

金星GCMで得られた 熱潮汐波の3次元構造

高木征弘 (京都産業大学理学部)

Email: takagi.masahiro@cc.kyoto-su.ac.jp

今日の予定

- 熱潮汐波
- 夜昼間対流
- 平均子午面循環

金星大気中の熱潮汐波

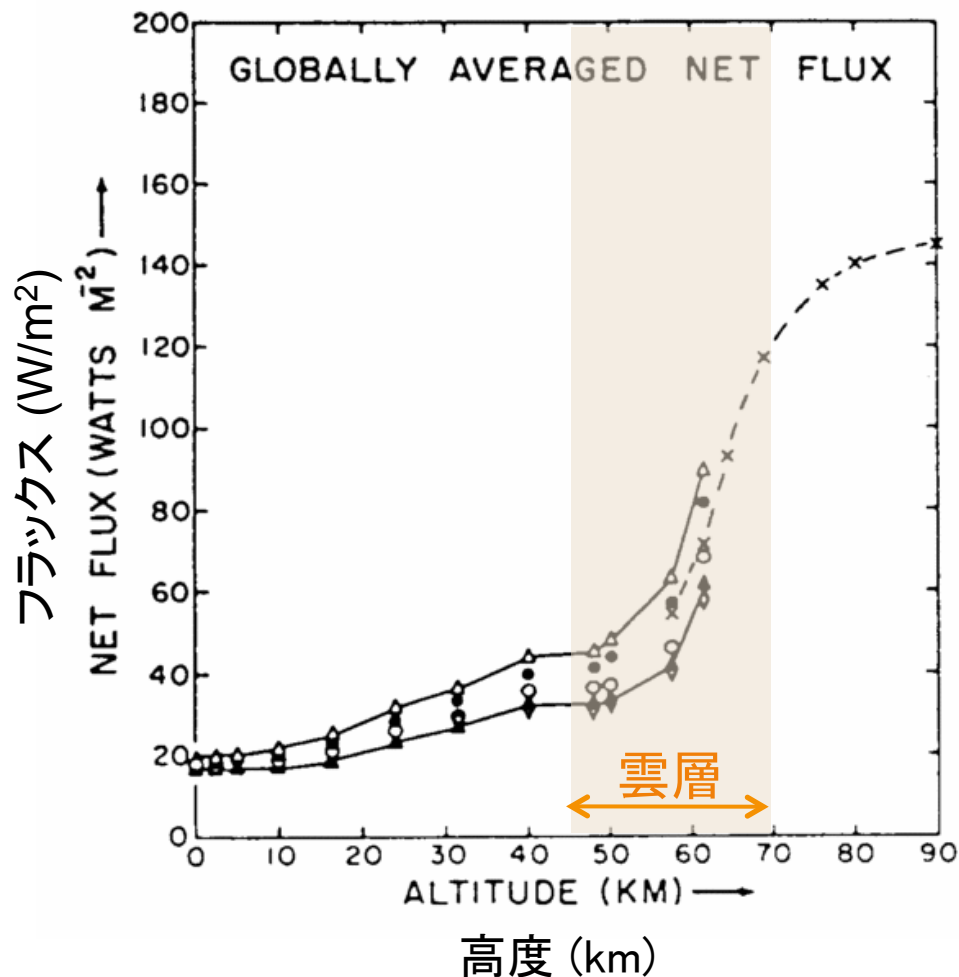
- 金星大気中では太陽光の6–7割が雲層高度（45–70 km）で吸収されるため、それによって励起される熱潮汐波（強制重力波）はもっとも重要な大気波動のひとつであると考えられている。
- 金星の大気スーパーローテーションは熱潮汐波によって維持されるという研究結果も報告されている（Newman and Leovy 1992; Takagi and Matsuda 2007）。
- しかしながら、金星熱潮汐波の空間構造はあまり調べられてこなかった。

金星の基本パラメータ

	金星	地球
赤道半径	6052 km	6378 km
重力加速度	8.90 m/s ²	9.80 m/s ²
公転周期	224日	365日
自転周期	-243日	1日
1太陽日	117日	1日
太陽放射量	2617 W/m ²	1370 W/m ²
アルベド	0.78	0.30
有効放射温度	224 K	255 K
大気組成	CO ₂ (98%), N ₂	N ₂ , O ₂
地表気圧	92 bar	1 bar

金星大気中の太陽光吸収

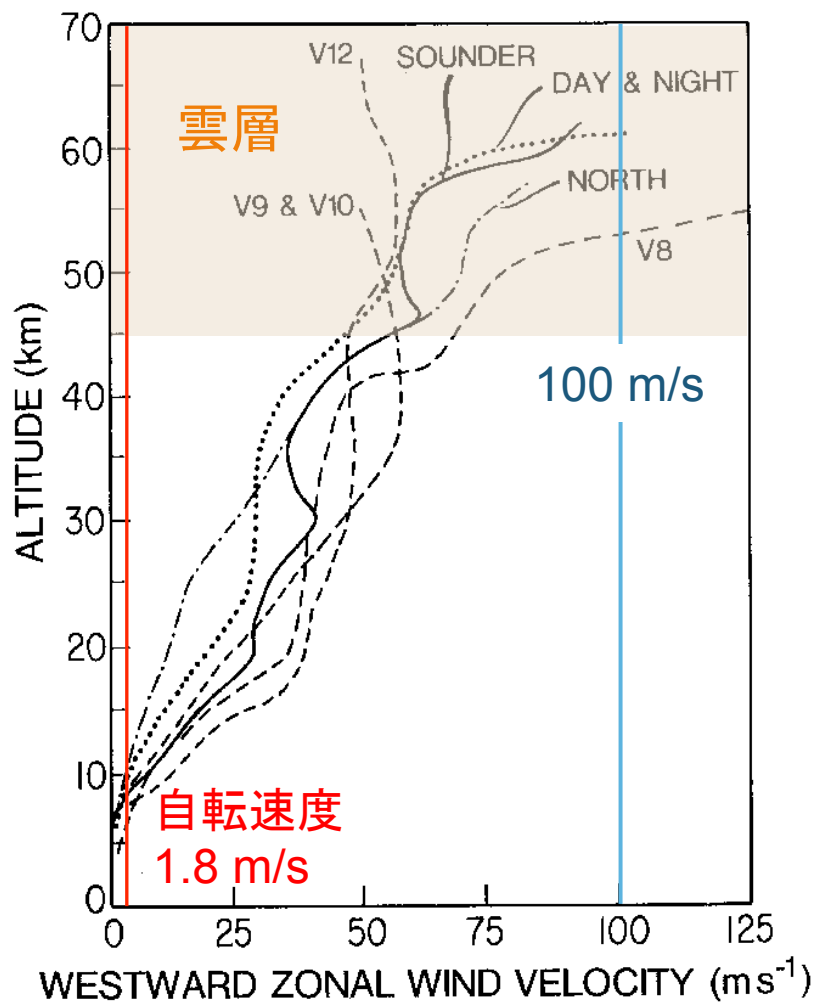
全球平均した正味の太陽光フラックス



- 太陽光の過半 (約60%) が雲層 (45–70 km) で吸収される
- もや層 (70–80 km) での吸収もかなり多い (大気密度が小さいので、加熱率 K/s が大きくなる)
- 地面に到達する太陽光は 17 W/m^2 (12%) 程度 (温室効果には不利)

金星では太陽エネルギーの大部分が上層大気で吸収され、大気運動が作られる。

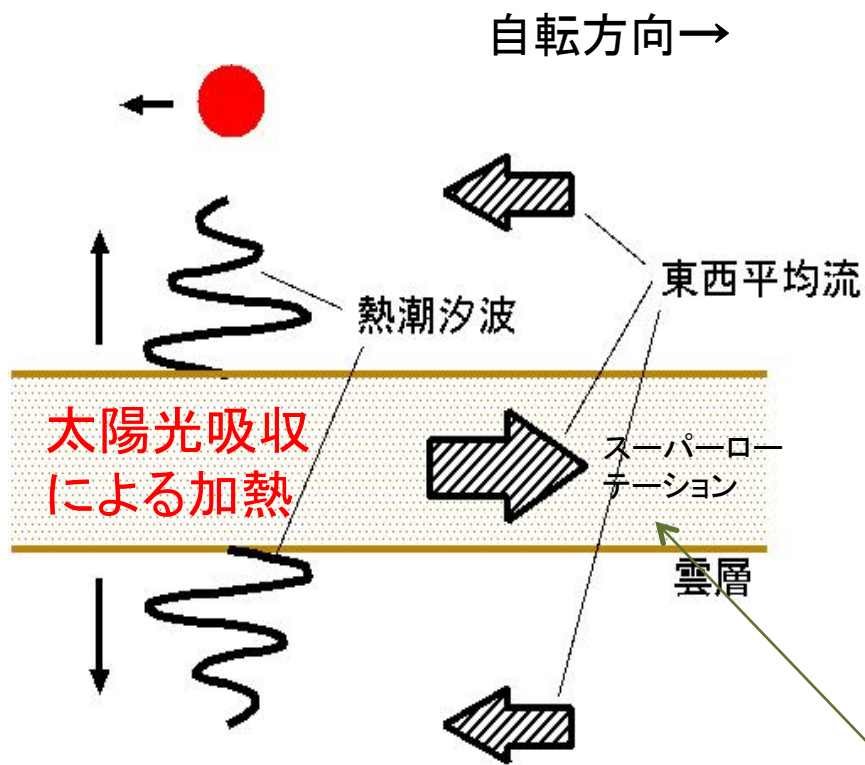
金星大気スーパーローテーション



Schubert et al. (1980)

- 自転と同方向の東西風が全球的に卓越(大気スーパーローテーション)
- 風速は高さとともに増大
 - 高度 70 km で ~100 m/s
 - 回転周期: 約4日
 - 自転速度の約60倍
- 緯度分布は剛体回転に近い
 - 雲頂では低緯度が等速分布
- 雲層より上 (> 70 km) では高さとともに減少
- 時空間変動も?

熱潮汐波による平均東西流生成

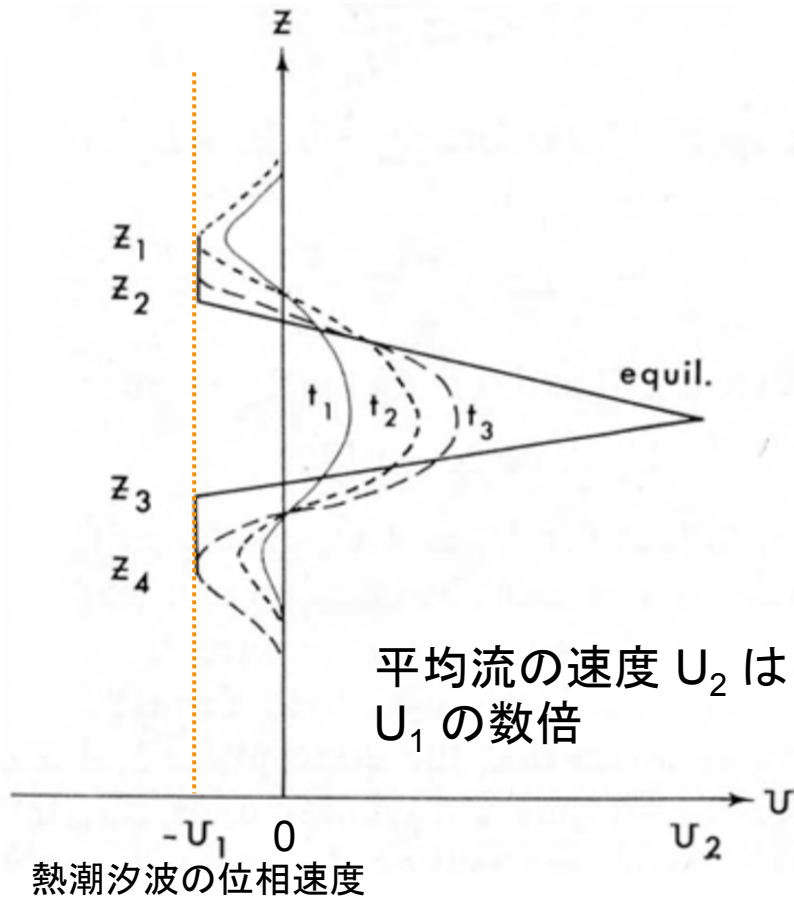


熱潮汐波は波の位相速度と同じ方向の運動量を伴う (Fels and Lindzen 1974)

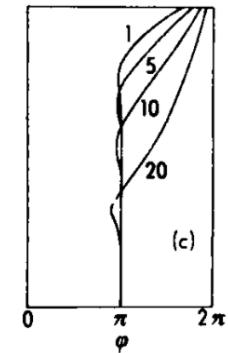
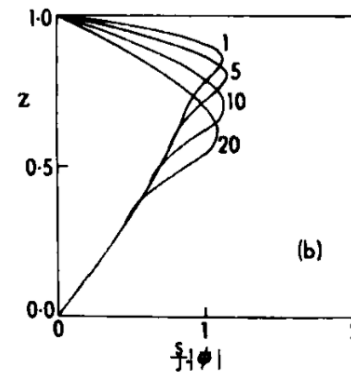
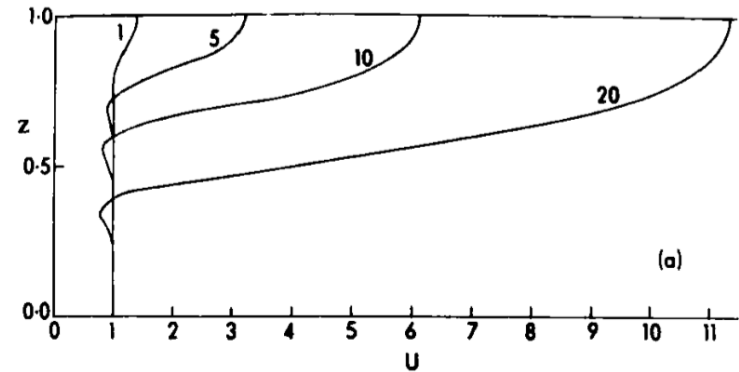
• 熱潮汐波とは…

- 太陽加熱によって励起される大気中の波(重力波)
- 地上からみると, 太陽と同じ位相速度で東西方向に伝播
- 東西波数1の波=一日潮
- 東西波数2の波=半日潮
- 雲層高度での太陽光吸収により, **金星大気中では熱潮汐波が強く励起される**
- 熱潮汐波は運動量を運ぶ(波に伴う運動量)
- 波が励起される領域(雲層)では **波の位相速度と逆方向(=自転の方向)の平均東西流**が作られる

熱潮汐波による平均流生成



Fels and Lindzen (1974)

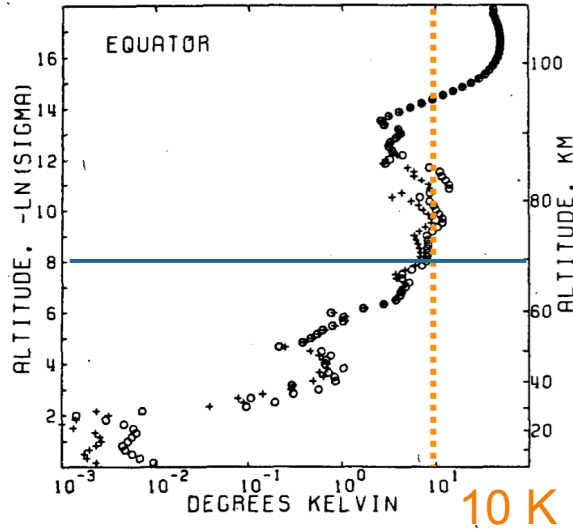


Plumb (1975)

熱潮汐波の構造 (球面上線型モデル)

一日潮の T'

DIURNAL AMPLITUDE OF T

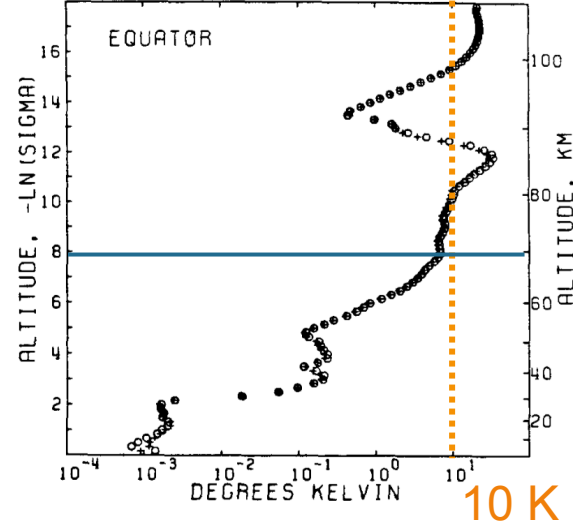


70 km

10 K

半日潮の T'

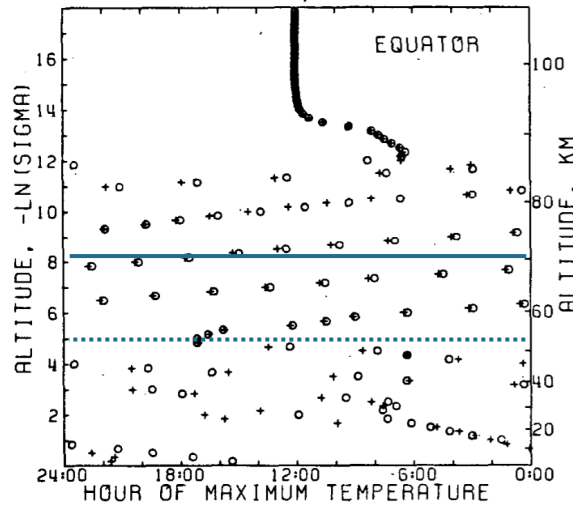
SEMI-DIURNAL AMPLITUDE OF T



70 km

10 K

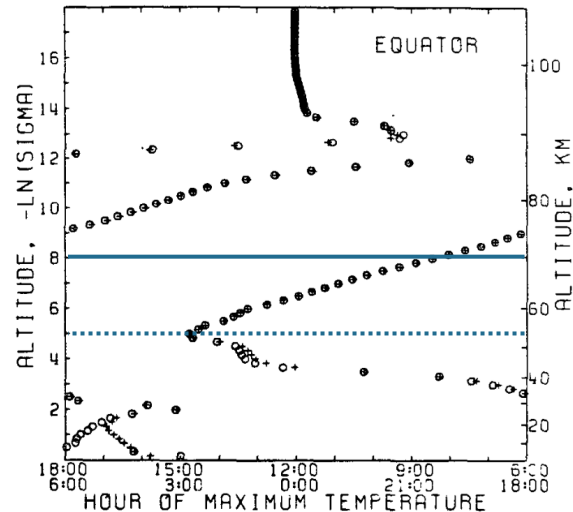
DIURNAL PHASE OF T



70 km

53 km

SEMI-DIURNAL PHASE OF T



λ_z : ~30 km

鉛直波長
 λ_z : ~6 km

一日潮の南北構造 (温度偏差)

実線: モデル
点線: PVO観測

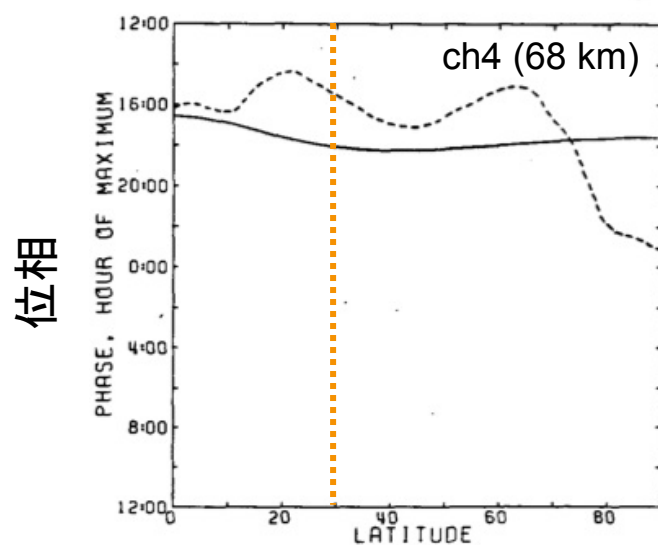
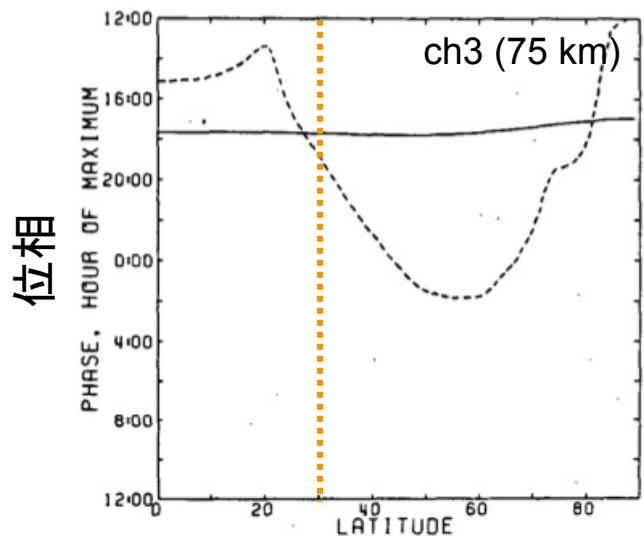
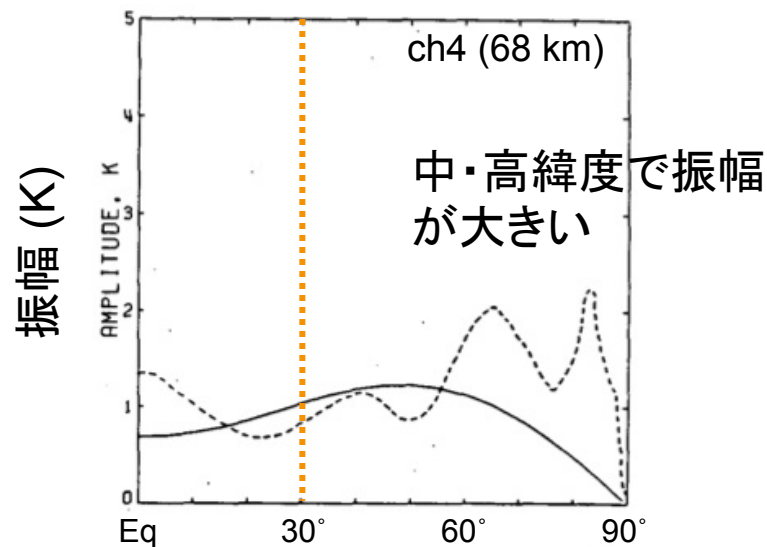
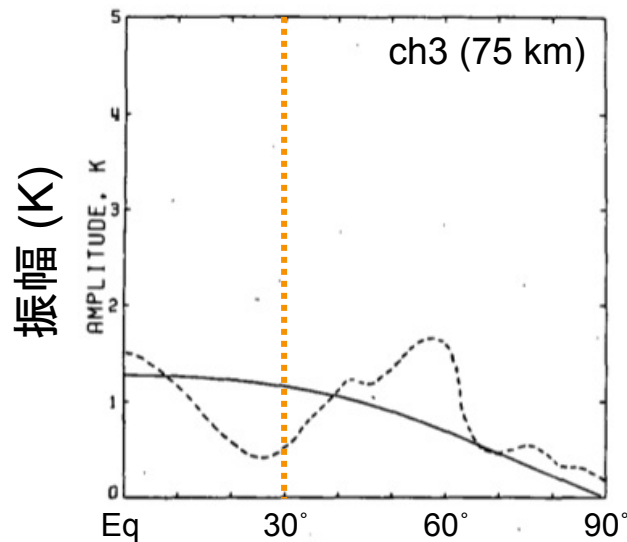


FIG. 12. As in Fig. 11 but for OIR channel 3.

FIG. 13. As in Fig. 11 but for OIR channel 4.

