

非静力学雲モデルによる雲・降水 過程の高解像度メソスケール計算 の現状と展望

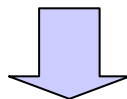
竹見哲也

東京工業大学

大学院総合理工学研究科

雲・降水過程のモデリングの問題と現状

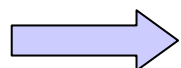
- 雲・降水過程は幅広い空間スケールにわたる現象である
 - ー 微物理スケール ($O(10^{-6}\text{m})$) ~ メソスケール ($O(10^6\text{m})$) and larger
- 力学・熱力学変数に加えて降水粒子・エアロゾルを含む莫大な変数を持つ複雑系である
- 力学・熱力学・放射・微物理過程が様々な時間スケールで相互作用する



- 対象とする現象の時間スケールに応じて、重要でない過程に係わる項や変数を見捨てる and/or より単純なモデル化 (= パラメタリゼーション) により問題を扱いやすい形に変える
- 計算領域を広く取るために格子幅を粗くする
- 格子幅を細かくするために計算領域を狭くする
- 注目したい素過程に応じて系を簡素化して、多数の感度実験をおこなう

雲は多様な環境場で形成・発達する

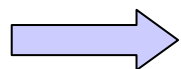
- 雲と温度分布
- 雲と水蒸気分布
- 雲と風速分布
- 雲とエアロゾル分布



湿度やエアロゾル分布は、大局的には大陸起源/
海洋起源の気塊によって決まる。

例：東アジアの降水現象

砂漠起源の鉱物性ダストや中国大陸の人為起源
