

研究背景

大気中の雲・降水過程の結果として生じる降水現象は、時に地上で多量の雨をもたらすことがある。多量の雨をもたらすような対流雲の特徴と周辺大気環境条件との関係について、これまでに多くの研究が行われてきた。しかしながら、地上で得られる降水量や降水強度は雲・降水過程の結果であるため、この雲・降水過程への周辺大気環境条件の応答を知ることが重要となる。

⇒ 気温や湿度、風向・風速といった大気環境条件の応答結果として生じる、対流雲内の支配的な雲微物理特性は把握可能か？

まとめと結論

本研究では、雨滴の粒径分布を明示的に扱うスペクトルビン法による雲微物理スキームを用い、理想化された条件下で数値シミュレーションを実施した。周辺大気環境条件に対する対流雲内の支配的な雲微物理特性の応答を調べるため、観測データに基づく気温減率・対流圏下層の水蒸気量・水平風の鉛直シアーを変化させた複数の数値シミュレーションを行い、それらを比較した。

⇒ 気温減率が高いほど対流雲内の代表的な粒径が大きくなり、その応答結果として降水強度が強くなることが分かった。さらに、対流圏下層の水蒸気量が増加すると、相対的に小さな粒径の数濃度が高まることでも、降水強度が強まること分かった。

⇒ 強い水平風の鉛直シアーは、基本的に対流雲内の粒径分布の鉛直構造に変動をもたらすし、降水強度を強める方向に働く。一方、弱い水平風の鉛直シアーは、雨滴の蒸発率を低下させるとともに対流雲内の粒径分布の鉛直変動を減少させることで、結果的に積算降水量が増加する方向に働くことが分かった。

計算設定

- 領域気象モデル: WRF-ARW ver. 4.5.2 (Skamarock et al. 2019)
 - 格子間隔: $dx = 250 \text{ m}$, $dz \sim 125 \text{ m}$
 - 計算領域: $80 \text{ km} \times 80 \text{ km} \times 20 \text{ km}$
 - 積分時間: 2 時間
 - 移流スキーム: 5 次オーダー WENO
 - 雲微物理スキーム: HUCM spectral-bin model (Shpund et al. 2019)
 - 乱流スキーム: 1.5th order TKE (Deardorff 1980)
 - 初期条件: 2022 年 7 月 12 日の大雨事例 (Unuma et al. 2023) を想定し、同 06 UTC の熊谷地方気象台近傍の格子点から鉛直分布を作成。
 - 境界条件: 側面は放射、下端は壁かつ摩擦無し、上端は壁かつレイリーダンピング層 (厚さ 7 km) を設置。
- 感度実験: 対流圏下層の水蒸気量・気温減率・鉛直シアー
 - 感度実験は、観測データから求めた周辺大気環境条件と対流雲内の粒径分布パラメーターとの関係を基に実施した (図 1; Unuma 2025, ACP)。気温減率を標準実験から $\pm 2 \text{ K km}^{-1}$ 変化させた実験 (TLR 実験; 図 2)、対流圏下層の相対湿度を最大で $\pm 2 \%$ 変化させた実験 (RH 実験)、水平風の鉛直シアーを一様に 0.5 倍または 1.5 倍した実験 (SH 実験; 図 3) を実施した。
- 対流雲の検出・追跡: *tobac* ver. 1.5.5 (Sokolowsky et al. 2024)
 - 粒径分布パラメーターの内、傾きパラメーターである λ を用いて対流雲を検出した。検出時の閾値は、地上での長期データ観測結果に基づき、1.5 から 3.0 mm^{-1} の範囲で動的に変化させた (Unuma et al. 2025, JMSJ)。