半日潮の南北構造(温度偏差)

実線: モデル
点線: PVO観測

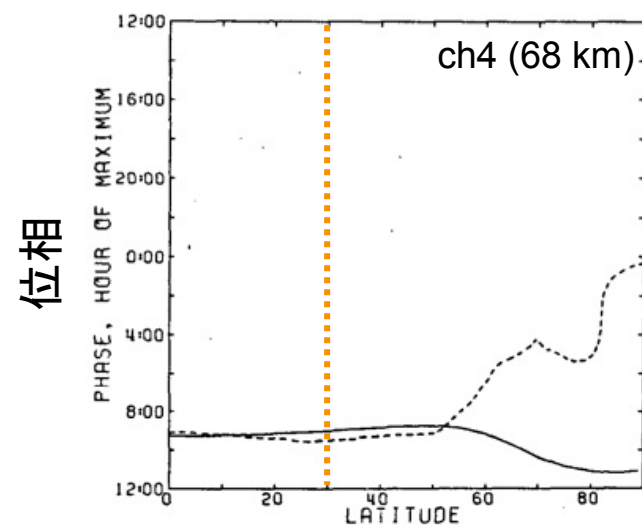
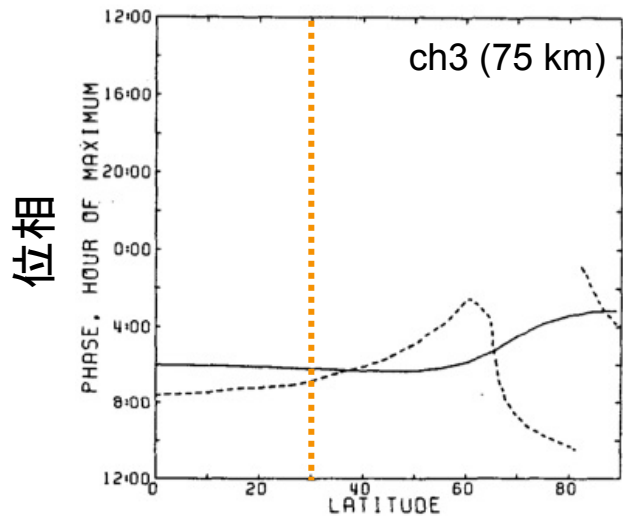
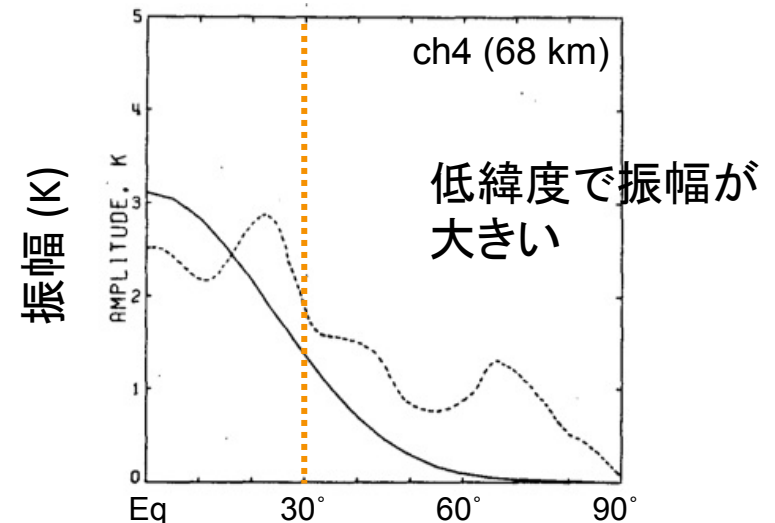
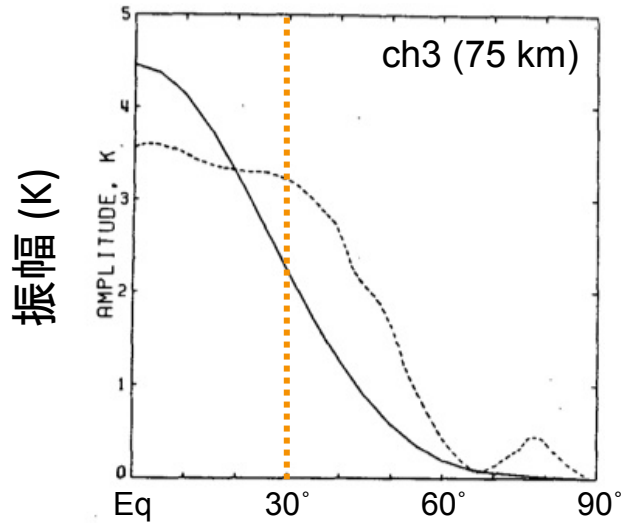
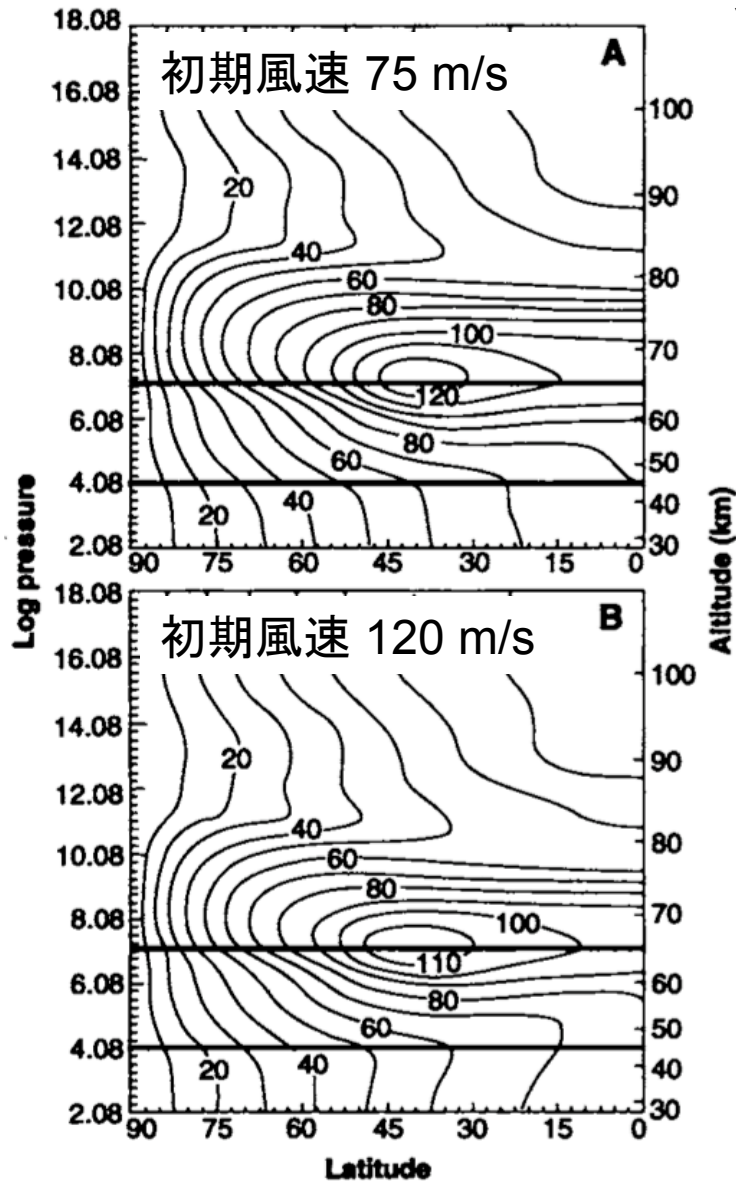


FIG. 8. As in Fig. 7 but for OIR channel 3.

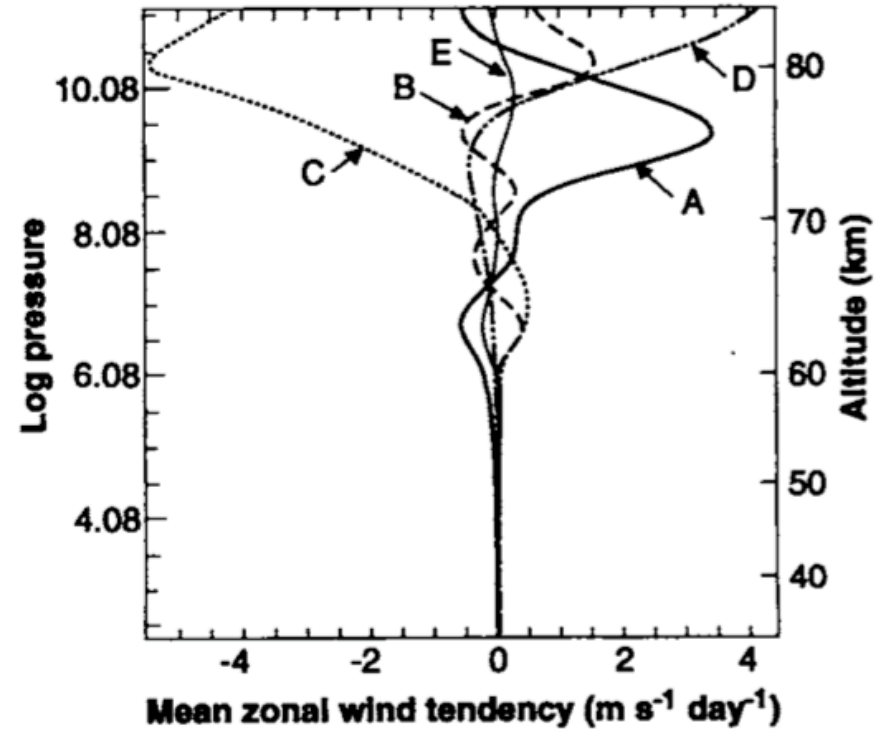
FIG. 9. As in Fig. 7 but for OIR channel 4.

熱潮汐波によって維持される平均東西風

東西波数 0, 1, 2 のみを含む弱非線型モデル

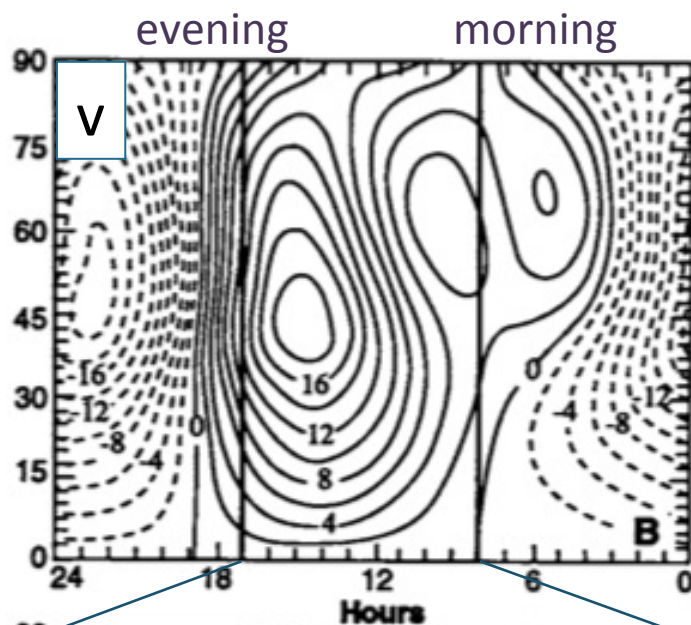
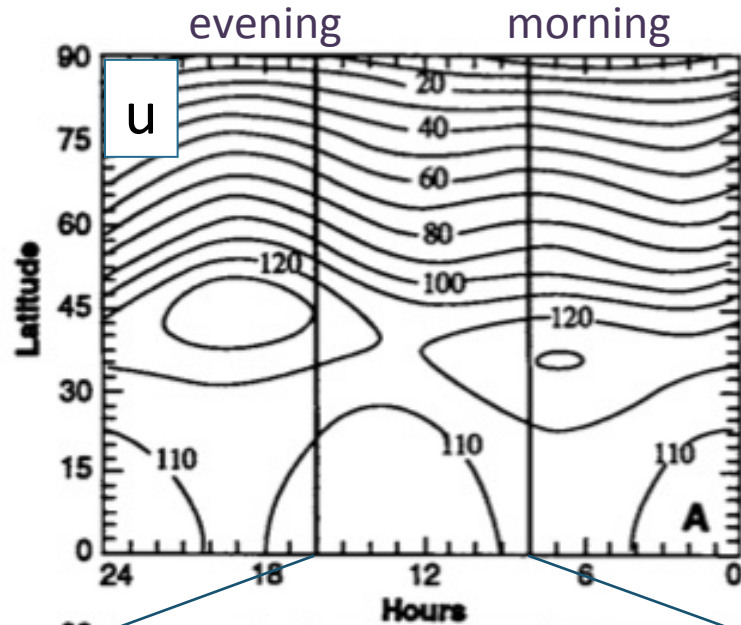


東西風の加速・減速

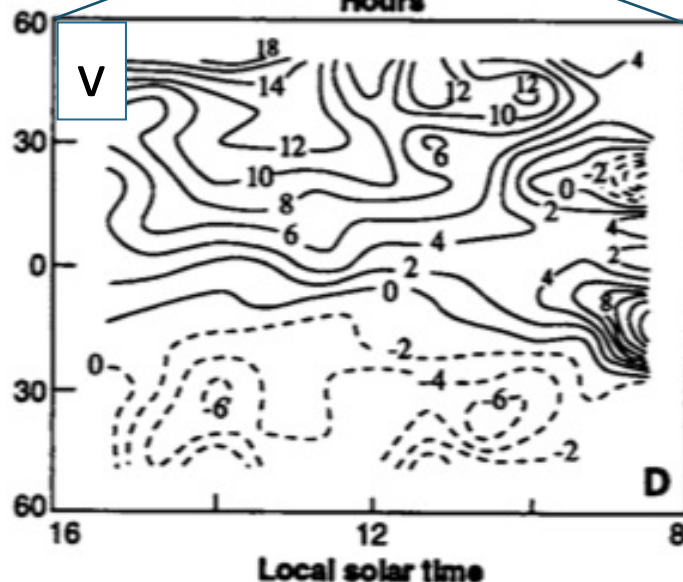
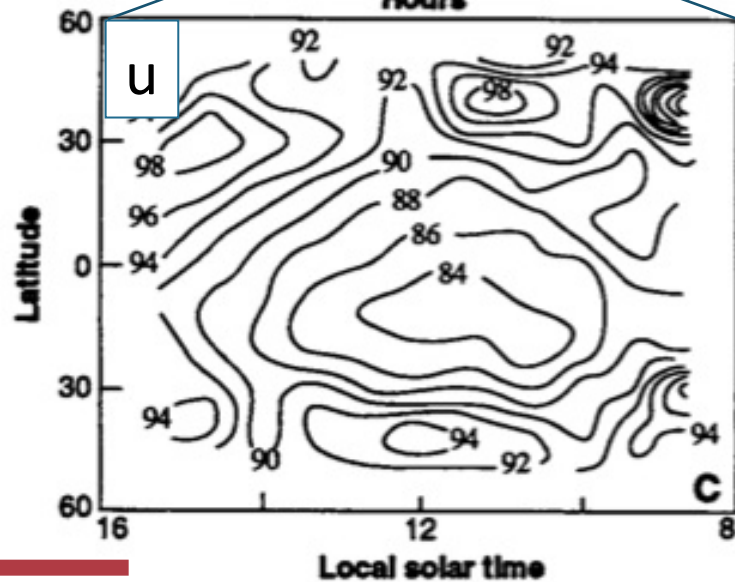


A: 平均鉛直流による移流, B: 一日潮, C: 半日潮, D: レーリー摩擦, E: 鉛直粘性

雲頂高度での風速分布



Model
output



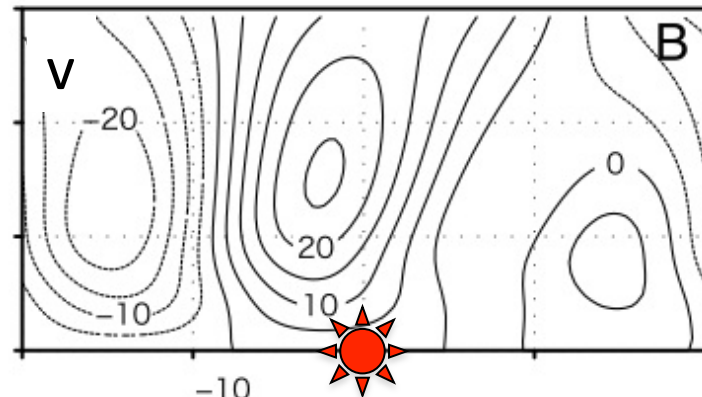
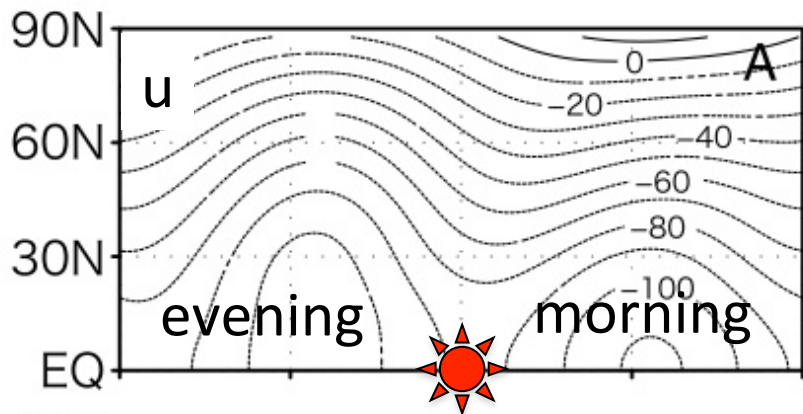
Cloud
tracked
wind

←
planet rotation

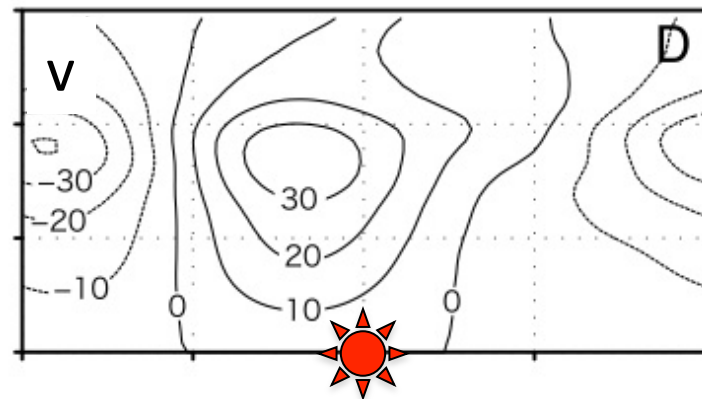
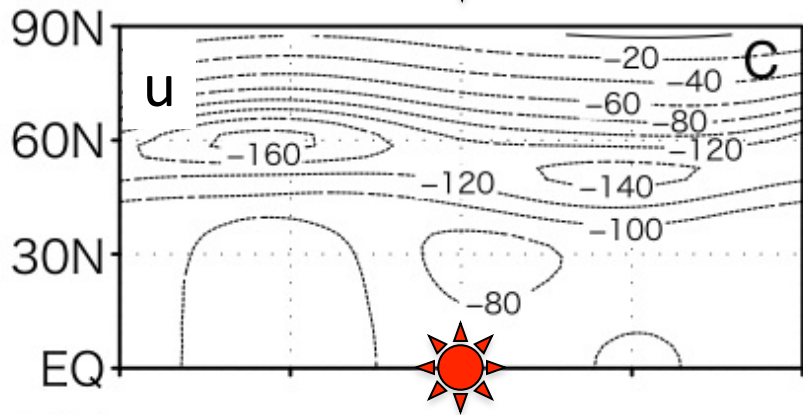


線型モデルで得られた雲頂水平風速

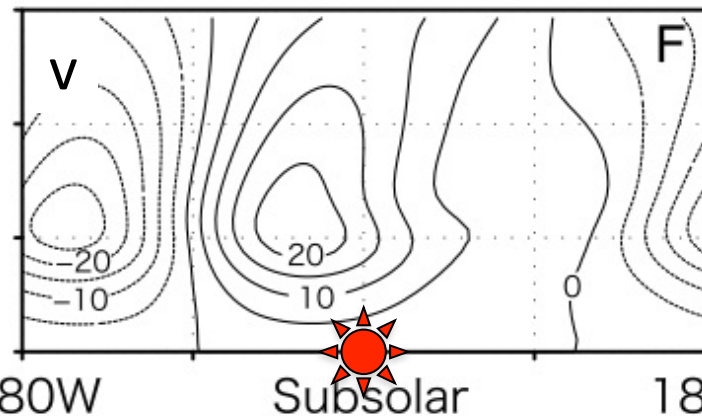
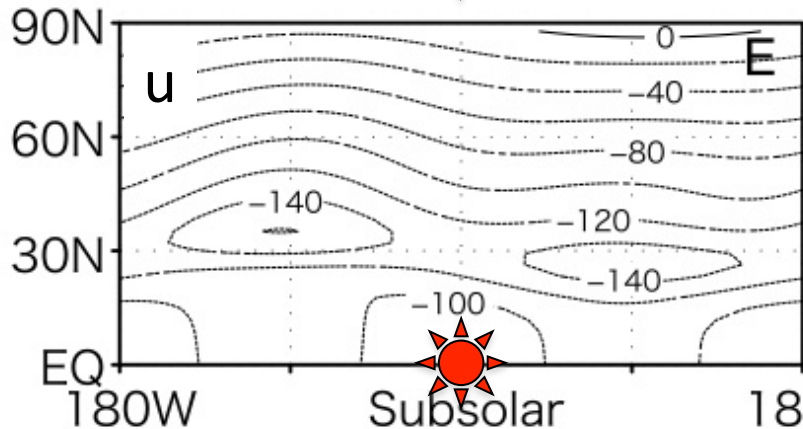
Takagi and Matsuda (2005)



Basic field:
Solid body rotation

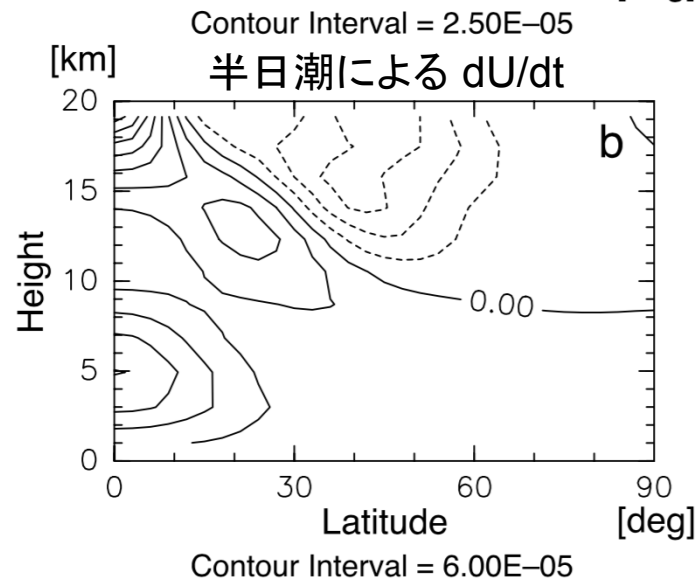
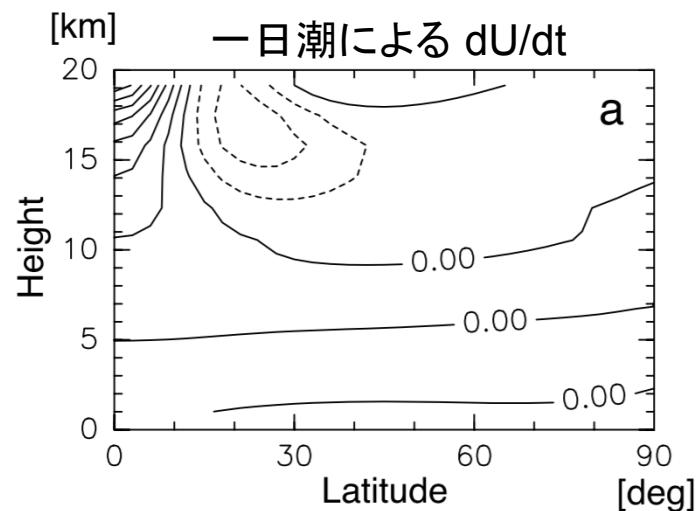
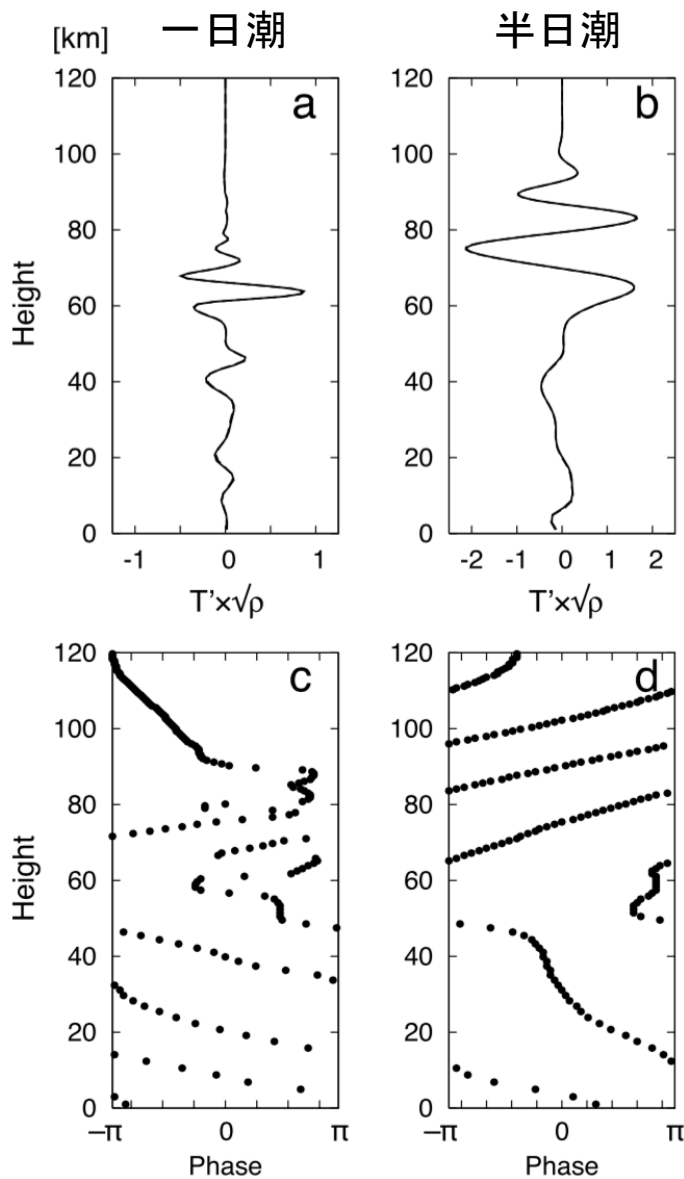


