

惑星大気のスーパーローテーション

今村 剛

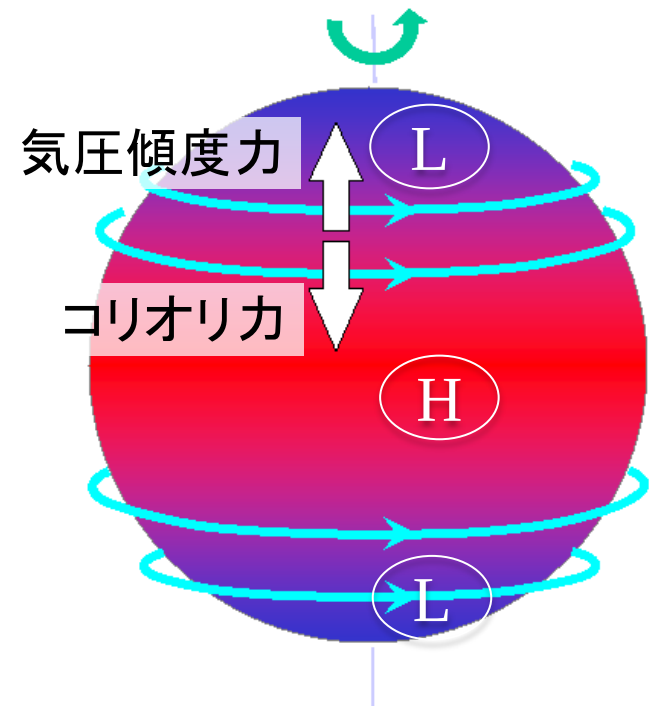
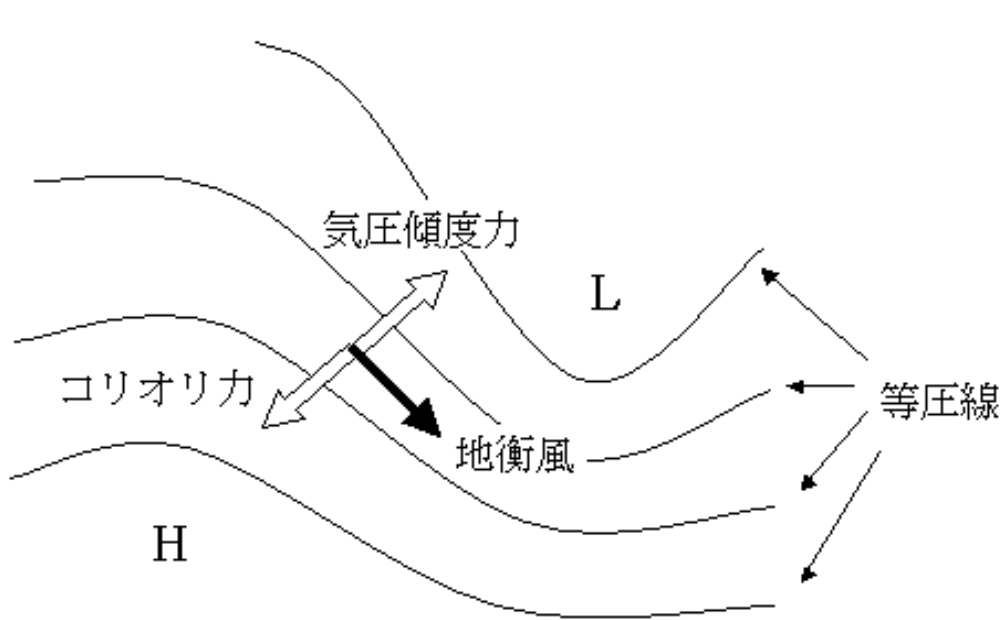
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

目次

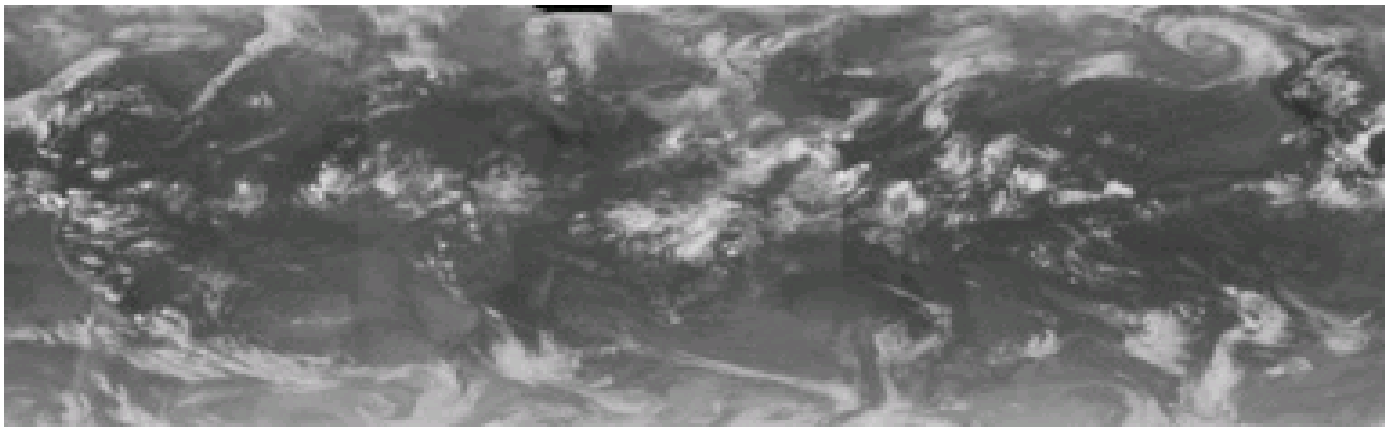
- 地球大気の角運動量バランス
- 惑星大気のスーパーローテーション

＊「角運動量」は「自転軸まわりの角運動量」を指し、
自転方向の回転を正とする。

地衡風バランス * 因果関係ではない



地球の雲の動き(静止気象衛星による)

