

## 2020年度 数値モデリング演習（川島 担当分） 第2回

### 第2回目 内容：山岳波, Kelvin-Helmholtz 不安定

#### 準備

前回同様、各自、自分（以下では user maro）のホームに適当なディレクトリ（以下では model-enshu）を作り、川島のホームの public/model-enshu20/から以下の必要なプログラムと、同名の GrADS の ctl ファイルなどをコピーする（コピーの際、最後のピリオドを忘れないこと）

```
[home/maro/model-enshu/%] cp ~kawasima/public/model-enshu20/mtwave.f .
[home/maro/model-enshu/%] cp ~kawasima/public/model-enshu20/KHwave.f .
[home/maro/model-enshu/%] cp ~kawasima/public/model-enshu20/mtwave.ctl .
[home/maro/model-enshu/%] cp ~kawasima/public/model-enshu20/KHwave.ctl .
[home/maro/model-enshu/%] cp ~kawasima/public/model-enshu20/cbar.gs .
```

今回使用するプログラムは以下の通り

```
mtwave.f
KHwave.f
```

前回使ったプログラムとほぼ同じです。各予報変数などの意味はプログラムの冒頭に記してある。ただし、温位は前回と異なり、初期場からの偏差(perturbation)ではなく、温位そのもの(perturbation+basic) で出力している。

### 1. （擬似）山岳波

```
PARAMETR (IFDRY=1) ! DRY SIMULATION 雲物理量などの計算はしない。
グリッドサイズ dx=1000m, dz=500m
z方向に60 grid 取っています。
40step=120sec=2min 毎にデータを出力。
成層は全層同じ安定度になっています。(CNB0, CNB1,CNB2=1e-4)
```

このモデルは地形が入っていないので、以下のようなSIN関数型の鉛直運動量強制をモデル中央部下層に与え、山岳波（状の）擾乱を作っています。

303行目付近 : 強制の設定

```
C***** MOMENTUM FORCING TO REPRESENT MOUNTAIN EFFECT
```

```
CMF=-0.05
```

```
DO 80 K=1,3
```

```
DO 80 I=ICENT-5, ICENT+5
```

```
WFORCE(I,K)=CMF * SIN(PI*(I-ICENT)/5.0)
```

```
80 CONTINUE
```

532 行目付近 : 強制を入れて時間積分

```
WF(I,K)=WP(I,K)+DELTAW(I,K)*DT*2.0
*      +WFORCE(I,K)*DT*2.0
```

mtwave.f をコンパイルして実行し、GrADSで結果を見てみる.

```
[/home/maro/model-enshu/] f77 -o mtw.out mtwave.f
[/home/maro/model-enshu/] ./mtw.out
[/home/maro/model-enshu/] grads
ga-> open mtwave.ctl
ga-> set t 31
ga-> d w      ! 鉛直流の表示
ga-> d pt     ! 温位の表示
ga> run cbar.gs ! カラーバーの表示
ga-> d u;w    ! 風ベクトルの表示
```

各物理量の分布を見てみることに。 (ctl ファイルには雲物理量も入っていますが、dry-simulationなので、水物質は計算されてません。

\*ある程度時間がたつと上部境界で入射波と反射波が共鳴して振幅が大きくなる。通常の実験では上部には波の吸収層 (sponge layer) を設けたり、波が上部境界から抜けるような境界条件を使う。

### [課題 2-1] 波の風速、山岳のスケール依存性について

基本場の水平風速  $U_0(I,K)$  (z-方向にconstant) の値を変えて、波の鉛直波長がどう変わるか確認せよ。また、運動量強制の水平スケール (=山岳の幅) を変えて実験してみよ。

参考) 非静力学の場合の重力波の位相速度 ( $k,m$ は水平・鉛直波数)

$$(C_{px}, C_{pz}) = \left( \frac{\pm N}{\sqrt{k^2 + m^2}}, \frac{\mp kN}{m\sqrt{k^2 + m^2}} \right)$$

