

実大室内空間を対象としたPIV測定法に関する基礎的研究

実大室内チャンバー及び教室を対象とした空調気流性状のPIV測定

井上 翔太 指導教員 有波 裕貴 助教

1 研究目的

流体の速度ベクトル分布を可視化画像から解析する手法として、粒子画像流速測定法^{文1)}(以下PIV)が挙げられる。PIVは流れの中に微細なトレーサ粒子を混入させてレーザシートで可視化し、その断面の動画をデジタルカメラで撮影することで、微粒子群の移動距離と撮影間隔から速度ベクトルを算出する手法であり、流れに非接触で複数の位置で同時に気流速度情報を得る事ができる。

既往の研究^{文2)}ではこれまで300[mm]×300[mm]程度であった測定範囲から実大室内空間の測定を目的として5,000[mm]×2,200[mm]に拡大し、等温条件において複数台のカメラを用いて様々な気流速度が混在する室内空間のPIV解析手法の検討を行った。また、複数台のカメラで測定対象空間を分割して可視化・PIV解析した結果の合成手法及び誤ベクトルの補正に関する検討を行った。

本研究では家庭用エアコンが設置された実大室内チャンバー(5,000[mm]×2,200[mm])において家庭用エアコンの空調条件(送風(等温)、暖房、冷房)を変化させた場合の気流の可視化撮影を行い、PIV解析手法を検討する(実験①)。また、測定対象空間を天井カセット型エアコンが2台設置された実際の大学の教室

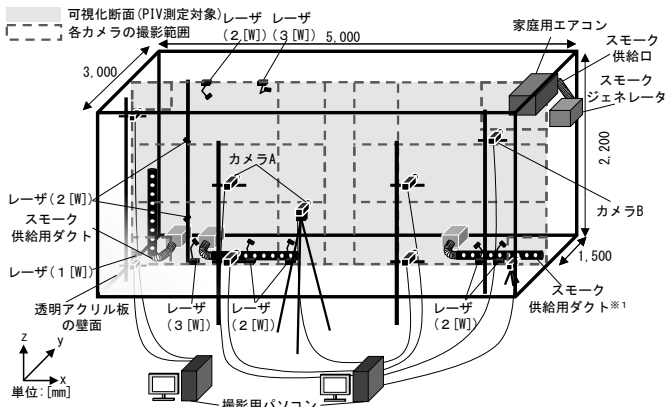


図1 測定対象空間と機器の概要(実験①)

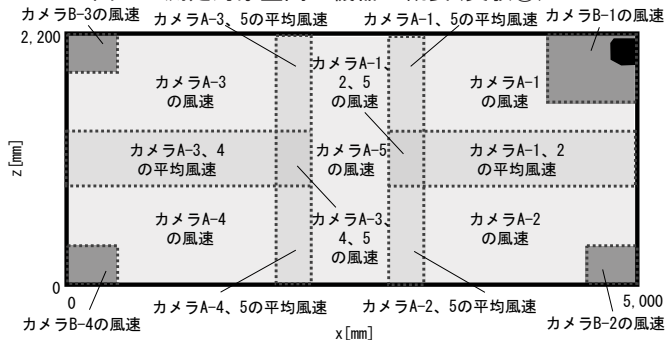


図2 可視化断面のカメラ配置とPIV解析結果の合成方法(実験①)

(9,130[mm]×3,000[mm])に拡大し、等温条件においてエアコンの風向を変化させた場合の気流の可視化撮影を行い、PIV解析手法を検討する(実験②)。

2 研究概要

2.1 冷暖房時の空調気流性状の測定(実験①)

2.1.1 実験条件：図1に測定対象空間と機器の概要、表1に実験caseを示す。測定対象は5,000[mm](幅)×2,200[mm](高さ)×3,000[mm](奥行)の実大室内空間を模擬したチャンバーとする。1つの壁面は撮影の為に透明なアクリル板で作成されている。向かって右壁面上部に家庭用エアコンが設置されており、実験時にcase1では送風運転(等温)、case2では冷房運転(設定温度:16[°C])、case3では暖房運転(設定温度:30[°C])を行う。全ての実験caseにおいてエアコンの循環風量は風量3、吹出風向は風向2(水平面から下向き19[°])に設定する。

