

地球以外の惑星・衛星に見られる雲 — 地球の雲との共通点と相違点 —

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
Planet-C プロジェクト 研究員

杉山 耕一郎

2015/07/18

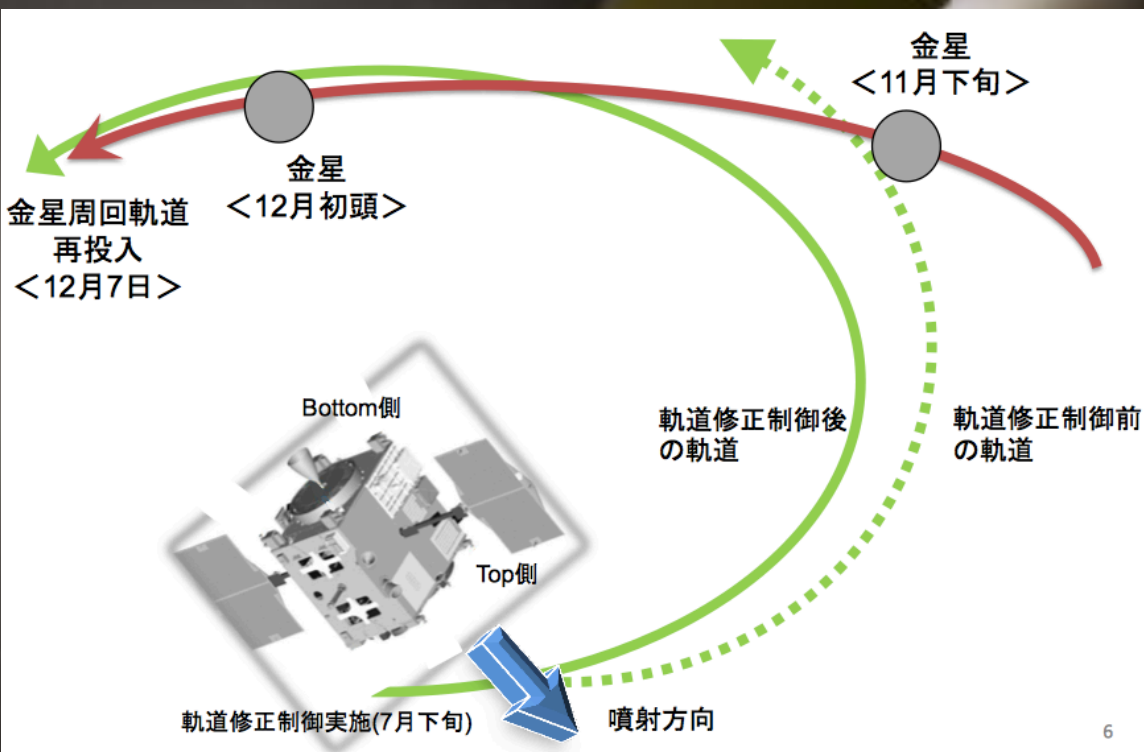
名古屋大学地球水循環研究センター公開講演会

自己紹介

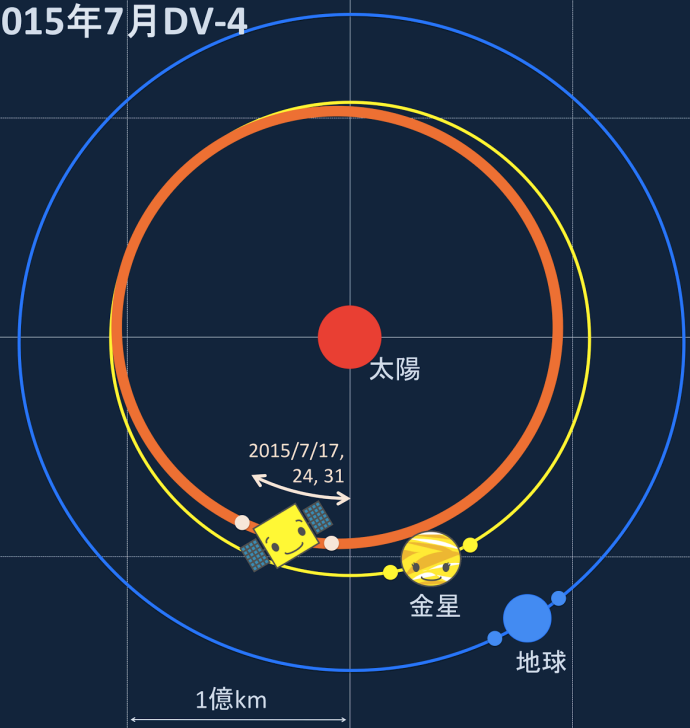
- ・ 名前: 杉山 耕一郎 (すぎやま こういちろう)
- ・ 学歴: 北海道大学大学院理学研究科 博士課程修了
- ・ 専門: 惑星大気物理 & 地球惑星情報学
 - 木星の雲対流
 - 火星, 金星の対流
 - 数値モデル開発
 - 知見アーカイブ mosir
<https://www.cps-jp.org/~mosir/pub>
- ・ 職歴: 九大 ⇒ 国立天文台 ⇒ 北大 ⇒ JAXA 宇宙研
 - 現在: 金星探査機「あかつき」プロジェクト

金星探査機 あかつき

2015年12月 金星到着予定



2015年7月DV-4

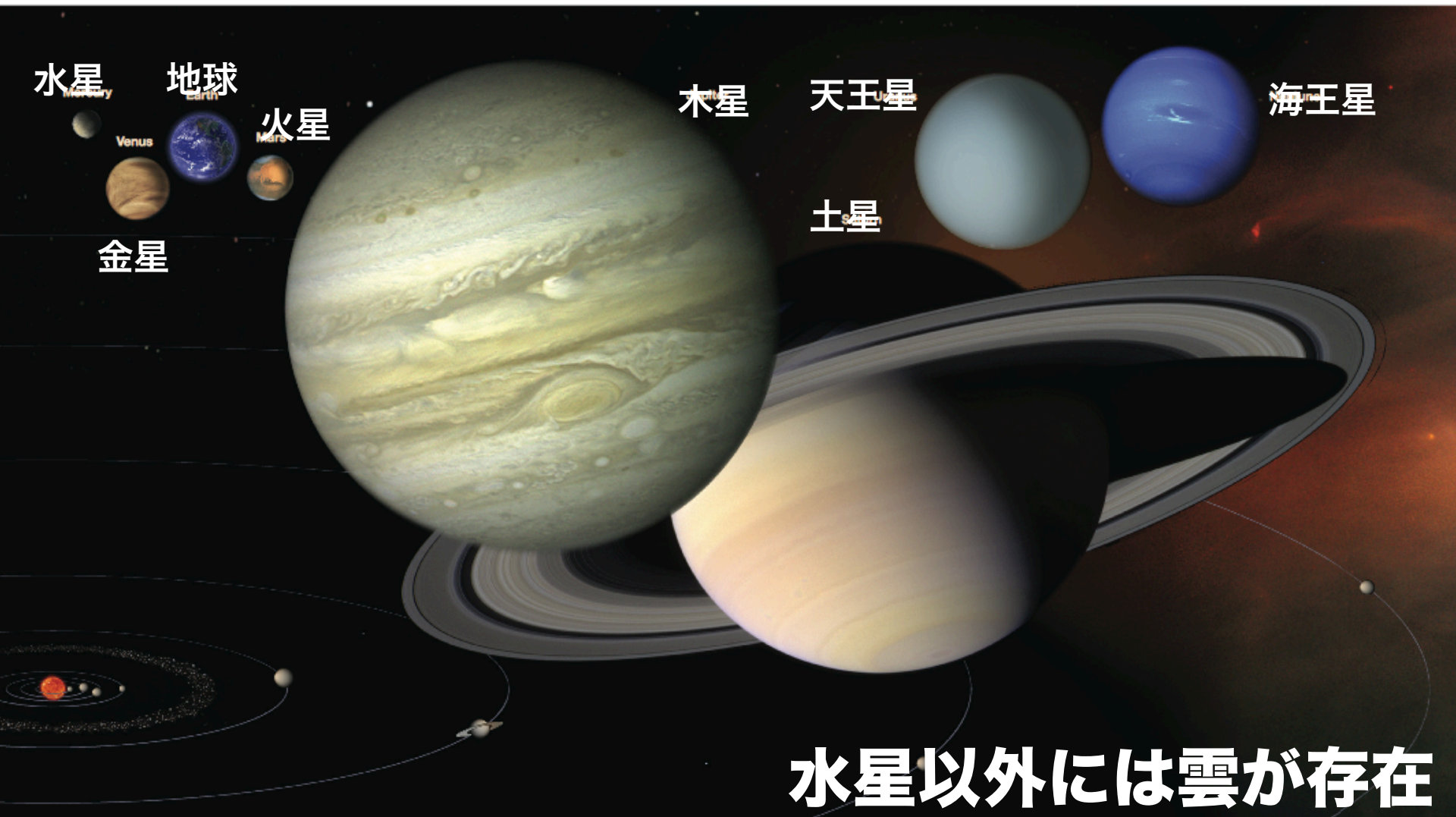


雲の動きから大気の運動を探るための気象衛星
金星に向けて軌道調整中 (7/17, 24, 31)

本日の内容

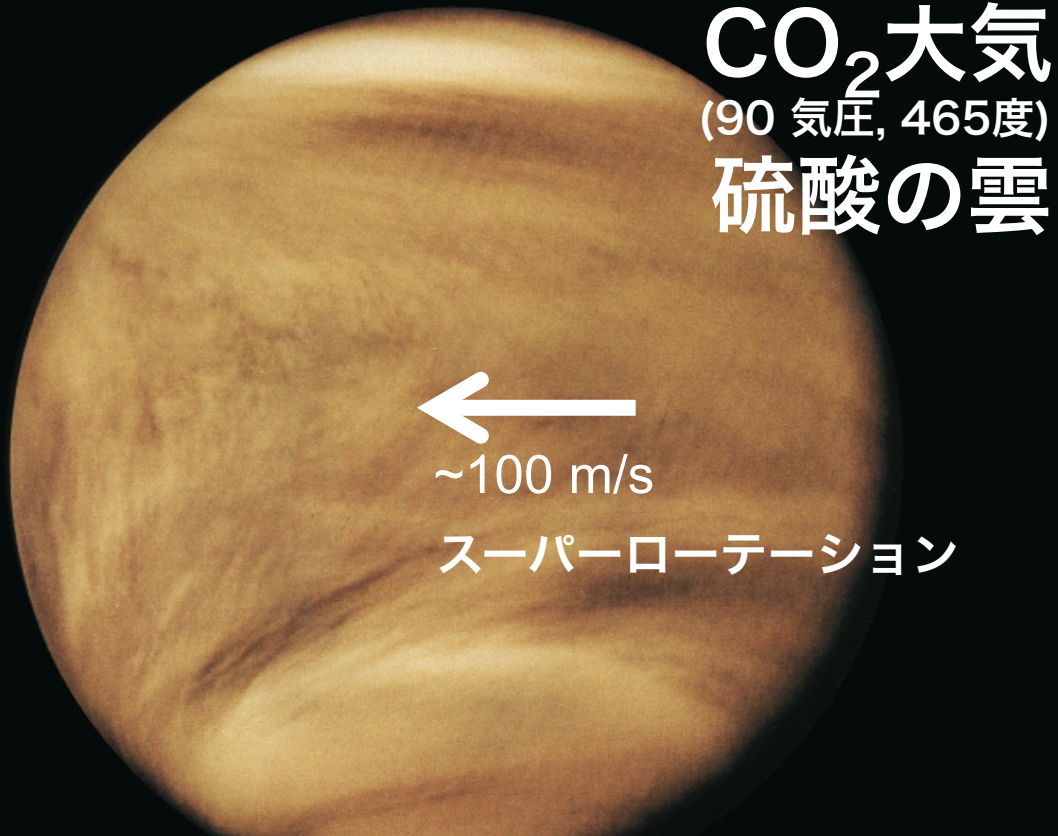
- ・ 雲の姿と、その組成
 - 金星, 火星, 木星, 土星, タイタン, 系外惑星
- ・ 地球の雲との比較
 - 金星, 木星, 過去の火星, をピックアップして.
 - 光化学反応による雲：金星
 - 対流運動に伴う雲：木星, 過去の火星
 - ・ 地球の雲対流の特徴は維持される？

