

## 惑星大気循環の比較論 ～スーパーローテーションを中心に

今村剛（東京大学）

スーパーローテーションとは、惑星大気が赤道域を含む広い領域で過剰な自転軸周り角速度で循環するような力学状態であるが、これはよく知られている金星大気にとどまらず、土星の衛星タイタン、木星・土星の赤道域にも存在する。系外惑星の中にも大気がスーパーローテーションの特徴を示すものがある。この循環がどのようなメカニズムで維持されており、地球や火星の大気のようにスーパーローテーションしない状態との違いがどのような要因によるのかを理解することは、惑星大気循環のレジームを統一的に理解するうえで重要である。提案されているメカニズムはいずれも惑星規模の波による角運動量輸送に注目するものである。一つの説は、中高緯度に作られる自転方向のジェットが不安定化して波動が生じ、角運動量が低緯度向きに運ばれ、低緯度の大気上層に角運動量が蓄積される、というものである。この説については近年、高緯度の Rossby モードと低緯度の Kelvin モードが結合した不安定性として理解しようとする研究が進んでいる。もう一つの説は雲層が太陽光により加熱されることにより生じる熱潮汐波に注目するもので、古くから想定されていた鉛直方向の角運動量輸送に加え、近年は高緯度から低緯度へ角運動量が運ばれることによる加速も指摘されている。木星と土星で見られるスーパーローテーションについては、重力探査により表層の循環が惑星深部まで広がっていることが示唆されているが、メカニズムは同定されていない。潮汐固定された系外惑星では強い昼夜間放射強制の結果として Matsuno-Gill パターンによる赤道加速が起こることが提案されている。このような様々な天体の条件下での大気循環の比較研究が観測と理論の両面から進行中である。金星探査機「あかつき」はこれらの天体の中で唯一詳細な大気力学観測が可能な金星についてデータを蓄積しており、スーパーローテーション研究の深化が見込まれる。

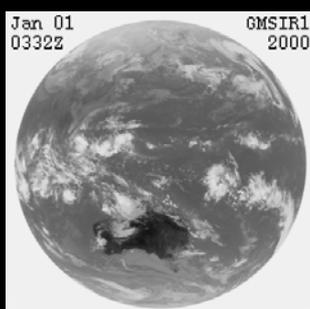
参考： T. Imamura, J. Mitchell, S. Lebonnois, Y. Kaspi, A.P. Showman, O. Korablev, Superrotation in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev.* 216:87 (2020)

惑星大気循環の比較論  
～スーパーローテーションを中心に

今村剛（東京大学）

T. Imamura, J. Mitchell, S. Lebonnois, Y. Kaspi, A.P. Showman, O. Korablev,  
Superrotation in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev.* 216:87 (2020)

