

# 平成 26 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：H25 ～ H26 [平成 26 年度で終了]

課題番号：133012

研究課題名（和文）：気象スケールと工学スケールを統合した一貫解析手法の開発

－気象スケール解析の結果を境界条件とした市街地気候の LES 解析－

研究課題名（英文）：Integration of simulation models of meso-micro climates

－ Prediction of microclimate in built-up environment based on LES analysis using meteorological simulation result as boundary conditions -

研究代表者：大風 翼

交付決定額（当該年度）： 410,000 円

## 1. 研究の目的

近年、都市温暖化や気候変動がもたらす異常気象により、都市空間の暑熱化が進み、熱中症等の健康被害も急増している。これに対する都市計画、建築設計上の対応策として、風の道の創出や都市部の緑化が積極的に進められている。

これら対応策の定量的評価のために気象スケール(数 10km 程度)の解析結果を流入境界条件として、工学スケール(1km 程度)の解析を行う一貫解析の研究がなされてきた。最近では、工学スケールにおいて、流れ場を高精度に予測するため Large-eddy simulation(LES)を用いる研究例もみられ、建物によって形成される乱流の影響の統計的性状を満たす時系列の風速変動データを付加する新たな手法も提案されているが、温度変動を適正に付加する研究例については殆ど無い。

そこで本研究では、気象スケールの解析結果に風速・温度変動を付加した流入変動風の生成手法を開発し、気象スケールの解析から工学スケールの LES 解析へ接続した一貫解析システムを構築することを目的とする。

## 2. 研究の方法

- 1) 都市境界層の流れ場の統計的性状を満たす時系列の風速変動データを付加する既往の手法を、温度変動等のスカラー変動の時系列データを考慮できるよう、理論的な拡張を行う。
- 2) 上記の手法により生成した人工的な変動風の流れ場の再現性を検証するために中立状態の平板境界層を対象とした予備的風洞実験を実施し、平均風速、乱流統計量の空間分布を用いて計測する。
- 3) 平板境界層や都市境界層を対象とした実験結果を用いて、温度に関して、平均値、統計量、自己相関関数を得る。
- 4) 1) で拡張した手法を用いて、3) を対象とした LES 解析を実施し、2) の手法の有効性を示す。必要に応じて、手法の改良を行う。

## 3. 研究成果

### 3. 1. スカラー変動を考慮した変動風の生成方法の開発

本報では、風速及びスカラー量の瞬時値を  $f_i$ 、時間平均成分を  $\langle f_i \rangle$ 、変動成分  $f'_i$  と表記する ((1)式)。ここで、 $i = 1\sim 3$  を風速の 3 成分 ( $u, v, w$ )、 $i = 4$  をスカラー量  $c$  と定義する。ここで、平均値が 0、分散が 1 の変数  $\Psi_j$  を定義する ((2), (3)式) と、スカラー量の乱流フラックスを含めた乱流フラックスの  $4 \times 4$  の正則行列  $R_{ij}$  にコレスキー分解を施した下三角行列  $a_{ij}$  と  $\Psi_j$  の内積として得た  $a_{ij}\Psi_j$  は、変動成分  $f'_i$  と一致し ((1)式)、変動成分どうしの共分散は、必ず  $R_{ij}$  を満たす。

$$f_i = \langle f_i \rangle + f'_i = \langle f_i \rangle + a_{ij}\Psi_j \quad (1)$$

$$\langle \Psi_j \rangle = 0 \quad (2)$$

$$\langle \Psi_i \Psi_j \rangle = \delta_{ij} \quad (3)$$

変数  $\Psi_j$  の与え方は、(4)式及び(5)式を満たす限り任意である。しかし、乱流による各々の変動は、時間的・空間的な広がりを持っている。本研究では、空間相関係数及び自己相関係数は指数関数型を仮定し、風速の変動成分に時間相関、空間相関を課することが可能な Xie and Castro (2008)の二次元のデジタルフィルタを用いる方法を改良した近藤・飯塚(2012)の方法を参考に  $\Psi_j$  を与えた。指数関数の形状は(4)、(5)式に示すとおりである。

$$\frac{\langle \Psi_j(r)\Psi_j(r+\lambda) \rangle}{\langle \Psi_j(r)\Psi_j(r) \rangle} = \exp\left(-\frac{\lambda}{L}\right) \quad (4)$$

$$\frac{\langle \Psi_j(t)\Psi_j(t+\tau) \rangle}{\langle \Psi_j(t)\Psi_j(t) \rangle} = \exp\left(-\frac{\tau}{T}\right) \quad (5)$$

