

木星大気の雲対流の数値計算

杉山 耕一郎(宇宙研), 中島 健介(九大理),
小高 正嗣(北大理), 倉本 圭(北大理), 林 祥介(神戸大理)

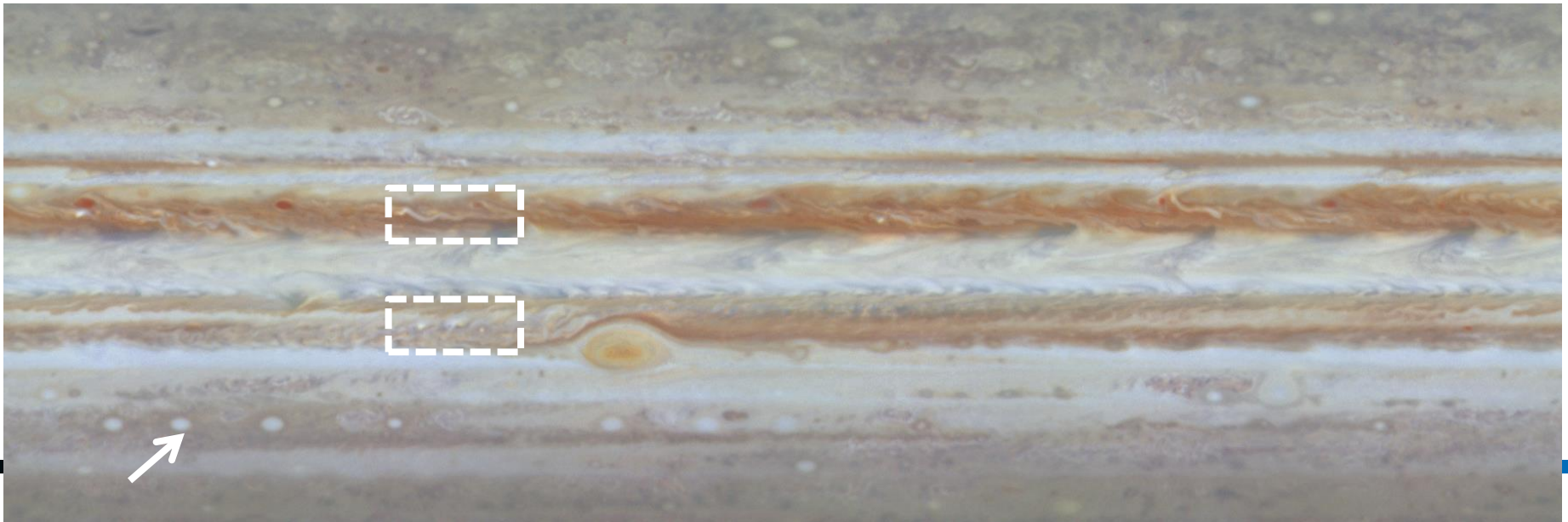
2015/07/09

目次

- ・ はじめに
 - 木星大気概観
 - 研究の目的
 - 木星の雲対流の見どころ（地球大気との違い）
- ・ モデルの概要 & 計算設定
- ・ 結果
 - 標準実験の結果
 - パラメタ実験の結果
- ・ 議論: 間欠性のメカニズム
- ・ まとめ

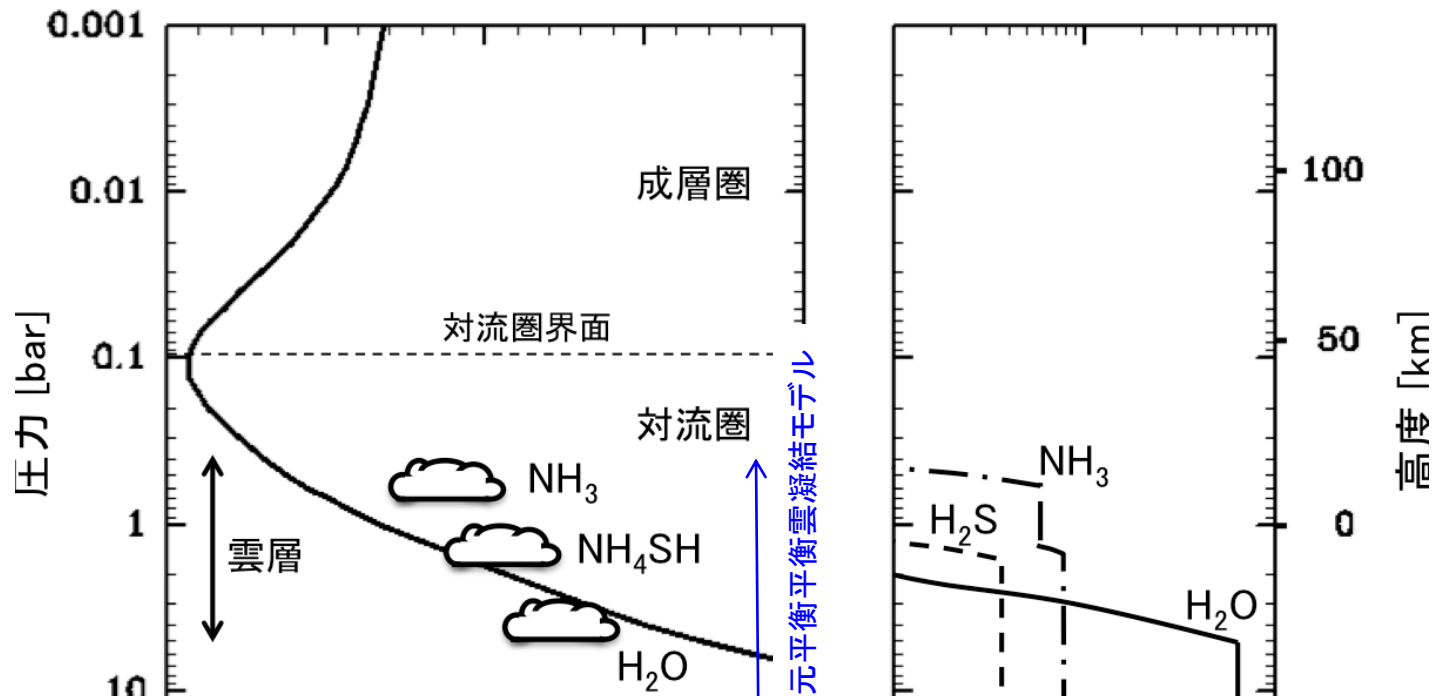
はじめに

- ・ 木星：雲に覆われた惑星
 - 明るい「帯」と暗い「縞」によって特徴付けられる。
 - 白斑や大赤斑といった多くの渦が見られる。
 - 縞の中には白く輝く活発な積雲が観測される。
- ・ 雲の模様の変動はそれなりに観測されているが、雲の下の大気の鉛直構造はよくわかっていない。



大気鉛直構造(理論的予想)

- 鉛直一次元の熱平衡計算(ECCM)によって推定
 - 断熱的に上昇する気塊中の化学熱平衡を仮定することで、平均的な温度・物質分布を得る



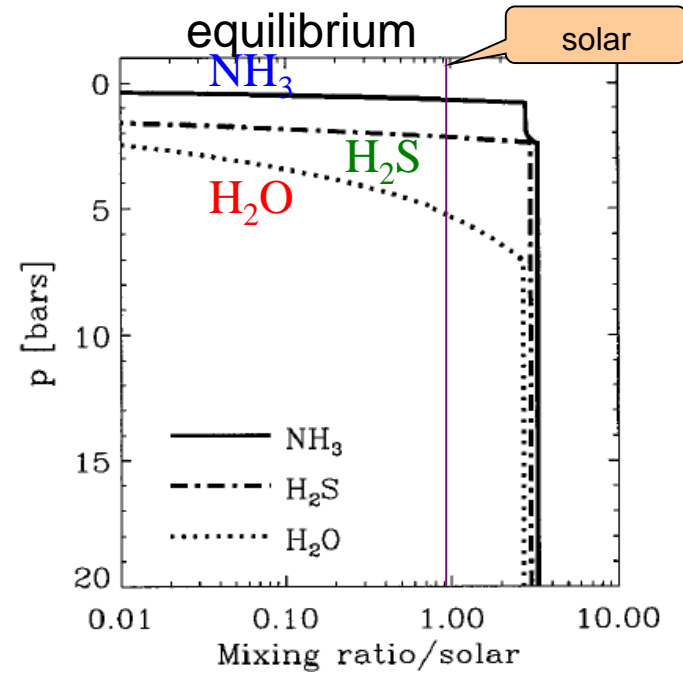
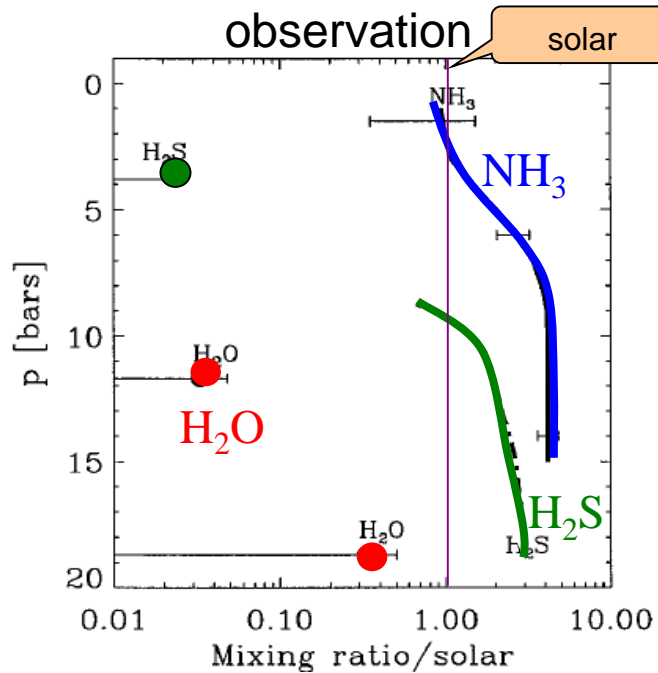
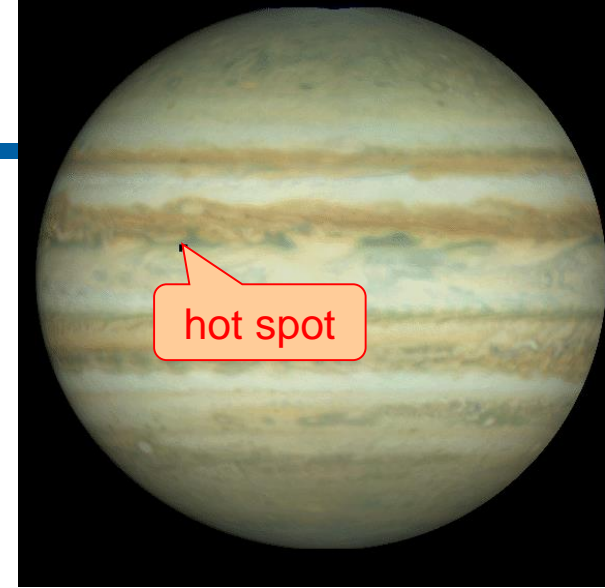
上昇域ではまだしも、上昇域・下降域も含めた大気全体の平均構造は、ECCMの結果と一致する保証は無い

