

Nakajima et al., 1992 test
program
コード解説

大西 将徳 (神戸大学理学研究科)

平成 24 年 11 月 9 日

目次

第1章	この文書について	1
第2章	コードの概要	2
2.1	変数, 定数の命名法について	2
2.1.1	基本ルール	2
2.1.2	変数, 定数の例	2
2.2	グリッドの与え方について	3
2.2.1	物理量の配置	3
2.3	関数	4
2.3.1	func_MoistAd()	4
2.3.2	func_OptDep()	5
2.3.3	func_Flux()	6
2.4	サブルーチン	6
2.4.1	calc_AdiabLapse()	6
2.4.2	calc_RaiseTemp()	7
2.4.3	calc_Tropopause()	8
2.5	プログラムの流れ	10
第3章	入出力とコンパイル	11
3.1	計算条件の入力について	11
3.2	計算結果の出力について	12
3.2.1	netCDF 出力	12
3.2.2	テキストデータ出力	13
3.3	コンパイルについて	13
第4章	その他	14
4.1	グリッドと物理量の配置について	14

第1章 この文書について

この文書は, 作者(大西)が、放射計算の勉強(放射対流平衡、数値計算、fortran プログラミング)のために作成した、Nakajima et al., 1992 の放射対流平衡計算を再現するテストプログラムのプログラム構造とソースコードについて解説したものである。大西自身、または放射計算の初学者(大学院生など)が、コードの内容を確認するための最低限の情報をまとめることを目的としている。

第2章では、プログラムの全体構造とソースコード中の変数や関数、サブルーチンなどについて記す。第3章では、計算条件、計算結果の入出力に関して記す。

第4章では、プログラム作成にあたって議論のあった点、テスト計算で検討が必要と思われた件について記す。

第2章 コードの概要

2.1 変数、定数の命名法について

モデル中の主要な変数の命名法は `demodel` プログラミングガイドライン

<http://www.gfd-dennou.org/library/demodel/coding-rules/demodel-coding-rules.htm>

を基本としている。

2.1.1 基本ルール

配列型の変数名の基本形は `demodel` プログラミングガイドラインに準拠し、以下のようになる。

(次元情報に関する接頭詞)_(物理的意味)

なお、本プログラムでは鉛直 1 次元の系を考えているため、次元情報に関する接頭辞は `z` のみである。

2.1.2 変数、定数の例

上記の規則に基づく変数の例を示す。

- 1 次元配列である座標データの例
 - `z_Press` : 圧力 [Pa]
 - `z_Temp` : 気温 [K]
 - `z_OptDep` : 光学的厚さ

– `z_RadLUwFlux` : 上向き長波放射フラックス [W m^{-2}]

- 物理定数の例

- `GasRUniv`: 気体定数 ($= 8.314 \text{ [J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}]$)
- `StB`: ステファンボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-4}]$)
- `MolWtDry`: 乾燥空気の平均分子量 [kg mol^{-1}]
- `CpDry`: 乾燥空気の定圧比熱 [$\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$]
- `AbsCoefWetCom`: 非凝結性気体の吸収係数 [$\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$]

2.2 グリッドの与え方について

モデル中の鉛直レベルの与え方について述べる。

2.2.1 物理量の配置

圧力 (`z_Press`)、温度 (`z_Temp`)、光学的厚さ (`z_OptDep`)、上向きフラックス (`z_RadLUwFlux`)、下向きフラックス (`z_RadLDwFlux`) はグリッド上に配置する。Flux Convergence (`z_FluxConv`) はグリッドの間、`layer` に対して与えられる。

```

k = 1    -----  大気上端
          :
k = i    -----  z_Press(i), z_Temp(i), z_OptDep(i), z_RadLUwFlux(i), z_RadLDwFlux(i)
          :
          z_FluxConv(i)
          :
k = i+1  -----
          :
k = kmax -----  地表面

```

- `z_Press` : 圧力 [Pa]