2.1.2 実験概要：表2に測定機器の仕様、表3にPIV測定パラメータを示す。PIV測定対象断面はy方向の室中央とし、連続光レーザ10台(3[W]×2、2[W]×7、1[W]×1)とスモークジェネレータ①4台を用い

表1 実験case(実験①)

実験case	空調条件	循環風量	吹出風向(風向角)
case1	送風(等温)	風量3	風向2 (水平面から 下向き19[°])
case2	冷房		
case3	暖房		

表2 測定機器の仕様(実験①、②)

カメラ	カメラA	工業用カメラ(実験①×5台、実験②×6台) (1,920[pixel]×1,200[pixel]、125[fps])
カメラB	工業用カメラ×4台 (720[pixel]×540[pixel]、375[fps])	
レーザー	LD励起: YAG/YVO ₄ レーザー 波長: 532[nm]	出力: 3[W] 出力: 2[W] 出力: 1[W]
スモークジェネレータ	スモークジェネレータ① スモークジェネレータ②	Antari FOG MACHINE Z-1200 II (実験①×4台、実験②×2台) Officek 400W FOG MACHINE(実験②×4台)
解析ツール	FlowExpert ver. 1.2.13	

表3 PIV測定パラメータ(実験①)

カメラ	カメラA	カメラB-1	カメラB-2、B-3、B-4										
PIV解析手法	直接相互相関法												
対象断面	鉛直断面(y=1,500[mm])												
カメラ1台の画像サイズ[pixel]	1,920×1,200	720×540											
キャリブレーション値 ^{文2)} [mm/pixel]	1.19	1.15	0.64										
対象領域[mm]	2,285×1,428	828×621	461×346										
撮影時のフレーム間隔[fps]	125	375											
シャッタースピード[sec]	1/125	1/375											
検査領域[pixel]	36×36	37×37	66×66										
探索領域[pixel]	±28	±10	±17										
解析時のフレーム間隔[msec]	8.00	16.0	32.0	48.0	2.67	5.33	10.7	16.0	2.67	5.33	10.7	16.0	
解析可能風速[m/s]	最小風速	0.149	0.074	0.037	0.025	0.431	0.216	0.108	0.072	0.24	0.12	0.06	0.04
	最大風速	4.17	2.08	1.04	0.69	4.3	2.16	1.08	0.72	4.1	2.04	1.02	0.68

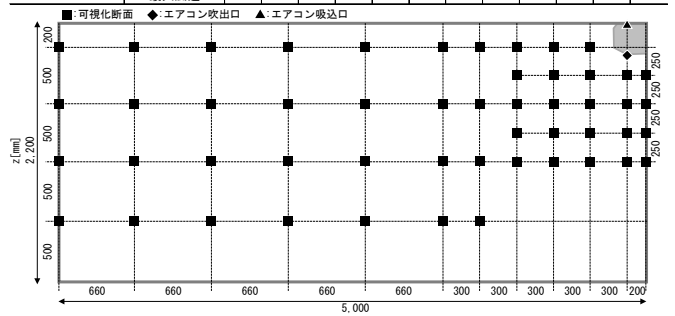


図3 測定対象空間における熱電対の配置(実験①)

る。10 台のレーザはそれぞれの照射断面を一致させるように配置する。1 台のスモークジェネレータはエアコン吸込口に設置する。また、3 台のスモークジェネレータは床面に設置し、スモーク供給用ダクト^{*1}を接続することでシーディングを行う。2 種類のカメラを計 9 台使用し、カメラ A(125 [fps]) は測定対象断面を 5 分割するように 5 台配置し、カメラ B(375 [fps]) は 4 台を可視化断面に接近して配置することでエアコン吹出部分及びチャンバー隅角部を詳細に撮影する。撮影時間は 10 秒間とする。PIV 解析には FlowExpert ver.1.2.13 を使用する。

