

# 木星大気の雲対流の直接数値計算

杉山耕一郎<sup>†</sup>, 小高正嗣<sup>†</sup>, 中島健介<sup>‡</sup>, 林祥介<sup>\*</sup>

† 北海道大学大学院理学院 宇宙理学専攻

‡ 九州大学大学院理学研究院 地球惑星科学部門

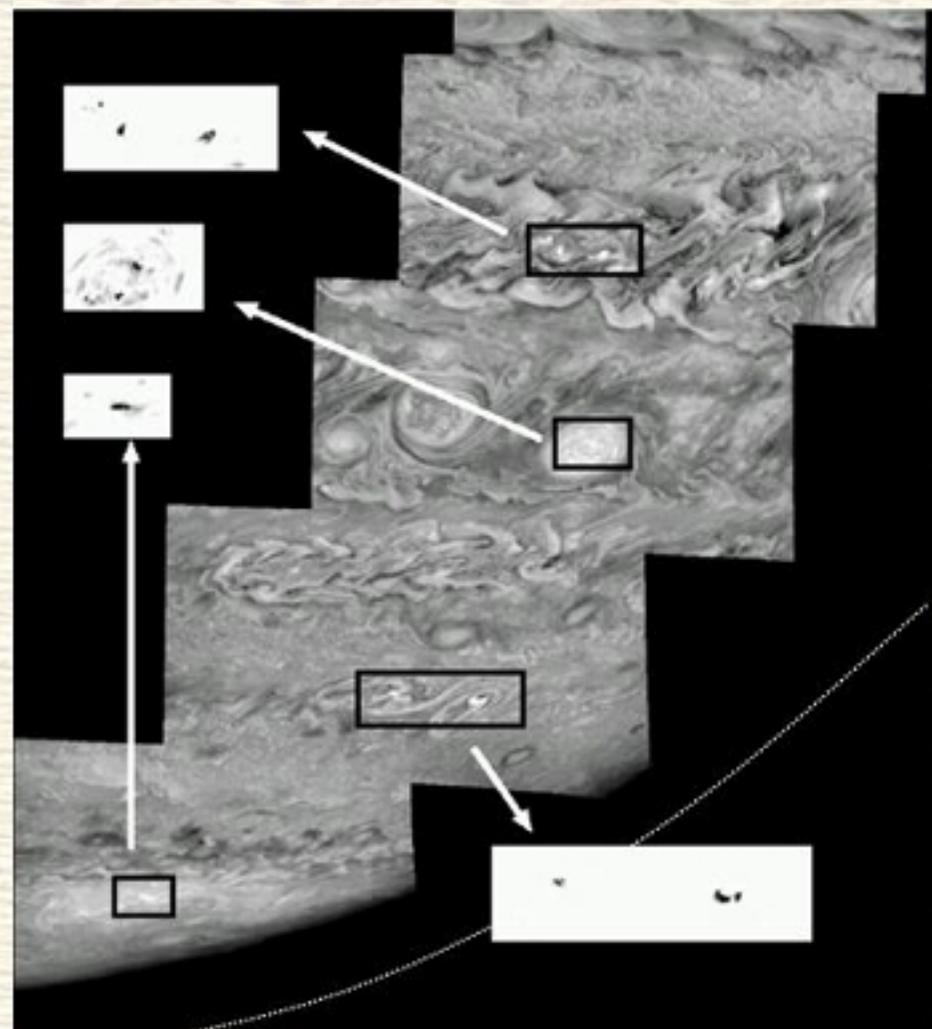
\* 神戸大学大学院理学研究科 地球惑星科学専攻

e-mail: sugiyama@gfd-dennou.org



# はじめに:木星大気の雲対流

- 平均的な大気構造の決定に重要な役割を担うと予想されている
- しかし、雲対流によって実現される大気構造はよく調べられていない

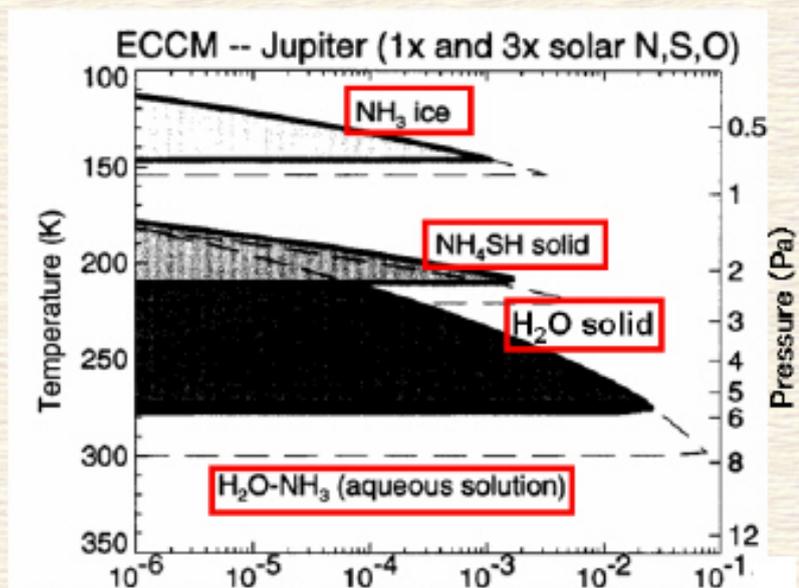


木星南半球の各所に点在する背の高い雲. 黒枠部分を反転・強調したものを各矢印の先に示す. NASA photojournal PIA01227 より作成

# 伝統的な雲分布の理解: 熱力学平衡 (Weidenschilling and Lewis, 1973)

## ■ 3層の雲層

- $\text{NH}_3$  氷
  - ◆ 表層の雲に対応
- $\text{NH}_4\text{SH}$  氷
  - ◆  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{NH}_4\text{SH}$
- $\text{H}_2\text{O}$  氷



熱力学平衡計算から求めた雲の鉛直分布 (Atreya et al., 1999)

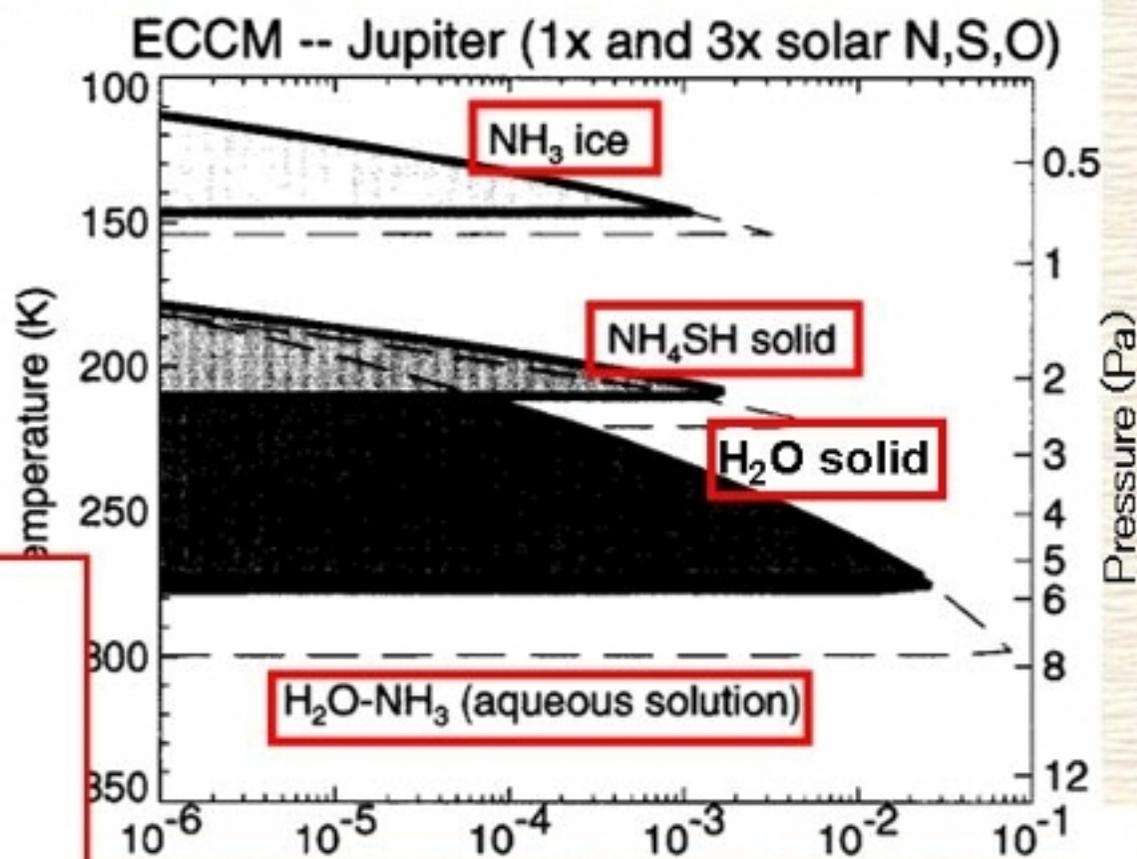
# 伝統的な雲分布の理解：熱力学平衡 (Weidenschilling and Lewis, 1973)

## ■ 3層の雲層

- $\text{NH}_3$  氷
  - ◆ 表層の雲に対応
- $\text{NH}_4\text{SH}$  氷
  - ◆  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{NH}_4\text{SH}$
- $\text{H}_2\text{O}$  氷

雲分布は大気の運動と降水等の雲微物理過程によって変化するはず

⇒ 力学・熱力学・放射の相互作用によって決まる  
3種類の雲の分布は？

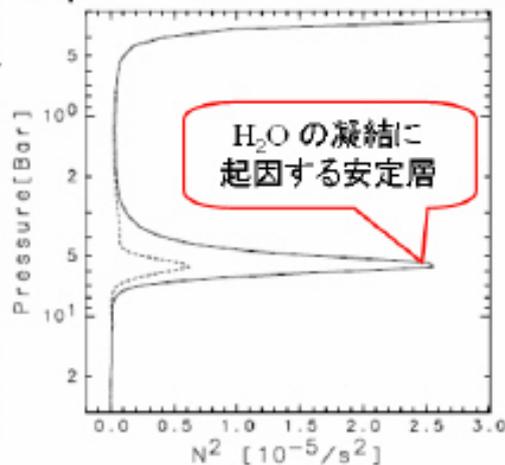
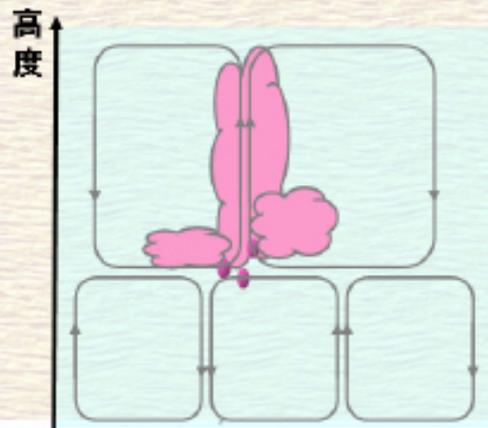


熱力学平衡計算から求めた雲の鉛直分布 (Atreya et al., 1999)

# 先駆的な雲対流の直接数値計算

(Nakajima et al, 2000)

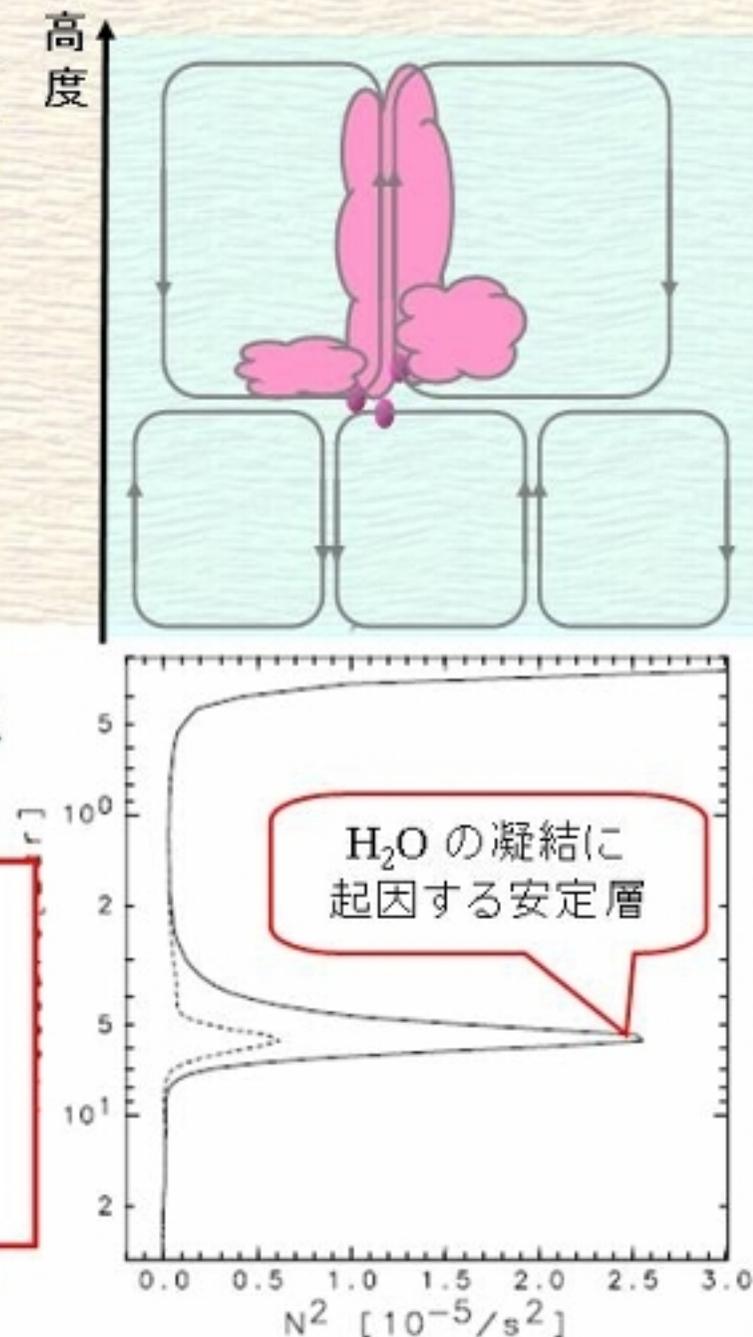
- 長時間積分を行うことで、統計的平衡状態での大気構造を求める
- 大気構造の特徴
  - $H_2O$  凝結高度で対流運動は上下に分割
    - ◆  $H_2O$  の凝結高度に安定層が形成
  - $H_2O$  雲は対流圏界面付近まで上昇



