

# TIMED/SABERデータおよび全球再解析データを用いた対流圏—下部中間圏の大気潮汐の研究

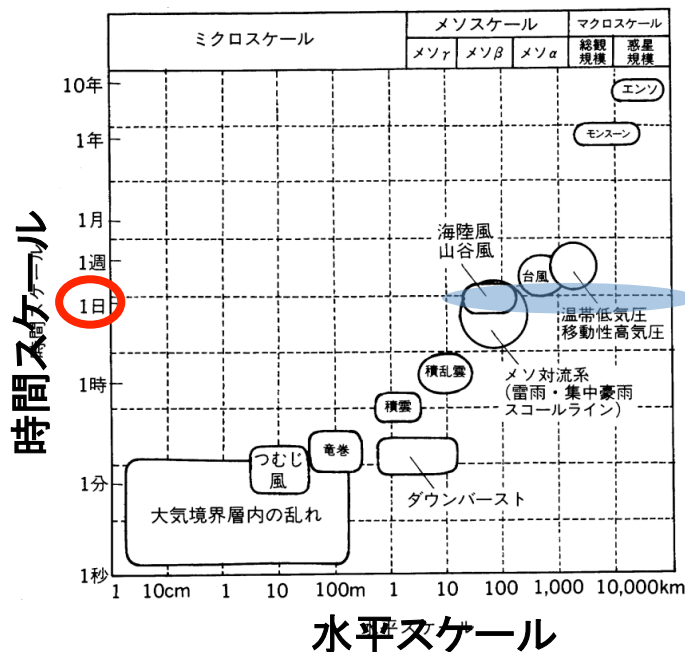
坂崎貴俊, 藤原正智(環境科学院),

Maura Hagan(NCAR/HAO),

Xiaoli Zhang, and Jeffrey Forbes (Univ. of Colorado)

# 自己紹介

- 名前：坂崎 貴俊（さかざき たかとし）
- 所属：北海道大学 環境科学院 地球圏科学専攻(大気海洋コース) D2  
(前所属(~B4): 北海道大学 理学部 地球科学科)
- 指導教員：藤原 正智 准教授（来週の話者）
- 興味：地球大気の日変動現象(海陸風、中間規模波、大気潮汐 etc...)



小倉 (1999)

# 目次

1. 研究動機・背景
2. データ・解析手法 (TIMED/SABER、再解析)
3. SABER一再解析の比較 (少し)
4. 大気潮汐の特徴 (鉛直構造・季節変化)
5. 議論 (線形モデル・理論)
6. まとめ

# 大気(熱)潮汐とは？

大気潮汐とは(？)

日周期の非断熱加熱によって  
励起される“全球規模”の  
日周期大気波動

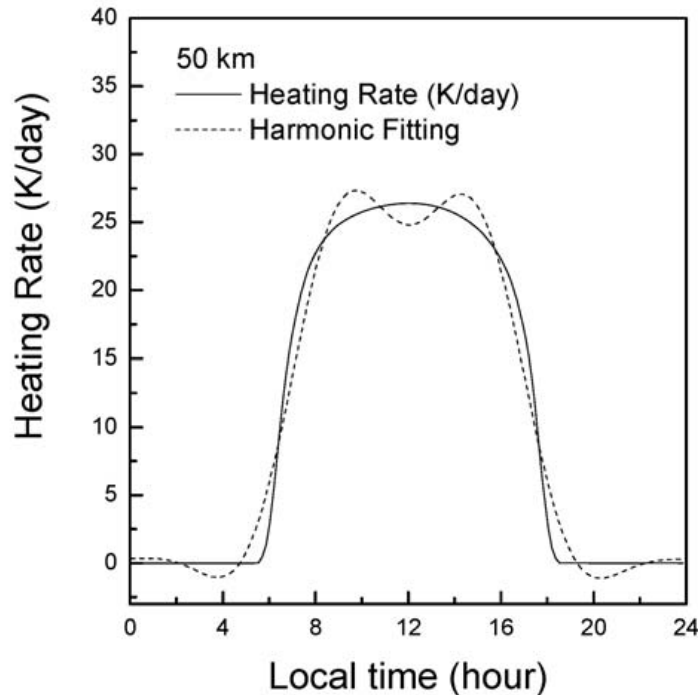
※海洋潮汐との違い

- 非断熱加熱によって励起される(月の引力による潮汐もあるが小さい)。
- “岸”がない(考えない)。

# 潮汐の駆動源

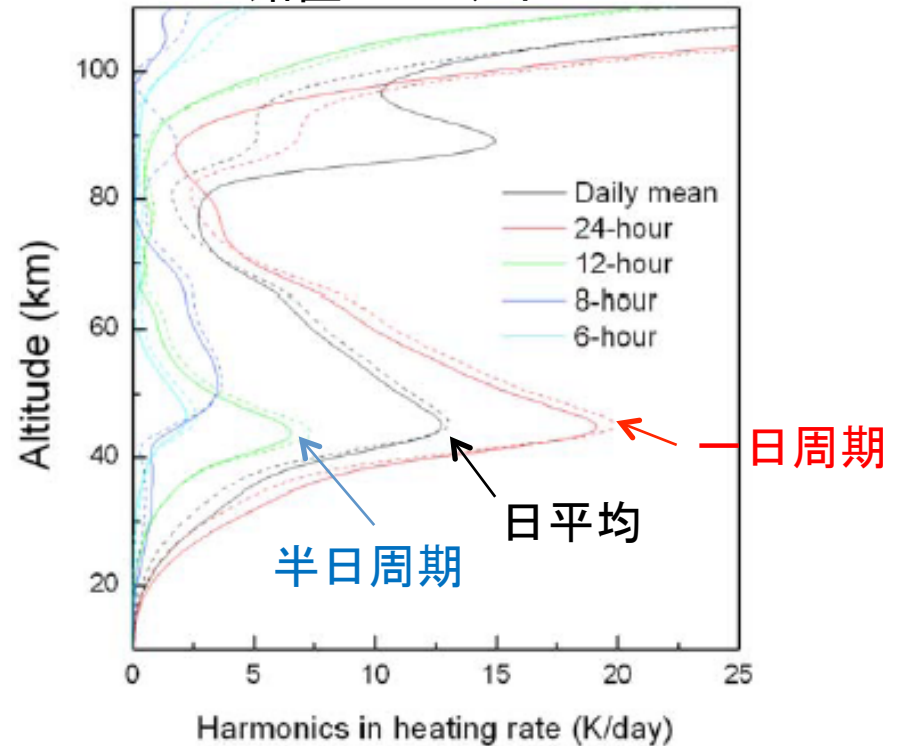
- 励起源: 太陽放射加熱(対流圏水蒸気、成層圏オゾン)・潜熱加熱

高度50 kmにおける  
オゾン加熱率(K/day)



Xu et al. (2010)

オゾン加熱率(各成分)の  
鉛直プロファイル



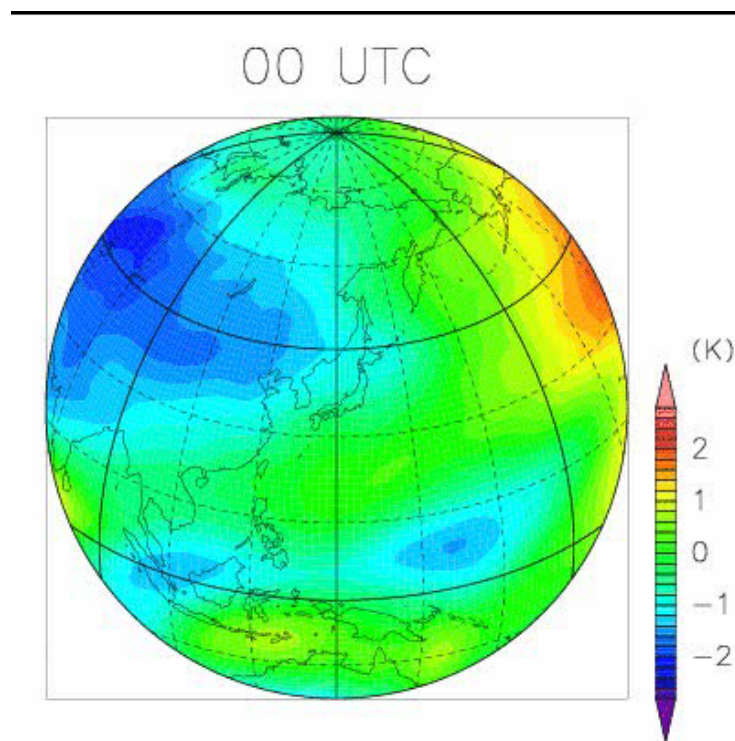
Xu et al. (2010)

- 一日周期成分、半日周期成分、の加熱が生じる。

# migrating (Sun-synchronous) tide (DW1)

- 上空(熱圏(高度~100 km)以下)では**一日周期潮汐(Diurnal tide)**が卓越。
- うち、太陽に同期して波数1で西進する成分(**Diurnal migrating tide: DW1**)に注目。  
←”帯状方向に一様な水蒸気・オゾン加熱”によって励起。
- DW1の位相はローカル時刻のみに依存(経度に依らない)。

