

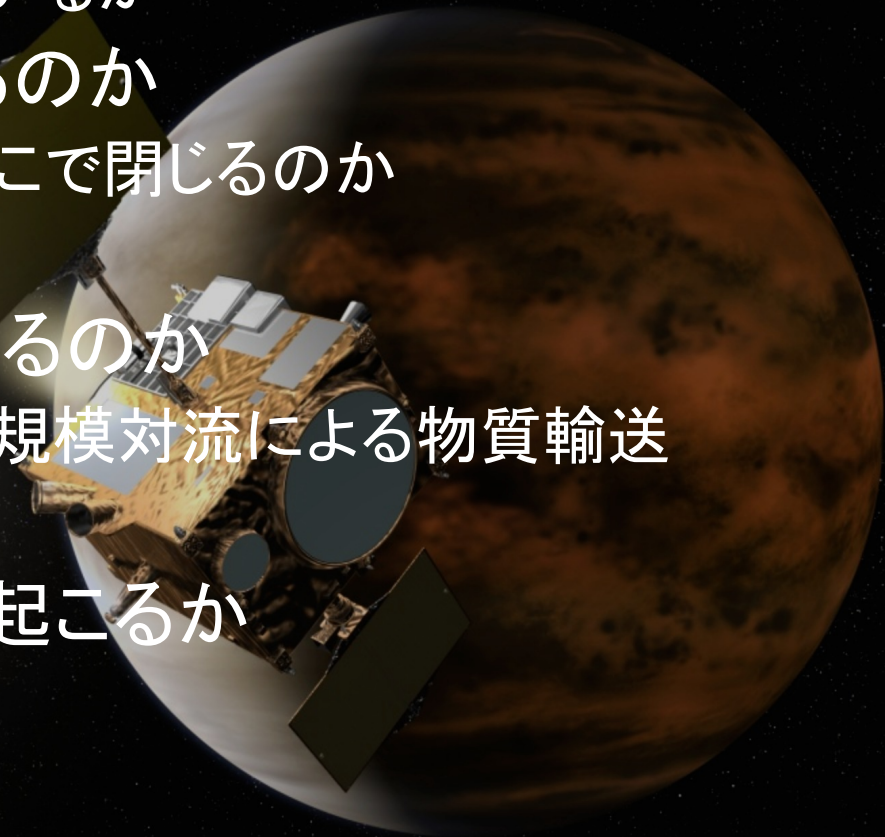
「あかつき」の科学目標

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
今村 剛

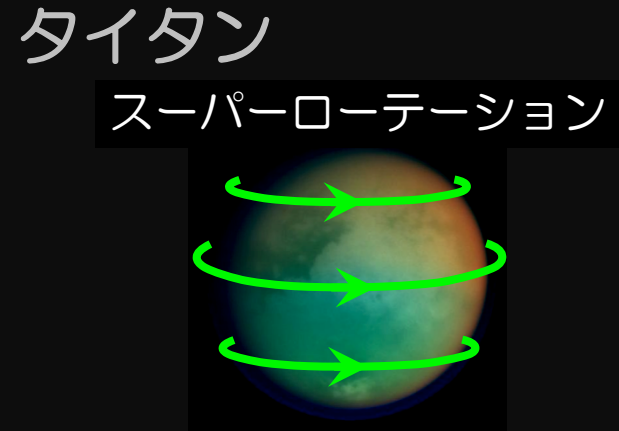
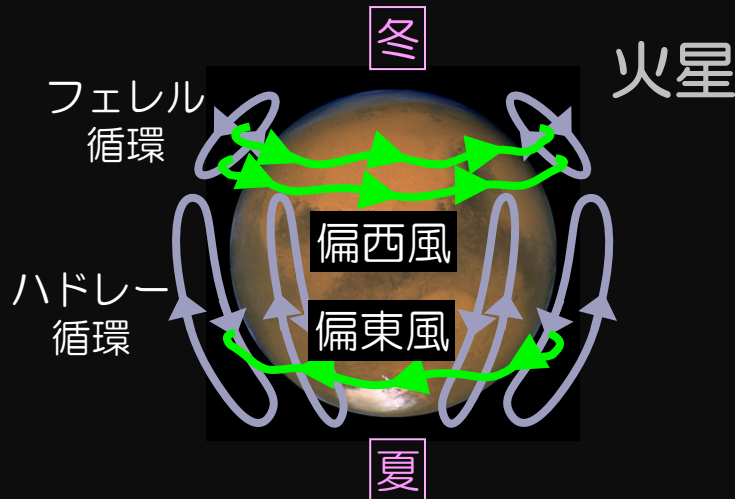
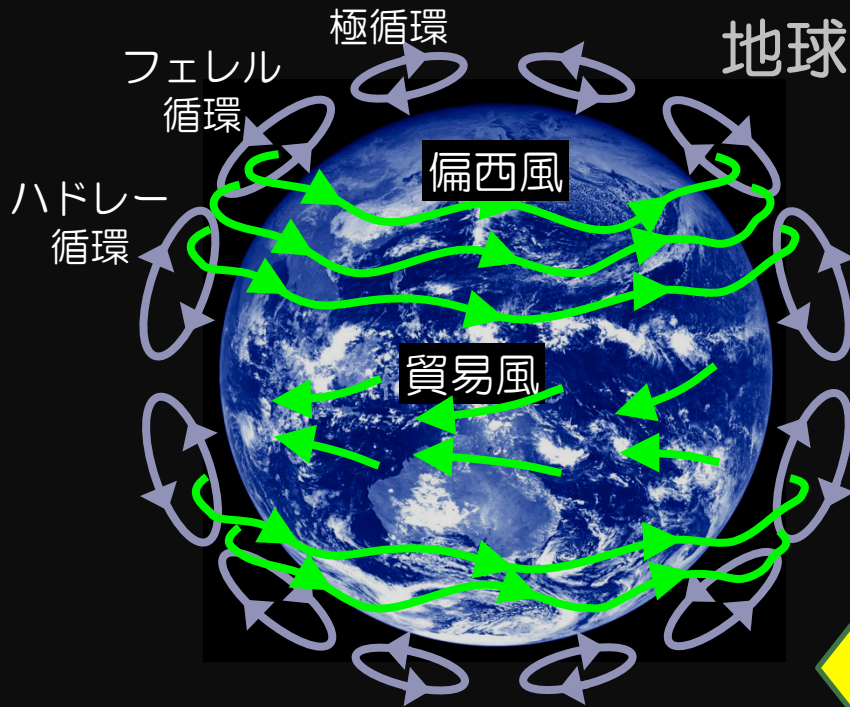
1. 科学目標
2. 雲追跡風(L3)による研究
3. 画像データ(L2)による研究

「あかつき」の目標

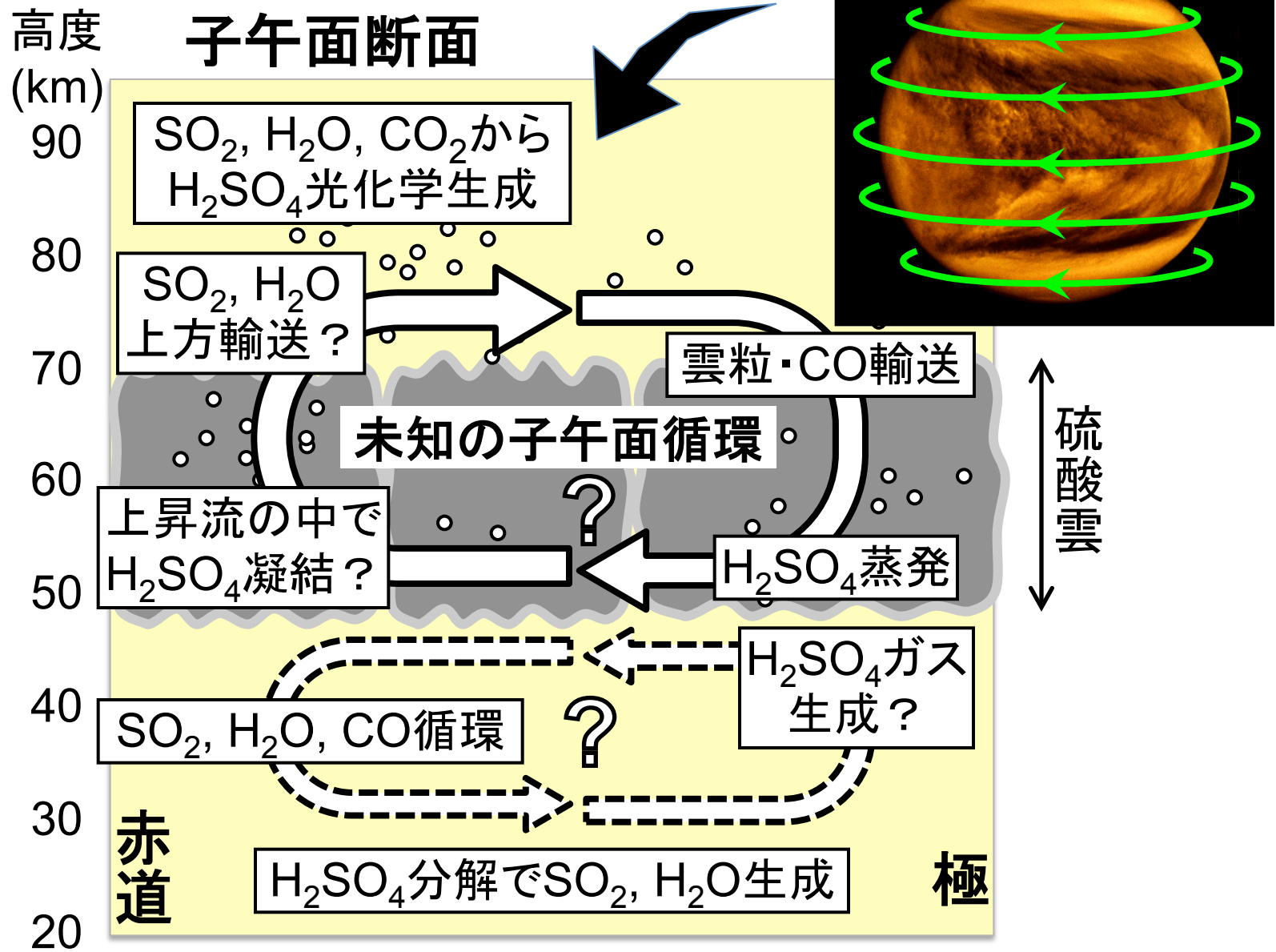
- ・ スーパーローテーションはなぜ起こるのか
 - 赤道向き角運動量輸送はあるか
 - 熱潮汐は雲より下に伝搬しているか
- ・ 子午面循環はどうなっているのか
 - 雲層高度のハドレー循環はどこで閉じるのか
 - 間接循環はあるか
- ・ 全球をおおう雲はどう作られるのか
 - 子午面循環、大規模波動、小規模対流による物質輸送
 - 雲の惑星スケールの輸送
- ・ 氷晶の生じない大気に雷は起こるか



地球型惑星の大気大循環



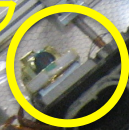
スーパーローテーション



大気大循環が雲をつくる

組み立て中のあかつき

雷・大気光カメラ



超高安定発振器



中間赤外カメラ



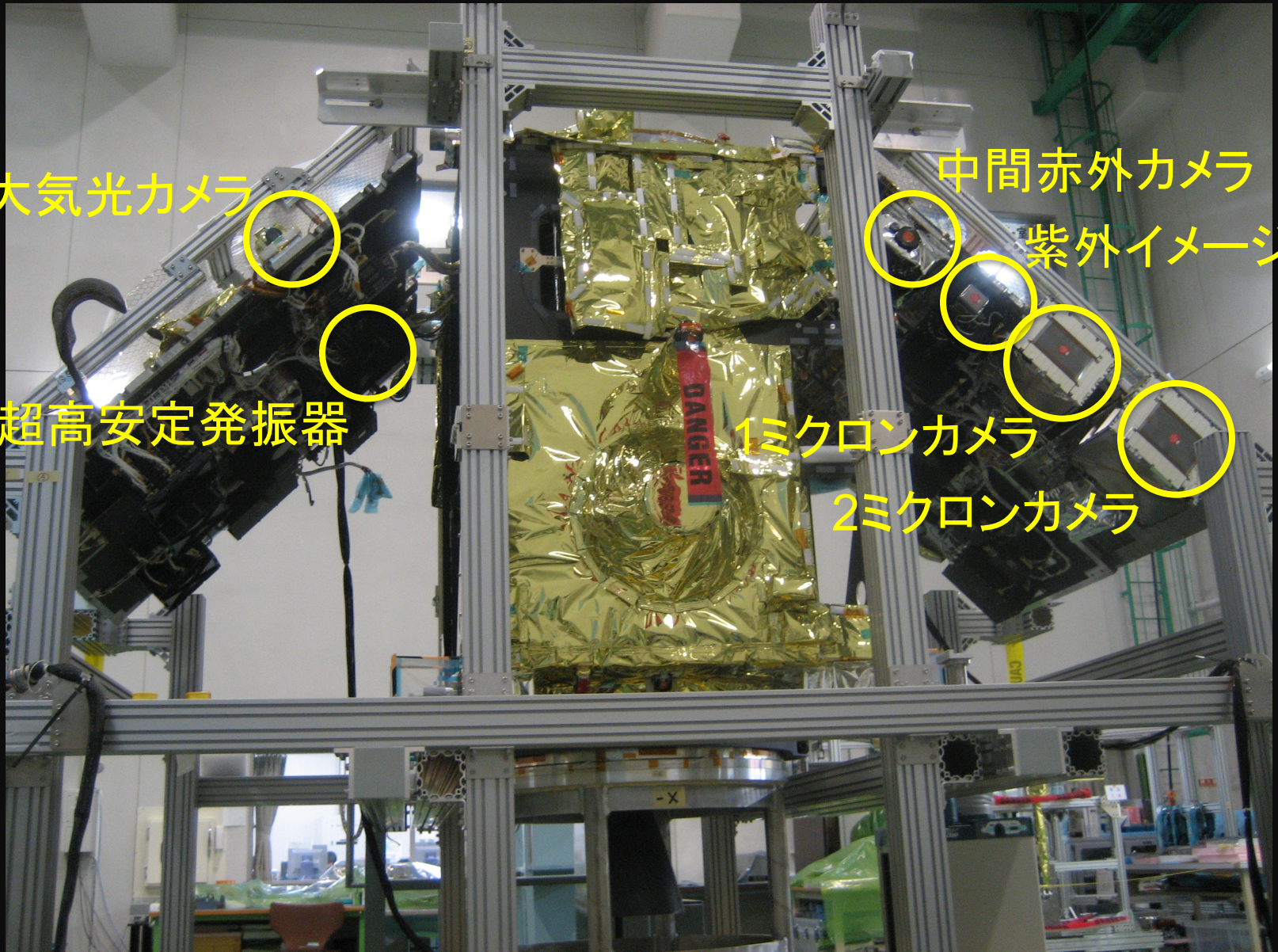
紫外イメージャ



1ミクロンカメラ



2ミクロンカメラ



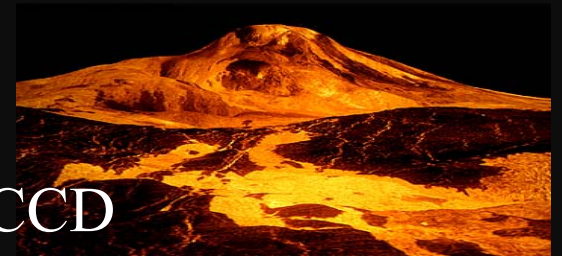
科学観測機器 (1)

1 μ mカメラ IR1 (東京大学・JAXA)

$\lambda = 0.9, 0.97, 1.01 \mu\text{m}$ (近赤外の窓)

視野 $12 \times 12^\circ$, 1024x1024画素, 検出器 SiCCD

→ 下層の雲, 活火山, 地表物質



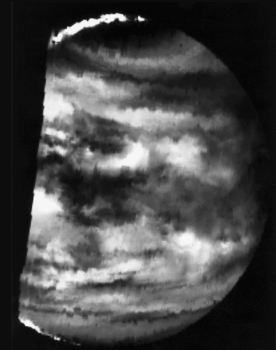
2 μ mカメラ IR2 (JAXA)

$\lambda = 1.73, 2.26, 2.32 \mu\text{m}$ (近赤外の窓),

2.02 μm (CO_2 吸収), 1.65 μm (黄道光)

視野 $12 \times 12^\circ$, 1024x1024画素, 検出器 PtSi

→ 下層の雲, 粒径, 雲頂高度, 下層の一酸化炭素



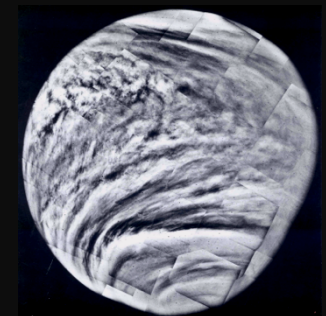
Galileo (2.3 μm)

紫外イメージャ UVI (北海道大学・JAXA)

$\lambda = 283, 365 \text{ nm}$

視野 $12 \times 12^\circ$, 1024x1024画素, 検出器 SiCCD

→ SO_2 , 未同定吸収物質



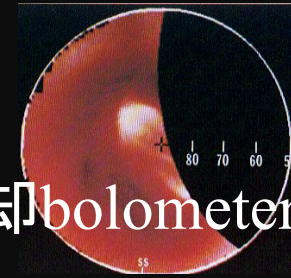
科学観測機器 (2)

中間赤外カメラ LIR (立教大・JAXA)

$\lambda = 10 \mu\text{m}$ (幅 $4 \mu\text{m}$)