のエアロゾル、海洋起源のエアロゾル、モンスーン
循環や傾圧波動による水蒸気分布



雲力学と雲微物理学、エアロゾル科学の融合の可能性

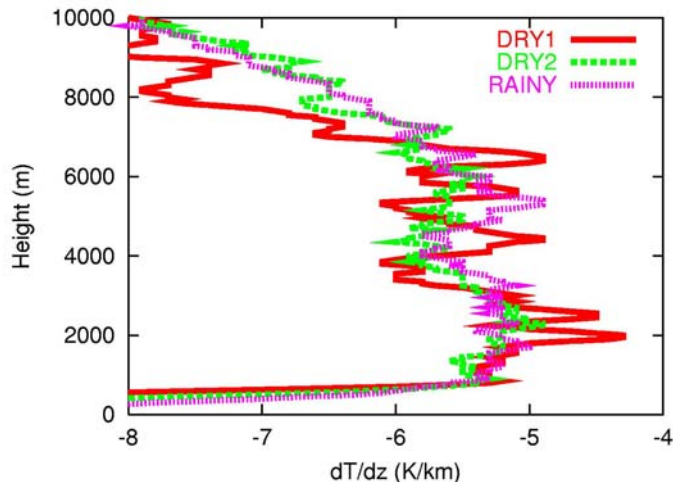
熱帯海上の対流雲



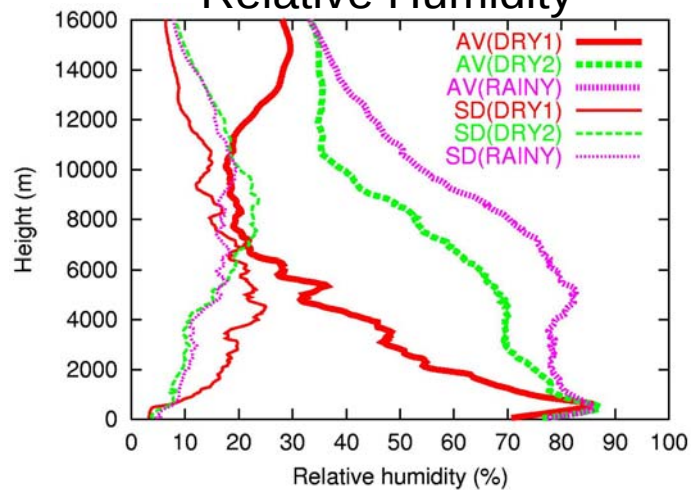
JAMSTEC「みらい」熱帯観測において

熱帯積雲と温度・湿度プロファイルとの関係

dT/dz

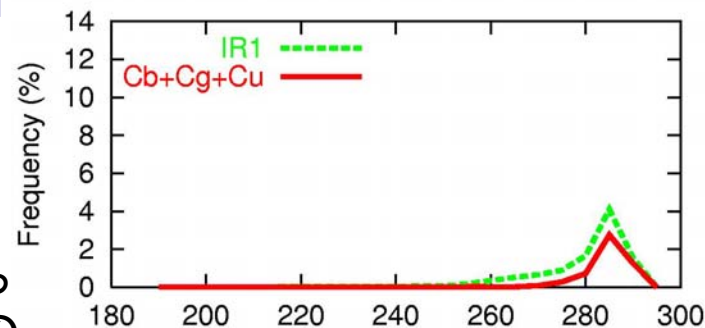


Relative Humidity

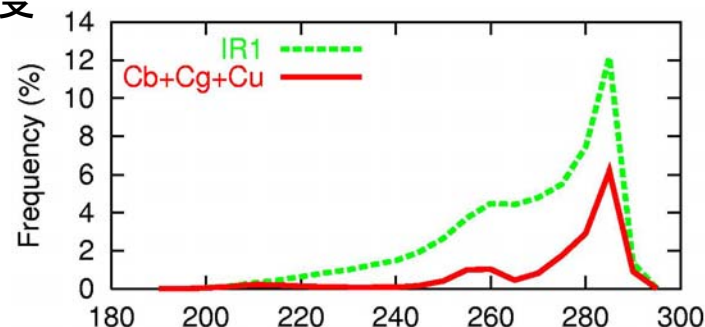


衛星データから
推定した積雲の
雲頂温度の頻度
分布

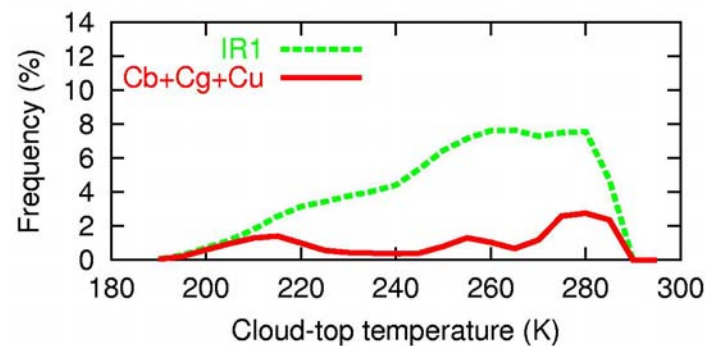
DRY1 PERIOD



DRY2 PERIOD

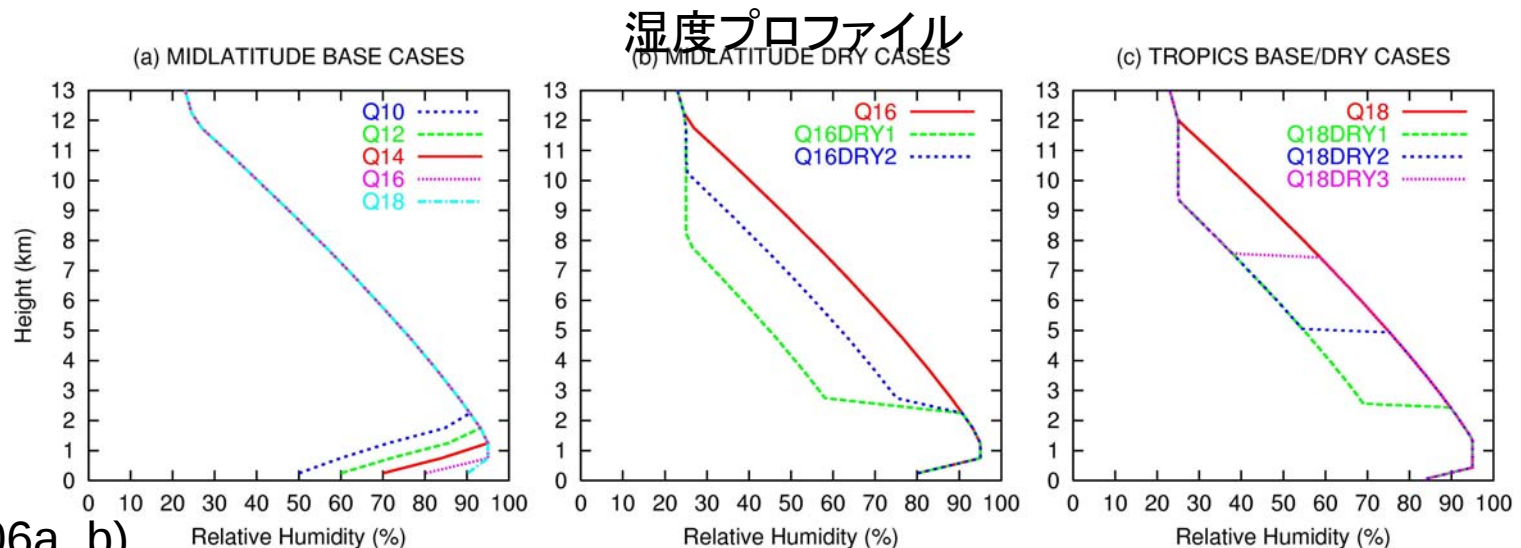
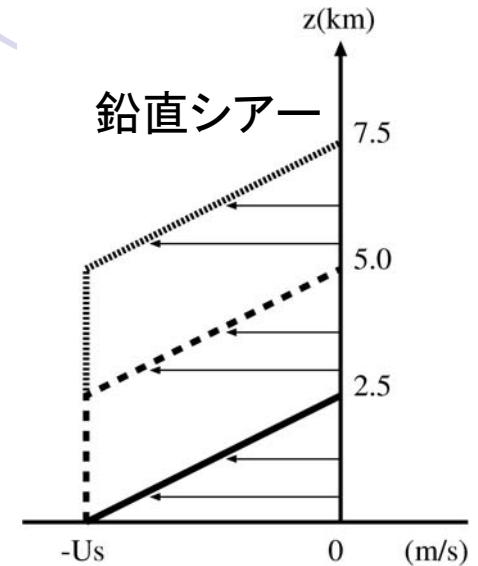
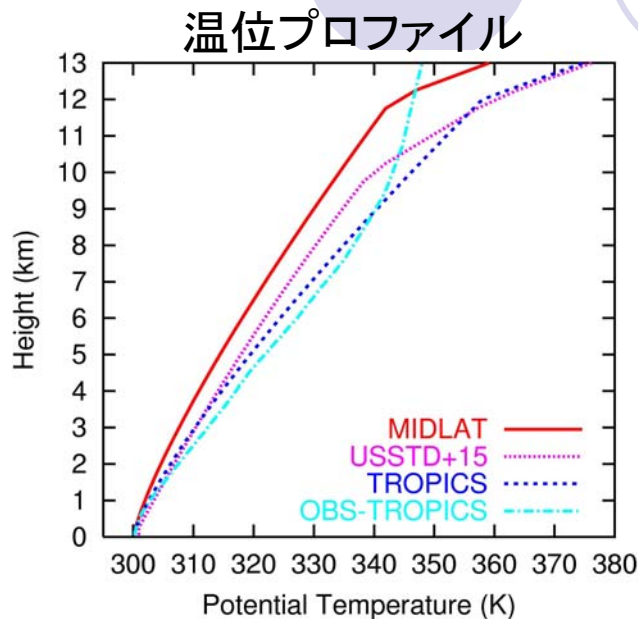


RAINY PERIOD



メソ対流系の温度・湿度・風速プロファイルに対する感度

- 数値モデル: WRF
- 計算領域: 450 km x 160 km x 18 km
- $\Delta x=1$ km, $\Delta z=500$ m
- 物理過程: 雲微物理
- 中緯度および熱帯の温度環境のスコールライン

