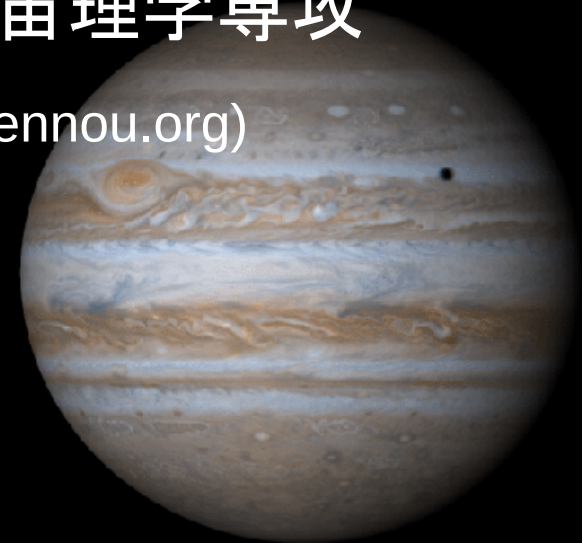


木星大気の雲対流

北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

杉山耕一郎(sugiyama@gfd-dennou.org)



イントロダクション

木星に落下していくガリレオ探査機の大気プローブ(想像図)

<http://galileo.jpl.nasa.gov/docs/galileolegacy.ppt> より

木星大気の鉛直構造

- 厚い雲に覆われているため、光学観測で表面の雲の下は直接測れない
 - 鉛直温度分布、大気組成は理論的に考察されてきた
 - 直接観測はガリレオ探査機の大気プローブの 1 回のみ
- 木星の元素存在度は、おおよそ太陽系元素存在度程度と考えられている
 - 太陽系形成論の立場から、太陽も木星もほぼ同じ元素組成であると仮定

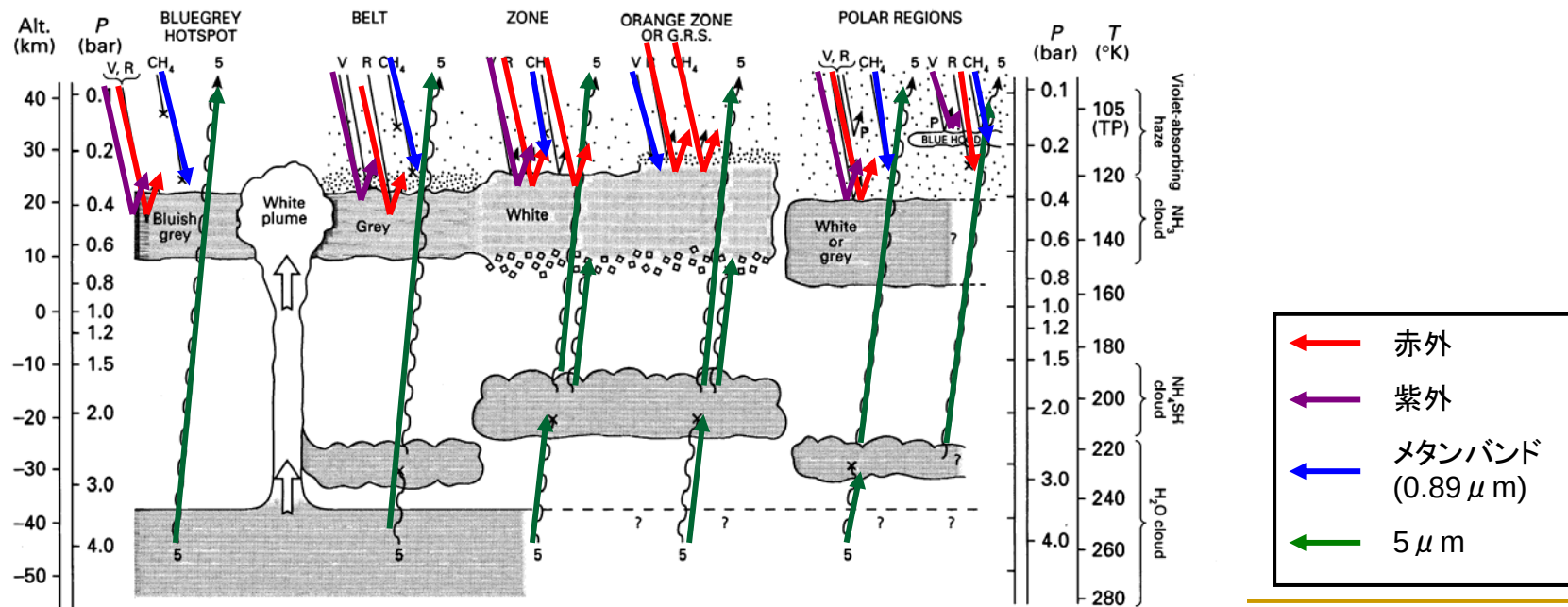


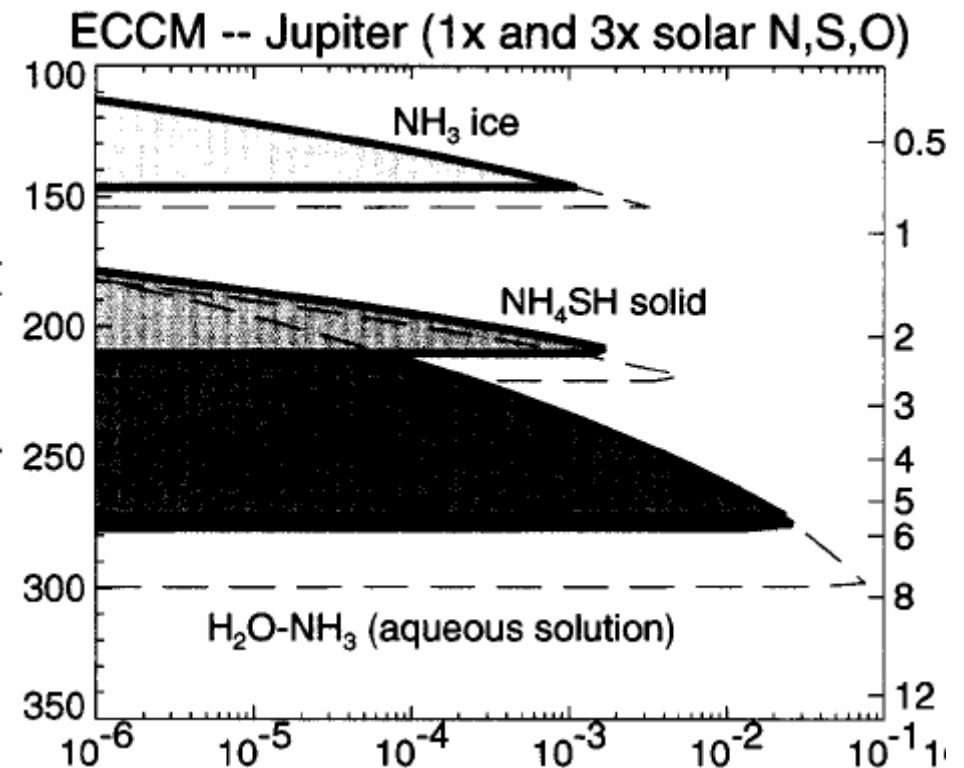
Fig. 4.28. Model of the cloud structures, synthesising data from this chapter. The diagram shows typical ray-paths for violet (V), red (R), 0.89- μm (CH_4), and 5- μm (5) radiation. (For 18- μm and 45- μm radiation, see Fig.

4.17.) Waves ending in X indicate absorption of radiation; scattering with P indicates that polarisation is induced.

Rogers (1995, Cambridge Univ. Press.)

理論的研究：熱力学平衡

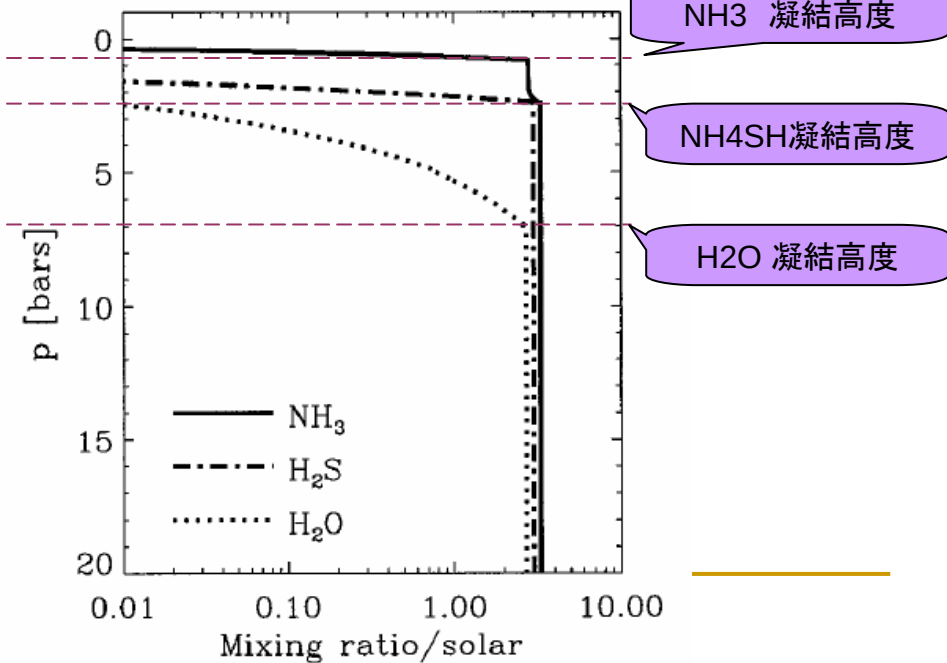
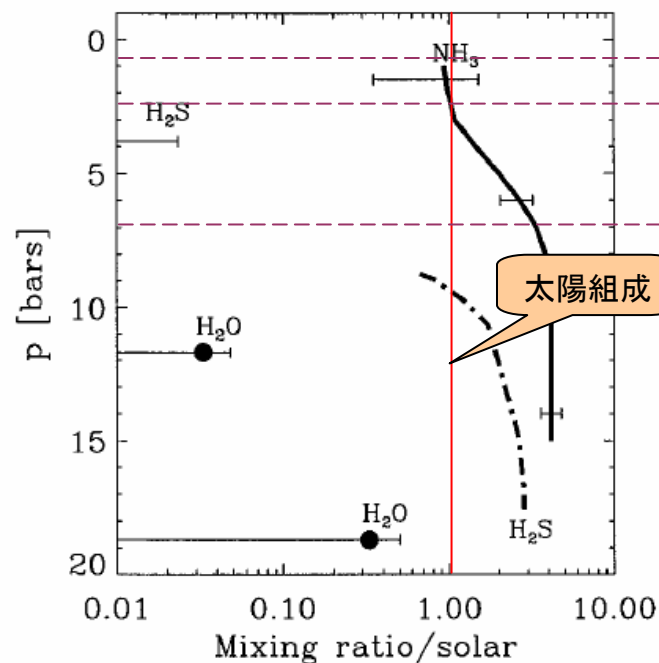
- 湿潤断熱的な温度・物質分布
 - 大気深部の気塊を断熱的に上昇させた時に実現する温度と凝縮成分気体および雲の鉛直分布を計算
 - 木星内部では活発な対流が生じていると仮定
 - Weidenschilling and Lewis (1973), Atreya and Romani (1985), Sugiyama et al. (2006)
- NH_3 , NH_4SH , H_2O 雲が存在
- 凝結高度を境に、凝結成分の存在度は急激に減少



Atreya et al. (1999, Planetary & Space Sci.)

ガリレオプローブの観測

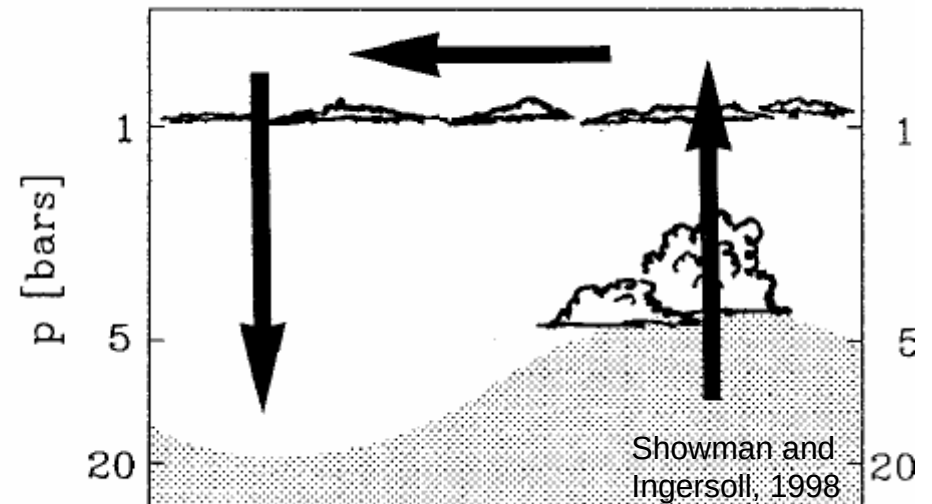
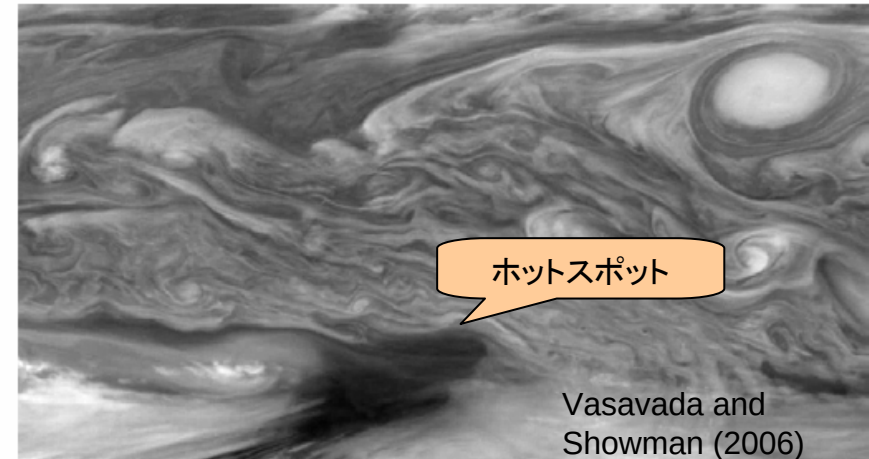
- 温度減率は断熱温度減率から大きく外れない
 - 6 – 16 bar において乾燥断熱減率程度. 1.7-3.5, 4.2-6.3 bar において乾燥断熱減率より若干減率が大きい(Seiff et al., 1998, GRL).
- 雲粒子の観測では NH_4SH らしき粒子を観測(Ragent et al., 1998, GRL)
- 凝縮成分気体の分布は、熱平衡計算の予想から大きく外れていた(Nieman et al., 1998, GRL)
 - NH_3 , H_2S は大気深部で一定の値となるが, H_2O は増加し続ける



ガリレオプローブの観測によって鉛直構造に関する認識は変化したか？

- NH_3 と H_2S は木星大気深部で太陽組成の 2.5 倍程度存在
- ホットスポットは「特殊な」乾燥領域として理解された
 - ガリレオプローブの落下点は「ホットスポット」と呼ばれる雲の少ない領域
 - ガリレオプローブの落下点には大規模な下降流が存在し、凝縮成分は大気深部に押し下げられたと解釈(Showman and Ingersoll, 1998, Icarus)
 - 実現可能性は疑問

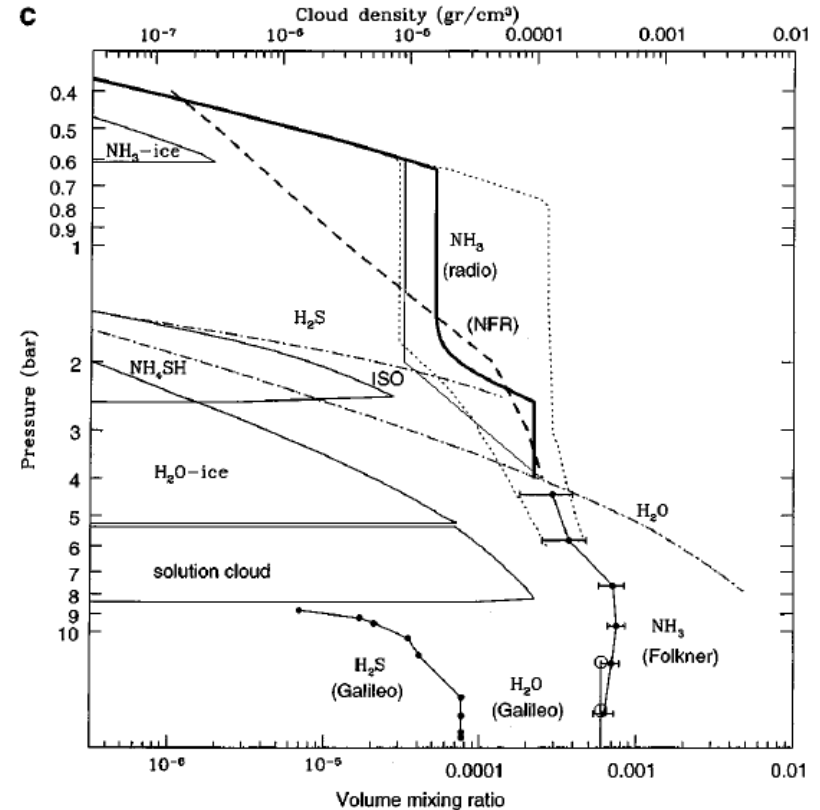
上昇流域における凝縮成分の鉛直分布は、従来の理論的予想が大きく外れていないとみなされてた



近年の近赤外・電波観測による鉛直構造の推定：メインの雲の組成は？

- 大気上端の「**平均的な**」 NH_3 存在度は熱力学平衡モデルの予想よりも少ない
 - メインの雲は 1-2 bar に存在. (Irwin et al., 2005)
 - この高度でアンモニアが凝結するためには、その存在量は太陽組成の 12 倍必要.
 - ガリレオの観測では NH_3 は太陽組成の 2.5 倍
 - 全球的に $0.6 \text{ bar} < p < 2 \text{ bar}$ においてアンモニアの存在度は太陽組成の半分程度. (de Pater et al., 2001; Gribson et al., 2005)
- メインの雲の組成は NH_3 でないかもしれない
 - ガリレオ探査機では、 NH_3 fresh ice は限られた場所では観測されていない
 - $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{NH}_4\text{SH}$ の反応で NH_3 を減らすというアイデアは、ガリレオの観測とは整合的でない
 - NH_3 と H_2S の減少する高度が異なる

木星大気上層の雲は NH_3 であるとする従来のイメージに疑問が呈されている



電波観測から推定された NH_3 の鉛直分布. (de Pater et al., 2001). 凝縮成分の分布は O, S, N をそれぞれ太陽系元素存在度の 1.2, 5-7, 4-5 倍したときの熱平衡状態と整合的.