視野 $16.4 \times 12.4^\circ$, 248×328 画素, 検出器 非冷却bolometer

→ 雲頂温度

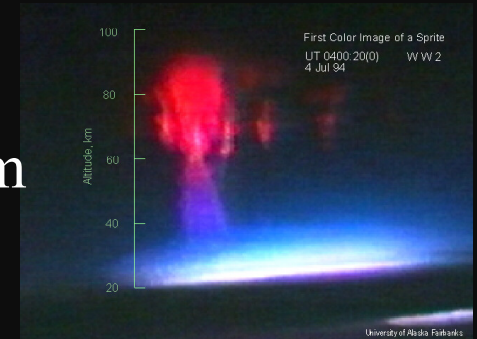


雷・大気光カメラ LAC (北大)

視野 $16 \times 16^\circ$, $\lambda = 777, 551, 553, 558, 630 \text{ nm}$

8×8 画素, 検出器 APD (32kHz sampling)

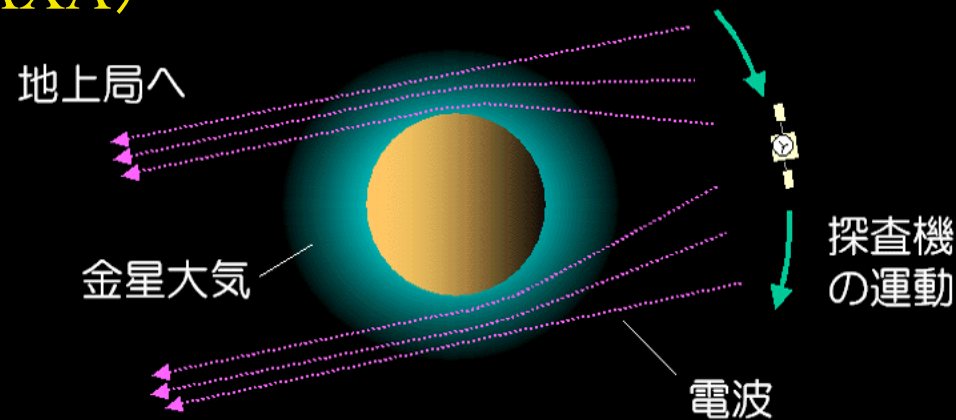
→ 雷放電, O_2 / O 大気光



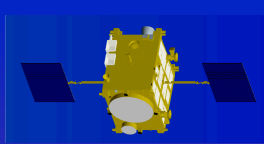
超高安定発振器 USO (JAXA)

電波オカルテーション観測

→ 気温・硫酸蒸気高度分布



あかつき



多波長リモセンで 迫る3次元循環

気温・硫酸蒸気の高度
分布 (電波掩蔽)

大気光
(雷・大気光カメラ)

二酸化硫黄
(紫外イメージャ)

雲の温度
(中間赤外カメラ)

下層の雲
(1 μ m/2 μ mカメラ)

風速ベクトル
(雲の動きから)

一酸化炭素
(2 μ mカメラ)

雷放電
(雷・大気光カメラ)

水蒸気(1 μ mカメラ)

地表物質・活火山
(1 μ mカメラ)

地表面

90 km

65 km

50 km

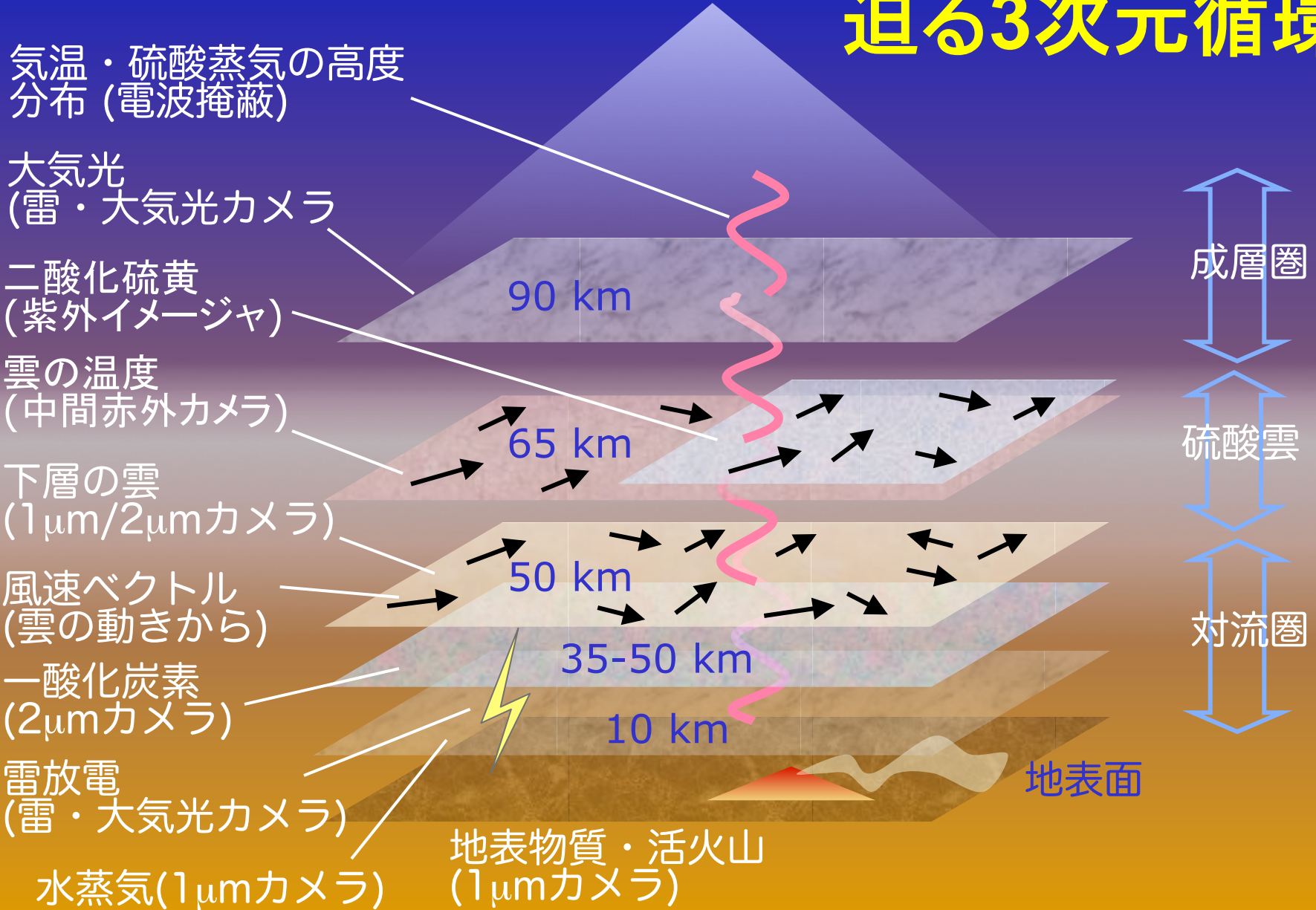
35-50 km

10 km

成層圏

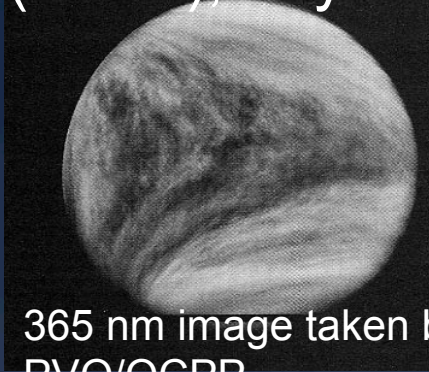
硫酸雲

対流圏



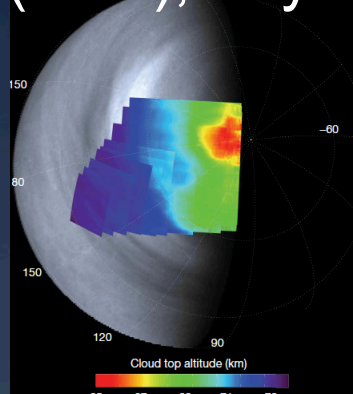
雲動画に最適化した世界初のミッション

365nm, cloud top
(65km), dayside



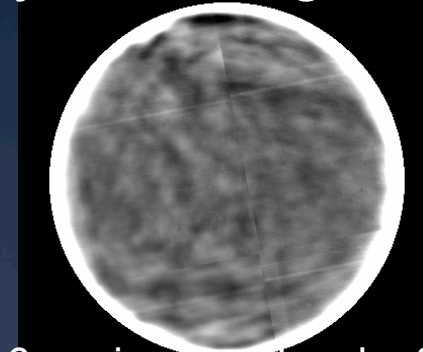
365 nm image taken by
PVO/OCPP

2.02 μ m, cloud
top(65m), dayside



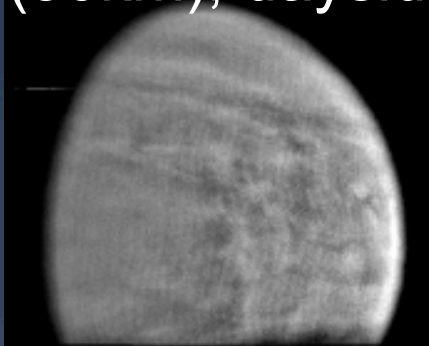
Cloud altimetry by
VenusExpress/VIRTIS

10 μ m, cloud top (65km),
dayside & nightside



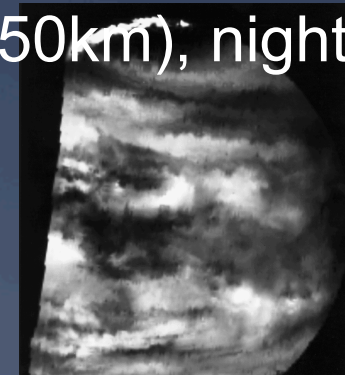
8.6 μ m image taken by Subaru
telescope, high-pass filtered

0.9 μ m, lower cloud
(50km), dayside



0.98 μ m image taken by
Galileo/SSI

2.3 μ m, lower cloud
(50km), nightside



2.3 μ m image taken by
Galileo/NIMS

雲層上部・下部の風速
ベクトル分布を初めて
全ローカルタイムで得る

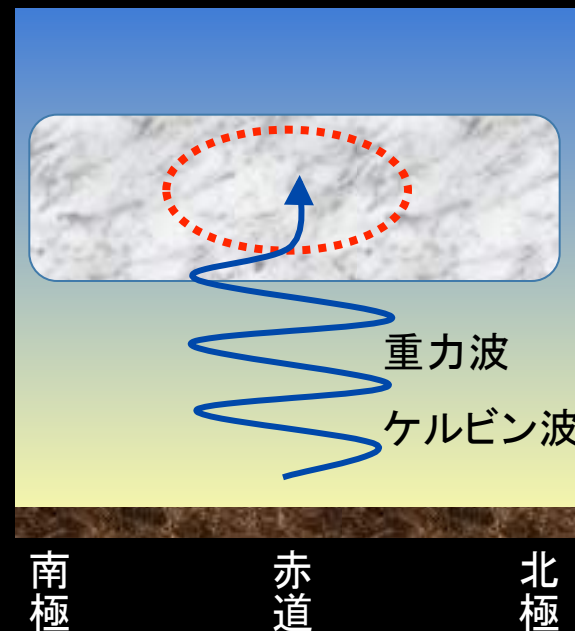
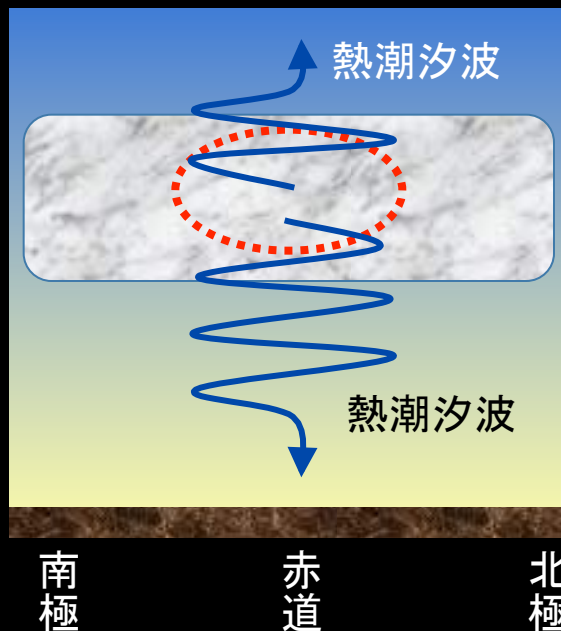
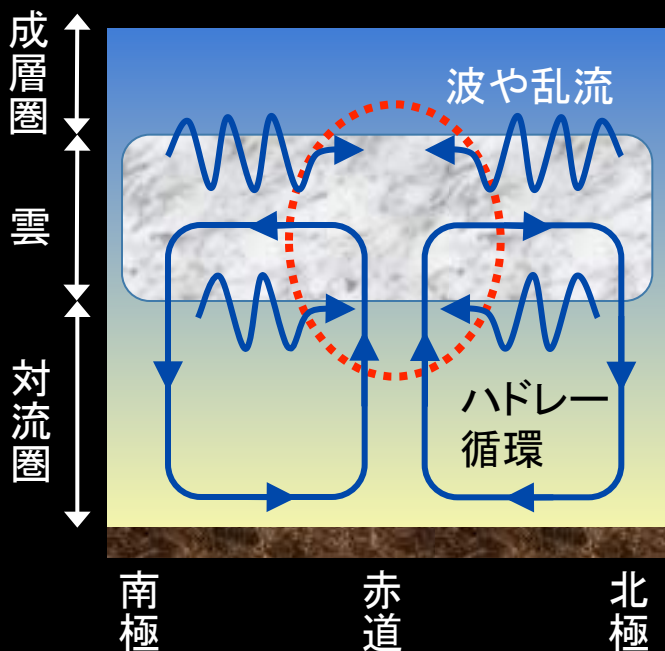
スーパーローテーションの様々な仮説

赤道向き角運動量 輸送説

熱潮汐波説

上方伝搬波動説

○ 加速域



低速回転惑星上の水平 2次元数値実験

(Williams and Rossow 1979)

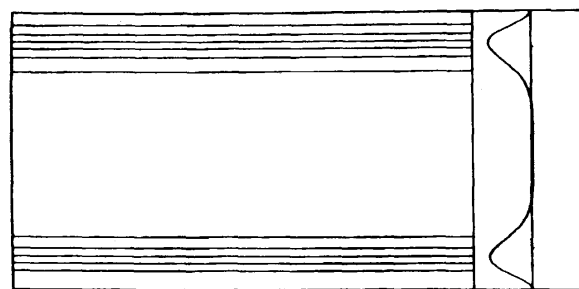
金星と同じ自転速度

高緯度でジェット型の強制

→ 順圧不安定から擾乱生成、
赤道向き角運動量輸送

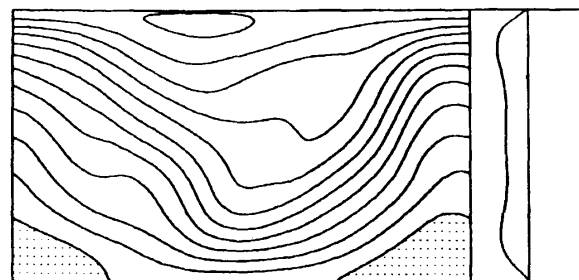
流線関数

帯状平均東西風



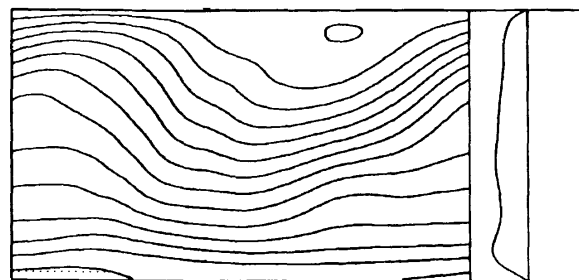
2.8日

(a)



11.5日

(b)



17.2日

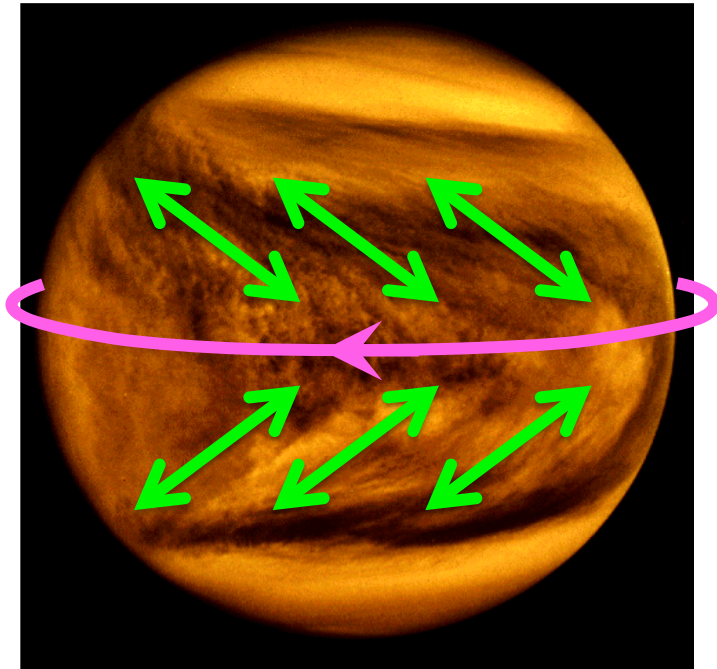
(c)

地球では傾圧不安定で生成するロスビー波が高緯度向きに
角運動量輸送

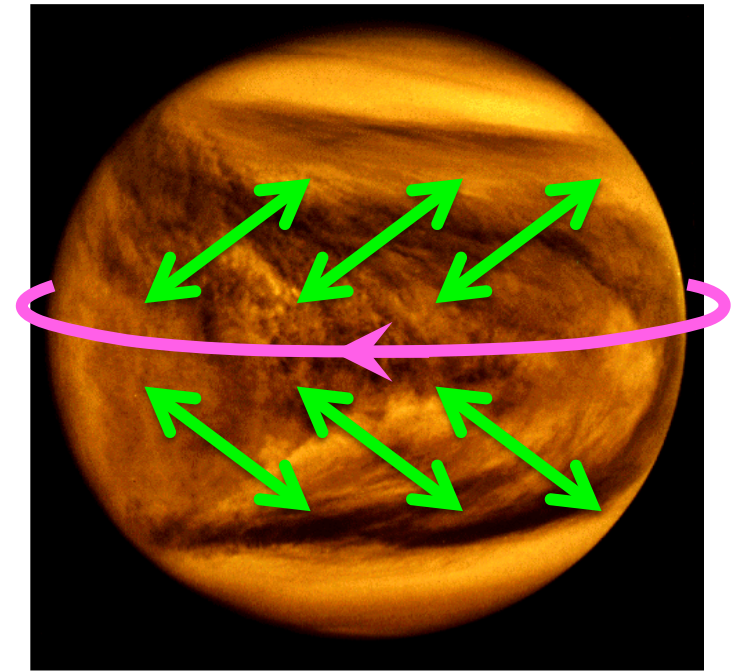
← 自転速度により方向が決まる？ (Mitchell & Vallis 2010)

観測では？

“Y字”は役に立たない



スーパー
ローテー
ション



“Y字”の傾きの方向は低緯度から高緯度へ角運動量を運ぶセンス。期待するものと逆。

こういうのが有ってほしい。

Pioneer Venusによる昼面の雲追跡風から求めた 運動量輸送 (Rossow et al. 1990)

TABLE 8. Components of the time-averaged momentum transport in $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$; positive values indicate northward transport of retrograde momentum. See (13) and (14) for definitions of the components.