温度 [K]

凝結性成分気体の混合比

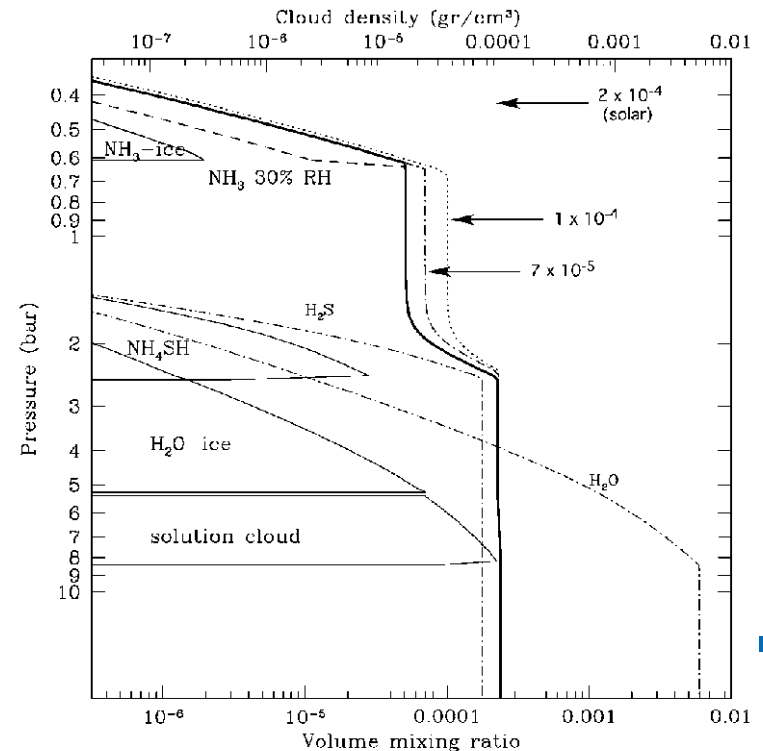
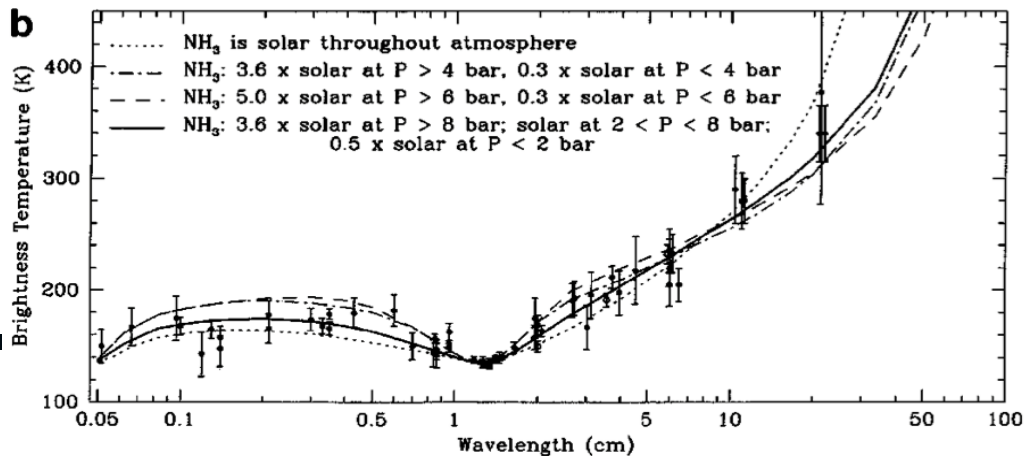
大気鉛直構造

- ・ ガリレオプローブによる 1 点観測
- ・ バルク組成
 - N/H & $S/H \sim 3$ solar, $O/H \sim$ 不明
- ・ 大気上部は非常に乾燥
- ・ 代表性は疑問
 - 雲のない領域(ホットスポット)を観測



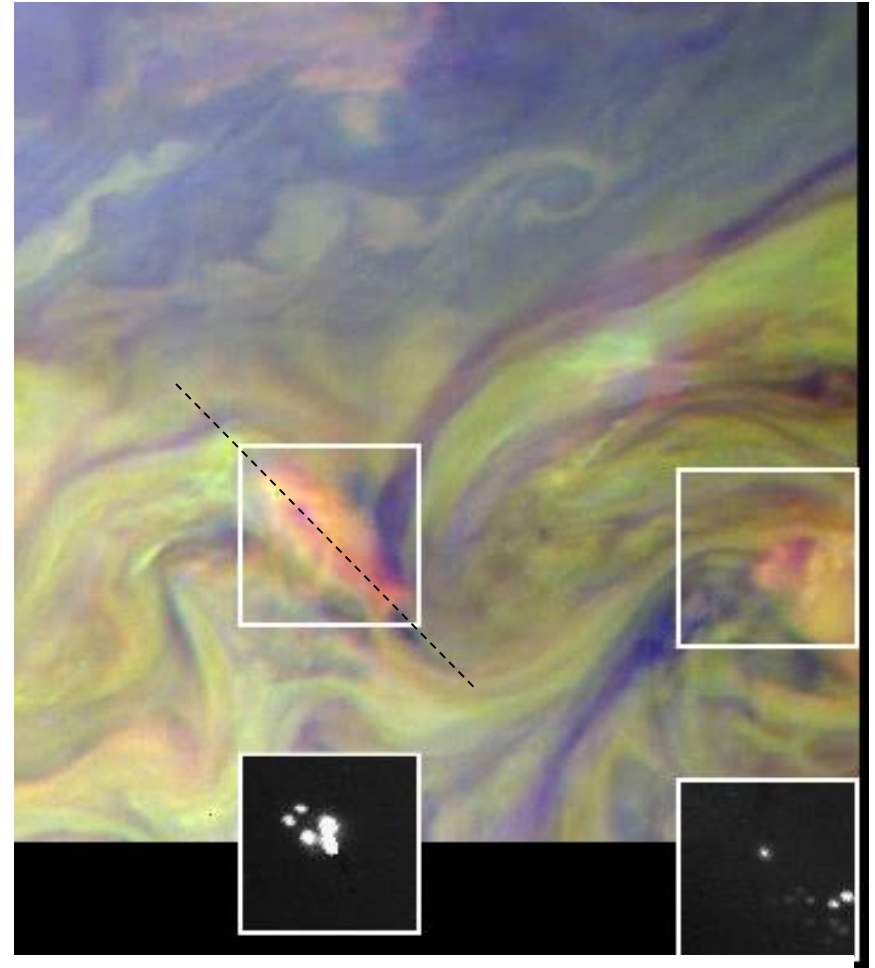
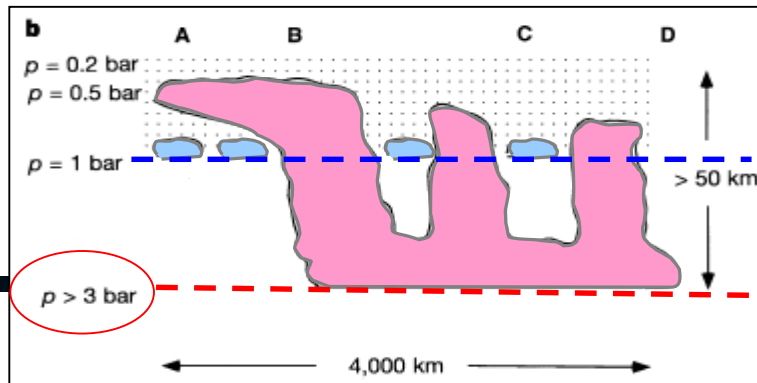
大気の鉛直構造(地上観測)

- ・ サブミリ波観測
 - 波長を選べば比較的深い所が探れる
- ・ アンモニア蒸気の鉛直分布
 - 0.6 bar < p < 2 bar において, 太陽組成の半分以下
- ・ 熱平衡で説明するのは難しい.
 - 1 個の H_2S が 10 個の NH_3 を消費する化学反応?



対流雲

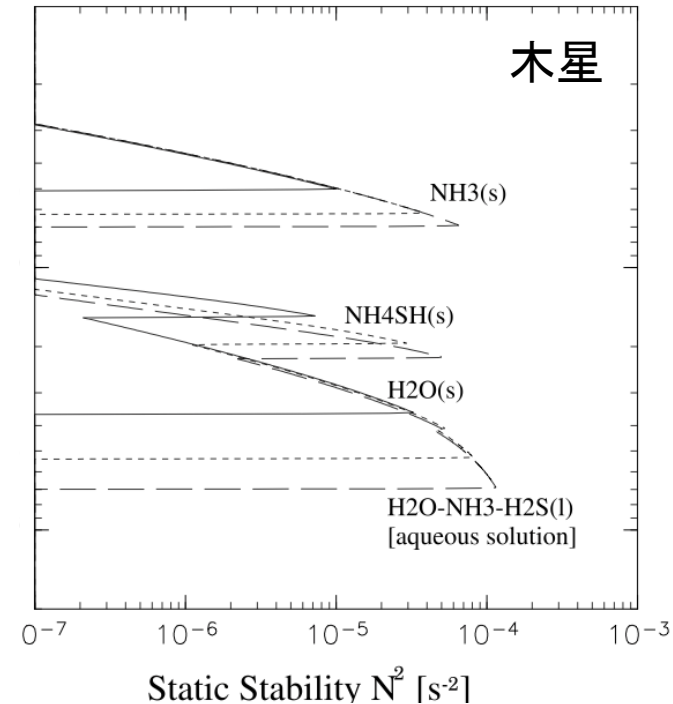
- ・ 雲対流は大気構造の決定に大きな役割を果たす可能性がある.
- ・ 背の高い対流雲の存在
 - $p > 3 \text{ bar}$ から雲が発達
- ・ 雷発光を伴う
- ・ 時間・空間スケール
 - 平均寿命 3.5 日
 - 1000~4000 km



ガリレオ探査機が大赤斑の北西で観測した対流雲の擬似カラー画像. 対流雲のスケールは約 1000 km (Vasavada and Showman, 2005)

雲対流と成層構造

- 木星型惑星の雲対流の特徴
 - 複数凝結性成分
(H_2O , NH_3 , H_2S)
 - 主成分(乾燥成分)の平均分子量
 \ll 凝結成分の分子量
- 複数成分の凝結によって複雑な成層構造が実現する可能性.
 - 凝結に伴う潜熱の放出と降水に伴う平均分子量変化は, 安定成層を強化する向きに働く.
- 凝結高度をまたぐような鉛直流は抑制される可能性がある.
 \Rightarrow 大気構造に影響



熱平衡計算から見積もった成層構造. Sugiyama et al. (2006) より

本研究の目的

- ・ 地球大気と同様に, 雲対流は大気構造の決定に大きな役割を果たす可能性がある.
- ・ しかし, 木星大気における雲対流と平均的大気構造との関係については未だ明らかとなっていない.
 - 観測的にあまり制約されていない.
 - 従来の雲の数値シミュレーションでは, 簡略化かつ恣意的な初期条件の下で発達する 1 つの雲の発達を調べたにすぎない(i.e., Yair et al., 1992, 1995; Hueso and Sanchez-Lavega, 2001).
- ・ そこで, H_2O と NH_3 の凝結および NH_4SH 生成反応を考慮した数値流体モデルを開発し, 雲の生成消滅が繰り返された結果として決まる統計的平衡状態での大気構造を調べる.

