

# ドップラーライダーで観測した大気境界層の ストリーク気流構造の特性

The characteristics of the Streak structure in the atmospheric boundary layer  
observed by Doppler Lidar

\*山下和也<sup>1</sup>、藤吉康志<sup>2</sup>

Kazuya Yamashita and Yasushi Fujiyoshi

1.北海道大学大学院環境科学院

Hokkaido Univ. Graduate School of Environmental Science

2 北海道大学 低温科学研究所

Hokkaido Univ. Institute of Low temperature Science

## Abstract

Coherent structures of different form and scale exist in the atmospheric boundary layer (ABL). Linear organized structures are a common feature in ABL. Under various environmental conditions, long-term observational data of organized structure in the ABL of urban area (Sapporo and Tokyo) and on sea, were obtained by scanning coherent Doppler Lidar. Whenever surface wind speed exceeded 4m/s, streak structure appeared, without relation to weather, time of day, season, and wind direction. We determined streak spacing at each altitude by using the PPI scan Doppler velocity data. The spacing of observed streaks is a few hundred meters, which is about one order smaller than that of well-known horizontal convective rolls. Observations show that ABL height and wind speed are not related to streak spacing. The streak spacing was found to slightly increase with height from surface. At nighttime, streaks were observed with their heights limited to low ABL height. At daytime, streaks coexist with rolls.

**1. はじめに：** 地表面と大気間の熱・運動量・物質の乱流輸送の大部分は、大気境界層内の組織化された流れが担っている。壁面近傍のせん断流中に、流れ方向に低速部と高速部が交互に並んだストリーク状の組織的乱流構造が存在し、これらが境界層全体の流れに支配的な影響を与えていることが1965年頃から知られるようになった。これまで、実験室で再現できるような、分子粘性がスケールパラメータとなる低レイノルズ数の流れにおいては、その構造の詳細が分かっている。一方、高レイノルズ数流れで完全粗面である大気境界層においても、ストリーク構造が存在することがLESを用いた数値実

験から予想されてきたが、観測自体が困難であることから理解は進んでいない。

我々は、走査型のコヒーレントドップラーライダーを用いた観測を行い、風が弱い（地上風速4m/s以下、晴天・日中時に熱的対流構造が卓越する）場合以外、ストリーク構造（=平均的間隔が数100m程度で、水平ロール状対流より一桁程空間スケールが小さい）が、常時地表付近（高度数百m以下）に存在することを見出した。今回は、多数の観測事例により、風に沿った方向の筋状構造の特性（ストリーク間隔等）と気象条件との関係を明らかにしたので、その結果を報告する。

**2. 観測の概要：** これまで札幌の都市域（設置場所：北大、期間：2004年～08年3月）、海上（長崎県池島、2009年7月～11年3月）、東京の都市域（東工大岡山キャンパス、2011年7月～現在も継続中）で観測を行っている。観測半径はいずれも4.4km、ビーム方向の距離分解能は50m(bin数:80)、動径方向の角度分解能は約 $0.8^\circ$ で、スキャンの回転速度は0.5rpmである。PPIの複数スキャンとRHIの複数スキャンを繰り返して連続観測している。解析に用いた期間は札幌の2005年3月～6月、2006年10月の41事例と、東京の2011年9月の45事例である。それぞれの事例中には、夜間弱風（地上風速2m/s）から台風接近時（地上風速11m/s）までの様々な風速のケースを含む。

ストリークの間隔は、東京では仰角 $-0.5$ 度、札幌では仰角 $+2.2$ 度のPPIのデータから求めた。東京でのPPIは低仰角の為、地上約30mの定高度として扱い(40～68binのデータを使用)、札幌は地上65m, 90m, 120m, 150m, 180mの5高度で求めた。風向の $\pm 30^\circ$ 内のドップラー速度を角度補正し主方向成分を求めたものからVAD法で求めた平均風を引いて、風速の標準偏差の1.5倍以上の変動を抽出した上でその極小値間の距離から算出した。境界層高度 $Z_i$ はRHI観測の散乱強度のS/Nの高度変化が最大となる高度とした。

