

巨大惑星の大気における 凝結による対流抑制に関する 数値実験

宮本 彩花

概要

背景、目的

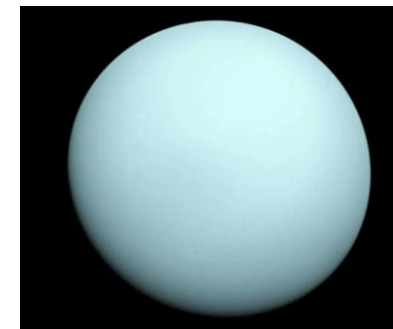
方法

計算結果

まとめと今後の課題

背景 · 目的

背景



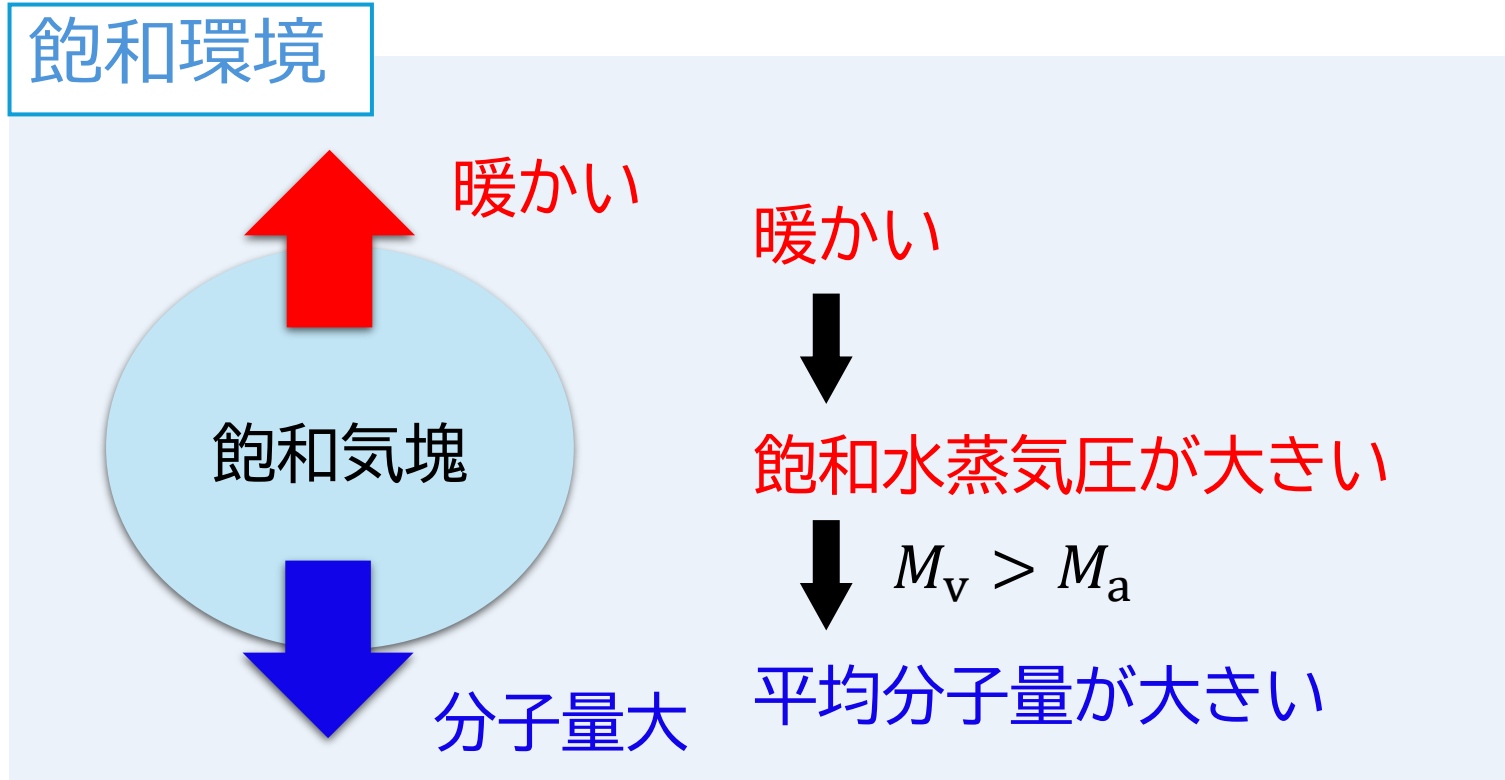
- ▶ 巨大惑星は、水素、ヘリウム、**氷物質**から成る
- ▶ 氷物質は巨大惑星の表層大気中では凝結して雲を形成
- ▶ **凝結成分の分子量が、主成分の分子量より大きい**

	主成分(分子量)	凝結成分(分子量)
地球	N ₂ (28)	H ₂ O (18)
木星, 土星 天王星, 海王星	H ₂ (2), He (4)	H ₂ O (18), NH ₃ (17), CH ₄ (16)

- ▶ **氷物質存在度がある閾値を超えると、対流が抑制される (Guillot, 1995; Leconte et al. 2017)**
- ▶ 凝結層で対流によるエネルギー輸送が阻害。内部の組成・温度構造の観測的推定は困難に。

氷物質存在度がある閾値を超えると、 対流は抑制される (Guillot, 1995; Leconte et al, 2017)

高温の気塊が「軽い」とは限らない



対流抑制条件

$$q_v \left(1 - \frac{M_a}{M_v} \right) \frac{M_v L}{RT} > 1$$

q_v : 蒸気混合比

M_a : 主成分の分子量

M_v : 凝結成分の分子量

L : 潜熱

どのくらい凝結物があれば対流は抑制される？

	CH ₄	NH ₃	H ₂ O	Fe
$\varpi \equiv (M_v - M_a)/M_v$	0.85	0.86	0.87	0.96
$T_{\text{ref}}(K)$ 露点温度	80 _(u)	150	300	3500
$M_v L / RT_{\text{ref}}$	12.	19.	16.	12.
Critical mixing ratio (q_{cri})	0.10	0.062	0.070	0.089
Enrichment over solar	40.	78.	9.9	74.

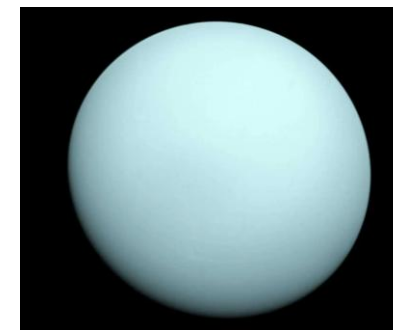
(Leconte et al. 2017)

H₂O 混合比の推定値 (×solar)

- ・木星, 土星… 大体 10 ?
- ・天王星, 海王星… 大体 100 ?

H₂O 雲層でほぼ確実に対流抑制が起こっている

背景



- ▶ 巨大惑星は、水素、ヘリウム、氷物質から成る
- ▶ 氷物質は巨大惑星の表層大気中では凝結して雲を形成
- ▶ 凝結成分の分子量が、主成分の分子量より大きい

	主成分(分子量)	凝結成分(分子量)
地球	N ₂ (28)	H ₂ O (18)
木星, 土星 天王星, 海王星	H ₂ (2), He (4)	H ₂ O (18), NH ₃ (17), CH ₄ (16)

- ▶ 氷物質存在度がある閾値を超えると、対流が抑制される (Guillot, 1995; Leconte et al. 2017)
- ▶ 凝結層で対流によるエネルギー輸送が阻害される。内部の組成・温度構造の観測的推定は困難に。

1次元熱力学モデル (Leconte et al. 2017)

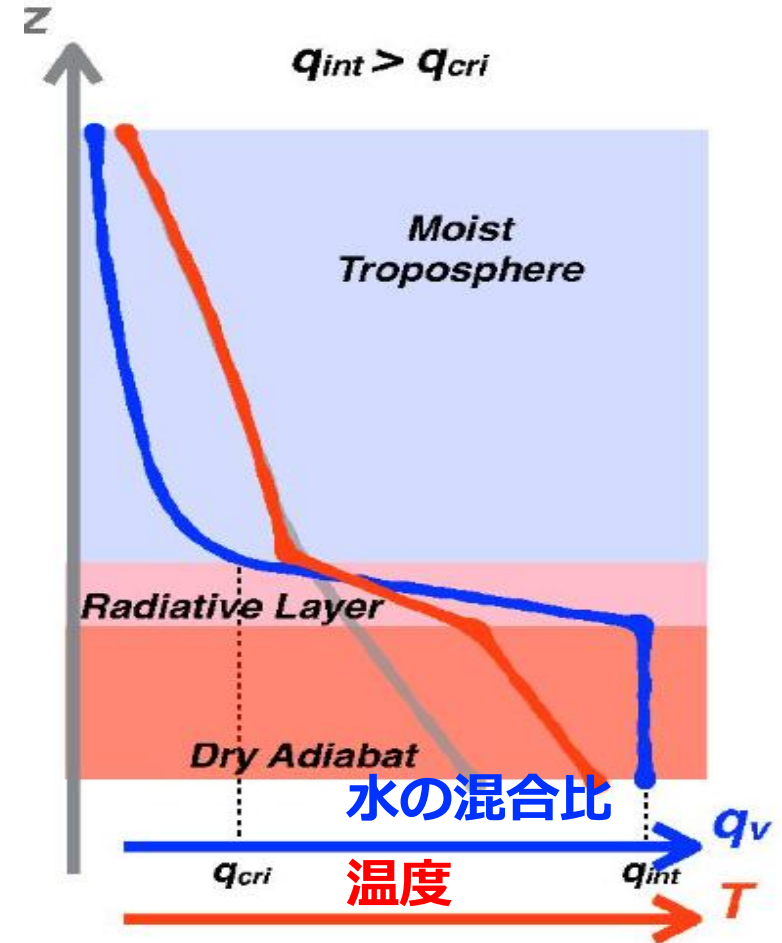
- ▶ 静水圧平衡・熱平衡。
- ▶ 凝結高度以上で常に飽和。
- ▶ 上部境界条件を与え、下向きに計算。
- ▶ 水蒸気混合比 $q_v =$ 臨界混合比 q_{cri} になれば、対流は禁止され、放射がエネルギーを輸送する。
- ▶ 放射層の温度分布:

$$\text{拡散近似 } \nabla_{\text{rad}} \equiv \frac{3}{16} \frac{p \kappa_R}{g} \frac{F_{\text{int}}}{\sigma_{\text{SB}} T^4}$$

F_{int} : 惑星の内部冷却フラックス W m^{-2}

σ_{SB} : ステファン・ボルツマン定数

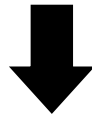
κ_R : ロスランド平均不透明度



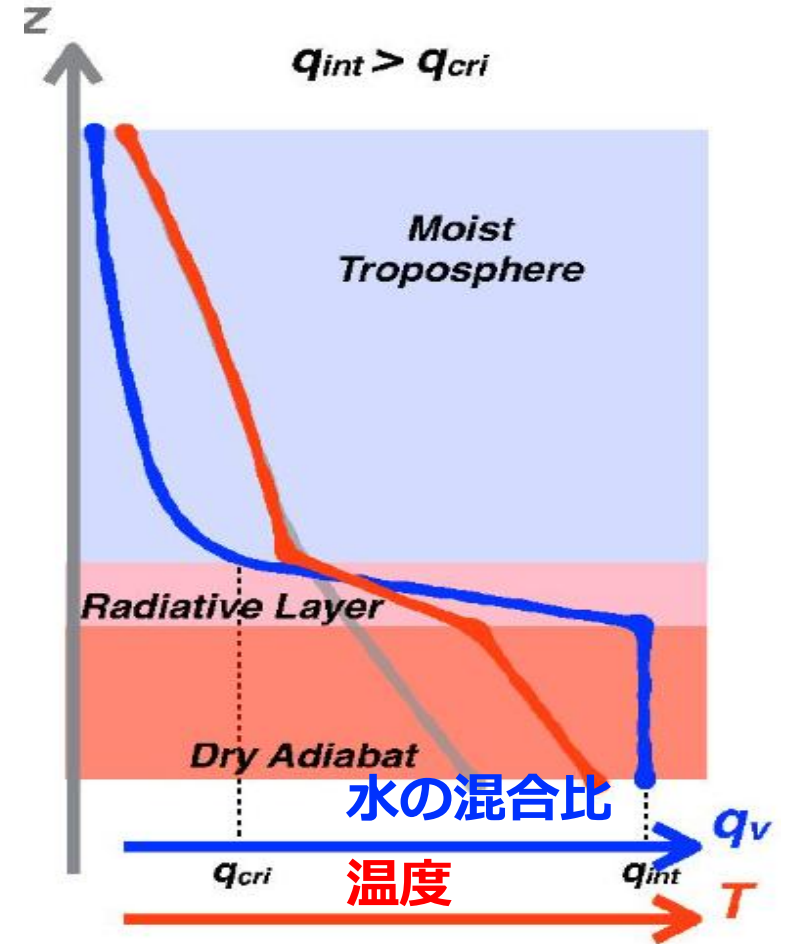
放射層が形成される3層構造

先行研究の問題点

- ▶ 鉛直 1 次元熱力学モデルによる計算。
- ▶ 運動の効果に関する考察が不十分。雲対流が対流抑制層・乾燥対流層に与える影響が考慮されていない。
- ▶ 降水による物質輸送、潜熱輸送の影響が考慮されていない。



