

金星大気スーパーローテーション の力学(1)

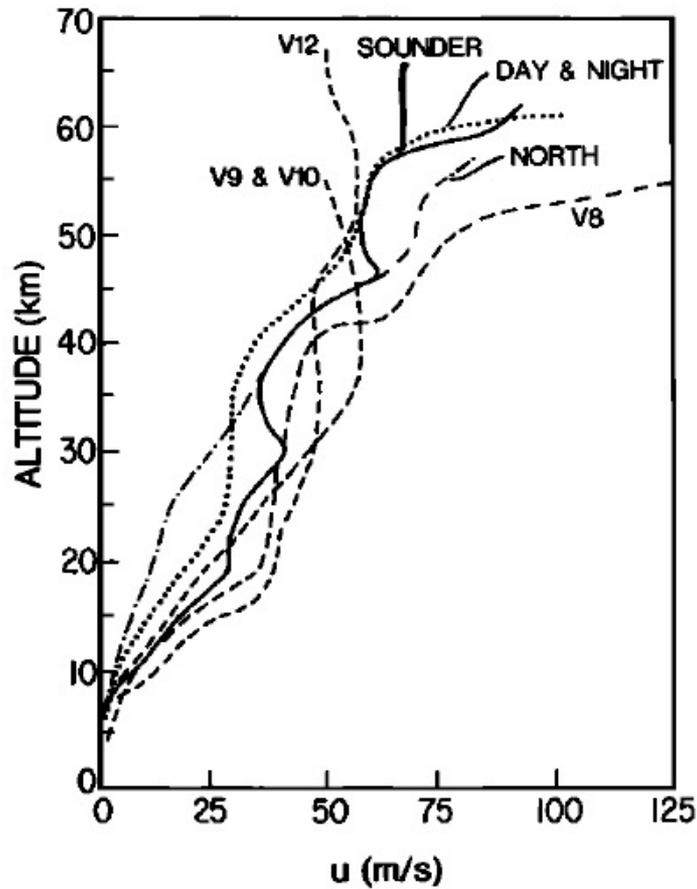
松田佳久

(2020年9月23日)

第2回温故知新ゼミ

スーパーローテーションの
第一発見者は？

スーパーローテーション(東風)の実測

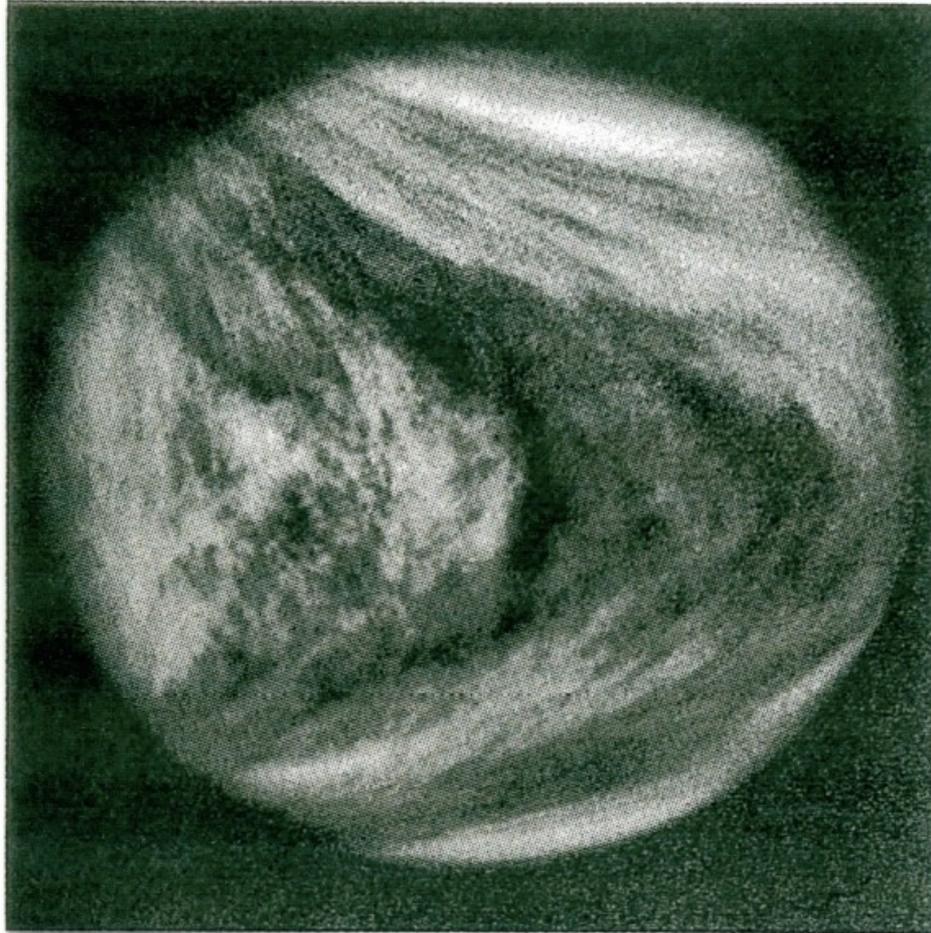


Venera 8号
(1972)

西風は観測されて
いない

A comparison of zonal wind velocity profiles from Pioneer Venus and Venera probes.

紫外線で見えるY字形の地上観測



Y字形が4（地球）日で1回転

1960年代：地上観測によるスーパーローテーションの発見

1961: “Observations photographiques de la planete Vénus” par Boyer et Camichel, *Annls. Astrophs.*, **24**, 531-535.

1966: “Mise en evidence directe, par la photographie, d’une rotation retrograde de Vénus en 4 jours” par Boyer et Geurin, *C. R. Acad. Sci. Paris t.* **263**, 253-255.

1969: “Etude de la rotation retrograde, en 4 jours, de la couche extérieure nuageuse de Vénus” par Boyer et Geurin, *Icarus*, **11**, 338-355.

研究の歴史：古典的理論

- (1) 夜昼間対流を出発点とするメカニズム
Schubert and Whitehead(1969),
Thompson(1970)
- (2) 熱潮汐波の運動量鉛直輸送によるメカニズム
Fels and Lindzen(1974)
- (3) 子午面循環の運動量鉛直輸送によるメカニズム
Gierasch(1975), Matsuda(1980,82)