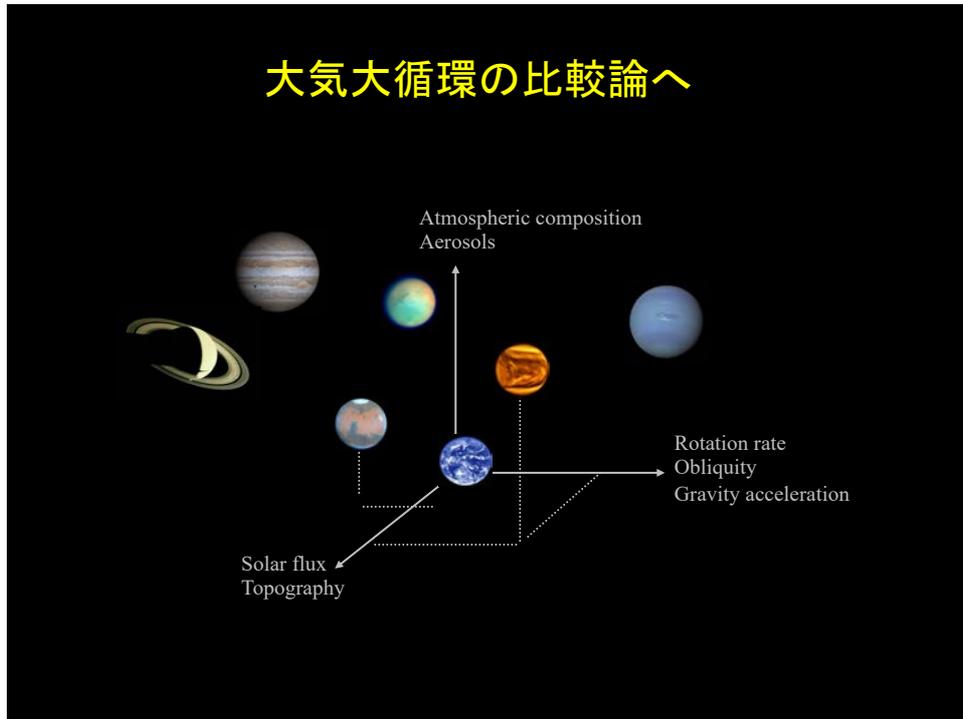
1



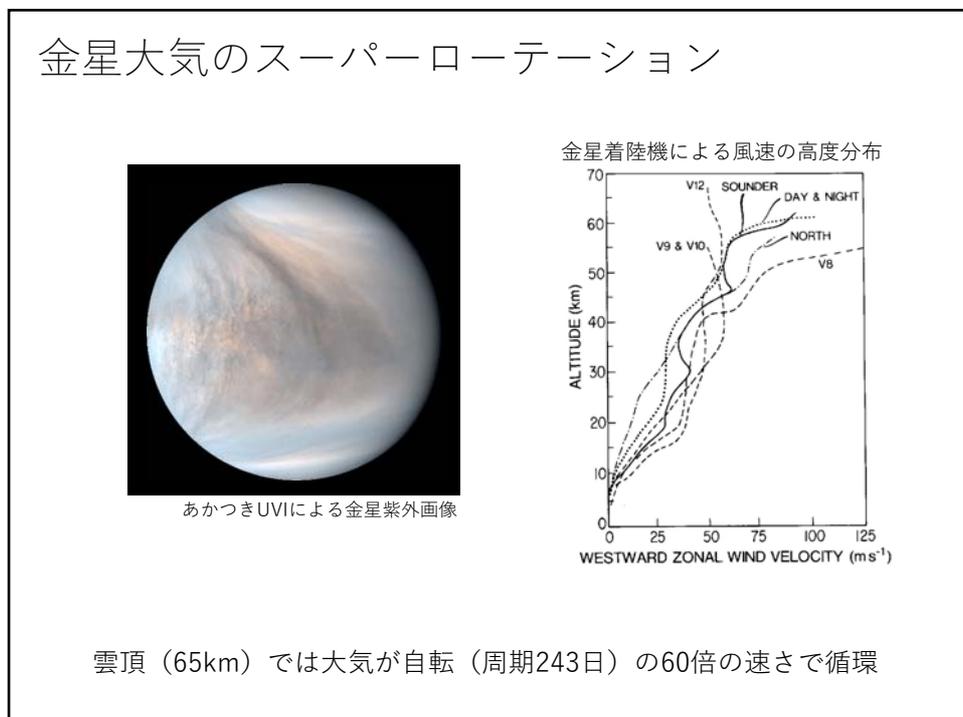
©小高正嗣

雲量（アルベド）、熱構造、揮発性物質の循環、地表の風化・・・を大気循環が支配

2

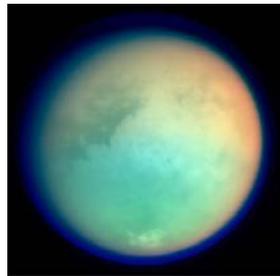


3

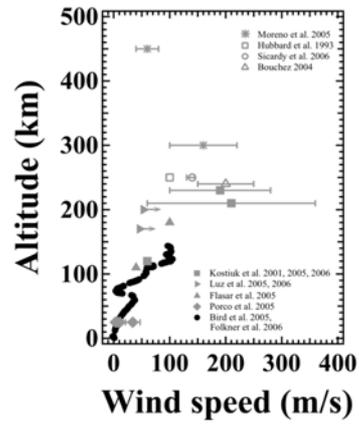


4

タイタン大気のスーパーローテーション

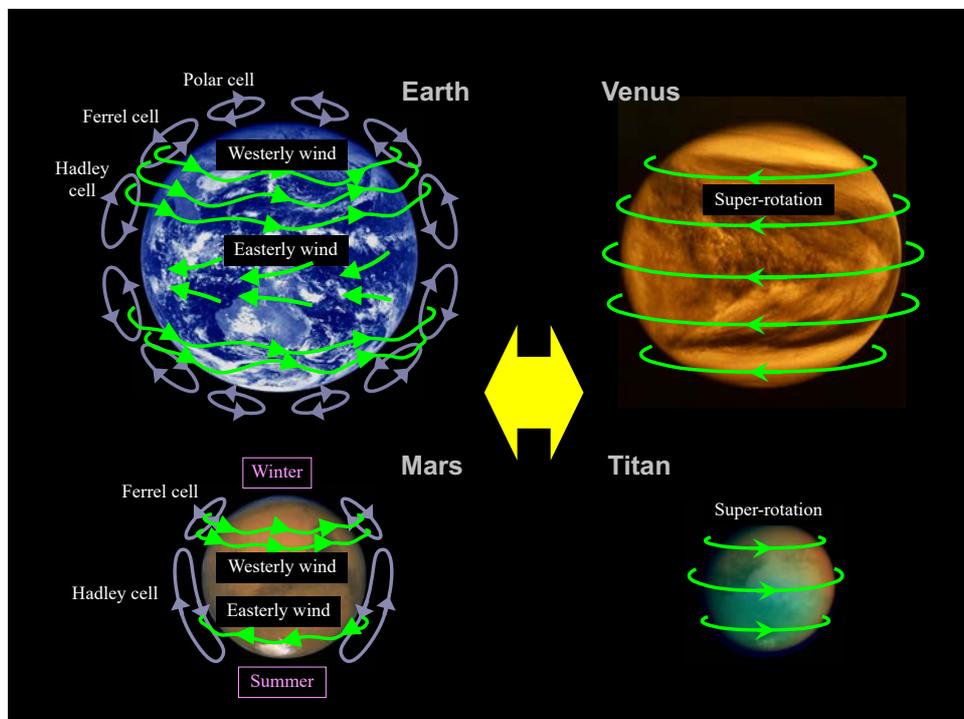


Hörst et al. 2017



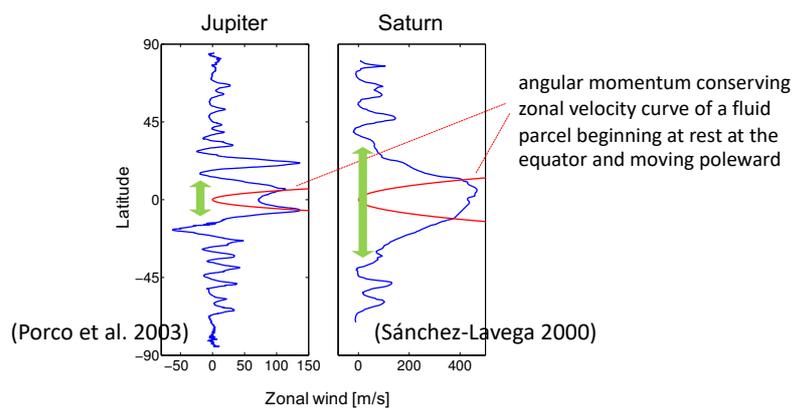
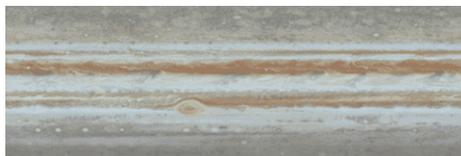
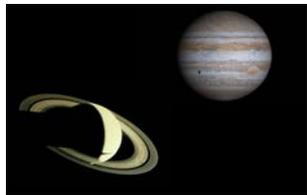
大気が自転（周期16日）の10倍の速さで自転方向に循環

