

# 乾燥大気力学コア上で生じる QBO 的振動の 発生要因解明に向けた諸解析

藤田 駿

京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻 気象学研究室 M2

July 22, 2024

EOR available

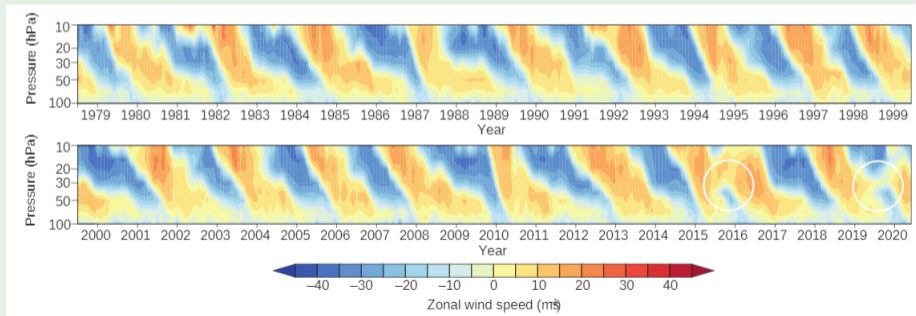
Fujita, S., and K. Ishioka, 2024:  
Do dry GCMs generate QBO-  
like oscillation?  
*J. Meteor. Soc. Japan*, **102**,  
485-506,  
doi:10.2151/jmsj.2024-026.



# はじめに

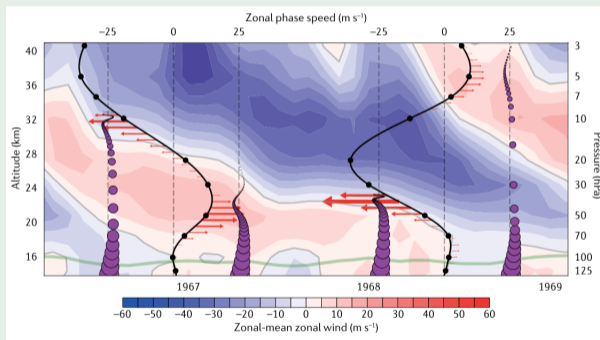
## 成層圏準二年周期振動 (Quasi-Biennial Oscillation, QBO)

- 熱帯成層圏の東西風の向きが周期的に反転しながら、位相が下方に移動する現象

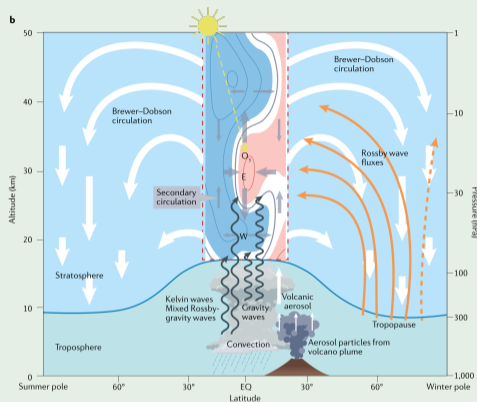


シンガポール上空の東西風 (Ansty, et al. (2022), Fig. 1a)

- 赤道域では様々な位相速度の波が励起.
- これらの波が成層圏に伝播し, 平均流に運動量を受け渡すことで QBO が生じると考えられている.



東西平均東西風 (カラーマップ, 黒線), 波の運動量 (紫丸), 波強制 (赤矢印)  
(Ansty, et al. (2022), Box 1 より)



30 in tropical stratospheric zonal wind and global through the winter extratropical stratosphere (orange arrow):

メカニズムは単純だが、  
様々な現象が絡み合っている。

- 赤道対流圏から上方伝播する波
- 中高緯度から伝播する波
- Brewer-Dobson 循環
- QBO の二次循環

## QBO に関する現象

(Ansty, et al. (2022), Fig. 1b)

# 先行研究

Yao and Jablonowski(2015, JAS. 以下 YJ2015)

離散化手法が異なる**乾燥大気力学コア**で長期間積分

→QBO 的振動がいくつかの実験設定で発生

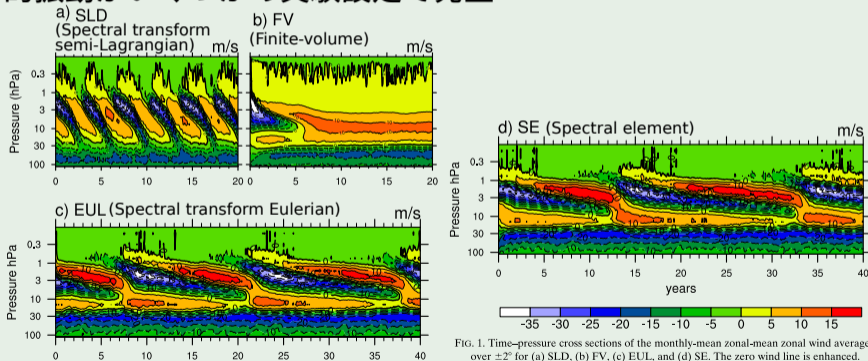


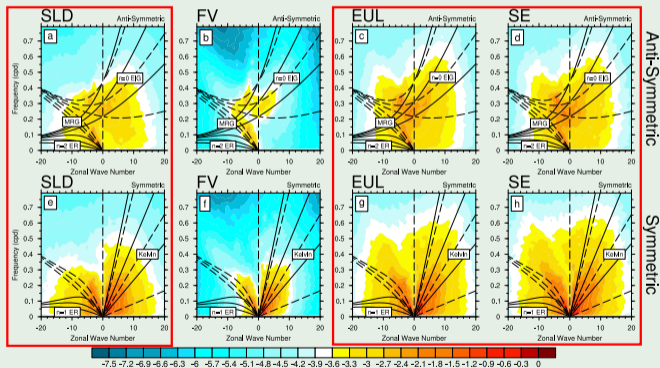
FIG. 1. Time–pressure cross sections of the monthly-mean zonal-mean zonal wind averaged over  $\pm 2^\circ$  for (a) SLD, (b) FV, (c) EUL, and (d) SE. The zero wind line is enhanced.