太陽系の惑星

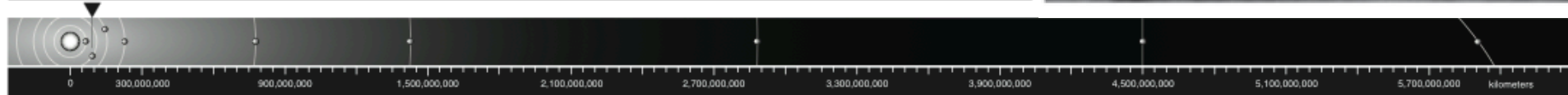
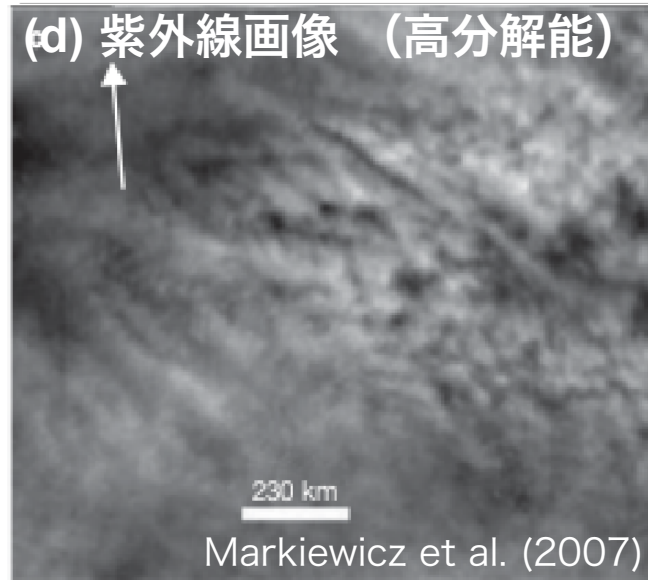
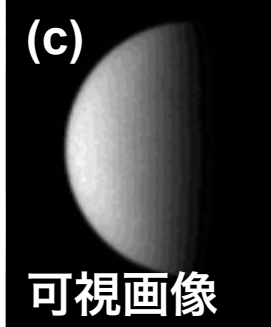
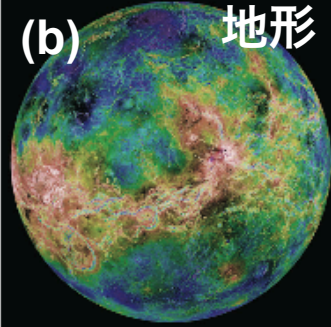


金星

(a)

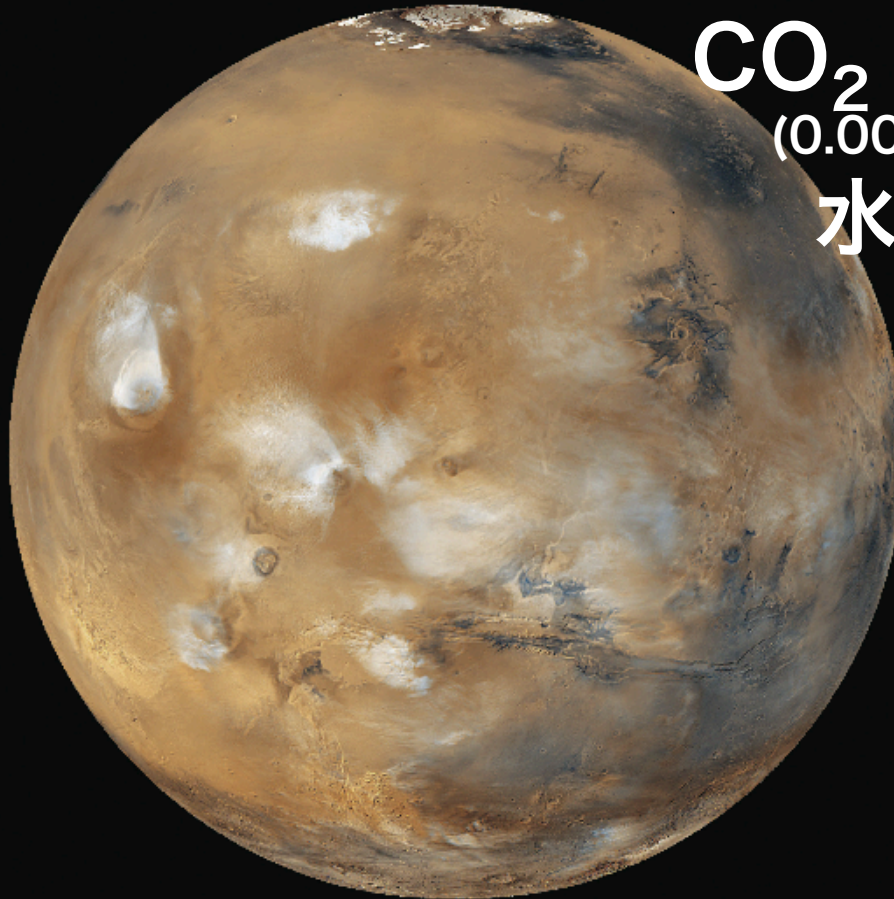


パイオニアビーナス (1979) の紫外線画像



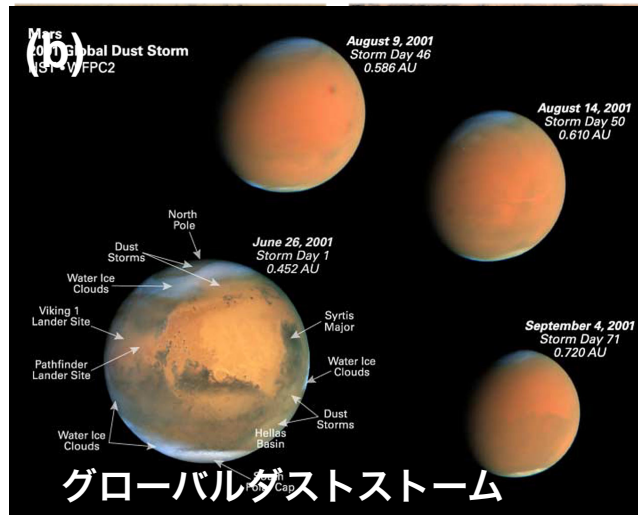
火星

(a)



CO₂ 大気
(0.006 気圧)
水の霧
極冠

(b)



(c)

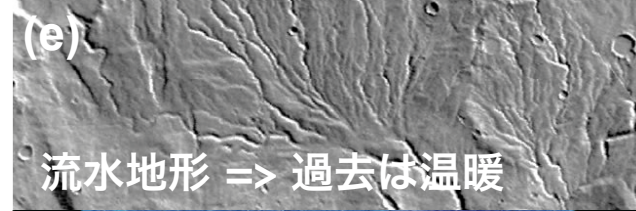


(d)



ダストデビル

(e)



流水地形 => 過去は温暖

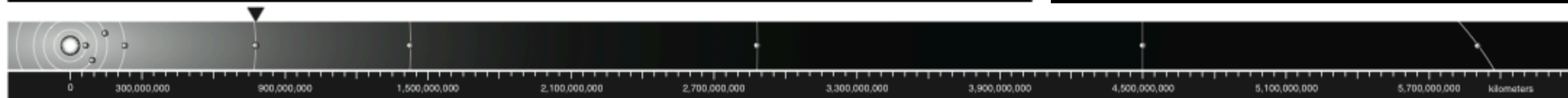
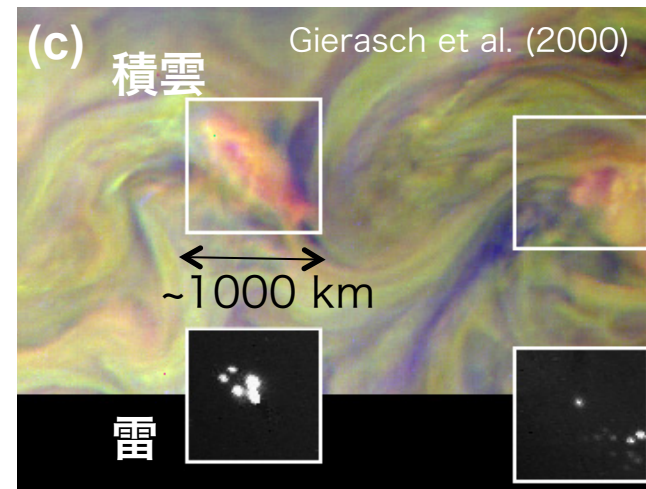
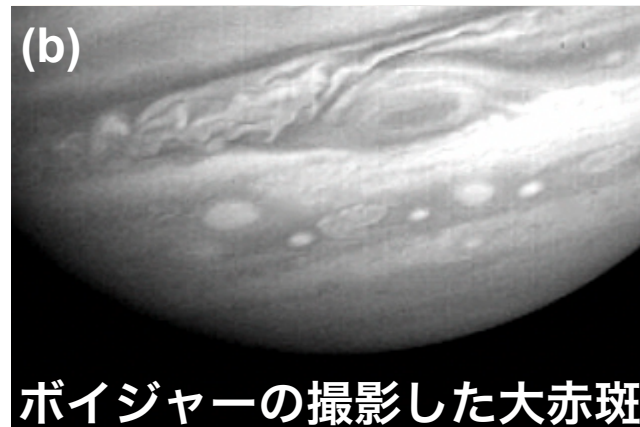
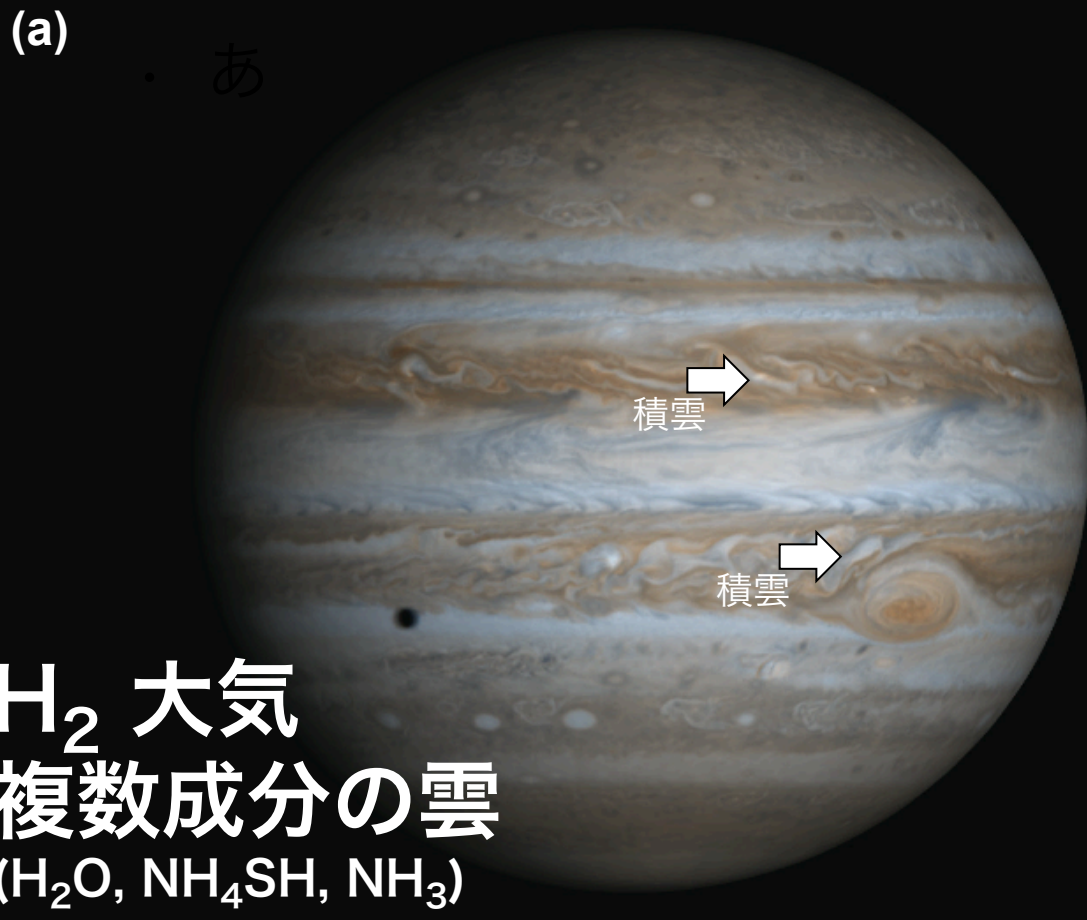


http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/downloads/000-SolarSystemLithosCombined_Rev1_FC.pdf