Basic field:
Jets at 60N



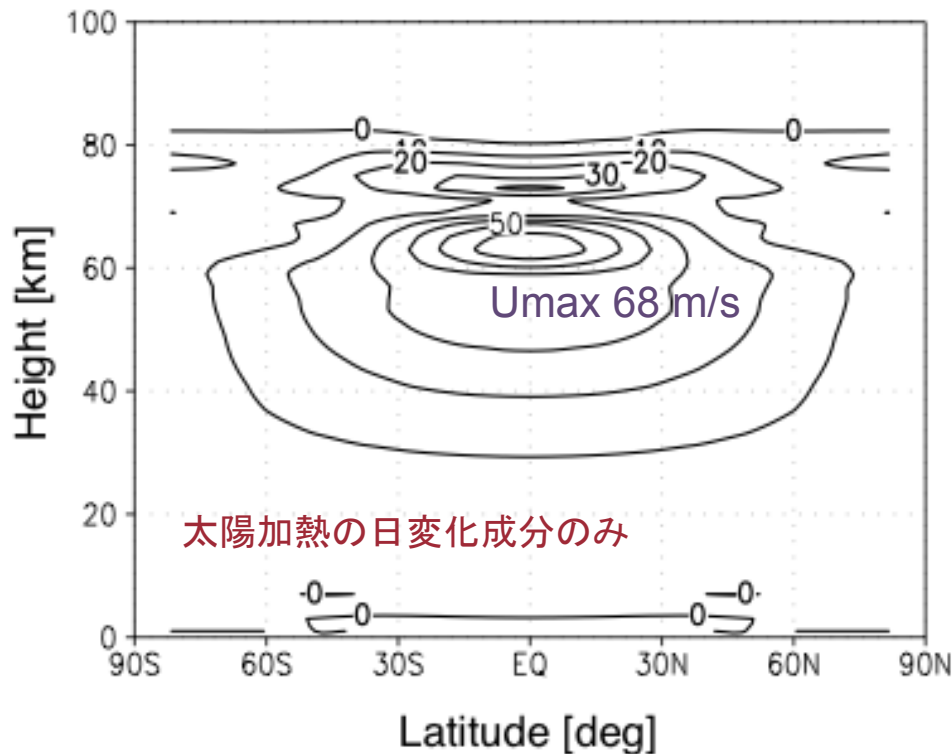
Basic field:
Jets at 30N

熱潮汐波の鉛直伝播と運動量輸送

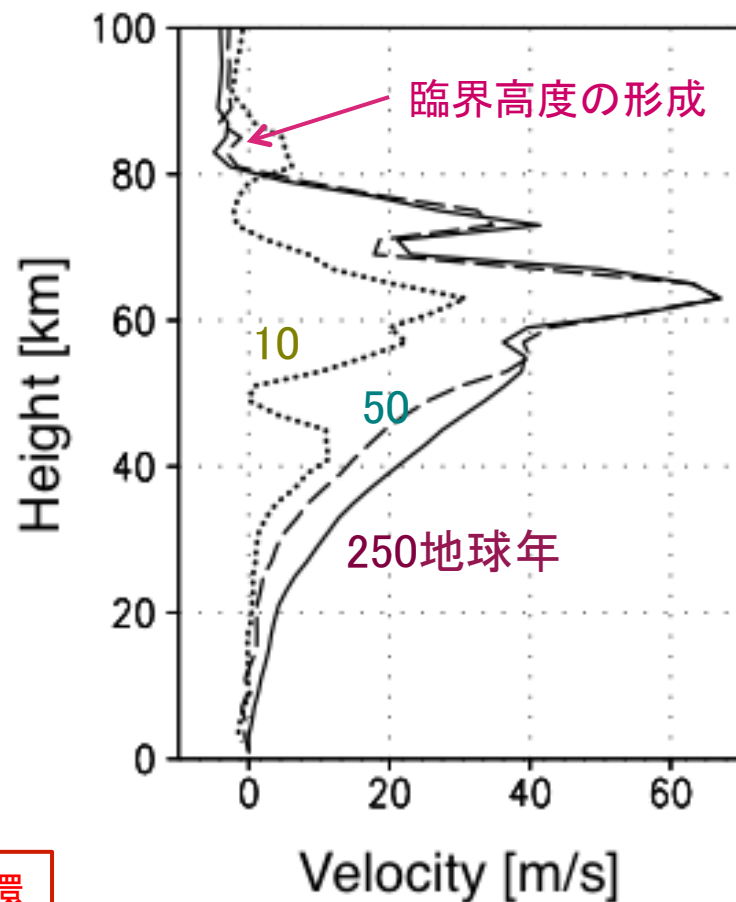


GCM による熱潮汐波メカニズムの検証

平均東西流 (m/s) の緯度-高度分布
(積分開始から250地球年目)



赤道での平均東西流の時間変化



大気スーパーローテーションはできたが、**子午面循環**の効果を無視している。緯度分布が顕著な赤道ジェット型になっている点も非現実的。

予想された循環：夜昼間対流

金星の1太陽日：
～243地球日
自転効果(太陽の移動)は
無視できる, と考える

太陽と金星を結ぶ直線
に対して軸対称な循環



太陽

昼側

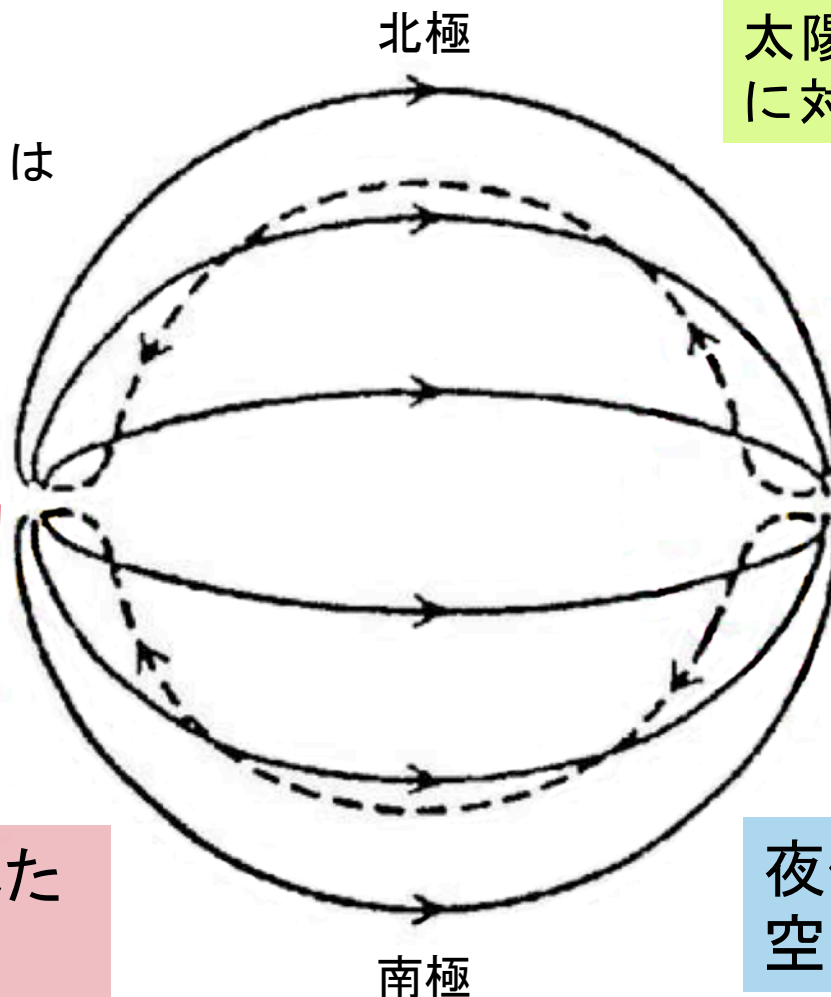
夜側

上昇流

下降流

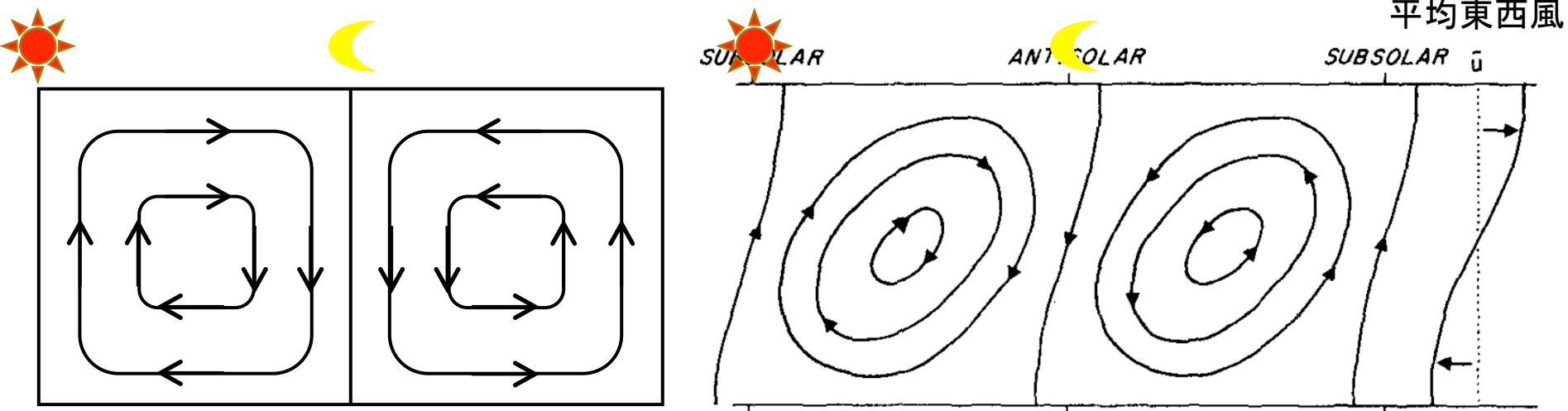
昼側で暖められた
空気が上昇

夜側で冷やされた
空気が下降



Thompson (1970) メカニズム

夜昼間対流の対流セルの傾きと鉛直シアを持つ平均流との相互作用による不安定。実際には温度場との相互作用が重要 (Takagi and Matsuda, 1999)。

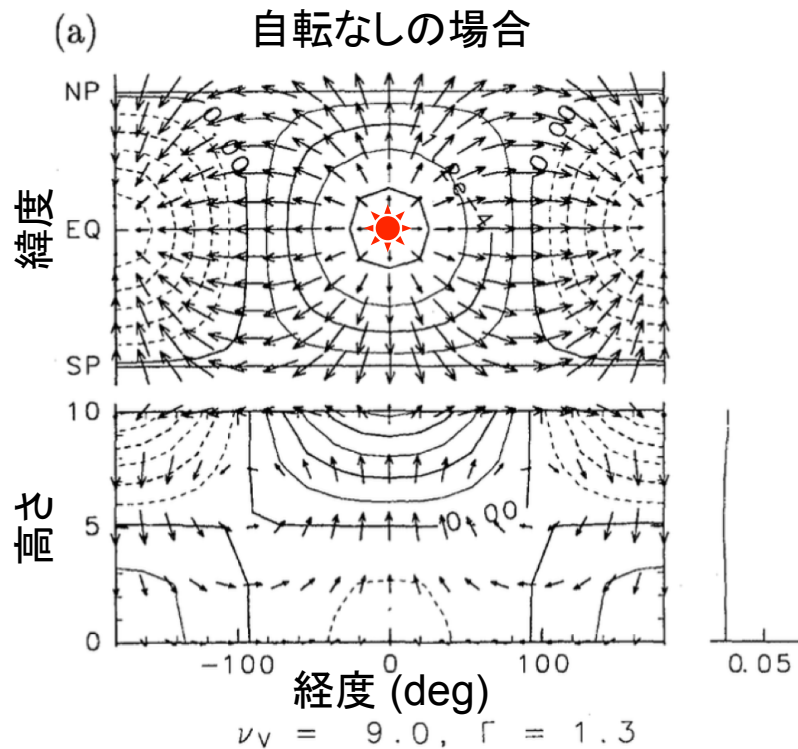


Thompson (1970)

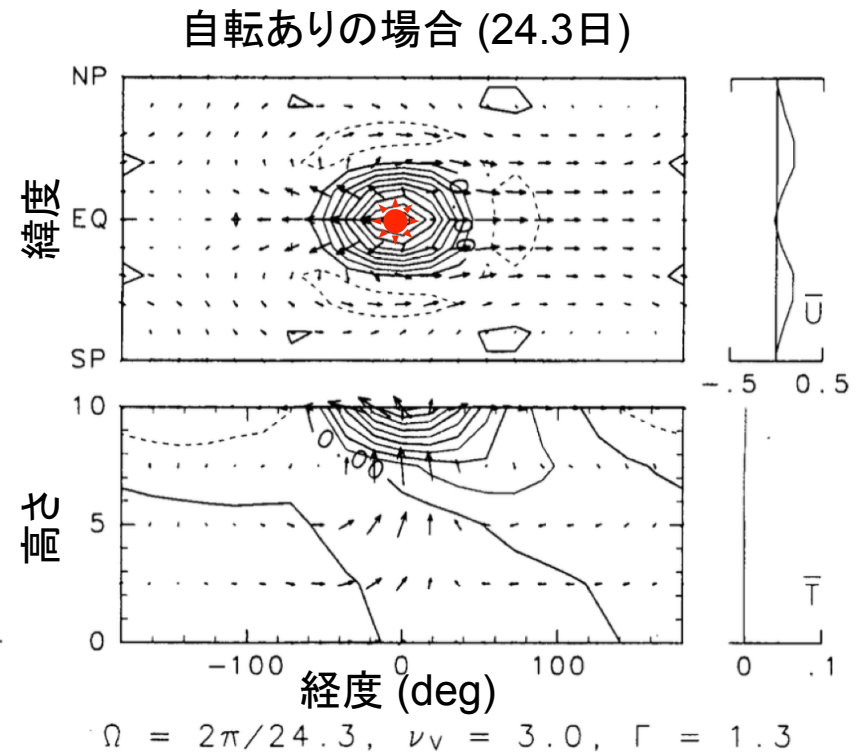
直立した夜昼間対流が不安定化し、平均東西風が作られる

3次元的な夜昼間対流の安定性

Thompson (1970) を三次元球面上に拡張し, 夜昼間対流の線型安定性を調査 → 安定



Takagi and Matsuda (1999)



Takagi and Matsuda (2000)

金星の子午面循環

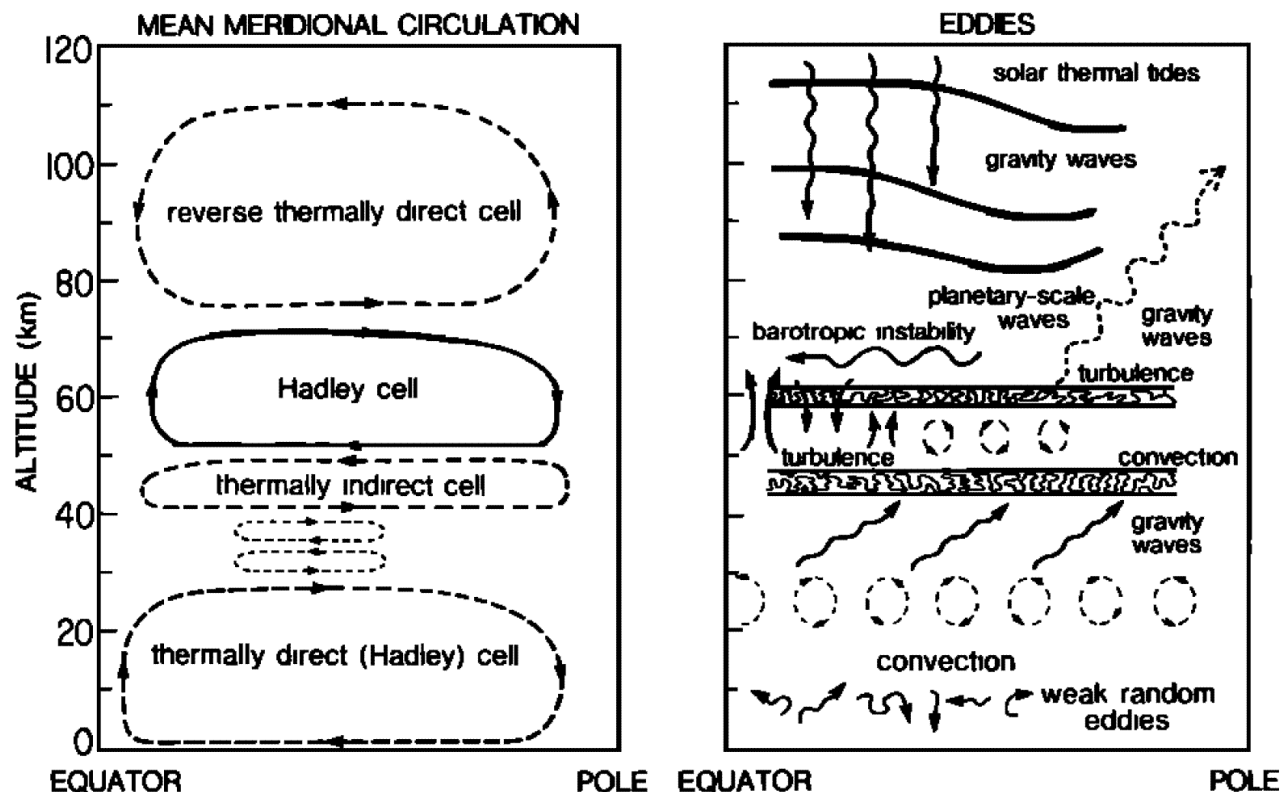


Fig. 24. Sketch summarizing ideas about Venus' mean meridional circulation and atmospheric eddy phenomena.

Schubert et al. (1980)

赤道から極に及ぶ子午面循環が鉛直方向にいくつか積み重なった構造(多重セル)が予想された。ただし、まだ観測的な裏付けはない。

地球の子午面循環 (南北方向の大気運動)

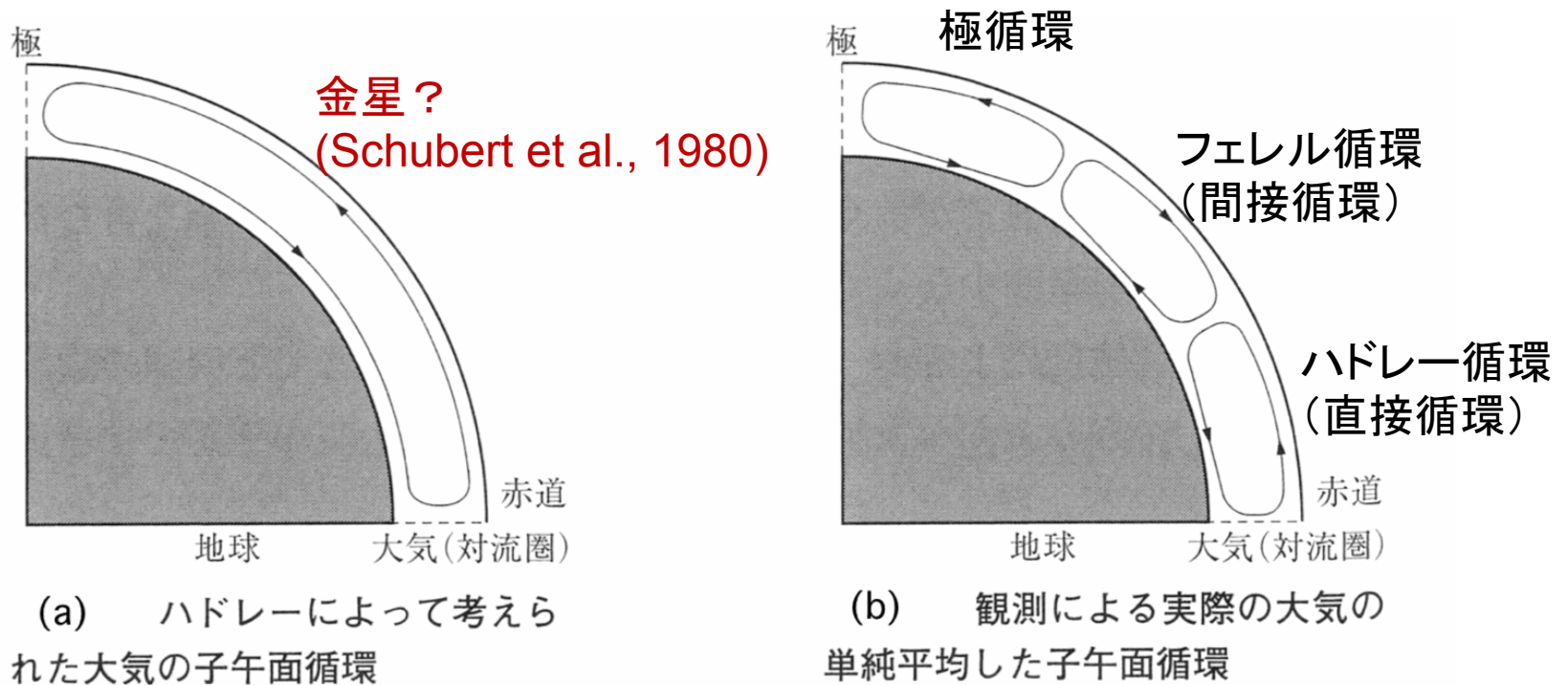
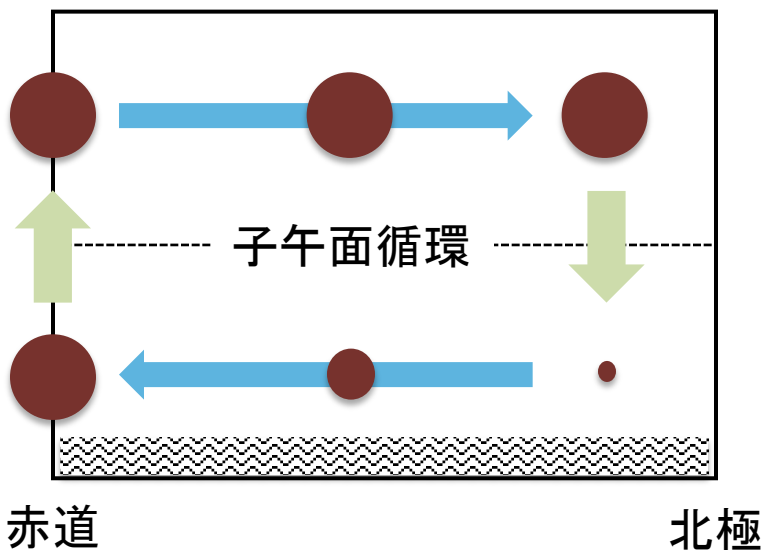


図 3.6 (a) ハドレーによって考えられた大気の子午面循環と、(b) 実際の大気の子午面循環の模式図。
(木村・新野 2010)

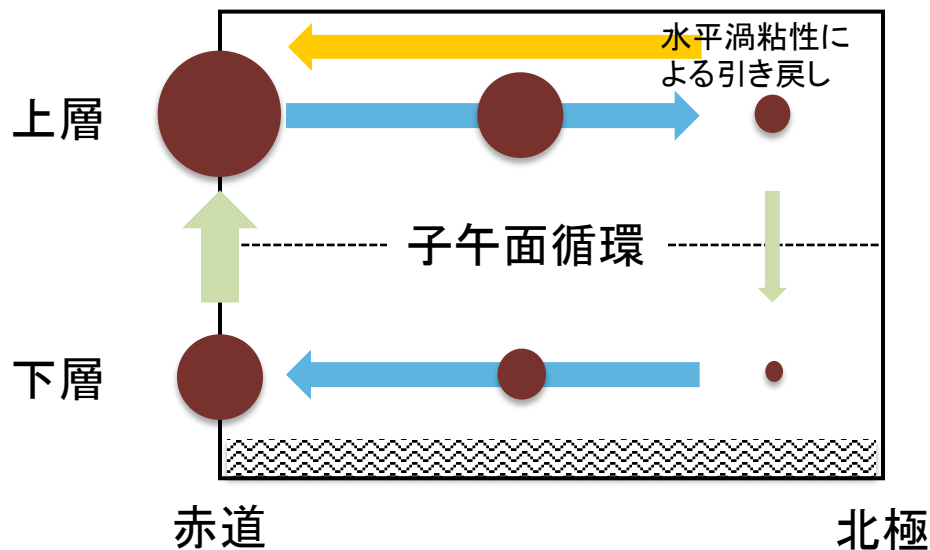
中緯度の偏西風中に生じる傾圧不安定波によってフェレル循環が作られる。

子午面循環メカニズムの模式図

大気の角運動量分布
(水平渦粘性なしの場合)



