

UVI 雲追跡風の観測システムシミュレーション実験による ロスビー波の再現とその金星大気循環への影響

小守 信正¹, 杉本 憲彦^{1,2}, 藤澤 由貴子¹, 阿部 未来³, 神山 徹⁴, 安藤 紘基⁵, 高木 征弘⁵, 山本 勝⁶
(1: 慶大 自然セ, 2: 慶大 日吉物理, 3: 横国大 先進学環, 4: 産総研 DigiARC, 5: 京産大 理, 6: 九大 応力研)

要旨: 金星の雲頂高度付近では、低緯度では周期約 4 日のケルビン波、中緯度では約 5 日のロスビー波がしばしば観測されており、スーパーローテーションなどの大気循環の維持に重要な役割を担っていると考えられている。本研究では、線形波動伝播モデルで生成されたロスビー波に伴う水平風を、金星探査機「あかつき」雲追跡風と見做して雲頂高度 (~70 km) に 30 日間に渡り同化する観測システムシミュレーション実験を行った。Eliassen–Palm flux を用いた解析から、中緯度域ではロスビー波の振幅増大が東西平均東西風の減速を誘起していることが示された。またデータ同化停止後、同化を行わなかった場合とは異なる準平衡状態に約 10 日で移行したことから、新たな観測データが得られなくても、同化された観測の『記憶』がしばらくは維持され得ることが示唆された。

第25回 惑星圏シンポジウム **かぜ&つち**

2024年2月21日(水), 東北大学 青葉サイエンスホール

UVI 雲追跡風の観測システムシミュレーション実験による ロスビー波の再現とその**金星**大気循環への影響

小守 信正¹✉, 杉本 憲彦^{1,2}, 藤澤 由貴子¹, 阿部 未来³,
神山 徹⁴, 安藤 紘基⁵, 高木 征弘⁵, 山本 勝⁶

¹慶應義塾大学 自然科学研究教育センター, ²慶應義塾大学 日吉物理学教室, ³横浜国立大学 大学院先進実践学環,
⁴産業技術総合研究所 デジタルアーキテクチャ研究センター, ⁵京都産業大学 理学部, ⁶九州大学 応用力学研究所

✉ komori-n@keio.jp

基盤研究 (S) 『あかつきデータ同化が明らかにする金星大気循環の全貌』

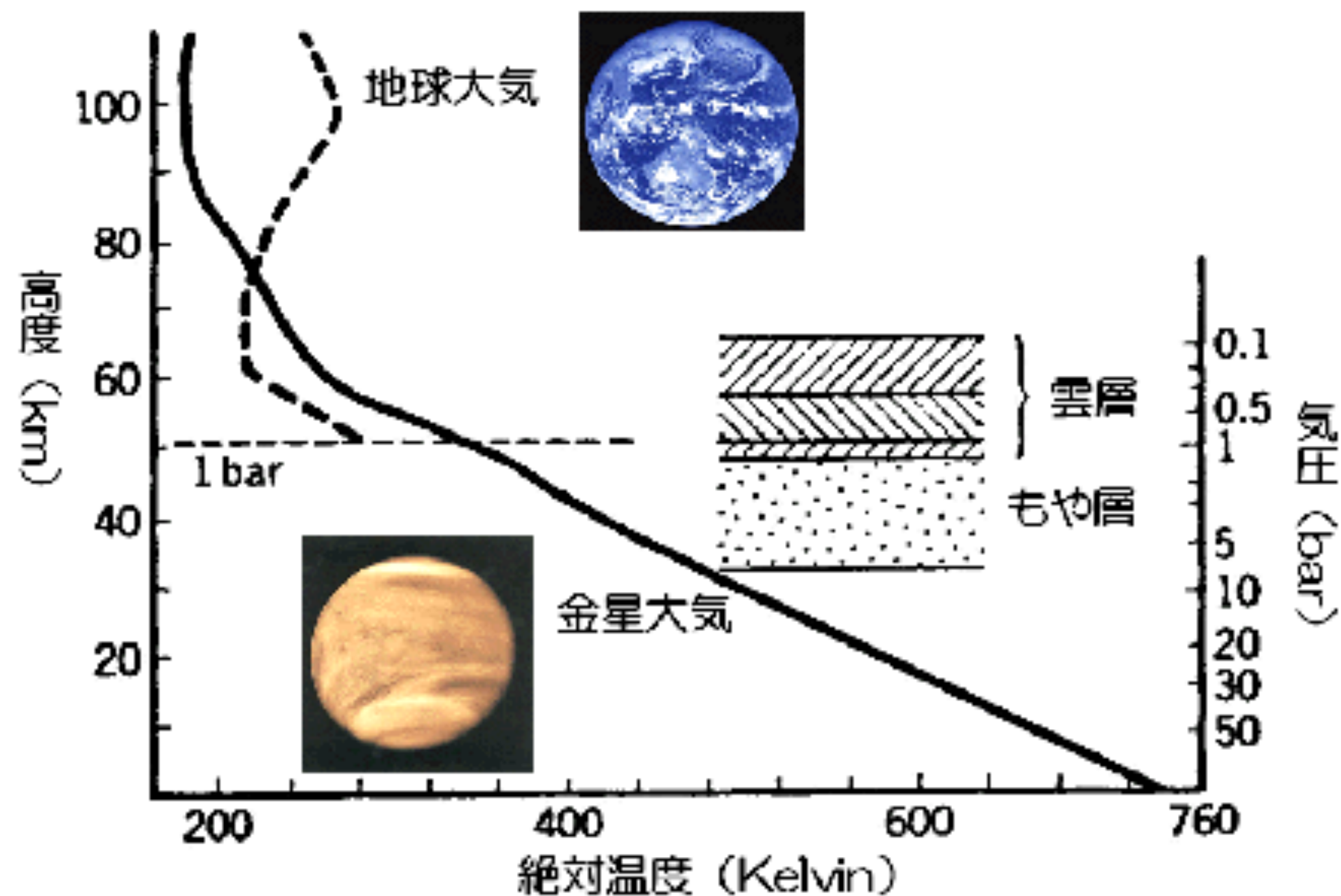


はじめに

金星の特徴

- ◎ 自転が極めて遅い
- ◎ CO₂ の濃密な大気
- ◎ 厚い雲層 (45–70 km)

図は https://www.stp.isas.jaxa.jp/venus/sci_meteor.html から拝借

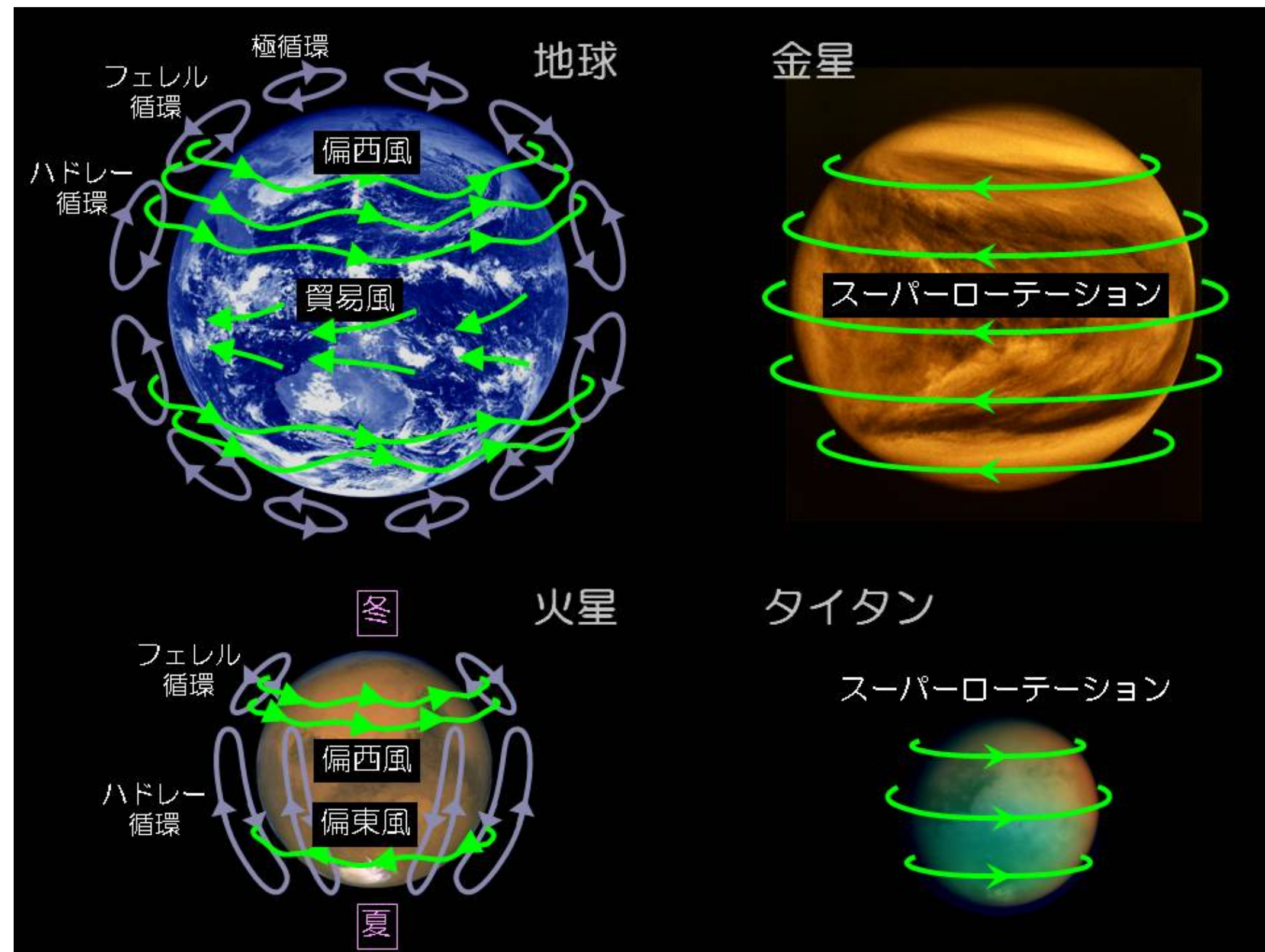


	金星	地球
半径	6050 km	6378 km
重力	8.9 m/s ²	9.8 m/s ²
公転周期	225日	365日
自転周期	-243日	1日
太陽日	-117日	1日
大気組成	CO ₂	N ₂ , O ₂
アルベド	0.78	0.30
表面気圧	92 bar	1 bar

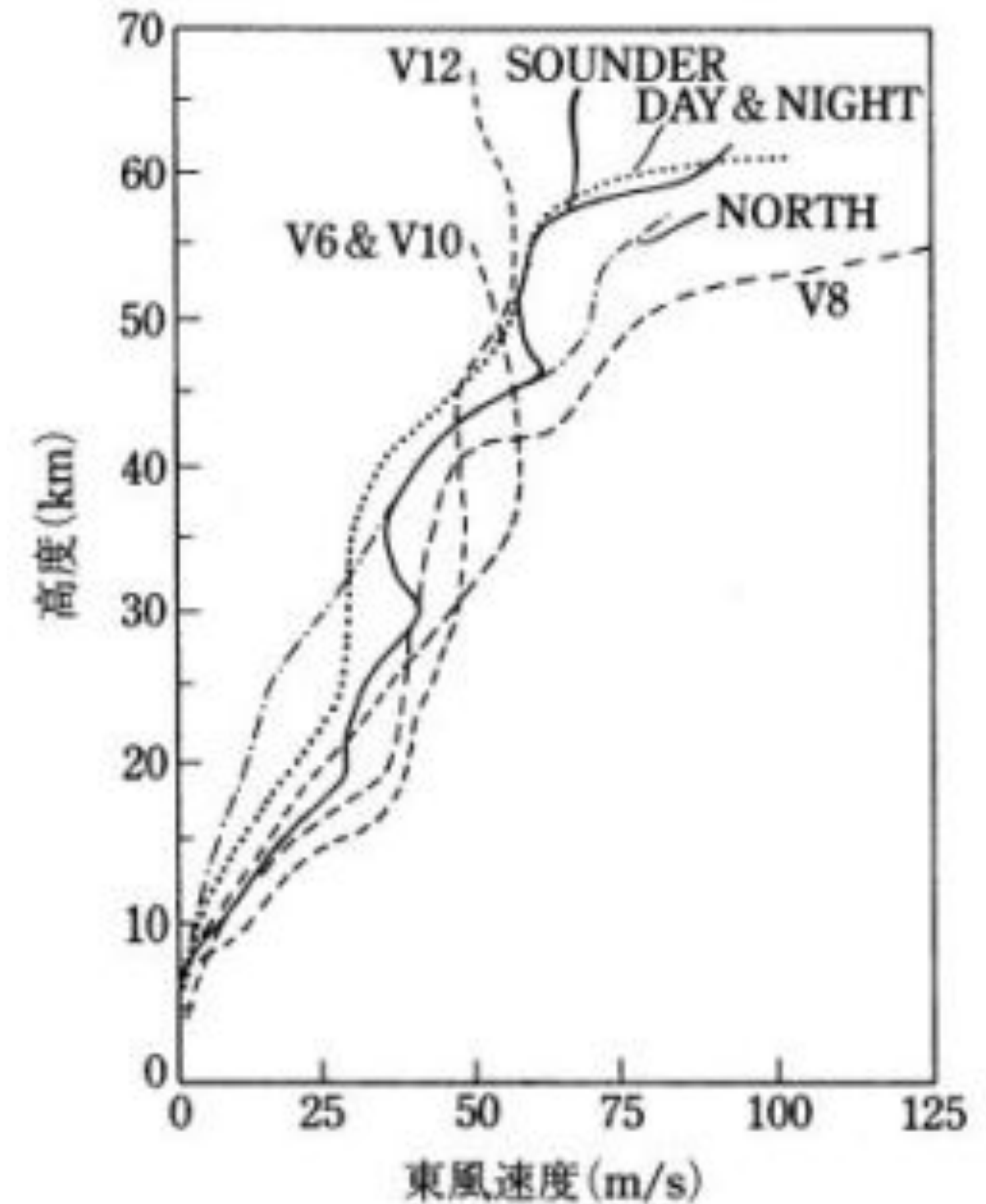
はじめに

スーパーローテーション Super Rotation

- ◎ 自転を追い越す高速の東風（約4日で一周する）



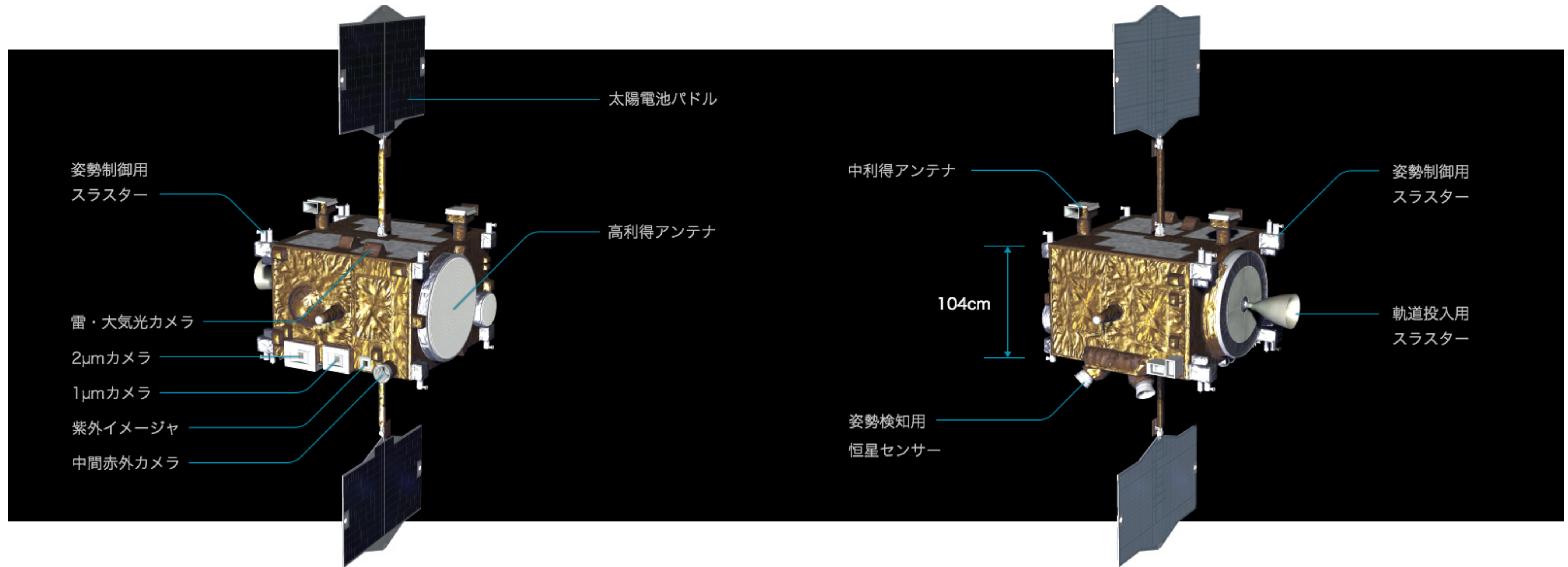
図は https://www.stp.isas.jaxa.jp/venus/sci_meteor.html から拝借



