

# 大気大循環モデル DCPAMを用いた 金星的条件での大気の角運動量の解析

理学研究科惑星学専攻

服部蒼紀

# 目次

## ■はじめに

- 金星大気の特徴
- スーパーローテーションのメカニズム
- 大気大循環モデル

## ■Lebonnois et al. (2012)

- 概要
- 計算に使われたモデル
- 二つのモデルの力学コア
- プリミティブ方程式
- 強制と水平散逸
- 大気に及ぼすトルク
- トルクの分析の結果
- 数値的残差の定量的評価

## ■DCPAM 5

- 概要
- 力学コア

## ■まとめ

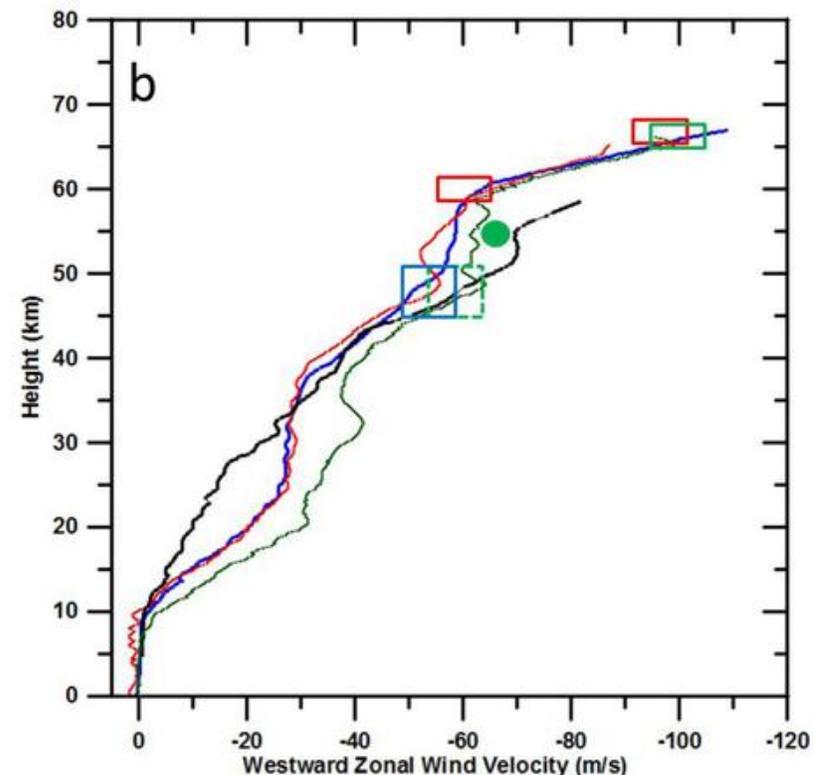
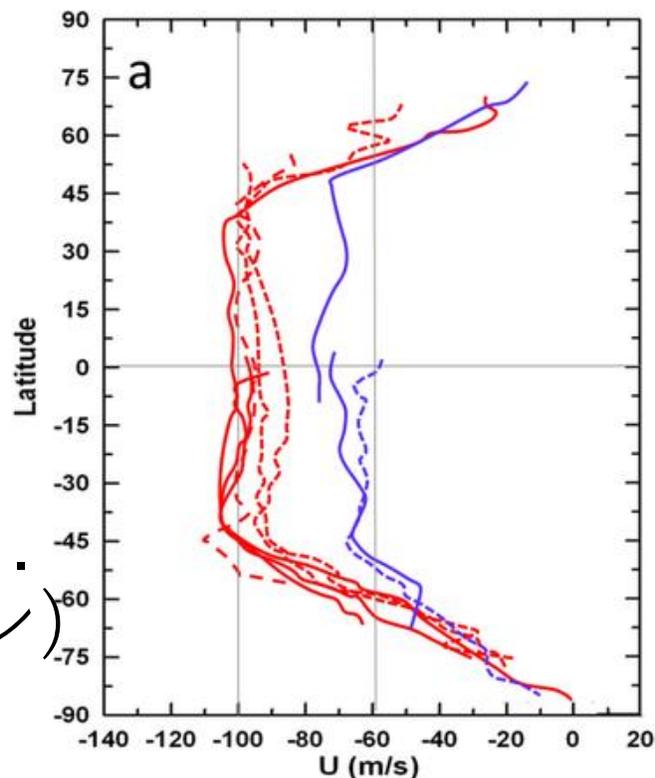
## ■付録

