

大気大循環モデルによる TRAPPIST-1系の惑星の気候 に関する数値実験

北海道大学 理学部 地球惑星科学科

惑星宇宙グループ GFD研究室

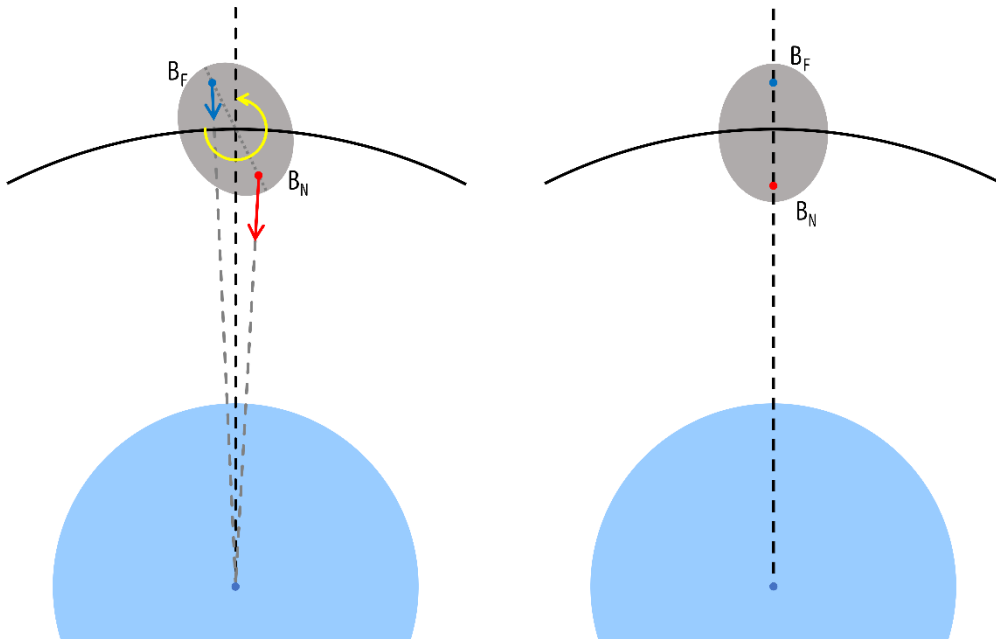
杉田 盛門

目次

1. 研究背景
2. 先行研究 Noda et al. (2017)
3. 本研究の目的
4. 使用モデル, 実験設定
5. 実験結果
6. まとめ・展望
7. 参考文献

1-1. 研究背景 -系外惑星-

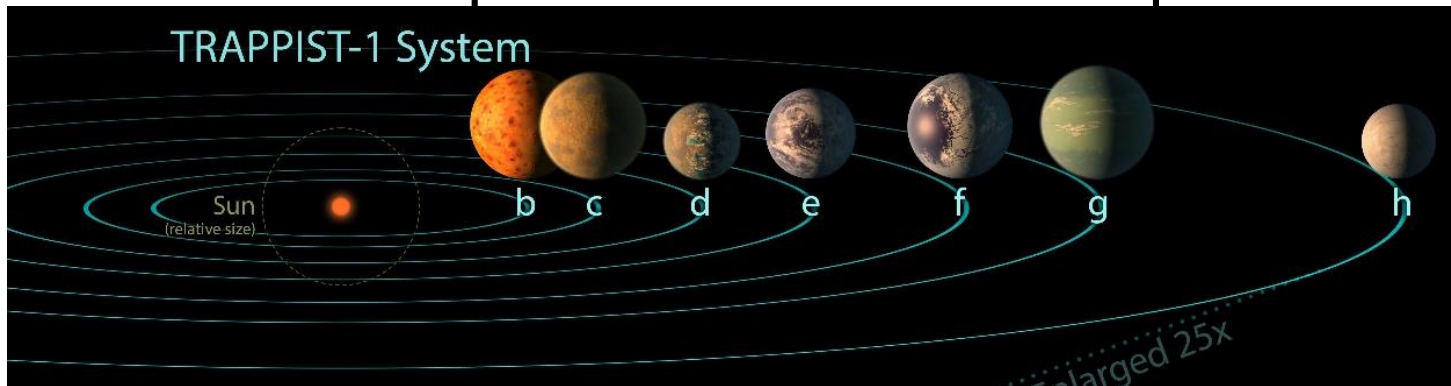
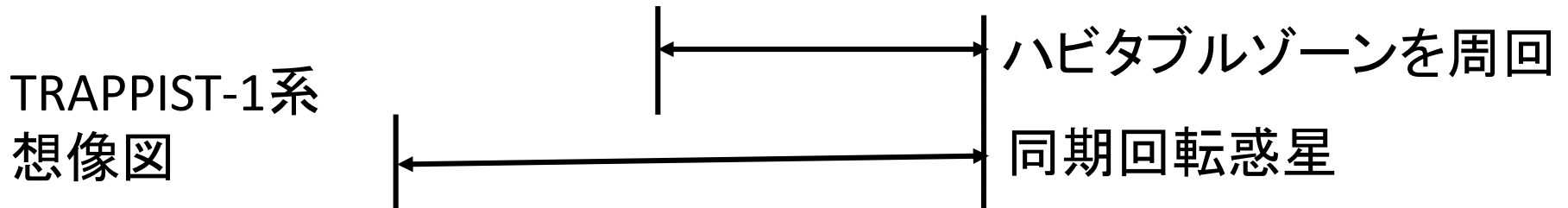
- 近年, 惑星の生命存在可能性が議論されている
- 太陽系外で, 自転周期と公転周期が等しい同期回轉惑星と考えられる惑星が発見されている
 - 惑星と中心星の距離が近い時, 潮汐力により惑星が楕円形になり, 同期回轉する
- 同期回轉惑星は恒星を向く面が変わらない



