階層構造の形成メカニズムに関する考察と端のあるバンド状降水系における応答パターン

吉崎正憲[1]・加藤輝之[2]・安永数明[1]

1)海洋研究開発機構・地球環境変動領域, 2)気象庁数値予報課

1. 序: 降水系(PSs)は，積乱雲のメソγ，メソ対流系のメソβ，台風・小低気圧・熱帯低気圧のメソαと，少なくとも三つのスケールに分かれることが知られている．これは階層構造と呼ばれる（Ninomiya)．それぞれ主要な物理過程が異なり，フラクタルではない．ところがその階層構造の成因は重要であるのにもかかわらず，あまり議論はない．ここでは無降水系(NPSs)と対比しながら，階層構造の形成メカニズムを考える．また端からセルが発生し後方にバンド状になるback building型（BB）が多く見られる。そこで、端を原点におきそこからx<0方向に伸びる直線状の定常な降水を理想化されたBBの熱源応答を考える。ここでは、x<<0のバンドに直交するy方向のデカルト系の熱源応答と端から半径rの円筒系の熱源応答を調べる。

2. 無降水系と降水系: 地球大気の特徴として，条件付不安定な成層がある．つまり，降水が起こる場合には，乾燥断熱減率と湿潤断熱減率の二つの中立曲線が重要な役割を果たす．それに対して，NPSsは，対流圏下層の境界層，海洋，火星･金星大気などの対流現象であり，それらの安定性を決めるのは一つの中立曲線である．

通常のPSsでは，時間変動する雲活動，階層構造が見られる（図1a)．一方、NPSsでは縦横比１のセルが規則正しく並ぶ構造となる（図1b)．この場合階層構造は見られない．図1cの場合は，定常な熱源による線型応答と同じように，準定常な一つの狭くて強い上昇流域(熱源域)と広くて弱い下降流域(断熱域)が再現する．

3. 絶対不安定な成層での対流(図2)**:** 場を不安定にする時間に比べて，対流により成層が中立化する時間は非常に小さいと仮定する。この場合、不安定は作られると直ちに中立になり，対流は運動を作っても周辺には不安定がないために新たな対流は生じない．つまり，階層構造はできないことになる．

4. 条件付不安定な成層での対流(図3)**:** 3と比べて，ここでは潜在不安定の場が新たに加わる．時間t_2までは絶対不安定の場合と同じであるが，時間t_3から変わる．対流が作る流れと環境場の間に収束が生じ，これまで潜在不安定であったのが絶対不安定と環境場が変わり新たな対流を作れるようになる．これにより，これまで単体のセルであったのがセル群となる．つまり，階層構造ができることになる．ここではメソγからメソβを想定したが，メソαの場合は場が広域にわたってより不安定であるためと考えられる．

5. PSsとNPSsの違い（表1）**:** PSsとNPSsの違いは，階層構造のほかにも，上昇流と下降流の対照的な水平構造，(熱帯域の大規模PSの)鉛直に傾いた構造と東進特性などの有無にみることできる．孤立系において，NPSsは熱（相当温位）と全水量が保存するが、PSsでは熱は保存するが全水量は保存しない．この全水量の保存性の違いが、結局二つの系の大きな違いを生み出している．

表 1：非降水系(NPS)，降水系(PS)、positive-only wave CISK の熱源を持つドライモデル(DS)の特性．T_{NPS}，T_{PS}，T_{DP}，T_{β} はNPS，PS，DP,赤道β効果が効くような循環の時定数を示す.一般にメソスケールPSsの時定数は大規模 PSs の時定数より小さいので、前者は赤道βは効かないが、後者は赤道βの効果が効くことになる。