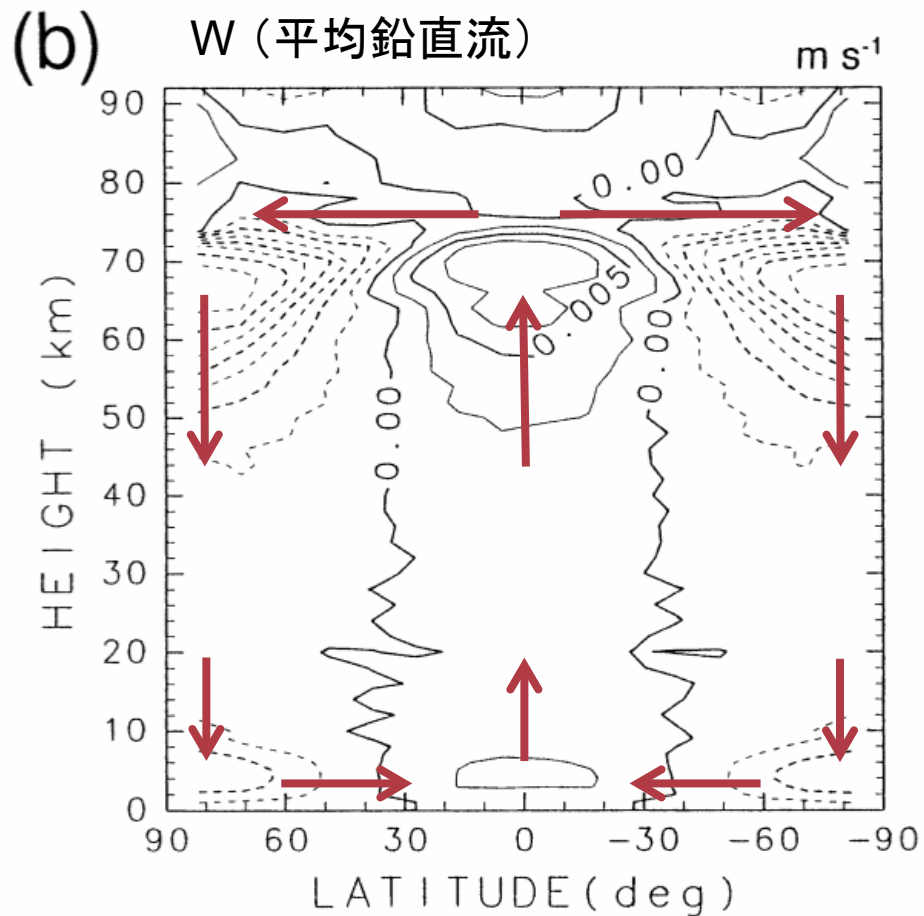
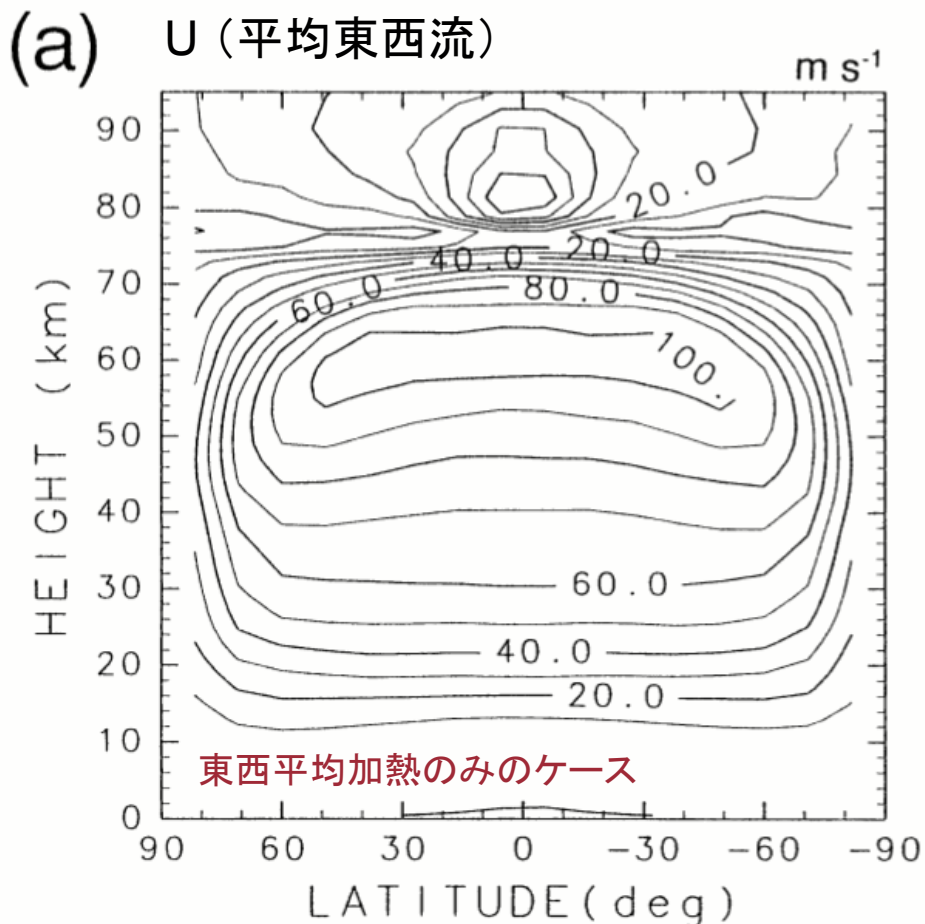
大気の角運動量分布
(水平渦粘性ありの場合)



- 下層の東西風分布は地面摩擦により剛体回転(等角速度分布)になる。
- 水平渦粘性がなければ上層での極向き輸送は角運動量を保存する。

- 水平渦粘性は角運動量を低緯度に輸送し, 上層の東西風分布を剛体回転(等角速度分布)に近づける。
- 高緯度での下向き輸送は, 低緯度での上向き輸送より小さくなる。
- 上層に角運動量が蓄積し, スーパーローテーションが作られる。

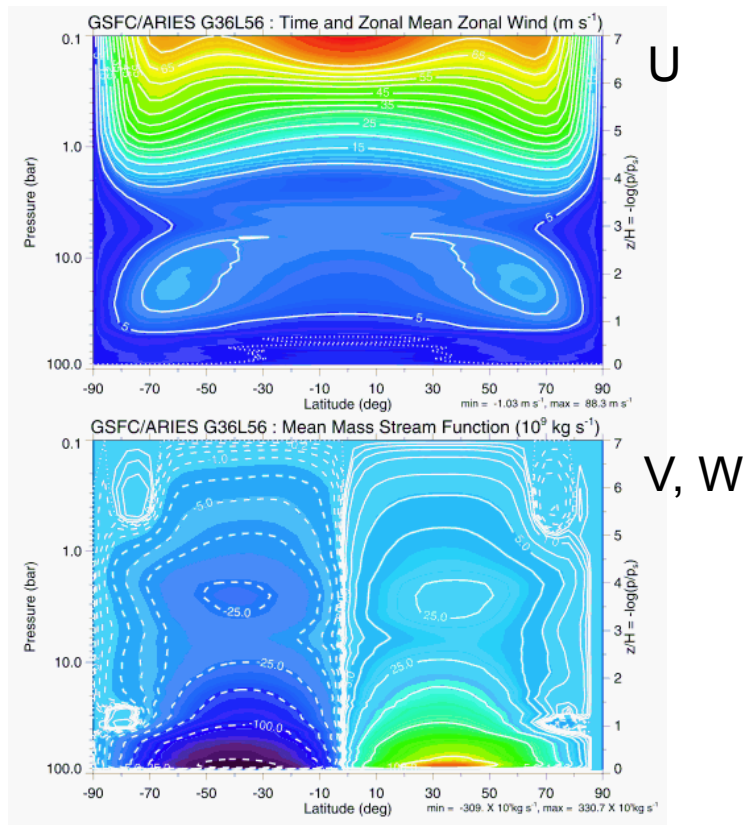
GCMによる子午面循環メカニズムの検証



地面から雲頂上端高度・赤道から極に達する1セルの子午面循環によって大気スーパーローテーションが生成・維持される。ただし、下層大気に非現実的に強い太陽加熱を与えていることに注意。

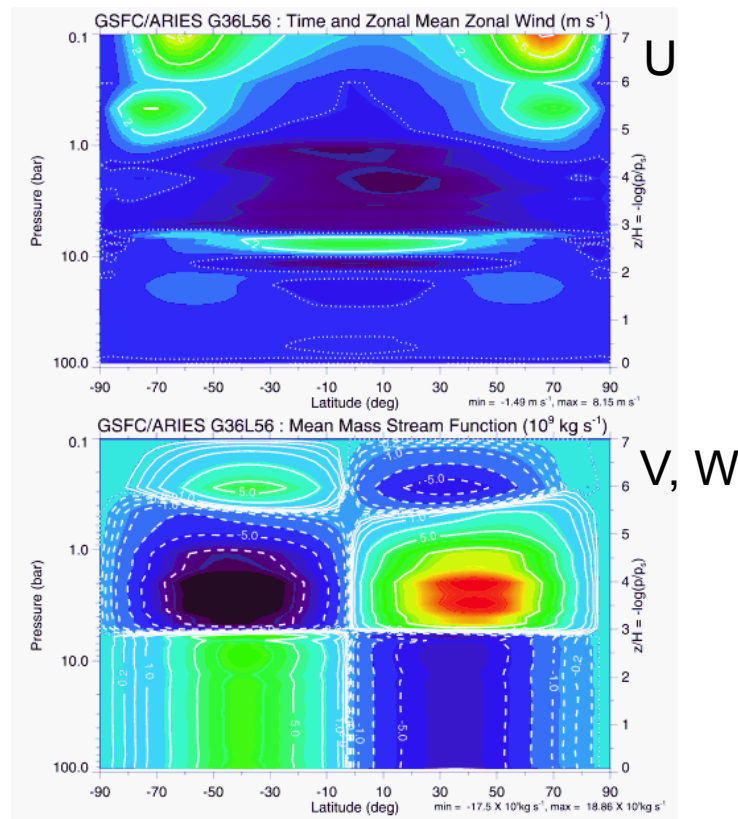
子午面循環メカニズムと太陽加熱強度

非現実的な強い太陽加熱



1セルの子午面循環
高速の大気スーパーローテーション

現実的な太陽加熱



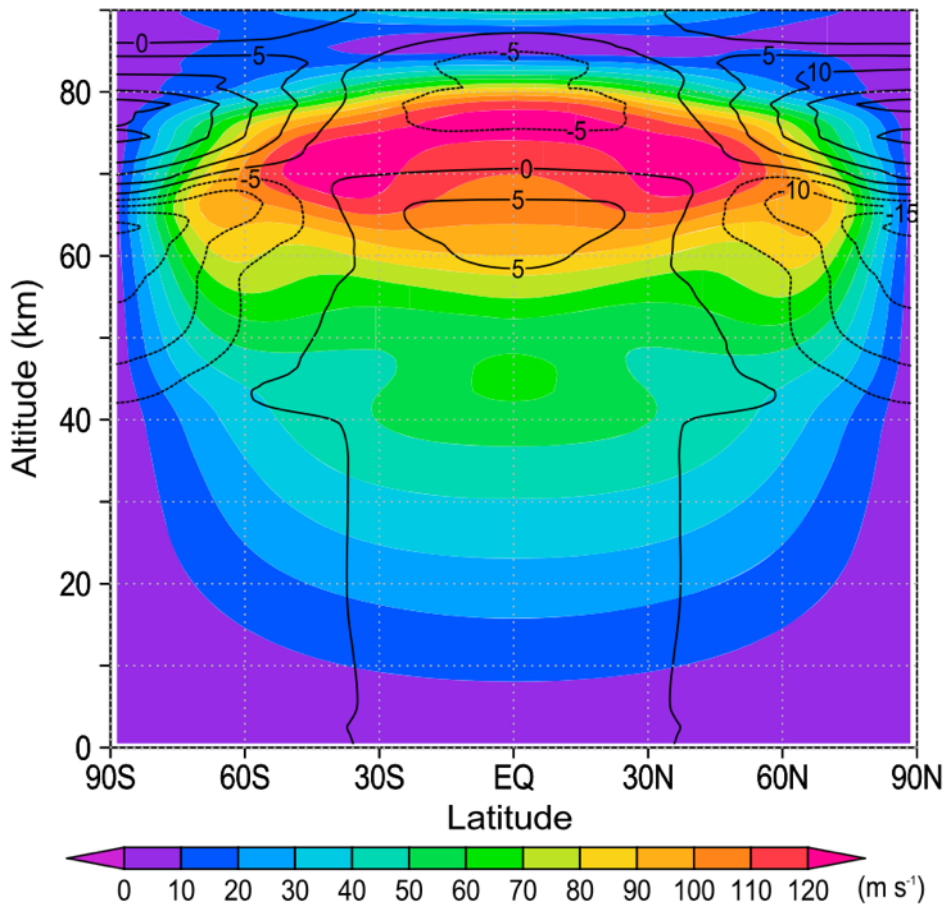
子午面循環は3セルに分裂
大気スーパーローテーションなし

数値モデル

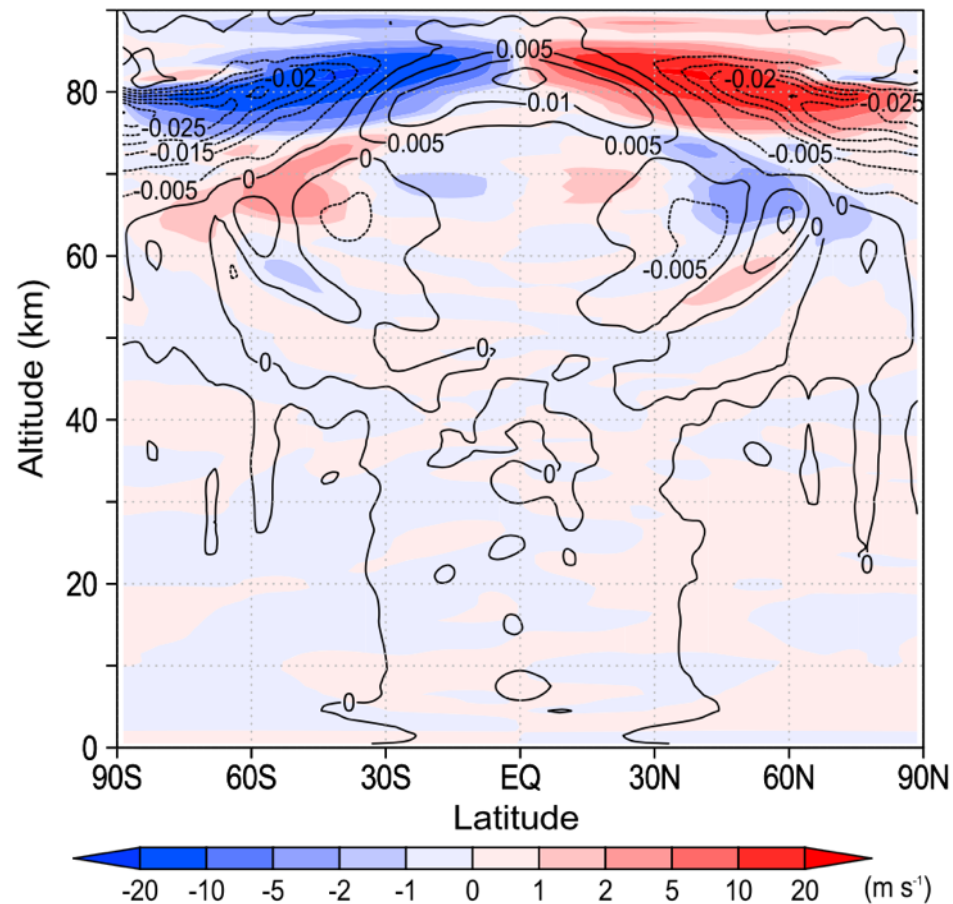
- GCM: AFES for Venus (Ohfuchi et al., 2004; Enomoto et al., 2008; Sugimoto et al., 2014a, b)
- 解像度: T63L120 (鉛直領域: 0–120 km)
- 太陽加熱: Tomasko et al. (1980)
 - 高度 80 km 以上での太陽加熱は無視
- 放射輸送過程はニュートン冷却:
 - 参照温度 T_{ref} の鉛直分布は観測に準拠
 - ただし, T_{ref} は水平一様
- 初期条件: 理想化したスーパーローテーションと, それにバランスする温度場を仮定
- 積分時間: 5地球年

東西平均場 (117日平均)

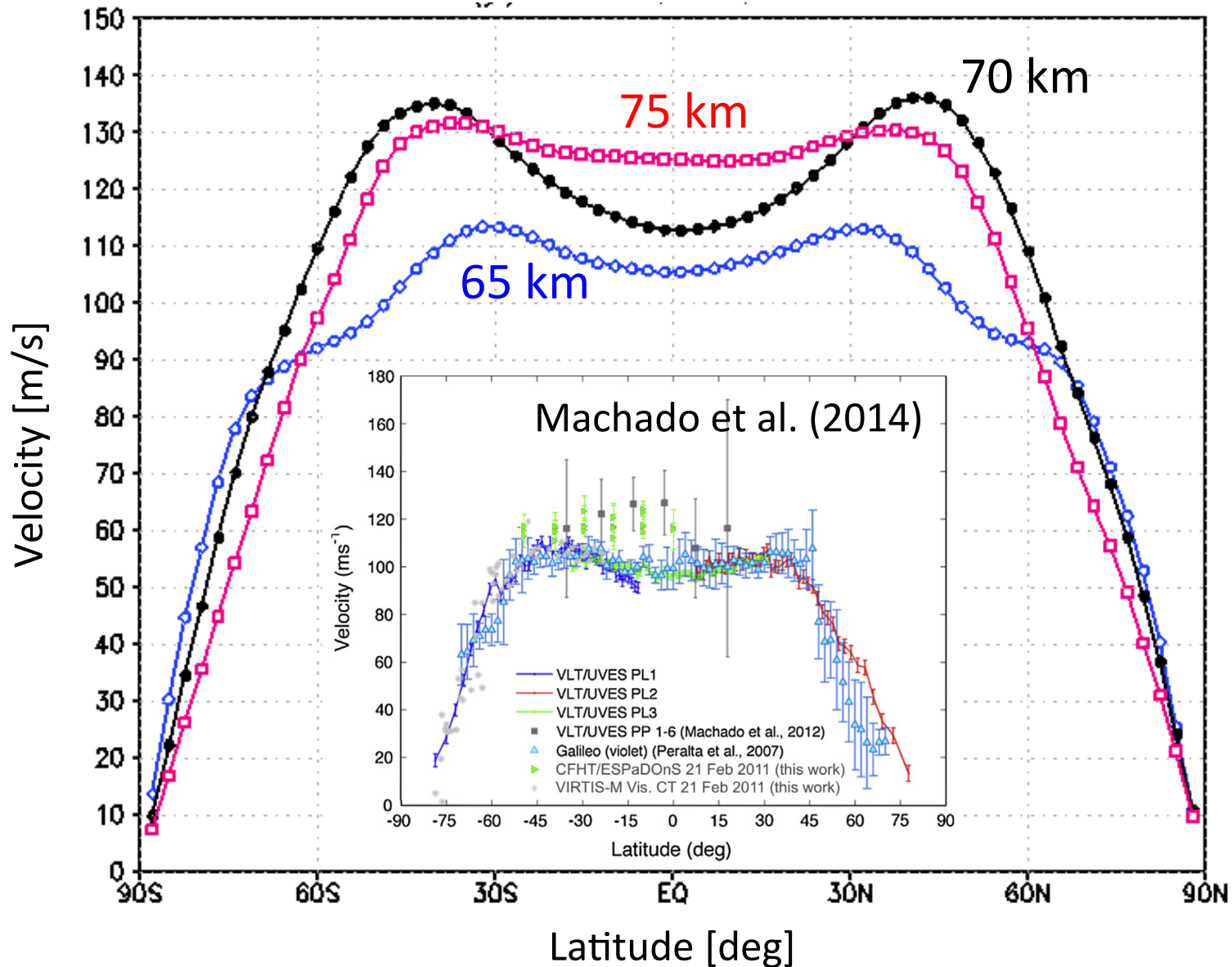
(a) U (color), T-T(z) (contour)



(b) V (color), W (contour)

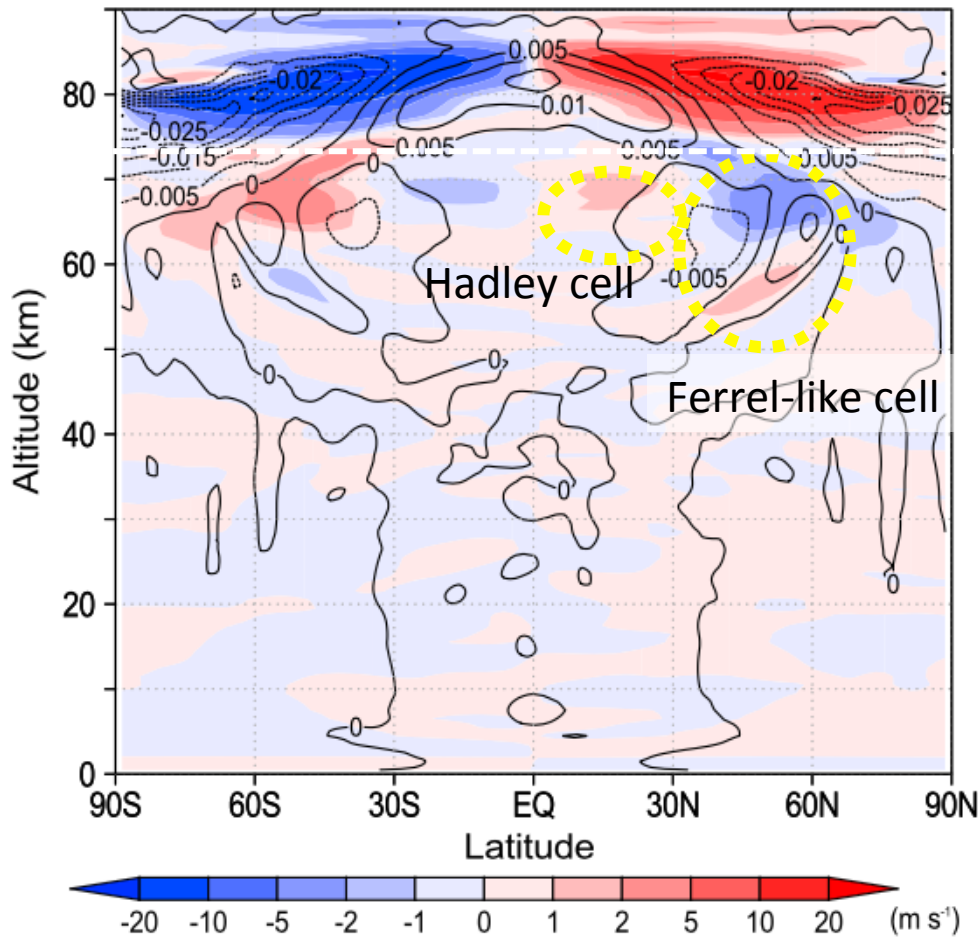


東西平均流の南北分布：観測との比較



雲層付近の平均子午面循環

(b) 東西平均した南北流と鉛直流



雲頂付近 (65–70 km)

- ハドレー循環(低緯度)とフェレル循環(中高緯度)が存在
- 従来の予想とは異なり, 地球的な子午面循環の構造
- ハドレー循環に伴う南北風速は1–2 m/s 程度

雲頂より上 (> 74 km)