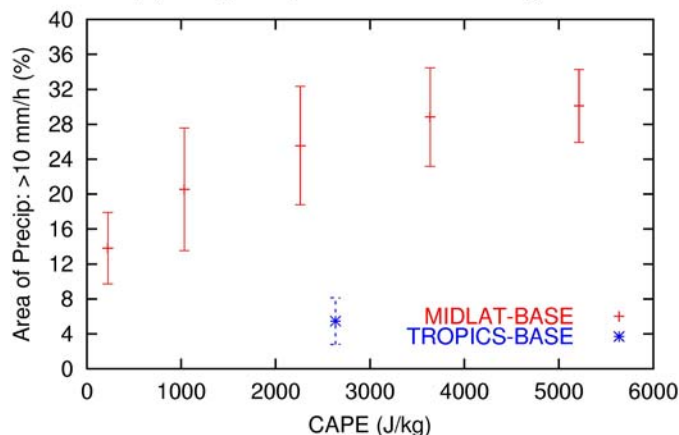


メソ対流系の降水量と環境パラメータとの関係

下層に強いシアアのある場合

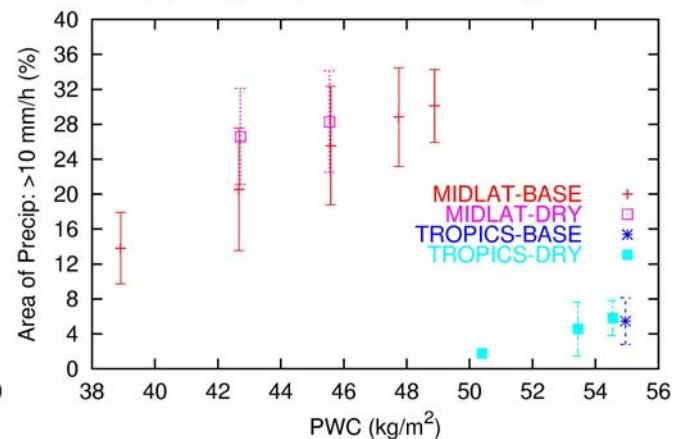
CAPEとの関係

(a) Strong Precipitation vs CAPE: Strong Shear

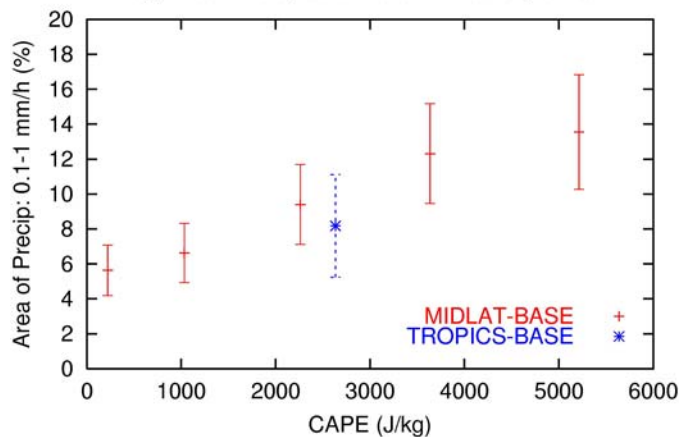


可降水量との関係

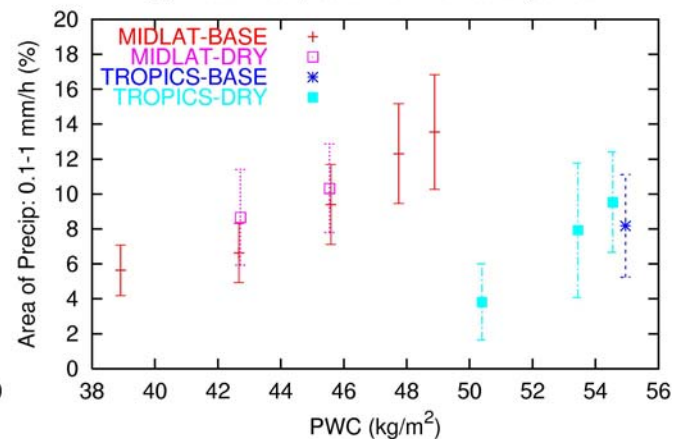
(b) Strong Precipitation vs PWC: Strong Shear



(c) Weak Precipitation vs CAPE: Strong Shear



(d) Weak Precipitation vs PWC: Strong Shear



(Takemi 2006a, b)

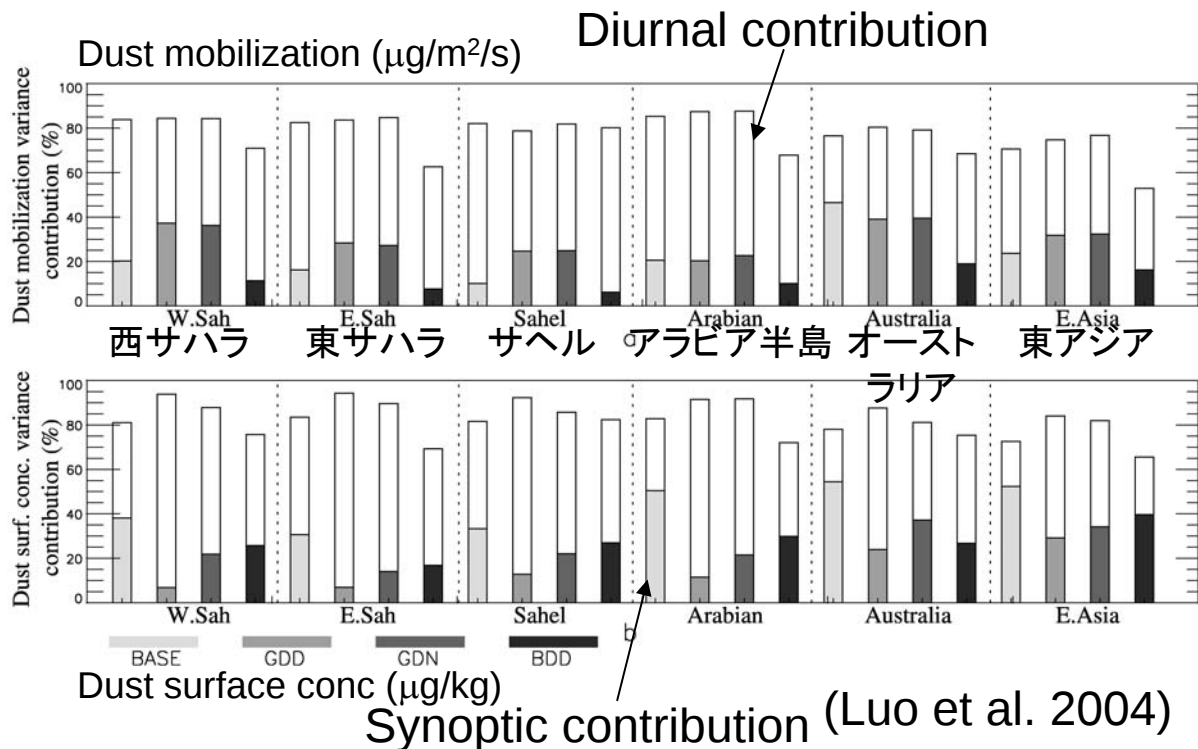
降水強度10 mm/h
以上の面積

降水強度0.1-1 mm/h
の面積

乾燥・湿潤対流とダストエアロゾルの輸送

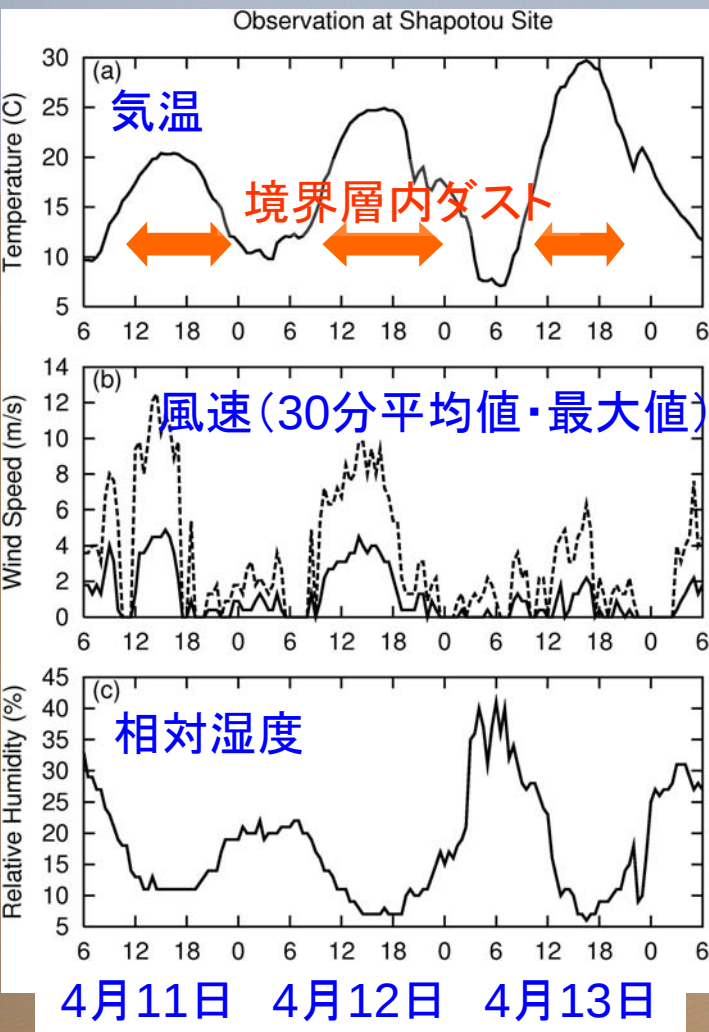
Table 3. Global Dust Fluxes (Koch and Renno 2005)

