

# 金星大気の力学： 観測・数値モデリングの現状と将来展望

高木征弘（京都産業大学理学部）

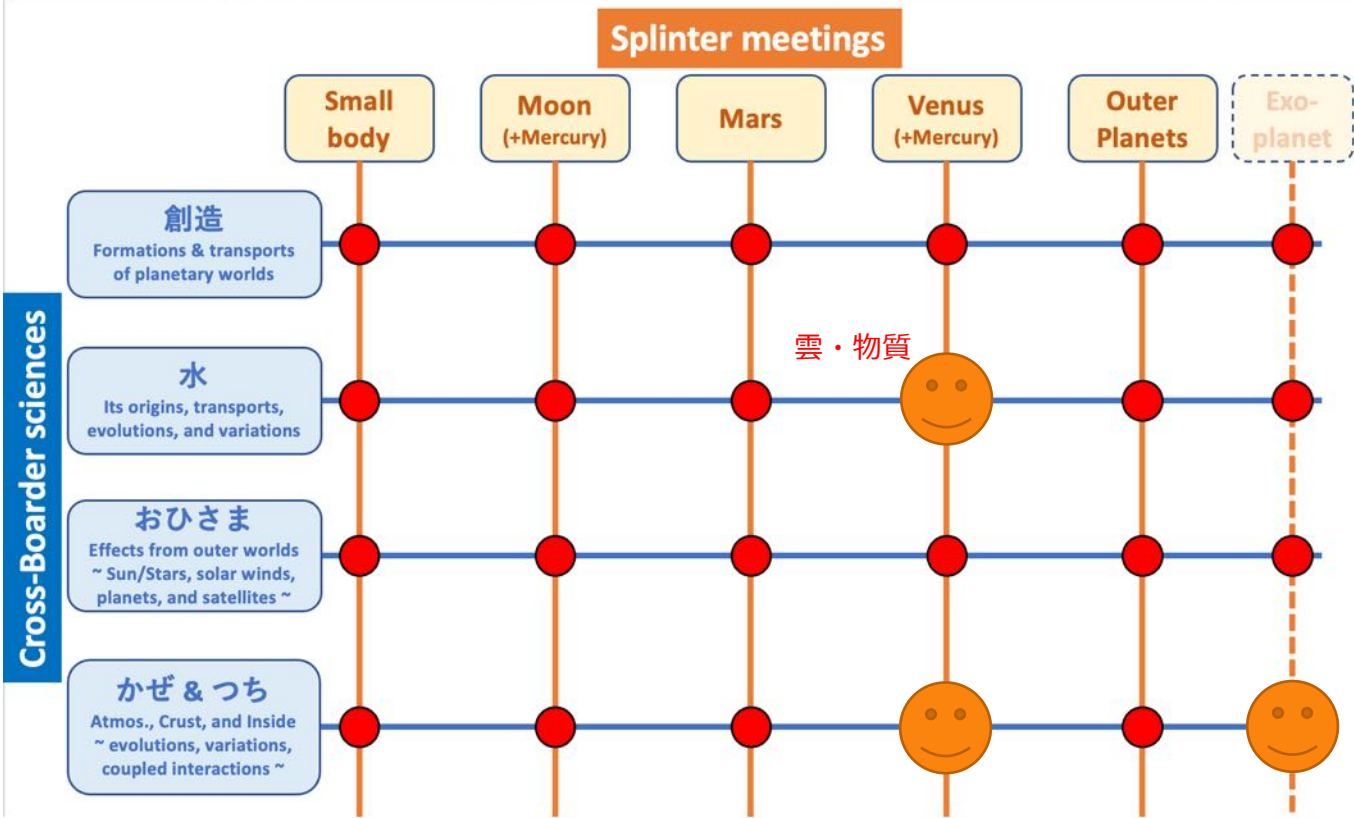
Email: [takagi.masahiro@cc.kyoto-su.ac.jp](mailto:takagi.masahiro@cc.kyoto-su.ac.jp)

# 要旨

- あかつきや Venus Express, 地上観測などによってもたらされた, 金星大気力学に関する最近の観測結果と, 理論・数値計算によって得られた結果を概観し, 今後の研究の展望を述べる。

# Focus of the Symposium 2023

Multiple Column x Low approach for Science requirement & Mission strategy



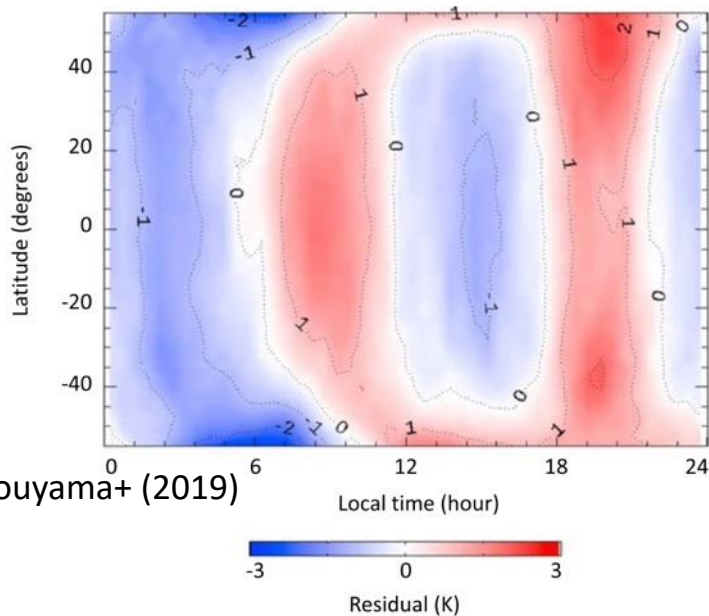
**Making borderless teams and finding/investigating seeds for future explorations!**

# 金星大気力学に関する最近の話題

- 大気スーパーローテーション (SR) 中の様々な大気現象が対象に
- 熱潮汐波
  - 水平構造, 角運動量輸送, 熱輸送, 上下伝播, 小規模な重力波の励起
- 4日波・5日波・7日波・その他の波
  - 周期解析, 水平構造, 成因と三次元構造, 角運動量輸送と熱輸送
- 子午面循環
  - あかつき LIR による世界初の観測結果, GCM の子午面循環
- 山岳波
  - SR に対する寄与, ローカルタイム依存性
- SR の時空間変動
  - 下部雲層の赤道ジェット, 雲頂 SR + 紫外アルベド変動 → 金星気候変動

# 熱潮汐波：雲頂での水平構造 (観測の進展)

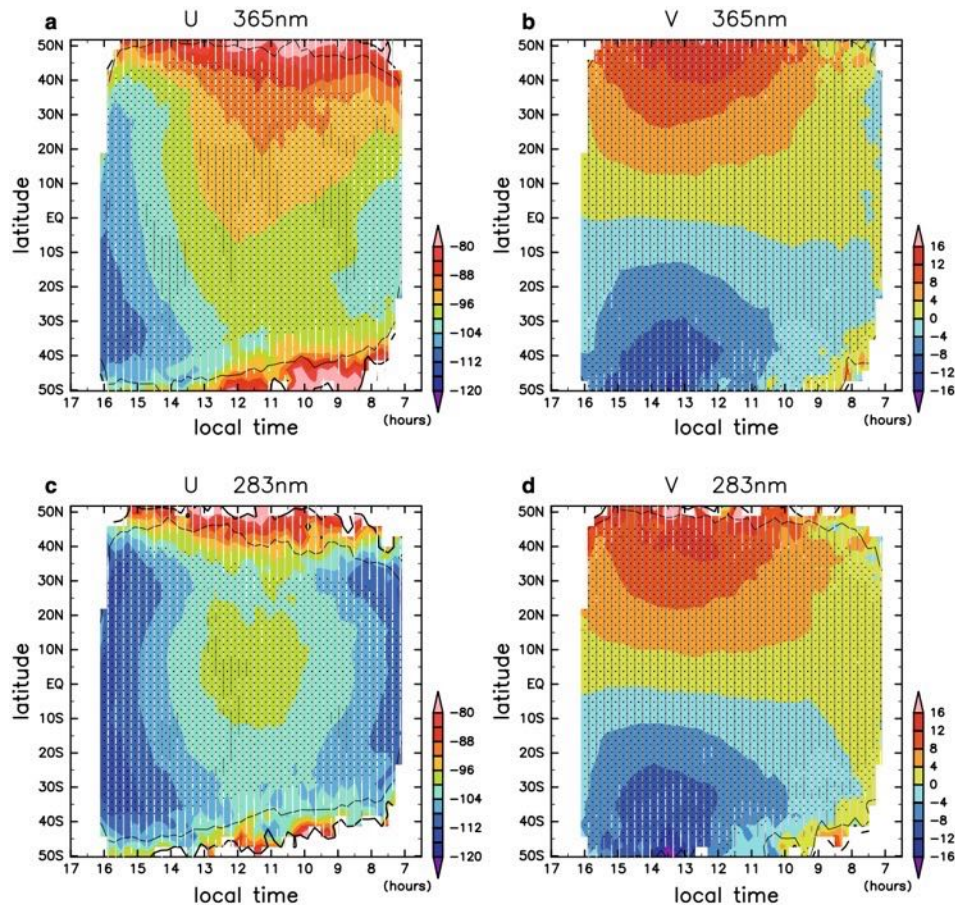
LIR が観測した熱潮汐波の温度偏差



Kouyama+ (2019)