PIV 解析ではキャリブレーション値^{*2}と解析対象とする 2 時刻間のフレーム間隔によって算出できる風速範囲が変化する。そのため、既往の研究³⁾ で検討を行った撮影時のフレーム間隔とスキップしたフレーム間隔での解析を行う。解析するフレーム間隔はカメラ A で 8、16、32、48 [msec]、カメラ B で約 2.67、5.33、10.7、16 [msec] とする。解析した 4 つのフレーム間隔で最適な風速ベクトルの選択^{*3}を行う。その後、既往の研究²⁾ で検討を行った補間方法^{*4}を用いて各測定点の PIV 解析結果を補正する。

図 2 に可視化断面のカメラ配置と PIV 解析結果の合成方法を示す。各カメラの撮影範囲には重複する領域が存在する。まずカメラ A の重複する領域では PIV 解析結果を各測定点で平均して合成を行う。その後、カメラ B の撮影範囲ではカメラ B の PIV 解析結果より各測定点の値を置換する。

図 3 に測定対象空間における熱電対の配置を示す。PIV 測定と同時に空間の温度分布の測定を行う。温度測定には T 型熱電対とデータロガーを用いる。熱電対は測定対象断面全体に計 51 箇所設置する。また、エアコン吹出口、吸込口にもそれぞれ 1 箇所設置する。

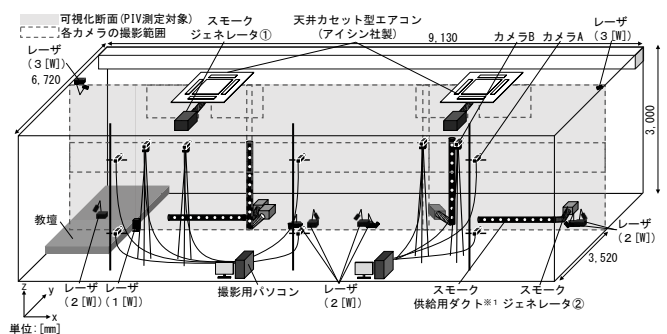


図 4 測定対象空間と機器の概要(実験②)

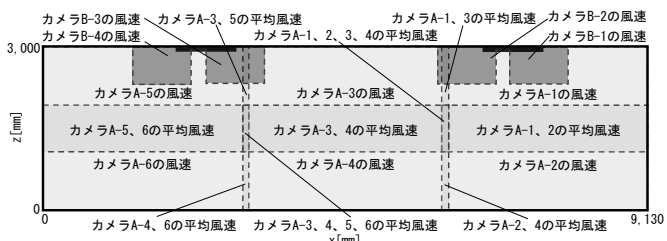


図 5 可視化断面のカメラ配置と PIV 解析結果の合成方法(実験②)

2.2 教室における等温条件での空調気流性状の測定(実験②)

2.2.1 実験条件：図 4 に測定対象空間と機器の概要、

表 4 に実験 case を示す。測定対象は 9,130 [mm] (幅) × 3,000 [mm] (高さ) × 6,720 [mm] (奥行) の新潟大学工学部 D 棟 207 講義室とする。天井カセット型エアコンが 2 台設置されており、全ての実験 case で送風運転 (風量：急) とする。caseA は風向 0 (水平面から下向き 19 [°])、caseB は風向 2 (水平面から下向き 34 [°])、caseC は風向 4 (水平面から下向き 53 [°])、caseD はスイング運転とする。スイング運転は風向 0 ~ 4 の風向角の範囲 (水平面から下向き 19 ~ 53 [°]) を約 10 秒で一往復する。

2.2.2 実験概要：表 5 に PIV 測定パラメータを示す。

実験②で用いる測定機器の仕様は表 2 と同様である。PIV 測定対象断面は y=3,520 [mm] とする。可視化には連続光レーザ 10 台 (3 [W] × 2、2 [W] × 7、1 [W] × 1) と 2 種類のスモークジェネレータを計 6 台 (スモークジェネレータ① × 2、スモークジェネレータ② × 4) 用いる。10 台のレーザはそれぞれの照射断面を一致させるように配置する。スモークジェネレータ①はエアコン吸込口に 1 台ずつ設置する。また、スモークジェネレータ②は 4 台とも床面に設置し、スモーク供給用ダクト^{*1}を接続することでシーディングを行う。カメラは計 10 台を使用し、カメラ A(125 [fps]) は測定対象断面を 6 分割するように 6 台配置、カメラ B(375 [fps]) はエアコン吹出気流を詳細に撮影するため各吹出口に接近して 4 台配置する。撮影時間は 10 秒間とする。PIV 解析には FlowExpert ver.1.2.13 を使用する。

