

2013/02/14 修士論文発表会

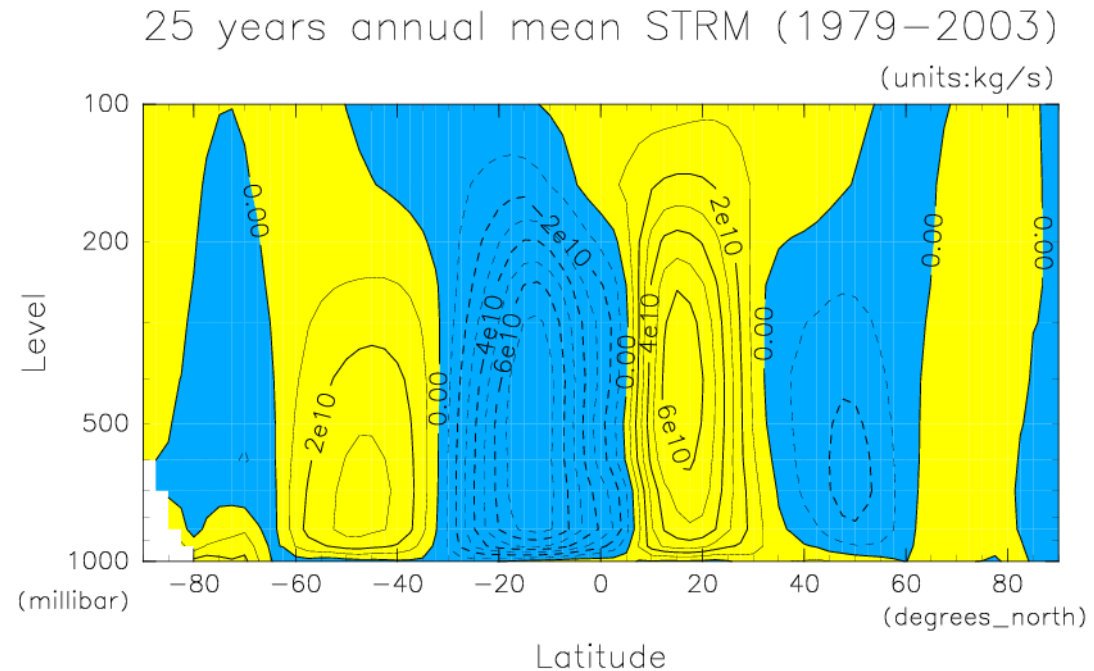
積雲成長の初期条件依存性に 関する数値実験

高橋由実子

地球および惑星大気科学研究室

はじめに

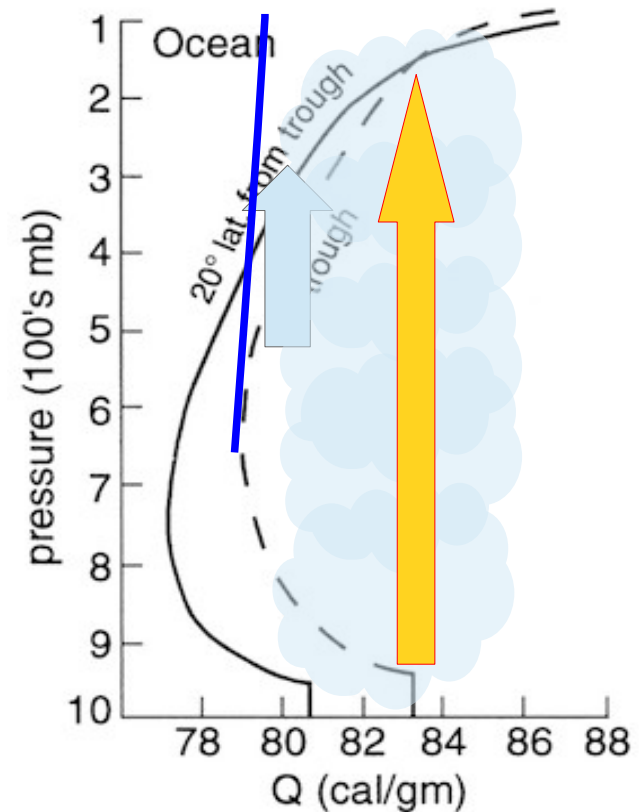
- 地球では太陽の入射による地面の加熱と地球からの放射が緯度ごとにつりあっていないため大循環が存在する
- しかし鉛直方向エネルギーを輸送する仕方は自明ではない



質量流線関数の1979年～2003年の25年の年平均
(dcchart プロジェクト NCEP再解析データ
<http://www.gfd-dennou.org/arch/dcchart/>)

