

金星大気中の傾圧不安定波

高木征弘(京都産業大学)

杉本憲彦(慶應義塾大学)

松田佳久(東京学芸大学)

スーパーローテーションの モデルによる再現

- Hollingsworth et al. (2007)
 - 現実的な太陽加熱分布では、平均子午面循環が高度方向に3つのセルに分離し、高速東西流が生成されなくなった。
 - Gierasch メカニズムが現実的な太陽加熱では働かない可能性を示唆している。
- Lebonnois et al. (2010)
 - 放射伝達モデルと地形を組み込んだ GCM
 - 高度 60 km 以上では熱潮汐波メカニズムにより高速のスーパーローテーションが生成された。しかしながら、45 km 以下の平均東西流は 10 m/s 以下で非常に弱いまま。
 - 45 km 以下の平均子午面循環には地形が強く影響している。
 - Gierasch メカニズムは地形の有無に依らず働かない。

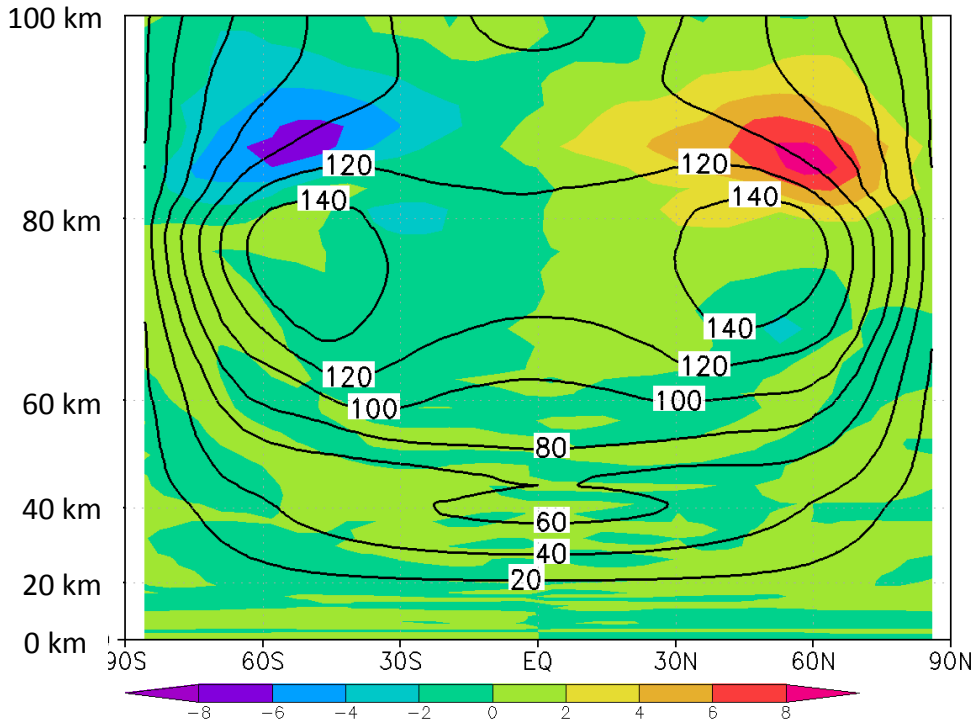
金星大気の多重平衡状態

- Matsuda (1980), Kido and Wakata (2008, 2009), Yamamoto (Kashimura) and Yoden (2013)
 - 金星大気には2つの安定平衡状態が存在
 - (1) 強い東西流＋弱い子午面循環
 - (2) 弱い東西流＋強い子午面循環
 - Hollingsworth et al. (2007) と Lebonnois et al. (2010) の初期条件は静止状態であった。
 - 彼らの研究で得られた下層大気の循環は、(2) の平衡状態(弱い東西流＋強い子午面循環)に対応しているのではないかと考えられる。
 - スーパーローテーション状態を初期条件にすれば、現実的な太陽加熱でも子午面循環メカニズムによる スーパーローテーションが再現されるのではないか？
- スーパーローテーションを初期条件として、どのような大気循環が維持されるかを調査する。

東西平均場 (100 地球年)

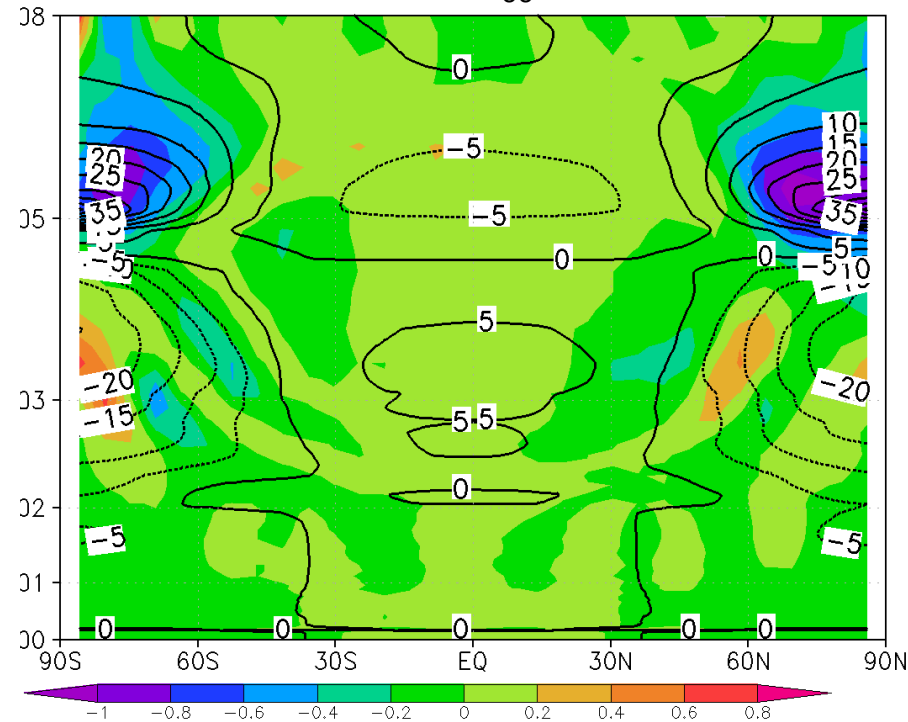
Case $Q=Q_0$, $H=2$ km, $E=3.0E-2$

V (color) and U (contour)



速いスーパーローテーションが上層だけでなく、45 km 以下の下層でも維持されている。顕著な中緯度ジェットが存在 (~150 m/s at 45° latitudes).

