

火星ダスト循環研究のレビューと今後

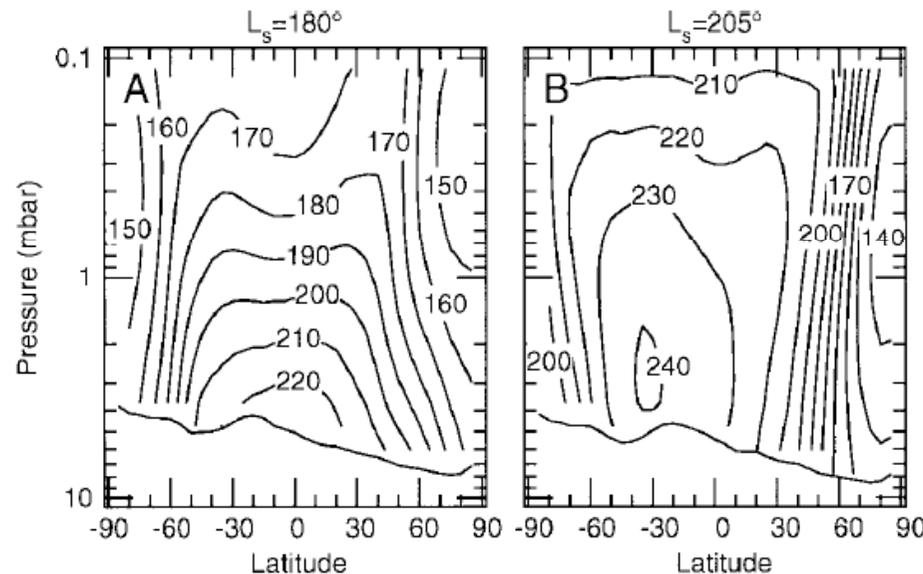
ISAS/JAXA

小郷原 一智

2011/08/30 WTK-online

なぜ火星でダストか？

- 大気中に豊富に存在し、時空間変動が大きく、しかも熱源となる。
- 熱的に励起される波動にはもちろん、大気大循環にも大きく影響する。



Smith et al. (2002)

ダストと関連する大気場：今日の目次

- 過去、現在の衛星による観測
 - 温度の子午面分布、波動観測
 - ダストの子午面分布観測
 - ダストストームの分布
- ダストストームの研究
 - 背景ダストについて
 - 観測
 - 理論、モデル
- 足りないもの、MELOS大気オービター

衛星による観測(ダスト、温度etc)

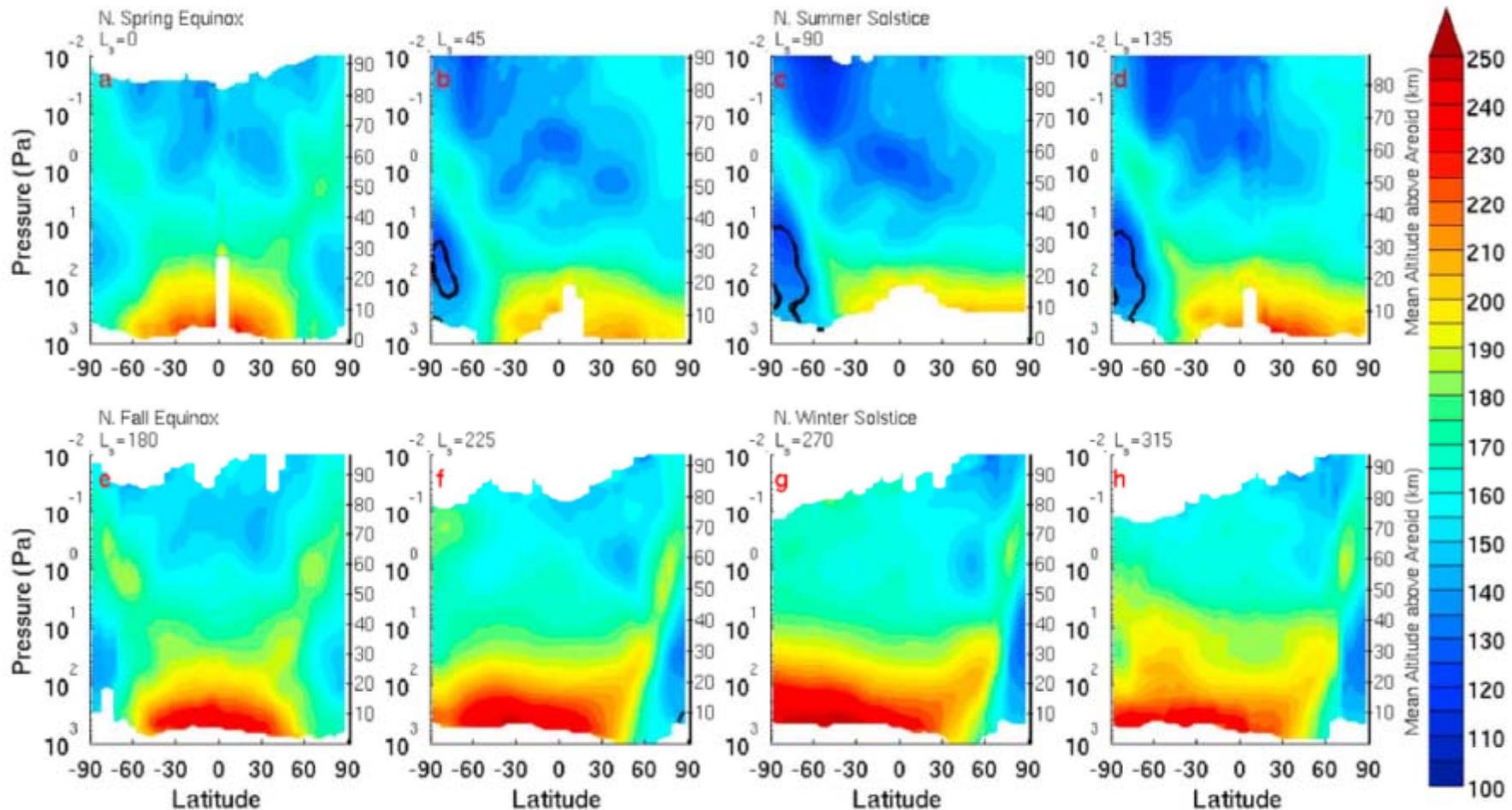
衛星	測器	軌道	軌道傾斜角	周期	物理量
VO 1	Infrared Thermal Mapper		~40°	~1 sol	温度
VO 2	Infrared Thermal Mapper		~80°	~1 sol	
MGS	Thermal Emission Spectrometer	円	~90°	~2 h	温度、ダスト
	Mars Orbiter Camera				可視光撮像
	Radio Science				温度
MO	Thermal Emission Imaging System	円	~90°	~2 h	温度、ダスト
MRO	Mars Climate Sounder	円	~90°	~2 h	温度、ダスト
	Mars Color Imager				可視光撮像
MEx	Planetary Fourier Spectrometer	楕円	~90°	~7 h	温度、ダスト



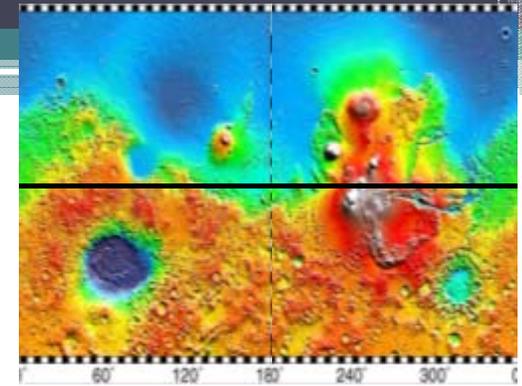
過去、現在の衛星による観測

温度の子午面分布

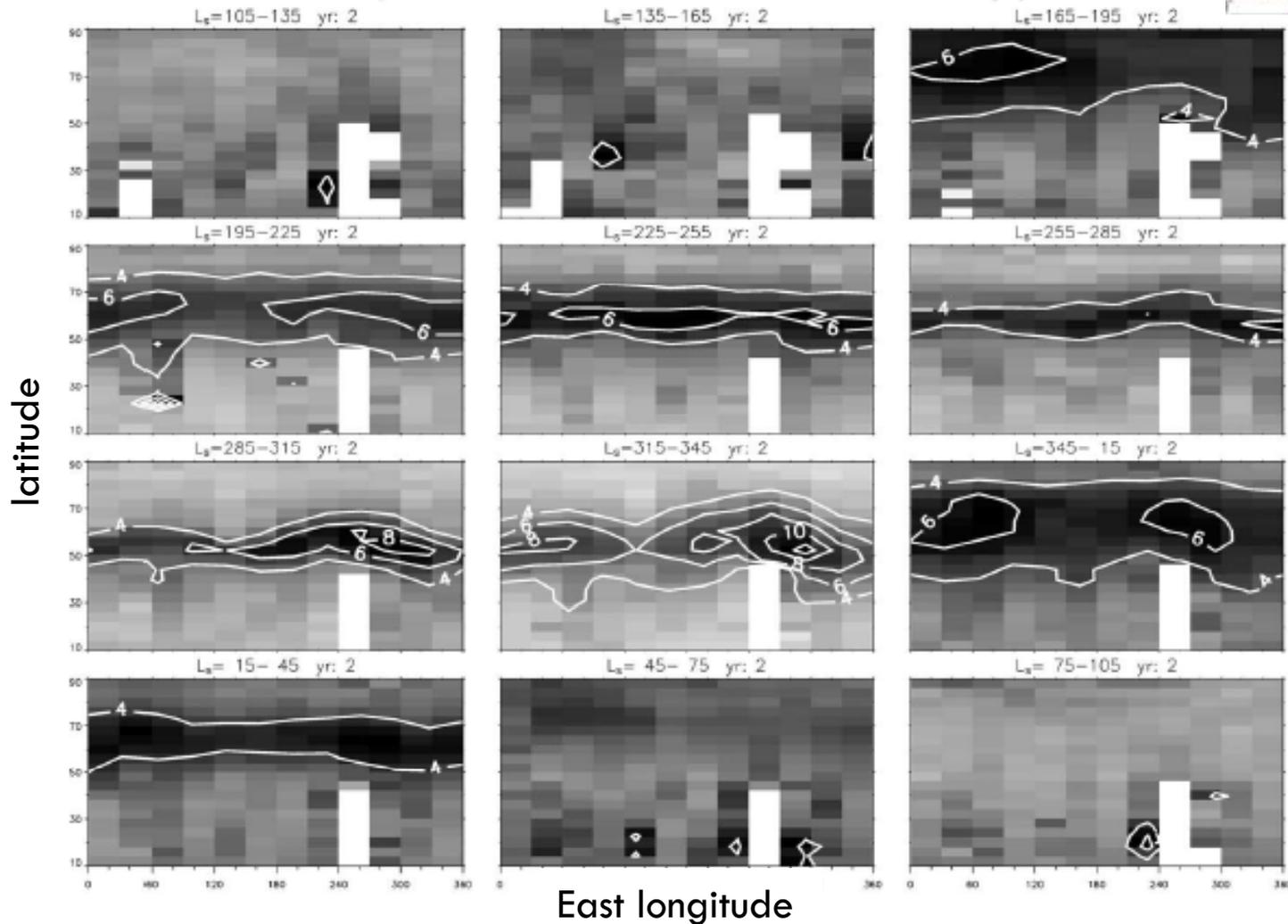
- MGS/TESによる温度観測(Banfield et al., 2003)
- MRO/MCSによる温度観測(McCleese et al., 2010)



温度(MGS TES)に見られる波動



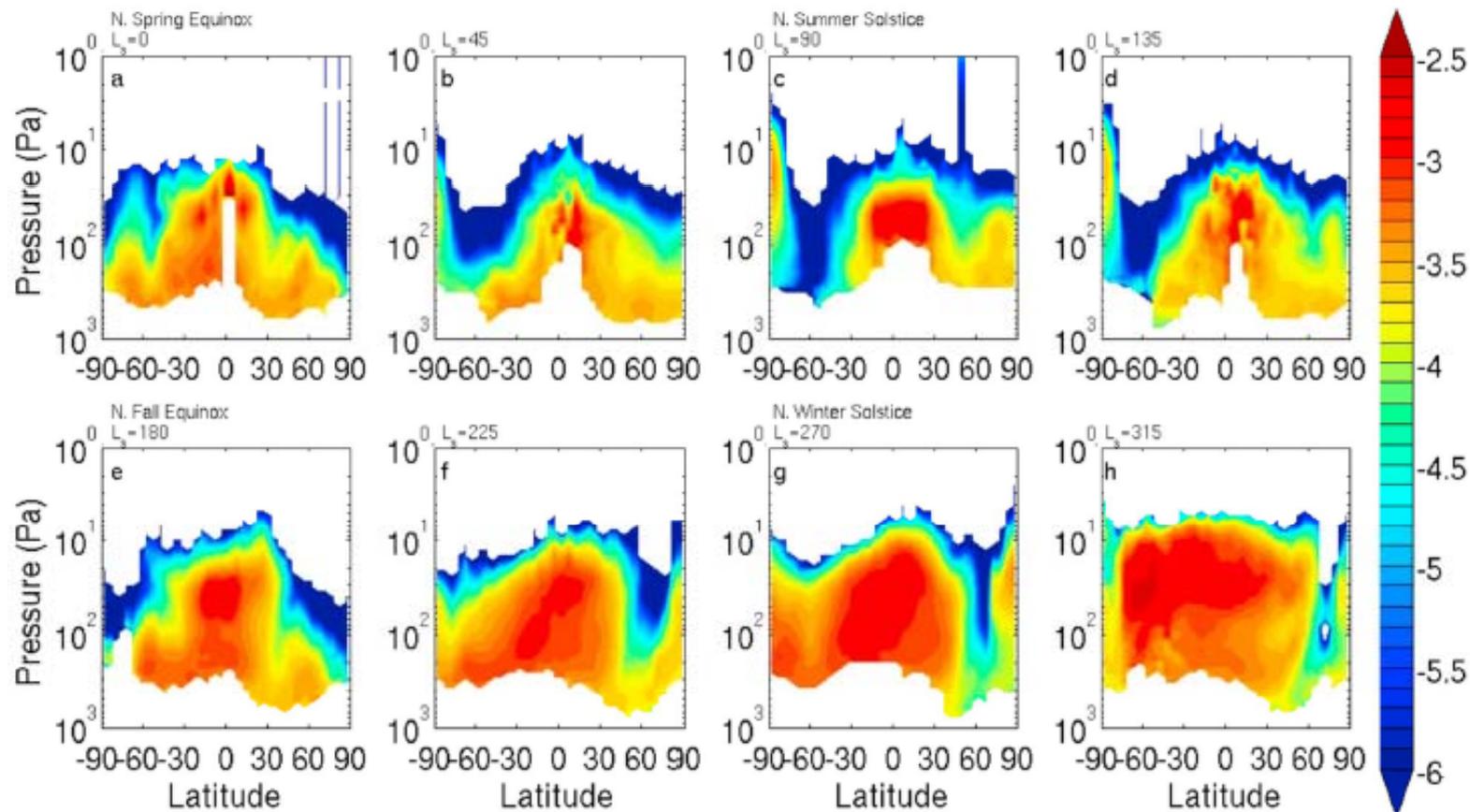
NH Transient Temperature Perturbation Standard Deviation (K) Level=0.0H