今回の目的

スーパーローテーションを生成するメカニズムのうち、まず

(1) 夜昼間対流を出発点とするメカニズム

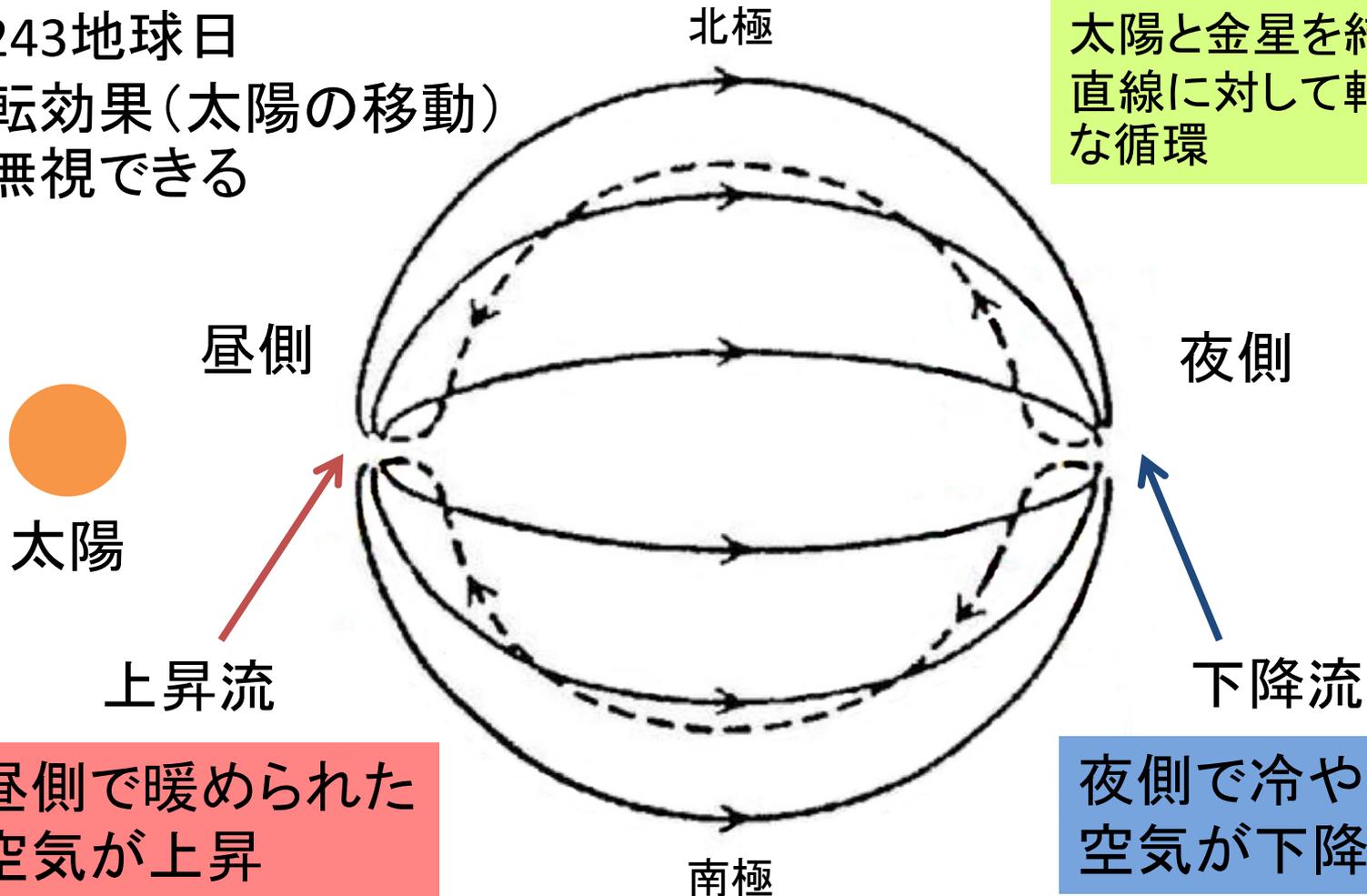
と (2) 熱潮汐波の運動量鉛直輸送によるメカニズム

を理解する

夜昼間対流

金星の自転周期：
～243地球日
自転効果(太陽の移動)
が無視できる

太陽と金星を結ぶ
直線に対して軸対称
な循環



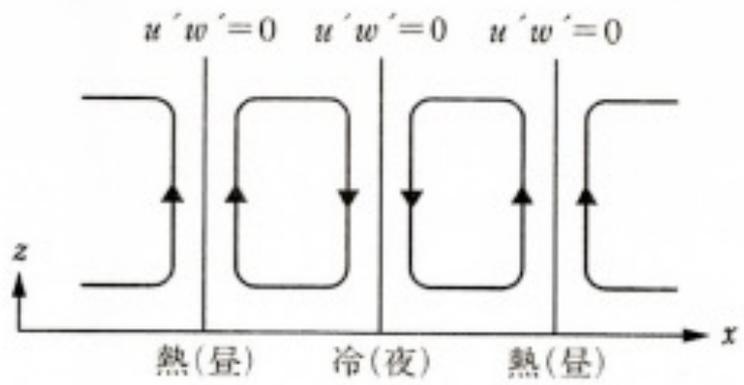
昼側で暖められた
空気が上昇

夜側で冷やされた
空気が下降

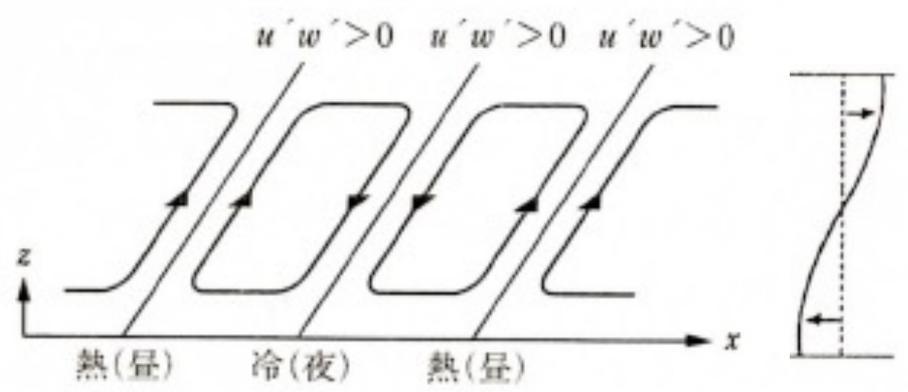
赤道上の夜昼間対流

Schubert and Whitehead(1969)(室内実験)と
Thompson(1970)(数値計算)はこの問題を赤道上の2次元(東西、鉛直)で考えた。

夜昼間対流によるスーパーローテーションの生成メカニズムの図解(1)



(a)



(b)

“Moving flame” メカニズム (室内実験) Schubert and Whitehead(1969)

- Balance of momentum

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}$$

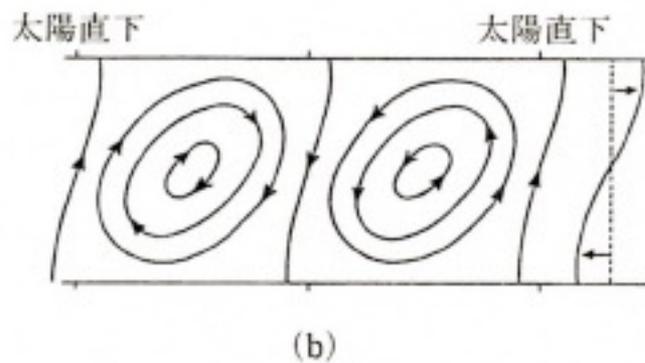
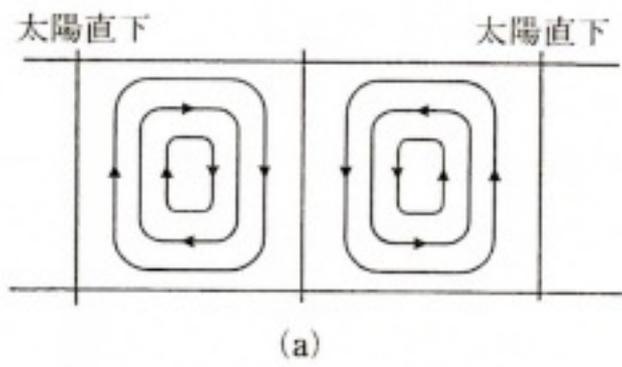
- Results of laboratory experiments:
fast zonal flow can appear by this mechanism
(4-times super-rotation appears for mercury)

This mechanism contains some problems:

The layer is heated from above in the cloud.

