

金星大気循環の 高解像度シミュレーション

榎村 博基 (神戸大/CPS)

共同研究者

杉本 憲彦 (慶應大) 高木 征弘 (京産大) 松田 佳久 (東京学芸大) 大淵 済 (神戸大/CPS)

榎本 剛 (京大・JAMSTEC) 中島 健介 (九大) 石渡 正樹 (北大) 佐藤 隆雄 (宇宙研)

はしもと じょーじ (岡山大) 佐藤 毅彦 (宇宙研・総研大) 高橋 芳幸 (神戸大/CPS) 林 祥介 (神戸大/CPS)

謝辞：金星探査機あかつきに関わる全ての方に感謝申し上げます。本研究は、地球シミュレータ利用課題『AFES を用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション』及び『AFES を用いた火星・金星大気の高解像度大循環シミュレーション』と文部科学省ポスト「京」萌芽的課題3「太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明」の一環として実施しました。

自己紹介 | 榎村 博基

- 専門分野：惑星気象学・大気力学・地球流体力学
- 研究対象：惑星規模の大気の流れ（大気大循環）
- 研究手法：数値実験・シミュレーション解析
- 所属学会：気象学会・惑星科学会・SGEPSS
- これまでの歩み
 - **学生時代@京都大学**
 - ▶ 研究室：気象学研究室 指導教官：余田成男 教授
 - ▶ 博士論文『惑星大気スーパーローテーションの力学に関する研究 -自転軸対称な理論モデルの構築と数値実験-』
 - **金星探査機「あかつき」チーム@宇宙研**
 - ▶ 任期中あかつきはクルージングのみ。カメラは動作せず。
 - ▶ 金星高解像度シミュレーションの解析を始める（継続中）。
 - **気候変動リスク情報創生プロジェクトチーム@JAMSTEC**
 - ▶ 気候工学（ジオエンジニアリング）のシミュレーションデータ解析
 - **ポスト「京」萌芽的課題 惑星大気@神戸大学CPS**
 - ▶ 正二十面体準一様格子の非静力学全球大気モデルSCALE-GMの火星化

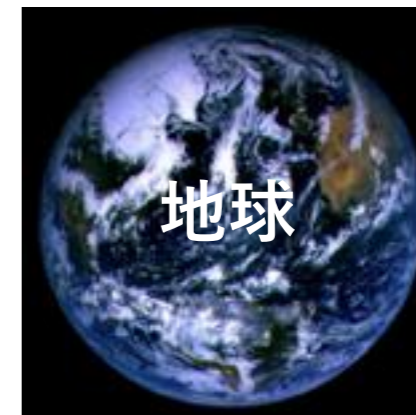
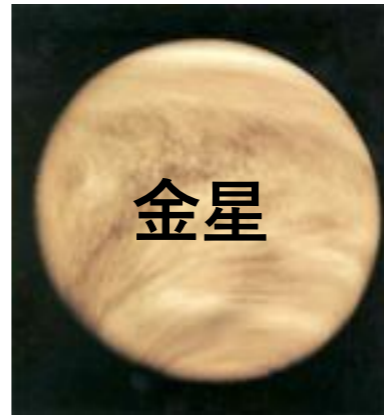
今日のお話

- ① 金星大気循環の特徴
- ② 大気大循環モデル（GCM）による研究
- ③ 金星AFESを用いた高解像度計算
with 金星探査機あかつきの観測

金星大気循環の特徴

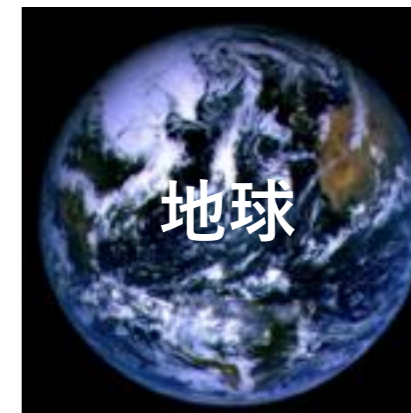
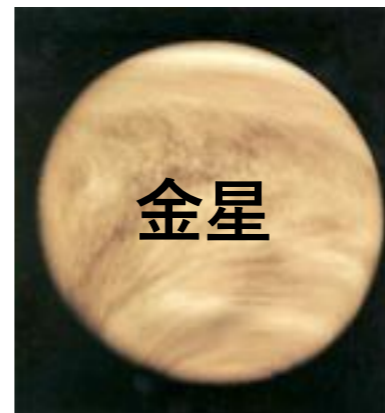
1

金星の特徴



赤道半径	6,052 km	6,378 km
表面重力	8.9 m/s ²	9.8 m/s ²
公転周期	224 日	365 日
自転周期	243 日 (逆向)	1 日
赤道自転速度	1.81 m/s	465 m/s

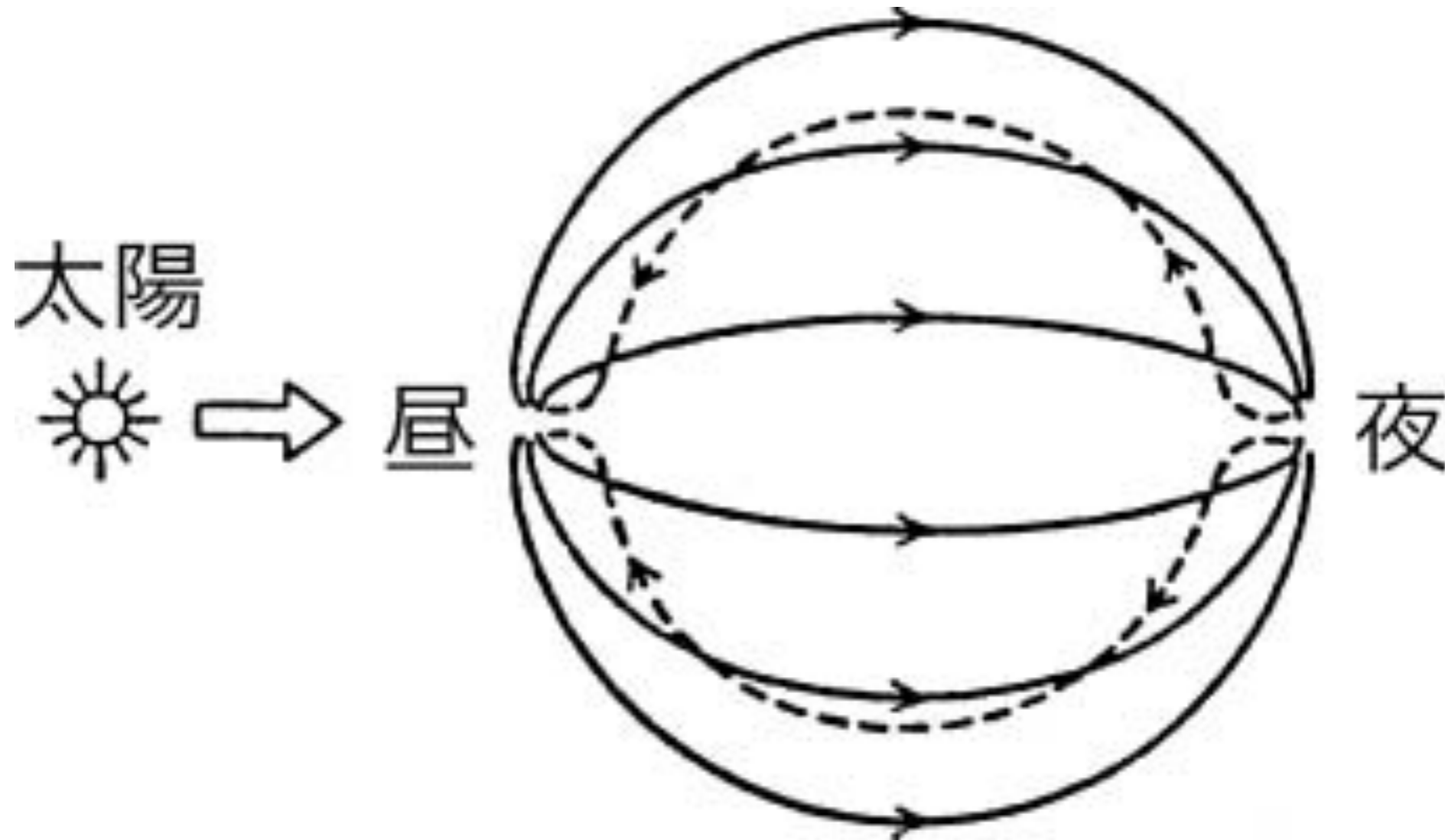
金星大気の特徴



主な大気組成	二酸化炭素	窒素、酸素
地表気圧	92 気圧	1 気圧
平均地表気温	730 K	288 K
凝結成分	硫酸 (全球覆う)	水
惑星アルベド	0.78	0.30
有効放射温度	224 K	255 K

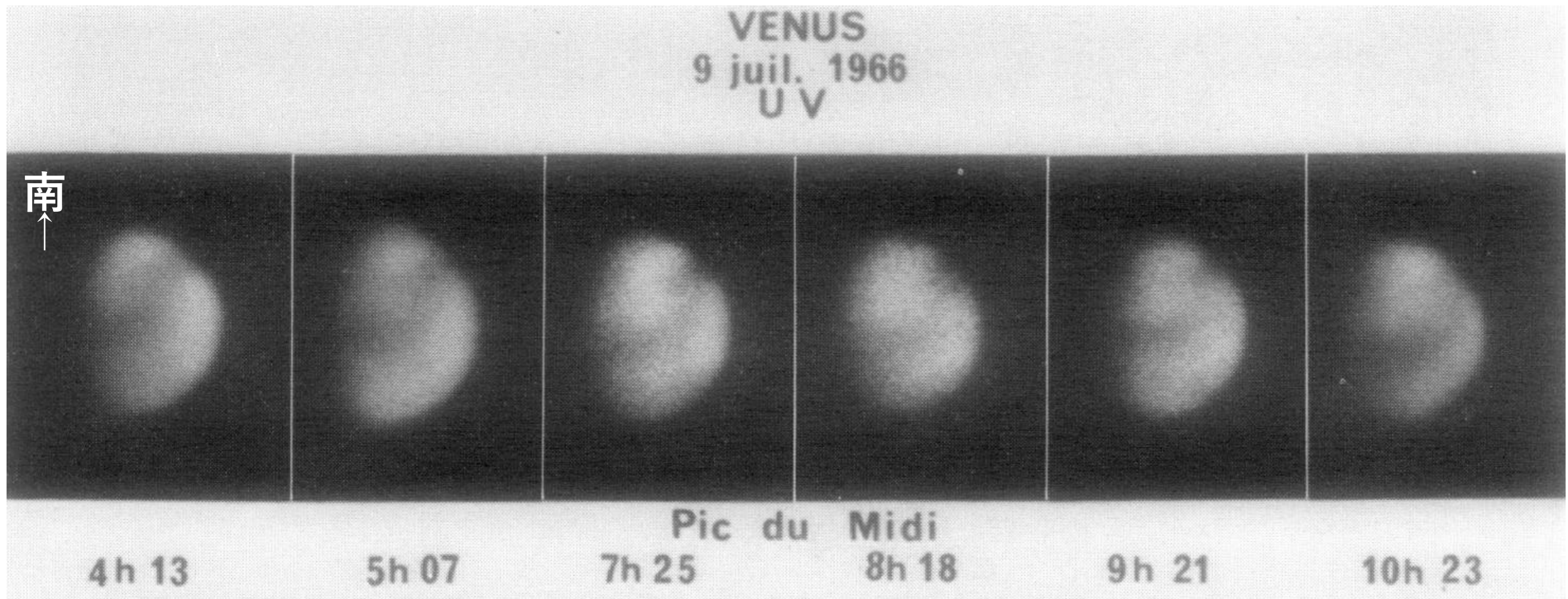
金星大気循環の特徴：昼夜間循環？

- 自転の非常に遅い金星では、昼面（太陽直下点）で上昇し、夜面（対蹠点）で下降する昼夜間対流が卓越すると考えられていた。



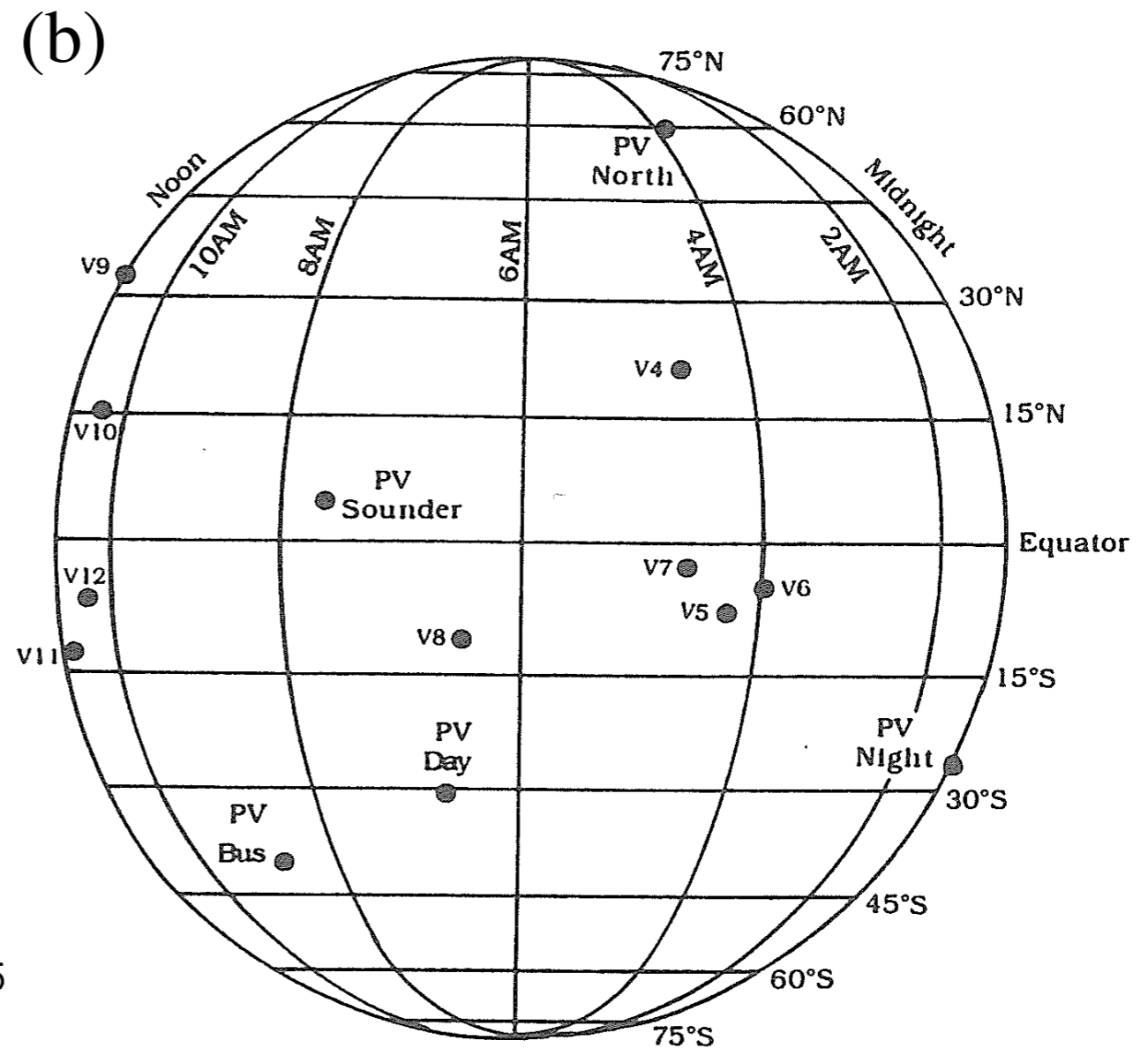
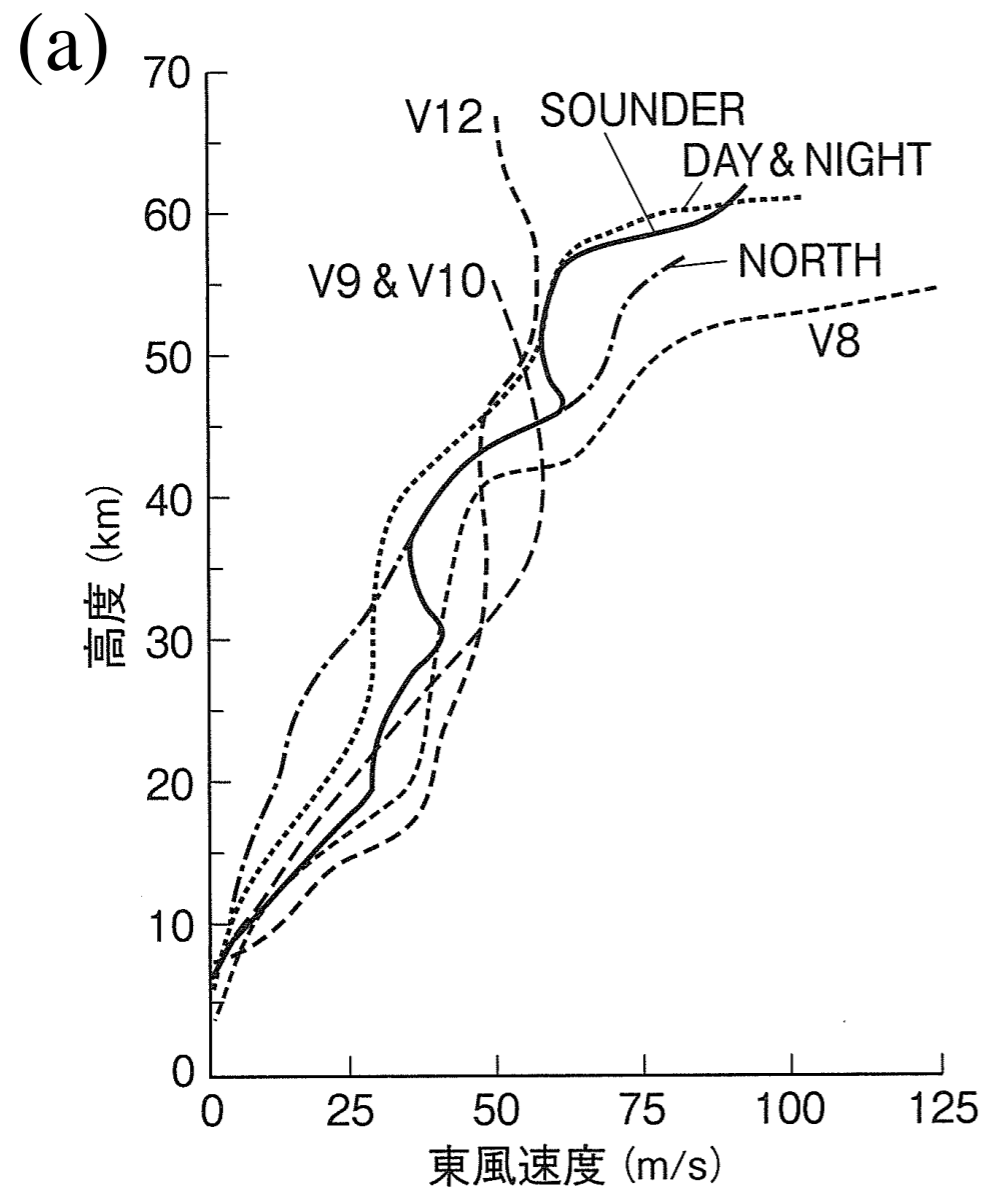
金星大気循環の特徴：スーパーローテーション

- 1960年代のBoyerらによる地上望遠鏡による紫外線観測によって、大気は高速で西向きに回転しており、4日で1周していることが示唆された。
 - 4日循環あるいはスーパーローテーションと呼ばれる。



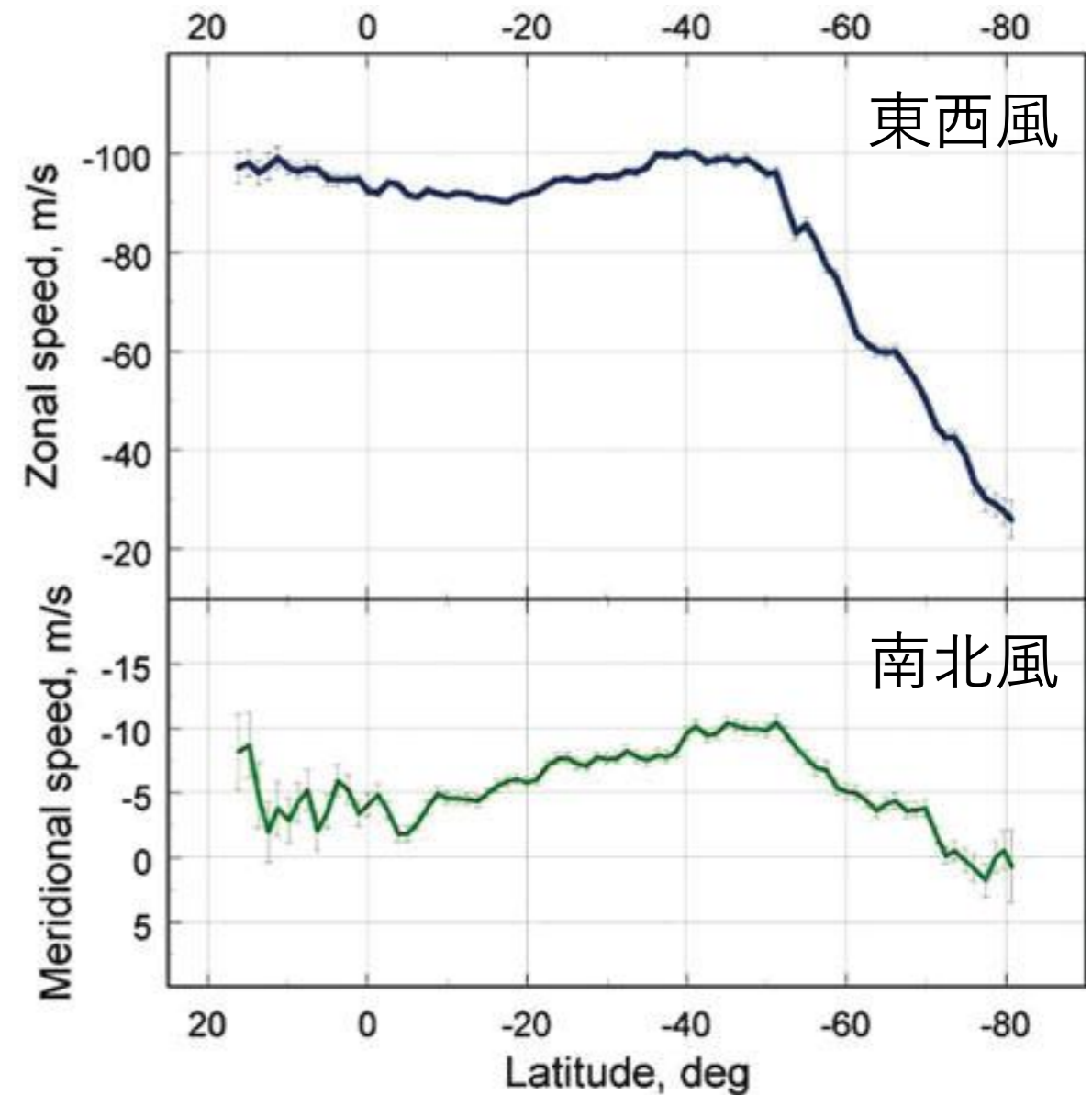
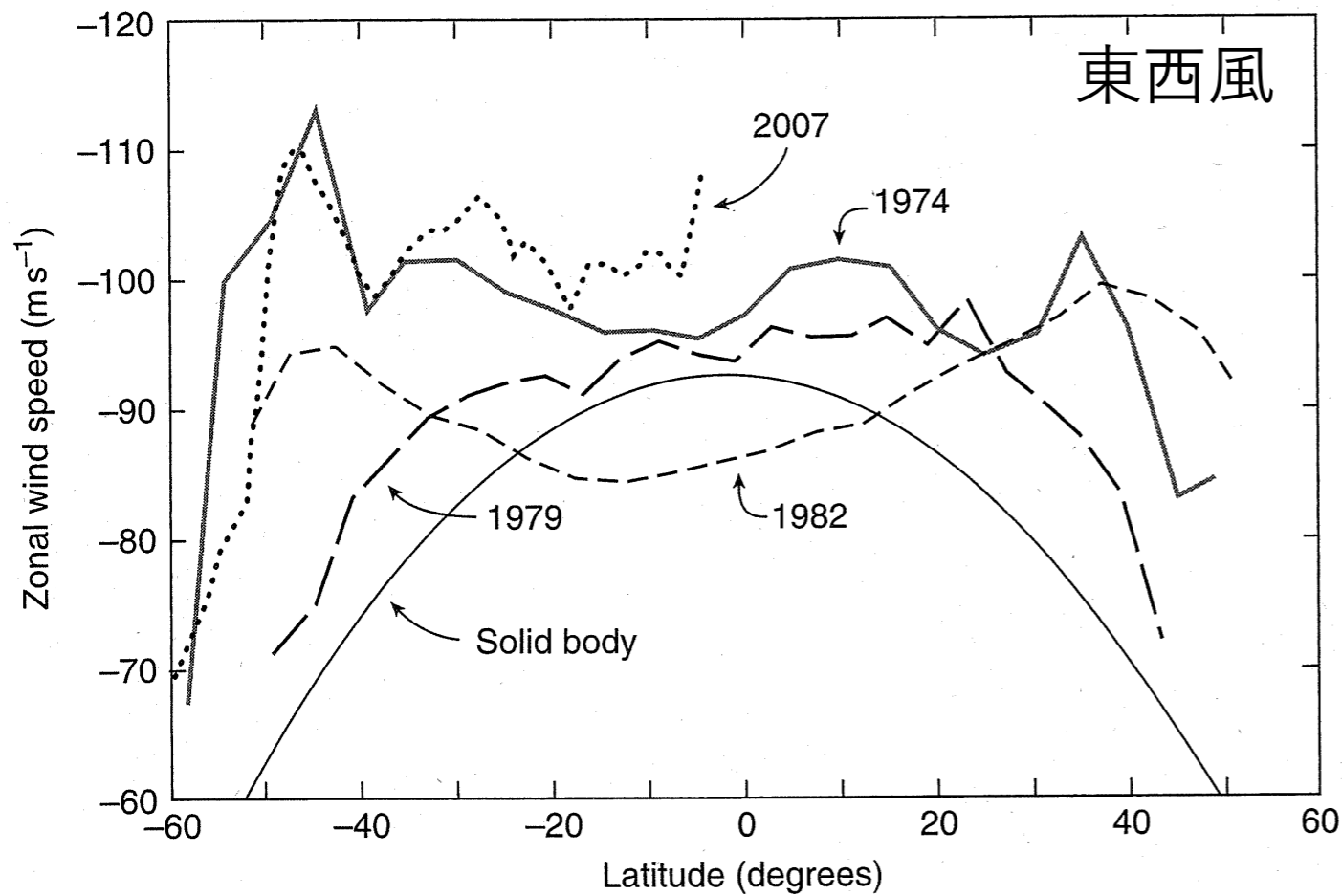
金星大気循環の特徴：スーパーローテーション