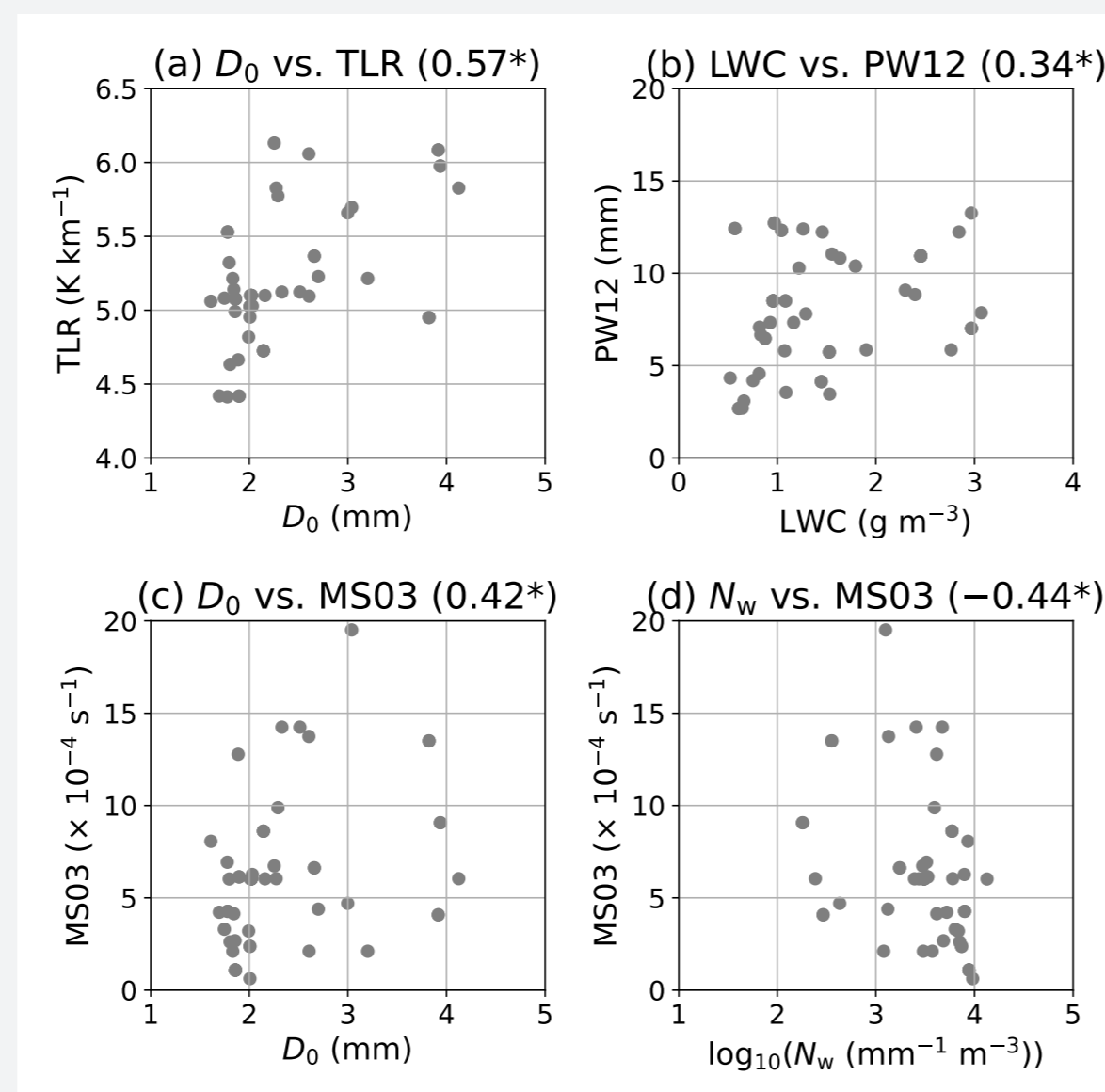


図 1: 粒径分布パラメーターと大気環境条件との観測的關係。

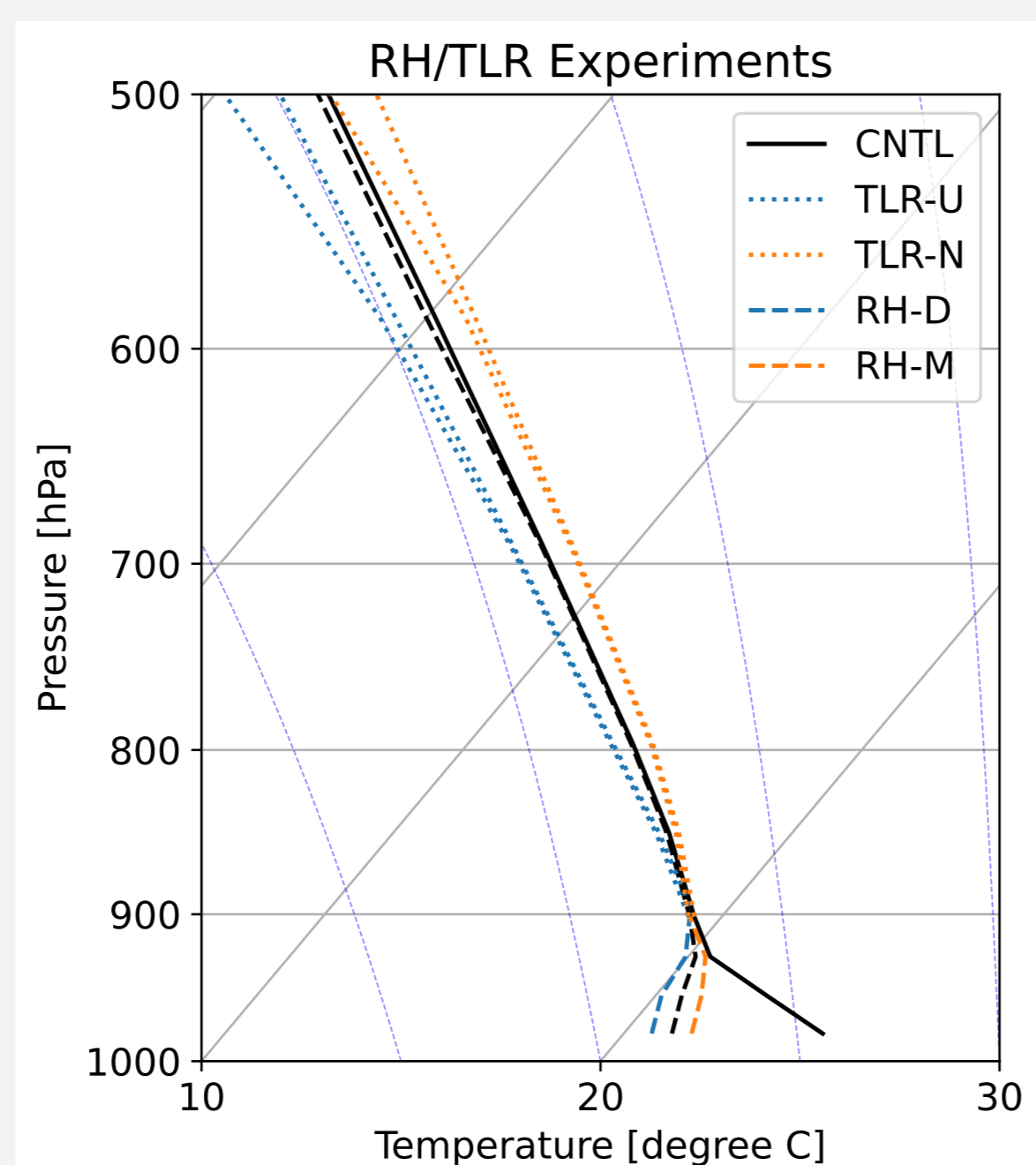


図 2: 標準実験、RH 実験、TLR 実験における Skew-T log-P 図。

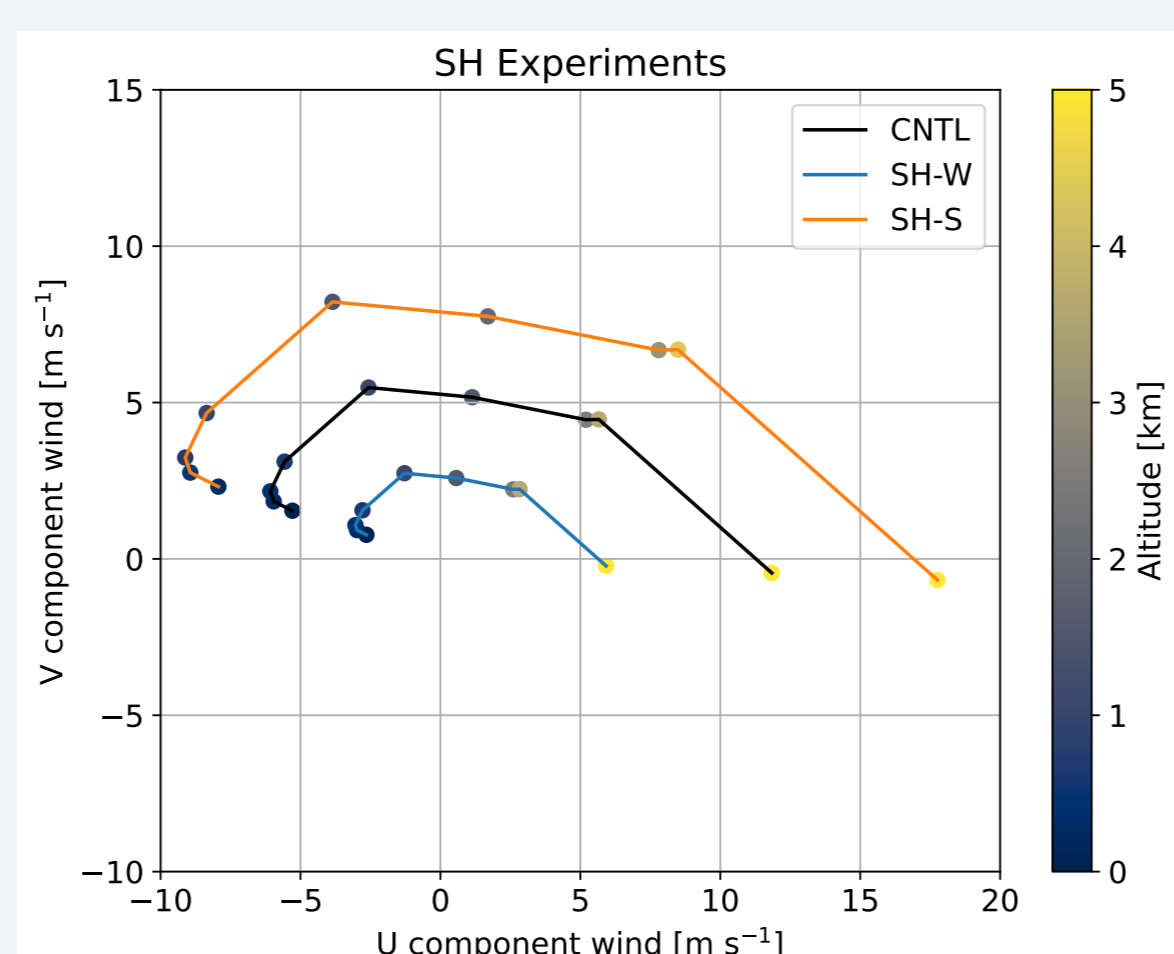
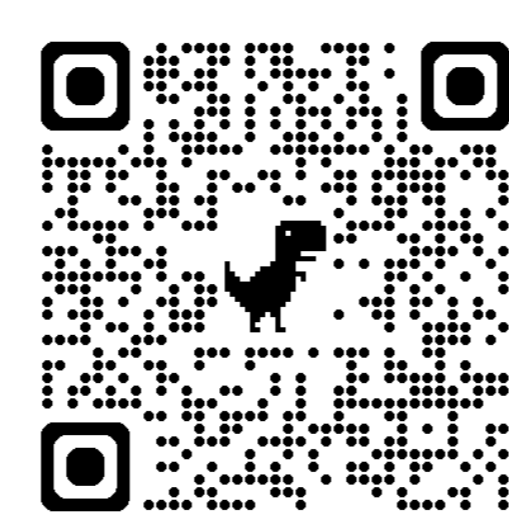


図 3: 標準実験及び SH 実験におけるホドグラフ。

参考文献・謝辞

- Deardorff, 1980, *Bound.-Layer Meteorol.*, **18**, 495–527.
- Shpund et al. 2019, *J. Geophys. Res. Atmos.*, **124**, 14072–14101.
- Skamarock et al. 2019, *NCAR Tech. Note*, 145pp.
- Sokolowsky et al. 2024, *Geosci. Model Dev.*, **17**, 5309–5330.
- Unuma 2025, *Atmos. Chem. Phys.*, **25**, 11109–11128.
- Unuma et al. 2023, *SOLA*, **19**, 150–156.
- Unuma et al. 2025, *JMSJ*, **103**, 219–232.



