

# 惑星大気大循環モデルの構築の現状

---

高橋芳幸(神戸大学),  
地球流体電脳倶楽部 dcmode1 プロジェクト



# 金星, 地球, 火星の東西風



金星

全ての緯度で東風(自転方向)  
スーパーローテーション

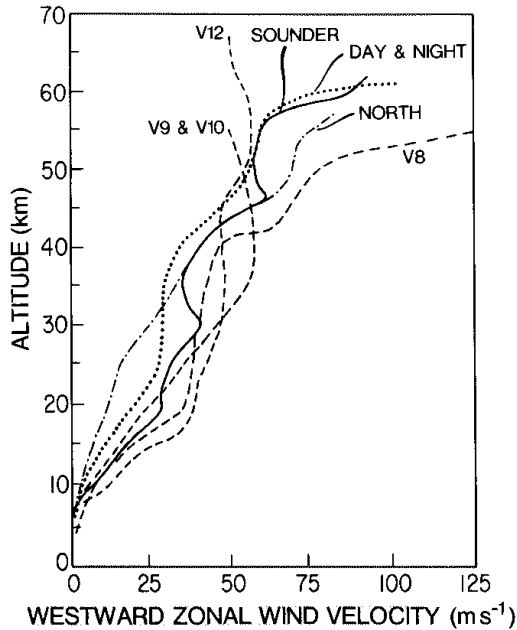


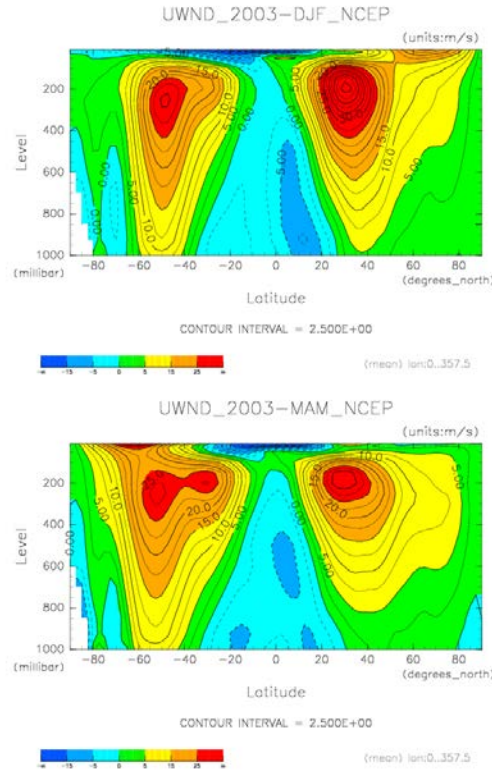
Fig. 9. Vertical profiles of east-to-west wind speed from Doppler tracking of Veneras 8, 9, 10, and 12 (V8, V9, V10, V12) and interferometric tracking of Pioneer Venus probes (from Schubert et al. 1980a).

Schubert, 1983: in Venus,  
Arizona Press, 684, Fig. 9.



地球

両半球中緯度西風  
赤道東風

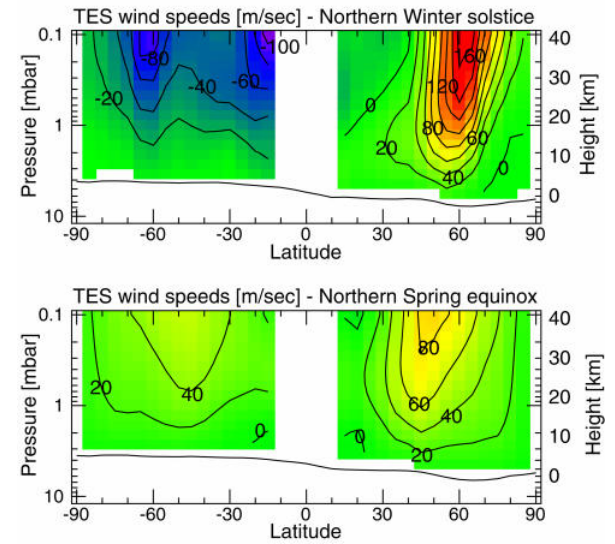


dcchart project,  
<http://www.gfd-dennou.org/library/dcchart/>



火星

冬半球中高緯度西風,  
夏半球中高緯度東風



# (世間の)惑星大気モデルの現状: 金星大気シミュレーション

- 金星相互比較実験
  - 様々なモデルを用いて、似たような条件で実験
  - 得られる金星スーパーローテーションの構造はモデルによって大きく異なる。
- より現実的な条件(放射伝達)での計算も、現実のスーパーローテーションを再現できていない。
- 中身の分かっている自分達のモデルを持つことで、詳細を把握したうえで現象を調査。

