

# 準地衡風 2 層モデルを用いた中緯度大気循環の研究

河合 佑太

地球および惑星大気科学研究室

## 1. イントロダクション

大気大循環の研究の歴史は長いですが、数値実験を用いた定量的な研究が行われるようになったのは約半世紀前からである。その先駆的研究は Phillips(1956) によって行われ、「Phillips の数値実験」と歴史的に呼ばれる。

Phillips の数値実験は、3 つの子午面循環、中緯度における西風ジェット、地表の偏西風帯などといった当時知られていた対流圏の大気大循環の基本的な特徴を数値的に再現した。

本研究の意義は、Phillips の数値実験の再現を通して、中緯度大気循環のより深い理解と数値予報の基本技術を習得することである。

\* Phillips(1956) では、系のエネルギーサイクルにも注目している。本研究においても系のエネルギーサイクルを取り扱ったが、紙面の都合上ここでは触れない。

## 2. 支配方程式・境界条件

### [支配方程式]

準地衡風ポテンシャル渦度方程式

$$\frac{\partial q}{\partial t} + J(\psi, q) = \mathcal{H} + \mathcal{D}$$

ここで、 $q$  は準地衡風近似(およびベータ平面近似)におけるポテンシャル渦度である。

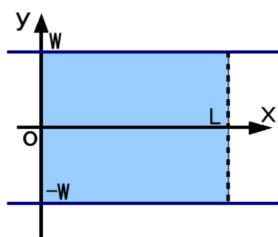
$$q = f_0 + \beta y + \nabla^2 \psi + f_0 \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{1}{S_0} \frac{\partial \Phi'}{\partial p} \right)$$

非断熱加熱の効果は、領域北半分で冷却・南半分で加熱となるような南北方向に線形な関数として与える。その比例定数は経験的に決定する。

散逸の効果としては、格子の解像度より小スケールの渦による効果と地表摩擦の効果を取り入れる。

水平方向・鉛直方向(2層)ともに格子点法によって、方程式を離散化する。予報方程式としては準地衡風ポテンシャル渦度方程式を用い、ポテンシャル渦度場の時間発展を計算する。なお、上の関係式からポテンシャル渦度場と流線関数場が関係付けられる。

### [系の設定と境界条件]



$P=0\text{hPa}$	$\omega=0$	0
$P=250$	$\psi_1$	1
$P=500$	$\omega_2$	2
$P=750$	$\psi_3$	3
$P=1000$	$\omega=0$	4

#### <水平方向>

- 南北幅 10000 km, 東西幅 6000 km の東西方向に開かれたチャンネルモデル。
- 境界条件として、東西境界に周期境界条件を課す。また、南北境界は剛体壁とし、滑りなし条件を課す。

#### <鉛直方向>

- 予報変数である地衡風の流線関数を 250 hPa, 750 hPa に配置する。温度と鉛直速度は、500 hPa において予報変数から診断的に求まる。
- 境界条件として、上端と下端で鉛直速度をゼロとする。

#### <記号の定義>

$H$ : 非断熱加熱の効果を表す項

$D$ : 散逸の効果を表す項

$J(A, B)$ : ヤコビ演算子

$p$ : 圧力

$t$ : 時刻

$\Phi'$ : ジオポテンシャルの静水圧場からのずれ

$\psi$ : 地衡風の流線関数

$$\psi = \Phi' / f_0$$

$f$ : コリオリパラメータ。ただし、ベータ平面近似を課しているので、

$$f = f_0 + \beta y$$

$S_0$ : 静的安定度

## 4. 数値実験の結果と考察

### [数値実験 1 終了時]

- 領域の南北温度差は約 60 度に達する。
- 弱い直接循環セルが生成される。
- 250 hPa 面では領域全体で西風であり、1000 hPa 面では弱い東風である。ともに領域の中心で極値を持つ。

### [数値実験 2]

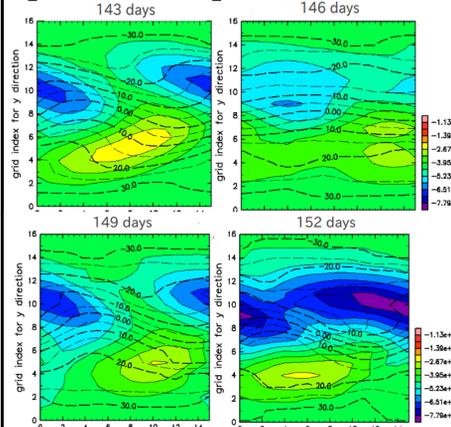


図1: 数値実験 2 の13, 16, 19, 22 日目における 1000 hPa 面の流線関数(m<sup>2</sup>/s)と 500 hPa 面の温度偏差(K)分布

