

惑星気候のパラメータ依存性

—Kaspi & Showman (2015) の紹介—

神戸大学理学部惑星学科
流体地球物理学教育研究分野
伊藤 旭人

発表の内訳

- ◆ 目的と内容
- ◆ モデルの概要
- ◆ 気候代表量
- ◆ 実験結果
- ◆ まとめと今後の課題

目的と内容

◆目的

- 惑星気候のパラメータ依存性を, 数値モデルを用いて調べる
- 多様な惑星気候を実現する要因を統一的に説明

◆本日の発表の内容

- 先行研究である Kaspi & Showman (2015) のレビューを行う
 - 一つのパラメータのみが変化したときの惑星気候の応答についての論文
 - 自転角速度, 恒星フラックス, 大気質量, 惑星の平均密度, 長波に対する光学的厚さ, 惑星半径に対する惑星気候の依存性が調べられている
 - 恒星フラックスは, 単位時間あたり単位面積あたりに惑星が大気上端において受け取る中心星からのエネルギー
 - 光学的厚さは放射の吸収, 散乱による減衰の程度を表すもの

モデルの概要

■ 湿潤大気大循環モデル

- 全球にわたり三次元大気大循環と温度分布を計算

◆ 実験設定

- 経度, 緯度, 圧力座標系
- 自転軸傾斜角ゼロ
- 水惑星
- 理想気体
- 雲, 大陸, 海氷, 雪の効果は含まない
- 水平解像度 T42 (約 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$), 最大 T170 (約 $0.7^\circ \times 0.7^\circ$)
- 鉛直方向には 30 レベルに離散化, 最上層の中心面は平均表面圧力の 0.46 % の平均圧力をもつ
- 最低 1500 日分計算, その後最低 1500 日分の平均をとる

モデルの概要

◆力学過程

- 三次元プリミティブ方程式系
 - 東西, 南北, 鉛直方向の運動方程式
 - 連続の式
 - 熱力学の式

λ : 経度, θ : 緯度, p : 気圧, u : 東西風速, v : 南北風速,
 ω : 鉛直 (気圧) 風速, t : 時間, Ω : 自転角速度,
 a : 惑星半径, Φ : ジオポテンシャル,
 Σ_u : 境界層からの表面応力 (経度方向),
 Σ_v : 境界層からの表面応力 (緯度方向),
 R_d : 乾燥空気の気体定数, T_v : 仮温度, T : 温度,
 c_p : 空気の比熱, Q_r : 単位質量あたりの放射加熱,
 Q_c : 単位質量あたりの対流加熱,
 Q_b : 単位質量あたりの境界層加熱

$$\frac{Du}{Dt} - 2\Omega v \sin \theta - \frac{uv}{a} \tan \theta = -\frac{1}{a \cos \theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} - \Sigma_u \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + 2\Omega u \sin \theta + \frac{u^2}{a} \tan \theta = -\frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \Sigma_v \quad (2)$$

$$0 = -\frac{\partial \Phi}{\partial \ln p} - R_d T_v \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{DT}{Dt} - \frac{R_d T_v \omega}{c_p p} = Q_r + Q_c + Q_b \quad (5)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \quad \text{at} \quad \mathbf{u} = (u, v, \omega)$$

モデルの概要

◆放射伝達

- 標準的な二流灰色放射スキーム
(Held 1982, Frierson et al. 2006)

$$\frac{dU}{d\tau} = U - \sigma_{\text{SB}}T^4$$
$$\frac{dD}{d\tau} = \sigma_{\text{SB}}T^4 - D$$

- 境界条件

$$U(\tau(z=0)) = \sigma_{\text{SB}}T_s^4 \quad \text{表面}$$

$$D(\tau=0) = 0 \quad \text{大気上端}$$

U : 上向き長波フラックス, D : 下向き長波フラックス,
 σ_{SB} : Stefan - Boltzmann 定数, τ : 長波の光学的厚さ,
 T_s : 表面温度

