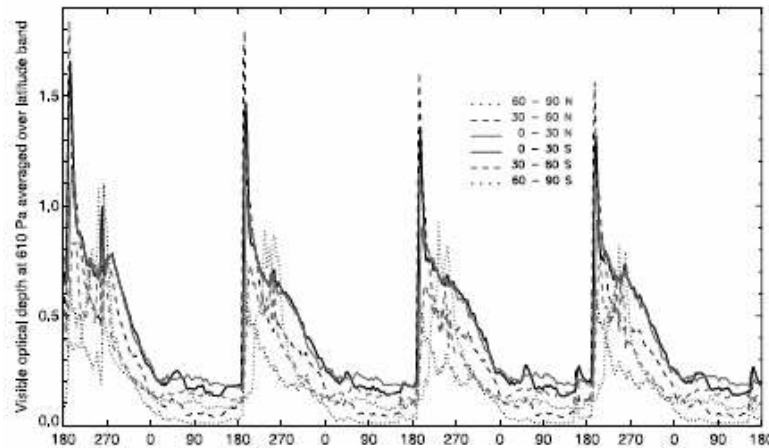
モデルで計算された平均値たる風速を中心として、ある確率で(ワイブル分布)風速をオフセットさせることで、格子点内の強風を表現する。風速が閾値を超えると、ダストを格子全体から一様に巻き上げる。



# ダスト循環シミュレーション

- ダスト巻き上げパラメタリゼーションには、未知のパラメータがたくさん組み込まれている。
  - 確率分布の幅
  - ダストを巻き上げ始める風速(地表応力)
  - 効率因子なるもの
  - その他いろいろ
- 地球の値を流用したり、適当にスイープしてうまい値を探す。
  - これがまたパラメータ依存性大

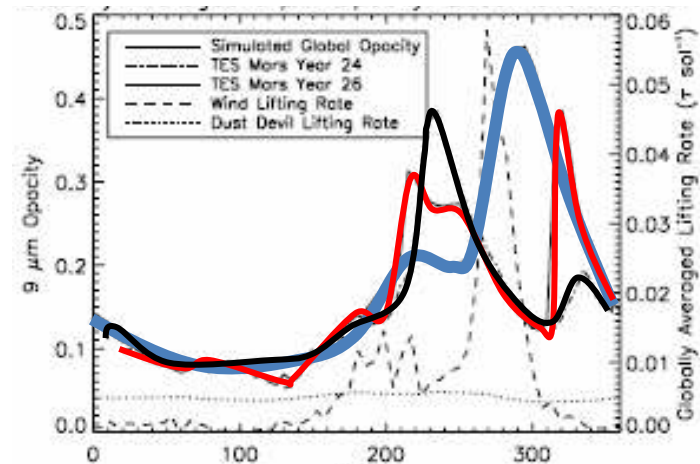
各緯度における経度平均光学的厚さ(可視)



Ls

Newman et al. (2002)

全球平均光学的厚さ(9 μm)

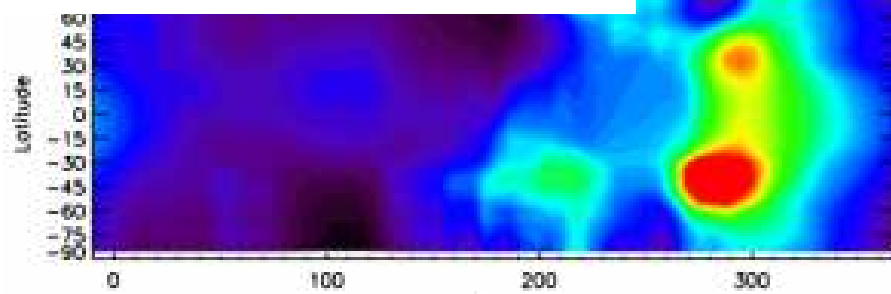


Ls

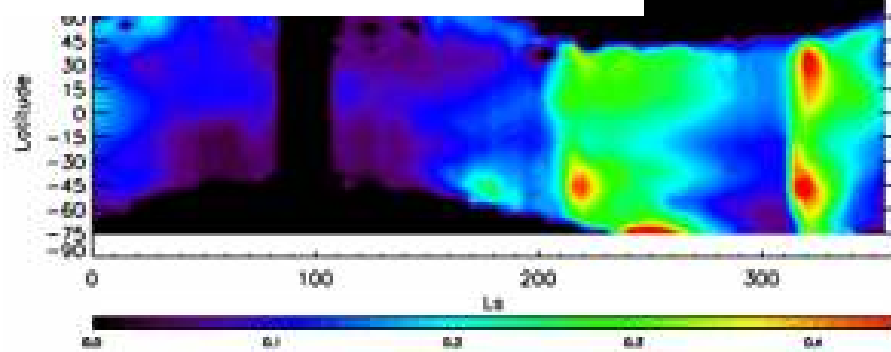
Kahre et al. (2006)