# 先駆的な雲対流の直接数値計算 (Nakajima et al, 2000)

- 長時間積分を行うことで、統計的平衡状態での大気構造を求める
- 大気構造の特徴
  - $H_2O$  凝結高度で対流運動は上下に分割
    - ◆  $H_2O$  の凝結高度に安定層が形成
  - $H_2O$  雲は対流圏界面付近まで上昇

$NH_3$  の凝結と  $NH_4SH$  の生成反応は考慮していない  
放射強制の強さは地球大気と同程度  
(2桁大きな値を利用)



# 本研究の目的

- 雲対流の直接数値計算を行うことで、統計的平衡状態における対流運動と雲分布を調べる
  - 凝結物として  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{NH}_4\text{SH}$  を考慮
  - 凝結成分存在度は予想される範囲で何通りか与える
    - ◆ 太陽系形成論では、太陽組成の同程度から数倍程度
    - ◆ ガリレオプローブの直接観測では、大気深部においても  $\text{H}_2\text{O}$  存在度は太陽組成の 1/10 倍程度
  - 冷却率に対する対流運動の依存性も合わせて調べる

# 方程式系

## ■ 基礎方程式

- 水平鉛直 2 次元の準圧縮系方程式
- 各凝結成分の保存式

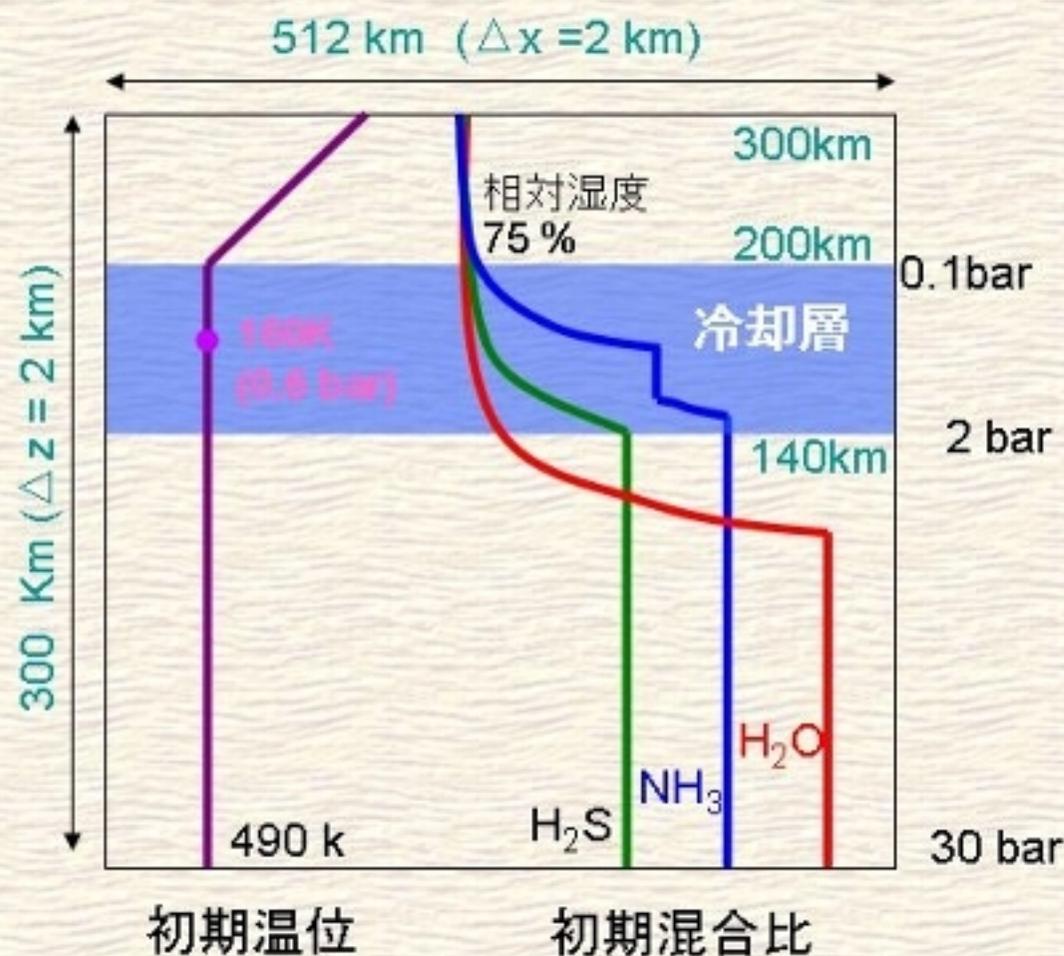
## ■ 雲微物理過程

- 地球大気で良く利用される雲微物理パラメタリゼーションを利用
  - ◆ 凝結物は重力落下する粒子と、しない粒子に 2 分
  - ◆ ただし、粒子間の変換係数に木星重力の影響を考慮

## ■ 放射過程

- 放射は陽に解かず、放射を模した熱強制を与える
  - ◆ ガリレオプローブで正味の放射冷却の観測された高度に一樣冷却を与える

# 系の設定と計算パラメータ



実験名	凝結成分存在度 (solar)	冷却率 (K/day)	積分時間 (モデル日)
標準実験	1.0	-1.0	10
0.1 × solar	0.1	-1.0	10
5 × solar	5.0	-1.0	50
10 × solar	10.0	-1.0	50
0.1 × rad	1.0	-0.1	180

## ■ 境界条件

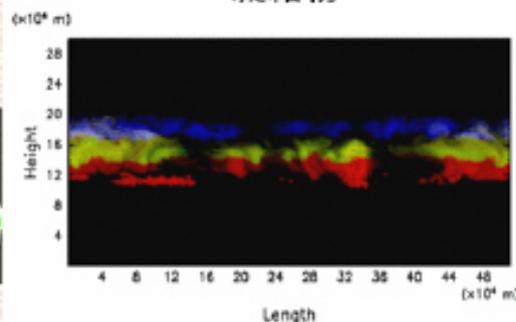
- 水平方向: 周期境界条件
- 上部境界: 応力なし,  $w = 0$ , 断熱壁
- 下部境界: 応力なし,  $w = 0$ , 温度と混合比フラックスはバルク法で与える

# 標準実験(1×solar 実験)の結果

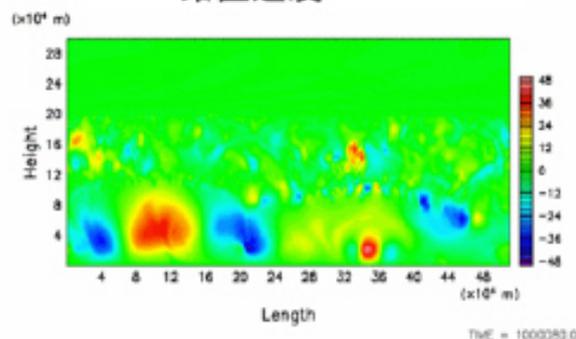
- 雲層は分離していない:  $H_2O$  と  $NH_4SH$  雲は対流圏界面まで上昇
- $H_2O$  凝結高度より上は「積乱雲」、下は「ベナール対流」的
- 乾燥気塊は  $H_2O$  凝結高度の下まで下降できない



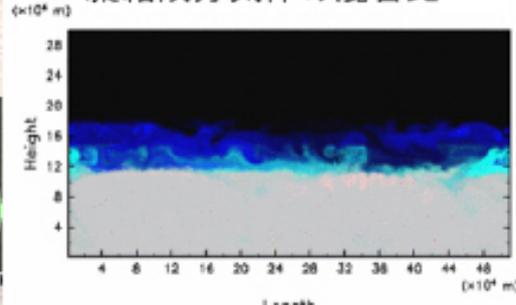
凝結物



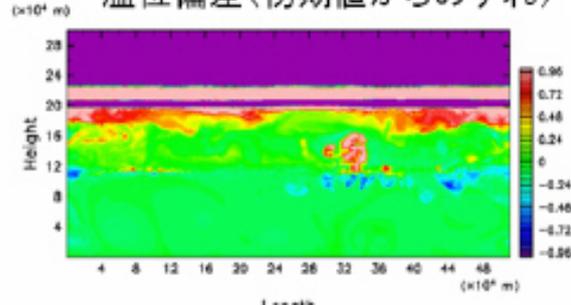
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



温位偏差(初期値からのずれ)

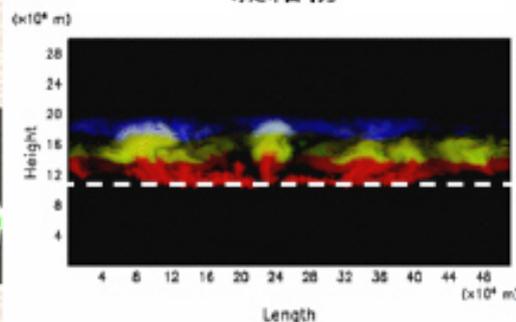


# 標準実験(1×solar 実験)の結果

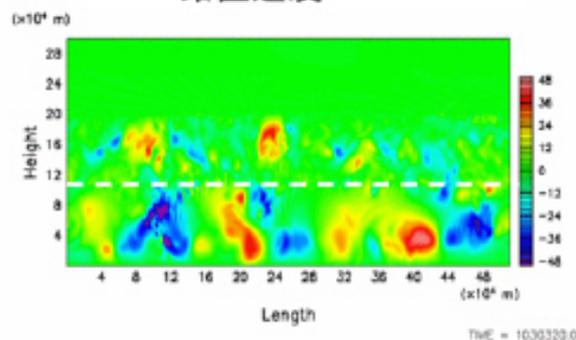
- 雲層は分離していない:  $H_2O$  と  $NH_4SH$  雲は対流圏界面まで上昇
- $H_2O$  凝結高度より上は「積乱雲」、下は「ベナール対流」的
- 乾燥気塊は  $H_2O$  凝結高度の下まで下降できない



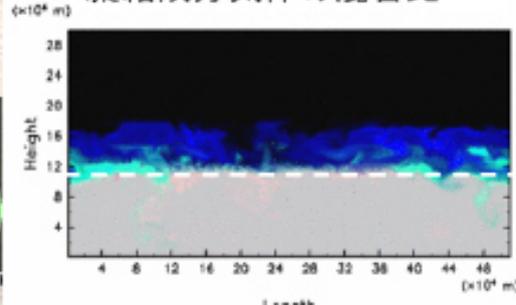
凝結物



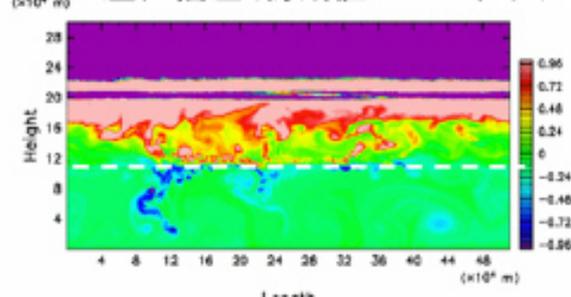
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



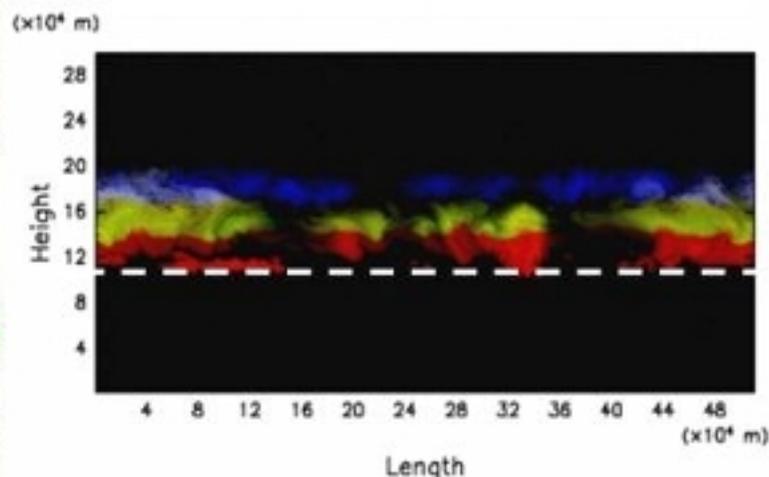
温位偏差(初期値からのずれ)



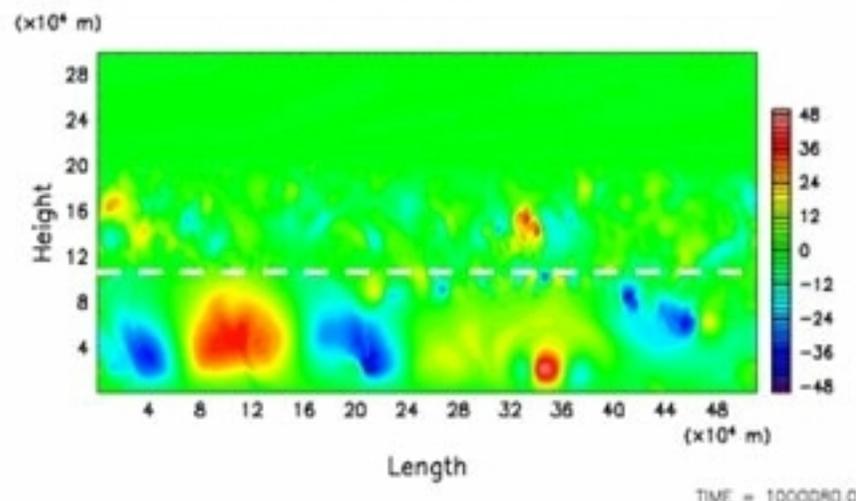
# 標準実験(1 × solar 実験)の結果

- 雲層は分離してない:  $H_2O$  と  $NH_4SH$  雲は対流圏界面まで上昇
- $H_2O$  凝結高度より上は「積乱雲」、下は「ベナール対流」的
- 乾燥気塊は  $H_2O$  凝結高度の下まで下降できない