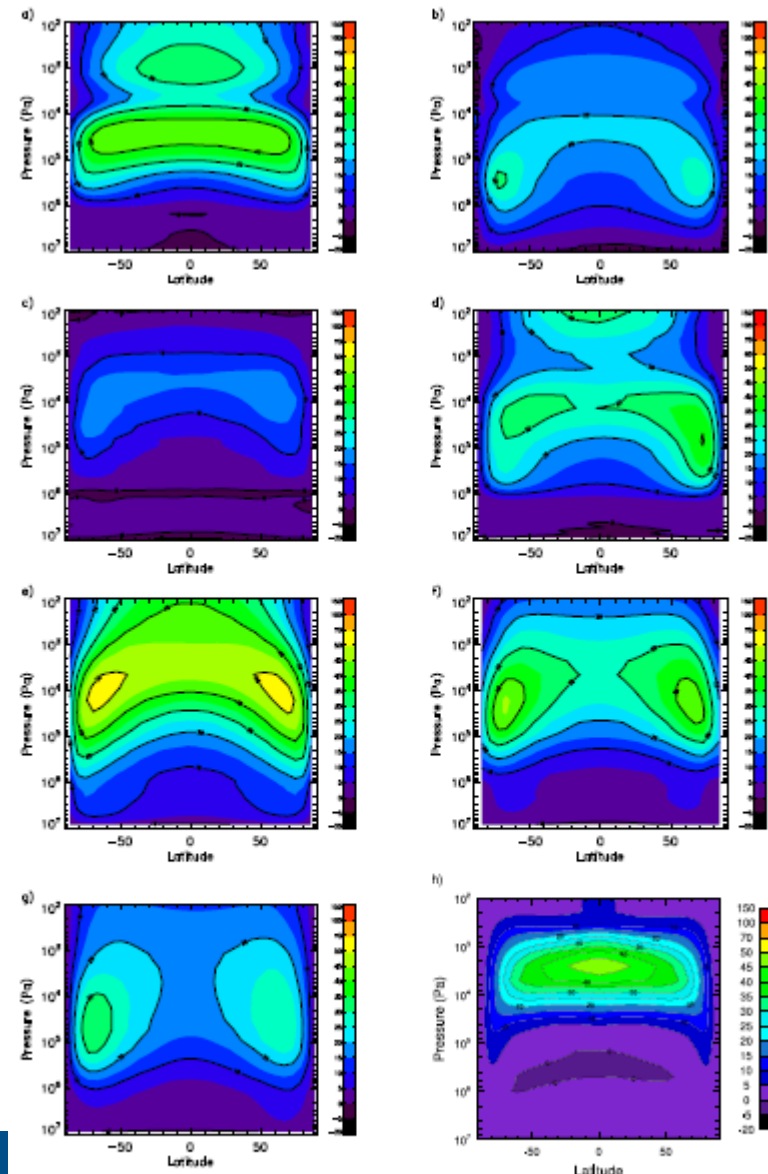
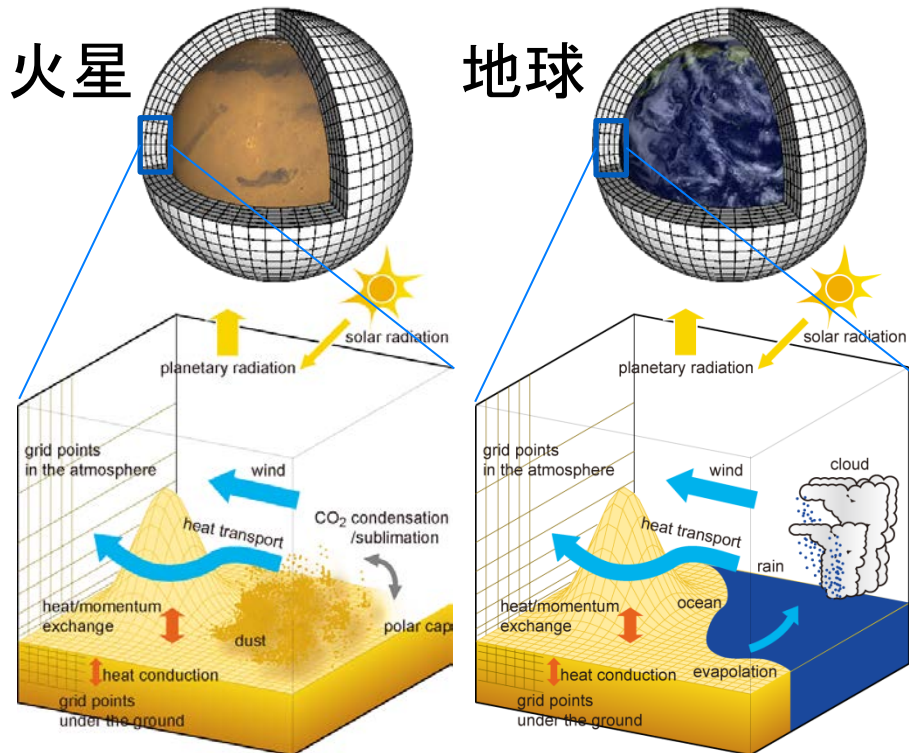