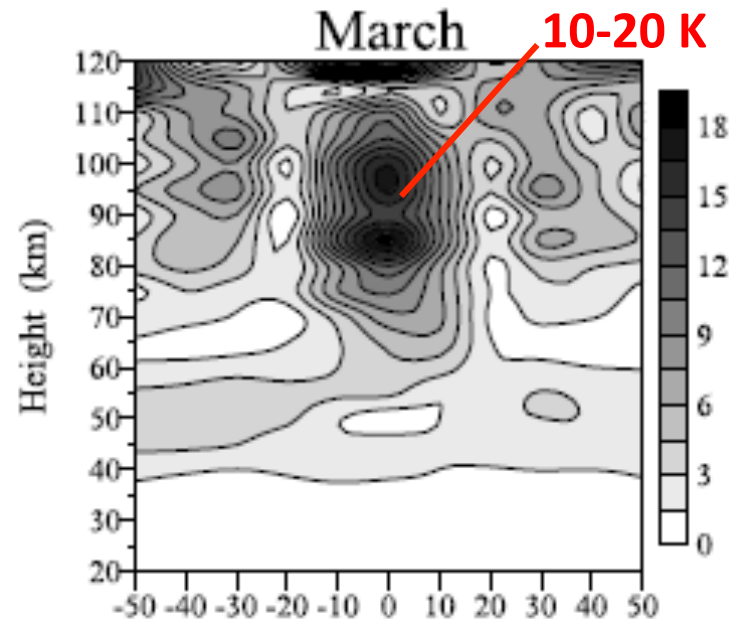
1 hPa (January)  
気温一日潮汐  
(MERRA data)



# 先行研究

- 対流圏水蒸気・成層圏オゾンの放射加熱によって励起され、上空へ伝播。
- 振幅は高度と共に増加し、中間圏・下部熱圏(MLT領域)において極大をとる。  
→多くの潮汐研究ではMLT領域がメインターゲット(衛星・ライダー・モデル)。
- 下層大気の研究は古くからなされているが(気象ロケット、高層ゾンデ)、数は少ない。
- 最近になって衛星観測(GPS radio occultation, TIMED/SABER) (e.g., Zeng et al., 2008; Mukhtarov et al., 2009)によって下層大気における潮汐の全球的描像が明らかになりつつあるが、

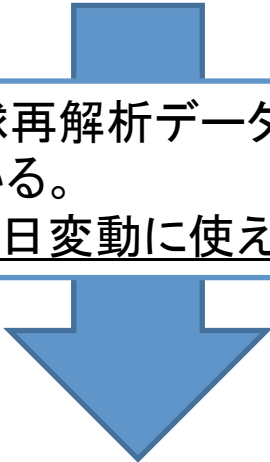
( 気温DW1の振幅の緯度－高度断面図 )



Mukhtarov et al. (2009)

# 目的

- GPS観測(緯度: -50S-50N; 高度10-35 km)、SABER(緯度: -50S-50N; 高度20-120 km)では全緯度-高度領域はカバーできない。しかも温度だけ。
- 観測結果の物理的解釈はなされていない。

- 
- ここ10-15年で、全球再解析データが“観測データ”として気象学/気候学的観点から利用されている。
  - もし再解析データが日変動に使えるれば、潮汐を調べるにはもってこい!

## 本研究の目的

- SABERと再解析を比較して再解析データの妥当性を確認し、
- 再解析データを積極的に用いて、対流圏-下部中間圏のDW1の全球構造・季節変動、および、それらを支配する力学プロセスを包括的に明らかにする。



# 目次

1. 研究動機・背景
2. データ・解析手法 (TIMED/SABER、再解析)
3. SABER一再解析の比較 (少し)
4. 大気潮汐の特徴 (鉛直構造・季節変化)
5. 議論 (線形モデル・理論)
6. まとめ

# データ概要

期間：2002-2006年の5年間

**1. TIMED/SABER衛星観測データ**

**2. 全球再解析データ(6種類)**

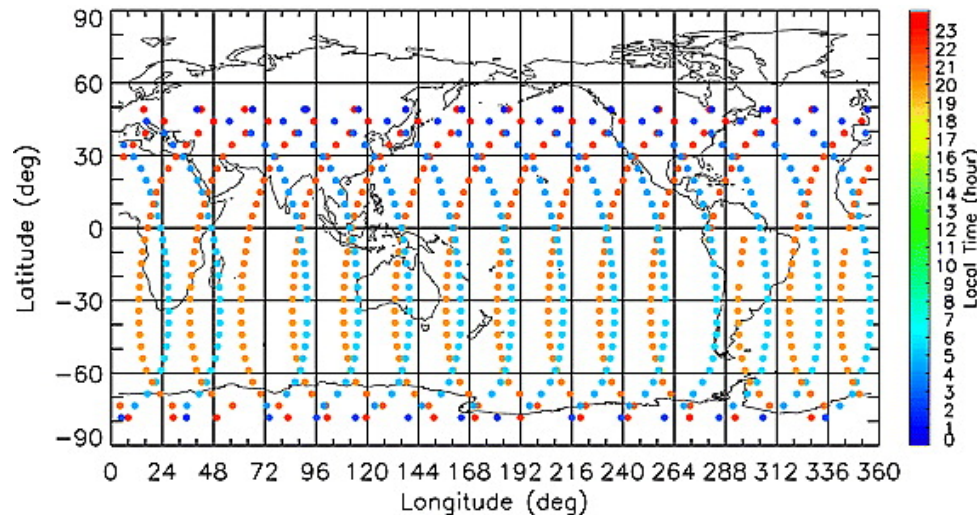
**3. 対流圏非断熱加熱データ**

— 水蒸気放射加熱 (ISCCP雲データを用いた放射伝達計算から求めた放射フラックス(5層)からの推定) と 潜熱加熱 (TRMMデータから推定) (Zhang et al. (2010)より)

# 1. TIMED/SABER

“The Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) on Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) satellite ”

(2003年349日目の観測点、色:ローカル時刻)



Zhang et al. (2006, JGR)

- 2001年12月観測開始
- CO<sub>2</sub>からの赤外放射を計測し、**温度**を算出
- 軌道周期: 1.5 hr
- 観測緯度帯: (83°S – 52°N) .or. (52°S – 83°N) ※60 days毎にraw manubar  
→(52°S – 52°N)は連続的に観測
- 観測高度: **高度20 – 120 km**
- 観測ローカル時刻が一日12minずれる。**全ローカル時刻をカバーするのに60 days必要。**

## 2. 全球再解析 (Global reanalysis data)

(name)	Time Resolution	Horizontal resolution	Vertical Levels	Top level
<b>MERRA</b>	<b>3 hr</b>	<b>1.25 degs</b>	<b>42</b>	<b>0.1 hPa (65 km)</b>
ERA-Interim	6 hr	1.5 degs	37	1 hPa (50 km)
NCEP CFSR	6 hr	0.5 degs	37	1 hPa
JRA25/JCDAS	6 hr	1.25 degs	23	0.4 hPa
NCEP1	6 hr	2.5 degs	17	10 hPa
NCEP2	6 hr	2.5 degs	17	10 hPa

- 特に成層圏においては、そもそも平均場でさえちゃんとしたvalidationはなされていらない (c.f., Manney et al., 2008; Rienecker et al, 2010)。  
— 再解析と独立した観測データが近年までなかった。

平均場、日変動場についてvalidationした上で使用。

# 解析手法： DW1成分の抽出方法（2002-2006平均/各月毎）

## 1. 一日周期成分の抽出

### - (a) SABER（※全ローカル時刻をカバーするのに60日必要）

- 単純に“ローカルタイムコンポジット”を行うと、背景場の変化が“ローカルタイム変動”として誤認識されてしまう(Forbes et al., 1997)。
- 予め、背景場の変動(60日移動平均)を取り除く(Forbes, 2008)。

1. ビン(24°, 15°, 2 km) を用意。
2. 各ビン・各日において60日の移動平均を計算。
3. 元データの時系列から移動平均(の時系列)を取り除く→“残差”時系列
4. 残差時系列を用いてローカルタイムコンポジット。
5. 一日周期成分を取り出す(最小二乗法)。

### - MERRA

#### • (b) MERRA（SABERとの比較用）

- SABERに沿って(同じ観測場所・時刻で)サンプリング。
- SABERと同じ手法を用いて一日周期成分を抽出する。

#### • (c) MERRA

- 期間中の全データを用いてローカルタイムコンポジット。

## 2. DW1（一日周期・西進波数1）の抽出 (c.f., Haurwitz and Cowley, 1973)

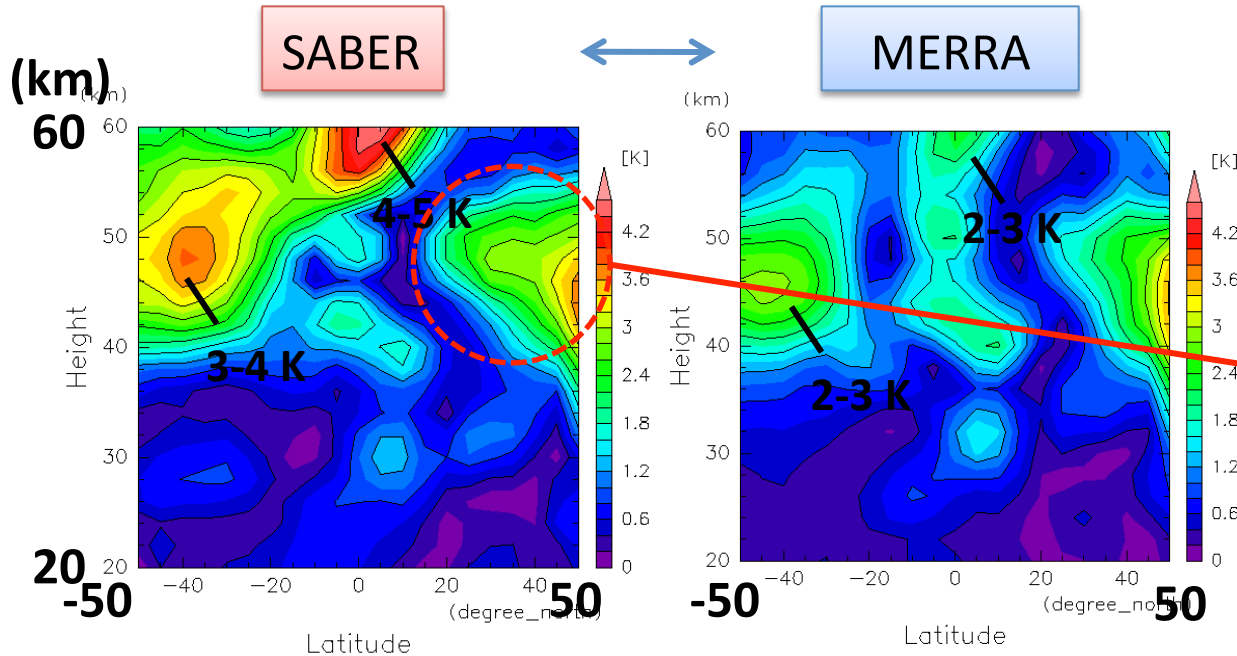
# 目次

1. 研究動機・背景
2. データ・解析手法 (TIMED/SABER、再解析)
3. SABER一再解析の比較(少し)
4. 大気潮汐の特徴(鉛直構造・季節変化)
5. 議論(線形モデル・理論)
6. まとめ