はじめに

金星探査機「あかつき」 Venus Climate Orbiter “AKATSUKI” (PLANET-C)

- ◎ 紫外イメージャ (UVI; 283 nm: SO₂ & 365 nm: unknown absorber), 1- μ m カメラ (IR1), 2- μ m カメラ (IR2), 中間赤外カメラ (LIR), 雷・大気光カメラ (LAC), 超高安定発振器 (USO)



図は <https://akatsuki.isas.jaxa.jp/mission/spacecraft/> から拝借

はじめに

観測的知見

- 雲頂高度では、低緯度で **4日波** (ケルビン波)・中緯度で **5日波** (ロスビー波) が存在 (e.g., Rossow et al., 1990)
→ これらの波が Super Rotation などの金星大気循環に与える影響を調べたい

金星データ同化システム ALEDAS-V を利用した先行研究

- Sugimoto et al. (2021) は別の VGCM で、Sugimoto et al. (2022) は線形波動伝播モデルで生成された **ケルビン波** に伴う水平風を同化する **観測システムシミュレーション実験** (OSSE) を実施 → **観測頻度**や**観測範囲**を変更した場合の再現性を調査
- Fujisawa et al. (2022) は「あかつき」UVI 雲追跡風データを同化し、**世界初の金星客観解析データセット**を構築 → **熱潮汐波**の再現性が向上することを確認

本研究

- 線形波動伝播モデルで生成された **ロスビー波** に伴う水平風を同化する OSSE を通じて、その再現性や問題点を確認し、金星大気循環に与える影響を明らかにする

数値モデル

金星大循環モデル AFES-Venus (Sugimoto et al., 2014)

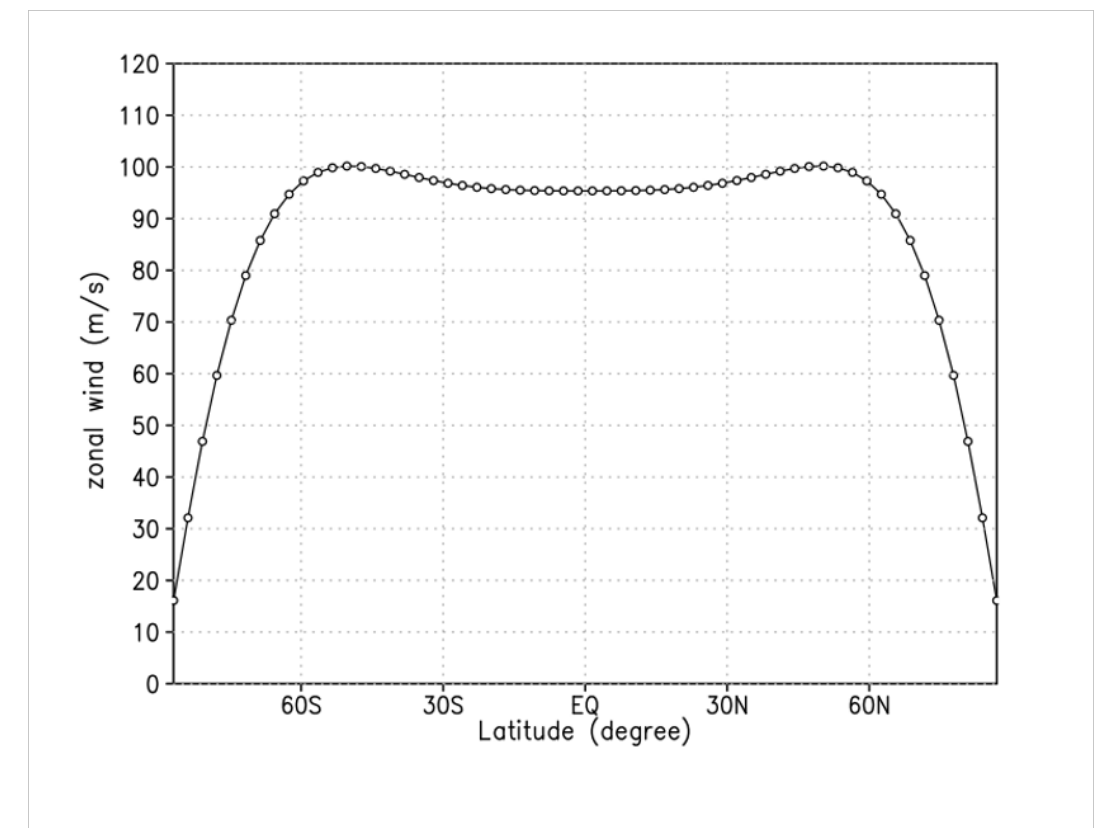
- ◎ 水平解像度: T42 (格子数: 128×64), 鉛直: 60層 (2 km 幅で高度 120 km まで)
- ◎ 比熱: 一定値 ($1000 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- ◎ 太陽加熱: Tomasko et al. (1980)
- ◎ 赤外冷却: ニュートン冷却 (Crisp, 1986)
- ◎ 地形および惑星境界層は考慮しない
- ◎ 地表で Rayleigh 摩擦 (時定数: 0.5日), 80 km 以高でスポンジ層
- ◎ 鉛直渦拡散: $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; 水平渦拡散: 4次, 時定数 0.1日
- ◎ 熱潮汐波は無し
- ◎ 自転の向きは地球と同じ (Super Rotation は西風)

ネイチャーラン

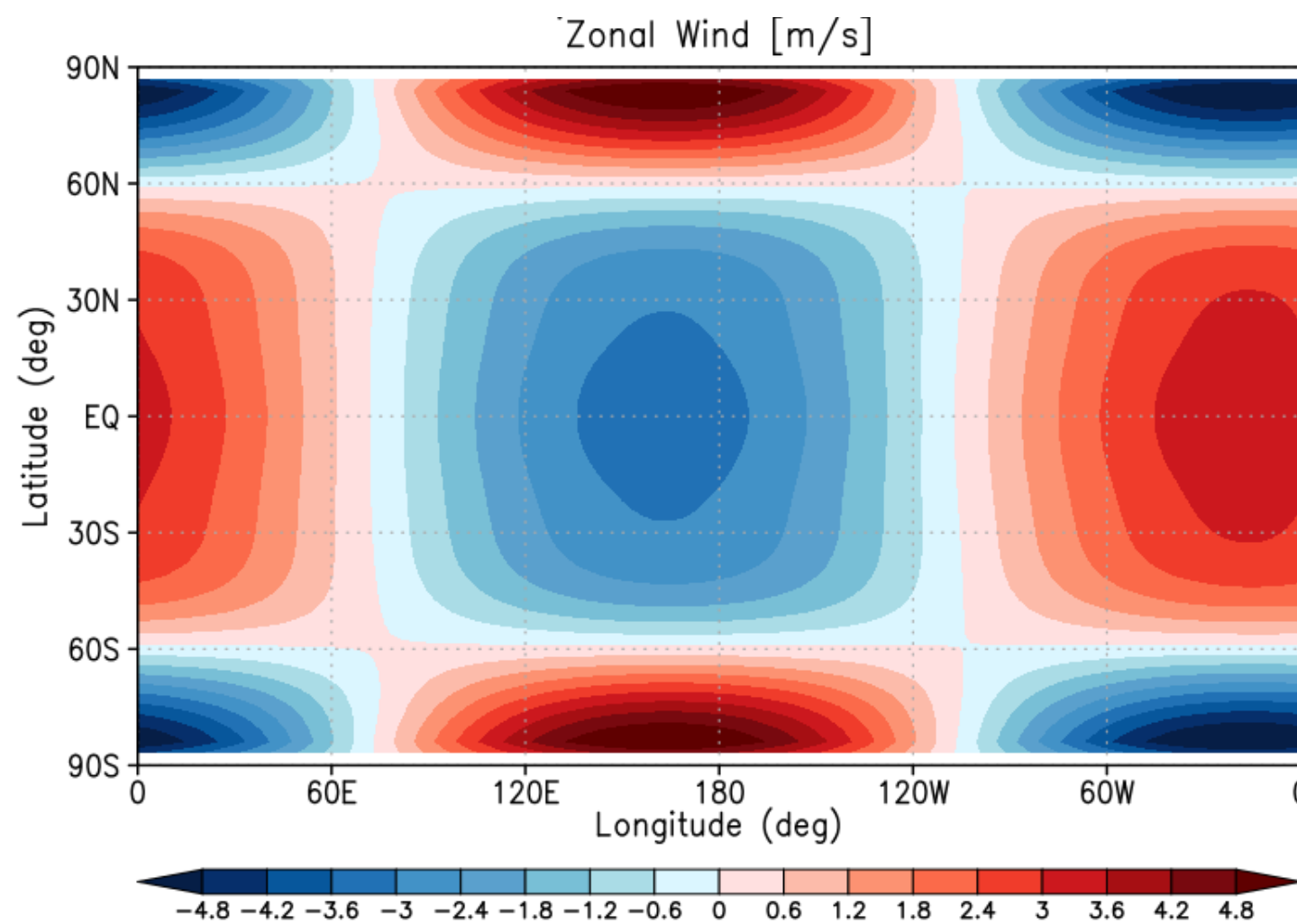
線形波動伝播モデル (Imamura, 2006; Kouyama et al., 2015) で生成されたロスビー波

- ◎ AFES-Venus と同様の基本場 (低・中緯度域で $\sim 100 \text{ m s}^{-1}$ の西風)
- ◎ 赤道 β 面における**周期 5.7日**のロスビー波を底面 (高度 60 km) で与える
- ◎ 水平解像度: 3° (格子数: 120×58)
- ◎ **$60^\circ\text{N} \cdot 60^\circ\text{S}$ 付近に渦構造**

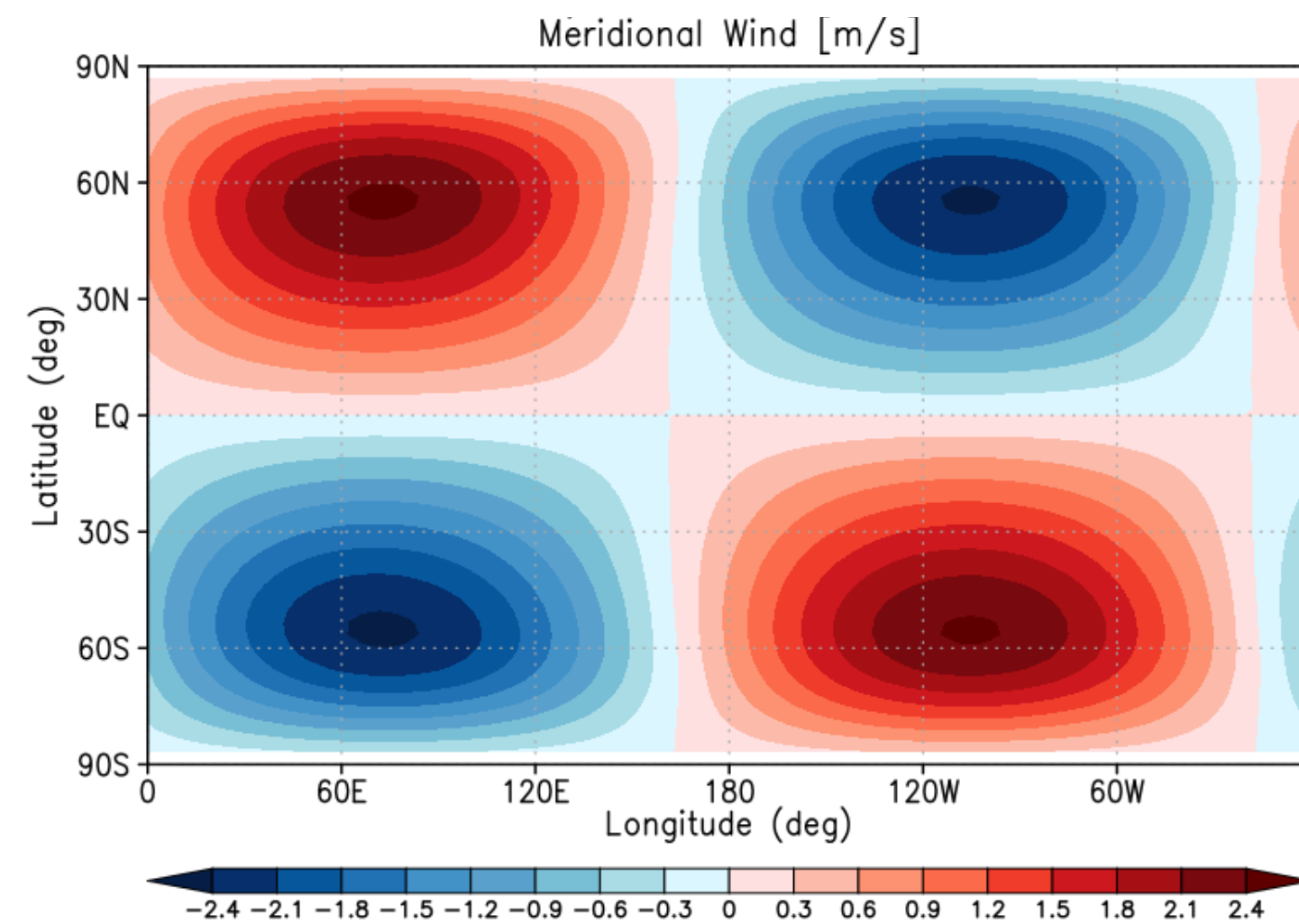
基本場



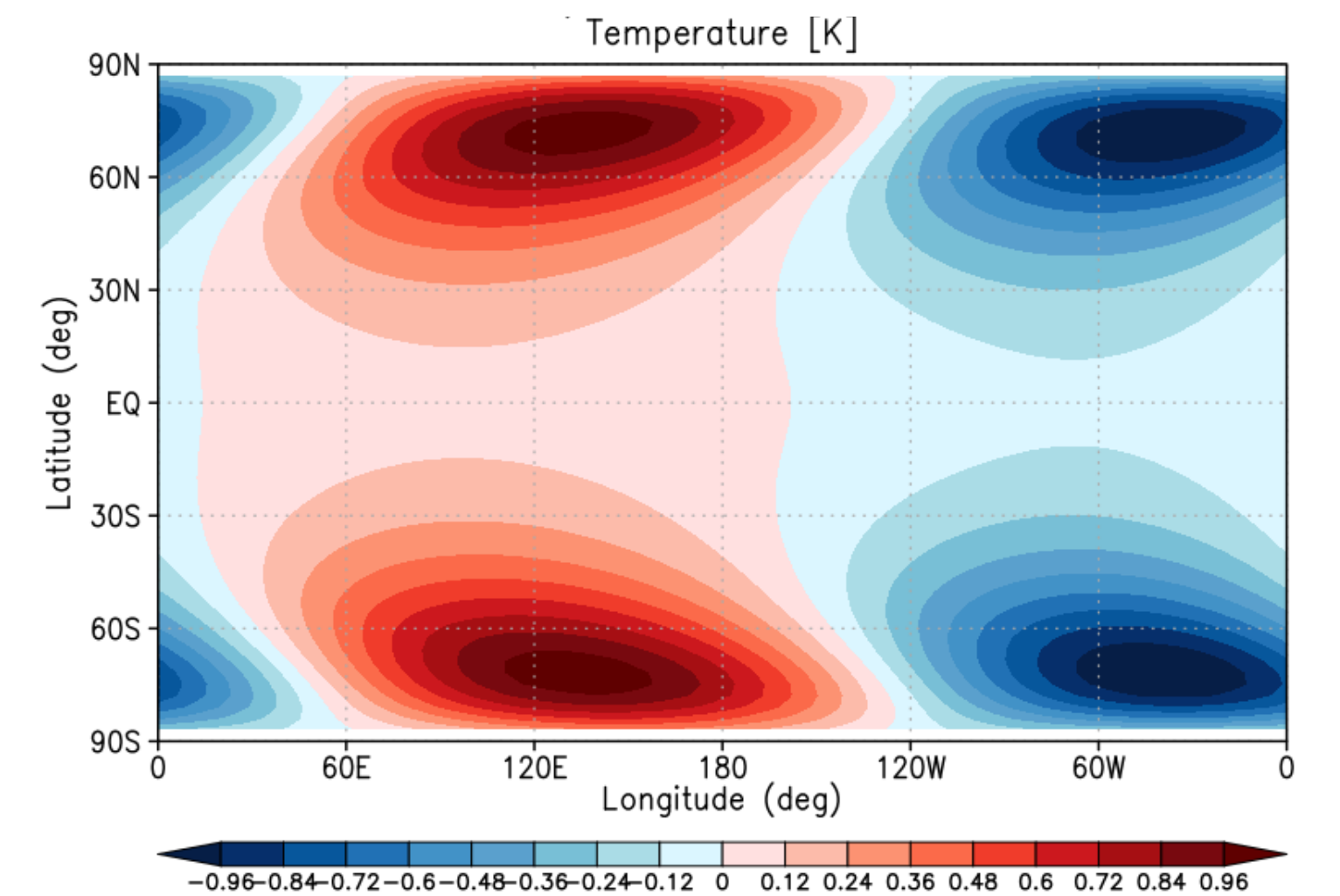
東西風偏差 (70 km)



