

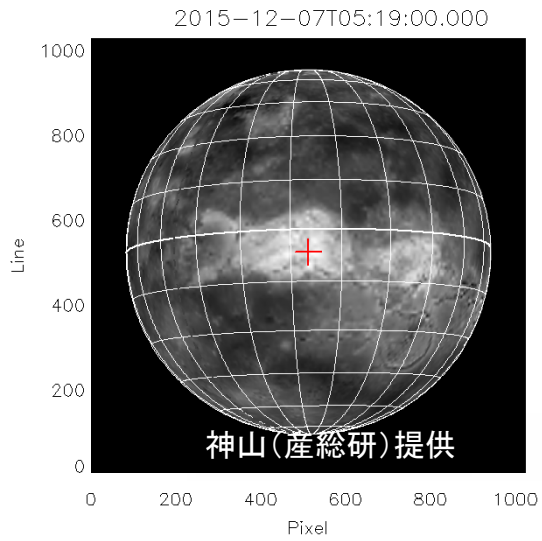
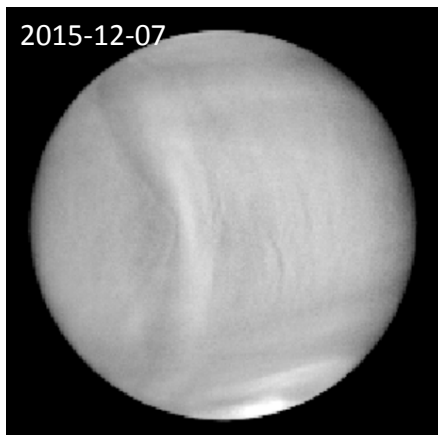
## 金星における地形固定重力波の数値実験

今村剛（東京大）、堀之内武(北海道大)

### 概要：

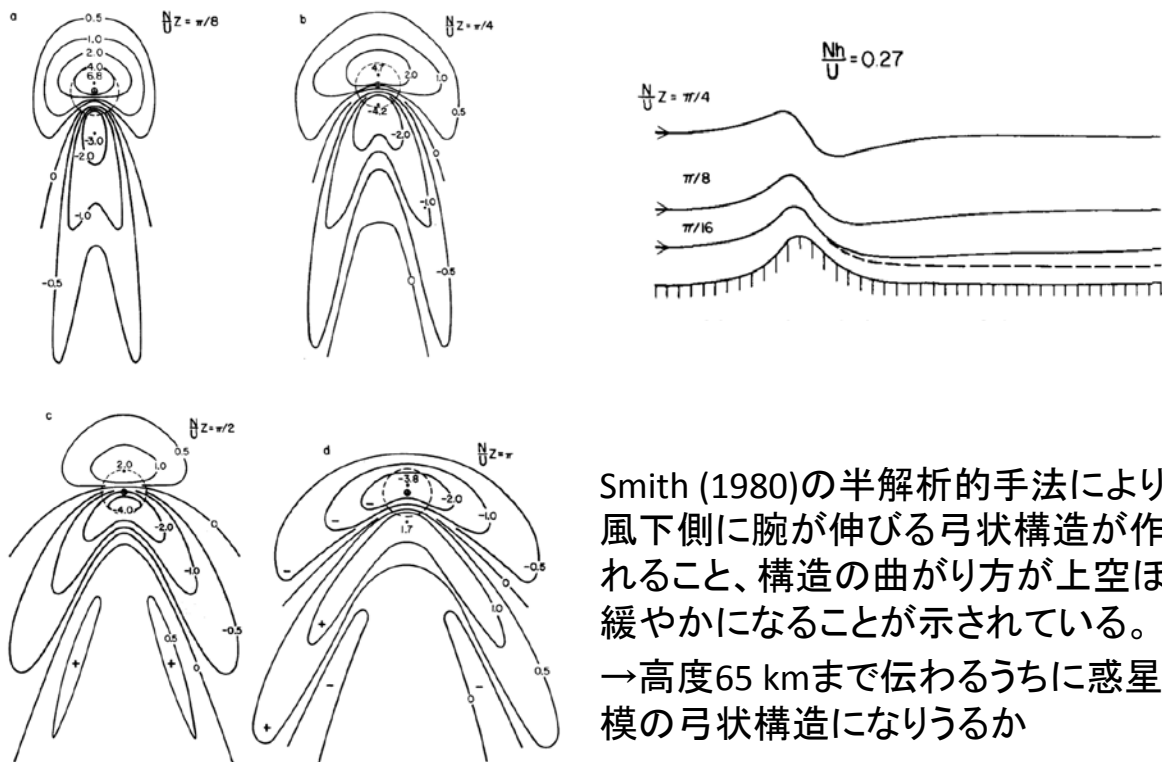
あかつき搭載 LIR により、金星雲頂において南北に 1 万 km にわたる弓状の温度構造が発見された。この構造は特定の高地の上空を通るように南北に伸びる傾向があり、注目すべき特徴として地表に対してほぼ静止しているということがある。我々はこの構造は赤道域の大規模地形によって励起された大気重力波が雲層高度まで伝搬することにより形成されると考え、数値モデリングにより構造の再現を試みた。計算結果は観測された特徴をよく捉えており、メカニズムがほぼ確定したと考えられる。しかし一方で、大気-固体惑星間の角運動量バランスの考察から、赤道域の地表近くには上空のスーパーローテーションとは異なる向きの背景風が存在することが期待されるため、地形性重力波が臨界層に阻まれず雲頂にまで到達するには特別な状況が必要かもしれない。このような地形性重力波は、これまでアクセスが困難だった接地境界層の物理状態について新たな情報をもたらすことが期待される。

