

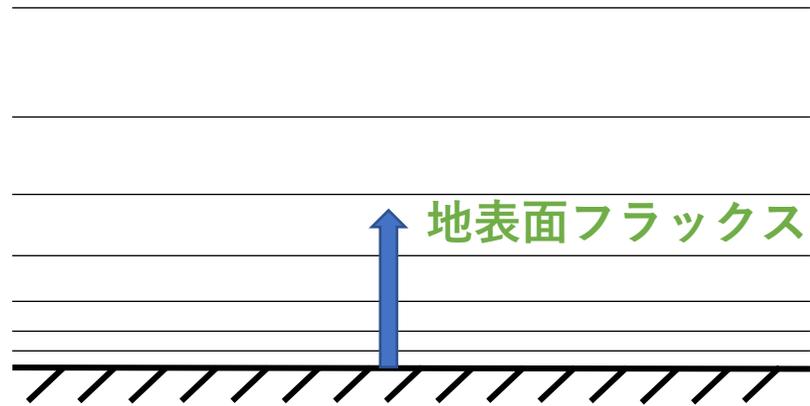
数値予報システムの高解像度化に対応した 地表面フラックス診断方法の改良

気象研究所 気象予報研究部

水野吉規

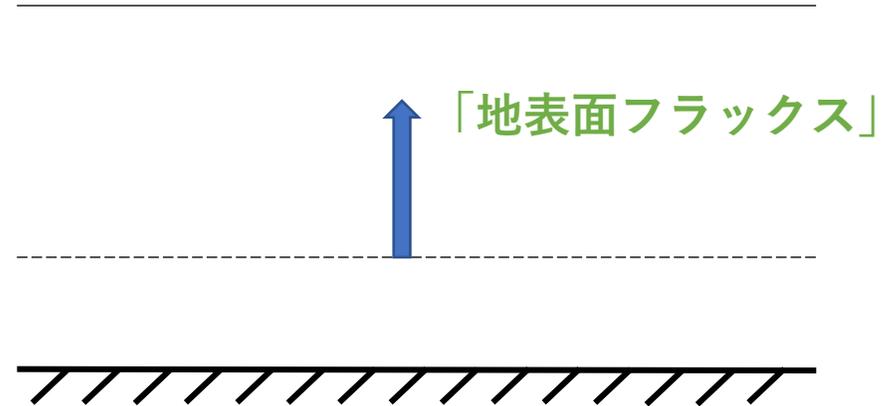
大気と地表面の間のやりとり

十分な解像度のシミュレーション



- 地表面上の分子運動による輸送
(厳密な意味での地表面フラックス)
- 地表面近くの小から大の渦運動による輸送
を経て大気側とやりとり

不十分な解像度のシミュレーション



- 左の過程を省略
- ある参照高度における乱流フラックスを
地表面フラックスとして与える

↑
モデルが必要

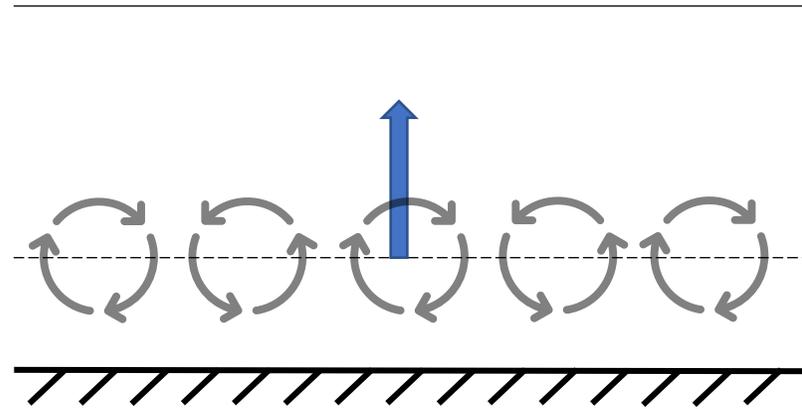
大気と地表面の間のやりとり

- ・ 地表面に近すぎず遠すぎず — 接地層
- ・ 高さ z における乱流輸送は z 程度の大きさの渦運動によってなされる
- ・ 統計的に定常性、水平一様性を仮定
- ・ 相似則 (Monin-Obukhov) → バルク法

$$\overline{F_A} = -C_A(\overline{A_a} - \overline{A_s})\overline{U}$$

F_A : A の輸送量, A_a : A の参照高度での値, A_s : A の地表面での値, C_A : 係数, U : 水平風, 上線は平均を表す

- ・ 水平格子間隔が十分に大きい場合は、格子内の平均フラックスを求めるのに有効



不安定成層時の大きな渦運動による輸送

① バルク法が有効

$$\overline{F_A} = -C_A(\overline{A_a} - \overline{A_s})\overline{U}$$

F_A : Aの輸送量、 A_a : Aの評価点での値、 A_s : Aの地表面での値
 C_A : 係数、 U : 水平風、上線は平均を表す

大きなスケールの風速変動による輸送量の増加 (Meso-scale enhancement)
2つの要因となる現象:

- ②-1 不安定成層時の静穏な気象条件における対流運動 (~境界層の厚さ程度)
- ②-2 積乱雲等の降雨を伴う対流運動

いずれの効果についても、水平風の変動成分 (gustiness) U_g を付加することで表現

$$\overline{F_A} = -C_A(\overline{A_a} - \overline{A_s})(\overline{U} + U_g)$$

(Beljaars 1995, Redelsperger et al. 2000)

これらの効果に関わる現象を解像できる高解像度のシミュレーションでは、②のいずれについても、その時空間変動をグリッドスケールの情報として正確に与える必要があるが、そのようなモデルは実用化されていない

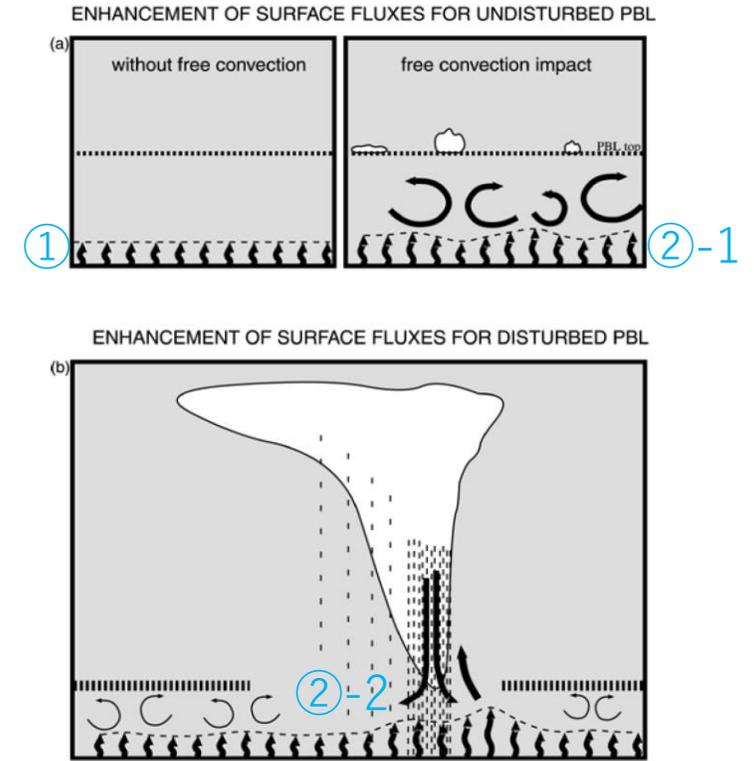
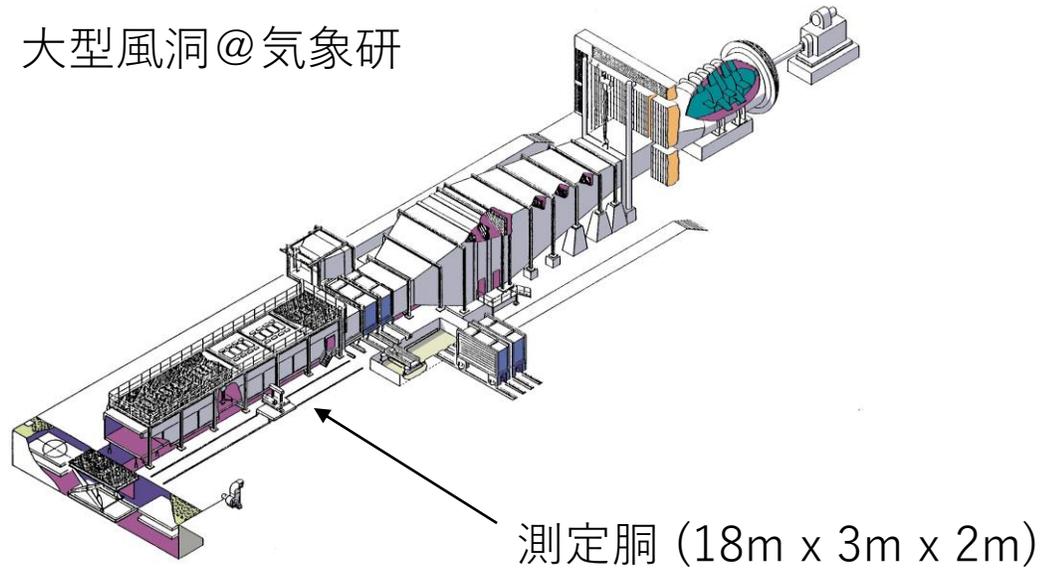


