

令和元年6月24日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18197

研究課題名(和文) マルチレーザー粒子画像流速測定手法を用いた実大空間の定量的可視化測定法の開発

研究課題名(英文) Development of quantitative visualization method of full-scale space using multi-laser particle image velocimetry

研究代表者

有波 裕貴(Arinami, Yuki)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：30768867

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：建築環境工学分野において、従来では測定することが困難であった1m角以上の範囲において時間的・空間的に連続な気流速度分布の測定方法の検討を、主にレーザーライトシートの配置方法とトレーサ供給方法(シーディング)、解析パラメータの設定方法に関して行った。単一の光源では障害物が存在し影が生じるような空間内でも複数のレーザーライトシートを使用することで概ね全ての位置で風速ベクトルを取得する方法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、複数のレーザーライトシートによる流れの可視化技術と画像処理手法を用いて、実大空間規模の空気流動構造を空間的・時間的に連続かつ定量的に明らかにすることが可能な測定法の開発を行った。本研究の成果は実大空間の詳細な実測データが得られることで、効率的な換気・空調計画の基礎的データとなることのみならず、室内の熱的・空気質的快適性の向上及び空調用エネルギーの新たな省エネ手法の開発に貢献できる点に極めて大きな学術的発展な意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In the field of architectural environmental engineering, we have investigated a method for measuring the temporal and spatial continuous air flow velocity distribution of 1 m square or more, which was difficult to measure conventionally. Mainly, the arrangement method of laser light sheet, tracer supply method (seeding), and setting method of analysis parameters were examined. Even in a space with obstacles and shadows with a single light source, methods to obtain wind velocity at almost all locations using multiple laser beams are constructed.

研究分野：建築環境工学

キーワード：流れの可視化 粒子画像流速測定法 レーザーライトシート 実大室内空間 検査領域 探査領域

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、建築設計の段階において数値流体解析(CFD)を用いて室内の気流分布、温度分布を検討し、空調用の制気口の配置等を計画することで効率的な換気空調方式を検討することが一般化し始めているが、竣工後の建物における実測データなど検証用データが不足している。一方、居住域内の温冷感的快適性の向上や室内空気質を維持しつつ知的生産性を向上させるためには、在室者の行動や滞在場所に応じた室内気流制御方法の検討が極めて重要である。更なる省エネルギーと室内環境の快適性の両立を実現するためには、実測や実大実験により建物室内の空気流動構造を詳細に解明する必要がある。

実大空間での空気流動構造の測定では、従来は熱線風速計や超音波風速計による点における風速測定、トレーサガスによる換気量の測定が行われているが、これらの測定法では、室内空間で連続体として流動している空気の部分的な性状が検討されている。実大空間を対象に空気流動現象の詳細な測定及び解明を行うためには、床から天井までの空間的・時間的に連続な空気流動現象の風速分布、乱流統計量分布が必要である。

### 2. 研究の目的

流れの可視化に画像処理技術を融合させた粒子画像流速測定法 (PIV: Particle image velocimetry) が開発されている。PIV では空間的に連続した平面内の時系列風速分布を非接触で測定することが可能であるが、実大室内空間規模程度の空間を対象とした測定結果はない。

本研究では、レーザーライトシートによる流れの可視化技術と画像処理手法を用いて、実大空間規模の空気流動構造を空間的・時間的に連続かつ定量的に明らかにすることが可能な測定法の開発を行う。本研究の成果は実大空間の詳細な実測データが得られることで、効率的な換気・空調計画の基礎的データとなることのみならず、室内の熱的・空気質的快適性の向上及び空調用エネルギーの新たな省エネ手法の開発に貢献できる点に極めて大きな学術的発展な意義がある。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 実大空間を対象とした流れの可視化方法に関する検討

図1に実験装置の配置概要を示す。床面積 12.15[m<sup>2</sup>]のダイニングキッチンを模擬した室を対象に実験を行う。実験室内にはエアコン、テーブル、椅子、常時換気口、ドアにアンダーカットとオーバーカット、天井にはセントラル空調を想定した天井給気口を設ける。厨房はペニンシュラ型とし、IHレンジ上部には整流板を有するフラット型レンジフードを設置する。調理時の排気はレンジフードから一定の風量となるよう排気用シロッコファンをインバータで制御し、超音波風量計で測定する。室内空調はエアコン及び天井給気(セントラル空調を想定)によって行い、常時換気は換気回数 0.5[回/h]の第一種機械換気とする。実験時の調理は湯沸しとし、IHレンジ1口で鍋を加熱し、鍋の水が沸騰した状態を保つ。