# LIRがとらえた弓状構造



- 直下に高地が存在 → 地形性の重力波か

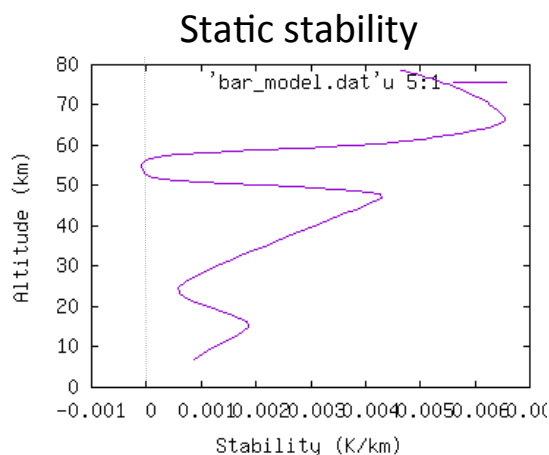
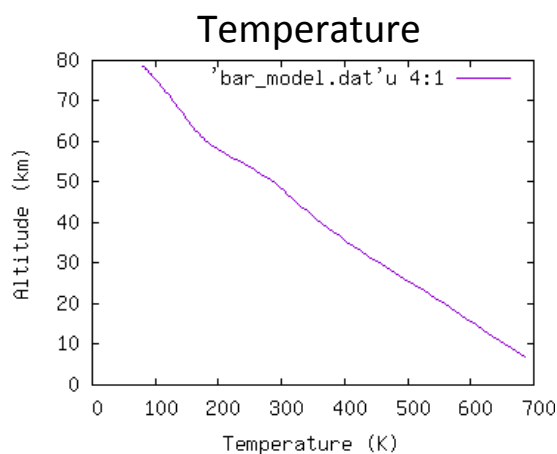
## 孤立峰による山岳波(重力波)の励起



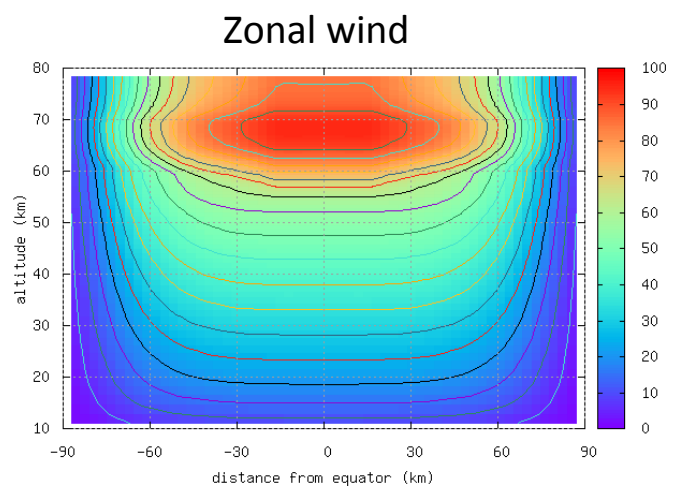
Smith (1980)の半解析的手法により、風下側に腕が伸びる弓状構造が作られること、構造の曲がり方が上空ほど緩やかになることが示されている。  
→ 高度65 kmまで伝わるうちに惑星規模の弓状構造になりうるか

