

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
地球流体力学研究室

学籍番号 : 02140791

杉田 盛門

平成 30 年 2 月 28 日

要旨

現在, 系外惑星のハビタビリティ (生命存在可能性) が議論されている. TRAPPIST-1 系の惑星はハビタビリティが議論されている系外惑星の一つである. TRAPPIST-1e, f, g は自転周期と公転周期が同じである同期回転惑星であり, 且ハビタブルゾーンを周回していると考えられる. 惑星のハビタビリティを議論するには, その惑星の全球的な気候を理解することが重要である. 同期回転惑星の全球的な気候を, 数値実験により解析した先行研究として Noda et al. (2017) がある. Noda et al. (2017) では同期回転惑星の気候の自転角速度依存性を議論している. Noda et al. (2017) では各パラメータに地球と同じ値を与え, 自転角速度に 0 から地球の値までの 16 通り与えている. Noda et al. (2017) の計算結果, 大気構造は自転角速度に応じてタイプ 1-4 の 4 種類に分類できるとされている.

本研究では, TRAPPIST-1e, f, g を想定した条件の下, 数値実験を行い, それらの惑星のハビタビリティ, 大気構造について議論することを目的としている. 大気構造を理解するために, Noda et al. (2017) と比較を行い, 類似点や相違点についても議論している.

数値実験を試みたところ, TRAPPIST-1e, f については計算ができたが, TRAPPIST-1g については計算できなかった. 正しく計算ができたと考えられる TRAPPIST-1e, f の両方で太陽直下点付近では液体の水が存在できる環境が得られた. TRAPPIST-1e の大気構造は 対流圏上層の赤道付近でロスビー波が見られるなど, Noda et al. (2017) のタイプ 2 と同様の特徴が見られた. TRAPPIST-1f の大気構造として, 赤道面の大気循環は Noda et al. (2017) のタイプ 2 と同様の特徴が見られたが, 対流圏上層の水平風は Noda et al. (2017) の記述と異なる結果が得られた.

目次

第1章	はじめに	4
第2章	系外惑星と TRAPPIST-1 について	5
2.1	系外惑星	5
2.2	TRAPPIST-1	5
第3章	先行研究 -Noda et al.-	7
第4章	大気大循環モデル DCPAM の説明	9
4.1	座標系の取り方	9
4.2	支配方程式	9
4.3	本研究で用いたモデル	12
第5章	実験設定	13
第6章	結果と考察	14
6.1	ハビタビリティの考察	14
6.2	TRAPPIST-1e の大気構造	14
6.3	TRAPPIST-1f の大気構造	15
6.4	TRAPPIST-1g の実験結果	15

第7章 まとめ	19
付録A Noda et al. (2017) 再現実験	22

第1章 はじめに

現在, 系外惑星のハビタビリティ (生命存在可能性) が議論されている. TRAPPIST-1 系の惑星はハビタビリティが議論されている系外惑星の一つである. TRAPPIST-1e, f, g は自転周期と公転周期が同じである同期回転惑星の一つであり, 且ハビタブルゾーンを周回していると考えられている. 惑星のハビタビリティを議論するには, その惑星の全球的な気候を理解することが重要である. 本研究では, 同期回転惑星の全球的な気候や大気循環を理解し, ハビタビリティを議論することを目指す.

GCM とは, General Circulation Model の略記で大気大循環モデルのことである. GCM は, 運動方程式で表される風の変化から気温・水蒸気・オゾンといった物質や物理量の輸送, 放射・対流・潜熱放出・地面とのエネルギー交換, 大気の内エネルギーの変化, 空気塊上昇や風速の変化へと変換される大気加熱などを計算する数値モデルである.

本研究では, 大気大循環モデルの一つである DCPAM を使用し, TRAPPIST-1e, f, g の気候に関する数値実験を行い, ハビタビリティに関する議論をした. また, それらの惑星の大気循環の特徴を掴むために同期回転惑星の気候の自転角速度依存性について議論されている Noda et al. (2017) と比較をし, 類似点, 相違点について議論した.

第2章 系外惑星と TRAPPIST-1 について

2.1 系外惑星

系外惑星とは太陽以外の恒星の周りを公転する惑星である。系外惑星には自転周期と公転周期が同じである同期回転惑星と推定されるものも見つかっている。同期回転惑星では恒星を向く面が変わらない。惑星と恒星の距離が近ければ、潮汐力の影響が大きくなり、惑星が楕円形になることによって同期回転する。

2.2 TRAPPIST-1

TRAPPIST-1 とは太陽から約 40 光年離れた赤色矮星の一つである。スペクトル型は M8 型、質量は太陽の約 8%、表面温度は約 2500 K である。2016 年 5 月に TRAPPIST-1 を周回する 3 つの惑星の存在が TRAPPIST (Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope) 望遠鏡を用いたトランジット法による観測で発見されたことが発表された。2017 年 2 月には スピッツァー宇宙望遠鏡による観測で TRAPPIST-1 系には惑星が 7 つ存在し、内側 6 つ (b,c,d,e,f,g) の惑星は同期回転しており、そのうち 3 つ (e,f,g) がハビタブルゾーンを周回していることが発表された。

Gillon et al. (2017) に記載されている TRAPPIST-1 系の惑星のパラメータを以下にまとめる。

	公転周期 [地球日]	軌道長半径 [10^{-3} AU]	惑星半径 [地球半径]	惑星質量 [地球質量]
TRAPPIST-1b	$1.51087081 \pm 0.60 \times 10^{-6}$	11.11 ± 0.34	1.086 ± 0.035	0.85 ± 0.72
TRAPPIST-1c	$2.4218233 \pm 0.17 \times 10^{-5}$	15.21 ± 0.47	1.056 ± 0.035	1.38 ± 0.61
TRAPPIST-1d	$4.049610 \pm 0.63 \times 10^{-4}$	$21.44^{+0.66}_{-0.63}$	0.772 ± 0.030	0.41 ± 0.27
TRAPPIST-1e	$6.099615 \pm 0.11 \times 10^{-4}$	$28.17^{+0.83}_{-0.87}$	0.918 ± 0.039	0.62 ± 0.58
TRAPPIST-1f	$9.206690 \pm 0.15 \times 10^{-4}$	37.1 ± 1.1	1.045 ± 0.038	0.68 ± 0.18
TRAPPIST-1g	$12.35294 \pm 0.12 \times 10^{-3}$	45.1 ± 1.4	1.127 ± 0.041	1.34 ± 0.88
TRAPPIST-1h	20^{+15}_{-6}	63^{+27}_{-13}	0.755 ± 0.034	-

表 2.2.1: TRAPPIST-1 系の惑星のパラメータ

第3章 先行研究 -Noda et al.-

同期回転惑星の気候と、数値実験について勉強するため、Noda et al. (2017) を読んだ。Noda et al. (2017) では、同期回転惑星の気候の自転角速度依存性について議論されている。また、数値実験には DCPAM (4章参照) が用いられている。

Noda et al. (2017) の数値実験では以下のパラメータが用いられている。

重力加速度	9.8 [m s ⁻¹]
太陽定数	1380 [W m ⁻²]
惑星半径	6371 [km]

