

雲水量について

1. 実験概要

観測から知られているように、雲は地球のエネルギー収支に影響を与える。また同様に、地球以外の水惑星や、水以外にも、相変化を伴う物質をもつ大気をもつ惑星であれば、エネルギー収支は雲の存在に強く影響されると考えられる。

そのような惑星のエネルギー収支を dcpam で扱うために、今回の実験では dcpam における雲の扱いが外向き長波放射 (OLR) や外向き短波放射 (OSR) に与える影響を調べた。

ここで調べたのは、雲の寿命の効果と移流の効果である。まず初めに、風が吹いても雲が流れない、すなわち雲の移流を無視して、放射収支が釣り合うように雲の寿命を調整した。次に雲の移流を考慮した上で、放射収支が釣り合う雲の寿命を調べることで、雲の移流による効果を調べた。

次の節では、雲水分布の支配方程式について述べる。また、dcpam5-Version: 20110407 (以下 dcpam) における雲水量決定方法と、その問題や課題についても述べる。

2. 雲水量の支配方程式

雲水密度、大気密度をそれぞれ ρ_{cw}, ρ とおくと、雲水量 q_{cw} は

$$q_{cw} \equiv \frac{\rho_{cw}}{\rho} \quad (1)$$

と表せ、鉛直 σ 座標系において以下の方程式に従う。

$$\frac{\partial q_{cw}}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla q_{cw} - \dot{\sigma} \frac{\partial q_{cw}}{\partial \sigma} + K \nabla^N q_{cw} - K \frac{\partial q_{cw}}{\partial p} \sigma \nabla^N P_s + P - L. \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 p は圧力である。また、 \mathbf{v} は水平風速、 $\dot{\sigma}$ ($= \frac{\partial \sigma}{\partial t}$) は σ 座標系における鉛直風速、 K は水平拡散係数、 N は水平拡散の次数、 P は雲水の生成率、 L は雲水の消滅率である。なお、 ∇ は等 σ 面における勾配であることに注意されたい。

(2) の各項の意味を述べておく。右辺第一項は水平移流項、第二項は鉛直移流項、第三項は水平拡散項、第四項は水平拡散補正項、第五項は雲水の生成項、第六項は雲水の消滅項である^{*1}。雲水の量はこの方程式を解くことで決まると考えられ、dcpam ではこの方程式を積分している。しかしいくつかの問題・課題がある。

3. dcpam における雲水量決定方法とその問題・課題

3.1 dcpam における雲水量の支配方程式

dcpam では、(2) の移流項 (右辺第 1 項から第 3 項) と水平拡散補正項 (右辺第 4 項) を無視した次の式を用いている。

$$\frac{\partial q_{cw}}{\partial t} = P - L. \quad (3)$$

3.2 消滅時定数の決定

雲水の凝結率 P には湿潤断熱温度分布を元に決めた凝結量を用いる。また、雲水の消滅率 L は以下の様に定式化している。

$$L = -\frac{q_{cw}}{\tau} \quad (4)$$

ここで、 τ は消滅の時定数である。

現段階では、 τ はフリーパラメータとして扱っており、この値を変えることで現実に近くなるように最適化する。現在考えている最適化の方法は、dcpam の計算から得られる全球平均放射 (OLR, OSR) が、現在の地球の値と近くなるようにすることである Trenberth *et al.* (2009) によると、現在の地球の OLR, OSR は 238.5 Wm^{-2} である。この値に近くなるように τ の値を決める。^{*2}

なお、 τ の値を変更して計算を行うためには、namelist ファイルにおいて、

^{*1}水平拡散補正項についての補足。

ここでは定性的な補足を述べる。(2) 右辺第四項の導出は付録 A を参照。

(2) の右辺第三項は、等 σ 面における水平拡散を表している。そのため、例えば急な斜面 (山) がある場合、山の麓にある大気塊と山頂にある大気塊が水平拡散によって混ざってしまうことになる。現実にはこのような事は起こらない。したがってここでは大気の水平拡散を等気圧面における混合と考え、右辺第四項を加えている。ただし実際には等温位面上の拡散になると考えられ、この項の表現は今後の課題となるだろう。

^{*2}実際には何度も計算し、OLR, OSR が現実の値と近くなるような τ の値を探す。dcpam (Ver. 20110407) ではそれなりに近い値になっているが、緯度分布まで現実の地球に近いかどうかは検討課題である。なお、全球平均放射収支は入った板海 (slab ocean) を用いた場合でも実際の地球に近い値になるようにする事が望まれる。dcpam (Ver. 20110407) の namelist ファイルを使えば、板海の場合にもそれなりに近い値になるはずである。

```
&set_cloud_nml
  CloudLifeTime = 1200.0d0
/
```

