

# H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 大気 of 冷却に関する いくつかのコメント

中島健介(九大 理)

# コメントする問題点

1. H<sub>2</sub>O 臨界点付近での「CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの分離」
  - H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> の相図より
2. H<sub>2</sub>O 臨界点での「海面」の出現の仕方
  - H<sub>2</sub>O の「蒸気表」より
3. 1成分凝結大気の冷却
  - 「雨」の落下に伴う熱輸送
4. H<sub>2</sub>O 凝結開始時のアルベド
  - 対流は許されるので、雲は fragmentary

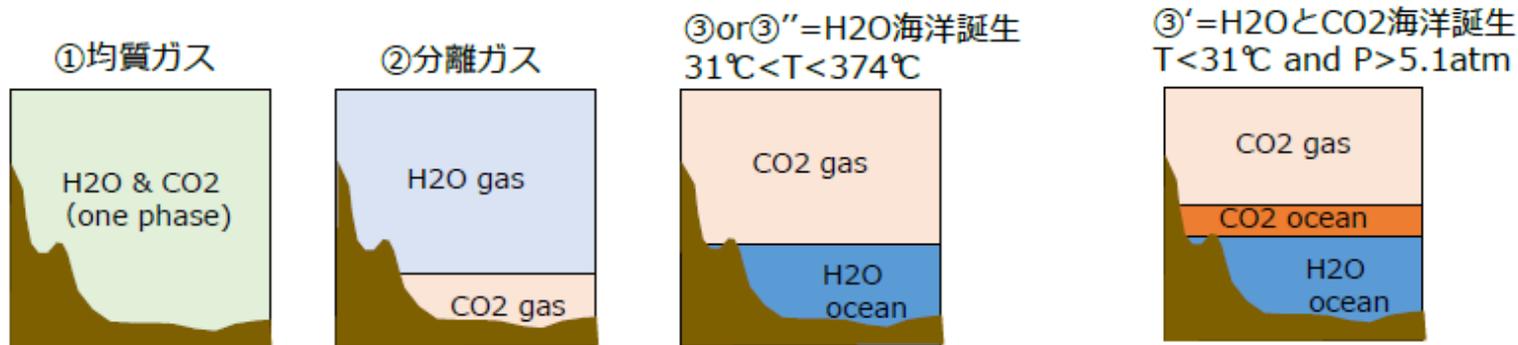
# コメントする問題点

H<sub>2</sub>O 臨界点付近での「CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの分離」

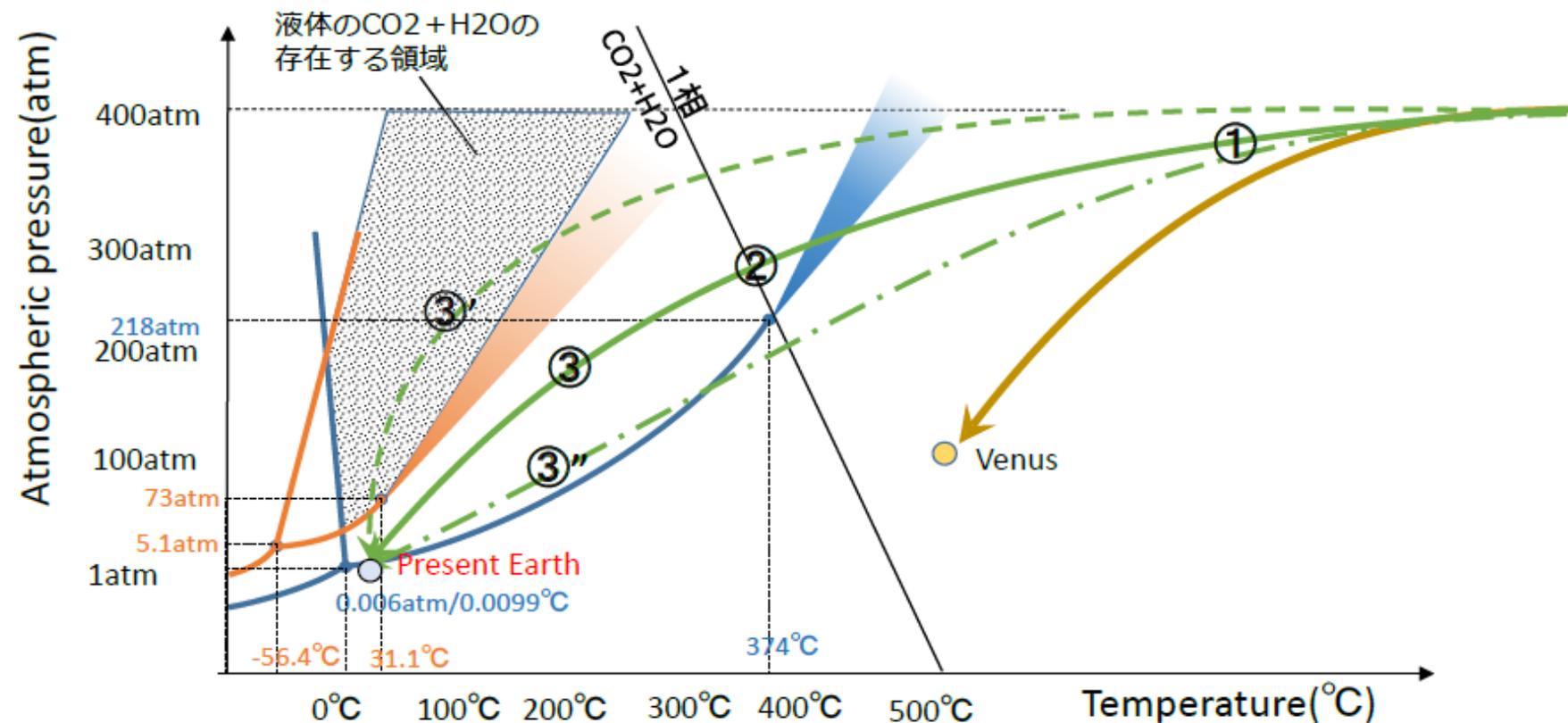
H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> の相図より

# 丸山メモ

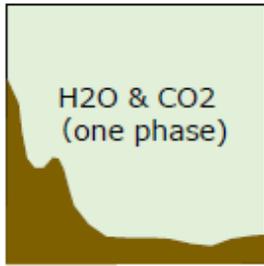
2015/08/20



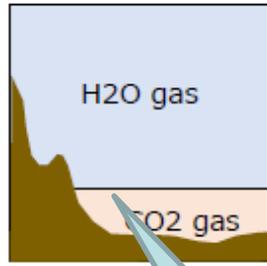
注意点：大気と岩石の反応はないものと仮定する



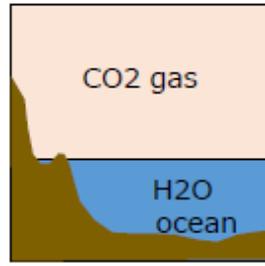
①均質ガス



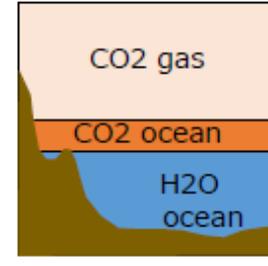
②分離ガス



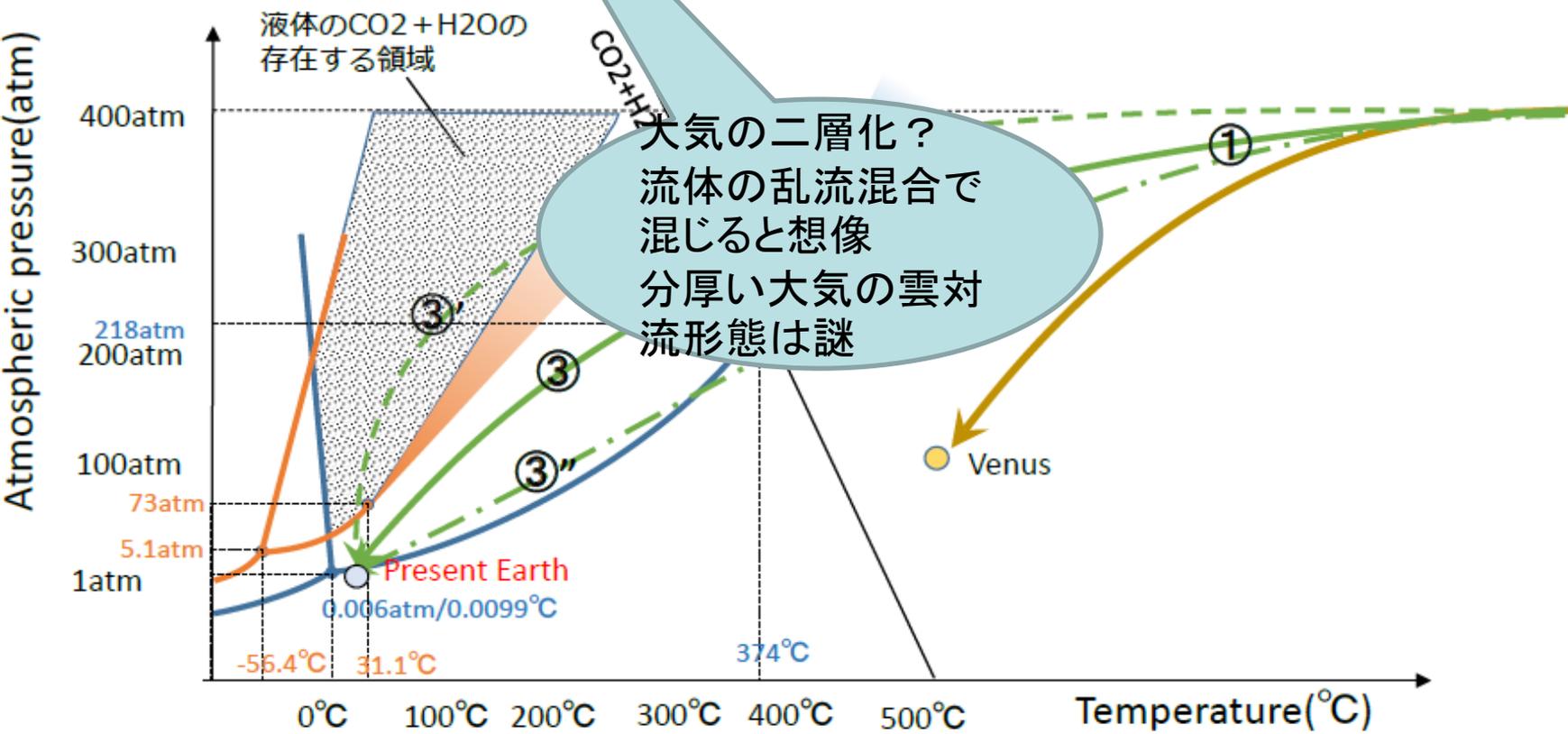
③or③''=H2O海洋誕生  
31°C < T < 374°C



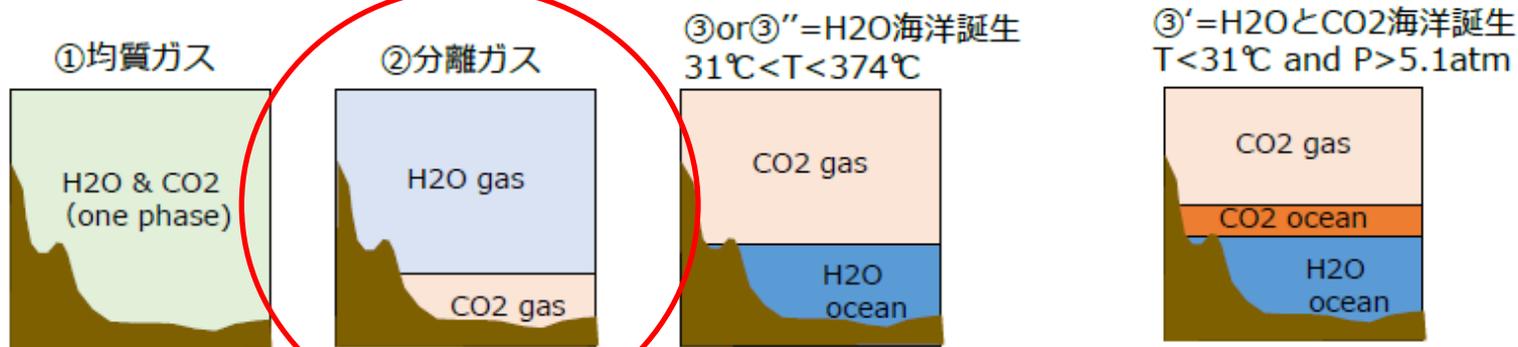
③'=H2OとCO2海洋誕生  
T < 31°C and P > 5.1atm