- DCPAM 5 での実験

はじめに

# 金星大気の特徴

- Sanchez-Lavega et al. (2023) によると赤道から中緯度かつ高度 70 km から上で対地速度が 100 m/s 以上の西向きが吹く。(スーパーローテーション)



赤: 高度 65-70 km, 青: ~60 km

# 金星大気の特徴

- スーパーローテーションは自転より早い東西風である。
  - 金星, タイタンについて多く研究されている。

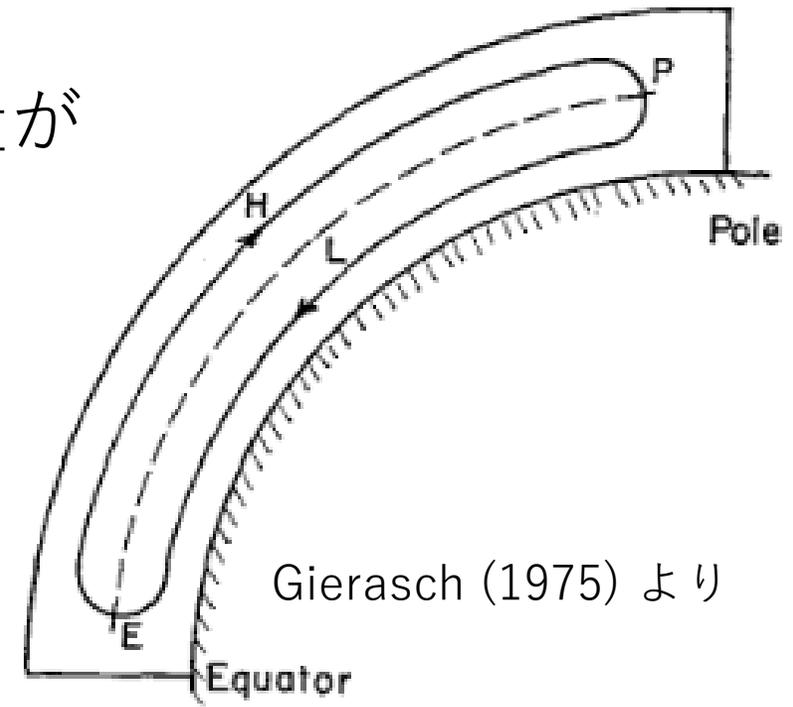
	地球	タイタン	金星
自転速度(地表)	463 [m/s]	12 [m/s]	1.8 [m/s]
東西風速度	~10 [m/s]	~200 [m/s]	~100 [m/s]

# スーパーローテーションのメカニズム

- Gierasch (1975) は大気が剛体回転し, 昼夜の温度差がないと仮定して, 赤道から極にわたる循環によって, 極へ輸送される角運動量に比べ赤道下層から赤道上層へ輸送される角運動量が多いため, 東西風が加速されると考えた.

(Gierasch メカニズム)

- 昼夜の温度差の無視と, 剛体回転が現実に即していないという問題をもつ.