自転角速度は 0 から地球の自転角速度まで、16 通りを考える。Noda et al. (2017) では、自転角速度に地球の自転角速度の 0.5 倍の値を与えた実験を $\Omega 0.5$ とするような表し方をしている。その他の設定は 5 章に記載したものと同一である。

また、TRAPPIST-1e, f, g を想定した数値実験を行うために、Noda et al. (2017) の再現実験を行い、数値実験が正しく行えることを確認した。詳しくは付録 A を参照。以降 Noda et al. (2017) の結果として示す図は、再現実験にて得られた結果を使用した。

16 通りの自転角速度で計算した結果、大気構造は 4 タイプに分類できるとされている。図 3.1 は、各タイプの代表的な自転角速度を一つ抜粋した地表面温度の図である。(a) のように夜半球が一様な地表面温度分布が得られた実験をタイプ 1, (b) のように夜半球の赤道付近で帯状に暖かい地表面温度が得られた実験をタイプ 2, (c) のように南北非対称な地表面温度分布が得られた実験をタイプ 3, (d) のように中高緯度帯で暖かい地表面温度分布が得られた実験をタイプ 4 としている。

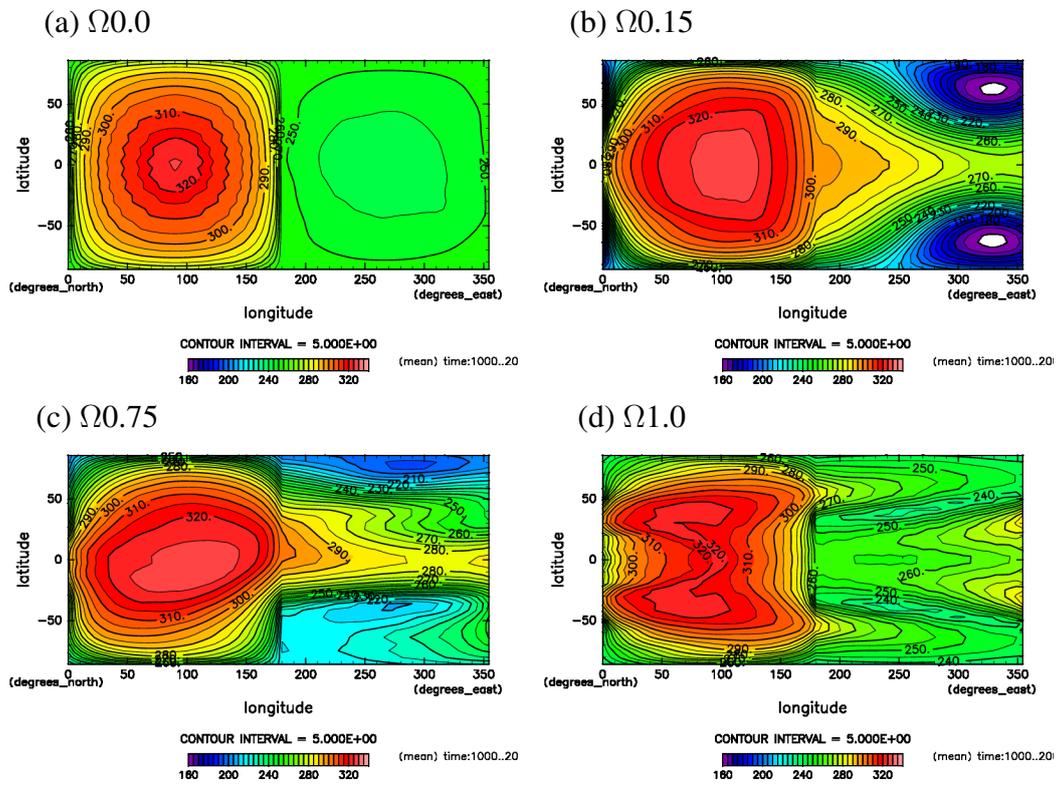


図 3.1: Noda et al. (2017) の地表面温度の図. (a) は $\Omega 0.0$, (b) は $\Omega 0.15$, (c) は $\Omega 0.75$, (d) は $\Omega 1.0$. 等値線間隔は 5 K.

第4章 大気大循環モデルDCPAMの説明

本研究では同期回転惑星の気候に関する数値実験を行うため、地球流体電脳倶楽部によって開発されている大気大循環モデルDCPAMを用いた。

DCPAMとは Dennou-Club Planetary Atmospheric Model の略記で、3次元球面上のプリミティブ方程式系に従う大気の大循環を計算する数値モデルである。本研究ではDCPAM5(20170306版)を用いた。本章では、DCPAM5における座標系の取り方や力学過程の支配方程式系を紹介し、本研究で用いたモデルについて説明する。

4.1 座標系の取り方

DCPAM5 で用いられている座標系は、水平方向には緯度 φ 、経度 λ 、鉛直方向には $\sigma \equiv \frac{p}{p_s}$ をとる。ここで p は気圧、 p_s は地表面気圧である。

4.2 支配方程式

大気の大規模な循環は、静力学平衡を仮定したプリミティブ方程式系を用いて記述される。DCPAM5 の力学過程は、流体力学の基礎方程式系に、回転系への ζ 変換、球座標への変換、静力学平衡近似および薄い球殻近似、 z 座標から σ 座標への変換を施すことにより得られる、以下の支配方程式系に従う。

連続の式

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi = -D - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}. \quad (4.1)$$

静水圧の式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT_v}{\sigma}. \quad (4.2)$$

運動方程式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu} \right) + \mathcal{D}(\zeta), \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_A}{\partial \lambda} + \frac{\partial V_A}{\partial \mu} \right) - \nabla_\sigma^2 (\Phi + R\bar{T}\pi + \mathbf{KE}) + \mathcal{D}(D). \quad (4.4)$$

熱力学の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial UT'}{\partial \lambda} + \frac{\partial VT'}{\partial \mu} \right) + T'D \\ & - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa T_v \left(\frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right) + \frac{Q}{C_p} + \mathcal{D}(T) + \mathcal{D}'(\mathbf{v}). \end{aligned} \quad (4.5)$$

水蒸気の式

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial Uq}{\partial \lambda} + \frac{\partial Vq}{\partial \mu} \right) + qD - \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} + S_q + \mathcal{D}(q). \quad (4.6)$$

以上の式では以下の独立変数が用いられている。

φ : 緯度 [deg.],

λ : 経度 [deg.],

$\sigma \equiv p/p_s$,

t : 時間 [s].

