

# ドップラーライダーを用いた内部境界層内 乱流構造の水平分布形状に関する観測研究

DOPPLER LIDAR OBSERVATION STUDY ON THE HORIZONTAL TURBULENT  
STRUCTURES IN THE INTERNAL BOUNDARY LAYER

小田僚子<sup>1</sup>・岩井宏徳<sup>2</sup>・村山泰啓<sup>3</sup>・石井昌憲<sup>4</sup>・水谷耕平<sup>5</sup>・板部敏和<sup>6</sup>・  
常松展充<sup>7</sup>・山田泉<sup>8</sup>・又吉直樹<sup>9</sup>・松島大<sup>10</sup>・余偉明<sup>11</sup>・山崎剛<sup>12</sup>・岩崎俊樹<sup>13</sup>  
Ryoko ODA, Hironori IWAI, Yasuhiro MURAYAMA, Shoken ISHII, Kohei MIZUTANI,  
Toshikazu ITABE, Nobumitsu TSUNEMATSU, Izumi YAMADA, Naoki MATAYOSHI,  
Dai MATSUSHIMA, Weiming SHA, Takeshi YAMAZAKI and Toshiki IWASAKI

<sup>1</sup>正会員 博(工) (独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター (〒184-8795東京都小金井市貫井北町4-2-1)

<sup>2</sup>非会員 修(情報) (独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター (同上)

<sup>3</sup>非会員 博(工) (独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター (同上)

<sup>4</sup>非会員 博(理) (独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター (同上)

<sup>5</sup>非会員 理博 (独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター (同上)

<sup>6</sup>非会員 理博 (独)情報通信研究機構 電磁波計測研究センター (同上)

<sup>7</sup>非会員 博(環境) 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター 客員准教授 (〒263-8522千葉県稲毛区弥生町1-33)

<sup>8</sup>非会員 修(科) (独)電子航法研究所 航空交通管理領域 (〒182-0012東京都調布市深大寺東町7-42-23)

<sup>9</sup>非会員 修(工) (独)宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ (〒181-0015東京都三鷹市大沢6-13-1)

<sup>10</sup>正会員 博(理) 千葉工業大学 工学部建築都市環境学科 准教授 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

<sup>11</sup>非会員 博(理) 東北大学大学院 理学研究科地球物理学専攻 准教授 (〒980-8578宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3)

<sup>12</sup>非会員 博(理) 東北大学大学院 理学研究科地球物理学専攻 准教授 (同上)

<sup>13</sup>非会員 理博 東北大学大学院 理学研究科地球物理学専攻 教授 (同上)

The Coherent Doppler lidar observations using the Electronic Navigation Research Institute (ENRI)'s lidar and the National Institute of Information and Communications Technology (NICT)'s lidar were used to investigate the turbulent organized structure over Sendai Airport on 19 June 2007. The horizontal distribution of the radial velocity fluctuations revealed the occurrence of the streak structure elongated along the main stream. The intervals between the streaks in the spanwise direction were estimated about 400m using a two-point correlation analysis. The interval of the streaks was not scaled with the atmospheric boundary layer height but with the internal boundary layer height.

**Key Words :** Doppler lidar, Turbulent structure, Internal boundary layer, Field observation

## 1. はじめに

地表面近傍には、乱流組織構造が発達し、これらは運動量・熱・物質輸送に対して支配的な役割を担っていると指摘されている<sup>1)</sup>。そのため、乱流構造の時空間的把握は重要であり、今日まで数値シミュレーションや風洞実験、屋外観測など、様々な方法で大気乱流構造の検討が行われてきた。例えば、Adrian et al. (2000)<sup>2)</sup>は平板上の風洞実験において高速・低速渦からなる風下方向に延びる筋状の乱流構造(ストリーク)を観測し、Inagaki

(2008)<sup>3)</sup>は屋外模型都市上において同様なストリーク構造を観測した。両者は定性的には似たような構造であることを示しているが、定量的な相似性については明らかにされておらず、どのようなスケーリングパラメータに従うのかは未だ研究段階である。

そこで本研究では、ドップラーライダーを用いた大気乱流構造の観測を実施した。ドップラーライダーは実際の自然条件下において数kmスケールの広範囲に及ぶ風場の場を面的に測定可能であり、上記手法に比べて数オーダー大きな乱流構造を捉えることができる。ライダー技術は1970年頃までに注目されはじめ、その後大気環境計

