

# 火星のダスト巻き上げパラメタリゼー ションスキームを用いたダストフラック スの診断実験

地形起伏の与え方の違いによるダストデビルによるダ  
ストフラックスの差

北海道大学大学院理学院

宇宙理学専攻

荻原弘堯

# 火星

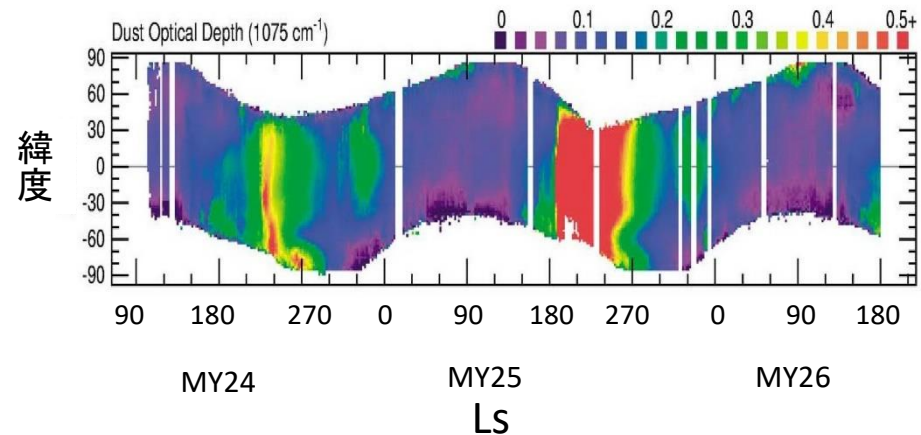
- 表層環境が季節変化する
- 薄い大気を持つ
  - 主成分は  $\text{CO}_2$
- 大気中にダストが含まれている

	地球	火星
自转轴の傾き(度)	23.44	25.19
平均地表気圧(hPa)	1014	6
主要な大気組成(%)	$\text{N}_2$ (78), $\text{O}_2$ (21)	$\text{CO}_2$ (95)

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>

# 火星のダスト

- 火星の土壌成分に似ており主成分は  $\text{SiO}_2$  と考えられている (Berger et al., 2016)
- 平均粒径  $1.4 \mu\text{m}$  程度 (Lemmon et al., 2015 他)
- 常時ある程度の量が大气中に存在する (Smith, 2004 他)
  - $9 \mu\text{m}$  の光学的厚さがオーダー 0.1
- 可視/赤外放射を吸収 (Gierasch and Goody, 1972 他)
- 季節変化と年々変動が起こる (Smith, 2004 他)
  - 南半球の春から夏の時期に光学的深さが大きくなる
  - 惑星全体を覆う塵嵐 (グローバルダストストーム) が起こる年もあれば起こらない年もある



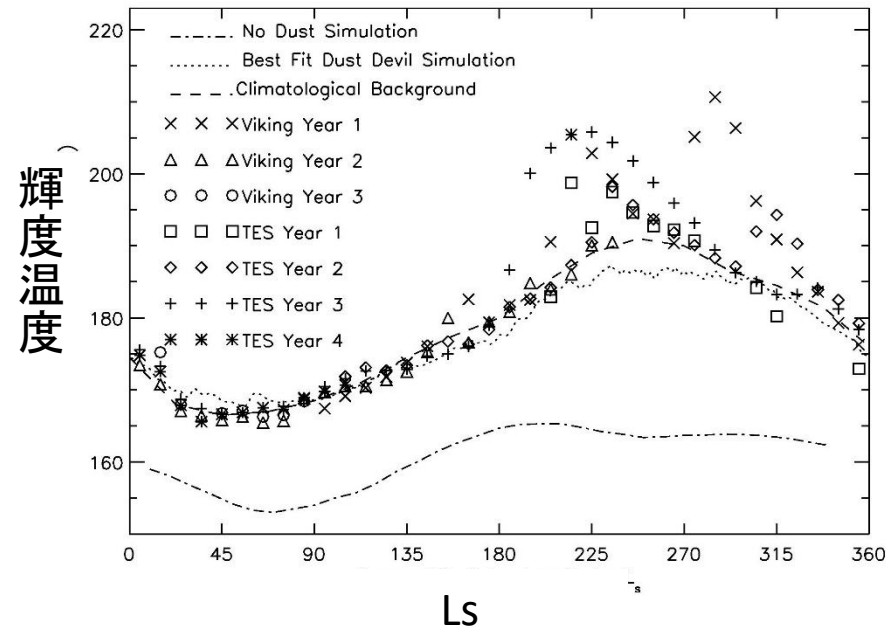
$9 \mu\text{m}$  におけるダストの光学的深さ (Smith, 2004)

# 火星 GCM を用いたダスト循環の計算

- ダスト循環過程を考慮した計算例
  - Newman et al. (2002), Kahre et al. (2006), Basu et al. (2004, 2006), Ogohara et al. (2011), Mulholland et al. (2013)
- モデルで考慮しているダスト循環過程
  - ダスト巻き上げ
    - 風応力によるダスト巻き上げ
    - ダストデビルによるダスト巻き上げ
  - 乱流混合
  - 移流
  - 重力沈降

# 過去の研究例:1

- Basu et al. (2004)
  - GFDL Mars GCM にダスト循環過程のスキームを実装し、ダストの輸送実験を実行
  - ダストデビルによる巻き上げが背景場のダストを維持し、ダストがない場合に比べて高い温度を保っていると主張
  - ダストデビルによるダスト巻き上げフラックスがどのように決まっているかには言及していない
    - 例えば、ダストデビルによるダスト巻き上げフラックスと大気場がどのような関係にあるか等

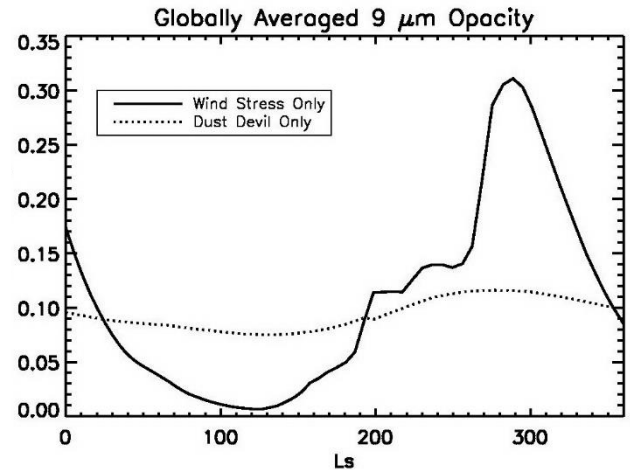


15 $\mu\text{m}$  波長帯における輝度温度の季節変化。  
点線がダストデビルを用いた計算結果。  
一点鎖線がダストデビルを用いなかった計算結果  
破線が観測結果に合わせた大気温度 (Basu et al., 2004).