2°S-2°N，東西平均東西風 時間 (横軸)-高度 (縦軸) 断面 (YJ2015, Fig.1 に一部加筆)

# 先行研究

Yao and Jablonowski(2015)

QBO 的振動が生じたモデルでは、対流圏から伝播する波の活動度が高い



22hPa での温度場のパワースペクトル (YJ2015, Fig.12 に一部加筆)

# 先行研究

## Yao and Jablonowski(2015)

離散化手法の違いによって QBO 的振動の有無の違いが生じる

- 非断熱加熱などの基本的な設定は同じ
- 波活動が活発だったのはすべて鉛直差分モデル

QBO 的振動が生じた (=波活動度が高い) 要因の考察

- 対流圏で力学的不安定? (慣性・順圧/傾圧不安定)
- 離散化誤差による波動励起?

しかし、**どの離散化手法の違いが効いたのかは不明**

# 本研究

## 目的

QBO 的振動の有無には鉛直離散化手法が影響するのではないか？

→ 鉛直離散化手法がモデル上の循環に及ぼす影響を調査

※現実的な QBO を得るのが目的ではない

本研究では、鉛直離散化手法のみが異なる 2 つのモデルを比較する。

- 鉛直差分・水平スペクトルモデル (Durran, 2010 に基づいて実装)
- 3次元スペクトルモデル (Ishioka, et al., 2022)



# モデル概要

鉛直差分(VFD)モデル

3次元スペクトル(3DS)モデル

支配方程式

回転球面,  $\sigma$ 座標のプリミティブ方程式

鉛直離散化

差分法

スペクトル法(Legendre関数)

水平離散化

スペクトル法(球面調和関数)

時間発展手法

AM2\*/AX2\*(多段階のsemi-implicit法, Durran &amp; Blossy, 2012)

水平拡散

ラプラシアン<sup>4</sup>の4階( $\nabla^8$ )の高階粘性

鉛直拡散

なし

## 鉛直差分・水平スペクトルモデル (VFD モデル)

実装は Durran (2010) に準じる.

鉛直微分は有限差分で近似し, 変数は各  $\sigma$  面で球面調和関数で展開される:

$$\delta(\lambda, \mu, \sigma, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n \hat{\delta}_n^m(\sigma, t) Y_n^m(\lambda, \mu)$$

### 特徴

- 鉛直微分の精度が低い (鉛直格子点間隔が等間隔でない場合は 1 次精度)
- 鉛直座標の分布を任意に設定できる
- YJ2015 の EUL と対応したモデル (水平・鉛直離散化手法が同様)

## 3次元スペクトルモデル (3DS モデル)

実装は Ishioka, et al. (2022) に準じる。

変数は水平方向に球面調和関数, 鉛直方向にルジャンドル関数で展開される:

$$\delta(\lambda, \mu, \sigma, t) = \sum_{l=0}^M \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^n \hat{\delta}_{n,m,l}(t) Y_n^m(\lambda, \mu) P_l(1 - 2\sigma)$$

(ただし温度場は異なる重み付け)

### 特徴

- 自由度が小さくても高精度で計算を行える
- 鉛直格子点数を定めると鉛直座標の分布が一意に定まる

# 実験設定

## YJ2015 に沿った設定

- 地形や水蒸気, 対流調節, 季節変動の効果はなし
- Held and Suarez(1994) の強制・散逸項
  - ▶ 下層渦度・発散場に対するレイリー摩擦
  - ▶ 放射平衡温度 ( $\sigma < 0.1$  ではほぼ 200K) への強制
- 最上層 ( $\sigma < 0.001$ ) で東西風にのみ効くレイリー摩擦 (スポンジ層として機能)
- (等温静止大気+微小擾乱) の場から時間発展

# 実験設定

鉛直格子点数  $L$ , 鉛直切断波数  $M$ , 時間刻み幅  $\Delta t$  は以下のような設定

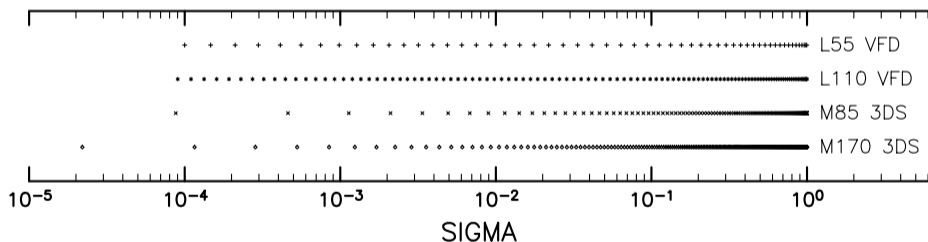
	$L$	$M$	$\Delta t$
L55 VFD	55	–	720 s
L110 VFD	110	–	720 s
M85 3DS	128	85	300 s (120 s in spin-up)
M170 3DS	256	170	150 s (60 s in spin-up)

いずれの実験でも, 水平解像度は T63, 水平格子点数は 256(経度) $\times$ 128(緯度).

## 実験設定

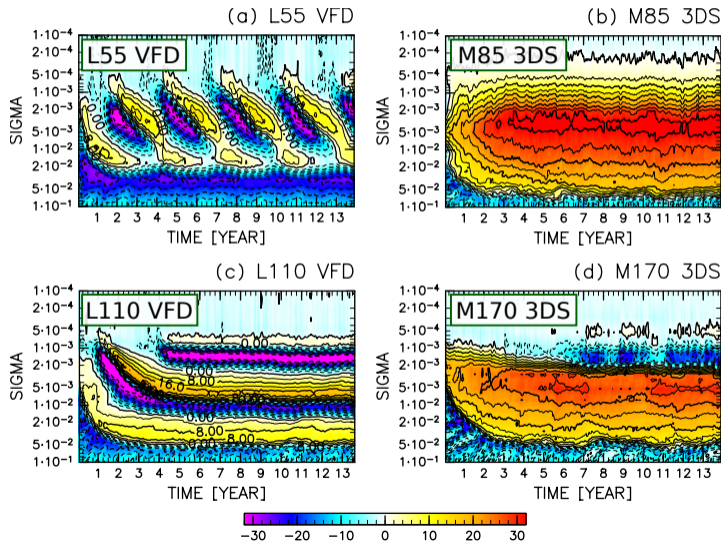
3DS モデルの鉛直格子点配置は (鉛直格子点数を決めると) 自動的に決まる.  
VFD モデルは