W (color) and $T(y,z)-T_{00}(z)$ (contour)

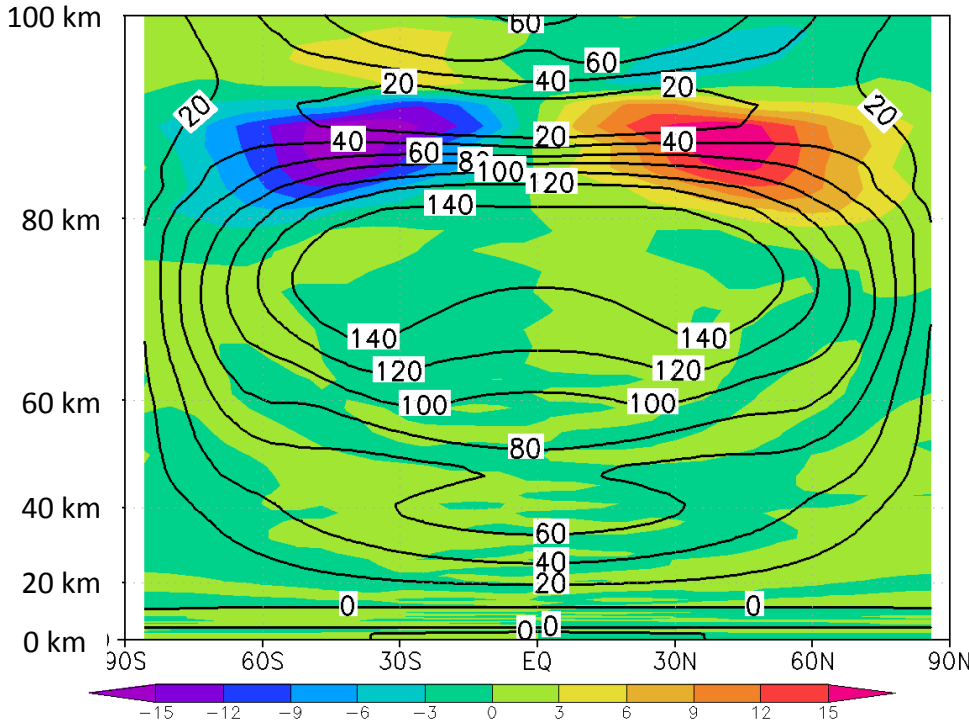


低緯度では地面から高度 100 km まで上昇流が卓越。

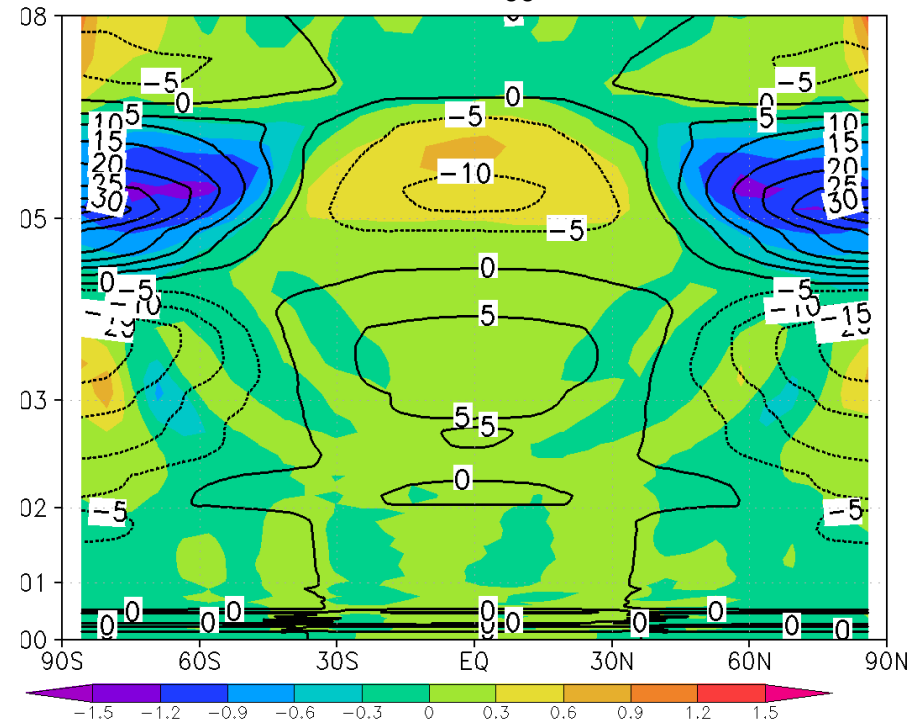
東西平均場 (100 地球年)

Case $Q=Q_0+Q_2$, $H=2$ km, $E=3.0E-3$

V (color) and U (contour)



W (color) and $T(y,z)-T_{00}(z)$ (contour)



太陽加熱に半日潮成分を加え、さらに鉛直渦粘性を小さくしたところ、負の東西平均流 $U < 0$ が低緯度に現れた。

AFES for Venus

- AFES (AGCM for ES2/JAMSTEC)
 - 地球シミュレータ (ES2) に最適化された大気大循環モデル。地球だけでなく、火星や水惑星にも応用されている。
 - 火星の計算例: T639L96 (Takahashi et al.)

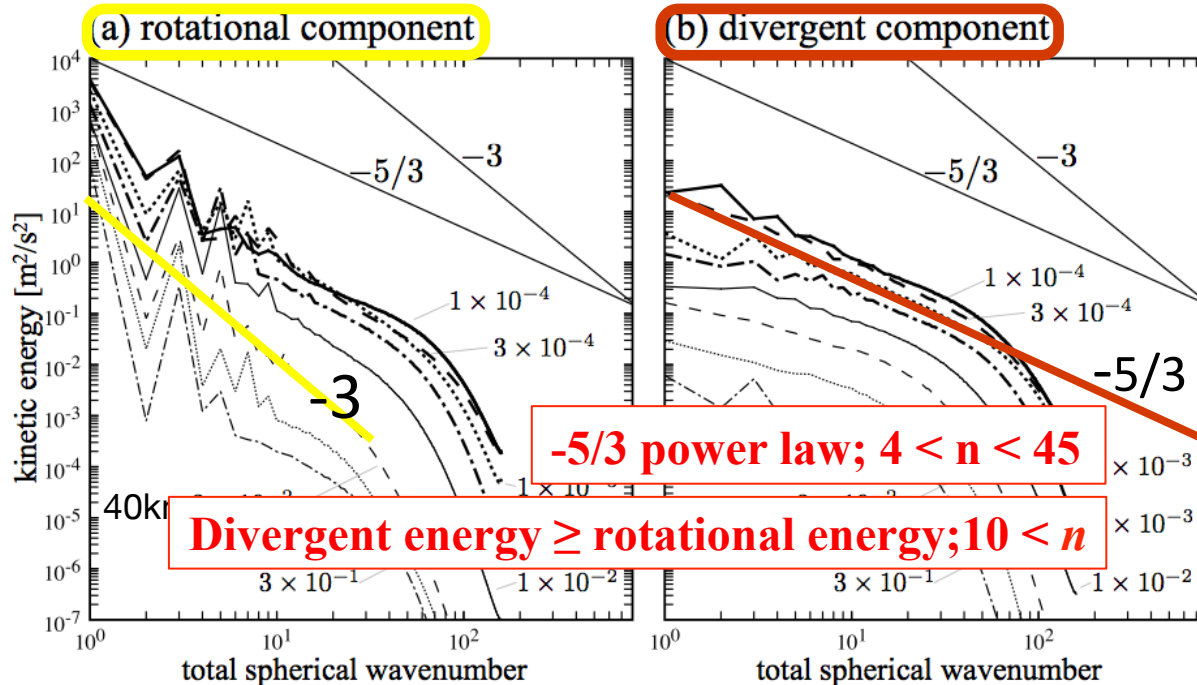
Node number	64 node
Vector efficiency	99.4%
Parallel efficiency	99.8%
CPU time	1 martian days / ~4 hours