また $\mu \equiv \sin \varphi$ である。

モデルで時間発展する予報変数は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \pi(\varphi, \lambda) & \equiv \ln p_s, \\ T(\varphi, \lambda, \sigma) & : \text{気温 [K]}, \\ q(\varphi, \lambda, \sigma) & : \text{比湿 [kg kg}^{-1}\text{]}, \\ \zeta(\varphi, \lambda, \sigma) & \equiv \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V}{\partial \lambda} - \frac{\partial U}{\partial \mu} \right) : \text{渦度 [s}^{-1}\text{]}, \\ D(\varphi, \lambda, \sigma) & \equiv \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{\partial V}{\partial \mu} \right) : \text{発散 [s}^{-1}\text{]}. \end{aligned}$$

ここで,

$$U(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv u(\varphi, \lambda, \sigma) \cos \varphi,$$

$$V(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv v(\varphi, \lambda, \sigma) \cos \varphi,$$

u : 東西風速,

v : 南北風速

である. 各時間ステップで診断的に求められる変数は以下の通りである.

$$\Phi \equiv gz : \text{ジオポテンシャル高度 [m}^2 \text{ s}^{-2}\text{]},$$

$$\dot{\sigma} \equiv \frac{d\sigma}{dt} \equiv \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial \sigma}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial \sigma}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma},$$

$$\bar{T}(\sigma) : \text{基準温度 [K]},$$

$$T'(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv T - \bar{T},$$

$$T_v(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv T \{1 + (\epsilon_v^{-1} - 1) q\},$$

$$T'_v(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv T_v - \bar{T},$$

$$U_A(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv (\zeta + f)V - \dot{\sigma} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - \frac{RT'_v}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_\lambda \cos \varphi,$$

$$V_A(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv -(\zeta + f)U - \dot{\sigma} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - \frac{RT'_v}{a} (1 - \mu^2) \frac{\partial \pi}{\partial \mu} + \mathcal{F}_\varphi \cos \varphi,$$

$$\mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi \equiv \frac{U}{a(1 - \mu^2)} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \mu}$$

$$\nabla_\sigma^2 \equiv \frac{1}{a^2(1 - \mu^2)} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left[(1 - \mu^2) \frac{\partial}{\partial \mu} \right],$$

$$KE(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv \frac{U^2 + V^2}{2(1 - \mu^2)}$$

$\mathcal{D}(\zeta)$: 渦度の水平拡散とスポンジ層における散逸,

$\mathcal{D}(D)$: 発散の水平拡散とスポンジ層における散逸,

$\mathcal{D}(T)$: 熱の水平拡散,

$\mathcal{D}(q)$: 水蒸気の水平拡散,

$\mathcal{F}_\lambda(\varphi, \lambda, \sigma)$: 小規模運動過程 (経度方向),

$\mathcal{F}_\varphi(\varphi, \lambda, \sigma)$: 小規模運動過程 (緯度方向),

$Q(\varphi, \lambda, \sigma)$: 放射, 凝結, 小規模運動過程等による加熱・温度変化,

$S_q(\varphi, \lambda, \sigma)$: 凝結, 小規模運動過程等による水蒸気ソース,

$\mathcal{D}'(\mathbf{v})$: 摩擦熱.

定数は以下の通りである.

- a : 惑星半径 [m],
- R : 乾燥大気の気体定数 [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],
- C_p : 乾燥大気の大気定圧比熱 [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],
- f : コリオリパラメータ [s^{-1}],
- $\kappa \equiv R/C_p$,
- ϵ_v : 水蒸気分子量比.

4.3 本研究で用いたモデル

積雲過程は対流調節スキームを使用した. これは, 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である. 形成された雲は一瞬で消え, 雲による温室効果等は考えない. 乾燥空気は放射に対して透明とした. 水蒸気は短波放射に対して透明であり, 長波放射に対して波長によらず一定に吸収するものとした. 地表面は swamp ocean (熱容量が0の海) とした.

第5章 実験設定

本研究では, TRAPPIST-1e, f, g の3つの惑星を想定した数値実験を行った. 本章では, 数値実験の計算設定をまとめる.

各惑星のパラメータは以下を用いる.

	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^{-1}]	自転角速度 [Noda et al. (2017) の表現]
TRAPPIST-1e	7.2	906	5850	1.192×10^{-5}	$\Omega_{0.16}$
TRAPPIST-1f	6.1	523	6657	7.899×10^{-6}	$\Omega_{0.11}$
TRAPPIST-1g	10.3	354	7180	5.887×10^{-6}	$\Omega_{0.08}$

以下はすべての惑星で共通の設定である.

全球平均表面気圧	10^5 [Pa]
乾燥大気分子量	28.964
水蒸気分子量	18.0
乾燥大気比熱	1004.6 [$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$]
水蒸気比熱	1810.0 [$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$]
大気アルベド	0.0
地表面アルベド	0.0
地表面熱容量	0.0 [J K^{-1}]
軌道離心率	0.0
自転軸傾斜角	0.0 度

空間解像度は東西方向に 64 点, 南北方向に 32 点, 鉛直方向に 16 点である. 時間解像度は 20 分である. 初期条件は, 気温が 280 K に振幅 0.1 K のノイズが加えられた値で, 風速 0 m s^{-1} である. 以上の設定で 2000 日計算を行い, 解析には最後の 1000 日平均を使用している.

第6章 結果と考察

TRAPPIST-1e, f, g のパラメータを用いた数値実験を行った結果, e, f は正しく数値実験を実行することができたと考えられる. g は実験を失敗した. 図 6.1 に TRAPPIST-1e の実験結果を, 図 6.2 に TRAPPIST-1f の実験結果を, 図 6.3 に TRAPPIST-1g の実験結果をそれぞれ示している. 本章では, TRAPPIST-1e, f のパラメータを用いた数値実験結果からそれぞれの惑星のハビタビリティを議論する. また, TRAPPIST-1e, f の大気構造を理解するために, Noda et al. (2017) の結果と比較を行う. 実験に失敗した TRAPPIST-1g の数値実験結果についても紹介する.

6.1 ハビタビリティの考察

地表面温度が 273 K を超えている範囲では, 惑星表面に液体の水が存在していると考えられる. 図 6.1, 6.2 の (h) は地表面温度の実験結果である. TRAPPIST-1e, f 両方で太陽直下点付近では 273 K を超えており, 液体の水が存在できる環境が見られた. 今回の実験では地表面アルベドを 0.0 に固定している. アルベドの効果を考慮すると, 今回の結果より温度が下がると考えられる.

6.2 TRAPPIST-1e の大気構造

図 6.1 (c) で, 太陽直下点付近で上昇風が見られ, 対流圏上層では経度によらず西風が発生していることが確認できる. 図 6.1 (b) の夜半球では, 赤道付近で西風が見られ, 高緯度で低気圧性の渦が見られる. 図 6.5 は Noda et al. (2017) でタイプ 2 に分類されている $\Omega 0.15$ の結果である. この図からも同じような特徴が見て取れる. Noda et al. (2017) では, 対流圏界面付近の赤道で見られる西風はロスビー波と考えられており, 図 6.1 (b) で見られる西風もロスビー波であると思われる.