# 過去の研究例:2

- Kahre et al. (2006)
  - NASA Ames GCM にダスト循環過程のスキームを実装し, ダストの輸送実験を実行
  - 一年間でのダストデビルによるダスト巻き上げ量は風応力によるダスト巻き上げ量と同程度と主張
  - 大気場とダストフラックスとの詳細な関係については触れていない
    - 大気場がダストフラックスへどのように寄与をするかまでは議論していない

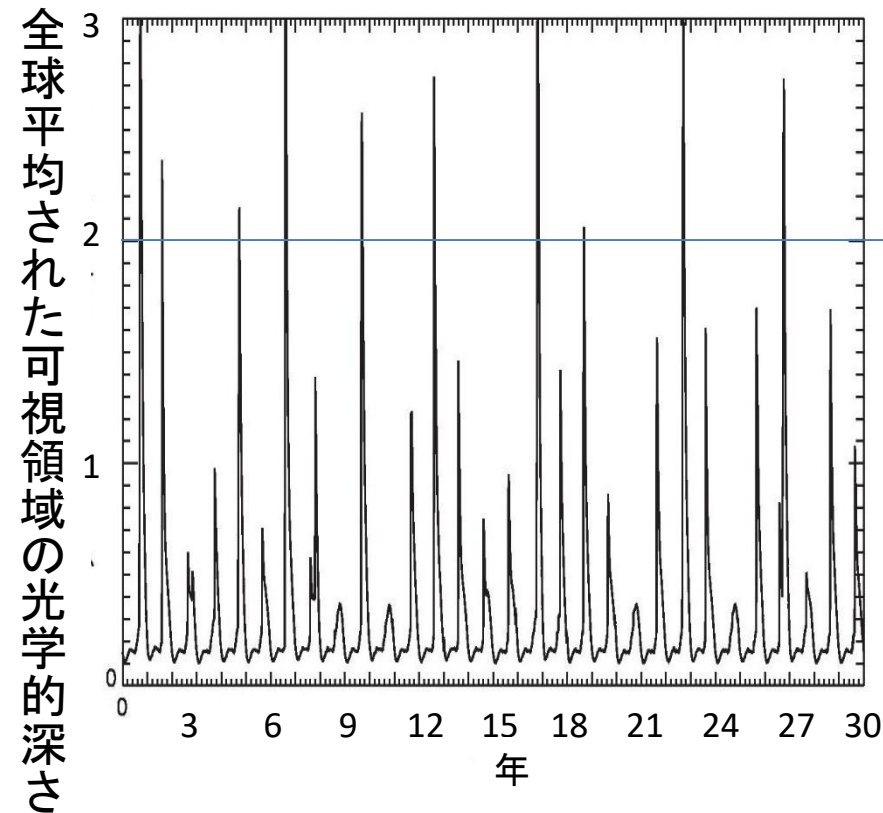
9  $\mu\text{m}$  における光学的深さ



全球平均された  $9\mu\text{m}$  の光学的深さ. 実線が風応力による巻き上げによる計算結果, 点線がダストデビルによる巻き上げによる計算結果 (Kahre et al., 2006).

# 過去の研究例:3

- Mulholland et al. (2013)
  - UKMGCM にダスト循環過程のスキームを実装し, ダストの輸送実験を実行
    - ダストの地表面密度の変化による巻き上げ率の変化を考慮
  - ダスト分布の年々変動を表現したと主張
    - 全球平均した可視領域の光学的深さが2を超える年が4-7年ごとに現れる
  - ダストデビルによる巻き上げによる年々変動への寄与は無視されている
    - ダストデビルによる巻き上げによるダストの面密度の変化は考えていない



全球平均されたダストの光学的深さ  
(Mulholland et al., 2013).

# 目的

- 大目標
  - 観測された火星のダスト分布の季節変動をモデルで表現し, それが起こるメカニズムについて議論したい
- 我々の現状
  - 我々の開発している大気大循環モデル DCPAM (高橋 他, 2015) にはダスト循環過程のスキームは実装されていなかった.
- この研究での目的
  - DCPAM にダスト循環過程のスキームを実装する
  - モデル内で, ダストデビルによるダスト巻き上げと大気場がどのような関係にあるかを理解する



# 本研究で行ったこと

1. DCPAM ヘダスト巻き上げパラメタリゼーションスキームを実装する
2. それを用いたダストフラックスの二つの診断実験を行う
  - 観測に基づく地形起伏を与えて, Smith et al. (2003) の観測結果, Kahre et al. (2006) の結果と比較
    - モデルの検証
  - 計算に与える地形起伏を変えた場合におけるダストデビルによる巻き上げフラックス診断実験
    - ダストフラックスに対する, 異なる地形の下での異なる大気場の影響を評価

# モデル

- DCPAM: (<http://www.gfd-dennou.org/arch/dcpam/index.htm>)
  - 力学過程
    - 3次元球面プリミティブ方程式
  - 放射過程
    - Takahashi et al. (2003, 2006)
      - CO<sub>2</sub> とダストの効果を考慮
  - 乱流過程
    - Mellor and Yamada (1982) level 2.5
  - 地表面過程
    - Beljaars and Holtslag (1991)
  - 乾燥対流調節
    - Manabe et al. (1965)

# 風応力によるダスト巻き上げスキーム

$$F_d = \max \left[ 0, \alpha_k R \tau^2 \left( \frac{\tau - \tau^*}{\tau^*} \right) \right]$$

$F_d$  : 地表面ダストフラックス  
 $\alpha_k$  : 効率因子  
 $R$  : 粒径分布によって決まる係数  
 $\tau$  : 地表面応力  
 $\tau^*$  : ダストが巻き上がる臨界応力

- モデルで解像された風応力によるダスト巻き上げ (Kahre et al., 2006; Haberle et al., 2003)
  - 地球観測の結果 (Westphal et al., 1987) に基づいている

# ダストデビルによる ダスト巻き上げスキーム

$$F_d = \max [0, \alpha_d \eta S]$$

$$\eta = 1 - \frac{(p_s^{\chi+1} - p_{top}^{\chi+1})}{(p_s - p_{top})(\chi + 1)p_s^\chi}$$