1-2. 研究背景 -TRAPPIST-1-

- TRAPPIST-1とは太陽系の外にある赤色矮星

- 太陽からの距離：約40光年
- 質量：太陽の約 8%
- スペクトル型：M8型
- 表面温度：約 2500K



NASA EXOPLANET EXPLORATION

- ハビタブルゾーンを周回する同期回転惑星が3つ存在すると考えられている
- 同期回転惑星の気候, 生命存在可能性に興味を持った

1-3. 研究背景 -TRAPPIST-1系の惑星-

- TRAPPIST-1 系の惑星のパラメータ (Gillon et al., 2017)

	公転周期 (日)	軌道長半径 (10^{-3} AU)	惑星半径 (地球半径)	質量 (地球質量)
b	$1.51087081 \pm 0.60 \times 10^{-6}$	11.11 ± 0.34	1.086 ± 0.035	0.85 ± 0.72
c	$2.4218233 \pm 0.17 \times 10^{-5}$	15.21 ± 0.47	1.056 ± 0.035	1.38 ± 0.61
d	$4.049610 \pm 0.63 \times 10^{-4}$	$21.44^{+0.66}_{-0.63}$	0.772 ± 0.030	0.41 ± 0.27
e	$6.099615 \pm 0.11 \times 10^{-4}$	$28.17^{+0.83}_{-0.87}$	0.918 ± 0.039	0.62 ± 0.58
f	$9.206690 \pm 0.15 \times 10^{-4}$	37.1 ± 1.1	1.045 ± 0.038	0.68 ± 0.18
g	$12.35294 \pm 0.12 \times 10^{-3}$	45.1 ± 1.4	1.127 ± 0.041	1.34 ± 0.88
h	20^{+15}_{-6}	63^{+27}_{-13}	0.755 ± 0.034	-

- TRAPPIST-1b, c, d, e, f, g は地球型惑星と考えられる

2-1. 先行研究 -Noda et al. (2017)-

- 概要

- 同期回転惑星の気候の自転角速度依存性を議論
 - 自転角速度は0から地球の自転角速度までの16通り
- 大気大循環モデル DCPAM を使用
- 重力加速度, 太陽定数, 惑星半径, 大気成分は地球のパラメータを用い数値実験

