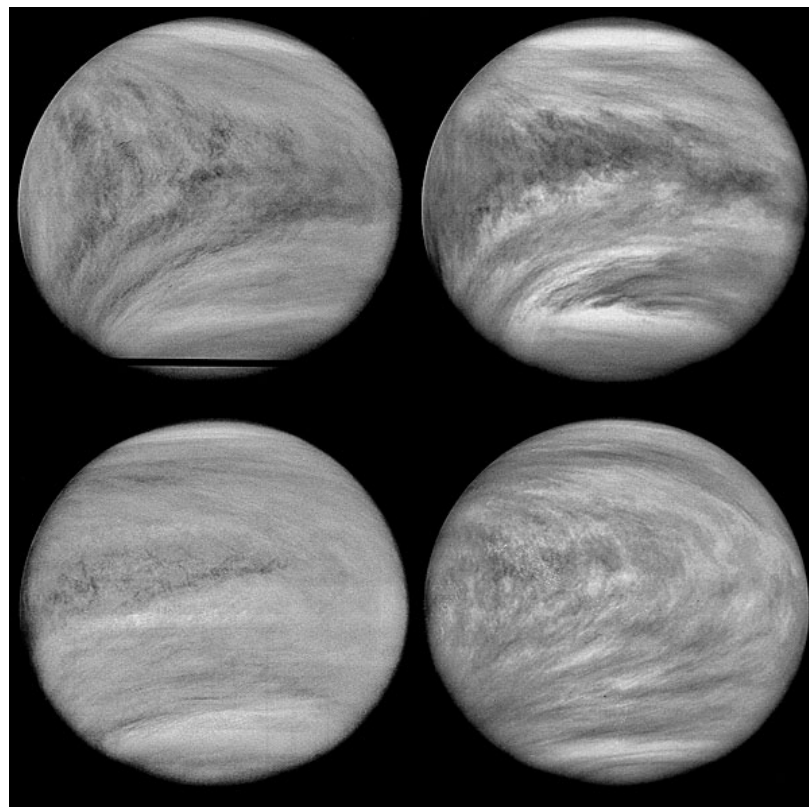
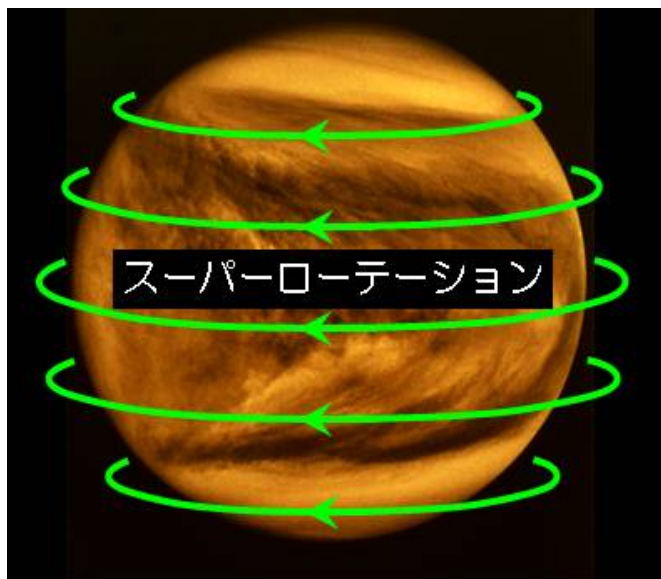


# 金星大気観測のレビュー

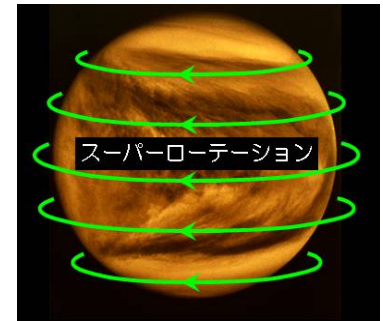
## 風速観測に関わる成果を中心に



# 観測成果に基づく スーパーローテーションの描像

◇鉛直構造 (In-situ Probe探査)

◇水平構造 (雲追跡・温度風)  
東西平均した構造



◇時間変動性

---

◆大気波動について

熱潮汐波由来の風速構造について  
惑星規模波動について

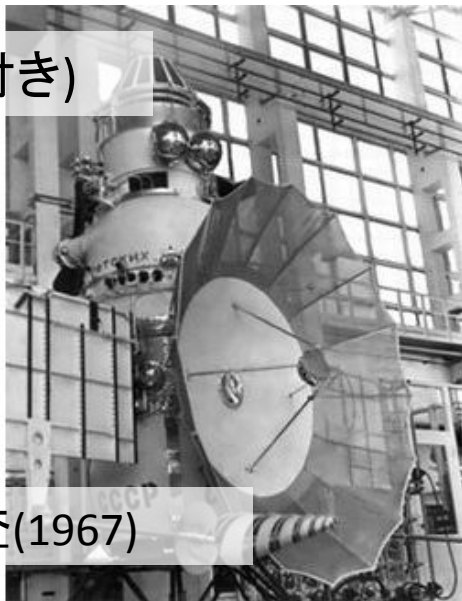
# ベネラ計画

・1-3号機(失敗)



4号機(着陸機付き)

・初の惑星直接探査(1967)



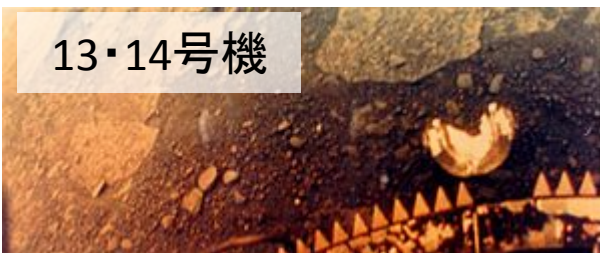
7号機

初の着陸後のデータ送信  
(23分間) (1970)

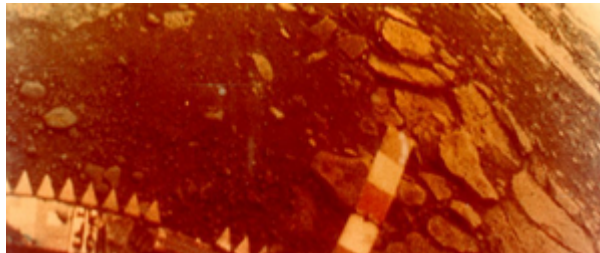


9号機

初の地表面撮像 (1975)



13・14号機



地表面撮像(カラー)  
地表面分析 (1981)

# Pioneer Venus 1号機・2号機

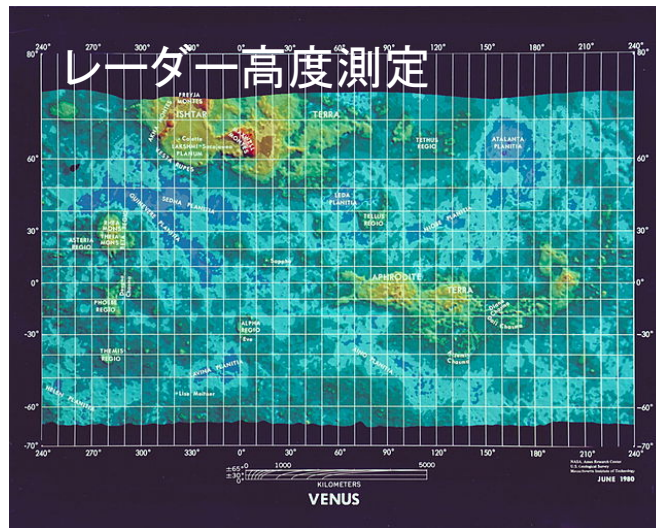
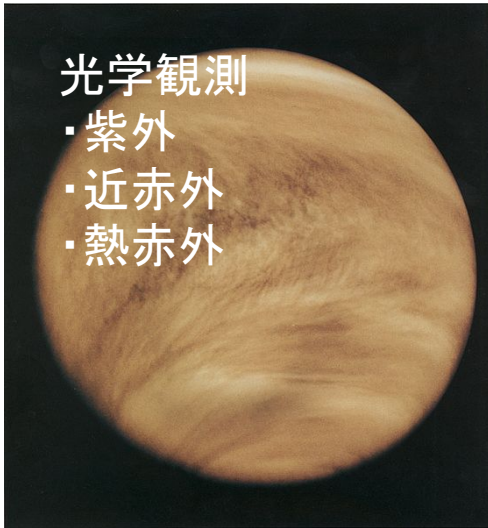


1号機:1978-1992年 観測実施

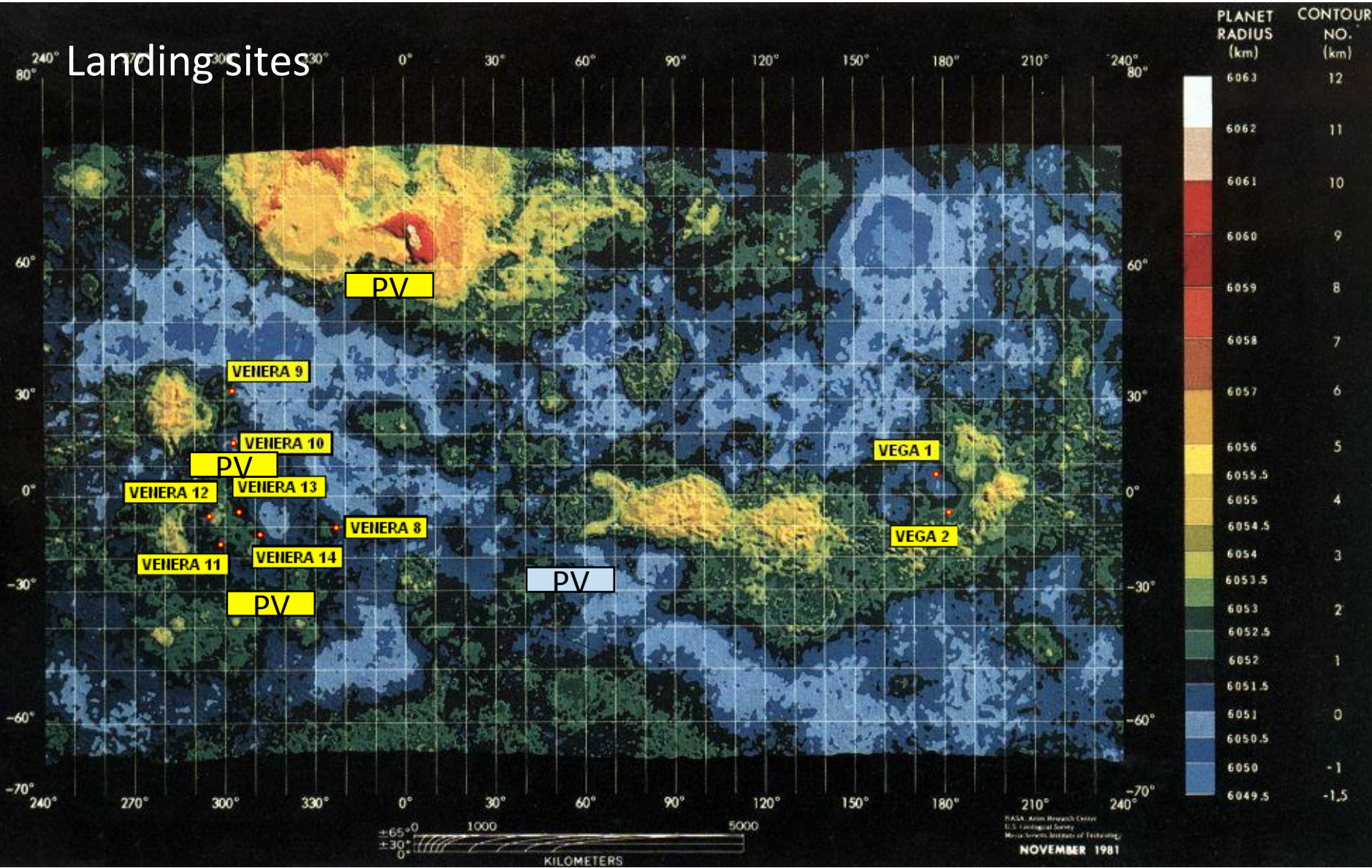
2号機:複数の降下機編隊観測  
多点直接観測の実施 (1978)

光学観測

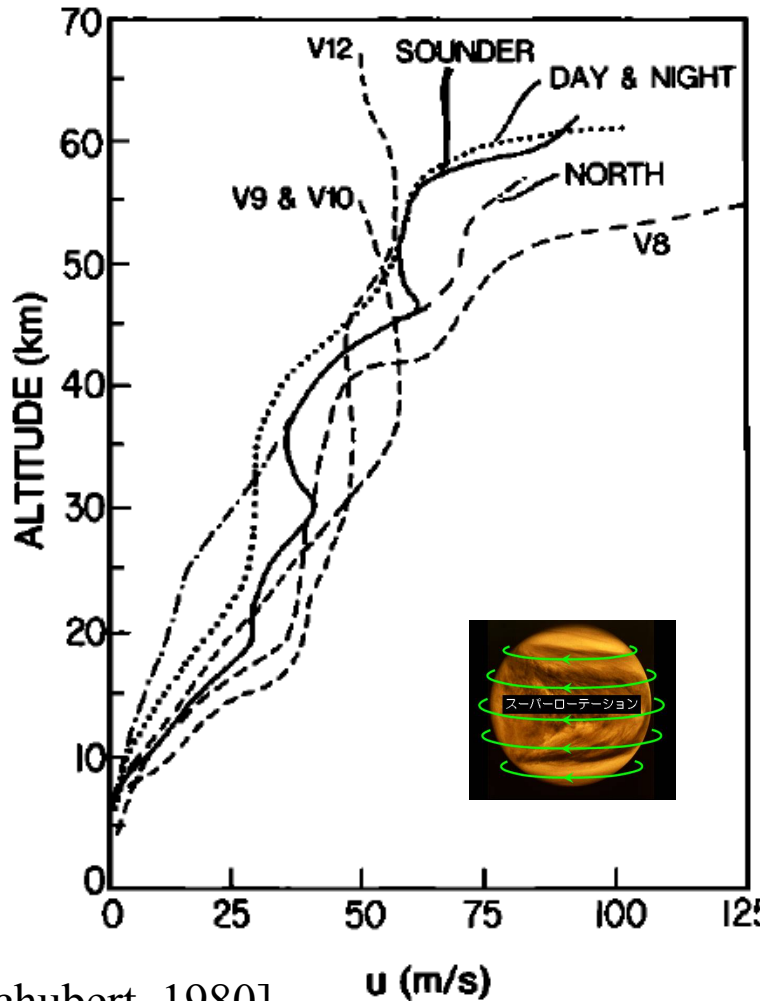
- ・紫外
- ・近赤外
- ・熱赤外



# Landing sites



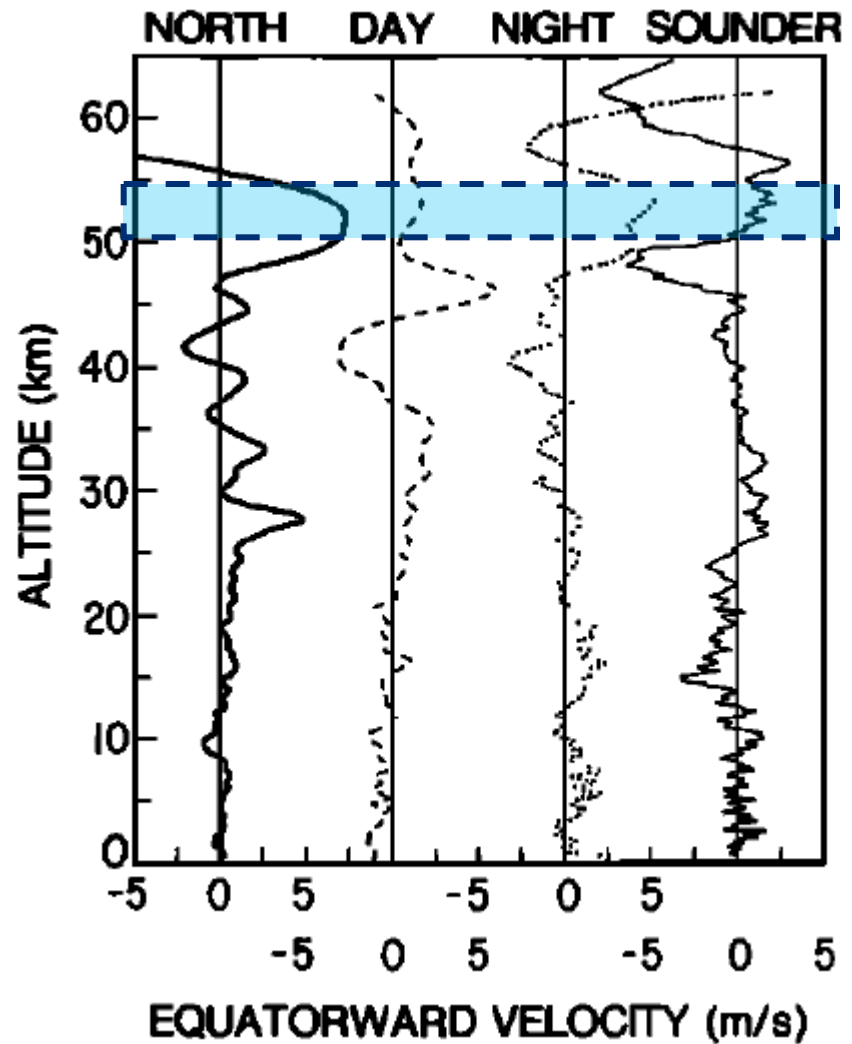
## 東西風速



[Schubert, 1980]

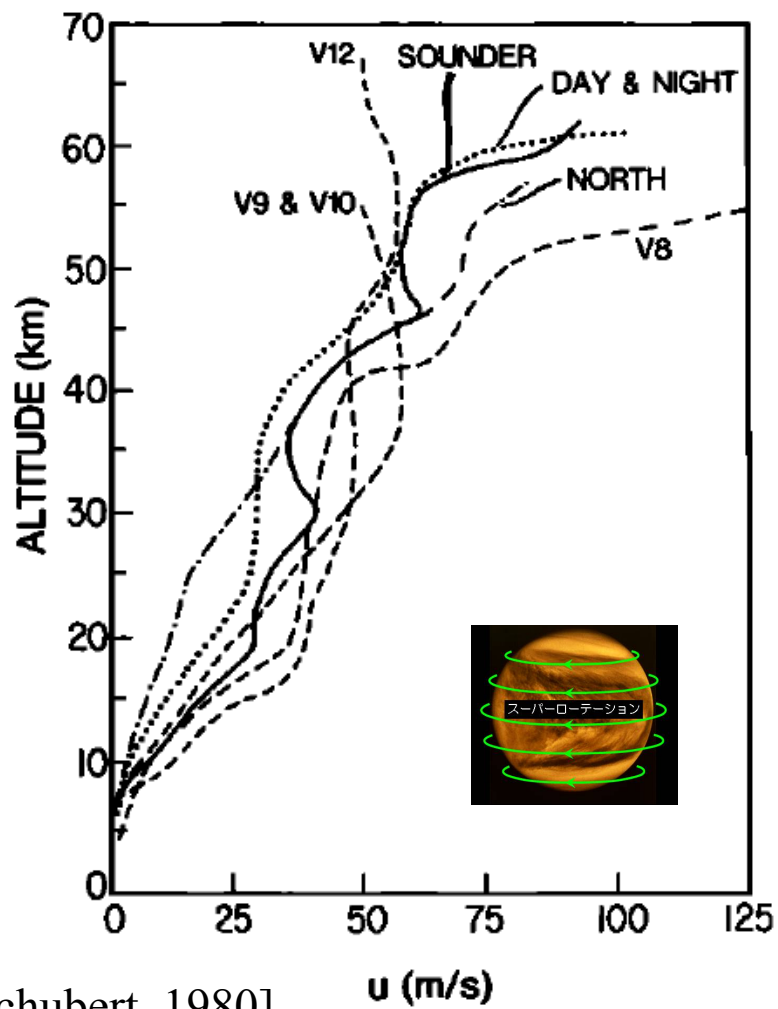
高度共に単調増加

## 南北風速(赤道向きを正)



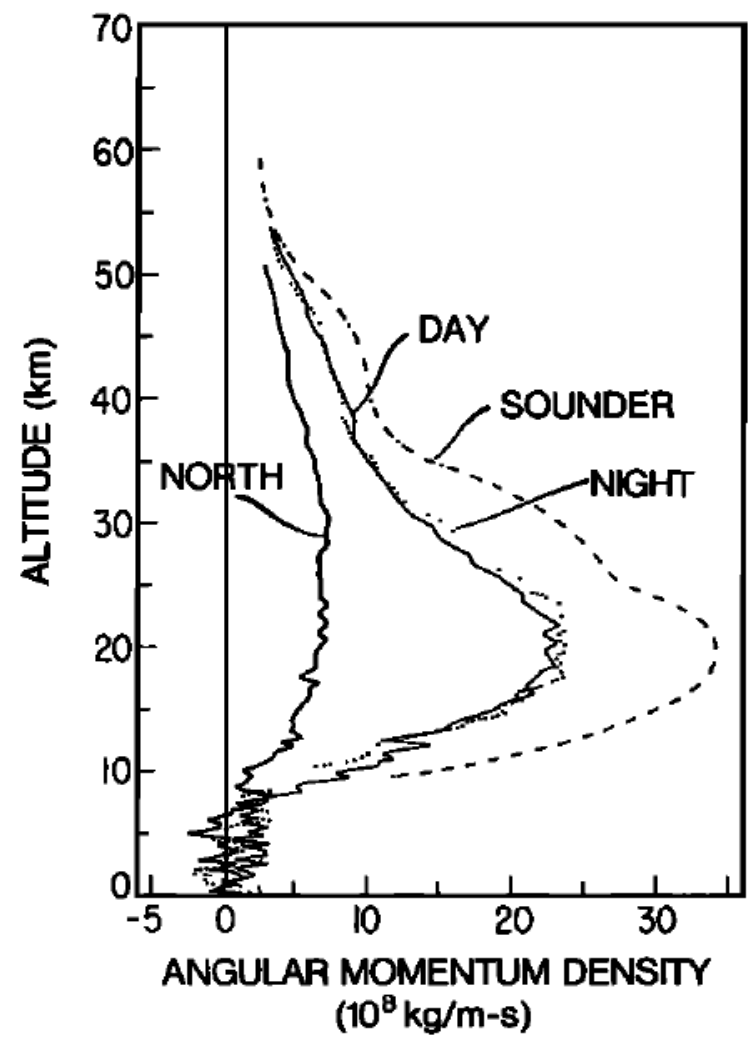
50-55kmに赤道向き南北風の層がある？  
雲頂高度での雲追跡結果と合わせて  
雲層ハドレーセルを想像 (マルチセル)

# 東西/南北風速分布

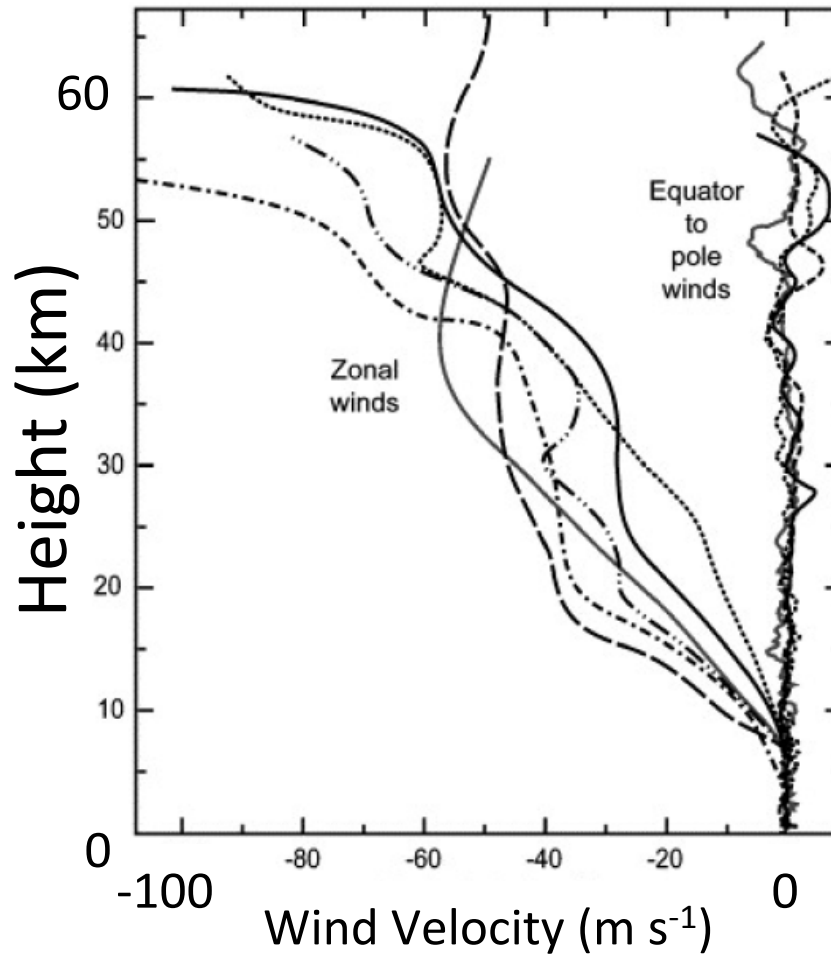


[Schubert, 1980]

# 角運動量換算



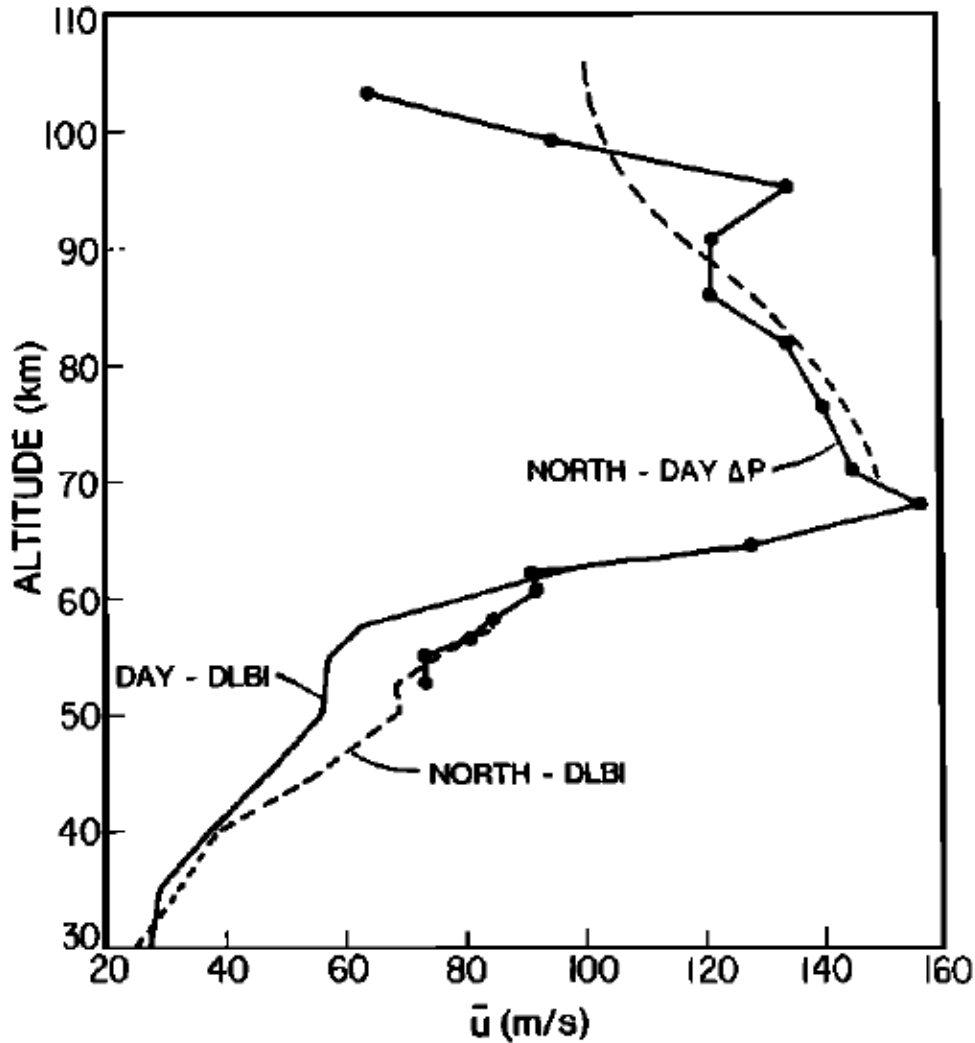
# 東西 vs 南北風速分布



[Schubert, 1980, from Moissl PhD Thesis]