<http://www.spacetelescope.org/images/opo0131k/>

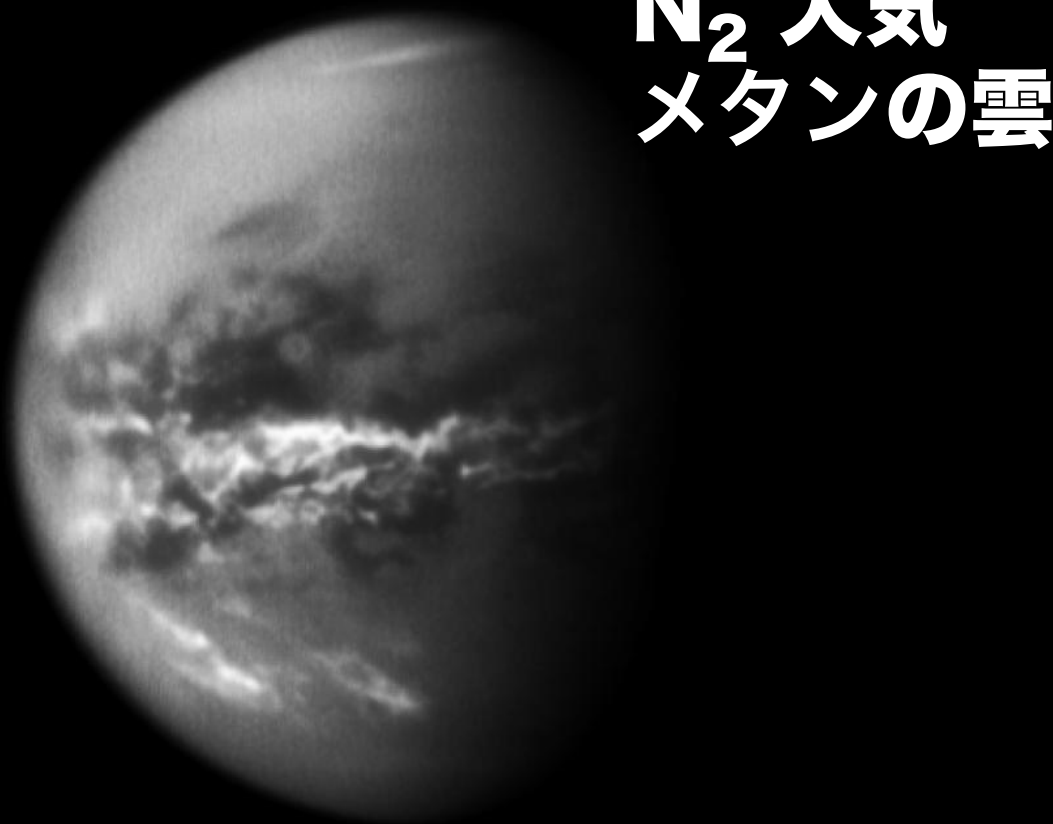
http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/redplanet2/slide_26.html

木星

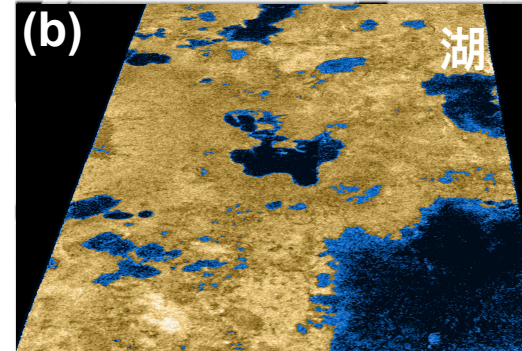


タイタン（土星の衛星）

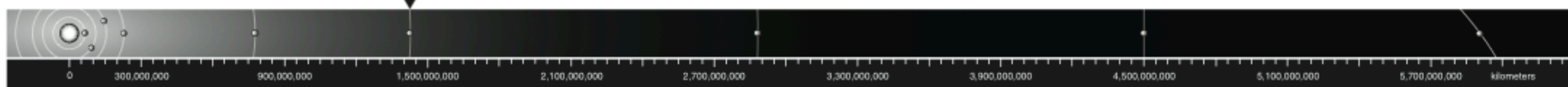
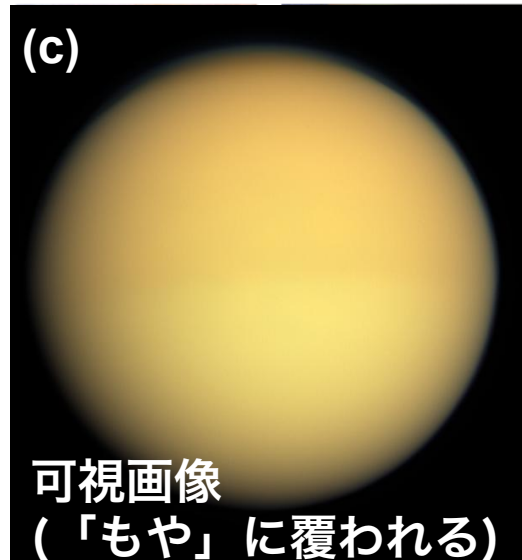
(a)



(b)

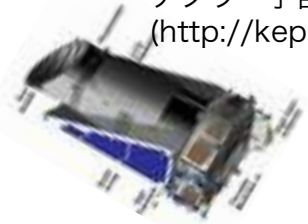


(c)



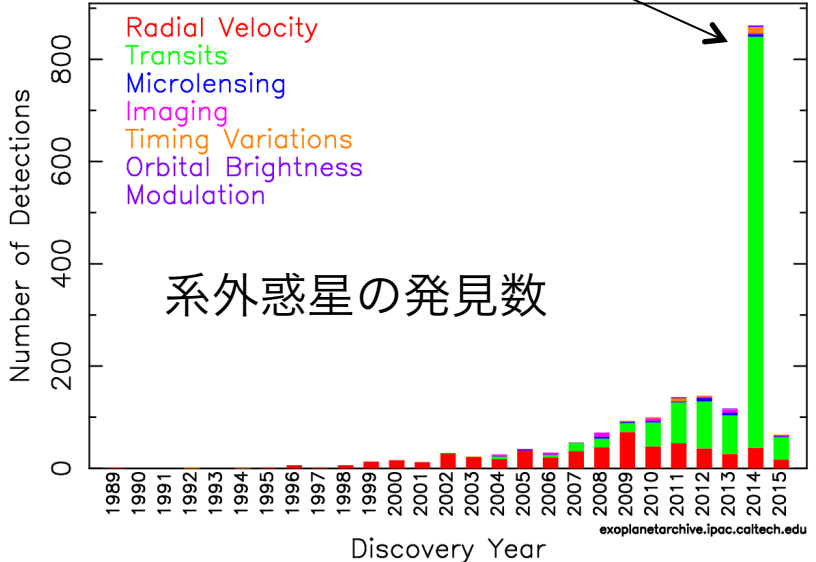
太陽系外惑星

ケプラー宇宙望遠鏡
(<http://kepler.nasa.gov>)



Detections Per Year

25 Jun 2015



<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>



- ホーム ホームへ戻る
- ニュース 各ニュースの一覧
- 一般の方向け 組織紹介、イベント等
- 研究者の方向け 共同利用や観測情報
- 当サイトについて 著作権と画像利用
- お問い合わせ コンタクト方法



- 観測所について
- 望遠鏡について
- 研究成果の紹介

「もや」のかかった温かい巨大ガス惑星

福井暁彦研究員（国立天文台）、大学院生の川島由依さん（東京大学）、生駒大洋准教授（東京大学）らを中心とする研究チームは、太陽系外惑星（以下、系外惑星）のなかでも比較的溫度の低い巨大ガス惑星「WASP-80b」の大氣を観測したところ、大氣中に「もや」がかかっている可能性があることを発見しました（図1）。大氣の溫度は摂氏300～500度程度と推定され、地球に比べると高温ですが、摂氏1,000度を越えるような灼熱の惑星が多く発見されている系外惑星の中では「温かい」部類に入ります。およそ摂氏700度以下の大氣には理論的に「もや」がかりやすいと考えられていますが、そのような低溫度の大氣の観測はこれまでにほとんど行われていませんでした。今回の発見は、系外惑星の大氣中に「もや」がどのような条件で生成されるかを解明する上で重要な手がかりになると期待されます。

「もや」のかかった温かい巨大ガス惑星

“近所”で爆発した宇宙のモンスター

関連研究：青い光で見るスーパーアースの空

論文紹介：中質量巨星HD100655を周回する惑星の発見

迫り来る爆発、「色」で予測可能に

晴天のスーパーアース？

宇宙空間に漂うサッカーボール

巨星に2個の巨大惑星を発見

巨星を回る新たな惑星系の発見

岡山MITSuME望遠鏡がとらえたGRB

宇宙最遠の巨大爆発を捉える

巨星を回る惑星を7つ発見

巨星のまわりに褐色矮星を発見

おうし座に巨大惑星を発見

岡山MITSuME（三つ目）望遠鏡、120億光年彼方の巨大爆発をとらえる

巨星のまわりの惑星を発見

系外惑星に関する研究成果

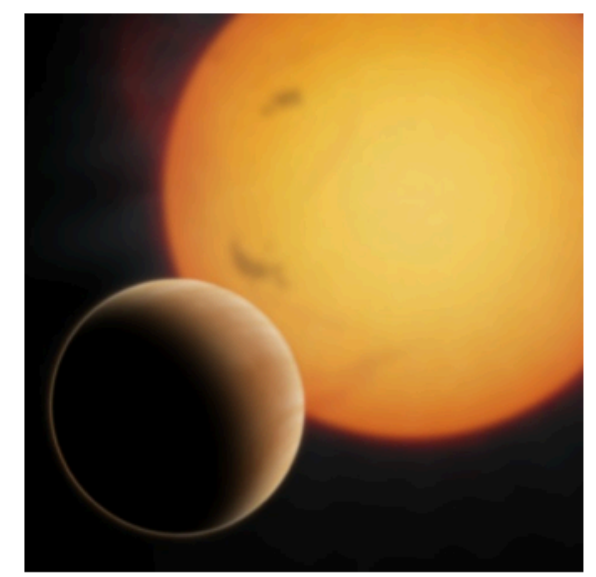


図1. 「もや」のかかった惑星WASP-80bの想像図。(クレジット：国立天文台)

本日の内容

- ・ 雲の姿と、その組成
 - 金星, 火星, 木星, 土星, タイタン, 系外惑星
- ・ 地球の雲との比較
 - 金星, 木星, 過去の火星, をピックアップして.
 - 光化学反応による雲：金星
 - 対流運動に伴う雲：木星, 過去の火星
 - ・ 地球の雲対流の特徴は維持される？

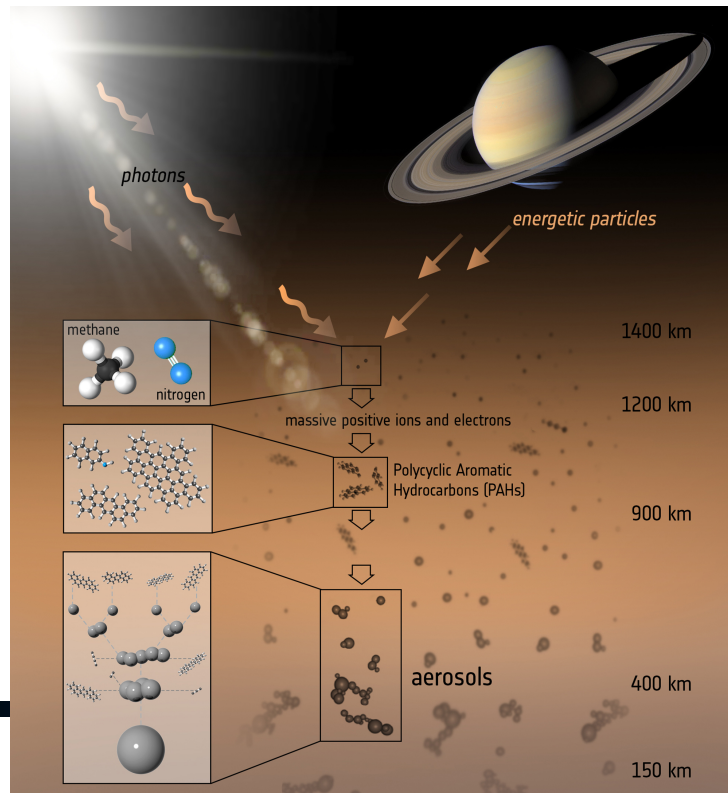
光化学反応 or 雲対流

- 光化学反応による雲

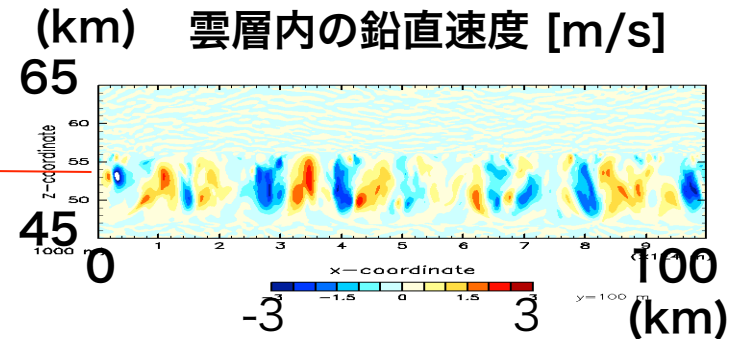
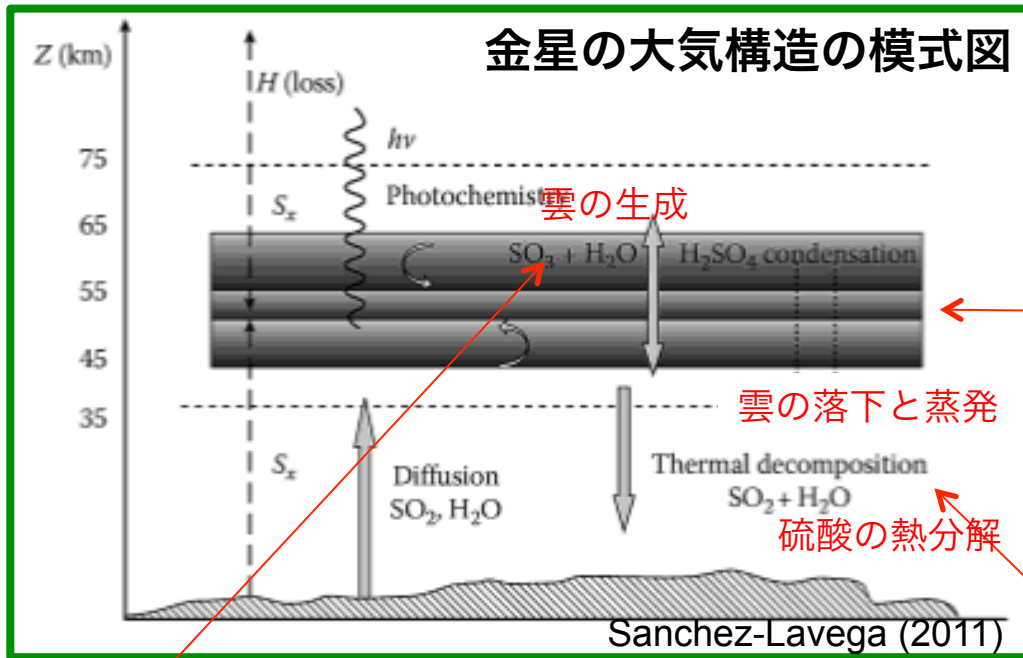
- 金星の雲・もや
- タイタンのもや
- 木星型惑星のもや