対流運動を陽に表現した流体力学モデル計算



放射層が形成される 3 層構造

本研究の目的

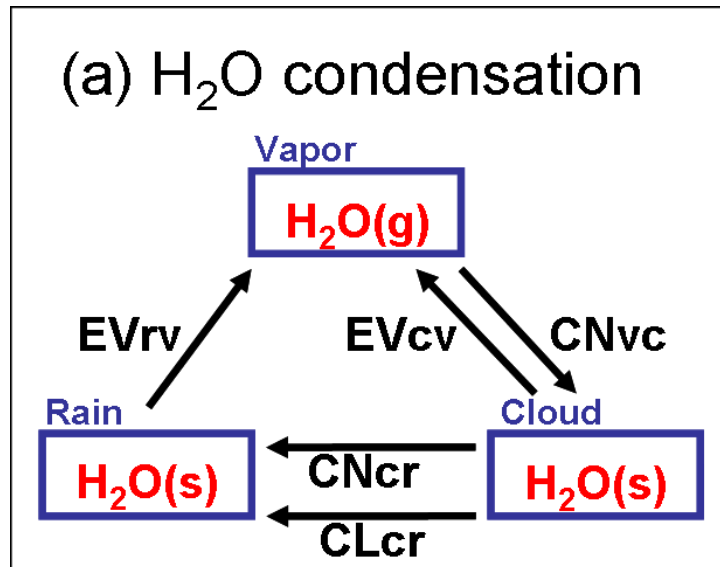
- ▶ 流体力学モデル (2次元雲対流モデル deepconv) を使用、対流抑制実験を実施。
- ▶ 対流抑制条件下での運動構造・エネルギー輸送構造、降水過程の役割を調査。

数值実験

2次元雲対流モデル deepconv

(Sugiyama et al. 2014)

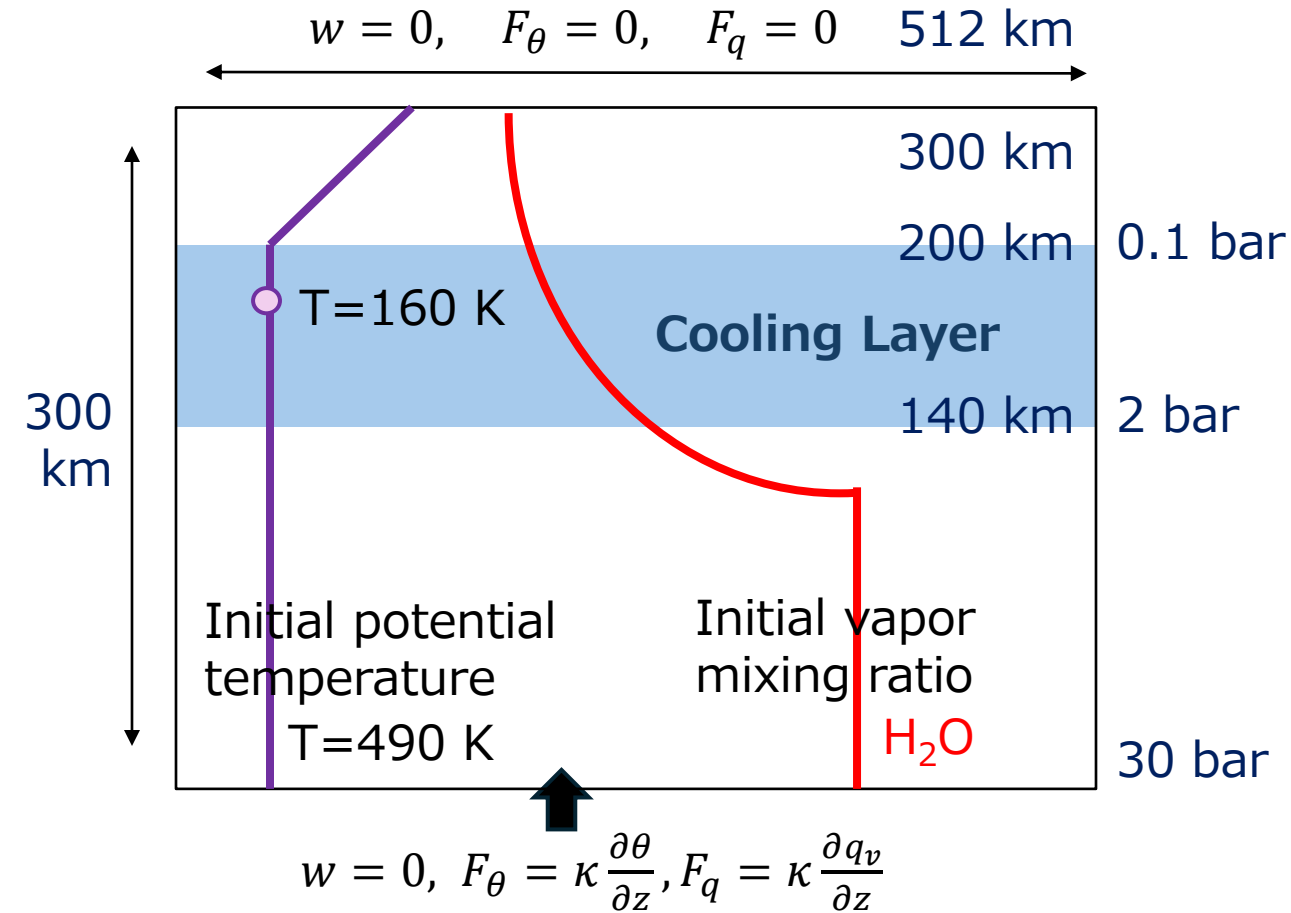
- 雲生成と雲物理過程を含む流体力学モデル
- 基礎方程式系: 準圧縮方程式系 + 凝結成分の保存式
- 雲微物理過程: 地球の雲モデルで利用されている Kessler (1969)
- 本研究では、凝結成分は H_2O のみ



- 水蒸気と凝結物がある
- 凝結物は、雲(落下しない)と雨(落下する)の2種類
- 雲から雨への変換が「雲微物理」
- 雨は不飽和の場所では蒸発する

計算設定

基本的には Sugiyama et al. (2014) と同じ



- 領域: 水平 512 km、鉛直 300 km (30-0.01 bar)
- 解像度: 2 km
- 積分時間: 約 1000 日
- 大気組成:
 - H₂, He, H₂O×40 (Sugiyama et al. (2014) の 10 倍実験よりもある程度大きく、対流抑制が容易に起こる量。)
- 放射強制: 140-200 km (2-0.1 bar) に水平一様 **-1 K/day** の強制 (現実的な値の 100 倍。計算を加速。)

結果

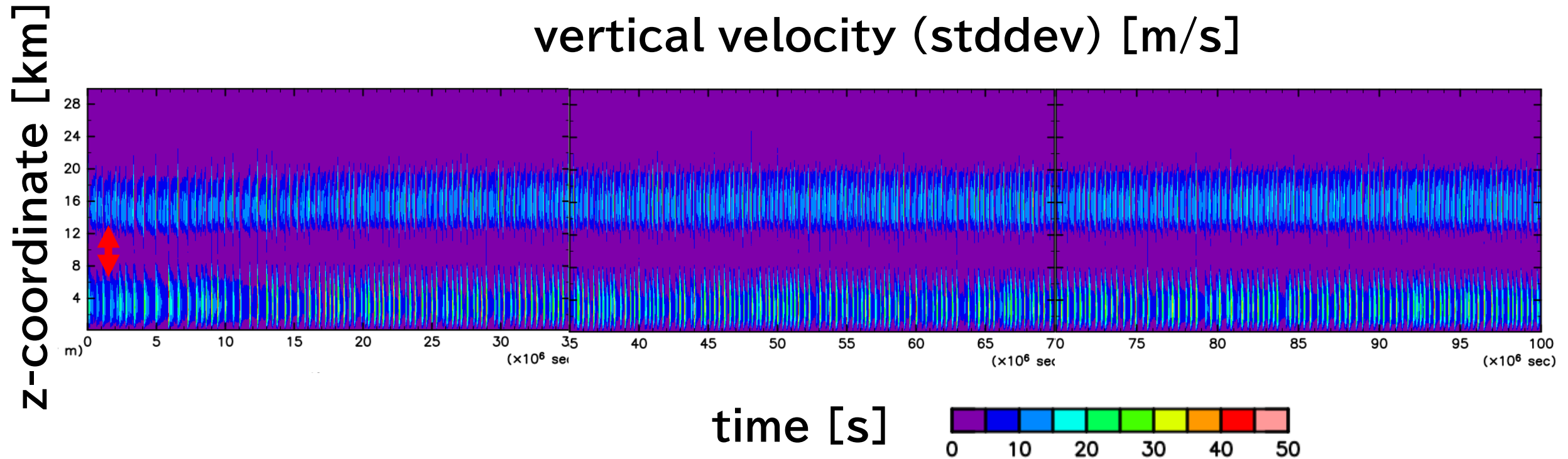
大気構造の時間発展

対流が抑制されているか？ Yes

準定常状態に至ったか？ Yes

エネルギー輸送は抑制されるのか？ No(意外にも)