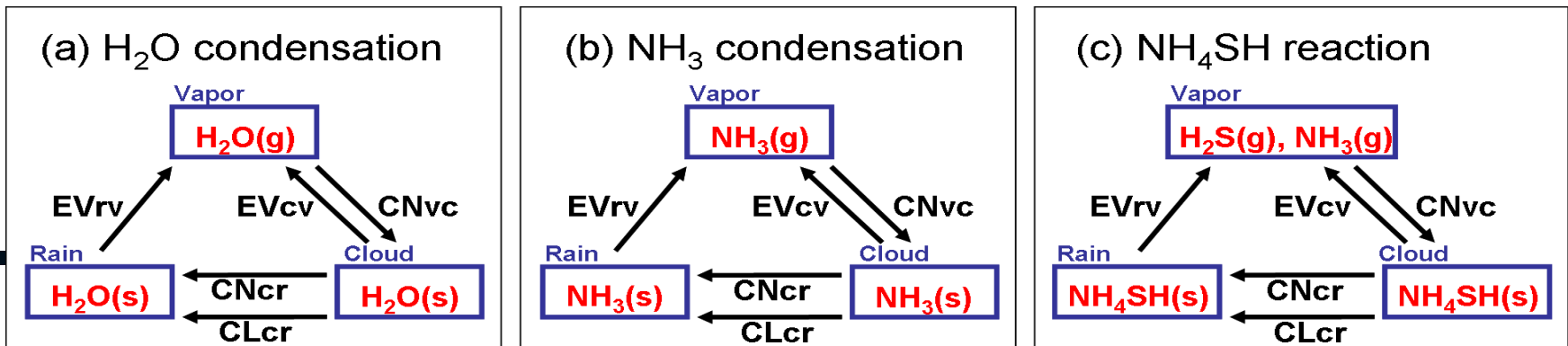
モデルの概要 & 計算設定

木星用雲解像モデル(数値流体モデル)開発

- ・ 雲解像モデル
 - 解くべき式: 運動方程式, 熱力学の式, 凝結成分の保存式
- ・ 困難さ: 地球用の数値モデルをそのまま適用できない
 - 複数の凝結性成分を考慮することが本質的に重要
(Sugiyama et al., 2006)
 - ・ H_2O , NH_3 の凝結
 - ・ $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{NH}_4\text{SH}$ の化学反応
- ・ 定式化から離散化・プログラミングまで独自に実行.
(Sugiyama et al., 2009, 2011, 2014)
 - プログラムの規模: 約 2 万行
 - 数値モデルはオープンソースとして Web 上で公開

モデルの概要

- ・ 複数凝結成分を考慮した雲解像モデル
 - deepconv (<http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>)
- ・ 準圧縮方程式系 (Klemp and Wilhelmson, 1978)
 - 運動方程式, 連続の式, 熱の式, 物質の保存式
 - ・ 熱の式: 潜熱と反応熱を考慮
 - ・ 物質の保存式: 3 種類の凝結性成分と 3 種類の凝結物
- ・ 放射過程は簡略化
- ・ 雲微物理過程
 - 暖かい雨のパラメタリゼーション(Kessler, 1969).



モデルの定式化

- 状態方程式

$$\rho = \frac{p}{R_d T} \left(\frac{1/M_d}{1/M_d + \sum q_v/M_v} \right) (1 + \sum q_v + \sum q_c + \sum q_r) = \frac{p_0 \pi^{c_{vd}/R_d}}{R_d \theta_v} \left(\theta_v = \frac{\theta}{\left(\frac{1/M_d}{1/M_d + \sum q_r/M_r} \right) (1 + \sum q_v + \sum q_c + \sum q_r)} \right)$$

- 運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - c_{pd} \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial x} + Turb.u \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= - \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - c_{pd} \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial z} + Turb.w + g \left(\frac{\theta}{\bar{\theta}} + \frac{\sum q_v/M_v}{1/M_d + \sum \bar{q}_v/M_v} - \frac{\sum q_v + \sum q_c + \sum q_r}{1 + \sum \bar{q}_v} \right) \end{aligned}$$

- 圧力方程式

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = - \frac{\bar{C}_s^2}{c_{pd} \bar{\rho} \bar{\theta}_v^2} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{\theta}_v u_j)$$

- 熱の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= - \left(u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \frac{L}{c_{pd} \bar{\pi}} (CN_{vc} - EV_{cv} - EV_{rv}) \\ &\quad + \frac{1}{\bar{\pi}} (Q_{rad} + Q_{dis}) + Turb.\bar{\theta} + Turb.\theta \end{aligned}$$

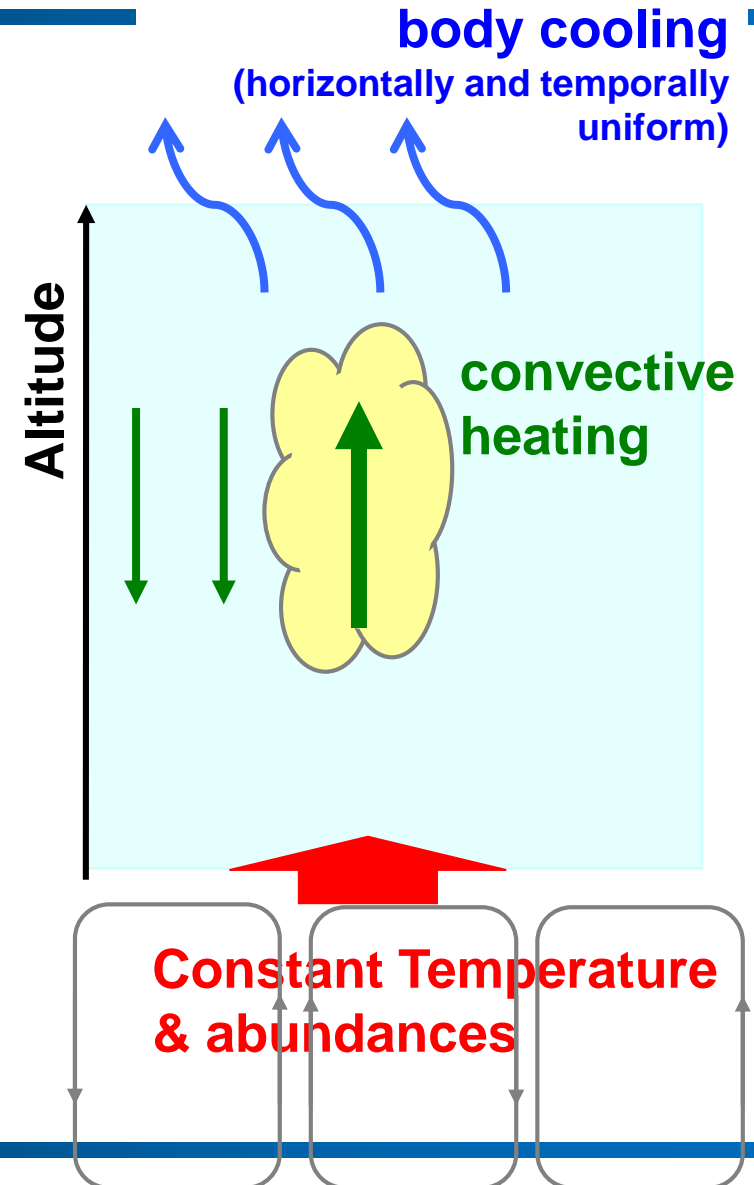
- 凝縮性成分の保存式

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_v}{\partial t} &= - \left(u \frac{\partial q_v}{\partial x} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \bar{q}_v}{\partial x} - (CN_{vc} - EV_{cv} - EV_{rv}) + Turb.q_v + Turb.\bar{q}_v, \\ \frac{\partial q_c}{\partial t} &= - \left(u \frac{\partial q_c}{\partial x} + w \frac{\partial q_c}{\partial z} \right) + (CN_{vc} - EV_{cv} - CN_{cr} - CL_{cr}) + Turb.q_c, \\ \frac{\partial q_r}{\partial t} &= - \left(u \frac{\partial q_c}{\partial x} + w \frac{\partial q_c}{\partial z} \right) + (CN_{cr} + CL_{cr} - EV_{rv}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} V_t q_r) + Turb.q_r \end{aligned}$$

変数		上付き添え字
p : 圧力	R : 気体定数	$\bar{\quad}$: 平均成分
π : 無次元圧力	M : 分子量	
T : 温度	c_p : 比熱	
θ : 温位	C_s : 音速	下付き添え字
θ_v : 仮温位	V_i : 雨の落下速度	d : 乾燥成分
u : 水平風速	L : 潜熱	v : 凝縮成分気体
w : 鉛直風速	$Turb$: 乱流拡散項	c : 雲
q : 混合比	Q_{rad} : 放射加熱項	r : 雨
ρ : 密度	Q_{dis} : 散逸加熱項	

