

平成 27 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：屋外環境

研究期間：H27 [平成 27 年度で終了]

課題番号：153006

研究課題名（和文）：非等温乱流境界層中の乱れの特徴的時間・長さスケールの系統的把握のための研究

研究課題名（英文）：Systematic investigation of turbulent length and time scales within non-isothermal boundary layer

研究代表者：大風 翼

交付決定額（当該年度）： 555,000 円

1. 研究の目的

最近の計算機性能のめざましい進歩により、都市スケールの風環境予測に LES(Large-eddy simulation)が用いられるようになり、渦の構造を再現するような物理的矛盾が生じない変動成分を付加し、流入変動風を生成する研究も精力的に行われている。

LES の流入変動風を生成する手法としては、①予備計算を行い、直接変動風を得る手法、②仮定した乱流統計量を満たすよう乱数を組み合わせて変動風を人工的に得る手法、の 2 つに大別される。これらの手法は、風速変動の時刻歴は再現できるものの、都市温暖化や粒子の飛散など様々な問題が叫ばれている中で、流入面で温度・濃度等のスカラー量の変動を再現できる手法はほとんどなかった。

代表者の大風は、上記②の手法の一つを援用して、乱流フラックスのコレスキー分解に基づき、風速変動に加えて温度変動等のスカラー変動を加えた流入変動風を生成する新しい手法を開発し、温度成層風洞での実験結果との比較から、その有用性を示した。

本研究では、上記の変動風生成手法において規定する必要がある乱流の特徴的長さスケールについて、野外観測を実施し、大気安定度との関係性について分析を行う。

2. 研究の方法

宮城県南部の平野に、超音波風速計を高さ 10m 及び 5m に設置し、風観測を行い、取得したデータを分析した。測定期間は、2015 年 8 月 28 日から 10 月 12 日までのおよそ 1 ヶ月半である。観測地点の卓越風向である西側には、数 km にわたり平原が広がっている。観測に用いた測定器を表 1 に示す。音仮温度を用いて、乱流熱フラックスの算出も行った。

表 1 実験に用いた測定機器

測定器	測定項目	測定高さ	サンプリングレート
ソニック社製 SAT-600	風速 音仮温度	5m、10m (2 高度)	20Hz

3. 研究成果

図 1 に、8 月 29 日～9 月 11 日の高さ 10 分間平均風向風速を示す。1m/s 以上の風が吹いている期間が多い。図 2 に測定期間の風配図（図 2(1)）及び卓越風が西であった日の風配図（図 2(2), (3)）を示す。卓越風向と想定した、西風は多いものの測定を行った 9 月は、例年より雨が多かった影響もあり、例年に無く北寄りの風も多かったが、図 2(2), (3)に示すように、1 日を通して西寄りの風が吹いた期間もあった。以降は、10 分間の平均風向で西南西から西北西の期間を抽出して分析を行う。

10 分間の平均風向が西南西から西北西に含まれる測定値を用い、各々の時間で、乱れの特徴的長さスケールの算出を行った。まず、10 分間の生データを用い、自己相関係数の算出を行った後、これを積分することで、乱れの特徴的時間スケールの算出を行った。続いて、Taylor の凍結乱流を仮定し、平均風速を乗じ、長さスケールに換算した。