対流の強度の時間発展



- ・ 高度 80-120 km (8-5 bar) で対流が抑制されている

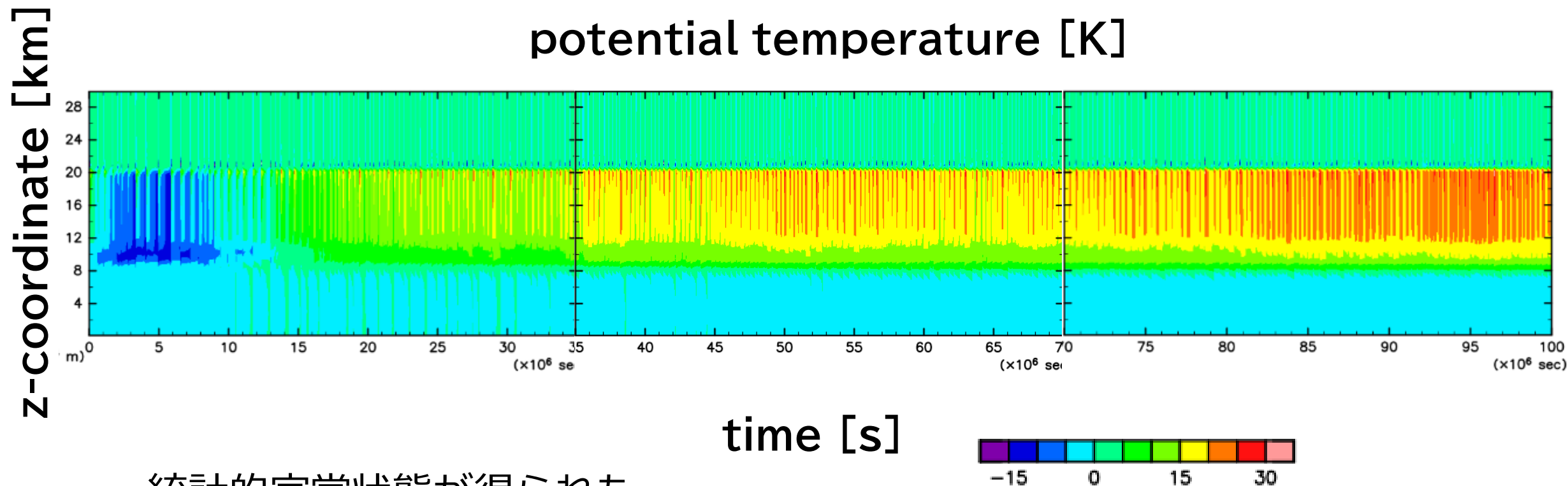
大気構造の時間発展

対流が抑制されているか？ Yes

統計的定常状態に至ったか？ Yes

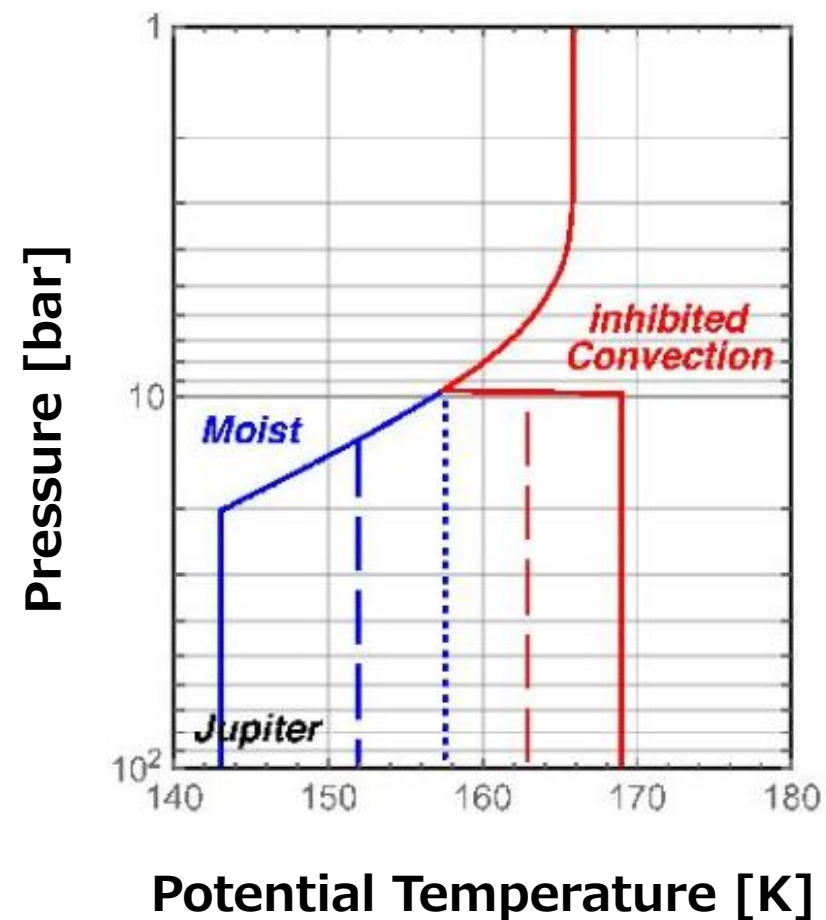
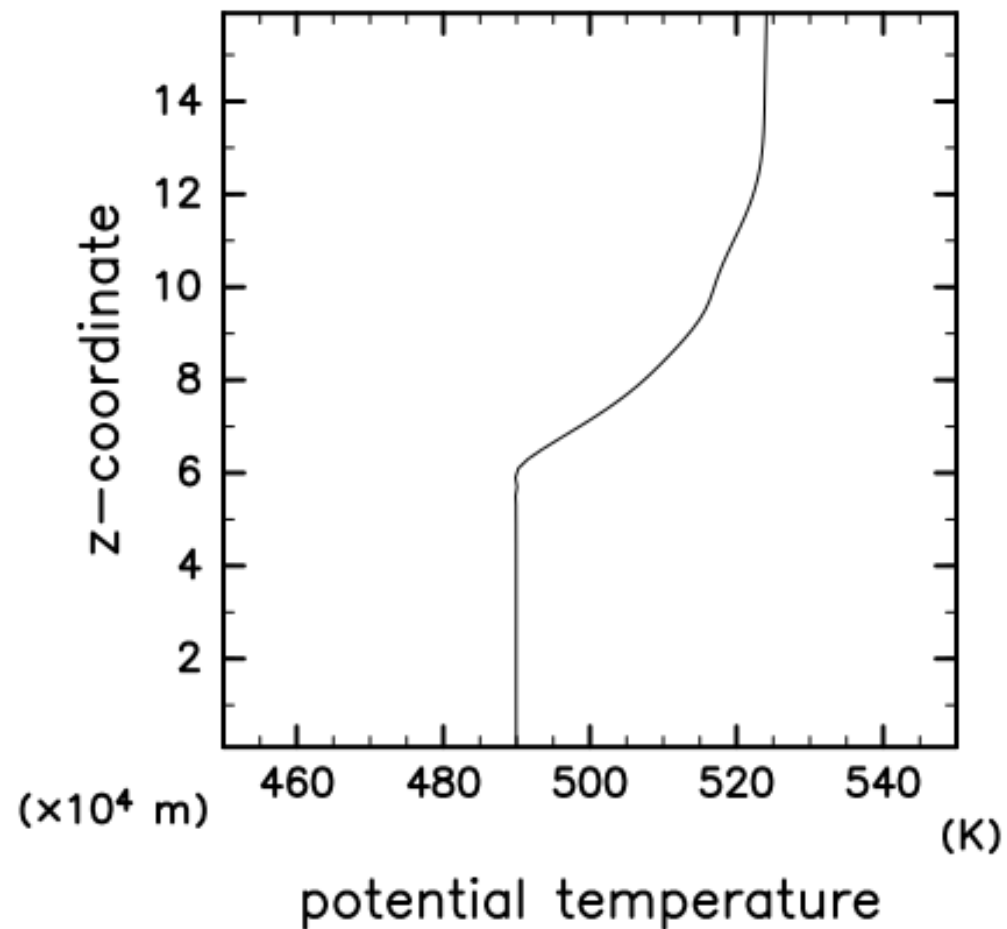
エネルギー輸送は抑制されるのか？ No(意外にも)

温位偏差(水平平均) の時間発展



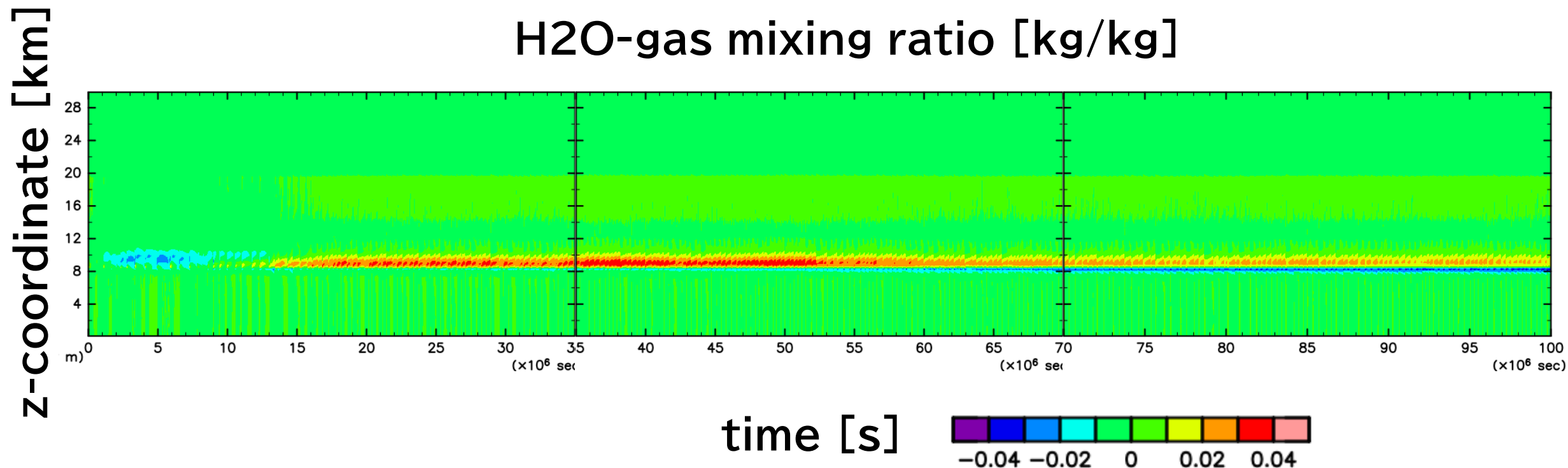
- 統計的定常状態が得られた
- 温位は徐々に上昇
- Leconte et al. (2017): 対流抑制層で温位は高度とともに減少 (<-逆の結果)

統計的定常状態の温位の鉛直分布: 温位が高度とともに上昇



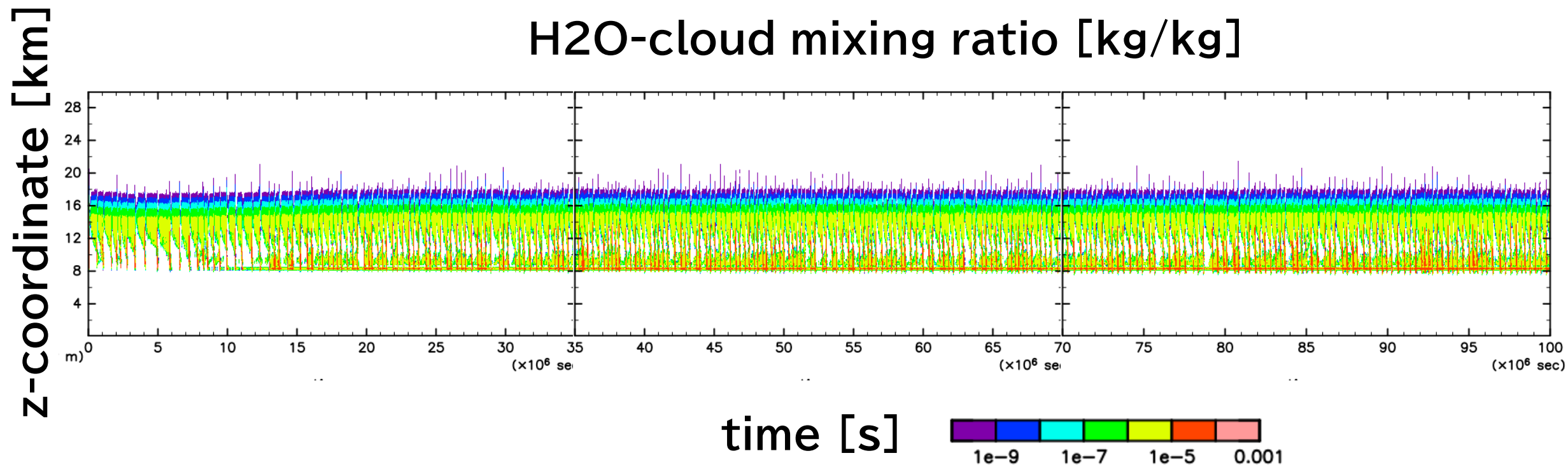
Leconte et al (2017)

水蒸気混合比偏差(水平平均) の時間発展



- ・ 対流抑制層にて、温度変化に伴う変化

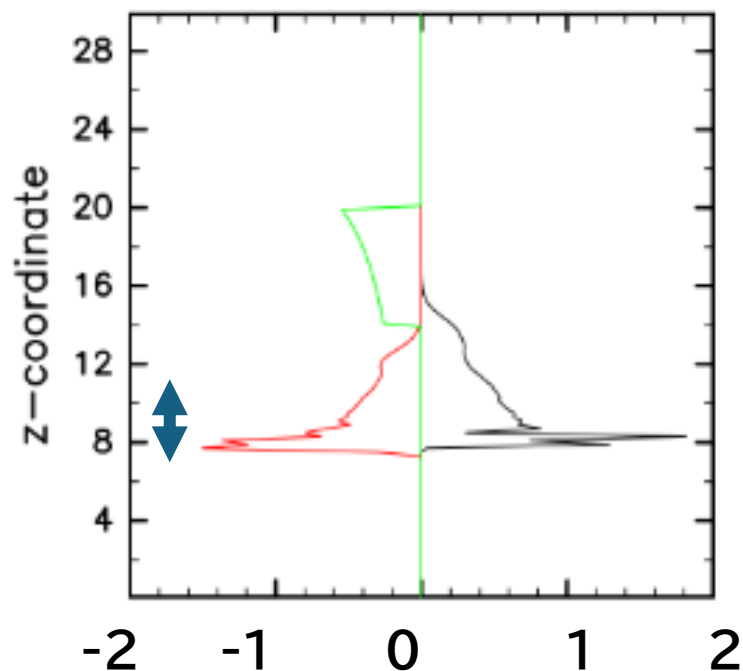
雲の混合比(水平平均) の時間発展



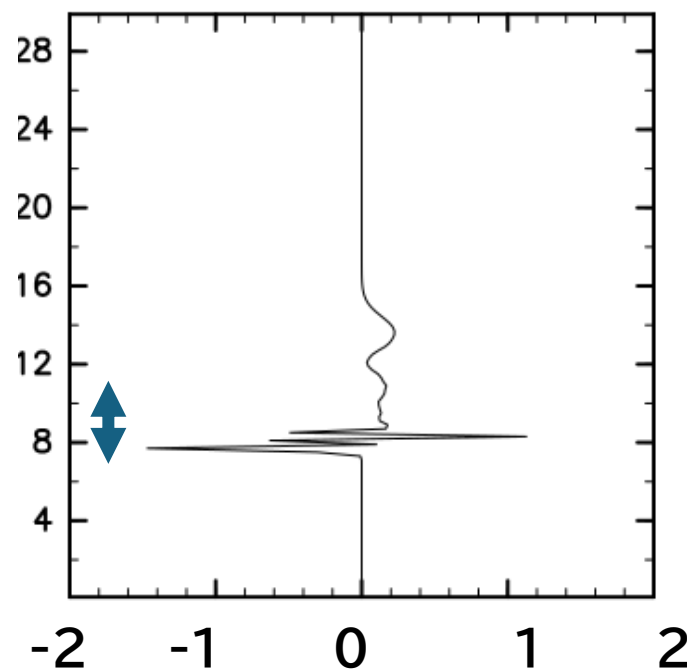
熱輸送・水輸送 (統計的定常状態)

熱収支への各過程の寄与 (1.0e7 秒間の平均)

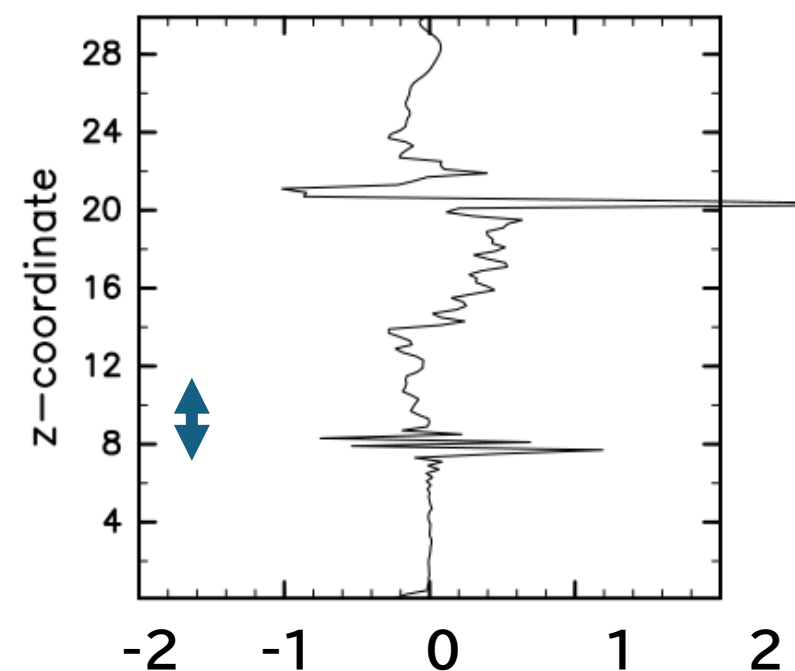
凝結項, 蒸発項, 放射項



凝結項+蒸発項



移流項



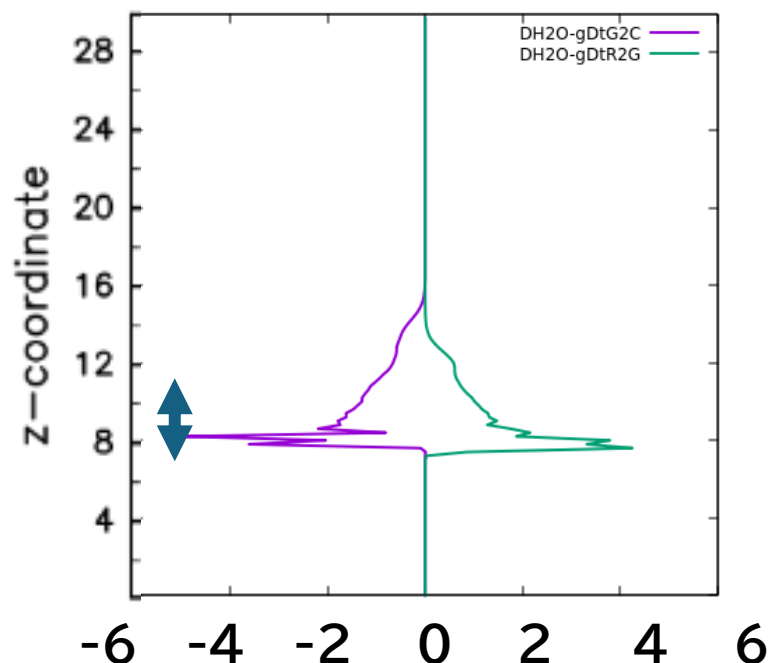
10
[km]