実験①と同様に撮影時のフレーム間隔とスキップしたフレーム間隔で解析を行い、4 つのフレーム間隔で最適な風速ベクトルの選択^{*3}を行う。その後、既往の研究²⁾ で検討を行った補間方法^{*4}を用いて各測定点の PIV 解析結果を補正する。

図 5 に可視化断面のカメラ配置と PIV 解析結果の合成方法を示す。各範囲における PIV 解析結果は実験①と同様の方法により、カメラ A の重複する領域では PIV 解析結果を各測定点で平均して合成、カメラ B の撮影範囲ではカメラ B の PIV 解析結果より各測定点の値を置換する。

表 4 実験 case (実験②)

実験 case	空調条件	循環風量	吹出風向(風向角)
caseA	送風(等温)	急	風向 0 (水平面から下向き 19 [°])
caseB			風向 2 (水平面から下向き 34 [°])
caseC			風向 4 (水平面から下向き 53 [°])
caseD			スイング運転(水平面から下向き 19 ~ 53 [°])

表 5 PIV 測定パラメータ(実験②)

	カメラ								
	カメラ A	カメラ B							
PIV解析手法	直接相互相関法								
対象断面	鉛直断面(y=3,520[mm])								
カメラ 1 台の画像サイズ[pixel]	1,920 × 1,200	720 × 540							
キャリブレーション値 ^{*2} [mm/pixel]	1.59	1.15							
対象領域[mm]	3,053 × 1,908	828 × 621							
撮影時のフレーム間隔 [fps]	125	375							
シャッタースピード[sec]	1/125	1/375							
検査領域[pixel]	35 × 35	48 × 48							
検査領域[pixel]	±21	±10							
解析時のフレーム間隔[msec]	8.00	16.0	32.0	48.0	2.67	5.33	10.7	16.0	
解析可能風速[m/s]	最小風速	0.199	0.099	0.050	0.033	0.431	0.216	0.108	0.072
	最大風速	4.17	2.09	1.04	0.7	4.30	2.16	1.08	0.72

3 実験結果

3.1 冷暖房時の空調気流性状の測定(実験①)

図6に各 case における平均風速ベクトル分布、図7に各 case における平均温度分布を示す。実験結果は測定時間(10秒間)の平均値で示す。

(1) case1(等温、吸込温度:30.2[°C]、吹出温度:29.8[°C]): エアコン吹出部分中心での風速は約2.0[m/s]となる。その後、吹出気流は風速約0.5[m/s]でチャンバー左下隅角部に到達し、左壁面を沿う気流と床面を沿う気流に分かれる。左壁面を沿う気流は左上隅角部付近で小さな渦を形成する。一方で床面を沿う気流はエアコン下部へ向かい、吹出気流に引き込まれるような循環流を形成する。

(2) case2(冷房、吸込温度:27.3[°C]、吹出温度:14.0[°C]): エアコン吹出部分中心での風速は約1.5[m/s]、約14[°C]となる。その後、吹出気流はチャンバー中央付近で下降気流となり、風速約0.5[m/s]、約22[°C]

