

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420578

研究課題名(和文)都市環境の高精度解析のための安定度を考慮した速度・スカラーの模擬乱流変動の生成

研究課題名(英文)Artificial generation of inflow turbulence with wind and scalar fluctuations for large-eddy simulation in urban environment

研究代表者

大風 翼 (Okaze, Tsubasa)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：40709739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)の流入境界条件として使用可能な温度・濃度等のスカラー量の特徴的な変動の時系列データを乱流統計量から人工的に生成する手法を開発した。本手法は、速度3成分と温度・濃度等のスカラー量の計4変数からなる乱流フラックスのコレスキー分解に基づくものであり、平均値だけでなく、規定した共分散、自己相関・空間相関を満たすことができる。この手法を用いて人工的に生成した変動風を流入境界条件としたLESを実施し、建物周辺流れで、流れ場・温度場等の再現精度を確認した。流入直後の乱流エネルギーがやや小さいものの平均風速・温度は風洞実験とよく一致した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a new method for generating turbulent fluctuations in wind velocity and scalars, such as temperature and contaminant concentration, based on a Cholesky decomposition of the time-averaged turbulent flux tensors of the momentum and the scalar. The artificial turbulent fluctuations generated by this method satisfy not only the prescribed profiles for the turbulent fluxes of the momentum and the scalar but also the prescribed spatial and time correlations.

Then, the artificially generated turbulent fluctuations of wind velocity and air temperature was applied as inflow boundary conditions for a large-eddy simulation of a non-isothermal flow around a building. The mean wind velocity and mean air temperature predicted from the large-eddy simulation agreed well with the experimental results. The turbulent kinetic energy and the fluctuation of the air temperature also corresponded fairly well with the experiment except for the region immediately behind the inflow boundary.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：ラージ・エディ・シミュレーション 流入変動風 大気安定度 コレスキー分解 都市風環境 都市温
熱環境 乱れの特徴的長さスケール 乱れの特徴的時間スケール

1. 研究開始当初の背景

従来の都市・建築スケールの風環境予測では、すべてのスケールの乱流渦による拡散をモデル化した RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)モデルが用いられてきた。しかし、最近の計算機性能のめざましい進歩により、より正確な予測が可能となりつつあり、平均値として得られた気象スケールの RANS モデルの風速分布に対して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、都市・建築スケール解析の LES の流入変動風を生成する研究も精力的に行われている。

現在のところ、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速度変動の空間 3 成分の共分散、相関関数等を仮定し、その統計量を満たすよう乱数を組み合わせる人工的に変動風を生成する手法の 2 つに大別される。

これらの手法は、建物によって生じる乱れの風速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顕在化している中、流入面での温度・濃度等のスカラー量の変動を再現する事はできなかった。

2. 研究の目的

市街地内の乱流拡散性状を数値解析により解明するための基礎的研究として、LES の流入境界条件として使用可能な温度・濃度等のスカラー量の特徴的な変動の時系列データを乱流統計量から人工的に生成する手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 3 次元流れにおいて、速度 3 成分と温度・濃度等のスカラー量の計 4 変数の共分散、自己相関・空間相関をターゲットに変動風を生成する数学的理論を構築する。
- (2) ア・プリオリテストとして、中立状態の 2 次元境界層の拡散問題を対象とした数値実験を実施し、数値実験より乱流統計量を取得する。続いて、取得した統計量を目標値に、上記理論を用いて変動風を生成し、これを流入条件とした LES を実施し、流れ場・拡散場の再現精度の検証を行う。
- (3) 都市境界層での自己相関・空間相関の測定データ取得および上記で構築した理論の妥当性を検証するため中立成層、不安定成層、安定成層を対象とした実験を実施する。実験結果との比較から、本研究による大気安定度を考慮した模擬乱流変動風の LES の流入境界条件としての有用性を示す。

4. 研究成果

- (1) 速度 3 成分とスカラー量の計 4 変数の変動風の人工的生成法の開発

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)。

$$f_i = \langle f_i \rangle + f'_i \quad (1)$$

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 ϕ と定義する。Reynolds stress やスカラー量の乱流フラックスを(2)式の 4×4 の正則行列 R_{ij} で表現する。

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} \langle u'u' \rangle & \langle u'v' \rangle & \langle u'w' \rangle & \langle u'\phi' \rangle \\ \langle v'u' \rangle & \langle v'v' \rangle & \langle v'w' \rangle & \langle v'\phi' \rangle \\ \langle w'u' \rangle & \langle w'v' \rangle & \langle w'w' \rangle & \langle w'\phi' \rangle \\ \langle \phi'u' \rangle & \langle \phi'v' \rangle & \langle \phi'w' \rangle & \langle \phi'\phi' \rangle \end{pmatrix} \quad (2)$$

