

# 惑星表層研究における 計算科学と計算機

---

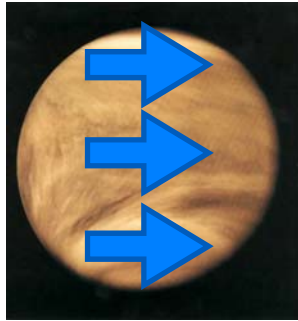
高橋芳幸(神戸大)

# 話の内容

- はじめに
  - 惑星大気について
  - 興味の対象
- 計算能力を生かした今後の方向性
- 補足: 気になること

# 太陽系内惑星の大気・表層環境

金星



$P_s \sim 90e5 \text{ Pa}$   
 $T_s \sim 700 \text{ K}$

厚い大気,  
高温高圧,  
全球厚い雲に  
覆われている  
スーパーローテーション

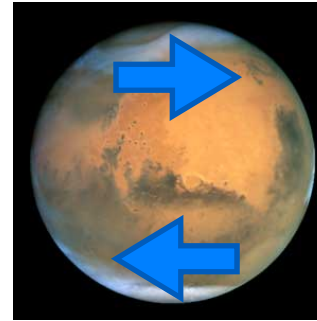
地球



$P_s \sim 1e5 \text{ Pa}$   
 $T_s \sim 300 \text{ K}$

温暖湿潤  
液体の水が存在  
中緯度は西風

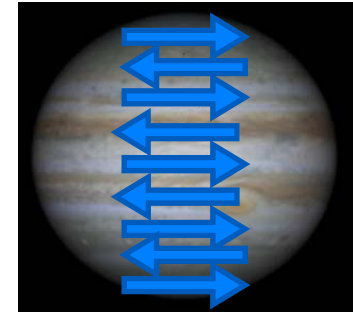
火星



$P_s \sim 7e2 \text{ Pa}$   
 $T_s \sim 220 \text{ K}$

薄い, 乾燥した  
ダストが浮遊  
昔は温暖湿潤  
季節に応じて  
西風・東風

木星

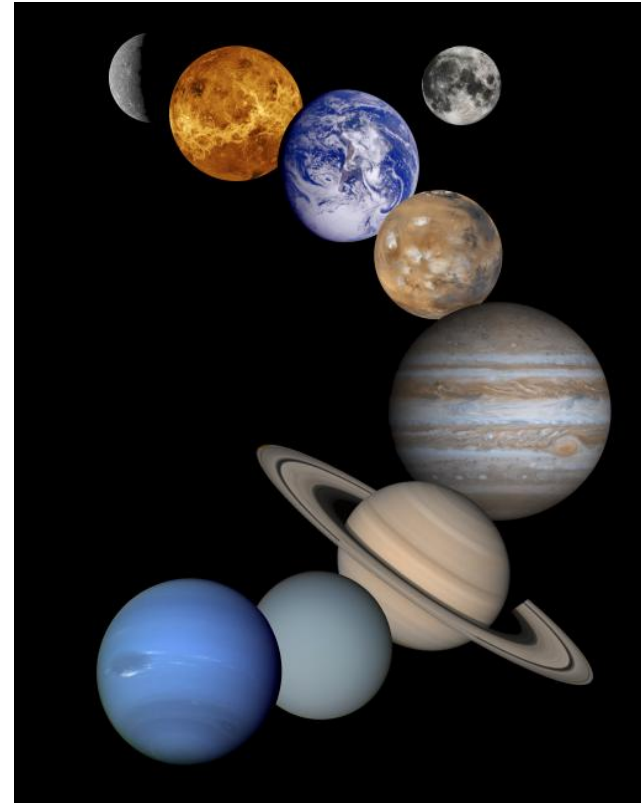


$P_s \sim ???$   
 $T_s \sim ??? \text{ K}$

厚い流体層  
複数成分の雲

# 惑星表層環境, 大気循環の多様性

- それぞれの惑星の表層環境はどのように維持されるのか?
- これら惑星表層環境や大気循環の多様性は, どのような過程によって決定づけられているのか? / 理解できるのか?



太陽系内惑星(上)と系外惑星(想像図, 下)