Thompsonによるスーパーローテーションの生成メカニズム

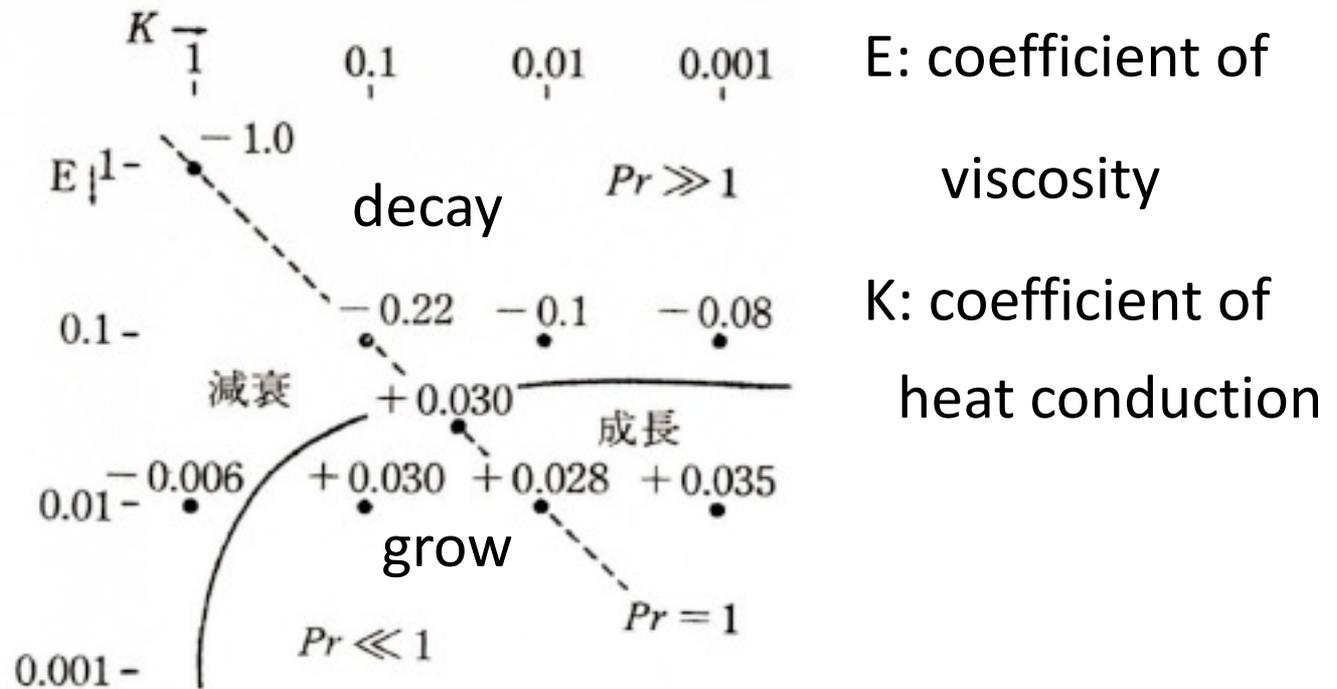
対流セルの傾きと平均東西流との相互作用による不安定



Thompson メカニズム(2)

数値計算の結果:

stability/instability diagram



Thompson メカニズムでの定常解

- decayのパラメータ領域では反対称成分は0
- growのパラメータ領域では反対称成分はEやKの減少とともに0から増大
- 平均流の符号 (i.e. 対流セルがどちらに傾くか) は決まらない。→ 初期条件により決まる
- 太陽(熱源)がゆっくり動いている場合
→ “moving flame” メカニズムと合体？ (平均流の方向は決まる)

Thompson メカニズムの球面上の再検討

- Reexamination by 3-dimensional model on the sphere: Takagi and Matsuda(1999,2000)

Instability does not take place in the parameter range where it does in the 2-dimensional model on the equator.

→ This mechanism cannot work in the real 3-dimensional atmosphere of Venus.

夜昼間対流によるスーパーローテーションの生成メカニズムのまとめ

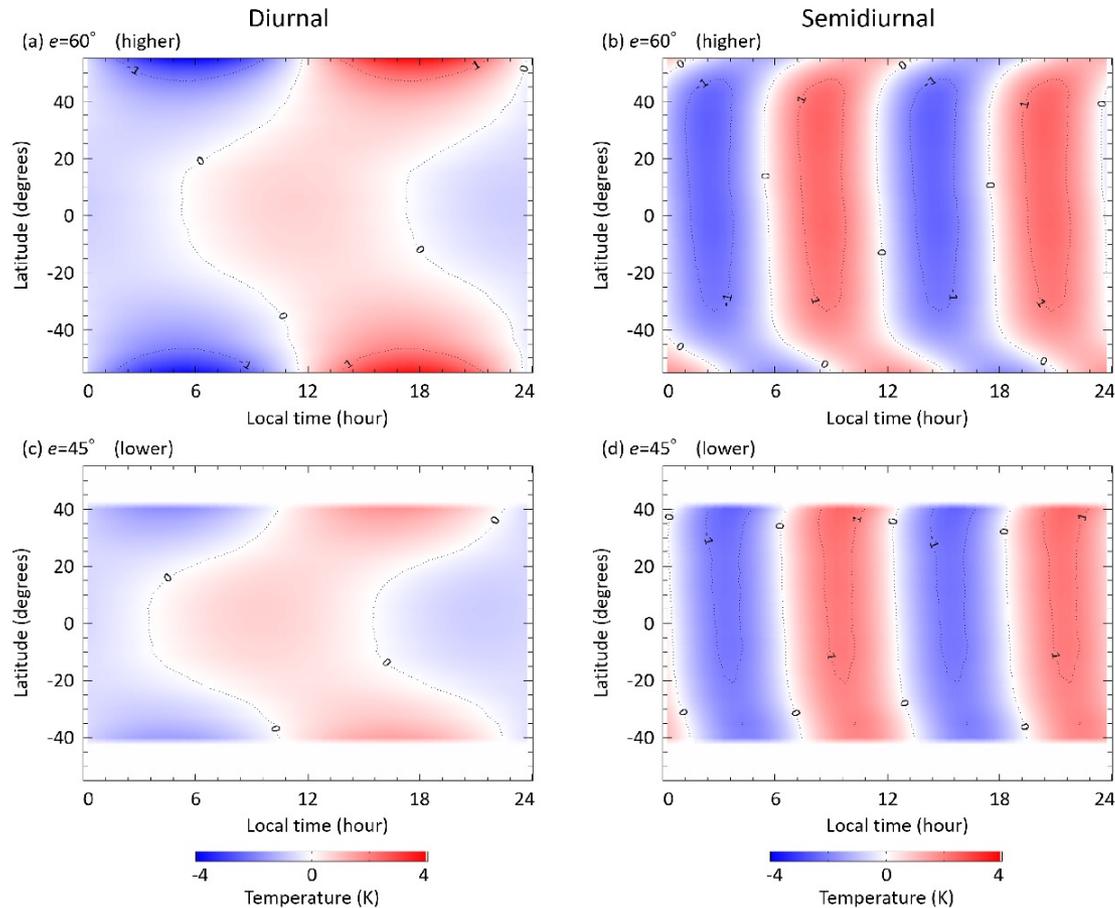
- 金星では夜昼間対流が卓越していると考えられたのにもかかわらず、スーパーローテーションが発見された。当初、前者を前提としてそれから後者を導きだそうという研究がなされた。
- その代表がシューバートやホワイトヘッドによって提唱されたmoving flame(動く炎)メカニズムである(1969年)。水槽実験において、地面からみて移動する太陽に相当する動く炎により、流体層を下から加熱する。熱伝導により熱が上方に伝わって行くが、加熱源が移動しているので、等温線が斜めに傾き、対流のセルも傾く。この対流セルが夜昼間対流に相当するものだが、この傾きが原因で、運動量が上方へ輸送されスーパーローテーションに相当する一様な流れができる。実際、彼らは炎の動きの数倍の大きさの流れを、実験室において実現した。
- 一方、トンプソンは炎の動きがなくても、傾いていない対流セル(夜昼間対流に相当)が自発的に不安定を起こして傾き、一様な流れができる事を数値実験により示した(1970年)。
- これらが、夜昼間対流からスーパーローテーションを導きだそうという試みである。一応、成功しているように見えるが、これらは赤道上の東西・鉛直断面の2次元面においてのみ調べられた研究である。そこで、高木と松田はこれらのメカニズムが3次元の球面上でもうまく働くかどうか調べた。その結果、残念ながら、球面上では働かない事が示された(1999年、2000年)。

