

# 理想化されたaqua-planetにおけるNICAMの結果とJRA-55のデータにより解析した対流圏における気温の鉛直分布と気温減率の特徴

吉崎正憲\* 高咲良規\*\* 伊賀晋一\*\*\* 佐藤正樹\*\*\*\*  
 高野かれん\*\*\*\*\* 小宮山祐矢\*\*\*\*\* 酒井絵梨\*\*\*\*\*  
 宮田学\*\*\*\*\* 森田将矢\*\*\*\*\* 森泉慎一\*\*

キーワード：対流圏, 気温減率, NICAM, JRA-55

## 1. はじめに

大気の見るとき、気温の鉛直分布と気温減率は重要な情報である。気温  $T$  (K)、高度  $z$  (m) から、気温減率  $\Gamma$  は、

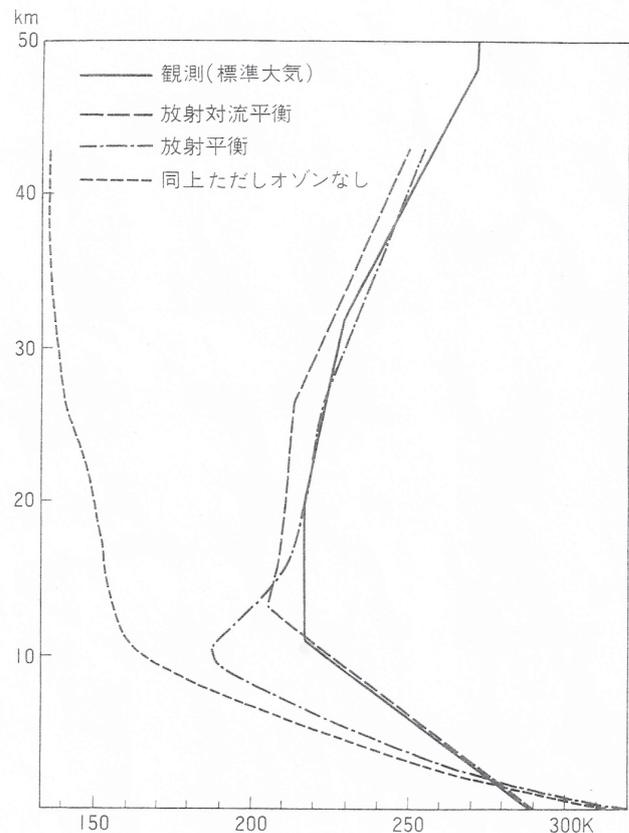
$$\Gamma = -\frac{dT}{dz} \quad (1)$$

と定義される。

気温減率の違い等から、地球大気は、対流圏、成層圏、中間圏、熱圏と大別される。温帯域（中緯度帯）では、地上から対流圏界面（高度約12km）までを対流圏、対流圏界面から成層圏界面（高度約50km）までを成層圏、成層圏界面から中間圏界面（高度約80km）までを中間圏、熱圏はそれ以上の高さとなる。このような地球大気の内層構造のうち対流圏と成層圏について、温帯域に関して、Manabe and Stricker (1964) によってCO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>の温室効果気体の鉛直分布の観測値を用いて放射計算することで明らかにした（第1図）。CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oだけの温室効果気体を持つ放射平衡の計算からは、対流圏の構造は再現されたが成層圏は再現されなかった。これにO<sub>3</sub>の観測データを加えることによりはじめて成層圏は再現された。しかし、放射過程だけの再現結果からは、対流圏は異常に不安定な気温分布（超断熱という）となり、地表温度は約50℃となった。そこで、彼らは対流圏の臨界気温減率6.5℃ km<sup>-1</sup>を導入し、超断熱な気温分布になると対流によって臨界気温分布になると仮定した（放射対流平衡）。こうして、対流圏は6.5℃ km<sup>-1</sup>の

気温減率をもち地表温度も約15℃となり、もっともらしい地表温度を得ることができた。

ここで対流圏の形成・維持には、対流の存在が重要であり、対流の実体は降水現象であり積乱雲である。



第1図 温帯域における放射平衡および放射対流平衡である気温の鉛直分布（原図：Manabe and Stricker 1964；小倉 1999より引用）。

\* 立正大学地球環境科学部  
 \*\* 立正大学大学院地球環境科学研究科  
 \*\*\* 一般財団法人・高度情報科学技術研究機構  
 \*\*\*\* 東京大学大気海洋研究所・海洋研究開発機構  
 \*\*\*\*\* 日本気象協会  
 \*\*\*\*\* SETソフトウェア  
 \*\*\*\*\* 立正大学地球環境科学部卒業生

理想化されたaqua-planetにおけるNICAMの結果とJRA-55のデータにより解析した対流圏における気温の鉛直分布と気温減率の特徴(吉崎・高峯・伊賀・佐藤・高野・小宮山・酒井・宮田・森田・森泉)

ところが、実際には計算機資源の不足等から、解像を大きくしなくて積乱雲を陽に表現しない様々な積雲のパラメタリゼーションが使われてきた。Manabe and Strickerの考えを引き継ぐ湿潤対流調節スキームのほか、Arakawa and Shubert (1974)では雲の集団効果をプルームとして取り入れている。異なる積雲パラメタリゼーションを用いるとそれぞれの結果があり、その良否を判断するのは難しい。

積乱雲は通常、発達期、成熟期、減衰期の1時間ほどの寿命を持つが、適当な強さの鉛直シアがあると寿命が数時間と長くなる特性がある(例えば、吉崎・加藤 2007)。それらを表現するために、水物質として、水蒸気のほかに雲水、雲氷、雨、雪、あられなどの雲物理量を導入する必要がある。このために全球雲解像モデル、例えば、非静力学正20面体格子大気モデル(NICAM, Satoh et al. 2008)などの利用が必要となる。

温帯域の対流圏の気温構造の形成に関して、雲がない場合の気温分布は乾燥断熱減率( $9.8\text{C km}^{-1}$ )ないしはそれより小さい値を持ち、雲ができる場合には湿潤断熱減率(温帯域下層では約 $4\text{C km}^{-1}$ )に近い値を持つことが予想される。したがって、雲の有無を長期間考慮すれば、約 $6.5\text{C km}^{-1}$ の中間的な値になるのは納得できる。実際、1976年に採択された米国標準大気の対流圏の気温減率はほぼ $6.5\text{C km}^{-1}$ であり、気象学のさまざまな教科書(例えば、Wallace and Hobbs 1977, 小倉 1999)や国際民間航空機関(ICAO)ではそのような値を採用している。

しかし、地球大気は温帯域だけでない。熱帯域のように対流活動が活発な領域もあれば、乾燥域、亜寒帯域、極域のような対流活動が不活発な領域もある。ほかにも海陸分布や山岳分布などの地表面状態は様々であるし、じょう乱に伴う高・低気圧域における違いもある。こうした環境の違いが気温減率にどのような影響を与えるか、また対流圏の平均気温減率をほぼ一定値として良いか、気象学において「気温減率」は基本的な量であるにも関わらず、そうした疑問に対してきちんと答えていないように思われる<sup>1)</sup>。

本稿では、緯度方向に20度毎に分け、時間平均・東西平均の全球の対流圏の気温の鉛直分布、その標準偏差と最大値・最小値、気温減率を求める。そこで、(1) NICAMによる理想化された水惑星実験から得られる結果(Satoh et al. 2008, 伊賀ほか 2010)と気象庁55年長期再解析(JRA-55)の解析値(原田ほか 2014, Kobayashi et al. 2015, Harada et al. 2016)との比較を