# Modeling of gravity waves excited by a stationary disturbance near the surface

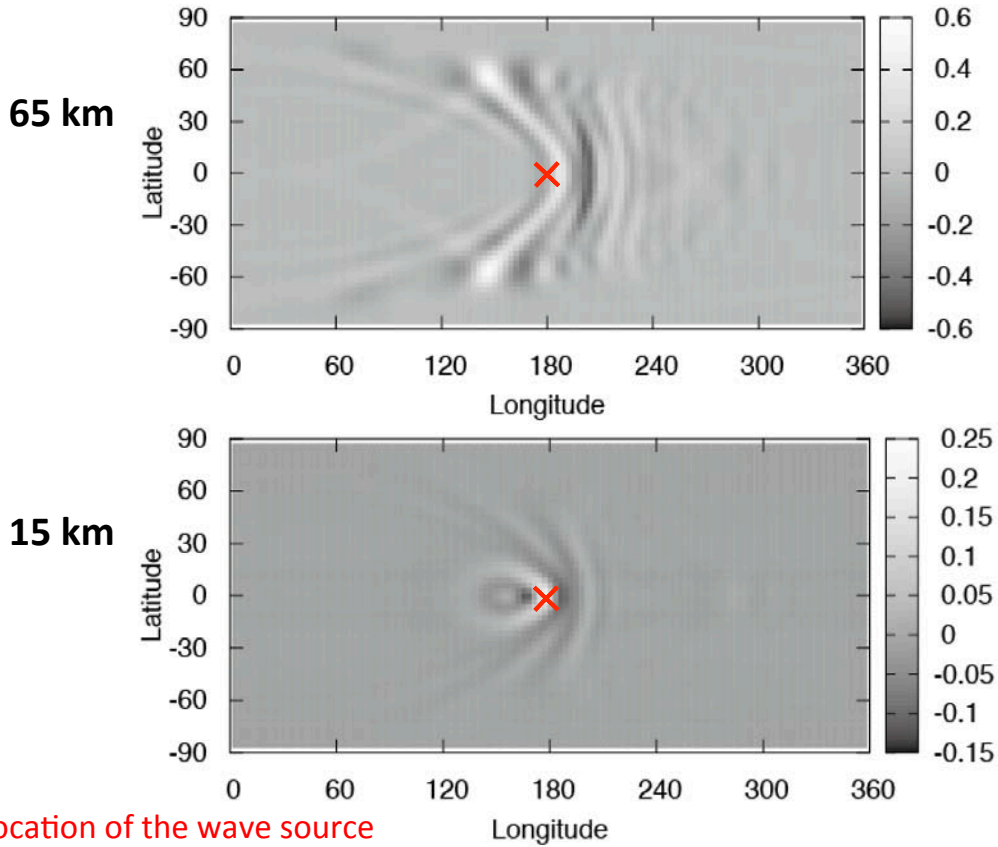
- Primitive equations on a sphere, solved by the numerical scheme by Haltiner and Williams (1980)
- Solving disturbances with the background winds/temperatures fixed to the initial state
- Altitude region: 5-80 km, discretized to 100 levels
- Grid interval:  $3^\circ$  both in longitude and latitude
- Wave forcing: Gaussian-shaped temperature anomaly with the peak value of 1 K and the half width of  $6^\circ$  at 5 km altitude
- Background field
  - The wind field and the temperature field are in cyclostrophic balance. The equatorial temperature profile is calculated from the static stability profile taken from Schubert and Walterscheid (1984).
  - The static stability is near zero around 50-55 km altitudes.
- Newtonian cooling according to Crisp (1989)