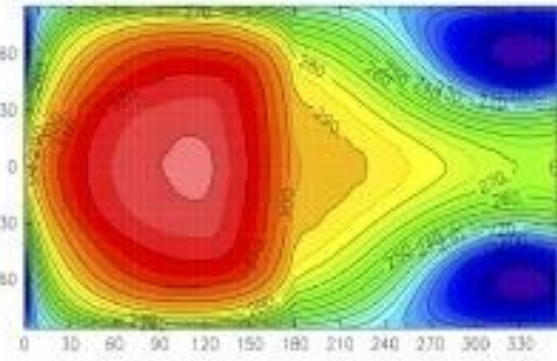
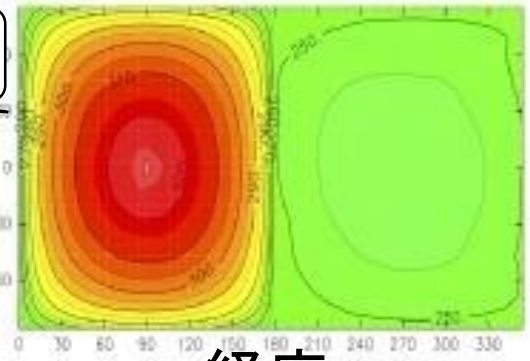
2-2. Noda et al. (2017) 計算結果

- 自転角速度に応じて, 大気構造は 4タイプに分類できる

地表面温度水平分布

(a) $\Omega 0.0$ タイプ1 (d) $\Omega 0.15$ タイプ2

夜半球が一様
緯度

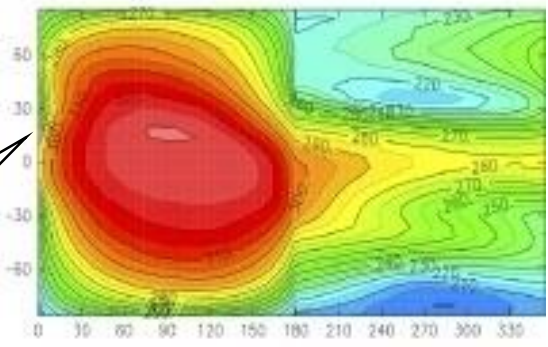


夜半球の赤道
付近で帯状に
暖かい

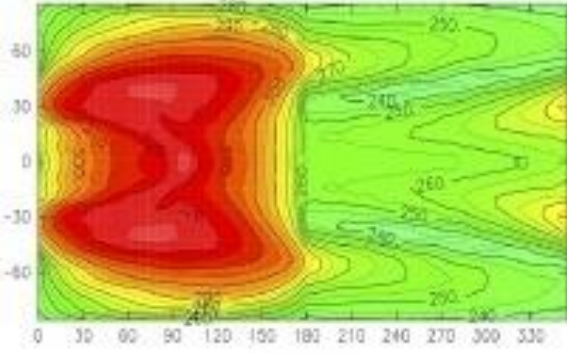
経度

(l) $\Omega 0.75$ タイプ3

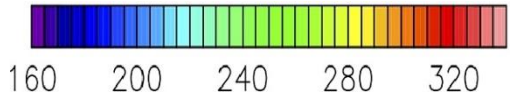
南北非対称



(p) $\Omega 1.0$ タイプ4



中高緯度帯が
暖かい



3. 本研究の目的

- Noda et al. (2017) では具体的な惑星を想定した計算を行っていない
- 目的
 - 実際の同期回転惑星を想定した数値実験を行い, ハビタビリティ, 大気構造を調べる
- 本発表の内容
 - ハビタブルゾーンを周回する同期回転惑星が3つ存在すると考えられているTRAPPIST-1系を選択し, 数値実験を行う
 - TRAPPIST-1e, f, g で液体の水が存在できるか確認する
 - TRAPPIST-1e, f, g の大気循環の特徴を調べる
 - 詳細に調べるために Noda et al. (2017) の自転角速度が同程度の実験と比較する

4-1. 使用したモデル

- 大気大循環モデル DCPAM
(Dennou-Club Planetary Atmospheric Model)
<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>
 - 3次元球面上のプリミティブ方程式系 (鉛直静水圧近似, 薄い大気の近似を行った方程式系)に基づく惑星大気大循環モデル
- 積雲過程：対流調節スキーム
 - 大気の鉛直構造が不安定になると空気塊が断熱的に上昇し, 安定化させる仕組み
- 雲：発生した瞬間なくなる
 - 凝縮した水はすぐに大気から除かれる
- 放射：水蒸気は短波放射に対して透明であり,
長波放射に対して灰色 (波長によらず一定に吸収)
- 地表面条件：熱容量0の海