# 計算能力を生かした今後の方向性

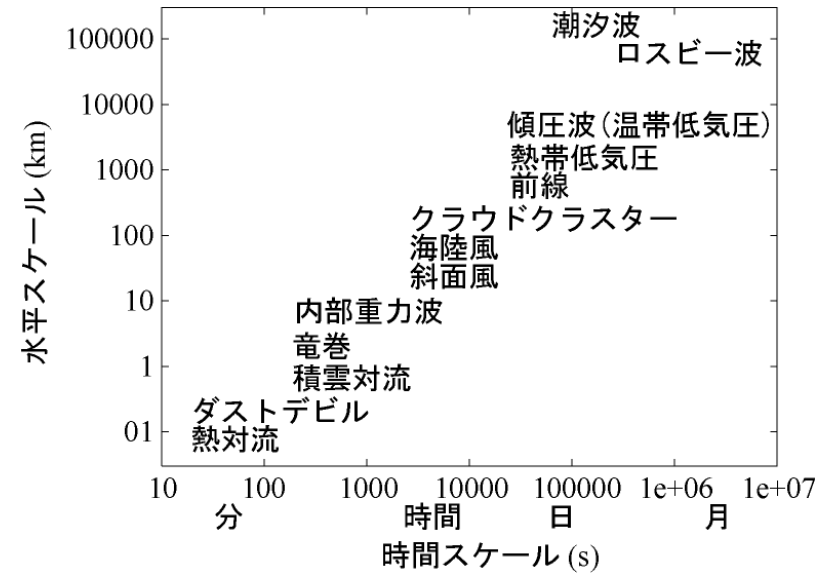
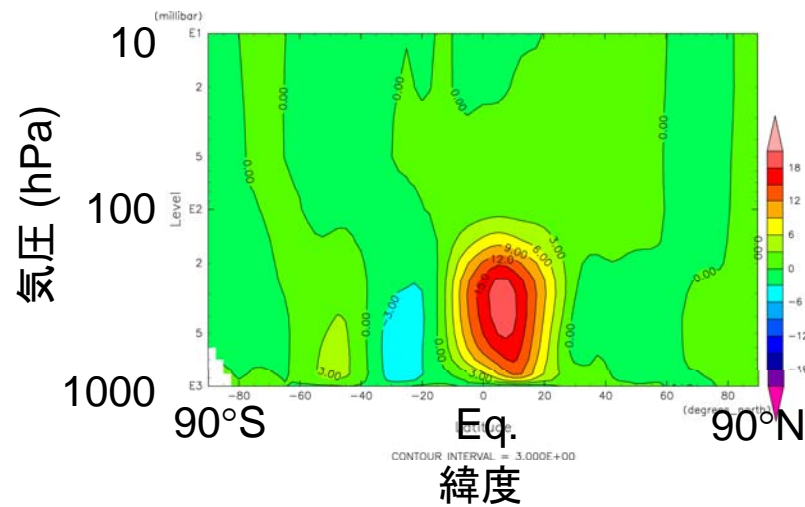
- 高解像度計算の実施
  - 小規模擾乱を陽に解像
    - 巨大惑星大気中のエネルギー保有渦の表現
    - (小規模)対流の表現
    - (小規模)大気波動の表現
- 長時間積分の実施
  - 時定数の長い放射過程の表現の向上
    - 例えば金星, 木星
  - 大気進化を陽に取扱い
- 様々な精緻なプロセスを組み合わせて実行
  - 流体運動
  - 放射伝達
    - 気体, 液体(雲), 固体(氷雲, エアロゾル)による吸収・散乱
  - 相変化
  - 光化学反応
  - 地面との運動量・熱・物質交換
- アンサンブル実験
  - 多数の惑星の計算 / パラメータを振った計算

# 計算能力を生かした今後の方向性

- **高解像度計算の実施**
  - － 小規模擾乱を陽に解像
    - 巨大惑星大気中のエネルギー保有渦の表現
    - (小規模)対流の表現
    - (小規模)大気波動の表現
- **長時間積分の実施**
  - － 時定数の長い放射過程の表現の向上
    - 例えば金星, 木星
  - － 大気進化を陽に取扱い
- **様々な精緻なプロセスを組み合わせて実行**
  - － 流体運動
  - － 放射伝達
    - 気体, 液体(雲), 固体(氷雲, エアロゾル)による吸収・散乱
  - － 相変化
  - － 光化学反応
  - － 地面との運動量・熱・物質交換
- **アンサンブル実験**
  - － 多数の惑星の計算 / パラメータを振った計算

# 平均大気循環と波動・擾乱(地球)

## 北半球の冬(2月)

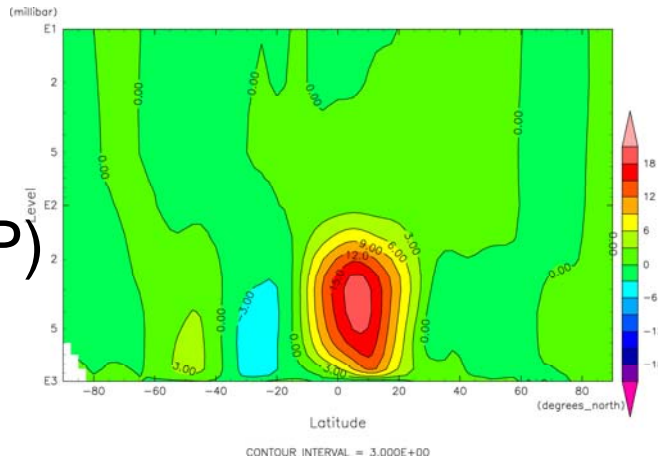


大気(・海洋)では  
平均循環(「金太郎飴」な循環)  
大気波動  
によって熱, 運動量, 物質を輸送.