Banfield et al.
(2004)

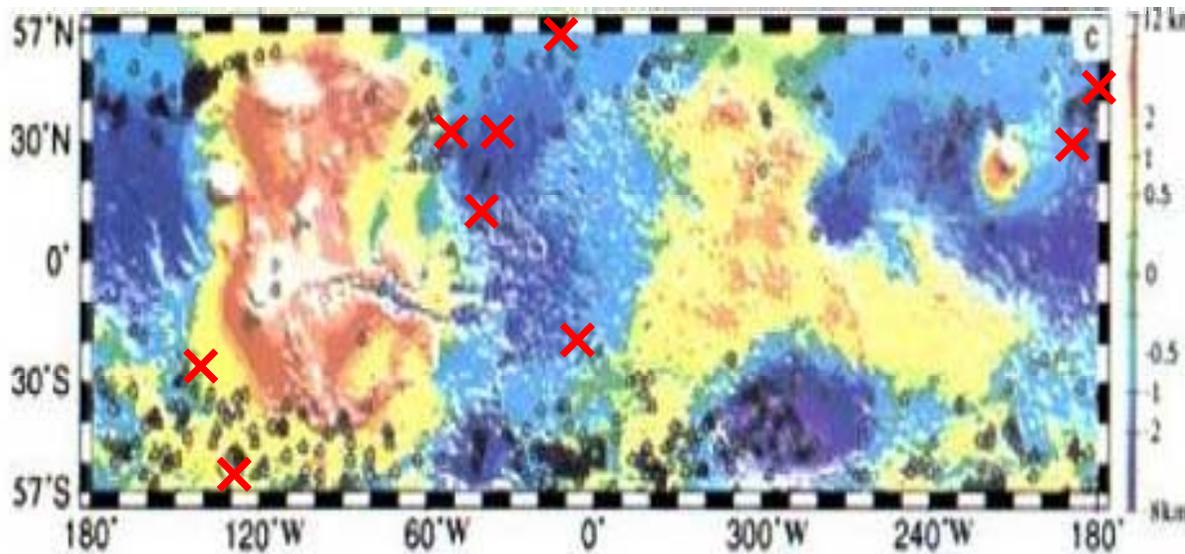
ダスト(MRO MCS)の子午面分布

$\text{Log}_{10}(\text{Dust density-scaled opacity})$ の子午面分布
(McCleese et al, 2010)

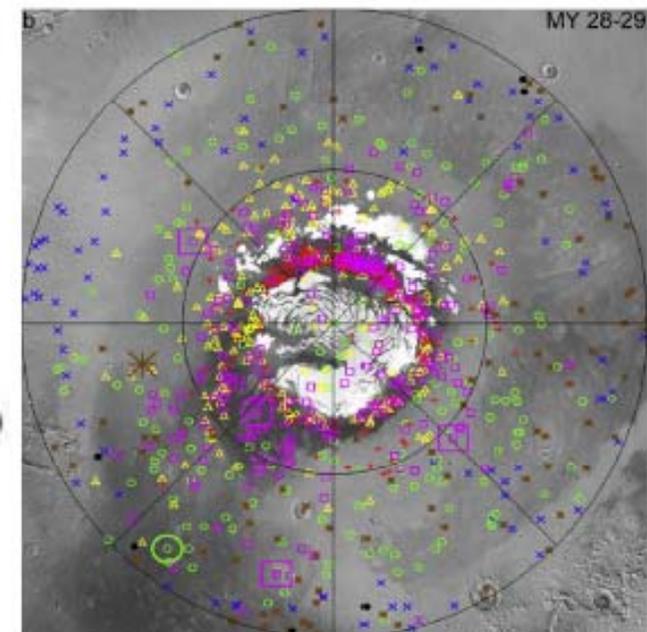
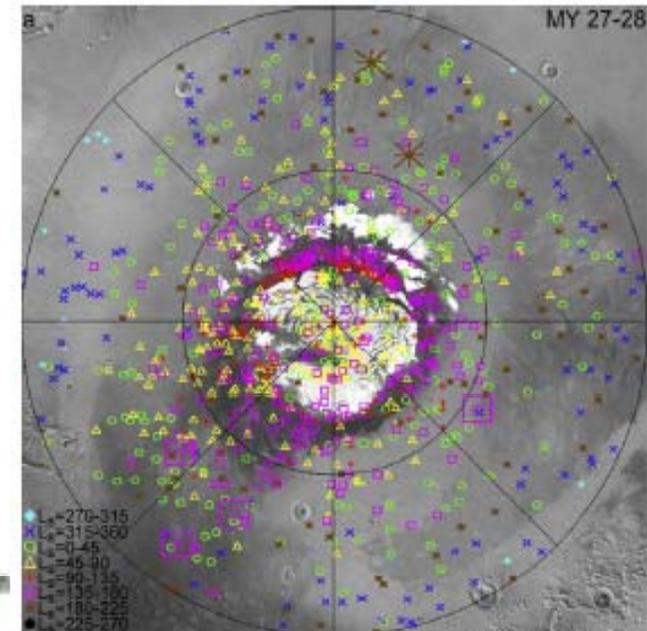


ダストストームの分布

- MGS MOC:Cantor et al. (2001)
- MRO MARCI:Cantor et al. (2010)
 - ダストストームは発生しやすい地域がある

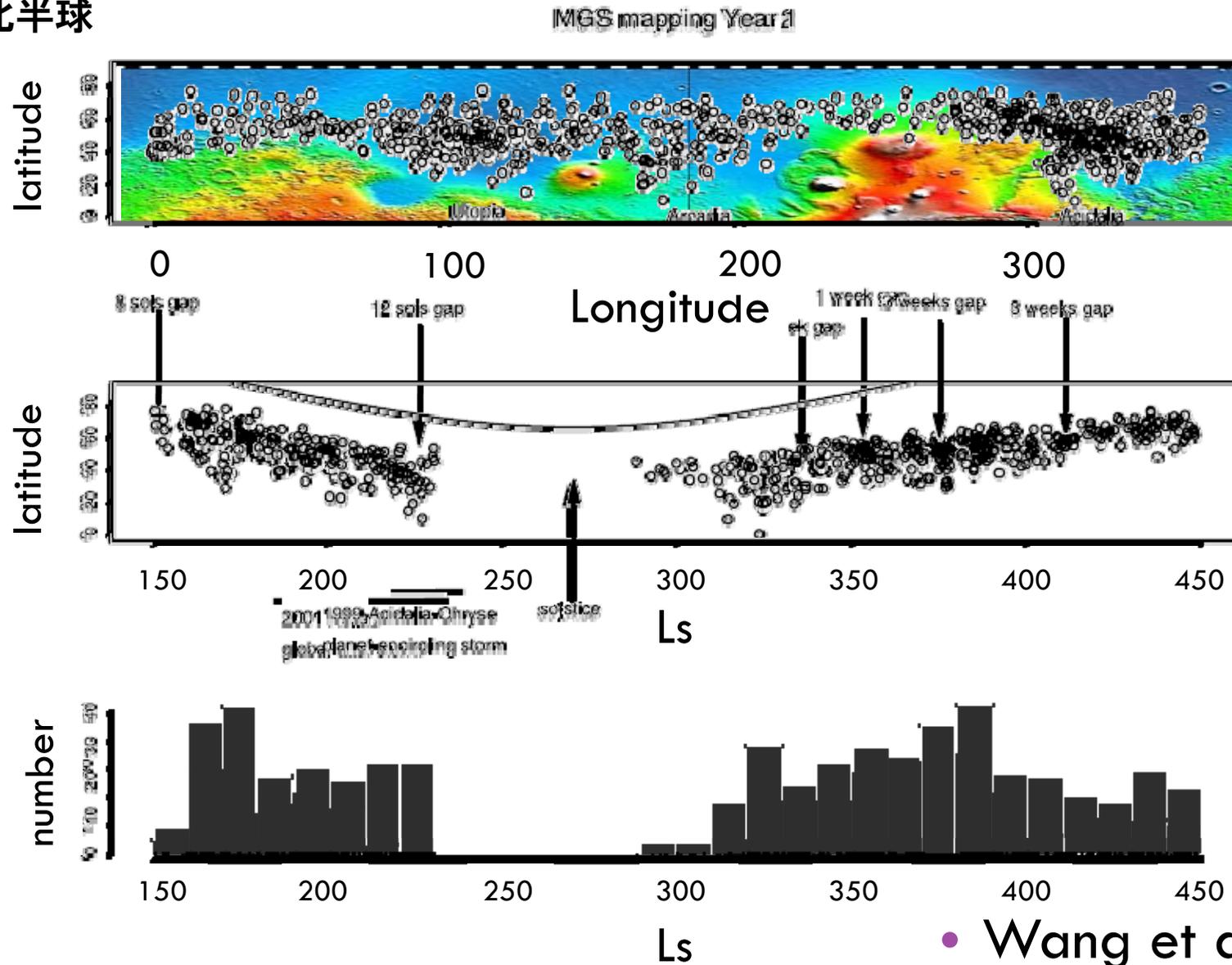


● : local dust storm x : regional dust storm



ダストストームには発生しやすい時期もある。(MGS MOC)

北半球

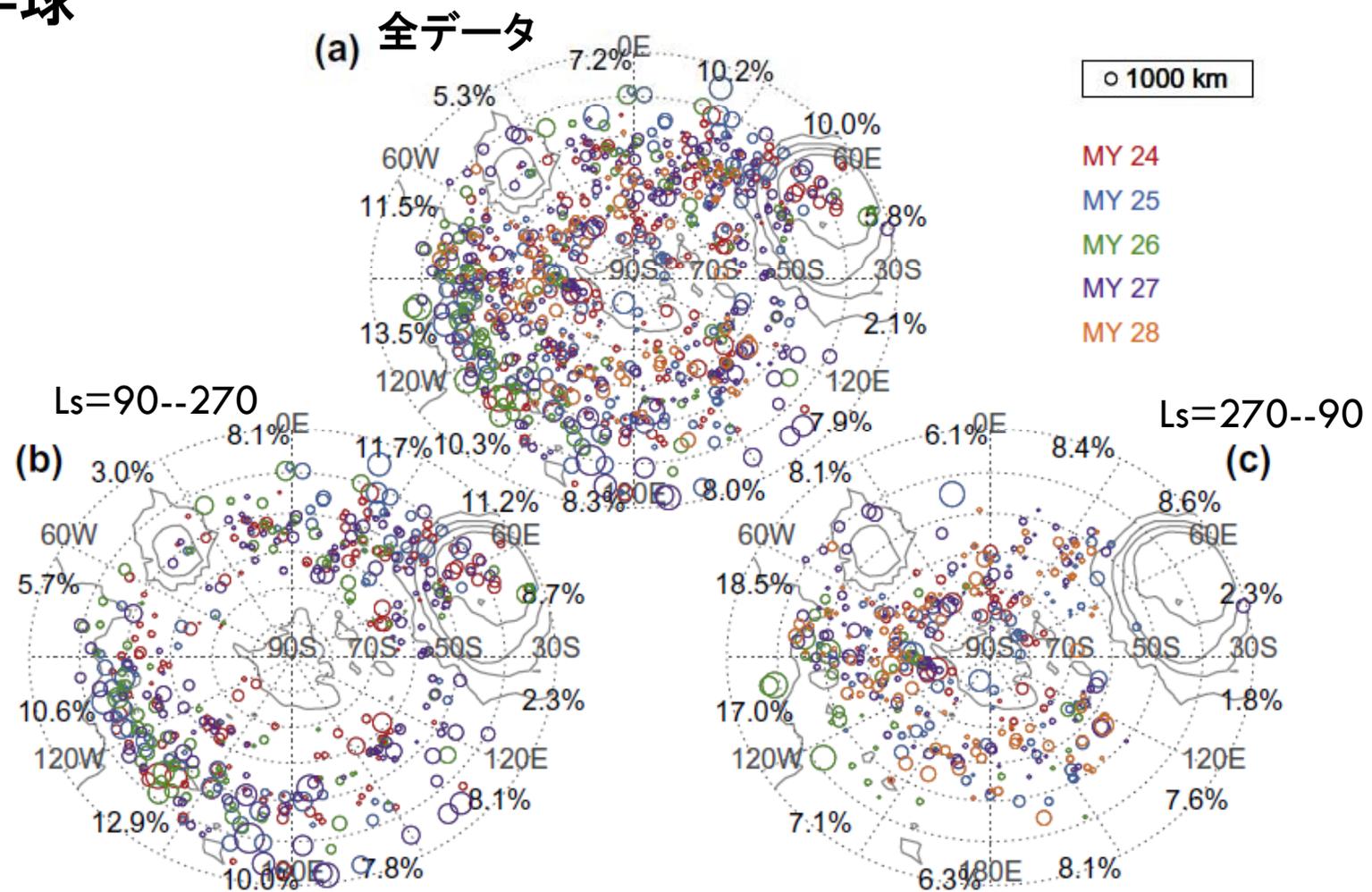


• Wang et al. (2005)