6.3 TRAPPIST-1fの大気構造

図 6.2 (c) で, 太陽直下点付近で上昇風が見られ, 対流圏上層では経度によらず西風が発生していることが確認できる. 図 6.2 (b) では, 対流圏界面付近では全球的に西風が見らる. 図 6.4 は Noda et al. (2017) でタイプ 2 に分類されている $\Omega 0.1$ の結果である. 図 6.4 右 からも, 同じような赤道面における大気循環の特徴が見られる. しかし, 図 6.4 左 ではロスビー波が見られ, TRAPPIST-1f と異なる. Noda et al. (2017) では, 赤道付近のロスビー波は, 昼半球と夜半球の温度差が大きいことによって, 潜熱エネルギー輸送量が増加し, 卓越すると考えられている. TRAPPIST-1f 実験では, 太陽定数が小さいことにより温度差が小さくなり, ロスビー波が見られなくなったと考えられる.

6.4 TRAPPIST-1gの実験結果

図 6.3 は 実験に失敗していることが顕著に見られる, TRAPPIST-1g の赤道面における気温 [K] (色) と鉛直風 [s^{-1}] と東西風 [$m s^{-1}$] である. TRAPPIST-1e, f の数値実験で得られた結果と同様に, 太陽直下点付近で高温になり, 上昇風が見られることを期待した. 赤道上で気温が経度によらず一定な結果が得られた. しかし, 図 6.3 では, 温度は経度によらず一定になっており, 風速は, 他の実験と比べ極端に小さい結果が見られる. この結果から, TRAPPIST-1g を想定した数値実験は失敗していると考えられる.

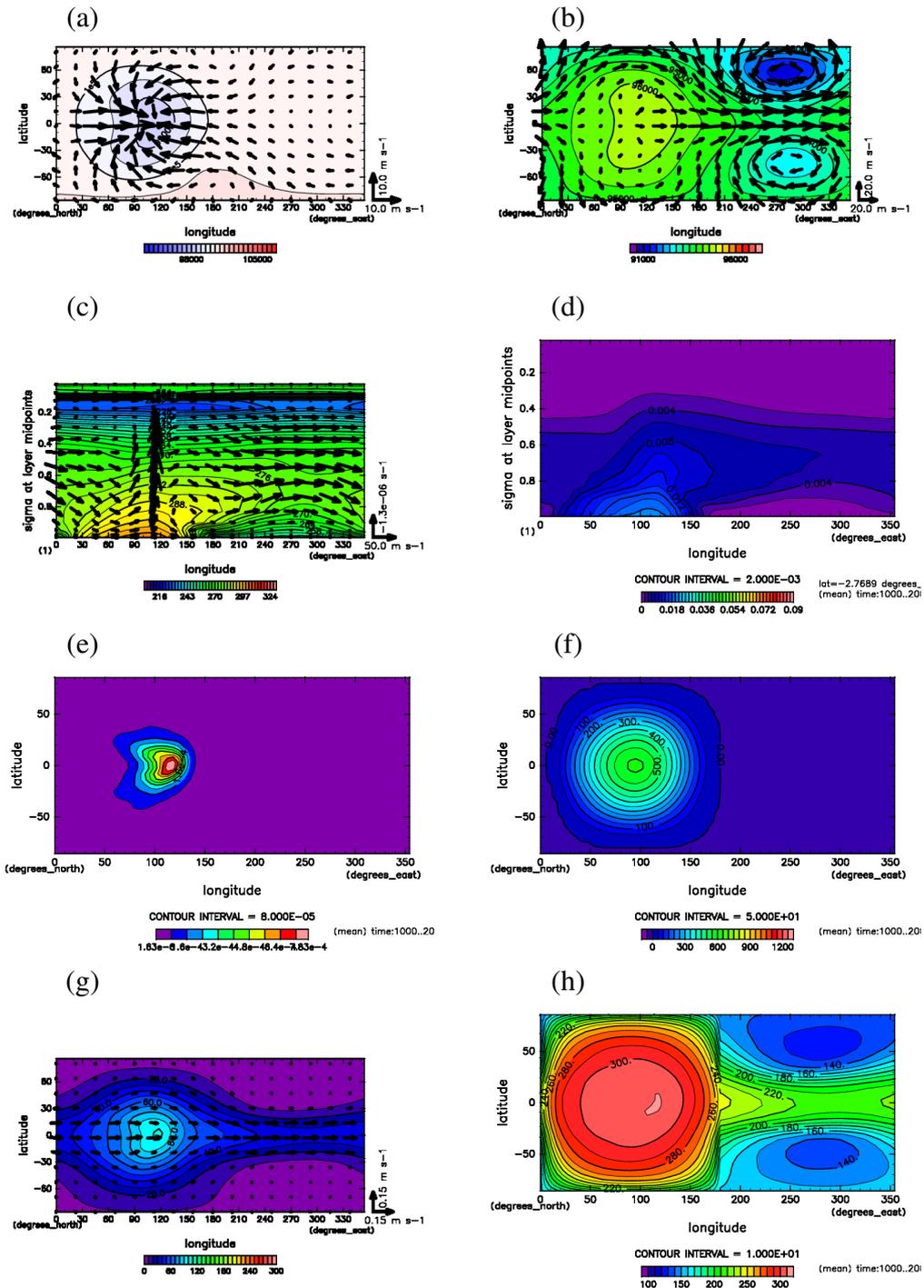


図 6.1: TRAPPIST-1e 設定実験結果. (a) は表面気圧 [Pa] (色) と大気最下層の水平風 [m s^{-1}]. (b) は 対流圏界面付近 ($\sigma = 0.29$) におけるジオポテンシャル [J kg^{-1}] (色) と水平風 [m s^{-1}]. (c) は 赤道面における気温 [K] (色) と鉛直風 [s^{-1}] と東西風 [m s^{-1}]. (d) は赤道面における水蒸気量. (e) は降水量. (f) は蒸発量 [W m^{-2}]. (g) は鉛直方向に積分した水蒸気質量 [kg m^{-2}] (色) と水蒸気フラックス [m s^{-1}]. (h) は地表面温度 [K].