Fig. 2 Zonally and temporally averaged zonal wind fields obtained in all the baseline simulations. Unit is m/s. The first column is spectral models: (a) CCSR, (c) OU, (e) LR10-s. The

# モデル開発: モデル概要 その1

## dcmodel プロジェクトの一部としての 惑星大気大循環モデル dcpam

(<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>)



- 惑星全球の温度, 風速, 密度分布を計算
- モデル構成
  - 移流過程
    - プリミティブ方程式系
      - 鉛直静水圧近似
  - 放射過程
    - 地球 / 火星放射モデル
    - 灰色大気
    - 新しいモデルを開発中(大西 他)
  - 乱流混合過程
  - 凝結過程
  - 地表面過程
- spmodel, gtool5 使用

# モデル開発: モデル概要 その2

## 移流過程: プリミティブ方程式

方程式系は, 静水圧平衡を仮定し, 鉛直方向に  $\sigma = p/p_s$  座標を用いたプリミティブ方程式系.

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \dot{\sigma} \frac{\partial \vec{u}}{\partial \sigma} - f \vec{k} \times \vec{u} - \nabla \Phi + \frac{RT}{p_s} \nabla p_s + \vec{F}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) T - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \frac{\kappa T}{p} \frac{dp}{dt} + Q$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = -\nabla \cdot (p_s \vec{u}) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (p_s \dot{\sigma})$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{u} \cdot \nabla) q - \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} + S_q$$

境界条件:

$$\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad \text{at } \sigma = 0, 1$$

$\vec{u}$  は水平風速,  $p$  は気圧,  $p_s$  は惑星表面気圧,  $T$  は温度,  $q$  は物質の混合比,  $\Phi$  はジオポテンシャル,  $\kappa = R/C_p$ ,  $R$  は気体定数,  $C_p$  は定圧比熱,  $\vec{F}$ ,  $Q$ ,  $S_q$  はそれぞれ摩擦, 非断熱加熱, 物質の生成・消滅である.

# モデル開発: モデル概要 その3

## 放射過程

$$Q_{rad} = \frac{g}{C_p} \frac{\partial F_{rad}}{\partial \sigma}, \quad F_{rad} = \int_{\lambda_s}^{\lambda_e} F_{rad,\lambda} d\lambda$$

散乱のない大気に対する放射伝達方程式:

$$F_{rad,\lambda}(\tau) = \pi B_\lambda(\tau_s) \mathfrak{S}(\tau_s, \tau) - \int_0^{\tau_s} \pi B_\lambda(\tau) \frac{\partial \mathfrak{S}(\tau', \tau)}{\partial \tau'} d\tau'$$