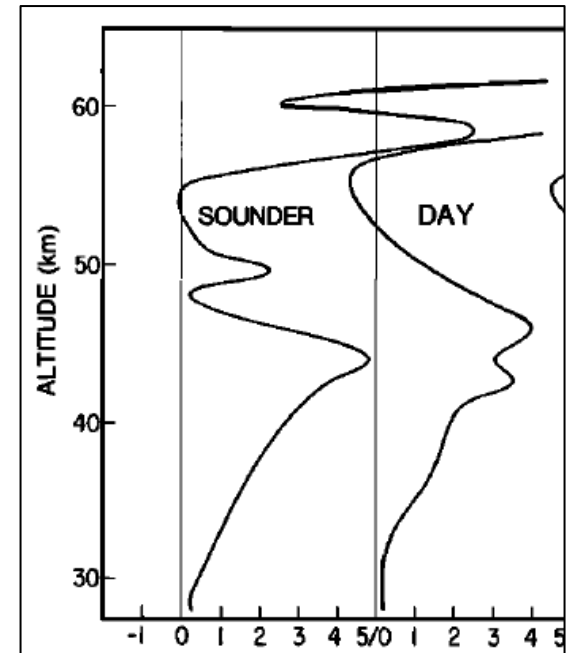
# もう少し上層高度



[Schubert, 1980]

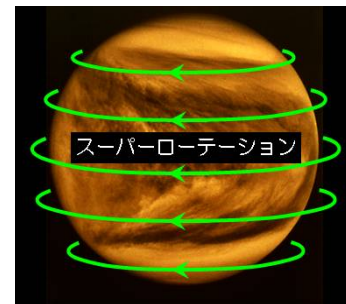
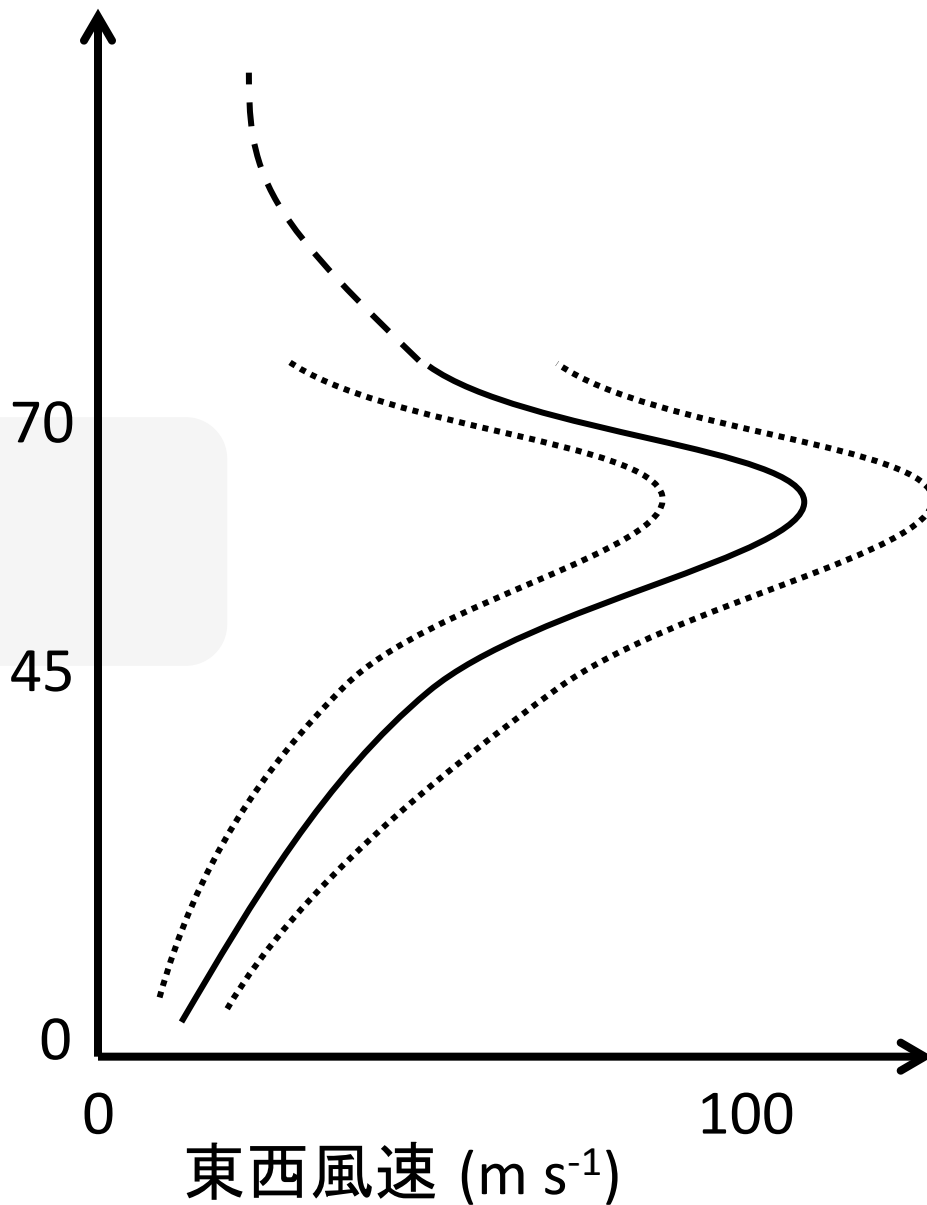
65 - 70 kmで風速極大  
60 - 65 kmに風速シア  
極大

## 大気安定度

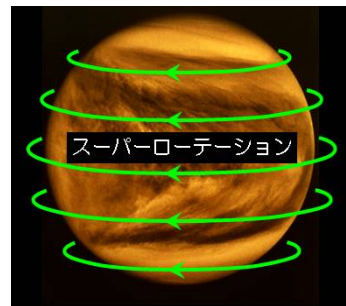


高度 (km)

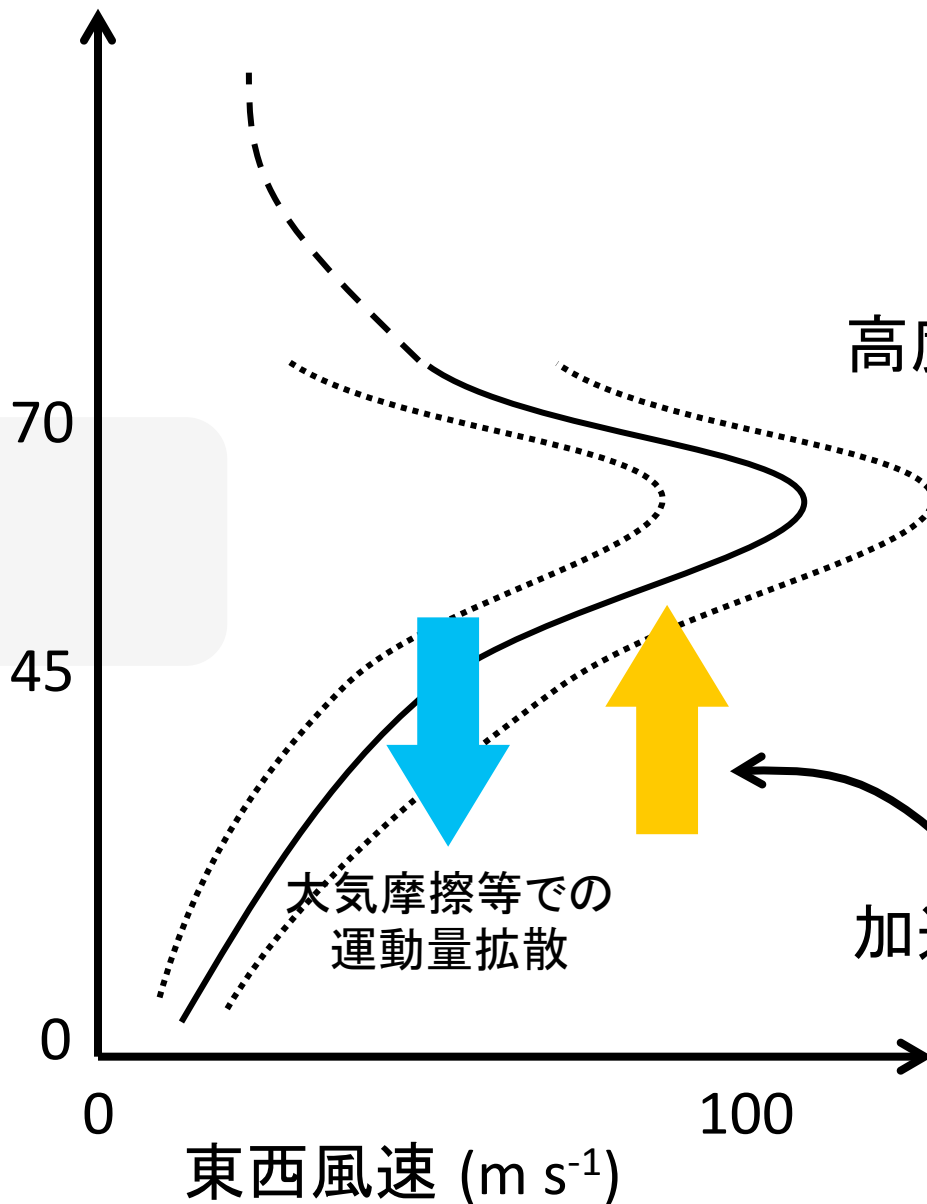
雲層  
(加熱層)



高度 (km)



雲層  
(加熱層)



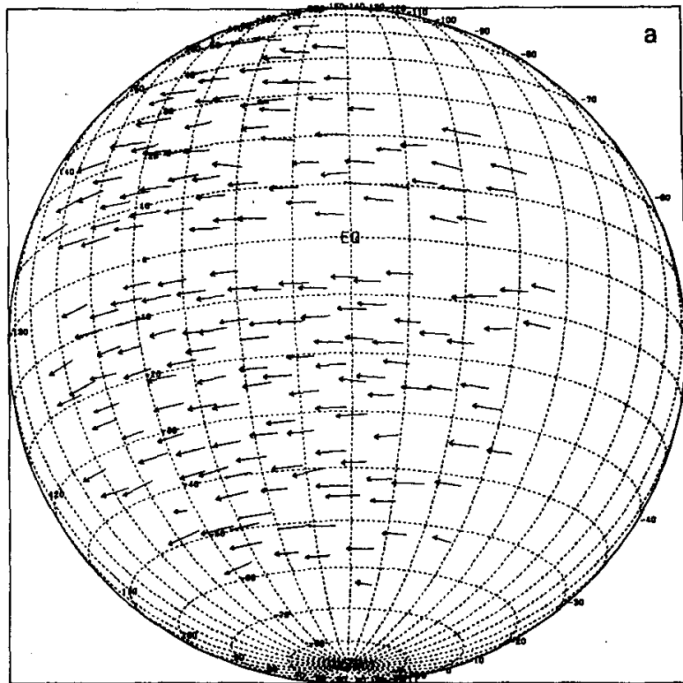
高度70kmでピーク

加速メカニズム?

大気摩擦等での  
運動量拡散

# リモートセンシングによる風速探査

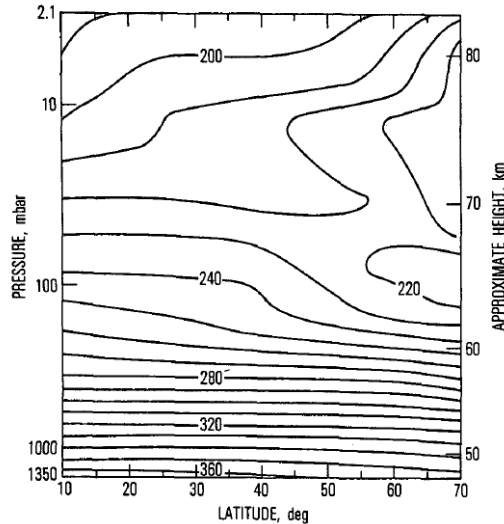
## 雲追跡



UV FEATURE MOTIONS..MARINER 10 OBSERVATIONS

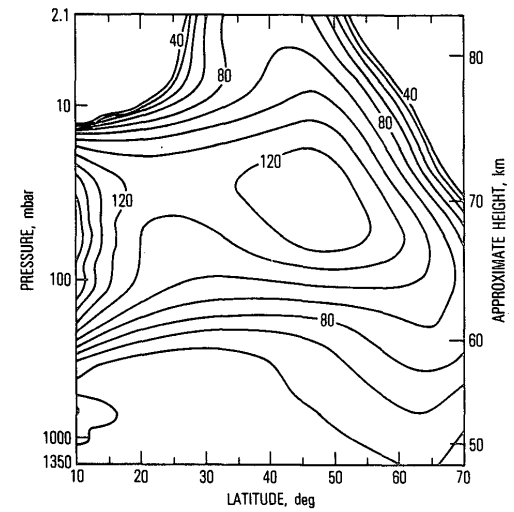
[Limaye and Suomi, 1981]

## 温度風(旋衡風バランス)



Walterscheid et al 1985

$$2u \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\tan \phi} \frac{\partial (RT)}{\partial \phi} \frac{1}{H}$$

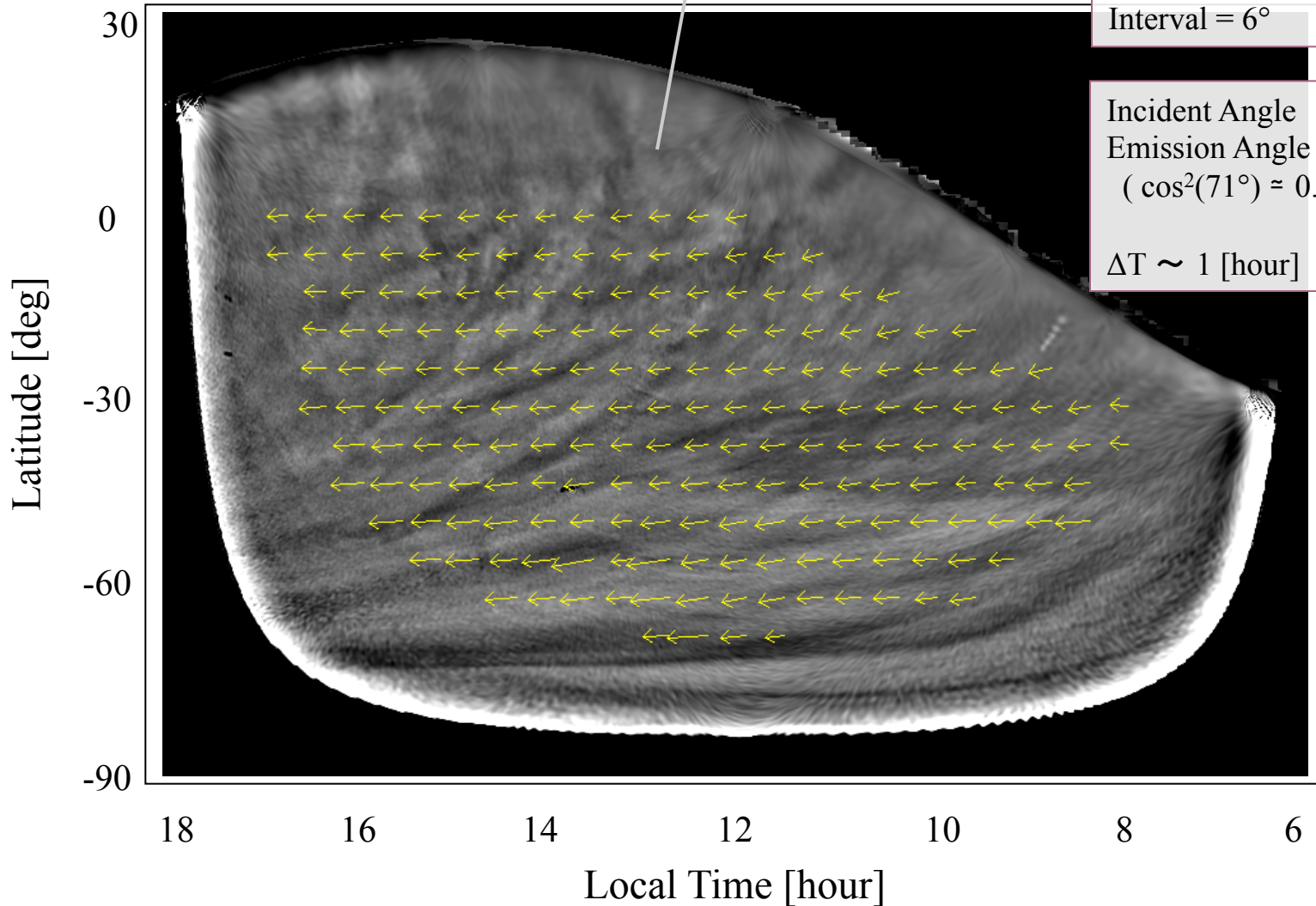


ドップラーシフト ⇔ 風速

# 風速の導出手法

小スケールの模様を強調してある

Orbit 489 (2007-08-22)



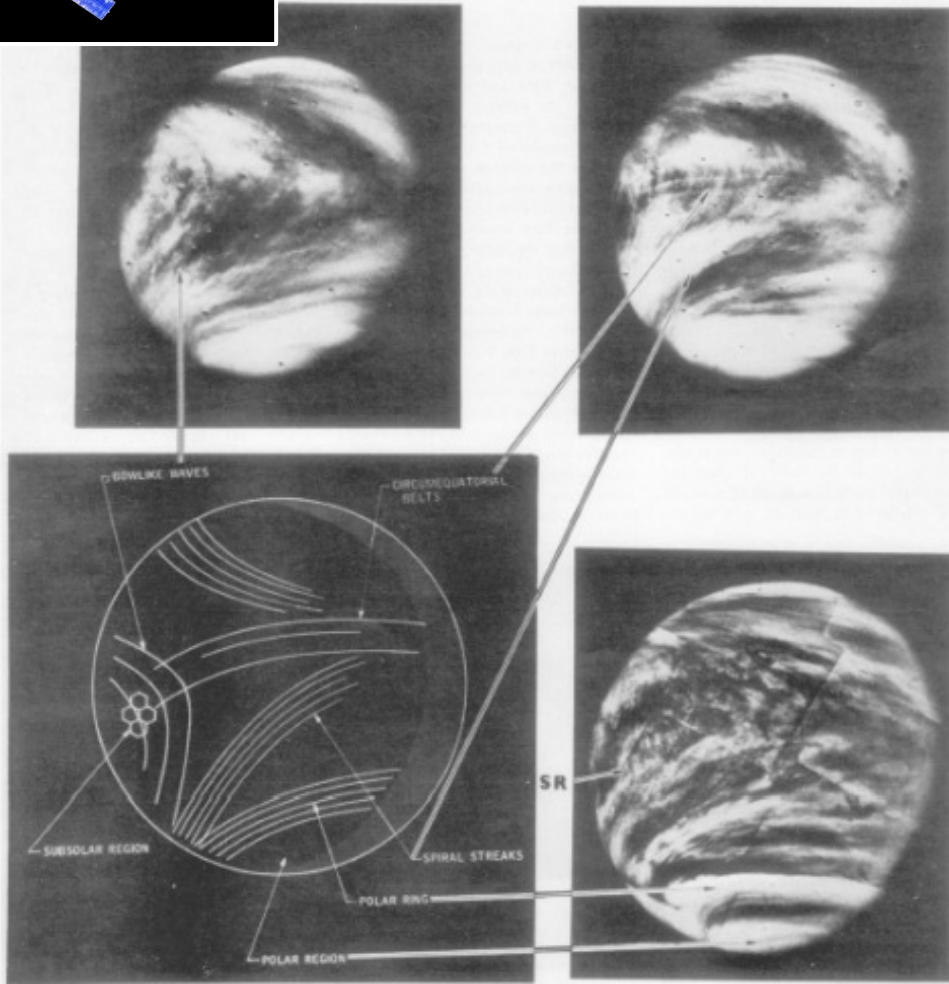
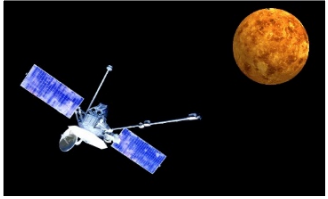
Example :  
Template Size =  $12^\circ \times 12^\circ$   
Interval =  $6^\circ$

Incident Angle  $< 71^\circ$   
Emission Angle  $< 71^\circ$   
( $\cos^2(71^\circ) \approx 0.1$ )

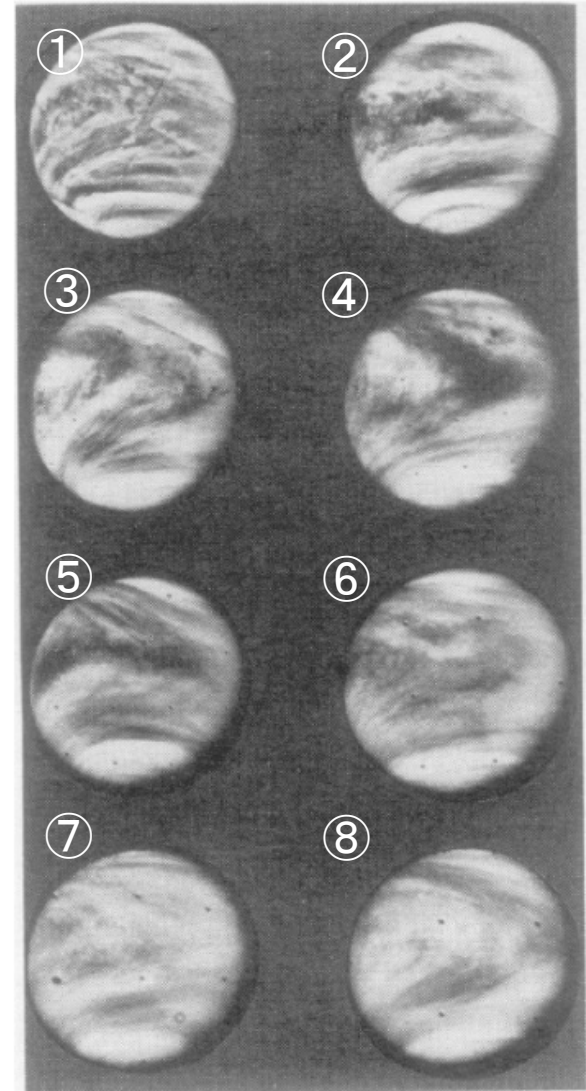
$\Delta T \sim 1$  [hour]

Analysis :: Template Size =  $6^\circ \times 6^\circ$ , Interval =  $3^\circ$

# Mariner 10 Observations (during 8 days of Venus encounter)



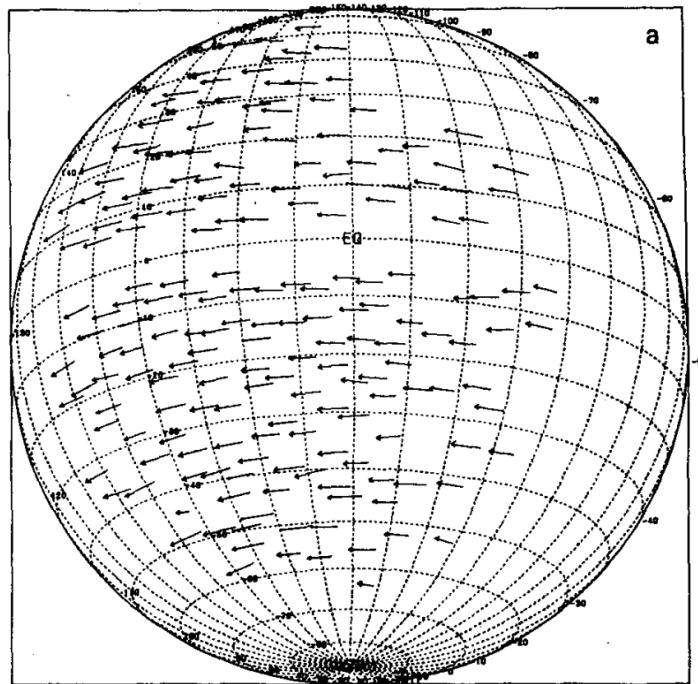
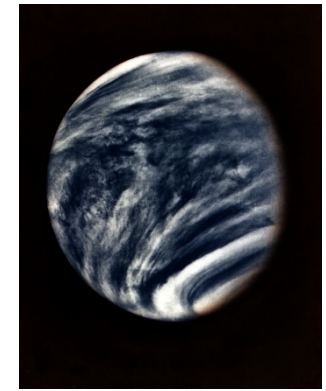
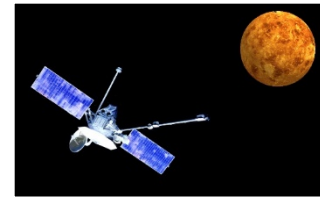
[Murray et al., 1974]



Y shape rotated  
with  $\sim 4.2$  day period (=  $\sim 106$  m/s)

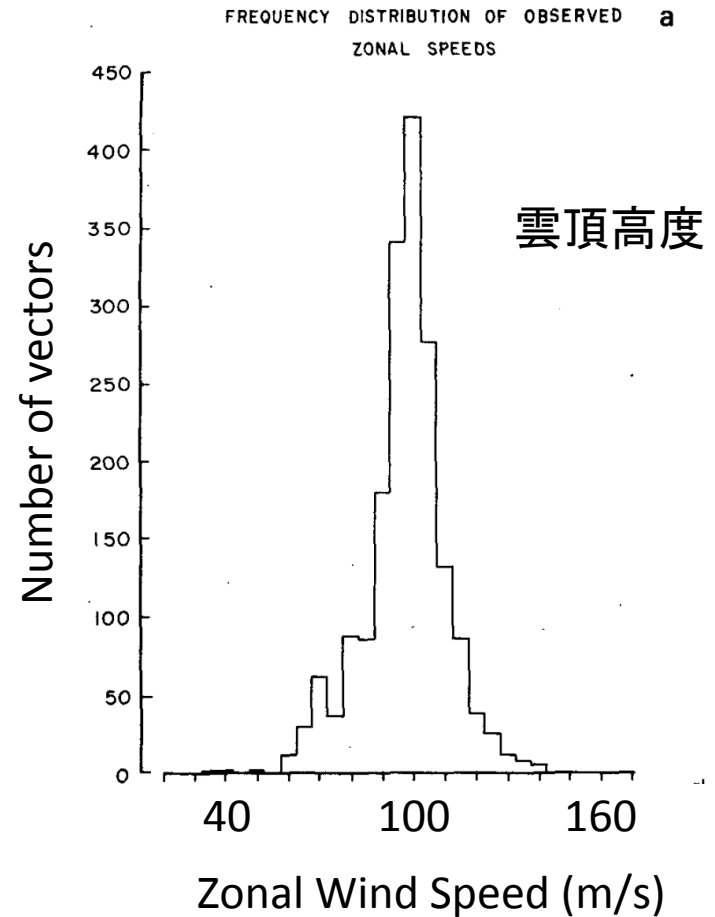
[Belton et al., 1979]

# Wind velocities from cloud tracking

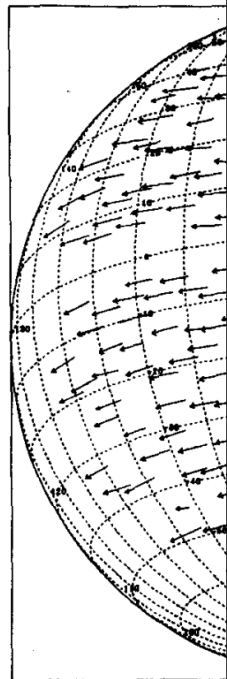
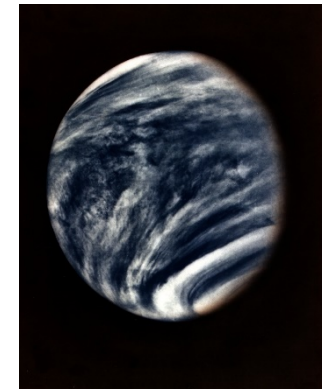
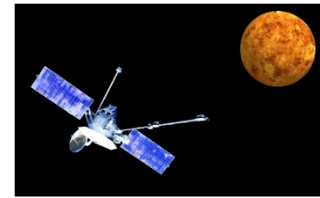