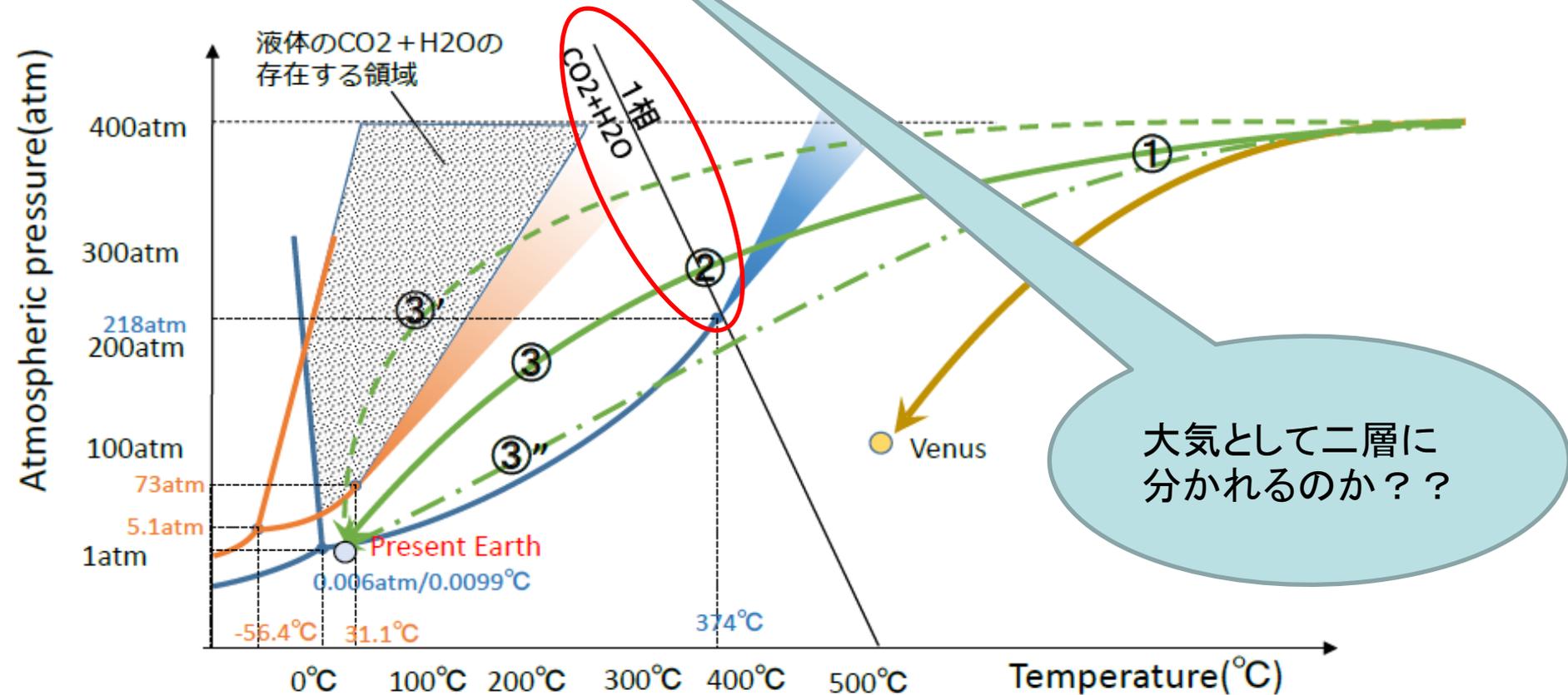
注意点：大気と岩石の反応はないものと仮定する



大気の大層化？  
流体の乱流混合で混じると想像  
分厚い大気の雲対流形態は謎



注意点：大気と岩石の反応はないものと仮定する



**The Thermodynamic Behavior of the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O System  
from 400 to 1000 K, up to 100 MPa and  
30% Mole Fraction of CO<sub>2</sub>**

**J. S. Gallagher, R. Crovetto and J.M.H. Levelt Sengers**

*Thermophysics Division, Chemical Science and Technology Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Technology Administration, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, MD 20899-0001*

Received August 10, 1992; revised manuscript received October 19, 1992

A model is presented for the thermodynamic properties of the aqueous mixture of carbon dioxide, up to 30 mol% composition, in a large range of temperatures (400–1000 K) and pressures (0–100 MPa) around the critical point of water. The model for the Helmholtz free energy of the mixture is based on the principle of generalized corresponding states, with the NBS/NRC Steam Tables as the reference state for pure water. Input to the model are data for the critical line of the mixture, apparent molar volume and  $pVTx$  data in supercritical water, phase boundaries, excess enthalpies and mixture second virial coefficient data. Comparisons are presented with those data, with Henry's constants and with other formulations available for this system. Phase boundaries and tabulated values of molar volumes, enthalpies, and fugacities are presented along 35 isobars from 0.05 to 100 MPa, for four compositions,  $x = 0.05, 0.10, 0.20$  and  $0.30$ , respectively, at 19 temperatures in the range of 400 to 1000 K. For the same pressures and temperatures, we also list the infinite-dilution (standard state) properties: partial molar volume, enthalpy, heat capacity and fugacity coefficient of the solute CO<sub>2</sub>. The Fortran codes for generating these properties are listed in Appendix B.

CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 系の  
熱力学特性について

# H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 系の「臨界点」

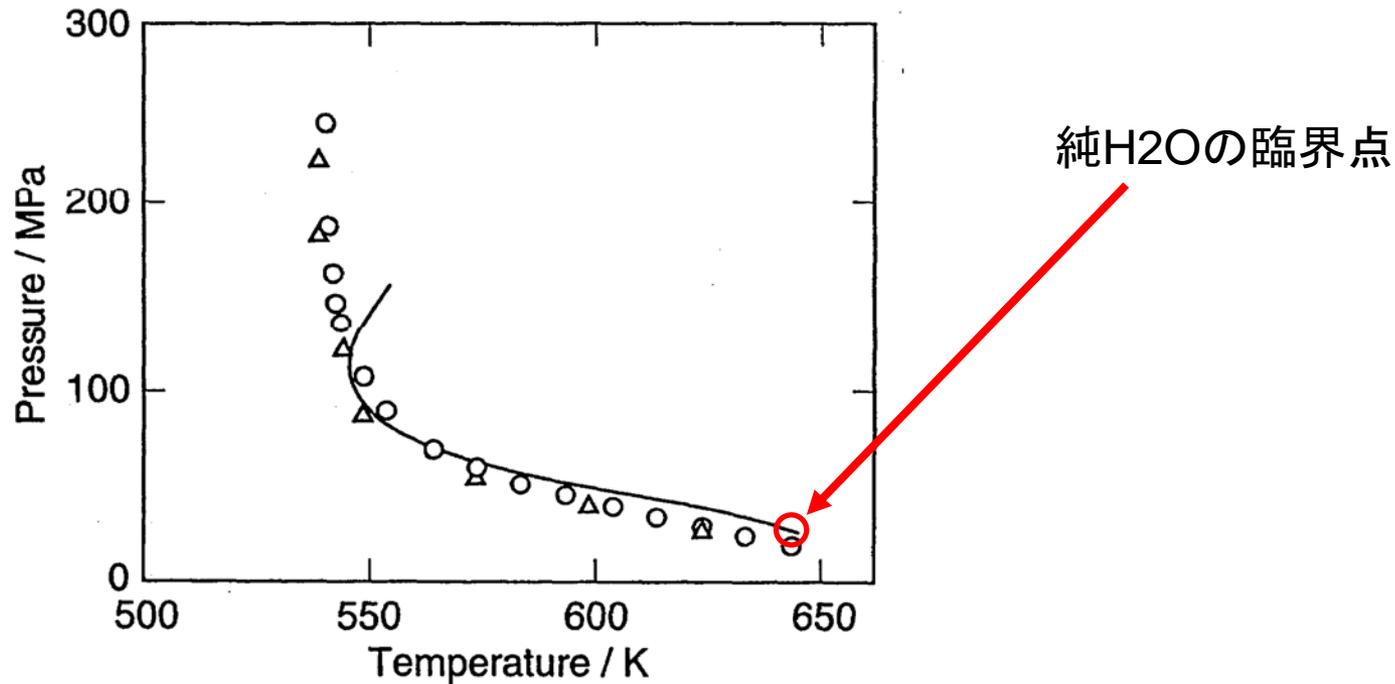


FIG. 2c. View of the critical line:  $p$  vs  $T$ . The solid curve represents the predictions of our model, the dashed curve those of the model of Christofarakos and Franck.<sup>37</sup> ○, data of Tödheide and Franck;<sup>13</sup> △, data of Takenouchi and Kennedy.<sup>14</sup>

# H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 系の「臨界点」

温度一定で、組成と圧力の関数としての相図

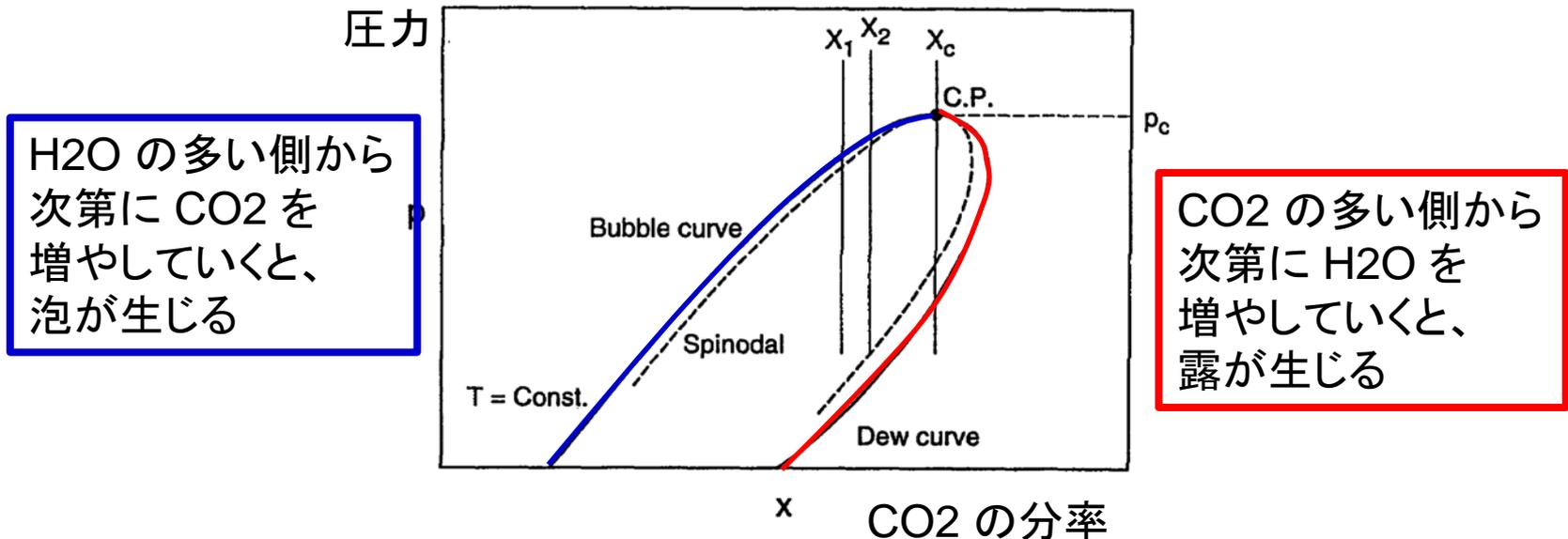
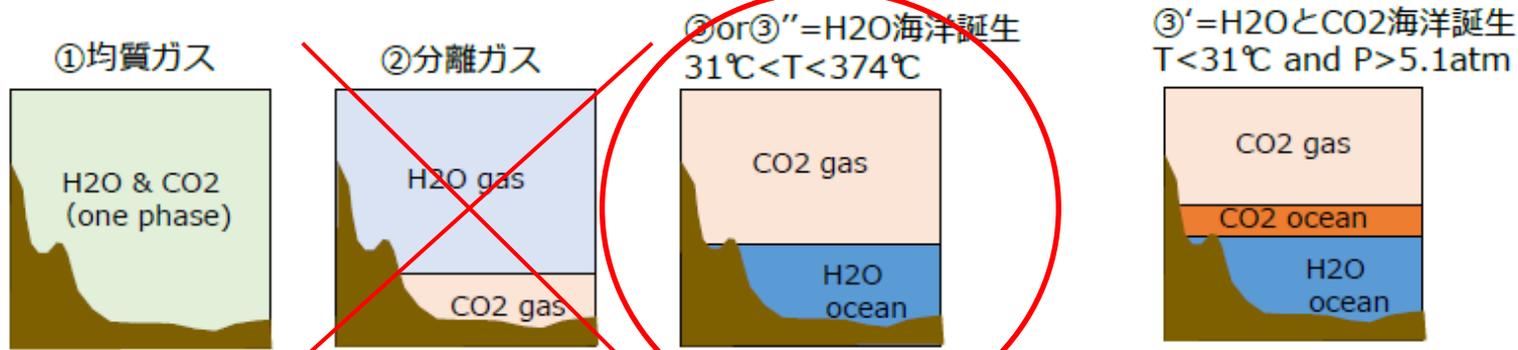
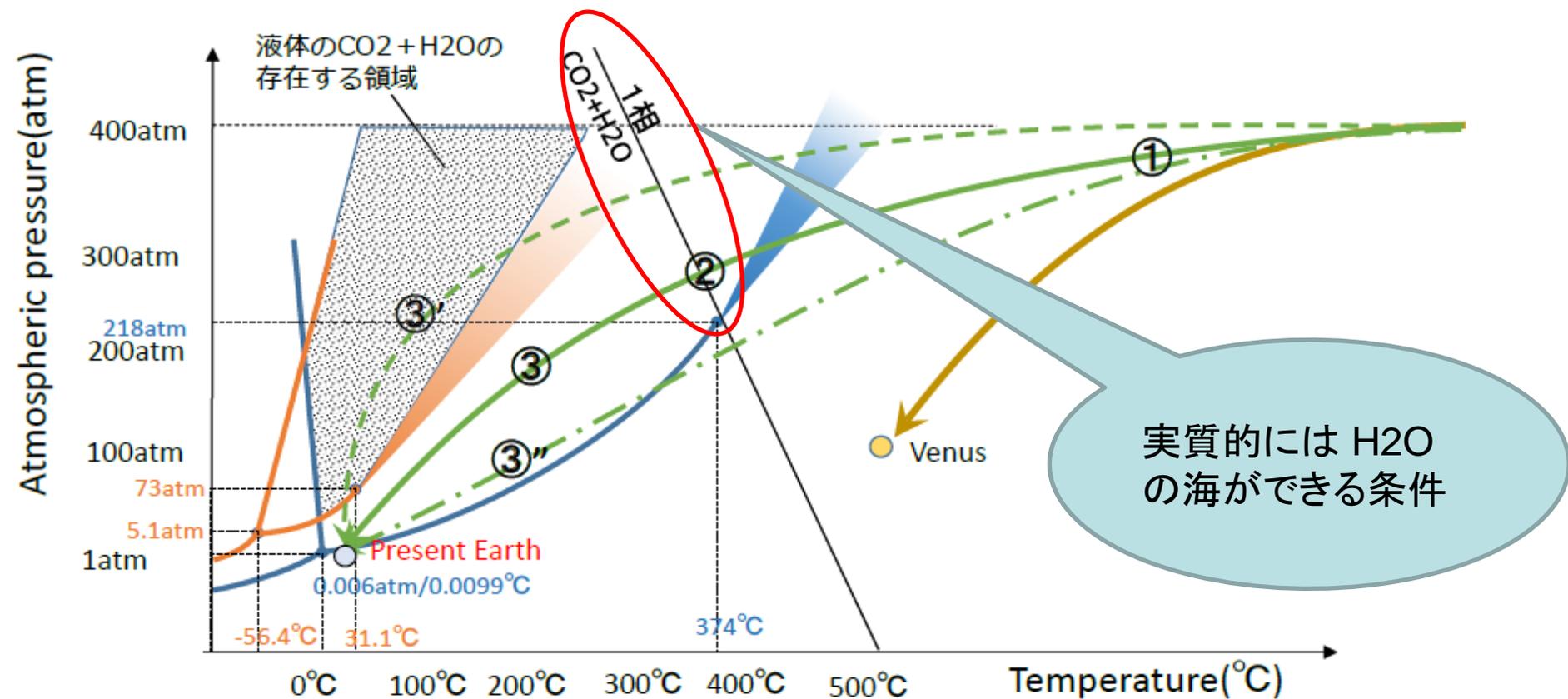