$\alpha_d$  : 効率因子

$\eta$  : 対流を熱機関としたときの熱効率

$S$  : 地表面顕熱フラックス

$p_s$  : 地表面気圧

$p_{top}$  : 対流境界層の上端の気圧

$\chi$  : 定圧比熱あたりの気体定数

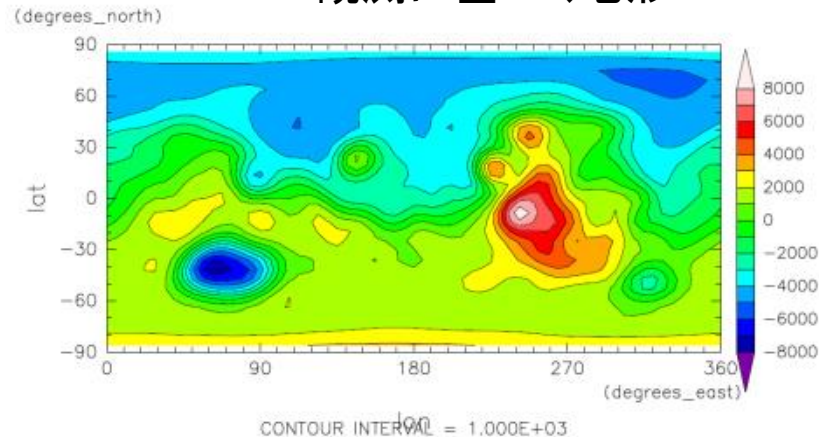
- モデルで解像できないダストデビルによる巻き上げ (Newman et al., 2002)
  - ダスト巻き上げフラックスはダストデビルを熱機関と仮定して, その熱機関がする仕事に比例する (Rennó et al., 1998)

# モデルの検証

# 計算設定

## 観測に基づく地形

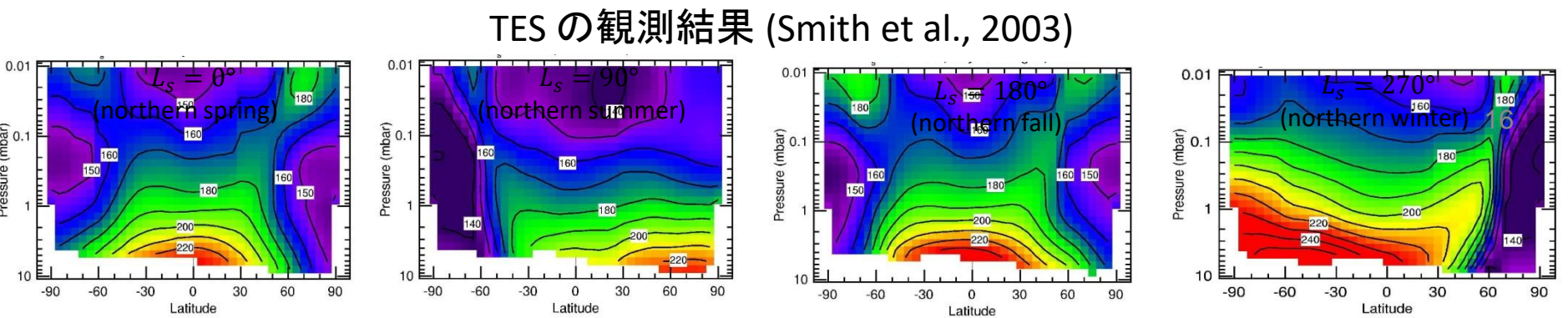
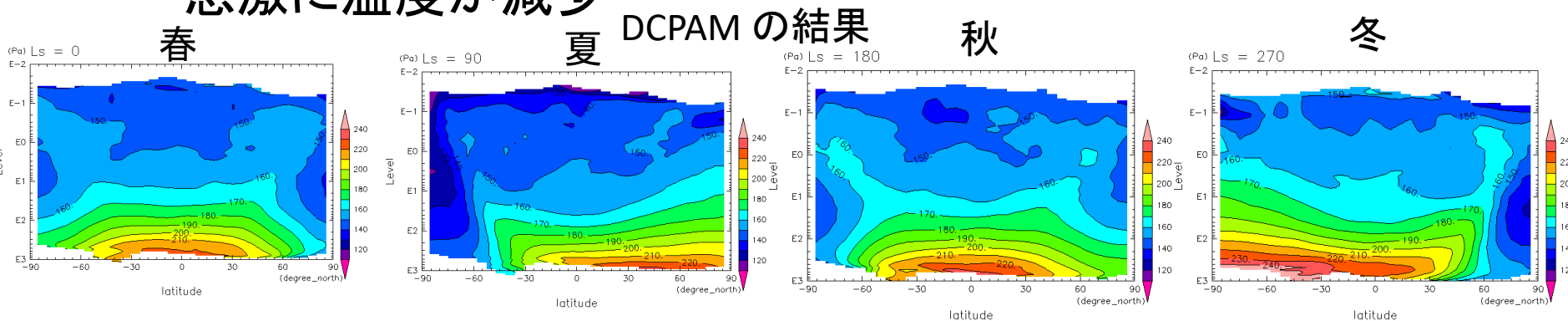
- 放射計算に与えるダスト空間分布
  - 水平方向に一様, 時間方向に一定
  - 地表面における波長  $0.67 \mu\text{m}$  に対する光学的深さ: 0.3
  - Conrath (1975), Pollack et al. (1990), Forget et al. (1999) に基づく鉛直分布
- ダスト巻き上げパラメータ
  - Kahre et al. (2006) に基づく
  - $\alpha_k = 1.0 \times 10^{-1}$ ,  $\tau^* = 2.25 \times 10^{-3}$ ,  
 $R = 2.3 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha_d = 1.0 \times 10^{-10}$
- 地表面特性 (地形高度, 熱慣性, 地表面アルベド)
  - マーズグローバルサーベイヤーの観測に基づく
- 解像度: T21L36
  - 緯度経度約  $5^\circ$  格子
  - 鉛直層数 36 層
- 初期条件
  - 静止等温大気 (200 K) に初期擾乱
- 積分時間
  - 4 火星年: そのうちの最後の 1 年を解析に使用