ここで、 $\lambda$ は2点間の距離、 $\tau$ は時間ラグで、 $L$ は乱れの積分長さスケール、 $T$ は乱れの積分時間スケールである。都市境界層では、 $T$ や $L$ は各成分で異なるため、 $T$ や $L$ の与え方により、生成される変動風やそれをLESの境界条件として用いた場合に再現される流れ場は、その特徴は大きく変わる可能性があり、以降でその検討を行う。

### 3. 2. 中立状態での平板境界層風洞実験

#### 3. 2. 1. 実験概要

東京工芸大学にて、中立状態の平板境界層を対象とした風洞実験を行った(図1)。(1)速度に関する乱流統計量のみを取得した実験、と(2)測定点の風上床面よりエチレンを発生させ濃度分布も測定した実験、の2ケース実施した。濃度を発生させた実験では、エチレンを発生させるチューブを床下に配置する都合上、図1の網掛けの部分で7[mm]風洞床と同じ材質の金属板をかさ上げし、風洞床とテーパーで滑らかに接続した。測定点は主流(x)方向に250[mm]毎に3地点( $x = -250, 0, 250$ [mm])、スパン方向(y)に3地点( $y = -200, 0, 200$ [mm])、鉛直(z)方向に5[mm]毎40地点(5~200[mm])とした。測定点の上流部にはラフネスやスパイヤーなどは一切設置していない。風速の測定には Split-Film-Probe(SFP)を用いた。線源は、最も風上側の測定点より750[mm]風上の床面に設置し、義江ら(2012)の検討を参考に、濃度100[%]のエチレンを500[cc/min]で均一に排出した。濃度の測定には高速炭化水素測定器を用い、このサンプリングチューブとSFPを近接させることで速度・濃度の同時測定をした。サンプリング間隔は1000[Hz]、測定時間は120[s]とした。

#### 3. 2. 2. 実験結果

##### 1) 風速3成分のみの乱流統計量を取得した実験

主流方向風速の鉛直分布を図2に示す。主流方向に風速プロファイルの鉛直分布はほとんど変化していないことがわかる。 $x = -250$ [mm]における99%境界層厚さはおよそ125[mm]であった。風洞実験より取得した時系列データから算出した、乱れの積分時間スケール $T$ の鉛直分布を図3に示す。積分時間スケールを算出する際の自己相関係数の積分範囲は、タイムラグが0から自己相関係数が初めて0になった時のタイムラグまでとした。 $T$ の添え字 $u, v, w$ は各々の速度成分の自己相関係数から得た積分時間スケールであることを示す。

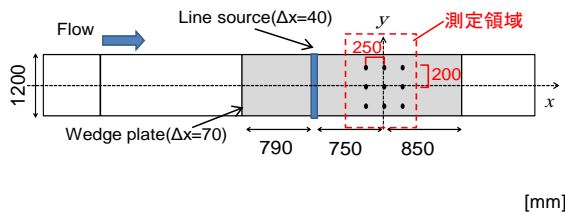


図1 風洞実験の概略図

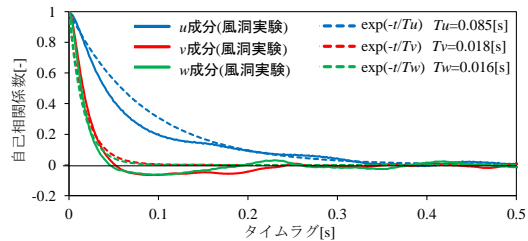


図4 速度変動の自己相関係数 ( $z = 75$ mm)