# 対流・雲の表現

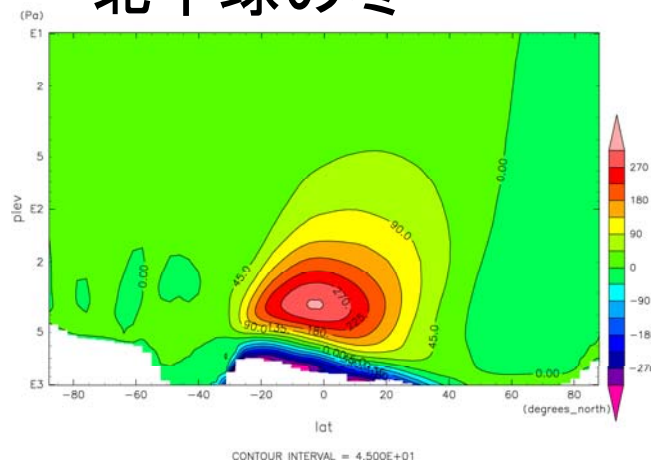
## 北半球の冬(2月)

地球  
(NCEP)

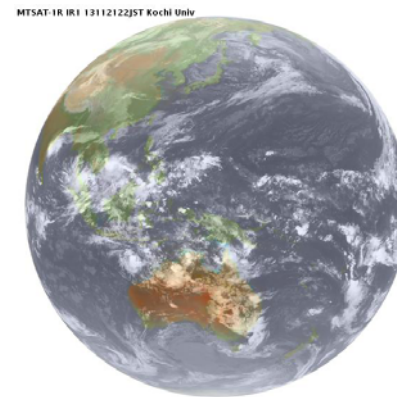


## 北半球の冬

火星  
(GCM)



- ハドレー循環の上昇流の実体は、 $O(10-1000 \text{ m})$  サイズの対流。
  - 地球: 主に積雲対流
  - 火星: 乾燥対流
- 高解像度化によってそれらの表現の向上が期待される。
- また、それら対流によってできた雲の表現も向上(?)
  - アルベドを介してエネルギー収支をより確からしく決定



地球の雲

地球と火星の大気質量および惑星半径の差を考慮して質量流線関数の単位をそれぞれ  $10^{10} \text{ kg/s}$ ,  $0.00372 \times 10^{10} \text{ kg/s}$  としている。さらに、見やすさのために地球と火星の図のカラーコードは変えてある..



# 小規模擾乱の物質輸送による気候への影響



Mars Pathfinder 着陸点画像



MER Spirit が観測したダストデビル

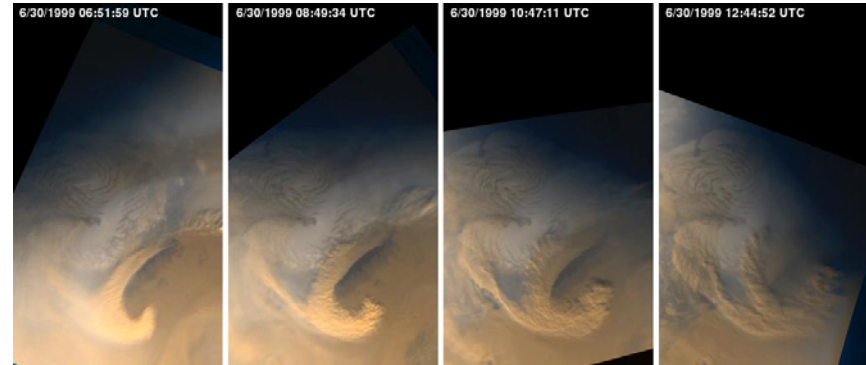


Figure. Dust storm observed by MOC onboard MGS.