# 観測結果との比較

# 観測結果との比較:温度子午面分布

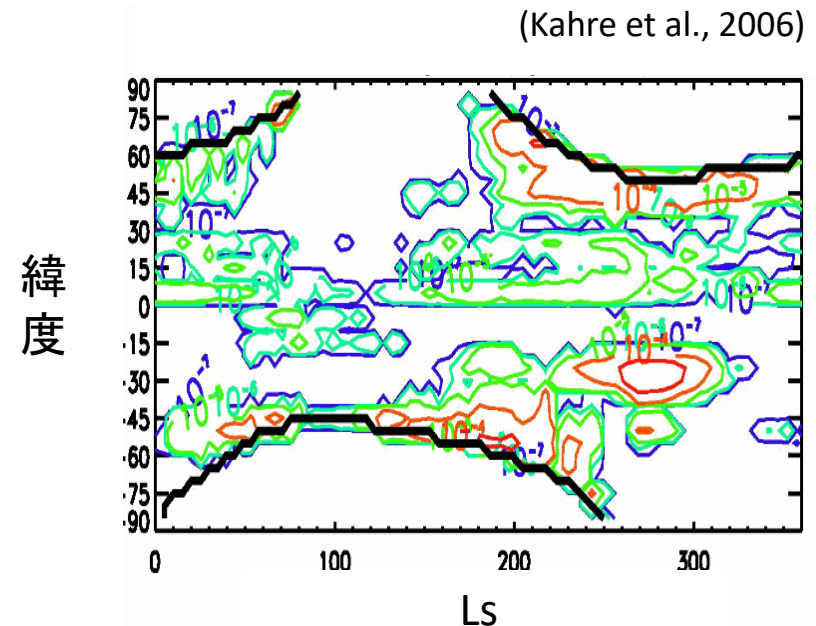
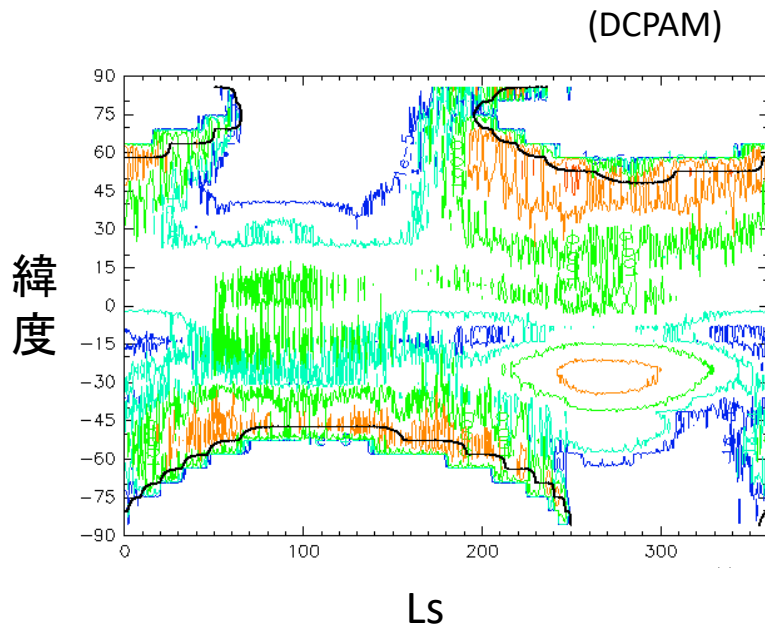
- 観測された温度子午面分布を表現できた
  - 春分と秋分で赤道を軸に対称で極に行くほど温度が減少
  - 夏至と冬至で夏半球と冬半球で非対称. 冬半球の中緯度で急激に温度が減少





Kahre et al. 2006 の結果との比較

# 風応力によるダスト巻き上げフラックス

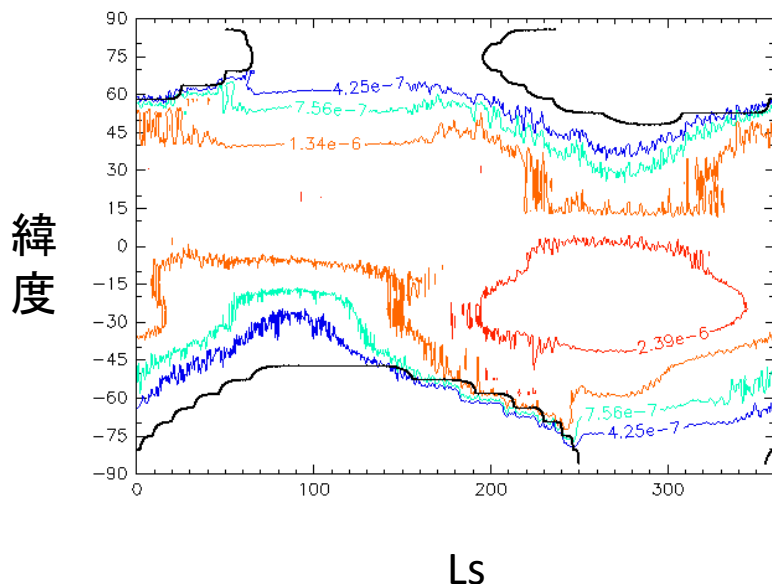


東西平均した風応力によるダスト巻き上げフラックスの季節変化  
(※左図は右図の $10^2$  倍の等値線を用いている)

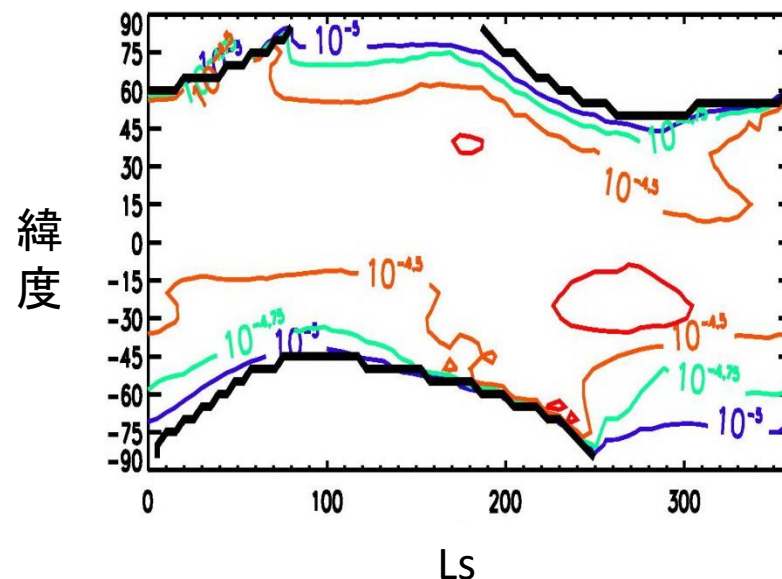
- Kahre et al. (2006) の季節変化パターンとほぼ同様
  - 極冠の縁および北半球の秋から冬にかけて  $30^{\circ}\text{S}$  付近で強い巻き上り
- DCPAM の方がオーダーで 100 倍程度大きい
  - 摩擦速度に直すと高々2倍程度の差

# ダストデビルによるダスト巻き上げフラックス

(DCPAM)



(Kahre et al., 2006)



東西平均したダストデビルによるダスト巻き上げフラックスの季節変化  
(※左図は右図の  $4.25 \times 10^{-2}$  倍の等値線を用いている)

- Kahre et al. (2006) の季節変化パターンとほぼ同様
  - 北半球の秋から冬にかけて  $30^{\circ}\text{S}$  付近で強い巻き上がり
  - 極冠を除く全緯度帯で巻き上がり
- 計算結果の方がオーダーで 100 倍程度小さい
  - Kahre et al. (2006) が間違っている?
  - 我々の結果は典型的なダストフラックスの見積もりと同程度