- L55 では YJ2015 の設定とほぼ同じ設定
- L110 では, L55 のレイヤーを二分割 (3 次スプライン補間を使用)



鉛直格子点配置, Fujita and Ishioka (2024), Fig. 1, (以下 FI2024)

# 実験結果 (東西風)



L55 VFDでQBO的振動が発生

- ・ 周期は約3年
- YJ2015 EULよりかなり短い

L110 VFD, 3DS

- ・ QBO的振動発生せず
- ・ 最初の数年間は位相が下方伝播
- ・ VFDと3DSで特徴が大きく異なる

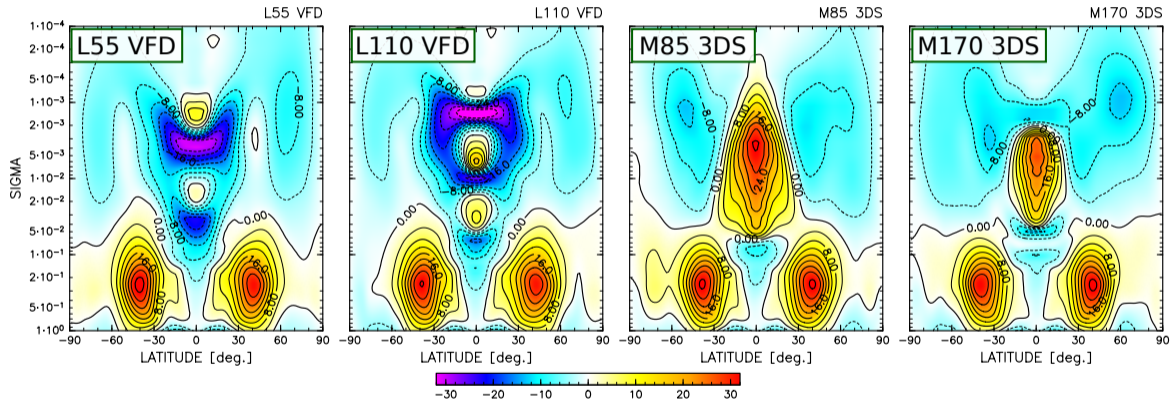
カラー: 月・東西平均東西風 [ $\text{m s}^{-1}$ ]

横軸: 時間[年]

縦軸: 高度( $\sigma$ )

FI2024 Fig.2に加筆

# 実験結果 (東西風)



月・東西平均東西風 [ $\text{m s}^{-1}$ ] 緯度 (横軸)-高度 (縦軸) 断面, (Fl2024 Fig. 3)



# パワースペクトル解析

3600 日目から 4500 日までの 1 時間ごとの温度場のデータを用いて、熱帯域の東西波数-振動数のスペクトル解析を行った。

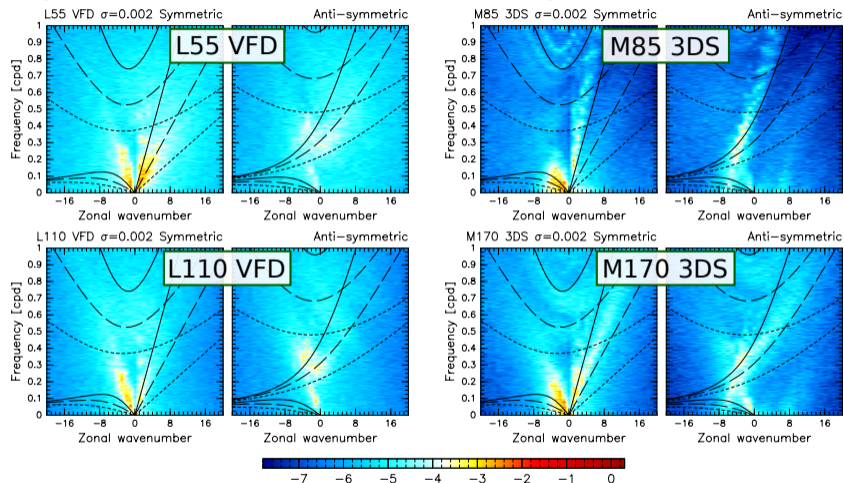
- 線型内挿である  $\sigma$  面での温度を求める
- 次に  $15^{\circ}\text{S}$ - $15^{\circ}\text{N}$  の各点で赤道対称成分  $T_s$  ・ 反対称成分  $T_a$  を求める
- 各緯度でパワースペクトル  $P$  を求める

$$\hat{T}_{s,a}(m, \nu, \mu) = \frac{1}{JK} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{K-1} T_{s,a}(\lambda_j, \mu, t_k) e^{-im\lambda_j + 2\pi i\nu t_k}$$

$$P_{s,a}(m, \nu, \mu) = |\hat{T}_{s,a}(m, \nu, \mu)|^2$$

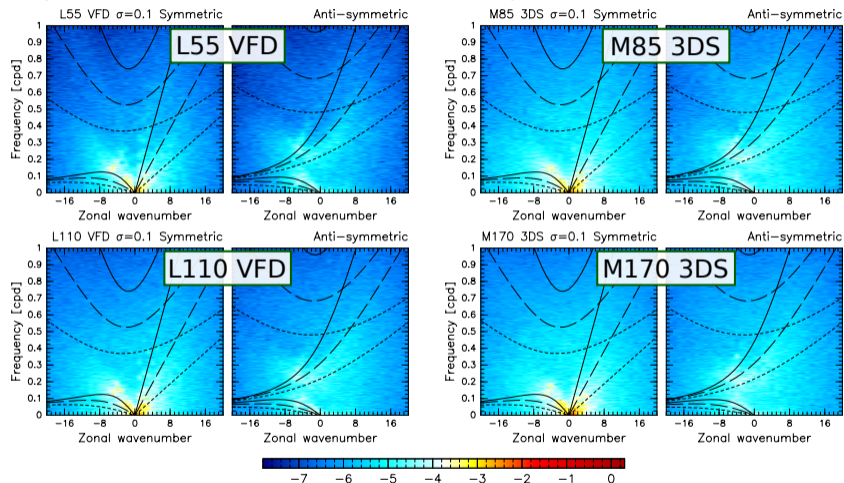
- 緯度方向に平均する

# 実験結果 ( $\sigma = 0.002$ でのスペクトル解析)



$[\log_{10}(K^2)]$  線:  $h = 12, 50, 200[m]$  の赤道波の分散曲線, (FI2024 Fig. 5 に加筆)