10^{-4} [K/s]

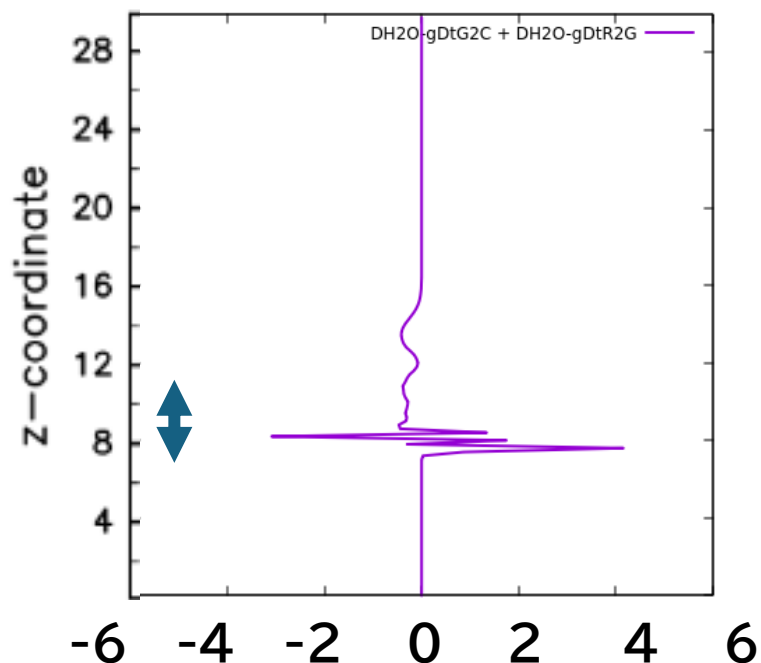
- 凝結高度以上で、凝結加熱が大きい
- 凝結加熱は移流によって輸送され、放射冷却と大体釣り合う

水蒸気収支への各過程の寄与 (1.0e7 秒間の平均)

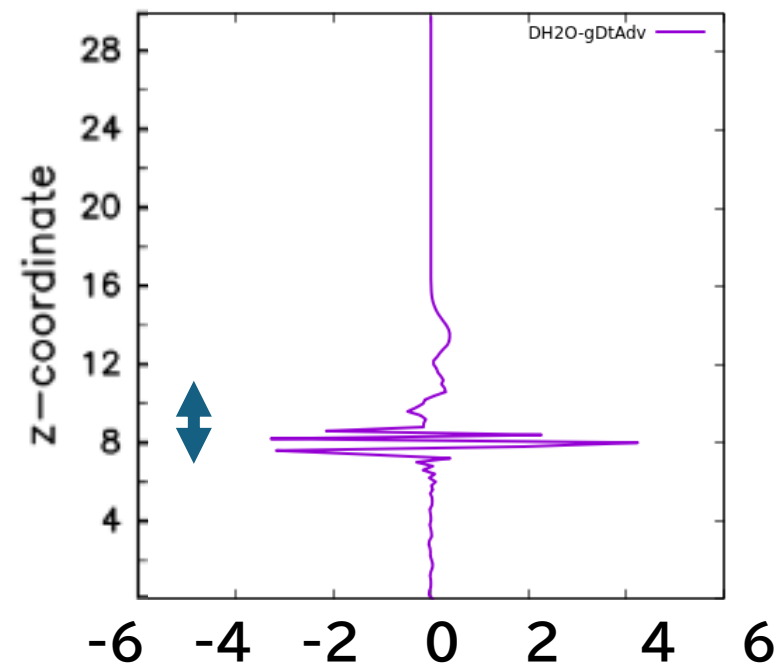
凝結項, 蒸発項



凝結項+蒸発項



移流項



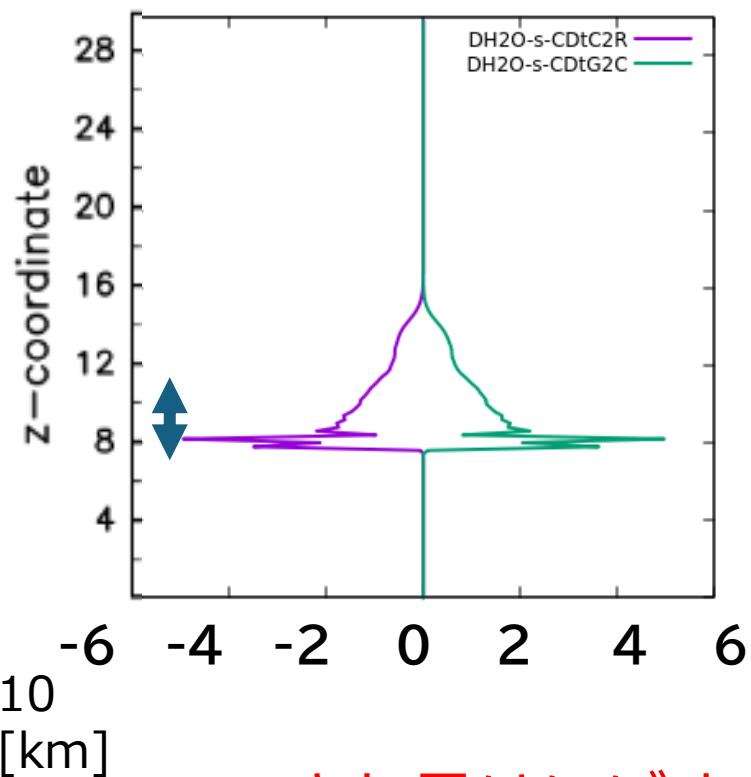
10
[km]

$10^{-7} [\text{kg/kg} \cdot \text{s}]$

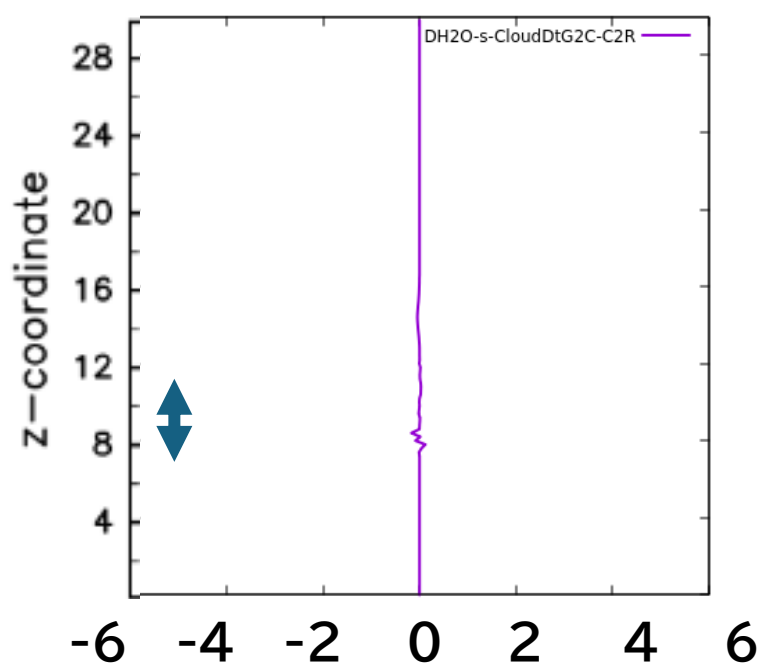
- 凝結高度以上では凝結項が大きい。
- 移流の寄与が大きい。湿潤層で蒸気は上方へ輸送されている。

雲収支への各過程の寄与 (1.0e7 秒間の平均)

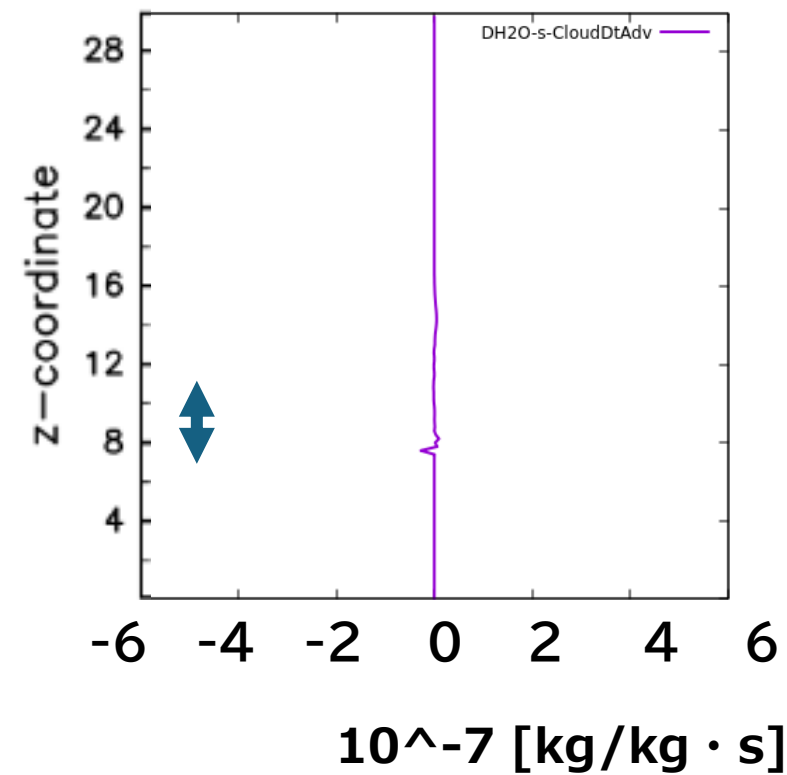
雨への変換項, 凝結項



雨への変換項, 凝結項



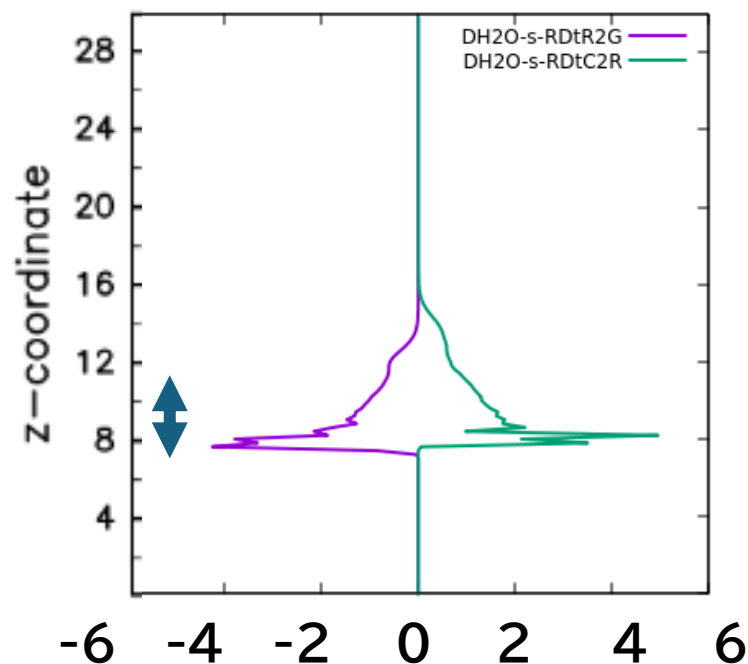
移流項



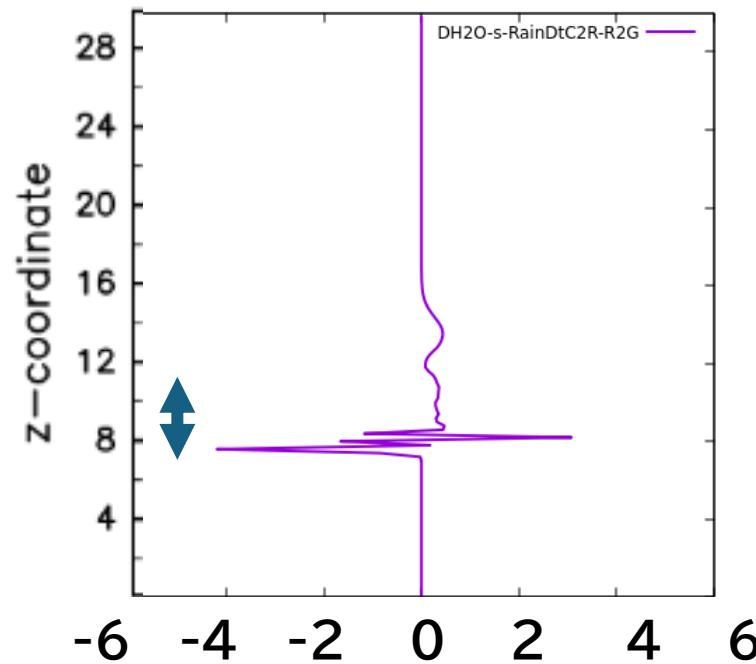
• できた雲はほぼすべて雨へ

雨収支への各過程の寄与 (1.0e7 秒間の平均)