研究目的

■ 我々の立場

- 大気の鉛直構造は放射対流平衡状態として決まるものである
 - 従来の研究のように、熱力学、放射、対流を別々に考慮するのではなく、それらを同時に解くことが必要。

■ 研究目的

- 放射の効果を取り入れ、多数の雲の生成消滅が繰り返された結果として決まる平均的な雲対流構造を調べる
 - NH_3 と H_2O の凝縮および NH_4SH の生成反応を考慮した 2 次元雲対流モデルを開発
 - 木星における対流雲の生成発達過程を調べる
 - 複数の凝縮成分を考慮した雲対流計算は、地球の気象学の範疇を逸脱した問題であるため、数値的に生成発達過程を調べる研究はほとんど行われていない。
 - 平均的な雲対流構造を調べる。
 - 3 つの雲の影響は？

雲対流モデル deepconv/arare の開発



2 次元準圧縮系モデル deepconv/arare4

- 地球流体電脳倶楽部で開発中の数値モデル
 - deepconv はそもそも、中島さん(九大)が地球大気用開発した数値モデル
 - 小高さんによって火星用に、中島さんによって木星用に改良。
 - 2003 年, 高橋(こ)さんの修論(deepconv/kaminari)と平行して, 杉山が開発開始.
 - 北守さん、小高さんとの共同研究として開発が進む
 - 中島さん(九大)、林さんが監修
- 設計方針
 - Fortran90 で書かれた数値計算モデル
 - 可読性の重視
 - Dcmodelプログラミングガイド(<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmodel/cording-rules/>)に従い, 他のモデルと書式, IO を揃える
- 動作環境
 - g95, Fujitsu Fortran Compiler (for Linux)
 - 最適化 Fortran Compiler (for SR11000)
 - NEC Fortran Compiler (for SX-6)

定式化: 準圧縮系方程式 (Klemp and Wilhelmson, 1978)

■ 状態方程式

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

■ 速度の式

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

■ 圧力の式

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

■ 熱の式

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

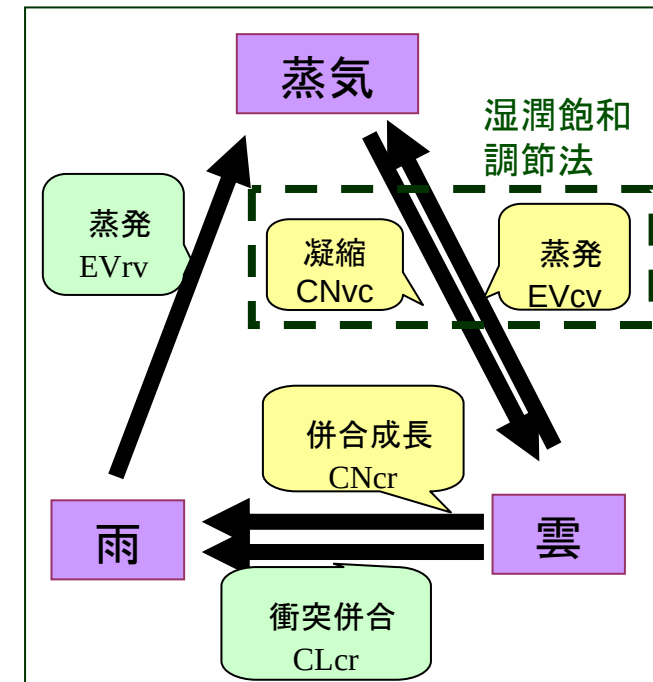
■ 凝縮成分の保存式

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

変数		上付き添え字
p : 圧力	R : 気体定数	$\bar{\cdot}$: 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_f : 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	

雲微物理過程の扱い

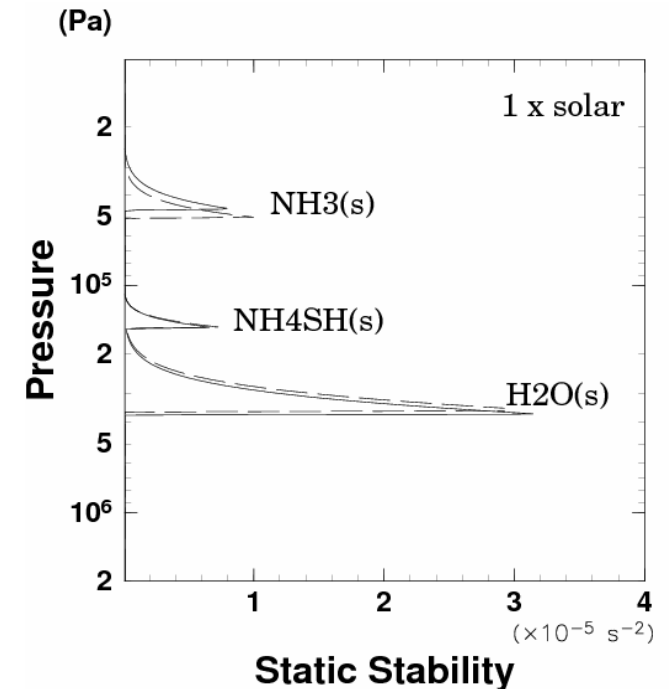
- 各凝縮成分の凝縮相は大気と共に流されるだけの「雲」と、大気の運動から離脱して落下する「雨」とに二分。
 - 「雲」と「雨」の間の変換式は Nakajima *et al.* (2000) と同様, Kessler (1969) を基に雲微物理過程をパラメタ化.
 - 雲から雨への衝突成長, 雨の落下速度, 雨から蒸気への再蒸発, の変換効率 は地球大気での値の 3 倍とする(Yair *et al.*, 1995).
- 各凝縮成分の相平衡状態は, 飽和蒸気圧と化学反応の平衡定数を基に計算.
 - 相平衡計算において気液平衡もしくは固気平衡を考慮し, 溶液と固溶体の生成は考慮しない.



パラメタ化された雲微物理過程の模式図. 蒸気と雲との変換には、湿潤飽和調節法を用いる.

定式化の妥当性

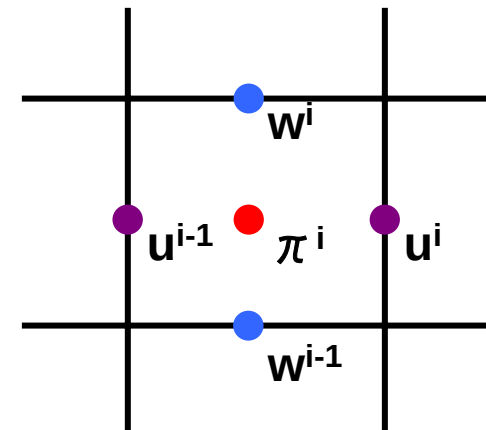
- 本定式化の問題点
 - 予報変数として温位を用いたため、大気の比熱を乾燥成分の比熱で代表させ、比熱の温度依存性を考慮していない。
 - $\text{NH}_3(\text{s})$, $\text{NH}_4\text{SH}(\text{s})$, $\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ に対して、地球大気の水を想定したパラメタリゼーションを利用
- 定性的な循環構造を描くという目的においては、以下の理由から考慮しなくも問題ないと考えている。
 - 雲層で期待される静的安定度 N^2 の値は、比熱の温度依存性と凝縮成分の比熱を無視しても、さほど変わらない(右図)。
 - 木星大気中の雲微物理の直接観測はなされていないため、なるべく単純な雲微物理パラメタリゼーションを使って見積もりを行うのが良い



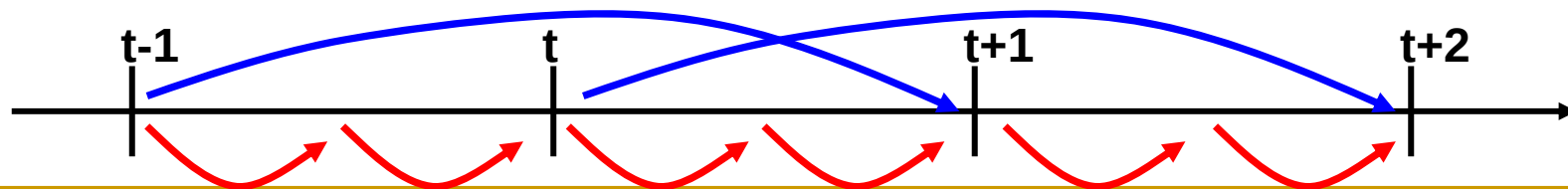
木星大気における静的安定度の分布. 比熱の温度依存性と凝縮成分の比熱を無視する場合(実線)と無視しない場合(破線). 計算に際して、凝縮成分を太陽組成の1倍とした. (Sugiyama et al., 2006)

有限差分法による方程式の離散化

- 空間方向には 4 次中央差分で離散化
 - 水平方向: Arakawa C グリッド
 - 鉛直方向: Lorentz グリッド
- 時間方向にはモード別時間分割法を用いて離散化
 - 音波に関連する項は, HE-VI 法を採用し, u の式は Euler スキーム, w と π の式はクランク・ニコルソンスキームを利用
 - 木星の場合, 音波速度は約 1000 m/s
 - 音波に関連しない項は, リープ・フロッグスキームに asselin の時間フィルタを併用



格子点配置



時間刻みの概念図

コードの例

■ 水平速度の移流計算

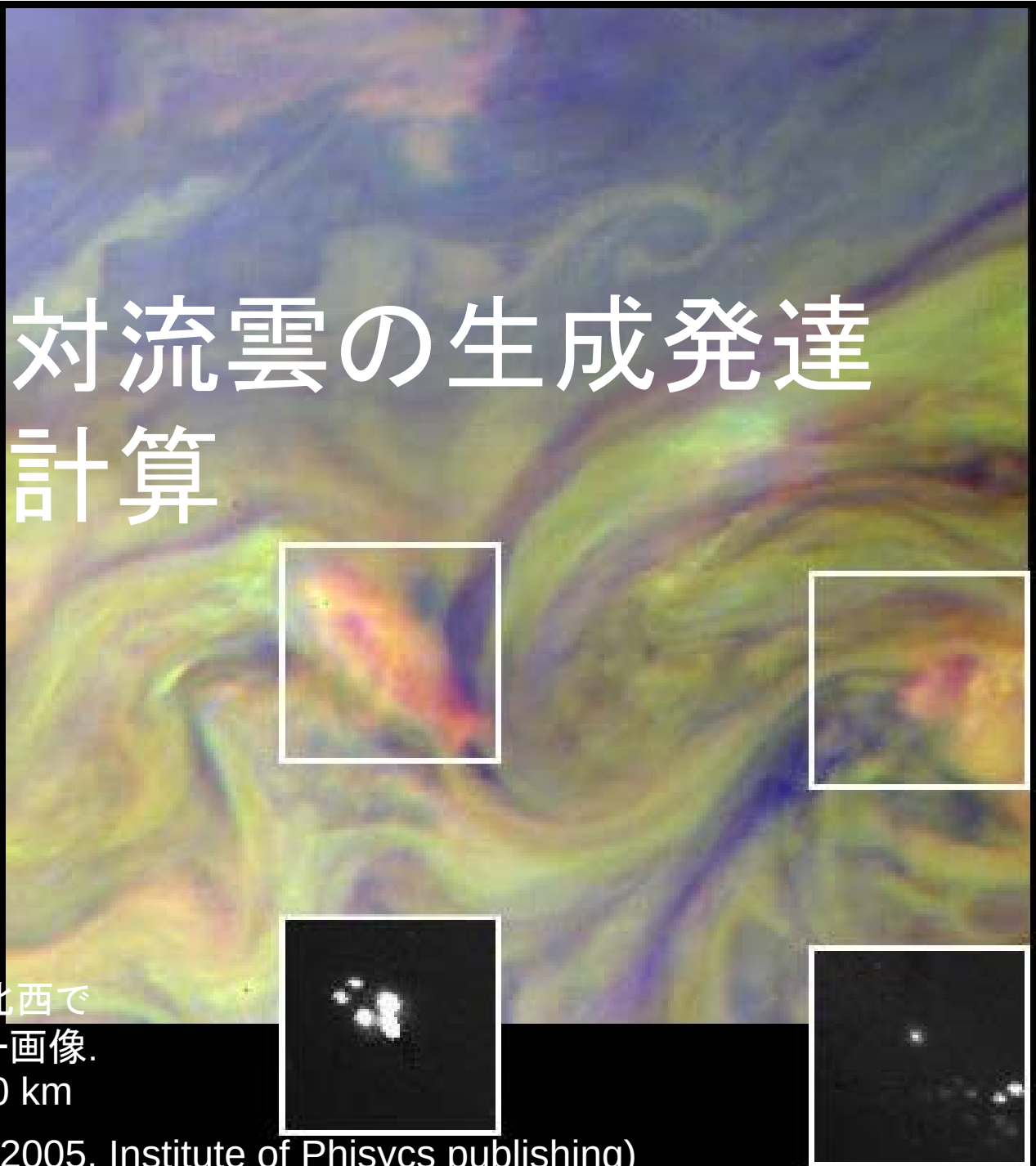
- 配列関数を多用し、「式っぽい」ソースコードを書く
- 変数名に格子点情報を付加する. 微分・平均演算関数の入力
格子点と変数名の格子点情報を揃えれば OK.

$$u_{i(u),k}^{T+\Delta\tau} = u_{i(u),k}^T - \left[c_p \bar{\theta}_v \Delta\tau \left\{ \frac{\partial \pi^T}{\partial x} - \frac{\partial (\alpha \text{Div} u)^T}{\partial x} \right\} \right]_{i(u),k} + F_{u,i(u),k}^T \Delta\tau$$

```
do k = 0,km
  do i = 0,im
    u(i,k) = u(i,k) &
      & + dts*( &
      & - cp * (vptemp_bs(i,k) + vptemp_bs(i-1,k) ) /2.0d0 &
      & *( ( pi(i,k) - pi(i-1,k) ) / dx - alp*div_x_u(i,k) ) &
      & + Accel(i,k) &
      & )
  end do
end do
```

deepconv/kaminari より引用

単独の対流雲の生成発達 過程の計算

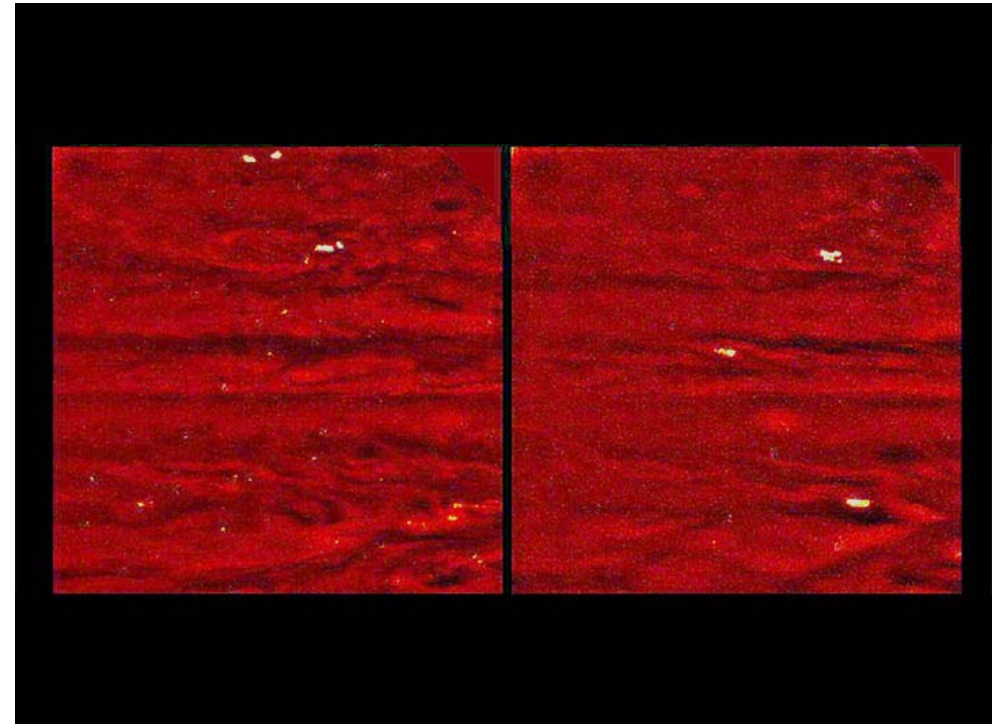


ガリレオ探査機が大赤斑の北西で
観測した対流雲の擬似カラー画像.
対流雲のスケールは約 1000 km

Vasavada and Showman (2005, Institute of Physics publishing)

木星における対流雲

- 1000 ～ 4000 km 規模の対流雲
 - ボイジャー、ガリレオ探査機による撮影
 - 雷発光を伴う
 - 従来大規模な下降域と考えられてきた木星の縞(茶褐色の帯)で多数観測.
 - H₂O の対流雲と想像されている
- 従来の対流雲研究
 - 雲解像モデルによる研究例はごく少数
 - Yair et al (1992, 1995), Hueso and Sanchez-Lavega (2001)

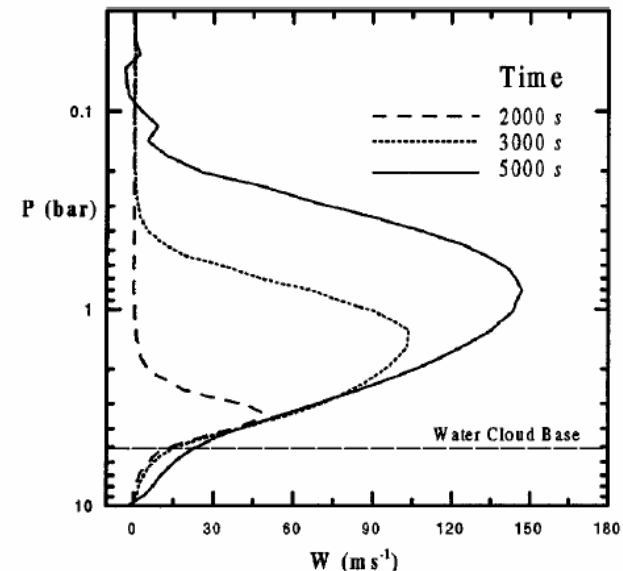
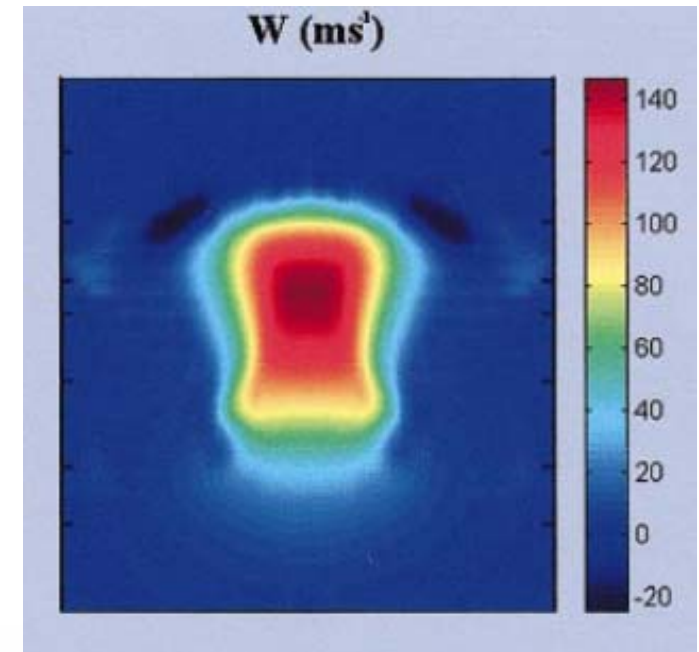


ガリレオ探査機によって撮影された雷発光の擬似カラー画像(75 分間隔). 広帯域の可視フィルターを用いて, 木星の夜側を撮影.