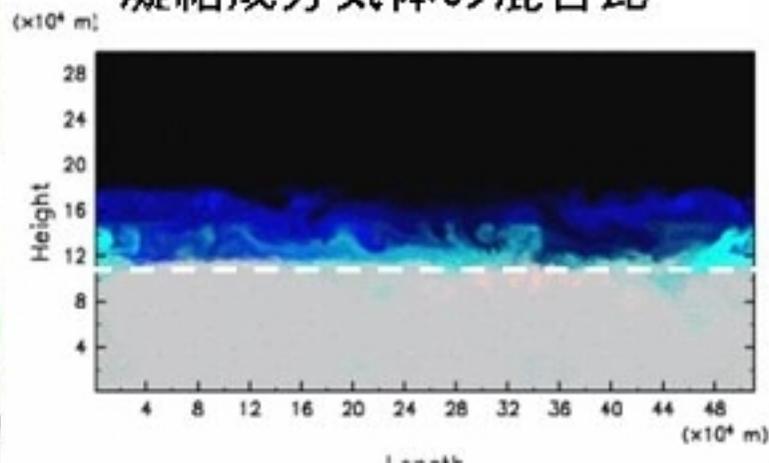
凝結物



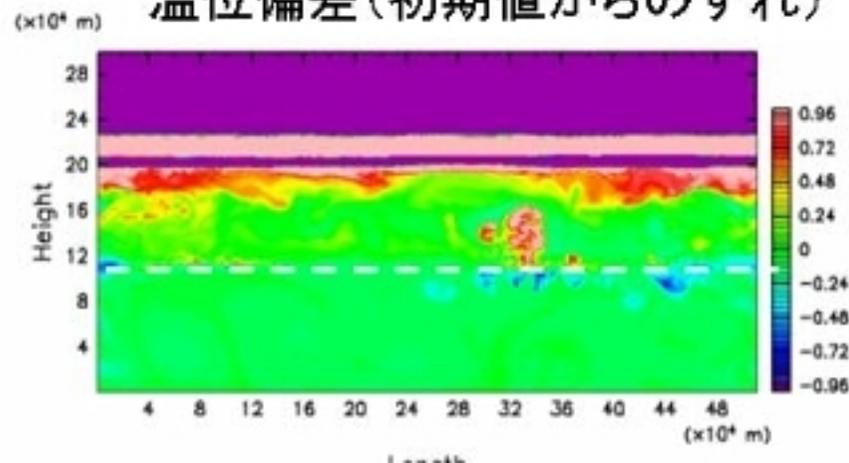
鉛直速度



凝結成分気体の混合比

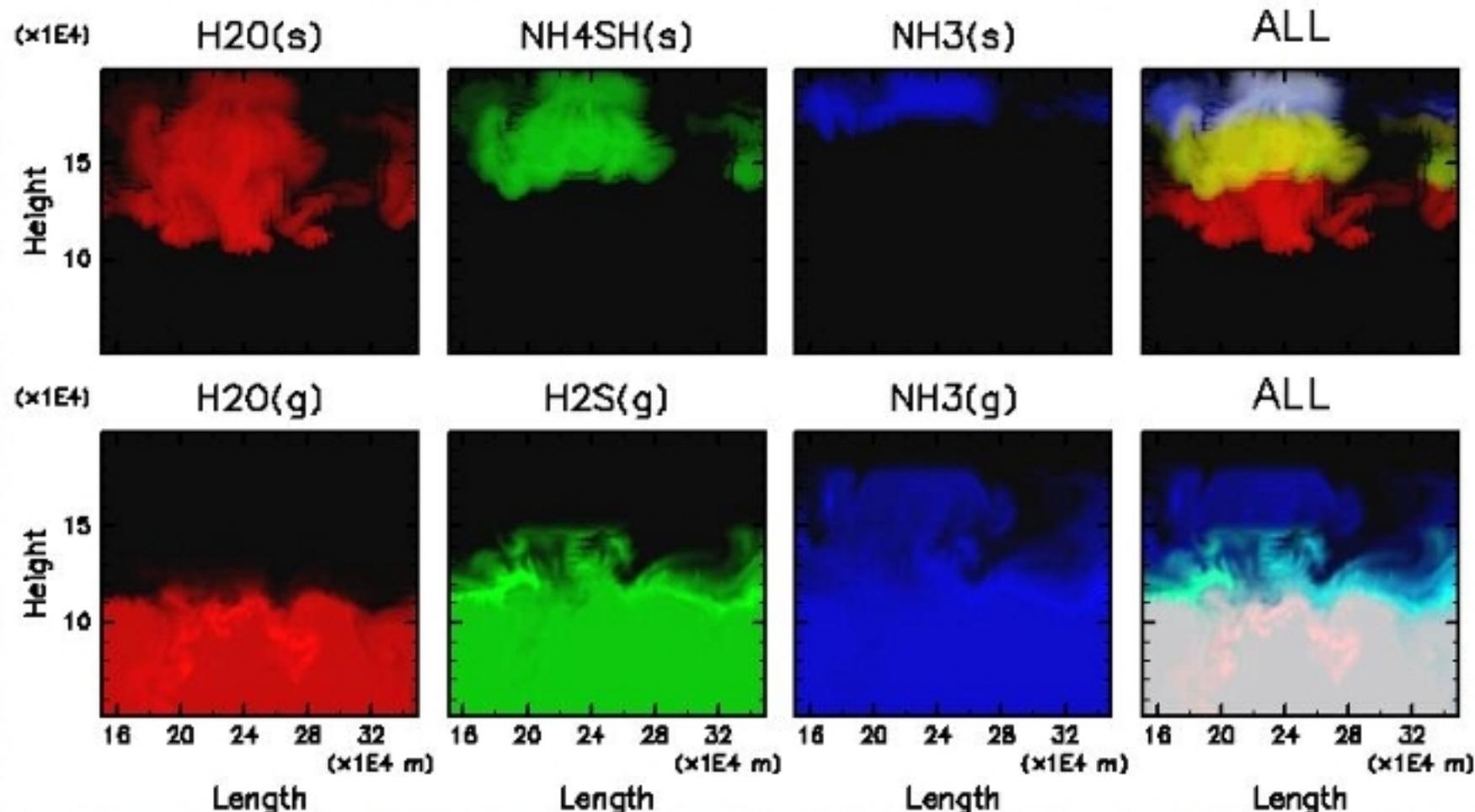


温位偏差(初期値からのずれ)



