

惑星大気の 数値モデリング

倉本 圭(北大)

阿部豊(東大)、石渡正樹(北大)、大西将徳(神戸大)、

玄田英典(ELSI)、齊藤大晶(北大)、関根康人(東大)、

杉山耕一朗(松江高専)、高橋芳幸(神戸大)、

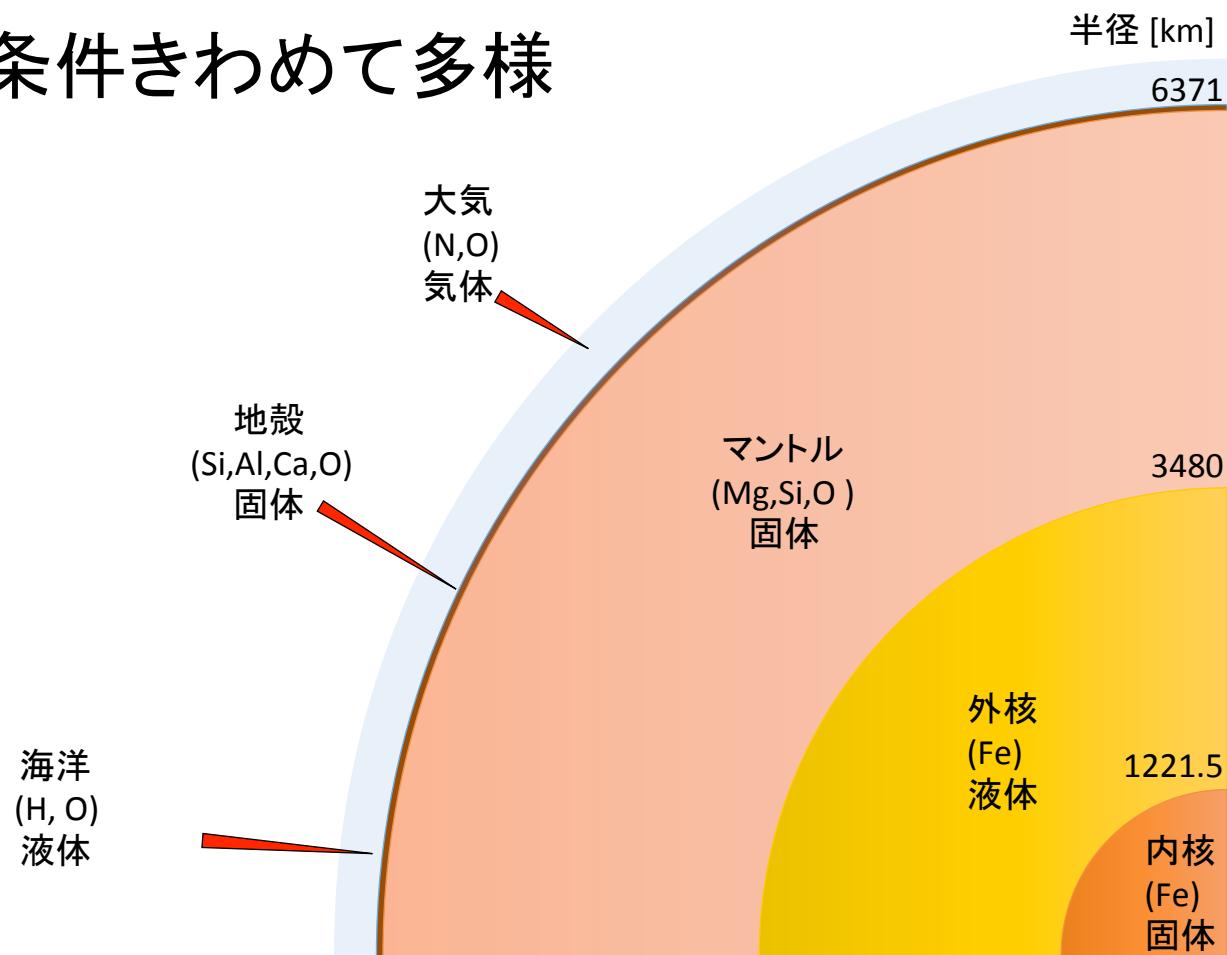
高橋康人(北大)、竹広真一(京大)、

中島健介(九大)、はしもとじょーじ(岡山大)、濱野景子(ELSI)、

林祥介(神戸大)、三上峻(北大)、渡辺健介(北大)

惑星大気

- 固体惑星に占める質量は小さい
 - 地球: $8 \times 10^{-7} M_{\text{地球}}$ (海洋 $2.3 \times 10^{-4} M_{\text{地球}}$)
- 惑星の表層環境を規定する最も重要な物質圏
- 組成、質量、境界条件きわめて多様

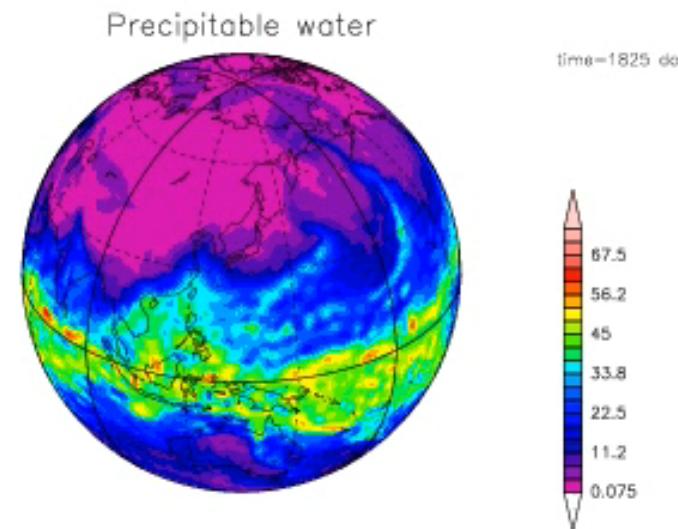
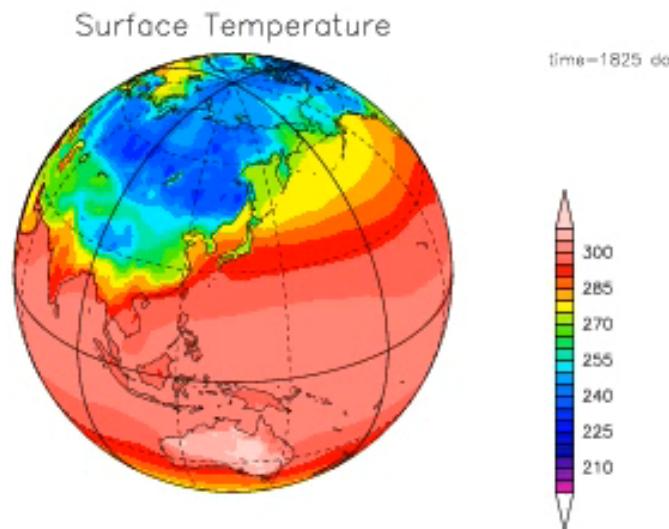