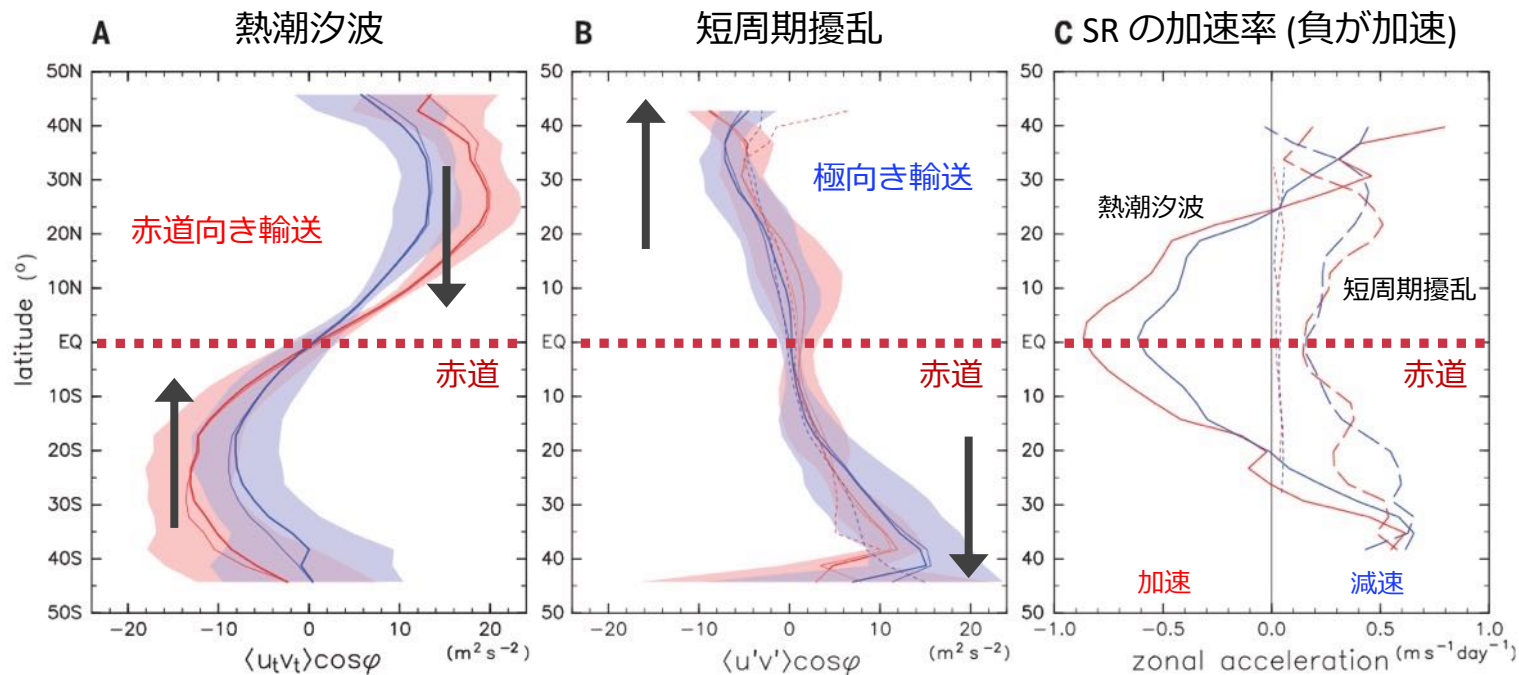
- あかつき観測により、雲頂付近での熱潮汐波の水平構造 (温度、水平風) が明らかになってきた。
- 水平風の分布はGCM (Takagi+, 2018) と整合的だが、温度分布は東西方向に位相が  $90^\circ$  ずれているという問題が明らかになった。
- 物理量によって観測と数値モデルの整合性に違いがあるのはなぜか？

UVI が観測した熱潮汐波の水平風分布



Horinouchi+ (2018)

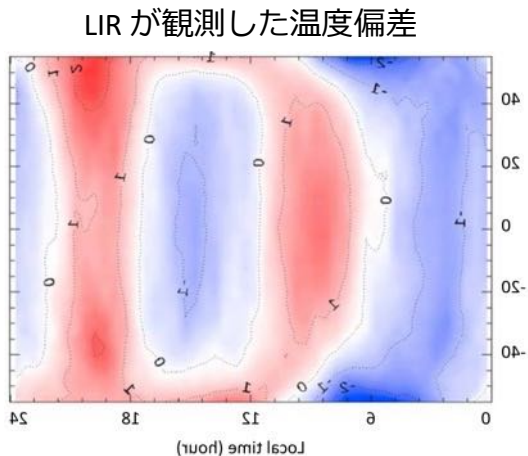
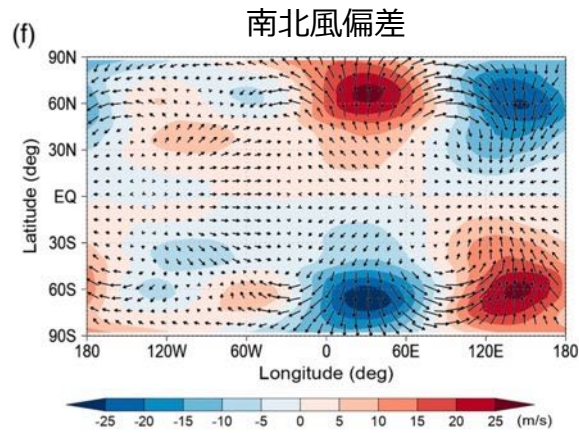
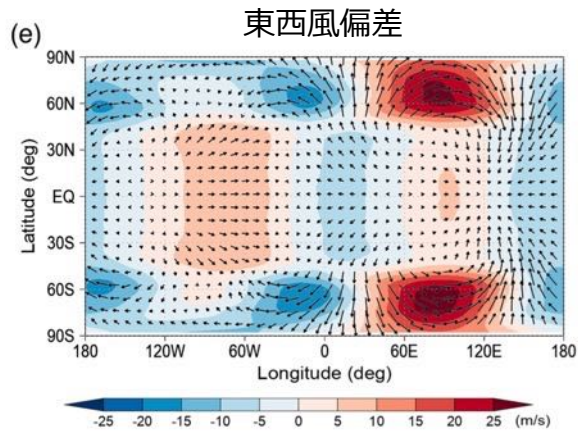
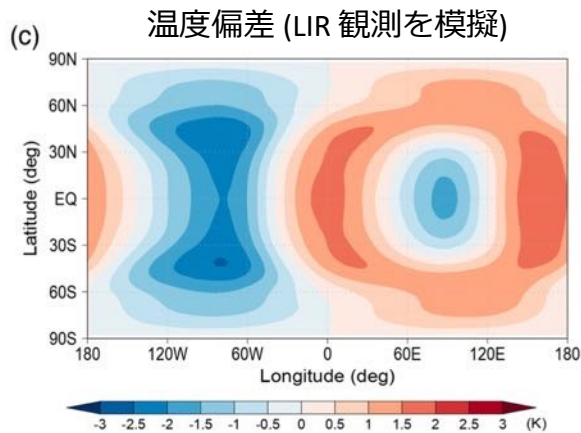
# 熱潮汐波：南北角運動量輸送 (Horinouchi+, 2020)



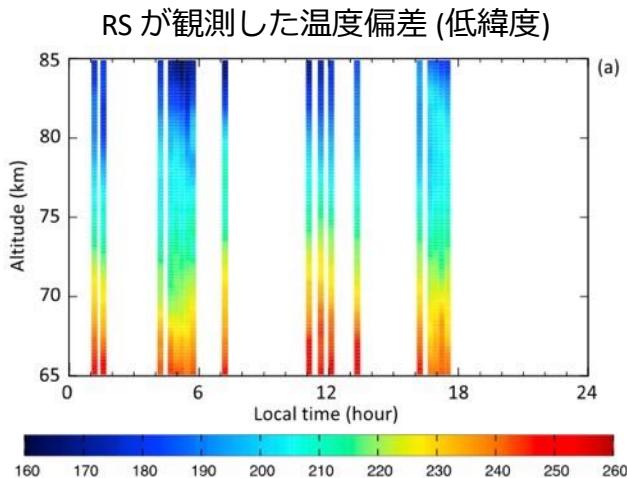
- あかつき UVI 観測による水平風分布から、熱潮汐波と短周期擾乱の南北角運動量輸送が導出された。
- 熱潮汐波は低緯度 ( $20^{\circ}S-20^{\circ}N$ ) の SR を加速する方向に角運動量を輸送する。
- 短周期擾乱による角運動量輸送は  $40^{\circ}S-40^{\circ}N$  の SR を弱く減速する。
- あかつきの観測結果は、熱潮汐波による赤道向き角運動量輸送が子午面循環メカニズムの補助メカニズムとして働く可能性を示している。

# 熱潮汐波：3次元構造の改善 (Suzuki+, 2022)

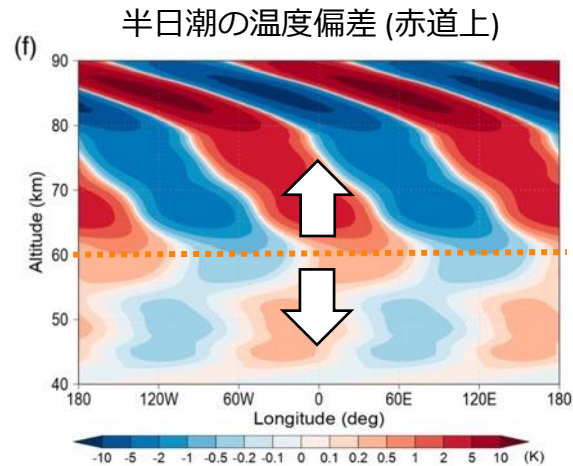
大気安定度分布の改善により  
熱潮汐波の空間構造が改善



Kouyama+ (2019)



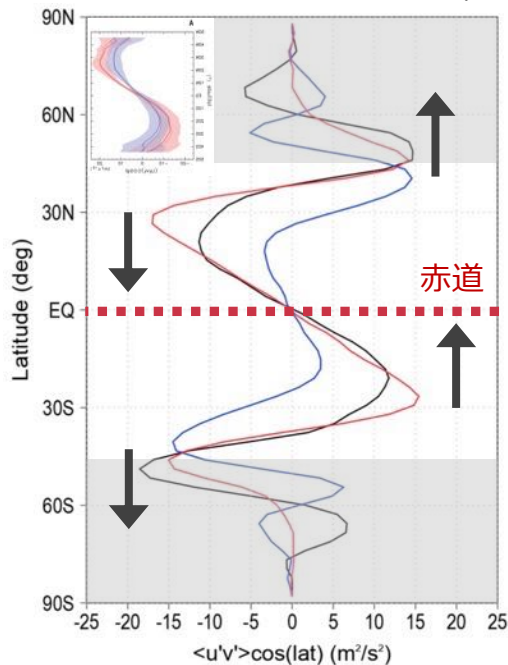
Ando+ (2018)