測の有用なツールとして活用されてきた<sup>4)</sup>。近年、風速測定が可能なコヒーレントドップラーライダー（CDL）を用いたストリーク構造の観測が実施されており、例えば山下ら（2008）<sup>5)</sup> は日中晴天時にストリーク間隔が広がる傾向にあることを示し、Newsom et al. (2008)<sup>6)</sup> はデュアルCDL観測により構造サイズの安定度依存性に言及している。またIwai et al. (2008)<sup>7)</sup> は同じくデュアルCDL観測より不安定時に下層のストリークが上部の水平ロール渦に組み込まれていることを示した。

本研究では、ストリーク構造の大きさを決めるスケーリングパラメータの一つとして内部境界層高度の可能性を指摘する。

## 2. 観測概要

### (1) 観測地点

仙台空港は宮城県名取市と岩沼市にまたがって位置し（38.14°N, 140.92°E），二本の滑走路（A滑走路：1,200m, B滑走路：3,000m）を有する国管理空港である。空港面積は239ha、標高は1.7mで、東側には太平洋が広がる海に近い立地であるため、航空気象は海風による影響を受けやすい。

本観測では、電子航法研究所（ENRI）と情報通信研究機構（NICT）所有の二台のCDLを用いている。ENRIライダー<sup>8)</sup> は太平洋沿岸から約2.5km西の空港敷地内にあるENRI岩沼分室の屋上（地上高16.7m）に設置されており、車載可搬型のNICTライダー<sup>9)</sup> は海岸から西に約4kmの名取市空港西グラウンドに設置した（図-1）。

### (2) 観測方法

CDLは、レーザ光線を大気中へ発射して大気中のエアロゾルによる後方散乱を受信し、参照光と後方散乱光との周波数差からドップラーシフトを求めることで視線方向風速を計測するシステムである。レーダーと比べ降雨のない晴天時でも観測できる特長があり、航空機に影響する空港周辺の乱気流を計測する目的で近年成田・東京国際空港といった主要空港にも導入されている<sup>10)</sup>。

2007年6月9日から20日にかけて、仙台空港周辺の大気場を計測するため、上記二台のCDLを用いた大気観測が実施された。ENRIライダーは波長1.54 $\mu\text{m}$ 、パルスエネルギー0.2mJ/pulseのレーザ光線を用い、パルス繰り返し周波数4kHz、レンジ分解能29.9m、最小・最大観測距離はそれぞれ80m、約2.5kmである。500パルス分を積分し、視線方向速度および信号対雑音比（signal-to-noise ratio; SNR）を求めている。一方、NICTライダーは波長2.012 $\mu\text{m}$ 、パルスエネルギー7mJ/pulseのレーザ光線を用い、パルス繰り返し周波数100Hz、レンジ分解能約90m、最小・最大観測距離はそれぞれ315m、約10kmであり、50パルス分の積分から視線方向速度とSNRを算出している。

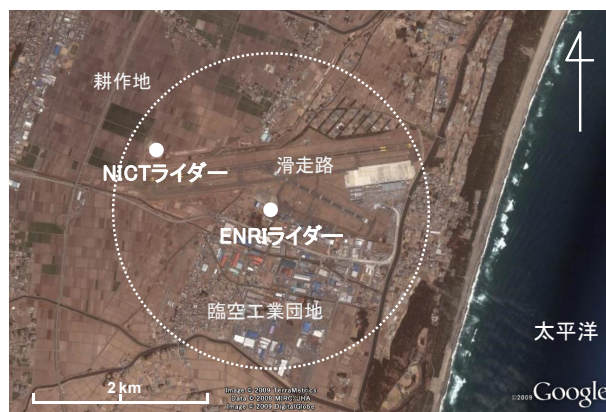


図-1 観測地点（図中点線はENRIライダー観測領域）

ENRIライダーでは、仰角0.5°から5.0°のConstant-Altitude Plan Position Indicator（CAPPI）スキャン（仰角を一定にして方位角方向に360°回転させる）を0.5°刻み、スキャンスピード6° s<sup>-1</sup>で実施した。ここでは地表面近傍の風速場に着目するため、仰角1.0°（地上から22.0m～48.6mの高度範囲）のPPIスキャンを対象に、2007年6月18日 0937～0938 JSTおよび2007年6月19日 1301～1426 JST（12分間隔で8回スキャン）の結果を用いる。NICTライダーでは、方位角135°のRange Height Indicator（RHI）スキャン（方位角を固定して鉛直断面データを得る）を実施し、2007年6月19日 1239～1247 JSTの結果を用いる。なお、本観測時間帯には3次元超音波風速計、温度計、露点計、気圧計を搭載した宇宙航空研究開発機構（JAXA）の実験用ヘリコプタ（MuPAL-ε）<sup>11,12)</sup>により、空港周辺の風速・風向、気温、気圧が測定された。離着陸時の観測データより、上記気象要素の鉛直分布が得られ、それにより両日とも不安定な大気場であったと推定される<sup>7)</sup>。