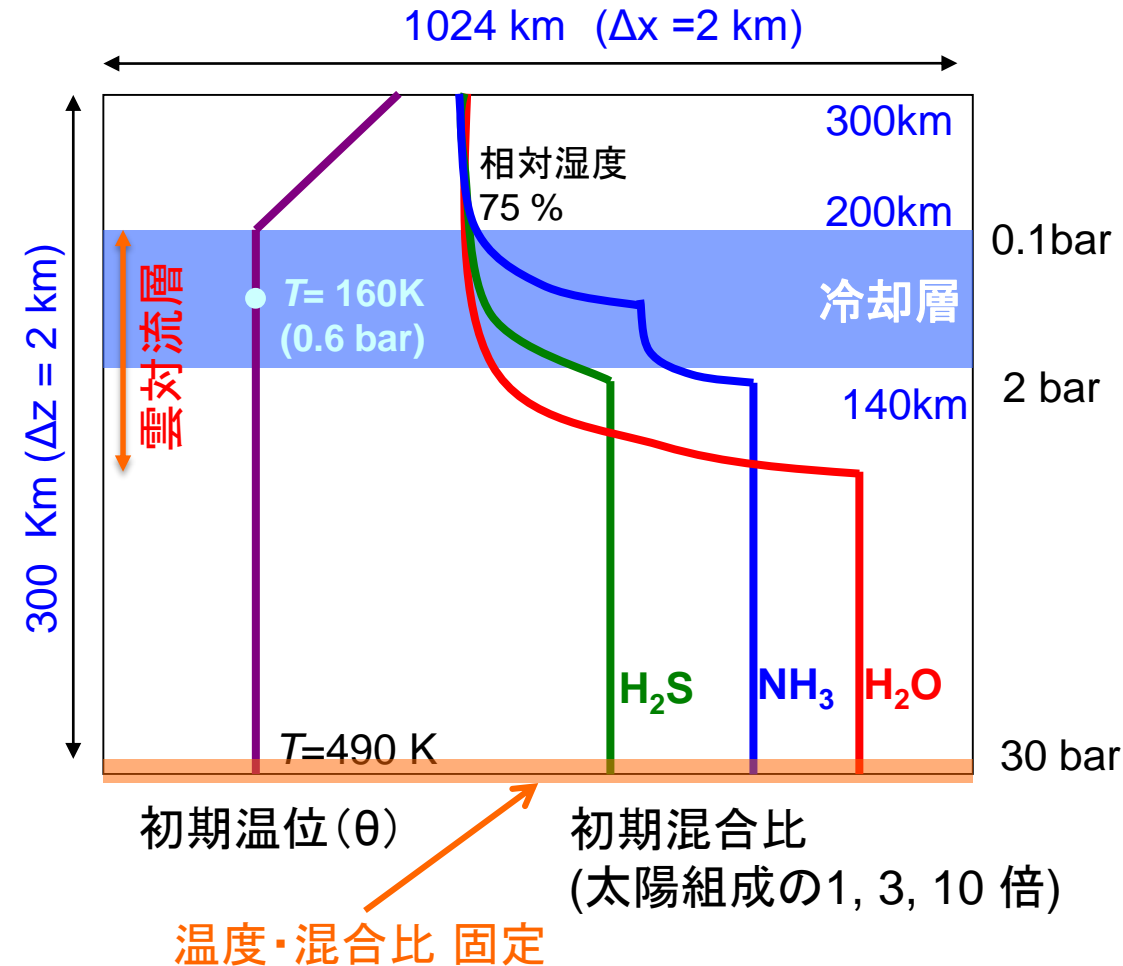
系の設定

- 以下がバランスすることで実現する大気構造を調べる
 - 内部熱源による上向き熱フラックス
 - 雲対流による熱輸送
 - 正味の放射冷却



系の設定

内部熱源 ⇒ 下部境界で温度・混合比を固定
放射冷却 ⇒ 大気上部で一様冷却

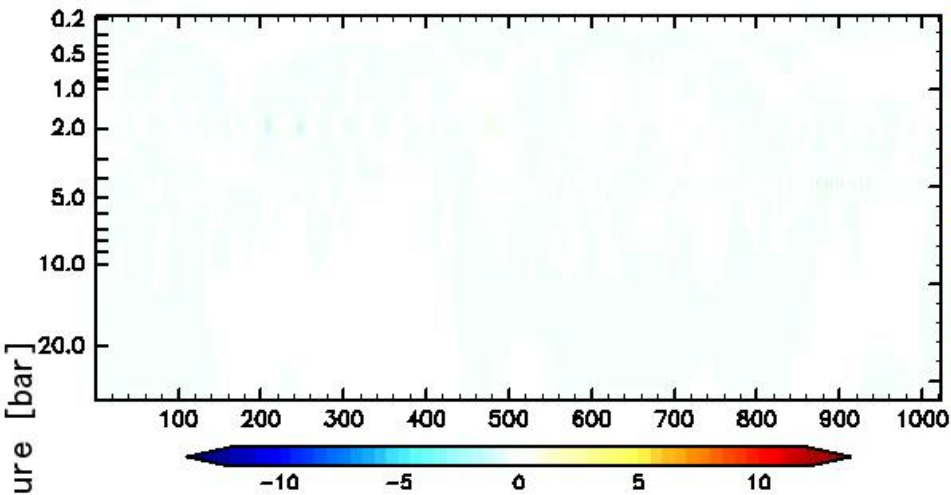


- ・ 計算領域
 - 1024 km x 500 km
 - 解像度 2 km (水平・鉛直ともに)
- ・ 境界条件
 - 水平: 周期境界条件
 - 鉛直: 応力なし, $w = 0$
 - 上部境界: 断熱壁
 - 下部境界: 温度と混合比を固定
- ・ 冷却率 Q
 - -0.01 K/day (標準)
 - -0.1 K/day
- ・ 大気成分
 - 乾燥成分気体: H_2 , He,
 - 凝縮成分気体: H_2O , NH_3 , H_2S
 - 太陽組成 (Grevesse et al., 2005) の 1, 3, 10 倍
- ・ 初期温度
 - 対流圏界面までは乾燥断熱源率に従う温度分布.
 - 対流圏界面より上空は温位一定.

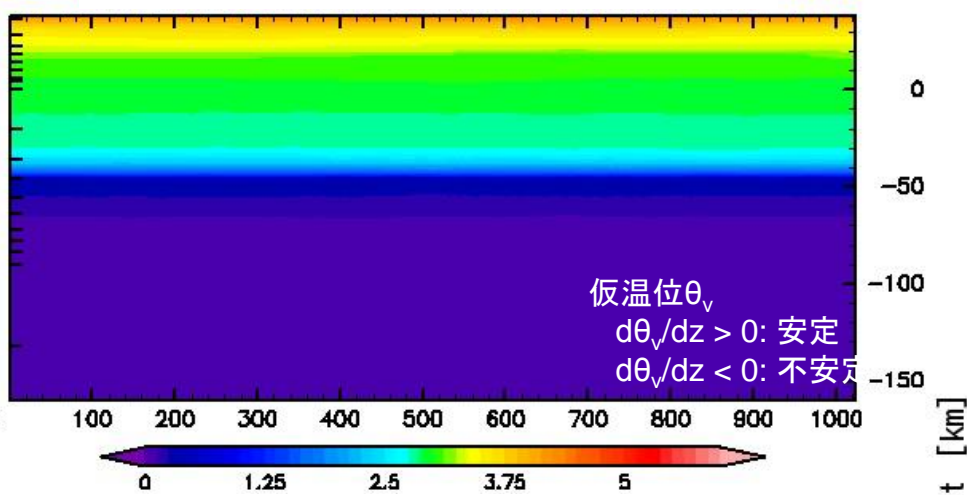
計算結果

$Q = -0.01 \text{ K/day}$ & 太陽組成の 1 倍

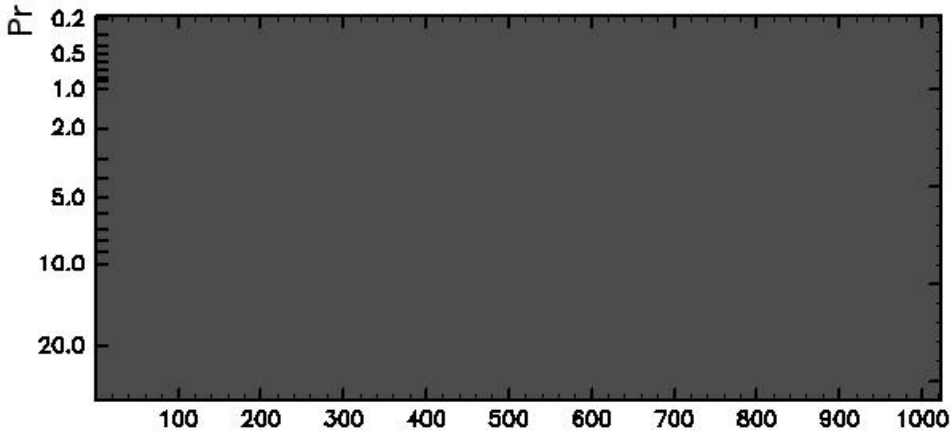
鉛直速度 [m/s]



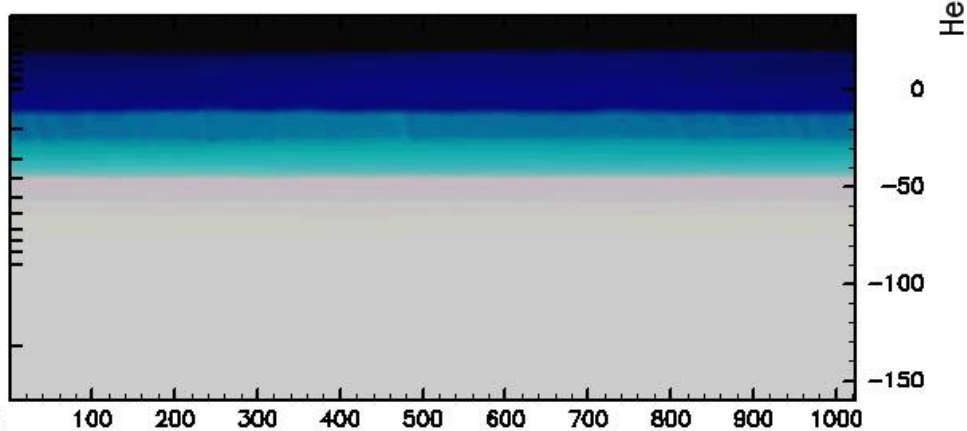
仮温位偏差 [K]



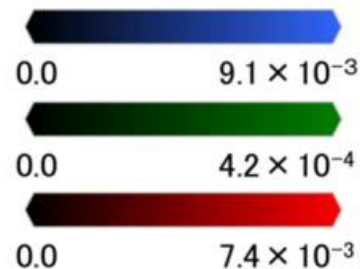
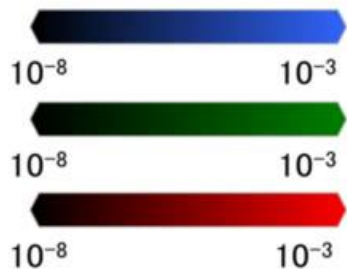
凝結物の混合比 [kg/kg]



凝結性成分気体の混合比 [kg/kg]