# ダスト循環シミュレーション

ダスト光学的厚さ(モデル)  $9 \mu\text{m}$  Baseline Simulation

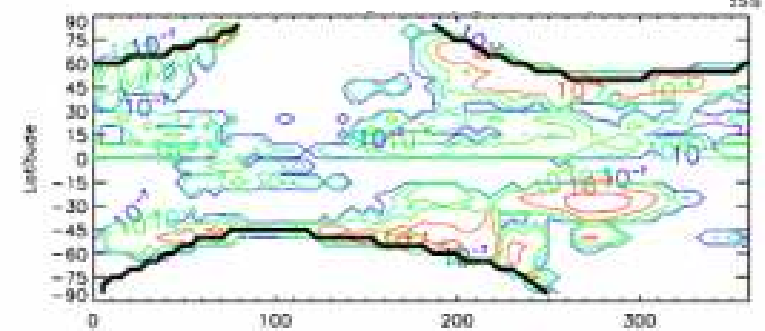


ダスト光学的厚さ(MGS)  $9 \mu\text{m}$  by: Mars Year 26

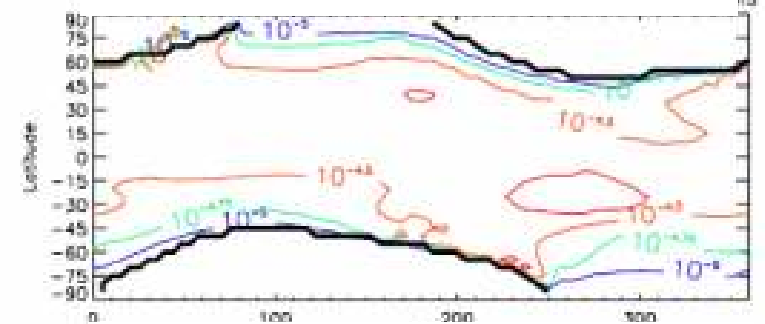


- 南半球の春から夏にダストが濃くなっていくのは整合的。
- 現実の物理が正確に再現されて、なるべく光学的厚さが整合的になった、とは言い難い。