# 実験結果 ( $\sigma = 0.1$ でのスペクトル解析)



$[\log_{10}(K^2)]$  線:  $h = 12, 50, 200[m]$  の赤道波の分散曲線, (FI2024 Fig. 6 に加筆)

## 結果・考察

- $\sigma = 0.002$  での波の振幅は L55 VFD が最も高い
- $\sigma = 0.1$  の波活動度はモデル間で差がない
  - ▶  $\sigma = 0.1$  以下から入ってくる波動の強さは同程度
  - ▶ YJ2015 とは異なる特徴

### 考察

$0.002 < \sigma < 0.1$  では

- ① 平均流の違いに起因して波吸収が違う？
- ② 鉛直解像度や離散化手法の違いに起因して波吸収が違う？
- ③ 励起されている波動が違う？

鉛直運動量フラックス  $\overline{u'\omega'}$  への波の寄与の解析

$\overline{u'\omega'}$  に対して, ある位相速度の波が高度ごとにどう寄与しているか調べた

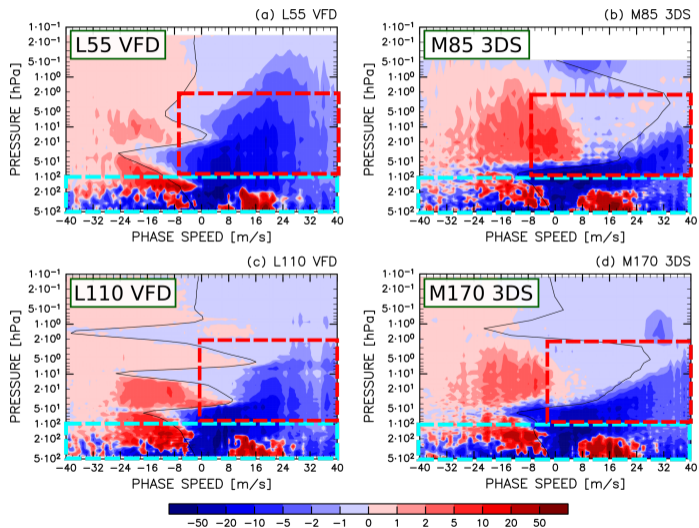
- $T$  と同様にある  $p$  面での  $u', \omega'$  のスペクトル  $\hat{u}, \hat{\omega}$  を求める
- 以下の式で,  $\overline{u'\omega'}$  への波の寄与  $C_{\overline{u'\omega'}}$  を調べる

$$S_{\overline{u'\omega'}}(m, \nu, \phi, p) = \frac{2}{\Delta\nu} \operatorname{Re} \{ \hat{u}(m, \nu, \phi, p) \hat{\omega}^\dagger(m, \nu, \phi, p) \},$$

$$C_{\overline{u'\omega'}}(c, \phi, p) = \sum_{c-\Delta c \leq c_p(m, \nu) < c+\Delta c} S_{\overline{u'\omega'}}(m, \nu, \phi) \Delta\nu.$$

- $C_{\overline{u'\omega'}}$  を  $\pm 2^\circ\text{N/S}$  で平均し, 赤道域平均とする.

# 結果 ( $\overline{u'\omega'}$ への波の寄与 $C_{\overline{u'\omega'}}$ , 900 日データ)



$p < 100\text{hPa}$  では異なる特徴

- ・ 背景風の違いに依存
- ・  $p = 50\text{hPa}$  付近の東向きシアで顕著
- ・ L55 VFD では抑制が弱い  
→ 結果多くの波が上方伝播

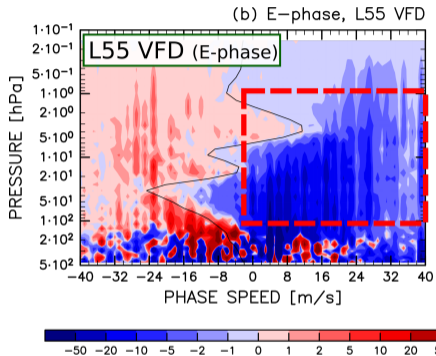
$p > 100\text{hPa}$  では同様の特徴

→ 温度場のパワースペクトルと整合的

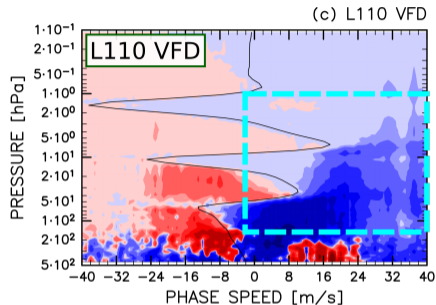
カラーマップ: 運動量フラックスへの波の寄与  
実線: 東西風  
横軸: 位相速度  
縦軸: 高度(圧力)

FI2024, Fig7に加筆

# 結果 ( $\overline{u'\omega'}$ への波の寄与 $C_{u'\omega'}$ , 120 日データ)



L55 VFDは東向きシアーで波抑制が弱い  
 ・  $p=5\text{hPa}$ 付近で最も顕著



カラーマップ: 運動量フラックスへの波の寄与  
 実線: 東西風  
 FI2024 Fig.7, 8に加筆

L110 VFDは東向きシアーで波抑制が強い  
 ・  $p=5\text{hPa}$ ではCritical levelに達していない波も強く散逸

## 結果・考察

- 平均流の違いに起因して上方伝播する波が異なる
  - ▶ L110 VFD や 3DS では下層の西風領域で上方伝播が阻害
  - ▶ この違いが QBO 的振動の有無に関係？

