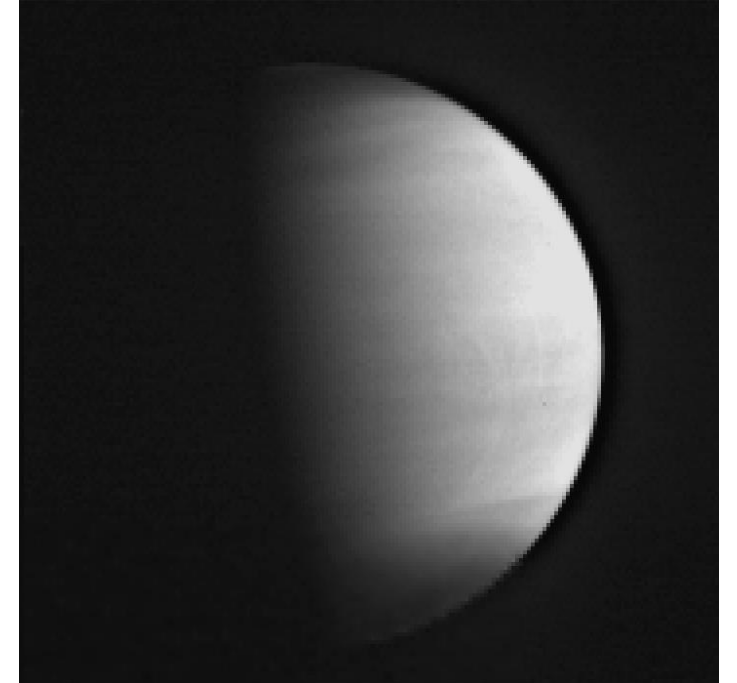


金星大気大循環モデル AFES-Venus による現実的な安定度と 東西風の再現

神戸大学理学部惑星学科
流体地球物理学教育研究分野 B4
2133406s 中井茉熙

金星大気の特徴

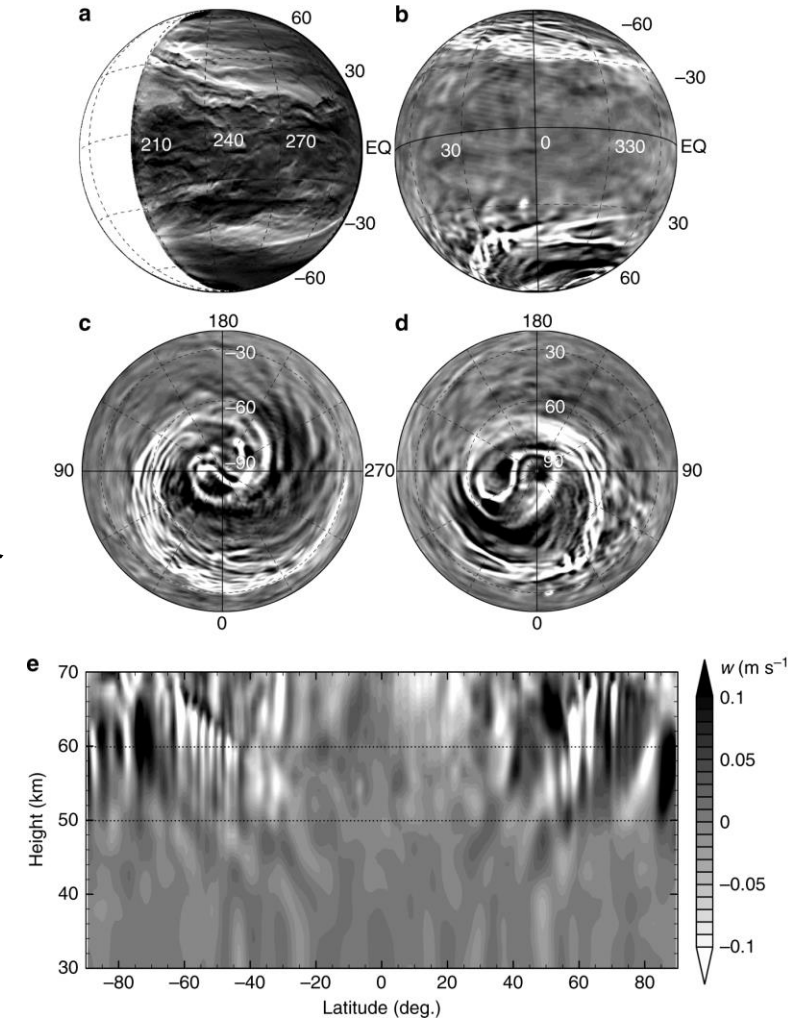
- 主成分は CO₂ (96.5 %) , N₂ (3.5 %)
 - 非常に高温高圧な環境
- 雲層
 - 高度 45-70 km を硫酸雲が覆う
- スーパーローテーション
 - 赤道上を約 100 m/s の速さで吹く東風
 - 赤道自転速度の約 60 倍
 - 金星は自転の向きが地球と逆であり, 東風が自転を追い越す