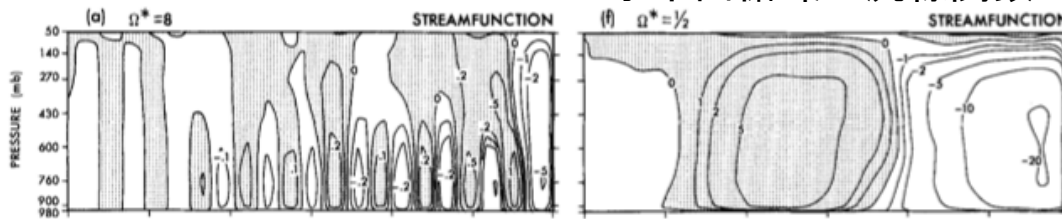
- 赤道から極に達するハドレー循環が存在
- 南北風速は 20–30 m/s

自転周期と子午面循環の構造

子午面循環の流線関数

いったんスーパーローテーションが成立すると、子午面循環が極まで届かない可能性。子午面循環メカニズムは作動するか？

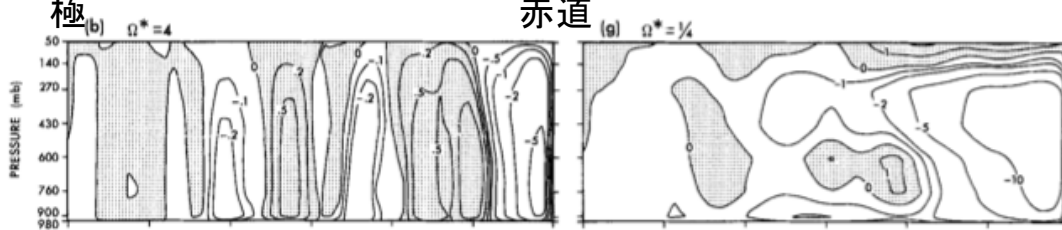
自転周期 1/8日



極

赤道

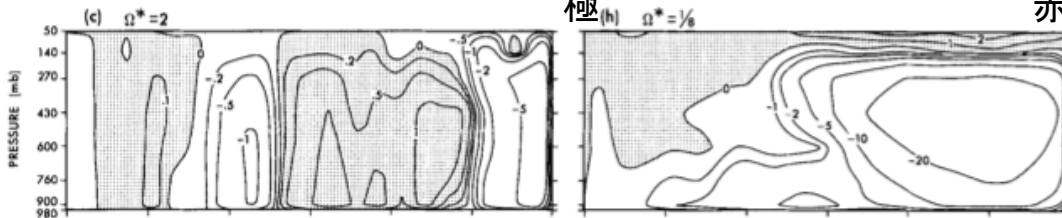
自転周期 4日
(金星上層)



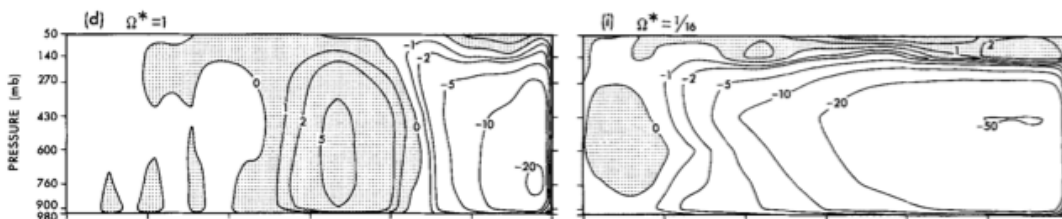
極

赤道

自転周期 1日
(地球)



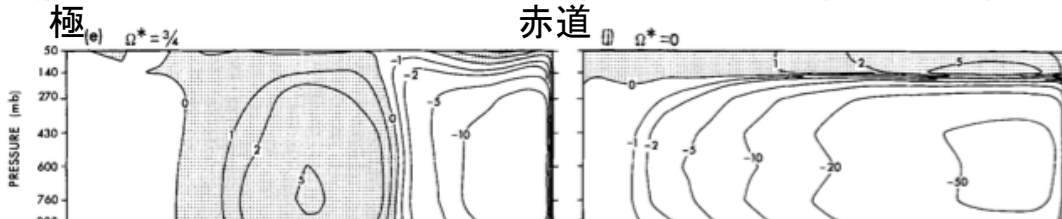
自転周期 16日
(金星下層)



極

赤道

自転なし

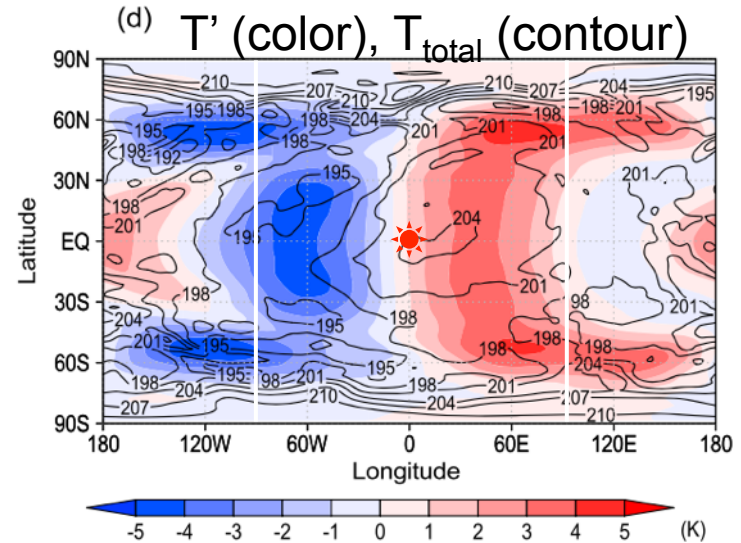
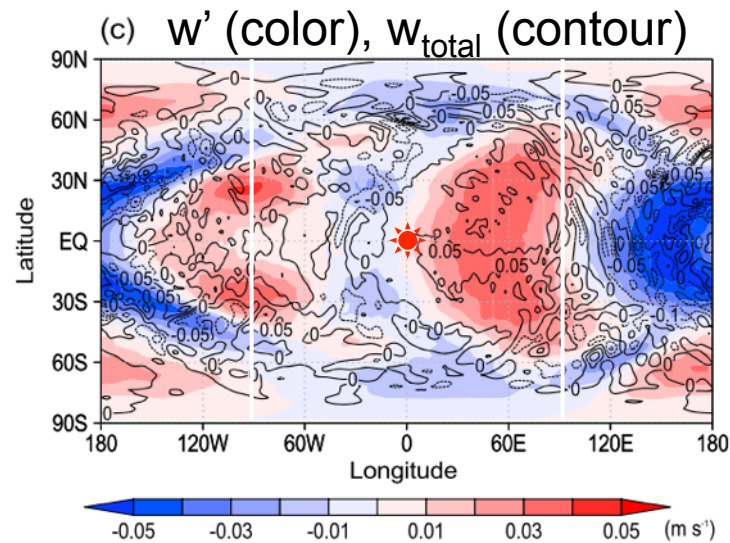
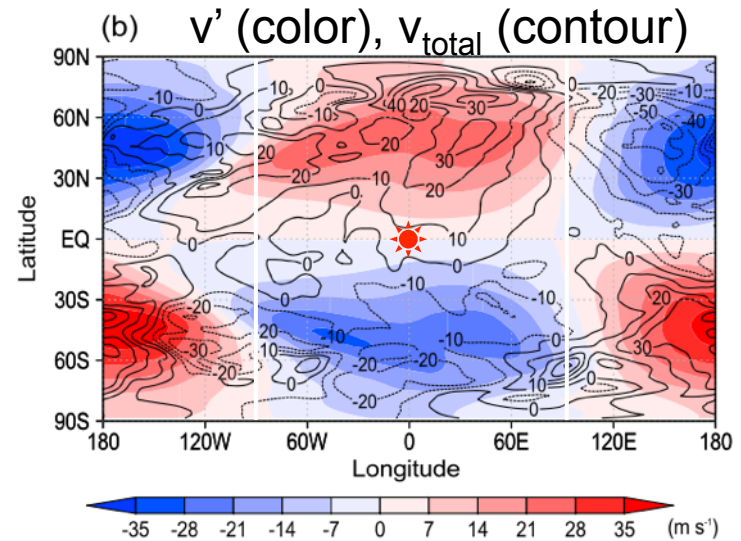
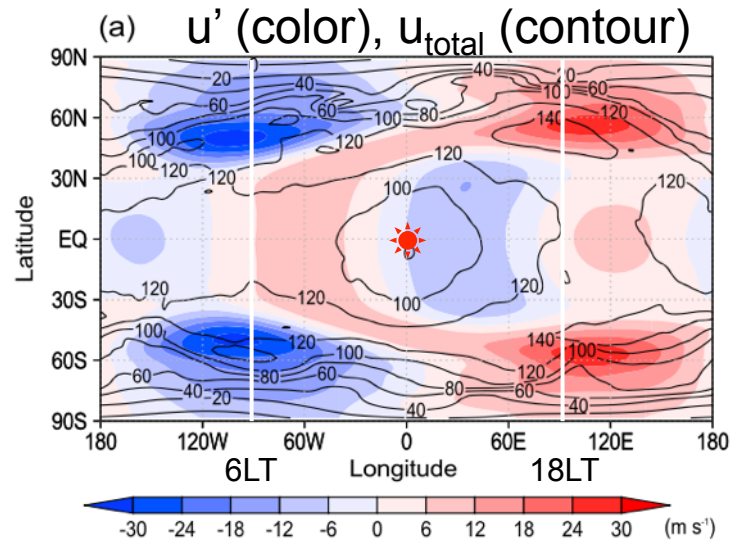


極

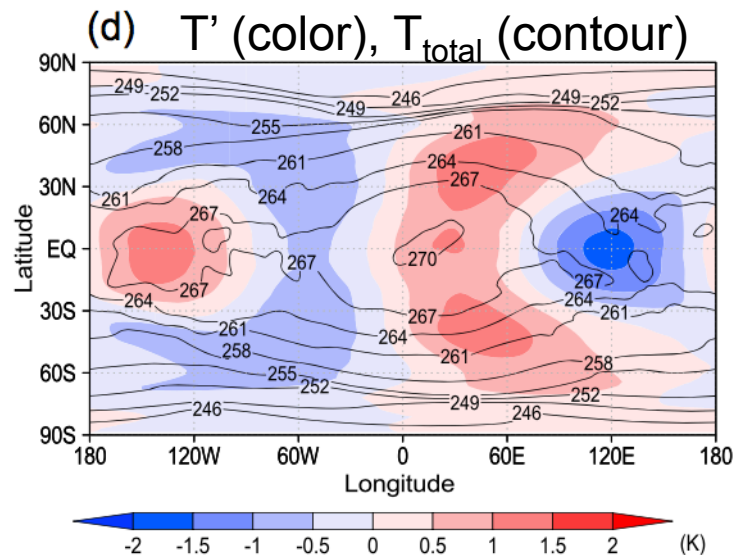
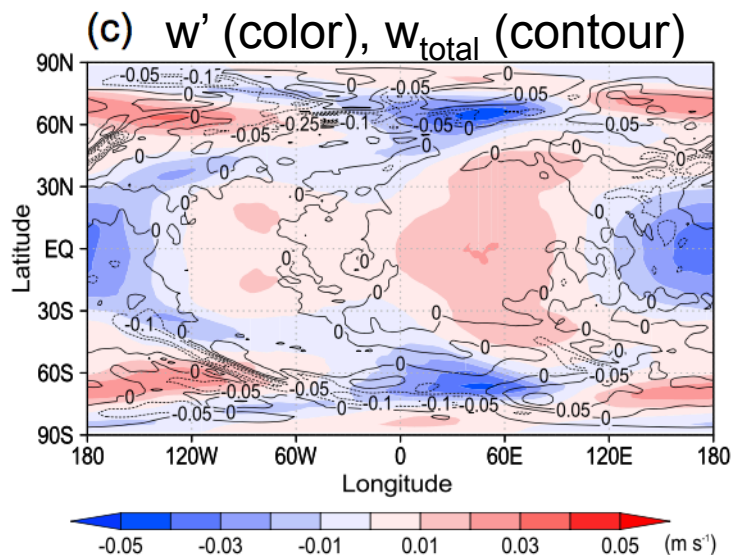
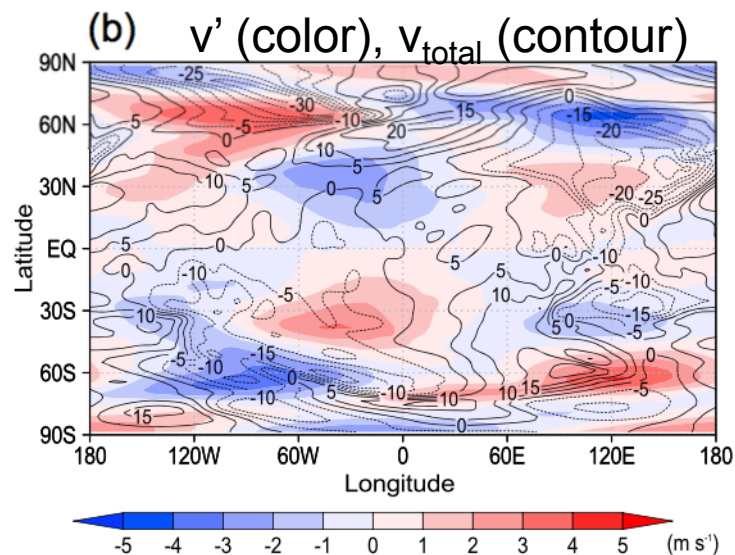
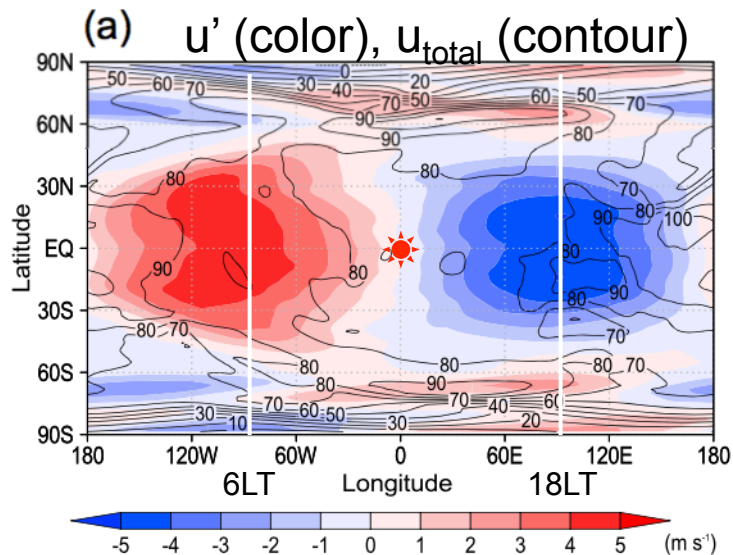
赤道

Williams (1988)

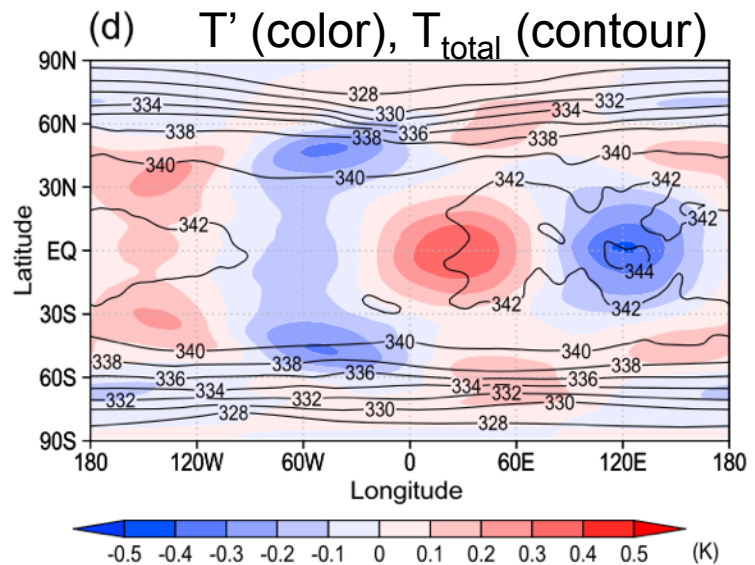
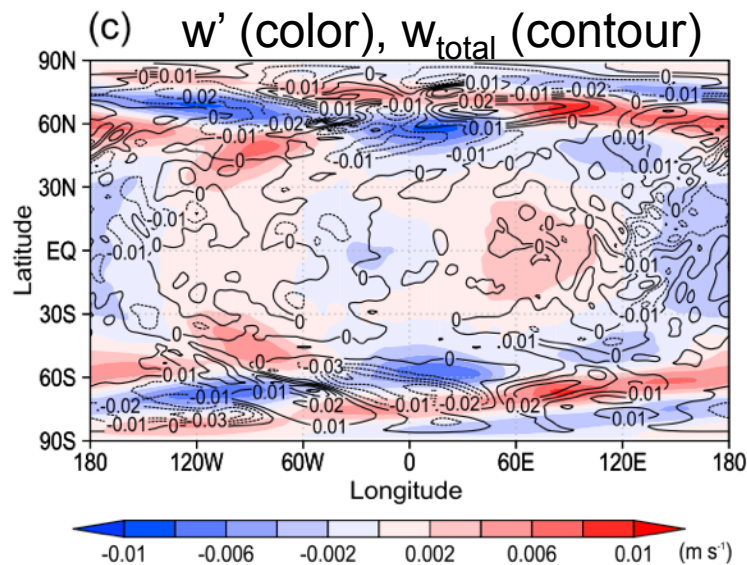
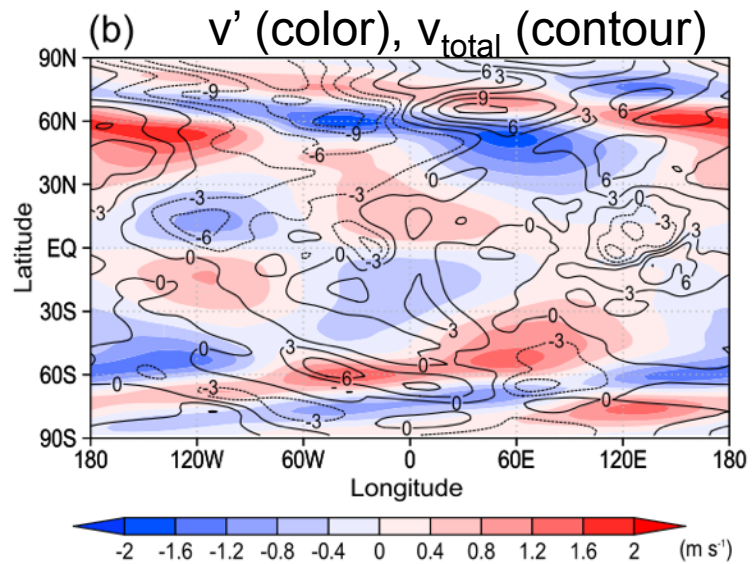
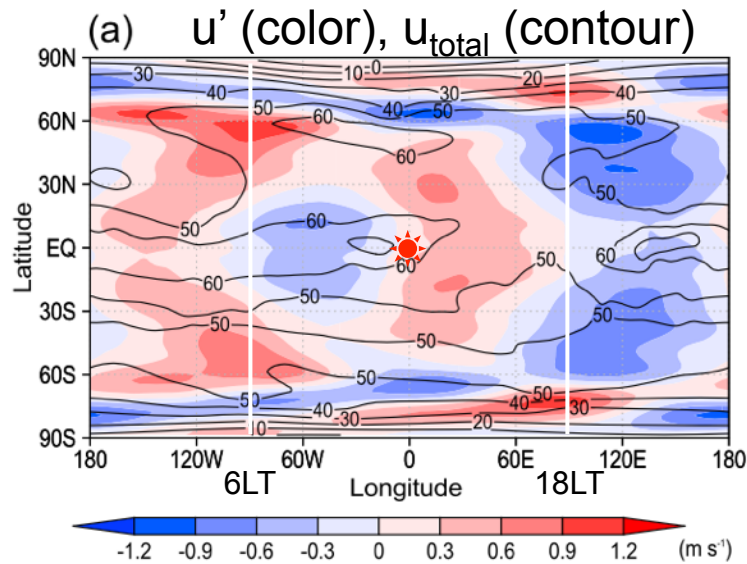
熱潮汐波の水平構造 (70 km)



熱潮汐波の水平構造 (60 km)



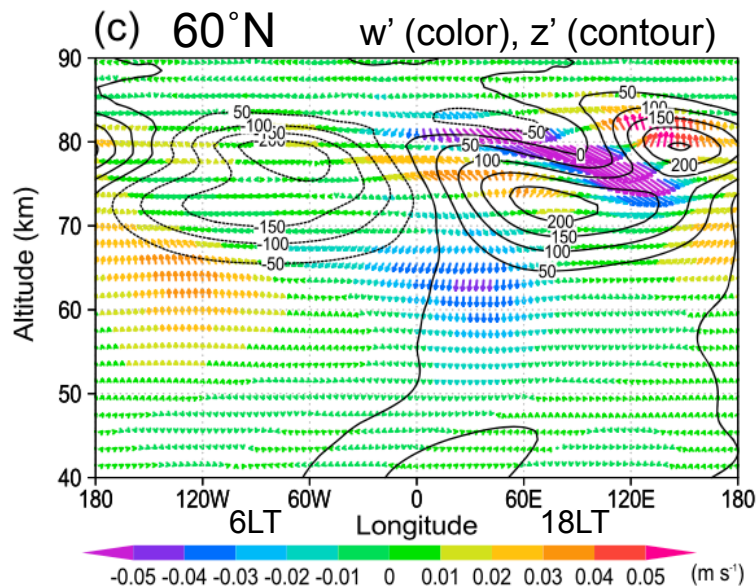
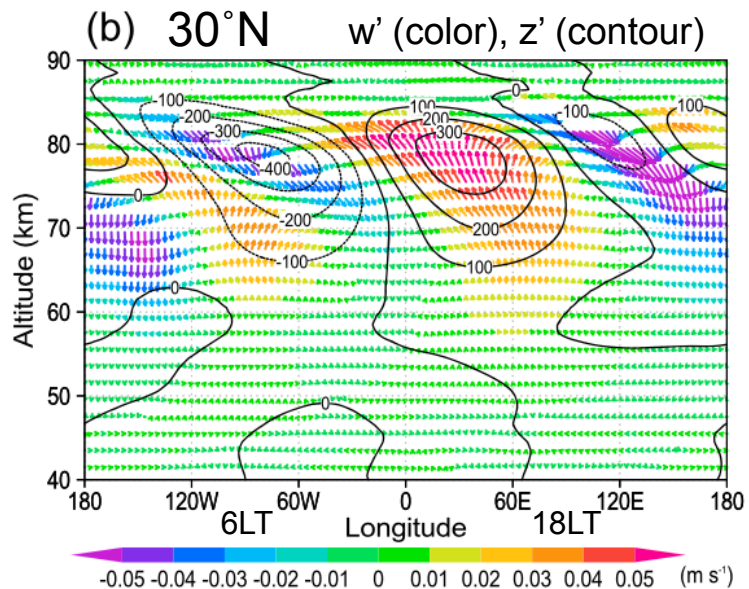
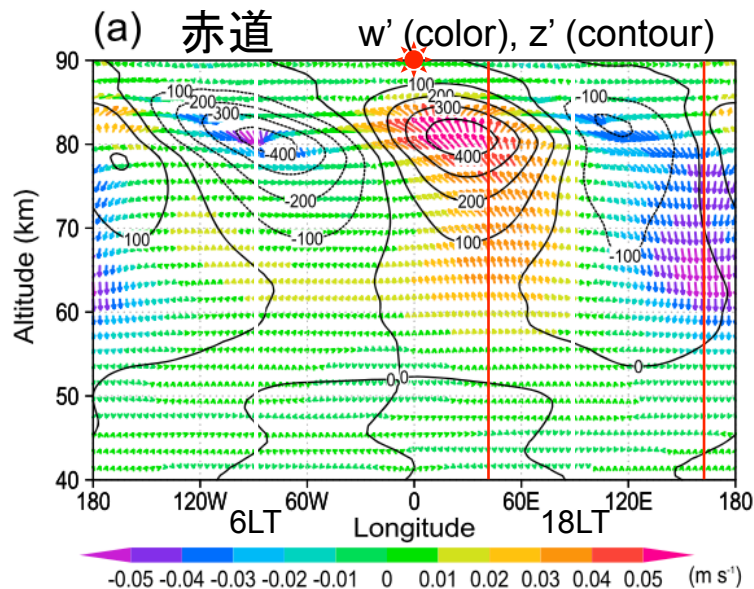
熱潮汐波の水平構造 (50 km)