(2) 熱潮汐波の運動量鉛直輸送によるメカニズム

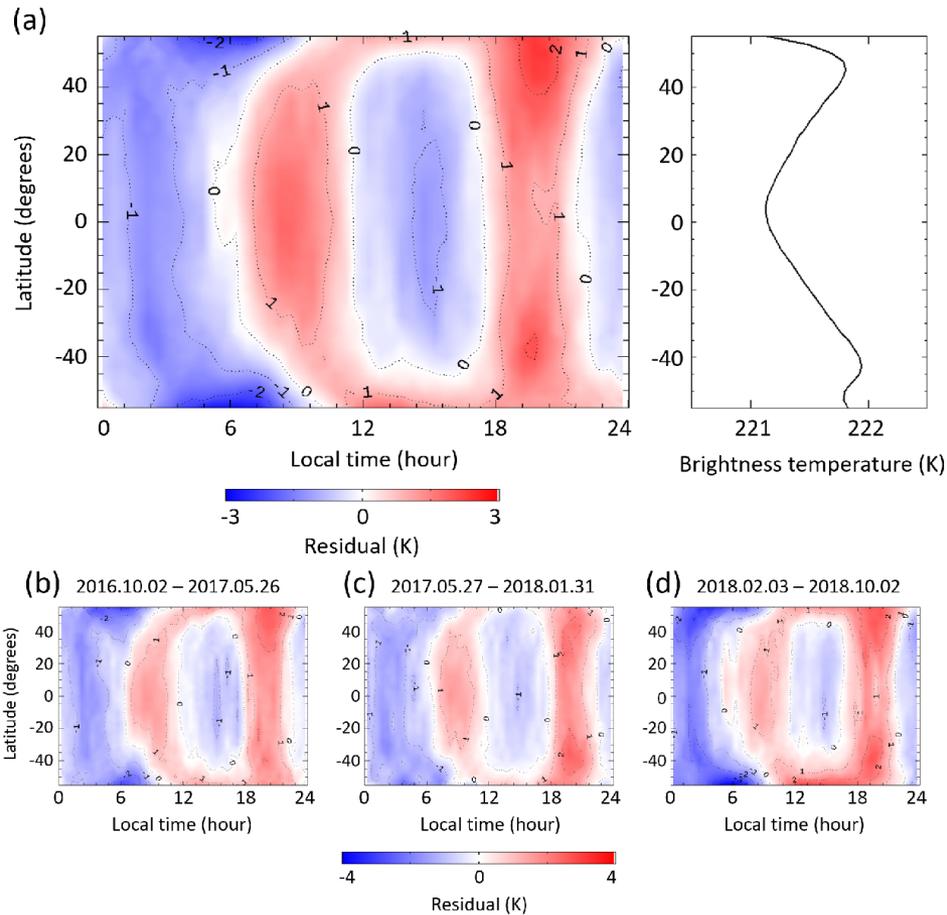
- 太陽光加熱により励起される水平対流を
(安定成層大気で)励起される強制重力波として捉える。→ 波として捉えると、鉛直伝播が問題になる。

熱潮汐波の定義: 太陽光加熱により励起される太陽から見て定常な波(大雑把に言って、強制重力波)

「あかつき」観測による熱潮汐波の温度場の水平構造(神山): 1日潮と半日潮



「あかつき」による熱潮汐波の温度場の水平構造(神山)



熱潮汐波によるメカニズム

- Basic idea of Fels and Lindzen

:interaction between wave and mean-zonal flow
(basic concept developed in the dynamic meteorology)

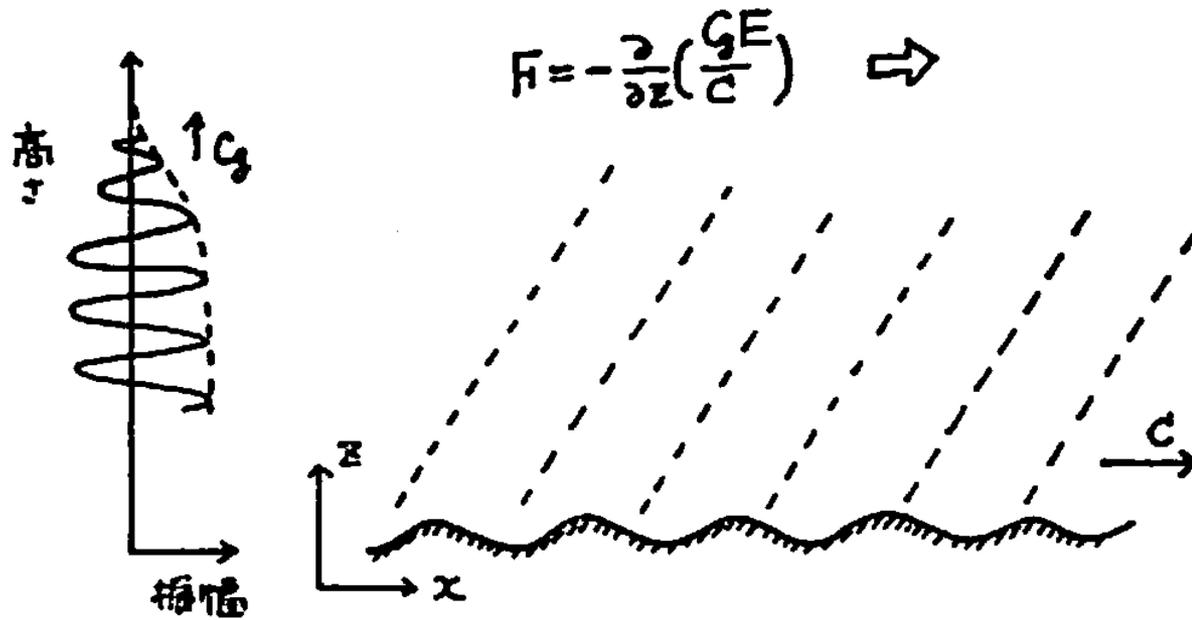


Zonal momentum (U) is associated with vertically propagating wave

$$U \propto c_x \quad (\text{phase velocity})$$

Uryu's relation : $U = E / c_x$ (E : wave energy)

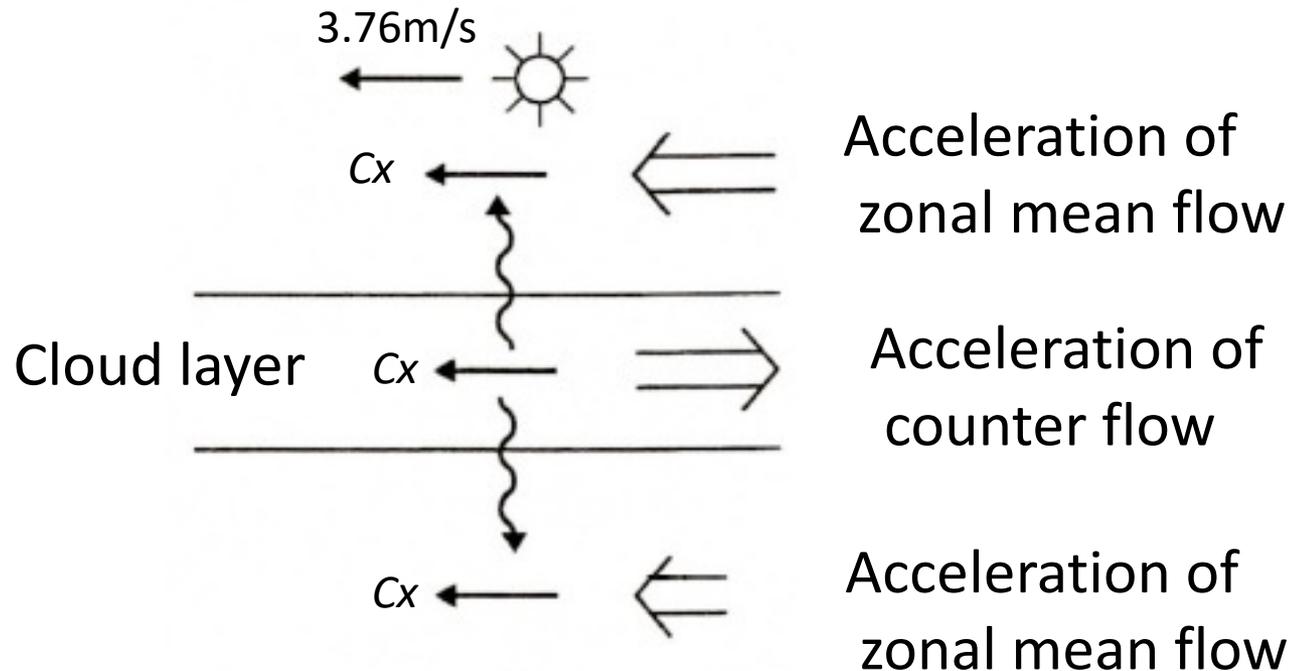
波板を引っ張ることによる波の生成 (=運動量の注入)



