

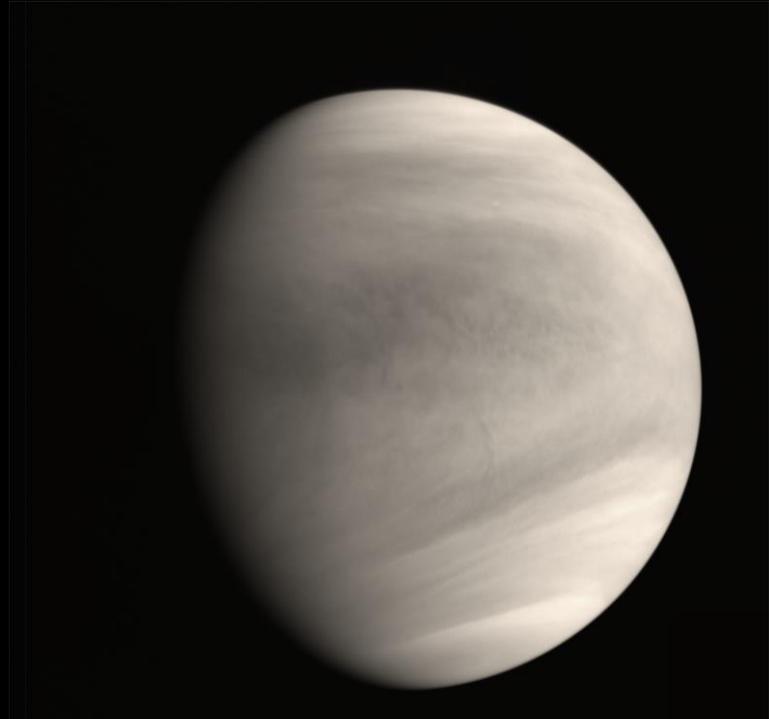
惑星の大気大循環

大気の循環が雲をつくり、気候をつくる

- 雲が増えると反射率が上がる
- 地球は反射率0.2になると数億年で水が宇宙に散逸



反射率=0.3をもたらしている地球の雲。雲は大気循環に伴う上昇流で生じる。



反射率=0.8をもたらしている金星の雲。高い反射率のせいで金星が受け取る太陽光エネルギーは地球よりも少ない。

緯度別放射収支

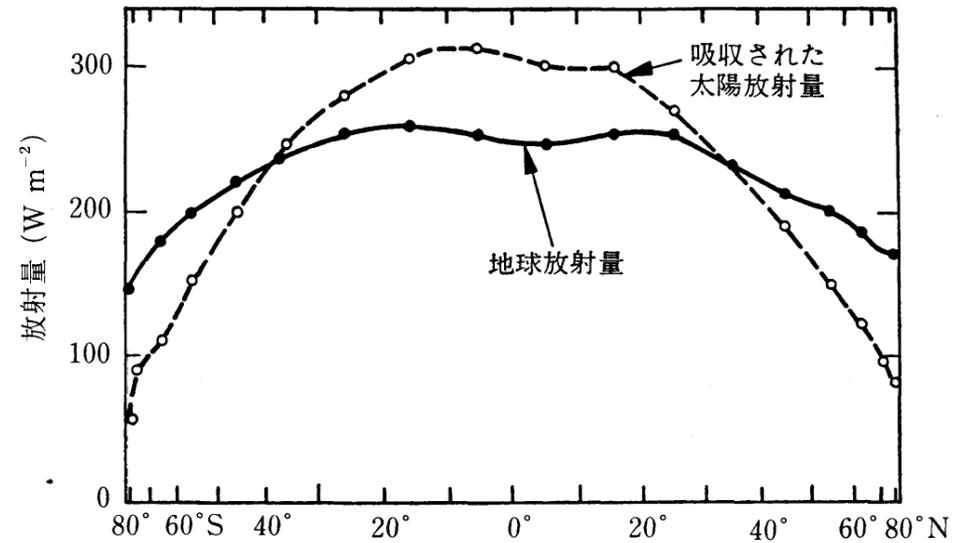
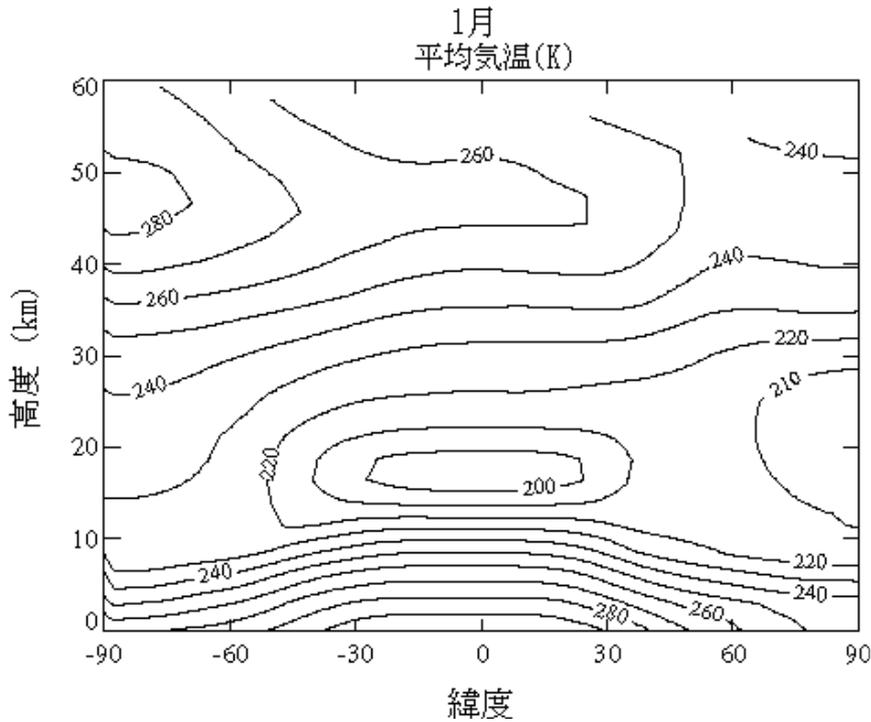
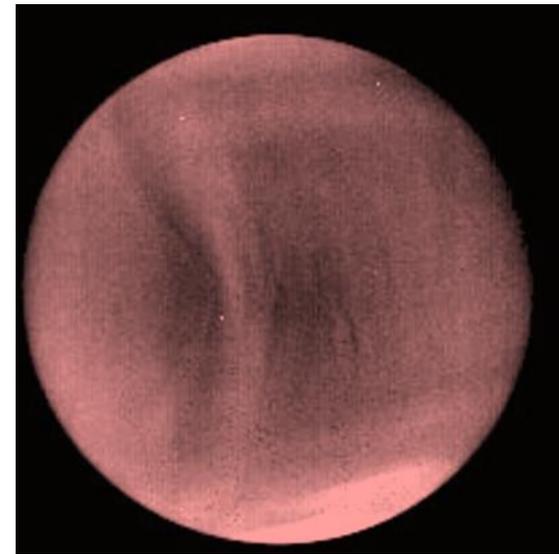
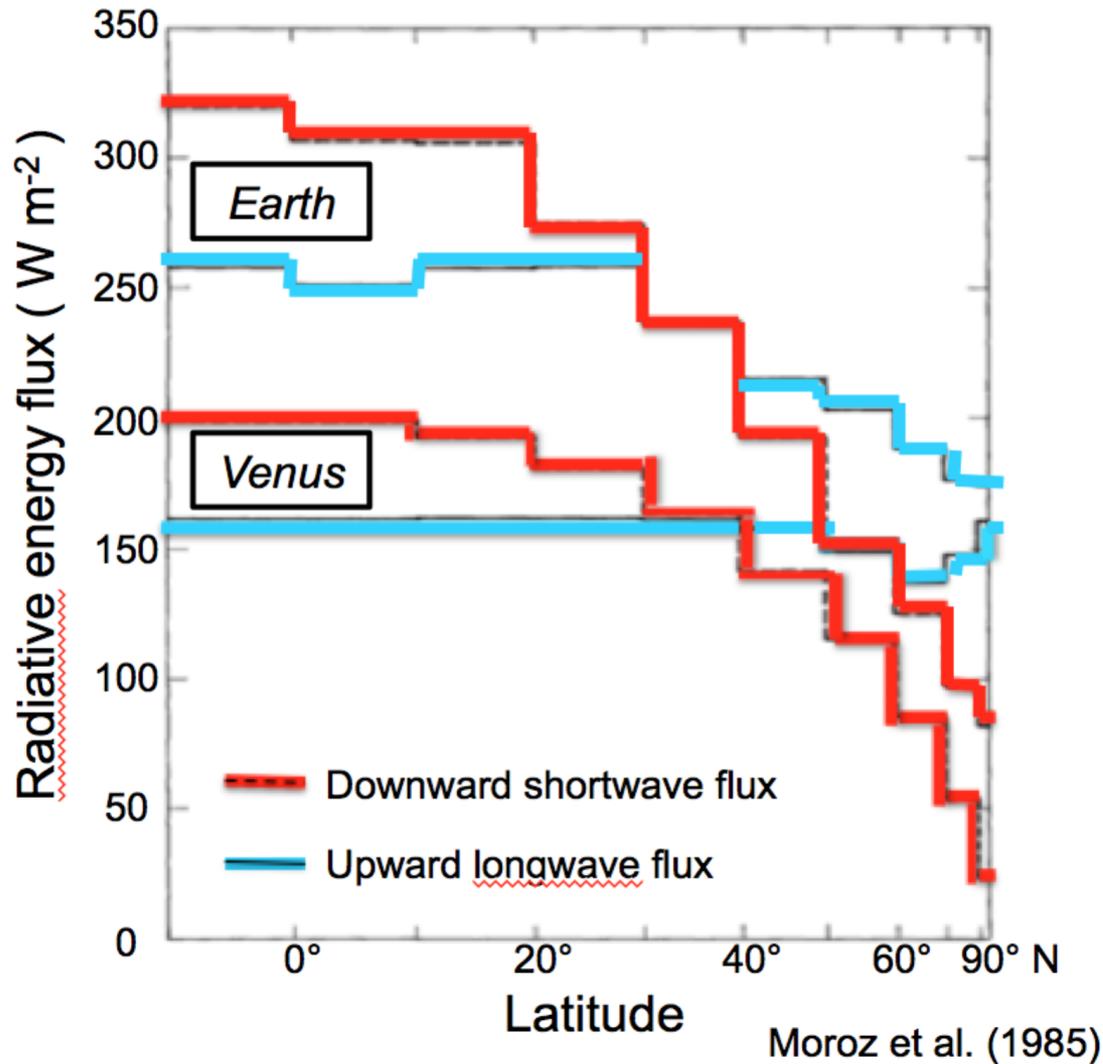


図 4.4 1962~66 年の衛星観測に基づく帯状平均した放射収支の緯度分布 (Vonder Haar and V. Suomi, 1971 : *J. Atmos. Sci.*, 28, 305-314.)

緯度別放射収支



あかつきLIR 10 μm 画像

水平対流

安定成層であっても水平方向に温度差があれば大気は循環する。
ハドレー循環は水平対流の一種

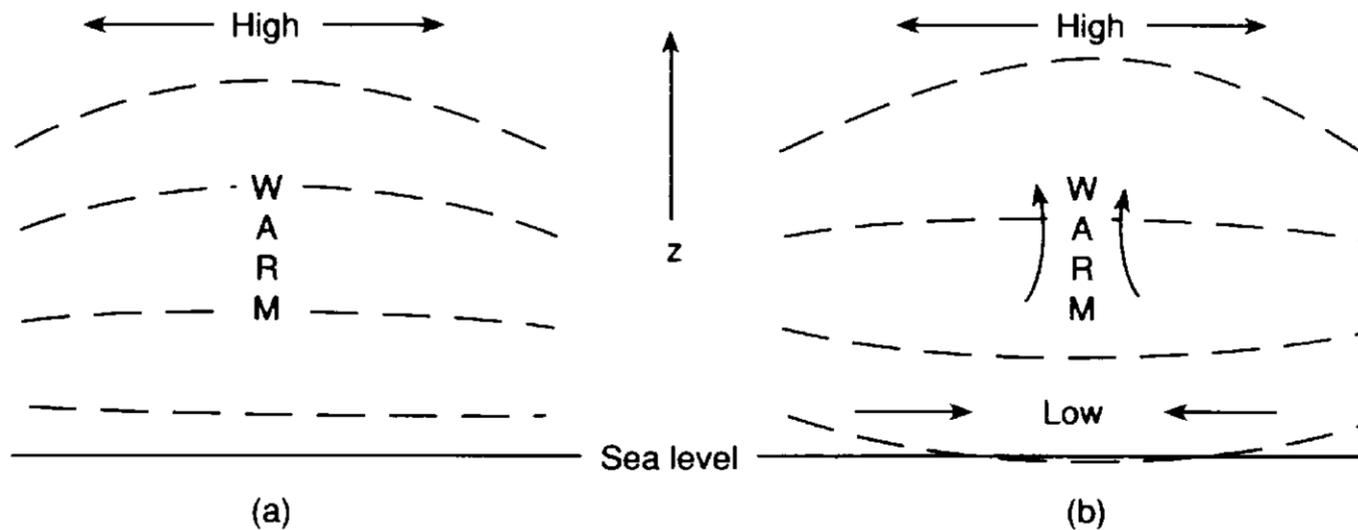
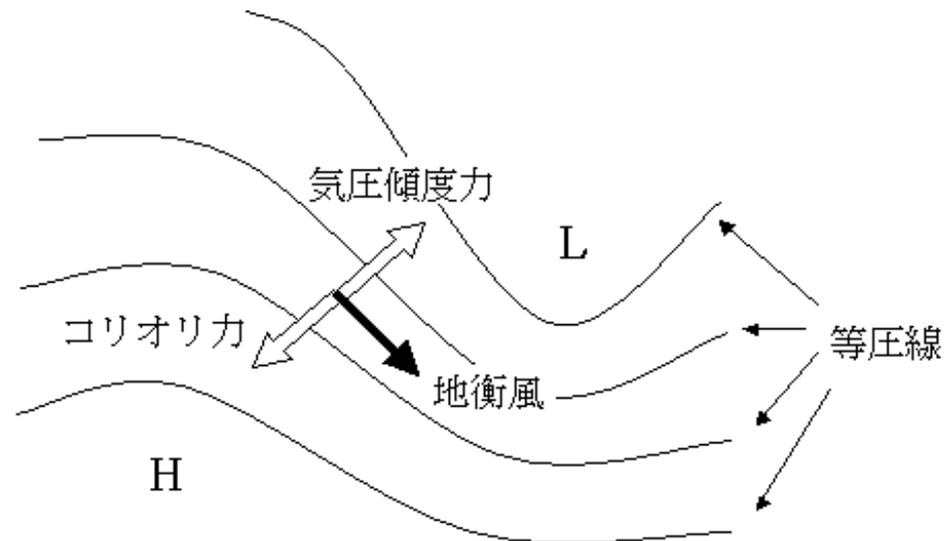
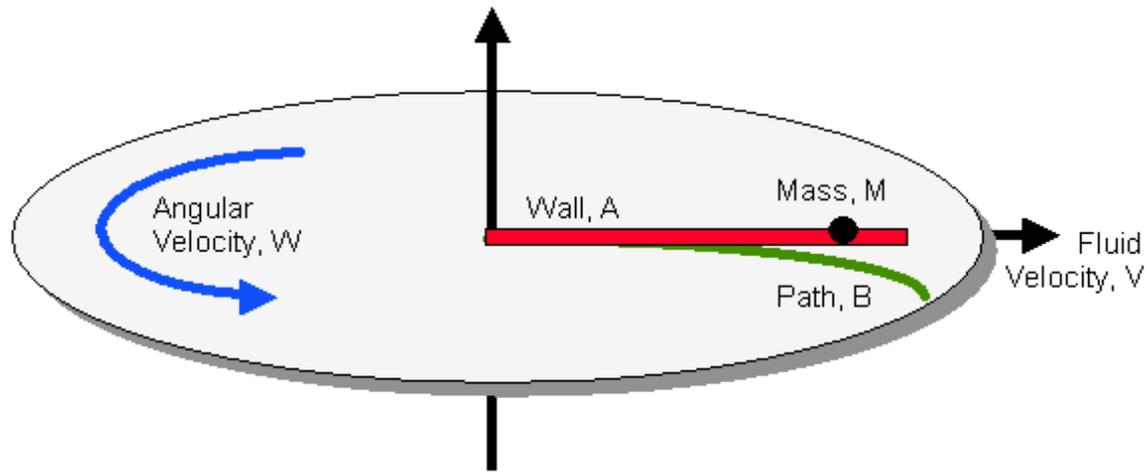


Fig. 3.11 Adjustment of surface pressure to midtropospheric heat source. Dashed lines indicate isobars.

コリオリ力：大規模運動の要



回転成分と発散成分

水平速度ベクトル \vec{v} は流線関数 ψ と速度ポテンシャル ϕ を用いて

$$\vec{v} = \vec{k} \times \nabla \psi + \nabla \phi$$

回転風 発散風

Rotational wind Divergent wind

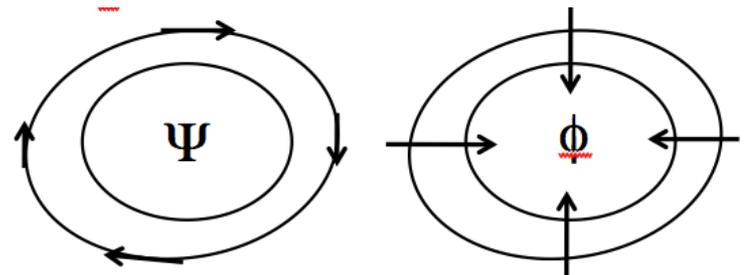
と表せる。

回転成分は発散なし

$$\nabla \cdot (\vec{k} \times \nabla \psi) = 0 \quad \rightarrow \text{地衡風、ロスビー波}$$

発散成分は回転なし

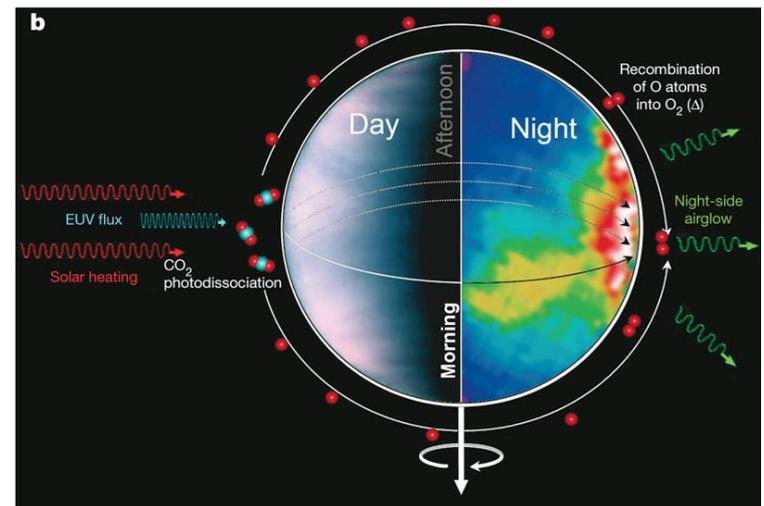
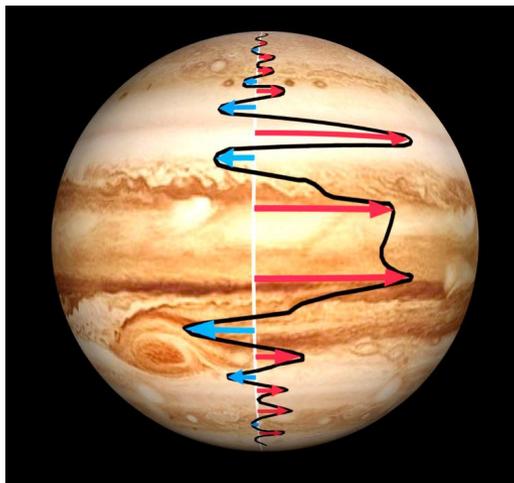
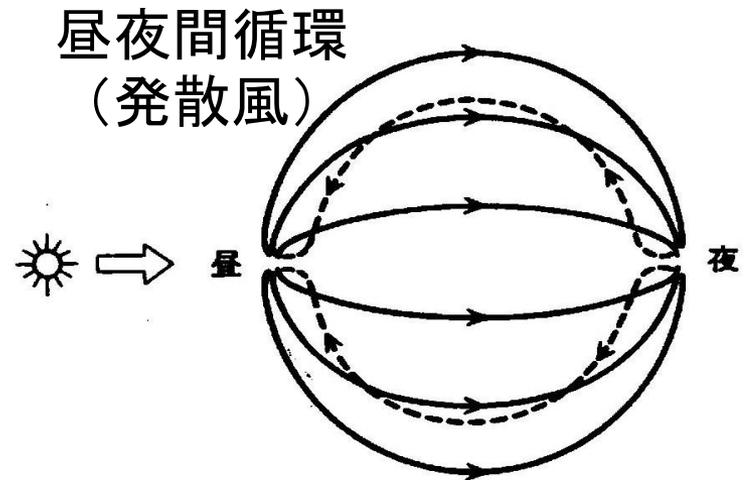
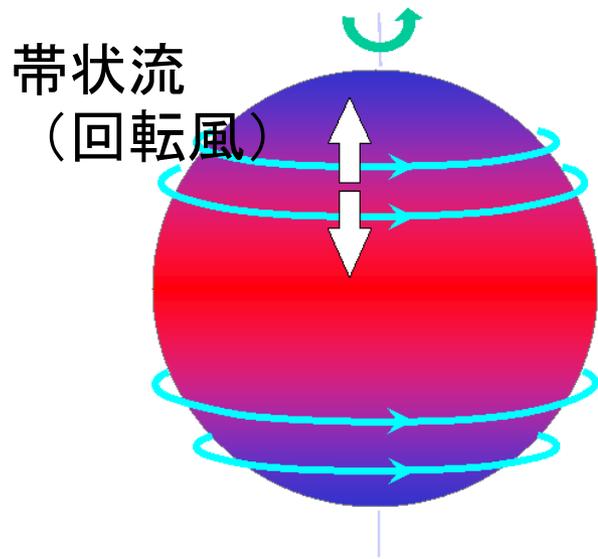
$$\nabla \times \nabla \phi = 0 \quad \rightarrow \text{対流、重力波}$$



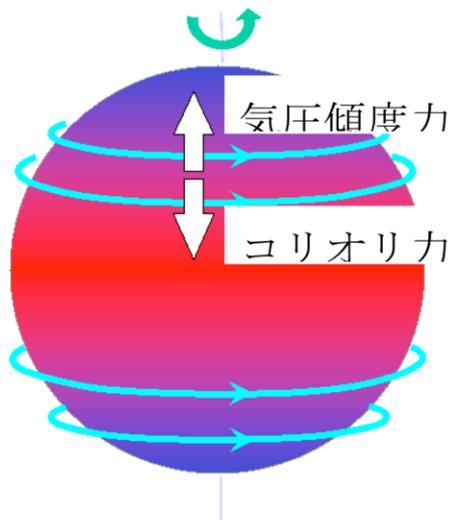
回転成分

発散成分

惑星スケールの運動



擾乱と大気大循環



自転軸に対して対称な定常状態を考えると、鉛直流 \bar{w} と南北流 \bar{v} がゼロで

$$f \bar{u} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = 0$$

という「地衡風バランス」を満たす東西風 \bar{u} だけが存在する。

(\bar{w} や \bar{v} がゼロでないためには、自転軸まわりの角運動量がどこでも同じという特別な風速分布である必要がある)