Curvilinear feature(ダストor雲)の分布:

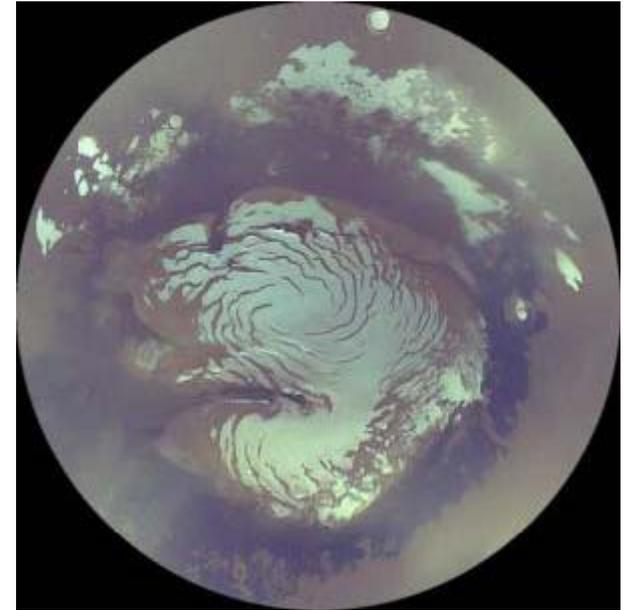
Wang et al. (2011)

南半球



ここまでのまとめ

- 全球ダストストームマップ
 - Cantor et al. (2001)
- 両半球中高緯度のfrontal featureマップ
 - Wang et al. (2011, 2005) etc.
 - Storm trackと場所、数ともに相関あり
- 低緯度は？
 - あまり研究されてない。
 - 観測されている限りではLocalなものは少ないようだ。
- Frontal でないものは？
 - Cantor et al. (2001)
- のこる疑問
 - 極冠の縁でlocal～regional stormは毎年よく観測される。
 - ダストはなくなるのか？1年もしくはもっと早く戻ってくる？
 - そもそも、たいして移動しない？

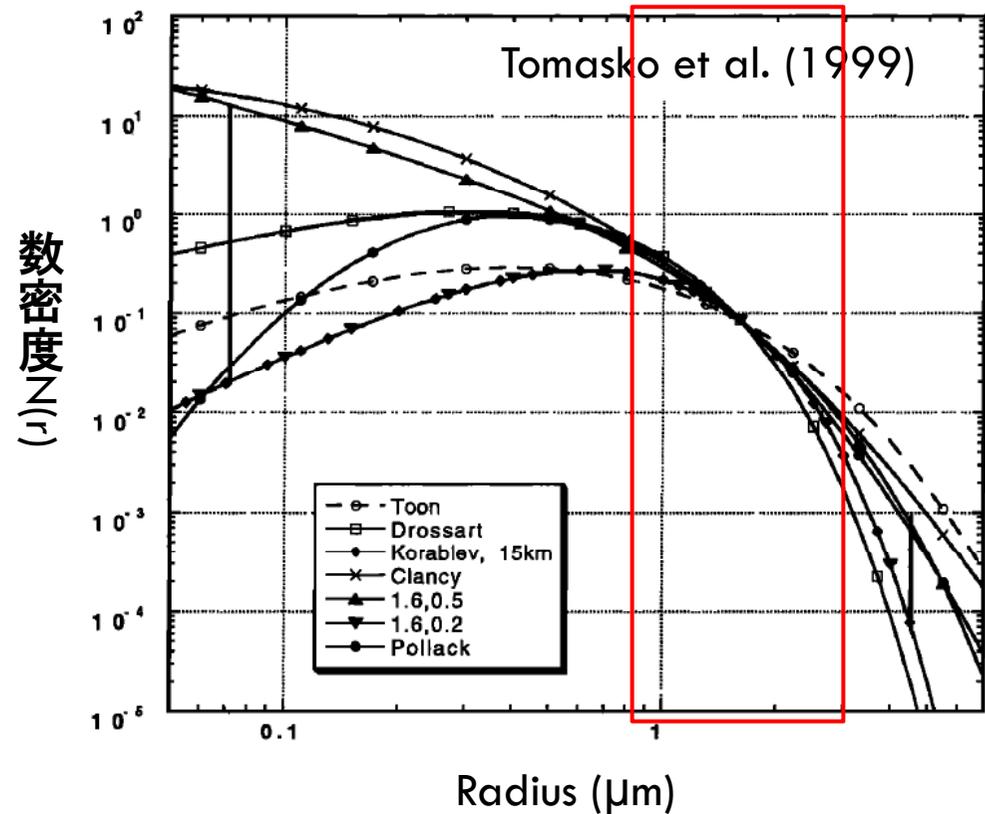




ダストストームの研究

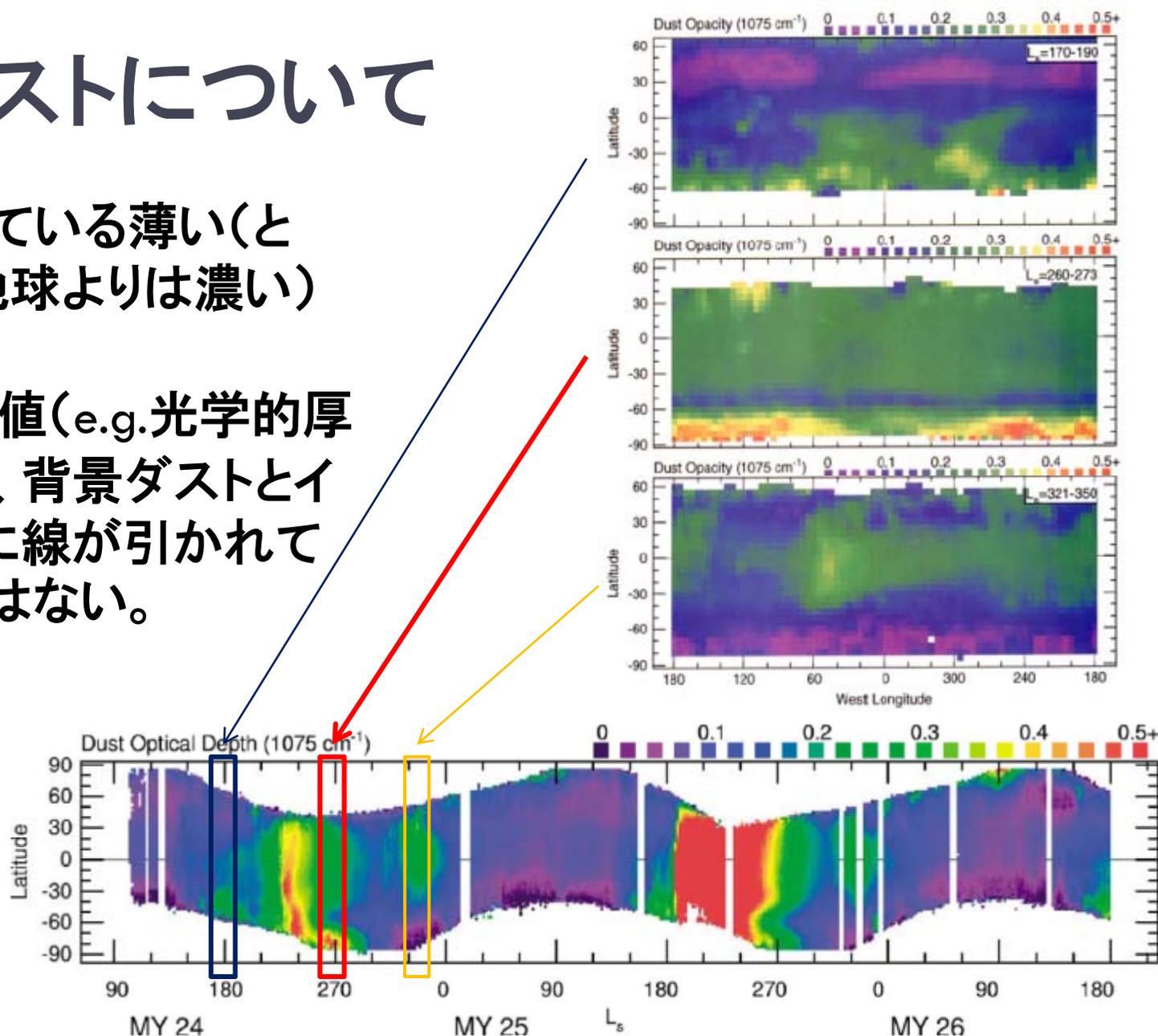
火星のダスト

- Mars Pathfinder/IMPの観測から粒径分布を推測した。
- $0.8 \sim 3 \mu\text{m}$ において、変形ガンマ関数にうまくフィットするようにした。しかし、それ以外は研究によってバラバラ。
- 大きな粒子と小さな粒子の量は未だ不明。



背景ダストについて

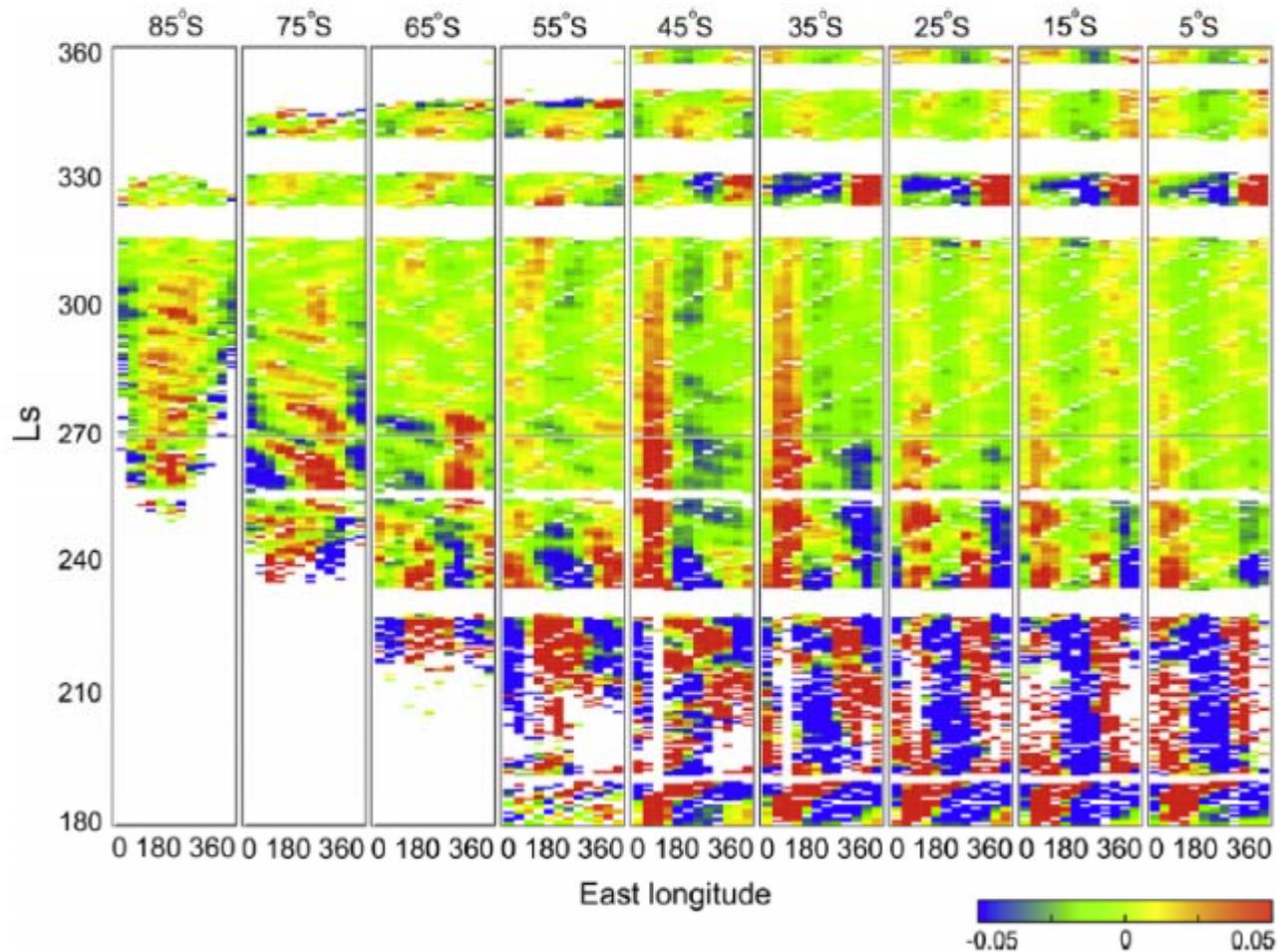
- 常時存在している薄い(と言っても、地球よりは濃い)ダスト。
- 具体的な数値(e.g. 光学的厚さ)でもって、背景ダストとイベントの間に線が引かれているわけではない。



背景ダストの時空間変動

- MGS/TES 9.3 μm ダスト光学的厚さ

Imamura and Ito (2011)



