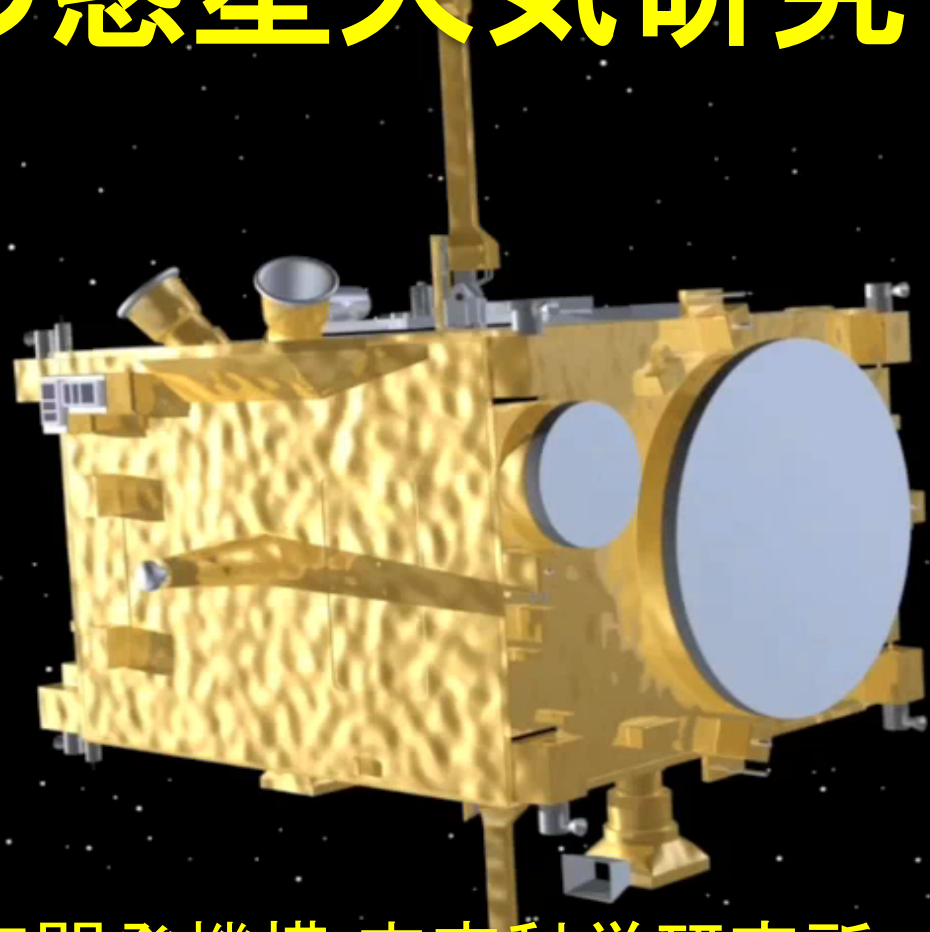


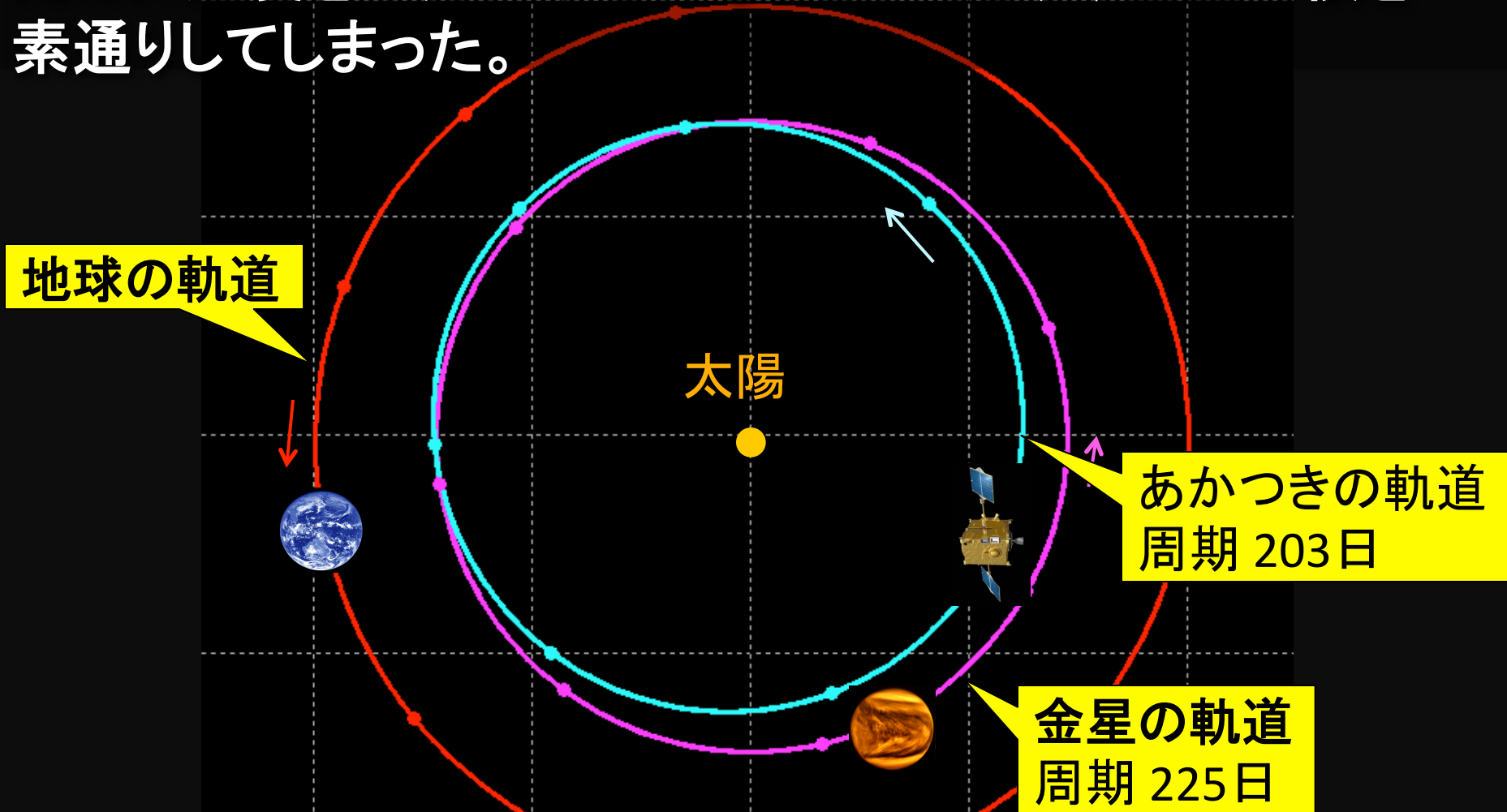
金星気象衛星「あかつき」と 今後の惑星大気研究



宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

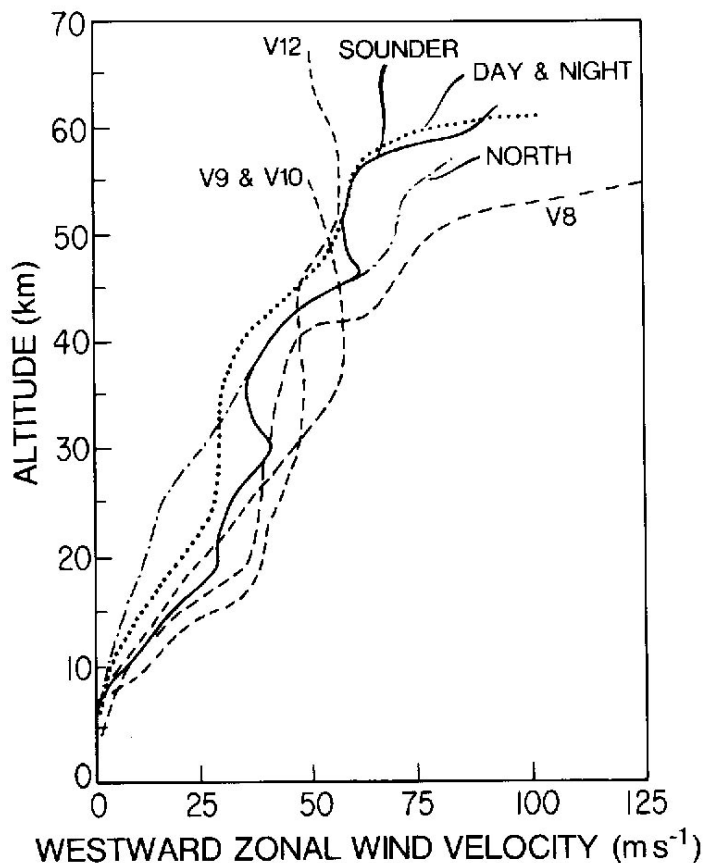
今村 剛

2010年12月に金星に到着したが、主エンジンの故障のために速度を十分にゆるめることができず、金星の横を素通りしてしまった。



2015年12月にもう一度金星に近づき、残された姿勢制御用の副エンジンを使って金星周回軌道投入に挑戦する。

金星大気のスーパーローテーション



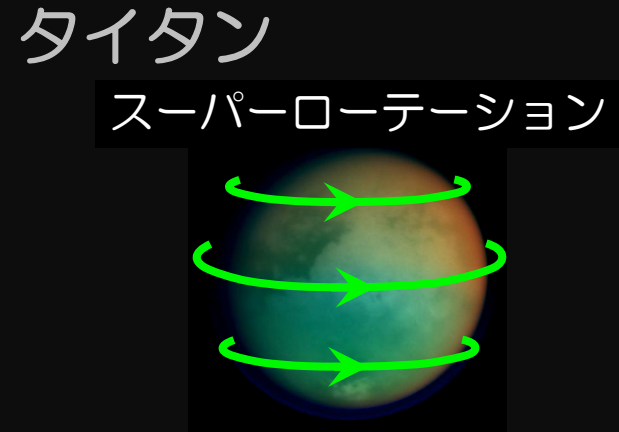
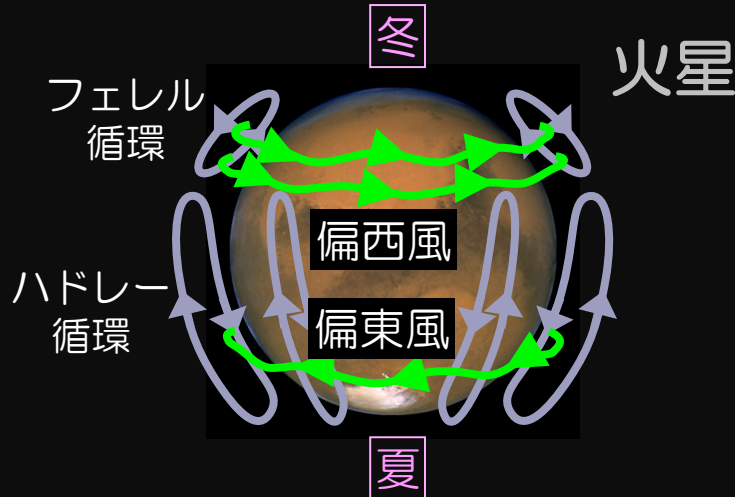
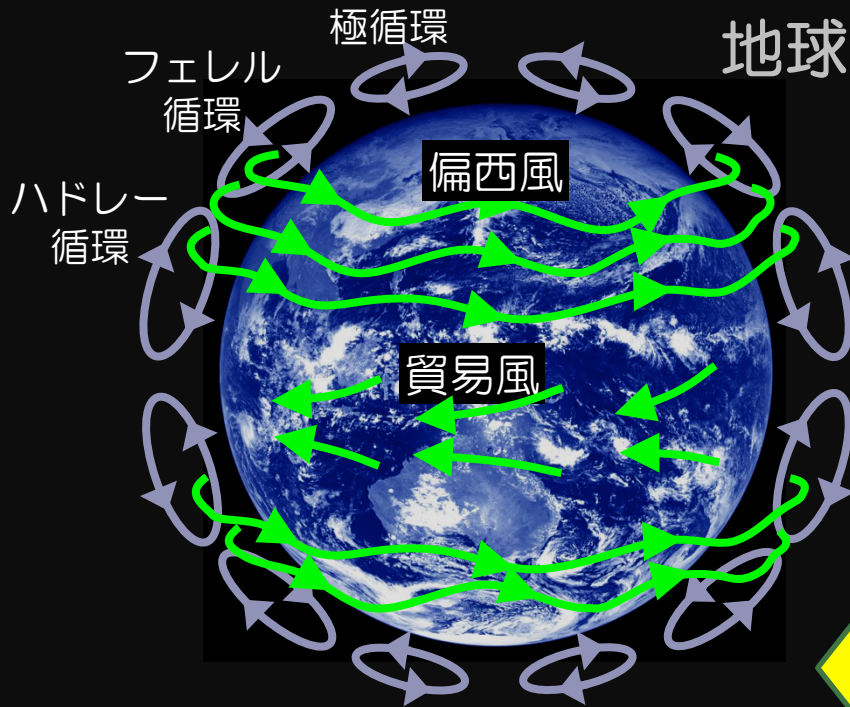
金星着陸機が降下途中で測った
風速の高度分布