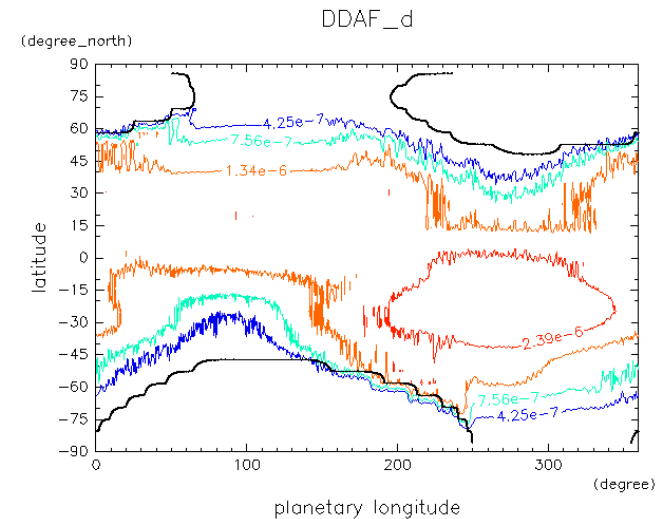
# Kahre et al. (2006) との比較まとめ

- 風応力によるダスト巻き上げ
  - 季節変動のパターンは大まかに整合的
  - 計算結果の方がオーダーで 100 倍程度大きい
    - 境界層の表現の違い?
    - 摩擦速度に直すと高々2倍程度の差
- ダストデビルによるダスト巻き上げ
  - 季節変動のパターンは大まかに整合的
  - 計算結果の方がオーダーで 100 倍程度小さい
    - Kahre et al. (2006) が間違っている?
    - 典型的なダストフラックスの見積もりと比べてみると同程度

地形起伏を変えた場合のダストデビ  
ルによるダストフラックスの違い

# ダストデビルによるダストフラックス

- ダストデビルによるダストフラックスの東西平均分布がどのように決まるか理解したい
  - なぜ北半球の秋から冬にかけて  $25^{\circ}\text{S}$  付近が北半球の春から夏の  $25^{\circ}\text{N}$  よりも大きくなっているのか?
  - ダストデビルによるダストフラックスを決めている顕熱フラックスと熱効率がどのように決まるか考えなければならない



# 顕熱フラックスと熱効率

- ダストデビルによるダストフラックスは顕熱フラックスと熱効率の掛け合わせ
  - 平均量の議論だけでは不十分。  
ローカルタイムでの量で議論する必要がある

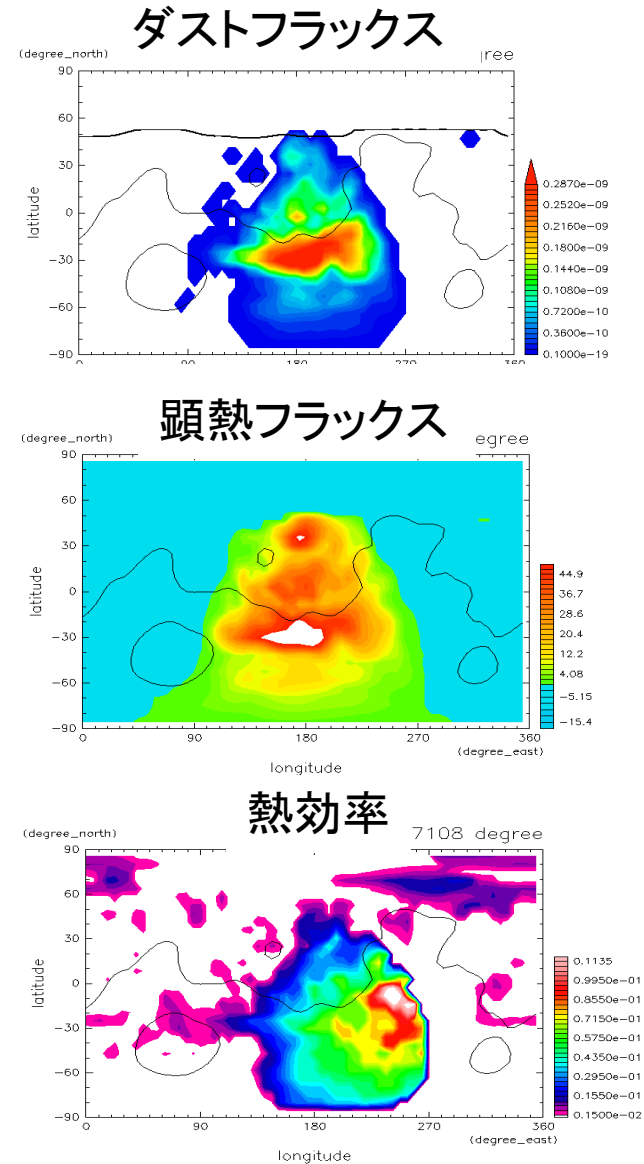
$$\overline{F_d} = \alpha(\overline{S\eta} + \overline{S'\eta'})$$

$F_d$  : ダストデビルによる巻き上げフラックス  
 $\alpha$  : 効率因子  
 $S$  : 地表面顕熱  
 $\eta$  : 熱効率

上線は東西平均を表し、「'」は東西平均からのずれを表す

# LS=270° 付近の時間変化

- ダストデビルによるダストフラックス, 顕熱フラックス, 熱効率は複雑な水平構造をしている
  - 地形起伏によってダストフラックスの水平構造は影響を受けているように見える
- 複雑なので単純な地形起伏を与えたものと比べて考える

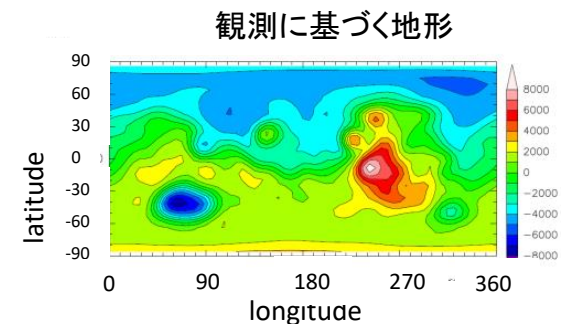
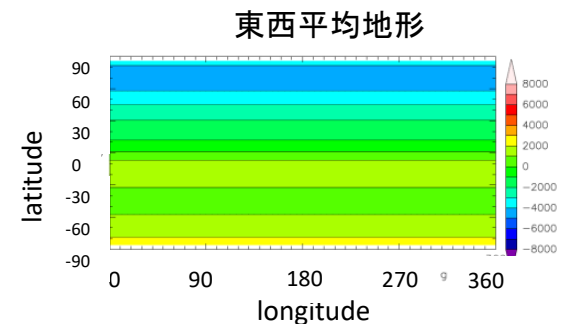
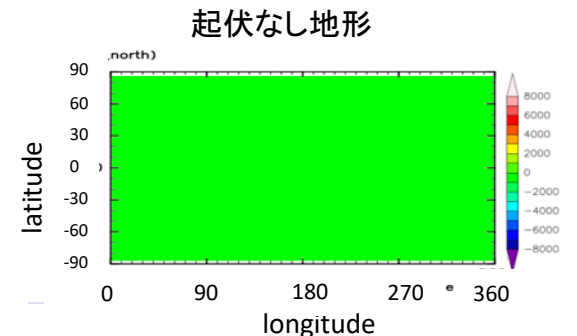