5



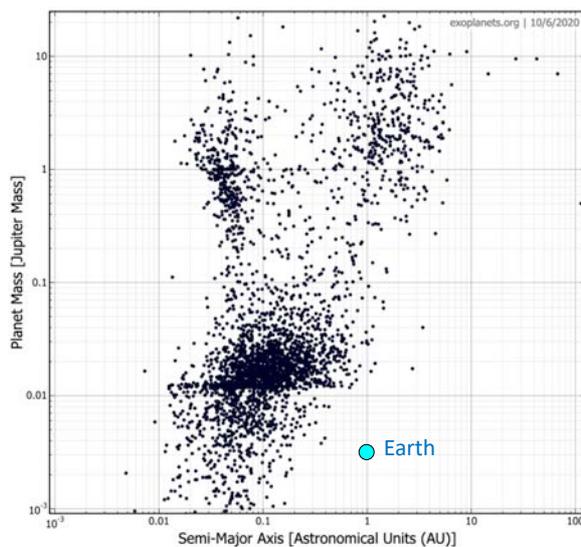
6

## 木星・土星大気のスーパーローテーション

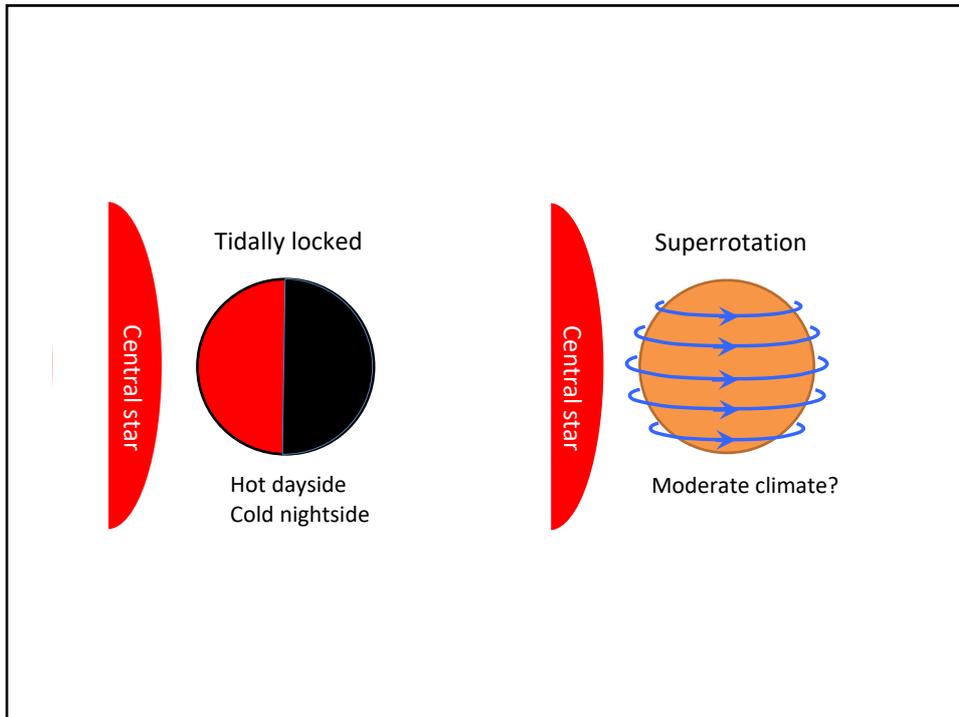


7

## 中心星近傍をまわる惑星 = 同期回転（潮汐固定）惑星？



8



9

### 系外惑星の大気のスーパーローテーション (Knutson et al. 2007)

A minimum brightness temperature of 973 +/- 33 K and a maximum brightness temperature of 1212 +/- 11 K at a wavelength of 8 microns, indicating that energy from the irradiated dayside is efficiently redistributed throughout the atmosphere

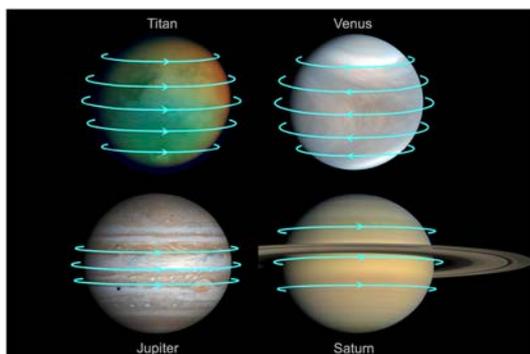
Lammer et al. (2013)

Brightness estimates on the surface of the planet

Observed phase variation for HD 189733b

10

## Observed superrotating atmospheres



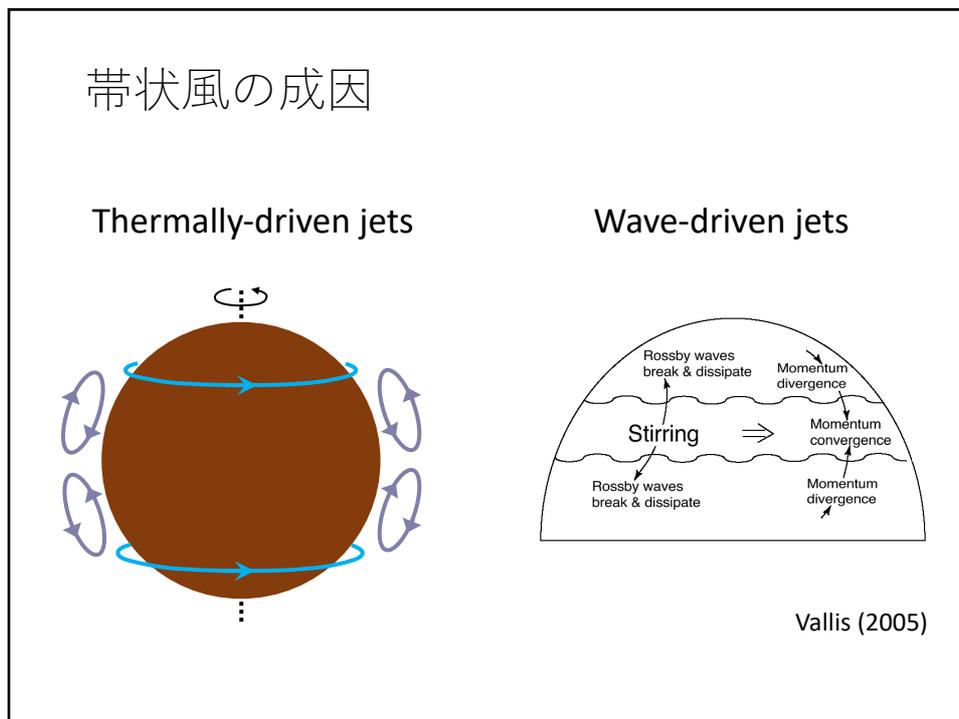
Imamura et al.  
(2020)