圧力に対して等間隔、または、圧力の対数に対して等間隔になるようにグリッドを配置する (デフォルトは圧力の対数に対して等間隔になるようにグ

リッドが配置される)。地表での非凝結性気体の圧力、地表面温度から計算される地表での凝結性気体の圧力から地表の全圧力が計算される。大気上端の圧力は地表での圧力に対する割合として与えることができる (デフォルトでは 10^{-5})。

- `z_Temp` : 気温 [K]
グリッド上での温度として与えられる。
- `z_OptDep` : 光学的厚さ
配置されたグリッドより上空の光学的厚さが与えられる。
- `z_RadLUwFlux` : 上向き長波放射フラックス [W m^{-2}]
配置されたグリッドより下の層からやってくる上向きフラックスが与えられる。最も下層のグリッドでは、地表からの上向き長波放射となる。
- `z_RadLdwFlux` : 下向き長波放射フラックス
配置されグリッドより上の層からやってくる下向きフラックスが与えられる。最も上のグリッドより上には大気がないため、 $z_RadLFlux(1) = 0$ となる。
- `z_FluxConv` : FluxConvergence
$$z_FluxConv(k) = z_RadLUwFlux(k+1) - z_RadLUwFlux(k) - (z_RadLDwFlux(k+1) - z_RadLDwFlux(k))$$
として、定義される。

2.3 関数

モデル中の関数について述べる。

2.3.1 `func_MoistAd()`

湿潤断熱減率の関数

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{moist\ pseudoadiabat} = \frac{\frac{RT}{pc_{pn}} + \frac{x_v}{x_n} \frac{l}{pc_{pn}}}{x_n + x_v \frac{c_{pv}}{c_{pn}} + \frac{x_v}{x_n} \frac{l^2}{RT^2 c_{pn}}} \quad (2.1)$$

```
func_MoistAd( GasRUniv, LatentHeat, CpDry, CpWet, pv0, z_Press, z_Temp )
```

- 引数

- GasRUniv : 気体定数
- LatentHeat : 潜熱
- CpDry : 定圧モル比熱 (非凝結性気体)
- CpWet : 定圧モル比熱 (凝結性気体)
- pv0 : 飽和蒸気圧曲線の係数
- z_Press : 圧力
- z_Temp : 気温

2.3.2 func_OptDep()

光学的厚さの関数

$$\frac{d\tau}{dp} = \frac{k_v x_v m_v + k_n x_n m_n}{\bar{m}g} \quad (2.2)$$

```
func_OptDep( GasRUniv, LatentHeat, Grav, MolWtDry,
MolWtWet, AbsCoefDryCom, AbsCoefWetCom, pv0, z_Press, z_Temp )
```

- 引数

- GasRUniv : 気体定数
- LatentHeat : 潜熱
- Grav : 重力加速度
- MolWtDry : 分子質量 (非凝結性気体)
- MolWtWet : 分子質量 (凝結性気体)
- AbsCoefWetCom : 吸収係数 (非凝結性気体)
- AbsCoefDryCom : 吸収係数 (凝結性気体)
- pv0 : 飽和蒸気圧曲線の係数
- z_Press : 圧力
- z_Temp : 気温

2.3.3 func_Flux()

Flux を計算するための関数

$$A = \frac{3}{2}\pi B(\tau') \exp\left(-\frac{3}{2}(\tau' - \tau)\right) \quad (2.3)$$

func_Flux(paiBkk, taukk, tauk)

- 引数

- paiBkk : 放射輝度 ($= \sigma T^4$)
- taukk, tauk : 光学的厚さ

2.4 サブルーチン

モデル中のサブルーチンについて述べる。

2.4.1 calc_AdiabLapse()

湿潤断熱減率で温度、フラックスを計算するサブルーチン温度は4段のルンゲクッタ法、光学的厚さは台形法を用いて鉛直積分を行う。

calc_AdiabLapse(GasRUniv, StB, LatentHeat, Grav, MolWtDry, MolWtWet, AbsCoefDryCom, AbsCoefWetCom, p_v_0, CpWet, CpDry, eps, kmax, z_Press, knum, z_Temp, z_OptDep, z_RadLUwFlux, z_RadLDwFlux, z_FluxConv)