背景ダスト

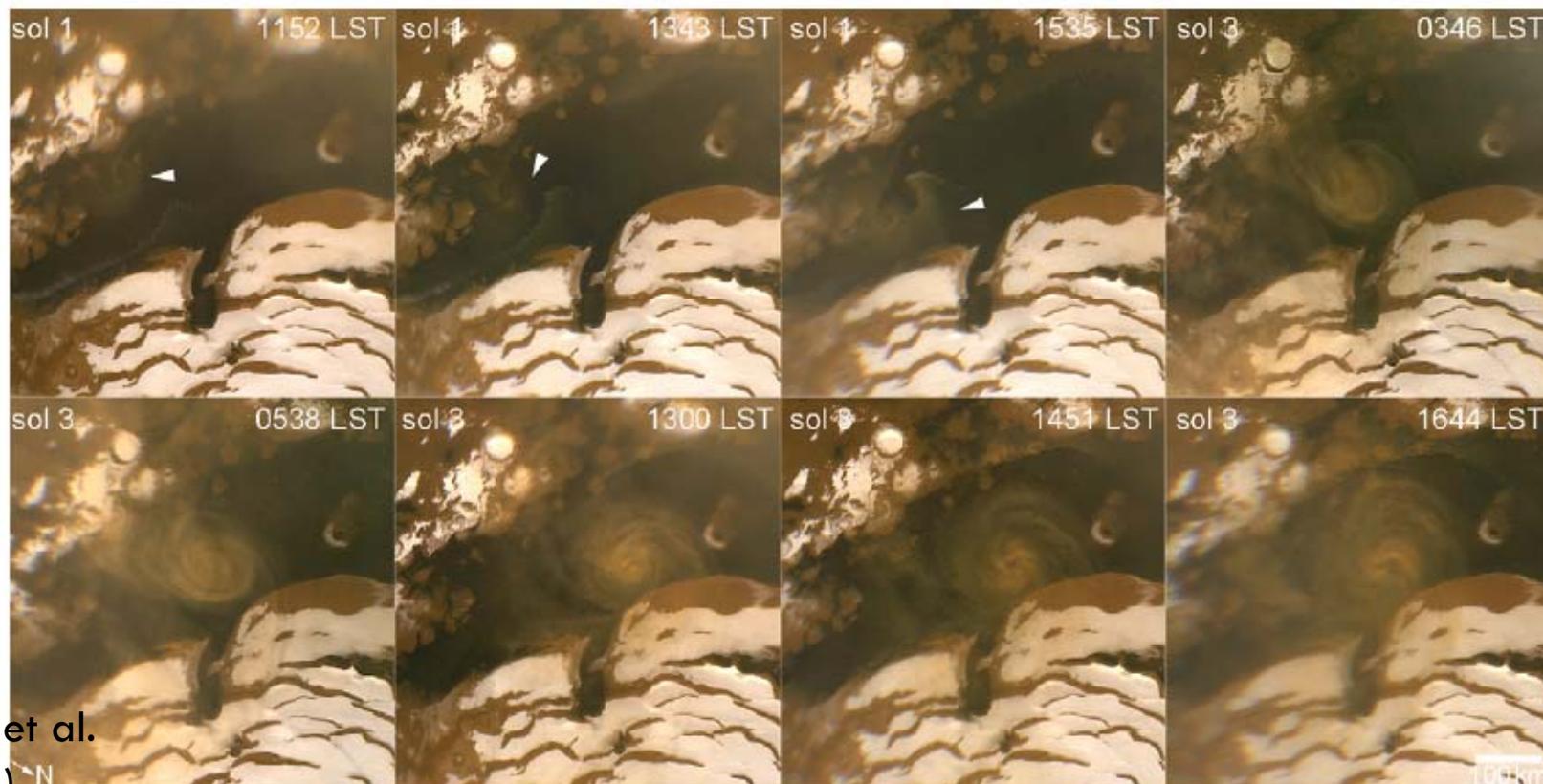
- あくまで可視や赤外で見たときの「背景」。
 - 0.1 μm クラスのダストがもっとたくさんあるかもしれないし、ないかもしれない。
- 供給源はダストデビルだとよく言われる。
 - 根拠はおそらく、Newman et al. (2002a,b), Basu et al. (2004)
 - ダストデビルパラメタリゼーションを導入し、うまく調節すると、背景ダストの分布や季節変化を作れた。
 - 300km x 300km以下のことを全部ダストデビルに任せた？
- 観測的には、実はよくわからない。
 - Balme and Greeley (2006):地球と火星のダストデビルのレビュー論文
 - Balme et al. (2003b):2つの盆地で観測されたdust devil track densityから「ダストデビルだけでは背景ダストを維持するフラックスを説明できない」
 - Ferri et al. (2003):MPF着陸地やAmazonisでは、ダストデビルによるフラックスは、背景ダストを維持するために必要な値よりひとけた以上大きい。

ダストストームの発生、拡大機構の研究

- Local dust storm
 - 単純設定な数値計算
 - 最近の観測
- Regional dust storm
 - "storm track"におけるregional dust stormと傾圧擾乱
 - 南半球におけるcurvilinear featureと傾圧擾乱
 - Passive dustのラグランジュ的移流計算
- Global, Planet-encircling dust storm
 - Smith et al. (2002);Martin 1974;Cantor 2007の発生拡大消失レポート
 - Regional dust stormとTele-connection
 - GCMのなかのglobal dust storm

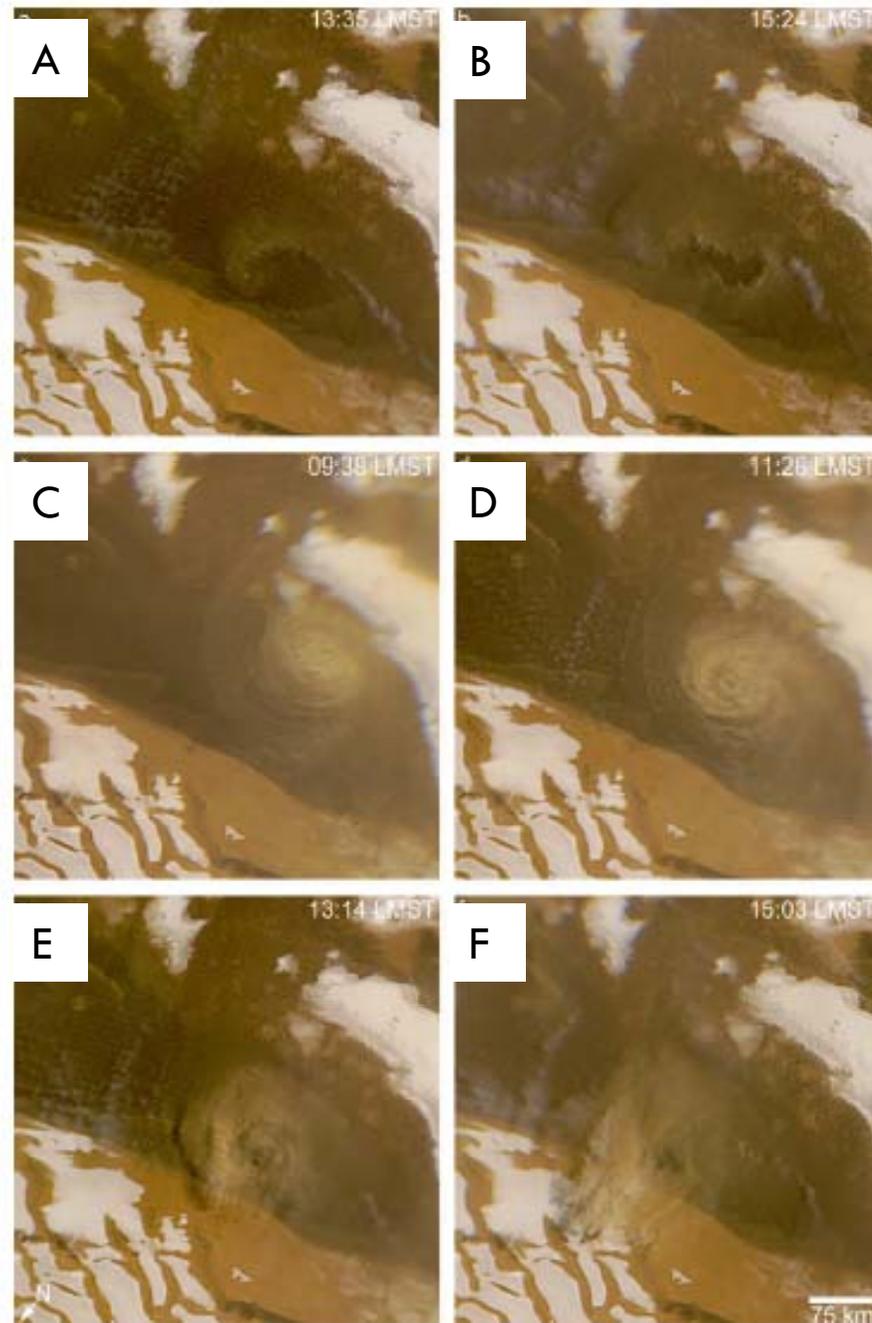
最近のlocal dust storm

- 極冠の縁周辺におけるlocal dust storm
 - 多発地帯(Cantor (2007), Cantor et al. (2001))



Malin et al.
(2008)

Olympia Planitia (Dune)



台風なのか？
極低気圧なのか？

Cantor et al.
(2010)

Local dust storm

- Gierash and Goody (1973)
 - 台風モデル説
 - Regional dust storm以上のダストストームにも適用を試みる。

→その後なぜか衰退

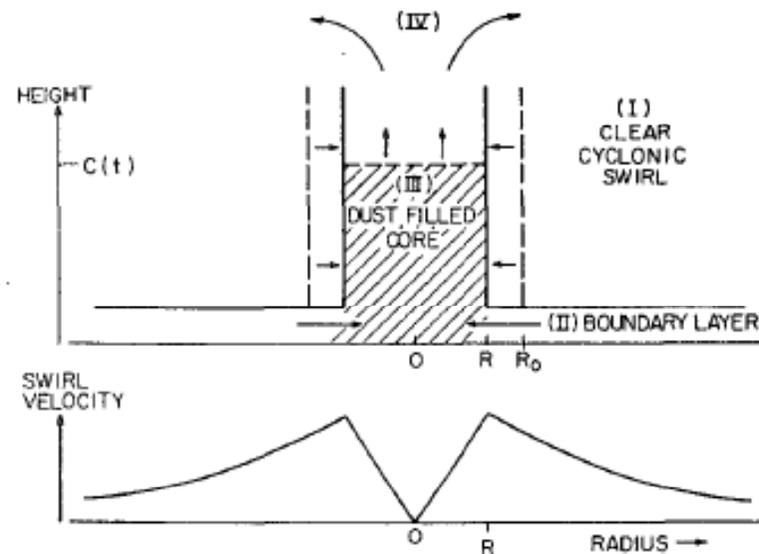
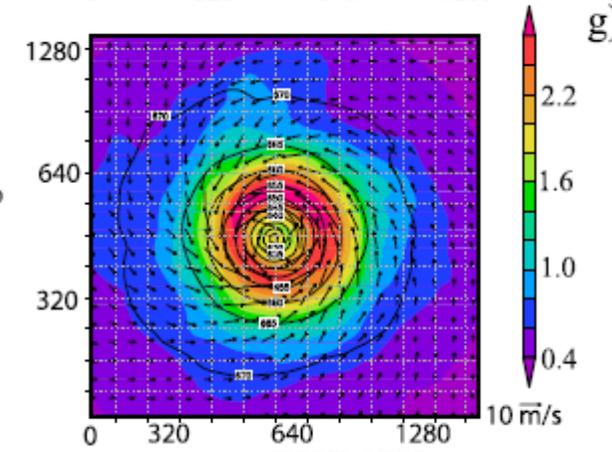
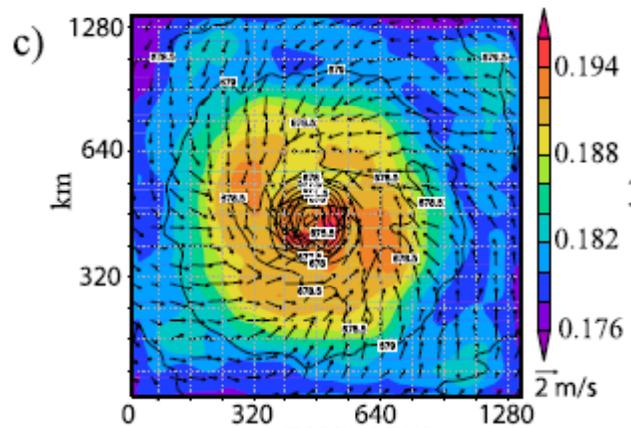
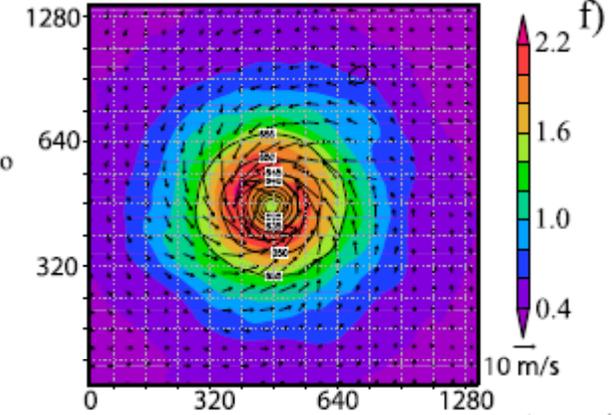
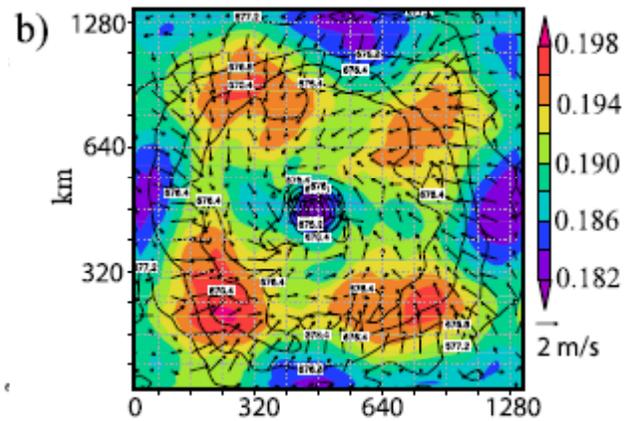
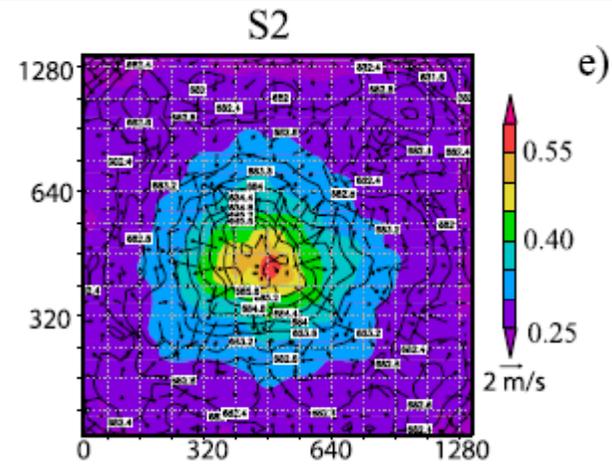
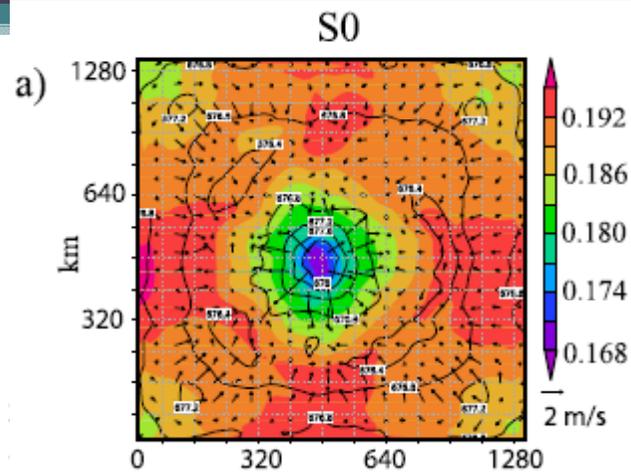


FIG. 1. Carrier's dynamical model of a hurricane.