Planet	Radius (km)	Rotation period (days)	Equatorial rotation speed (m/s)	Equatorial wind speed (m/s)	Superrotation index, $s$ , on the equator
Venus	6,052	243	1.81	100–120	55–66
Titan	2,576	16.0	11.7	100–180	8.5–15
Jupiter	69,911	0.41	12,300	60–140	0.005–0.011
Saturn	58,232	0.44	9,540	350–430	0.037–0.045
HD 189733b	79,500	2.2	2600	2400	0.92

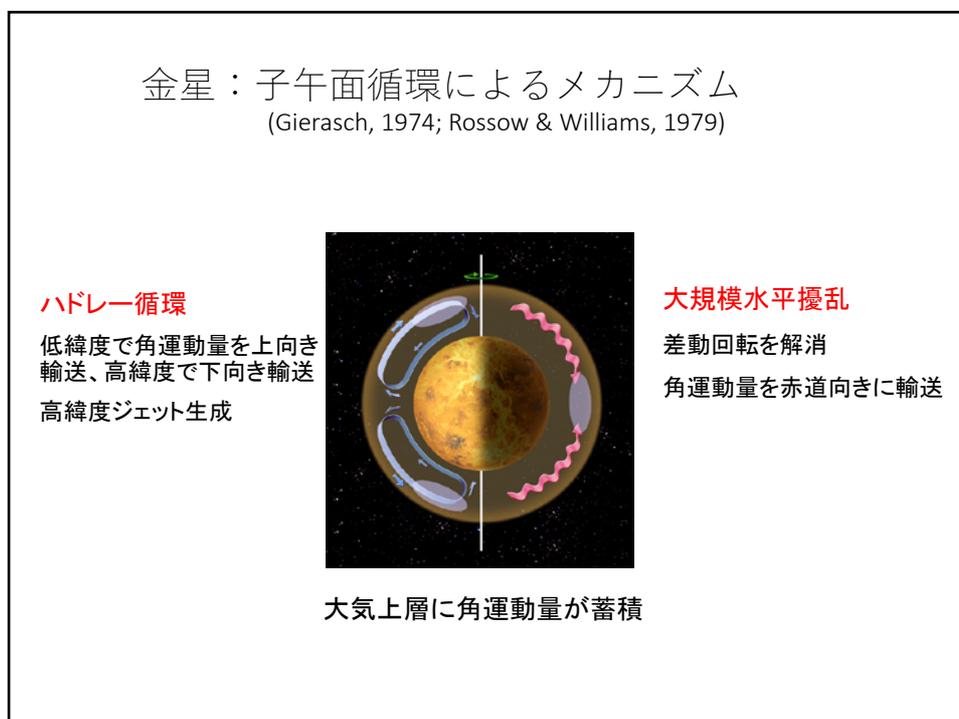
11

メカニズム？

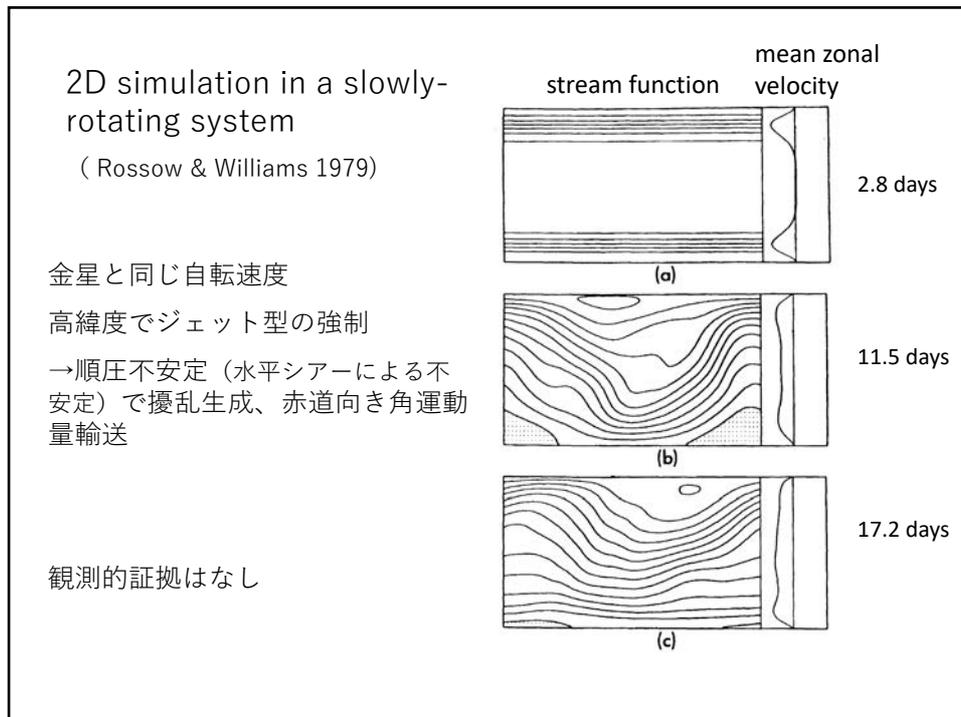
12



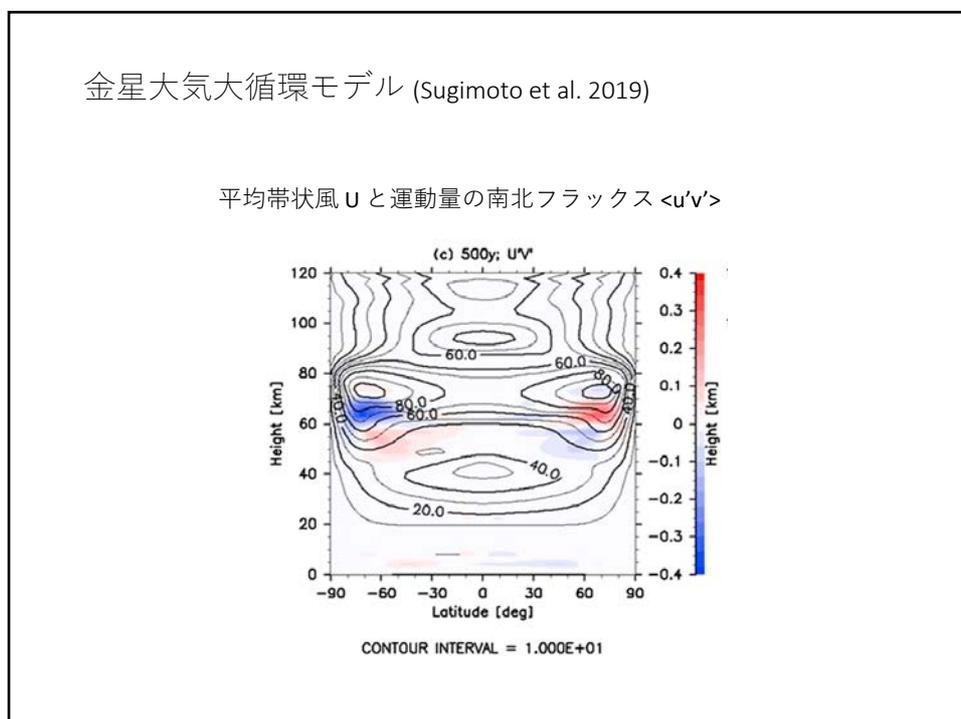
13



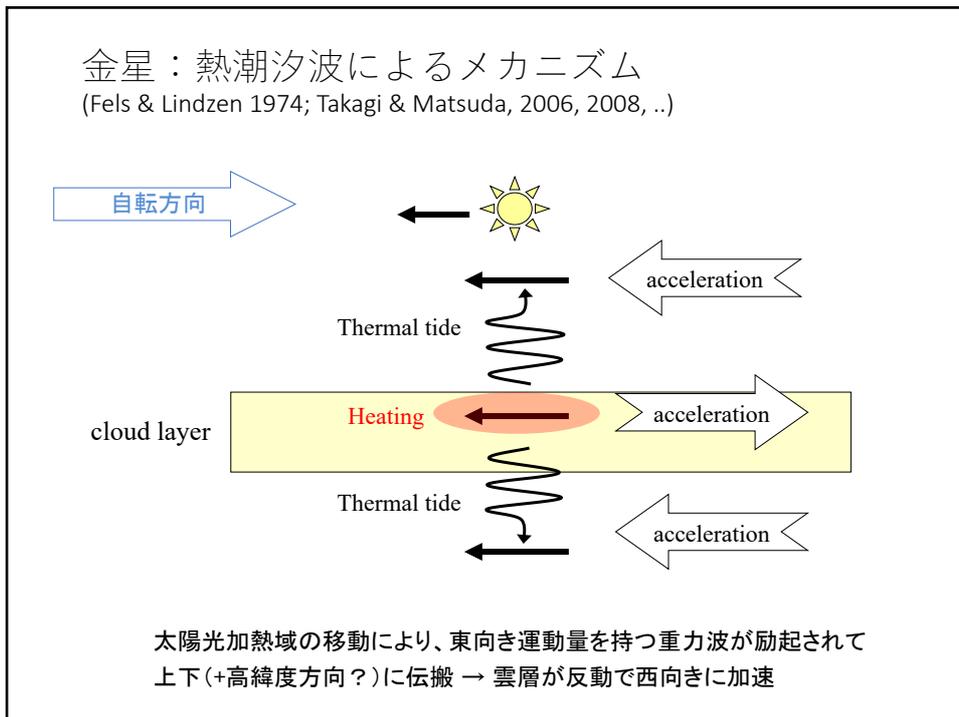
14



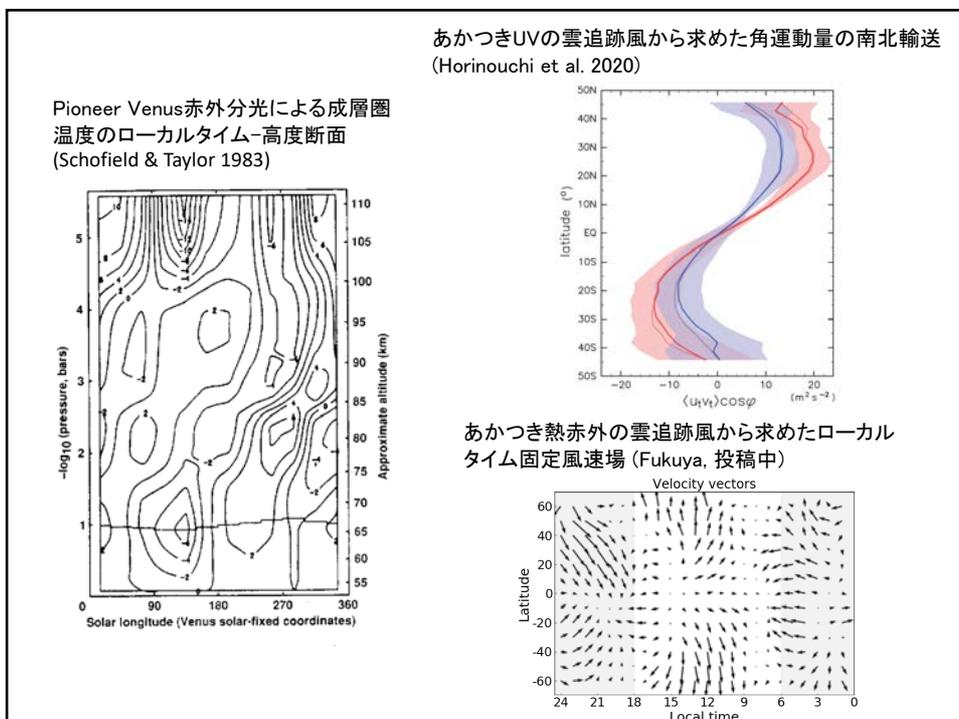
15



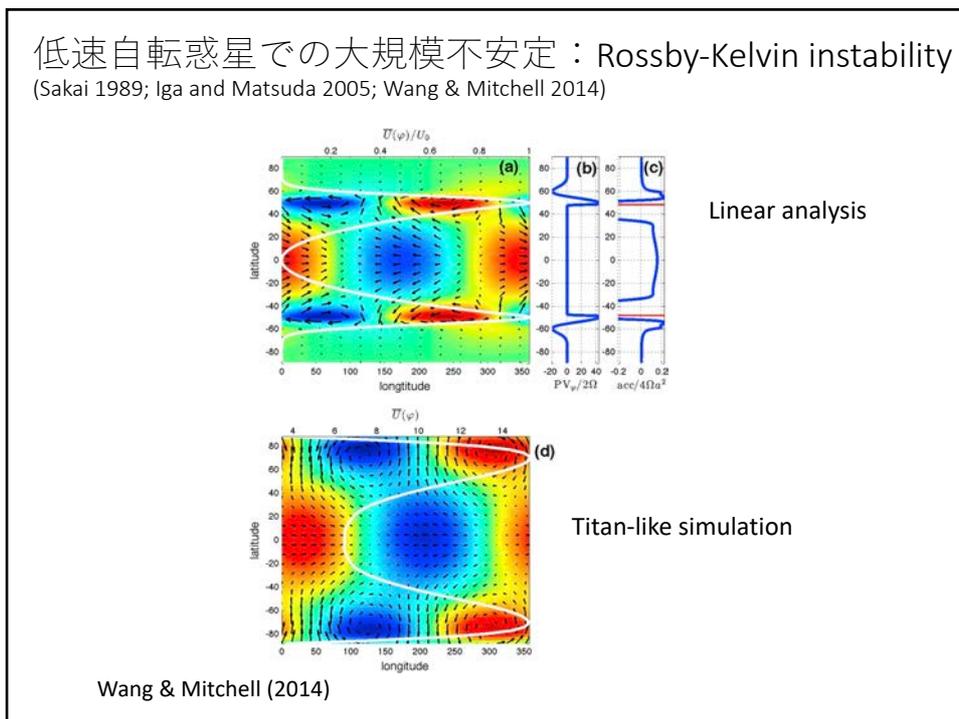
16



