

ラージ・エディ・シミュレーションを用いた
対流系と境界層の乱流過程の研究

伊藤純至（東北大学）

内容

0. ラージ・エディ・シミュレーション (LES) とは？

1. 対流系：線状降水帯の理想化LESとスペクトル解析を通じた乱流の特徴の理解

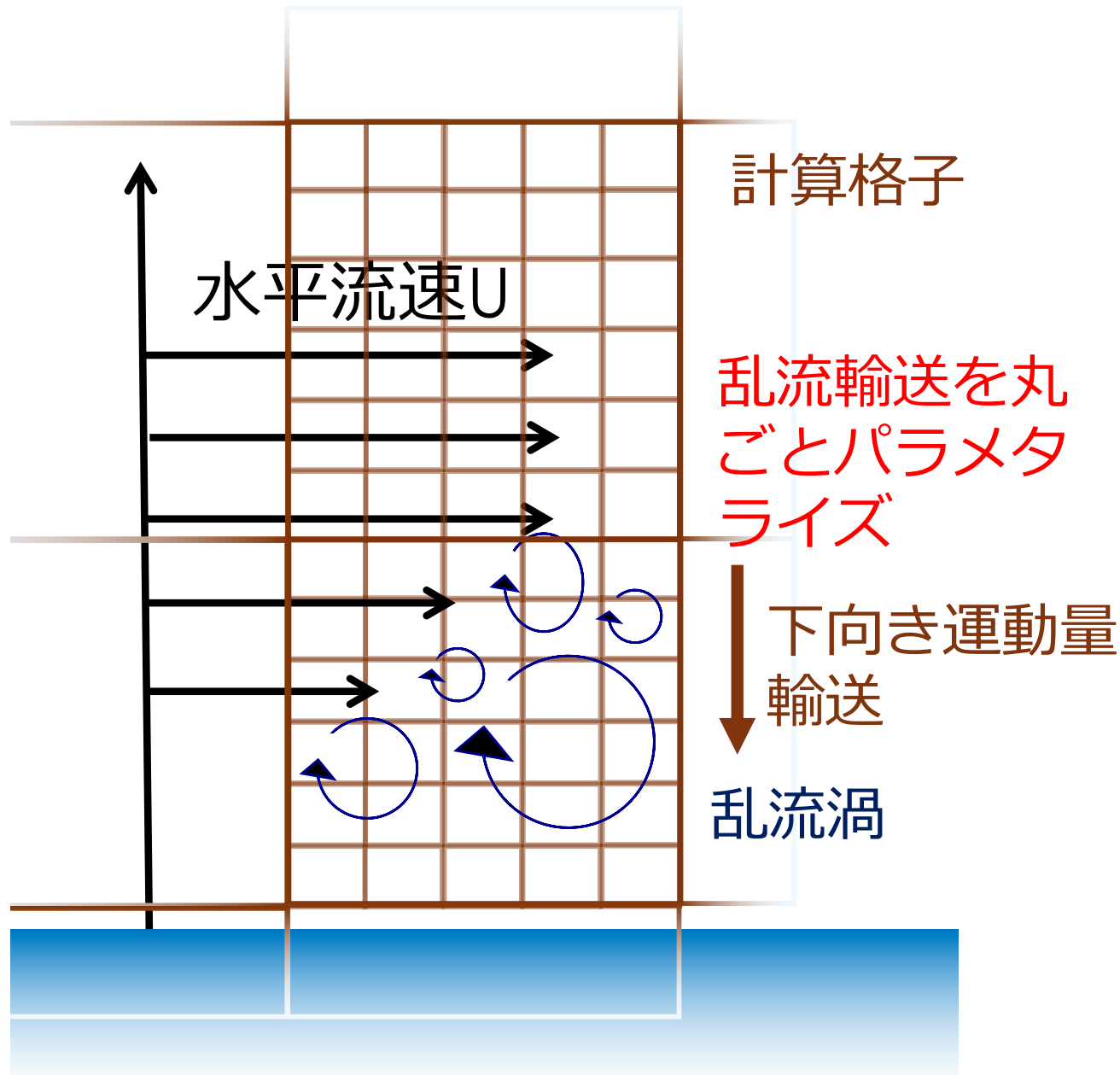
Didier Ricard 博士(Meteo-France)との共同研究

2. 境界層：LESを利用したMYNNモデルの再検討-TKE逆勾配輸送の導入

尾前 亮太郎 大学院生(東北大学M2)との共同研究

3. まとめ

ラージ・エディ・シミュレーション (LES) とは



“レイノルズ平均”
モデル(RANS)

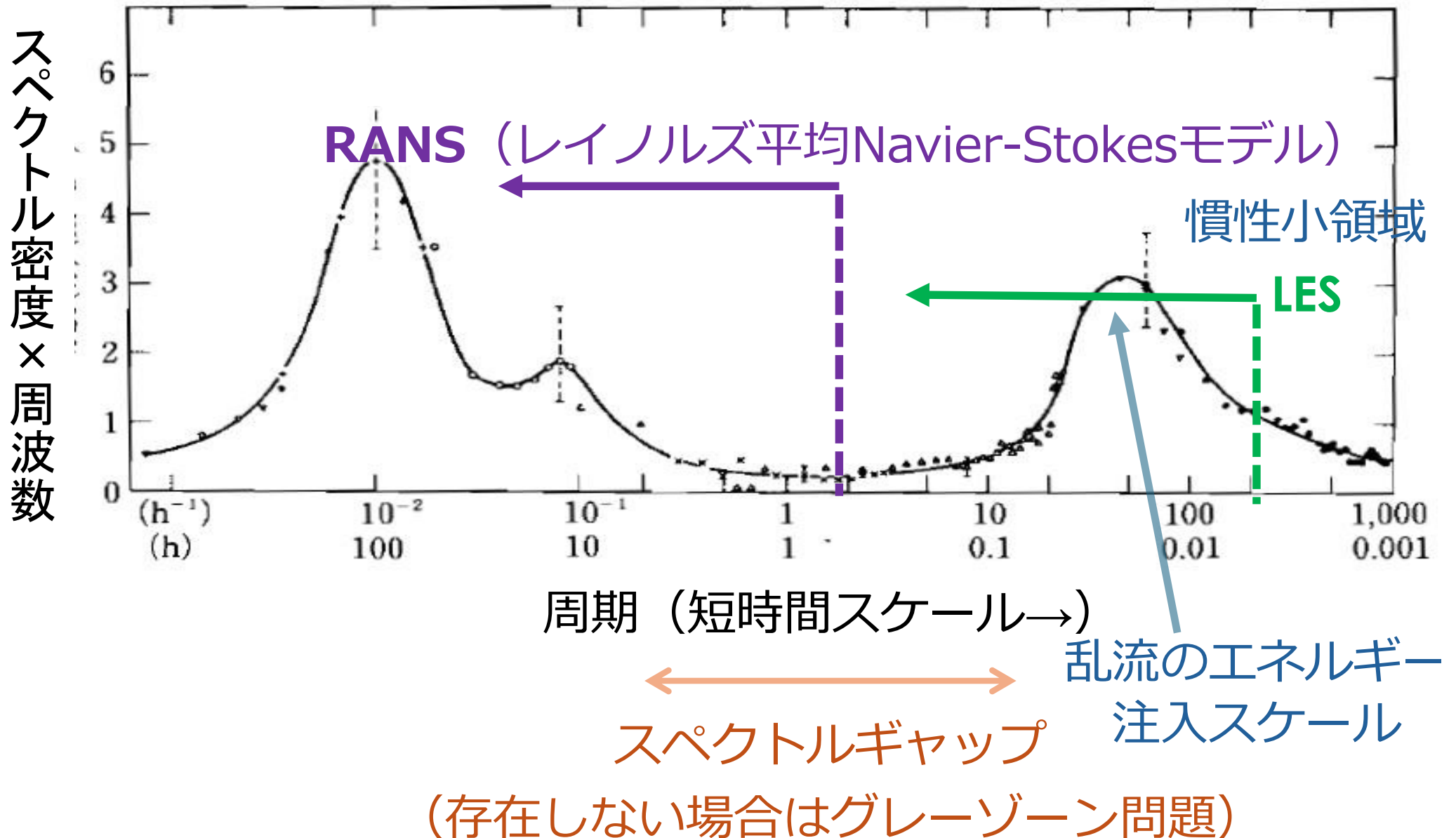


LES: 乱流構造をある程度、陽に格子状で表現

- パラメタライズの不確実性は軽減
- × 計算負荷が大きい

大気変動のエネルギースペクトル

露場観測：Van der Hoven (1957)



内容

0. ラージ・エディ・シミュレーション (LES) とは？

1. 対流系：線状降水帯の理想化LESとスペクトル解析を通じた乱流の特徴の理解

Didier Ricard 博士(Meteo-France)との共同研究

2. 境界層：LESを利用したMYNNモデルの再検討-TKE逆勾配輸送の導入

尾前 亮太郎 大学院生(東北大学M2)との共同研究

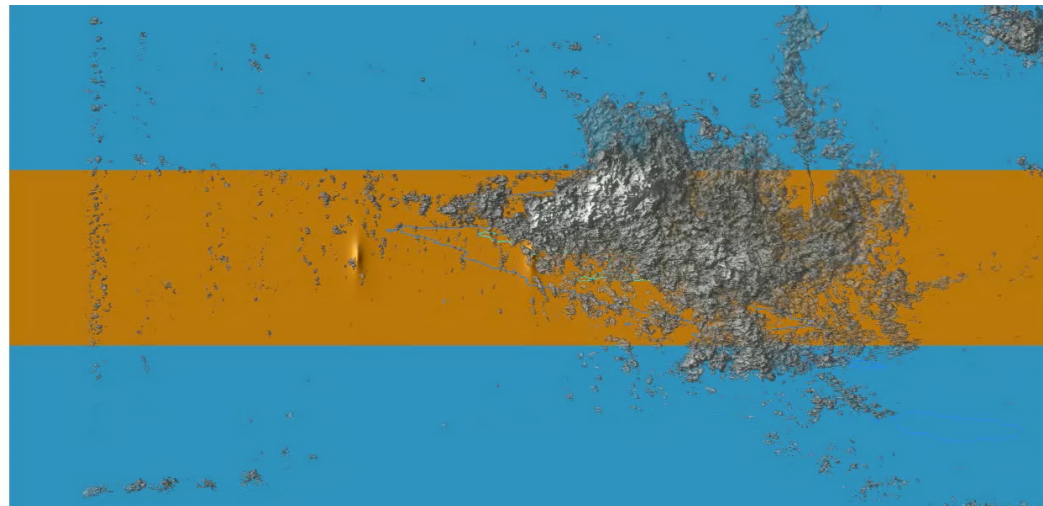
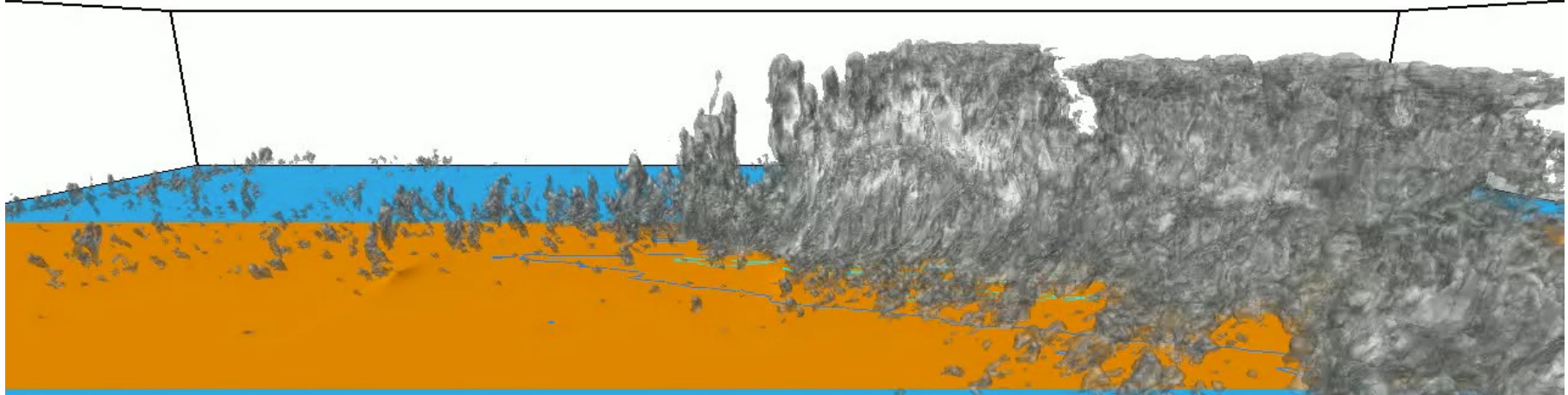
3. まとめ