モデルの概要

◆ 表面境界層スキーム

- Frierson et al. 2006
- 下部境界 (板海: 鉛直方向に一様で, 運動しない) の温度の時間発展

$$c_{po}\rho_0 H \frac{\partial T_s}{\partial t} = R_s(1 - \alpha) - R_u - L_e E - S$$

◆ 水循環

- 水分の方程式

$$\frac{Dq}{Dt} = g \frac{\partial E}{\partial p} - \frac{Q_c}{L_e}$$

T_s : 表面温度, c_{po} : 表面の熱容量, ρ_0 : 板海の有効密度,
 H : 板海の深さ, L_e : 蒸発による潜熱,
 R_u : 海面からの正味の上向き長波フラックス,
 R_s : 日射によるエネルギーフラックス,
 E : 表面蒸発熱フラックス, S : 顕熱フラックス

気候代表量

◆東西風速

◆子午面質量流線関数

- 質量流線関数は, その等値線に沿って流れが存在するもの
- ハドレーセル, フェレルセルの分布を可視化

◆温度

- 今回は主に赤道 - 極間表面温度差に注目する

◆南北方向の東西運動量フラックス

- 東西方向の運動量の, 南北方向への輸送
- 上線は時間平均, プライムは時間平均からの偏差

◆湿潤静的エネルギー (MSE)