FIG. 1. Enhancement of surface fluxes for (a) undisturbed convective boundary layer and (b) disturbed boundary layer.

Redelsperger et al. (2000) Fig.1より

風洞実験による乱流フラックスの測定

大型風洞@気象研



スモークワイヤによる可視化 (1/4倍速)



不安定成層時



安定成層時

X型熱線風速計および冷線温度計による風速2成分 (流れ方向, 鉛直方向) と温度の同時測定

→ 運動量と温度の鉛直フラックスの時系列

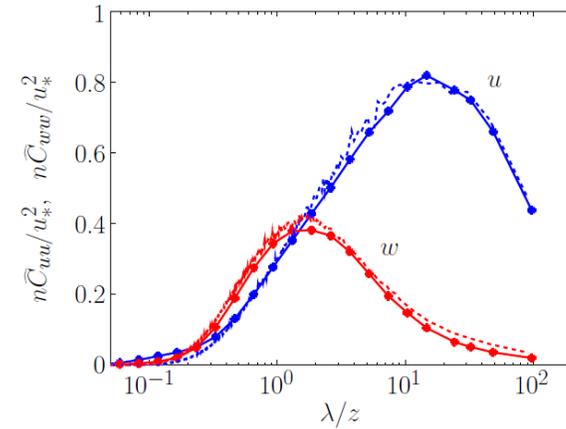
風洞実験による乱流フラックスの測定

- ✓ 時系列 → 1次元空間場の変換 (Taylor の仮説)

$$t \mapsto x = -Ut$$

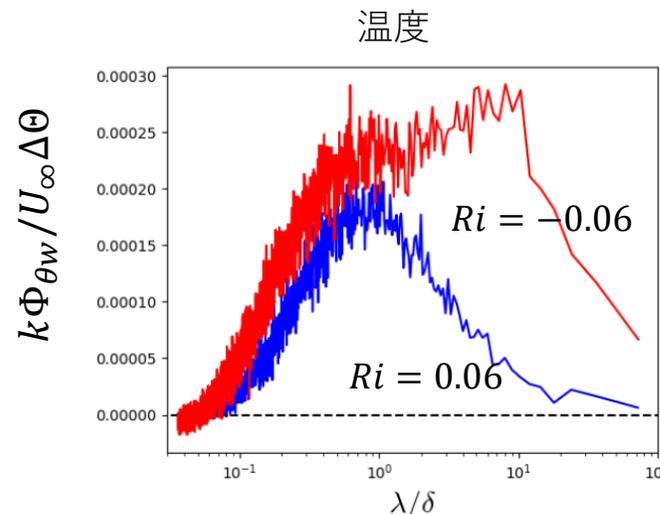
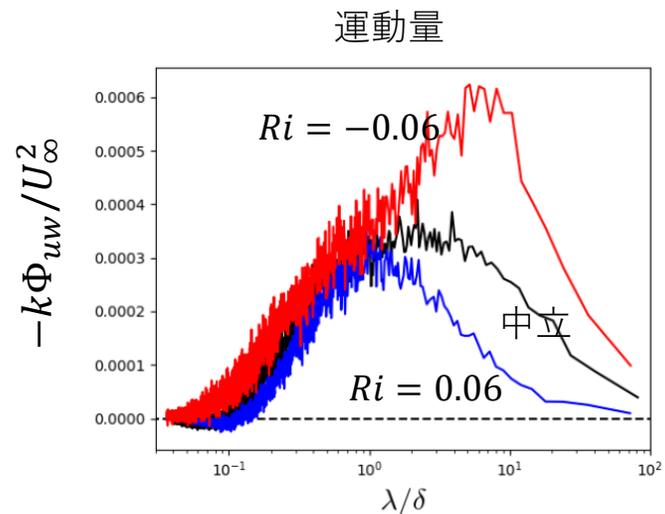
U : 移流速度 (\approx 平均流速)

流れ方向と鉛直方向の風速変動成分 (u, w) のスペクトル
 中立境界層 $Re_\tau \approx 1800, z/\delta \approx 0.18, \lambda$: 流れ方向の波長



実線: 風洞実験+Taylor仮説
 破線: DNS

- ✓ フラックスのコスペクトル — 不安定成層の影響により境界層厚さ δ の数倍の波長の変動成分からの寄与が増加



Ri : 勾配Richardson数

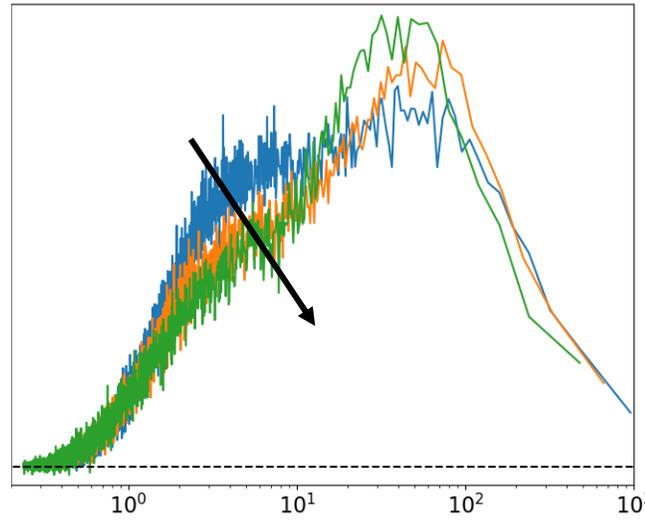
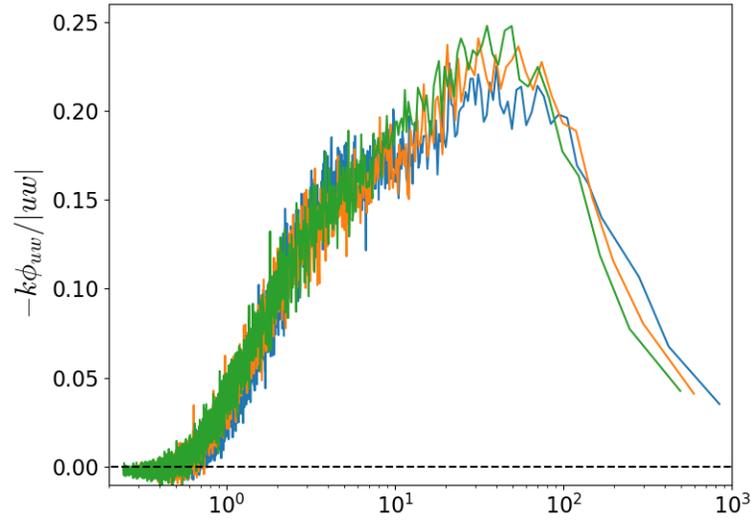
風洞実験による乱流フラックスの測定- コスペクトル