地球気象の階層構造

1秒

10分

1時間

6時間

2日

20日

1年

10年

10^4 km

10^3 km

10^2 km

10 km

1 km

100 m

10 m

1 m

10 cm

惑星波 気候変動

高・低気圧

台風・熱帯低気圧

雲クラスター・慣性重力波

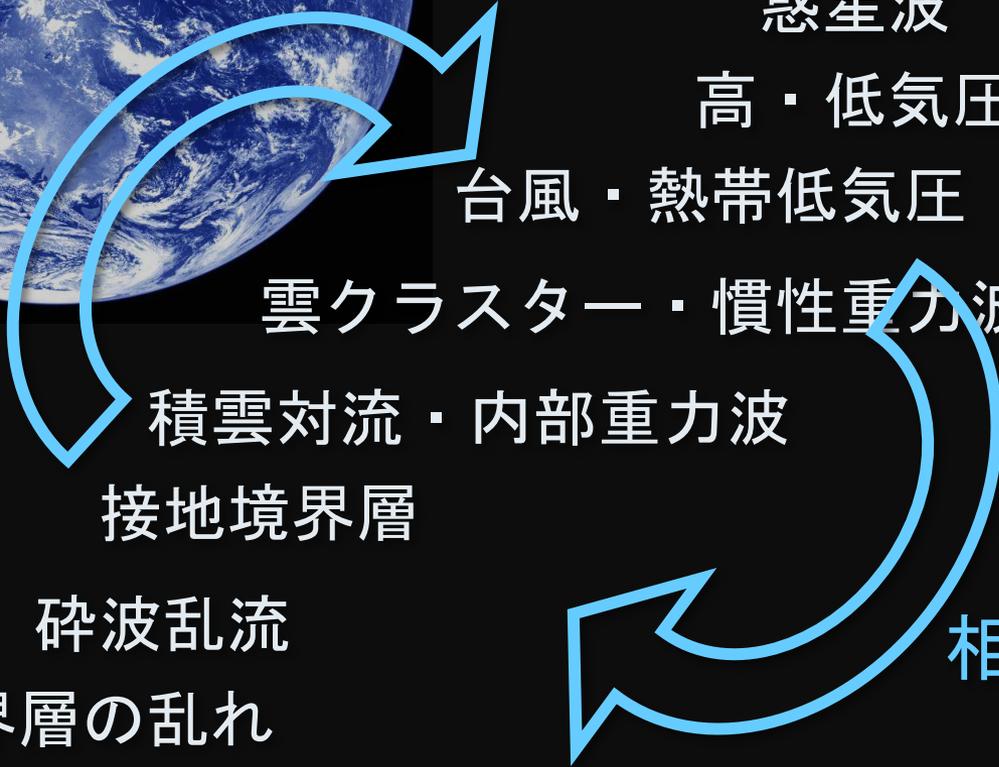
積雲対流・内部重力波

接地境界層

碎波乱流

境界層の乱れ

相互作用

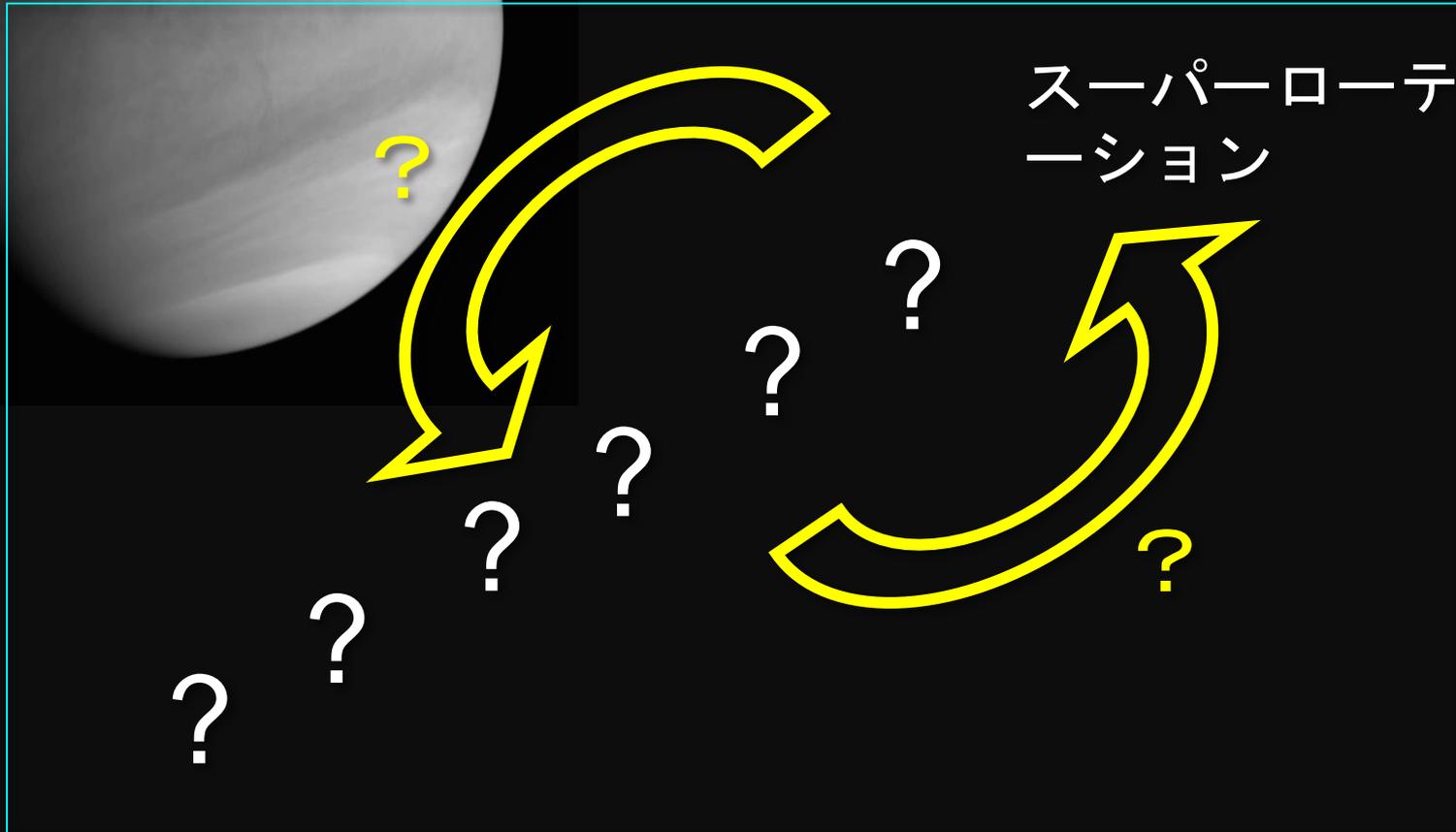


金星気象の階層構造

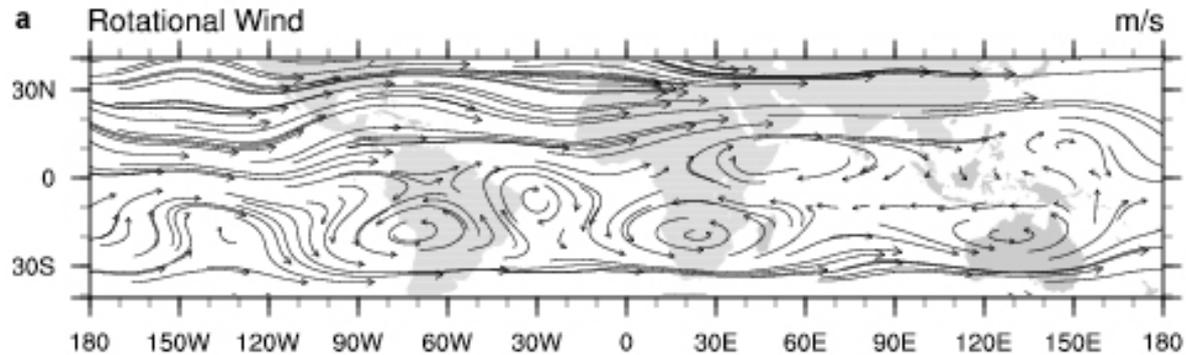
1秒 10分 1時間 6時間 2日 20日 1年 10年

10^4 km
 10^3 km
 10^2 km
10 km
1 km
100 m
10 m
1 m
10 cm

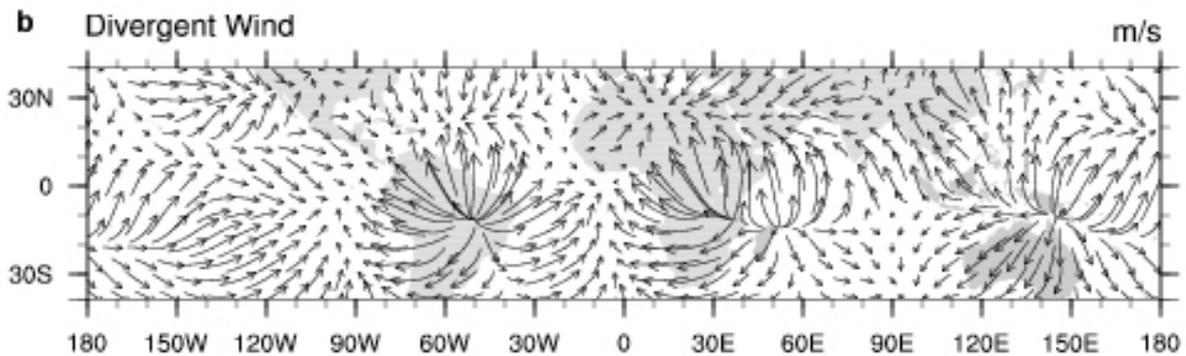
スーパーローター
ーション



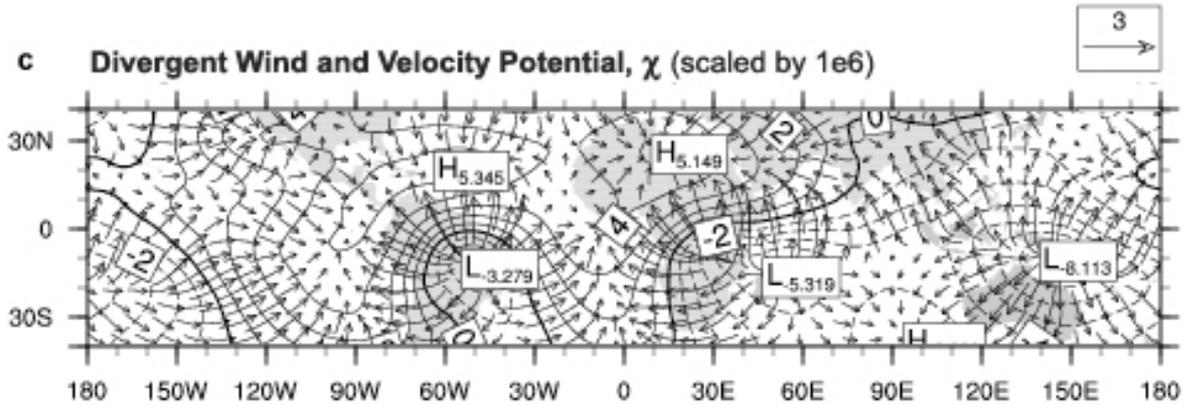
総観規模擾乱



回転風



発散風

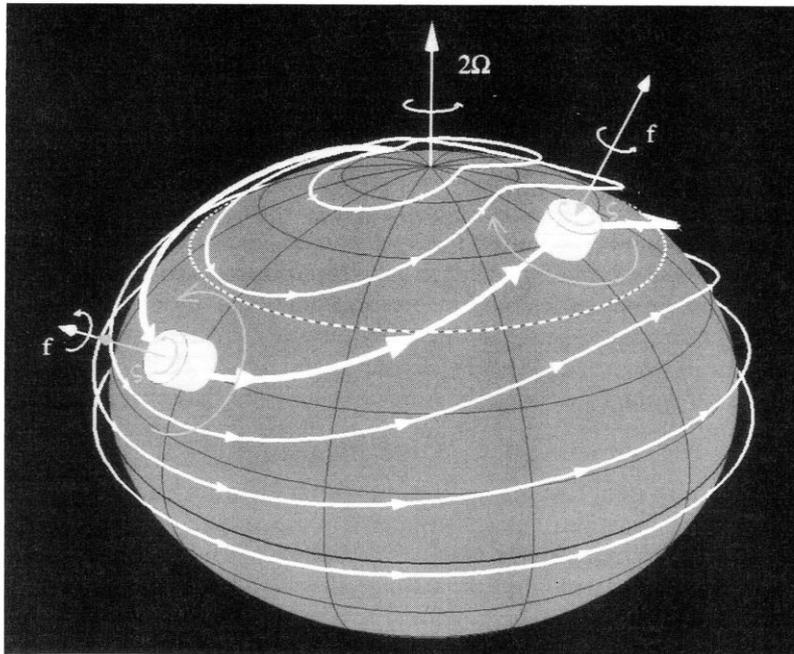


発散風と速度
ポテンシャル

大気波動

ロスビー波(回転風)

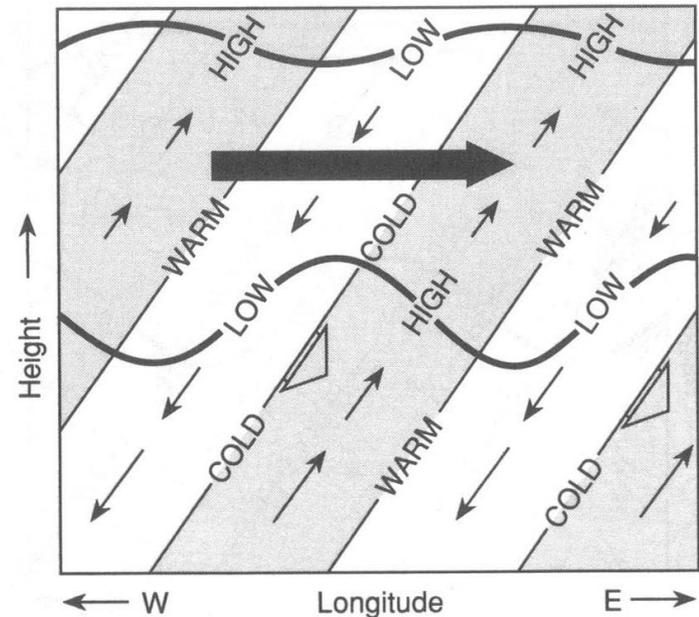
自転の効果で大気がかもとの緯度にとどまろうとする力を復元力として伝わる波動。本質的に水平面内の波動。偏西風の蛇行など。



(Salby, 1996)

重力波(発散風)

大気の成層の効果で空気塊がかもとの高度にとどまろうとする力を復元力として伝わる波動。本質的に大気の上下動を伴う。山岳波など。



金星の雲頂に見られたロスビー一波的風速擾乱

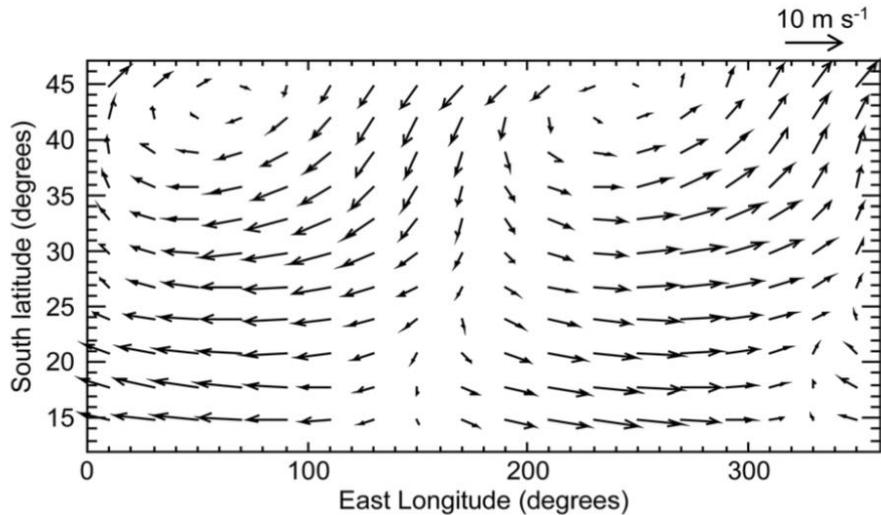
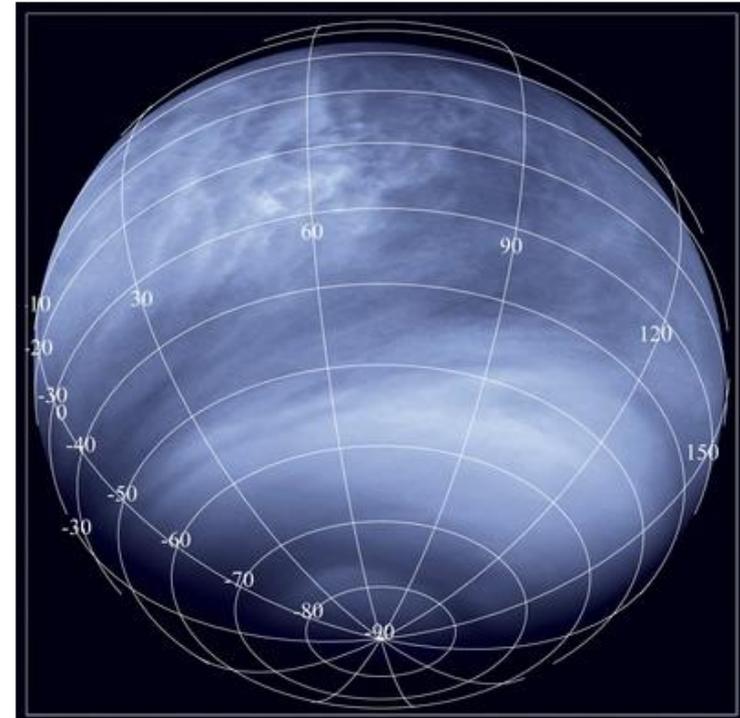


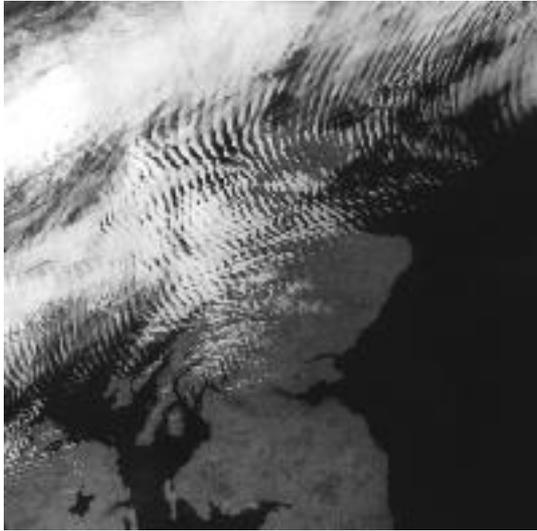
Figure 11. Velocity vectors of a 4.8d oscillation constructed from zonal and meridional velocities in the period from 660 to 710 days in epoch 4. The direction of planetary rotation and the propagation of this oscillation are from right to left.

Venus Expressによる紫外画像

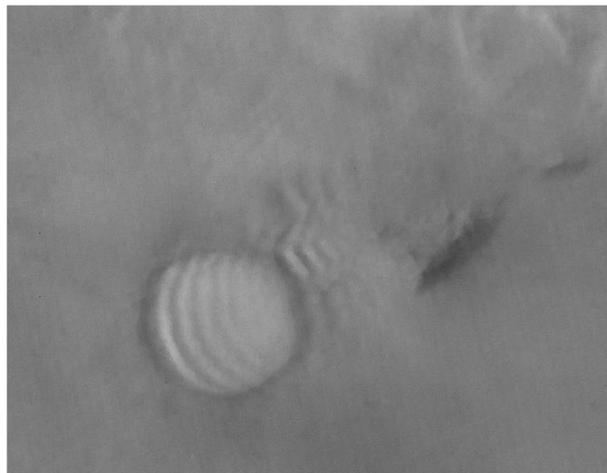


雲追跡で得られた風速場に見られた
東西波数1の振動構造
(Kouyama et al., 2013)

内部重力波



地球の山岳波



火星の山岳波

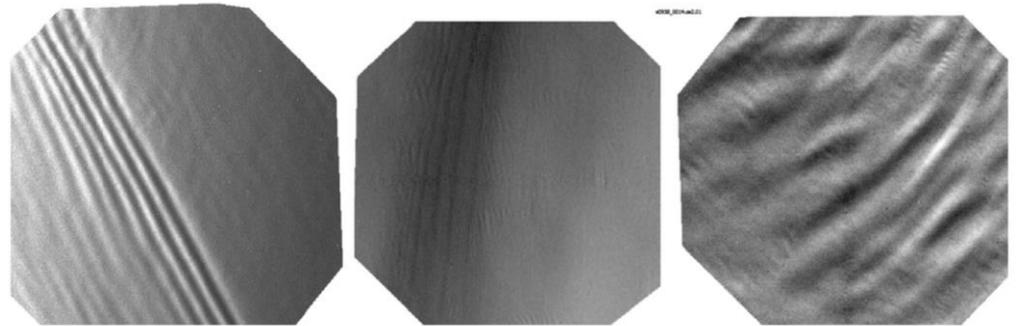
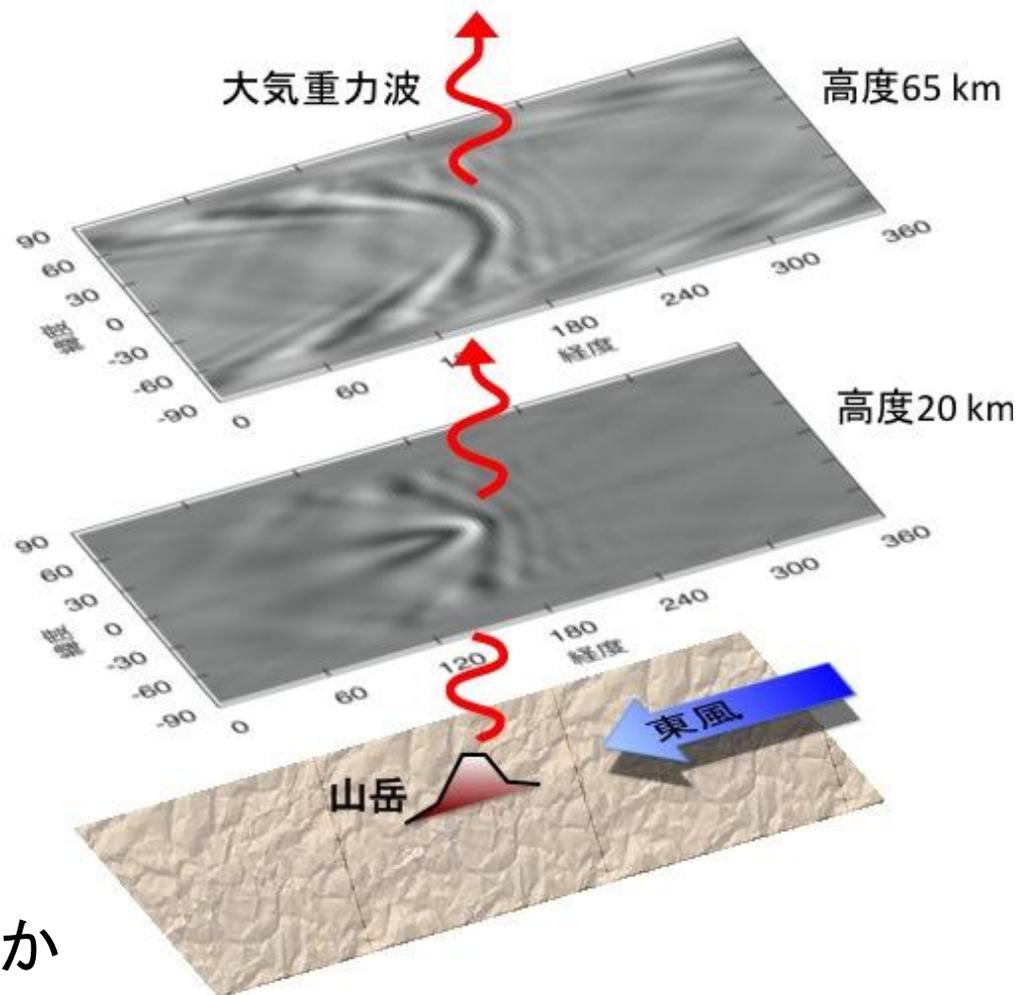
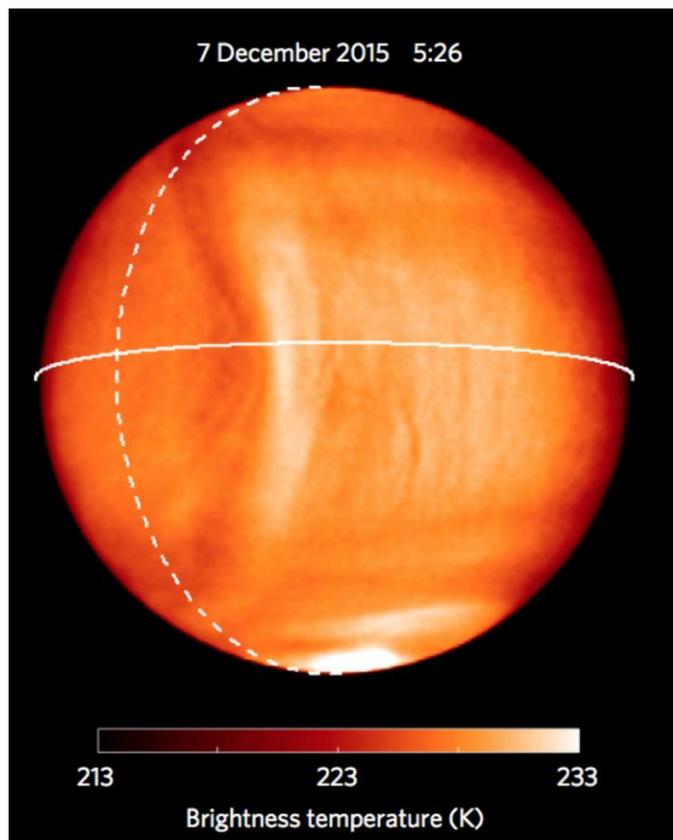


Fig. 11. VMC images of polar waves: left - long waves (NIR1 filter), middle - long waves producing short wave trains (UV), right - irregular waves (UV).