第1図 凹凸のある底板によってつくられた波が上方へ伝わっているところ。

瓜生(1976)

Basic idea of Fels and Lindzen(2)



- difficulty of this mechanism: formation of critical level (at which $U = c_x = 3.76\text{m/s}$)

臨界点(高度)とは？

- 一様な東西風、 $U=U(z)$ での重力波の式

$$\frac{d^2W}{dz^2} + \left(\frac{N^2}{(U(z)-c)^2} - k^2 \right) W = 0$$

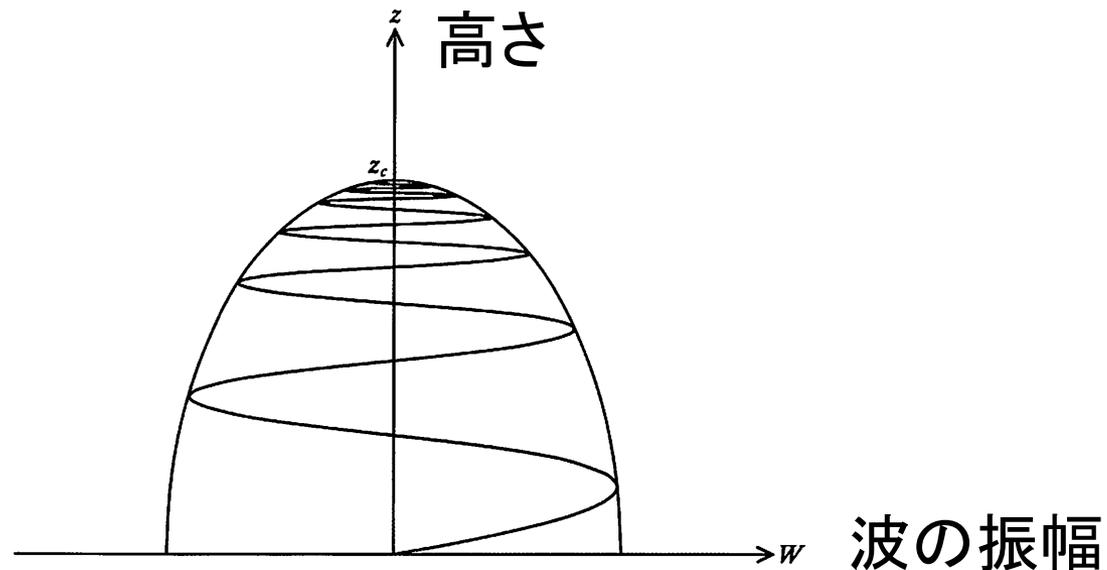
ここで、 $w'(x, z, t) = W(z) \exp(ik(x - ct))$

$U(z_c) = c$ となる z_c は方程式の確定特異点 z_c を臨界高度という。→ この上下で W の大きさは大きく変わる。

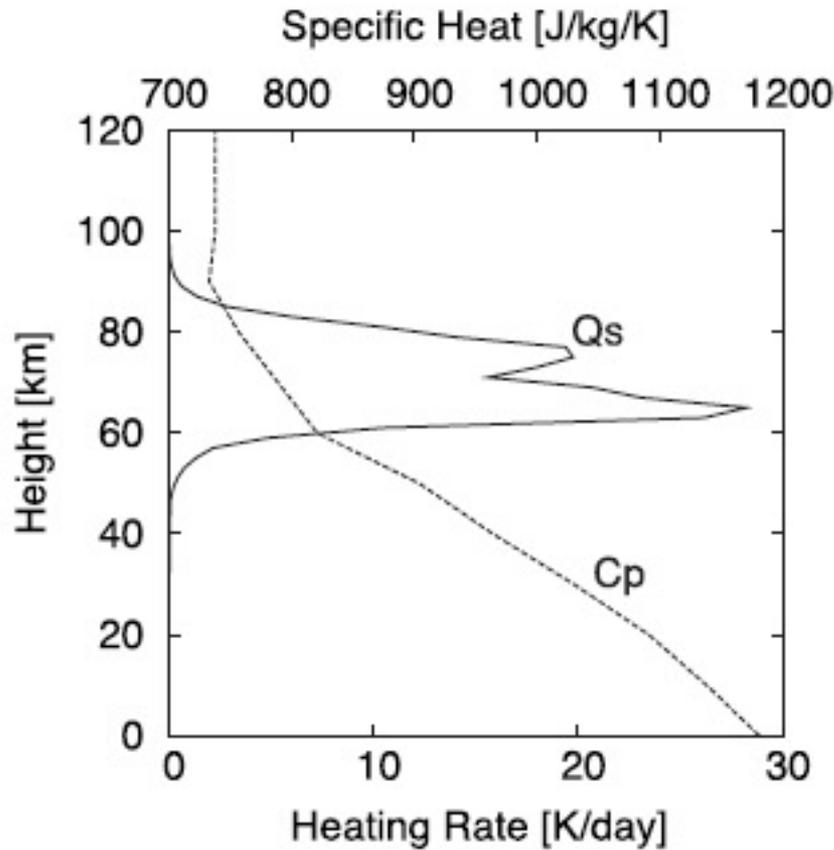
臨界高度付近での波の振る舞い

- WKB近似: $W \propto \exp(imz)$

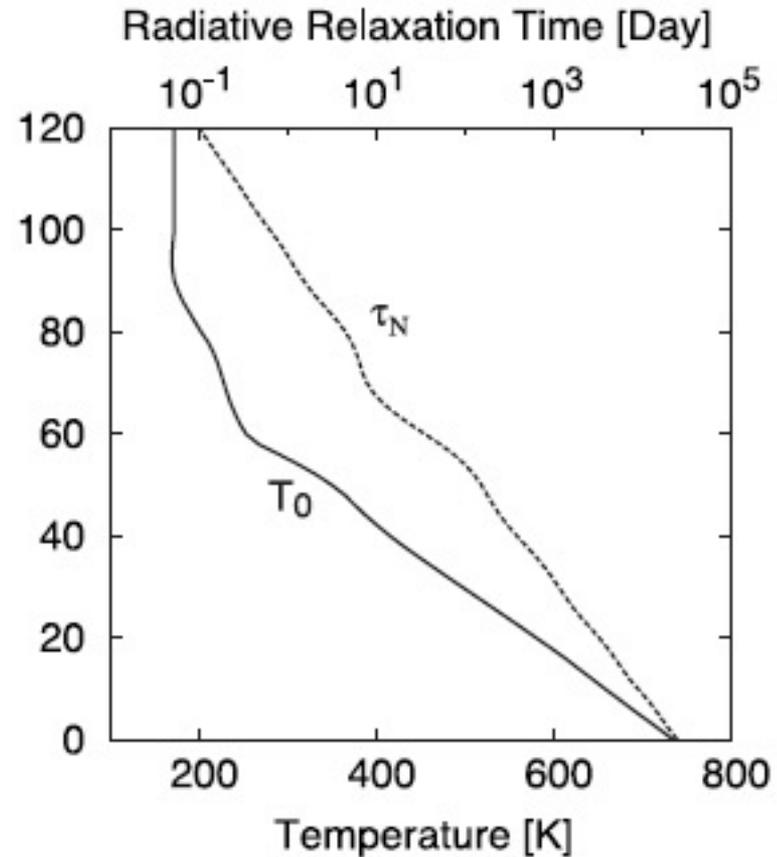
$$m^2 \propto \frac{N^2}{(z - z_c)^2} \quad c_{gz} \propto \frac{k(z - z_c)^2}{N} \quad |W| \propto \sqrt{|z - z_c|}$$