しか

• Rat

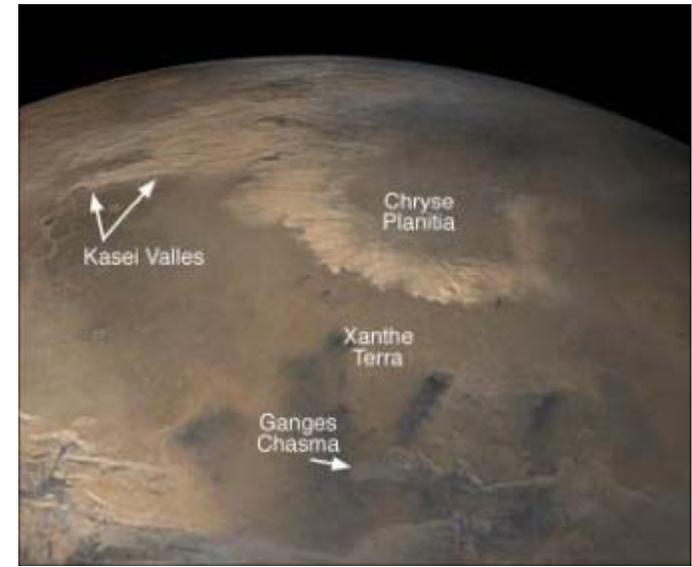
□ ▲



エン

Regional dust storm

- 北半球のStorm trackで頻発
 - およそ同じ拡大経路
 - 前線状構造を有することが多い。
- 南半球でもStorm trackでも発生
- 全部が全部Storm trackというわけでもない。
- 一つのソースから供給か？
それとも巻き上げ領域の拡大か？



Storm trackにおけるfrontal dust storm

- 前線状のRegional dust storm多発地帯

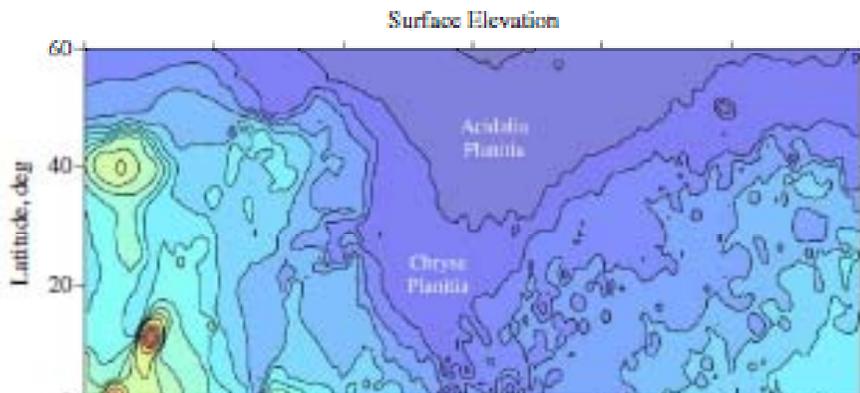
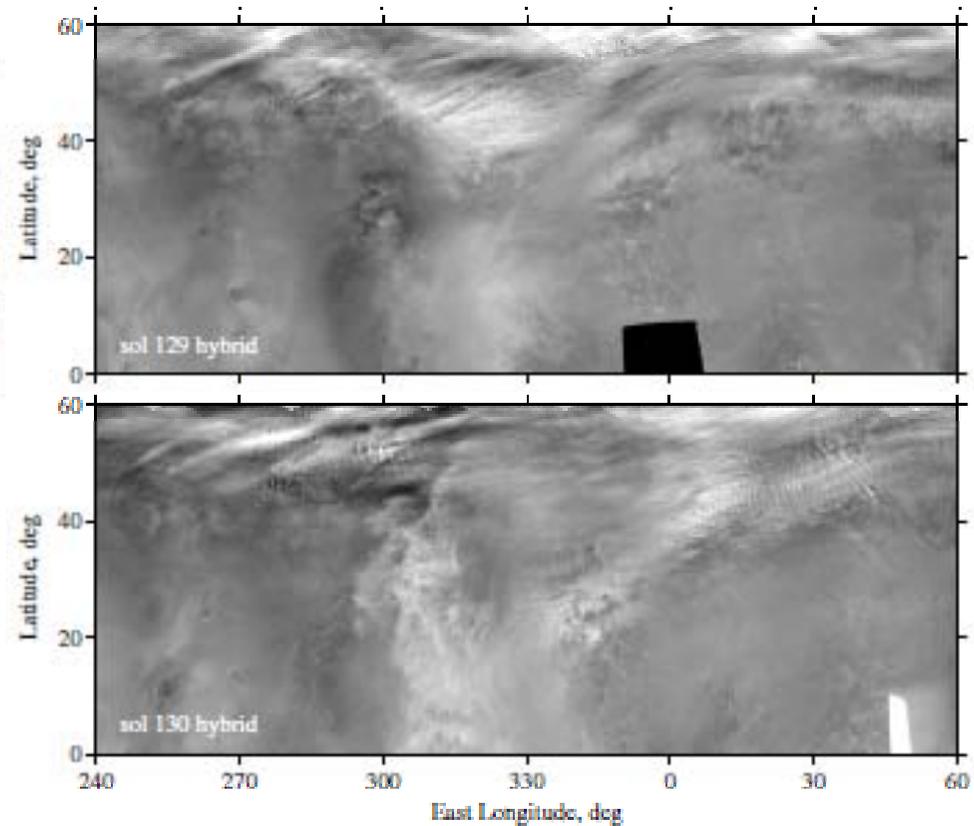


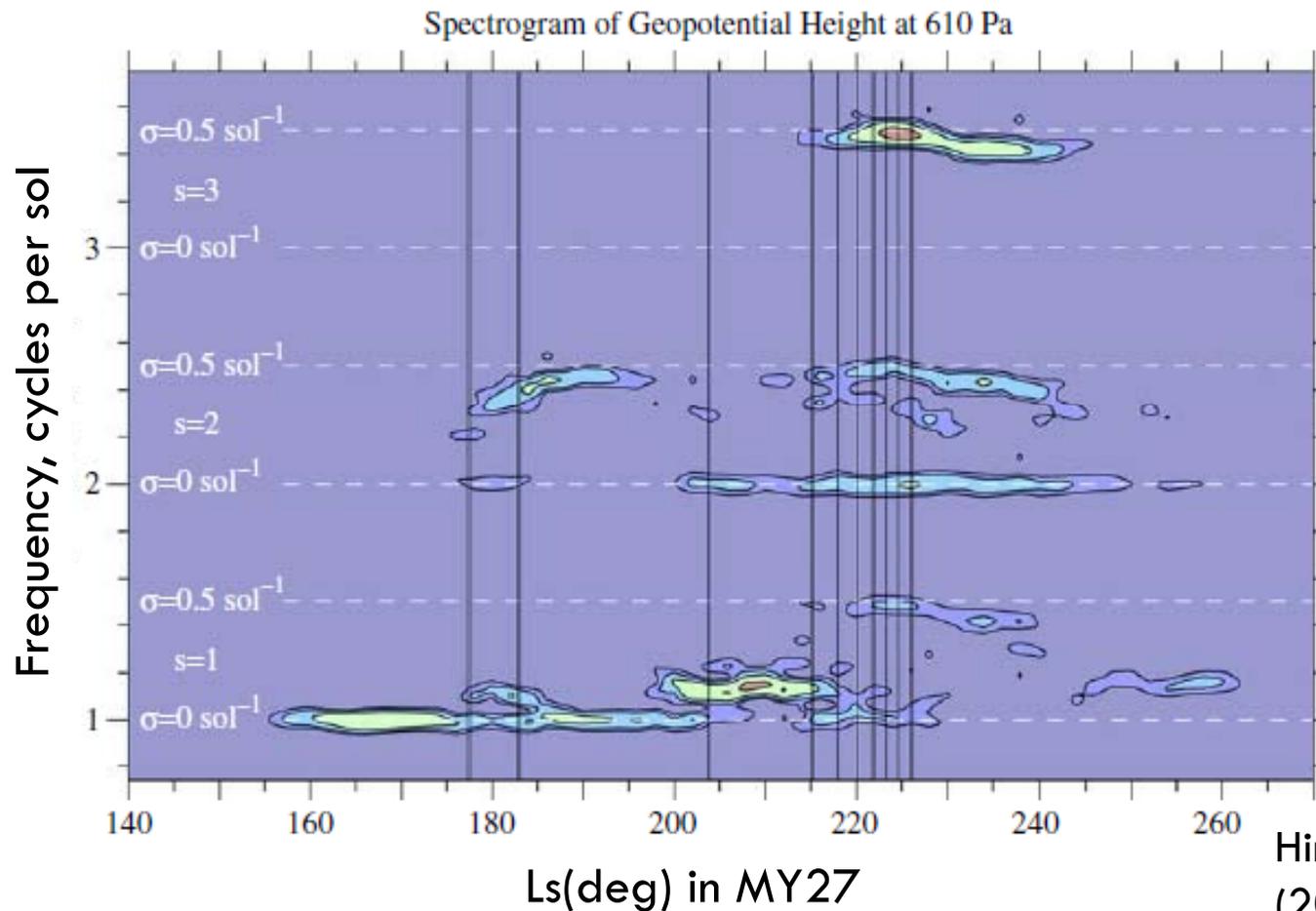
Table 1
Regional dust storms of the northern hemisphere.

L_s (°)	Sol number	Location
177.3	51	Utopia
177.6	51	Acidalia
182.8	60	Acidalia
183.1	61	Utopia
203.8	95	Acidalia
215.1	113	Acidalia
215.3	114	Arcadia
218.0	118	Utopia
220.1	121	Acidalia
221.7	124	Arcadia
222.0	124	Acidalia
223.3	126	Acidalia
224.6	128	Acidalia
225.9	130	Acidalia
226.2	131	Arcadia



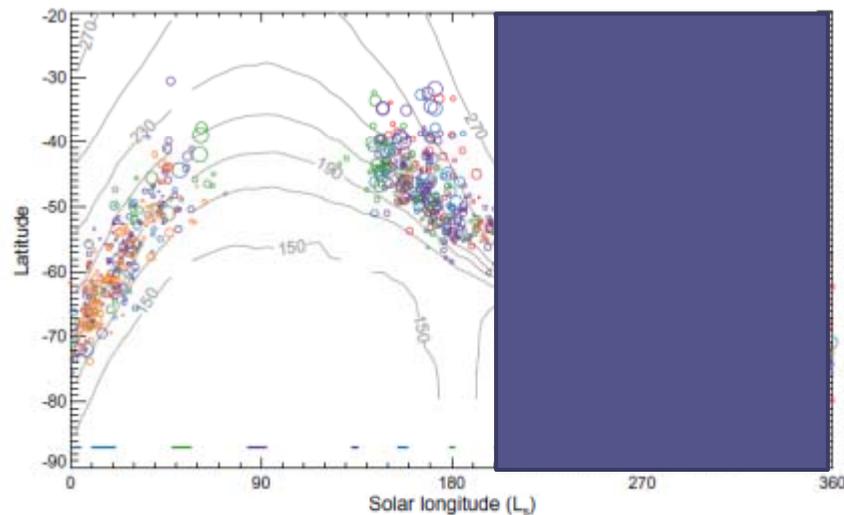
Regional dust stormの発生は、

- モードの変化と同じタイミング。

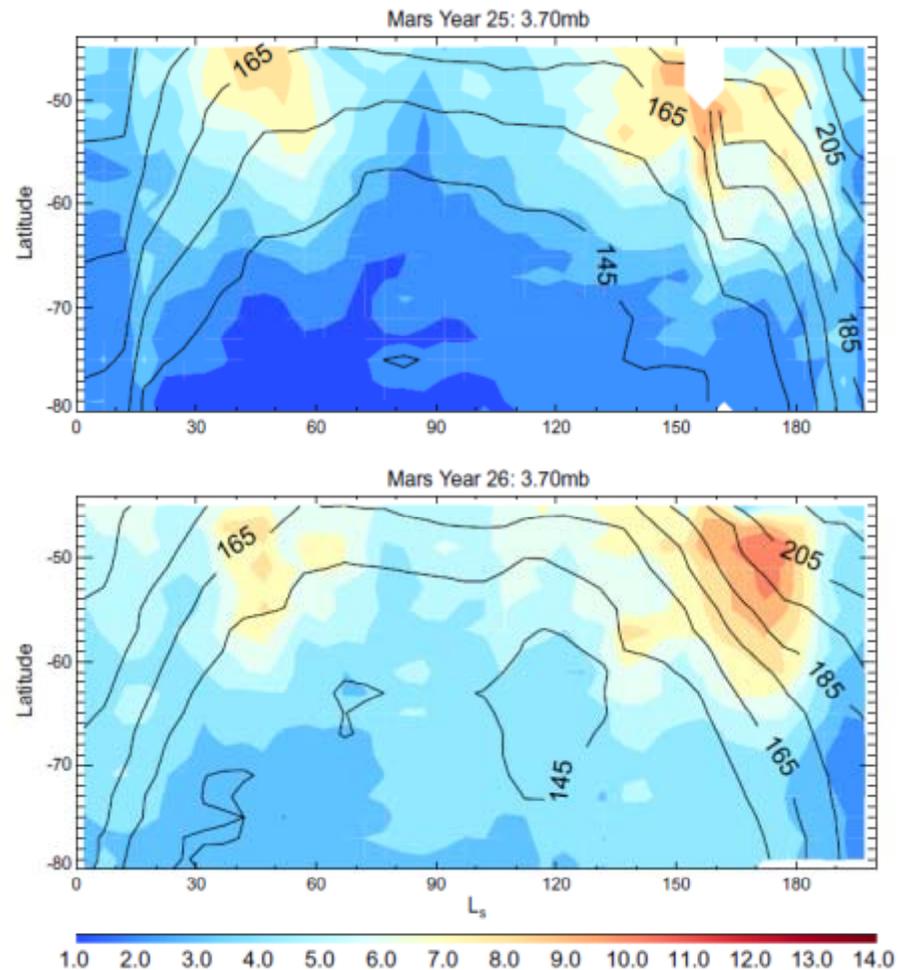


Hinson and Wang
(2010)