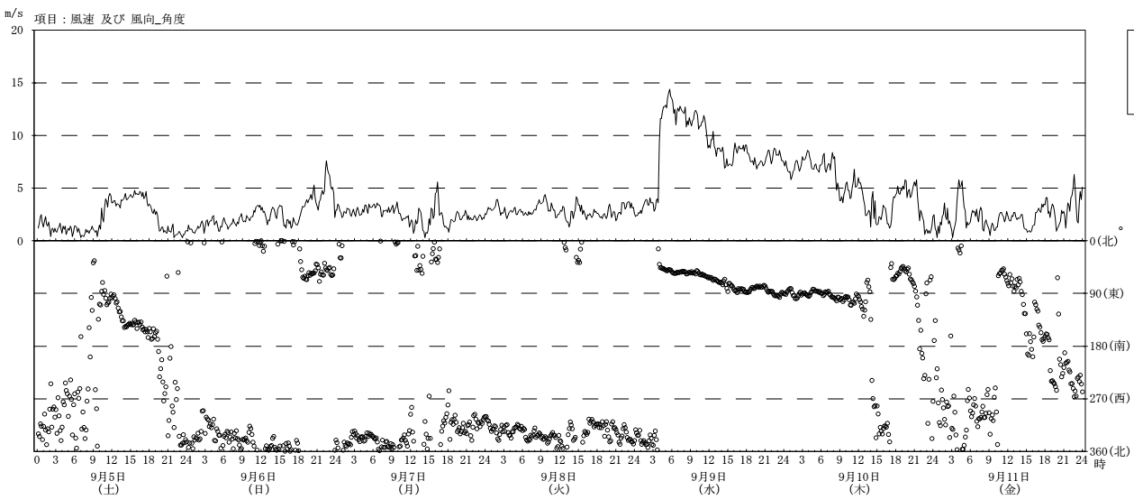
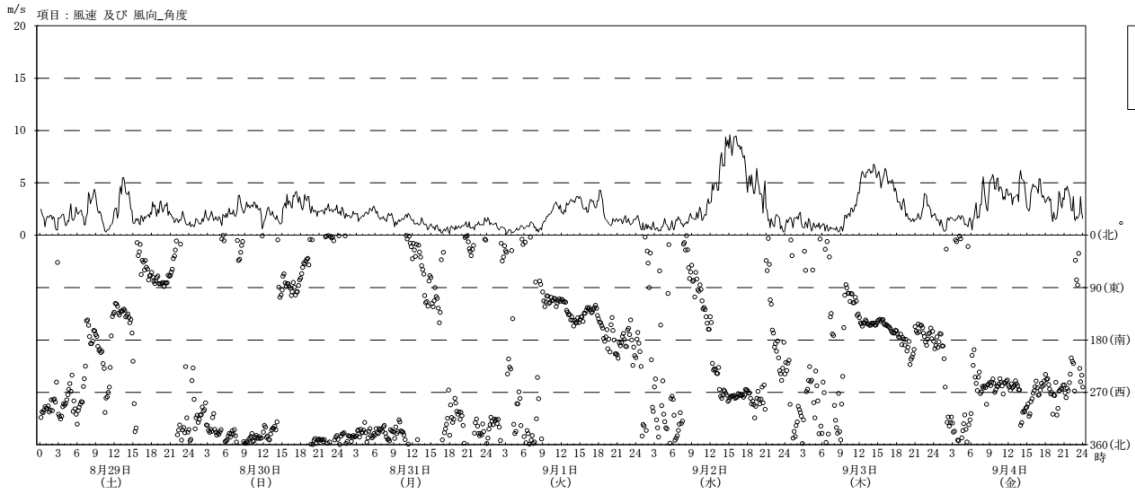


図1 10分間平均風向風速の時系列変化

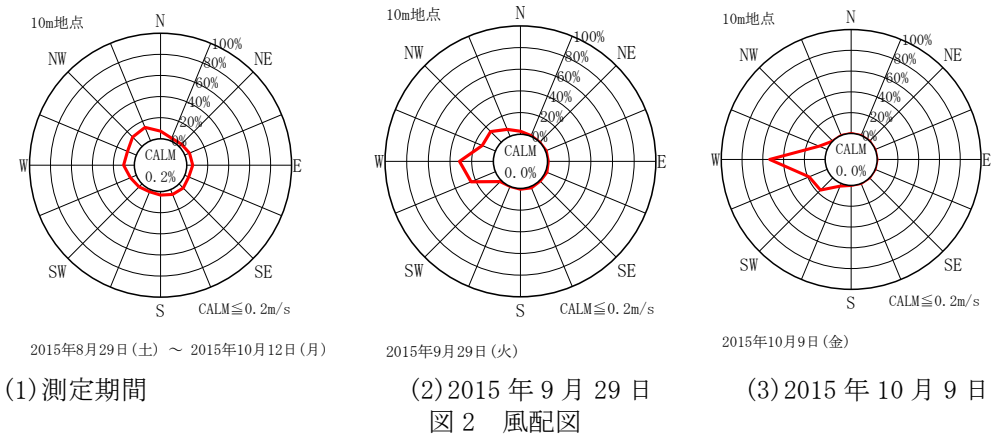


図2 風配図

図3に高さ10mにおける10分間の測定値から算出した主流方向の風速及び温度の乱れの特徴的長さスケールの累積確率分布を示す。サンプル数は、853個である。風速の主流成分の長さスケール L_u の平均値は87m（中央値70m）、温度変動の長さスケール L_t の平均値は78m（中央値53m）であった。低頻度で発生する大きな長さスケールの影響で、平均値は、中央値と比較すると、いずれの長さスケールもやや大きな値となった。建築物荷重指針・同解説¹⁾における地表面粗度区分Iの高さ10における長さスケールと比較すると、図4に示すとおり、荷重指針の値とよく一致している。