	Dust Flux, $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Fractional Updraft Area	Contribution to Global Mineral Dust Production, %
Dusty Plumes	0.1 ± 0.03	$5 \times 10^{-5} \pm 4 \times 10^{-5}$	8 ± 6
Dust Devils	0.7 ± 0.3	$3 \times 10^{-5} \pm 2 \times 10^{-5}$	26 ± 18
Total	—	—	34 ± 19



砂漠におけるダストの鉛直分布

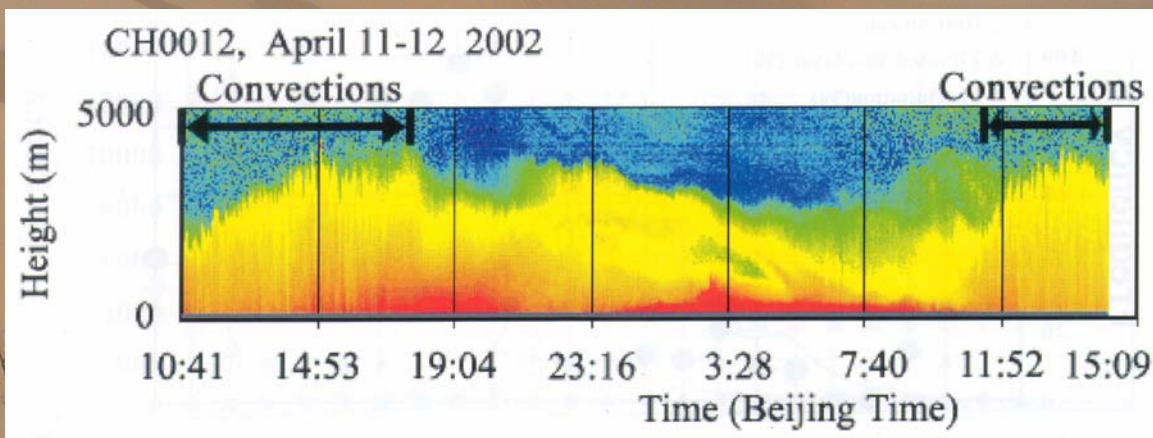
地上気象変化



(Takemi et al. 2005)

ADEC観測時にライダーで観測されたゴビ砂漠南部における晴天時のダストの鉛直分布の変化。

期間: 2002年4月11日 - 12日



(Yasui et al. 2005)

(背景写真: 情報通信研究機構 安井氏提供)

ダスト輸送の日変化の数値シミュレーション

数値モデル

- オクラホマ大学ARPS+ダスト放出・輸送モデル (Takemi 2005)
- $\Delta x = 500$ m, $\Delta z = 20$ -810 m
- 計算領域: 80 km x 20 km x 18 km
- 物理過程: 雲微物理、地表面過程、大気放射、SGS乱流混合
- ダスト量は混合比 (粒子半径 1 μ m) で表現

ダストの地表面フラックス

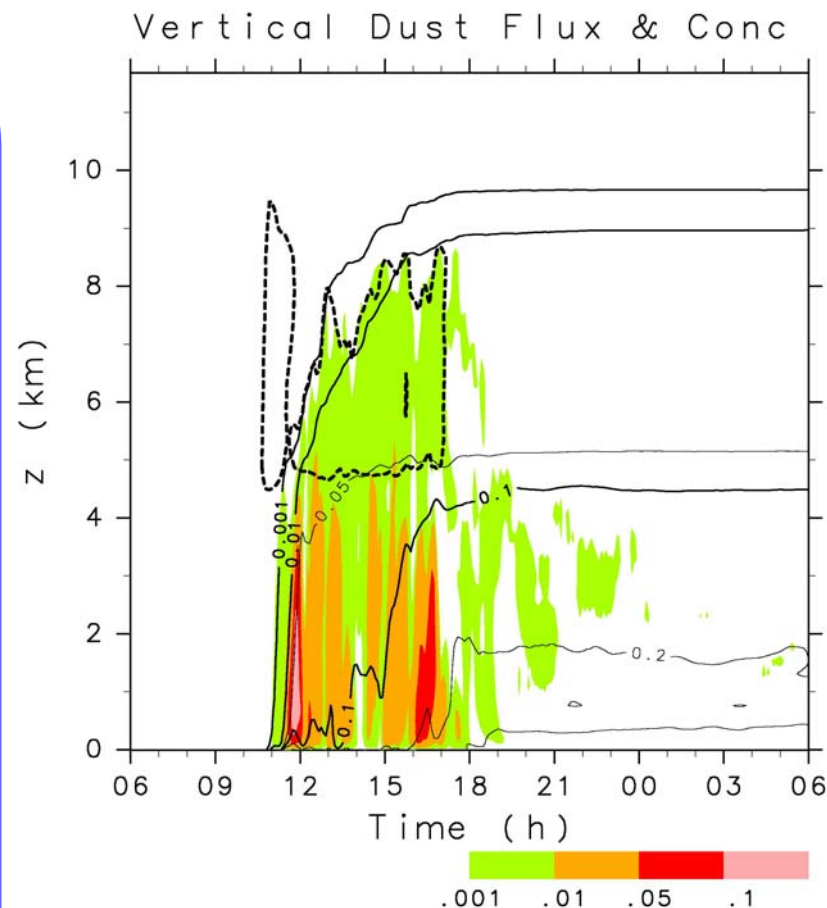
$$F_{flux} = 1.42 \times 10^{-5} u_*^4 \quad \text{if } u_* \geq u_{*t}$$

ダスト混合比の予測方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho q_d) = F_{adv} + F_{mix} + F_{flux} + F_{grav} + F_{wet} + F_{revap}$$

雨に捕捉されたダスト混合比の予測方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho q_{dw}) = F'_{adv} + F'_{mix} + F_{fall} - F_{wet} - F_{revap}$$