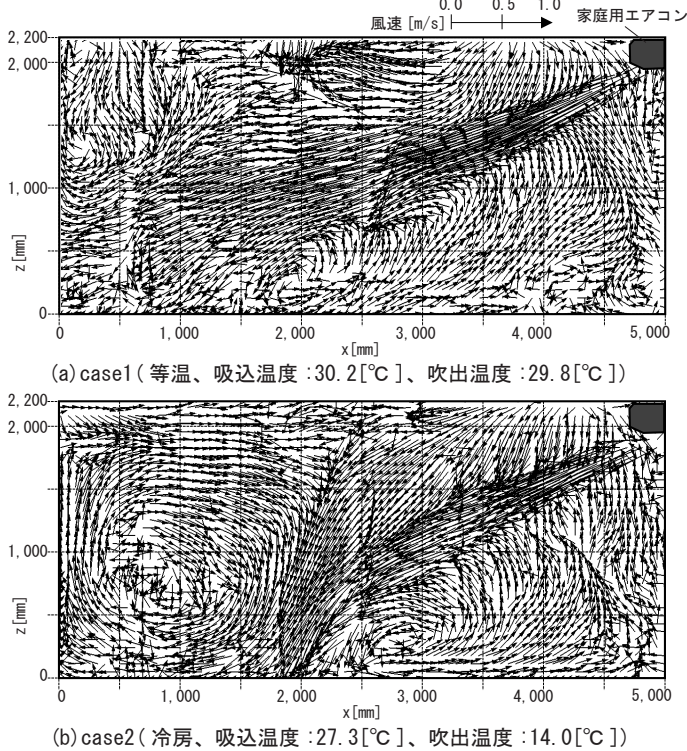


図6 各 case における平均風速ベクトル分布(実験①)

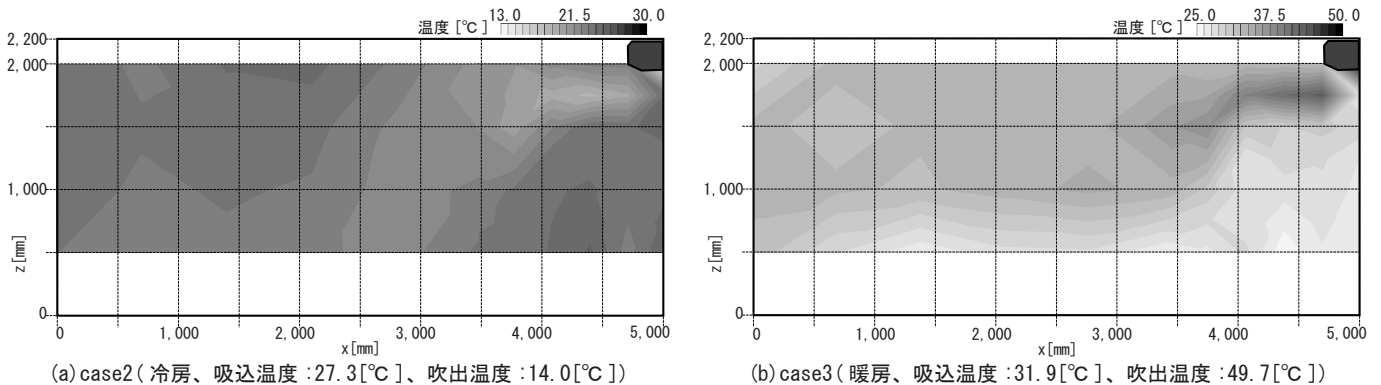


図7 各 case における平均温度分布(実験①)

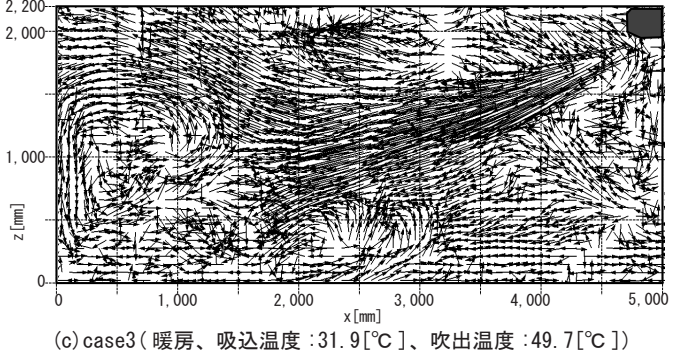
で床面に到達する。到達した気流は床面付近で左右に分かれ、エアコン下部へ向かう気流は吹出気流に引き込まれるような循環流を形成する。また床面付近から左下隅角部へ向かう気流は左側壁面に沿って上昇し、x=750[mm]、z=750[mm]付近を中心とした比較的大きな渦を形成する。冷房時の温度分布では、エアコン下部から床面付近の範囲及びエアコンから離れた天井面付近において温度が比較的高くなる傾向がある。