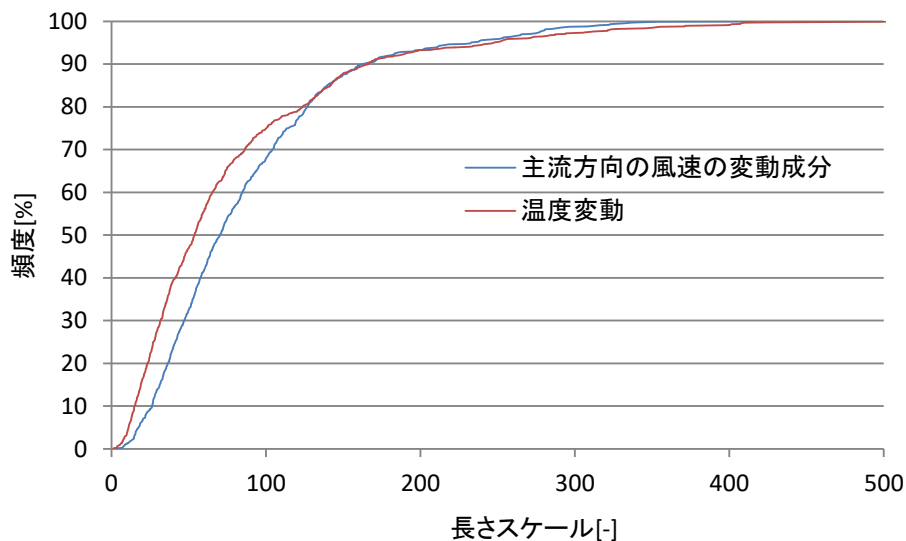
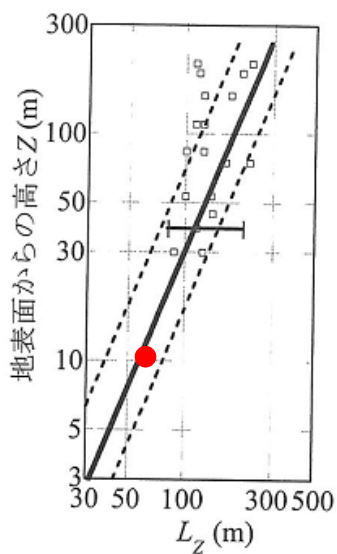


図3 乱れの特徴的長さスケールの累積密度分布



(a) 地表面粗度区分I

図4 建築物荷重指針における乱れの特徴的長さスケールと高さの関係¹⁾
(図中の●は今回の測定結果の中央値)

続いて、大気安定度と乱れの特徴的長さスケールについて分析を行った。大気安定度を表現する指標として、フラックス・リチャードソン数 Ri_f を用いた。フラックス・リチャードソン数 Ri_f は、次式より、乱流エネルギーの輸送方程式の速度勾配による生産項 P_k 及び浮力による生産項 G_k を測定値から算出し、これらを用いて推定した。

$$P_k = -\langle u'w' \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial z}$$

$$= -\left(\frac{\langle u'w' \rangle_{10m} + \langle u'w' \rangle_{5m}}{2} \right) \times \frac{\langle u \rangle_{10m} - \langle u \rangle_{5m}}{5} \quad (1)$$

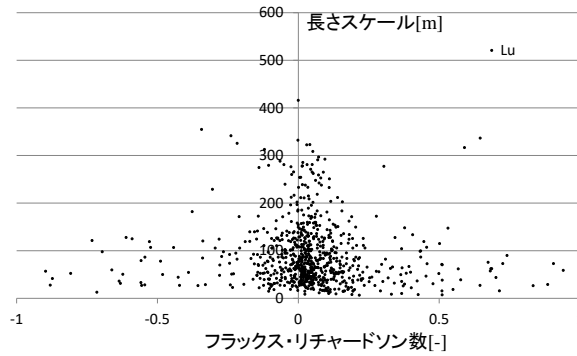
$$G_k = -g \frac{1}{\langle \theta_0 \rangle} \langle w'\theta' \rangle$$

$$= -g \frac{1}{\langle \theta_{10m} \rangle + \langle \theta_{5m} \rangle} \left(\frac{\langle w'\theta' \rangle_{10m} + \langle w'\theta' \rangle_{5m}}{2} \right) \quad (2)$$