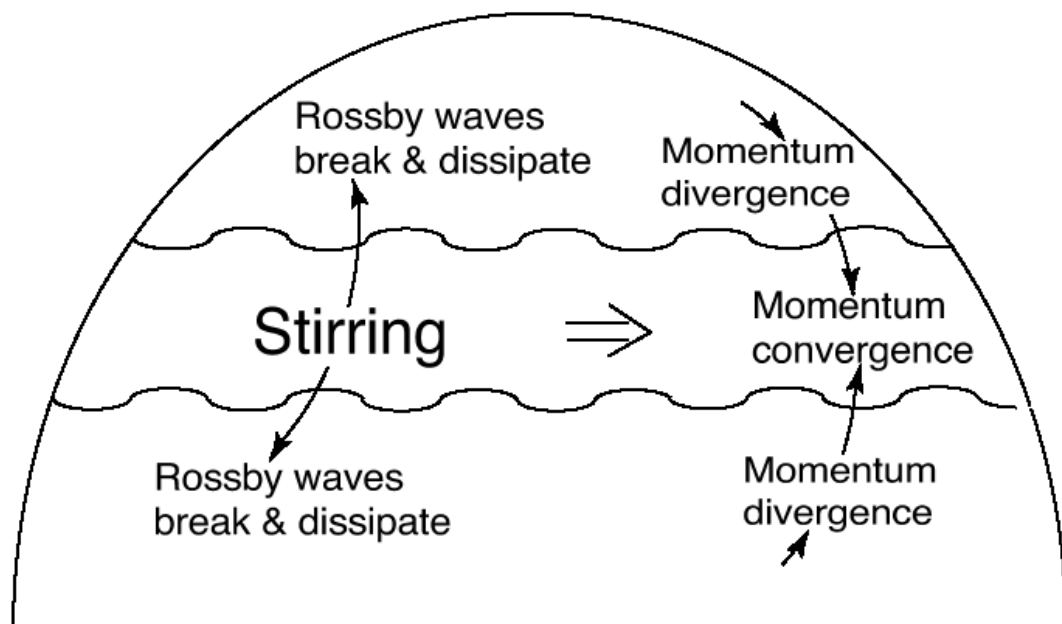


波動による中緯度ジェット生成

傾圧不安定(水平温度差による不安定)によりRossby波が励起

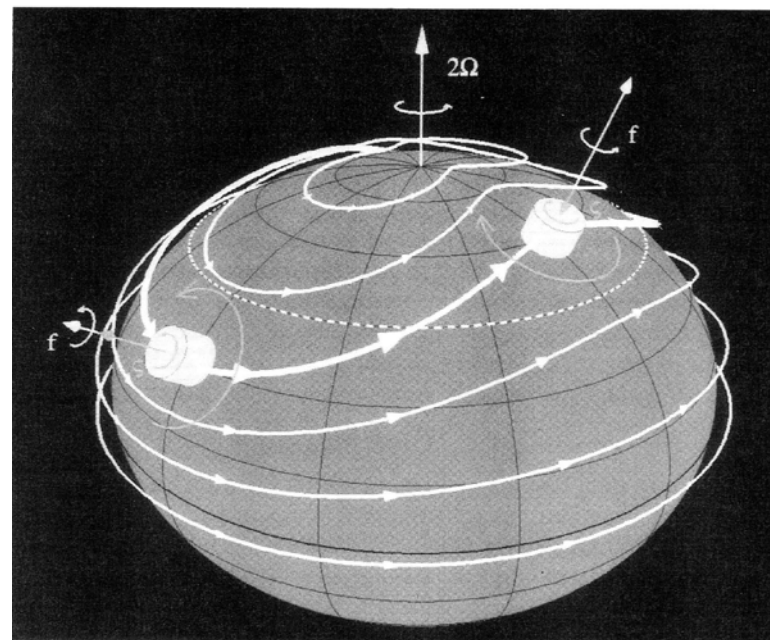
→ 南北に伝搬 → Rossby波が負の角運動量を持ち去る

→ 中緯度で角運動量が蓄積しジェット生成



(Vallis, 2005)

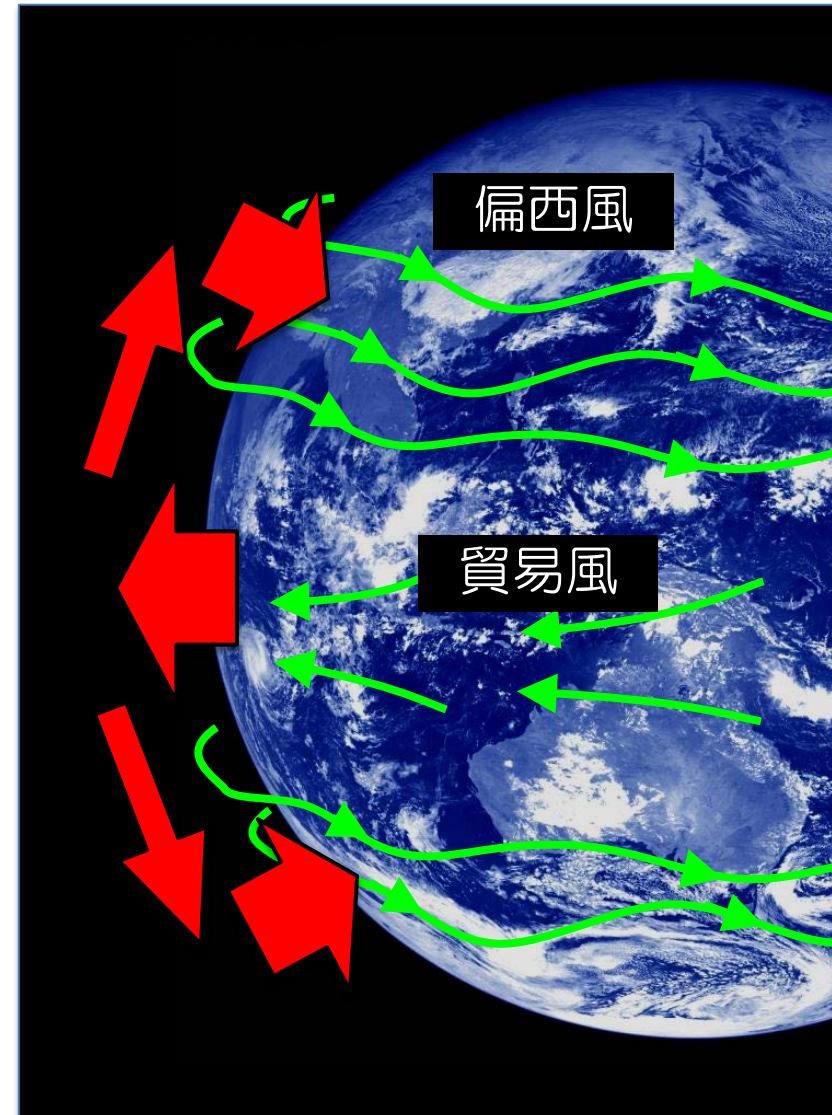
Rossby波: 回転と球面の効果で伝搬する波動



(Salby, 1996)

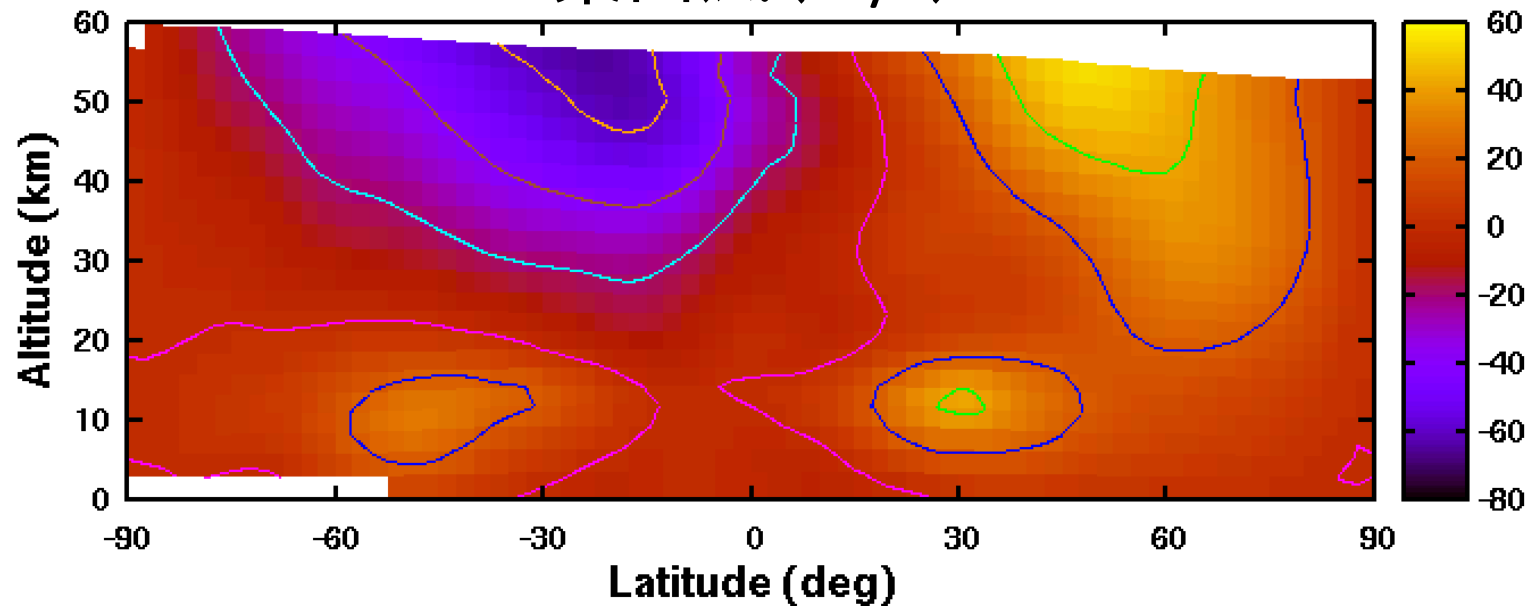
角運動量の循環

- 中高緯度：偏西風のため大気が地面を引きずり、大気から固体惑星へ角運動量輸送
- 低緯度：偏東風のため地面が大気を引きずり、固体惑星から大気へ角運動量輸送
- 対流圏上層：Rossby波の効果により低緯度から高緯度へ角運動量輸送