- 今回はそれを金星に適用し、金星の大気循環を調べる。

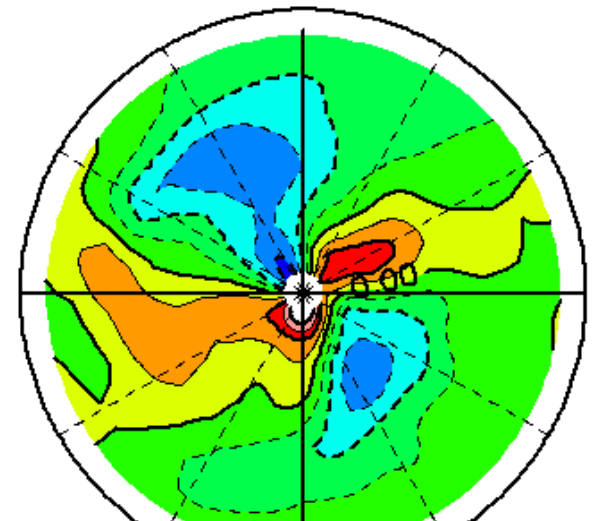
AFES for Venus による計算

- 主に以下の結果を解析中
 - 傾圧不安定について（この発表）
 - エネルギーースペクトル（檜村@JAMSTEC）
 - 極渦（安藤@JAXA）

T159L120 simulation (Kashimura et al., in preparation)



Vorticity in polar region
(Ando et al., in preparation)



“S-shaped” polar vortex

金星大気中の傾圧不安定

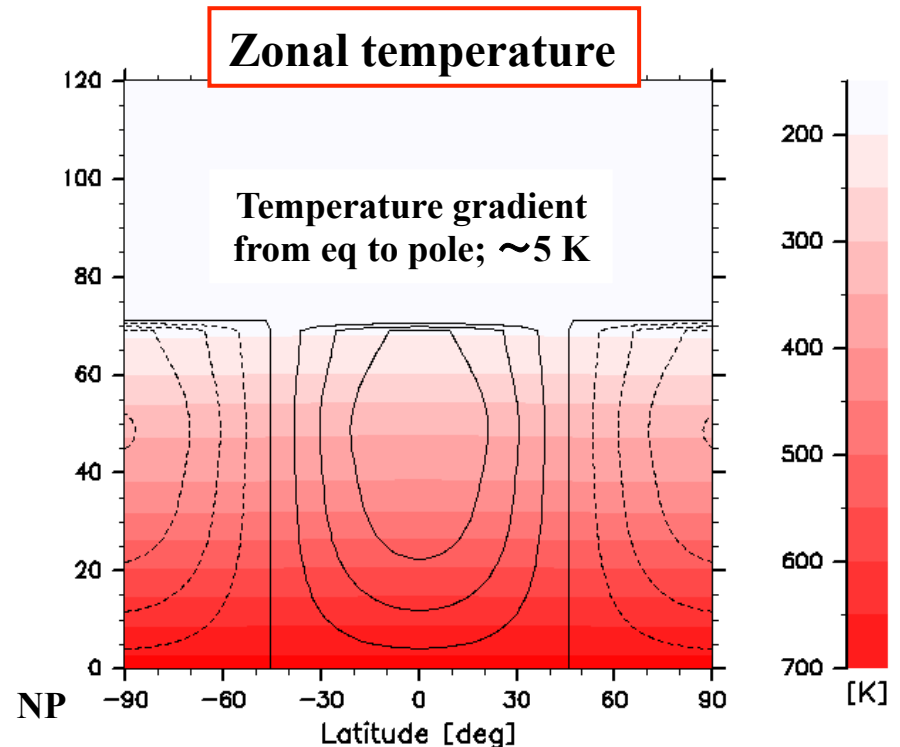
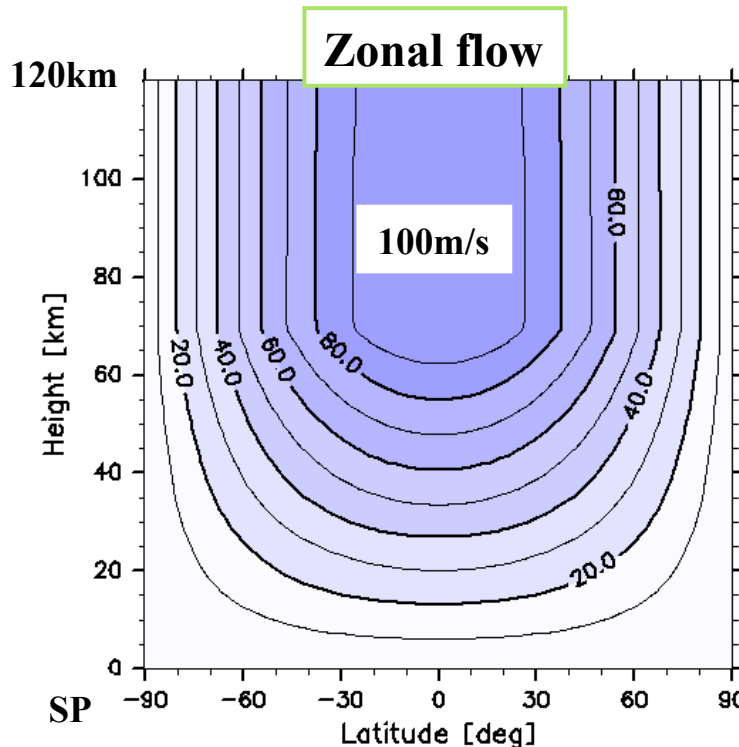
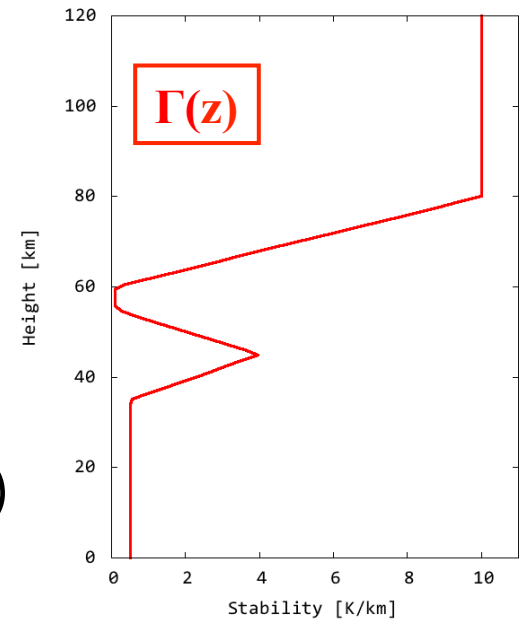
- 理想化されたスーパーローテーションの線型安定性解析
 - 傾圧不安定は起こり得る (Matsuda 1984; Young et al. 1984; Takagi and Matsuda 2005, 2006)
 - ただし、観測されたことはない。
- GCMによる研究
 - 傾圧不安定が生じた (Sugimoto et al. 2014)
 - ただし、太陽加熱を考慮していない。
- 本研究では、太陽加熱を考慮し、現実的なスーパーローテーション中の傾圧不安定を調べる。
Sugimoto et al. (GRL 2014) として報告済み。