地球大気循環の数値モデリング

- ・天気予報・気候予測にむけた豊富な経験



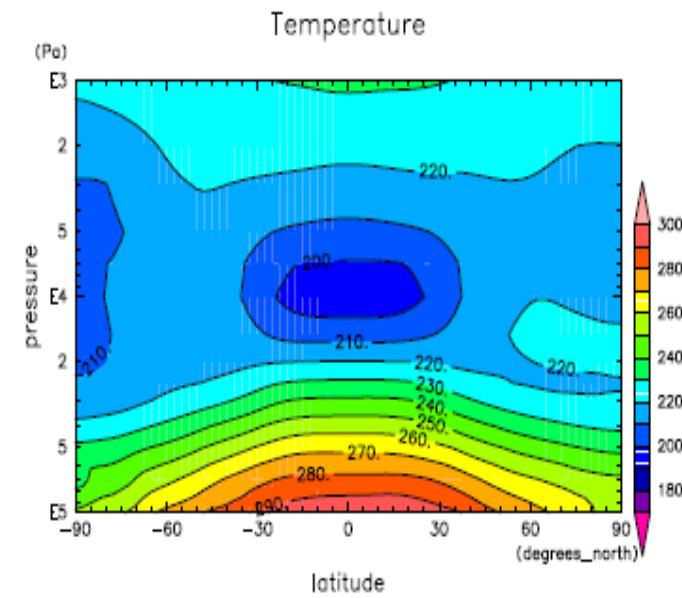
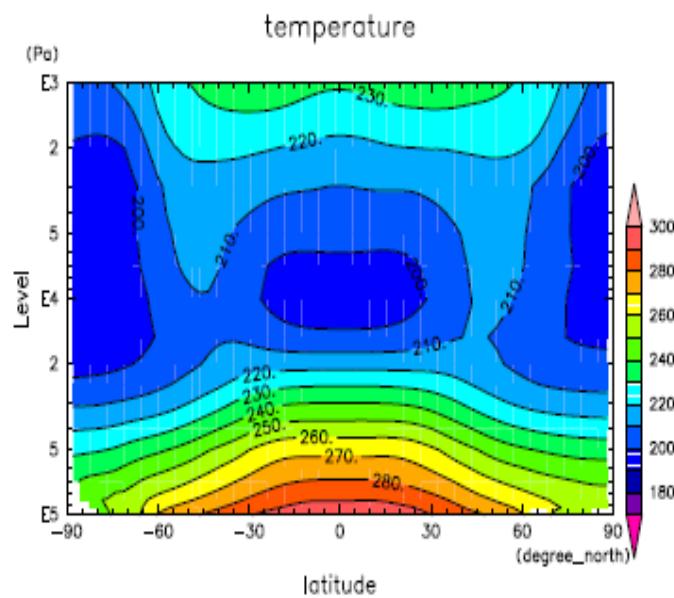
ボックス: 熱収支
1次元: 熱・化学構造
2次元: EBM、2D対流
3次元: GCM、3D対流



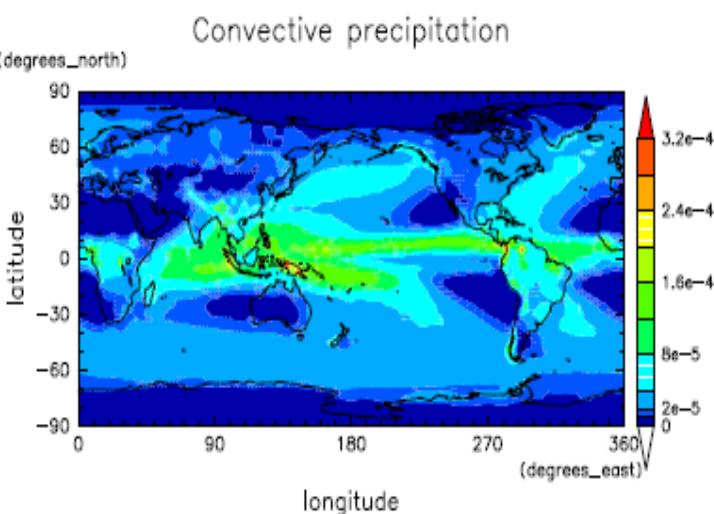
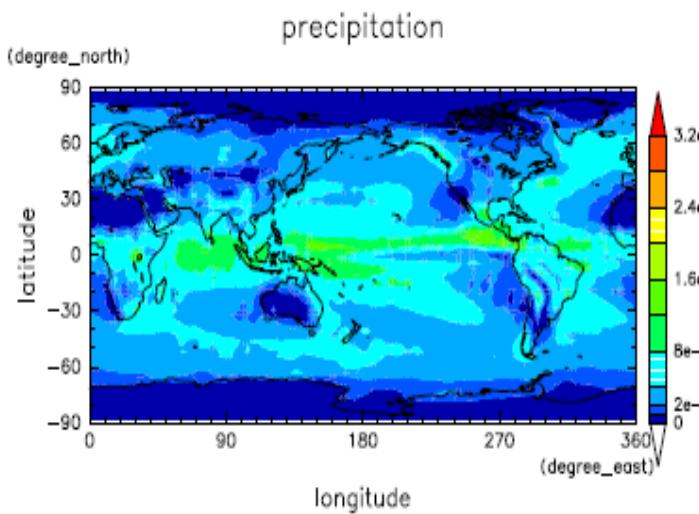
model

“observation” (ECMWF reanalysis)