既往の研究では、Reynolds stress を 3×3 の正則行列で表現し、風速変動のみを生成するものであったが、本研究はスカラー量の乱流フラックスを含めた乱流フラックスを 4×4 の正則行列で表現し、スカラー変動を含めた変動風を生成する理論を新たに構築するものである。(2)式の正則行列 R_{ij} をコレスキー分解すると得られる下三角行列を a_{ij} とする。ここで、平均値が 0、分散が 1 の変数 Ψ_j を定義すると、 a_{ij} と Ψ_j の内積として得た $a_{ij}\Psi_j$ は、変動成分 f'_i と一致し、変動成分ごうしの共分散は、必ず R_{ij} を満たす。

変数 Ψ_j の与え方は、任意である。しかし、乱流による風速や温度の変動は、時間的・空間的な広がりを持っており、ある点の変動は別の時刻の同じ点での変動や他の点の変動とさまざまな関連性を有するため、変動成分 f'_i が、各々、仮定した時間相関および空間相関を満たすよう Ψ_j を与える必要がある。本研究では、指数関数型の相関係数を仮定し、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参考に Ψ_j を与えた。

Xie and Castro は、(3)式に示すように、空間に発生させた乱数にフィルタ係数を乗じ、畳み込み積分を行うことで、指数関数型の空間相関を満たす Ψ_j を生成している。

$$\Psi_m = \sum_{m'=-N}^N b_{m'} r_{m+m'} \quad (3)$$

ここで、 r_j は、 $\langle r_j \rangle = 0$ 、 $\langle r_i r_j \rangle = \delta_{ij}$ を満たす一様乱数。(9)式中の N はフィルタを施す区間の半分に含まれる格子点数を表す。ここで、格子点で α だけ離れた 2 点間の空間相関を考えると、(4)式となる。

$$\langle \Psi_m \Psi_{m+\alpha} \rangle = \sum_{m'=-N+\alpha}^N b_{m'} b_{m'-\alpha} \quad (4)$$

$\langle \Psi_j \Psi_j \rangle = 1$ を保証するために、フィルタ係数 \tilde{b}_k の標準偏差で基準化したフィルタ係数を b_k とする((5)式参照)。

$$b_k = \tilde{b}_k / \left(\sum_{j=-N}^N \tilde{b}_j^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

格子点 (m, n) 上における Ψ_j の時間発展は、(6)、(7)式により与える。

$$\Psi_j(t + \Delta t, m, n) = \Psi_j(t, m, n) \exp\left(-\frac{\Delta t}{T}\right) + \psi_j(t + \Delta t, m, n) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2\Delta t}{T}\right) \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$\psi_j(t, m, n) = \sum_{m'=1}^{N_y} \sum_{n'=1}^{N_z} b_m b_{n'} r_{m+m', n+n'} \quad (7)$$

(2) 中立の平板境界層を対象とした数値解析に基づく人工生成された変動風流れ場拡散場の再現精度の検証

①解析概要

解析の概略図を図1示す。まず、目標とする乱流統計量を得るために、予備計算を実施した。流れ場については、水平2方向について周期境界条件を課した境界層の解析を行い、生成する境界層の乱流統計量を取得した。濃度場については、解析領域の風上端の地表面第一セルの床面から、主流直交方向に様にパンプスカラーを発生させた。濃度については、主流直交(y)方向についてのみ周期境界条件を課し、主流(x)方向の流出面の法線方向の勾配をゼロとした。全統計量は、 $x = 5.0H$ の位置で取得し、この統計量をもとに、前節の手法を用いて、濃度の変動を考慮した変動風データを生成した。

続いて、この生成した変動風データを流入条件とした本解析を実施した。本解析における $x = 1H, 2H, 3H, 4H, 5H$ の濃度に関する統計量の鉛直分布と予備計算における $x = 6H, 7H, 8H, 9H, 10H$ の結果を比較することで、本研究の手法により生成したスカラー変動を含む流入変動風を用いて得られる流れ場・濃度場の再現精度について検討を行った。