行う。またこれらの比較をもとに、(2) 対流圏の気温分布が水平方向に同じようなものか、(3) 対流圏の気温の鉛直分布ははたして一定として良いか、について議論をする。

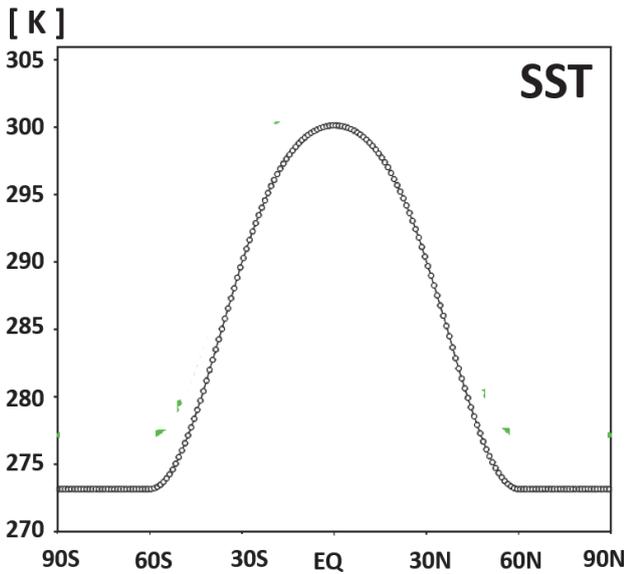
対流圏界面は気温減率が $2\text{C km}^{-1}$ またはそれ以下になる高度と定義し、対流圏界面から地上までの間を「対流圏」とする。NICAMは極域の扱いが単純すぎるため、またJRA-55の南極域は山岳があるために対流圏下層の気温分布は不確定となるので、主な研究対象は熱帯域から亜寒帯域までとする。また地上~大気境界層(高々約800hPaの高さ)の間では地表面からの影響が大きいことから、この高度から対流圏界面までの自由大気は「対流圏内」として区別する。

## 2. NICAMによる理想化された水惑星実験の結果を用いた解析

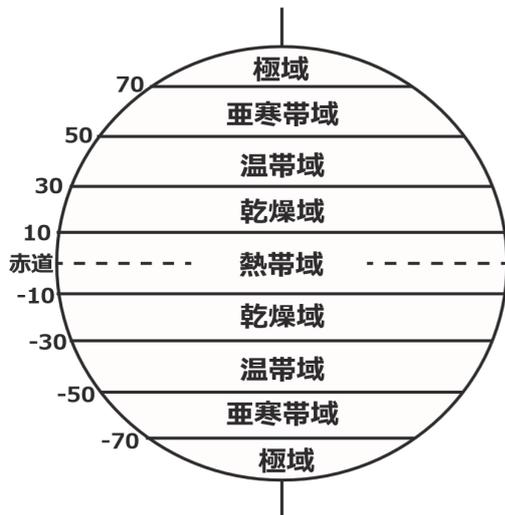
### 2.1 モデルの概要と解析方法

NICAMは、放射・力学・雲物理・乱流等の全物理過程を含む大気モデルである(Satoh et al. 2008)。伊賀ほか(2010)が用いたNICAMは、水平解像は約14km(東西方向には2560個、南北方向に1280個のグリッド数)、鉛直解像として最下層は35mで高度が高くなるにつれストレッチした54層のモデルである。本研究で用いる大気モデルの結果は水惑星大気モデルの結果である。ここでは、太陽は緯度変化しないが赤道上下を動くものとして日変化はある。また大気は海洋からの運動量、熱、水蒸気の乱流による影響は受けるが、海洋の海面水温(SST)には影響しないものとして、SSTは東西方向に一様で南北方向に赤道に関して対称な分布である(第2図)。したがって、太陽放射の緯度依存性はあるが、ここで再現される対流圏の大気大循環は主にSSTの南北傾度によって駆動されたものである。ここでは、赤道域では高温のためHadley循環があり、また中緯度帯では傾圧性が強く傾圧不安定波が発生するような場となっている。一方、60度から極域まではSSTを273K(=0°C)と固定して大気運動は小さくなるようにしてある。こうして、モデルを初期時間からランさせて十分安定したところで、60日間3時間ごとのデータを作成した。

緯度-90度(南緯90度, 南極点)から緯度90度(北緯90度, 北極点)までを20度ごとに分け(第3図)、領域毎に60日間東西・時間平均とその標準偏差・最大値・最小値のデータを作成した。



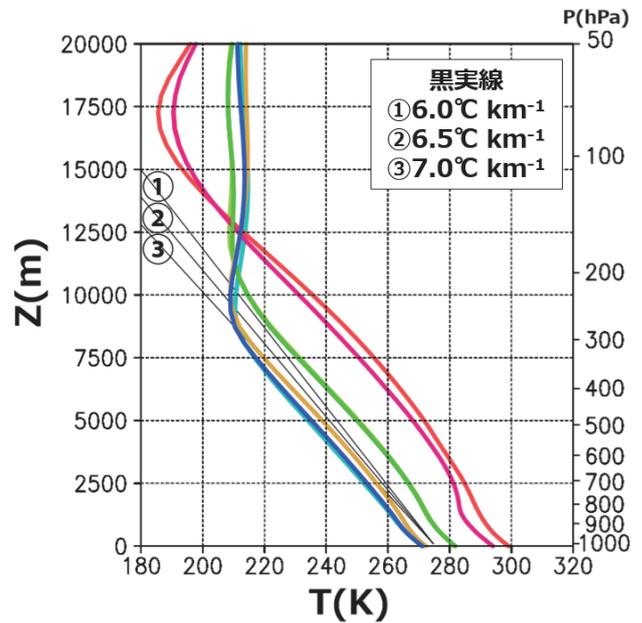
第2図 NICAMによる水惑星実験で用いられる海面水温 (SST) の南北分布.



第3図 領域の仕分け. ここでは, 緯度「-10度~10度」は熱帯域, 緯度「-30度~-10度」と「10度~30度」は乾燥域, 「-50度~-30度」と「30度~50度」は温帯域, 「-70度~-50度」と「50度~70度」は亜寒帯域, 「-90度~-70度」と「70度~90度」は極域と呼ぶ.

## 2.2 気温の鉛直分布

第4図は, NICAMで計算された気温の鉛直分布の東西平均値を60日間にわたって平均したものである. 対流圏内の気温は $6.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 前後の傾きを持ち, 高さとともに下がっていた. 両半球の乾燥域, 温帯域, 亜寒帯域の気温分布は地上温度が変わるが, それぞれ高さ方向には同じような鉛直傾度であった. これは, 対流圏内の気温構造は乾燥域や亜寒帯域のような対流活動が不活発な領域でも熱帯域や温帯域の対流活動が活発な領域とほとんど変わらないということである.



第4図 NICAMによる水惑星実験の東西と60日間平均した気温の鉛直分布. カラー線は下のカラーボックスの色に対応する. 細い3本の実直線は,  $1\text{ km}$ 当たりの $6.0^{\circ}\text{C}$ ,  $6.5^{\circ}\text{C}$ ,  $7.0^{\circ}\text{C}$ の傾度線である. 左の縦軸は高度 (m) を示す. 右の縦軸の気圧 (hPa) は, 温帯域の代表的な気温分布をもとに計算したものであり, 第4図から第6図までリファレンスとして使う.