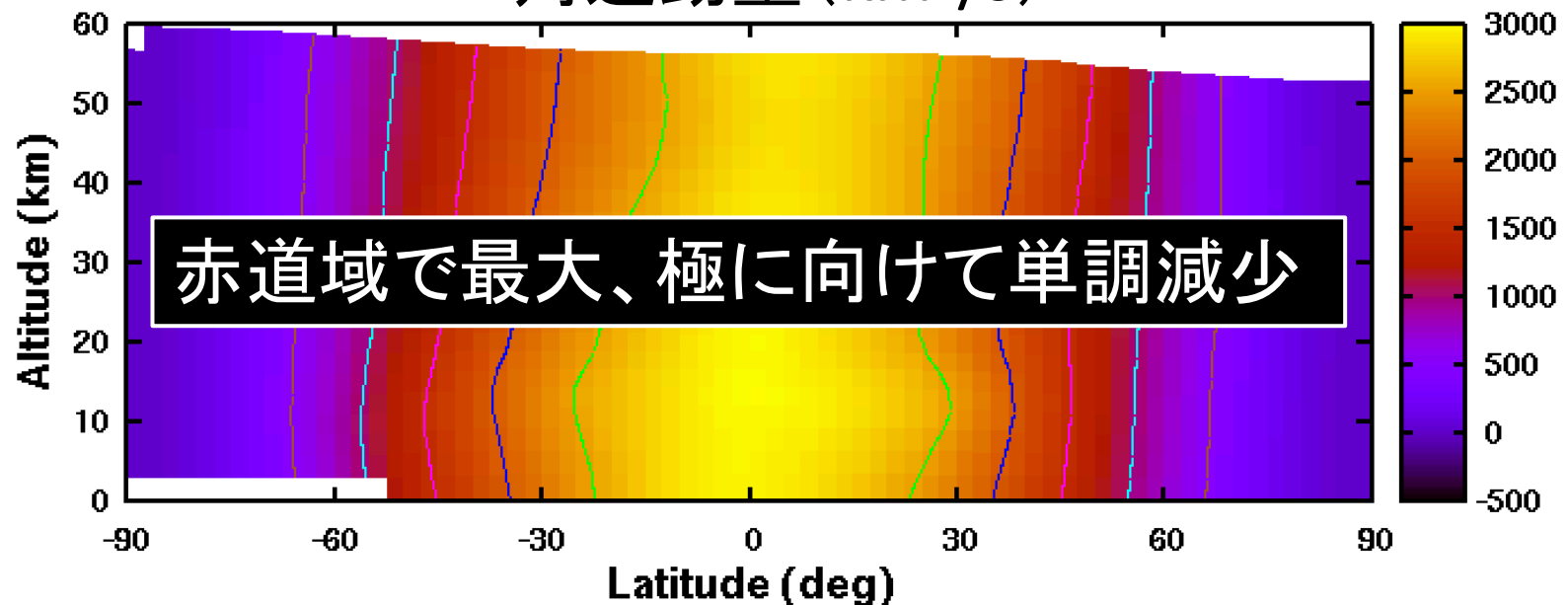


東西風 (m/s)

(1月の平均風)



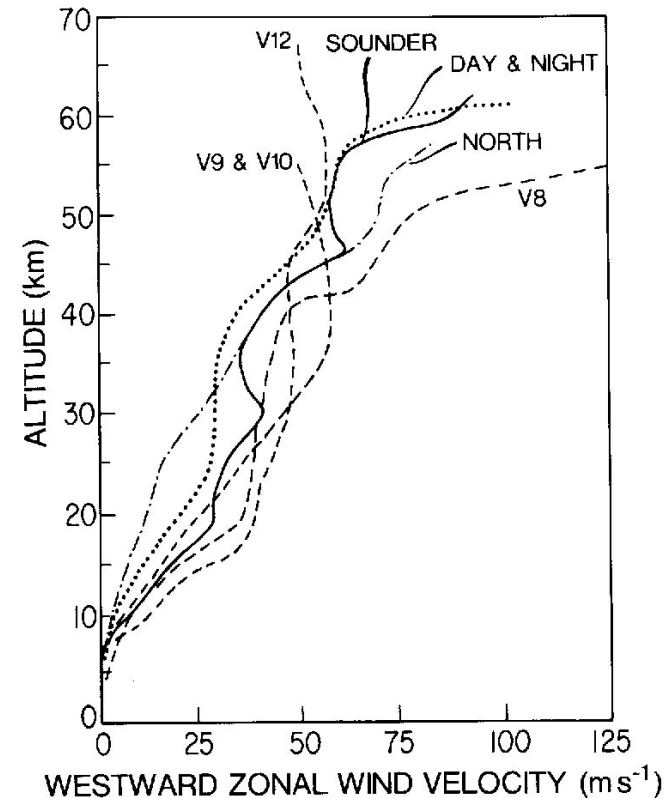
角運動量 (km^2/s)



金星大気のスーパーローテーション



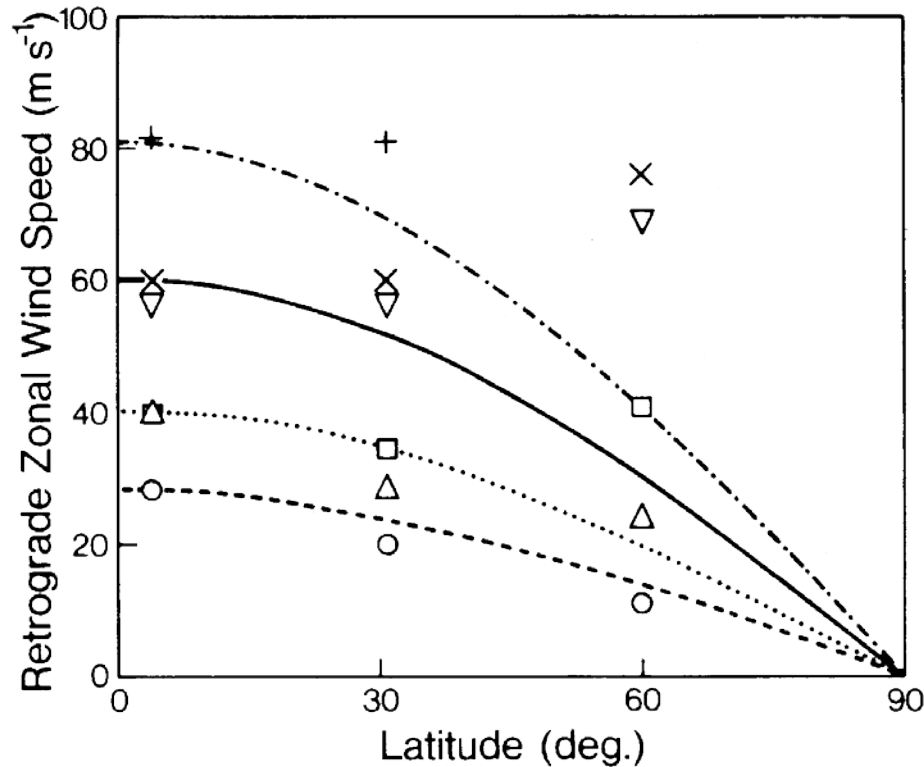
パイオニア・ビーナス探査機(米)による雲頂の紫外線連続画像



金星着陸機が測った風速の高度分布

雲頂(65km)では大気が自転(周期243日、地球と逆向き)の60倍の速さで循環

スーパーローテーションの緯度構造



等角速度分布(各高度で剛体回転)に近い



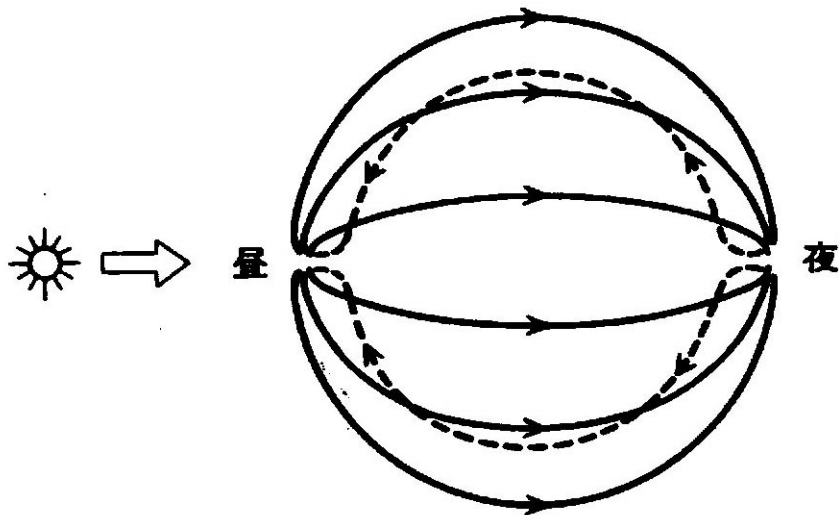
角運動量は赤道で最大、高緯度ほど小さい。地球のように惑星自転によるオフセットが無いにもかかわらず、地球と同じ傾向が見られる。