<http://galileo.jpl.nasa.gov/gallery/images/top10-09.jpg>

従来の雲解像モデル研究(Hueso and Sanchez-Lavega, 2001)

- 対流雲の生成発達過程を調べる
 - 非弾性系の3次元雲解像モデル
 - 対流雲内の上昇速度は 150 m/s
- 問題点
 - NH₄SH の生成反応が考慮されていない
 - NH₄SH の生成に伴う安定成層の強さは H₂O, NH₃ の数分の一。無視できない
 - 雨の落下と再蒸発が考慮されていない
 - 地球の経験では、雨の存在は対流雲の運動に大きな影響を及ぼす



目的と計算設定

■ 目的

- 湿度 99 % の気塊を大気深部から上昇させた際に発生する雨, 鉛直速度の分布を調べる.

■ 計算設定

□ 基本場の設定

- 温度: 10 bar ~ 0.1 bar までは等温位, 0.1 bar ~ 0.02 bar は温度一定
- 相対湿度: 99 %
- 放射強制なし

□ 大気成分

- 乾燥成分気体: H₂, He
- 凝縮成分気体: H₂O, NH₃, H₂S
 - それぞれ太陽組成(Anders and Grevesse, 1989) の 1, 2.5, 2.5 倍

□ 計算領域と時間ステップ

- 領域: 水平 150 km, 鉛直 150 km (10 ~ 0.02 bar), 解像度: 1.5 km
- 時間ステップ: 0.4 秒, 4.0 秒
- 境界条件: 水平周期境界, 上下境界 で応力なし

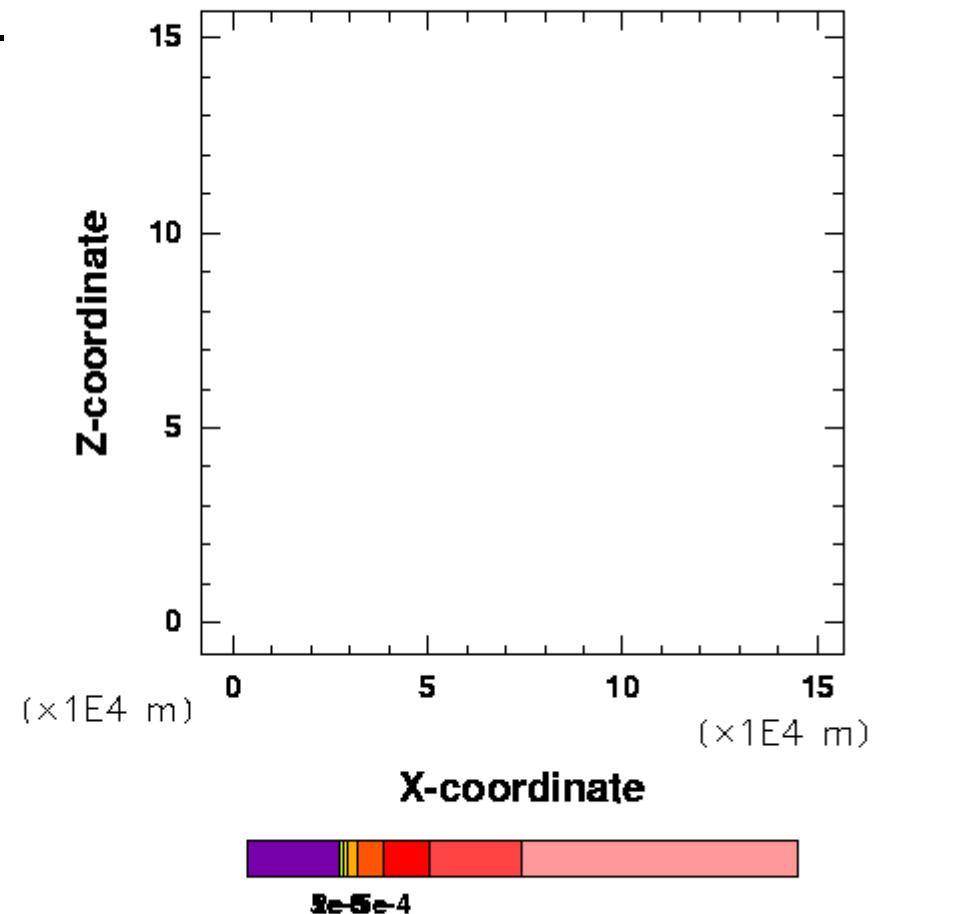
□ 初期条件

- 水の凝縮高度の下 5.7 bar に, 5 km × 5 km の温位擾乱($\Delta \theta = 0.15$)

計算結果(1): 雨の混合比

- サーマルの上昇に伴い, NH_3 , NH_4SH , H_2O の雲が発生する.
 - H_2O は 30 km, NH_4SH は 60 km, NH_3 は100 km 高度で凝縮する.
- 雨の混合比と雲の混合比の割合はおおよそ 10:1.
 - 類似の雲微物理過程のパラメタリゼーションを用いた Klemp and Wilhelmson (1978) と整合的

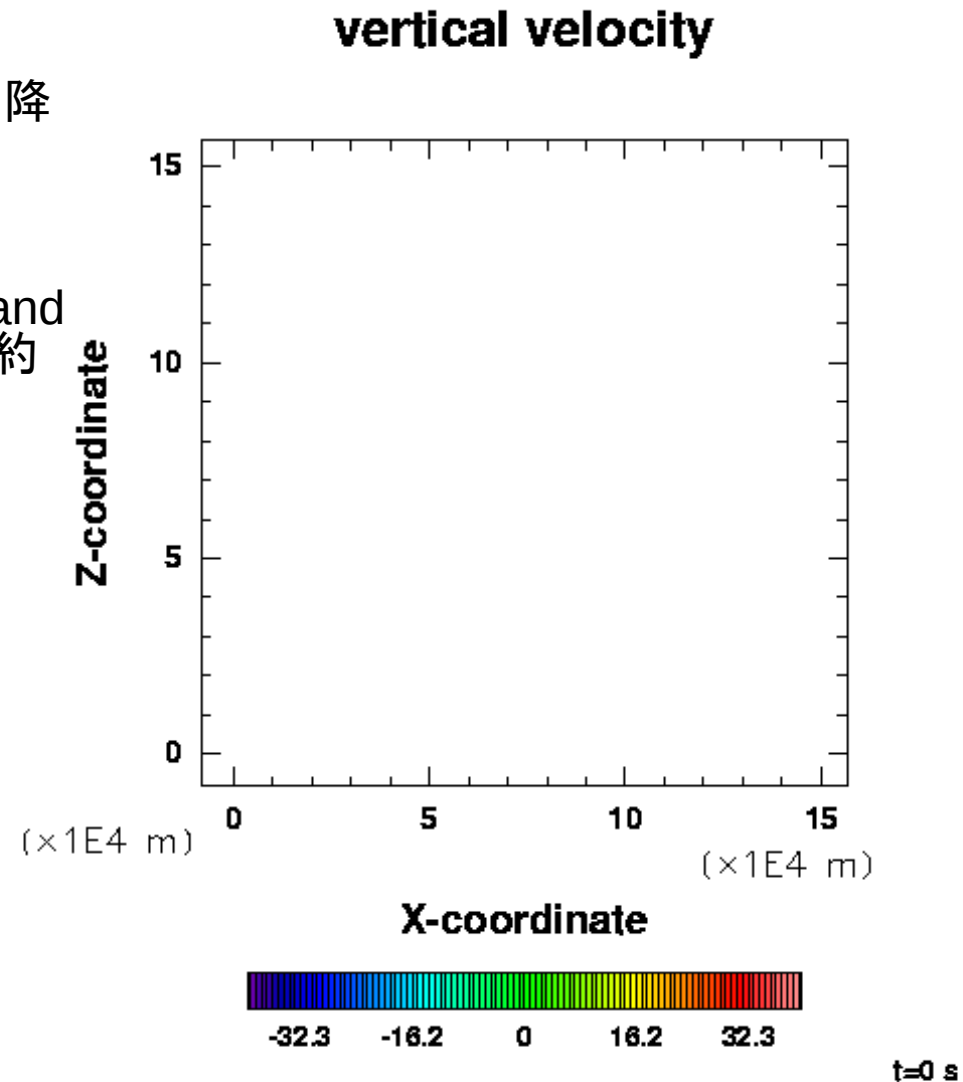
All Rains Mixing Ratio



t=0 s

計算結果(2):鉛直速度

- H₂O の雨, NH₄SH の雨に伴い下降流れが生成
 - 下降流が 2 箇所が生じる
- 上昇流の速度の大きさは Hueso and Sanchez-Lavega (2001) に比べ 約 1/5 .



従来の対流雲研究との比較: サーマルに働く浮力

■ 浮力の項をプロット

- 温位擾乱の効果

$$g \left(\frac{\theta}{\bar{\theta}} \right)$$

- 分子量効果

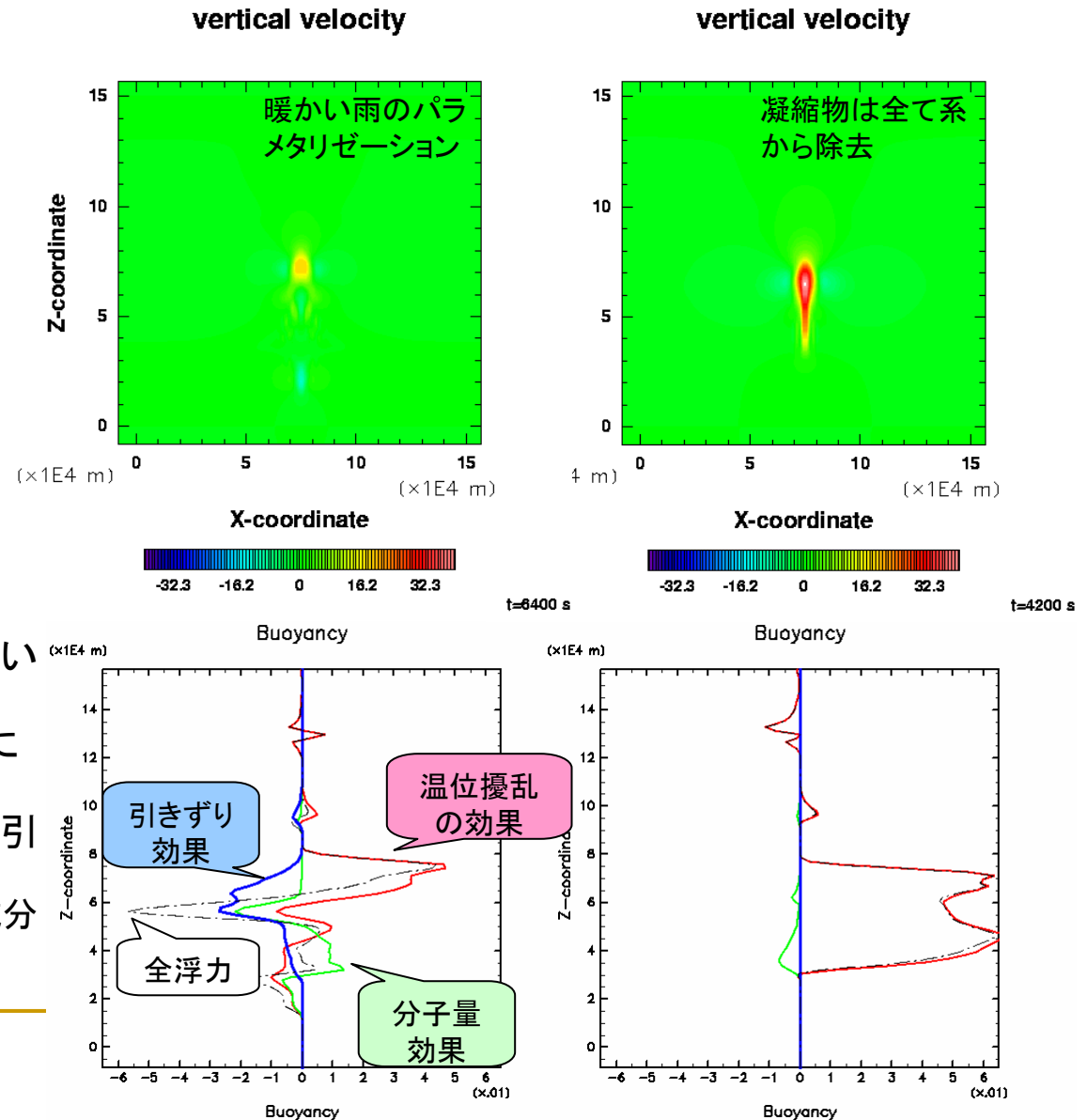
$$g \left(\frac{\sum q_v / M_v}{1 / M_d + \sum \bar{q}_v / M_v} - \frac{\sum q_v}{1 + \sum \bar{q}_v} \right)$$

- 引きずり効果

$$-g \left(\frac{\sum q_c + \sum q_r}{1 + \sum \bar{q}_v} \right)$$

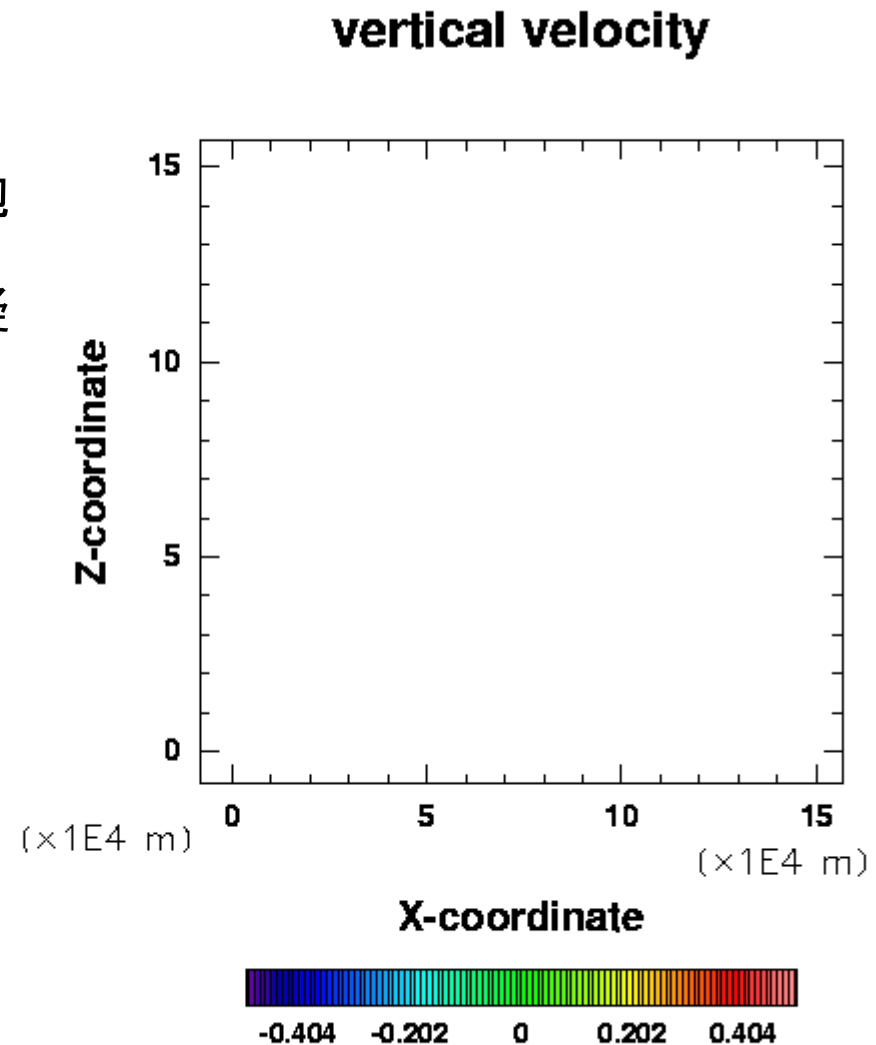
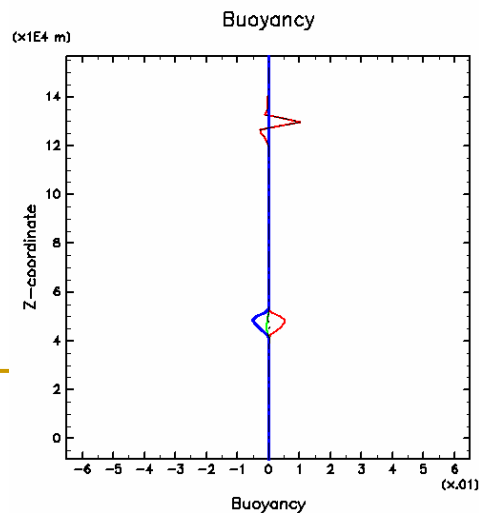
■ Hueso and Sanchez-Lavega (2001) に比べて上昇速度が小さい理由