60 km 付近を境に上下伝播

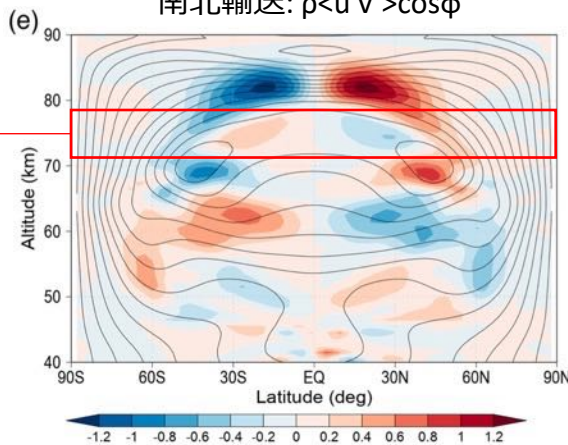
# 熱潮汐波：角運動量輸送・熱輸送とSR加速・減速

雲頂付近の南北角運動量輸送 (GCM)

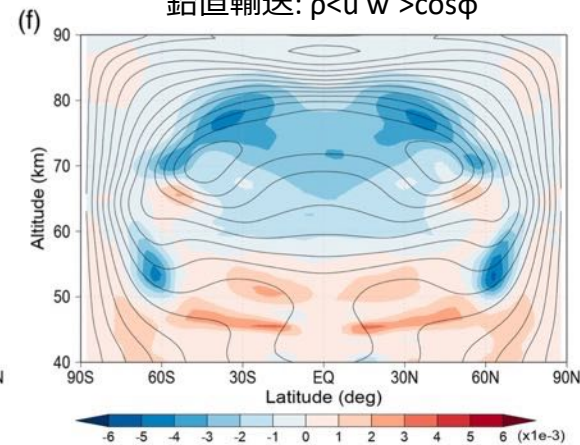


- 熱潮汐波の角運動量輸送は緯度・高度に強く依存する。
- 子午面循環メカニズムに対する寄与を明らかにするには、広い範囲での観測が必要。雲頂だけではダメ。
- 鉛直角運動量輸送・熱輸送も重要。しかし、前者の観測は極めて困難。

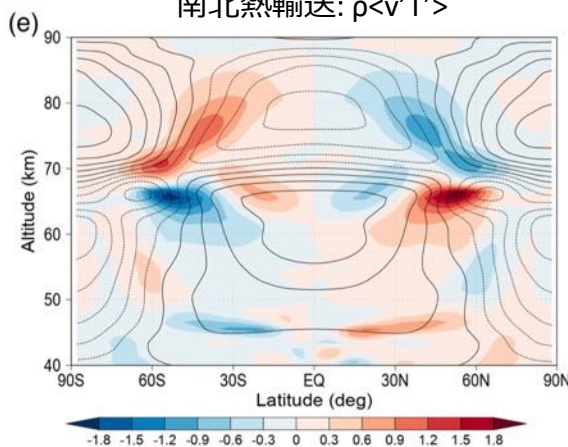
南北輸送:  $\rho \langle u'v' \rangle \cos \phi$



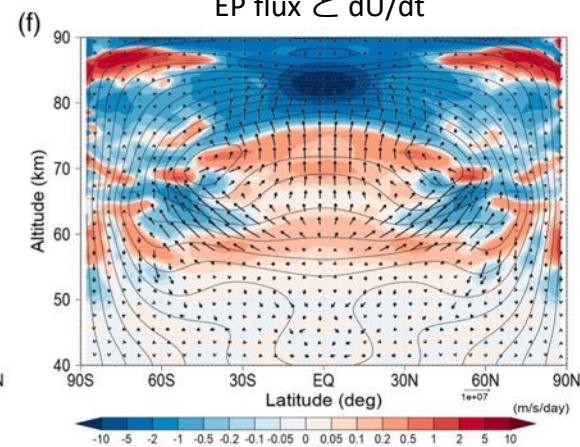
鉛直輸送:  $\rho \langle u'w' \rangle \cos \phi$



南北熱輸送:  $\rho \langle v'T' \rangle$



EP flux と  $dU/dt$

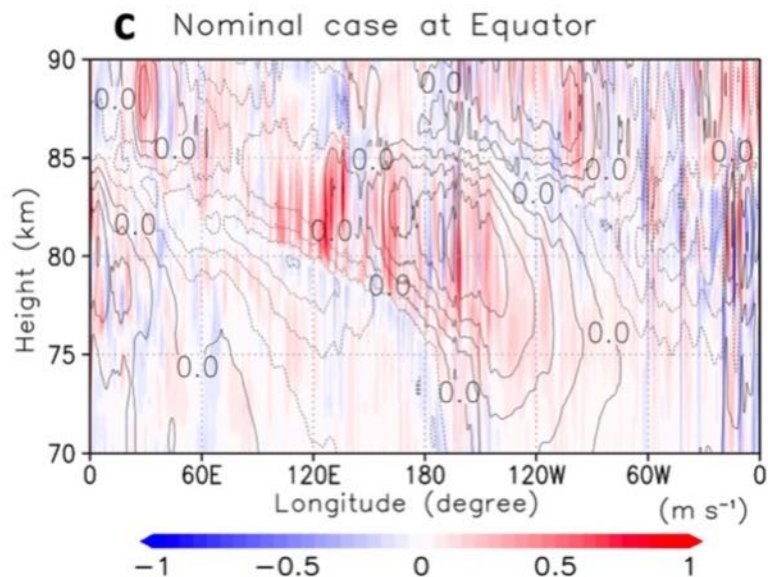


低緯度の広い高度範囲でSRを加速

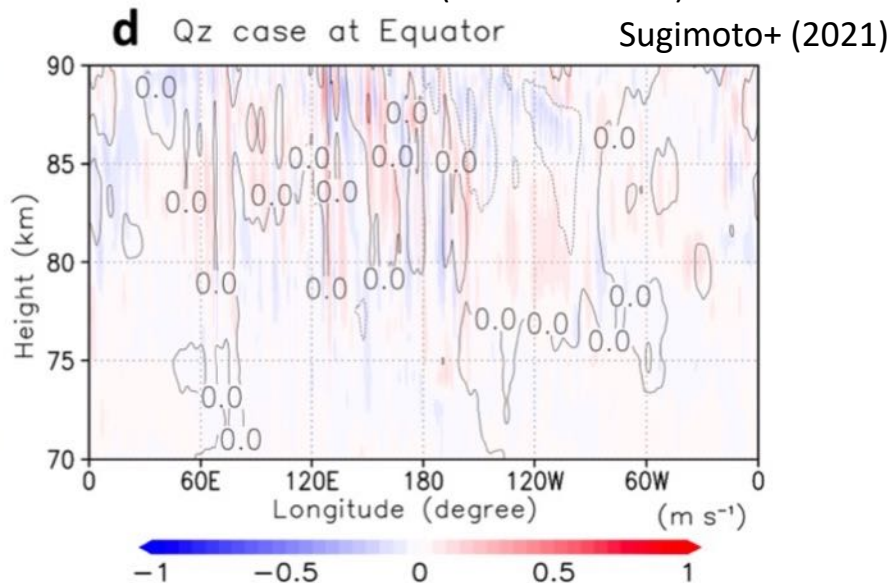


# 熱潮汐波：重力波の励起

鉛直風の xz 分布 (熱潮汐波あり)

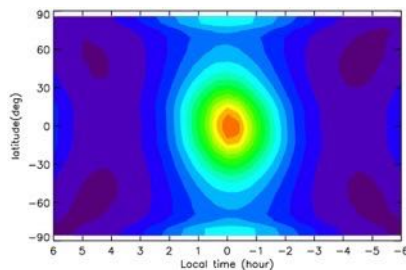


鉛直風の xz 分布 (熱潮汐波なし)

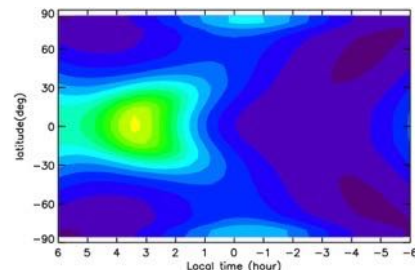


- 雲頂 (~70 km) より上の高度では、熱潮汐波と SR の相互作用によって様々な空間スケールの重力波が励起される。(熱潮汐波が「地形」のように作用)
- 励起された重力波は鉛直伝播し、熱圏の大気大循環に強く影響する可能性がある。(cf. Hoshino+, 2013)

O<sub>2</sub>夜光分布 (重力波なし)



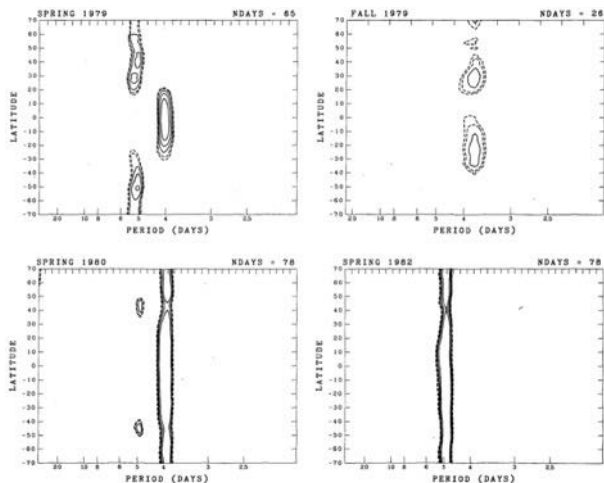
O<sub>2</sub>夜光分布 (重力波あり)



Hoshino+ (2013)