Propagation of thermal tides in the realistic atmosphere: Takagi and Matsuda(2006)



Q_s : solar heating rate



τ_N : relaxation time of
Newtonian cooling

Propagation of thermal tides to the ground

Results of Takagi and Matsuda(2006)

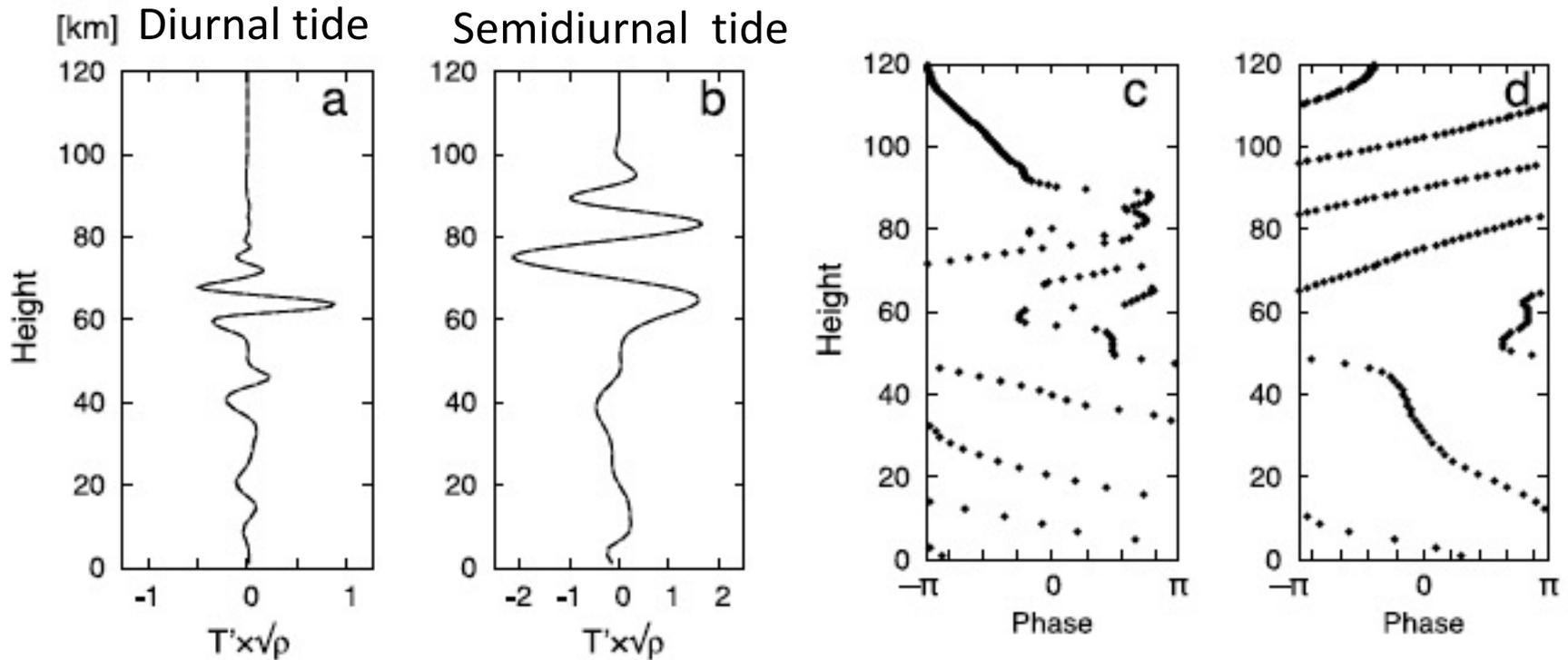


Figure 1. Vertical distributions of temperature deviations and their phase associated with (a and c) diurnal and (b and d) semidiurnal tides at the subsolar point multiplied by square root of the basic state density ($T' \times \sqrt{\rho}$), which are calculated for the heating profiles (a) and (b) and without ground heating. The two distributions are overlapped almost

熱潮汐波によるスーパーローテーション 生成のメカニズム

Fels and Lindzen(1973) Takagi and Matsuda(2007)

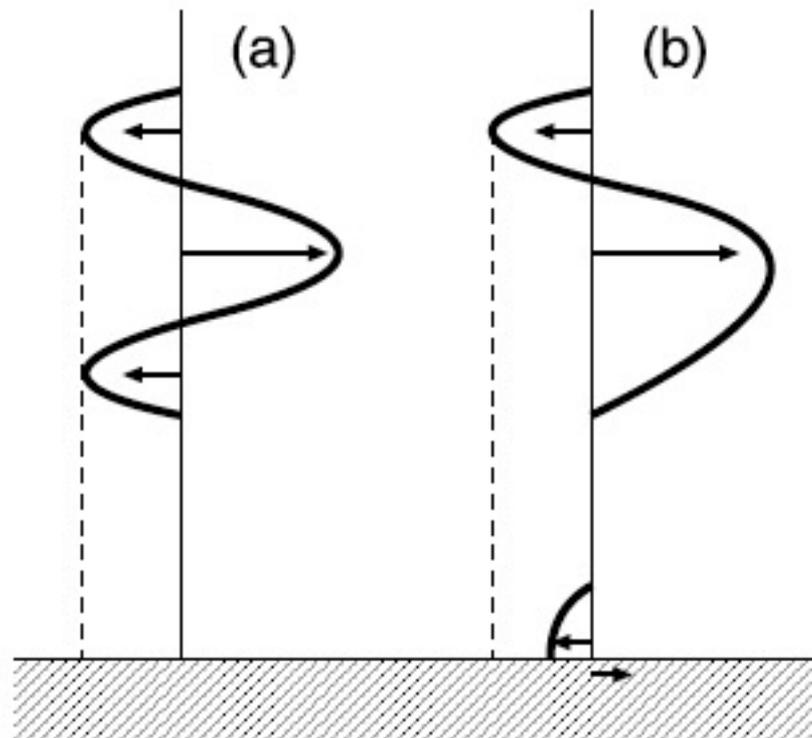
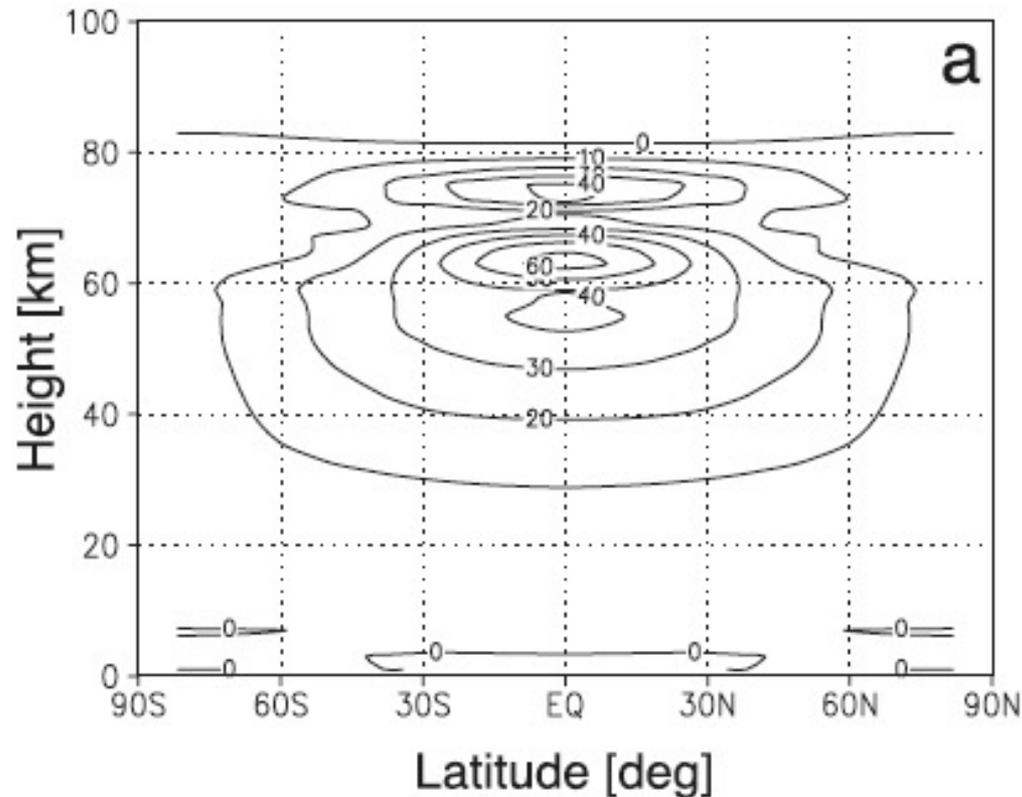