- その後、旧ソ連と米国の探査機による直接観測により、様々な緯度や地方時において東風が高度 60 km 付近で 100 m/s に達することが明らかになった。



金星大気循環の特徴：水平風速分布

- また、硫酸雲の濃淡模様を追跡することで、雲層上部（高度約 65 km）の昼面の平均的な水平風速分布が推定されている。

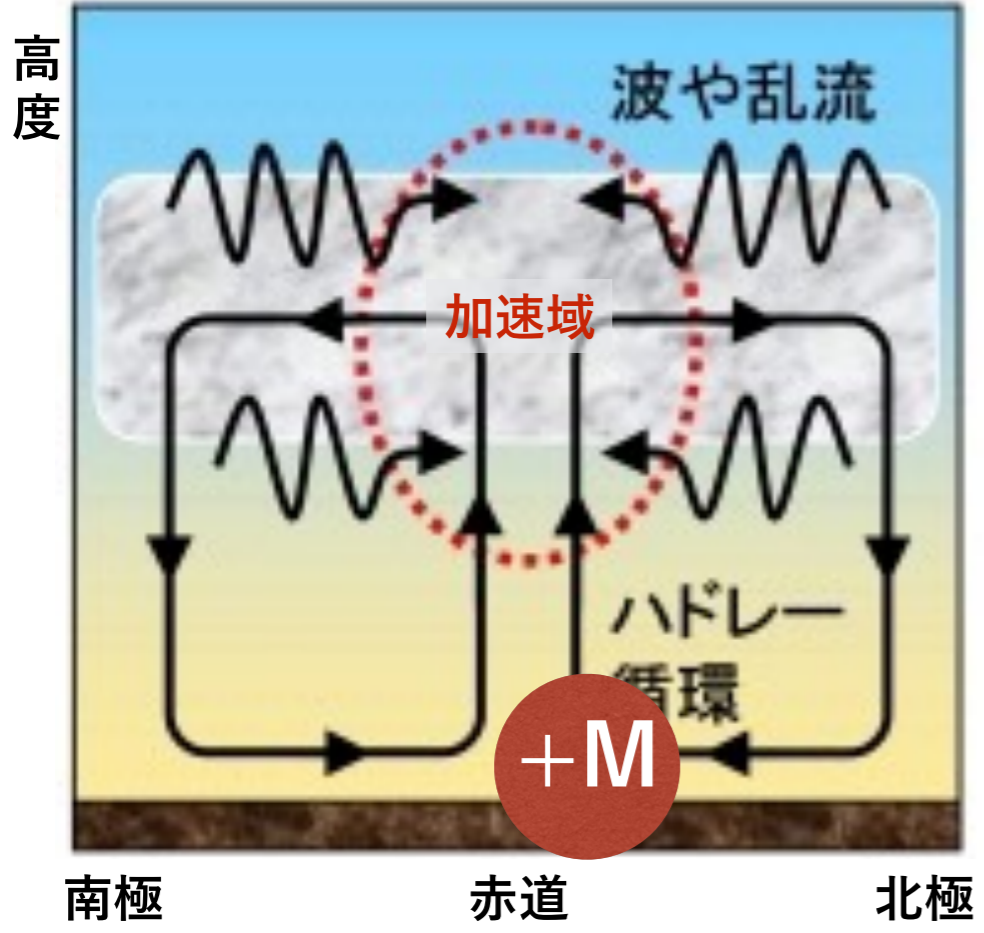


VMC/Venus Express

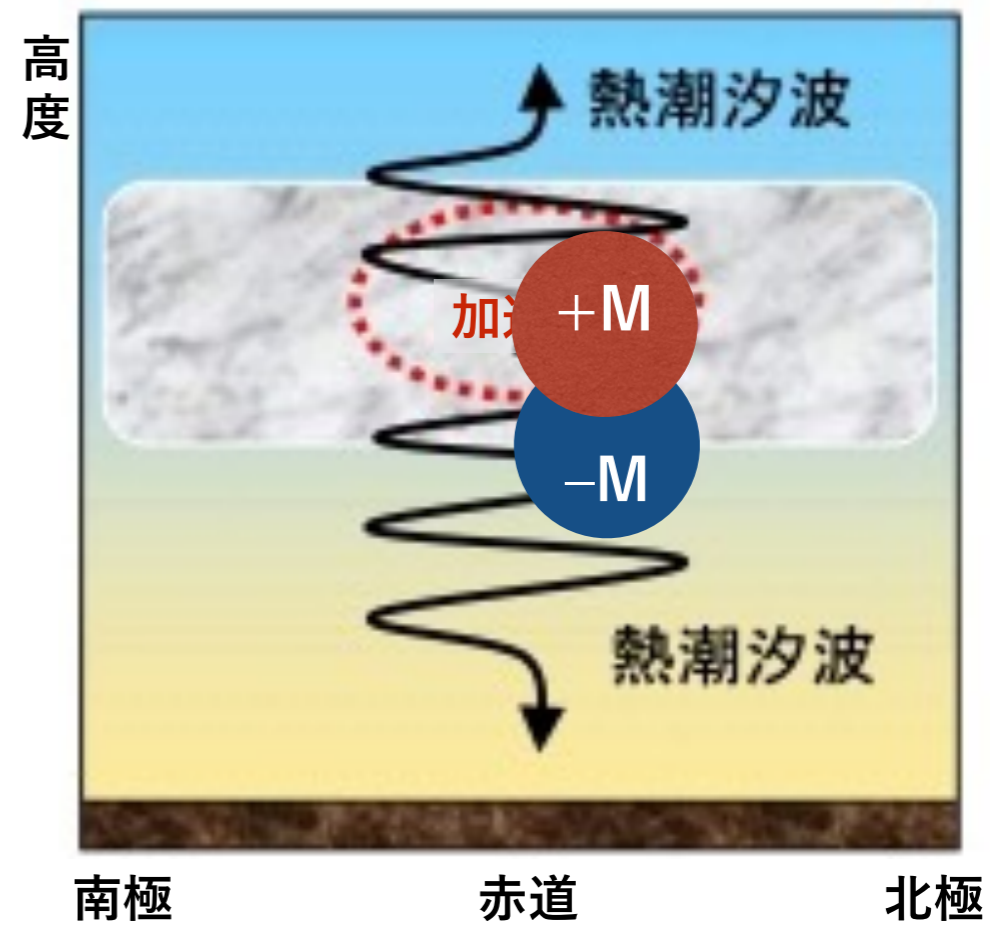
スーパーローテーションの謎と仮説

- 地表面との摩擦・鉛直粘性によって、大気は減速されるはず。
 - 上空に西向き角運動量を供給し続けるメカニズムが必要。
- 提案されている生成・維持メカニズムの仮説

子午面循環に着目した仮説
(Gierasch 1975; Matsuda 1980)



熱潮汐波 (重力波) に着目する仮説
(Fels & Lindzen 1974; Takagi & Matsuda 2005)



- 子午面循環、波や乱流、熱潮汐波の詳細を観測的に求めることは難しい。
 - ➡ 数値シミュレーションによる研究

今日のお話 | ここまでのまとめ

① 金星大気循環の特徴

- 金星は、自転が遅くて、空気が濃く、全球雲で覆われている
- 大気は自転より約60倍も速く回転 = スーパーローテーション
- 子午面循環 説 と 熱潮汐波 説 の 2 つ の 仮 説

② 大気大循環モデル (GCM) による研究

③ 金星AFESを用いた高解像度計算 with 金星探査機あかつきの観測

大気大循環モデルによる研究

2

大気大循環モデルとは

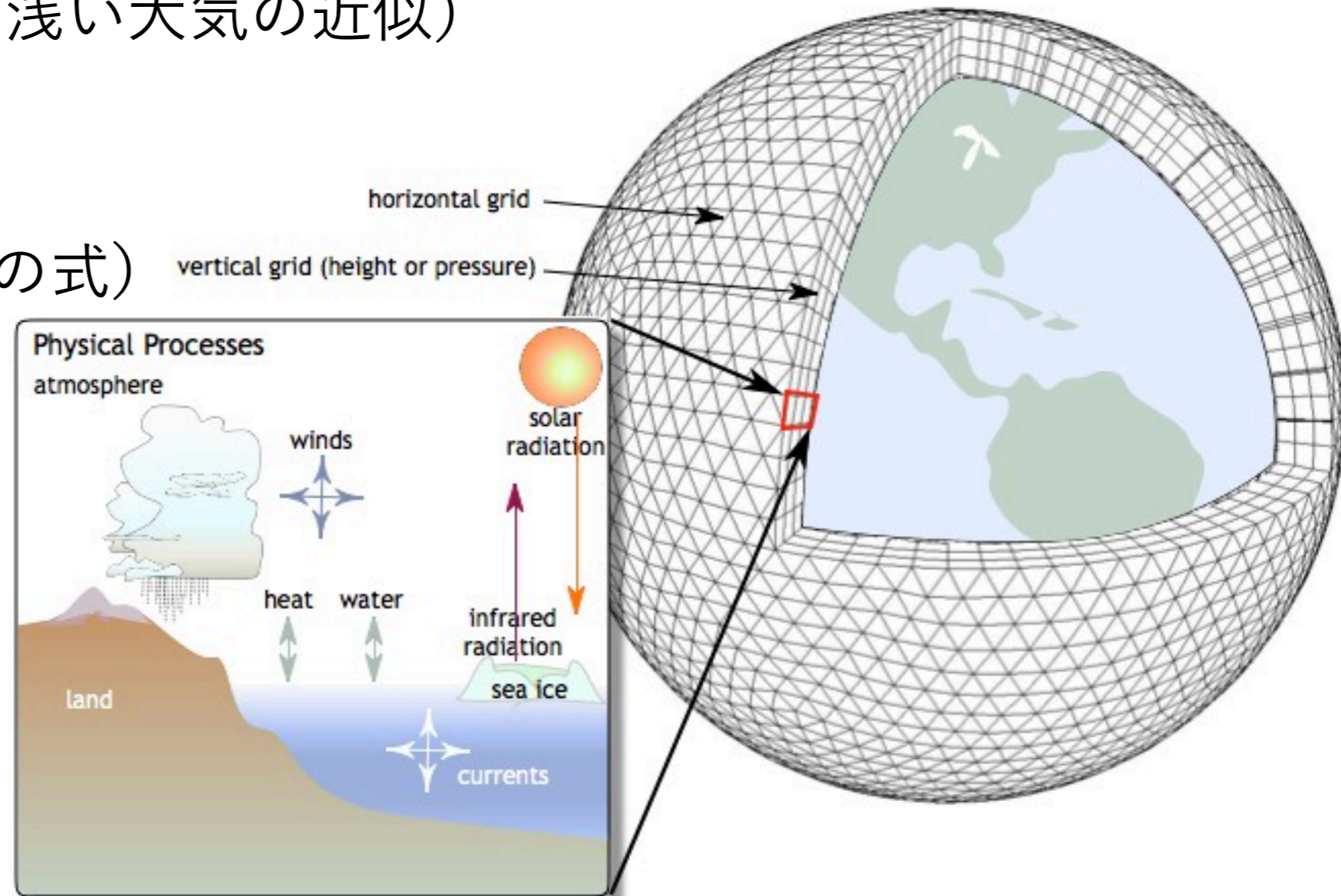
- 球面上の大気の支配方程式（微分方程式）を数値的に解くモデル

- 力学過程（力学コア）

- ▶ 運動方程式（ナビエストークス方程式）
 - （+ 静力学近似 + 浅い大気の近似）
- ▶ 熱力学方程式
- ▶ 物質移流の式
- ▶ （状態方程式、連続の式）

- 物理過程

- ▶ 放射
- ▶ 対流調節
- ▶ 凝結・雲過程
- ▶ 化学
- ▶ エアロゾル微物理
- ▶ などなど



- （海洋を含む場合は大気海洋結合モデル、植生や炭素循環なども含む場合は地球システムモデルと呼ばれる）

力学コアの数値解法

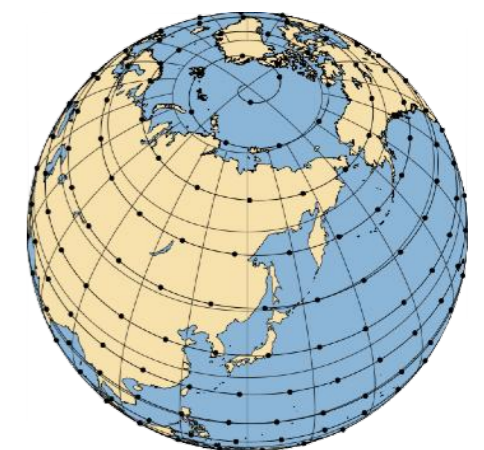
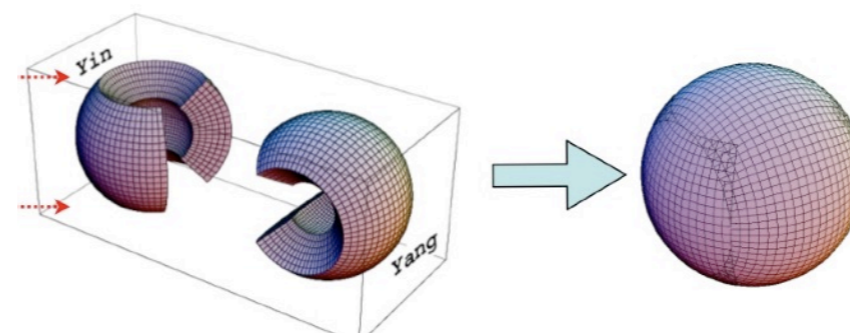
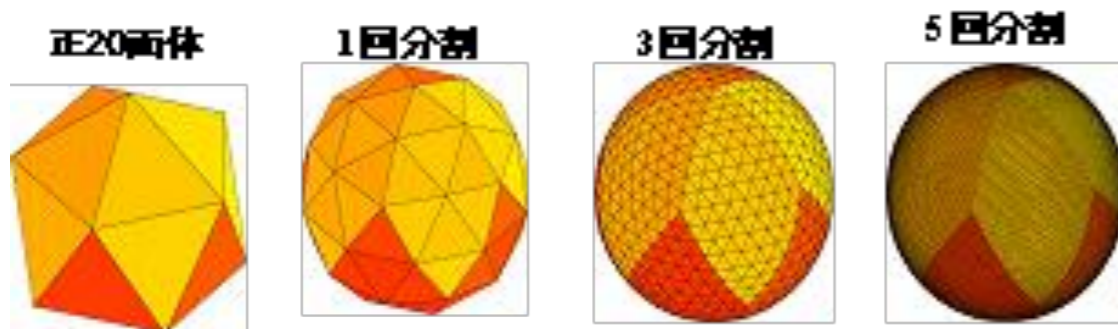
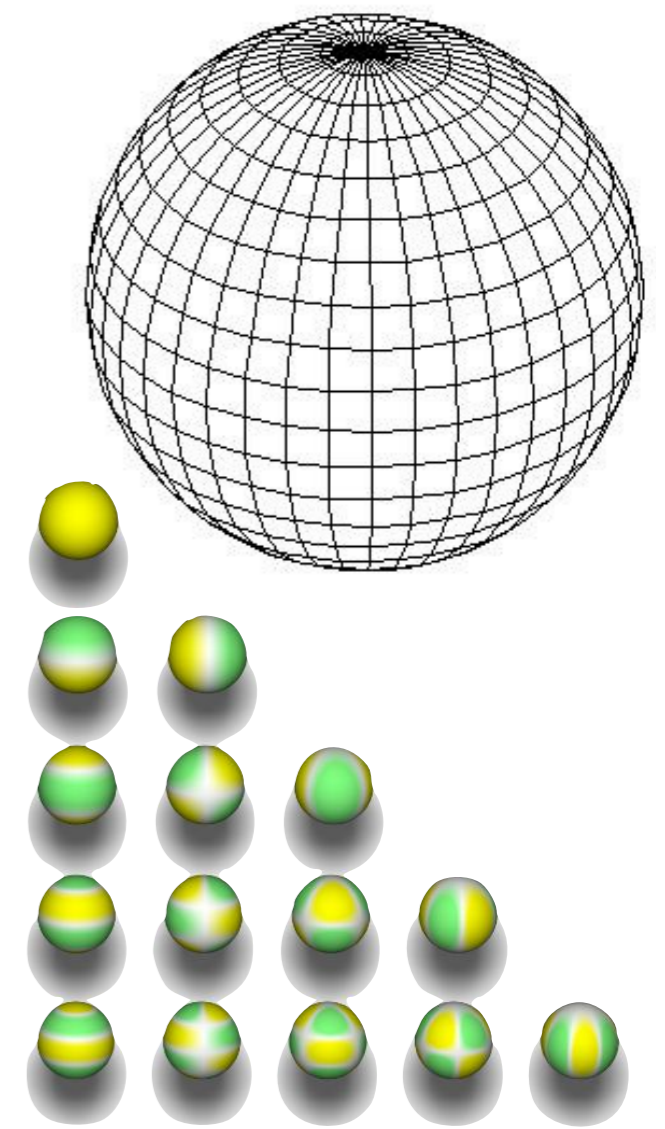
- 単純な緯度-経度格子は格子間隔が不均一。
特に、極付近で狭くなる → CFL条件が厳しくなる。

- **スペクトルモデル**

- 球面調和関数で展開して、波数空間上で時間積分。
(非線形項は実空間で計算)
- 解像度は最大波数 (切断波数) で指定する。
 - ▶ T21, T42, T63, T159, ...

- **格子モデル**

- 球面上の格子点の取り方を工夫することで、準一様な格子を形成。
 - ▶ 例) 正二十面体準一様格子 Yin-Yang 格子 球面螺旋格子



金星大気GCM計算の難しさ

地球大気と比べて

- **密度が高い**

- 放射緩和時間が長い | 地球 ~ 50 地球日 ; 金星 ~ 2 万 地球日

- **自転が遅い**

- 角運動量供給が遅い | 地球 $\sim 3 \times 10^9$; 金星 $\sim 1 \times 10^7$ [$\text{m}^2/\text{s}/\text{cycle}$]*

➔ 静止状態から (統計的) 平衡状態に達するまで、長期間の積分が必要

- 地衡流平衡 (コリオリ力と気圧傾度力のバランス) ではない

➔ (地球大気で有用な) 準地衡モデルが使えない

- **観測が少ない**

➔ 子午面循環場の検証が行えない

➔ 物理過程 (スキーム) の検証が行えない

金星大気GCM研究の歩み

- 動機：スーパーローテーションの再現・メカニズムの解明
- 20世紀：変わり者(?)がたまたまに実施
 - Kalnay de Rivas (1975)：東西波数 4 までの準自転軸対称モデル
 - Young & Pollack (1977)：切断波数 10、積分時間が不足
 - Rossow & Williams (1980)：水平 2 次元モデル
 - Matsuda (1982)：少数モード展開モデル（多重解を示す）
 - Del Genio & Zhou (1996)：地球GCMで自転を遅くした計算
- ✓ 解像度や時間積分の不足・理想化された設定
 - ➡ **金星大気シミュレーションというよりは、
スーパーローテーションメカニズムの仮説の数値的研究**
- ▶ 私のD論 [Yamamoto (Kashimura) & Yoden 2013, 2015] もこれらに近い
 - 自転軸対称 2 次元モデル、ブシネスク流体、パラメータスイープ

金星大気GCM研究の歩み

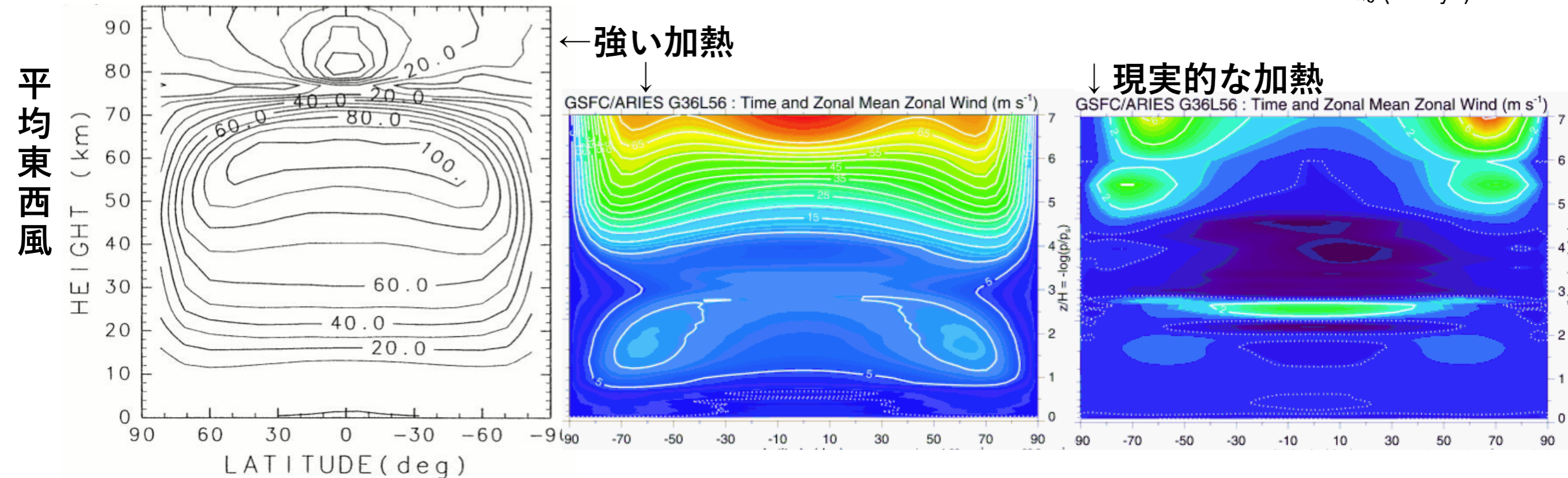
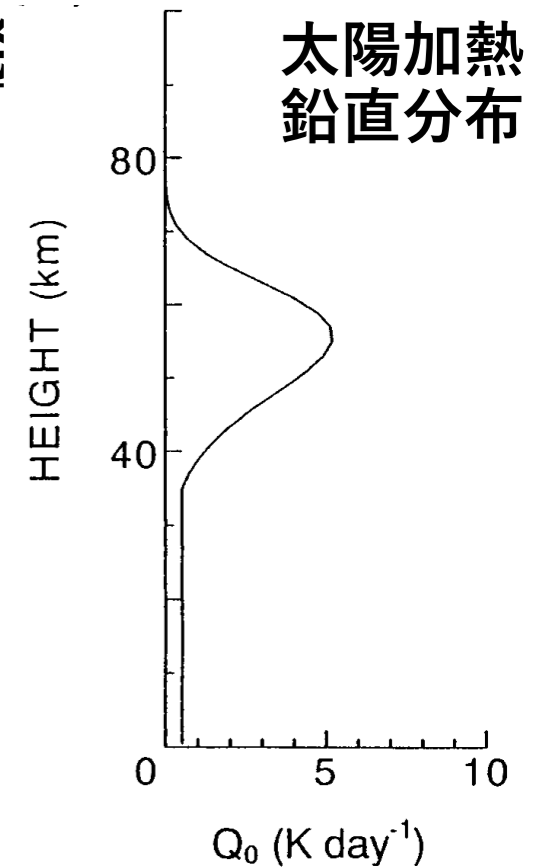
• 2000年代：金星大気GCMの開発・研究が世界各国で活発

- 日本：Yamamoto & Takahashi (2003a,b, 2004, 2006)
- 英国：Lee et al. (2005, 2007), Lee (2006)
- 米国：Hollingsworth et al. (2007)

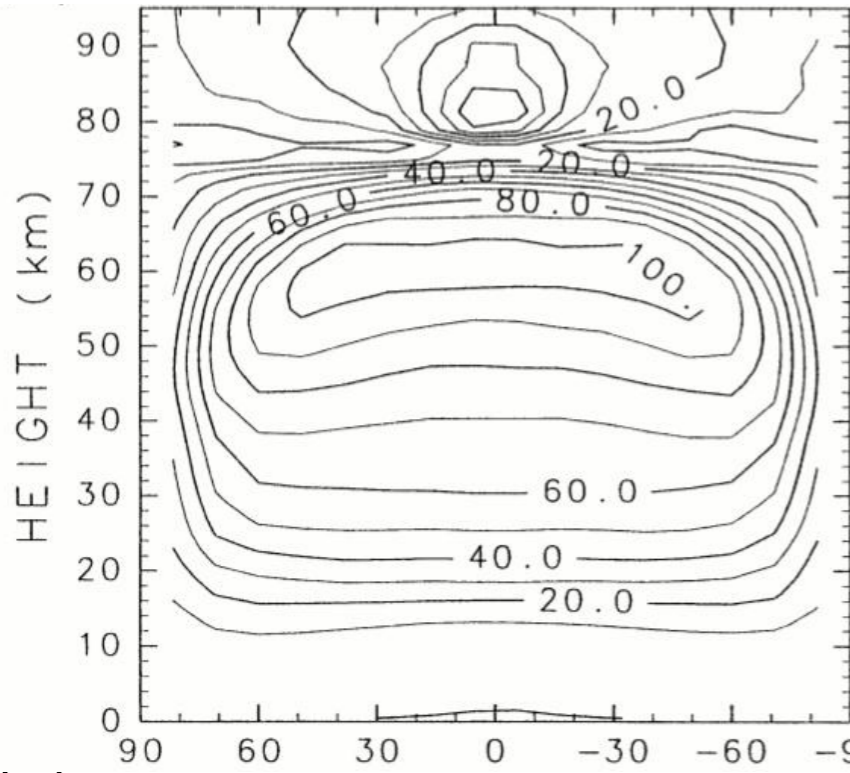
✓ 3次元GCMではあるものの、ほぼ力学のみのモデル
放射強制はニュートン冷却と太陽加熱関数で与える

➔ **スーパーローテーションの生成・維持に成功**

✓ **ただし、下層に非現実的に強い加熱が必要**

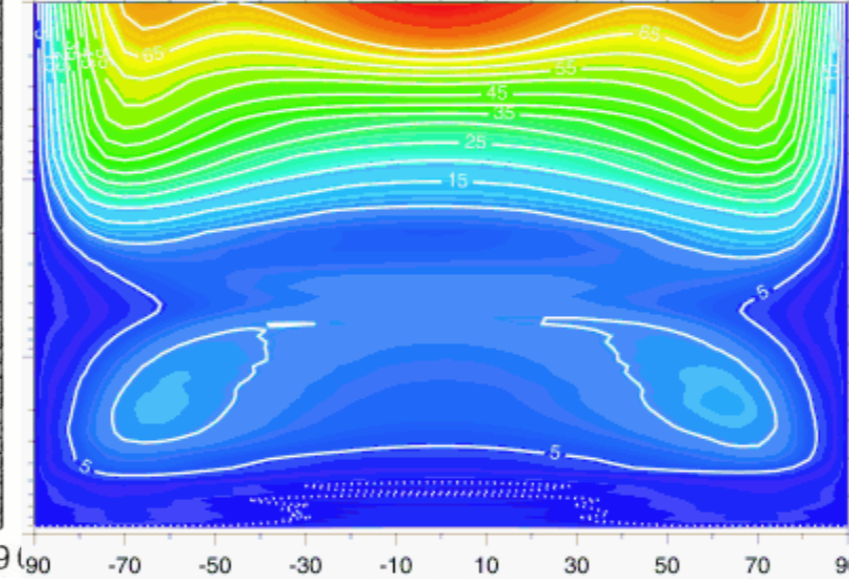


平均東西風



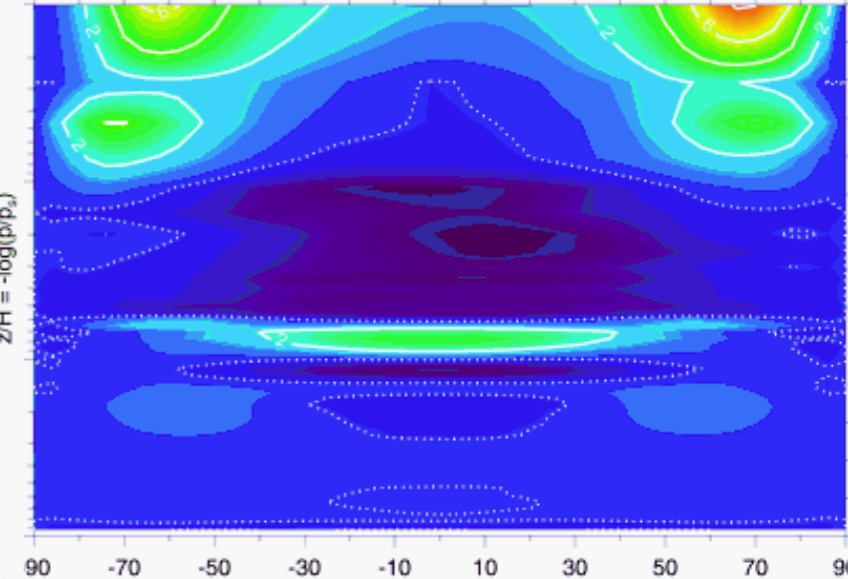
← 強い加熱

GSFC/ARIES G36L56 : Time and Zonal Mean Zonal Wind (m s⁻¹)