- 引数

- GasRUniv : 気体定数
- StB : ステファンボルツマン定数
- LatentHeat : 潜熱
- Grav : 重力加速度

- MolWtDry : 分子質量 (非凝結性気体)
- MolWtWet : 分子質量 (凝結性気体)
- AbsCoefWetCom : 吸収係数 (非凝結性気体)
- AbsCoefDryCom : 吸収係数 (凝結性気体)
- pv0 : 飽和蒸気圧曲線の係数
- CpDry : 定圧モル比熱 (非凝結性気体)
- CpWet : 定圧モル比熱 (凝結性気体)
- eps: 計算精度 (温度、光学的圧さ、フラックス)
- kmax: 鉛直グリッド数
- z_Press : 圧力
- z_Temp : 気温
- z_OptDep: 光学的厚さ
- z_RadLUwFlux: 上向き長波フラックス
- z_RadLDwFlux: 下向き長波フラックス
- z_FluxConv: Flux Convergence

2.4.2 calc_RaiseTemp()

Flux Convergence の値と大気の熱容量から、成層圏の温度を上昇させるサブルーチン。温度の上昇は下式による。

$$\Delta T = \frac{mg}{c_p} \frac{FluxConv.(k)}{(p(k+1) - p(k))} \delta t \quad (2.4)$$

```
calc_RaiseTemp( GasRUniv, StB, LatentHeat, Grav, MolWtDry, MolWtWet,
  AbsCoefDryCom, AbsCoefWetCom, p_v_0, CpWet, CpDry,
  eps, DelTime, kmax, ktp, knum, z_Press,
  z_Temp, z_OptDep, z_RadLUwFlux, z_RadLDwFlux, z_FluxConv )
```

● 引数

- GasRUniv : 気体定数

- StB : ステファンボルツマン定数
- LatentHeat : 潜熱
- Grav : 重力加速度
- MolWtDry : 分子質量 (非凝結性気体)
- MolWtWet : 分子質量 (凝結性気体)
- AbsCoefWetCom : 吸収係数 (非凝結性気体)
- AbsCoefDryCom : 吸収係数 (凝結性気体)
- p_v_0 : 飽和蒸気圧曲線の係数
- CpDry : 定圧モル比熱 (非凝結性気体)
- CpWet : 定圧モル比熱 (凝結性気体)
- eps: 計算精度 (温度、光学的圧さ、フラックス)
- DelTime: タイムステップ
- kmax: 鉛直グリッド数
- ktp: 対流圏界面のグリッド
- knum: 積分計算のための作業変数
- z_Press : 圧力
- z_Temp : 気温
- z_OptDep: 光学的厚さ
- z_RadLUwFlux: 上向き長波フラックス
- z_RadLDwFlux: 下向き長波フラックス
- z_FluxConv: Flux Convergence

2.4.3 calc_Tropopause()

対流圏界面の計算をするためのサブルーチン。Flux Convergence が負から正に変化するグリッド (地表から上空へ向かって) を挟んで、上下の層の中に対流圏界面が存在する。その上下の層をそれぞれ 2 つに分割し、新しくできた 4 つの層について、改めて Flux Convergence が負から正に変化するグリッドを探す。この操作を繰り返し、Flux Convergence が負から正に変わるグリッドの上下の層の Flux Convergence が十分小さくなったとき、そのグリッドを対流圏界面とする。

```
calc_Tropopause( GasRUniv, StB, LatentHeat, Grav, MolWtDry, MolWtWet,
  AbsCoefDryCom, AbsCoefWetCom, p_v_0, eps, kmax,
  z_Press, z_Temp, z_OptDep, z_RadLUwFlux, z_RadLDwFlux, z_FluxConv,
  val_tropo )
```