### 3. 結果

**3-1. 普遍的にみられるストリーク構造：** 図1に札幌、東京、池島それぞれで観測した気流構造を示す。風の方向に沿った間隔数百m程度の筋状の構造が見られる。札幌、東京においてはこのようなストリーク構造が昼夜、季節、風向、上空を通過する気象擾乱によらずほぼいつでも観測された。また池島での観測により小スケールの島や陸上も風上数100kmに存在しない観測領域でもストリークが出現することが分かった。このことは地形や障害物がない海上でもストリークが生成される事を示している。

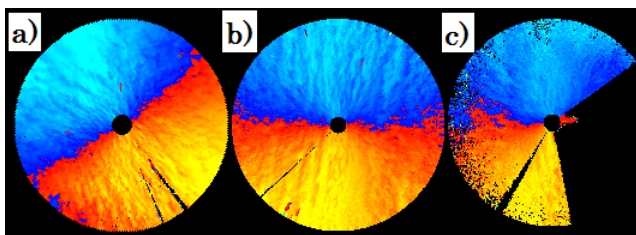


Fig1. Streak structure (a)Sapporo (b)Tokyo (c)sea

**3-2. ストリークの間隔：** 晴れの日の典型的な昼と夜の観測例を図2a, bに示す。夜間(図2a)は間隔数百mの細かいストリークがほぼ領域に一樣に分布しているのが分かる。一方日中(図2b)は大気境界層の高さと同程度の1km以上の大きな構造が見られ、同時に夜間と同様の細かいストリーク構造もそれに重なるように見られる。

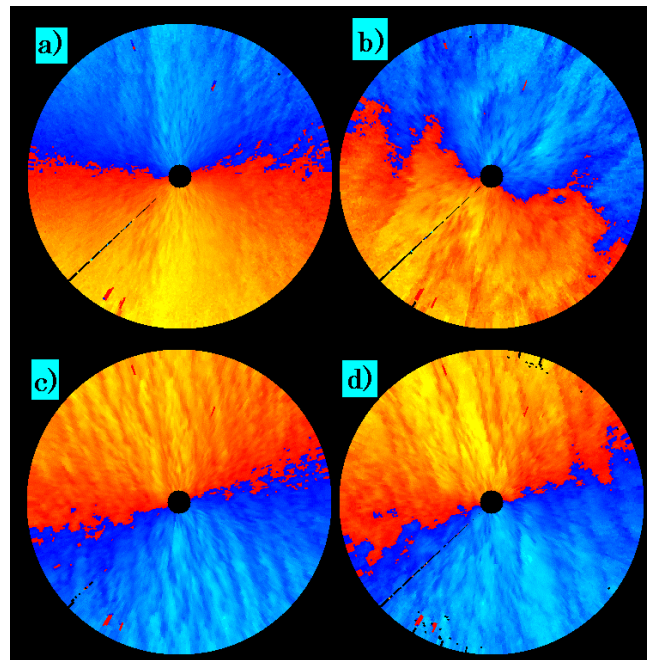


Fig2. Streak at daytime and night : (a)night-normal wind Sept. 28, 2011 04JST, (b)daytime-normal wind Sept. 28, 2011 14JST, (c)nighttime-strong wind Sept. 3, 2011 04JST (d)daytime-strong wind Sept. 3, 2011 14JST

図3a～eに間隔、3f～jに高速と低速間のピーク風速差(風速で規格化)の度数分布の日変化をそれぞれ示す。未明(図3a)は幅の狭いストリークの割合が多く、日の出後には幅の広い間隔が検出されだし(図3b)、境界層最発達時(図3c)では境界層スケールの大きな空間変動が見られる。日の入り後(図3d, e)は大きな構造の割合が減ってくる。間隔分布で短い方の1番目のピークと、それに続くより広い間隔のピークを求め(図3a～e中の度数分布内の塗りつぶしで表示)、図4に典型晴天日2日間の時系列を示す。大気境界層高度、風速、ピーク風速差(度数分布の最頻値)も図4に示す。境界層高度は日の出前に100m～200m程度まで低くなり、14時～16時の間に1.6～2kmまで発達する。風速は28日は5m/s前後で一日を通してほぼ一定で29日は10時を境に北よりの風から南よりの風に変化しその際に一時弱くなっていてその時間帯はセル状の気流構造が見られた。ストリークに対応する第1の間隔のピークは150～350mで大気境界層高度の変化とは無関係で日変化を示さない。第2以降のピークは日中、夜間とも700m～1800m程度である。朝の6～8時台及び夕方18～20時台には第2以降のピークがないワンピーク(図3b参照)の時間帯が両日共にある。ピーク間の規格化風速差は未明が0.25～0.3程度で日中から日没後にかけては0.4程度である。