UV FEATURE MOTIONS..MARINER 10 OBSERVATIONS

[Limaye and Suomi, 1981]

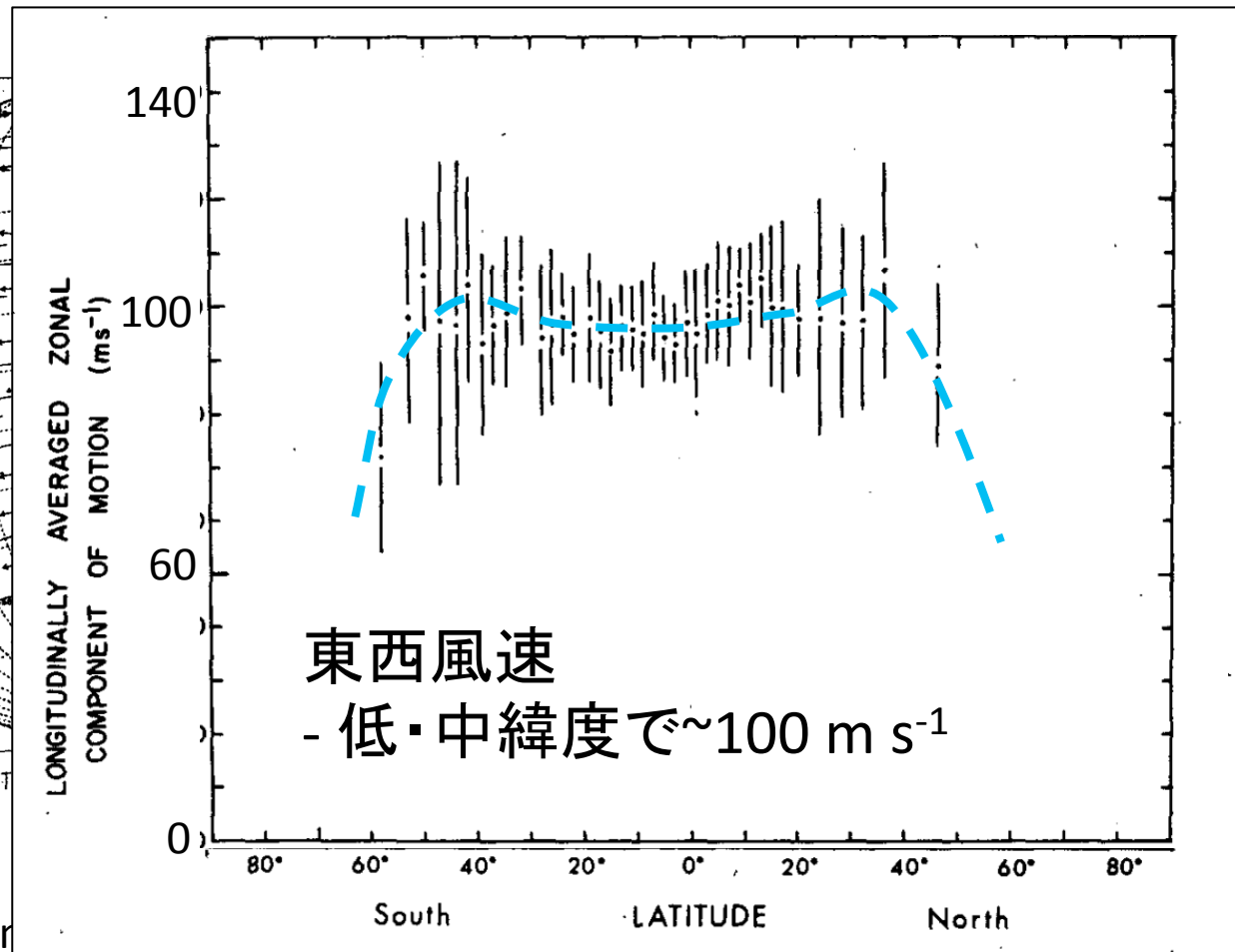


# Wind velocities from cloud tracking



UV FEATURE MOT

[Limaye an



ERVED a

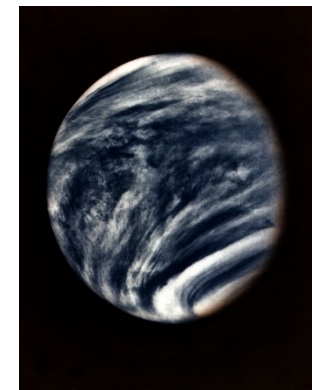
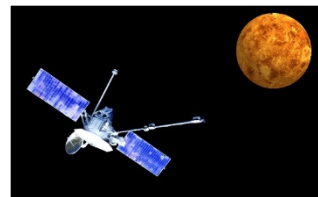
頂高度

160

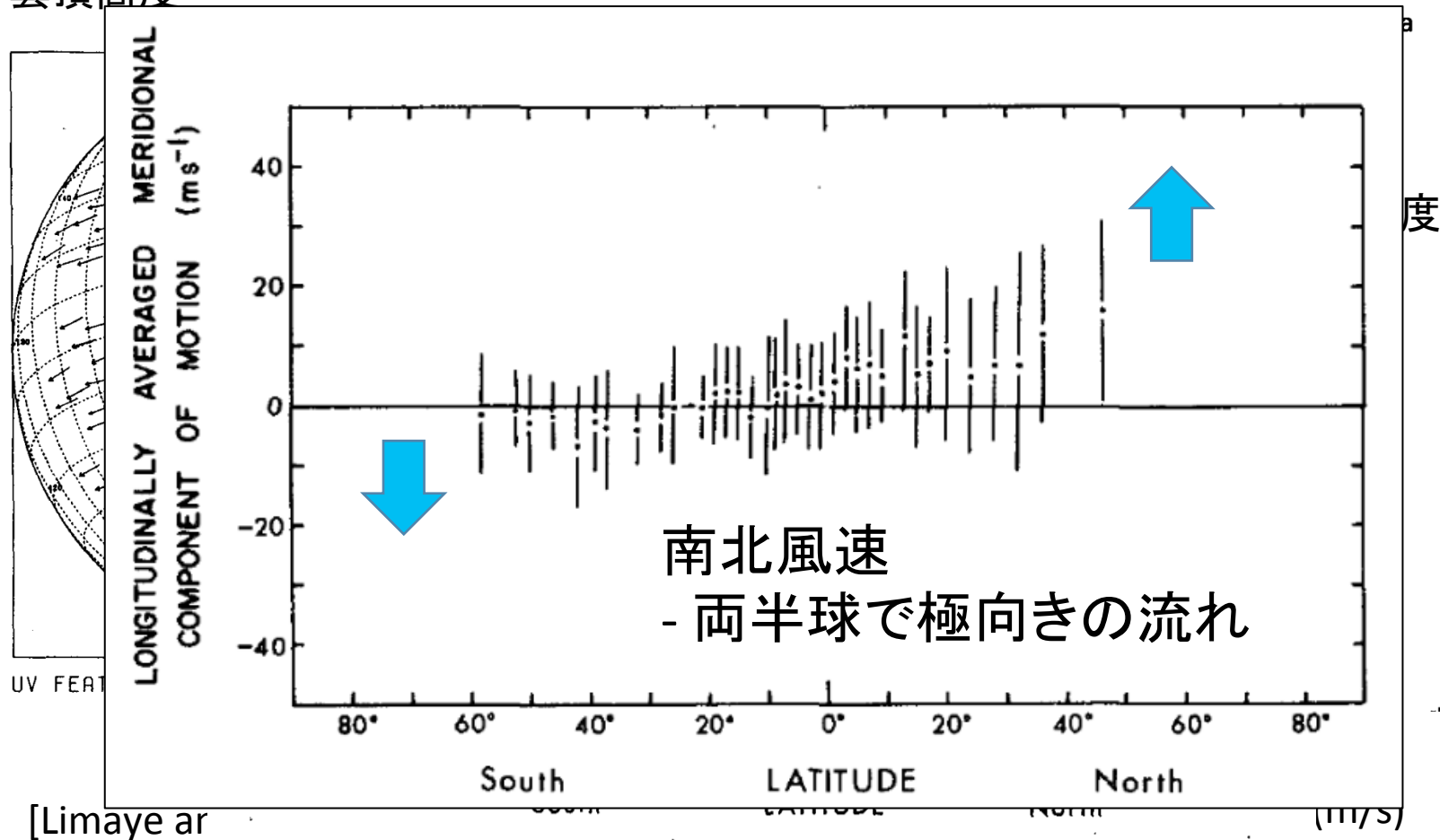
(m/s)

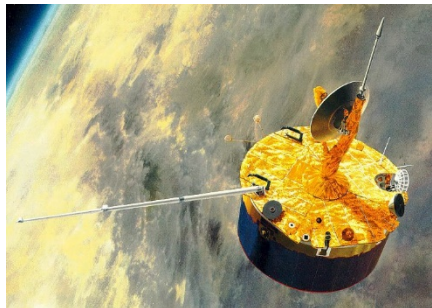


# Wind velocities from cloud tracking

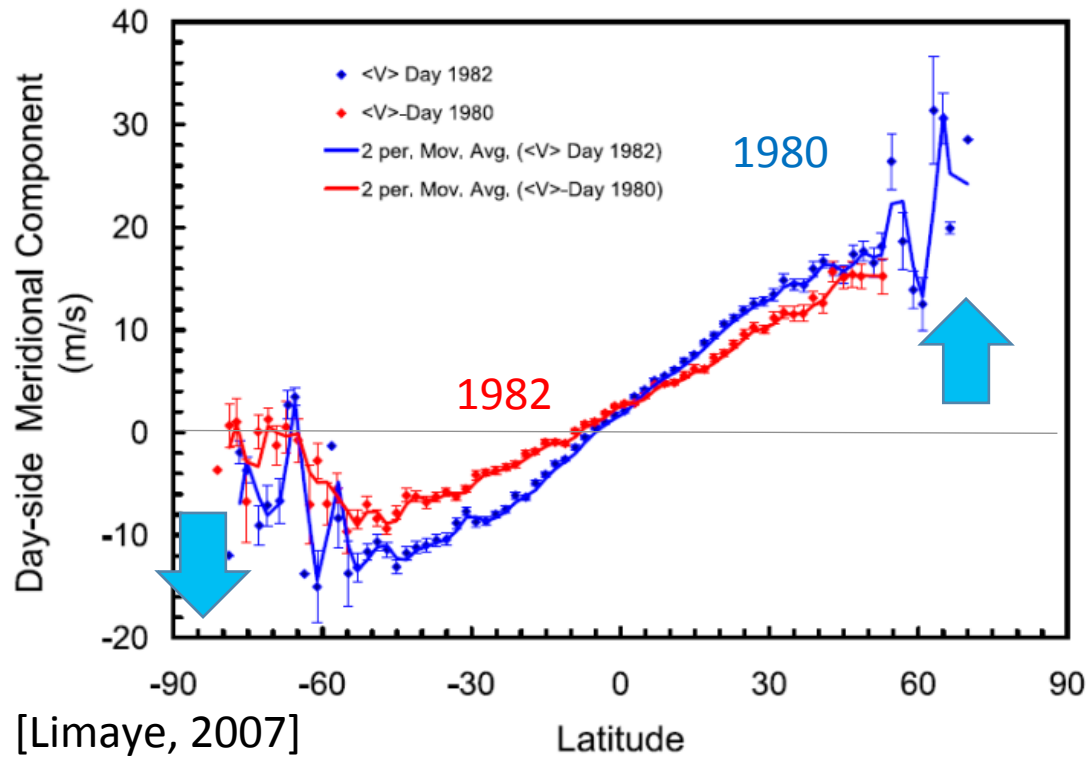
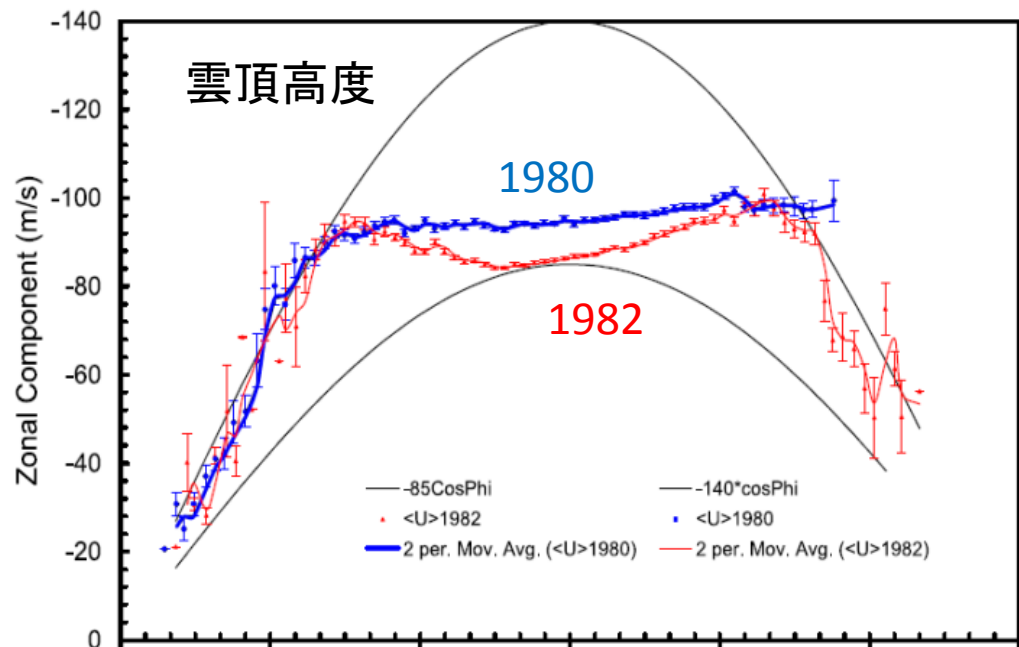


雲頂高度



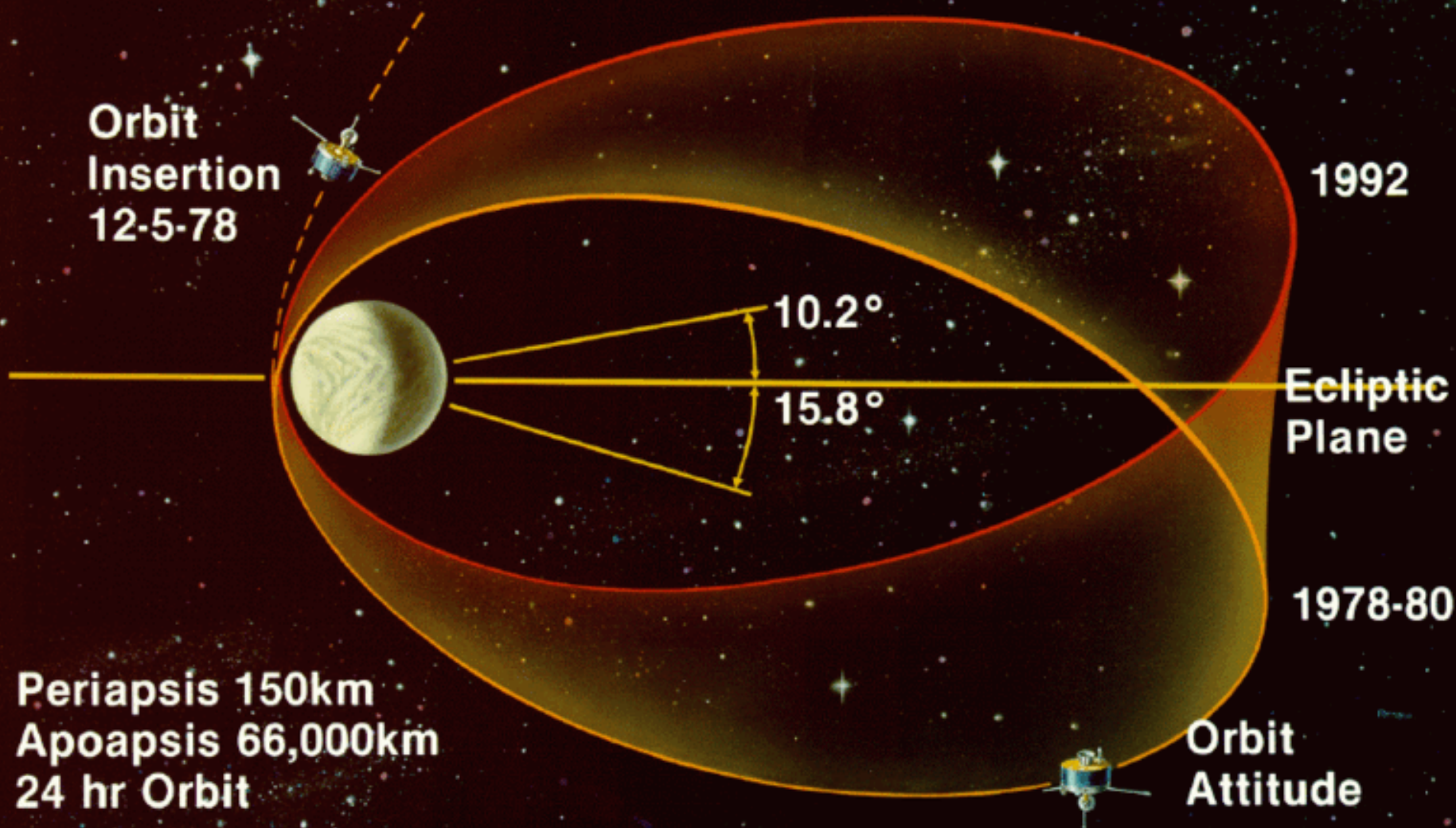


# Pioneer Venus Orbiter / OCPP

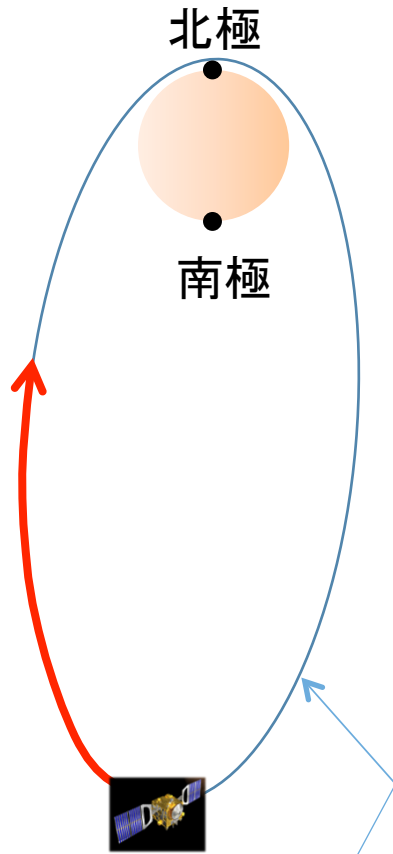


[Limaye, 2007]

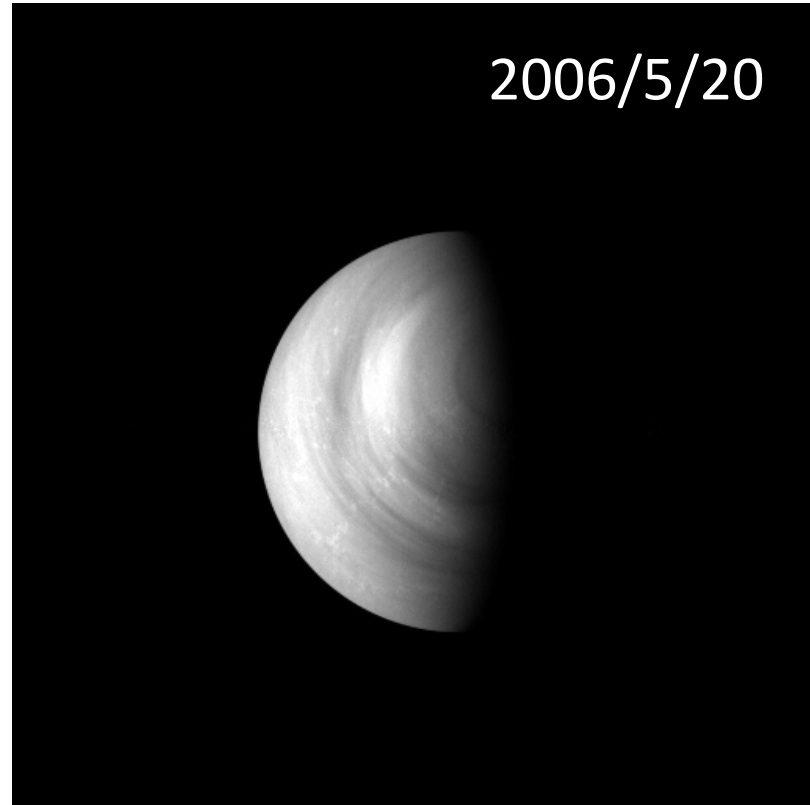
# PIONEER VENUS ORBITER MISSION



# Venus Express / Venus Monitoring Camera



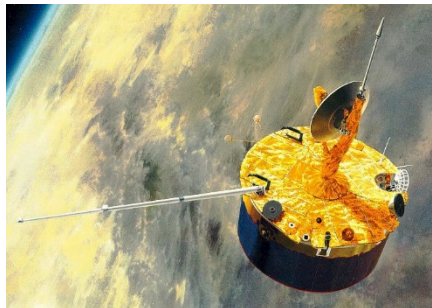
極軌道衛星  
1周回24時間



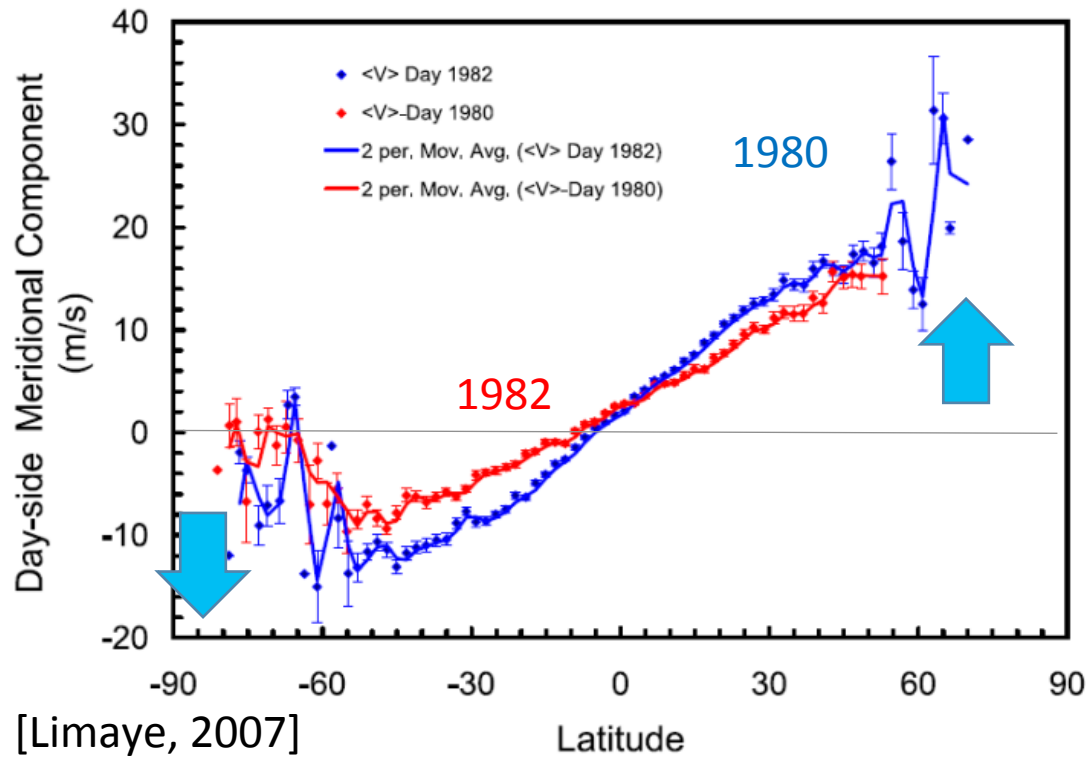
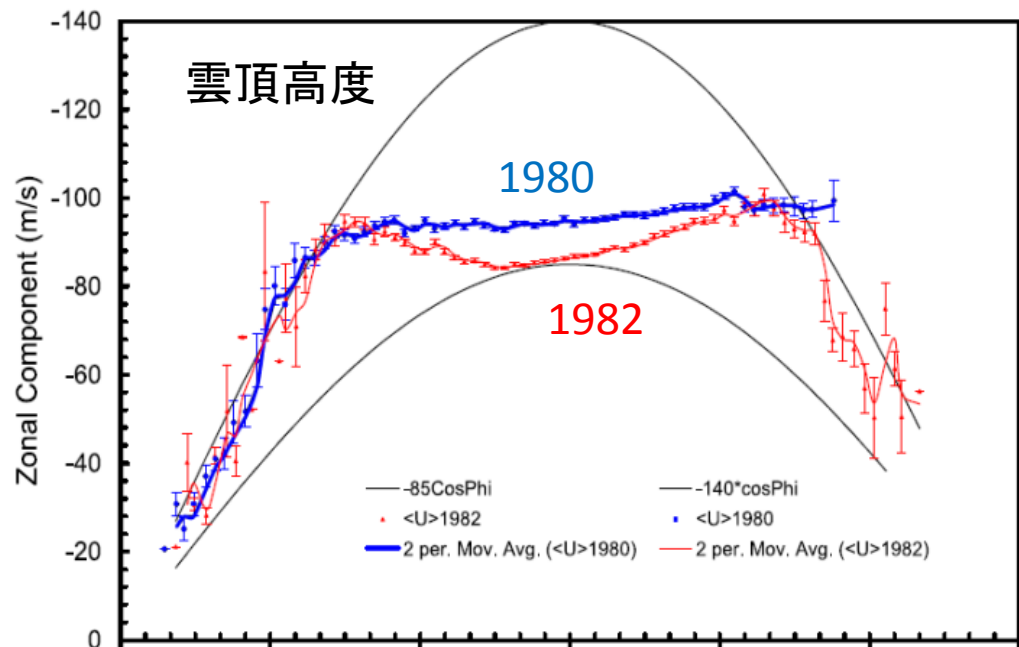
観測波長 : 365 nm (昼面観測のみ)

- 雲高度 : 雲頂高度 (~ 70 km) [Kawabata et al 1980]
- 撮像領域が広い観測は南半球に限られる

データ期間: 2006年4月 ~ 2010年4月

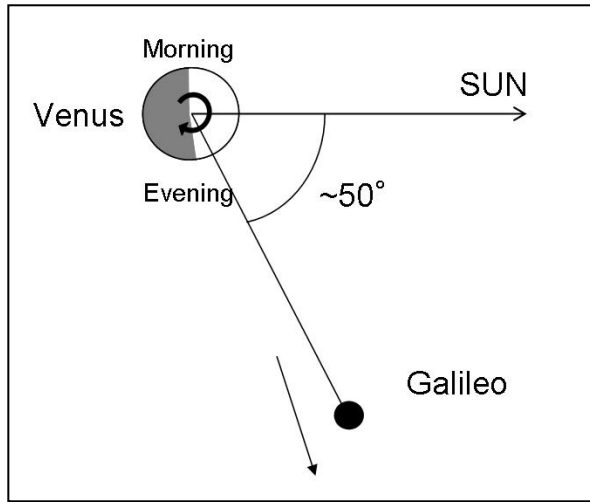


# Pioneer Venus Orbiter / OCPP

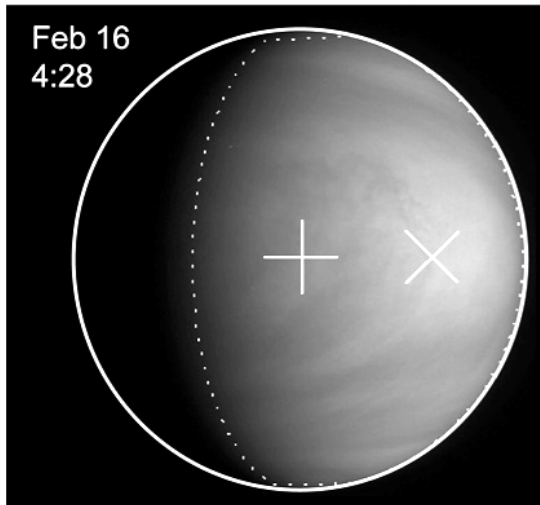


[Limaye, 2007]