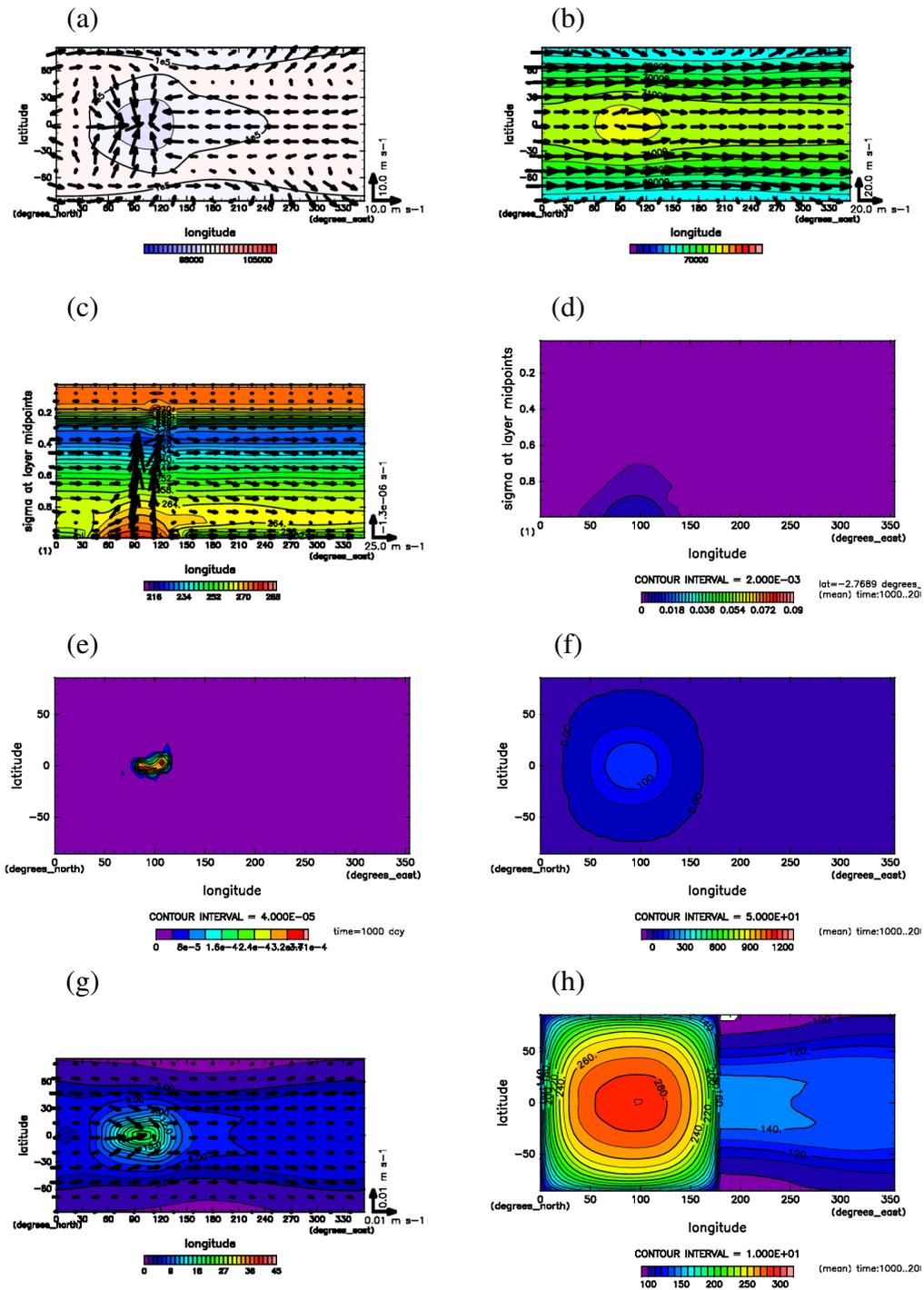


図 6.2: TRAPPIST-1f 設定実験結果. 図 6.1 と同じ量を描いている. (b) は $\sigma = 0.36$ である.

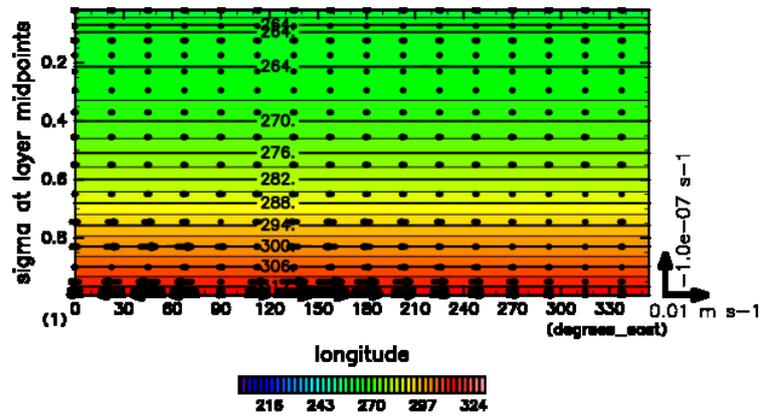


図 6.3: TRAPPIST-1g 設定実験結果. 赤道面における気温 [K] (色) と鉛直風 [s^{-1}] と東西風 [$m s^{-1}$].

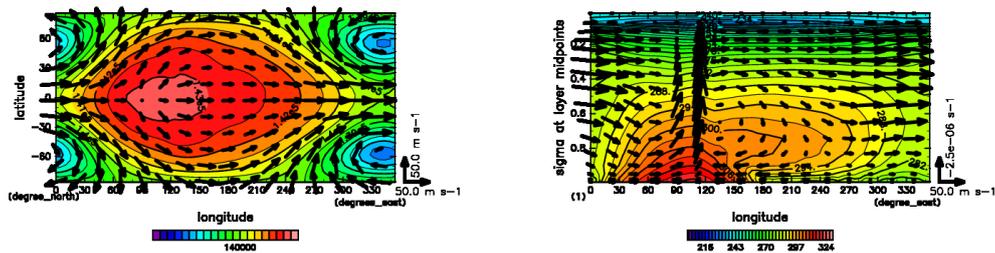


図 6.4: Noda et al. (2017) $\Omega 0.1$ 実験結果. 左は対流圏界面付近 ($\sigma = 0.17$) におけるジオポテンシャル [$J kg^{-1}$] (色) と水平風 [$m s^{-1}$]. 右は赤道面における気温 [K] (色) と鉛直風 [s^{-1}] と東西風 [$m s^{-1}$].

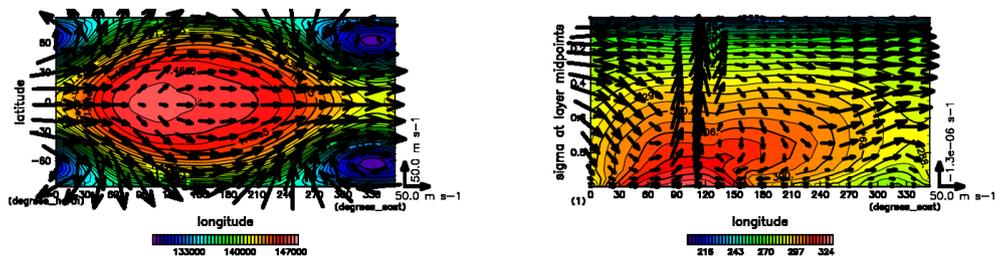


図 6.5: Noda et al. (2017) $\Omega 0.15$ 実験結果. 図 6.4 と同じ量である.

第7章 まとめ

DCPAMを用いて TRAPPIST-1e, f, g を想定した条件の下, 数値実験を試み, TRAPPIST-1e, f は計算できたが, TRAPPIST-1g は計算できなかった. 正しく数値実験を実行することができたと考えられる TRAPPIST-1e, f の両者とも, 地表面温度に関しては太陽直下点付近では 273 K を超え, この設定の下では太陽直下点付近に液体の水が存在できる環境が得られた. TRAPPIST-1e の大気構造に関しては, 赤道付近でロスビー波が見られるなど, Noda et al. (2017) のタイプ 2 と同じような結果が得られた. TRAPPIST-1f の大気構造に関しては, 赤道面の東西, 鉛直構造は太陽直下点付近で上昇風, 対流圏上層で西風など, Noda et al. (2017) のタイプ 2 と同じような結果が得られたが, 対流圏界面付近の水平風を見ると, 全球的に西風になっており, Noda et al. (2017) との違いが現れた. TRAPPIST-1g については実験に失敗しており, 原因の追究は今後の課題だ. また, 実際のハビタビリティを考察するためにはいくつか課題がある. 本研究の実験では地球大気や灰色放射で考え, アルベドを考慮しないなど多くの設定で理想化している. 今後, まずは地球放射の実験を行い, 同期回転惑星の気候やハビタビリティの理解を目指したい.