金星雲頂

金星探査機あかつきが捉えた停滞構造 (Fukuhara et al. 2017)



地形性重力波か

波が駆動する循環

帯状平均流についての運動方程式は(移流項を無視して)

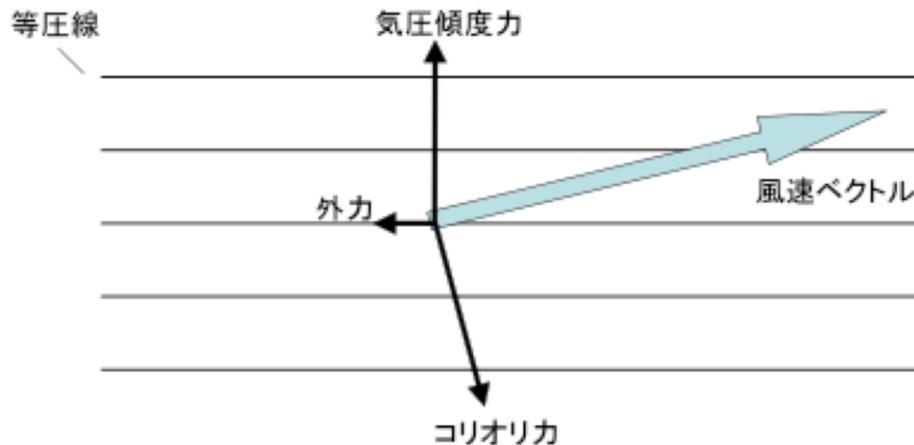
$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = f \bar{v} + F_x \quad F_x: \text{東西方向の外力}$$

定常状態 ($\partial / \partial t = 0$) を考えると

$$\bar{v} = -F_x / f$$

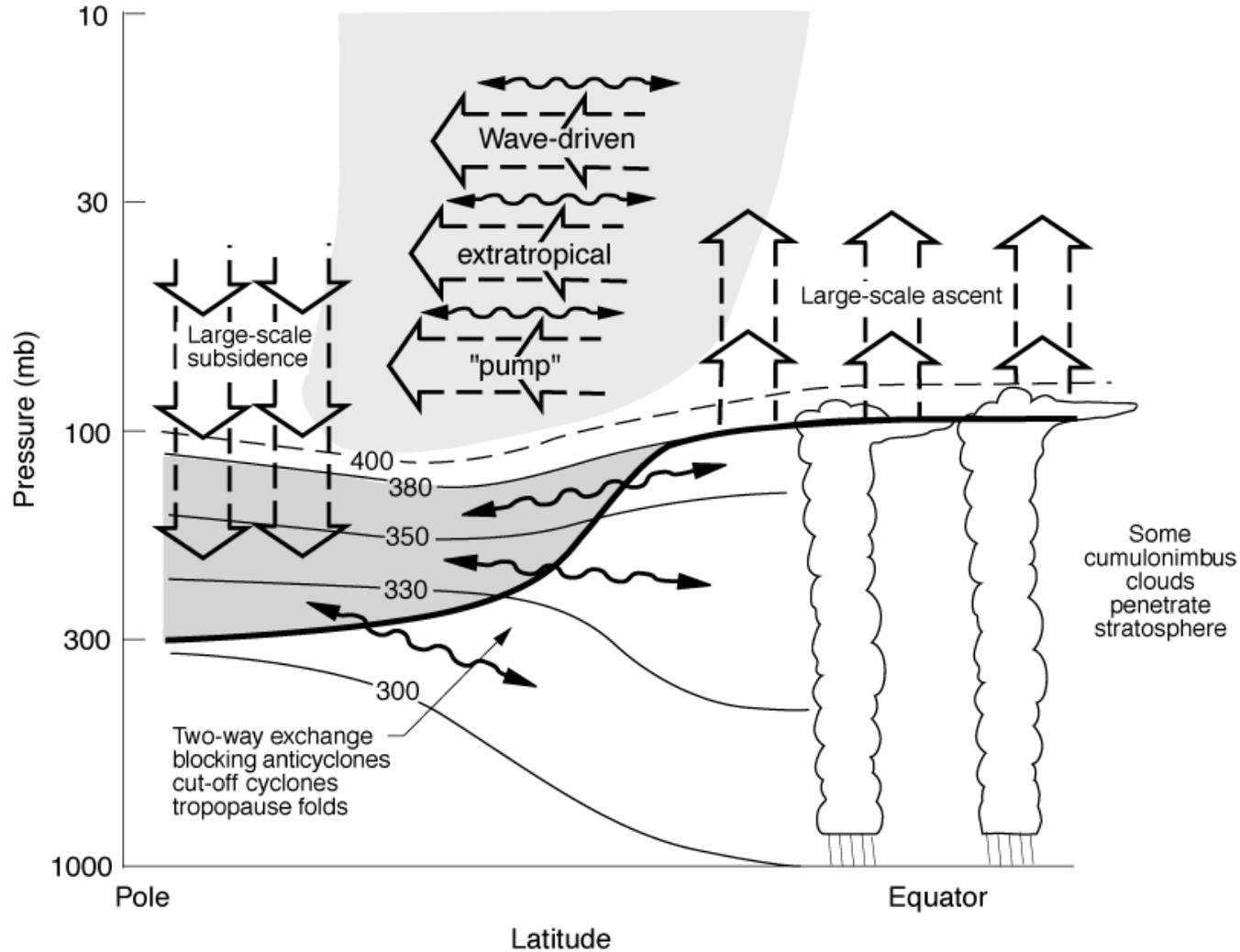
つまり外力 F_x によって平均南北流が駆動される。

F_x の源 .. 波動による運動量輸送



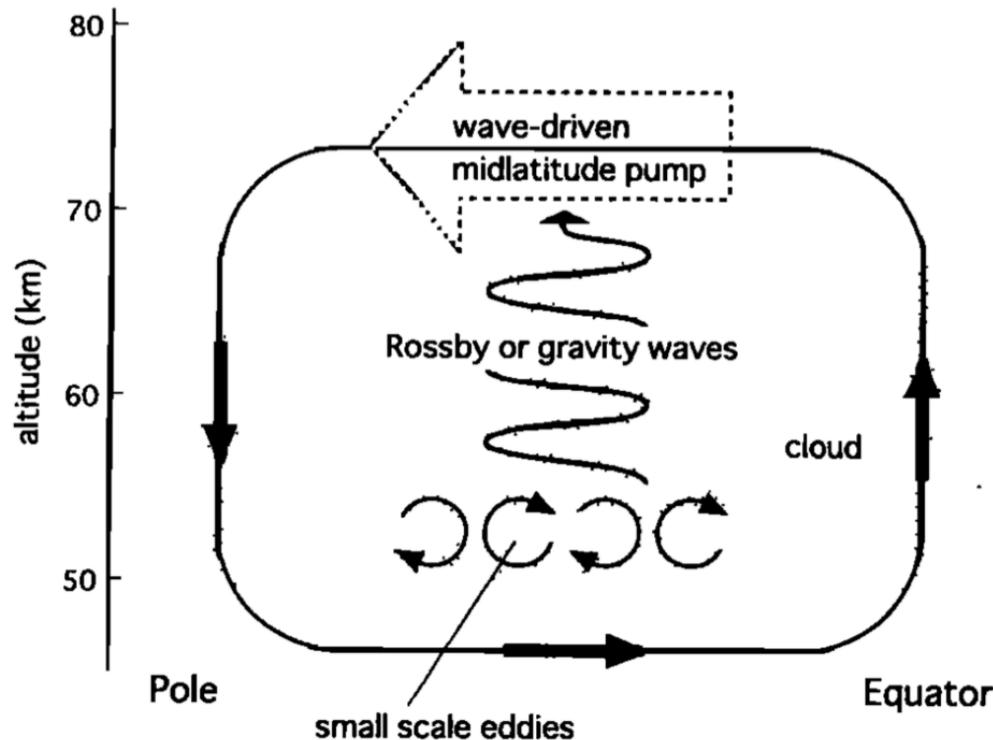
3つの力のベクトル合成がゼロ

地球成層圏の循環



金星大気における波が駆動する循環 ?

Imamura (1997)

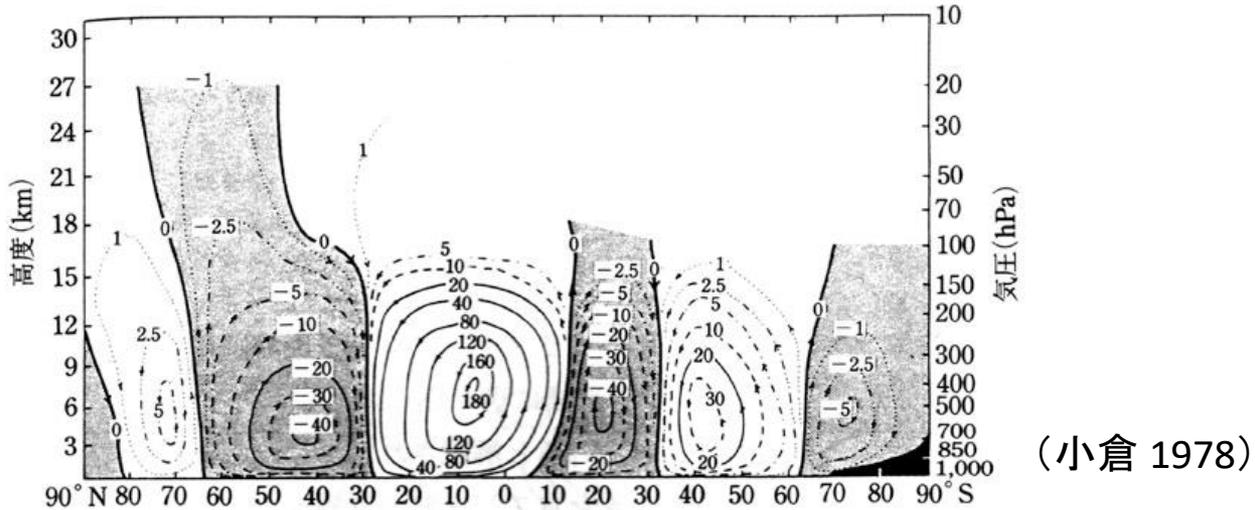


雲頂で観測されたロスビー波
にともなう運動量フラックスが、
熱収支から見積もった子午
面循環強度と整合的

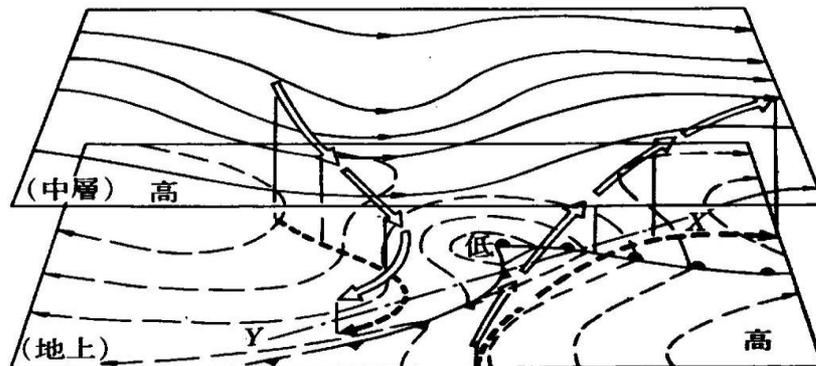
Figure 3. Dynamical aspects of meridional circulation at the Venusian cloud level. Angular momentum advection associated with meridional circulation is canceled by the EP flux divergences associated with Rossby or gravity waves above the cloud base and small-scale eddies due to shear instability around the cloud base.

地球中緯度の間接循環

子午面循環



傾圧不安定擾乱の立体構造 → フェレル（間接）循環

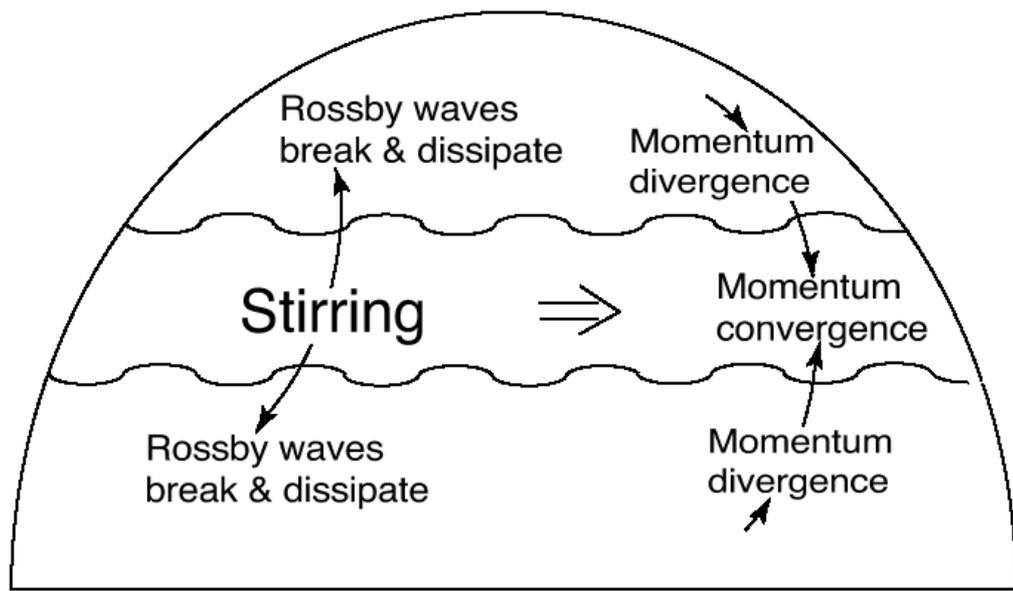


傾圧不安定と中緯度ジェット生成

傾圧不安定(水平温度差による不安定)によりRossby波が励起

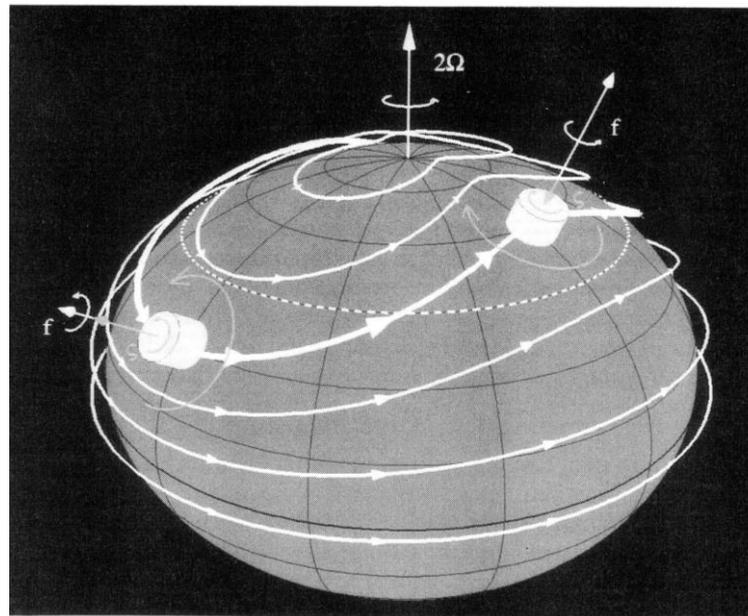
→ 南北に伝搬 → Rossby波が負の角運動量を持ち去る

→ 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)

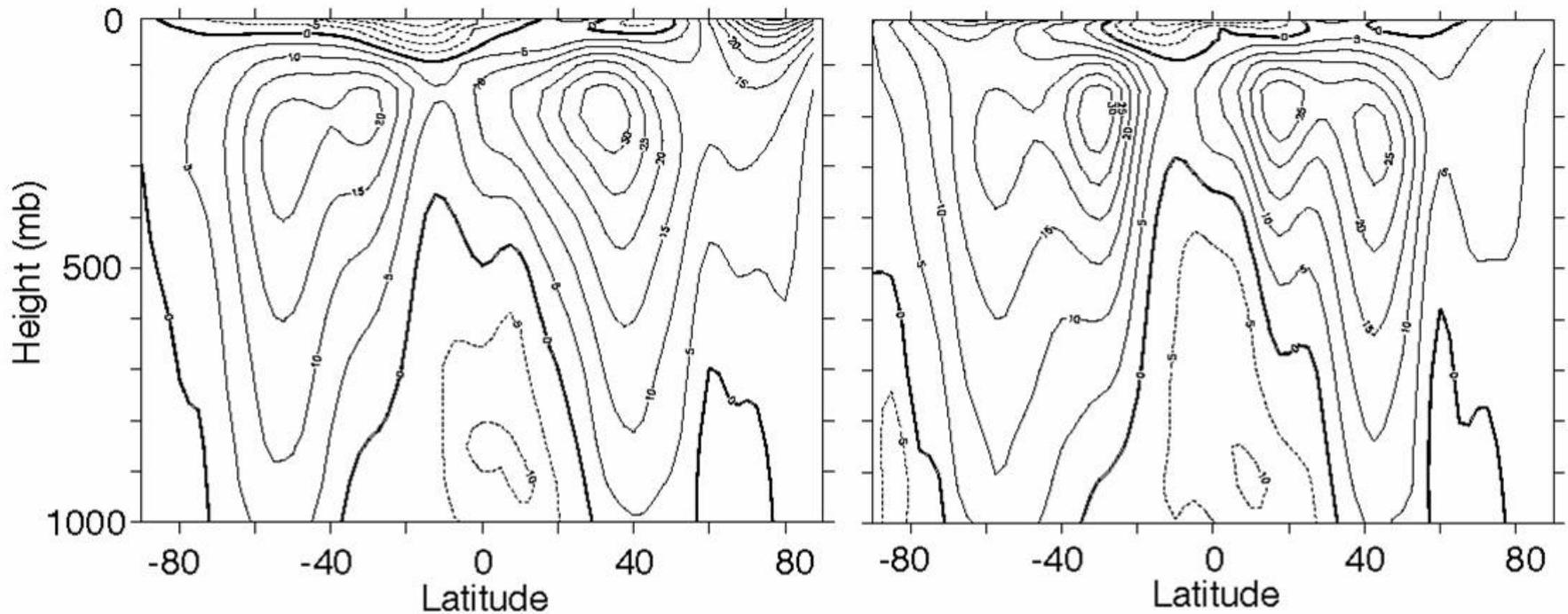


Fig. 3.1 The time-averaged zonal wind at 150°W (in the mid Pacific) in December-January-February (DJF, left), March-April-May (MAM, right). The contour interval is 5 m s^{-1} . Note the double jet in each hemisphere, one in the subtropics and one in midlatitudes. The subtropical jets are associated with strong meridional temperature gradient, whereas the midlatitude jets have a stronger barotropic component and are associated with westerly winds at the surface.