$-\delta/L=0.16$

$-\delta/L=0.26$

$z/\delta=0.07$ (青), 0.14 (橙), 0.21 (緑)

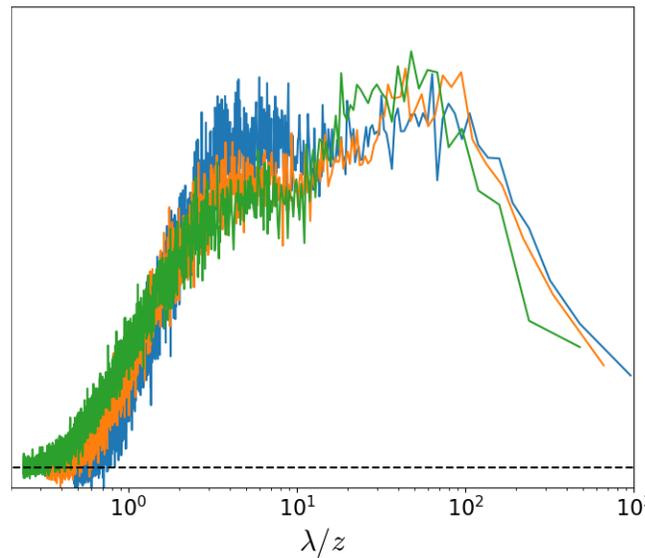
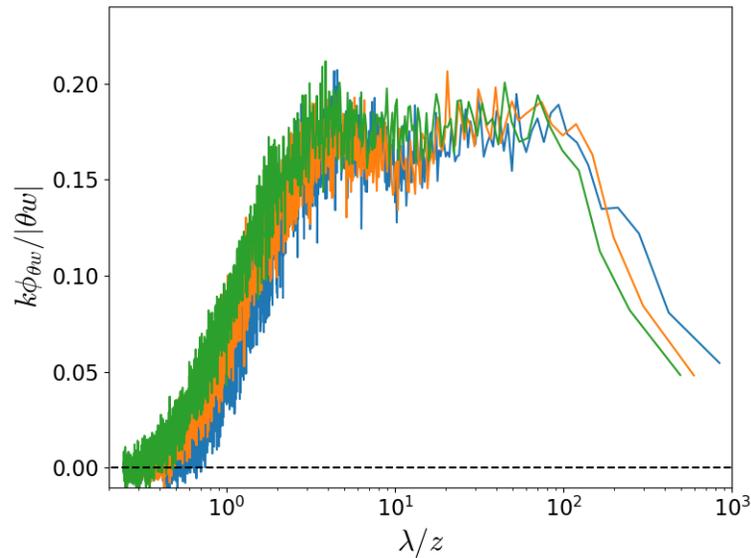
運動量



$\lambda \sim z$ はMOの領域

不安定度が増すと大スケールからの寄与が増す

温度



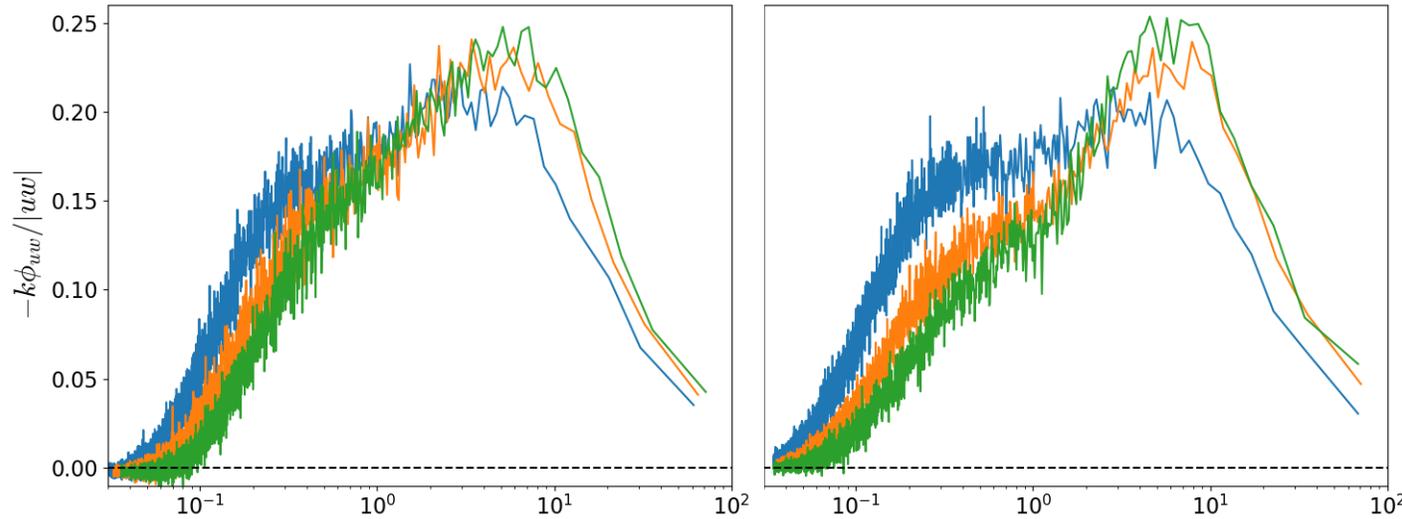
風洞実験による乱流フラックスの測定- コスペクトル

$-\delta/L=0.16$

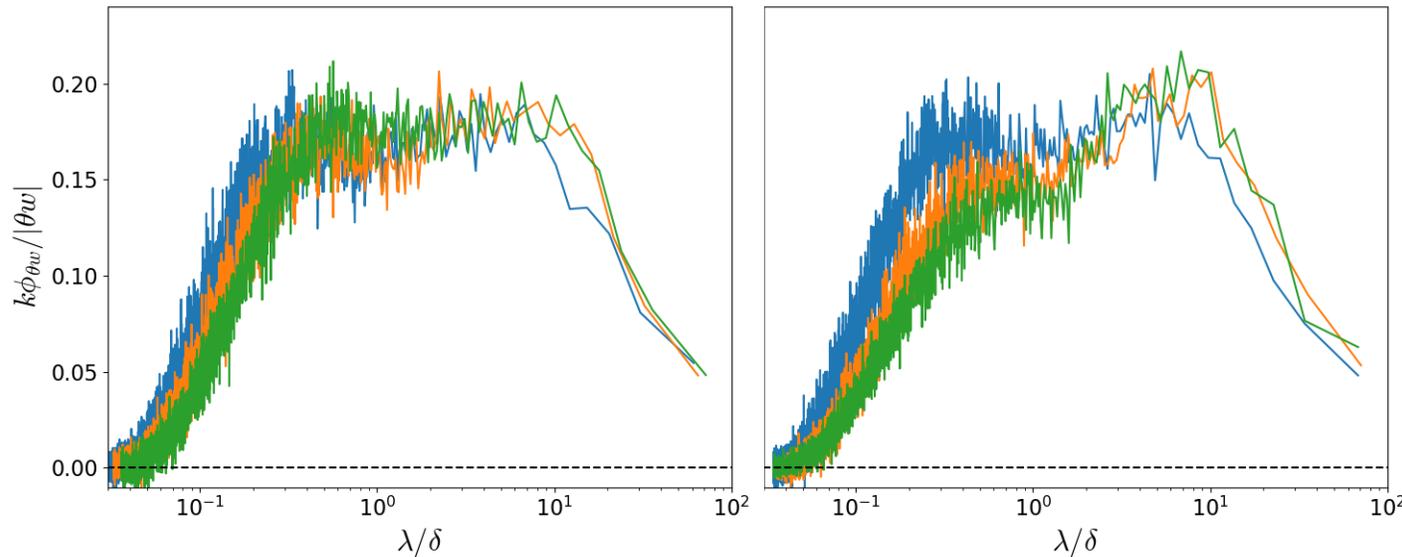
$-\delta/L=0.26$

$z/\delta=0.07$ (青), 0.14 (橙), 0.21 (緑)