対流系=線状降水帯の理想化LES

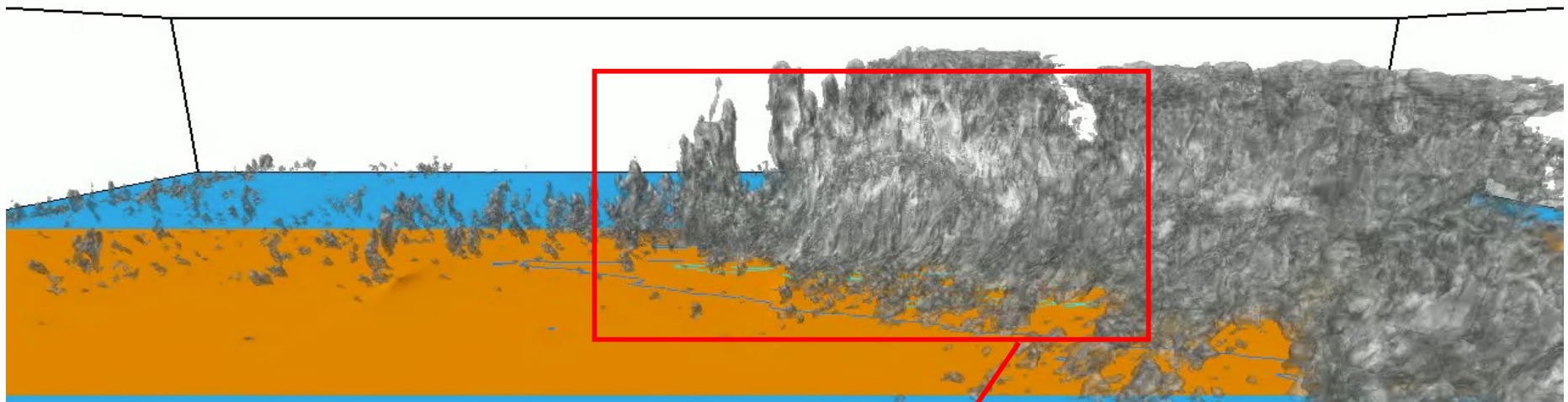
Ito et al. (2021)

$dx=150\text{m}$

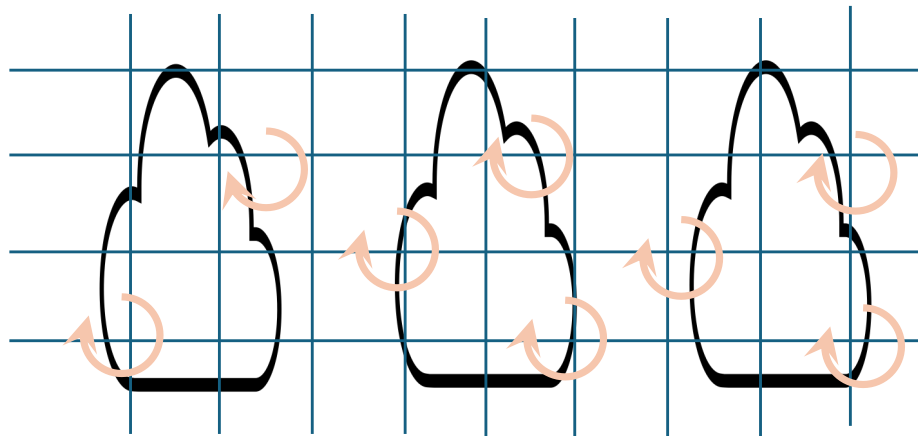
計算開始6時間（降水系発達後）→12時間後



線状降水帯の理想化実験による サブグリッド乱流モデルの開発



多数の積乱雲のアンサンブル



長時間平均

→ 乱流モデルの開発

Watanabe and Ito (2024)

理想化実験のコンセプト

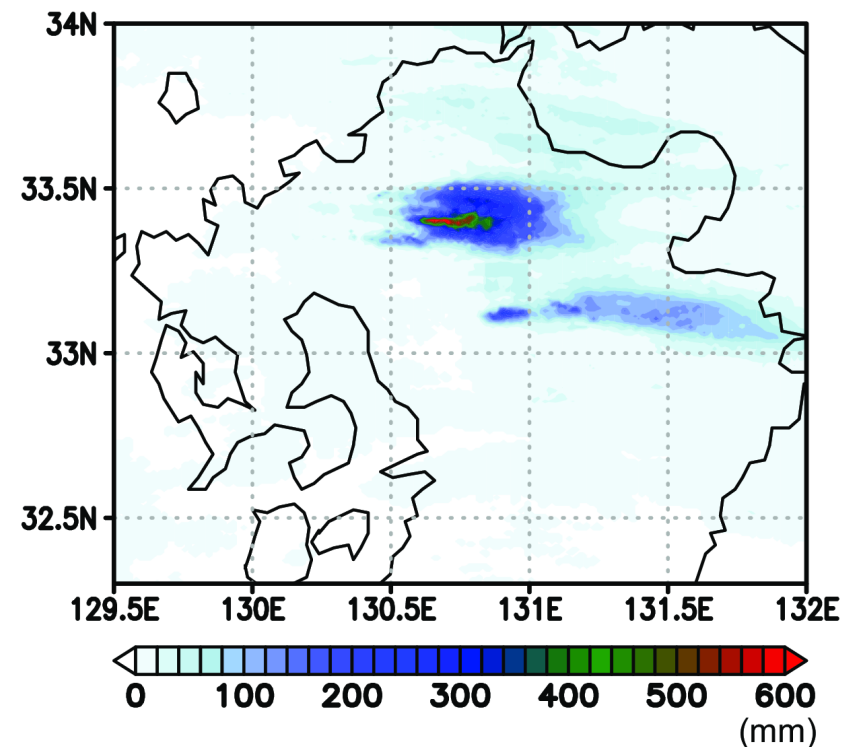
- 2017年九州北部豪雨を想定
→非常に局在した強雨域
- 停滞のメカニズム→地形やコールドプールの寄与？



- 感度実験（津口、2018）：それらが無い場合であっても、**降水系はある程度停滞**

⇔ 予備実験：地形やバブルのみを置いた理想実験では停滞しない

2017/7/5 12時～18時の積算雨量（解析雨量より）

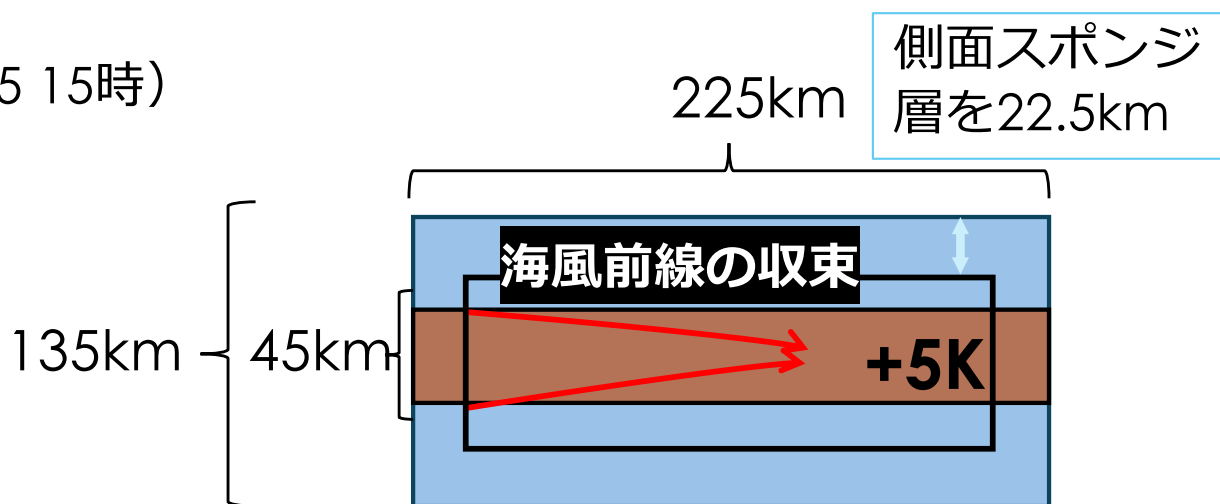
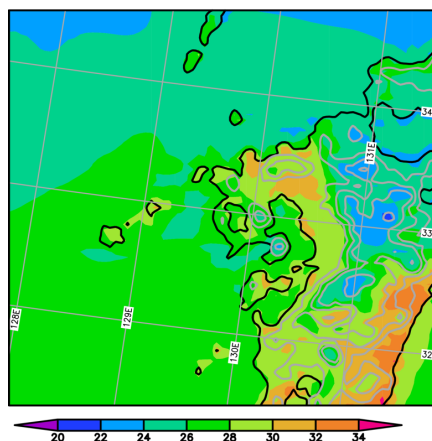


計算設定

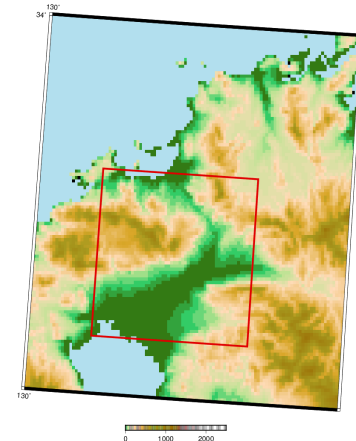
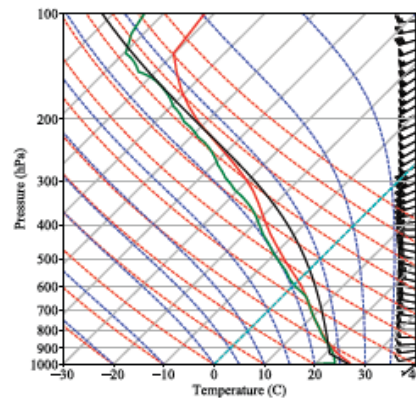
- モデル : JMANHM
- 計算領域 : 東西225km×南北135km×鉛直19.4km
(側面スポンジ領域を22.5km)
- 水平解像度dx : **150m**, 300m, 600m
- 鉛直 : 100層、解像度は～100m
- 時間積分 : 12時間
- 側面は開放境界、コリオリ効果なし
- 地形なし、**海陸面のコントラストのみ**を導入、

↑ 計算領域の中央を陸、南北を海

毎時大気解析の地上気温 (7/5 15時)