4-2. 計算設定

	重力加速度 (m/s^2)	太陽定数 (W/m^2)	惑星半径 (km)	自転角速度 (/s)	自転角速度 (Noda et al., 2017 の表現)
e	7.2	906	5850	1.192×10^{-5}	$\Omega 0.16$
f	6.1	523	6657	7.899×10^{-6}	$\Omega 0.11$
g	10.3	354	7180	5.887×10^{-6}	$\Omega 0.08$

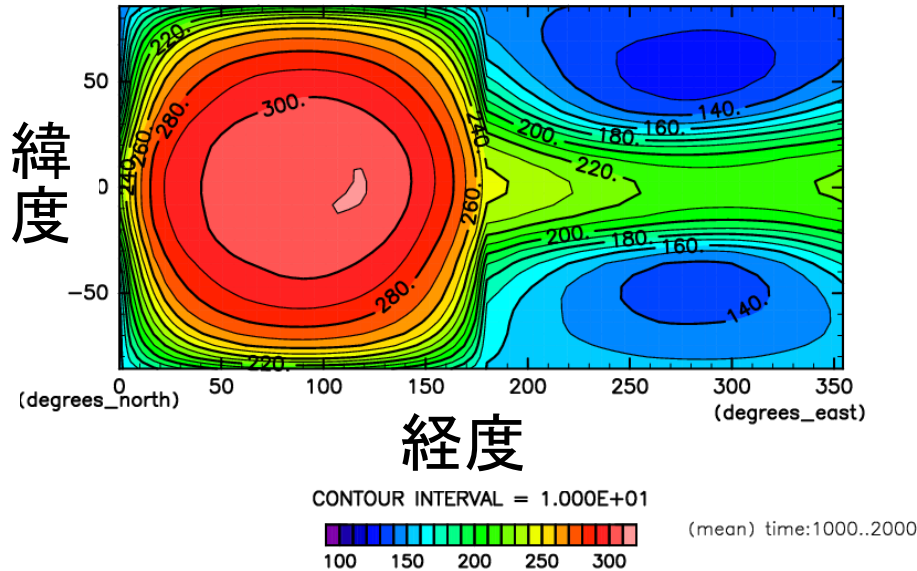
g の実験は上手く走らない

- 全ての惑星で共通
 - 全球平均表面気圧 : 10^5 Pa
 - 乾燥大気分子量 : 28.964
 - 乾燥大気比熱 : 1004.6 J/K kg
 - 大気アルベド : 0.0
 - 地表面熱容量 : 0.0 J/K
 - 自転軸傾斜角 : 0.0 度
 - 水蒸気分子量 : 18.0
 - 水蒸気比熱 : 1810.0 J/K kg
 - 地表面アルベド : 0.0
 - 軌道離心率 : 0.0

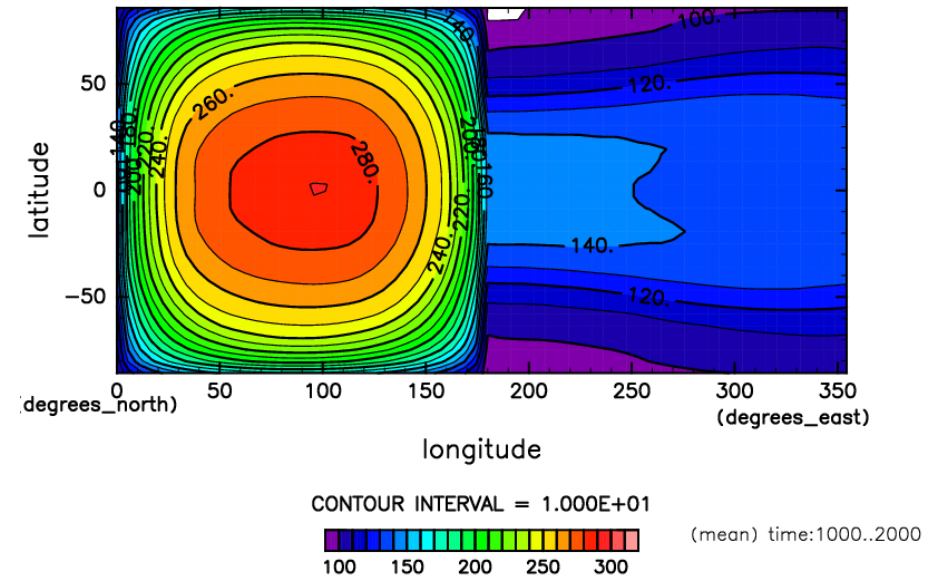
4-3. 計算設定

- 空間解像度
 - 東西方向 : 64点, 南北方向 : 32点, 鉛直方向 : 16点
- 時間解像度 : 20分
- 初期条件
 - 気温 : 280K に振幅 0.1K のノイズが加えられた値
 - 風速 : 0 m/s
- 2000日計算を行い, 解析には最後の1000日平均を用いる