運動量



温度

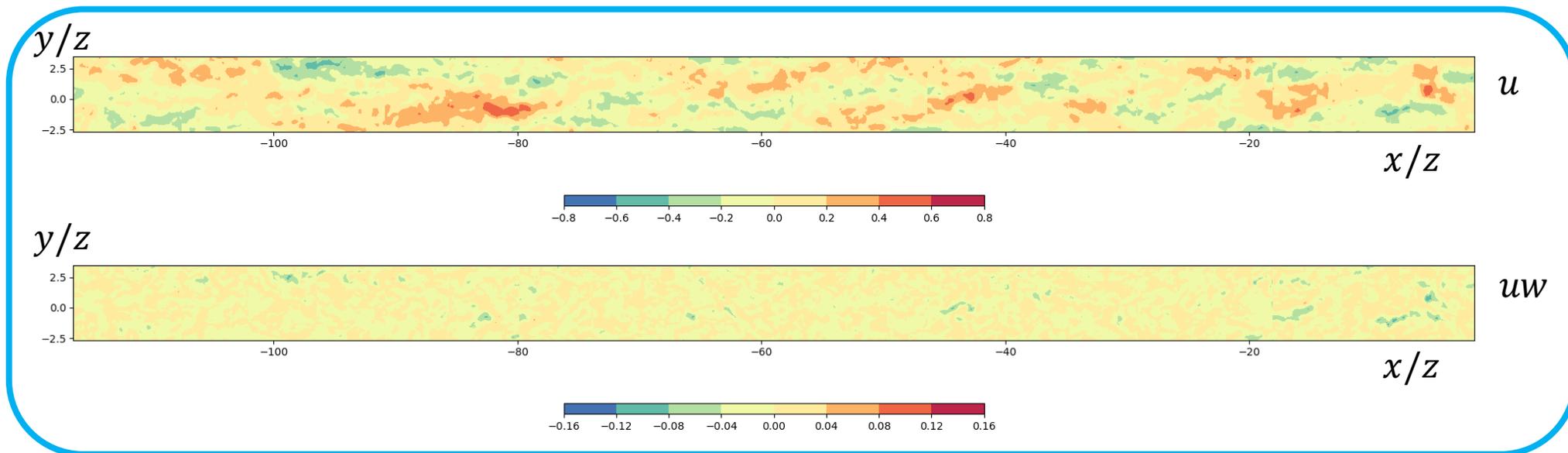


$\lambda \sim z$ はMOの領域

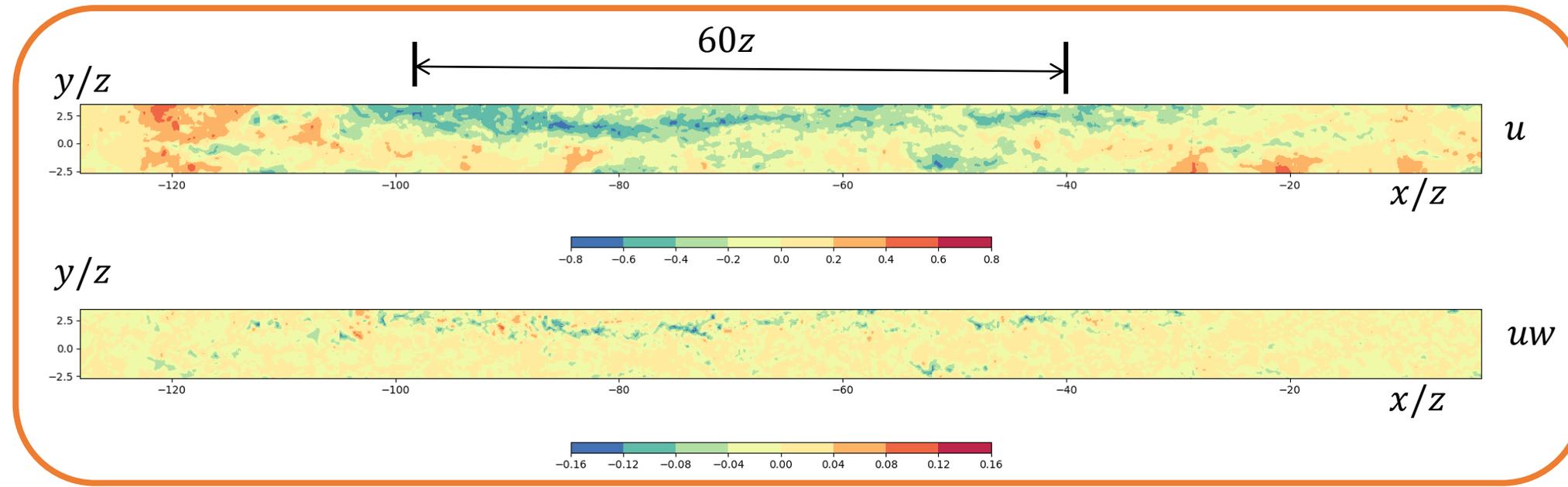
不安定度が増すと大スケールからの寄与が増す

$\lambda \sim \delta$ におけるフラックスの強化は不安定成層の特性

(参考) 風洞実験による乱流フラックスの測定- Stereo PIV



中立



不安定成層

- 長大な構造あり
- ・境界層厚さの5~6倍
 - ・ロール構造 (?)