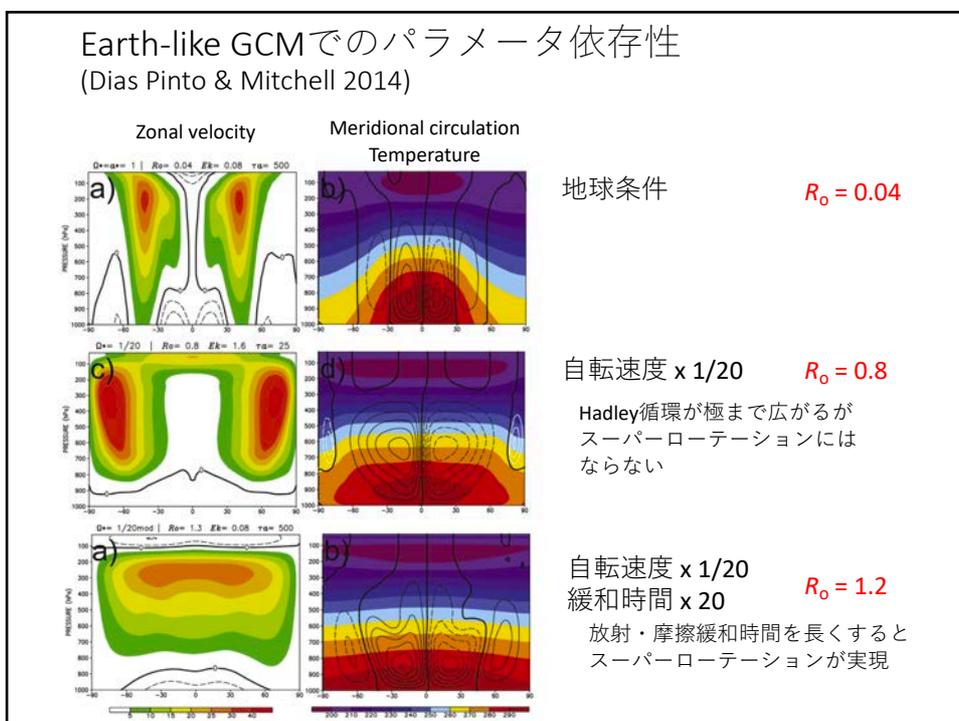
17



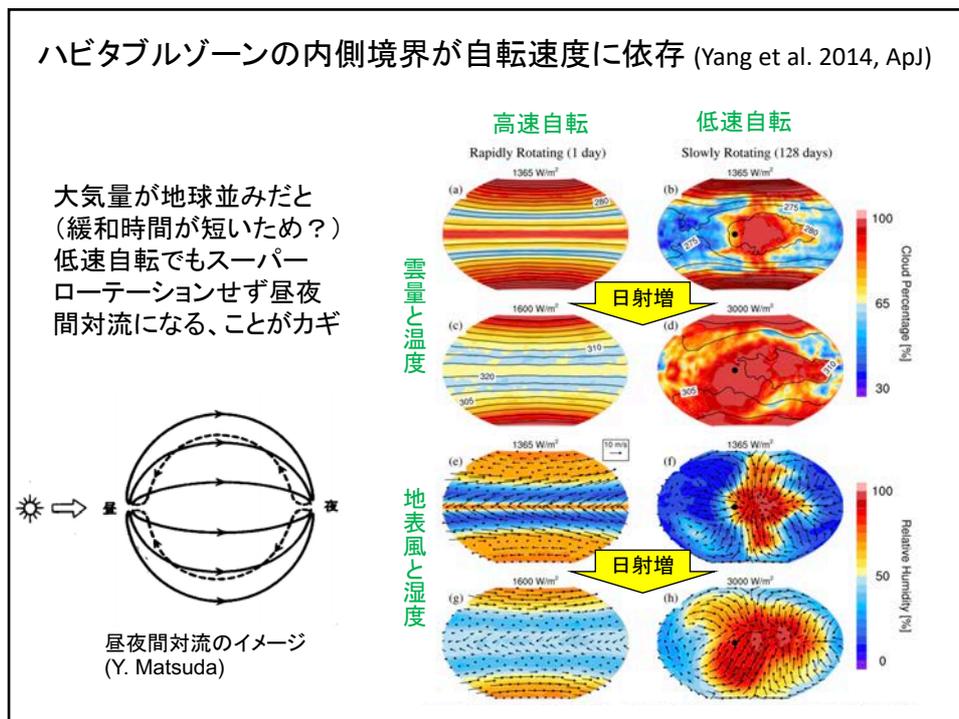
18



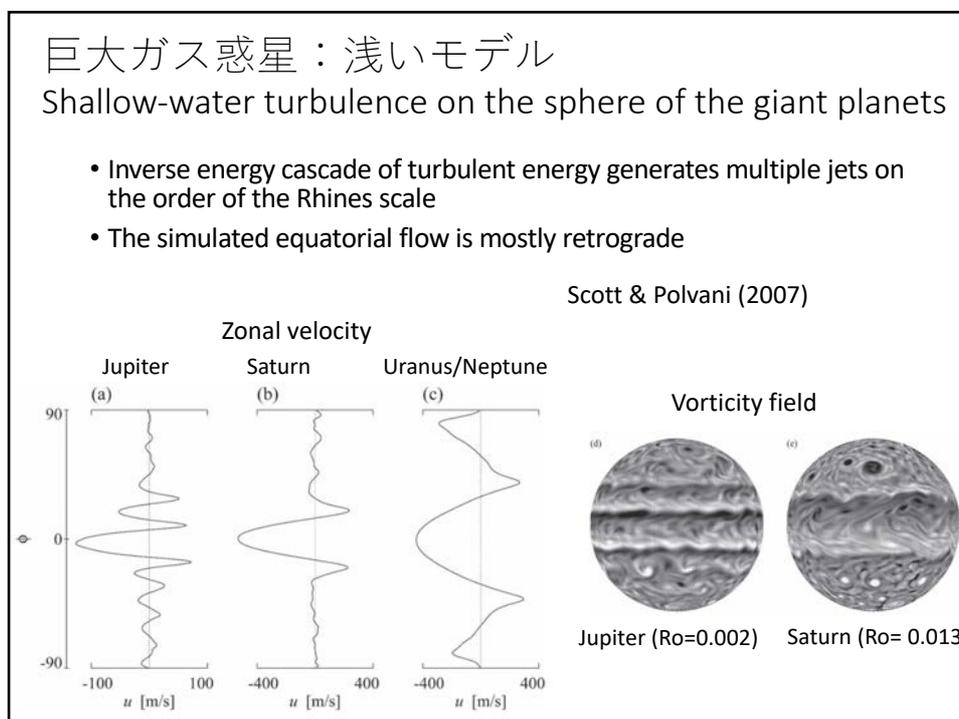
19



20

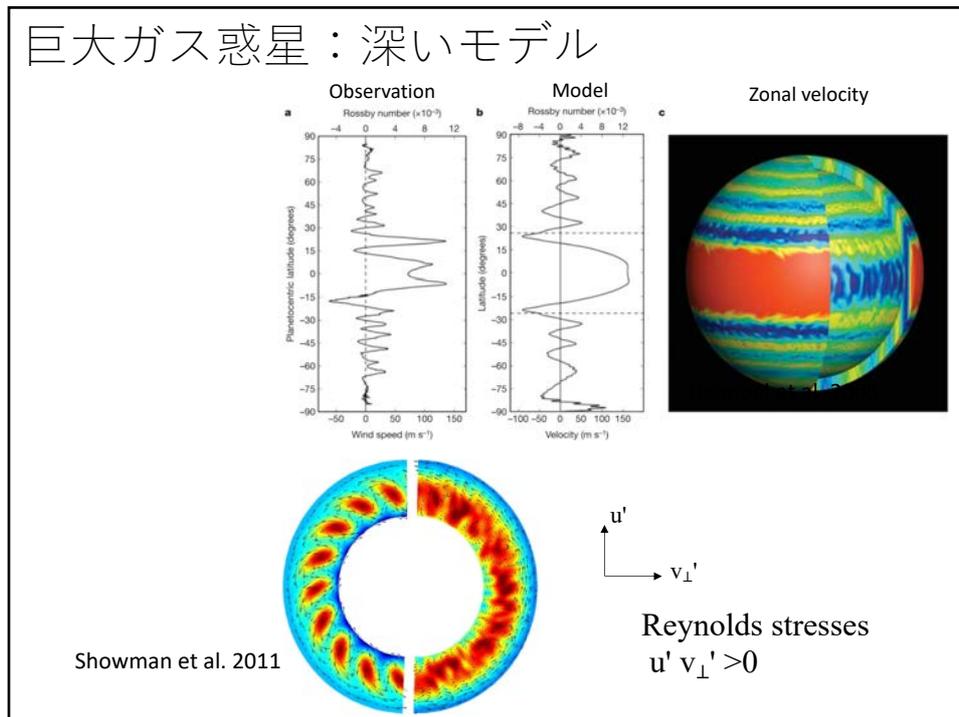


21



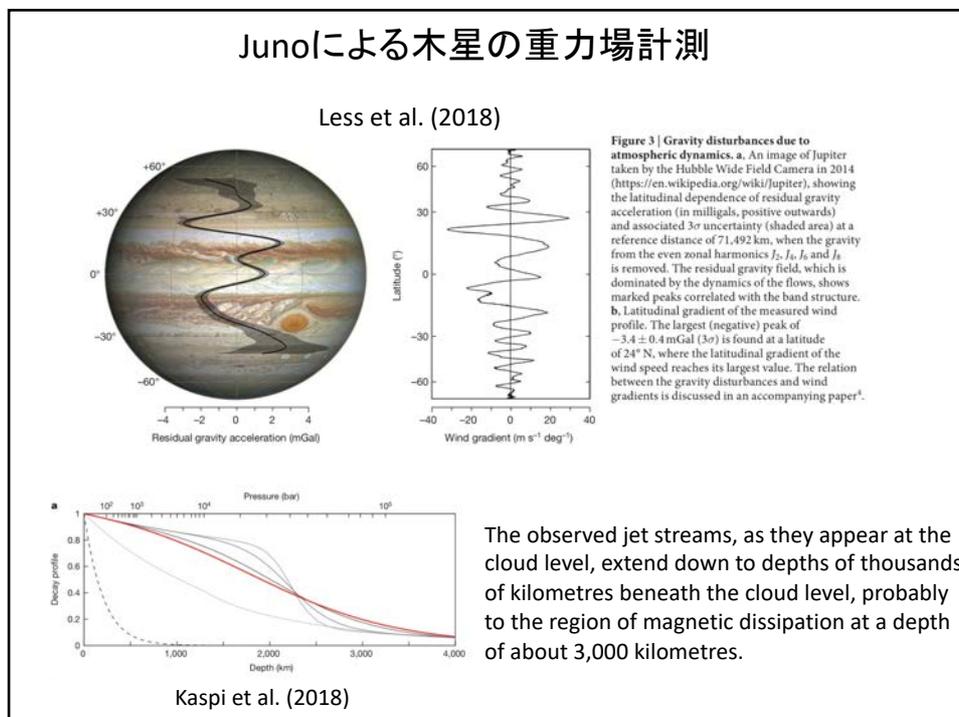
22

## 巨大ガス惑星：深いモデル



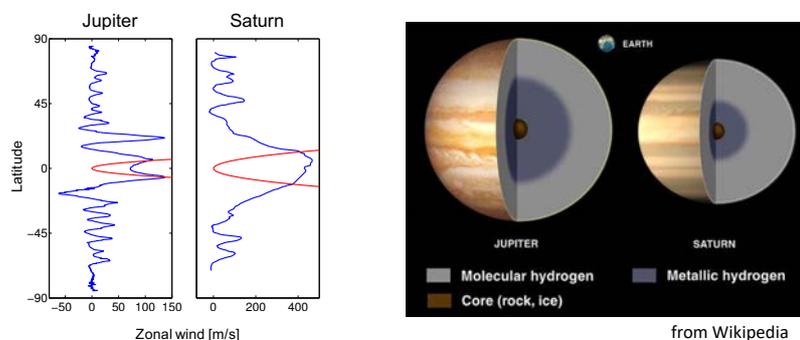
23

## Junoによる木星の重力場計測



24

