雲解像モデルによる積雲のデトレインメントの解析

村田昭彦(気象研·台風)

1. はじめに

積雲対流のパラメタリゼーションの改善を目的と して、雲解像数値シミュレーションの結果の解析を 行ってきた。現在主流となっている質量フラックス を基にしたパラメタリゼーションでは、エントレイ ンメント率が重要な物理量の一つであり、これによ って質量フラックスの鉛直プロファイルが決まる。 これまでの研究(Murata and Ueno 2005)では、 エントレインメント率の鉛直プロファイルを雲解像 モデルの実行結果を用いて検証した。そして、その 知見を基に質量フラックス型のパラメタリゼーショ ンの一つであるArakawa-Schubertスキームに対し て、新たなエントレインメント率プロファイルを適 用した。

このとき、雲頂でのデトレインメントに加えて、 雲底-雲頂間の高度において、雲の側面から環境場へ のデトレインメントを考慮した。ただ、どの高度で どの程度のデトレインメントが起こるかということ に対し任意性があった。そこで今回は、雲の側面で のデトレインメントの高度と強さを見積もることを 目標にする。

2. 数値実験の方法

気象庁非静力学モデル(JMANHM; Saito et al. 2006)を雲解像モデル(水平格子間隔 200 m、格子数 305×305×76)として使用し、台風 0418 号発生 直後の積雲を対象にシミュレーションを行った。こ のとき、初期値・境界値を与えるため、水平格子間 隔 1, 3, 18 km の JMANHM をネストした。一番外 側のモデル(水平格子間隔 18 km)の初期値・境界 値については、気象庁全球スペクトルモデルの予報 値から与えた。全ての水平解像度のモデルにおいて、 氷相を含むバルク法の微物理過程を使用し、一番外 側のモデルにのみ改良した Arakawa-Schubert 積雲 パラメタリゼーションを併用した。

3. デトレインメントの検出

まず、雲解像シミュレーションの数値データから 積雲を抽出する。積雲の抽出法は様々なものがあり 方法が確立されている訳ではないが、どれを用いて もある程度は似たような結果が得られる(Lang et al. 2003)。ここでは、鉛直速度の水平傾度の情報 から積雲対流の核を判別する Xu (1995)の方法を基 に、得られたデータから積雲領域を判別する。判別 手順は以下の通りである。

融解層以下の上昇流の最大値を Wx とおく。各コ ラムについて、Wx が下記(1),(2)のいずれかの条件を 満たせば、積雲対流の核の領域とみなす。

- (1) Wx > Wxa
- (Wxa: 周囲 24 コラムでの Wx の平均値)
 (2) Wx > Wxth

 $(Wxth = 3 ms^{-1})$

次に、対流核以外の積雲域を高度毎に判別する。対 流核に隣接する格子点において、鉛直速度W、雲水 量Qc、雲氷量Qiが下記(3),(4)の両方の条件を満た せば積雲域とみなす。

(3) W > Wth

 $(Wth = 0 ms^{-1})$

$$\begin{array}{ll} (4) & \mathrm{Qc} + \mathrm{Qi} > \mathrm{Qth} \\ & (\mathrm{Qth} = 0.1 \ \mathrm{gkg}^{\text{-}1}) \end{array} \end{array}$$

積雲域と判断された格子点に隣接する格子点においても、(3),(4)の条件を適用して積雲域か否かの判定を同様に行う。Xu(1995)の方法に上記(3),(4)の条件を追加し、各高度で適用することによって、雲量の高度依存性が表現できる。

このようにして抽出された積雲毎に、エントレイ ンメント率を計算してデトレインメントを検出する。 エントレインメント率は以下の式で定義する。

∂ M/M ∂ z (M: 質量フラックス, z: 高度)

つまり、任意の時刻における質量フラックスの鉛直 プロファイルからエントレインメント率が計算でき る。この値が負になった場合にデトレインメントが 起きていることになる。

4. デトレインメントと浮力の関係

デトレインメントをもたらす要因の一つとして負 の浮力が考えられる。ただ、エントレインメント率 には鉛直速度だけでなく雲量の高度変化による寄与 も含まれているので、エントレインメント率と浮力 を比較する際に雲量の効果を除く方がよい。そこで、 これまでと同様にエントレインメント率を以下のよ うに各項に分ける。

∂ M/M ∂ z= ∂ w/w ∂ z+ ∂ A/A ∂ z+ ∂ ρ / ρ ∂ z (w: 鉛直速度, A: 雲量, ρ : 密度)

ここで右辺第一項が鉛直速度による寄与(上昇流エ ントレインメント率)である。右辺第三項の密度に よる寄与は小さいため無視できる。

積雲の領域内で平均した、鉛直速度と浮力の鉛直 プロファイルの例を図1に示す。高度の増加と共に 上昇流速が減少している場合、デトレインメントが 起こっていることになる。この積雲については、高 度5kmから6kmにかけて雲の側面からのデトレ インメントがあり、そこでは浮力が高度と共に減少 している。つまり、浮力そのものというよりは、負 の浮力鉛直傾度とデトレインメントとの対応が示唆 される。

多数の積雲をサンプルにした、上昇流エントレイ ンメント率と浮力あるいは浮力鉛直傾度の散布図を 図2に示す。全体的に見ると、浮力よりは浮力鉛直 傾度の方がエントレインメント率との相関が高い。 デトレインメントを示す負の上昇流エントレインメ ント率に注目すると、この量の絶対値は浮力鉛直傾 度の絶対値と正の相関のあることが分かる。すなわ ち、高度の増加に伴う浮力の減少が急なほど、デト レインメントが起こりやすいと言える。

この状況を積雲内のある部分(空気塊)について 考える。浮力の鉛直傾度によって空気塊の上下に浮 カの違いが生じる。これが、上昇速度の差をもたら し、空気塊が上下方向に縮小あるいは伸長する。そ れに応じてエントレインメント、デトレインメント が起こっていると考えられる。

参考文献

- Lang, S., W.-K. Tao, J. Simpson and B. Ferrier, 2003: Modeling of convective-stratiform precipitation processes: Sensitivity to partitioning methods. J. Appl. Meteor., 42, 505-527.
- Murata, A. and M. Ueno, 2005: The vertical profile of entrainment rate simulated by a cloud-resolving model and application to a cumulus parameterization. J. Meteor. Soc. Japan, 83, 745-770.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. Mon. Wea. Rev., 134, 1266-1298.
- Xu, K.-M., 1995: Partitioning mass, heat, and moisture budgets of explicitly simulated cumulus ensembles into convective and stratiform components. J. Atmos. Sci., 52, 1-23.



図1 積雲内の(a)鉛直速度と(b)浮力の鉛直プロファイルの例



図2 上昇流エントレインメント率と(a)浮力、(b)浮力鉛直傾度の散布図