FIG. 1. Schematic diagram showing the method for the determination of a point on the critical line. An isotherm is shown on a  $p$  vs  $x$  plot, with the solid line being the coexistence curve, and the dashed line the "spinodal" – the locus of the zeroes of  $(\partial^2 G / \partial x^2)_{p,T}$ .

組成一定で、圧力を増加されると、気相から液相に変化する



注意点：大気と岩石の反応はないものと仮定する



# コメントする問題点

H<sub>2</sub>O 臨界点での「海面」の出現の仕方  
– H<sub>2</sub>O の「蒸気表」より

# 冥王代の大気？ 分厚いCO<sub>2</sub>大気・H<sub>2</sub>O大気 宿題

神戸大学理学研究科惑星学専攻  
林 祥介

shosuke@gfd-dennou.org

2015年9月7日

はしもとじょーじ(岡山大学)・石渡正樹(北海道大学)・大西将徳(神戸大学)  
倉本圭(北海道大学)・中島健介(九州大学)・高橋よしゆき(神戸大学)

提供

地球流体電脳倶楽部 <http://www.gfd-dennou.org/>

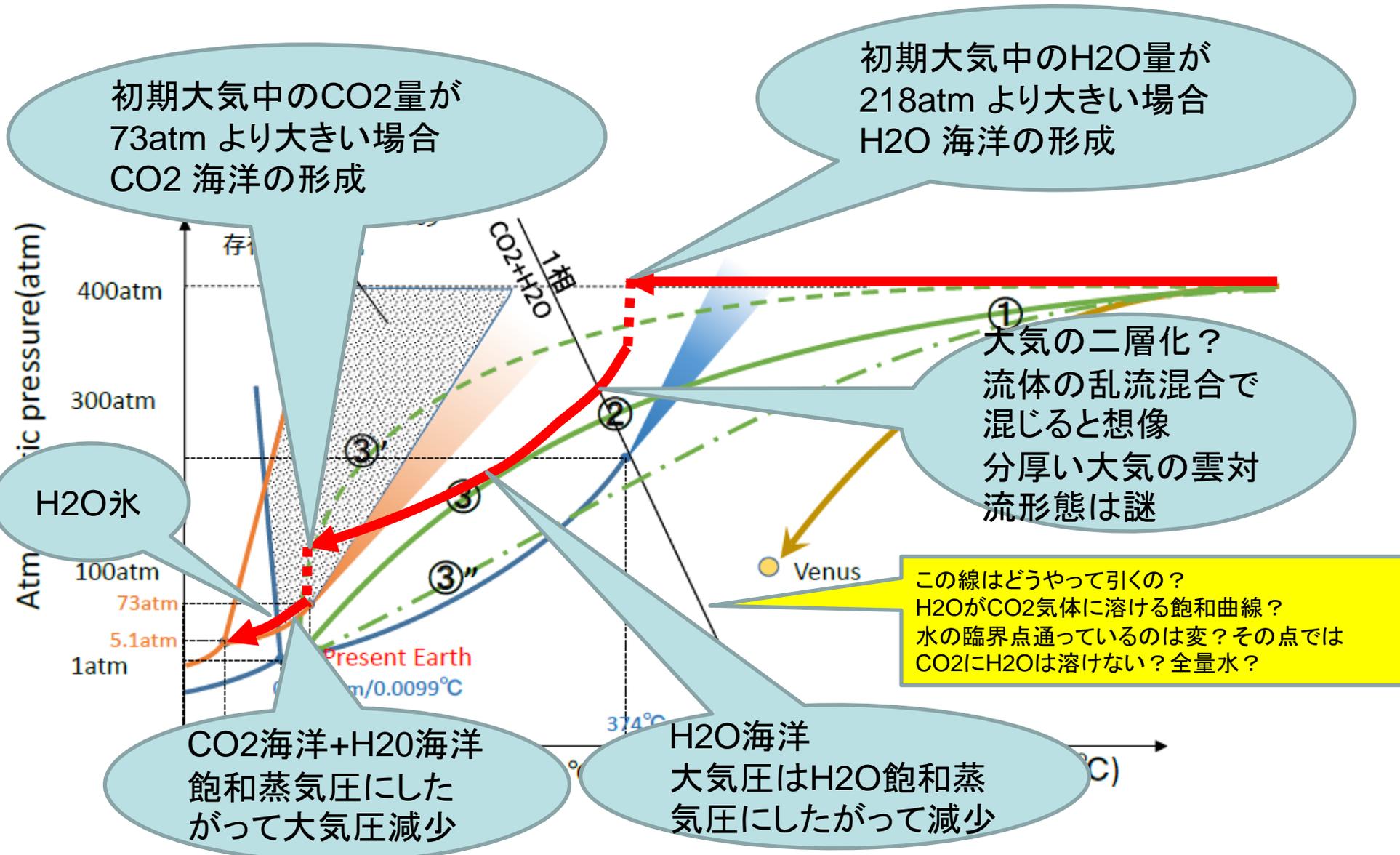


CPS惑星科学研究センター <http://www.cps-jp.org/>

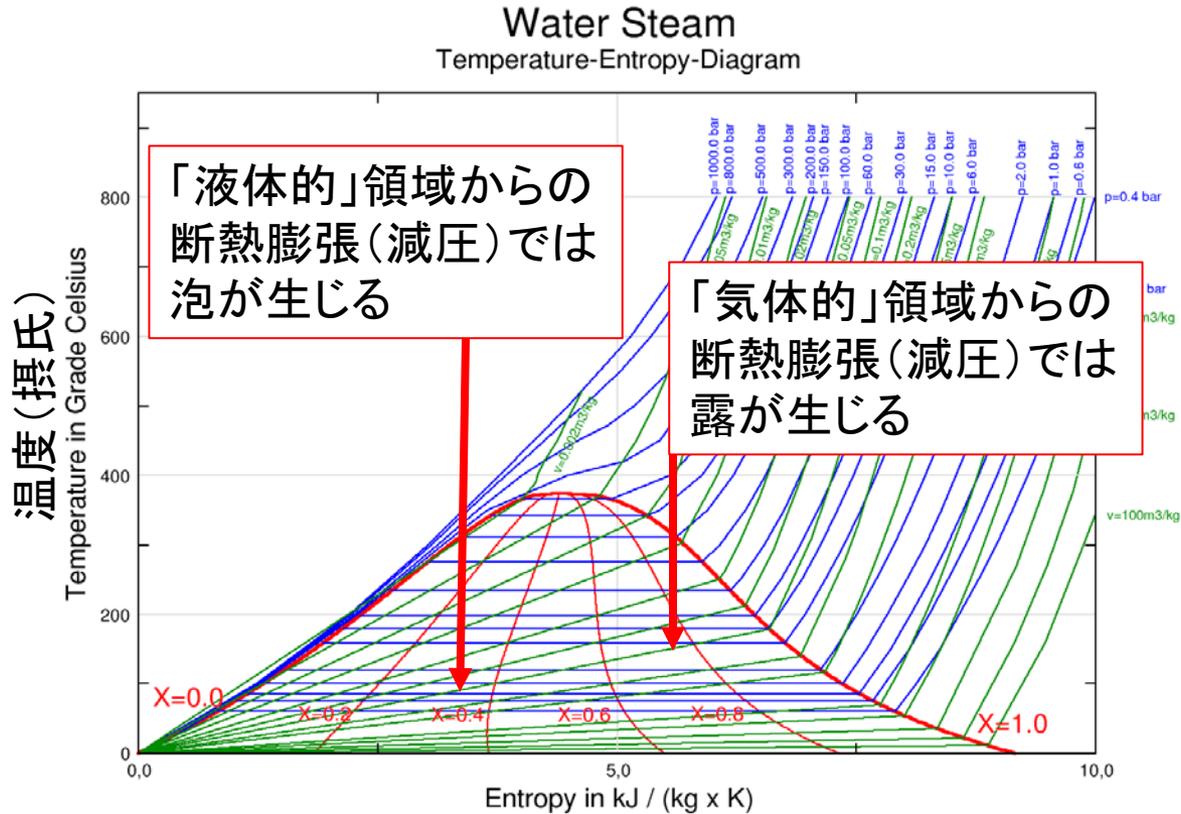


縦軸: 大気圧(液相除く)  $P_s$ 、横軸: 地表(気相最下層=海面) 気温  $T_s$

赤線: 大気+海洋系の相物質保存したまま冷却するばあいのみ考える



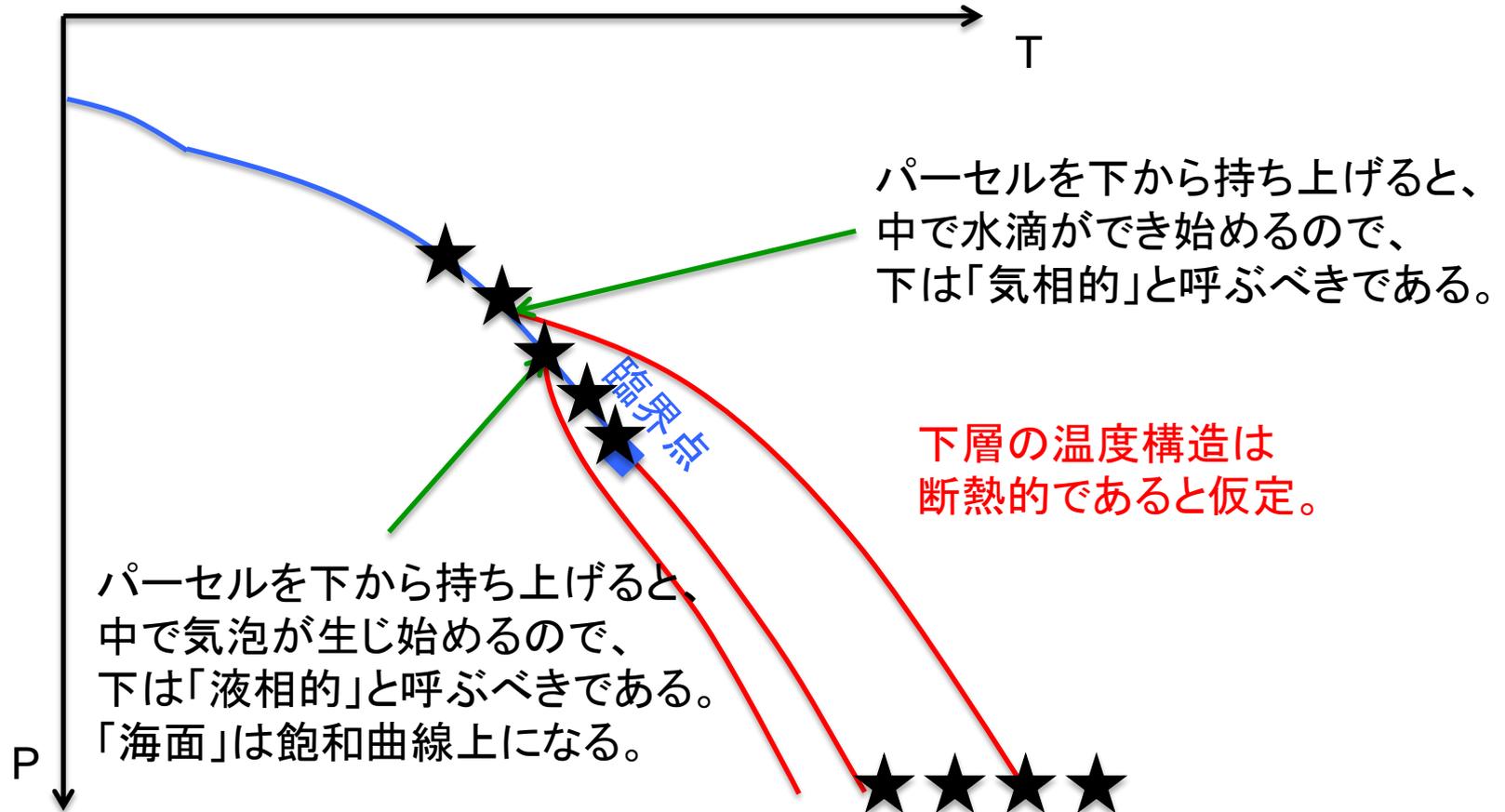
# 超臨界状態からの断熱膨張



Xは気相の比

エントロピー

# 超臨界部分を、どう呼ぶべきか？



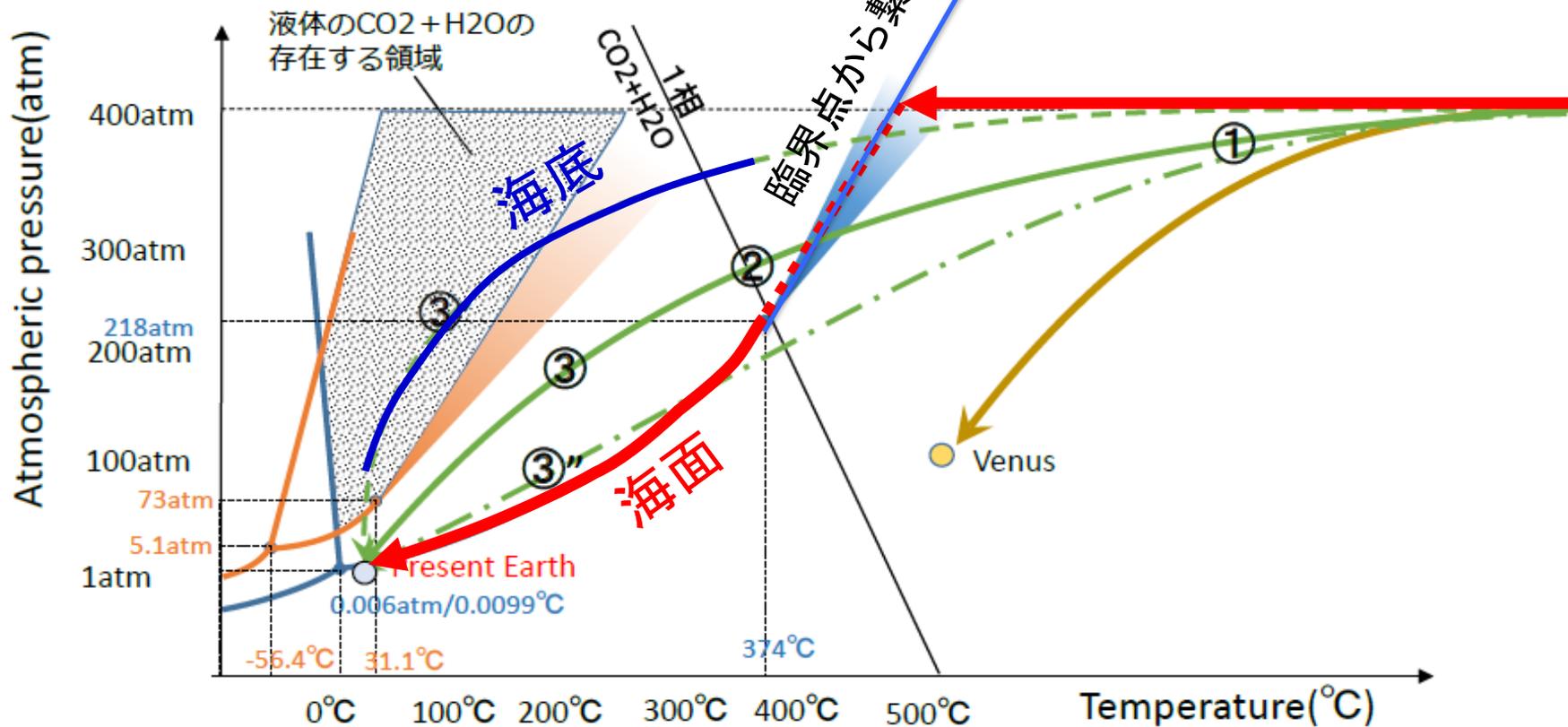
臨界点から高温高圧側に伸ばした断熱線より温度が下がると、臨界点の温度圧力の所が「海面」になる。

地表面(陸面または海面)の温度・圧力(星印)はジャンプする。

# 全H2O大気の臨界点付近の状況

大気の鉛直構造が断熱的と仮定すると、  
海の形成は、 $T_c$  を通る断熱線の 400 atm  
での温度で起こり、大気圧は  $P_c$  に向かって  
ジャンプする。

CO<sub>2</sub> についても似たような  
ことが起こりそうに思う。



# コメントする問題点

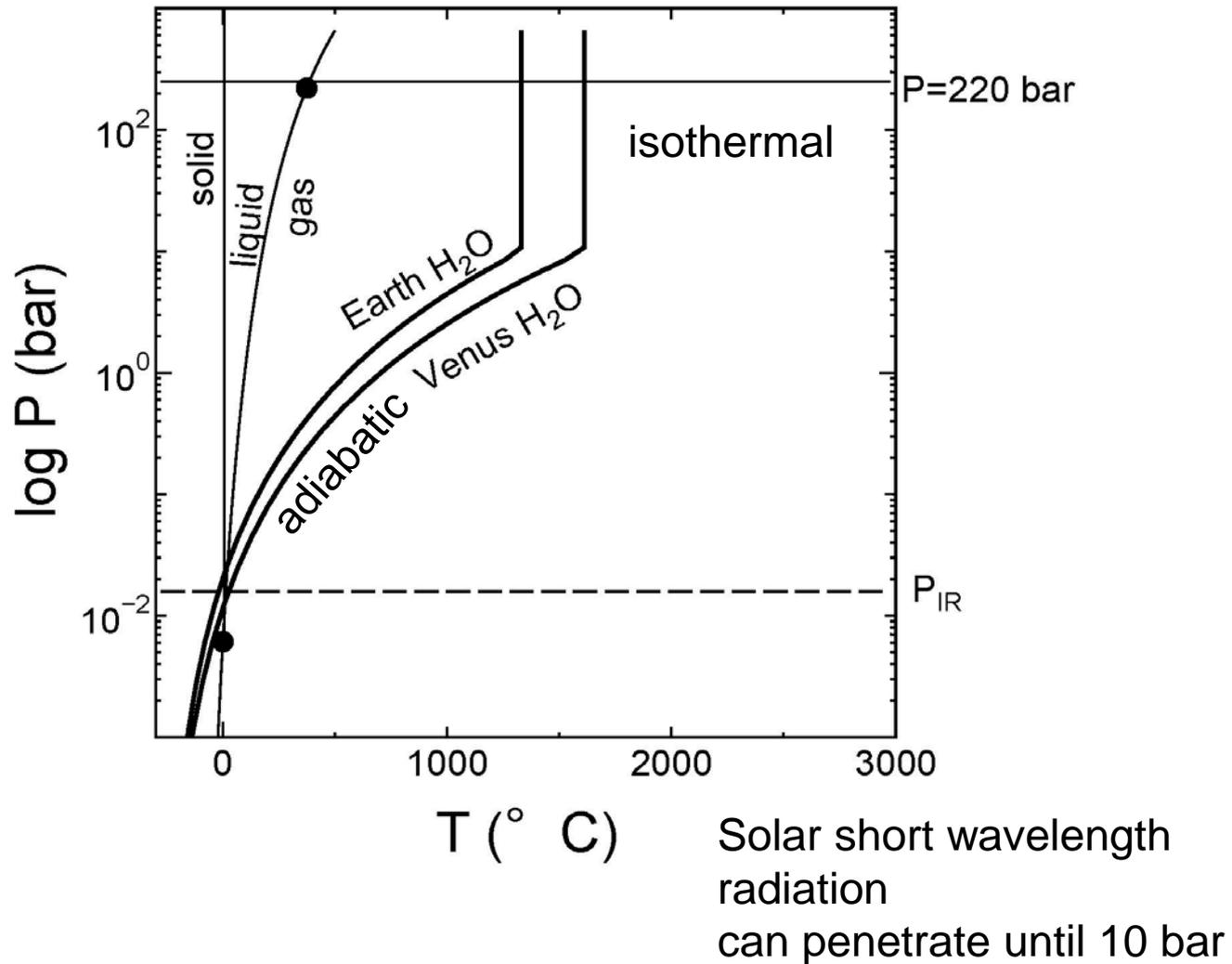
- H<sub>2</sub>O 凝結開始時のアルベド
  - 対流は許されるので、雲は fragmentary
  - 等温大気はあるか？