- 合計の熱輸送を表すもの
- 以降簡単のために「熱輸送」と表記

u

$$\psi(\theta, p) = 2\pi a \cos \theta \int v(\theta, p) dp / g$$

T

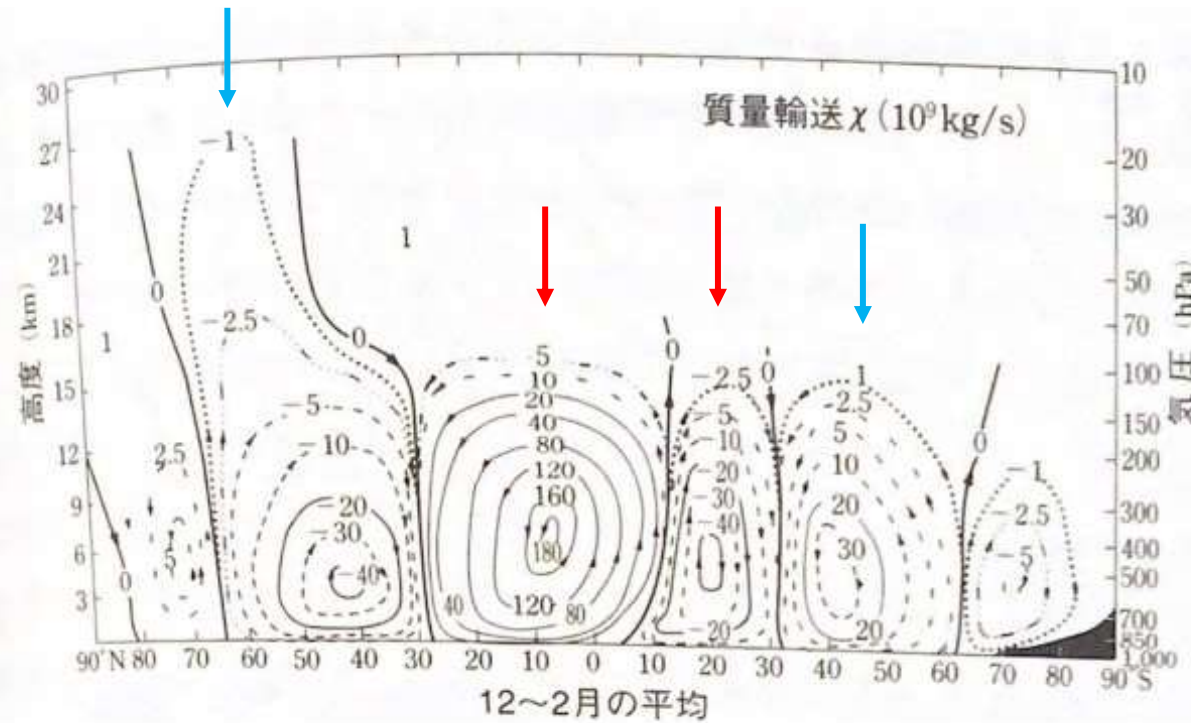
$\overline{u'v'}$

$$m = \underline{c_p T} + \underline{gz} + \underline{L_e q}$$

熱の成分 重力の成分 潜熱成分

m : 湿潤静的エネルギー, c_p : 空気の熱容量, T : 温度, g : 重力加速度, z : 高度, L_e : 蒸発による潜熱, q : 比湿

ハドレーセル, フェレルセル



◆ ハドレーセル →

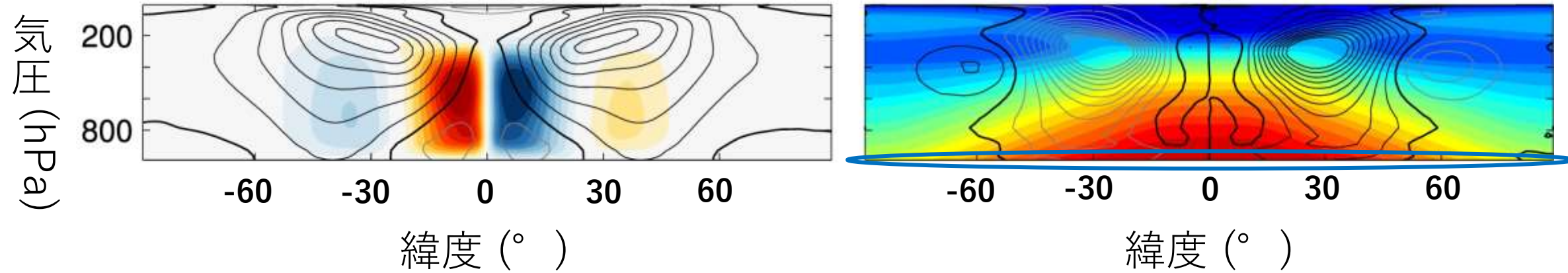
- 低緯度帯に存在する大気循環セル
- 赤道付近で上昇, 高緯度側で下降

◆ フェレルセル →