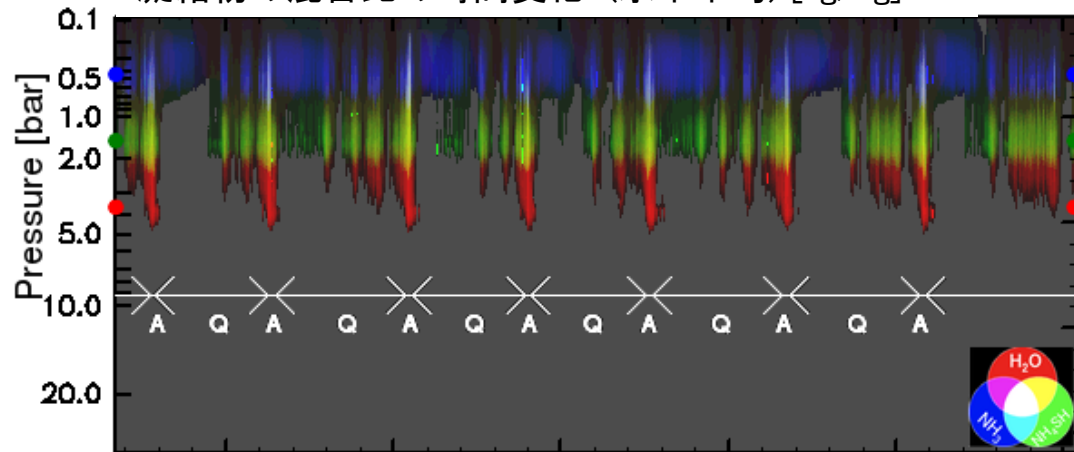
Length [km]



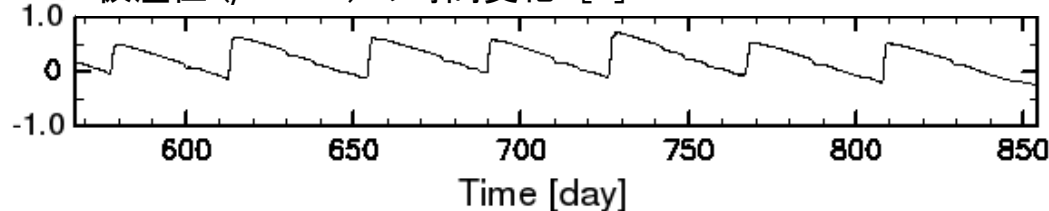
対流活動の時間変化

- 対流活動は定常的でなく準周期的。
 - おおよそ 40 日周期
 - 活発な雲対流が生じる時期を活発期(A), それ以外を静穏期(Q)と名付ける。
- 仮温位は活発期に急激に増加, 静穏期に緩やかに減少。

凝結物の混合比の時間変化 (水平平均) [kg/kg]

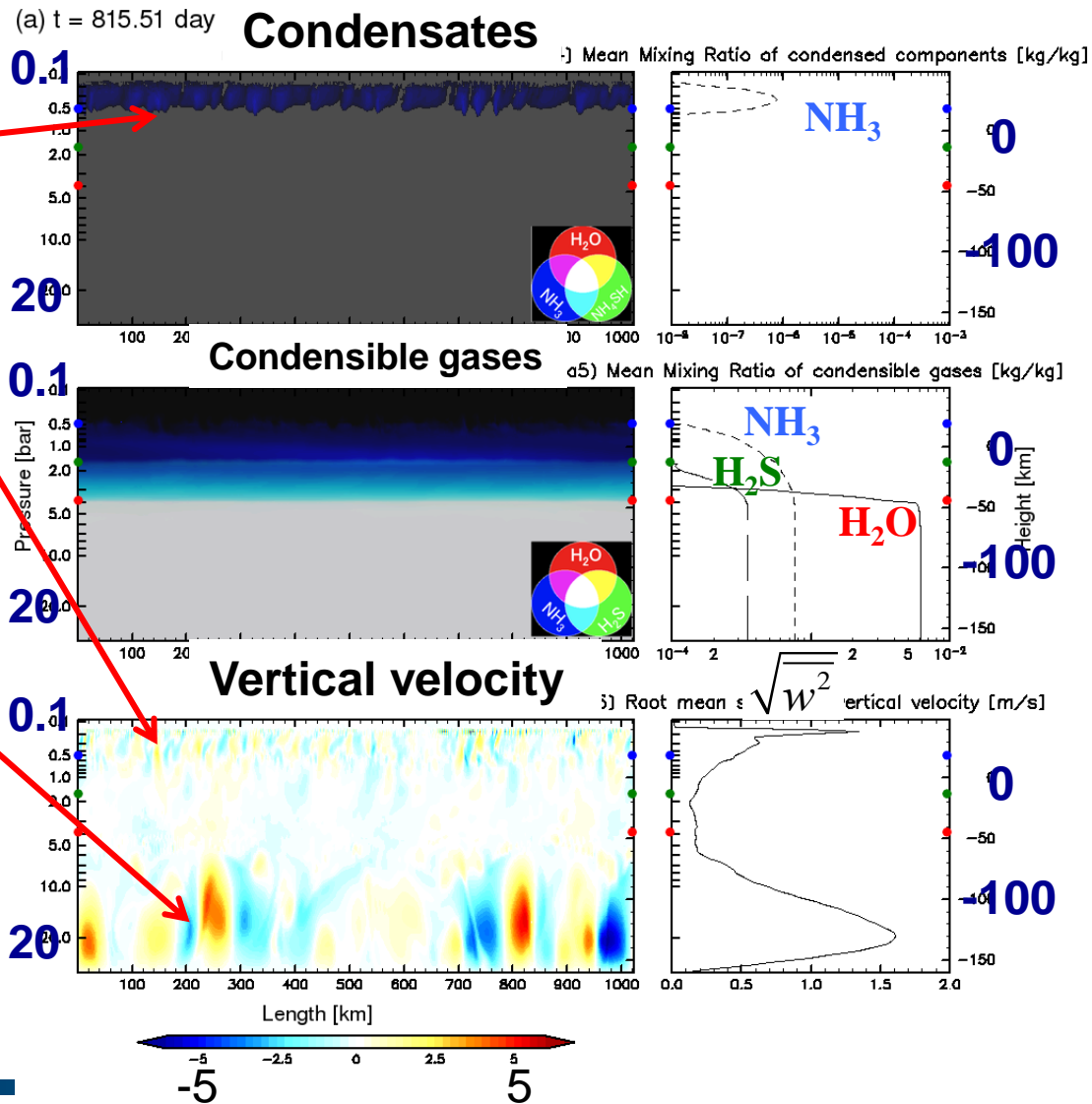


(+490K) 仮温位 ($p=2$ bar) の時間変化 [K]



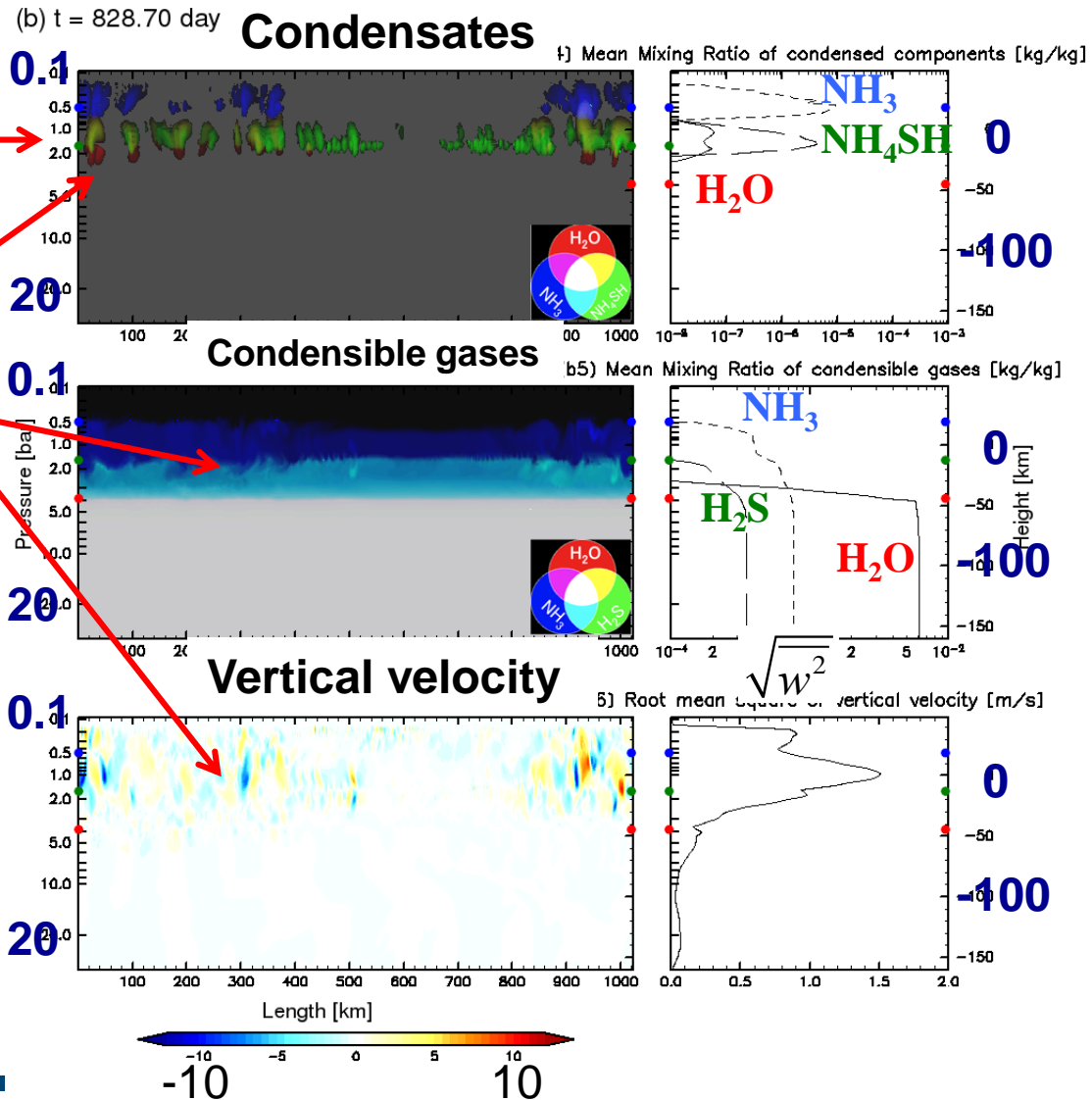
雲の発達 (1)

- 静穏期の始めでは、 NH_3 の雲を伴う対流が発生。
 - NH_3 の雲は水平方向に広く分布する。
 - 鉛直速度は弱い ($w = \sim 5 \text{ m/s}$)
- 対流圏下部の対流 = 活発期に駆動された対流の名残。