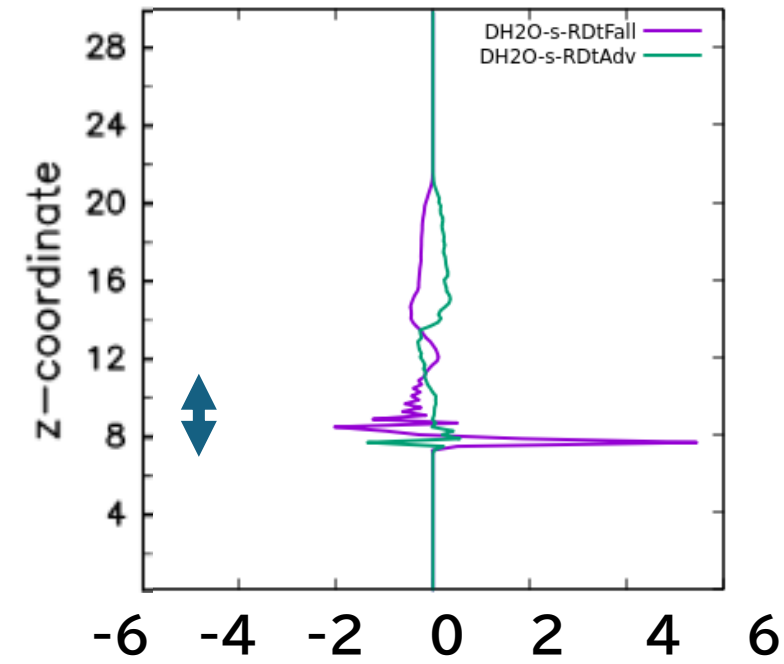
蒸発項, 雨の生成項



蒸発項 + 雨の生成項



落下項, 移流項



10
[km]

10^{-7} [kg/kg · s]

- ・凝結高度以上で雨の生成項が大きい
- ・雨は落下や移流により輸送され、乾燥層へと H2O 供給される

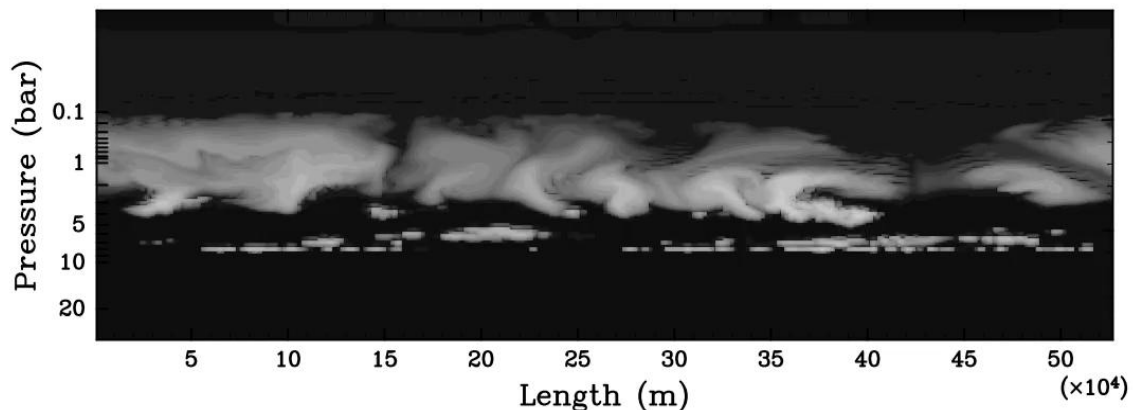
対流運動の様子

対流の様子

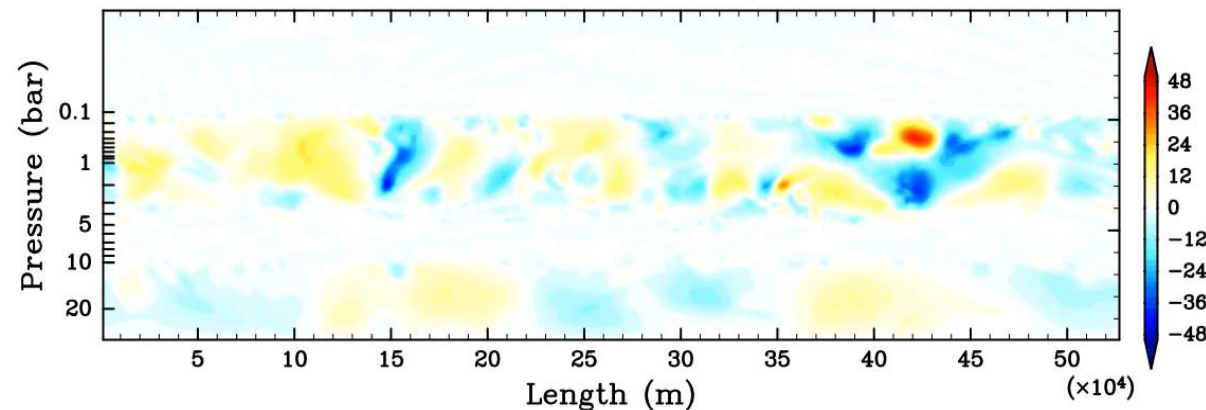
対流抑制層 (8-5 bar)では晴れと雨を繰り返す

t = 100000000.00 sec

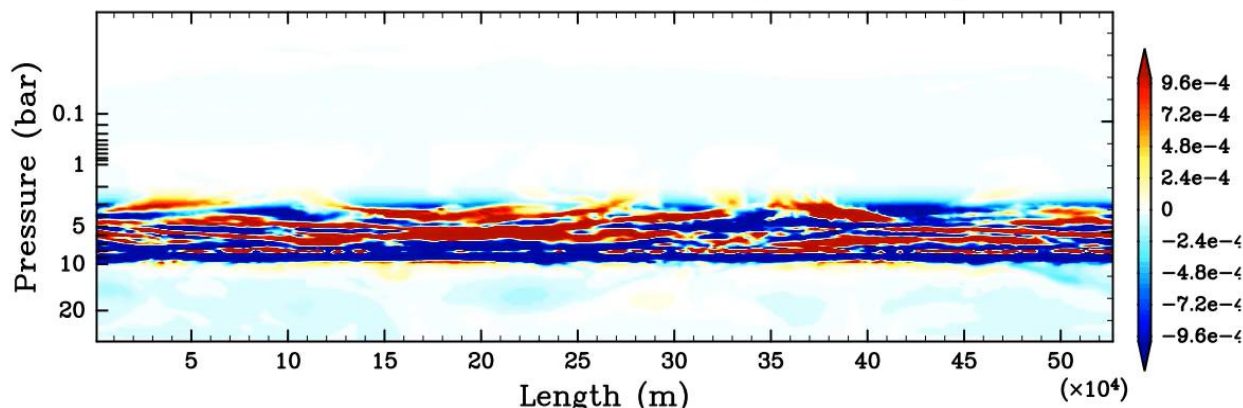
雨 [kg/kg]



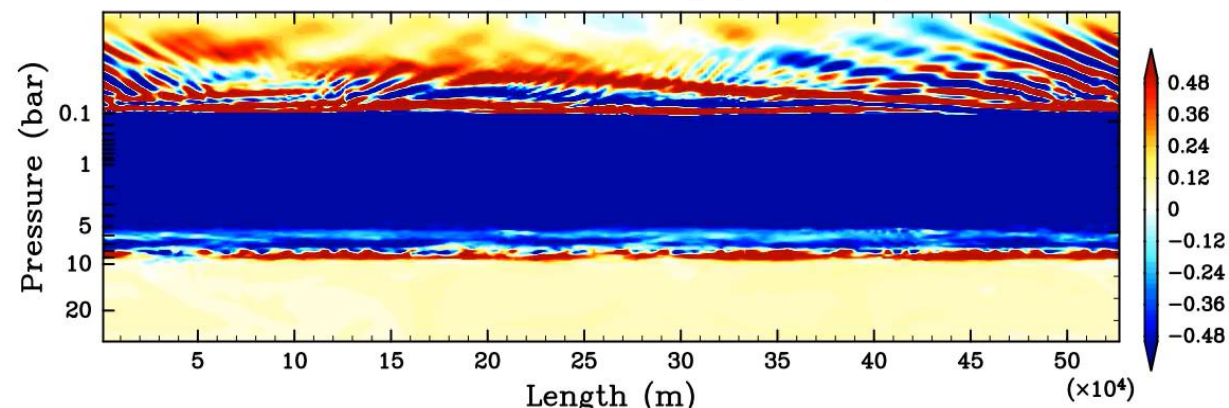
鉛直速度 [m/s]



水蒸気混合比の偏差 [kg/kg] (mean t)



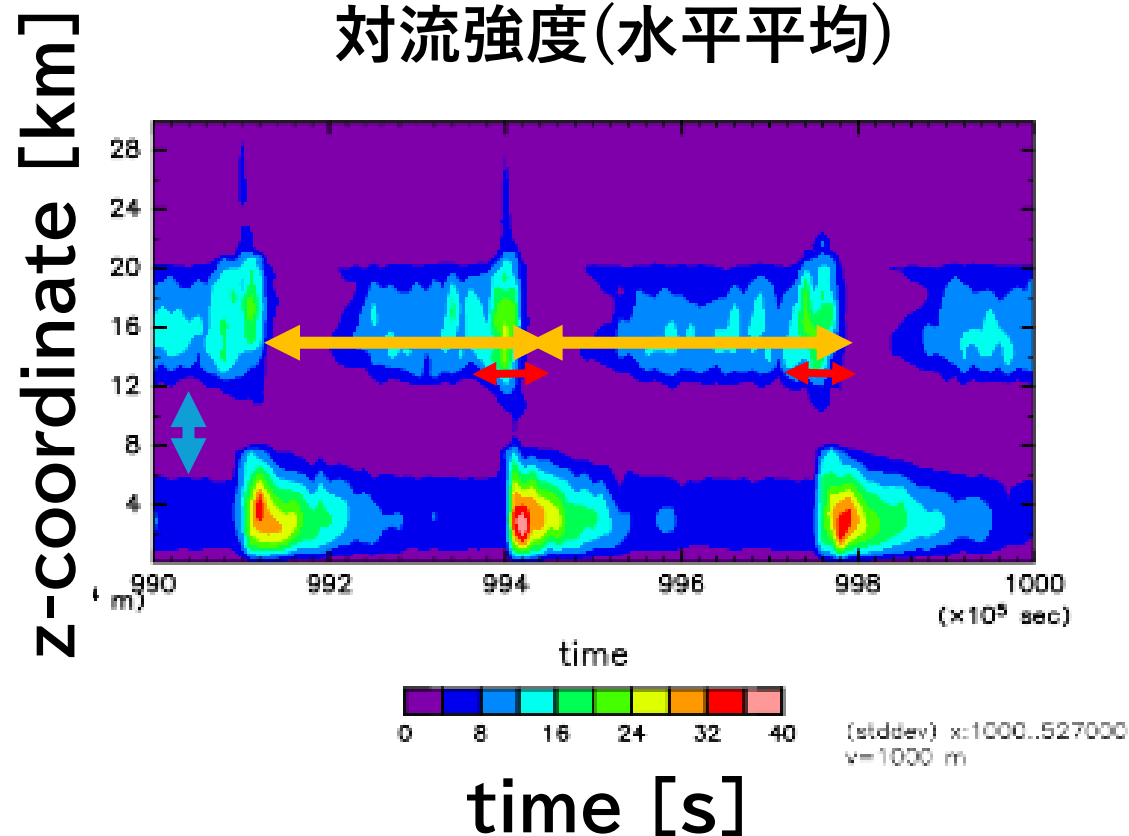
温位偏差 (mean t) [K]



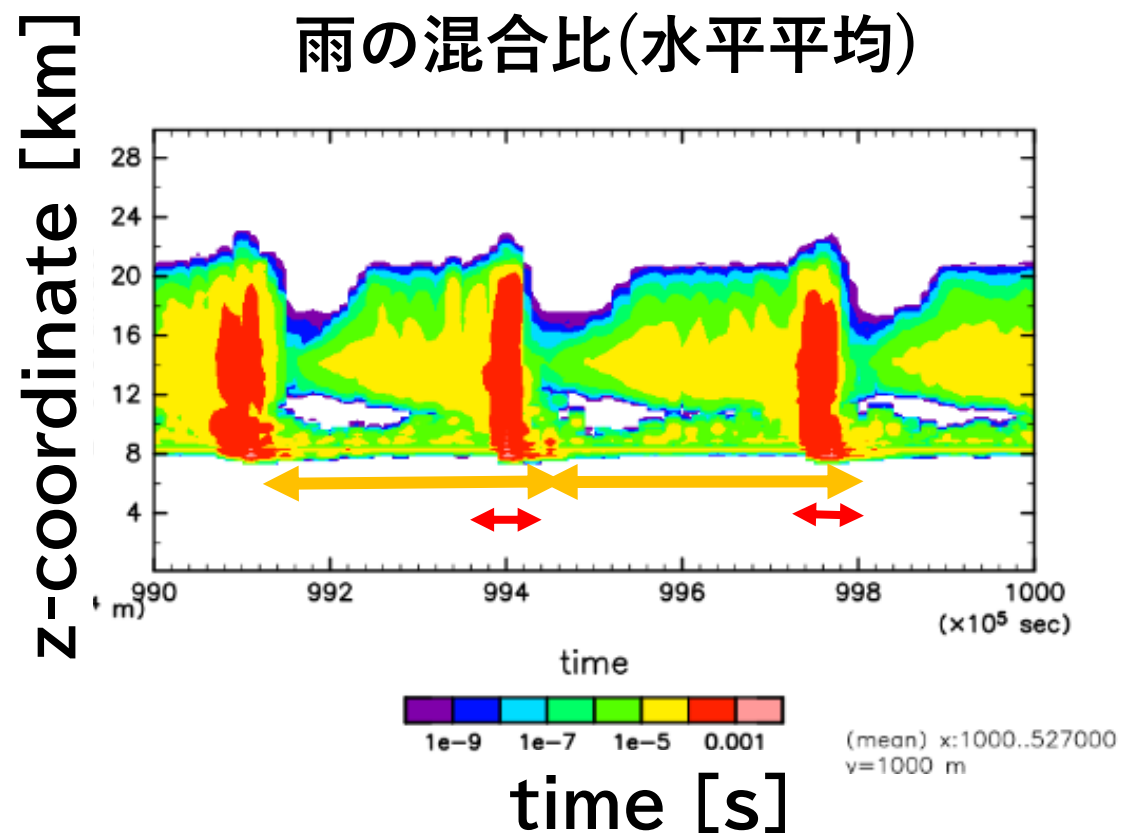
周期的な変動

約3-4日周期の変動

対流強度(水平平均)