着陸プローブによる、5つの異なる高度(20-60km)での風速の緯度分布

観測前の予想

昼夜間循環

自転の効果が小さい場合、
昼夜の温度差が循環を駆動

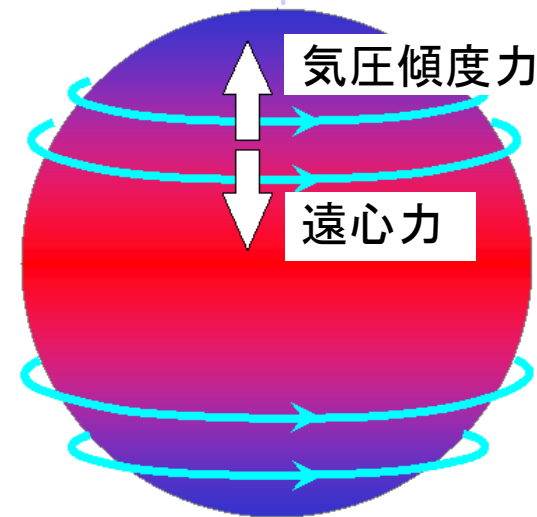


(松田 2000)

実際

スーパーローテーション

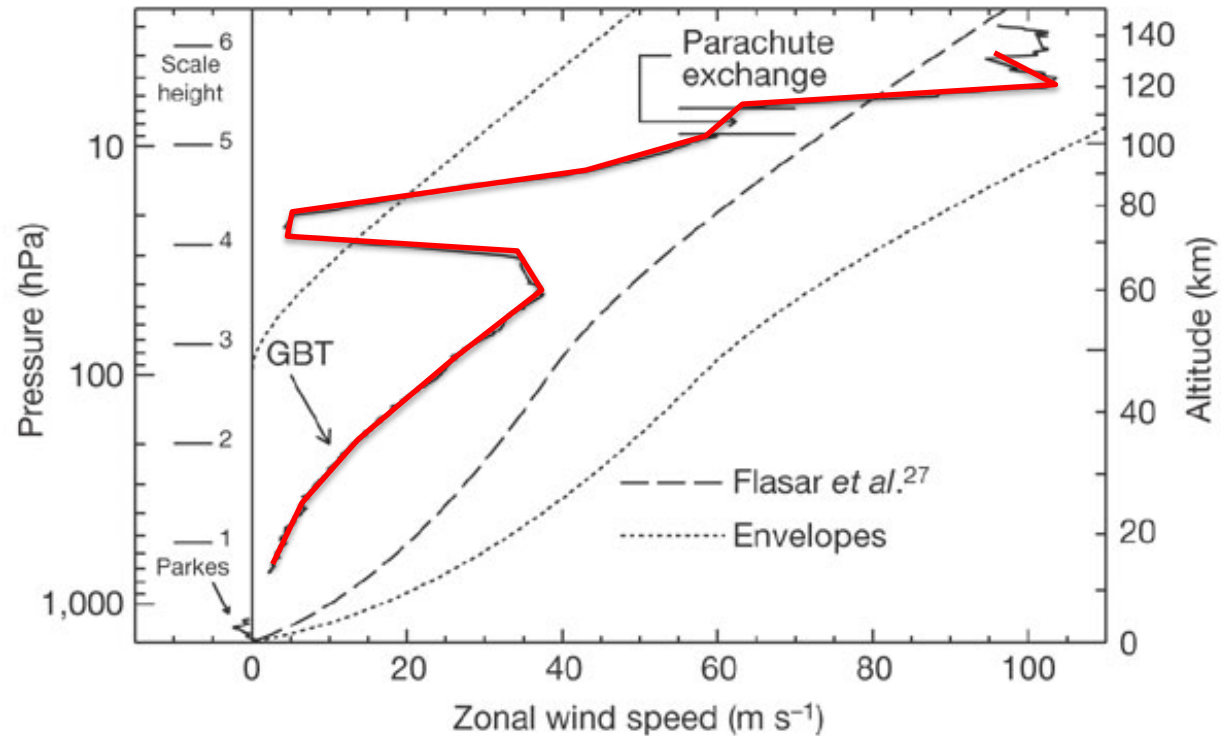
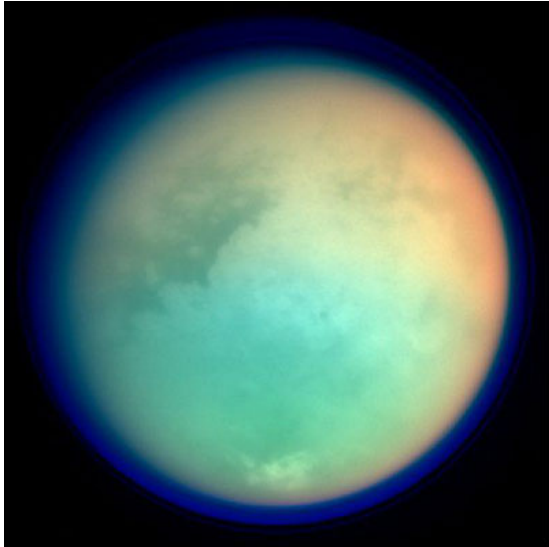
強い軸対称風により温度は
東西によく均されている