Rossby deformation radius

回転系で生じる擾乱の特徴的空間スケール

$$L = \frac{NH}{f}$$

N : 浮力振動数

H : 流体の深さ

$f = \Omega \cos \theta$: コリオリパラメータ
(θ : 緯度)

自転速度が大きくなると擾乱のスケールが小さくなる

Parameter study of the atmospheric circulation of Earth-like planets with general circulation models (GCMs)

Williams (1988)

東西風速度
 白地：西風
 陰影：東風

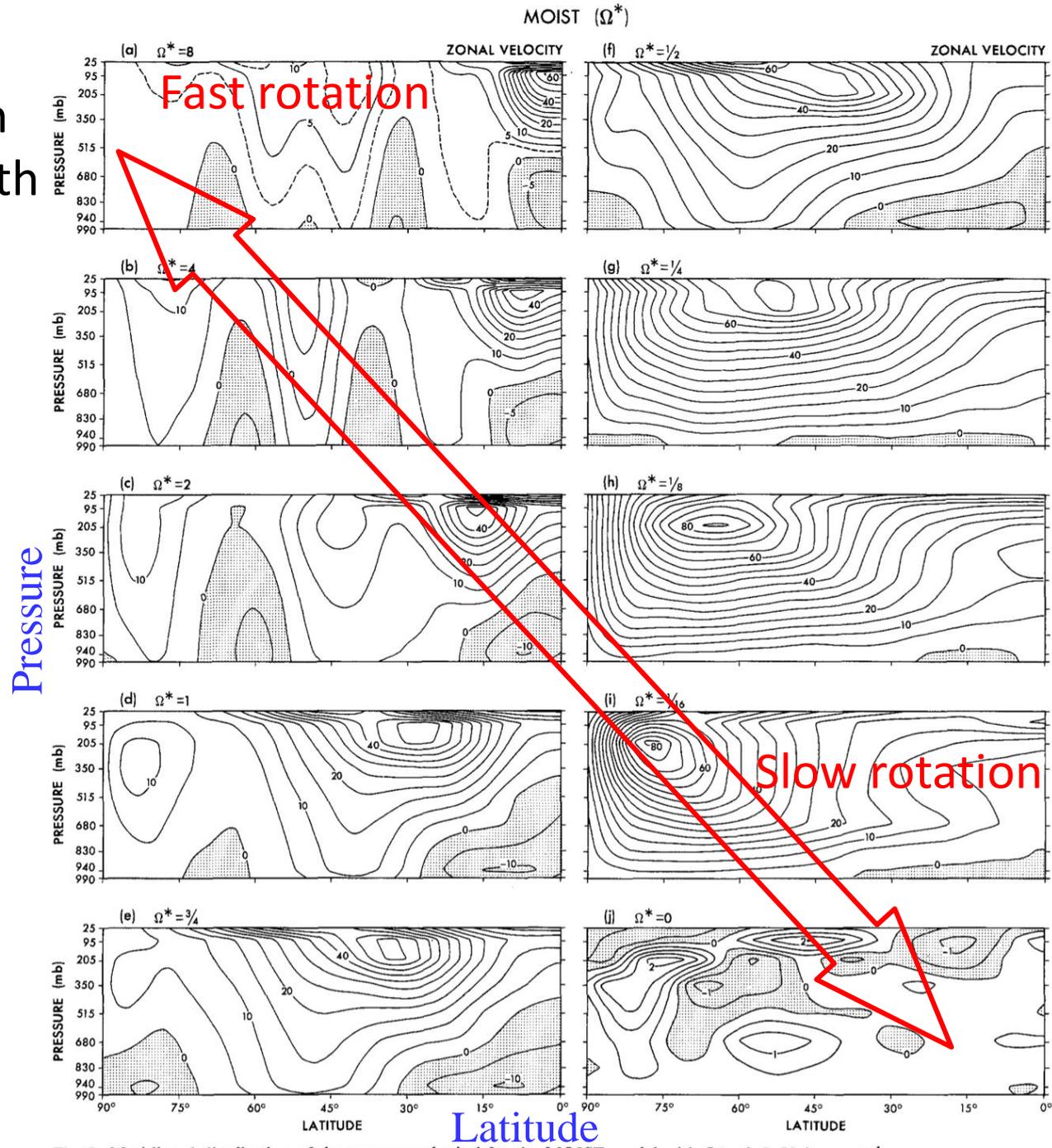
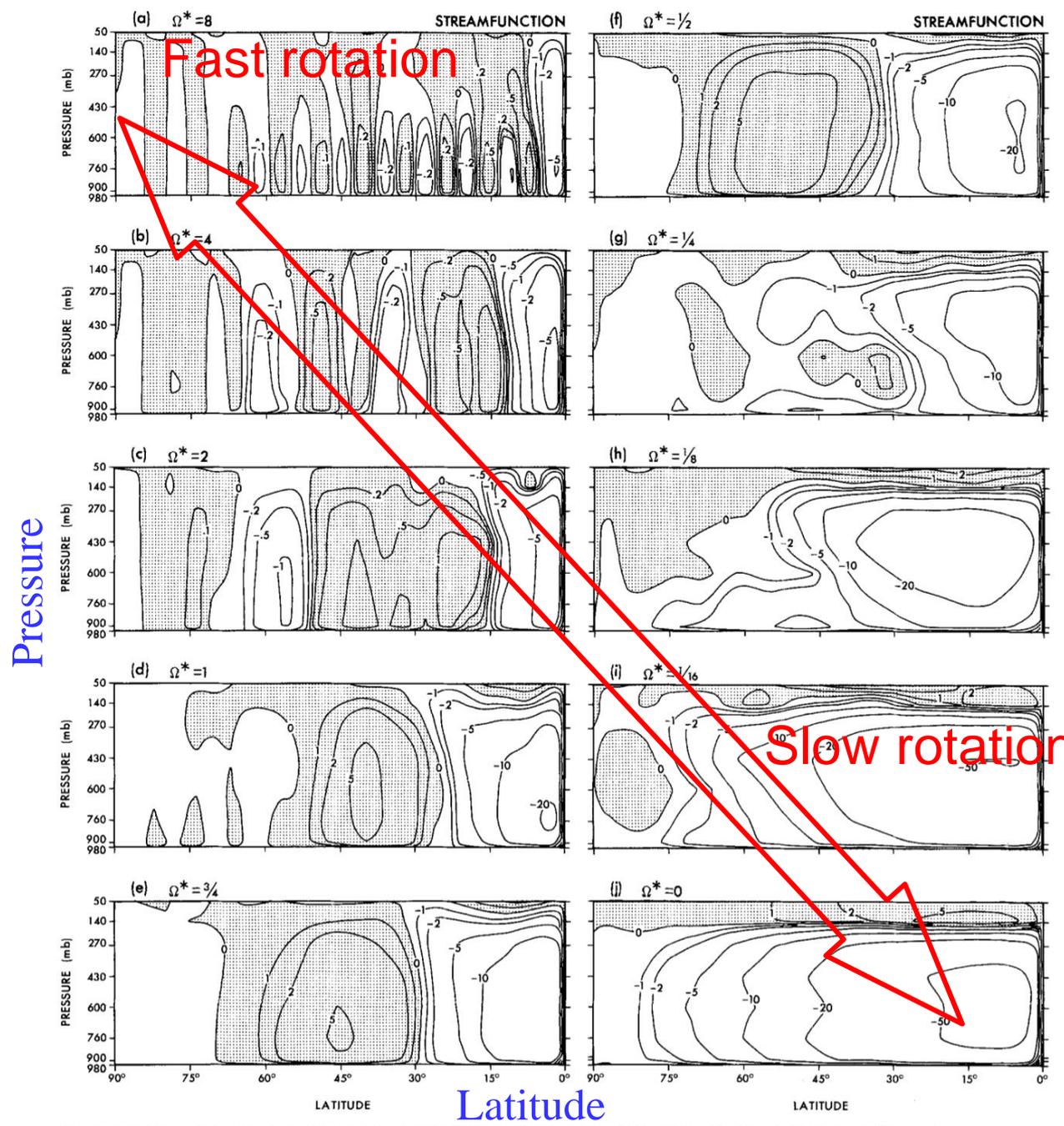


Fig. 2. Meridional distribution of the mean zonal wind for the MOIST model with $\Omega^* = 0-8$. Units: $m s^{-1}$



Fast rotation

Slow rotation

子午面循環の流線関数

白地: 反時計回り

陰影: 時計回り

Pressure

Latitude

Fig. 3. Meridional distribution of the mean stream function for the MOIST model with $\Omega^* = 0-8$. Units: 10^{13} g s^{-1}

気温の子午面分布

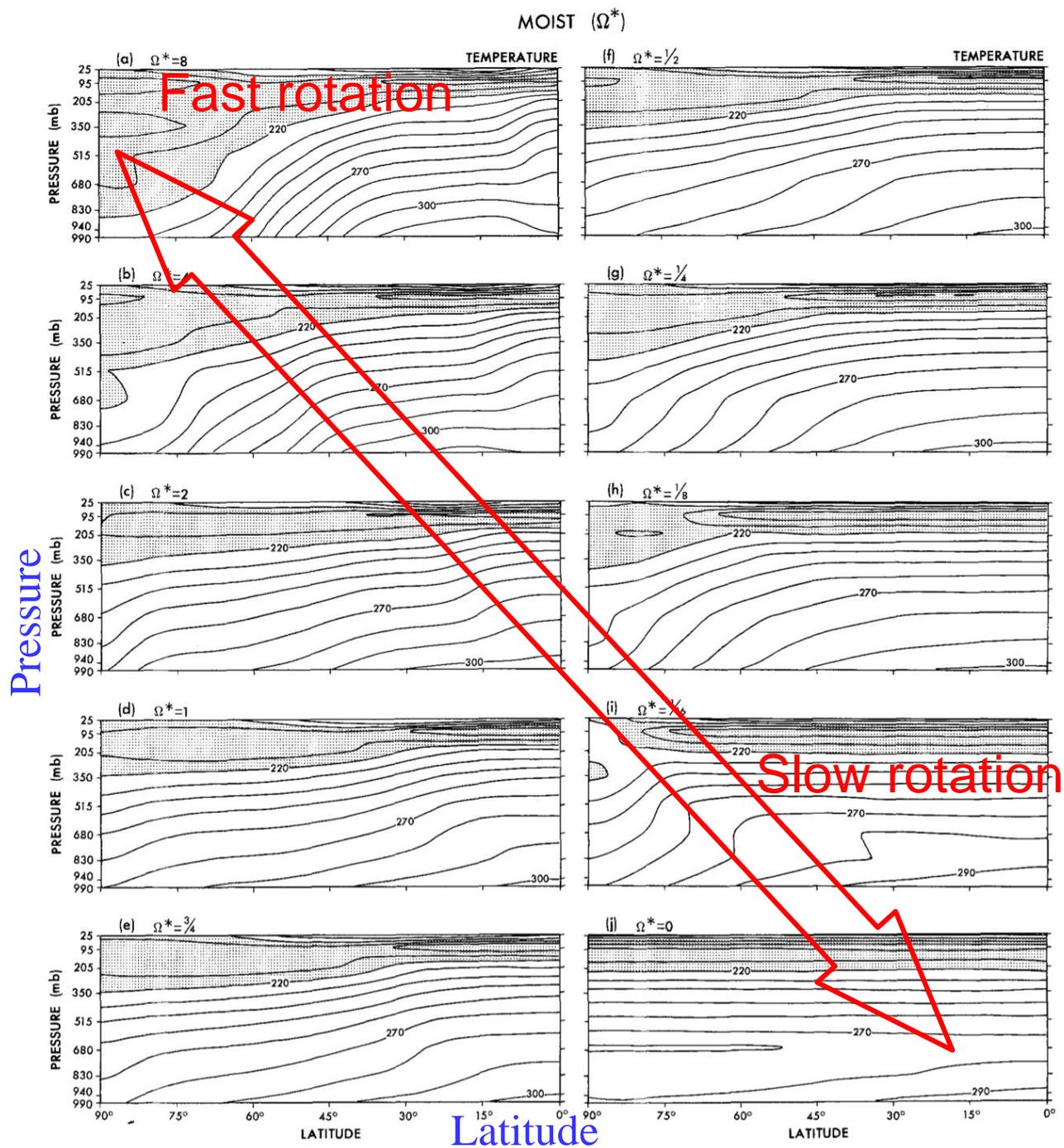
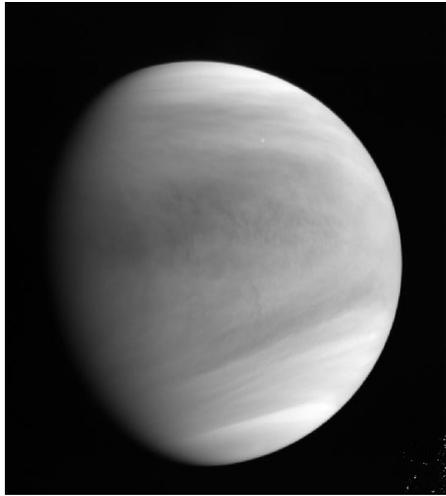


Fig. 4. Meridional distribution of the mean temperature for the MOIST model with $\Omega^*=0-8$. Units: K

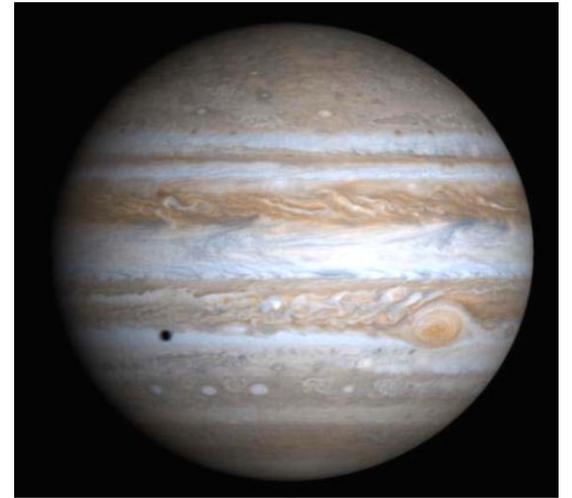
大気循環の南北構造



自転周期 243日

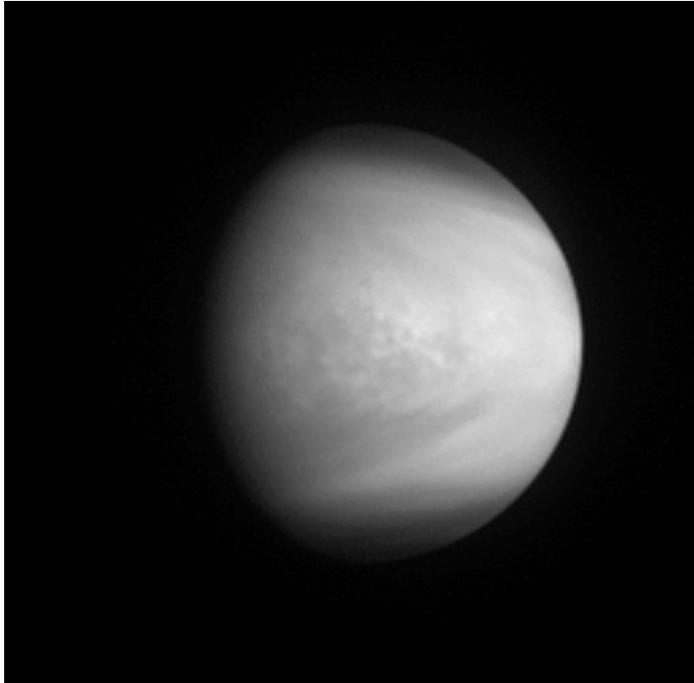


1日

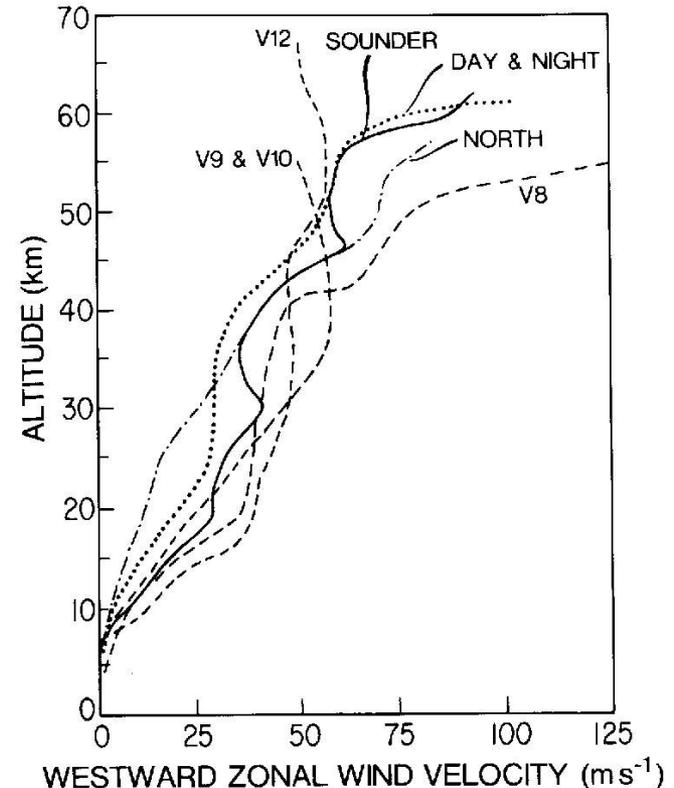


10時間

金星大気のスーパーローテーション



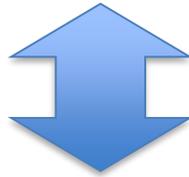
Akatsuki near-IR (2.02 μ m) images



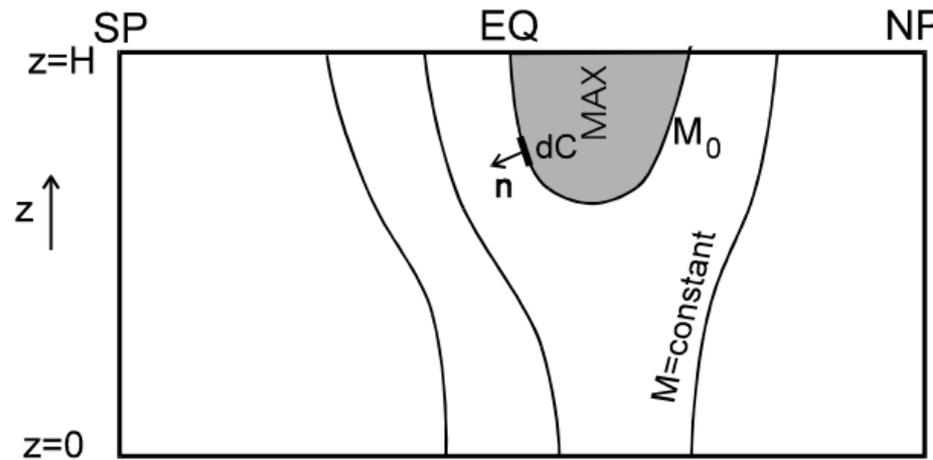
金星着陸機が測った風速の高度分布

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」 = 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



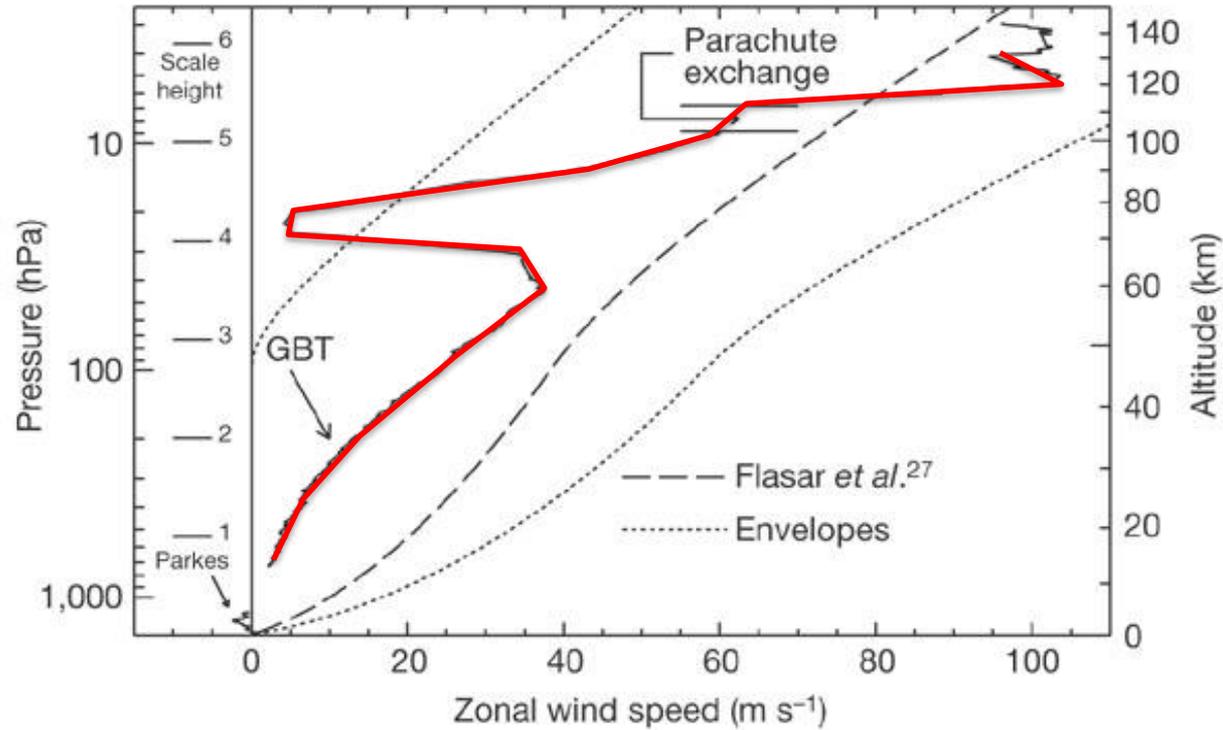
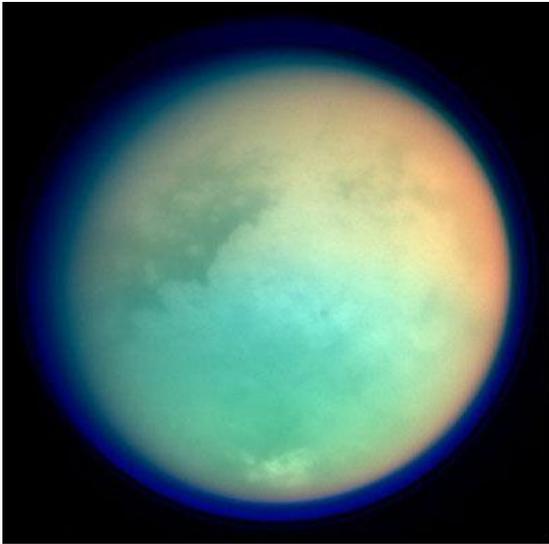
Hideの定理：自転軸に対して対称な循環では、地表から離れた場所に角運動量の正の極値を維持することはできない。