モデルの概略

- AFES for Venus
 - T63L120 (0–120 km)
 - 水平超粘性の緩和時間: 0.03地球日
 - 鉛直渦粘性: $0.15 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
 - 80 km 以上に弱いスポンジ層(波数 0 成分を除く)
- 太陽加熱
 - 観測と理論計算に基づく現実的な強度と分布 (Tomasko et al. 1980; Crisp 1985)
 - 東西平均成分とそれ以外を別々に与えられる
- 放射過程
 - ニュートン冷却で近似
 - 緩和先の温度分布は VIRA に基づく水平一様な温度場
 - 緩和係数は Crisp (1986) に基づく

初期値

- 初期値は剛体回転したスーパーローテーション(左下)
- 雲層中の弱安定成層を考慮(右上)



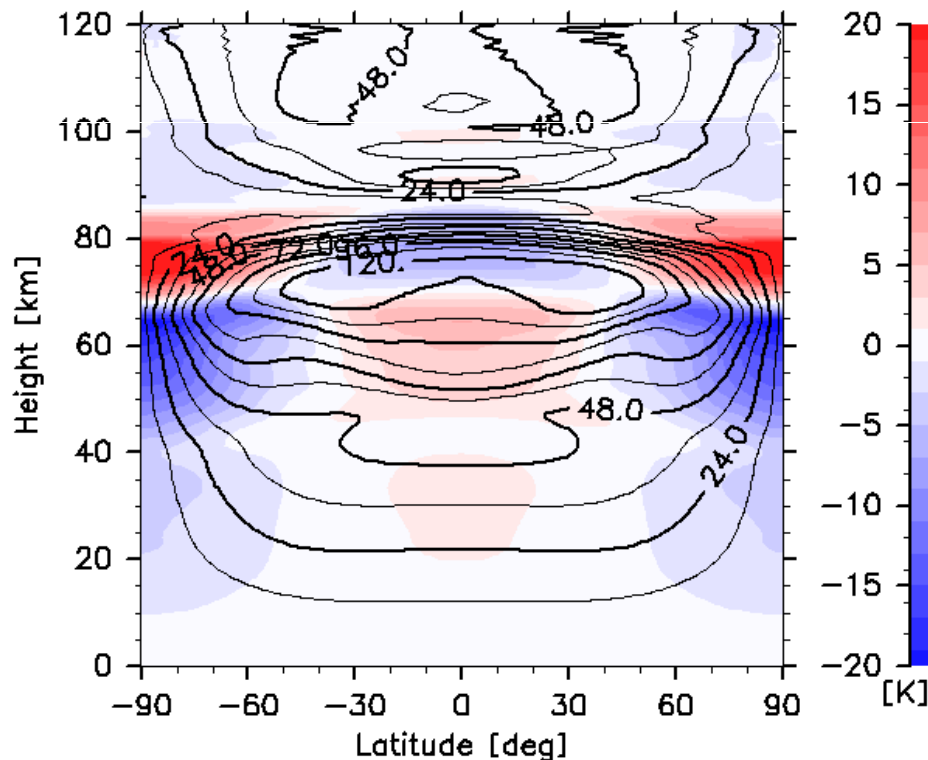
結果

- 現実的なスーパーローテーションが再現された
 - 熱潮汐波による赤道加速 (120 m/s)
 - 極と赤道間の水平温度差は 25 K 以上

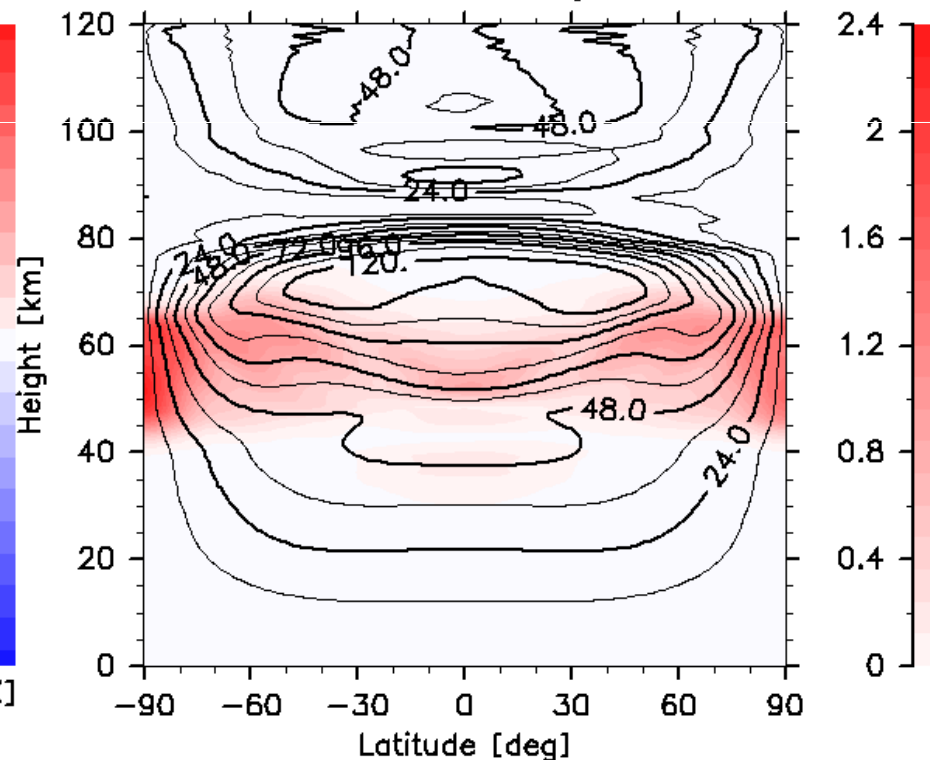
Temperature gradient

Zonal-mean zonal flow(contour)

Wave activity



CONTOUR INTERVAL = 1.200E+01



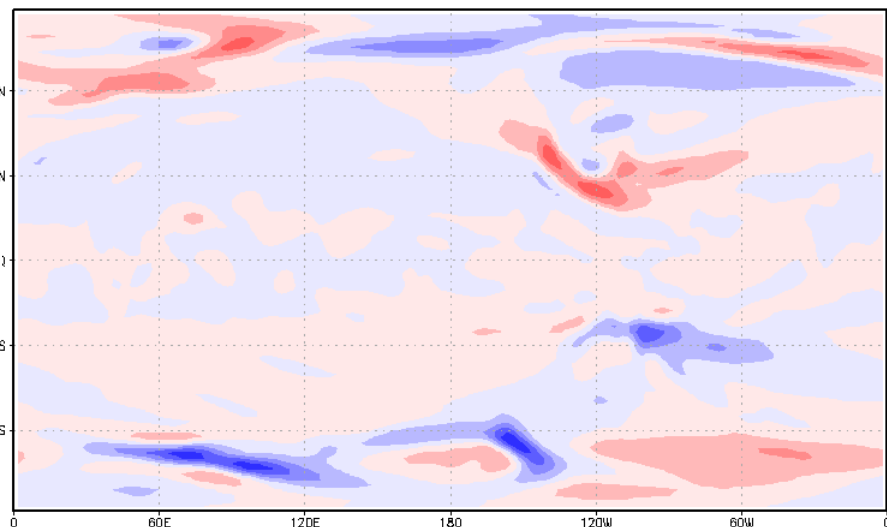
CONTOUR INTERVAL = 1.200E+01

傾圧波のライフサイクル

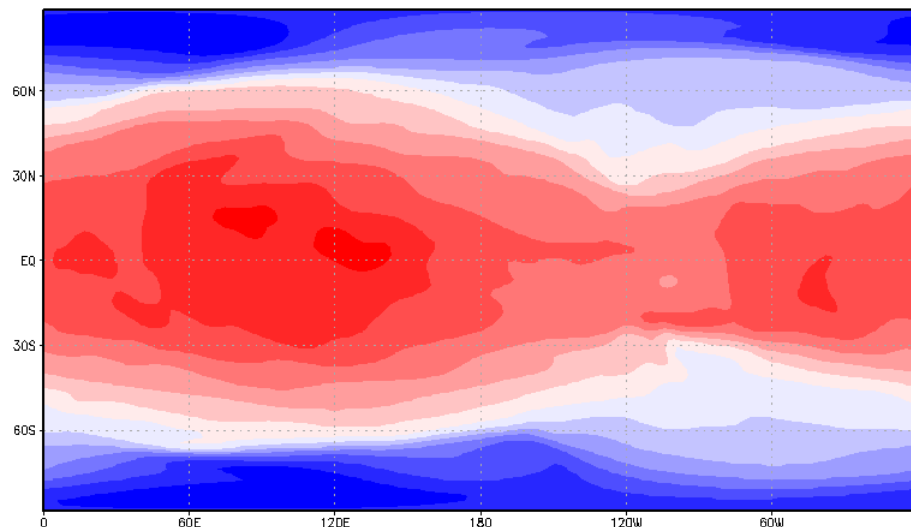
- 大きな南北温度傾度により, 40° – 70° の中緯度付近で傾圧波が繰り返し励起される。卓越東西波数は 1
- 高緯度 ($> 70^{\circ}$) では別の不安定もみられる(位相速度が異なる)。