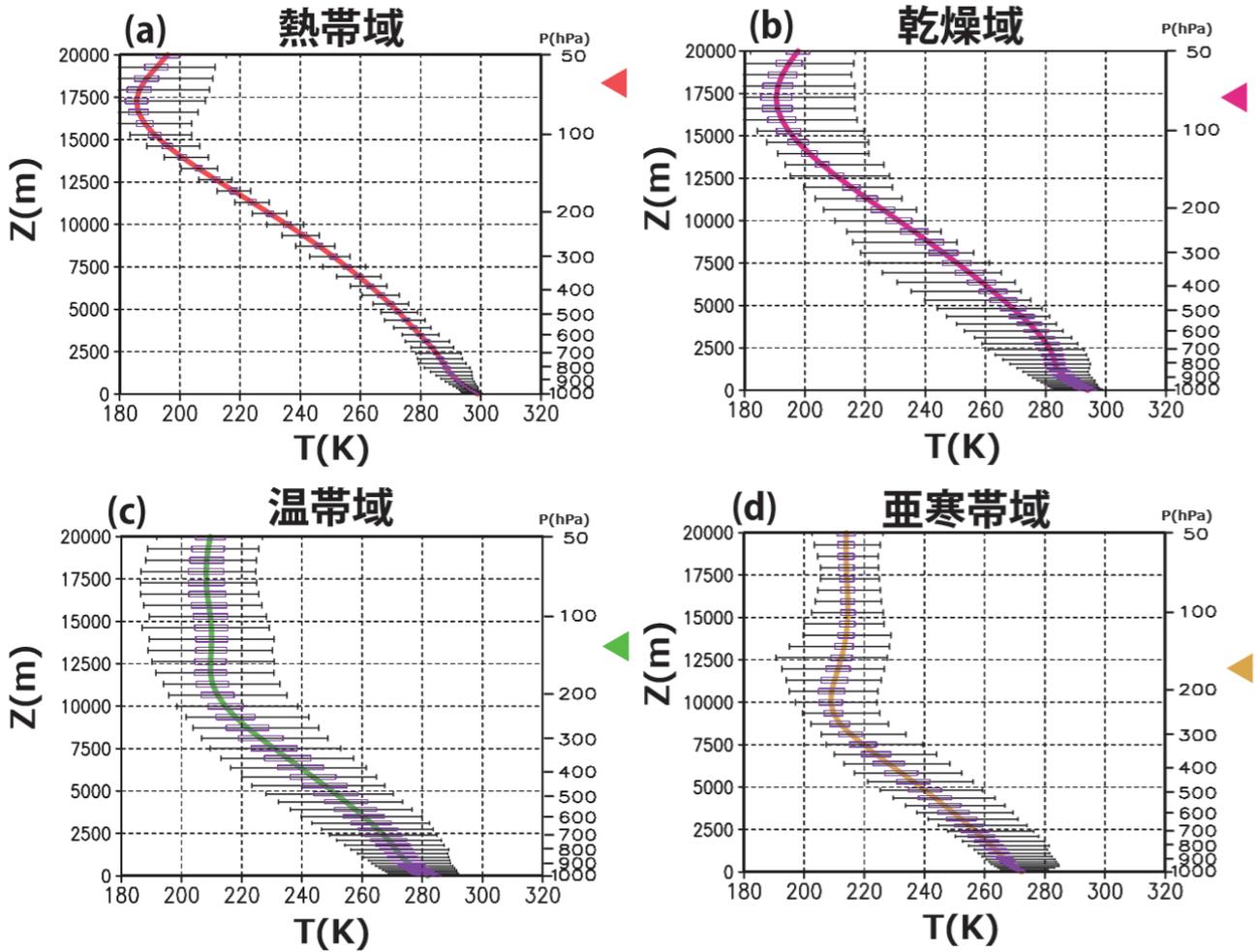
## 2.3 気温の標準偏差および最大値・最小値

第5図は, 熱帯域, 乾燥域, 温帯域, 亜寒帯域のNICAMで表現された気温の標準偏差と最大値・最小値の鉛直分布である. 標準偏差の変動幅は, 熱帯域ほど小さく乾燥域・温帯域・亜寒帯域と大きくなっていく. それに対して, 気温の最大値・最小値の変動幅は, 熱帯域は小さいが (地上付近で $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度) 温帯域では乾燥域・亜寒帯域に比べてわずかに大きかった (地上付近で $\pm 30^{\circ}\text{C}$ 程度). 温帯域での変動をもたらし擾乱として傾圧不安定波が考えられる. 温帯域の変動は, 動画1からじょう乱は緯度30度から60度までの範囲で西から東に形を変えながら移動していた.

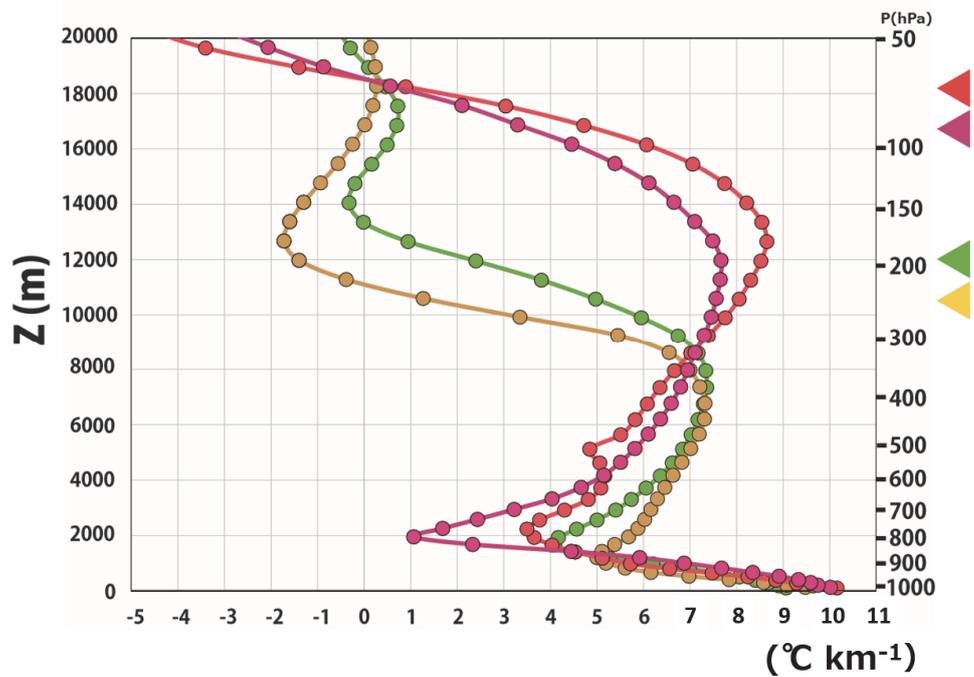
## 2.4 気温減率

第6図は, 熱帯域, 乾燥域, 温帯域, 亜寒帯域におけるNICAMで表現された気温減率の鉛直分布である. 気温減率は対流圏下部では $1\sim 5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ と小さく上部では $7\sim 8^{\circ}\text{C km}^{-1}$ と大きかった. また対流圏の気温減率の平均値は $6.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 程度であったが, 対流圏内における平均値は $6.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ より小さかった.

理想化されたaqua-planetにおけるNICAMの結果とJRA-55のデータにより解析した対流圏における気温の鉛直分布と気温減率の特徴  
(吉崎・高峯・伊賀・佐藤・高野・小宮山・酒井・宮田・森田・森泉)



第5図 NICAMによる水惑星実験の東西と60日間平均した (a) 熱帯域 (赤), (b) 乾燥域 (紫), (c) 温帯域 (緑), (d) 亜寒帯域 (黄) の気温の標準偏差と最大値・最小値の鉛直分布. 右側の△は対流圏界面の平均高度を表す.