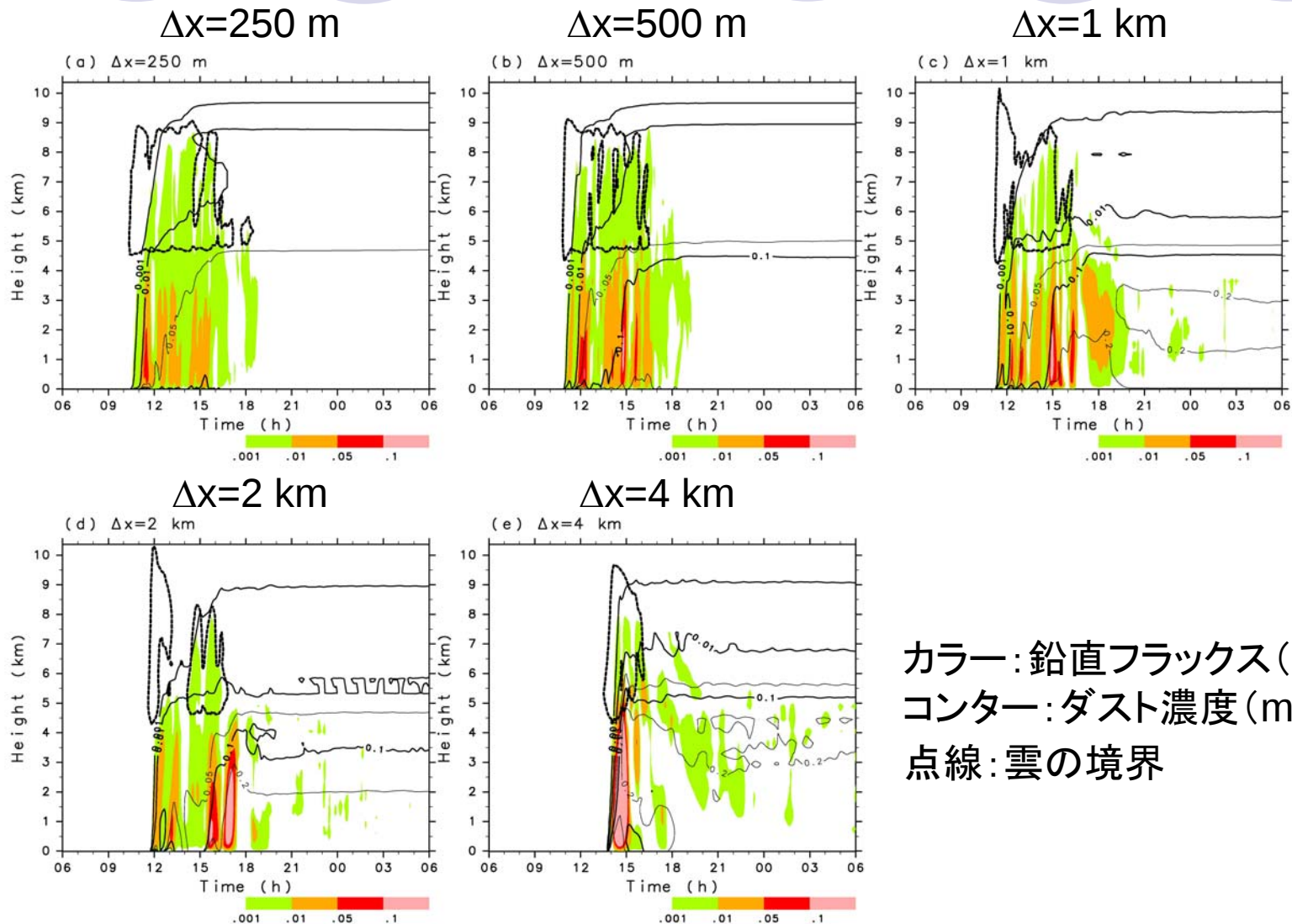


カラー: 鉛直フラックス ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$)

コンター: ダスト濃度 (mg/m^3)

点線: 雲の境界 (Takemi et al. 2005)