5-1. 計算結果：地表面温度



TRAPPIST-1e

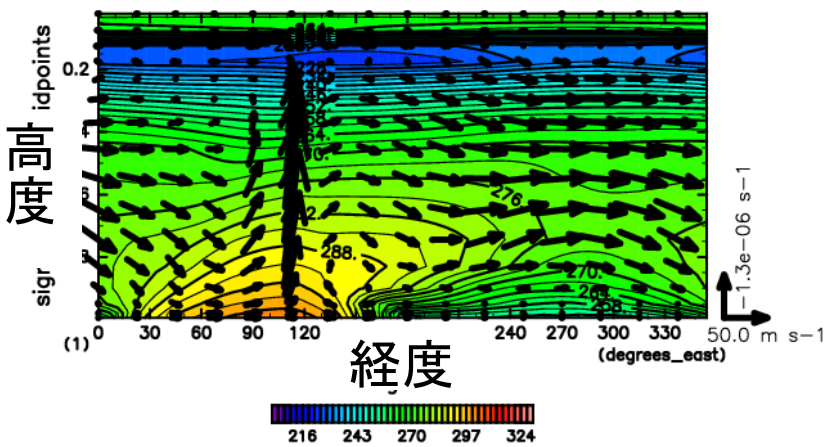


TRAPPIST-1f

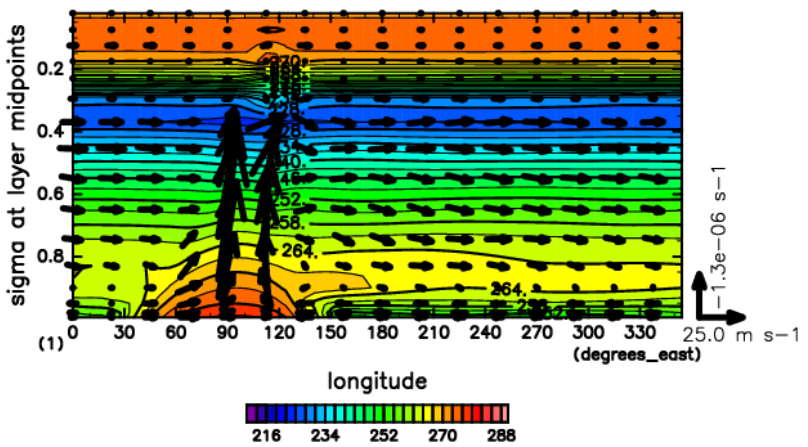
- TRAPPIST-1e, f 共に太陽直下点付近では 273 K を超える
- 液体の水が存在できる
- 今回の実験では地表面アルベドを 0.0 で固定
- アルベドの効果を検討すると, 太陽直下点でも 273 K を下回るかもしれない