- 雨の落下先における再蒸発による冷却
- 気塊に含まれる雲と雨による引きずり効果
 - 凝縮成分の分子量は乾燥成分に比べ 10 倍重い



凝縮成分は重いので対流できない？

- 凝縮成分が雨として落下しないケース
 - 潜熱で暖まると、凝縮成分の飽和混合比も増える
 - 温度上昇に伴う正の浮力と、凝縮成分の増加に伴う負の浮力が競合する
 - 凝縮物(雲)が気塊に含まれていなくとも、H₂O 混合比が太陽組成の 5 倍程度の場合にはサーマルは上昇できない



t=0 s

まとめ

- サーマルの上昇に伴い, H_2O , NH_4SH , NH_3 の凝縮が生じる
- 従来の研究と比較し, 上昇流の速度は小さい. 従来の研究で見られなかった下降流が生じる
- 気塊に含まれる凝縮物の引きずりの効果と雨の落下によって, サーマルには負の浮力が働く.
 - 凝縮物(雲と雨)が含まれることで気塊の密度は増加する. そのため周囲の大気よりも重くなり, 気塊には負の浮力が働く
 - 雨の落下によって, 落下先の気塊の密度が増加し, また雨の再蒸発によって冷却が生じる. 密度の増加と冷却によって, 気塊には負の浮力が働く.
- 下降流は 2 度生じ, 1 度目は H_2O の雨に, 2 度目は NH_4SH の雨に起因する

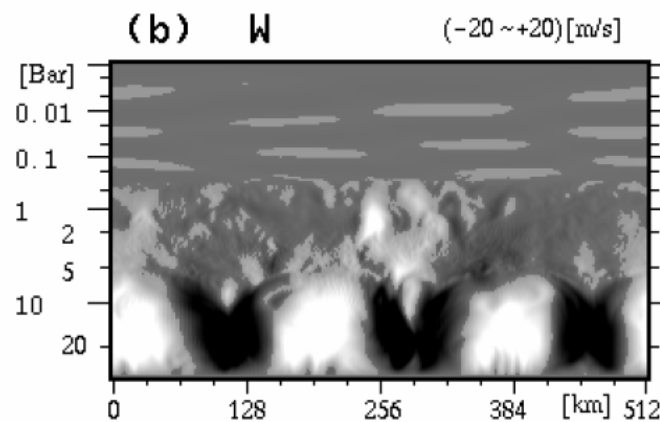
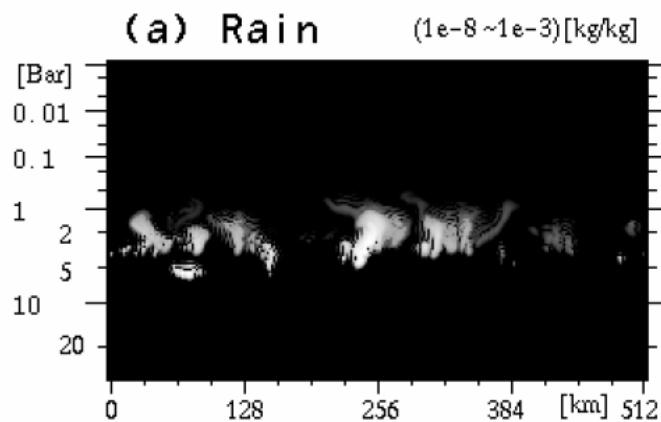
木星の対流雲に与えるエアロゾルの影響について

- エアロゾルは雲の凝結核として雲微物理過程、すなわち蒸気と雲と雨の変換効率に大きな影響を与える
- 木星のエアロゾルの候補
 - 大気深部起源: 難溶性の NH_4Cl , Na_2S (Sagan and Selpeter, 1976)
 - 大気上層起源: ヘイズ層で生成される HCN , C_2H_2 等の高分子有機化合物
 - 隕石起源の鉱物(Yair et al, 1995)
- 従来の研究での扱い
 - 凝結核・氷晶核の存在度、平均サイズ、臨界飽和比は適当に仮定 (Yair et al., 1995)

雲対流構造の直接計算

従来の雲対流計算(Nakajima et al.,2000)

- 平衡状態での平均的な大気構造を調べる
 - 雲の生成消滅が繰り返された結果として決まる平均的な大気構造を計算
 - 「2 階建ての大気構造」: 水の凝縮高度を境に対流が分割する
- 問題点
 - 凝縮成分として H₂O しか考慮していない
 - 与えた放射冷却が現実的な放射冷却の強度に比べ2桁大きい



目的と計算設定

■ 目的

- 予備実験として, Nakajima et al (2000) と同様の設定で計算を行い, 平均的な大気構造を調べる

■ 計算設定

□ 基本場の設定

- 温度: 10 bar ~ 0.3 bar までは等温位, 0.3 bar ~ 0.02 bar は温度一定
- 相対湿度: 75 %
- 放射強制: 高度100kmから200km を -1K/day で一様冷却
- ニュートン冷却: 東西平均温度を 5 dayで基本場に緩和

□ 大気成分

- 乾燥成分気体: H₂, He
- 凝縮成分気体: H₂O (NH₃, H₂S)
 - それぞれ太陽組成(Anders and Grevesse, 1989) の 1, 2.5, 2.5 倍

□ 計算領域と時間ステップ

- 領域: 水平 300 km, 鉛直 300 km (30 ~ 0.02 bar), 解像度: 2 km
- 時間ステップ: 0.4 秒, 4.0 秒
- 境界条件: 水平周期境界, 上下境界 で応力なし, 下部境界の温度を固定

□ 初期条件

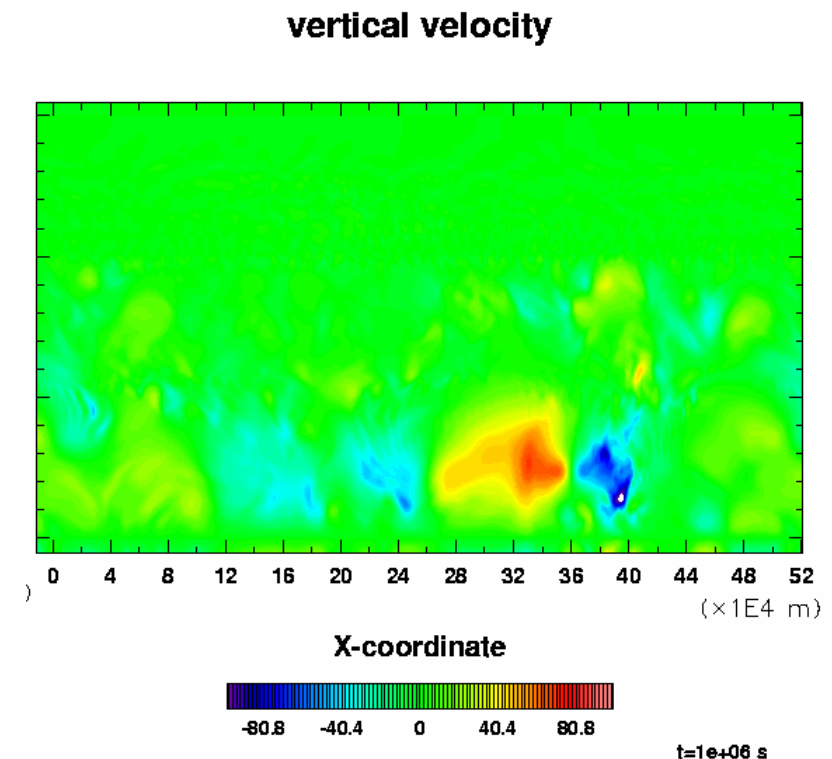
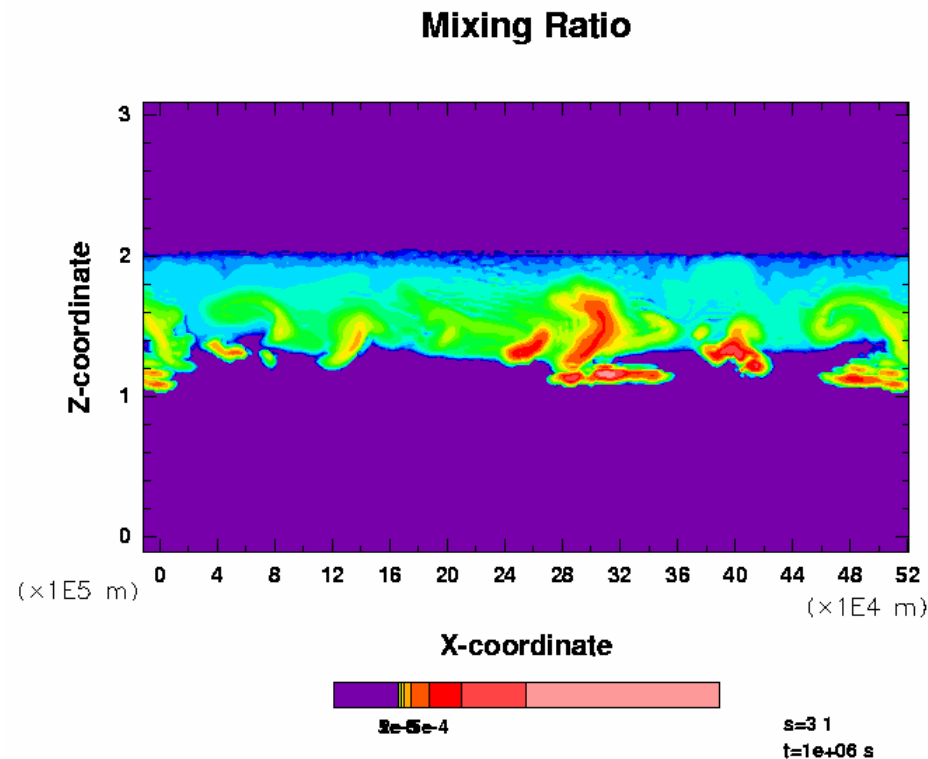
- 高度 100 km にランダムな温度擾乱(最大 0.3 K)

□ 積分時間: 1e6 秒 (約 11 日)

妥当性の検証:

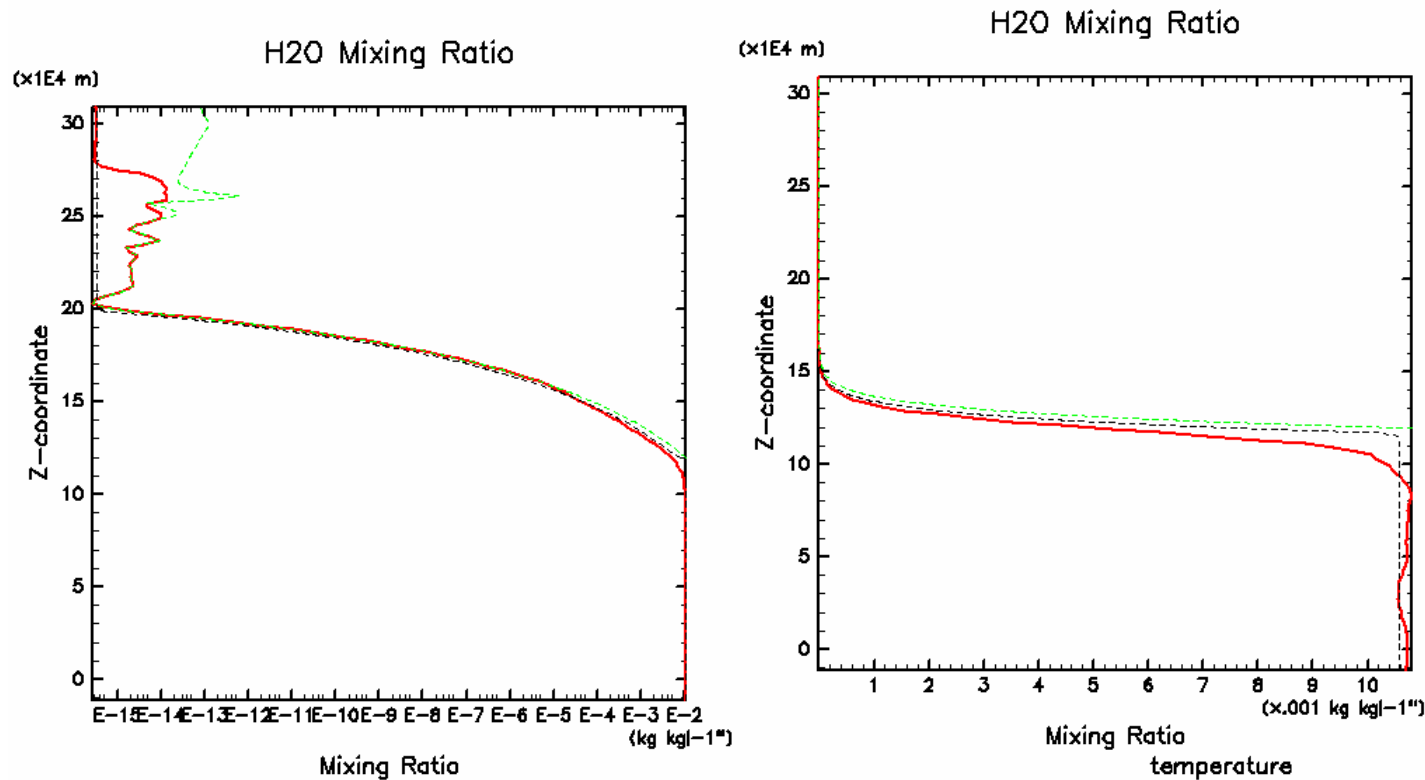
Nakajima et al. (2000) の再計算

- Nakajima et al (2000) を再現
 - 大気上層で飽和している点が異なる.



Nakajima et al. (2000) の再計算(2)

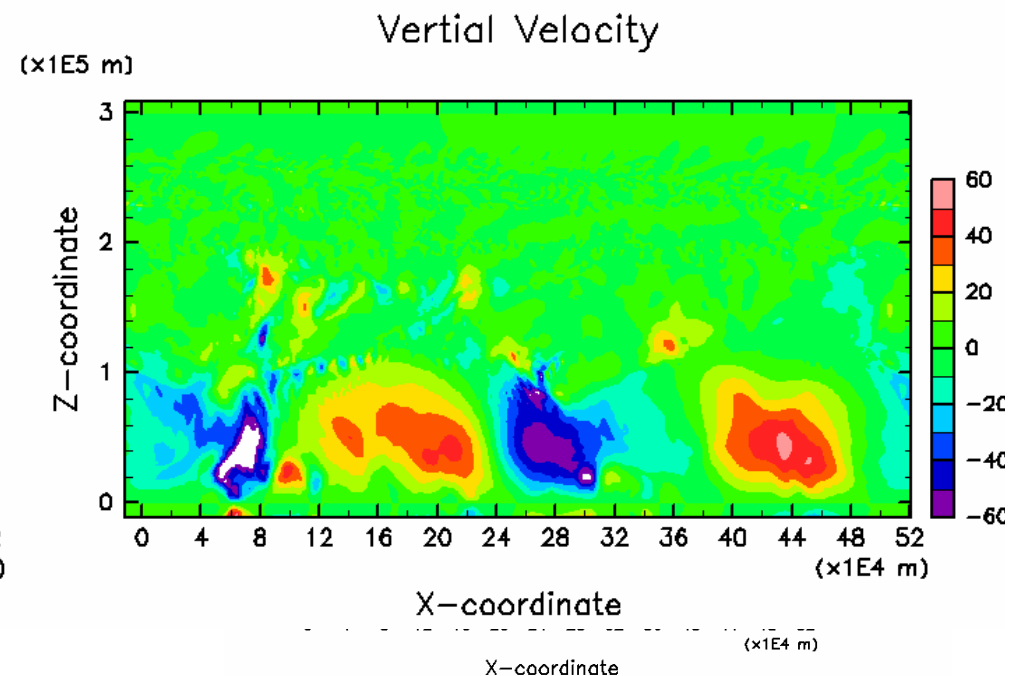
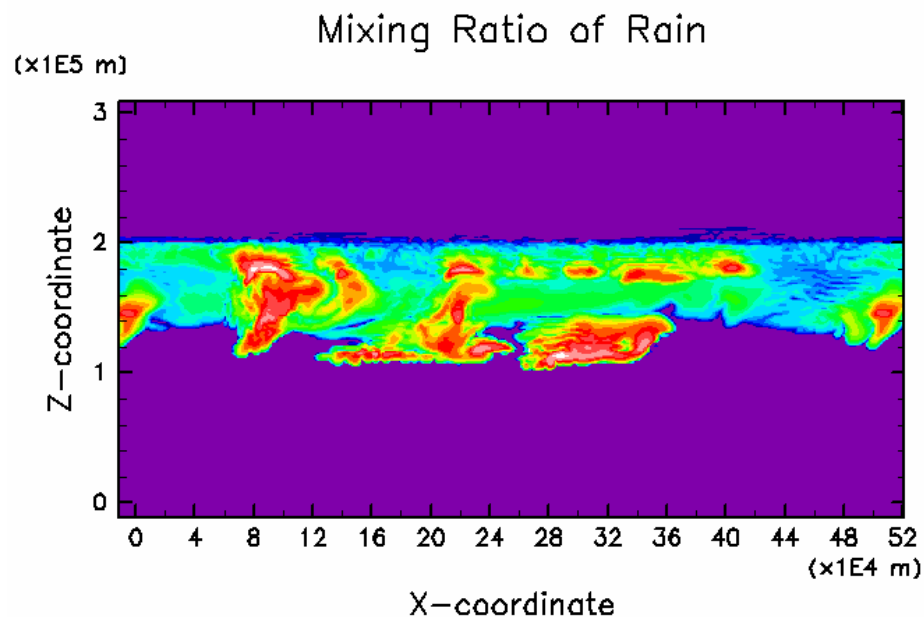
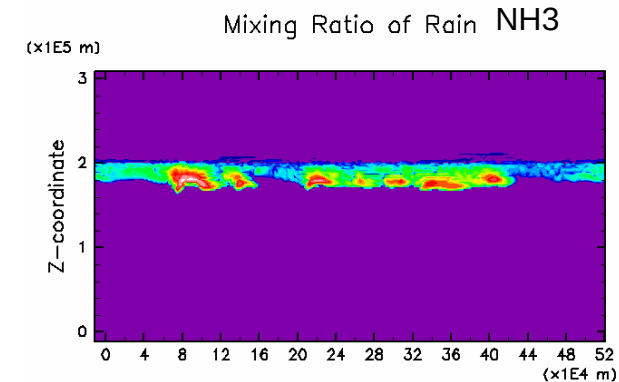
■ 平均的な鉛直温度・水蒸気混合比分布