Lat

Vorticity disturbance



Temperature



0.0001 8e-05 6e-05 4e-05 2e-05 0 2e-05 4e-05 6e-05 8e-05 0.0001

Lon

246 248 250 252 254 256 258 260 262 264 266 268 270

GrADS: COLA/IGES

2014-09-05 10:50

2014-09-05-10:50

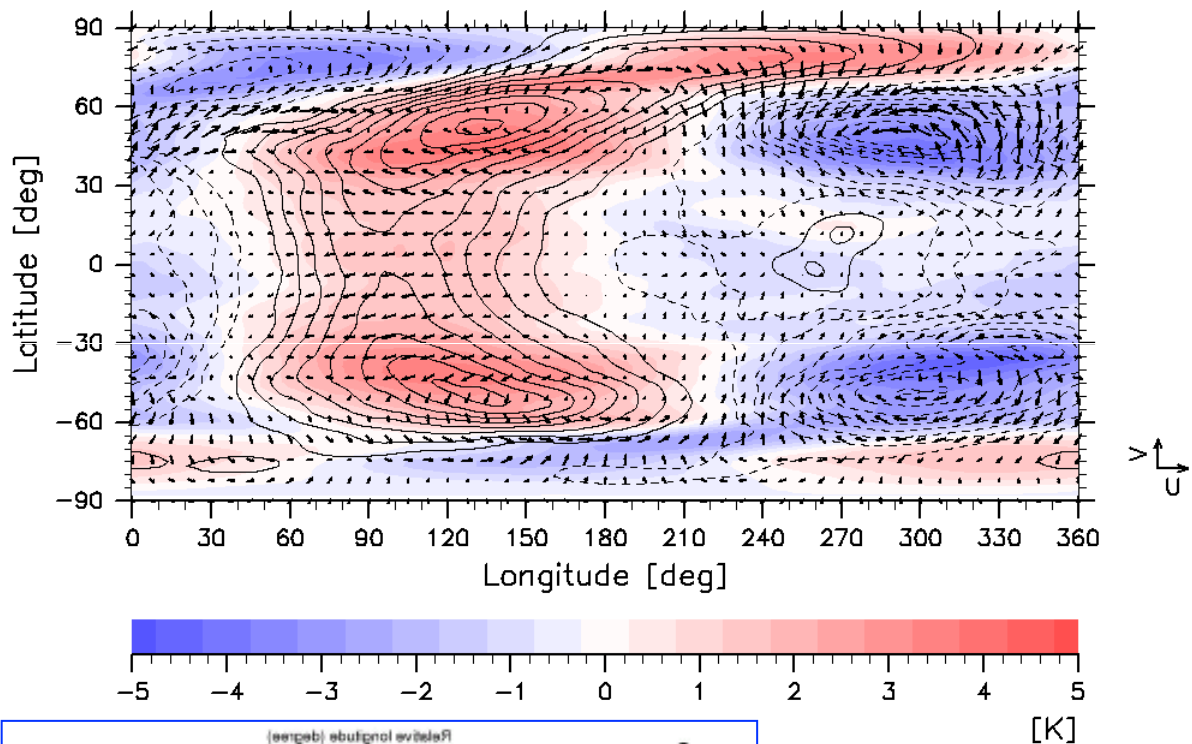
自転の方向

(6 hour intervals)

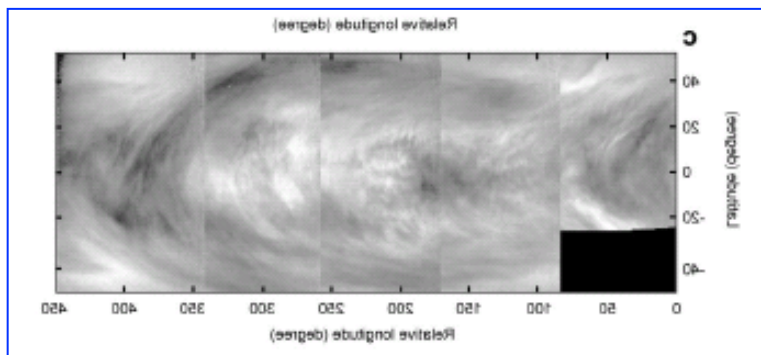
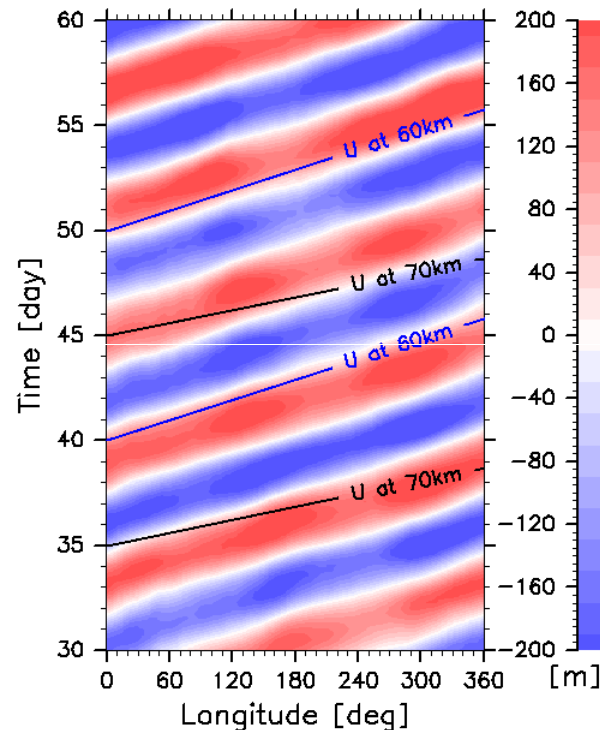
雲頂高度のいわゆるロスビー波に類似

- 雲頂高度でみると、波は平均流より遅く東西伝播し、周期は 5.8 地球日程度。
- 波に伴う風速は $v' \sim 20$ m/s at 70 km.

