相似則に基づいた大気境界層における 水平乱流場の分類

CLASSIFICATION OF HORIZONTAL TURBULENT STRUCTURE IN TERMS OF SIMILARITY LAW

八木綾子¹・稲垣厚至²・神田 学³・藤原忠誠⁴・藤吉康志⁵

Ayako YAGI, Atsushi INAGAKI, Manabu KANDA, Chusei FUJIWARA, and Yasushi FUJIYOSHI

¹学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 工博 東京工業大学助教 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

³正会員 工博 東京工業大学教授 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

⁴非会員 博(環境科学) 気象研究所気象衛星・観測システム研究部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

非会員 理博 北海道大学低温科学研究所教授 (〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目)

Horizontal turbulent flow fields within atmospheric boundary layer above an urban area (Tokyo, Japan) measured by Doppler lidar in autumn and winter were visually classified into six groups, *Streak*, *No streak*, *Mixed*, *Fish net*, *Front*, *The others*. The conditions of each flow occurrence were examined with observed surface meteorological data and related scaling parameters. The following results were obtained: (1) *Streak* dominates 64% of all valid data, while *Fish net* does only 2%. *No streak* and *The others*, look more laminar rather than turbulent, reach to 20% contribution in total. (2) Each flow patterns can be categorized by $-z_i/L$ and Re (z_i is boundary layer height, L is the Monin Obukhov length. Re is Reynolds number, the length scale of which is z_i). (3) Each flow patterns can be categorized by $-z/L$ and Re_{surf} (z is observation height. Re_{surf} is Reynolds number, the length scale of which is z_i) as well as $-z_i/L$ and Re . (4) The diagrams of $-z_i/L$ and Re , and z/L and Re_{surf} qualitatively illustrate the flow regimes.

Key Words : Atmospheric boundary layer, Similarity theory, Doppler lidar, Turbulent structure

1. はじめに

大気境界層の流れ場は、水蒸気・熱・物質輸送を担っており、大気汚染やヒートアイランド現象等の大気環境問題の解決において重要な役割を果たす。既往研究により、水平ロール渦^{1,2)}、ストリーク構造³⁾、セル状対流^{2,4)}、ダストデビル⁵⁾等の大気境界層における特徴的な流れ場の構造が明らかになりつつある。しかしながら、大気境界層の長期に渡る連続観測・解析は少なく、大気境界層における流れ場の全体像は十分にわかっていない。

本研究では、ドップラーライダー（以下、ライダー）および超音波風速計によって得られた長期間の実測データから、都市上空の大気境界層における流れ場の特性（出現頻度、出現時の大気場の特徴）を明らかにする。高時空間解像度で視線方向風速および信号対雑音比（以下、SNR）の3次元分布を取得可能なライダーの特性を活かし、大気境界層（地上高42 m）の水平乱流構造を目視で詳細に分類する。目視分類は、アルゴリズムによる分類よりも客観性は劣るが、風向・風速・流れ場の組織

的構造が複雑に変化する大気境界層の水平乱流構造を的確に判別・分類するには最善の手法である。既に八木ら⁶⁾はライダーによって観測された大気境界層の水平構造の目視分類を行っているが、本研究は以下の2点において新しい。

まず、1) より詳細な枠組みによる分類を行う。ライダーによる常時観測から、既往研究で着目されているストリーク構造やセル状対流とは異なる流れ場が度々確認された。これらの流れ場には再現性があり、大気境界層の流れ場を分類する上で重要であると判断し、流れパターンとして分類枠組みに新たに加えた。

次に、2) 相似則に基づき、境界層のスケールパラメータと流れパターンの関係を議論する。既往研究において、大気境界層における特徴的な流れ場の発生条件は、大気安定度 ($-z_i/L$) で説明されてきた⁷⁾。 $-z_i/L$ は、大気境界層における流れ場の説明変数として欠かせないが、慣性力の効果を含まない。そこで、本研究では慣性力も大気境界層の流れ場に影響を与えていると考え、 $-z_i/L$ に加えてレイノルズ数 (Re) を説明変数に加えた。