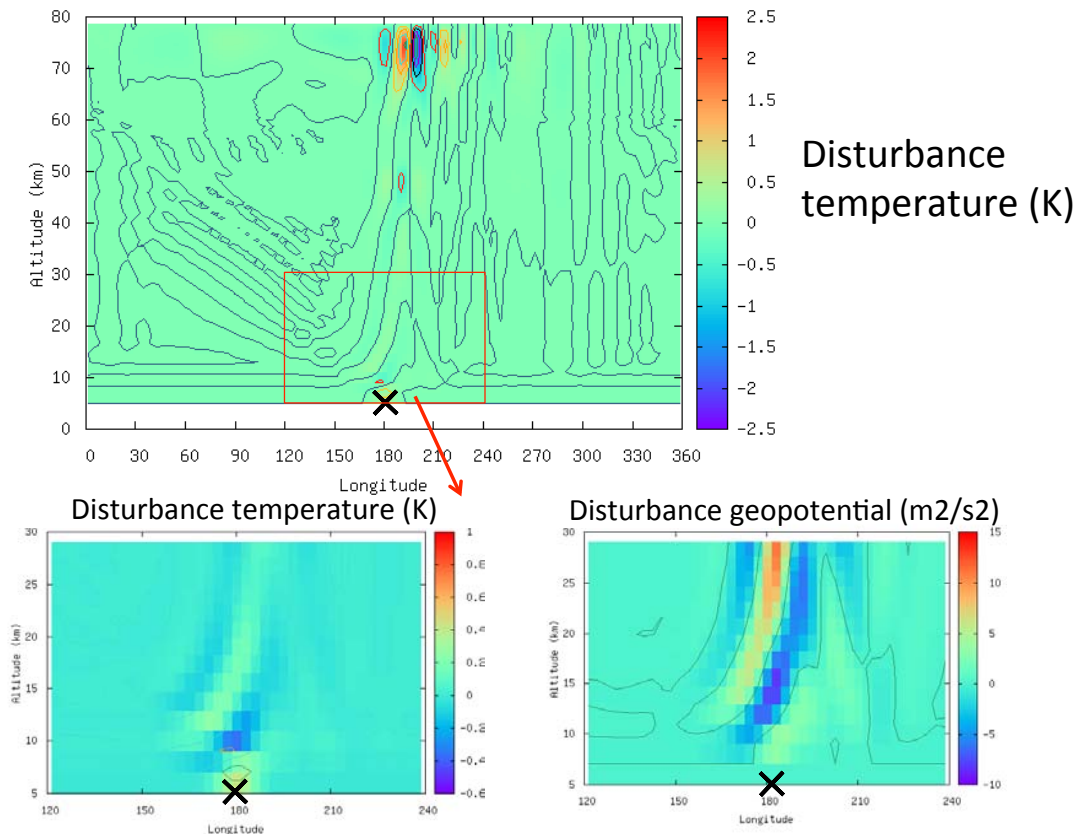
## Background state



# Horizontal structure of disturbance temperature



# Cross sections along the equator



## 中立層の影響

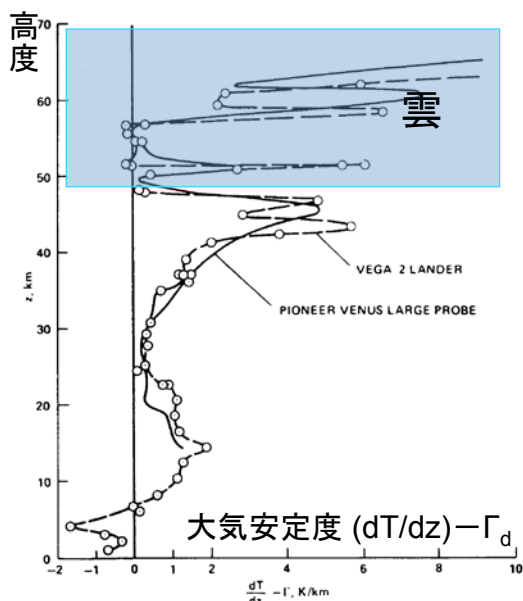


Figure 2. Static stability ( $dT/dz - \Gamma_d$ ) of the Venus lower atmosphere from the Pioneer Venus sounder probe (solid) and the Vega-2 Lander ( $\odot$ ) (figure from Sciff et al. 1987).

- 雲底が大気下層から赤外放射で加熱されることにより、雲層の中～下部にあたる高度48～58kmに中立成層がある。このため金星では重力波は雲層を横切って伝搬できない、としばしば考えられてきた。
- 各高度での波の鉛直構造が各高度の背景場で局所的に決まる(WKBJ)として、中立層での振幅の高度  $z$  への依存性は

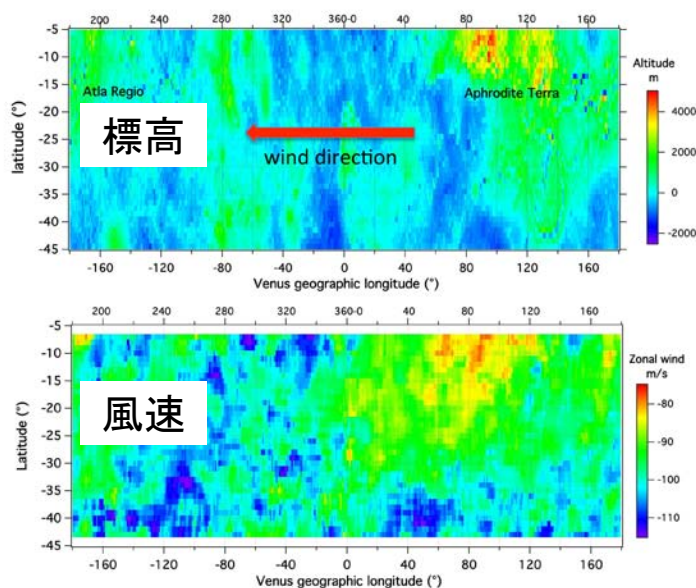
$$\hat{w}(z) \propto \exp(-k^2 H z)$$

$k$ : 水平波数

$H$ : スケールハイト

のようになる。 $(k^2 H)^{-1} \sim 8800$  kmであり振幅は中立層でほぼ一定となる。密度が高度とともに減少するぶんだけ波のエネルギー密度は下がるが、波は中立層の上まで透過すると考えられる。