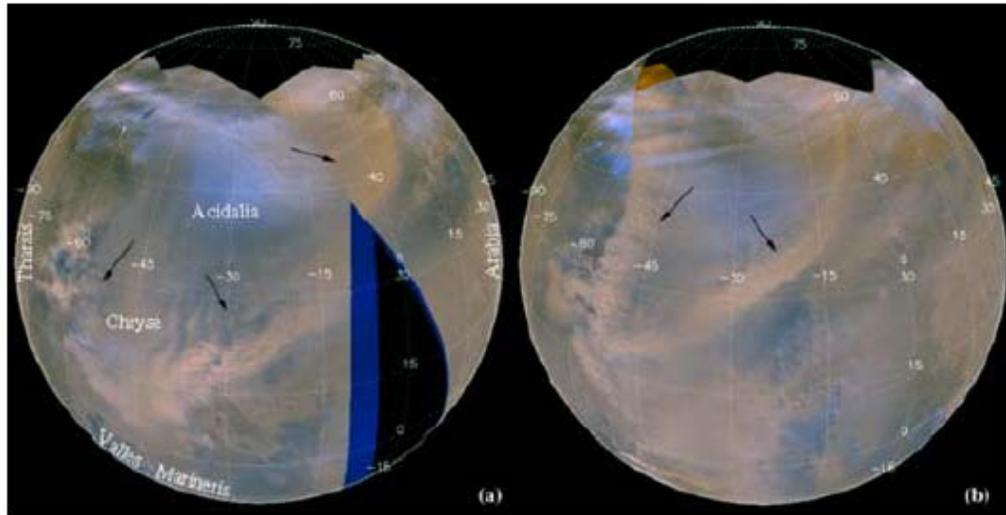
Curvilinear featureの分布(南半球): Wang et al. (2011)



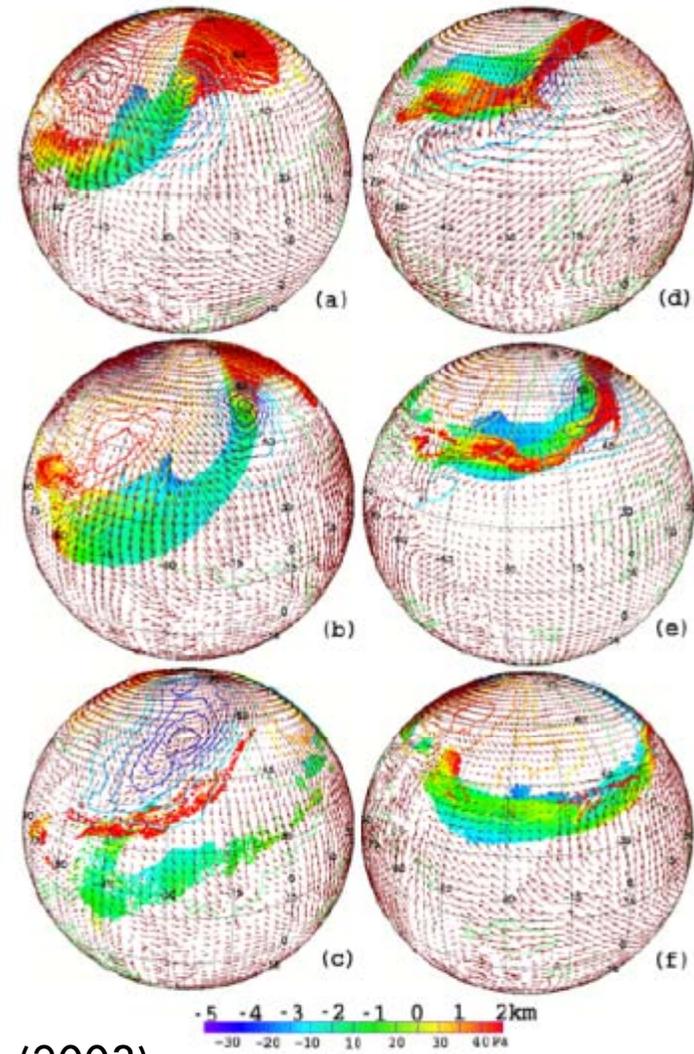
- Curvilinear featureは移動性擾乱の活動度と相関あり。



Regionalなfrontal dust stormの再現(?)



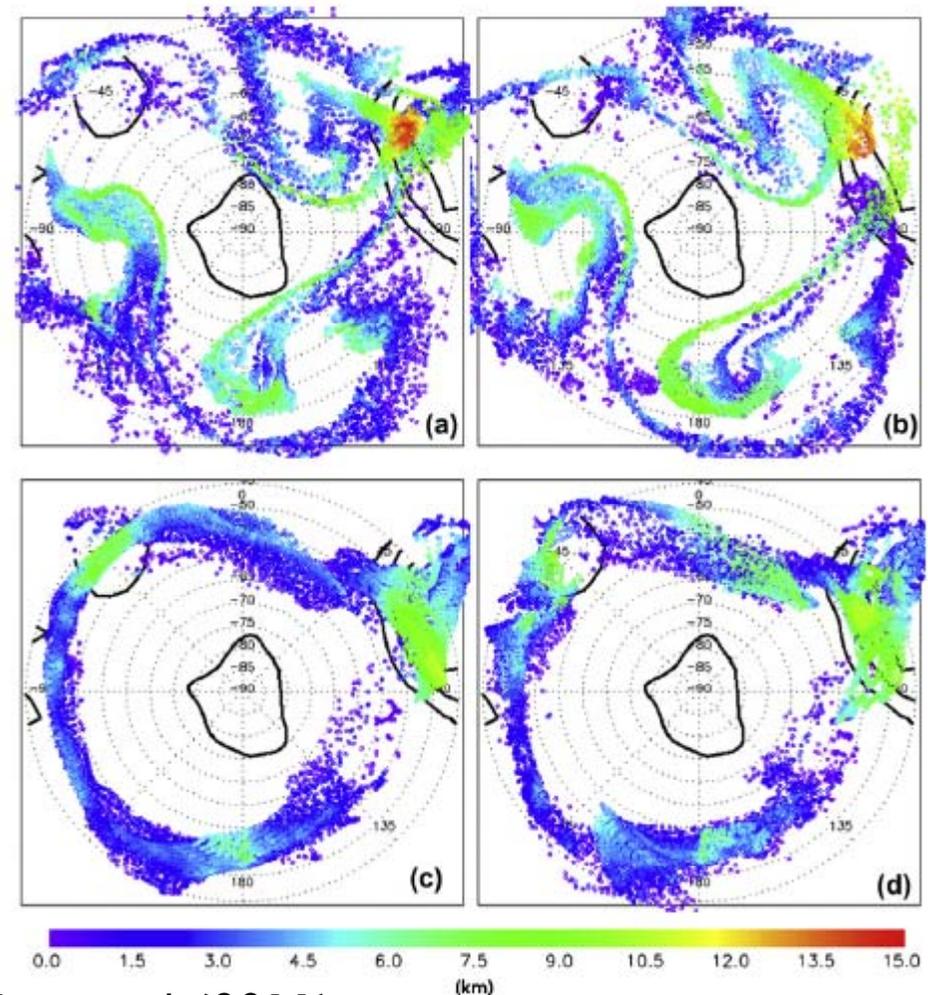
- Passive tracerのラグランジュ的移流実験
- 潮汐+傾圧波+タルシス東側のboundary currentがうまく合わさると、赤道に向かって北風領域("Window")が現れる。



Wang et al. (2003)

南半球でcurvilinear featureの再現(?)

- Passive tracerのラグランジュ的移流実験
- 波数3の東進モード(傾圧波)がフィラメント状の構造を作る。
- 平均場(zonal mean + stationary wave)や潮汐だけではうまく作れない。



Wang et al. (2011)

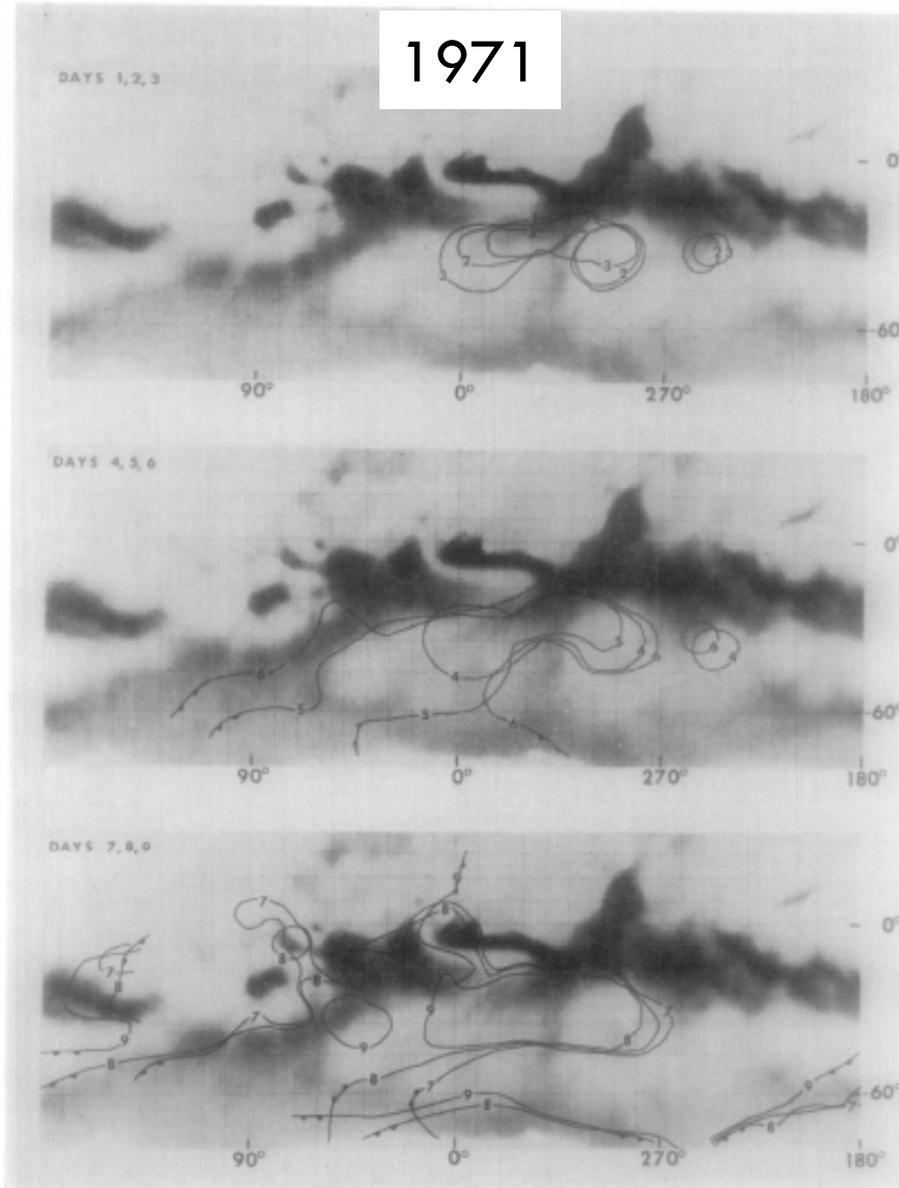
Global, planet-encircling dust storm

- 有名なものは、
 - 1956, 1971, 1973, 1977, 2001年
 - →ランダム？
- もっとも有名で、注目されているものは
 - 2001年
- 定義があいまい
 - 空間的な大きさ
 - 光学的厚さ