# SABER—再解析の比較

- SABERに沿ってサンプリングした再解析を利用。

気温DW1の緯度—高度断面図(1月)



- 背景温度場の短周期変動(e.g., SSW)による偽の日変動(サンプリング問題)。

- **SABERで捉えられたDW1は再解析データで良く再現されている。**  
※ ただし、上部成層圏より上では再解析のDW1振幅がSABERに比べて小さい(~50%)。

続いて、再解析データ(MERRA)を用いて、  
DW1(気温)の構造・季節変化を調べる。

# 全データをローカルタイムコンポジットして得られるDW1

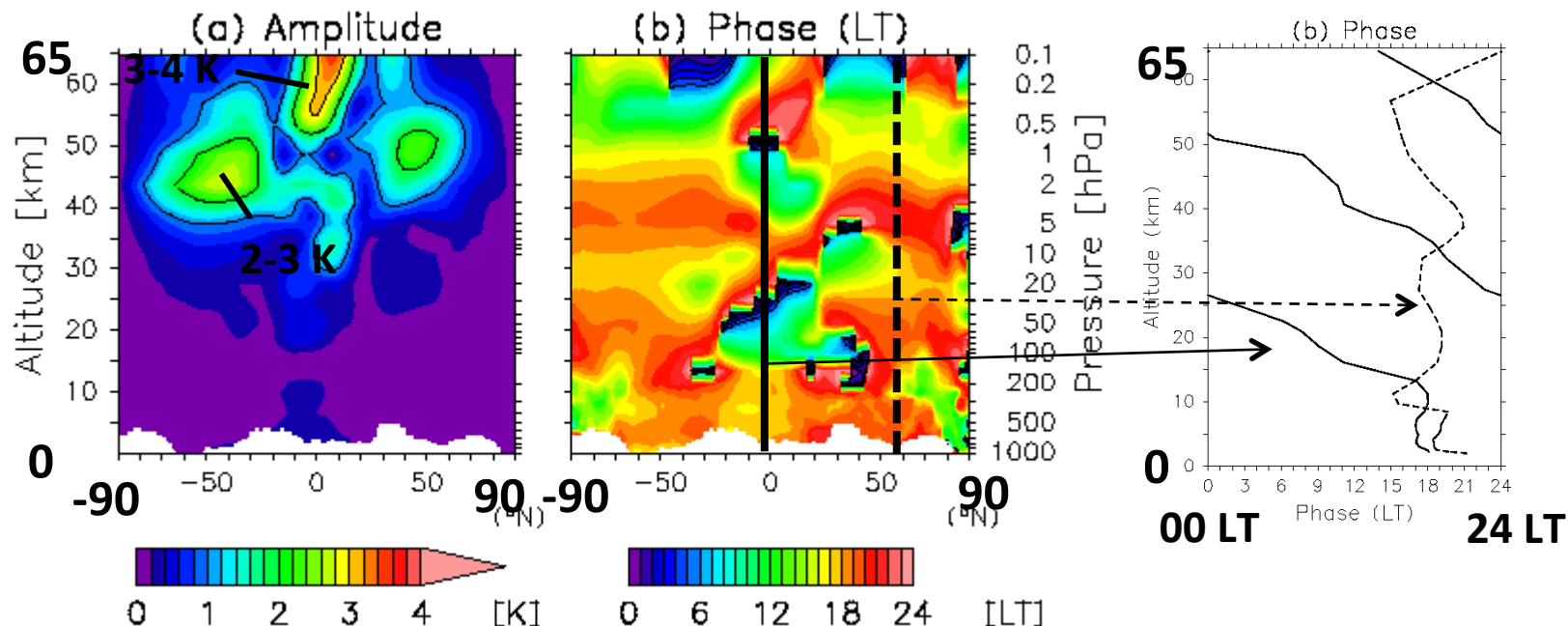


# 目次

1. 研究動機・背景
2. データ・解析手法 (TIMED/SABER、再解析)
3. SABER一再解析の比較 (少し)
4. 大気潮汐の特徴 (鉛直構造・季節変化)
5. 議論 (線形モデル・理論)
6. まとめ

# DW1の緯度－高度分布

気温DW1 (1月; MERRAデータ)



- **振幅**は基本的に赤道上空で大きい。ただし、上部成層圏では中緯度にダブルピークを持つ。

- **位相**:

(熱帯)対流圏で一定。成層圏以上では下方伝播を示す。

(中－高緯度)鉛直方向に一定の値(~18 LT)を示す。

# 大気潮汐へのアプローチ(理論/モデル)

- 球面のプリミティブ方程式系で、非断熱加熱(のDW1成分)に対する応答を求める。

## 1. 古典潮汐(線形)論 (Classical tidal theory; 次スライド) c.f., Chapman and Lindzen (1970)

- (仮定) **背景風ゼロ、背景温度場は高度(z)のみに依存**。  
※潮汐の位相速度(赤道で $-400$  m/s)は背景風に比べて十分小さい。
- 背景場からの摂動を潮汐として方程式を線形化。
- 解は**変数分離**可能→緯度方向のモード(ハフモード)の重ね合わせ。

## 2. 線形モデル/理論

- **背景風あり(緯度 $\theta$ 、高度 $z$ に依存; 通常東西風のみ)**。
- **背景温度場は緯度( $\theta$ )・高度( $z$ )に依存**。
- 背景場からの摂動を潮汐として線形化。
- 解は**変数分離できない**ため、“**数值的に解く**” or “**近似的に解く**”。

c.f., 摂動法、複スケール解析...

## 3. GCM

- 非線形項も扱う(複雑)。
- 潮汐-プラネタリー波の相互作用、潮汐-重力波の相互作用...  
TIME-GCM, WACCM, CMAM...

古典潮汐論の枠組みで理解を試みる。

# 古典潮汐論 (classical tidal theory)

- 背景場: 静止大気、温度は高度(z)のみに依存。
- 線形化したプリミティブ方程式系 (log-p 座標)。

(水平方向の運動方程式)

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv + (a \cos \theta)^{-1} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu + a^{-1} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = 0$$

(連続の式)

$$(a \cos \theta)^{-1} \left\{ \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial (v \cos \theta)}{\partial \theta} \right\} + \rho_0^{-1} \frac{\partial (\rho_0 w)}{\partial z} = 0$$

(熱力学方程式)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + N^2 w = \frac{\kappa J}{H} \quad \text{非断熱加熱}$$

$u$ : 東西風速、 $v$ : 南北風速、 $w$ : 鉛直風速、 $\Phi$ : ジオポテンシャル  
 $\lambda$ : 経度、 $\theta$ : 緯度、 $z$ : 高度 (log-p座標)  
 $f$ : コリオリパラメーター、 $N$ : 鉛直安定度、 $H$ : スケールハイト (7 km)、 $J$ : 非断熱加熱

$(u, v, w, \Phi, J)$

$$= (\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}, \tilde{\Phi}, \tilde{J}) e^{i(\omega t + s\lambda) + z/2H}$$

DW1

$\omega = 1 \text{ day}$

$s = -1$

$$\tilde{w}(\theta, z) = \sum_n \tilde{w}_n(z) \Theta_n(\theta)$$

ハフモード  $\Theta_n$  (緯度方向の固有関数) の重ね合わせ

Laplaceの潮汐方程式

$$L\Theta_n = -\frac{1}{gh_n} \Theta_n$$

固有関数

固有値

(等価深度)

# ハフモードの構造・鉛直構造方程式

## 鉛直構造方程式

①  $\tilde{J} = \sum_n \tilde{J}_n(z) \Theta_n(\theta)$

②  $\tilde{w} = \sum_n \tilde{w}_n(z) \Theta_n(\theta)$

$$\frac{d^2 \tilde{w}_n}{dz^2} + \left( \frac{N^2}{gh_n} - \frac{1}{4H^2} \right) \tilde{w}_n = \frac{\kappa \tilde{J}_n}{gh_n}$$

正(伝播) or 負(捕捉)?