- 雲対流(凝結を伴う対流運動)

- 地球の雲
- (過去の)火星の雲
- 木星型惑星の雲
- タイタンの雲



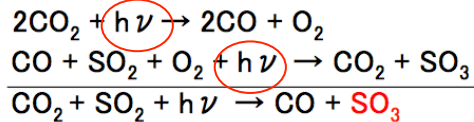
金星：光化学反応による雲



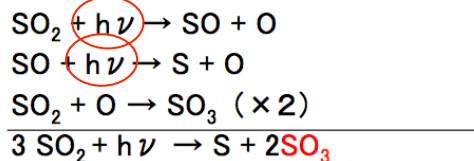
雲層下部の対流 and/or 大循環によって SO_2 , H_2O は雲層上層まで運ばれる？

高度60km以上の光化学:いくつかストーリーあり

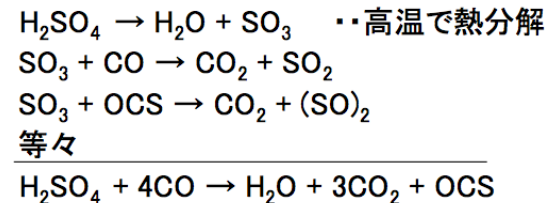
シナリオ1 (実際は ClO_x , HO_x , NO_x の触媒サイクル)



シナリオ2



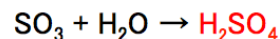
雲の下の熱化学 (実際は触媒反応)



今村剛 講義資料より

<http://ssl.tksc.jaxa.jp/pairg/member/ima/venus.pdf>

SO_3 は水と反応し硫酸へ



雲対流の比較

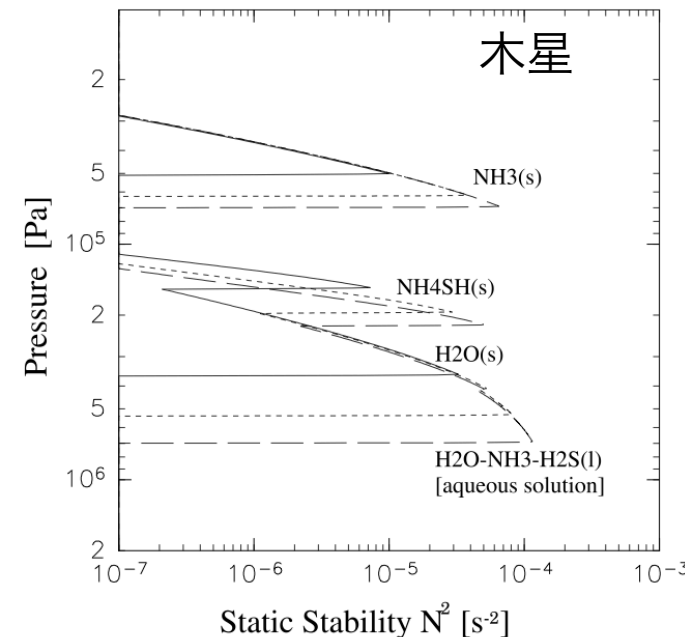
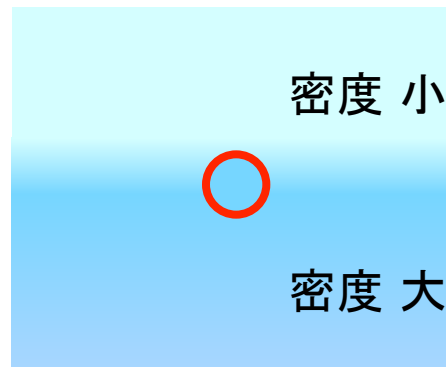
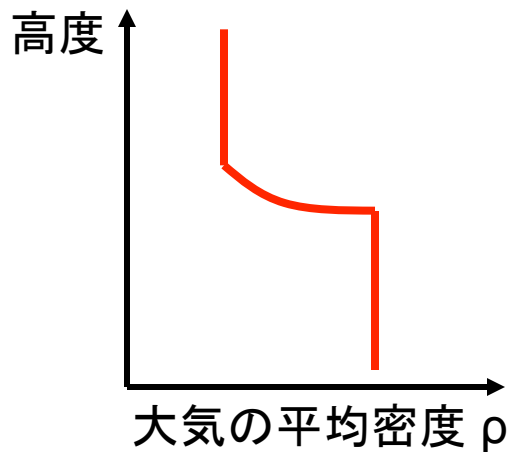
地球の雲対流の特徴は維持されるのか？

「狭くて強い上昇流と広くて弱い下降流」

- ・ 木星： H_2O , NH_4SH , NH_3
 - 主成分の分子量 (H_2 , He) < 凝結成分の分子量
 - 地面が無い
- ・ 過去の火星： CO_2
 - 地表で 2 bar の CO_2 大気
 - ・ 現在は 0.006 bar の CO_2 大気
 - 主成分の CO_2 が凝結
 - 大気圧が飽和蒸気圧(温度に依存)で決まる

木星の雲対流：凝結成分が重い影響は？

- 凝結高度をまたぐような混合が生じ難いはず
 - 凝結高度付近に**安定成層が形成**.
 - 凝結高度より上空の「乾燥」した大気は、その下の「湿った」大気より「重い」



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

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)
 - ・ H₂O, NH₃ の凝結
 - ・ NH₃ + H₂S → NH₄SH 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

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - c_{p_d} \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial x} + Turb.u, \quad (A.4)$$

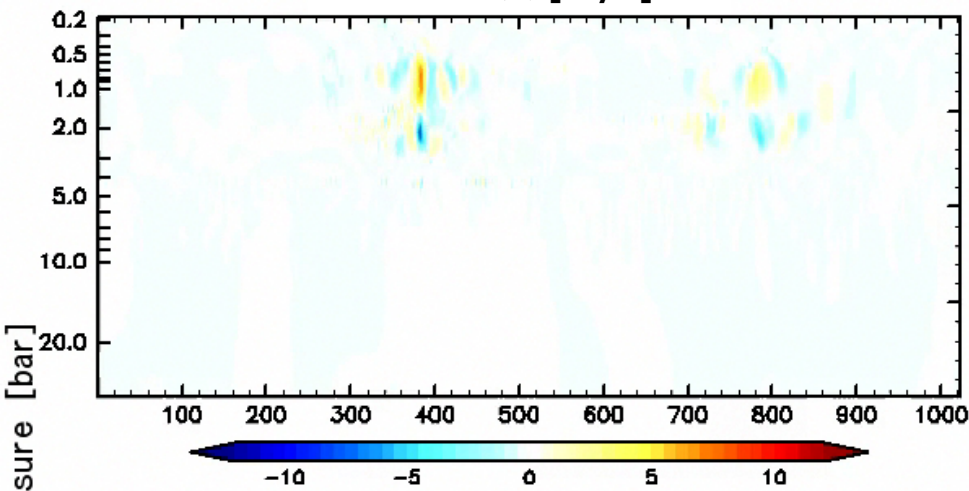
$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - c_{p_d} \bar{\theta}_v \frac{\partial \pi}{\partial z} + Turb.w$$
$$+ \left(\frac{\theta}{\bar{\theta}} + \frac{\sum q_v / M_v}{1/M_d + \sum \bar{q}_v / M_v} - \frac{\sum q_v + \sum' q_c + \sum' q_r}{1 + \sum \bar{q}_v} \right) g, \quad (A.5)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = - \frac{\bar{C}_v^2}{c_{p_d} \bar{\rho} \bar{\theta}_v^2} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{\theta}_v u_j), \quad (A.6)$$

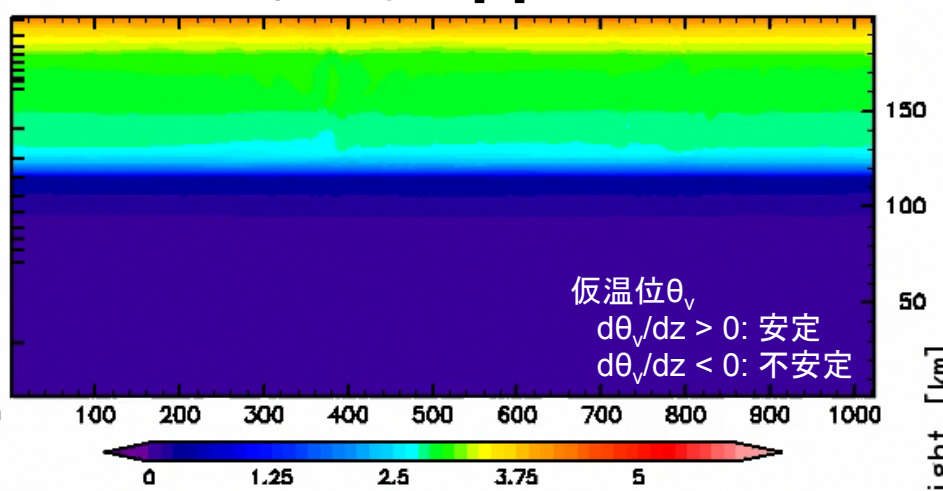
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \frac{1}{\bar{\pi}} (Q_{cond} + Q_{rad} + Q_{dis}) + Turb.\bar{\theta} + Turb.\theta,$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + Src.q + Turb.\bar{q} + Turb.q, \quad (A.8) \quad (A.7)$$

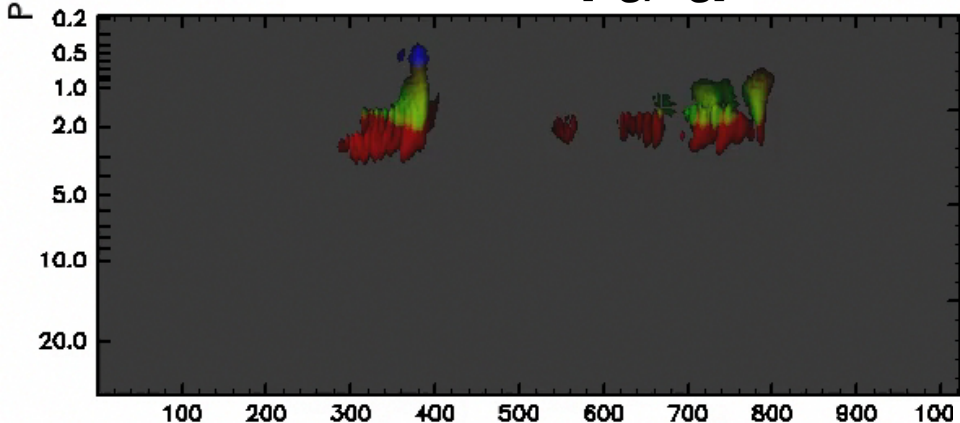
鉛直速度 [m/s]



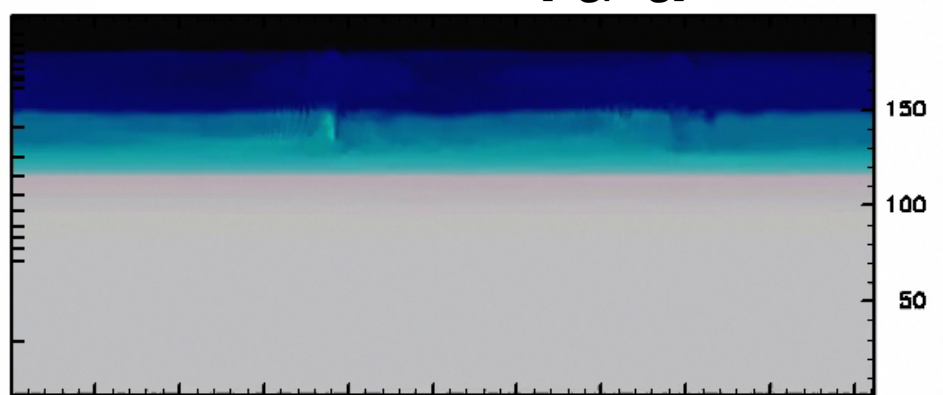
仮温位偏差 [K]