2. 観測・解析概要

(1) 観測概要

a) 観測サイト

東京都目黒区でライダーおよび超音波風速計を用いて観測を実施した。観測地周辺は住宅地が広がる市街地である。ライダーは目黒区東京工業大学構内の建物屋上（地上高42 m）に設置し、超音波風速計はライダーの設置地点から北西に500 m 離れた建物屋上（地上高25 m）に設置した。

b) ライダーおよび超音波風速計

ライダーの諸元を表-1に示す。本研究では、三菱電機 LR-02A、3次元コヒーレントドップラーライダーを使用した。ライダーは近赤外（1.54 μm ）のパルスレーザーを用い、大気中に浮遊するエアロゾルによる後方散乱のドップラーシフトから、視線方向風速およびSNRを高時空間解像度で測定する。視線方向分解能は50 m、観測レンジは325 m から4275 m である。方位角分解能はパルス繰り返し周波数、積分回数、スキャンスピードで決まり、本観測のパラメタ設定では約1.2 $^\circ$ である。走査スケジュールは、水平スキャン（Plan Position Indicator, PPI）および鉛直スキャン（Range Height Indicator, RHI）を交互に行う30分間のシークエンスを繰り返した。

超音波風速計はクリマテック CYG81000、3成分超音波風速計を使用し、サンプリング周波数10 Hzで風速3成分および気温を計測した。

(2) 目視分類

a) 分類基準

ライダーによって観測されたPPI画像（視線方向風速の空間分布）を表-2の基準によって分類した。本研究で新たに加えた分類枠組みは、2. *No streak*, 3. *Mixed*である。分類指標となっている視線方向風速が0 m s^{-1} となる線（図-1の赤色と青色の境目）は主流風向に直交する方向に走る。例えば、観測領域内で風向が一樣な場合、視線

方向風速が0 m s^{-1} となる線は主流直交方向の直線となる。

図-1に各流れパターンのPPI画像を示す。図-1のa1の筋の幅が細い*Streak*はシア不安定により生じるストリークに対応し、図-1のa2の筋の間隔が広い*Streak*は水平ロール渦に対応していると予測されるが、これについては別途解析を進めている最中である。*No streak*は主流が存在するものの筋状のパターンは認められず、場所によって細いまだらの微細構造が存在し、層流から乱流への遷移で見られる乱流斑点（turbulent spot）を予想させる（図-1のb）。*Fish net*はセル状の鉛直対流卓越時に見られる風速分布であり⁴⁾、*Mixed*は*Streak*および*Fish net*の中間的な風速分布である。*Front*は視線方向風速の不連続線が時間と共に風下に通過した事例とした。*The others*に含まれる事例（図-1のe1, e2）は、視線方向風速が0 m s^{-1} となる線の形状も、視線方向風速のパターンも多様である。

b) 解析データ

2012年9月25日から2012年10月20日（以下、秋期）および2012年12月1日から2013年1月10日（以下、冬期）の2期間に、30分あたり7回のPPIスキャンを含むスキャンシークエンスで観測されたPPI画像全てを解析対象とした。但し、データの品質管理のため、観測半径2025 mの円周上でSNRが6 dB 以下となるエラー値が10%以上のデータは*Error*、降水による欠損データを*Rain*と分類し、目視分類の解析対象から除外した。

表-1 ドップラーライダーの諸元

Wavelength	1.54 μm
Leaser pulse width	213 $\pm$ 10 ns
Pulse repetition frequency	4 kHz
Integral number of pulses	1000
Range resolution	50 m
Minimum range	325 m
Maximum range	4275 m
Scan speed (in PPI mode, RHI mode)	4.5 m s^{-1} , 5.1 m s^{-1}

表-2 ライダーにより観測されたPPI画像（視線方向風速の水平分布）の分類基準

流れパターン	分類基準
1. <i>Streak</i>	視線方向風速が0 m s^{-1} となる線が直線状であり、主流風向が一定である。 視線方向風速分布が主流風向に沿った明瞭な筋状のパターンとなっている。
2. <i>No streak</i>	視線方向風速が0 m s^{-1} となる線が直線状であり、主流風向が一定である。 視線方向風速分布が筋状のパターンとなっていない。
3. <i>Mixed</i>	視線方向風速が0 m s^{-1} となる線が乱れており直線状ではないが、主流風向は一定である。 視線方向風速分布が筋状のパターンとなっているが、1. <i>Streak</i> と比べると不明瞭である。
4. <i>Fish net</i>	視線方向風速が正の領域と負の領域が入り混じっており、主流風向が定まらない。
5. <i>Front</i>	視線方向風速分布の不連続線が存在し、不連続線が時間と共に風下に移動する。
6. <i>The others</i>	上記5つのグループに含まれない事例。