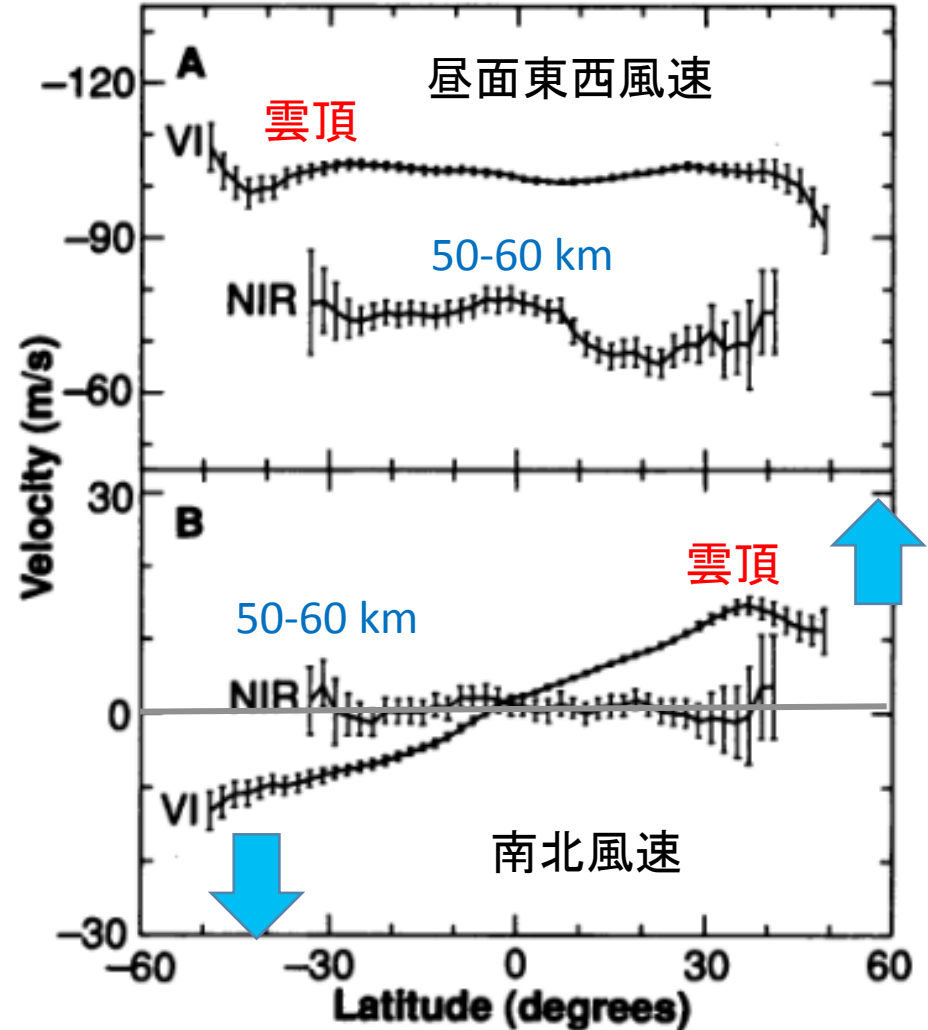
# Galileo / Solid State Imaging system (SSI)

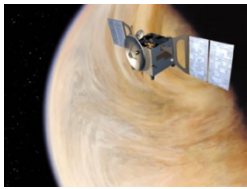


a



雲頂高度

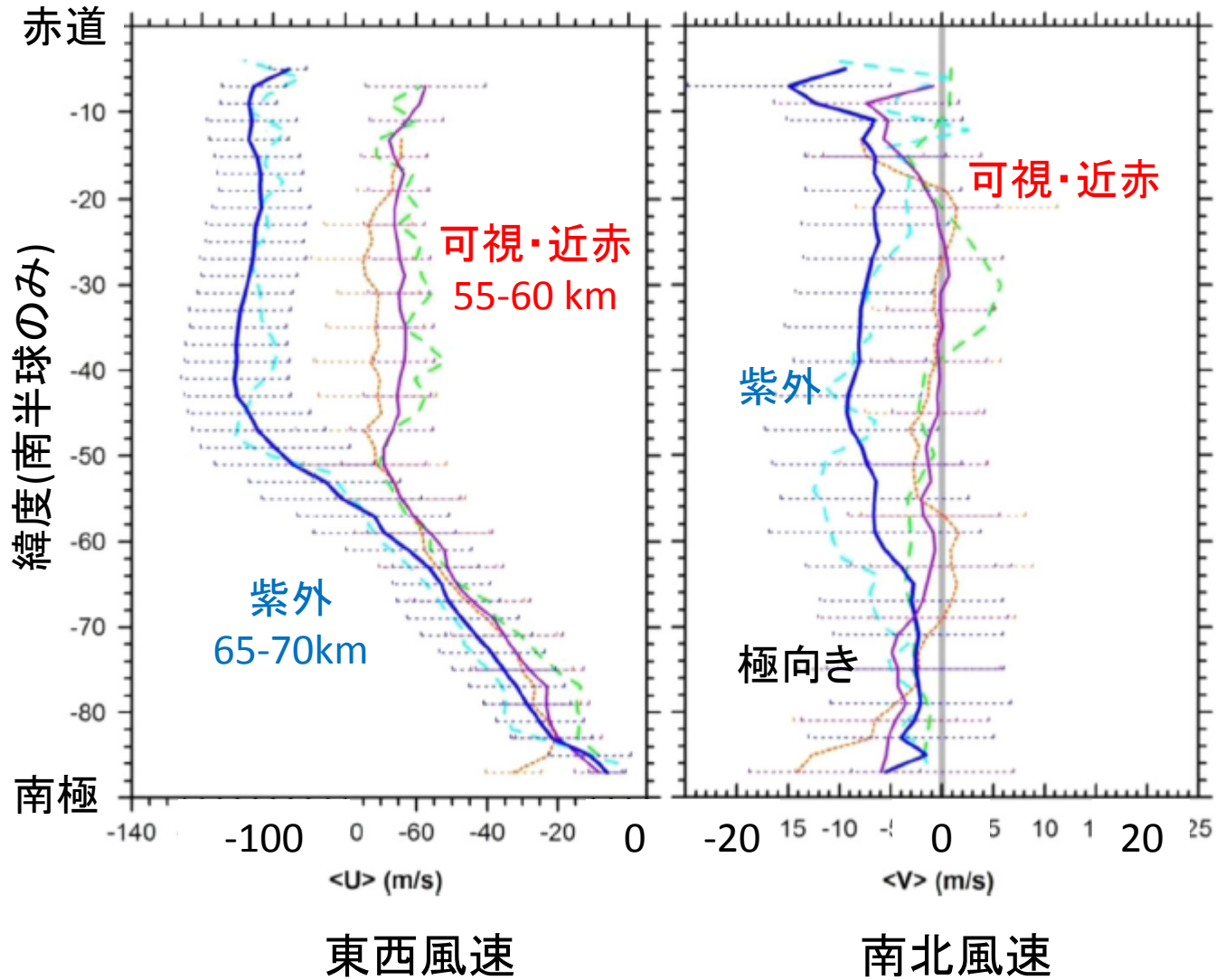


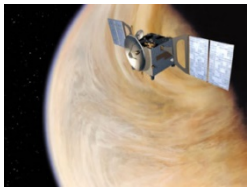


# Venus Express/VIRTIS

Hueso, et al., 2016

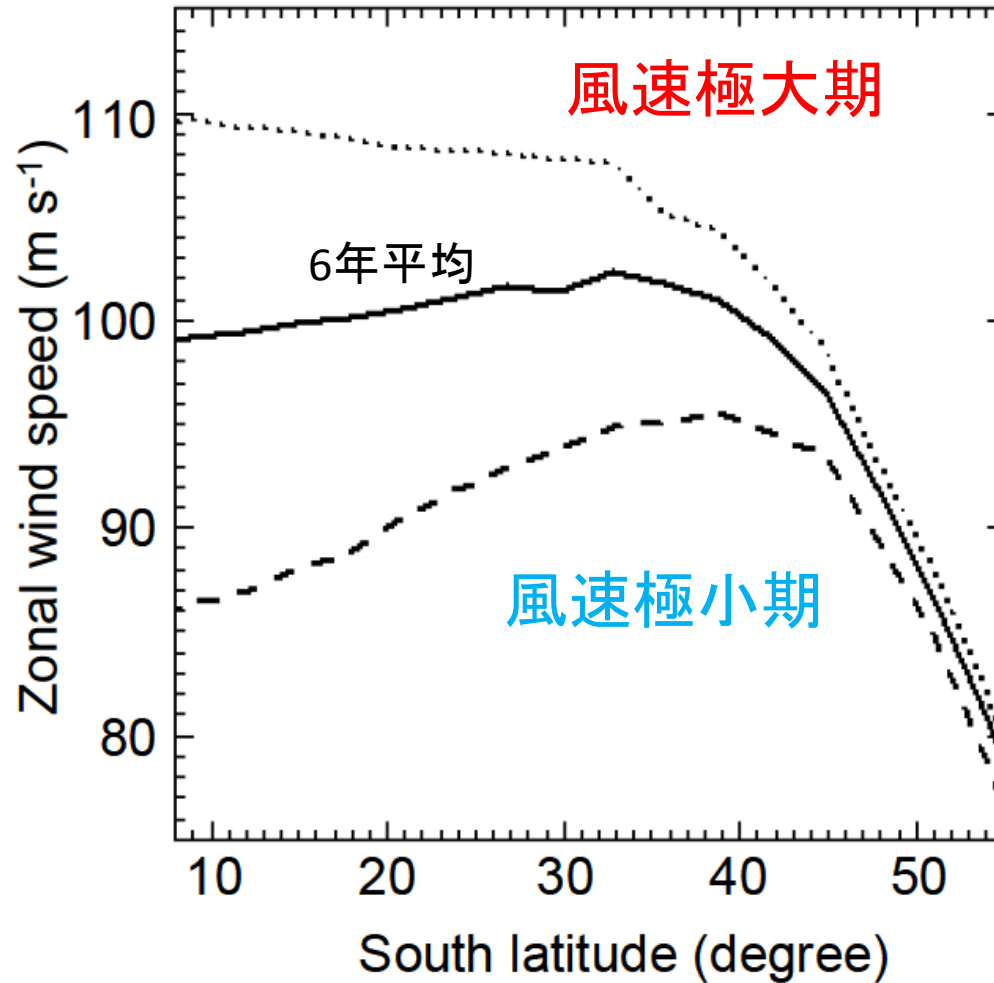
Averaging VIRTIS 6-years observation





# Venus Express/VMC

紫外  
65-70km

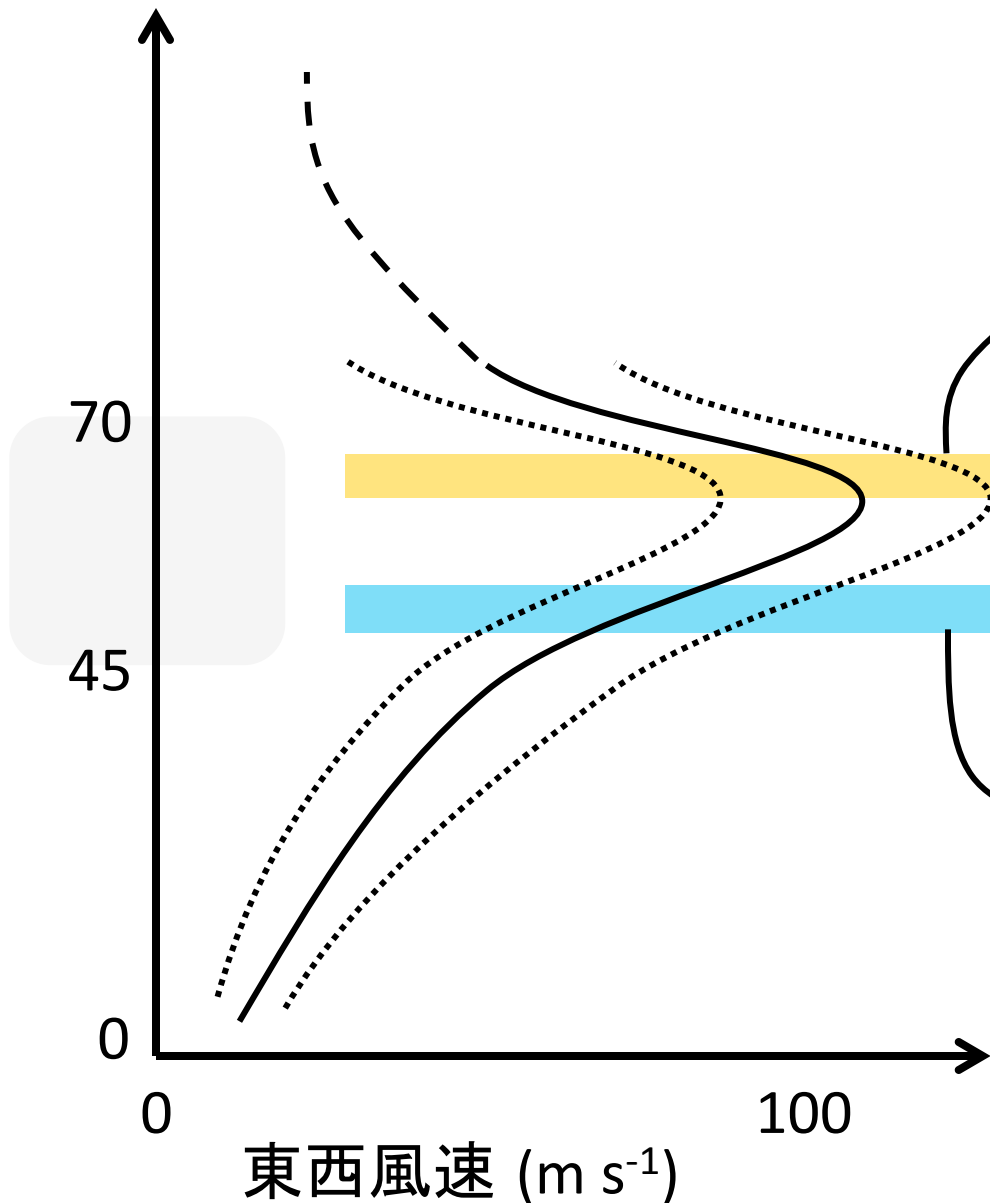




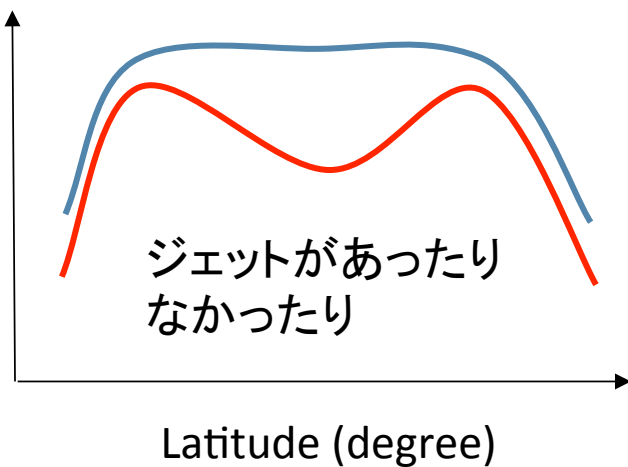
# 平均構造のまとめ

高度 (km)

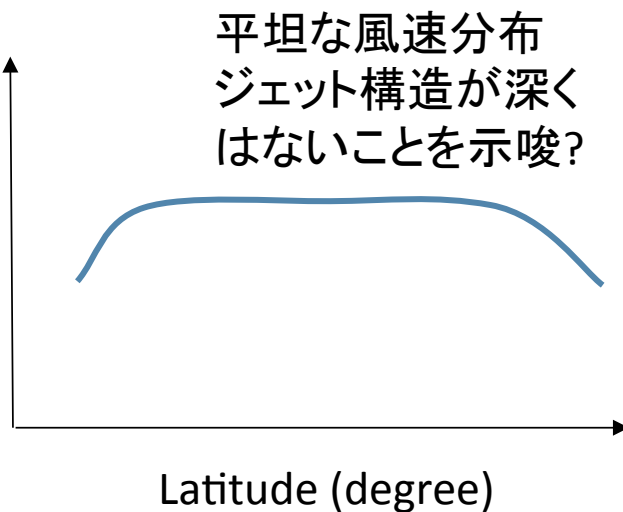
赤道～中緯度で  
 $100 \text{ m s}^{-1}$



Zonal wind ( $\text{m s}^{-1}$ )

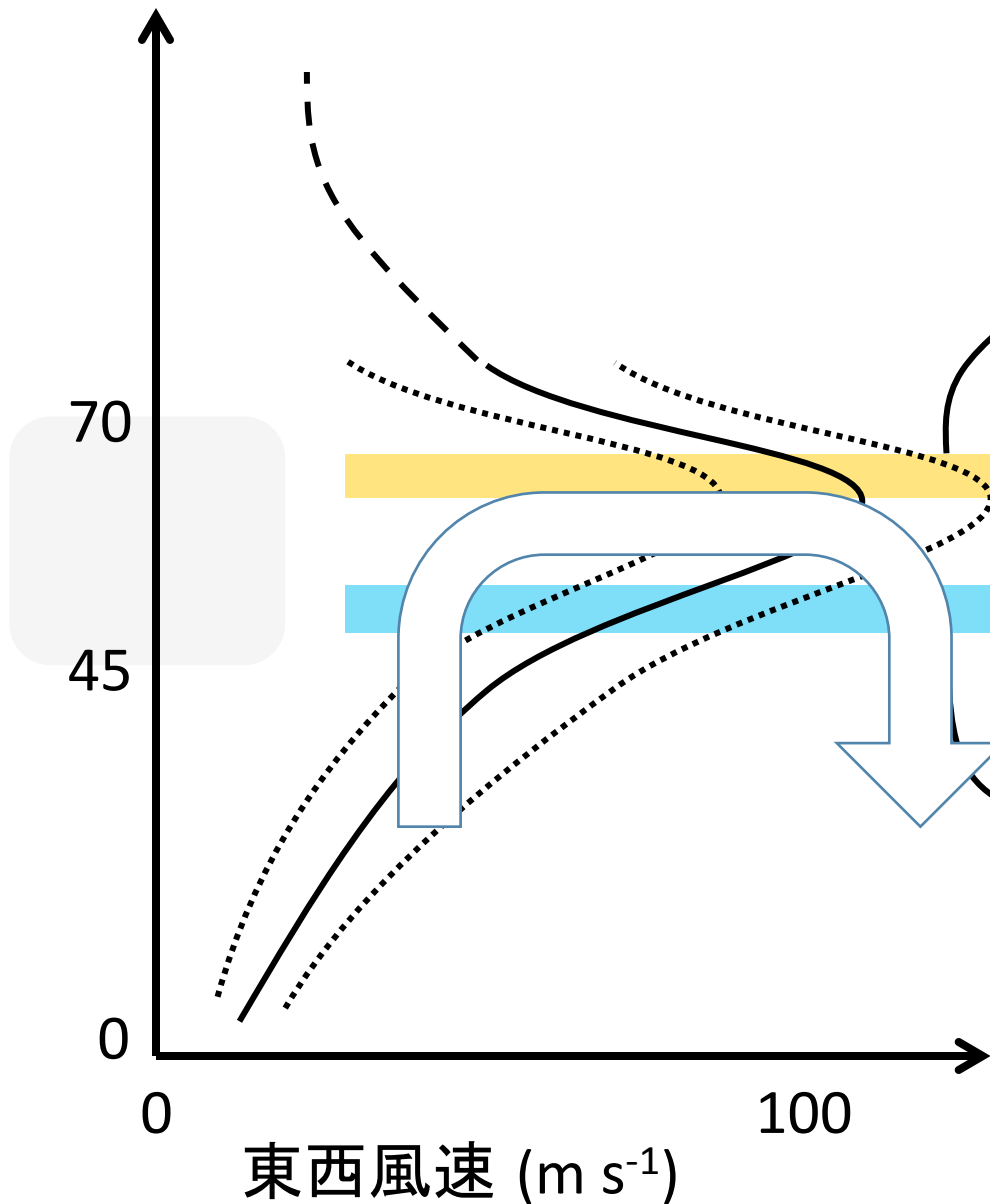


Zonal wind ( $\text{m s}^{-1}$ )

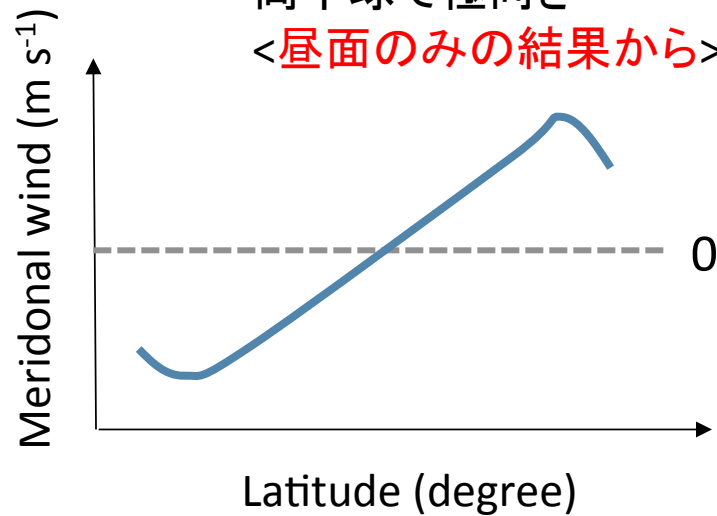


# 平均構造のまとめ

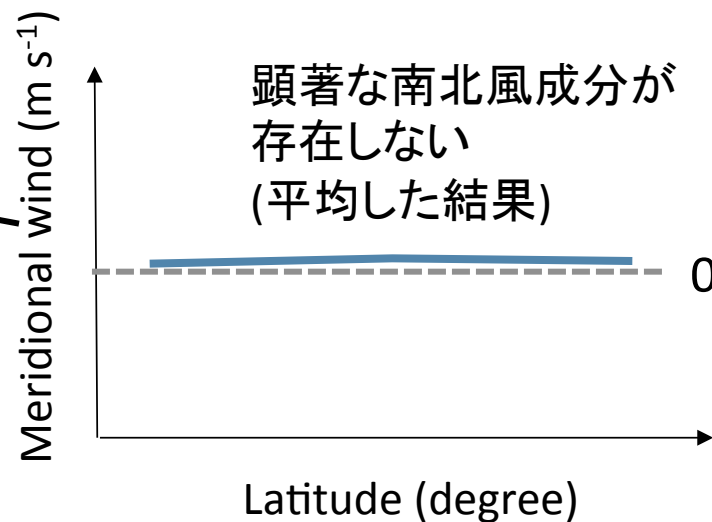
高度 (km)



赤道対称に  
両半球で極向き  
<昼面みの結果から>



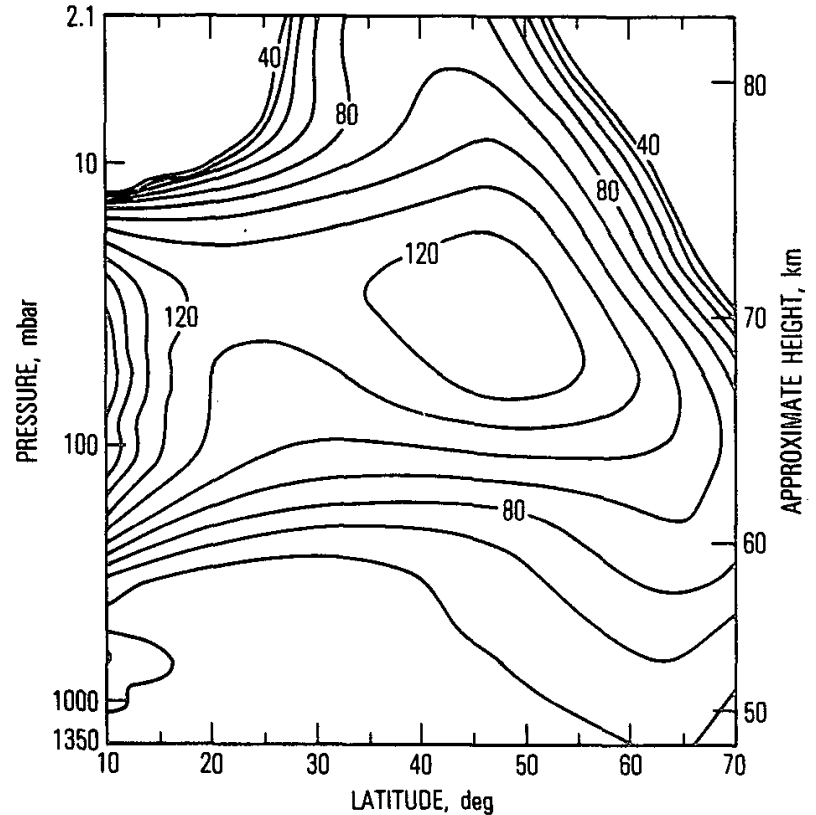
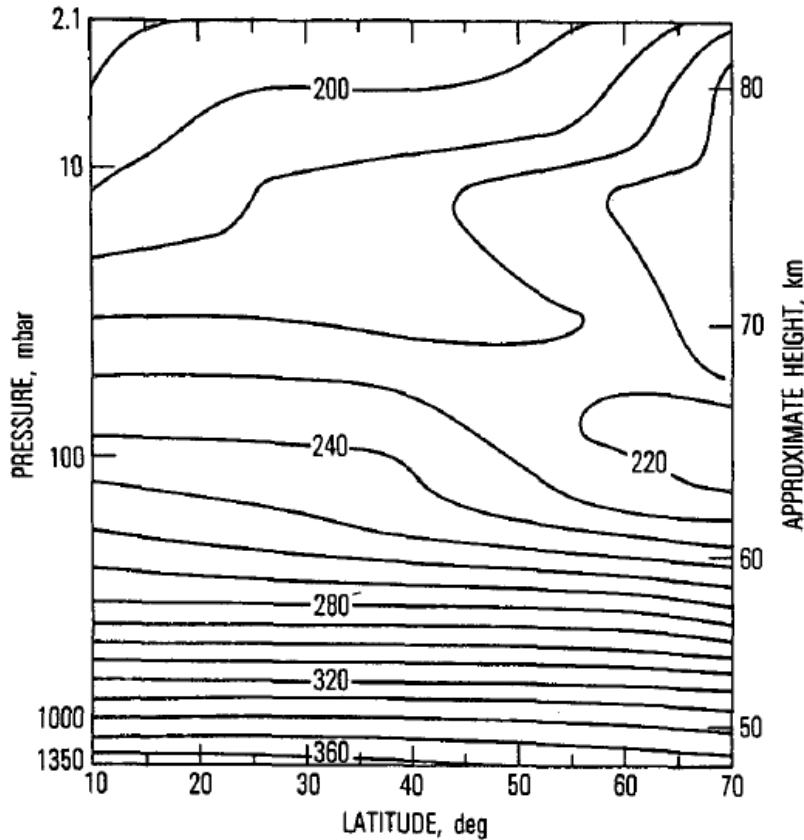
顕著な南北風成分が  
存在しない  
(平均した結果)



# 旋衡風バランスについて

温度場の観測 (電波掩蔽・分光観測)  
→ 風速場

1982 Oct, 1983 Jul-Aug



$$2u \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\tan \phi} \frac{\partial (RT)}{\partial \phi} \frac{1}{H}$$