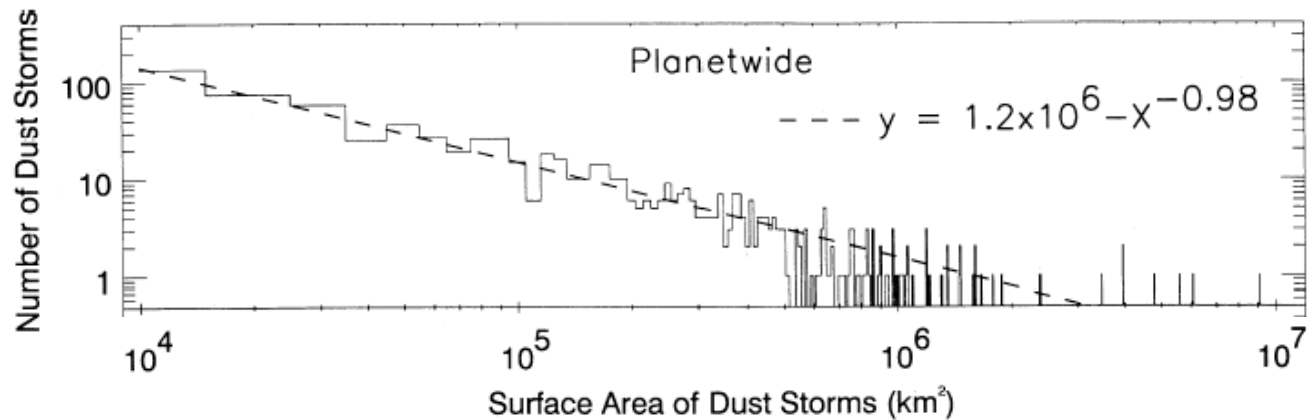


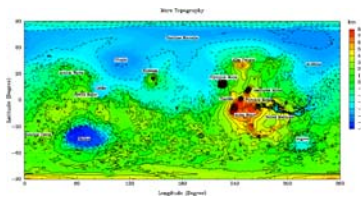
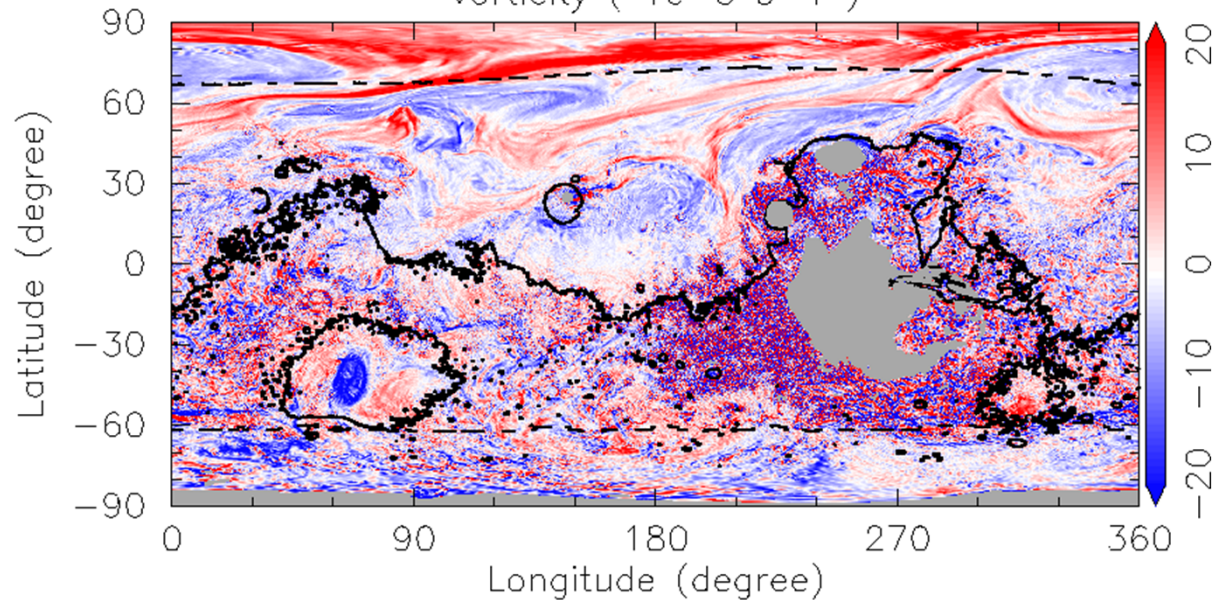
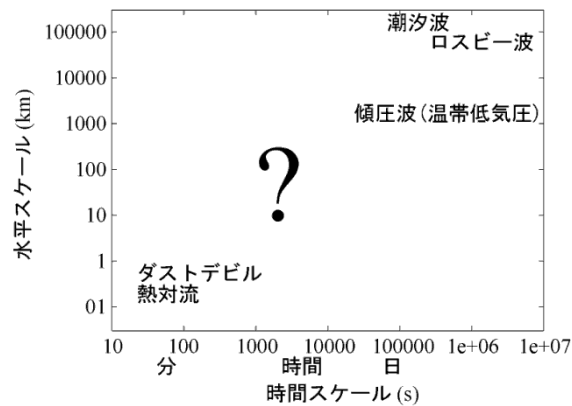
Figure. Distribution function of dust storms observed by MOC (after Cantor et al., 2001).