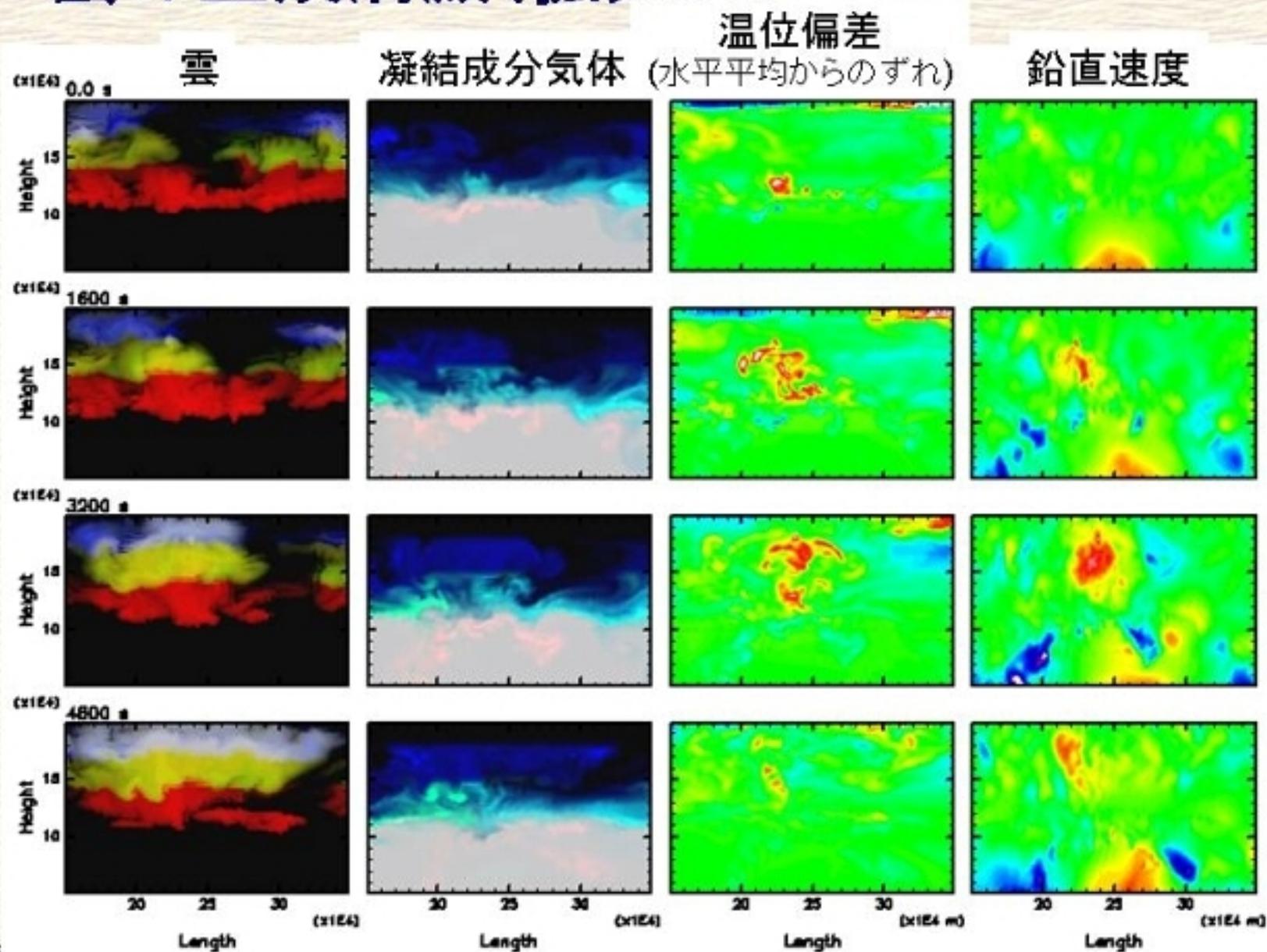
# 可視化方法

## ■ RGB合成

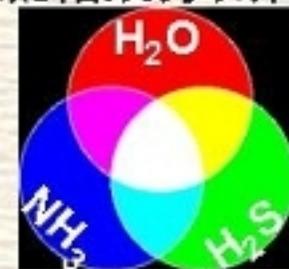


# 標準実験(1×solar 実験)の結果

## ■ 雲の生成消滅(拡大図)

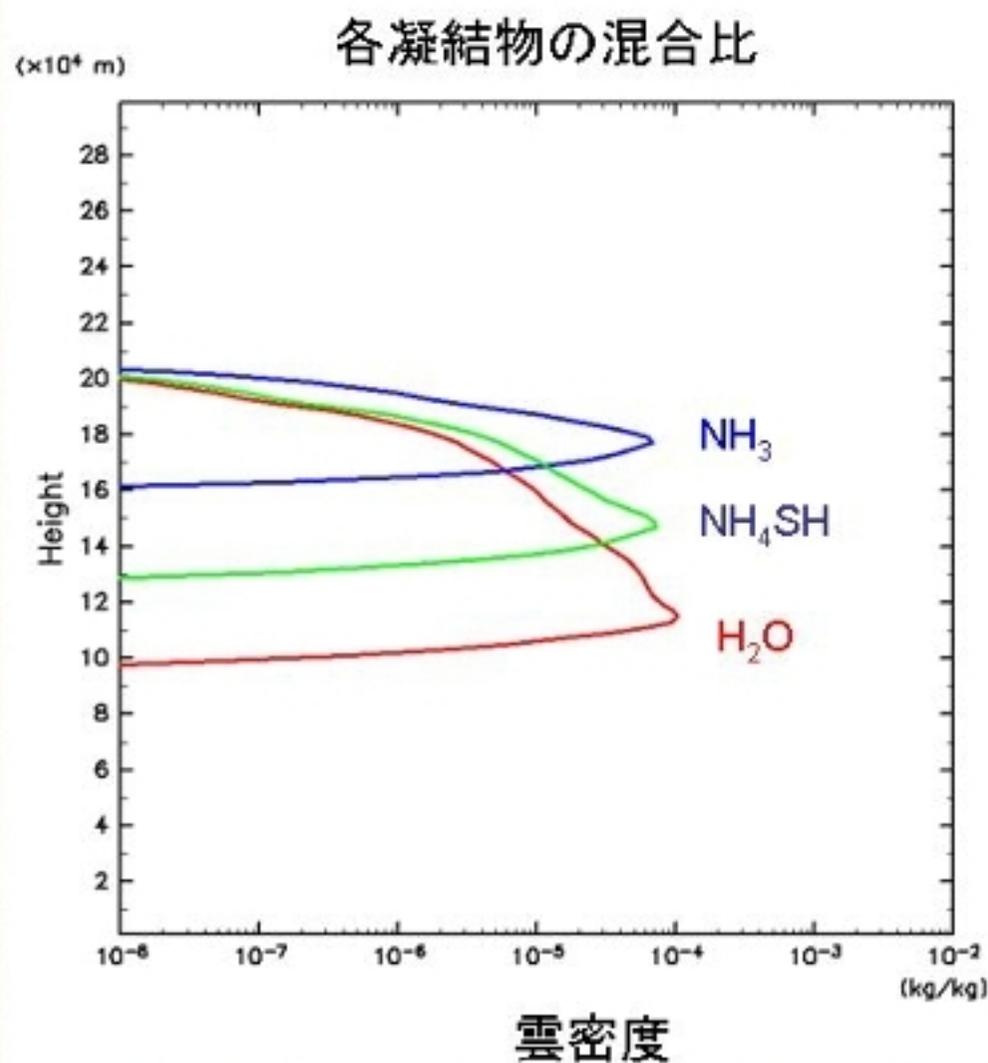


凝結成分気体



# 凝結物分布の水平・時間平均

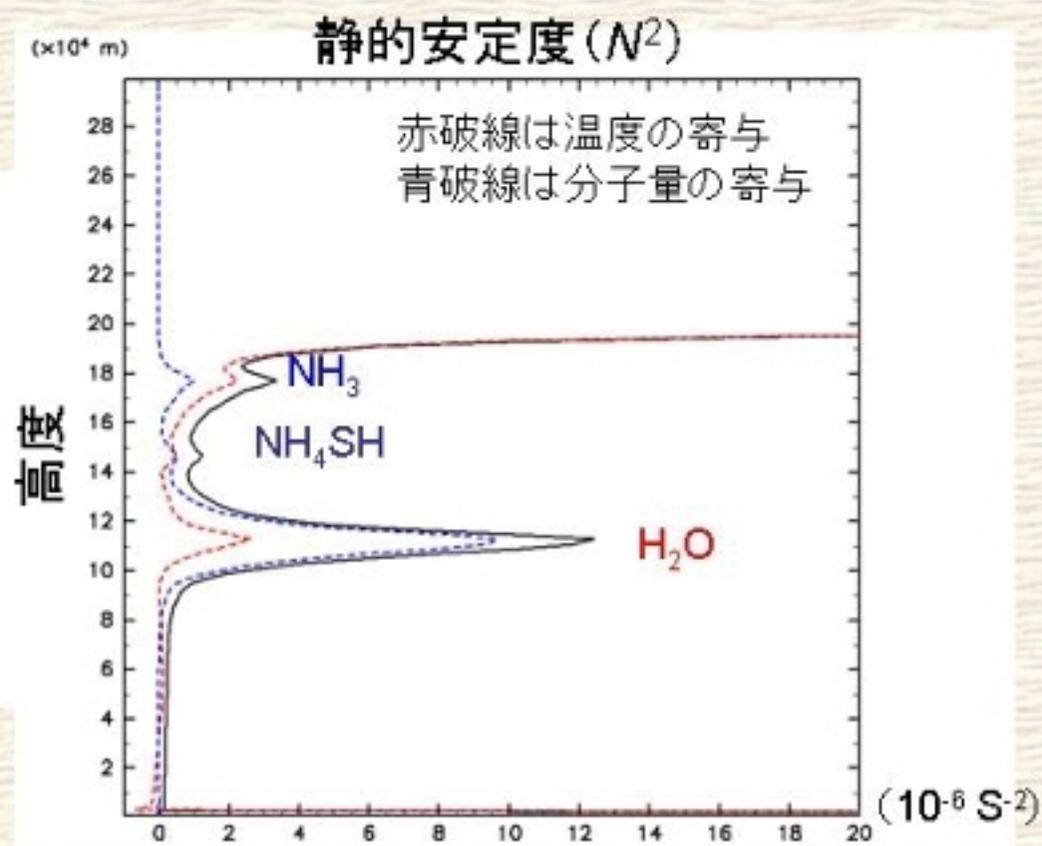
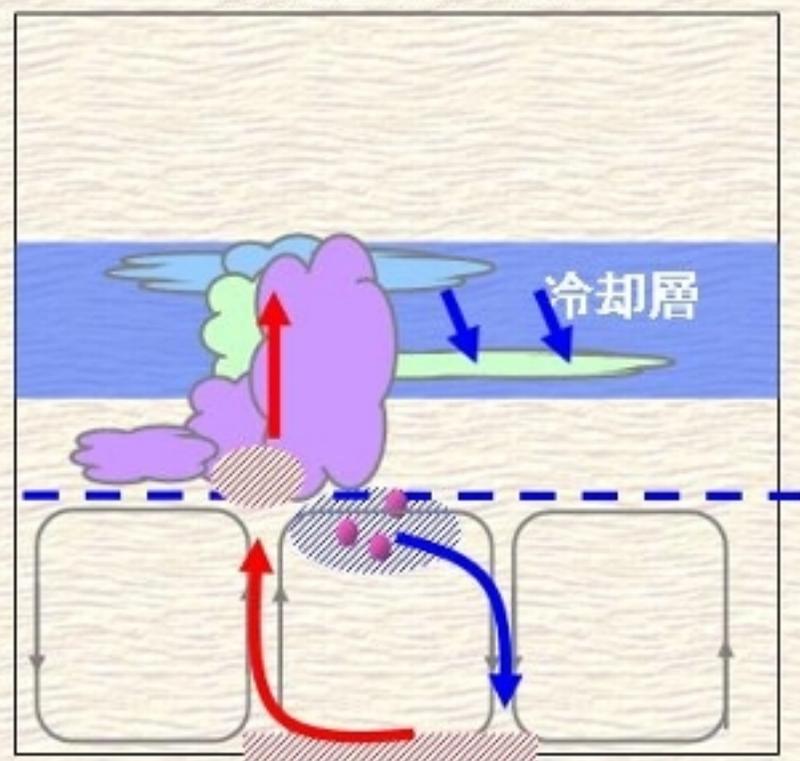
- 雲層は独立して存在しない
  - $H_2O$ ,  $NH_4SH$  の雲粒は  $NH_3$  凝結高度の上まで上昇
  - 従来の描像である3層構造と異なる



# 議論：対流運動の描像

- $H_2O$  凝結高度を境に鉛直運動は分割される
  - 上部： $H_2O$  雲の凝結に伴う加熱と放射冷却がバランス
  - 下部： $H_2O$  雨の蒸発による冷却と下部境界での加熱がバランス
- $H_2O$  凝結高度に強い安定層
  - $NH_3$  の凝結と  $NH_4SH$  の生成に伴う安定層は弱い

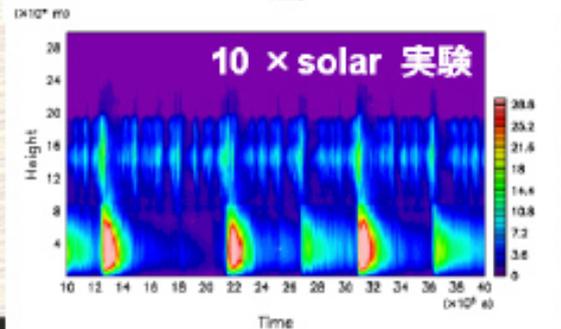
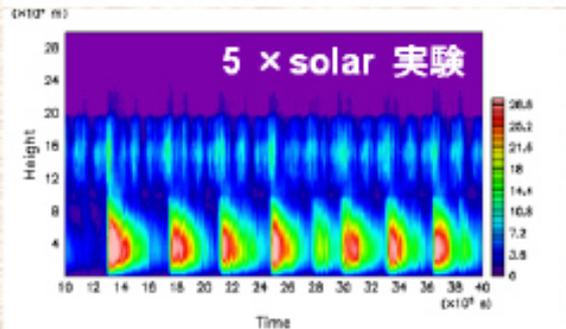
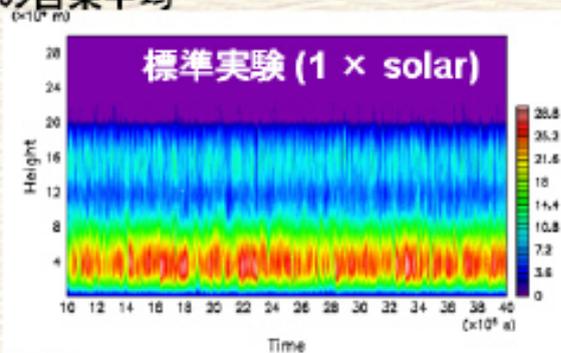
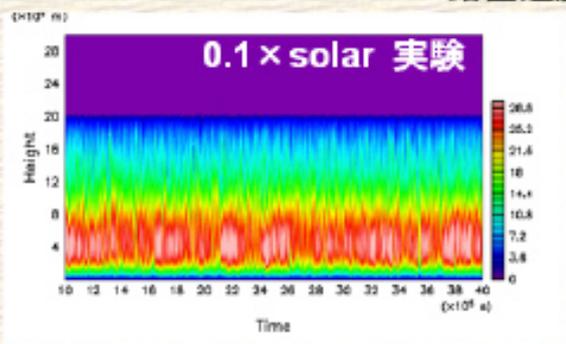
対流運動の描像



# 凝結成分を増減させると

- 凝結成分を減らすと、対流運動が上下に分割されなくなる
- 凝結成分を増やすと、対流運動が上下に分割され、さらに間欠性が増す

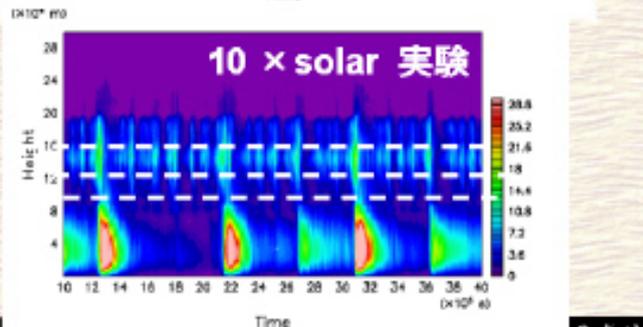
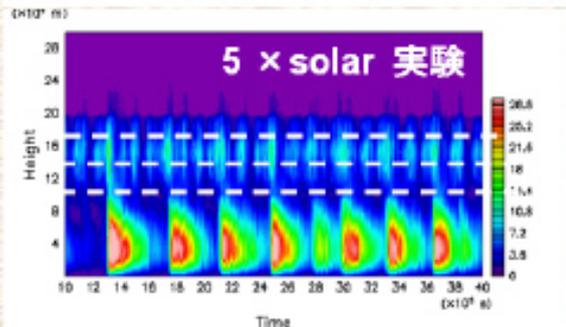
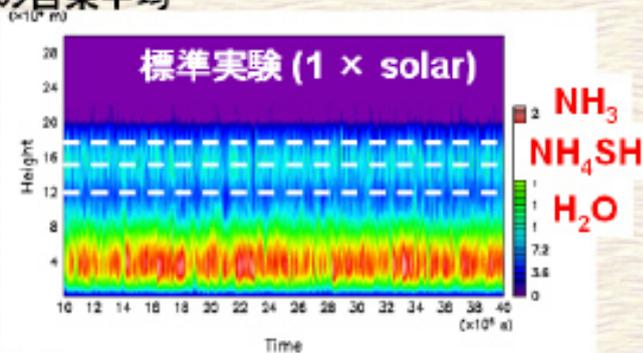
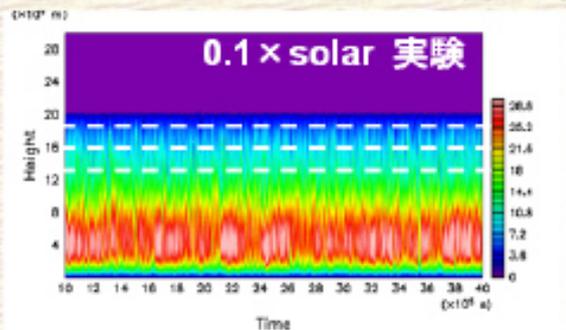
鉛直速度の自乗平均