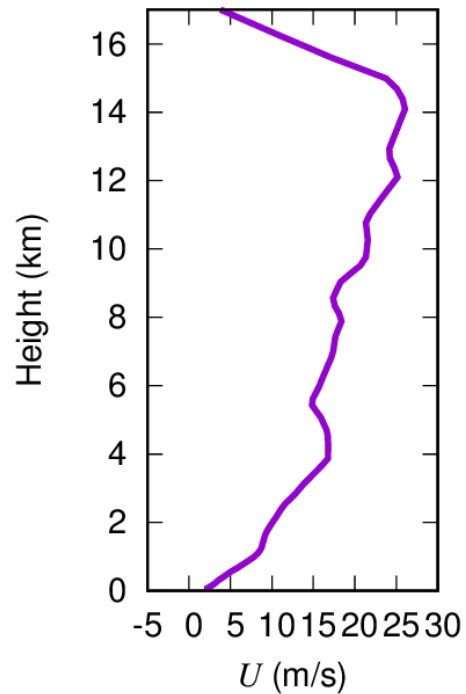


初期値・境界値

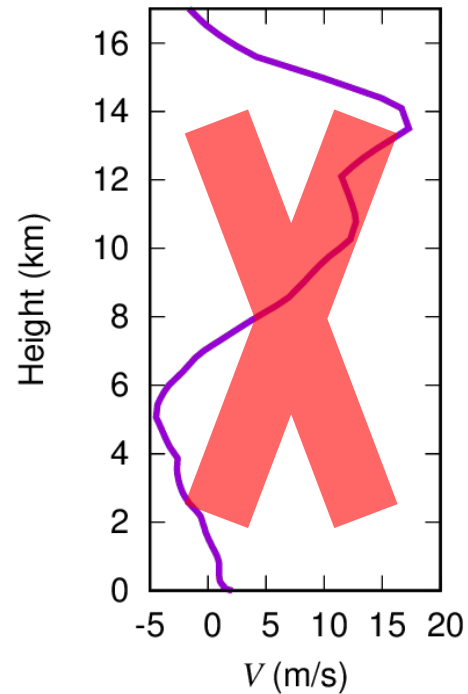


メソ解析値を赤線
範囲で平均
2017/7/5 15JST

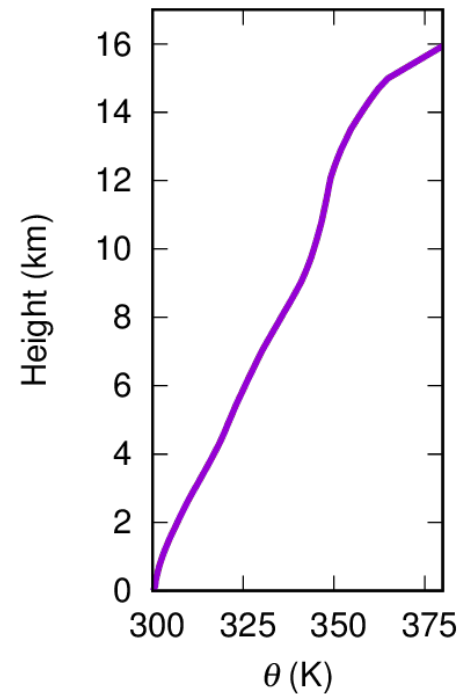
東西風



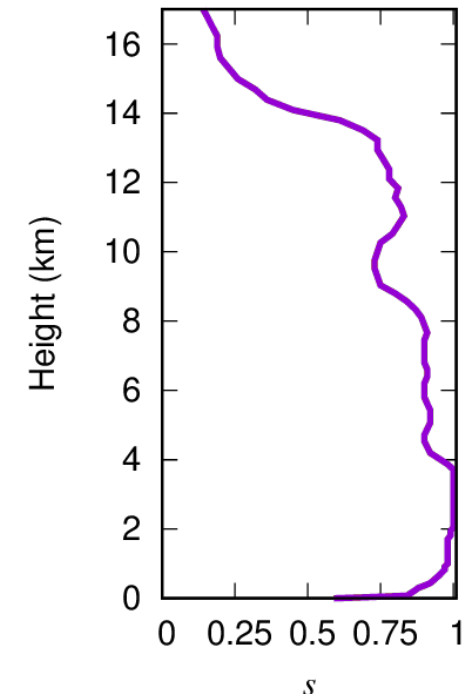
南北風



温位



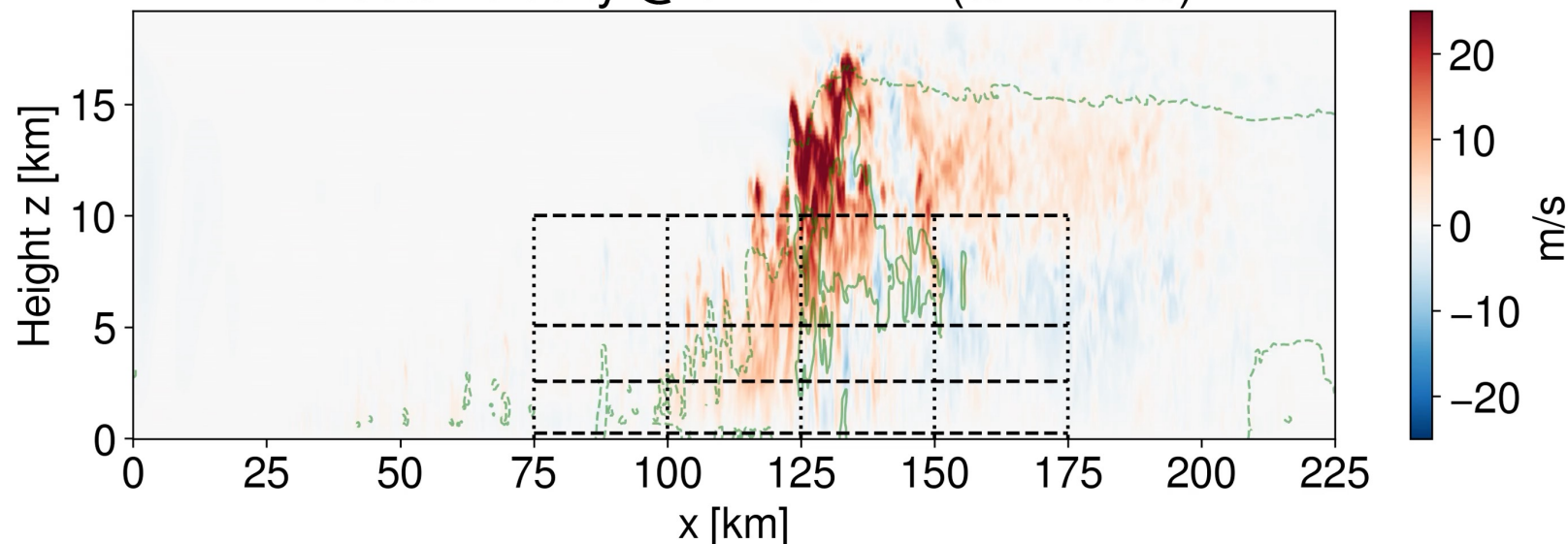
相对湿度



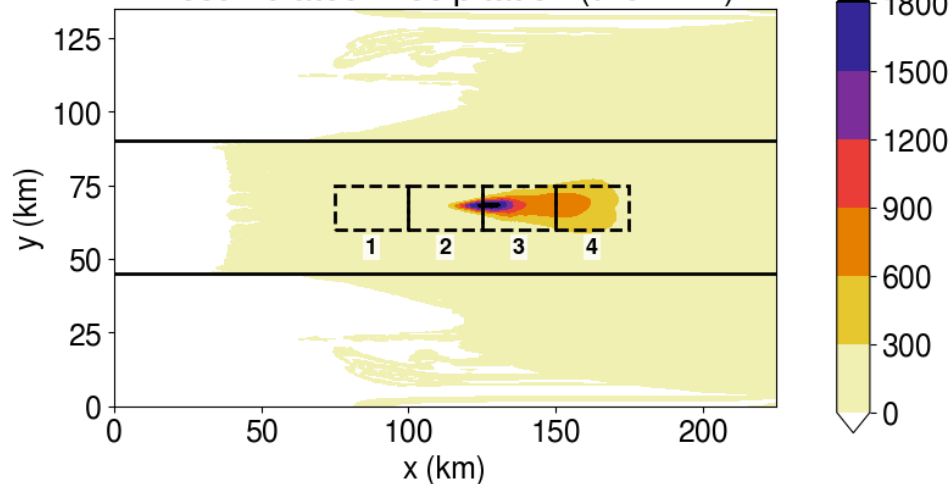
単純化のため南北風を除く

理想化実験の結果

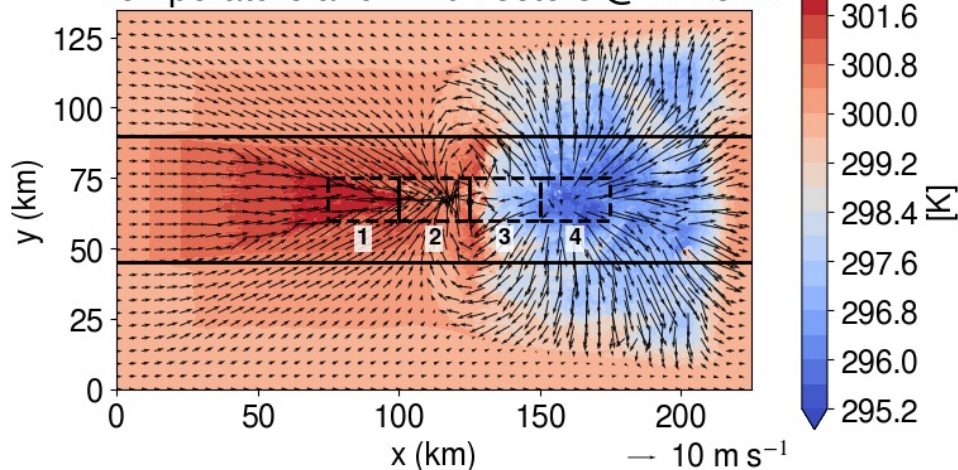
Vertical velocity @ $t=720$ min. (all modes)



Accumulated Precipitation ($t=6-12$ h)



Temperature and wind vectors @ $z=25$ m

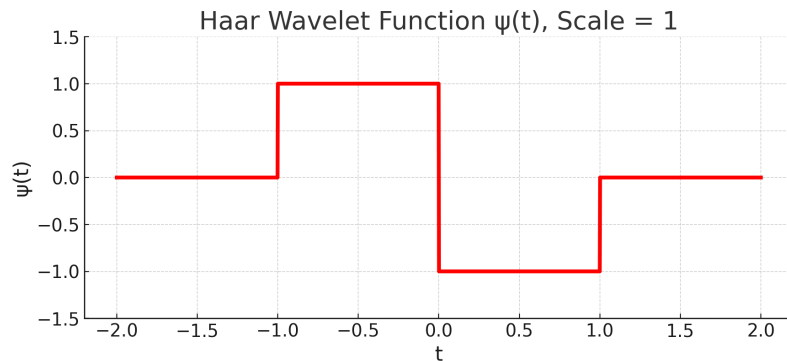


バックビルディング: 固定位置で積乱雲のライフサイクル

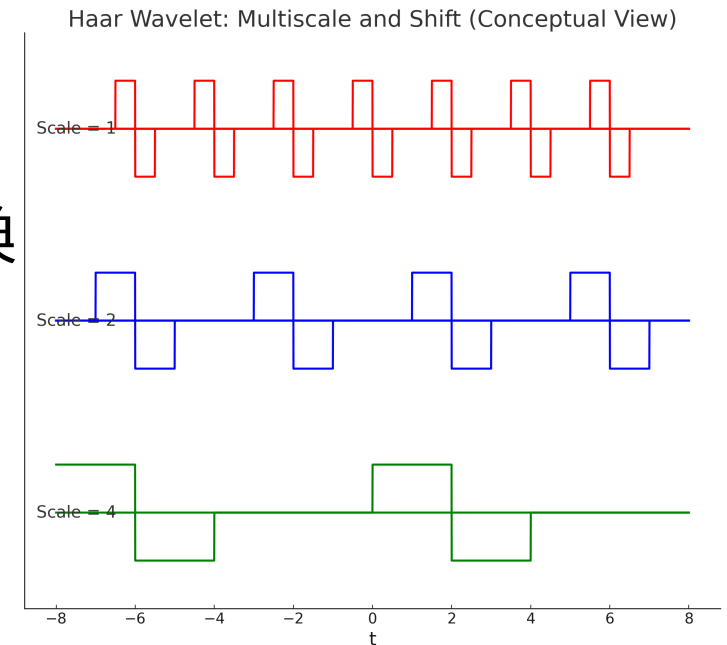
Area 1: 発生期 → Area 2: 発達期 → Area 3: 成熟期 → Area 4: 衰退期