(3) case3(暖房、吸込温度:31.9[°C]、吹出温度:49.7[°C]): エアコン吹出部分中心での風速は約2.0[m/s]、約50[°C]となる。吹出気流はチャンバー中央付近で上昇する傾向があり、風速約0.3[m/s]、約32[°C]でチャンバー左上隅角部に到達する。到達した気流は壁面を沿い、床面に向かう循環流を形成する。暖房時の温度分布では、エアコン下部から床面付近の範囲において温度が低くなる傾向がある。

3.2 教室における等温条件での空調気流性状の測定(実験②)

図8に代表的な case における平均風速ベクトル分布を示す。実験結果は測定時間(10秒間)の平均値で示す。

(1) caseB(風向2): エアコン吹出部分の中心で風速は1.0~2.0[m/s]となる。測定対象空間中央付近で2つのエアコンの吹出気流が衝突して風速約0.7[m/s]で床面に到達し、左右に分かれる。また、左右の壁に到達した吹出気流は風速約0.7[m/s]で壁面を沿って床面に到達する。エアコン下部では、測定対象空間中央の床面から流れた気流と左右の壁面からの気流が合流して床面付近から上昇し、エアコン吸込口



に向かう気流が生じる。

(2) caseC(風向4): エアコン吹出部分の中心で風速は1.4~2.0[m/s]となる。エアコンから壁面に向かう吹出気流は測定対象空間の隅角部に風速約0.7[m/s]で到達する。測定対象空間中央に向かう2つの吹出気流は中央から床面にかけて衝突し、床面付近で左右に風速約0.6[m/s]で流れる。エアコン下部では風速約0.5[m/s]でエアコン吸込口に引き込まれる気流が生じる。測定対象空間中央の吹出気流下部では定常的な渦が形成される。

4 まとめ

4.1 冷暖房時の空調気流性状の測定(実験①)

- ①各 case の吹出直後の気流分布は概ね同様となる。しかし、吹出気流は case2(冷房)においてチャンバ中央付近で下降し、case3(暖房)において上昇する傾向がある。
- ②どの case でも室内に循環流及びエアコン吹出気流に引き込まれる気流が形成された。
- ③ case2(冷房)、case3(暖房)ではエアコン下部から床面付近の範囲において、冷房時は温度が比較的高くなり、暖房時は温度が低くなる傾向がある。

4.2 教室における等温条件での空調気流性状の測定(実験②)

- ① caseB(風向2)、caseC(風向4)の吹出直後の気流は概ね一致し、中心で1.0~2.0[m/s]となる。また、左右の壁面に到達する吹出気流の位置は風向によって異なるが、到達する際の気流は約0.7[m/s]となる。
- ②どちらの実験 case でもエアコンの下部では床面から上昇し、エアコン吸込口に引き込まれる気流が生じる。
- ③ caseB(風向2)、caseC(風向4)はそれぞれ吹出気流が壁面に到達する位置、測定対象断面中央で衝突する位置に違いはあるが、気流性状は概ね一致する。

注釈

- ※1 長さ1,400[mm]、直径60[mm]であり、φ8の穴が100[mm]間隔で空いている。
- ※2 撮影画像間隔と実際の距離との換算係数であるキャリブレーション値は、撮影断面に校正用プレートを設置して実際の距離が画像上で認識できるように撮影して求める。
- ※3 解析可能風速の範囲内にあるフレーム間隔を選択する。解析可能風速が重複している範囲で複数のフレーム間隔で風速が算出された場合には相関係数の最も高いベクトルを選択する。
- ※4 対象とする測定点の風速がその周囲8点の平均スカラー風速に対して一定の範囲を超える場合に、周囲8点の平均風速により補間する。なお、平均する周囲8点のベクトルはそれぞれ補間前の各点の時間平均ベクトルに対して500[%]未満のベクトルとし、500[%]以上のベクトルは平均に含めない。

参考文献

- 文1) 可視化情報学会編:PIVハンドブック、森北出版株式会社、2018年
- 文2) 赤林・有波「マルチレーザ・カメラを用いたPIV測定・解析に関する研究 その1 実大室内空間を対象としたPIV測定法に関する基礎的検討」、空調調和・衛生工学会学術講演論文集、2022年
- 文3) 小栗・赤林ら「実大室内空間を対象としたPIV解析に関する基礎的研究 その3 冷暖房時を対象としたPIV測定」、日本建築学会学術講演梗概集、2021年