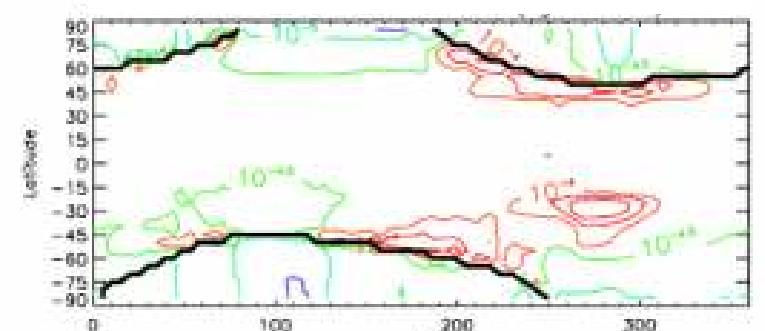
“Wind stress lifting”による巻き上げ



“Dust devil”による巻き上げ

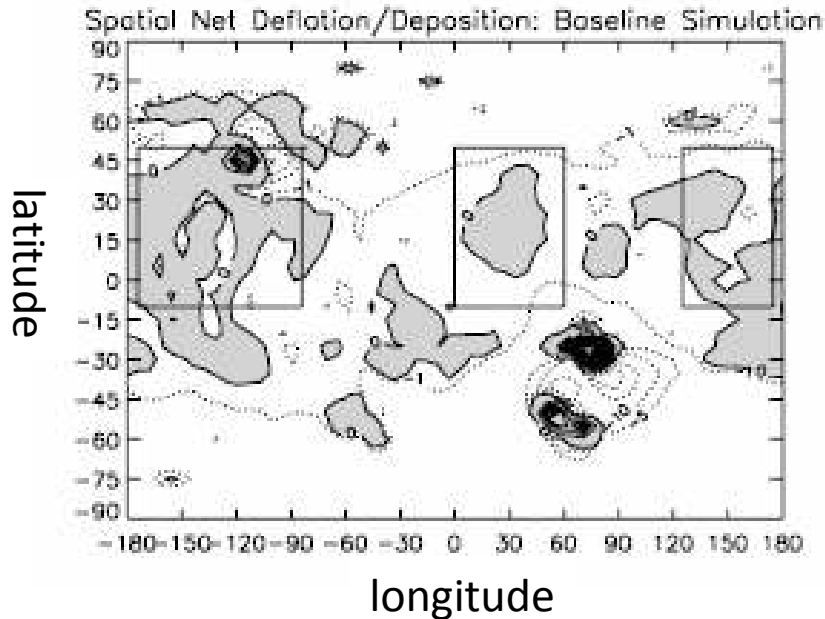


落下

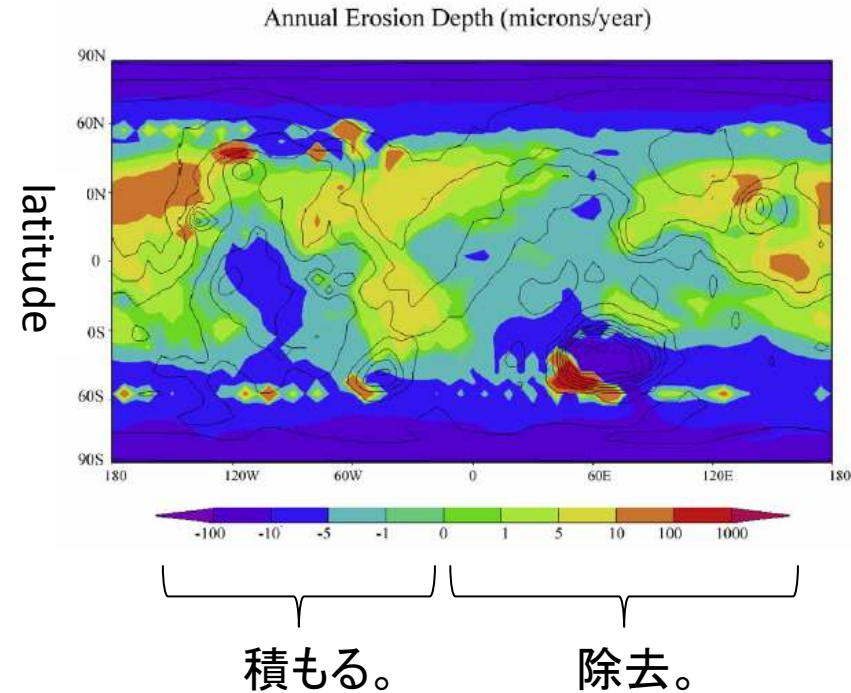


0 Ls 360

# ダスト循環シミュレーション ダスト収支



Kahre et al., 2006  
正味の放出/落下量分布。陰影が正味の巻き上げ。



Basu et al. (2004)