# 凝結成分を増減させると

- 凝結成分を減らすと、対流運動が上下に分割されなくなる
- 凝結成分を増やすと、対流運動が上下に分割され、さらに間欠性が増す

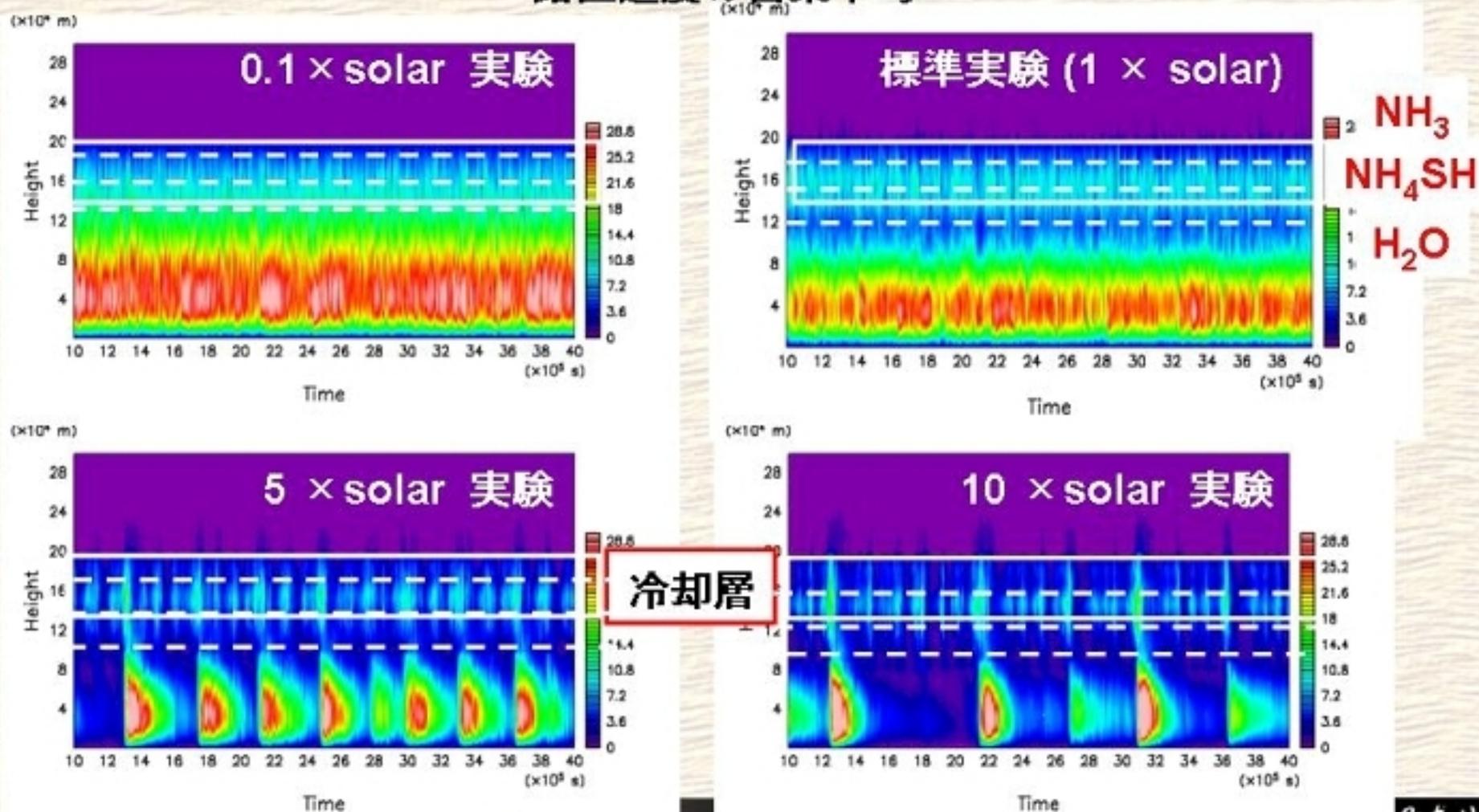
鉛直速度の自乗平均



# 凝結成分を増減させると

- 凝結成分を減らすと、対流運動が上下に分割されなくなる
- 凝結成分を増やすと、対流運動が上下に分割され、さらに間欠性が増す

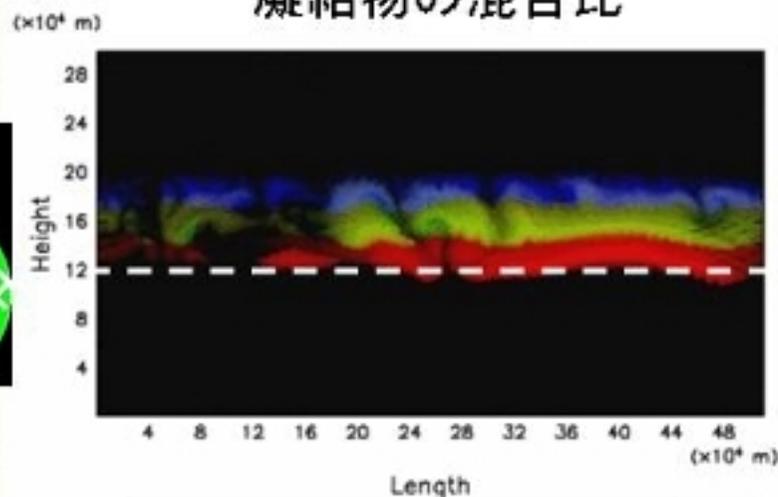
鉛直速度の自乗平均



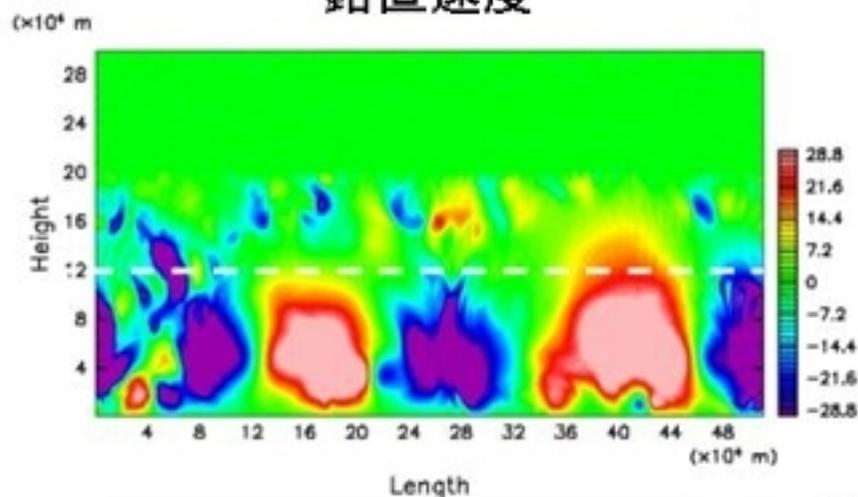
# 0.1 × solar 実験

- H<sub>2</sub>O 凝結高度での対流構造の区別が目立たない
- H<sub>2</sub>Oの雲は層状

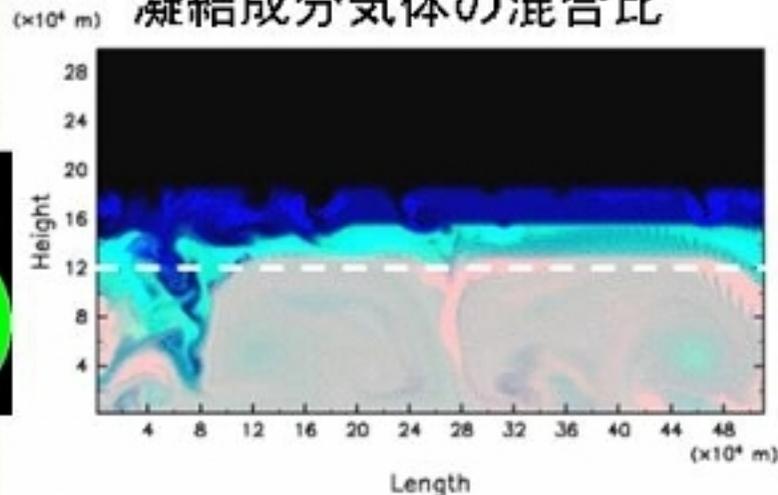
凝結物の混合比



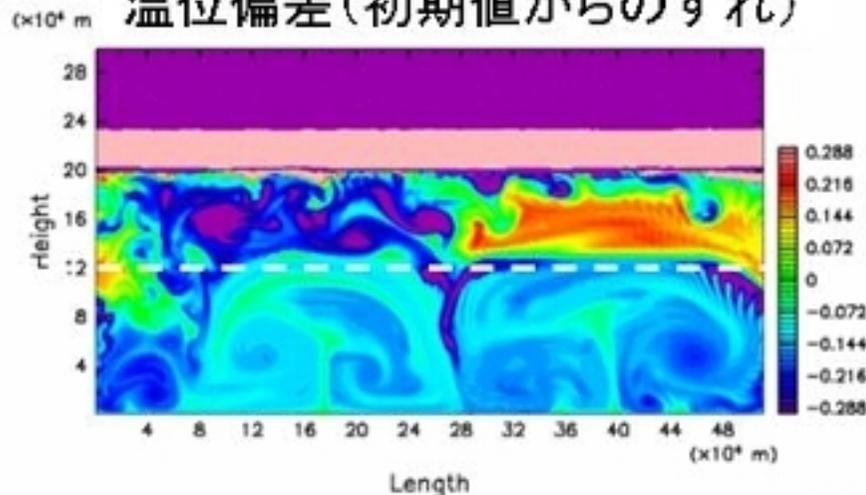
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



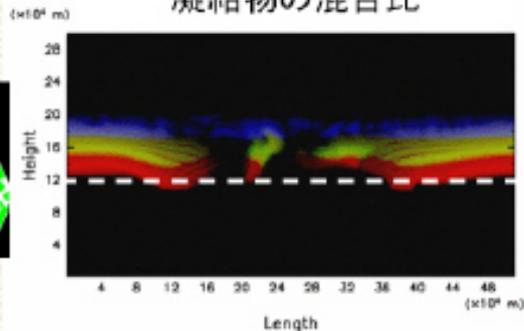
温位偏差 (初期値からのずれ)



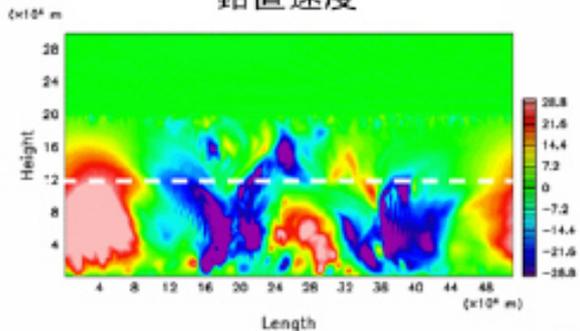
# 0.1 × solar 実験

- H<sub>2</sub>O 凝結高度での対流構造の区別が目立たない
- H<sub>2</sub>Oの雲は層状

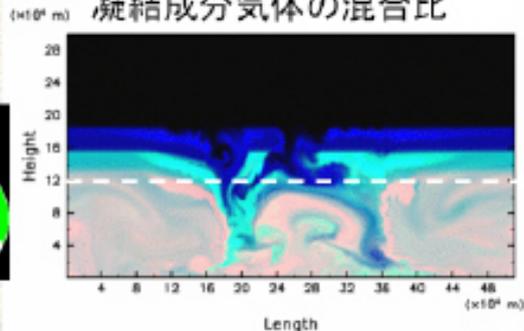
凝結物の混合比



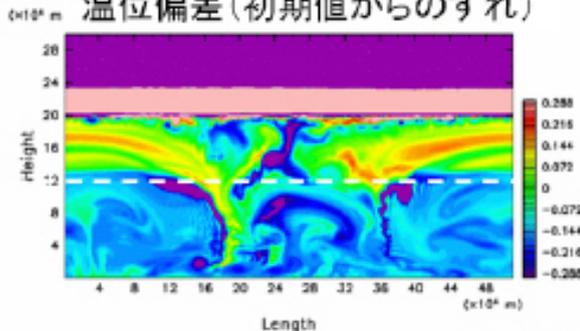
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



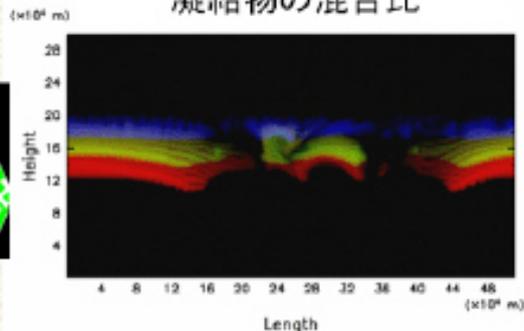
温位偏差 (初期値からのずれ)



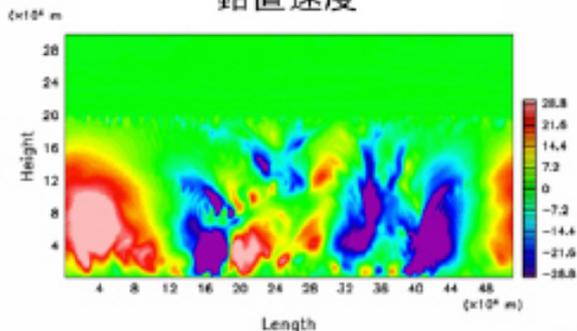
# 0.1 × solar 実験

- $H_2O$  凝結高度での対流構造の区別が目立たない
- $H_2O$ の雲は層状

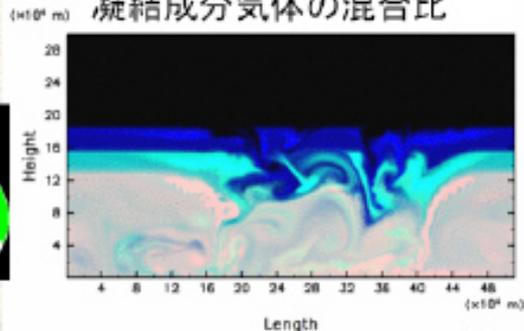
凝結物の混合比



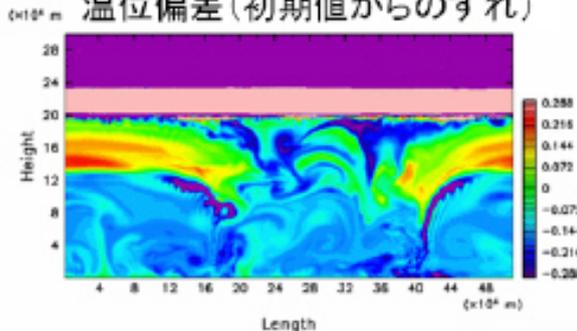
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



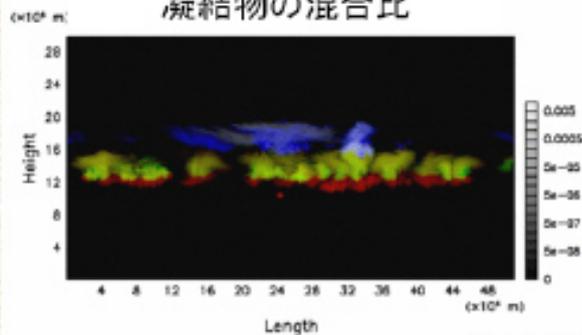
温位偏差 (初期値からのずれ)



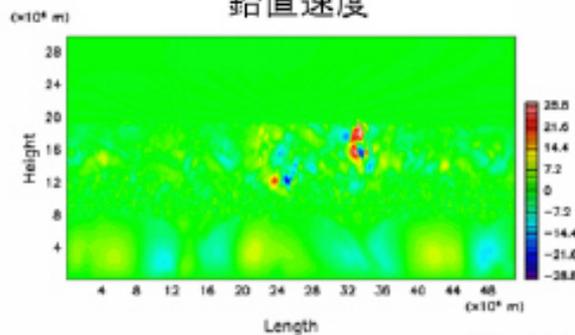
# 10 × solar 実験

- 間欠性が生じる
  - 静穏期:  $\text{NH}_3$  凝結高度と  $\text{NH}_4\text{SH}$  生成高度で局所的に対流
  - 活発期: 1 × solar と同じ特徴

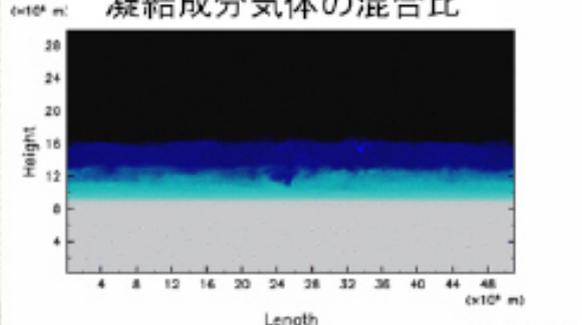
凝結物の混合比



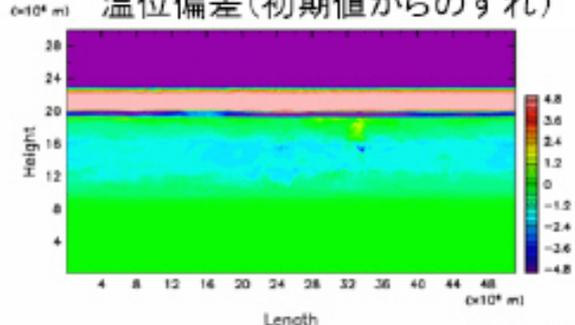
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