③  $\frac{\partial \tilde{T}_n}{\partial t} + N^2 \tilde{w}_n = \tilde{J}_n \rightarrow$  ④  $\tilde{T} = \sum_n \tilde{T}_n(z) \Theta_n(\theta)$

伝播モード

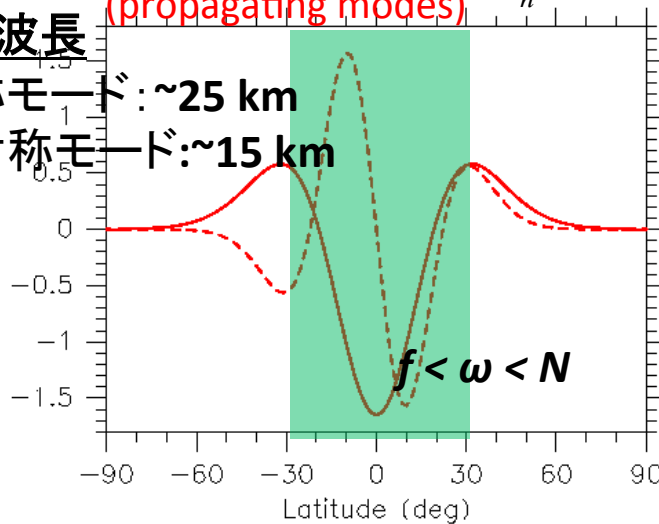
(propagating modes)

$$\tilde{w}_n \propto e^{ikz}$$

鉛直波長

対称モード: ~25 km

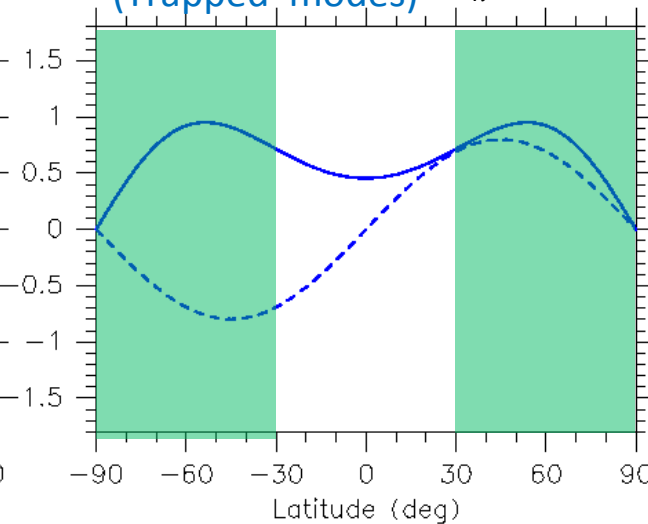
反対称モード: ~15 km



捕捉モード

(Trapped modes)

$$\tilde{w}_n \propto e^{-\lambda z}$$

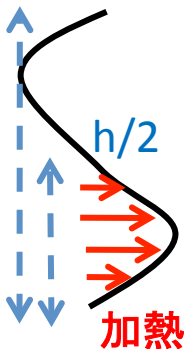


— 対称モード

- - - 反対称モード

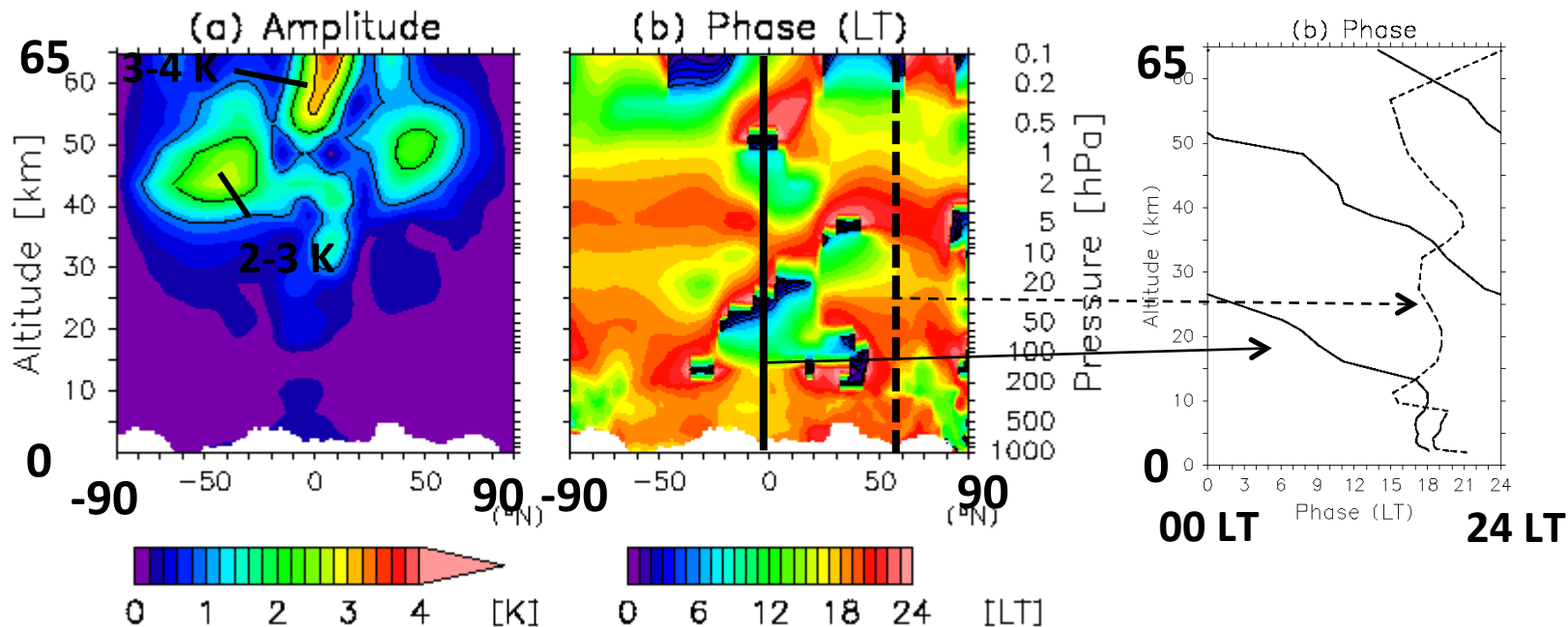
- 加熱層の厚さが鉛直波長の1/2であるとき、波は効率的に励起される(Salby and Garcia, 1987, JAS):  $J_n$ の鉛直構造が重要

→ DW1は対流圏加熱( $h \sim 10$  km)により効率的に励起される。



# DW1の緯度－高度分布

気温DW1 (1月; MERRAデータ)



- **振幅**は基本的に赤道上空で大きい。ただし、上部成層圏では中緯度にダブルピークを持つ。

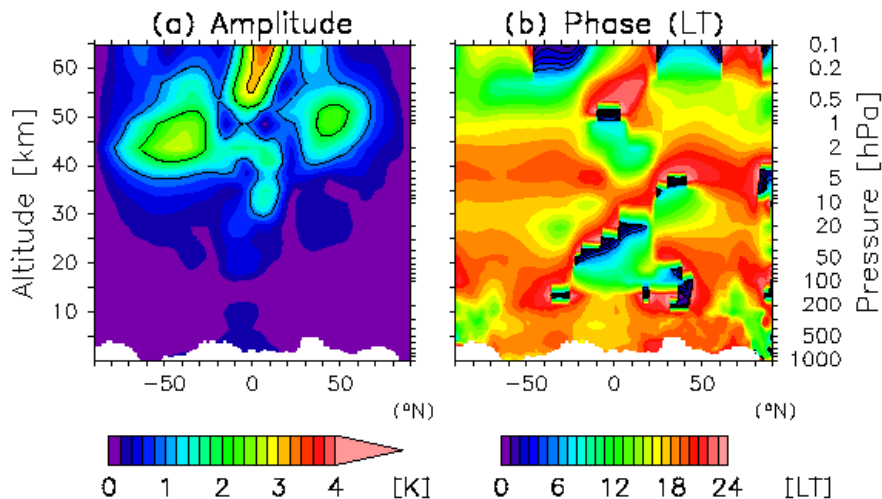
- **位相**:

(熱帯)対流圏で一定。成層圏以上では下方伝播を示す。

(中－高緯度)鉛直方向に一定の値(~18 LT)を示す。

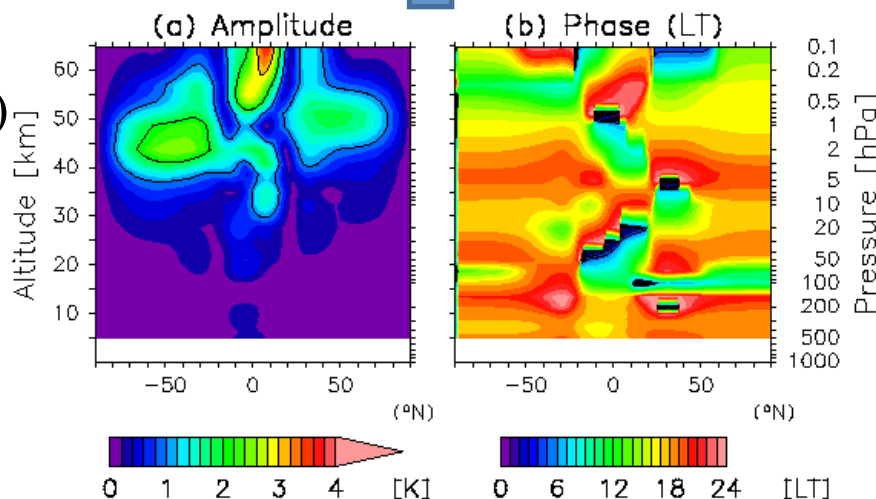
# ハフモード展開

元データ



4モードのみ

$$\tilde{T} = \sum_{n=1}^4 \tilde{T}_n(z) \Theta_n(\theta)$$

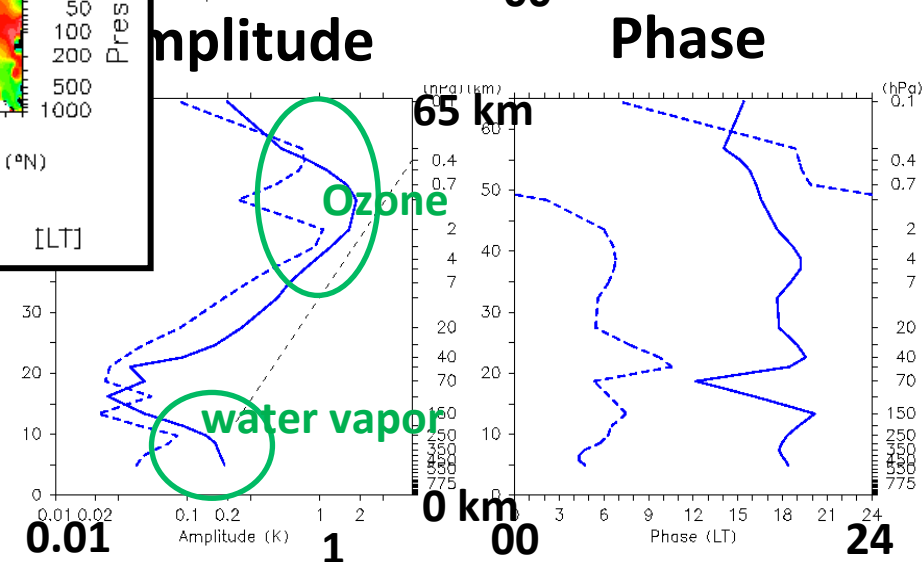
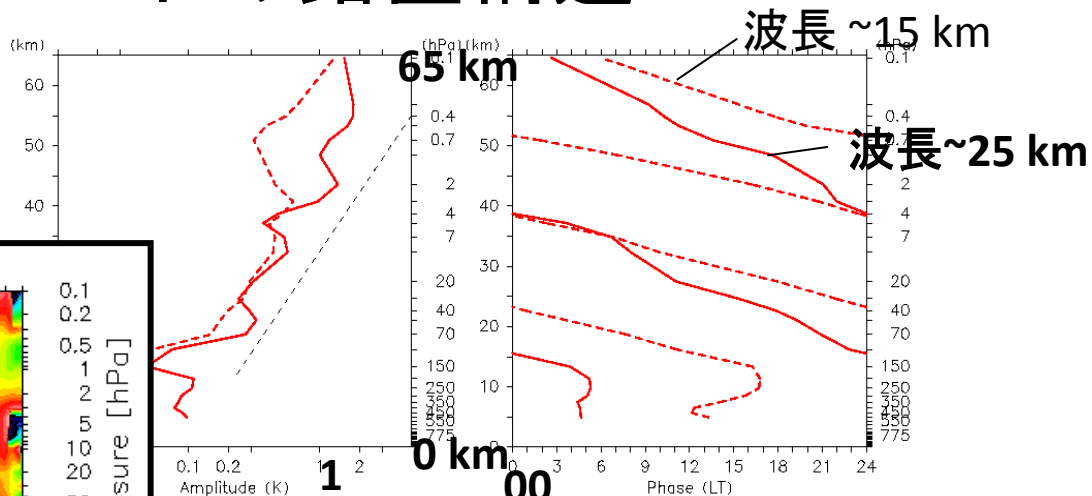
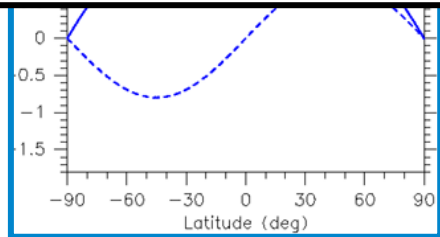
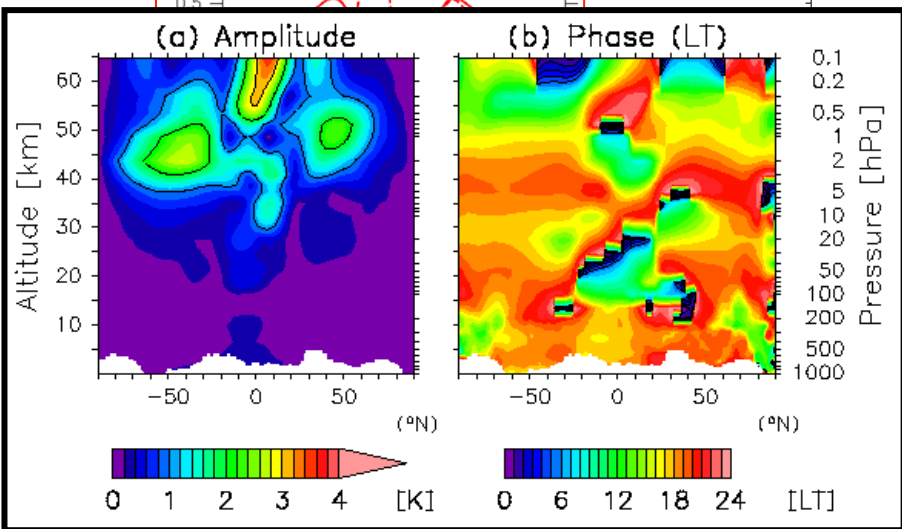
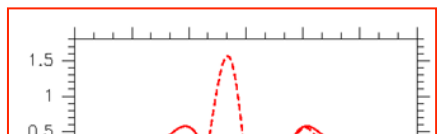


たった4つモードで特徴を再現できる！

# 各ハフモードの鉛直構造

$$\tilde{T} = \sum_n \tilde{T}_n(z) \Theta_n(\theta)$$

伝播モード



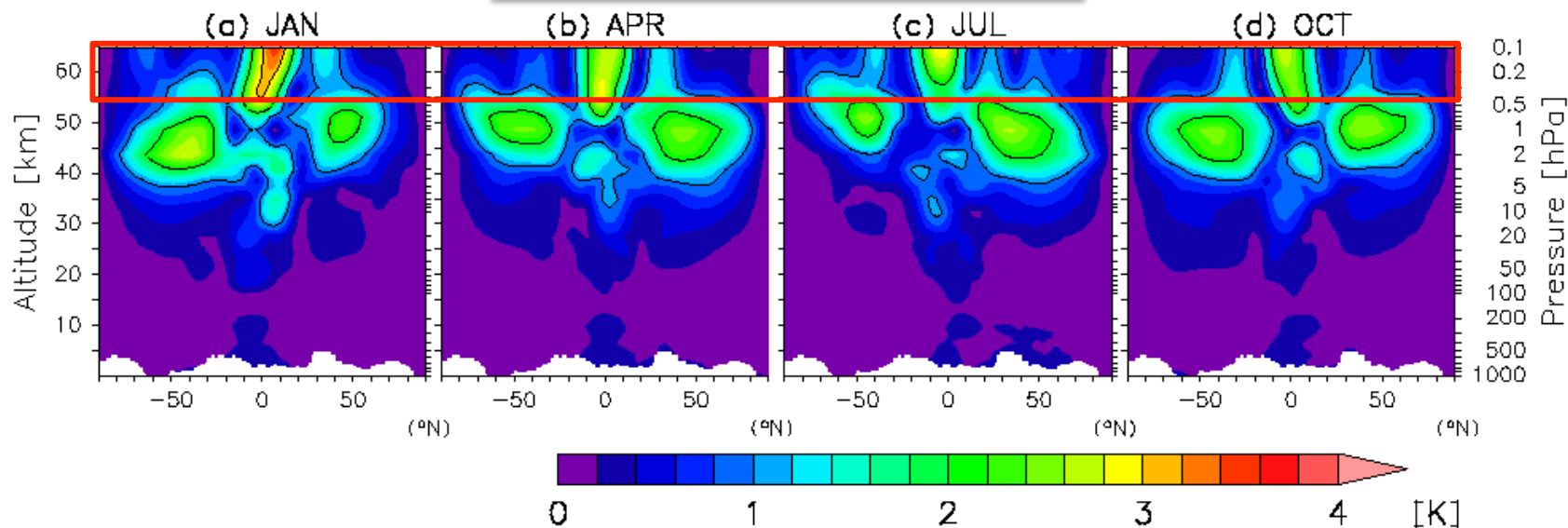
- **伝播モード**: 振幅は指数関数的に増加。位相は上方伝播。  
 - 対称(反対称)モードの鉛直波長は25 km(15 km)。
- **捕捉モード**: 対流圏・上部成層圏で局所的に振幅が大きい。位相一定。