annual mean
atmospheric
temperature



annual mean
precipitation



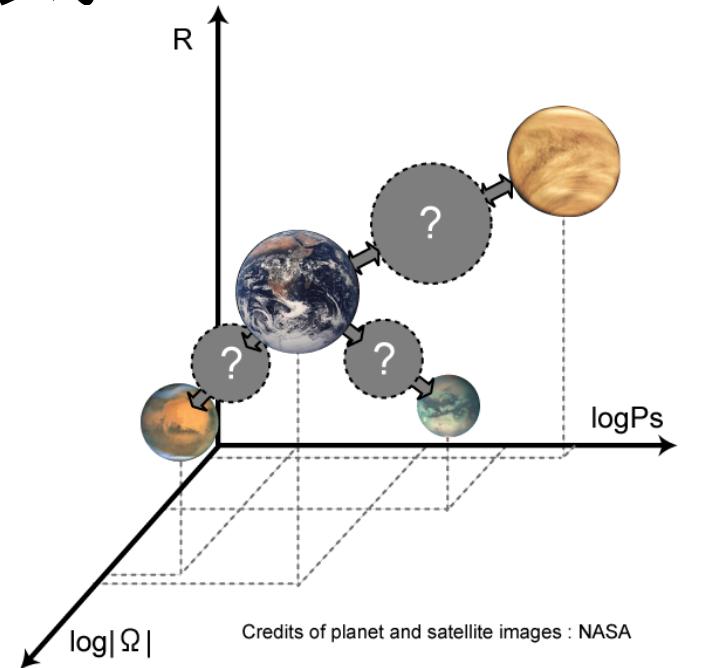
地球大気から惑星大気へ

I. 地球大気モデルの拡張

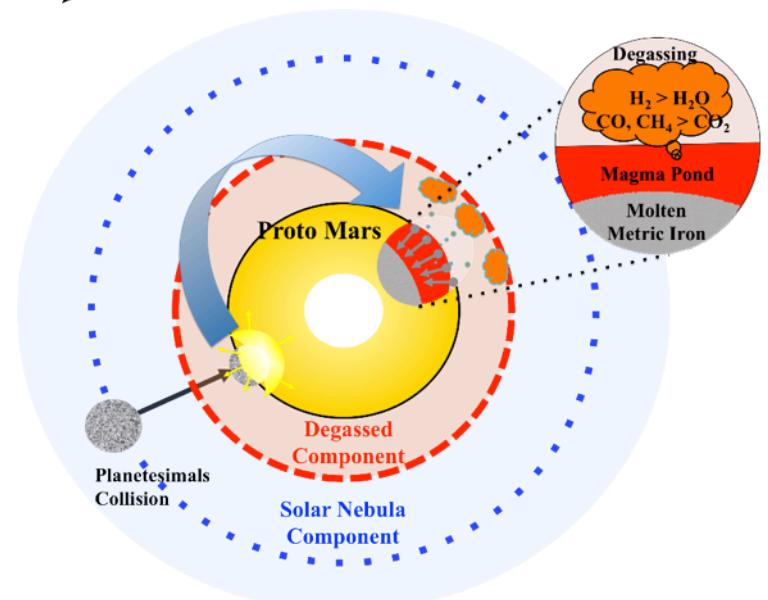
- 熱(放射)収支、大気循環、大気化学
- 気候推定、海洋の熱的安定性解析

II. 大気形成・進化モデリング

- 惑星集積過程に伴う大気形成
- 太陽、固体惑星の進化と結合した大気進化
- 形成と進化の物理素過程
大気散逸、脱ガス、…

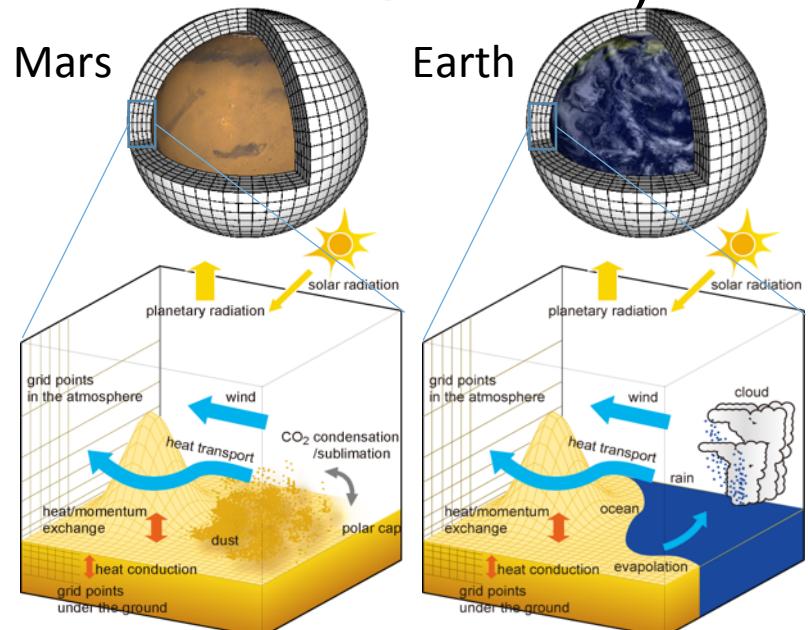


Credits of planet and satellite images : NASA

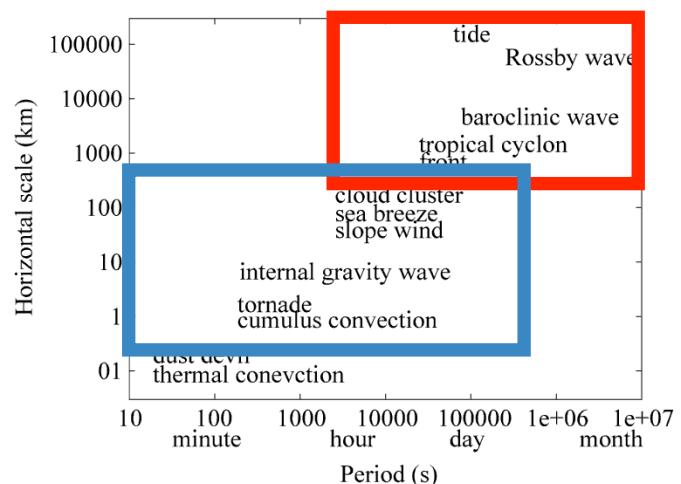


dcmodel (あらゆる惑星向けの大気循環モデル)

- 地球流脳俱楽部  が開発を継続しているコミュニティ大気循環モデル
- 地球用の数値モデルを設定条件を自在に変え、あらゆる惑星の大気循環を再現することを目標とする
 - オープンソース
 - 高い可読性
 - ドキュメンテーション
 - 物理過程の容易な脱着のための構造化
- 太陽系惑星大気をすべてカバー

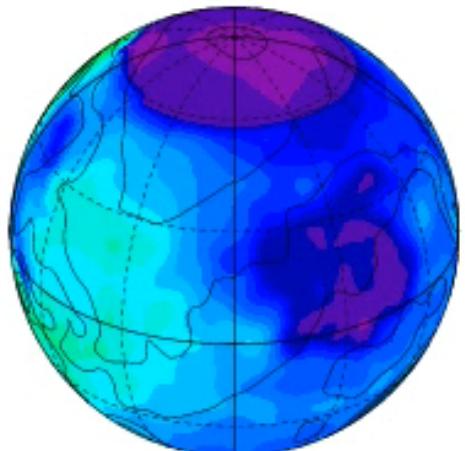


spmodel & DCPAM
(global model)



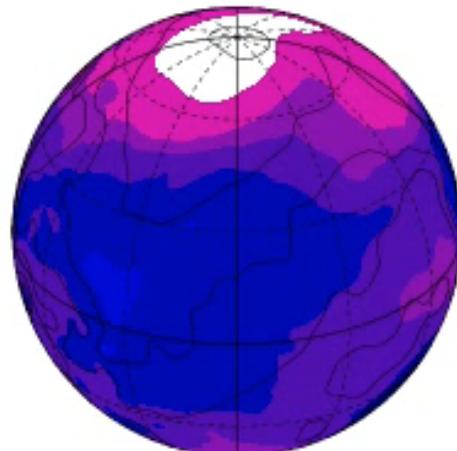
deepconv (regional model)

Surface temperature



CONTOUR INTERVAL = 2.000E+03

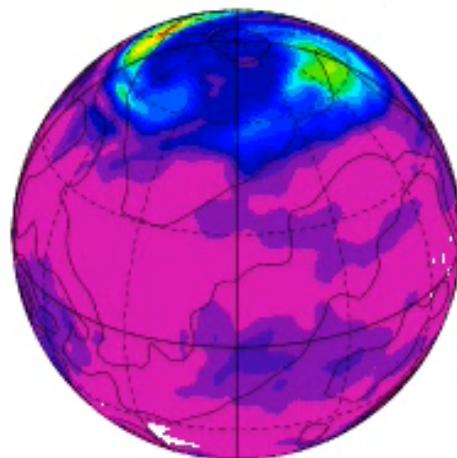
Precipitable water



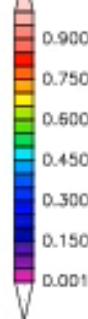
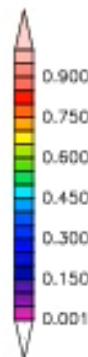
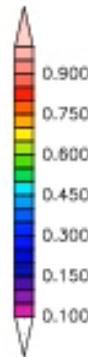
CONTOUR INTERVAL = 2.000E+03