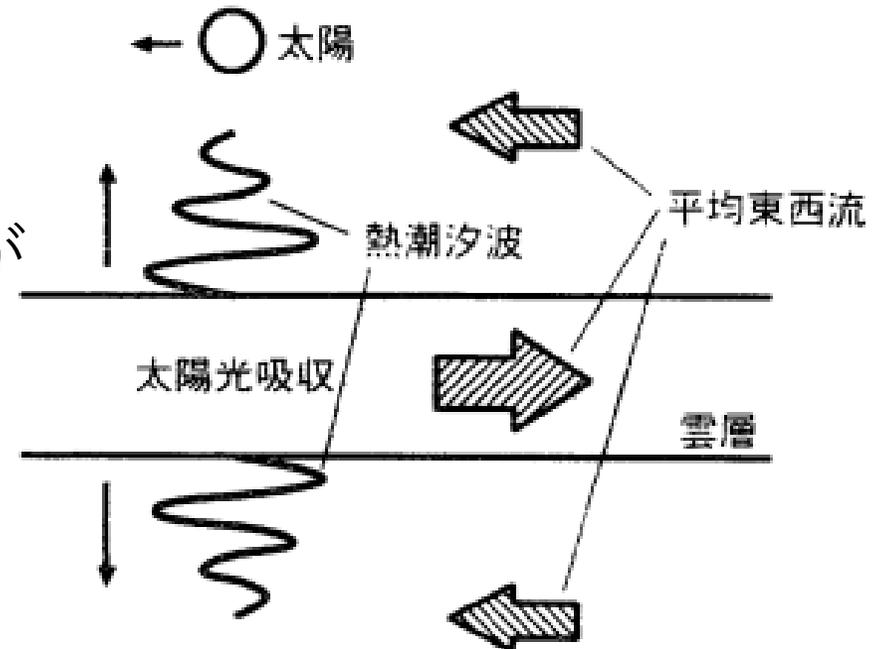


# スーパーローテーションのメカニズム

■Matsuda, (1980) などは, 雲層から発せられる熱潮汐波が東西風の加速と考えている.

- これは, 昼夜の温度差と東西風が差動回転する金星の観測結果に一致する

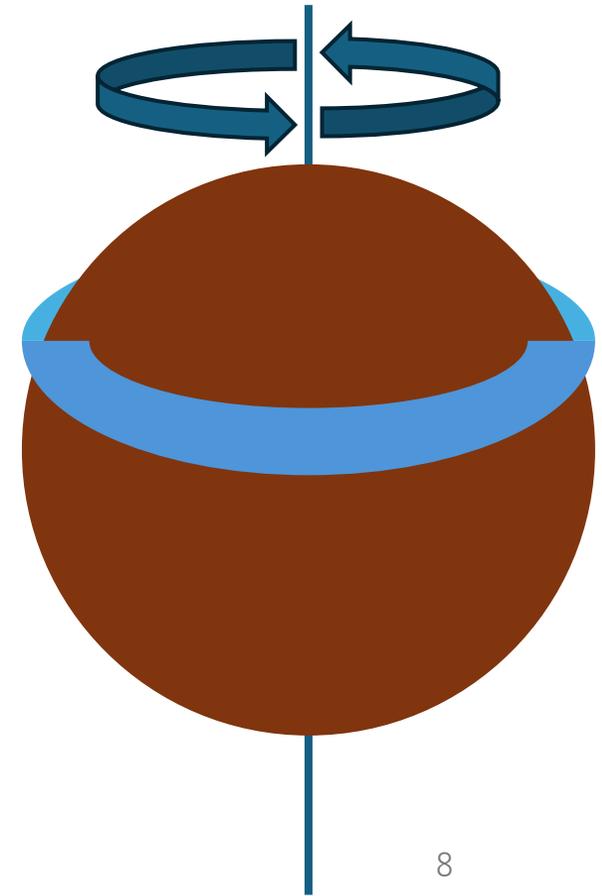
■現在は Gierasch と Takagi and Matsuda の両方のメカニズムによって, スーパーローテーションが形成されていると考えられている (Gierasch-Matsuda モデル)



高木, 松田 (2003) より

# 角運動量

- 地表と大気では, 境界層などを介して角運動量を交換している.
  - この角運動量の交換によって大気は加速される.



# 大循環モデル

- 大循環モデル (GCM) は, 流体力学によって計算される力学過程とそのほかの放射や散逸の効果の物理過程によって構成される.
- 物理過程は放射, 散逸, 雲形成, 降雨などが一般的にはある.
- 実験によって, 使われる物理過程は変更されることが多い.

# Lebonnois et al. (2012)

Lebonnois, S., C. Covey, A. Grossman, H. Parish, G. Schubert, R. Walterscheid, P. Lauritzen, and C. Jablonowski(2012), Angular momentum budget in General Circulation Models of superrotating atmospheres: A critical diagnostic, J. Geophys.Res., 117, E12004, doi:10.1029/2012JE004223.

# 概要

- 二つの GCM を用いて, 地形の有無, 放射過程, 水平散逸を変更し, トルクの内訳を計算した.
  - 地形がある場合, 山岳トルクの影響が大きい.
  - 金星設定の計算の場合, モデルの保存による誤差が大きい場合があった.
- GCM でトルクの内訳を計算するときには, 慎重な取り扱いが必要と主張している.

# 計算に使われたモデル

## ■LMD

- Laboratoire de Météorologie Dynamique  
(気象力学研究所 @ フランス) によって開発された地球向けの  
大循環モデル.