- 引数

- GasRUniv : 気体定数
- StB : ステファンボルツマン定数
- LatentHeat : 潜熱
- Grav : 重力加速度
- MolWtDry : 分子質量 (非凝結性気体)
- MolWtWet : 分子質量 (凝結性気体)
- AbsCoefWetCom : 吸収係数 (非凝結性気体)
- AbsCoefDryCom : 吸収係数 (凝結性気体)
- p_v_0 : 飽和蒸気圧曲線の係数
- CpDry : 定圧モル比熱 (非凝結性気体)
- CpWet : 定圧モル比熱 (凝結性気体)
- eps: 計算精度 (温度、光学的圧さ、フラックス)
- kmax: 鉛直グリッド数
- z_Press : 圧力
- z_Temp : 気温
- z_OptDep: 光学的厚さ
- z_RadLUwFlux: 上向き長波フラックス
- z_RadLDwFlux: 下向き長波フラックス
- z_FluxConv: Flux Convergence
- val_tropo: 対流圏界面の物理量 (val_tropo(1,2,3,4,5,6,7)=(圧力, 温度, 光学的厚さ, 上向きフラックス, 下向きフラックス, 上の層の Flux Convergence, 下の層の Flux Convergence))

2.5 プログラムの流れ

Nakajima et al., 1992 test program が必要とする入力ファイルは初期値ファイル (namelist) である。出力ファイルとしては、netCDF フォーマットのデータと、テキスト形式のデータを出力することができる。どちらも最終的な温度分布だけでなく、放射平衡に達するまでのヒストリーデータも出力することができる。

モデルの基本的な流れは以下のようなものである。

1. 初期値設定
2. 湿潤断熱減率に従って上空まで温度、Flux を計算 (calc_MoistAd)
3. 対流圏界面の計算 (calc_Tropopause)
4. 対流圏界面を挿入
5. 圏界面水蒸気混合比で飽和
6. 光学的厚さの計算
7. 放射平衡計算 (以下の過程をループ)
 - (a) 加熱 (calc_RaiseTemp)
 - (b) 圏界面の計算 (calc_Tropopause)
 - (c) 圏界面の移動
 - (d) 収束判定
 - (e) 圏界面の計算 (calc_Tropopause)
 - (f) 圏界面移動

第3章 入出力とコンパイル

3.1 計算条件の入力について

Nakajima et al., 1992 test program は計算条件を namelist ファイル (nakajima_RadiatConvEqModel.nml) から読み込む。

namelist ファイルから読み込まれるのは、以下のものである。() 内はデフォルト値である。

- MolWtDry: 乾燥大気のア平均分子量 (0.0180 [kg mol⁻¹])
- CpDry: 乾燥大気のア定圧比熱 (29.0990 [J mol⁻¹ K⁻¹])
- MolWtWet: 凝結成分のア平均分子量 (0.0180 [kg mol⁻¹])
- CpWet: 凝結成分のア定圧比熱 (33.2560 [J mol⁻¹ K⁻¹])
- AbsCoefWetCom: 凝結成分のア吸収係数 (0.01 [m² kg⁻¹])
- AbsCoefDryCom: 非凝結成分のア吸収係数 (0.0 [m² kg⁻¹])
- SurfTemp: 地表面温度 (300.0 [K])
- Humidity: 相対湿度 (1.0 [1])
- p_n_s: 非凝結大気のア地表での圧力 (100000.0 [Pa])
- sigma_min: 大気上端での圧力のア大きさ (地表に対する割合) (0.000010 [1])
- kmax: 鉛直総数 (500)
- changeP: 格子点設定: grid の並べ方 (圧力等間隔: 1, ln(圧力) 等間隔: 2) (2)
- DelTime: タイムステップ (1000000.0 [s])

- eps: 計算精度 (温度、光学的厚さ、フラックス) (0.0000010)
- eps_FluxConv: 計算精度 (放射平衡の収束) (0.00010)