$L_s = 0.00$ degrees

Water ice optical depth



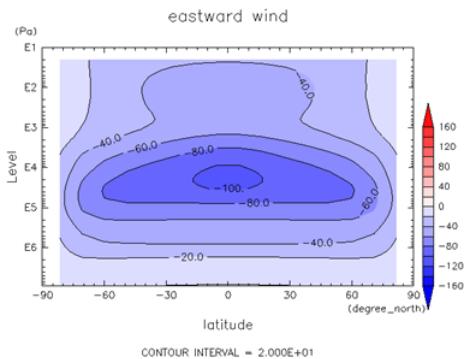
CONTOUR INTERVAL = 2.000E+03



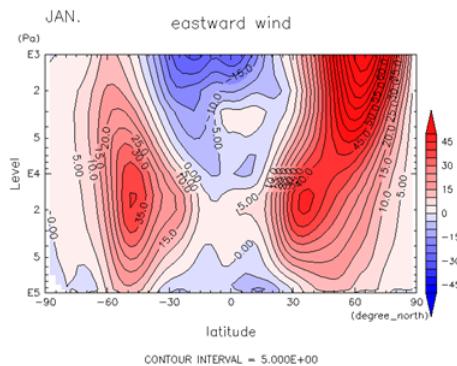
Examples of DCPAM experiments 1: Venus, Earth, Mars



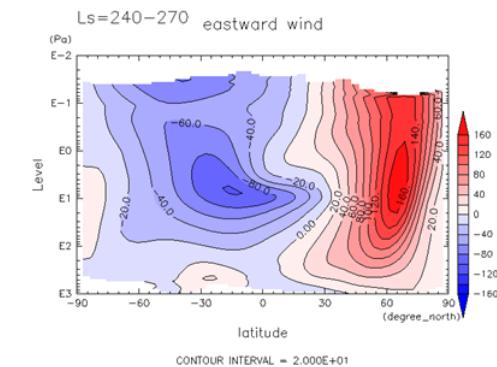
Venus



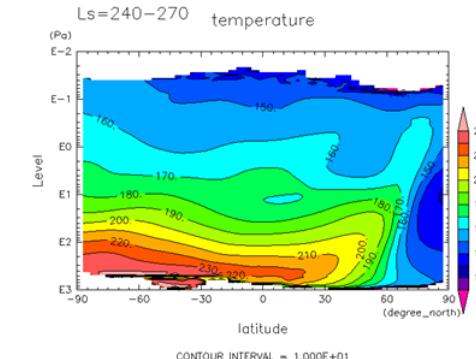
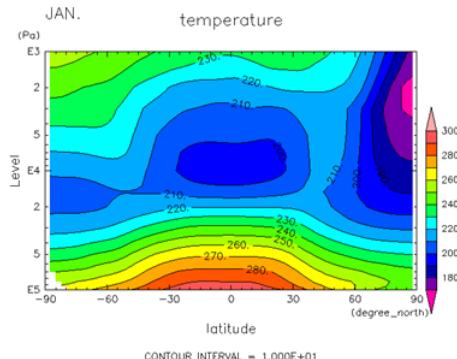
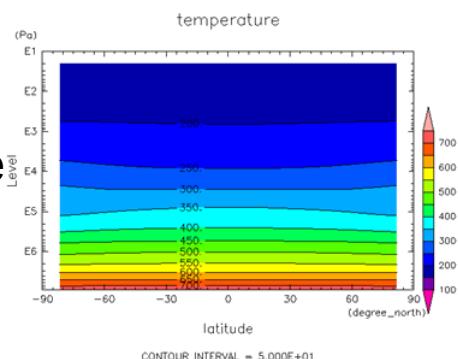
Earth



Mars



Zonal
wind

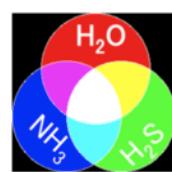
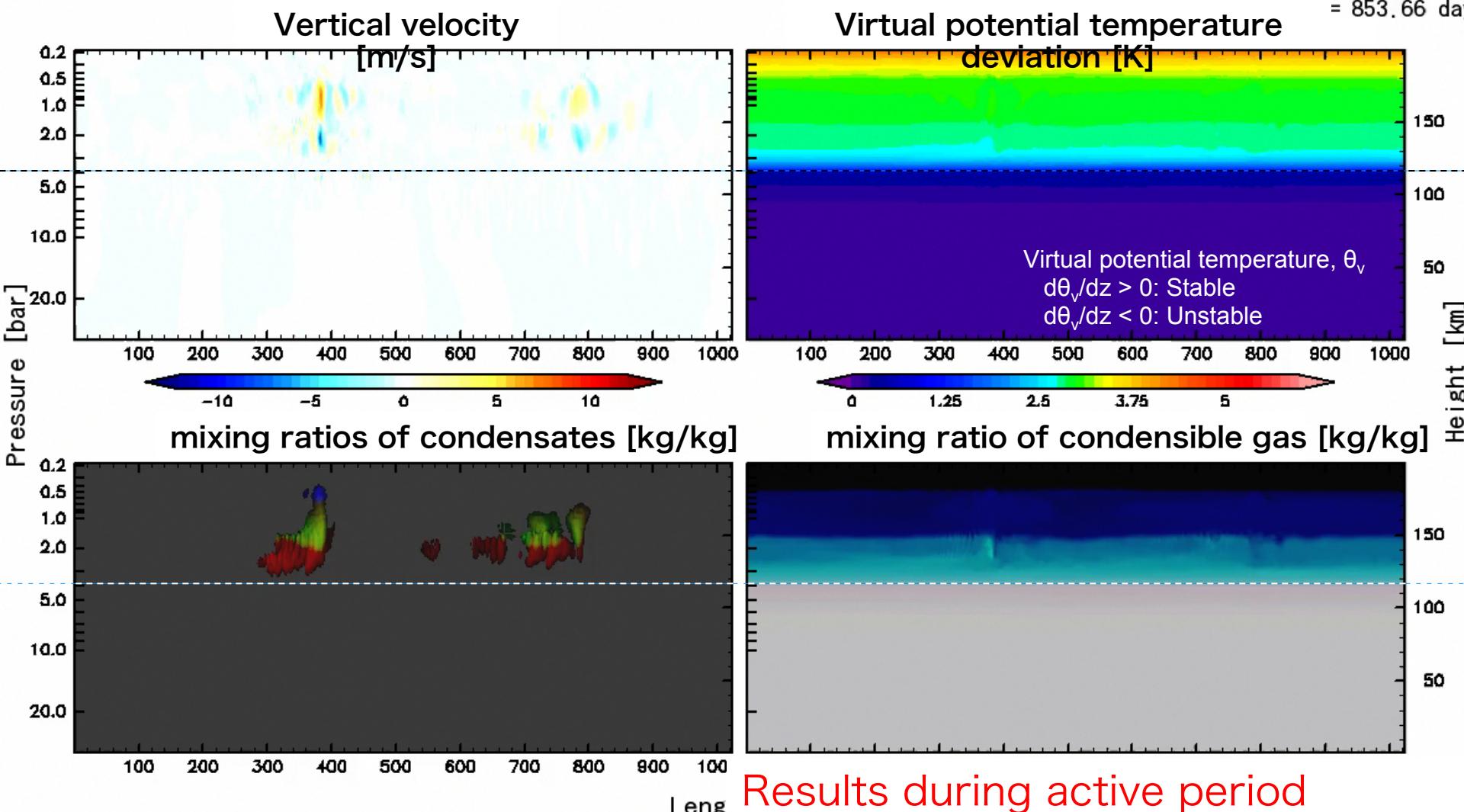