Lat (deg)	$[U][V]$	$\{[U^*][V^*]\}$	$\{[u][v]\}$	$\{[u'v']\}$	$[U'V']$	$\{[U^*V^*]\}$	$-[U^*][V^*]$
-50	-603.1	-171.5	-774.6	172.8	2.0	-0.7	171.5
-40	-477.1	-67.2	-544.3	58.6	0.9	-9.5	67.2
-30	-474.3	-93.1	-567.4	95.1	-0.2	2.2	93.1
-20	-507.1	81.5	-425.6	-85.9	0.0	-4.4	-81.5
-10	-268.8	63.8	-205.0	-58.1	2.1	3.6	-63.8
0	-5.7	14.1	8.4	-13.3	0.8	0.0	-14.1
10	302.9	-63.2	239.7	77.8	1.0	13.6	63.2
20	414.3	-73.1	341.2	85.1	1.8	10.2	73.1
30	606.0	-16.6	589.4	37.5	0.6	20.3	16.6
40	894.7	90.1	984.8	-59.2	5.3	25.6	-90.1
50	699.9	-59.8	640.1	91.3	-10.2	41.7	59.8

Hadley
circulation

tides transients

$$u(\lambda, \theta, t) = \{[u]\} + \{u'\} + u^*$$

$$\{u\} = U = [U] + U'$$

$$u(\lambda, \theta, t) = [U] + U' + U^*$$

$\{ \}$: time averaging

$()^*$: deviation from time average

$[]$: zonal averaging

$()'$: deviation from zonal average

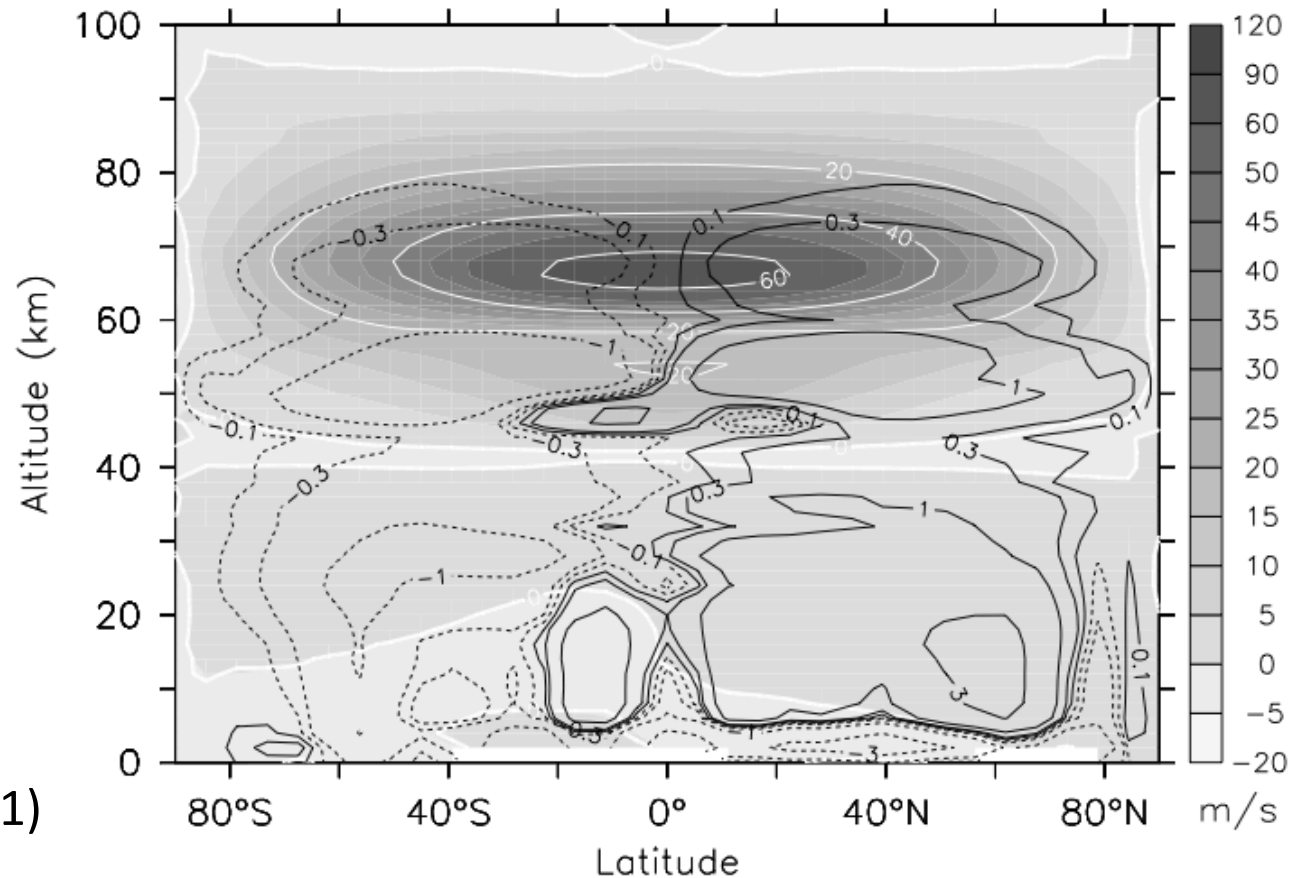
これまでの観測

- 赤道向き角運動量輸送があるのではないかという予想に反して、もっぱら高緯度向きの角運動量輸送だけが観測されてきた。
- ただし観測データは昼側の雲頂(65-70km)のみ

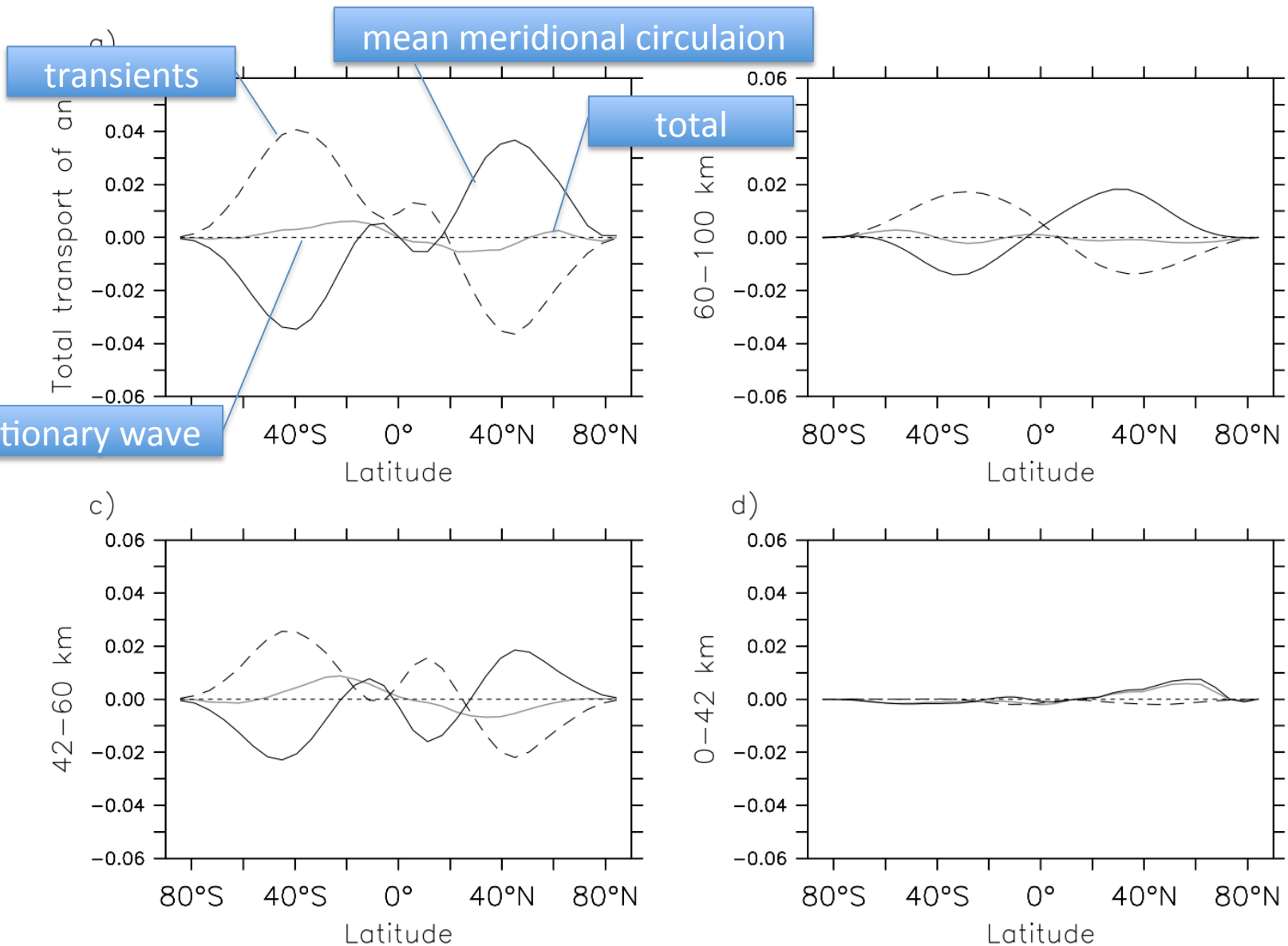
→もっと低高度、あるいは夜側でどうなっているかが問題

数値実験では

- 現実的な設定条件で大気全層のスーパーローテーションが生じたものは少ない。いまのところ発現条件についてコンセンサスがない。
- 初期値依存性？

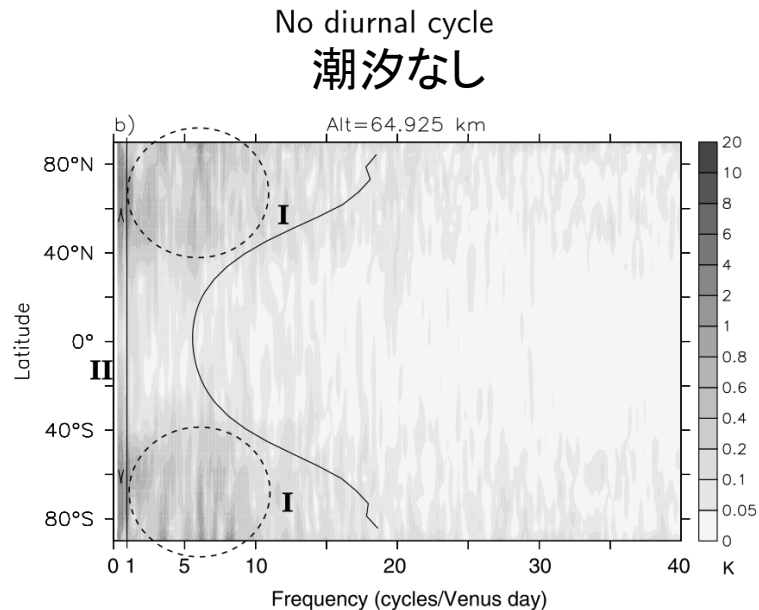
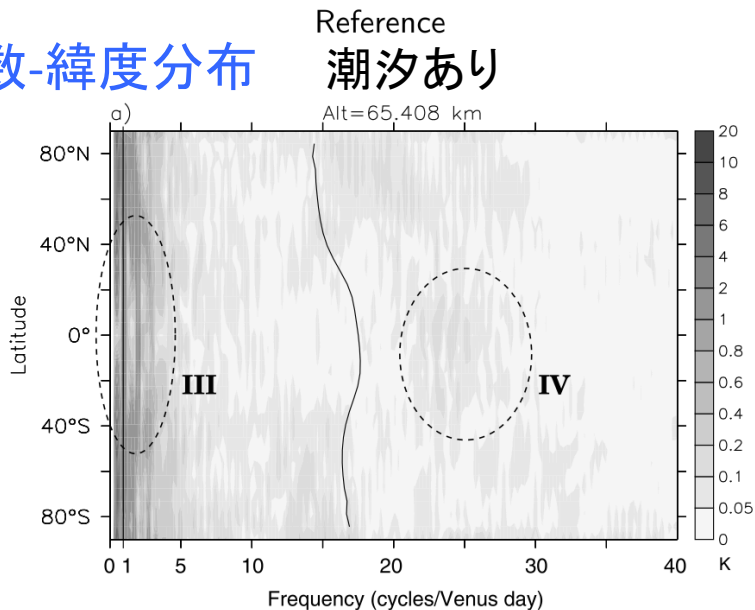


Venus GCM (Lebonnois et al. 2011)における角運動量の南北輸送

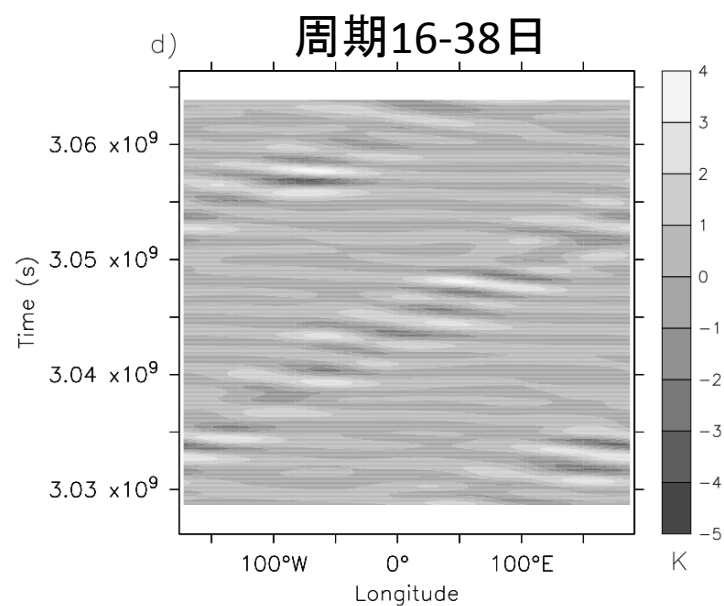
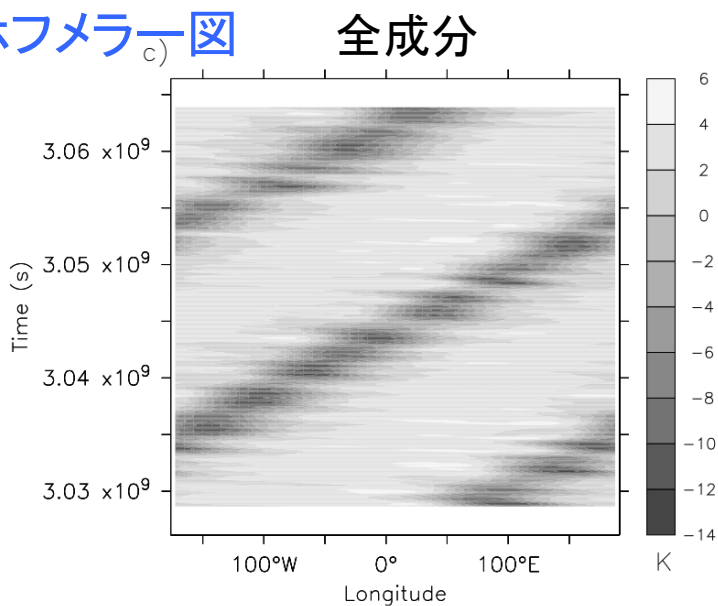