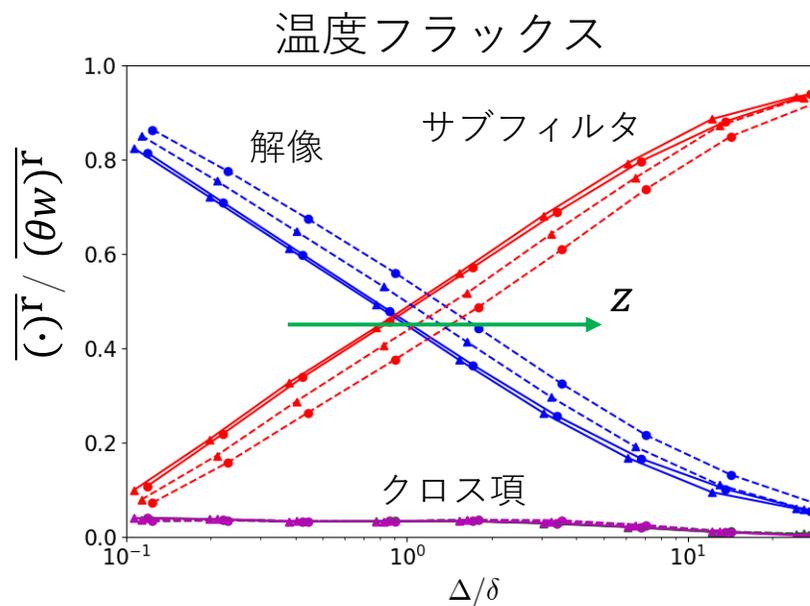
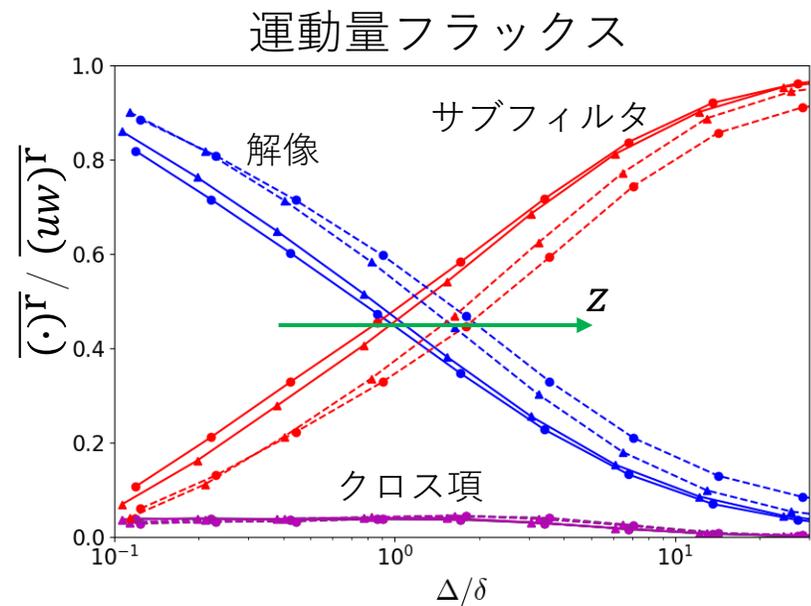
フィルタサイズ（グリッドサイズ）への依存性

✓ フィルタにより解像成分とサブフィルタ成分に分解 $a = a^r + a^s$

✓ a の鉛直フラックス $(aw)^r = \underbrace{(a^r w^r)^r}_{\text{解像成分}} + \underbrace{(a^r w^s)^r}_{\text{クロス項}} + \underbrace{(a^s w^r)^r}_{\text{サブフィルタ成分}} + \underbrace{(a^s w^s)^r}_{\text{サブフィルタ成分}}$

✓ 各項の寄与率

$-\delta/L=0.26$

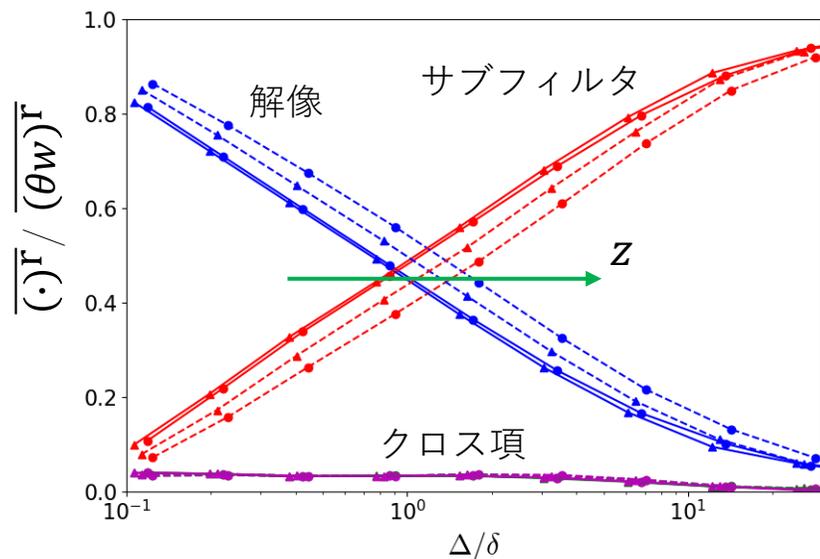


$-\delta/L=0.16$ (▲), 0.26 (●)

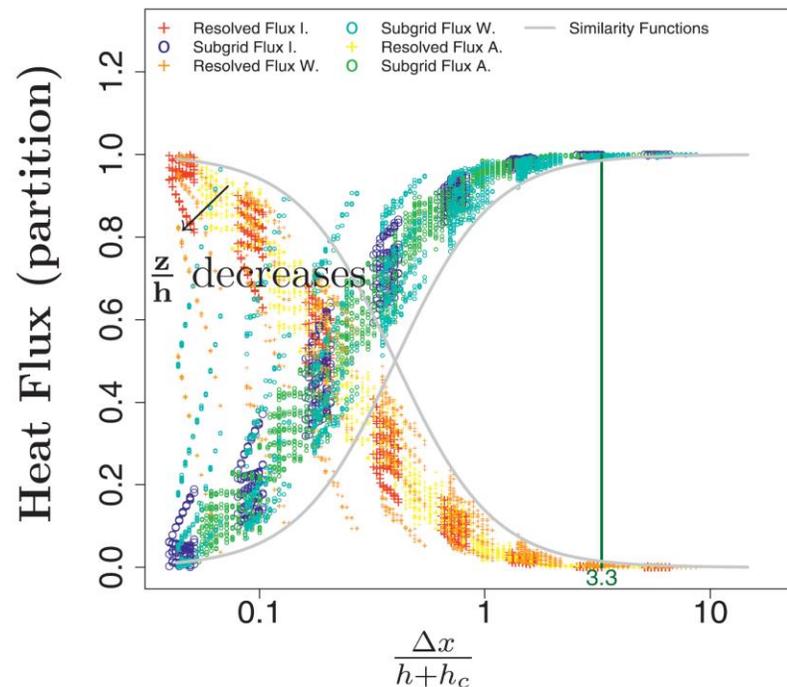
- $\Delta \sim \delta$ あたりで解像成分とサブフィルタ成分の寄与が同程度
- クロス項の寄与は小さい

フィルタサイズ（グリッドサイズ）への依存性 — 1次元 vs 2次元

風洞実験（1次元フィルタ）



LES（水平2次元フィルタ）(Honnert et al. 2011)



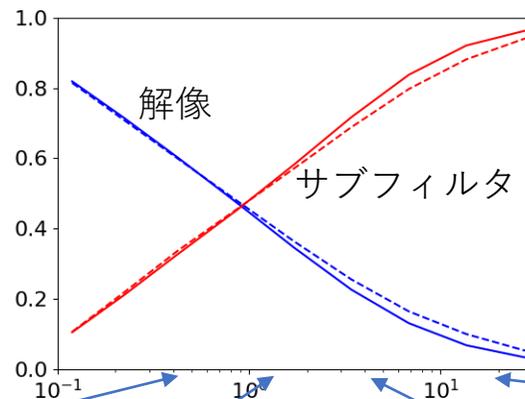
- 定性的には同じだが、2次元フィルタのほうが解像成分の寄与が小さい（サブフィルタ成分の寄与が大きい）
- 解像成分のフラックスが現れ始めるのはフィルタ幅が境界層厚さと同程度するとき