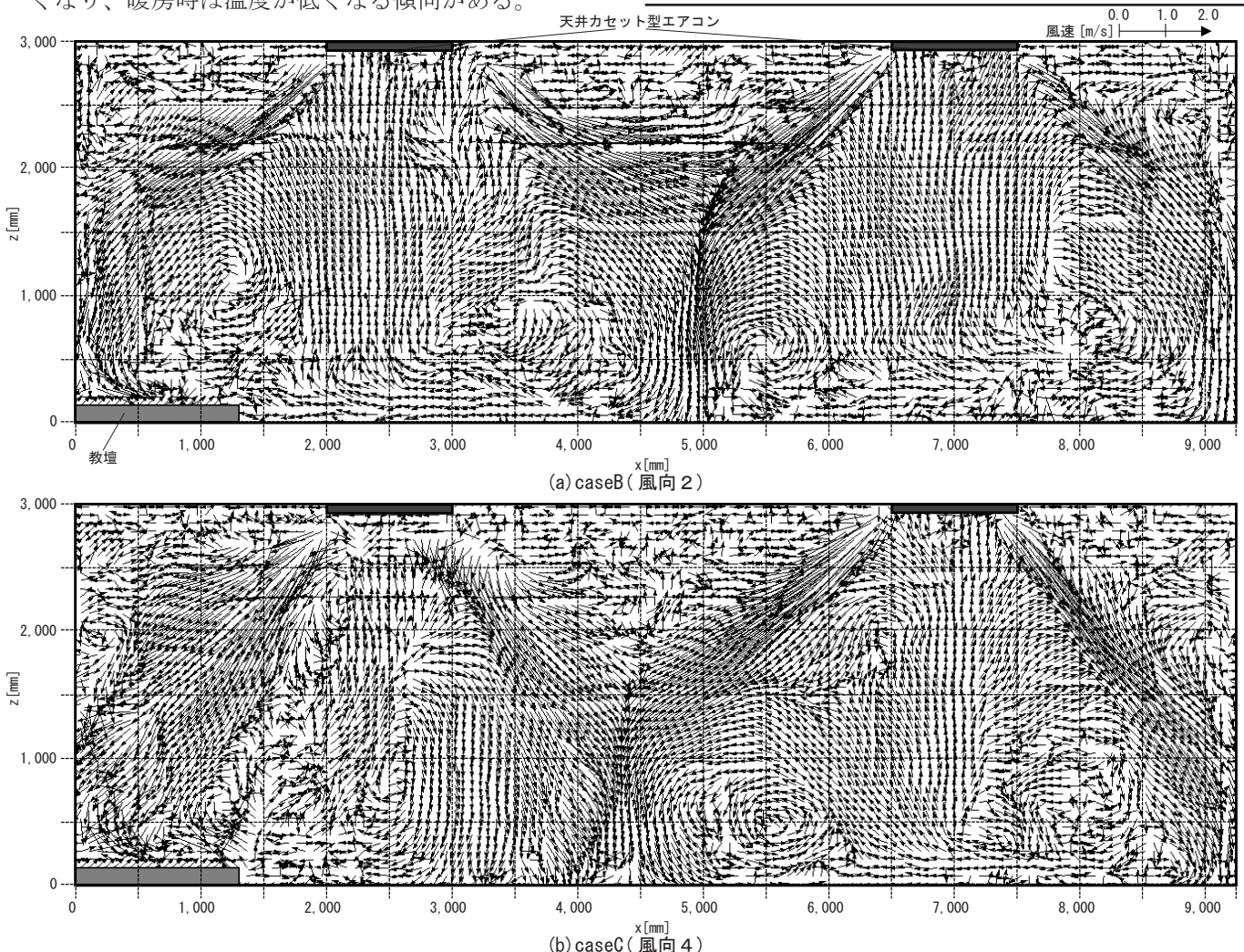


図8 代表的な case における平均風速ベクトル分布(実験②)