### (3) データ処理

観測データの解析に際し、有意データを選別することが重要である。本研究では、PPIスキャンデータに対して、視線方向風速の定量的な推定精度に大きく影響するSNR<sup>13)</sup>によるデータ処理を行った。まずSNRがある閾値以下（ここでは5dB以下）を除去し、ライダーからの距離に伴ってSNRが減少することから、距離ごとにSNRの平均 $\bar{m}$ と標準偏差 $\sigma$ を算出し、 $\bar{m} \pm 2\sigma$ （95%信頼区間）の範囲外を除去した。上記方法を適用後も明らかにエラー値と思われる値が残っていた場合は個別に取り除いた。また、データが非常に疎らであったためにライダーから約1.8km以遠は解析対象外とした（図-1 図中点線）。

## 3. 観測結果

### (1) ストリーク構造の抽出

図-2に (a) 6月18日0937～0938 JST, (b) 6月19日1301～

1302 JST に観測されたENRIライダーPPIスキャンによる視線方向風速の結果を示す。寒色系（負の値）は風がライダーに向かって吹いてくる方向、暖色系（正の値）はライダーから遠ざかる方向であることを示しており、主流方向はほぼ南東（北から約 (a) 121°, (b) 136°）で、それぞれスキャン断面平均で約 $3.5\text{ m s}^{-1}$ ,  $5.7\text{ m s}^{-1}$ の海風が仙台空港に向かって流入している状況である。海風フロントは両日とも0800 JST頃に仙台空港を通過し、本観測時間帯ではライダー測定範囲より内陸にある。図-2のとりわけ(b)からは主流方向に沿った縞状のストリーク構造が確認できるが、平均風速場からの低速域・高速域を明瞭に表すため、視線方向風速変動成分の抽出を試みた。

図-3は、図-2で示した各高度の視線方向風速から、各高度の平均風速を減じ、平均風速場からの変動成分を求めて図示したものである。各高度の平均風速は、Velocity Azimuth Display (VAD) 法（一定仰角で走査した円周内の平均風速・風向などを求める手法<sup>14)</sup>）において、時空間的な風速場の一様性を仮定した簡易VAD法

によって推定した。

図-3(b)からは、高速・低速領域が交互に並んだ主流方向に沿った明瞭なストリーク構造が確認できる。一方、図-3(a)は図-3(b)ほどはっきりとしたストリーク構造は見られず、全体的に高速・低速領域の塊が存在するようにも見える。上述した通り、ここでは、PPIスキャンにより測定された円周内の風速場が高度毎に一樣であるとの仮定に基づいて平均風速を求めたが、6月18日のケースではその仮定は成立していなかったと言える。比較的弱風で不安定な大気場であったため、強風時のような主流方向に沿って伸びる明瞭なストリーク構造は現れず、サーマルのような水平風速の斑が観測されたと考えられる<sup>15)</sup>。以降、明瞭なストリーク構造が見られる6月19日のデータを対象として、ストリーク構造の水平分布形状について議論する。