離散ウェーブレット解析

ウェーブレット基底

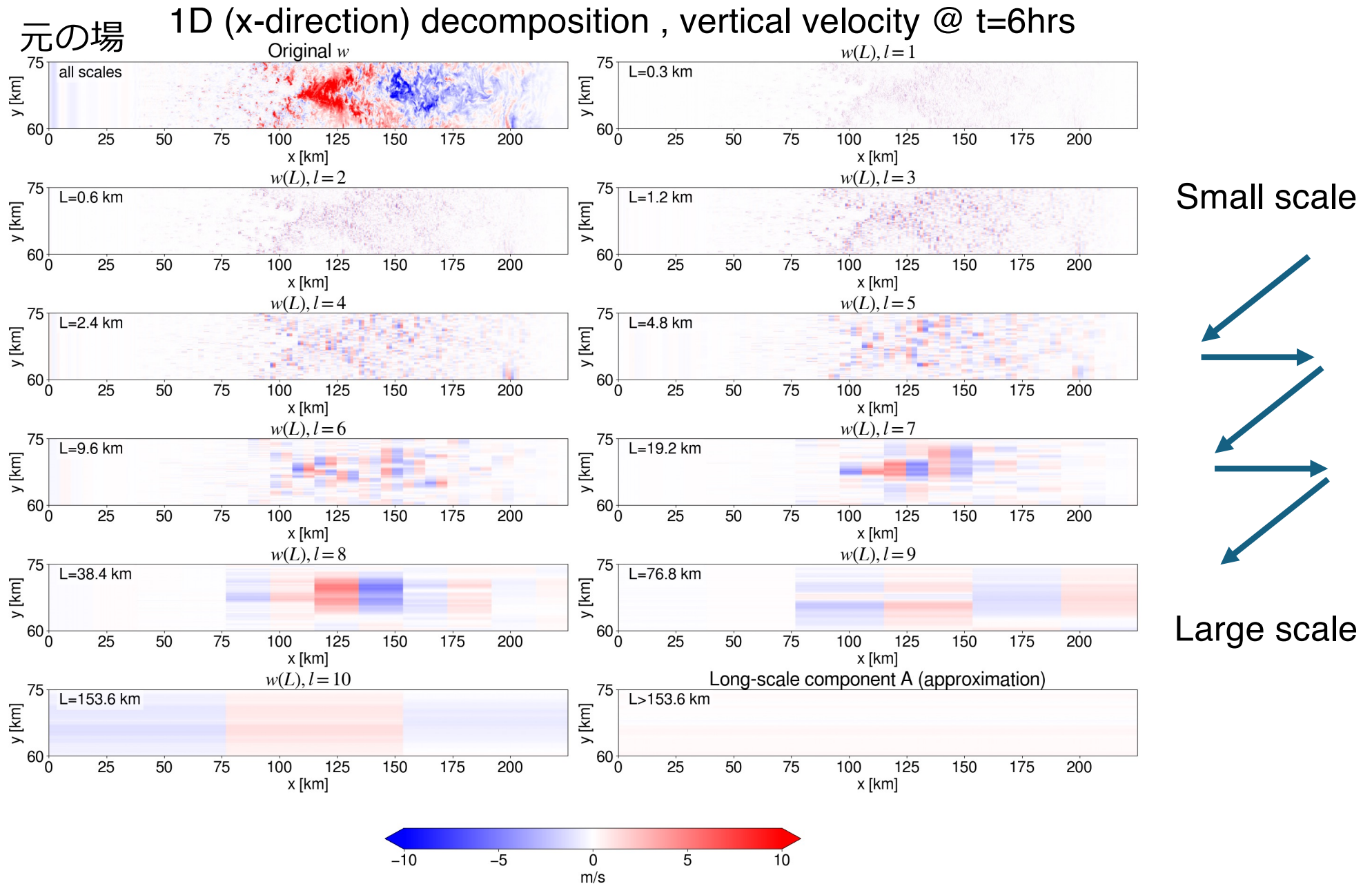


並進
or スケール変換



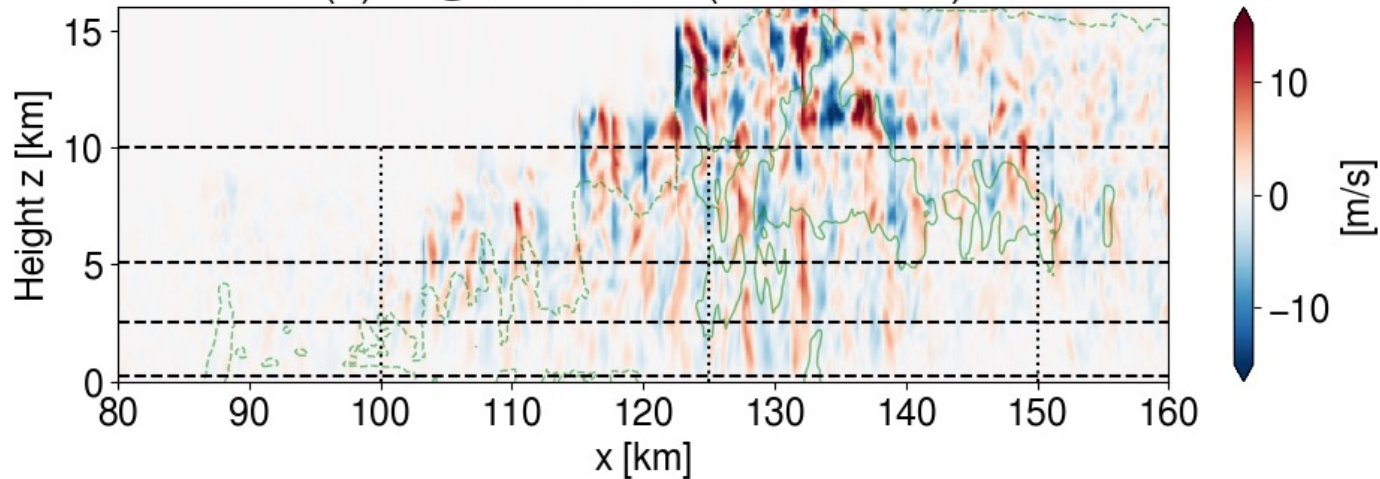
- 正規直交基底を形成
- 周期性の仮定が不要

ウェーブレット分解した鉛直速度（水平断面）



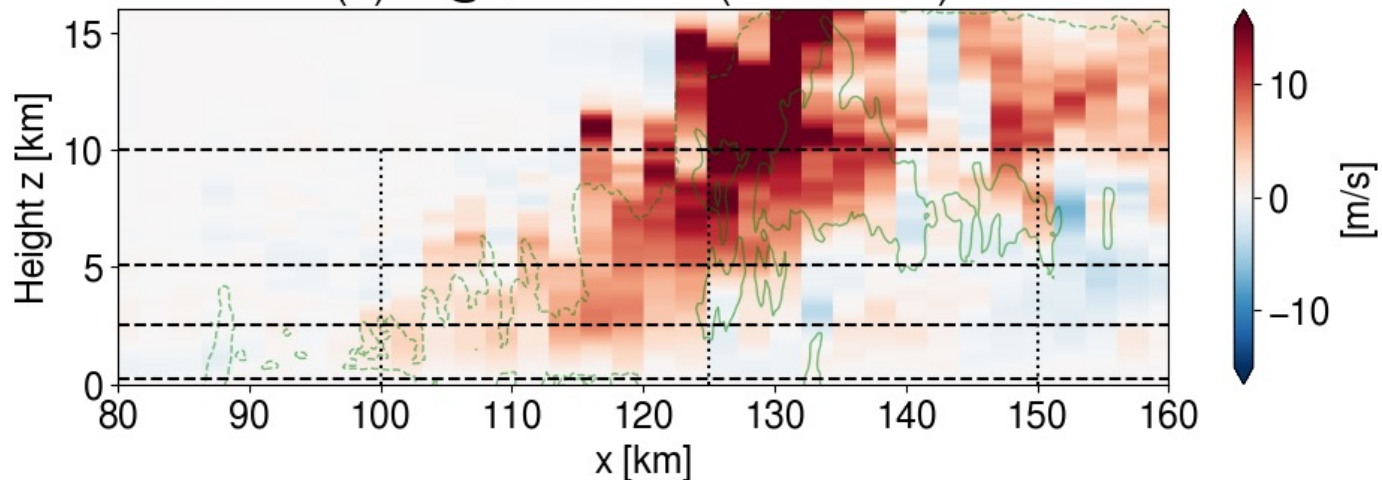
鉛直速度のウェーブレット再構成 (鉛直断面)

(a) w @ $t=720$ min. ($L \leq 2.4$ km)



2.4km以下の
スケール
(high-pass)

(b) w @ $t=720$ min. ($L > 2.4$ km)



2.4kmより大
きいスケール
(low-pass)

各エリア・高度における w^2 (エネルギー) の スペクトル * 144ステップのアンサンブル平均

エリア： 発生

発達

成熟

衰退

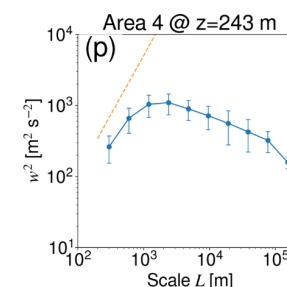
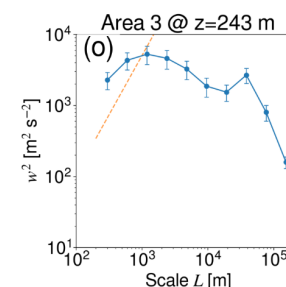
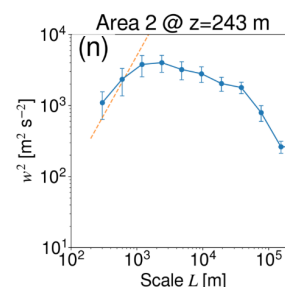
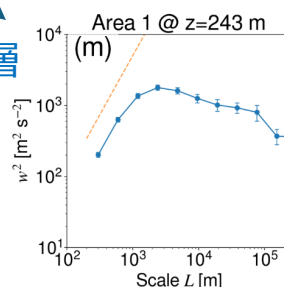
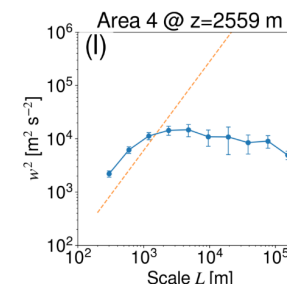
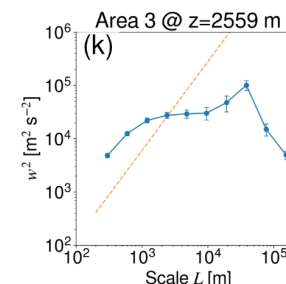
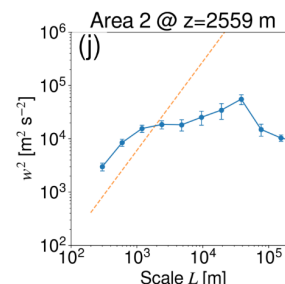
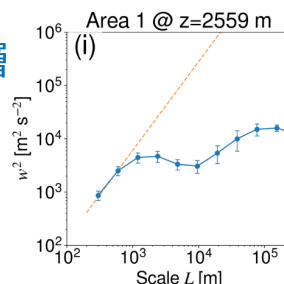
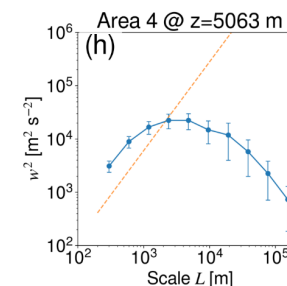
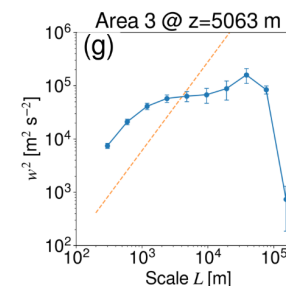
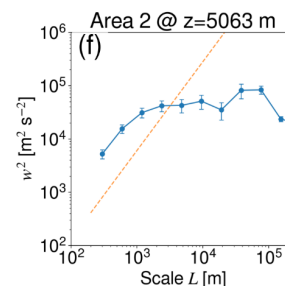
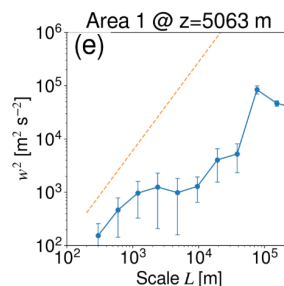
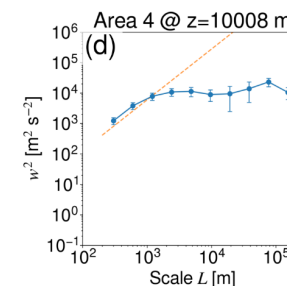
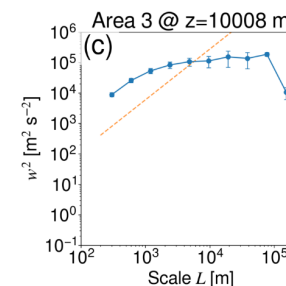
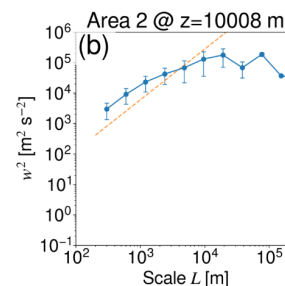
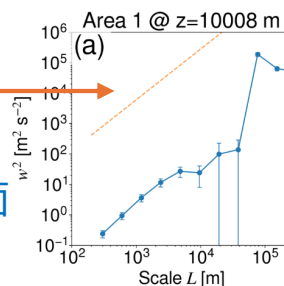
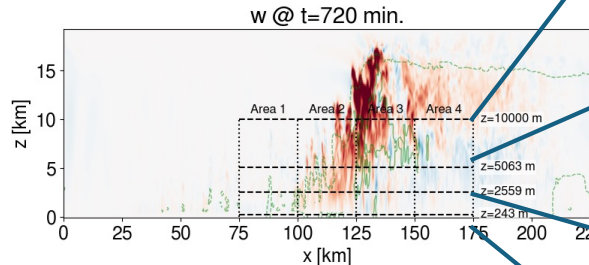
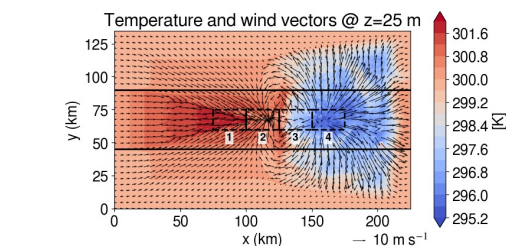
慣性小領域の理論的な
スペクトル($L^{5/3}$)

