

海岸頭状地周辺の安定大気境界層の乱流構造:航空機観測とモデル結果 Brooks et al. (2003) BLM 107

Brooks, L.M., Soederberg, S. and Tjernstroem, M. (2003): The turbulence structure of the stable atmospheric boundary layer around a coastal headland: Aircraft observations and modelling results, Boundary-Layer Meteorology 107, 531-559.

要旨: 航空機観測と数値シミュレーションによって、海岸頭状地近傍の安定海洋大気境界層の乱流構造を調査する。Coastal Waves 96 (CW96) 観測プロジェクトにおいて、1996年6月7日に北カルフォルニア海岸メンドチノ岬周辺でNCAR C-130を用いた航空機観測がなされた。既存研究で得られたのと類似した速度変動の局地相似スケーリングが連続乱流層中において、良好に適用される。モデルによるスケーリング結果と観測によるスケーリング結果に良い一致が見られる。岬の風下側で、スケーリングの振る舞いには有意な変化が観測されない。このことから、このスケーリングが水平均一条件に適用できることが判る。しかし、観測では、スケーリング速度および安定度に関連する関数の細かい部分が地表面付近で変化する。この結果、つまり、本研究で見られるスケーリング関数と既存研究とに相違がみられ、既存理論により予測される定数から関数が離れるため、観測された相似関数の性質を考察する。関数形は、風速変動の収支に対する局地的でない寄与によって制御され、観測されたスケーリング関数の相違は局地的でない項の相違によって説明されるとの仮説が立てられる。

キーワード: 海岸線、局地相似スケーリング、安定境界層、乱流

0.はじめのはじめ

宮古島での海面フラックス観測により、8月の南西諸島域の海面でのエネルギー収支らしき結果が得られた…なんちゃって～みたいな～論文を書くために、イントロを充実させようなど海面フラックスがらみの文献を漁り中。宮古島では中立に近い不安定対流境界層だったので、この論文はやや失敗。まあ、境界層研究の一般的な知識を得るのには良かるう。stressとshearってどう違うの？curlってなに？逆転層の下にはjetがあるんだあ～。

1.はじめに

海岸域海洋大気境界層(ABL) = 不均一；海岸から100km(口スピーハンジ)程度まで影響有(Overland, 1984)。
開けた海洋上の均一ABLでの仮定・簡易化が不成立。
西海岸：低温上昇水流により海面が冷却 安定ABL。
安定ABLは観測例が少・未解明 対流性ABLと対照的。
安定ABL：風速、層状性、放射、乱流、それら履歴の関数(Nappo and Johansson, 1999) モデル化が困難。
CW97：海岸境界層動態とメソスケール変動の把握 本研究；航空機観測と3次元シミュレーションから乱流構造の解明。

2.航空機観測

NCAR C-130 ヘラクレスを使用。詳細はRogers et al.(1998)図1参照。全データを25Hzで収録。状態量は1秒平均化。
海岸頭状地周辺ABL構造のメソスケール変動を捉える。
鉛直構造：高度15m～逆転層上までを鋸歯状に飛行。
表面フラックス：高度30mを水平飛行。

ABLマップ：逆転層上での水平飛行からの下方ライダー。
2次モーメント：平均化水平距離1km = 鉛直距離50m

2.1 モデルについて

Uppsala大学気象学部(MIUU)メソスケールモデルを使用。
3次元、非線形、静水力学初等式、改良2.5次クロージャー
詳細はTjernstroem (1987a,b)とEnger (1990)を参照。
鉛直解像度：表面で6m 上端(高度5000m)で150m。
水平解像度： $2 \times 2\text{km}$ (頭状地付近) $35 \times 55\text{km}$ (沖合い端)
陸地表面温度は正弦関数で日周期を単純化。
海面水温は観測値(SST)を使用。
可能蒸発量から湿度を計算。地面は海面の15%蒸発量。
表皮域は相似則を仮定し、下端境界条件として入力。
初期化：水平均一場(温位、湿度、地衡風)
予報モデルではなく、単純条件下の実験モデルである。

3.総観場とメソスケール動態

1996年6月7日は夏のアメリカ西海岸沖の典型的条件。
北太平洋上の高気圧領域 北アメリカ上の熱低気圧への北西風 = 南への沈降風：ABL頂部の逆転層10K以上。
逆転層高さ：沖で1~2km 海岸で400m以下(海岸山脈がプロックする)。

ジェット様の風が海岸地形の影響を受けて複雑に変化。
風上領域での表面応力の分布と最低SSTの分布が一致。
エクマンポンピングによる低温上昇水流 大気安定化。

4.境界層構造

4.1 平均構造

図2 ABL高度と表面(30m)風速(観測値とモデル値)

観測ABL: 600m強 海岸近く400m。岬の風下で100m。
モデルABL: 概ね良好。大規模勾配がやや過小。岬の風下の海岸付近で少し高くなることは再現不能。