T10L50
(Newtonian cooling)

T42L26

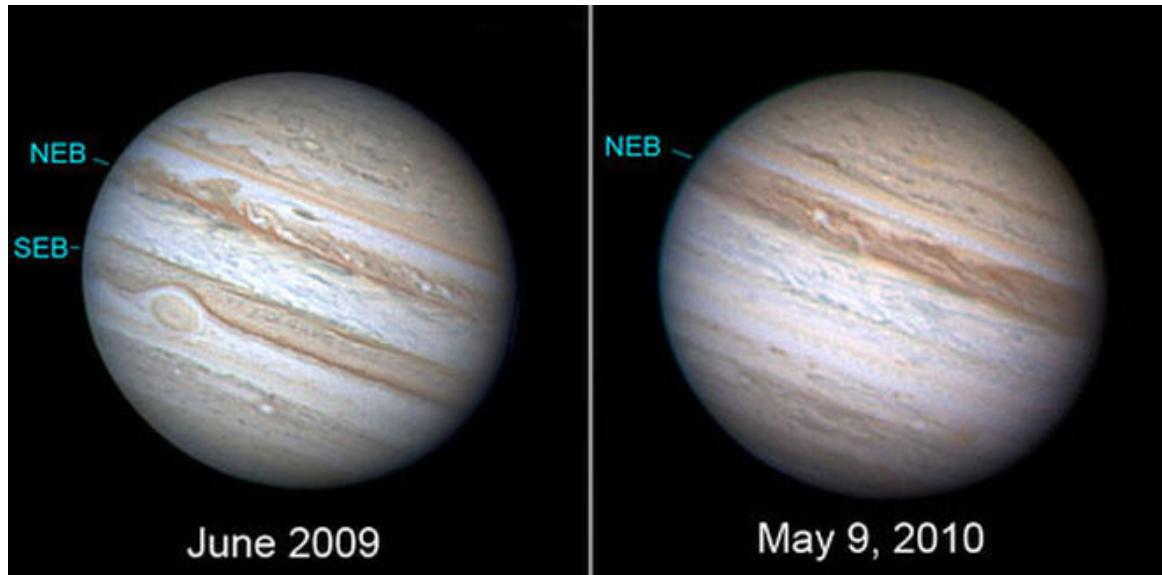
T31L36

Color code and vertical axes are different in three figures.



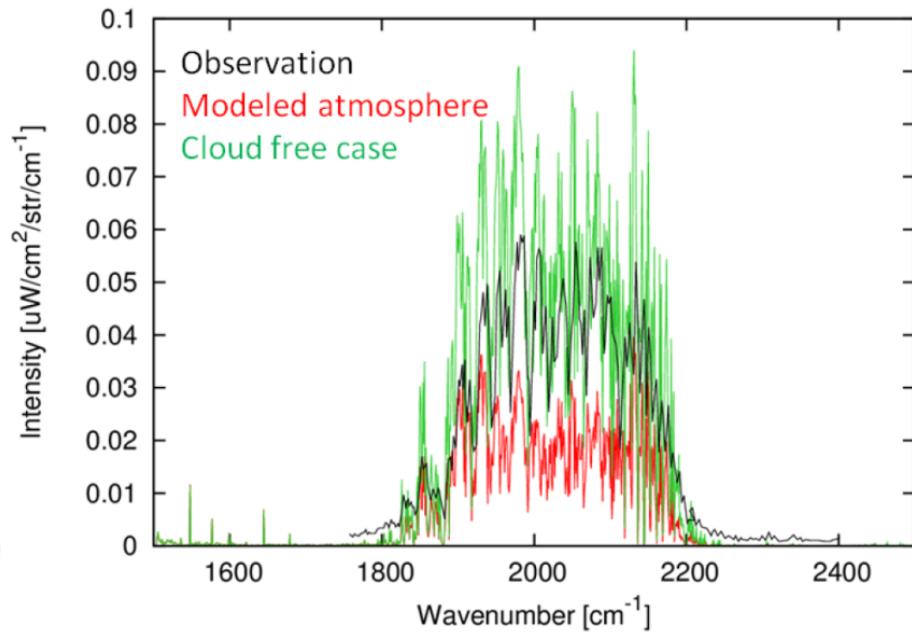
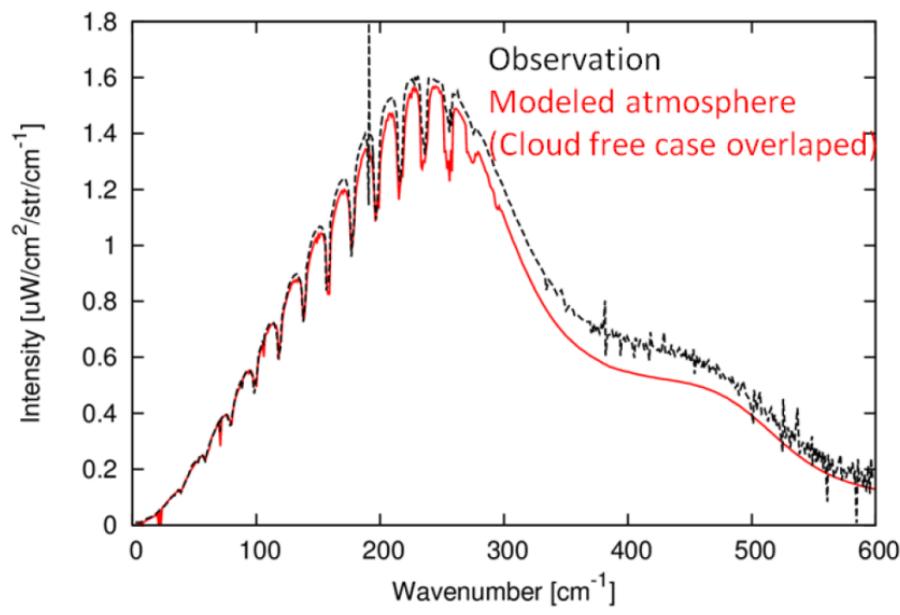
Results during active period

- Convection reaches tropopause
 - Cumulus is observed.
- Convection is divided at H₂O condensation level
 - Molecular weight effect