雨の混合比(水平平均)

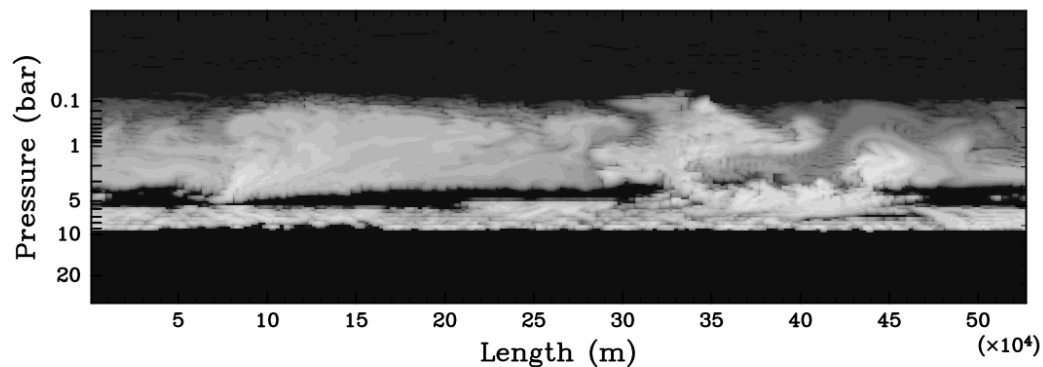


湿潤対流が強まる -> 強い雨が降る -> 乾燥対流が強化 -> 対流抑制層が狭まる

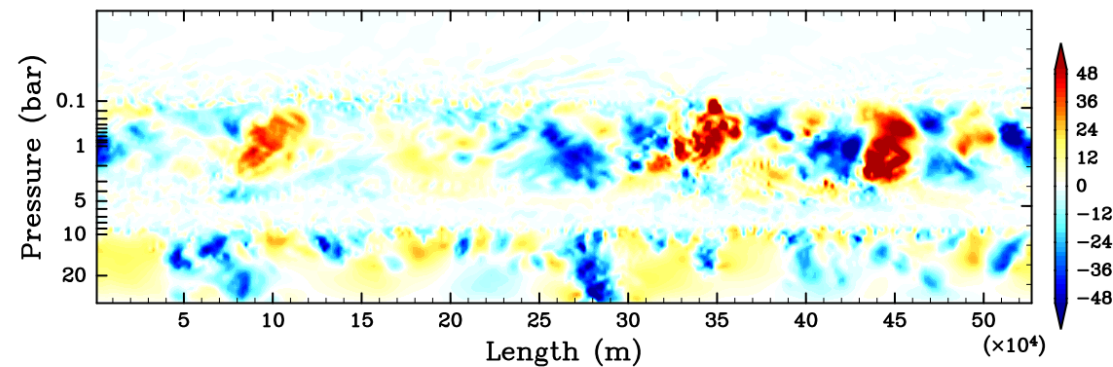
強い雨の期間のスナップショット

乾燥対流層で雨は蒸発し温度は低下、水蒸気混合比は増加

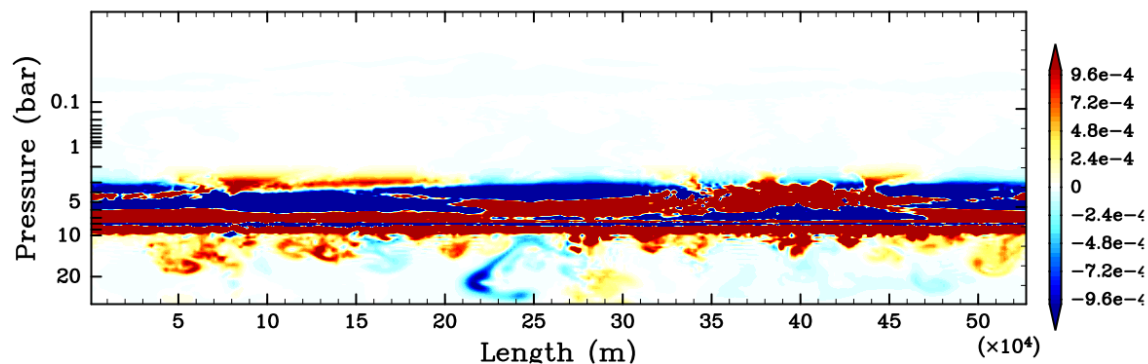
t = 96070000.00 sec 雨 [kg/kg]



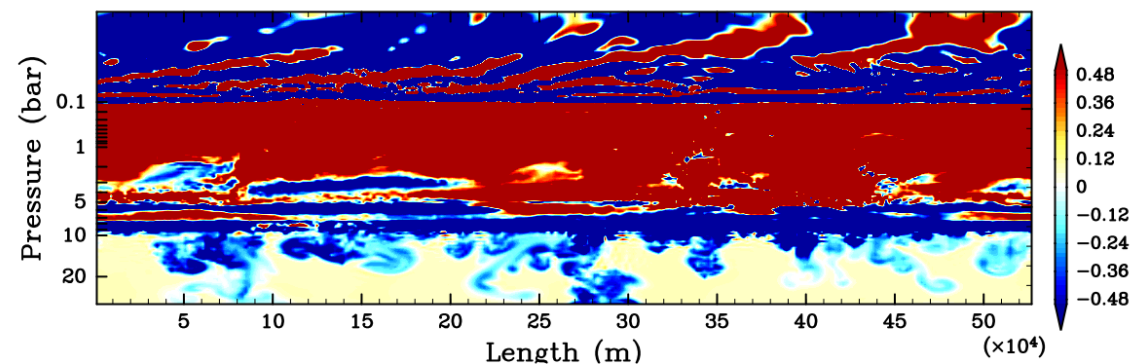
鉛直速度 [m/s]



水蒸気混合比の偏差 [kg/kg] (mean t)



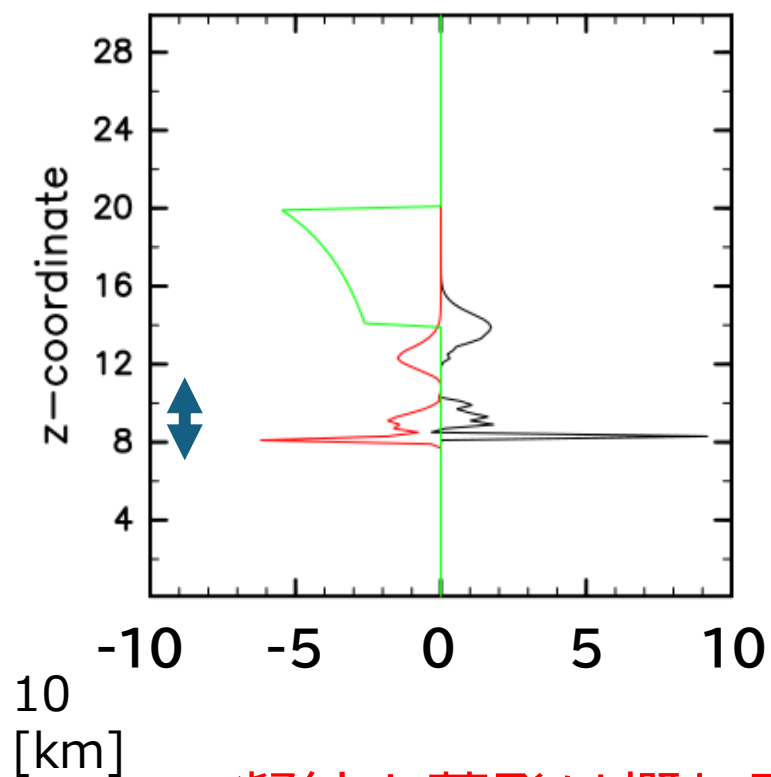
温位偏差 (mean t) [K]



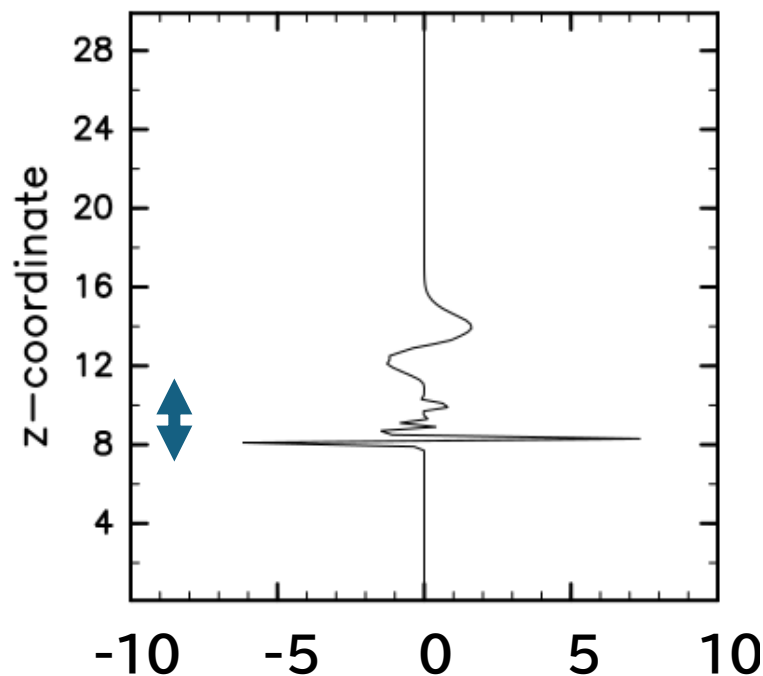
熱輸送・水輸送

熱収支への各過程の寄与 (晴れの期間の平均)