南北風偏差 (70 km)



温度偏差 (70 km)



疑似観測

あかつき UVI 雲追跡風を模した観測

- ◎ 高度 70 km, 経度 120°E–120°W で1時間毎に**東西風・南北風**を「観測」
- ◎ 観測緯度幅を変えたデータを作成
- ◎ 3 m s⁻¹ のランダム誤差を付加

L30	30°S–30°N を観測
L45	45°S–45°N を観測
L60	60°S–60°N を観測
L75	75°S–75°N を観測
L90	90°S–90°N を観測
Lexc30	30°S–30°N 以外を観測
Lexc45	45°S–45°N 以外を観測
Lexc60	60°S–60°N 以外を観測
L0090	北半球 (Eq.–90°N) を観測

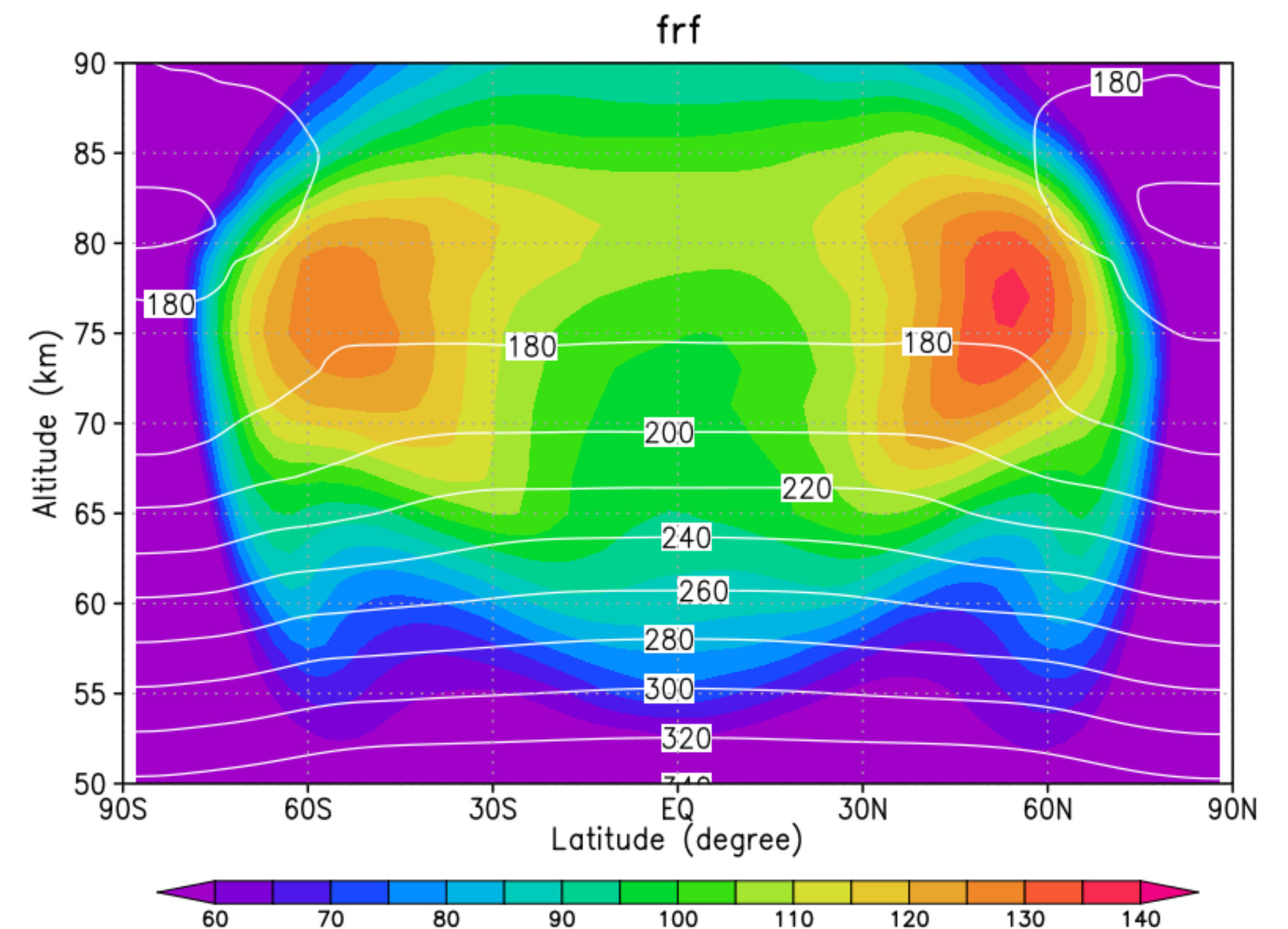
データ同化実験

金星データ同化システム ALEDAS-V (Sugimoto et al., 2017)

- ◎ AFES-Venus に局所アンサンブル変換カルマンフィルタ LETKF (Miyoshi & Yamane, 2007) を適用
- ◎ アンサンブルメンバー数: 31; 局所化スケール: 水平 400 km, 鉛直: $\log P = 0.4$
- ◎ 4 m s^{-1} の観測誤差を仮定, 10% のスプレッド膨張を使用

実験設定

- ◎ 理想化された SR を初期条件として4年間スピナップ
- ◎ 疑似観測データを6時間毎に30日間同化
その後 (同化をせずに) さらに30日間の予報実験
- ◎ 同化をしないケース (frf: free run forecast) と比較

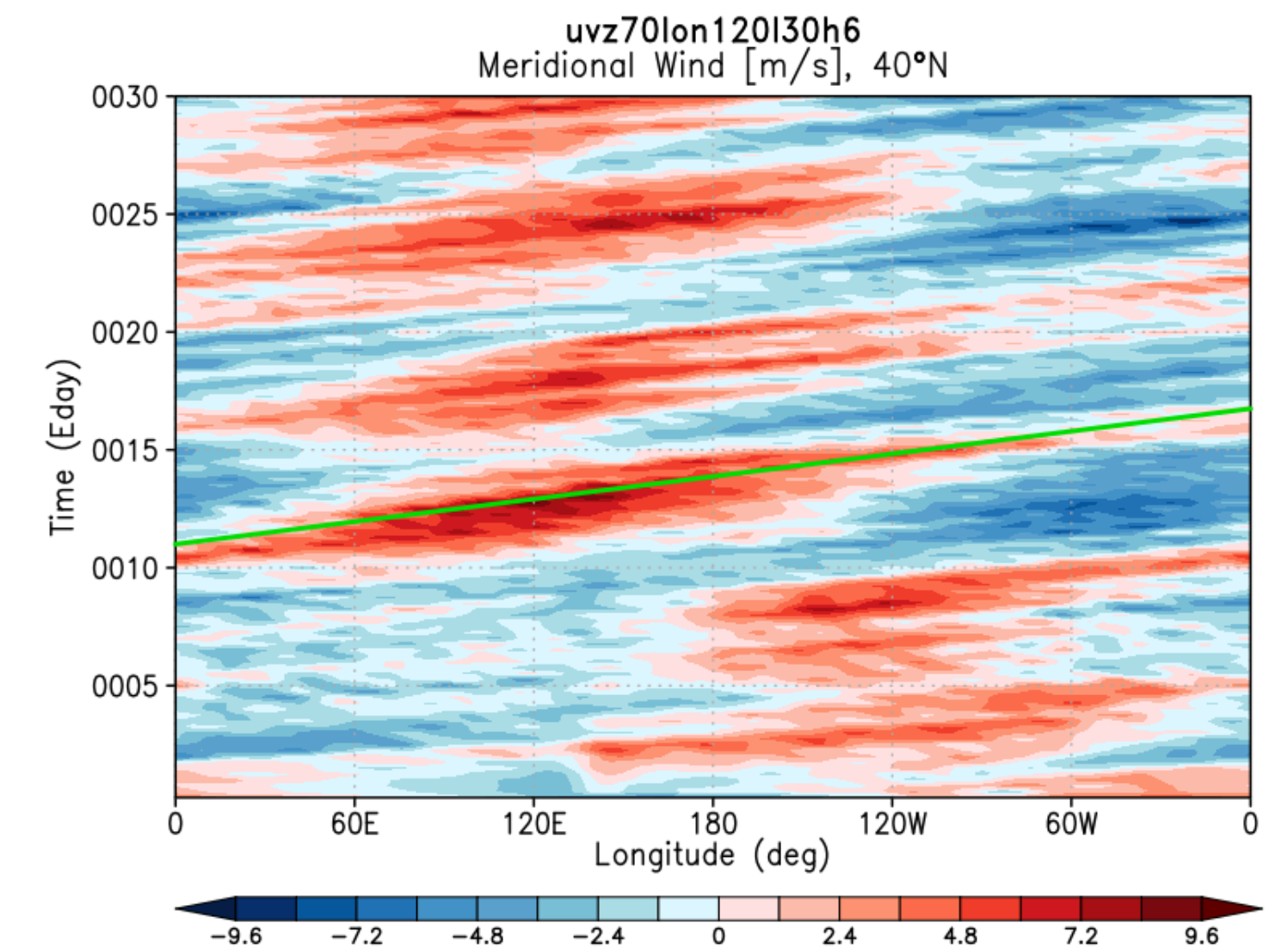
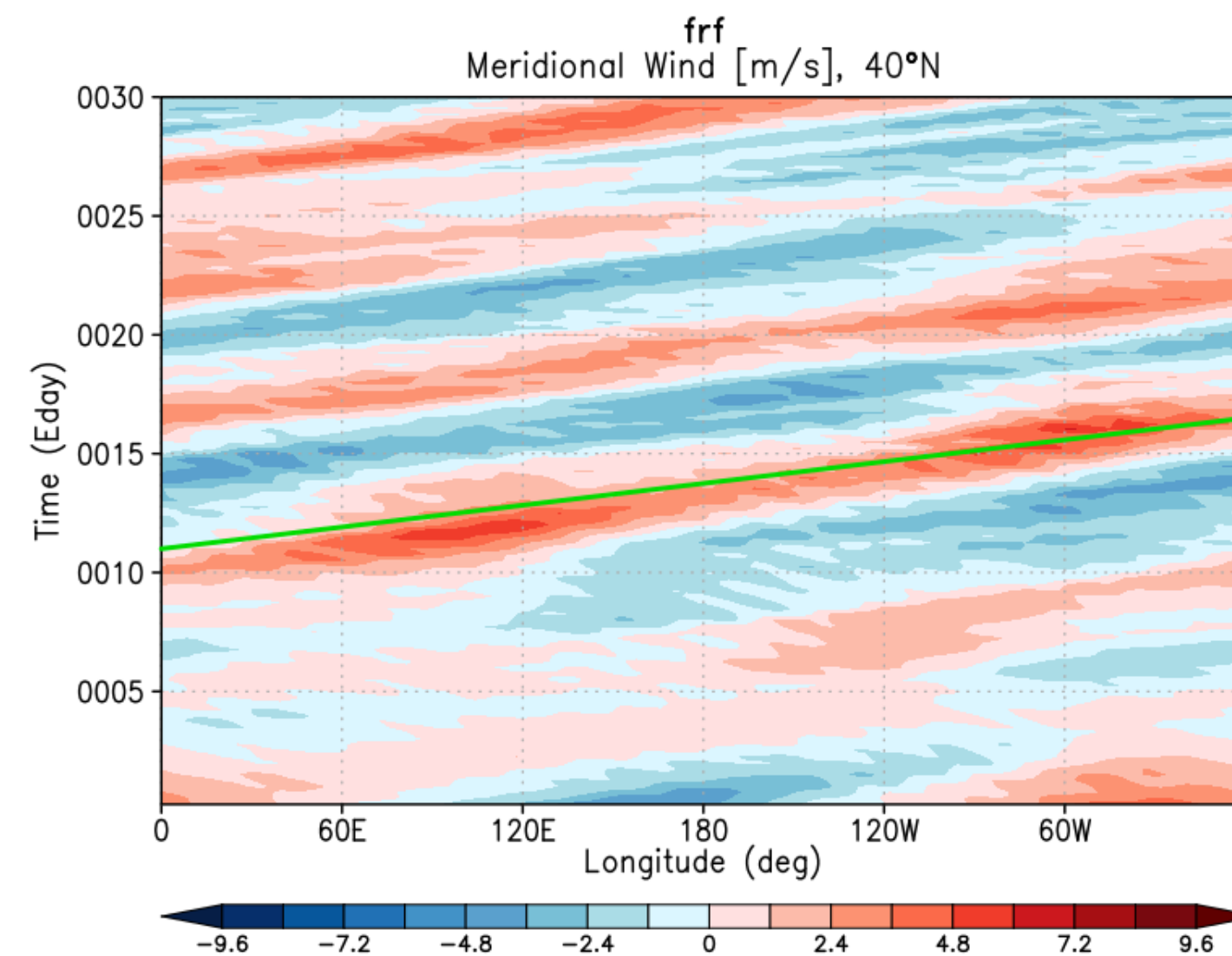
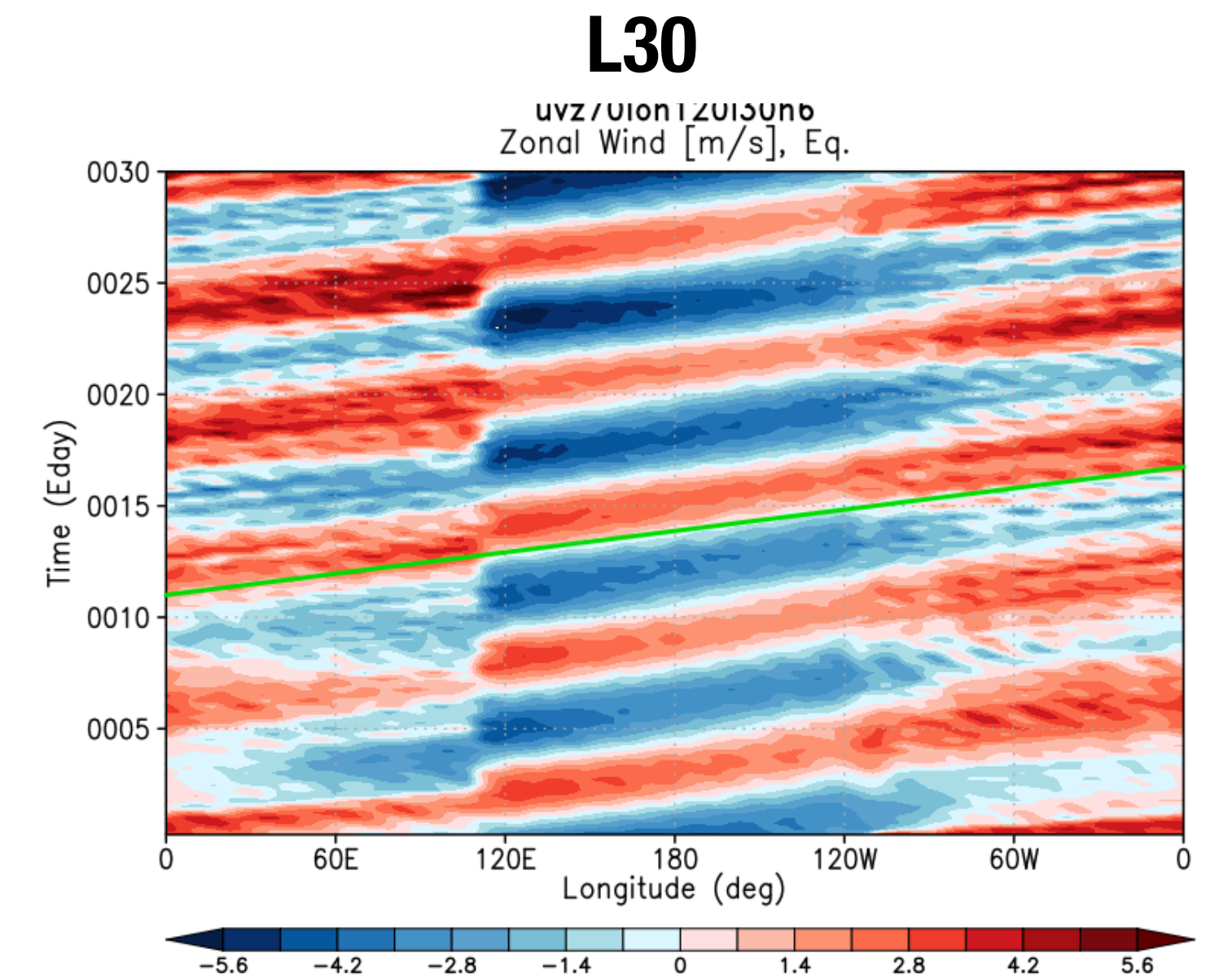
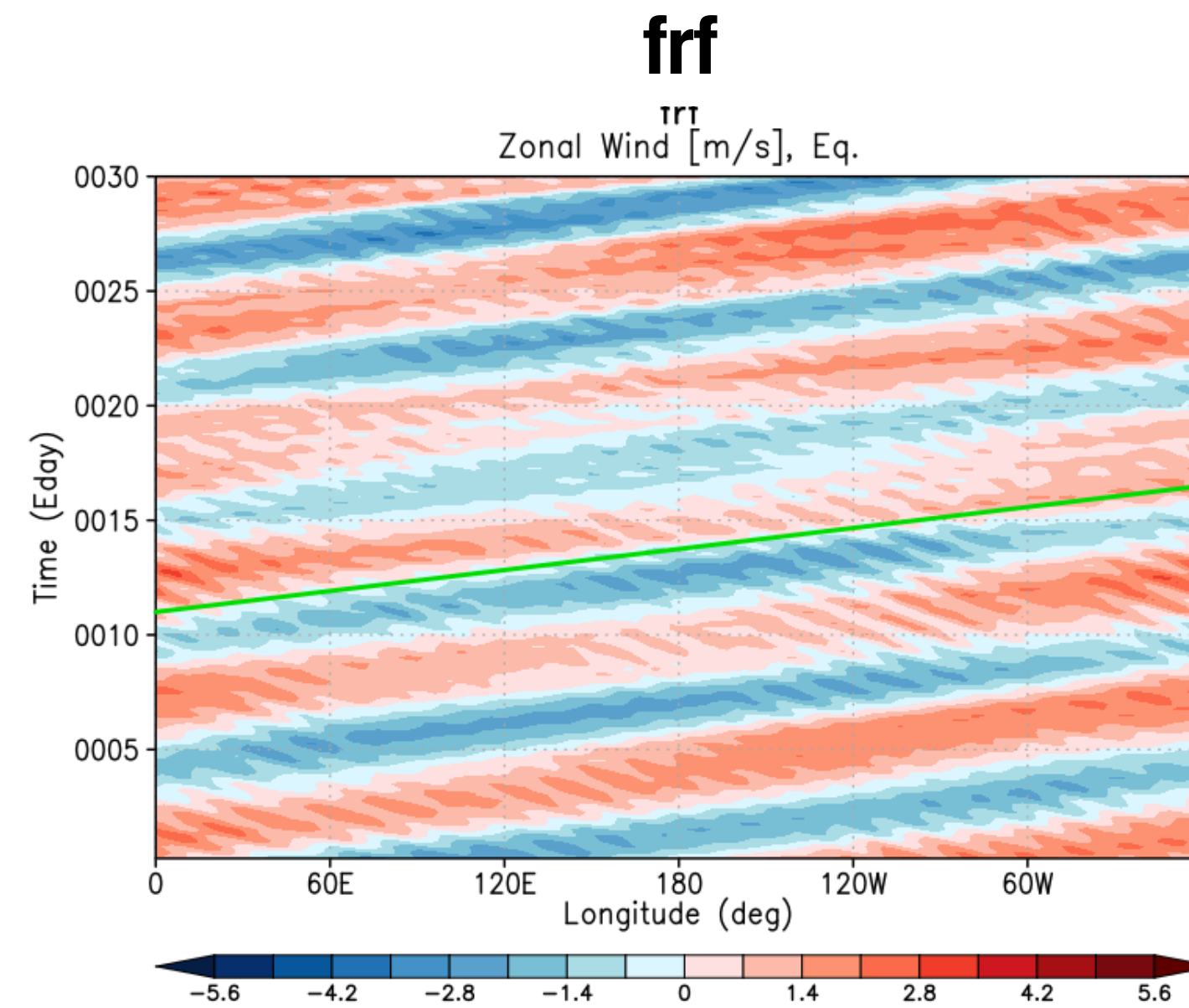