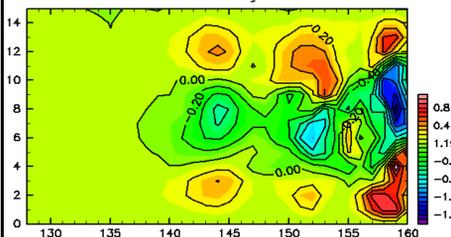


図2: 250hPa面における南北速度(m/s)の帯状平均場の時間的な変化(平均子午面循環の時間変化に対応)。縦軸は南北方向のインデックス。

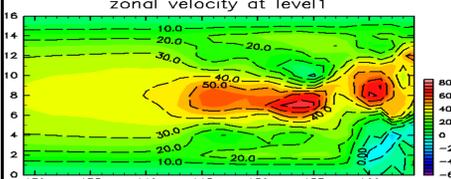


図3: 250 hPa面(上図), 1000 hPa面(下図)における帯状流(m/s)の時間的な変化。縦軸は南北方向のインデックス。

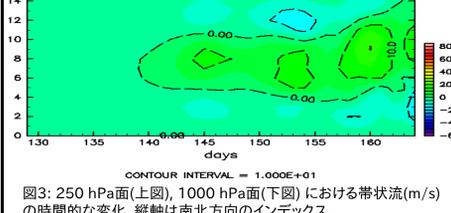


図4: 500hPa面における温度偏差(K)の帯状平均場の擾乱挿入後からの変化の積算。縦軸は南北方向のインデックス。

#### <渦について(図1)>

- 小規模な渦は数値実験2 開始から1週間で減衰する。
- その後、1500 km/day で東へ移動する波数1の傾圧波が卓越してくる。
  - 地表低気圧の前面で北向きの暖気の移流、後面で南向きの寒気の移流
  - 温度場と風の場の位相が近づくと、地表の低・高気圧は発達
  - 地表のトラフとリッジは北半分でNW-SE, 南半分でNE-SW に傾く。

#### <平均子午面循環について(図2)>

- 擾乱を入れてしばらくは一つの弱い直接循環セル。
- 期間中頃から領域中心で間接循環、その南側北側で直接循環の循環構造が明確になってくる。

#### <帯状流について(図3)>

- 250 hPa 面: 領域中心に約 80 m/s の強い西風ジェットが形成される。
- 1000 hPa 面: 最初は領域全体で弱い東風。期間後半から領域中心付近で西風、南側北側で東風のパターンに変化する。
- 運動量収支の解析によれば、..
  - 250 hPa 面: 大規模な渦の効果によって、正の運動量が領域中心に運ばれる。平均子午面循環の効果はこれと相補的であり、大規模な渦による運動量変化を抑制する。
  - 750 hPa 面: 風の分布は平均子午面循環の応答であるが、地表面摩擦がその運動量変化を抑制する。

#### <温度の帯状平均場について(図4)>

- 擾乱を入れてしばらくは、南北温度差は増加し続ける。
- 期間中頃から、南北境界間の温度差は小さくなる一方で、領域中心付近の南北温度勾配は大きくなる。
- 熱収支の解析によれば、..
  - 大規模な渦による北側への熱輸送によって、南北温度差は小さくなる。
  - 平均子午面循環の効果は、領域の北側と南側で非断熱加熱による温度変化を打ち消す。一方で、領域中心では南北温度勾配を大きくする。

## 3. 数値実験の手順

### [数値実験 1 (初期場づくり)]

- 静止大気(等温大気)から開始する。
- 帯状平均した予報方程式を、130 日間時間積分する。
  - 130 日後には領域の南北温度差が約 60 度に達する。

### [数値実験 2 (本実験)]

- 数値実験 1 終了時の流線関数場に、ランダムで小さな擾乱を挿入する。
  - 平均流に対し、約 20 % の運動エネルギーを持つ擾乱を挿入する。また 250・750 hPa 面で同じ擾乱場を挿入する。
- 完全な予報方程式を、30 日間時間積分する。
  - 約30日程で非線形不安定により数値実験を継続できなくなる。

### [数値実験に用いた主要なパラメータ]

- 格子点法に伴う水平方向の格子刻み幅  
東西方向:  $\Delta x = 375$  km, 南北方向:  $\Delta y = 625$  km
- 時間積分に伴う時間刻み幅  
 $\Delta t = 30$  分

## 5. 結論

- 本研究では、大気大循環の数値実験として先駆的な研究である「Phillipsの数値実験」を再現した。
- Phillips(1956) の結果と同様に、対流圏の大気循環を特徴付ける地表の東西風分布、中緯度に存在する西風ジェット、3つの循環セル構造が確認された。
- 中緯度に発生する傾圧波の果たす役割は重要である。
  - 東西風分布・西風ジェットを形成・維持するための運動量輸送
  - 地球が獲得する正味の放射エネルギーの過不足を埋めるための南北熱輸送

## 6. 参考文献

- Charney, J.G., FJØRTOF, R., von Neumann, J., 1950: Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation. *Tellus*, 2, 237-254.
- Haltiner, G.J., Williams, R.T., 1979: Numerical prediction And Dynamics meteorology, 2nd ed. *John Wiley & Sons*, 477pp.
- Holton, J.R., 2004: An introduction to dynamic meteorology, Fourth Edition, *The Geophysics Series*, 48, 535pp
- Lewis, M. J., 1998: Clarifying the Dynamics of the General Circulation: Phillips's 1956 Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 39-60.
- Pedlosky, J., 1987: *Geophysical Fluid Dynamics*, 2nd edn. *Springer-Verlag, New York*, 710 pp
- Phillips, N.A., 1956: The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment. *Quart. J.Roy. Meteor. Soc.*, 82, 123-164.
- 小倉義光, 1978: 気象力学通論. 東京大学出版会, 249 pp
- 岸保勘三郎, 田中正之, 時岡 達志, 1982: 大気大循環. 大気科学講座. 東京大学出版会, 256 pp
- 田原智志, 2001: 単純化したモデルを用いた, 大気大循環に関する数値的研究
- 新田尚, 二宮洗三, 山岸米次郎, 2009: 数値予報と現代気象学. 東京堂出版, 224 pp
- 増田善信, 1981: 数値予報 -その理論と実際-. 東京堂出版, 278 pp