パイオニア・ビーナス探査機(米)に
よる雲頂の紫外線連続画像

雲頂(65km)では大気が自転(周期243日)の60倍の
速さで自転方向に循環

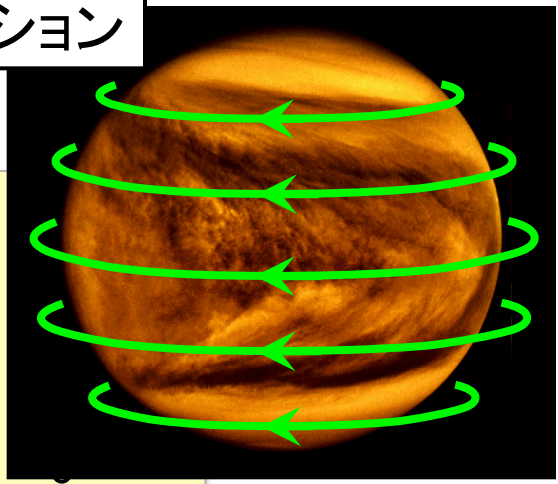
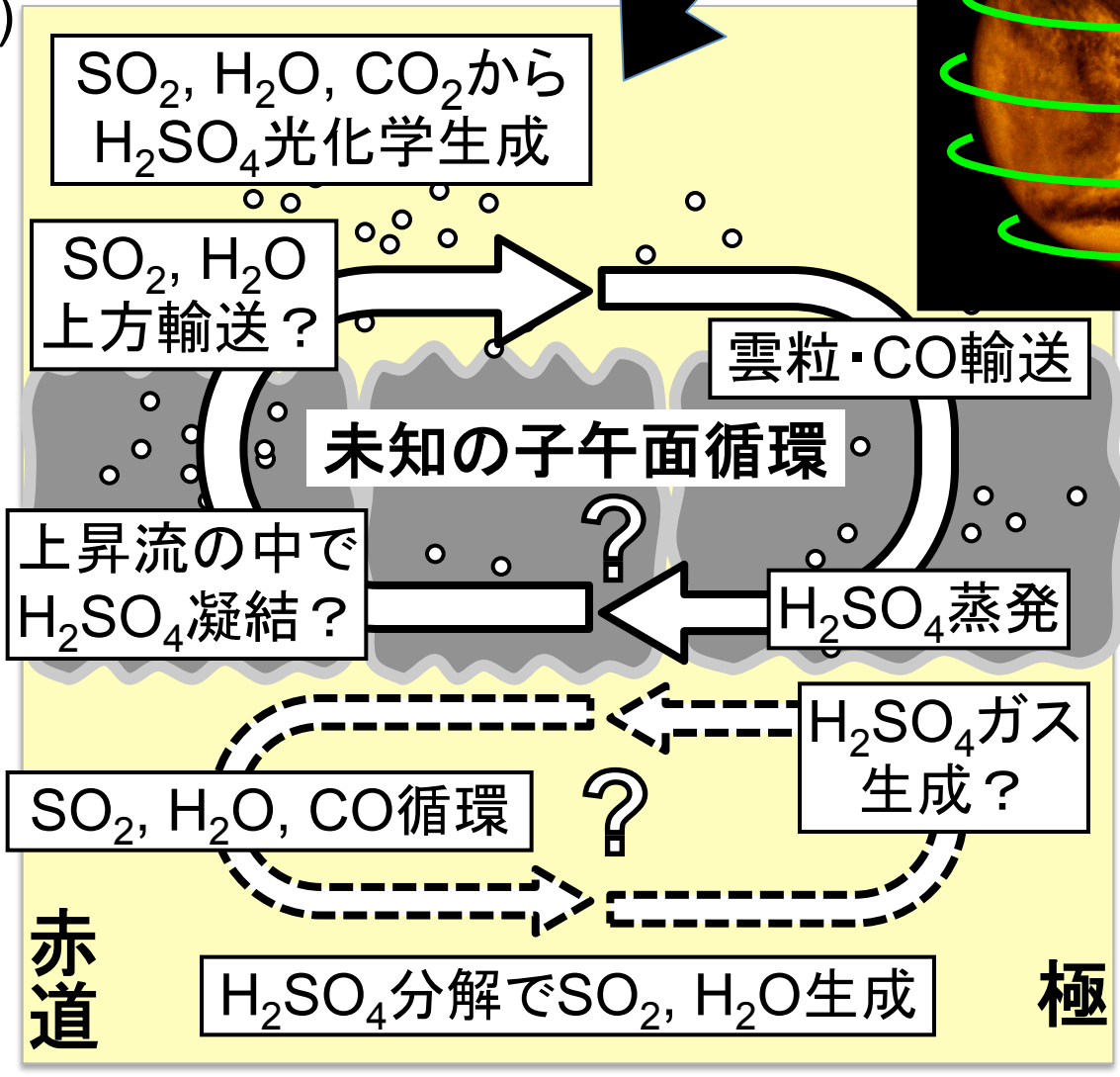
地球型惑星の大気大循環



スーパーローテーション

高度 (km)
90
80
70
60
50
40
30
20

子午面断面



硫酸雲

大気大循環が雲をつくる

同期回転惑星の大気大循環

(Joshi et al., 1997)

Antistellar Point

高度500 m

Antistellar Point

高度20 km

中心星からの光

Subst Point

10

Subst Point

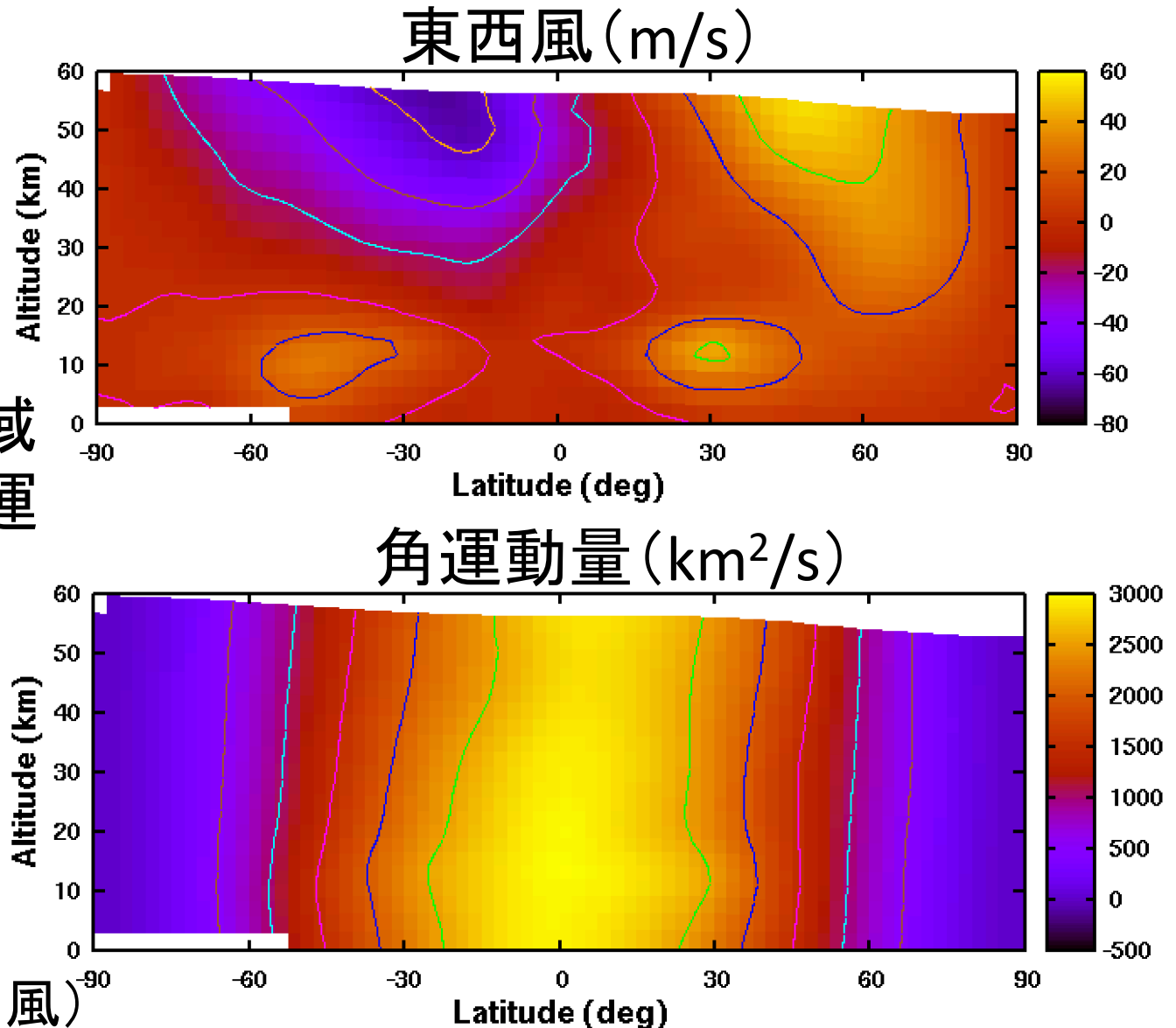
100

スーパーローテーションによって温度が均されることが
ハビタブルになれるかどうかにとって重要かもしれない

どう不思議なのか？

地球では赤道域
の低高度で角運
動量が最大

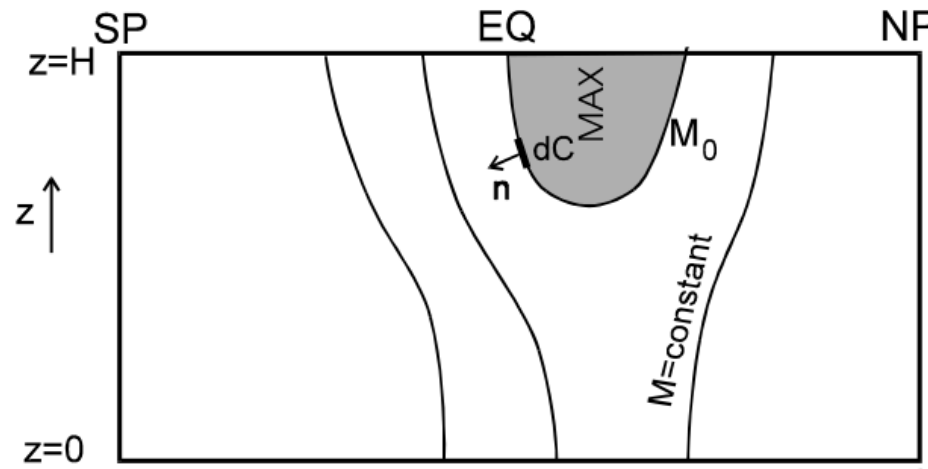
(1月の平均風)