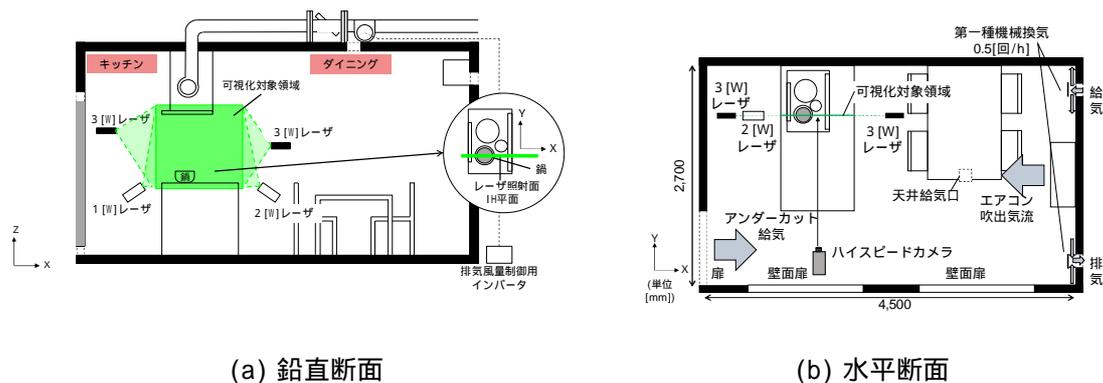


図1 実験装置の配置概要

表1に可視化装置の仕様を、表2にPIVの解析パラメータを示す。可視化対象領域は鍋中心の鉛直断面とする。気流の可視化には、出力3[W]×2台、2[W]、1[W]のシート状の連続光レーザー4台を使用し、レーザーの照射断面を一致させ、可視化対象領域全体をほぼ均一な輝度分布にして実験を行う。可視化に用いるトレーサには難燃性のスモーク(DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002、粒径:数 10[μm])を使用し、シーディングを行う。カメラはハイスピードカメラ:Photoron FASTCAM-SA3を、可視化画像のPIV解析にはFlow-Expert ver.1.2.13を使用する。PIV解析は直接相互相関法によって行う。

表 1 可視化装置の仕様

Camera	ハイスピードカメラ Photron FASTCAM SA3	
Laser	DPGL-3W × 2	LD励起Nd:YAG/YVO <sub>4</sub> レーザ(連続光) 波長532[nm],出力3[W]
	DPGL-2W	DPGL-3Wと同様(但し、出力2[W])
	G1000	DPGL-3Wと同様(但し、出力1[W])
Software	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer ver.3.4.1.0
	PIV解析	FlowExpert Ver1.2.13

表 2 PIVの解析パラメータ

測定対象領域	1,241[mm] × 1,241[mm]
画像サイズ	1,024[pixel] × 1,024[pixel]
キャリブレーション値	1.21[mm/pixel]
測定時間	22[sec]
測定間隔	4[ms](250[fps])
検査領域	32[pixel] × 32[pixel]
探查範囲	±3[pixel] × ±3[pixel]

3.2 PIV 解析パラメータの検討

PIV の解析で重要なパラメータである検査領域と探查領域に関して建築分野の流れを対象として、体系的に検討された例は少なく、これらのパラメータの設定方法を検討する必要がある。

図 2 に中層建物モデルの概要を、図 3 に実験対象市街地モデルの配置を、図 4 に平均風速分布の比較位置を示す。建物モデルは、1/500 を想定し、一辺を 50[mm]とし、50[mm](奥行き) × 50[mm](幅) × 100[mm](高さ)の中層建物モデルとする。建物モデルを 4 × 4 列に整列配置する。モデルの隣棟間隔は 25[mm]とする。PIV の測定対象範囲は、風上側から 2 棟目と 3 棟目の隣棟間の中心であり、地表面付近(z=4.0[mm])の水平断面とする。