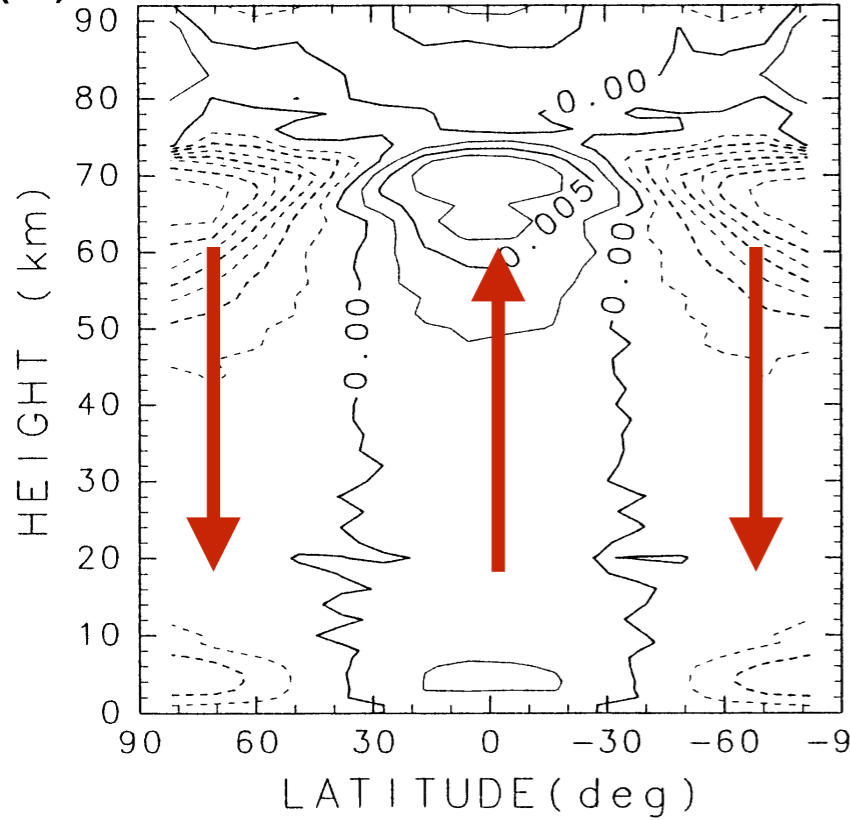


↓ 現実的な加熱

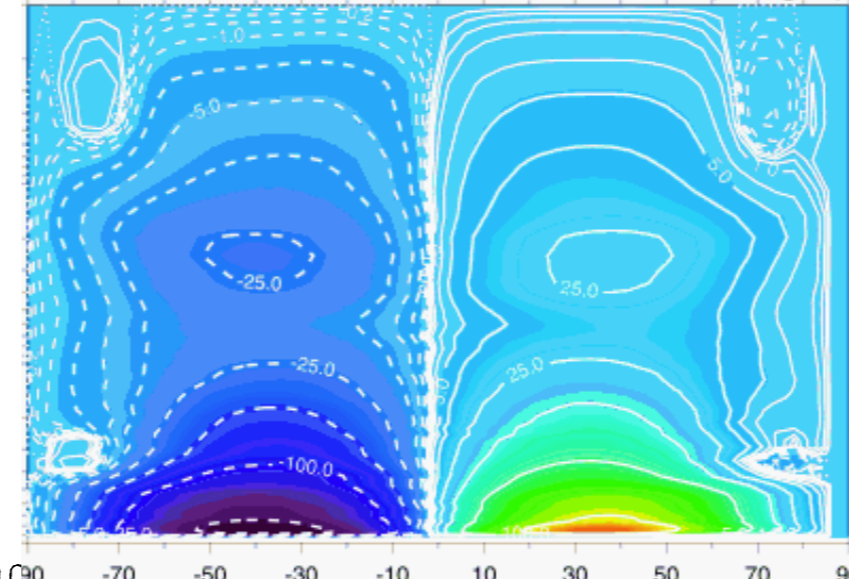
GSFC/ARIES G36L56 : Time and Zonal Mean Zonal Wind (m s⁻¹)



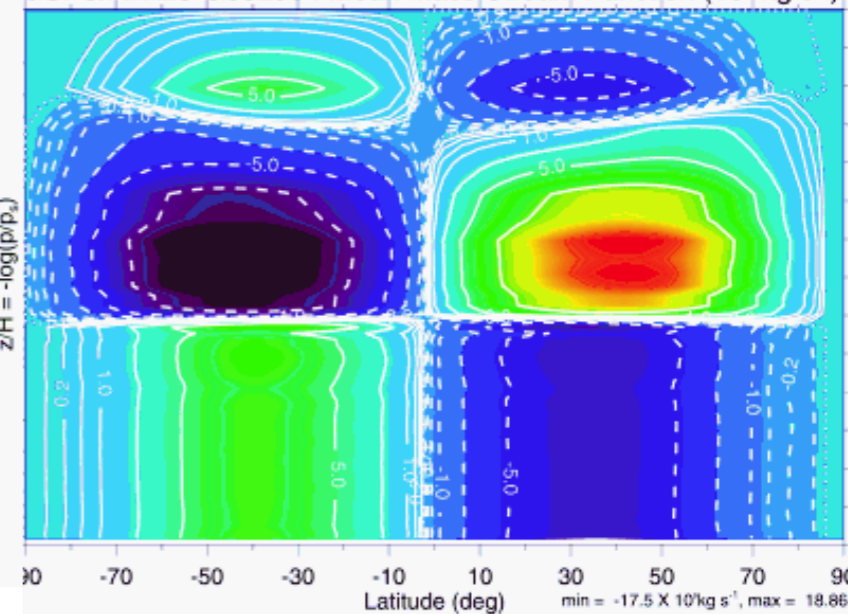
平均鉛直流 / 子午面循環



GSFC/ARIES G36L56 : Mean Mass Stream Function (10⁹ kg s⁻¹)



GSFC/ARIES G36L56 : Mean Mass Stream Function (10⁹ kg s⁻¹)



- 強い加熱を与えれば、GCMで「子午面循環仮説」が働くことを示した。
 - ただし、これらは日変化加熱（熱潮汐）を排除した設定。

金星大気GCM研究の歩み

• 2000年代：金星大気GCMの開発・研究が世界各国で活発化

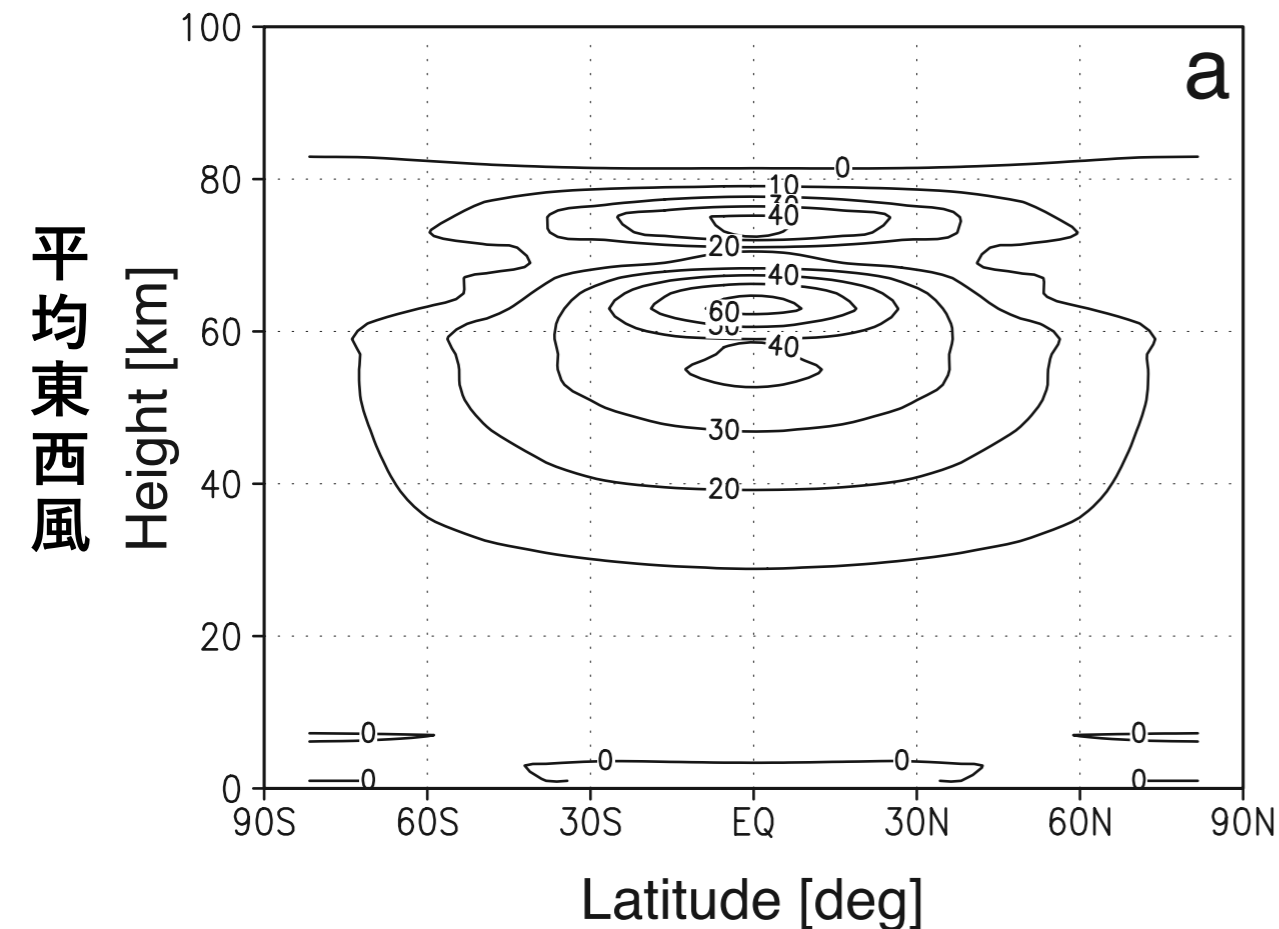
- 日本：Takagi & Matsuda (2007)

▶ モデルの複雑さは前頁のモデルと同様。

▶ 南北加熱差を排除して、日変化加熱のみを与えた。

✓ 「熱潮汐波仮説」によりスーパーローテーションが生成しうることを示した。

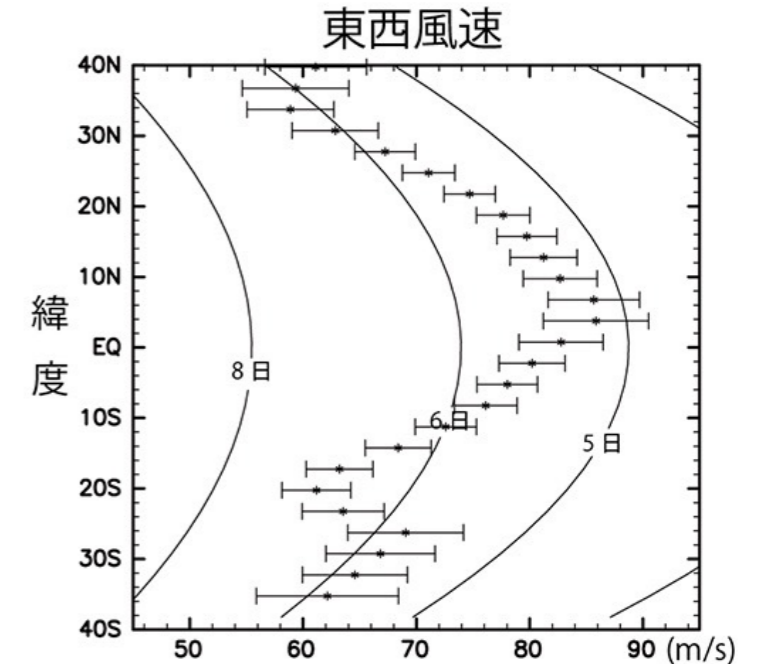
✓ 東西風分布は、赤道に風速が集中しており、現実的でない？



【最近のあかつき観測】

雲層下層に赤道ジェットが存在するときもある

IR2カメラで撮影した画像の雲追跡により確認。



金星大気GCM研究の歩み

• 2010年代：計算資源が潤沢に

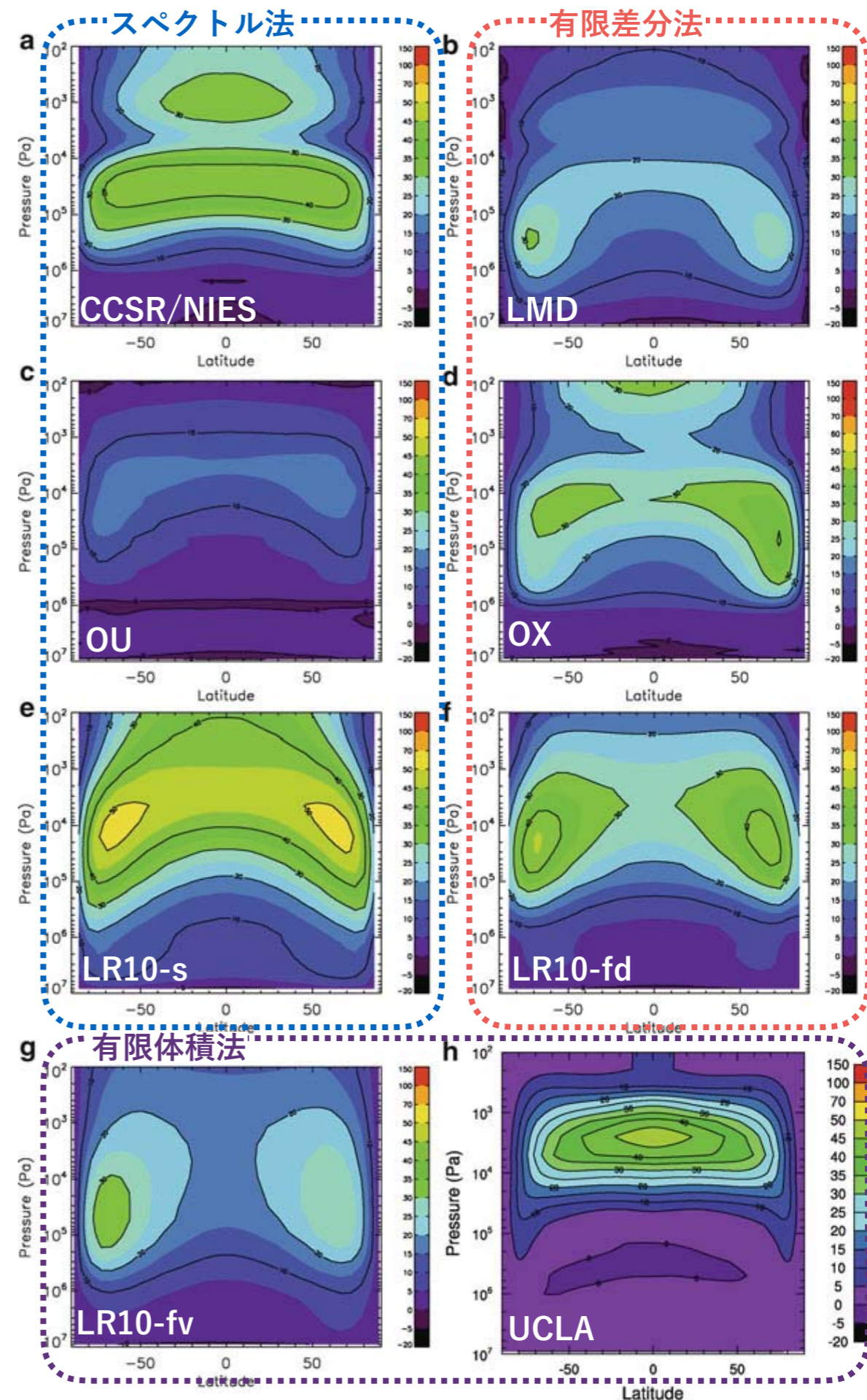
- Lee & Richardson (2010)
- Lebonnois et al. (2013)

▶ 複数のGCM/力学コアによる相互比較実験

- ▶ 水平解像度は $5^\circ \times 5^\circ$ 程度
- ▶ ほぼ力学のみ
- ▶ ニュートン加熱冷却
- ▶ 日変化加熱なし

➔ 拡散表現や数値解法に依存して、数値解が大きく異なる結果に！

平均東西風



金星大気GCM研究の歩み

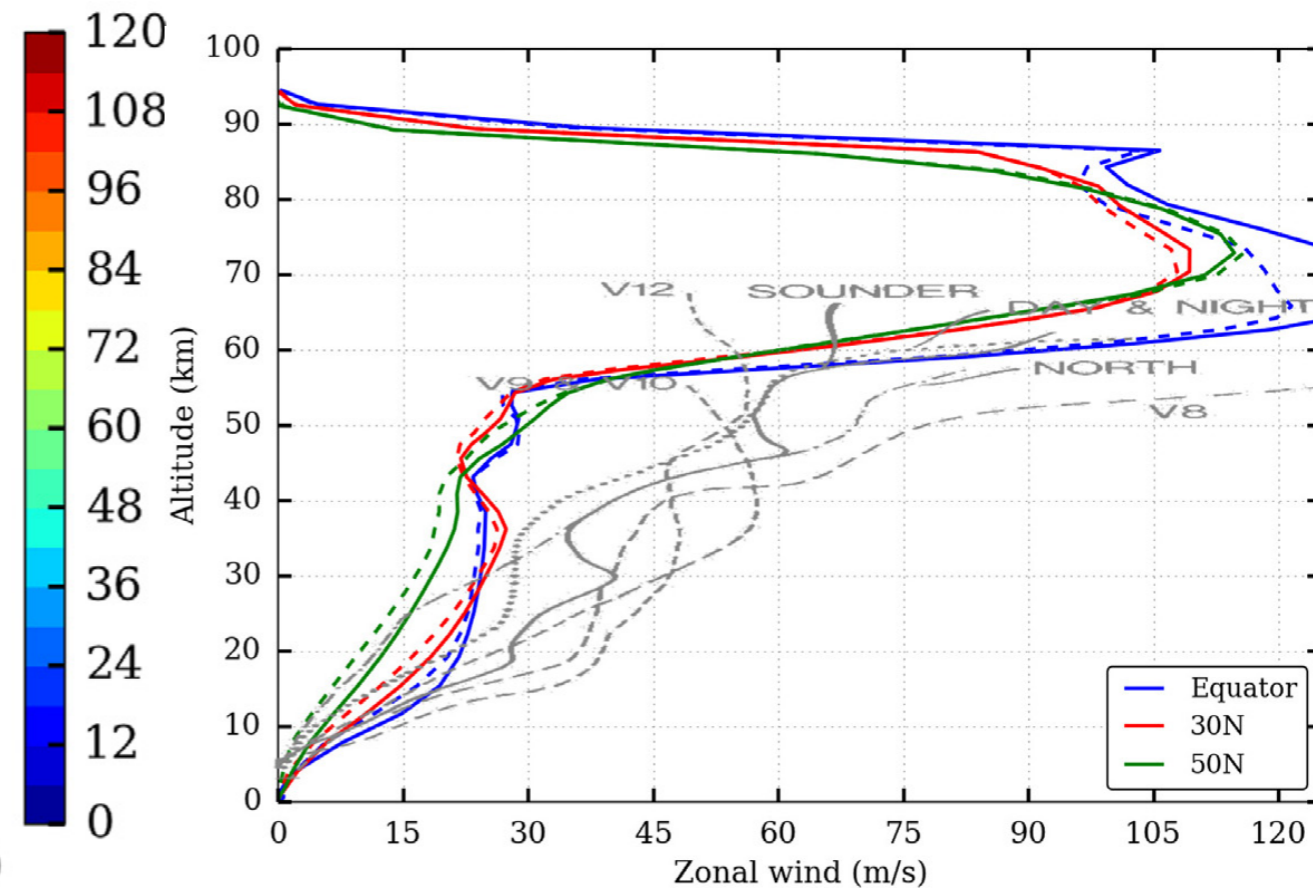
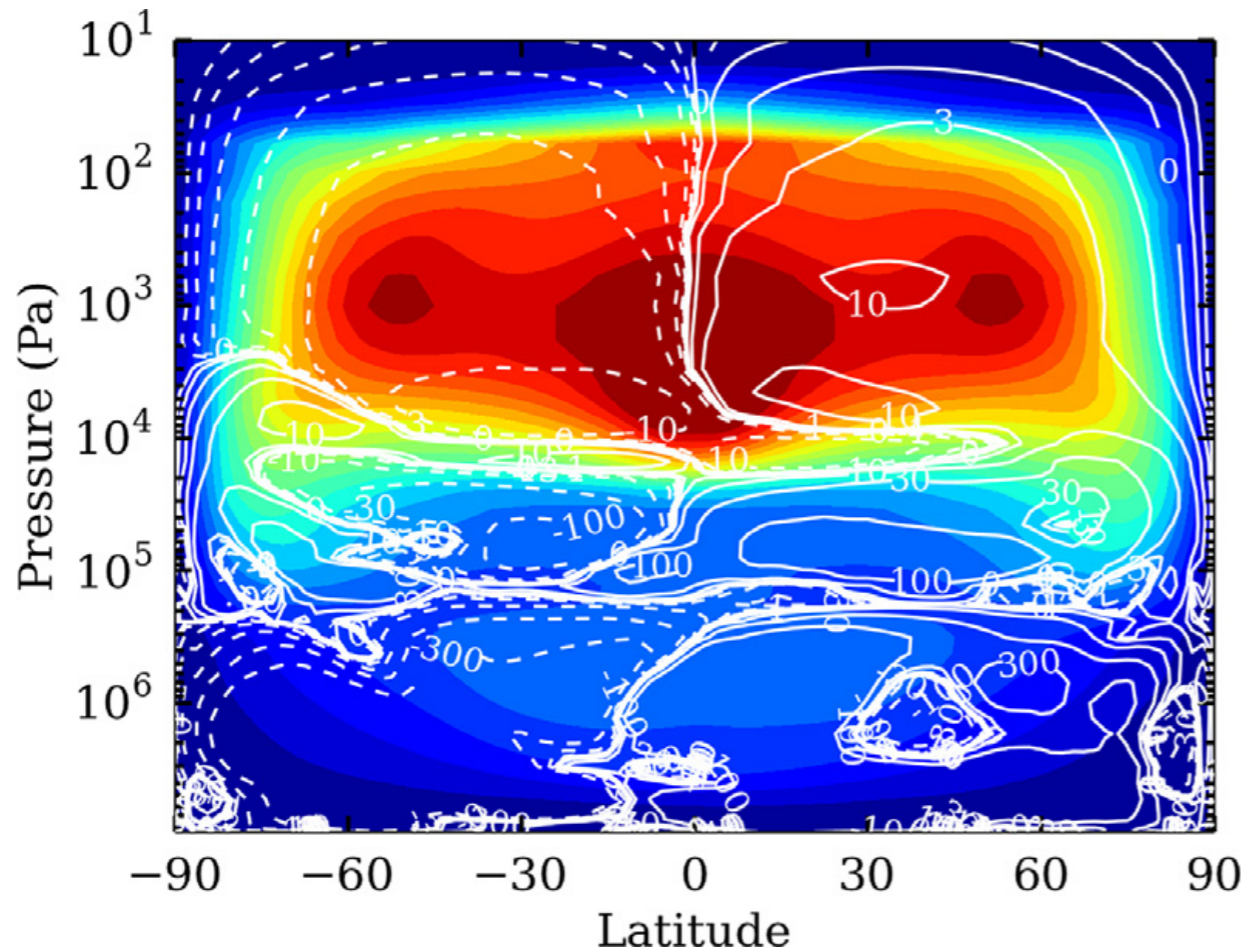
- 2010年代：計算資源が潤沢に

- Ikeda et al. (2011)
- Lebonnois et al. (2010, 2016)

- ▶ **放射伝達をまじめに計算 / 日変化・地形含む**

➡スーパーローテーションが生成・維持されるが、
大気下層の東西風速が小さすぎる

平均東西風



金星大気GCM研究の歩み

- 2010年代：計算資源が潤沢に

- Kashimura et al. (in prep, in prep)

- ▶ based on Sugimoto et al. (2014a,b), Ando et al. (2016, 2017)

- ▶ **高解像度計算**

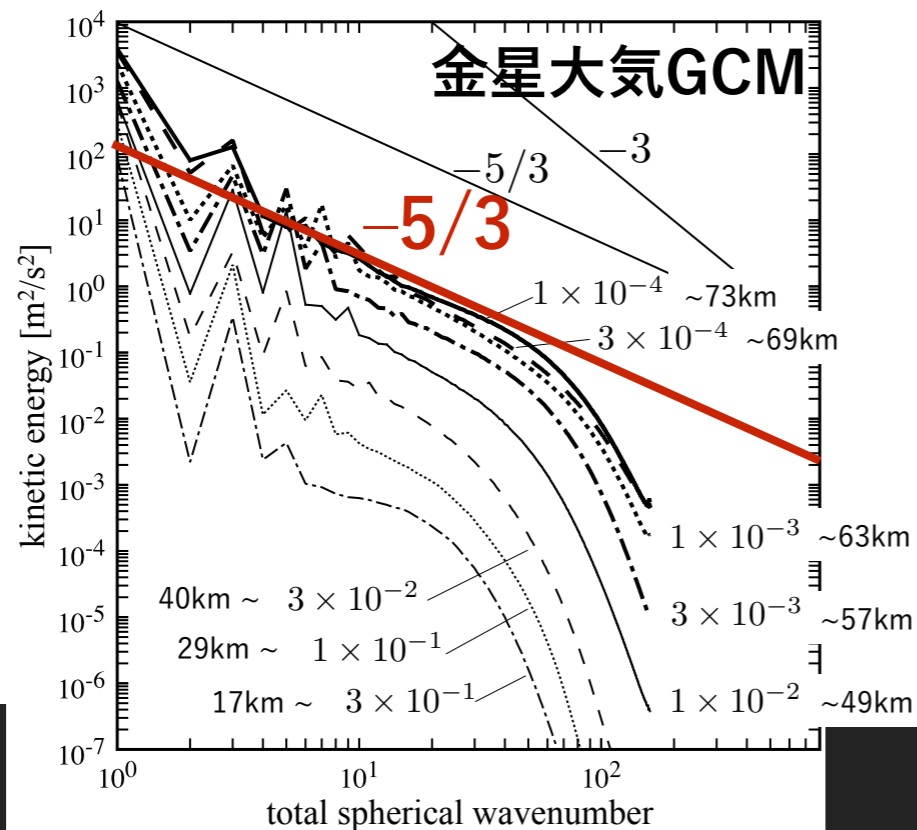
- ▶ ニュートン冷却 + 太陽放射関数 (現実的な強さ)