## (2) ストリーク間隔の推定

主流方向の構造の長さは、測定領域の制限などから特

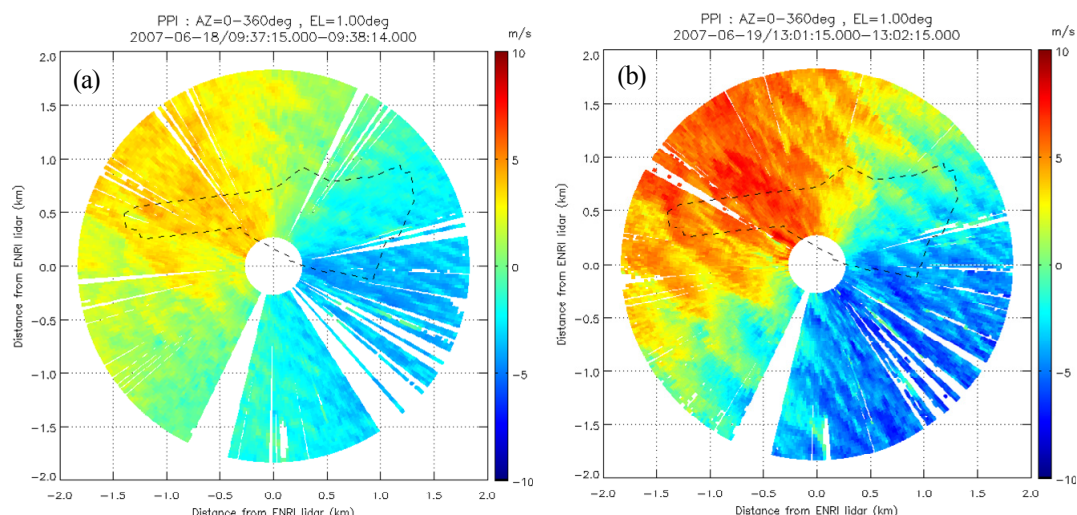


図-2 ENRIライダーPPIスキャンによる視線方向風速；(a) 6/18\_0937-0938 JST, (b) 6/19\_1301-1302 JST (寒色系が風がライダーに向かって吹く方向、暖色系がライダーから去る方向。図中点線は仙台空港の位置。)

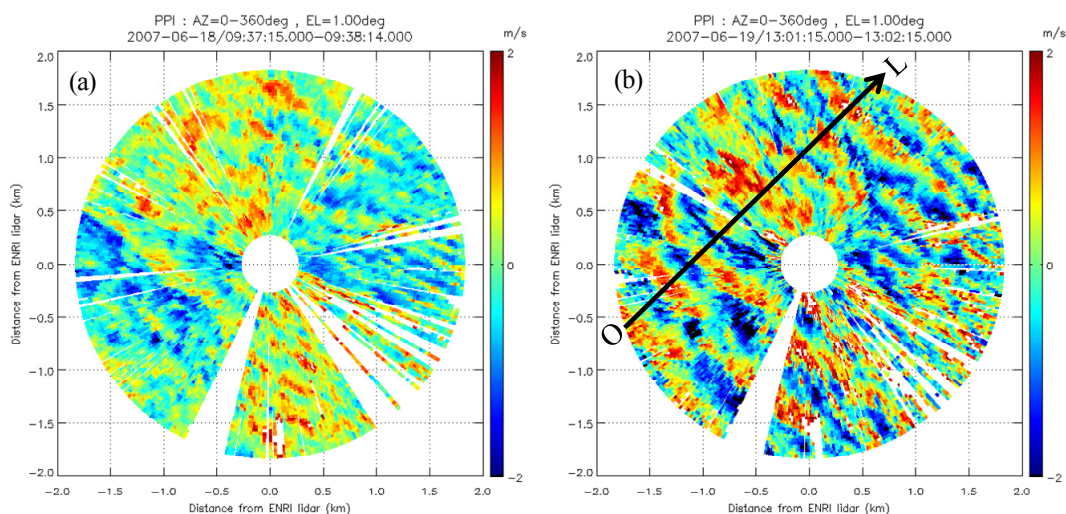


図-3 視線方向風速変動成分；(a) 6/18\_0937-0938 JST, (b) 6/19\_1301-1302 JST (寒色系が低速域、暖色系が高速域。図中0-L線は二点相関解析で対象とした主流直交方向の線。)