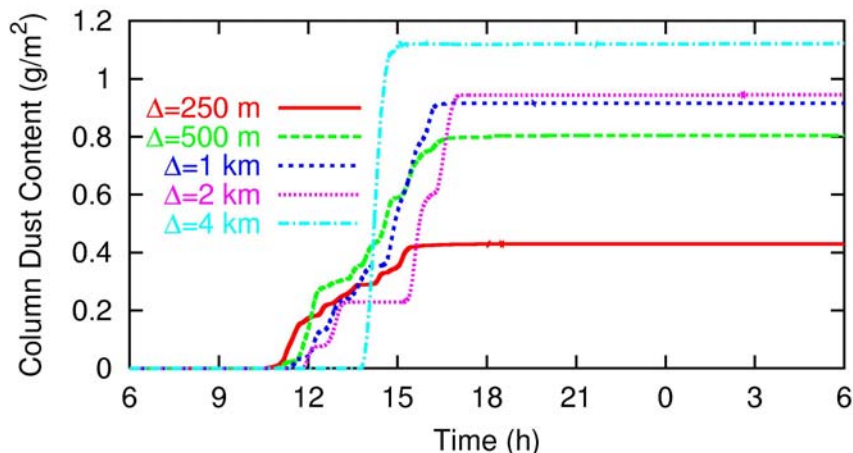
ダスト鉛直輸送の日変化の格子幅依存性



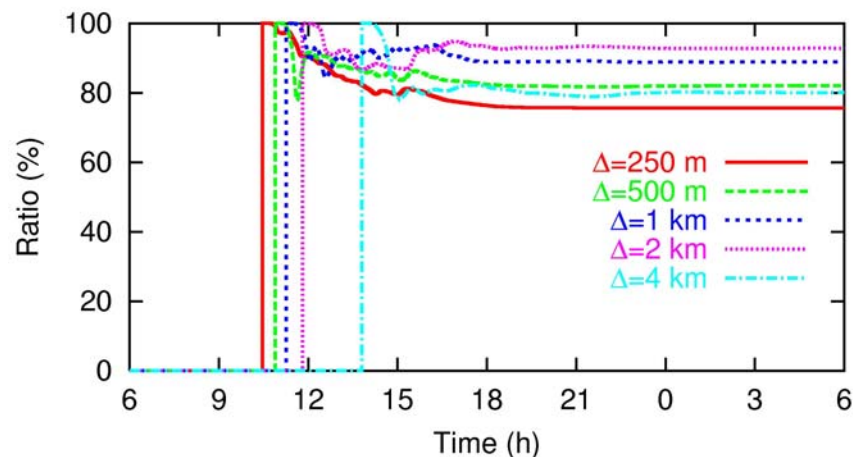
鉛直輸送量・地上風速変動の格子幅依存性

コラム量

Grid Dependence: Column Dust Content

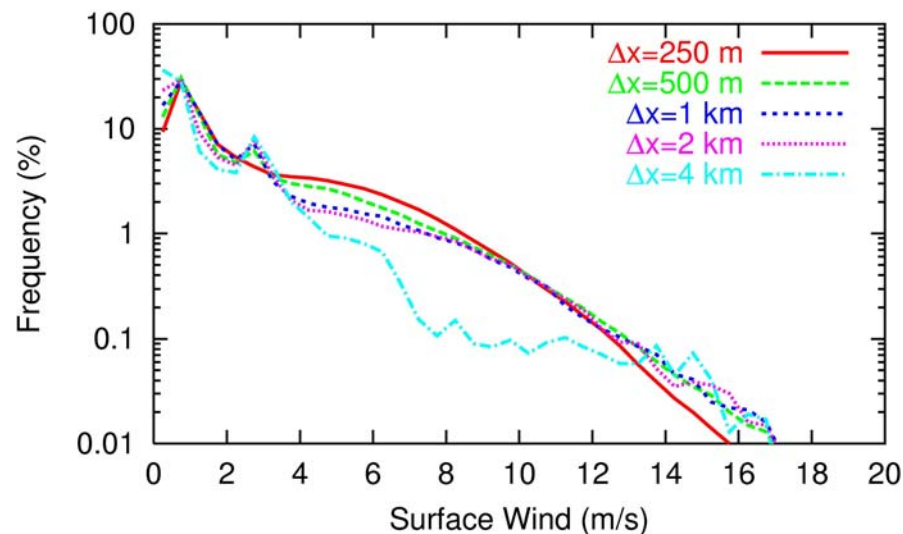


Boundary-Layer Total/Surface Emitted Total



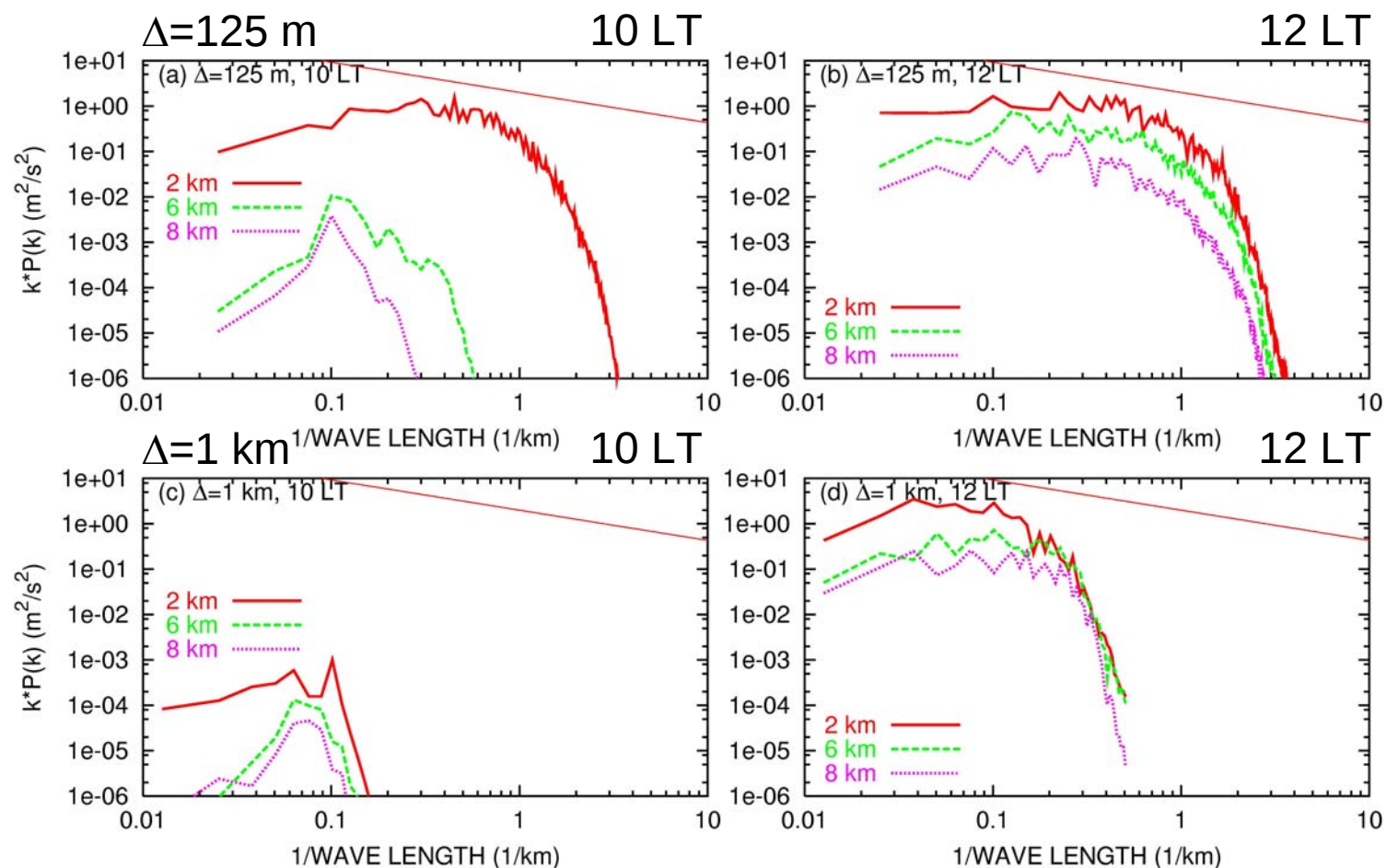
地面積算放出量に対する境界層内の
総量の割合(%)