- 「スーパーローテーション」 = 大気の単位質量あたり角運動量が赤道上空で最大
- 地球では長期間の平均状態としては見られない



Hideの定理：自転軸に対して対称な循環では、地表から離れた場所に角運動量の正の極値を維持することはできない。



→レイノルズストレス(波動による運動量輸送)が必要

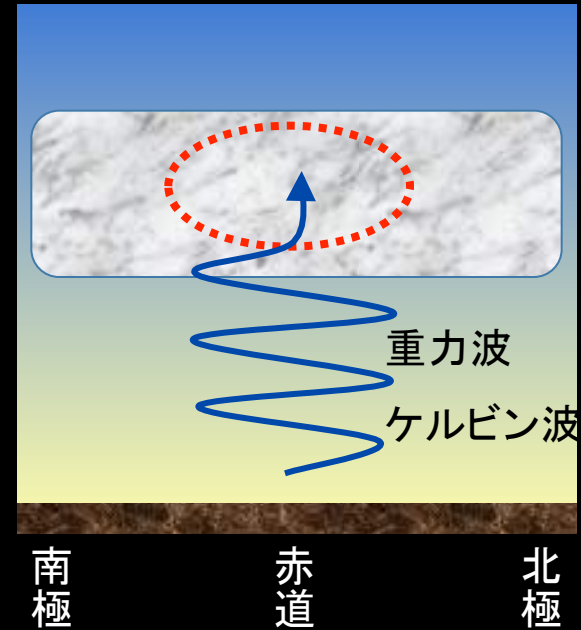
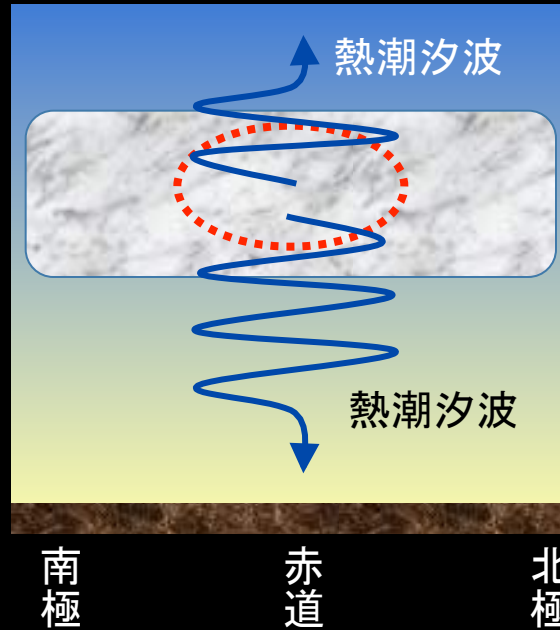
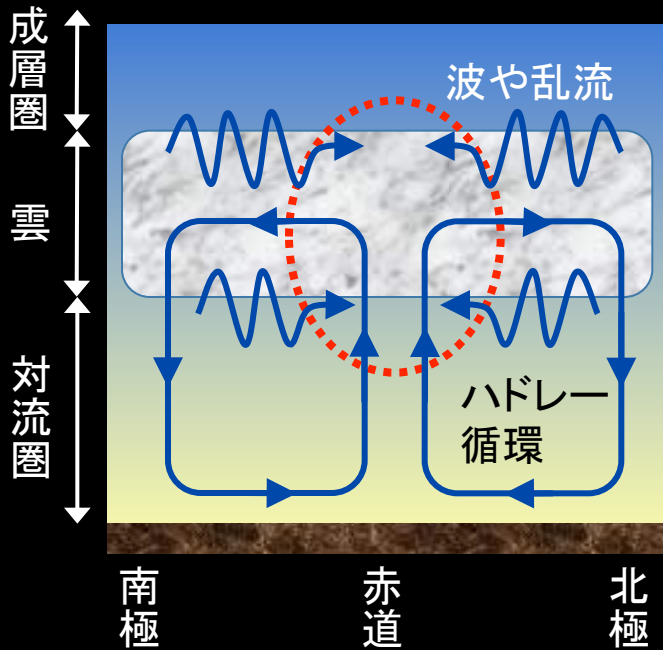
スーパーローテーションの様々な仮説

赤道向き角運動量 輸送説

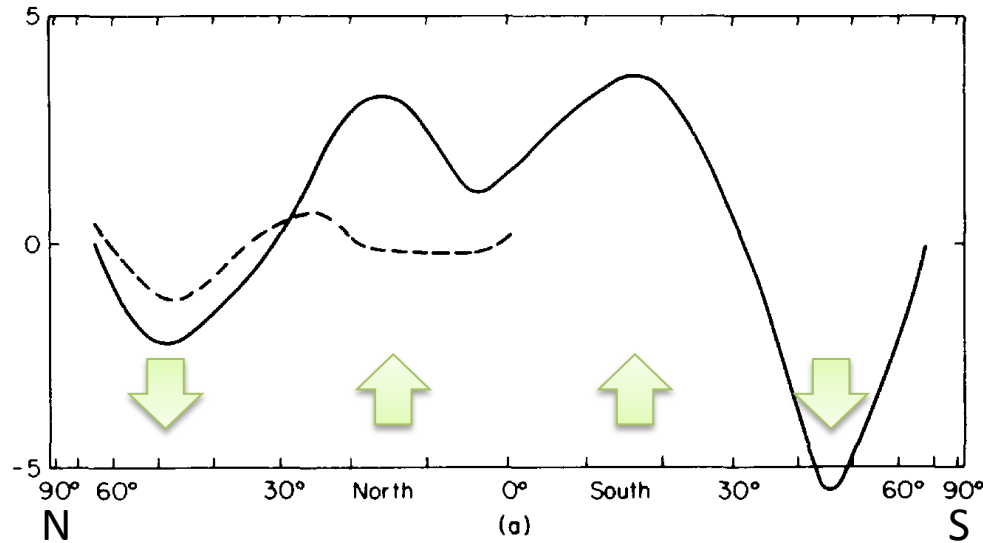
熱潮汐波説

上方伝搬波動説

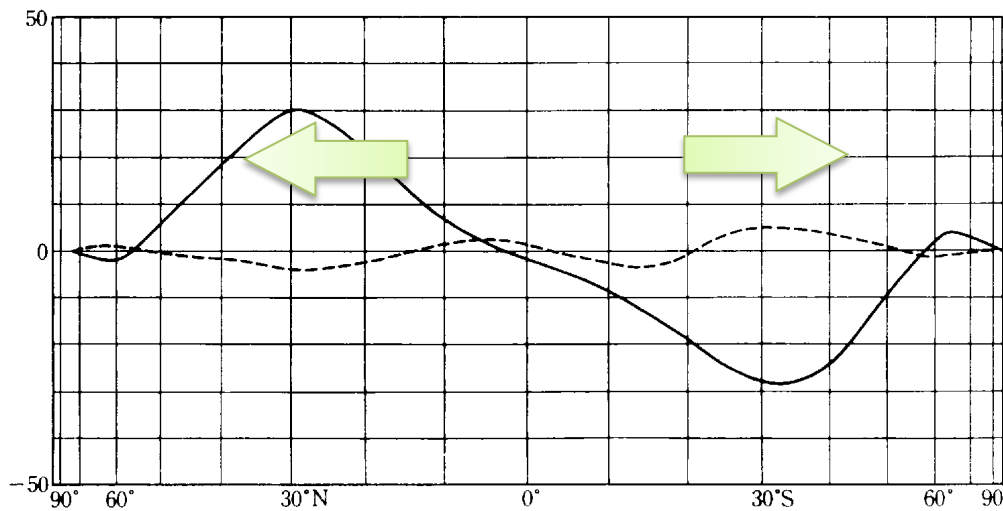
 加速域



地球では



地表が大気に及ぼす
東向きトルク



東向き角運動量の
北向きフラックス

波動により極向き
角運動量輸送

図 8.6 子午面内循環による絶対角運動量の極向き輸送量(破線)と擾乱による輸送量(実線)の年平均(Lorenz, 1967).
単位は $10^{18} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$.

(小倉 1978)

低速回転惑星上の水平 2次元数値実験

(Williams and Rossow 1979)

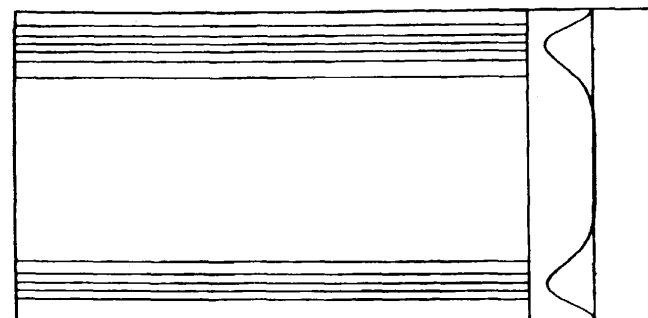
金星と同じ自転速度

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

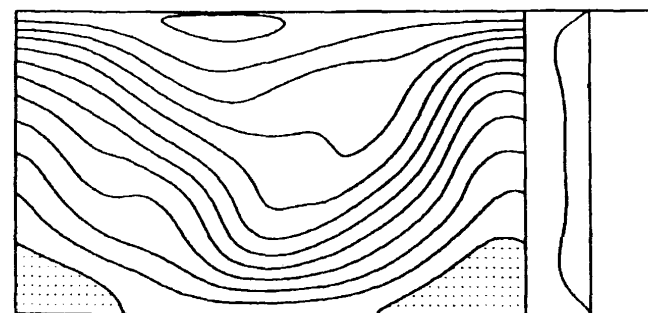
流線関数

帯状平均東西風



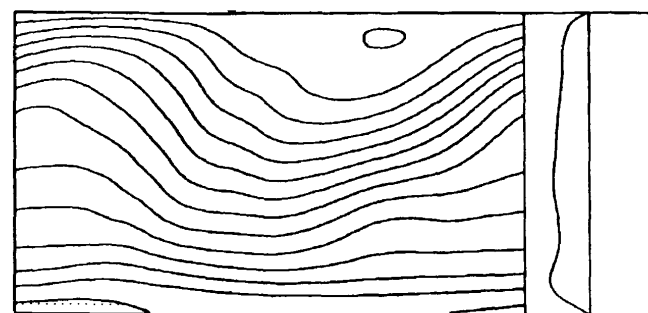
2.8日

(a)



11.5日

(b)