観測風速：岬の北側で約6m/s 風下で20m/s以上に加速。
岬を回りこむ加速はABL高さの最大勾配と一致。

モデル風速：風速範囲がやや過小(10~19m/s)。2つの加速(風下領域と、少し広い海岸ジェット)が存在。観測でも？

図3 温位・風速プロファイル(風上と風下)

風上地点(A)：モデル温位1K過小、風速が2m/s過大。ABL高さは良好に一致。300m程度の安定内部境界層(IBL)が形成。ABL上半分は元の対流混合層、風速勾配が小 混合が小。IBL内と上部逆転層で風速が減少。ABL上半分が広いジェット帯を形成。モデルはIBLを正確には再現せず。風速プロファイルはまあまあ。

風下地点(B)：ABLが100m以下に衰退。ABLの数倍の逆転層に蓋される。モデルでも同様だが、逆転層の温位勾配が緩やかで厚い。モデル温位は2K過小。鉛直解像度の問題もある。モデル中での混合効率が過大 ABL温位の変化が过大。

混合距離の定式化の問題：単純なBlackadar型モデルを使用。暗黙のうちに、鉛直的に結合した乱流場を生成。

4.2 接地層乱流

表面温度に対する流れの平均構造の感度は小さい。

ABL乱流特性は大気-海洋温度差特性に依存する。

SSTは西 東に著しい勾配(図4)。海岸付近が低温。岬の風下に低温域。表層大気は徐々に低温海域へ移動。

下部ABLの安定度は風向き方向に徐々に増大 = 乱流抑制 風速の増大 = 乱流生成

図5 風応力と鉛直温位フラックスの分布

観測風応力：岬の北0.05N/m² 風下0.8N/m²増大。

バルク法：風速分布と一致しすぎ。海岸で過大。沖で過小。バルク法は水平均一を仮定し、ポイントの情報からフラックスを算出 観測は風上の影響を受けている。

TOGA-COAREバルク法での安定度関数が不適切。

モデル応力：風上で過小。風上で過大 再現風速に依存。分布は良好に再現。第二のピークを明瞭に可視化。

温位フラックス：岬の風下での安定度増大が明瞭。バルク法・モデルは過大評価。分布は良好に一致。

図6 風応力カールの分布

岬の風下の応力が急激に減少する領域で極大。正のカール

ル: 平均流と平均応力の水平発散で発生する。 海洋表面の拡散水流 低温上昇水流 エクマンポンプを強化 岬の南側に低温海面領域。

計算カール: 1/2過小。 風速、応力が過小。 分布は良好。 大きな違い=同規模の負のカール領域が出現。

観測側の問題。 領域が狭い。 空間解像度が悪い。

4.3 鉛直乱流構造

図7 3次元風速各成分の分散プロファイル

風上: 乱流はABL内のみ。 但し、安定層化している。

風下: 薄いABL内で乱流が大。 逆転層全体にも乱流: v' 分散が u' 分散と一致 = 高度毎に強い指向性シア

モデル値分布 図2: 4つの領域(風上 風下 / 岸 沖)

図8a 風下 & 岸近傍の運動量フラックス鉛直プロファイル

高度はABL高さ z_i で正規化。

ABL上で上向きフラックス 沿岸ジェットの鉛直シア

図8b,c 風上 & 沖 風下 & 岸の風速分散プロファイル

風下でABLが攪乱。 ジェットによる指向性シア(v')が大。

図9 風応力 & 風速プロファイルの風向き方向の変化

区間内では実線 点線へと変化。 区間内変化の相違が明瞭

1) 風上: ABL高度はほぼ一定。 応力 & 風速は微妙に増大。

2) 風上: ABL高度が低下開始。 風速が増大。 応力が凹型化。

3) 風下: ABL高度が激減。 風速が増大。 シアも増大 直線的

4) 風下: 風速が減少。 応力は一瞬凸になって直線に戻る。

表面応力増大 応力プロファイルは凹化

ABL高度低下 応力プロファイルは凸化

ABL高度低下 & 風速増大 応力プロファイルは直線的

複雑に絡み合って、実際のプロファイルが形成される。

図10 ジェット上の運動量フラックス分布

沿岸では運動量フラックスが上向きで大きい。

風下で顕著: 表面応力の80%に達する規模。

ジェット東側のみ ジェット周辺の2次循環。

暖かい陸風 ジェット頂部を不安定化: 乱流大

4.4 局地相似性

局地相似則(Nieuwstadt, 1984; Sorbjan, 1984, 1986)

安定条件での乱流を良好に表示。 一般性は未確認。

モニンオブコフ相似則(地表面の乱流)の拡張 高さ z での局地乱流量に依存するスケーリング。

基礎式(右側は地表面でのMO相似則スケール; 訳者挿入)

$$\begin{aligned} u_L(z) &= \left[\overline{w' u'}^2 + \overline{w' v'}^2 \right]^{1/4} \quad u_* = \left[\overline{w' u'} \right]^{1/2} \\ \theta_L(z) &= -\overline{w' \theta'}/u_L \quad T_* = -\overline{w' \theta'}/u_* \\ L_L(z) &= -u_L^3 / [\kappa \beta \overline{w' \theta_v}] \quad L = -u_*^3 / [\kappa (g/T) \overline{w' \theta'}] \end{aligned}$$

安定度パラメタ z/L_L 大(1~4): 局地スケール量 一定?