Walterscheid et al 1985

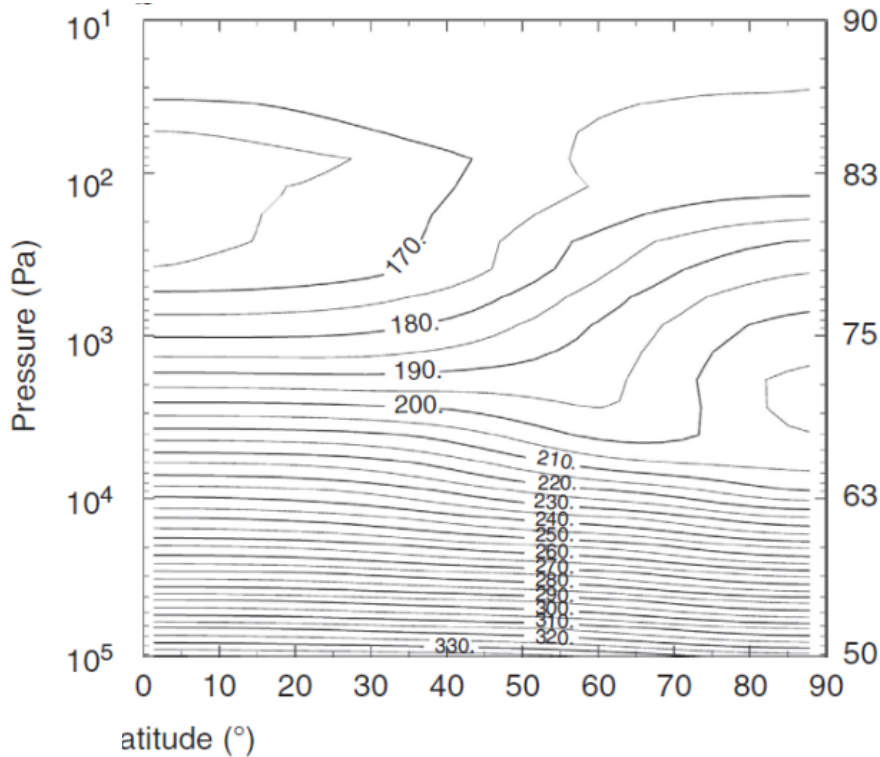
コリオリカが無視できるほど小さい金星では  
遠心力が気圧傾度力( $\propto$ 南北温度勾配)に釣り合う、と仮定できる

# 旋衡風バランスについて

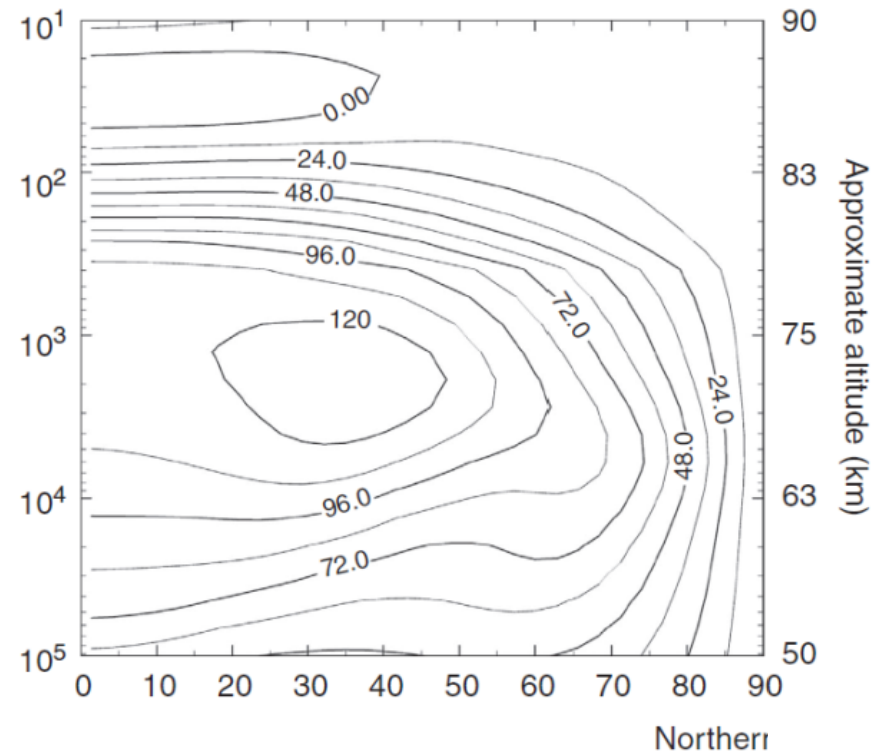
シミュレーション結果から

(after Ando et al., 2016)

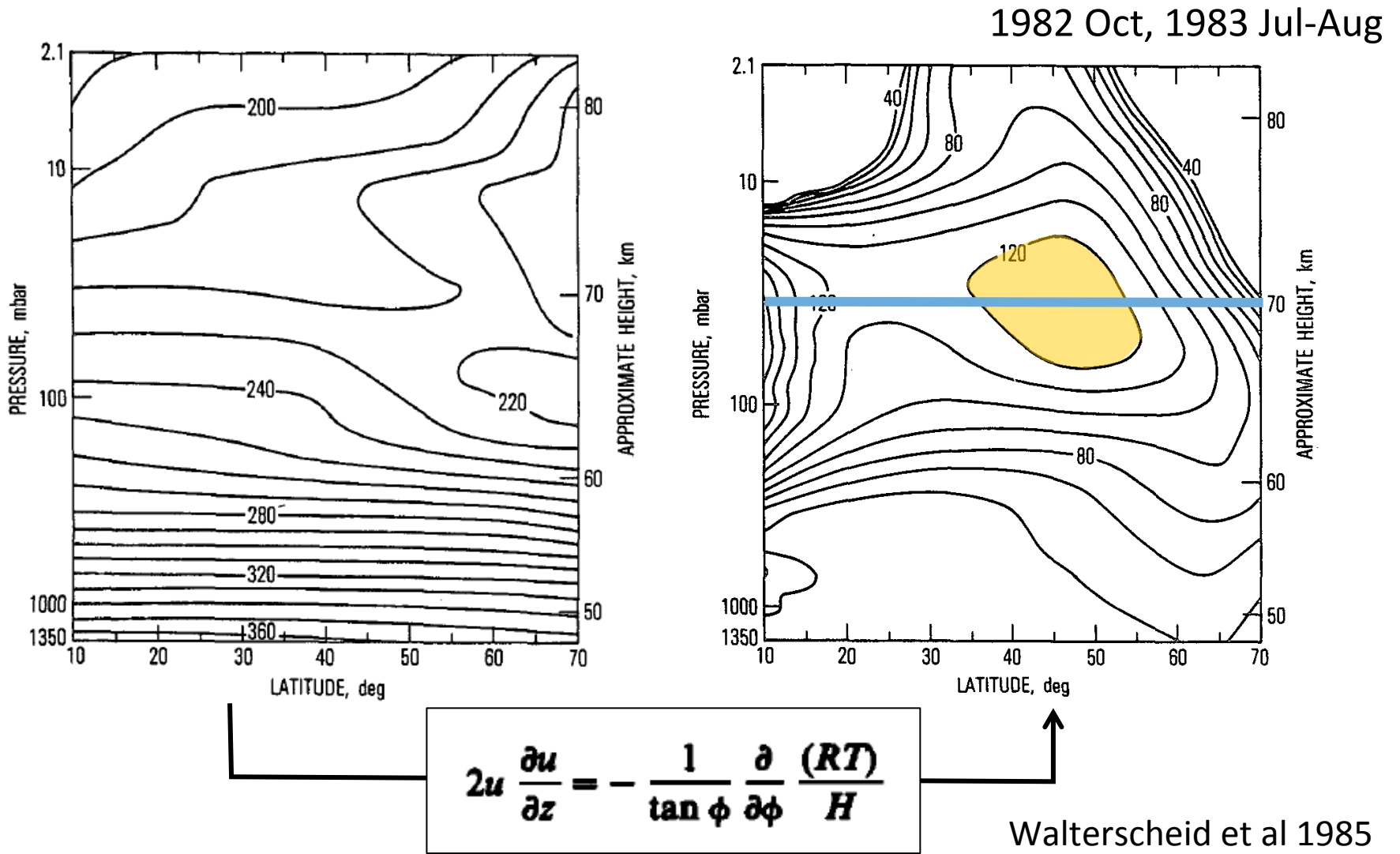
## 温度場 (K)



## 東西風速 ( $\text{m s}^{-1}$ )

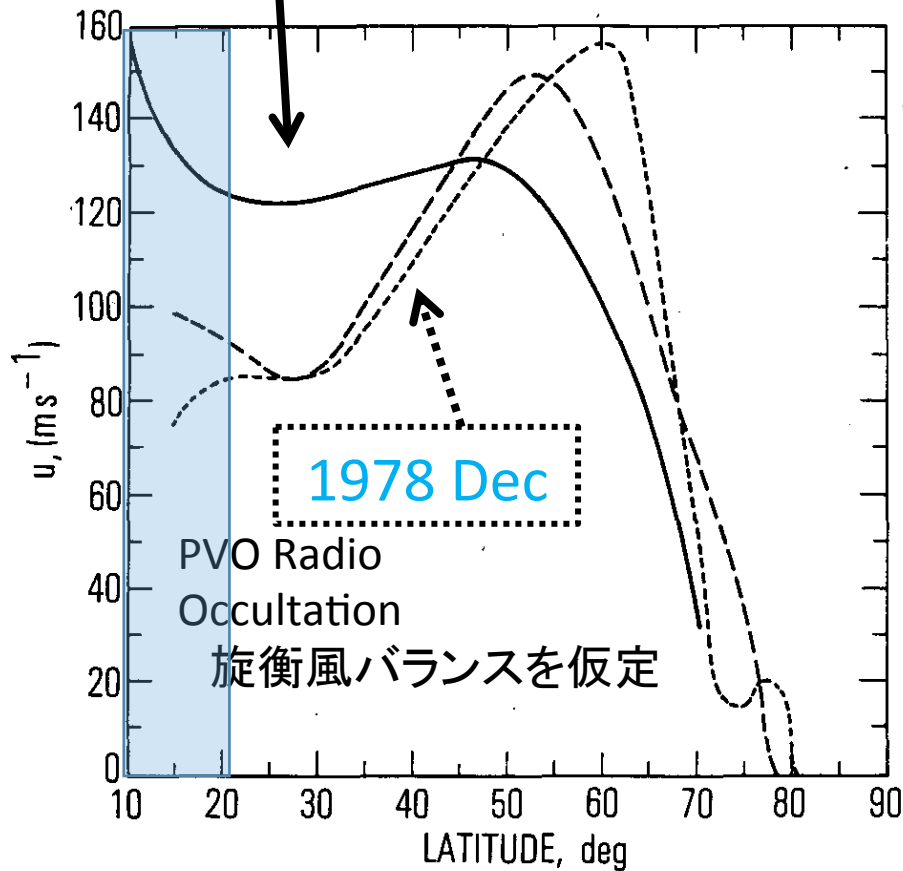


# 旋衡風バランスについて



コリオリカが無視できるほど小さい金星では  
遠心力が気圧傾度力( $\propto$ 南北温度勾配)に釣り合う、と仮定できる

1982 Oct  
1983 Jul-Aug



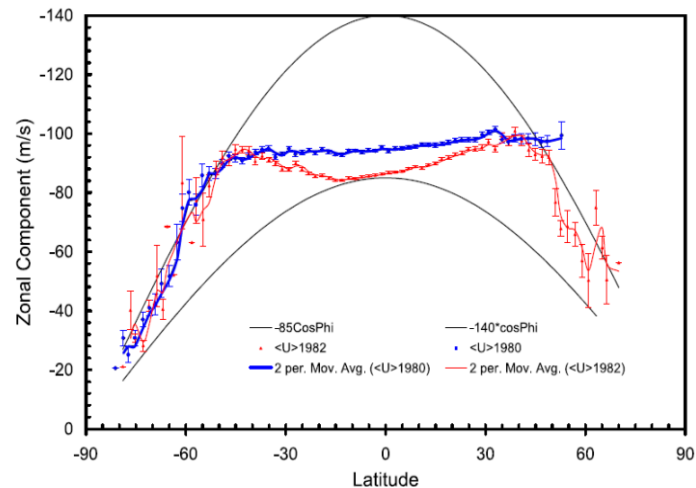
高度70kmでの緯度断面

Walterscheid et al 1985

- 旋衡風バランスを仮定して得られる風速分布には中緯度帯ジェットが明確に確認された。
- ただしジェットの強さ・位置は時期によって異なる。
- ハドレー循環によりジェット位置が流された？ [Walterscheid et al 1985]

雲追跡での分布との不一致性の理由はよくわかっていない

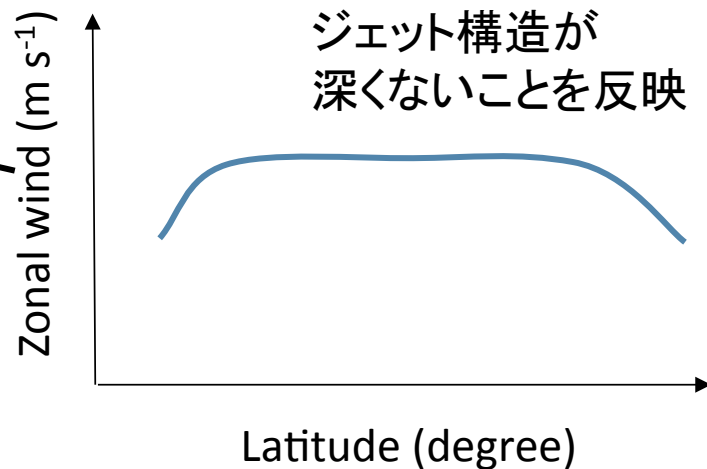
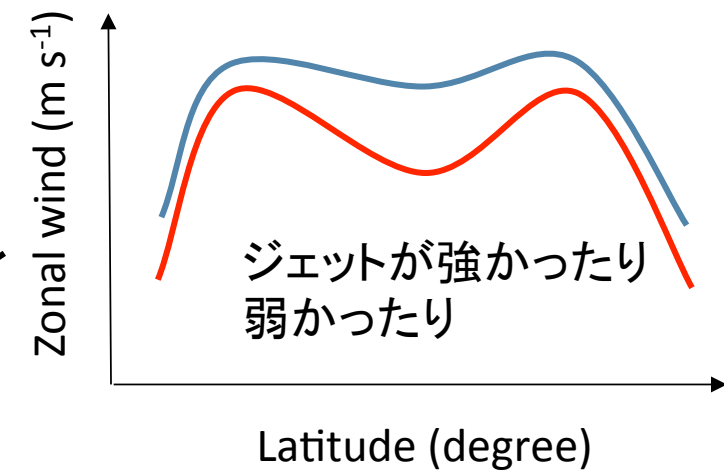
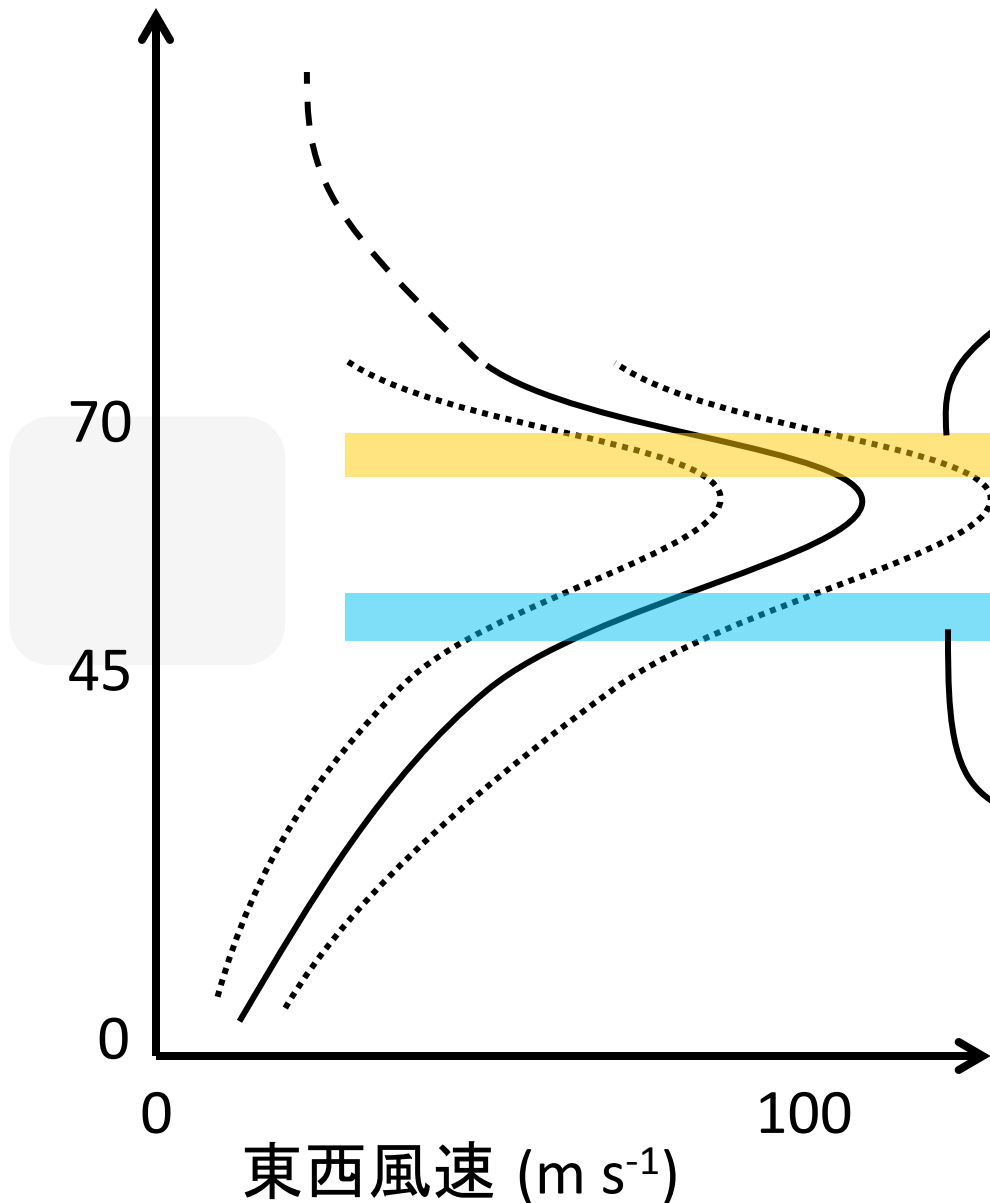
- 高緯度での雲追跡妥当性？
- 追跡できる雲の高度が緯度によって異なる？
- 旋衡風バランスの妥当性？

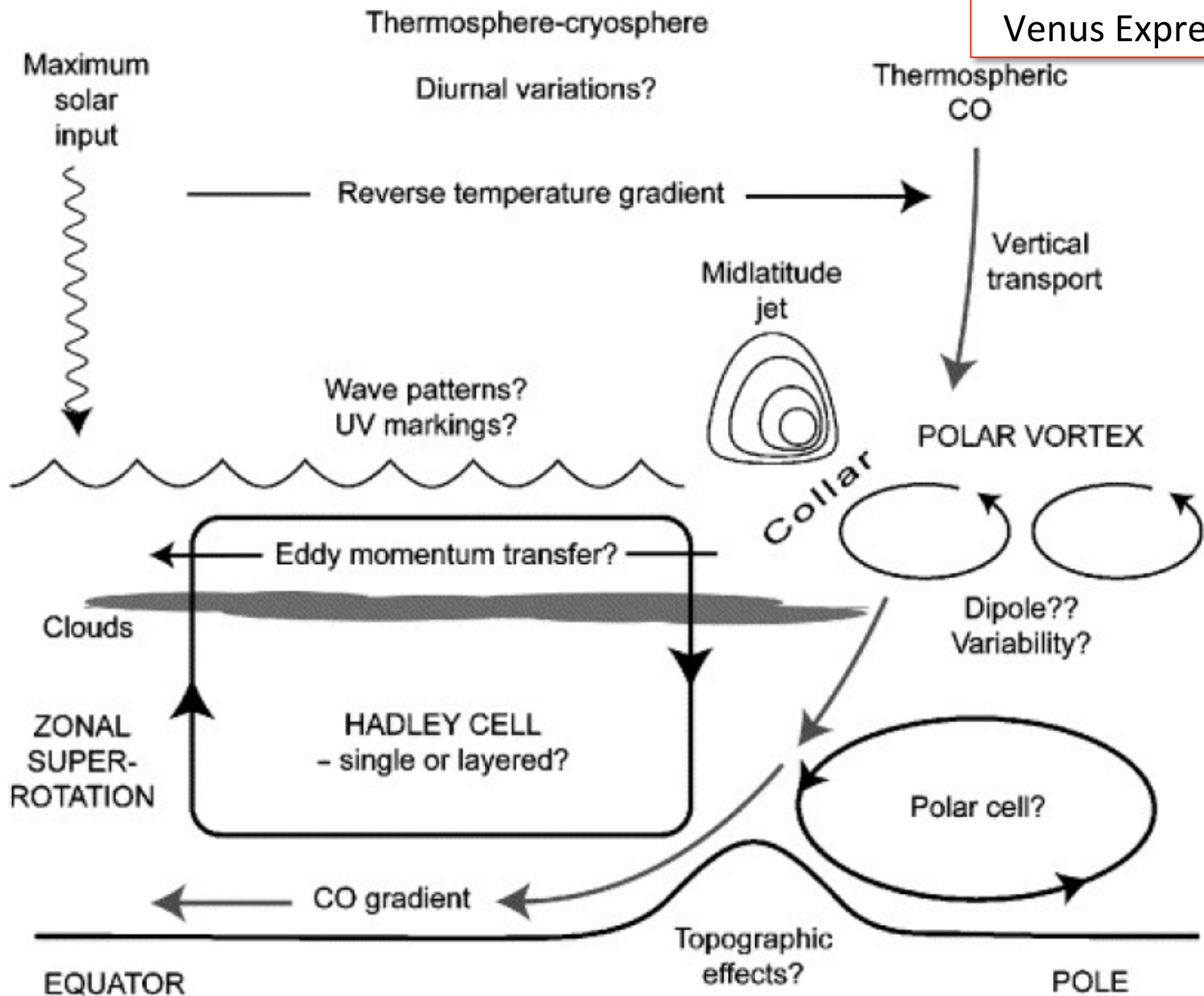


# 平均構造のまとめ

高度 (km)

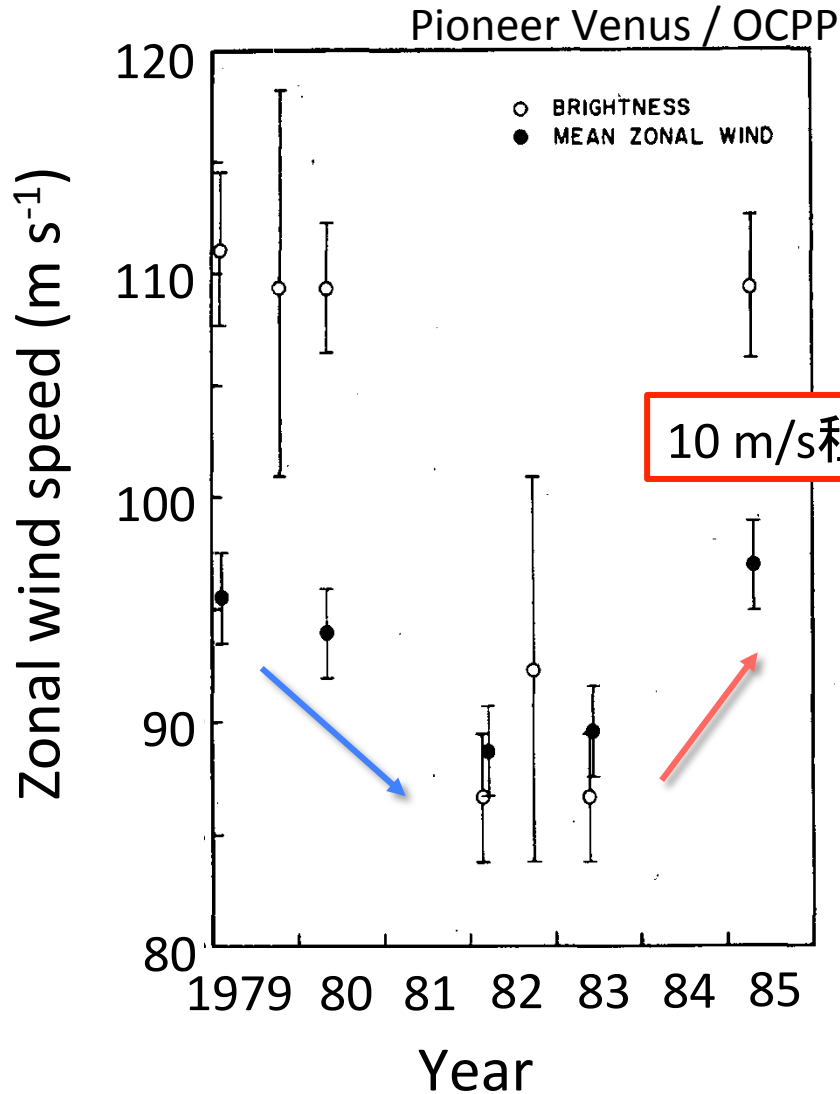
赤道～中緯度で  
 $120 \text{ ms}^{-1}$







# スーパーローテーションの時間変動性

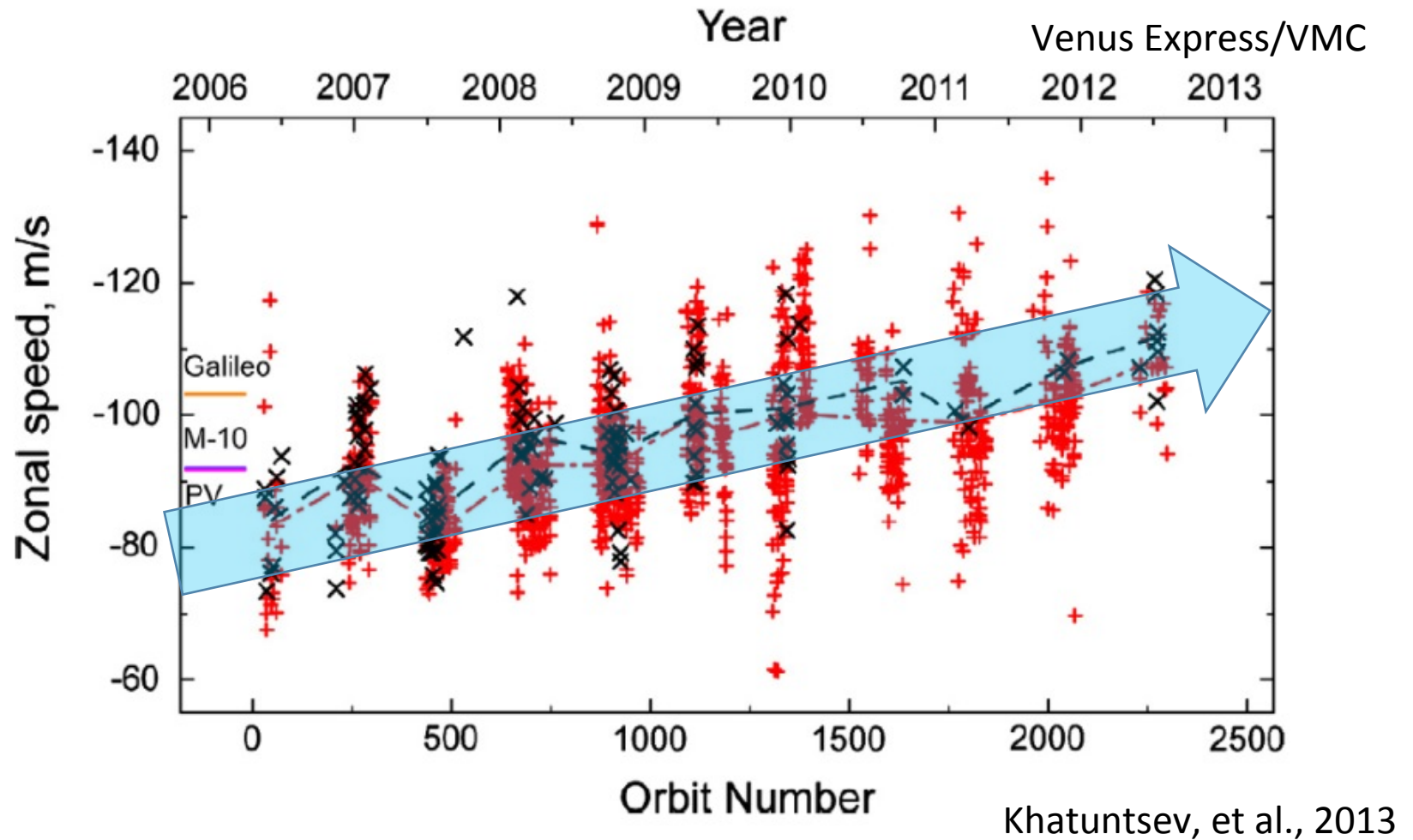


雲追跡から求めた東西風速の  
時間変化

[Del Genio et al., 1990]