# 冥王代の地球と金星の大気

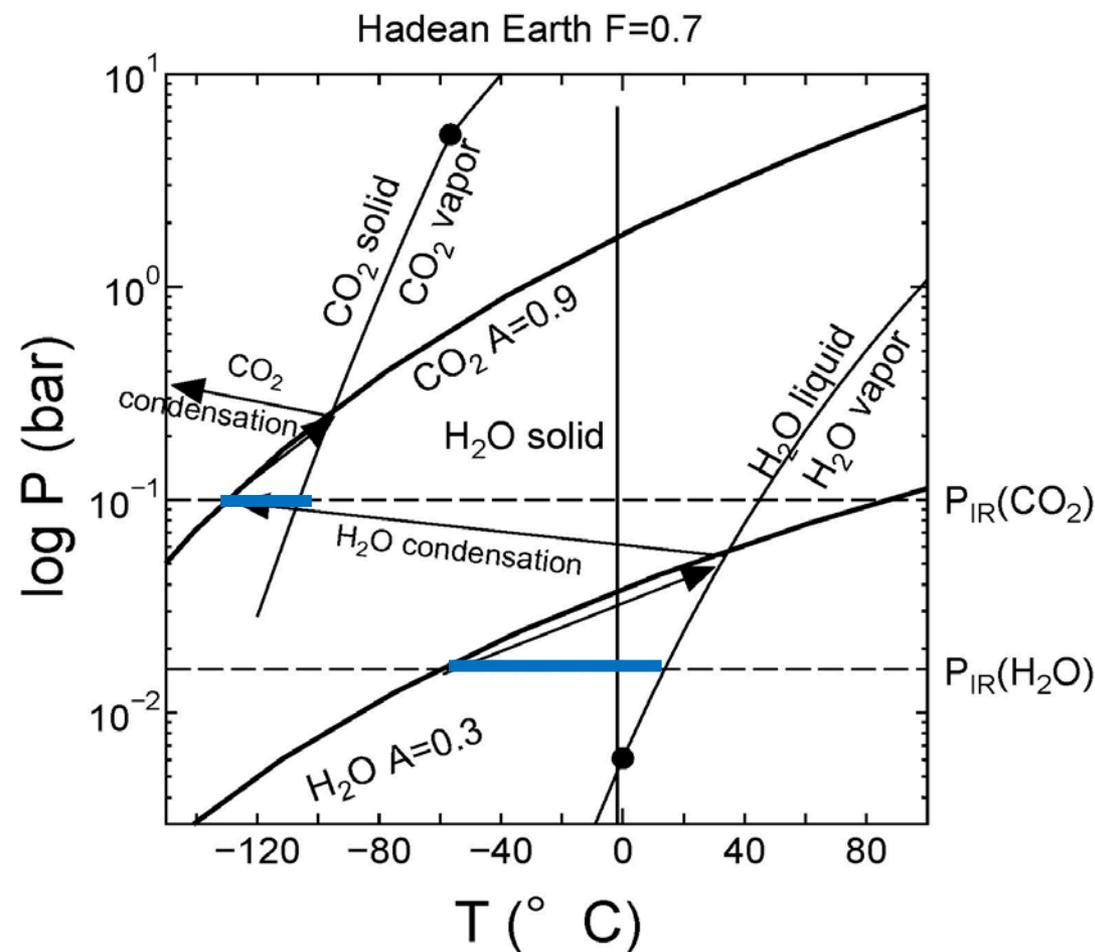
戒崎 2015/12/04

# Hadean H<sub>2</sub>O Atmosphere

Abe and Matsui 1981



# Hadean Earth

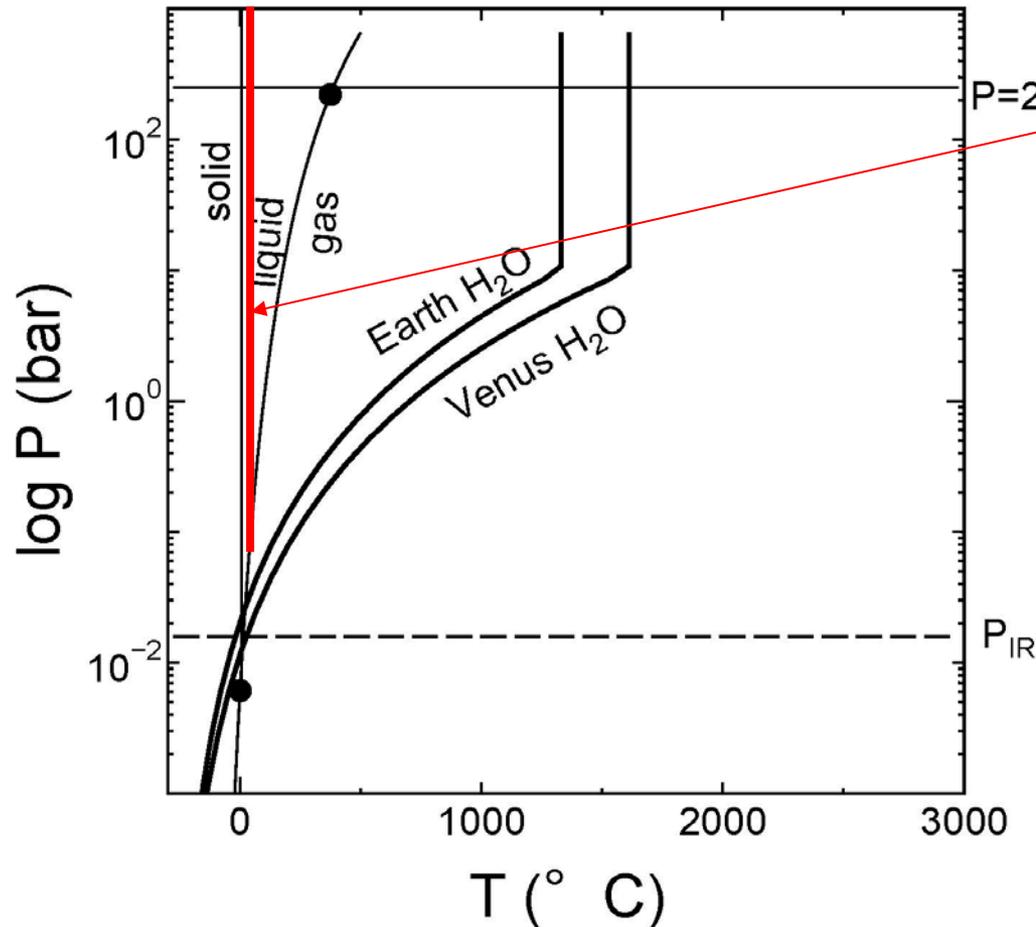


- IR sphere of H<sub>2</sub>O atmosphere locates in the condensation area  
→ loose energy to condensate H<sub>2</sub>O
- H<sub>2</sub>O particles block solar SWR
  - nearly isothermal atmosphere
  - large albedo  $A \sim 0.9$
  - H<sub>2</sub>O sea
- CO<sub>2</sub> atmosphere
- IR sphere of CO<sub>2</sub> atmosphere in the condensation area  
→ loose energy to condensate CO<sub>2</sub>  
→ N<sub>2</sub> atmosphere



# 雲層より下の等温部分の適否

等温部分



H<sub>2</sub>O の液相領域に入っている。

H<sub>2</sub>O の分率が高く、気相である限りは実現できない。

相当量の H<sub>2</sub>O が凝結した後でないとして許されない。

冷却中(海洋形成が進行中)の大気は断熱的であろう。

# アルベドは非常に大きいか？

- H<sub>2</sub>O凝結部分は、対流が許される。
  - 組成は「全H<sub>2</sub>O」ではない。そこそこCO<sub>2</sub>あり。
  - CO<sub>2</sub>(非凝結)の分子量 > H<sub>2</sub>O(凝結)の分子量
- 対流性の雲の「雲量」は「そこそこ」である。
- アルベドは極端に大きくはならないだろう。

# Earth's water clouds

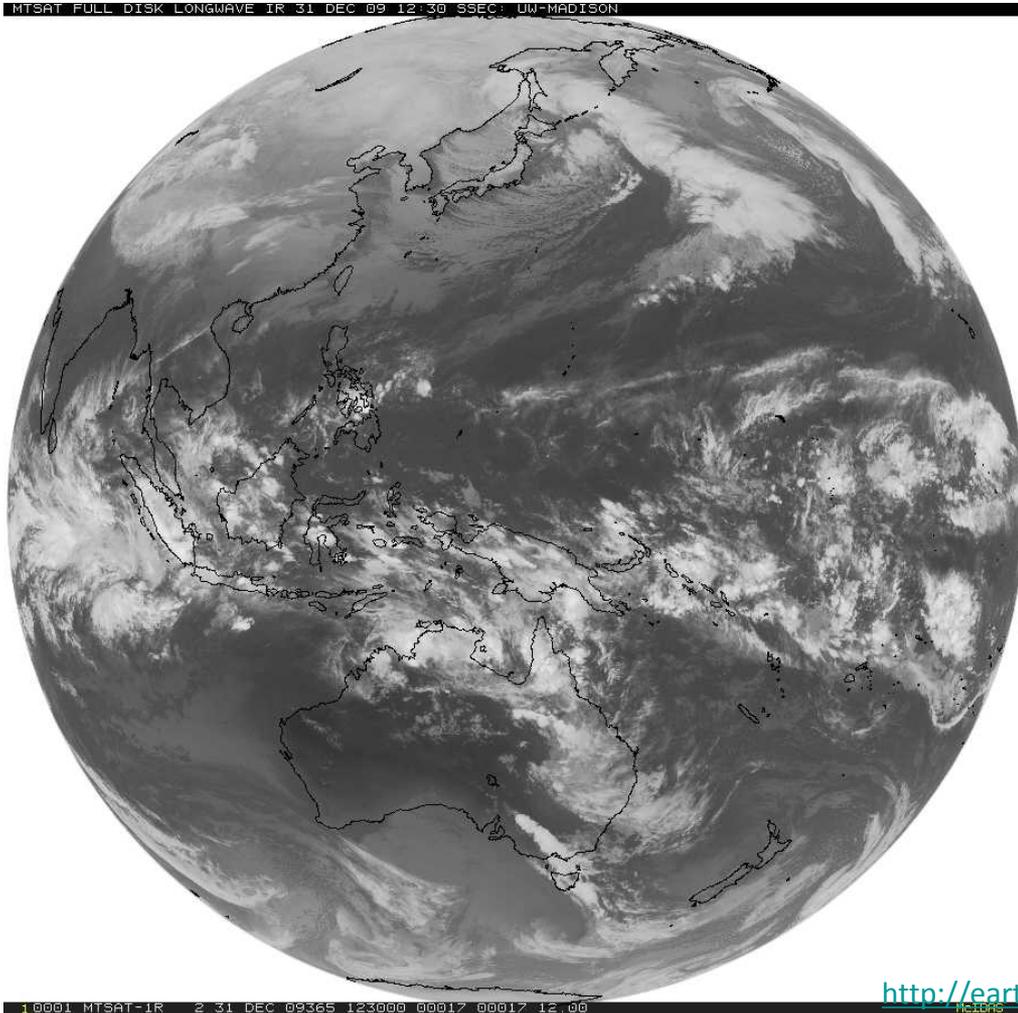
The only place where we have detailed knowledge on clouds.



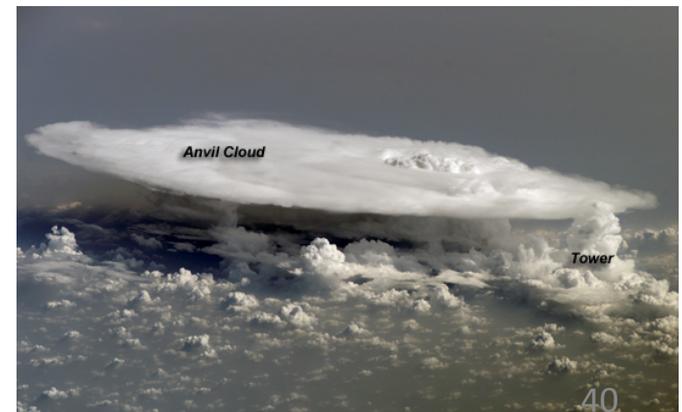
# Thunderclouds

from space: “clusters” of 100-1000km scale are seen.

Individual updraft:  $O(10\text{km})$

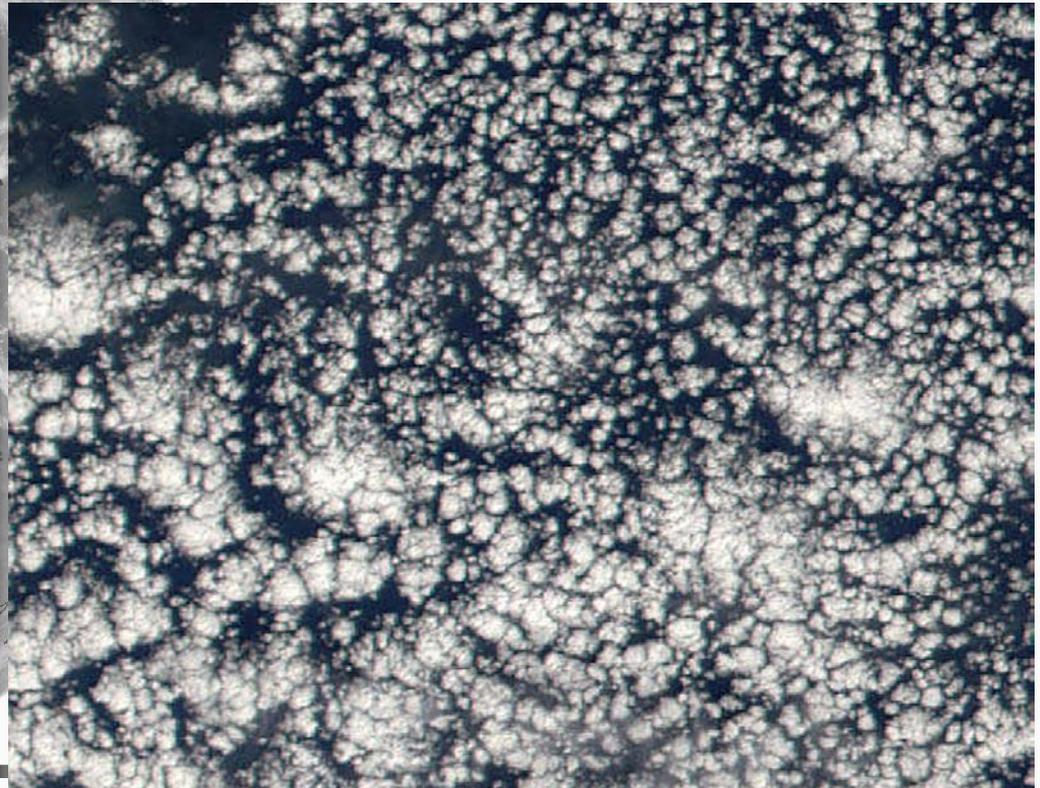
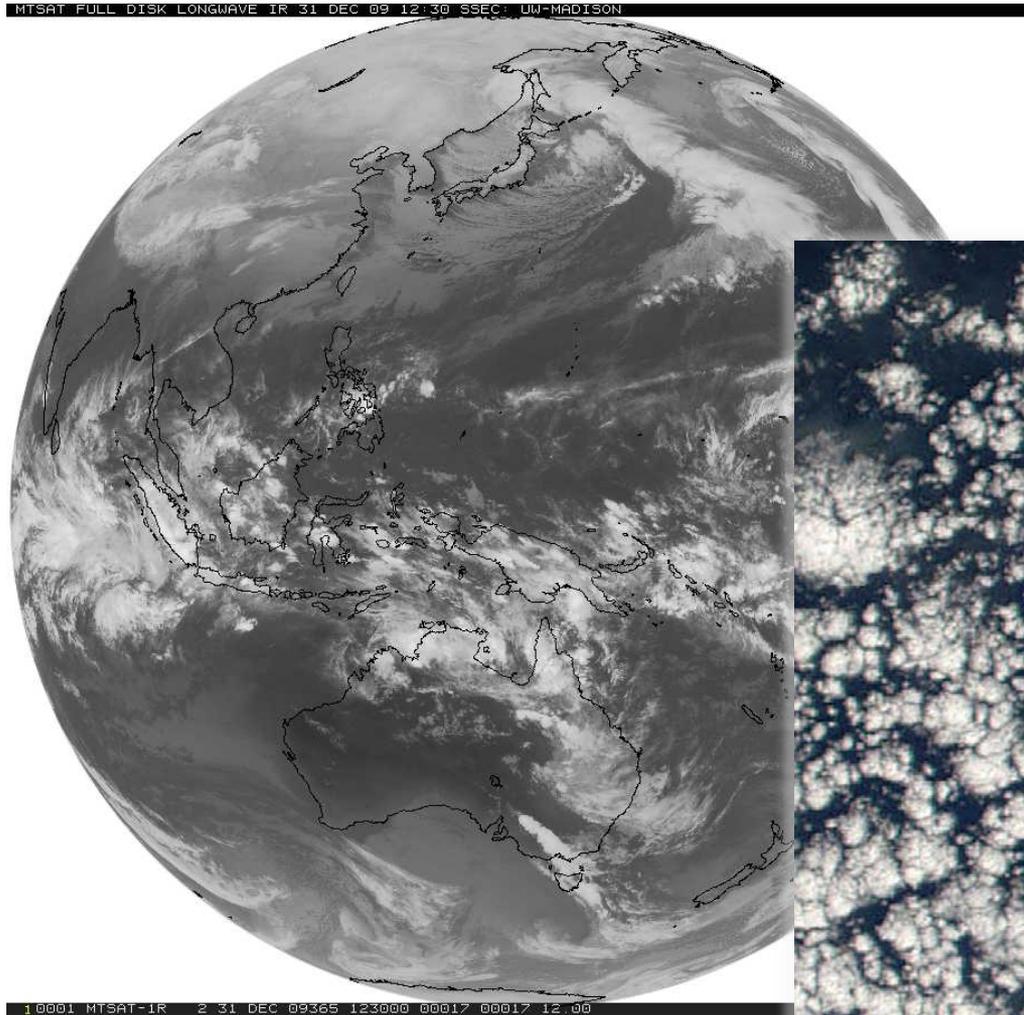


[http://en.wikipedia.org/wiki/Cumulonimbus\\_cloud](http://en.wikipedia.org/wiki/Cumulonimbus_cloud)