詳細はこちらの QR コードから

謝辞：本研究は、東京大学情報基盤センター若手研究者・女性研究者推薦プログラム 2025-B-001、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点萌芽型共同研究課題 EX25307、日本学術振興会科研費若手研究 JP24K17126 の各支援を受けて実施された。

降水強度最大値と積算降水量の統計値

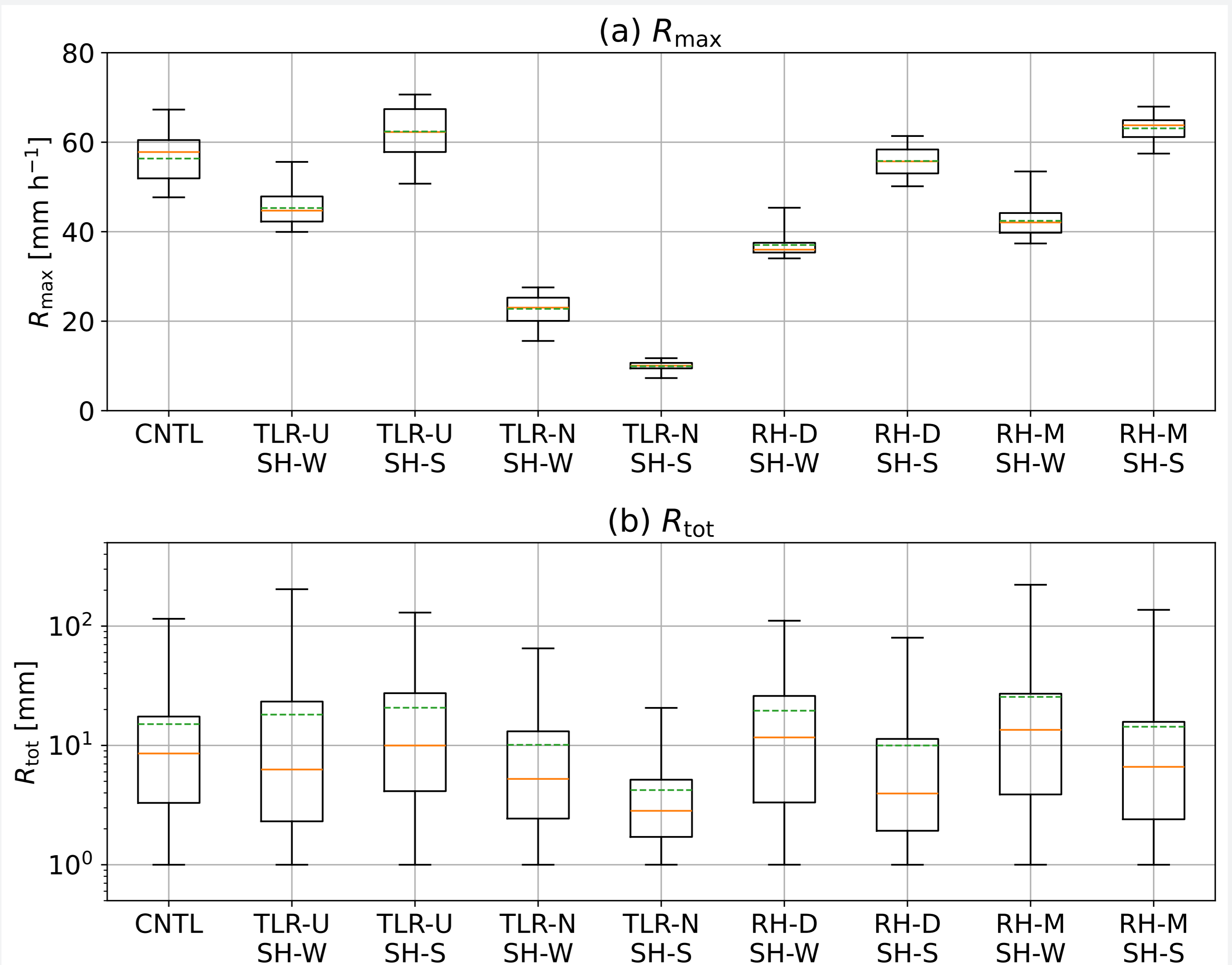


図 4: (a) 降水強度の最大値 (R_{\max} ; mm h^{-1}) と (b) 計算領域内での積算降水量 (R_{tot} ; mm) の各実験における箱ひげ図。箱の下端と上端はそれぞれ 25 と 75 パーセンタイル値を示し、橙色と緑色の線は中央値と平均値を示す。

降水強度の最大値 (R_{\max}) は、気温減率が大きく (TLR-U)、対流圏下層の水蒸気量が多く (RH-M)、水平風の鉛直シアーが強い (SH-S) 場合に大きくなる傾向にある。一方、積算降水量 (R_{tot}) の最大値は、水平風の鉛直シアーが弱い場合に増加する傾向にある。