- ▶ 初期にスーパーローテーション流を与える

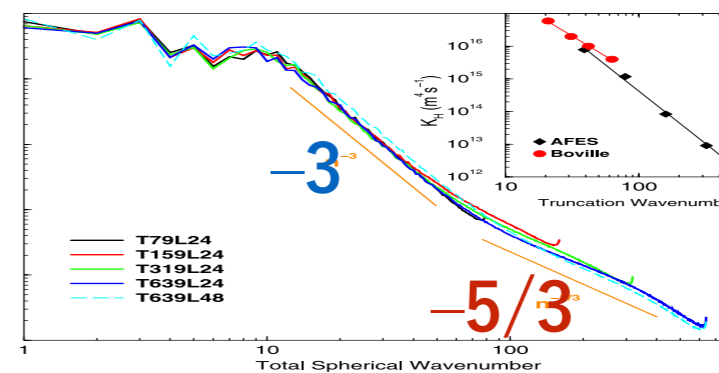
- ▶ 循環場で見られる、諸現象を解析

- ✓ 波動、周極低温域、ストリーク構造 (あとで詳しく)

- ✓ 運動エネルギースペクトル → $-5/3$ 乗則が低波数まで



地球大気GCM



今日のお話 | ここまでのまとめ

① 金星大気循環の特徴

- ・ 金星は、自転が遅くて、空気が濃く、全球雲で覆われている
- ・ 大気は自転より約60倍も速く回転 = スーパーローテーション
- ・ 子午面循環 説 と 熱潮汐波 説 の 2 つ の 仮 説

② 大気大循環モデル (GCM) による研究

- ・ 長期積分が必要・観測が少ない = 金星大気計算の難しさ
- ・ 2000年代までは力学モデル、なのにモデル間のバラツキ 大
- ・ 2010年以降、モデル間相互比較・高度複雑化・高解像度化

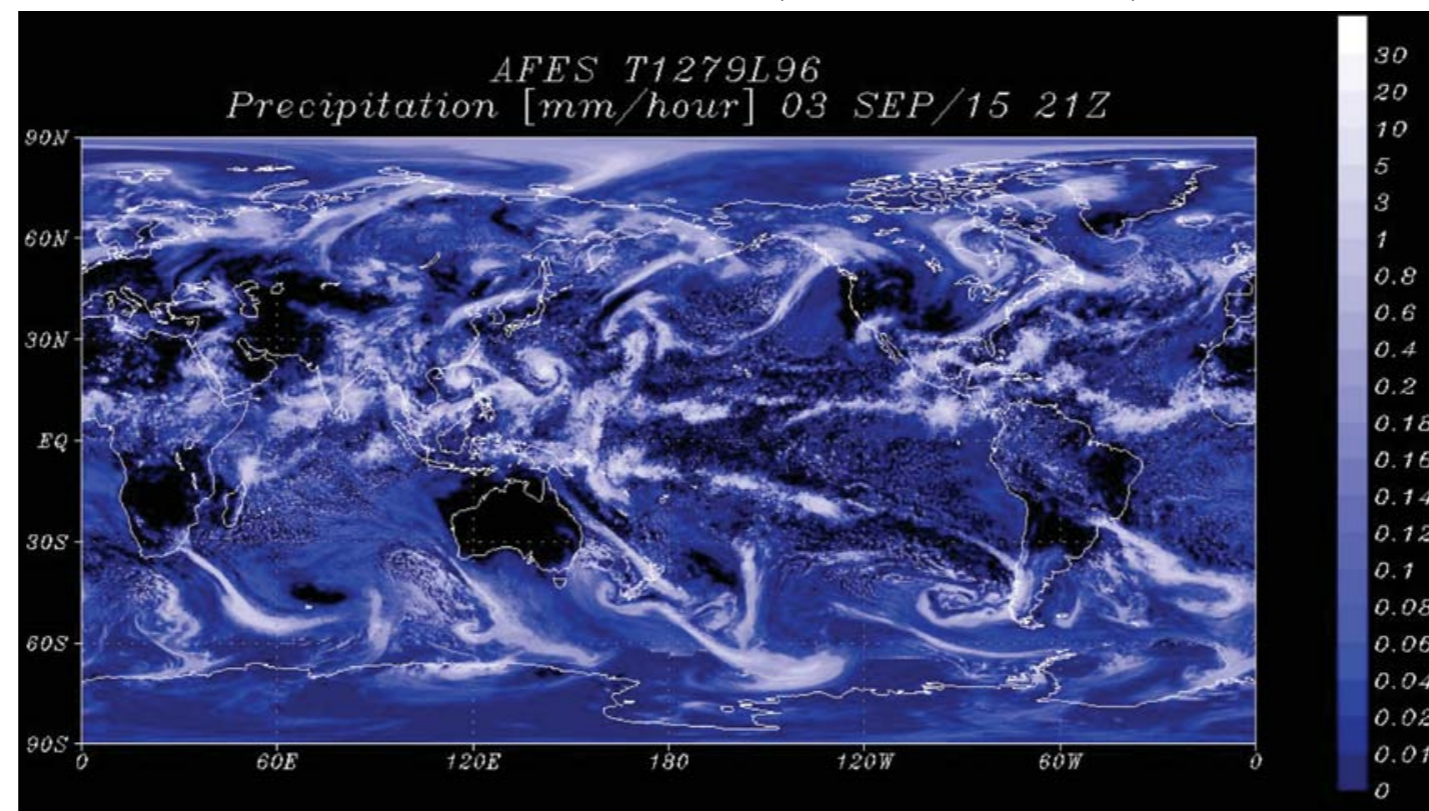
③ 金星AFESを用いた高解像度計算 with 金星探査機あかつきの観測

金星AFESによる高解像度計算
with 金星探査機あかつきの観測

3

AFESとは？

- AFES = Atmospheric GCM For the Earth Simulator
(Ohfuchi et al. 2004; Enomoto et al. 2008)
 - 地球シミュレータ (ES) に最適化された地球仕様の大気大循環モデル
 - 静力学近似を用いたナビエ-ストークス方程式 (プリミティブ方程式) を解く
 - 球面調和関数展開を利用したスペクトルモデル
 - 1998年から初代ESをターゲットとして開発が始まり、
2003年に全球10km格子・鉛直96層 (T1279L96) の高解像度計算を実現。



- 初代ESの全システムを使って、ピーク性能比65% (26.58TFLOPS) を達成。

金星AFESとは？

- 地球シミュレータ公募課題 (↓代表はいずれも林祥介教授)
『AFES を用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション』(2006–2014)
『AFES を用いた火星・金星大気の高解像度大循環シミュレーション』(2015–)
のもとで、AFESを金星化したもの。(開発は高木征弘准教授、杉本憲彦准教授)
- ほぼ力学モデル。2000年代の金星GCMと同じ。
- さまざまな解像度で計算を実施してきた。

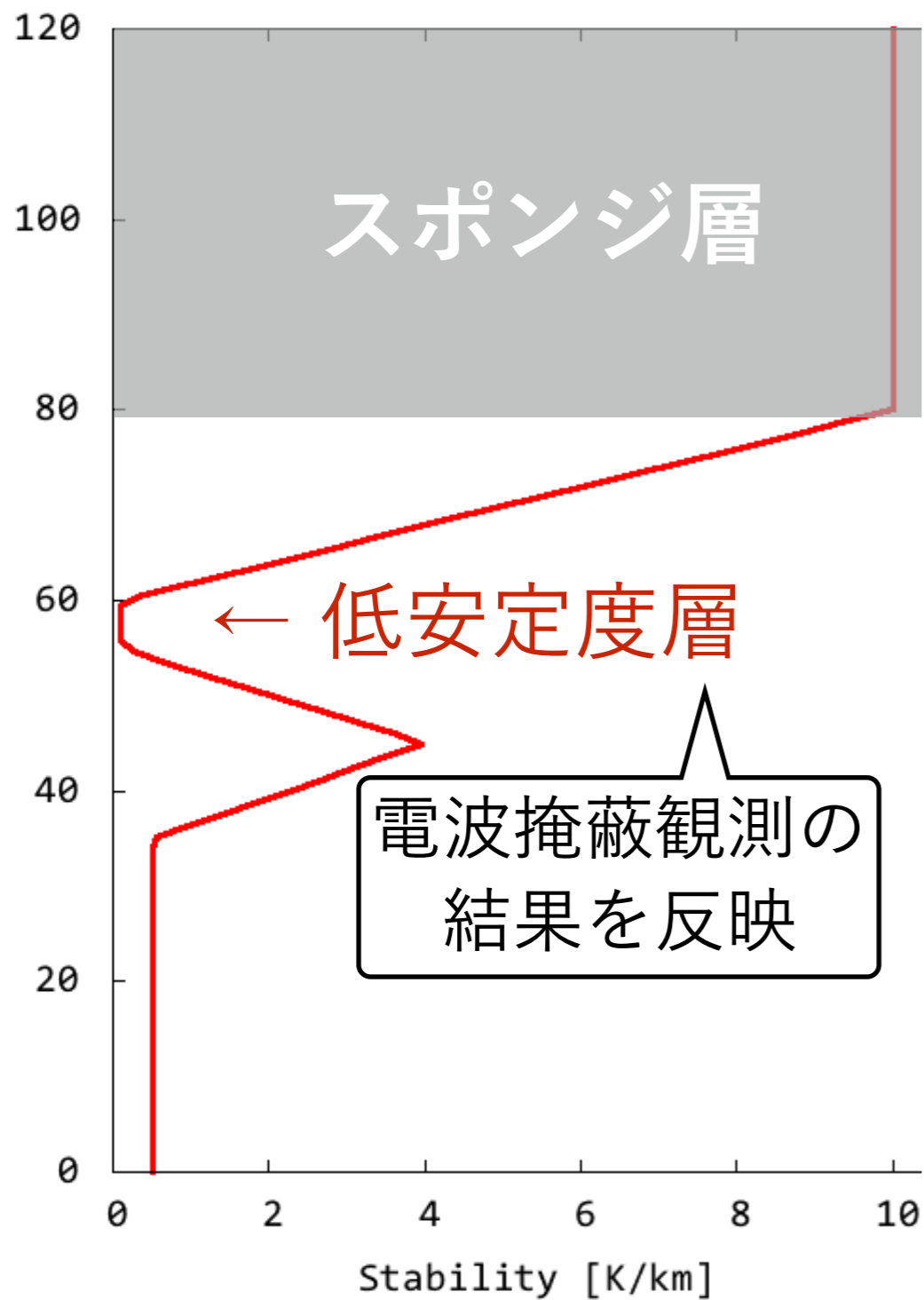
切断波数	~水平格子間隔		鉛直層数 / 層間隔		備考
T21	5.6° × 5.6°	600 km	60	2 km	2000年代の金星GCMの典型的な解像度
T42	2.8° × 2.8°	300 km	60	2 km	
T63	1.9° × 1.9°	200 km	120	1 km	
T159	0.75° ×	80 km	120	1 km	ESの80 node × 4 cpuで180日積分/24h
T319	0.35° ×	40 km	240	0.5 km	ESの80 node × 4 cpuで20日積分/24h
T639	0.19° ×	20 km	120	1 km	ESの80 node × 4 cpuで4日積分/24h

- 最近では、金星AFESを用いたデータ同化システムも開発 (Sugimoto et al. 2017)。

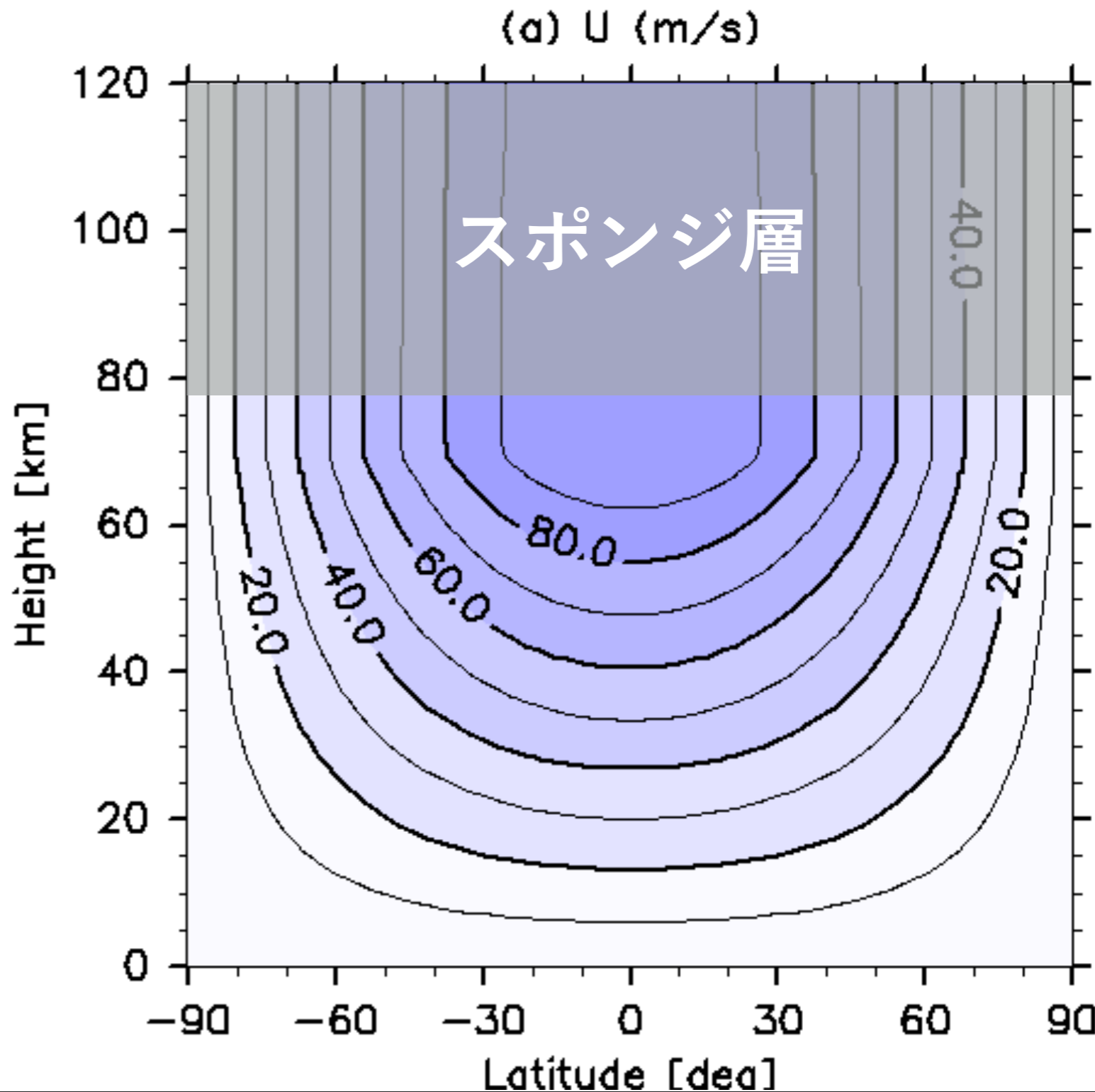
簡易金星版 AFES 計算設定

- 空間解像度：
 - 切断波数 T159 ($\sim 0.75^\circ \times 0.75^\circ$; 水平 480 \times 240 格子)
 - 鉛直層数 L120 ($\Delta z \sim 1\text{km}$; シグマ座標 = 地表気圧で規格化した気圧座標)
- 放射過程は簡易：
 - 水平一様なニュートン冷却 と日変化含む太陽加熱 (0–80 km; 60–70kmで強い)
 - **基準温度場に 低安定度層 (55–60km) を配置**
- 雲・湿潤過程なし・地形なし・乾燥対流調節なし
- 大気上端での波の反射を防ぐための スポンジ層 ($\geq 80\text{km}$)
- 渦粘性 (解像できないスケールの乱流の効果)
 - 4 次の水平超粘性 (∇^4) — 切断波数に対する緩和時間 0.01 地球日
 - 鉛直渦粘性 — 係数 $0.15 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
- 自転は地球と同じ向き
- 初期値：基準温度場と温度風平衡にあるスーパーローテーション流
- 積分期間：4 地球年

ニュートン冷却の 基準温度場の安定度 (Sugimoto et al. 2013)

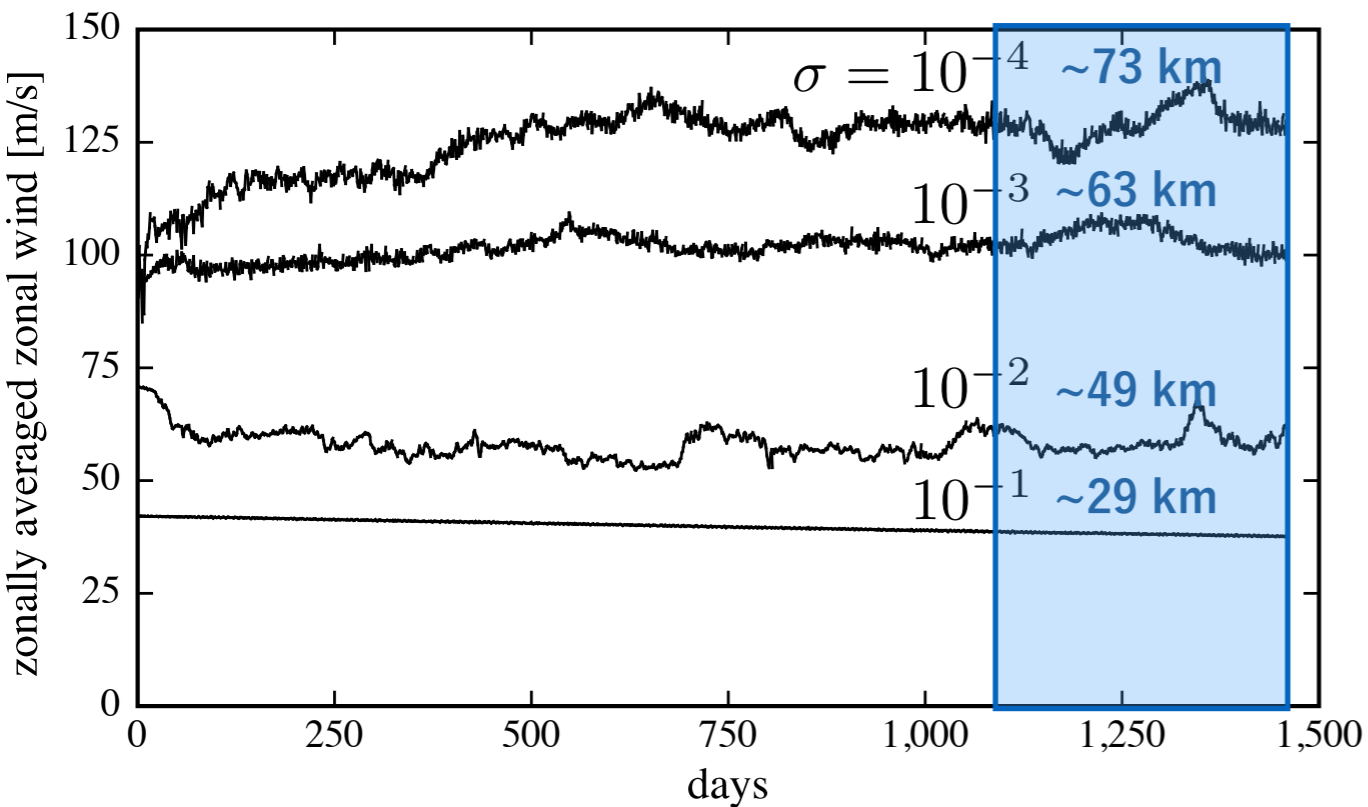


初期スーパーローテーション流



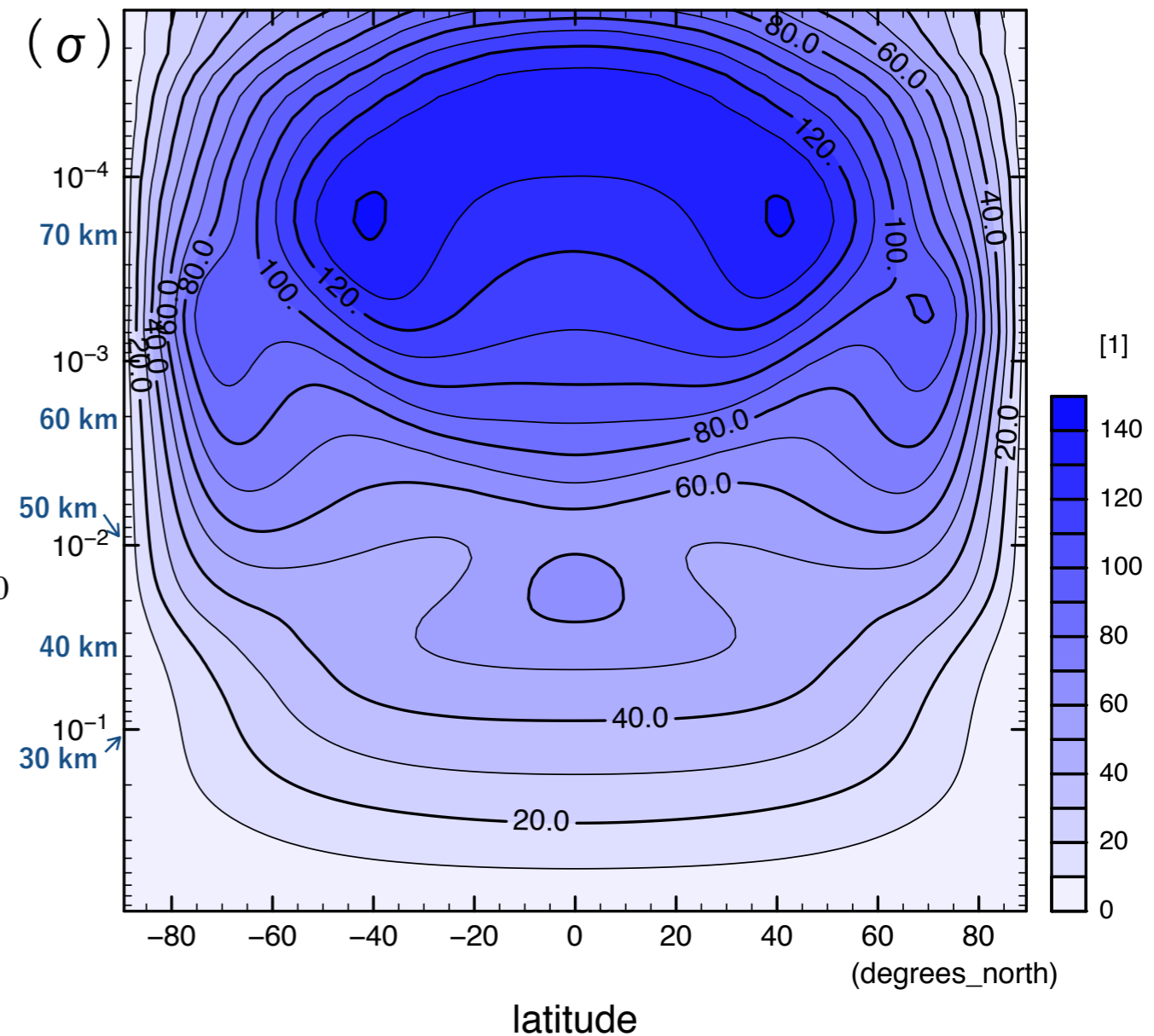
計算結果 | 平均東西風

赤道上空の平均東西風の時間発展



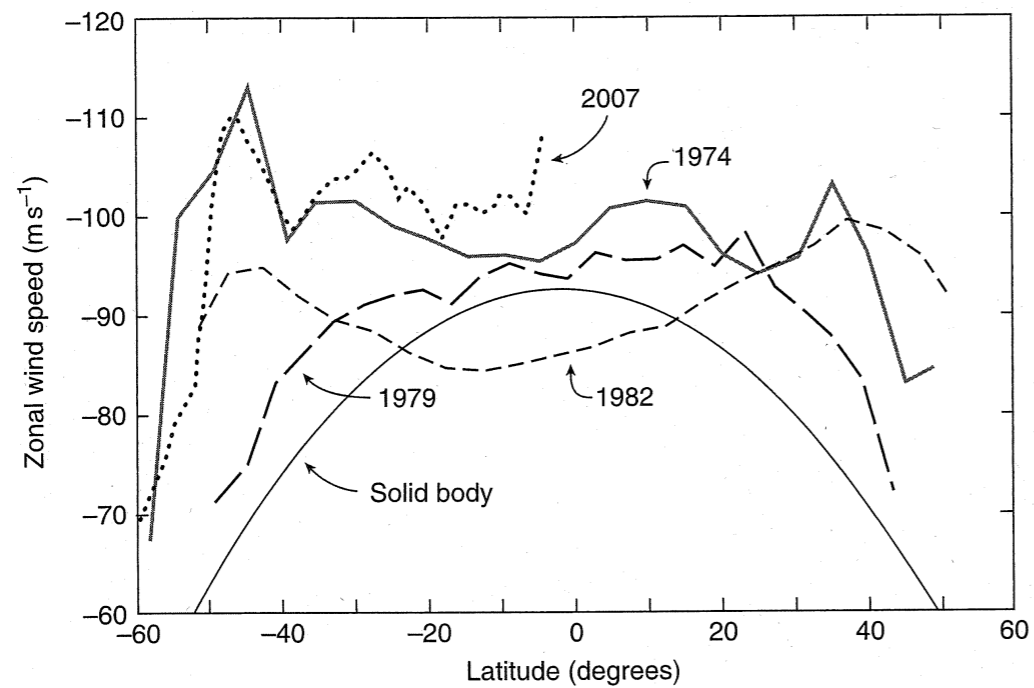
- 上層は準定常状態
- 下層はわずかながら減速傾向
 - スーパーローテーションは、完全には維持されていない？

最後の1地球年分の時間東西平均



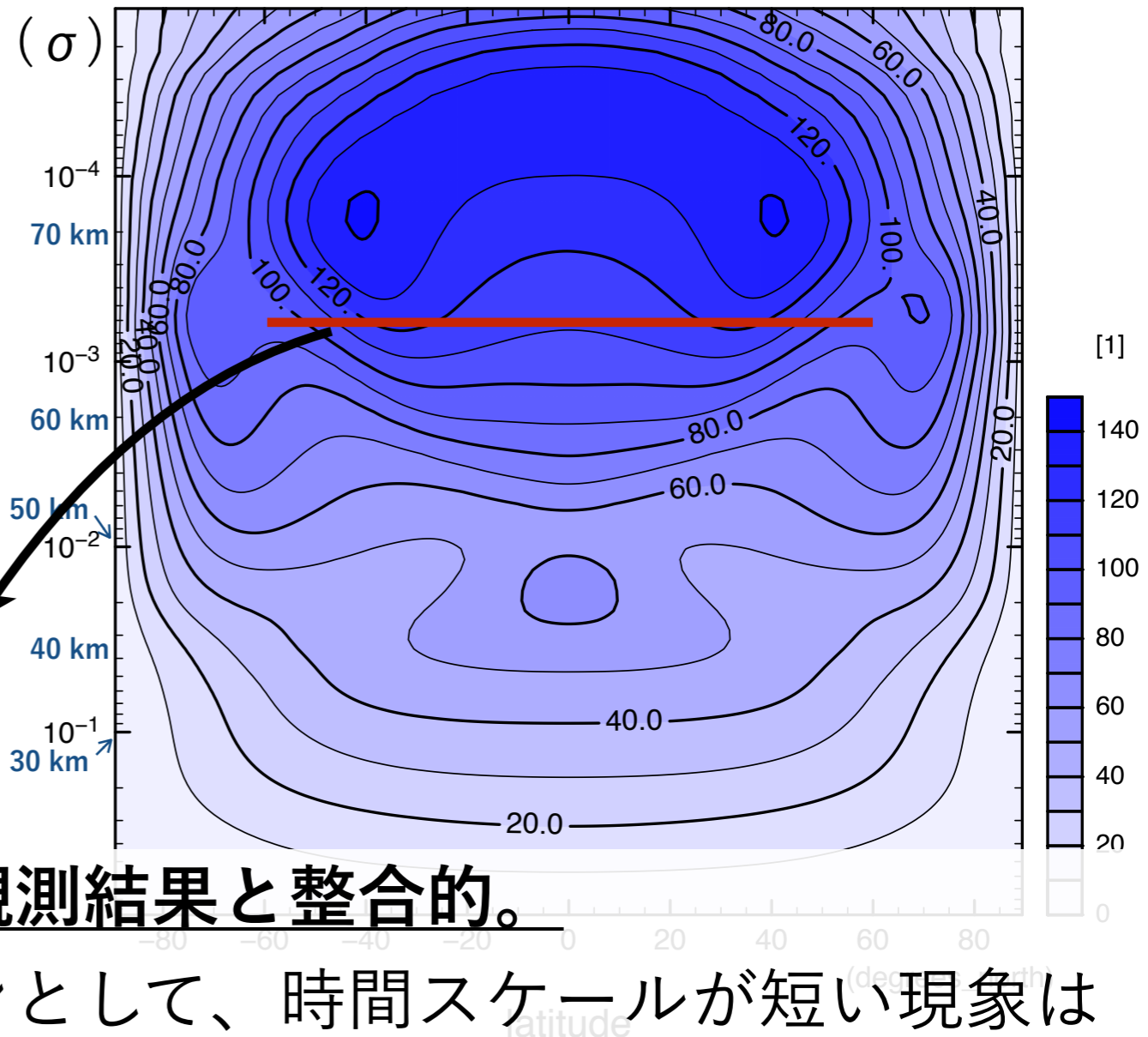
計算結果 | 平均東西風

観測：雲追跡風



(Taylor 2010)