凝結物の混合比 [kg/kg]

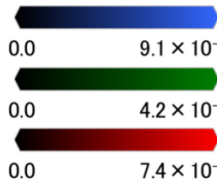
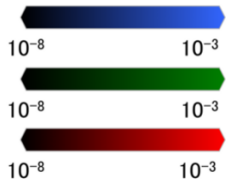
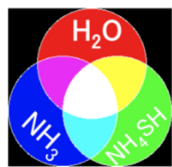


凝結性成分気体の混合比 [kg/kg]



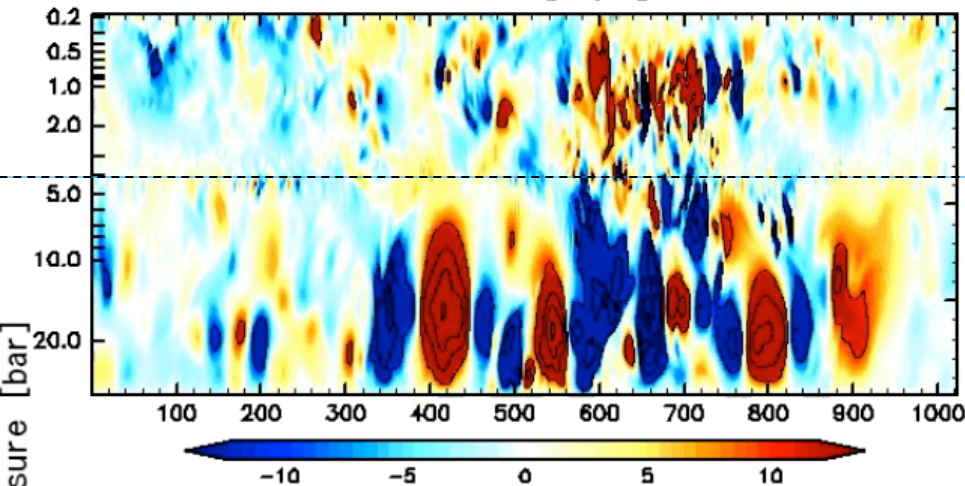
Leng

対流が活発な時期のアニメーション

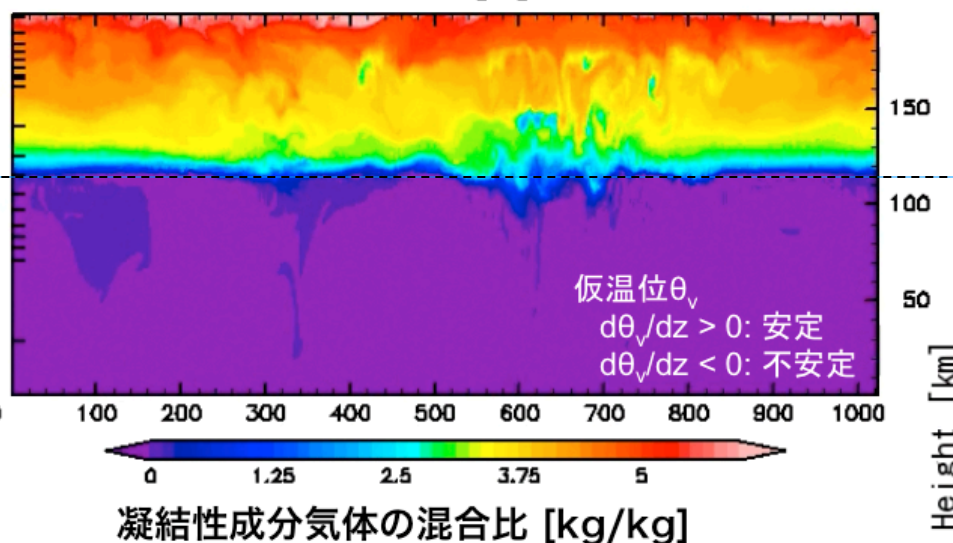


- 対流圏界面まで達する強い積雲
 - 積雲の存在は観測と整合的
- H₂O 凝結高度で流れ場が分割

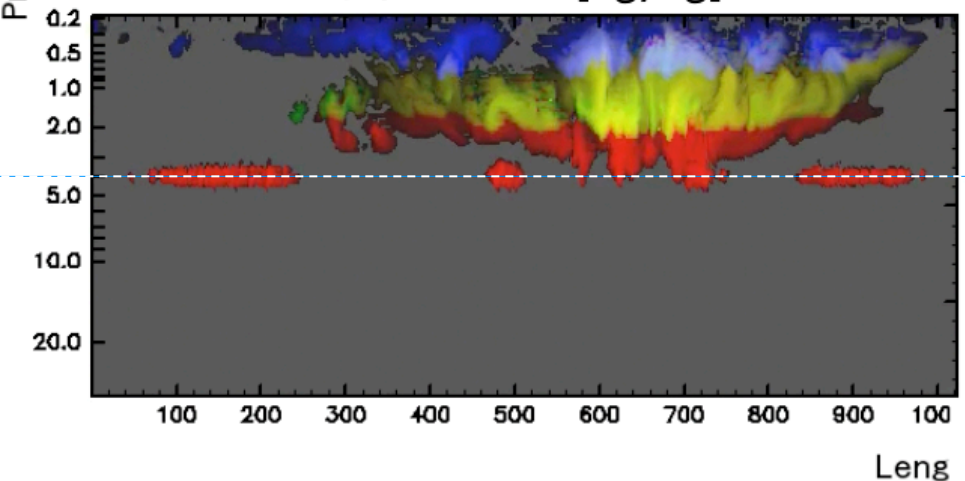
鉛直速度 [m/s]



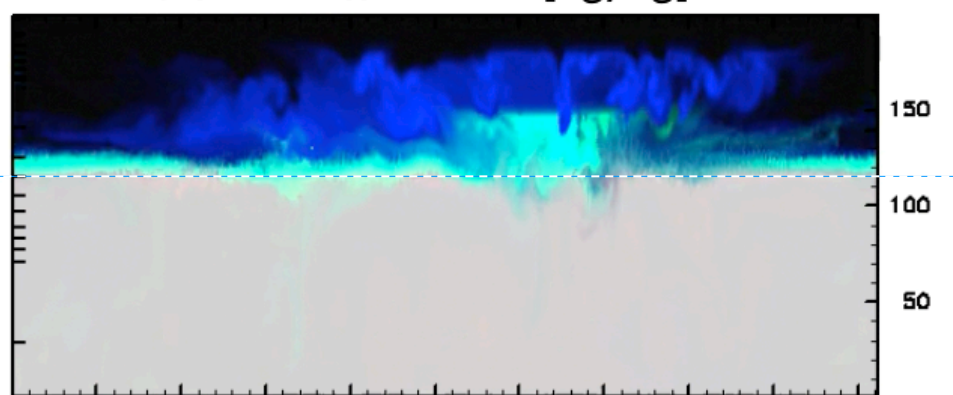
仮温位偏差 [K]



凝結物の混合比 [kg/kg]

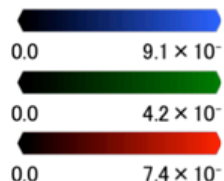
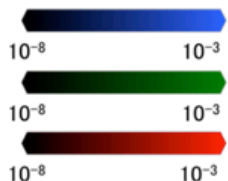


凝結性成分気体の混合比 [kg/kg]



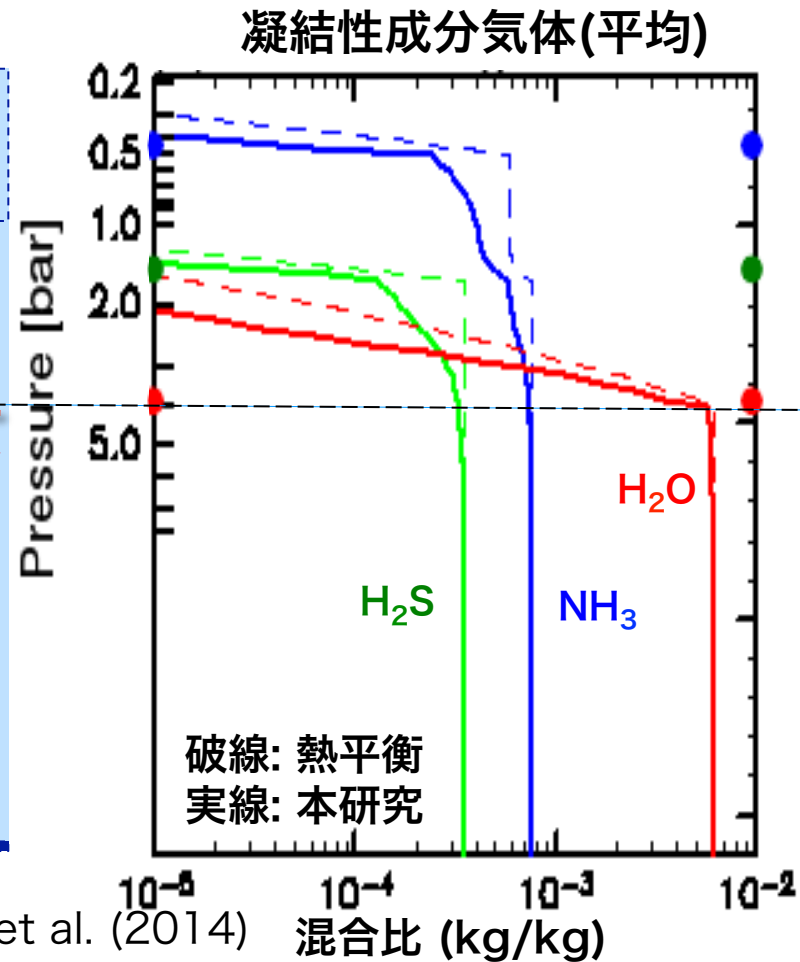
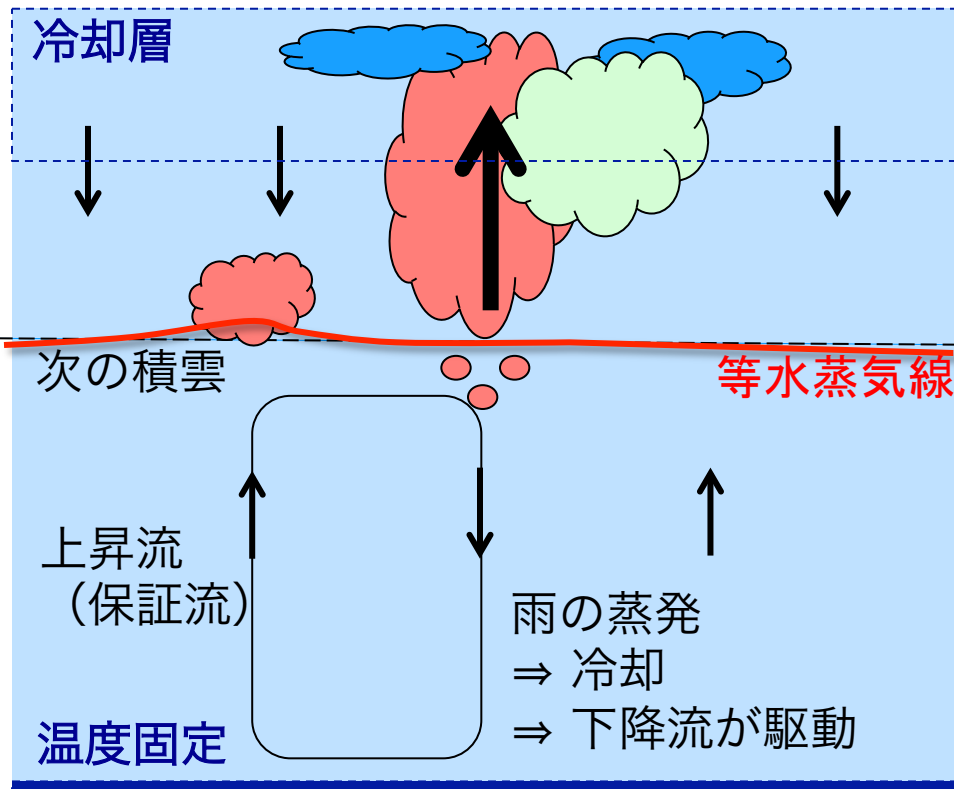
対流が活発な時期のアニメーション