Geopotential height and horizontal flow



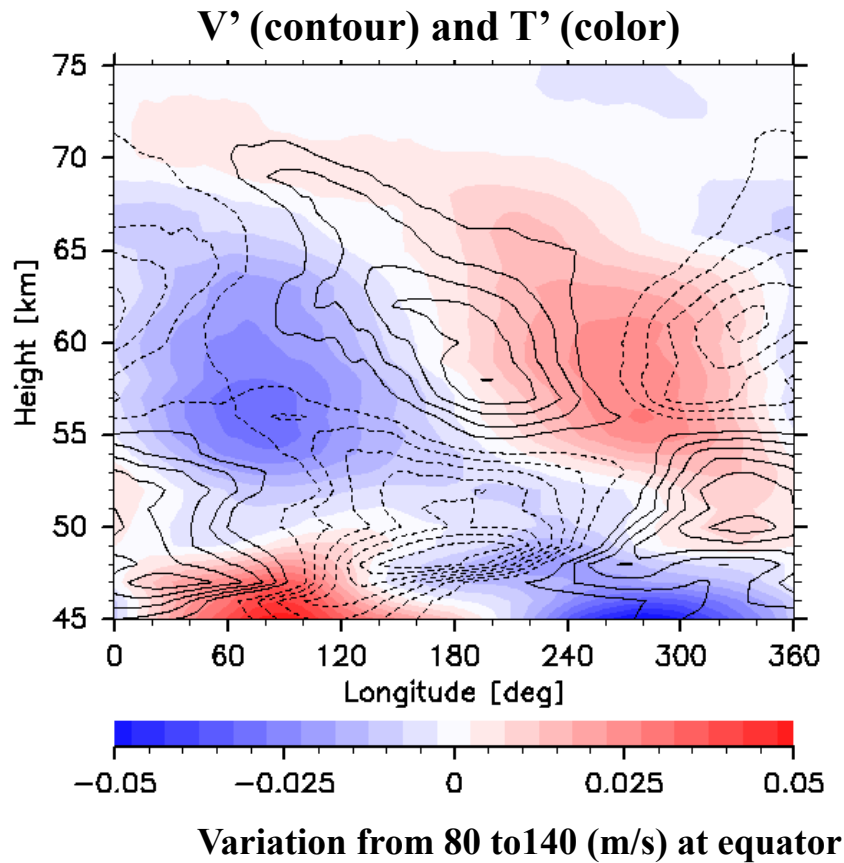
Hovmöller diagram at 45N



Reminiscent of Y-shape structure

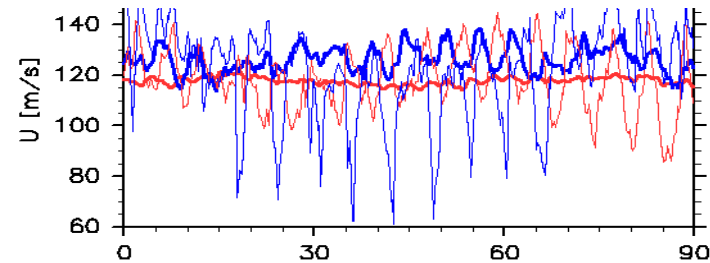
鉛直構造と平均東西流の時間変化

- 傾圧不安定波が雲層上端ではいわゆるロスビー波として観測される。
- この波はスーパーローテーションの時空間変動に寄与している。

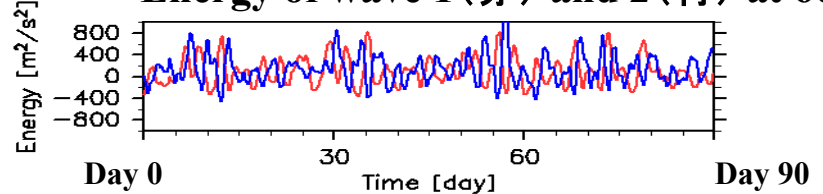


観測によく似た平均東西流の
時間変動が見られる。