コリオリ力と気圧傾度力がつりあう
地衡風ではなく、遠心力の水平成分
と気圧傾度力がつりあう「旋向風」

タイタン大気のスーパーローテーション

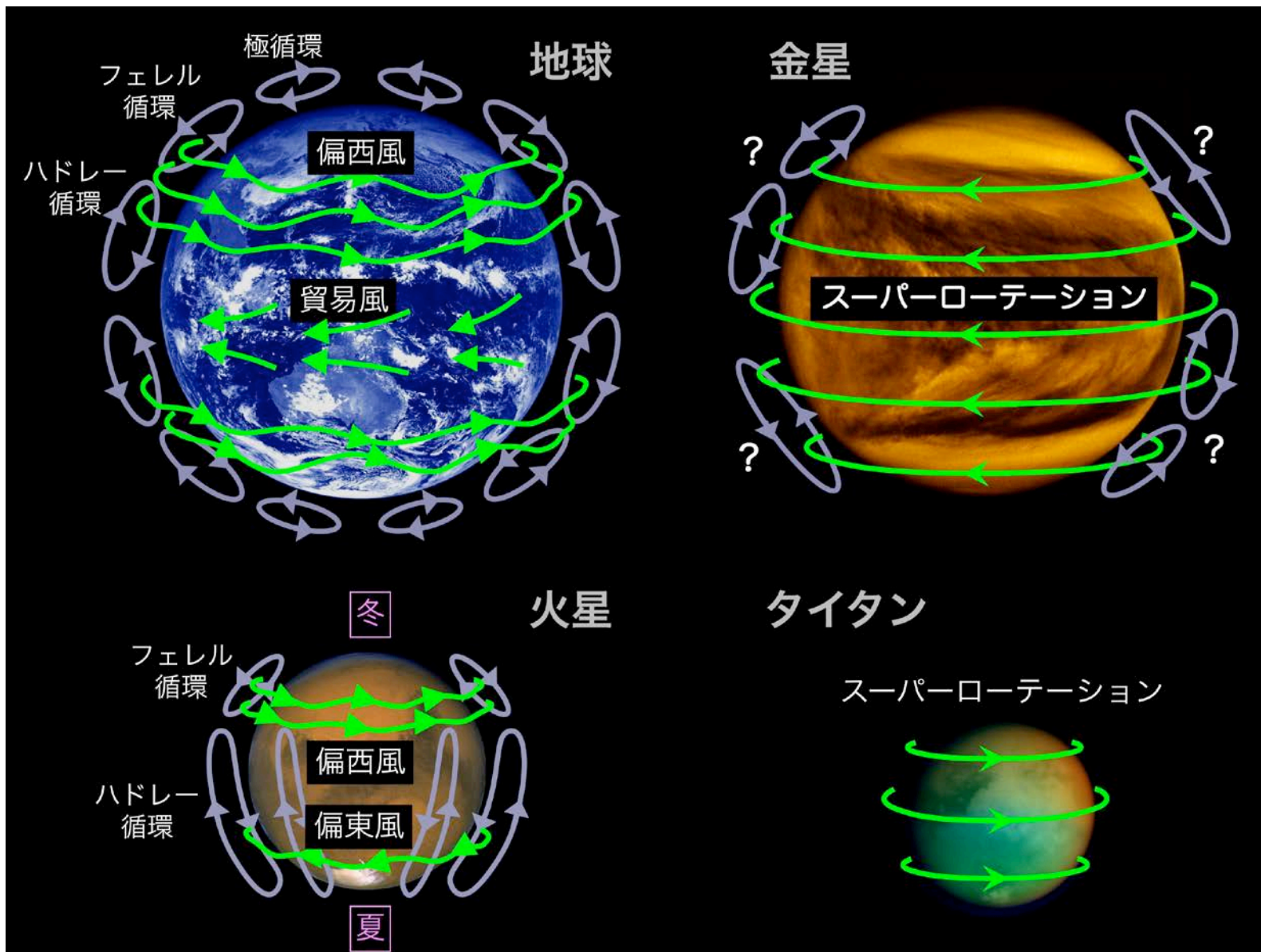
土星の衛星タイタン



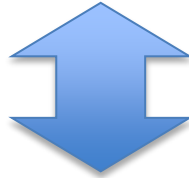
Cassini-Huygensプローブによる西風の鉛直分布

上空では大気が自転(周期16日)の10倍の速さで自転方向に循環

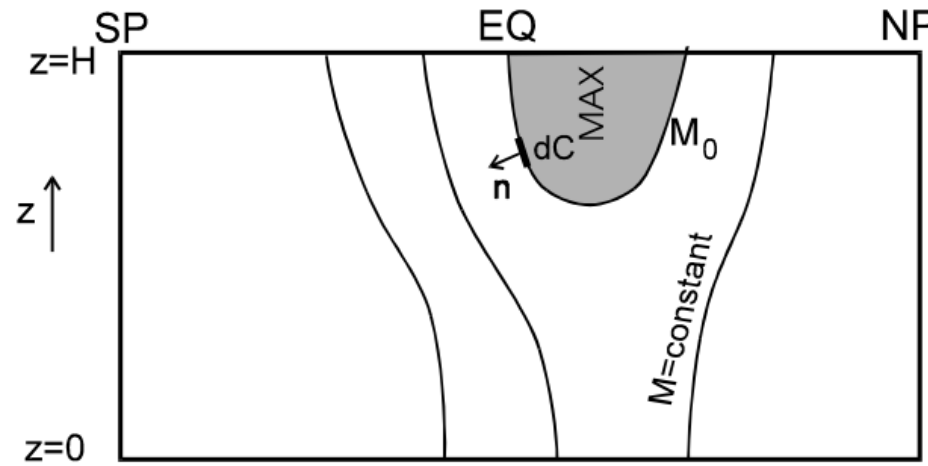
地球型惑星の大気大循環



- 「スーパーローテーション」 = 大気の単位質量あたり角運動量が赤道上空で最大
- 地球では長期間の平均状態としては見られない



Hideの定理：自転軸に対して対称な循環では、地表から離れた場所に角運動量の正の極値を維持することはできない。



→レイノルズストレスが必要

タイタンと金星の違い

- 金星は灼熱(740K)、タイタンは極寒(90K)
- 金星は大きい(半径6050km)、タイタンは小さい(2575km)

タイタンと金星の共通点

- 自転が遅い(金星243日、タイタン16日)
- 厚いエアロソル層
- 放射時定数が長い(金星30年、タイタン100年)

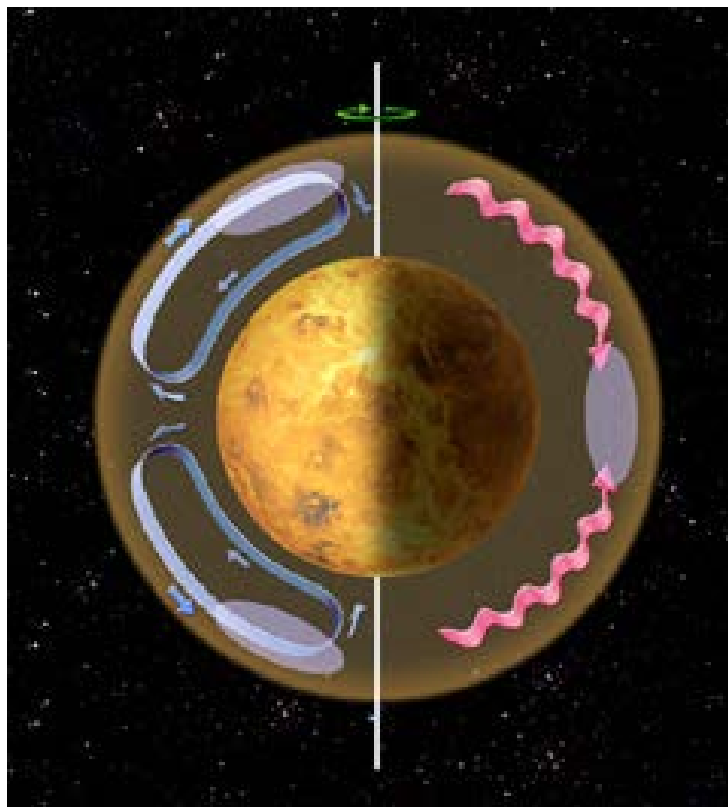
仮説1 子午面循環によるメカニズム

(Gierasch, 1974; Rossow & Williams, 1979)

ハドレー循環

低緯度で角運動量を
上向き輸送、高緯度
で下向き輸送

高緯度ジェット生成



水平粘性

(実体は波動や乱流)

差動回転を解消

結果的に角運動量を
赤道向きに輸送

結果として大気上層に角運動量が蓄積

低速回転惑星上の水平 2次元数値実験

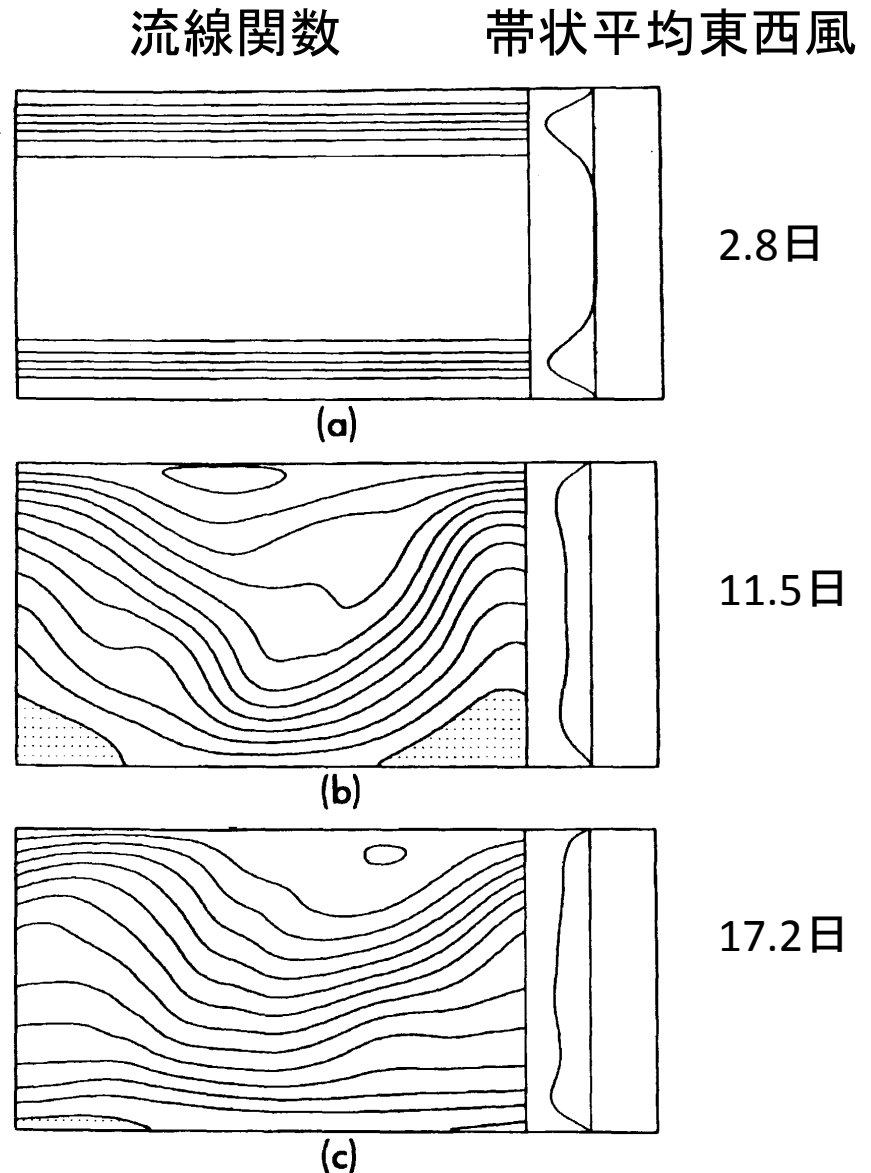
(Williams and Rossow 1979)