# 与える地表面特性

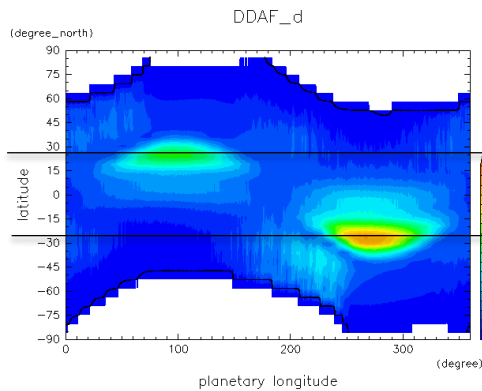
観測に基づく地形, 起伏なし地形, 東西平均地形

- 与える地形起伏
  - 起伏なし地形
  - 南北方向にのみ起伏がある地形
    - 東西平均地形
- 与える熱慣性とアルベド
  - 一定の地表面熱慣性
  - 一定の地表面アルベド
  - 地形起伏を変えた場合の効果に注目するため

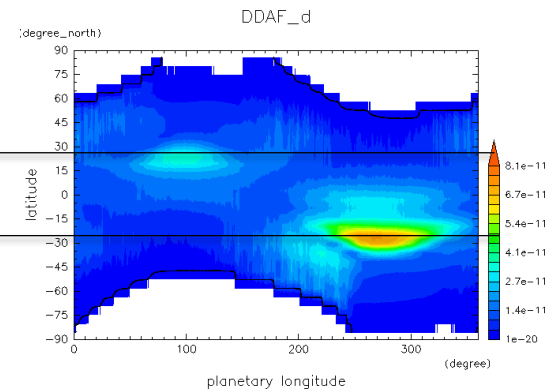


# ダストデビルによるダストフラックスの東西平均された季節変化

[起伏なし地形]



[東西平均地形]



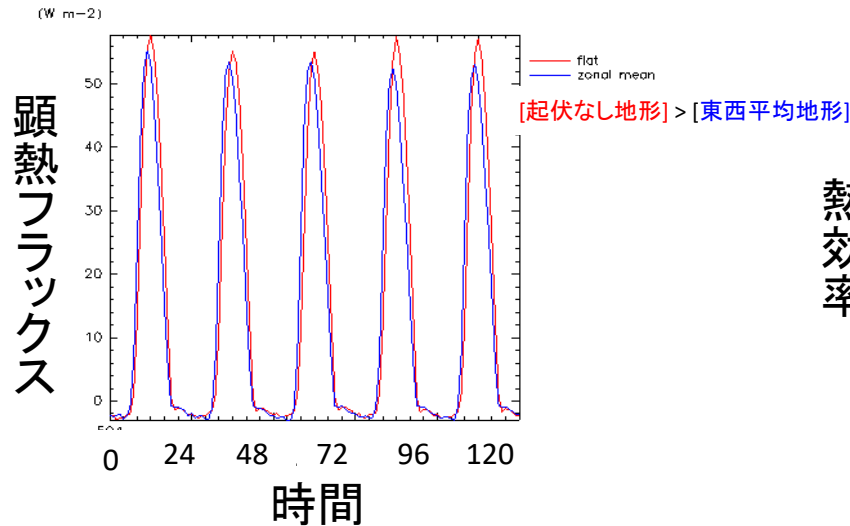
- $L_s=90^\circ$  付近: [起伏なし地形] > [東西平均地形]
- $L_s=270^\circ$  付近: [東西平均地形] > [起伏なし地形]

**南北方向に起伏がある場合とない場合の比較**

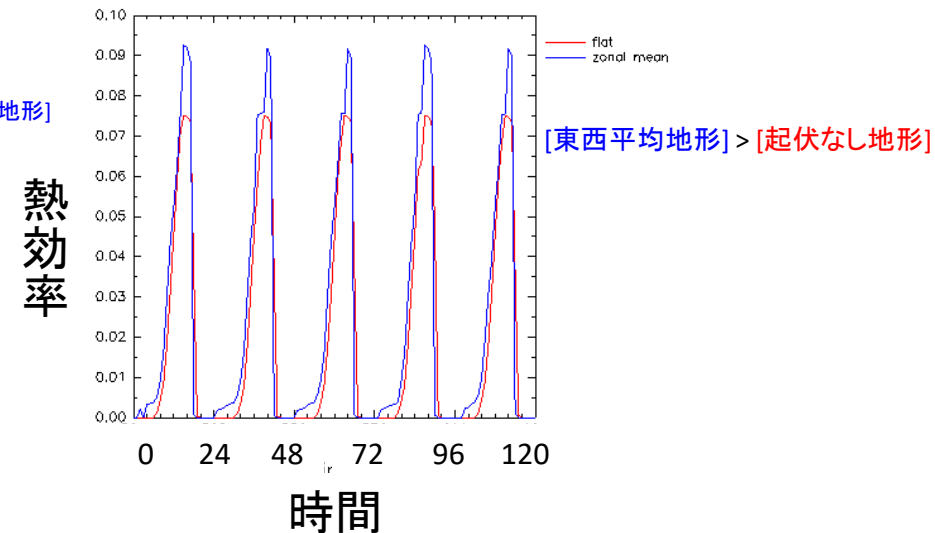
25°S 付近

# 5日間の顕熱フラックスと熱効率の時間変化 ( $L_s=270^\circ$ , $25^\circ S$ 付近)

## 顕熱フラックス



## 熱効率



- 顕熱フラックス: [起伏なし地形] > [東西平均地形]
- 熱効率: [東西平均地形] > [起伏なし地形]

# 顕熱フラックスと熱効率を決める要因

- 顕熱フラックスは最下層の不安定度と地表面気圧に依存する
  - 安定度が小さく, 地表面気圧が大きいほど顕熱フラックスが大きい
  - 対流が起きているところは安定度が小さい

$$S = \rho C_h |v| (T - T_s)$$

$\rho$  : 地表面密度 (地表面気圧に依存)  
 $C_h$  : バルク係数 (不安定度に依存)  
 $v$  : 最下層速度  
 $T$  : 最下層温度  
 $T_s$  : 地表面温度