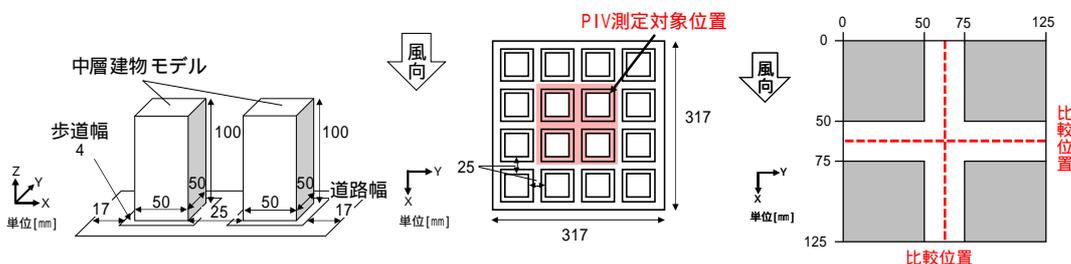


図 2 建物モデルの概要

図 3 市街地モデルの配置 (平面)

図 4 平均風速分布の比較位置(平面)

表 3 に測定機器の概要を、表 4 に PIV 測定パラメータを、図 5 に風洞内と実験装置の概要を示す。可視化には、出力 3 [W]及び 2 [W]のシート状レーザを同時に使用し、レーザ 2 台の照射断面を一致させる。実験は 4,000[mm](長さ) × 1,000[mm](幅) × 1,000[mm](高さ)の新潟大学所有の可視化用風洞で行う。風洞内の接近流の鉛直プロファイルは市街地風を想定して  $U Z^{1/4}$ (U: 流速、Z: 高さ)とする。可視化用のトレーサには難燃性のスモークを使用し、スモークジェネレータを風洞外に設置し、風上側の可能な限り気流場に影響が生じない位置に設置したダクトからスモークを供給する。

表 3 測定機器の概要

Camera	ハイスピードカメラ	Photron FASTCAM SA3
Laser	DPGL-3W	LD励起Ld: YAG/YVO <sub>4</sub> レーザ 波長: 532[nm] 出力: 3[W]
	DPGL-2W	LD励起Ld: YAG/YVO <sub>4</sub> レーザ 波長: 532[nm] 出力: 2[W]
SoftWare	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer ver.3.3.8
	PIV解析	Flow-Expert ver1.2.13

表 4 PIV 測定パラメータ

測定断面	水平断面
画像サイズ[pixel]	1,024 × 1,024
キャリブレーション値 [mm/pixel]	0.167
測定対象領域[mm]	172 × 172
測定時間[s]	11
測定間隔	2[ms](500[fps])
シャッター速度[s]	1/2000

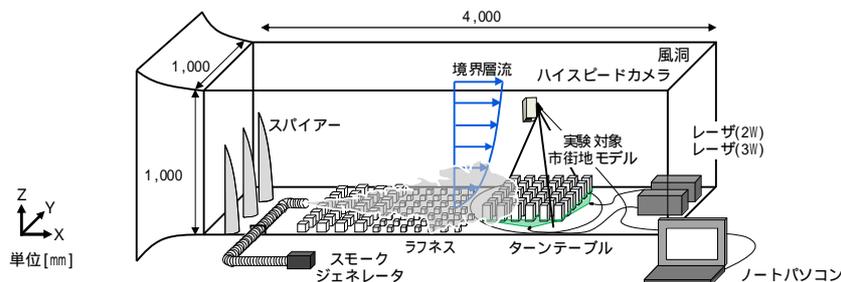


図 5 可視化用風洞と実験装置の概要

表5に解析パラメータの検討 case を示す。PIV 解析に用いる直接相互相関法は、異なる2時刻の画像間で1時刻目に取得した画像中に検査領域を設定し、最も輝度分布の相関関数が高い画像を2時刻目の画像中の探查領域内から探し出す。検査領域は大きい程、領域内の輝度情報が多いため、安定的に相関の高い画像を見つけることが可能であるが、空間分解能が低下し、細かい動きの把握が困難になる。また、探查領域を小さくすると速い風速に対応できなくなる。探查領域は、風洞内の高さ700[mm]における風速を3.0[m/s]と設定しているため、 $\pm 35 \times \pm 35$ [pixel]を基準とする。基準とした検査領域と探查領域のパラメータを変化させて解析パラメータの検討 case を設定し、計25caseの解析を行う。