フィルタサイズ（グリッドサイズ）への依存性 — ゆらぎ

解像成分とサブフィルタ成分の寄与

— $\delta/L=0.26$, $z/\delta=0.07$

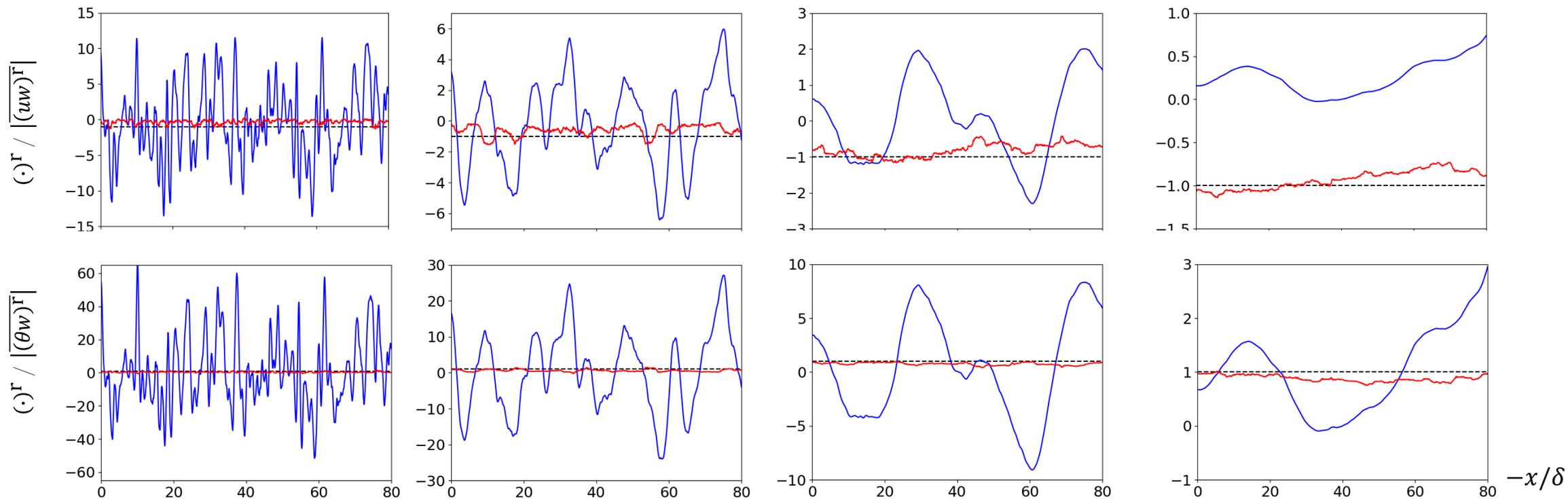
実線：運動量, 破線：温度



✓ 解像成分の揺らぎが大きい

✓ 局所的な大気の運動への影響大

空間分布のサンプル



ここまでのまとめ

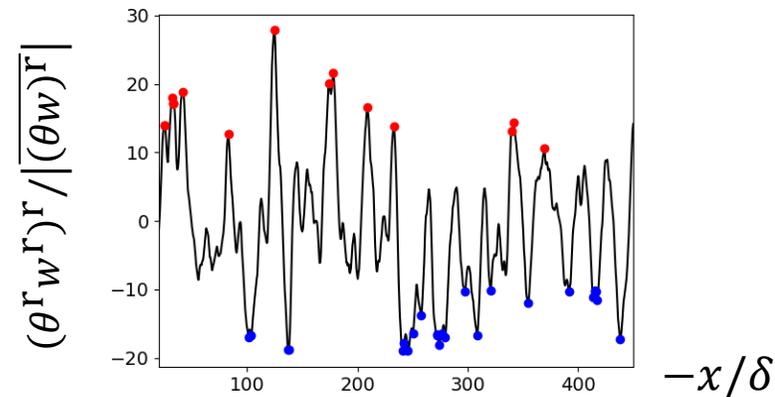
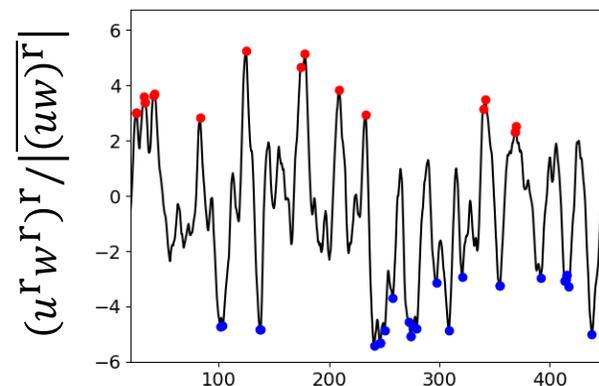
$$\begin{aligned}(aw)^r &= (a^r w^r)^r + (a^r w^s)^r + (a^s w^r)^r + (a^s w^s)^r \\ &\simeq \underline{(a^r w^r)^r} + \underline{(a^s w^s)^r}\end{aligned}$$

- ✓ 地表面フラックスには、**解像成分**と**サブフィルタ成分**のいずれも与えなければならない
- ✓ 不安定境界層では、フィルタサイズが境界層厚さと同程度になると、**解像成分**の寄与が現れてくる
- ✓ **解像成分**の揺らぎは大きく、局所的には大気の運動への影響が大きいと考えられる
- ✓ **解像成分**を適切に与える必要がある（**サブフィルタ成分**は従来のモデルを適用）

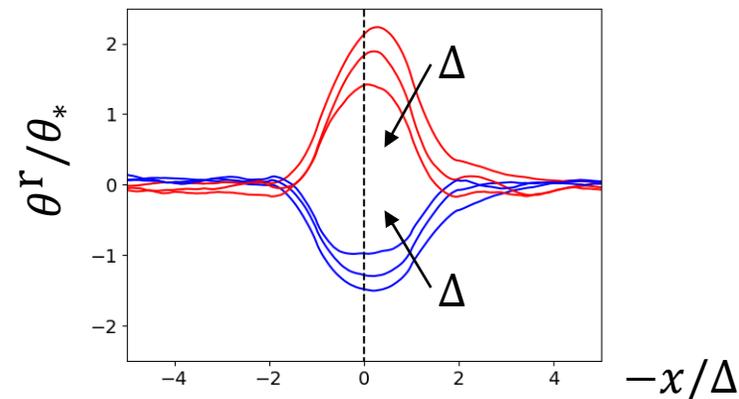
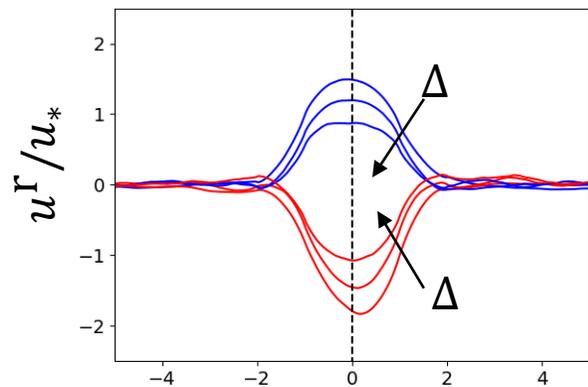
a^r によるフラックス $(a^r w^r)^r$ の予測可能性

- ✓ フラックス $(a^r w^r)^r$ の大きな変動のみを予測することにする → $(a^r w^r)^r$ のピークと a^r の関係

| (平均) ± (標準偏差) | 以上のピークを抽出 (●, ●)



ピーク周りの条件付き平均場



- ✓ $(u^r w^r)^r$ が上に凸 (下に凸) のピーク周辺で u^r が減少 (増加)

- ✓ $(\theta^r w^r)^r$ が上に凸 (下に凸) のピーク周辺で θ^r が増加 (減少)

a^r によるフラックス $(a^r w^r)^r$ の予測

$$\frac{d(a^r w^r)^r}{dt} \sim \left(w^r \frac{da^r}{dt} \right)^r \sim \alpha \frac{da^r}{dt}$$