	NPS	PS	DS
Stratification	Absolutely unstable	Conditionally unstable	Stable with the heating
Number of neutral stability curves	1	2	1
Horizontal structure of motions	Periodic motions with an aspect ratio of O(1)	Several narrow areas of w > 0 & wide areas of w < 0	A single narrow area of w > 0 & wide areas of w < 0
Horizontal expansion	Homogeneous	Inhomogeneous	Inhomogeneous
Multi-scale structures/ Vertical slanted structure	No	Yes	No
Propagation property of systems	Advection due to environmental flow	Eastward propagation of equatorial large-scale PS	Eastward propagation of equatorial systems
Turnover time of motions	$T_{\beta} >> T_{NPS}$	$T_{\beta} \sim T_{PS}$	$T_{\beta} << T_{DS}$
Conservative quantities in the isolated system	Conserve EPT & TWC	Conserve EPT, but not TWC	Conserve PT
Reversible/irreversible	Reversible	Irreversible	Irreversible

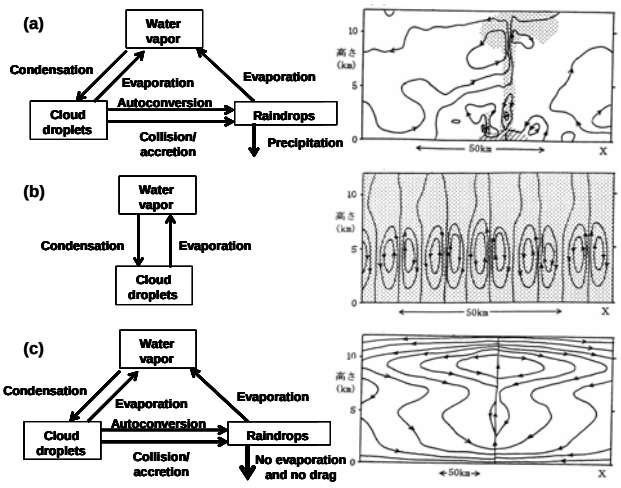

図1: 2次元の暖かい雲モデルの感度実験．(a) 通常のPS，(b) NPS，(c) 雨の蒸発と雨のドラッグを無視した場合のPS（Nakajima and Matsuno，(1988)を書きなおした)．ドット域は雲域，影域は寒気域，実線は流線を表す．

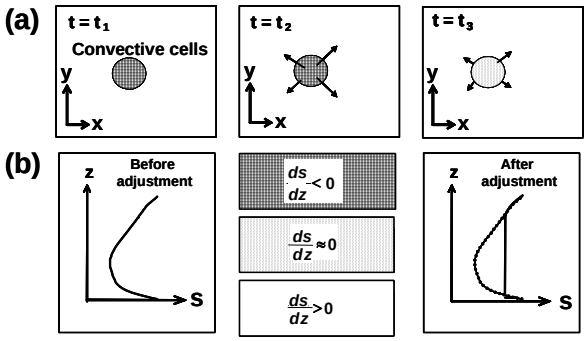

図 2:（a）絶対不安定な成層の場合の対流活動の時間変化の模式図．（b）対流が起こる前と対流が起こった後の乾燥静的エネルギー(s)の鉛直分布．矢印は対流圏下層の対流が作り出す流れを表す．

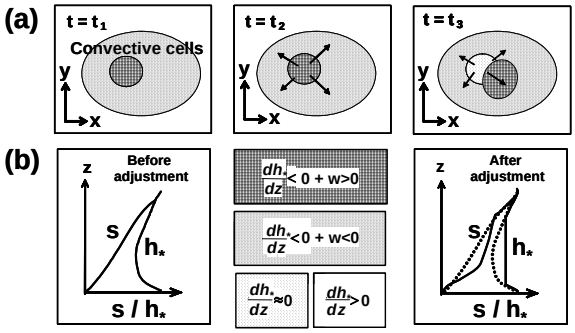

図3: 図2と同じ．ただし(a)では条件付不安定成層，(b)では飽和湿潤静的エネルギー(h_*)とs．二つの中立曲線の存在により，潜在不安定成層が加わる．そこでは，下降流の中で安定であるが，上昇流になると不安定に変わりうる．

6. 端のあるバンド状降水の実験設定と解法（図4）：三つの領域（A;降水域，B;距離ｙのデカルト系，C;半径ｒの円筒系）について鉛直流と浮力について線型応答の解析解を求める．高さh，静的安定度Nは一定と仮定する．ここではなぜバンドに沿う方向よりも端で新しいセルができやすいのかが問題である。