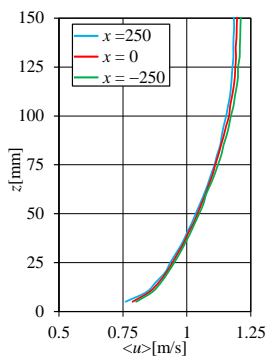


図2 <u>の鉛直分布

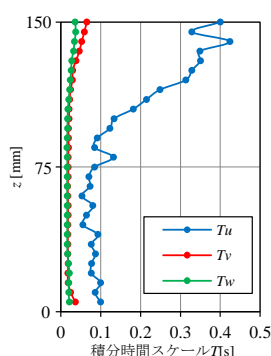


図3 Tの鉛直分布

表1 解析条件

解析領域	$10H(x) \times H(y) \times H(z)$ ( $H$ : 解析領域高さ150[mm])
メッシュ分割	$300(x) \times 30(y) \times 30(z)$ (等間隔)
SGSモデル	標準 Smagorinsky モデル ( $C_s = 0.1$ )
時間差分スキーム	2次精度 Adams-Bashforth 法
空間差分スキーム	2次精度中心差分
圧力解法	SMAC 法
流入境界	乱流フラックスのコレスキー分解に基づき人工的に生成した
流出境界	諸量の法線方向の勾配ゼロ
側面境界	周期境界条件 (流れ場、濃度場)
上面境界	$\bar{u}_1, \bar{u}_2$ : 法線方向の勾配ゼロ $\bar{u}_3, \bar{u}_3 = 0$
地表面および物体壁面境界	Werner and Wengle の linear - power law 型の2層モデル
濃度の SGS Schmidt 数	0.5

いずれの速度成分も、高さ  $z = 75[\text{mm}]$ 以下では  $T$ は概ね一定であることが分かる。また、 $v$ 成分の  $T_v$ 、 $w$ 成分の  $T_w$ は境界層内において、ほぼ同値であり、 $u$ 成分の  $T_u$ のおよそ  $1/5$ 程度の値である。高さ  $z = 75[\text{mm}]$ での自己相関係数より算出した  $T$ を、時間相関を表す(5)式に代入したグラフを図4に示す。(5)式は各成分とも実験値を概ね再現している。

## 2) 風速・濃度を同時計測した実験

濃度変動を含む風洞実験で取得した濃度分布を図5に示す。床面近傍では、風下側に行くにしたがい濃度が低下している。一方、 $z = 25[\text{mm}]$ より上方では、風下に行くにしたがい濃度が増加しており、濃度が上方へ拡散していることがわかる。 $z = 75[\text{mm}]$ より上方では濃度はほぼ0となっていた。 $x = -250[\text{mm}]$ における濃度変動も含む乱れの積分時間スケール  $T$ の鉛直分布を図6に示す。境界層内では風速の3成分は概ね一定値であったが、濃度変動の積分時間スケール  $T_c$ も平均濃度が0近傍になる高さ  $z = 37.5[\text{mm}]$ より下では、概ね一定の値となった。 $T_c$ が最大となった高さ  $z = 20[\text{mm}]$ の  $T_c$ を(5)式に代入したグラフを図7に示す。時間相関を仮定した指数関数は概ね実験値を再現していることがわかる。

### 3. 3. 速度場の積分時間スケール、積分長さスケールの与え方が再現される流れ場に及ぼす影響の検討

#### 3. 3. 1. 計算対象

解析条件を表1に示す。風洞実験で取得したもつとも風上である  $x = -250[\text{mm}]$ での乱流統計量を目標値とし、流入変動風を生成し、LES解析を行った。生成面は  $y, z$ 方向ともに30分割し、各々の格子点上で変動データを生成した。解析領域は  $10H(x) \times H(y) \times H(z)$ ( $H$ : 解析領域高さ  $150[\text{mm}]$ )、メッシュサイズは  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = H/30$ とした。計算は、 $15[\text{s}] (= 120H/\langle U \rangle)$ ( $\langle U \rangle$ : 解析領域上端の平均風速)助走計算し、その後の  $15[\text{s}]$ で諸統計量を取得した。解析ケースを表2に示す。 $T$ および  $L$ の大きさを風速の3成分で等しくし、3段階に変化させた基礎3ケース(Case 1-3)と、風洞実験結果を基に3成分で異なる  $T$ および  $L$ の与えたケース(Case 4)の全4ケース実施した。各々のケースの  $T$ および  $L$ の与え方は、表2を参照。