- 中緯度帯に存在する大気循環セル
- 高緯度側で上昇, 低緯度側で下降

小倉義光 『一般気象学 第2版補訂版』 2016年 より

実験結果の図の見方

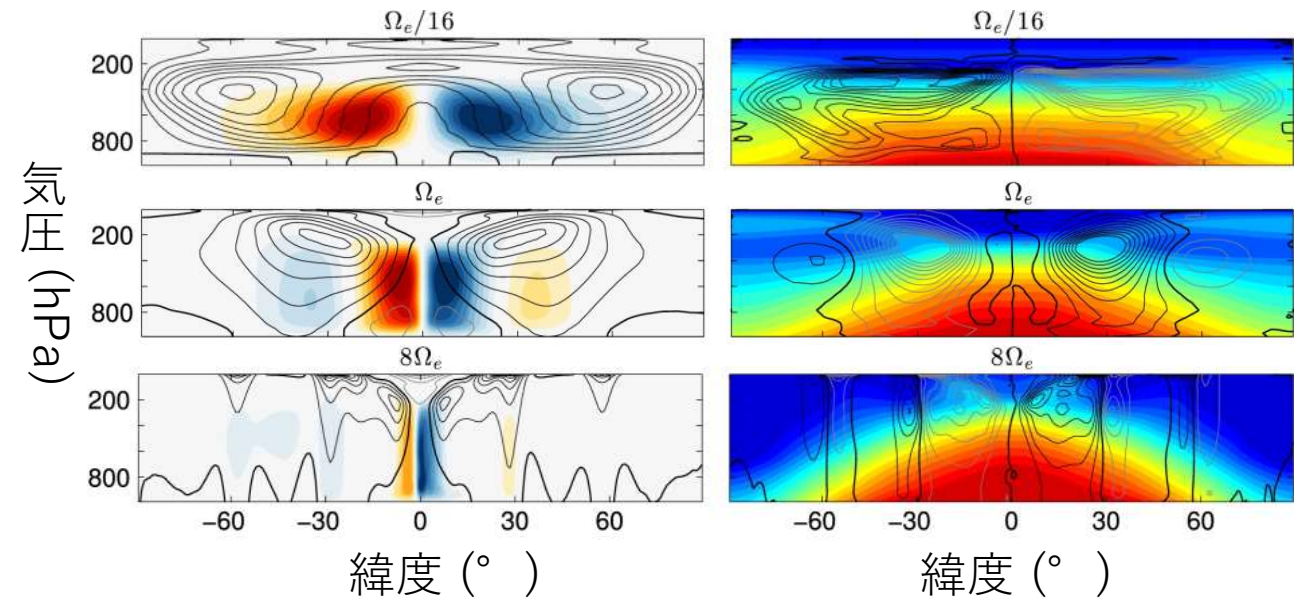


- 左, 等値線: 東西風速
- 左, 色: 子午面質量流線関数 (青: 時計回り, 赤: 反時計回りの循環)
- 右, 等値線: 南北方向の東西運動量フラックス
- 右, 色: 温度

実験結果 1

◆ 自転角速度依存性についての実験結果

- 右図は地球の自転角速度 (Ω_e) の $1/16 - 8$ 倍の場合における東西, 時間平均した物理量
- 自転角速度が大きくなるとハドレーセルの規模は小さくなり, 赤道-極間表面温度差は大きくなる



東西風速 (左列等値線)

子午面質量流線関数 (左列色付き部分)

南北方向の東西運動量フラックス (右列等値線)

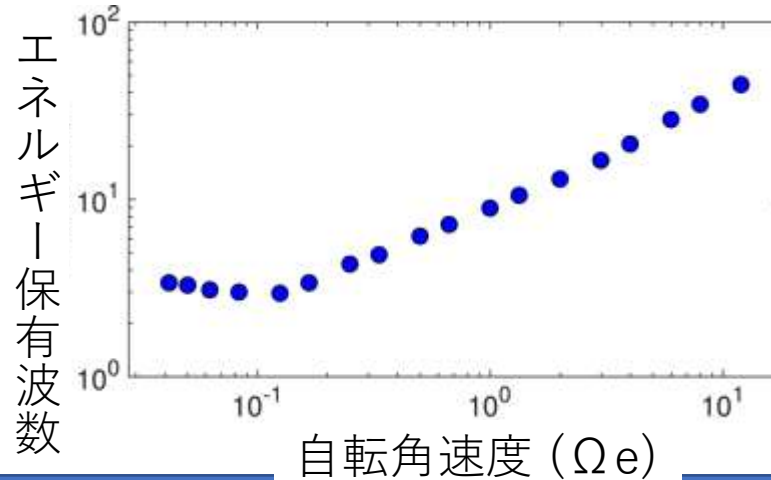
温度 (右列色付き部分)