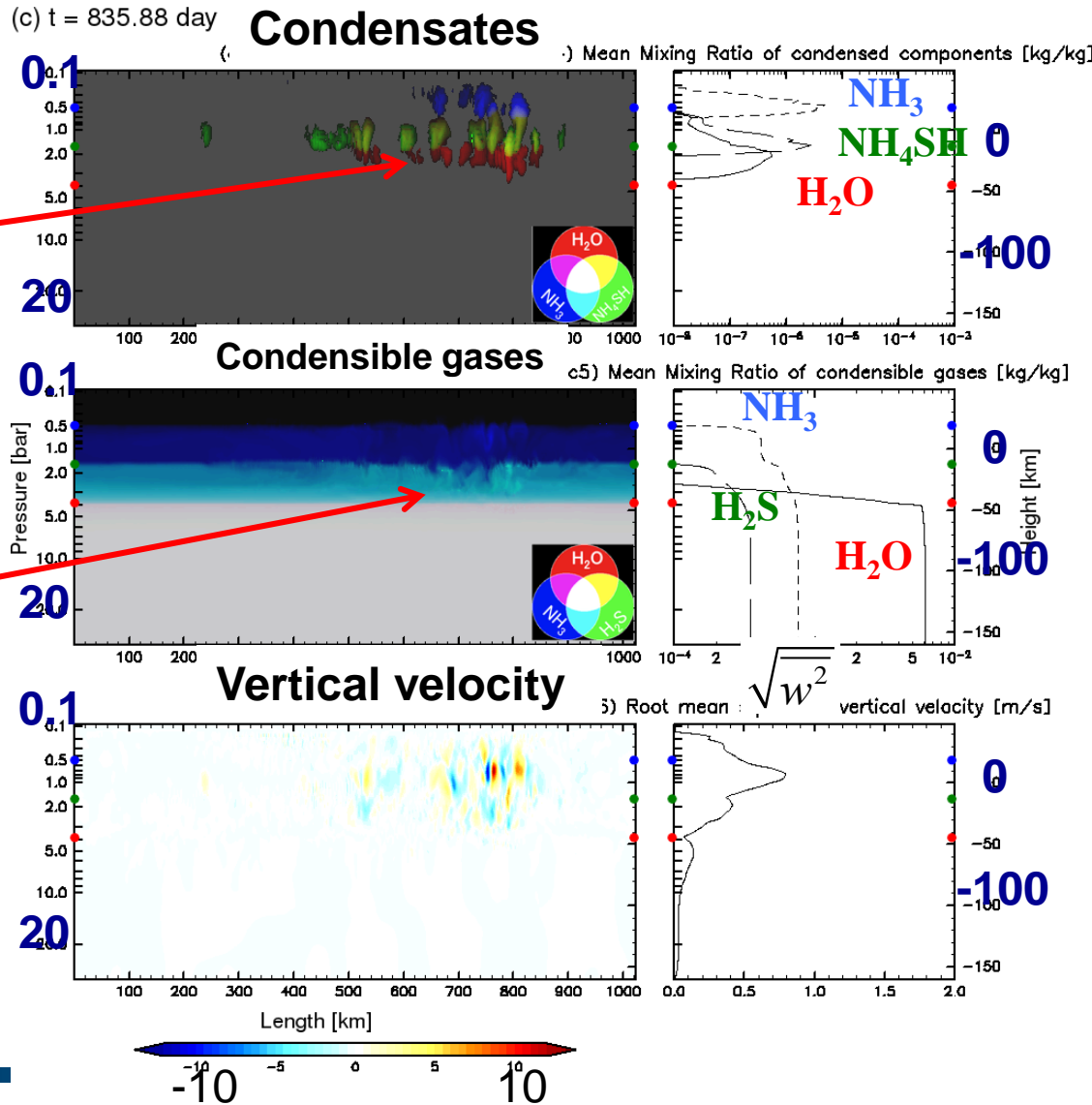
雲の発達 (2)

- 時間の経過と共に NH_4SH の雲が発生.
- NH_4SH の雲と重なるように, H_2O の雲が発生.
- NH_3 LCL と NH_4SH LCL をまたぐような鉛直混合は弱い, 対流プルームの貫入によって時折生じる.
 - LCL: 持ち上げ凝結高度



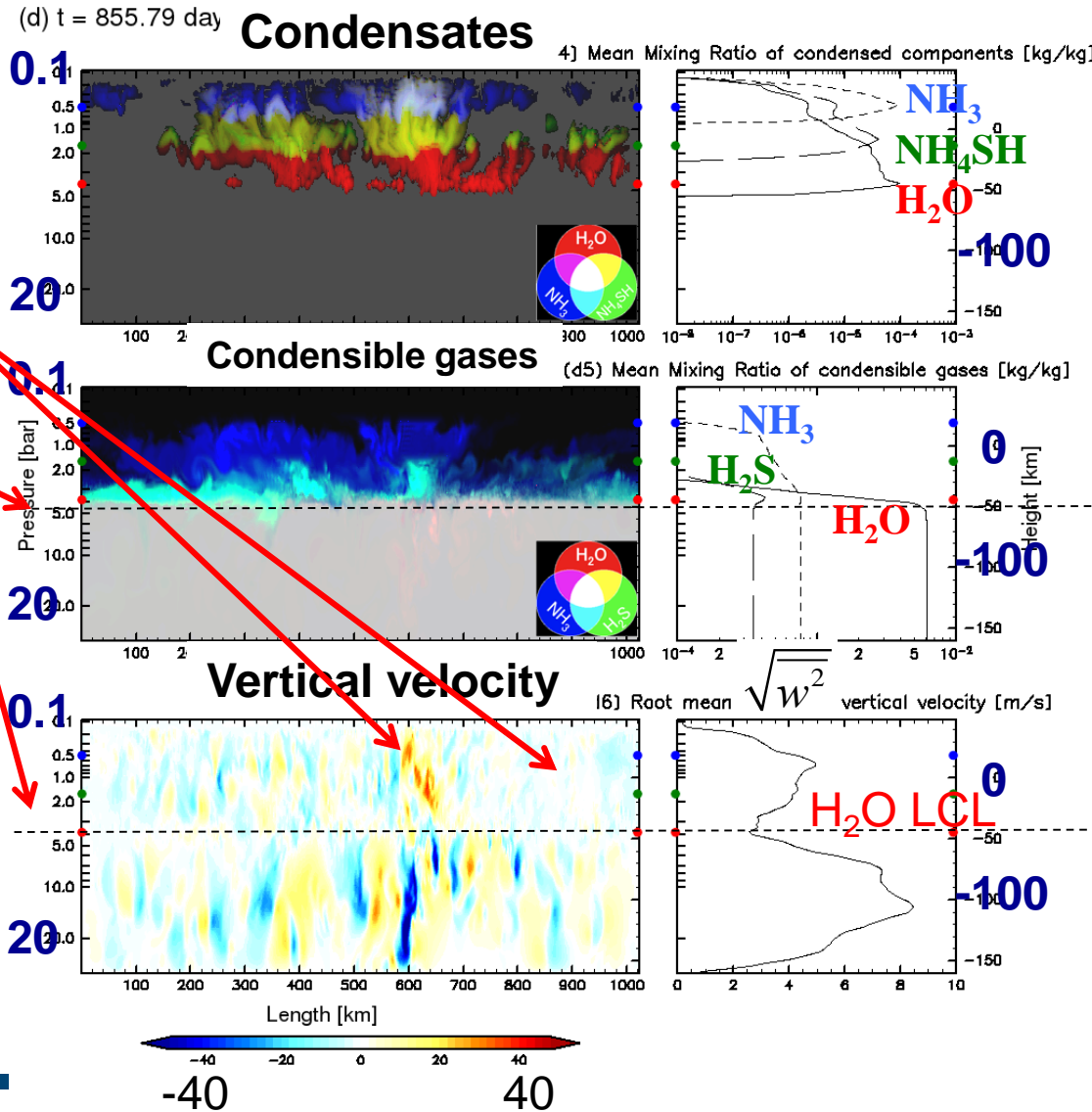
雲の発達 (3)

- NH₄SH の雲が発生するようになってしばらくすると、より活発な H₂O 雲が局所的に発生。
 - H₂O 雲の雲底高度は前の時刻に比べて低くなる。
- 凝結性成分気体の分布はほぼ水平方向に一様。
 - NH₃ LCL と NH₄SH LCL をまたぐような鉛直混合は依然として弱い



雲の発達 (4)

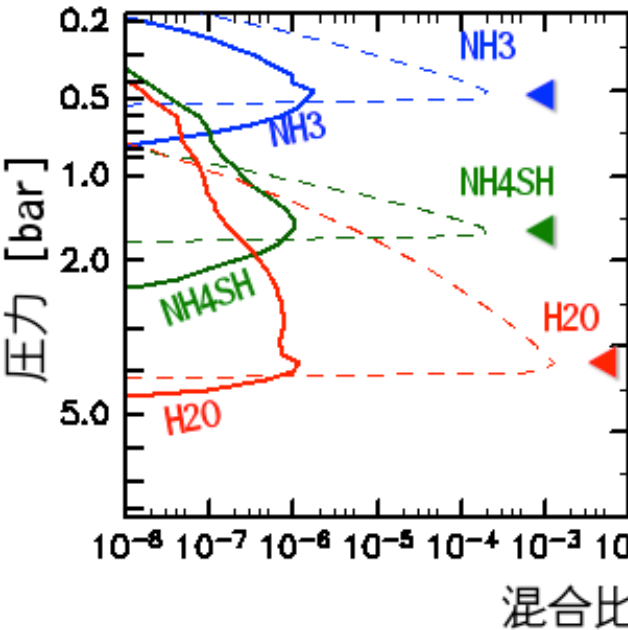
- H₂O の凝結を伴う活発な対流が発生.
- 雲対流層: 狭い上昇域と広い下降域
- H₂O LCL が対流運動に対する境界として作用.
 - H₂O LCLをまたぐ鉛直混合は弱い
 - 上昇流は NH₃ LCL と NH₄SH LCL を貫入



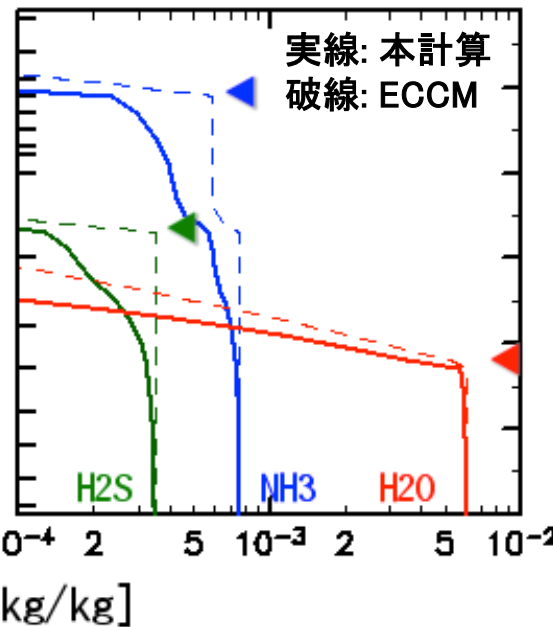
平均的大気構造

- 凝結物と蒸気の鉛直分布は ECCM の結果とは異なる
 - H_2O と NH_4SH の凝結物が NH_3 持ち上げ凝結高度(LCL) より上空に存在
 - NH_3 と H_2S 蒸気の混合比は, それぞれの LCL ではなく, H_2O LCL より減少を開始
 - これらの特徴は, 活発期の強い鉛直輸送に起因