Venus GCM (Lebonnois et al. 2011)における波動

周波数-緯度分布



緯度60°のホフメラー図



平均子午面循環による移流が引き起こす帯状風の減速

Newman and Leovy 1992

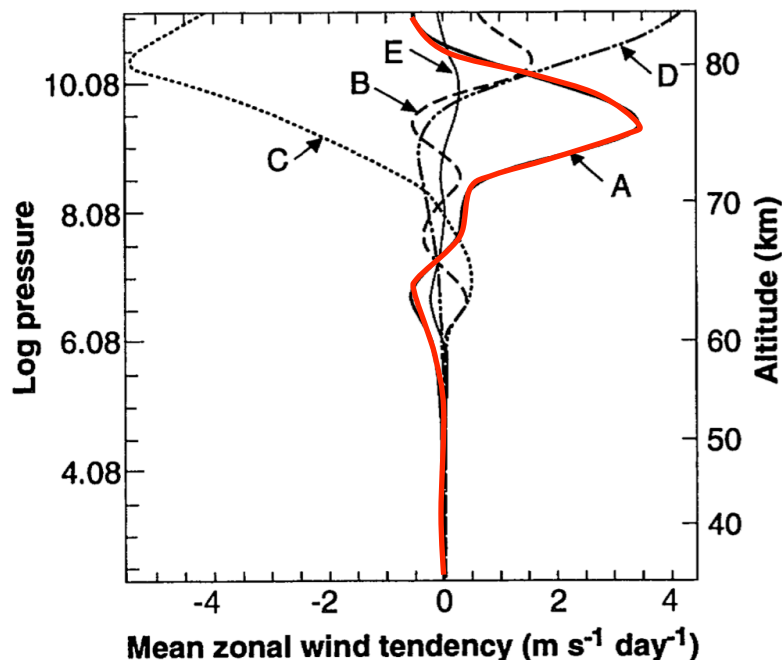
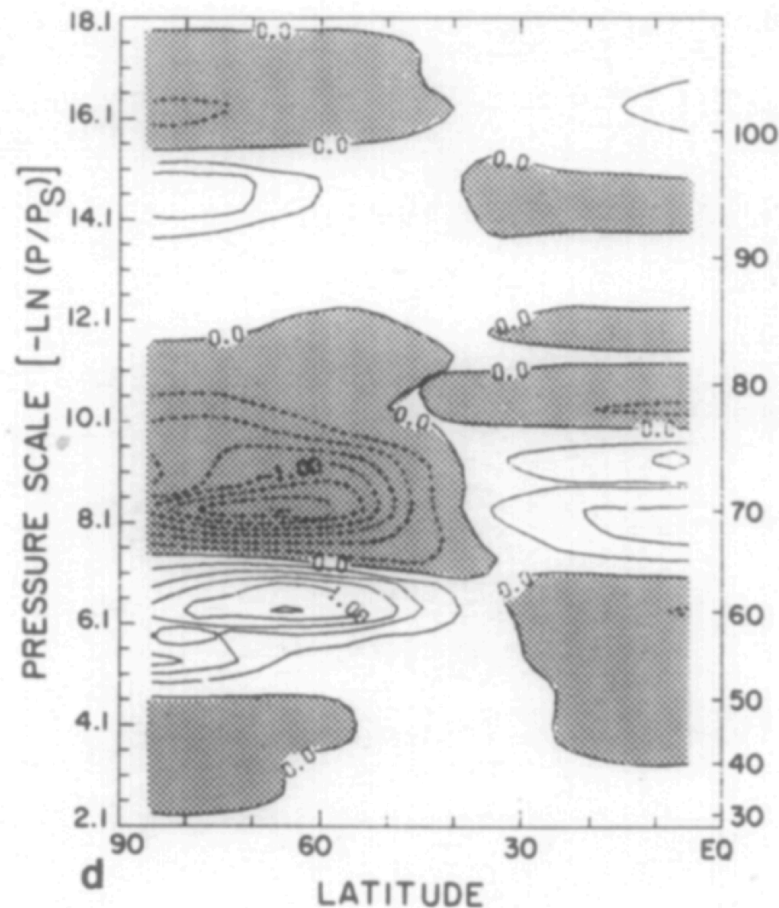


Fig. 2. Contributions to mean zonal flow acceleration on the equator from: (A) advection by zonal mean vertical velocity, (B) momentum flux convergence of the semidiurnal tide, (C) momentum flux convergence of the diurnal tide, (D) Rayleigh friction, (E) vertical diffusion. Averages are for the last 40 days of the 300-day simulation with initial sheared angular velocity.

Baker & Leovy 1987



雲層高度で 0.1 m/s/day のオーダー

赤道向き角運動量輸送の大きさ

ハドレー循環による鉛直移流が引き起こす減速と波動による加速がバランスするとして

$$dU/dt = d\langle u'v' \rangle / dy \sim \langle u'v' \rangle / (a/2)$$

0.1 m/s/day

a : 惑星半径

ここから

$$\langle u'v' \rangle \sim 4 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

個々の雲追跡ベクトルにおいてこの精度は挑戦的
多数の観測値の平均により誤差をどこまで減らせるか

子午面循環

Galileoフライバイ時の雲画像から求めた平均風

Belton et al. (1991)

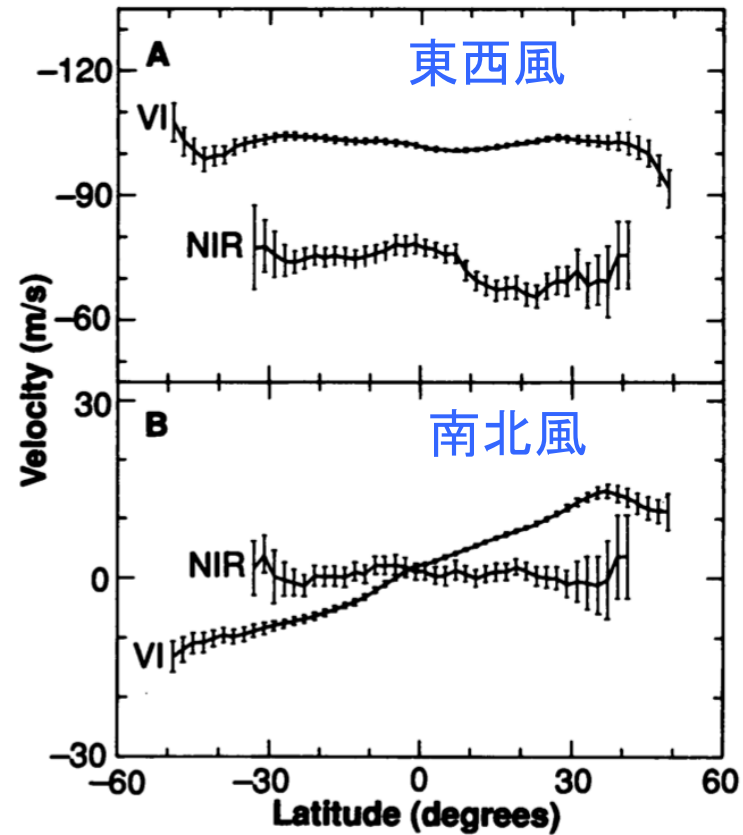
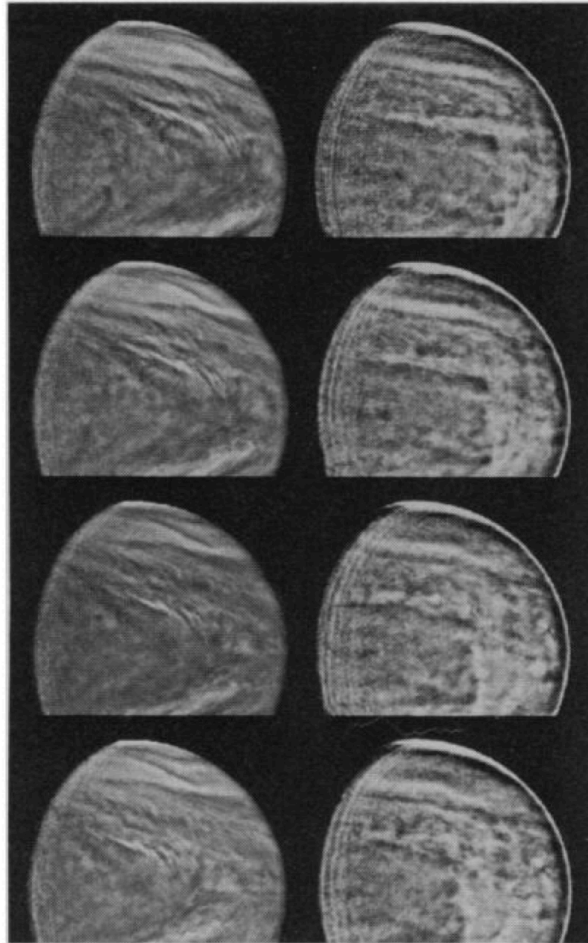
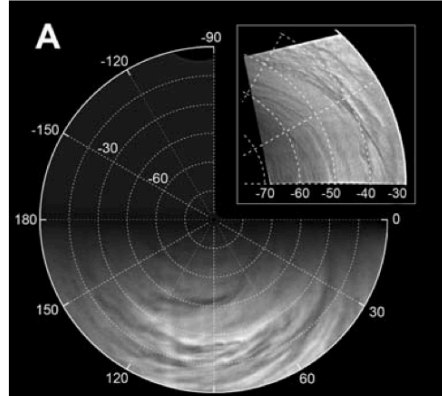


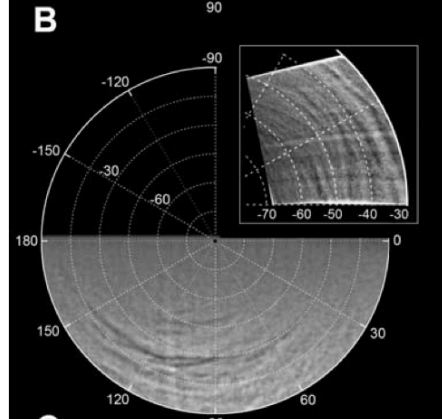
Fig. 5. Velocities of NIR and violet (VI) features as a function of latitude; (A) eastward, (B) northward. The vertical bars indicate the estimated error, based on the sample standard deviations within each 15° latitude averaging bin.

Venus Express/VIRTIS による結果 (Sanchez-Lavega et al. 2008)

380nm
(day)



980nm
(day)



1.74um
(night)

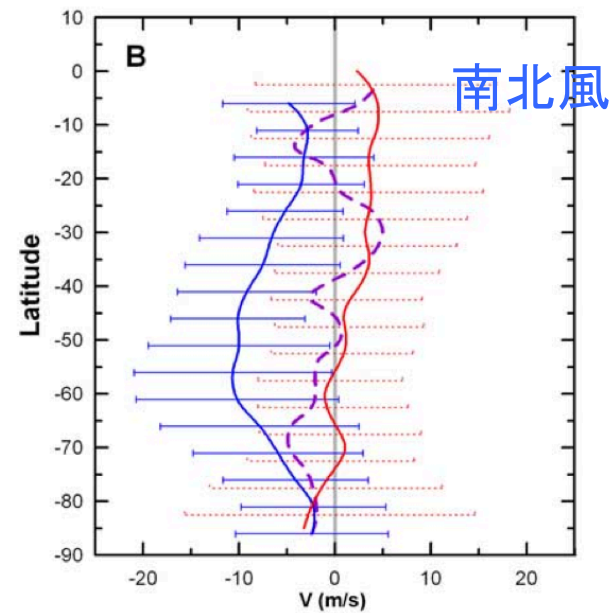
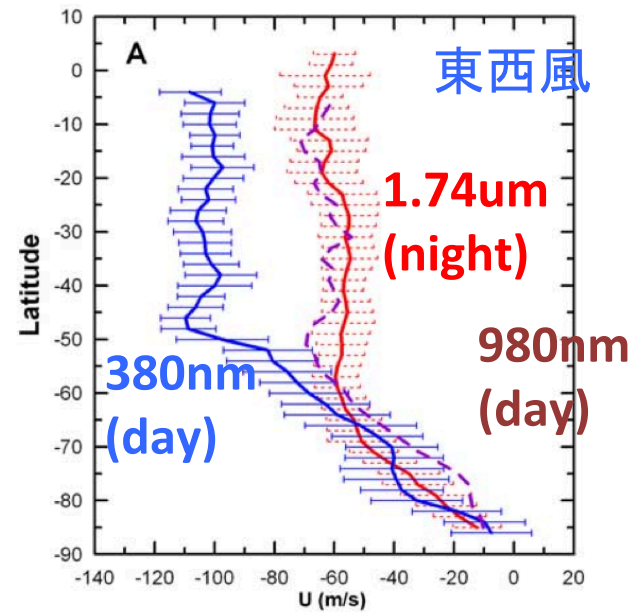
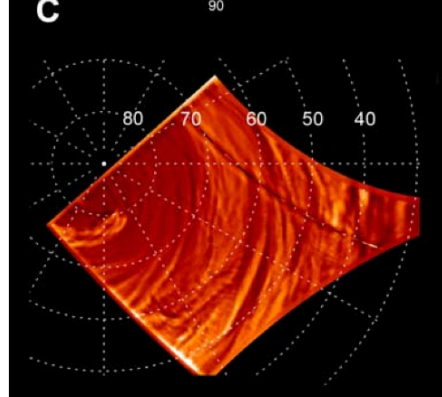


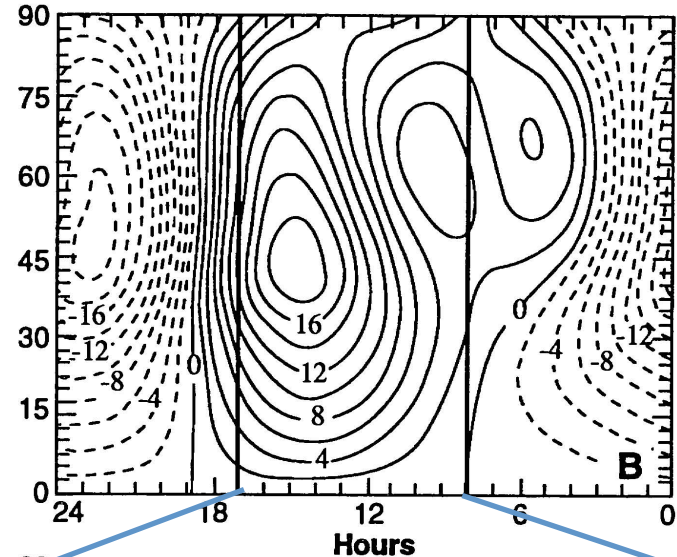
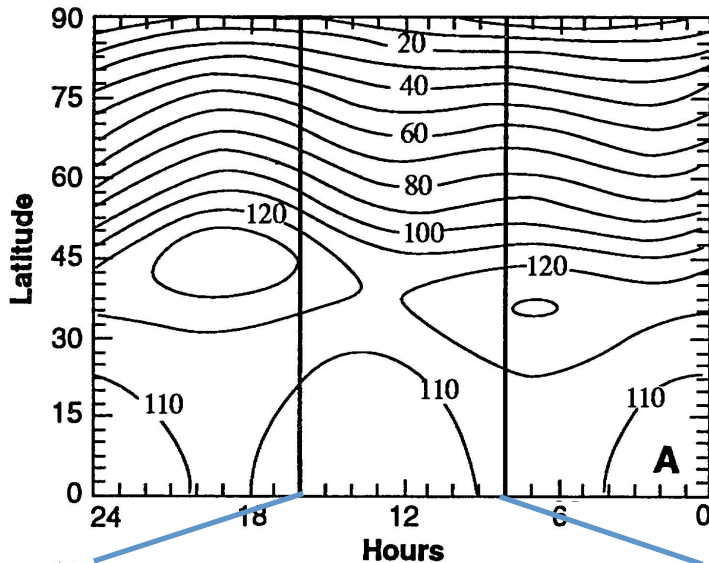
Figure 1. Projected maps of Venus cloud features at different wavelengths as observed by VIRTIS-VEX between April 19, 2006 and June 2007. (a) Day-time 380 nm polar map, April 19 2006. (b) Day-time 980 nm polar map, April 19 2006. (c) Night-time 1.74 μ m polar map, 2 July 2006. Figure 1a and 1b show magnified insets of the cloud morphology in the area obtained on 29 June 2006.