実験結果 1 の解釈

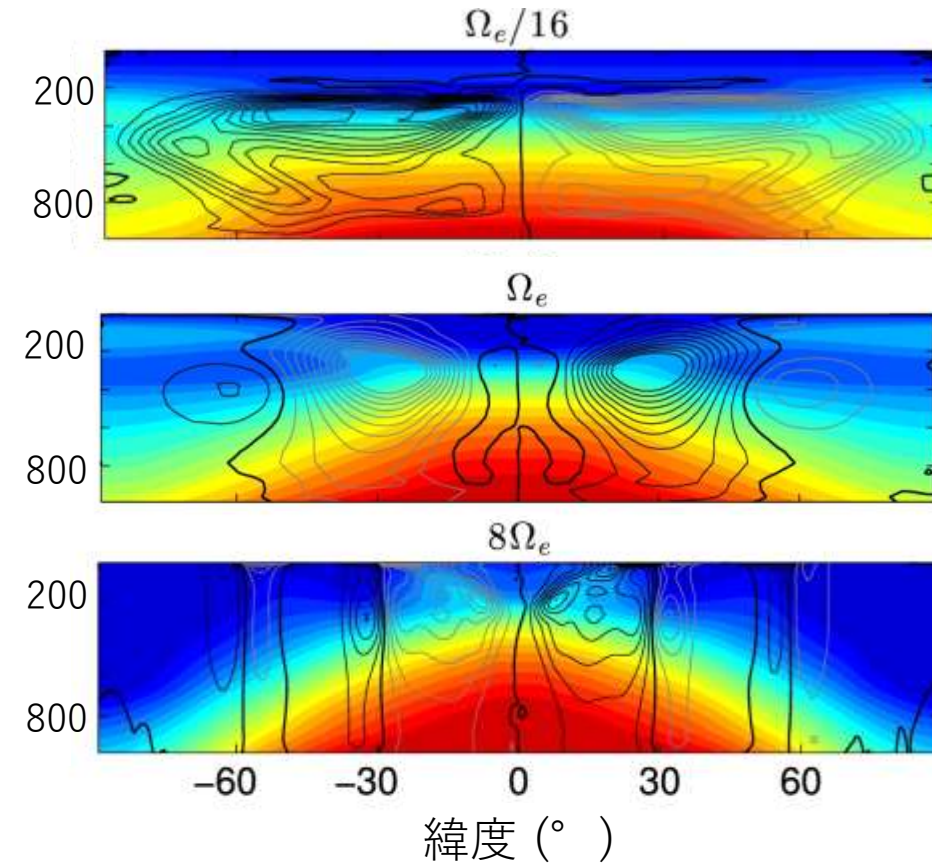
◆ 自転角速度依存性についての実験結果

- 自転角速度が大きくなると, 渦の長さスケールが減少する (下図)
 - 渦はここでは時間平均流からの偏差という意味
- 小さな渦は南北熱輸送において効率的でないため, 赤道-極間表面表面温度差は大きくなる
- よって自転角速度が大きくなると, 赤道-極間表面温度差は**大きくなる**

エネルギー保有波数... 最もエネルギーが多く存在する波数. 波数が大きいことは長さスケールが小さいことを意味する



気圧 (hPa)