- 平均流の違いによる波吸収の違いだけでは説明できない点も。
  - ▶ L110 と L55 では波吸収のされ方が異なる
- そもそも、なぜ鉛直解像度の違いによって実現される平均流が変わるのか？
  - ▶ 鉛直解像度の違いが波吸収の違いを生み、平均流を変化させている可能性を示唆



# TEM 解析

L55/110 VFD の波動の違いはどれほど東西風加速に効く？ 定量的に見積もりたい  
 → 運動量収支の解析 (TEM 解析)

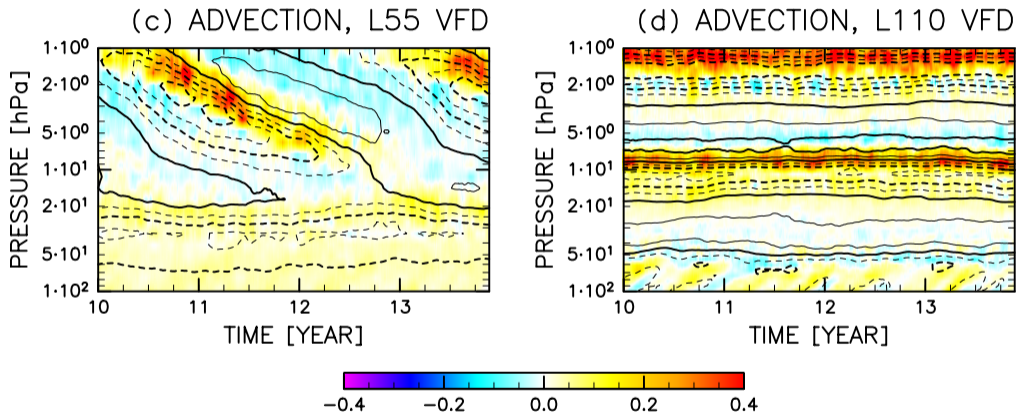
$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \bar{v}^* \left[ f - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\bar{u} \cos \phi) \right] - \bar{\omega}^* \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} + \frac{1}{a \cos \phi} \left[ \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (F_\phi \cos \phi) + \frac{\partial}{\partial p} F_p \right] + X.$$

右辺各項は

- 残差循環の水平/鉛直成分による移流で起こる加速 (第 1,2 項)
- 波-平均流相互作用による加速 (EP フラックス収束/発散)(第 3 項)
- 運動量残差項  $X$ (第 4 項)

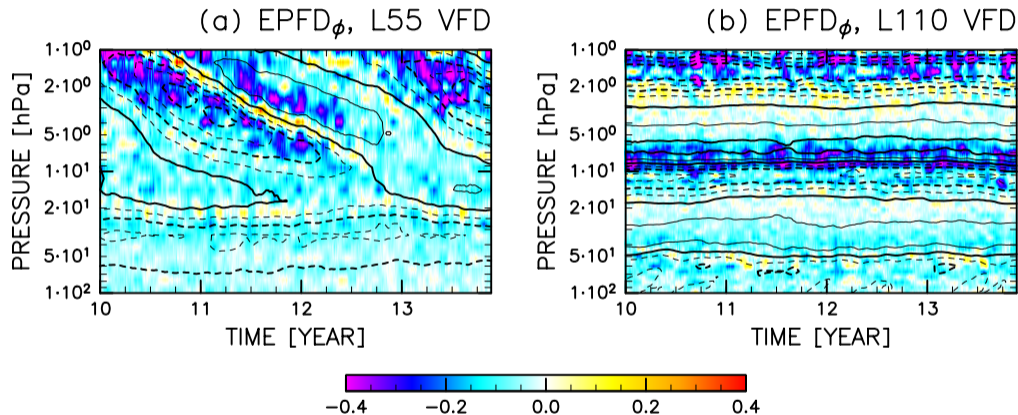
残差項  $X$  に振り分けられるのは, 主に  $\bar{u}$  にはたらく水平粘性による散逸.

# 結果 (TEM 解析/移流項)



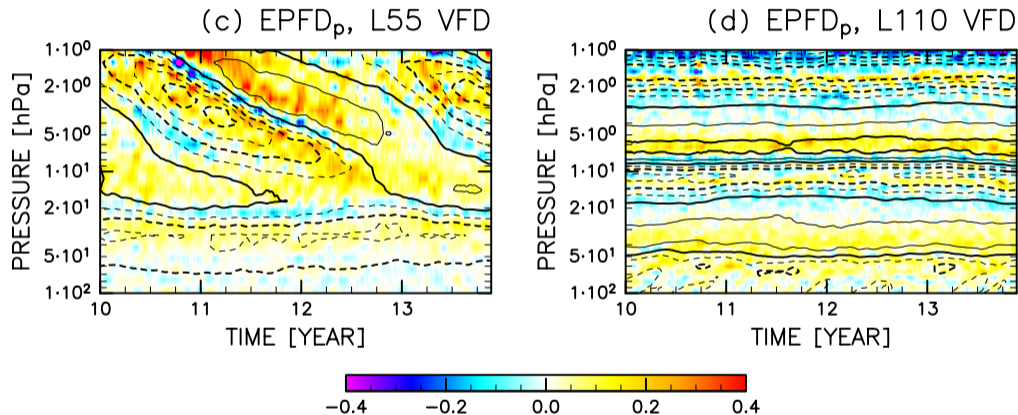
移流による加速量 [ $\text{m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ], 東西平均東西風 [ $\text{m s}^{-1}$ ], (FI2024 Fig. 9)