図2c, dに台風接近による強風時の昼夜の観測事例を示す。昼夜で構造に大きな差は見られない。図5に間隔分布とピーク規格化風速差を示す。図は4時のものであるが、両分布共1日を通して大きな変化は見られず同様の分布を示した。ストリーク間隔のピークは約300mで規格化風速差の最頻値は0.3で並の風速の

28日と同程度の値である。この日、大気境界層の高度は1日を通して1kmでほぼ一定であった。

デルの実験とも概ね一致する。東京と札幌では若干東京の方が同一高度では大きな間隔を示している。

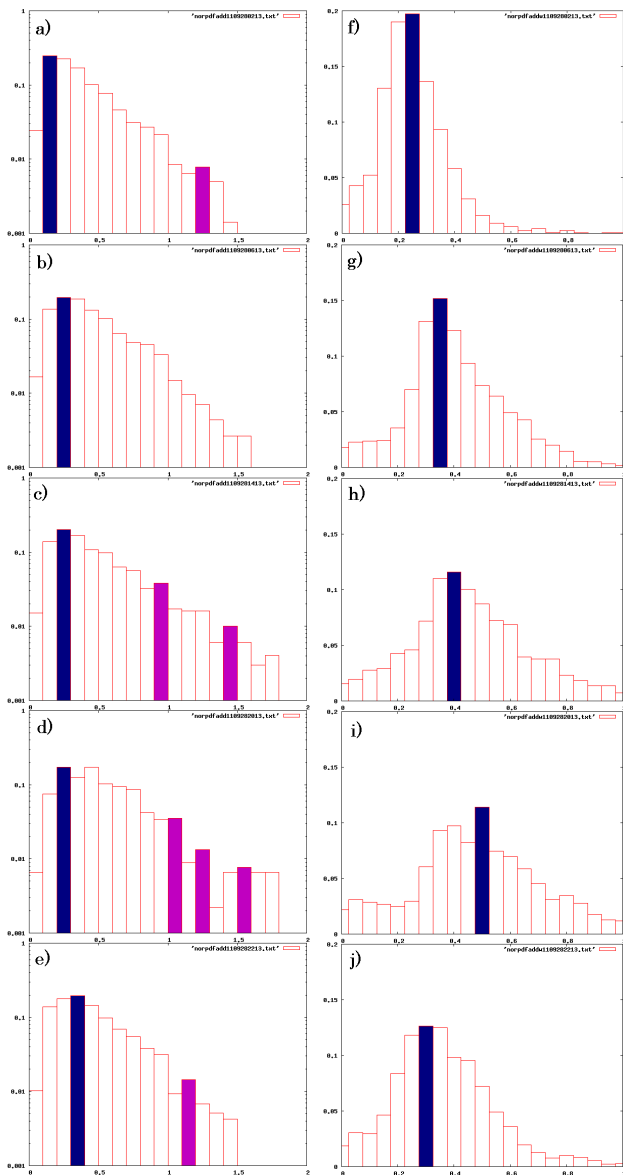


Fig3. Structure spacing (a-e) and normalized wind speed difference ( $V_{p-p}$ ) (f-j) distribution (a) Sept. 28, 2011 02JST, (b) 06JST, (c) 14JST, (d) 20JST, (e) 22JST

次に高さ毎のストリークの間隔を調べた結果を示す。図6は札幌の41事例の高さ毎の卓越する空間周期 $\lambda$ である。400mより小さな変動はストリークによる変動と仮定すると、概ね高さと共に緩やかに間隔が広がっている。一方日中に見られる400m以上のロール渦に対応すると思われる間隔は高さによる変化はあまり見られない。