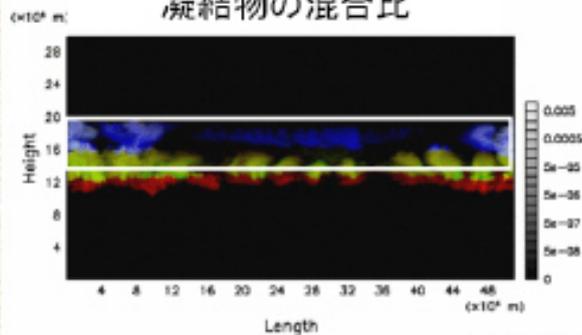
温位偏差 (初期値からのずれ)



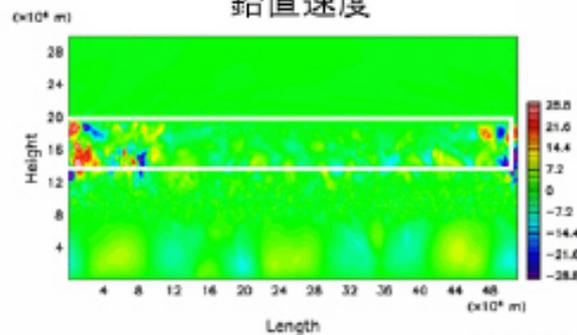
# 10 × solar 実験

- 間欠性が生じる
  - 静穏期:  $\text{NH}_3$  凝結高度と  $\text{NH}_4\text{SH}$  生成高度で局所的に対流
  - 活発期: 1 × solar と同じ特徴

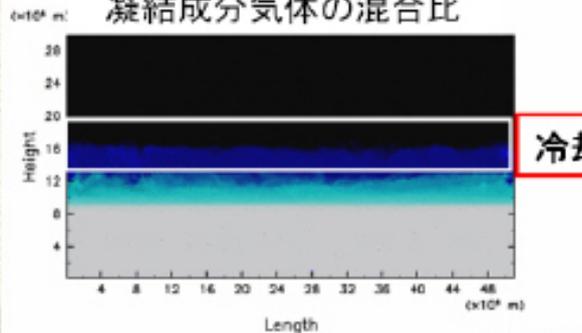
凝結物の混合比



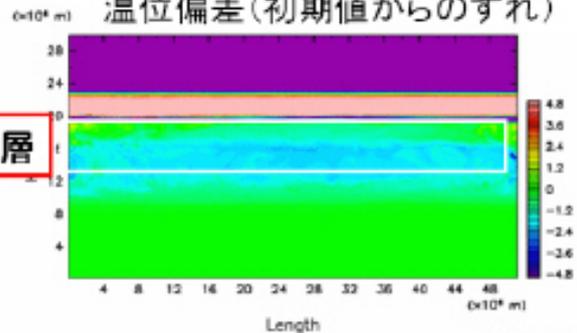
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



温位偏差 (初期値からのずれ)

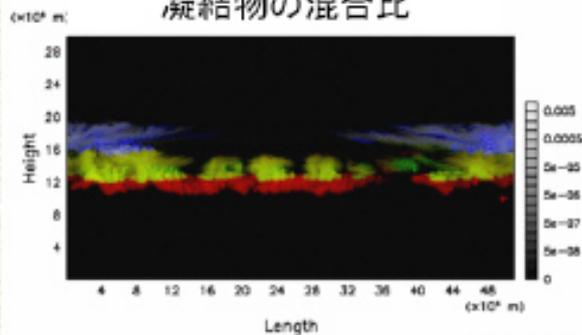


冷却層

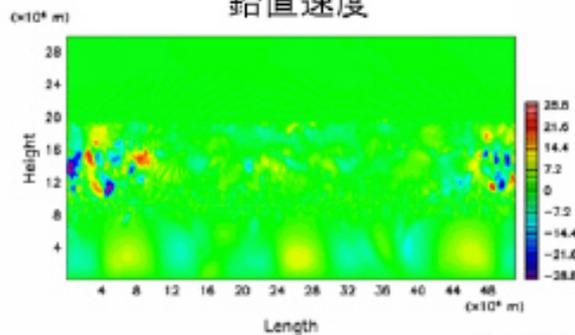
# 10 × solar 実験

- 間欠性が生じる
  - 静穏期:  $\text{NH}_3$  凝結高度と  $\text{NH}_4\text{SH}$  生成高度で局所的に対流
  - 活発期: 1 × solar と同じ特徴

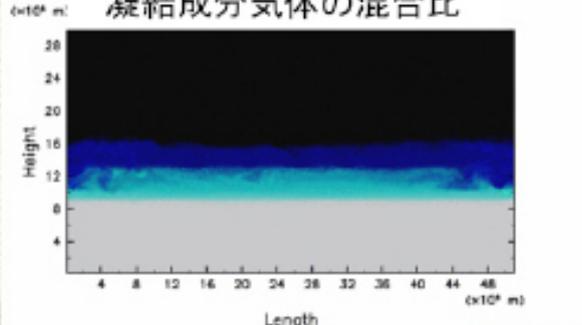
凝結物の混合比



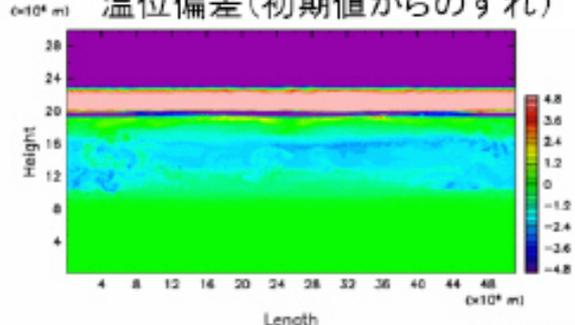
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



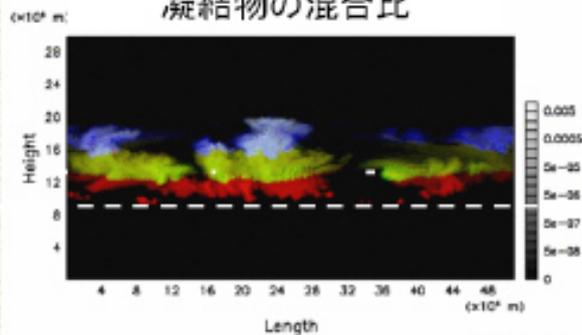
温位偏差 (初期値からのずれ)



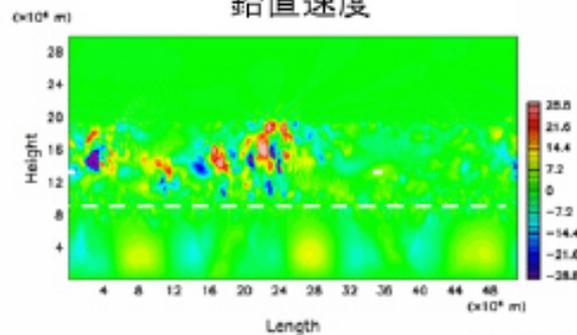
# 10 × solar 実験

- 間欠性が生じる
  - 静穏期:  $\text{NH}_3$  凝結高度と  $\text{NH}_4\text{SH}$  生成高度で局所的に対流
  - 活発期: 1 × solar と同じ特徴

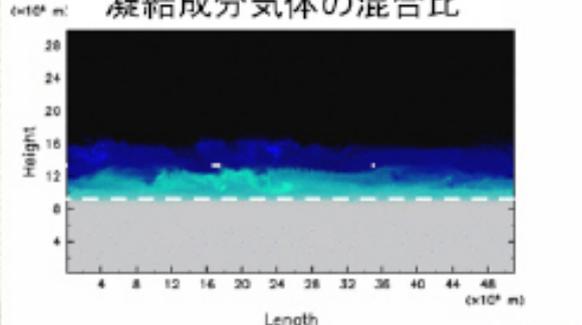
凝結物の混合比



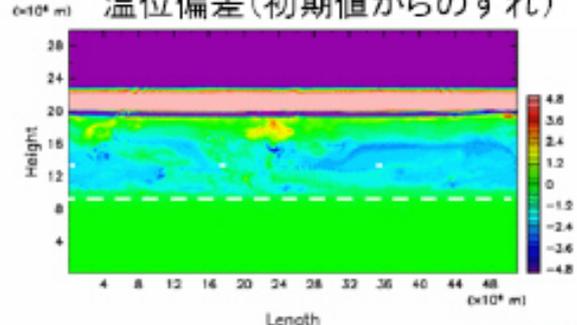
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



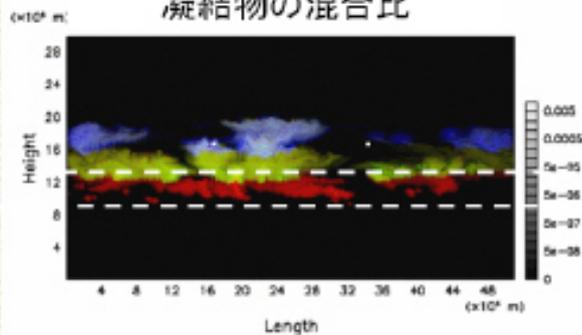
温位偏差 (初期値からのずれ)



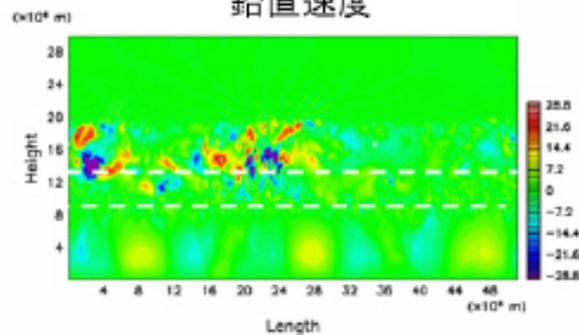
# 10 × solar 実験

- 間欠性が生じる
  - 静穏期:  $\text{NH}_3$  凝結高度と  $\text{NH}_4\text{SH}$  生成高度で局所的に対流
  - 活発期: 1 × solar と同じ特徴

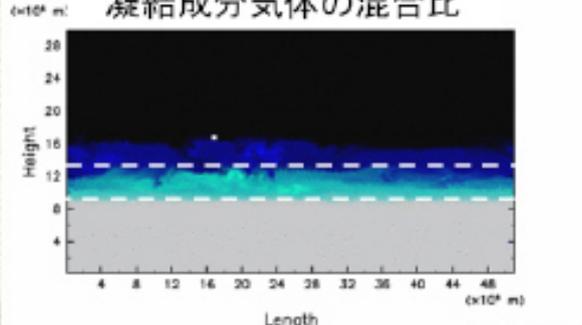
凝結物の混合比



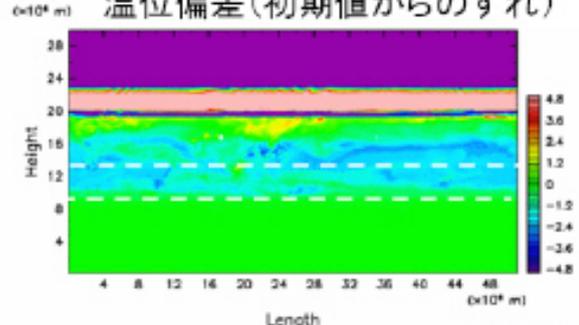
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



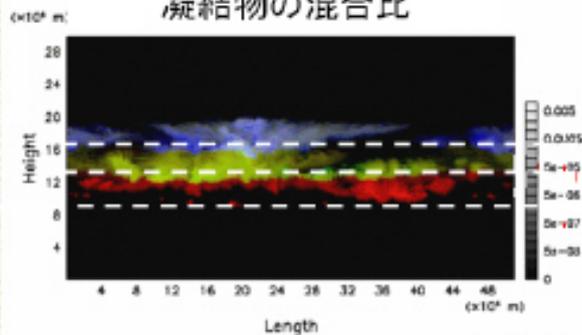
温位偏差 (初期値からのずれ)



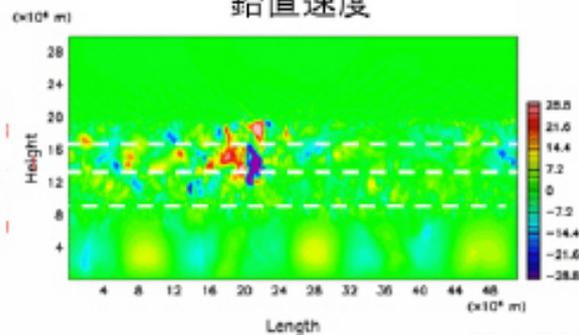
# 10 × solar 実験

- 間欠性が生じる
  - 静穏期:  $\text{NH}_3$  凝結高度と  $\text{NH}_4\text{SH}$  生成高度で局所的に対流
  - 活発期: 1 × solar と同じ特徴

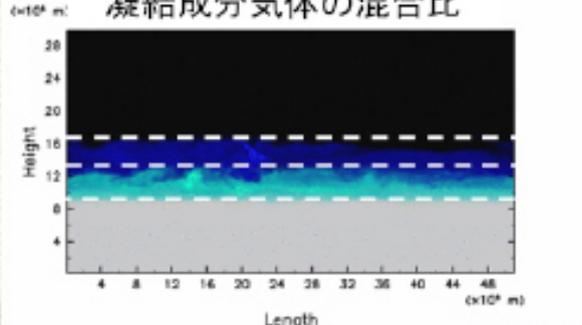
凝結物の混合比



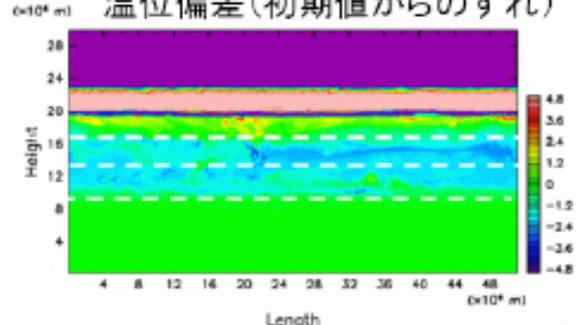
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



