

実大室内空間を対象とした PIV測定に関する基礎的研究

教室を対象とした等温時の
空調気流性状のPIV測定

落合 駆
指導教員
有波 裕貴 助教

研究目的

研究目的

流体の速度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は熱線風速計等による測定法とは異なり、**非接触で同一面の速度情報**を複数の位置において同時に測定することが可能な手法である。

研究目的

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]に測定範囲を拡大し、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。

本研究では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(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・解析を行い、PIV解析手法の検討を行う。

実験概要

実験概要

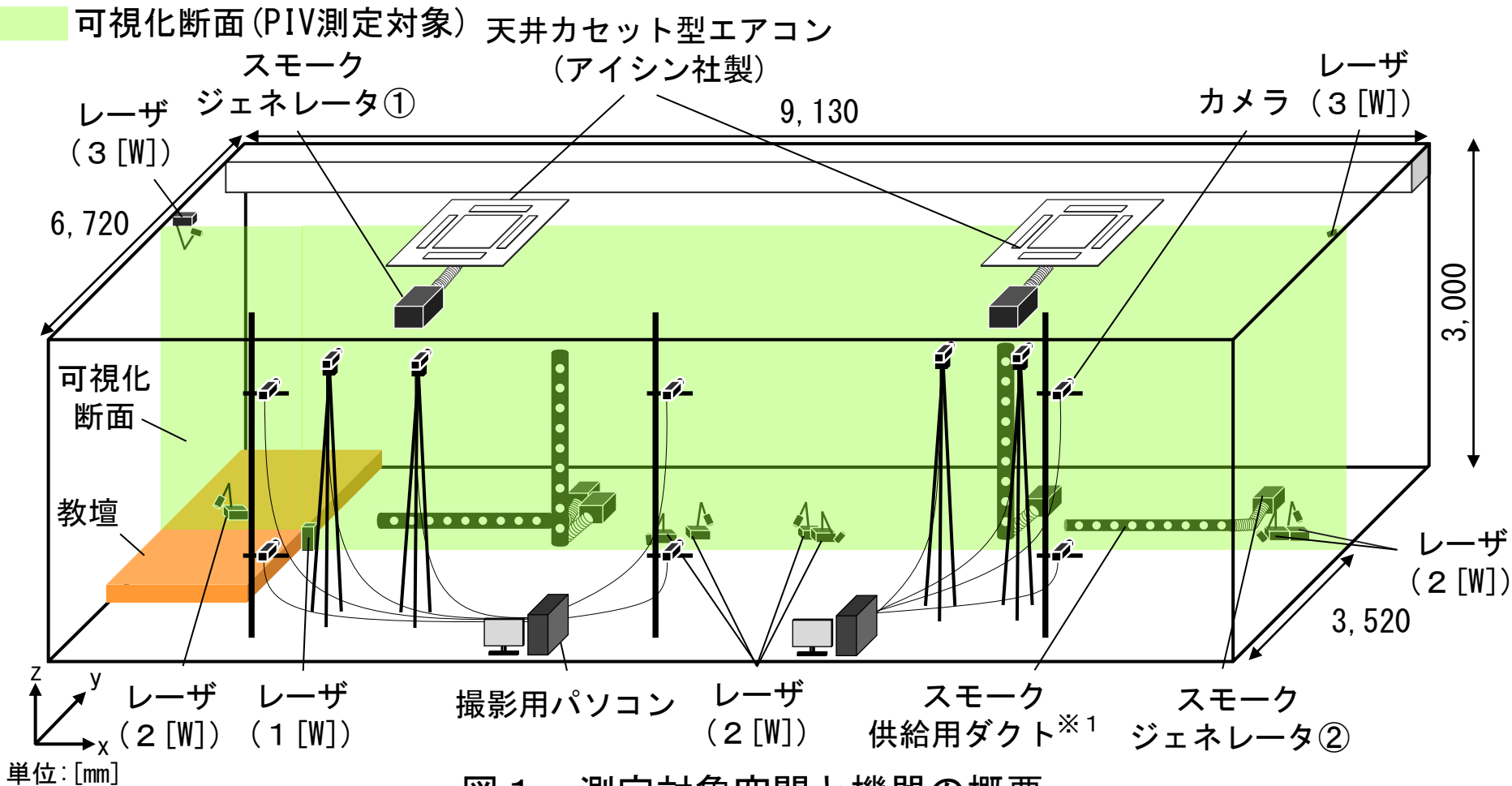


図1 測定対象空間と機器の概要

※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。

実験概要

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。

可視化断面 (PIV測定対象) 天井カセット型エアコン
(アイシン社製)

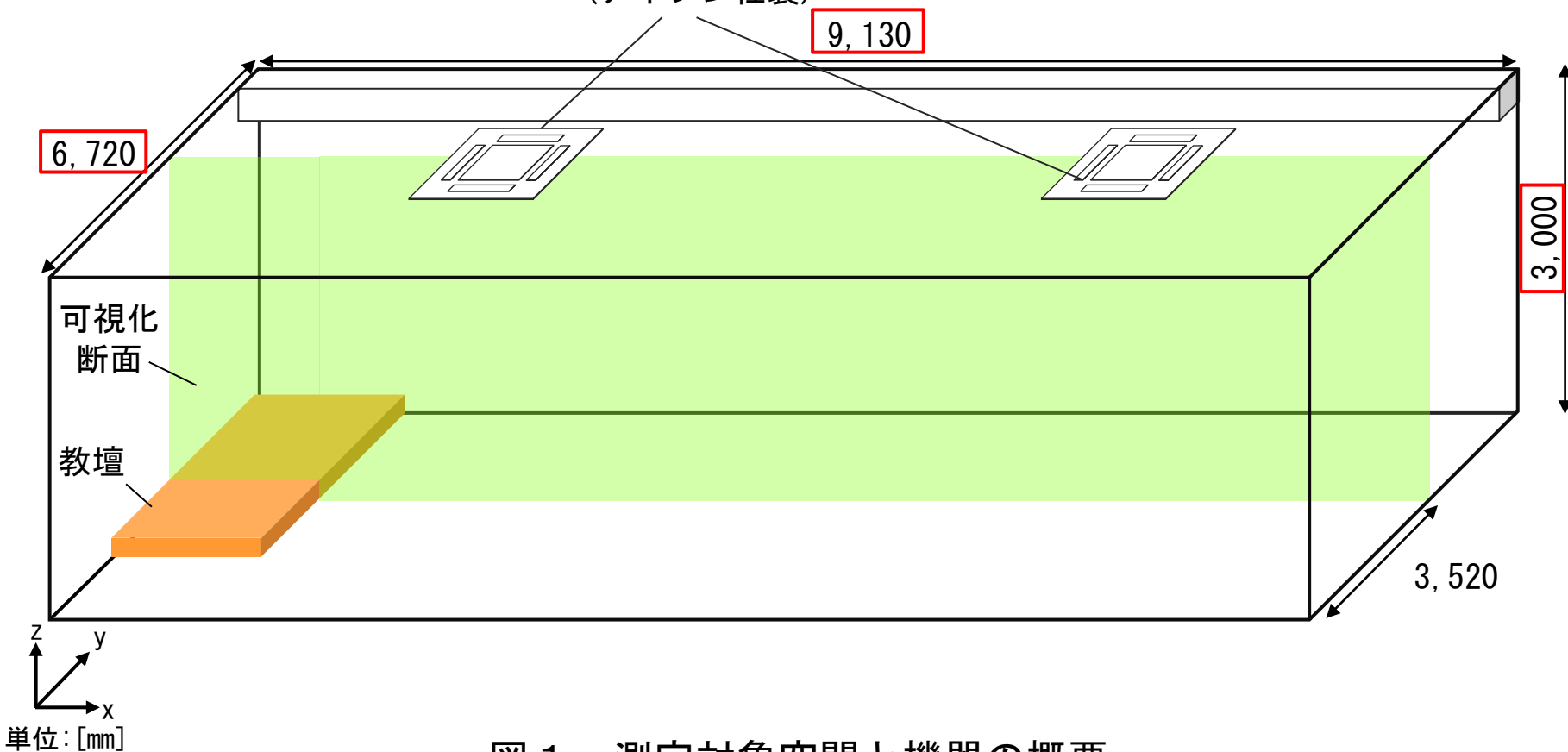


図1 測定対象空間と機器の概要

実験概要

天井カセット型エアコンは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。

可視化断面(PIV測定対象) 天井カセット型エアコン
(アイシン社製)