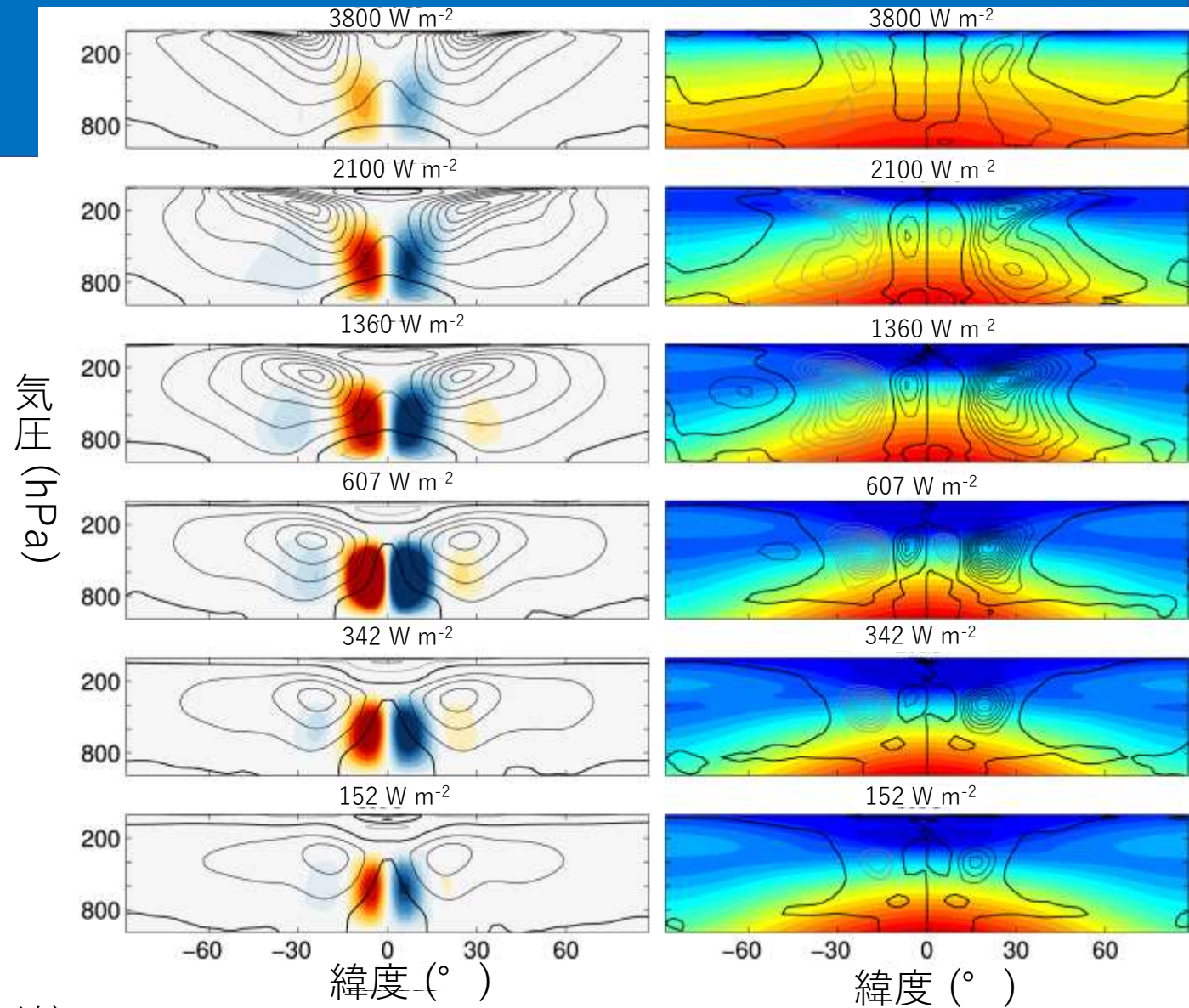


実験結果 2

◆ 恒星フラックス依存性についての 実験結果

- 恒星フラックス $3800 - 152 \text{ W m}^{-2}$ の場合における東西, 時間平均した物理量
- ハドレーセル, フェレルセルの強さのピークは 607 W m^{-2} あたりに存在する

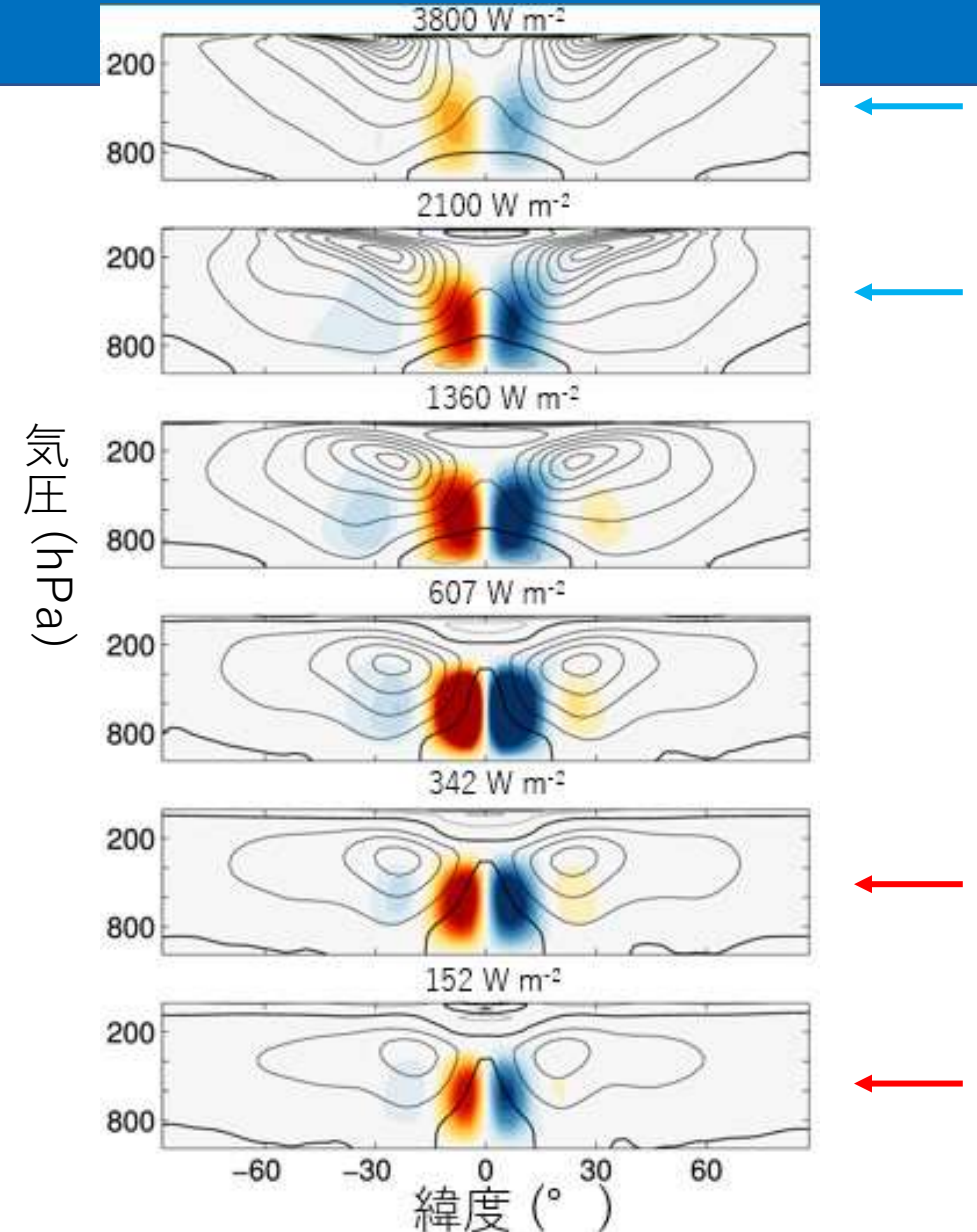
東西風速 (左列等値線)
子午面質量流線関数 (左列色付き部分)
南北方向の東西運動量フラックス (右列等値線)
温度 (右列色付き部分)