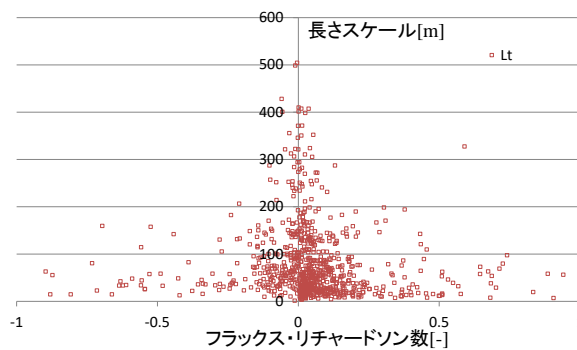
$$Ri_f = -\frac{G_k}{P_k} \quad (3)$$

ここで、 u は風速の主流方向成分、 w は鉛直方向成分、 θ は温度である。 $\langle f \rangle$ は変数 f の時間平均値、 f' は変数 f の変動成分を表し、また、添字の 10m 及び 5m は測定高度を表す。

図 5 にフラックス・リチャードソン数と乱れの特徴的長さスケールの関係を示す。



(1) 主流方向の変動成分



(2) 温度変動

図 5 フラックス・リチャードソン数と乱れの特徴的長さスケールの関係

続いて、モニン・オブコフの長さスケールと乱れの特徴的長さスケールの関係について、分析を行った。モニン・オブコフの長さスケールは以下のように算出した。

$$L = -\frac{\langle u^* \rangle^2}{\frac{g}{\langle \theta_0 \rangle} \langle \theta^* \rangle}$$

$$= -\frac{\langle u^* \rangle^3}{\frac{g}{\langle \theta_0 \rangle} \langle u^* \rangle \langle \theta^* \rangle} \quad (4)$$

ここで、 $\langle u^* \rangle$ 、 $\langle \theta^* \rangle$ は各々摩擦速度及び摩擦温度であり、測定値を用いて、次式から推定した。

$$-\langle u'w' \rangle \approx \langle u^* \rangle^2 \quad (5)$$

$$-\langle w'\theta' \rangle \approx \langle u^* \rangle \langle \theta^* \rangle \quad (6)$$

図6にフラックス・リチャードソン数とモニン-オブコフ長の関係を示す。(5)、(6)式の近似が精度よく成り立つ場合、フラックス・リチャードソン数とモニン-オブコフ長は反比例の関係にあるが、図6に示すとおり、今回の測定結果では、よく反比例していた。