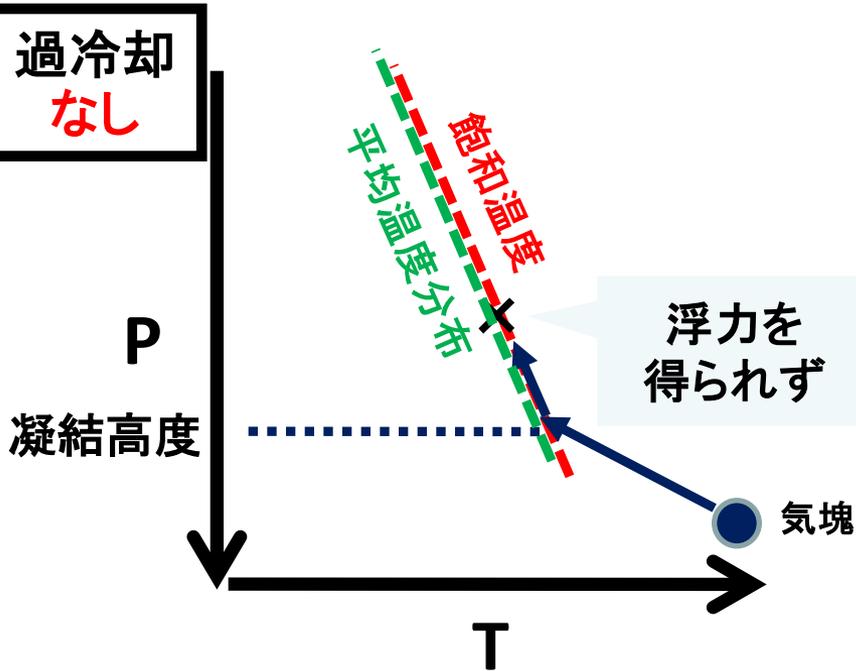


<http://earth.jsc.nasa.gov/sseop/EFS/images.pl?photo=ISS016-E-27426>

# smaller scale convective clouds



# 主成分凝結系 (Colaprete et al., 2003)

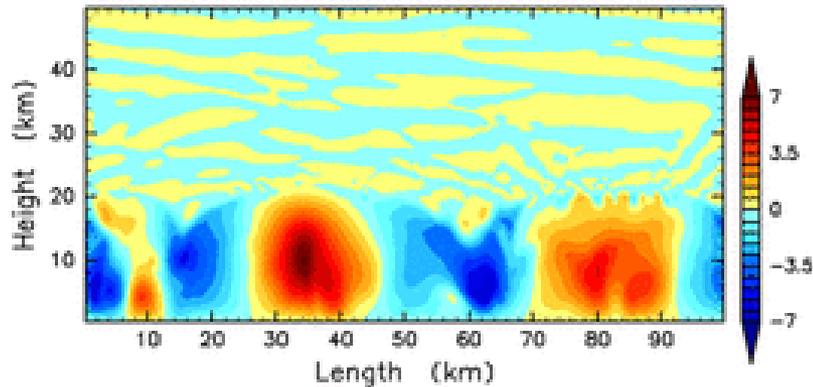


- 強い鉛直流は生じず

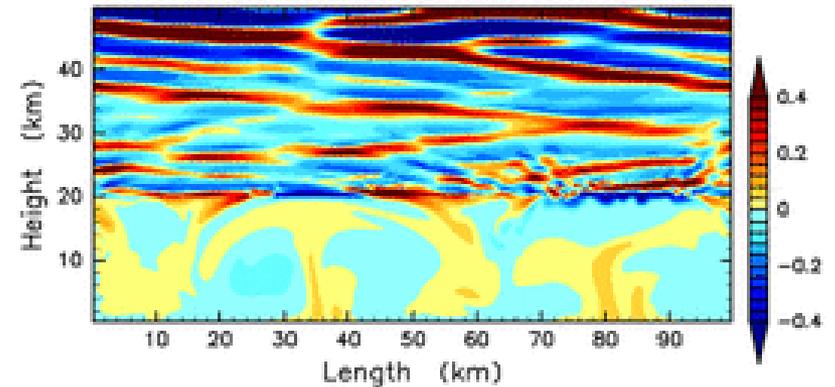
Colaprete et al.(2003)の問題点:  
1次元モデルを用いた研究であり, どのような流れ場・雲分布が自然に実現されるのか分からない

# 流れ場・雲密度の空間分布

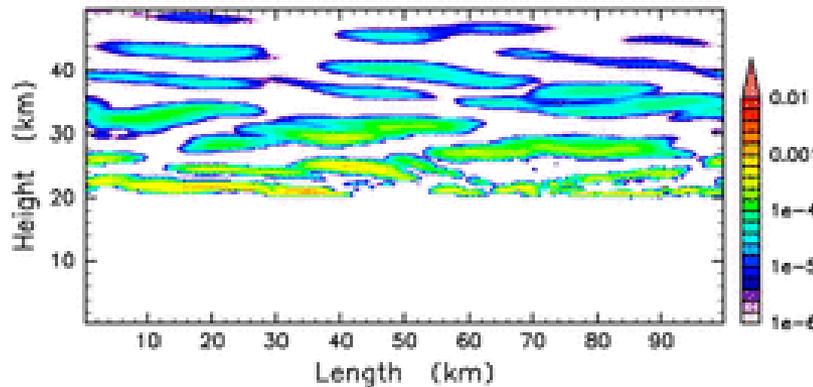
(a) Vertical velocity



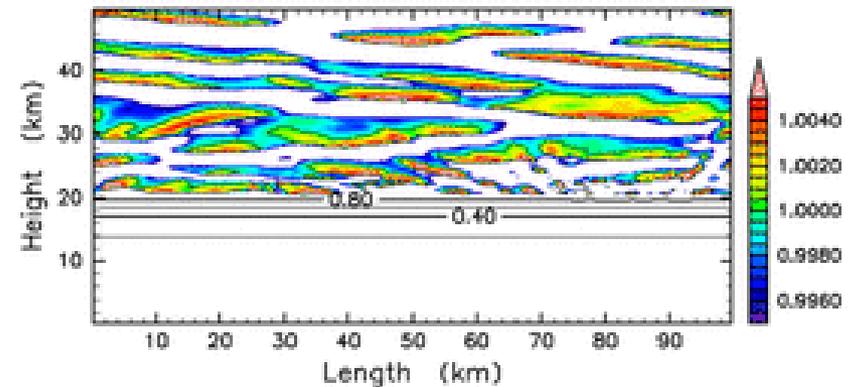
(b) Pot. temp. dev.



(c) Density of cloud



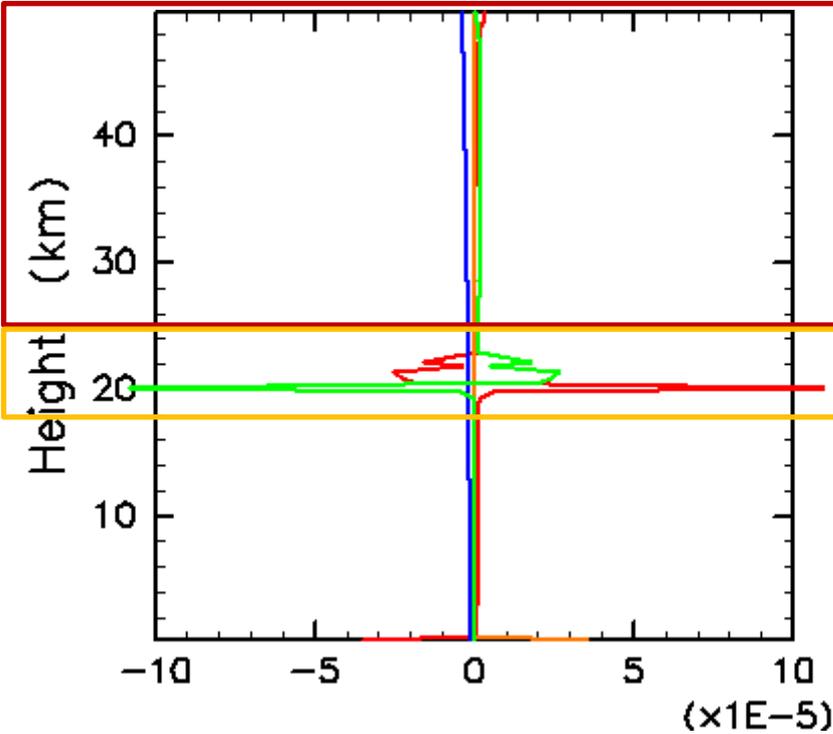
(d) Saturation ratio



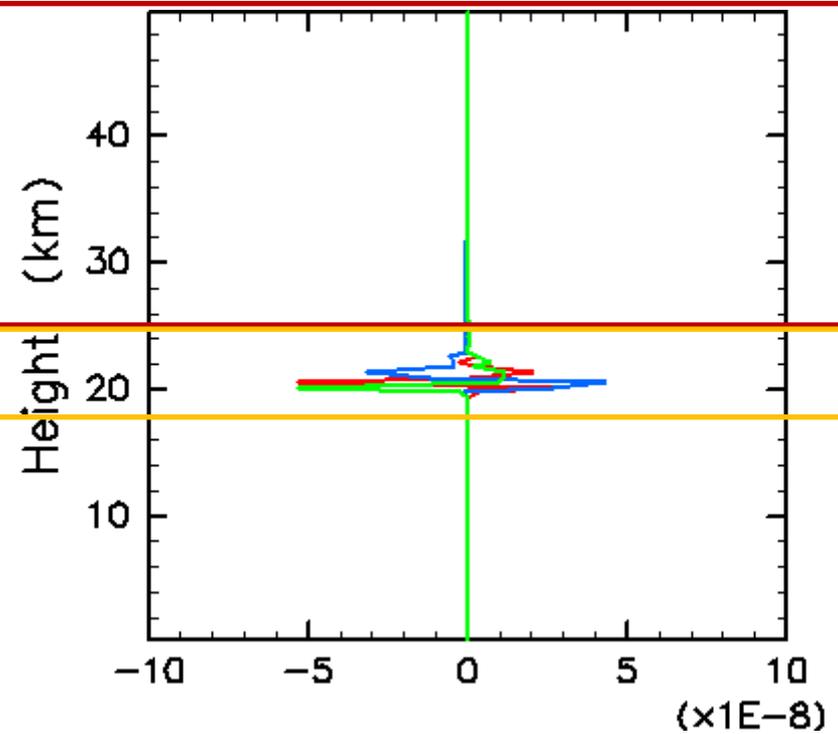
CONTOUR INTERVAL = 2.000E-01

# 熱収支の特徴

## 温位収支(K/s)



## 雲密度収支(kg/m<sup>3</sup>/s)



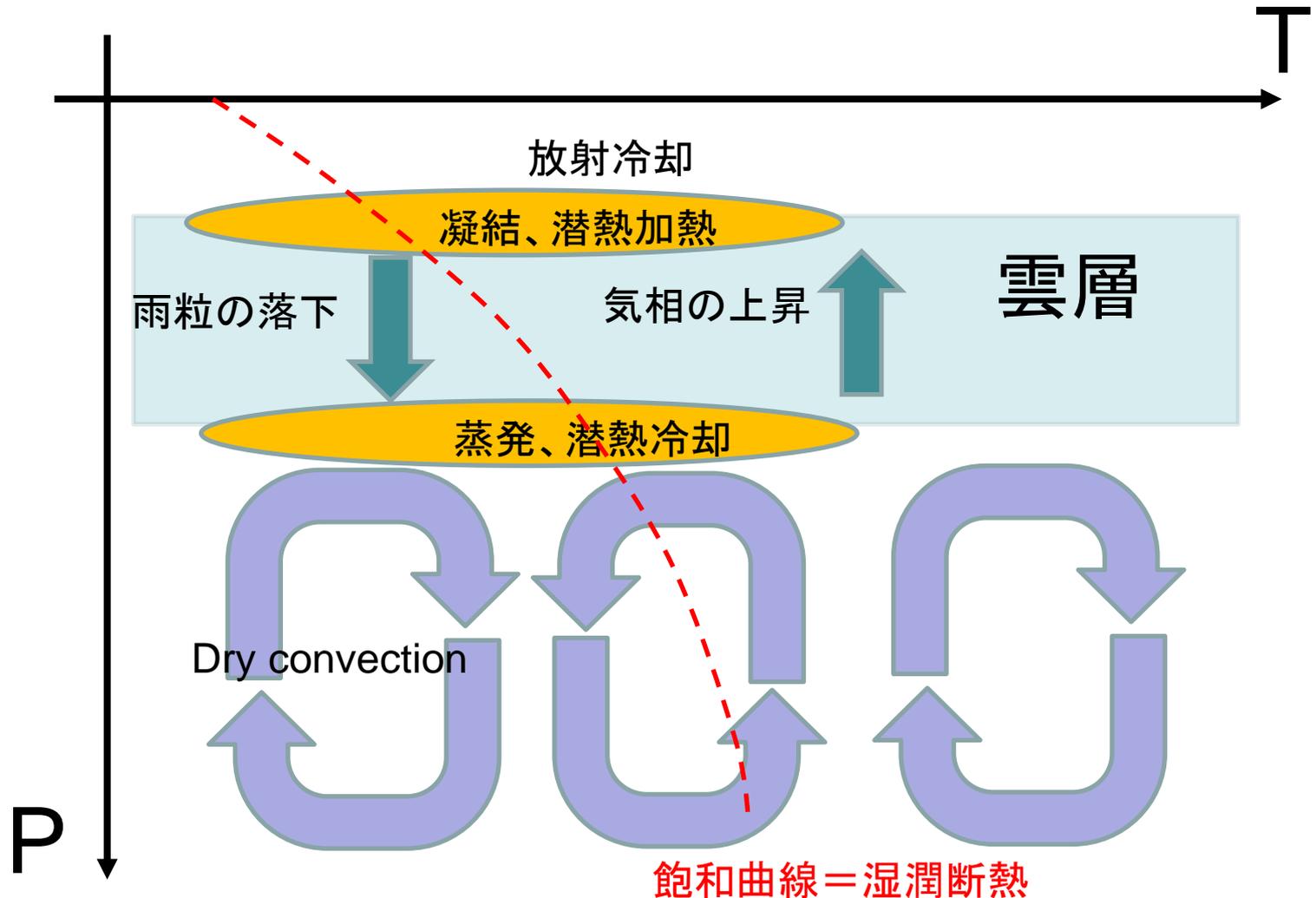
赤: 移流+乱流拡散  
青: 放射冷却  
緑: 潜熱加熱・冷却  
橙: 地表熱フラックス加熱