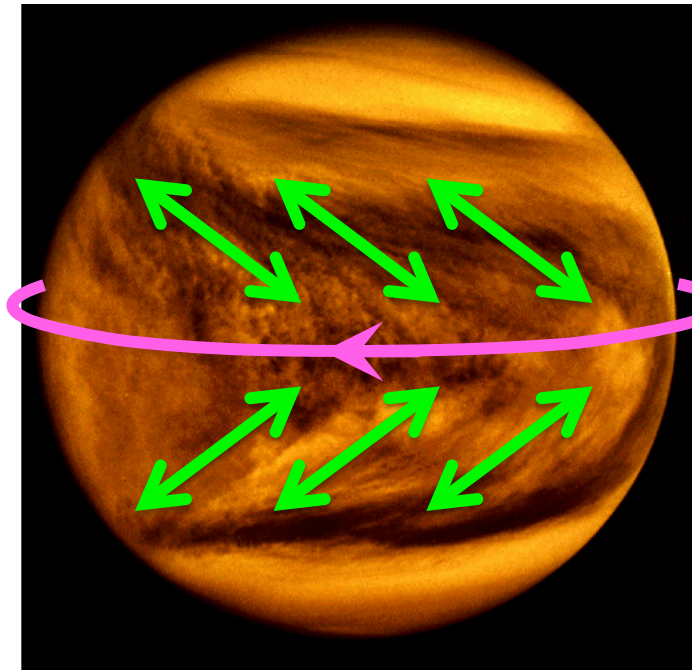


17.2日

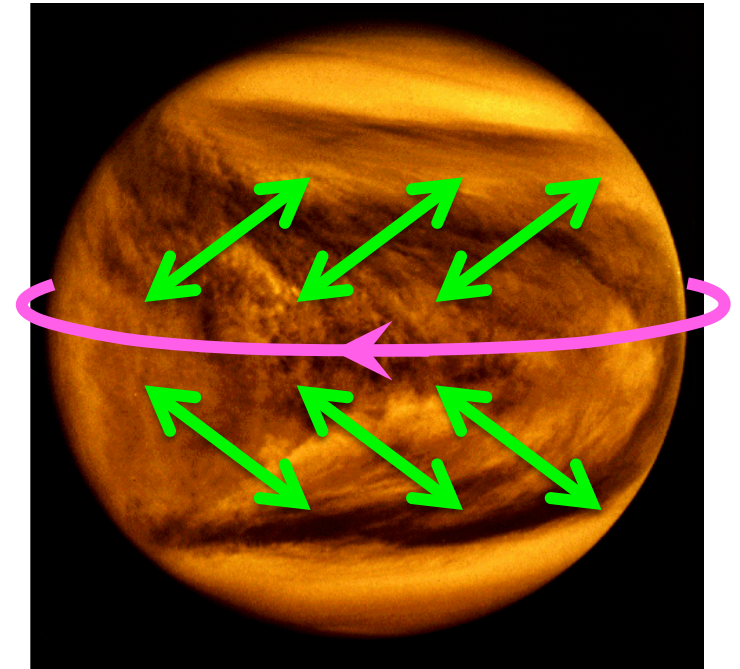
(c)

3次元大気で角運動量輸送の方向を決めるものは
何なのか

“Y字”は役に立たない



スーパー
ローテー
ション

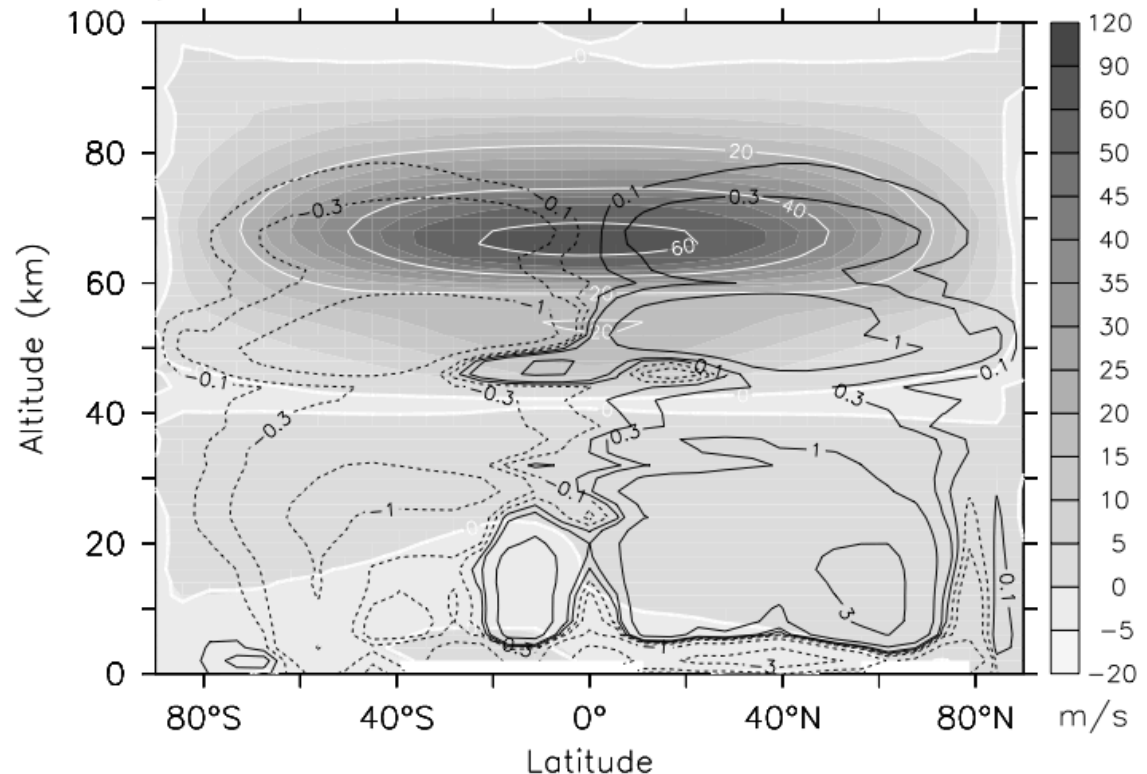


“Y字”の傾きの方向は低緯度から高緯度へ角運動量を運ぶセンス。期待するものと逆。

こういうのが有ってほしい。

数値実験では

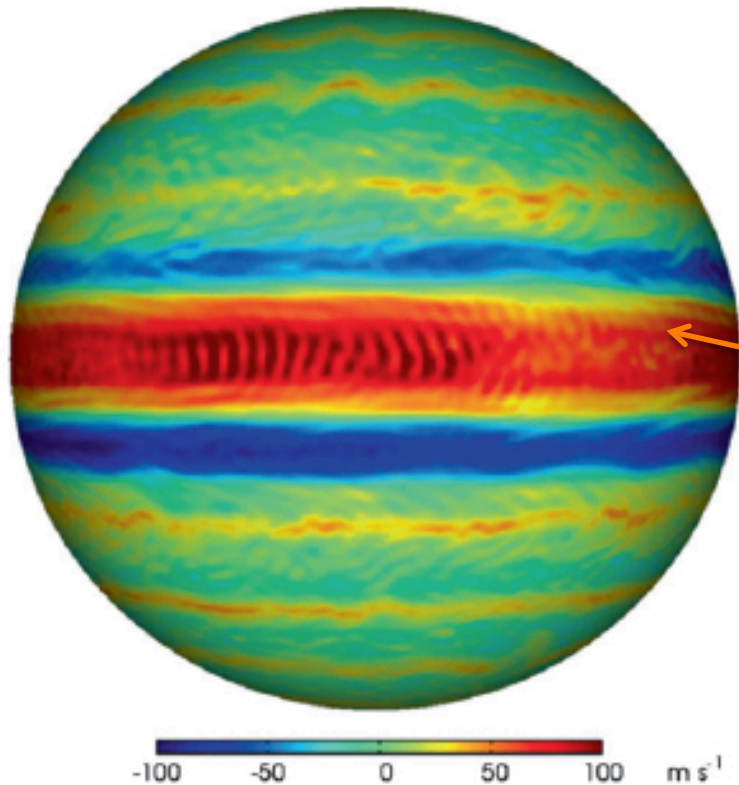
- 現実的な設定条件で大気全層のスーパーローテーションが生じたものは数少ない。いまのところ発現条件についてコンセンサスがない。
- 計算では下層大気のハドレー循環が著しく弱いことが原因か
- 初期値依存性あり？



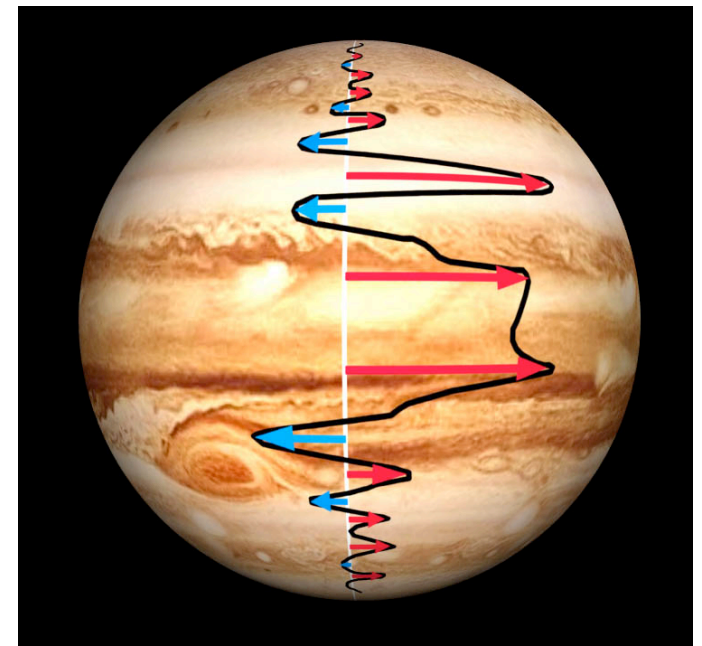
Lebonnois et al. (2011)

木星の赤道スーパーローテーション

Schneider & Liu (2009)



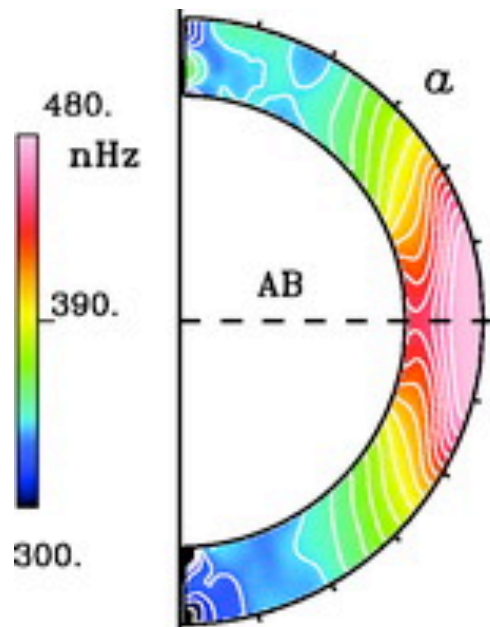
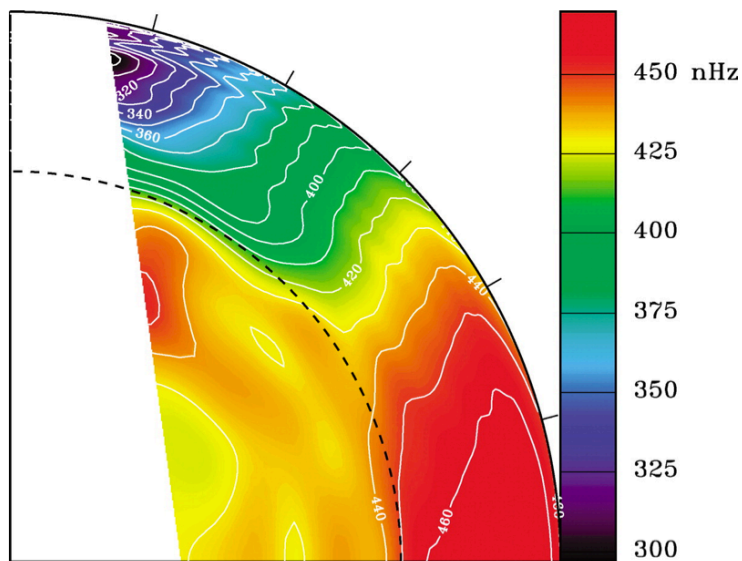
雲追跡による東西風の緯度分布