熱潮汐波の東西-鉛直構造

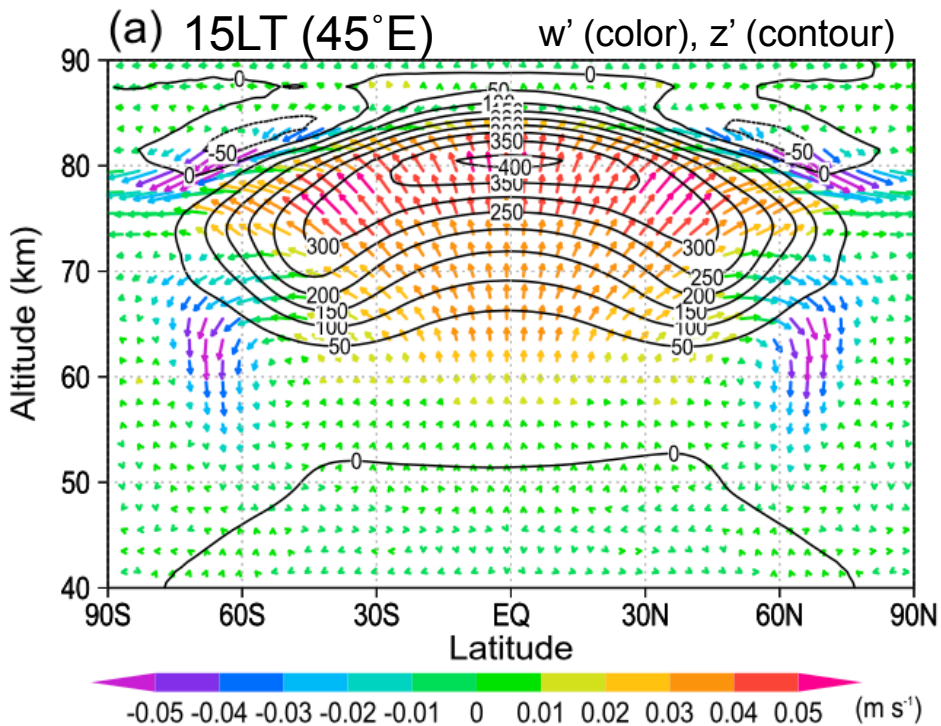


自転方向

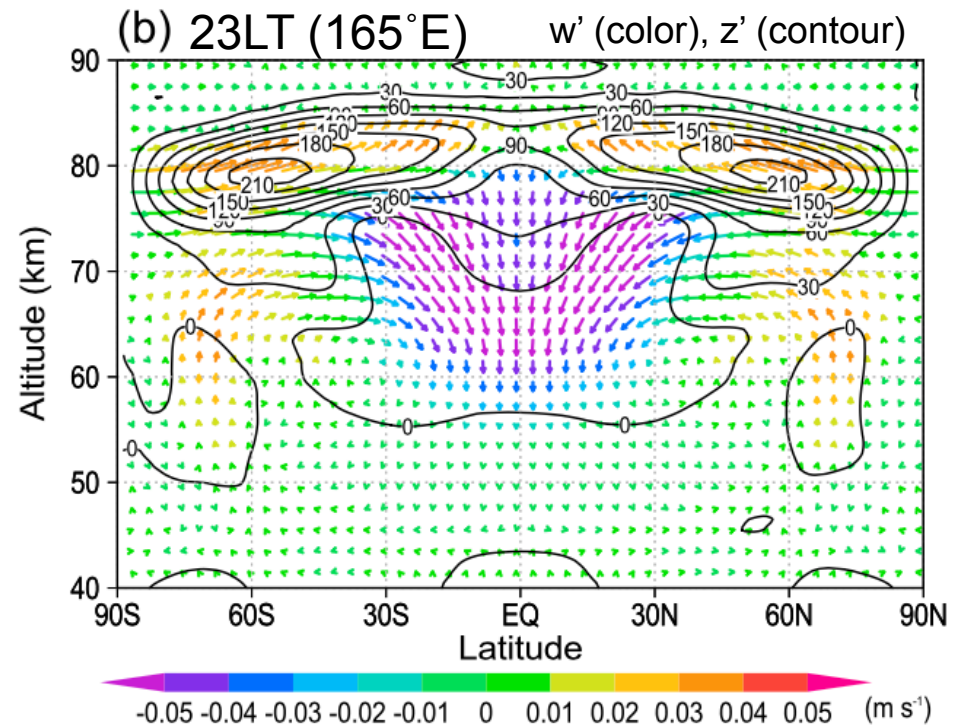


上部雲層 (60–70 km) に注目すると、赤道と60°Nでは一日潮、30°Nでは半日潮が卓越。赤道域では昼面で上昇流、夜面で下降流であるが、60°Nでは鉛直流の方向が逆転している。

熱潮汐波の緯度-高度構造

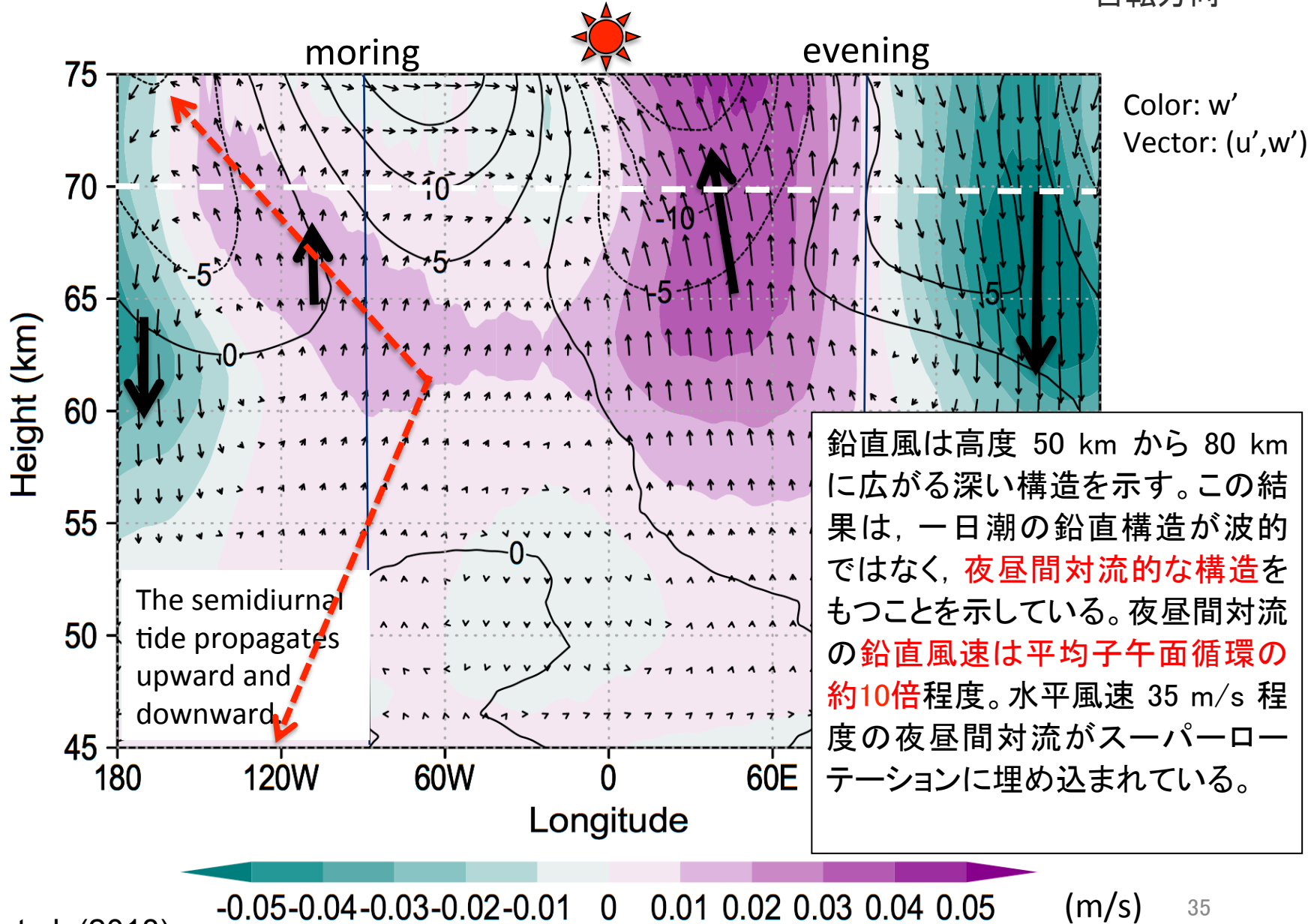


15LT付近の低緯度 (45°S–45°N) の上昇流は高度 55–85 km の広い範囲に存在している。極向きの流れは 75–80 km では極を超えて夜側に流れるが、60–70 km では 60°N/S 付近で下降する。

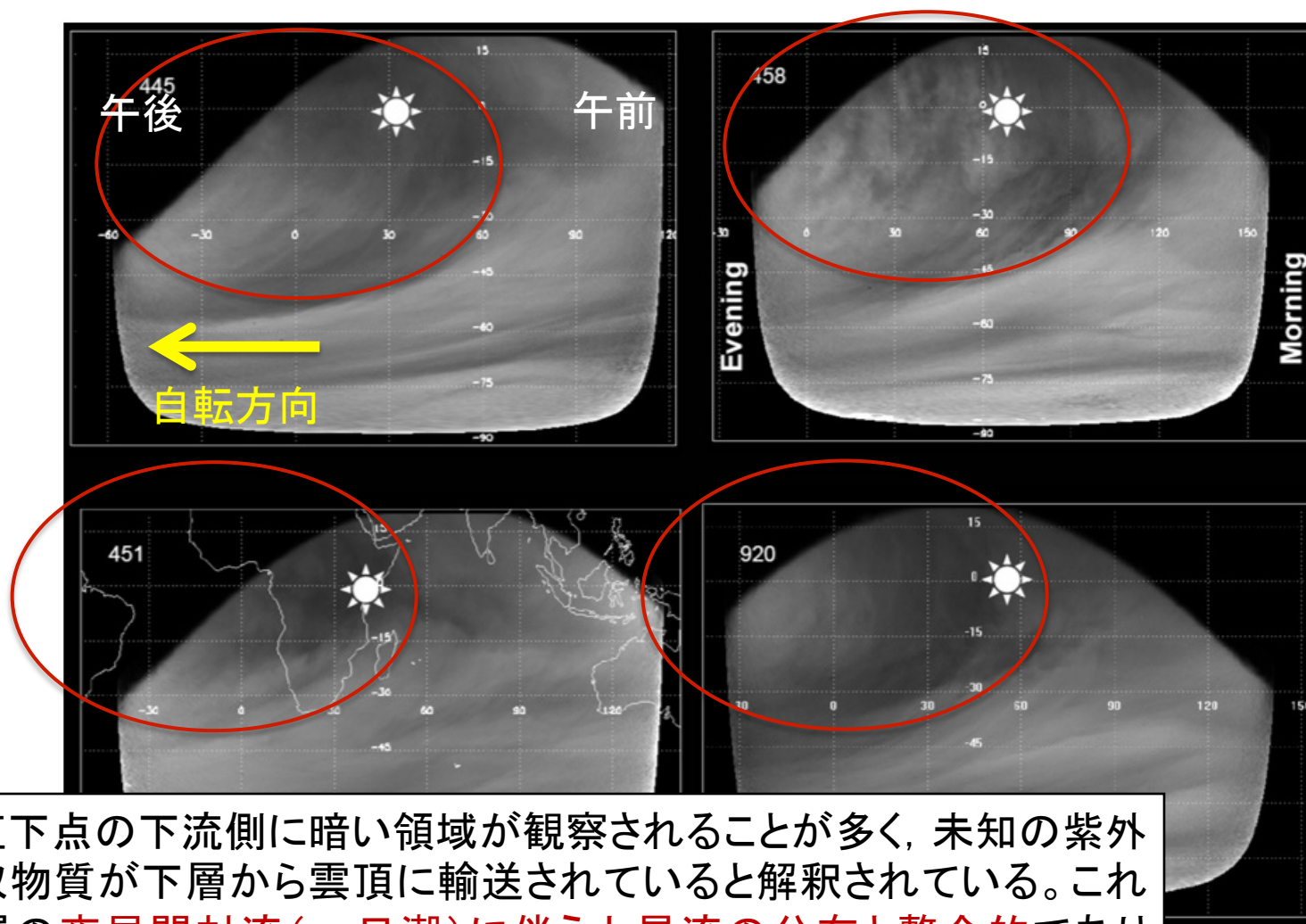


高度 55–75 km には低緯度で下降流, 45°–80° で上昇流がみられる。スーパーローテーションの影響で 55–70 km 付近では夜昼間対流が低緯度に集中している？

熱潮汐波に伴う鉛直風(赤道上)



雲頂の紫外光吸収物質の分布



太陽直下点の下流側に暗い領域が観察されることが多く、未知の紫外光吸収物質が下層から雲頂に輸送されていると解釈されている。これは雲層の夜昼間対流(一日潮)に伴う上昇流の分布と整合的であり、熱潮汐波は金星上層大気物質循環(雲物理過程など)に重要である可能性がある。

osphere rotates from right to
of the Earth's continents are

UV contrast observed by Mariner 10

planet rotation

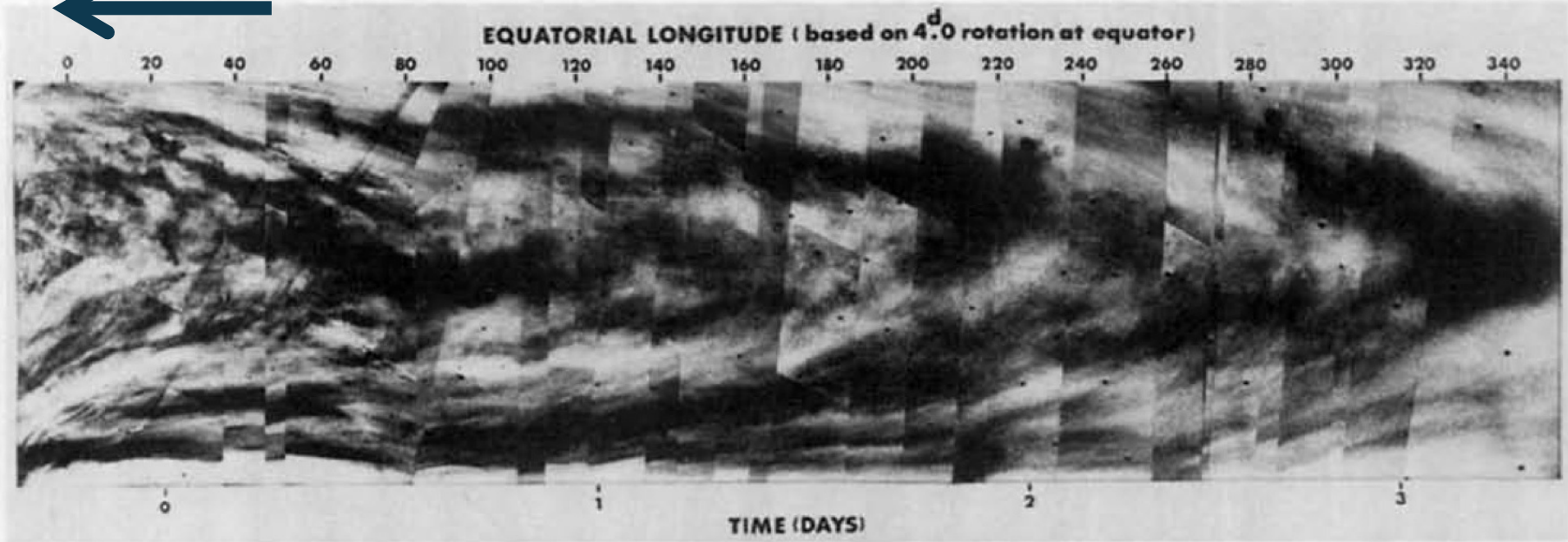
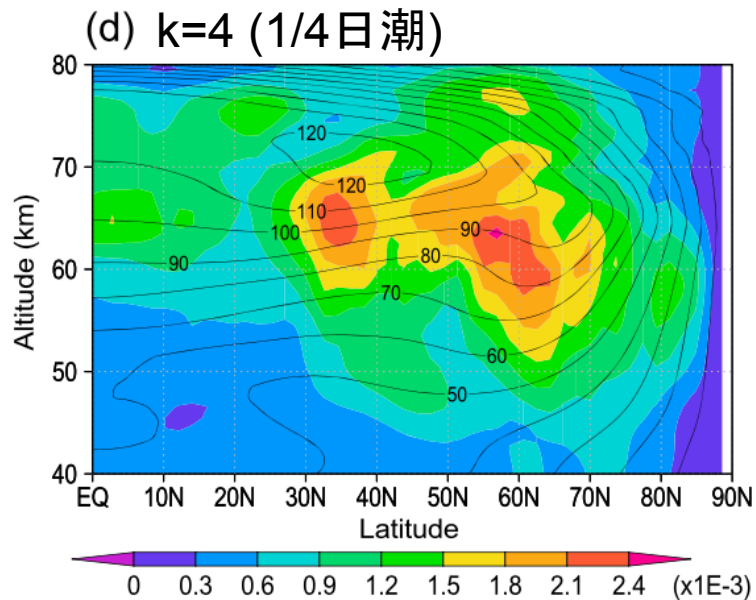
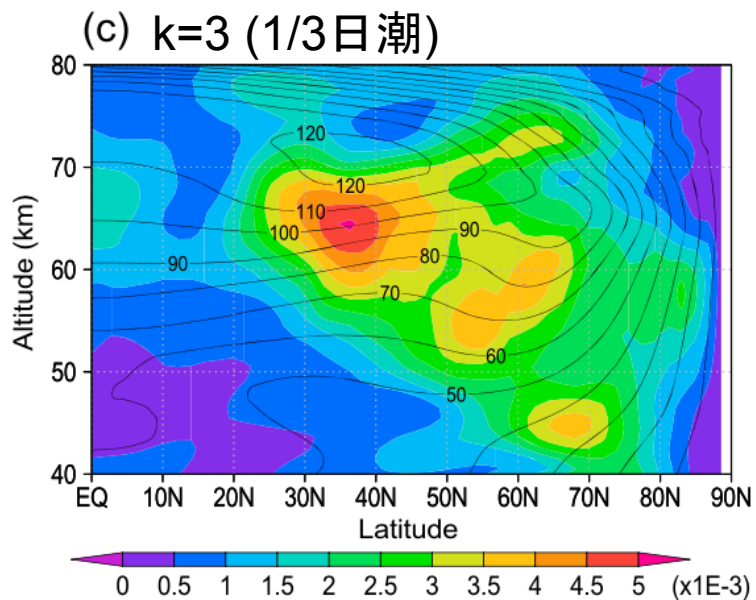
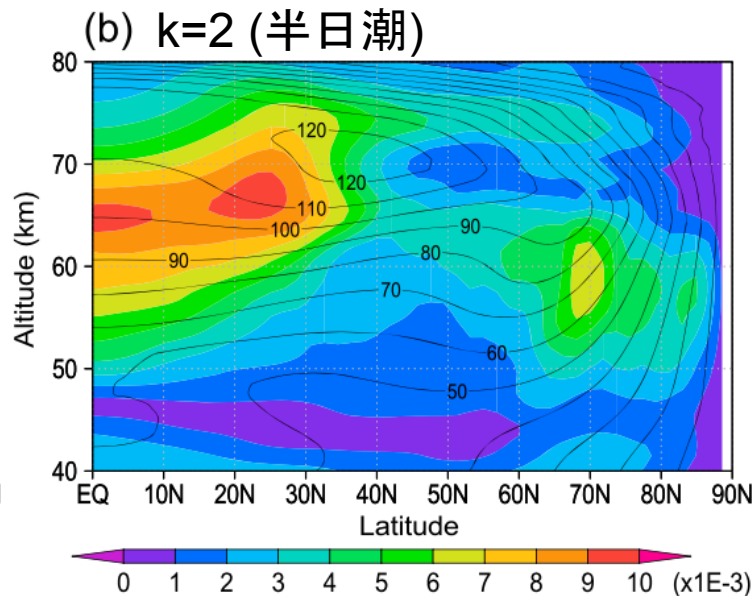
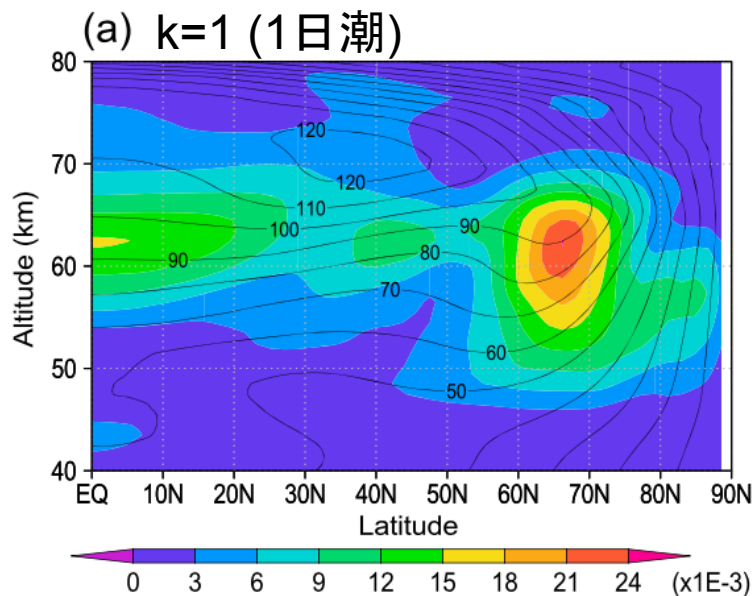


FIG. 1. Composite picture showing the temporal development of UV markings on Venus near the subspacecraft meridian. This picture is a reproduction of Fig. 11 in Murray *et al.* (1974). The abscissa measures the advance of time from an arbitrary point and the ordinate is a rough measure of latitude. In order to compare the details of this figure with those in Figs. 2-7, note that the zero point of time is at Encounter +1.35 days.

It is speculated that the global Y-shape pattern observed in UV is related to the Y-shape patterns formed by the thermal tide, though the phase speeds are completely different.

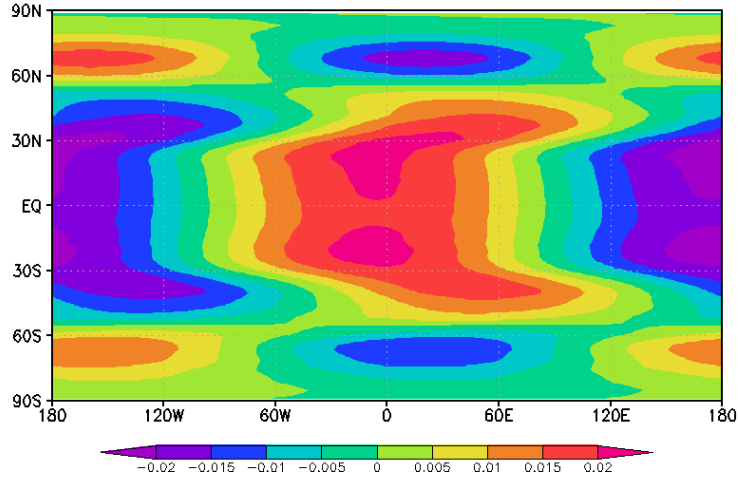
Belton et al. (1976)

熱潮汐波の振幅 (東西波数ごと)

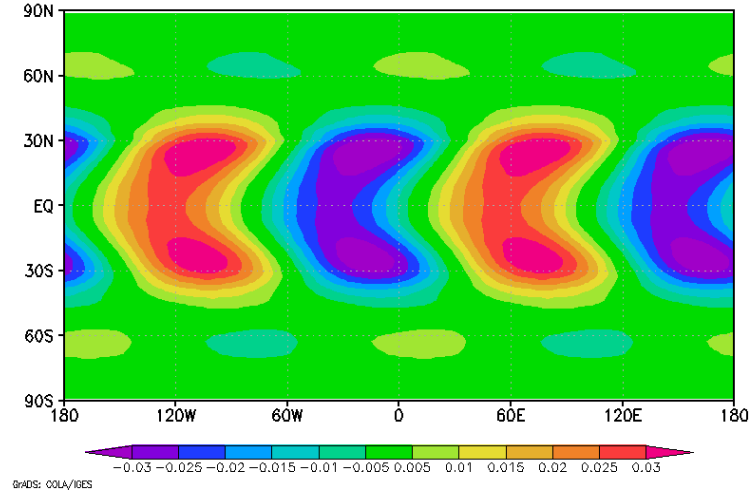


Vertical wind distributions at 70 km

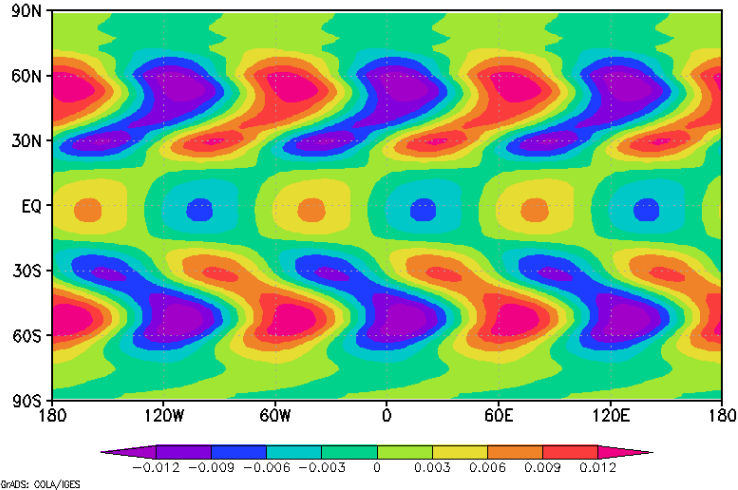
Zonal wavenumber 1 (0.02 m/s)