第6図 NICAMによる水惑星実験の東西と60日間平均した熱帯域 (赤), 乾燥域 (紫), 温帯域 (緑), 亜寒帯域 (黄) における気温減率の鉛直分布. 右側の△は域毎の対流圏界面の平均高度を表す.

### 3. JRA-55を用いた解析

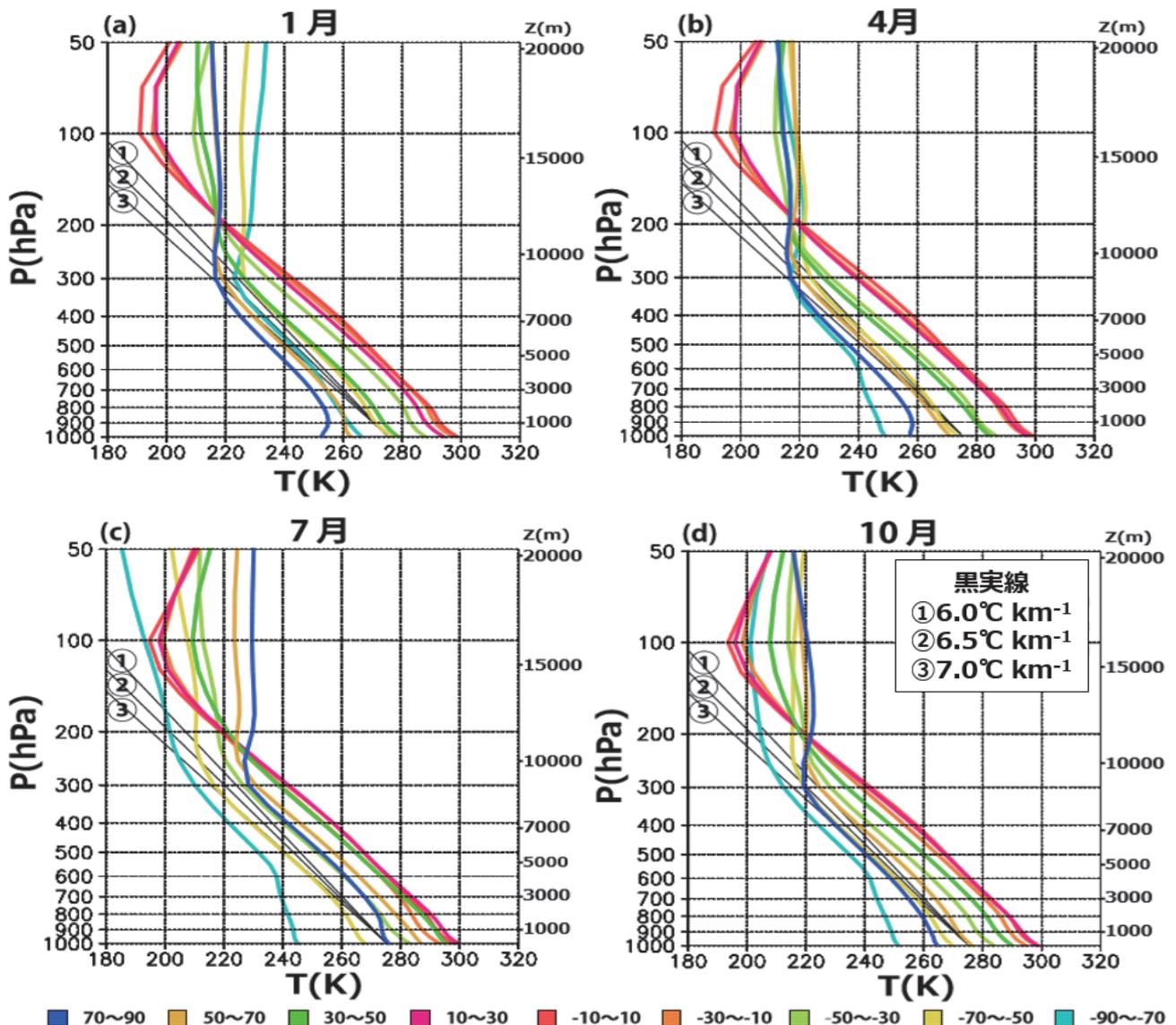
#### 3.1 解析期間と領域

JRA-55とは、過去の観測データに対して4次元変分法を含む気象庁数値予報データ同化システムを適用し作成された全球長期再解析データである (Kobayashi et al. 2015). JRA-55におけるデータ同化は1日4回実施され、等圧面プロダクトの空間解像度は、水平方向は $1.25^\circ$ 、鉛直方向は1000hPa面から1hPa面まで37層（水蒸気関連データは27層）である。2009年から2013年までの5年間のデータを用い、第3図のように20度ごとに分け、領域毎に東西・月平均とその標準偏差・最大値・最小値のデータを作成した。気温減率は、気圧面のジオポテンシ

ヤル高度と温度のデータから計算した。

#### 3.2 気温の鉛直分布

2009–2013年5年平均の1月、4月、7月、10月の気温の鉛直分布を第7図に示す。対流圏内では、全般的に季節変化に伴い全層の気温は変わっていた。6.5°C km<sup>-1</sup>前後で気温は高度とともに下がっており、その様子は季節にも地域にも依っていなかった。これは、対流圏内の気温構造は乾燥域や亜寒帯域のような対流活動が不活発な領域でも熱帯域や温帯域の対流活動が活発な領域でもほとんど変わらないということ、第4図と変わらない結果であった。



第7図 JRA-55の2009–2013年5年間平均の (a) 1月, (b) 4月, (c) 7月, (d) 10月の気温の鉛直分布。カラー線は下のカラーボックスの色に対応する。細い3本の実直線は、1km当たりの6.0°C、6.5°C、7.0°Cの傾度線である。左の縦軸は気圧 (hPa) を示す。右の縦軸の高度 (m) は、温帯域の代表的な気温分布をもとに計算したものであり、第7図から第10図までリファレンスとして使う。

理想化されたaqua-planetにおけるNICAMの結果とJRA-55のデータにより解析した対流圏における気温の鉛直分布と気温減率の特徴 (吉崎・高咲・伊賀・佐藤・高野・小宮山・酒井・宮田・森田・森泉)