赤道域では深部からの熱流により対流が生じ、ここからロスビー波が高緯度に向けて放射される結果、運動量が収束して赤道ジェットが作られる？

太陽の赤道スーパーローテーション

数値実験の例 (Miesch 2000)

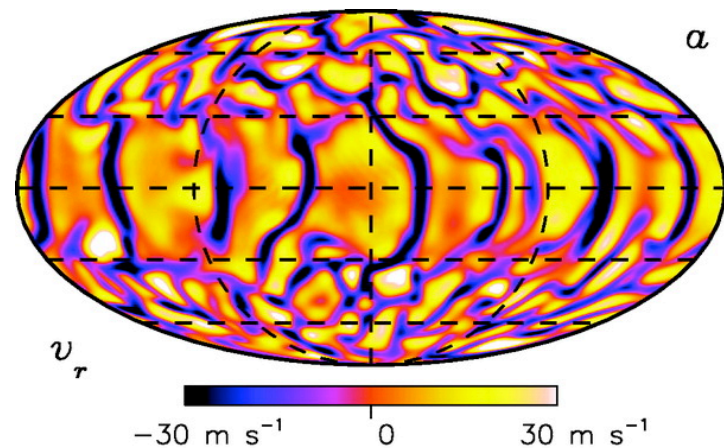


$r = 0.95 R_{\odot}$ における鉛直速度

日震学による自転レート

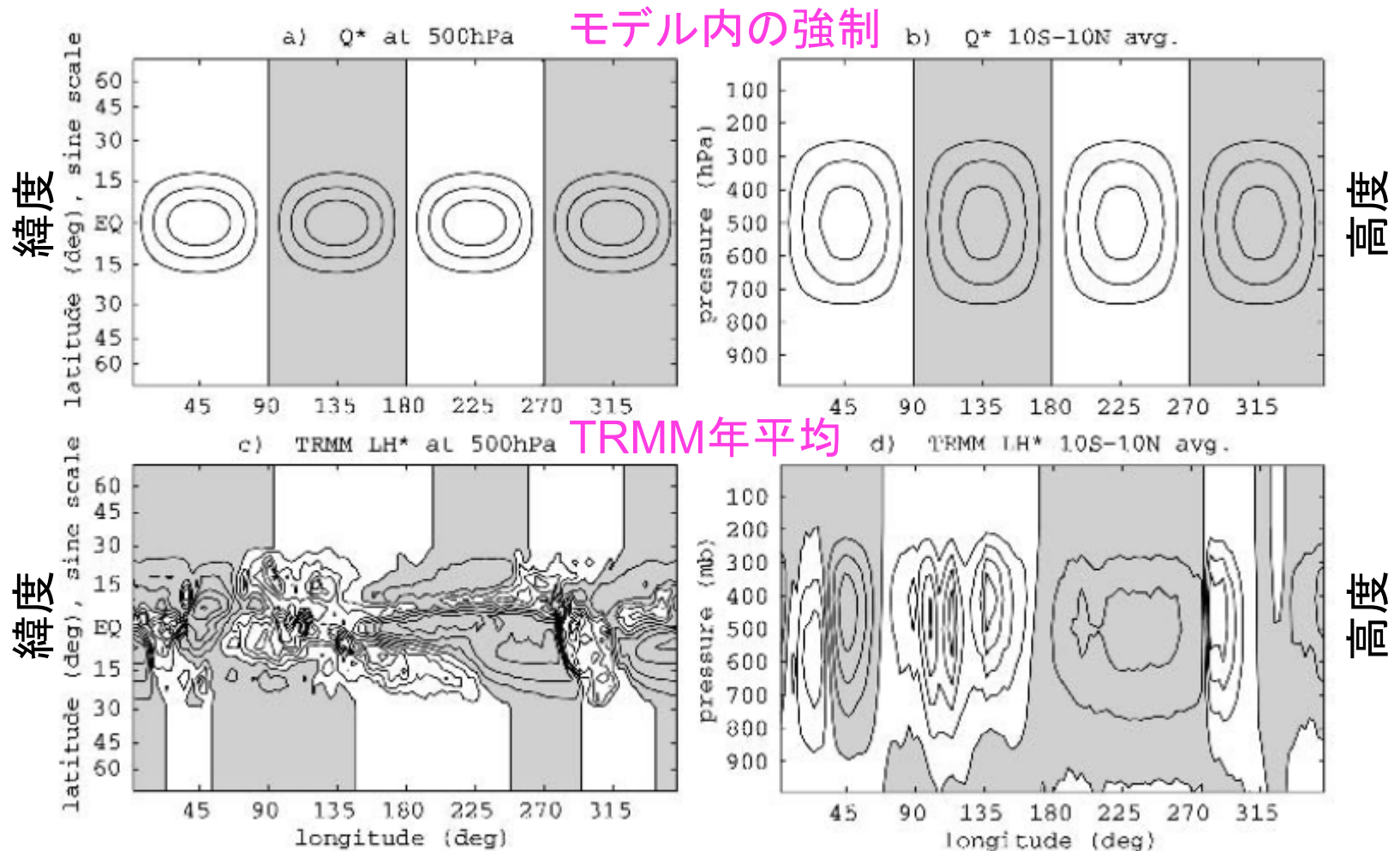
周期 = 赤道域で25日、両極付近で36日

自転軸に沿ったコラム状対流が緯度に対して傾くことにより赤道向きに角運動量を輸送？

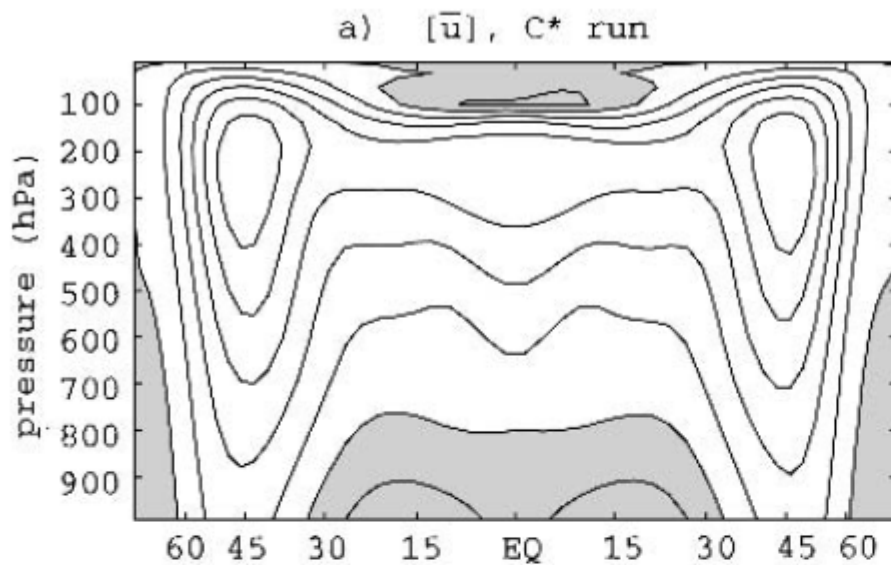


地球の熱帯対流圏の超回転可能性 (Kraucunas & Hartmann, 2005)

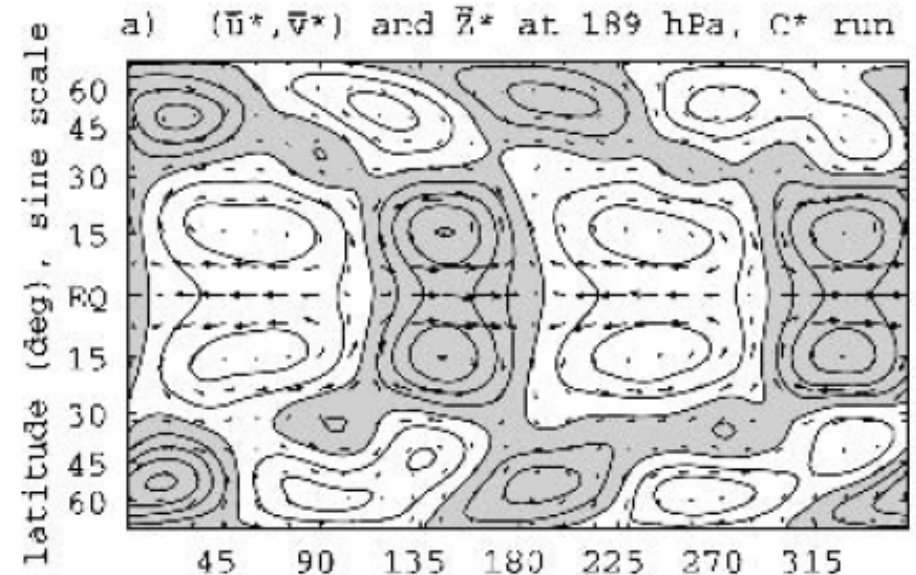
南北対称、季節なしで、赤道域に波数2の定常加熱強制



- 熱帯大気で西風が生じた（スーパーローテーション）
- 加熱強制で励起された定在ロスビー波が高緯度側に伝搬して西向き角運動量を輸送するために熱帯大気は東向きに加速される