②解析結果

図2に解析領域中心断面($y = 0.5H$)における目標とした乱流統計量および生成した乱流統計量の鉛直分布を示す。速度の相関 $\langle u'w' \rangle$ や速度と濃度の相関 $\langle w'c' \rangle$ は、ほぼ両者が一致していた。図は省略するが、平均風速 $\langle u \rangle$ 、平均濃度 $\langle c \rangle$ については、目標とした値と人工的に生成した値がほぼ完全に一致していた。乱流エネルギーや濃度変動の分散 $\langle c'^2 \rangle$ についても、ほぼ一致していた。以上より、本研究で

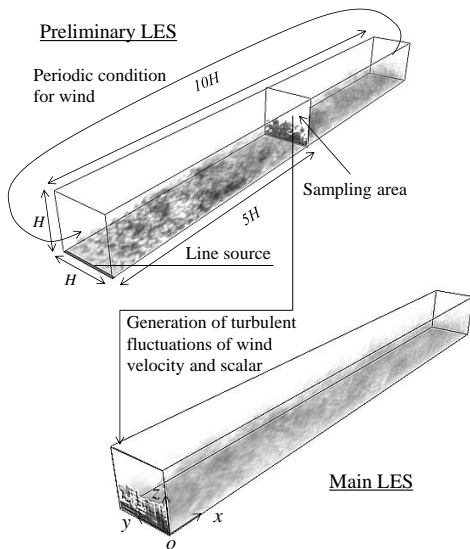
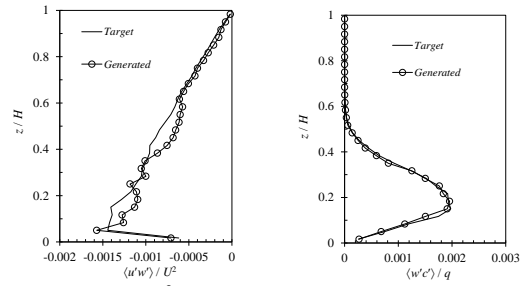


図1 解析の概略図

提案した手法により、目標とする乱流統計量を満たす流れ場、濃度場の変動データを人工的に生成可能なことが確認できた。

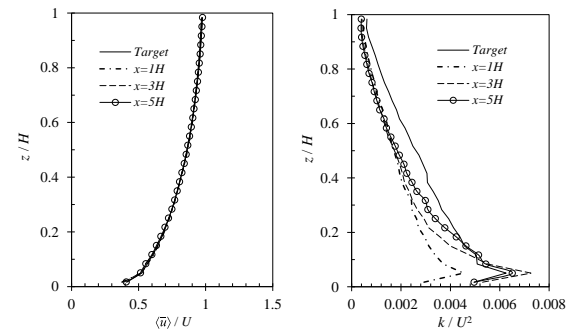


(1) $\langle u'w' \rangle / U^2$ (2) $\langle w'c' \rangle / q$

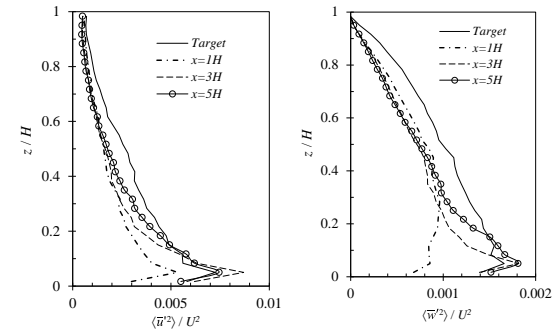
図2 目標とした乱流統計量及び生成した乱流統計量の鉛直分布

続いて、この人工的に生成した濃度変動を含む変動風を用いてLES解析を行い、予備解析のSampling area風下(図1の上図参照)側の濃度場の解析結果と比較を行った。

図3に流れ場に関する諸量の鉛直分布の主流方向の変化を示す。平均風速(図3(1))については、主流方向にほとんど変化していないことがわかる。乱流エネルギー(図3(2))をみると、 $x = 1.0H$ では、全体的に目標値の6割程度に減少している。地表面近傍を見ると、 $x = 3.0H$ ではほぼターゲットと等しい値まで乱れが回復し、それより風下側の $x = 5.0H$ でも同程度の値となっている。乱流エネルギーの構成をより詳細に分析するため、 \bar{u} および \bar{w} の分散(図3(3)、(4))をみると、いずれも $x = 3.0H$ より風下側の地表面近傍では、目標値とほぼ等しい結果となっている。 $x = 1.0H$ で