赤: 移流+乱流拡散  
緑: 潜熱加熱・冷却  
水: 重力落下

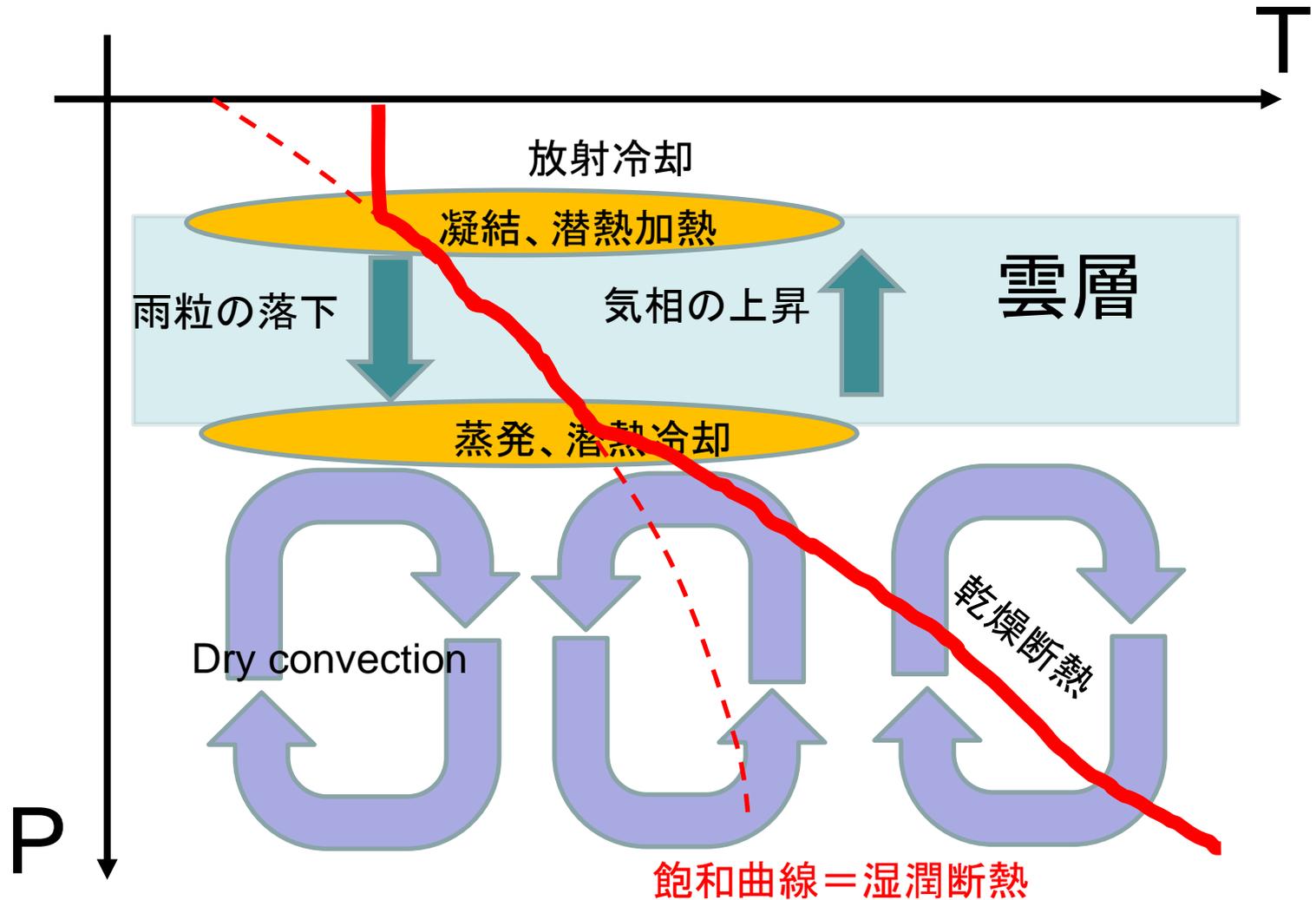
# 雲層の上端で放射冷却すると？

- 運動形態は、先に見せたもの（雲層の中や下でも冷却）とほとんど変わらない。
- 凝結層の雲は分厚い。
- 冷却部分で凝結した雲粒が、凝結層の下まで落下してから蒸発。途中では蒸発しない。
- 蒸発潜熱で冷却されて、凝結層より下の「乾燥対流」が駆動される。この部分の大気は乾燥断熱勾配。