- アルベド変化の観測と矛盾。
- 地表ダスト有限計算すると、同じところから放出されるばかりで、数年で火星はclearな世界になる。

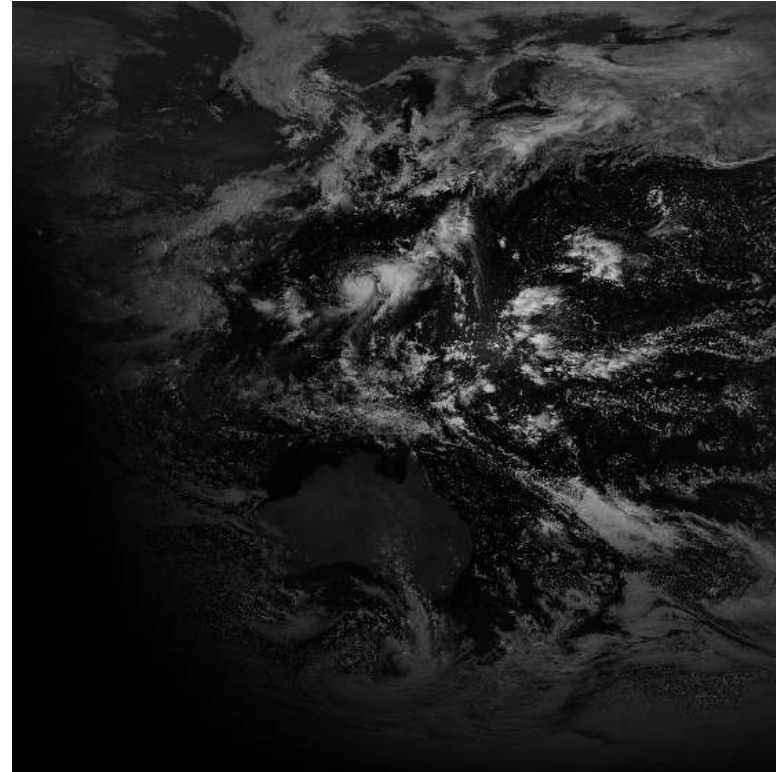
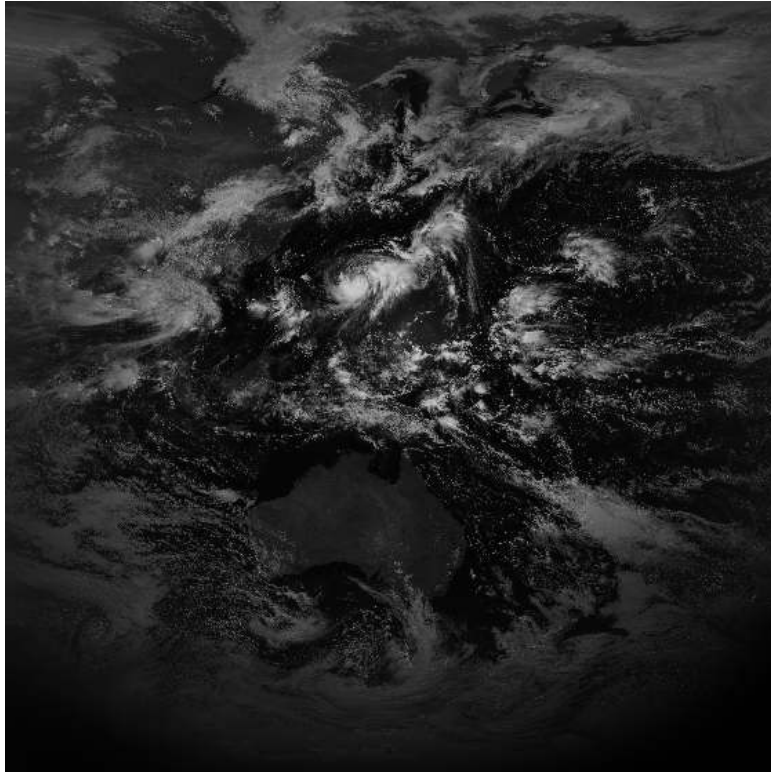
# ここまでのまとめ

- 浮遊ダストは加熱源となり、現在の火星気候を支配している。
- 浮遊ダスト循環を解明しなければならない。
  - どこから、どのように輸送されるか。
  - それはなぜか？
  - →長期的にもそうなのか、昔や将来はどうなのか。
- ダストの輸送プロセスは理解されていない。
  - 誰も動いているダストを見たことがない。
  - 過去の観測は致命的な時空間分解能不足。
- ダスト循環シミュレーションも未完。
  - すでに知っていることは組み込まれている。
  - パラメータをいじる程度では解決されそうにない。
    - 全く新しい巻き上げプロセス
    - 個々のダスト現象のメカニズムに則した定式化
    - 観測的に根拠あるパラメータの使用

# 目次

- 火星におけるダストの役割
- 過去の観測で分かった火星ダスト
  - 時間平均
    - 水平分布、季節変化
    - 鉛直分布
  - ダスト循環
    - 地域間のダストの移動
    - 大気中へのダスト供給 (dust storm, dust devil, その他)
    - 現在の認識
- ダスト循環プロセスの理解
  - 「動いているダストは誰も見たことがない」
  - データの時空間カバレッジ問題
- ブレイクスルーへ
  - まずは環境モニタリング
  - モニタリングしてダストを輸送する素過程を推定
  - 素過程を推定して、モデルを改良して、データ同化