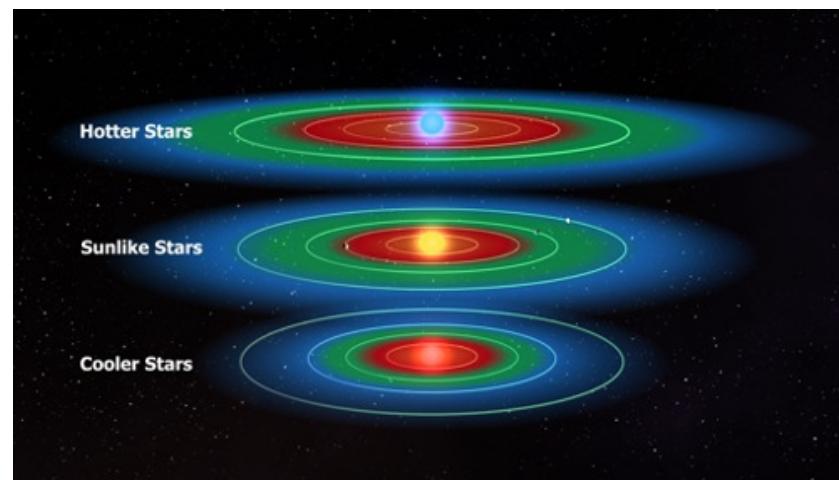
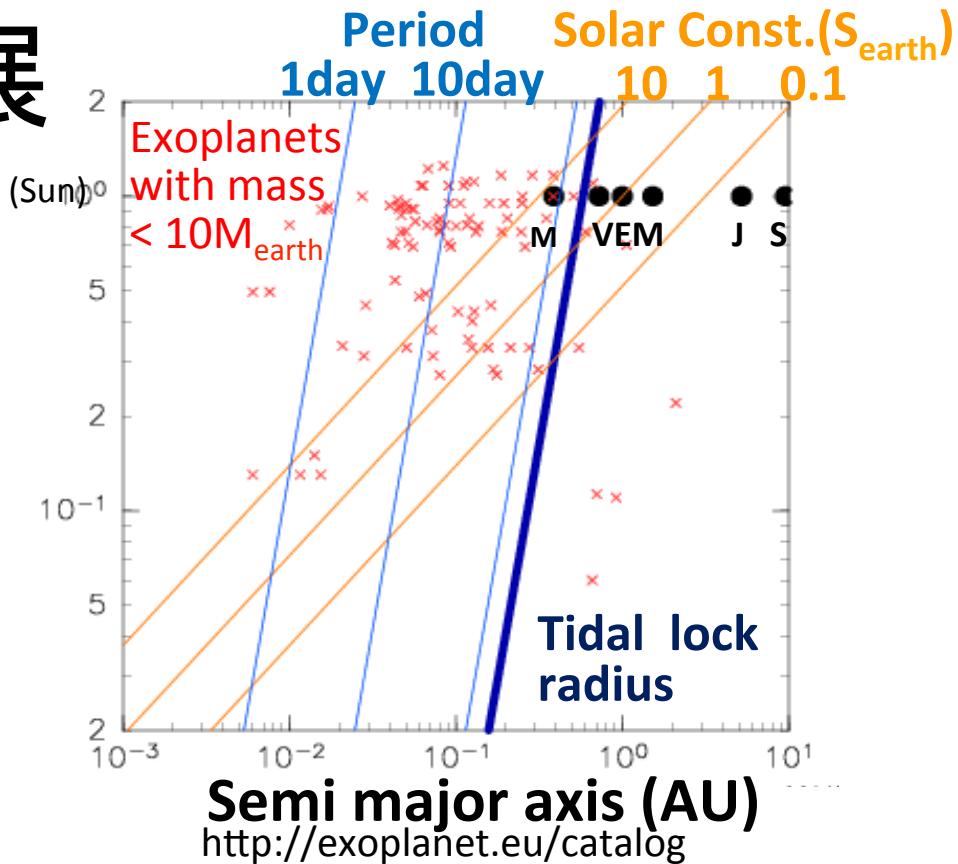
“fading/revival” cycle
周期 3-10 年
 H_2O 存在度~10x solar

低雲量
熱赤外域ほぼ透明



系外惑星学の進展

- ・太陽系惑星よりも、はるかに幅広い設定条件での数値シミュレーション研究が活発化
 - ・観測との対比はこれから
- ・比較惑星学のスコープを拡大、太陽系惑星の従来の理解にも再考を促しつつある

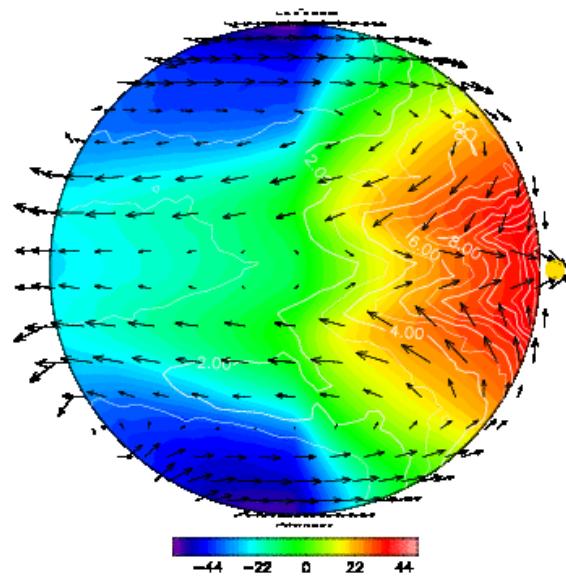
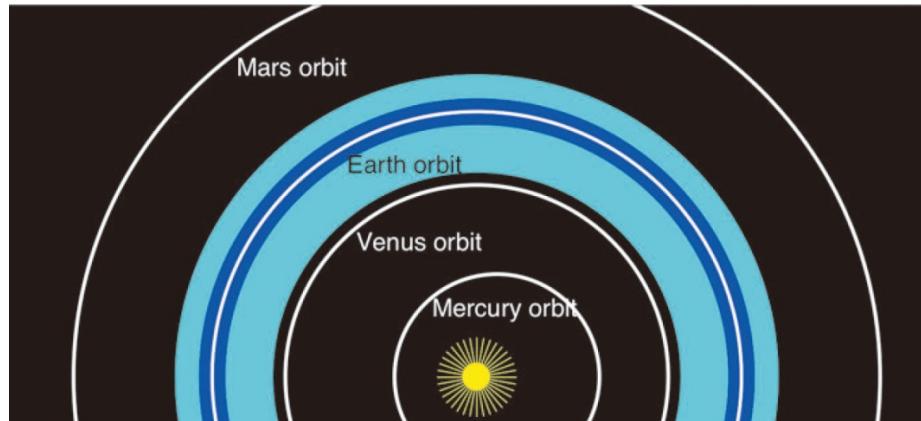


新学術領域研究「太陽系外惑星の新機軸：地球型惑星へ」H23-27
計画研究：系外惑星大気の数値モデリングと形成進化理論

1. 水の安定性：惑星成長と進化の過程で水が保持される（失なわれる）条件の解明
 - ・巨大衝突後の水蒸気大気の進化と観測可能性（→濱野）
 - ・寡占成長期の原始惑星の大気形成と揮発性物質分配
 - ・大気散逸素過程（成層圏コールドトラップ、熱的流出機構）
2. 大気大循環：多様な境界条件下における大気大循環シミュレーションと、惑星表層における水の安定性の解明
 - ・同期回転惑星（暴走温室効果の発生条件、化学風化率）
 - ・水の極域局在化による安定化
3. 巨大ガス惑星：雲対流、放射輸送、球殻対流シミュレーション