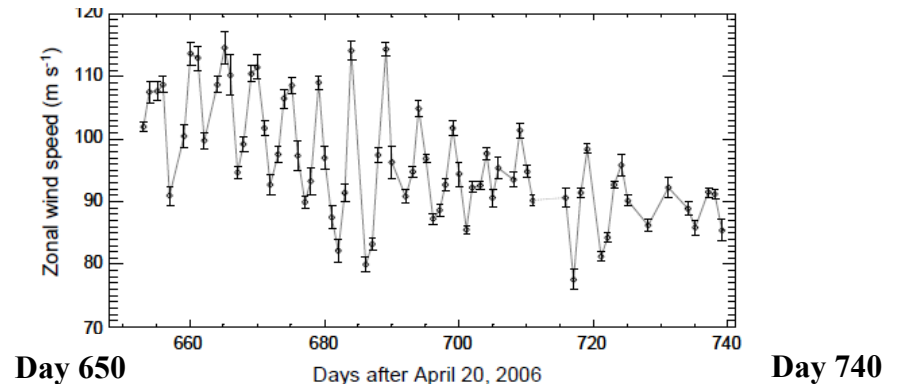
**Zonal flow at Equator (赤) and
45N (青), 70km**



Energy of wave 1 (赤) and 2 (青) at 60km



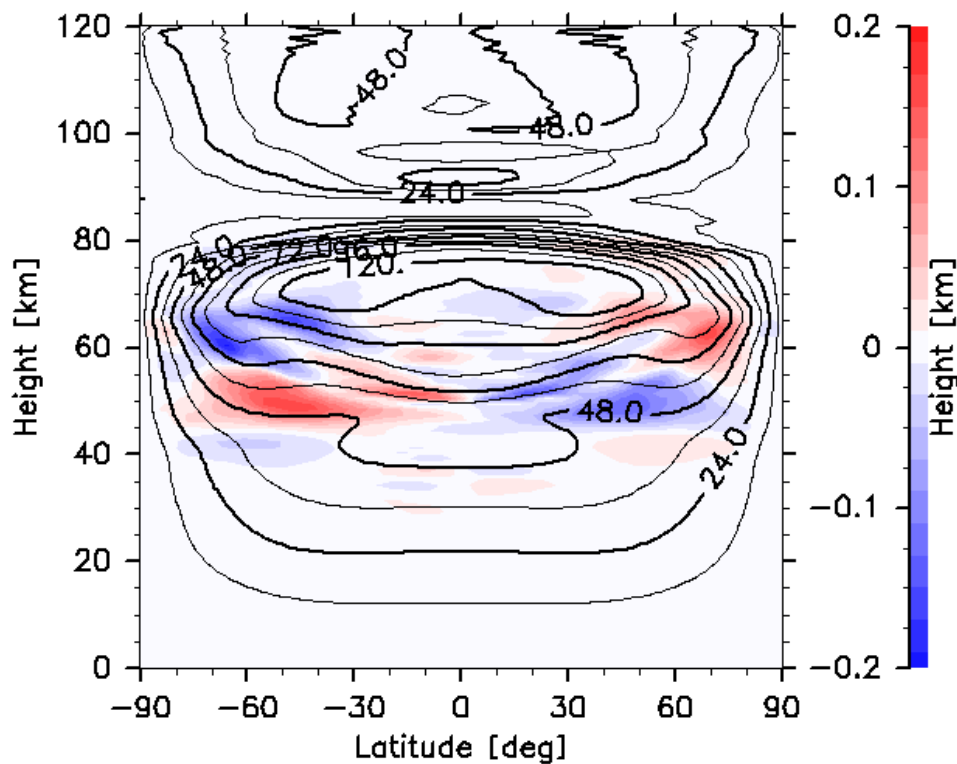
Zonal flow Obs. (Kouyama et al., 2013)



波による運動量と熱の輸送

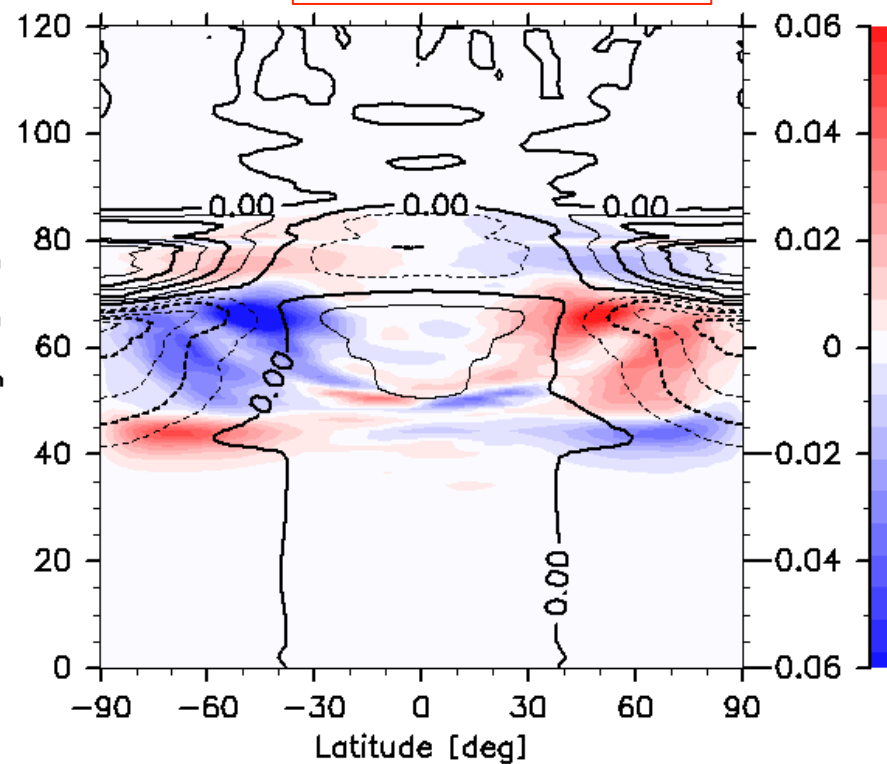
- 波が成長する領域で平均流を加速
- 極向きの熱輸送（傾圧不安定波に典型的）

Zonal mean ($u'v'$)