(C)JAXA

モデル計算による金星大気の再現

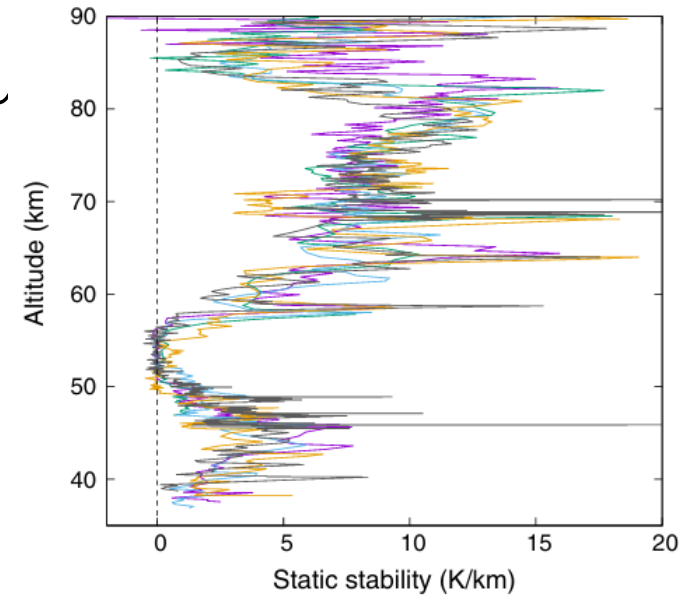
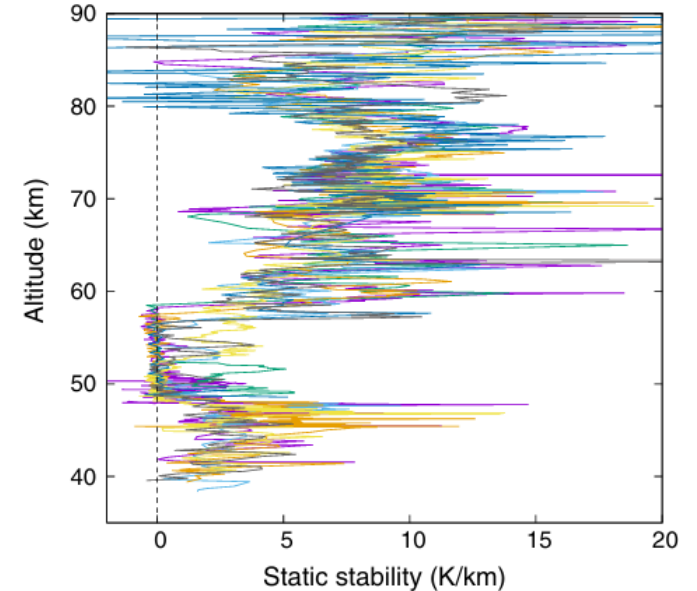
- 世界各地で大気モデルを用いた金星大気の再現が行われている
 - IPSL-VGCM (仏), AFES-Venus (日) など
- 今回は AFES-Venus を使用
 - 地球用の全球大気モデル AFES を金星用に改良
- 現実の金星大気で発生する諸現象を非常に高解像度で再現
 - スーパーローテーションの再現 (Sugimoto et al. 2019)
 - 周極低温域を再現 (Ando et al. 2016)
 - 筋状構造を再現 (Kashimura et al. 2019)
 - 探査機「あかつき」とのデータ同化 (Fujisawa et al. 2022)



再現された筋状構造の図
(Kashimura et al. 2019
Fig. 2 より引用)

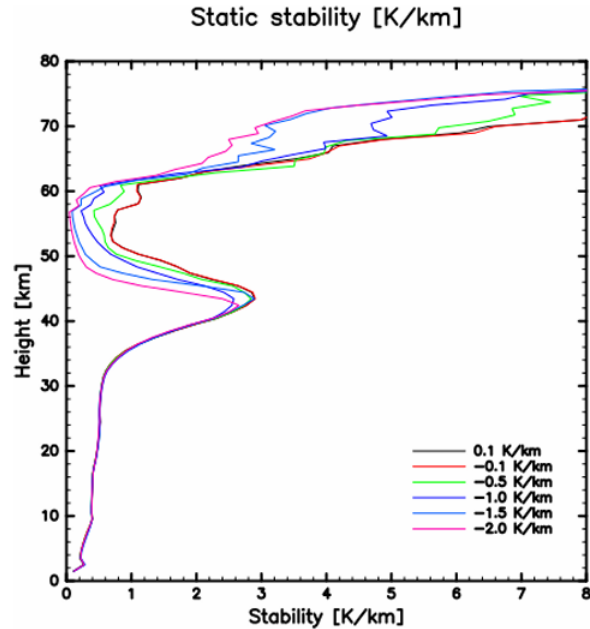
研究背景

- 金星大気には静的安定度が中立に近い層が存在
 - 大気がどのくらい安定しているかの指標
- AFES-Venus でもニュートン冷却の基準温度場として導入
 - しかし、実現された安定度と観測のものとはずれ
- 岡田 (2023) では、低安定度層の安定度に負の値を強制することで現実的な安定度分布と傾圧不安定を再現
 - 通常 0.1 K/km 変更後 -2.0 K/km
- 一方で、東西平均東西風が弱まってしまった
 - 次のスライドで結果を紹介