はじめに

- 単に下から上へ移流するだけでは湿潤静的エネルギー($Q = C_p T + Lq + gz$) は上へ行くほど減少する
- 実際には高度 600hPa で極小
- “hot tower” 仮説(Riehl and Malkus 1958)
 - 積雲対流のコアはまわりの空気と混ざらない
- 混ざらない上昇コアはほぼ存在しない(Zipser 2003)
- 積雲対流がまわりの空気によってどのような影響を受けるのか研究しなければならない



Riehl and Malkus (1958) で示された湿潤静的エネルギーの分布

本研究の目的

- 特に相対湿度場が変化すると、積雲成長にどのような影響があるかを理想化した数値実験によって調べる
- 積雲成長への影響がどのような過程によるものか考察を行う

モデルの基礎方程式系

- 用いるモデル: 雲解像モデル deepconv/arare5

- 方程式系: 準圧縮方程式系

- 運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - C_{pd} \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial x} + Turb.u$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - C_{pd} \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial z} + Turb.w$$

$$+ \left(\frac{\theta}{\bar{\theta}} + \frac{q_v/M_v}{1/M_d + \bar{q}_v/M_d} - \frac{q_v + q_c + q_r}{1 + \bar{q}_v} \right) g$$

- 圧力方程式

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = - \frac{C_s^2}{C_{pd} \bar{\rho} \bar{\theta}_v} \nabla \cdot \{ \bar{\rho} \bar{\theta}_v \mathbf{u} \}$$

- 熱の式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \frac{1}{\pi} (Q_{cnd} + Q_{dis})$$

- : 基本場
 (添字なし) : 擾乱場
 u : 水平速度
 w : 鉛直速度
 C_{pd} : 乾燥成分の定圧比熱
 q_v, q_c, q_r : 水蒸気, 雲, 雨の混合比
 π : エクスター関数
 p : 圧力, p_0 : 基準圧力
 R_d : 乾燥成分の気体定数
 $Turb.$: 乱流拡散項
 g : 重力加速度
 θ : 温位
 θ_v : 仮温位
 Q_{cnd} : 凝縮による加熱
 Q_{dis} : 散逸による加熱

モデルの基礎方程式系

- 水物質の保存式

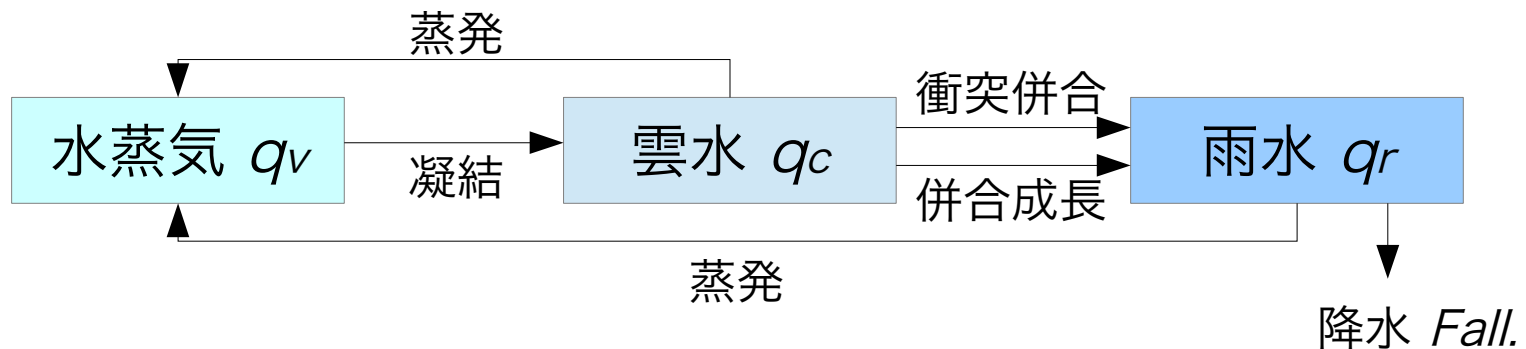
$$\text{水蒸気} \quad \frac{\partial q_v}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial q_v}{\partial x} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial z} + Src.q_v + Turb.\bar{q}_v + Turb.q_v$$

$$\text{雲水} \quad \frac{\partial q_c}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial q_c}{\partial x} + w \frac{\partial q_c}{\partial z} \right) + Src.q_c + Turb.q_c$$

$$\text{雨水} \quad \frac{\partial q_r}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial q_r}{\partial x} + w \frac{\partial q_r}{\partial z} \right) + Src.q_r + Fall.q_r + Turb.q_r$$