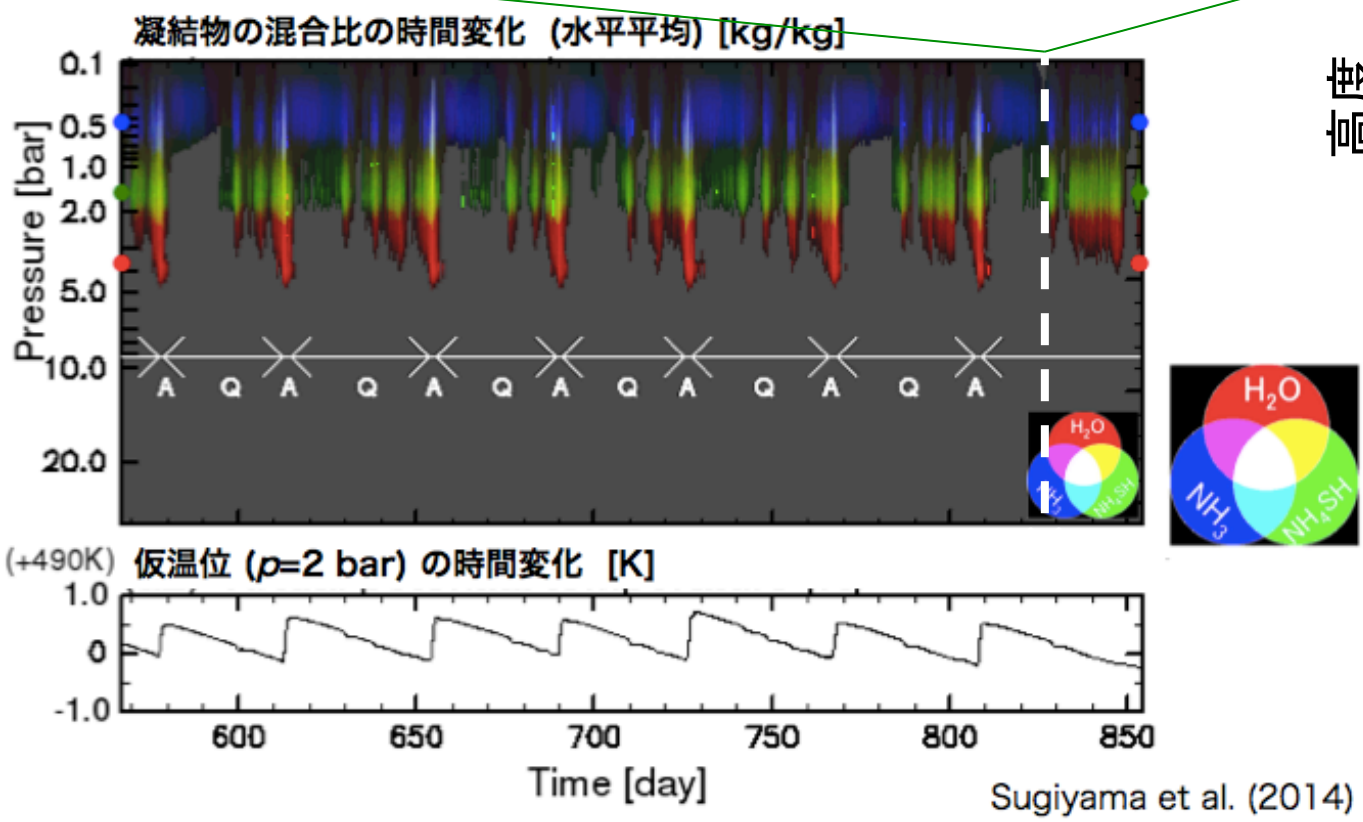
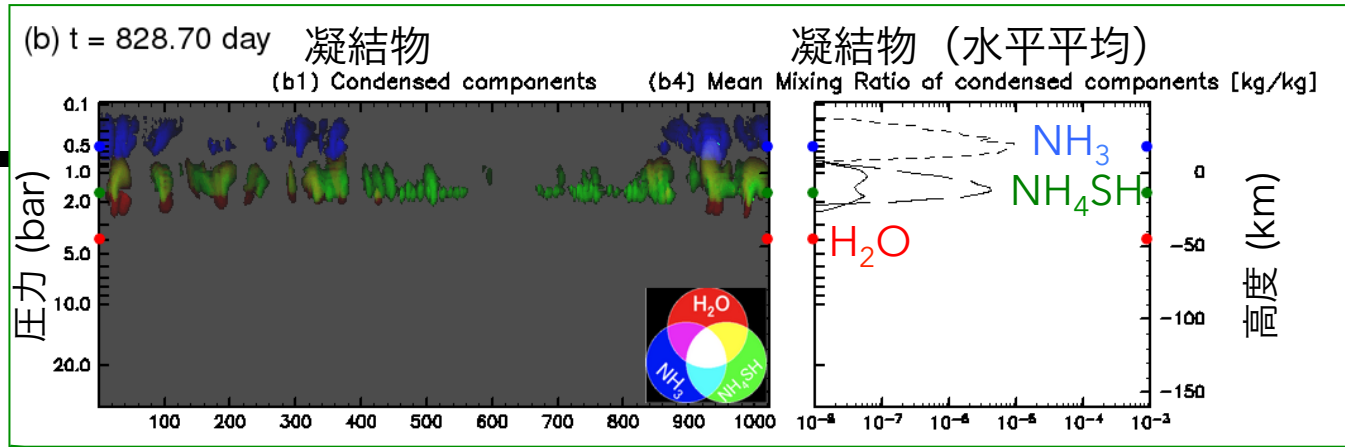
- 対流圏界面まで達する強い積雲
 - 積雲の存在は観測と整合的
- H₂O 凝結高度で流れ場が分割



木星の雲対流

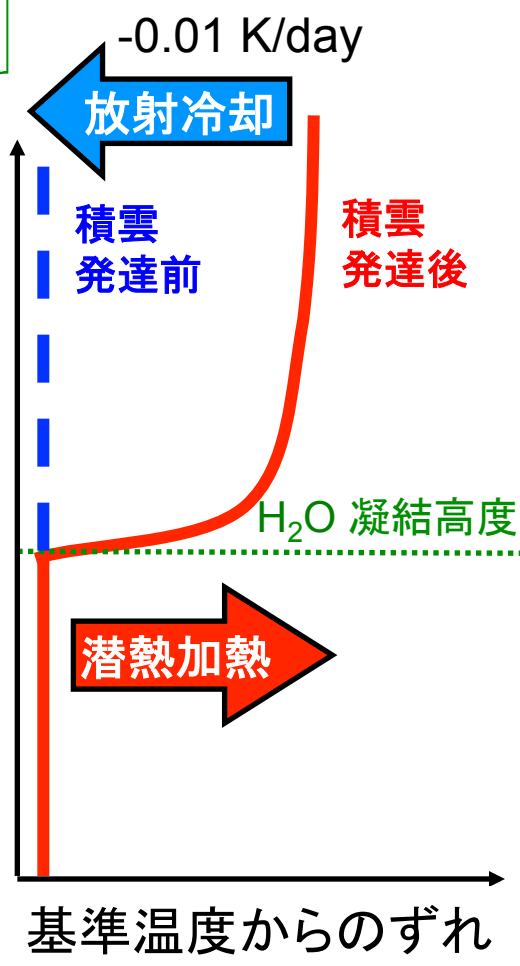
水の雲が次々に発達





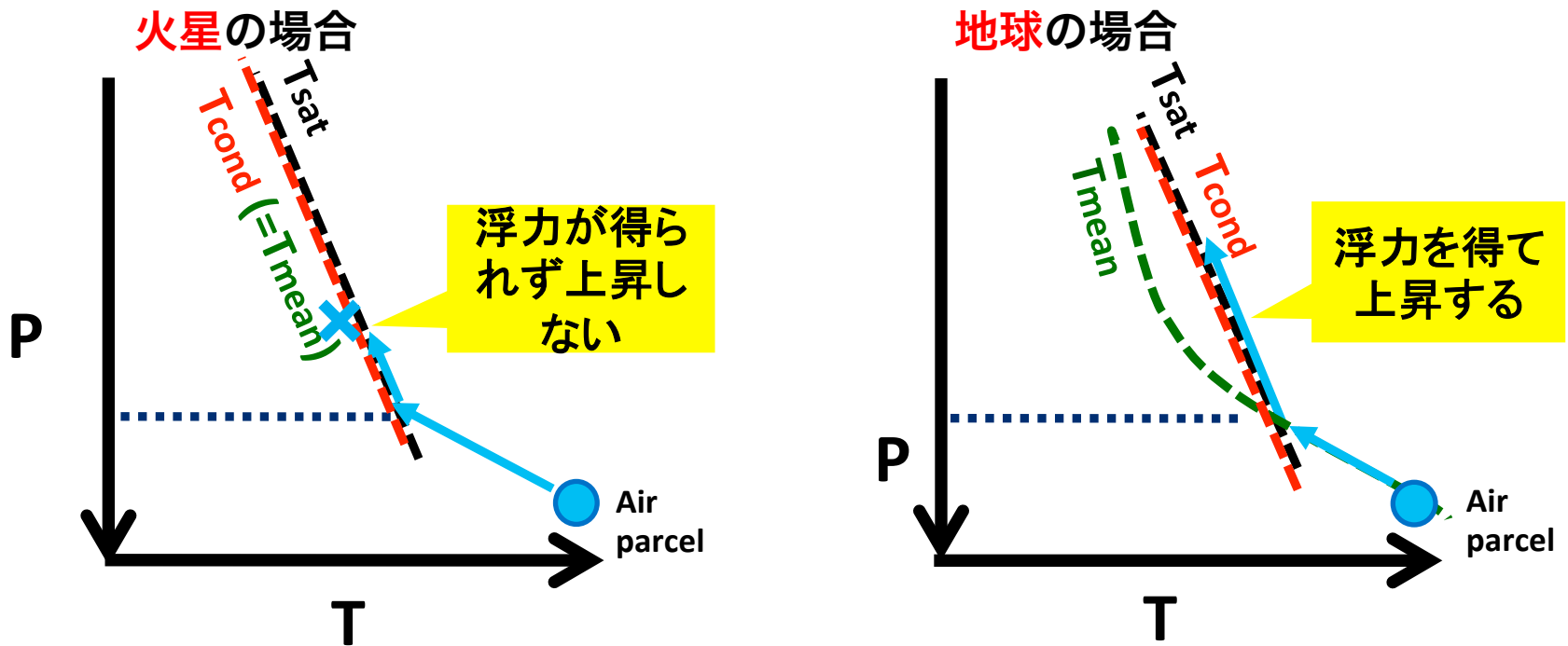
Sugiyama et al. (2014)

時に



過去の火星：主成分の凝結の影響は？

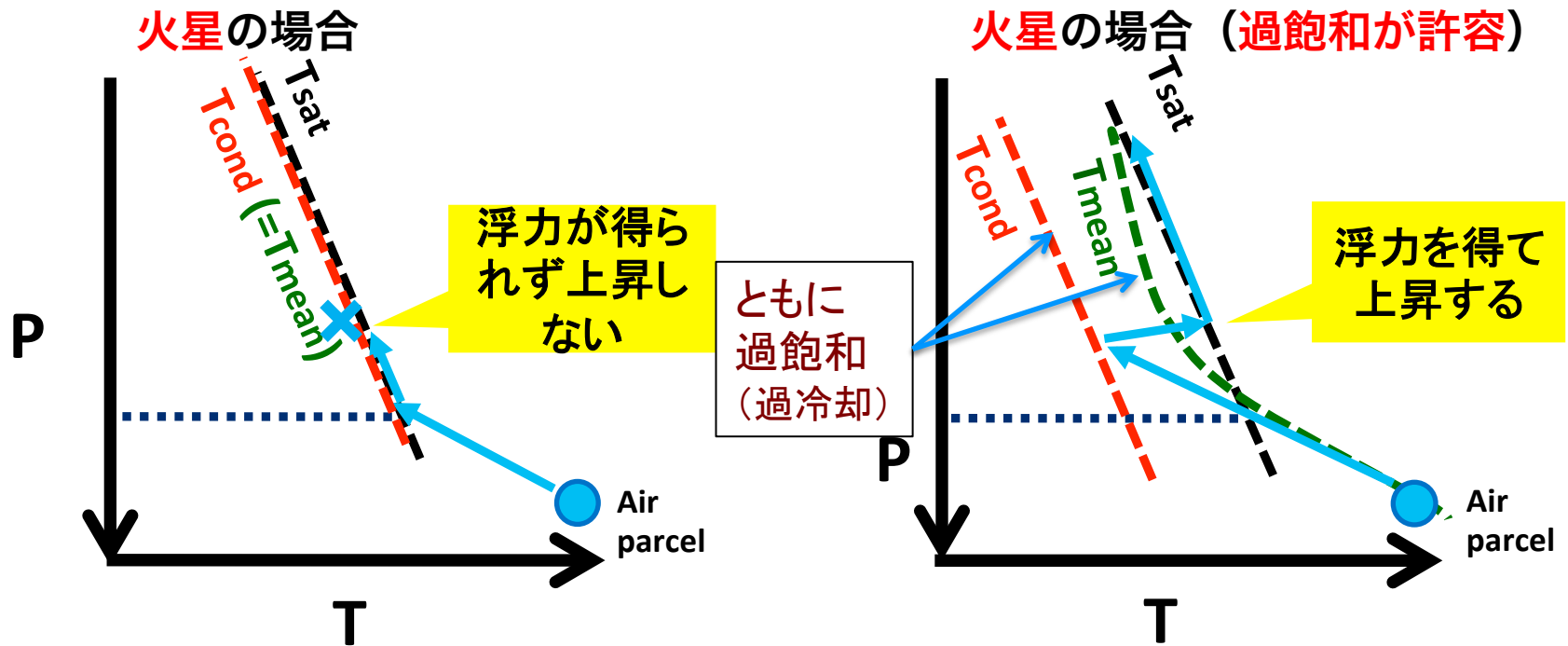
- 過飽和が許容されないと雲対流は発生しないのか？
 - 過飽和が許容されない場合, 大気の圧力は飽和蒸気圧に固定される (温度のみに依存) = 浮力を得られない
 - 浮力：気塊と周囲の大気の温度差に比例