### 3.3 気温の標準偏差および最大値・最小値

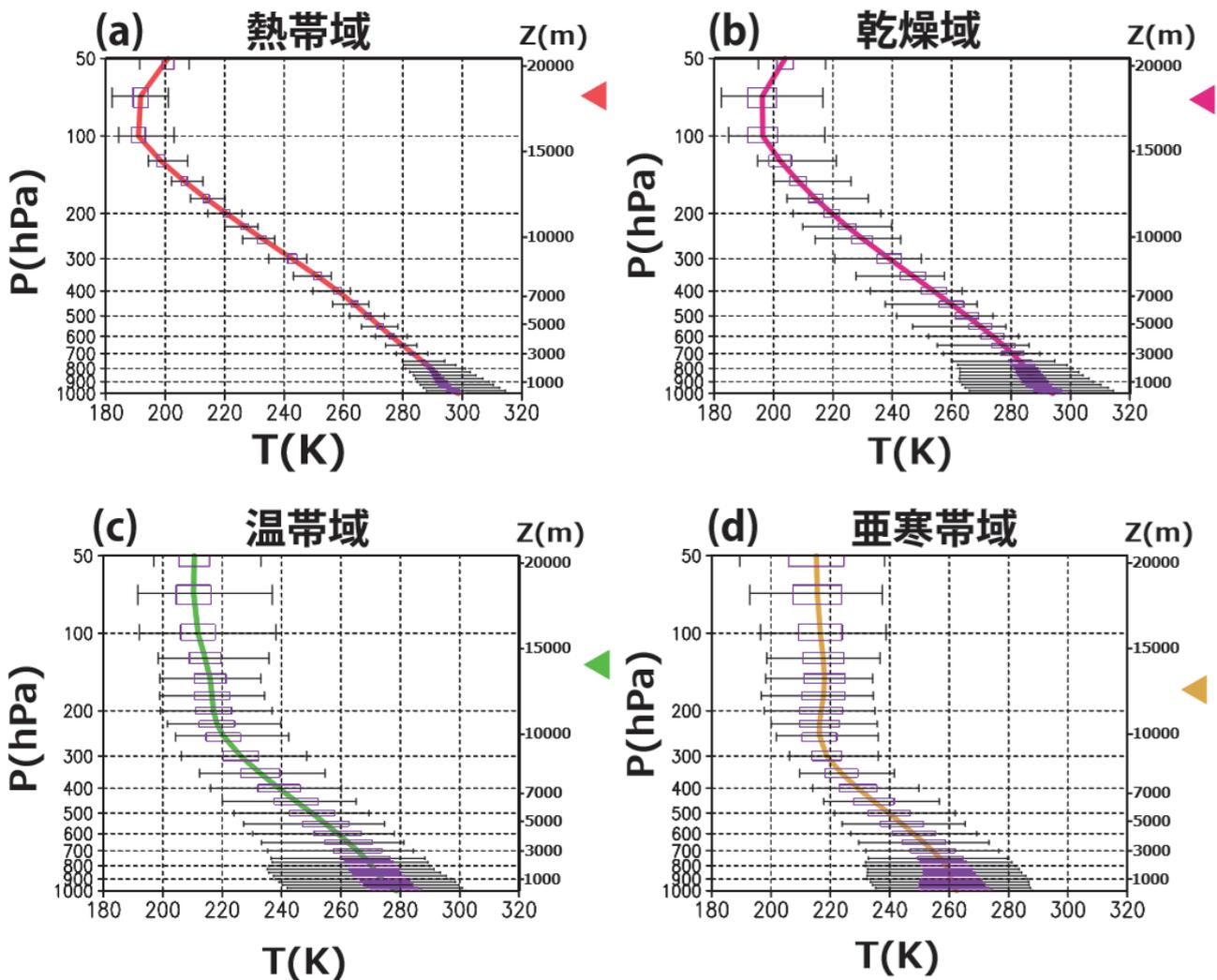
第8図は、2009–2013年5年平均の1月における熱帯域、北半球の乾燥域、温帯域、亜寒帯域の気温の標準偏差と最大値・最小値の鉛直分布である。NICAMの結果と同様であり、標準偏差の変動幅は、熱帯域ほど小さく乾燥域・温帯域・亜寒帯域と大きくなっていった。また気温の最大値・最小値の変動幅は、熱帯域は小さいが(地上付近で $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度)、温帯域では乾燥域・亜寒帯域に比べてわずかに大きかった(地上付近で $\pm 30^{\circ}\text{C}$ 程度)。温帯域での変動をもたらし擾乱は傾圧不安定波と考えられる。

動画2では、水平風が作る渦は北半球の東西方向に極東域と北米東部から大西洋にかけてしばしば見られた。

またじょう乱の南北方向の変動では、渦の変動が南北30度から60度までの範囲に見られ、乾燥域や亜寒帯域まで影響を与えていた。そのため、乾燥域と亜寒帯域の変動幅も温帯域と同じような大きさになったと考えられる。

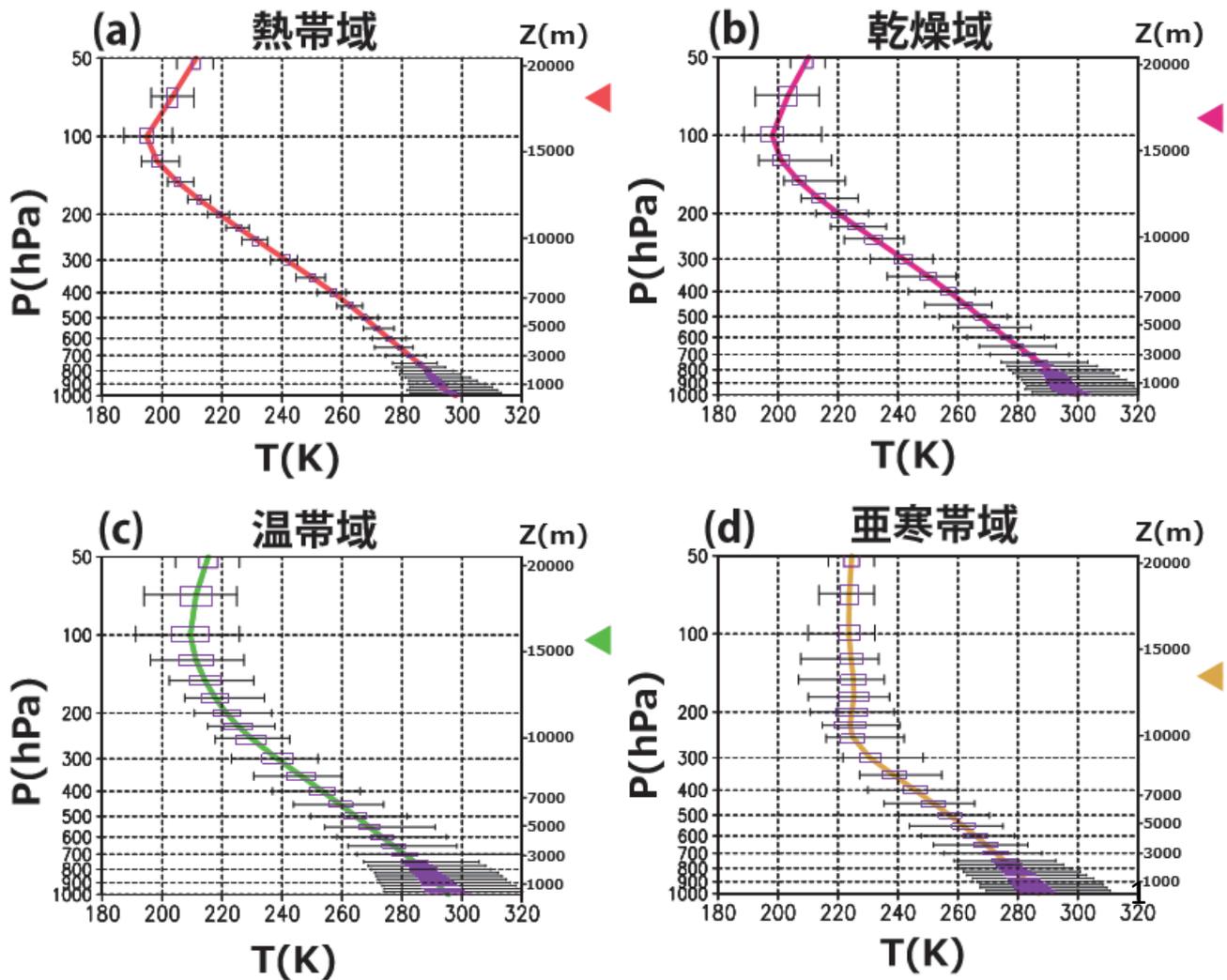
第9図は、2009–2013年5年平均の7月の場合である。第8図とは季節が異なるので、特に地表付近の気温は高緯度ほど高かった。気温の標準偏差の変動幅は1月と同様であったが、気温の最大値・最小値の変動幅のうち温帯域は $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 程度と第7図(c)に比べて小さかった。これは、第8図の冬季は傾圧不安定波が活発であったのに対して第9図の夏季は不活発であったためと考えられる。