Figure 10. Schematic illustration of acceleration mechanism of mean zonal flow by the thermal tides (a) in the work of *Fels and Lindzen* [1974] and (b) in the present model.

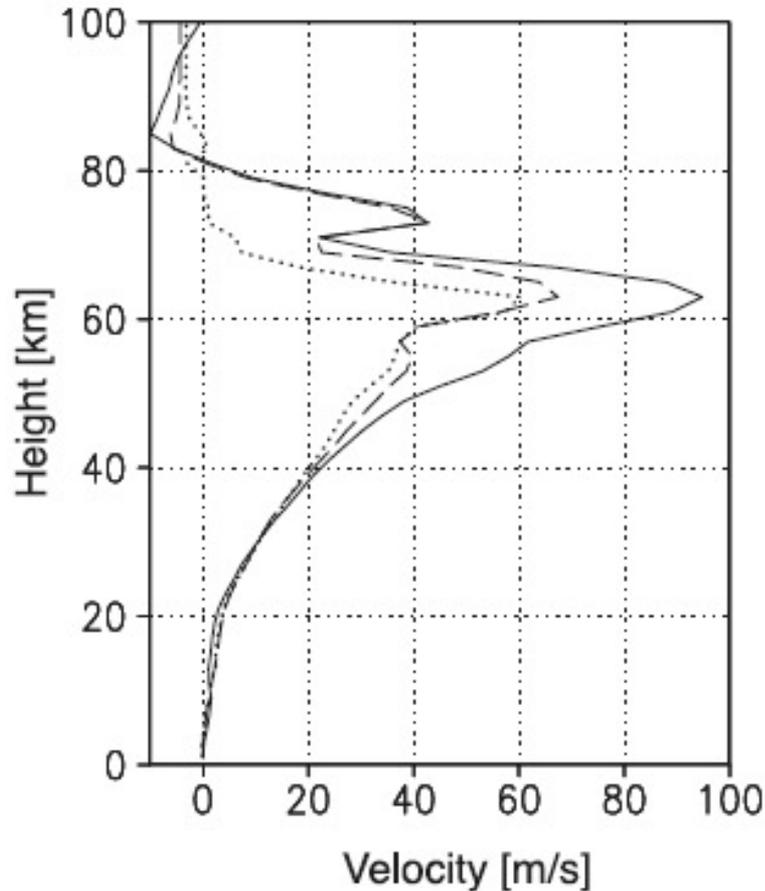
最近の研究の展開 : GCMによる研究(2)

- 熱潮汐波によるスーパーローテーションの再現:
Takagi and Matsuda(2007)



南北-鉛直断面での東風速度分布

Parameter dependency of super-rotation generated in Takagi and Matsuda(2007)



Zonal velocity at the equator

solid line: small Newt. cooling
dashed line: standard
dotted line: large Newt cooling

Meridional circulation is not involved in T and M(2007).

上に伝播した波（運動量）

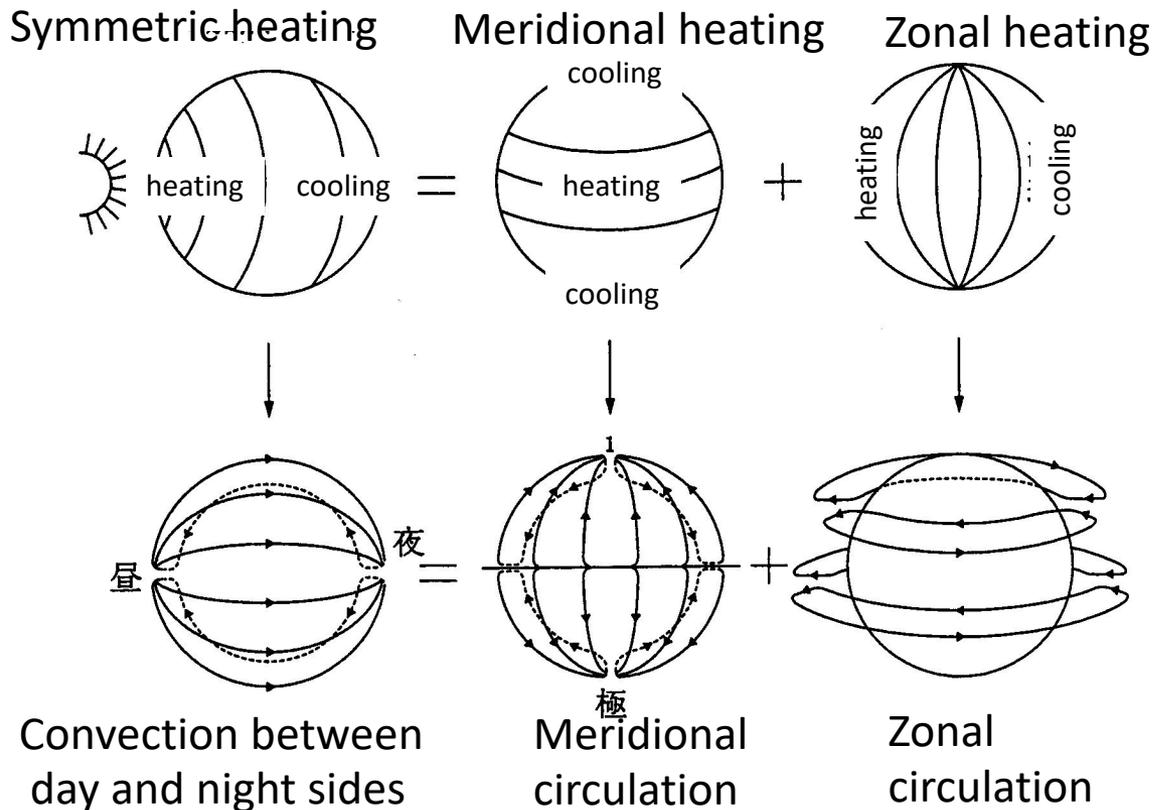
- 上に伝播した波にはスーパーローテーションと反対方向の運動量が伴う
- 観測：スーパーローテーションは70km位がピーク→それより上では減衰
- 減衰させるメカニズムが働かなければ、粘性の働きで等速分布
- 上に伝播した熱潮汐波はこの減衰に寄与し得る

熱潮汐波によるメカニズムのまとめ

- 金星が吸収する太陽光エネルギーの加熱効果により励起される(太陽から見て定常の)波を熱潮汐波という。この熱潮汐波の作用によってスーパーローテーションの生成を説明しようという説がフェルスとリンゼンによって提唱された(1973年)が、重大な欠陥があった。しかし、高木と松田は金星の状況を具体的に考慮する事により、このメカニズムによってスーパーローテーションの形成が可能である事をGCMによる数値シミュレーションで示した(2007年)。
- 波と平均流の相互作用を取り扱う気象力学の理論によると、大気中の波は波の(位相の)進行方向と同じ向きの運動量を担っている。従って、地面から見て太陽の進行方向に熱潮汐波の位相も進行して行くので、この波は太陽と同じ方向、つまり自転(即ちスーパーローテーション)と逆の方向の運動量を担っている。従って、この波が雲層(45km~70km)上部で励起され、それが上下に伝播すると、自転と逆方向の運動量が雲層から上下に運び出され、(その反動で)雲層では自転と同じ方向の運動量が残ることになる。この流れをスーパーローテーションとして解釈しようというのが、このメカニズムである。
- 下方に伝播した波は、地面まで到達して、そこで運動量を固体部分に受け渡し、消えてなくなる。従って、大気には自転方向の正味の運動量が残る事になる。