同化実験開始時の東西平均東西風

結果

高度 69 km での経度時間断面

- 上段：赤道での東西風偏差
- 下段：40°N での南北風偏差
- frf の周期は**5.5日**が卓越
- L30 の周期は**5.75日**が卓越

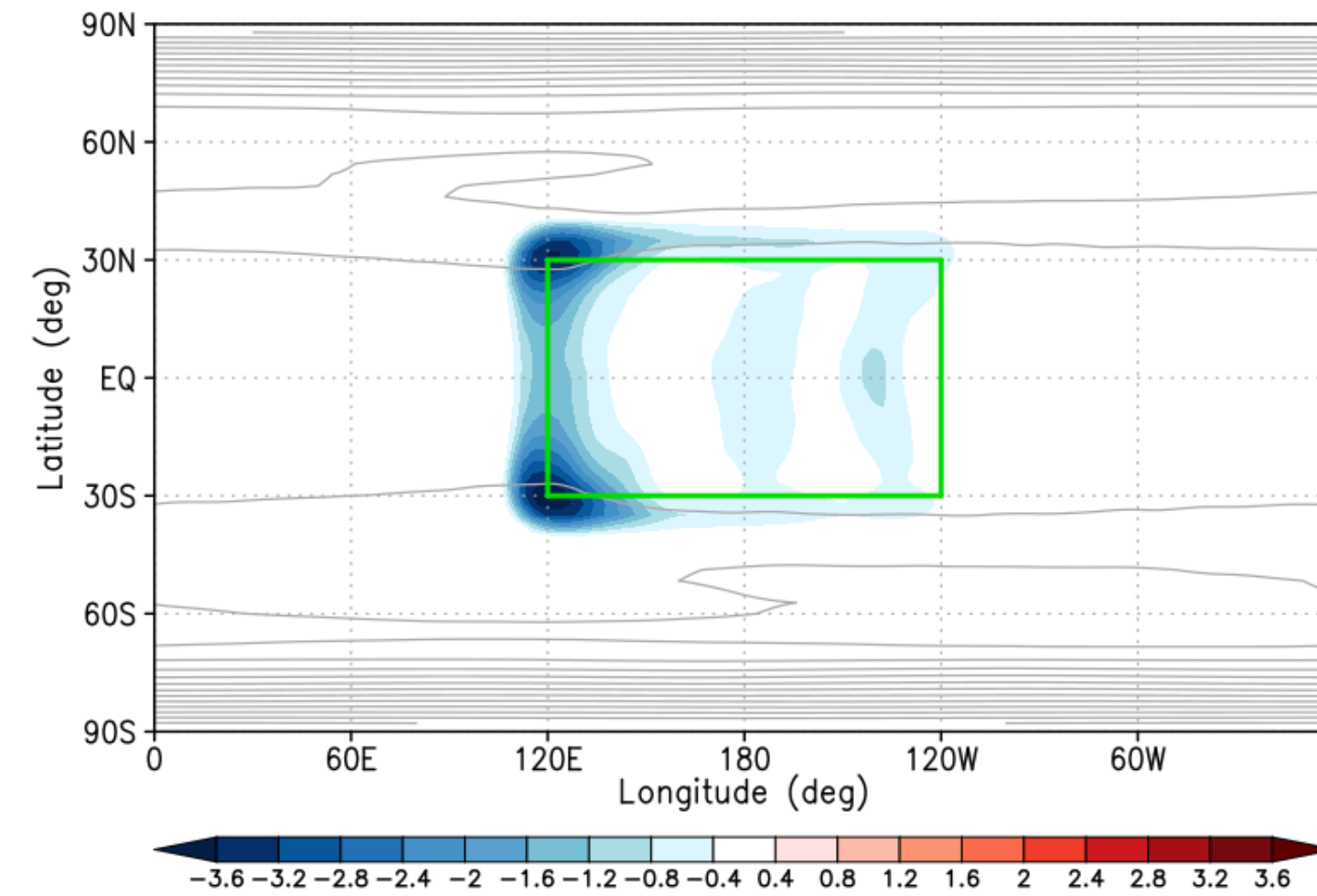


結果

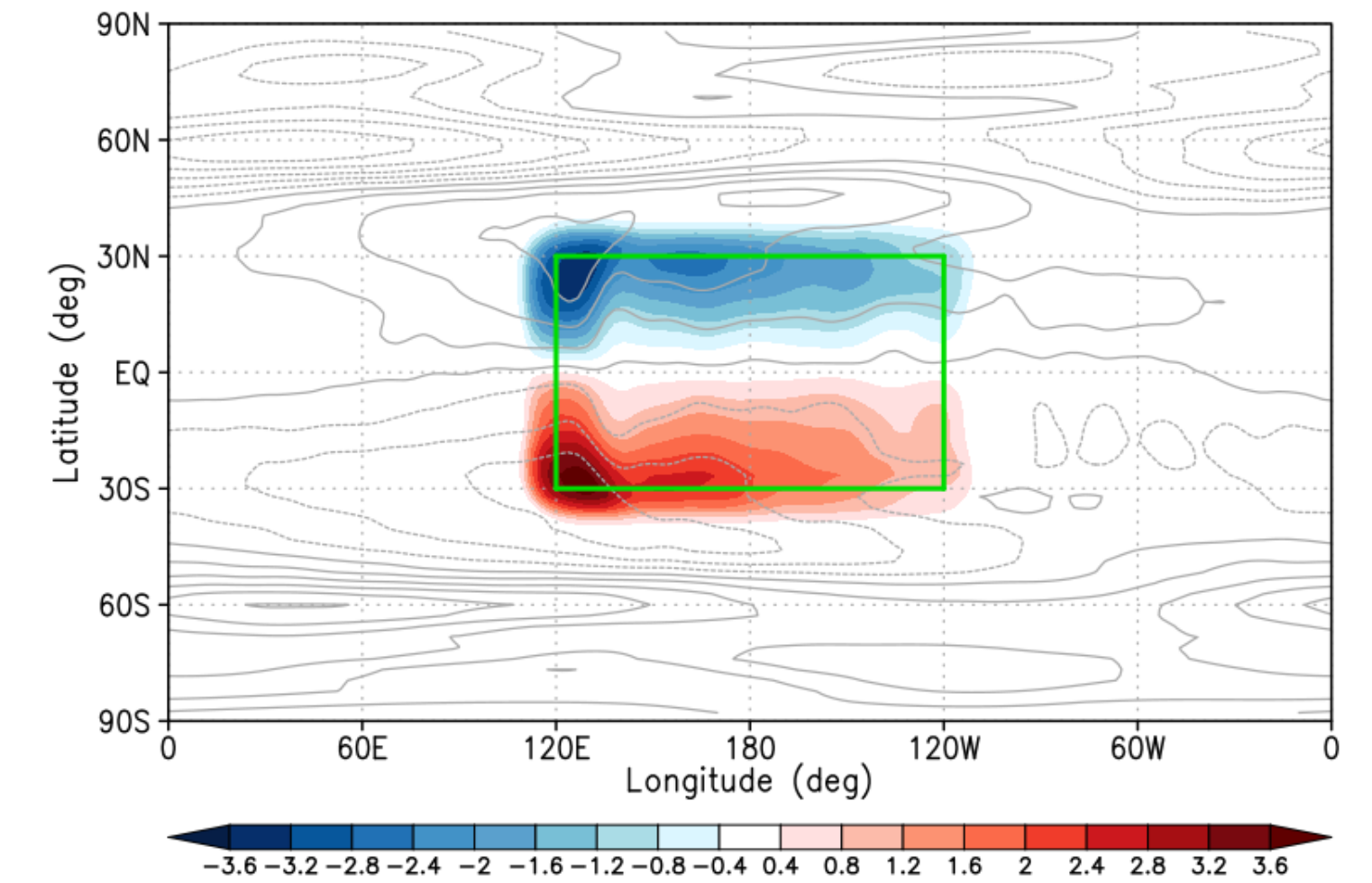
高度 69 km での解析インクリメント

- ◎ 第一推定値と解析値の30日間の**時間平均の差**
- ◎ $u^{obs} < u^{gues}$ なので西端で $\Delta u < 0$
- ◎ u を補償するように
北半球で $\Delta v < 0$, 南半球で $\Delta v > 0$
- ◎ $\Delta \omega$ は $\Delta u, \Delta v$ の収束に対応し,
地表まで到達