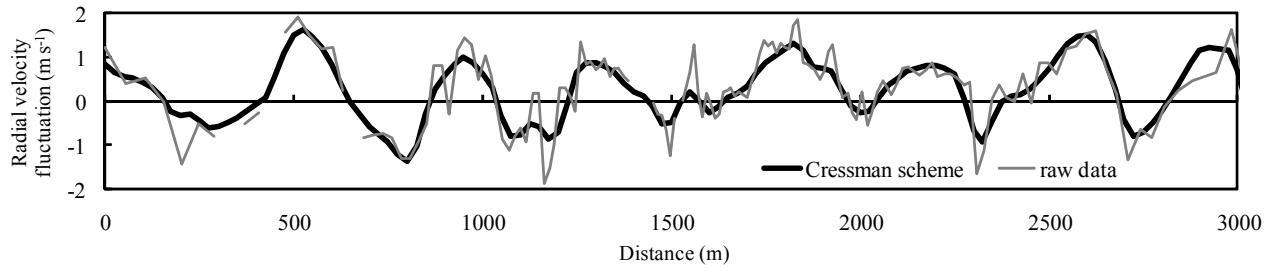


図-4 ENRIライダーから約800m下流の主流直交方向ラインに沿った視線方向風速変動成分（図-3（b）の図中O-L線に対応）

定が難しいため、今回は構造の間隔に着目し、二点相関解析による検討を行った<sup>16)</sup>。ここでは、ENRIライダーの中心から約800m下流の主流直交方向ラインを対象とした（図-3（b）図中O-L線）。しかしながら、単純に主流直交方向ラインに乗るデータを抽出すると、主流直交方向の距離間隔および高度にばらつきがあり（PPIスキャン結果の外縁に近いほど距離間隔が広く、高度が高い）、また、データ欠損を生じている場合がある。そこで本研究では、高度40m、主流直交方向距離間隔25mに任意の点を設定し、各点を中心とした水平方向半径  $dl$  50m、鉛直方向半径  $dz$  25mの影響回転楕円体の内部に入る視線方向風速変動成分データ（ $N$  点）を、Cressman型重み関数<sup>17)</sup>  $W_i$ （式(1)）を用いて、任意の点に内挿する手法を適用した。

$$W_i = \begin{cases} \frac{dl^2 - (x_i^2 + y_i^2)}{dl^2 + (x_i^2 + y_i^2)} \cdot \frac{dz^2 - z_i^2}{dz^2 + z_i^2} & (x_i^2 + y_i^2 < dl^2 \text{ and } z_i^2 < dz^2) \\ 0 & (x_i^2 + y_i^2 \geq dl^2 \text{ or } z_i^2 \geq dz^2) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $x_i, y_i, z_i$  は点  $i$  から任意の点までの距離を示す。任意の点に内挿される値  $G$  は、 $D_i$  を極座標上の点  $i$  上の視線方向風速変動成分とすると、

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N D_i W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (2)$$

となる。

図-4は図-3（b）の図中O点を原点に取り、Lに向かってx軸を設定した視線方向風速変動成分を示す。黒線は上式のCressman型重み関数を用いて内挿処理を行った結果であり、灰色線は内挿処理を行わない結果である。内挿処理を行うことで滑らかな波形となっているが、生データと比較してデータ欠損がなく、場の代表的な構造と見られる低速・高速域の変動も評価できていると考えられる。このデータから、二点相関解析によりストリーク間隔の推定を試みる。二点  $(x, x+dx)$  での相関係数  $R(x)$  は、次の式(3)のように計算される。

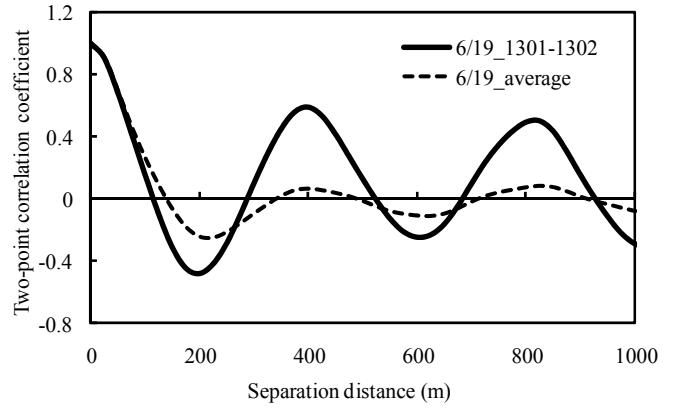


図-5 視線方向風速変動成分の二点相関係数

$$R(x) = \frac{\overline{u'(x)u'(x+dx)}}{\sqrt{\overline{u'^2(x)}}\sqrt{\overline{u'^2(x+dx)}}} \quad (3)$$

ここで、 $x$  はある座標値、 $dx$  は二点間の距離、 $u'$  は視線方向速度変動成分、 $\overline{\quad}$  はアンサンブル平均を意味する。

図-5の黒色実線は、図-4の黒線波形から算出した二点相関係数を示す。相関係数の初期ピークが現れる位置からストリークの間隔を推定すると、約400mの間隔を持つことが数値的に求められた。第二ピークが約800mのところに存在するが、これは第一ピークに対応するハーモニックな周期と考えられる。また、図-5の黒色破線は、2007年6月19日1301～1426 JSTの間に計8回観測されたPPIスキャン結果を、これまでの手法と同様に解析し、アンサンブル平均した結果である。相関強度は小さくなっているものの、先ほどと同様に400mに初期ピークがあり、観測時間中（約1時間半）に仙台空港付近では約400mの間隔を持つストリーク構造が発達していたと言える。