6 LT-18LTの間の地上風速の頻度分布

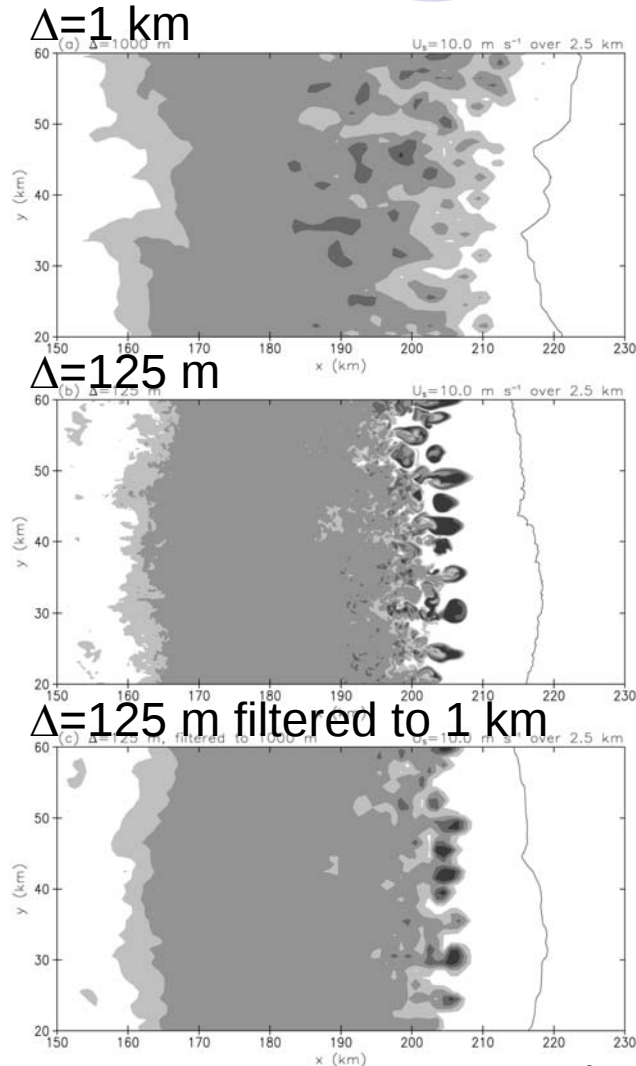


鉛直速度の空間スペクトル

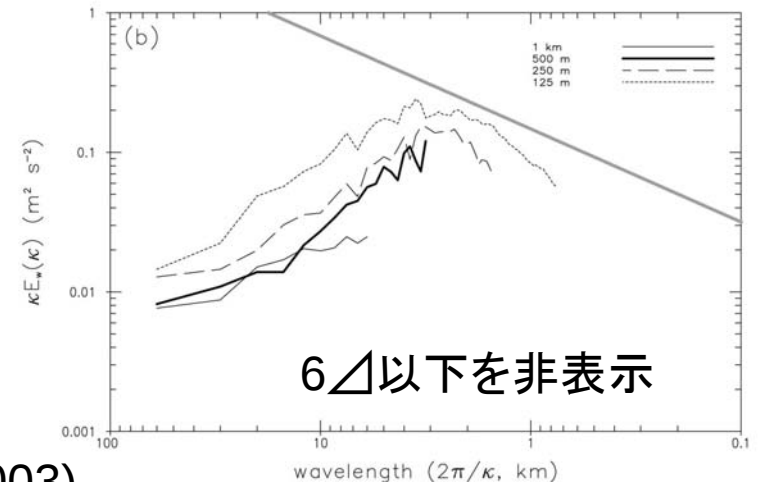
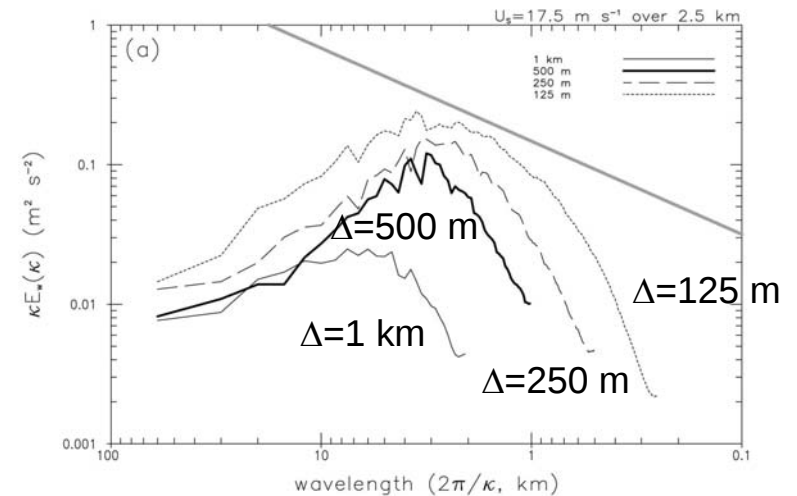
- 125 m格子 : 領域 40 km x 10 km x 11 km; 格子数 323 x 82 x 85
- 1 km格子 : 領域 80 km x 20 km x 18 km; 格子数 83 x 22 x 46



スコールラインのパワースペクトル



スコールライン計算での高度5 km
の鉛直風速の空間スペクトル。

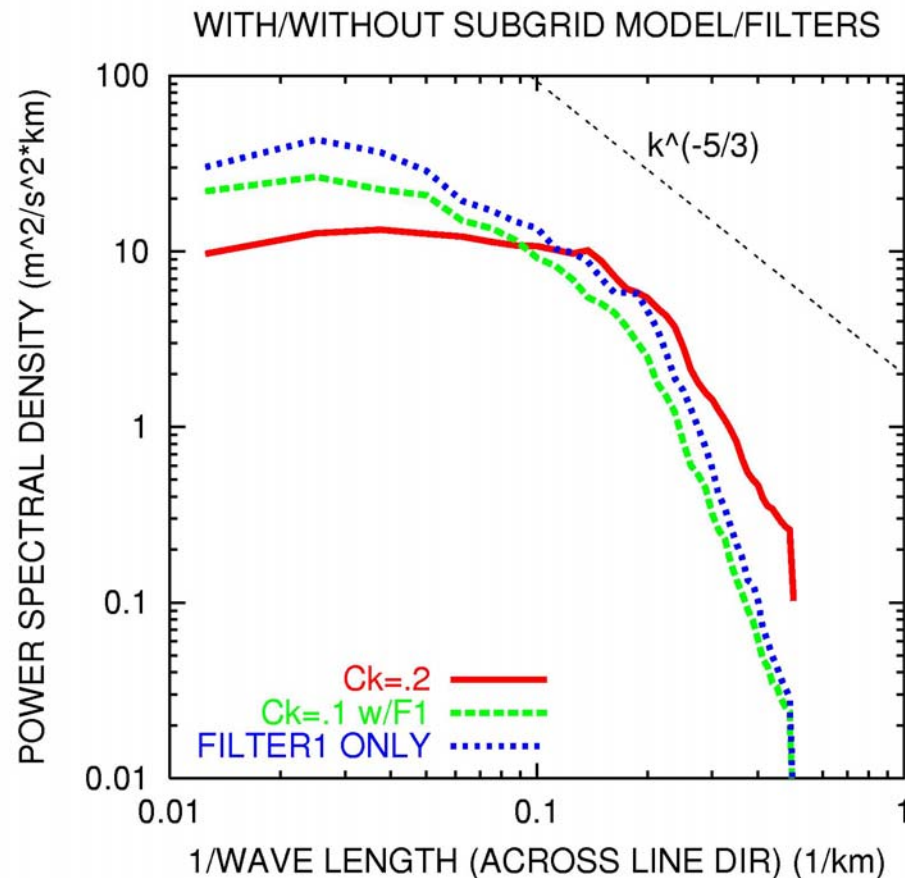


(Bryan et al. 2003)