雲頂でのモデル-観測比較 (Newman & Leovy 1992)

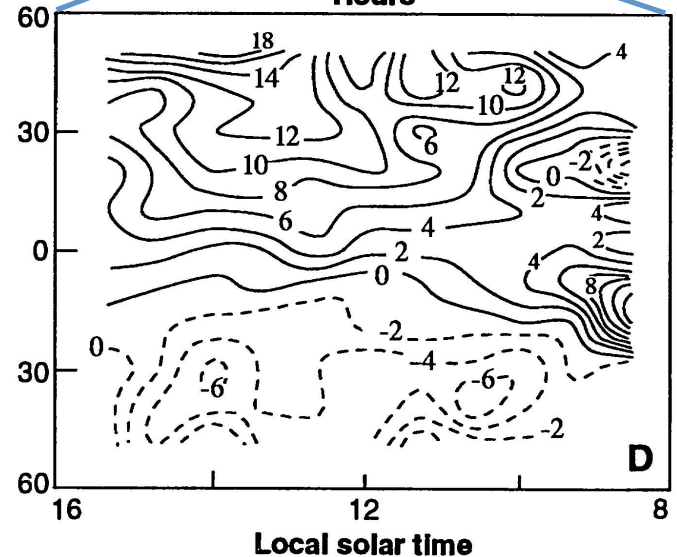
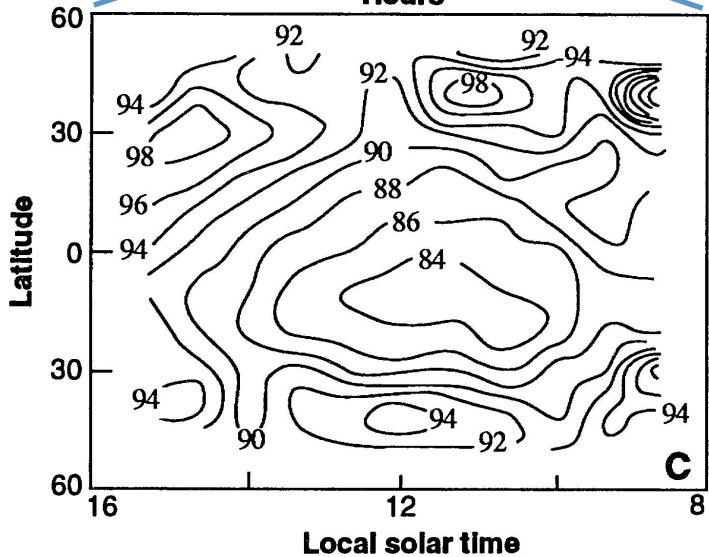
東西風

南北風

モデル



観測

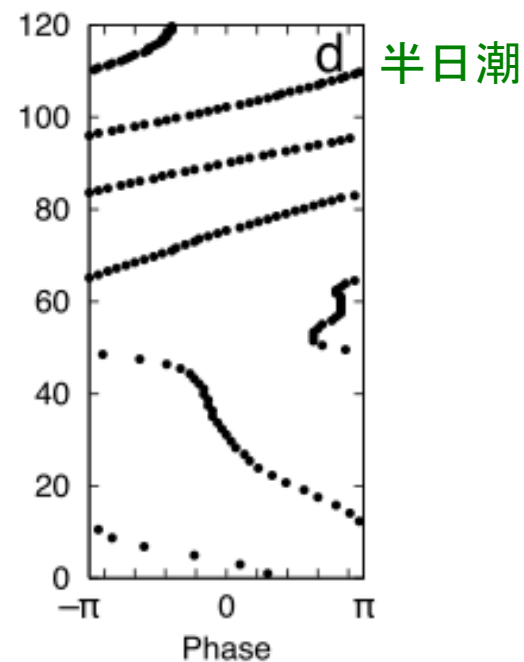
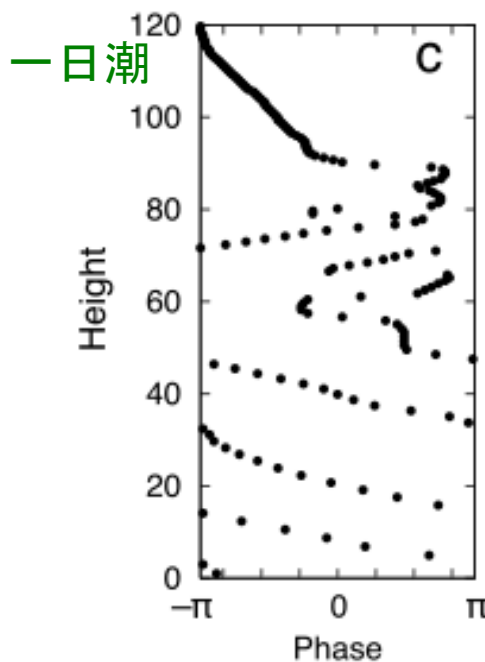
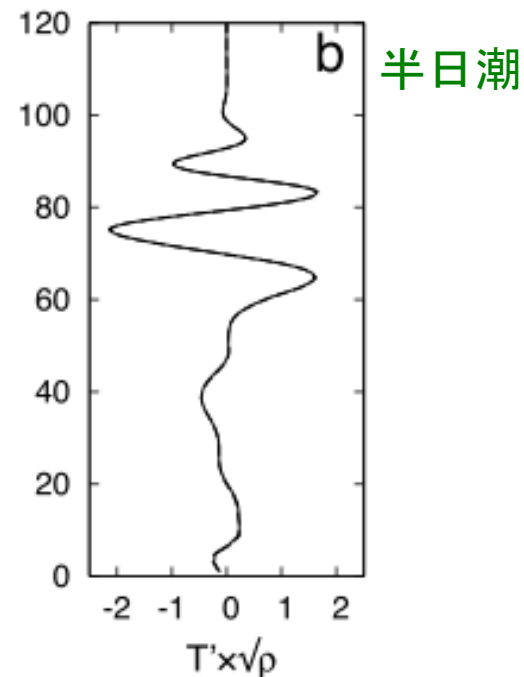
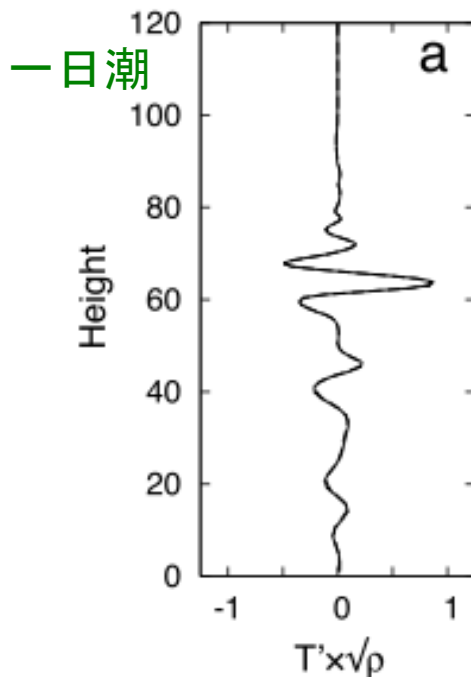


熱潮汐波による スーパーローテー ション生成

(Takagi & Matsuda,
2005,2006,2007)

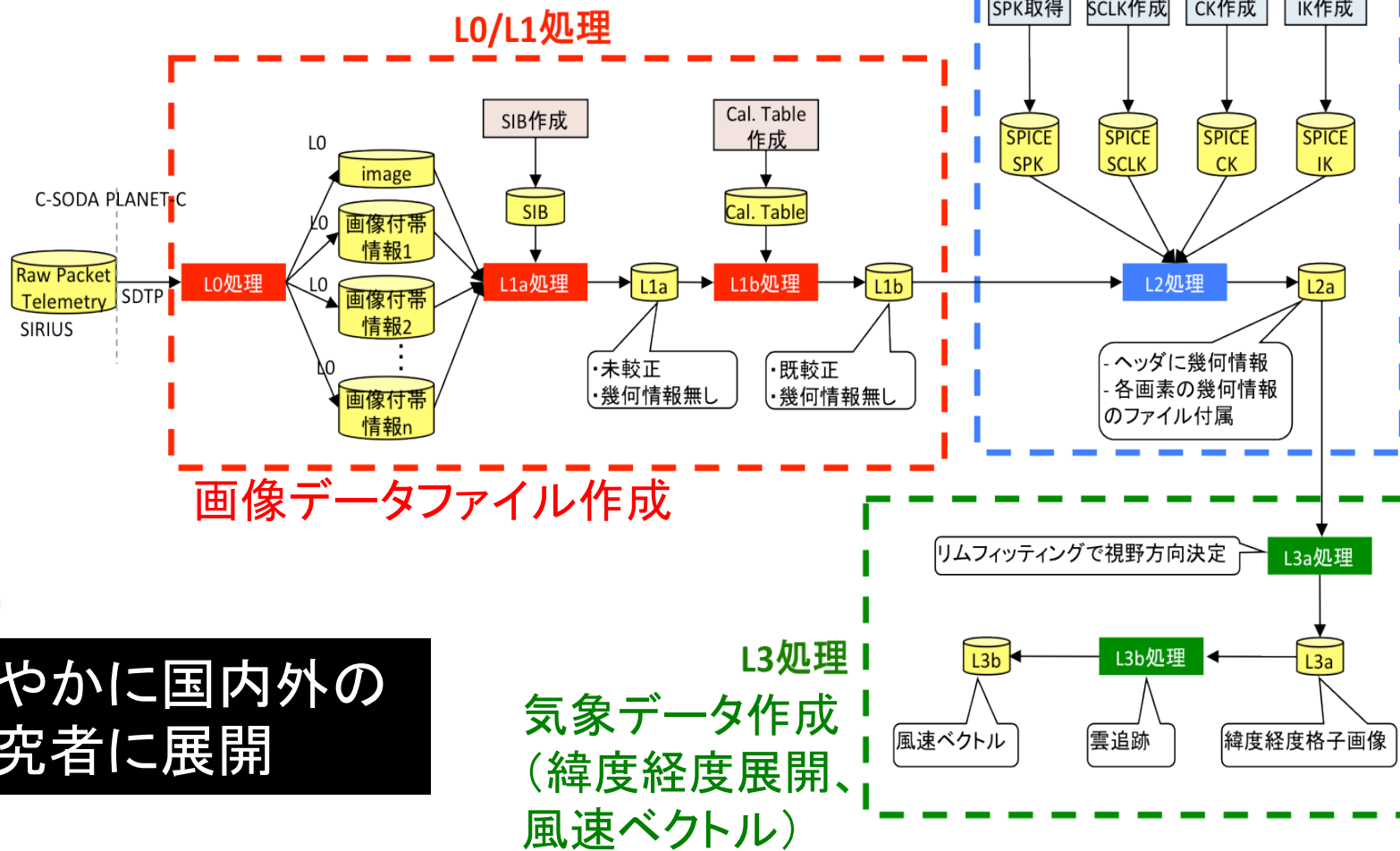
下向きに伝播する波が地
面近くまで到達して地面に
運動量を渡すことにより大
気を加速する可能性がある。

雲層より上で熱潮汐波の観
測はあるが、雲層から下向
きに伝搬している証拠は得
られていない。



画像データ処理パイプライン

地上に伝送された後は半自動化されたパイプライン処理



L2処理 幾何情報付加

画像データファイル作成

速やかに国内外の研究者に展開

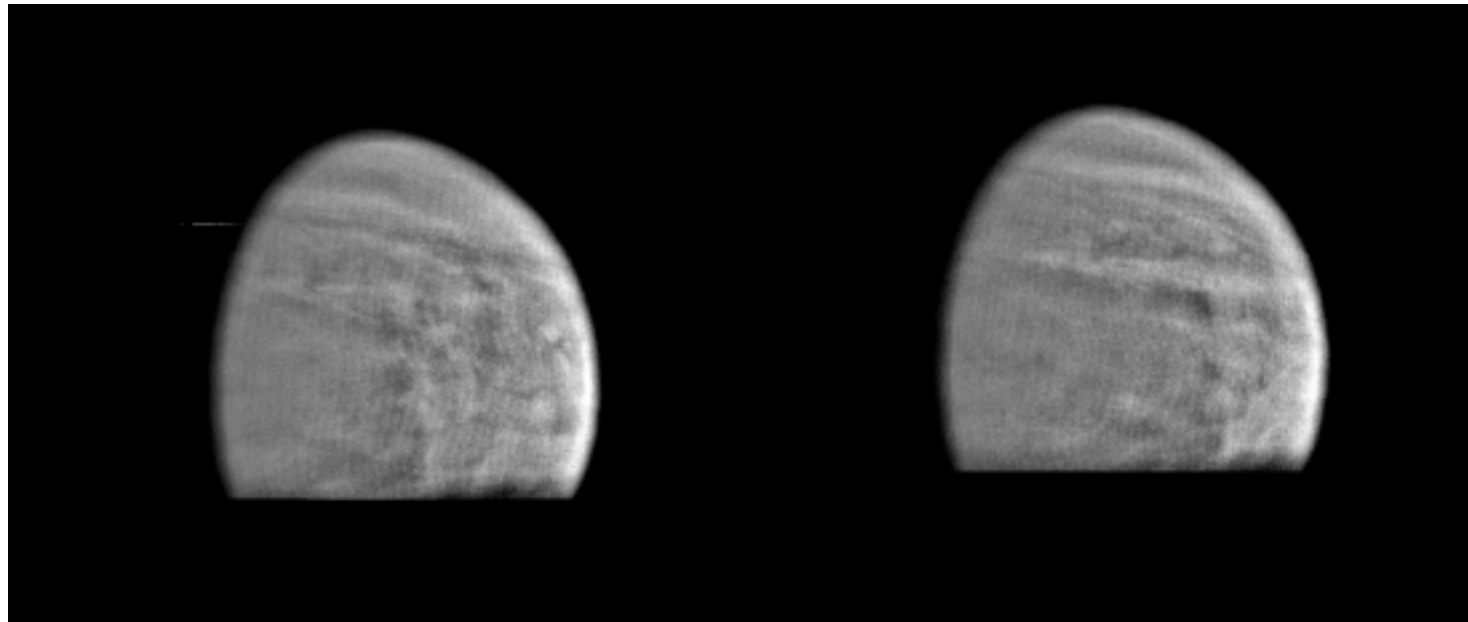
L3処理
気象データ作成
(緯度経度展開、
風速ベクトル)

雲画像 (L2データ) による研究

- 形態学 (morphology)
- 輝度のホフメラー図、スペクトル解析
- 雲の3次元構造
- 位相曲線から粒径情報
- 層構造のリム撮像

1 μ mカメラ IR1

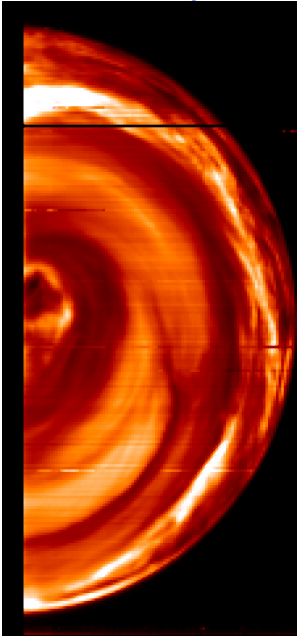
- $\lambda = 0.9, 0.97, 1.01 \mu\text{m}$ (近赤外の窓)
視野 $12 \times 12^\circ$, 1024×1024 画素 → 下層の雲, 活火山, 地表物質
- 昼面のグローバル雲画像はGalileoフライバイのみ。Venus Express/VIRTISは南半球高緯度、VMCは成果なし(低S/N比?)
→ グローバル構造の変動はあかつきが初めて見る



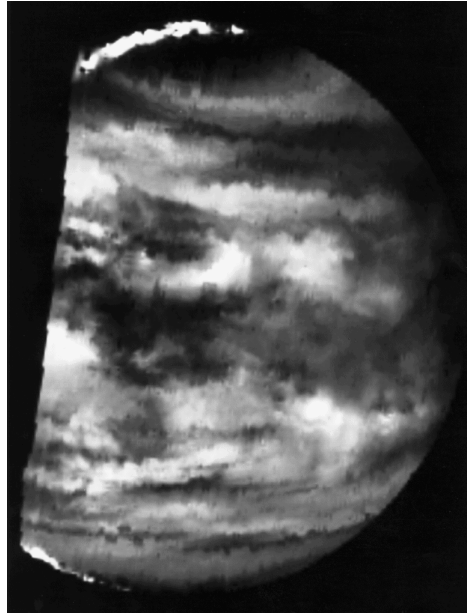
2 μ mカメラ IR2

- $\lambda = 1.73, 2.26, 2.32 \mu\text{m}$ (近赤外の窓), $2.02 \mu\text{m}$ (CO_2 吸収)
視野 $12 \times 12^\circ$, 1024×1024 画素 \rightarrow 下層の雲, 雲頂高度, CO
- この波長で連続撮像はVenus Express/VIRTISによる南極域のみ。
低緯度と両半球を含む画像はGalileoフライバイ時のスナップ
ショットや地上観測のみ \rightarrow グローバル&連続&高解像データ
はあかつきが初めて

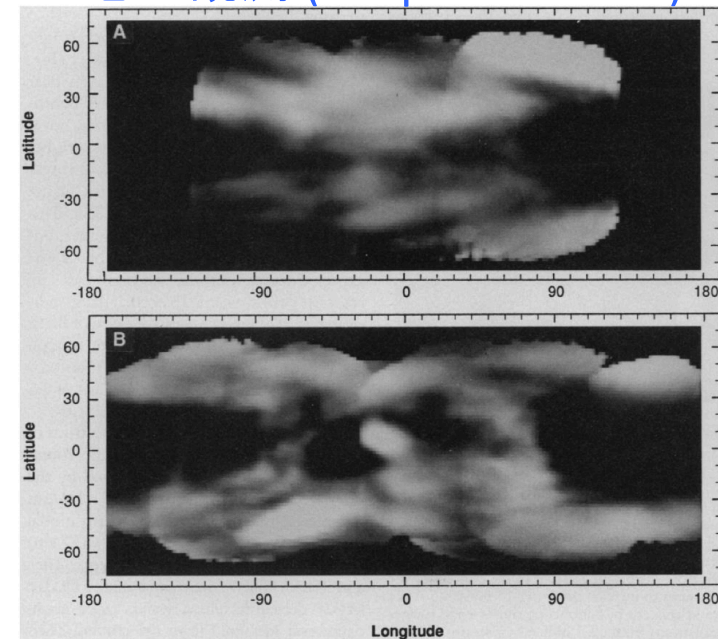
Venus Express/VIRTIS



Galileo

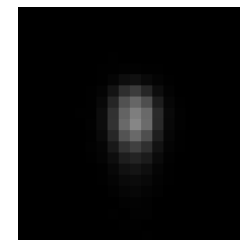
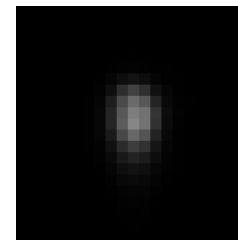
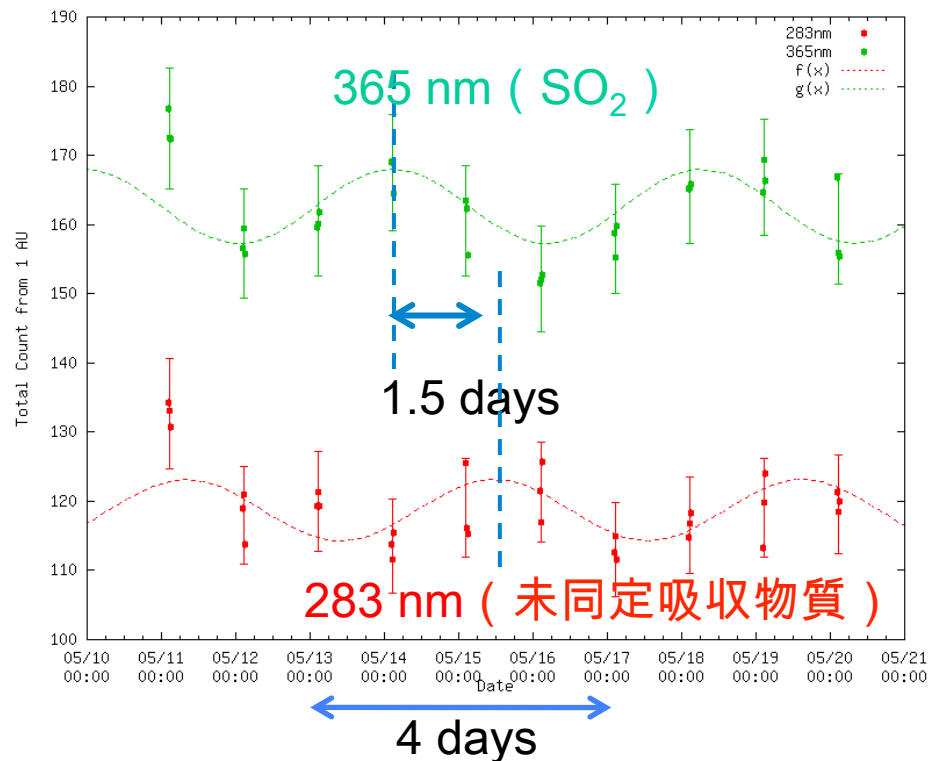