最後の1地球年分の
時間東西平均



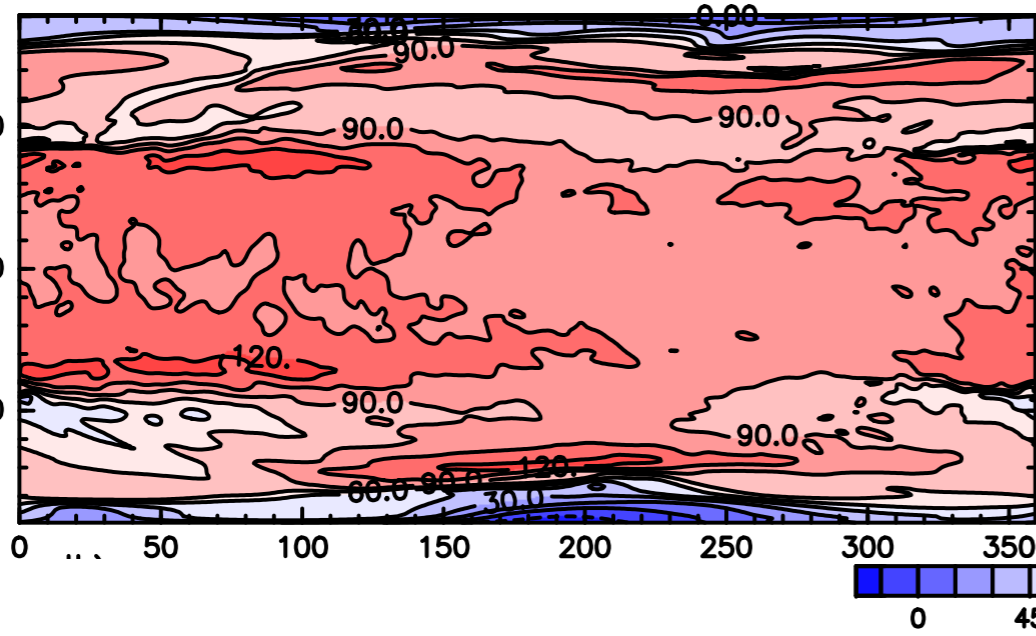
• 計算された風速場は、これまでの観測結果と整合的。

- 金星大気の気象シミュレーションとして、時間スケールが短い現象は解析にあたいする。

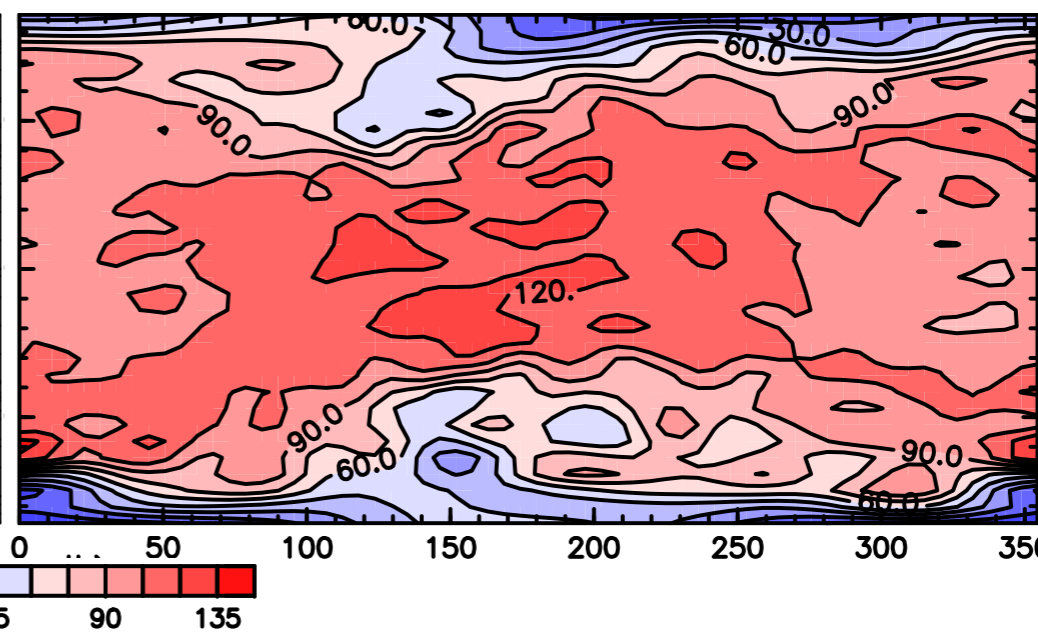
(degrees_north)

東西風

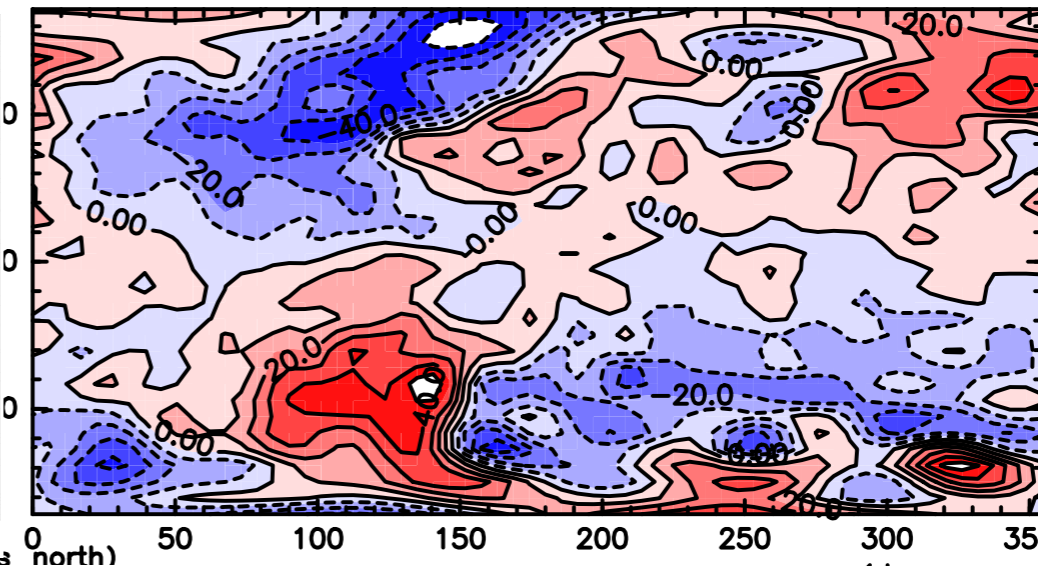
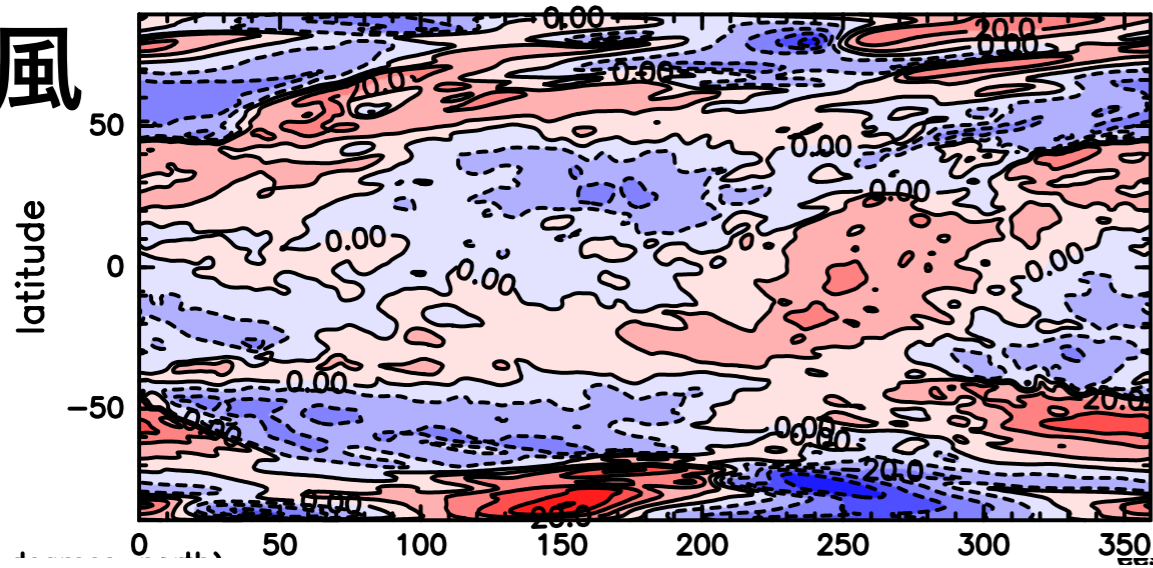
T159
($\Delta x \sim 80 \text{ km}$)



T21
($\Delta x \sim 600 \text{ km}$)



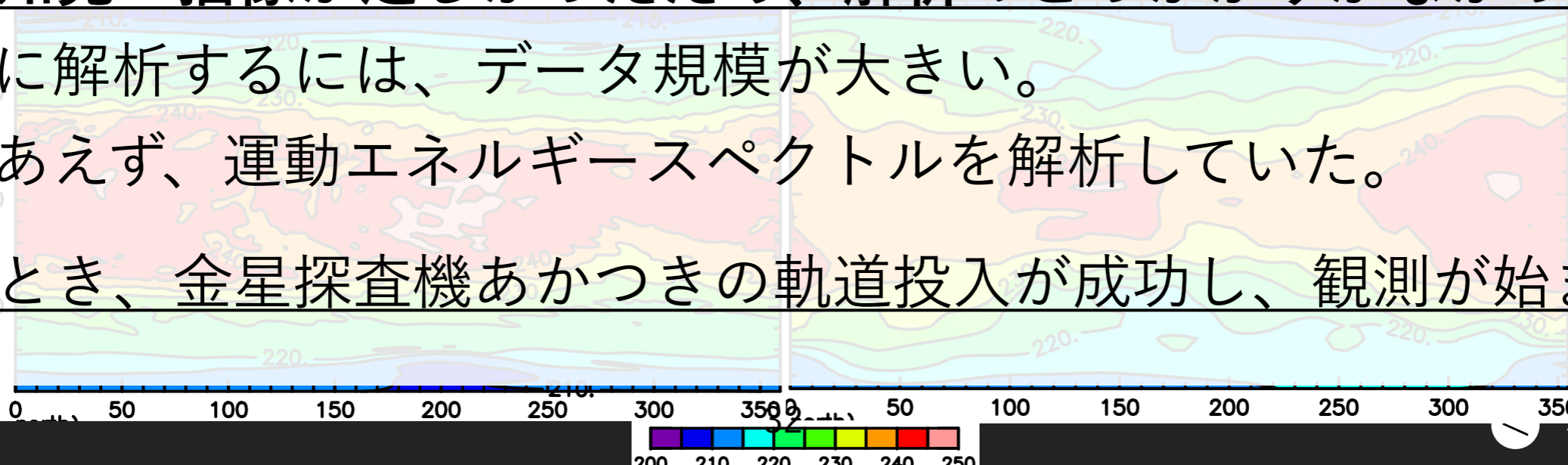
南北風



• 観測的知見・描像が乏しかったため、解析のとっかかりがなかった。

- 闇雲に解析するには、データ規模が大きい。
- とりあえず、運動エネルギースペクトルを解析していた。

• そんなとき、金星探査機あかつきの軌道投入が成功し、観測が始まった。



金星探査機あかつき

太陽電池パドル

姿勢制御用
スラスタ

高利得アンテナ

雷・大気光カメラ

2 μ mカメラ

1 μ mカメラ

紫外イメージャ

中間赤外カメラ

あかつき



5カメラと電波による 3次元観測

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

成層圏

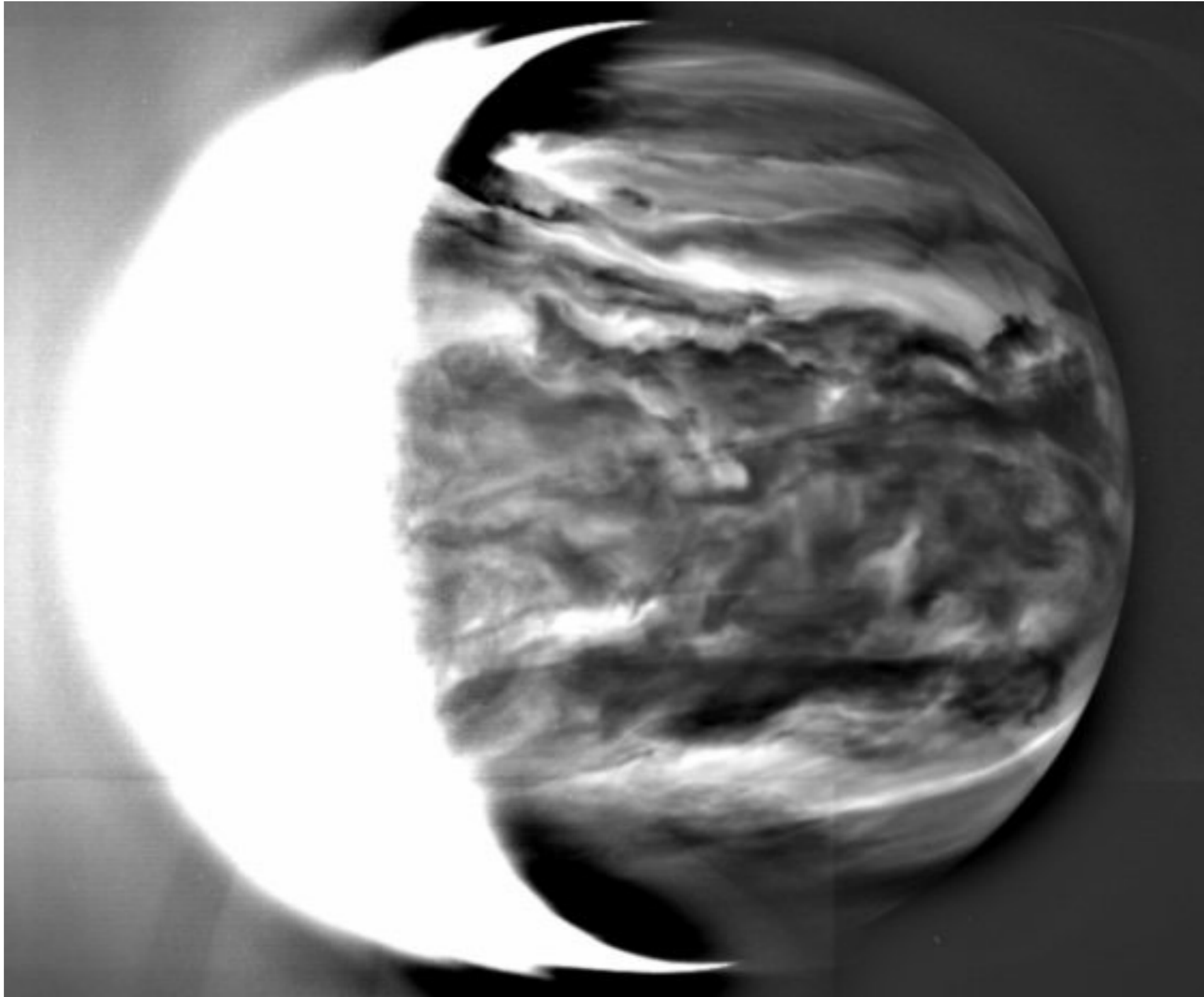
硫酸雲

対流圏

金星探査機あかつき と 私 の年表

年表	あかつき (PLANET-Cプロジェクト)	私
2000年12月	宇宙理学委員会に提案書が提出される	高校生
2001年7月	第24号科学衛星「PLANET-C」計画が開始	
2004年	PLANET-Cの開発が開始 (予算がつく)	大学生
2009年10月	探査機名が「あかつき」に決定	D1
2010年5月18日	打ち上げ予定 → 5分前に中止	種子島から見守る
2010年5月21日	打ち上げ成功!	大学に戻ってた...
2010年8月	宇宙研に滞在 (解析プログラム開発に参加)	
2010年12月7日	金星軌道投入 → 失敗	大学でセミナー聴講中
2012年4月	(金星より少し速く太陽を周回する)	宇宙研に着任
	(金星より少し速く太陽を周回する)	測距・テレメトリ受信など(地味な)運用
2014年8月	(金星より少し速く太陽を周回する)	宇宙研を離任
2015年12月7日	金星軌道投入 → 成功	
2016年4~6月	IR2夜面画像 (プレス用) が世に出回る	

公開されたIR2金星夜面画像

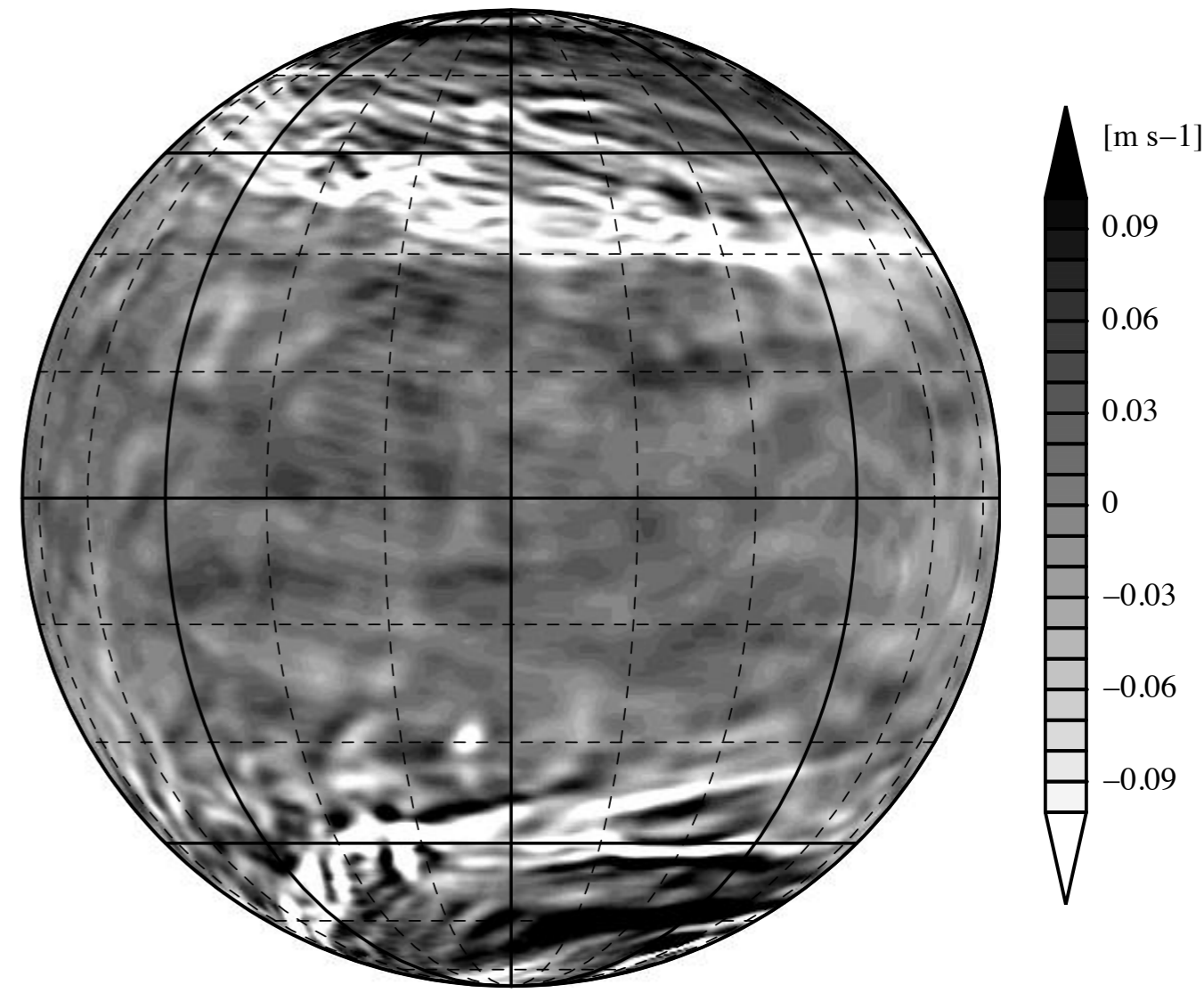
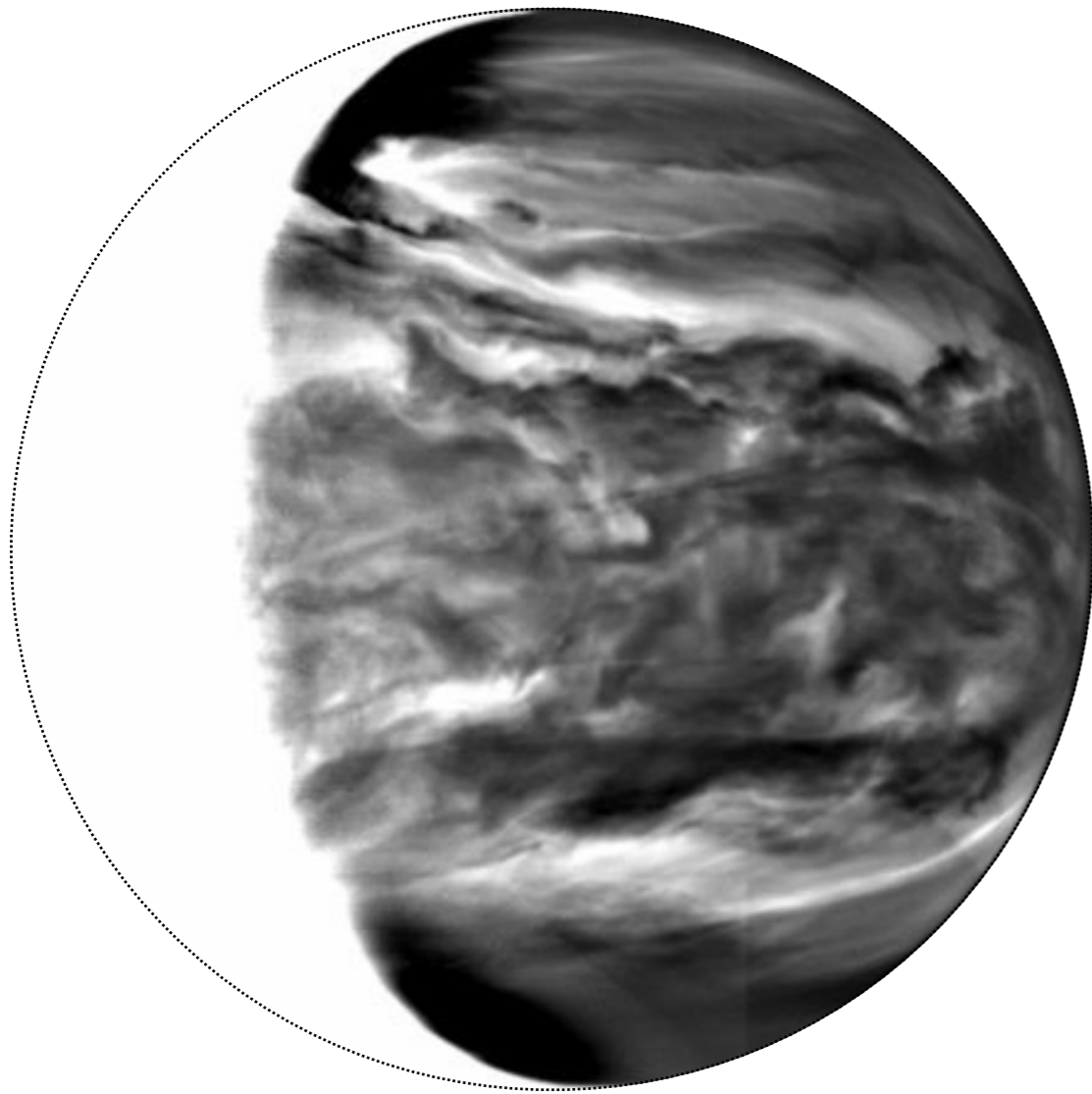


- 2016年3月に、金星から約10万kmの地点から撮影（波長 $2.26 \mu\text{m}$ ）

触発されて、金星AFESの結果を調べてみた

IR2の夜面画像（プレス用）

金星AFESで計算された鉛直流



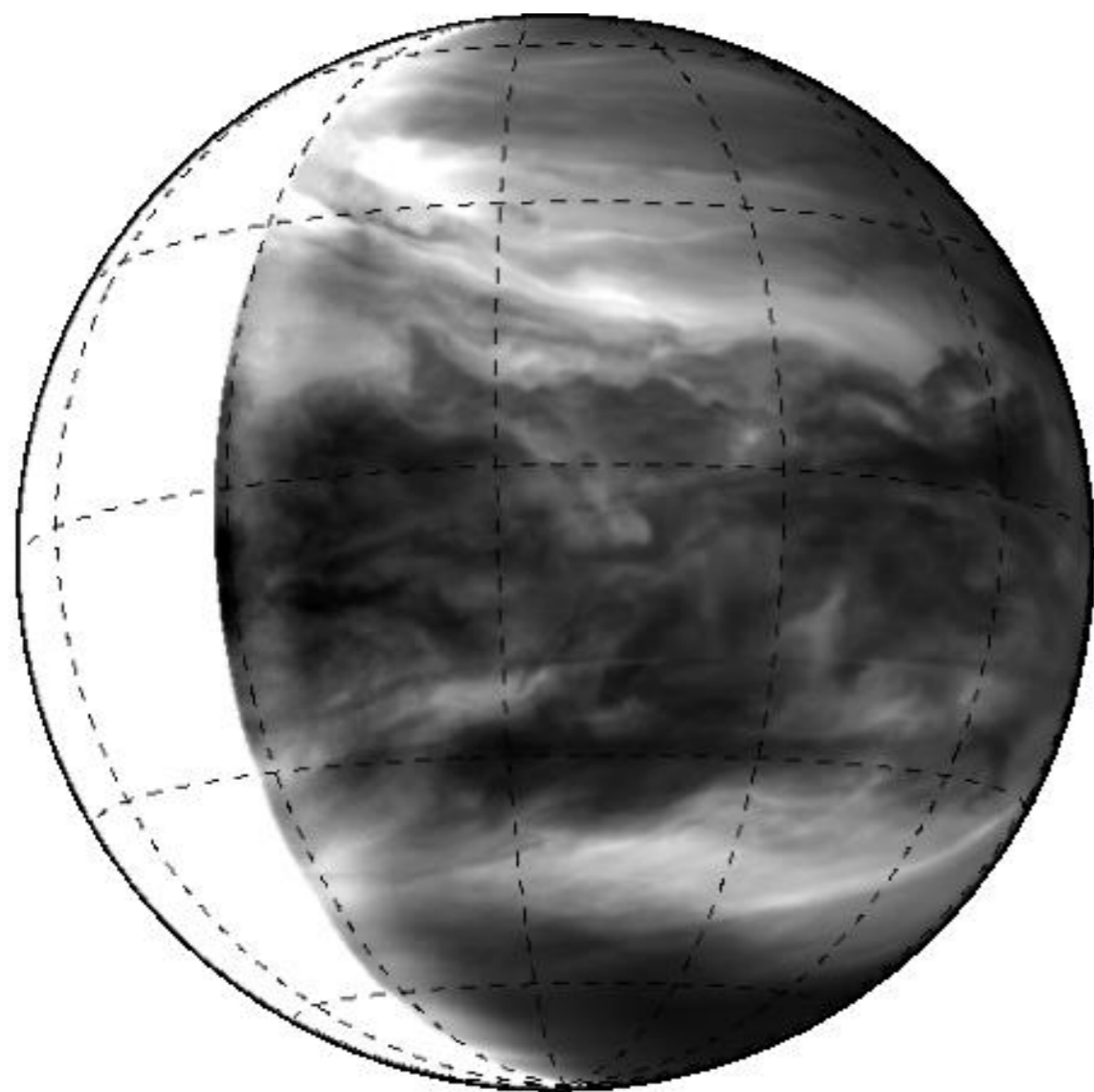
- 地表付近の暑い大気から射出される赤外線を観測している。その赤外線は雲に遮蔽される。
 - ▶ 白 = 雲が薄い = 下降流?
 - ▶ 黒 = 雲が厚い = 上昇流?