# 4日波・5日波：観測の進展

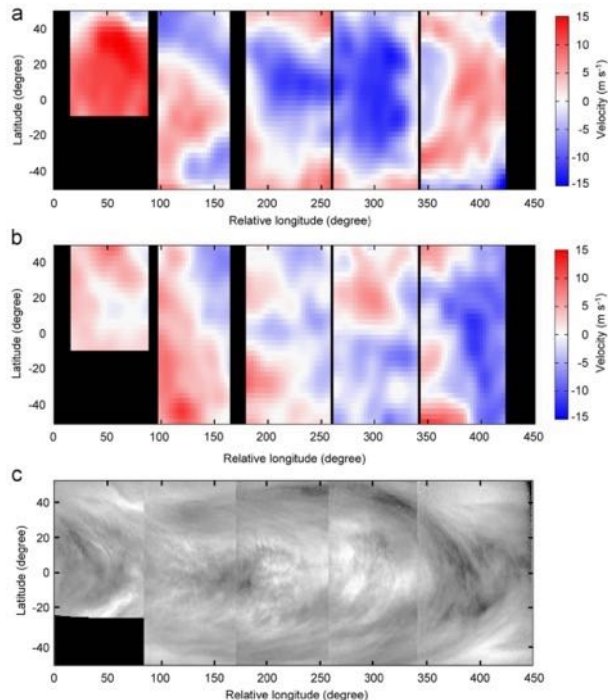
## 紫外雲模様の周期解析



## Del Genio & Rossow (1990)

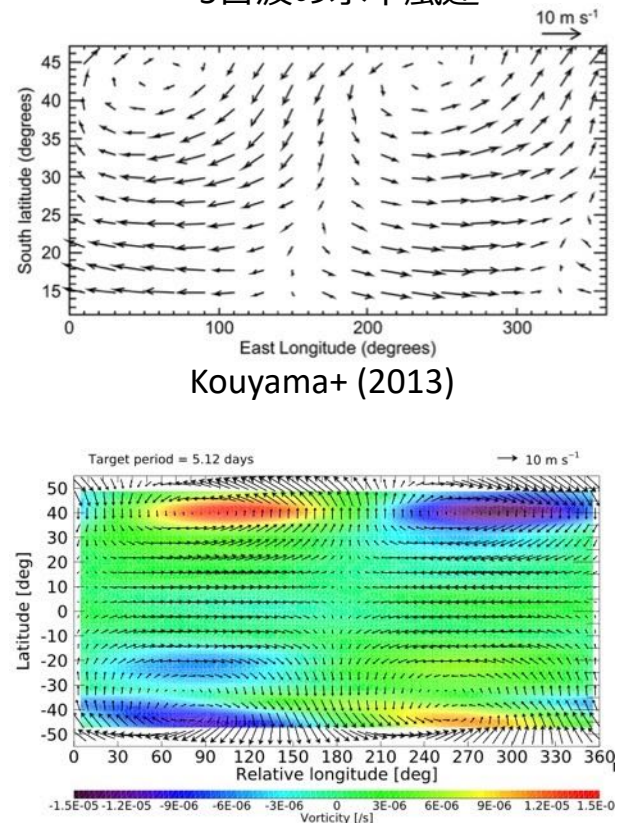
- 紫外雲模様の周期解析から、雲頂高度に4日波 (赤道 Kelvin 波) と5日波 (中緯度 Rossby 波) の存在が示唆された。
- 近年の観測により、4日波と5日波の水平風分布が明らかになってきた。
- 5日波は中緯度に中心をもつ赤道対称な渦である。

## 4日波の水平風速と雲模様



## Kouyama+ (2012)

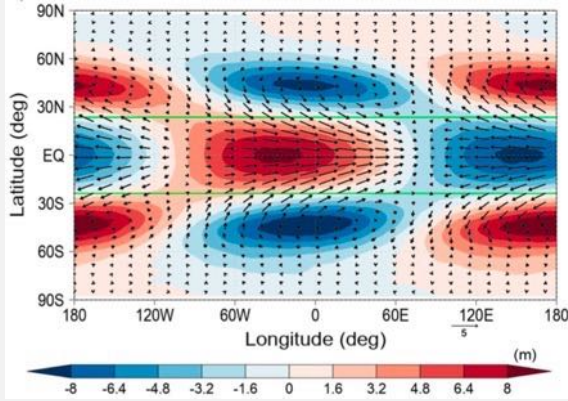
## 5日波の水平風速



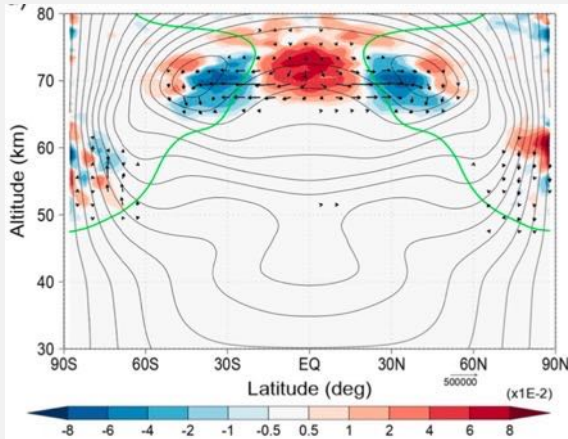
## Imai+ (2019)

# 4日波・5日波：成因と空間構造 (Takagi+, 2022)

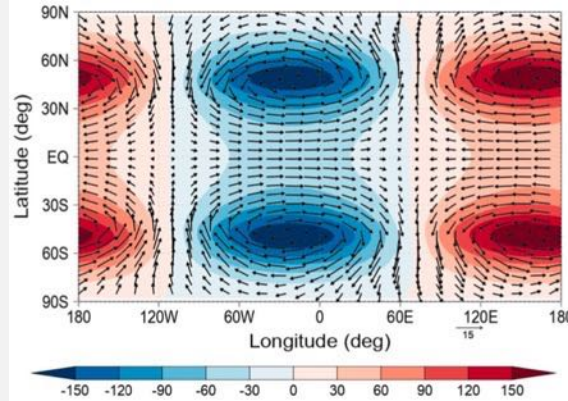
3.3日波:  $Z'$ , ( $u'$ ,  $v'$ ) (70 km)



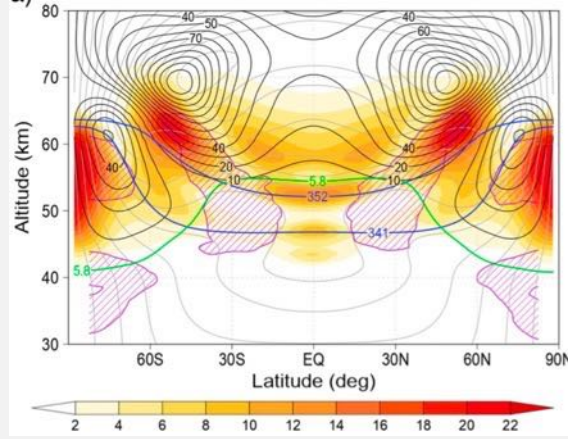
3.3日波: EP flux,  $dU/dt$



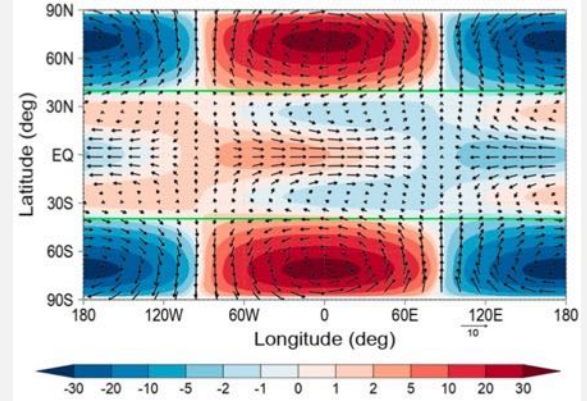
5.8日波:  $Z'$ , ( $u'$ ,  $v'$ ) (70 km)



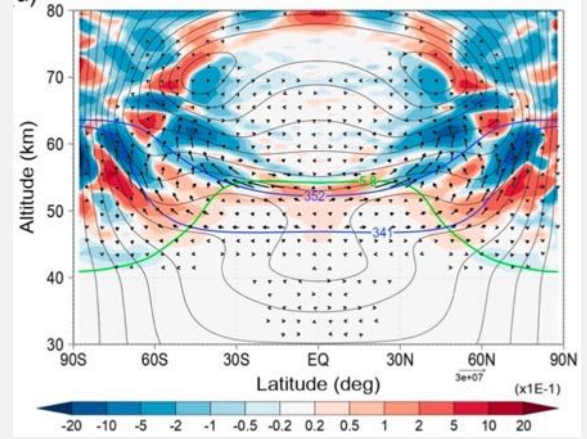
5.8日波の  $y$ - $z$  構造



5.8日波:  $Z'$ , ( $u'$ ,  $v'$ ) (52 km)



5.8日波: EP flux,  $dU/dt$

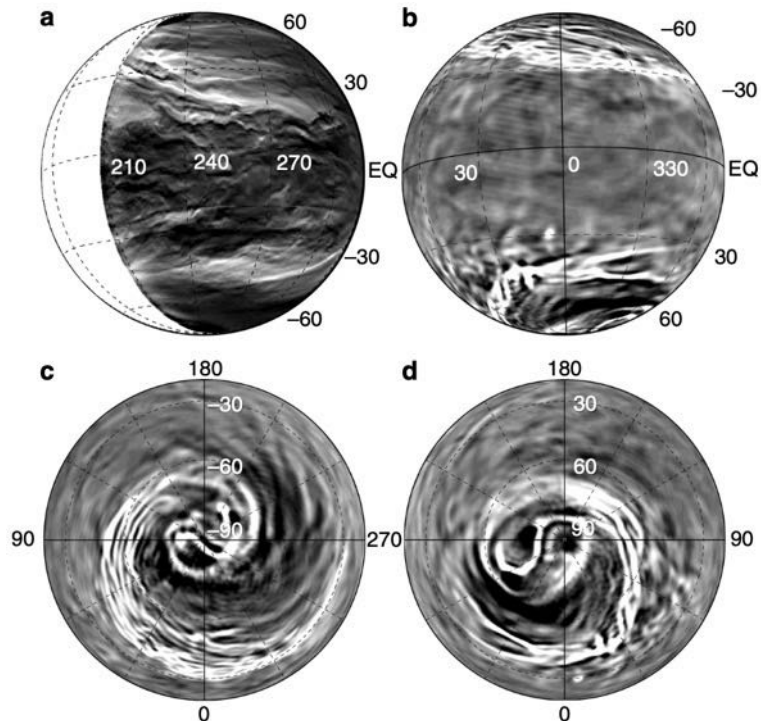


- 赤道 Kelvin モードと中緯度 Rossby モードによる Rossby-Kelvin 不安定 (Iga & Matsuda, 2005)

- 赤道 Kelvin モードと2つの Rossby モードによる Rossby-Kelvin 不安定
- 雲頂高度では中緯度 Rossby モードのみが卓越 → 5日波の観測と整合的
- 顕著な赤道加速 0.1–0.2 m/s/day (高度 50 km 付近) → 下部雲層の赤道ジェットを生成