⇒ 降水の強さや量は、粒径分布に対してどのように応答している？

対流雲内の粒径分布パラメーター時間変化

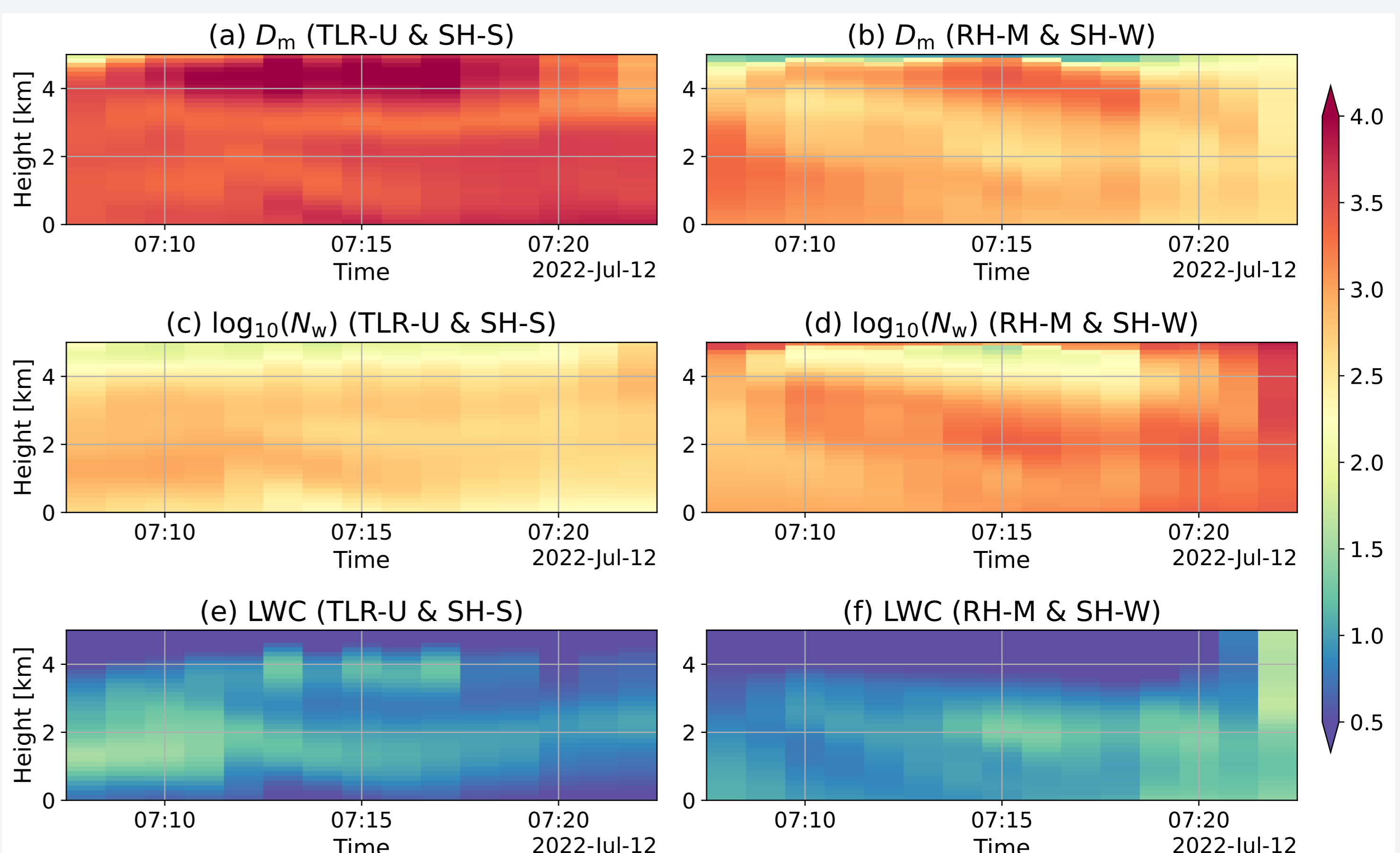


図 5: 計算領域内で最も発達した対流雲の中心付近における粒径分布パラメーターの鉛直分布の時間変化を示した図。左列は降水強度が最大の場合 (TLR-U & SH-S 実験)、右列は積算雨量が最大の場合 (RH-M & SH-W 実験)。上段は質量加重平均粒径 (D_m ; mm)、中段は規格化切片パラメーター (N_w ; $\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$)、下段は雨水量 (LWC; g m^{-3})。