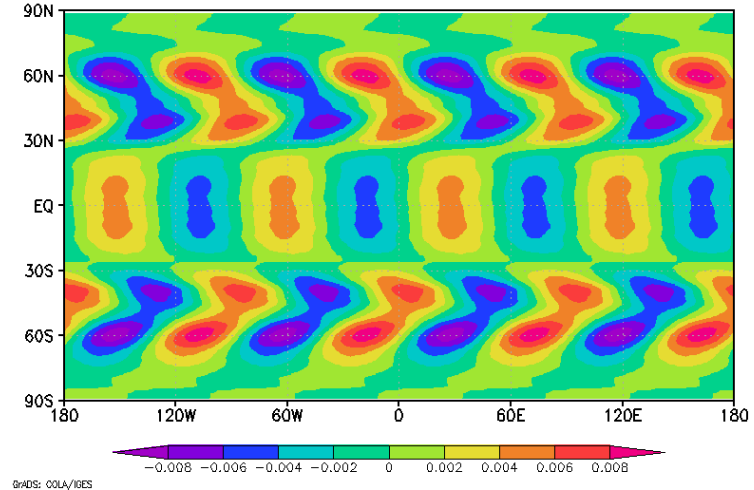
Zonal wavenumber 2 (0.03 m/s)



Zonal wavenumber 3 (0.012 m/s)



Zonal wavenumber 4 (0.008 m/s)



GrADS: COLA/IGES

GrADS: COLA/IGES

太陽加熱強度との比較

太陽加熱の東西分布

$$Q_{\text{sol}}(\text{lon}) = \begin{cases} Q_{\text{max}} * \cos(\text{lon})^n & (\text{dayside}) \\ 0 & (\text{nightside}) \end{cases}$$

東西方向にフーリエ展開

$$Q_{\text{sol}}(\text{lon}) = Q_0 + Q_1 * \cos(\text{lon}) + Q_2 * \cos(2 * \text{lon}) + \dots$$

東西波数	Q' (n=1)	Q' (n=1.44)	W'
1	5.00e-1	4.62e-1	0.020
2	1.06e-1	1.18e-1	0.030
3	0.00e+0	4.58e-2	0.012
4	-2.12e-2	-1.22e-2	0.008

位相速度の効果

- 温度偏差 (東西波数 k 成分) の式

$$ik (U-c) T_k' + \dots = Q_k'$$

- 位相速度

- 一日潮: $c_1 = 3.76 \text{ m/s}$

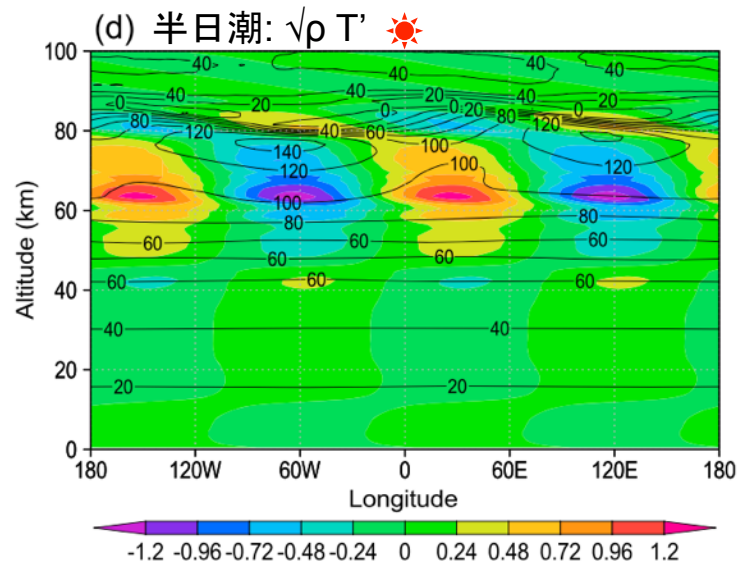
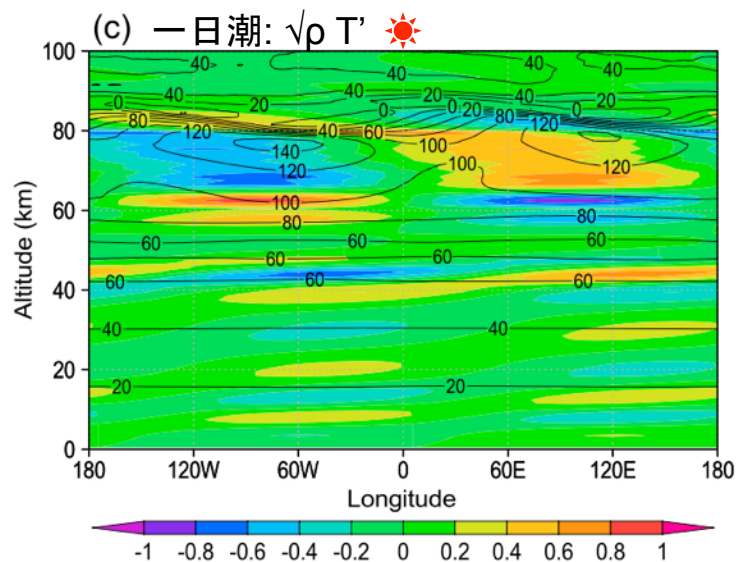
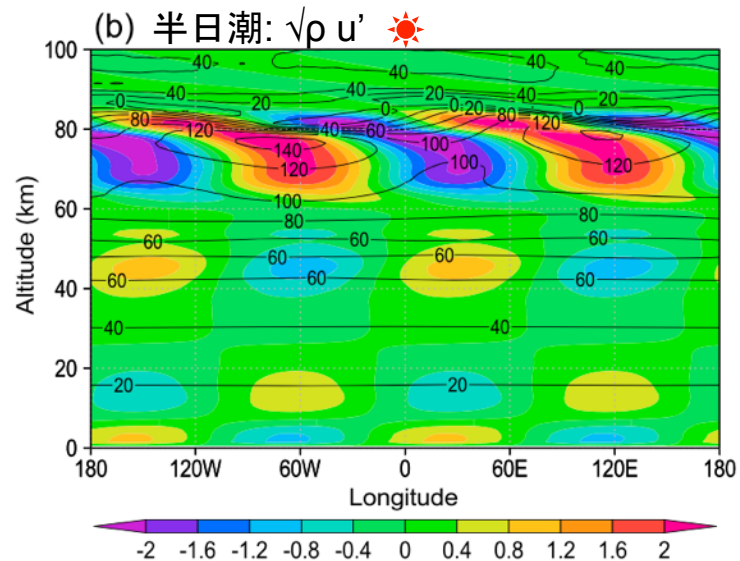
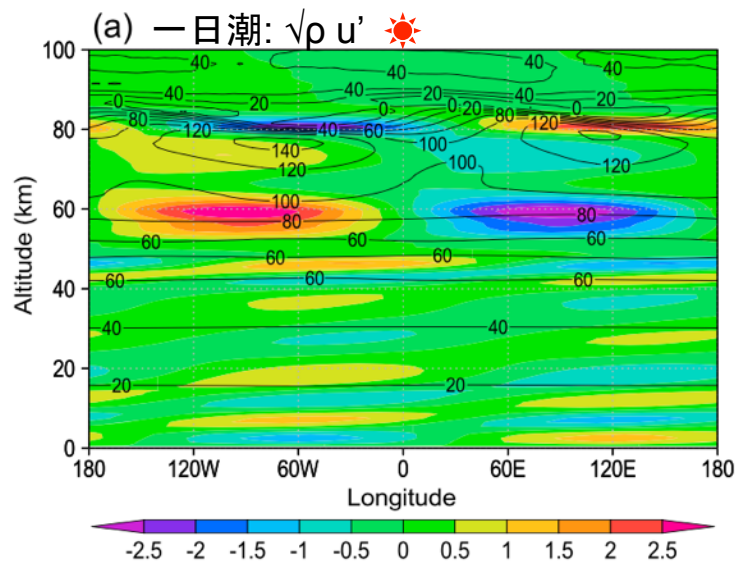
- 半日潮: $c_2 = 7.52 \text{ m/s}$

- 1/3日潮: $c_3 = 11.3 \text{ m/s}$

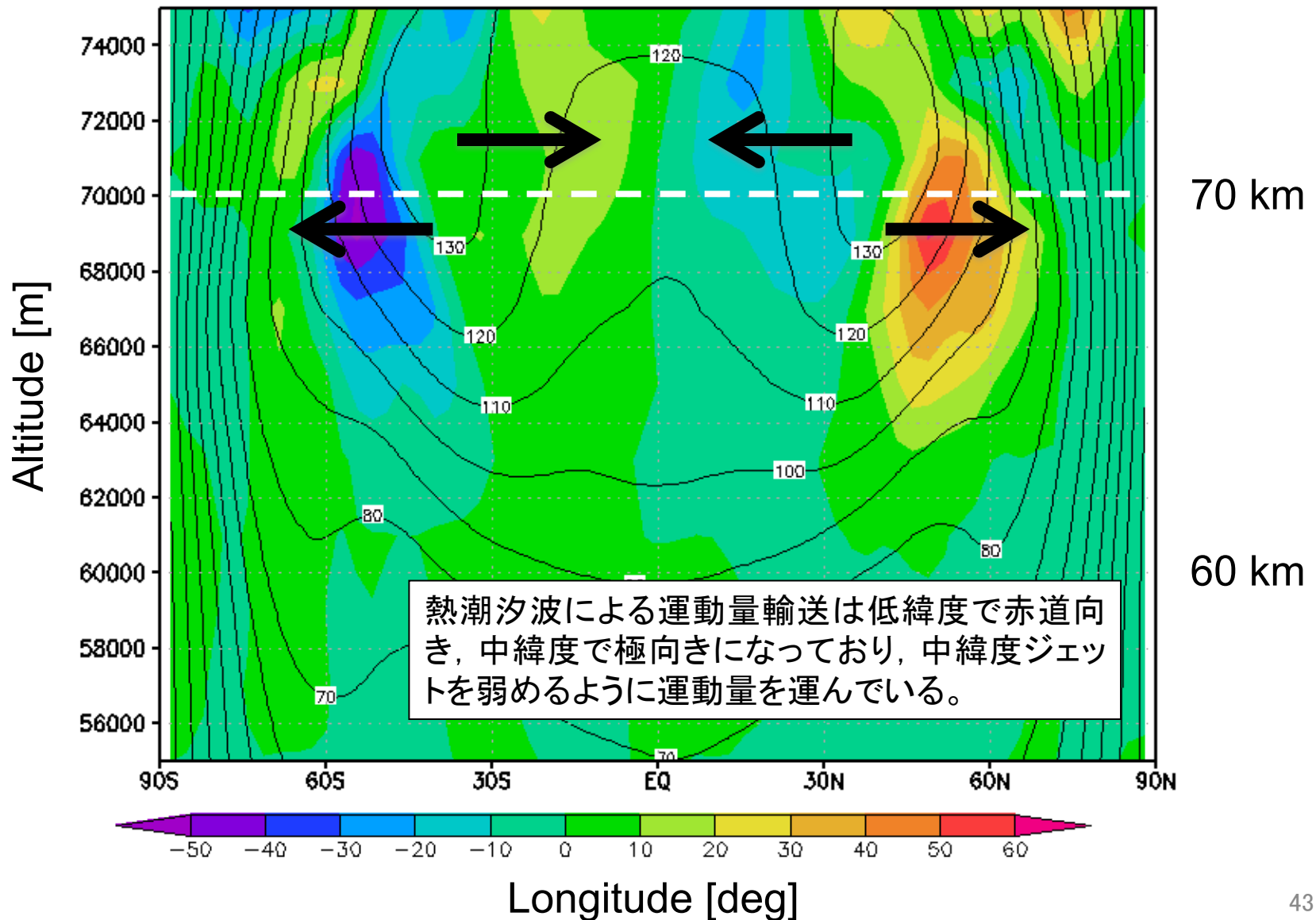
- 1/4日潮: $c_4 = 15.0 \text{ m/s}$

- 東西平均流 U は $\sim 100 \text{ m/s}$ なので, $U-c$ の変化は1割程度

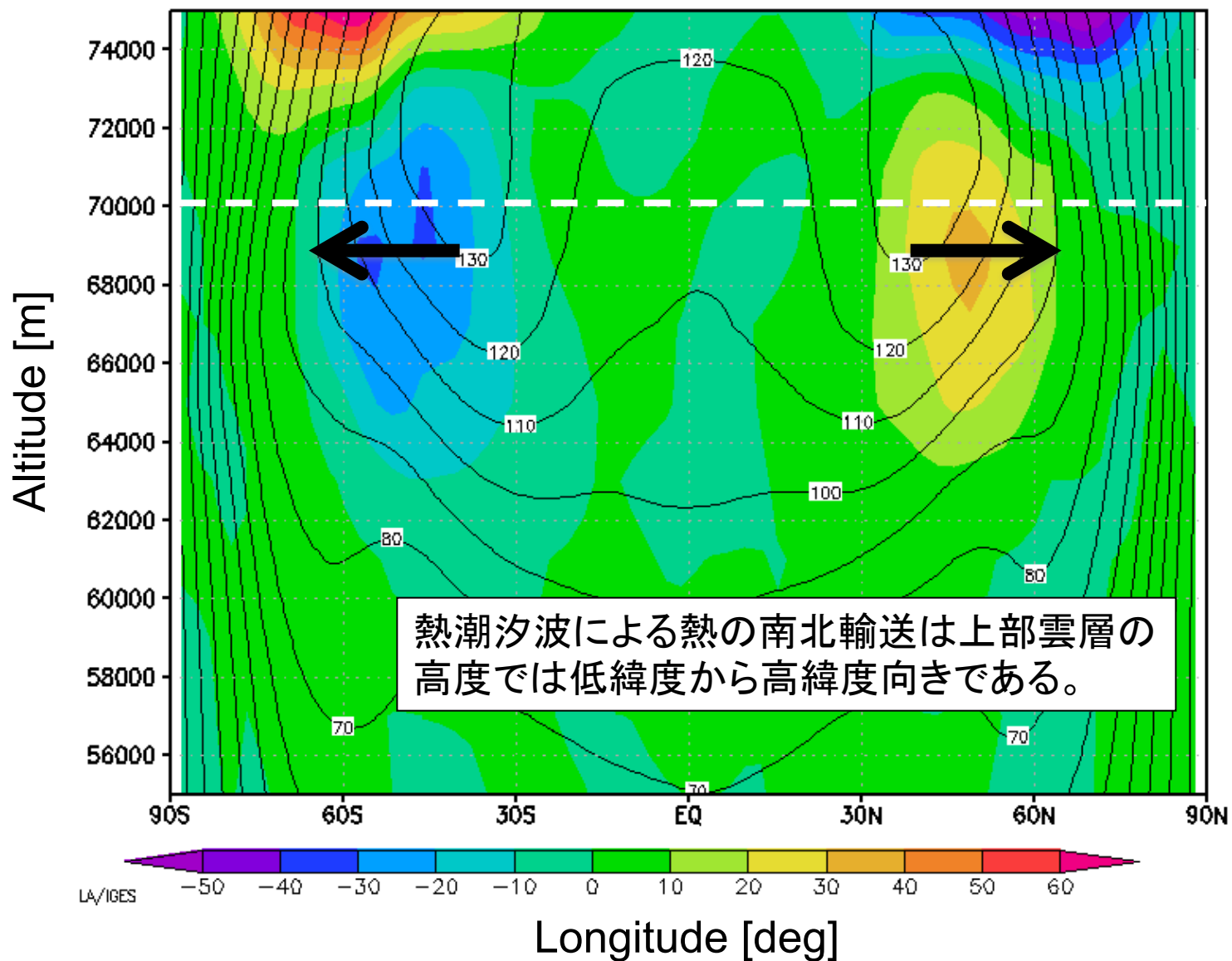
一日潮と半日潮の東西-高度分布



熱潮汐波による運動量の南北輸送

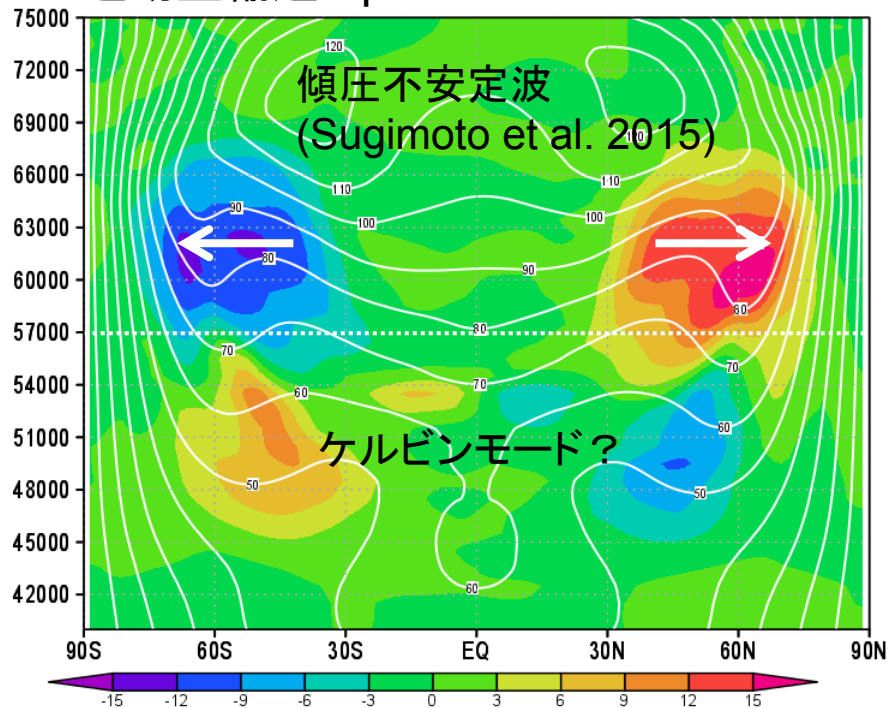


熱潮汐波による熱の南北輸送



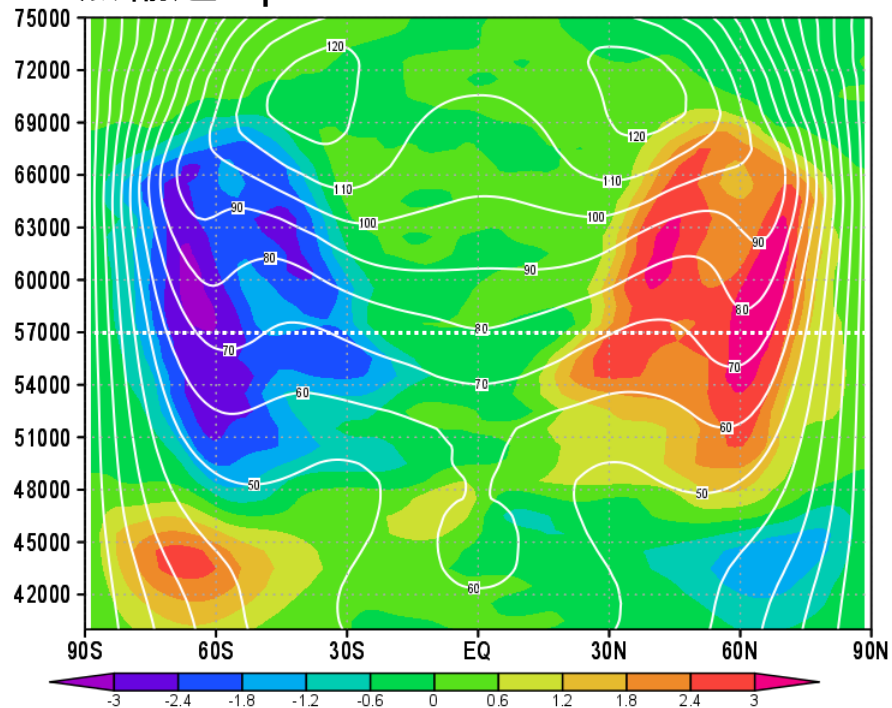
短周期擾乱の運動量と熱の輸送

運動量輸送 $\langle pu'v' \rangle$



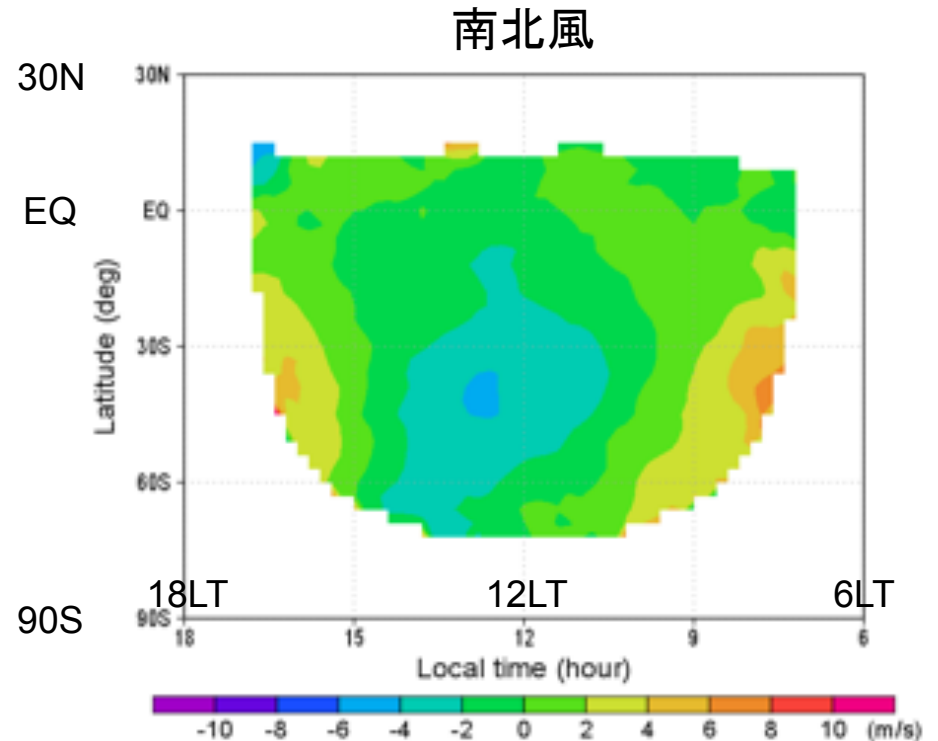
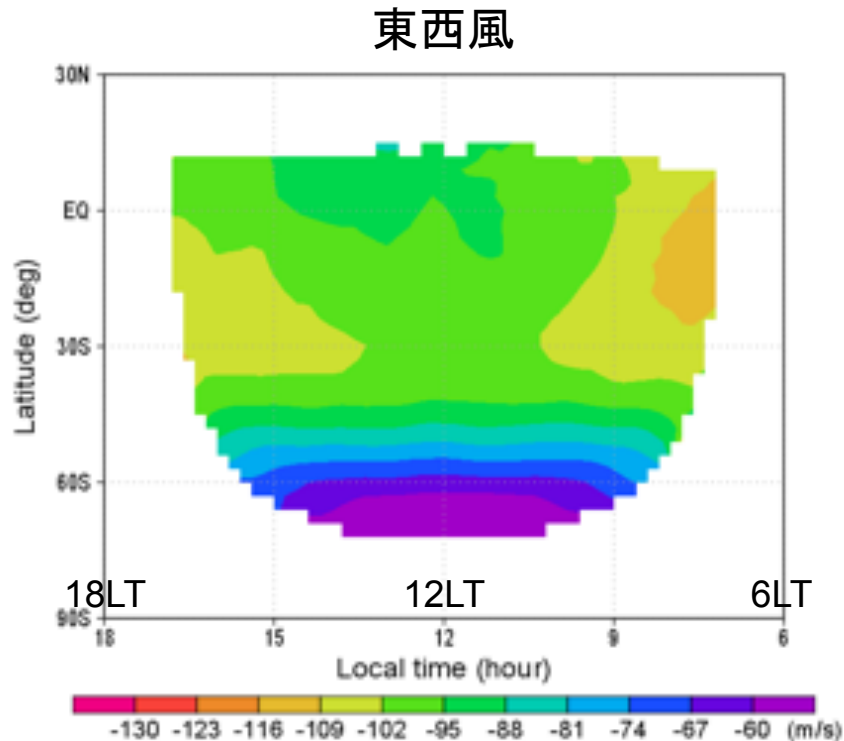
短周期擾乱による南北運動量輸送は高度 55 km より上で極向き, 下で赤道向きである。極向きの運動量輸送は傾圧不安定波に伴うものと考えられる (Sugimoto et al. 2014b)。