金星と同じ自転速度

高緯度でジェット型の強制

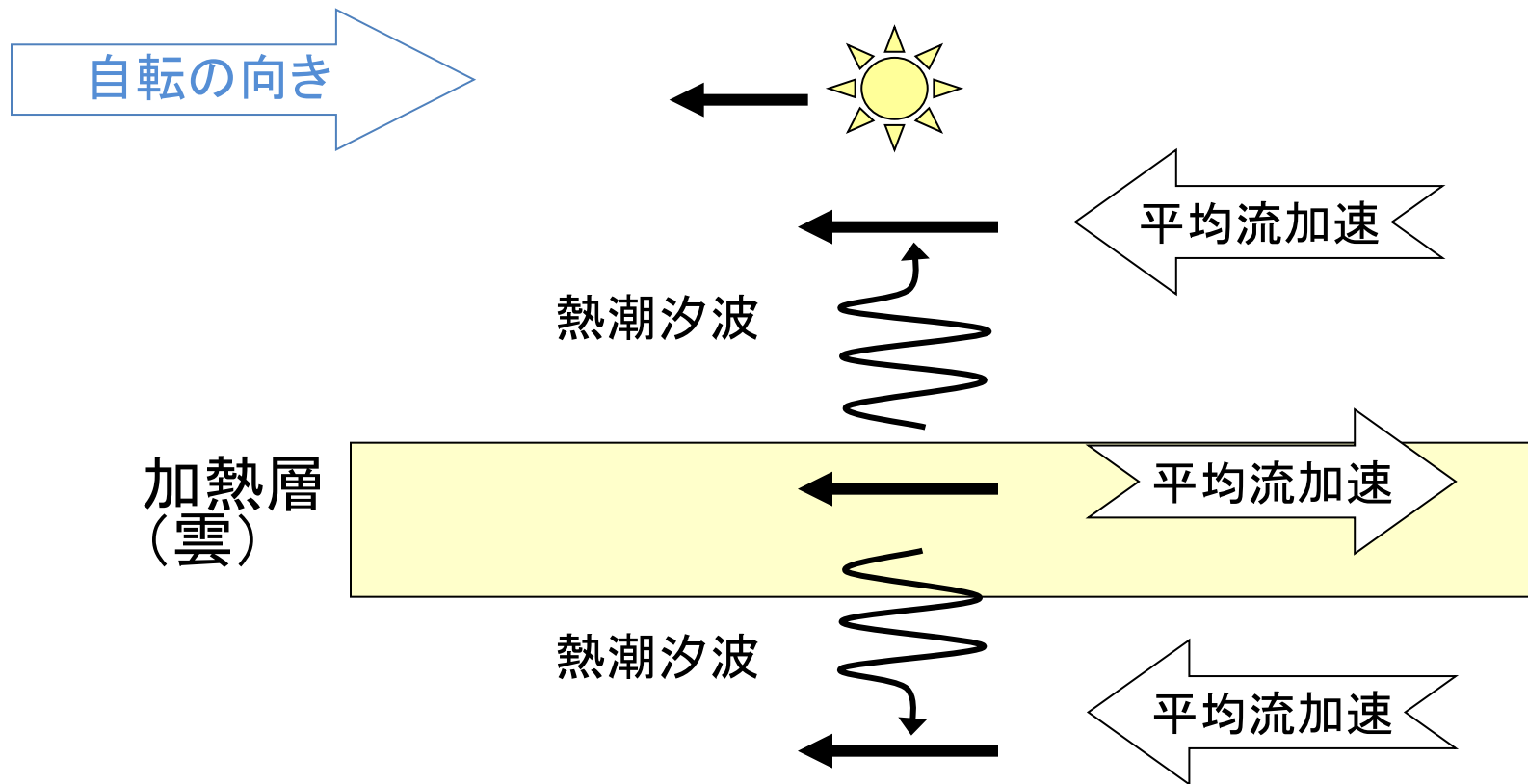
→ 順圧不安定 (水平シアーによる不安定) で擾乱生成、赤道向き角運動量輸送

自転が遅いとRossby波は存在しにくい → 地球との違いか？



仮説2 熱潮汐波によるメカニズム

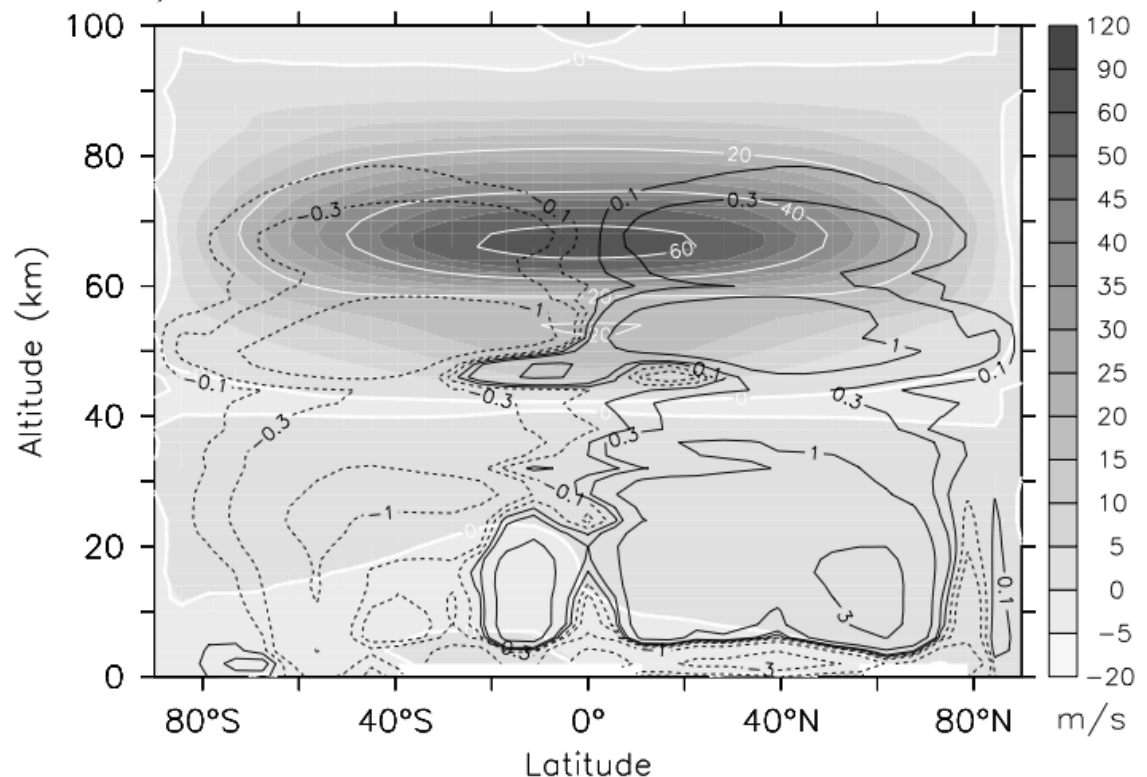
(Fels & Lindzen 1974)



太陽光加熱域の移動により、東向き運動量を持つ重力波が
励起されて上下に伝搬 → 雲層が反動で西向きに加速

数値実験

- 現実的な設定条件で大気全層のスーパーローテーションが生じたものは数少ない。いまのところ発現条件についてコンセンサスがない。
- 計算では下層大気の手ドレー循環が著しく弱いことが原因か
- 初期値依存性あり



Lebonnois et al. (2011)