## 1月



第8図 JRA-55の2009–2013年5年間平均の1月における (a) 熱帯域と、北半球の (b) 乾燥域、(c) 温帯域、(d) 亜寒帯域における気温の標準偏差と最大値・最小値の鉛直分布。右側の△は対流圏界面の平均高度を表す。

## 7月



第9図 第8図と同じ。ただし7月の場合。

## 3.4 気温減率

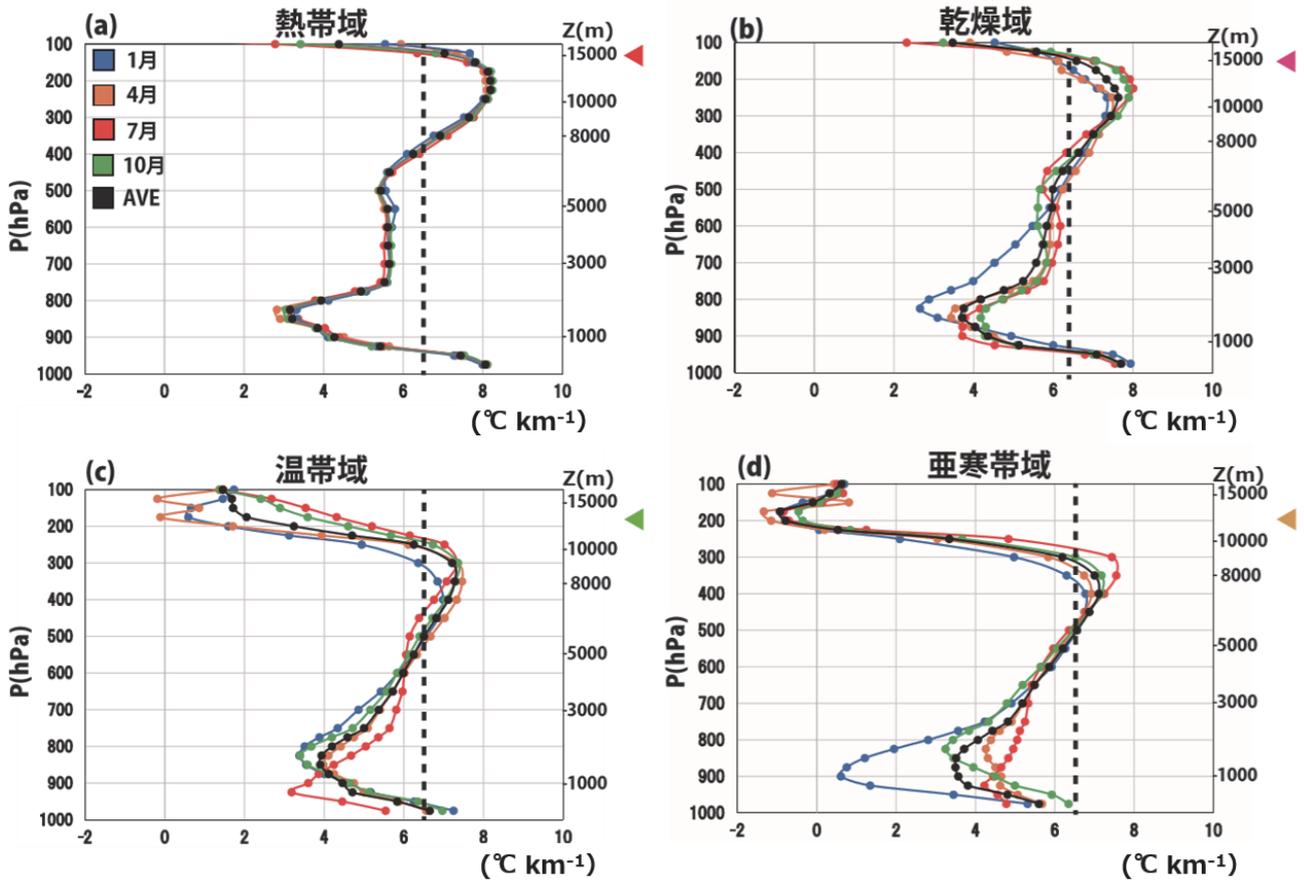
気温減率に関しては第7図からも読み取れたが、気温の高度差分を計算することにより、気温減率を直接評価することができる。第10図は、2009–2013年5年平均の1月、4月、7月、10月、年平均における熱帯域、北半球の乾燥域、温帯域、亜寒帯域の気温減率の鉛直分布である。対流圏内の気温減率の分布は変動していて、下部の値は $3\text{℃ km}^{-1}$ あたりと小さく、上部の値は $7\sim 8\text{℃ km}^{-1}$ と大きかった。この傾向は季節にも地域にも依らず、こうした特性は普遍的なものといえる。また地上から対流圏界面までの対流圏の平均的な気温減率はほぼ $6.5\text{℃ km}^{-1}$ であったが、対流圏内の気温減率は $6.5\text{℃ km}^{-1}$ よりも小さかった。

## 4. 経度平均場に関するNICAMによる理想化された水惑星実験とJRA-55との対応

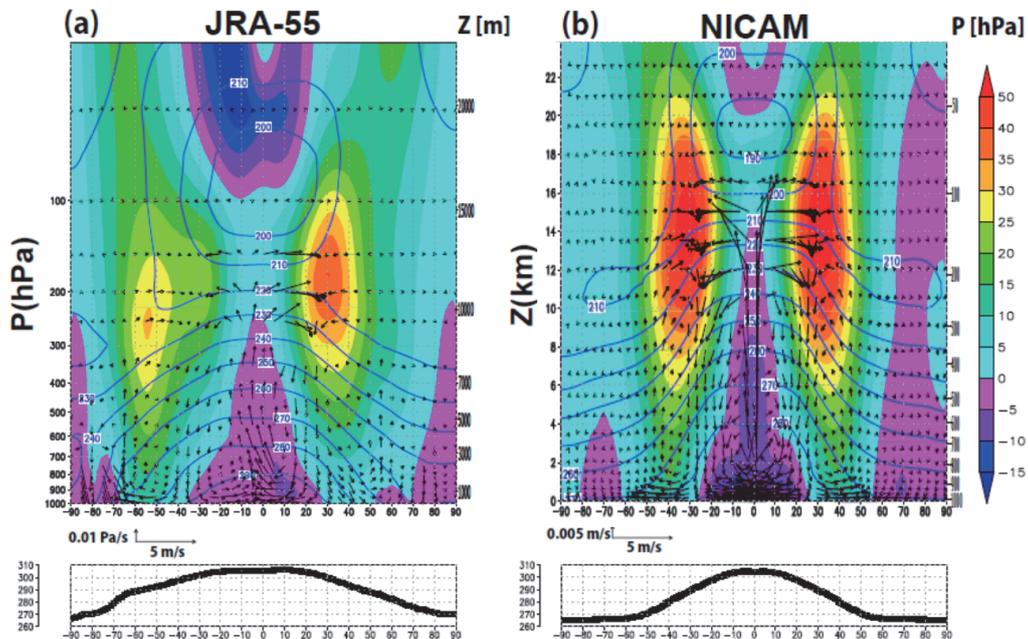
「気温減率」という物理量で眺めると、NICAMによるモデル結果とJRA-55の解析値ともほとんど $6.5\text{℃ km}^{-1}$ であった。さらに両者の場について詳しく見るために、双方の時間・東西平均の地上気温の南北分布と温度、東西風  $u$ 、南北風  $v$ 、NICAMの場合は鉛直流  $w$ 、JRA-55の場合は鉛直  $p$  速度の南北–高度分布を調べた（第11図）。JRA-55の場合は2009年から2013年までの時間平均である。これから、ほぼ同じような分布であるのが見て取れた。またNICAMの地上気温はほとんどSSTの値に対応すると考えられる。