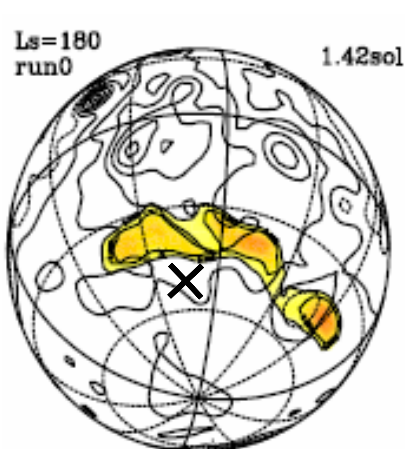
# 1. 火星における広域高頻度モニタリング



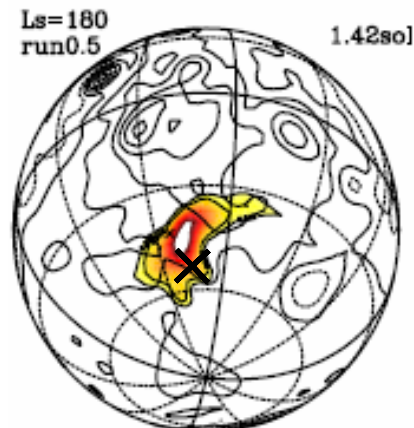
- ・偏光撮像で浮遊ダストと地面を明確に区別
- ・惑星規模のダストの移動を把握しないといけない→→全球
- ・ダスト現象の一生をとらえる必要
- ・ダスト輸送過程を考える場合、日周期の現象の寄与を無視できない。

→ 全球撮像を1, 2時間ごと

# 日周期変動の重要性



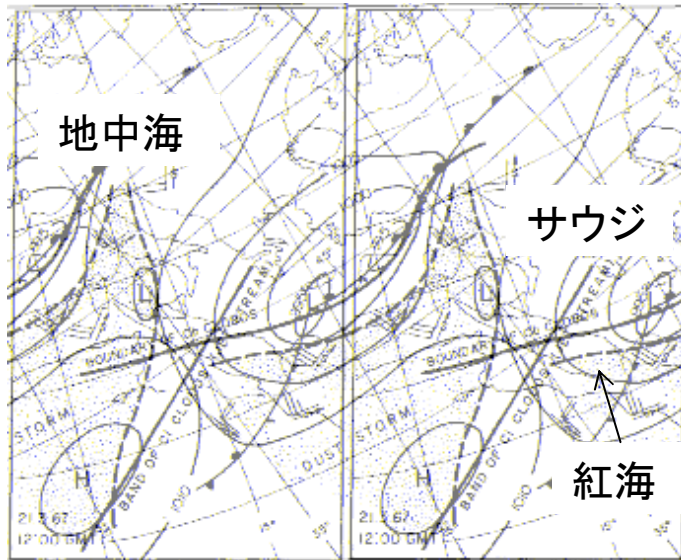
南半球春分の00:00UTから  
1 sol放出。  
放出開始から1.42 sol後。



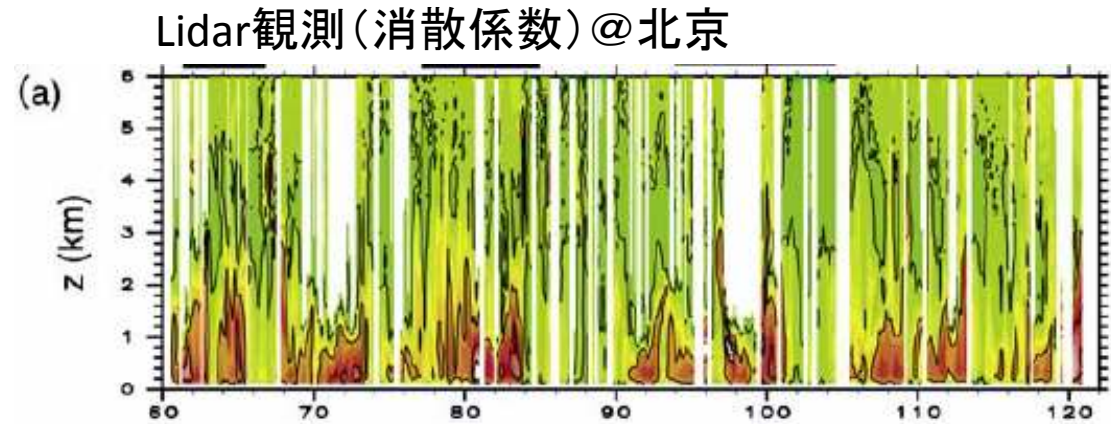
南半球春分の12:00UTから  
1 sol放出。  
放出開始から1.42 sol後。