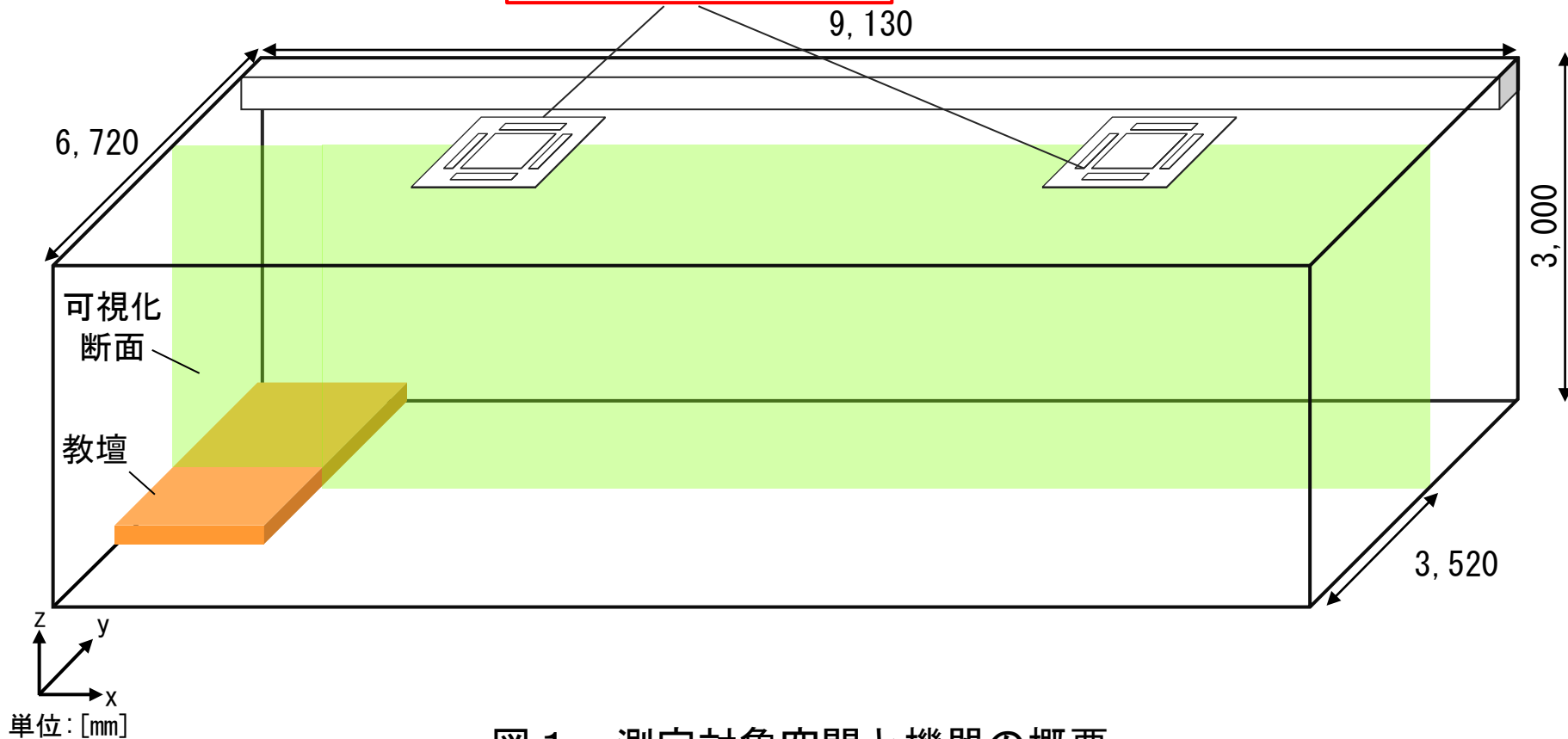


図1 測定対象空間と機器の概要

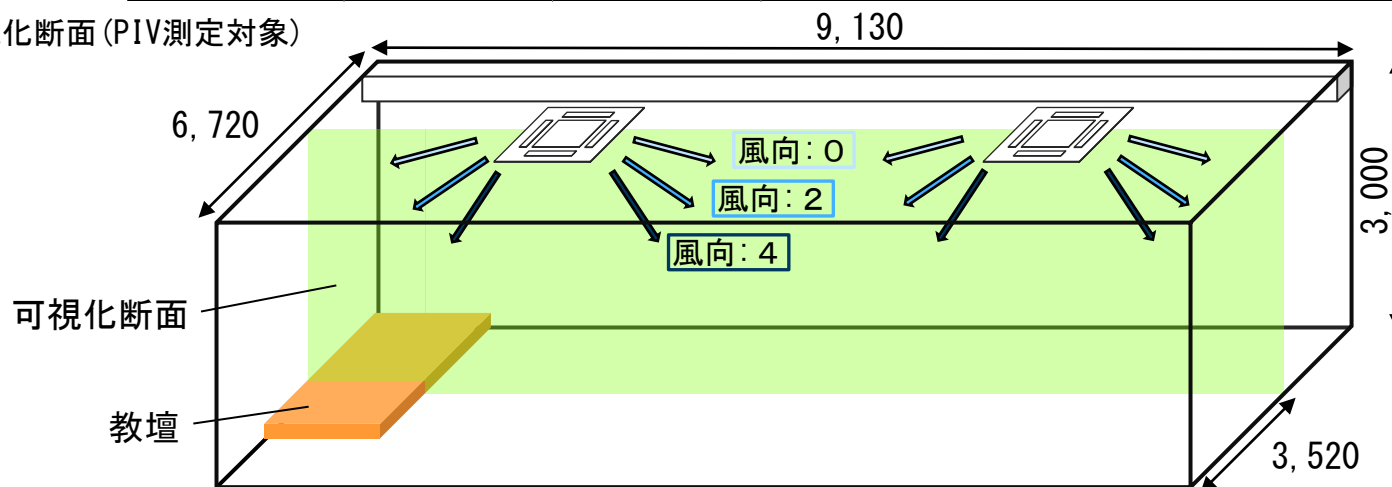
実験概要

case1は風向0（水平面から下向き19[°]）、case2は風向2（水平面から下向き34[°]）、case3は風向4（水平面から下向き53[°]）、case4はスイング運転とする。

表1 実験case

実験case	空調条件	循環風量	吹出風向(風向角)
case1	送風運転 (等温)	急	風向0 (水平面から下向き19[°])
case2			風向2 (水平面から下向き34[°])
case3			風向4 (水平面から下向き53[°])
case4			スイング運転

可視化断面 (PIV測定対象)



単位: [mm]

図1 測定対象空間と機器の概要

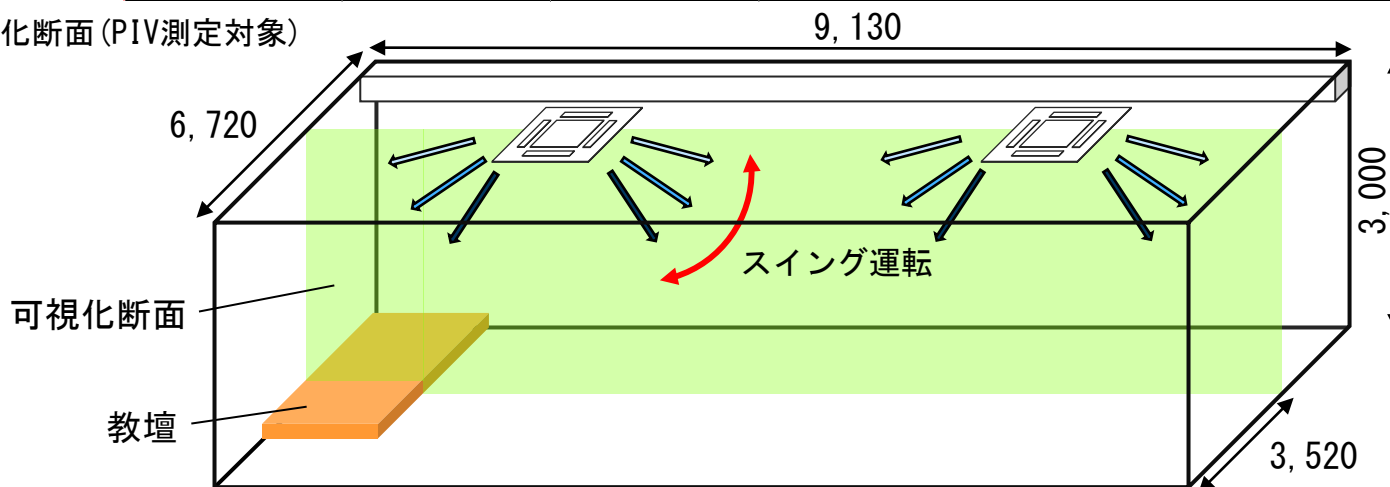
実験概要

case1は風向 0 (水平面から下向き $19[^\circ]$)、case2は風向 2 (水平面から下向き $34[^\circ]$)、case3は風向 4 (水平面から下向き $53[^\circ]$)、**case4はスイング運転**とする。

表 1 実験case

実験case	空調条件	循環風量	吹出風向(風向角)
case1	送風運転 (等温)	急	風向 0 (水平面から下向き $19[^\circ]$)
case2			風向 2 (水平面から下向き $34[^\circ]$)
case3			風向 4 (水平面から下向き $53[^\circ]$)
case4			スイング運転

可視化断面 (PIV測定対象)



単位: [mm]

図 1 測定対象空間と機器の概要

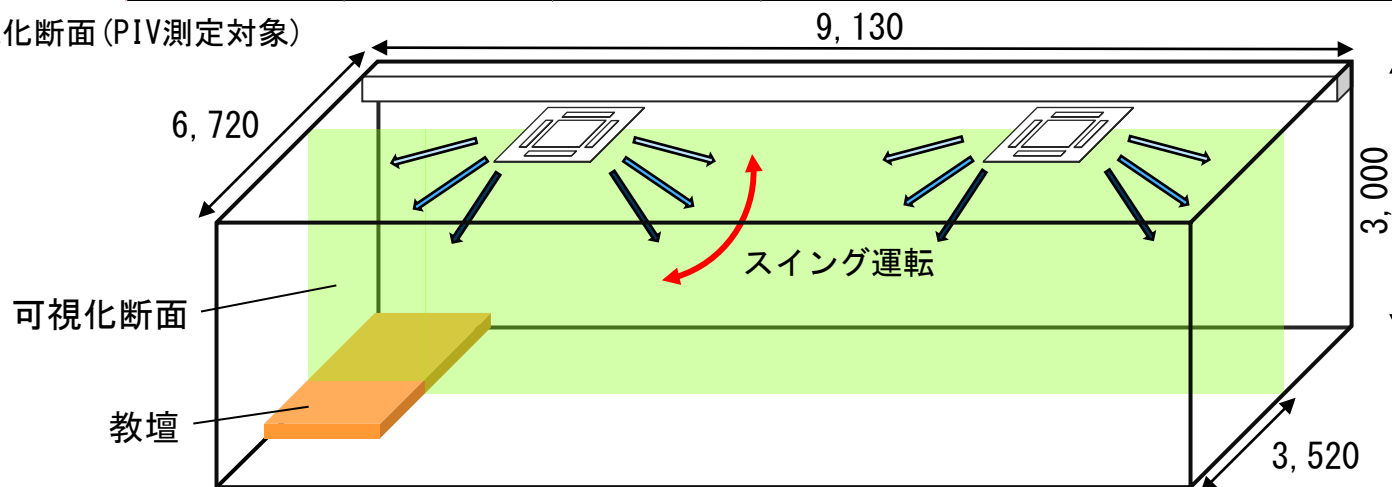
実験概要

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。

表1 実験case

実験case	空調条件	循環風量	吹出風向(風向角)
case1	送風運転 (等温)	急	風向0 (水平面から下向き19[°])
case2			風向2 (水平面から下向き34[°])
case3			風向4 (水平面から下向き53[°])
case4			スイング運転

可視化断面 (PIV測定対象)



単位: [mm]