(1) 平均風速 (2) 乱流エネルギー



(3) \bar{u} の分散 (4) \bar{w} の分散

図3 流れ場に関する諸量の鉛直分布の主流方向の変化

は、 $\langle w'^2 \rangle$ は全体的に目標値の6割程度になっているのに対し、 $\langle w'^2 \rangle$ は地表面近傍で目標値の半分以下まで、本解析の結果が小さくなっている。積分長さスケールや積分時間スケールを3方向で変化させる非等方性乱流の再現など、更なる検討が必要である。

図4に平均濃度分布の鉛直分布の主流方向の変化を示す。いずれの位置でも解析結果が、目標とする予備解析の結果と概ね一致している。しかし、地表面近傍では、解析結果が目標値よりもやや大きく、 $z = 0.3H$ 以上では、わずかではあるが、本解析の方が、値が低くなっている。この差が生じる原因としては、図3(2)~(4)に示したとおり、本解析の流入面近傍で乱れ(特に鉛直成分)が大きく減衰している点や $x = 5.0H$ の位置でも、 $z = 0.2H$ より上方で、乱れを過少に評価してしまっていることが考えられ、これに起因して、上方への濃度の乱流拡散が小さくなっているものと考えられる。

図5に $\langle w'c' \rangle$ の主流方向の変化を示す。 $x = 1.0H$ では、乱れの減衰に伴い、ほぼ全体的に $\langle w'c' \rangle$ が目標値よりも若干小さくあり、鉛直方向の乱流拡散が過小に評価されている。地表面近傍では、 $x = 3.0H, 5.0H$ と風下側に行くにしたがい、乱れの回復とともに、本解析の結果が目標値をよく再現する結果となった。

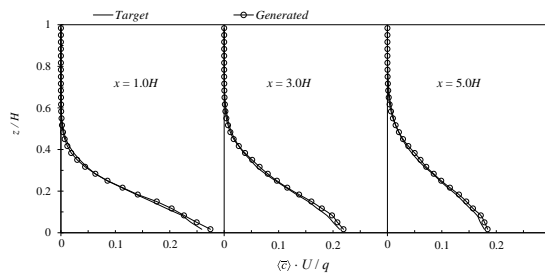


図4 平均濃度の鉛直分布の主流方向の変化

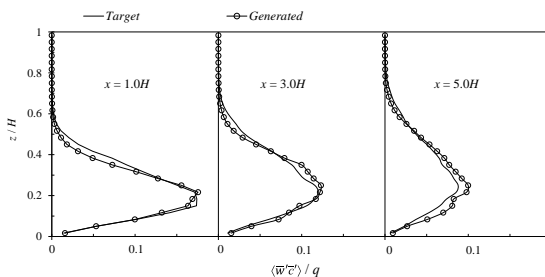


図5 濃度フラックスの鉛直分布の主流方向の変化

(3) 人工的に生成した変動風の建物周辺の非等温流れのLESへの適用

①解析概要

東京工芸大学の温度成層風洞で実施されたデータベースとして整備されている1:1:2の単体建物周辺の非等温流れ場とした。成層状態は弱不安定で、流入面における建物高さ H ($= 0.16$ m)の平均風速 $\langle u_H \rangle$ ($= 1.46$ m/s)、流入面

における床面と建物高さの平均温度差 $\Delta\theta$ ($= 33.6$ °C)、境界層内の平均温度 $\langle \theta \rangle$ 重力加速度 g ($= 9.81$ m/s²)を用いて算出した Richardson 数は、 $Ri = -0.10$ である。流入面($7.5H \times 6.25H$)において、第2節の手法を用いて、 $1/16H$ 間隔で、温度変動を含む変動風を生成し、これを流入条件として課した。変動風の生成に必要な乱流の特徴的長さスケールは、境界層高さ(およそ $1.5H$)の0.15倍と仮定し、一定値を用いた。特徴的時間スケールは、Taylorの凍結乱流の仮定より、特徴的長さスケールと境界層上端の風速を用いて換算した。

LESは、OpenFOAM ver.2.4.0を用いて行い、Sub-grid scaleの乱流モデルは標準スマゴリンスキーモデルを用いた。その他、計算条件はまとめて、表1に示す。建物高さとして流入面における建物高さの平均風速で無次元化した時間でおおよそ200だけ助走計算を行い、その後、おおよそ200間の乱流統計量を取得した。

表1 計算条件

解析領域	12.5H(x) × 7.25H(y) × 6.5 H(z)
メッシュ分割	147(x) × 114(y) × 90(z)
SGSモデル	標準 Smagorinsky モデル ($C_s = 0.12$)
時間差分スキーム	完全院解法
空間差分スキーム	二次精度中心差分 (ただし、速度に関しては数値振動を抑制するため、局所的に一次風上差分を混入)
流入境界	本研究で開発した乱流フラックスのコレスキー分解に基づく手法
流出境界	対流境界条件
上面・側面境界	Slip 壁
地表面境界	2層モデル