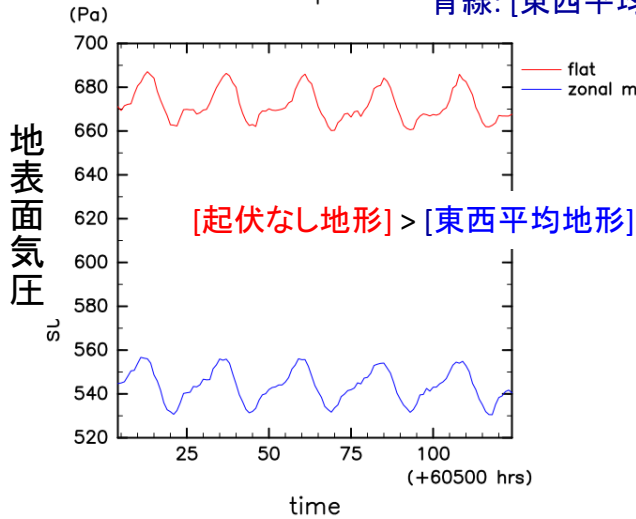
- 熱効率は対流層の厚さに依存する
- よって, 以降は対流調節の加熱率と地表面気圧を調べる

# 大気加熱率と地表面気圧

## 地表面気圧の時間変化

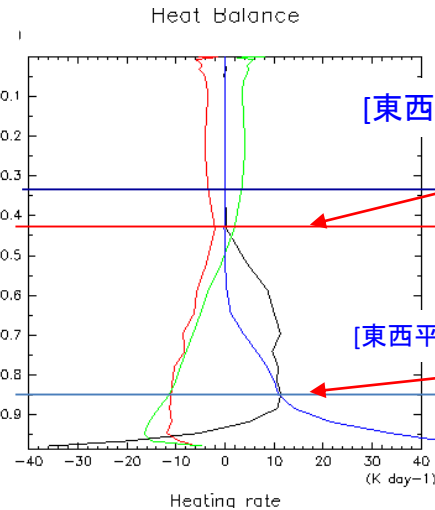
surface pressure

赤線: [起伏なし地形]  
青線: [東西平均地形]

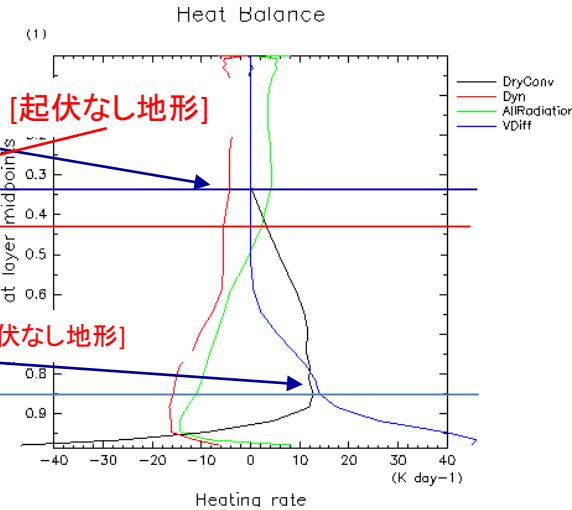


## 起伏なし地形の加熱率

地表面気圧で規格化した気圧



## 東西平均地形の加熱率



### ● 顕熱フラックスの差の原因

- 地表面気圧: [起伏なし地形] > [東西平均地形]
- 大気の安定度~対流調節の加熱率: [起伏なし地形] > [東西平均地形]
- 結果的に相殺して差がない

### ● 熱効率の差の原因

- 対流層の厚さ: [東西平均地形] > [起伏なし地形]

- 東西平均地形において中層で大循環による冷却と対流調節による加熱が大きい

- 地形の差による大循環による冷却が起こっている高さの差がダスト巻き上げフラックスの差になっている

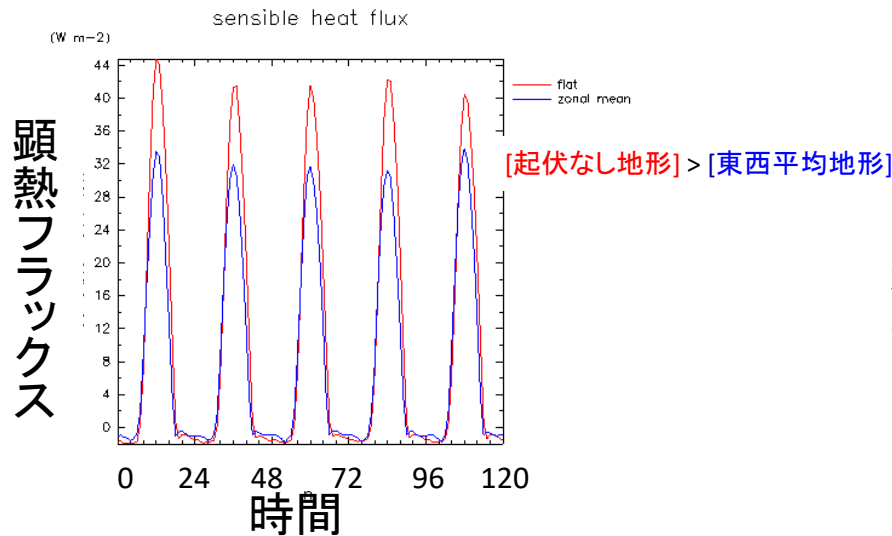
黒線: 対流調節の加熱率  
赤線: 大循環の加熱率  
緑線: 放射の加熱率  
青線: 混合の加熱率