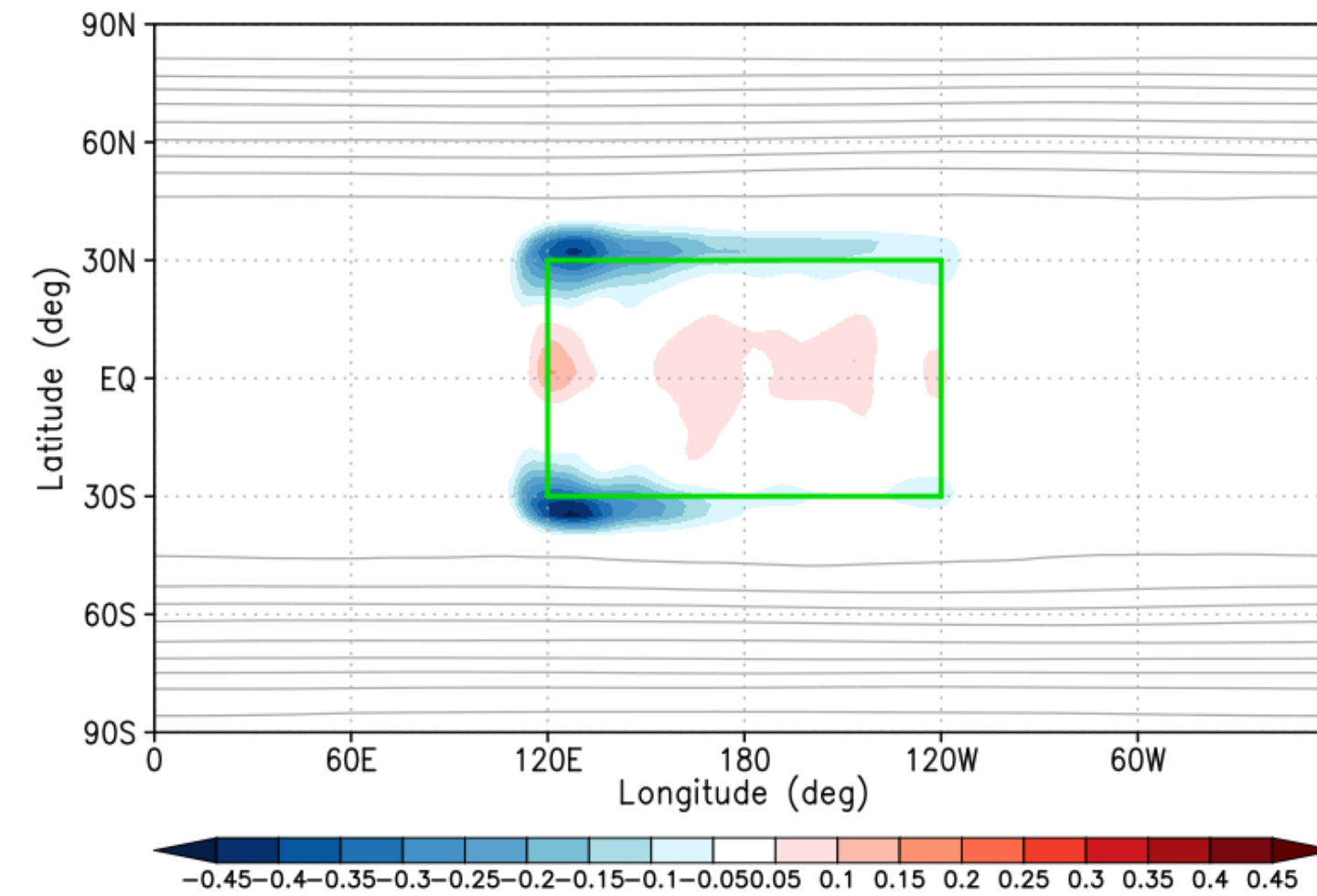
東西風 u



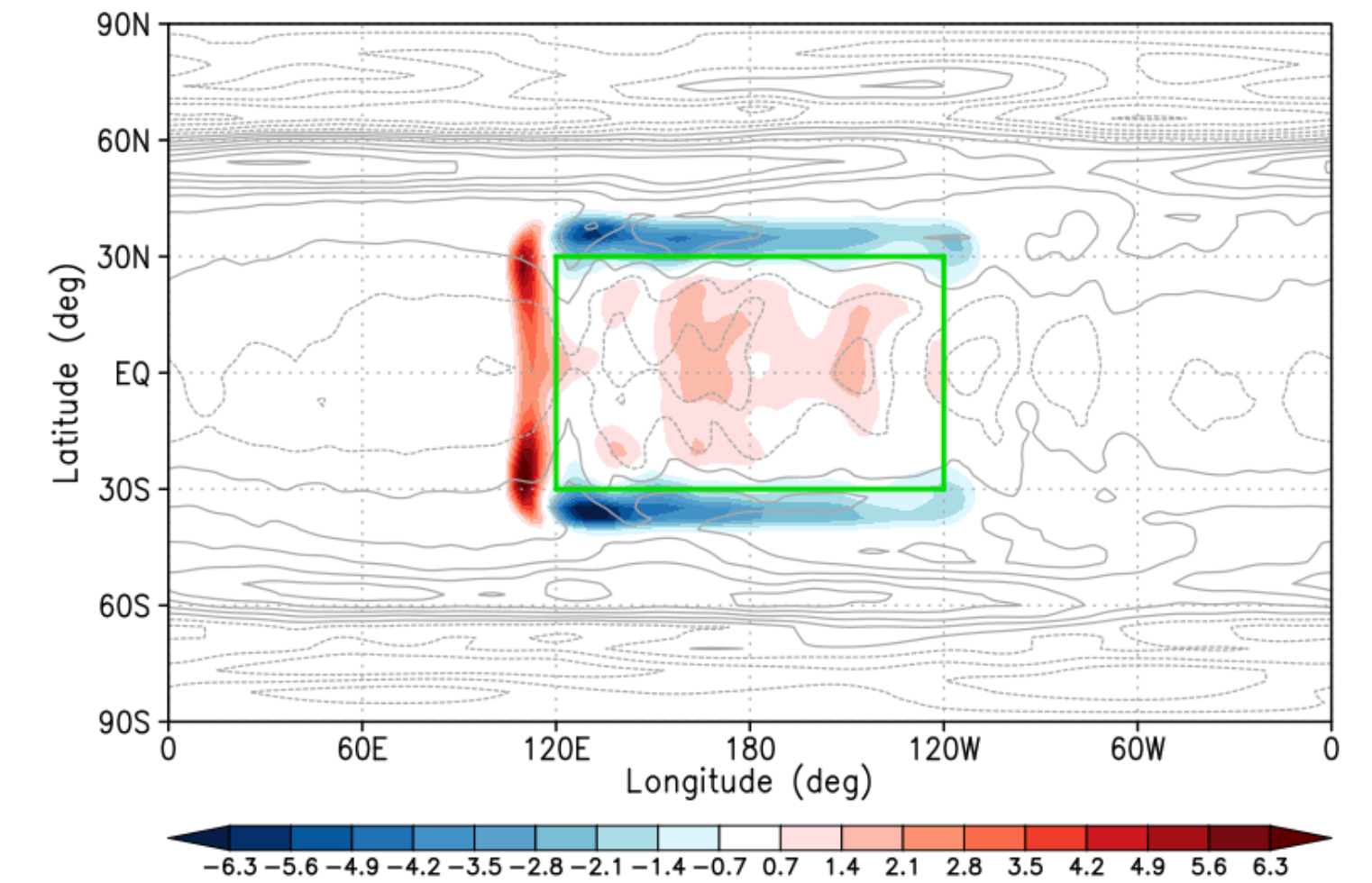
南北風 v



温度 T



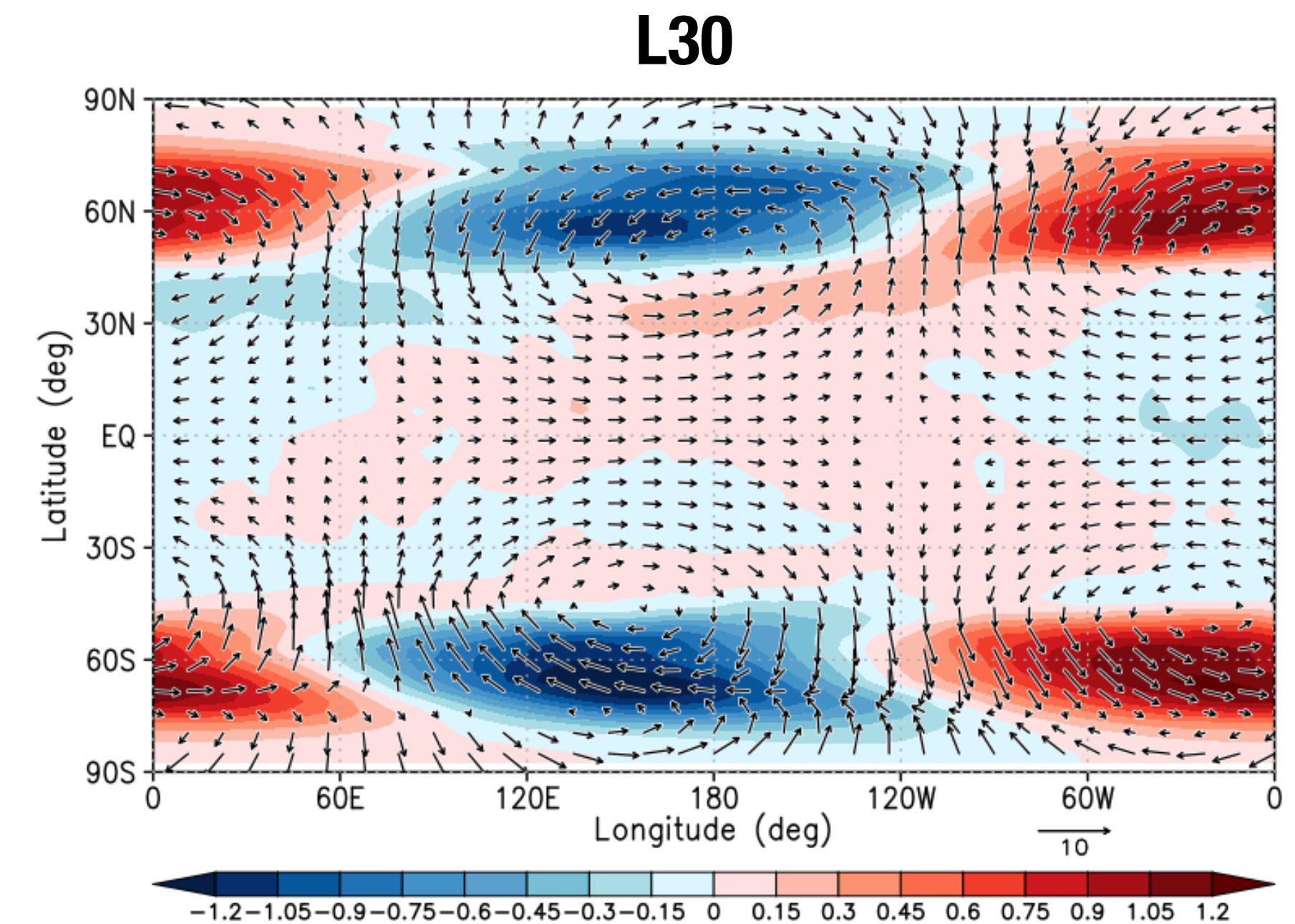
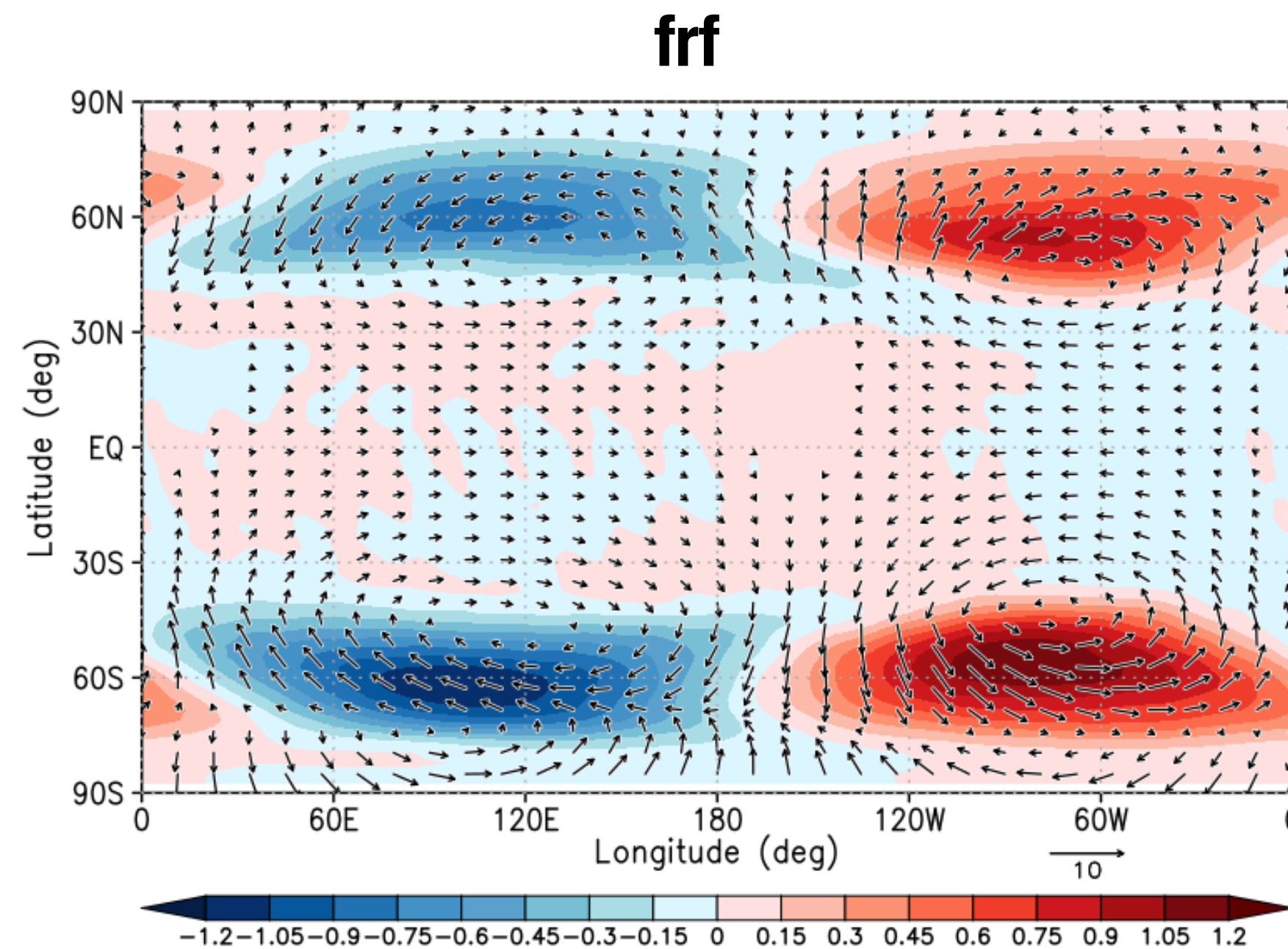
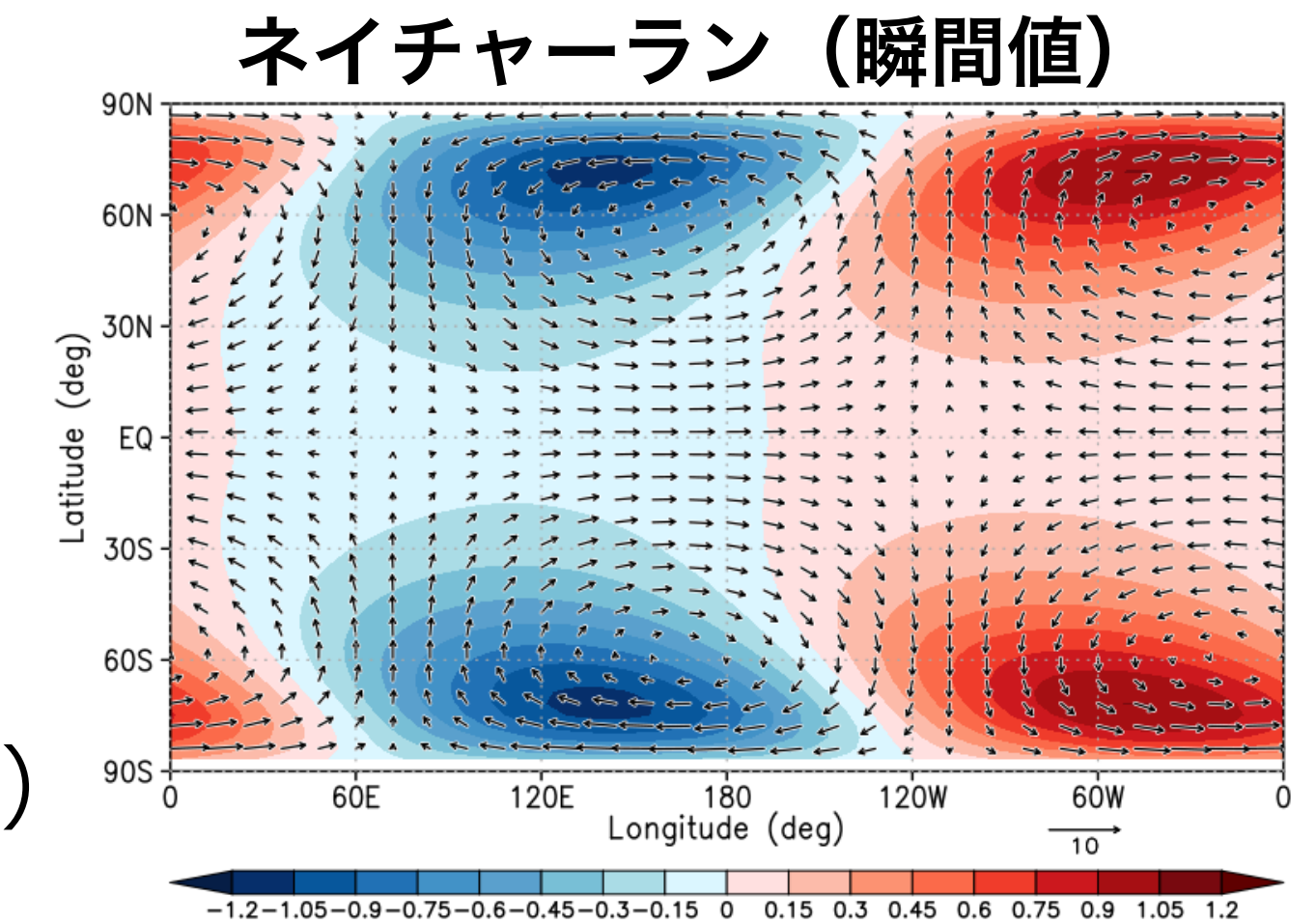
鉛直圧力速度 ω



結果

合成図解析（経度緯度断面）

- 高度 69 km での温度偏差（色）と水平風偏差（矢印）
- frf は 5.5日周期, L30 は 5.75日周期の合成図
- **40°N・40°S 付近の渦構造はやや強化**（70°N・70°S 付近はあまり変わらず）