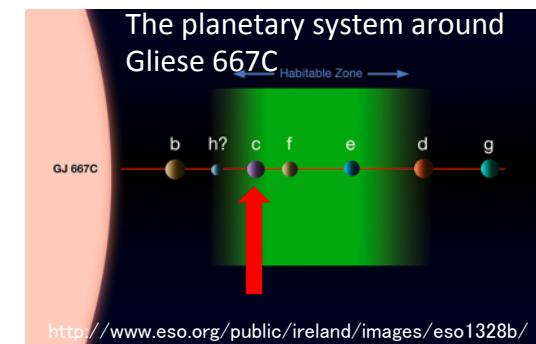
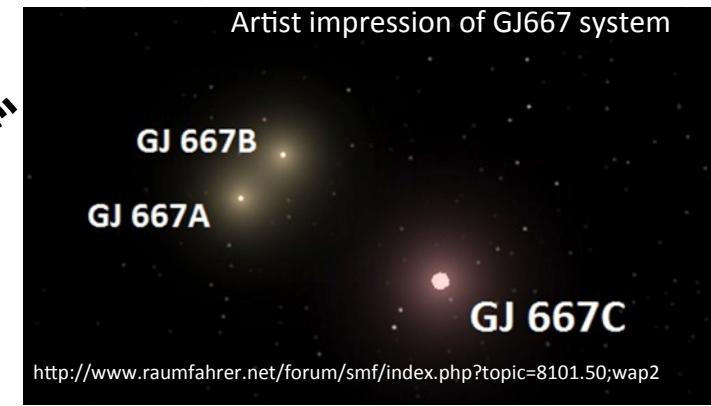
ハビタブルゾーンの再考

- 内側境界：暴走温室or水蒸気損失
- 外側境界：全球凍結
- 低赤道傾斜陸惑星のハビタブルゾーン拡大 (Abe+, 2011)
 - 赤道域の乾燥化
 - 赤道域の低アルベド持続
- 同期回転惑星のハビタブルゾーン拡大 (Ishiwatari +)
 - 恒星直下定在雲によるアルベド上昇
- 水蒸気損失限界の縮小 (Onishi +)
 - 無酸素大気における対流圏界面コールドトラップの強化



系外惑星気候予測モデリング GJ667Cc (Narita+)

- 地球にもっとも似るとされる系外惑星
- 母星 M dwarf GJ667C, 三重連星
- RV 法 (Bonfils et al., 2011)
- 質量 : $3.8 \sim 7.6 M_{\oplus}$
- 軌道周期 : 28.14 days
- 離心率 : ~ 0.02
- 軌道長半径 : 0.125 AU
 - HZ of GJ667C : 0.111 – 0.246 AU
- 恒星放射: 1230 W/m^2 (90 % of the earth's)
- 年齢 $> 2.0 \text{ Gyrs}$
 - 潮汐固定時間よりながい (Heller et al., 2011)
- 質量スケーリングで大気質量を与え、同期回転条件で GCM 計算



Physical quantities of GJ667Cc used in our model

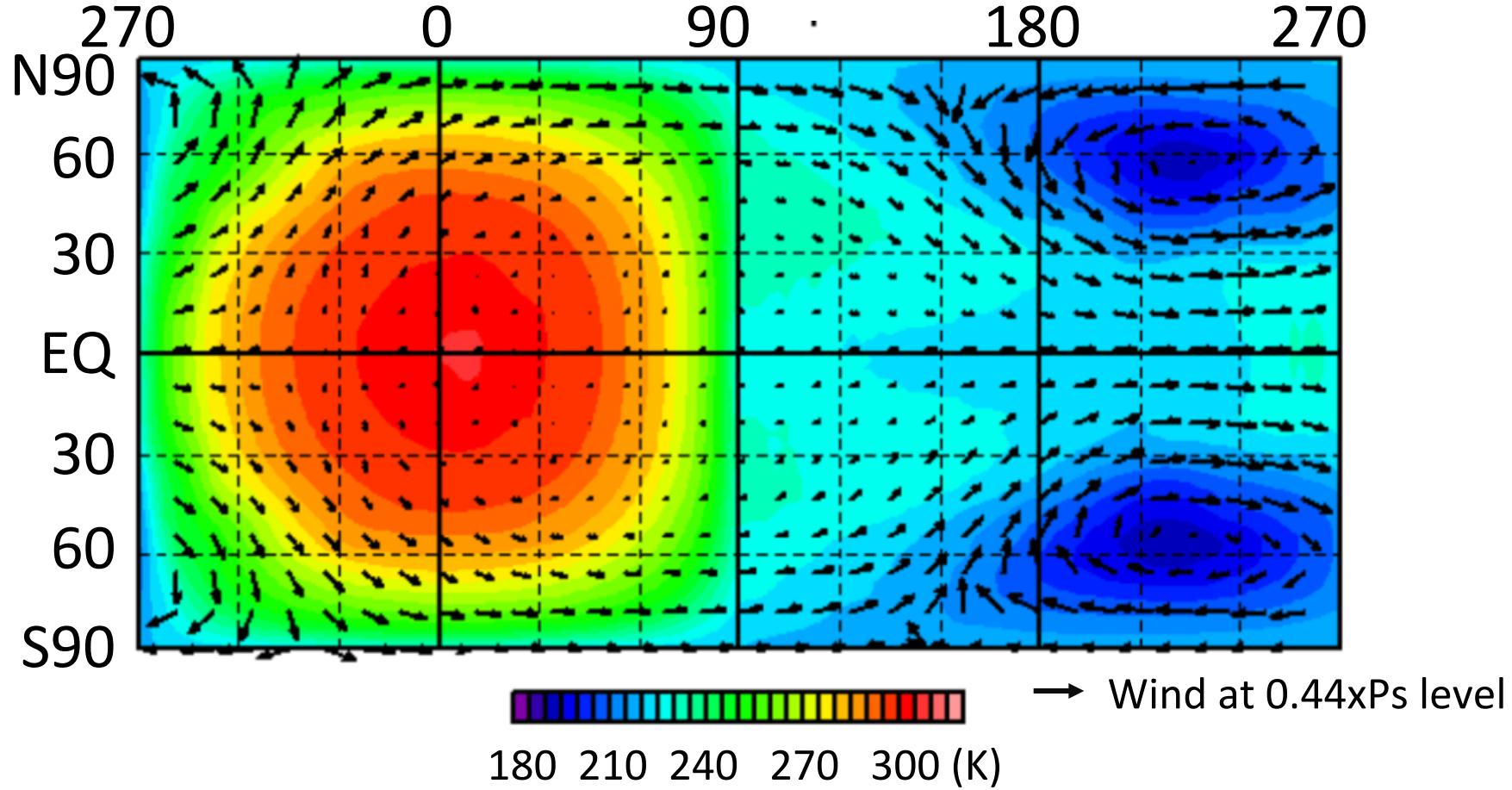
Table.1 Physical quantities of GJ667Cc

Physical quantities	Values	Remarks
Orbital period	28.14 days	Cycle of Doppler shifts
Planetary mass	3.8 M_⊕	Lower limit from observation
Semi-major axis	0.125 AU	Kepler's 3rd law
Eccentricity	0	Assuming true circle orbit
Stellar flux	1230 W/m²	Stellar temperature, Distance from star
Rotation rate	2.591×10⁻⁶ rad/s	Assuming synchronous rotation
Gravitational acceleration	15.3 m/s²	Mass scaling
Planetary radius	9938 km	Mass scaling
Surface pressure	2.4 bar	Mass scaling

Blue characters : Observational values Red characters : Assumed values

Blue ones are based on Anglada-Escudé et al. (2013)