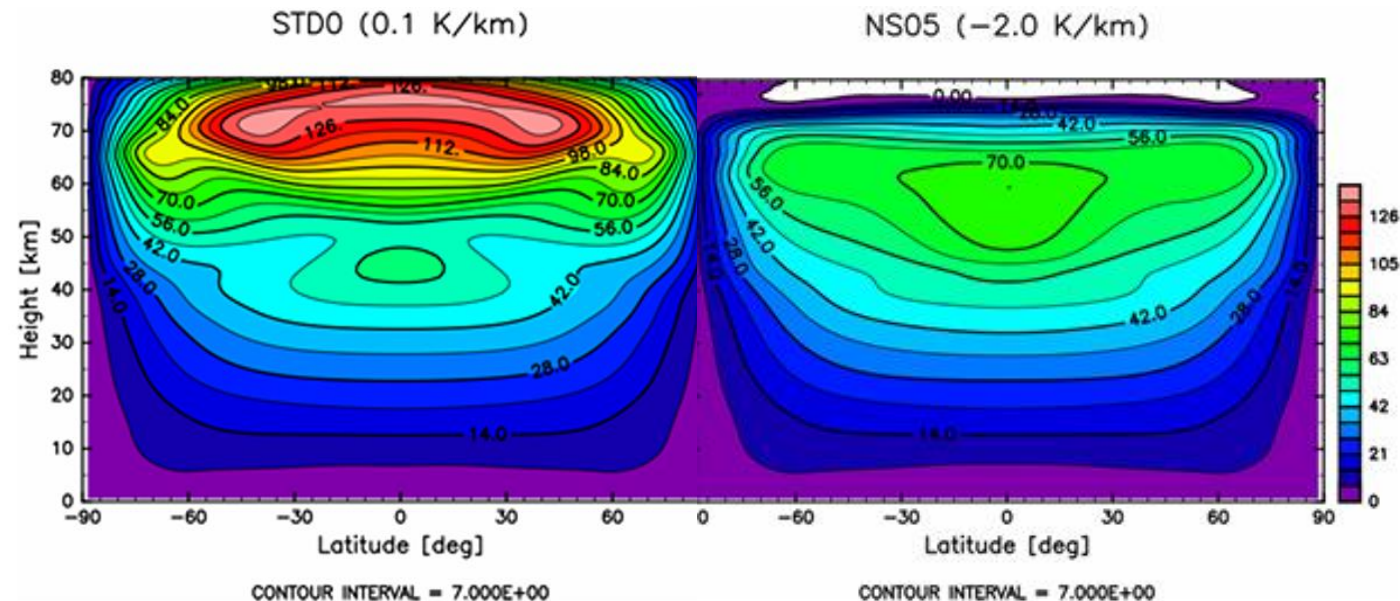
金星大気の静的安定度
Imamura et al. (2017)
Fig.7 より引用

時間水平平均した安定度分布/時間東西平均東西風



上図: 水平平均した安定度分布 (岡田 (2023) 図 3.2 より引用)
下図: 東西平均東西風 (岡田 (2023) 図 3.4 の一部を引用)

- STD (0.1 K/km: 黒線)では, 高度 55-60 km において 1 K/km を超える高い安定度となった
- NS05 (-2.0 K/km: ピンク線)は 0.1 K/km 程度の低い安定度が実現されており, 観測と整合的である
- STD (0.1 K/km) では高度 70 km 付近に 130 m/s を超える東西風が見られる
- 一方 NS05 (-2.0 K/km) では最大風速は70 m/s 程度にとどまる



AFES の設定, 計算設定

- 支配方程式系
 - 3次元プリミティブ方程式系
- 水平方向は球面座標系, 鉛直方向は σ 座標系
- 雲過程, 光化学反応, 地形効果は省略
- 乾燥対流調節を導入
- 離散化手法
 - 水平方向はスペクトル法, 鉛直方向は差分法
 - 経度方向は等間隔に, 緯度方向は Gauss 緯度で分割
- 空間解像度 T63L120 (水平方向 192 × 96 格子, 鉛直120 層)
- 自転の向きは地球と同じ (現実の金星とは逆)