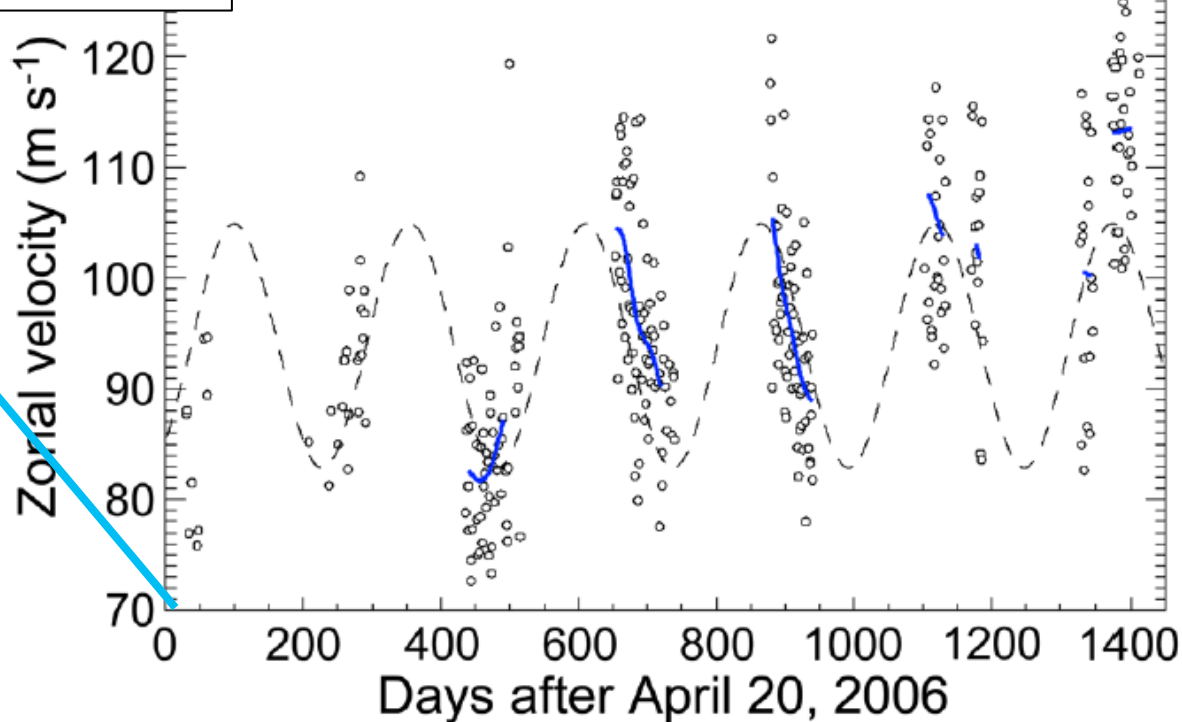
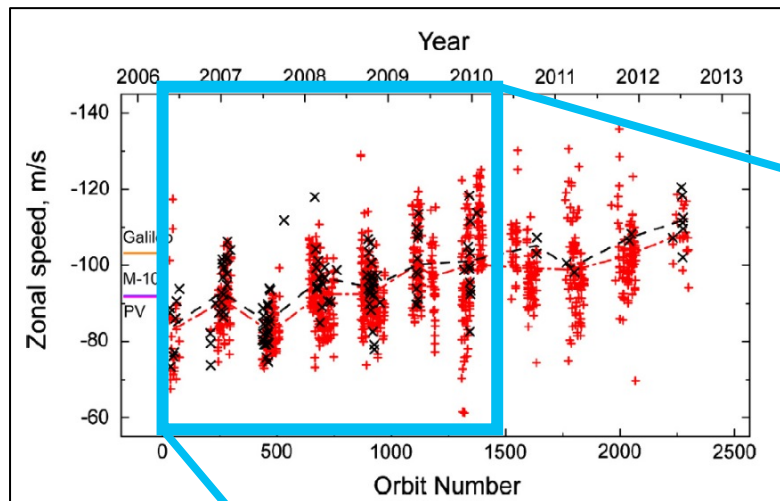
10 m/s程度の風速変動

# スーパーローテーションの時間変動性



6年間で $80\text{ms}^{-1}$ から $110\text{ms}^{-1}$ まで東西風が加速されたように見える  
(観測がとぎれとぎれなのはVenus Expressの軌道による)

# スーパーローテーションの時間変動性



~260日周期の  
周期的変動に見える  
変化を報告  
[Kouyama et al., 2013]

ただし一過性のもの  
だった？

# 異なる高度での風速変動性の違い

## 雲低高度での東西風速変動

[Hueso et al., 2011]

雲頂高度 (70 km)

顕著な風速変動

振幅:  $11 \text{ m s}^{-1}$

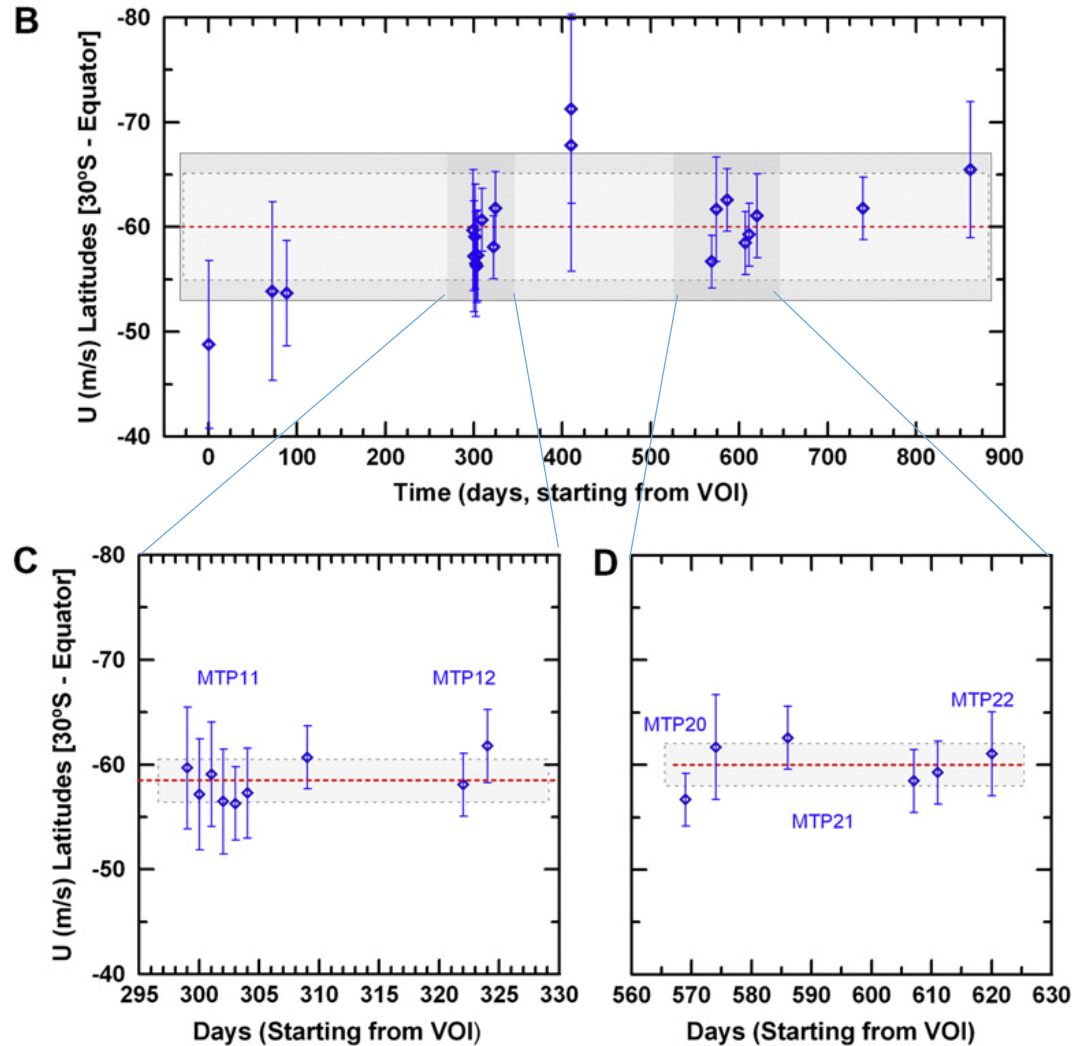
周期: 255日

雲底高度 (45 km)

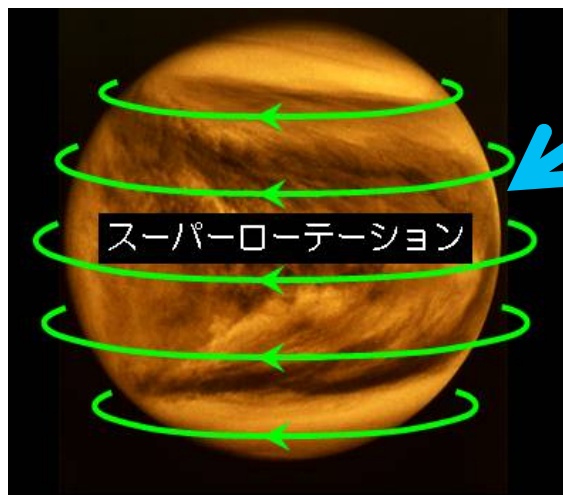
変化に乏しい [Hueso et al., 2011]

300日間の観測を通して  
ほぼ一定の風速値

雲頂高度での風速変動は  
雲層全体を貫くものではない？



# スーパーローテーションの時間変動性



スーパーローテーションは  
いつも安定して $100\text{ m s}^{-1}$ の  
風速になっているわけではない

○100日単位で $20\text{ m s}^{-1}$

○数年単位で $30\text{ m s}^{-1}$

動的な  
運動量交換を反映

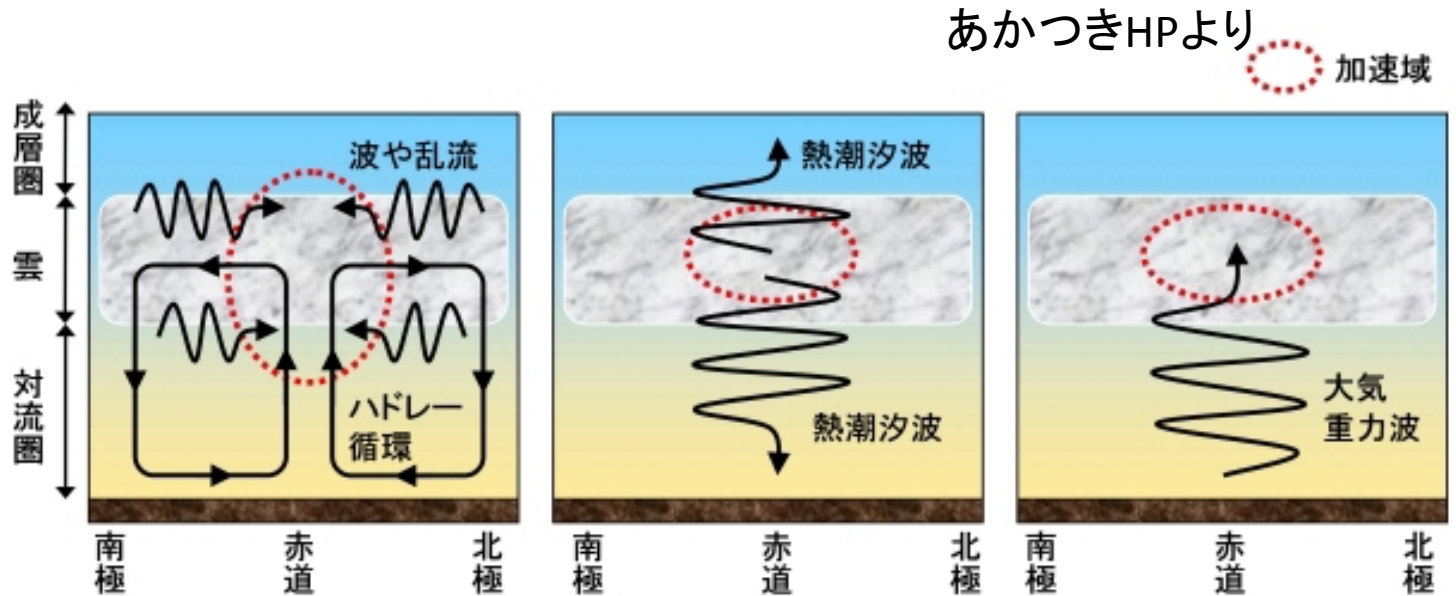
あかつきの観測へ期待:

◇今のスーパーローテーション強度

◇連続した風速観測による変化の調査

→ スーパーローテーション維持に関わるメカニズム

# 風速観測で見られる波動構造について



## ○波動に着目する理由

波動の伝搬に伴って運動量が運ばれ、大気の**加速**・**減速**が生じるため → スーパーローテーション維持メカニズムの候補

①熱潮汐波

②しばしば観測されるKelvin波・Rossby波

# 熱潮汐波について

図2

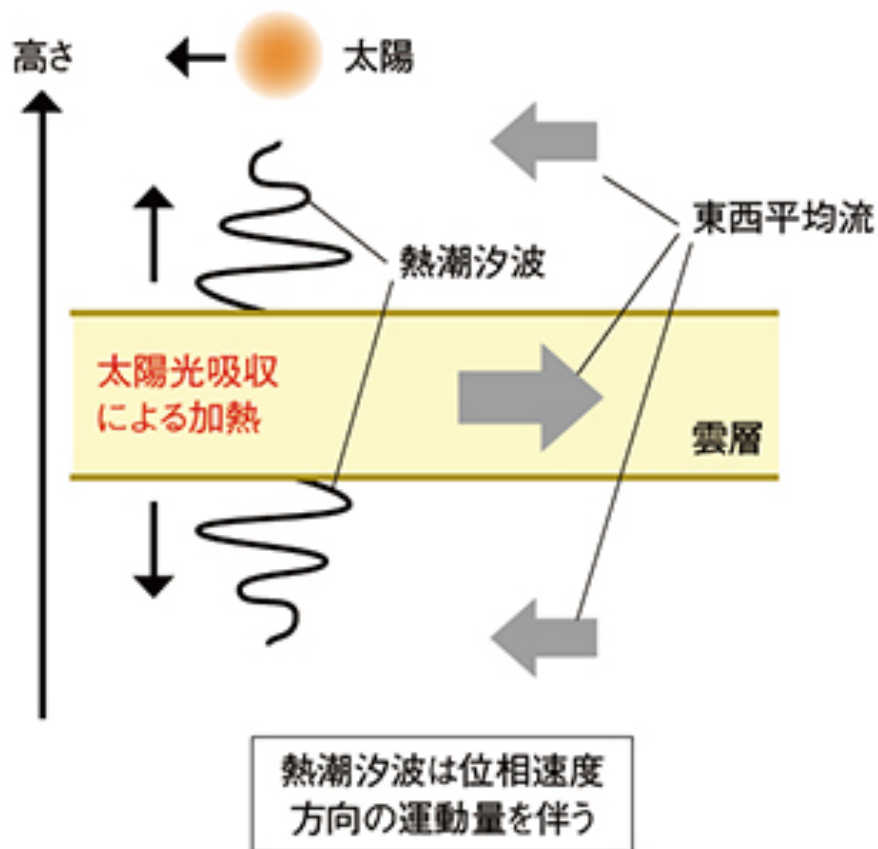
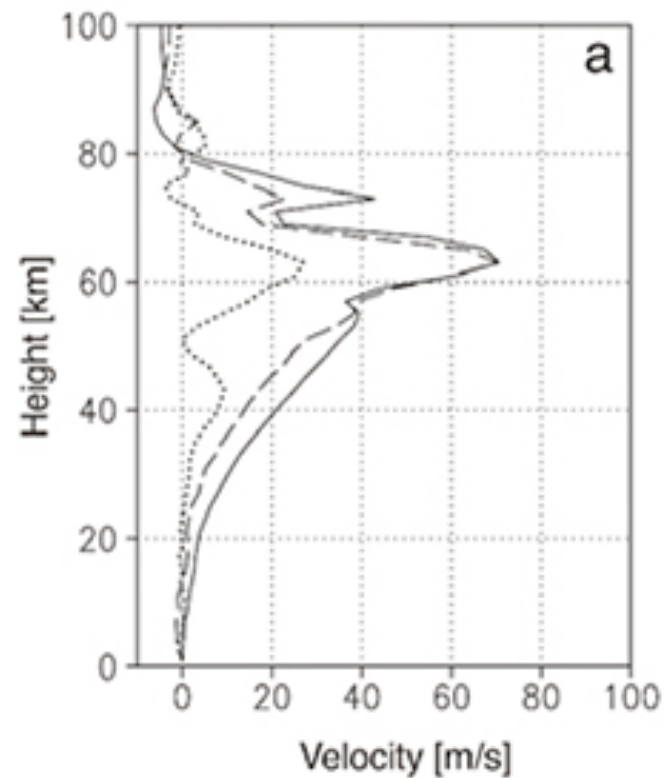


図3

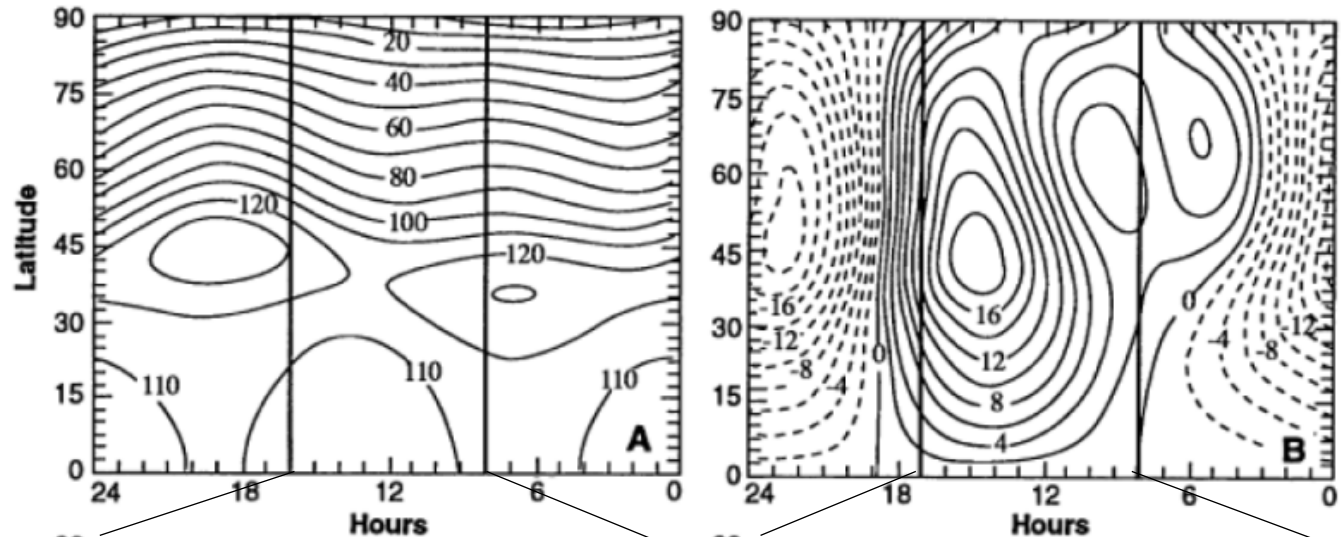


高木ほか  
京産大HPより

# 熱潮汐波に由来する風速構造

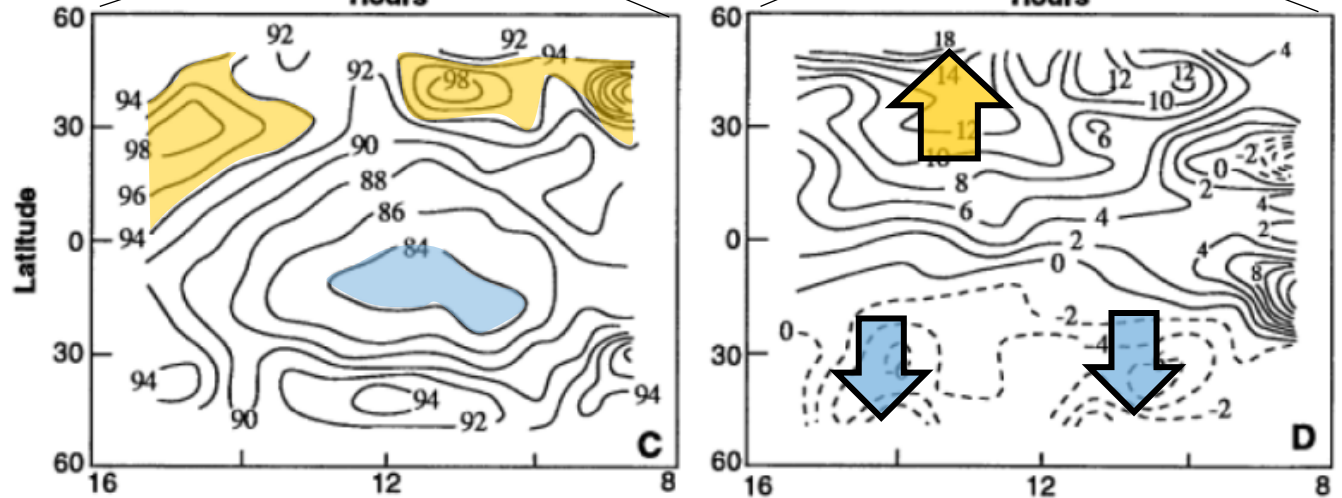
[Newman et al., 1990]

モデル



観測  
LTに着目して  
データを平均

Pioneer Venusの  
観測結果から



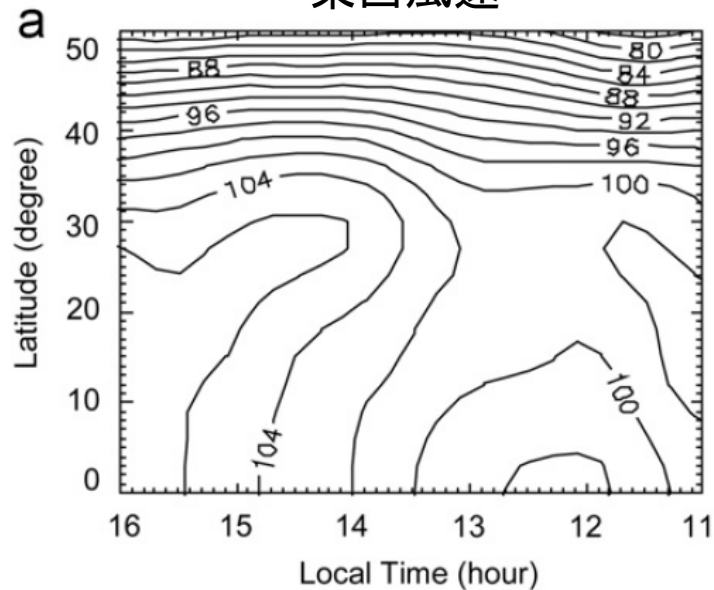
東西風速

南北風速

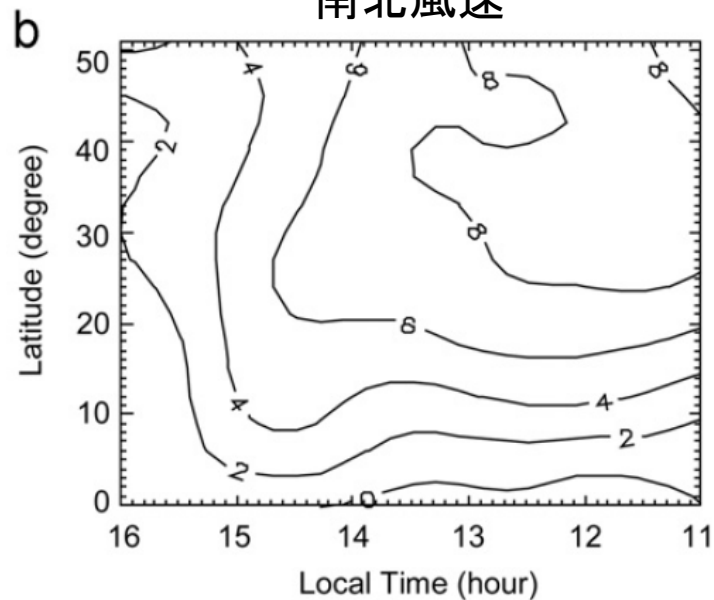


Galileo (Kouyama et al., 2012)

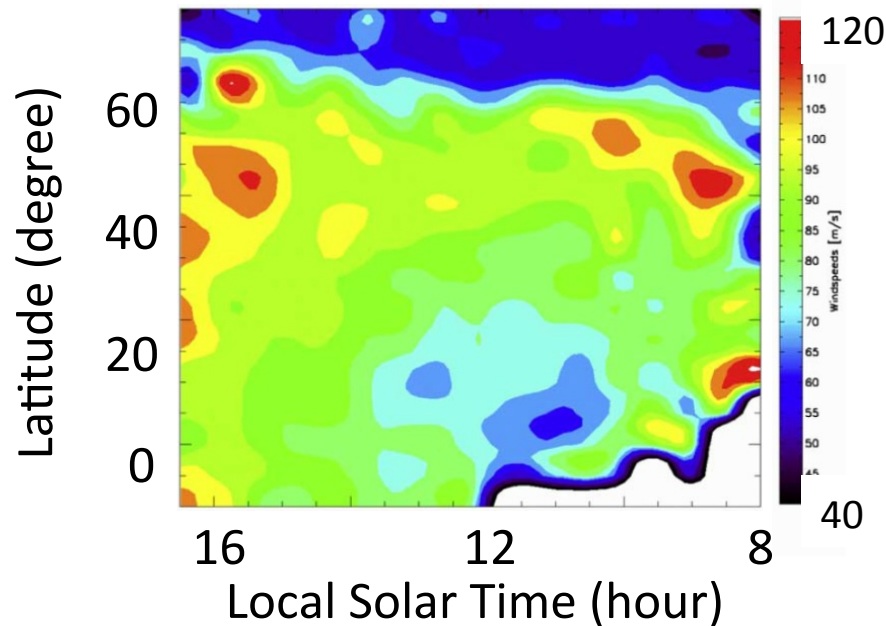
東西風速



南北風速



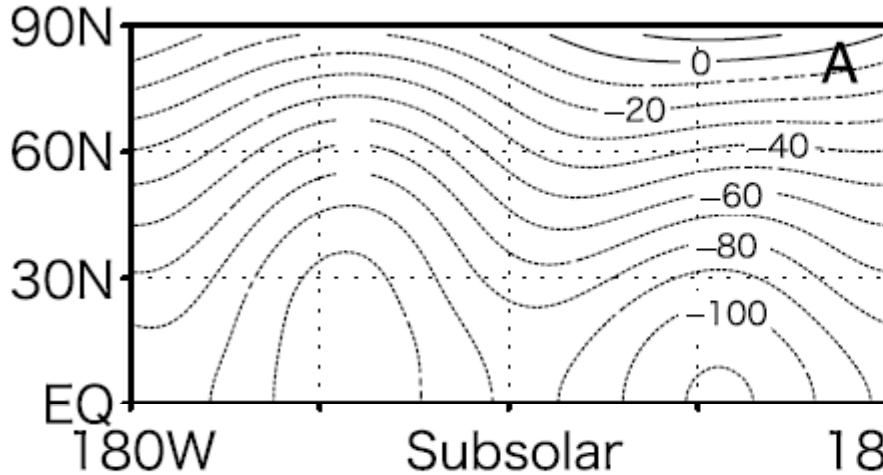
Venus Express(after Moissl et al., 2009)