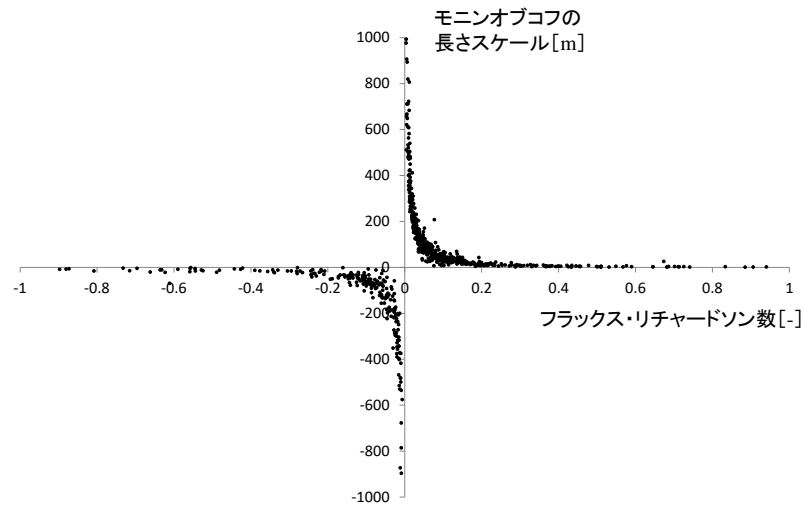
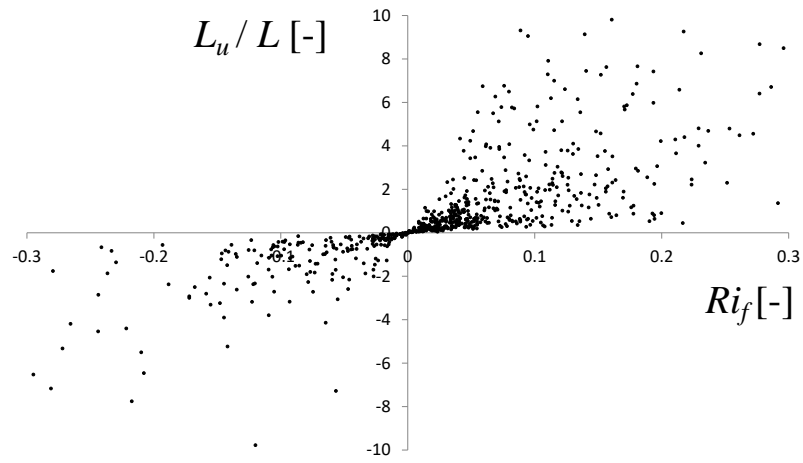
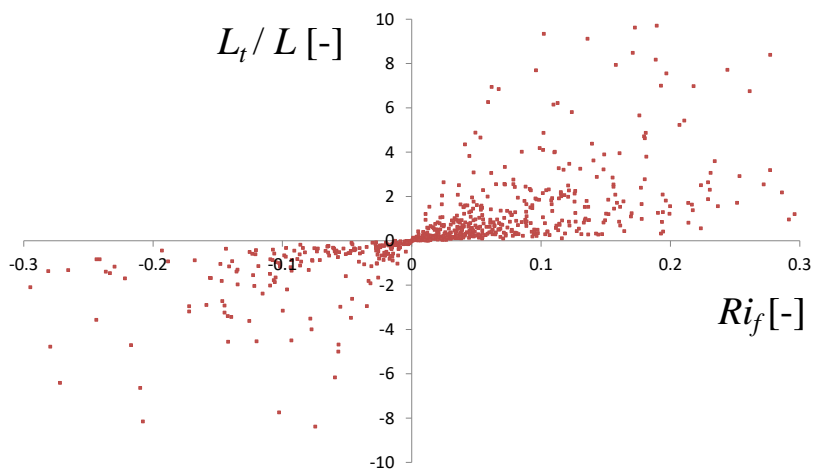


図6 フラックス・リチャードソン数とモニン-オブコフ長の関係

図7に、フラックス・リチャードソン数とモニン・オブコフの長さスケールで基準化した乱れの特徴的長さスケールの関係を示す。ある程度のバラツキの幅を持って、分布しているが、関係性を見出すことは難しい。フラックス・リチャードソン数が負の場合のほうが、モニン・オブコフの長さスケールで基準化した乱れの特徴的長さスケールのバラツキはやや小さい。



(1) 主流方向の変動成分



(2) 温度変動

図7 フラックス・リチャードソン数と

モニン・オブコフの長さスケールで基準化した乱れの特徴的長さスケールの関係

参考文献

- 1) 建築物荷重指針・同解説：日本建築学会、2015

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

大風翼、環貫陽、持田灯: LES のためのスカラー変動を考慮した流入変動風の生成(その 3): 流入変動風生成時の乱れの時間スケールや長さスケールの変化が再現される流れ場に及ぼす検討 日本建築学会大会学術講演梗概集 2015(環境工学 II), 725-728, 2015

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

[図書] (計 1 件)

[その他]

産業財産権, ホームページ等

5. 研究組織

(1) 研究代表者

大風翼 (東北大学)

(2) 研究分担者

義江龍一郎 (東京工芸大学)

持田灯 (東北大学)

弓野沙織 (東北大学)

内田大貴 (東北大学)

加藤冴佳 (東北大学)

渡部朱生 (東北大学)

東海林 諭 (東北大学)

阿藤 裕昭 (東北大学)

市林 あゆみ (東北大学)

長谷川 拓真 (東北大学)

新井 千秋 (東北大学)

河西 昌隆 (東北大学)

ゲン トウアン アイ (東京工芸大学)

立花卓巳 (東京工芸大学)

吉田真紗子 (東京工芸大学)