- ダストソースから人為的に1 solダストを放出し続けた。
- 放出開始を0.5 solずらした計算を行った。
- 総放出量は同じでも、ダストの放出開始が0.5 solずれただけで、その後の輸送経路や拡大面積が異なる。(Ogohara and Satomura 2011)
- あるダストストームを観測し、その発展の理屈を考える場合、そのダストストームが何時LTに出現したかを把握する必要がある。

## 2. ダストと温度の同時観測による素過程の推定



Morales (1986)



Uno et al. (2004)

- 地球の例: タク라마カン砂漠からの黄砂発生、Saharan Dust
- ダスト現象は気象場とつながって初めて解釈できる。
- 火星各地の様々なダスト現象の裏にある様々な素過程を一つ一つ理解していくことができる。



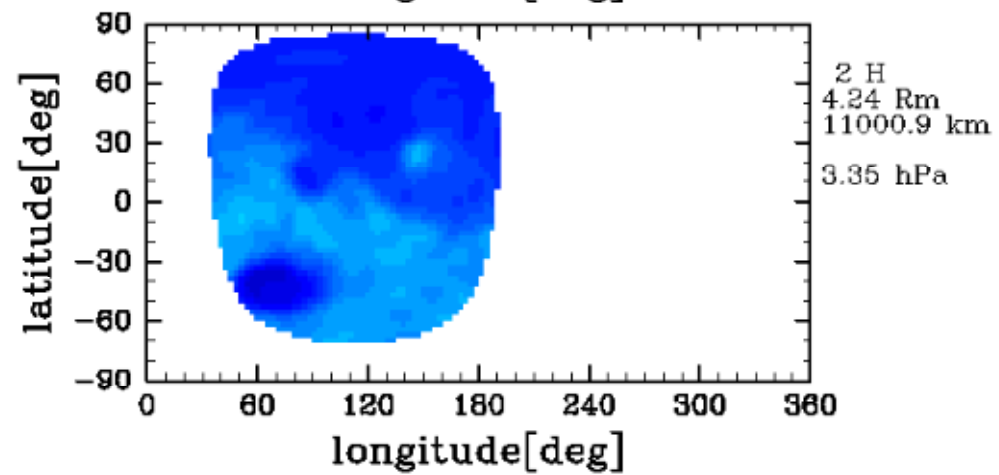
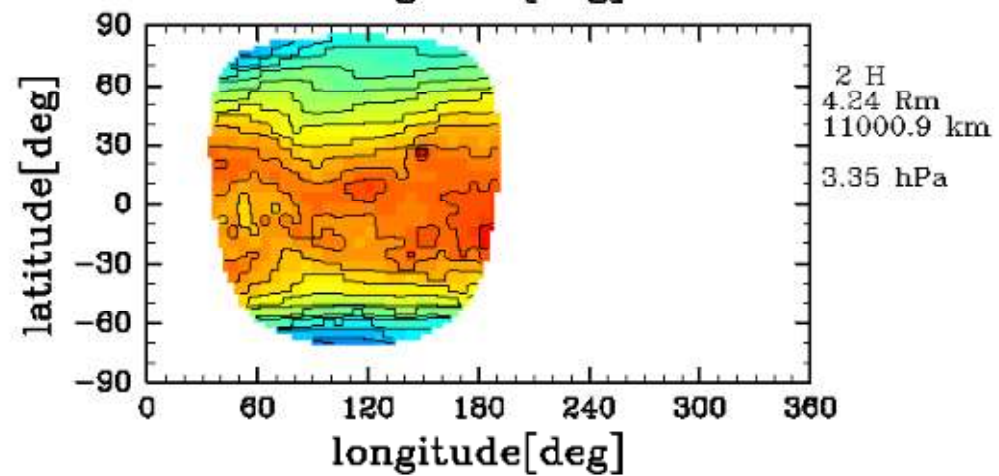
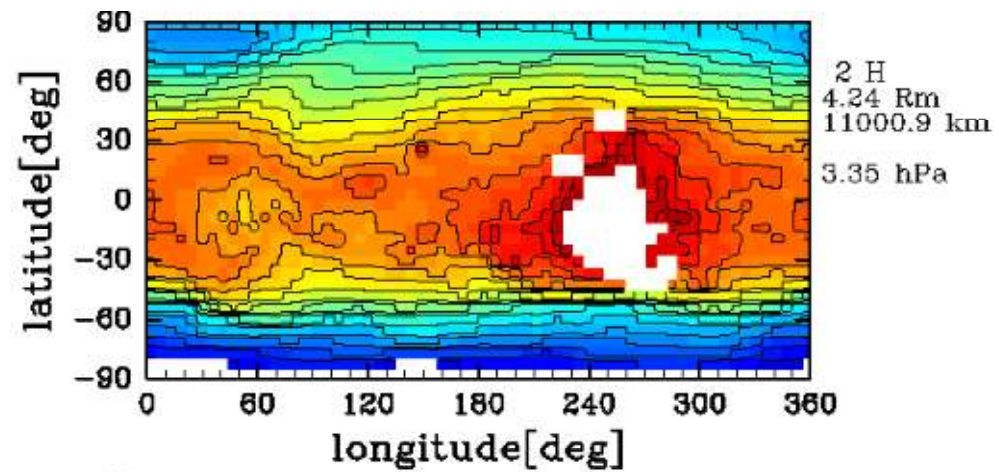
気温や地表面温度と、ダストの鉛直分布も同時に観測