#### 3. 3. 2. 解析結果

基礎3ケースの  $u$ 成分時系列データを図8に示す。最も  $T$ および  $L$ の大きいCase 1-2では細かい変動が見られず、周期の長い変動が卓越していることが分かる。 $x-z$ 断面内の  $u$ 成分の瞬時値の分布を図9に示す。 $T$ や  $L$ が大きいCase 1-2では、大きな変動が流入面から  $x = 750[\text{mm}]$ 程度にかけて存在し、その後床面近傍から細かな変動が生成されている。一方、Case 1-1や1-3では流入付近の細かな変動が、比較的そのまま風下側に流れているように見える。次に、解析領域中心( $x = 750, y = 75[\text{mm}]$ )におけるCase 1と  $T$ および  $L$ を3成分で別々に与えたCase 1-4の  $v$ 成分のワースペクトルを図10に示す。低周波成分をみると、Case 1-1はCase 1-4より大きい値となっている。これは、Case 1-1では  $u$ 成分から求めた  $T_u$ を風速3成分すべての変動の生成に用いているのに対し、Case 1-4では、 $T_u$ の  $1/5$ 程度の  $v$ 成分から求めた  $T_v$ を  $v$ 成分の生成に用いており、流入面での  $v$ 成分の変動の違いが風下の  $x = 750[\text{mm}]$ の地点でも表れているためと考えられる。

### 3. 4. スカラー輸送を含む平板境界層でのLES解析

#### 3. 4. 1. 計算対象

計算ケースを表3に示す。濃度場の時間スケールについて、速度場の  $T_v$ と同じ値で与えたものと濃度場の自己相関係数より算出した  $T_c$ を与えたものの2ケース実施した。濃度変動の長さスケールは検討の第一歩として、時間スケールからTaylorの凍結乱流の仮定を用いて算出した。流れ場の3成分( $u, v, w$ )の  $T$ や  $L$ は、両ケースとも前章で検討したCase 1-4と同じ手法で、各成分、別々の値を与えた。

#### 3. 4. 2. 解析結果

図11に解析領域中心( $x = 750, y = 75$

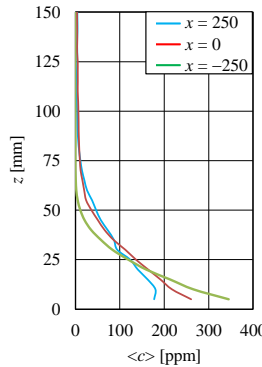


図5 <math>\langle c \rangle</math>の鉛直分布

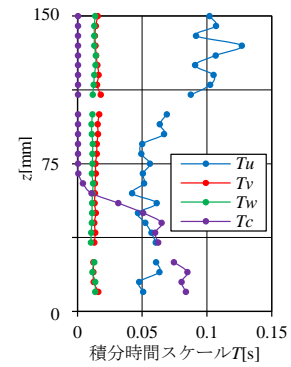


図6  $T$ の鉛直分布

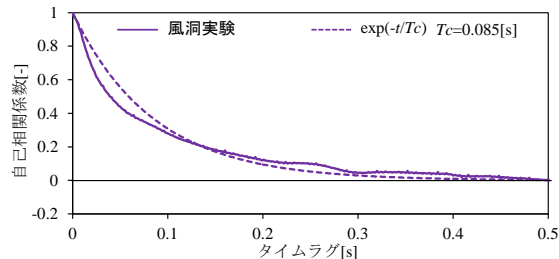


図7 濃度変動の自己相関係数 ( $z = 20\text{mm}$ )

[mm])の床面近傍  $z = 12.5[\text{mm}]$ における両ケースの濃度変動の時系列データを示す。Case 2-2はCase 2-1に比べ、流入変動風生成時に用いた濃度変動の時間スケールがおよそ5倍程度大きい。速度変動に関しては前章で示したとおり、流入面の長周期変動が風下側にまで影響していたが、濃度変動は解析領域内で速度変動の影響も受けるので、さらなる分析を行っていく予定である。