破線: 初期状態、赤線: 10^6 秒後のプロファイル、緑線: 飽和混合比

NH₃, NH₄SH, H₂O を考慮した場合：雨と流れ場の結果

- 「2階建て対流」という特徴は変わらない



NH₃, NH₄SH, H₂O を考慮した場合：平均的な温度・凝縮成分分布

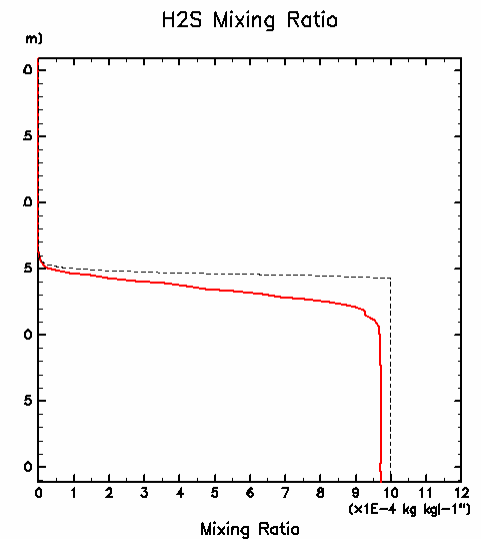
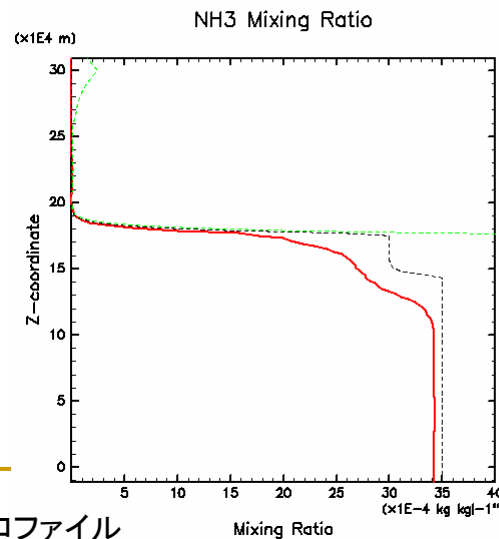
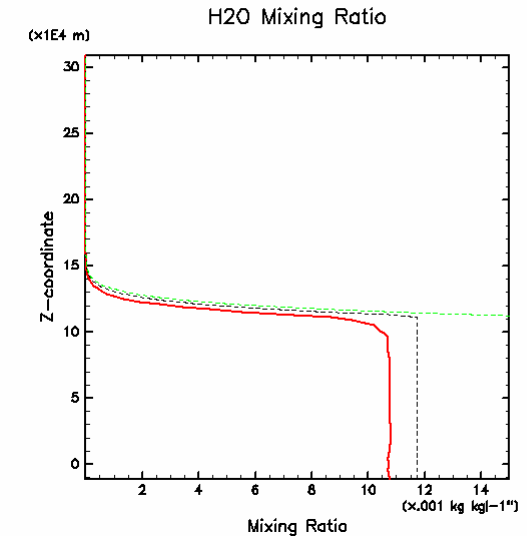
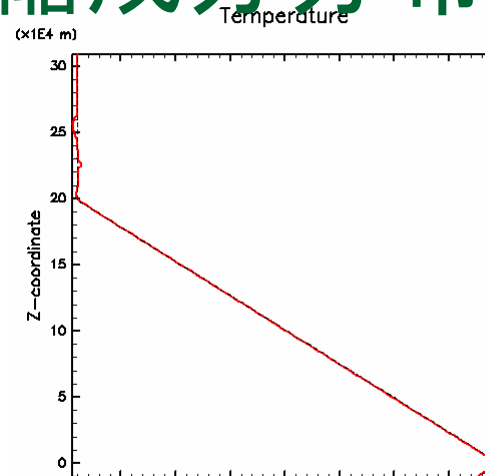
- 凝縮成分混合比は，凝縮高度より深い領域においても減少する

- バグが残っているような

...

- 雲の混合比を足し合わせても，混合比が保存していないように見える

...



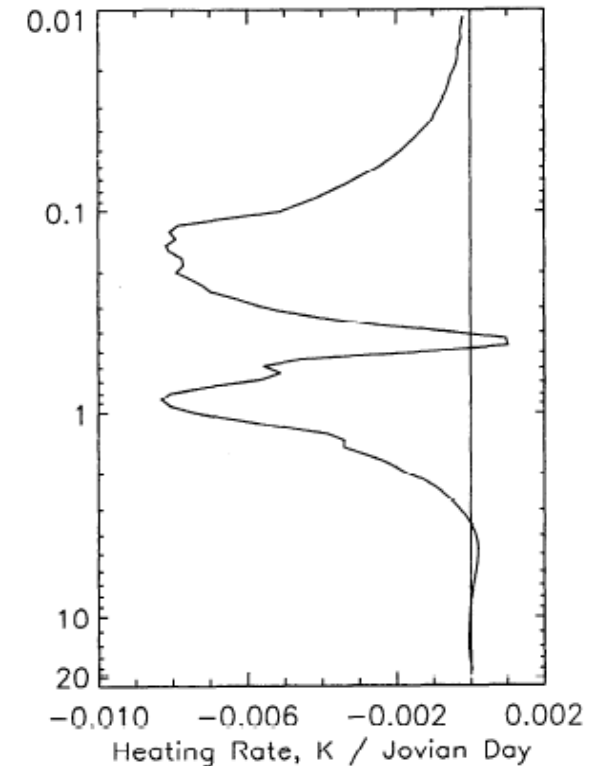
破線：初期状態

赤線：1e6秒後のプロファイル

緑線：飽和混合比

まとめ

- 予備的な実験として, Nakajima et al (2000) と同様の設定で計算を行った
- 予備的な結果では, 彼らと同様の 2 階建て対流を再現できた
 - 差異を生じる原因については現在検討中
- 今後の研究
 - 計算設定の再検討
 - 現実の木星大気に即した放射強制を用いる
 - ガリレオ探査機の大気プローブの観測した熱フラックスを利用する予定



ガリレオプローブの観測した放射フラックス. (Sromovsky et al., 1998, JGR)

おまけ： 木星観測・探査計画について



今後20年を睨んだ観測計画を

■ 地上観測

- ALMA

■ 地球周回軌道

- 惑星用宇宙望遠鏡(TOPS)

■ 探査機

- JUNO (NASA)

- Cosmic Vision (ESA & JAXA ?)

- ソーラーセイル(技術試験衛星) (JAXA)

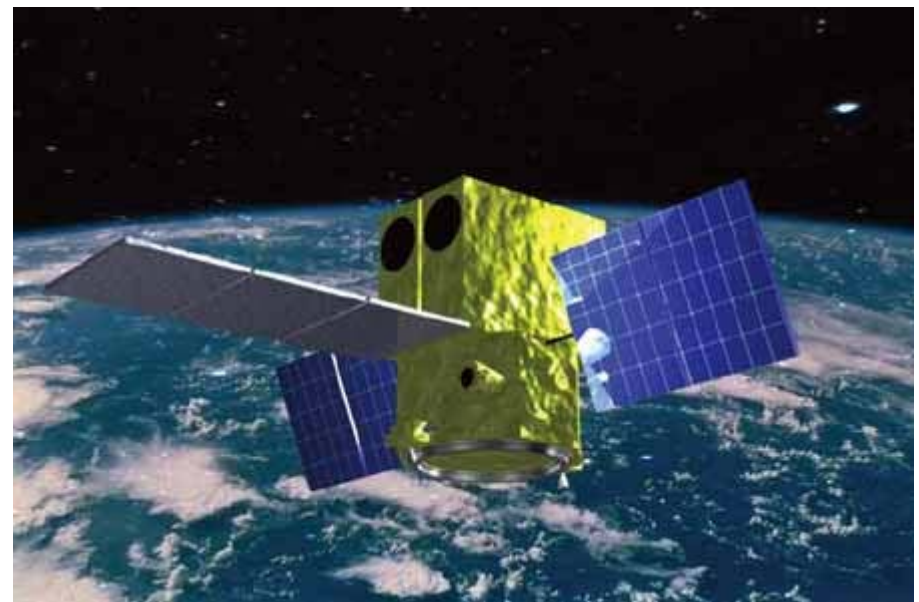
ALMA

■ チリのアタカマ砂漠に建設中の電波干渉計



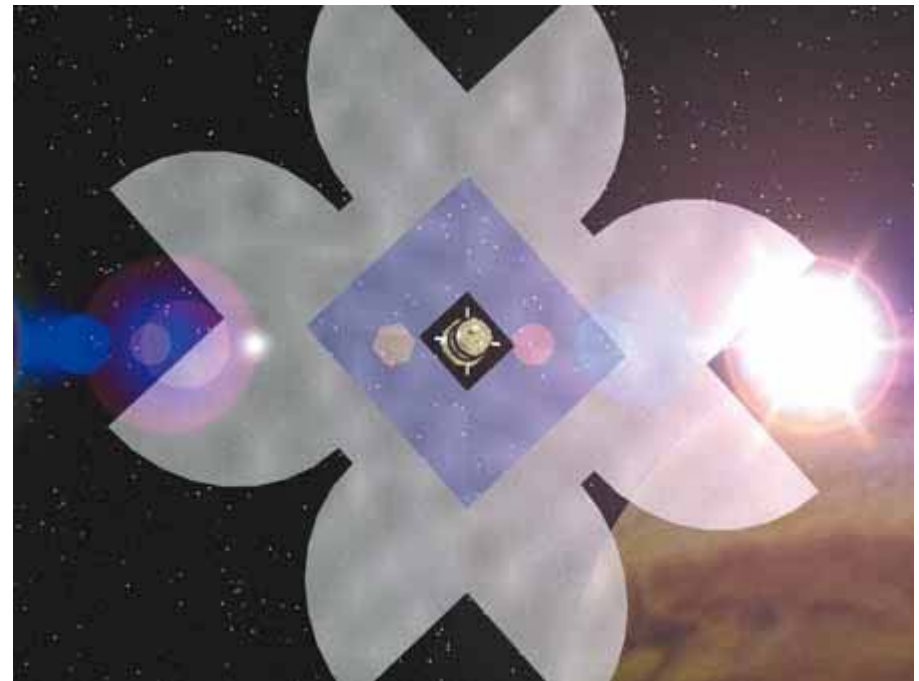
http://www.nro.nao.ac.jp/alma/J/Images/ALMA_photo.jpg

惑星宇宙望遠鏡TOPS



<http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.288/GIF288/15-z1.jpg>

ソーラーセイル



<http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.288/mission-05.html>

图表集

プローブの観測した東西風速 (Atkinson et al., 1998)

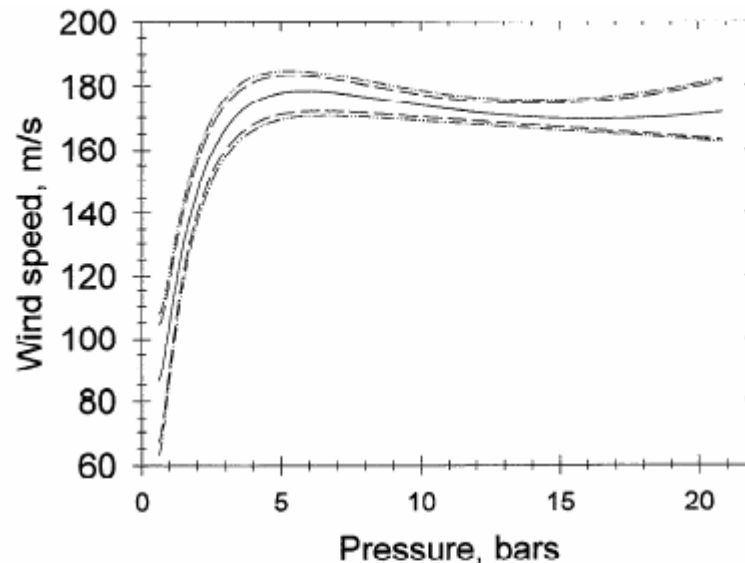


Figure 4. Measured wind profile (solid line) surrounded by error envelopes that include (1) errors in descent velocity of $\pm 5\%$, (2) no corrections and maximum corrections for high-temperature drift rate of the probe USO, and (3) 1σ descent longitude errors of $\pm 0.07^\circ$ (dashed lines). The dot-dashed curves show the envelope for the same descent velocity errors and thermal models but with the 99% error of 0.19° in probe entry longitude.

プローブの質量分析計の結果 (Niemann et al., 1998)

Table 1. Measured Mixing Ratios or Isotope Ratios

Species or Ratio	Mixing Ratio f or Isotope Ratio	Mole Fraction q	Ratio to Solar
^4He	0.157 ± 0.030	0.136 ± 0.026	0.8
$^3\text{He}/^4\text{He}$	$(1.66 \pm 0.05) \times 10^{-4}$		
D/H	$(2.6 \pm 0.7) \times 10^{-5}$		
^{20}Ne	$\leq 3 \times 10^{-5}$	$\leq 2.6 \times 10^{-5}$	≤ 0.13
^{36}Ar	$\leq 10.5 \times 10^{-6}$	$\leq 9.06 \times 10^{-6}$	≤ 1.7
^{84}Kr	$\leq 3.7 \times 10^{-9}$	$\leq 3.2 \times 10^{-9}$	≤ 5
^{132}Xe	$\leq 4.5 \times 10^{-9}$	$\leq 3.8 \times 10^{-10}$	≤ 5
H_2O			
3.6 bars	$\leq 8 \times 10^{-7}$	$\leq 6.9 \times 10^{-7}$	$\leq 4.1 \times 10^{-4}$
12 bars	$\leq (5.6 \pm 2.5) \times 10^{-5}$	$\leq (4.8 \pm 2.1) \times 10^{-5}$	≤ 0.033
19 bars	$\leq (6 \pm 3) \times 10^{-4}$	$\leq (5.2 \pm 2.6) \times 10^{-4}$	≤ 0.35
CH_4	$(2.10 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	$(1.81 \pm 0.34) \times 10^{-3}$	2.9
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	0.0108 ± 0.0005		
NH_3 (>15 bars)	$\leq 2.3 \times 10^{-3}$	$\leq 2 \times 10^{-3}$	≤ 10
H_2S			
3.6 bars	$< 10^{-6}$	$< 8.6 \times 10^{-7}$	< 0.03
8.7 bars	7×10^{-6}	6.1×10^{-6}	0.23
>16 bars	$(7.7 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	6.7×10^{-5}	2.5
PH_3 (>16 bar)	$\leq 6 \times 10^{-6}$	$\leq 5.2 \times 10^{-6}$	≤ 8
Cl	detected		

プローブの無線信号の減衰から見積もられたアンモニアモル比 (Folkner et al., 1998)

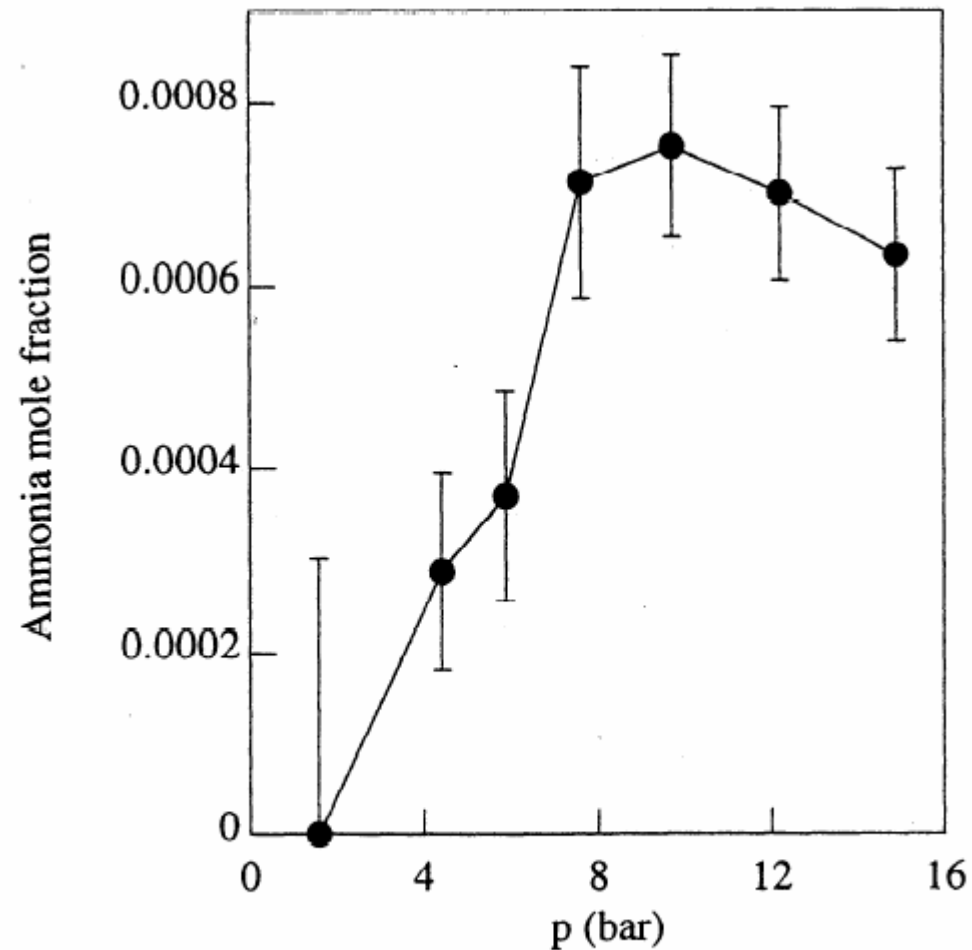
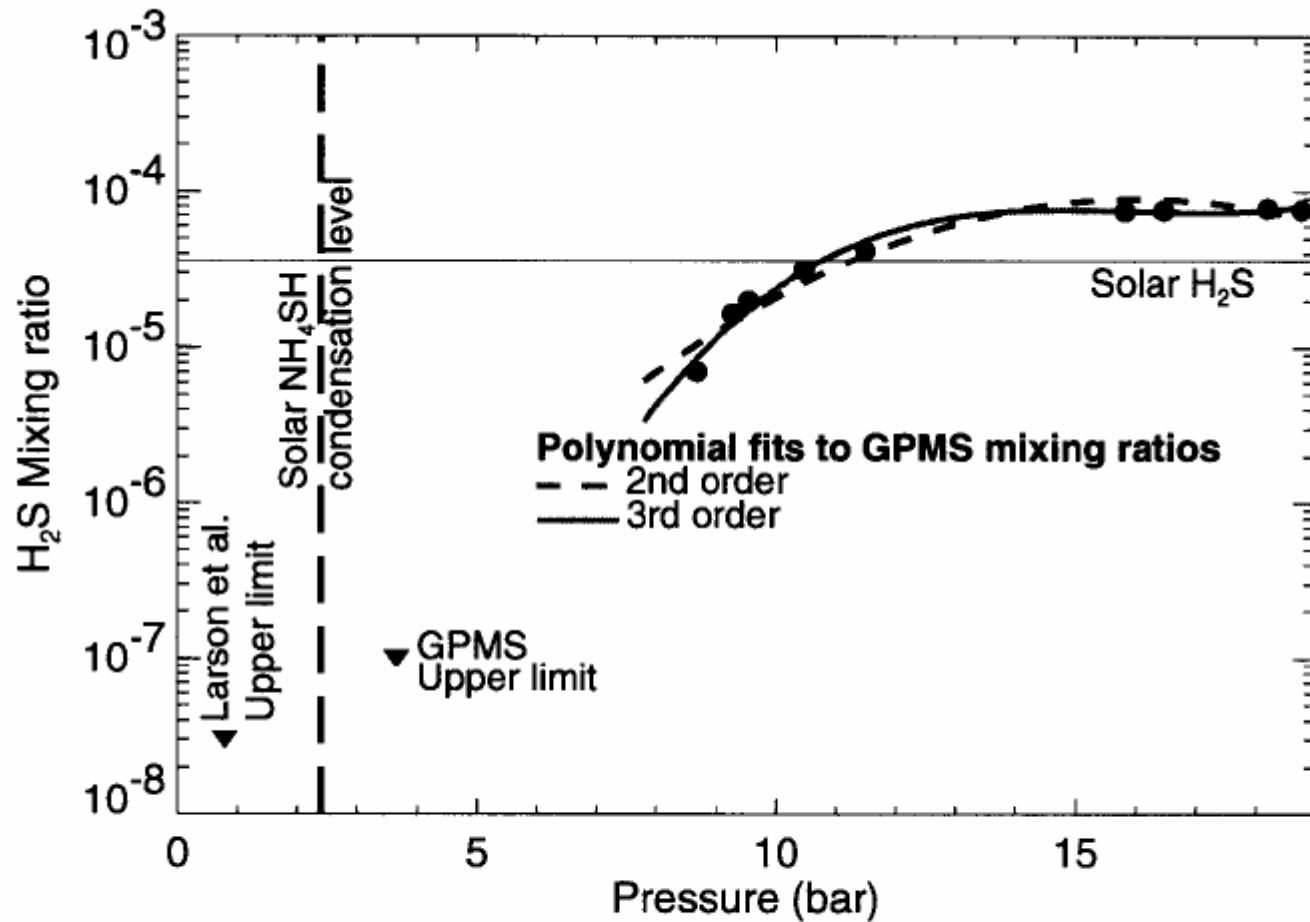