# 結果 (TEM 解析/EPFD(水平))



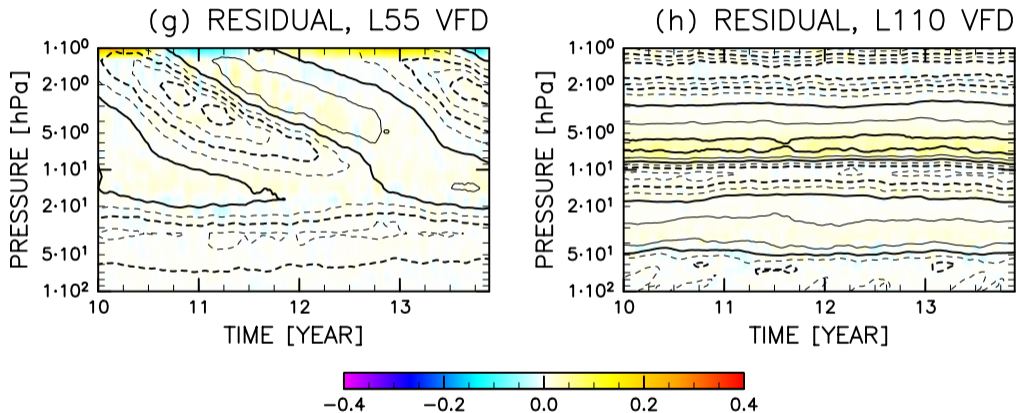
EPFD $_{\phi}$  による加速量 [ $\text{m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ], 東西平均東西風 [ $\text{m s}^{-1}$ ]( $\pm 2^\circ$  平均), (FI2024 Fig. 10)

# 結果 (TEM 解析/EPFD(鉛直))



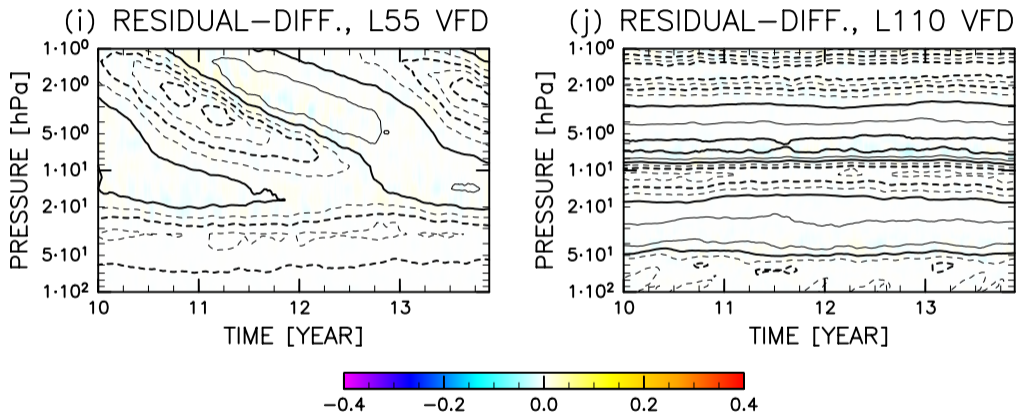
EPFD<sub>p</sub> による加速量 [ $\text{m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ], 東西平均東西風 [ $\text{m s}^{-1}$ ]( $\pm 2^\circ$  平均), (FI2024 Fig. 10)

# 結果 (TEM 解析/残差項 $X$ )



運動量残差  $X$  [ $\text{m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ], 東西平均東西風 [ $\text{m s}^{-1}$ ]( $\pm 2^\circ$  平均), (FI2024 Fig. 9)

# 結果 (TEM 解析/残差項 $X$ -散逸項)



$X$ -(散逸項)[ $\text{m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ], 東西平均東西風 [ $\text{m s}^{-1}$ ]( $\pm 2^\circ$  平均), (FI2024 Fig. 9)

## 結果・考察

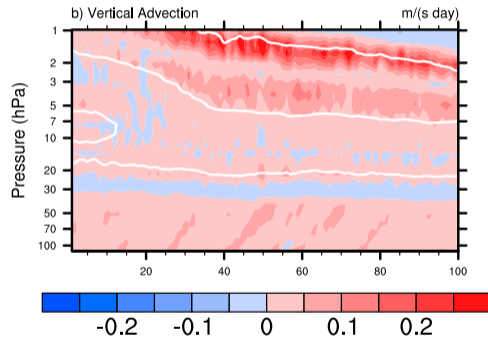
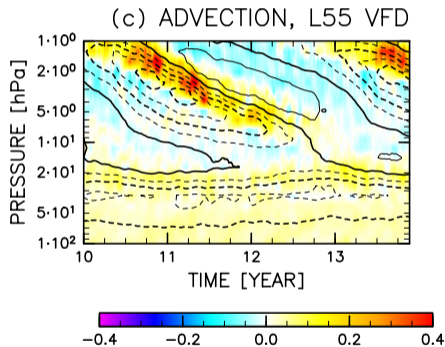
	L55 VFD	L110 VFD
移流	東向きシアーで強い東向き加速	
EPFD(水平)	東向きシアーで強い西向き加速	
EPFD(鉛直)	強い東向き加速	弱い東向き加速
運動量残差	小さい ほとんど水平散逸で説明可	

- EPFD(鉛直)の違いは  $\overline{u'\omega'}$ , 温度場の解析結果と整合的な結果
  - ▶ (L55 VFD のほうが上方伝播する東向きの  $\overline{u'\omega'}$  が多かった)
- 鉛直伝播する波動の違いが QBO 的振動の有無と関係

# 残差循環

L55 VFD では移流項が位相下降に寄与. (YJ2015 EUL と異なる)

→ 残差循環はどうなっているか？



L55 VFD での移流による加速 (FI2024 Fig. 9)

YJ2015 EUL での移流による加速 (YJ2015 Fig. 4)



# 残差循環

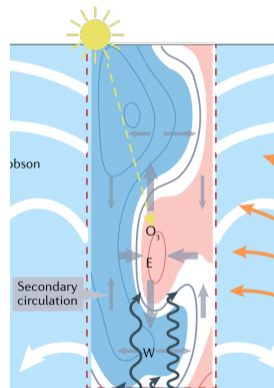
前述の通り、赤道付近の循環は以下の2つで特徴づけられる;