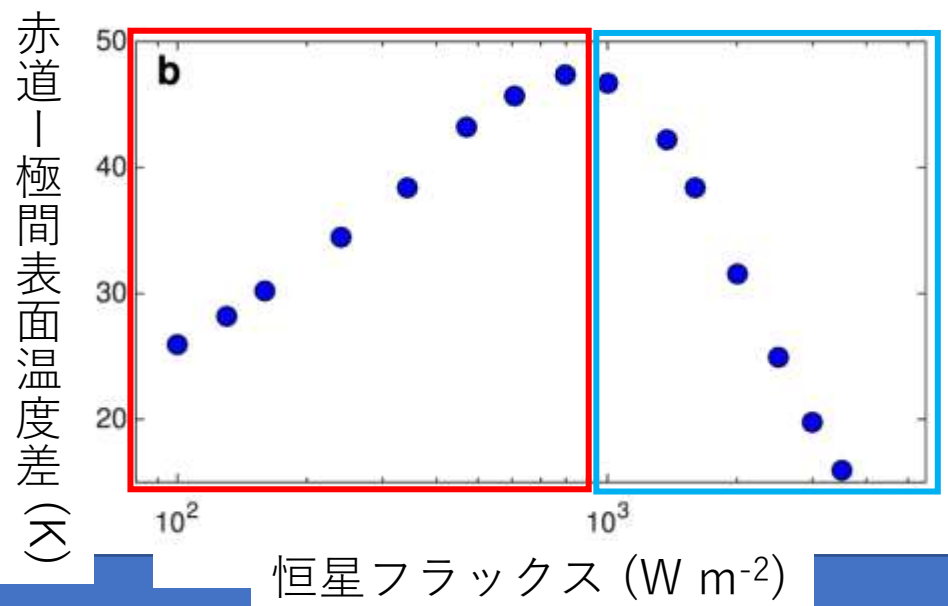
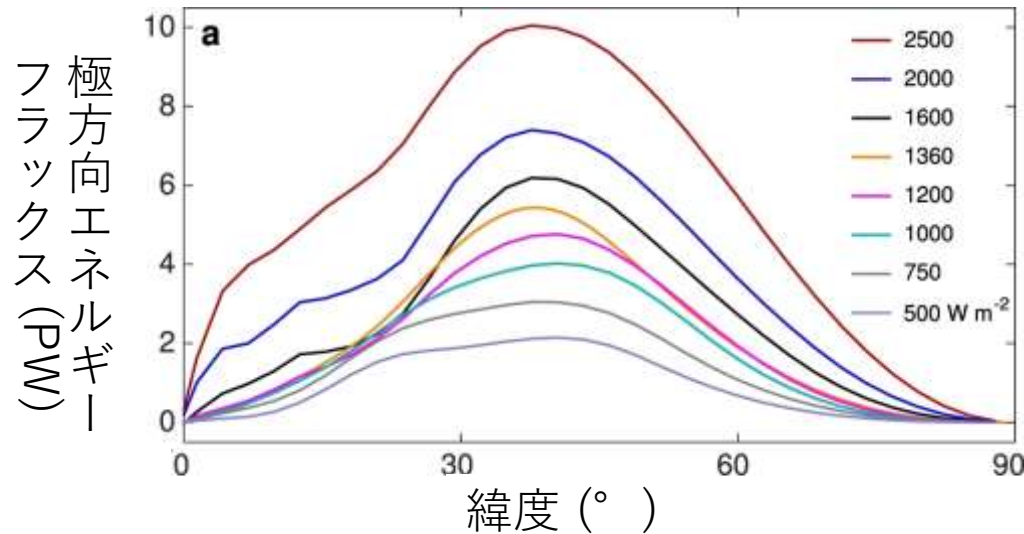
実験結果 2 の解釈