CONTOUR INTERVAL = 1.200E+01

Zonal mean ($v'T'$)



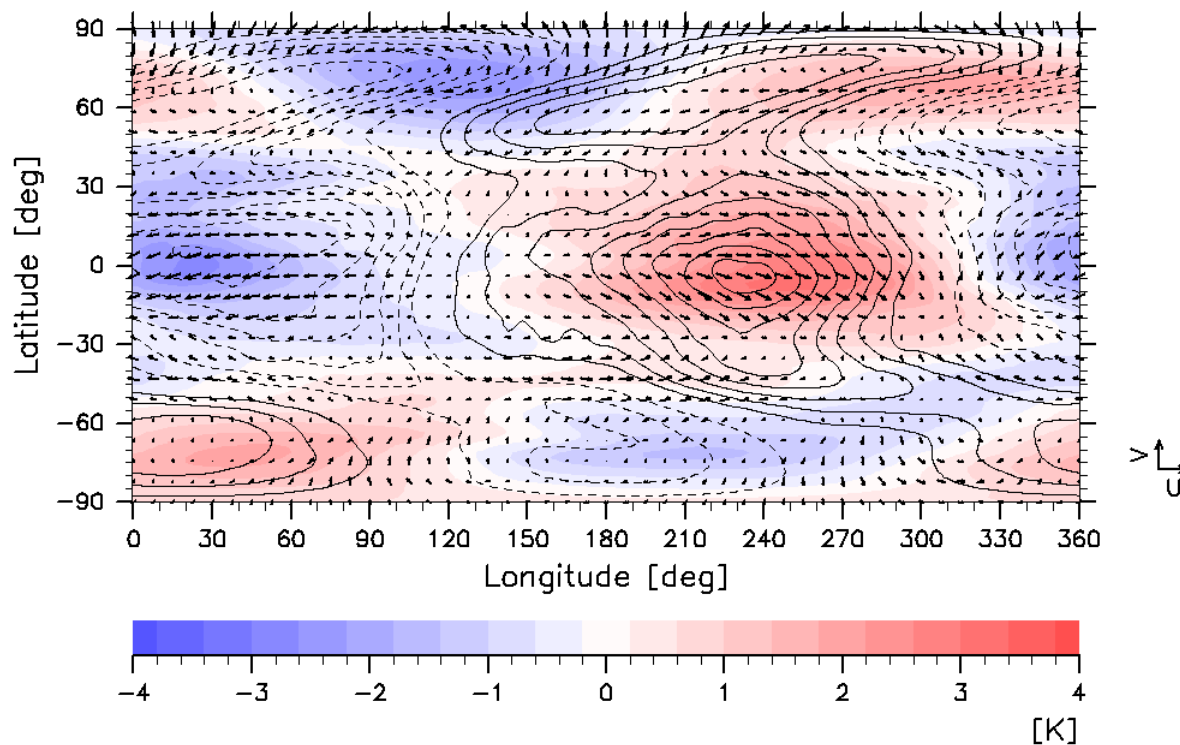
CONTOUR INTERVAL = 4.000E+00

Sugimoto et al. (JGR 2014) よりも顕著な傾圧不安定波による運動量と熱の輸送がみられる。

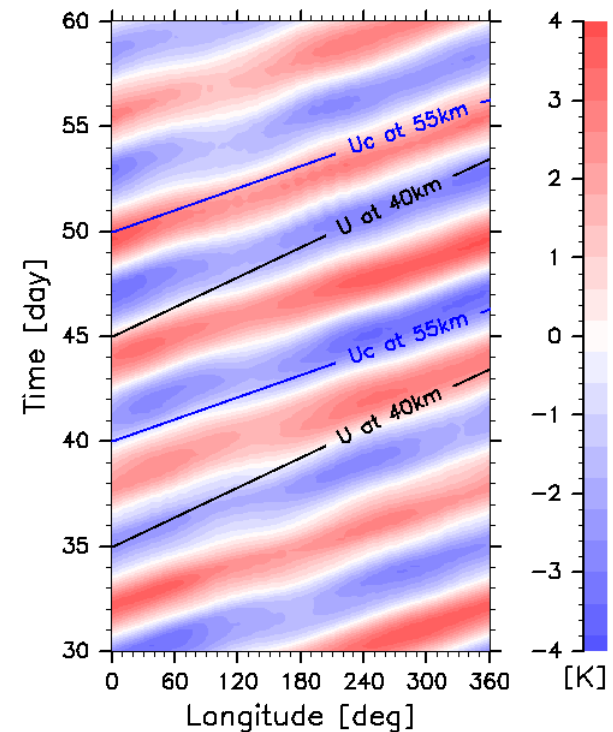
ケルビン波的な不安定波 (50 km)

- 下部雲層の高度には、平均流よりも速く伝播する赤道に振幅をもつ波がみられる。
- 波の振幅は $v' \sim 5$ m/s, $Z' \sim 10$ m at 40 km.

Geopotential height and horizontal flow



Hovmöller diagram at equator



波の構造は球面上のシア不安定波に類似？ (Iga and Matsuda, 2005)。
Hosouchi et al., (2012) が観測した雲中の波とも類似？
詳細はこれから。

まとめ

- AFES for Venus に現実的な太陽加熱を導入して金星大気シミュレーションを行った。
- 観測ともよく一致する、現実的なスーパーローテーションが再現された。
- 中緯度の雲中の低安定度層に、10日程度のライフサイクルをもつ傾圧不安定が生じた。
- この傾圧不安定波は雲層上端でいわゆるロスビー波に類似していた。また、この波が引き起こす平均東西流の時空間変動は、観測された東西流の変化とよく一致していた。
- 雲中高緯度や下部雲層赤道域にも、活発な波活動がみられた。今後、詳細に解析していく予定。