5-2. 計算結果：赤道面の気温と風速

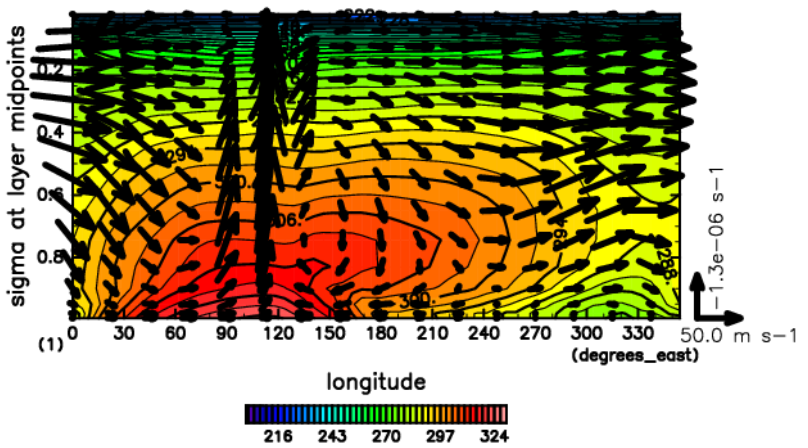
TRAPPIST-1e



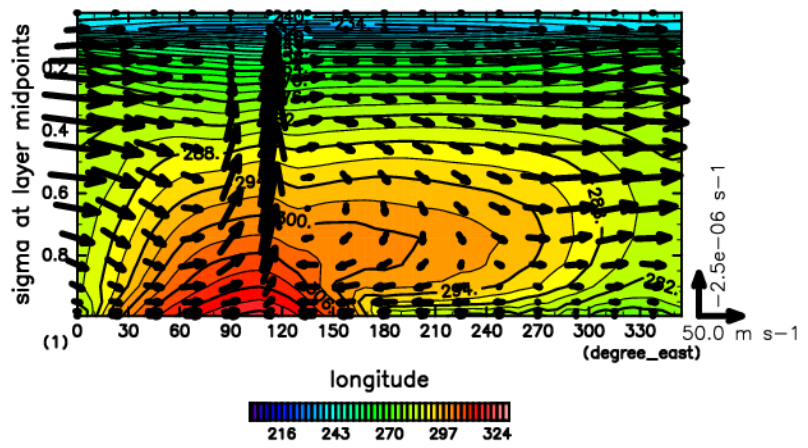
TRAPPIST-1f



Noda et al. (2017) ($\Omega 0.15$)



Noda et al. (2017) ($\Omega 0.1$)



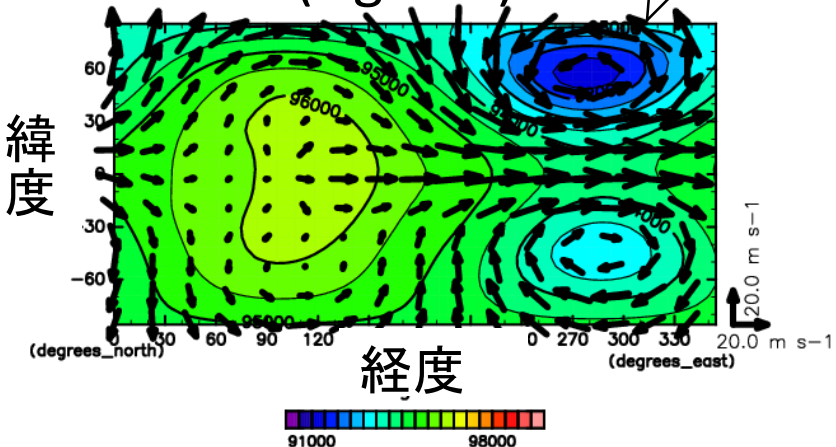
太陽直下点で上昇風, 対流圏上層で西風
 Noda et al. (2017) と同じ特徴