### (3) ストリーク間隔と大気境界層および内部境界層高度の関係

ストリーク構造と大気境界層高度（ $z_i$ ）との関連性についてはこれまでも指摘されてきたが<sup>18)</sup>、実際の気象場において、数十～数千mに及ぶ水平・鉛直分布の同時計測は極めて困難であり、実観測の側面からの両者の関係性は詳細には理解されていない。本観測では、ストリーク間隔推定に用いた観測とほぼ同時刻（1239～1247 JST）に、NICTライダーによって方位角135°のRHIスキャンを実施しており、大気境界層高度の推定が可能で



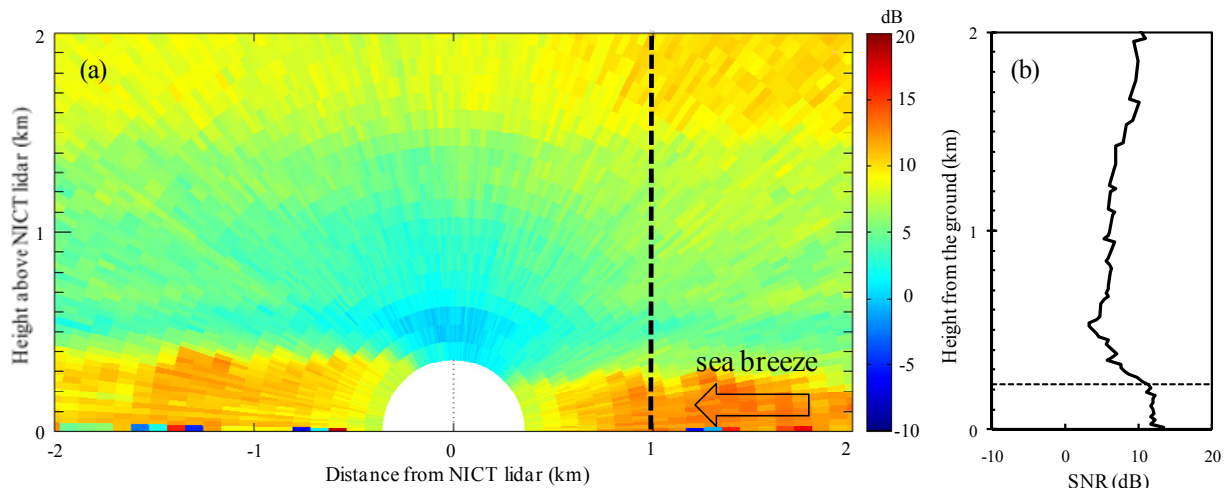


図-6 (a) NICTライダーRHIスキャン (方位角135°) でのSNR分布 (6/19\_1239-1247 JST), (b) NICTライダーから風上方向に1kmの地点におけるSNRの鉛直断面 (図-6 (a) の図中点線)

あった。RHIスキャンにより得られた視線方向風速の結果から、高度700m辺りで風速変化が緩やかで風向が下層と逆転する傾向にあり、この付近が自由大気との境界である大気境界層高度であったと推察される<sup>7)</sup>。距離二乗補正を施したSNRの鉛直断面図を図-6(a)に示す。図の右側から下層に海風が流入している状況である。これより、高度200~300m付近に海風による内部境界層が存在していることが認められる。ENRIライダーから風上方向1kmの地点におけるSNRの鉛直プロファイルを示したのが図-6(b)である。SNR鉛直プロファイルのうち、SNRの高度変化が最大となるところで内部境界層高度と良い一致を示すことが知られている<sup>19)</sup>。ここでもその関係性を用いると、約220m高度の内部境界層 (海風層厚) が発達していたと考えられる (図-6(b) 図中点線)。

これまで指摘されていたように、ストリーク構造が混合層スケールだとすると、その水平スケールは約 $1.5z_i$ として約1000mと推定されるが<sup>20)</sup>、本観測で得られたストリーク間隔は約400mであるため、混合層スケールであるとは考えにくい。そこで、ストリーク間隔の大きく異なる屋外での観測例との比較により、適切なスケリングパラメータについて検討する。