図1 測定対象空間と機器の概要

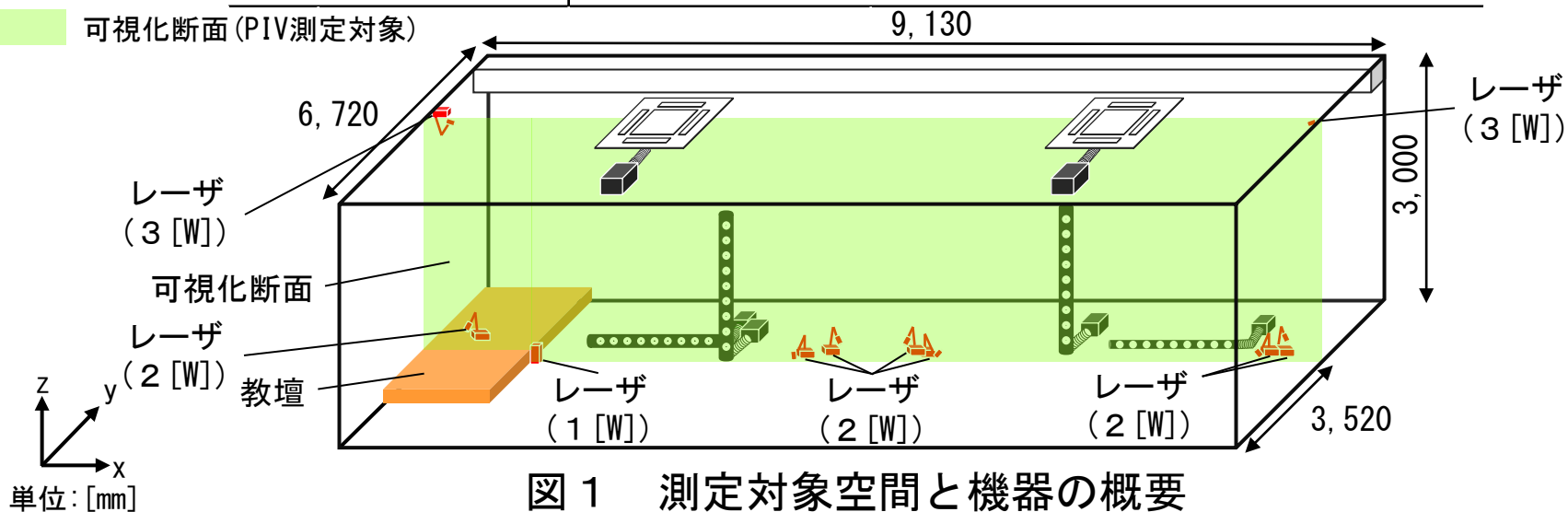
実験概要

可視化には**連続光レーザー**を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台用いる。

表2 測定機器の仕様

カメラ	カメラA	工業用カメラ×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]	DPGL-3W×2台
		出力：2[W]	DPGL-2W×7台
		出力：1[W]	G1000×1台
スモークジェネレータ	スモークジェネレータ①	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 2台	
	スモークジェネレータ②	Officek 400W FOG MACHINE × 4台	
解析ツール	FlowExpert ver1.2.13		

可視化断面 (PIV測定対象)



実験概要

可視化には連続光レーザーを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台用いる。

表2 測定機器の仕様

カメラ		カメラA	工業用カメラ × 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]	DPGL-3W × 2台
		出力：2 [W]	DPGL-2W × 7台
		出力：1 [W]	G1000 × 1台
スモークジェネレータ		スモークジェネレータ①	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 2台
		スモークジェネレータ②	Officek 400W FOG MACHINE × 4台
解析ツール		FlowExpert ver1.2.13	

可視化断面 (PIV測定対象)

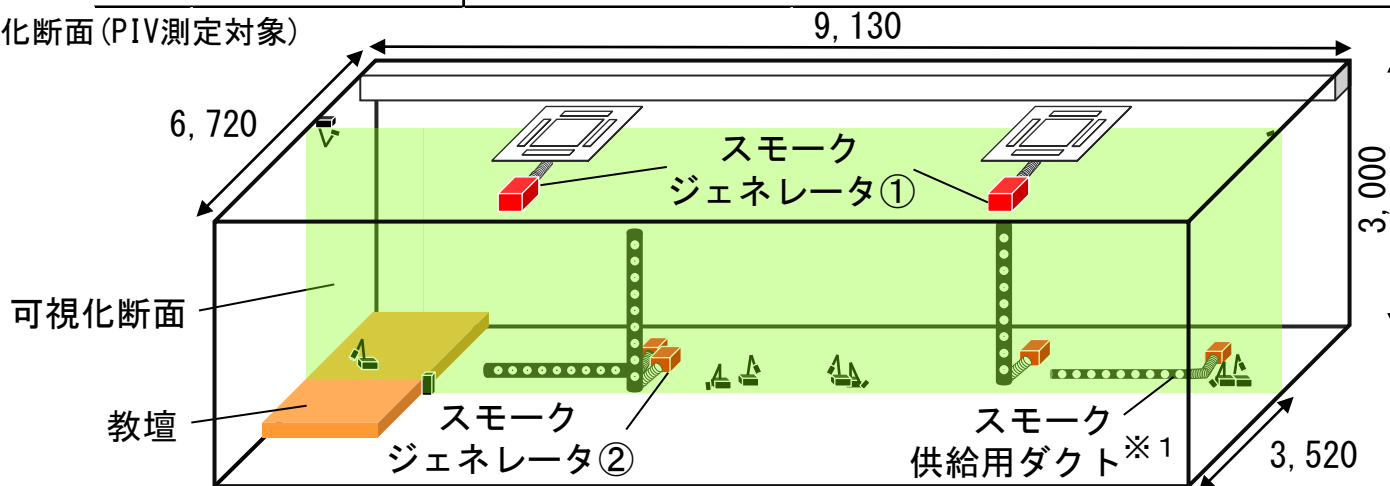


図1 測定対象空間と機器の概要

※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。

実験概要

10台のレーザーはそれぞれの照射断面を一致させるように配置する。

表2 測定機器の仕様

カメラ	カメラA	工業用カメラ×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]	DPGL-3W×2台
		出力：2[W]	DPGL-2W×7台
		出力：1[W]	G1000×1台
スモークジェネレータ	スモークジェネレータ①	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 2台	
	スモークジェネレータ②	Officek 400W FOG MACHINE × 4台	
解析ツール	FlowExpert ver1.2.13		

可視化断面 (PIV測定対象)

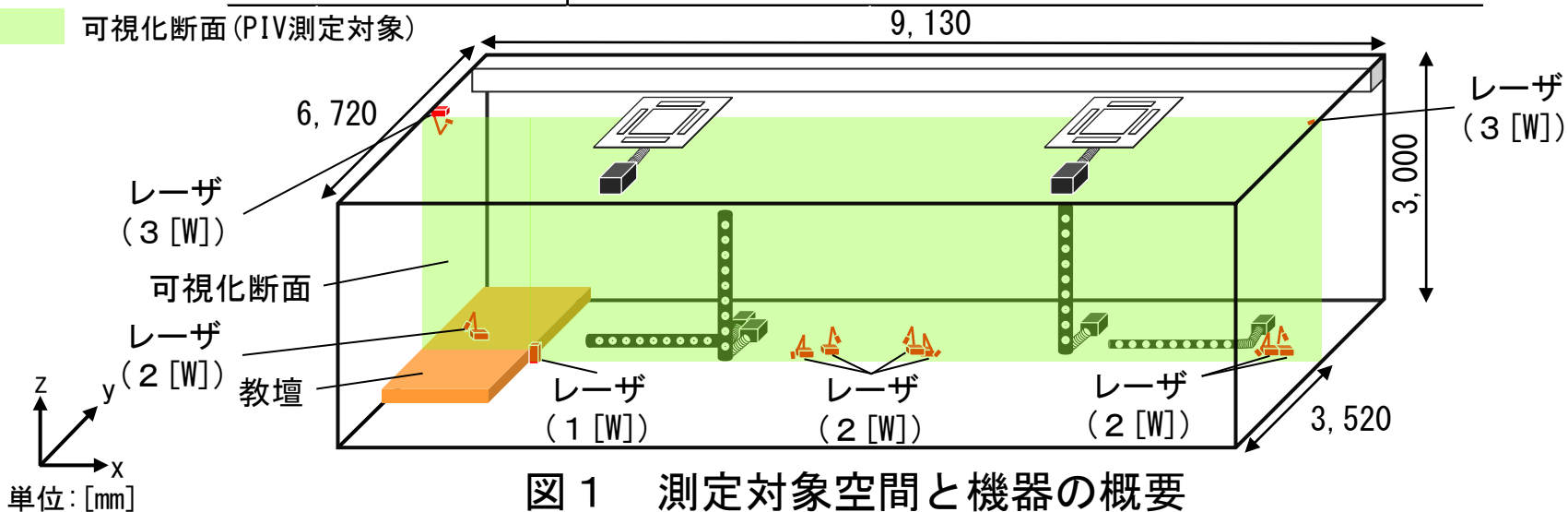


図1 測定対象空間と機器の概要

実験概要

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。

表2 測定機器の仕様

カメラ		カメラA	工業用カメラ×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]	DPGL-3W×2台
		出力：2[W]	DPGL-2W×7台
		出力：1[W]	G1000×1台
スモークジェネレータ		スモークジェネレータ①	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 2台
		スモークジェネレータ②	Officek 400W FOG MACHINE × 4台
解析ツール		FlowExpert ver1.2.13	

可視化断面 (PIV測定対象)

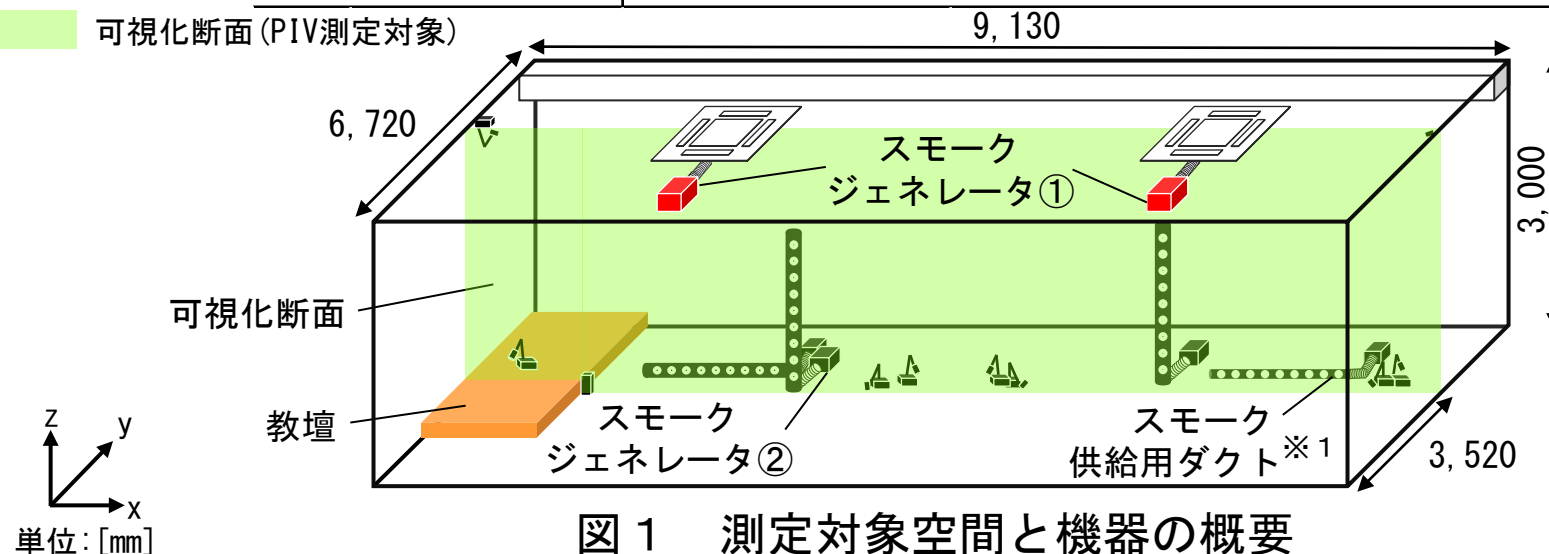


図1 測定対象空間と機器の概要

※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。

実験概要

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。

表2 測定機器の仕様

カメラ		カメラA	工業用カメラ×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]	DPGL-3W×2台
		出力：2[W]	DPGL-2W×7台
		出力：1[W]	G1000×1台
スモークジェネレータ		スモークジェネレータ①	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 2台
		スモークジェネレータ②	Officek 400W FOG MACHINE × 4台
解析ツール		FlowExpert ver1.2.13	