→レイノルズストレス(擾乱による角運動量輸送)が必要

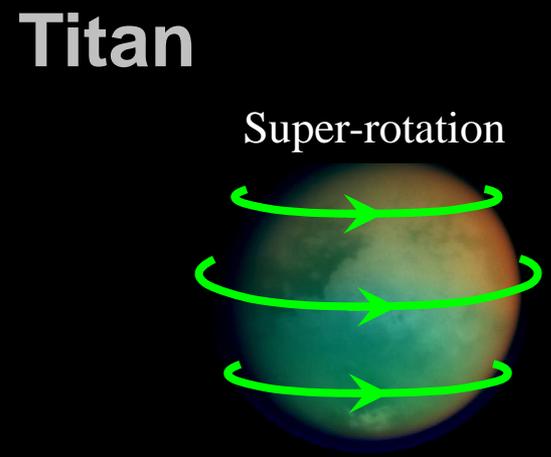
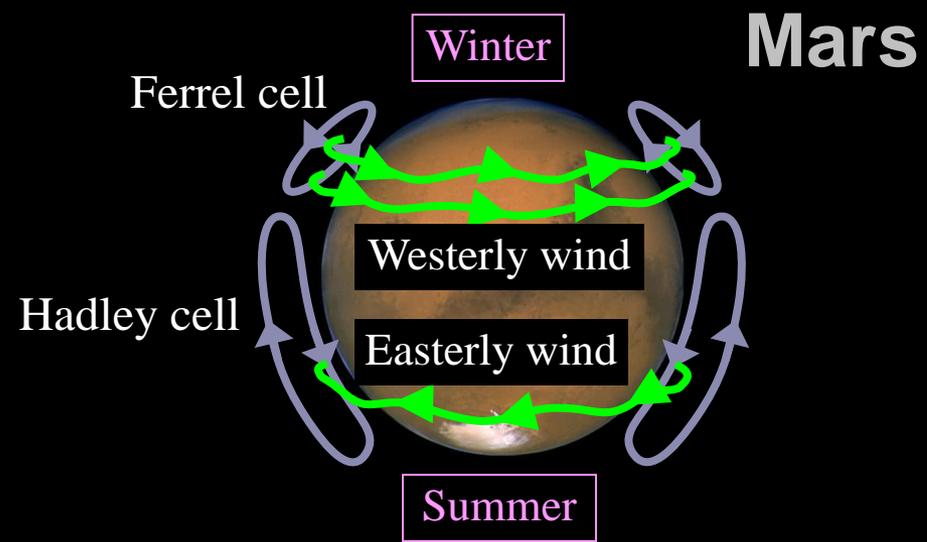
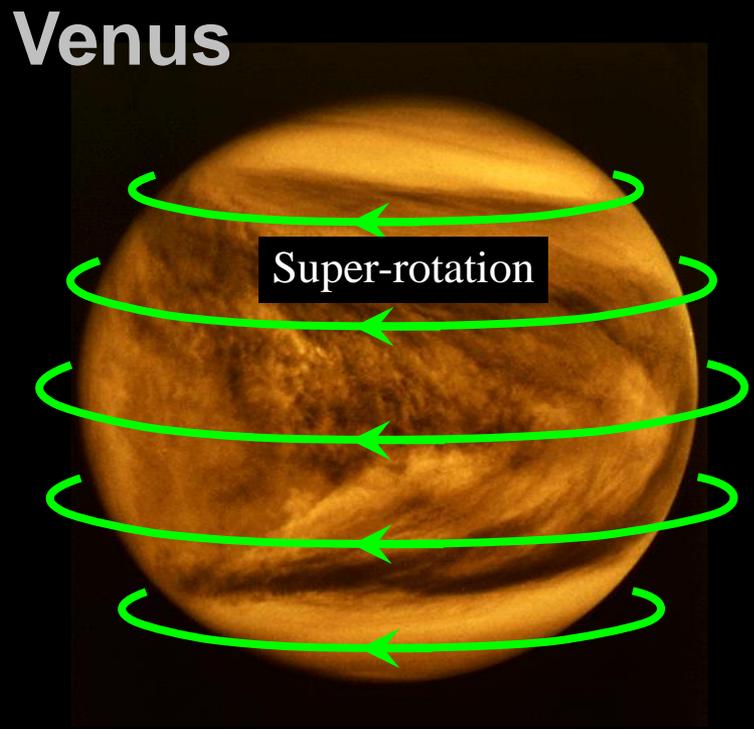
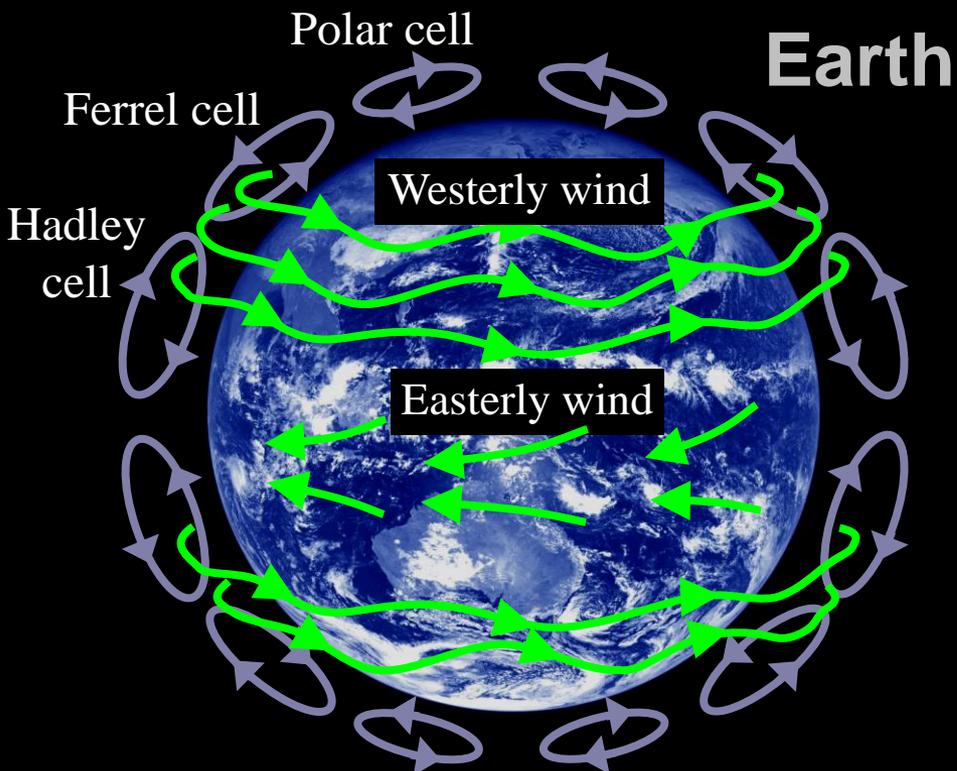
タイタン大気のスーパーローテーション

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



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)

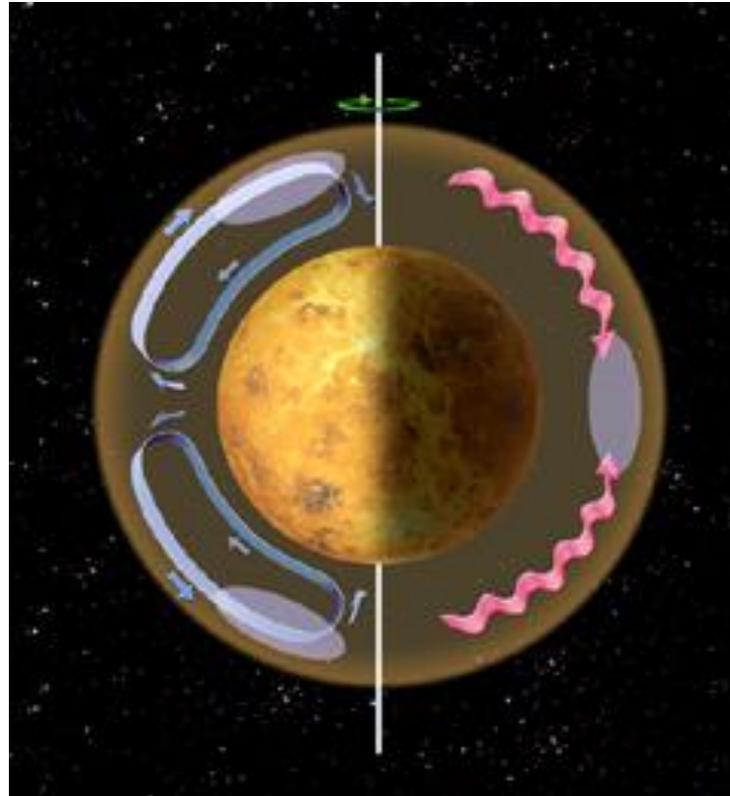
仮説1 子午面循環によるメカニズム

(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)

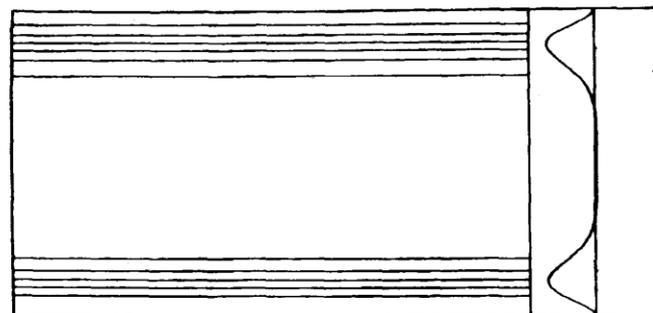
金星と同じ自転速度

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

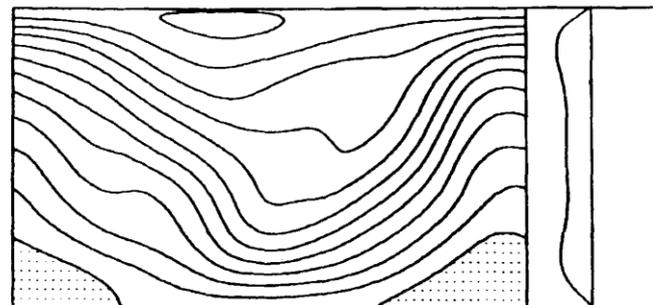
流線関数

帯状平均東西風



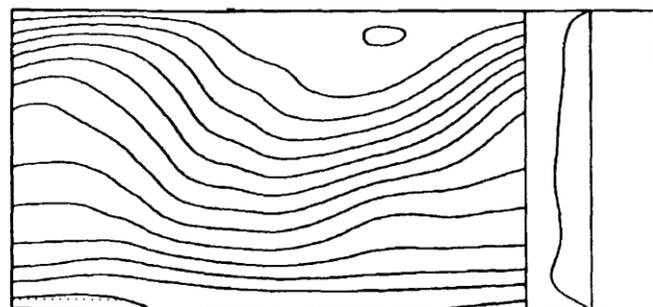
(a)

2.8日



(b)

11.5日

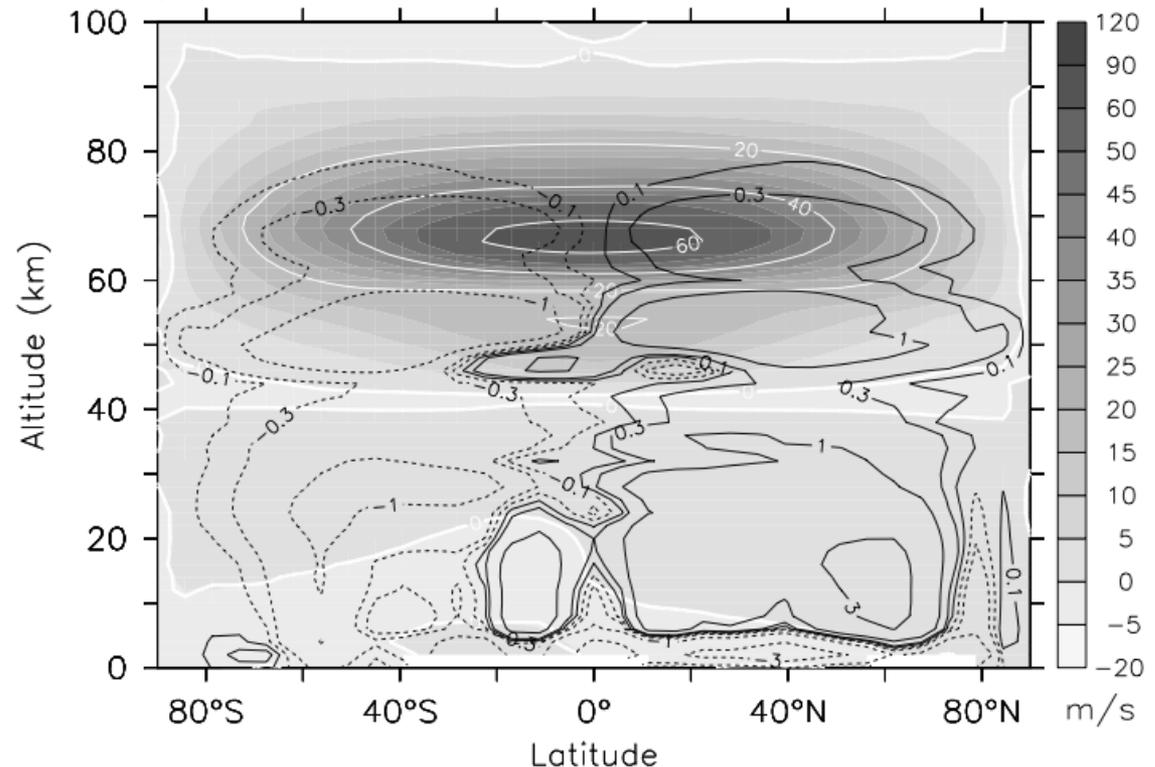


(c)

17.2日

数値実験

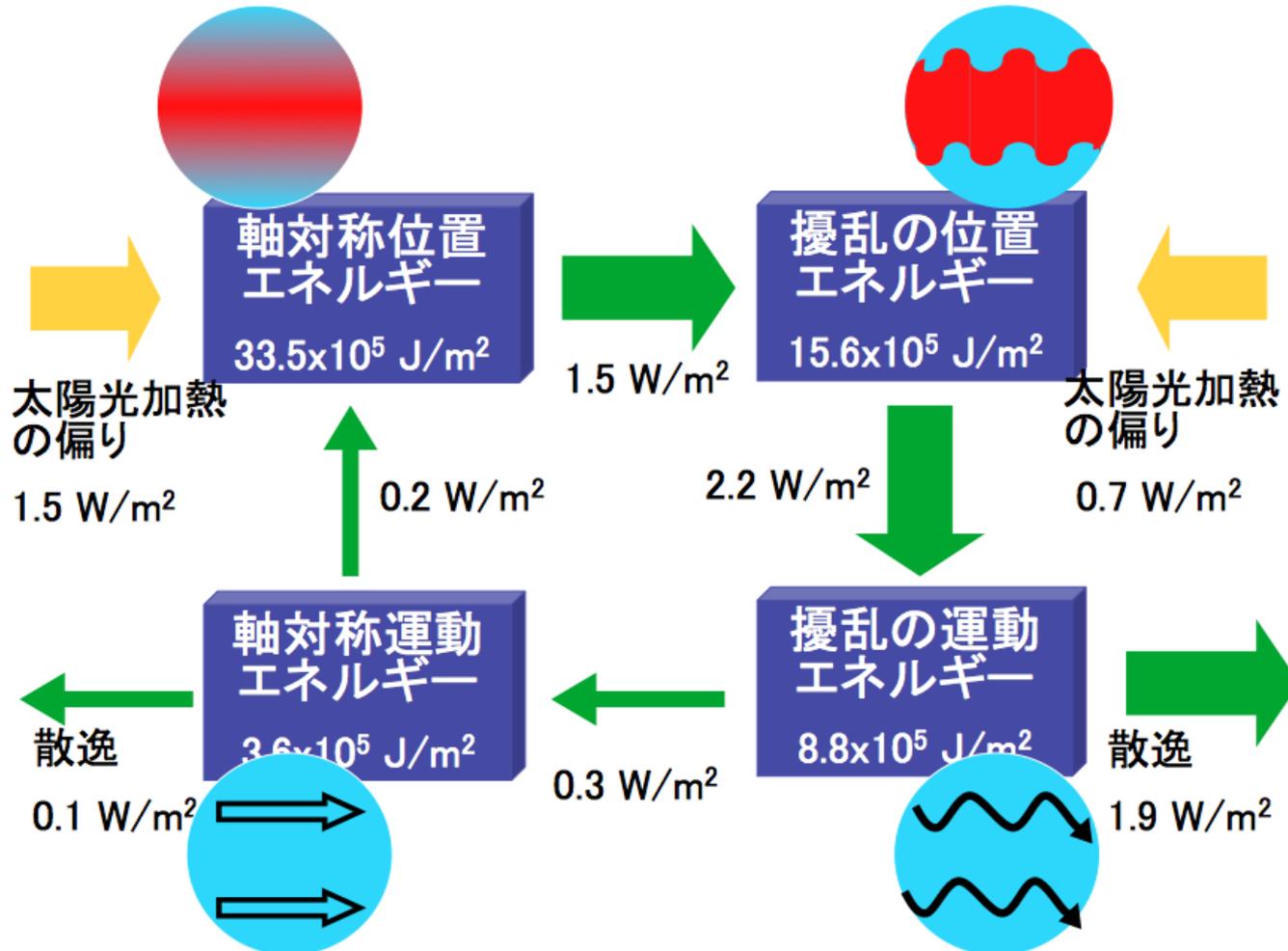
- 現実的な設定条件で大気全層のスーパーローテーションが生じたものは数少ない。いまのところ発現条件についてコンセンサスがない。
- 計算では下層大気の手ドレー循環が著しく弱いことが原因か
- 初期値依存性あり



Lebonnois et al. (2011)

エネルギーサイクル

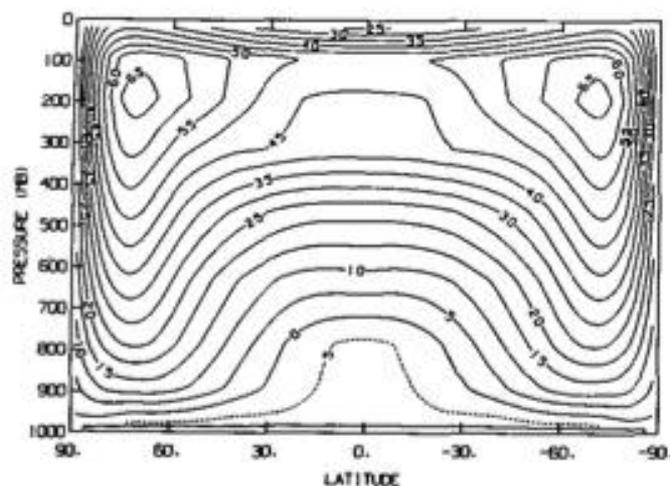
地球の場合



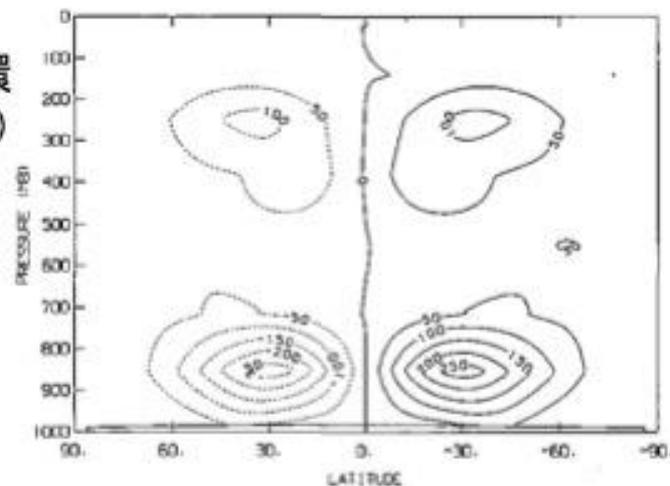
「タイタン型」GCM (DeGenio et al., 1993)

- 地球GCMをベースに自転周期を16日に変更
- 150-550 hPaに一様な雲層を置いて大気の成層を安定化

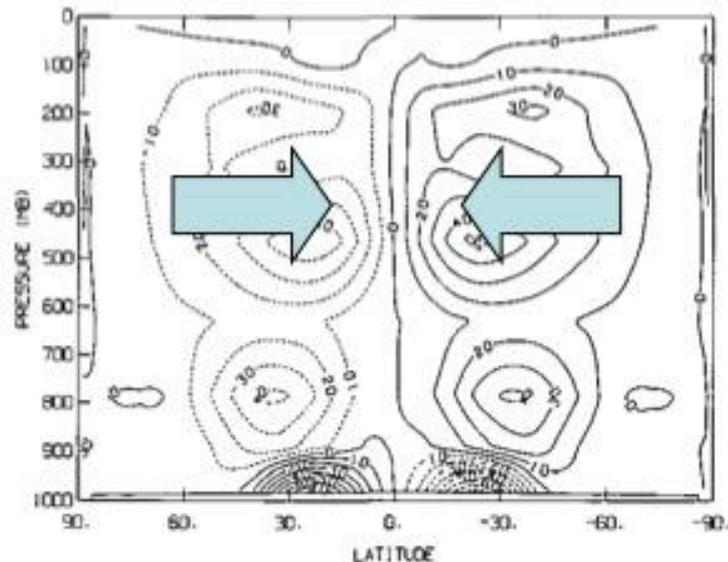
東西風



子午面循環
(流線関数)



角運動量の南北輸送



ジェット近傍で順圧不安定
→赤道向き角運動量輸送

エネルギーサイクル

低速自転

→ 順圧不安定

→ 赤道向き角運動量輸送

→ 赤道でsuper-rotation

高速自転

→ 傾圧不安定

→ 極向き角運動量輸送

→ 赤道でsub-rotation

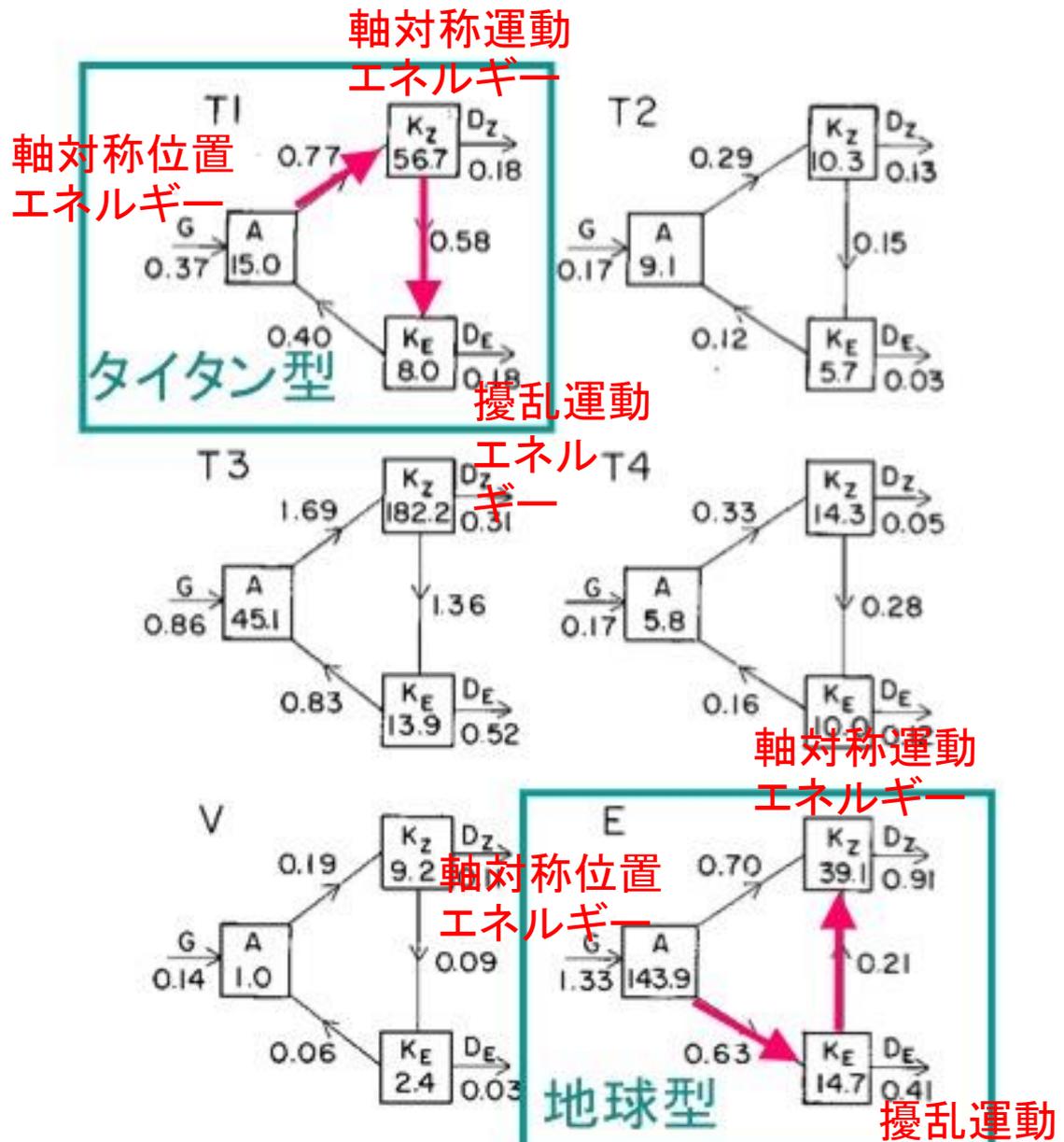
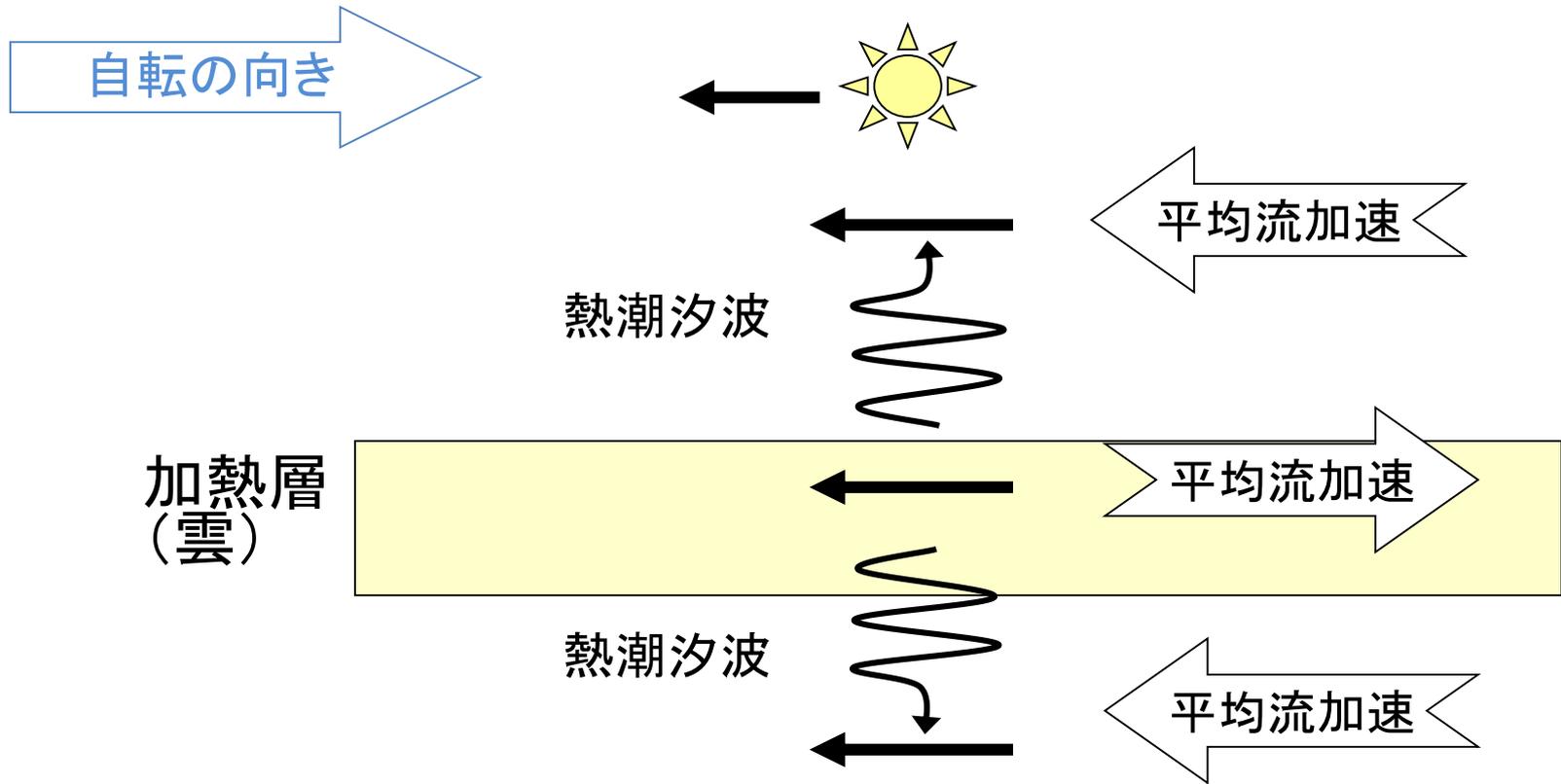


FIG. 12. Atmospheric energy cycle for each of the six simulations. Available potential energy (A), zonal mean kinetic energy (K_z), and eddy kinetic energy (K_E) in 10^5 J m^{-2} ; generation of A (G), dissipation of K_z (D_z) and K_E (D_E), and conversions between energy forms (indicated by connecting arrows) in W m^{-2} .