の値を変更すればよい。単位は秒である。

3.3 移流

先ほども述べたように、dcpam では雲水量の支配方程式 (2) において移流項を無視している。これは、移流計算に用いているスペクトル変換法におけるギブズ現象の影響を危惧しているためである^{*3}。この影響の大きさを調べるために、移流項を含める場合と含めない場合の両方の計算を行い、比較する必要がある。

移流項を含めて計算を行うためには、namelist ファイルにおいて、

```
&composition_nml
  ncmx      = 2,
  Names     = 'Qvap' 'CloudWater'
  FlagAdv   = .true., .false.
/
```

を

```
&composition_nml
  ncmx      = 2,
  Names     = 'Qvap' 'CloudWater'
  FlagAdv   = .true., .true.
/
```

とすればよい。

3.4 水平拡散補正項

先ほども述べたように、現在行っている dcpam の計算では、雲水量の支配方程式 (2) において水平拡散補正項を無視している。これは、この項の扱いに慣れていないためである。

^{*3}物理的な意味も後述する

しかし、物理的には必要な項であると考えられるため、この影響の大きさを調べるために、移流項を含める場合と含めない場合の両方の計算を行い、比較する必要がある。

水平拡散補正項を含めて計算を行うためには、namelist ファイルにおいて、

```
&dynamics_hspl_vas83_nml
  HDOrder = 8,

  HDEFoldTimeValue = 1.0,

  HDEFoldTimeUnit = 'day'

/
```

に FlagMassHorDifCor の指定を追加し、

```
&dynamics_hspl_vas83_nml
  FlagMassHorDifCor = .true.,
  HDOrder = 8,

  HDEFoldTimeValue = 1.0,

  HDEFoldTimeUnit = 'day'

/
```

とすれば良い^{*4}。

^{*4}ドキュメント生成の都合上、namelist ファイル中のコメント文は省略している。

付録 A: 水平拡散補正項の導出

(2) の水平拡散項と、その補正項の導出を行う。

p 座標において、水平拡散は $\kappa \nabla_p q_{cw}$ と書ける。 p 座標系における x 微分は σ 座標系において

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)_{y,p,t} &= \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)_{y,\sigma,t} - \left(\frac{\partial}{\partial p} \right)_{x,y,t} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{y,\sigma,t} \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial x} \right)_{y,\sigma,t} - \left(\frac{\partial}{\partial p} \right)_{x,y,t} \sigma \left(\frac{\partial p_s}{\partial x} \right)_{y,\sigma,t} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

である。ここで $\sigma = p/p_s$ を用いた。 y 微分も同様に変換すると、結局、雲水量 q_{cw} の水平拡散は

$$\kappa \nabla_p^N q_{cw} = \kappa \nabla_\sigma^N q_{cw} - \kappa \frac{\partial q_{cw}}{\partial p} \sigma \nabla p_s \quad (\text{A.2})$$

と書ける。右辺の第一項が σ 座標系における水平拡散項であり、右辺第二項が水平拡散補正項である。

付録 B: 実際の地球の放射収支

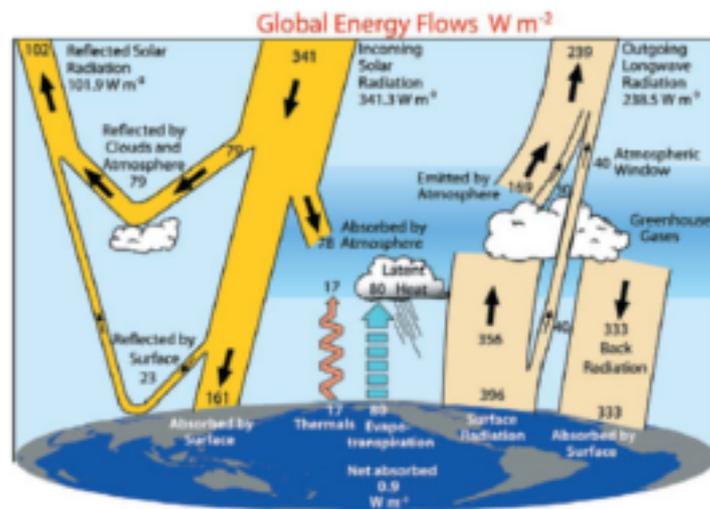


FIG. 1. The global annual mean Earth's energy budget for the Mar 2000 to May 2004 period ($W m^{-2}$). The broad arrows indicate the schematic flow of energy in proportion to their importance.

☒ 3.1: Trenberth *et al.* (2009) fig.1

引用文献

- Trenberth, Kevin E., John T. Fasullo, Jeffrey Kiehl, 2009: Earth's Global Energy Budget. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, p.311-323.