## ■CAM

- NCAR (国立大気研究センター @ アメリカ) によって開発された  
地球気候モデル US Community Climate Model (CCM) の大気計算  
のみを取り出したモデル.

# 二つのモデルの力学コア

■力学コアは、流れを流体力学を用いて計算する部分である。

それぞれのモデルの力学コアは以下の通りである。

	LMD	CAM
基礎方程式	プリミティブ方程式	プリミティブ方程式
水平分割	48 × 32	200 × 288
鉛直分割	50	50
鉛直座標	$p - \sigma$ ハイブリット座標	$p - \sigma$ ハイブリット座標
空間計算	有限体積法	有限体積法
時間積分	リーブフロッグ法	リーブフロッグ法

# プリミティブ方程式系

- 静水圧平衡, 惑星大気が惑星半径に比べ小さいとき, 回転する球面上の運動方程式は, 右のようである.  
(z- プリミティブ方程式)

- 右の式に対して,  $\sigma = p/p_s$  を導入し, 高度を  $\sigma$  としたものが,  $\sigma$ - プリミティブ方程式である.

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= \frac{uv \tan \varphi}{a} + fv - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_\lambda \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{u^2 \tan \varphi}{a} - fu - \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + F_\varphi \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= -g\end{aligned}$$

$u$ ; 東西風  $v$ ; 南北風  
 $f$ ; コリオリパラメータ  
 $p$ ; 圧力  $\rho$ ; 密度  
 $\varphi$ ; 経度  $\lambda$ ; 緯度

# 強制と水平散逸

- 強制は, 力学以外の効果で, 大気に影響を与える部分である.
  - ニュートン冷却: 平衡温度との差をある時定数で緩和する加熱を与える.
  - Held and Suarez: ニュートン冷却に加え, 地表境界での摩擦を与える.
  - LEB10: 地形による圧力変化, 日変化による加熱率の変化, 比熱の温度依存性, 金星大気各層の放射伝達を反映した.
- 散逸は, 運動が熱へ変換される効果である.  
波数に依存するため, 速度の発散などで再現される.  
高次の微分は低次の微分に比べて, 高波数の影響が小さくなる.

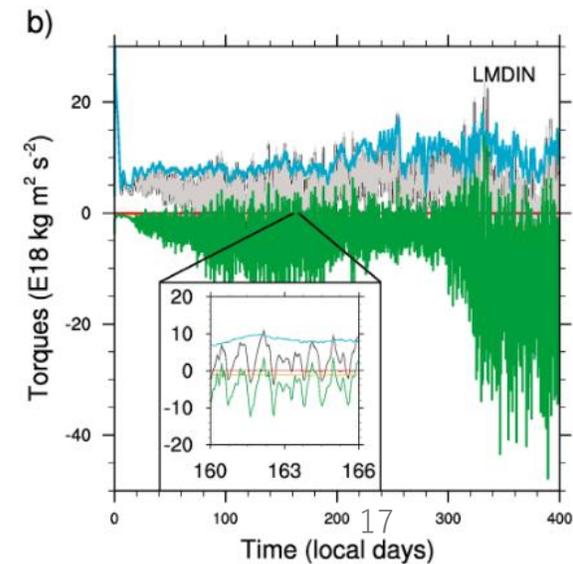
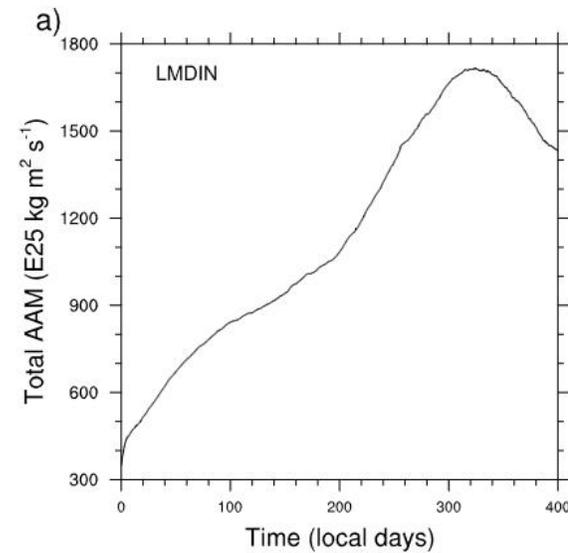
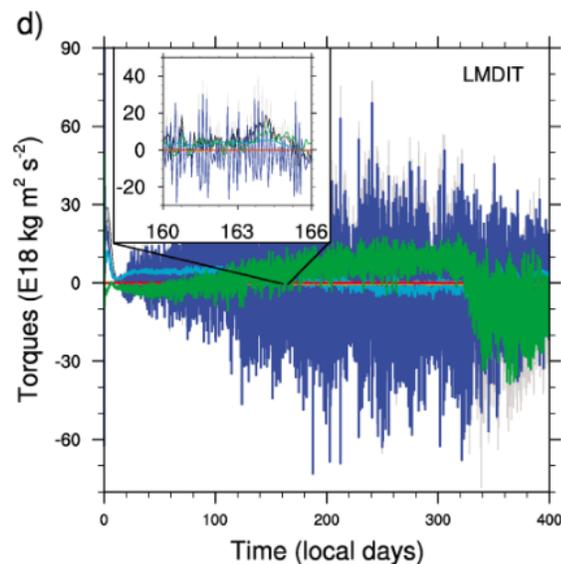
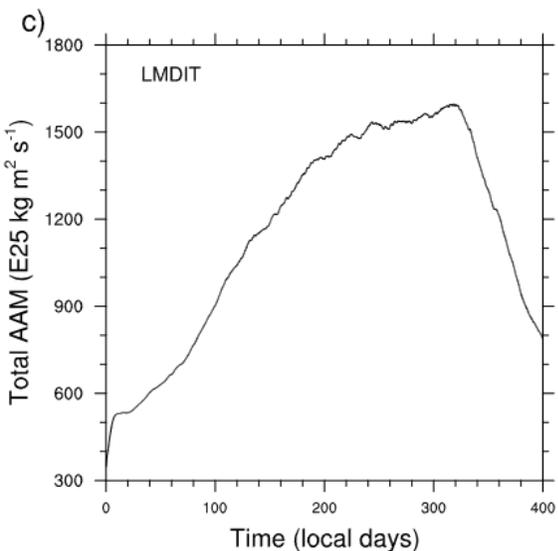
# 大気に及ぼすトルク