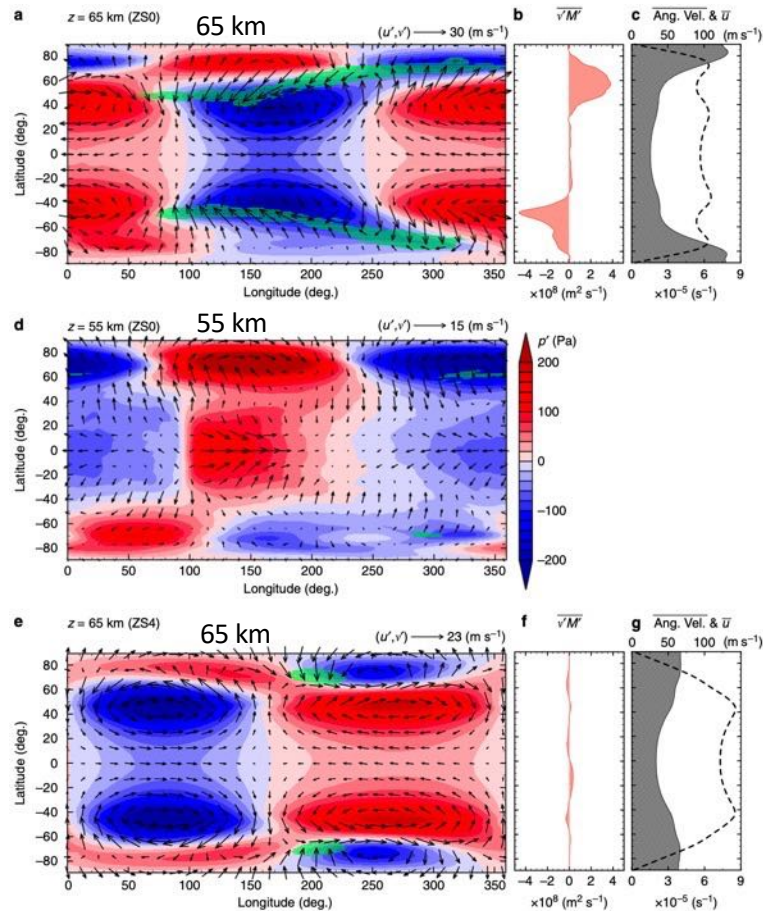
# 5日波と下部雲層のストリーク構造 (Kashimura+, 2019)

IR2が発見したストリーク構造(左上)とGCMでの再現



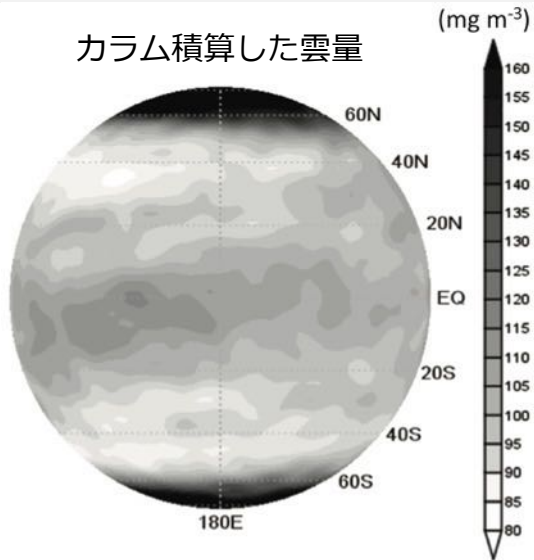
- 下部雲層のストリーク構造は中高緯度ロスビー波に伴う前線構造(鉛直風)によって作られる。
- このロスビー波はRK不安定によって励起される5日波の中高緯度ロスビーモード。

ストリーク構造を作る波の水平構造

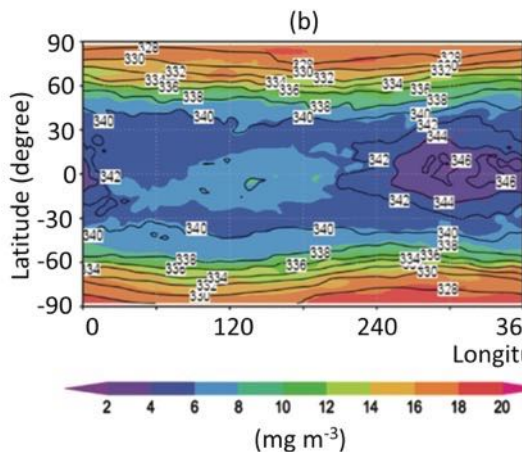


# 5日波と下部雲層の時間変動 (Ando+, 2020b, 2021)

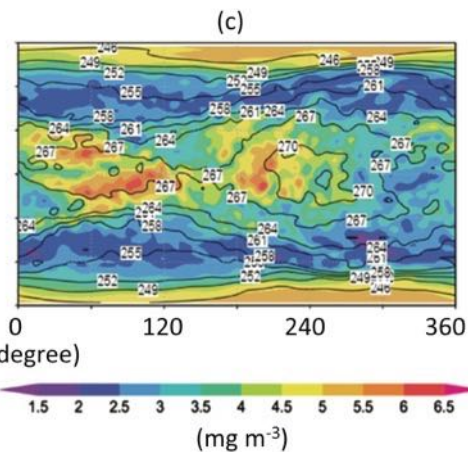
カラム積算した雲量



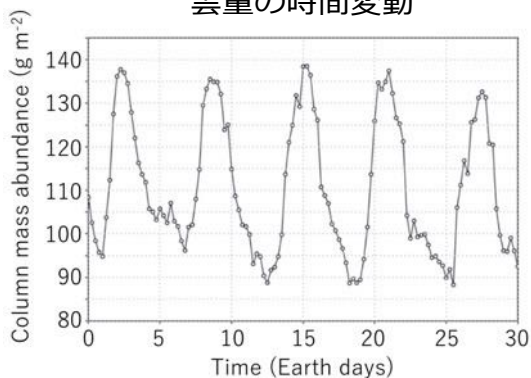
温度と雲密度 (50 km)



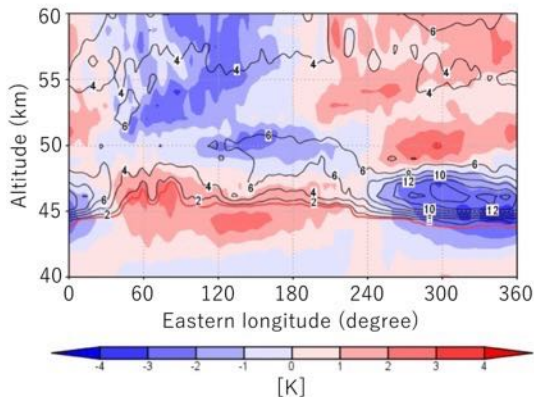
温度と雲密度 (60 km)



雲量の時間変動



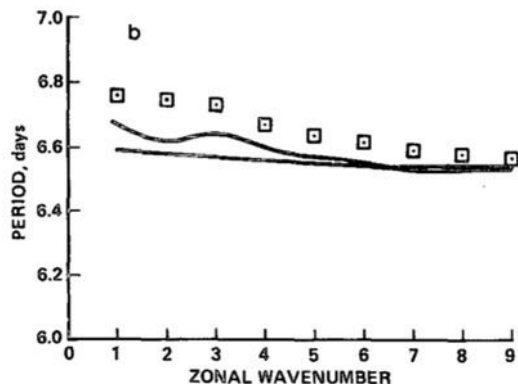
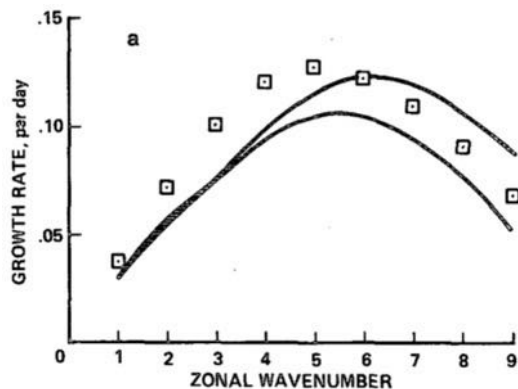
温度偏差と雲密度 (赤道)



- 簡単な雲モデルを組み込んだ GCM によって、観測と矛盾しない雲分布の南北構造が再現された (左上)。
- 低緯度の下部雲層を中心に、顕著な雲量の周期的変化がみられる。これも観測と整合的 (e.g., Crisp+, 1991)。
- この周期変動は5日波 (赤道 Kelvin モード) に伴う温度変動によって引き起こされる。
- 鉛直流の重要性を指摘する研究もある。(Peralta+, 2020; Karyu+, 2023)

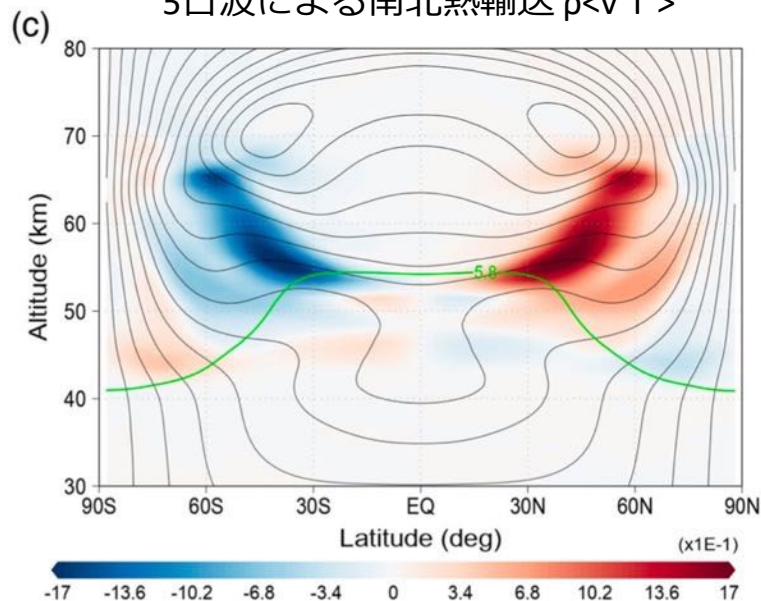
# 5日波と傾圧不安定波

傾圧不安定波の東西波数と成長率



Young+ (1984)

5日波による南北熱輸送  $\rho \langle v'T' \rangle$

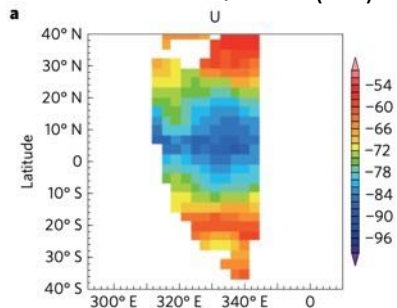


Takagi+ (2022)