T_{sat} : 凝結した気塊の温度, T_{cond} : 凝結温度, T_{mean} : 周囲の大気の温度

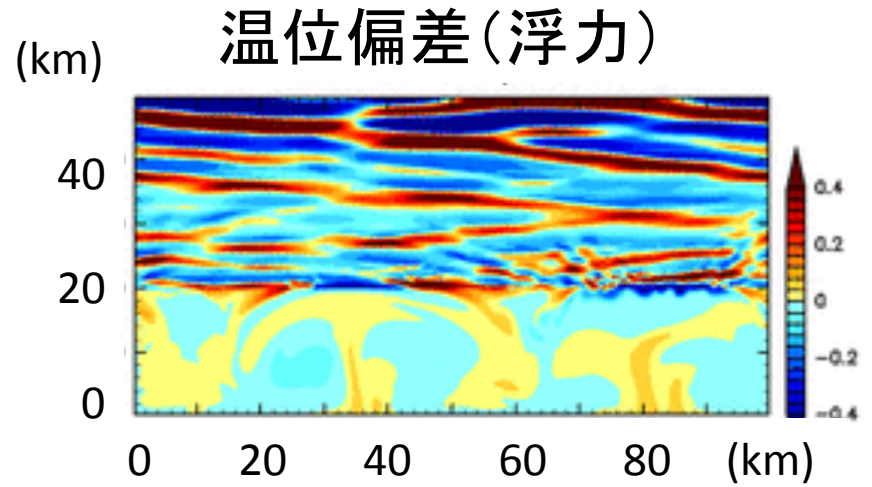
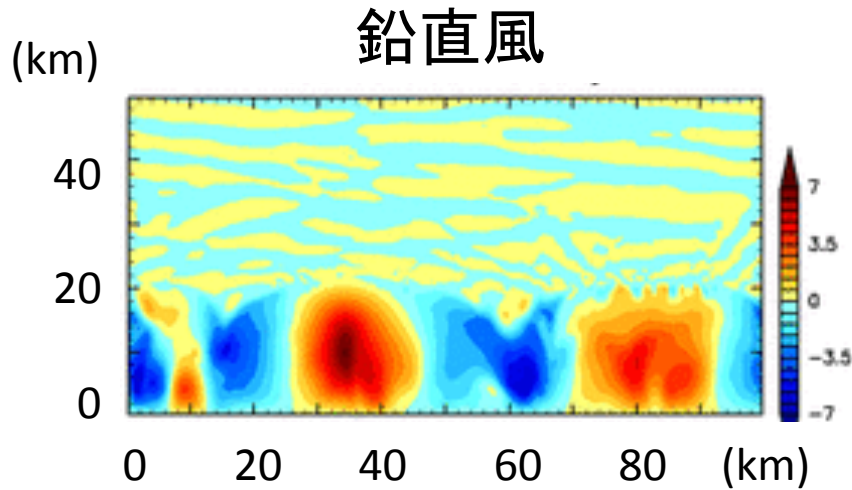
過去の火星：主成分の凝結の影響は？

- 過飽和が許容されないと雲対流は発生しないのか？
 - 過飽和が許容されない場合, 大気の圧力は飽和蒸気圧に固定される (温度のみに依存) = 浮力を得られない
 - 浮力：気塊と周囲の大気の温度差に比例

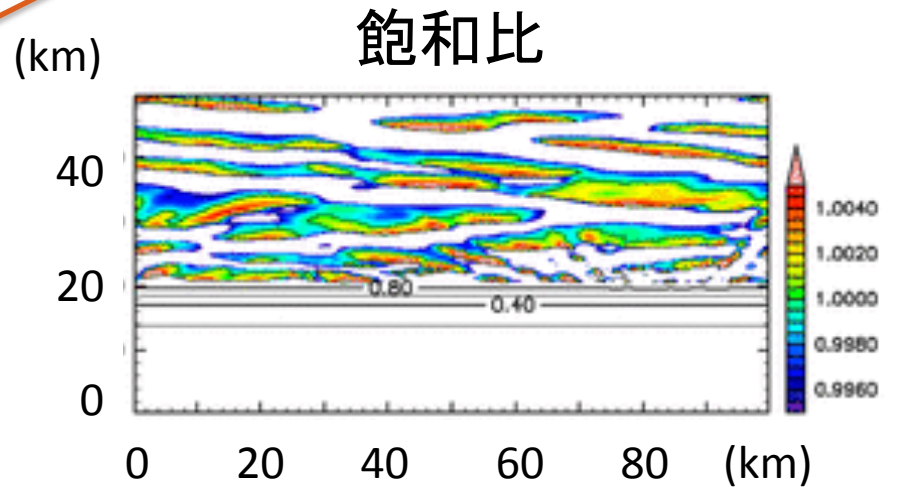
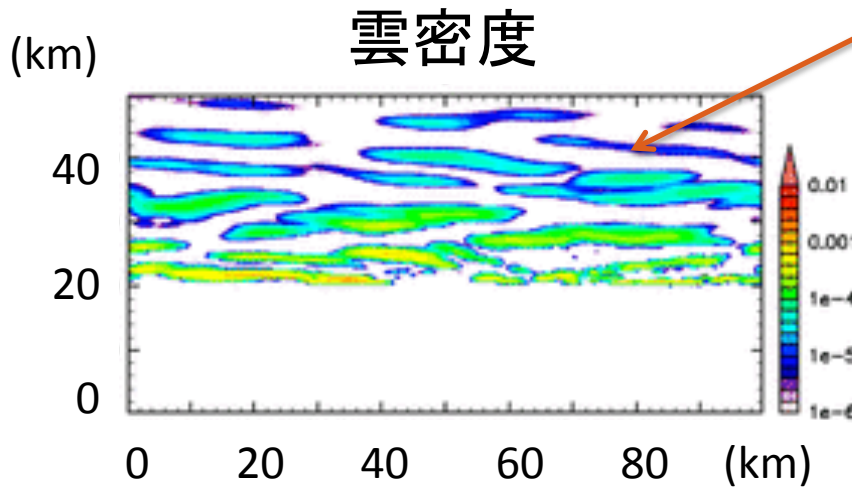


T_{sat}: 凝結した気塊の温度, T_{cond}: 凝結温度, T_{mean}: 周囲の大気の温度

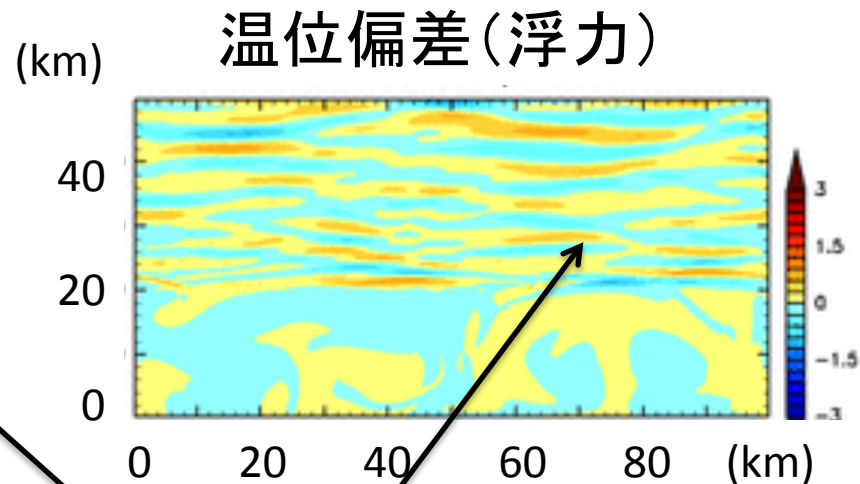
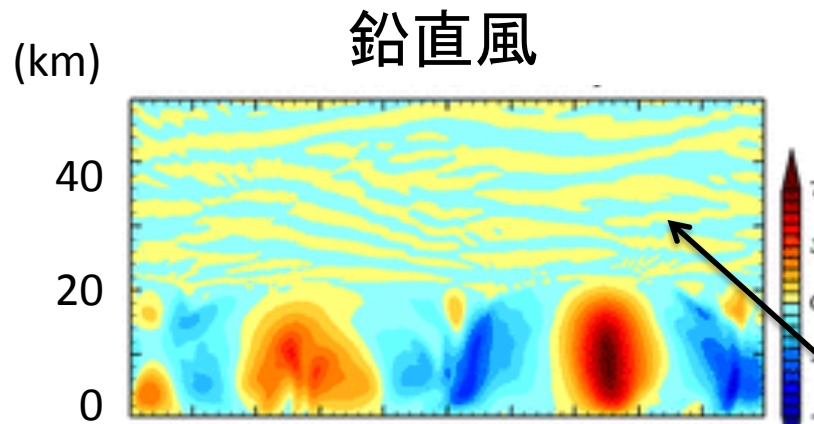
過飽和が要求されない場合



雲は、大気中を伝播する波にともなって生じている
対流性の雲ではない

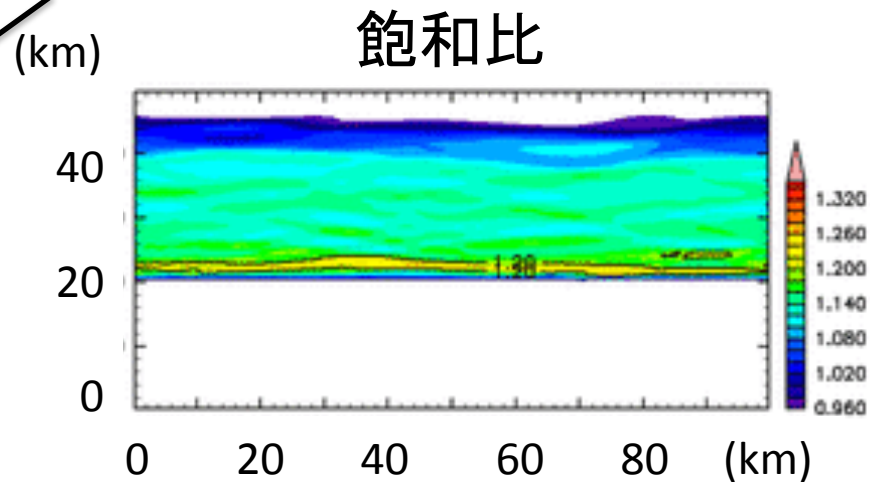
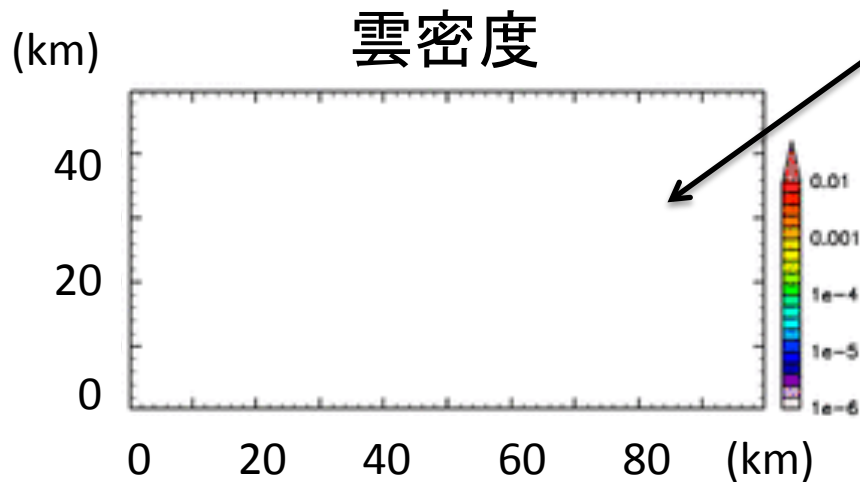


過飽和が要求される場合



過飽和が許容されるのは雲が無い時
⇒ ひとたび雲が発生すると次の雲の発生は抑えられる (間欠的に雲は発生)

凝結域の上部で浮力・上昇流
対流性の雲の発生



おわりに

地球以外の多くの惑星・衛星に雲が存在する。

地球の雲の「当たり前」が、当たり前ではない世界

= 地球以外の惑星大気を研究する醍醐味

- 金星の雲: 光化学反応で生成
- 木星の雲: 凝結成分の分子量 > 主成分の分子量
 - ・ H₂O 凝結高度より上空では, 地球の雲対流と共通の特徴.
 - ・ H₂O 凝結高度で流れ場が上下に分割.
- 過去の火星: 主成分凝結
 - ・ 過飽和状態が実現して始めて雲が発達

地球大気で培われた気象学の概念の一般化へ

参考文献 (1)