- 高度 60 km の鉛直流の瞬間場
 - ▶ 白 = 下降流
 - ▶ 黒 = 上昇流

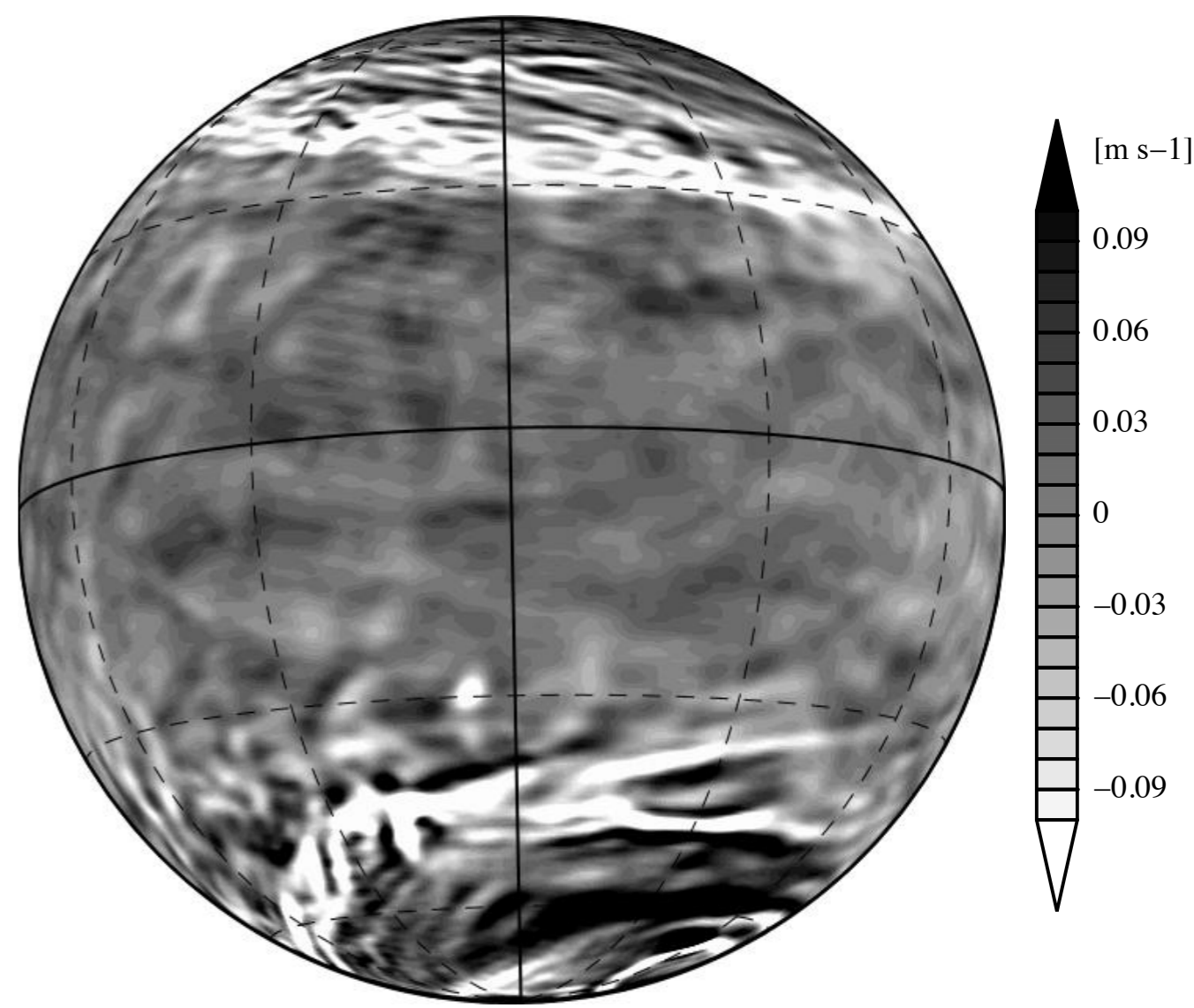
惑星規模のストリーク構造？

IR2の夜面画像（校正後）

金星AFESで計算された鉛直流



- ▶ 白 = 雲が薄い = 下降流？
- ▶ 黒 = 雲が厚い = 上昇流？



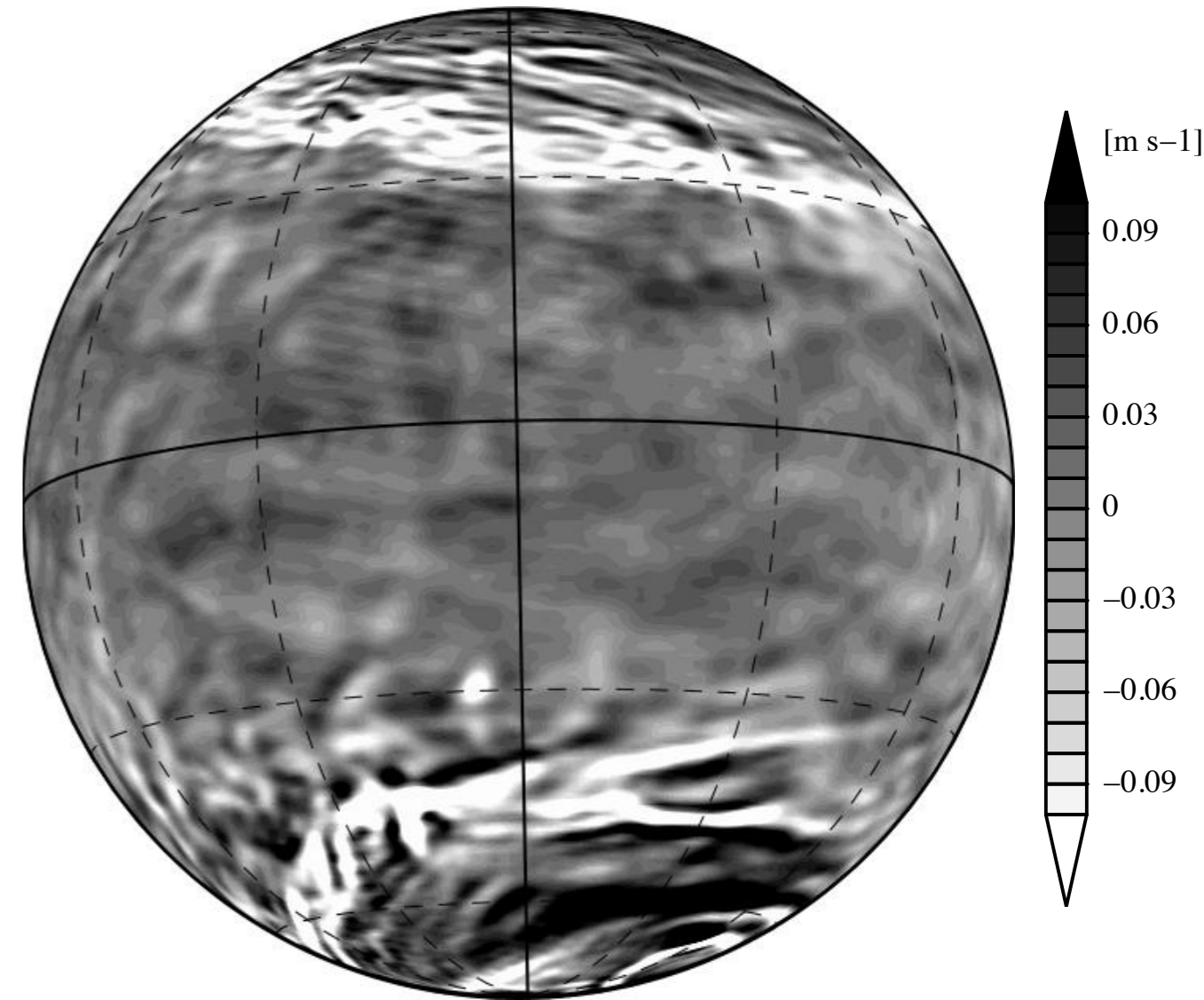
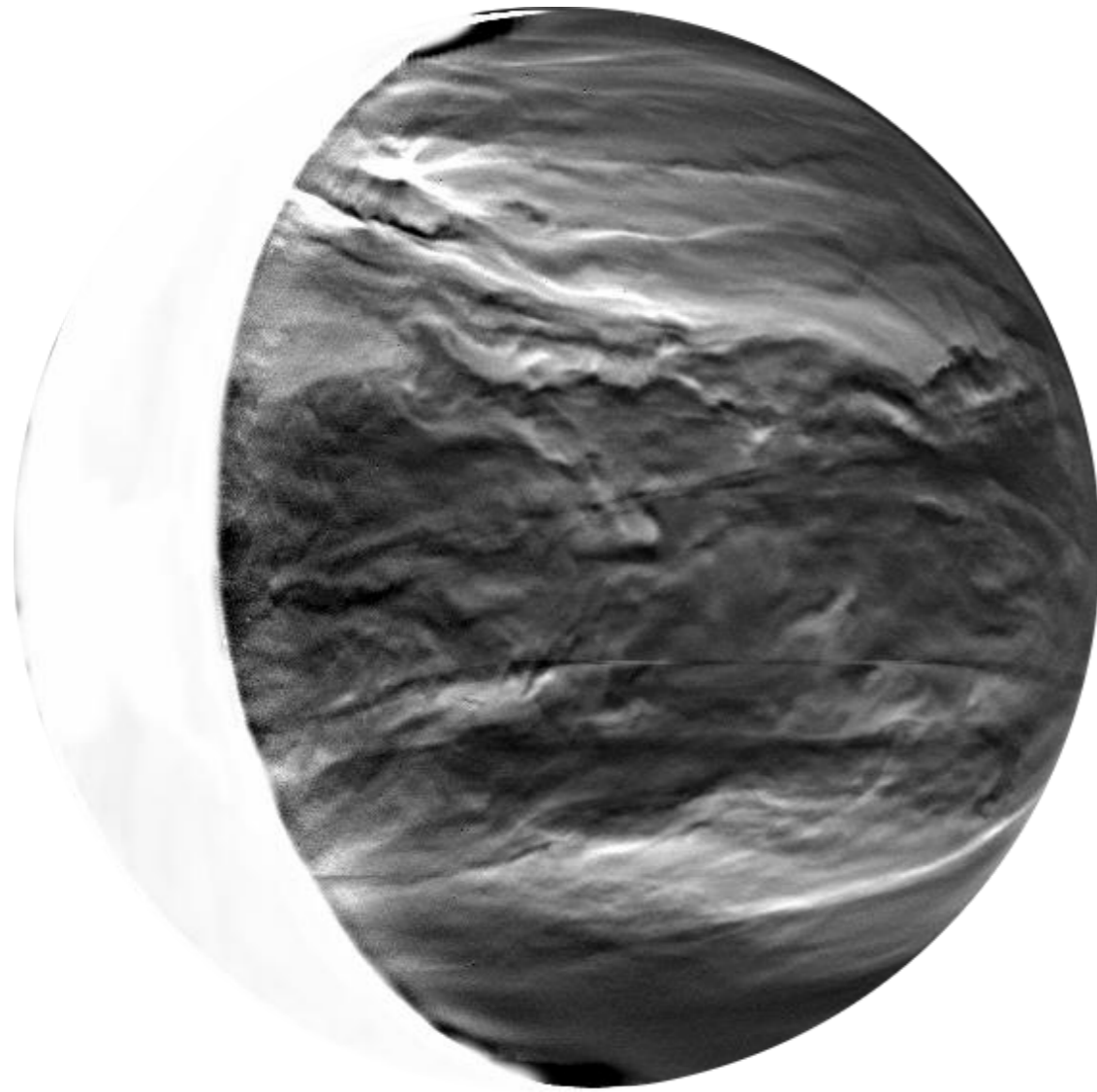
• 高度 60 km の鉛直流の瞬間場

- ▶ 白 = 下降流
- ▶ 黒 = 上昇流

惑星規模のストリーク構造？

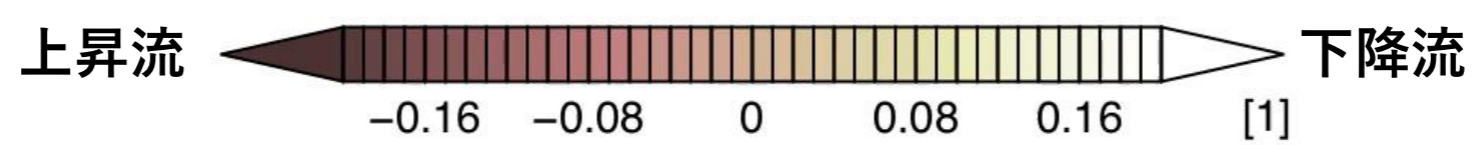
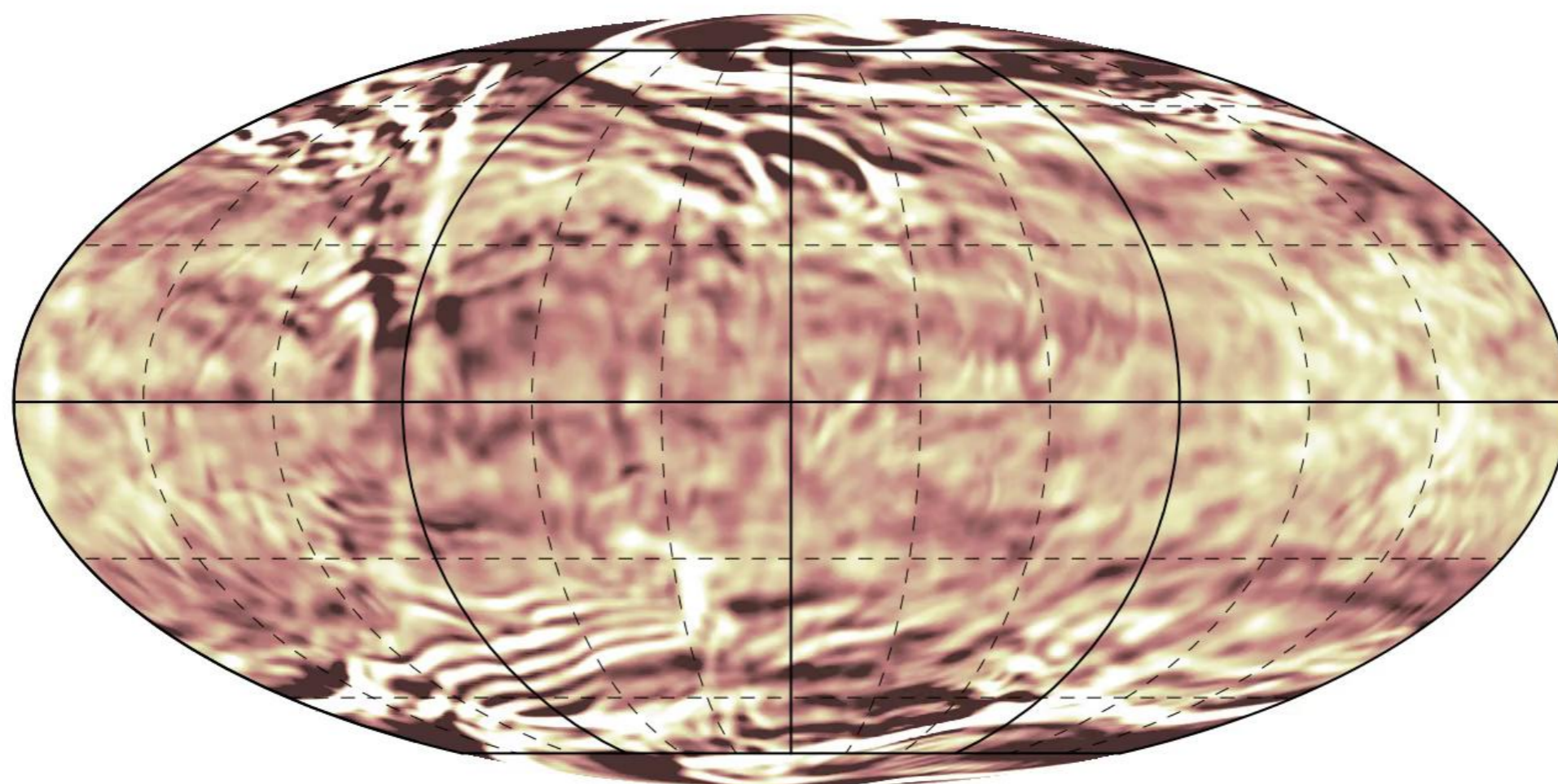
IR2の夜面画像（エッジ強調処理後）

金星AFESで計算された鉛直流



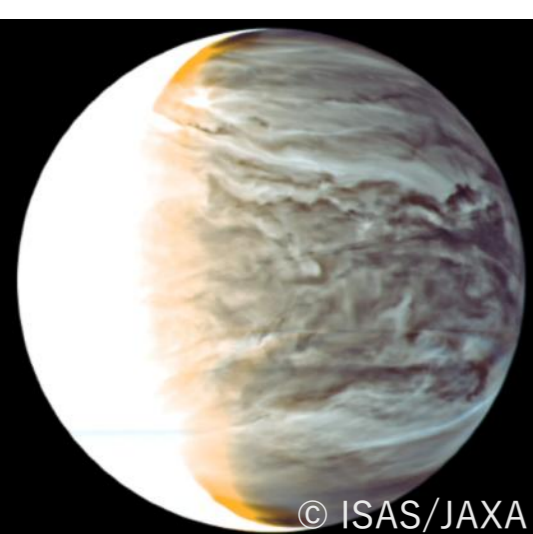
- 南北方向の位置が若干異なるものの、高緯度から低緯度にかけて伸びる、惑星規模の（幾本もの筋からなる）ストリーク構造が、南北両半球に見られる。

鉛直気圧速度 | 動画 (1時間毎)



高度 ~ 60 km

z=0.0018708 hPa
0005-01-01 01:00:00+0000

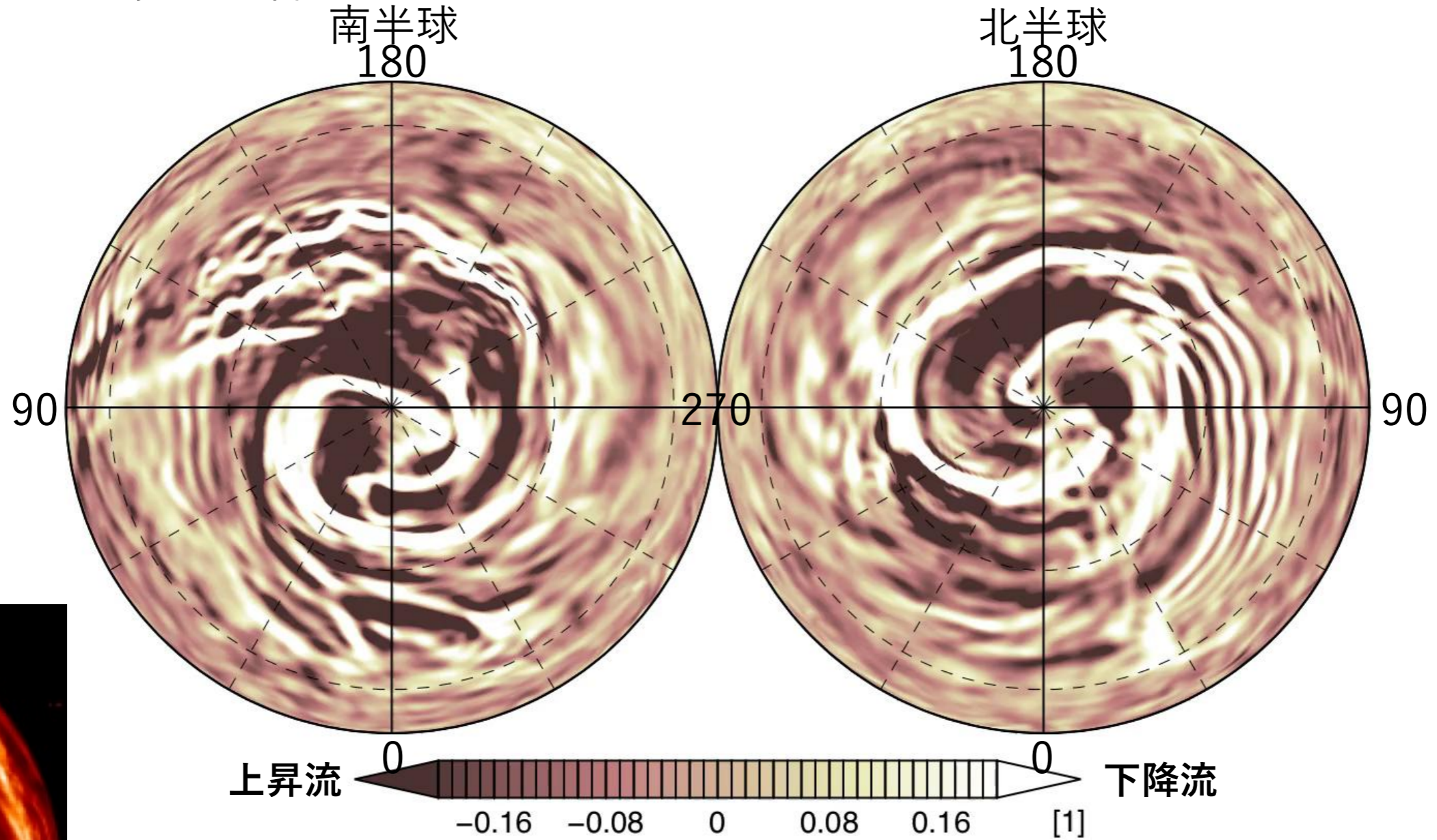


←IR2夜面疑似カラー画像

鉛直気圧速度 | 動画 (1時間毎)

高度 ~ 60 km

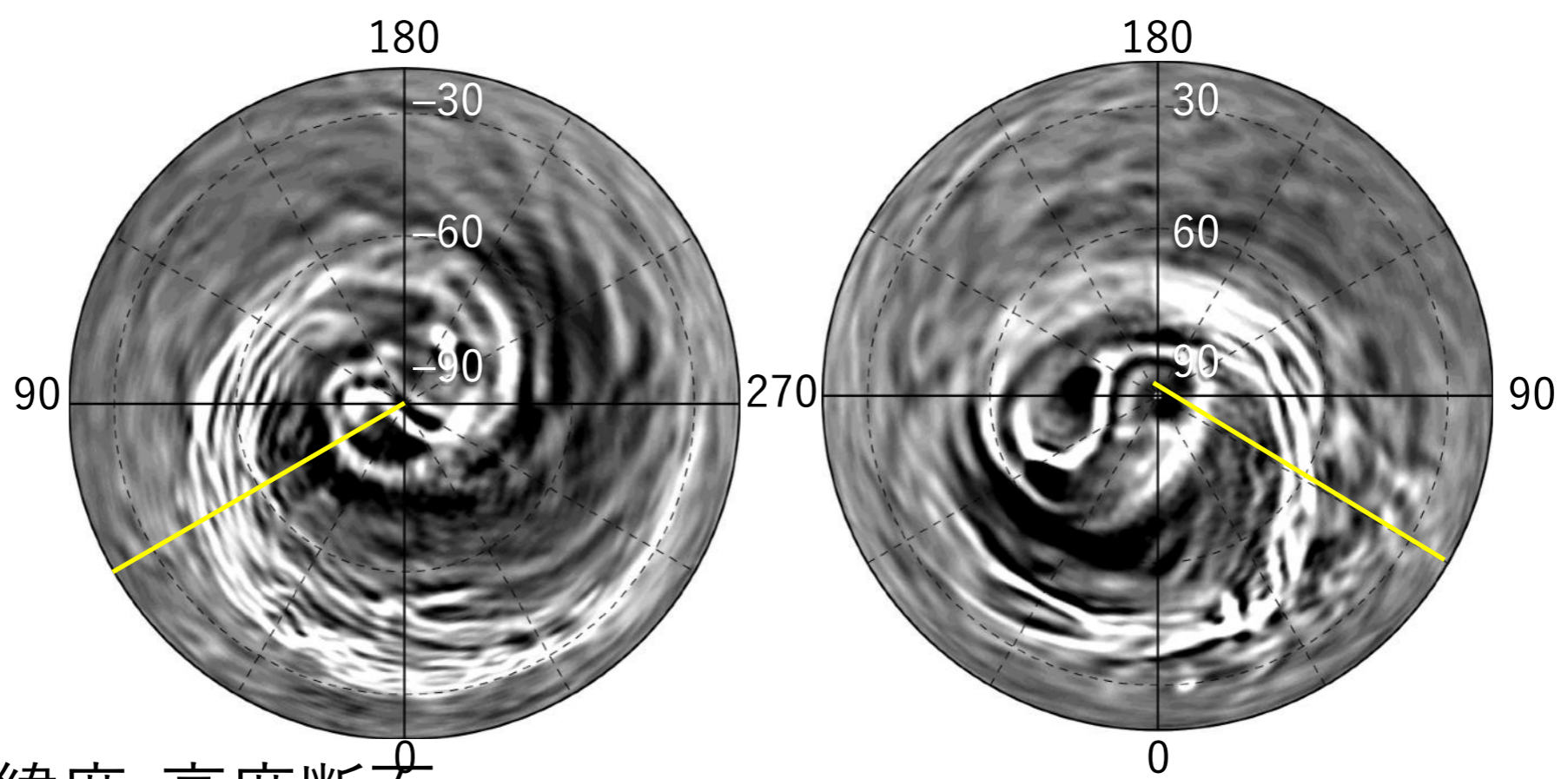
両極の上空から見た場合



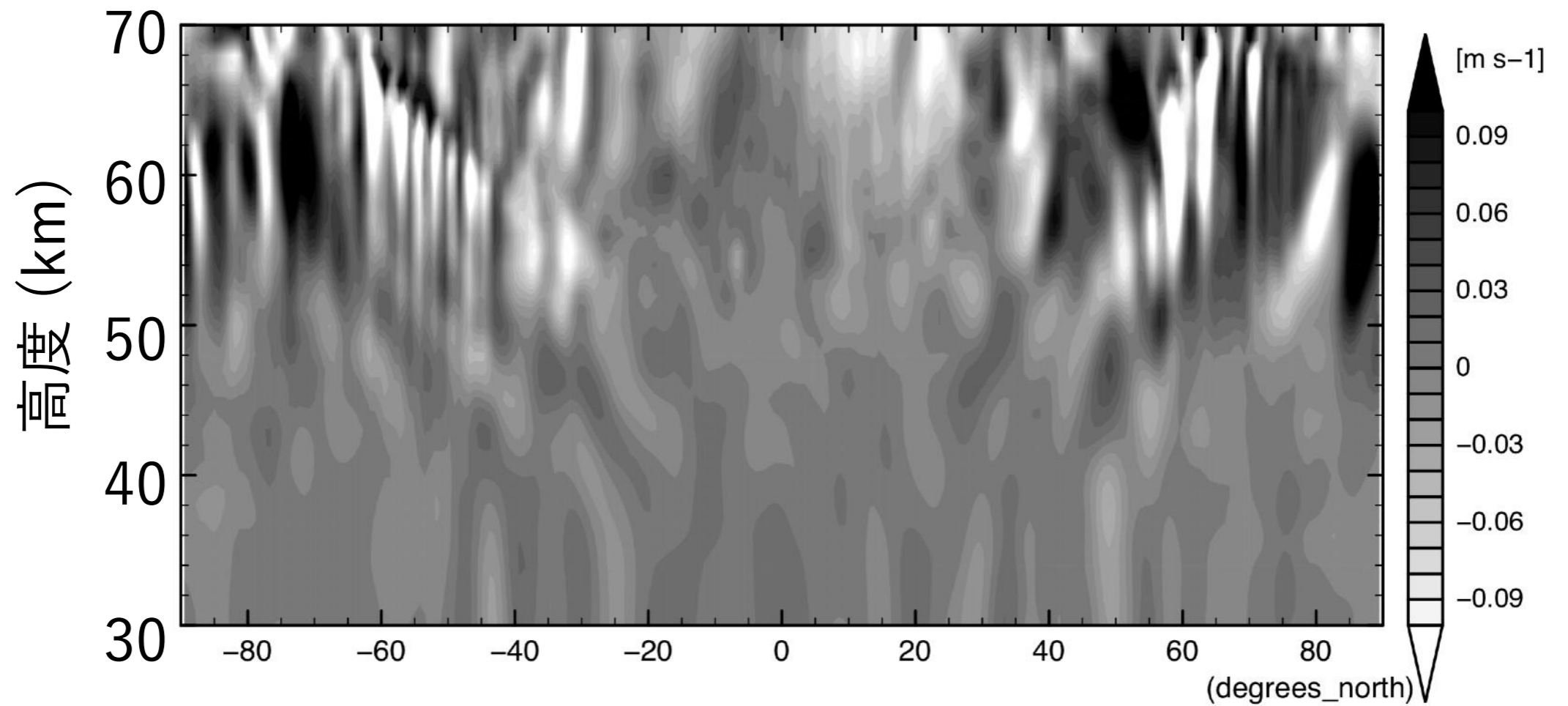
z=0.0018708 hPa
0005-01-01 01:00:00+0000