Src. : 混合比の生成項
Fall. : 雨水の落下項

- Kessler (1969) のパラメタリゼーション

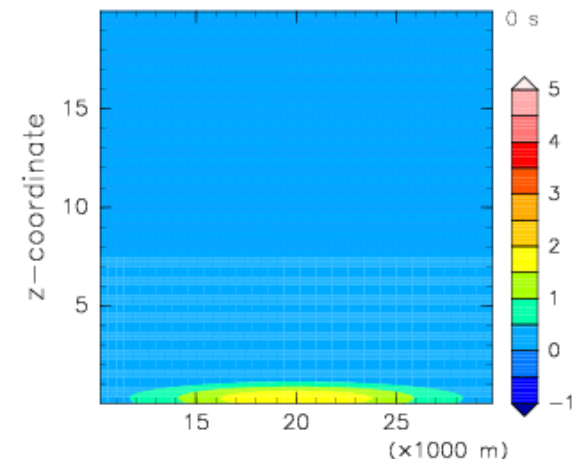


- 乱流パラメタリゼーションは Klemp and Wilhelmson (1978)

計算設定

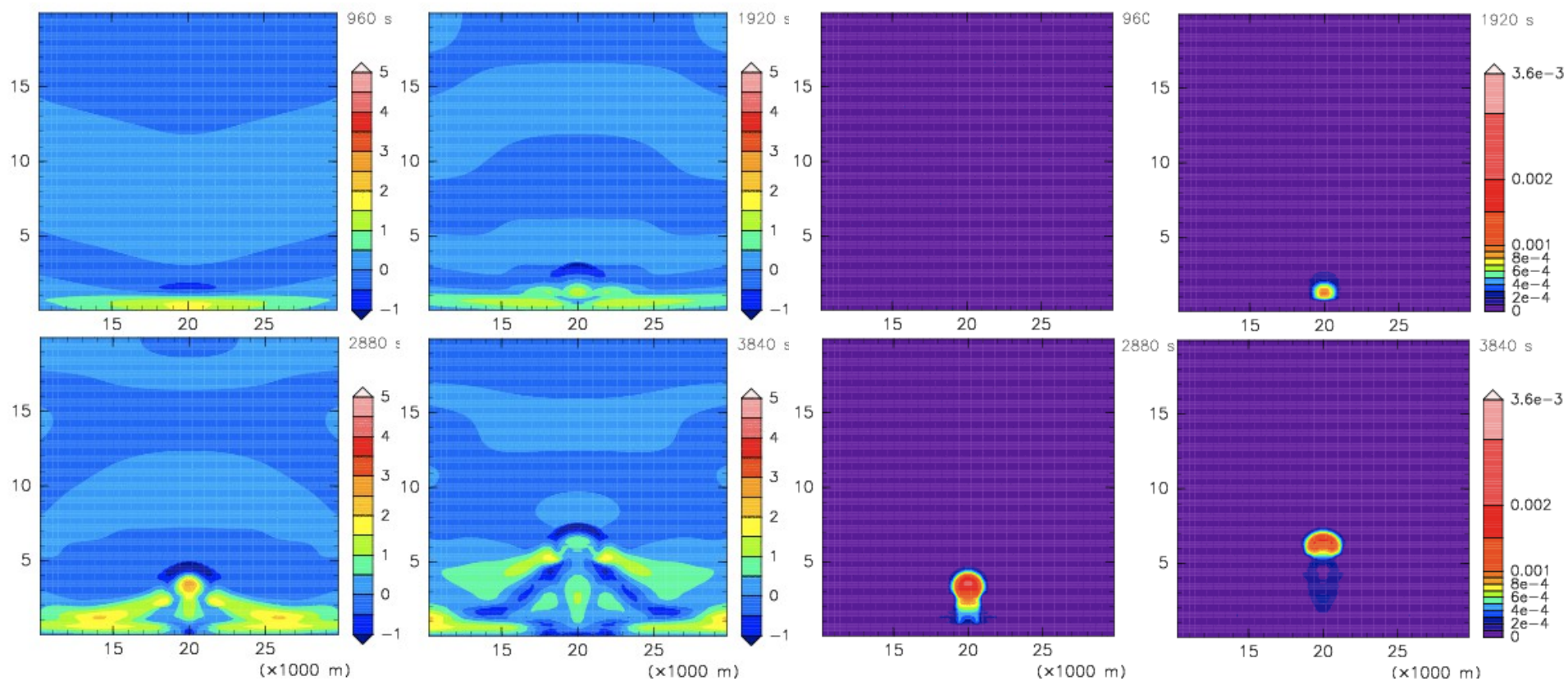
- 初期場として熱帯の観測値の温度・湿度を用いる
- ある高さ以上で相対湿度の初期場を0%, 35%, 100% とする
 - この高さを乾燥高度と呼ぶ
 - 乾燥高度以下は観測値
 - 今回は 0, 35% の結果のみを示す
- 乾燥高度は 1, 2, 3, 4, 5km
- 初期場に 2K の温位擾乱(サーマル)をおく
- 計算領域 水平 40km, 鉛直 20km
- 解像度 水平 400m, 鉛直 100m
- 積分時間 10800 秒