夜昼間対流と子午面循環の関係

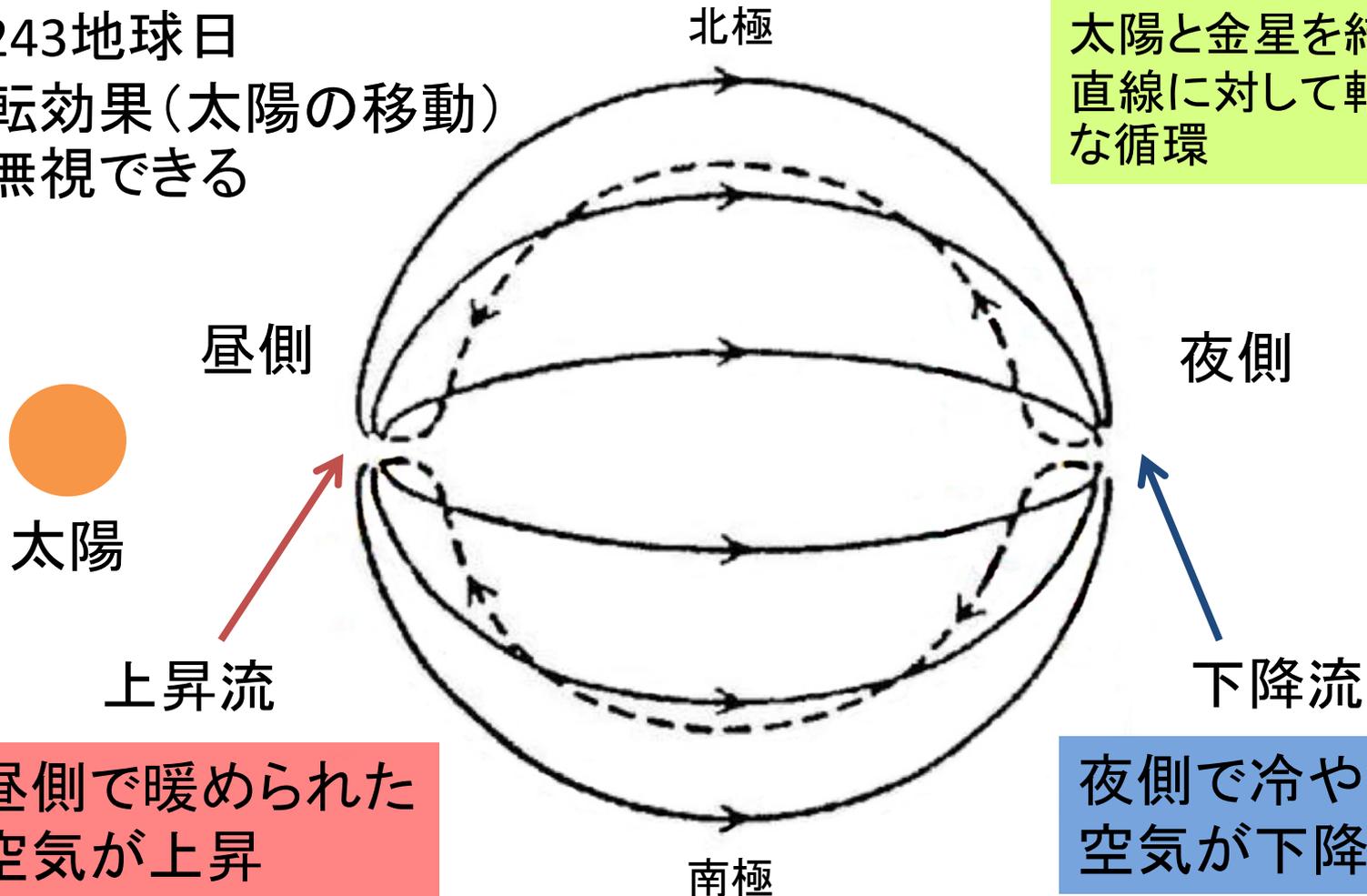
- 夜昼間対流を東西方向に平均すると子午面循環になる



夜昼間対流

金星の自転周期：
～243地球日
自転効果(太陽の移動)
が無視できる

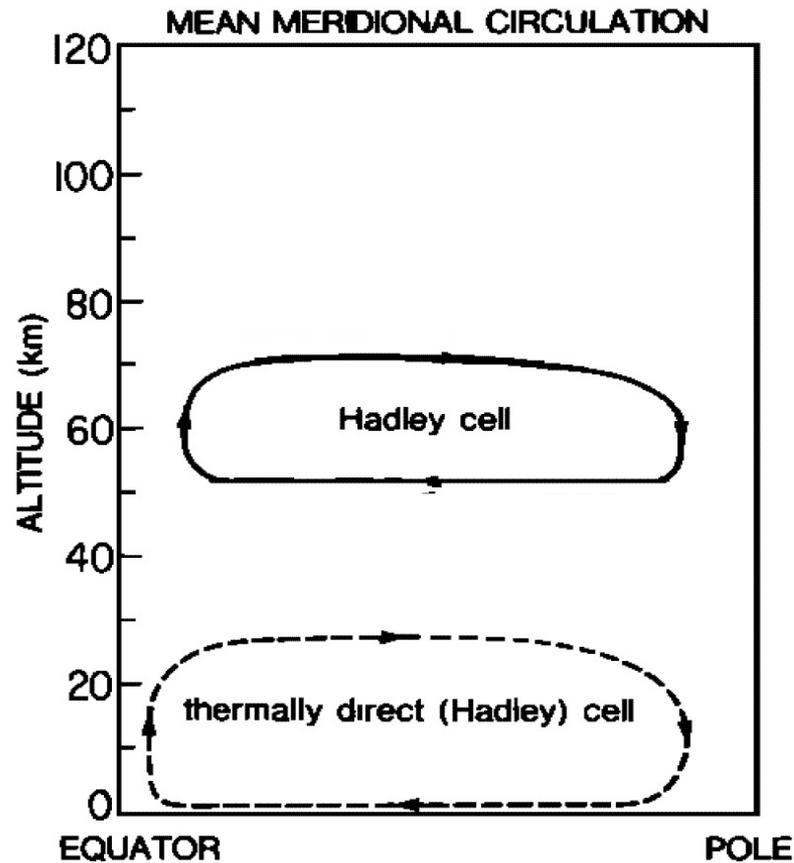
太陽と金星を結ぶ
直線に対して軸対称
な循環



昼側で暖められた
空気が上昇

夜側で冷やされた
空気が下降

子午面循環の予想図



温度場を球関数で表現すると

- 温度場(太陽直下点を北極とする座標系) =
$$c_1 P_1^0(\theta') + c_2 P_2^0(\theta') + c_3 P_3^0(\theta') + c_4 P_4^0(\theta') + \dots$$
- 温度場(普通の座標系) =
$$c_{11} P_1^1(\theta) e^{i\phi} + \left(c_{20} P_2^0(\theta) + c_{22} P_2^2(\theta) e^{2i\phi} \right) +$$

$$\left(c_{31} P_3^1(\theta) e^{i\phi} + c_{33} P_3^3(\theta) e^{3i\phi} \right) + \left(c_{40} P_4^0(\theta) + \dots \right) \dots$$
- 東西平均した温度場 = $c_{20} P_2^0(\theta) + c_{40} P_4^0(\theta) + \dots$