地上観測 (Crisp et al. 1991)



紫外イメージャ UVI

- $\lambda = 283, 365 \text{ nm}$
視野 $12 \times 12^\circ$, 1024×1024 画素 対象: SO_2 , 未同定吸収物質
- SO_2 吸収波長での高解像度撮像はない。→あかつきが初めて
- 低緯度でのクローズアップ撮像例はない →あかつきが初めて



2011/03/08

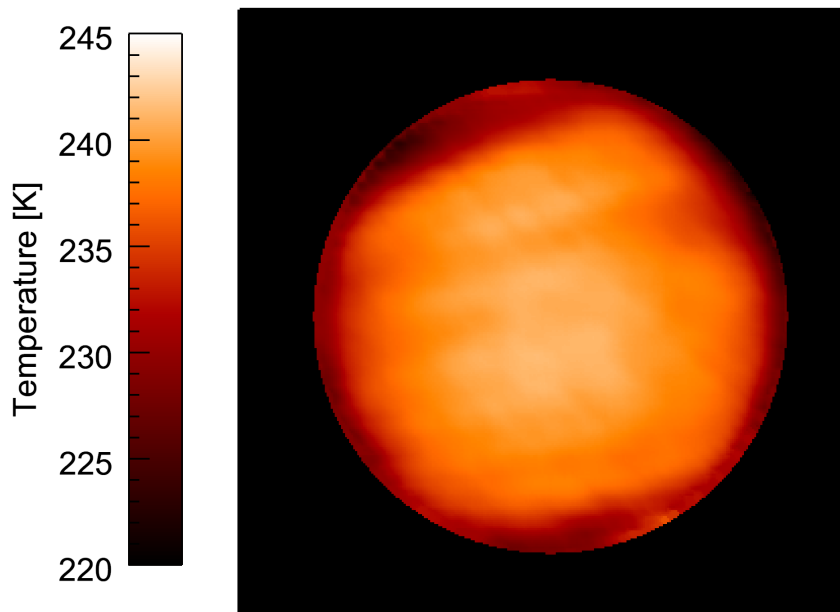
Phase: 40.17 deg

Diameter: 0.0543 deg

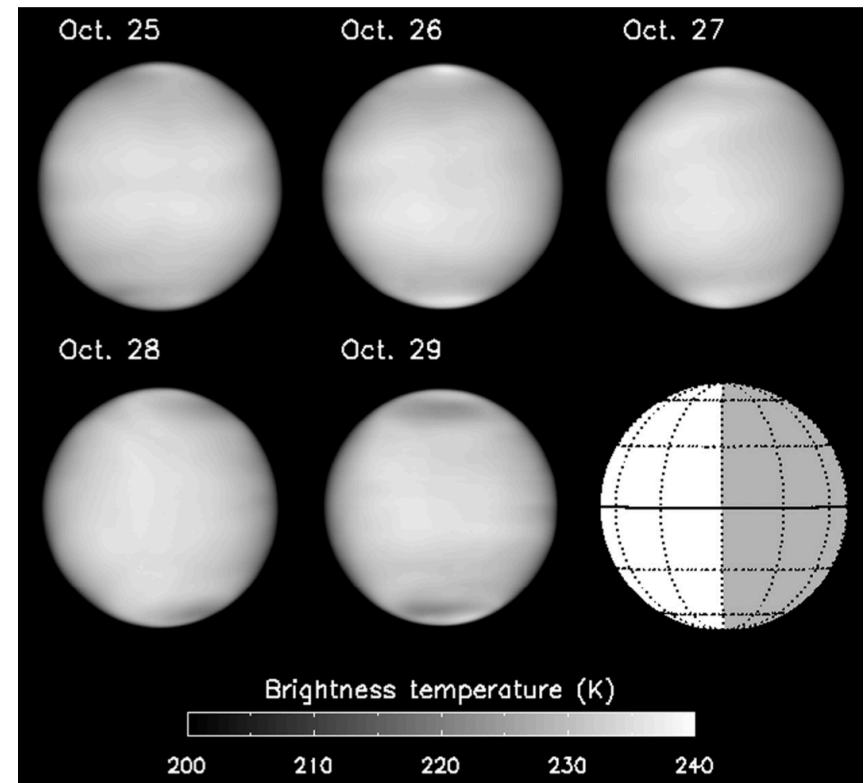
中間赤外カメラ LIR

- $\lambda = 10 \mu\text{m}$ (幅 $4 \mu\text{m}$)
視野 $16.4 \times 12.4^\circ$, 248×328 画素 対象: 雲頂温度
- この波長での撮像はこれまで地上観測のみ。連続観測なし。
→あかつきがやる

周回軌道投入失敗の2日後の撮影
(Taguchi et al., 2012)



地上観測 (Sato et al., 2014)



雷・大気光カメラ LAC

- 視野 $16\times 16^\circ$, $\lambda = 777, 551, 553, 558, 630$ nm
8x8画素, 32kHz sampling
- 全てが新しい
- 雲画像との比較により雷発生条件の解明

リム観測

- エアロゾル高度分布導出はGalileoフライバイのみ。ローカルタイム依存性、緯度依存性など不明。 →あかつきで調べる
- 赤道域はVenus Expressでは無理 →あかつきが見る

Galileoフライバイ (Belton et al. 1991)

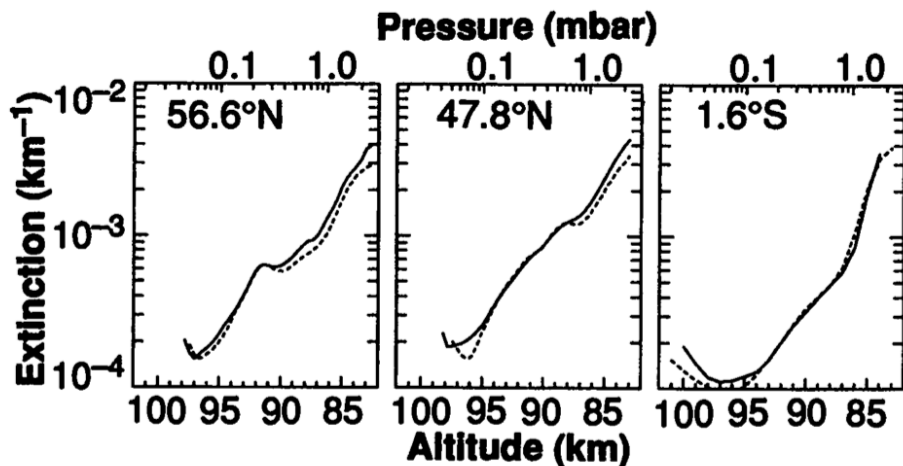
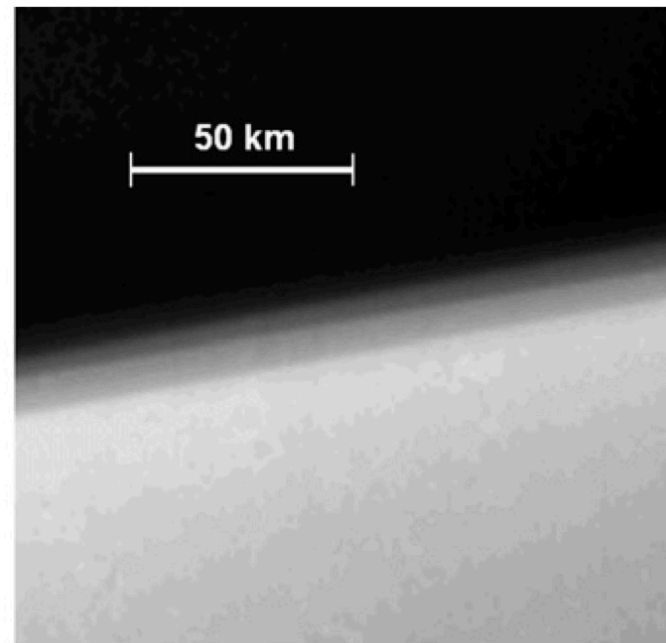


Fig. 9. Run of volume extinction coefficient with height in the cloud tops at three different latitudes. Continuous lines correspond to images taken through the violet (418 nm) filter; dashed lines correspond to the NIR (986 nm) filter. The altitude scale refers to the surface, assumed to be at a radius of 6051 km.

Venus Express/VMC



クローズアップ撮影

- 近接撮像はこれまでVenus Express/VMCによる極域のみ
→低緯度や多波長はあかつきが初

Venus Express/VMC

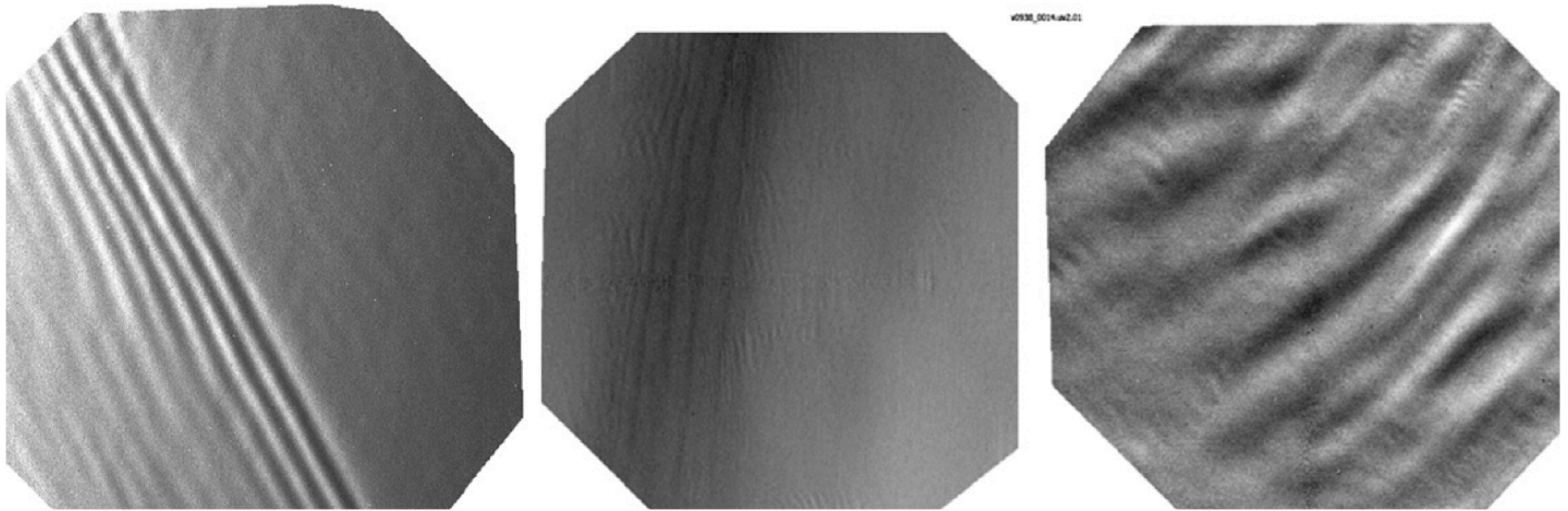
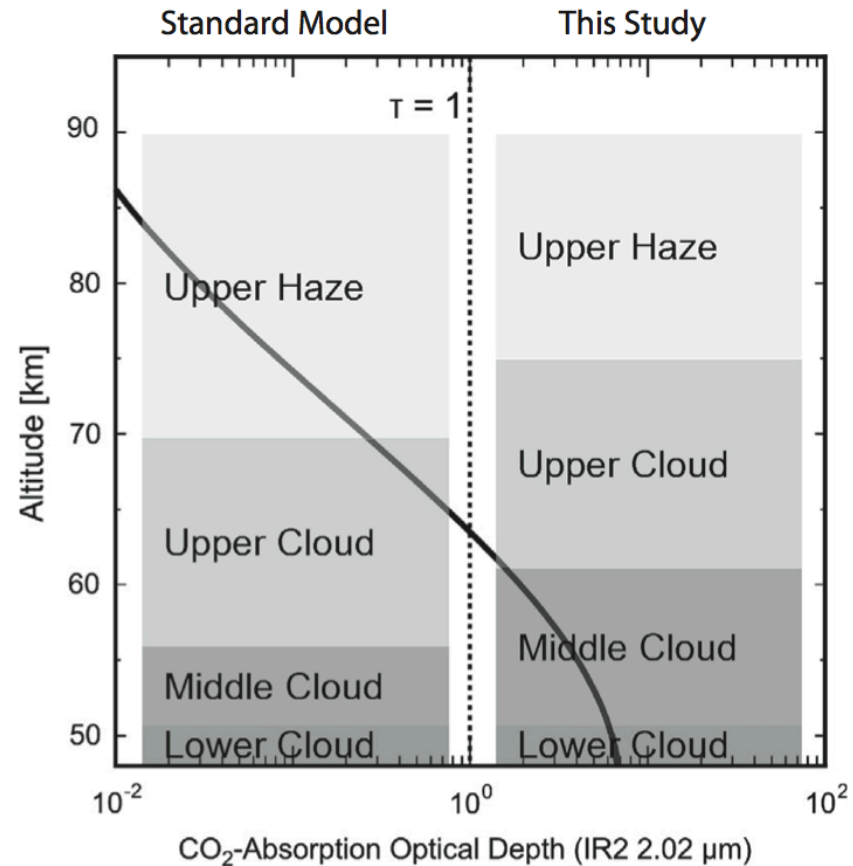
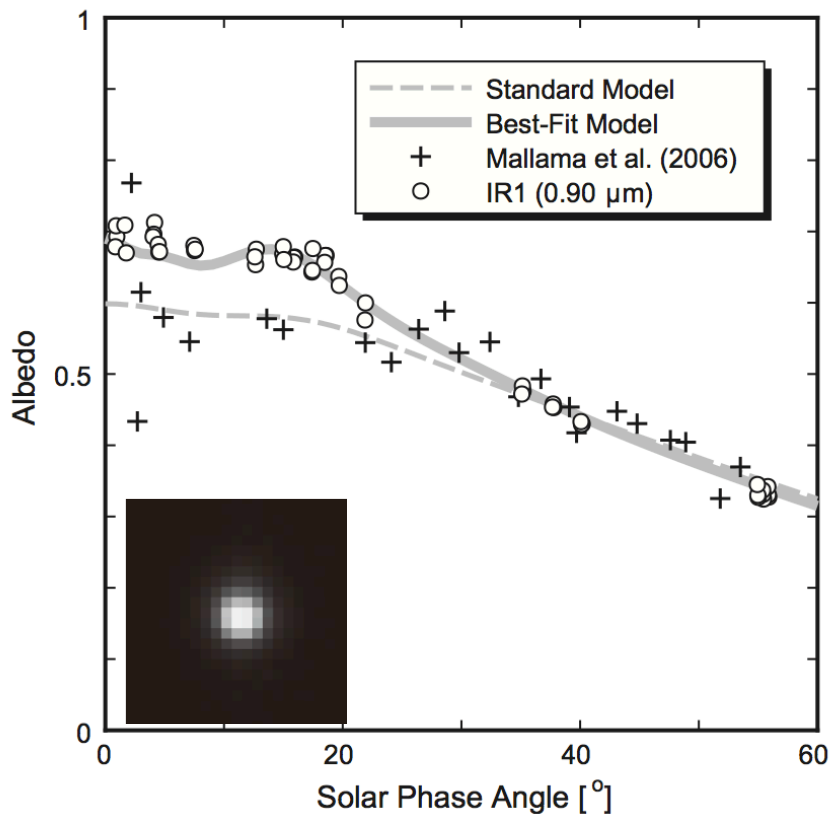


Fig. 11. VMC images of polar waves: left – long waves (NIR1 filter), middle – long waves producing short wave trains (UV), right – irregular waves (UV).