仮説2 熱潮汐波によるメカニズム

(Fels & Lindzen 1974)



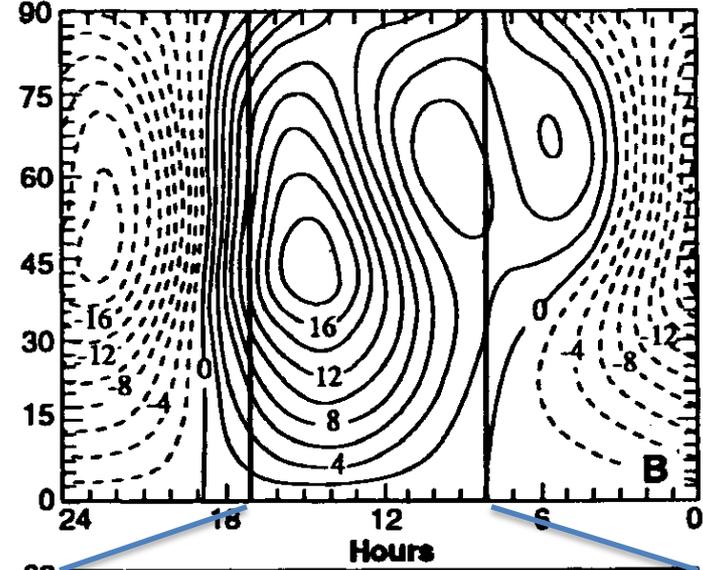
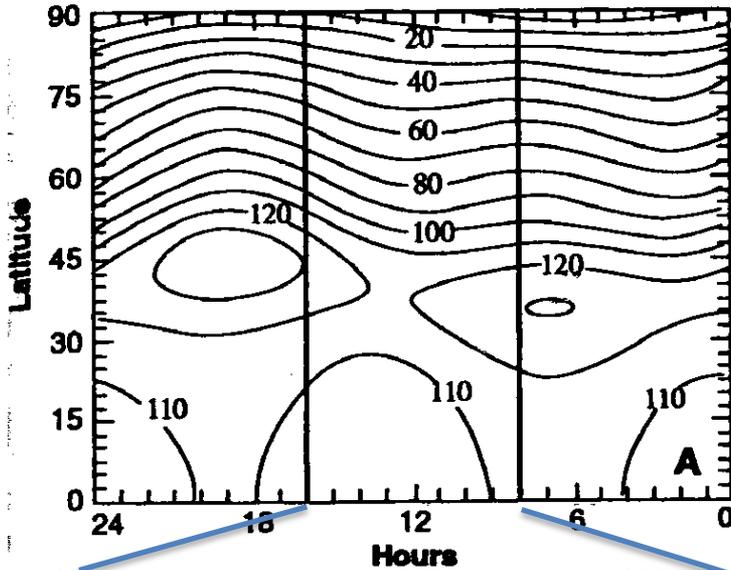
太陽光加熱域の移動により、東向き運動量を持つ重力波が
励起されて上下に伝搬 → 雲層が反動で西向きに加速

雲頂の熱潮汐波

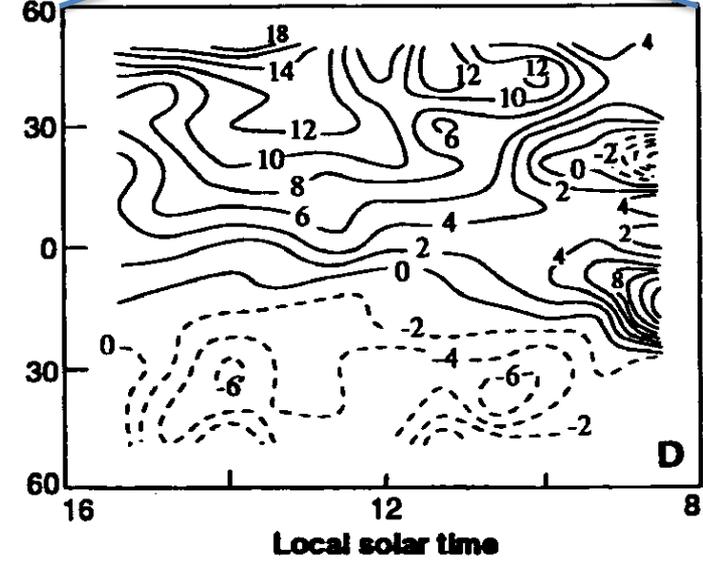
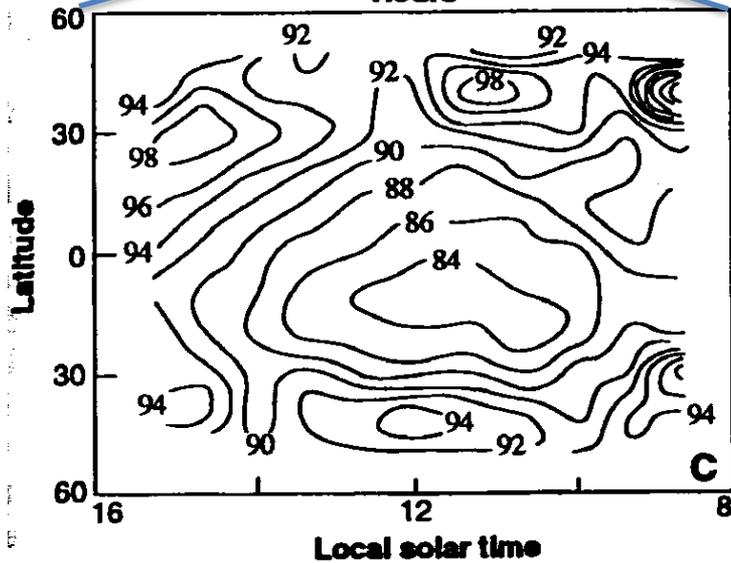
東西風

南北風

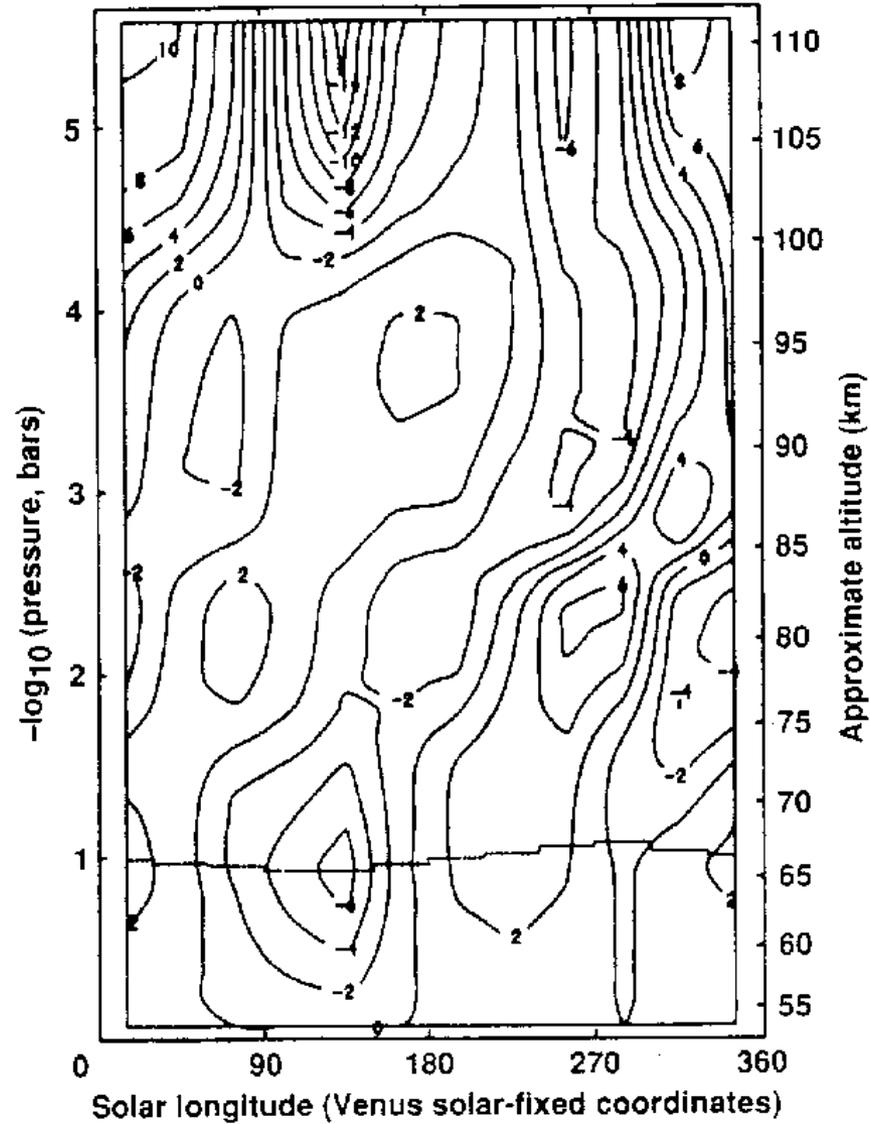
モデル



観測



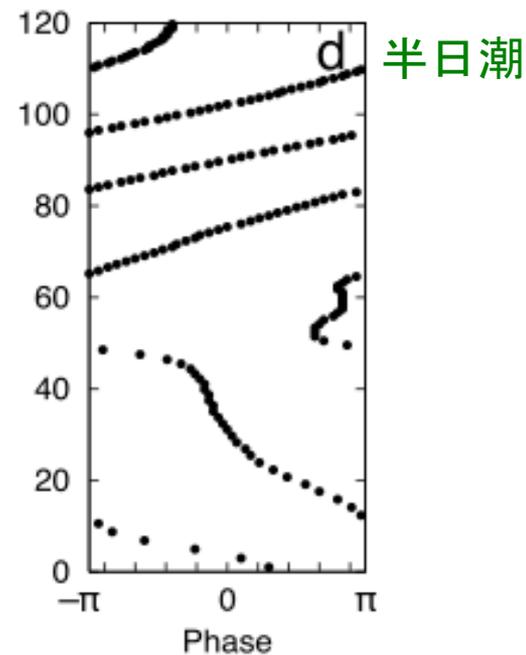
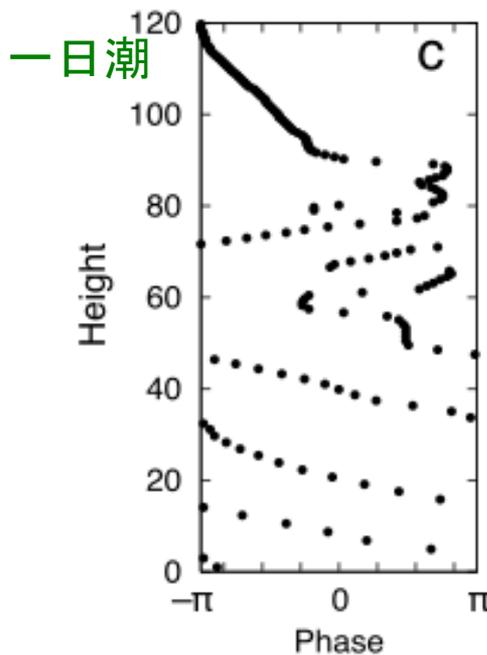
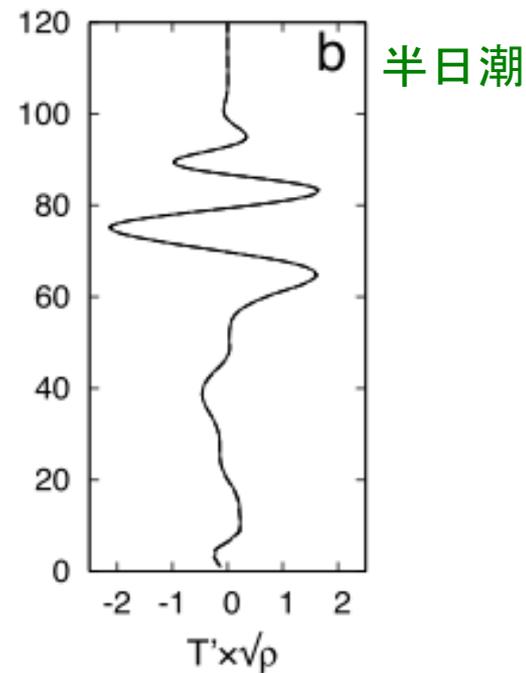
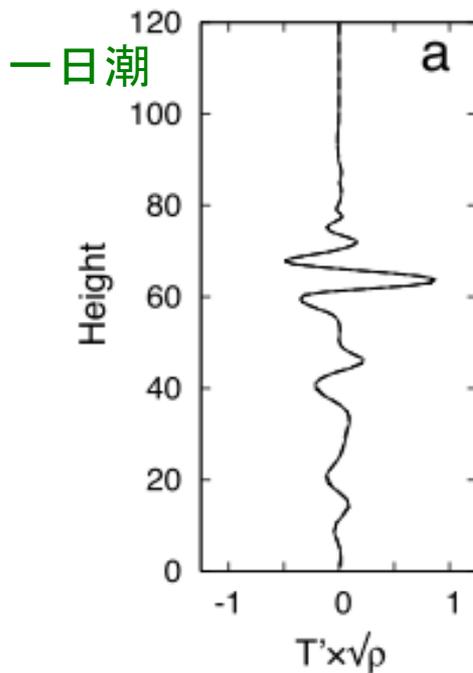
温度場で見た熱潮汐波



Pioneer Venusによる成層圏温度

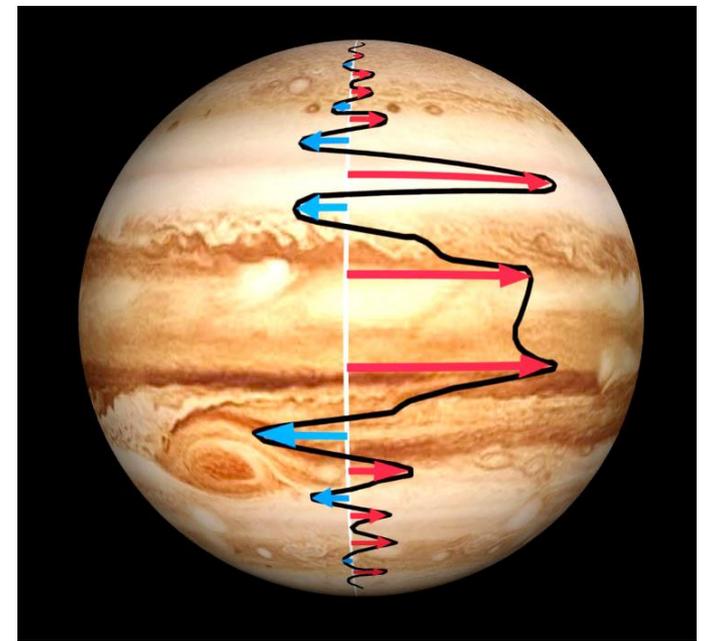
熱潮汐波の鉛直構造 (Takagi & Matsuda, 2006)

下向きに伝播する波が地面近くまで到達して地面に運動量を渡すことにより大気を加速する可能性がある

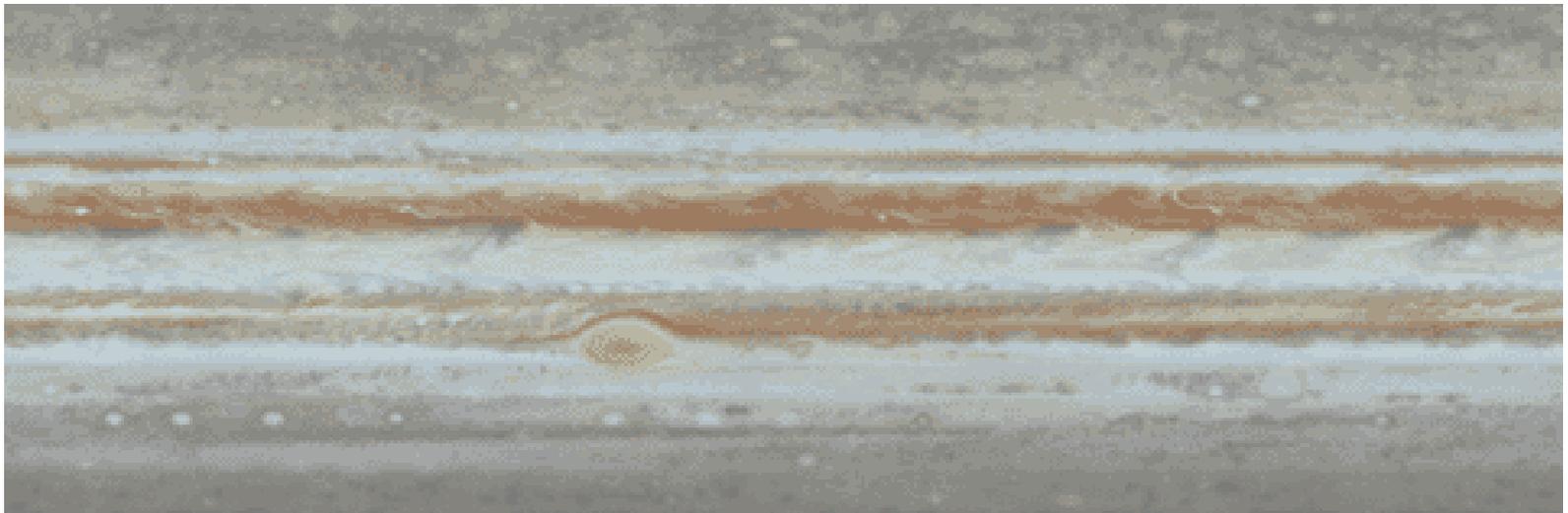


木星の縞々

- ・ 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

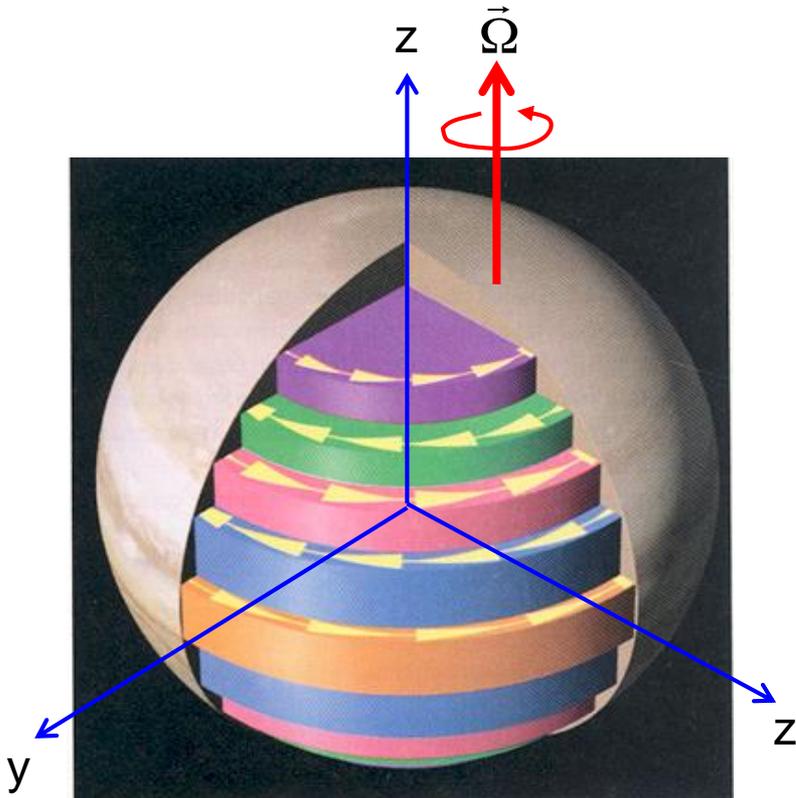


雲追跡による東西風の緯度分布



Taylor–Proudman theorem

- In a fluid that is steadily rotated, the fluid velocity will be uniform along any line parallel to the axis of rotation.