熱輸送 $\langle \rho v'T' \rangle$



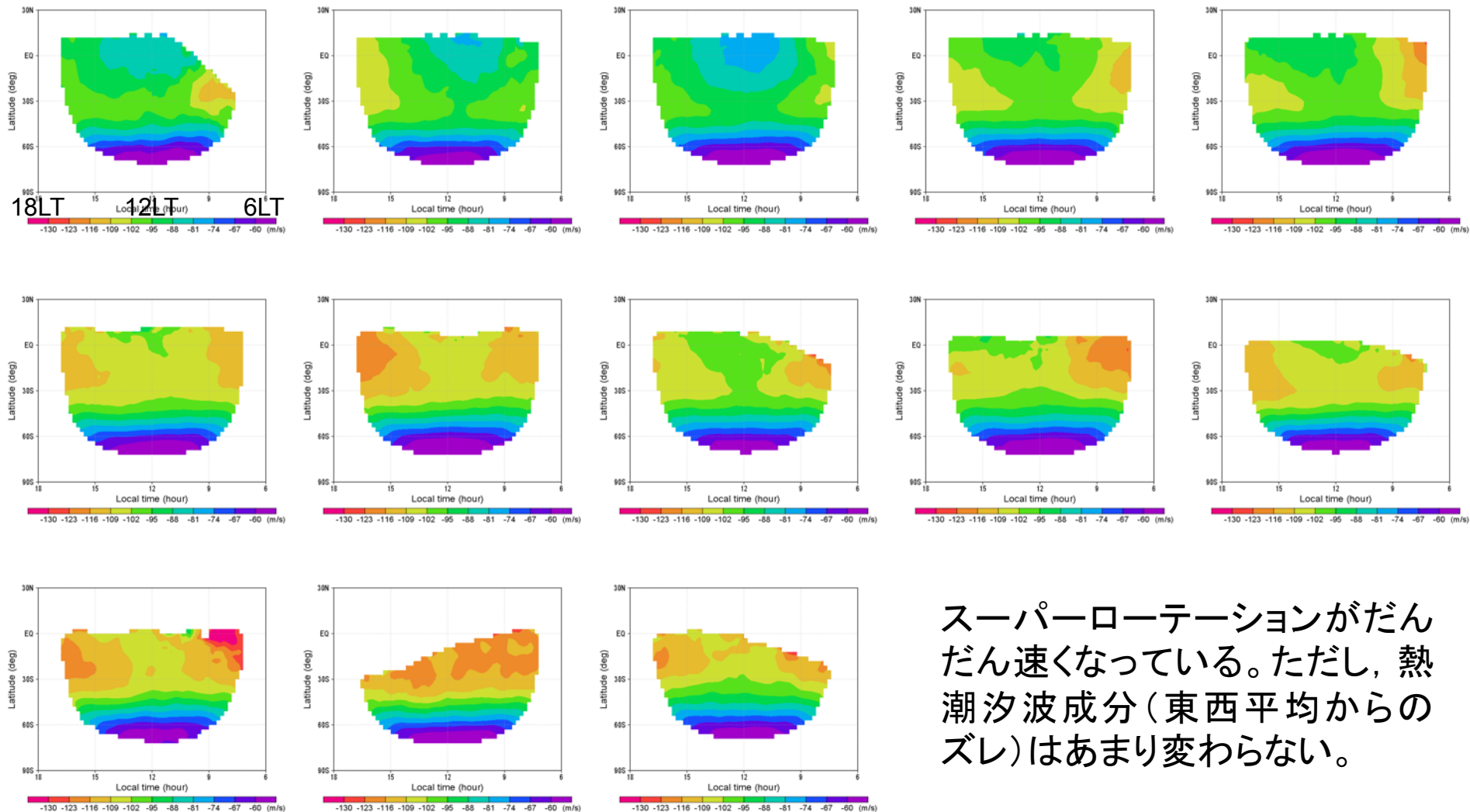
短周期擾乱による南北熱輸送は高度 48 km より上で極向き, 下で赤道向きである。運動量輸送との対応関係が複雑。

雲追跡風との比較 (VMC)



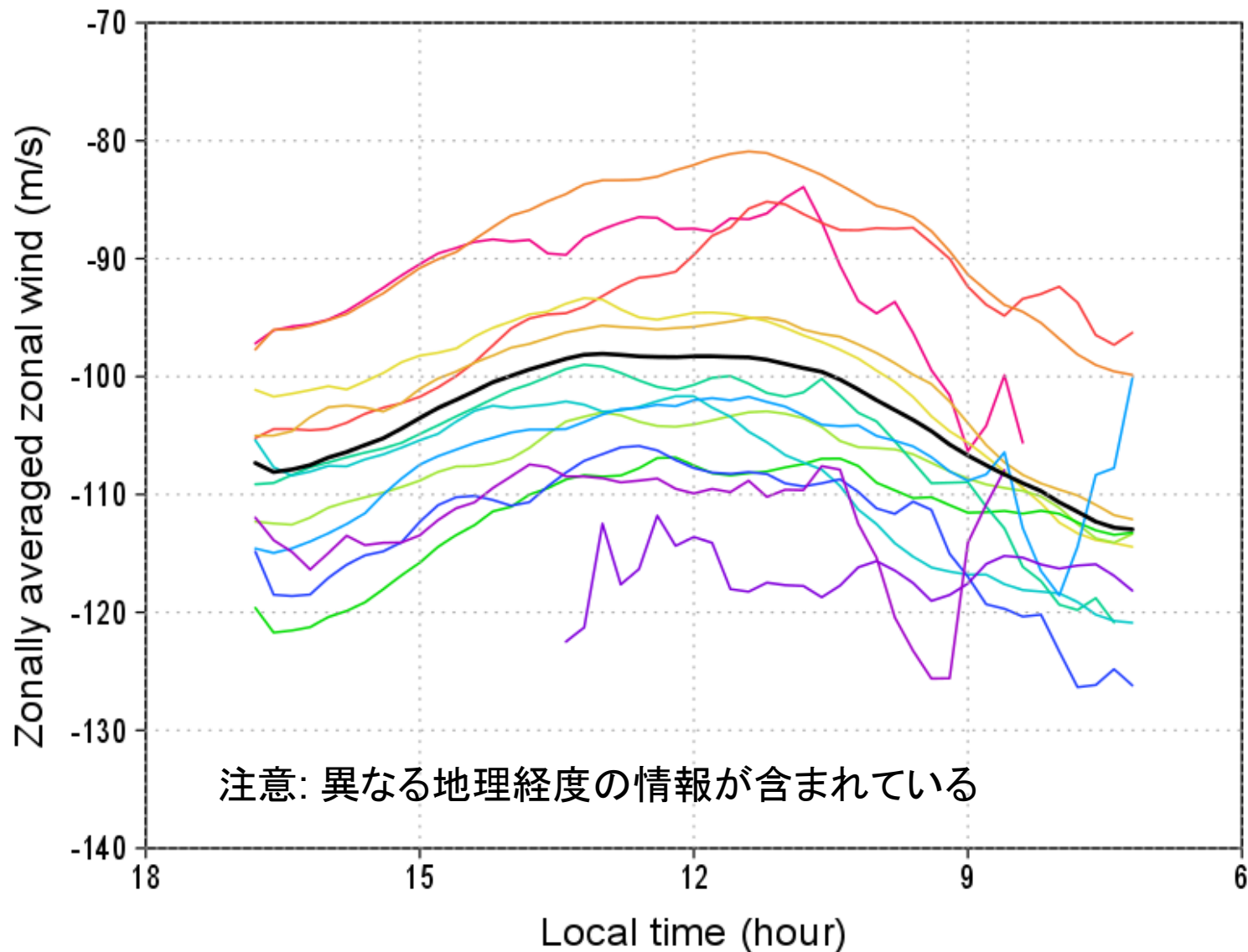
VMC/Venus Express の紫外画像から雲追跡によって求めた水平風速 (Epoch 4: 2008/1–2008/5)。期間は2006年5月から2013年3月まで。

Epochごとの $u(LT, lat)$ 分布

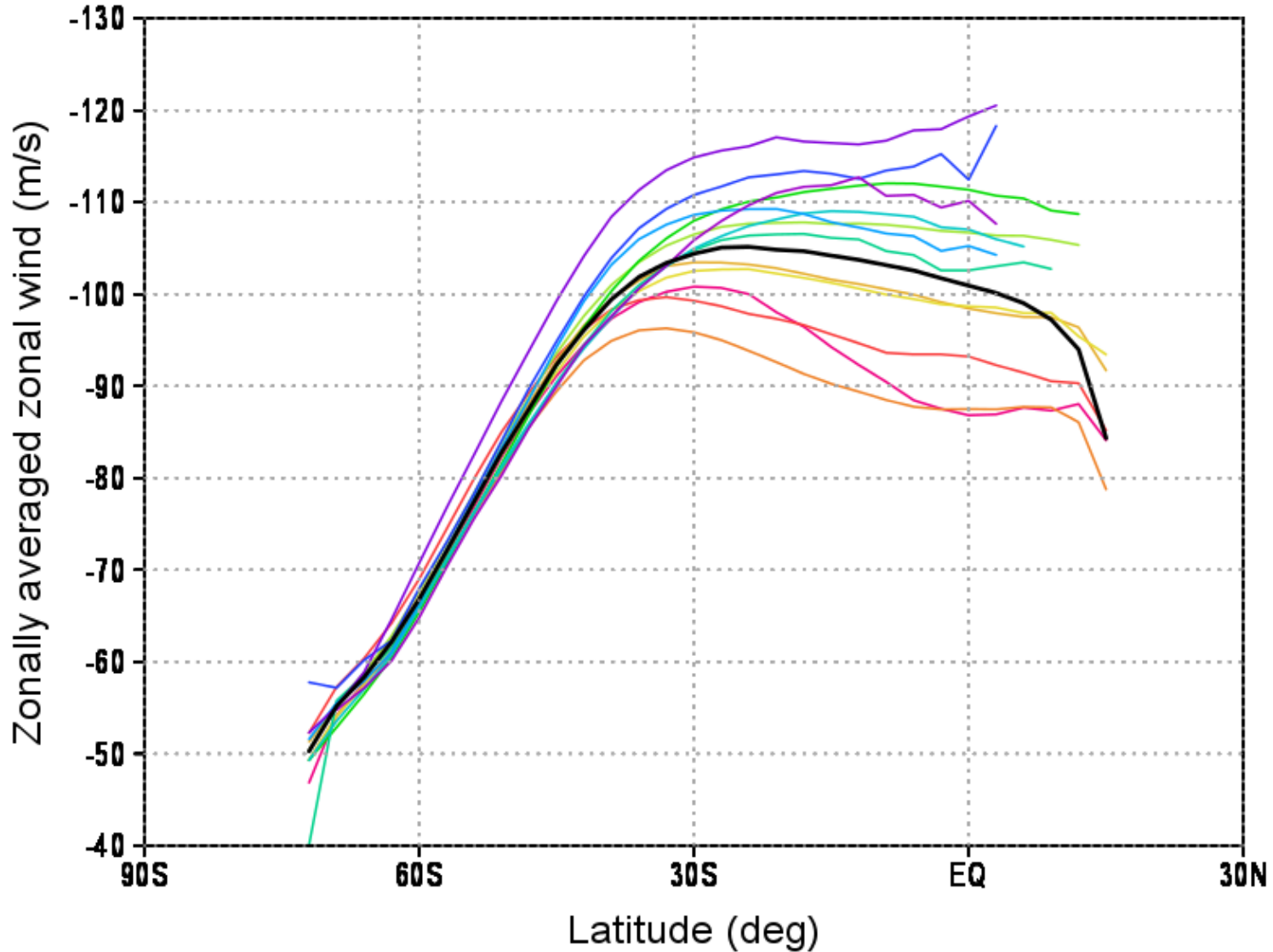


スーパーローテーションがだんだん速くなっている。ただし、熱潮汐波成分(東西平均からのズレ)はあまり変わらない。

Epochごとに 15S-5S で緯度平均した $u(LT)$ 分布

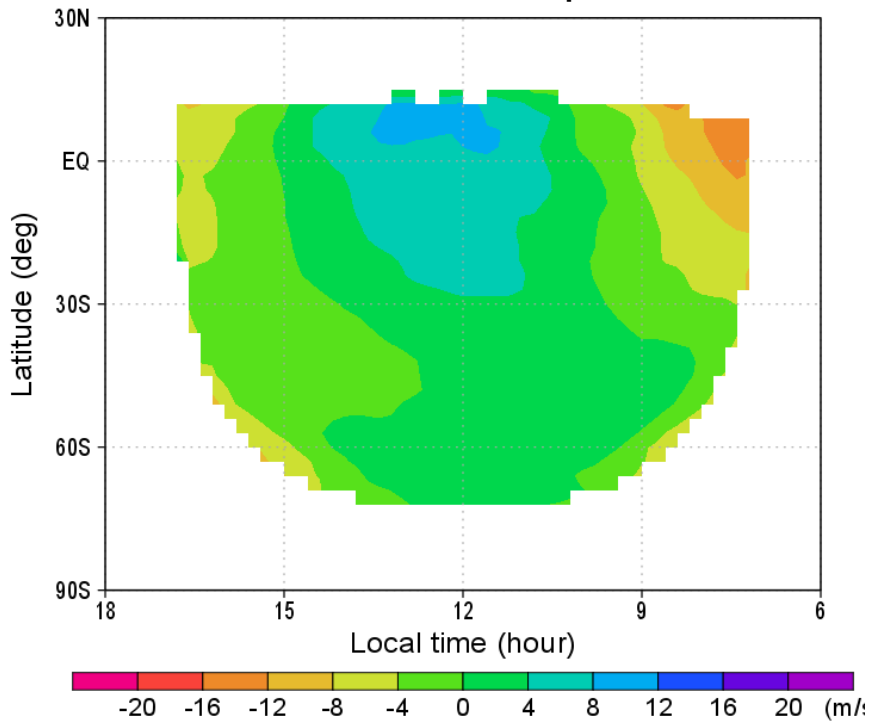


Epochごとに18LT-6LT で東西平均した東西風の緯度分布

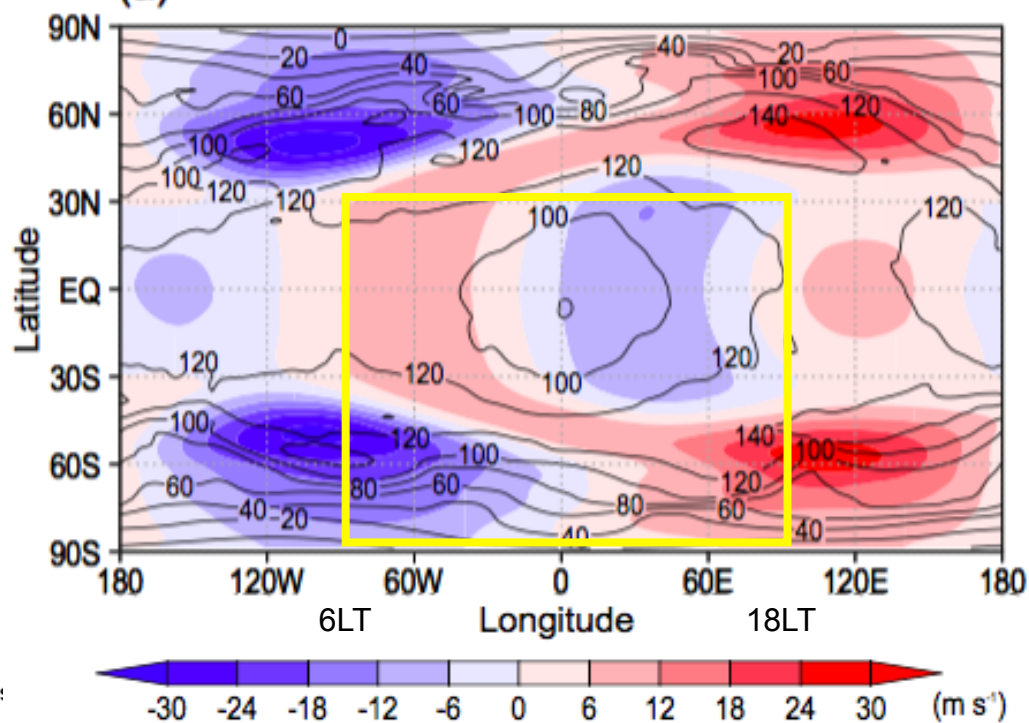


全期間で平均した熱潮汐波の東西風偏差 (東西平均からのズレ)

VMC/Venus Express

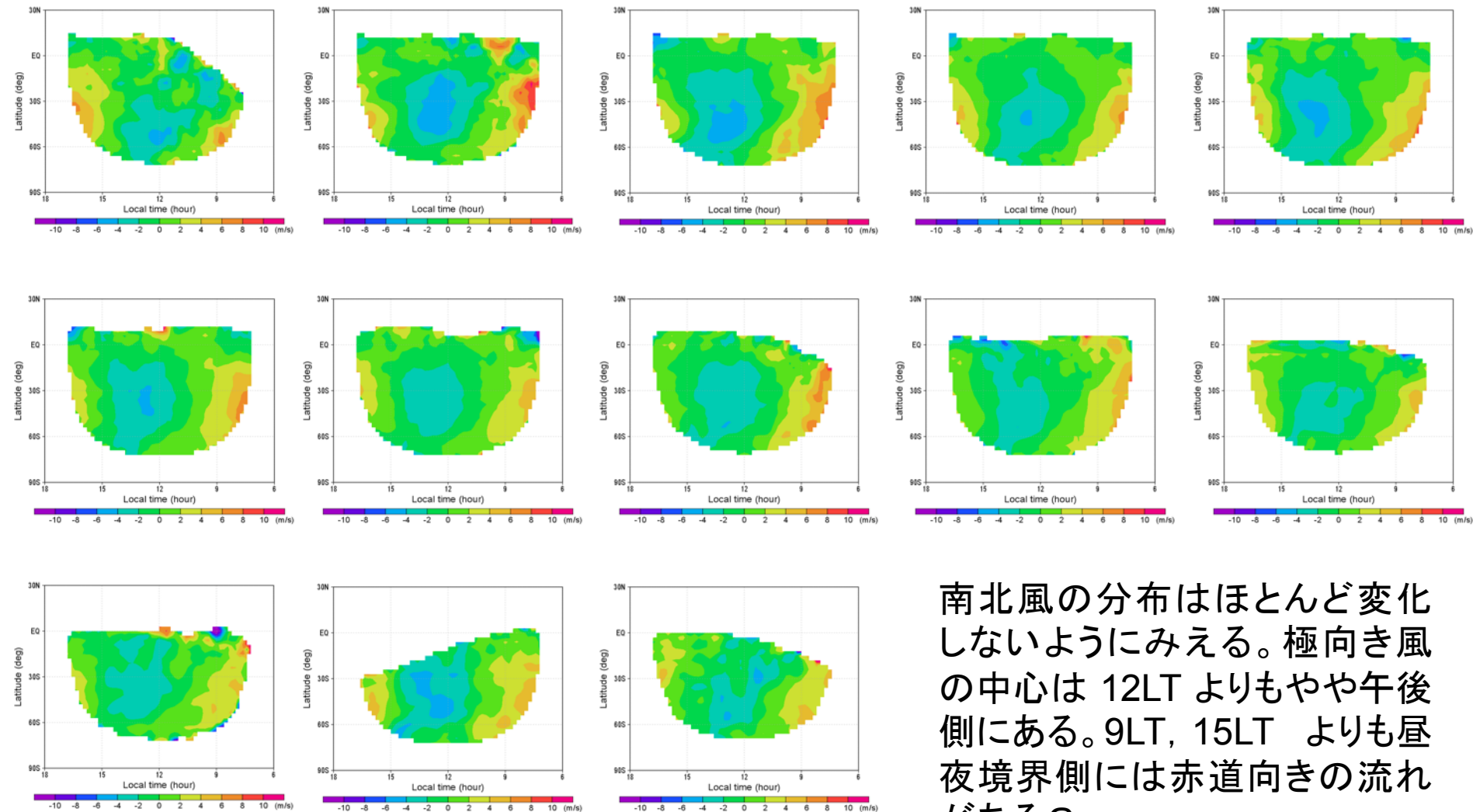


(a) GCM (AFES-Venus) at 70 km



左図とは左右が逆であることを注意

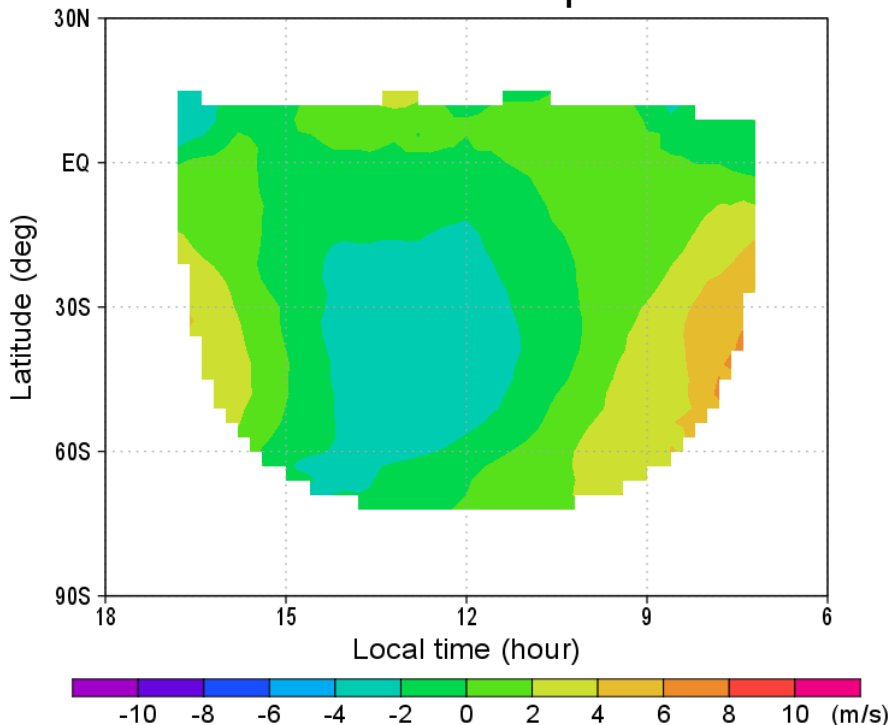
Epochごとの $v(LT, lat)$ 分布



南北風の分布はほとんど変化しないように見える。極向き風の中心は 12LT よりもやや午後側にある。9LT, 15LT よりも昼夜境界側には赤道向きの流れがある？

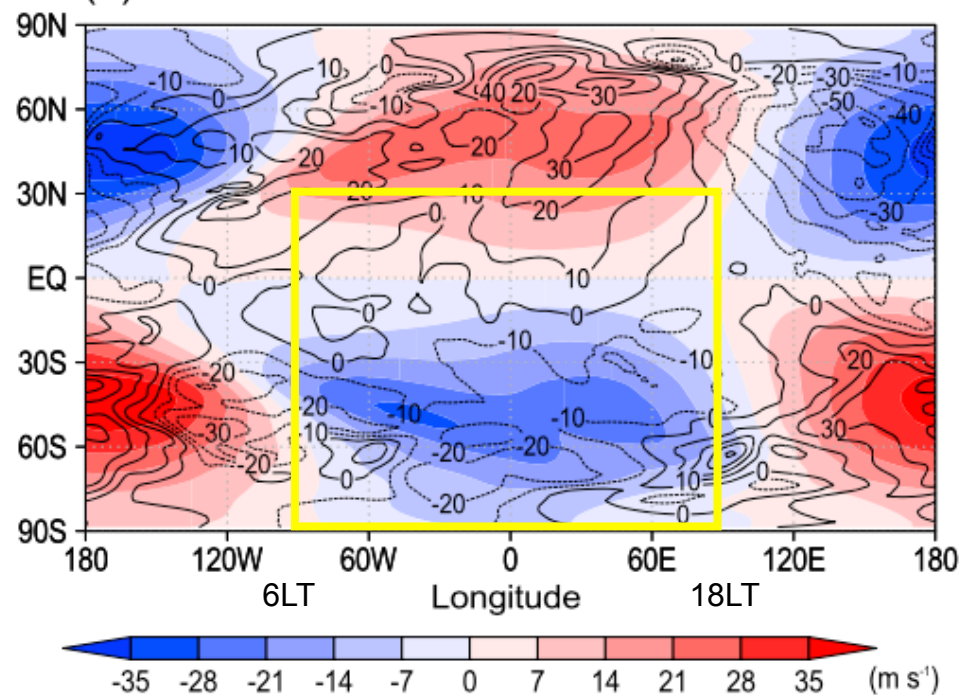
全期間で平均した熱潮汐波の南北風偏差 (東西平均からのズレ)

VMC/Venus Express



極向き風の中心は 13LT 付近。9LT, 15LT より昼夜境界側では赤道向きの流れがみられるが、モデルでは昼面全体で極向き。

(b) GCM (AFES-Venus) at 70 km



左図とは左右が逆であることに注意

まとめ

- GCMを利用して熱潮汐波の3次元構造を調べた。
- 卓越波長は緯度・高度で複雑に変化。
- 高度 70 km では...
 - u' : 低緯度で半日潮, 中高緯度で一日潮
 - v' : 一日潮
 - w' : 低緯度で半日潮 + 1/3, 1/4日潮, 高緯度で一日潮
 - T' : 低緯度で半日潮, 中高緯度で一日潮
- VMCの解析結果とは 2–3LT 程度のずれ。
- 波の励起高度・鉛直伝播などに依存？

まとめ (2)

- 雲層中には顕著な夜昼間対流 (一日潮) が存在し、スーパーローテーションと共存している。
- 夜昼間対流に伴う鉛直流は平均子午面循環の鉛直流の10倍程度。物質輸送 (紫外吸収物質) に影響？
- 平均子午面循環は低緯度の直接循環と中高緯度の間接循環から成る (かなり複雑な構造)。