- Brewer-Dobson 循環
- QBO による二次循環

これらをそれぞれ調べるため、

- 1 サイクル平均での残差循環
- ある高度での残差循環の時間発展

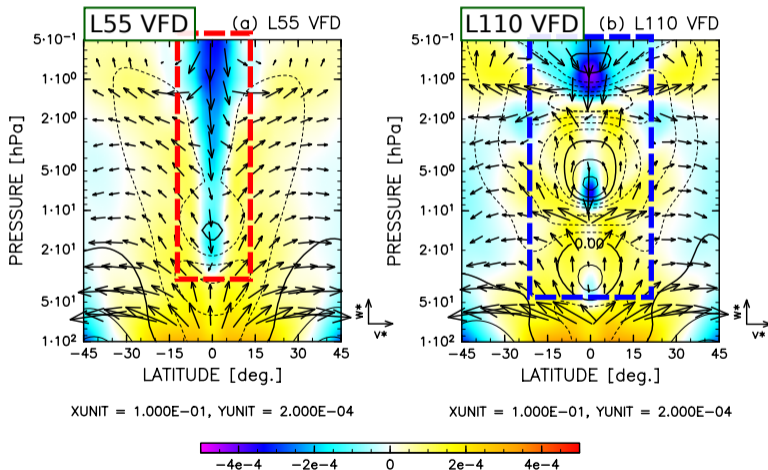
を調べた。



二次循環の概念図

(Ansty, et al. (2022), Fig. 1b を一部改変)

# 結果 (残差循環・一周期平均)



## L55 VFD

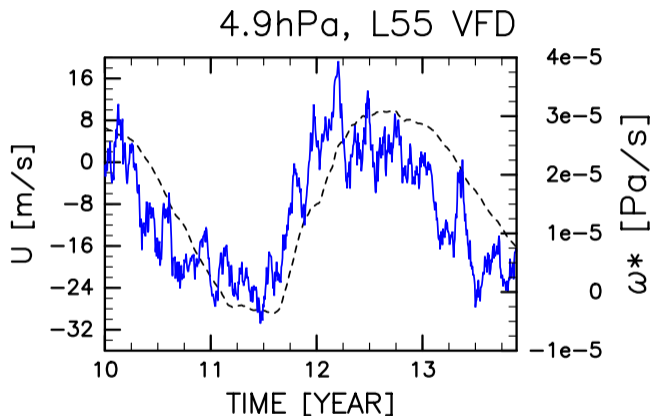
- ・赤道域で平均的に下降流  
→ Brewer-Dobson 循環とは逆
- ・この下降流が下方伝播に寄与

## L110 VFD

- ・二次循環のパターンが明瞭
- ・東向きシアーで下降流  
→ 東向き加速に寄与

カラーマップ: 鉛直残差循環 ( $\text{mm s}^{-1}$ )  
 ベクトル: 残差循環 ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 コンター: 東西風 ( $\text{m s}^{-1}$ )  
 値は1080日平均, FI2024 Fig11に加筆

## 結果 (残差循環・時間発展)



$\bar{u}$  が  $\bar{\omega}^*$  の時間発展に追随  
 → 二次循環のパターンが明瞭

つねに  $\bar{\omega}^* > 0$   
 → つねに下降流  
 → 移流項が位相下降に寄与と整合

東西風  $\bar{u}$  [m/s] (黒破線, 左軸), 鉛直残差循環  $\bar{\omega}^* > 0$  [Pa/s] (青実線, 右軸), FI2024 Fig. 12

## 結果・考察

L55VFD では

- 赤道域では平均的に下降流になっている
- 上昇流はほとんど見られない (Brewer-Dobson 循環とは逆……?)
- この下降流が、二次循環によって変調されている
  - ▶ 東向きシアーでは二次循環で下降流が強化
  - ▶ これが強い東向き加速に寄与

L110VFD モデルでは

- 二次循環が明瞭に見える
- 強い東向きシアーで強い下降流が誘起
  - ▶ これが強い東向き加速に寄与

## ここまでのまとめ

- L110 VFD や 3DS モデルでは 50hPa 付近に定常な東向きの風が形成
  - ▶ それにより上層に伝わる波動が抑制され
  - ▶ QBO 的振動が発生しなかった
- L55 VFD モデルではそのような定常な東向きの風が形成されなかった
  - ▶ それによって波動がより上方伝播
  - ▶ QBO 的振動が発生

というシナリオが考えられる。

→ 下層の東向きジェットでの波吸収が重要？

## 追加実験 1

では L110 VFD でこの東向きの風領域を “取り除いたら” どうなるか？

- そこでの平均流による波吸収がなくなるはず.
- より多くの波動が上方伝播し, L110 VFD でも QBO 的振動が発生？

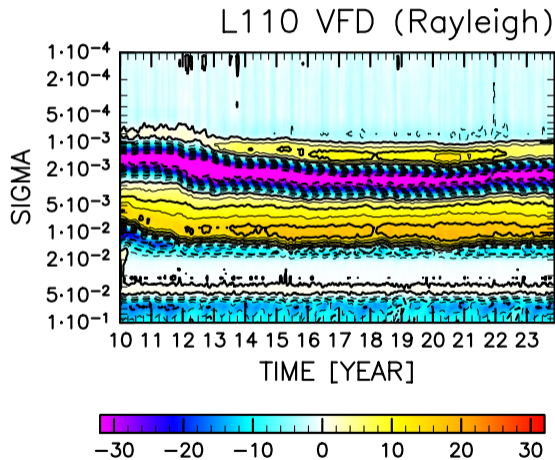
$$\frac{\partial u}{\partial t} = -k_0 K_v(\sigma) K_h(\phi) \bar{u}(\phi, \sigma, t)$$

のように, 平均流のみを選択的に弱めるレイリー摩擦を掛けた. 鉛直構造は

$$K_v(\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[ \tanh\left(\frac{z^* - z_b}{H}\right) + \tanh\left(-\frac{z^* - z_t}{H}\right) \right] & (0.02 < \sigma < 0.05) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases},$$

で, L110VFD の 10 年目の定常状態を初期値とした.

## 結果 (追加実験 1)



月・東西平均東西風 [m/s], FI2024 Fig. 15

## 結果・考察

- はじめの数年間は位相が下方伝播
- 数年経つと再び定常となり, QBO 的振動発生せず
  - ▶ この場合でも結局, 摩擦をかけた所より上の領域で東向きの風が形成される.
  - ▶ 強い東向きジェットがどこかにできてしまうと, QBO 的振動が発生しないのでは?