- 大気は地表や, モデルの上端などと角運動量をやり取りすることで, 大気は加速する.
- Lebonnois et al. (2012) では以下の成分にトルクを分解した.
  - 地表摩擦  $T$ : 地表での摩擦によるトルク
  - 山岳トルク  $F$ : 地表の凹凸 (山岳) によるトルク
  - スポンジ層  $S$ : モデル上端の境界条件を満たすためのトルク
  - 水平散逸  $D$ : 水平散逸によるトルク
  - 数値的残差  $\epsilon$ : 角運動量の時間変化から上記のトルクを引いたもの

# トルクの分解の結果 LMD

黒:  $dM_r/dt$  (総角運動量から剛体回転の成分を引いたものの時間微分)  
 グレー:  $F + Dy$  ( $dM_r/dt$  と理論上一致する)  
 水色: 地表摩擦  $T$ , 青色; 山岳トルク  $F$   
 オレンジ, 赤: 水平散逸  $D$ , スポンジ層  $S$   
 緑: 数値的残差  $\epsilon$

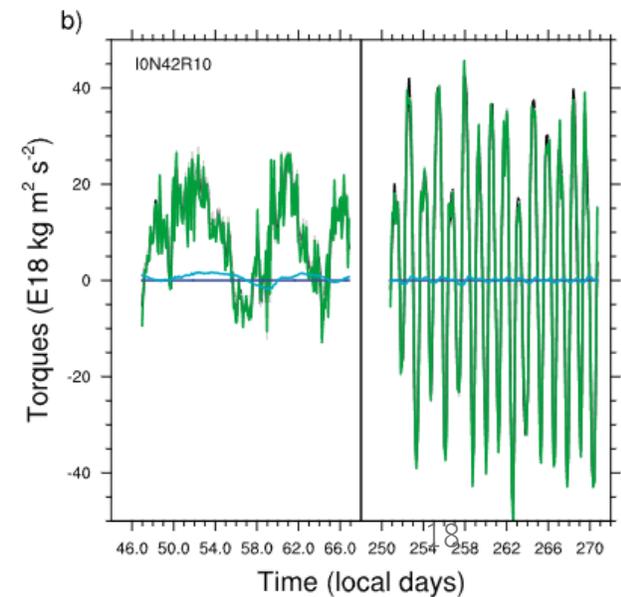
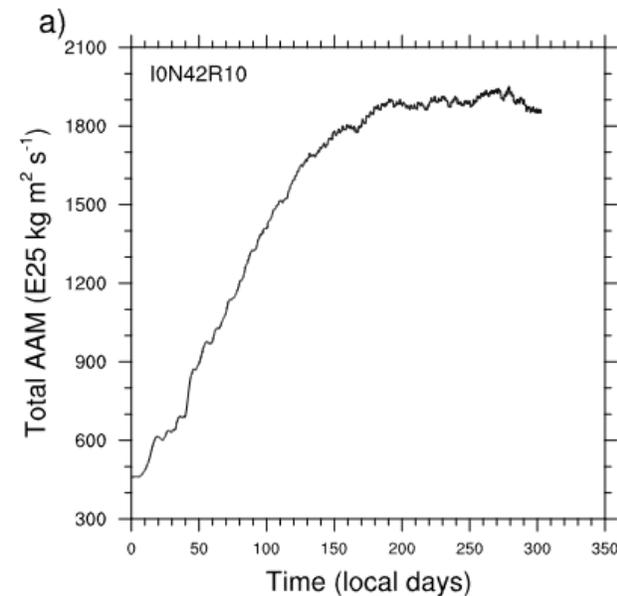