## 木星-土星比較



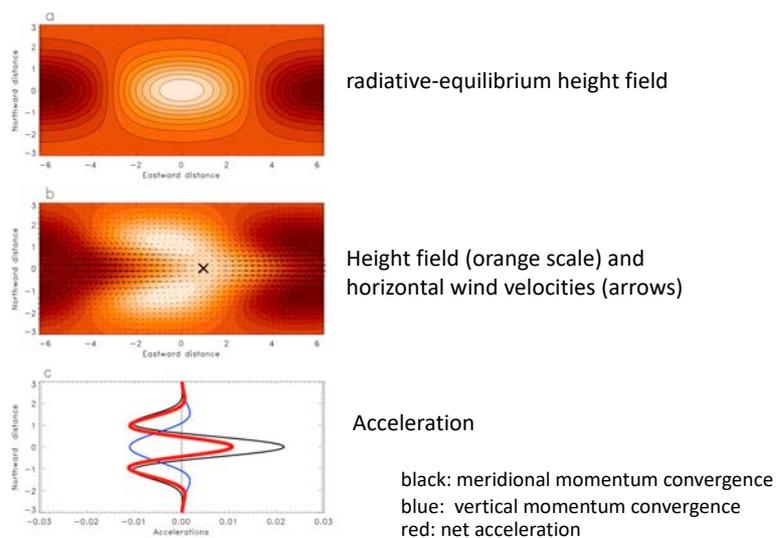
(Porco et al. 2003) (Sánchez-Lavega 2000)

- JunoとCassiniの重力計測によれば土星のジェットは木星に比べて3倍の深さまで及んでいる(木星:3000 km vs. 土星:9000 km).これは大気が導電性を持ちオーム抵抗が生じる深さに対応すると考えられる。
- 赤道スーパーローテーションの到達緯度は木星では13°、土星で31°くらい。これは導電性が生じる深さから自転軸方向に伸ばした直線が表面と交わるあたりに相当する。

25

## 潮汐固定惑星: Matsuno-Gillパターンによる加速?

Linear analytic solution (Showman & Polvani 2011)



26

## まとめ

- 波動による角運動量輸送が惑星ごとの異なる条件においてどのように現れるかが大気大循環のパターンを決める。スーパーローテーションは象徴的な課題。太陽系内・外惑星の観測データの増加と理論モデルの進展によりいくつかのシナリオが見えつつある。
- 惑星の環境形成において大気大循環は本質的な役割を果たすが、循環パターンが地質学的な証拠として残ることはほとんどない。現在と異なる条件下での循環パターンについて議論するには、実証的研究に基づく汎用的な大気循環論の構築が必須。
- あかつきデータにより金星で実証的研究が進んでいる。