Inagaki (2008)<sup>3)</sup> は、大気境界層下での屋外都市模型実験において、中立安定度時に約20m間隔のストリーク構造を観測している。その時の $z_i$ は約1000m程度であり、この値でストリーク間隔を無次元化すると約 $10^{-2}$ のオーダーとなる。一方本研究で観測されたストリーク間隔を同様に $z_i$ で無次元化すると、約 $10^{-1}$ のオーダーであり、同じ屋外であるにも関わらず両者が $z_i$ の値に対して相似であるとは言えない。これに対し内部境界層高度に着目すると、屋外都市模型の場合は通常10m以下の内部境界層が発達するとされており<sup>21)</sup>、本観測結果と同様に、ストリーク間隔は内部境界層高度の約2倍である。

以上より、ストリーク構造の大きさを決定するスケリングパラメータの可能性として内部境界層高度が挙げられる。

#### 4. ストリーク間隔の流下距離依存性

3. (2) では、ENRIライダーから約800m下流の地点を対象とし、約400mのストリーク間隔を持つ構造が存在することを示したが、ここでは流下距離に伴うストリーク構造の変化に着目する。なお、ENRIライダーより風上側はデータ欠損が多いため (図-2, 3参照), ここでは風下側を対象とする。図-7は、ENRIライダーから0.4~1.0km下流の地点 (0.1km間隔) を対象とし、それぞれについて計算した二点相関係数をまとめたものである。各々のピークは375~450mに現れているが、流下距離に対して線形的な関係性はなく、また、内挿処理を施していることやアンサンブル平均するサンプル数 (8つ) を鑑みると有意な差とは言いがたい。対象とした流下距離間隔 (600m) ではストリーク構造は大きく変化せず、約400mのストリーク間隔であったと言える。3. (3) より、ストリーク構造を決定する一要因が内部境界層高度であったとすると、図-6(a)に示すように本観測においては海風による内部境界層高度が既に発達して場所的に大きな変化を示さない状況であったために、流下方向のストリーク間隔の変化が見られなかったと考えられる。

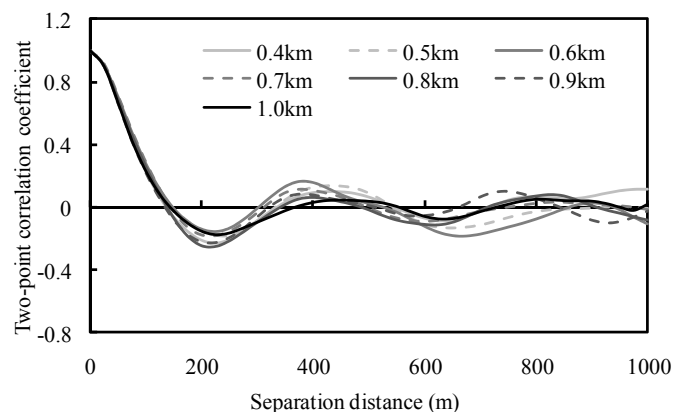


図-7 各流下距離における視線方向風速変動成分の二点相関係数 (6/19\_1301-1426 JST アンサンブル平均)

## 5. 結論

2007年6月19日に仙台空港で行われたENRIライダーによる仰角1.0°のPPIスキャン結果より、発達するストリーク構造の間隔を二点相関解析により推定した。その結果、流下距離方向（距離間隔600m）では変化しない約400mの間隔を有するストリークが発達していることがわかった。このストリーク間隔について $z_i$ での無次元化を施したところ、他の屋外観測事例と1オーダー異なる結果となった。これはスケーリングパラメータとして妥当ではないことを意味する。これに対し、内部境界層高度がスケーリングパラメータである可能性を指摘した。今後さらなる観測事例を増やし、この妥当性を検証する必要がある。