乱流粘性・数値粘性の効果

スコールラインのシミュレーションで得られた高度3 kmでの鉛直流の空間スペクトル。

乱流モデルによる粘性効果、人工粘性による効果を見ている。

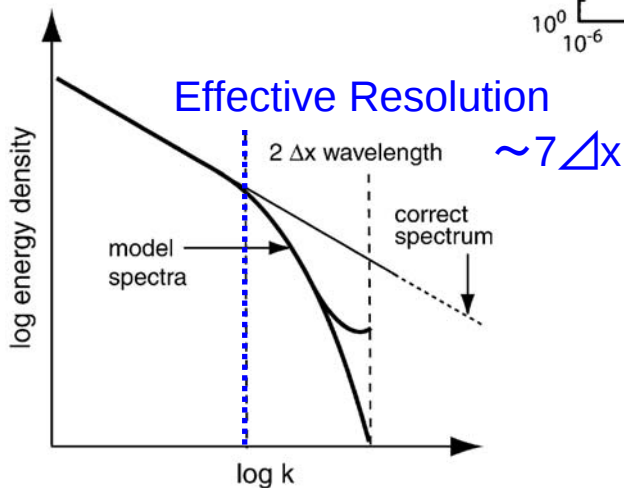
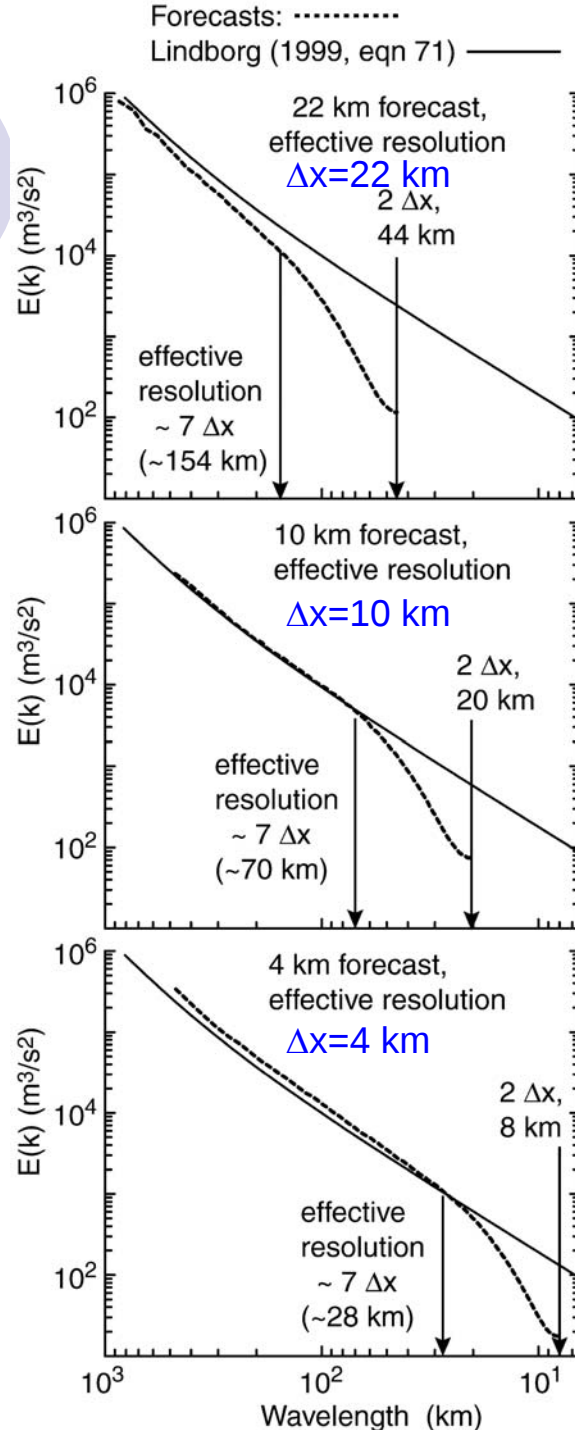
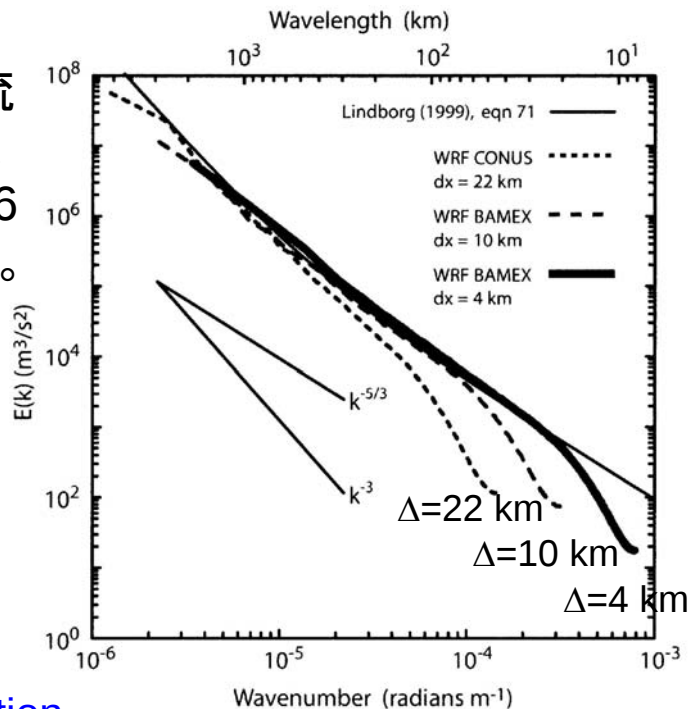


(Takemi and Rotunno 2003)

メソモデルのスペクトル

格子依存性

WRFモデルによるメソスケール予報での対流圏(3-9 km)における速度スペクトル。2003年6月のBAMEXのケース。



2 Δx まで十分に解像されているわけではない

(Skamarock 2004)

まとめ：これまでの研究から

- 積雲および組織化したメソ対流系は、静的安定度・下層/中層の湿度プロファイル・鉛直シアーによって、強度・構造・持続性が決まる。
- 対流運動(乾燥/湿潤)によってマイクロスケールの物質輸送が決まる。
- 高解像度計算をする際には、モデルのフィルタリング(乱流粘性・数値粘性)の影響を念頭におかねばならない。
- 何が解像された現象であるかの把握が必要である。
- 降水粒子・エアロゾルの微物理過程は、周囲の温度場・湿度場に影響を受け、また影響を与える。よって、微物理過程と雲スケールの力学の両者を考慮した雲・降水現象の研究が必要である。

今後の展望

- 10^9 個の格子点数でのfull physicsシミュレーションが可能として
 - 10 m格子幅で $(10 \text{ km})^3$ の湿潤対流Large-eddy simulation
 - 積雲シミュレーションのreference
 - LESでのモデル化に対する依存性も10 m格子になれば小さい(?)
 - 雲微物理・エアロゾル: binモデル vs bulkモデル
 - 乱流: LES vs RANS
 - 環境の温度・湿度・エアロゾル分布に対する感度
 - $O(1 \text{ km})$ 格子のモデリングの改善
 - LES領域はネスティング。境界条件の与え方が問題
- 検証用の細密観測の実施
 - 積雲スケールの細密観測
 - 技術的に可能な新しい測器の開発との連携
 - モデル化/パラメタリゼーションに関連付けられる物理量の測定
- 測器開発の技術者、観測研究者、モデル研究者の密な連携
- 雲微物理・エアロゾル微物理・乱流の微細過程のサイエンス