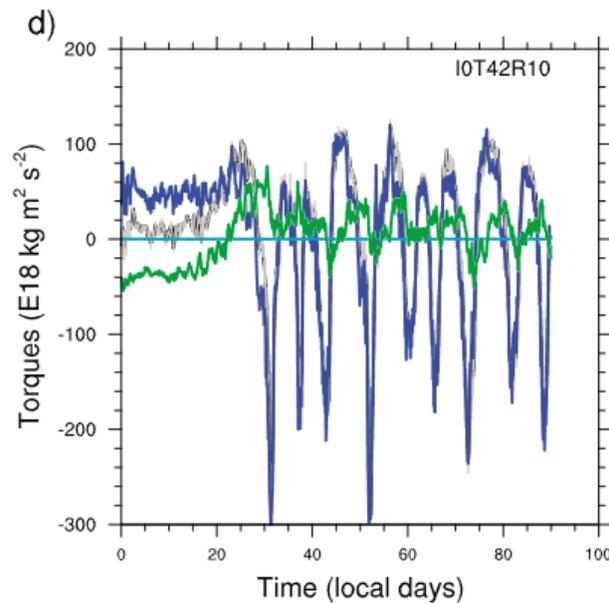
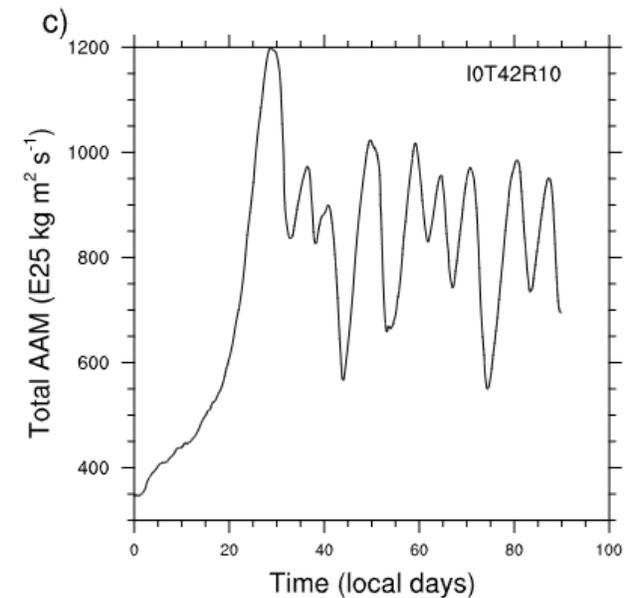
- ニュートン冷却で、高度によって変化する水平散逸の定数を採用し、地形の有無での比較(LMDIN, LMDIT)
- どちらも角運動量が 400 金星日で安定しない
- 地形がある場合は、山岳トルクが支配的だが、地形がない場合には、数値的残差が大きくなる。



# トルクの分解の結果 CAM

黒:  $dM_r/dt$  (総角運動量から剛体回転の成分を引いたものの時間微分)  
 グレー:  $F + Dy$  ( $dM_r/dt$  と理論上一致する)  
 水色: 地表摩擦  $T$ , 青色; 山岳トルク  $F$   
 オレンジ, 赤: 水平散逸  $D$ , スポンジ層  $S$   
 緑: 数値的残差  $\epsilon$

- ニュートン冷却で, 地形の有無での比較 (I0N42R10, I0T42R10)
- 地形なしの場合は角運動量が定常になる.
- 地形なしの場合には, 数値的残差が他のものより大きい.