図11 安定度と局地スケール量(w と u 分散)の関係

風上(+)と風下(-)で有意な違いなし。 バラツキが共に大。

経験式とよく一致。 高安定時に異なるがバラツキの中。

$0.1 < z/L_L < 5$ で $w/u_L = 1.4$ を通過。 u/u_L はバラツキ大。

図12 モデルABLの風速分散(図11と同じもの)

4つの領域(風上 風下 / 岸 沖)で相違なし。 観測と同様

図13 乱流力学エネルギーに対する風ストレスの比(モデル)

下半分では一定: 高度毎のTKE生成と消散が均衡。

バラツキ 均衡の崩れ 乱流輸送項の規模 TKE消散項

中立に近い不安定層や斜面下降流でも同様の観測結果。

局地相似則のスケーリングは一般的に適用可能。 しかし、

研究毎にやや相違あり。 場所・状況毎に違うのか?

図14 高度毎の風速分散の分布(図11と同じ)

安定度レンジが違う フィッティング時に問題。

Nieuwstadt(1984)の元々の局地相似則: コリオリ無視、定常、水平均一、鉛直輸送無視 少なくとも水平均一は不成立
仮説: 関数形の相違 安定度依存・非局地的な輸送項 場所と状況毎に違う。 同一研究中のバラツキの原因でも? もうちょい沢山データを解析しないとわかんないかなあ。

図15 ABL上の局地相似性(風速分散vs安定度)

岬風下域 上向き応力 地表の効果なし。 自由シア乱流。

モデルと観測値と良く一致。

観測の最適化曲線と中立状態の一定値の間に分布 非局地輸送に依存 = 非局地輸送特性のバラツキ

中立時の直線付近の点: 乱流過程がまったく局地的な領域

最適化曲線付近の点: ABL内と類似の非局地輸送の領域

5. 結論

局地相似則は一般的に適用可能である。

関数形は地点・状況毎に変化する。

非局地的過程が地点・状況毎に異なる。

この問題の解決のためには、スケーリング関数とABL流れの非局地的性質の関係を解析し、局地相似性を再調査する必要がある。

スペースがあまつたのでメモ書き

x. 大気境界層とは?

x.1 大気境界層: Atmospheric Boundary Layer

地表面の摩擦や熱の影響を強く受ける高度1~2km程度の大気層
自由大気より下の層。

接地境界層、夜間接地逆転層、混合層、残留層、上層逆転層を含む。

x.1.1 対流境界層: Convective Boundary Layer

熱対流が卓越する大気境界層。

接地境界層、混合層、上空逆転層に分けられる。

対流境界層中の混合層を対流混合層という。

x.1.2 雲のある大気境界層: Cloud-Topped Boundary Layer

- 1) 大気境界層上端に雲層がある場合
- 2) 大気境界層上端に雲層があり、更に大気境界層と結合していない上層雲層がある場合

3) 大気境界層と雲層が分離している場合

雲層の上面は逆転層がある。

x.1.3 内部境界層: Internal Boundary Layer

地表面の不連続によって生じる。

x.1.4 エクマン層: Ekman Layer

理論・概念的な層。 風速プロファイルの計算は現実と少し異なる

地表面の摩擦効果が重要な領域。 ほぼ大気境界層と同義。

その上は摩擦の効果が重要でない自由大気。

x.2.1 接地境界層(接地層): Surface Layer

コンスタントフラックス、対数則が仮定できる高度数10~100m程度以下の層

x.2.2 混合層: Mixed Layer

熱対流が卓越し、温位勾配、水蒸気量勾配がない

高度数10m~1,2km程度の層

対流境界層中の混合層を対流混合層という。

雲層も混合層の1種。

x.2.3 逆転層: Inversion Layer

1) 接地逆転層: 夜間の地表面付近の空気が冷えて出来る層

2) 沈降逆転層: 下降流の断熱圧縮昇温で出来る層。 対流混合層上面。

3) 移流逆転層: 前線面で形成される層。

x.3. 対流層: Troposphere

高度10km程度までの大気の最下層。

上面を圏界面といい、その上は成層圏。 圏界面直下でジェットが吹く。