実験1における相対湿度の基本場
(相対湿度 35% で一定の場合)



温位擾乱の初期場

サーマルの時間発展

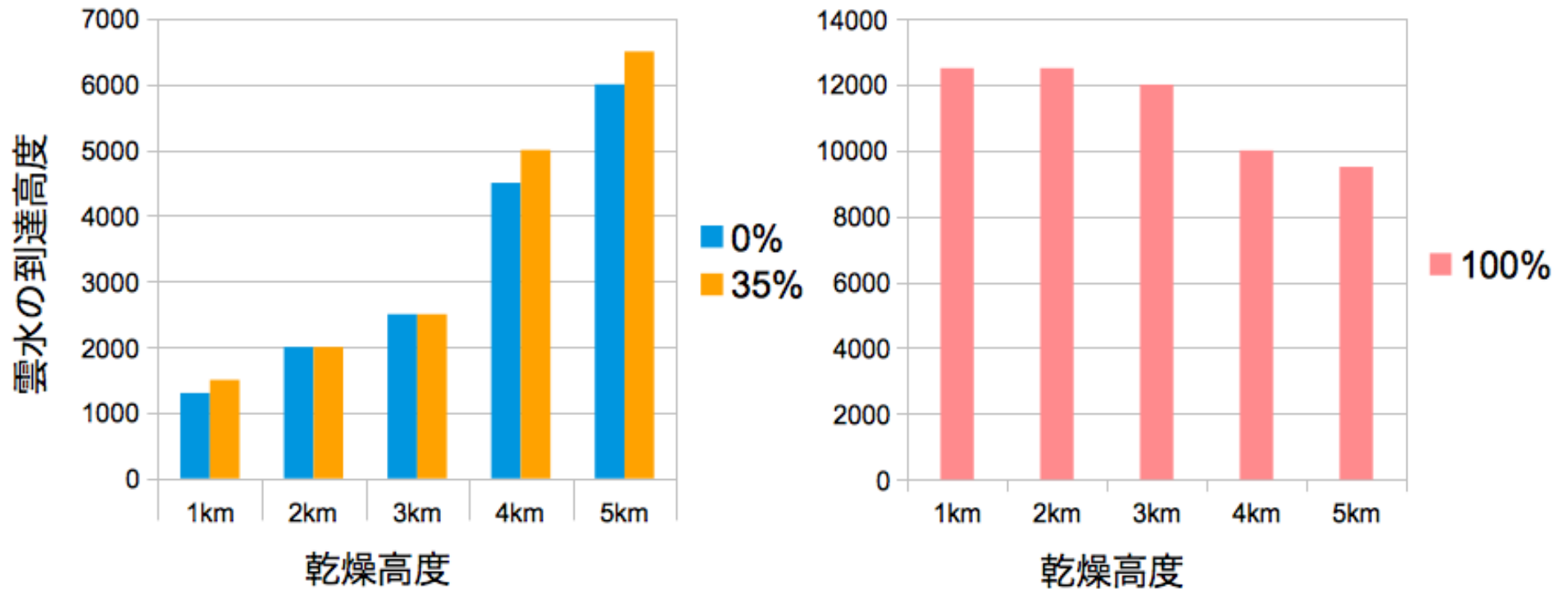


温位擾乱

雲水混合比

観測値の相対湿度のままの場合のスナップショット

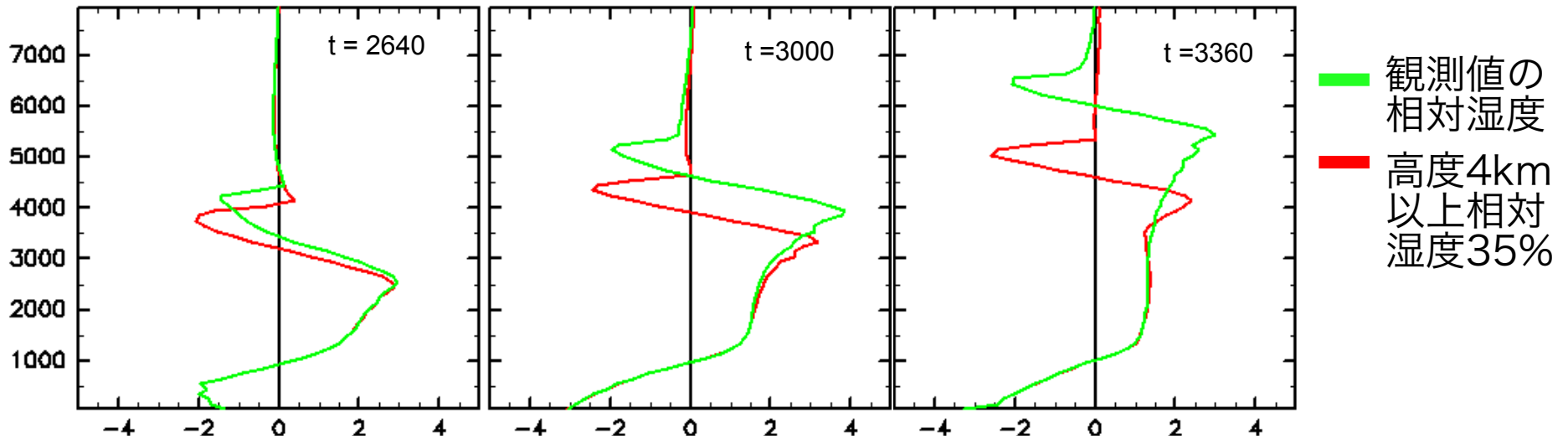
雲の到達する高度



各計算設定における雲の到達高度

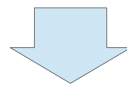