位相角依存性

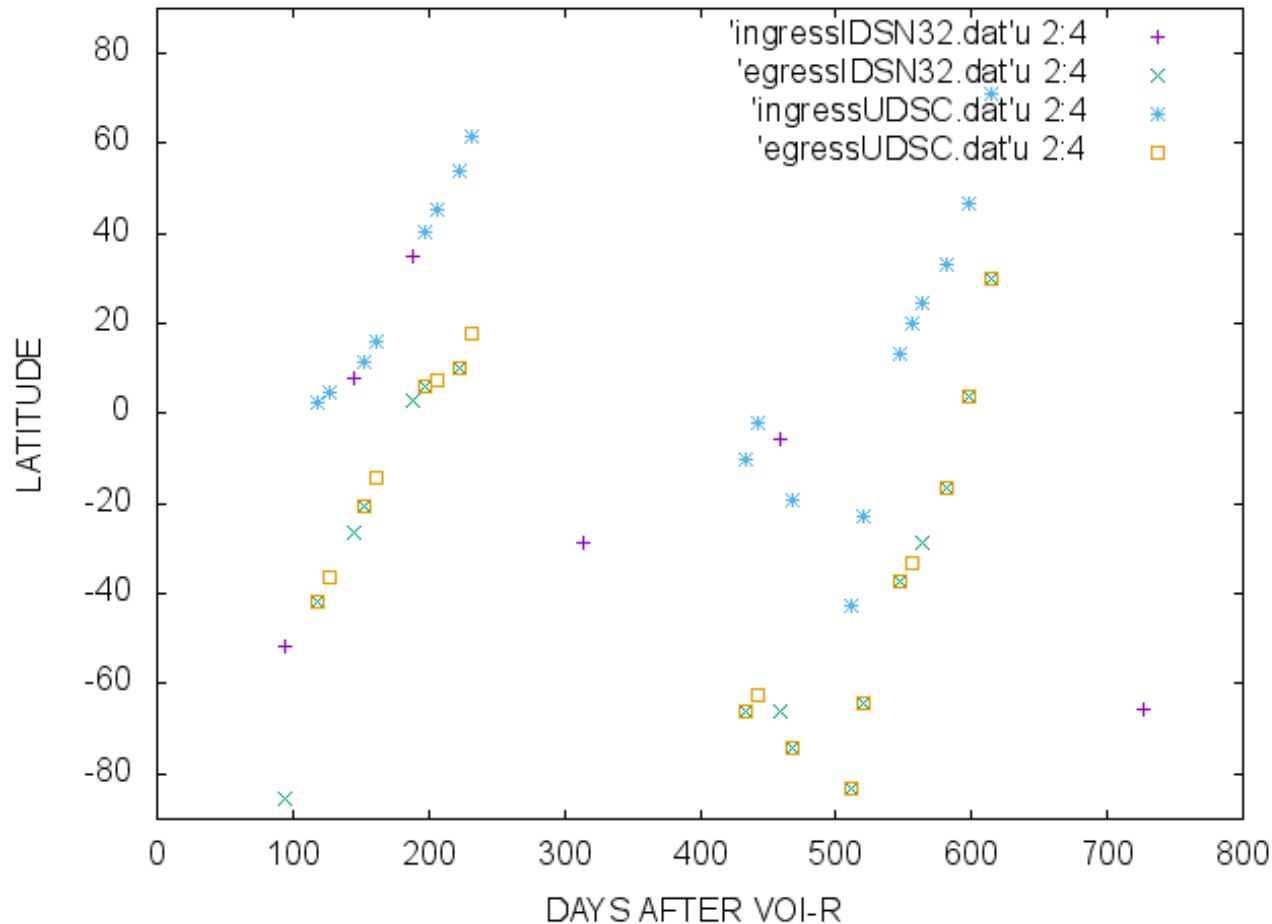
2011年に実施したIR1による測光観測で得た位相曲線
(Sato et al. 2015)



→場所や時期による違いの把握へ

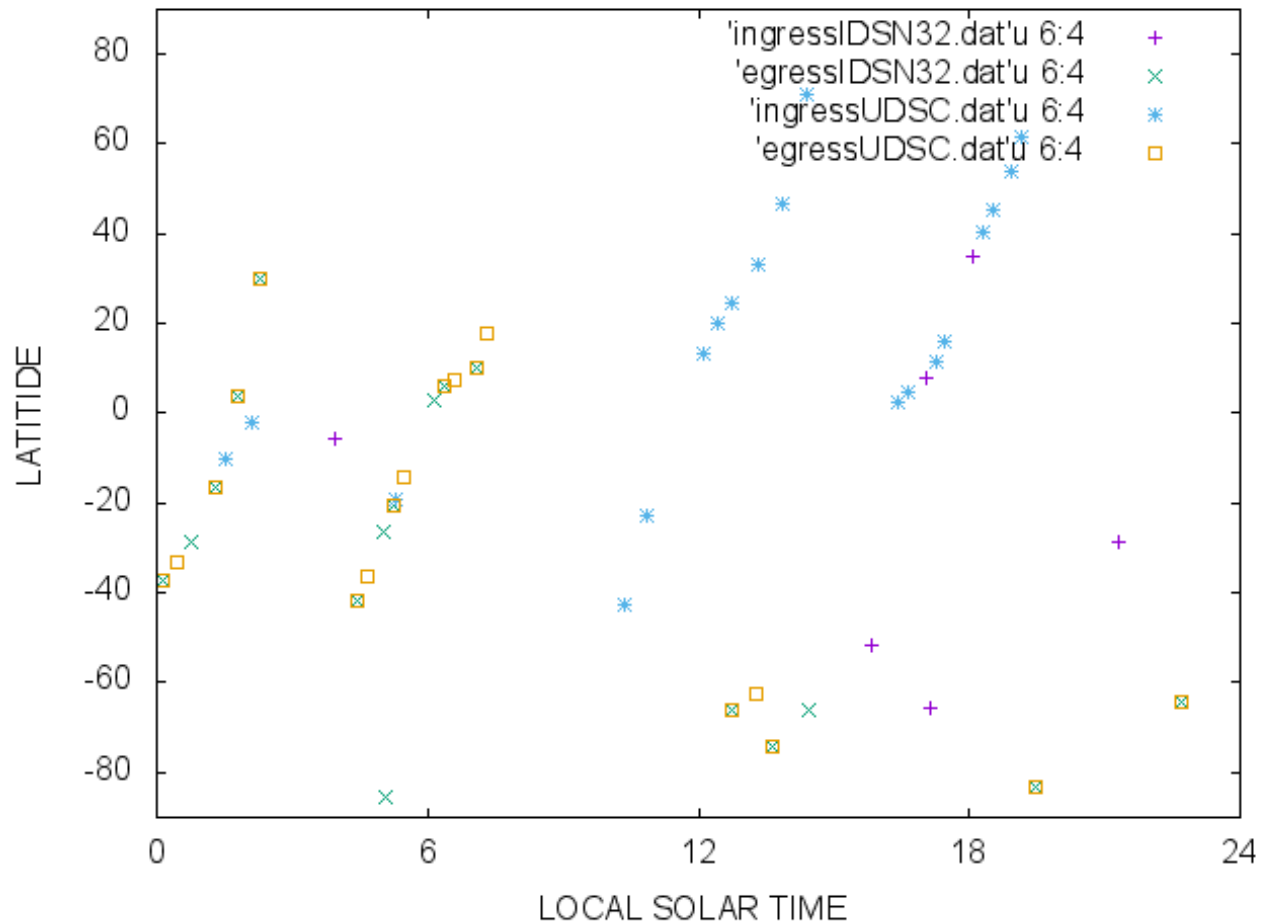
電波掩蔽

- あかつきに匹敵する精度はVenus Expressのみ
- あかつきは低緯度で手厚く観測



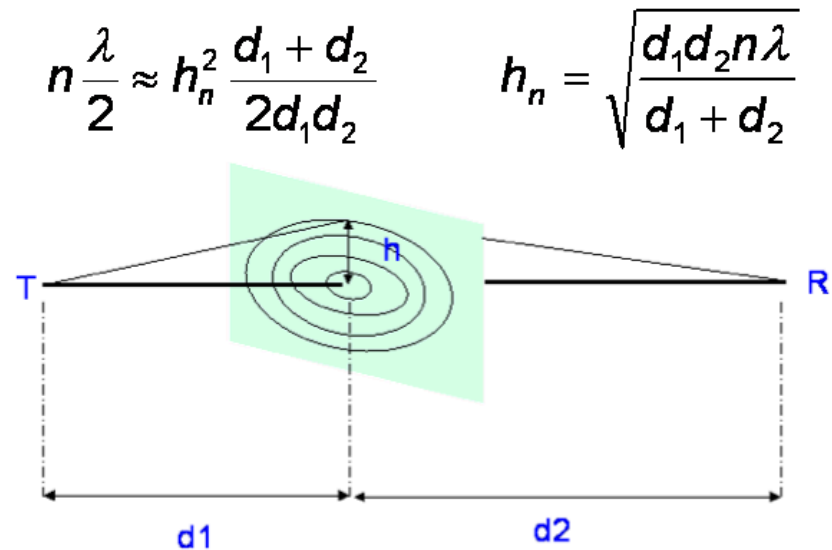
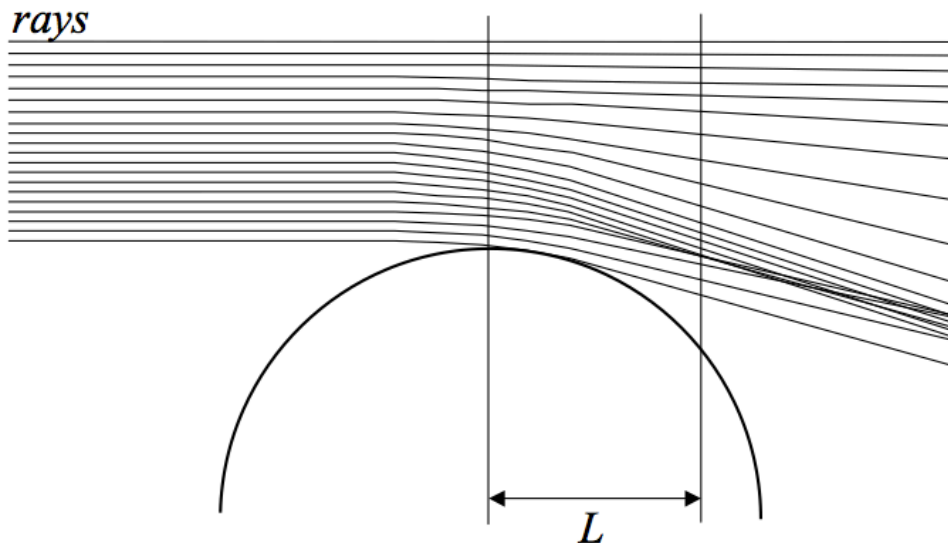
電波掩蔽

- あかつきに匹敵する精度はVenus Expressのみ
- あかつきは低緯度で手厚く観測

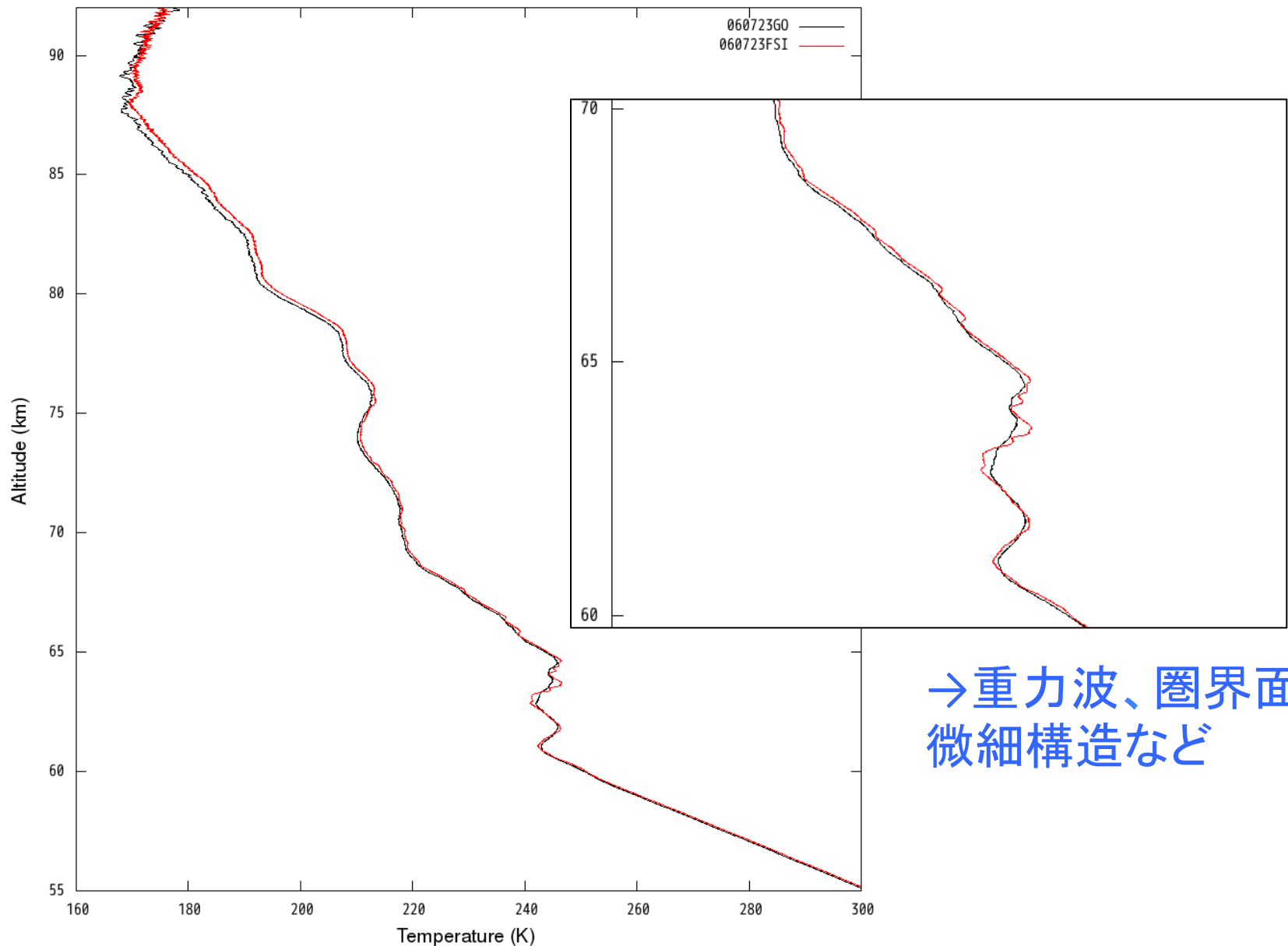


電波ホログラフィ法

- これまでの幾何光学解法で懸案であったMulti-path問題、Fresnel径程度の分解能制約を解決
- Venus Expressデータに適用中



幾何光学 vs. 電波ホログラフィ (ISAS宮本)