可視化断面 (PIV測定対象)

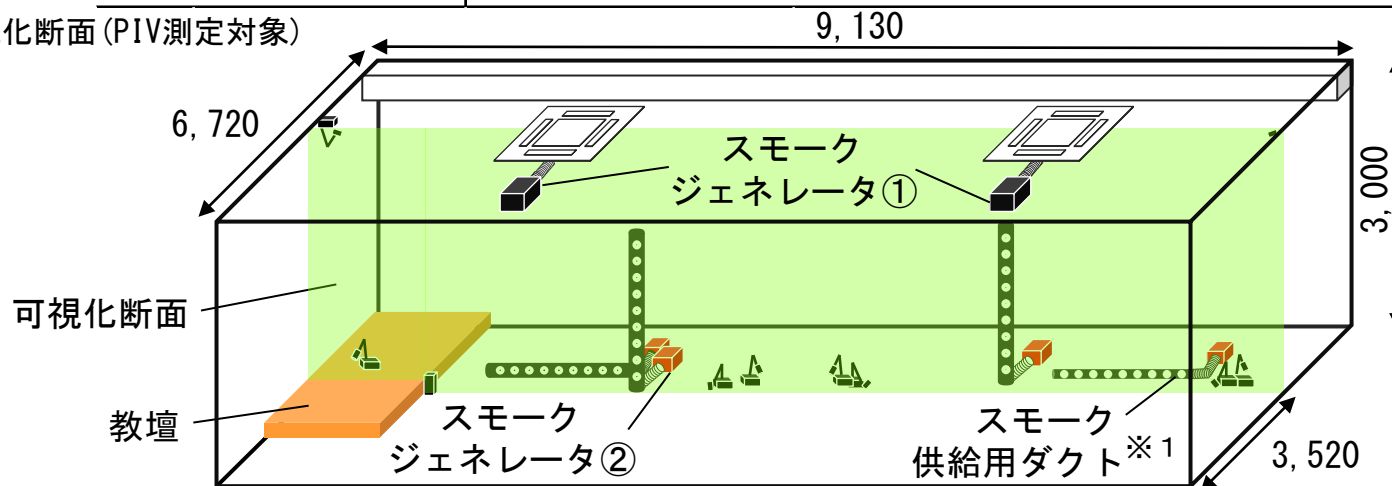


図1 測定対象空間と機器の概要

単位：[mm]

※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。

実験概要

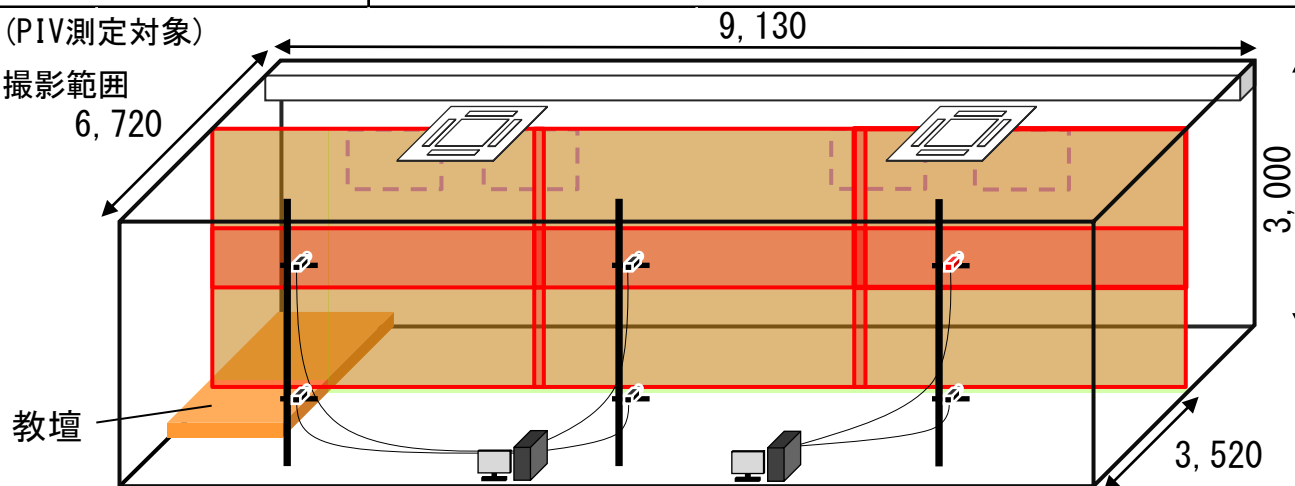
カメラは計10台使用し、**カメラAは測定対象断面を6分割する
ように6台配置する。**

表2 測定機器の仕様

カメラ		カメラA	工業用カメラ×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]	DPGL-3W×2台
		出力：2[W]	DPGL-2W×7台
		出力：1[W]	G1000×1台
スモークジェネレータ		スモークジェネレータ①	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 2台
		スモークジェネレータ②	Officek 400W FOG MACHINE × 4台
解析ツール		FlowExpert ver1.2.13	

可視化断面 (PIV測定対象)

各カメラの撮影範囲



単位：[mm]

図1 測定対象空間と機器の概要

実験概要

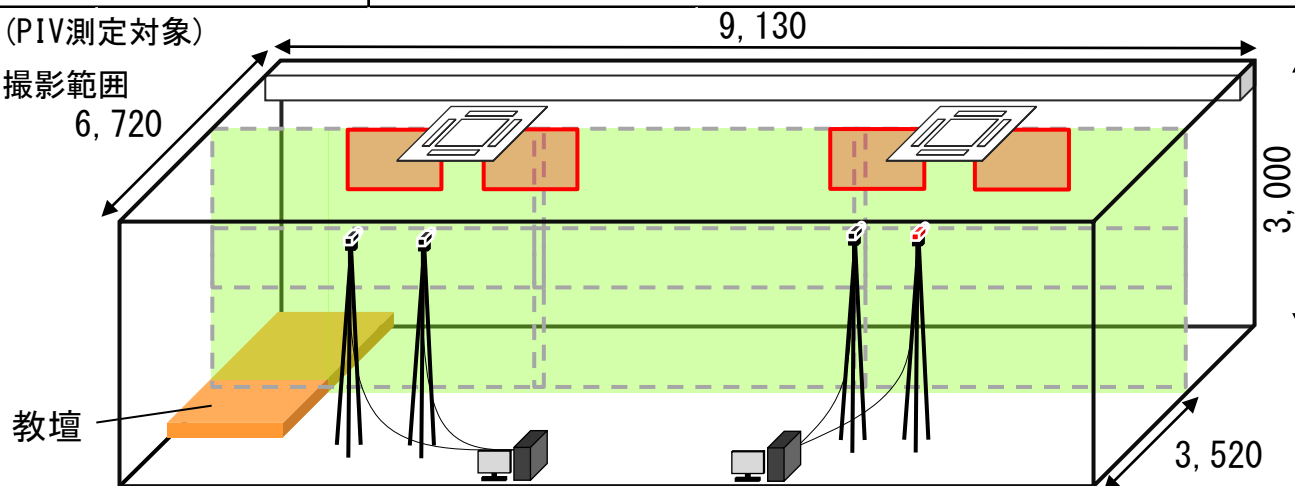
カメラBはエアコン吹出気流を詳細に撮影するため各吹出口に接近して配置する。

表2 測定機器の仕様

カメラ		カメラA	工業用カメラ×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]	DPGL-3W×2台
		出力：2[W]	DPGL-2W×7台
		出力：1[W]	G1000×1台
スモークジェネレータ		スモークジェネレータ①	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 2台
		スモークジェネレータ②	Officek 400W FOG MACHINE × 4台
解析ツール		FlowExpert ver1.2.13	

可視化断面 (PIV測定対象)

各カメラの撮影範囲



単位：[mm]

図1 測定対象空間と機器の概要

実験概要

撮影時間は10秒間とし、PIV解析にはFlowExpert ver. 1.2.13を使用する。

表2 測定機器の仕様

カメラ		カメラA	工業用カメラ×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]	DPGL-3W×2台
		出力：2[W]	DPGL-2W×7台
		出力：1[W]	G1000×1台
スモークジェネレータ		スモークジェネレータ①	Antari FOG MACHINE Z-1200 II × 2台
		スモークジェネレータ②	Officek 400W FOG MACHINE × 4台
解析ツール		FlowExpert ver1.2.13	

可視化断面 (PIV測定対象)