表5 解析パラメータの検討 case

解析case	検査領域[pixel]	探查領域[pixel]	最大解析可能風速[m/s]	
case1	15 × 15	case1-1	$\pm 15 \times \pm 15$	1.257
		case1-2	$\pm 20 \times \pm 20$	1.676
		case1-3	$\pm 25 \times \pm 25$	2.095
		case1-4	$\pm 30 \times \pm 30$	2.514
		case1-5	$\pm 35 \times \pm 35$	2.932
case2	20 × 20	case2-1	$\pm 15 \times \pm 15$	1.257
		case2-2	$\pm 20 \times \pm 20$	1.676
		case2-3	$\pm 25 \times \pm 25$	2.095
		case2-4	$\pm 30 \times \pm 30$	2.514
		case2-5	$\pm 35 \times \pm 35$	2.932
case3	25 × 25	case3-1	$\pm 15 \times \pm 15$	1.257
		case3-2	$\pm 20 \times \pm 20$	1.676
		case3-3	$\pm 25 \times \pm 25$	2.095
		case3-4	$\pm 30 \times \pm 30$	2.514
		case3-5	$\pm 35 \times \pm 35$	2.932
case4	30 × 30	case4-1	$\pm 15 \times \pm 15$	1.257
		case4-2	$\pm 20 \times \pm 20$	1.676
		case4-3	$\pm 25 \times \pm 25$	2.095
		case4-4	$\pm 30 \times \pm 30$	2.514
		case4-5	$\pm 35 \times \pm 35$	2.932
case5	35 × 35	case5-1	$\pm 15 \times \pm 15$	1.257
		case5-2	$\pm 20 \times \pm 20$	1.676
		case5-3	$\pm 25 \times \pm 25$	2.095
		case5-4	$\pm 30 \times \pm 30$	2.514
		case5-5	$\pm 35 \times \pm 35$	2.932

#### 4. 研究成果

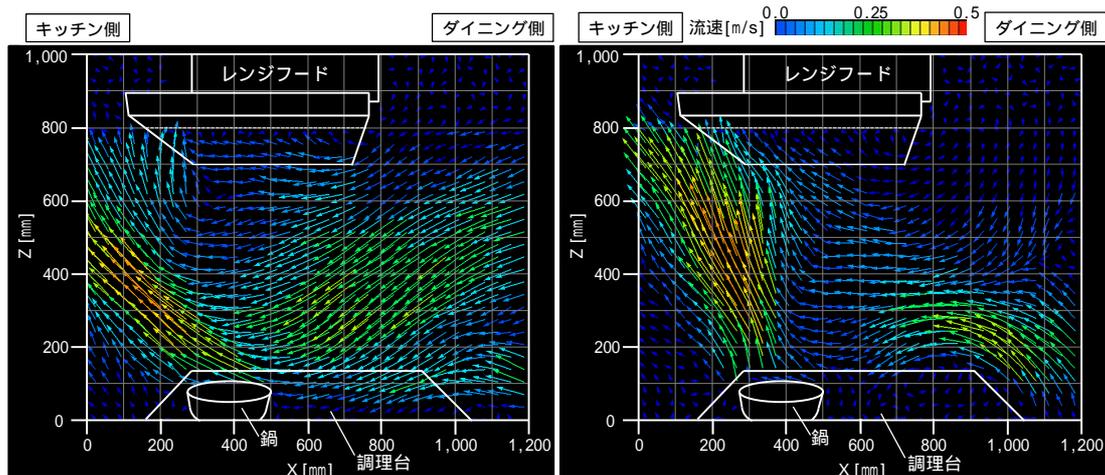
##### 4.1 実大空間を対象とした流れの可視化方法に関する検討

図6に代表的な case の平均流速分布を示す。鍋上方に生じる上昇気流はどの case でも0.4[m/s]程度となる。

レンジフード排気量300[m<sup>3</sup>/h]の caseA では、鍋上方に生じる上昇気流はアンダーカットからの給気により生じる調理台上をダイニング側からキッチン側へ水平方向の0.25[m/s]程度の気流によって偏流し、レンジフードに捕集される前にキッチン側へ漏出する。

レンジフード排気量150[m<sup>3</sup>/h]の caseB では、鍋上方に生じる上昇気流は調理台上の高さ400[mm]付近まで垂直に上昇する。400[mm]より上部ではダイニング側から0.2[m/s]程度の水平方向の気流により、上昇気流の一部がキッチン側へ流れる。レンジフードに到達した上昇気流は捕集されるが、一部はキッチン側へ漏出する。

以上から実大規模の室内空間において強制対流と自然対流が混在する流れ場の可視化及びPIV測定による定量的な気流速度情報の取得が可能となった。



(a) caseA(アンダーカット給気量300[m<sup>3</sup>/h]・レンジフード排気量300[m<sup>3</sup>/h]・エアコン風量:720[m<sup>3</sup>/h]) (b) caseB(アンダーカット給気量150[m<sup>3</sup>/h]・レンジフード排気量150[m<sup>3</sup>/h]・エアコン風量:720[m<sup>3</sup>/h])