AFES における放射過程

- 太陽加熱関数
 - Tomasko et al. (1980) による観測の値を基にした太陽放射加熱
 - 南北方向に勾配があり, 日変化成分, 気体の効果を持つ
- ニュートン冷却
 - $\frac{dT}{dt} = -\frac{T-T_{nc}}{\tau}$ の関係式で表される
(T は温度, T_{nc} は基準温度場, τ は緩和時定数)
 - 温度場と基準温度場のずれがどのくらいで緩和されるかを決定
 - 強制する安定度分布から基準温度場が決定される
 - 水平一様

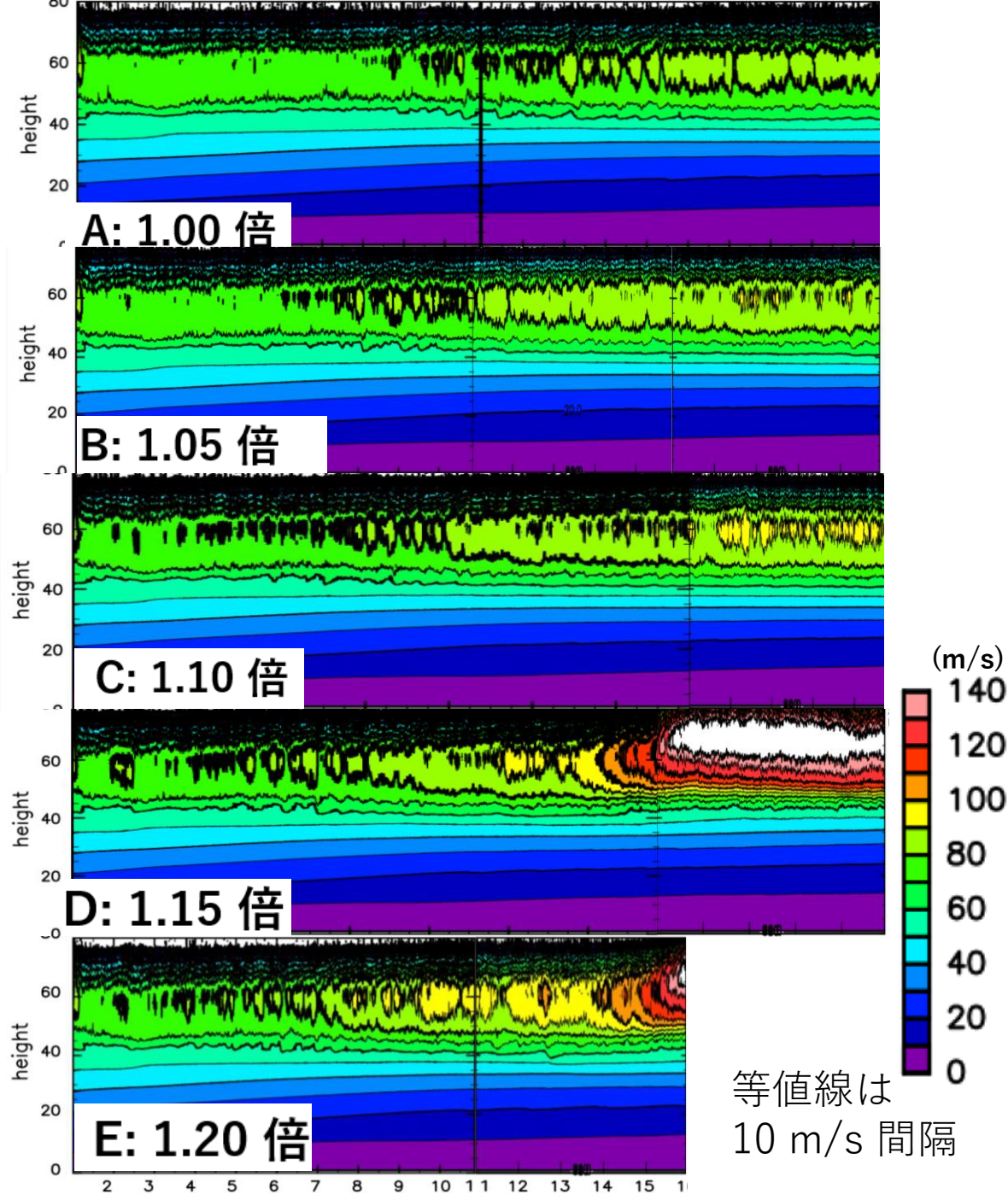
実験設定

- 南北方向の加熱率の振幅を変更(水平平均した値は変化しない)
- 強制する安定度は岡田 (2023) を踏襲

	STD	A	B	C	D	E
強制する安定度 (K/km)	0.1	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
南北方向の加熱率の振幅	1.00	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20