謝辞

本研究を行う際に, 多くの方々にお世話になりました. 指導教員である石渡正樹准教授には研究の進め方, 論文指導等, 様々な指導や助言をいただきました. 小高正嗣助教には研究内容や発表資料について多くの貴重なコメントをしていただきました. 先輩方には数値モデルの扱いなどの疑問に対して, 丁寧に応えていただきました. また, 本研究の数値計算や作図には地球流体電脳倶楽部の DCPAM5, GPhys を利用させていただきました. この場をお借りして皆様に感謝申し上げます.

参考文献

- [1] Michal Gillon, Amaury H. M. J. Triaud, Brice-Olivier Demory, Emmanul 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, Valrie 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
- [2] NASA Telescope Reveals Largest Batch of Earth-Size, Habitable-Zone Planets Around Single Star, Last Update: Aug 7, 2017 [tps://www.nasa.gov/press-release/nasa-telescope-reveals-largest-batch-of-earth-size-habitable-zone-planets-around](https://www.nasa.gov/press-release/nasa-telescope-reveals-largest-batch-of-earth-size-habitable-zone-planets-around)
- [3] Noda, S., M. Ishiwatari, K. Nakajima, Y.O. Takahashi, S. Takehiro, 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.
- [4] 地球流体倶楽部, 大気大循環モデル DCPAM <http://dennou.gfd-dennou.org/library/dcpam/>

付録A Noda et al. (2017) 再現実験

本研究で TRAPPIST-1e, f, g を想定した数値実験を行うために, Noda et al. (2017) の再現実験を行った. 図 A.1 は Noda et al. (2017) に記載されている地表面温度である. 図 A.1 と 図 3.1 を比較するとタイプ1の太陽直下点付近でノイズが見られたり, タイプ3で南北が反転しているが, 概ね同じ結果が得られた.

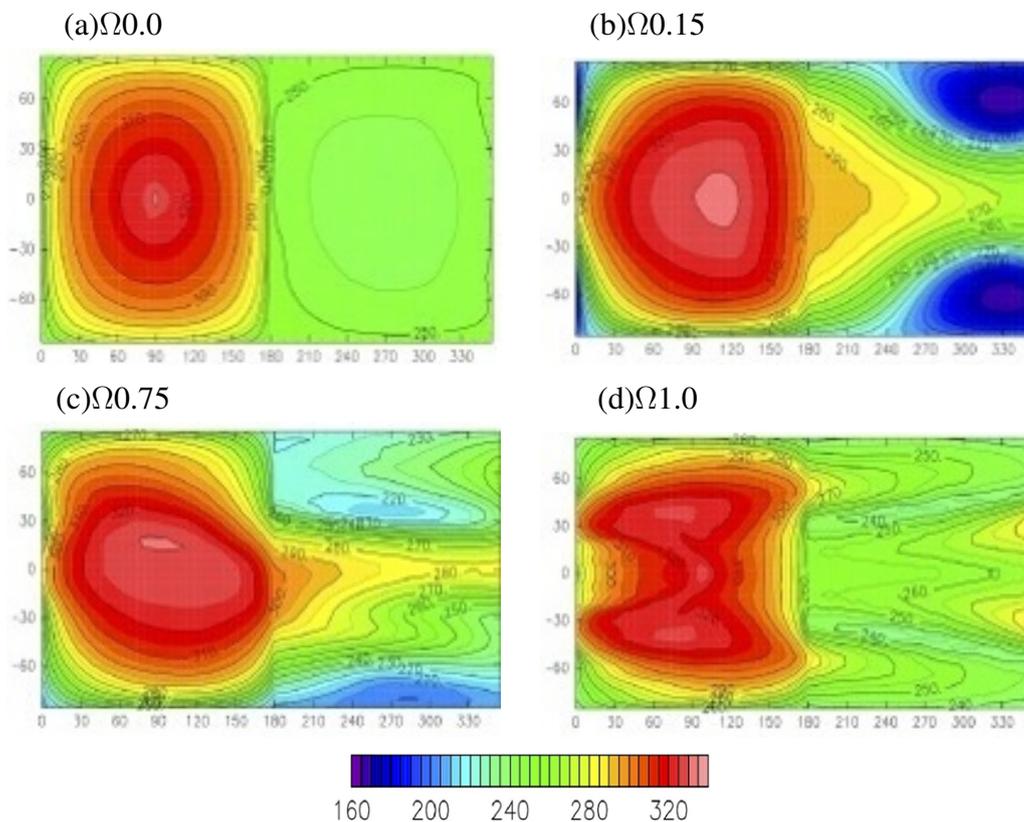


図 A.1: Noda et al. (2017) に載っている地表面温度.

以下に Noda et al. (2017) で各タイプの代表例として示されている自転角速度実験の再現画像をまとめる.