- 乾燥高度が低いほど、雲の到達高度は低くなる
- 固定する湿度の値が低い方がやや到達高度は低くなる

乾燥した場の仮温位の違い



水平領域中点での仮温位擾乱の鉛直分布

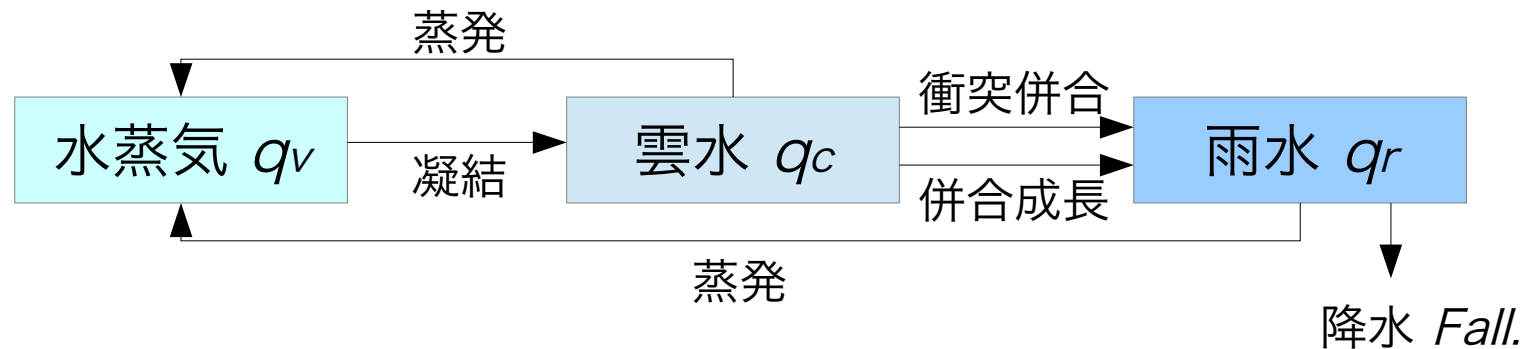
- 仮温位: 水蒸気の重さを考慮した温位
- より乾燥した場合の方が仮温位は低い
- 生成された雲水の蒸発によって上昇する空気塊は冷却され、その浮力は失われると考えられる