鉛直伝播特性は、古典潮汐論とよく一致。しかし、



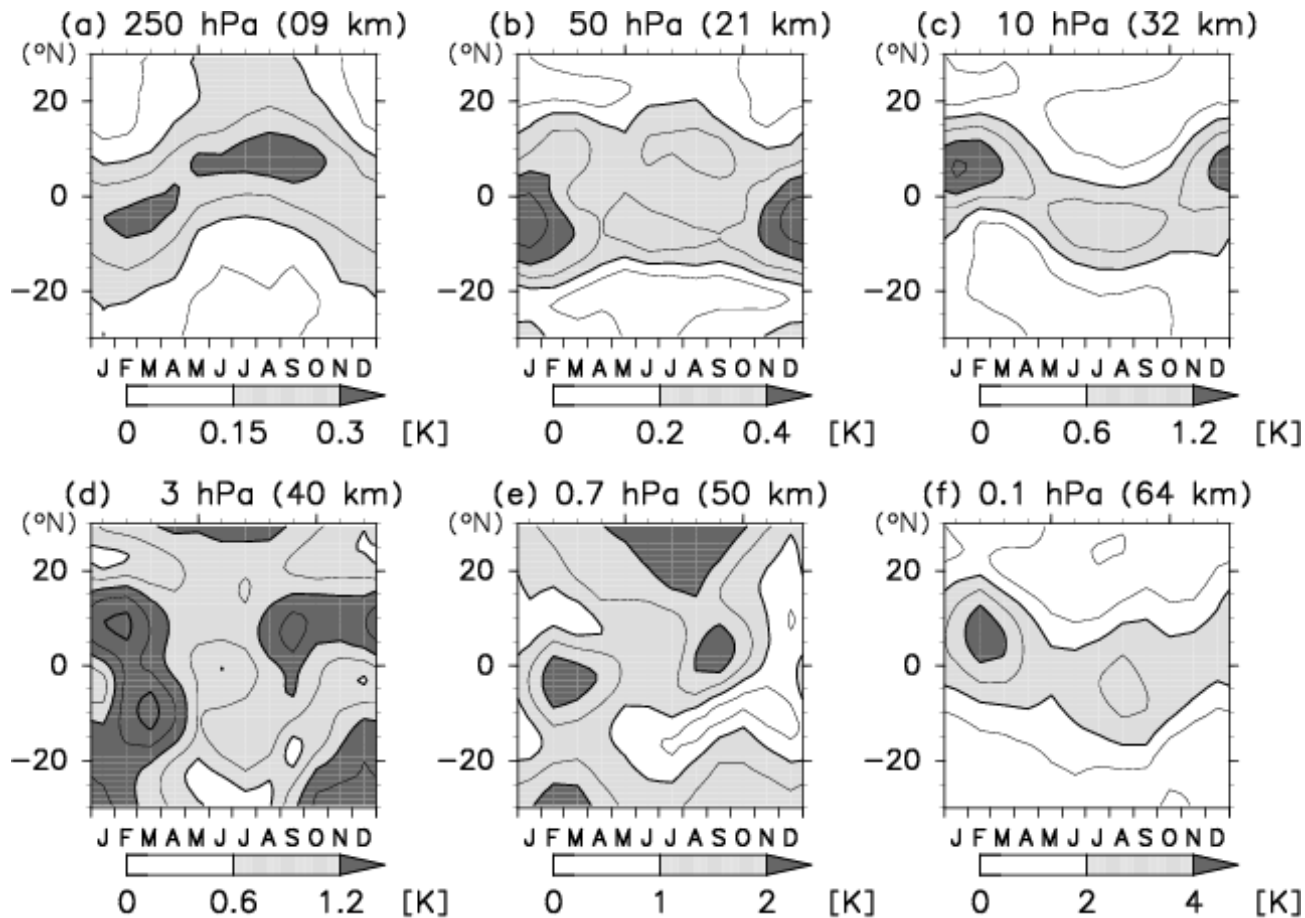
# 成層圏の季節変化

気温DW1の緯度－高度断面図



- 成層圏の振幅ピークはオゾン分布の季節変化に従う。
- 赤道上空では冬に振幅大？→より詳しく。

# 熱帯上空のDW1(気温)の季節変化



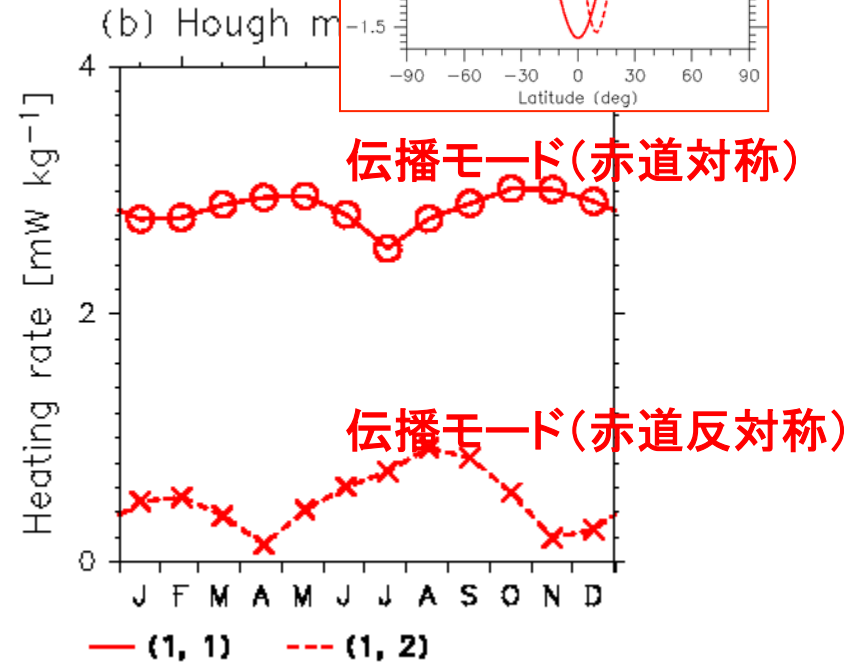
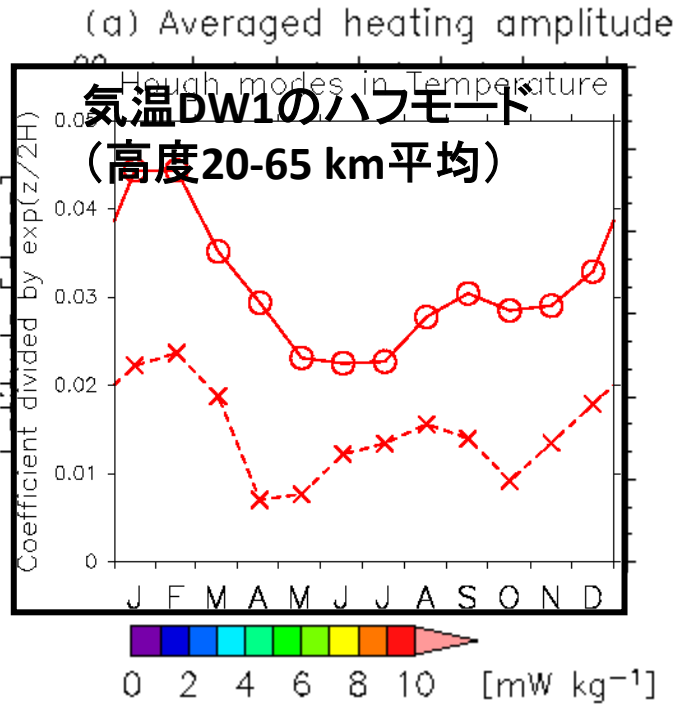
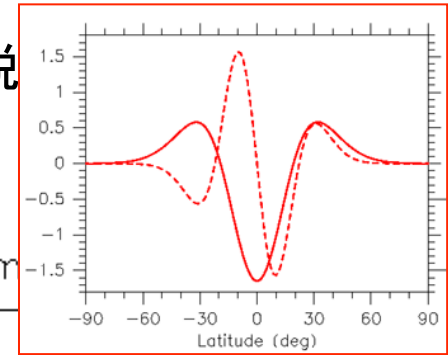
- 成層圏内の振幅は1-2月(7-8月)に極大をとる。
- これらは主に**伝播モード(赤道対称・反対称)**の振る舞いで決まる。

# 加熱の季節変化との対応

潮汐の変動は励起源(≡対流圏加熱)の変動で説明

対流圏加熱(平均)の季節変化

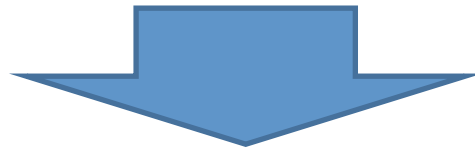
伝播モード



- 伝播特性(鉛直波長)は古典論と整合的だが、非断熱加熱だけでは成層圏より上空の季節変化が説明できない。非古典項(背景風)が生み出す強制を考える必要あり？

# ここまでのまとめ

- 対流圏—下部中間圏のDW1の描像は、伝播モード(熱帯上空)と捕捉モード(成層圏オゾン加熱)の重ね合わせで理解でき、各モードの鉛直伝播特性(e.g., 鉛直波長)は、古典論と整合的である。
- 成層圏内の熱帯上空の振幅(←伝播モード)は1—2月および7—9月に極大を取る季節変化を示す。これは対流圏加熱の季節変化では説明できない。
- 非断熱加熱以外の強制項を考える必要あり。



## 背景場(温度/東西風)の影響？

- 線形モデルを用いた考察へ

# 目次

1. 研究動機・背景
2. データ・解析手法 (TIMED/SABER、再解析)
3. SABER一再解析の比較 (少し)
4. 大気潮汐の特徴 (鉛直構造・季節変化)
5. 議論: 成層圏より上空の季節変化について
6. まとめ

# モデル概要

## 使用モデル

線形スペクトル潮汐モデル(Zhu 1998; Zhu et al. 2003)

※ 時間周期(一日)・東西波数はあらかじめ仮定(2Dモデル)

- 特定の基本場( $T = T(y, z)$ ,  $U = U(y, z)$ ,  $V = 0$ ,  $W = 0$ )のもと非断熱加熱に対する大気の応答を診断的に求める(時間発展しない)。
- 方程式系: **log-p座標一球面プリミティブ方程式(線形化)**
- 境界条件: 下部境界  $w = 0$ 、上部境界 放射条件
- 減衰過程:
  - ・運動量: "実効"レイリー摩擦で表現(レイリー摩擦、分子拡散、波の砕波による拡散)
  - ・温度: ニュートン冷却で表現(プラントル数=1)
- 計算範囲:
  - 緯度 -90S-90N (スペクトル法; MM(切断波数)=24)
  - 高度 0 - 130 km (差分法;  $\Delta z = 1$  km)
- 風・温度場 (monthly):

	0 - 50 km	50 - 80 km	80 - 130 km
温度	MERRA	SABER	MSISE90
東西風	MERRA	SABER (gradient wind)	HWM

- 非断熱加熱 (monthly):  
対流圏加熱・成層圏加熱(Zhang et al., 2010)

# 実験設定 (2種類)

- 実験設定(異なる背景場)