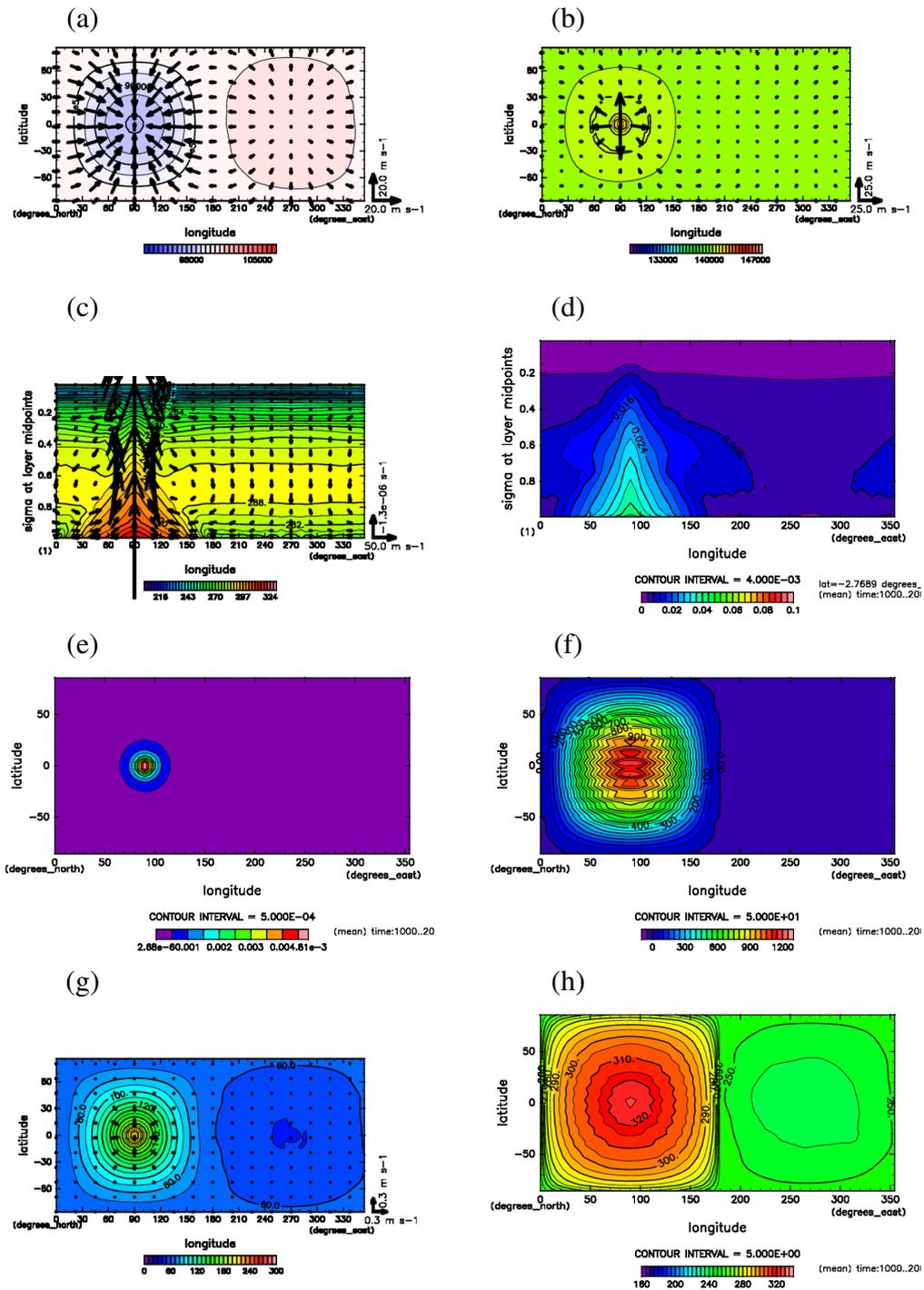


図 A.2: Noda et al. (2017) $\Omega 0.0$ 実験結果. 図 6.1 と同じ量を描いている. (b) は $\sigma = 0.17$ である.

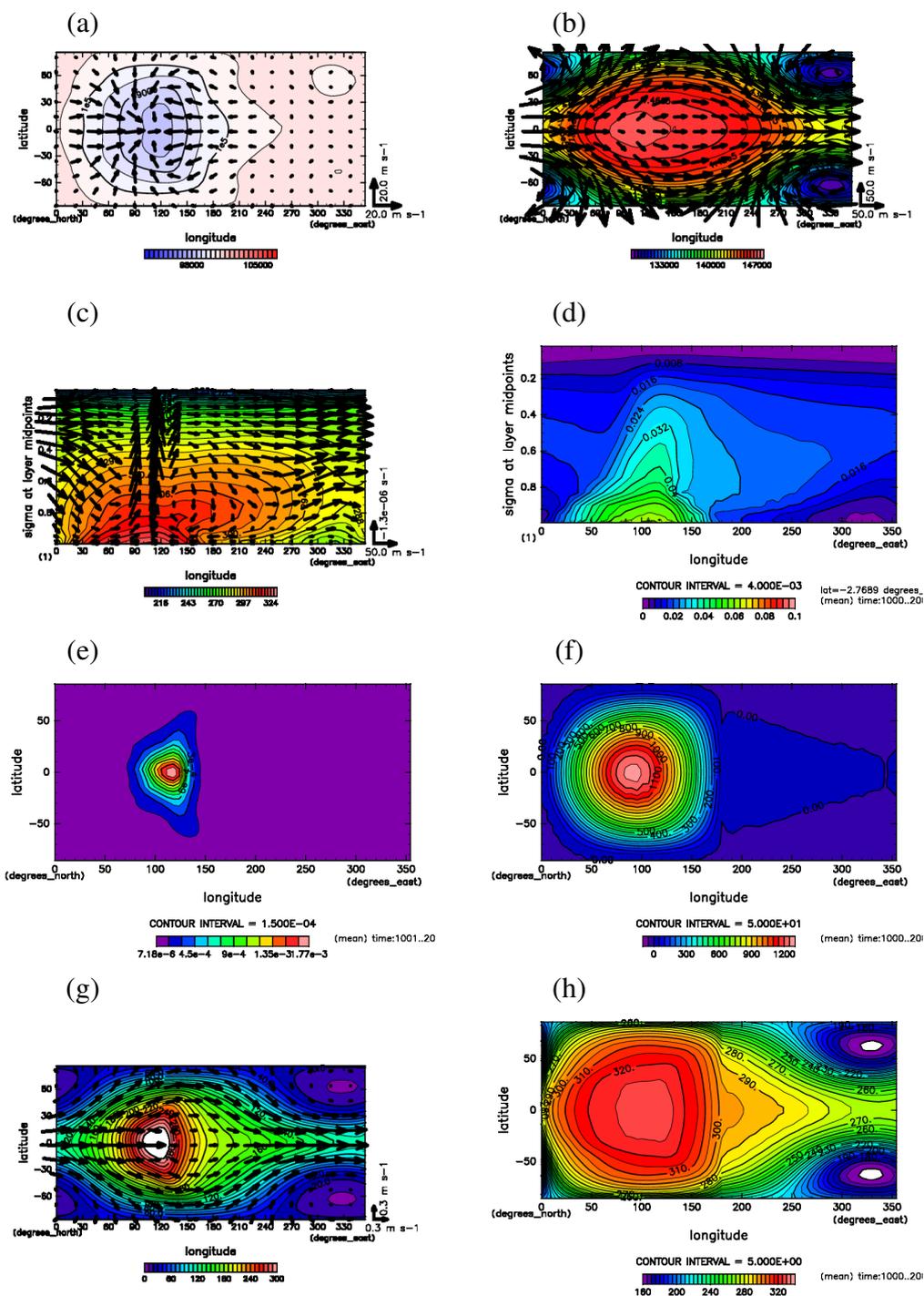


図 A.3: Noda et al. (2017) $\Omega = 0.15$ 実験結果. 図 6.1 と同じ量を描いている. (b) は $\sigma = 0.17$ である.