7. デカルト系における熱源応答問題（図5）：情報を水平に伝えるのは重力波である．鉛直モードを一つ選択すると，この系での重力波の水平伝播は非分散となる．このために伝播速度は一定となり，物事は簡単になる．inputする浮力（温度変化をΔTとする）は両方向に伝播して，影響範囲の温度は$\Delta T/2$だけ変化する．

8. 円筒系における熱源応答問題（図略）： この場合、浮力は時間と共にr方向に一定の速度で伝播するが、時間とともにその大きさは小さくなる．

9. 対流調節による温度変化（図6）：対流調節前は全域図6cのように一様な条件付不安定の場を仮定する．A領域での対流調節後の温度はΔTだけ変わるとすると、デカルト系のB領域での対流調節後の温度は$\Delta T/2$だけ変化する．デカルト系では調節後でも弱くなりながらも潜在不安定のままである．一方，円筒系のC領域の温度変化は小さくてほぼ調節前の鉛直分布のままとなる．これから、初期の不安定な場はx>0の方向ほど残りやすいことから、端のほうで新しいセルが発生しやすいことになる。この結果は、さまざまなバンド状降水の中でBBがもっとも見られることと整合的である。

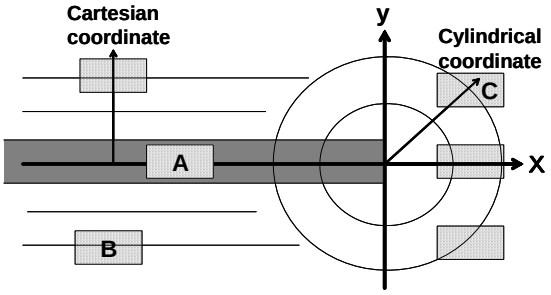

図4：バンド状の降水（濃い領域）が原点を端としてｘ<0に広がっているとする．この熱源に対する応答問題は，ｘ<<0のB領域ではデカルト系ｙで，ｘ>0のC領域では円筒系ｒで表現される．

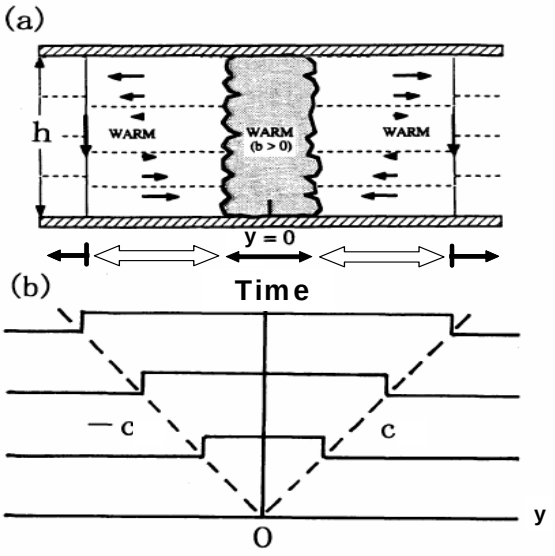

図5：B領域における熱源応答（Bretherton 1993：吉崎 1999）．（ａ）流れの水平−鉛直断面図．（ｂ）浮力の水平ー時間断面図．(a)の影響範囲内では水平風は一定の強さ，境界に下降流がある．(b)の影響範囲で影響を受けた浮力は一定の速度で伝播する．

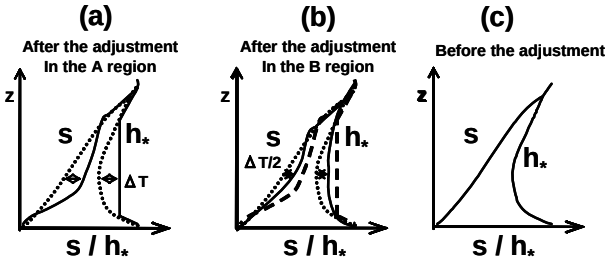

図 6:（a)A 領域の調節後，（b)B 領域の調節後，(c)調節前，の乾燥静的エネルギーs と飽和湿潤静的エネルギーh_*の鉛直分布．(a)と(b)の実線は調節後の鉛直分布を表す．