定在波なら、 $C_{px}=U$ 、水平波数は山岳の水平スケールで変わらないので、 $U$ が変われば鉛直波数(波長)が変わります。

$U$ に対し山岳の水平スケール $L$ が十分小さくなる (あるいは $U$ が十分大きくなる) と、波は鉛直伝播しなくなる。

Parcelが山を通過する時間 (Advection time)  $=L/U$

浮力振動周期  $=2\pi/N$

$L/U < 2\pi/N$  となると、浮力振動でなく、advectionによる変化が卓越し、山岳に対し対称的、かつ高さとともに減衰する擾乱になる。  $U=20\text{m/s}$ ,  $MWIDTH=3$ として実験してみ

よ。

**[課題2-2]** 運動量フラックス、臨界高度 (Critical level) について

$U_0(I,K)$ を上空でシアを持つようなプロファイルに変え、波の鉛直伝播が変わる様子を確認せよ。

例

```

DSHEAR=2500.          ! 鉛直shear zoneの深さ
USHEAR=-15.0         ! 風速差
HSHEAR=15000.0       ! 鉛直シア層の中心の高度
DO 60 K=1,KMD+1
DO 60 I=1,IMD+1
U0(I,K)=10.0+USHEAR*(1.0+tanh((H0(K)-HSHEAR)/DSHEAR))/2.0

```

60 CONTINUE

```
ga->set t 31          ! (=1時間後)
```

```
ga->d w
```

波のパターンを確認すること。アニメーションでも見てみることに。

以下は運動量フラックスを求めるための偏差量の計算

```
ga->set t 1 61
```

```
ga->define ud=u-ave(u,x=1,x=100)      ! 水平風速の擾乱成分を定義
```

```
ga->define wd=w-ave(w,x=1,x=100)      ! 鉛直風速の擾乱成分を定義
```

これから、運動量フラックス  $\overline{u'w'}$  (=ave(ud\*wd, x=1,x=100)) の時間-高度断面を作ってみよ。

## 2. Kelvin-Helmholtz 波の実験

モデルはx-方向には周期境界条件にしている。

初期場の風は以下でtanh型で与えている。(282行目以降)

```
C***** SET INITIAL WIND PROFILE
```

```
DSHEAR=200.
```

```
USHEAR=10.0
```

```
HSHEAR=6000.
```

DSHEARは シア層の厚さを与えるパラメータ

USHEARは シア層を挟んだ上下の層の風速差の半値

HSHEARは シア層の中心の高度である。

成層はCNB0, CNB1, CNB2でブラントバイサラ振動数の2乗を与えている。

```
[/home/maro/model-enshu/] f77 -o khw.out KHwave.f
```

```
[/home/maro/model-enshu/] ./khw.out
```

```
[/home/maro/model-enshu/] grads
```

```
ga-> open Khwave.ctl
```

```
ga-> d pt          ! 温位の表示
```

```
ga-> d u;w        ! 風ベクトルの表示
```

```
ga-> d vor       ! 水平渦度 (=du/dz-dwdx) の表示
```

```
ga-> d ri       ! 初期場のRichardson number の表示
```

```
ga-> set x 1
```

```
ga->set t 1 61
```

```
ga->d ave(u,x=1,x=100)      ! 水平風速の東西平均値の表示
```

から、KH不安定波ができることにより、平均流の鉛直シアが弱まることがわかる。

### [課題2-3]

平均流から擾乱への運動エネルギー変換は $-\overline{u'w'dU/dz}$  で与えられる。ここで $u'$ ,  $w'$ はそれぞれ水平風、鉛直風の水平平均からの偏差、 $U$ は水平平均水平風

```
ga->set t 1 61
```

```
ga->define ud=u-ave(u,x=1,x=100)      ! 水平風速の東西平均値からの偏差を定義
```

```
ga->define wd=w-ave(w,x=1,x=100)
```

により、偏差量を定義し、擾乱の運動エネルギー $(u'^2 + w'^2)/2$ , 運動量フラックス $\overline{u'w'}$ の時間-高度断面を作って、擾乱の構造との関係について考察せよ。

### [課題2-4]

defaultの設定では、Kelvin-Helmholtz 不安定が起こる条件 ( $Ri < 0.25$ ) を満たしている。

ここで $Ri$ はリチャードソン数で

$$Ri = N^2 / (dU / dz)^2$$

モデル中では $N^2 = CNB1$ としている。

Uのプロファイルを変えて実験し、結果を見てみよ。特に、**USHEAR=5** としたときの水平渦度の時間変化、また、**USHEAR=15** とした実験結果をdefaultの結果と比較してみよ。