Table 5  
Local names for Saharan dust-bearing winds (after Middleton, 1986)

Name (derivation where known)	Area affected	Season	Direction (from)	Meteorological conditions	Reference
	地方	季節	擴大 方向	气象条件	
Irifi	Western Sahara		SE	Frontal	Morales (1946)
Ghibli (free translation: 'wind from south Mecca')	Tripolitania			Pre-frontal	Sivall (1957)
Guebli (south wind)	Tunisia and Algeria (northern parts)	All year but most prevalent May–October	S	Pre-frontal with katabatic effects from interior uplands to coastal plains	Naval Intelligence Division (1943)
Sahel	Morocco		SW	Frontal	Mainguet (1980)
Harmattan (Fantee: 'aharaman' to blow and 'ta' grease locally used to cover skin)	Bilma/Faya Largeau area plus much of West Africa south of 20°N	October–April	ENE	Pressure surge after cold air outbreaks from mid-latitudes	Kalu (1979)
Brume sèche (French: 'dry haze')	West Africa	October–April		Harmattan haze in light winds	Bertrand et al. (1979)
Haboob (Arabic: 'to blow')	Sudan (but has become almost generic in its use)	May–July		Single cell thunderstorm downdraft	Freeman (1952)
Khamsin (Arabic: 'fifty' <sup>a</sup> )	Egypt	Spring		Pre-frontal	Fisher (1978)
Chili	Tunisia and Algeria (southern parts)	Spring	SW	Pre-frontal	Naval Intelligence Division (1943)
Shekheli	Algeria	Spring			Borushko (1972)
Chergui	Moroccan Sahara	Summer	NE		Naval Intelligence Division (1943)
Dschani	Southern Sahara				Goudie (1978)
Kharif	Somalia	June–September	SW		Brooks (1920)
Gobar	Ethiopia				Goudie (1978)
Sirocco	Southern Europe	Spring	S	Frontal	Conte et al. (1996)
Leveche	Spanish Mediterranean coast Malaga– Alicante	Spring	SE–SW	Frontal	Tout and Kemp (1985)
Leste	Madeira			Frontal	Goudie (1978)
Levanto	Canary Islands				Nalivkin (1983)

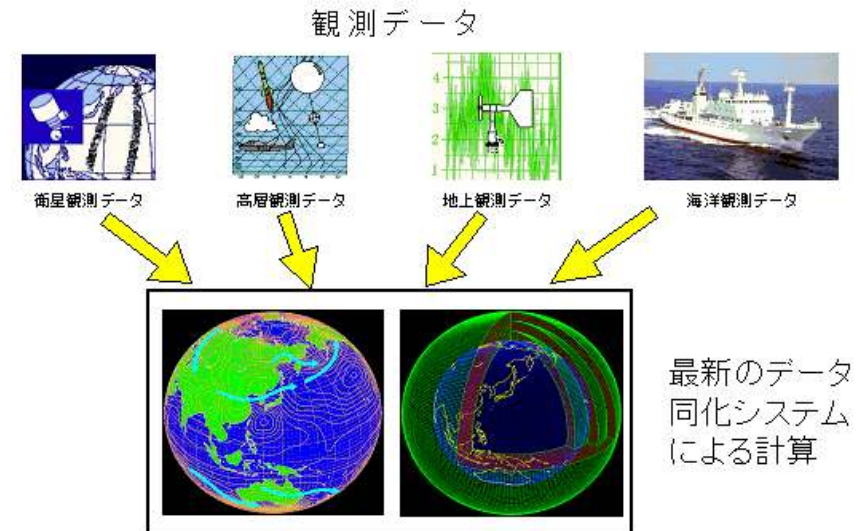
Goudie and  
Middleton (2001)