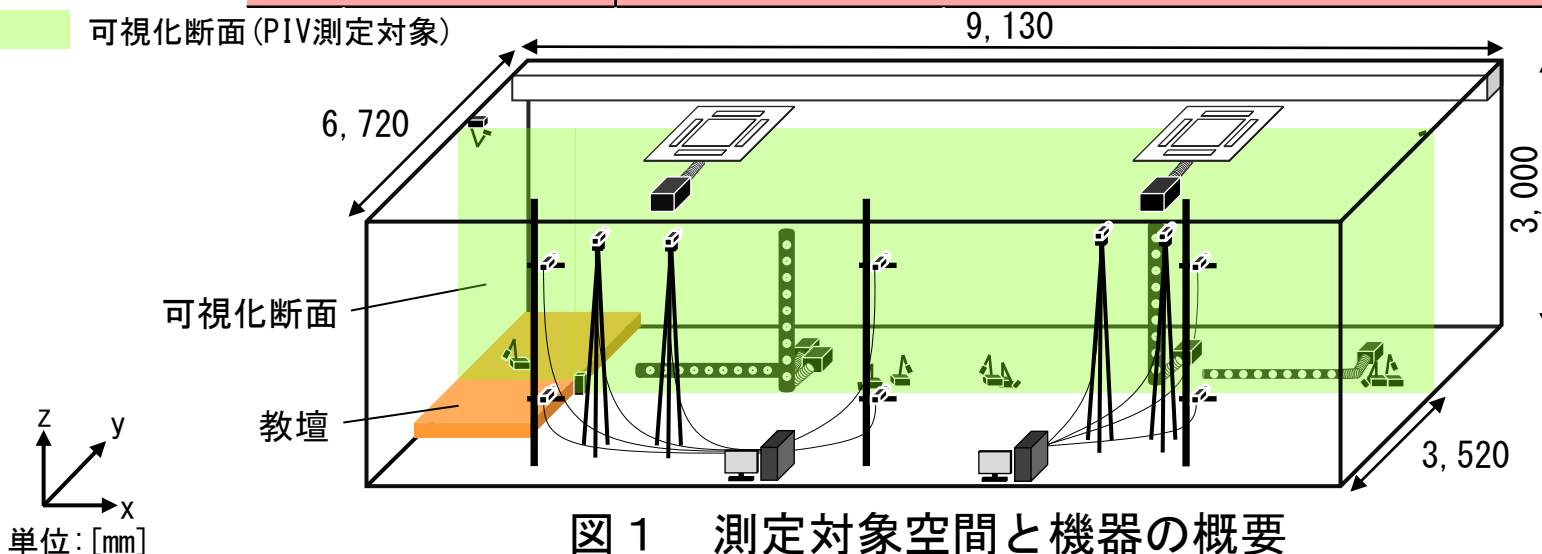


図1 測定対象空間と機器の概要

実験概要

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**。

表3 PIV測定パラメータ

カメラ	カメラA				カメラB				
PIV解析手法	直接相互関連法								
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				
探査領域 [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

※² 撮影画像間隔と実際の距離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で算出された風速ベクトルを選択する。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。

文3) 小栗・赤林ら「実大室内空間モデルを対象とした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

実験概要

既往の研究^{文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**で解析を行い、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。

表3 PIV測定パラメータ

カメラ	カメラA				カメラB				
PIV解析手法	直接相互関連法								
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				
探査領域 [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

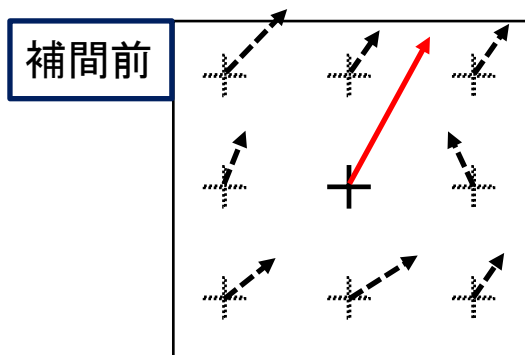
※2 撮影画像間隔と実際の距離の換算係数であるキャリブレーション値は、撮影断面に校正用プレートを設置して実際の距離が画像上で認識できるように撮影して求める。

※3 解析可能風速の範囲内にあるフレーム間隔で算出された風速ベクトルを選択する。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。

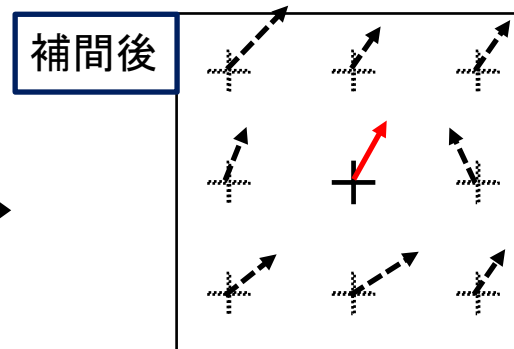
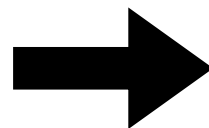
文3) 小栗・赤林ら「実大室内空間モデルを対象としたPIV解析に関する基礎的研究 その3 冷暖房時を対象としたPIV測定」、日本建築学会学術講演梗概集、2021年

実験概要

その後、既往の研究^{文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。



対象の測定点のスカラ風速: 2.0 [m/s]
 周囲8点の平均スカラ風速: 0.8 [m/s]



対象の測定点のスカラ風速: 0.8 [m/s]

- 対象の測定点のスカラ風速が周囲8点の平均スカラ風速の160[%]以上または40[%]以下で補間する場合
 周囲8点の平均スカラ風速 $0.8 \text{ [m/s]} \times 1.6 = 1.28 \text{ [m/s]} \leq$ 対象のスカラ風速 $2.0 \text{ [m/s]} \rightarrow$ 補間対象と判断

(a) 周囲8点の平均スカラ風速による補間 (空間補間)

図 PIV解析結果における誤ベクトルの補間による補正方法^{文2)}

※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。周囲8点の平均風速を求める際、平均化の対象とする周囲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。

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」、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、2022年