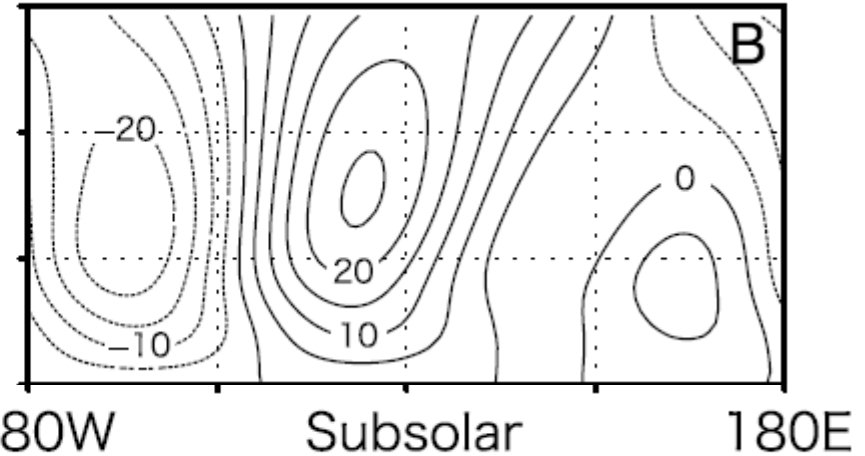
<ポイント>

- ・PVO -> VExまで30年以上にわたって存在 → 安定した現象
- ・東西風速・南北風速に特徴的な構造を作る

東西風速



南北風速



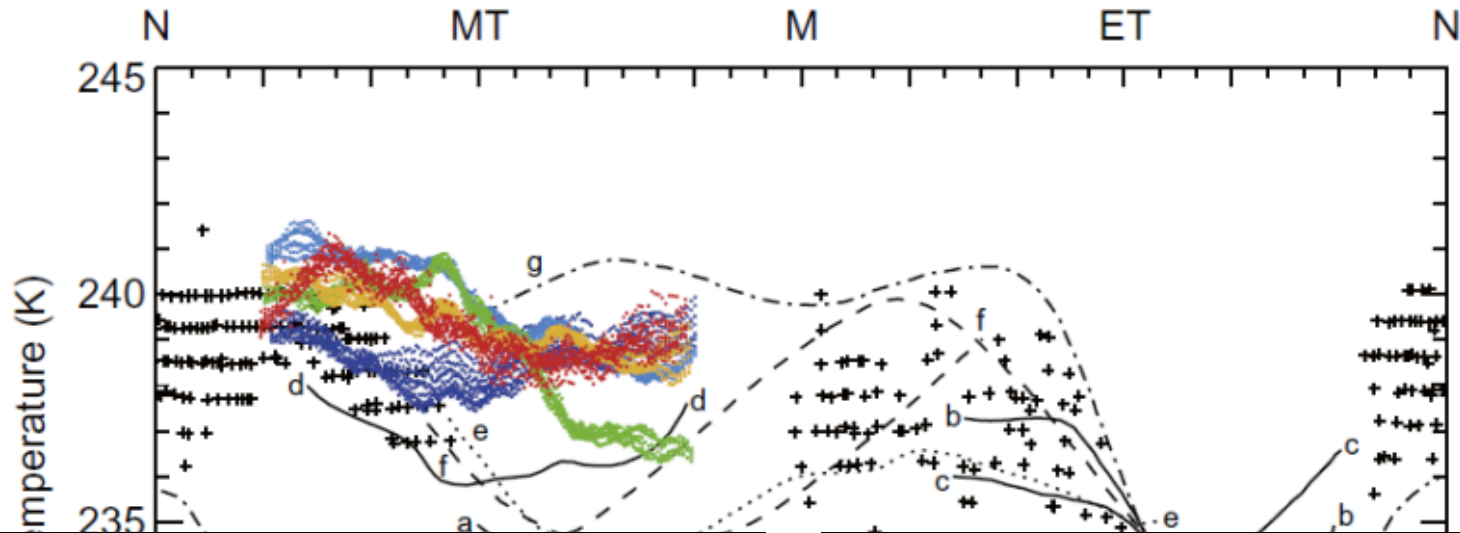
○熱潮汐波は全球(昼・夜)に広がる構造を持つ。  
熱潮汐構造の全貌を観測的に知るためには  
広いローカルタイム帯での風速推定(温度推定)がカギ

○昼面のみの観測では潮汐構造と子午面循環を区別できない。  
雲頂高度での子午面循環強度をできるだけ  
正しく見積もるには、昼面・夜面両方の風速分布を得て  
熱潮汐成分を取り除く必要がある

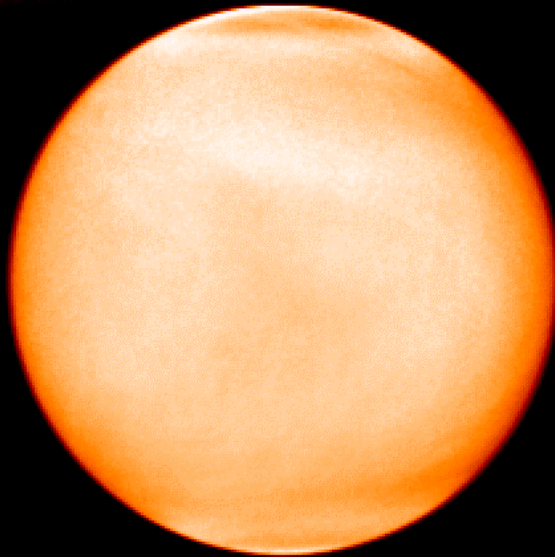
◎UVI, LIR, IR1, IR2の連携による昼夜観測に期待

# 温度場からも

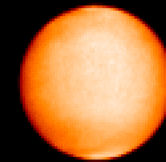
Subaru/COMICS 8  $\mu\text{m}$ 観測から  
[Sato, et al., 2014]



2016-01-31T14:27:24



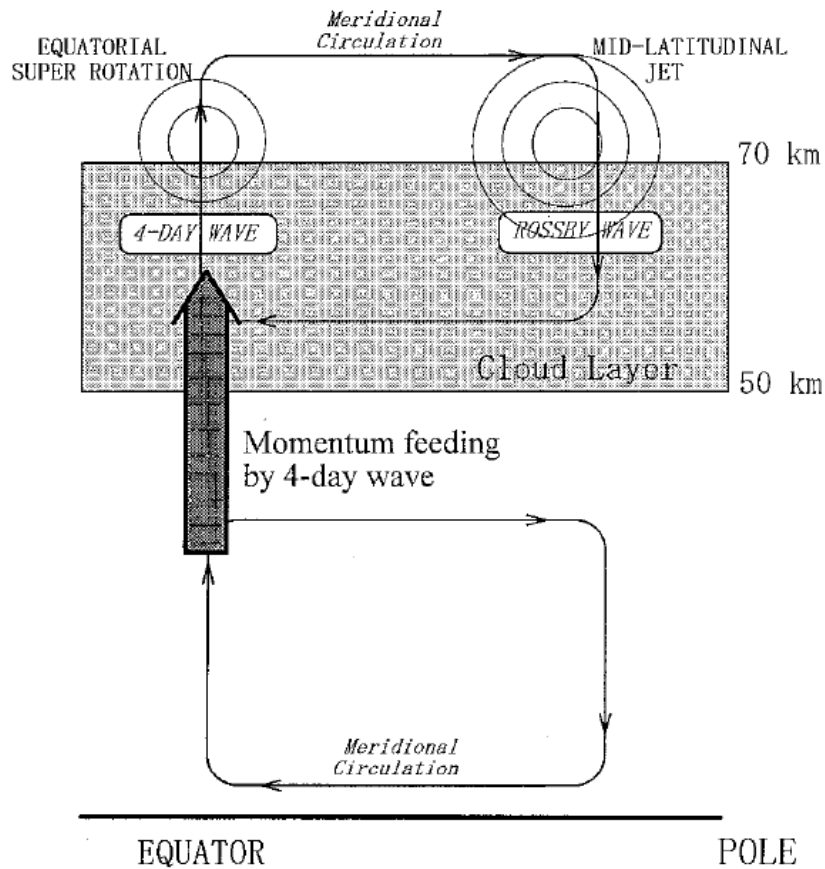
2016-02-02T12:15:20



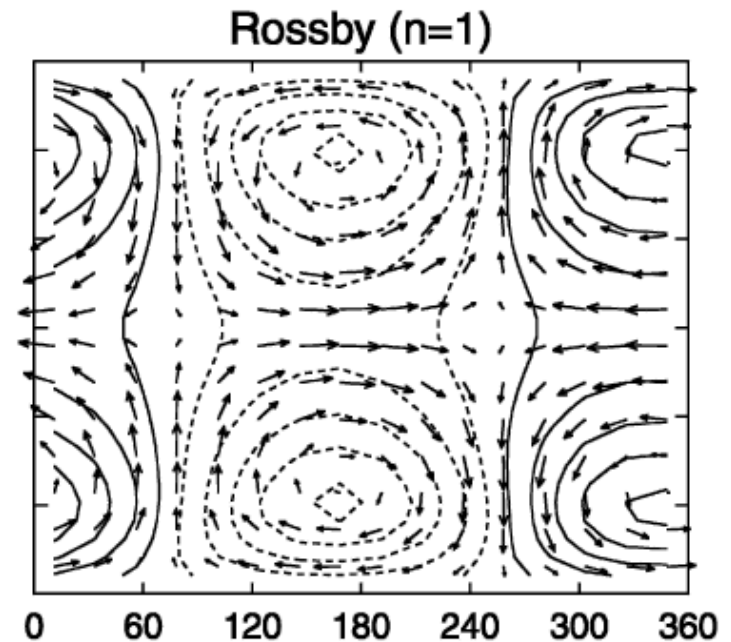
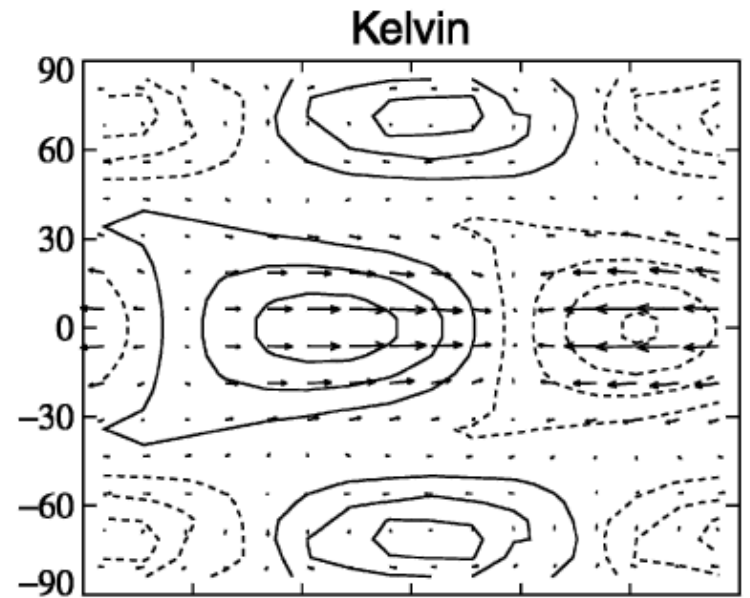
180  
ituc

# 惑星規模波動について

## Kelvin波とRossby波



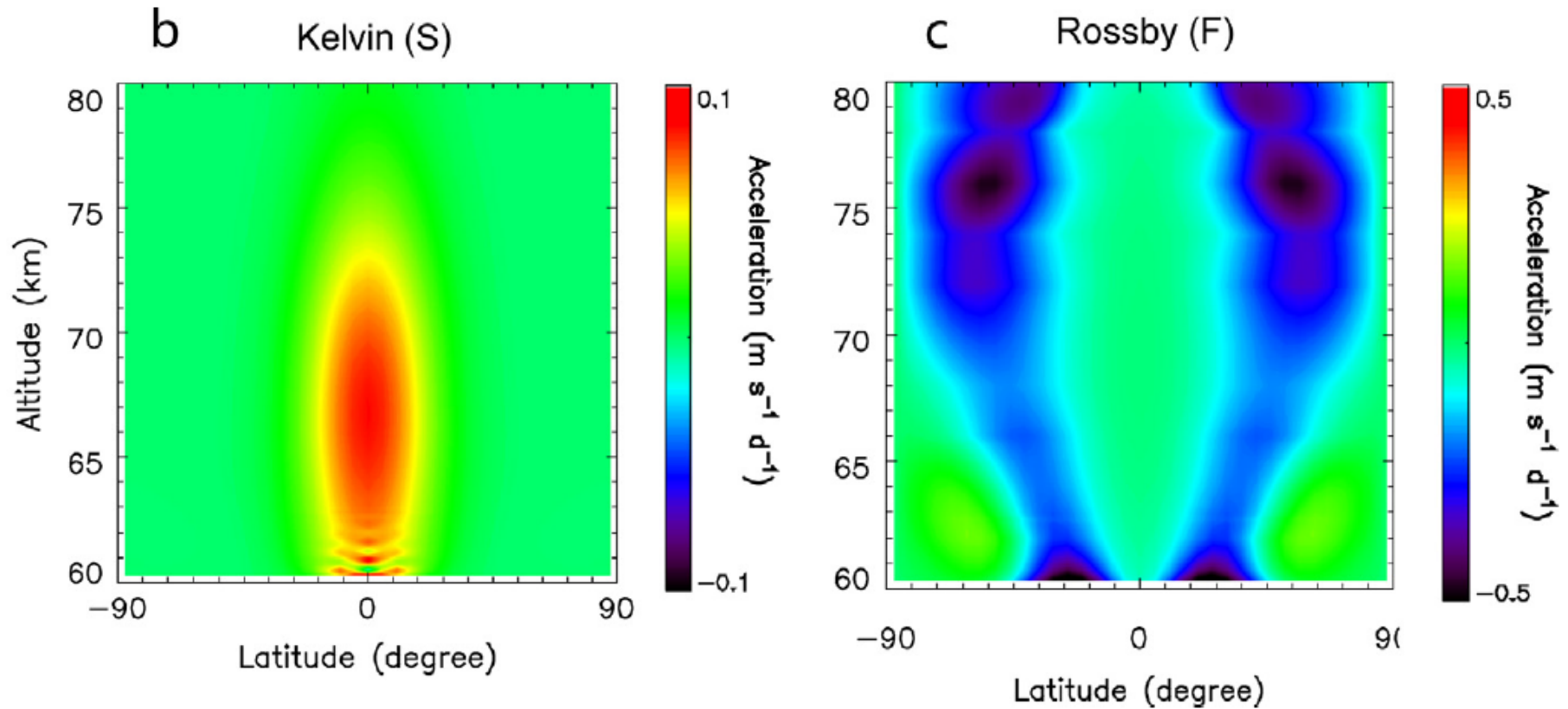
Yamamoto and Tanaka, 1997



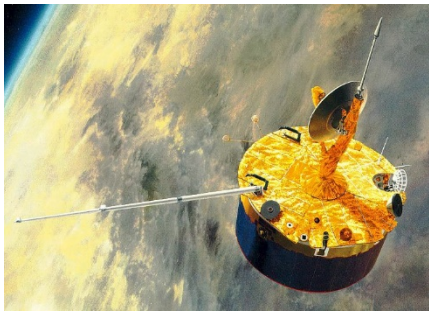
モデル(線形モデル計算から)  
Imamura, 2006

# 惑星規模波動について

Kelvin波とRossby波

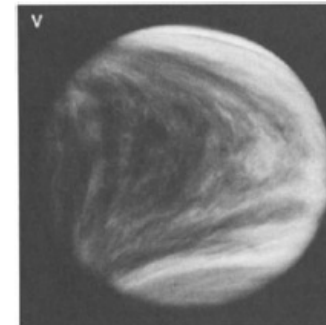
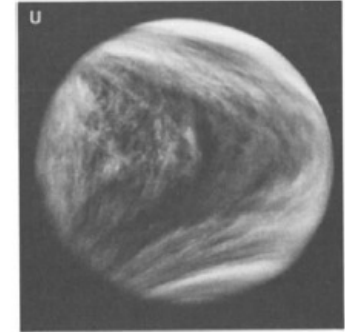
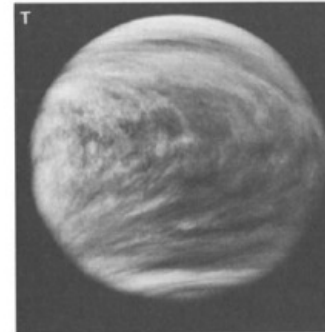
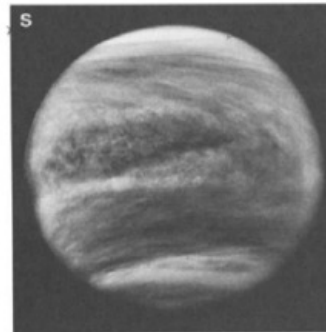
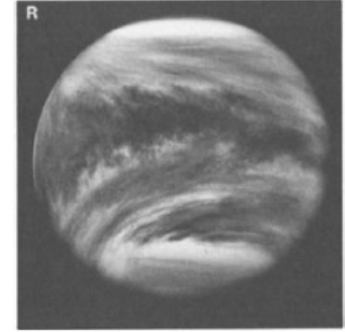
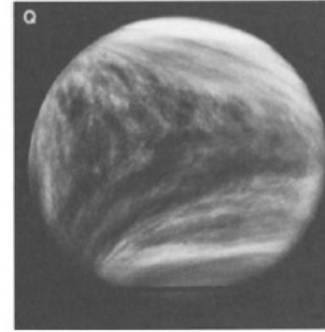
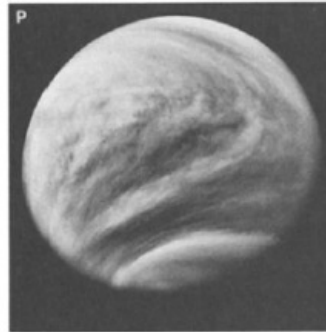
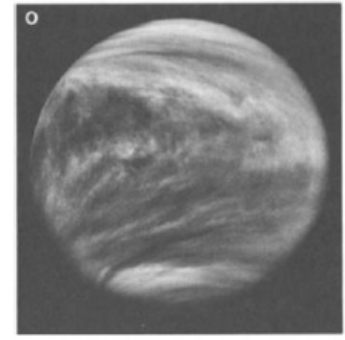
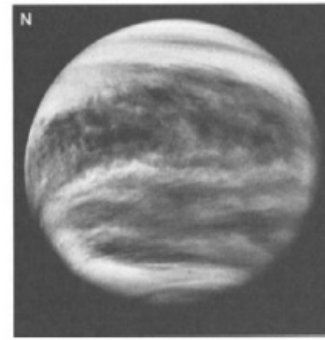
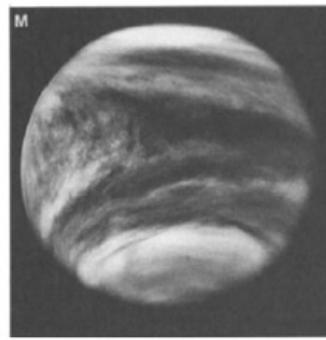


Kouyama et al., 2015



UV images from  
Pioneer Venus  
observations  
(OCPP)

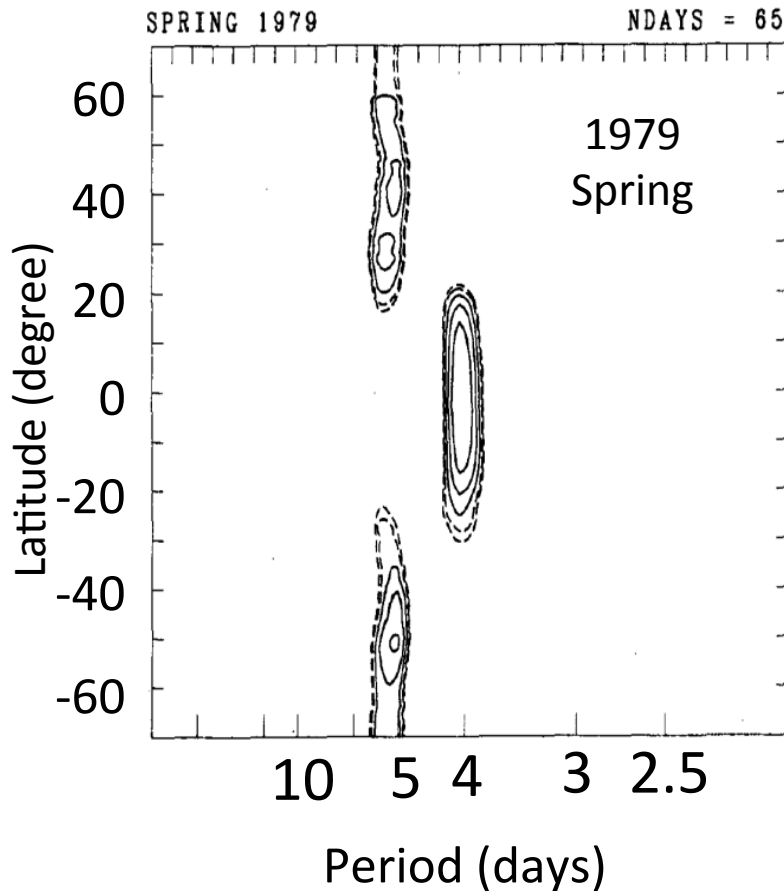
1979 Feb. 11 - 20



[after Rossow et al., 1980]

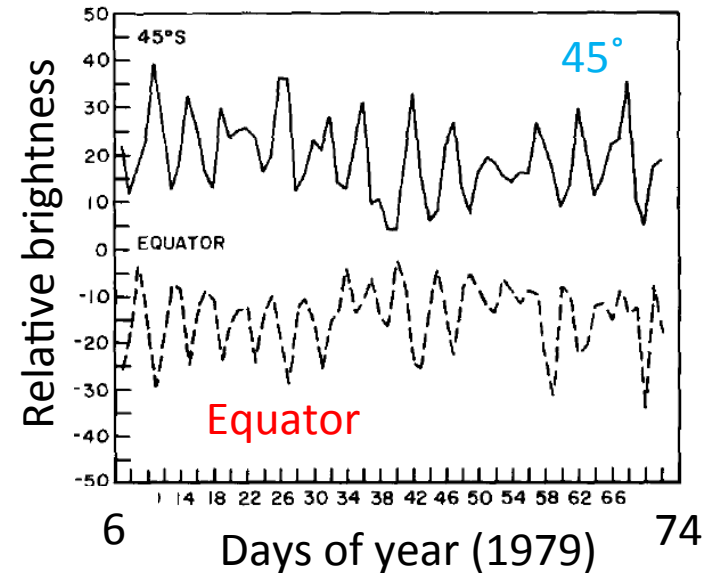
# Periodicity of cloud brightness variations

[Del Genio & Rossow, 1990]



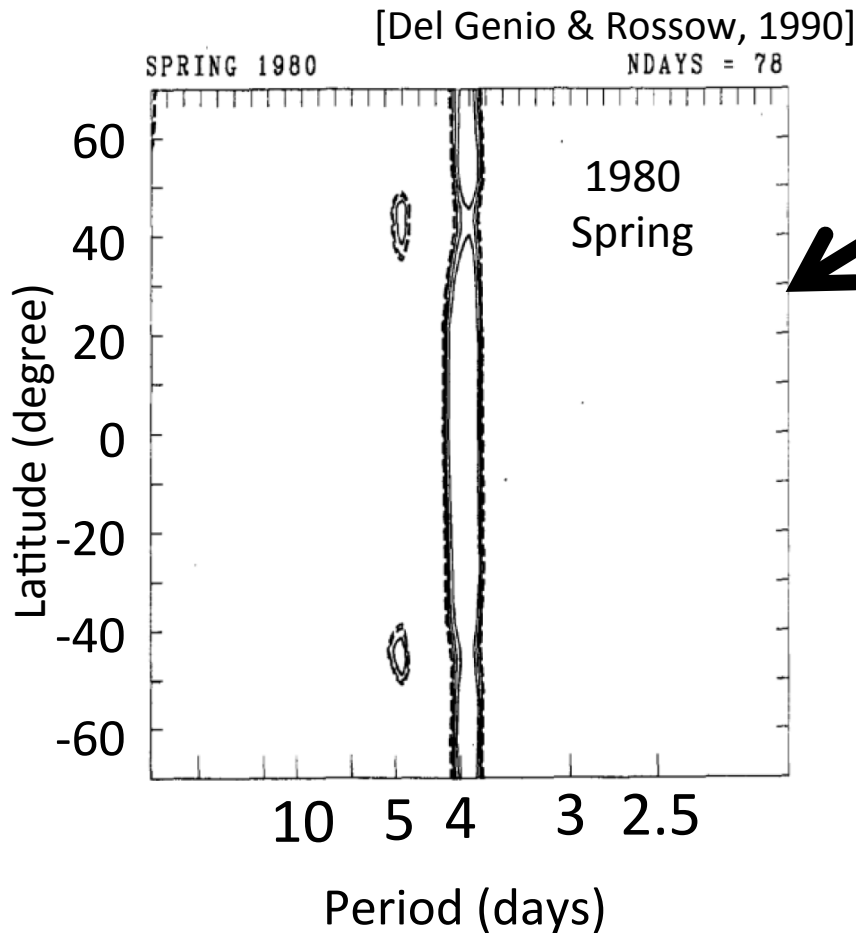
Contours = significant levels  
75, 85%(dashed), 95, 99, 99.9%(solid)

[Del Genio & Rossow, 1982]



4-day and 5 day  
perturbations were  
detected.

# Periodicity of cloud brightness variations

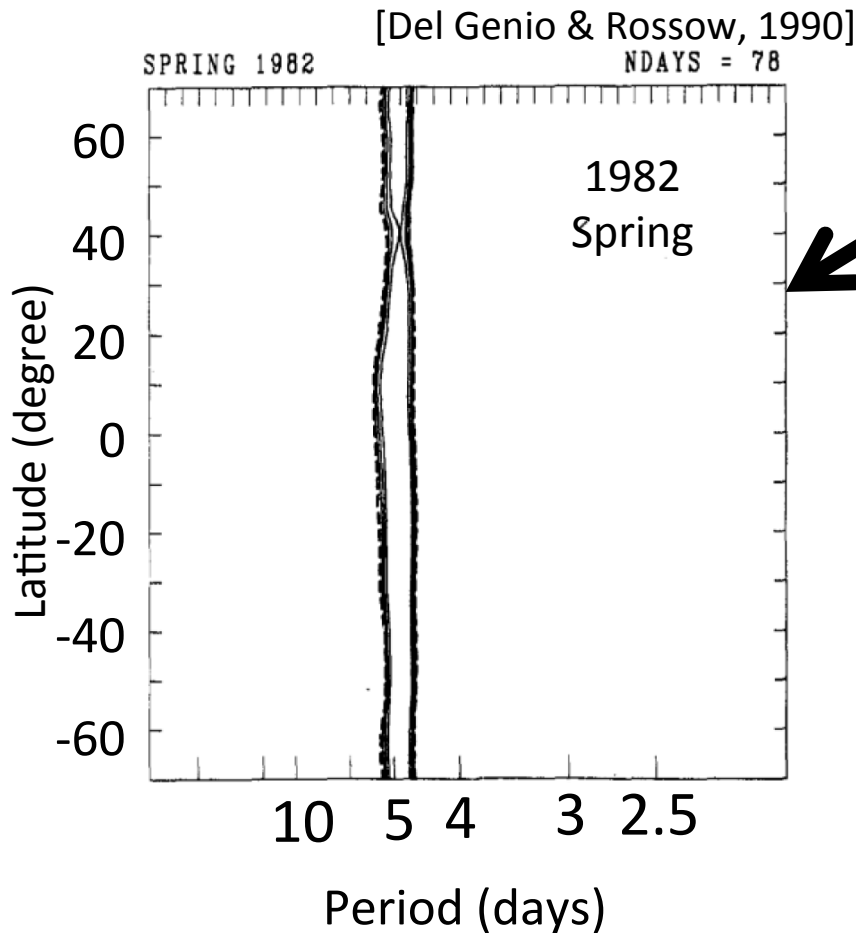


Different periods appeared in different observation periods!