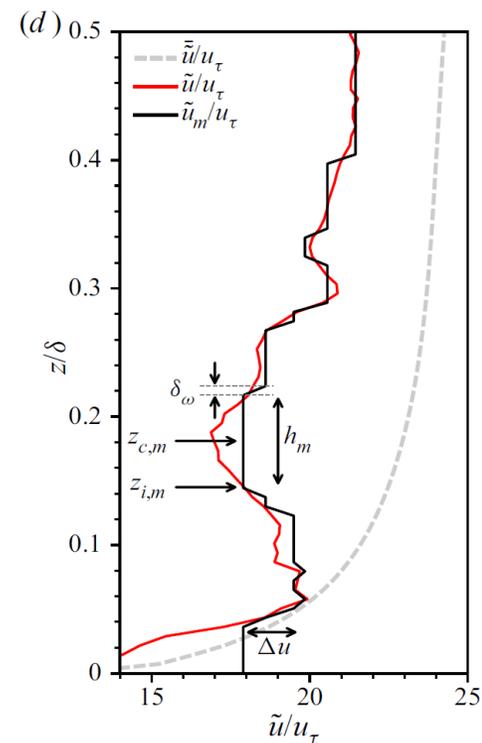
1. a^r を Δa でステップ関数化 $\rightarrow a_q^r$ $\frac{da^r}{dt} \rightarrow \frac{da_q^r}{dt} = \Delta a \delta(t - t_0)$

✓ a^r の大きな変動だけを検出 $\rightarrow (a^r w^r)^r$ の大きな変動だけを予測

✓ Uniform Momentum/Temperature Zone

瞬時の水平流速分布を何層かの水平流速の一様な領域(UMZ)から構成するモデル化が可能 (Meinhart & Adrian, 1995)

不安定成層時の温度分布にも同様の性質あり (Salesky, 2023)
境界のごく近傍では, $\Delta u = u_*$, $\Delta \theta = 1.5 \theta_*$



Salesky (2023)
Fig. 1(d) より

a^r によるフラックス $(a^r w^r)^r$ の予測

$$\frac{d(a^r w^r)^r}{dt} \sim \left(w^r \frac{da^r}{dt} \right)^r \sim \alpha \frac{da^r}{dt}$$

1. a^r を Δa でステップ関数化 $\rightarrow a_q^r$

$$\frac{da^r}{dt} \longrightarrow \frac{da_q^r}{dt} = \Delta a \delta(t - t_0)$$

2. 緩和時間 τ を与える

$$\frac{d(a^r w^r)^r}{dt} + \frac{1}{\tau} (a^r w^r)^r = \alpha \frac{da_q^r}{dt}$$

インパルス応答

$$(a^r w^r)^r = \begin{cases} \alpha \Delta a e^{-(t-t_0)/\tau}, & (t \geq t_0) \\ 0, & (t < t_0) \end{cases} \quad (*)$$

- ✓ a_q^r が変化するたびにフラックスイベント(*)が発生
- ✓ フラックス $(a^r w^r)^r$ の時系列はこれらの重ね合わせによって表される
- ✓ τ はフィルタサイズより大きければよさそう

a^r によるフラックス $(a^r w^r)^r$ の予測

$$\frac{d(a^r w^r)^r}{dt} \sim \left(w^r \frac{da^r}{dt} \right)^r \sim \alpha \frac{da^r}{dt}$$

1. a^r を Δa でステップ関数化 $\rightarrow a_q^r$

$$\frac{da^r}{dt} \longrightarrow \frac{da_q^r}{dt} = \Delta a \delta(t - t_0)$$

2. 緩和時間 τ を与える

$$\frac{d(a^r w^r)^r}{dt} + \frac{1}{\tau} (a^r w^r)^r = \alpha \frac{da_q^r}{dt}$$

インパルス応答

$$(a^r w^r)^r = \begin{cases} \alpha \Delta a e^{-(t-t_0)/\tau}, & (t \geq t_0) \\ 0, & (t < t_0) \end{cases} \quad (*)$$

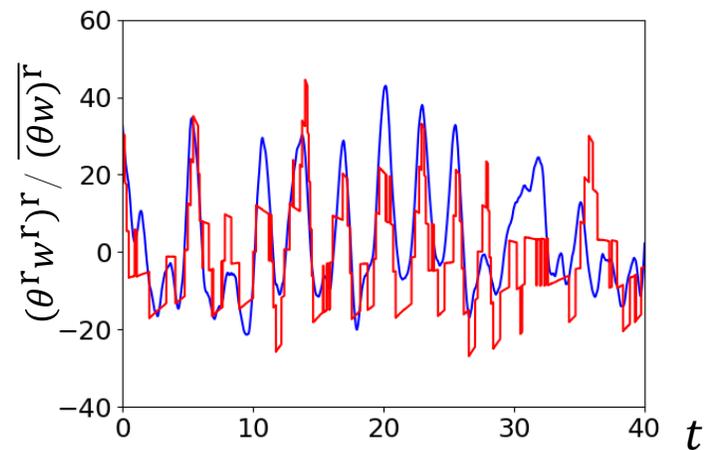
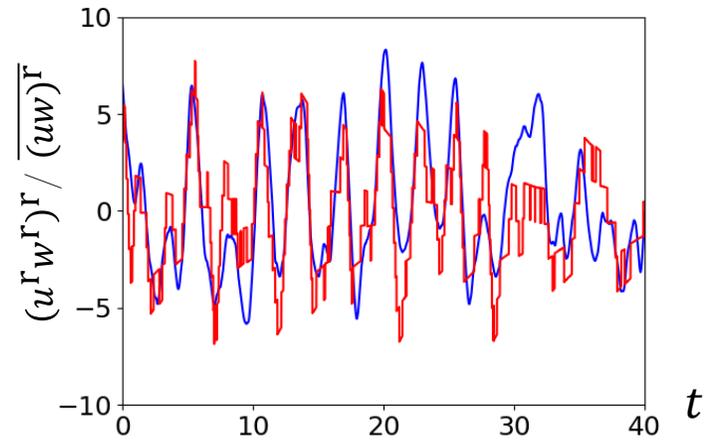
3. $|\alpha| \sim u_*$ とする

(より適切な速度のスケールがあるかもしれない)

a^r によるフラックス $(a^r w^r)^r$ の予測 — 適用例 ($|\alpha| = 1.5u_*$ (運動量), $8u_*$ (温度)とした)