表2 流れ場の  $T$  および  $L$  を検討するための計算ケース

計算ケース	$T[\text{s}]$	$L[\text{m}]$	乱れの積分時間スケール $T$ 及び長さスケール $L$ の与え方
Case 1-1	$T = 0.085$ (3成分で一定)	$L = 0.05$ (3成分で一定)	$T$ : $u$ 成分の自己相関係数から算出した値を全成分に適用 $L$ : $u$ 成分の $T$ より、等方性乱流の仮定から算出 ( $L = 1/2 T \times \langle U \rangle$ ) ( $\langle U \rangle$ : 解析領域上端の平均風速)
Case 1-2	$T = 0.425$	$L = 0.25$	$T$ : Case 1-1の値を5倍した $L$ : Case 1-1の値を5倍した
Case 1-3	$T = 0.018$	$L = 0.02$	$T$ : $v$ 成分の自己相関係数から算出した値を全成分に適用 $L$ : $Tv$ より、Taylorの凍結乱流仮定から算出した値を全成分に適用 ( $L = Tv \times \langle U \rangle$ )
Case 1-4	$Tu = 0.085$ $Tv = 0.018$ $Tw = 0.018$	$L = 0.02$	$Tu$ : $u$ 成分の自己相関係数から算出した値を $u$ 成分に適用 $Tv$ , $Tw$ : $v$ 成分の自己相関係数から算出した値を $v$ , $w$ 成分に適用 $L$ : $Tv$ より、Taylorの凍結乱流の仮定から算出 ( $L = Tv \times \langle U \rangle$ )

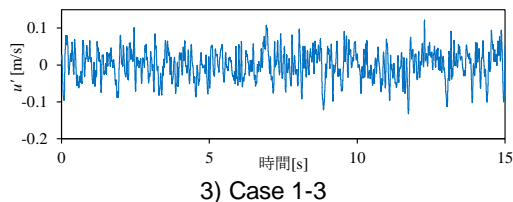
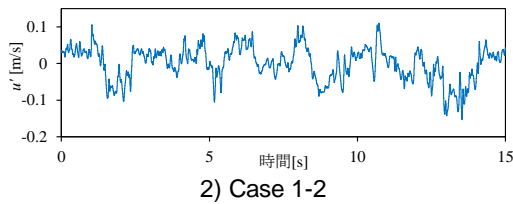
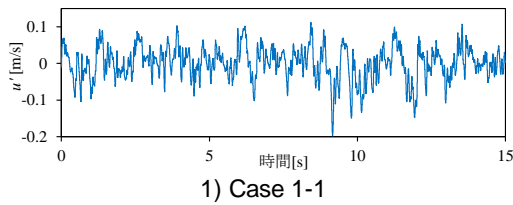


図8 基礎3ケースの  $u$ 成分の時系列データ ( $x = 750, y = 75, z = 75[\text{mm}]$ )

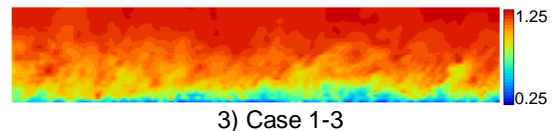
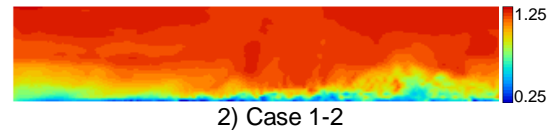
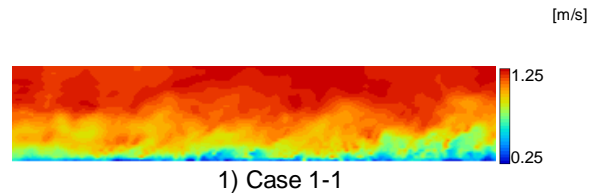


図9  $u$ 成分の  $x$ - $z$ 断面内の瞬時値 ( $y = 75[\text{mm}]$ )

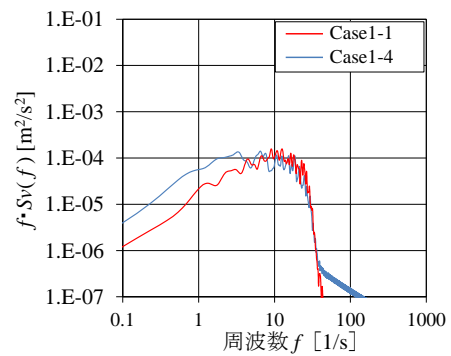
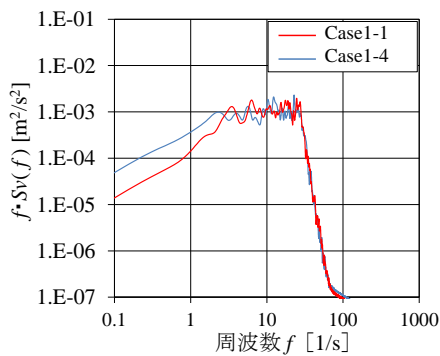


図10  $v$ 成分のパワースペクトル密度 ( $x = 750, y = 75[\text{mm}]$ )