実験概要

各カメラの撮影範囲には**重複する領域**が存在する。

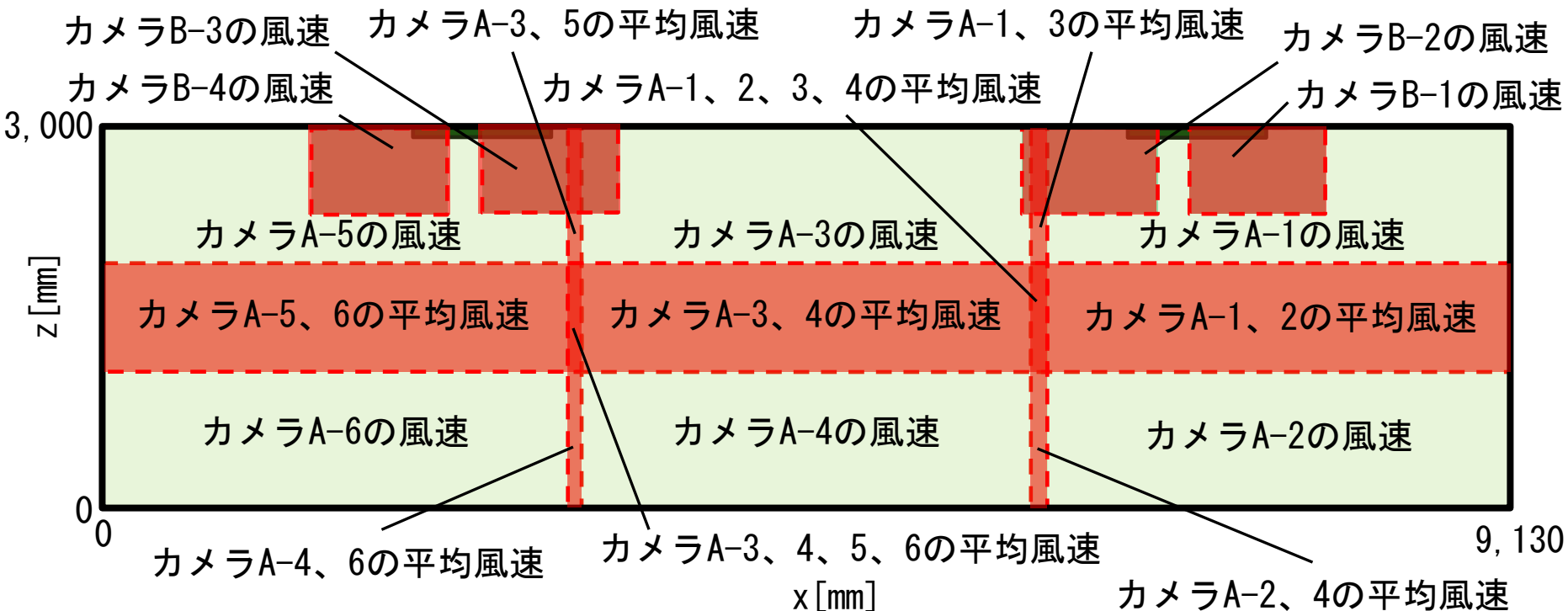


図2 可視化断面のカメラ配置とPIV解析結果の合成方法

実験概要

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。

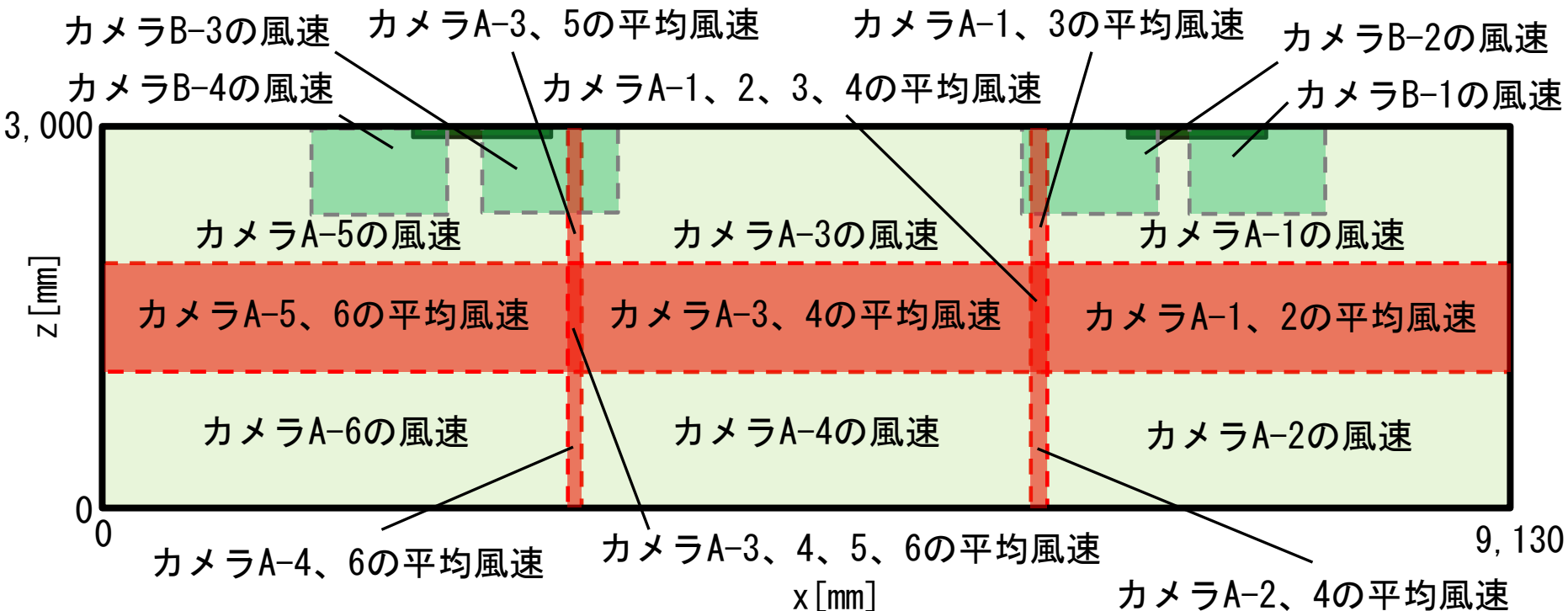


図2 可視化断面のカメラ配置とPIV解析結果の合成方法

実験概要

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。

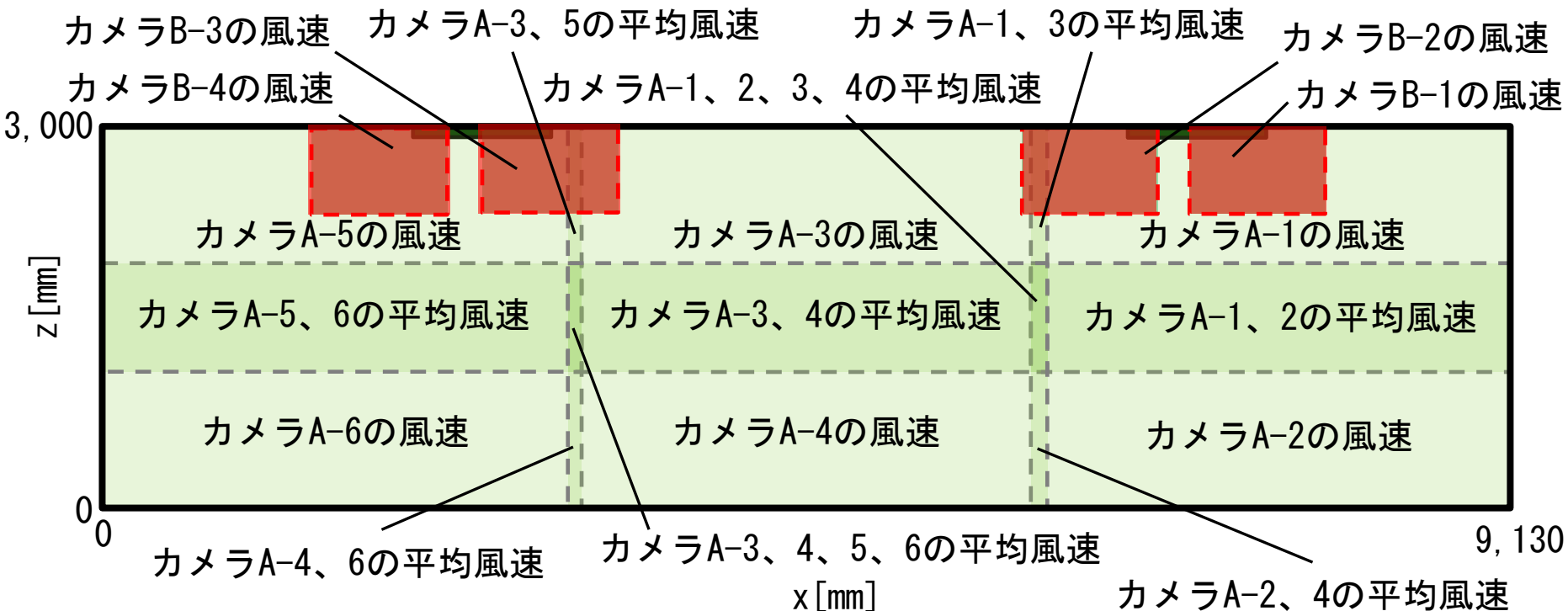
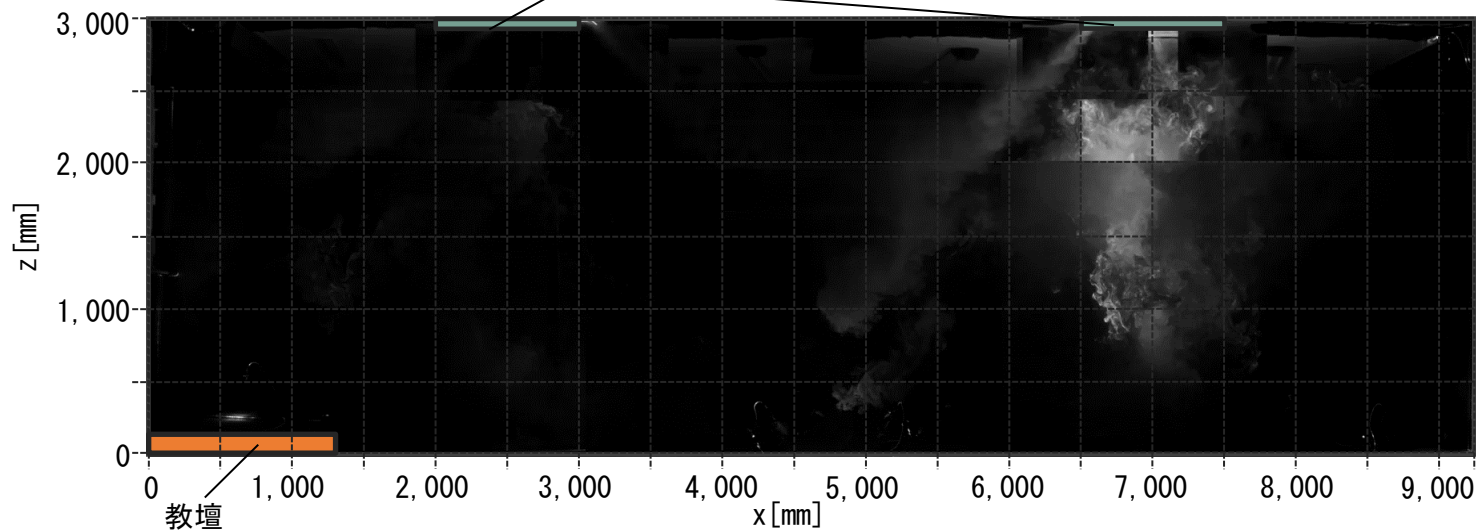


図2 可視化断面のカメラ配置とPIV解析結果の合成方法

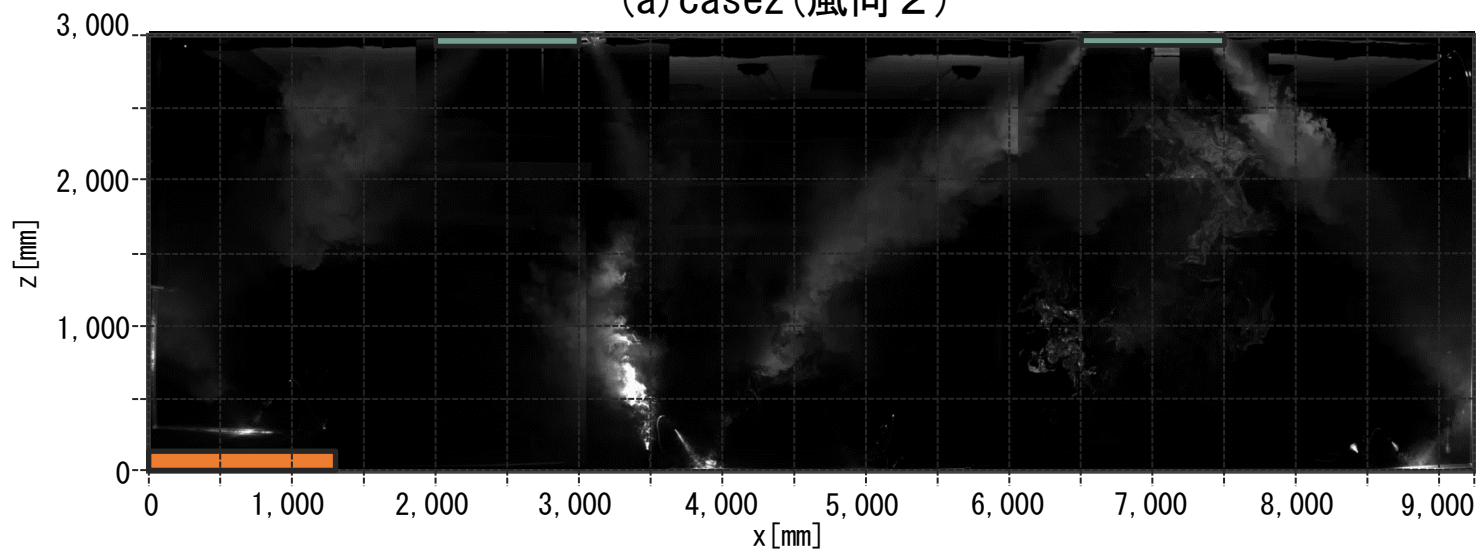
実験結果

実験結果

天井カセット型エアコン(アイシン社製)