雲水・雨水からの蒸発を止めた実験を行い、蒸発が空気塊の上昇へ及ぼす影響を調べる

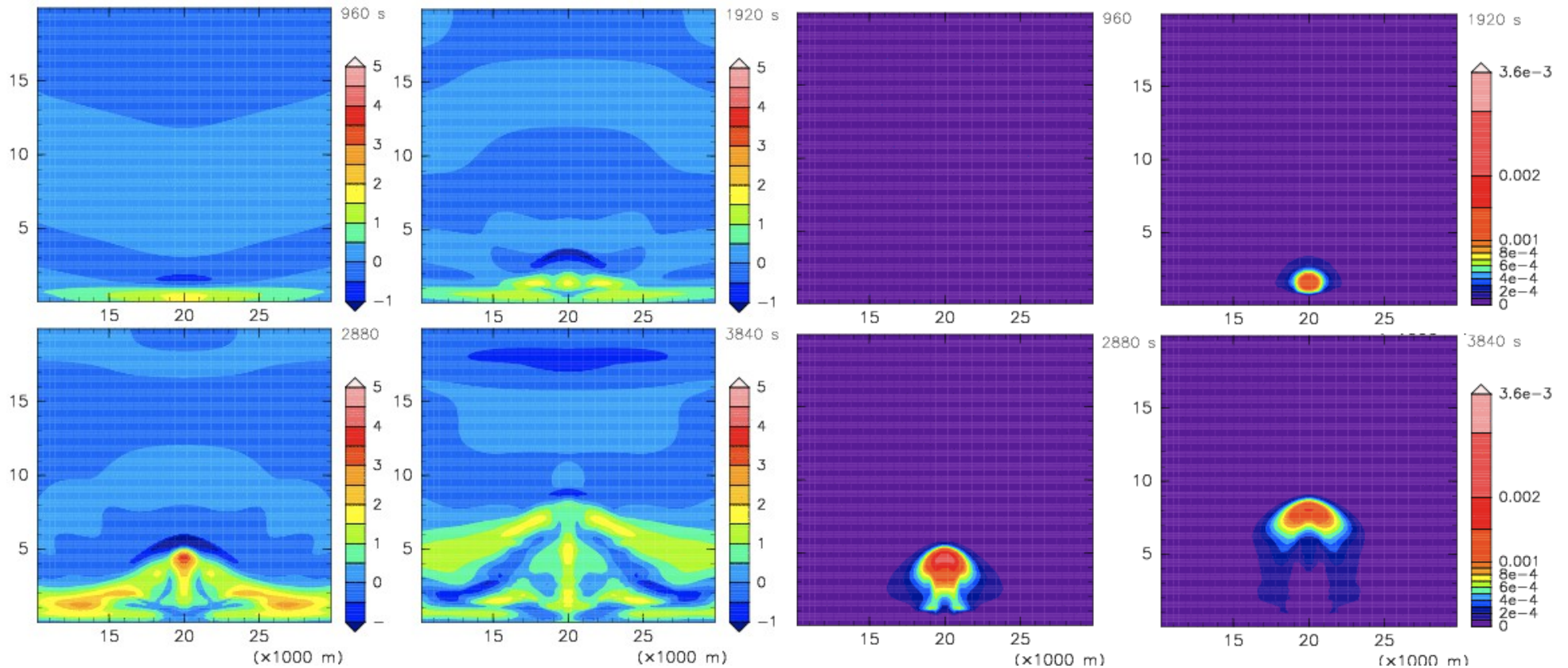
蒸発なしの計算設定

- 雲物理過程において蒸発過程をなしとする



- 相対湿度 35%, 乾燥高度 1, 2, 3, 4, 5km の初期場に対して数値計算を行った

サーマルの時間発展

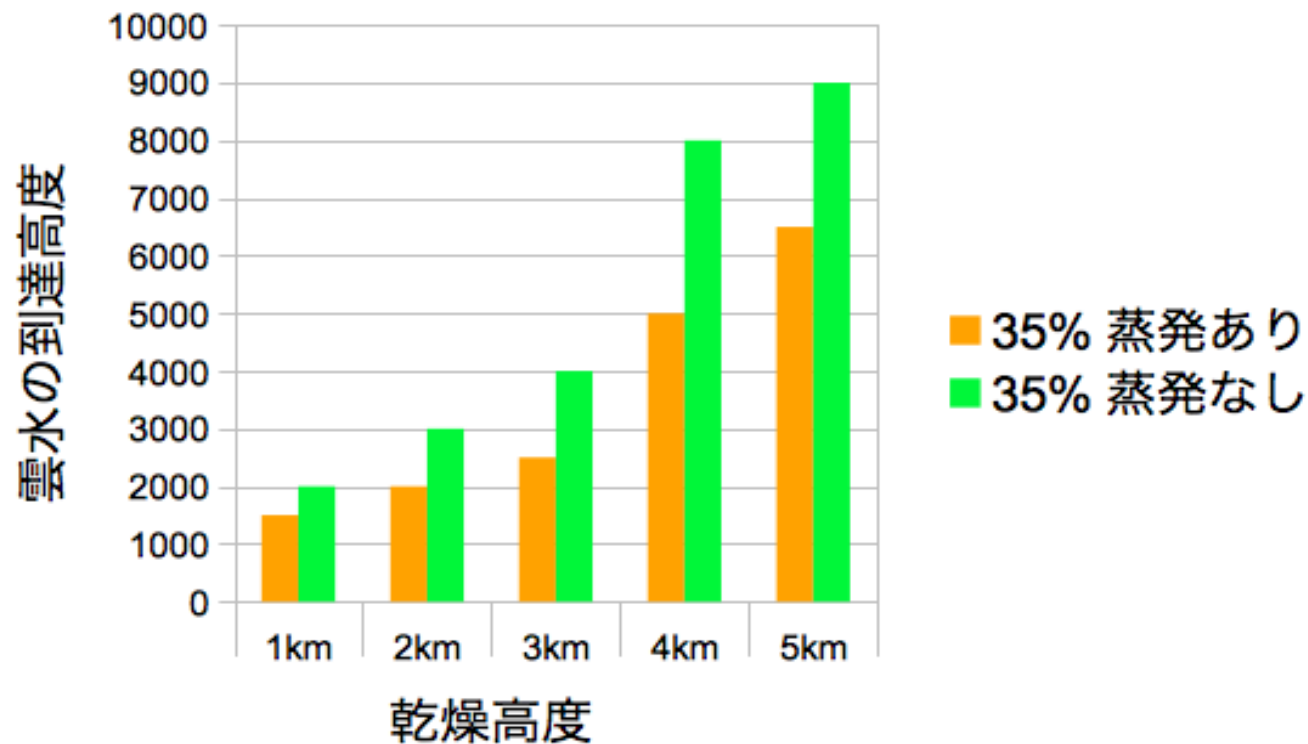


温位擾乱

雲水混合比

観測値の相対湿度のままの場合のスナップショット

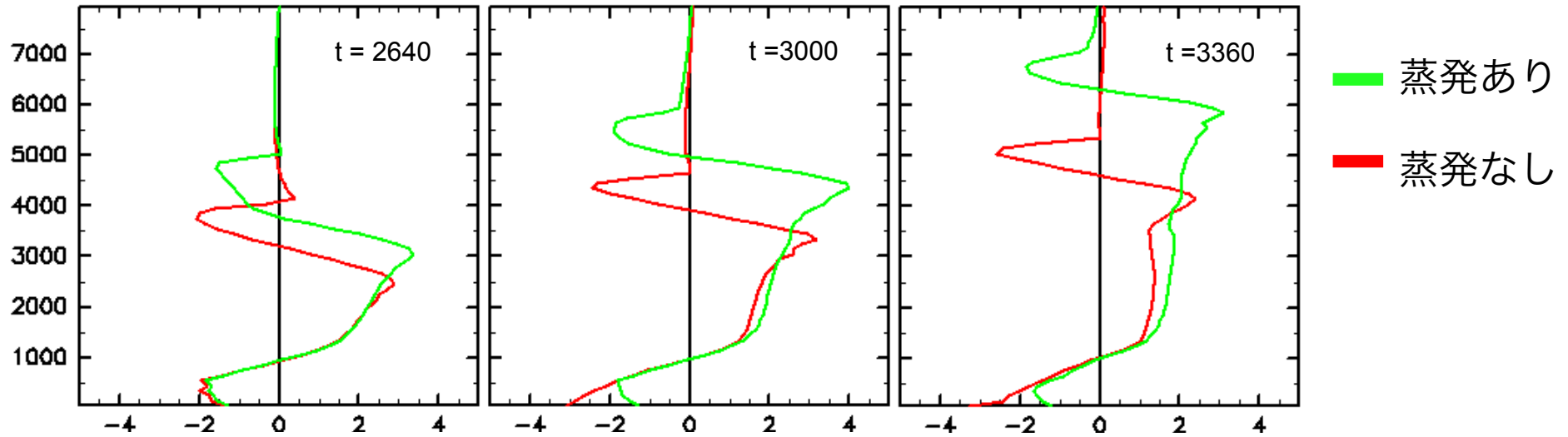
雲の到達する高度



各計算設定における雲の到達高度

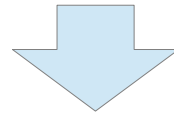
- 「蒸発あり」よりも「蒸発なし」の場合の方が到達高度は上昇する

蒸発あり/なしの違い: 仮温位



高度 4km 以上で相対湿度 35% の
場合の水平領域中点での仮温位擾乱