図6 代表的な case の平均流速分布

##### 4.2 PIV 解析パラメータの検討

図7に検査領域を変化させた場合の平均風速分布を、図8に検査領域の大きさと平均風速分布の比較を示す。比較位置は、 $X=62.5$ [mm]、 $Y=62.5$ [mm]の線上とする(図4)。

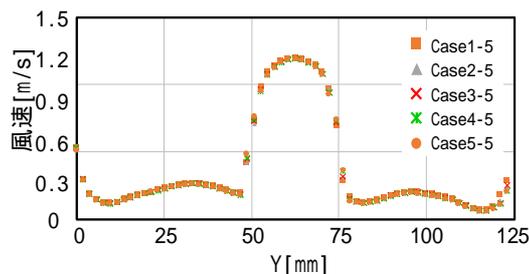
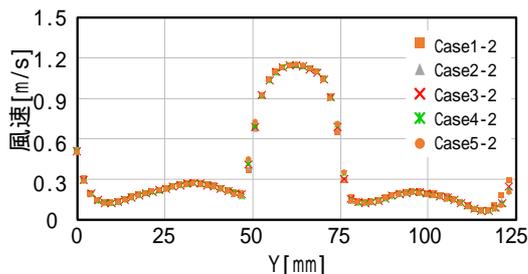
###### (1) 検査領域を変化させた場合の平均風速分布

図7(1)、(2)ではどちらの探查領域の場合でも検査領域が15×15[pixel]以上であれば、平均風速の値に変化はみられない。

図7(3)、(4)では、 $X=50\sim 75$ [mm]付近の範囲では、どの検査領域でも概ね一致している。探查領域 $\pm 20 \times \pm 20$ [pixel]の場合、検査領域が $25 \times 25$ [pixel]以上の大きさで、探查領域 $\pm 35 \times \pm 35$ [pixel]の場合、検査領域が $20 \times 20$ [pixel]以上の大きさであれば、平均風速の値に変化はみられない。

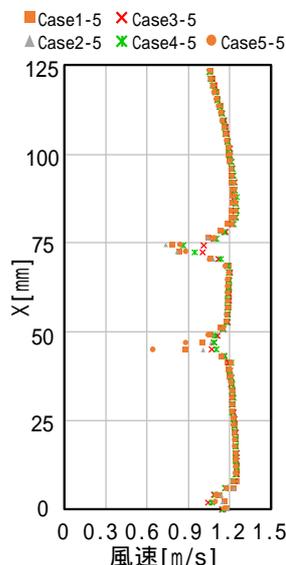
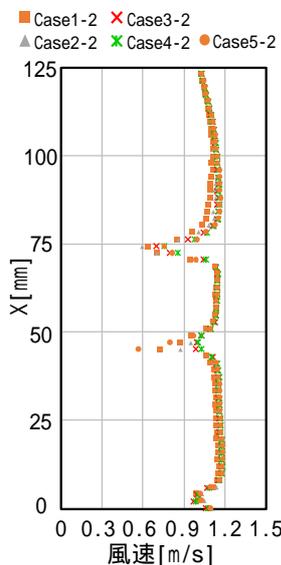
(2) 検査領域の大きさと平均風速分布の比較(図8)

case5-4 と case3-4 を比較するとモデル壁面近傍( $X=15\sim 50$  及び  $75\sim 110$ [mm]、 $Y=75$ [mm])の範囲)で違いがみられる。case5-4 の検査領域は $35 \times 35$ [pixel]であり、case3-4 の検査領域 $25 \times 25$ [pixel]に比較して大きいいため、壁面近傍では検査領域内にモデル壁面が含まれることにより、解析することが困難となる。壁面近傍では検査領域の大きさの選定が重要であると考えられる。



(1)位置 (探查領域 $\pm 20 \times \pm 20$ [pixel])