射出のない散乱吸収大気に対する放射伝達方程式

$$\frac{\partial F_{rad,\lambda}^+}{\partial \tau} = \gamma_1 F_{rad,\lambda}^+ + \gamma_2 F_{rad,\lambda}^- - S^+(\tau)$$

$$\frac{\partial F_{rad,\lambda}^-}{\partial \tau} = \gamma_2 F_{rad,\lambda}^+ + \gamma_1 F_{rad,\lambda}^- + S^-(\tau)$$

$$S^+(\tau) = \gamma_3 \pi F_s \omega_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right), \quad S^-(\tau) = \gamma_4 \pi F_s \omega_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right)$$

$\tau$  は光学的厚さ,  
 $\mathfrak{S}(\tau', \tau)$  は  $\tau', \tau$  間の透過率,  $F^+, F^-$  はそれぞれ上向き, 下向きフラックス,  $\gamma_{1,2,3,4}$  は係数 (詳細は, 例えば, Toon et al. (1989) を参照のこと),  $\mu_0, F_s$  は太陽天頂角の余弦, 太陽放射フラックスであり,  $\omega_0$  は一次散乱アルベドである.



# dcpam による計算例 その 1: 金星, 地球, 火星計算



金星  
(簡単強制計算)

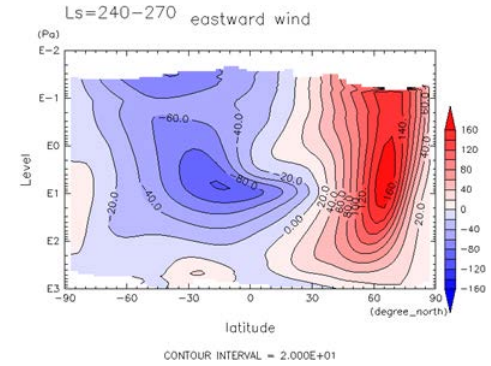
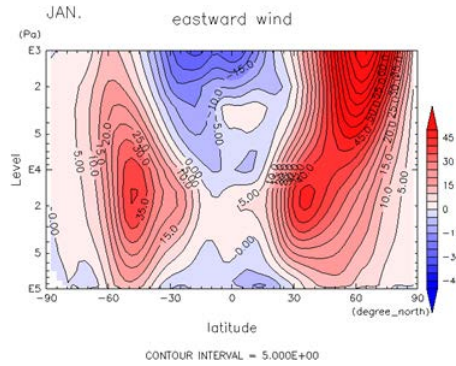
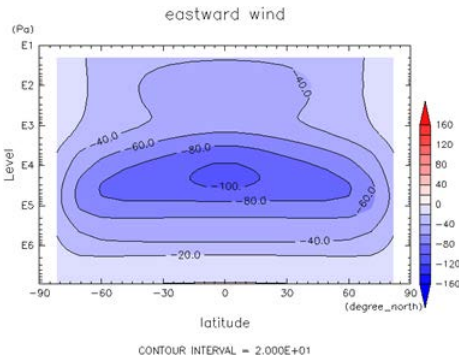


地球

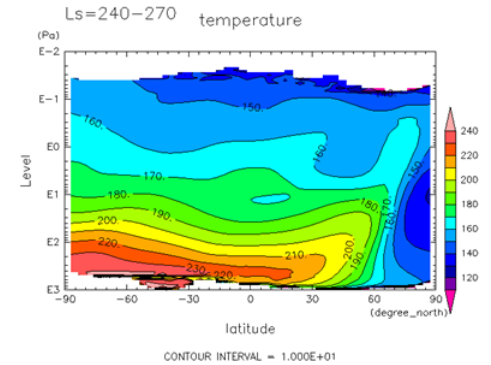
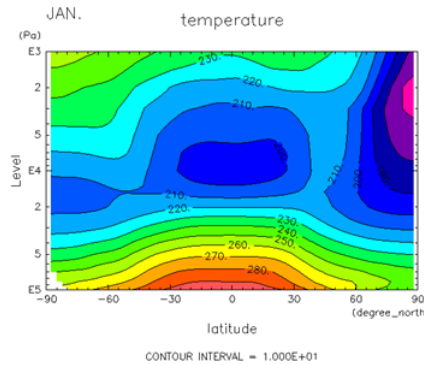
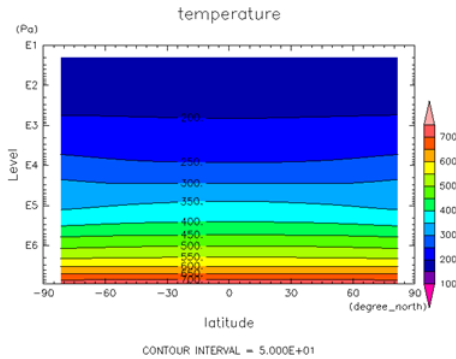