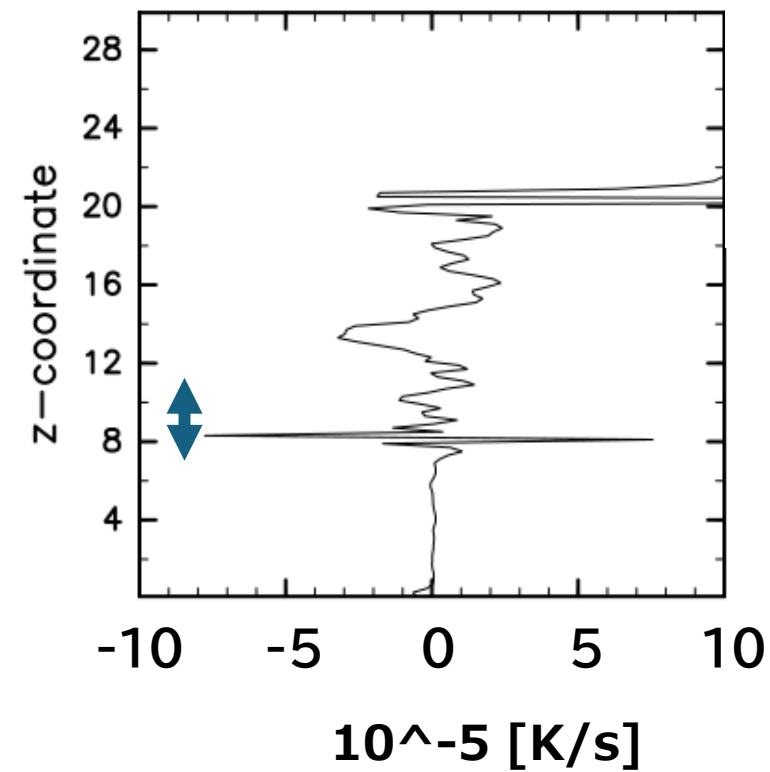
凝結項, 蒸発項, 放射項



凝結項+蒸発項



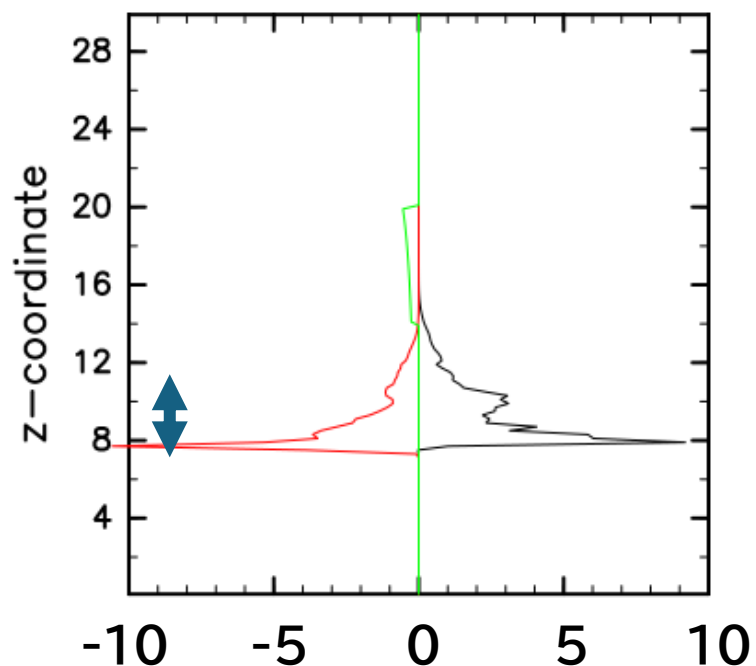
移流項



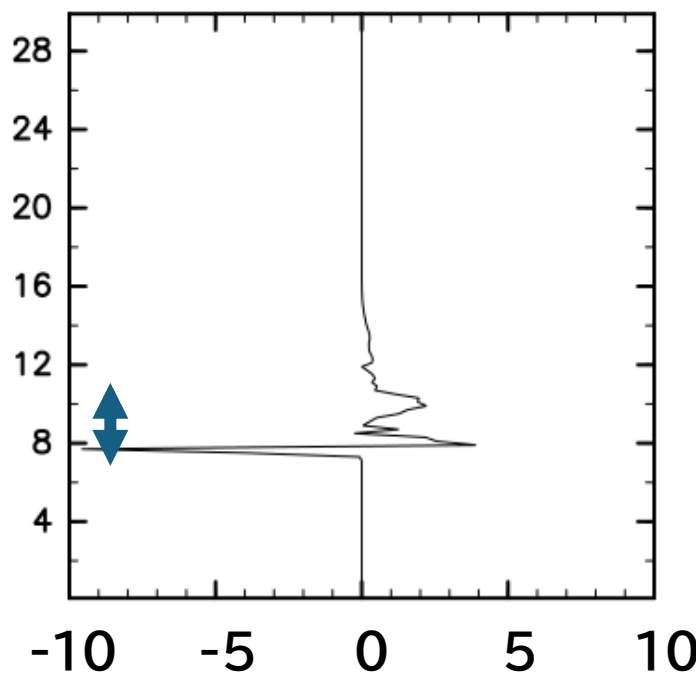
- 凝結と蒸発は概ね同程度、放射冷却が強い。

熱収支への各過程の寄与 (雨の期間の平均)

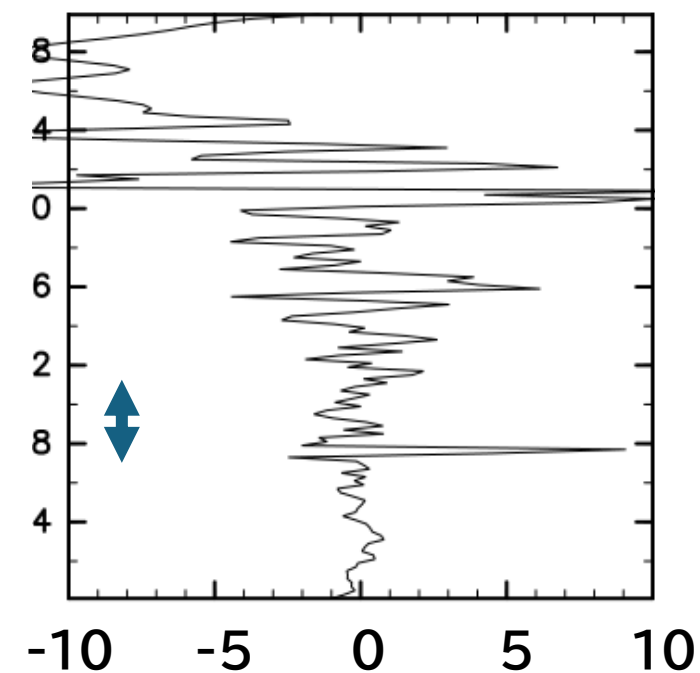
凝結項, 蒸発項, 放射項



凝結項+蒸発項



移流項



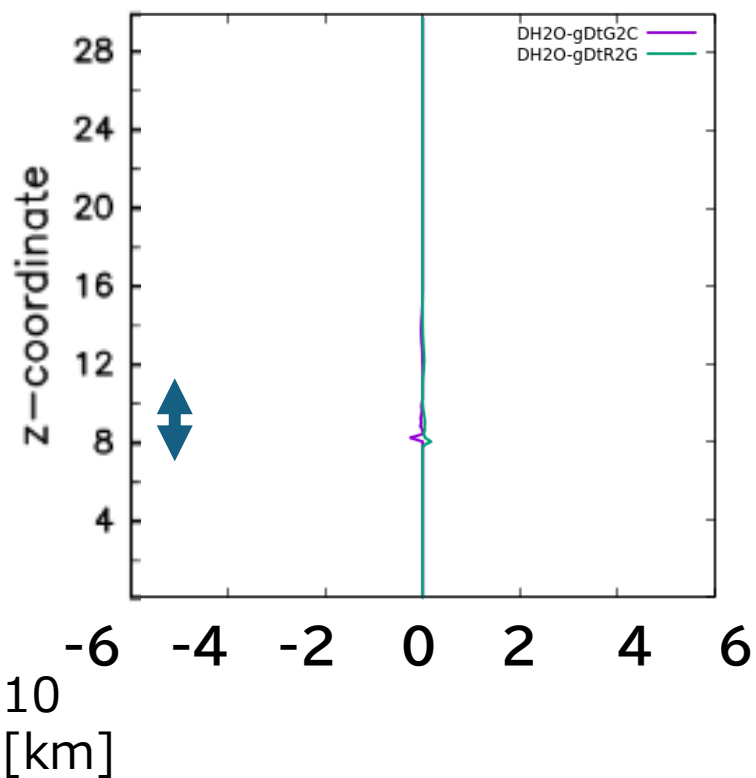
10
[km]

10^{-4} [K/s]

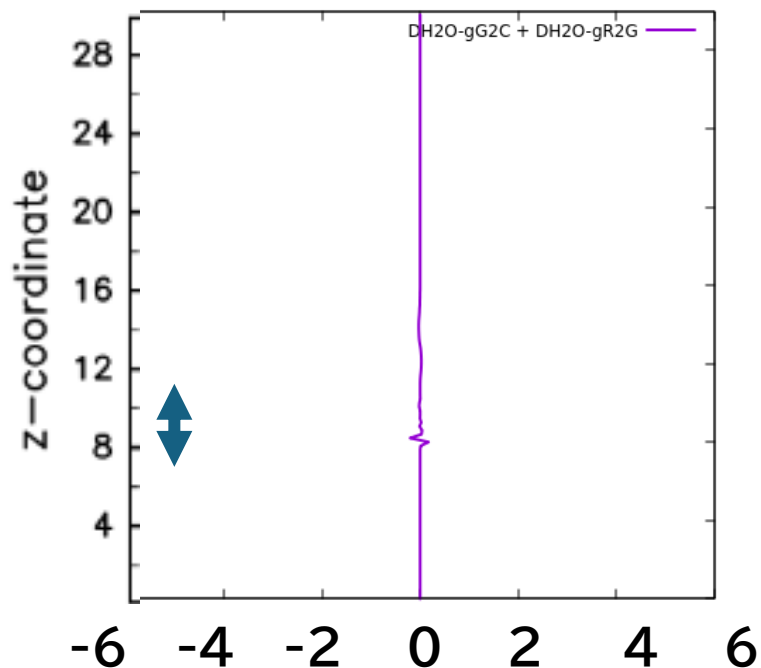
- 凝結高度以上で凝結加熱が大きい。
- 正味の凝結加熱は放射冷却より大きい。

水蒸気収支への各過程の寄与 (晴れの期間の平均)

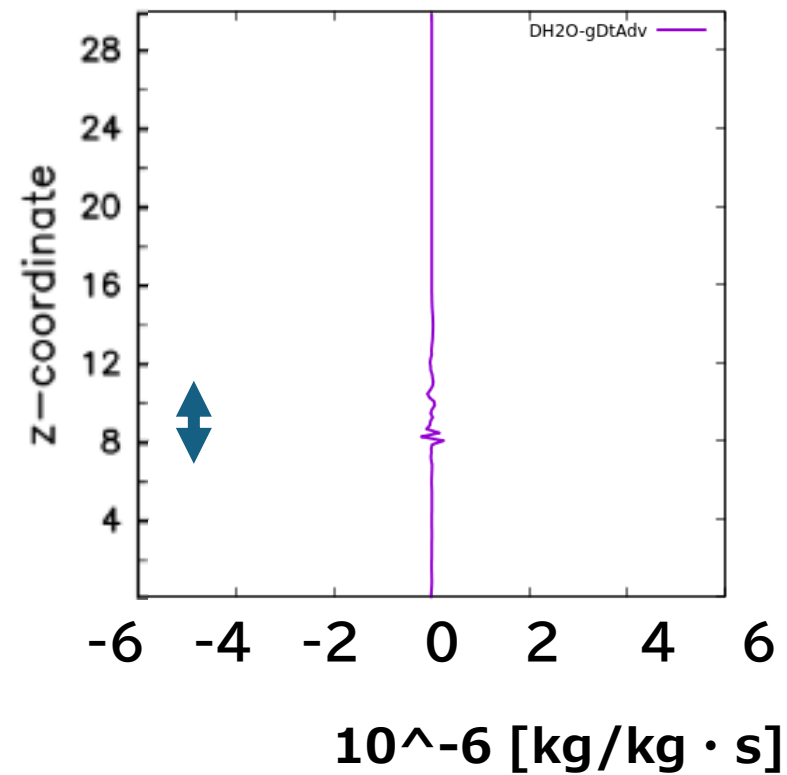
凝結項, 蒸発項



凝結項+蒸発項

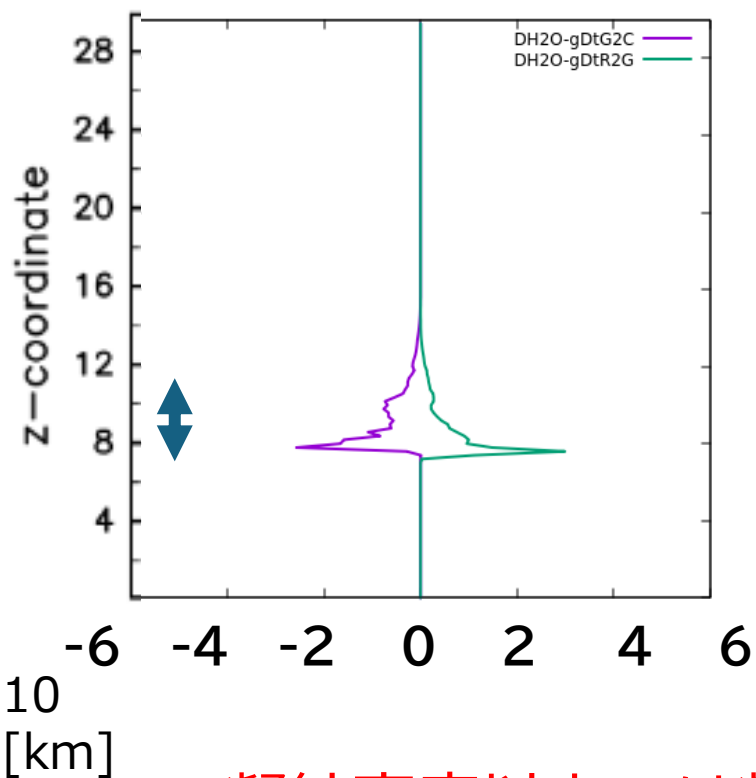


移流項

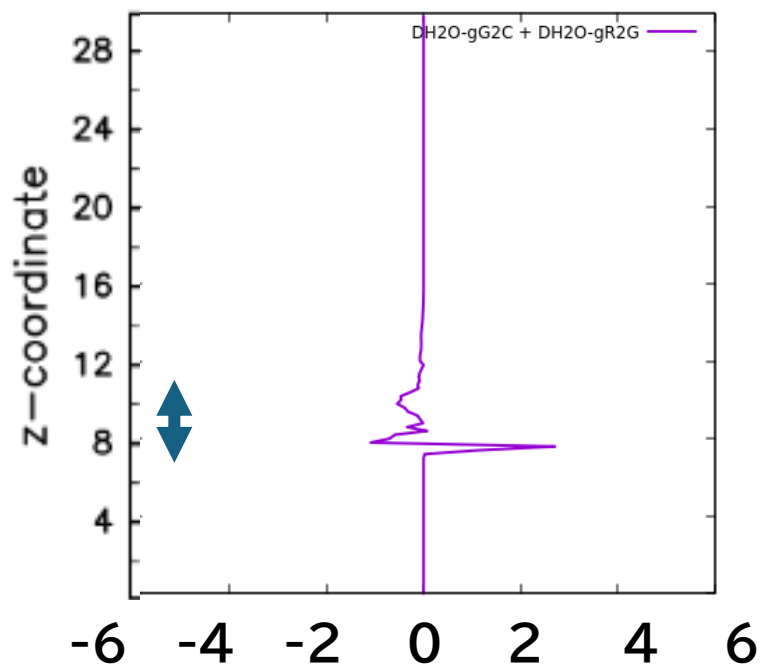


水蒸気収支への各過程の寄与 (雨の期間の平均)