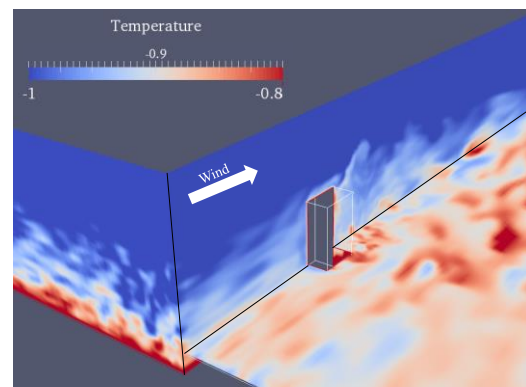
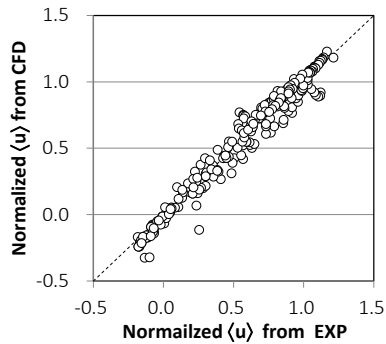


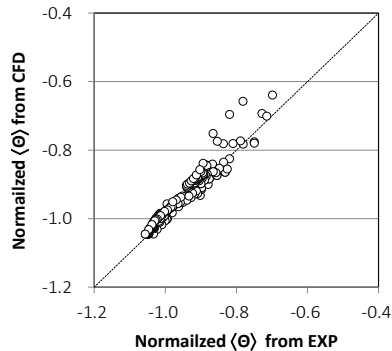
図6 温度場の瞬時値 ($x = 0H$ (inflow boundary)、 $y = 0H$ (center section) 及び $z = 0.25H$)

②解析結果

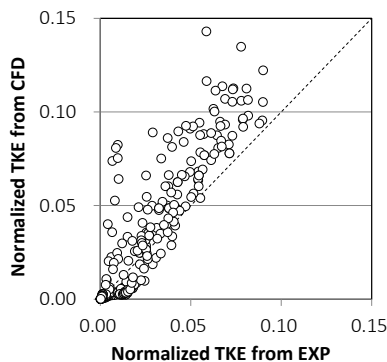
速度、乱流エネルギーは流入面における建物高さの風速 $\langle u_H \rangle$ 、温度は床面の平均温度 $\langle \theta_f \rangle$ との温度差 $(\theta - \langle \theta_f \rangle)$ を流入面における建物高さ H と床面の平均温度差 $(\langle \theta_H \rangle - \langle \theta_f \rangle)$ で除すことで無次元化した。



(1) 主流方向の平均風速



(2) 平均温度



(3) 乱流エネルギー

図7 風洞実験と LES の比較

図6に、流入面、主流方向建物中心断面及び $z = 0.25H$ における x - y 平面の無次元温度の瞬時値の分布を示す。流入面で温度変動が生成されている様子がわかる。建物中心断面や $z = 0.25H$ の x - y 平面の建物風上側の領域でも、温度変動が見られ、流入面で生成された温度変動が移流していると考えられる。建物側方の強風域の風下側では、剥離に伴い、床面近傍の流れが加速し、高温の空気が上方へ輸送されるため、 $z = 0.25H$ の x - y 平面上において局所的に周辺より温度の高い領域が見られる。

図7に、主流方向の平均風速、乱流エネルギー及び平均温度の実験値と LES による解析値の比較を散布図で示す。実験の測定点は、建物周辺の主流方向建物中心断面上に152点及び $z = 0.25H$ の x - y 平面上に101点設置されている。平均風速は非常によく一致しており、平均温度についても、LES のほうが温度の高

い測定点が幾つかあるが、全体的にはよく一致している。乱流エネルギーは、値が小さい領域は実験値のほうが大きく、値が大きい領域では LES のほうが大きい傾向があった。乱流エネルギーが小さい領域は主に建物前方に対応しており、大きい領域は建物後方に対応している。人工的に生成した流入変動風は、流入直後に乱流エネルギーが減衰することが指摘され、前節の解析でも同様の減衰が生じており、本解析でも、建物風上側の乱流エネルギーが僅かに減少した。この影響で建物後方の周期的変動が実験よりも顕著に現れ、その結果、建物後方では、LES の乱流エネルギーの方が、実験よりも大きくなったと考えられる。しかしながら、全体的には、建物周辺の平均風速・温度はよく再現できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件)