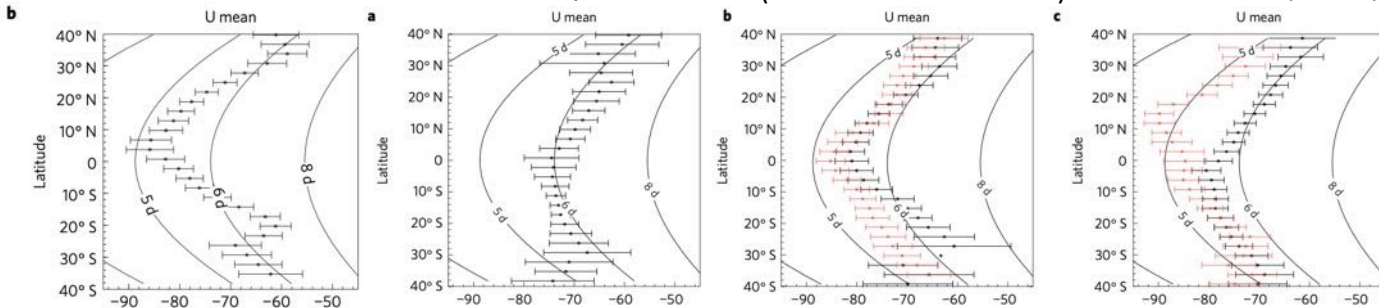
- 線型安定性解析によって、金星雲層の most preferred mode は東西波数 4-6 程度の傾圧不安定波であると予想されている。(Young+, 1984; Takagi & Matsuda, 2005, 2006)
- GCM で目立つのは5日波 (東西波数1) だが、中高緯度ロスビーモードは顕著な極向き熱輸送を伴う (傾圧波的な性質?)。
- 5日波と傾圧不安定波はどのような関係にあるのか？

# 5日波と7日波が引き起こす赤道ジェットの周期変動

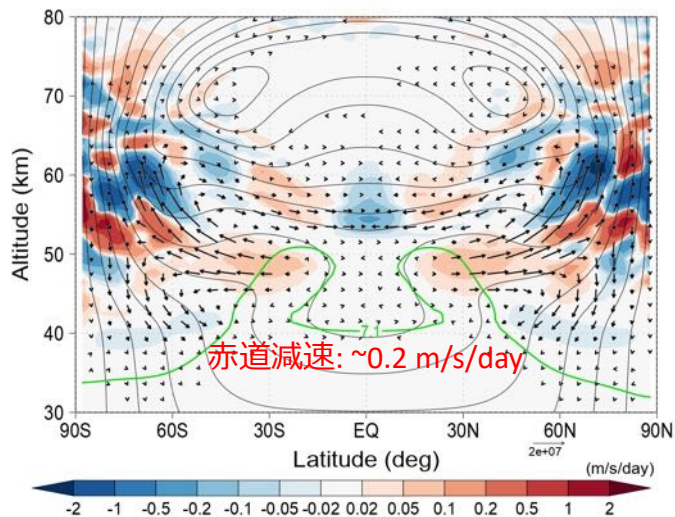
下部雲層の東西風 (IR2)



IR2 観測によって推定された東西風の分布 (観測時期による違い) Horinouchi+ (2017)

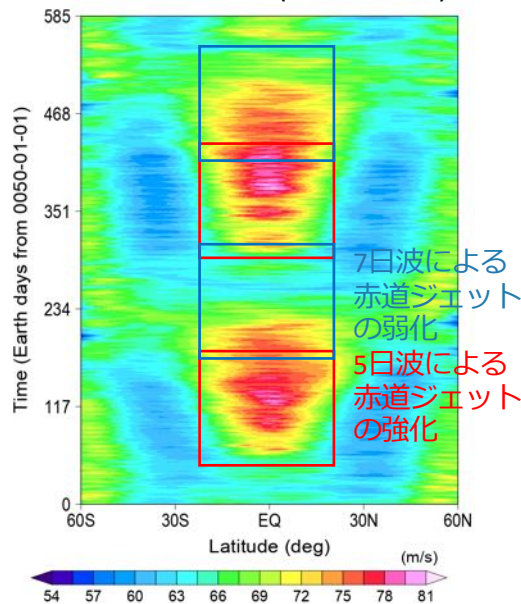


7日波の EP flux と  $dU/dt$



Takagi+ (in prep.)

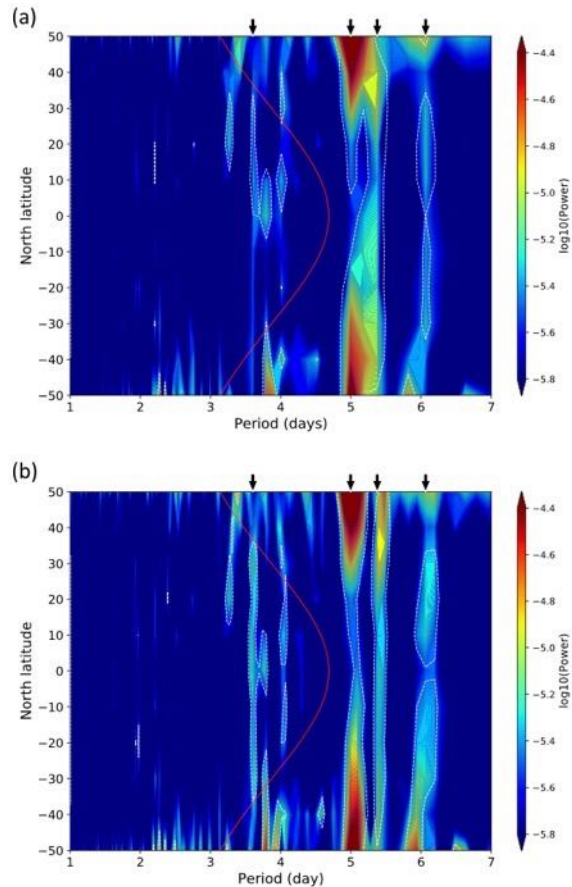
SR の時間変化 (高度 53 km)



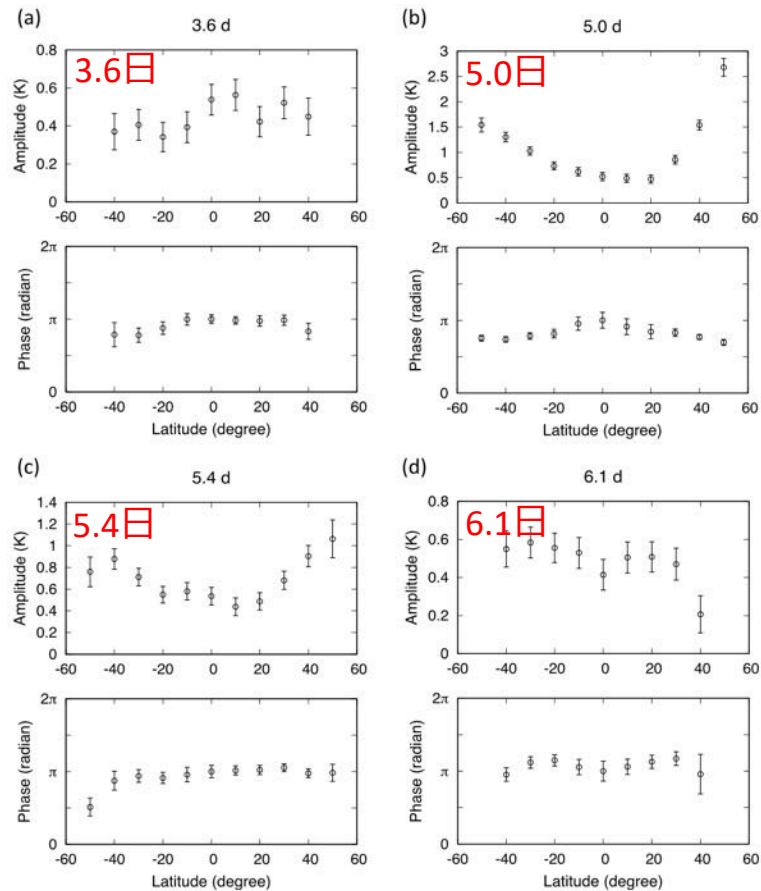
- 5日波が下部雲層の赤道ジェットを強化する。
- 赤道ジェットが強まると7日波が発達し、赤道ジェットを弱める。
- 5日波と7日波が交互に発達と減衰を繰り返すことにより、下部雲層の赤道ジェットの生成と時間変動が説明できる可能性がある。
- ただし、観測した東西範囲が非常に狭いことは大きな問題。
- 剛体回転に5日波の Kelvin モードを重ね合わせるだけで、観測を説明できる可能性がある。

# その他の短周期波動 (Kajiwara+, 2021)

## LIR 観測の周期解析



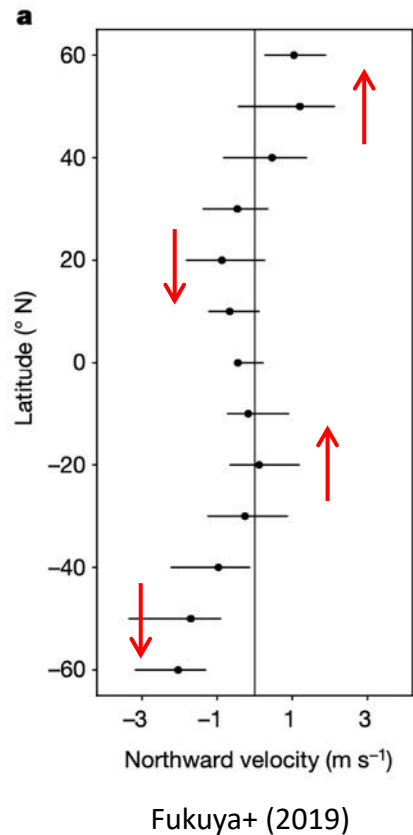
## 各モードの南北構造 (振幅と位相)