5-3. 対流圏界面のジオポテンシャルと水平風

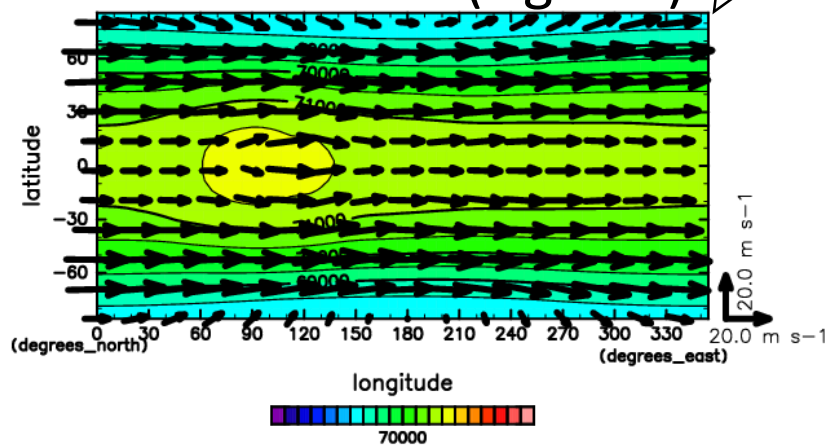
ロスビー波

全球的に西風

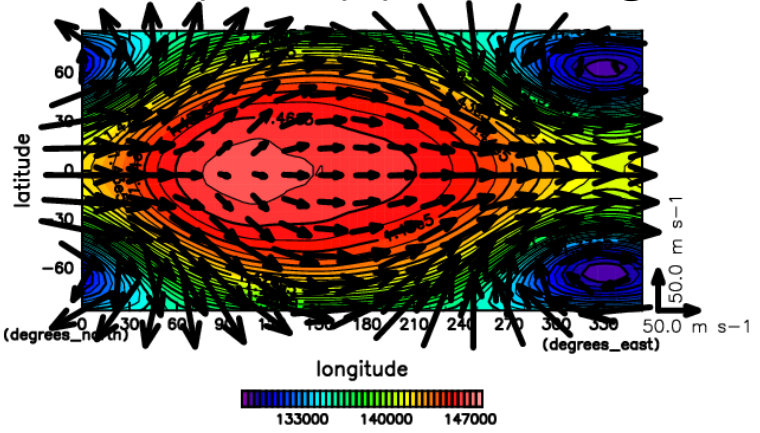
TRAPPIST-1e (sig0.29)



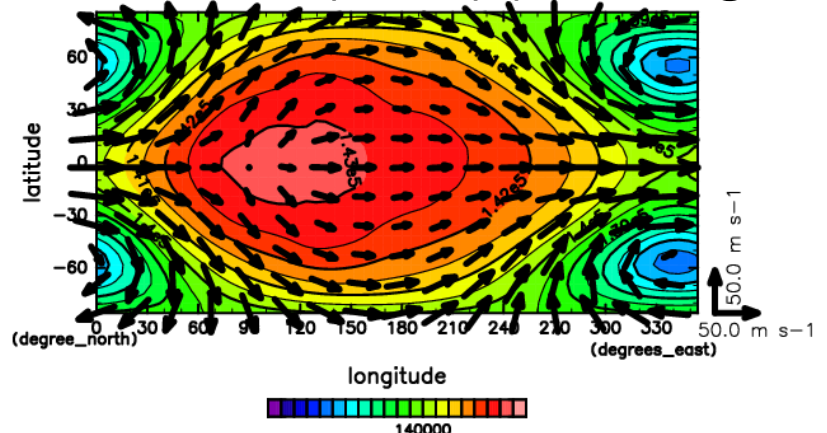
TRAPPIST-1f (sig0.36)



Noda et al. (2017) ($\Omega 0.15$, sig0.17)



Noda et al. (2017) ($\Omega 0.1$, sig0.17)