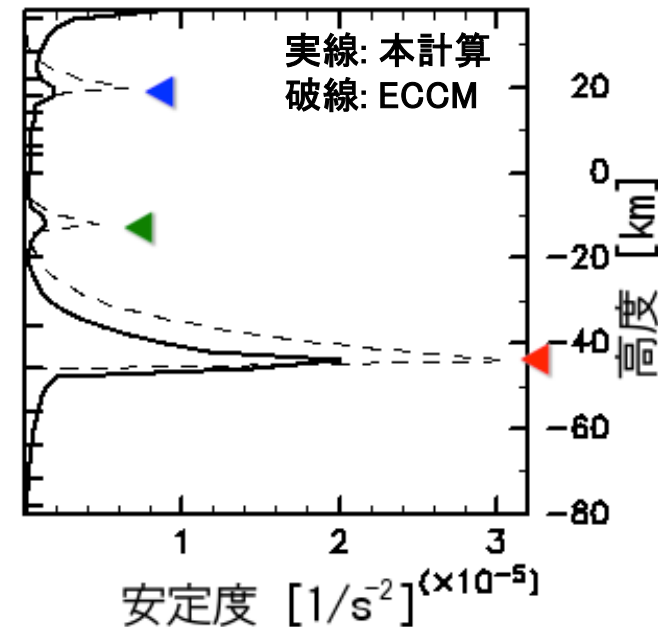
(a) 雲



(b) 凝結性成分気体



(c) 静的安定度



凝結性成分の存在度に対する依存性

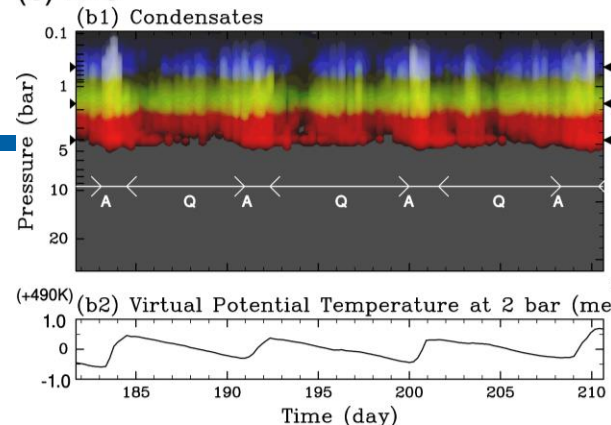
$Q = -0.1 \text{ K/day}$ (CPU 時間短縮のため)

凝結性成分に対する依存性

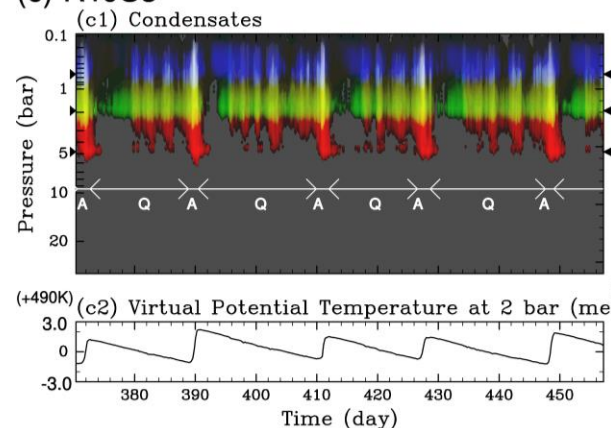
- 一連の計算結果の定性的特徴は標準実験のそれと整合的.
- 準周期的な対流活動の周期は大気深部での H_2O 蒸気の存在量に概ね比例.

	deep abundances (solar)	period (day)	ratio
R10	1	9	1
R10S3	3	19	2.1
R10S1	10	139	16