25°N 付近

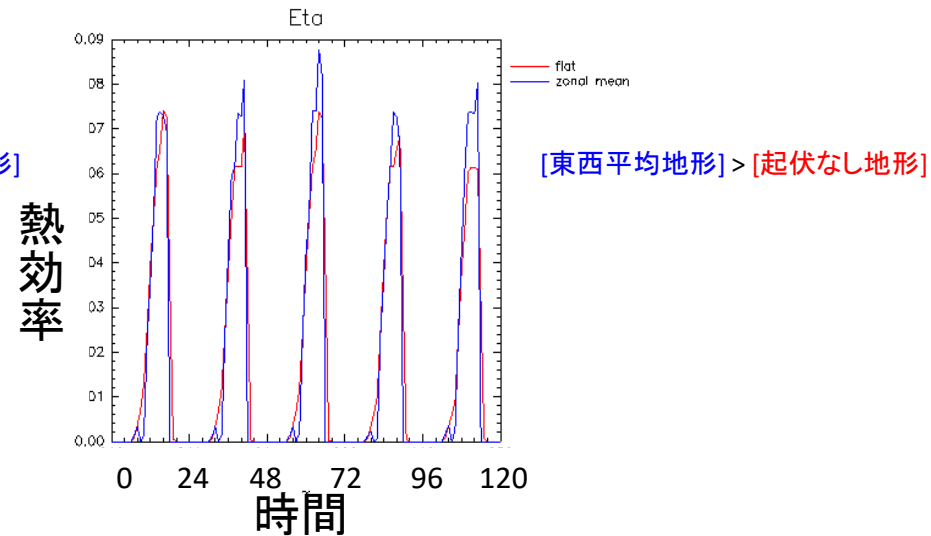


# 5日間の顕熱フラックスと熱効率の時間変化 ( $L_s=90^\circ$ , $25^\circ\text{N}$ 付近)

## 顕熱フラックス



## 熱効率



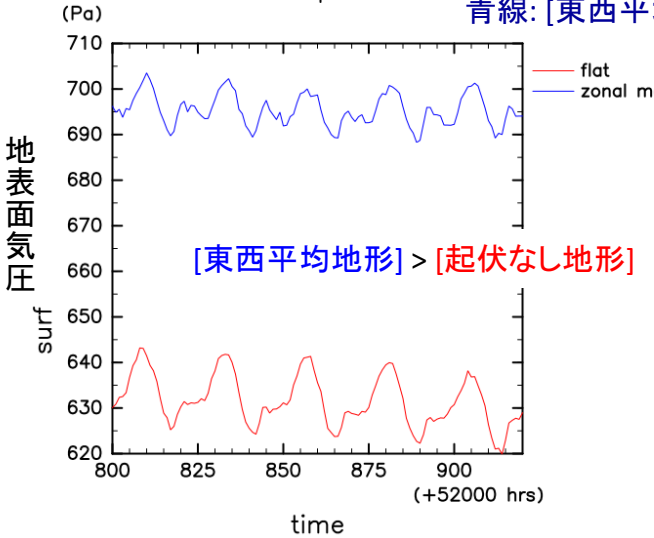
- 顕熱フラックス: [起伏なし地形] > [東西平均地形]
- 熱効率: [東西平均地形] > [起伏なし地形]

# 大気加熱率と地表面気圧

## 地表面気圧の 時間変化

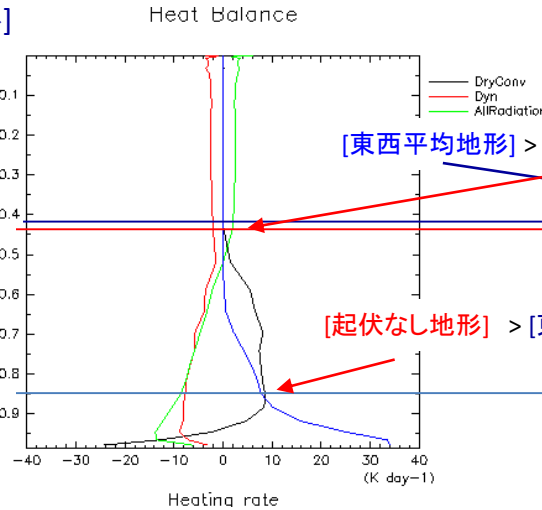
surface pressure

赤線: [起伏なし地形]  
青線: [東西平均地形]

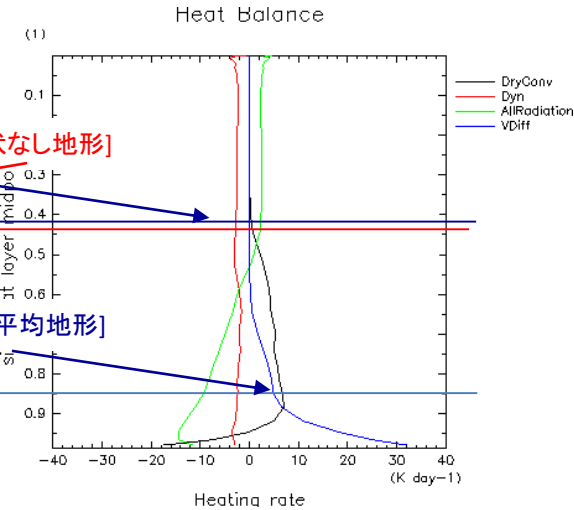


## 起伏なし地形の加熱率

地表面気圧で規格化した気圧



## 東西平均地形の加熱率



黒線: 対流調節の加熱率  
赤線: 大循環の加熱率  
緑線: 放射の加熱率  
青線: 混合の加熱率

## ● 顕熱フラックスの差の原因

- 地表面気圧: [東西平均地形] > [起伏なし地形]
- 大気の安定度～対流調節による加熱率: [東西平均地形] > [起伏なし地形]
  - 起伏なし地形において下層での大循環による冷却と対流調節による加熱が大きい
- 結果的に起伏なし地形の方が顕熱フラックスが大きい

## ● 熱効率の差の原因

- 対流層の厚さ: [東西平均地形] > [起伏なし地形]

- 地形の差による大循環による冷却率の強さの違いがダスト巻き上げフラックスの差になっている

# 起伏なし地形と東西平均地形の比較のまとめ

- 起伏なし地形と東西平均地形を用いて何がダストデビルによる巻き上げフラックスを決めているかを調べた

	LS=270° , 25°S	LS=90° , 25°N
東西平均ダストフラックス	[東西平均地形] > [起伏なし地形]	[東西平均地形] < [起伏なし地形]
効いている要因	熱効率	顕熱フラックス
理由	対流層の厚さが厚くなったため	下層で不安定になったため

- ハドレー循環が強いほど下層が不安定である
- ハドレー循環の高さが高いほど対流層が厚い
- 南北地形起伏の有無でハドレー循環が強くなるか、高さが高くなると、それに伴ってダストフラックスも大きくなる

# まとめ

- DCPAM にダスト循環過程スキームを実装した
  - 季節変化のパターンは一致する.
- 起伏なし地形と東西平均地形を与えた場合でダストデビルによる巻き上げフラックスを比較した
  - ダストデビルによる巻き上げフラックスは下層での大循環強度と大循環の高さに影響を及ぼされるところと思われる.

- $\frac{Dq}{Dt} + \vec{v} \cdot \text{grad } q = g$   
 $\frac{DF_v}{Dp} + G$
- $G = g \frac{DF_g}{Dp}$
- $F_g = w \text{ [m/s]} q * \rho \text{ [kg /m}^3] = \text{[kg / (m}^2 \text{ s}^1)]$