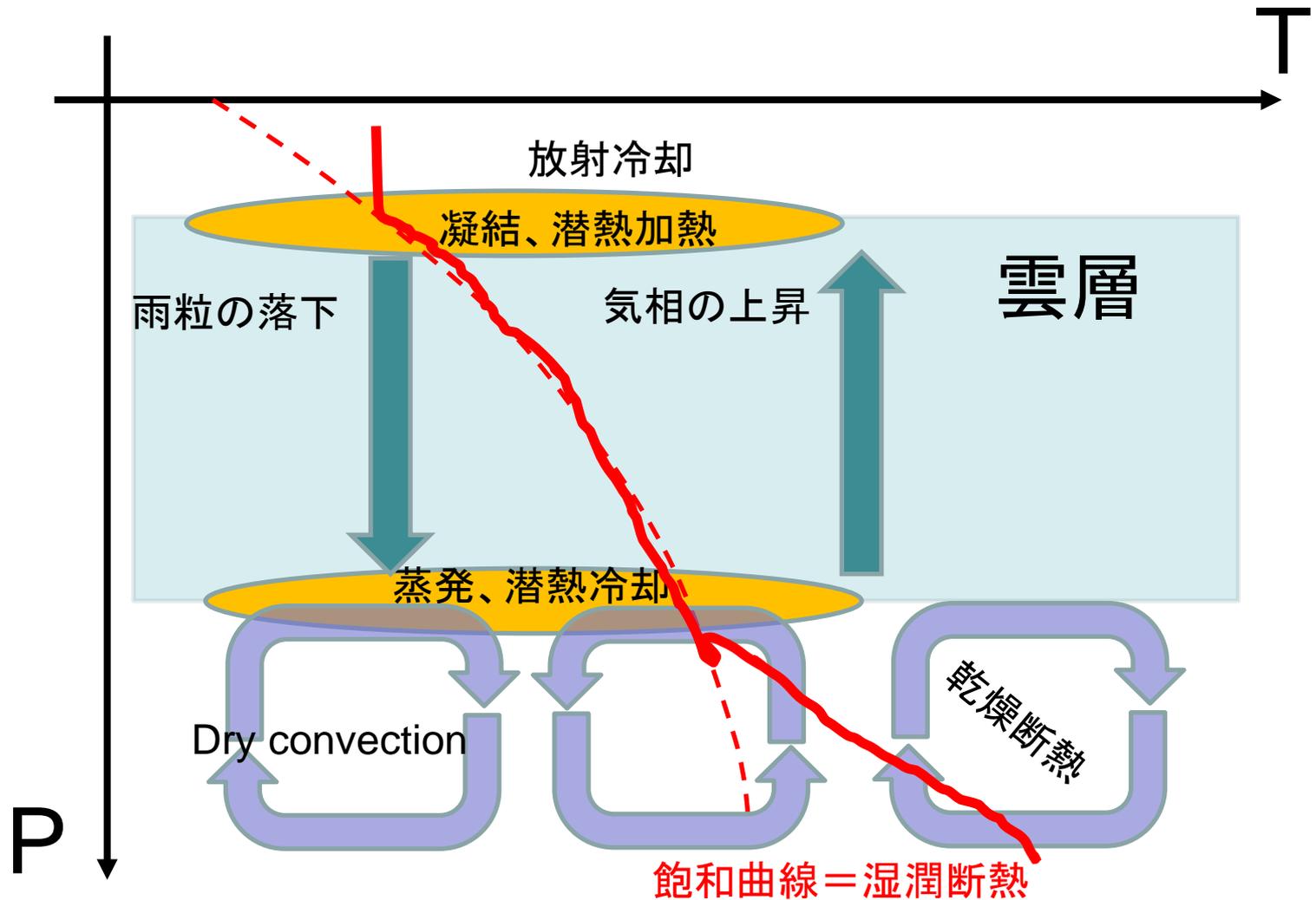
# 主成分凝結大気構造の進化



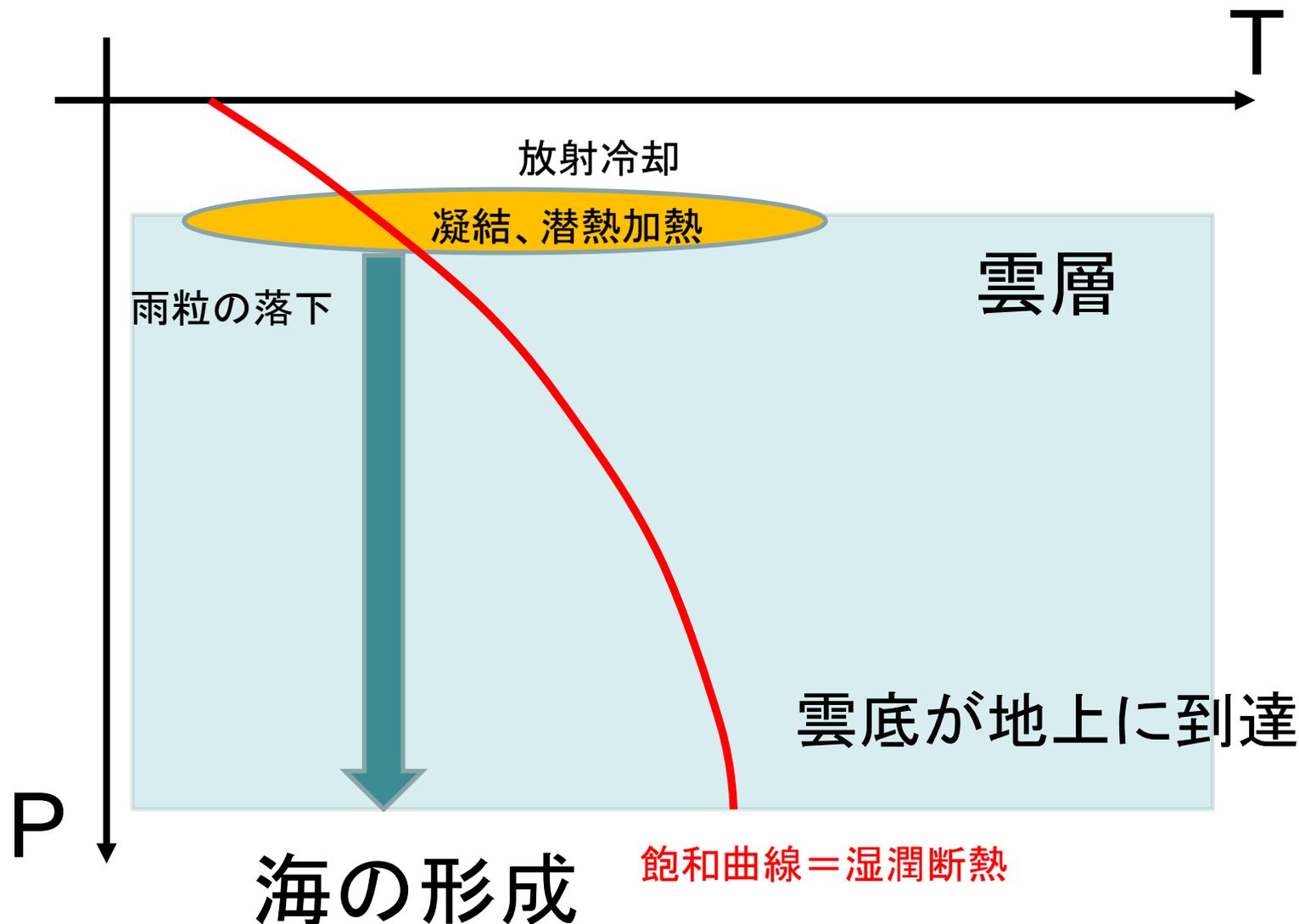
# 主成分凝結大気構造の進化



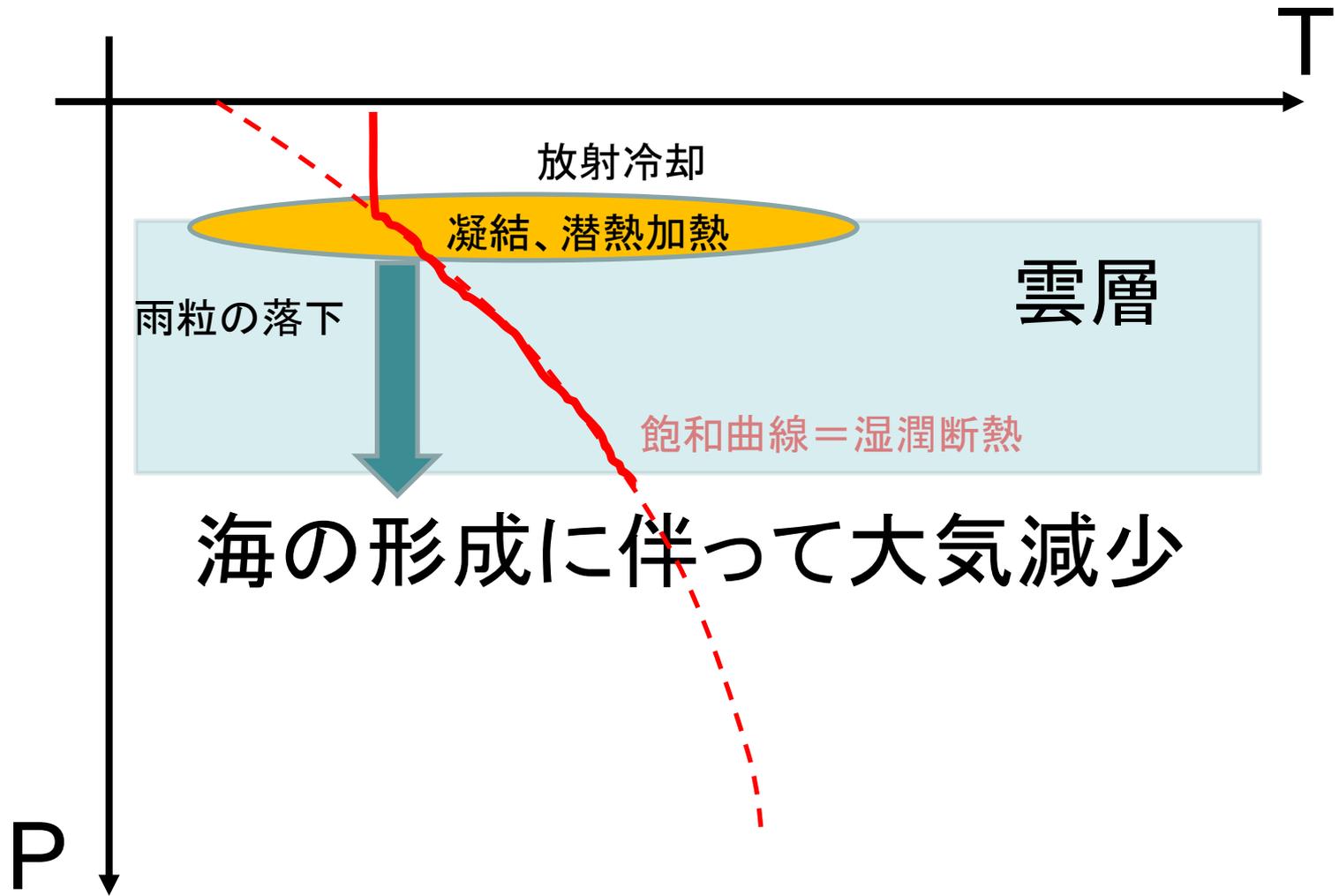
# 主成分凝結大気構造の進化



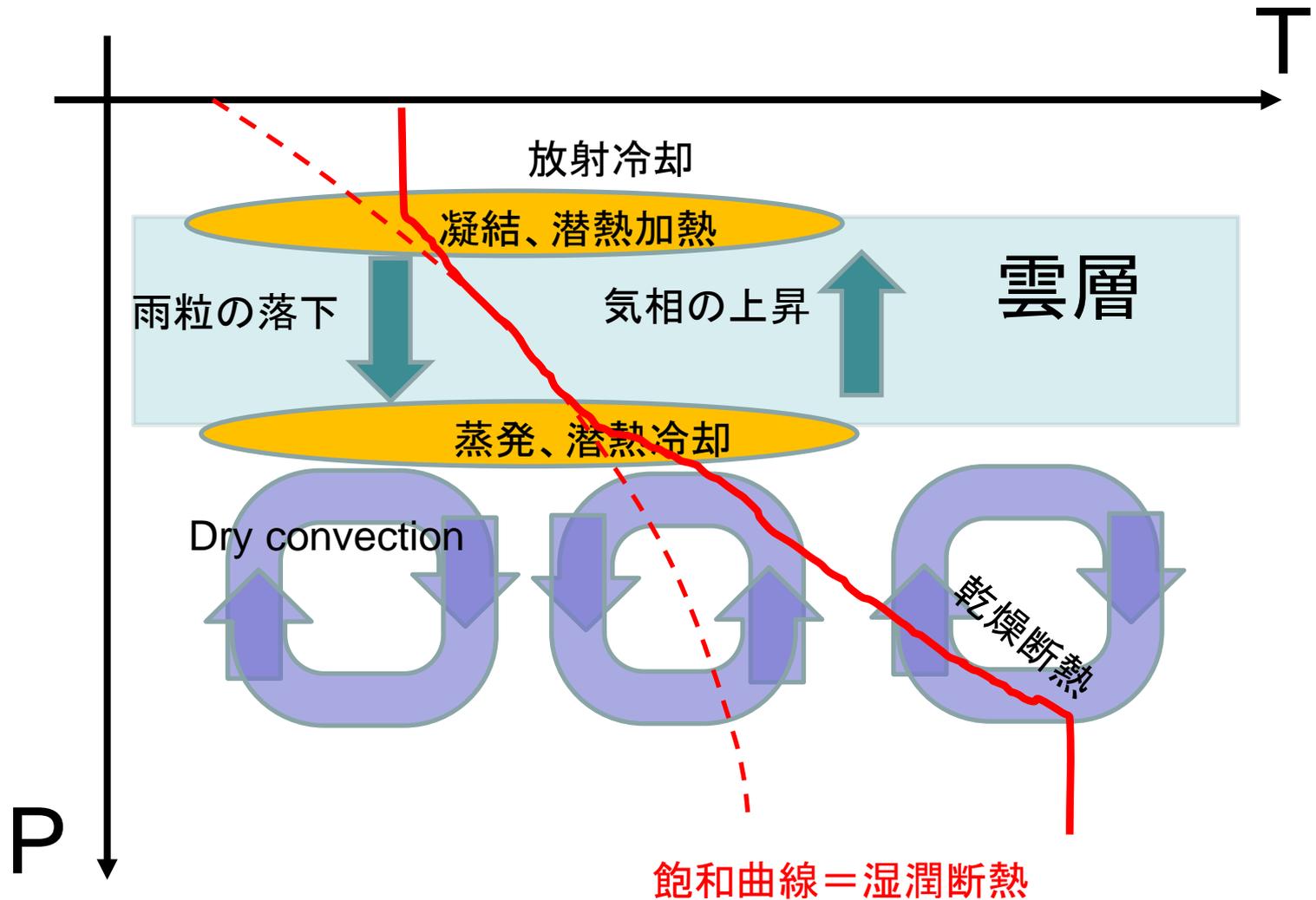
# 主成分凝結大気構造の進化



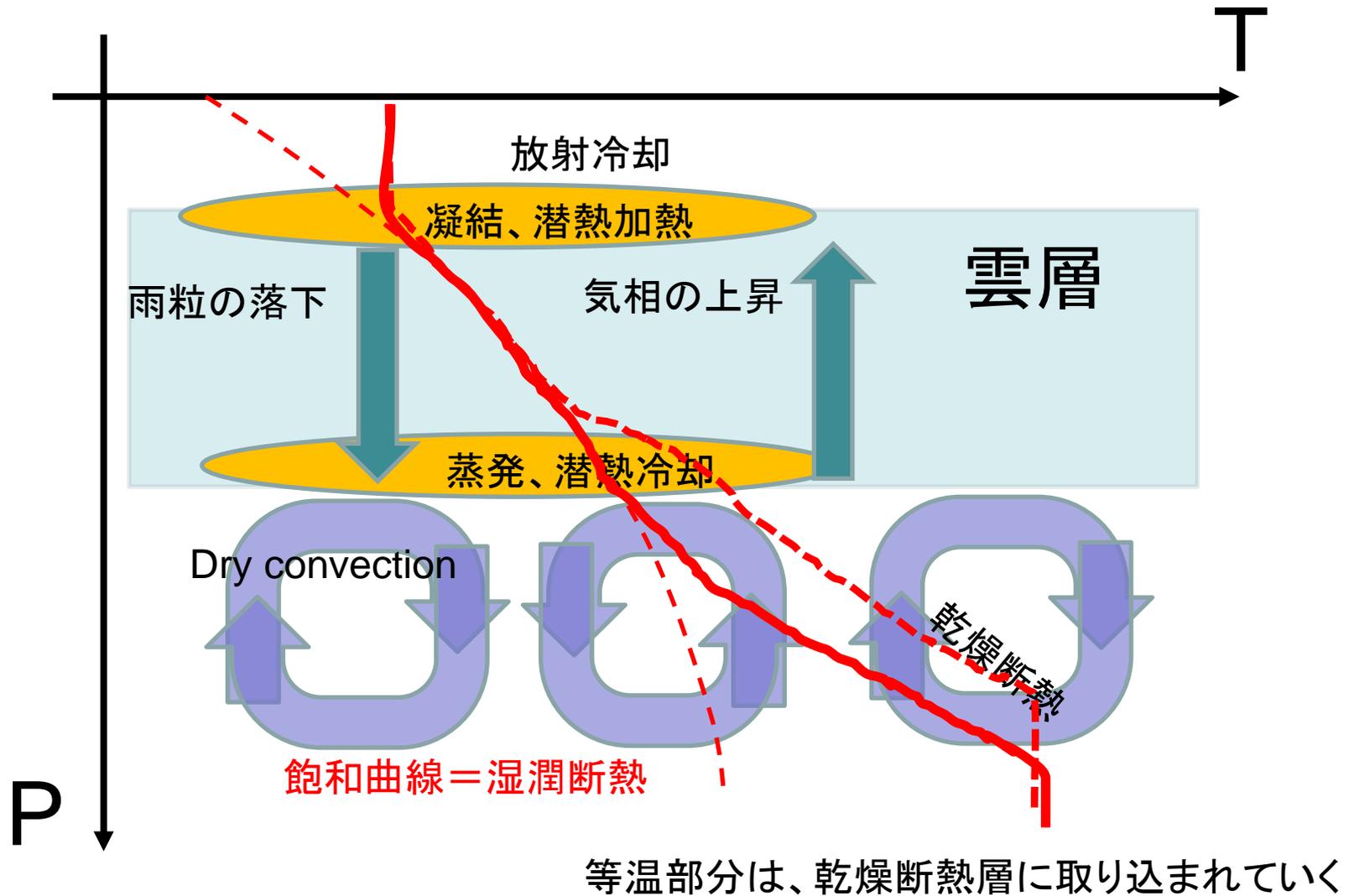
# 主成分凝結大気構造の進化



# 下の方に等温部分があると？



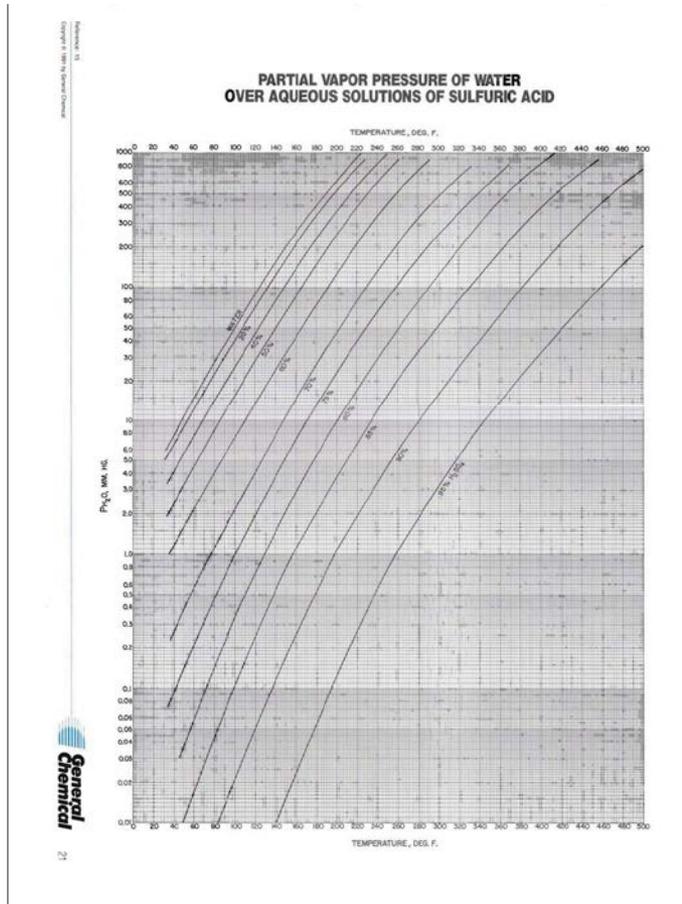
# 下の方に等温部分があると？



# メモ

- 硫黄がものすごく多いとどうなるか？
- 硫酸が大量にできる？
- 硫酸が水を吸って、「雨粒」として落下？
- 大きな粒になるのか？
- 硫酸の海ができて、 $H_2O$  を吸ってしまう？
- そうすると低温になってしまう？
- 硫酸は石を溶かすか？
- 細かい砂にしないと、石の反応は遅い。

# 硫酸の上の水蒸気圧



[http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/SulfuricAcid-Water\\_VaporPressure.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/SulfuricAcid-Water_VaporPressure.pdf)