※ 非断熱加熱(monthly)は両実験で同じ。

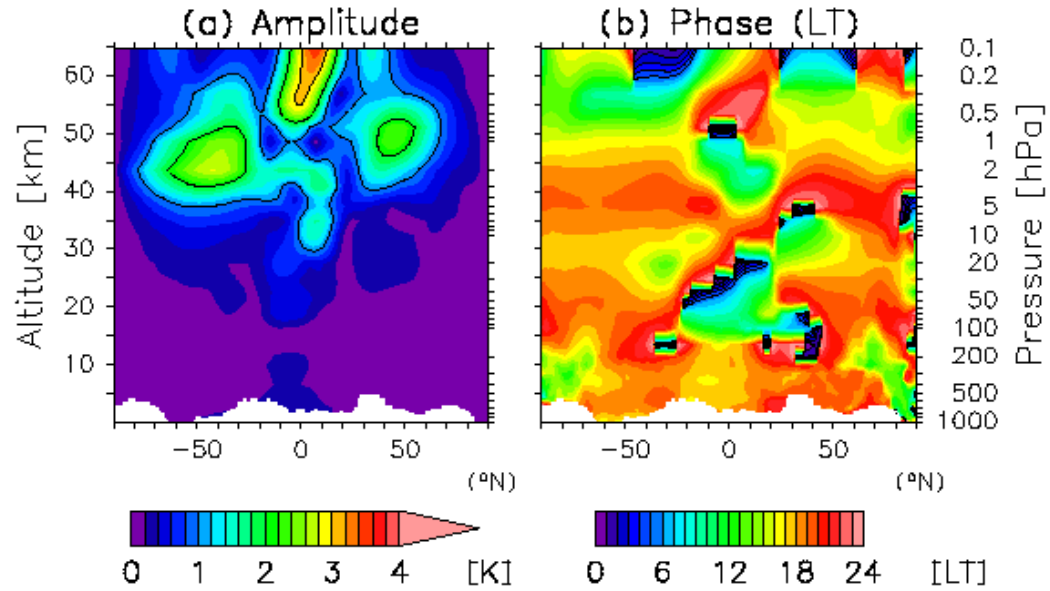
	温度場 (monthly)	東西風 (monthly)
(1) CTL	$T_0(z) + T(\theta, z)$	$U(\theta, z)$
(2) CLASS	$T_0(z)$	なし

※  $T_0(z)$ : 30S-30N平均の温度場

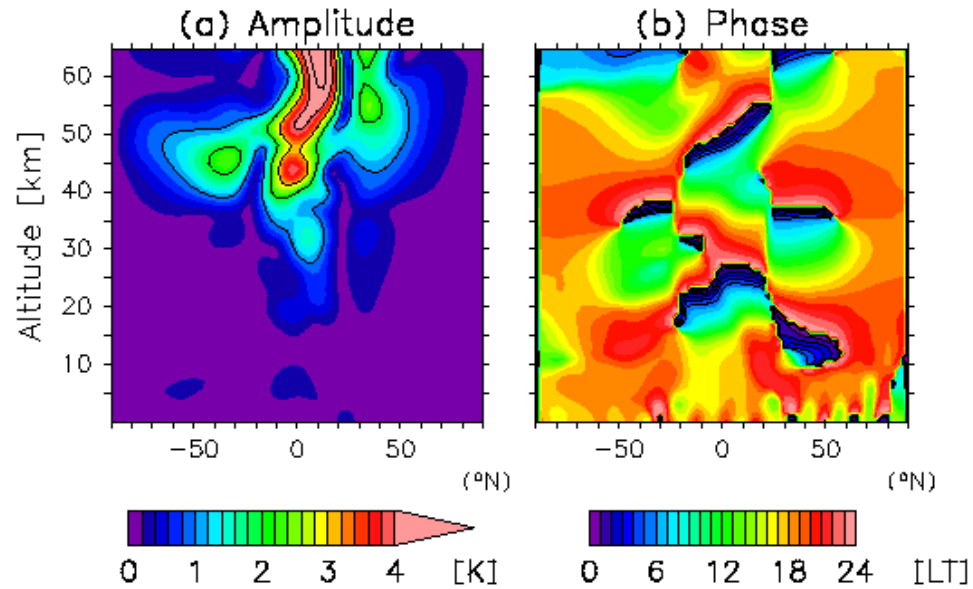
# 観測とCTL実験の比較

1月の気温DW1

MERRA



CTL実験

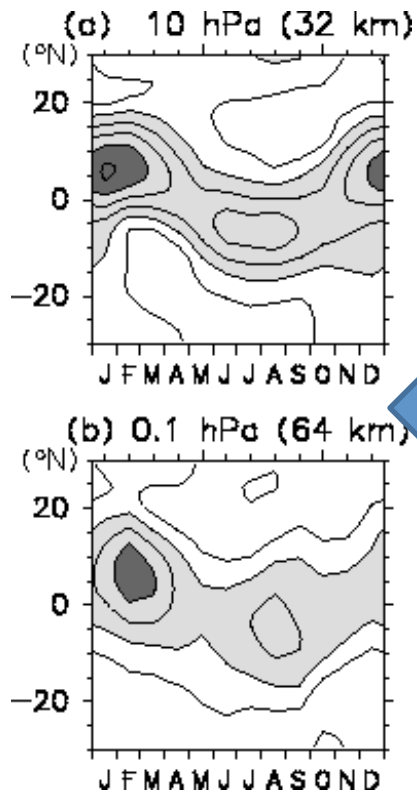




# モデル結果(熱帯上空成層圏の季節変化)

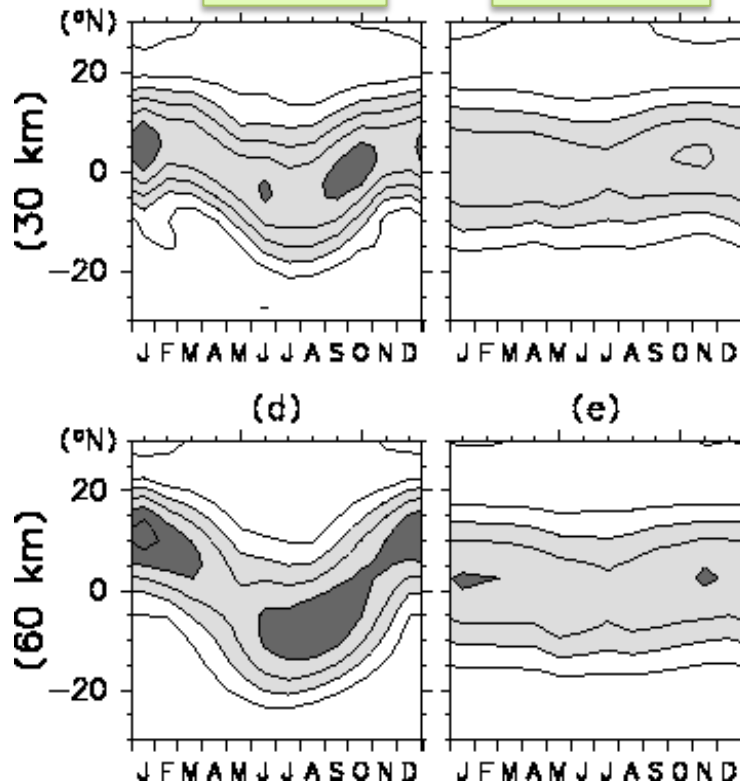
線形モデル実験

観測(MERRA)



(1) CTL

(2) CLASS



コンター間隔:  
0.25 K  
灰色: 0.5 K以上  
黒色: 1.25 K以上

コンター間隔:  
1K  
灰色: 2 K以上  
黒色: 4 K以上

$U(y, z), T(y, z)$

どのようなメカニズムで非古典項が潮汐に影響を及ぼしているのか？

# “非古典項”の影響

## 背景風的重要性

Mclandress (2002): 背景東西風の水平シアーが重要。

## 背景風の影響の解析的/力学的解釈

1. 背景風によってハフモードの形が変わる(Ortland, 2005)。  
— 複スケール解析。 数学的に複雑。。
2. 背景風の影響を古典潮汐論での“強制力”として扱う(Lindzen and Hong, 1974)。  
— 摂動展開

$$\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial \lambda} \quad \varepsilon \sim 10\% (\text{東西風/位相速度})$$

Lindzen and Hong (1974)が提唱した摂動法

$$L_0(\Phi) + \varepsilon L'(\Phi) = J(Q) \quad \Phi = \Phi_0 + \varepsilon \Phi_1$$

$\Phi$ にまとめた式から出発したため、物理的解釈は困難(L'が複雑すぎ)。。

# 摂動法 (Lindzen and Hong (1974) revisited)

線形化した球面プリミティブ方程式系 (=モデルの支配方程式)

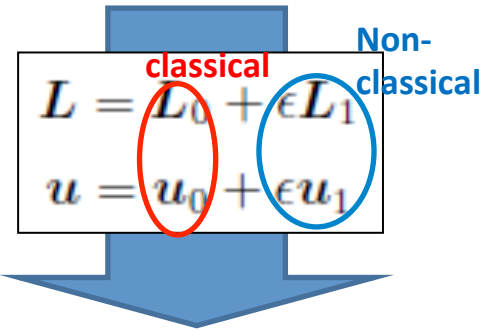
$$Lu = Q$$

運動方程式(x, y)、熱力学の式、連続の式

*Linear operator*

$$L = \begin{pmatrix} \underline{-i(2\Omega\sigma - \frac{s\bar{u}}{a \cos \phi})} & \underline{(a \cos \phi)^{-1}(\bar{u} \cos \phi)_\phi} & \underline{\bar{u}_z} & \underline{i(a \cos \phi)^{-1}s} \\ \underline{f + 2\bar{u}a^{-1} \tan \phi} & \underline{-i(2\Omega\sigma - \frac{s\bar{u}}{a \cos \phi})} & 0 & \underline{a^{-1}\partial/\partial y} \\ 0 & \underline{(aH)^{-1}R\bar{T}} & \underline{N(z)^2 + N'(y,z)^2} & \underline{-i(2\Omega\sigma - \frac{s\bar{u}}{a \cos \phi})} \\ \underline{(a \cos \phi)^{-1}s\bar{u}} & \underline{\partial/\partial y - a^{-1} \tan \phi} & \underline{\partial/\partial z - 1/2H} & 0 \end{pmatrix} \quad u = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ \Phi \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Q \\ 0 \end{pmatrix}$$

*Tides*      *Diabatic heating*



- どちらも古典潮汐論 ( $L_0$ ) の枠組みで議論する。  
(背景大気は、  $T=T(z)$ ,  $U=0$ )