- 蒸発ありのときよりも仮温位は高くなった

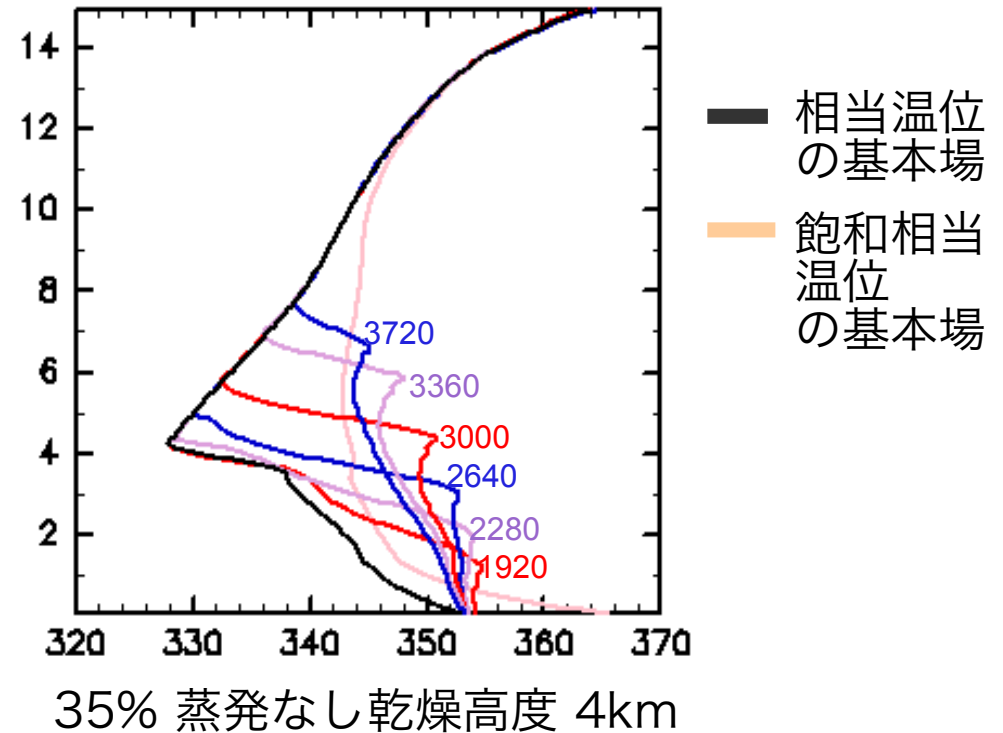


- まわりが乾燥している場合, 雲水・雨水の蒸発による空気塊の冷却がより起こることによって空気塊は上昇しにくくなる

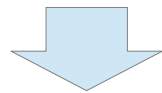
蒸発あり/なしの違い: 相当温位

- 相当温位

- ある空気塊内の水蒸気が全て蒸発したときの潜熱加熱, 冷却を考慮した温位
- 空気塊がまわりの空気と混ざっていないければ保存する



- 相当温位は減少している



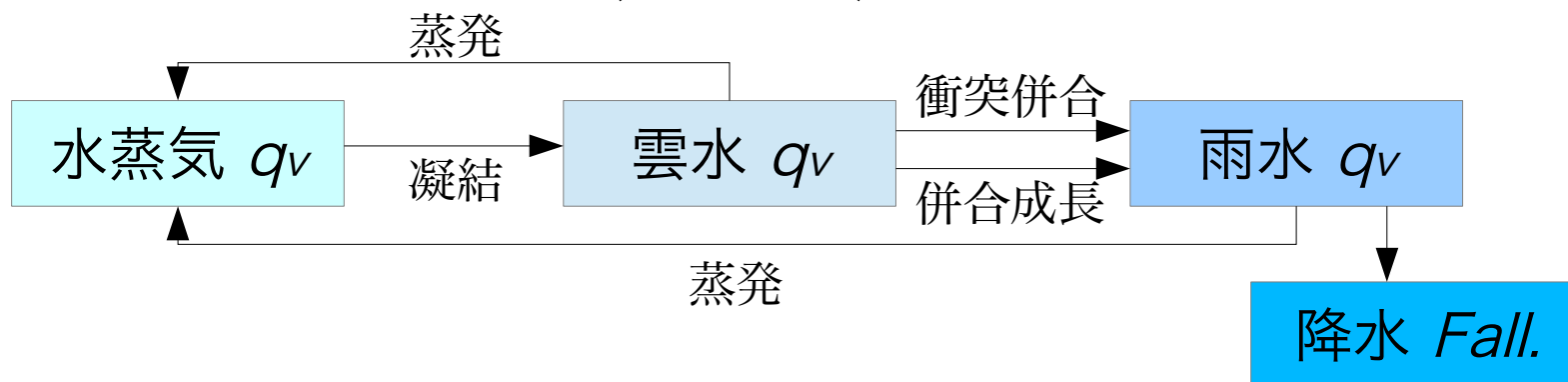
空気塊はまわりの空気と混ざっているなので雲が上昇できなかった

まとめ

- 相対湿度場が変化すると、積雲の成長にどのような影響があるかを、雲解像モデルを用いた理想化した数値実験を行って調べた
- 相対湿度場がより乾燥している、またはより低い高度が乾燥しているほど雲は上昇しなくなった
- 雲が上昇しなくなる原因として以下の 2 点が考えられる
 - まわりが乾燥していることで雲水・雨水の蒸発が起こり、空気塊が冷却されて浮力を失うため
 - まわりの乾燥した空気とまざり相当温位が下がるため

モデルの物理過程

- 雲微物理: Kessler (1969)



- 乱流パラメタリゼーション Klemp and Wilhelmson (1978)

$$Turb.u_i = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[-K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} E \right]$$

$$Turb.\theta = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right)$$

E : サブグリッドスケールの
乱流運動エネルギー

K_m : 運動量に対する乱流
拡散係数

K_h : 温位に対する乱流
拡散係数