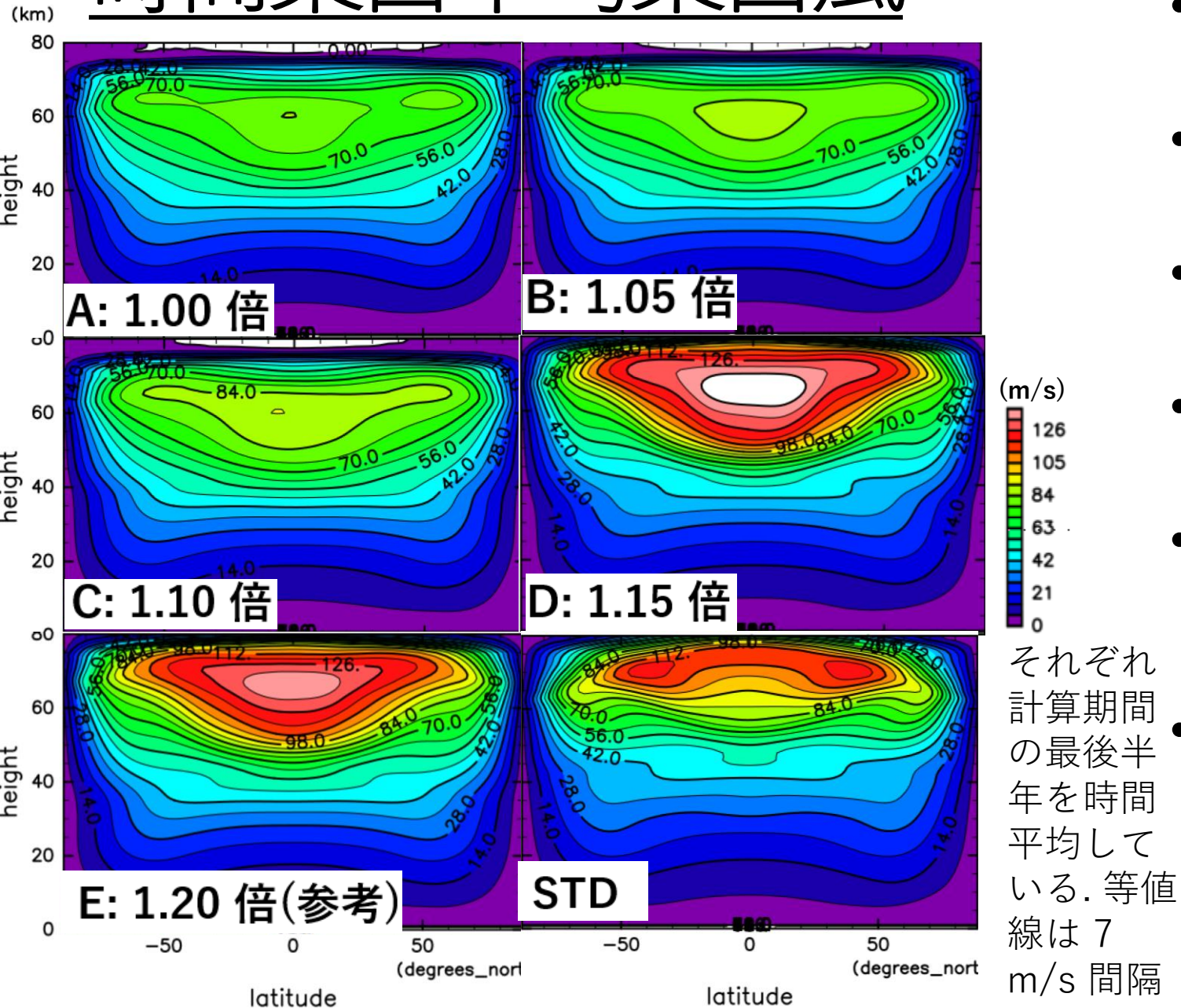
- 計算期間
 - STD, A, B, C, D 20 地球年 E 15 地球年 ➔ 出力間隔 1 地球日 (共通)
- 初期東西風
 - $100 \times \cos \phi \times \frac{z}{70} \text{ m/s}$ (東西一様, ϕ は緯度 z は高度 (km))
- スポンジ層: 高度 80 km 以上

赤道上の東西平均東西風の時間発展



- A, B, Cは 20 年時点で準定常状態に至っていると考えられる
- A, B では初期東西風から一度速度減少後数年は低い速度で落ち着いているがその後発達している
- A, B, C でジェットの高度は 約 60 km 付近にある
- D, E は STD で見られた 130 m/s を大幅に上回っており, 速度増加傾向は続いている
- D のみジェットの高度が上昇傾向にある
- E は以後の解析も 15 年時点で行う