- 違いは強制項のみ。  
 $u_0$ : 非断熱加熱によって励起 = CLASS実験  
 $u_1$ :  $-L_1 u_0$  によって励起

$$O(1): L_0 u_0 = Q$$

$$O(\epsilon): L_0 u_1 = -L_1 u_0$$

- 非古典項は(背景場ではなく) "二次的な強制力" を生み出すものとする。

# $u_1$ 成分の計算：摂動法の妥当性

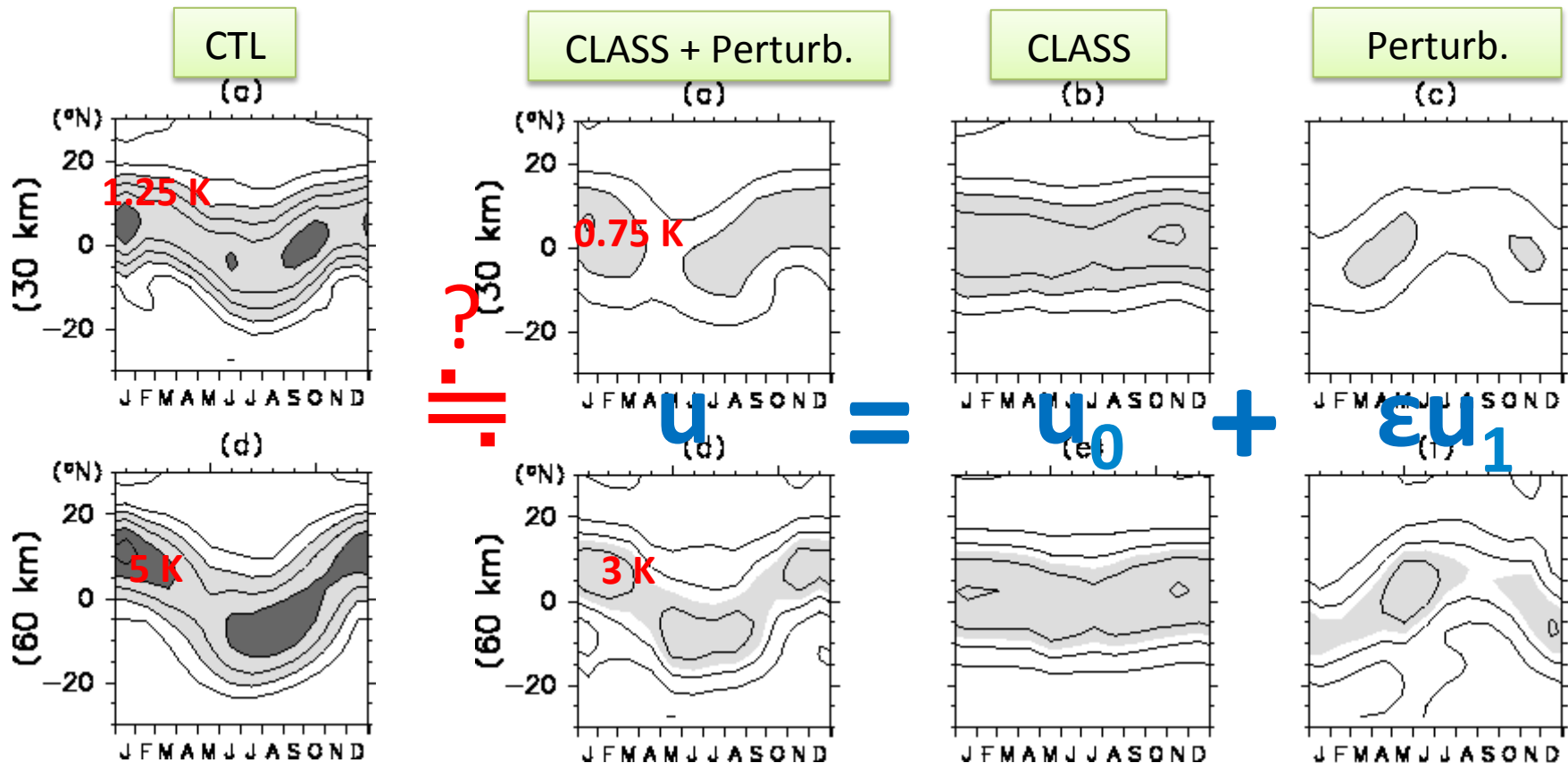
Momentum Eqs.

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} - f v_1 + \frac{1}{a \cos \theta} \frac{d\Phi_1}{d\lambda} = -\frac{\bar{U}}{a \cos \theta} \frac{\partial u_0}{\partial \lambda} - \frac{v_0 \partial \bar{U}}{a \partial \theta} - w_0 \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + \frac{2v_0 \bar{U} \tan \phi}{a}$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} + f u_1 + \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = -\frac{\bar{U}}{a \cos \theta} \frac{\partial v_0}{\partial \lambda} - \frac{2u_0 \bar{U} \tan \phi}{a}$$

Thermodynamic Eqs.

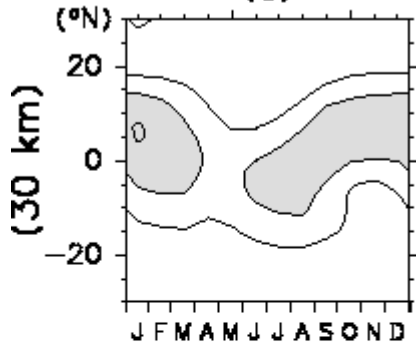
$$\frac{\partial T_1}{\partial t} + N^2 w_1 = -\frac{\bar{U}}{a \cos \theta} \frac{\partial T_0}{\partial \lambda} - v_0 \frac{R}{aH} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \theta} - N^2 w_0.$$



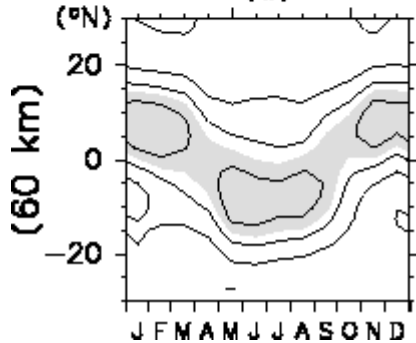
# 摂動項の中で効いているのは？

CLASS + Perturb.

(a)

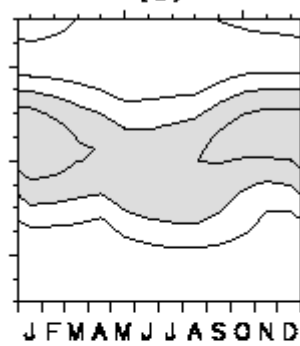


(d)

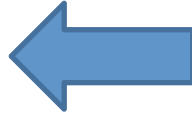
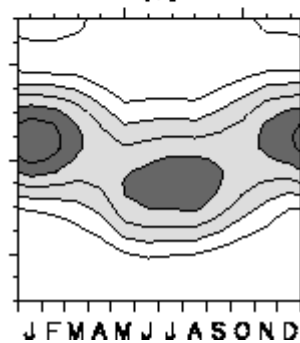


CLASS +  $v^{(0)}dU/dy$ 項

(c)

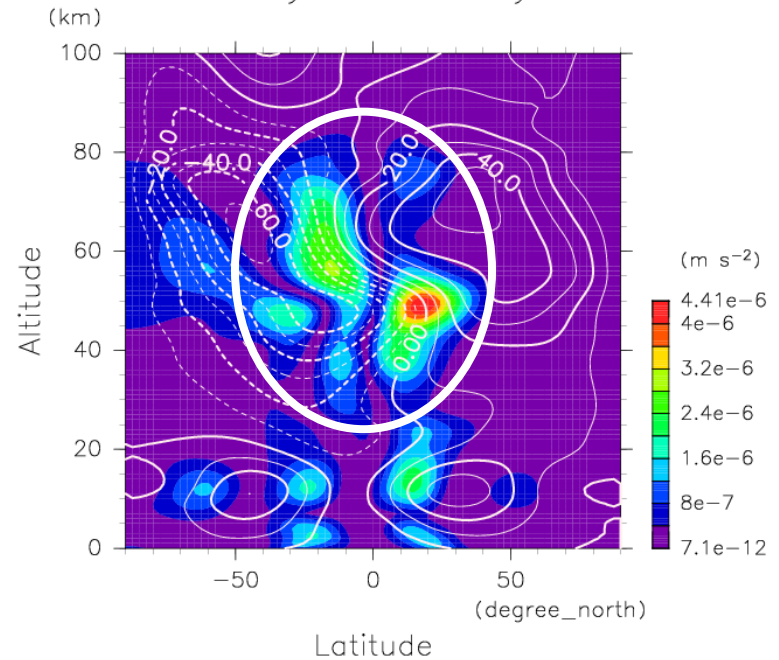


(f)



1月のU(コンター)と  
 $v_0 dU/dy$ の振幅(カラー)

$|v \cdot U_y|$  in January



- (断熱加熱によって励起された) **潮汐南北風による東西運動量輸送**によって潮汐の**二次成分が励起**される。

← 東西風の南北勾配は1月/7月に赤道上空で強く、伝播モードを効率的に励起。

c.f., 「背景場の水平シアーが重要 (Mclandress, 2002)」

# まとめ

- TIMED/SABERデータとの比較により、全球再解析データが潮汐(日変動)研究に使えることを明らかにした。
- DW1の構造は、赤道上空で卓越する伝播モードと中・高緯度で卓越する捕捉モードの重ね合わせで説明でき、各モードの鉛直伝播特性は、古典潮汐論と整合的である。
- ただし、成層圏内の季節変化は、非断熱加熱のそれとは異なる特徴を示す。
- 線形モデル・摂動法を用いて考察を行ったところ、非断熱加熱によって**熱的に励起される成分(一次成分)**に加えて、背景東西運動量の南北移流によって**力学的に励起される成分(二次成分)**の寄与の影響が無視できないことがわかった。

おわりです。