平均東西風の子午面分布



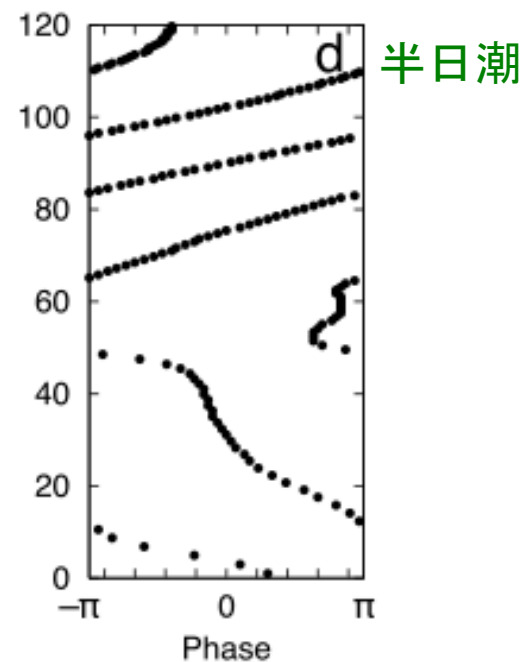
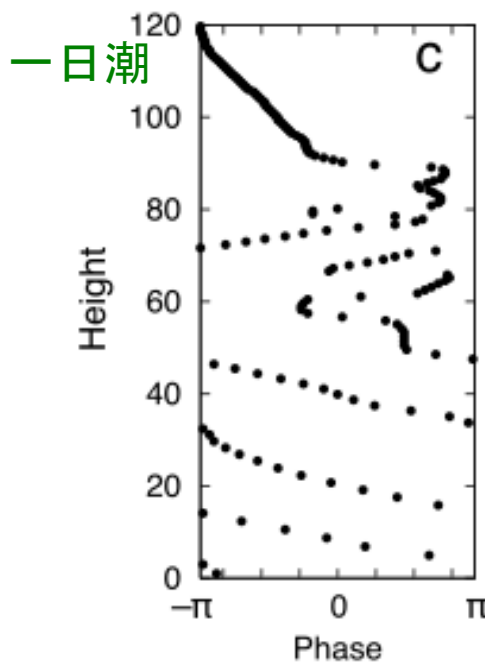
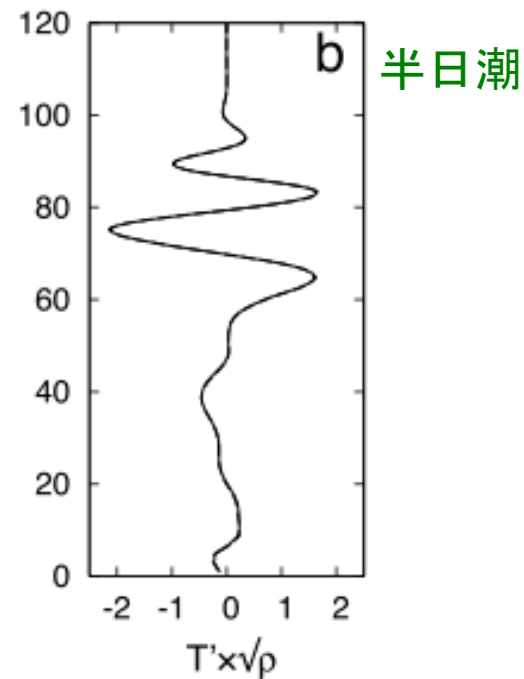
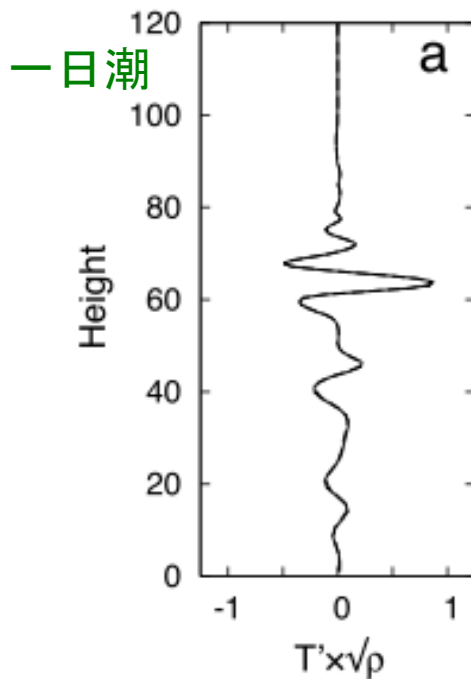
定在波の構造

熱潮汐波による スーパーローテー ション生成

(Takagi & Matsuda, 2006)

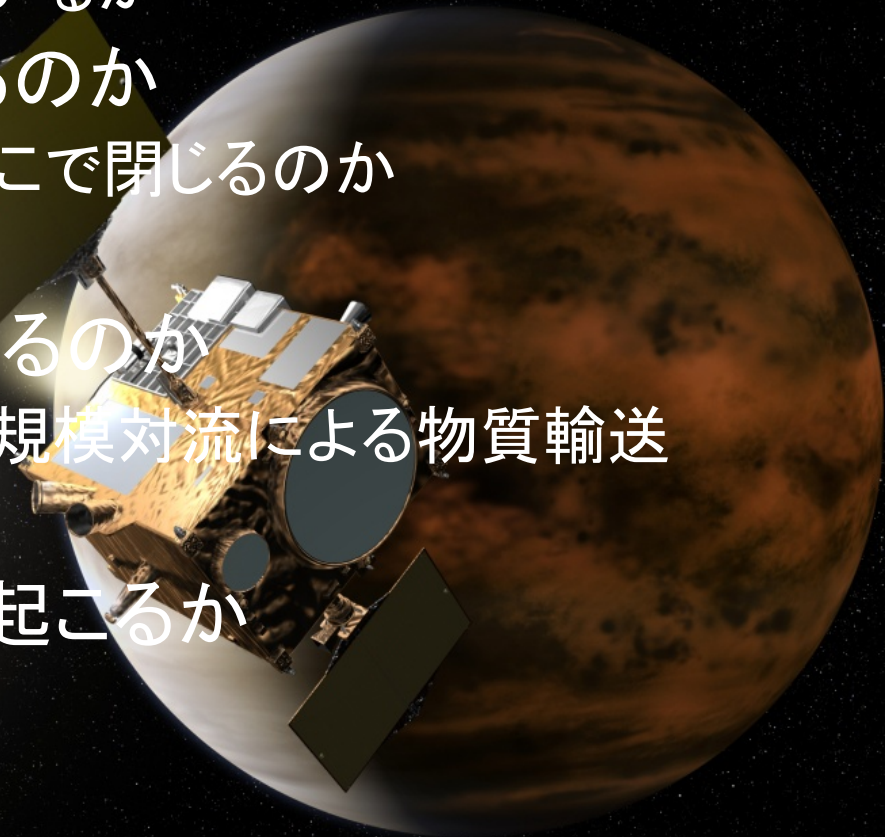
下向きに伝播する波が地
面近くまで到達して地面に
運動量を渡すことにより大
気を加速する可能性がある。