尚、ここに挙げない物理量 (気体定数、潜熱など) はプログラムコード中に書かれている。また、データの出力に関する変数もプログラム中に書かれており、変更する場合はその部分を変更する必要がある (次節参照)。

3.2 計算結果の出力について

Nakajima et al., 1992 test program は出力データを netCDF フォーマットとテキスト形式で出力することができる。

出力するのは以下の物理量である。

1. 圧力 (pressure [Pa])
2. 温度 (temperature [K])
3. 光学的厚さ (optical depth [1])
4. 上向き放射フラックス (longwave upward flux [W m^{-2}])
5. 下向き放射フラックス (longwave downward flux [W m^{-2}])
6. FluxConvergence (flux convergence [W m^{-2}])

3.2.1 netCDF 出力

以下の3つのデータを出力することができる。

1. RCEMnetCDF_initial.nc: 湿潤断熱減率に従って上空まで計算した鉛直分布
2. RCEMnetCDF_run.nc: 放射対流平衡計算のヒストリー
3. RCEMnetCDF_final.nc: 放射対流平衡に至った鉛直分布

尚、これらはプログラムコード中の変数

1. OutNetCDF_initial
2. OutNetCDF_run
3. OutNetCDF_final

をそれぞれ (.true.) にすることでデータは出力される。デフォルトでは (.true.) となっている。(出力しない場合は (.false.) とする)

3.2.2 テキストデータ出力

テキストデータ出力は、放射平衡計算のヒストリーと、最終結果を同一のファイルで出力する。

ファイル名は output_RCEM.d、出力の可否を決める変数は OutText である。

3.3 コンパイルについて

Nakajima et al., 1992 test program は netCDF フォーマットのデータ出力のために、gtool5 のライブラリを使用している。そのためコンパイルする前に、gtool5 のインストールが必要である。gtool5 のインストールについては下記参照。

<http://www.gfd-dennou.org/arch/gtool/gtool5.htm>

インストール後は

```
$ gt5frc nakajima_RadiatConvEqModel.f90
```

でコンパイルすることができる。

第4章 その他

4.1 グリッドと物理量の配置について

Nakajima et al., 1992 test program は 2.2.1 節で述べたように、温度はグリッド上に、Flux Convergence は Layer に対して計算される。

```

k = 1    -----  大気上端
          :
k = i    -----  z_Press(i), z_Temp(i)

                          FluxConv(i)

k = i+1  -----
          :
k = kmax -----  地表面

```

そのため Flux Convergence の大きさに従って温度を上昇させる場合に、layer に対して与えられた温度上昇率から、グリッド上で定義された温度を上昇させている。具体的には、温度が定義されたグリッドの上下の層の温度上昇分を半分ずつ足すことで温度を上昇させている。

```

k = 1    -----  大気上端
          :
k = i-1  -----

                          z_FluxConv(i-1), delTemp(i-1)

k = i    -----  z_Temp(i)

```



```
z_FluxConv(i), delTemp(i)
```

```
k = i+1 -----
```

```
      :
```

```
k = kmax ----- 地表面
```

```
z_Temp(i) = z_Temp(i) + (delTemp(i-1) + delTemp(i))/2
(delTemp(i): z_FluxConv(i) から計算された温度の上昇分)
```

ただし、大気上端では以下のように与える。

```
z_Temp(1) = z_Temp(1) + delTemp(1)
```

温度をグリッドで与え、温度上昇を layer に対して計算するという、'ずれ'のために、このまま温度を上昇させると、上下のグリッドで温度の大小が連続する鉛直分布が実現してしまうことが、明らかとなった。このため、本プログラムではこのような温度分布が生じないように、プログラム上の制約を課して温度上昇をさせている。それは、'隣り合うグリッドの Flux Convergence が正から負になる場合 (地上方向から上空方向へ) は温度を変化させない' というものである。これにより、温度の大小が連続するこをは抑えられた。ただし、対流圏界面付近ではそのような現象が生じる場合がある。