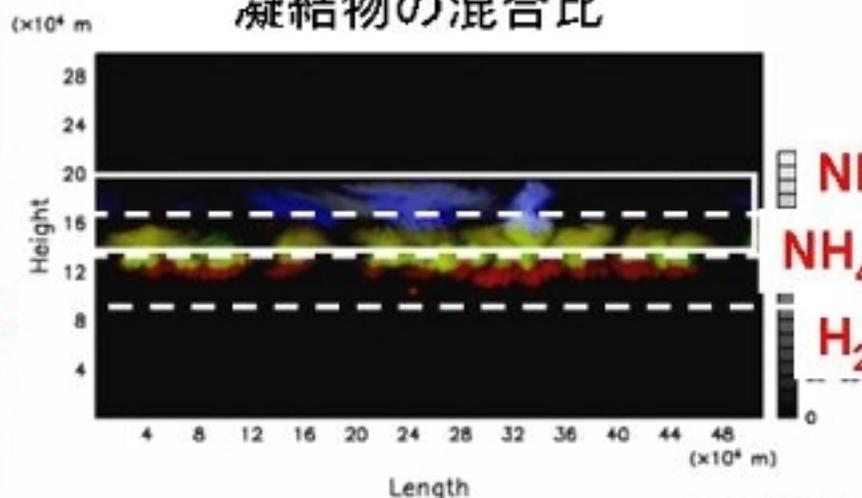
温位偏差 (初期値からのずれ)



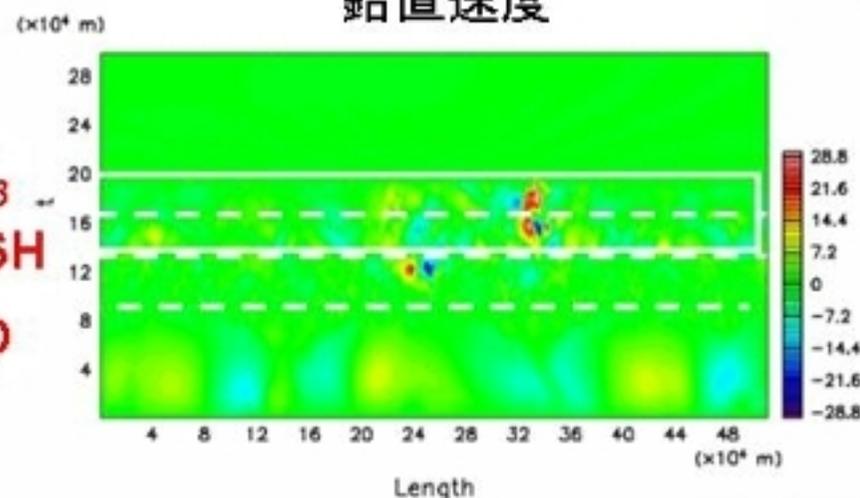
# 10 × solar 実験

- 間欠性が生じる
  - 静穏期:  $\text{NH}_3$  凝結高度と  $\text{NH}_4\text{SH}$  生成高度で局所的に対流
  - 活発期: 1 × solar と同じ特徴

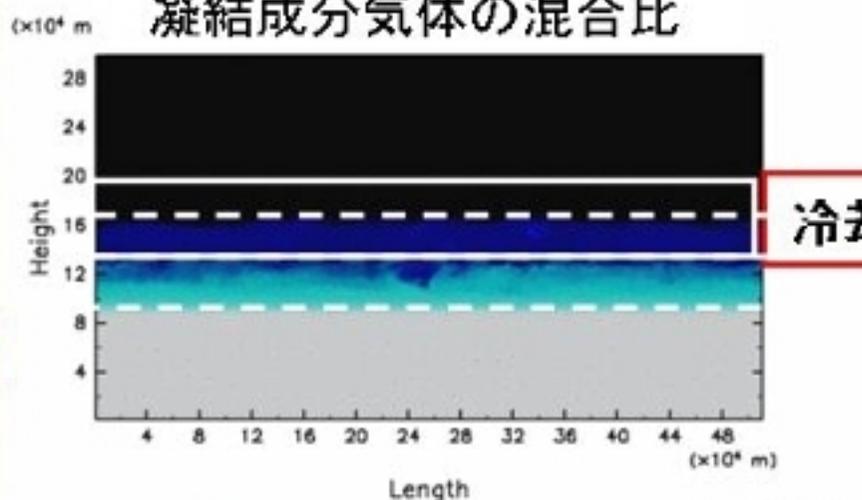
凝結物の混合比



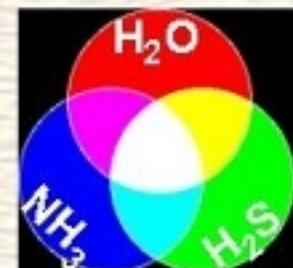
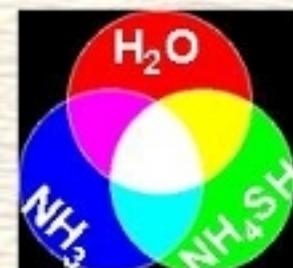
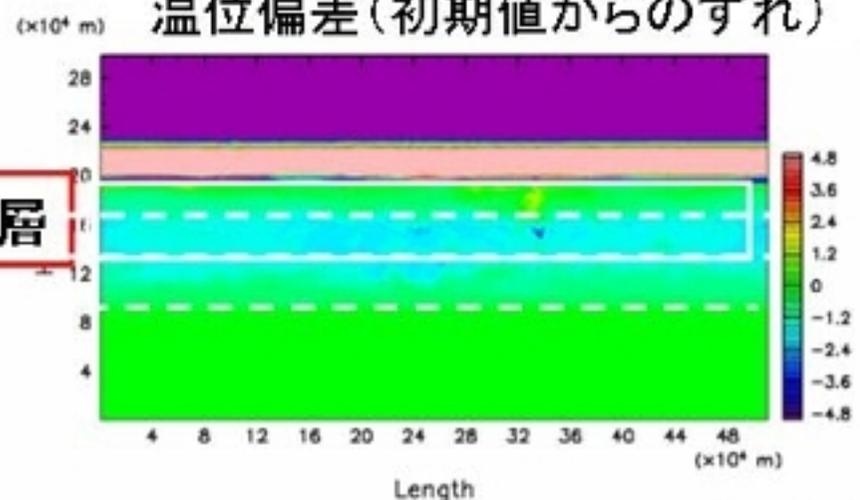
鉛直速度



凝結成分気体の混合比



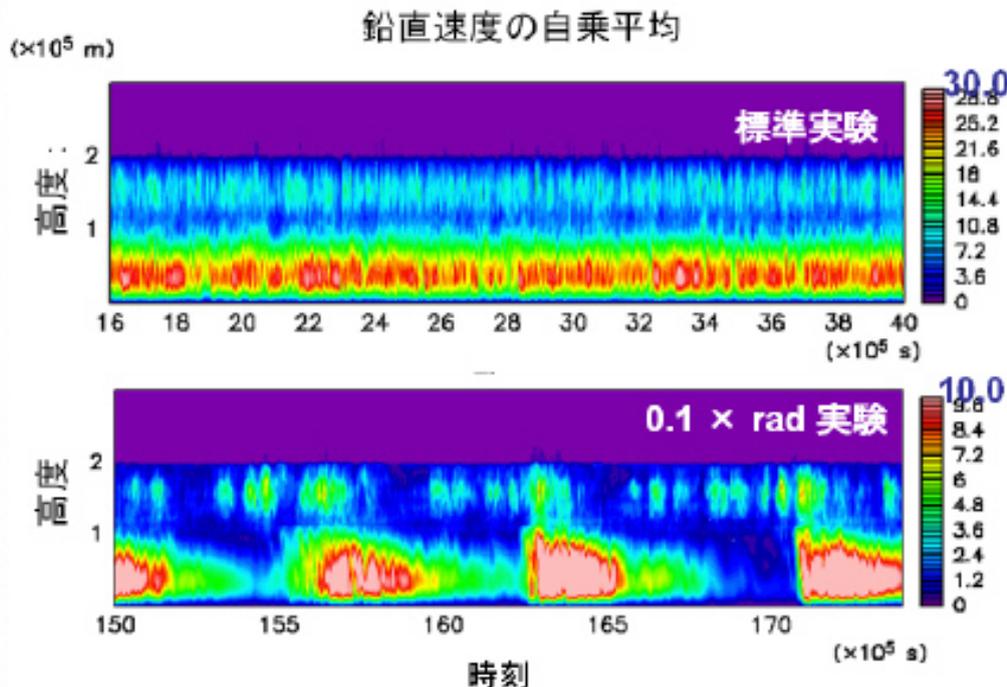
温位偏差 (初期値からのずれ)