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。



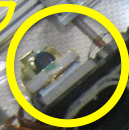
「あかつき」の目標

- ・ 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



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



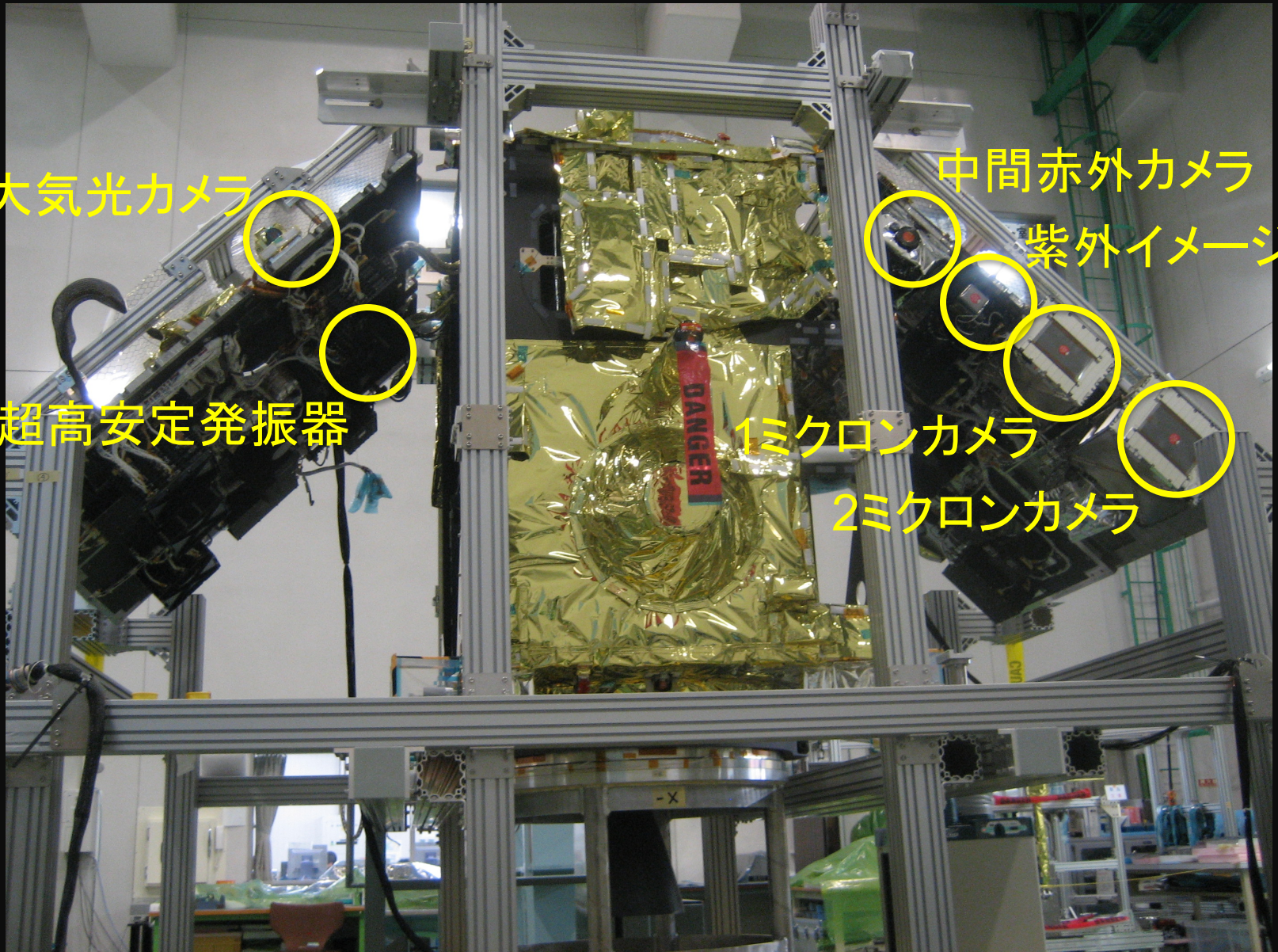
紫外イメージャ



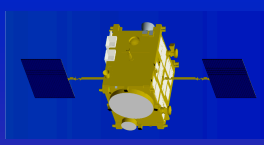
1ミクロンカメラ



2ミクロンカメラ



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

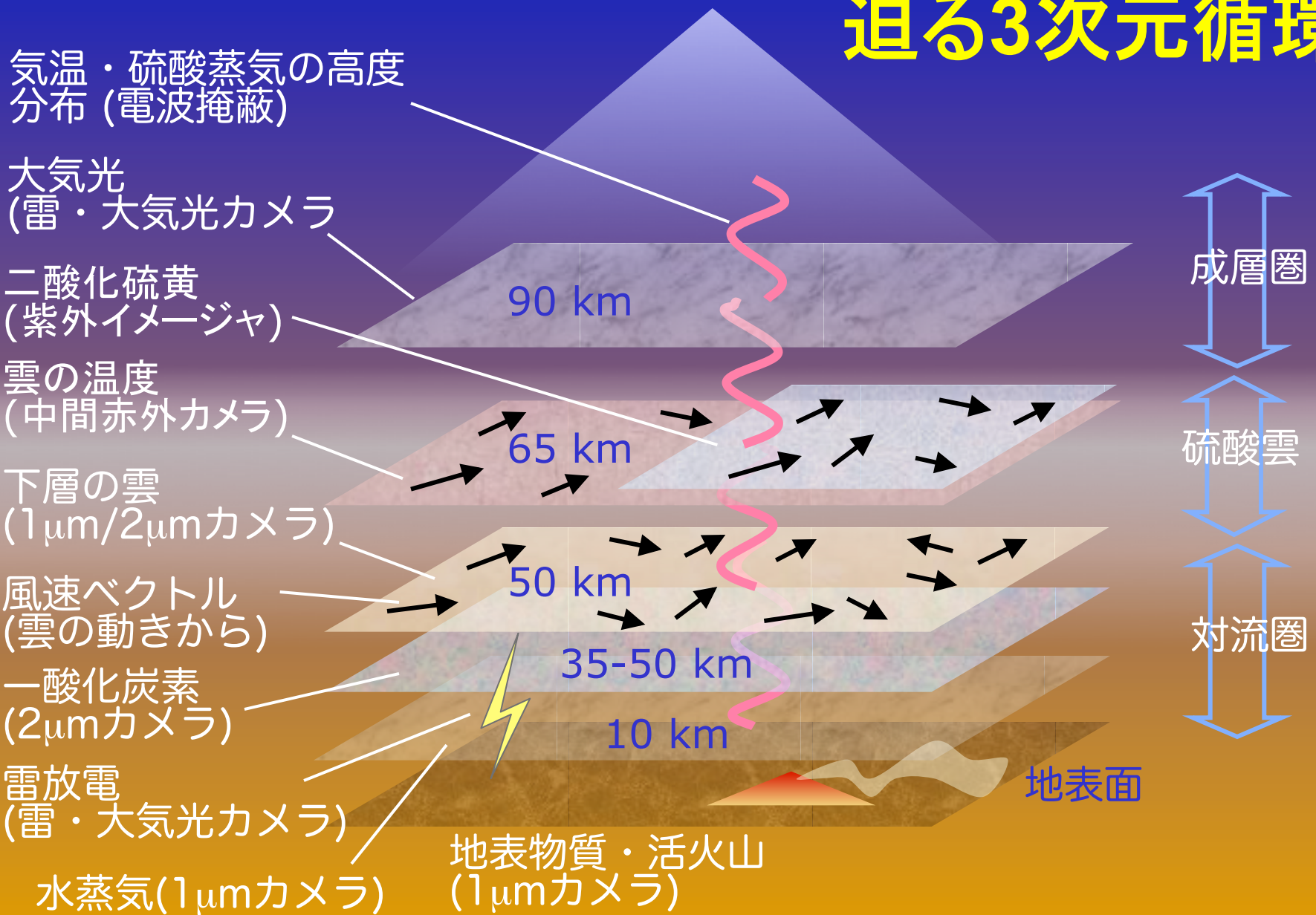
35-50 km

10 km

成層圏

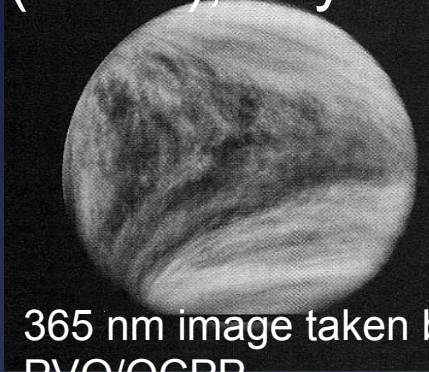
硫酸雲

対流圏



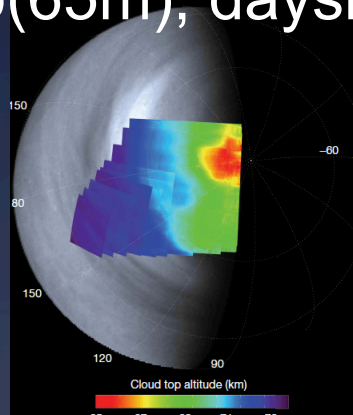
雲追跡風に最適化した世界初のミッション

365nm, cloud top
(65km), dayside



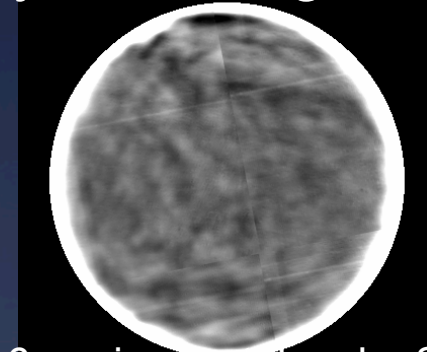
365 nm image taken by
PVO/OCPP

2.02 μ m, cloud
top(65m), dayside



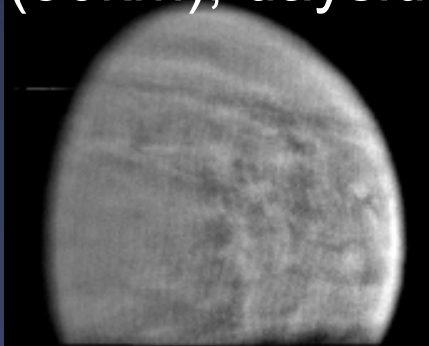
Cloud altimetry by
VenusExpress/VIRTIS

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



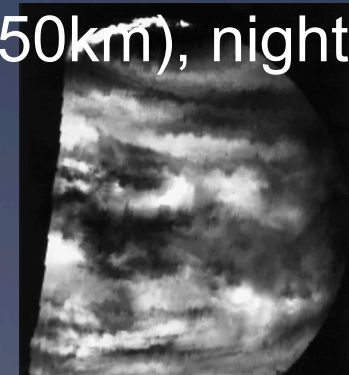
8.6 μ m image taken by Subaru
telescope, high-pass filtered

0.9 μ m, lower cloud
(50km), dayside



0.98 μ m image taken by
Galileo/SSI

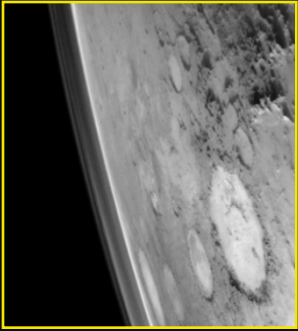
2.3 μ m, lower cloud
(50km), nightside



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

観測計画



雲の層構造を横から見る

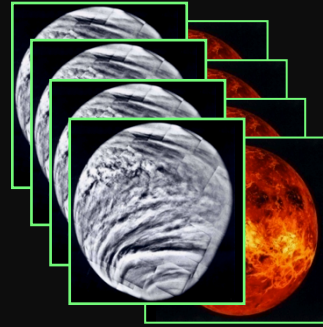


電波掩蔽: 大気の層構造をとらえる

グローバル撮像:

当初計画より解像度が落ちるが、同程度の解像度の画像を用いた検討によれば、当初目的をある程度は達成できる可能性がある。

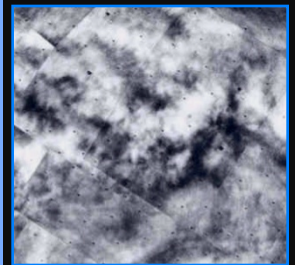
数日以上にわたって途切れなくモニターできるようになるメリットを生かす。

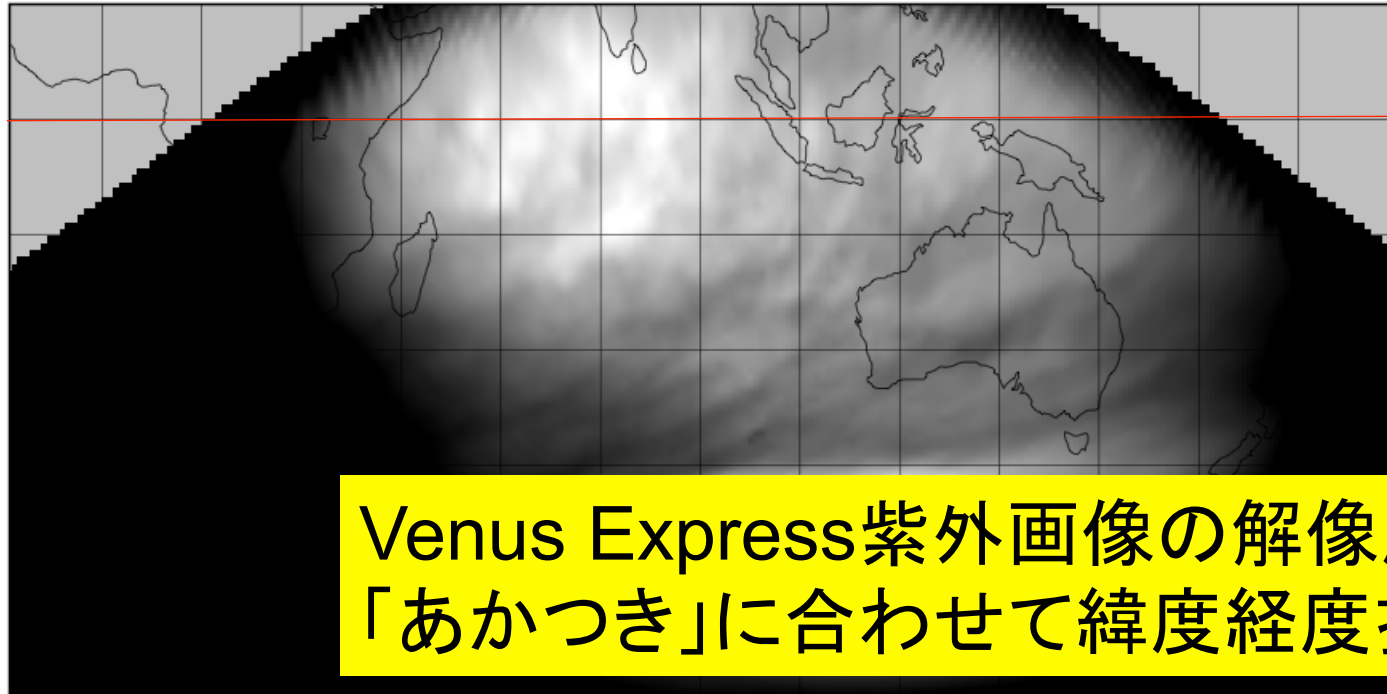


軌道周期
1~2週間

クローズアップ撮像:

ここに重点的にデータ量を割り振って、微細な大気構造の時間変化を追跡する研究を強化するという案も。

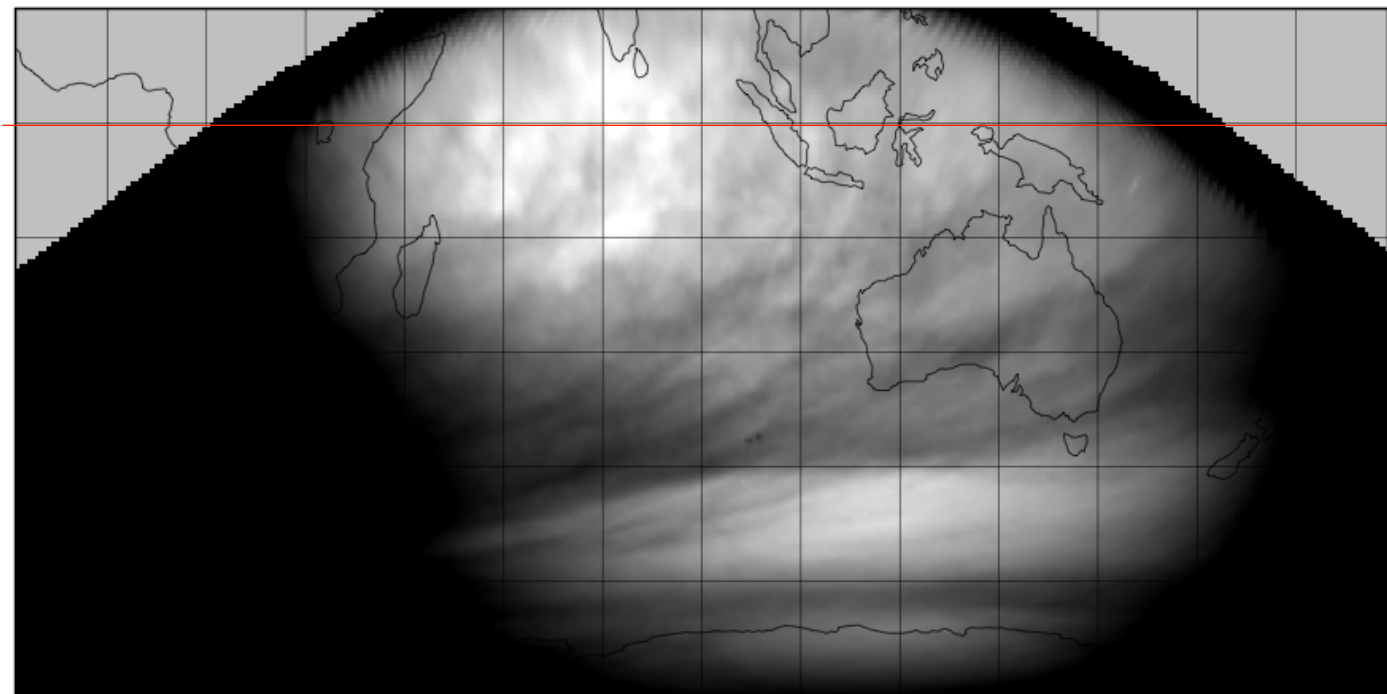




赤道

45万km相当

Venus Express紫外画像の解像度を「あかつき」に合わせて緯度経度投影



赤道

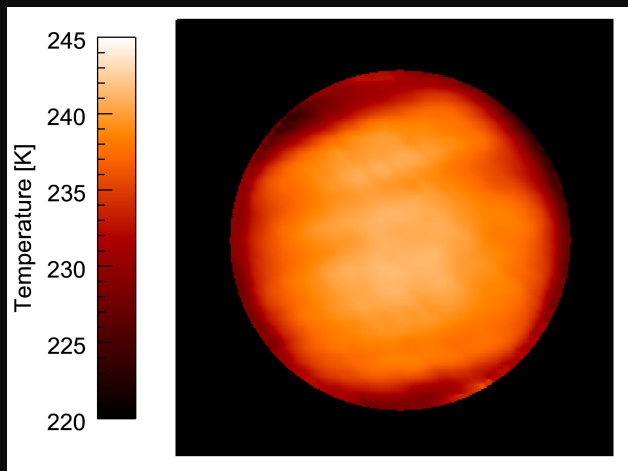
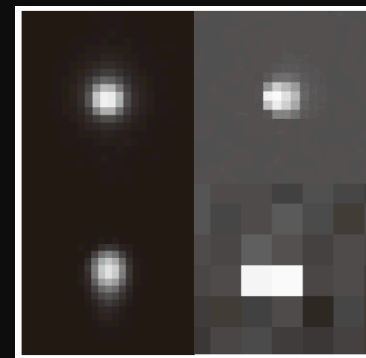
30万km相当

(コントラスト強調)

「あかつき」のこれまでの成果

周回軌道投入失敗の直後の金星撮像により、雲の温度分布にこれまで知られていなかった微細構造を発見 (Taguchi et al., 2012)

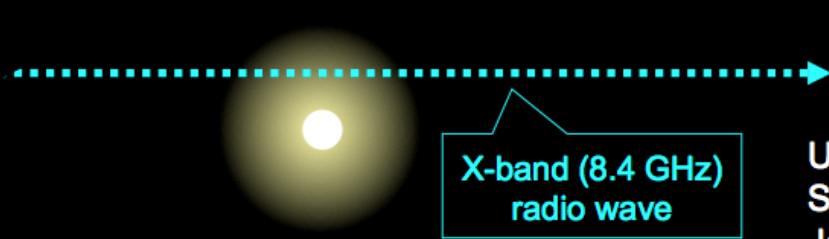
遠距離からの測光観測により、雲頂での大粒子の増加を発見 (Sato et al., in press)



波長365nm(未同定吸収物質)と283nm(SO₂)の輝度の周期変動に位相差を発見、雲形成に関わる輸送過程の情報 (投稿準備中)

太陽コロナの電波掩蔽観測を行い、速度分布や電磁流体波動の分布を明らかにした。 (Imamura et al. 2014; Miyamoto et al., in press)

観測装置の性能
は実証済み！



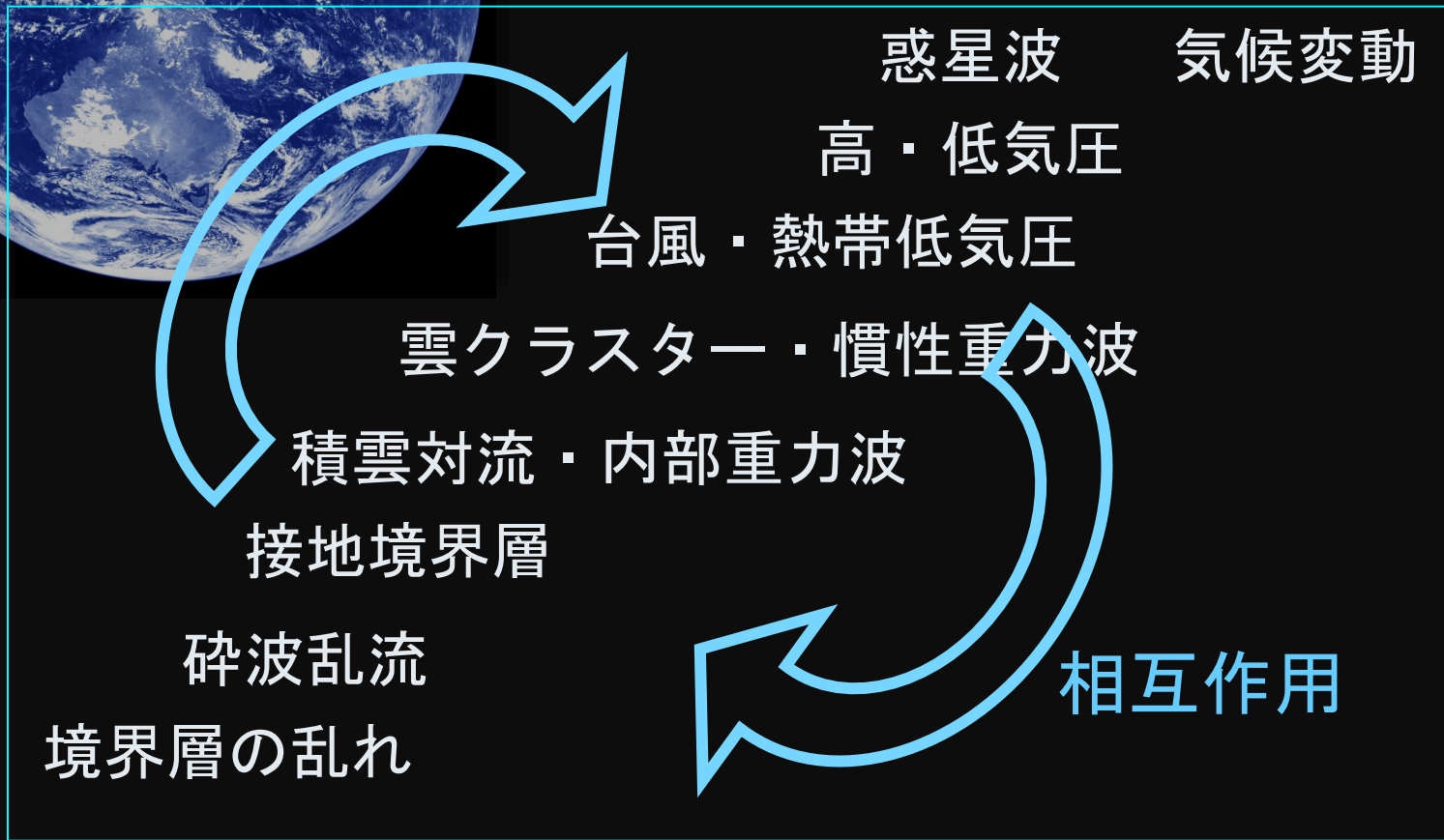
Usuda Deep Space Center, Japan

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



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

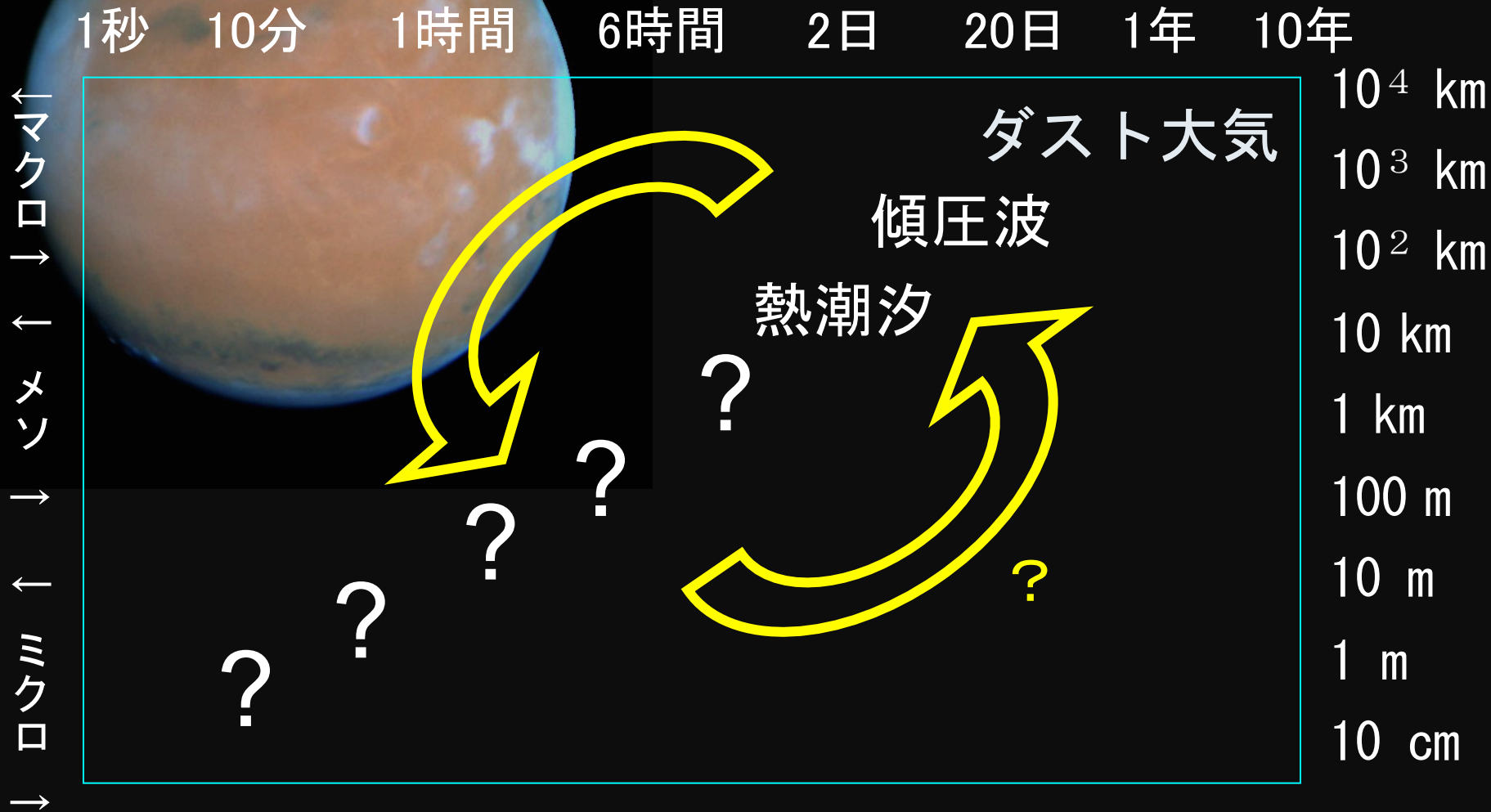
←マクロ→
←メソ→
←ミクロ→

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

超回転



火星気象の階層構造



木星気象の階層構造

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



まとめ

- 「あかつき」は来年12月に金星オービターになる。長年の悲願である独自の惑星気象ミッションの達成まであと一歩。
- スーパーローテーションとその中で生じる大気現象(階層構造)の研究は、気象学の一般化に向けた第一歩。
- 初めて見る時間的・空間的に密な金星気象データには想定外の多彩な現象が観察されるはず。我々の想像力と思考の柔軟さが試される。
- ここできちんと経験を積むことがさらなる実証的惑星気象研究への道をひらく。