角運動量循環の時間スケール

- 地球

中緯度の地表トルク $\sim 2 \times 10^5 \text{ kg/s}^2$

コラム角運動量 (10m/sとして) $\sim 6.6 \times 10^{11} \text{ kg/s}$

→ 角運動量の循環時間 **およそ1ヶ月**

これは子午面循環の時間スケールと同程度

- 金星

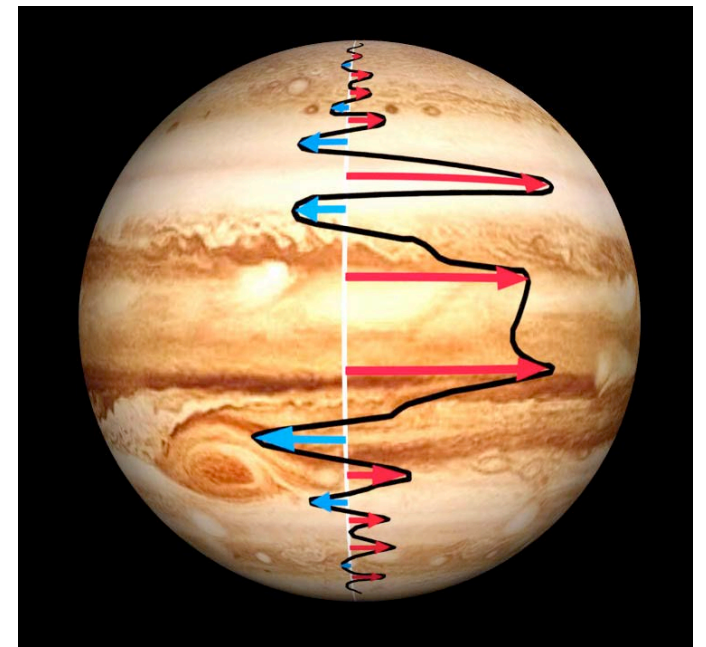
地表トルク: 不明

子午面循環: おそらく**数十年**

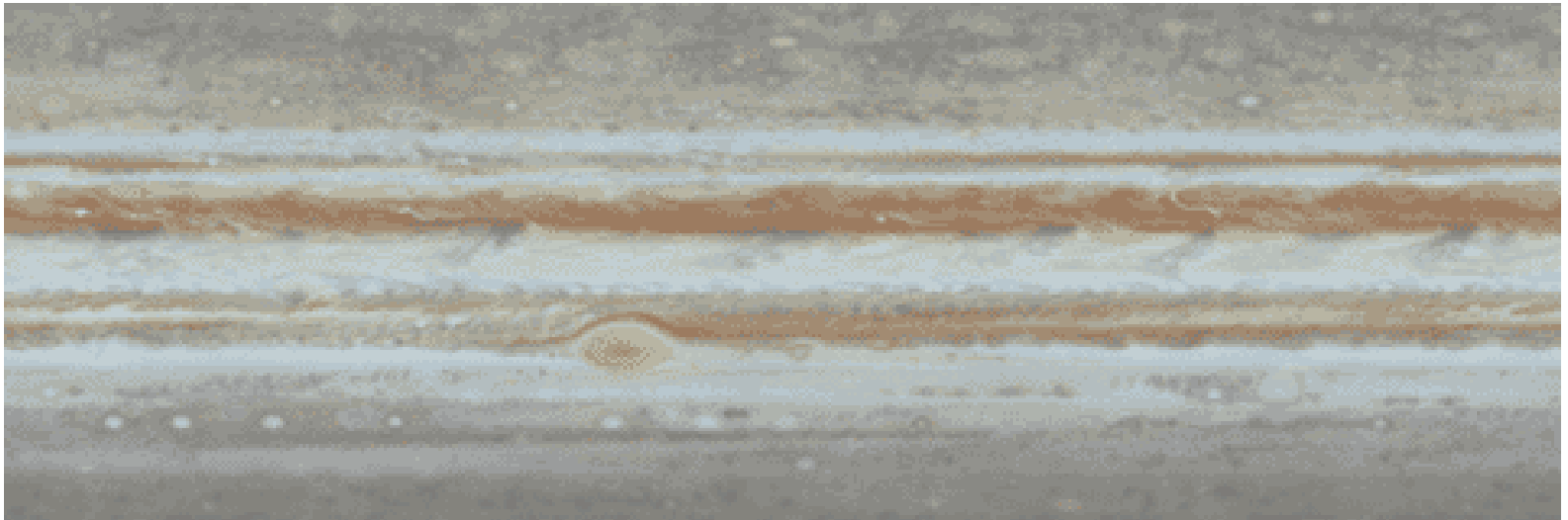
→ スーパーローテーションは、地球では問題にしないような小さな加速が長い時間をかけて生成するものらしい。モデリングにあたっては計算上の誤差 (数値粘性による低緯度向き角運動量輸送など) を正しく評価することが重要。

木星の縞々

- ・ 赤道ジェットあり(スーパーローテーション)
- ・ 様々な考え方があり、定説はない
- ・ 浅い流体説 vs. 深い流体説 など



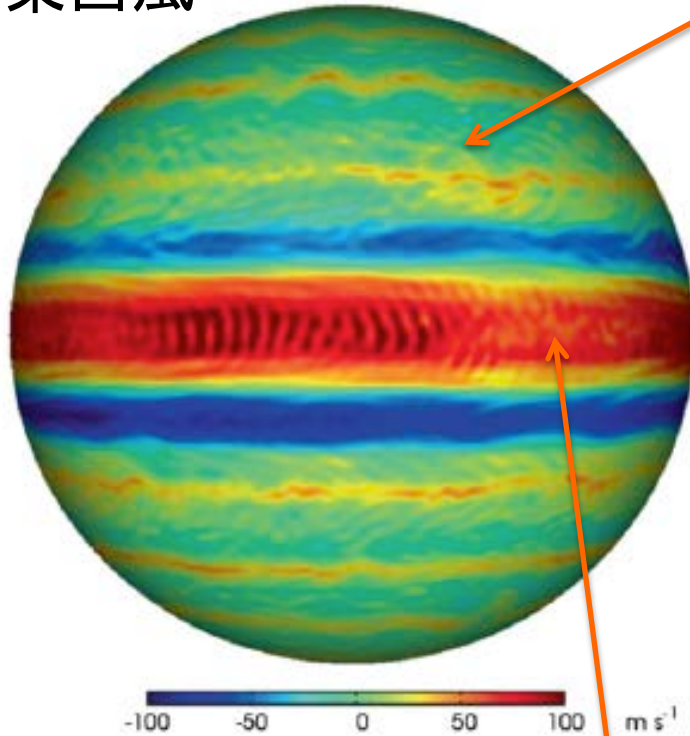
雲追跡による東西風の緯度分布



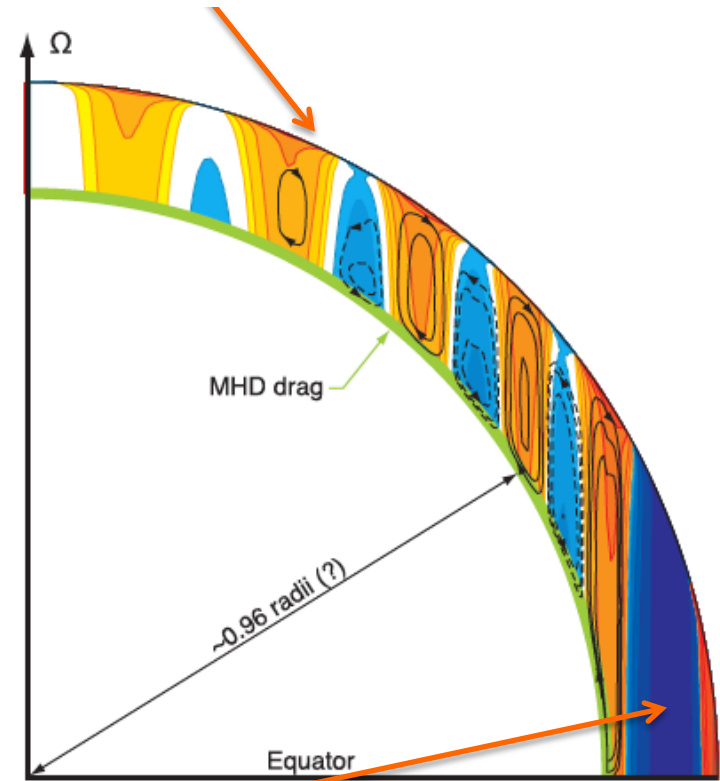
数値実験の例

(Schneider & Liu, 2009)