Momentum equation in rotational frame

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \Phi = 0$$

Assuming non-compressibility and $d/dt=0$, the curl is applied to give

$$\vec{\Omega} \cdot \nabla \vec{v} = 0$$

Taking z-axis along the planet's rotational axis,

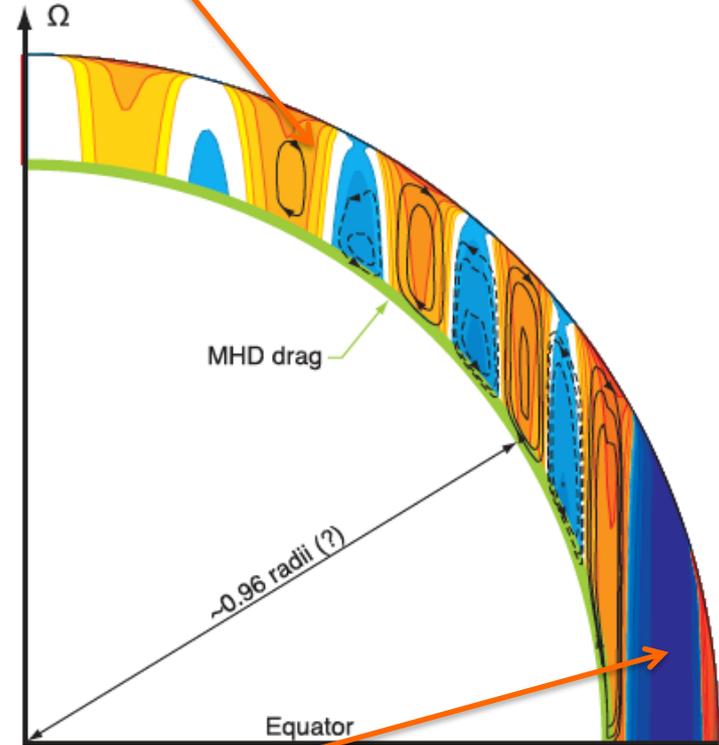
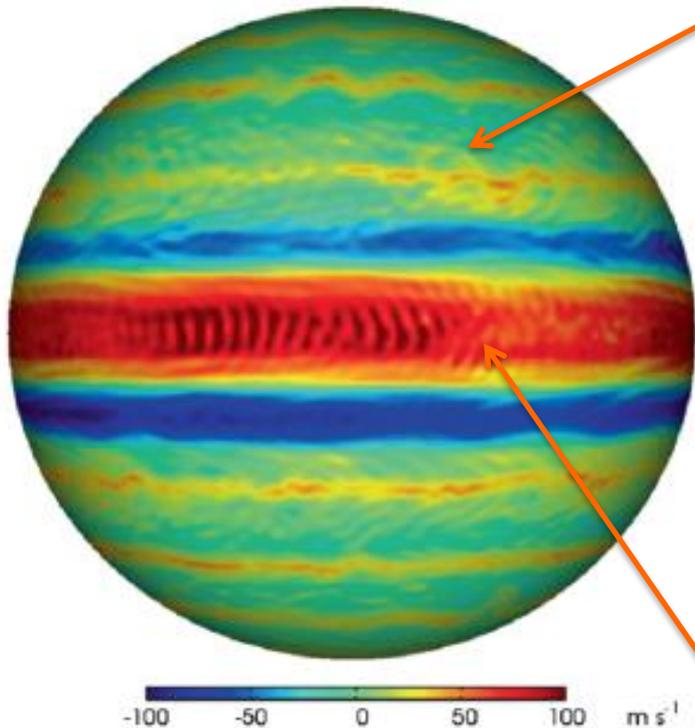
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = 0$$

数値実験の例

(Schneider & Liu, 2009)

中・高緯度では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、ここから放射されるロスビー波に伴う運動量収束・発散によって西風や東風のジェットが作られる。

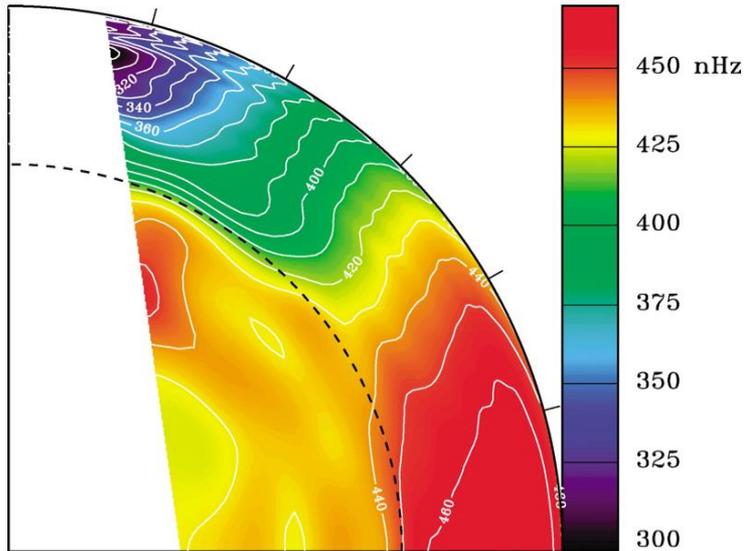
zonal velocity



赤道では深部からの熱フラックスにより対流が生じ、ここからロスビー波が高緯度に向けて放射される結果、運動量が収束して赤道ジェットが作られる。

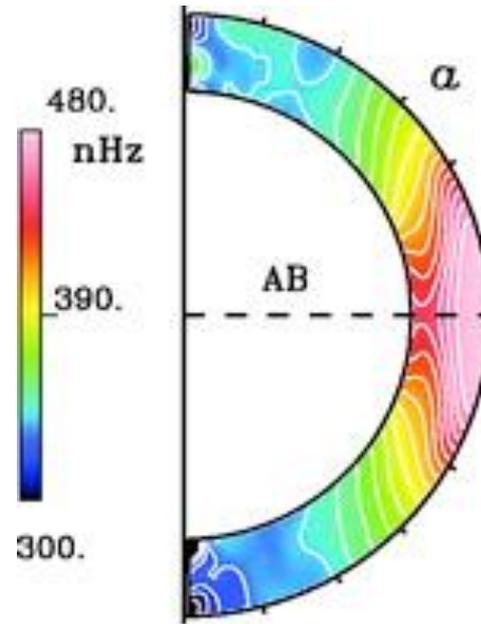
Equatorial superrotation in the Sun

Rotation rates revealed by helioseismology

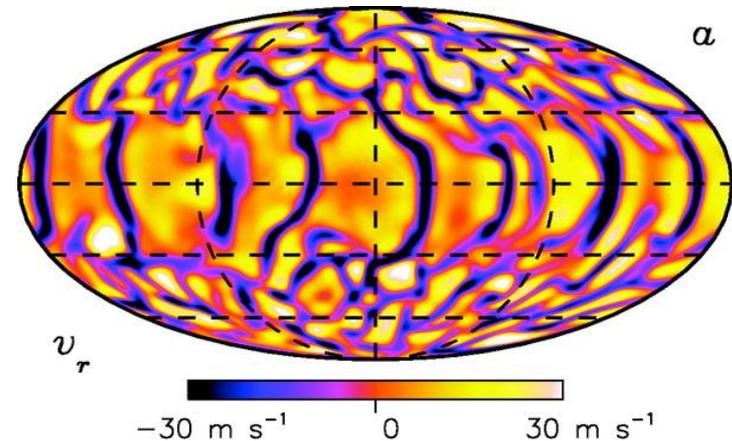


Rot. rate = 25 days on the equator
36 days near the poles

Numerical modeling (Miesch 2000)



Vertical velocity
at $r = 0.95 R_{\odot}$



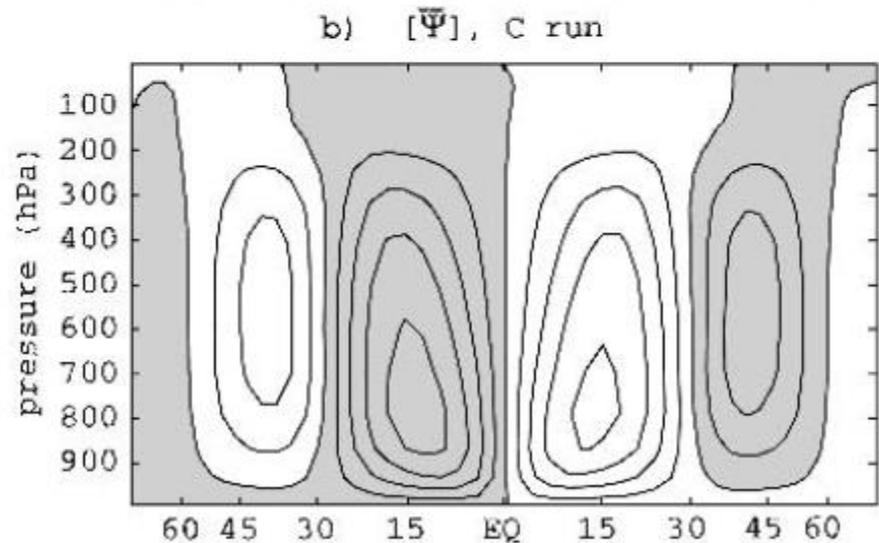
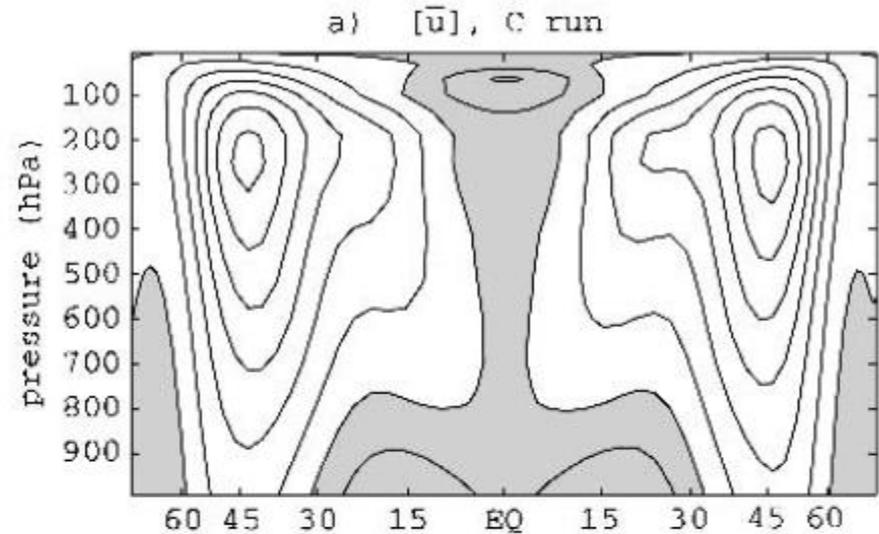
Equatorward angular momentum transport by slant convection ?

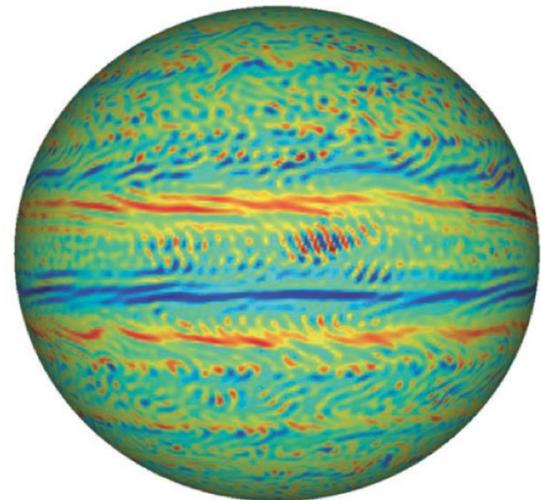
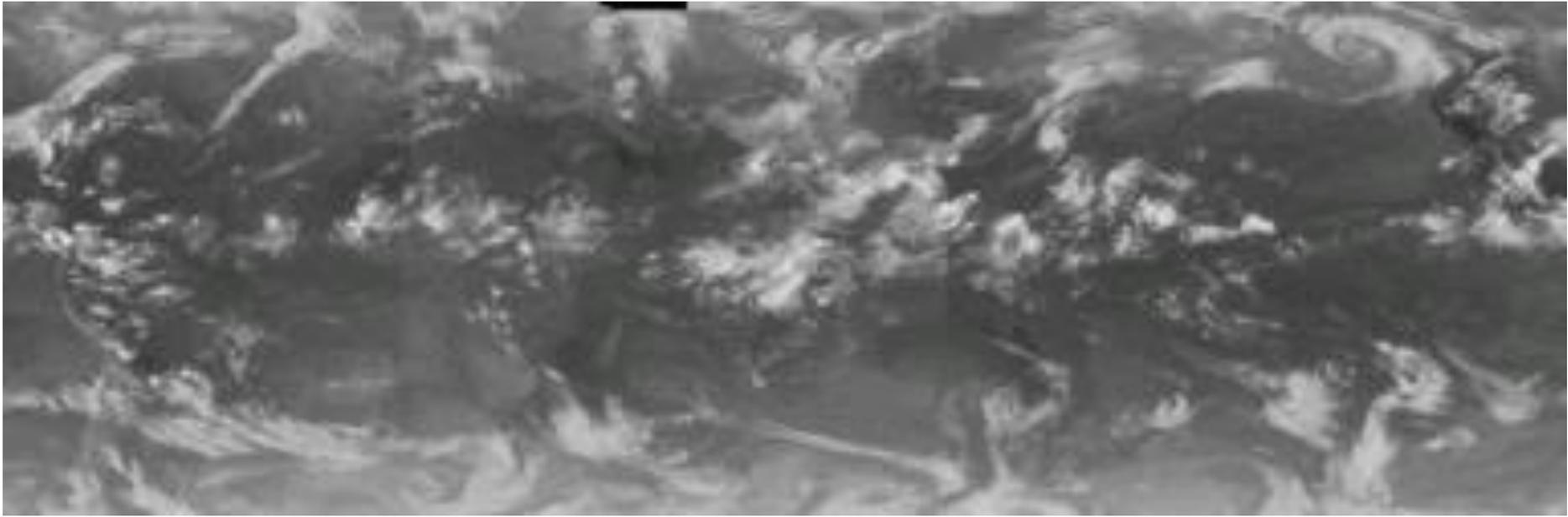
地球の熱帯対流圏の超回転可能性

(Kraucunas & Hartmann, 2005)

簡略化GCMによるパラメタ実験により、観測されている熱帯の東風のバランスを考察

南北対称、東西一様な加熱強制だと赤道域で東風(超回転しない)





-5.0 -2.5 0.0 2.5 5.0 $10^{-6} s^{-1}$

赤道域に波数2の定常な加熱強制を付加

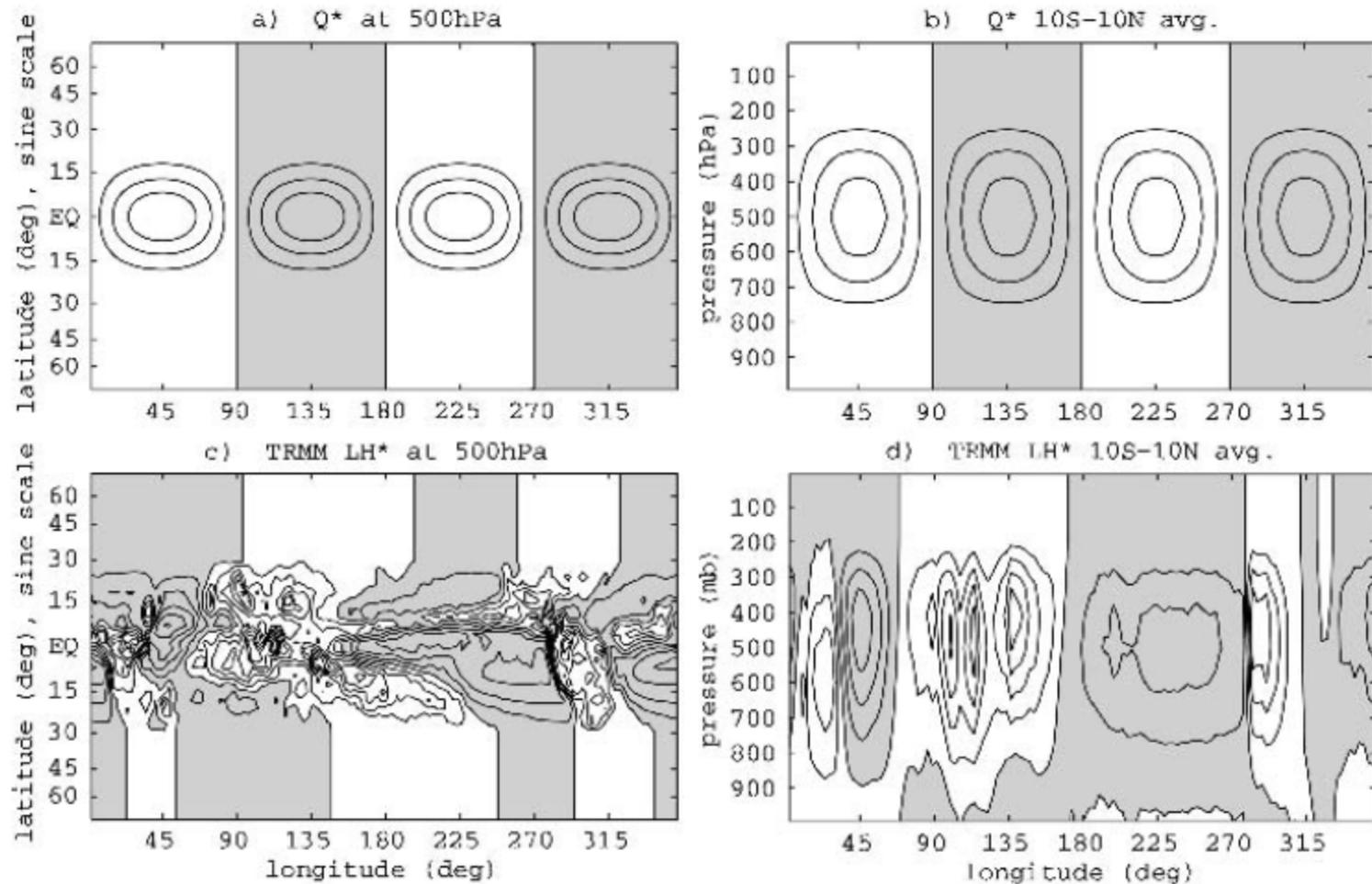
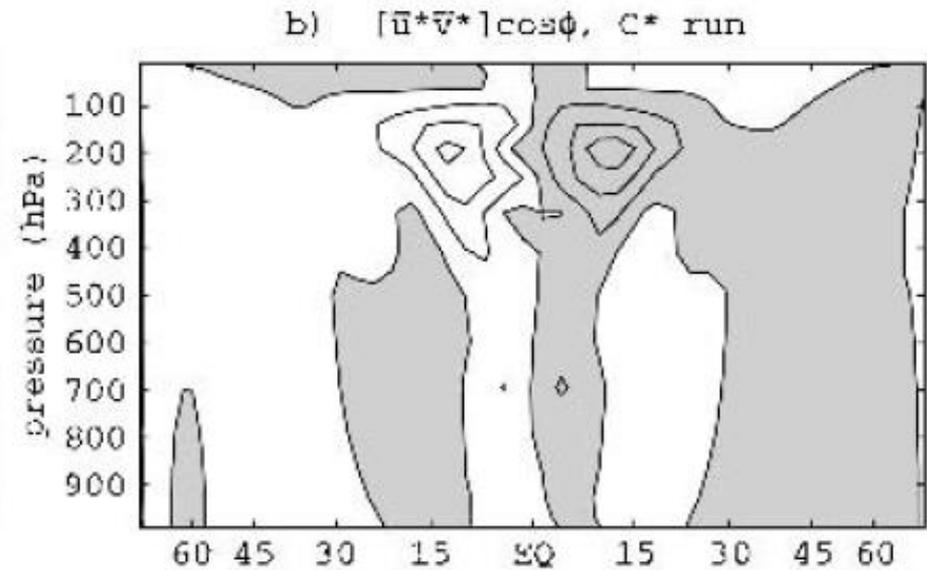
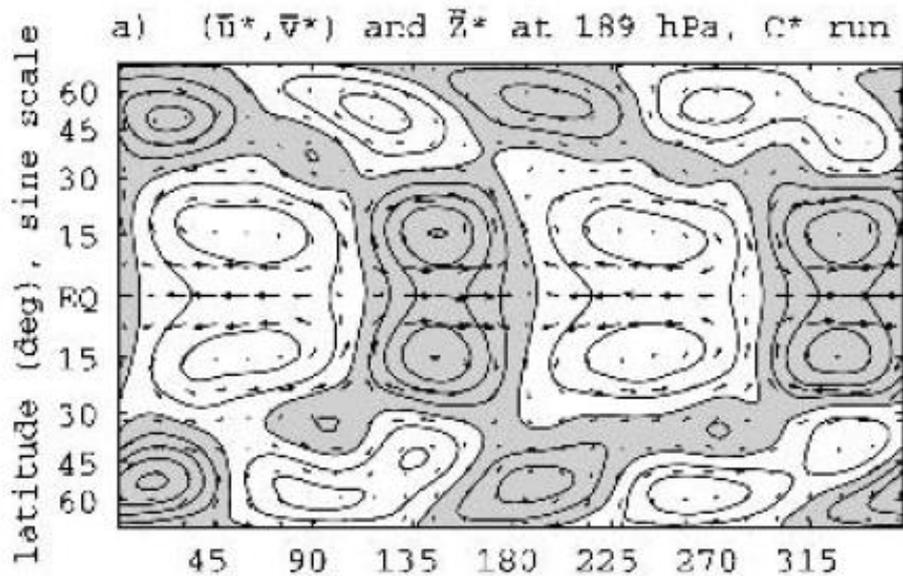
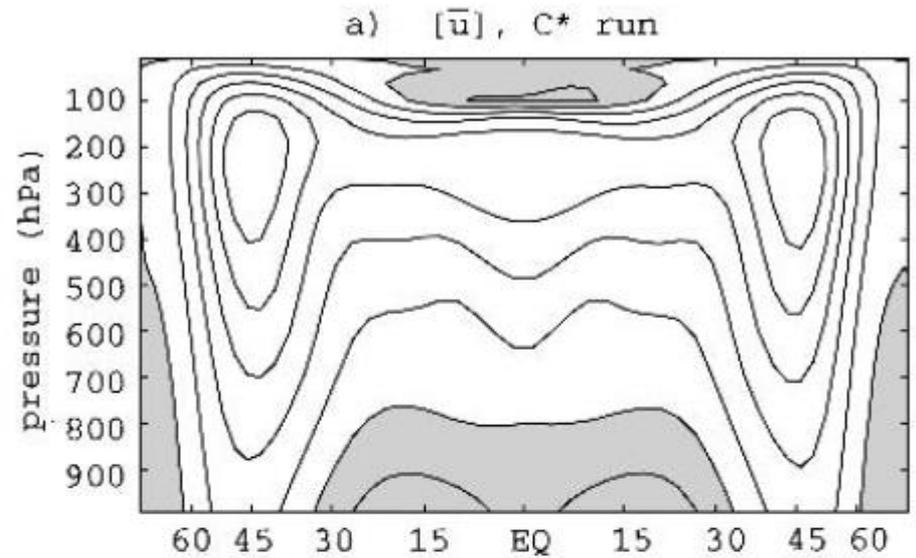


FIG. 3. The imposed tropical eddy heating perturbation, Q^* , (a) at 500 hPa and (b) averaged between 10°N and 10°S, and the annual-mean eddy latent heating distribution derived from TRMM precipitation measurements by Schumacher et al. (2004), (c) at 500 hPa, and (d) averaged between 10°N and 10°S. The contour interval is 0.25 K day^{-1} , and negative values (i.e., latent heating rates that are less than the zonal average at each latitude) are shaded.