図-1 各流れパターンのPPI画像（視線方向風速の水平分布）の例

(3) パラメタの算出

a) 摩擦速度および摩擦温度

摩擦速度 (u^*) および摩擦温度 (T^*) は超音波風速計によって観測された風速3成分および気温に渦相関法⁸⁾を適用し、式(1)(2)から算出した。

$$u^* = (-\overline{u'w'})^{1/2} \quad (1)$$

$$T^* = -\overline{T'w'}/u^* \quad (2)$$

ここで、 u' 、 w' 、 T' は、主流風速、鉛直風速、気温の30分平均値からの変動成分である。 $\overline{\quad}$ は30分平均値を意味する。

b) 大気境界層高度

大気境界層高度 (z_i) はライダーで観測されたSNRの鉛直プロファイルにHaar wavelet transform⁹⁾を適用して推定した。SNRの鉛直プロファイルは、RHIスキャンによって観測されたSNRの鉛直平面分布を高度毎に空間平均して用いた。空間平均後のSNRの鉛直プロファイルのレンジは、0m -3000m (ライダー設置高度を0 m とする)、分解能は50 mである。SNRの鉛直プロファイルをHaar wavelet変換して得られるウェーブレット係数はSNRが急激に減少(増加)する高度でウェーブレット係数が大きく(小さく)なる。図-2にSNRの鉛直空間分布とSNRおよびウェーブレット係数の鉛直プロファイルを示す。SNRの鉛直空間分布から、高度 1.6 km 付近までエアロゾル濃度が高い大気境界層が発達し、2.2 km および 2.8 km 付近に雲が発生している。ウェーブレット

係数は、SNRが急激に減少する大気境界層上端および雲頂で大きくなり、SNRが急激に増加する雲底で小さくなっている。一般的に大気境界層上端よりも雲頂の方がSNRの減少幅は顕著なため、ウェーブレット係数は大きな値となる。

本研究では、雲によってウェーブレット係数が雲頂で大きくなる場合を考慮し、ウェーブレット係数が最大となる3高度の中で最も低い高度を z_i とするアルゴリズムを用いた。大気境界層が多層構造となる場合、算出される z_i は最も下層の高度となる。 z_i のレンジは、Haar関数の窓幅(本研究では150 m)およびライダーの観測高度によって決まり、算出最低高度は150 m、最高高度は2850 mである。

3. 結果と考察

(1) 各流れパターンの出現傾向

表-3に各流れパターンの発生回数およびデータ取得率を示す。データ取得率は、全データ数に対する解析対象事例数合計の割合である。

発生回数は、*Streak*、*Mixed*、*The others*、*No streak*、*Fish net*、*Front*の順で多い。最も多く発生した*Streak*は解析対象事例の64%を占めており、大気境界層内の代表的な流れ場と言える。季節間で比較すると、秋期よりも冬期の方が*No streak*および*The others*の発生率は一桁大きい。一

方, *Streak*の発生率は冬期の方が小さい。つまり, *No streak*および*The others*と*Streak*の発生比率が季節に応じて相互補完的に変化している。また, 秋期に比べ, 冬期の*Error*の頻度が高い。これは, 冬期においてライダーのターゲットであるエアロゾルの数密度および粒径が小さくなり, SNRが低くなるためであると考えられる。

図-3に流れパターンの出現頻度および $\overline{w'T'}$ の日変化を示す。 $\overline{w'T'}$ は解析期間の平均値である。*Streak*は時間帯によらず出現している。一方, *Fish net*および*Mixed*は $\overline{w'T'}$ が正の値となる日中に出現している。*No streak*および*The others*は $\overline{w'T'}$ が負の値となる夜間に出現している。季節間で比較すると, 秋期の $\overline{w'T'}$ は冬期よりも朝の早い時間帯から増加し始める。これと対応して*Mixed*および*Fish net*は秋期の方が朝早い時間帯から発生している。また, 冬期の $\overline{w'T'}$ は秋期よりも夕方の早い時間帯から減少し負の値となる。これと対応して, *No streak*および*The others*は冬期の方が夕方の早い時間帯から発生している。これらのことから, *Mixed*および*Fish net*は熱フラックスによって駆動され, 正の熱フラックスの供給が無くなると*No streak*および*The others*が発生すると考えられる。

(2) 大気境界層高度の推定

秋期において算出した z_i および気温の時系列を図-4の(a)に示す。算出された z_i は, 気温の上昇と共に高くなり, 概ね気温の日変化と矛盾しない時系列変化となっている。しかしながら, 時系列変化から大きく離れた値となる z_i も見受けられる(図-4(a)の赤円部)。そこで, z_i とライダーのRHIスキャンによって観測されたSNRおよび視線方向風速分布の鉛直空間分布を目視で照合し, 鉛直空間分布と整合しない z_i は棄却し, 最も整合する高度を他の候補高度から最終推定値として選出した。 z_i の最終推定値を図-4(b)に示す。2章で述べたアルゴリズムで適当な z_i を算出することができなかった事例は, 雲