◆ 恒星フラックス依存性についての実験結果

- 恒星フラックスが小さな惑星は熱強制が小さく、ハドレーセル, フェレルセルの強さは小さくなる ←
- 逆に恒星フラックスが大きな惑星は水蒸気量が大きくなるので潜熱加熱も大きくなり, 弱い循環で強い熱輸送が可能になる. そのためハドレーセル, フェレルセルの強さは小さくなる ←
- ハドレーセル, フェレルセルの強さのピークは 607 W m^{-2} あたりに存在する



実験結果 2 の解釈



◆ 恒星フラックス依存性についての実験結果

- 恒星フラックスが大きくなると熱輸送の潜熱成分が大きくなり, 極方向熱フラックスが大きくなる (左上図)
- 極方向熱フラックスが大きくなると赤道-極間表面温度差は小さくなる (左下図) □
- 逆に大気が乾燥的になるほど恒星フラックスが小さな惑星は, 平均的に低い温度と大きな放射時間スケールのために, 小さな赤道-極間温度差をもつ (左下図) □

全実験結果まとめ

増加させるパラメータ	赤道－極間表面温度差	ハドレーセル, フェレルセルの強さ
自転角速度	増加	減少
恒星フラックス	非単調な応答	非単調な応答
大気質量	減少	増加
惑星の平均密度	増加	増加
長波に対する光学的厚さ	減少	—
惑星半径	増加	—

全体のまとめと今後の課題

- Kaspi & Showman (2015) では, 湿潤大気大循環モデルを用いて惑星気候のパラメータ依存性が調べられている
- 恒星フラックスの変化に対しては赤道－極間表面温度差, ハドレーセルとフェレルセルの強さのどちらも非単調な応答をする

◆今後の課題

- さらなる理解のためにモデルの式の導出を行う
- 数値モデルを用いて Kaspi & Showman (2015) の恒星フラックスについての追試を行う
- 恒星フラックスの時間変化を考慮した計算を行う

- Kaspi, Y., & Showman, A. P. (2015). ATMOSPHERIC DYNAMICS OF TERRESTRIAL EXOPLANETS OVER A WIDE RANGE OF ORBITAL AND ATMOSPHERIC PARAMETERS. *The Astrophysical Journal*, 804:60, 18pp. doi:10.1088/0004-637X/804/1/60
- 小倉義光 (2016) 『一般気象学 第2版補訂版』