← 欧州宇宙機関の金星探査機 Venus Express の
VIRTISによる赤外線画像

鉛直流速

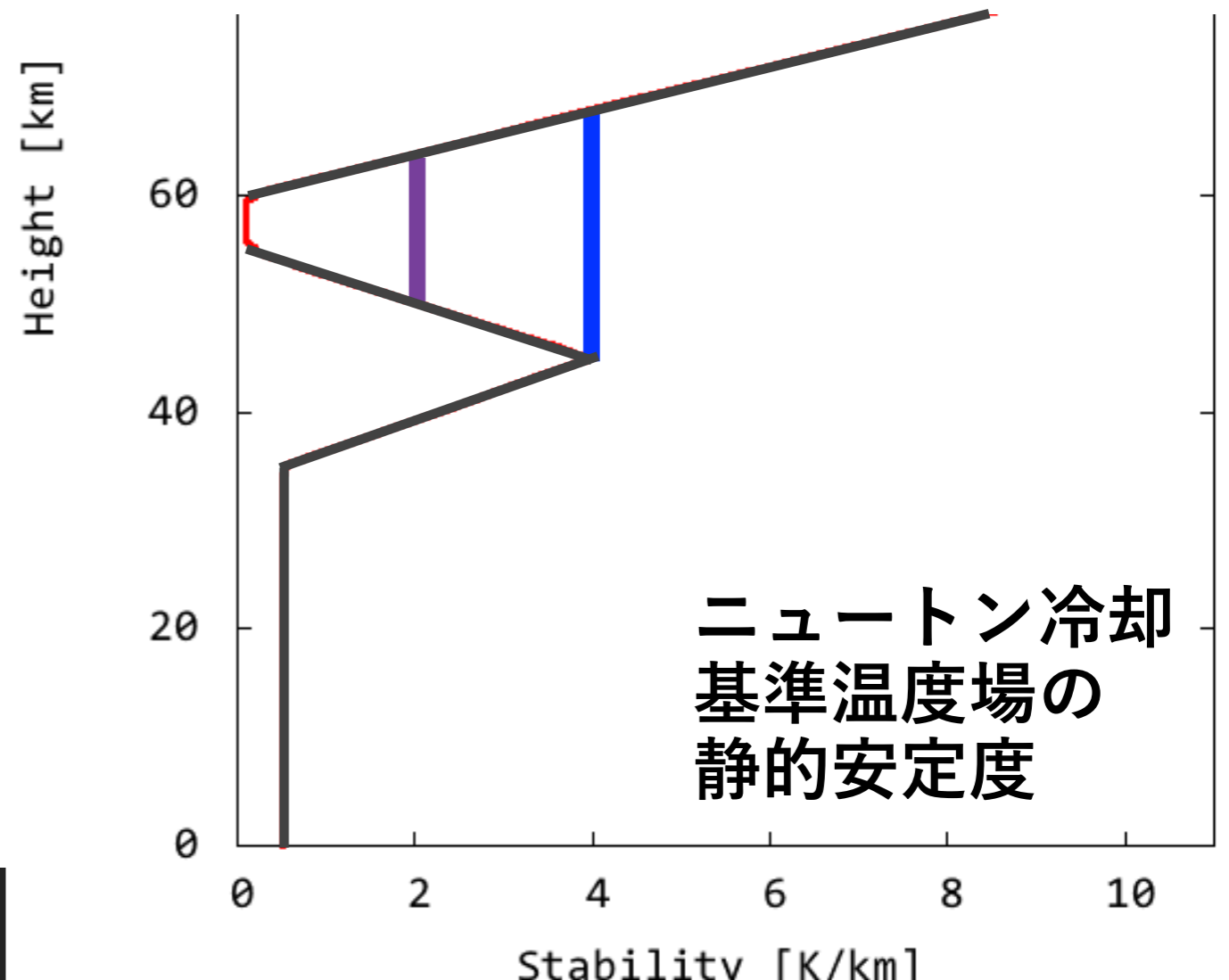


経度60°での緯度-高度断面



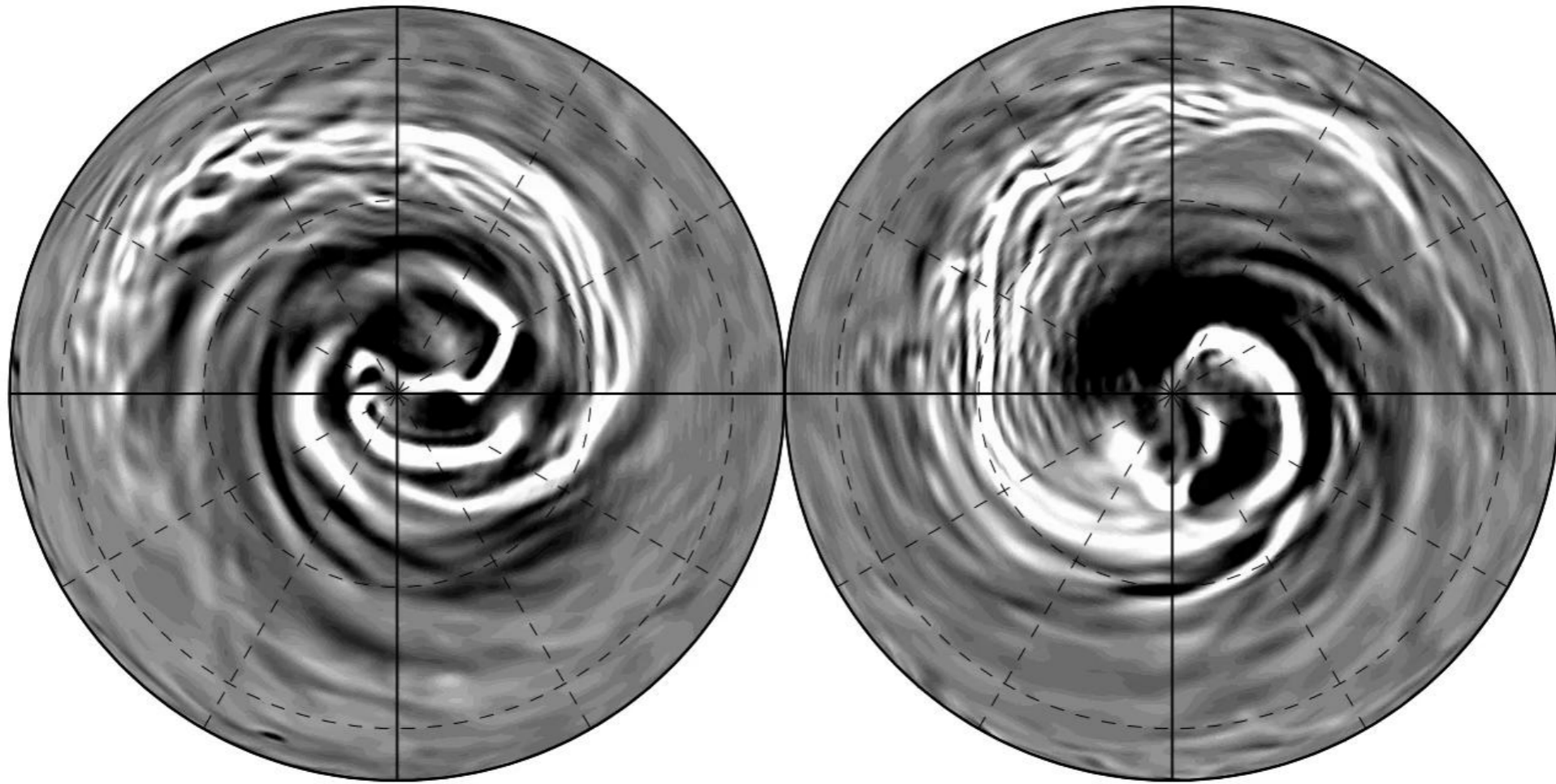
数値実験

- 惑星規模ストリーク構造に対する
日変化加熱（熱潮汐）と
低安定度層（55–60 km、**0.1 K/km**）
の影響を調べるために、以下の実験を実施
 - 日変化なし（東西一様加熱）実験
 - 低安定度層の安定度を **2.0 K/km** と **4.0 K/km** に変えた実験



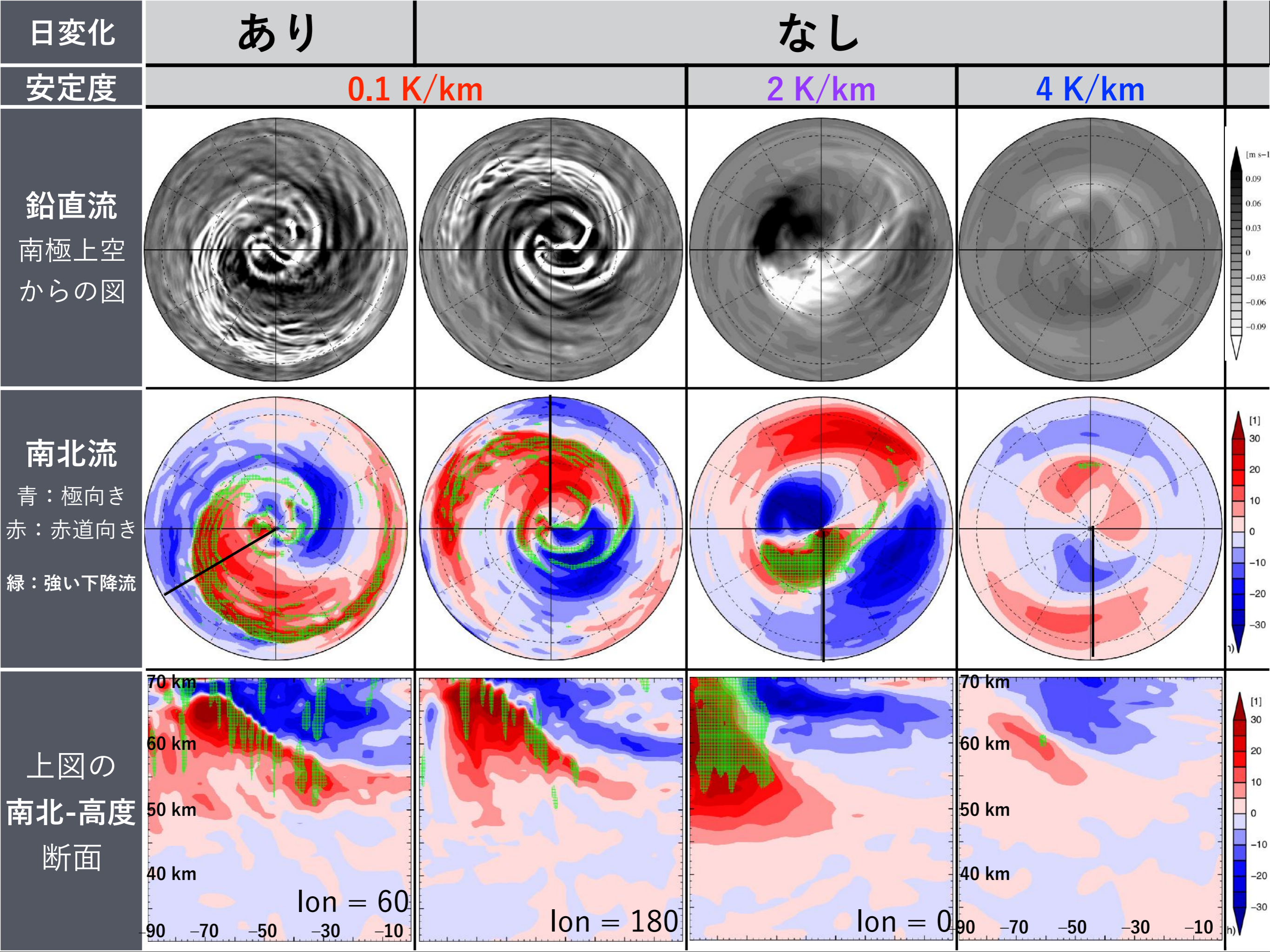
鉛直流速 | 動画 (6時間毎)

日変化なし (東西一様加熱)



高度 = 60 km Z=60000 m
0005-01-01 06:02:00+0000

- 東西一様な加熱でも、南北同期している。
➡ 太陽加熱の日変化は、南北同期の原因ではない。



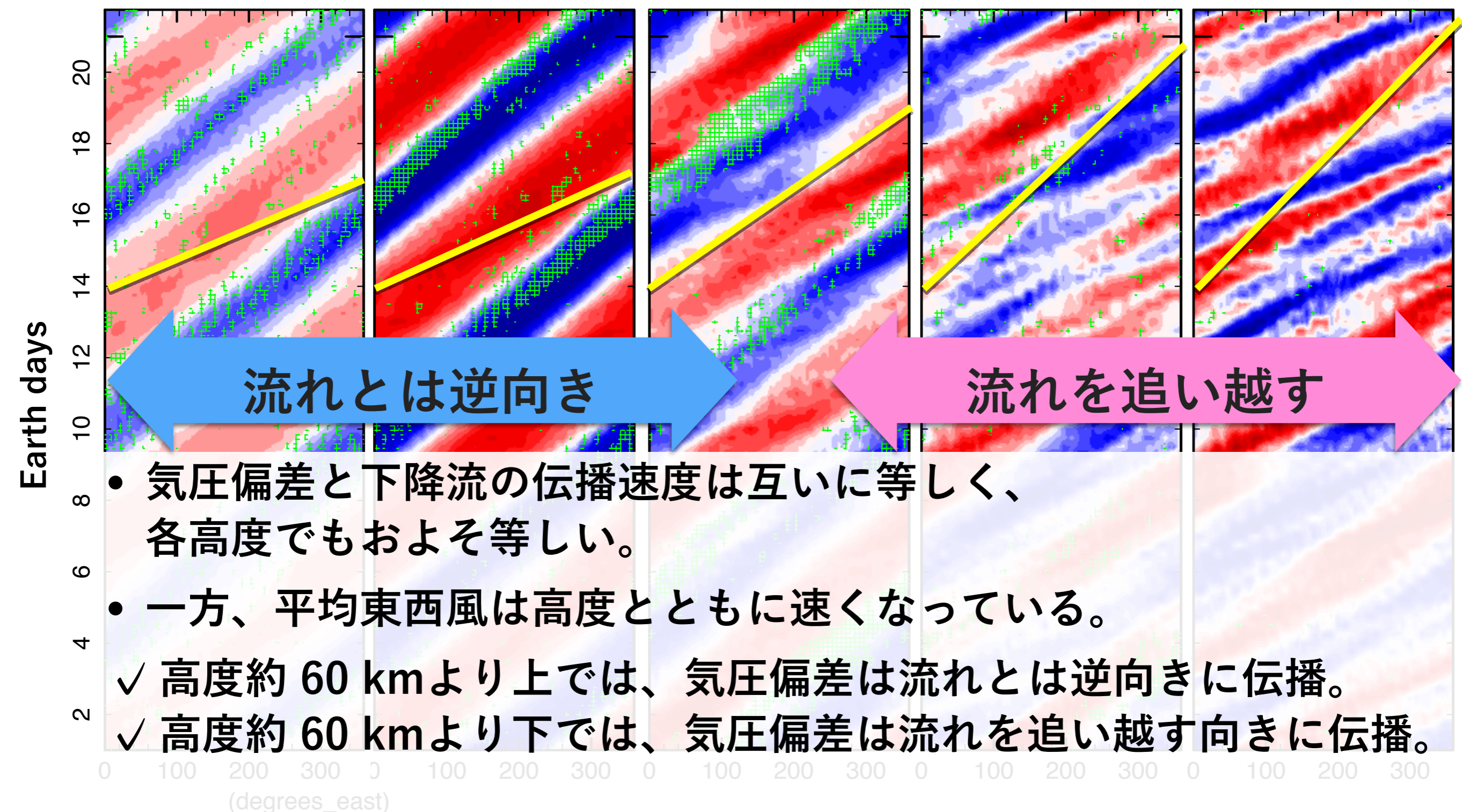
疑問点

- ストリーク構造の南北同期の原因は？
- 安定度を高くすると、
ストリーク構造が現れないのはなぜか？

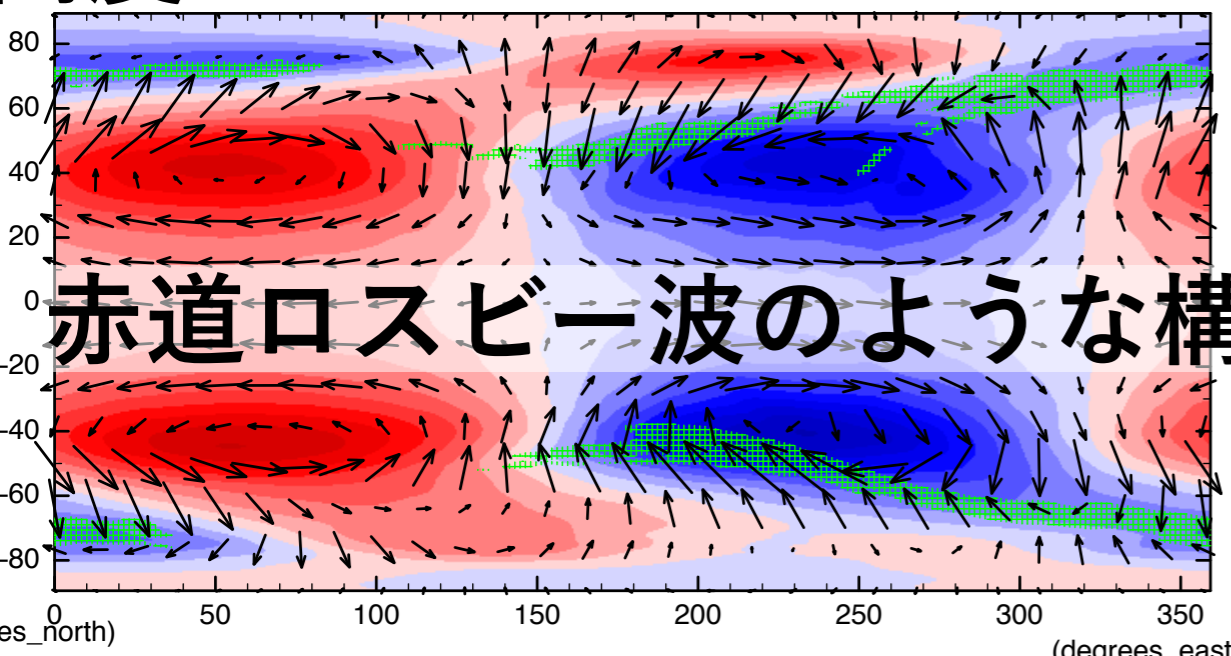
東西-時間断面@南緯35° (日変化なし、安定度低い0.1 K/km)

- 気圧の東西平均からの偏差 (赤-青)
- 強い下降流 (緑)
- 平均東西風速 (黄色の線)