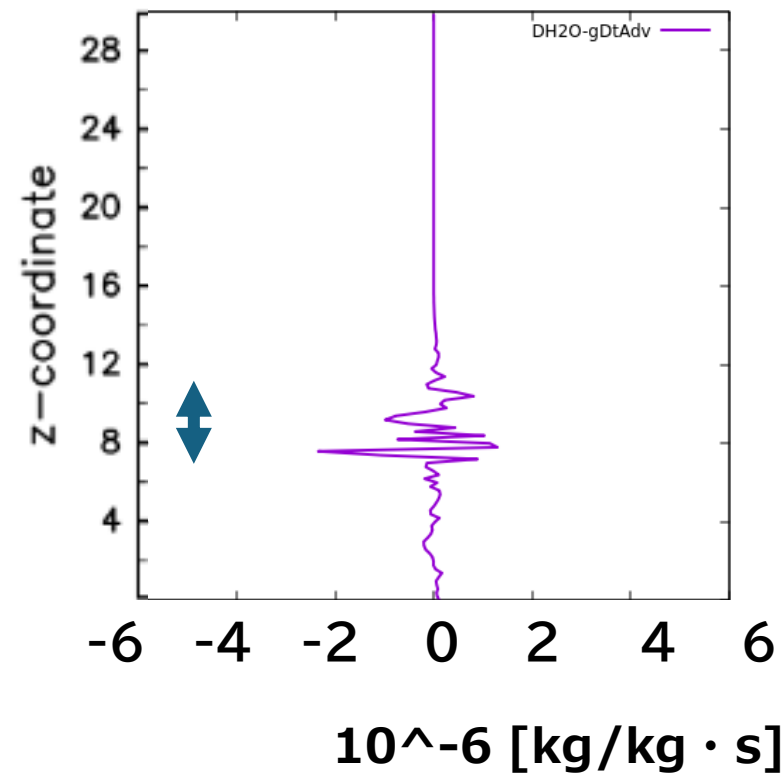
凝結項, 蒸発項



凝結項+蒸発項



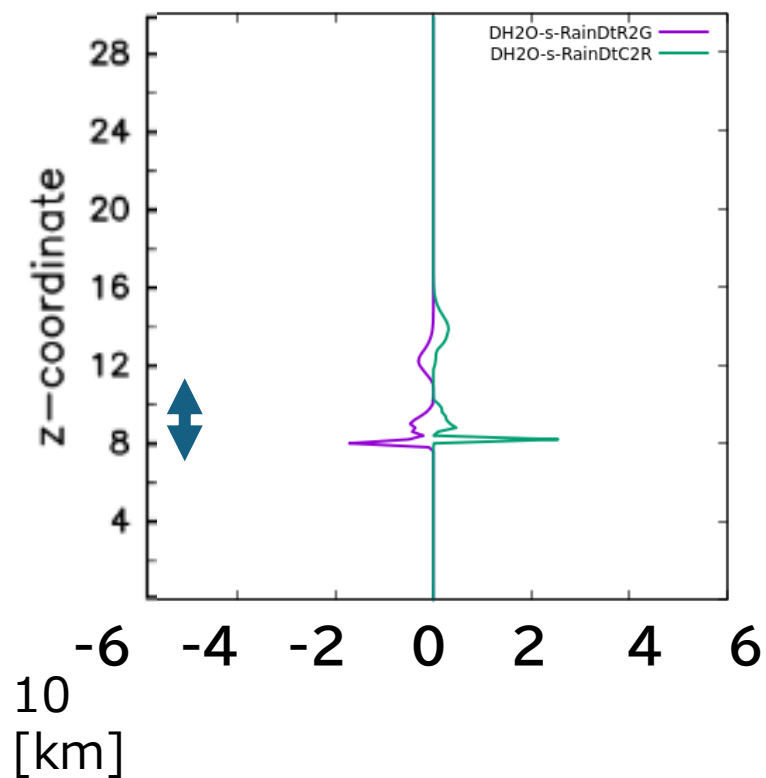
移流項



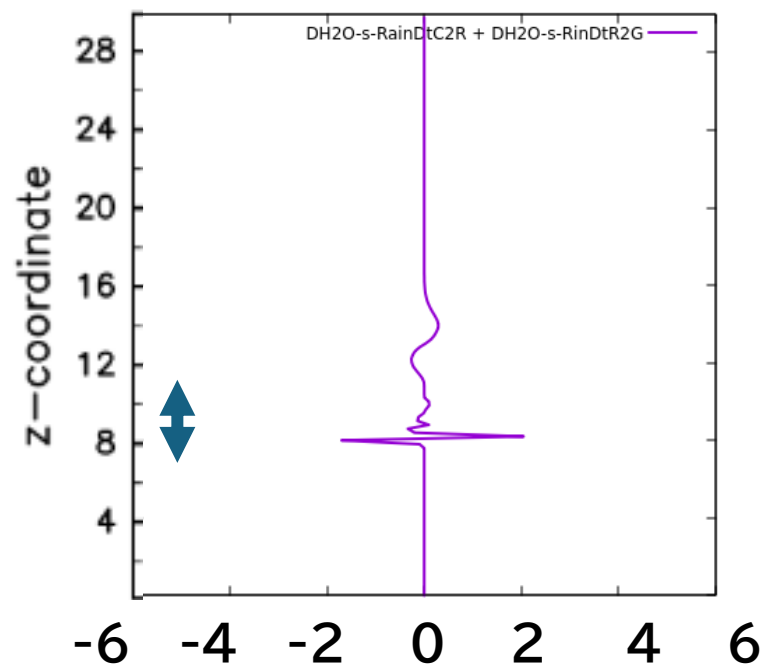
- 凝結高度以上では凝結項が大きい。
- 凝結高度付近で蒸発が卓越。

雨収支への各過程の寄与 (晴れの期間の平均)

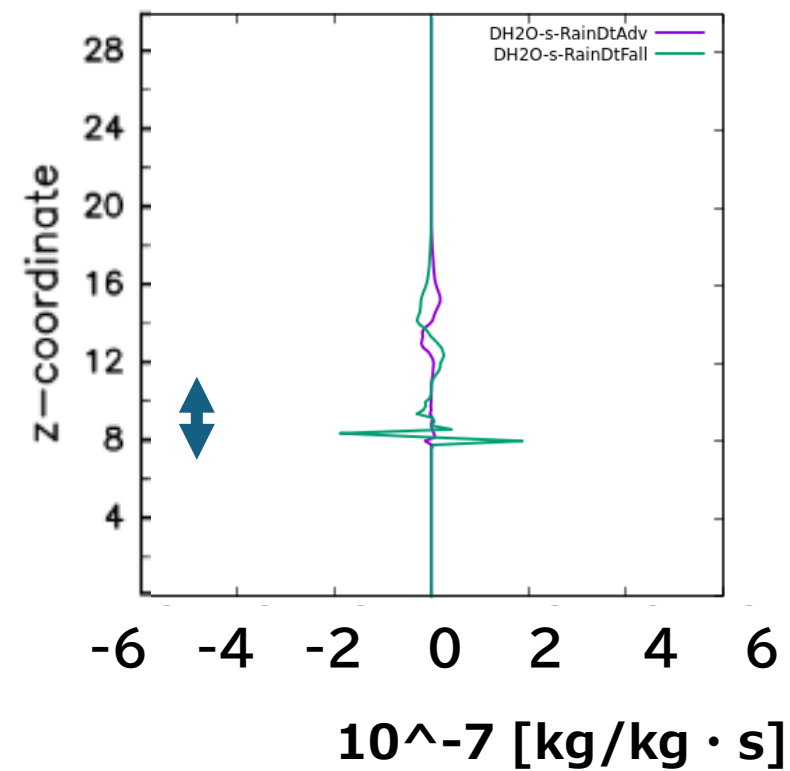
蒸発項, 雨の生成項



蒸発項 + 雨の生成項

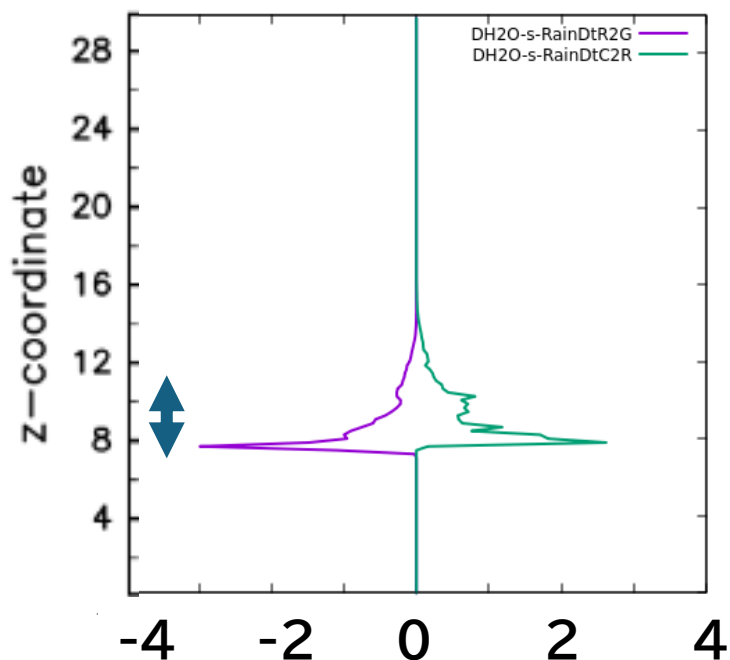


移流項, 落下項

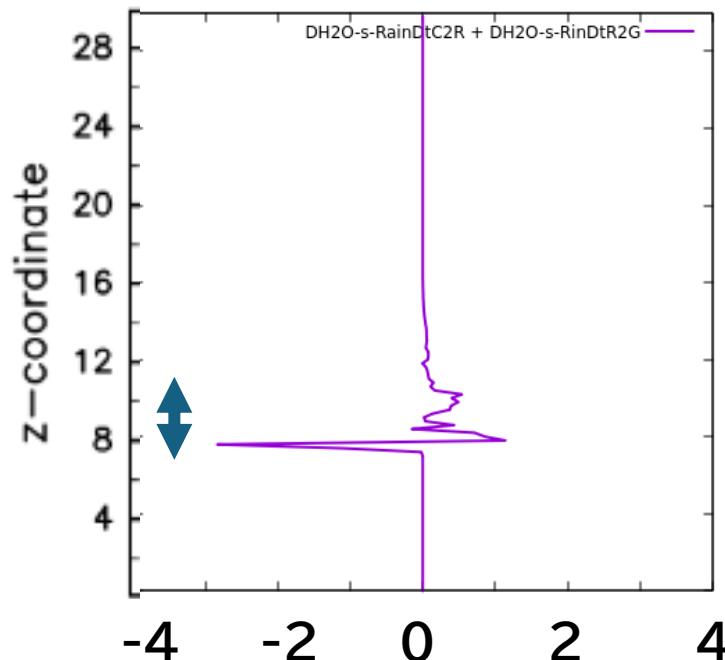


雨収支への各過程の寄与 (雨の期間の平均)

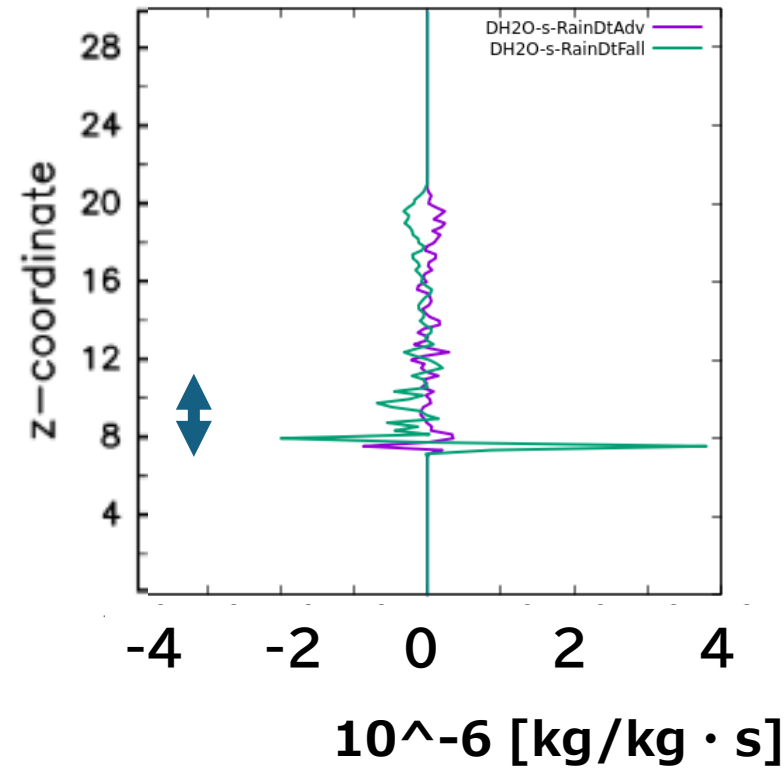
蒸発項, 雨の生成項



蒸発項 + 雨の生成項



移流項, 落下項



10
[km]

- ・凝結高度以上で雨の生成項が大きい
- ・凝結高度付近で落下、蒸発が非常に大きい

まとめ・今後の課題

まとめ

- 乾燥対流層・湿潤対流層の間に対流抑制層が形成された。
- 対流抑制層の温位が高度とともに上昇している点は、過去の1次元モデルによる研究 (Leconte et al. 2017) の結果と全く異なる。
- 3-4 日周期で強い雨が降る。雨の期間には、対流抑制層が狭まり、熱・物質輸送が起こった。
- 1 次元熱力学モデルによる研究 (Leconte et al. 2017) では考慮されていなかった降水過程が、対流抑制条件下の大気の運動構造・エネルギー輸送構造に重要な影響を及ぼしうるということが分かった。

今後の課題・方針

- Leconte et al. 2017 と違う理由。なんで対流抑制層で、温まる？
- 統計的定常状態で何が起きているかを理解する。
 - 周期的な変化のメカニズム
 - 熱輸送・水輸送のメカニズム
- 高温の統計的定常状態が現実的に起こるのかを調査する。
 - 今回の結果は非常に強い熱強制 -> より現実的な熱強制での計算
 - 深部の水蒸気混合比（今回は 40 倍）を変えた計算
- 雲微物理過程に関するパラメタを系統的に変更した数値実験の実施
- 多成分凝結を考慮した対流抑制実験の実施