- 熱帯大気で西風が生じた（超回転）
- 波数2の加熱強制で励起された定在ロスビー波が高緯度側に伝搬して西向き角運動量を輸送するために熱帯大気は東向きに加速

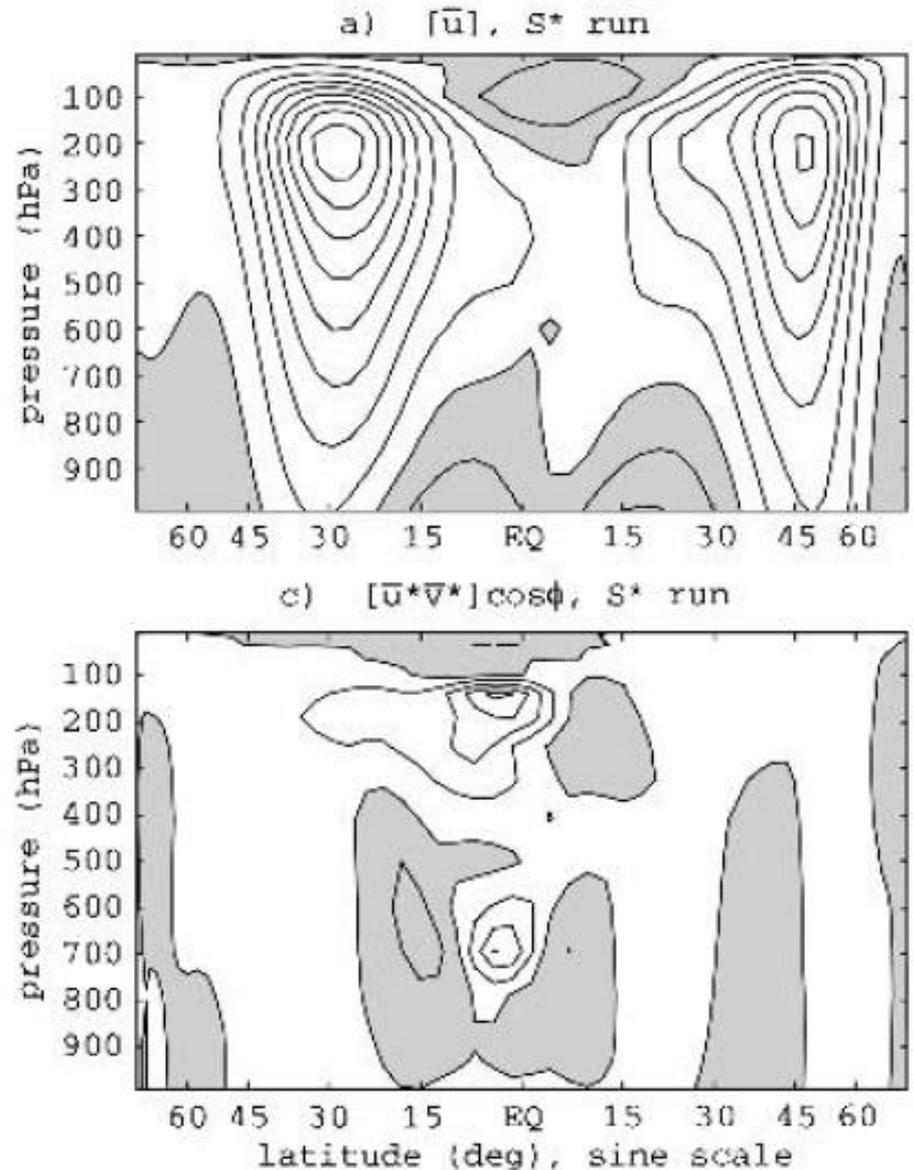


- 南北非対称な加熱強制を与えると赤道をまたぐハドレー循環による運動量移流により西風は弱まる
- 現実大気では地形や季節変化に起因する南北非対称なハドレー循環のために超回転が打ち消されている

→微妙なバランスに依存しており、今と異なる気候では地球大気も超回転するかもしれない

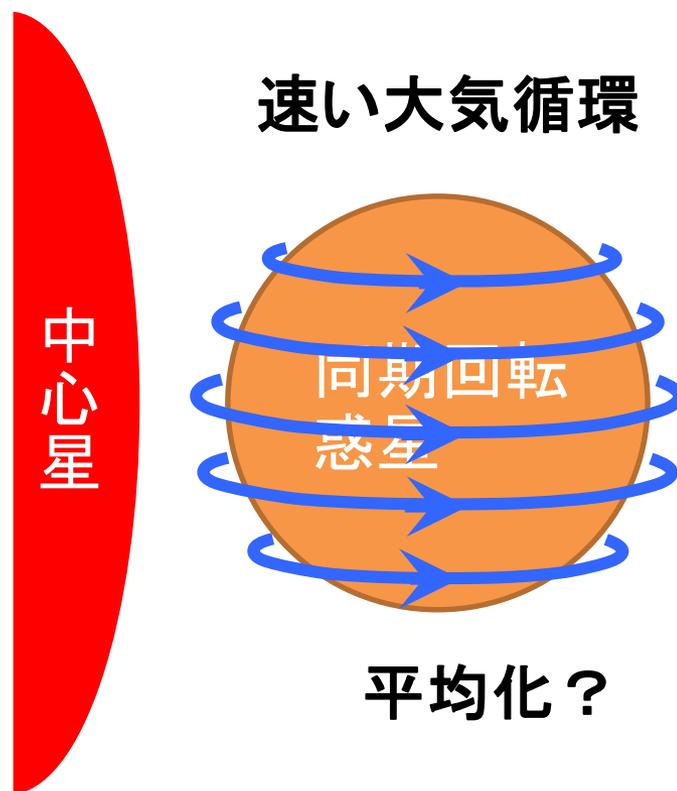
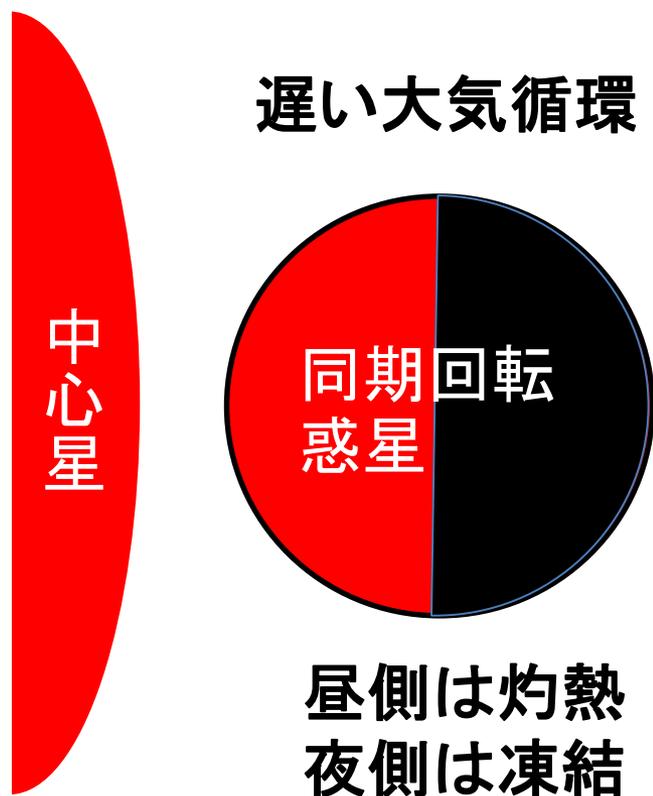
同様の指摘

Lee (1999)、Caballero and M. Huber (2010) など



系外惑星の大気循環

中心星に近い同期回転惑星は極端な気候になりそうである一方、低速回転惑星(=金星と似た状況)ゆえにスーパーローテーションによって熱が均されるという予想もある



Atmospheres of Synchronously Rotating Terrestrial Planets Orbiting M Dwarfs (Joshi et al., 1997)

- Planets within the habitable zones of M dwarfs are likely to be synchronous rotators; in other words, one side is permanently illuminated while the other side is in perpetual darkness.
- Simulation with a rotation rate similar to that of Titan

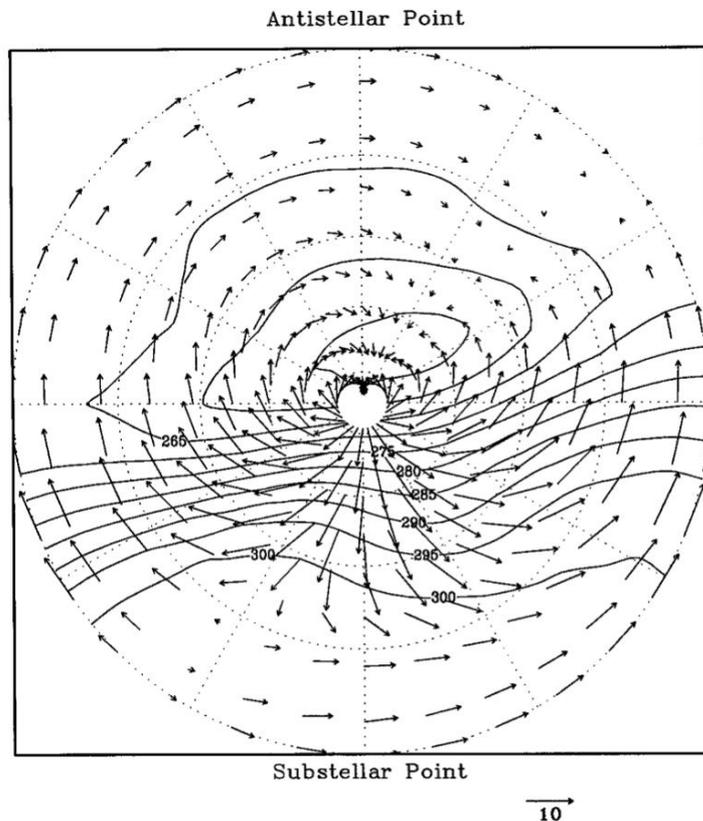


FIG. 10. Polar stereographic plot of temperatures (K) and horizontal wind vectors on the 950-mb surface (approximately 500 m above the ground).

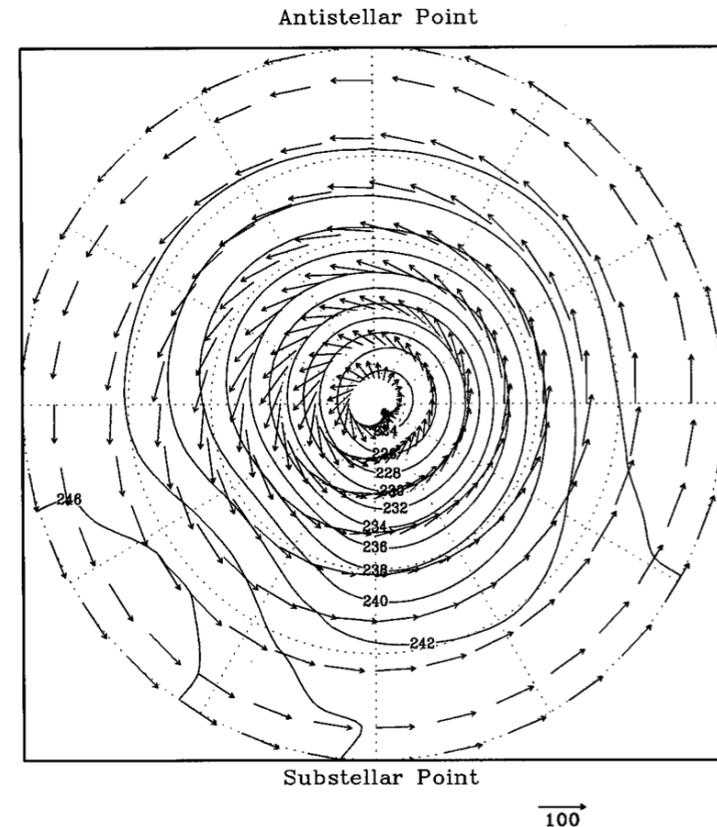


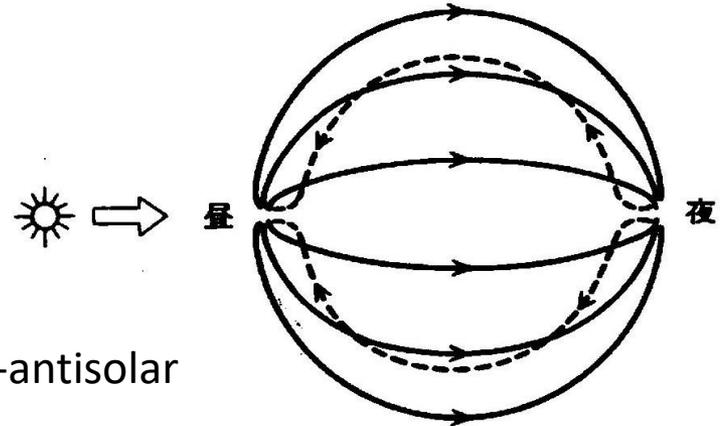
FIG. 11. Polar stereographic plot of temperatures (K) and horizontal wind vectors on the 150-mb surface (approximately 20 km above the ground).

Radiative time constant of modern Venus atmosphere

TABLE 2. Radiative time constants for various levels in the Venus atmosphere.

Level (km)	Radiative time constant (s)	
75-80	1.57×10^5	← 2 days
70-75	8.79×10^5	
65-70	5.36×10^5	
60-65	3.74×10^6	← 100 days (~Earth)
55-60	1.66×10^7	
50-55	3.96×10^7	
45-50	7.09×10^7	
40-45	1.13×10^8	
35-40	1.78×10^8	
30-35	2.59×10^8	
25-30	3.77×10^8	
20-25	5.21×10^8	
15-20	7.23×10^8	
10-15	9.56×10^8	
5-10	1.28×10^9	
0-5	1.65×10^9	← 20000 days

Rotation period \gg Radiative time constant

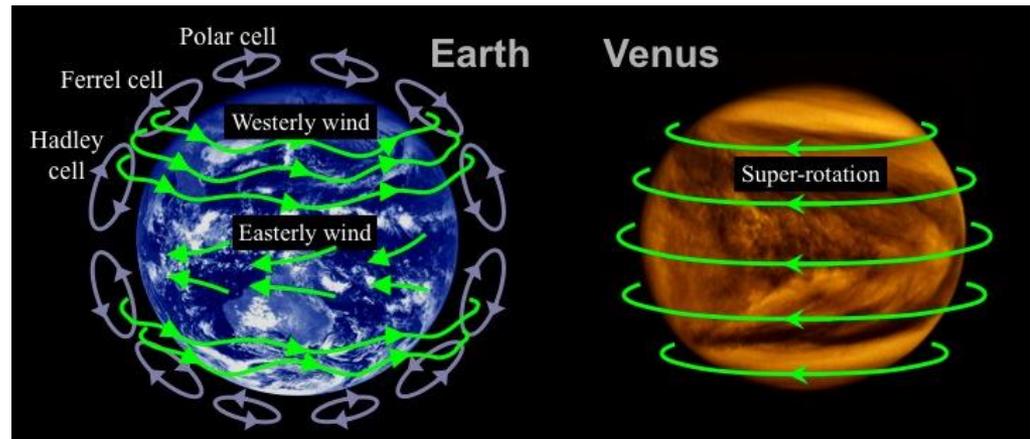


Subsolar-to-antisolar circulation

(松田 2000)

Rotation period \ll Radiative time constant

Axi-symmetric circulation

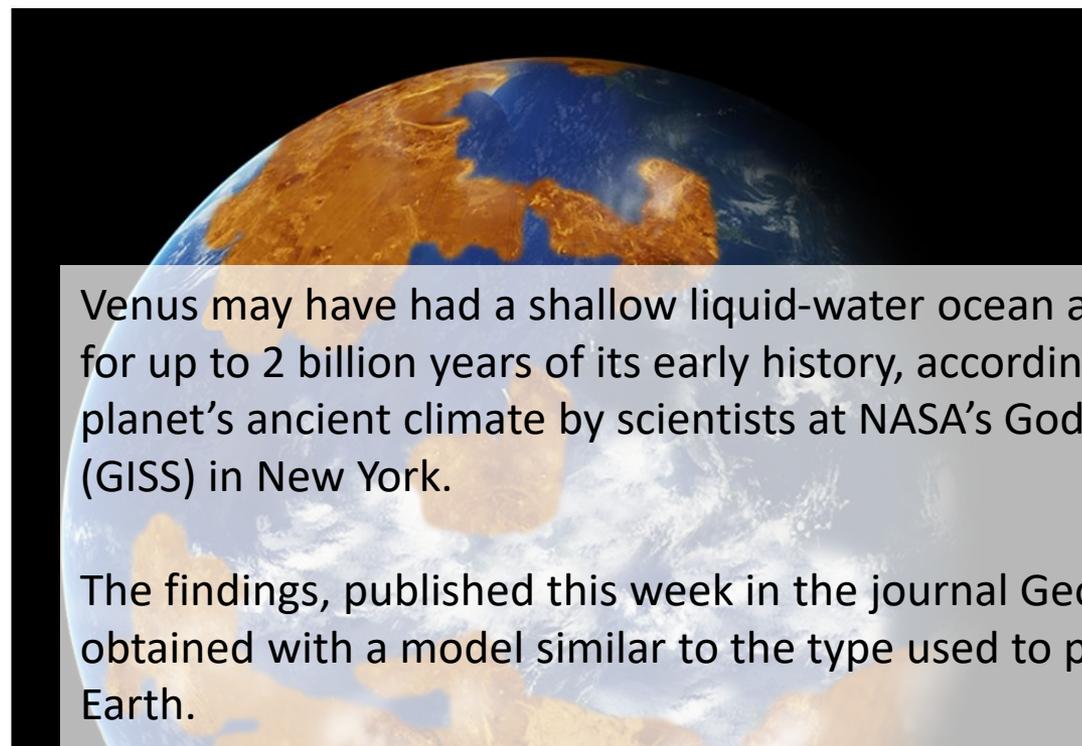




NEWS | August 11, 2016

NASA climate modeling suggests Venus may have been habitable

By Michael Cabbage and Leslie McCarthy,
NASA's Goddard Institute for Space Studies



Venus may have had a shallow liquid-water ocean and habitable surface temperatures for up to 2 billion years of its early history, according to computer modeling of the planet's ancient climate by scientists at NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS) in New York.

The findings, published this week in the journal *Geophysical Research Letters*, were obtained with a model similar to the type used to predict future climate change on Earth.

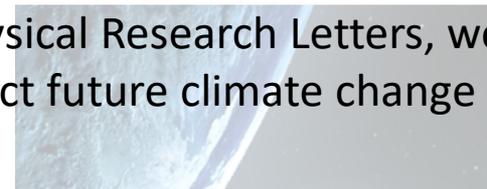
Related resource



Data related to climate change that

can help inform and prepare
American communities, businesses
and citizens

Explore

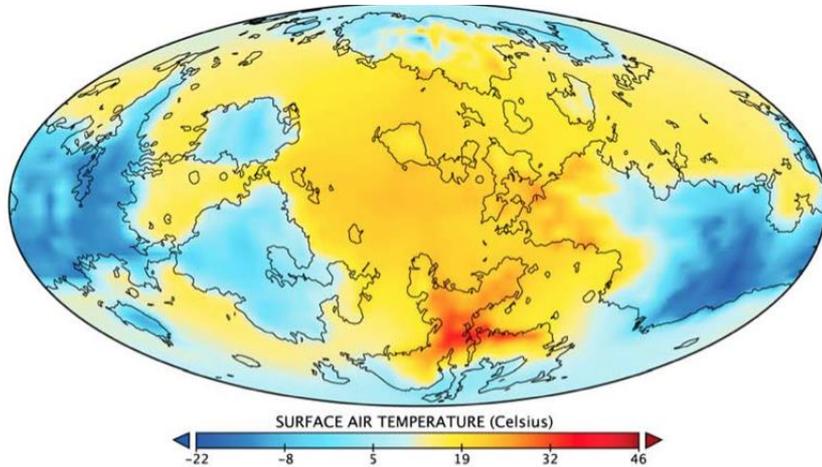


Way et al. (2016) “Was Venus the first habitable world of our solar system?”

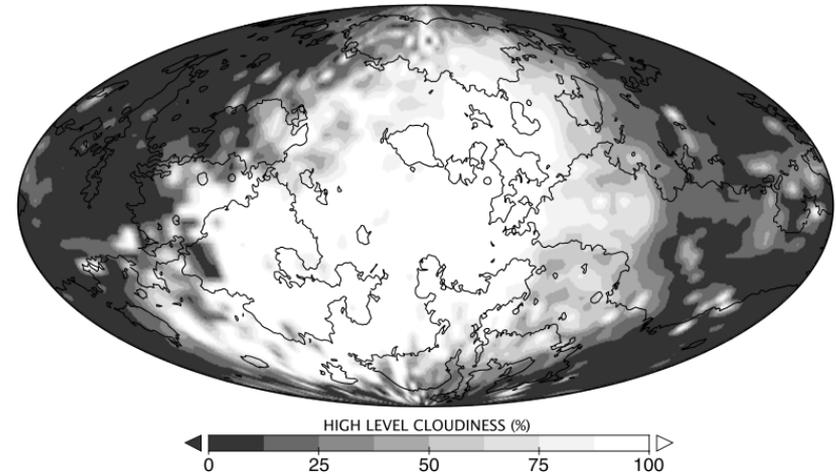
Sim A

Solar flux: 1.46 x Earth, Rot. period: Modern Venus

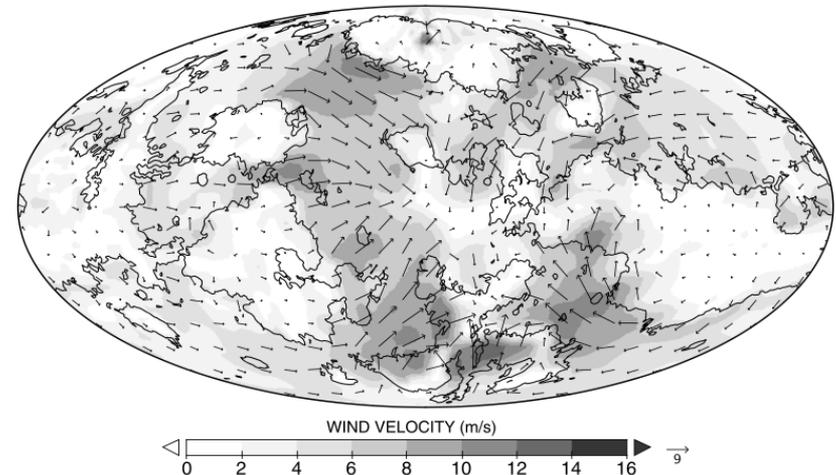
Surface air temperature



Cloudiness



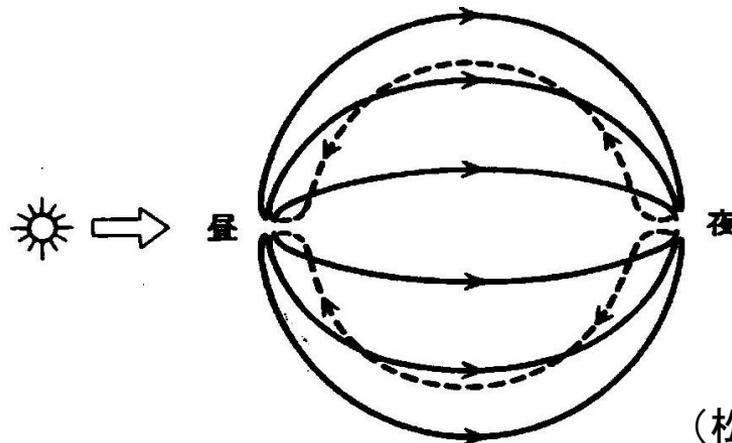
Surface level winds



- Global mean surface air temperature of 11° C despite an incident solar flux at Venus’s orbit ~46% higher than that received by modern Earth
- The dayside of the planet is almost completely cloudy.

What is happening in Sim A ?

- The high-level cloudiness on the dayside of Sim A has values as high as 100%. This is the result of this world's slow rotation which generates a strong circulation with rising motion and accompanying high thick clouds on the dayside that reflect a substantial fraction of the incident sunlight.
- These highly reflective thick areally extensive clouds are formed from smaller scale parameterized convective clouds that carry water vapor and condensed water to high altitudes in buoyant updrafts.



(松田 2000)