気温に関して、両者とも赤道域から温帯域にかけての傾圧場が再現された。しかし細かく見れば違いがあり、例

理想化されたaqua-planetにおけるNICAMの結果とJRA-55のデータにより解析した対流圏における気温の鉛直分布と気温減率の特徴 (吉崎・高峯・伊賀・佐藤・高野・小宮山・酒井・宮田・森田・森泉)



第10図 JRA-55の2009–2013年5年間平均の1月、4月、7月、10月および年平均に関する (a) 熱帯域、北半球の (b) 乾燥域、(c) 温帯域、(d) 亜寒帯域における気温減率の鉛直分布。カラー線は (a) 図左上のカラーボックスの色に対応する。破線は $6.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ を示す。右側の $\triangleleft$ は域毎の対流圏界面の平均ジオポテンシャル高度を表す。



第11図 (a) JRA-55の2013年2月20日から4月20日までの間の時間と東西平均した (上図) 温度 (K; 実線), 東西風 ( $\text{m s}^{-1}$ ; カラー), 南北風 ( $\text{m s}^{-1}$ ; ベクトルの水平成分), 鉛直p速度 ( $\text{Pa s}^{-1}$ ; ベクトルの鉛直成分) の南北-ジオポテンシャル高度分布図と (下図) 1000hPaにおける気温の南北分布。 (b) は (a) と同じ。ただし、NICAMによる水惑星実験の結果で、上図は鉛直流 ( $\text{m s}^{-1}$ ; ベクトルの鉛直成分) と下図は高さ35mにおける気温である。

えば、赤道域の成層圏の極小値に着目すると、NICAMは190K以下であったのに対してJRA-55は200Kぐらいであった。またJRA-55では極付近の地上気温は南極大陸の存在のために南北差は大きかった。

東西風に関して、両者とも30~40度付近の緯度で対流圏上層には西風ジェットがあり、一般的には対応は良かった。しかし、NICAMの西風ジェットの強さの極大値は、JRA-55と比べてかなり大きかった。

子午面循環に関して、NICAMではハドレー循環とフェレル循環しか見られなかったのに対して、JRA-55では両半球にハドレー循環、フェレル循環、極循環の三つのセル構造があった。これは、大気大循環を駆動するためにNICAMの水惑星実験ではSSTの南北分布を与えたが、緯度60度より高緯度側ではSSTの傾度がゼロとしたために、実質この領域では大気を駆動する力が弱かったためと考えられる。

以上のように、用いたNICAMの境界値の設定を実際より単純化していたために、JRA-55の解析データと比べて異なる点が見られた。しかし、高緯度帯を除くと、対流圏内の気温分布および気温減率をみれば、両者とも同じ傾向を示していたことから、十分比較には耐えうるものと判断した。

## 5. 議論

これまで、JRA-55の解析とNICAMによる水惑星実験の結果から、対流圏内の気温の鉛直分布、標準偏差と最大値・最小値、気温減率について調べた。両者とも、南北方向には気温減率の鉛直分布はほとんど同じであること、そして高さ方向にはその値は一定値ではなく対流圏下部では小さく上部では大きいことが明らかになった。こうした特徴は対流圏内では普遍的な特徴であったと考えられる。そこで、「南北方向に気温減率の鉛直分布がほとんど同じである理由」と「鉛直方向の気温減率は対流圏下部では小さく上部では大きい理由とそのインパクト」について議論する。

### (1) 南北方向に気温減率の鉛直分布がほとんど同じである理由

静穏な状態で水平領域のあるところに対流が生じて降水が発生することを考える。降水があるところでは熱が発生して、鉛直方向の気温分布は大きな影響を受ける。では、その周りの水平方向にはどのような影響を与えるのだろうか。実際には降水域とそのまわりの非降水域で

は、降水量の大きさに比べて両者の温度差は小さく観測されるのが普通である（例えば、吉崎 1999）。その理由として、大気は安定成層をしているため、降水による温度変化は水平方向に中立波動という形で広がってゆくためと考えられる。

対流圏のほとんどの運動は安定成層と地球の自転によって支配される。地球の自転が効かないほど短時間で小規模な降水の場合は、線型論では鉛直モード毎に異なる水平速度を持つ重力波が熱源によって励起され周りに伝搬してゆく（例えば、Bretherton and Smolarkiewicz 1989, Nicholls et al. 1991）。そして、熱源の影響をうけた周りの場は熱源の場と同じような成層になってゆく。コリオリ力が一定と近似できる中程度の時間・空間スケールでは、熱源は慣性重力波と地衡風を励起して周りの場を調節する。さらに、大規模な時間・空間スケールになると、慣性重力波とロスビー波を励起して同じように調節が起こる。このように、ローカルに励起される熱源の影響は長時間かけて広く水平に広がってゆく。これが、対流圏内の気温分布が水平方向にほぼ同じである要因であると考えられる。

### (2) 鉛直方向の気温減率が対流圏下部では小さく上部では大きい理由とそのインパクト

これからは、温位 ( $\theta$ ) を使い、大気安定度  $N$  を用いて議論する。 $N$  の二乗は、 $N^2 = \frac{g}{\Theta} \frac{d\bar{\theta}}{dz}$  と表現される。ここで、 $g$  は重力加速度の大きさ、 $\theta$  は温位であり  $\theta = \Theta + \bar{\theta}(z) + \theta'(x, y, z, t)$  と書くことができる。 $\Theta$  は対流圏全領域の平均 (= 定数)、 $\theta$  の上付きバーは高さの関数、 $\theta'$  は  $\Theta$  および  $\theta$  の上付きバーからのずれを表す。対流圏の厚さを10km、中緯度帯における対流圏内の温位差を30K、代表的な温位  $\Theta$  を300Kとすると、 $N^2$  は  $10^{-4} \text{ s}^{-2}$  となり、中緯度帯の代表的な  $N$  の値は  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  となる。

対流圏下部で気温減率の値が小さいことは非常に強い安定成層であることを意味し、その場合の  $N$  の値は大きい。逆に、対流圏上部で気温減率の値が大きい（ただし乾燥断熱減率までは達しない）ことは中立成層に近い（弱い）安定成層であることを意味し、 $N$  の値は小さい。ただし、ここではすべて  $N$  は正值である。鉛直方向に気温減率が変化することは対流圏内における  $N$  が鉛直方向に変動することであり、そういう状態が全球規模で見られるというのである。

対流圏内で  $N$  の分布が鉛直変化する要因として、一つ

理想化されたaqua-planetにおけるNICAMの結果とJRA-55のデータにより解析した対流圏における気温の鉛直分布と気温減率の特徴(吉崎・高峯・伊賀・佐藤・高野・小宮山・酒井・宮田・森田・森泉)

に高度について雲(積乱雲)の存在頻度の違いが考えられる。雲が多く存在する領域では気温減率は湿潤断熱減率に近い値をとり、 $N$ は大きい値となりやすい。一方、雲が少ない領域では気温減率は乾燥断熱減率近くまで大きくなり、 $N$ は0に近づく。飛行機に乗って窓から見える風景を思い出せば、下層には雲が多くあるのに対して上層には雲が少ないという経験があるだろう。高さ方向の雲の存在の違いが長期間持続すると、対流圏下部では $N$ は大きく対流圏上部では $N$ は小さくなるということは十分考えられる。