火星

東西風



温度



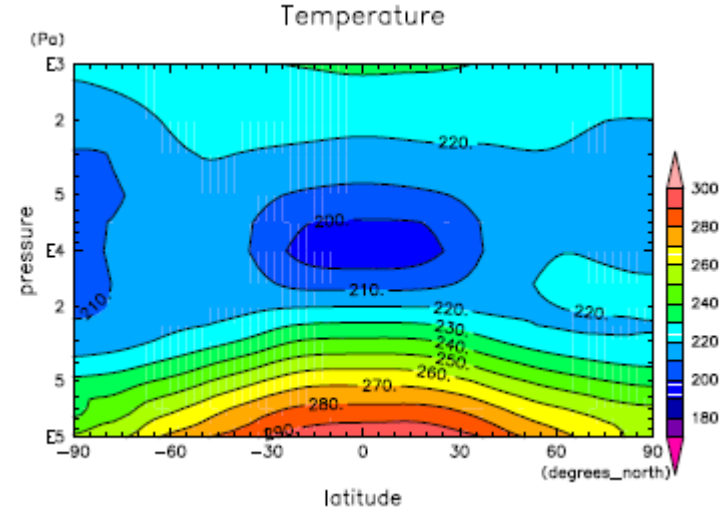
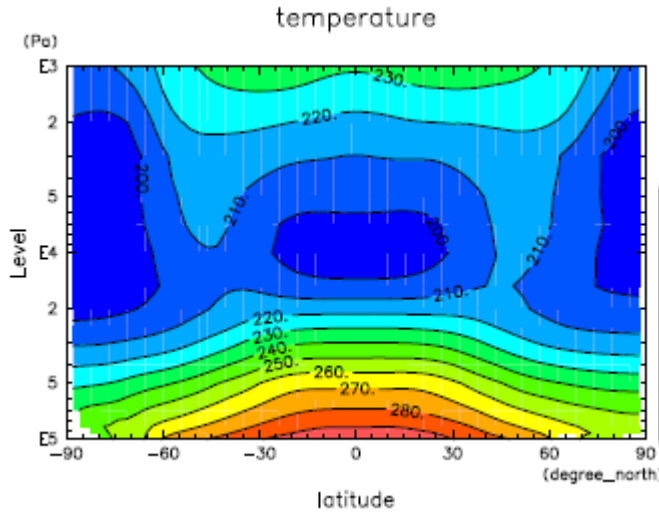
注意: 色の付け方と縦軸は図によって異なる。

# dcpam による計算例 その 2: 地球計算と観測との比較

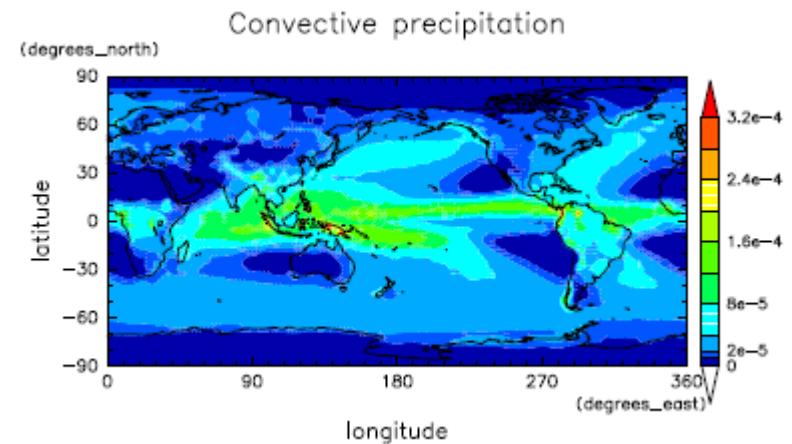
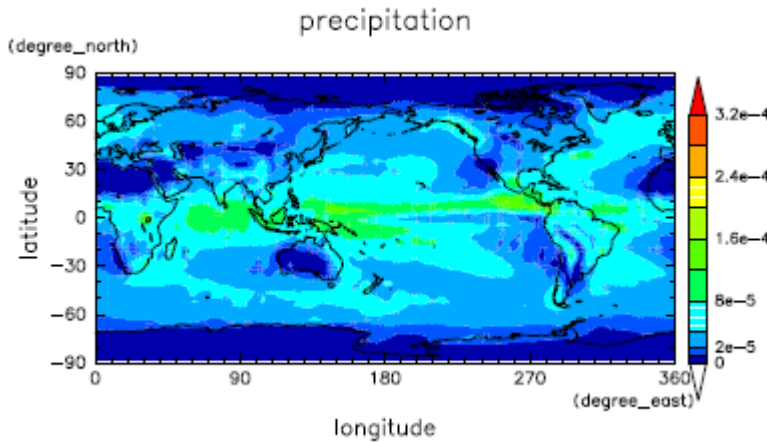
モデル