高度：
圏界面

中層

下層

境界層

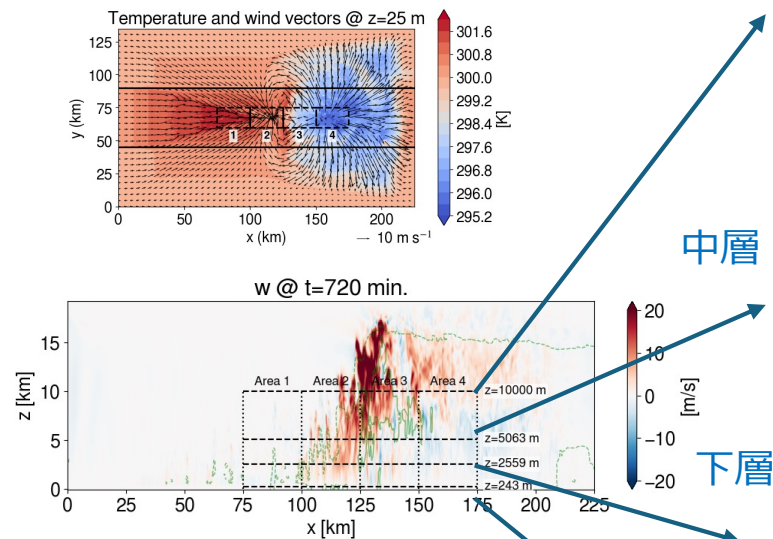


- 小スケールでは慣性小領域のスペクトル (除く成熟域の境界層)
- 境界層以外はメソスケールにピーク
- 発生域上空での高い間欠性

各エリア・高度における θ^2 (温位分散)のスペクトル

* 144ステップのアンサンブル平均

慣性小領域の理論的な
スペクトル($L^{5/3}$)



圏界面

中層

下層

境界層

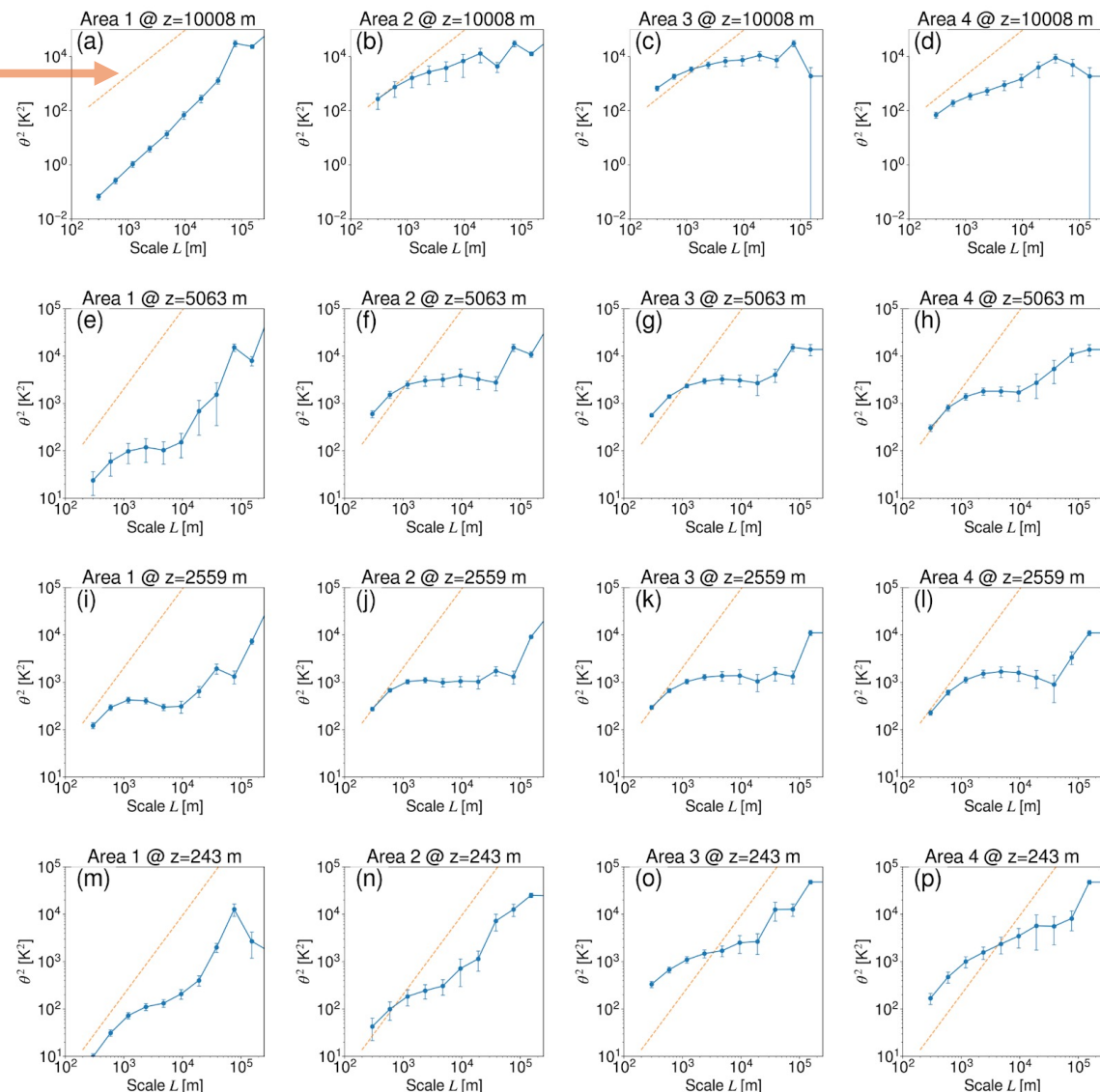
- 小スケールでは慣性小領域のスペクトル (除く成熟域の境界層)
- メソスケールにピーク

発生

発達

成熟

衰退



乱流熱フラックスの空間スペクトル

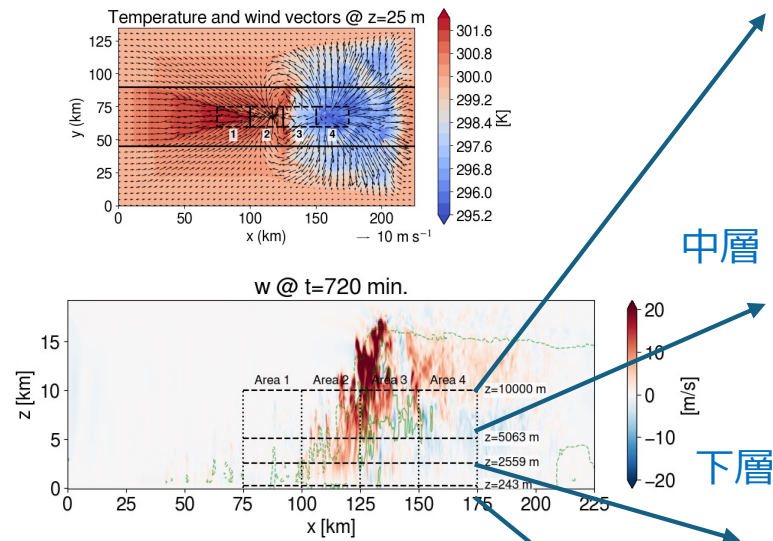
* 144ステップのアンサンブル平均、**上昇域**、**下降域**、**合計**