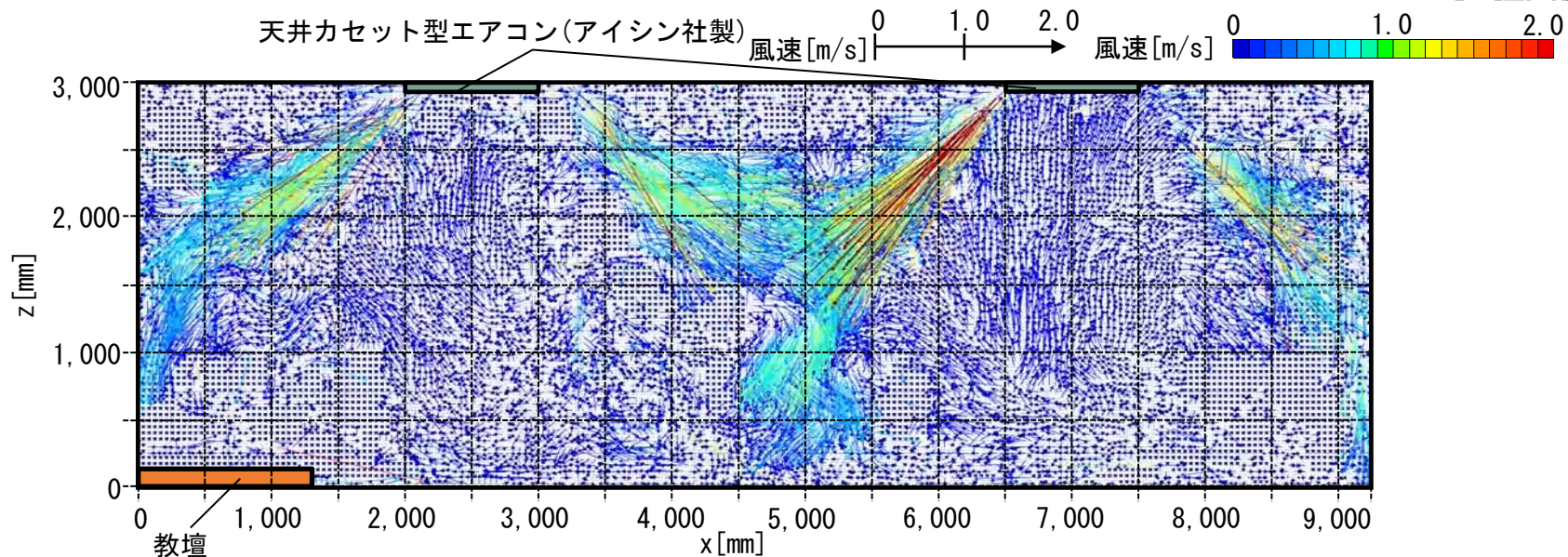
(a) case2 (風向 2)



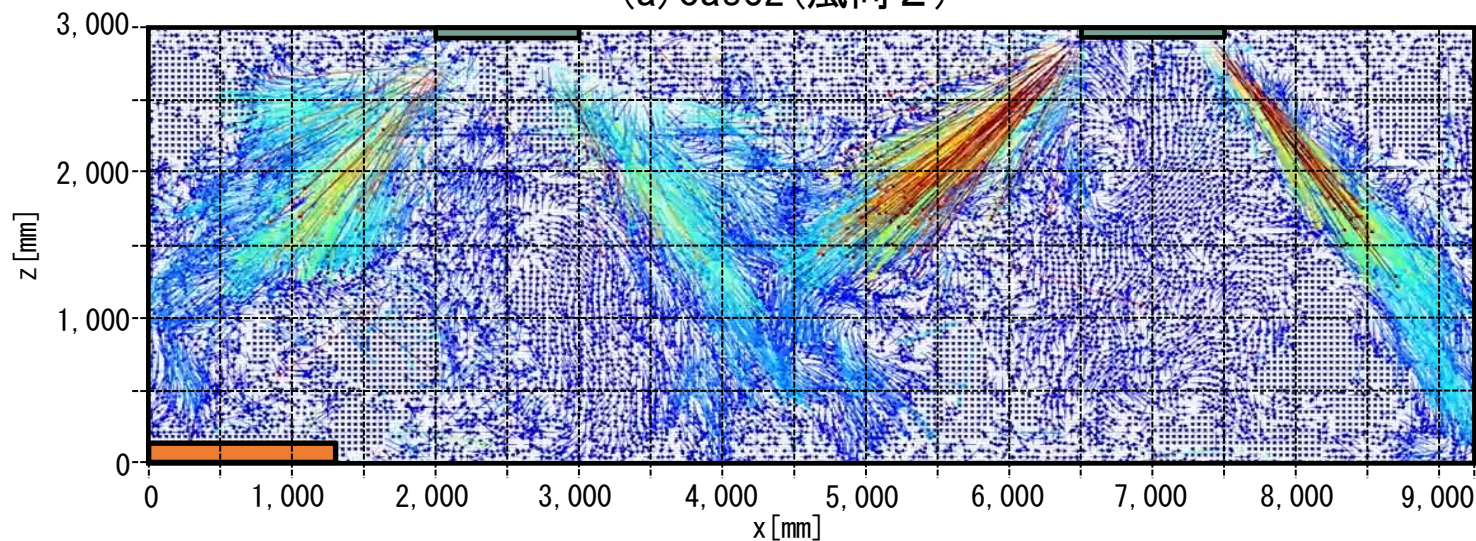
(b) case3 (風向 4)

動画 代表的なcaseにおける可視化結果

実験結果



(a) case2 (風向 2)

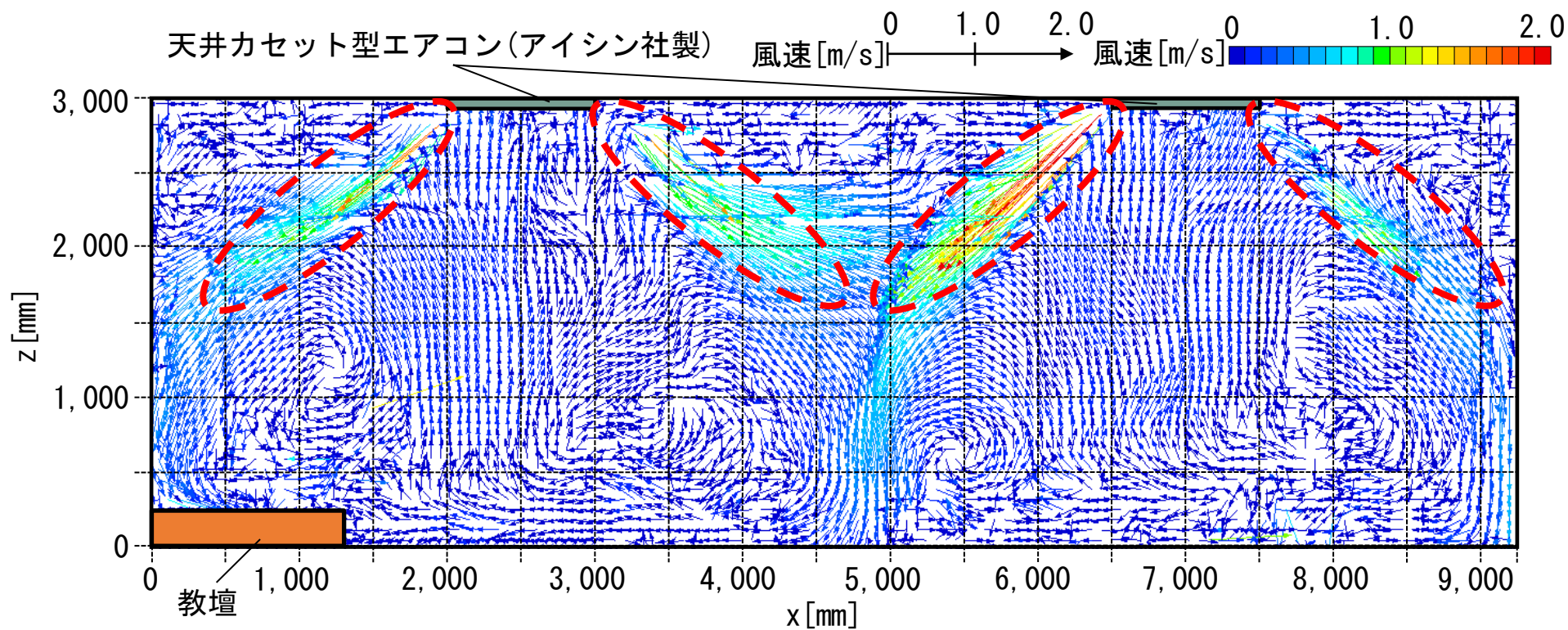


(b) case3 (風向 4)

動画 代表的なcaseにおける解析結果

実験結果：case2 (風向 2)

各エアコン吹出部分の中心で風速は1.0~2.0[m/s]となる。

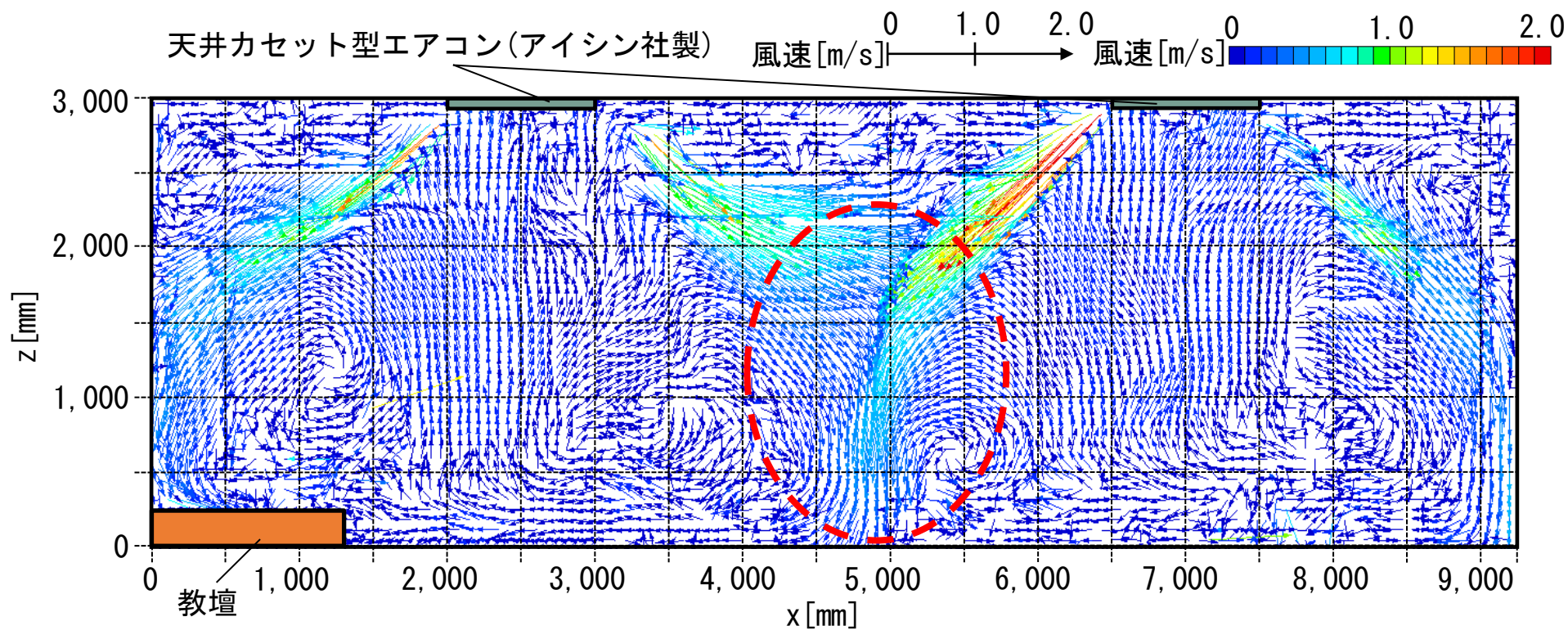


(a) case2 (風向 2)