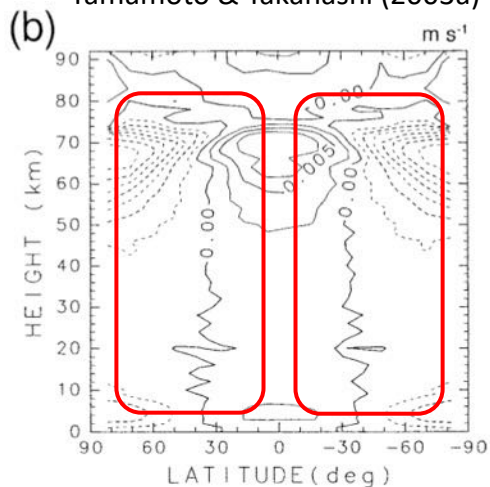


# 子午面循環：LIR 観測と GCM の比較

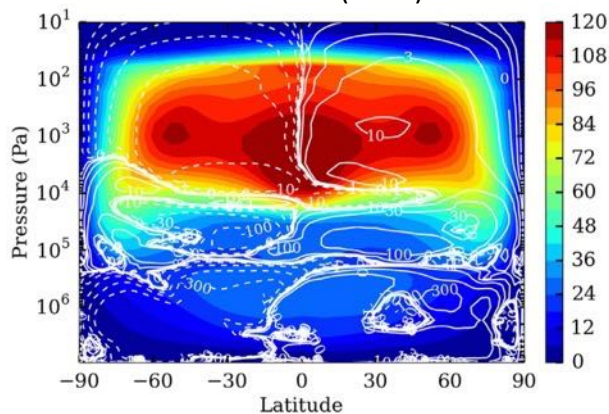
LIR 観測から推定された平均南北風



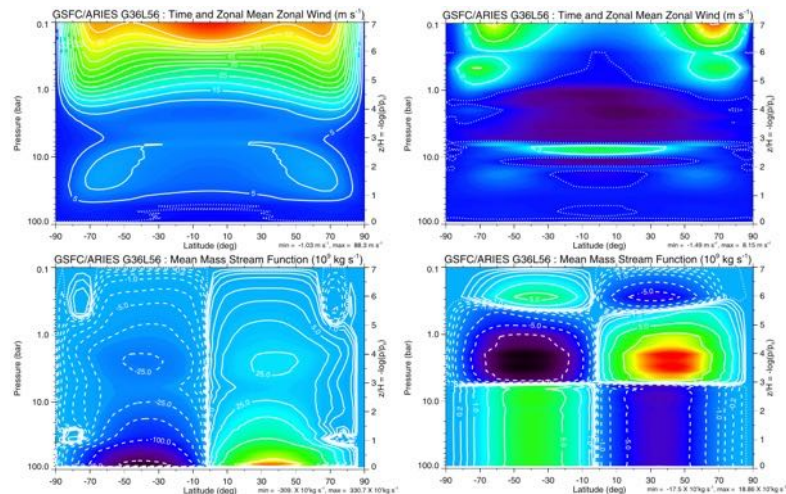
Yamamoto & Takahashi (2003a)



Lebonnois+ (2016)

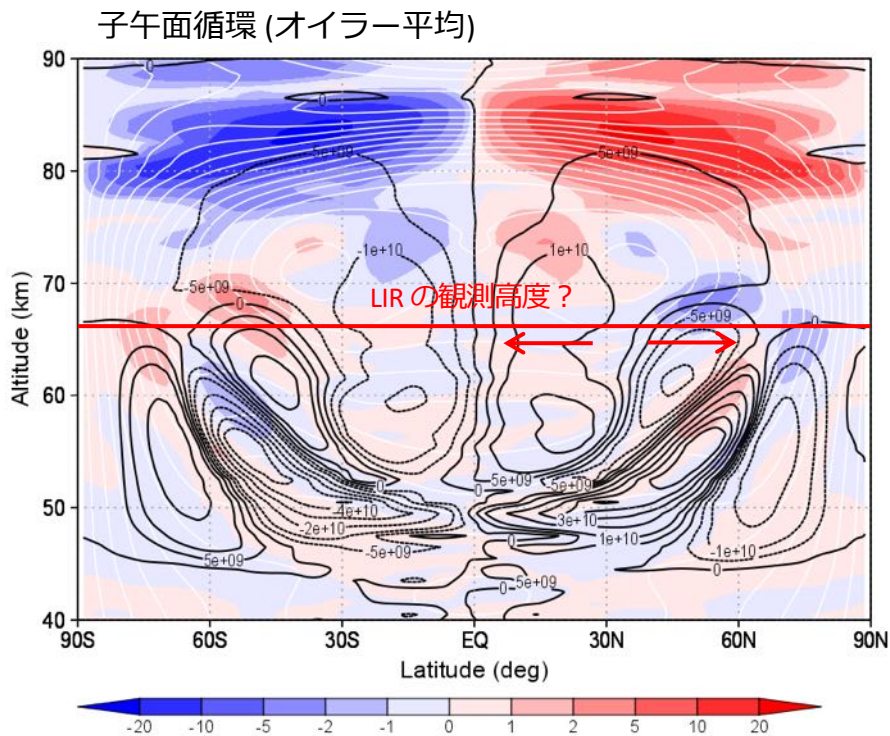


Hollingsworth+ (2007)

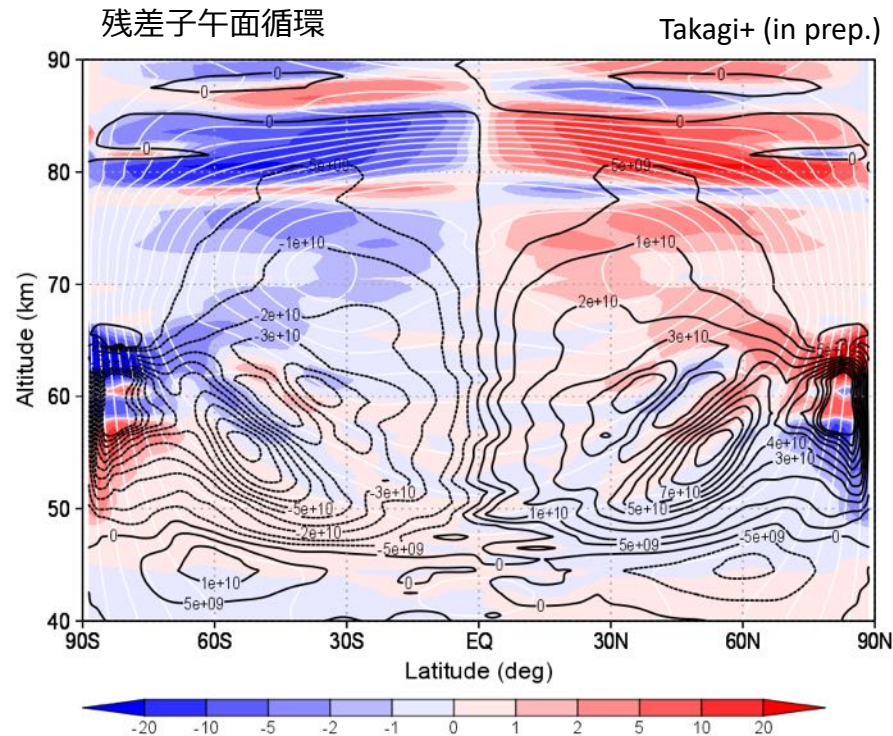


- LIR 観測 (24 LT をカバー) によって雲頂高度での平均子午面循環が初めて導出された (左図; Fukuya+, 2019)。
- 低緯度で赤道向き、中緯度で極向き。
- GCM (Euler 平均) では、赤道から極に達する1セルのハドレー循環となる結果が多く、雲頂での南北風は極向きである。
- これらとは異なる GCM もある。(次頁)

# 子午面循環：Euler 平均と Lagrange 平均



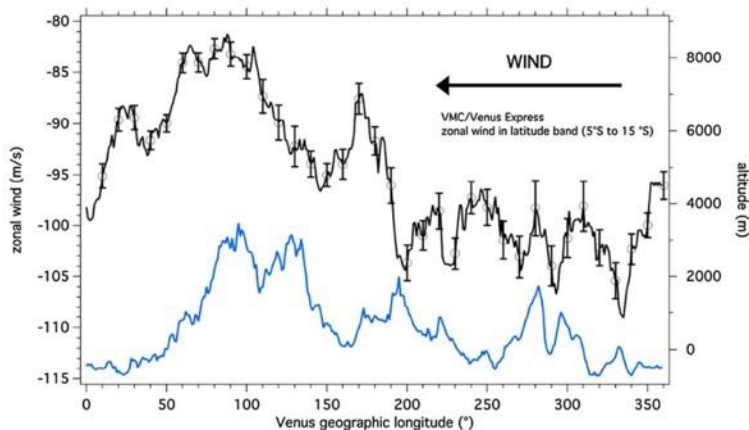
- オイラー平均では、低緯度と低～中緯度に直接循環、中緯度と高緯度に間接循環が存在する。
- 65-68 km 付近では赤道域のハドレー循環が弱い赤道向き、中緯度のフェレル循環が極向きとなり、LIR 観測と矛盾しない？ (残差子午面循環と比べるべき？)



- 2つの間接循環は残差平均では消失する。
- この結果は間接循環が傾圧不安定波・5日波によって作られていることを示唆する。
- 現状では、子午面循環の検証は極めて困難。

# 山岳波：あかつきによる発見

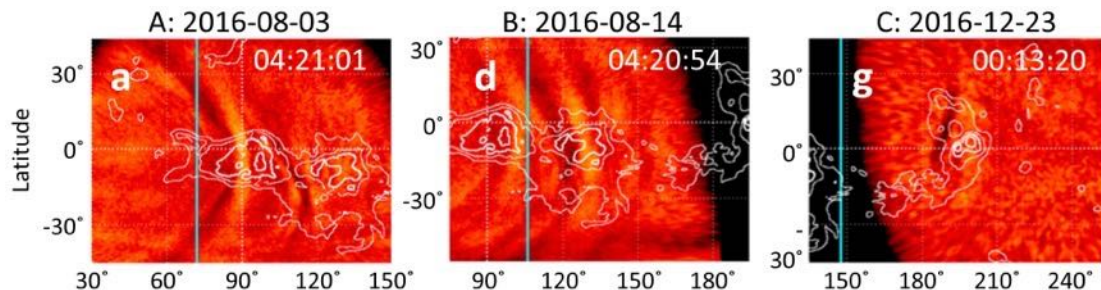
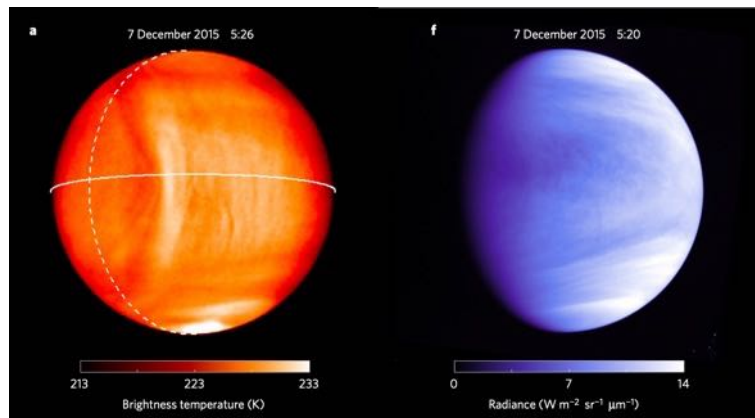
雲頂での東西風速と地形 (5°S-15°S)