# 火星全球の中小規模擾乱

- ~11 km 格子全球火星計算

## 4 hPa (~2-3 km) の渦度分布

Year 1, Ls = 197.5 degrees, 1.0 hour  
vorticity ( $1e-5 \text{ s}^{-1}$ )



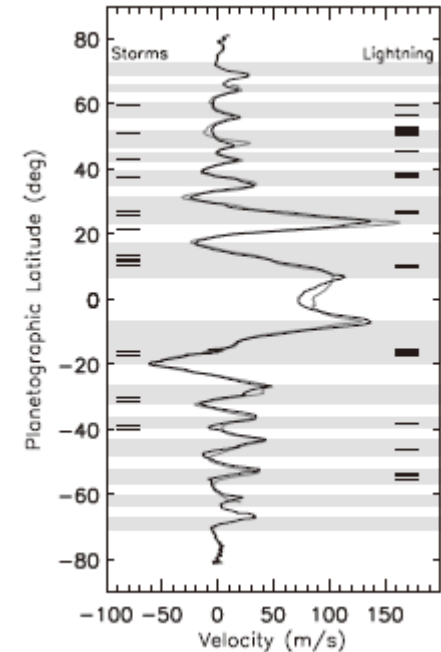
- 惑星規模から O(10 km) までの様々な擾乱が表現
  - 地形性の擾乱
  - モデルで表現される熱対流に伴う多数の小規模渦

# ガス惑星の場合

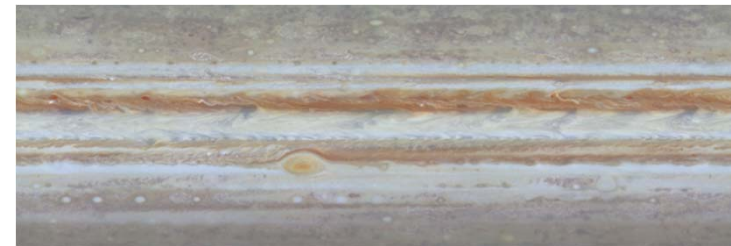
- 惑星サイズに比べて小さな波・渦による運動量・熱輸送の重要性
- 木星の例
  - 赤道一周：~400000 km
  - 変形半径：~1000 km
    - 大気が回転の影響を感じる特徴的な長さスケール
    - 大雑把に言って高低気圧のスケール
  - 高低気圧の表現にすら従来の高解像度計算が必要.
  - 対流解像のためには言うまでもなく.



Jupiter observed by Cassini spacecraft. NASA Planetary Photojournal, PIA04866.



Zonal wind on Jupiter (Vasavada and Showman, 2005)

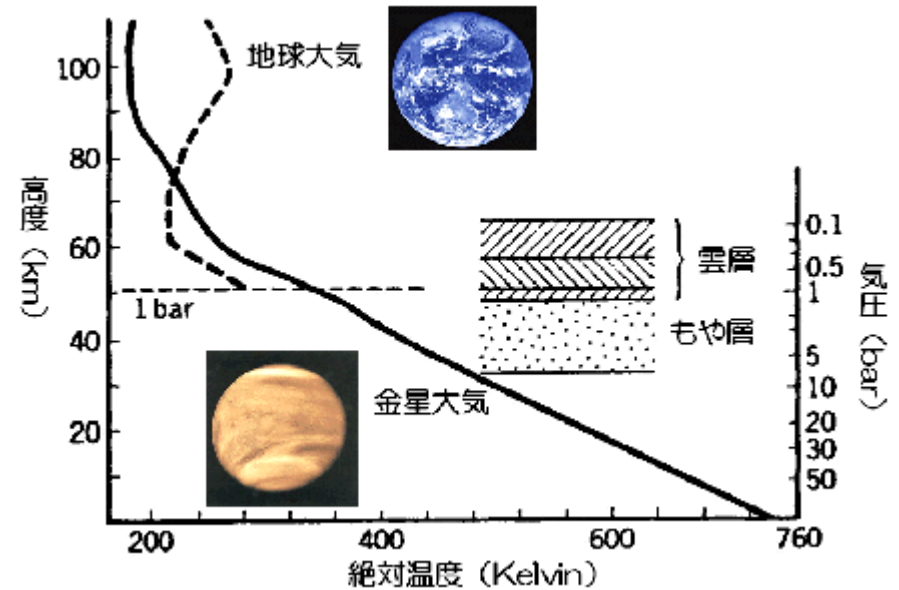


# 計算能力を生かした今後の方向性

- 高解像度計算の実施
  - 小規模擾乱を陽に解像
    - 巨大惑星大気中のエネルギー保有渦の表現
    - (小規模)対流の表現
    - (小規模)大気波動の表現
- 長時間積分の実施
  - 時定数の長い放射過程の表現の向上
    - 例えば金星, 木星
  - 大気進化を陽に取扱い
- 様々な精緻なプロセスを組み合わせて実行
  - 流体運動
  - 放射伝達
    - 気体, 液体(雲), 固体(氷雲, エアロゾル)による吸収・散乱
  - 相変化
  - 光化学反応
  - 地面との運動量・熱・物質交換
- アンサンブル実験
  - 多数の惑星の計算 / パラメータを振った計算