**謝辞：**本研究は科学研究費補助金基盤研究(A)（課題番号：19204046、代表者：岩崎俊樹）による財政的援助を受けた。また、東京工業大学の稲垣厚至助教には乱流組織構造全般について有益な助言をいただいた。記して深甚の謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) Wilczak, J. M. and Tillman, J. E.: The three-dimensional structure of convection in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **37**, pp.2424-2443, 1980.
- 2) Adrian, R. J., Meinhardt, C. D. and Tomkins, C. D.: Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, **422**, pp.1-54, doi:10.1017/S0022112000001580, 2000.
- 3) Inagaki, A.: Atmospheric turbulence over an array of massive cubes, PhD Thesis, Tokyo Institute of Technology, 2008.
- 4) Wilczak, J. M., Gossard, E. E., Neff, W. D. and Eberhard, W. L.: Ground-based remote sensing of the atmospheric boundary layer: 25 years of progress, *Boundary-layer Meteorol.*, **78**, pp.321-349, 1996.
- 5) 山下和也, 藤原忠誠, 中西幹郎, 藤吉康志: 大気境界層に普遍的に存在するストリーク構造の特性, 2008年度気象学会春季大会講演予稿集, p.288, 2008.
- 6) Newsom, R., Calhoun, R., Ligon, D. and Allwine, J.: Linearly organized turbulence structures observed over a suburban area by dual-Doppler lidar, *Boundary-Layer Meteorol.*, **127**, pp.111-130, doi:10.1007/s10546-007-9243-0, 2008.
- 7) Iwai, H., Ishii, S., Tsunematsu, N., Mizutani, K., Murayama, Y., Itabe, T., Yamada, I., Matayoshi, N., Matsushima, D., Sha, W., Yamazaki, T. and Iwasaki, T.: Dual-Doppler lidar observation of horizontal convective rolls and near-surface streaks, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14808, doi:10.1029/2008GL034571, 2008.
- 8) Komatsubara, T. and Kaku, N.: The status of wake vortex research in Japan, *Proceedings of the 13th Coherent Laser Radar Conference*, Kamakura, Japan, pp.140-143, 16-21 October, 2005.
- 9) Ishii, S., Sasaki, K., Mizutani, K., Aoki, T., Itabe, T., Kanno, H., Matsushima, D., Sha, W., Noda, A., Sawada, M., Ujiie, M., Matsuura, Y. and Iwasaki, T.: Temporal evolution and spatial structure of the local easterly wind “Kiyokawa-dashi” in Japan PART I: coherent Doppler lidar observations, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **85**, pp.797-813, doi:10.2151/jmsj.85.797, 2007.
- 10) 山本健太郎: 東京国際空港及び成田国際空港に設置された空港気象ドップラーライダーの測風性能特性, 第三回航空気象研究会講演予稿, 2009.
- 11) 奥野善則, 又吉直樹, 照井祐之, 若色薫, 穂積弘毅, 井之口浜木, 船引浩平: 実験用ヘリコプタMuPAL-εの開発, 航空宇宙技術研究所資料, TM-764, 2002.
- 12) Matayoshi, N., Inokuchi, H., Yazawa, K. and Okuno, Y.: Development of an airborne ultrasonic velocimeter and its application to helicopters, *Proceedings of the AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*, San Francisco, California, AIAA 2005-6118, 15-18 August, 2005.
- 13) Kane, T. J., Zhou, B. and Byer, R. L.: Potential for coherent Doppler wind velocity lidar using neodymium lasers, *Appl. Opt.*, **23**, pp.2477-2481, 1984.
- 14) Browning, K. A. and Wexler, R.: The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar, *J. Appl. Meteor.*, **7**, pp.105-113, 1968.
- 15) 山下和也, 藤吉康志: 札幌で観測された大気境界層内の様々な流れ〜3次元走査型コヒーレントドップラーライダーによる観測, 日本気象学会北海道支部平成17年度研究発表会予稿, pp.1-2, 2005.
- 16) Kim, J., Moin, P. and Moser, R.: Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, **177**, pp.133-166, doi:10.1017/S0022112087000892, 1987.
- 17) Cressman, G. P.: An operational objective analysis system, *Mon. Weather Rev.*, **87**, pp.367-374, 1959.
- 18) Lin, C.-L., Moeng, C.-H., Sullivan, P. P. and McWilliams J. C.: The effect of surface roughness on flow structures in a neutrally stratified planetary boundary layer flow, *Phys. Fluids*, **9**, pp.3235-3249, 1997.
- 19) Melfi, S. H., Spinhirne, J. D., Chou, S.-H. and Palm, S. P.: Lidar observations of vertically organized convection in the planetary boundary layer over the ocean, *J. Clim. Appl. Meteor.*, **24**, pp.806-821, 1985.
- 20) Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Haugen, D. A., Coté, O. R. and Izumi, Y.: Turbulence structure in the convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **33**, pp.2152-2169, 1976.
- 21) Inagaki, A. and Kanda, M.: Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow, *J. Fluid Mech.*, **615**, pp.101-120, doi:10.1017/S0022112008003765, 2008.

(2009. 9. 30受付)