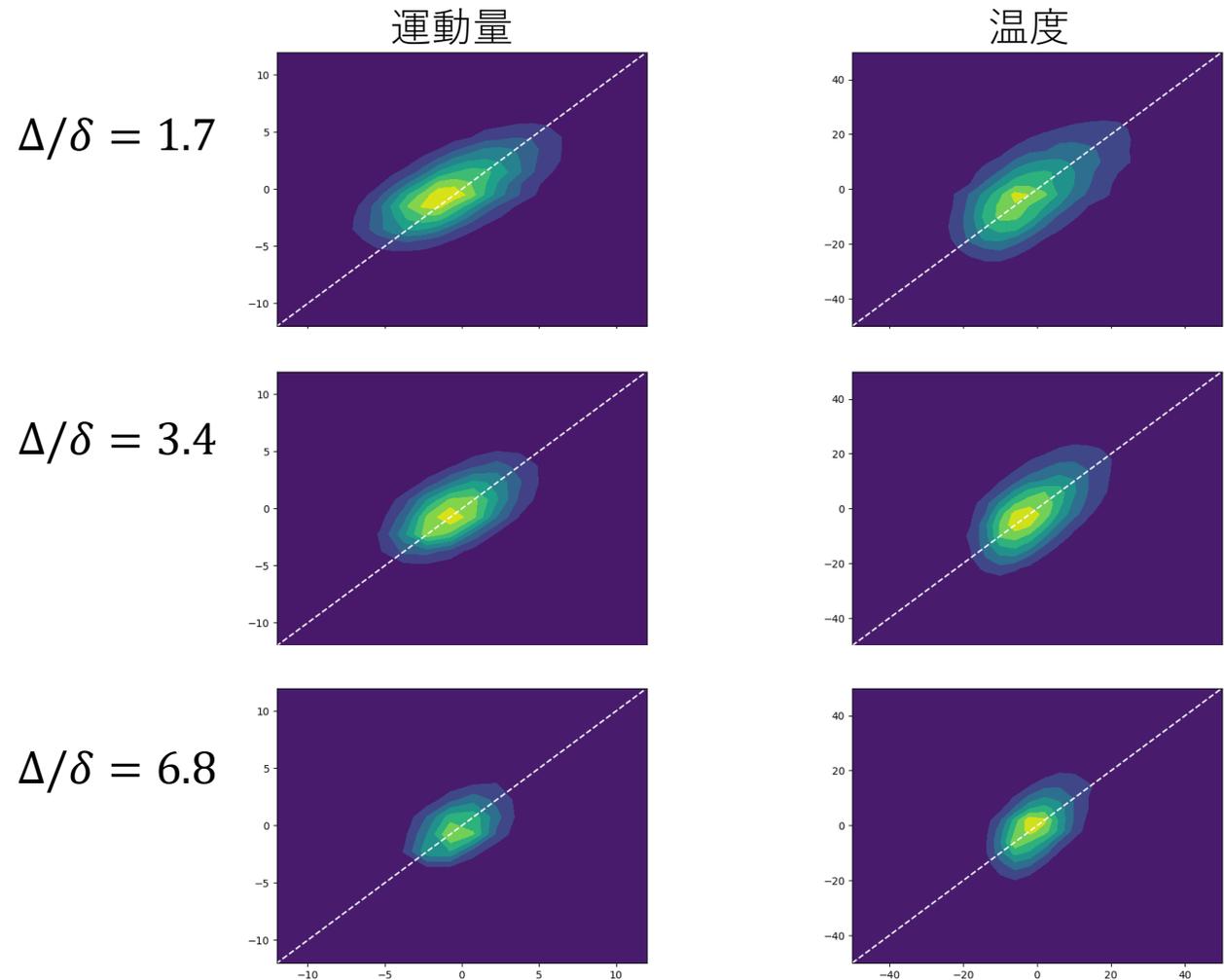
時系列サンプル

$-\delta/L=0.26, z/\delta=0.07, \Delta/\delta = 3.4$



青：実測値, 赤：モデル

実測値-モデル値ヒストグラム (横軸: 実測, 縦軸: モデル)



フィルタサイズが大きくなると予測が困難になる

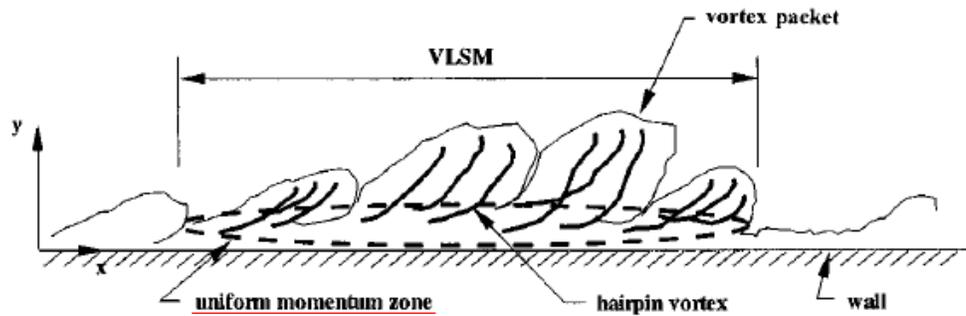
まとめ

- ✓ 水平方向の高解像度化により、乱流フラックスの一部は格子スケールで表される
- ✓ これに整合する格子スケールの地表面フラックスを与える必要がある
- ✓ 平均的な寄与が小さい場合であっても、その揺らぎが大きい
- ✓ 地表面フラックスの大きなスケールの変動を予測する新しいスキームを提案
- ✓ 実験データによる検証を行った

今後、実装実験を行う予定

参考資料 Uniform Momentum Zone

- ✓ 瞬時の水平流速分布を何層かの水平流速の一様な領域(Uniform Momentum Zone, UMZ)から構成するモデル化が可能 (Meinhart & Adrian, 1995)



- ✓ 鉛直輸送が活発におこると、UMZ が現れる (Kim & Adrian, 1999)

Heisel et al. (2020) より

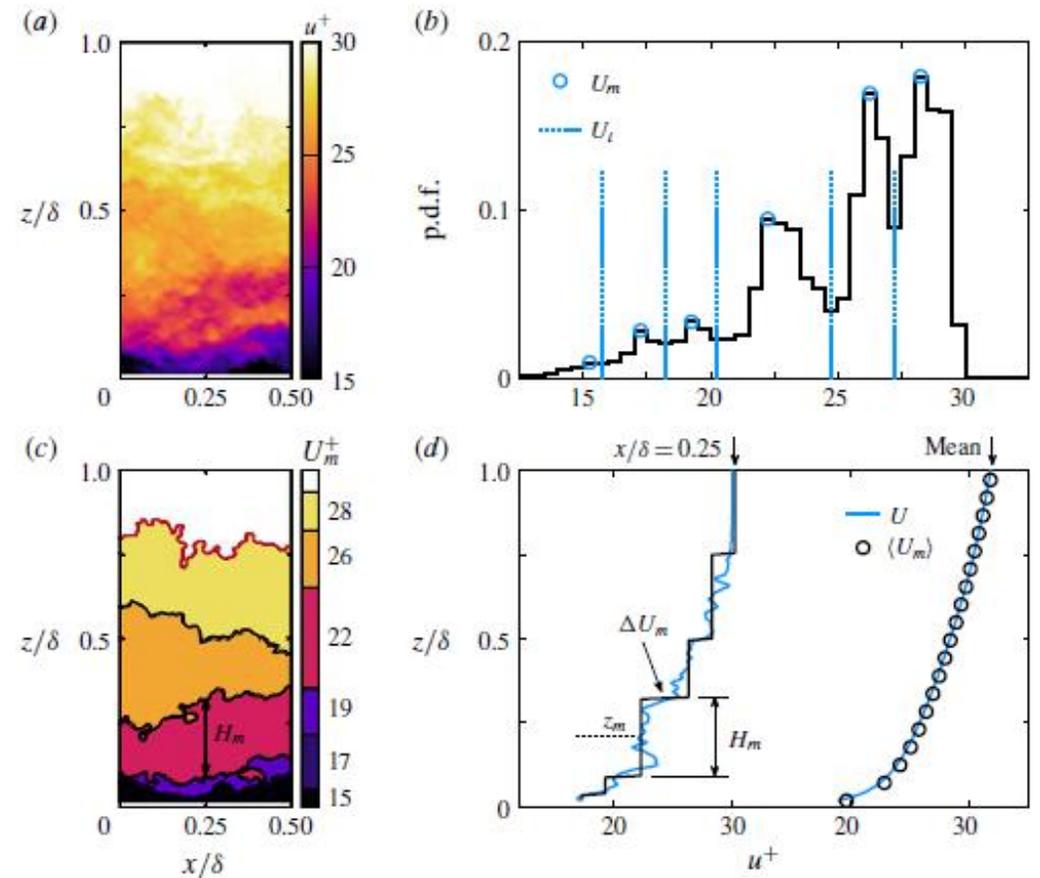


FIGURE 2. Example detection of UMZs from experiment ‘sw5’ in table 1. (a) Streamwise velocity field $u(x, z)$. (b) Histogram of the vectors in (a) with the detected modes U_m and minima U_i . (c) Estimated UMZ field including internal UMZ interfaces corresponding to U_i (black lines) and the turbulent/non-turbulent interface (red line). (d) Instantaneous and time-averaged profiles of u (blue lines) and U_m (black lines).