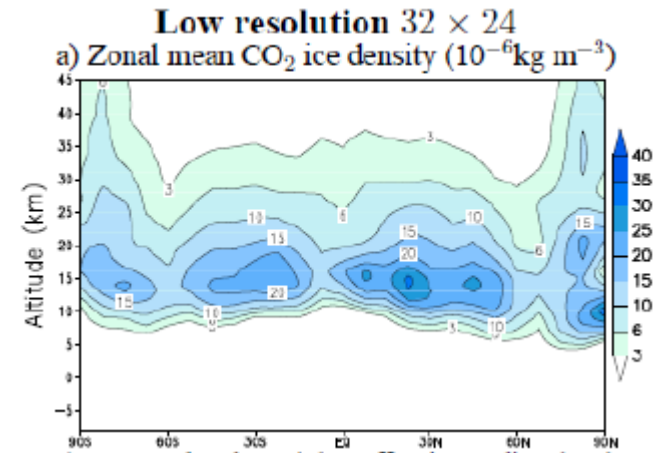
# 放射時定数の長い厚い大気の平衡状態

- 金星大気の放射時定数
  - $O(100 \text{ 年})$  @ 地表付近
- 木星大気の放射時定数
  - $O(100 \text{ 年})$  @  $\sim 1e5 \text{ Pa}$
  - $O(1000 \text{ 年})$  @  $\sim 1e6 \text{ Pa}$
  - ...
- 通常は, 放射対流平衡を初期値にして, そこから「短時間」だけ運動も計算
- 本来は, 長時間積分によって初めて熱的・力学的平衡状態・数十年の時間スケールを持つ時間変動の議論が可能になる.



# 火星大気進化

- 最近は、循環も考慮した上で惑星古気候の研究が行われるようになってきた (e.g., Forget et al., 2013)
  - これで現在, 過去それぞれの表層環境を別々に抑えることができるようになってきた.
- その間の進化を直接計算することはまだまだ計算能力的に不可能.
  - 大気散逸に対する表層環境の応答
  - 太陽の進化に対する表層環境の応答



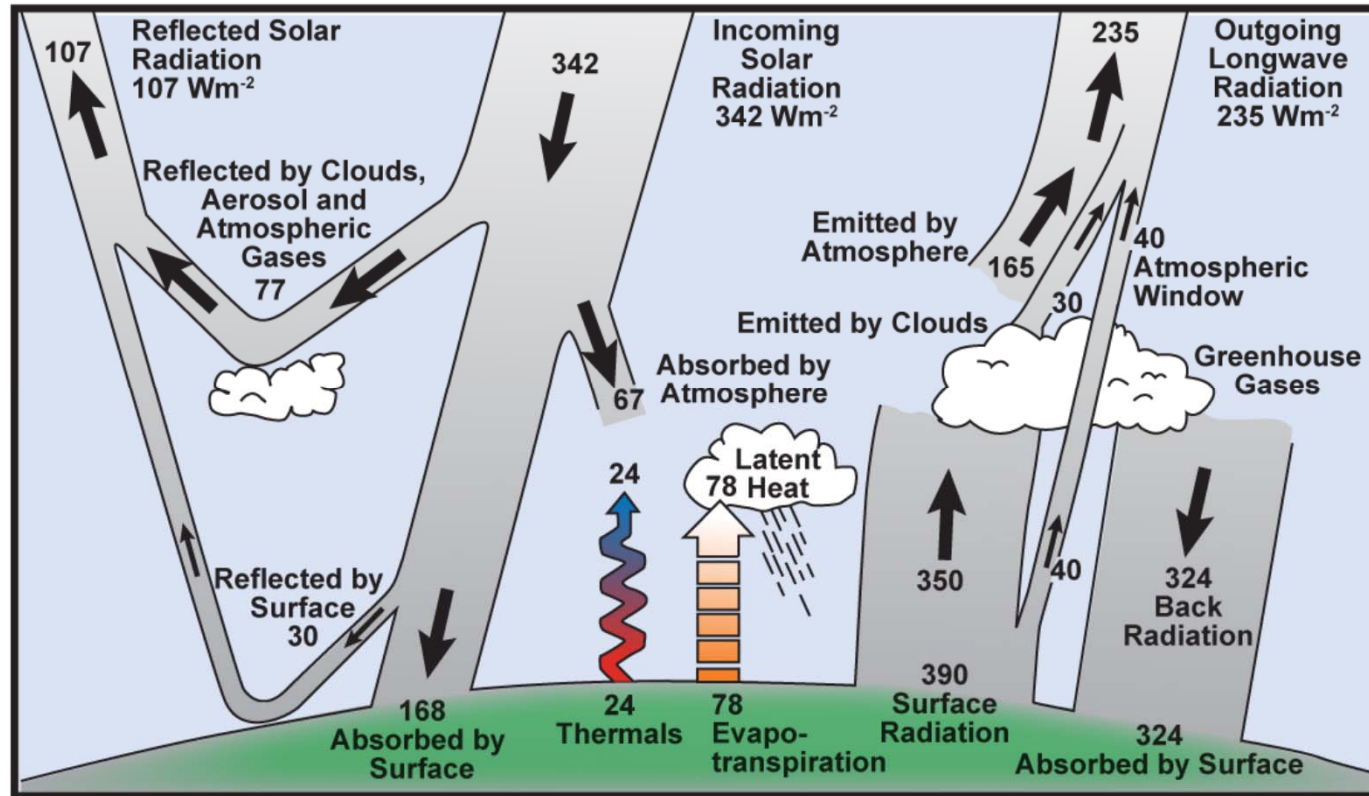
古火星の雲分布 (Forget et al., 2013)