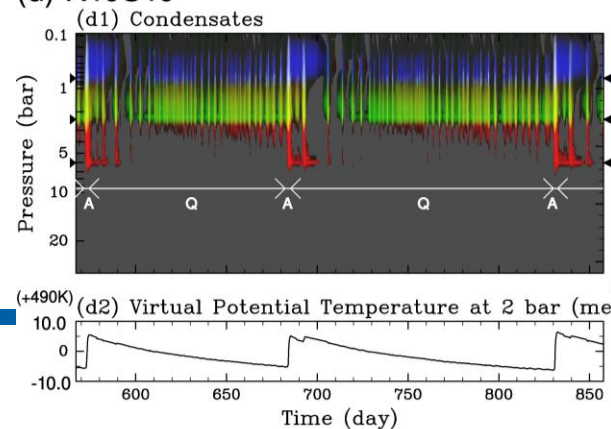
(b) R10



(c) R10S3

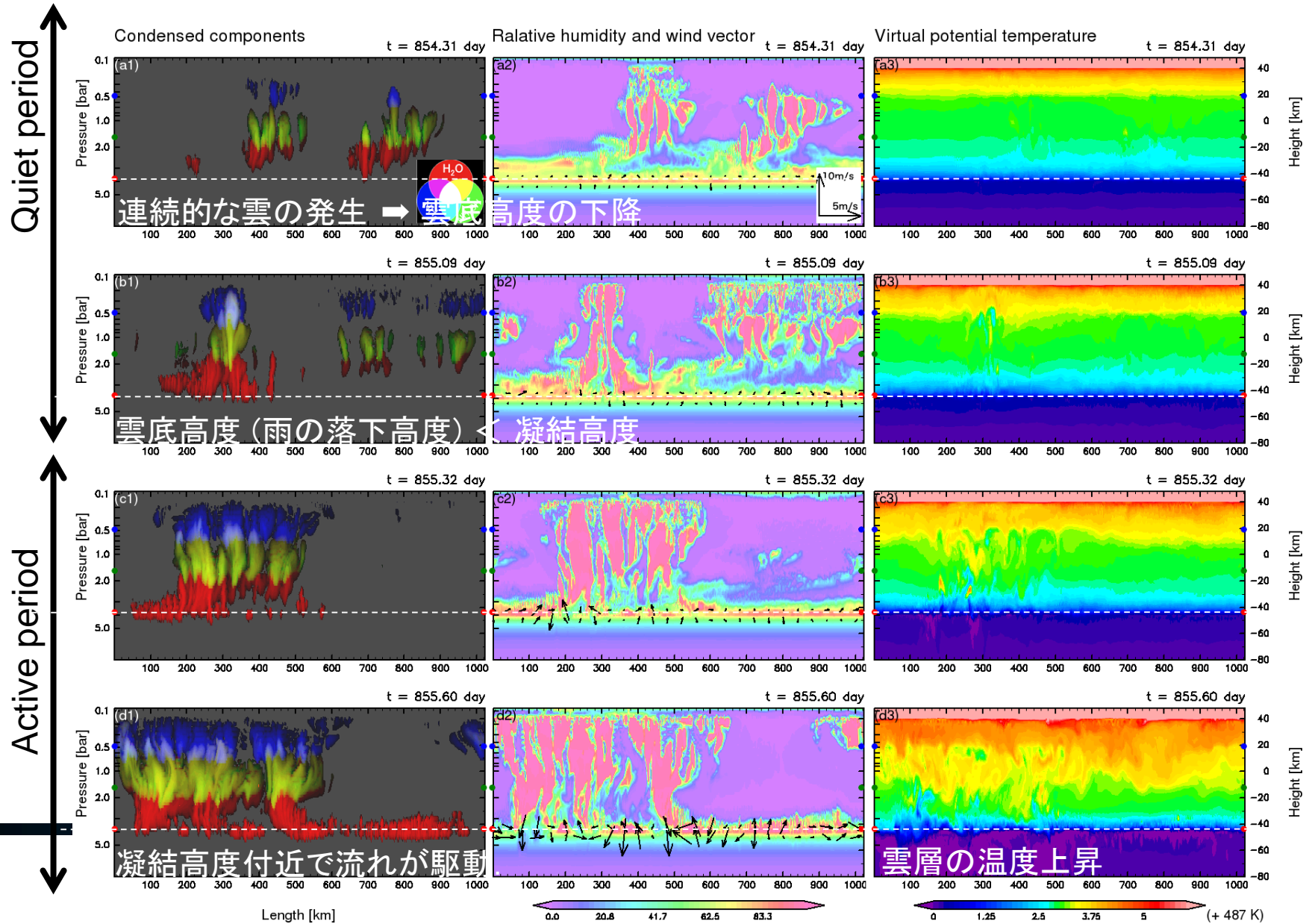


(d) R10S10

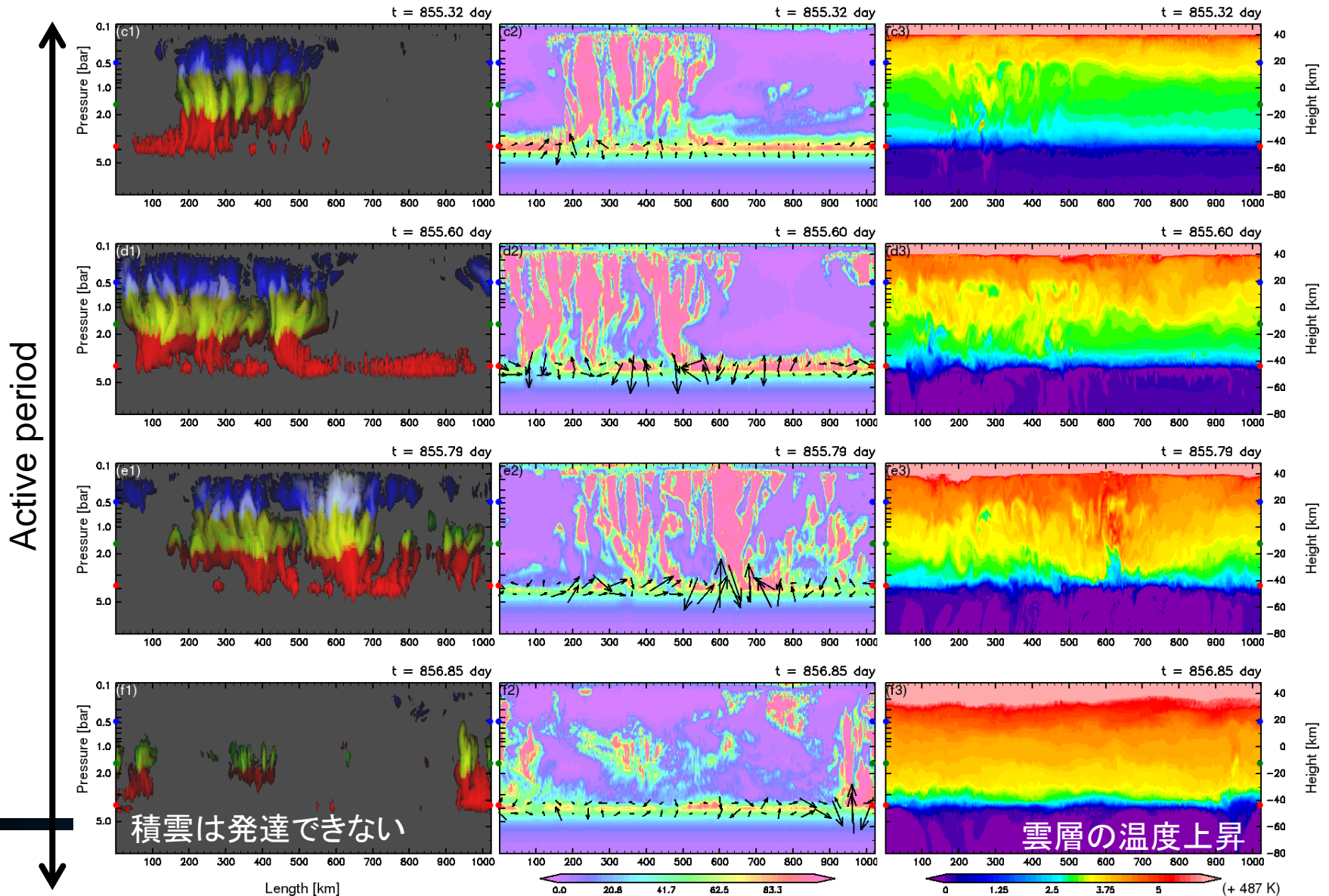


議論：なぜ間欠的か？

静穏期 ⇒ 活発期

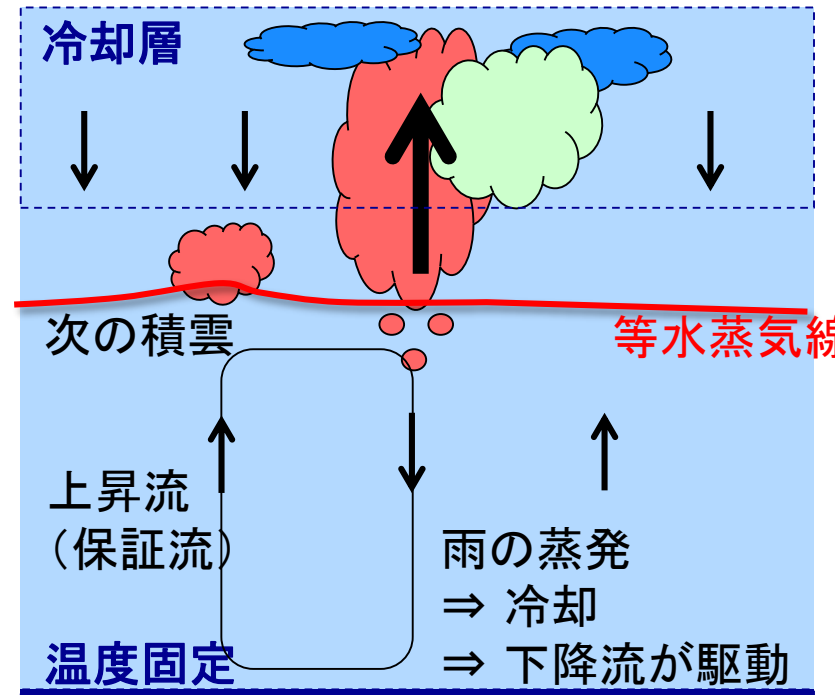


活発期 ⇒ 静穏期

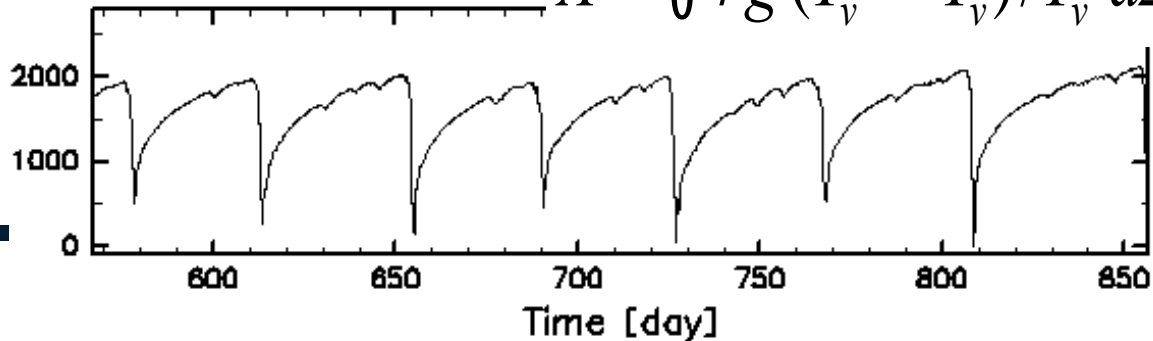


開始・終了の条件

- 活発期のトリガー:
 H_2O LCL を超えて落下する
 H_2O 凝縮物
 - H_2O の再蒸発によって H_2O LCL より下で流れが駆動
 $\Rightarrow H_2O$ に富む気塊を雲対流層まで持ち上げられる
- 活発期の終了: 潜在不安定の解消
 - 対流不安定の指標 (A) は静穏期に増加, 活動期に急激に減少.
 - 活動期の終了時点で $A = 0$.

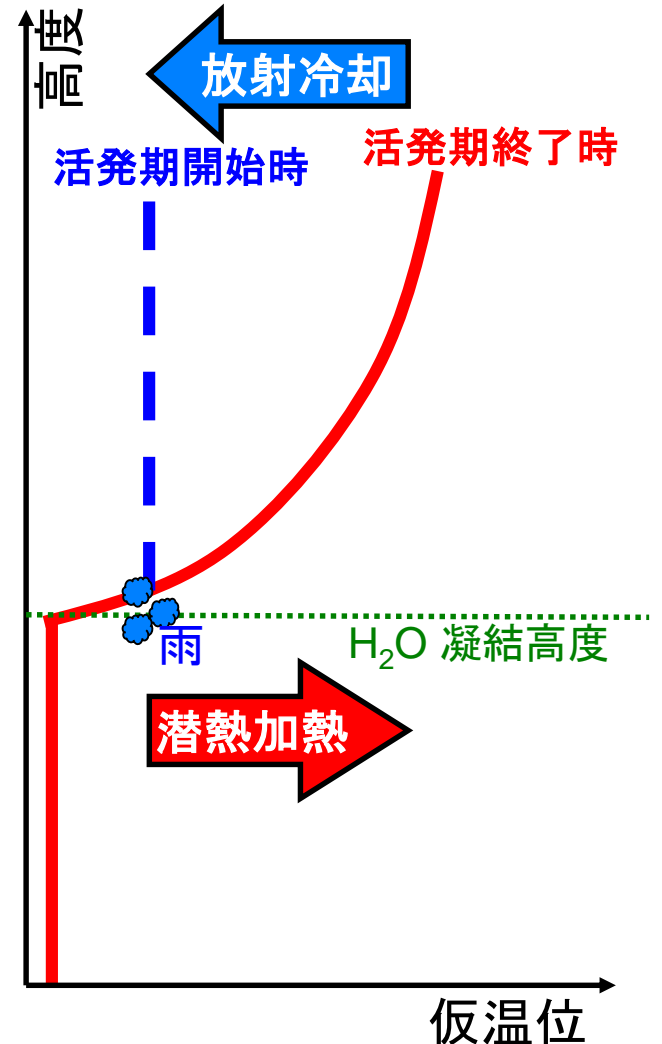


$$A = \int_0^{\infty} rg (T_v^* - T_v) / T_v dz$$



間欠性の周期

- ・ 活発期で積雲が続けざまに生じるのは、活発期開始時の大気構造が、下層の H_2O に富む気塊に対して、潜在不安定であるため.
- ・ 積雲の潜熱加熱によって、放射冷却で瞬時に解消できないほど、雲層の温度は上昇.
- ・ 間欠性の周期は、温度上昇を冷却率によってわり算することによって得られる時間に概ね等しい.
- ・ そのような大気構造になるのは、雲底下の大気が膨大、かつ、上から冷やされる系であるため.



まとめ

まとめ

- ・ 木星大気の「平均的」な大気構造を調べることを目的とした、長時間の雲対流の数値計算を実施.
- ・ H_2O 凝結高度から対流圏界面にまで達する強い積雲が間欠的に発生する
 - 間欠性の周期は概ね凝結性成分の存在度に比例.
- ・ 活発期には H_2O 凝結高度が, 静穏期には NH_3 凝結高度と NH_4SH 生成高度が, 対流運動に対する境界として働きうる
- ・ 強い積雲に伴う鉛直輸送によって, 雲と凝結成分気体の鉛直分布は鉛直一次元の熱平衡計算の結果から変化する.
 - 凝結成分気体の分布はそれぞれの凝結高度ではなく H_2O 凝結高度から高度と共に減少
 - H_2O と NH_4SH の雲粒が対流圏界面まで上昇

まとめ

- ・ NH_3 蒸気の鉛直分布は従来の電波観測で得られた分布と整合的
 - 観測: NH_3 凝結高度よりも深い領域の $0.6 \text{ bar} < p < 2 \text{ bar}$ において NH_3 混合比の平均値が太陽組成の約半分
 - 雲層内で NH_3 蒸気と凝結性成分気体に乏しい気体の鉛直混合によって説明可能.
- ・ H_2O 存在度はガリレオプローブの結果と整合的でない
 - 大気深部まで非常に少ないというガリレオプローブの観測結果は再現されなかった.
 - ガリレオの観測した乾燥した状態を説明するためには, 雲対流以外の効果 (例えば全球規模の擾乱) を考慮する必要があるだろう.

まとめ

- ・ 積雲が間欠的に生じるメカニズム
 - 上から冷やされる系
 - 活発期の開始時: 潜在不安定 & H₂O 凝結高度より下方への雨の落下がトリガー
 - 活発期の終了時: 潜在不安定の解消
 - 活発期の雲が続けざまに生じる結果, 雲層の温度は上昇.
 - 温度上昇分を放射冷却で緩和すると, 次の活発期へ.
- ・ 現実の木星・土星では, 積雲活動に関係すると考えられている数年から数十年スケールの変動が見られる. このような現象のメカニズムを考察する手がかりになるかもしれない.