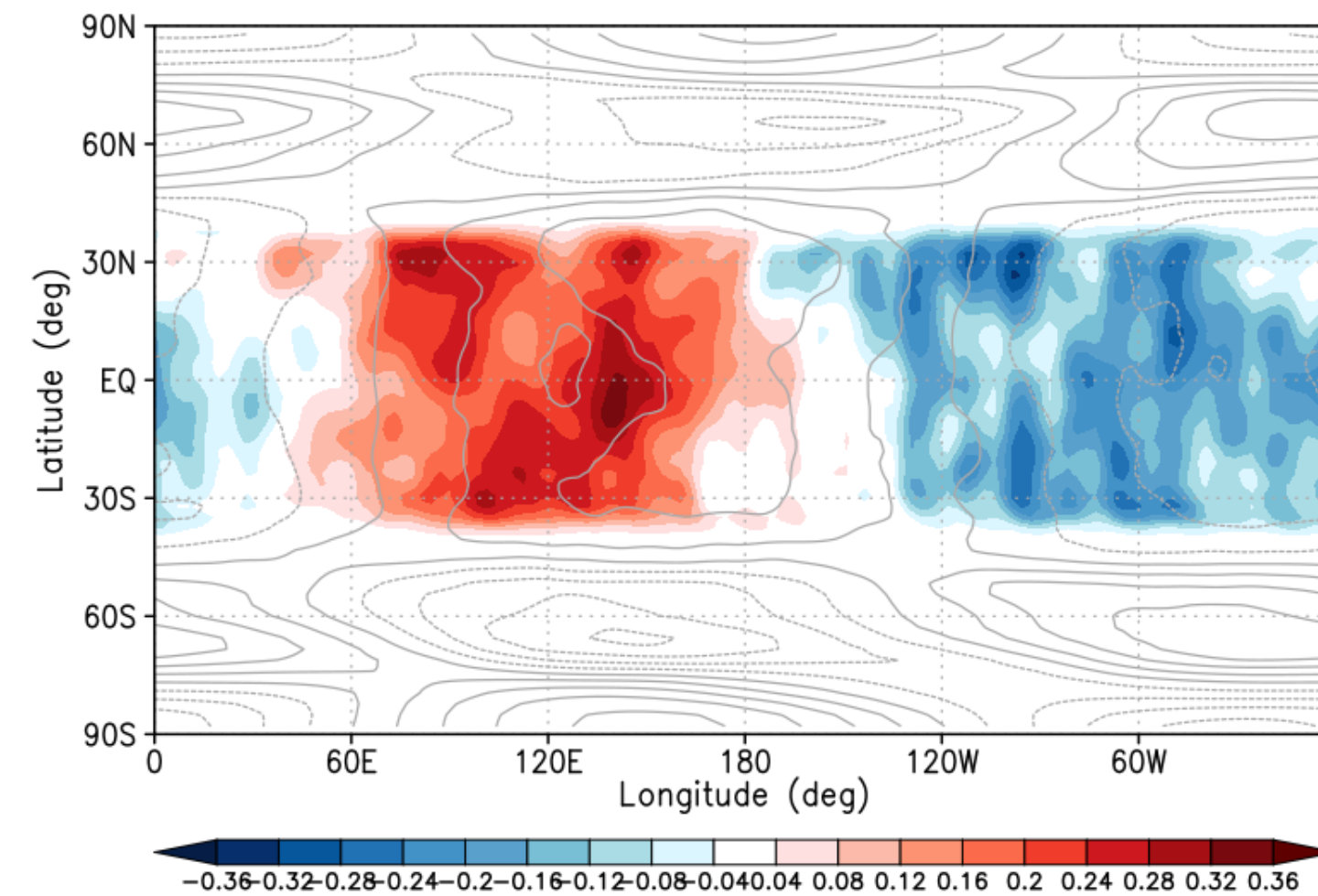


結果

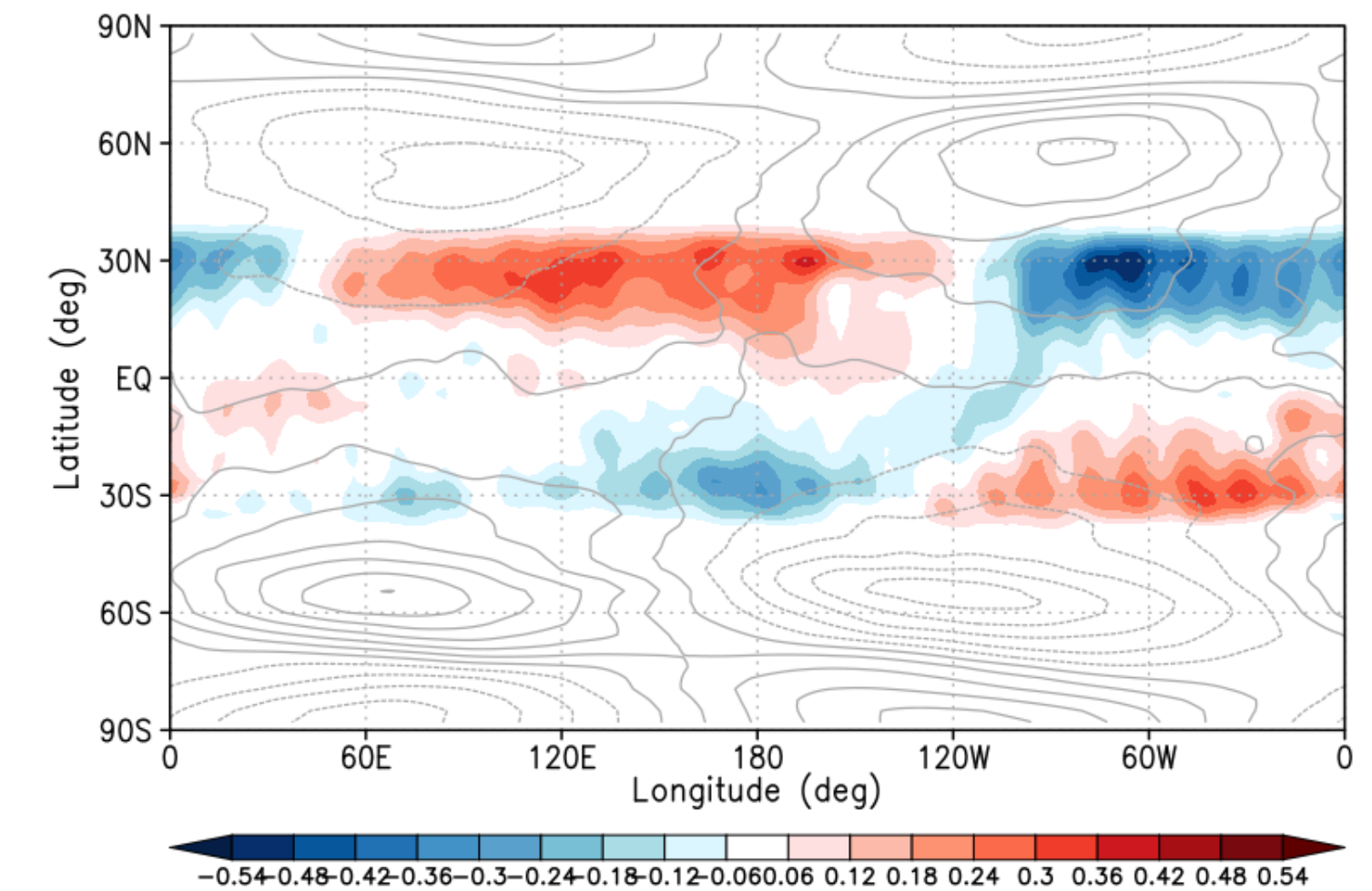
高度 69 km での解析インクリメント

- ◎ 第一推定値と解析値の
5.75日周期の**合成図の差の偏差**
- ◎ Δu , Δv は東西波数1の構造を強化
- ◎ Δu と Δv の位相のズレは不自然