高度 = 70 km 65 km 60 km 55 km 50 km

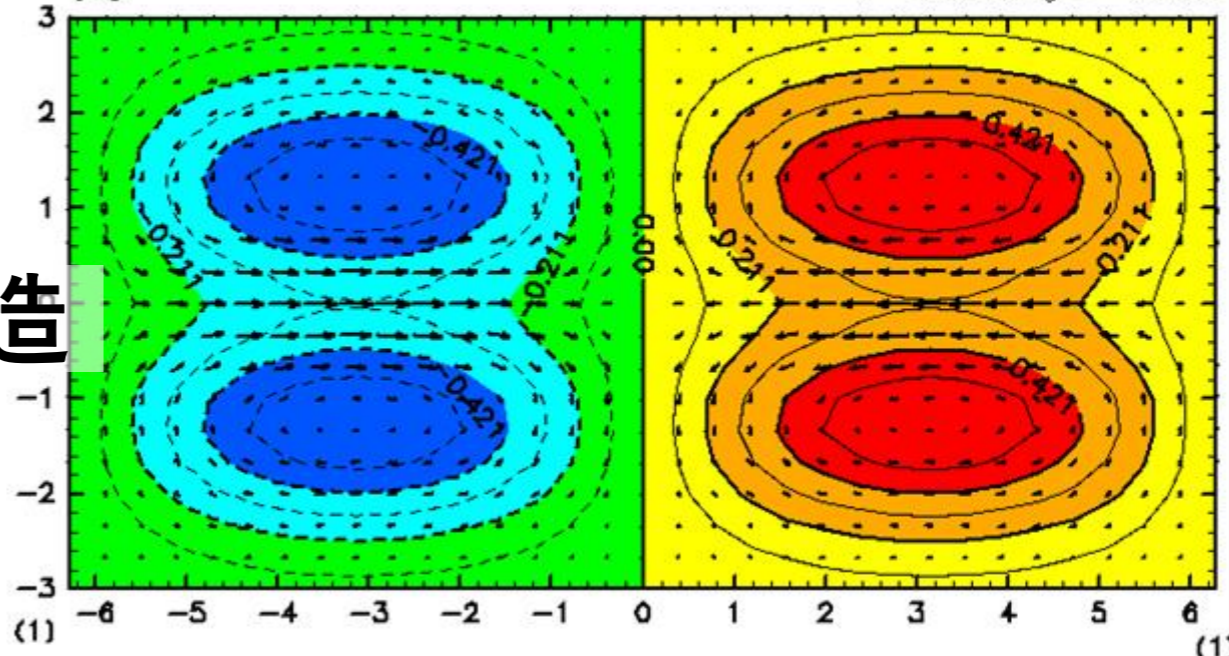


高度 65 km

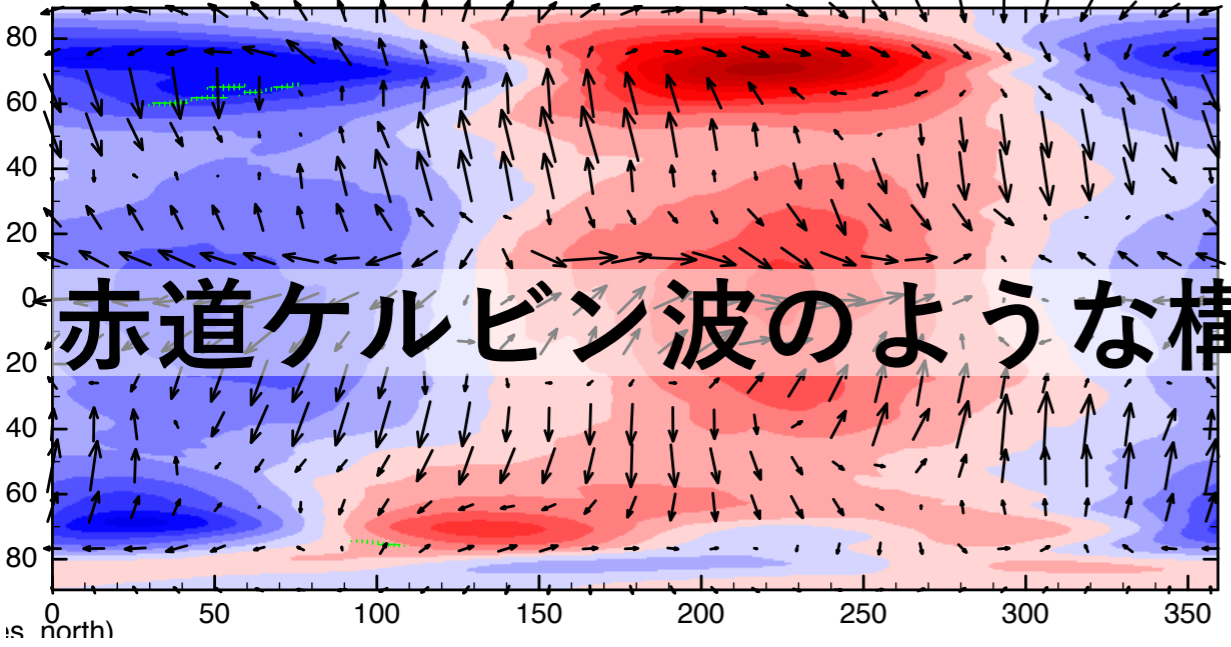


赤道ロスビー波のような構造

(1) 波数 1 の赤道ロスビー波 $k = 0.5, \omega = -0.155$

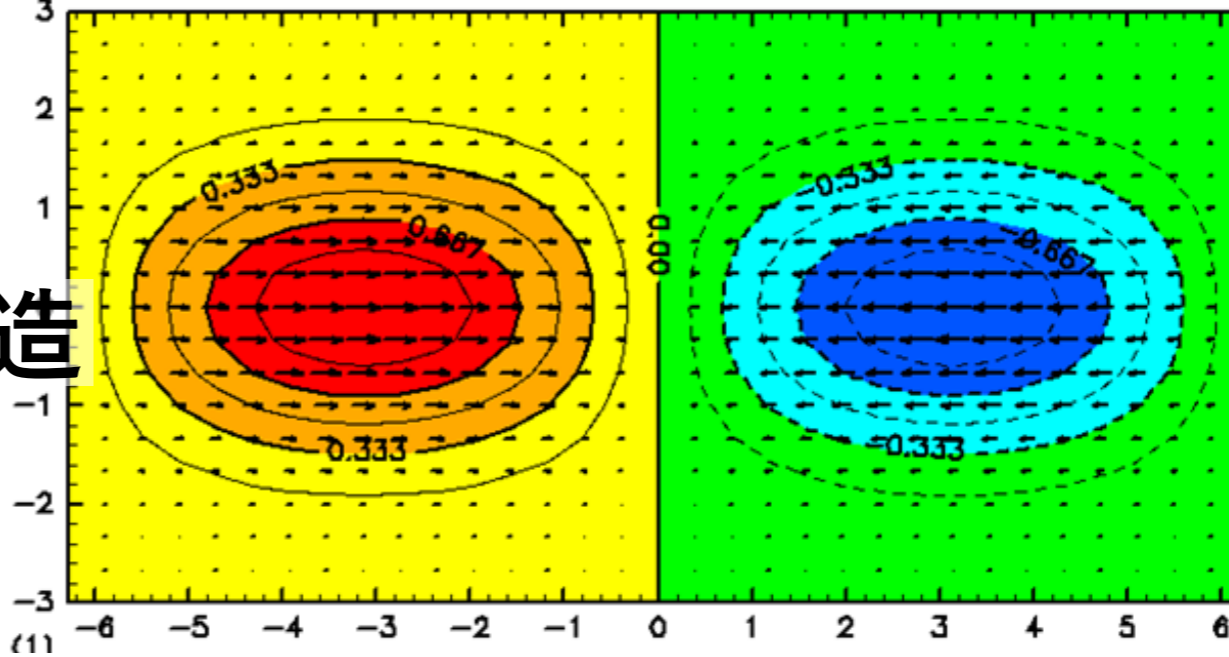


高度 55 km



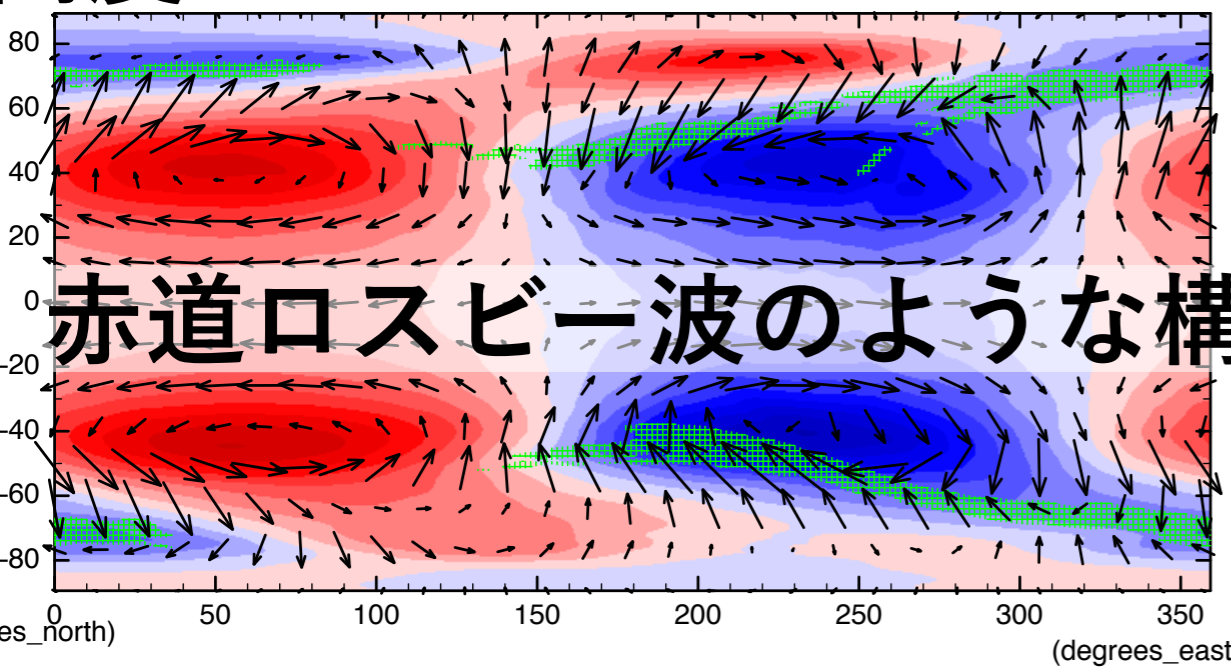
赤道ケルビン波のような構造

(1) 波数 1 の赤道ケルビン波 $k = 0.5, \omega = 0.500$

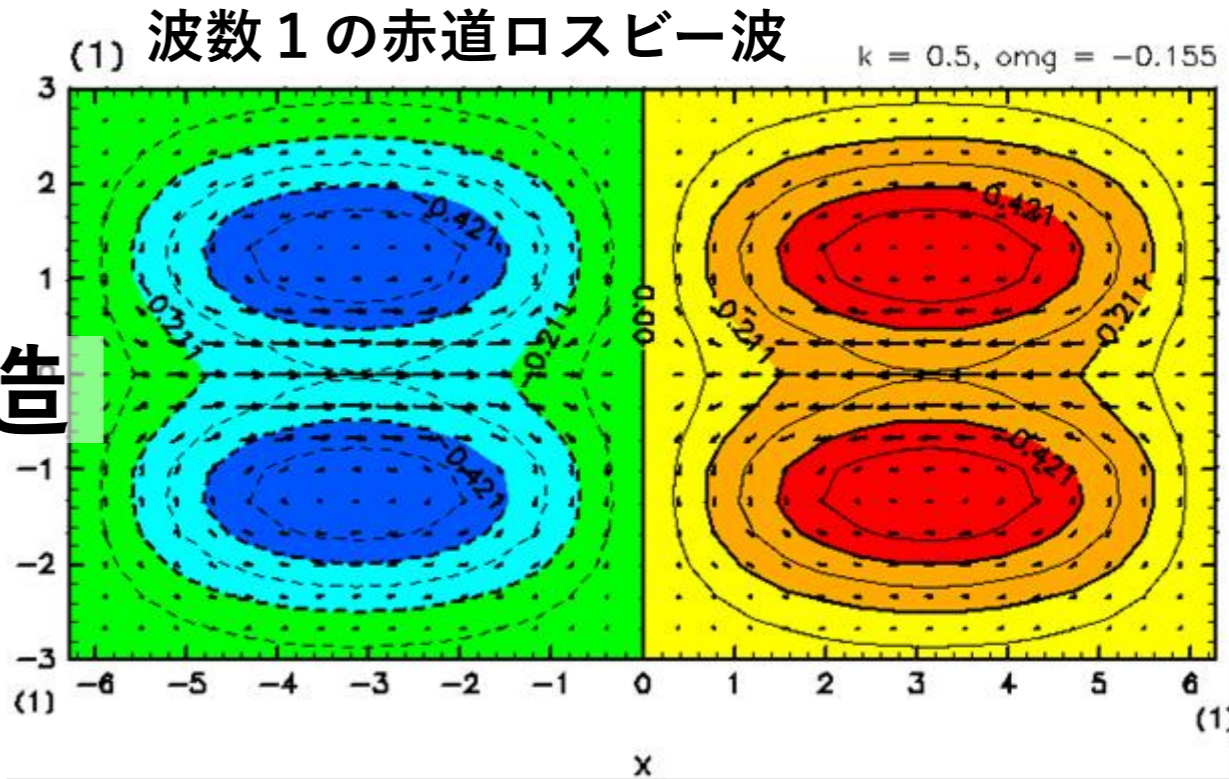


- (極付近の気圧偏差は、順圧不安定によるもの。 Sugimoto et al. 2014)
- 赤道ロスビー波のような構造 と 極付近の渦 が接続して収束領域が形成？
- これらの波が南北同期の原因か？

高度 65 km

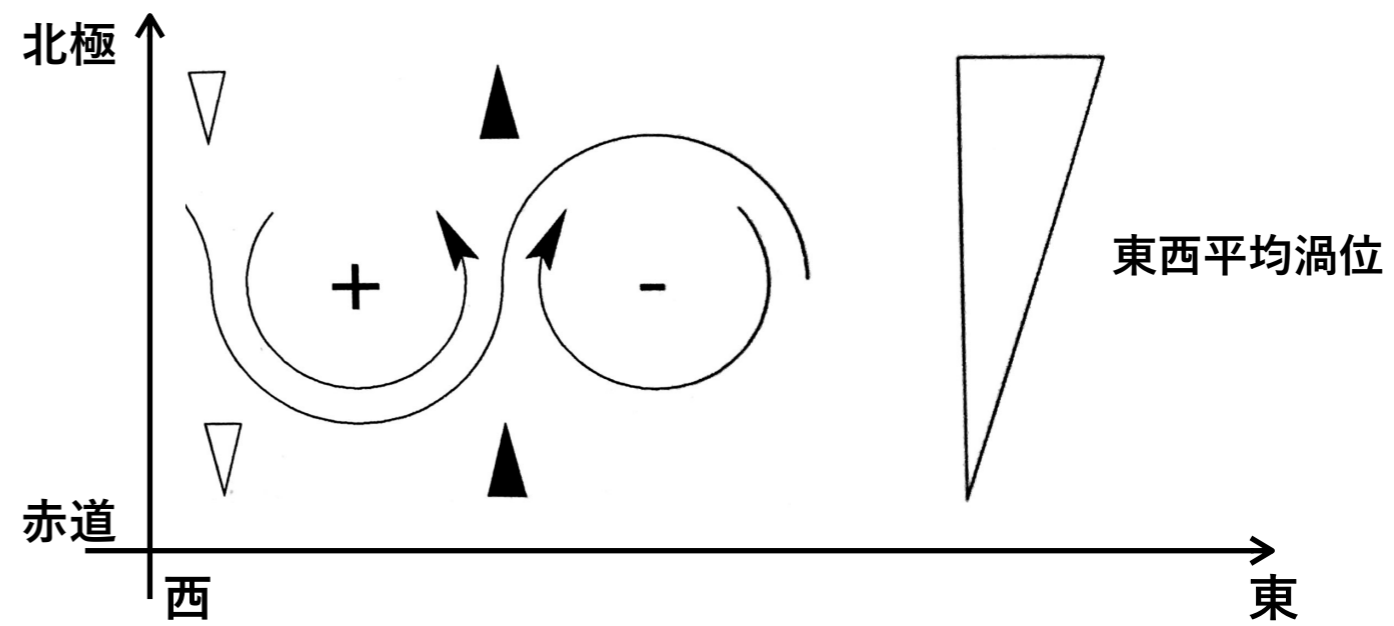


赤道ロスビー波のような構造



ロスビー波のポンチ絵 →

$$\text{渦位} = (\omega_a \cdot \nabla \theta) / \rho$$

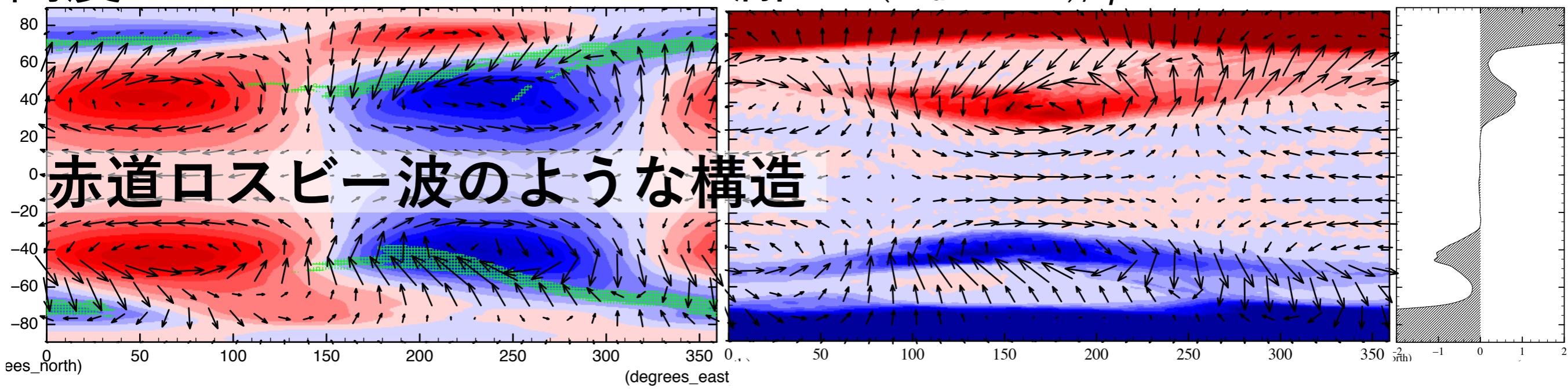


- 西向きに伝播するロスビー波が存在するには、渦位の平均南北勾配がつねに正でなければならない。

高度 65 km

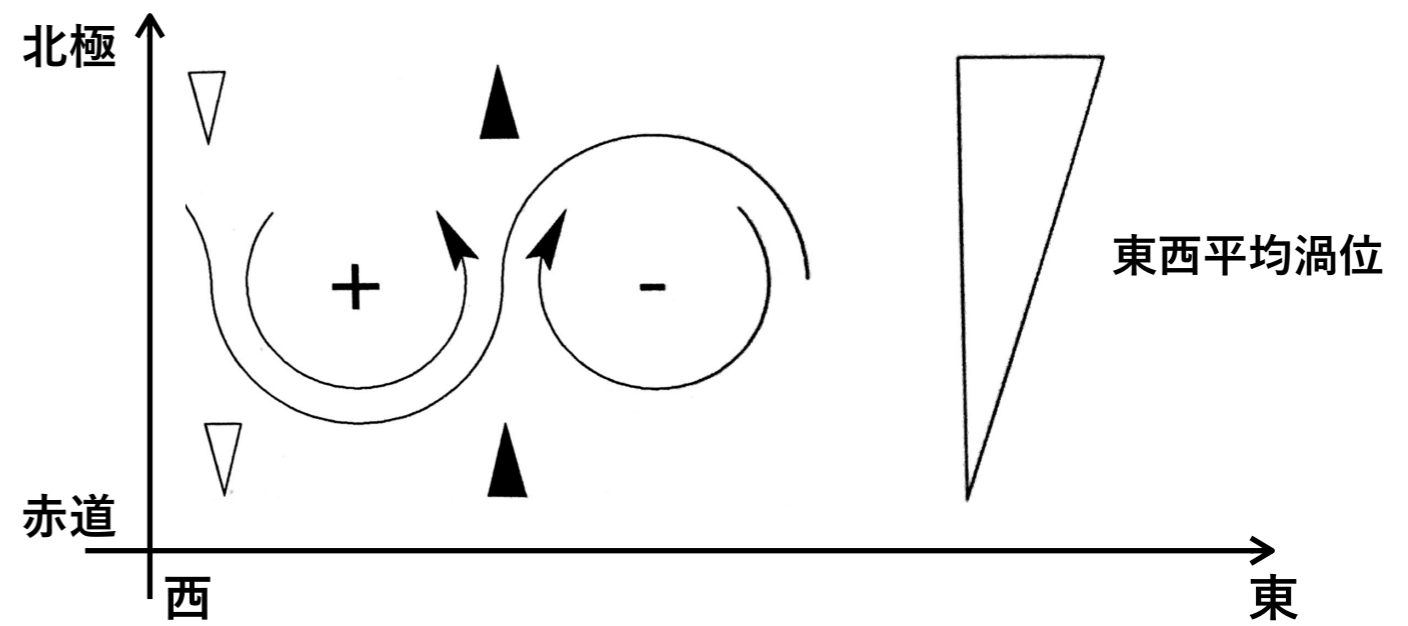
渦位 = $(\omega_a \cdot \nabla \theta) / \rho$

東西平均



ロスビー波のポンチ絵 →

渦位 = $(\omega_a \cdot \nabla \theta) / \rho$



- 渦位の南北勾配の符号が変化している
- 擾乱の振幅が平均場に対して大きい

➡ 地球気象学での赤道ロスビー波とは異なる

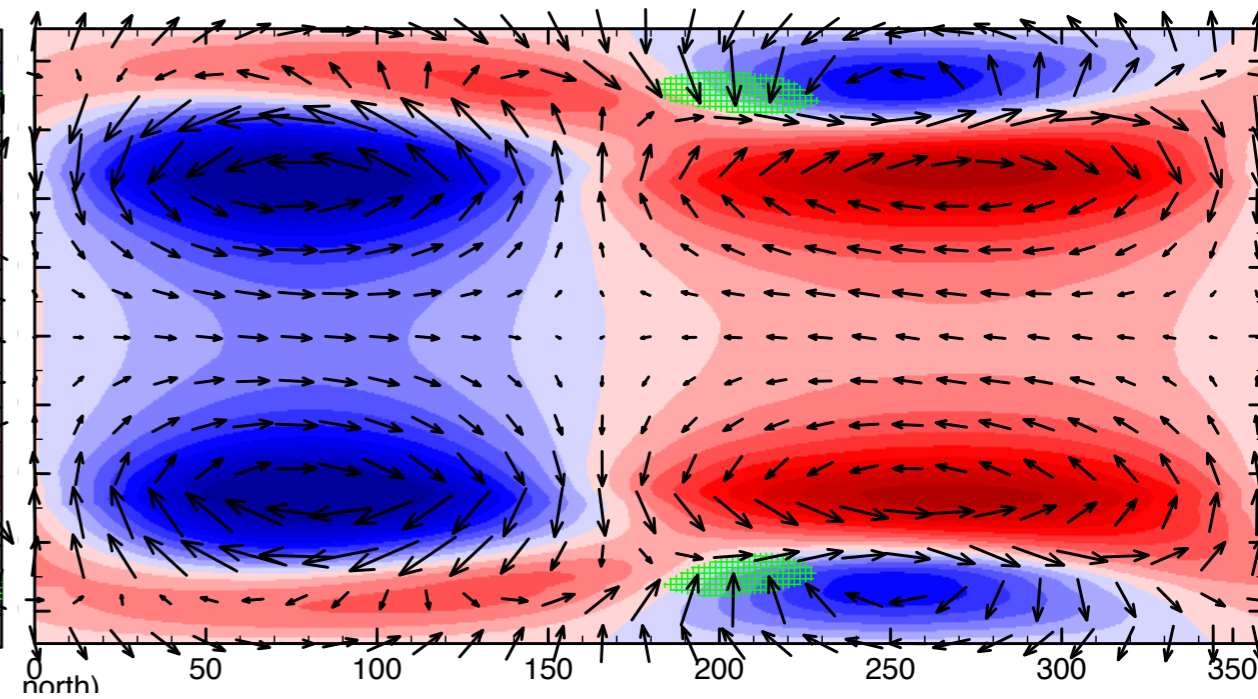
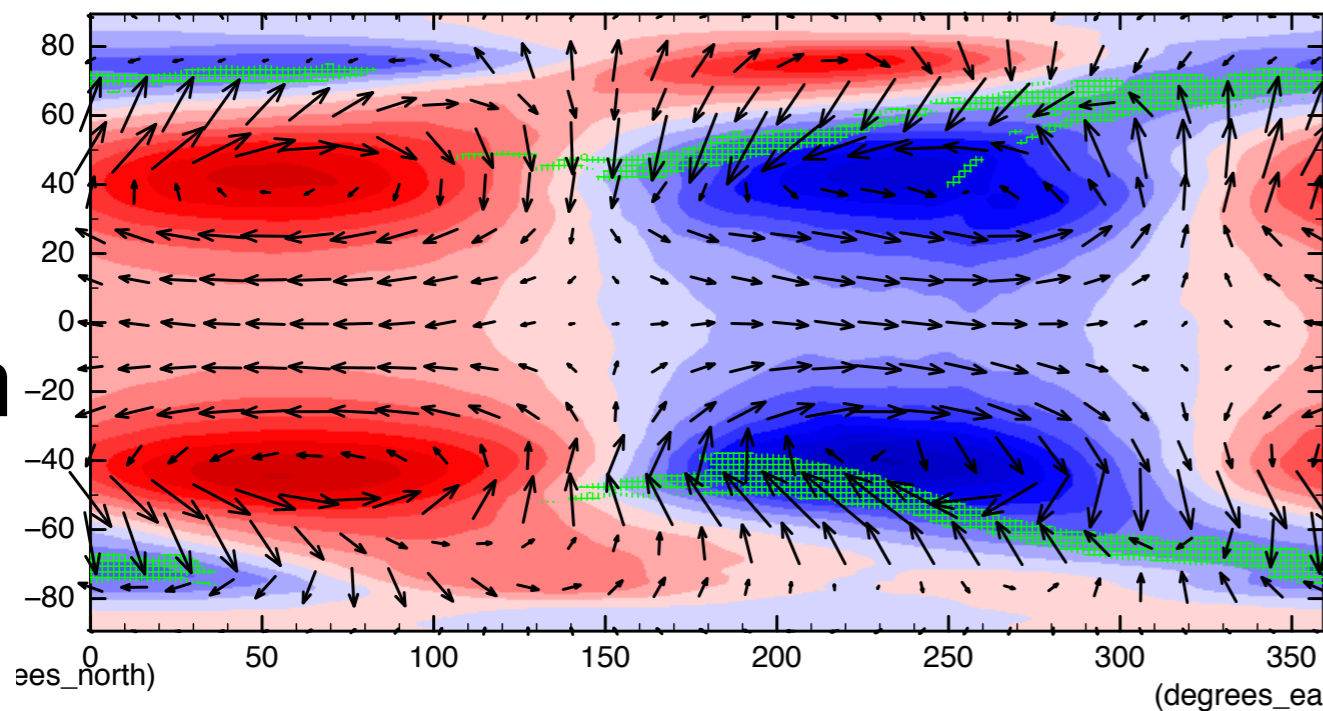
✓ 自転の遅い金星気象学の難しさ

ω_a : 絶対渦度、 θ : 温位、 ρ : 密度

日変化なし | 0.1 K/km

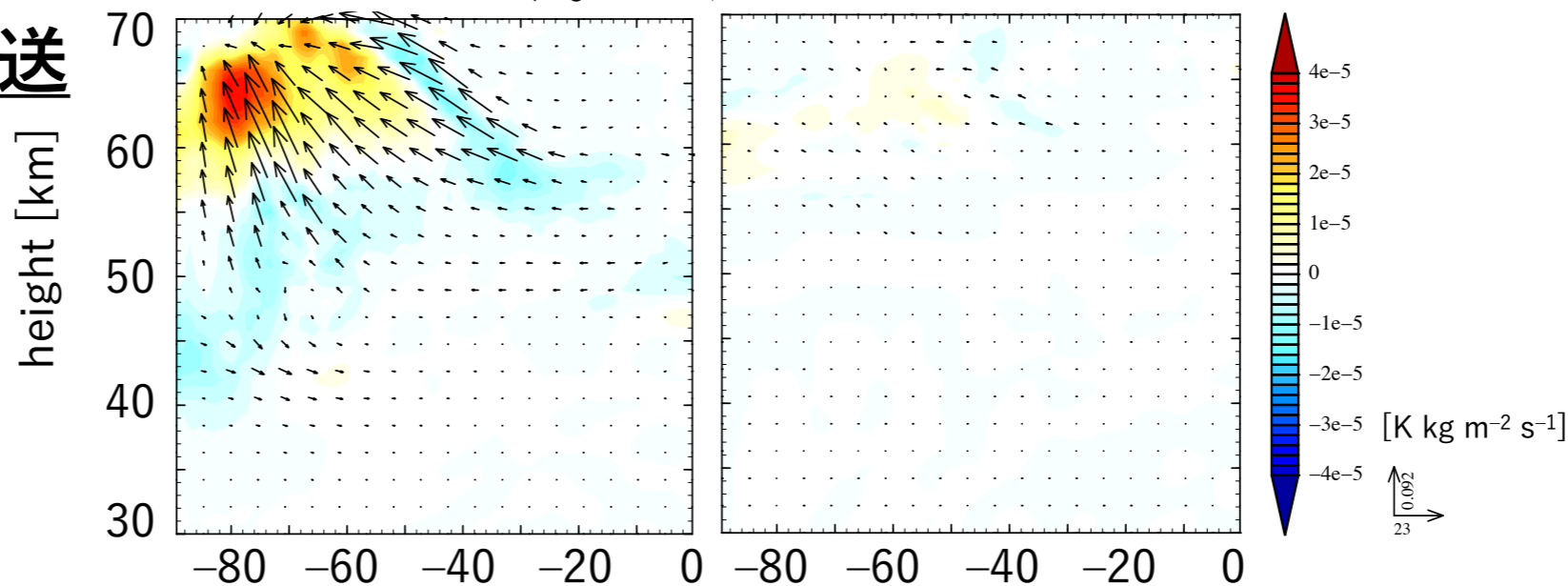
4 K/km

65 km



擾乱成分による熱輸送

ベクトル： $(\overline{v'\theta'}, \overline{w'\theta'})$
 色：収束/発散



- 擾乱成分による 極上空向きの熱輸送 は 傾圧不安定 の発生を示唆する。
 - 安定度が低い → 傾圧不安定
 - 赤道ロスビー波のような構造 と 極域の渦との接続(?)
 - 南北流の収束領域の形成 → 強い下降流 → 惑星規模ストリーク構造

今日のお話 | ここまでのまとめ

① 金星大気循環の特徴

- ・ 金星は、自転が遅くて、空気が濃く、全球雲で覆われている
- ・ 大気は自転より約60倍も速く回転 = スーパーローテーション
- ・ 子午面循環 説 と 熱潮汐波 説 の 2 つ の 仮 説

② 大気大循環モデル (GCM) による研究

- ・ 長期積分が必要・観測が少ない = 金星大気計算の難しさ
- ・ 2000年代までは力学モデル、なのにモデル間のバラツキ 大
- ・ 2010年以降、モデル間相互比較・高度複雑化・高解像度化

③ 金星AFESを用いた高解像度計算 with 金星探査機あかつきの観測

- ・ 地球シミュレータ用のGCMを金星化して高解像度計算
- ・ あかつきIR2カメラの夜面画像が捉えた、惑星規模のストリークと、類似の構造がシミュレーションで得られた
- ・ 赤道ロスビー波・ケルビン波のような構造により南北同期(?)
- ・ 低安定度層 → 傾圧不安定 がストリーク形成のカギ(?)

今日のお話のまとめ

① 金星大気循環の特徴

- 金星は、自転が遅くて、空気が濃く、全球雲で覆われている
- 大気は自転より約60倍も速く回転 = スーパーローテーション
- 子午面循環 説 と 熱潮汐波 説 の 2 つ の 仮 説

② 大気大循環モデル (GCM) による研究

- 長期積分が必要・観測が少ない = 金星大気計算の難しさ
- 2000年代までは力学モデル、なのにモデル間のバラツキ 大
- 2010年以降、モデル間相互比較・高度複雑化・高解像度化

③ 金星AFESを用いた高解像度計算 with 金星探査機あかつきの観測

- 地球シミュレータ用のGCMを金星化して高解像度計算
- あかつきIR2カメラの夜面画像が捉えた、惑星規模のストリークと、類似の構造がシミュレーションで得られた
- 赤道ロスビー波・ケルビン波のような構造により南北同期(?)
- 低安定度層 → 傾圧不安定 がストリーク形成のカギ(?)