- ① 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、査読有
- ② 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,No703、pp771-776、2014、査読有
- ③ 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、査読無
- ④ 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、査読無
- ⑤ 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、査読無
- ⑥ 大風翼、環貫陽、弓野沙織、持田灯：COSMO site での不安定成層形成時の測定結果を目標とした変動風データの人工的な生成、日本気象学会2014年度秋季大会講演予稿集、pp415、2014、査読無
- ⑦ Okaze T., Mochida A.: Generation of artificial inflow turbulence including scalar fluctuation for LES based on Cholesky decomposition, The proceedings of 9th international conference on urban climate, 2015、査読有
- ⑧ Okaze T., Ono A., Mochida A., Kannuki Y., Watanabe S.: Evaluation of turbulent length

scale within urban canopy layer based on LES data, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.144, pp79-83, 2015、査読有

- ⑨大風翼、環貫陽、持田灯：LES のためのスカラ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、オーガナイズドセッション選抜梗概、環境工学 II、pp725-728、2015、査読無
- ⑩大風翼、吉澤徹、持田灯：渦粘性係数の輸送方程式に基づく3方程式レイノルズ平均モデルの建物周辺気流への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学 II、pp803-804、2016、査読無
- ⑪大風翼、持田灯：人工的に生成した温度変動を含む流入変動風を用いた単体建物周辺の非等温 LES、第30回数値流体力学シンポジウム講演要旨集、2016、査読無
- ⑫Tsubasa Okaze, Akashi Mochida : LES of Non-Isothermal Flow around a Building using Artificially Generated Inflow Turbulent Fluctuations of Wind Velocity and Air Temperature, Proceedings of 8th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, pp317-322, 2017、査読有

[学会発表] (計11件)

- ①大風翼、持田灯、環貫陽：LES のためのスカラ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(近畿)、2014年09月12日～2014年09月14日神戸大学(兵庫県・神戸市)
- ②環貫陽、大風翼、持田灯：LES のためのスカラ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(近畿)、2014年09月12日～2014年09月14日神戸大学(兵庫県・神戸市)
- ③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2014、2014年09月15日～2014年09月17日、東北大学(宮城県・仙台市)
- ④大風翼、環貫陽、弓野沙織、持田灯：COSMO site での不安定成層形成時の測定結果を目標とした変動風データの人工的な生成、日本気象学会2014年度秋季大会、2014年10月21日～2014年10月23日(福岡県福岡市)
- ⑤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、第23回風工学シンポジウム、2014年12月03日～2014年12月05日、東京大学(東京都・文京区)

⑥Okaze T., Mochida A.: Generation of artificial inflow turbulence including scalar fluctuation for LES based on Cholesky decomposition, The proceedings of 9th international conference on urban climate, July 20-24, 2015. (Toulouse, France)

- ⑦大風翼、環貫陽、持田灯：；LES のためのスカラ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(関東)、2015年09月04日～2015年09月06日、東海大学(平塚市、神奈川県)
- ⑧大風翼、吉澤徹、持田灯：渦粘性係数の輸送方程式に基づく3方程式レイノルズ平均モデルの建物周辺気流への適用、2016年度日本建築学会大会(九州)、2016年08月24日～2016年08月26日、九州工業大学(福岡)
- ⑨大風翼：乱流フラックスのコレスキー分解によるスカラ変動を含む変動風生成法の開発、第43回LES研究会、2016年11月11日、東京大学生産技術研究所(東京)
- ⑩大風翼、持田灯：人工的に生成した温度変動を含む流入変動風を用いた単体建物周辺の非等温 LES、第30回数値流体力学シンポジウム、2016年12月12日～2016年12月14日、東京
- ⑪Tsubasa Okaze, Akashi Mochida : LES of Non-Isothermal Flow around a Building using Artificially Generated Inflow Turbulent Fluctuations of Wind Velocity and Air Temperature, 8th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, 2017年03月25日～2017年03月29日、Osaka, Japan

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

大風翼 (OKAZE Tsubasa)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授
研究者番号：40709739

(2)連携研究者

義江 龍一郎 (YOSHIE Ryuichiro)

東京工芸大学・工学部・教授
研究者番号：60386901

(3)研究協力者

成田 健一 (NARITA Kenichi)

日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：20189210