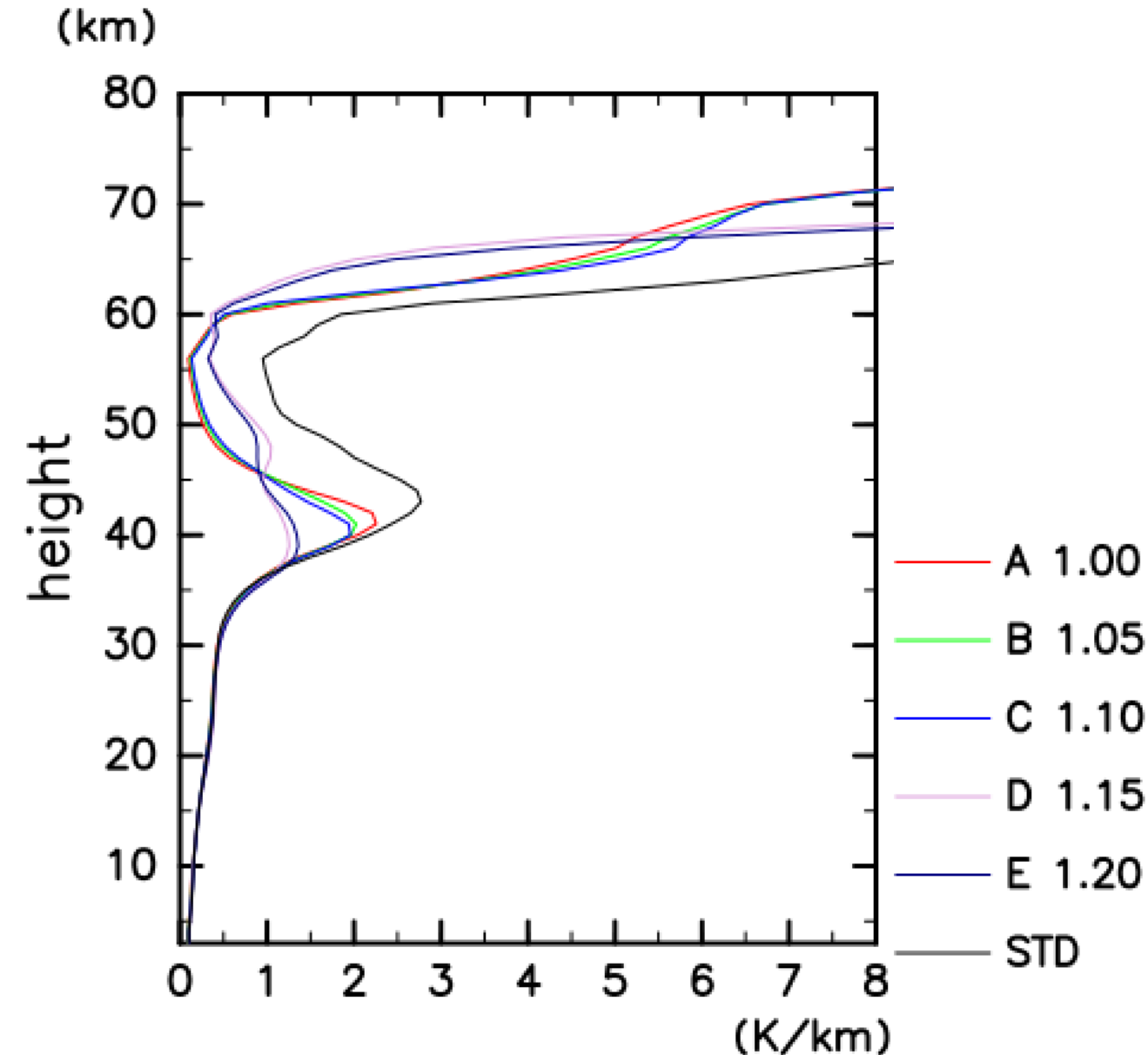
時間東西平均東西風



- 南北加熱差を大きくするほど赤道のジェットが強まった
- B では約 85 m/s, C で約 90 m/s の東西風が実現された
- ジェットの高度は低いままである
- 赤道付近に比べて中緯度の速度はあまり成長しなかった
- STD で見られる赤道上高度 40 km 付近の極大値も見られなかった
- D, E では STD の速度を上回ったが, その構造は A, B, C に近い