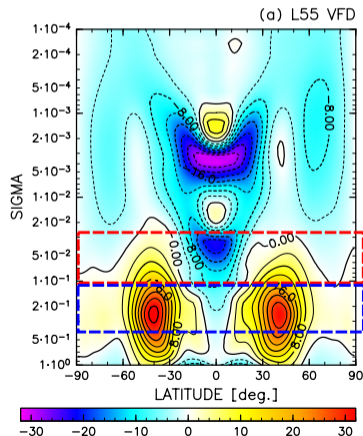
## 追加実験 2

どの高度領域の解像度が QBO 的振動の有無に関係するのか？

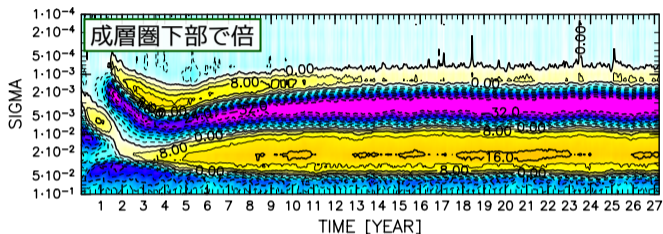
→ 一部の高度領域で鉛直解像度を倍に

- $0.028 < \sigma < 0.12$   
 (成層圏下部, 62 層)
- $0.12 < \sigma < 0.49$   
 (対流圏上部, 66 層)

鉛直解像度を倍にする際には,  
L110 と同様に三次スプライン補間を使用

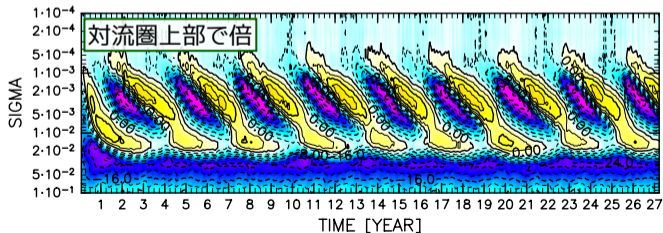


## 結果・考察 2(追加実験)



成層圏下部で解像度倍

- 強い東向きジェットが形成、
- QBO的振動発生せず
- 波の上方伝播が阻害？



対流圏上部で解像度倍

- L55と同様の結果
- 対流圏上部での振る舞いは
- 解像度に依存しない？

FI2024 Fig.~14に加筆

# まとめ

- ドライ力学コア上での QBO 的振動の鉛直離散化手法・解像度依存性を調査
- 鉛直解像度の低い差分モデルのみで QBO 的振動が発生
- パワースペクトル解析の結果, 上方 ( $\sigma = 0.002$ ) まで伝播する大気波動は QBO 的振動が発生したモデルで大きかった
- これは 50hPa 付近の定常な東向きの風が生じなかったことに起因
- L55/110 VFD モデルでは TEM 解析も行い, 加速を定量的に評価した

## 考察

なぜ鉛直解像度/離散化手法の違いが平均流の違いを生むのか

→ 波-平均流相互作用の表現が変わった？

いま鉛直拡散は陽に入れてない

- Critical level 近傍の波
  - ▶ 鉛直&水平波長<sup>Ⓢ</sup> (非線形項による効果)
    - 水平粘性 & ニュートン冷却により散逸
- 鉛直解像度を上げると非線形効果がより表現可能に？
- これにより平均流に多くの運動量が渡され, 定常な風が形成？
- 実際, critical level に達していない波の吸収のされ方は L55/L110 で違う (どちらが “正しい” のかはわからないが.....)

L55 と L110 では表現可能な鉛直波長が 2 倍違うことも関係していそう

- L110 では鉛直波長がより短い波も表現可能
- シアー不安定などで波動が碎波？

# 考察

離散化誤差による重力波励起の可能性も？

- 例えば渦位などの Lagrange 保存量が乾燥断熱的に等  $\theta$  面を移流しているとする
- ただ passive に移流していたとしても、鉛直移流の計算が正しくないとバランスした状態が崩れる
  - ▶ 重力波の励起につながる？
  - ▶ 今考えている領域での  $N$  は大きいため、一度バランスが崩れれば強い重力波励起が起きそう

ただ、以上の重力波励起の明確な証拠は得られなかった。

# 結論








手元の材料で言える結論は

- YJ2015 の設定で生じる QBO 的振動は鉛直離散化手法や解像度に強く依存
- その有無は平均流の形成のされ方や、上方伝播する波の量に関係している
  - ▶ 鉛直解像度の違いが波吸収の違いを生んだ可能性がある
  - ▶ 離散化誤差が波動を生み出す明確な証拠は掴めていない(が、可能性も)

EOR available

Fujita, S., and K. Ishioka, 2024: Do dry GCMs generate QBO-like oscillation?  
*J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 485-506,  
doi:10.2151/jmsj.2024-026.



-  Anstey, J. A., et al., 2022: The quasi-biennial oscillation: Impacts, processes, and projections. *Nat. Rev. Earth Environ.*, **3**, 588–603.
-  Durran D. R., 2010: Numerical Methods for Fluid Dynamics 2nd Ed., Springer, 433-448
-  Durran, Dale R., and Peter N. Blossey. 2012 :Implicit-Explicit Multistep Methods for Fast-Wave-Slow-Wave Problems. *Monthly Weather Review*, **140** (4): 1307-25.
-  Fujita, S., and K. Ishioka, 2024: Do dry GCMs generate QBO-like oscillation? *J. Meteor. Soc. Japan*, **102**, 485-506.
-  Ishioka K., Yamamoto N., and Fujita M., 2022: A Fourmulation of a Three-Dimensional Spectral Model for the Primitive Equations, *J. Meteor. Soc. Japan*, **100**, 445-469
-  Issac M. Held, and Max J. suarez. (1994): A Proposal for the Intercomparison of the Dynamical Cores of Atmospheric General Circulation Models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75(10)**, 1825-1830
-  Yao W. and Jablonowski C., 2015: Idealized Quasi-Biennial Oscillations in an Ensemble of Dry GCM Dynamical Cores, *J. Atmos. Sci.*, **72**, 2201-2226