Bertaux+ (2016)

- Vega気球がアフロディーテ山上空で強い鉛直風を観測 (Blamont+, 1986)。
- VMC/Venus Express から推定した雲頂高度での東西風速と同緯度の地形の間に強い相関がみられた (左上)。山岳波によって雲頂の東西風が減速されているのではないか。
- ただし、あかつき UVI の解析では、地形との強い相関はみられず、観測のバイアスの影響が指摘された (Horinouchi+, 2018)。

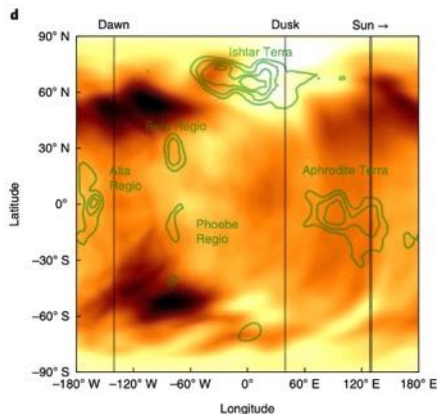
LIR が発見した山岳波 (Fukuhara+, 2017; Kouyama, 2017)



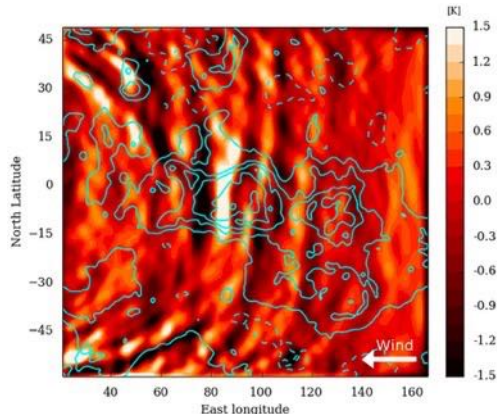
LIR 観測によって大規模山岳地形によって励起された重力波が発見され、ローカルタイム依存性などが明らかになった。山岳波による鉛直運動量輸送により、SR を減速する可能性がある。

# 山岳波：数値モデルによる研究

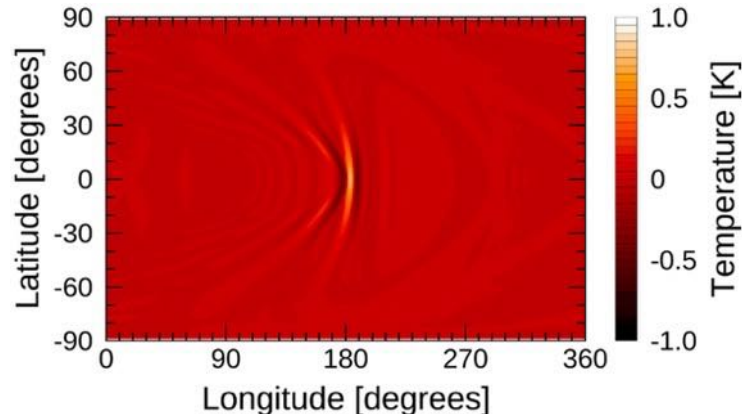
大規模地形によって励起された山岳波が雲頂高度 (~70 km) まで到達し、弓状模様を形成する



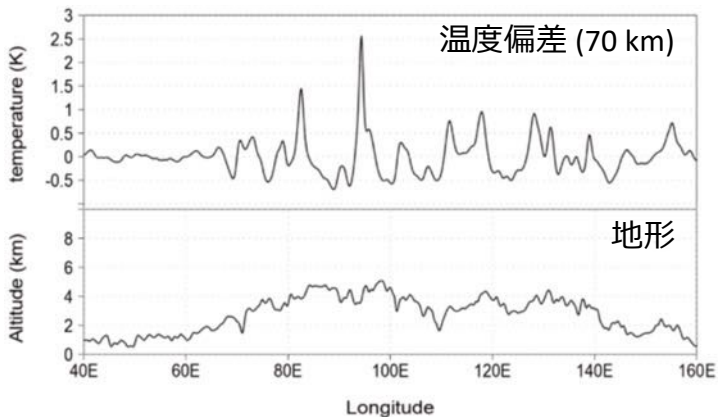
Navarro+ (2018)



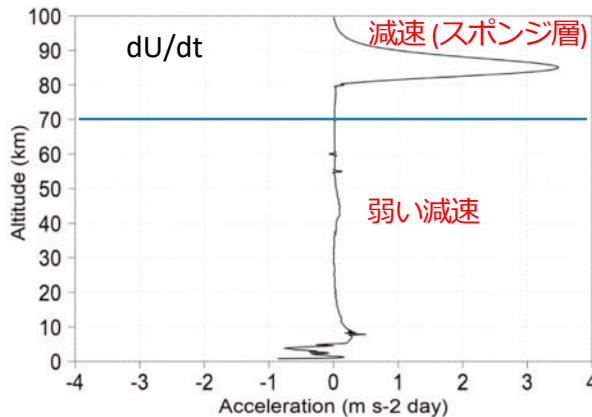
Lefevre+ (2020)



Yamada+ (2019)



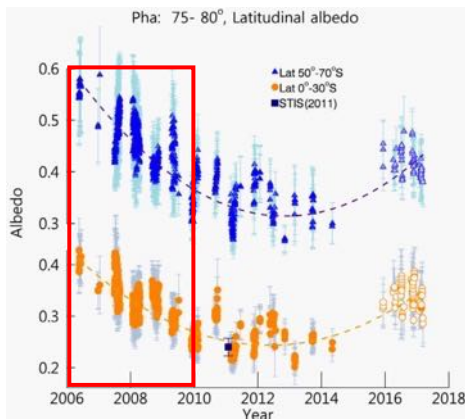
Suzuki+ (submitted)



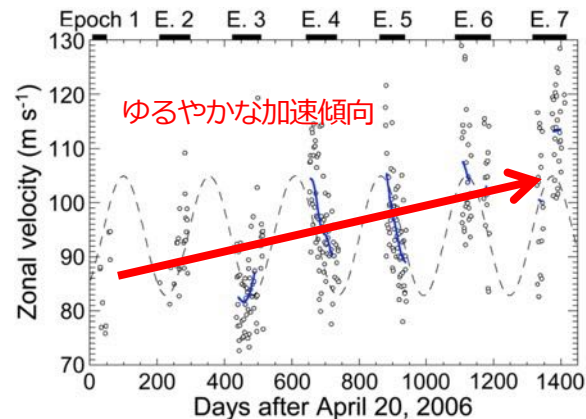
- 山岳波のローカルタイム依存性は、地表面付近の大気成層度と水平風速の変化によって説明できる可能性がある。
- 惑星境界層の情報が間接的に得られるかもしれない。
- 山岳波は雲頂付近の平均東西風を減速せず、もっと高高度の大機循環に影響する。

# 平均東西風 (SR) の変動

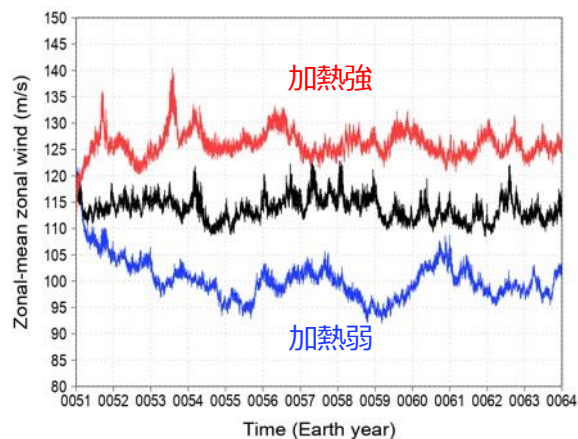
紫外アルベドの時間変化 (左) と太陽加熱の変化の推定 (右) (Lee+, 2019)



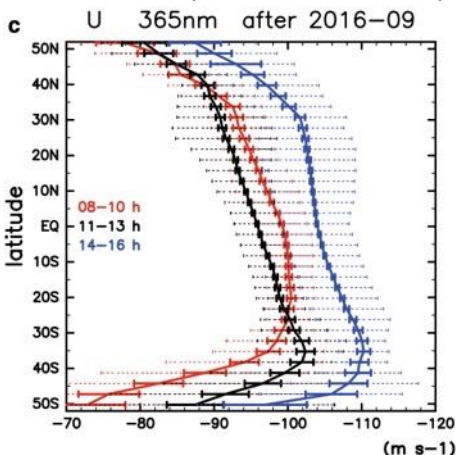
雲頂東西風の時間変化 (Kouyama+, 2013)



太陽加熱と雲頂東西風 (Takikawa+, in prep.)



UVI 東西風 (Horinouchi+, 2018)



- 紫外アルベドの長期変動 (左上) と雲頂東西風 (右上) が同期して変動している可能性がある (アルベド減少↔風速増大)。
- 雲・大気化学と力学の相互作用による金星気候変動が存在する。長期継続観測が重要。
- GCM による初期結果によると、風速変動をもたらす主な要因は熱潮汐波の変化 (左下)。
- 東西風の南北構造に持続的な赤道非対称性が見いだされている。未説明。

# 今後の展望

- 大気波動
  - 熱潮汐波の角運動量輸送・熱輸送
  - 4日波・5日波・7日波など, 惑星規模～総観規模の波
  - 波の鉛直伝播 (特に下方伝播)
- 子午面循環
  - 直接観測, 物質分布からの推定
- 雲・大気化学
  - 紫外アルベド変動を伴う金星気候変動
  - 物質観測を利用した大気運動の間接的解明 (子午面循環など)
- 地面～雲底高度 (0-45 km) の観測
  - ほとんど観測されていない (数点の落下プローブ観測のみ)
  - 下層大気の子午面循環や夜昼間対流, 大気波動も?
  - 惑星境界層: 大気・固体惑星間の角運動量交換, 山岳波の励起, 放射による対流

雲層全域 45-70 km を  
カバーする観測が必要。  
東西方向にも。