# 冷却率を小さくすると

## ■ 対流活動は間欠的になる

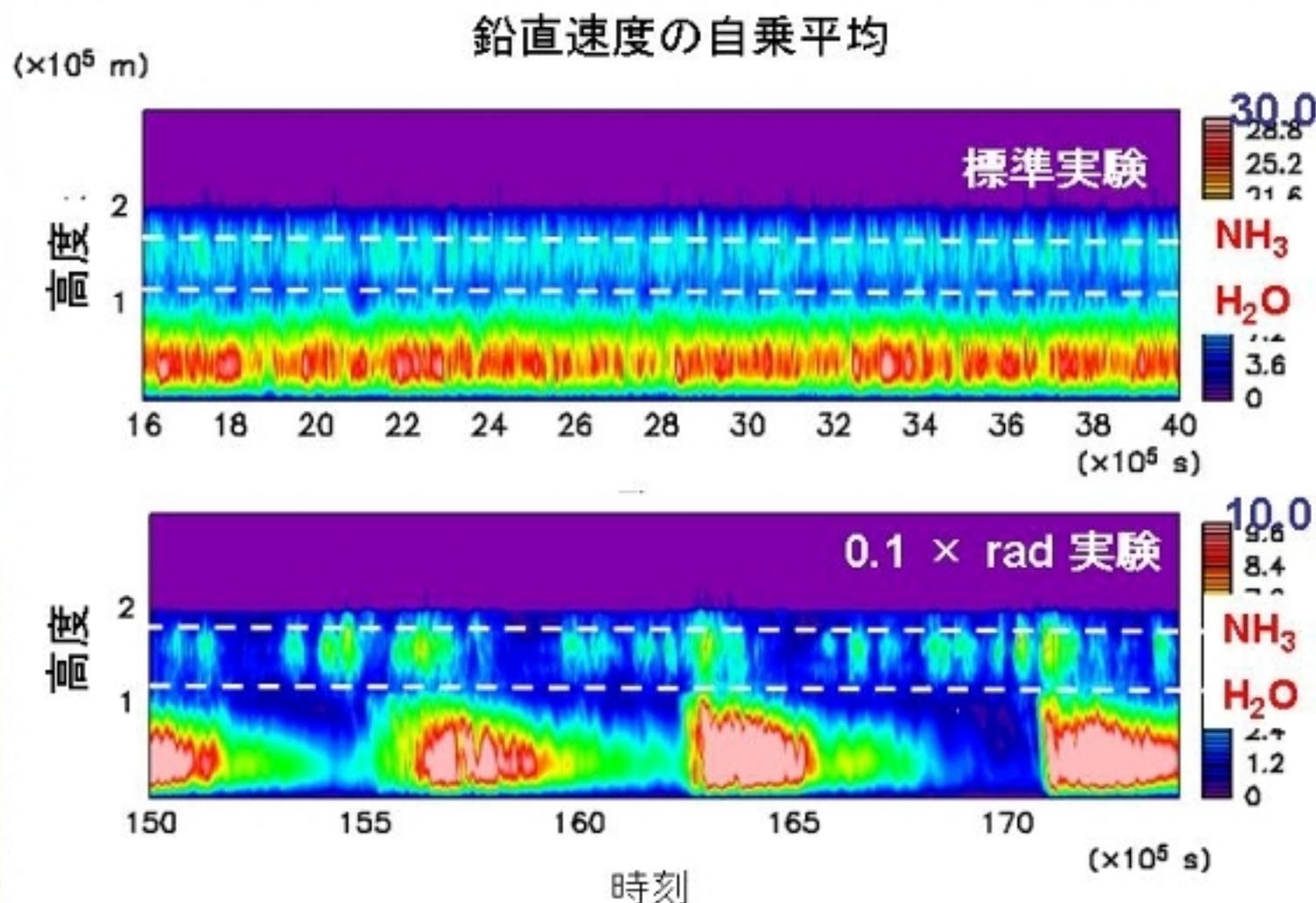
- $H_2O$  凝結高度で対流運動が鉛直方向に分離する特徴は同じ



# 冷却率を小さくすると

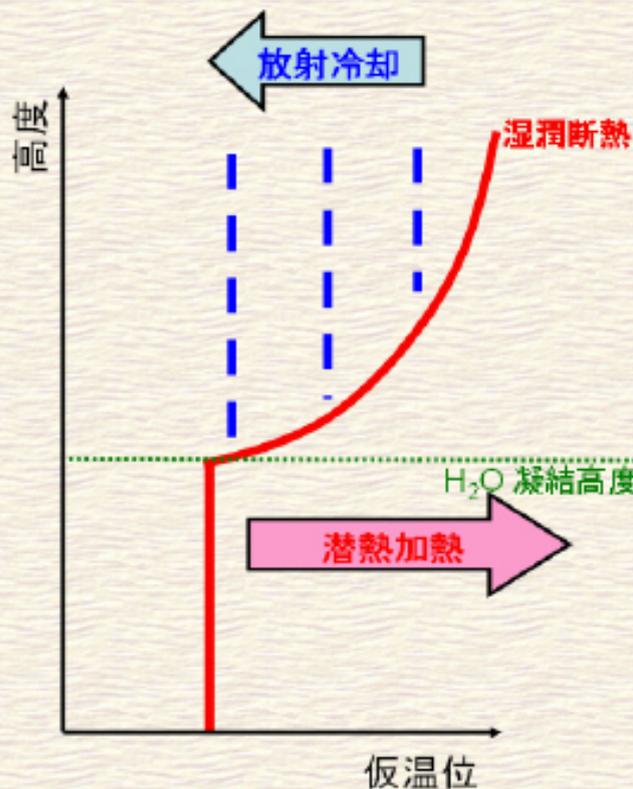
## ■ 対流活動は間欠的になる

- $H_2O$  凝結高度で対流運動が鉛直方向に分離する特徴は同じ



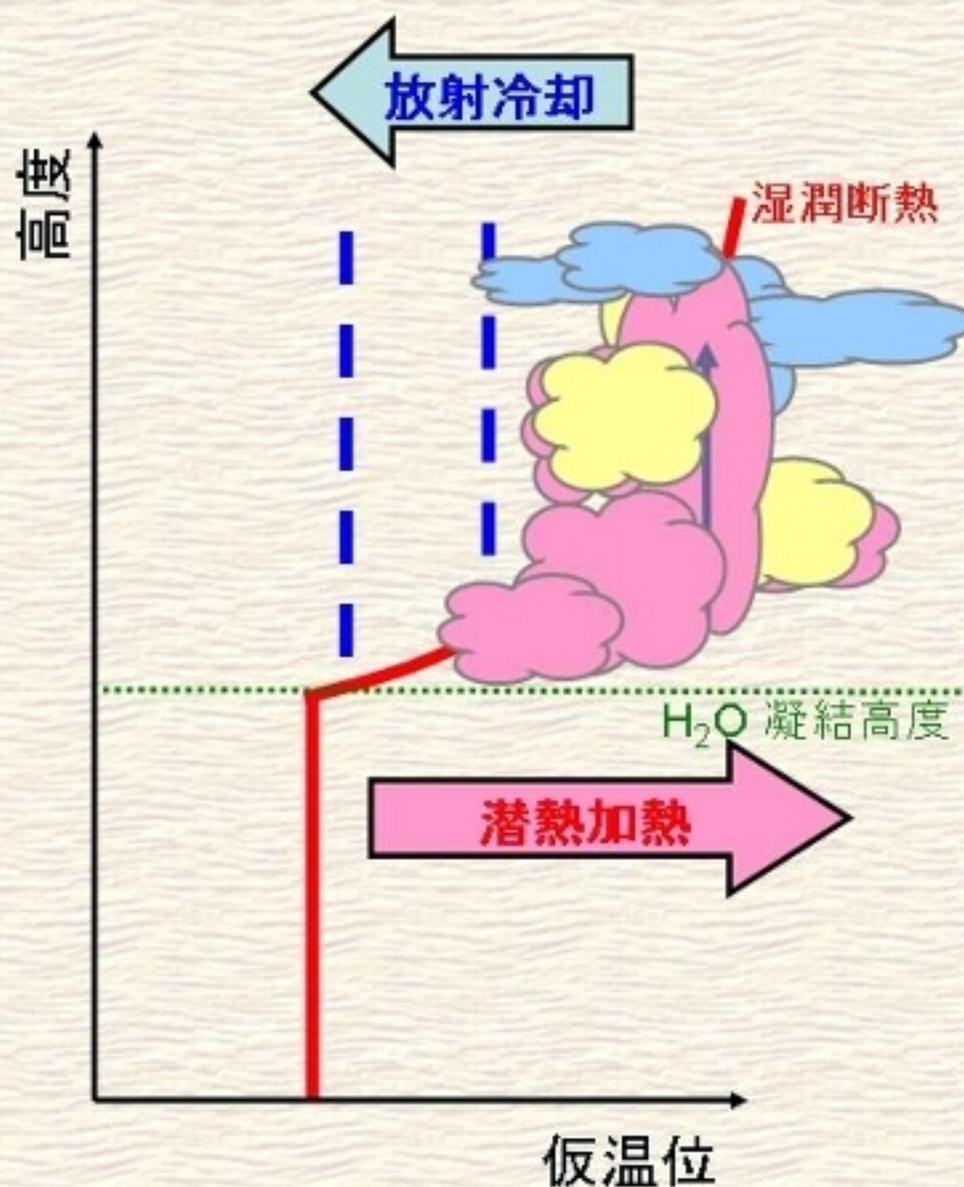
# 議論:なぜ間欠的?

- 活発な対流によって、雲層領域の温度は湿潤断熱的に
  - 凝結成分は雨として落下
- 放射によって温度が下がる
  - 対流圏上部で弱い対流
- 対流活動が  $H_2O$  凝結高度まで下降すると、再び対流活動は活発化
  - $H_2O$  凝結高度より下方の対流も駆動



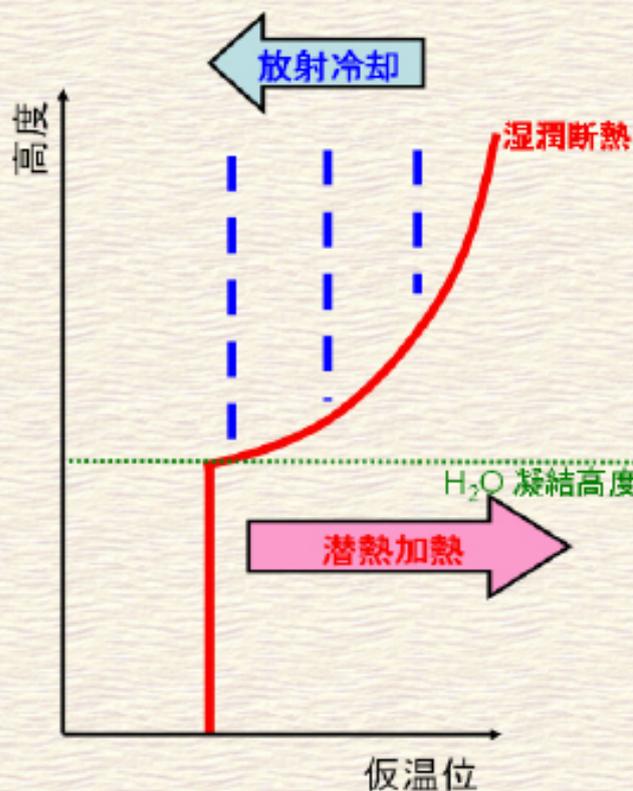
# 議論：なぜ間欠的？

- 活発な対流によって、雲層領域の温度は湿潤断熱的に
  - 凝結成分は雨として落下
- 放射によって温度が下がる
  - 対流圏上部で弱い対流
- 対流活動が  $H_2O$  凝結高度まで下降すると、再び対流活動は活発化
  - $H_2O$  凝結高度より下方の対流も駆動



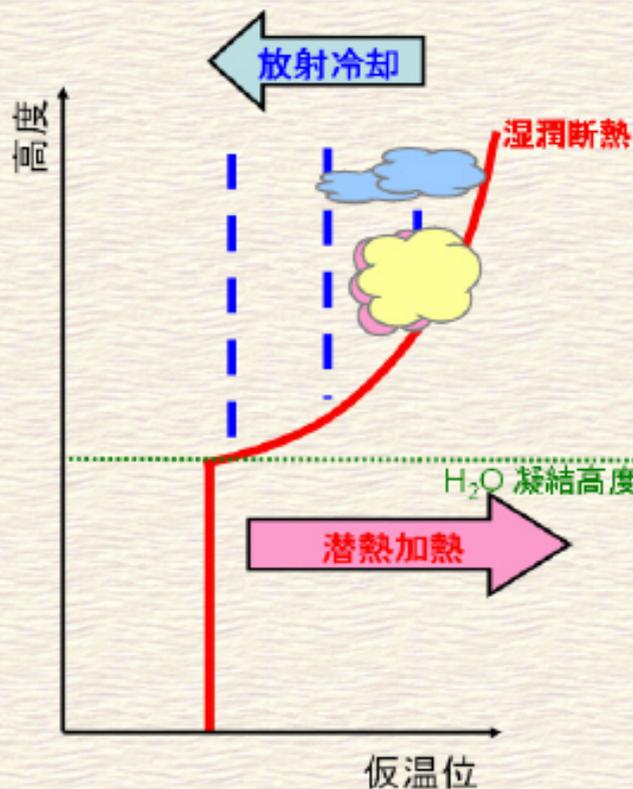
# 議論:なぜ間欠的?

- 活発な対流によって、雲層領域の温度は湿潤断熱的に
  - 凝結成分は雨として落下
- 放射によって温度が下がる
  - 対流圏上部で弱い対流
- 対流活動が  $H_2O$  凝結高度まで下降すると、再び対流活動は活発化
  - $H_2O$  凝結高度より下方の対流も駆動



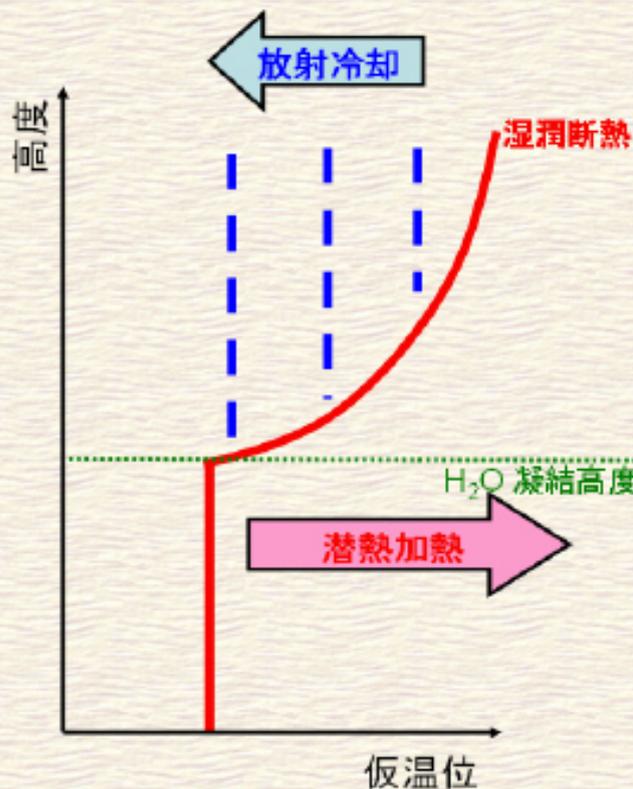
# 議論:なぜ間欠的?

- 活発な対流によって, 雲層領域の温度は湿潤断熱的に
  - 凝結成分は雨として落下
- 放射によって温度が下がる
  - 対流圏上部で弱い対流
- 対流活動が  $H_2O$  凝結高度まで下降すると, 再び対流活動は活発化
  - $H_2O$  凝結高度より下方の対流も駆動



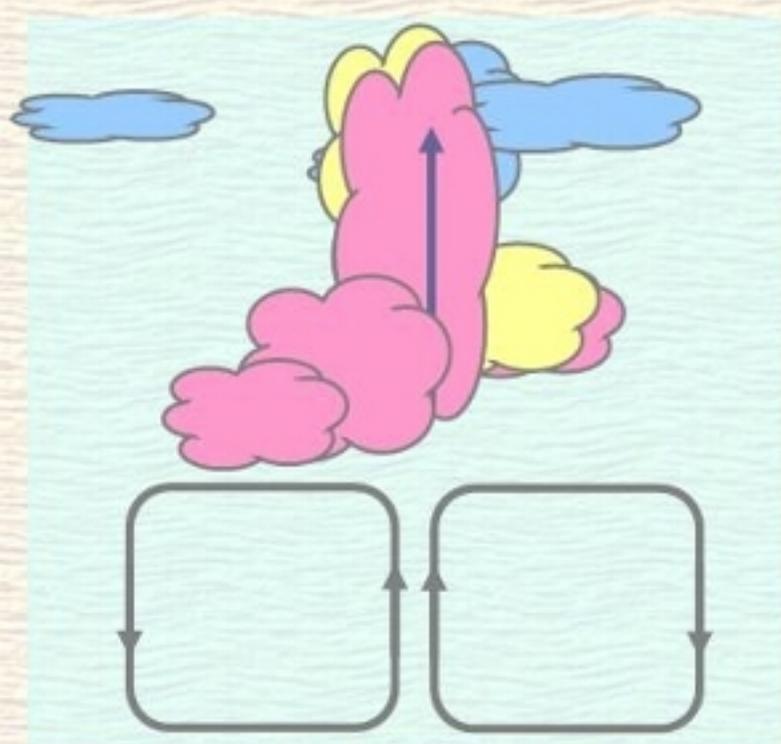
# 議論:なぜ間欠的?

- 活発な対流によって、雲層領域の温度は湿潤断熱的に
  - 凝結成分は雨として落下
- 放射によって温度が下がる
  - 対流圏上部で弱い対流
- 対流活動が  $H_2O$  凝結高度まで下降すると、再び対流活動は活発化
  - $H_2O$  凝結高度より下方の対流も駆動



# まとめ(1): 標準実験の結果

- 雲対流に伴う, 対流運動の鉛直構造と凝結成分の鉛直分布を調べた
  - $H_2O$  凝結高度を境に鉛直運動は分割される
  - $H_2O$  と  $NH_4SH$  の雲粒は対流圏上部まで移流される
    - ◆ 従来の熱平衡計算による描像とは明らかに異なる
  - 乾燥気塊は  $H_2O$  凝結高度の下までは移流されない
    - ◆ ガリレオプローブが観測したような乾燥状態は実現されない



# まとめ(2)

## ■ 凝結成分を減らすと...

- 層状性の雲
  - ◆ 観測と整合的でない
- 対流運動は上下に分割されない

## ■ 凝結成分を増やすと...

- 対流運動は  $H_2O$  凝結高度を境に上下に分割
- 対流活動は間欠的
  - ◆ 活発期:  $H_2O$  雲と  $NH_4SH$  雲が対流圏上端まで上昇
  - ◆ 静穏期:  $NH_3$  凝結高度と  $NH_4SH$  生成高度で局所的に対流

## ■ 放射冷却を弱くすると....

- 凝結成分を増加させた時と同じ傾向
- 潜熱加熱 > 放射冷却