Contours = significant levels  
75, 85%(dashed), 95, 99, 99.9%(solid)



# Periodicity of cloud brightness variations



Different periods appeared in different observation periods!

Planetary brightness variation has at least two typical periods, and they seldom existed at the same time.

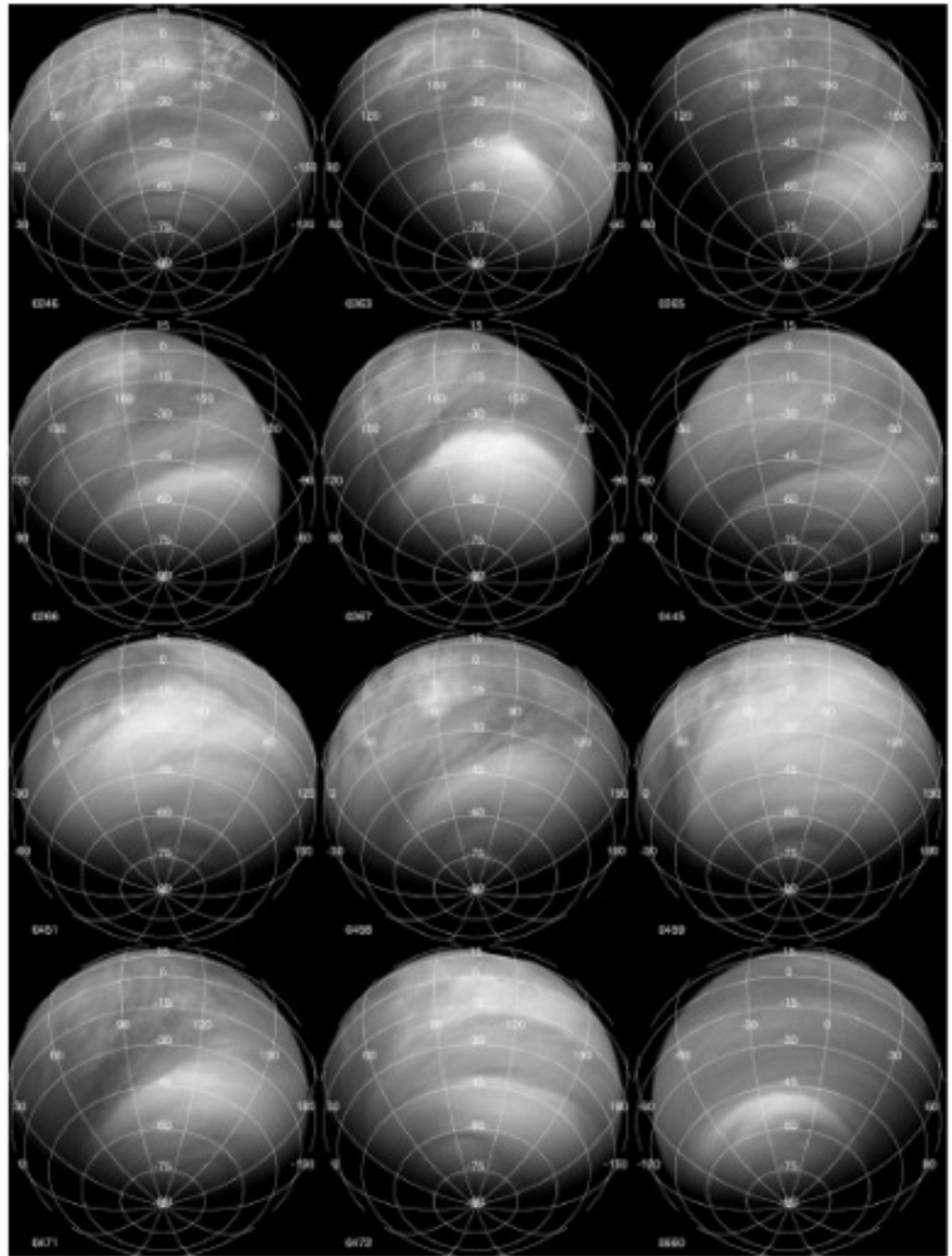
4-day variation  $\leq$  Kelvin wave  
5-day variation  $\leq$  Rossby wave

Contours = significant levels  
75, 85%(dashed), 95, 99, 99.9%(solid)

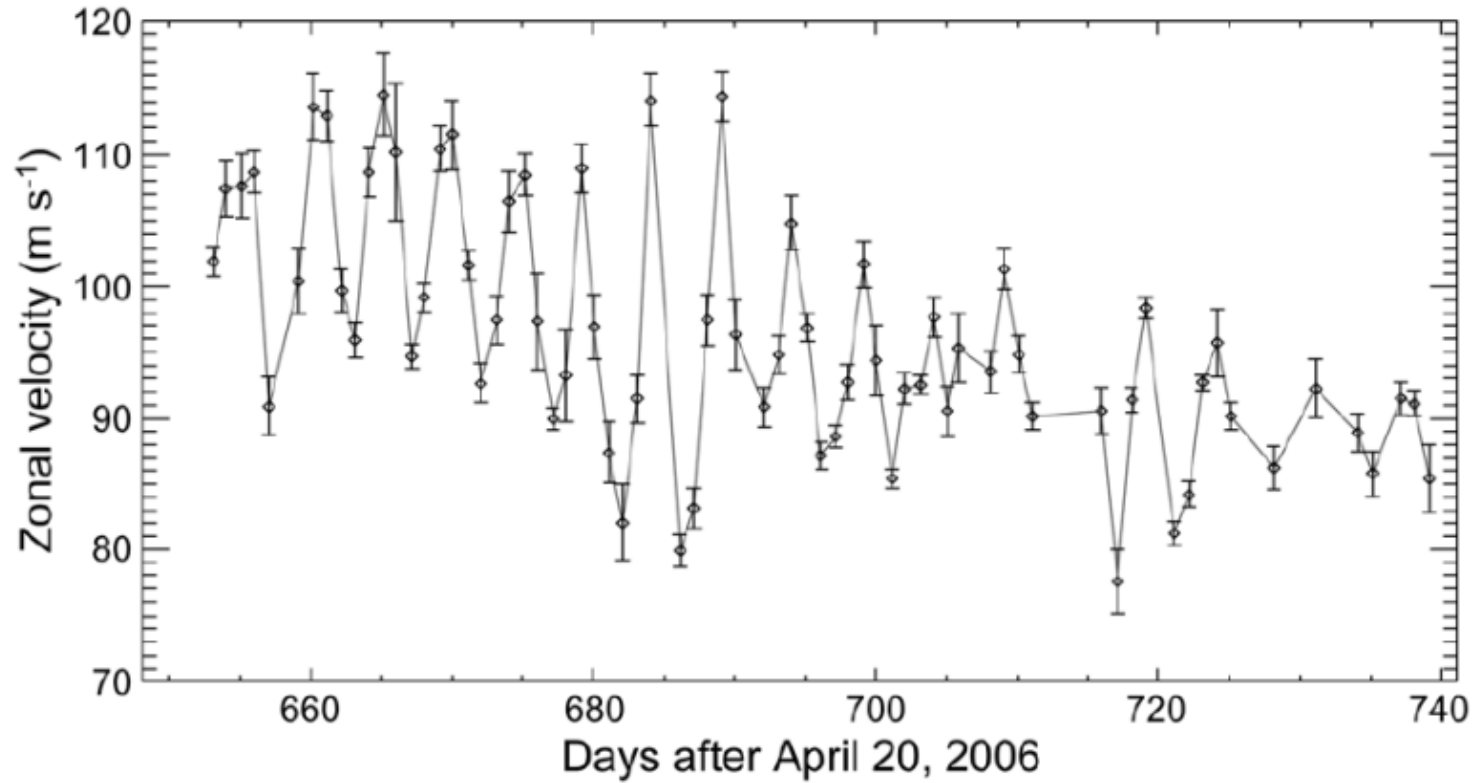
# From Venus Express Observation...



Titov et al., 2012



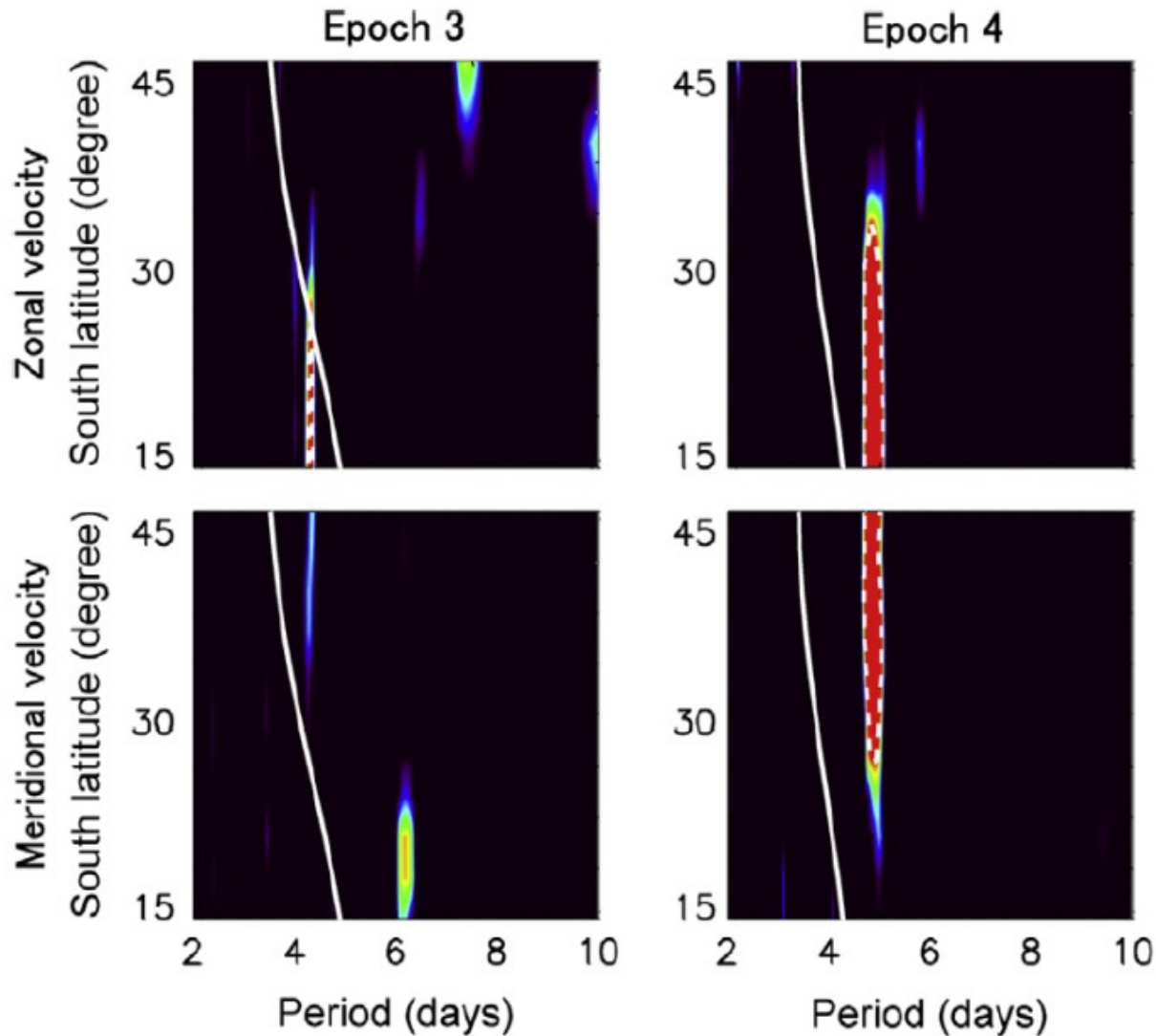
# Waves in wind fields



[Kouyama et al., 2013]

# Waves in wind fields

## 周期解析の結果

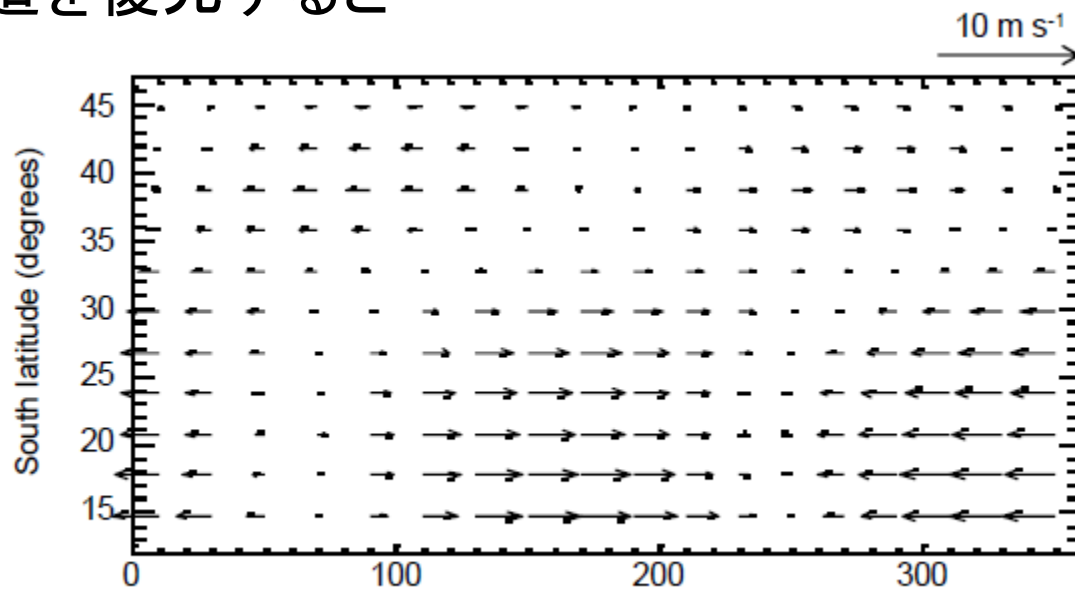


Significance 0 %  >99.9 %

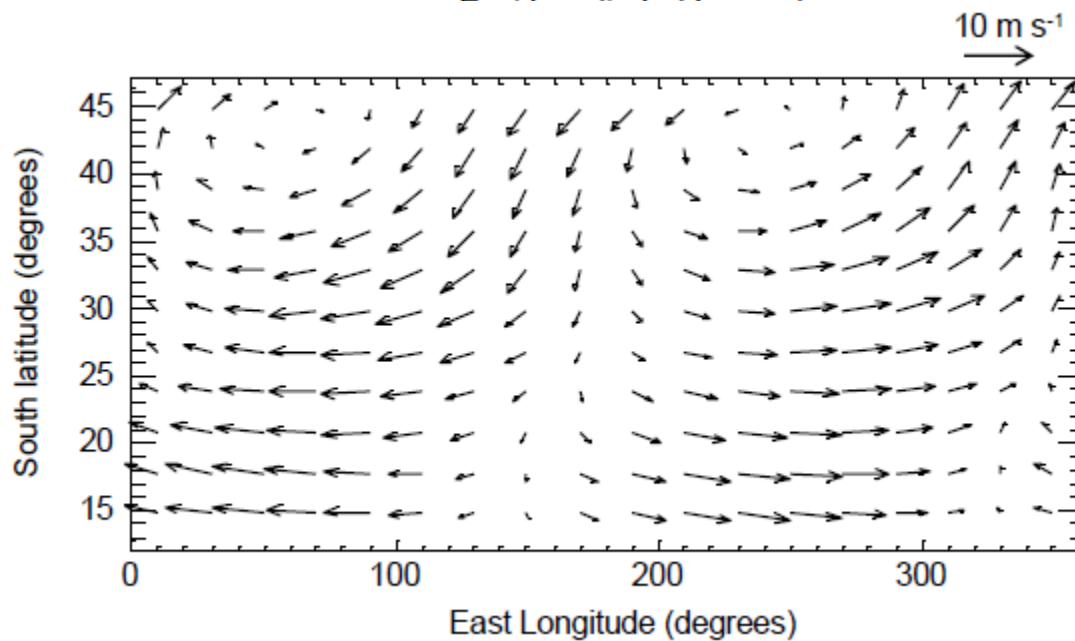
[Kouyama et al., 2015]

# 周期特性から擾乱構造を復元すると・・・

4日波  
(東西風成分のみ)

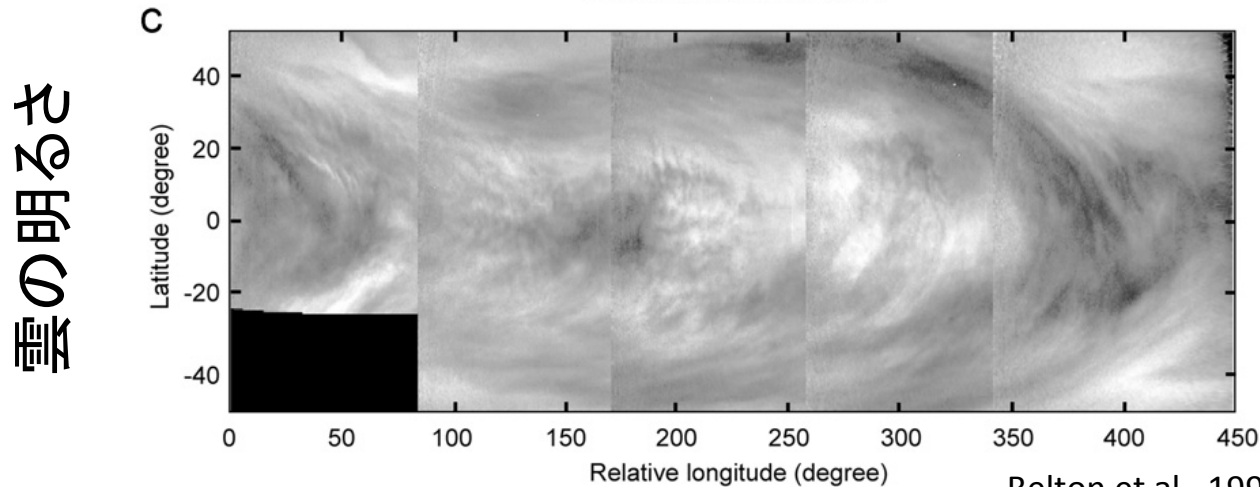
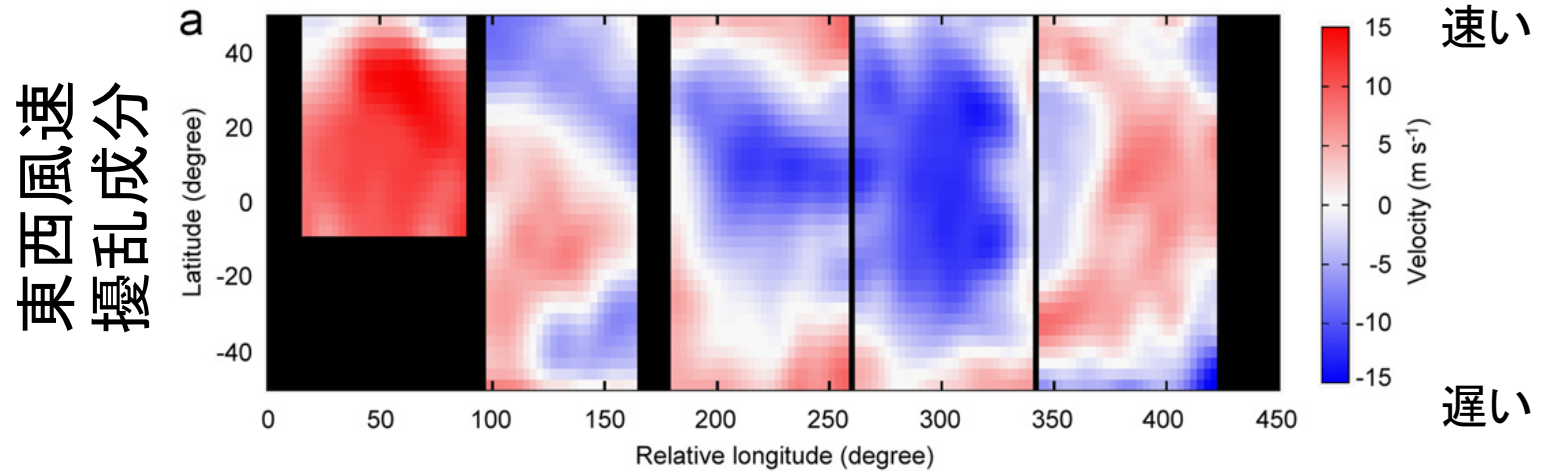


5日波



# 風速擾乱の波数1構造

(日々の風速場 - 潮汐成分)



Belton et al., 1991に基づく規格化済み

東西風速に赤道域を中心とした顕著な波数1構造 (南北風速には見られない)

→ Kelvin波由来の擾乱であることを示唆

雲の明暗模様には東西風速擾乱との対応関係: 速 → 暗 遅 → 明

# 惑星規模波動について

大気に加減速をもたらすことから  
スーパーローテーションの維持・変化を考える上で  
重要かもしれない

これまでの観測から：

- Kelvin波とRossby波
- 時期によって卓越する種別が異なる
- 雲模様と関連性がある -> Y字？

分かっていない：

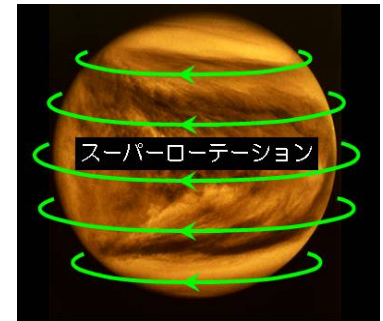
- 波の励起高度 - 励起高度によっては加減速の向きが変わる
- 波の励起源 (Rossby波は傾圧不安定？)

まとめ

# 観測成果に基づく スーパーローテーションの描像

◇鉛直構造 (In-situ Probe探査)

◇水平構造 (雲追跡・温度風)  
東西平均した構造



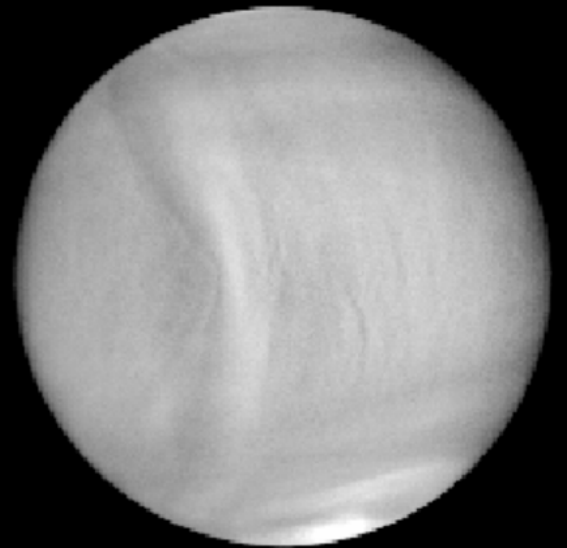
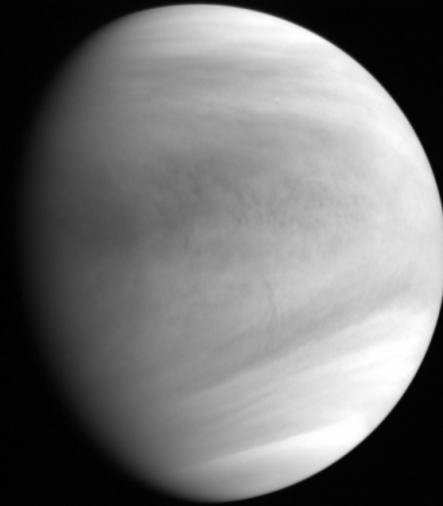
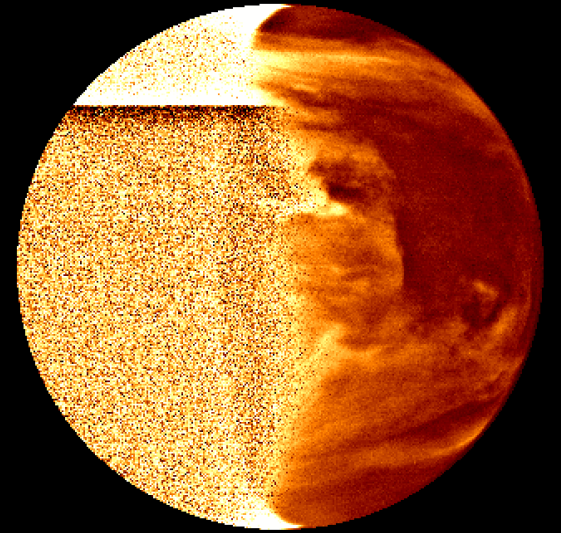
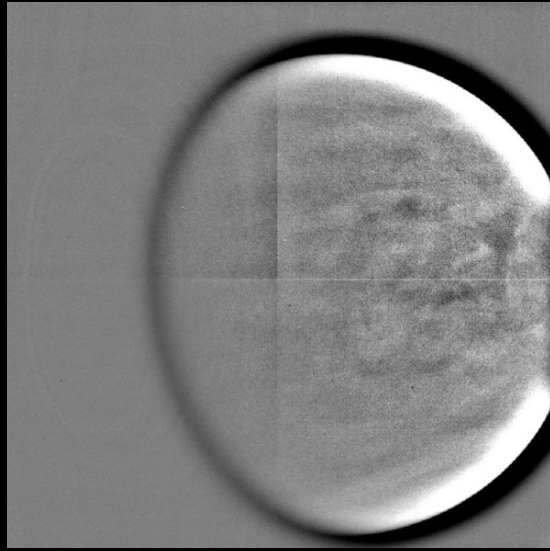
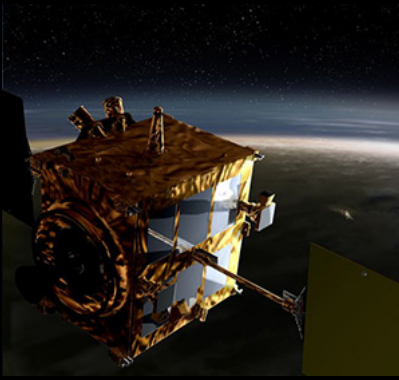
◇時間変動性

---

◆大気波動について

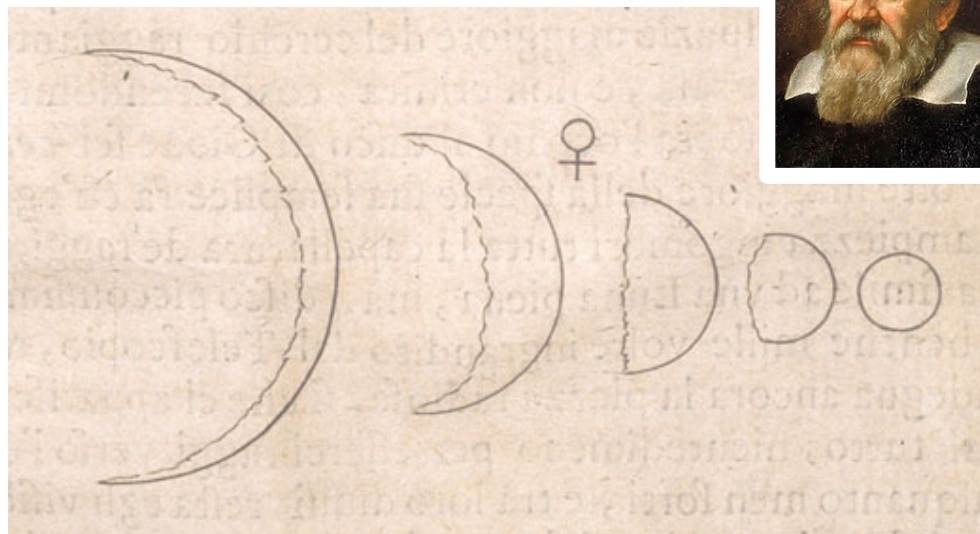
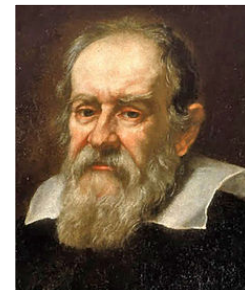
熱潮汐波由来の風速構造について  
惑星規模波動について





プレスリリース資料から

# 金星の科学観測の始まり



ガリレオの金星スケッチ

金星の満ち欠け＝地動説の論拠に