地球気象の階層構造

1秒 10分 1時間 6時間 2日 20日 1年 10年

マクロ
メソ
ミクロ

10^4 km
 10^3 km
 10^2 km
10 km
1 km
100 m
10 m
1 m
10 cm

気候変動

惑星波

高・低気圧

台風・熱帯低気圧

雲クラスター・慣性重力波

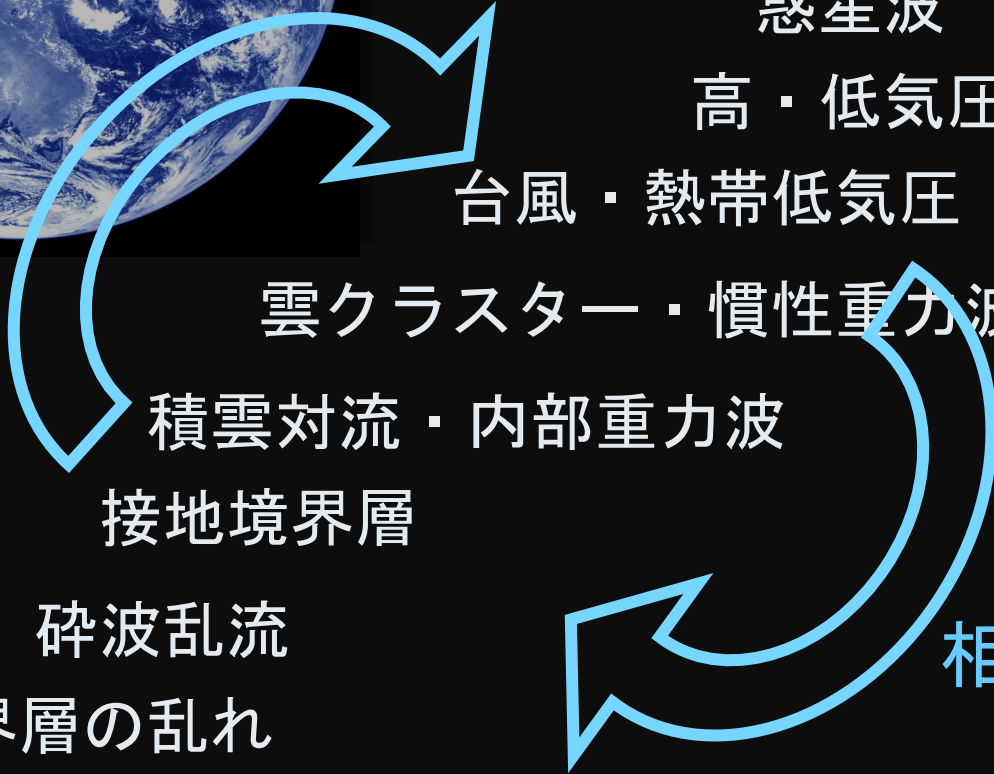
積雲対流・内部重力波

接地境界層

碎波乱流

境界層の乱れ

相互作用



金星気象の階層構造

1秒 10分 1時間 6時間 2日 20日 1年 10年

←マクロ→
←メソ→
←ミクロ→

10^4 km
 10^3 km
 10^2 km
10 km
1 km
100 m
10 m
1 m
10 cm

超回転

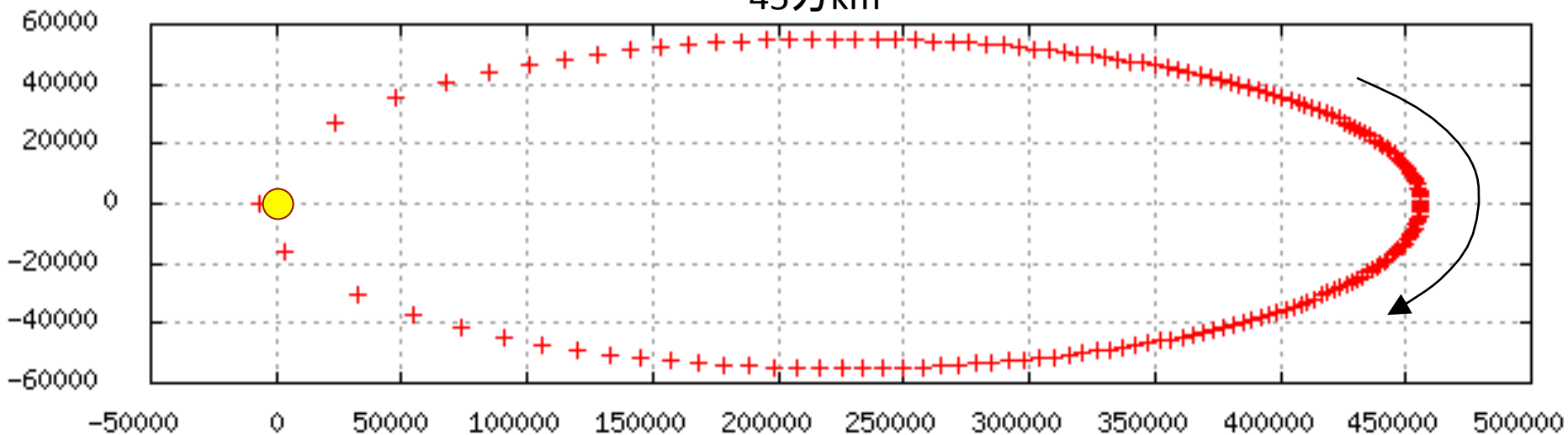


観測計画

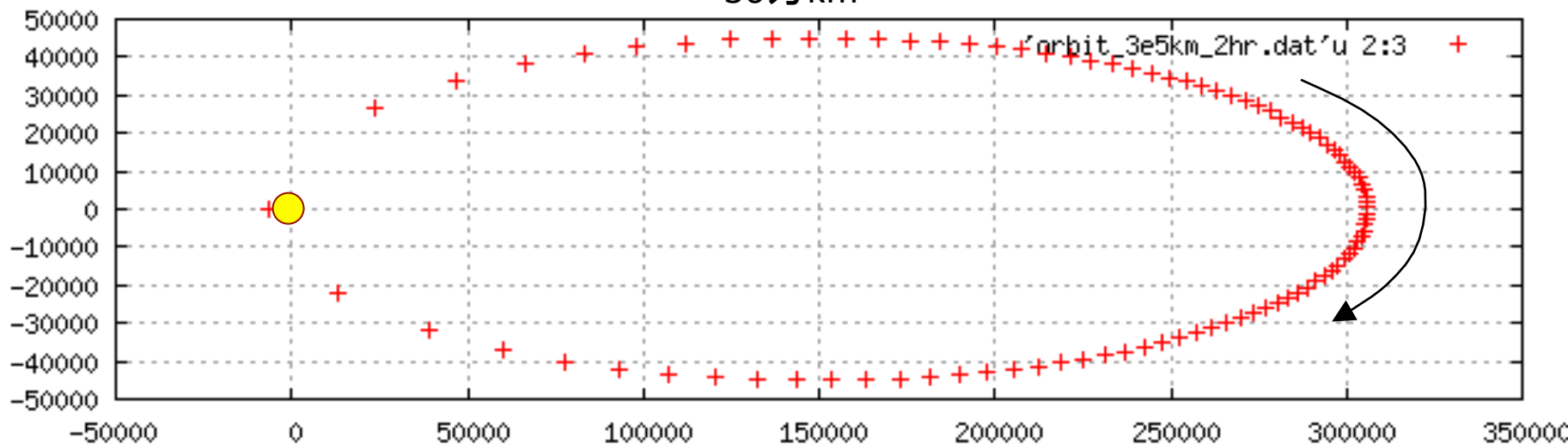
ISAS 今村

参考：遠金点45万kmと30万kmのときの2時間ごとの衛星位置

45万km



30万km



45万km相当

30万km相当

96km/pixel

64km/pixel

125 pixels

190 pixels

2E+07

4E+07

6E+07

8E+07

1E+08

1.2E+08

1.4E+08

V0470_0048_UV2_L2_b3

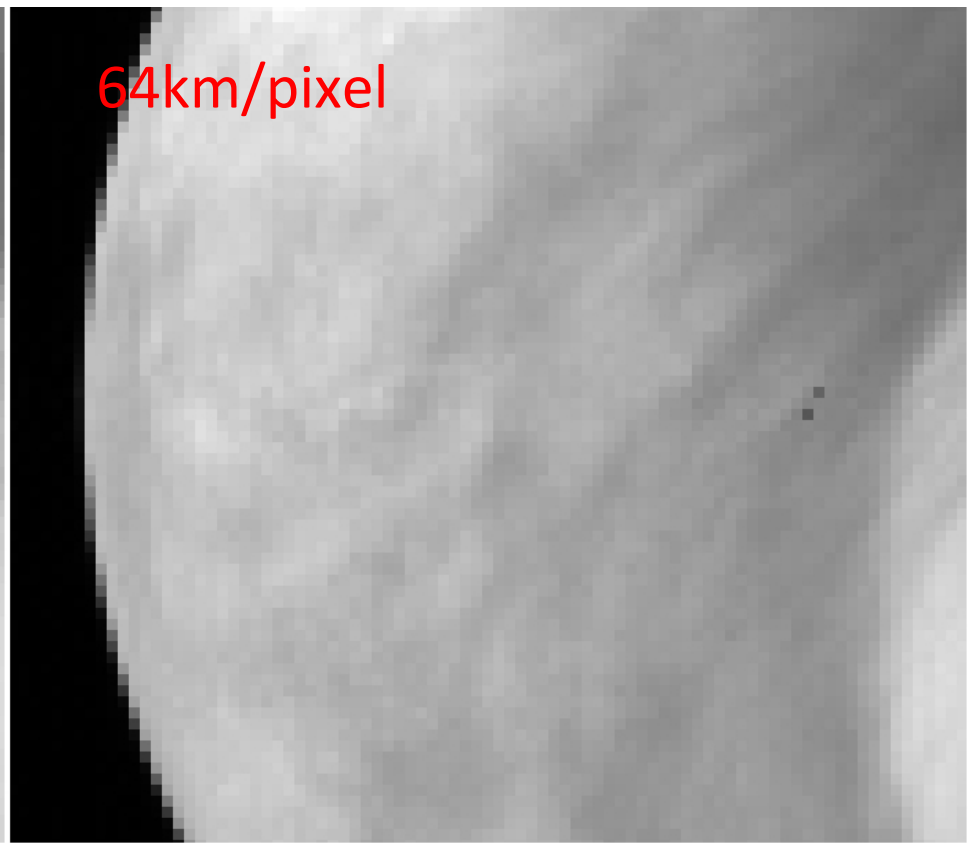
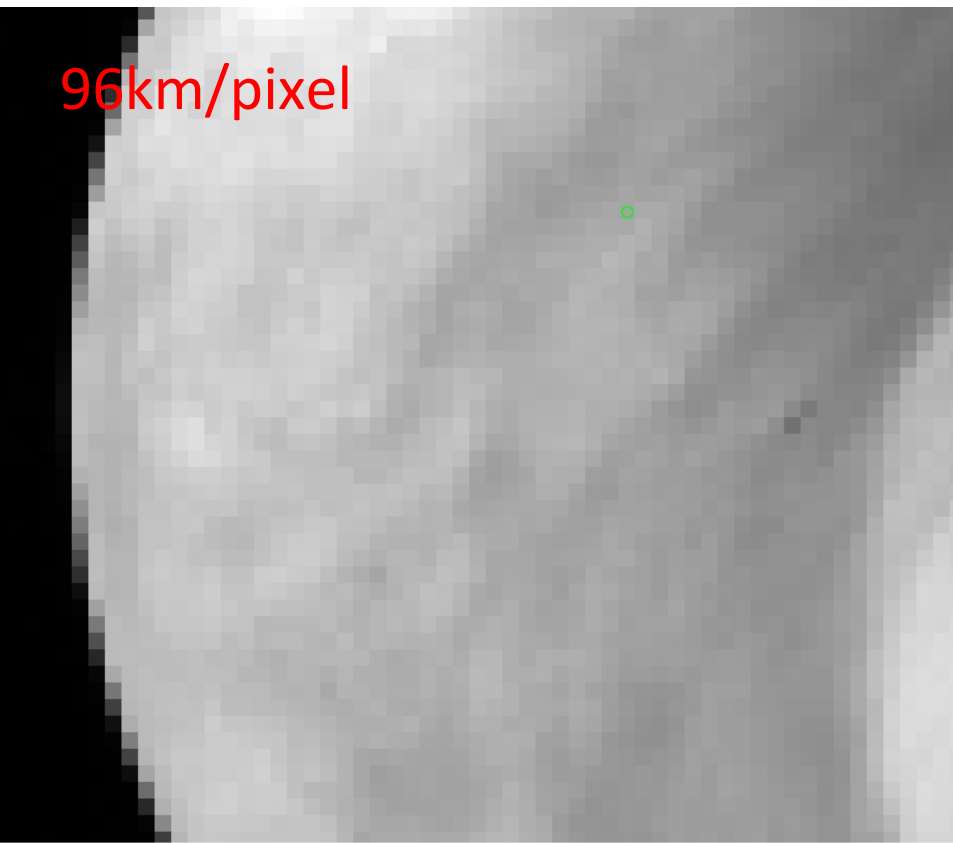
V0470_0048_UV2_L2_b2

45万km相当

30万km相当

96km/pixel

64km/pixel



2E+07

4E+07

6E+07

8E+07

1E+08

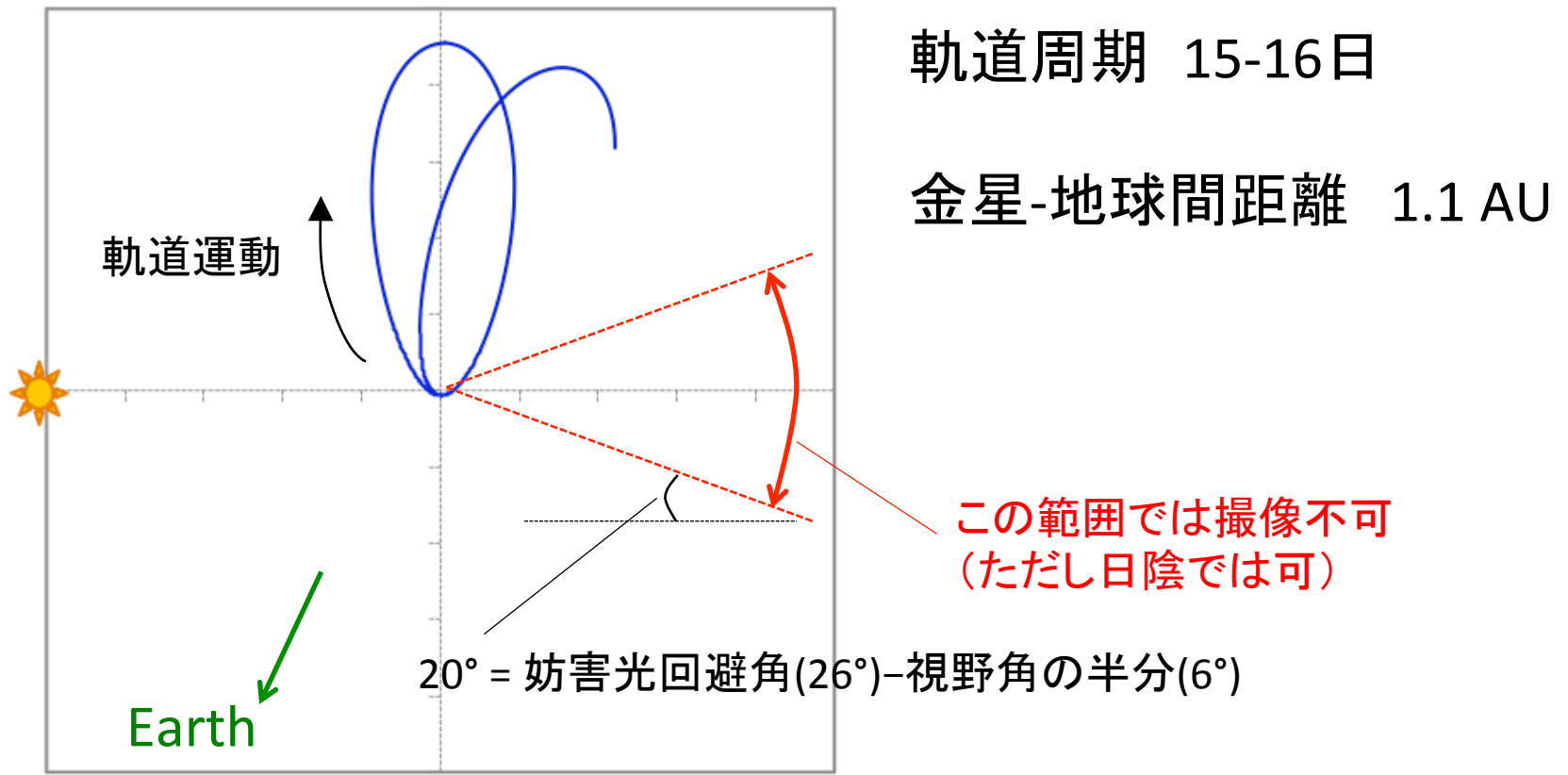
1.2E+08

1.4E+08

V0470_0048_UV2_L2_b3

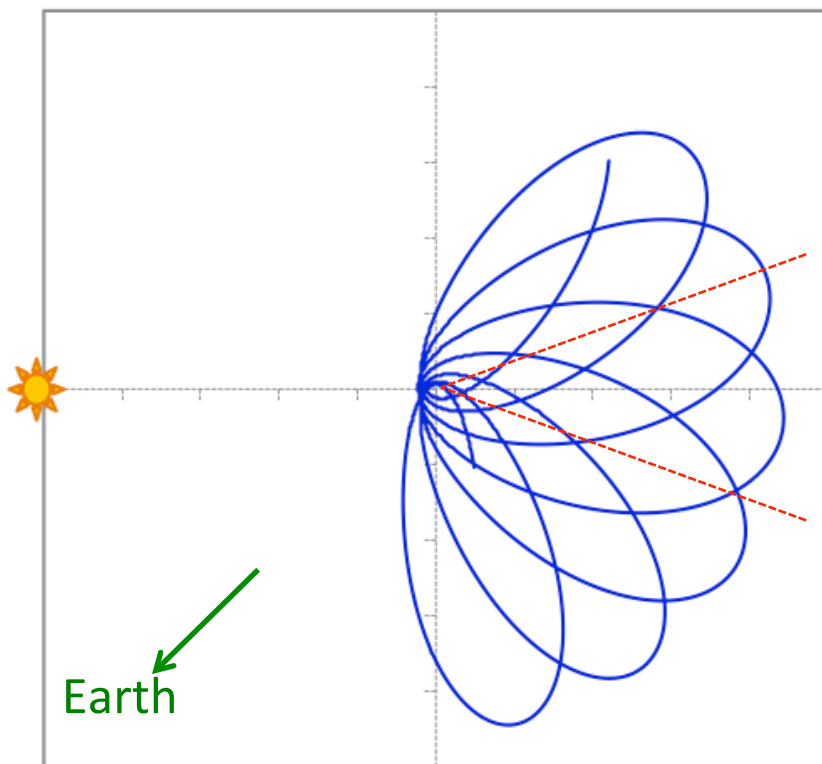
V0470_0048_UV2_L2_b2

VOI-R ~ 2015/12/31 (初期C/O)



- ・初期C/O、カメラの露光時間など決定
- ・軌道前半は主に昼面、後半は主に夜面を観測

2016/1/1 ~ 2016/3/31 (初期C/Oから定常観測へ)



金星-地球間距離 1.4 AU

- ・主に夜面を観測。昼面がディスクの半分近くを占めるときには昼夜両方を観測。
- ・日陰でLAC HV ONテスト
- ・昼側近金点付近でリム観測
- ・電波掩蔽スタート

・1月前半の1周回の撮像イメージ

Day 0-5: [06]day_slim(IR1 0.9D, IR2 2.02, UVI 365, LIR)+[02]night_slim(IR2 2.26, LIR)を2時間おきに11回、その2時間後に[05]day_delux(IR1 0.9D, IR2 2.02, UVI 283, 365, LIR)+[01]night_delux(IR2 1.73, 2.26, 2.32, LIR)+[03]night_delux_ir1(IR1 0.9N, 0.97, 1.01)を1回、の組み合わせを反復

Day 5-11: [02]night_slimを2時間おきに11回、その2時間後に[01]night_delux+[03]night_delux_ir1を1回、の組み合わせを反復

Day 11-14: 妨害光回避角の制限のため観測なし

画像データ量の削減

- HGAによるダウンリンクが可能な時間が当初予定より限られるかもしれない。そのため、より効率よくデータを転送したい。より長期間のデータを機上に保存できるようにしておきたい。
- 撮像頻度を従来案(2時間に1回)よりも増やすことで雲追跡ベクトルの精度が上がり、解像度低下によるサイエンス低下をある程度補えるかもしれない。
- 定常観測に入るであろう2016春以降(遠金点~32万km)は、遠金点から見る金星の視直径はUVI,IR1,IR2では 185 pix。画像は機上で128x128pix単位の64枚の「タイル」に分割されたあとHIREWで圧縮される。金星は多くの場合に4~16タイルにまたがることになり、残り48~60タイルには深宇宙だけが写る。現状ではタイルを取捨選択することはできない。

→はやぶさ2のカメラ制御計算機に追加した機能をあかつきに移植して、選択したタイルだけを保存できるようにすることになった。機上で検証するのは金星到着後。