# 計算能力を生かした今後の方向性

- 高解像度計算の実施
  - 小規模擾乱を陽に解像
    - 巨大惑星大気中のエネルギー保有渦の表現
    - (小規模)対流の表現
    - (小規模)大気波動の表現
- 長時間積分の実施
  - 時定数の長い放射過程の表現の向上
    - 例えば金星, 木星
  - 大気進化を陽に取扱い
- 様々な精緻なプロセスを組み合わせて実行
  - 流体運動
  - 放射伝達
    - 気体, 液体(雲), 固体(氷雲, エアロゾル)による吸収・散乱
  - 相変化
  - 光化学反応
  - 地面との運動量・熱・物質交換
- アンサンブル実験
  - 多数の惑星の計算 / パラメータを振った計算

# 地球大気のエネルギー収支



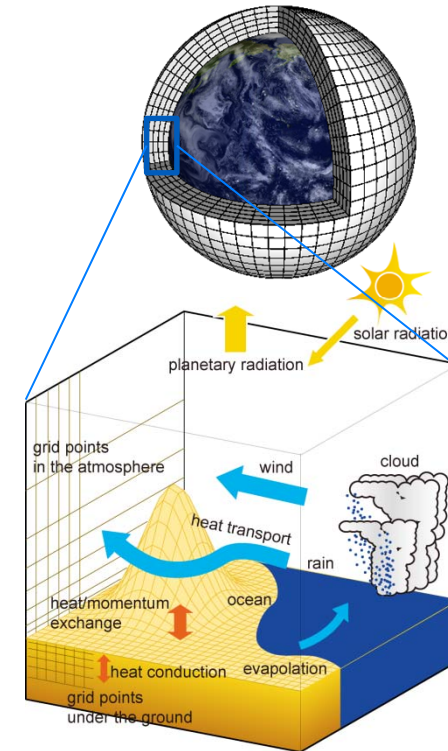
(IPCC AR4 WG1 報告書, 2007)

- 放射伝達
- 対流の生成
- 雲の生成・消滅
- ...



# よくある大気モデルの構成

- いくつかの要素の組み合わせで構成
  - 流体モデル
    - 完全圧縮
    - 非圧縮
    - 静水圧平衡の仮定
  - ...
  - 「乱流」モデル
    - サブグリッドスケールの運動の効果
  - 雲(微物理)モデル
  - 放射伝達モデル
  - 地面モデル
  - 光化学モデル
- 格子スケールで表現できないものは「パラメタ化」により導入