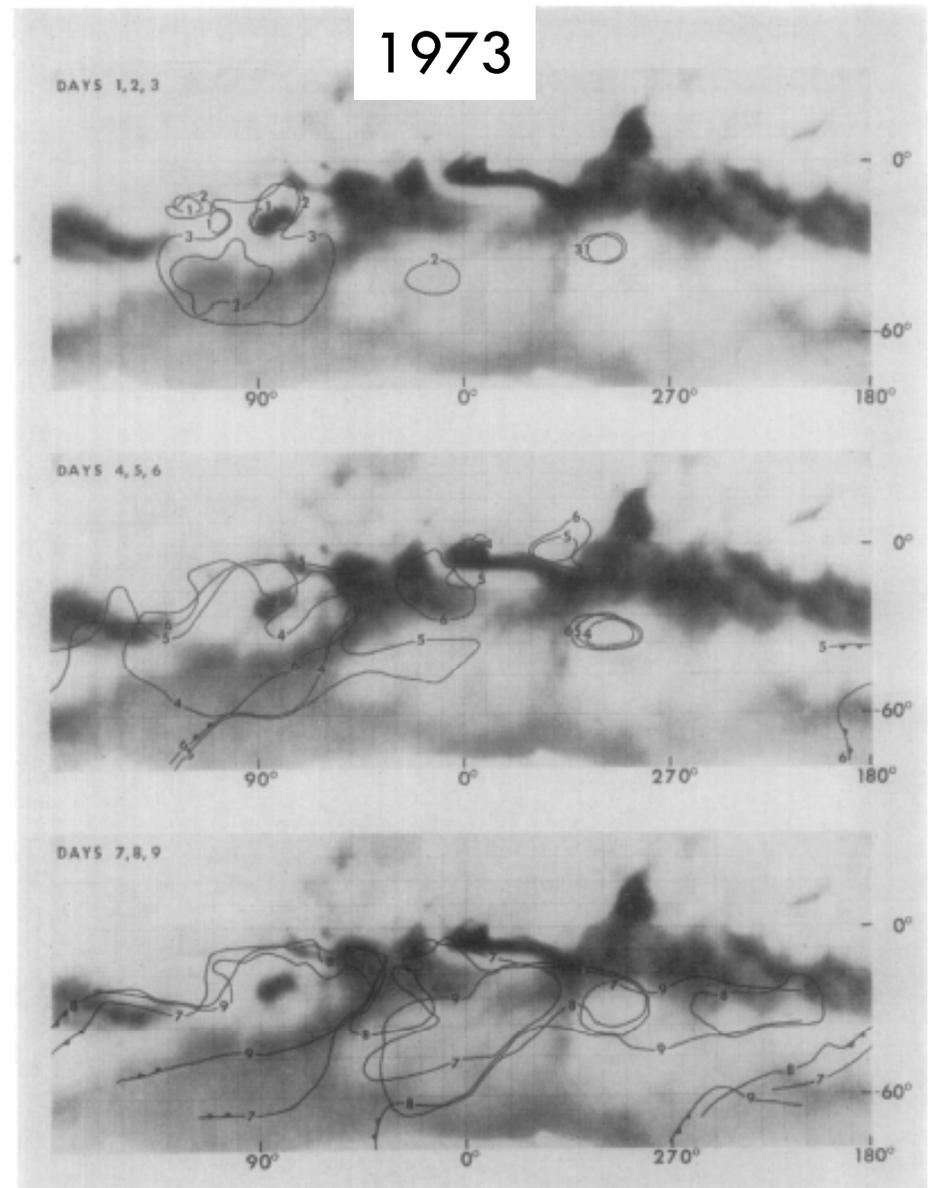


Martin 1974

1971



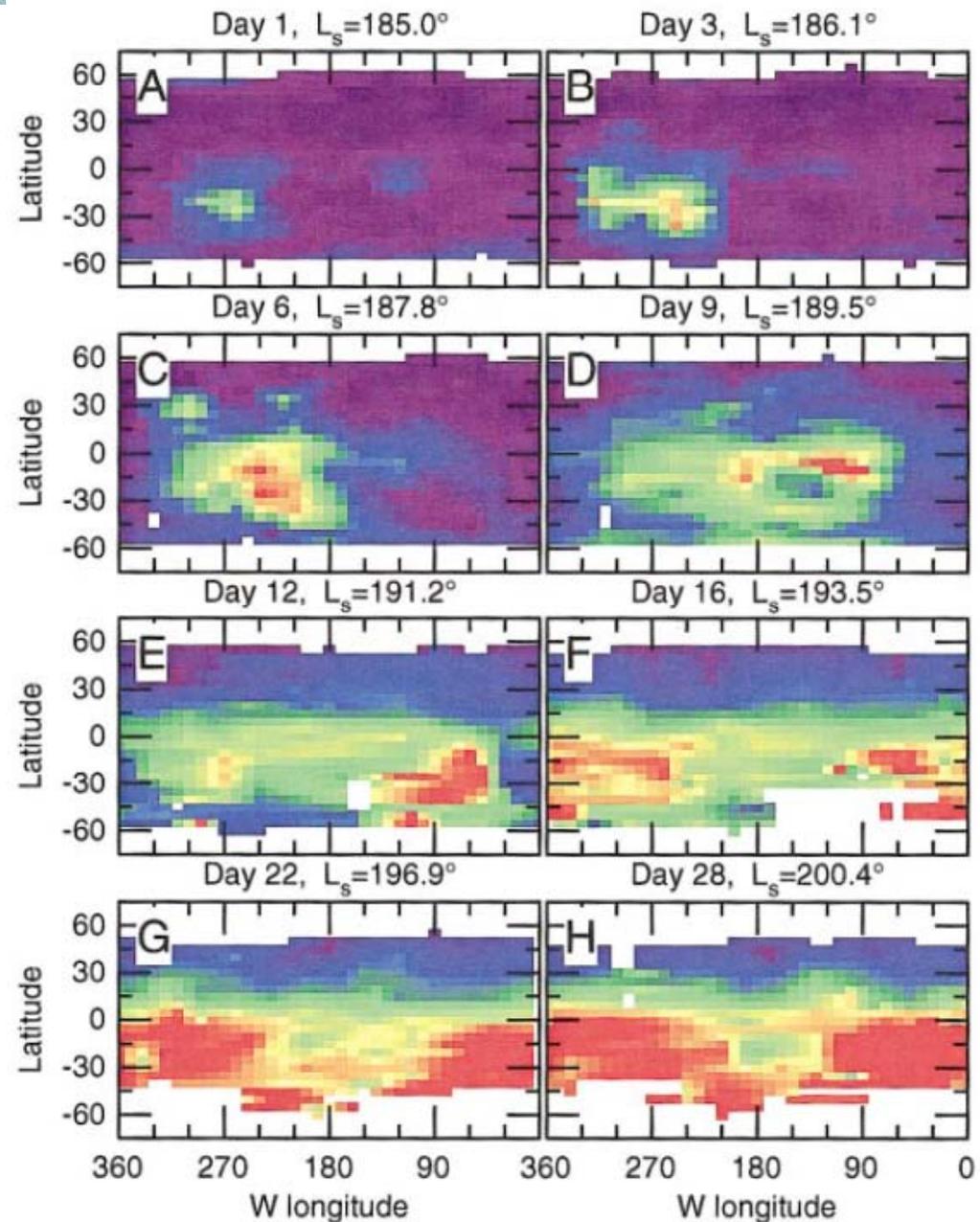
1973



2001年

- Hellas北側から発生
- いくつかのregional dust stormが時を同じくして発生→拡大→沈静化。結果的に広範囲にダストがいきわたる。

(Cantor 2007)



Smith et al. (2002)

テレコネクション(?)

タルシスで地表面応力が上昇し、2
発目のダストストーム発生。
→1発目とマージ。



Standing waveの位相が東にずれ
る。腹がちょうどタルシスに重なる。

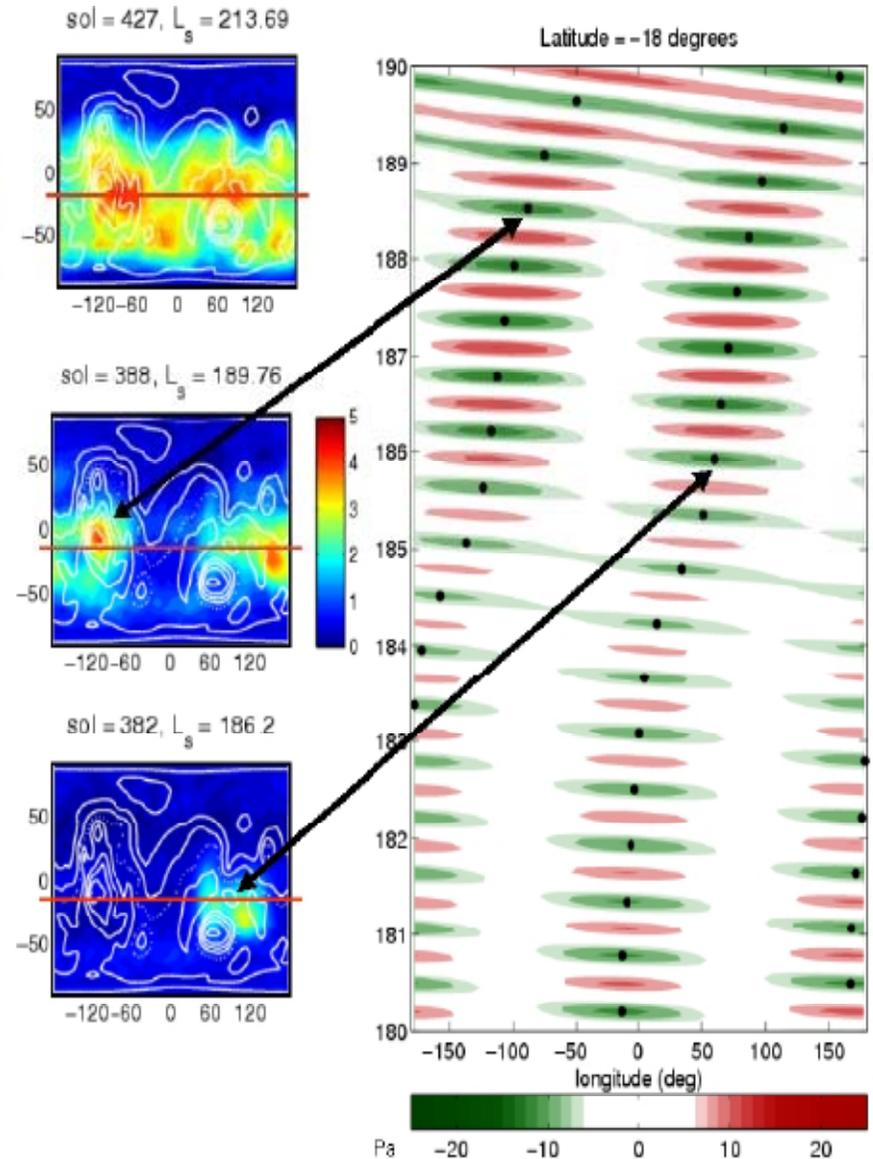


Hellas北東部でダストストームが大
規模化

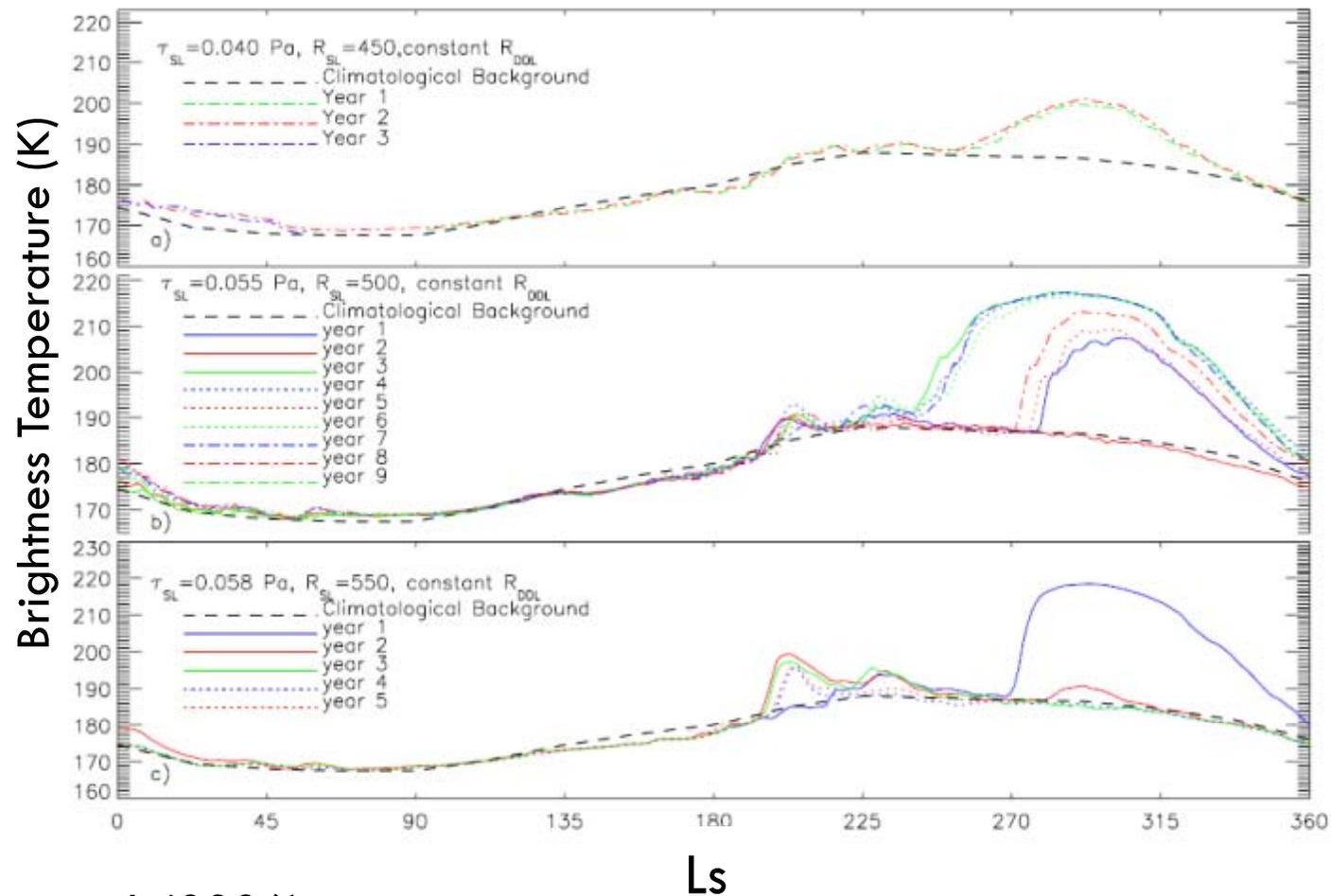


diurnal tide と diurnal Kelvin mode
の重ねあわせでstanding waveが存
在している。(らしい)