が複数の高度で存在する場合, 夜間において安定層のSNRが残留層よりも小さい場合等であった。また, 冬期においても z_i の算出を試みたが大気境界層高度を上手く見積もることができなかった。これは, 冬期において, SNRの値が低く, SNRのピーク値が適切に検出できないためであると考えられる。なお, 以後の議論には目視で得た最終推定値 z_i を用いる。

図-2 SNRの鉛直プロファイルとウェーブレット係数の関係
(左図はRHIスキャンで得られたSNRの鉛直空間分布)

表-3 目視分類による各流れ場の発生回数およびデータ取得率

分類	発生回数 (発生率)		
	秋期 9/25~10/15	冬期 12/1~1/10	合計
1. <i>Streak</i>	3,728 (78%)	1,595 (46%)	5,323 (64%)
2. <i>No streak</i>	233 (5%)	593 (17%)	826 (10%)
3. <i>Mixed</i>	507 (11%)	559 (16%)	1,066 (13%)
4. <i>Fish net</i>	124 (3%)	57 (2%)	181 (2%)
5. <i>Front</i>	15 (0.3%)	8 (0.2%)	23 (0.3%)
6. <i>The others</i>	177 (4%)	670 (19%)	847 (10%)
解析対象事例合計	4,784	3,482	8,266
11. <i>Error</i>	2,163 (95%)	8,249 (98%)	10,412 (98%)
12. <i>Rain</i>	113 (5%)	140 (2%)	253 (2%)
非解析対象事例合計	2,276	8,389	10,665
データ取得率	68%	29%	44%

図-3 各流れパターンの発生回数および $\overline{w'T'}$ の日変化

図-4 境界層高度の推定値および気温の時系列変化

((a) 境界層高度の第一推定値, (b)最終推定値を黒い点で, 気温を灰色の線で示す)

● 1. Streak ● 2. Nostreak ● 3. Mixed ● 4. Fish net ● 5. Front ● 6. The others ● 1. Streak ● 2. Nostreak ● 3. Mixed ● 4. Fish net ● 5. Front ● 6. The others

図-5 各流れパターンと Re および $-z_i/L$ の関係

(3) 相似則パラメータと流れパターンの関係

a) z_i を含むレイノルズ数および大気安定度

図-5に秋期の Re および $-z_i/L$ と各流れパターンの関係を示す((a)に不安定場, (b)に安定場を対数表示した). Re および $-z_i/L$ は, 式(3)(4)によって算出した.

$$Re = \frac{U z_i}{\nu} \quad (3)$$

$$\frac{-z_i}{L} = \frac{k(g/T)T^* z_i}{u^*{}^2} \quad (4)$$

ここで, U は地表面付近の主流風速, ν は動粘性係数, L はMonin Obukhovの安定度スケール, k はカルマン定数, g は重力加速度, T は気温である. U および T には超音波風速計による観測値の30分平均値を使用した. 大気乱流はレイノルズ数が大きく粘性の影響が極めて小さいと考えられるため, 動粘性係数を渦動粘性係数に変えた検討

図-6 各流れパターンと Re_{surf} および $-z_i/L$ の関係

も行ったが, 各モードの分類は動粘性係数を用いた場合に比べて大きく改善しなかったため, より一般的な動粘性係数を用いた Re で議論する. 図-5より, 各流れパターンが出現する大気場にはそれぞれ特徴があることがわかる. 不安定場に注目すると, *Streak*は大気が中立に近く慣性力が大きい場で発生する. 大気がより不安定になると, 慣性力が強い場で*Mixed*が, 慣性力が弱い場で*The others*が発生する. そして, 大気がさらに不安定になると*Fish net*が出現する. 安定場において, *The others*は安定度が強く慣性力が小さい場で生じる. これは, 地表面からの機械的および熱的乱流エネルギー供給が極めて小さい場に相当するが, それでも図-1(f2)に見られる有意な乱流変動のパターンが形成される原因として, 重力波やマイクロフロントの様な外部擾乱の影響 (TKEの移流) が考えられる¹⁰⁾¹¹⁾. さらに, *The others*のプロットは右肩下がりにならんでおり, 強い安定度場では, より高い Re でも静穏な流れ場である*The others*が出現可能であるこ

図-7 図-5から得られた流れパターンの発生傾向（点線で各流れパターンの出現境界を、各領域内に上位の流れパターンおよび領域内の出現頻度を示した。）

とが示唆される。また、No Streakは不安定場および安定場において、StreakとThe othersの境界に位置し、乱流遷移状態を予測させる。図-5から求めた流れ場パターンの境界および発生傾向を図-7に示す。