発生期

発達期

成熟期

衰退期



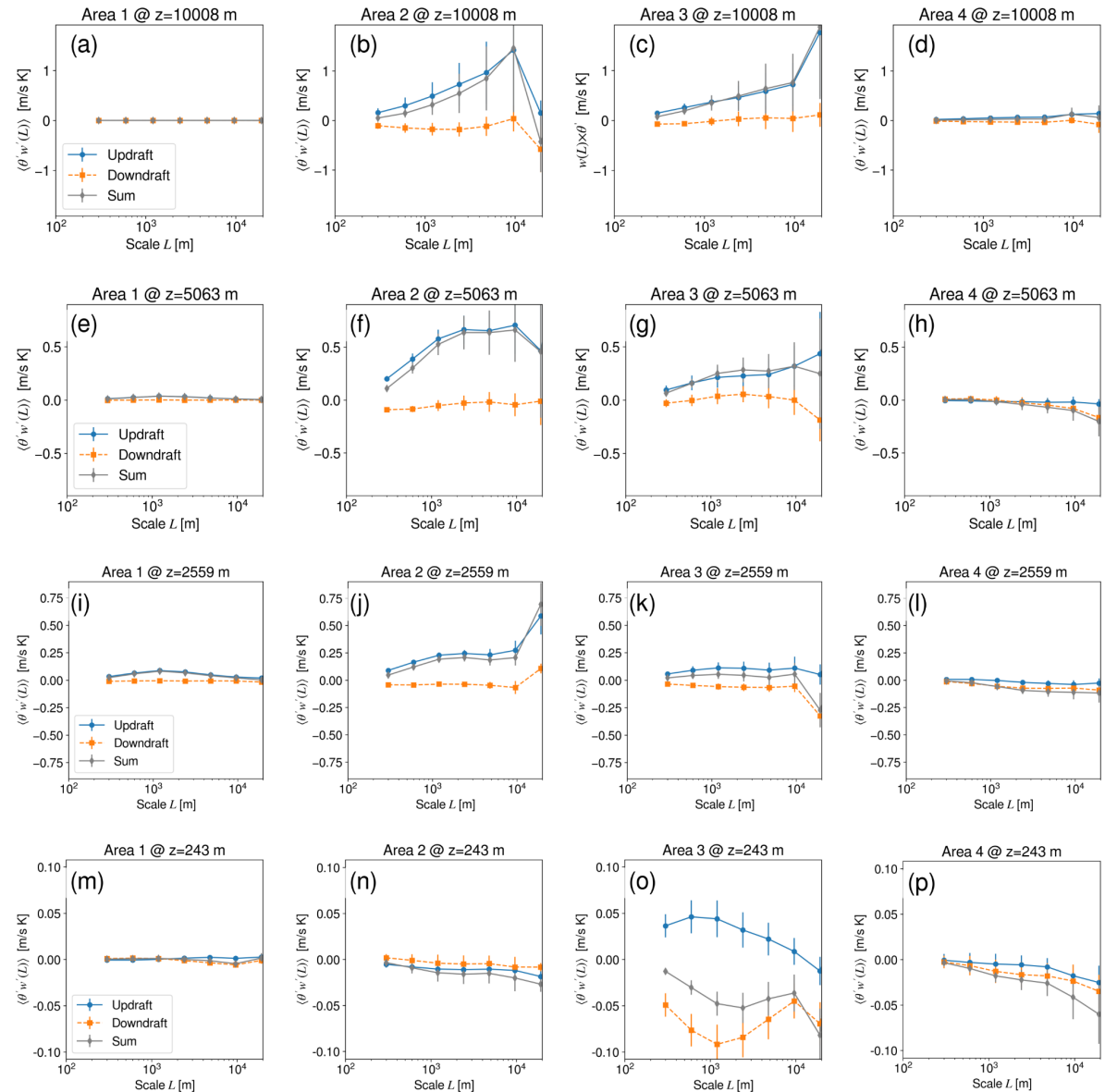
圏界面

中層

下層

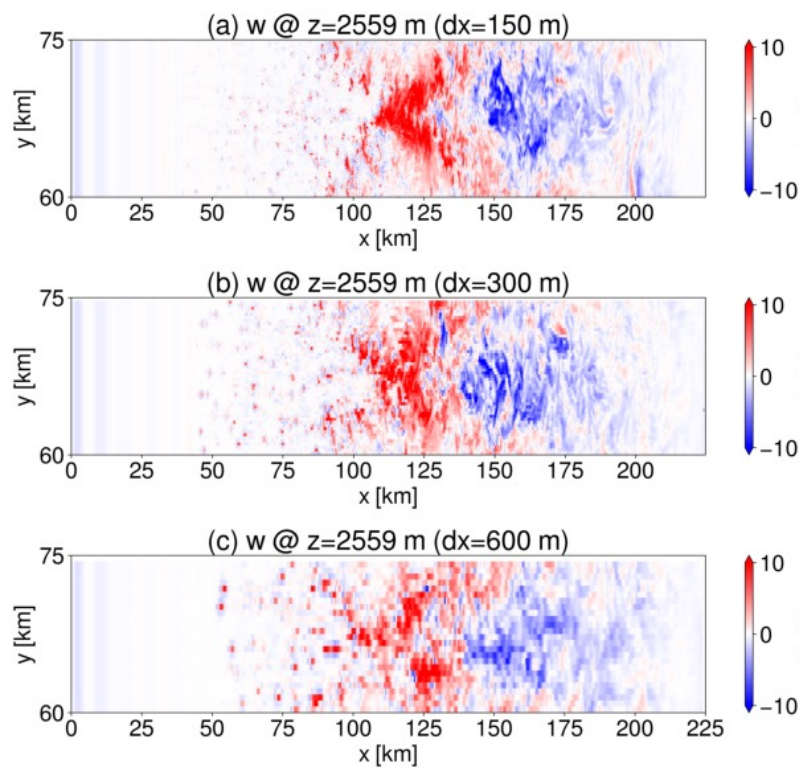
境界層

- 積乱雲内では上昇流による上向き輸送
- 境界層では下降流による下向き輸送

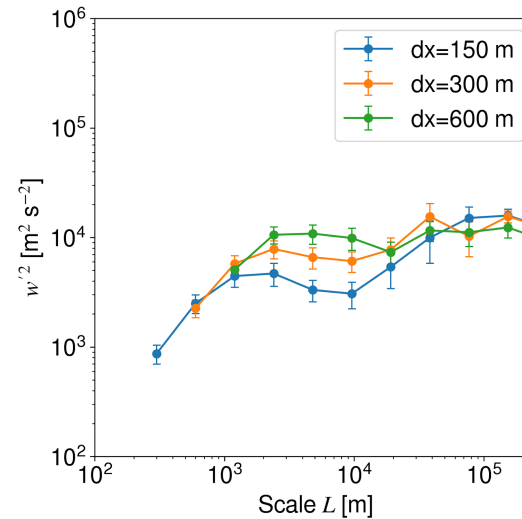


エネルギースペクトルの 解像度依存性

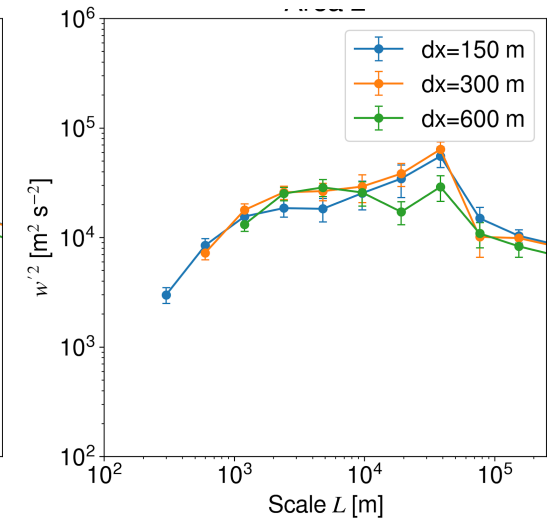
鉛直速度の水平分布（対流
圏下層）



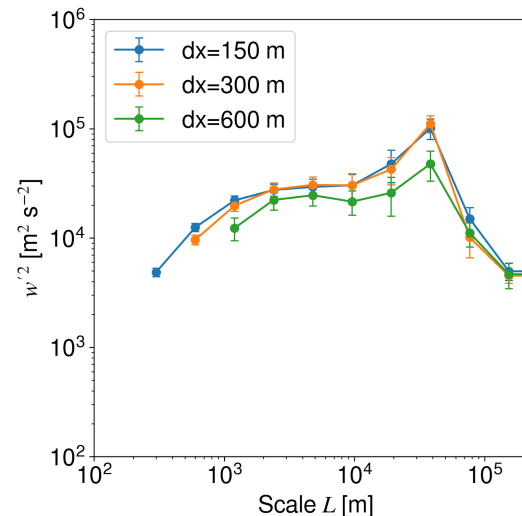
発生域



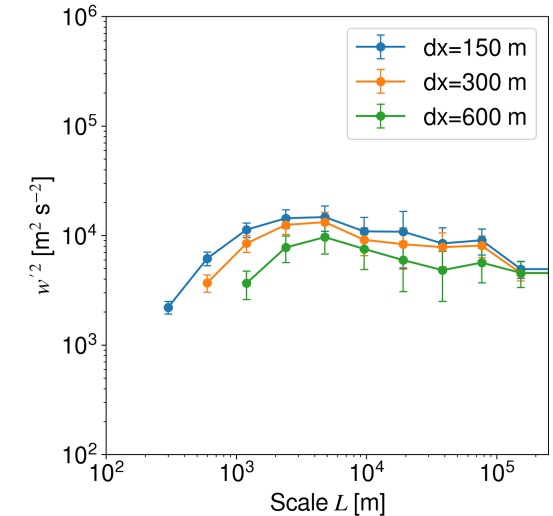
発達域



成熟域



衰退域



→ 粗い解像度のモデル：

LESと相対的にエネルギーは、発生期では過大 ↔ 衰退期は過小

まとめ（対流システム）

- 線状降水帯の理想化LES→対流システムのモデリング研究に活用可能
- 離散ウェーブレット変換による解析



- プリユーム（小スケール）と上昇流（メソスケール）を分離
- 小スケールでは慣性小領域の $-5/3$ 乗のスペクトルにおおよそのる（積乱雲下部の境界層は除く）
- 乱流輸送の特徴、解像度依存性を明らかに

内容

0. ラージ・エディ・シミュレーション (LES) とは？

1. 対流系：線状降水帯の理想化LESとスペクトル解析を通じた乱流の特徴の理解

Didier Ricard 博士(Meteo-France)との共同研究

2. 境界層：LESを利用したMYNNモデルの再検討-TKE逆勾配輸送の導入

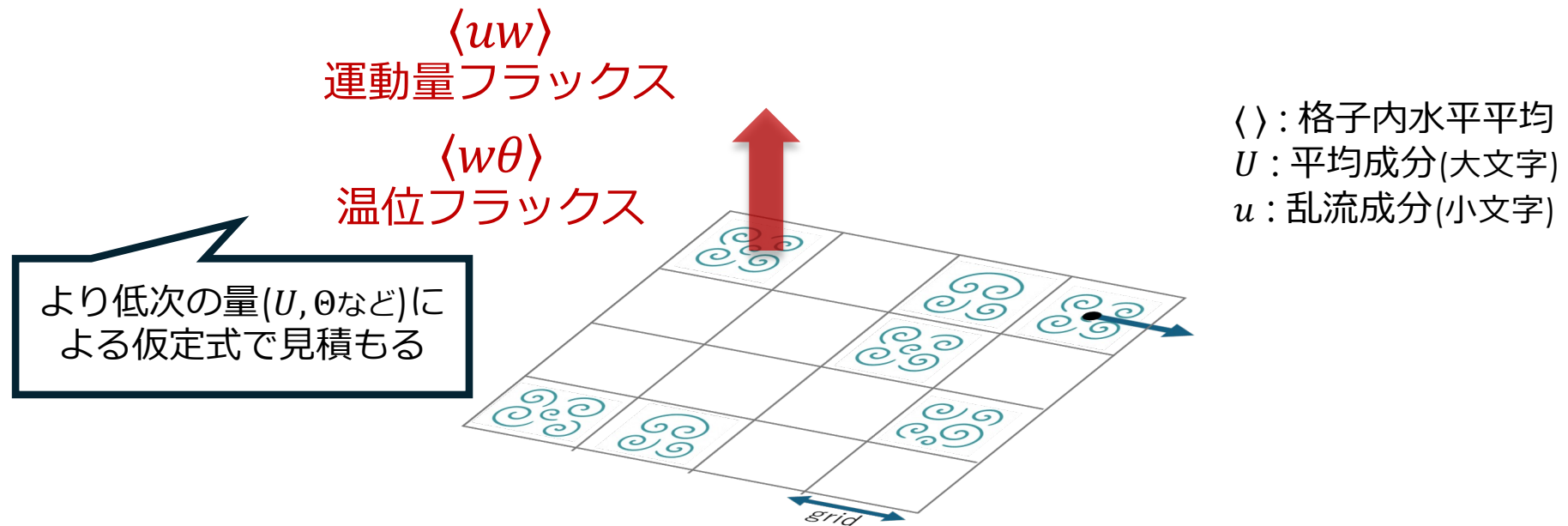
尾前 亮太郎 大学院生(東北大学M2)との共同研究

3. まとめ

乱流パラメタリゼーションについて

大気境界層ですべての乱流運動の解像は困難

➡ サブグリッドスケールの乱流輸送を解像スケールの量から見積もる

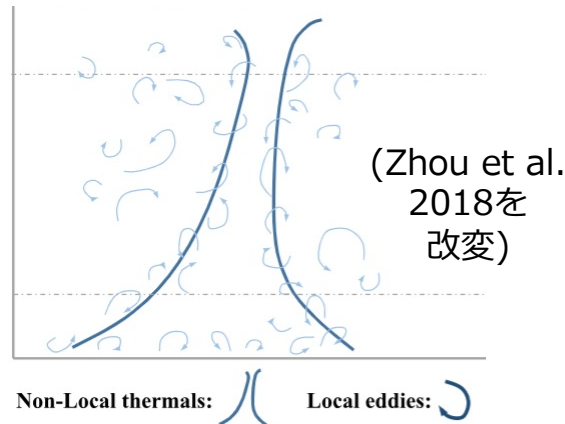


AsucaではMellor-Yamada-Nakanishi-Niino(MYNN)
Level 3 モデルを利用

(Nakanishi 2001, Nakanishi and Niino 2004, 2009; Mellor and Yamada 1974, 1982)

対流混合層での逆勾配輸送

対流混合層の模式図



非局所効果を表す**逆勾配輸送**が重要

MYNNモデルLevel3では温位フラックスの逆勾配輸送は自然に現れる

$$\langle w\theta \rangle = -K \frac{\partial \theta}{\partial z} + \gamma$$

(w, θ : 鉛直風速と温位の乱流成分,
 θ : 温位の平均成分, K : 拡散係数)

勾配輸送
Local

逆勾配輸送
Non-Local

乱流運動エネルギーTKE ($\frac{\langle q^2 \rangle}{2}$)のフラックス $\langle wq^2 \rangle$ でも**逆勾配輸送**は本来必要
(e.g. Zeman and Lumley 1975, Moeng and Wyngaard 1989, 中西 2016)

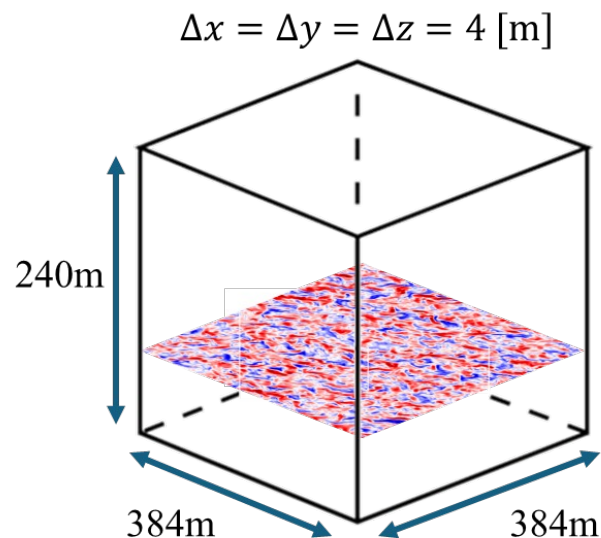
しかし, MYNNモデルでは圧力の項と合わせて 勾配輸送でのみパラメタライズ

$$\langle wq^2 \rangle + \frac{2}{\rho_0} \langle wp \rangle = -K_q \frac{\partial \langle q^2 \rangle}{\partial z}$$