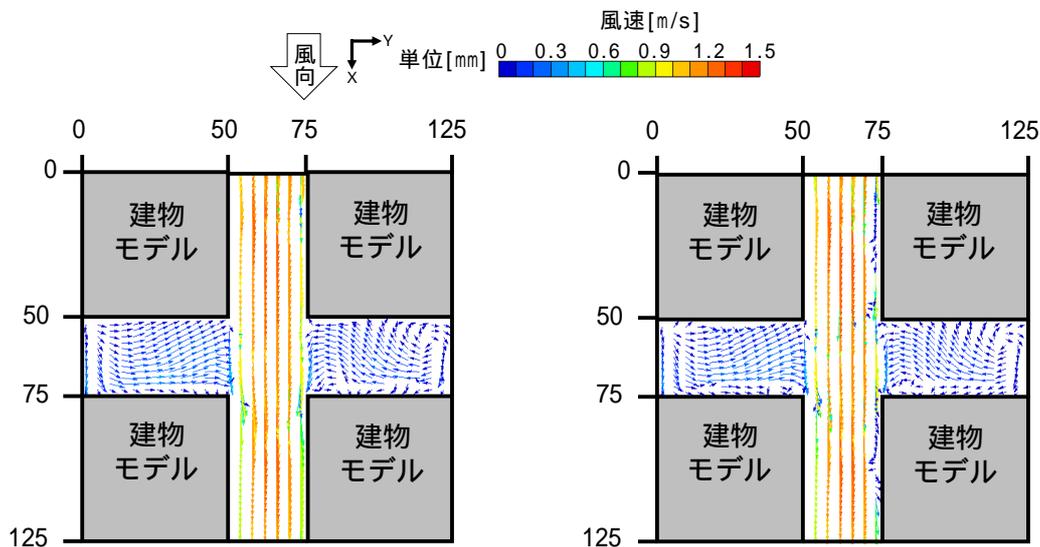
(2)位置 (探查領域 $\pm 35 \times \pm 35$ [pixel])



(3)位置 (探查領域 $\pm 20 \times \pm 20$ [pixel])

(4)位置 (探查領域 $\pm 35 \times \pm 35$ [pixel])

図7 検査領域を変化させた場合の平均風速分布



(1) case3-4

(2) case5-4

図8 検査領域の大きさと平均風速分布の比較

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 10 件)

1. 江川将史、赤林伸一、有波裕貴、吉弘崇滉：PIV 及び LES による建物周辺気流に関する基礎的研究 その6 中層市街地モデルを対象とした PIV 解析パラメータの選定方法、日本建築学会大会学術講演梗概集、2019 年 9 月
2. 吉弘崇滉、赤林伸一、有波裕貴、江川将史：PIV 及び LES による建物周辺気流に関する基礎的研究 その7 中・高層市街地モデルを対象とした地表面付近の水平面気流分布の PIV 計測、日本建築学会大会学術講演梗概集、2019 年 9 月
3. 江川将史、赤林伸一、有波裕貴、吉弘崇滉：PIV 及び LES による建物周辺気流に関する基礎的研究 その4 中層市街地を対象とした PIV 解析パラメータの検討、日本建築学会北陸支部研究報告集 第 62 号、2019 年 7 月
4. 吉弘崇滉、赤林伸一、有波裕貴、江川将史：PIV 及び LES による建物周辺気流に関する基礎的研究 その5 密集市街地を対象とした地表面付近の水平面気流分布の PIV 測定、日本建築学会北陸支部研究報告集 第 62 号、2019 年 7 月
5. 栗屋義明、赤林伸一、有波裕貴、窪寺航、小前草太、志賀彰、斎木あゆみ：住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式の開発研究 その6 レンジフード形状を変化させた場合の捕集率に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018 年 9 月
6. 窪寺航、赤林伸一、有波裕貴、栗屋義明、志賀彰、斎木あゆみ、小前草太、住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式の開発研究 その7 エアコンの吹出風量を変化させた場合の捕集率に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、2018 年 9 月
7. 志賀彰、赤林伸一、有波裕貴、斎木あゆみ、小前草太：住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式の開発研究 その3 IH レンジ周辺気流の PIV 測定及びレンジフードの捕集率測定実験、空気調和衛生工学会大会、学術講演論文集、2017 年 9 月
8. 栗屋義明、赤林伸一、有波裕貴、志賀彰、斎木あゆみ、小前草太：住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式の開発研究 その4 レンジフード形状及びエアコンの吹出風量を変化させた場合の捕集率、日本建築学会北陸支部研究報告集 第 61 号、2018 年 7 月
9. 小前草太、赤林伸一、有波裕貴、永田貴一、志賀彰、斎木あゆみ：住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式に関する研究 その4 IH レンジ周辺の気流性状の PIV 測定、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017 年 8 月
10. 有波裕貴、赤林伸一：住宅用厨房を対象とした高効率換気・空調方式の開発研究 その3 IH レンジ周辺気流の PIV 測定及びレンジフードの捕集率測定実験、日本建築学会北陸支部研究報告集 第 60 号、2017 年 7 月

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。