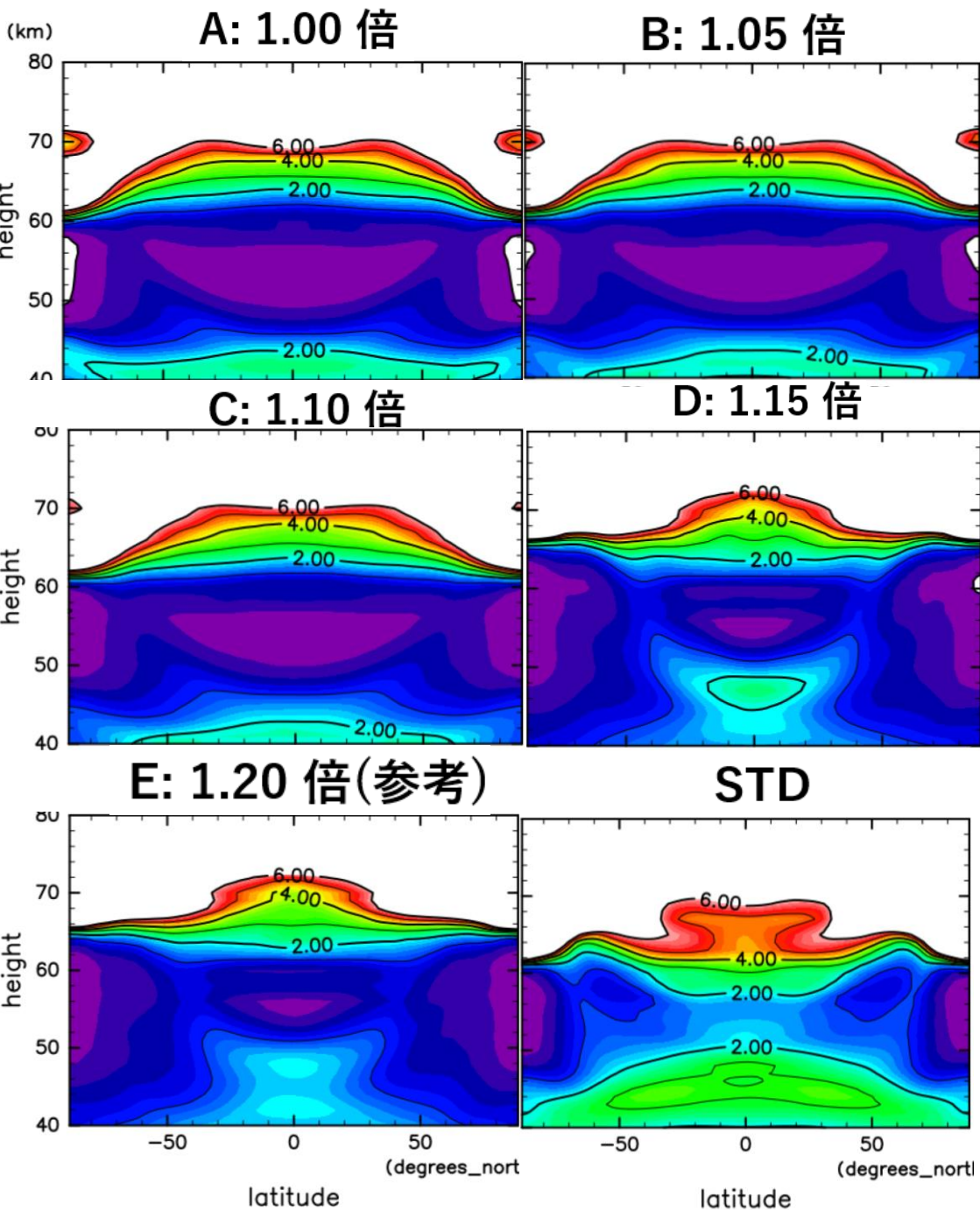
それぞれ計算期間の最後半年を時間平均している. 等値線は 7 m/s 間隔

実現された時間水平平均安定度分布



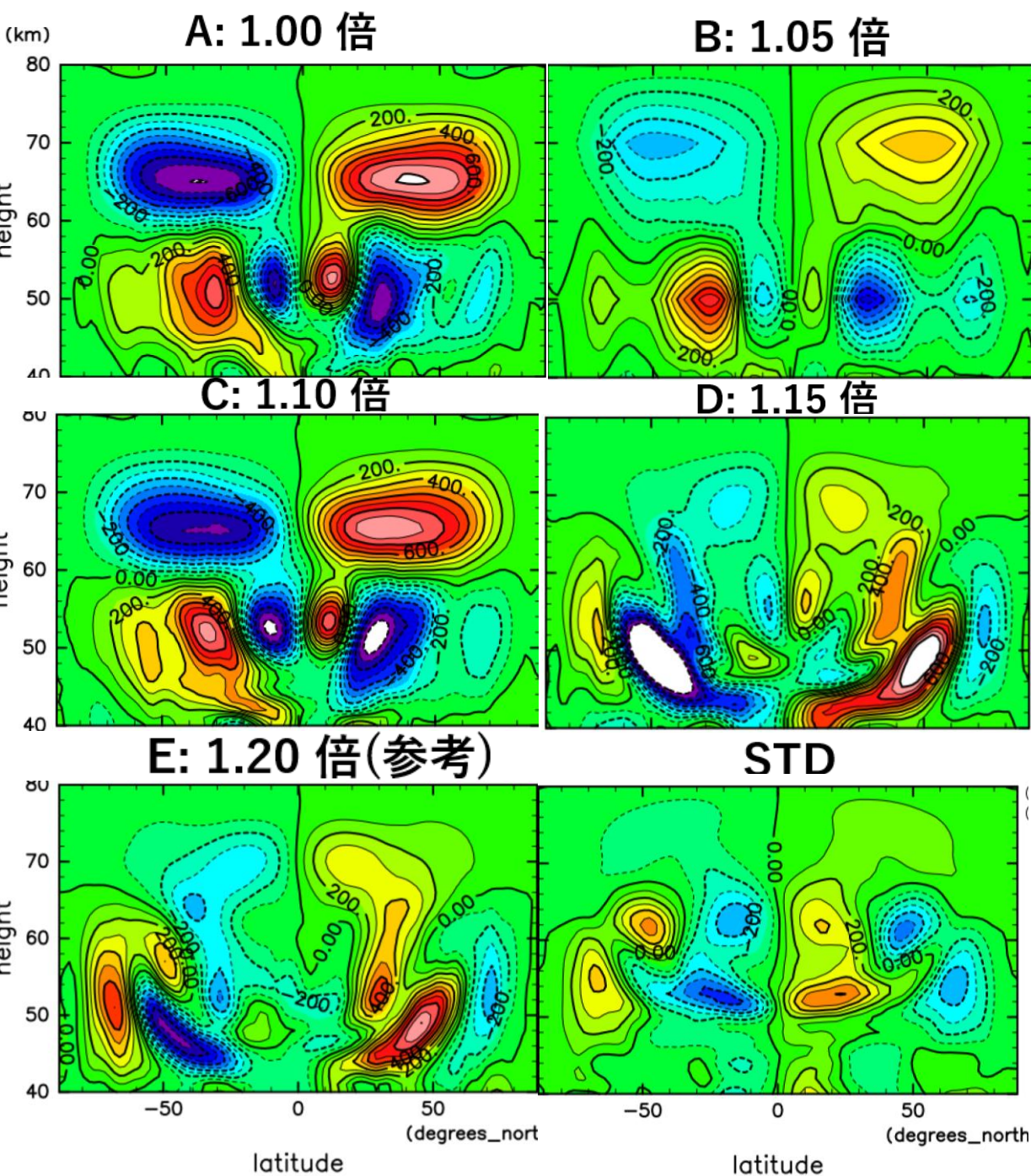
- A, B, C と D, E と STD で概形が大きく異なる
- A, B, C では低安定度層を実現でいている
- 高度 55-60 km 付近に 0.1 K/km の中立に近い安定度が見られる
- A, B, C では南北加熱差を大きくするほど高度 40 km と 55 km における安定度差が小さい
- D, E も STD よりは低い安定度だが、観測のものよりは大きい

時間東西平均した安定度分布



それぞれ計算期間の最後半年を時間平均している。等値線は1 K/km 間隔

- 赤道上空に低安定度層を作り出すことができた
- その大きさは、南北加熱差を大きくするほど薄く、狭くなっている
- 中緯度上空では南北加熱差が大きくなるにしたがって安定度が大きくなっている
- D, E の東西風は STD よりも強いが、低い安定度分布が実現された
- 極域における低安定度層の厚さは A, B, C よりも D, E のほうが低い



質量流線関数

- 北半球における寒色の領域が逆循環である
- どの場合でも、逆循環が存在した
- 傾圧不安定が発生していると考えられる
- 極側にもう一つ逆循環が存在している