勾配輸送
Local

MYNNモデルの設計に利用された乱流データベース

- ✓ Nakanishi(2001)では, LES(ラージエディシミュレーション)で再現した大気境界層の乱流データをMYNNモデルのために参照.
- ✓ 当時のLESは領域の広さに制約があった



スーパーコンピュータ「富岳」を用いて
Nakanishi,2001よりも
高解像度・広い領域のLESを実施

目的

↓
「TKEフラックスの逆勾配輸送」を導入し
MYNNモデルをより高精度化

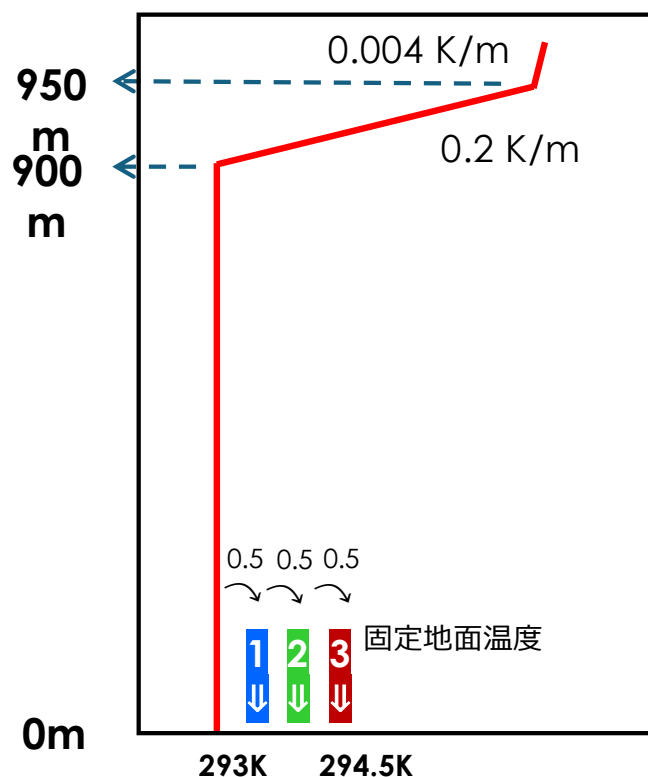
計算設定

	実験 A	実験 B
Model	SCALE-RM ver.5.5.3 (from RIKEN) (Scalable Computing for Advanced Library and Environment – Regional Model)	
$\Delta x = \Delta y = \Delta z$	2m	
領域	768m× 768m× 1000m	768m×768m× 240m
Δt	0.004 s	
積分時間	12000 s	
側面境界条件	2重周期境界条件	
サブグリッドモデル	Smagorinsky(1963) & Lilly(1962)型のサブグリッドスケール乱流モデル (Brown et al., 1994 と Scotti et al., 1993 による補正)	
地表面モデル	固定地面温度と普遍関数によるバルク法 (Beljaars and Holtslag, 1991; Nishizawa and Kitamura, 2018)	
固定地面温度[K]	A-1: 293.5, A-2: 294, A-3: 294.5	B-1: 293.5, B-2: 294, B-3: 294.5
初期風速と地衡風	時間空間的に一様 (2m/s)	

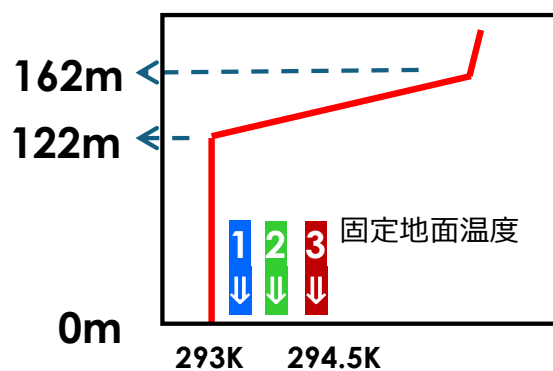
計算設定：温位プロファイルと地面温度

初期温位

実験 A

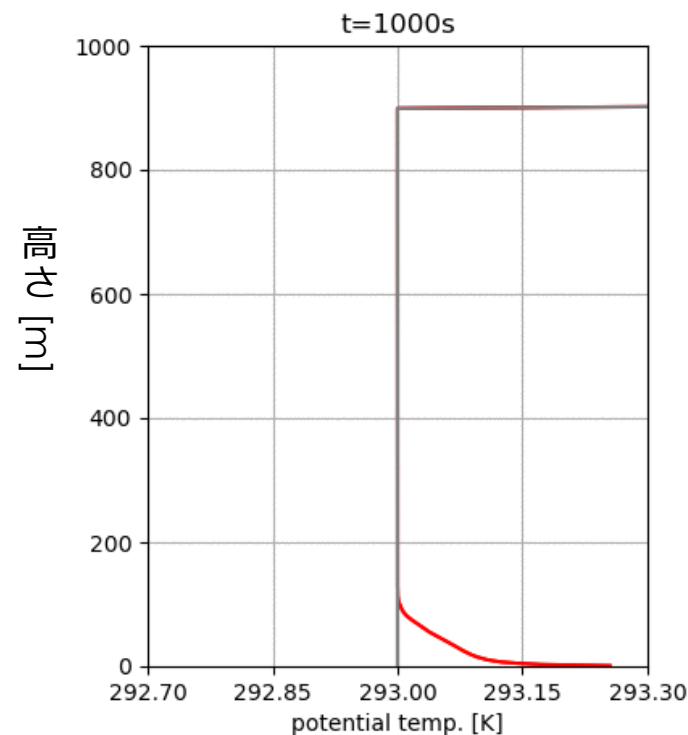


実験 B



時間変化

実験A-1



十分発達した対流混合層

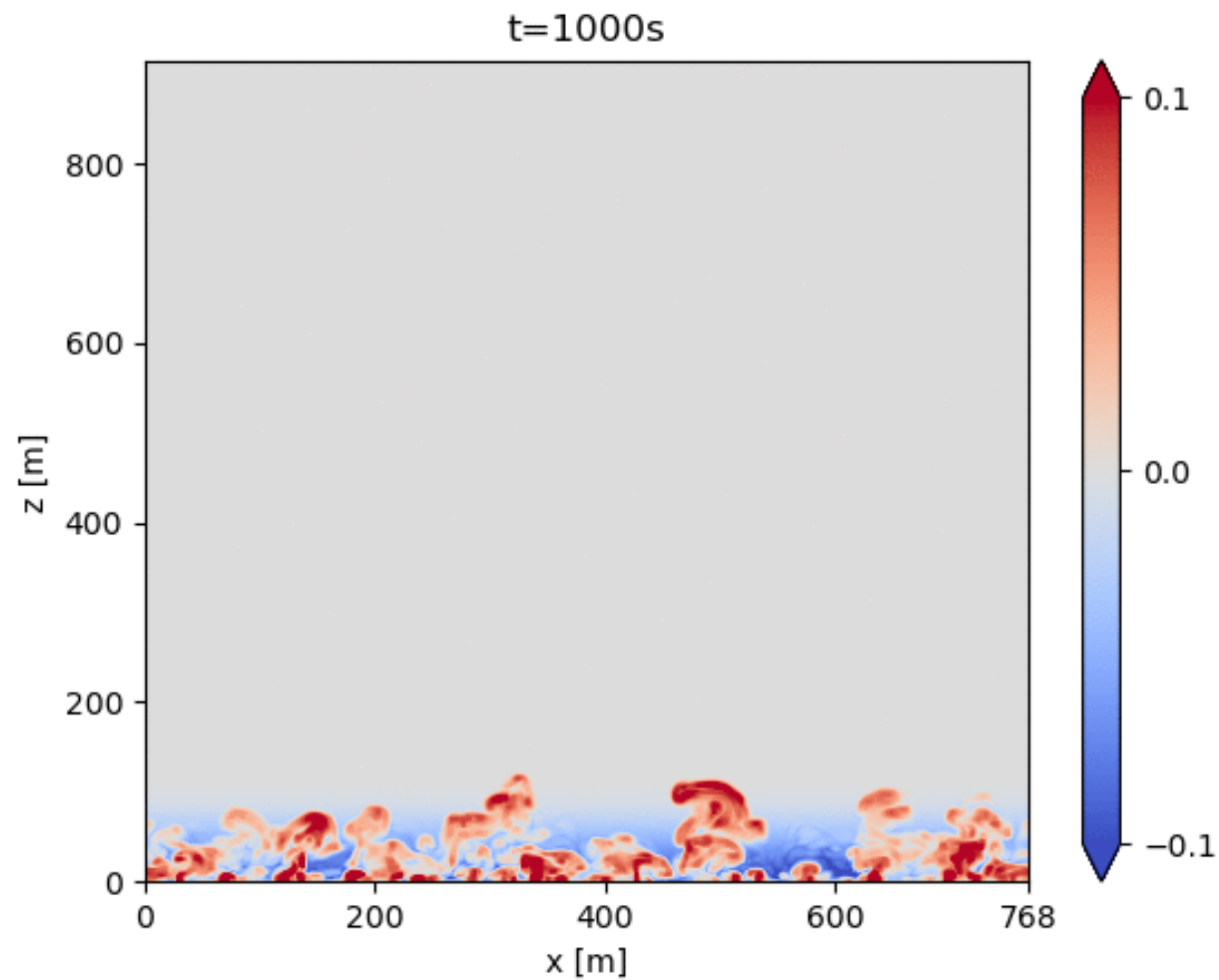


背の低い対流混合層

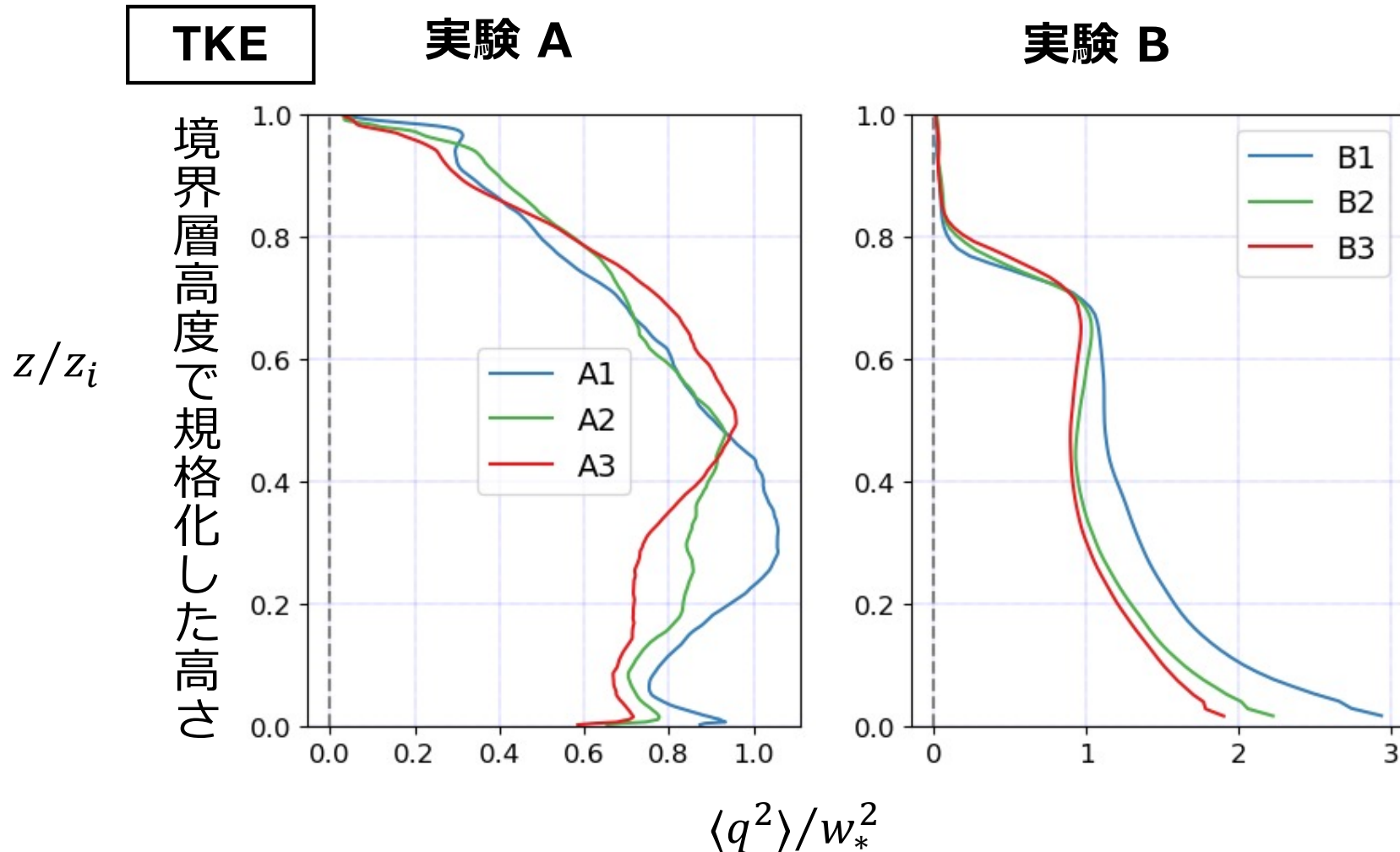
(Nakanishi, 2001と似た設定)