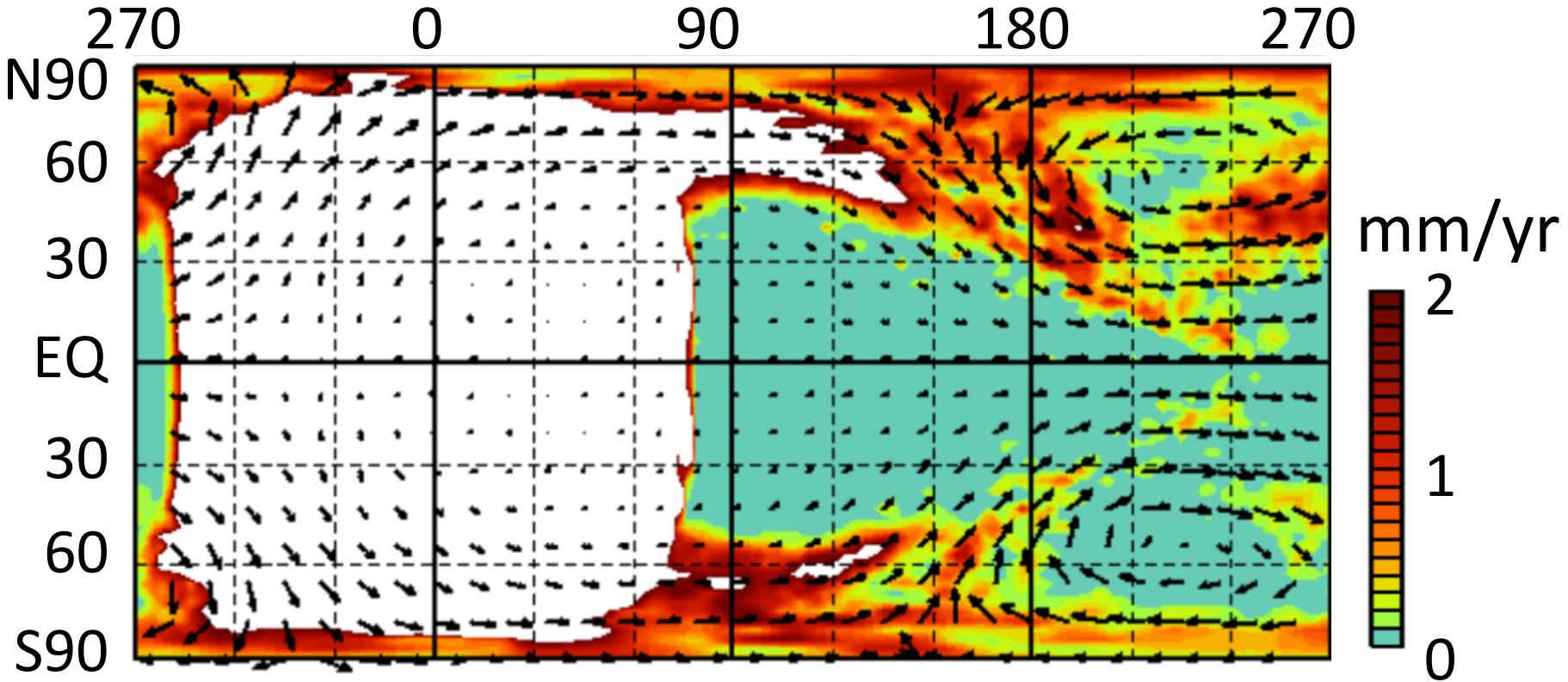
表面温度



- 強い温度コントラスト
- 恒星直下点 max +32°C
- 夜半球 min -83°C

- 全球平均気温 -25°C
c.f. Earth model =+14 °C
- $\Delta T_{\text{eff}} = \text{several K}$

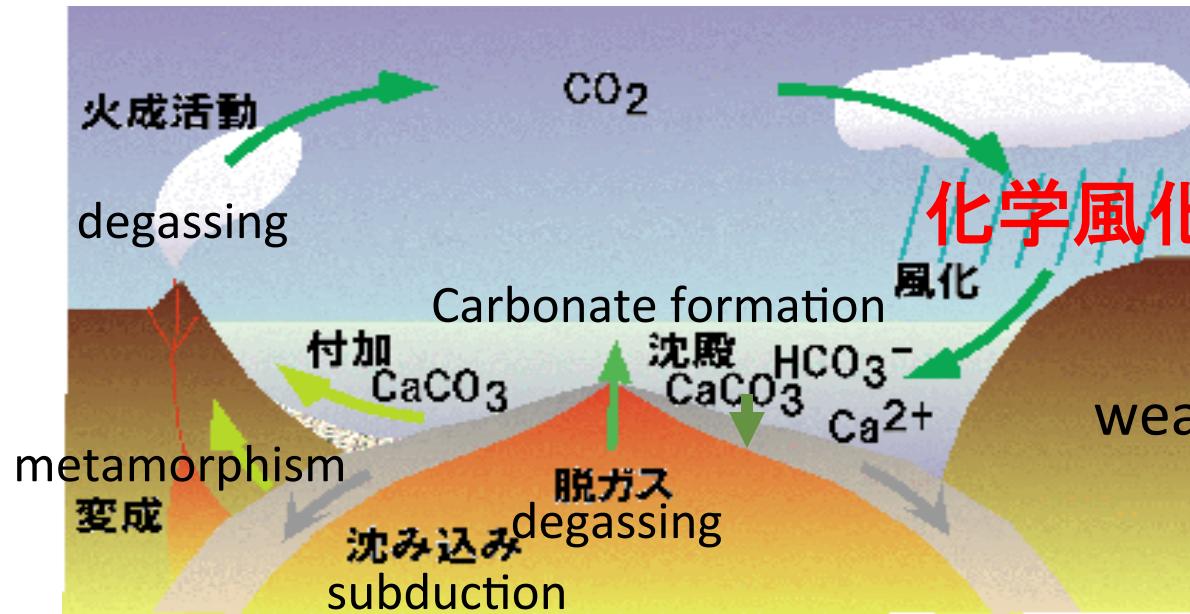
降水 (incl. 着氷)



- 恒星直下点に集中 max 9000mm/yr
- 夜半球も微小着氷あり

- 全球平均
735 mm/yr
c.f. Earth GCM=1052 mm/yr

地球化学的炭素循環への応用



CO₂ 固定速度を支配

$$w \propto RP_{\text{CO}_2}^{0.3} \exp\left(\frac{T_s(K) - 285}{17.7}\right)$$

↑ 局所降水率 ↑ 局所気温

- 単位面積化学風化率: 地球の1.1倍
- 恒星直下点の高温と高降水量が重要
- GJ667Cc が地球同様の海陸比を持つ場合、大気CO₂濃度は地球よりも低く抑えられる可能性がある
 - 脱ガス過程の惑星質量依存性も重要

惑星大気の数値モデリング：まとめ

- ・大気：惑星表層環境を規定する最も重要な物質圏
- ・天体ごとに境界条件が大きく異なり、物理過程を自由に交換可能なモデル設計が有効
- ・太陽系惑星大気モデルの精緻化、探査データとの本格的な比較研究へ
- ・系外惑星大気モデリング興隆、太陽系惑星へフィードバック、観測研究との融合へ
- ・不確定性をつぶす必要性、一手段は階層化モデリング
- ・惑星形成・進化の視点で大気循環モデルを用いることが有益
- ・惑星大気循環・放射モデルは、コミュニティモデルとして開発を進行中
 - ・地球流体電腦俱楽部で検索