Figure 11. Estimated mole fraction of ammonia versus pressure.

H₂Sの鉛直分布存在量 (Atreya et al., 1999)



GPMS measurements of the H₂S mixing ratio are shown by squares at pressures greater than 8 bars. No compositional measurements by GPMS between 3.8 and 8 bars. The H₂S count rates are statistically insignificant at pressures below 3.8 bars, so that only an upper limit H₂S could be obtained at 3.8 bars (triangle). The upper limit shown at 0.8 bar (triangle) is from the ground-based infrared studies (Larson et al., 1984). Also shown are second and third order polynomial fits to the GPMS data beyond 8 bars. H₂S mixing ratio corresponding to the Solar H₂S level is indicated by a horizontal line at 10⁻⁵.

プローブの Nephelometer の結果(Ragent et al., 1998).
1.4 bar 付近のピークはNH₄SH 雲に対応すると考えられている.
H₂O雲に対応するピークは見られない

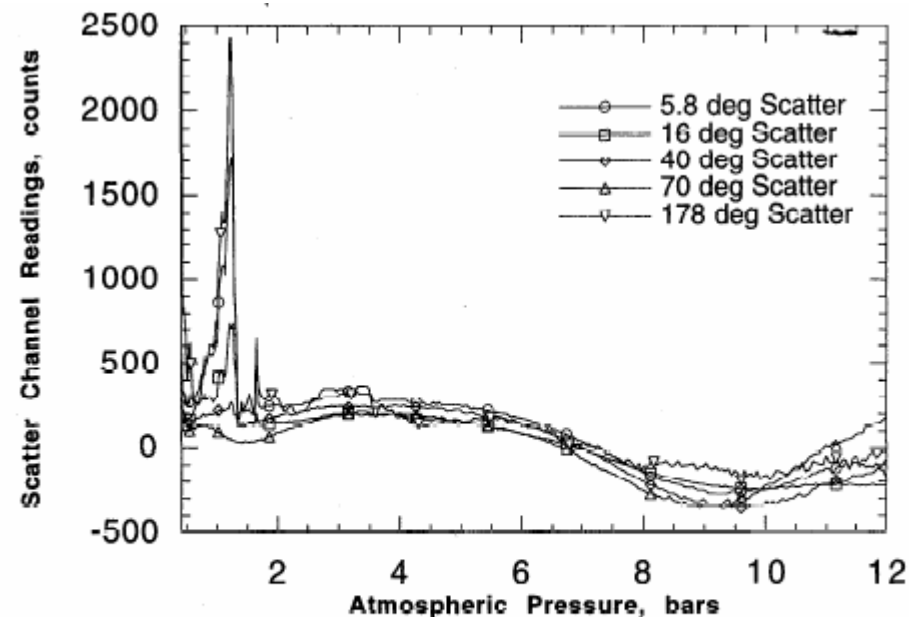
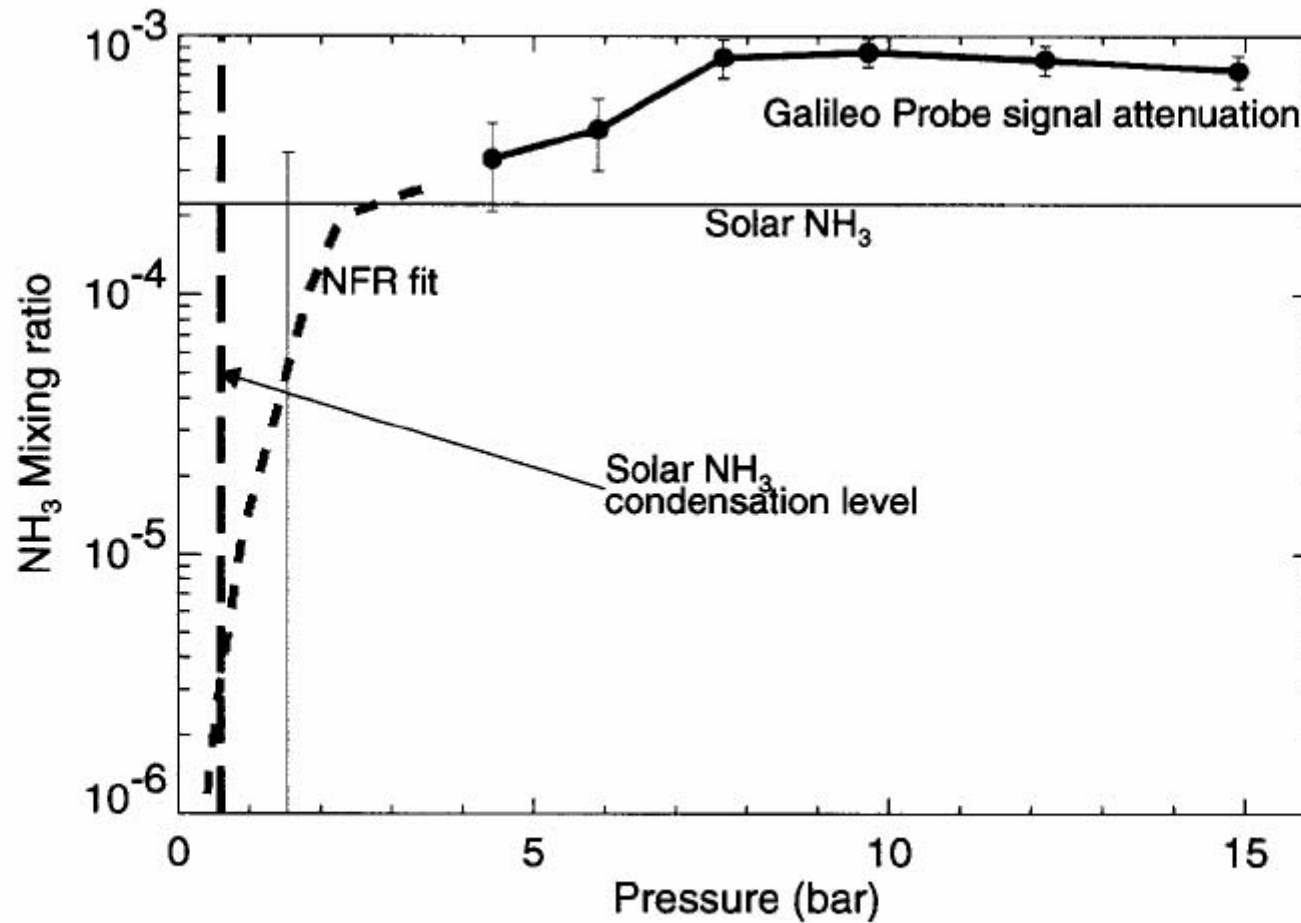


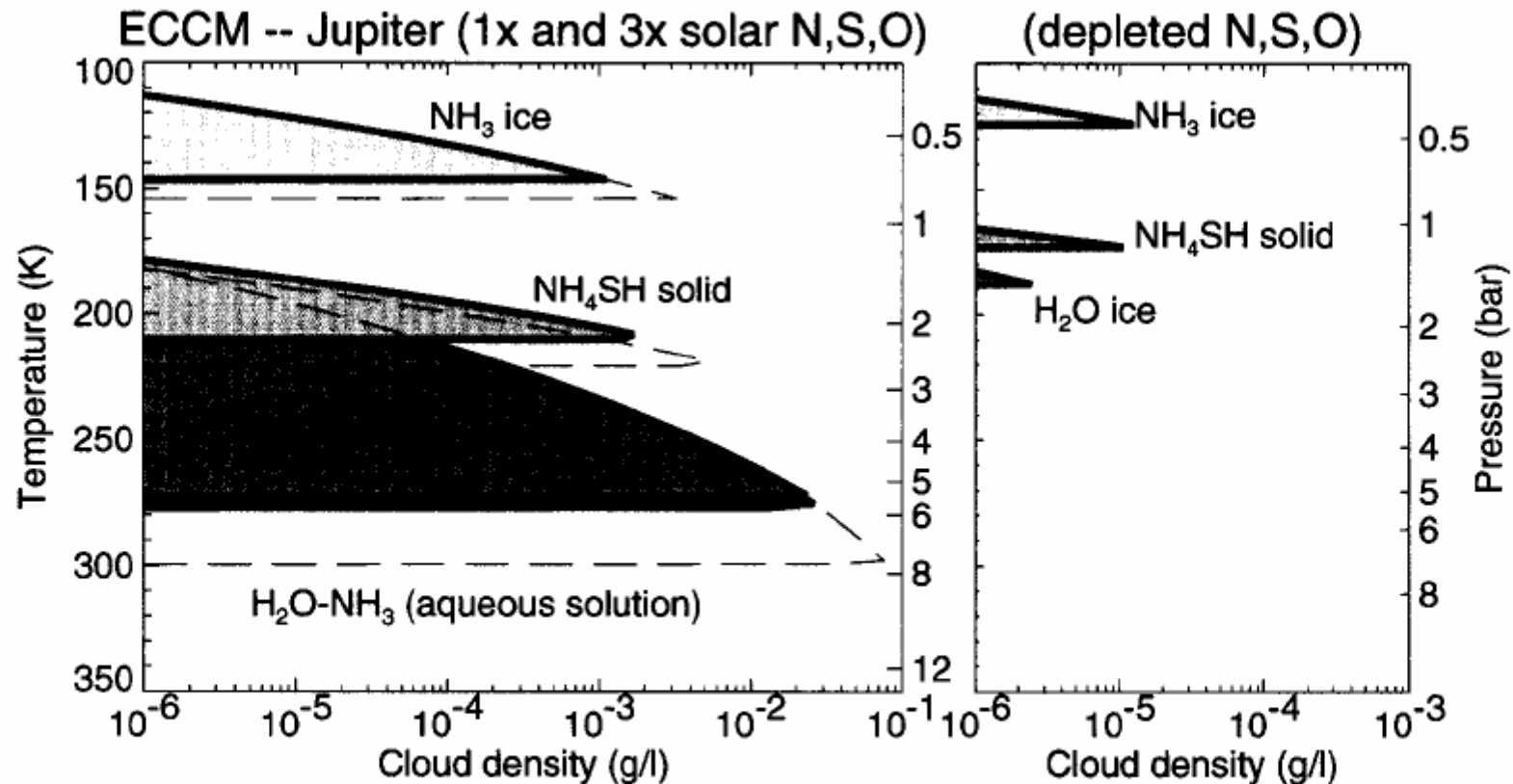
Figure 4. Plots of recorded raw scatter channel readings as a function of ambient atmospheric pressure during the probe descent.

NH₃ の鉛直分布 (Atreya et al., 1999)



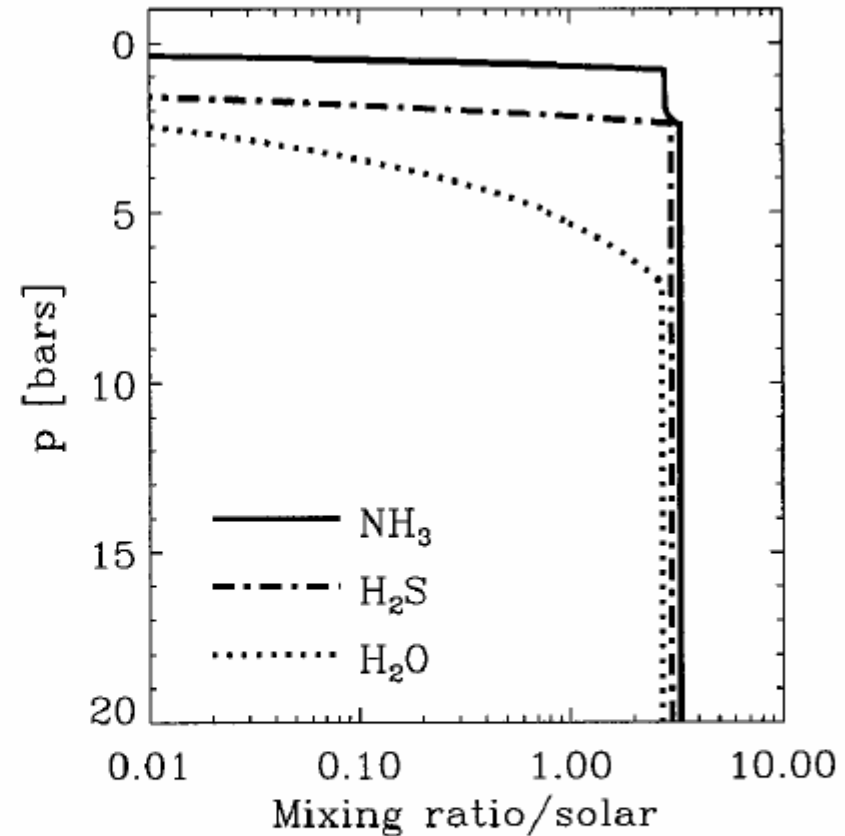
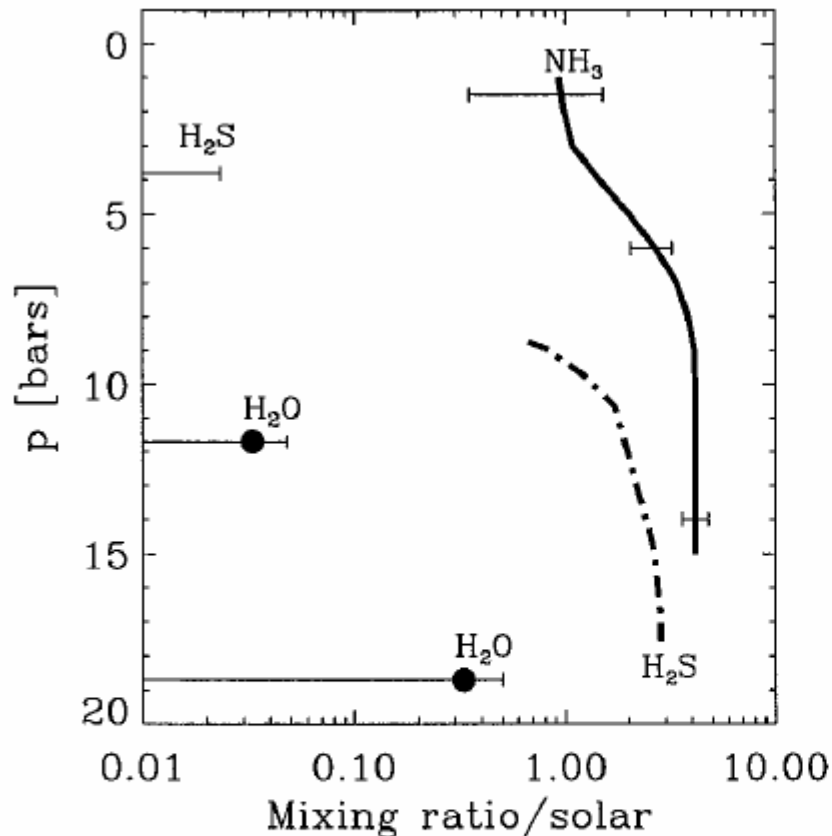
The NH₃ profiles from Net Flux Radiometer measurements (Sromovsky et al. 1998) and from probe signal attenuation measurements (Atreya et al. 1998) are shown. NH₃ mixing ratio corresponding to solar N/H (Table 2), and the expected atmospheric level of NH₃ condensation (Fig. 4) for this ammonia abundance, are indicated.