表 3 濃度場の  $T$  および  $L$  を検討するための計算ケース

計算ケース	$T$ [s]	$L$ [m]	乱れの積分時間スケール $T$ 及び長さスケール $L$ の与え方
Case 2-1	$Tu=0.056$ $Tv=0.018$ $Tw=0.018$ $Te=0.018$	$L=0.027$	$Tu$ : $u$ 成分の自己相関から算出した $Tv, Tw, Te$ : $v$ 成分の自己相関から算出した値を $w$ 成分と $c$ にも適用 $L$ : $v$ 成分の $T$ より、Taylor の凍結乱流の仮定から算出 ( $L=Tv \times \langle U \rangle$ ) した値を全長さスケールに適用
Case 2-2	$Tu=0.056$ $Tv=0.018$ $Tw=0.018$ $Te=0.085$	$Lu=0.027$ $Lv=0.027$ $Lw=0.027$ $Lc=0.128$	$Tu$ : $u$ 成分の自己相関から算出した $Tv, Tw$ : $v$ 成分の自己相関から算出した $w$ 成分にも適用 $Te$ : $c$ の自己相関係数から算出した $Lu, Lv, Lw$ : $v$ 成分の $T$ より、Taylor の凍結乱流の仮定から算出した $Lc$ : $Te$ より、Taylor の凍結乱流の仮定から算出した ( $Lc=Te \times \langle U \rangle$ )

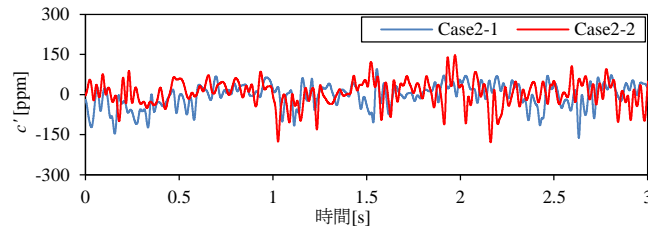


図 11  $z = 12.5$  [mm] の濃度の変動成分の時系列データ  
( $x = 750, y = 75$  [mm])

#### 参考文献

- Xie, Z.-T., Castro, I. P.: Efficient Generation of Inflow Conditions for Large Eddy Simulation of Street-Scale Flows. *Flow, Turbulence and Combustion*, 81(3), pp.449-470, 2008.
- 近藤亮彦, 飯塚悟: 気象モデルと工学 LES モデルのシームレスな結合手法の開発 (その 1) Reynolds 応力のコレスキー分解に基づく人工的な LES 流入変動風生成手法の検討, 日本建築学会環境系論文集, 77 (678), pp661-669, 2012.8.
- 義江龍一郎, 野村佳祐, 堅田弘大, Guoyi JIANG: 都市街区内の非等温流れ場における汚染物質拡散・熱拡散に関する風洞実験と LES, 風工学シンポジウム論文集, 22, pp61-66, 2012.

#### 4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

1. T.Okaze, A.Ono, A.Mochida, Y.Kannuki, S.Watanabe: Evaluation of turbulent length scale within urban canopy layer based on LES data, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015. (Accepted)
2. 大風翼, 弓野沙織, 持田灯, 環貫陽: 温度変動を考慮した不安定境界層中の人工的な流入変動風の生成, 風工学シンポジウム論文集, Vol.23, pp55-60, 2014.
3. 大風翼, 持田灯: 乱流フラックスのコレスキー分解によるスカラー変動を含む変動風生成法の開発, 日本建築学会環境系論文集, Vol.79(703), pp771-776, 2014.
4. 大風翼, 持田灯, 環貫陽: 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 1) 乱流フラックスのコレスキー分解に基づく変動風生成手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp661-662, 2014.
5. 環貫陽, 大風翼, 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 2) 濃度変動を考慮した変動風データを用いた流れ場・濃度場の再現解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp663-664, 2014.
6. 環貫陽, 大風翼, 弓野沙織, 持田灯: 野外観測結果を目標とした温度変動を含む人工的な変動風の生成, 日本流体力学会年会講演論文集, 2014.

[雑誌論文] (計 3 件)

[学会発表] (計 5 件)

[図書] (計 0 件)

[その他] (計 0 件)

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)

高野芳央 (東北大学)

環貫陽 (東北大学)

切石薫 (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)

宮里龍太郎 (東京工芸大学)

田辺剛志 (東京工芸大学)