降水強度が最大となる場合には、粒径の大きい雨粒が生成されやすいことで雨水量への寄与が高くなる。積算降水量が最大となる場合には、相対的に小さな雨粒の数濃度が高くなることで雨水量への寄与が高くなる。

対流雲内の粒径分布の鉛直変動

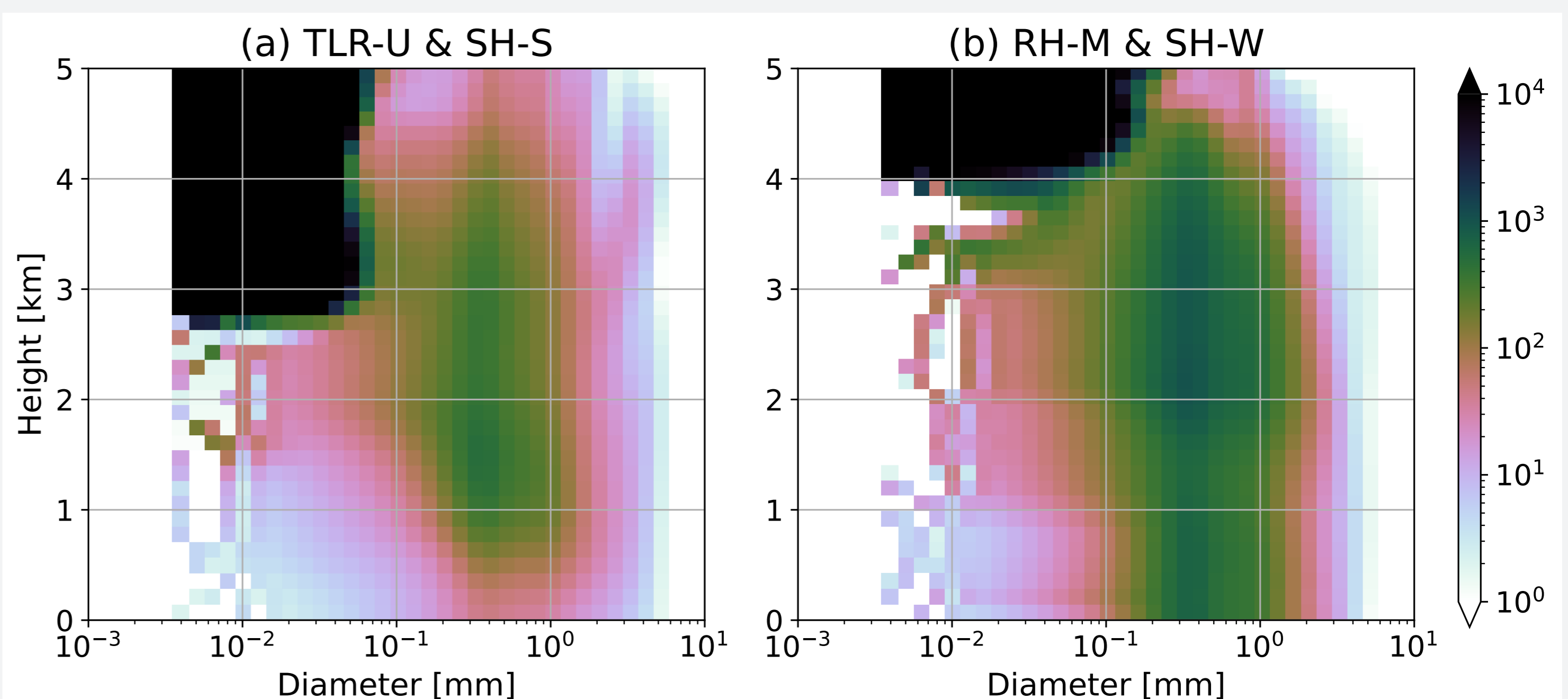


図 6: 図 5 で示した時間高度断面の内、07:15 UTC の粒径分布の鉛直分布を二次元ヒストグラム化したもの。陰影は横軸の粒径幅での数濃度 ($\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}$) を表し、各高度の粒径分布が鉛直方向に並んだもの。

降水強度が最大となる場合には、地上付近で雨粒または雲粒の数濃度が地上に向かって減少しやすい一方、積算降水量が最大となる場合にはその変動が小さくなっている。

⇒ 雲粒と雨粒との相互作用、或いは雲粒・雨粒の蒸発率が低いことを示唆。