- STD と比較すると、A, B, C では循環は強く、大きい
- しかし、逆循環の高度は低い

それぞれ計算期間の最後半年を時間平均している。
等値線は 100 kg/s 間隔

まとめ

- 太陽加熱関数の南北加熱差を拡大することで東西平均東西風を増加させることができた
 - 南北加熱差 1.10 倍で約 90 m/s となった
- 一方で中緯度における速度など構造には違いがある
- 南北加熱差を 1.15 倍以上にすると東西平均東西風は現実のものよりも大きくなってしまった
 - 現実の金星大気を再現するためには 1.10 倍から 1.15 倍の間で拡大する必要がある
- A (南北加熱差 1.0 倍) は岡田 (2023) の設定を積分期間 4 倍で計算した結果であるが, 20 年計算することで岡田 (2023) よりも早い東西風となった
 - 正確な準定常状態の判断には更なる計算が必要

まとめ 2

- 負の静的安定度を強制すると, 南北加熱差を拡大しても実現される安定度分布は中立に近いままだった
 - 高度 55-60 km において南北加熱差 1.1 倍以内で拡大した際に 0.1 K/km が実現された
 - 赤道上空は, 南北加熱差の拡大にかかわらず 0.1 K/km という中立に近い安定度が実現された
 - 南北加熱差を 1.15 倍以上に拡大すると東西風は STD を上回ったが, 安定度は STD よりも低くなった
- 南北加熱差を拡大しても質量流線関数の逆循環が確認できたため, 傾圧不安定が発生していると考えられる