次に境界層高度で規格化した高度と間隔の関係を図7に示す。400mとの大小でそれぞれロールとストリークによる変動と定義し、札幌、東京のそれぞれの値をプロットしている。規格化したストリークの間隔は規格化高度に応じてほぼ線形に増加する傾向がみられる。同様の結果を示した Lin et al. 1997 の LES モ

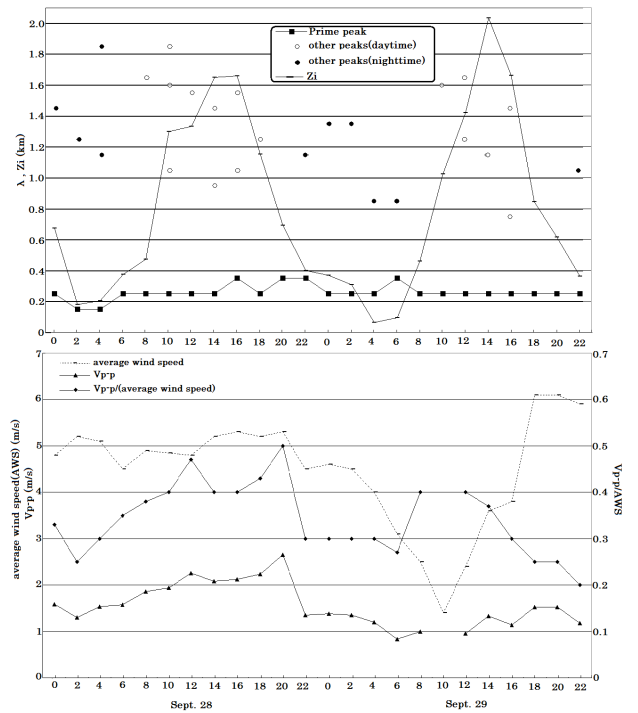


Fig4. Time series of prime peak/other peaks of structure spacing, boundary layer height ( $Z_i$ ), average wind speed,  $V_{p-p}$ , normalized  $V_{p-p}$

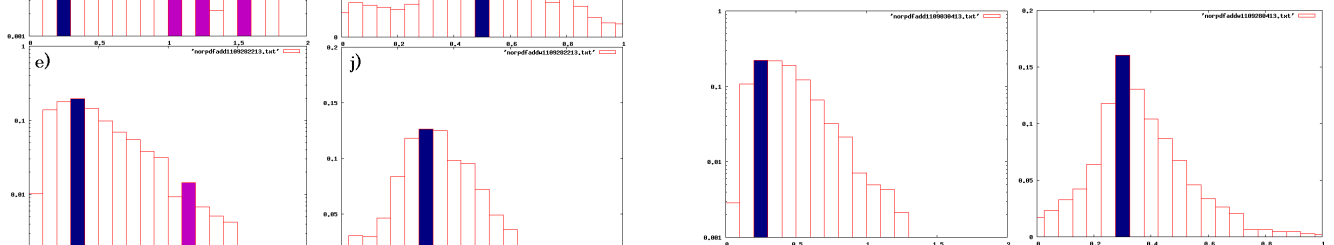


Fig5. Structure spacing and normalized  $V_{p-p}$  distribution on strong wind day (Sept. 3, 2011)