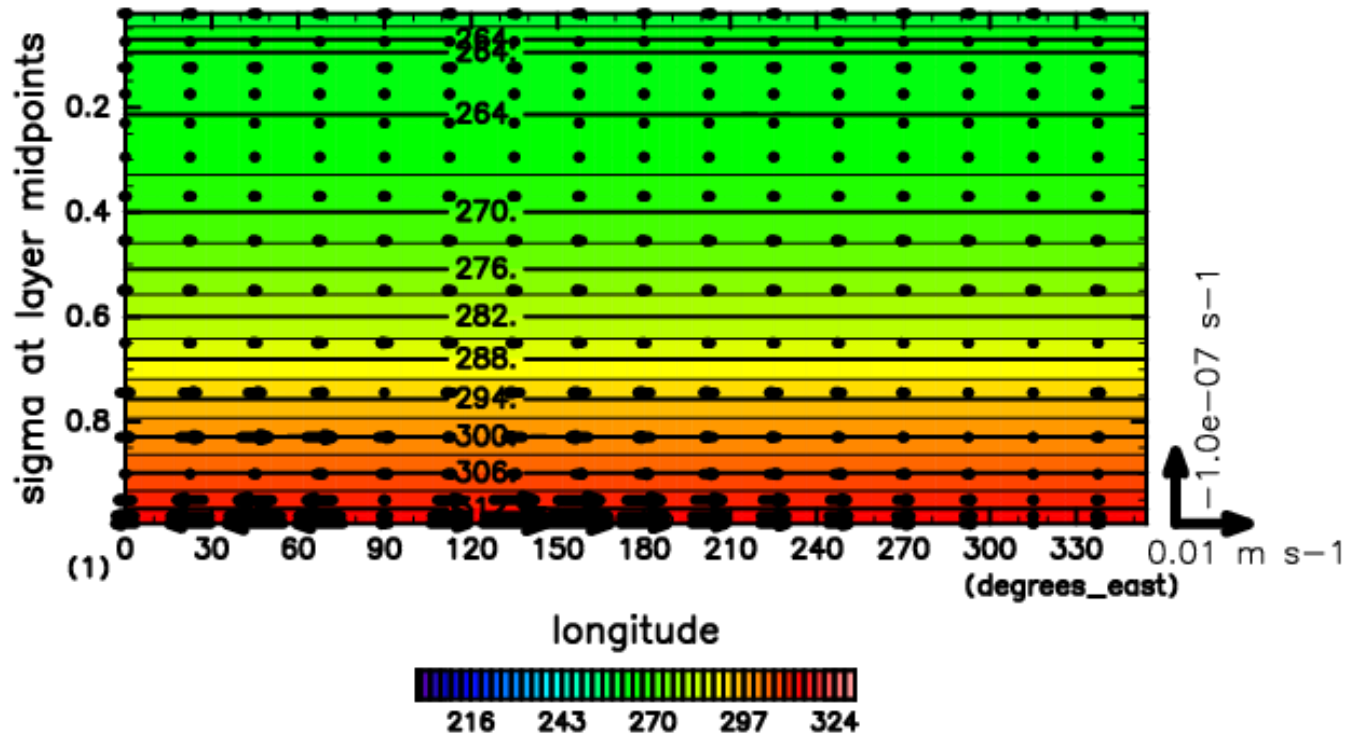
e はNoda et al. (2017) と対応

f はNoda et al. (2017) と違う

5-4. TRAPPIST-1g

- TRAPPIST-1g の設定で実験を行ったが, うまく計算できていない

赤道面の気温と風速



風がほぼ吹いていないが, 気温が経度によらない
太陽定数が小さいが, 大気下層で高温

6. まとめ・展望

- TRAPPIST-1e, f, g を想定した条件下で数値実験を試み, e, f は計算できたが, g は計算できなかった
- TRAPPIST-1e, f の両者とも, 地表面に液体の水が存在できる
- TRAPPIST-1e は, 対流圏界面でスーパーローテーション, ロスビー波
 - Noda et al. (2017) と対応している
- TRAPPIST-1f は, 太陽直下点で上昇風, 対流圏界面で全球的に西風
 - Noda et al. (2017) と違う
- 本研究では地球大気や灰色放射を想定し, アルベドの効果を考えないなど, 多くの設定で理想化している
- これらの設定を実際の惑星に近づけると, 本研究より正確な気候が得られる.
- まずは地球放射を考えた実験を行い, 同期回転惑星の気候の理解を目指したい

7. 参考文献

- Michaël Gillon, Amaury H. M. J. Triaud, Brice-Olivier Demory, Emmanuël Jehin, Eric Agol, Katherine M. Deck, Susan M. Lederer, Julien de Wit, Artem Burdanov, James G. Ingalls, Emeline Bolmont, Jeremy Leconte, Sean N. Raymond, Franck Selsis, Martin Turbet, Khalid Barkaoui, Adam Burgasser, Matthew R. Burleigh, Sean J. Carey, Aleksander Chaushev, Chris M. Copperwheat, Laetitia Delrez, Catarina S. Fernandes, Daniel L. Holdsworth, Enrico J. Kotze, Valérie Van Grootel, Yaseen Almleaky, Zouhair Benkhaldoun, Pierre Magain, Didier Queloz : Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1. Nature 542, 456-460
- NASA EXOPLANET EXPLORATION, Largest batch of Earth-size, habitable zone planets <https://exoplanets.nasa.gov/trappist1/>
- NASA Telescope Reveals Largest Batch of Earth-Size, Habitable-Zone Planets Around Single Star, Last Update: Aug 7, 2017 <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-telescope-reveals-largest-batch-of-earth-size-habitable-zone-planets-around>
- Noda, S., M. Ishiwatari, K. Nakajima, Y.O. Takahashi, S. Takehiro, M. Onishi, G.L. Hashimoto, K. Kuramoto, and Y.-Y. Hayashi, 2017: The circulation pattern and day-night heat transport in the atmosphere of a synchronously rotating aquaplanet: dependence on planetary rotation rate. Icarus 282, 1-18.
- 自転と公転の同期 – Wikipedia <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%87%AA%E8%BB%A2%E3%81%A8%E5%85%AC%E8%BB%A2%E3%81%AE%E5%90%8C%E6%9C%9F>
- 地球流体電脳倶楽部 大気大循環モデル DCPAM, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>