対流圏内での気温減率の高さ方向の変動のインパクトを考えてみる。インパクトが大きい例として、理想化された水惑星実験の中で赤道域に発現する大規模雲群(降水系)の話題がある(Yoshizaki 2016)。東西方向に一樣なSSTの場合、ハドレー循環が卓越する赤道域では、速度約 $15\text{ m s}^{-1}$ で東進する大規模雲群がしばしば発現する。その東進のメカニズムをpositive-only wave CISKという熱源を用いた線型論を調べると、対流圏の $N$ が一定の場合には卓越する大規模雲群はほぼ停滞するのに対して、対流圏下部では $N$ が大きく上部では $N$ が小さい場合には大規模雲群は東進するのが見られた。理論計算では、対流圏の $N$ の値を一定とすることが多い。しかしながら、上記のように $N$ が一定の場合と $N$ が高さの関数である場合では結果が違ふことがあるので、注意が必要である。

$N$ が高さの関数であるのが主に降水現象によると考えると、降水過程をきちんと解像する必要がある。それに対して、雲を解像できない粗い水平解像の大循環モデルでは、降水の存在は湿度と気温と収束との関係で決めざるを得ない。現在気候時はJRA-55のような再解析データをもとに対流のパラメタリゼーションスキームを定式化することができる。しかし、例えば、地球温暖化時の気候研究では、現在気候時の対流のパラメタリゼーションスキームをそのまま使う訳にはゆかない。そうした場合、NICAMのような全球雲解像モデルを併用するのは一つの打開策となると考えられる。

## 6. 結論

JRA-55の再解析データとNICAMによる水惑星実験の数値結果を用いて、時間・東西平均した対流圏における南北別の気温の鉛直分布、その標準偏差・最大値・最小値、および気温減率について調べた。対流圏内の気温減率に関して南北方向にはほとんど同じであったのに対して、高さ方向に関して気温減率は一定値ではなく、対流

圏下部では小さく上部では大きい値を持っていた。こうした特性は普遍的であった。南北方向に気温減率の鉛直分布がほとんど同じであったのは、地球大気が安定成層しているからであり、たとえローカルに降水が生じてもその情報は中立波動によって水平方向に広く伝えられるためと考えられる。また対流圏内の気温減率が鉛直方向に対流圏下部では小さく上部では大きいのは、一つに雲の鉛直方向の存在頻度の違いによるものと考えられる。

## 注

1) 気温減率について、木村(2017)の議論がある。

## 引用文献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part 1. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Bretherton, C. and P. K. Smolarkiewicz 1989, Gravity waves, compensating subsidence and detrainment around cumulus clouds. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 740-759.
- 原田やよい・古林慎哉・大田行哉・海老田綾貴・守谷昌己・小野田浩克・大野木和敏・釜堀弘隆・小林ちあき・遠藤洋和, 2014: 気象庁55年長期再解析(JRA-55). *天気*, **61**, 269-275.
- Harada, Y., H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, S. Kobayashi, Y. Ota, H. Onoda, K. Onogi, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2016: The JRA-55 reanalysis: representation of atmospheric circulation and climate variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 269-302, doi: 10.2151/jmsj.2016-015.
- 伊賀晋一, 吉崎正憲, 佐藤正樹, 那須野智恵, 富田浩文, 安永数明, 2010: NICAM新コードを用いた全球水惑星実験. 日本気象学会春季大会講演予稿集, **97**, 76.
- 木村龍治, 2017: 対流圏の気温減率がなぜ $6.5\text{ K/km}$ なのか—エネルギー収支からの考察— *天気*, **64**, 147-156.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, doi: 10.2151/jmsj.2015-001.
- Manabe, S., and R. F. Strickler, 1964: Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 361-385.
- Nicholls M. E., R. A. Pielke, and W. R. Cotton, 1991: Thermally forced gravity waves in an atmosphere at rest. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1869-1884.
- 小倉義光, 1999: 一般気象学. 東京大学出版会, pp 314.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J.*

*Comp. Phys.*, **227**, 3487-3514.

Wallace, J. M. and P. V. Hobbs, 1977 : Atmospheric Science —An Introductory Survey—. *Academic Press*, pp 467.

吉崎正憲, 1999 : メソ対流系 (II) 天気, **46**, 833-841.

吉崎正憲・加藤輝之, 2007 : 豪雨・豪雪の気象学 朝倉書店, 187pp.

Yoshizaki, M., 2016 : Comparison of models having positive-only wave CISK with the NICAM outputs about eastward propagation of super clusters in the equatorial region. Part 1. Approach from a full model. *Bull. Geo-Environmental Sci.*, **18**, 1-15.

[http://ris-geo.jp/wp/wp-content/uploads/2016/04/201\\_ronbun\\_YOSHIZAKI.pdf](http://ris-geo.jp/wp/wp-content/uploads/2016/04/201_ronbun_YOSHIZAKI.pdf)

#### 参考動画

動画 1 : [http://rissho-es.jp/yoshizaki/publication/anim\\_caseB\\_p36\\_p5640\\_uv36\\_480.gif](http://rissho-es.jp/yoshizaki/publication/anim_caseB_p36_p5640_uv36_480.gif)

NICAMで60日間計算された高さ36mにおける気圧(カラー, hPa)と水平風(ベクトル), 高さ5640mにおける気圧(実線, hPa)の水平分布. なお, 本動画には地図が入っているが, じょう乱の動きをみるためのリファレンスのためである. また動画2と比べてじょう乱の動きが異なって見えるのは, 主に時間・空間の解像の違いのためである.

動画 2 : [http://rissho-es.jp/yoshizaki/publication/anim\\_JRA\\_p1000\\_p500\\_uv1000\\_20130221\\_20130420.gif](http://rissho-es.jp/yoshizaki/publication/anim_JRA_p1000_p500_uv1000_20130221_20130420.gif)

JRA-55の2013年2月21日から4月20日までの気圧1000hPaのジオポテンシャル高度(カラー, m)と水平風(ベクトル), 気圧500hPaにおけるジオポテンシャル高度(実線, m)の水平分布.

# Characteristic features of vertical profiles of temperature and lapse rate in the troposphere using data of aqua-planet NICAM results and JRA-55 analysis

YOSHIZAKI Masanori\*, TAKASAKI Yoshinori\*\*, IGA Shinichi\*\*\*  
SATO Masaki\*\*\*\*, TAKANO Karen\*\*\*\*\*, KOMIYAMA Yuya\*\*\*\*\*, SAKAI Eri\*\*\*\*\*  
MIYATA Manabu\*\*\*\*\*, MORITA Masaya\*\*\*\*\*, MORIIZUMI Shinichi\*\*

\* Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University  
\*\* Graduate School of Geo-environmental Science, Rissho University  
\*\*\* Research Organization for Information Science and Technology  
\*\*\*\* Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo,  
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology  
\*\*\*\*\* Japan Meteorological Association  
\*\*\*\*\* SET Software  
\*\*\*\*\* Graduate, Rissho University

## Abstract:

The vertical profiles of temperature and lapse rate in the troposphere are studied in the latitudinal direction with time and zonal mean data of NICAM aqua-planet results and five-year averaged JRA-55 analysis. It is found that (1) latitudinal variations of the vertical profiles of temperature are small, but (2) vertical variations are large; small (large) in the lower (higher) layer of troposphere. Physical reasoning of (1) small horizontal variations of lapse rates and (2) large vertical variation and its impact is discussed. It is suggested that horizontal propagation of neutral waves appeared in the atmosphere is responsible for the problem (1).

**Key words:** troposphere, lapse rate, NICAM, JRA-55