東西風



太陽光加熱の緯度による違い
によって傾圧不安定が生じ、こ
こからRossby波が伝搬して中高
緯度のジェットを作る



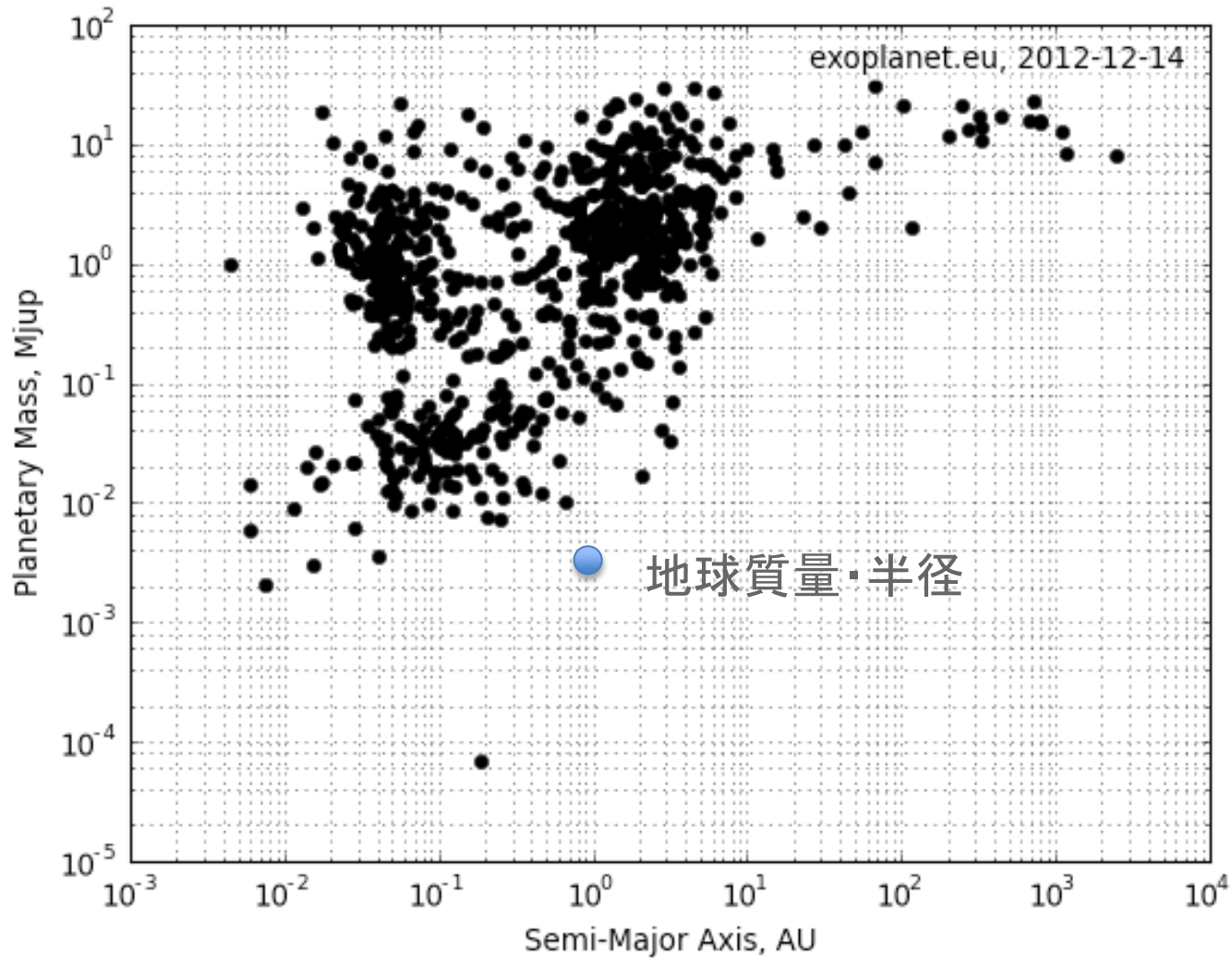
深部からの熱フラックスにより対流が生じ、
これが励起するRossby波に伴う運動量収束
により赤道ジェットが作られる

(Schneider & Liu, 2009)

系外惑星

既に数百個が発見されている

惑星の質量(木星質量に対する割合)



公転軌道の半径(地球太陽間距離に対する割合)

系外惑星の大気のスーパーローテーション

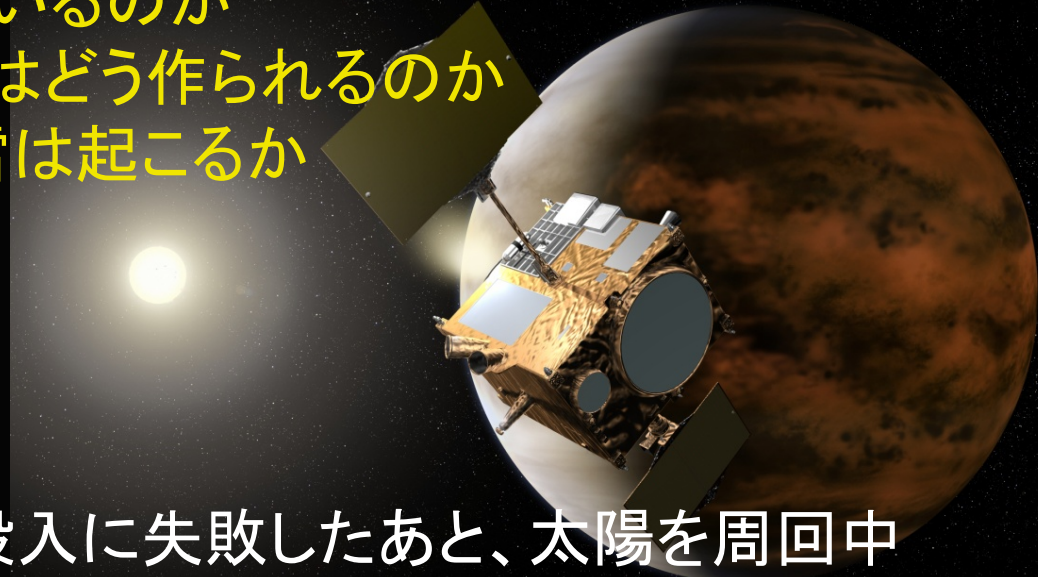
- これまでに発見された系外惑星の中には中心星の近傍を周回するものが多い。そのような惑星は中心星の強い引力の影響で常に同じ面を中心星に向けている可能性が高い。

= 同期回転惑星

- 同期回転惑星では、昼側では高温のため水は全て蒸発、夜側では極低温のため大気成分や水が一方向的に凝結？
- 一方、大気循環によって昼と夜の間で熱が均されれば極端な状況になりにくい。同期回転惑星は自転自転が遅く、金星やタイタンと似た状況。スーパーローテーションの有無が同期回転惑星の気候の鍵を握る。

金星探査機あかつき

- ・ 日本初の金星探査機であり初の惑星周回機
- ・ リモートセンシングによって大気の運動を3次元的に可視化し、スーパーローテーション大気の気象学を理解する
 - スーパーローテーションはなぜ起こるのか
 - 子午面循環はどうなっているのか
 - 全球を隙間無くおおう雲はどう作られるのか
 - 氷晶の生じない大気に雷は起こるか
- ・ 2010年5月打ち上げ
- ・ 同年12月に金星周回軌道投入に失敗したあと、太陽を周回中
- ・ 軌道投入用エンジンは壊れたが、姿勢制御用の副エンジンを使って2015年末に改めて金星周回軌道に投入し、観測を始める予定



まとめ

- 地球大気の角運動量収支では波動が重要な役割を果たす。
- 金星と土星の衛星タイタンの大気はスーパーローテーションしており、これがどのような角運動量収支によって維持されているのかはわかっていない。木星の赤道大気もスーパーローテーションしている。
- スーパーローテーションに関わるレイノルズストレスは乱流ではなく波動が担う？
- 太陽系外の同期回転惑星の気候形成においてはスーパーローテーションの有無が重要。
- スーパーローテーションは地球気象学で扱ってこなかった力学状態であり、従来より高い精度での力学過程の扱いが要求される。スーパーローテーションの研究を通じて、地球気象学をより普遍的な惑星気象学の中に位置づけることができると期待。