LESの計算結果

鉛直断面内の温位偏差



TKEプロファイルの違い



実験A（背の高い対流混合層）：境界層中層にピーク

実験B（背の低い対流混合層）：地表面付近にピーク

TKE輸送の診断式の改良

オリジナル

LESによる評価

診断式

$$\frac{\langle wq^2 \rangle + \frac{2}{\rho_0} \langle wp \rangle}{\text{-----}} = -K_q \frac{\partial \langle q^2 \rangle}{\partial z}$$

実線

破線

改良

$$\frac{\langle wq^2 \rangle + \frac{2}{\rho_0} \langle wp \rangle}{\text{-----}} = -\frac{1}{3} K_q \frac{\partial \langle q^2 \rangle}{\partial z} + \underbrace{C_{s1} \frac{Lg}{q\Theta} \langle w^2 \theta \rangle}_{\text{逆勾配輸送項}}$$

Sun and Ogura, 1980を参考に,
逆勾配輸送を表現できる項を導入
($C_{s1} = 4.41$, 勾配輸送の拡散係数 K_q も小さく変更)

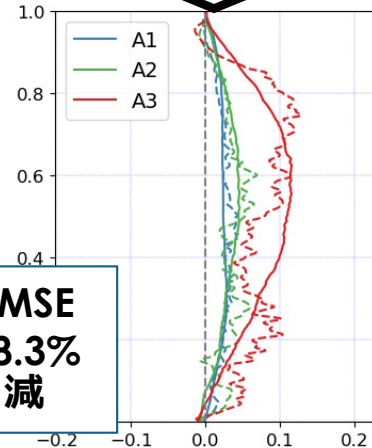
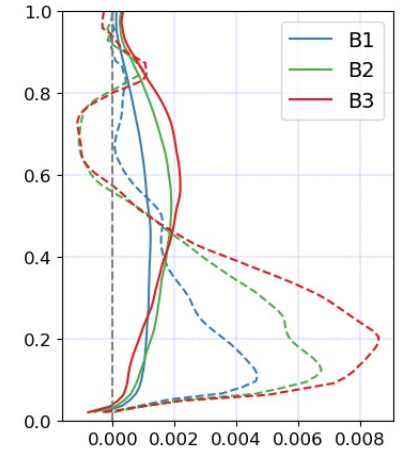
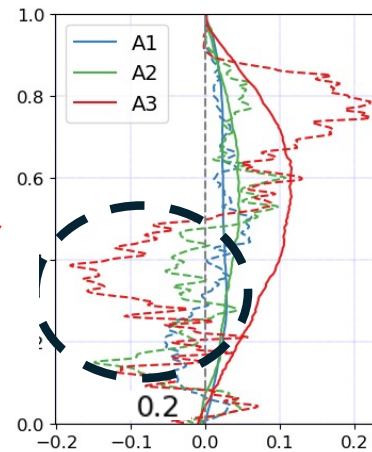
反対向きに輸送を診断してしまう

で規格化した高さ
 z/z_i

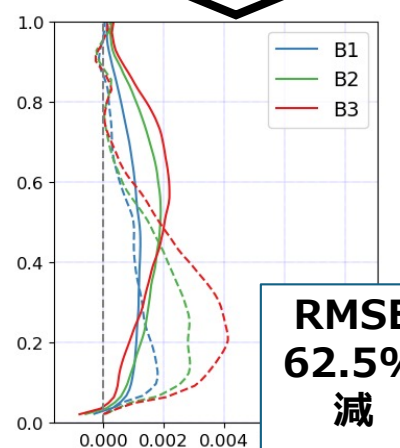
TKE鉛直輸送 [m^3/s^3]

実験 A

実験 B



RMSE
78.3%
減



RMSE
62.5%
減

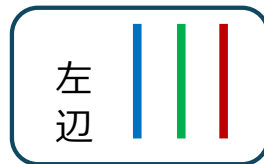
3次モーメント $\langle w^2 \theta \rangle$ の診断の追加

TKEフラックスに新たに必要な $\langle w^2 \theta \rangle \rightarrow$ MYNNでは診断していない

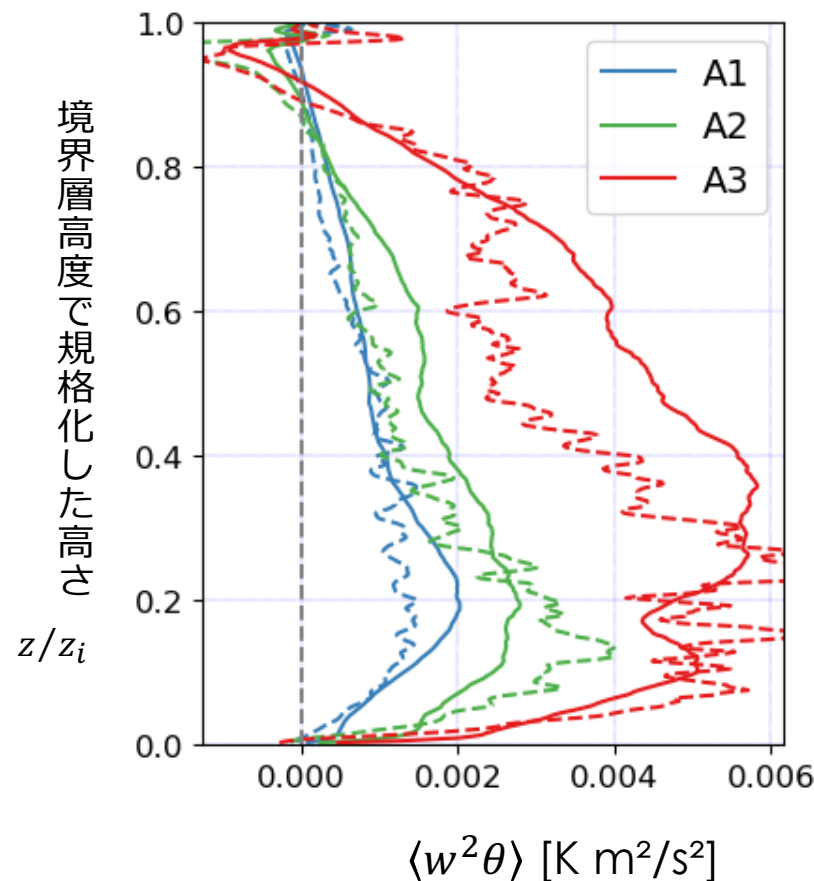
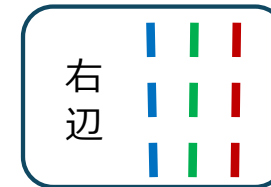
LESによる評価

診断式

実験Aのみ表示



$$\langle w^2 \theta \rangle = -K_q \frac{\partial \langle w \theta \rangle}{\partial z} + \underbrace{C_{s2} \frac{L}{q} \frac{g}{\theta} \langle w \theta^2 \rangle}_{\text{MYNNで診断}} \rightarrow \text{MYNNで診断} \quad (\theta^2 \text{の輸送項})$$

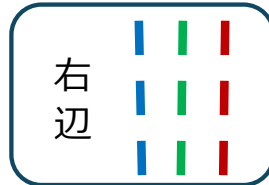


θ^2 の乱流輸送項 $\langle w\theta^2 \rangle$ への逆勾配項の追加

オリジナルのMYNN

Moeng and Wyngaard, 1989を参考に変更

実験Aのみ表示

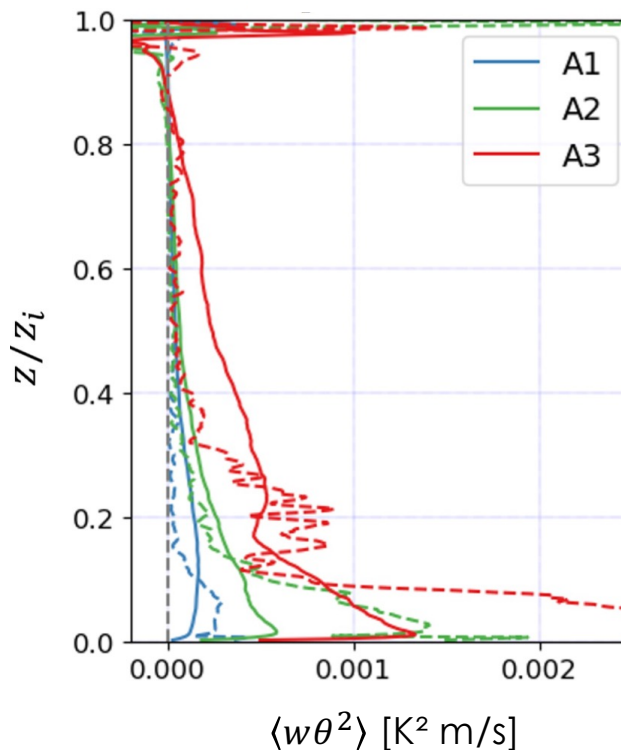


境界層高度で規格化した高さ

LESによる評価

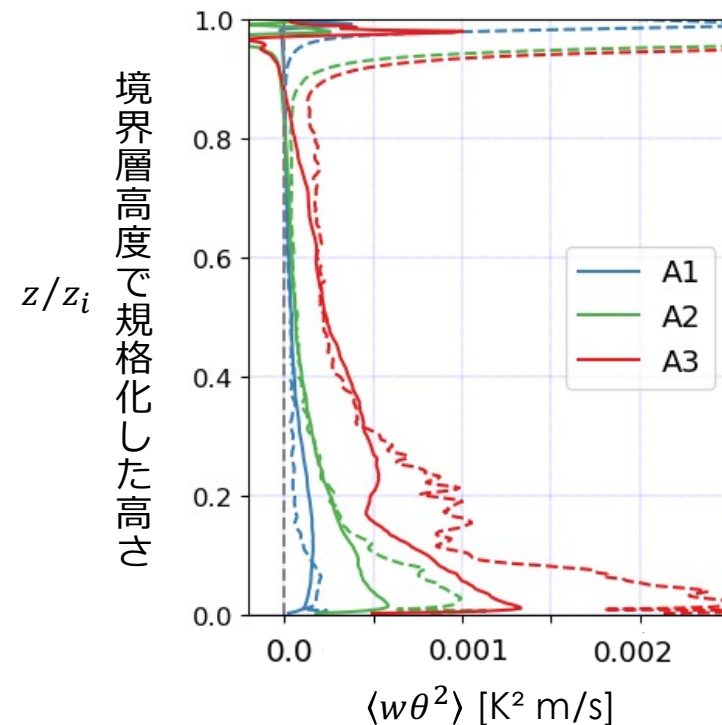
$$\langle w\theta^2 \rangle = -K_t \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z}$$

診断式



$$\langle w\theta^2 \rangle = -K_t \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z} + \frac{Lg}{q\Theta} \theta_* \langle \theta^2 \rangle$$

境界層高度で規格化した高さ



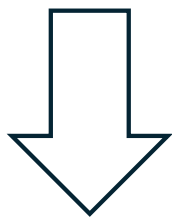
→ 逆勾配輸送項の導入により $\langle w\theta^2 \rangle$ の診断も改善

まとめ（MYNNモデル再検討）

広領域・高解像度のLESを実施

→ 発達した対流混合層を表現

MYNNモデルのTKE逆勾配輸送と新たなクロージャを導入



TKEの分布自体の改善を期待

まとめ（全体）

LESによって対流や境界層の「正解」とみなせるデータが得られる



- 線状降水帯など気象擾乱における乱流の特徴の理解
- 乱流パラメタリゼーションの研究

【課題】

- 間欠性・非等方性をどのようにパラメタライズするか？
- モデルへの実装