大気大循環モデルで考慮する過程の模式図

# 移流：力学過程：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.

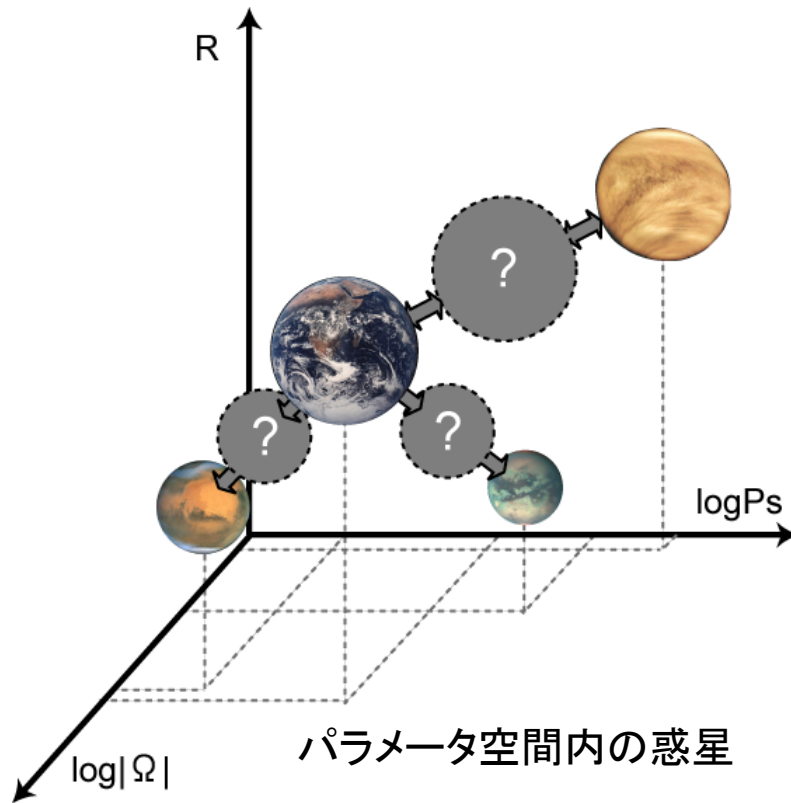
# 精緻な物理過程の導入

- 精緻な放射伝達の扱い
  - 光学的に厚い大気の放射伝達
  - 3次元放射
- 雲微物理の精緻化
  - 雲粒の粒径分布関数を陽に表現
    - ビン法
  - 木星の複数成分の雲
- 多成分の物質の光化学反応の考慮

# 計算能力を生かした今後の方向性

- 高解像度計算の実施
  - 小規模擾乱を陽に解像
    - 巨大惑星大気中のエネルギー保有渦の表現
    - (小規模)対流の表現
    - (小規模)大気波動の表現
- 長時間積分の実施
  - 時定数の長い放射過程の表現の向上
    - 例えば金星, 木星
  - 大気進化を陽に取扱い
- 様々な精緻なプロセスを組み合わせて実行
  - 流体運動
  - 放射伝達
    - 気体, 液体(雲), 固体(氷雲, エアロゾル)による吸収・散乱
  - 相変化
  - 光化学反応
  - 地面との運動量・熱・物質交換
- アンサンブル実験
  - 多数の惑星の計算 / パラメータを振った計算

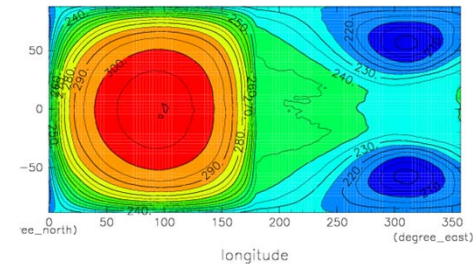
# 多数の惑星の多数のパラメータの計算



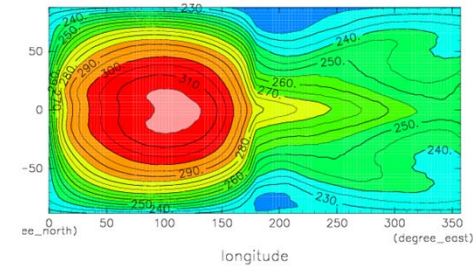
自転速度  
(地球基準)

表面温度

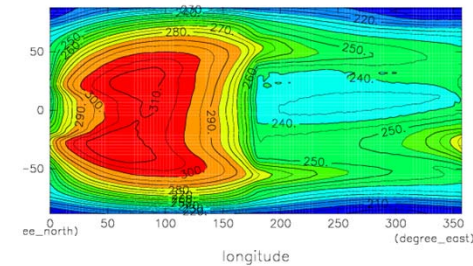
0.05



0.5



1



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00  
180 210 240 270 300 330

# その他 気になること その 1

- スペクトル法 v.s. 格子点法
  - 大気業界では, スペクトル変換法が重宝されてきた.
    - 微分評価の精度が高い.
    - 収束性が良い.
    - 惑星大気の形状は球・球面.
    - 高速フーリエ変換の発明.
    - 簡単.
  - 超並列計算には, スペクトル法は向かないと考えるのが良くある反論.
  - 実際には, 今のところはまだ世の中の天気予報, 温暖化研究ではスペクトル法を使ったモデルは現役.
    - 世界最高の天気予報機関 ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecast) では, 「スペクトル法で少なくとも $O(1 \text{ km})$ までは行ける」「実際にはもっと行ける」(?) と言っているらしい.
  - 本当の性能分岐点はどこ?

## その他 気になること その2

- 世の中では様々なコンセプトに基づいて様々なパラメタリゼーションが開発されている。
- パラメタライズの方法の不確定性が結果の曖昧さの原因。
  - 例えば, 温暖化予測.
  - パラメタリゼーションの評価方法, それらを使う効率的な方法が問題.
- パラメタリゼーションの上手いライブラリ化
  - ハードウェア(動向)を睨んだソフトウェア作り
- ソフトウェア作り(の動向)を睨んだハードウェア作り.