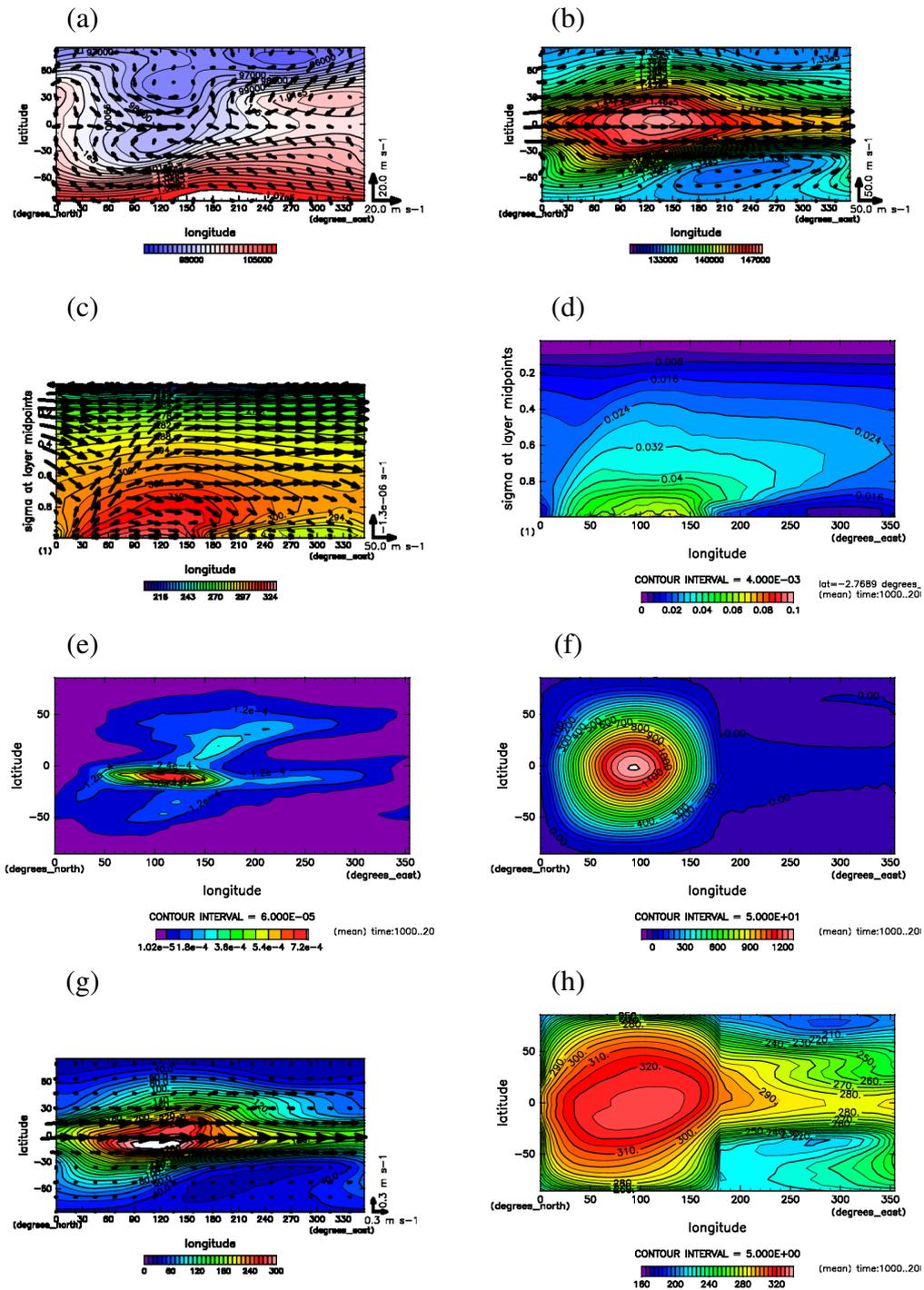


図 A.4: Noda et al. (2017) $\Omega = 0.75$ 実験結果. 図 6.1 と同じ量を描いている. (b) は $\sigma = 0.17$ である.

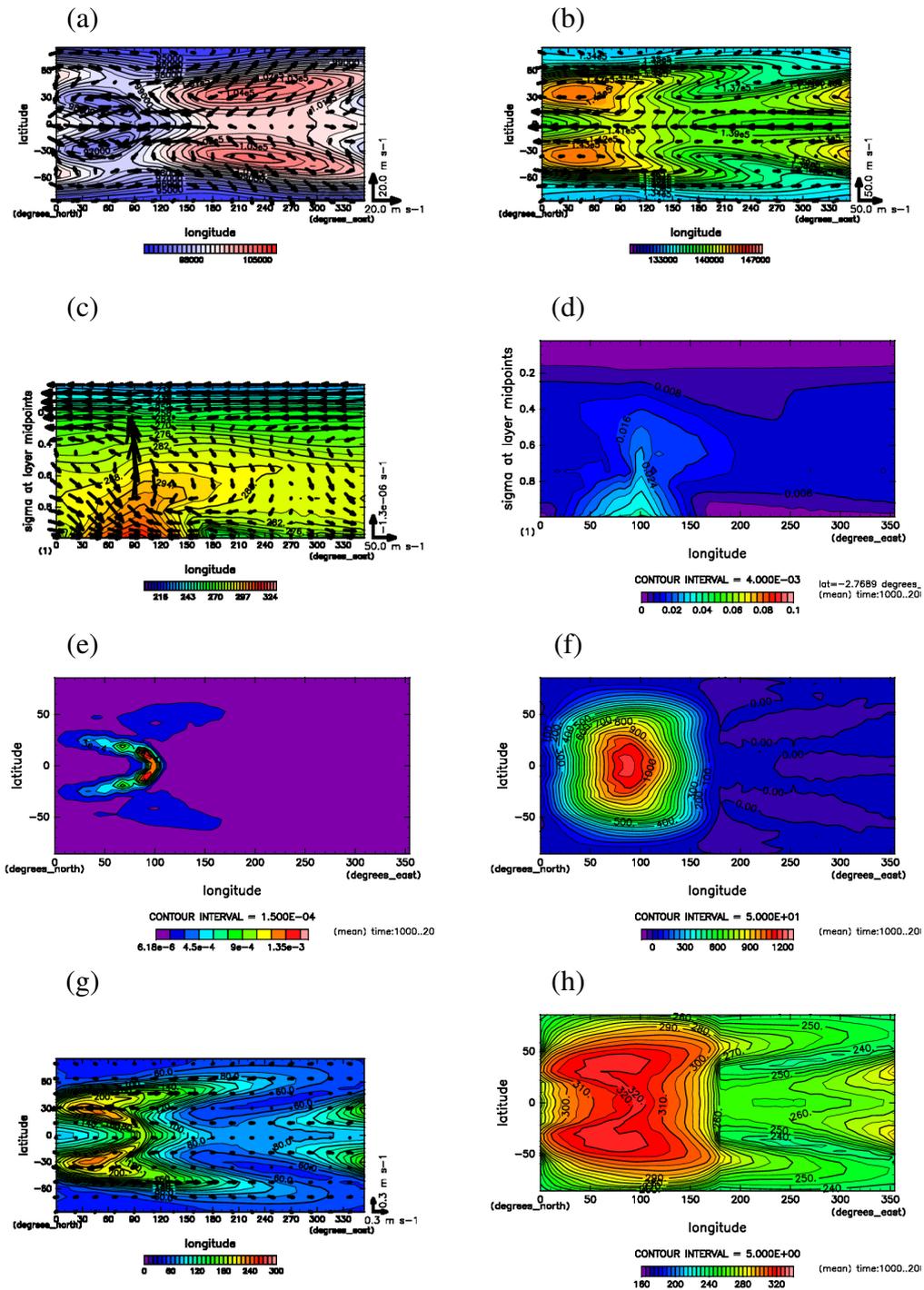


図 A.5: Noda et al. (2017) $\Omega 1.0$ 実験結果. 図 6.1 と同じ量を描いている. (b) は $\sigma = 0.17$ である.