従来予想されてきた組成、およびプローブの測定した組成を仮定した場合に、ECCM によって見積もられた雲密度 (Atreya et al., 1999)



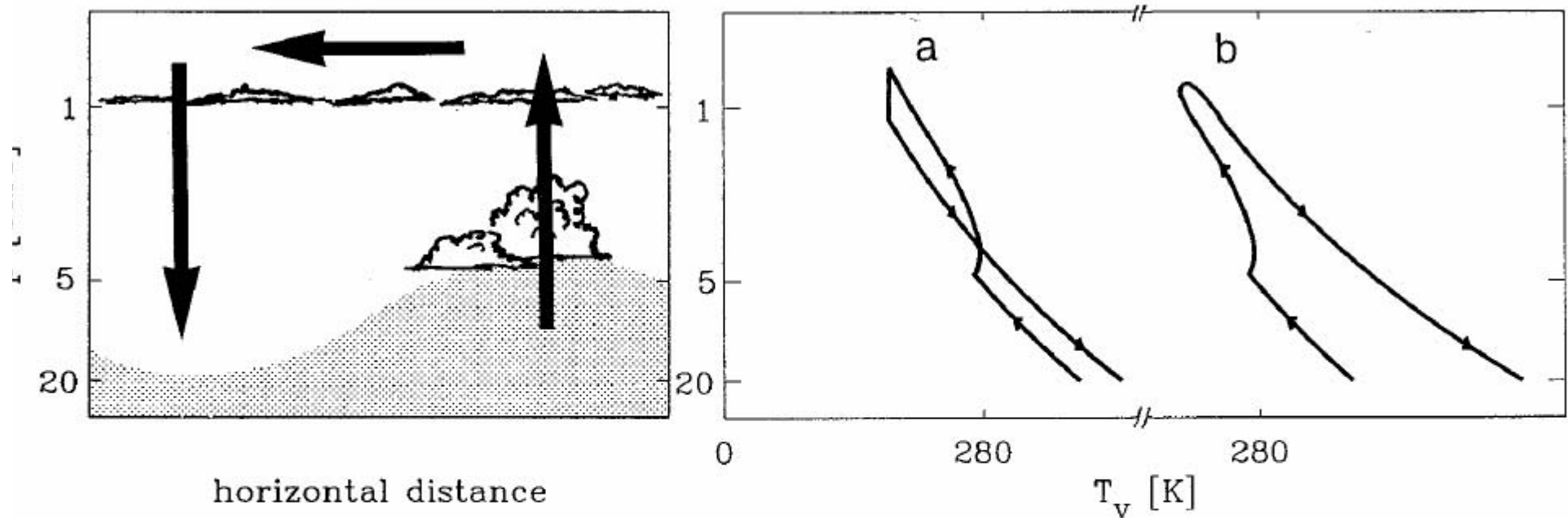
(a, left) Jovian deep abundances of condensible volatiles were taken at $1 \times$ solar (solid area) and $3 \times$ solar (dashed lines) values (see Table 1) and used to calculate the equilibrium cloud densities. (b, right) As (a), but with the following depleted condensible volatile abundances relative to solar: H₂O: 0.01%; NH₃: 1%; H₂S: 0.5%.

プローブの観測した凝縮成分の鉛直分布(左)と, ECCM から
予想される凝縮成分の鉛直分布
(Showman and Ingersoll, 1998)



(ft) Abundances of NH_3 , H_2S , and H_2O vs pressure as measured by the Galileo probe. The NH_3 profile (thick solid line) is from Showman and Ingersoll (1998), while the H_2S data (thick dash-dot line) and H_2O data (filled circles) are from Niemann *et al.* (1997). The filled circles are upper limits because of the possibility of outgassing from the equipment; the upper limit on H_2S is at ~15 bars. All data are preliminary and may be revised in the future. (Right) Profiles of NH_3 (solid line), H_2S (dash-dot line), and H_2O (dotted line) from an equilibrium condensation model, assuming deep abundances near 3 times solar. Comparison with the model

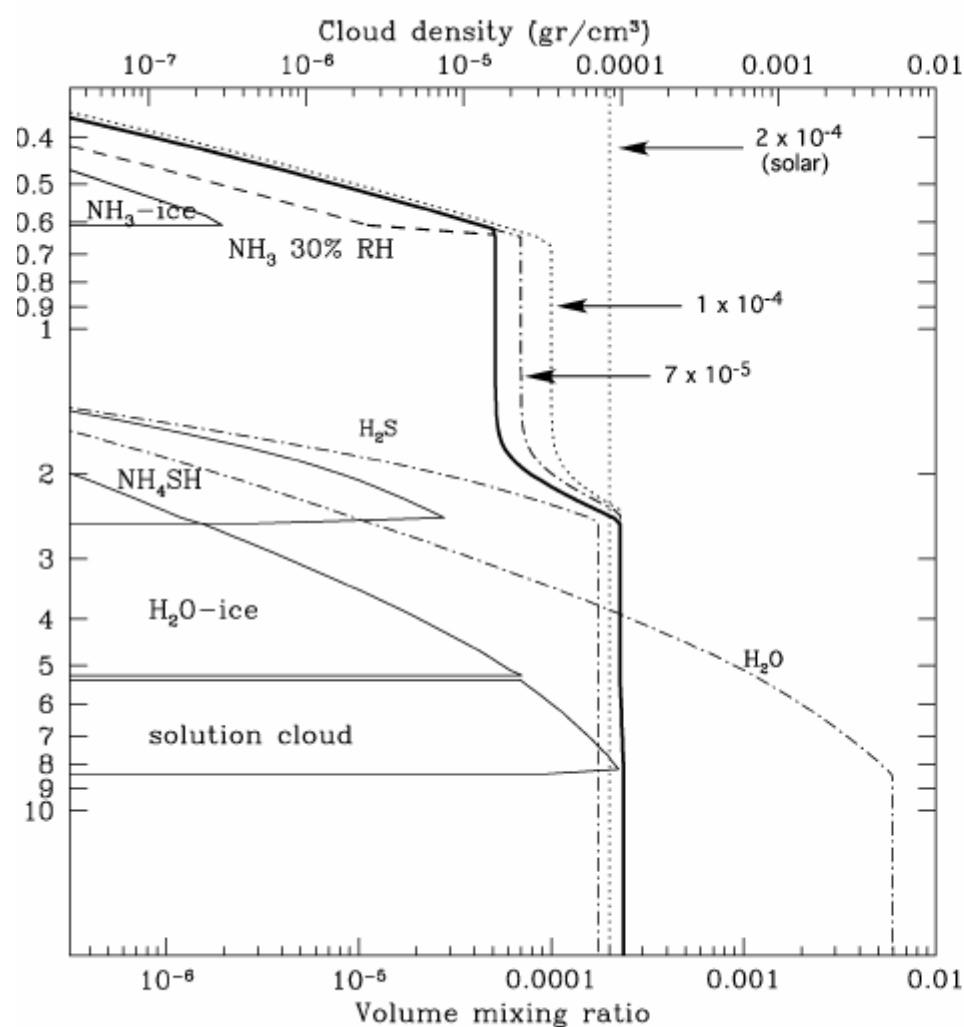
Showman and Ingersoll (1998) が提唱した、プローブ落下点の乾燥状態を説明するためのシナリオ 乾燥した気塊が大気深部まで貫入する



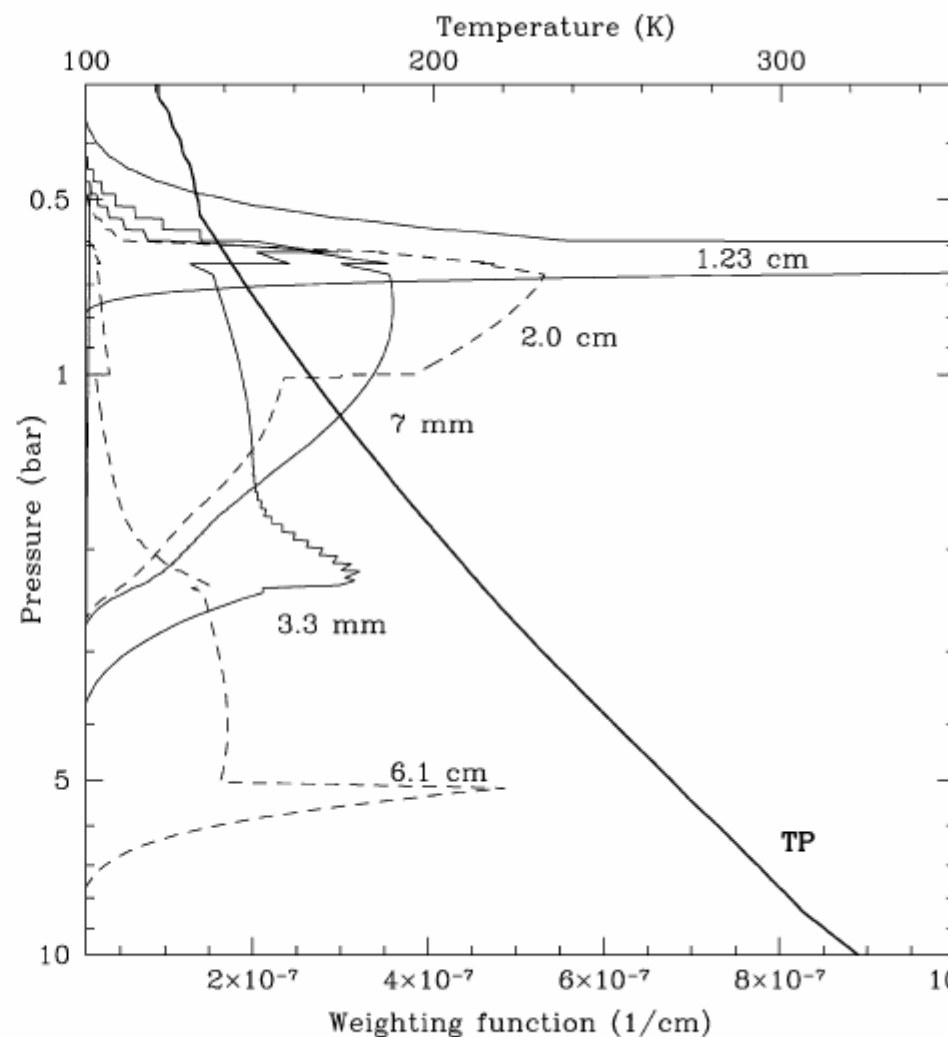
model to explain the dryness at the probe site. (Left) A schematic of our proposed circulation; arrows denote air motion. The shaded region indicates air with high water vapor content. (Right) Diagrams of two possible thermodynamic paths followed by air during the hot spot and descending in the hot spot. The plots have the same vertical axis; the horizontal axis for the temperature. (a) Updrafts follow a moist adiabat above the 5-bar water condensation level; downdrafts cool by radiation and follow a dry adiabat below. Downdraft is less dense at $p > 5$ bars. The difference between the moist and dry adiabats has been exaggerated. (b) Updrafts follow a moist adiabat, but radiatively warm in upper troposphere. Downwellings follow dry adiabat. Downdraft is less dense at $p > 5$ bars. Both models produce a deep stable layer which suppresses the mixing of volatiles into the downdraft.

電波観測の解析から得られたNH₃分布と、そのときに予想される雲

(Gribson et al., 2005)



(a)



(b)

ガリレオの撮像したホットスポット
(Vasavada and Showman, 2006).

ガリレオプローブはこのような雲のない地点に落下

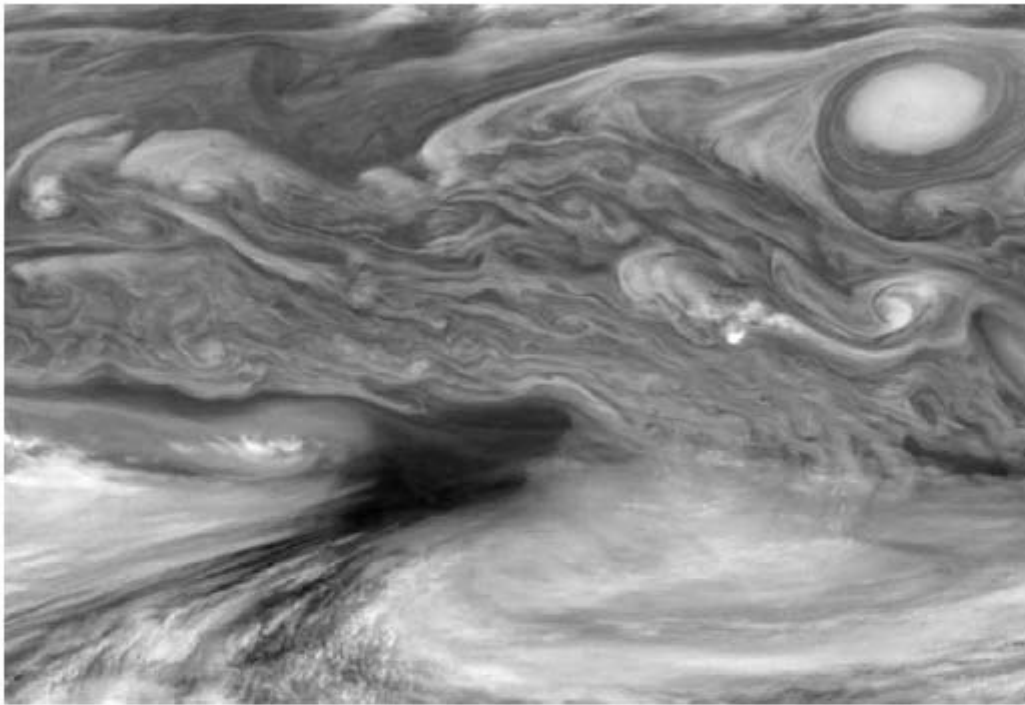


Figure 23. *Galileo* mosaic showing the region north of Jupiter's equator (about 1–21°N) in a near-infrared continuum filter. The dark feature near the centre of the mosaic is an equatorial hot spot, characterized by a clearing in the clouds. The upper half of the mosaic shows a small anticyclone with two discrete storms to its south. The leftmost storm (just northeast of the hot spot) was shown to be associated with very high relative humidity, consistent with a moist convective origin. NASA image PIA00604.

ガリレオの撮像した対流雲(Vasavada and Showman, 2006).
1000 km スケールの対流雲が観測されている

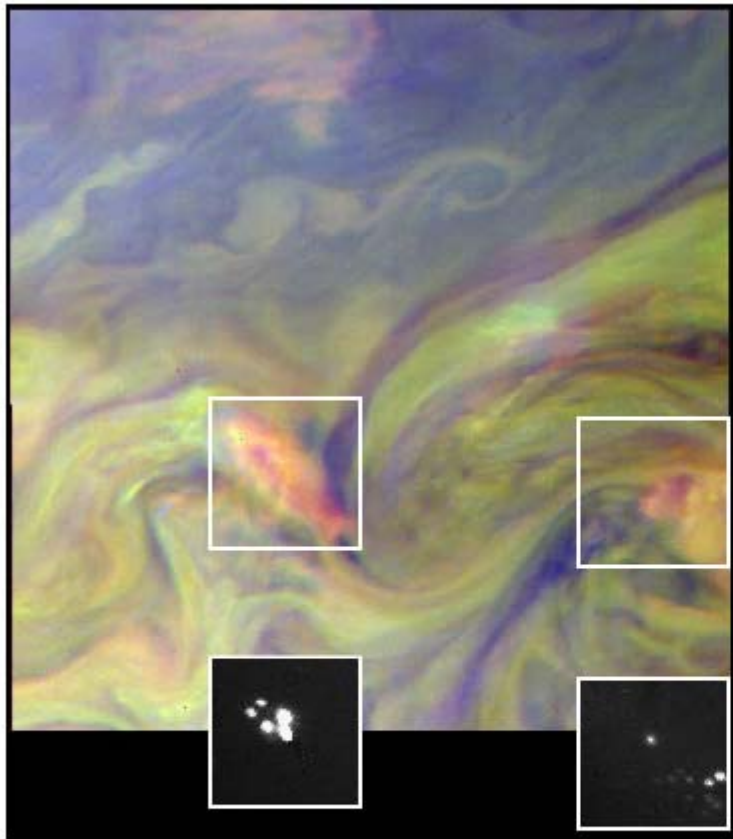


Figure 21. False-colour, day-side view of storms northwest of Jupiter's Great Red Spot, acquired by *Galileo*, with insets showing night-side lightning detections co-located with the storm. In this false-colour representation, bluish clouds are deep and white clouds are high and thick. The day-side storms are ~ 1000 km across and are located near 16°S (right) latitude.