Time



Regional, global dust stormの数値計算



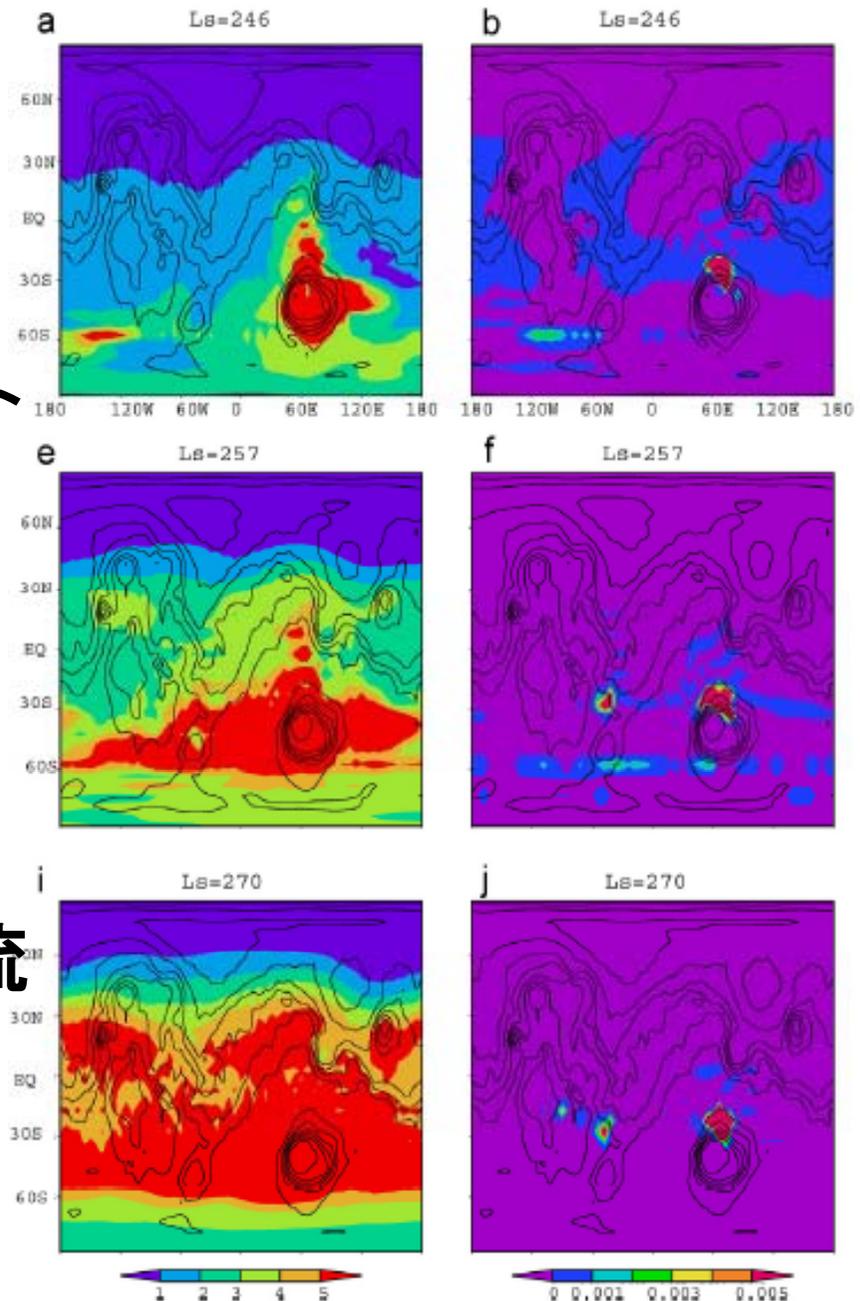
- Basu et al. (2006)
 - 強い風が吹くとダストは舞い上がる、ダストは無限にある

光学的厚さ

ダスト放出量

計算機内で発生した global dust storm

- ダストソースは小さくロバスト
 - Hellas北側
- 複数の場所でダストが巻き上がる。
 - 極冠の縁
 - マリネリス溪谷の東端
- 個々のダストの広がりは移流（私見）



Basu et al. (2006)

まとめ

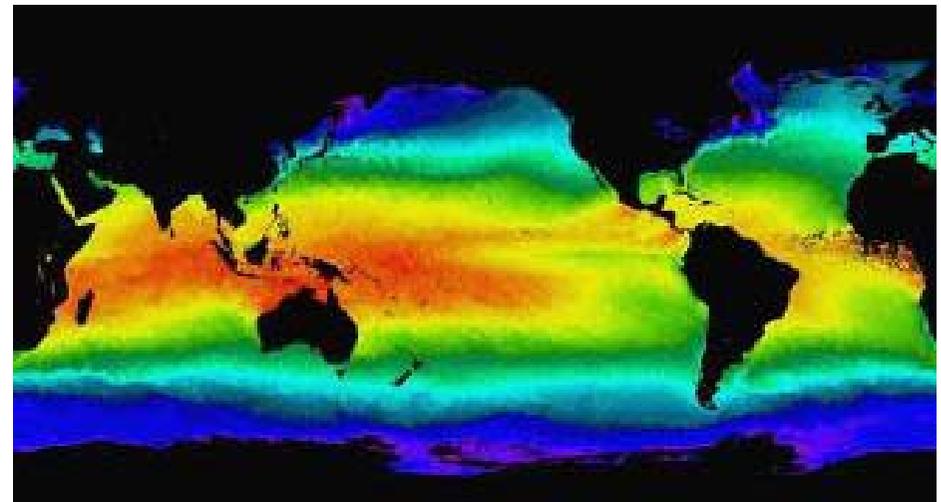
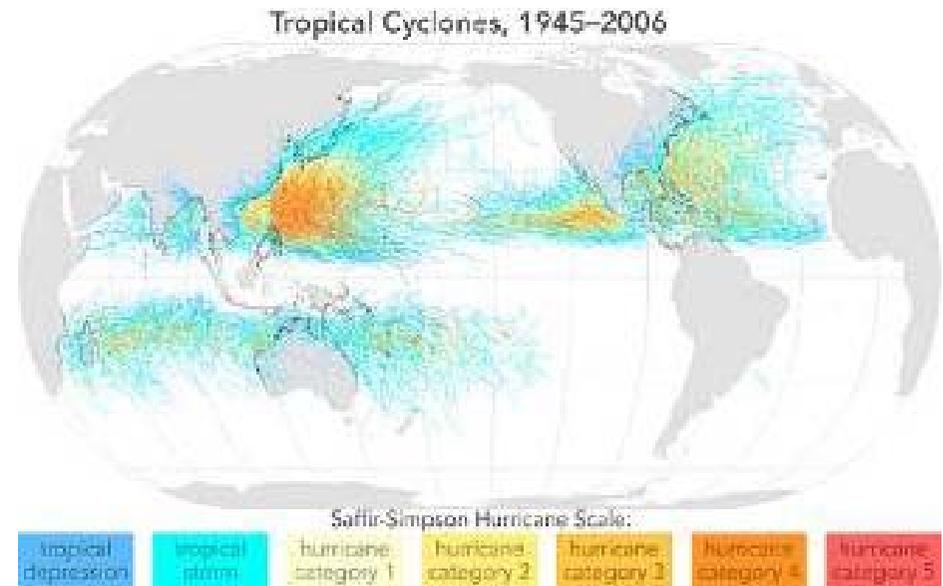
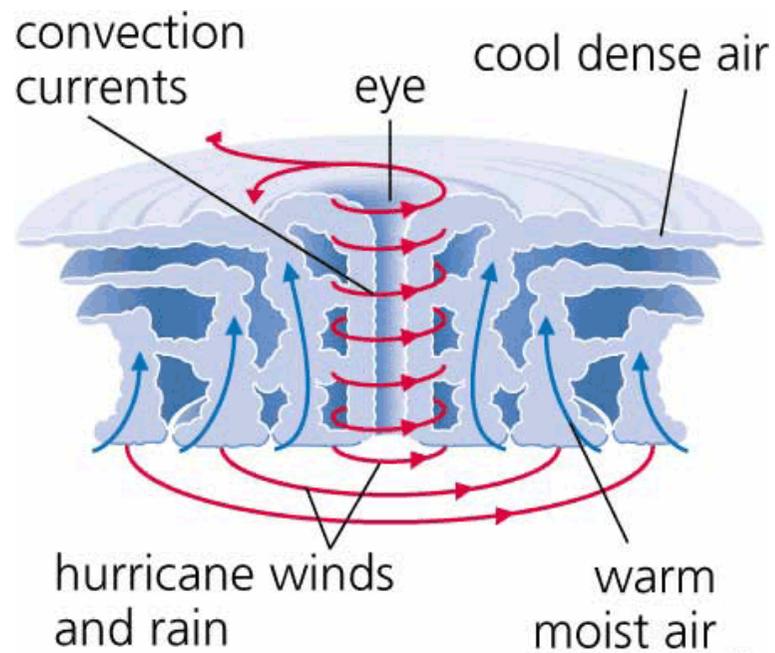
カテゴリ	観測的研究	数値的研究
Local	<ul style="list-style-type: none">・時間発展がわからないので、標準的モデルがない。	<ul style="list-style-type: none">・台風クラスの大きさのみ
Regional	<ul style="list-style-type: none">・もっぱら中緯度の前線状ストーム・発生や拡大が、大気場(温度分布)と関連づけられていない	<ul style="list-style-type: none">・Passive dust 移流計算・GCMで作れたはよいが、データ解析はしていない
Global	<ul style="list-style-type: none">・発生や拡大が、大気場(温度分布)と関連付けられていない	<ul style="list-style-type: none">・GCMで作れたはよいが、データ解析はしていない
背景ダスト	<ul style="list-style-type: none">・ダストデビル自体のメカニズムは、よくわかっている。・全球的な供給量までたどり着かない。	<ul style="list-style-type: none">・本当に納得してよいのか？

足りないもの:

ダスト関連現象の一般的性質

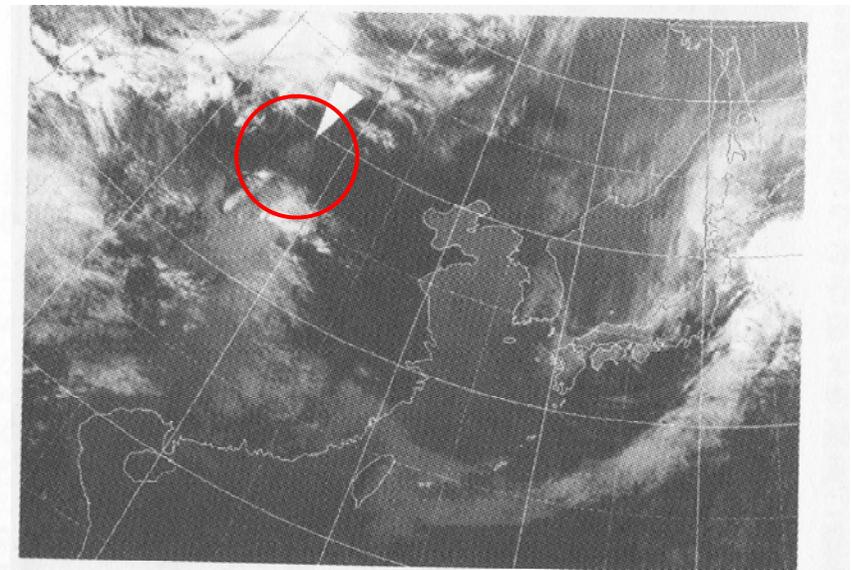
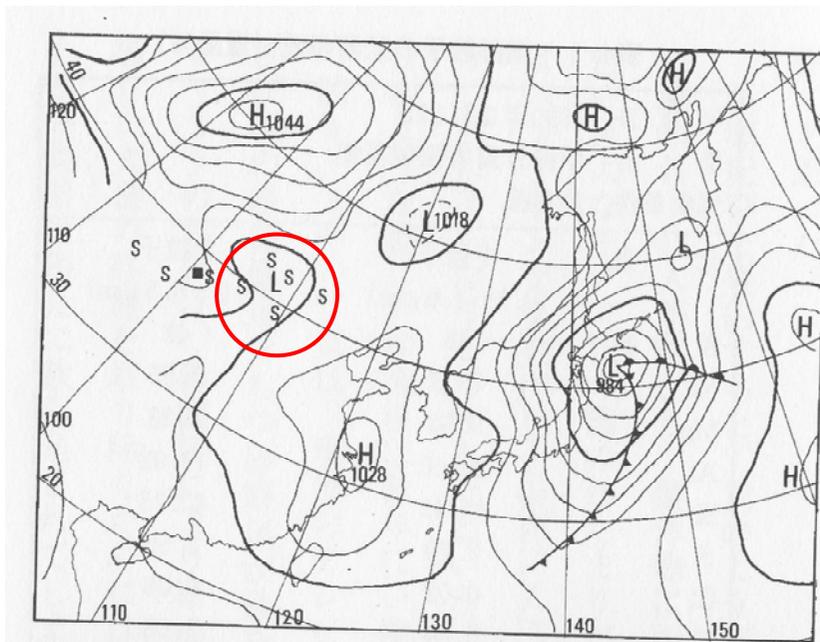
- Micro scale
 - 各地域、各現象別(dust devil, 対流etc)のダスト巻き上げ量
- Local scale
 - 時間発展→観測による平均的な性質の把握
 - 周囲の大気場との相関→メカニズムの推測
- >=Synoptic scale
 - 時間発展→観測による平均的な性質の把握
 - 内部の巻き上げ
 - 周囲の大気場との相関→メカニズムの推測
- 全体
 - 周囲の大気場との相関→メカニズムの推測
 - 地域別季節別の背景ダスト供給量、そのメカニズム
 - ダスト除去過程

e. g. 台風



e. g. 黄砂

甲斐(2008)、黄砂の科学



- 気圧の谷が来たときによく黄砂が発生する。

MELOS大気オービターでは、 常時モニタリングを提案

- 大気場とダストを同時に、連続的に、かつ定常的に監視し続けることが必要
- ダストイベント、背景ダスト両方の輸送プロセスを推測
- シミュレーションとデータ同化
- 地球の気象学の後追いではあるが、問題解決の手順をある程度参考にできるのは楽。
- 背景ダストの供給量やその分布も知りたいが、アイディア不足。
- そろそろ小郷原の脳内ストックも尽きてきた。



以上。