流れパターンが出現する大気場は、既往研究で指摘されている $-z_i/L$ のみならず Re にも依存しており、 $-z_i/L$ および Re を用いて流れ場を整理することで、浮力および慣性力による乱流エネルギー供給が少ない場で発生する流れ場（No streak, The others）の評価が可能となった。

b) 地表面付近を代表するレイノルズ数および大気安定度

図-6に秋期および冬期の Re_{surf} および $-z/L$ と各流れパターンの関係を纏めて示す。 Re_{surf} および $-z/L$ は式(3)(4)において z_i の代わりに超音波風速計の地上高25 mを代入した値であり、地表面付近のローカルな大気場を表す（なお、前節で議論したパラメータ $-z_i/L$ は、大気境界層全体を代表するスケーリングパラメータ z_i を含む）。

図-6より、各流れパターンのプロットは纏まって分布しており、 Re_{surf} および $-z/L$ によっても流れパターンが整理できると言える。尚、図-6から求めた流れ場の発生傾向は図-8に示す。

4. 結論

1) ライダー観測によって得られたPPI画像を6グループに目視で分類した。各流れパターンの出現率を定量化し、季節・時間・安定度などに関連づけた。Streakは全出現パターンの半分程度を占めること、安定・静穏時に現れやすいNo streakやThe othersも10%程度であり、MixedやFish netと同程度の寄与があることが明らかになった。

2) 各流れパターンが出現した大気場は、 Re および $-z_i/L$ で特徴づけることが可能であり、流れパターンの出現条件を相似則パラメータ（ Re および $-z_i/L$ ）によって定量的に示した。

3) 流れパターンは、地表面のローカルな大気場を表す Re_{surf} および $-z/L$ によっても分類可能であることが明らかになった。

図-8 図-6から得られた流れパターンの発生傾向（点線で各流れパターンの出現境界を、各領域内に上位の流れパターンおよび領域内の出現頻度を示した。）

謝辞：本研究は文部科学省・社会システム改革と研究開発の一体的推進「気候変動に伴う極端現象に強い都市創り」、及び科学研究費補助金基盤研究（A）（課題番号：25249066）による支援を受けた。

参考文献

- 1) Stull, Roland B.: An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer academic publishers, Vol. 666, pp.468-469, 1987.
- 2) 藤吉康志, 山下和也, 藤原忠誠: 3次元走査型コヒーレントドップラーライダーによる大気境界層の流れの可視化, 天気, 52.9, 665-666, 2005.
- 3) Drobinski, Philippe., FOSTER, Ralph C.: On the origin of near-surface streaks in the neutrally-stratified planetary boundary layer, Boundary-layer meteorology, 108.2, 247-256, 2003.
- 4) Kanak, Katharine M., LILLY, Douglas K., SNOW, John T.: The formation of vertical vortices in the convective boundary layer, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 126.569: 2789-2810, 2000.
- 5) Fujiwara, C., Yamashita, K., Nakanishi, M., & Fujiyoshi, Y.: Dust devil-like vortices in an urban area detected by a 3D scanning Doppler lidar, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50.3, 534-547, 2011.
- 6) 八木綾子, 有場次郎, 稲垣厚至, 神田 学, 藤原忠誠, 藤吉康志: ドップラーライダーによる都市上空の流れ分類, 土木学会水工学論文集, 57巻, 753-758, 2013.
- 7) Grossman, Robert L.: An analysis of vertical velocity spectra obtained in the BOMEX fair-weather, trade-wind boundary layer, Boundary-Layer Meteorology, 23.3, 323-357, 1982.
- 8) 近藤純正編: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, 99-108, 1994.
- 9) Cohn, Stephen A., and Wayne M. Angevine.: Boundary layer height and entrainment zone thickness measured by lidars and wind-profiling radars, Journal of Applied Meteorology, 39.8, 1233-1247, 2000.
- 10) Fujiyoshi, Y., K. Yamashita, and C. Fujiwara.: Detection of organized airflow in the atmospheric boundary layer and the free atmosphere using a 3D-scanning coherent Doppler lidar, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- 11) 小田僚子, 岩井宏徳, 石井昌憲, 関澤信也, 水谷耕平, 村山泰啓: ドップラーライダーの鉛直風速観測に基づく都市大気境界層内乱流スケールの推定, 土木学会論文集B1(水工学), 55巻, S313-S318, 2011. (2013. 9. 30受付)