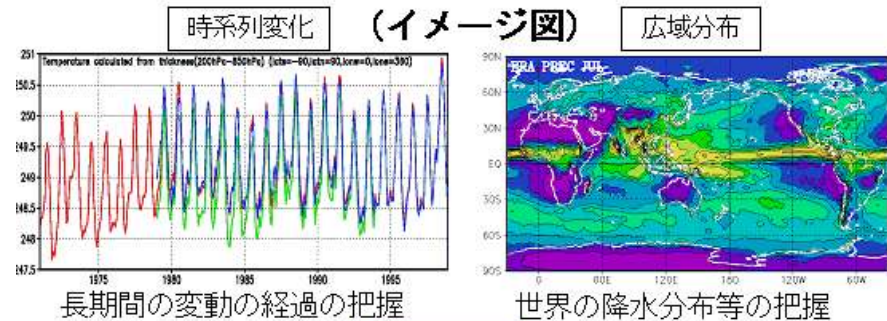
## 2. データ同化によるダスト輸送量の定量

- 淡路ほか(2009)

- 観測や実験データを最適化理論を用いてうまく取り込み(同化して)モデル結果を修正する技法
- また時空間的にも断片的にしか得られない観測や実験データをモデルを用いて補完する技法
- つまり、データ同化は観測データと数値モデルの双方から情報を取り出して、統計的あるいは力学的に組み合わせ、最適な場や条件を求める優れた手法。



地球全体の大気の長期間にわたる高品質なデータセット



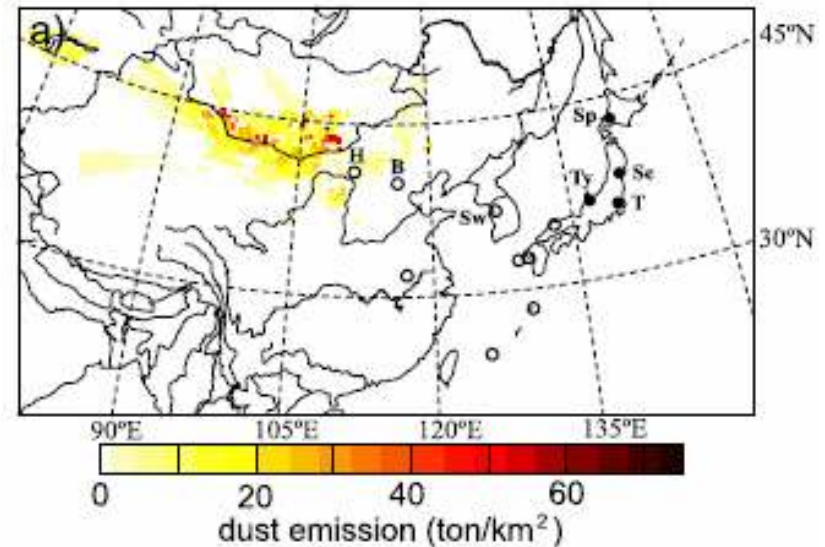
成果の活用

- より詳細な異常気象等の監視
- 季節予報に用いるモデルの精度向上
- 気候変動メカニズム・温暖化の研究

気象庁より

# ダスト鉛直分布の重要性

- 現実と「そこそこ」合うモデルがまず必要
- 適当に鉛直分布を仮定したダスト分布を同化すると、まったく間違っただ解析結果を生む()
  - モデルが計算した温度や光学的厚さが、誤った方向に修正される。
  - それほどダストのインパクトが大きいということ。
- 3次元ダスト分布をもっともよく説明する、放出量と放出源を「推定」することもできる



Yumimoto et al. (2007)

2005/04/30のダストイベント@地球