# 数値的残差の定量的評価

- モデルごとの数値的残差は異なるが、その影響を評価するために、無次元数を導入した。  
( $\epsilon$ : 数値的残差,  $T, F$  はそれぞれ全時間平均した山岳トルクと地表摩擦, 添え字は向きを表す.)

$$\xi = \frac{|\epsilon|}{\text{Max}(T^+ + F^+, |T^- + F^-|)}$$

- その結果は下の通りである。

実験名	$\xi$
LMDIN	0.66
LMDIT	0.04
I0N42R10	6.90
I0T42R10	0.01

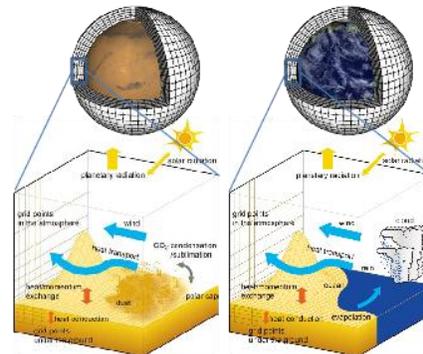
DCPAM 5

# 概要

- DCPAM 5 は地球流体電脳倶楽部 @ 日本 が開発した大気大循環モデルである。
- 乾燥大気や, 地球, 火星, 金星など多くの条件で使われている。

## 大気大循環モデル概要

惑星全体の温度, 風速, 密度分布を計算



モデルの模式図

- 大気大循環モデルの構成
  - 「力学過程」
    - モデル格子で表現できる運動
  - 「物理過程」
    - モデル格子より小さなスケールの運動や流体運動以外の効果
- 「力学過程」
  - 流体力学の方程式系
    - 通常は「プリミティブ方程式系」を使用。
      - 鉛直静水圧近似, 薄い大気の近似を行った方程式系
- 「物理過程」
  - 乱流混合過程
    - モデル格子より小さなスケールの運動の効果
  - 放射過程
  - 凝結過程
    - 「積雲対流」「非対流性凝結」からなる
      - 「積雲対流」
        - 複数鉛直格子にまたがる積乱雲の効果
      - 「非対流性凝結」
        - 単一格子点内でのその場での凝結の効果
  - 雲過程
    - 霧水, 霽水, 降水間の変換
  - 陸面過程
    - 陸地の温度, 水分量, 積雪などの計算
  - (スラブオーシャン)
    - 運動の効果を無視した海の温度の計算

# 力学コア

- 力学コアの基礎方程式は LMD, CAM と同様のプリミティブ方程式である。
- 水平方向には, 有限体積法ではなく, スペクトル法が使われる。

	LMD	CAM	DCPAM 5 (Yamamoto and Takahashi)
基礎方程式	プリミティブ方程式	プリミティブ方程式	プリミティブ方程式
水平分割	48 × 32	200 × 288	32 × 16
鉛直分割	50	50	50
鉛直座標	$p - \sigma$ ハイブリット座標	$p - \sigma$ ハイブリット座標	$\sigma$ 座標
空間計算	有限体積法	有限体積法	スペクトル法 (水平)
時間積分	リーブフロッグ法	リーブフロッグ法	リーブフロッグ法

まとめ

# まとめと今後について

- Lebonnois et al. (2012) は山岳による大気の加速の効果が大きいことを示した.
- また, モデルによっては数値的残差が大きいことを示した.
- DCPAM 5 は LMD, CAM とは水平方向の計算方法が異なる.
- DCPAM 5 を用いて, 地形の有無によって大気の加速の源が何かを調べたい.

# DCPAM 5 での金星の実験

- 70000 時間 (約 25 金星日) の計算での角運動量 (全球平均), 東西風 (東西平均, 赤道上) の時系列

## 計算設定

粘性	超粘性 (4 次)
最大波数の時定数	40 [day]
積分時間	70000 [h] ( $\sim 25V_d$ )
時間間隔	1 [h]
加熱方法	ニュートン冷却