“観測” (ECMWF ERA40)

年平均  
大気温度



年平均  
降水量

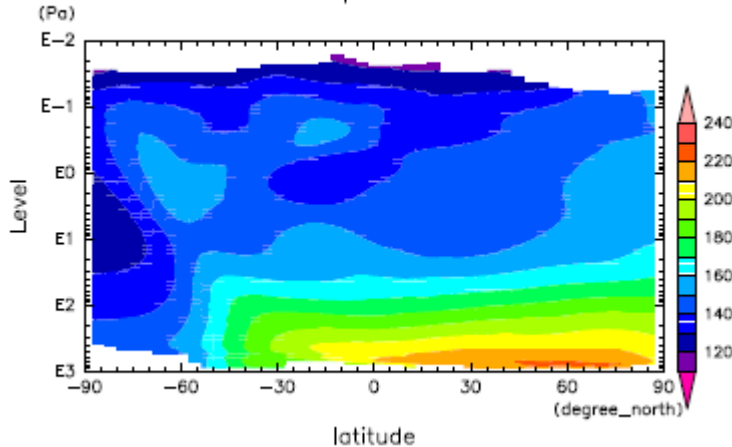




# dcpam による計算例 その 3: 火星計算と観測との比較

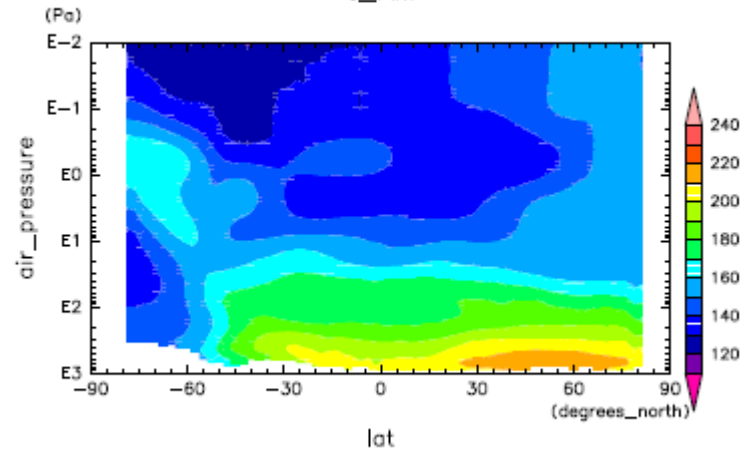
## モデル

Ls=60-90 temperature



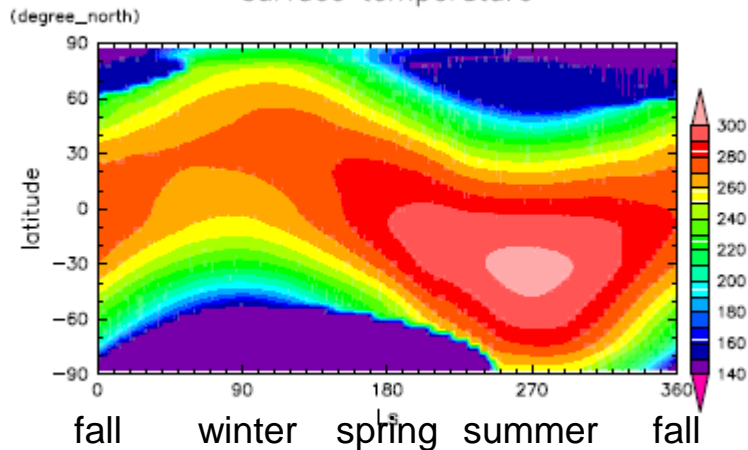
## 観測

Ls=60-90 t\_AM

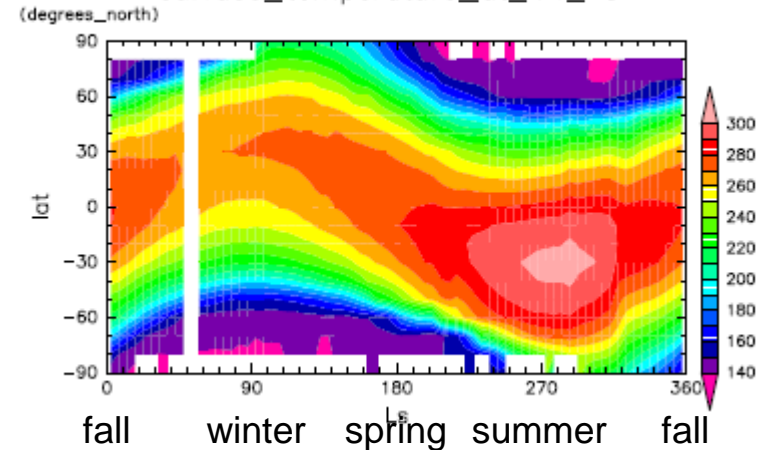


03 LST,  
北半球の夏  
における  
大気温度

spring summer fall winter spring  
surface temperature



spring summer fall winter spring  
surface\_temperature\_at\_14\_LST

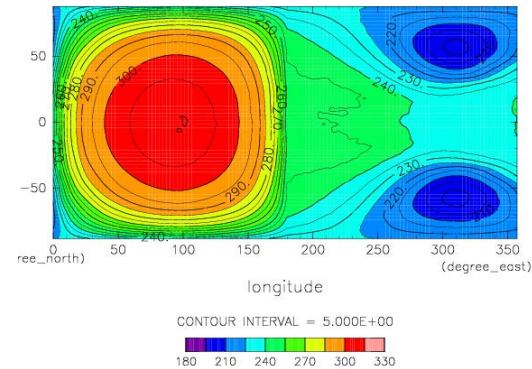


14 LST  
における  
地表面温度

# dcpam による計算例 その 4: 仮想惑星計算, 理想条件計算

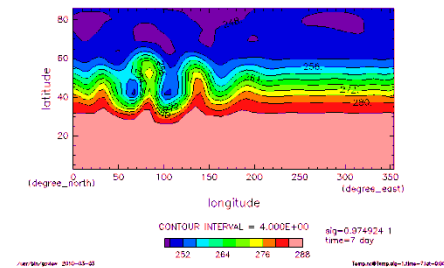
- 仮想惑星の計算
  - 水惑星計算
  - 同期回転惑星の計算
- 理想的条件における数値計算
  - 強制なし計算
    - 傾圧不安定波動計算 (Polvani et al., 2004)
  - 力学コア実験 (Held and Suarez, 1994)

## 同期回転惑星の計算



Time mean Surface temperature, T42L22 (石渡 他)

## 傾圧不安定波動計算



Temperature at lowest level at 7th day, T21L20

# まとめと今後

- 様々な惑星の大気大循環構造を調べることを目指して、薄い大気を持つ惑星のための大気大循環モデルを構築している。
- 現在のモデルは、地球、火星の観測される大気構造をそこそこ表現するものにはなってきている。
- このモデルは、系外惑星を想定した惑星の循環構造や熱収支の調査にも使われつつある(石渡 他)。
- いずれ新たな放射伝達モデル(大西 他)を導入し、系外惑星大気の研究にも使えるようにしていきたい。
- また、現状のモデルは特に雲の扱いなど、改善に向けて考察中。いずれは水以外の雲も扱える必要あり? その他には?