ガリレオの撮像した雷発光 (Vasavada and Showman, 2006)

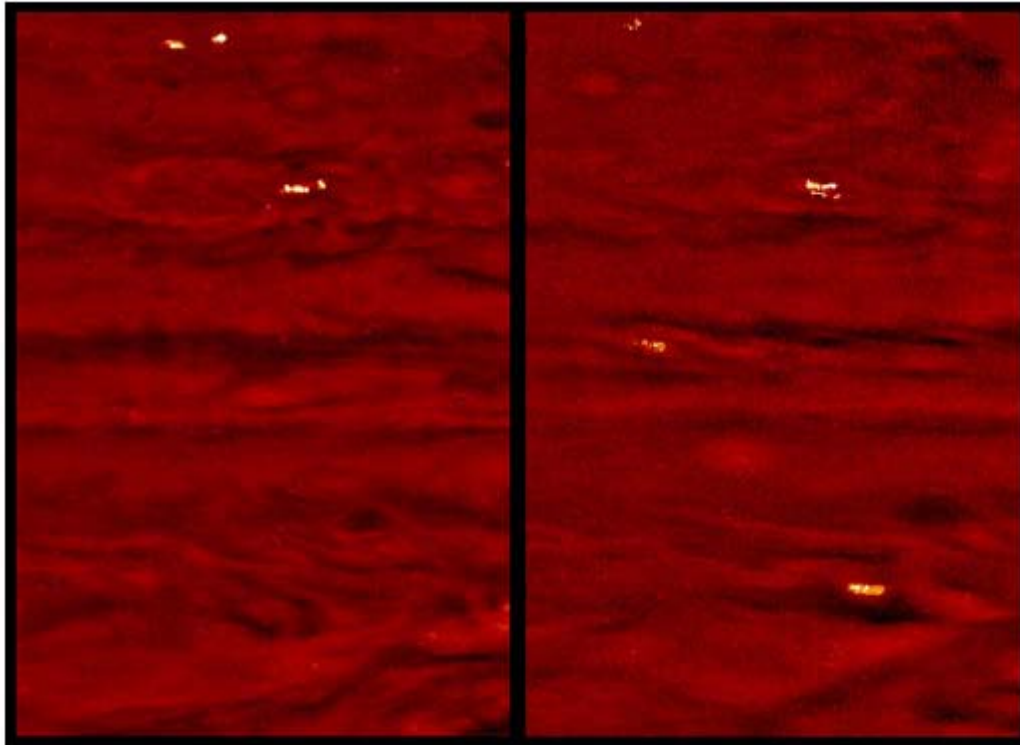
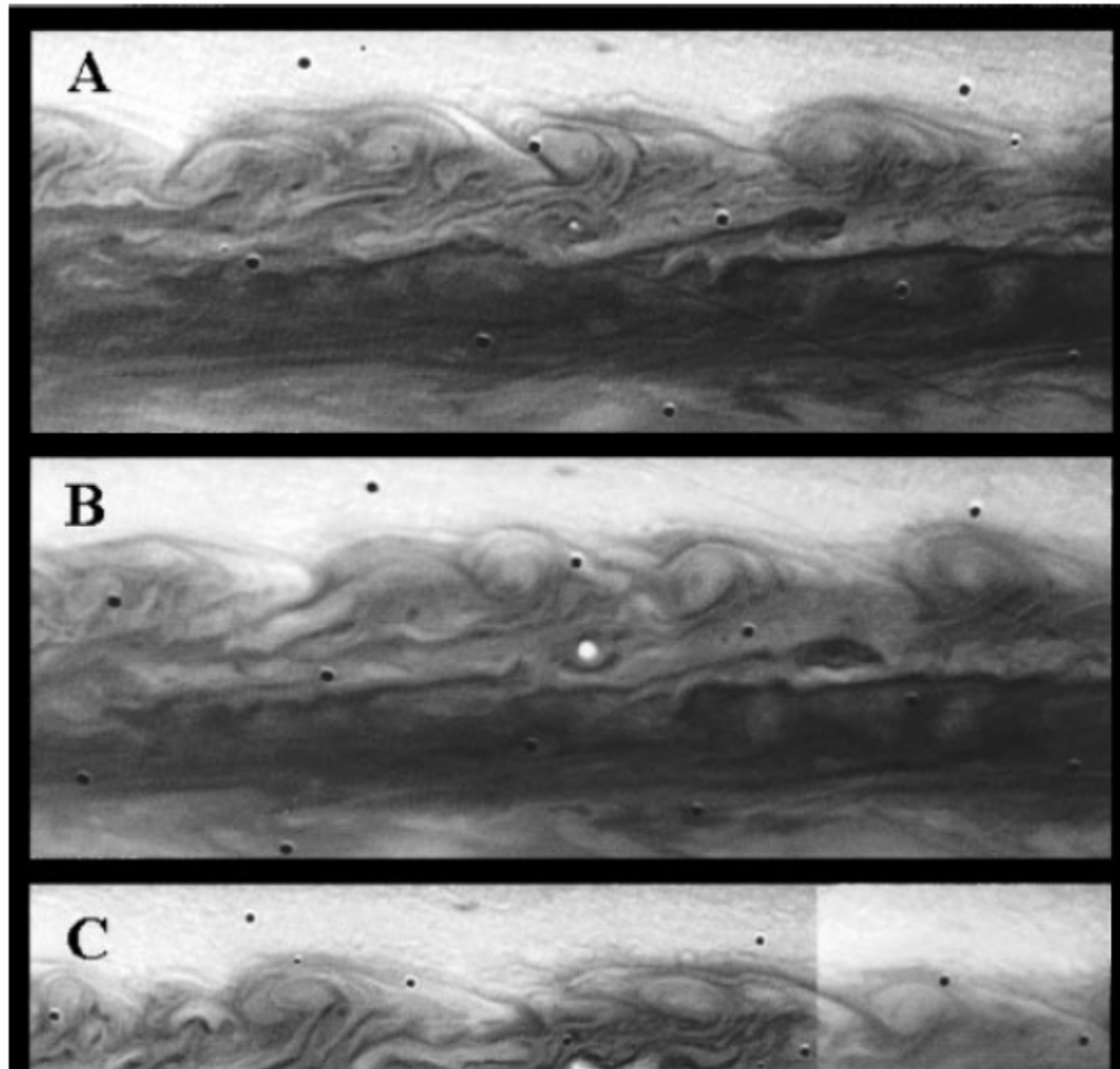


Figure 20. False-colour, night-side images of Jupiter's clouds showing clusters of lightning strikes, acquired by *Galileo*. The images were taken 75 min apart in a broad, visible-wavelength filter. The clouds are lit by moonlight from Jupiter's moon, Io, and have been coloured red. The ~ 1 min exposures capture many lightning strikes within each storm cluster. Latitude ranges from the equator to 50°N .

ボイジャーが撮像した対流雲の発達 (Hueso and Sanchez-Lavega, 2001)



HST が撮像した白斑の合体 (Vasavada and Showman, 2006)

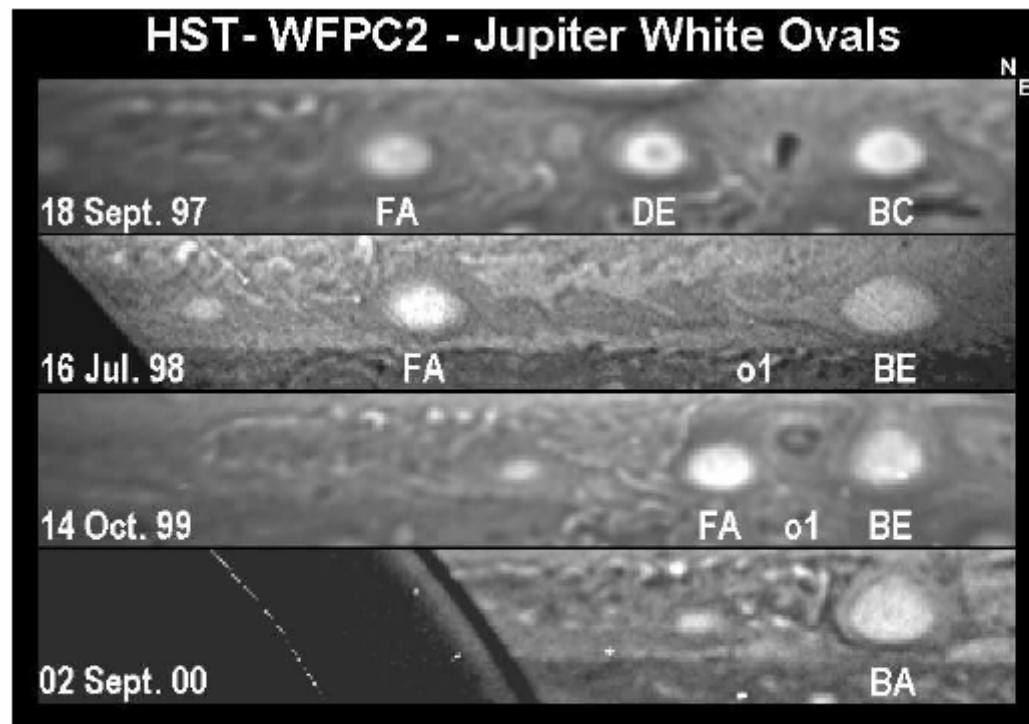
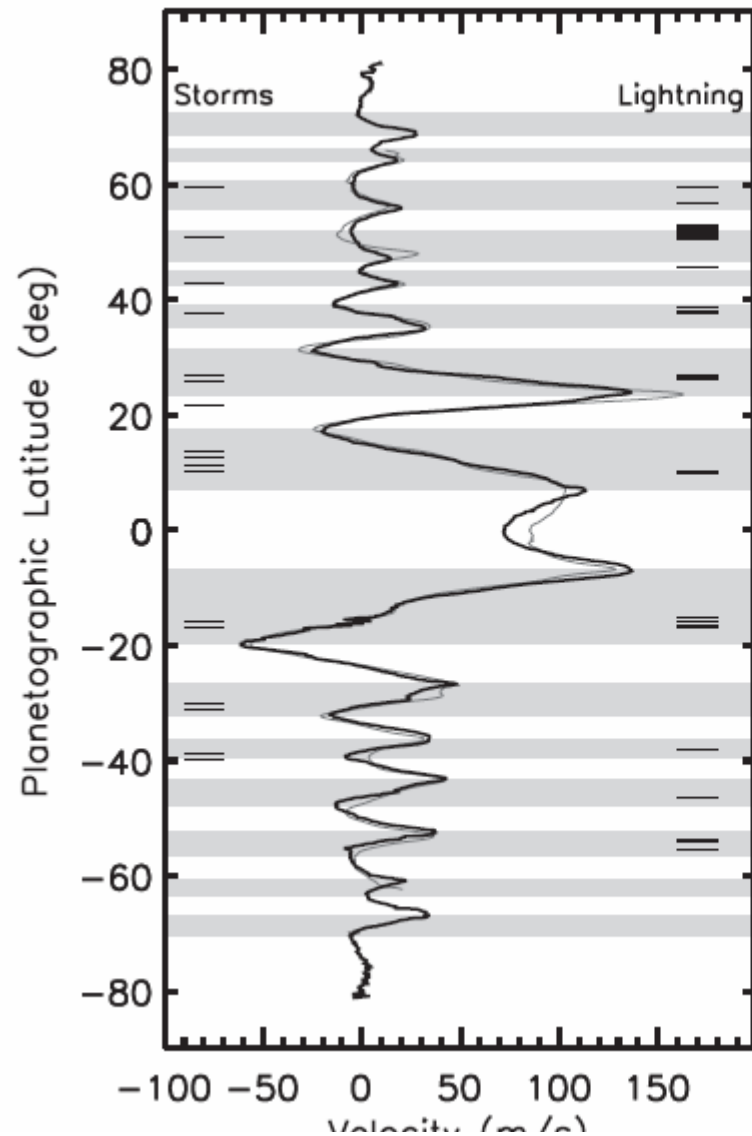


Figure 19. Four images acquired by the *HST*'s Wide-Field/Planetary Camera (WFPC2) showing the evolution of Jupiter's White Ovals over a three-year period. White Ovals DE and BC merged to form BE. Subsequently, FA and BE merged to form BA. Feature o1 is a cyclonic vortex that interacted with the White Ovals during these years. NASA image PIA02823.

東西風速の大きさの変化(1979 vs 2003)と雷発光が観測されている緯度帯
(Vasavada and Showman, 2006)



木星の模様の変化(1979 vs 2000) (Vasavada and Showman, 2006)

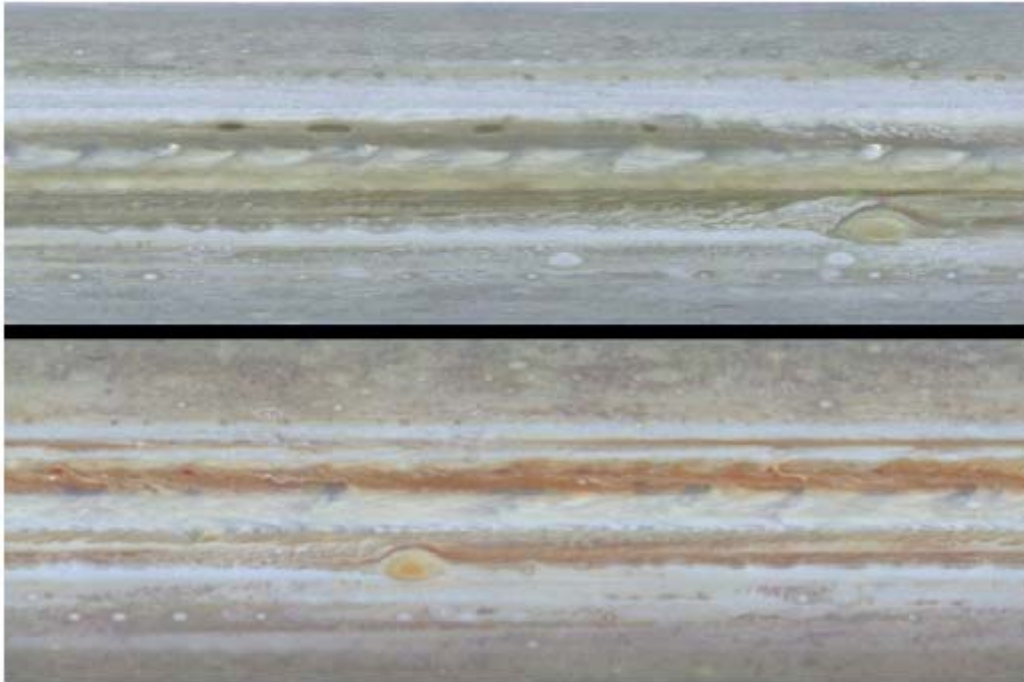
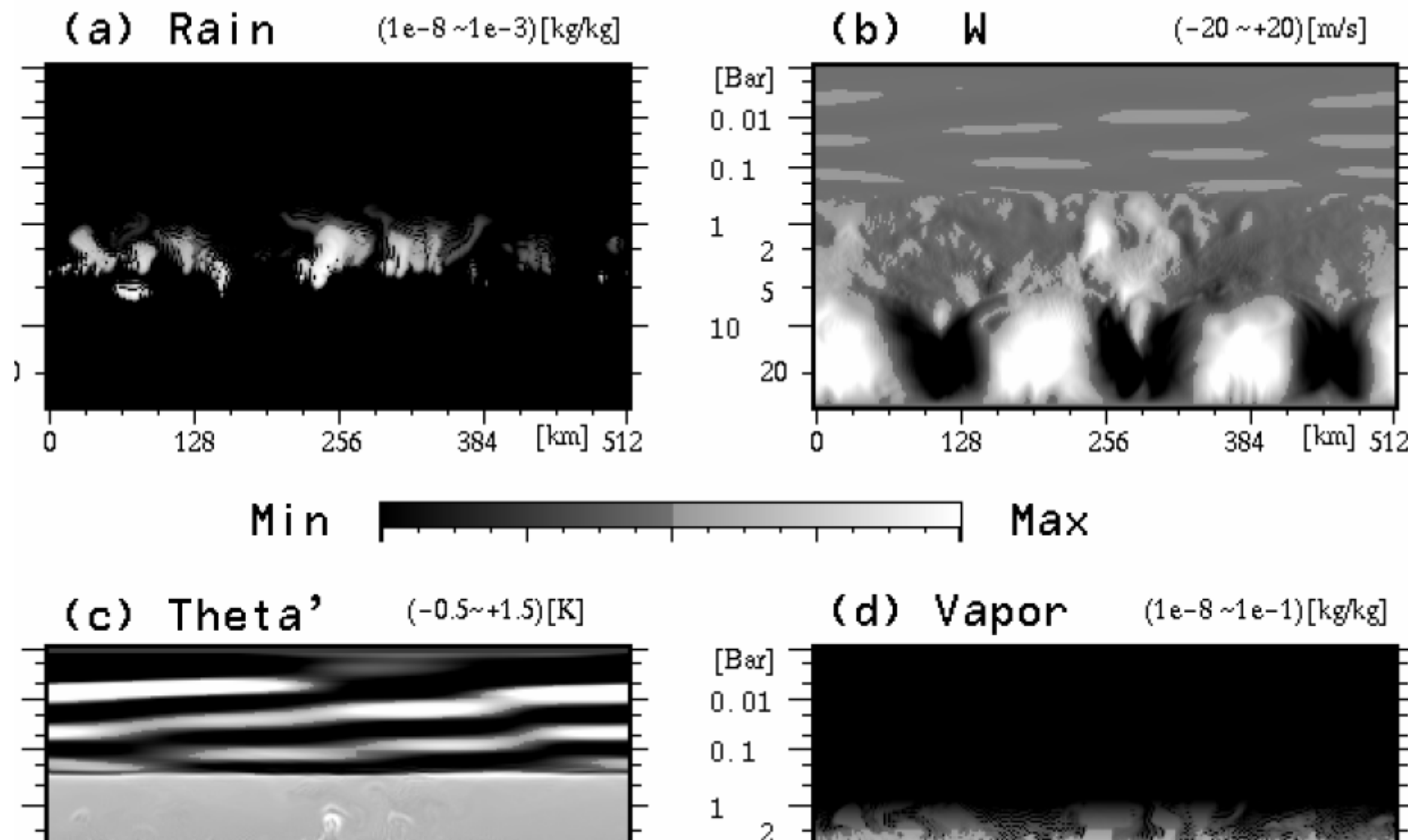
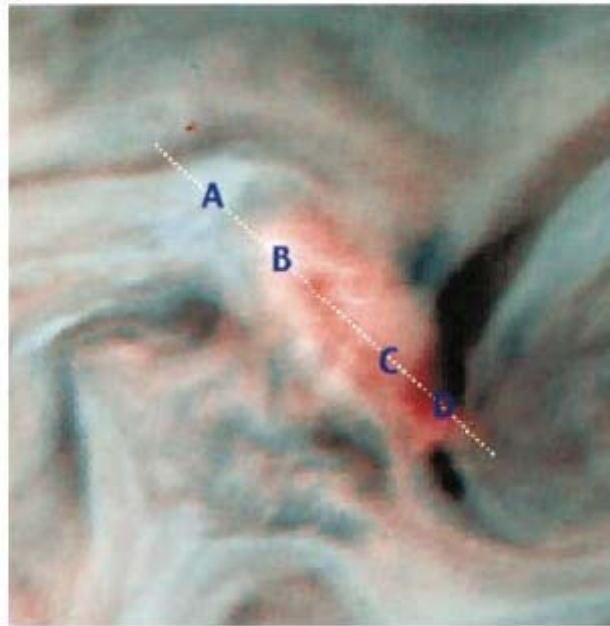


Figure 2. Comparison of Jupiter's appearance between 1979 and 2000. The top and bottom halves contain colour mosaics acquired by *Voyager 1* and *Cassini*, respectively. Both mosaics are cylindrical maps showing all longitudes and $\pm 60^\circ$ latitude. Many real changes are apparent, though the overall shift in colour and contrast is attributable to the different imaging systems and processing methods used. Equatorial plumes and dark vortices in the band north of the equator are more prominent in the *Voyager* map. The *Cassini* map has a brighter equatorial band and reveals small storms within the band north of the equator and west of the Great Red Spot. NASA images PIA00011 and PIA02864.

Nakajima et al. (2000) の大気構造 H₂O 凝結高度で対流が2層に分離する



a



b