- ESA Venus Express, http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Venus_Express
- Gierasch et al., 2000, Observation of moist convection in Jupiter's atmosphere, *Nature*, 403, 628–630.
- Hueso and Sanchez-Lavega, 2004, A three-dimensional model of moist convection for the giant planets II: Saturn's water and ammonia moist convective storms, *Icarus*, 172, 255–271
- 今村剛, 2014, 惑星探査学II 講義資料, <http://ssl.tksc.jaxa.jp/pairg/member/ima/venus.pdf>
- JAXA 金星探査機あかつき, http://www.jaxa.jp/projects/sat/planet_c/index_j.html,
<http://www.stp.isas.jaxa.jp/venus/>
- 国立天文台 観測成果の紹介, 2014, 「もや」のかかった温かい巨大ガス惑星,
<http://www.oao.nao.ac.jp/public/research/wasp80b/>
- Markiewicz et al., 2007, Morphology and dynamics of the upper cloud layer of Venus, *Nature* 450, 633–636
- 中島 他, 1998, 地球流体における「雲対流」, *Nagare Multimedia (Journal of the Japan Society of Fluid Mechanics)*, <http://www2.nagare.or.jp/mm/1998/nakajima/>

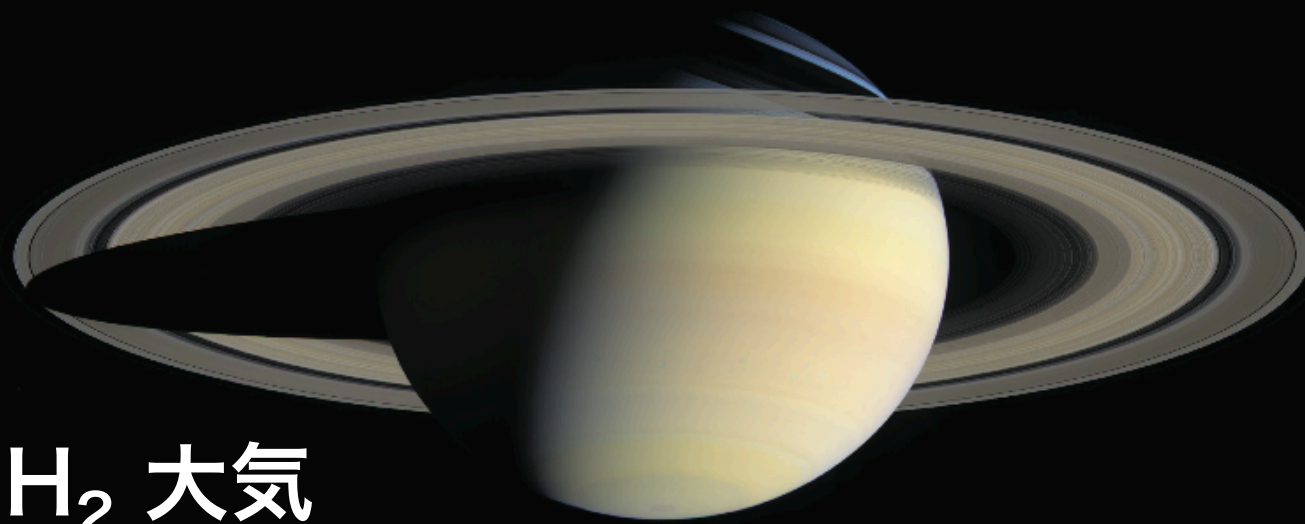
参考文献 (2)

- NASA EXOPLANET ARCHIVE, <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- NASA Kepler space telescope, <http://kepler.nasa.gov>
- NASA photojournal, <http://photojournal.jpl.nasa.gov>
- NASA Solar System Exploration, <http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery>
- Sanchez-Lavega et al., 2004, Clouds in planetary atmospheres: A useful application of the Clausius–Clapeyron equation, American Association of Physics Teachers, DOI: 10.1119/1.1645279
- Sanchez-Lavega, 2011, An Introduction to Planetary Atmospheres, CRC Press, 629 pp.
- Sugiyama et al., 2006, Static Stability of the Jovian Atmospheres Estimated from Moist Adiabatic Profiles, Geophys. Res. Lett., 33, L03201, doi:10.1029/2005GL024554.
- Sugiyama et al., 2009, Development of a Cloud Convection Model to Investigate the Jupiter's Atmosphere, Nagare Multimedia (Journal of the Japan Society of Fluid Mechanics), <http://www2.nagare.or.jp/mm/2009/sugiyama/>
- Sugiyama et al., 2011, Intermittent cumulonimbus activity breaking the three-layer cloud structure of Jupiter, Geophys. Res. Lett., 38, L13201, doi:10.1029/2011GL047878.
- Sugiyama et al., 2014, Numerical simulations of Jupiter's moist convection layer: Structure and dynamics in statistically steady states, Icarus, 229, 71--91.
- Yamashita et al. 2015, A numerical study on convection of a condensing CO₂ atmosphere under an early Mars like condition, J. Atmos. Sci., submitted.

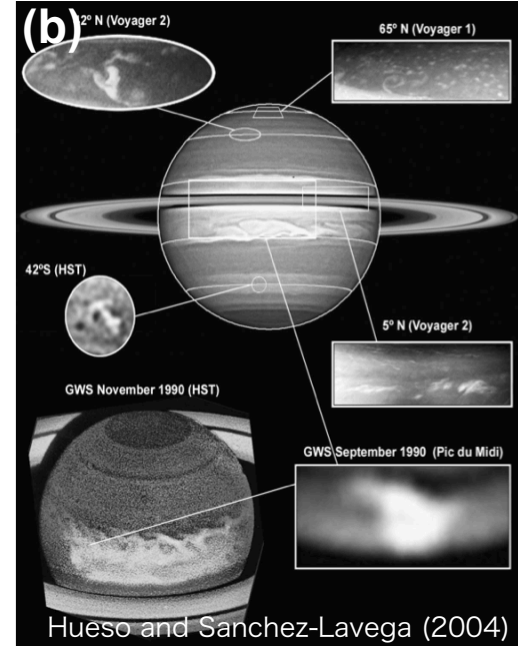
付録

土星

(a)

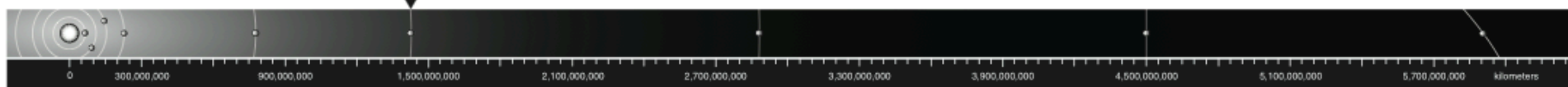
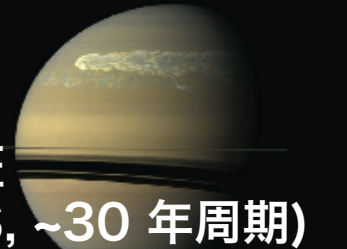


H₂ 大気
複数成分の雲
(H₂O, NH₄SH, NH₃)



(c)

大白斑
(GWS, ~30 年周期)



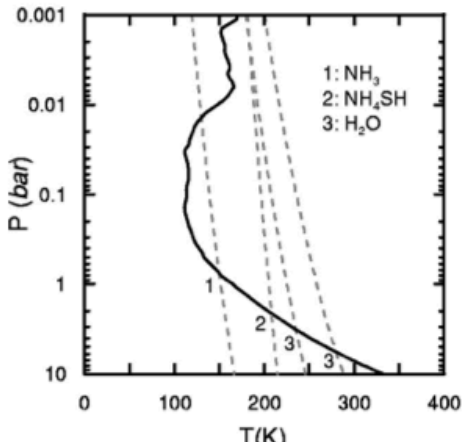
雲の組成の予想の仕方

凝結の条件：

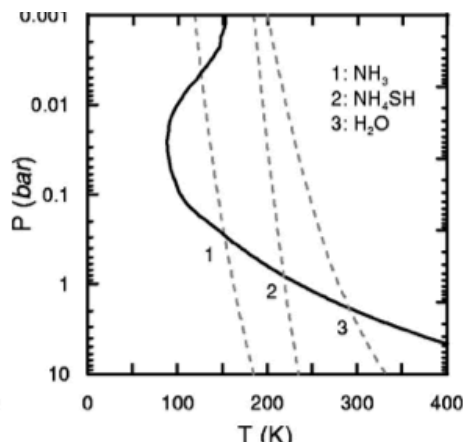
凝結成分の分圧 (= 凝結成分の存在度 × 気圧) > 飽和蒸気圧

↑ 温度のみに依存

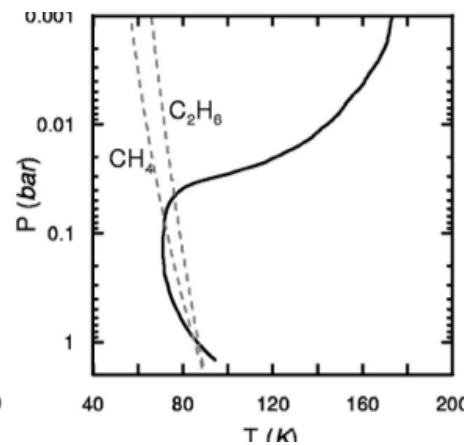
木星



土星



タイタン

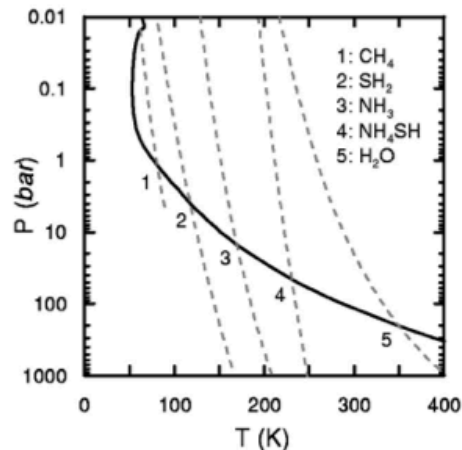


実線：
気圧と温度の関係

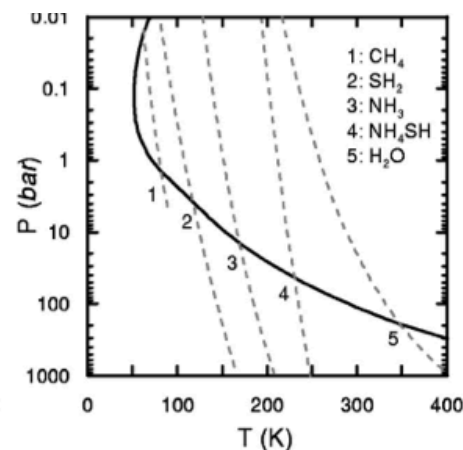
破線：
飽和蒸気圧
/ 凝結成分のモル比
と温度の関係

実線と破線の交点が
凝結高度を示す。

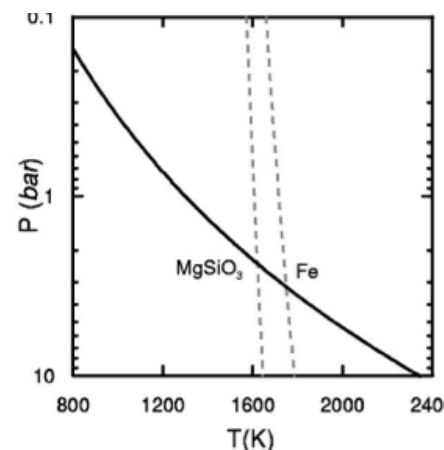
天王星



海王星



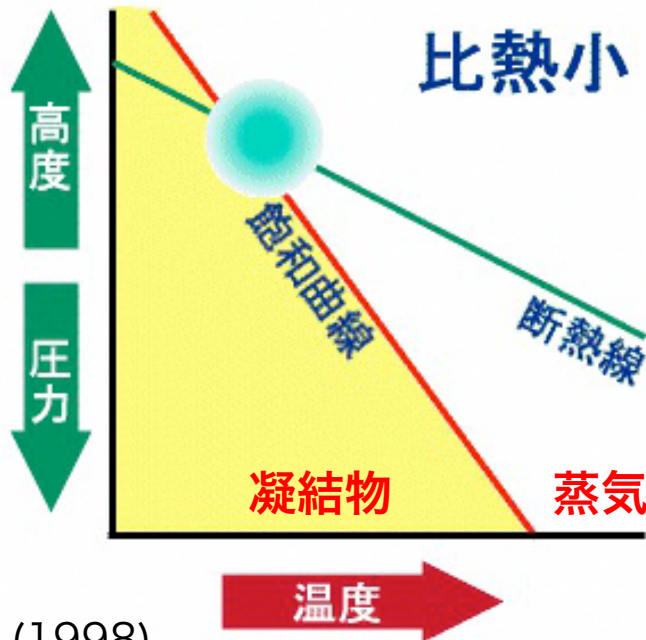
系外惑星(HD209458b)



Sanchez-Lavega (2004)

上昇流で凝結？ 下降流で凝結？

- ・ 上昇流で凝結する条件：比熱 < 潜熱 (モル凝結エントロピー)
- ・ 代表的な凝結成分は、上昇流で凝結する条件を満たす。
 - 比熱：20 ~ 30 [J/mol K]



中島他 (1998)

凝結成分	モル凝結 エントロピー [J/mol K]
H ₂ O	168
NH ₃	92
CH ₄	86
C ₂ H ₆	160
CO ₂ (昇華)	125
Fe	200
MgSiO ₃	225