## 帯状風の減速範囲

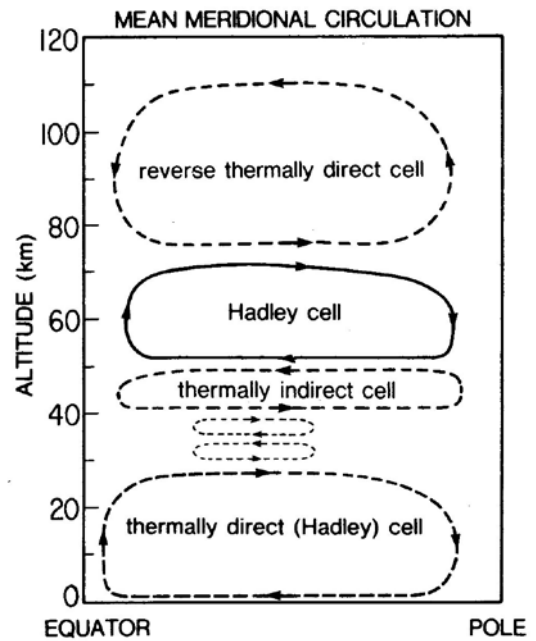


Bertaux et al. (2016)

- 重力波が雲頂高度で南北に大きく広がった構造を持つことは、帯状風が減速する領域が赤道域に集中せず中緯度まで広がっていることを説明するかもしれない
- 運動量輸送の評価が必要

# 赤道域低高度の風向と角運動量バランス

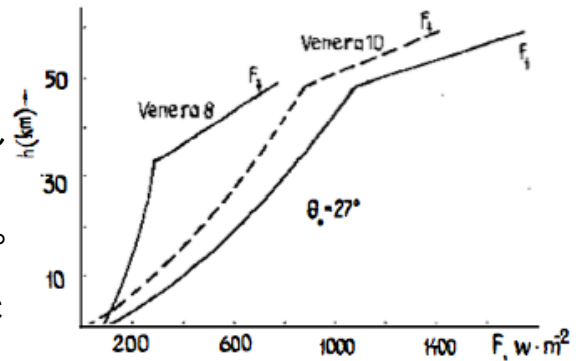
- 赤道域のいつでもどこでもスーパーローテーションと同方向であると、大気-固体惑星間の角運動量収支を満たしづらい
- 地理的あるいは時間的に風向が反転しているのか
- あるいは低地ではスーパーローテーションと逆方向、高地ではスーパーローテーションと同方向の風なのか



Schubert et al. (1980)

# 熱的励起の可能性

- 弓状構造は午後～夕方に現れる傾向
- ローカルタイム依存のメカニズムは？
  - 地表風にローカルタイム依存(熱潮汐など)
  - 日射サイクルが関与
- 下層大気の放射緩和の時定数は数十年 → 温度極大はかなり夕方側にずれるはず
- ある地域が日照側にあるのは約2ヶ月。たとえば地表への1ヶ月間にわたる正味日射フラックスを高度5kmにある厚さ2kmの大気層に分配すると、約2Kの温度上昇。この加熱によって高地の頂上の大気だけが周囲に比べて温められるとしたら、これが励起源となることも考えられる。



Marov (1978)

## まとめと課題

- あかつきLIRによって観測された定在弓状構造は赤道域の地形によって励起された重力波と考えられる。
- 大気-固体惑星間の角運動量バランスを考慮すると、赤道域で地形性重力波が臨界層に阻まれず雲頂にまで到達するには特別な状況が必要かもしれない。あかつきがLIRを始めカメラ群で観測しつつある地形性重力波は、これまでアクセスが困難だった接地境界層の物理状態について新たな情報をもたらすことが期待される。
- この重力波は雲頂からさらに高高度まで伝搬して上層大気の運動量収支に影響を与えることが予想される。
- 現実的な地形と日射サイクルを考慮した下層大気のモデリングが必要。