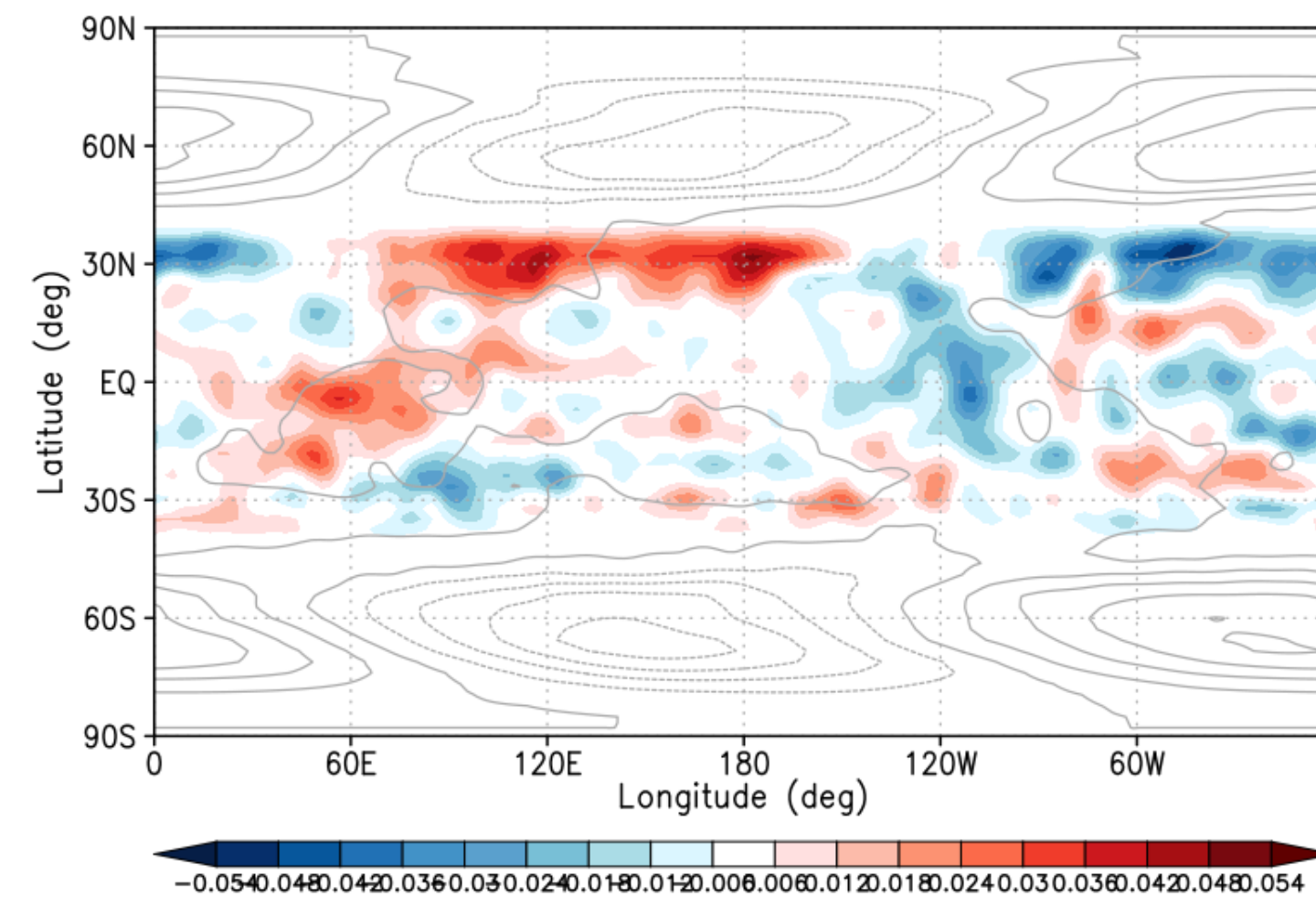
東西風 u



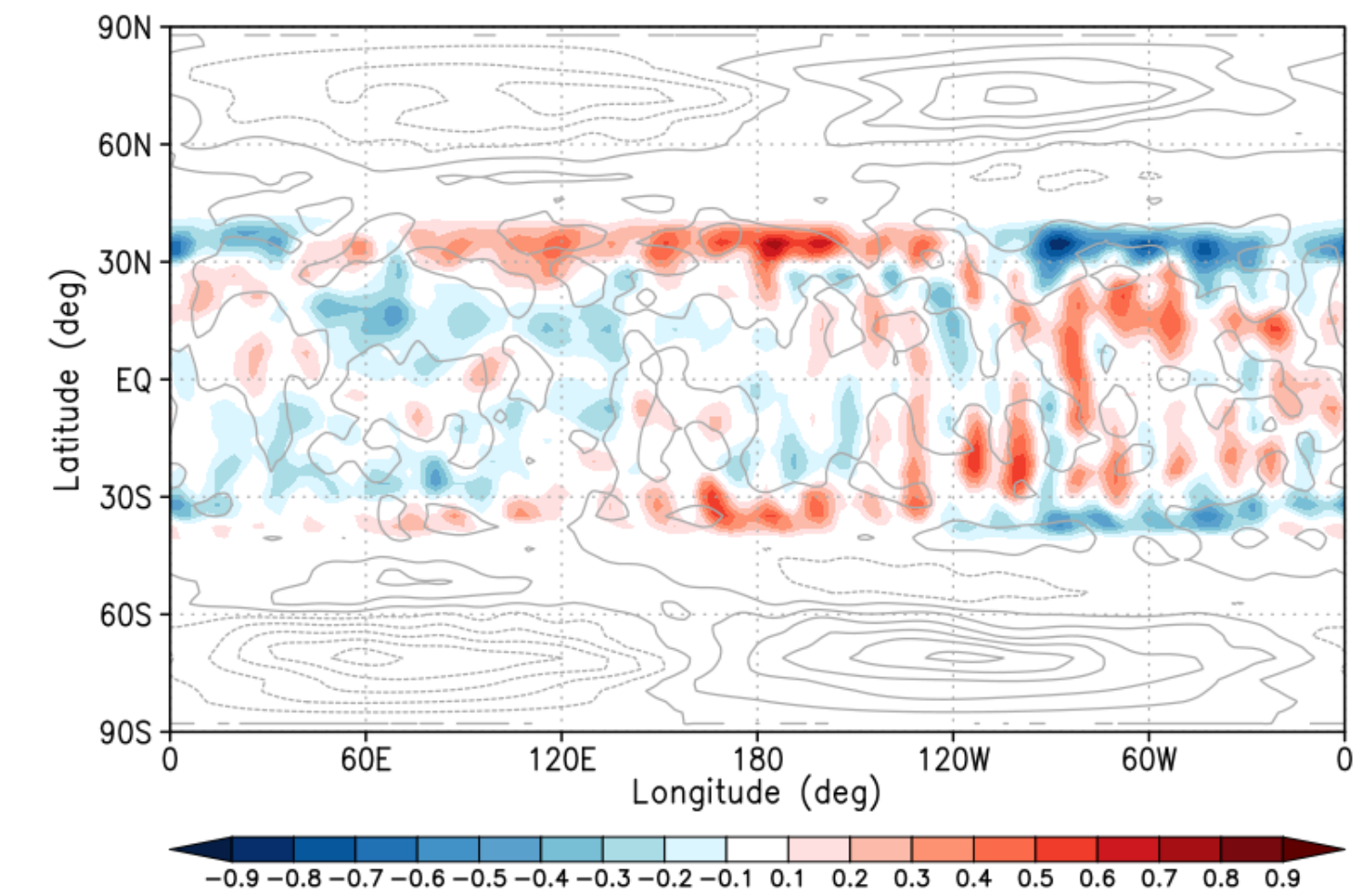
南北風 v



温度 T



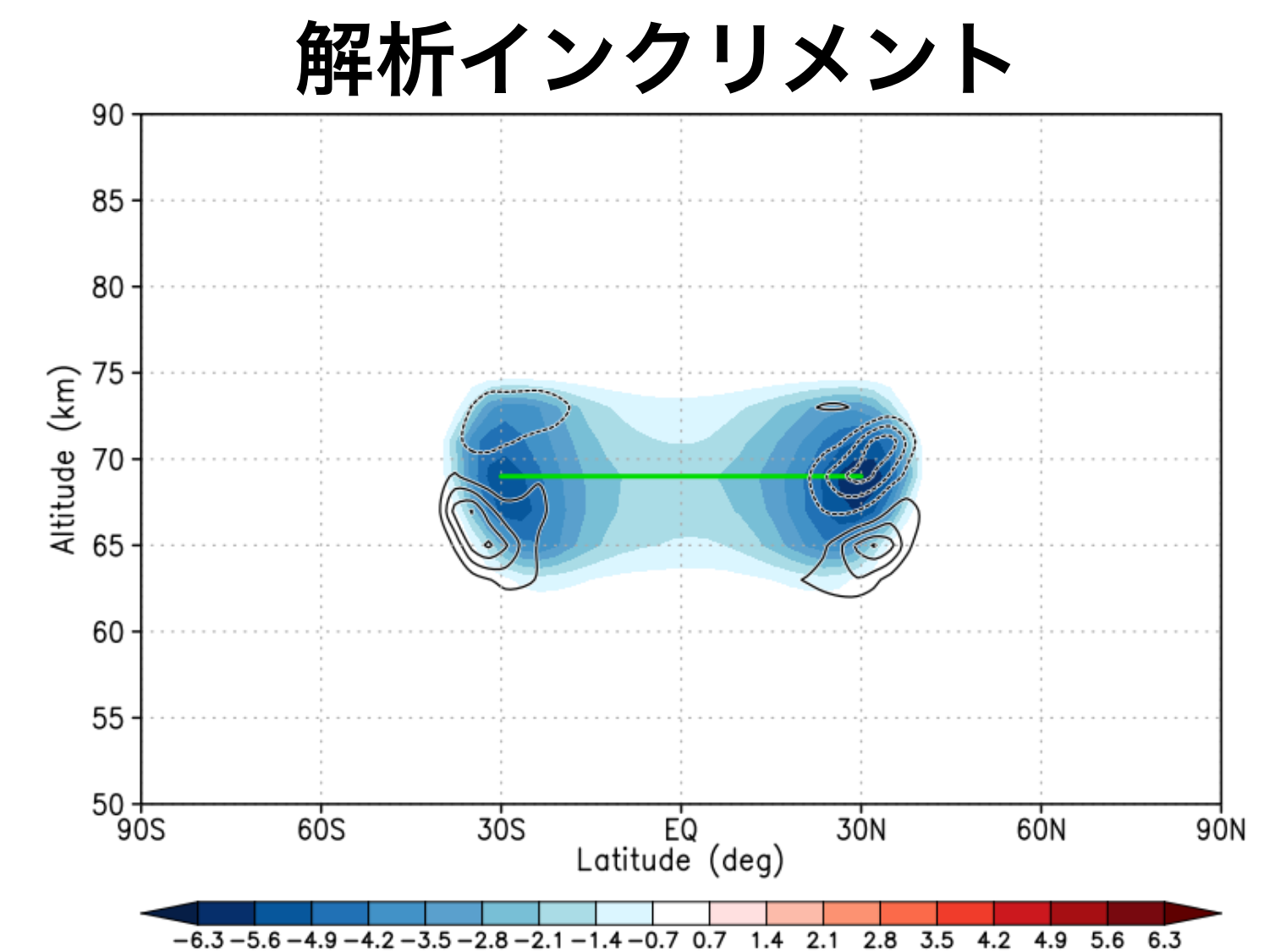
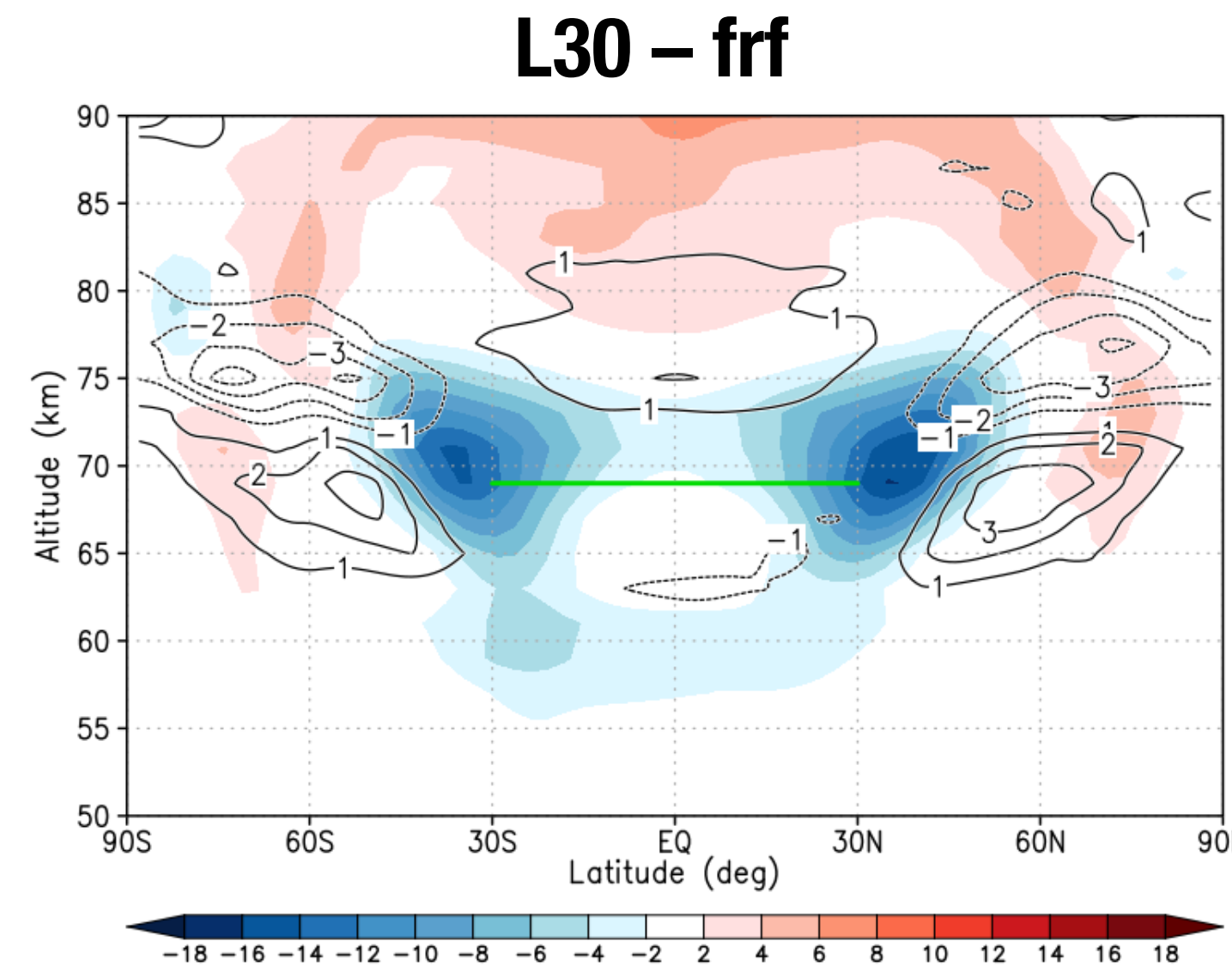
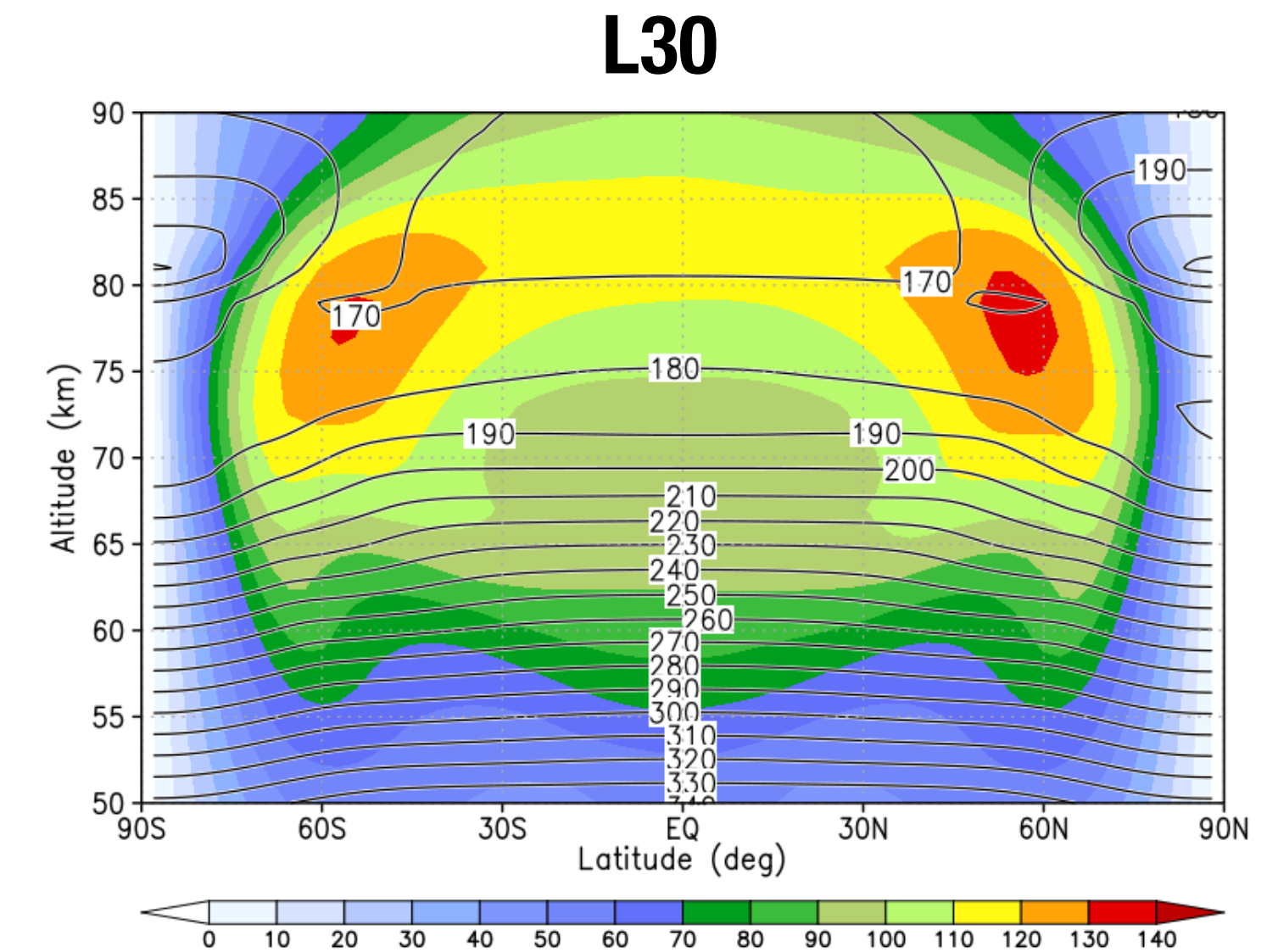
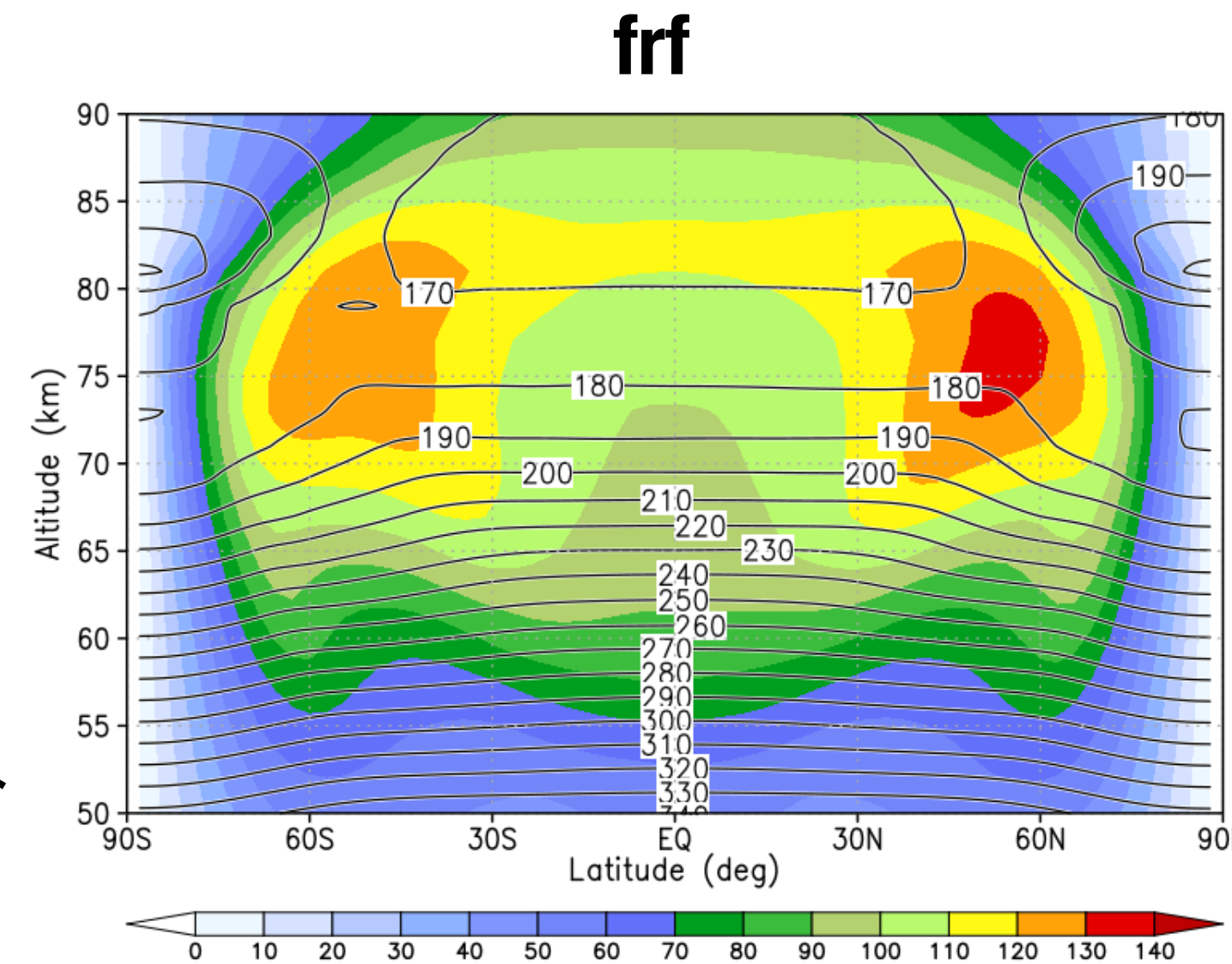
鉛直圧力速度 ω



結果

東西平均場への影響（緯度高度断面）

- 30日間の**時間平均**
- 東西風（色）と温度（等値線）
- 左下：両者の差
- 右下：最初の解析インクリメント
- データ同化に伴う直接的な変化だけでは説明できない