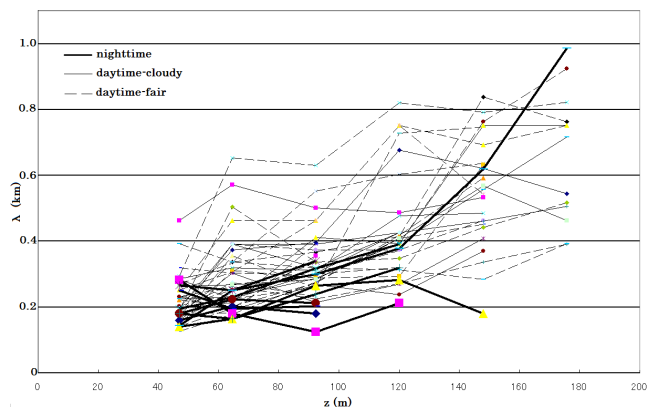


Fig6. Structure spacing at each altitude

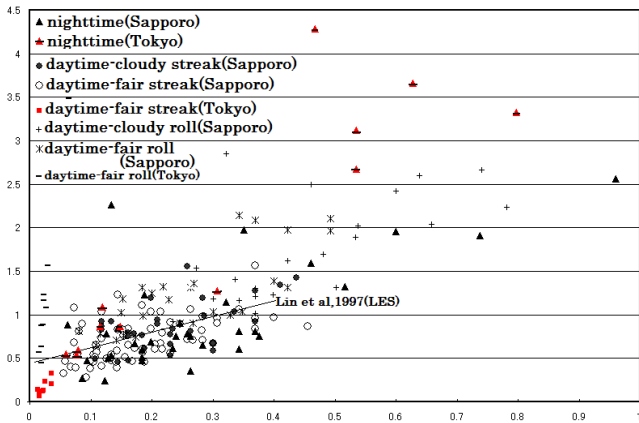


Fig7. normalized structure spacing at each normalized height

### 3. 考察

図8に以上の結果から考えられるストリークとロール渦の模式図を示す。低速ストリーク部は平均風速の遅い下方の流れが輸送されてきている上昇域に対応していると考えられる。間隔が高度と共に緩やかに広がるのは、それぞれの上昇域の到達する高度に限界があり、上空に行く程ストリークの数が減るからと考えられる。また大気境界層の高度や風速に関わらず同高度では同じ間隔を示す事から、間隔は地表面の機械的性質を示す抵抗係数等のパラメータで決まっていると推定される。地表面粗度の小さい海上ではドップラーライダーの空間分解能以下のより細かいストリークが形成されていた可能性がある。ストリークに対して境界層高度はその存在の上限を規定していると考えられる。一方日中は境界層の発達に伴って境界層全体を満たすロール渦が現れる。日中はこれら生成メカニズムの異なるストリークとロールが共存していると考えられる。

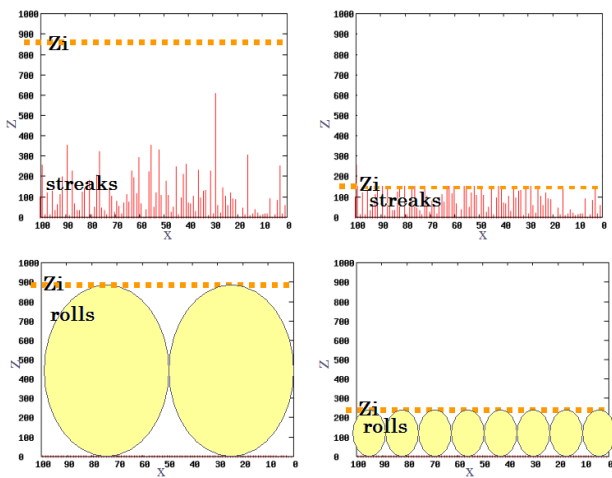


Fig8. Schematic structure of streaks and rolls

夜間にストリークより大きな空間変動が現れるのは境界層上端が重力波等により波打ち、その変動が見られていると思われる。

これらドップラーライダーで観測された大小の構造やその動きが、定点で観測される風の時間変動の要因となっている。今回はストリークの間隔に主に注目したが、流れ方向の長さや寿命、ストリーク構造の揺動を調べ、それらを決めている要素も明らかにしたい。

### 4. まとめ:

- ドップラーライダーを用いた多数の観測事例からストリークの間隔を求め、その決定因子を探った。
- ストリークの間隔は大気境界層の発達と無関係である。(ロール渦の波長は境界層の発達に伴い大きくなる)
- ストリークの間隔は高度と共に緩やかに広がる。
- 境界層高さで規格化すると、高度とストリーク間隔の関係は概ねある直線にのる。(Lin et al. 1997のLES結果も同様)東京の方が若干札幌よりストリーク間隔が広いが今後の詳査が必要。
- 風速と間隔の関係は明確でない。
- ストリークの間隔はほぼ高度と地表面条件だけで決まり、境界層高度は存在範囲を決める。
- 日中はストリークとロール渦の異なるメカニズムの筋状構造が共存していると考えられる。

### 参考文献

Lin et al., 1997: Phys.Fluids, 9, 3235-3249.