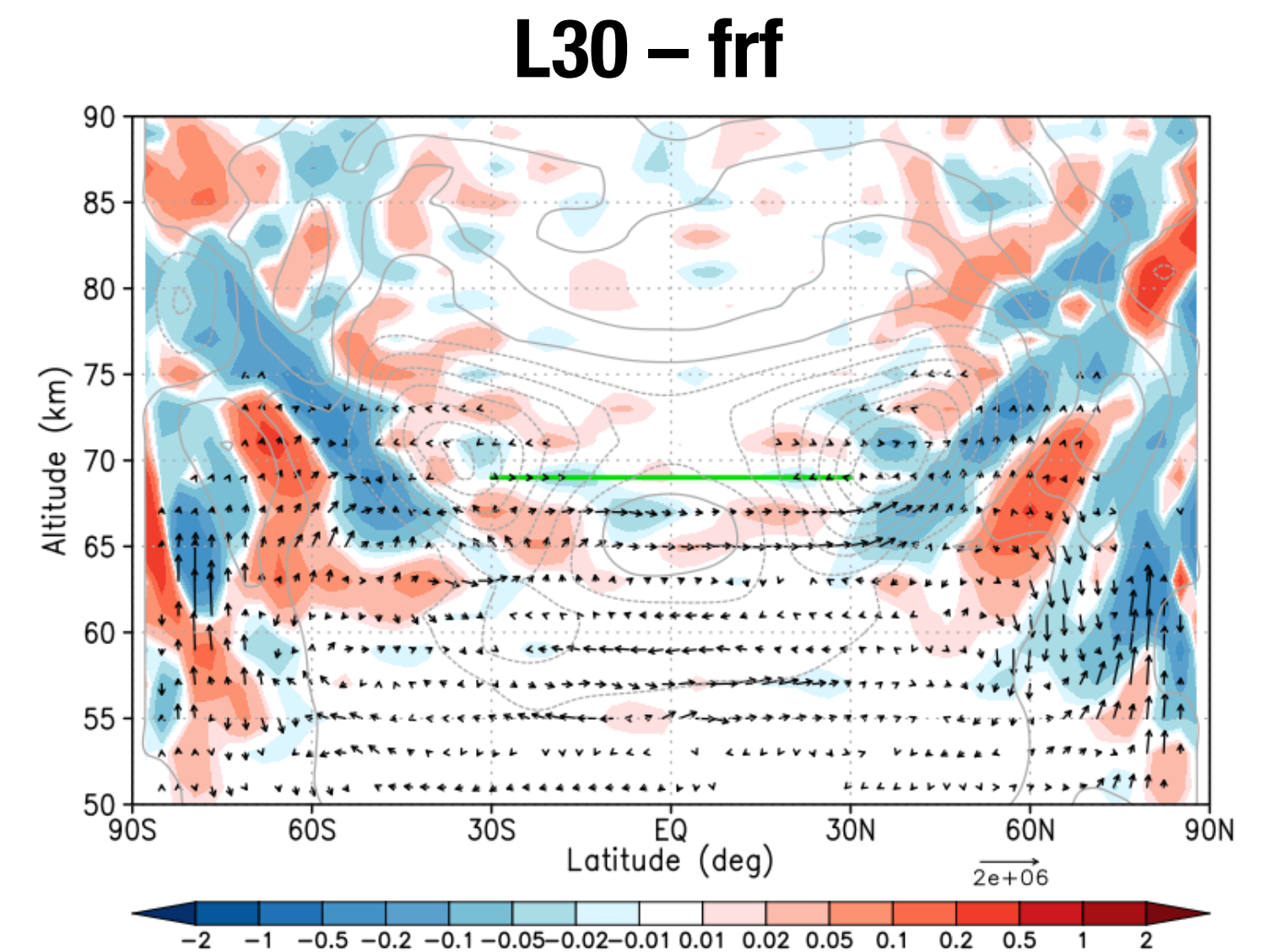
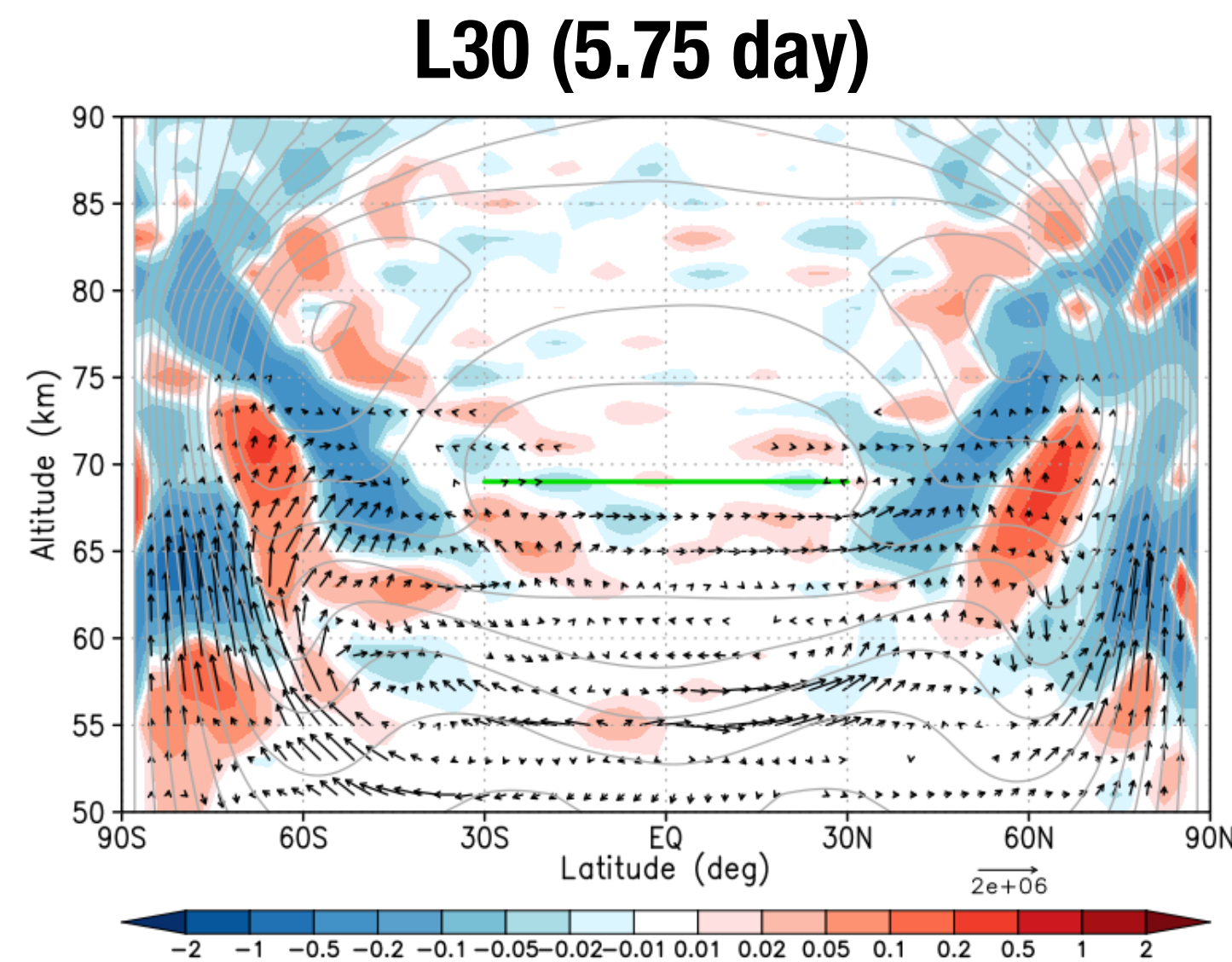
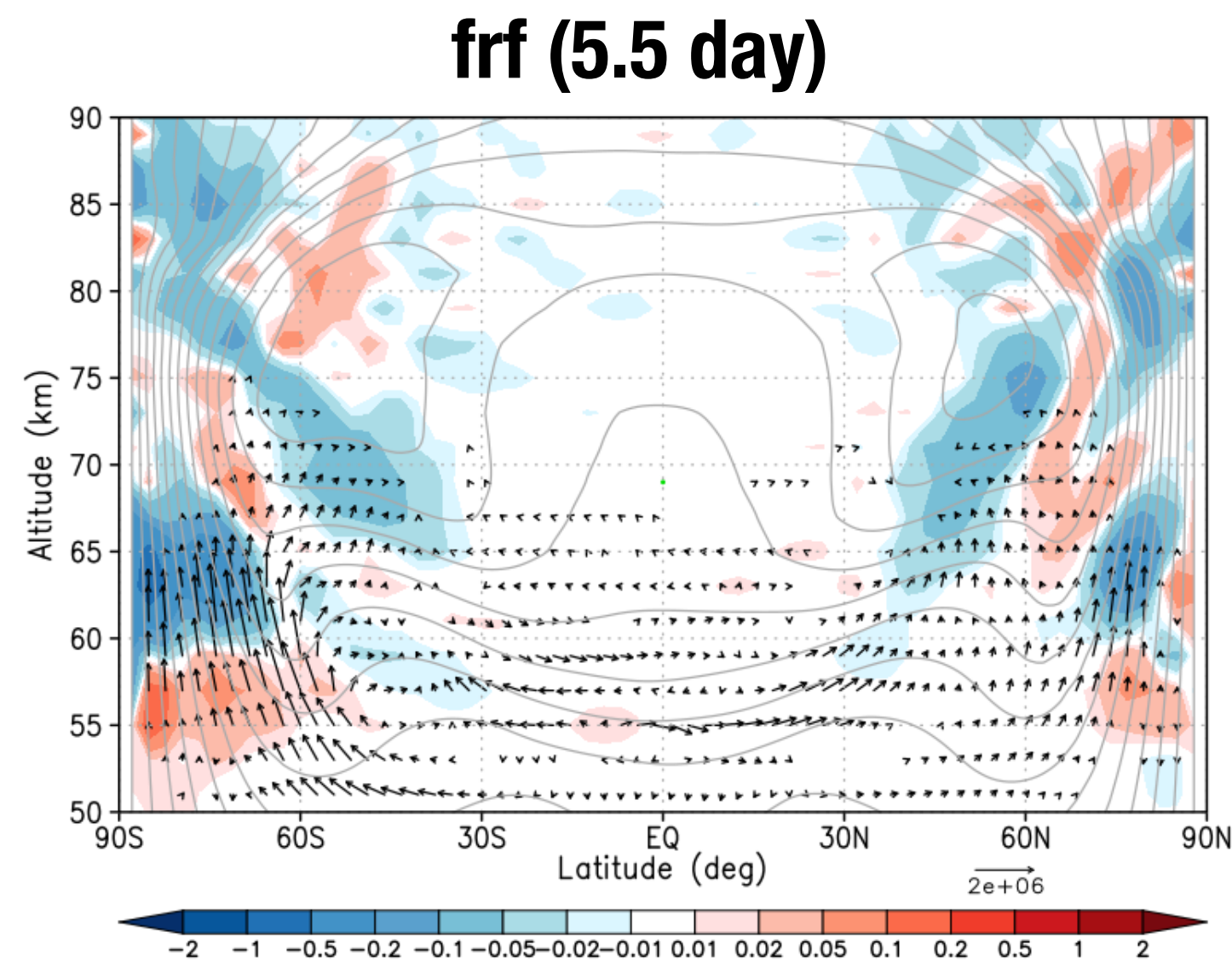
結果

東西平均場への影響（緯度高度断面）

- Eliassen–Palm flux（矢印）とその発散から評価した加速率（色）

$$F^{(\phi)} = \rho_0 a \cos \phi \left(\bar{u}_{z^*} \frac{\overline{v'\theta'}}{\bar{\theta}_{z^*}} - \overline{u'v'} \right), \quad F^{(z)} = \rho_0 a \cos \phi \left[\left\{ f - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial(\bar{u} \cos \phi)}{\partial \phi} \right\} \frac{\overline{v'\theta'}}{\bar{\theta}_{z^*}} - \overline{u'w'} \right]$$

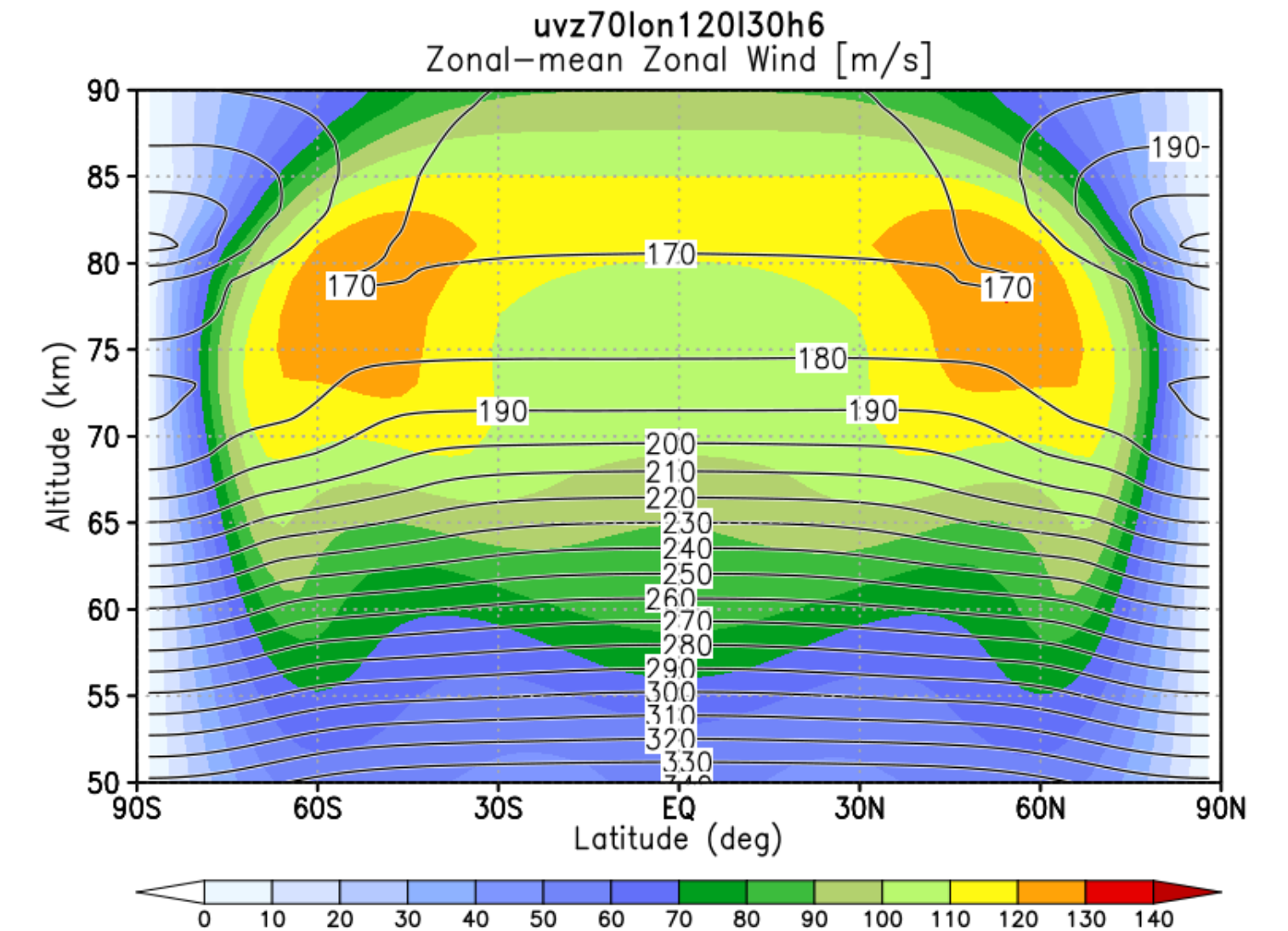
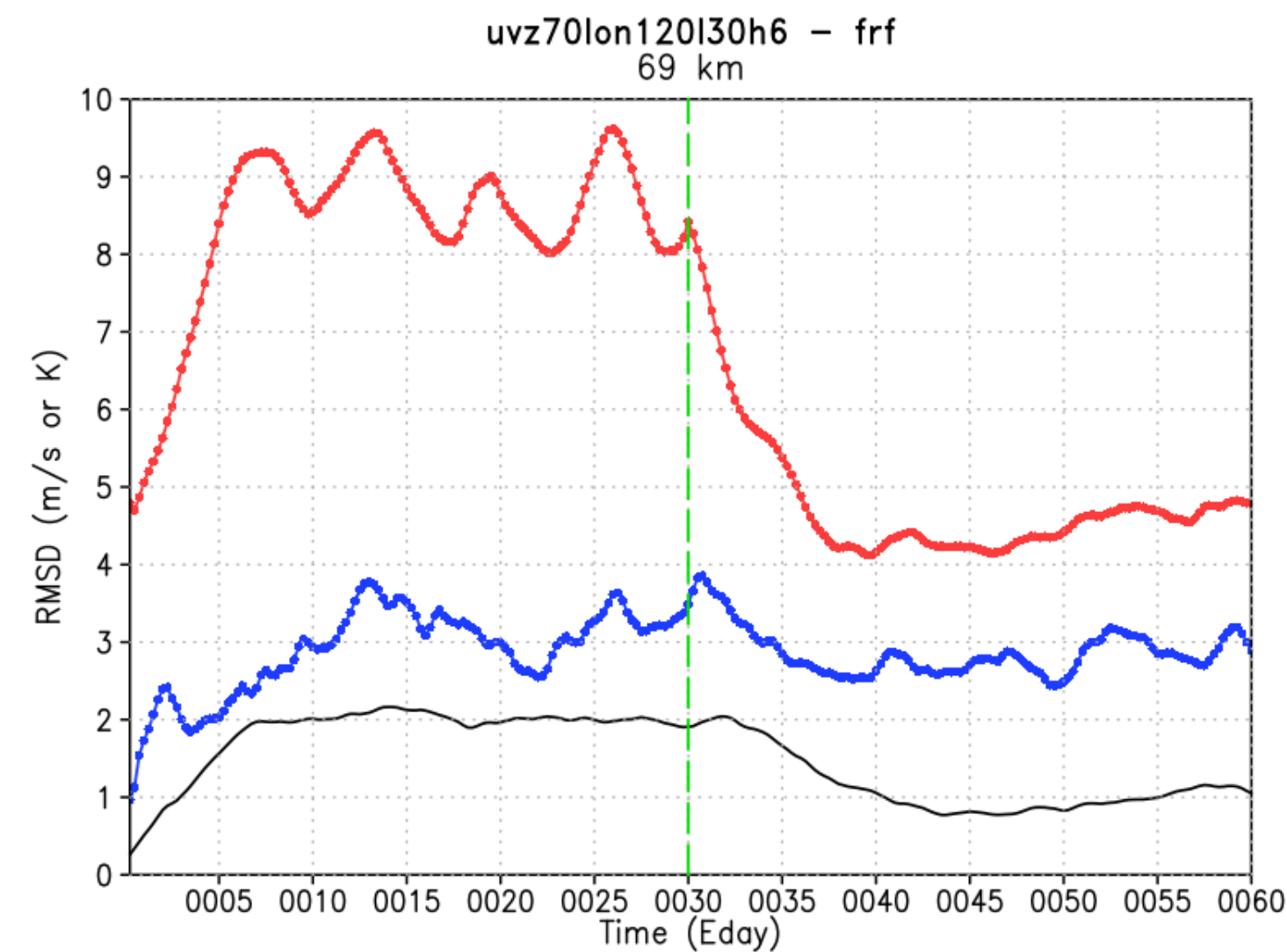
- ロスビー波の振幅増大に伴い 40°N・40°S 付近で**減速**（60°N・60°S 付近で**加速**）



結果

データ同化停止後の応答

- 左：高度 69 km での frf と L30 の RMS 差（赤：東西風，青：南北風，黒：温度）
- 右：41日目から60日目までで時間平均した東西平均東西風（緯度高度断面）
- データ同化停止後，10日ほどで新たな準平衡状態に
- 観測データが得られない期間があっても，しばらくは状態が維持される可能性



まとめと今後の課題

線形波動伝播モデルで生成されたロスビー波の水平風を AFES-Venus へ同化する OSSE を実施

- ◎ データ同化の影響は上下 10 km 程度までに限定される (w を除く)
- ◎ データ同化を行った緯度幅 (30°S – 30°N) を超えて東西平均東西風にも影響を与える
- ◎ 中緯度 ($\sim 40^{\circ}\text{S/N}$) でのロスビー波の増幅と東西平均東西風の減速はよい対応関係がある
- ◎ データ同化を停止した後も10日ほどで新たな準平衡状態に移行し観測の影響は残る
- ◎ ロスビー波の再現には低緯度 (30°S – 30°N) のみの観測では不十分かもしれない

今後の課題

- ◎ データ同化を行う緯度幅を変えた実験についても結果を確認する
- ◎ 「あかつき」UVI 雲追跡風データの同化によるロスビー波の再現に向けて準備を進める