図 3 代表的なcaseにおける平均風速ベクトル分布

実験結果：case2 (風向 2)

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**、風速約0.7[m/s]で **床面に到達し**、左右に分かれる。

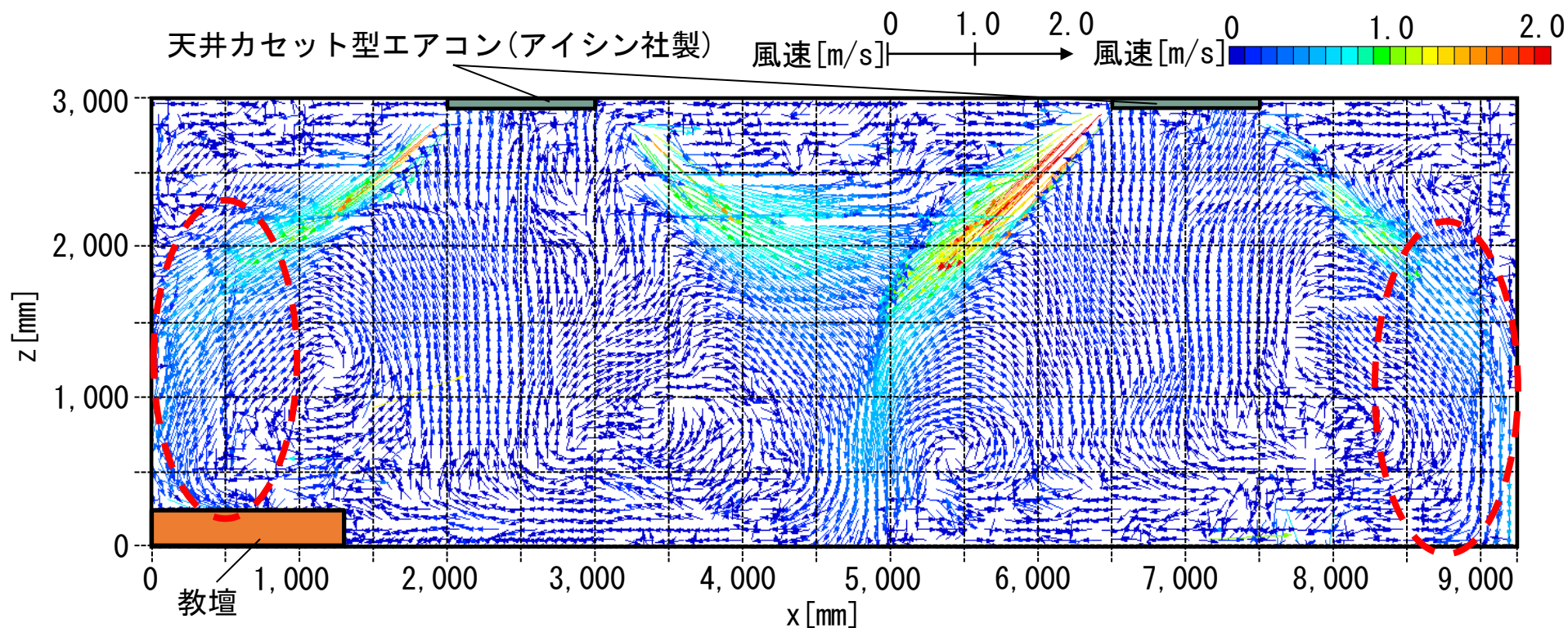


(a) case2 (風向 2)

図 3 代表的なcaseにおける平均風速ベクトル分布

実験結果：case2 (風向 2)

また、左右の壁に到達した吹出気流は風速約0.7 [m/s] で壁面に沿って床面に到達する。

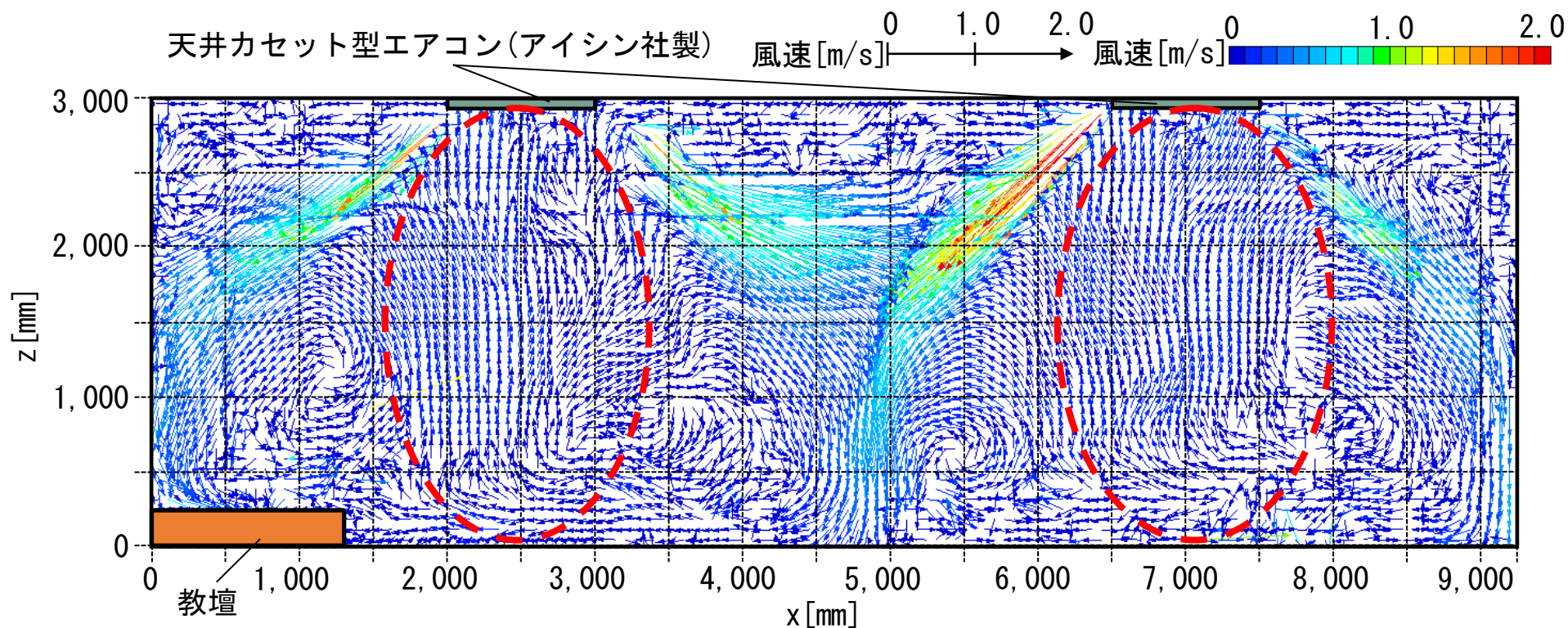


(a) case2 (風向 2)

図 3 代表的なcaseにおける平均風速ベクトル分布

実験結果：case2 (風向 2)

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、各エアコン下部では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。

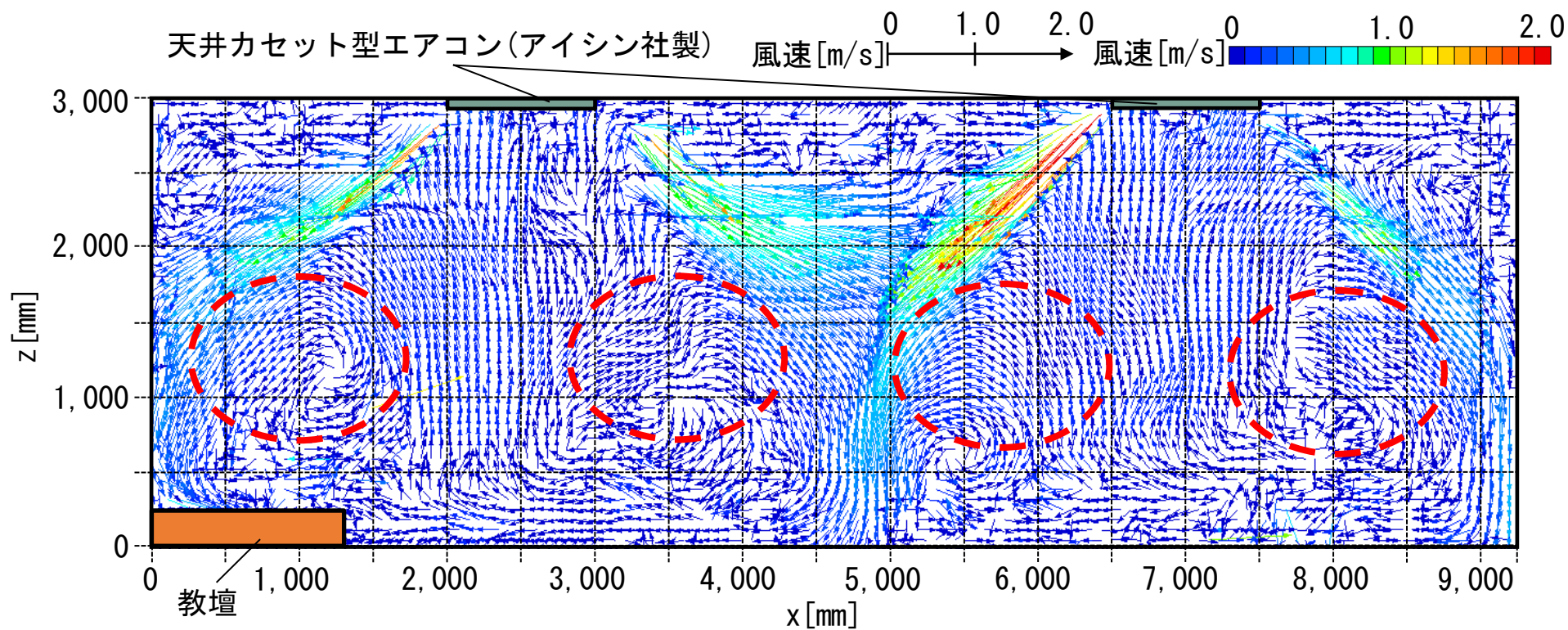


(a) case2 (風向 2)

図 3 代表的なcaseにおける平均風速ベクトル分布

実験結果：case2 (風向 2)

また、吹出気流に引き込まれるような**循環流を形成する。**

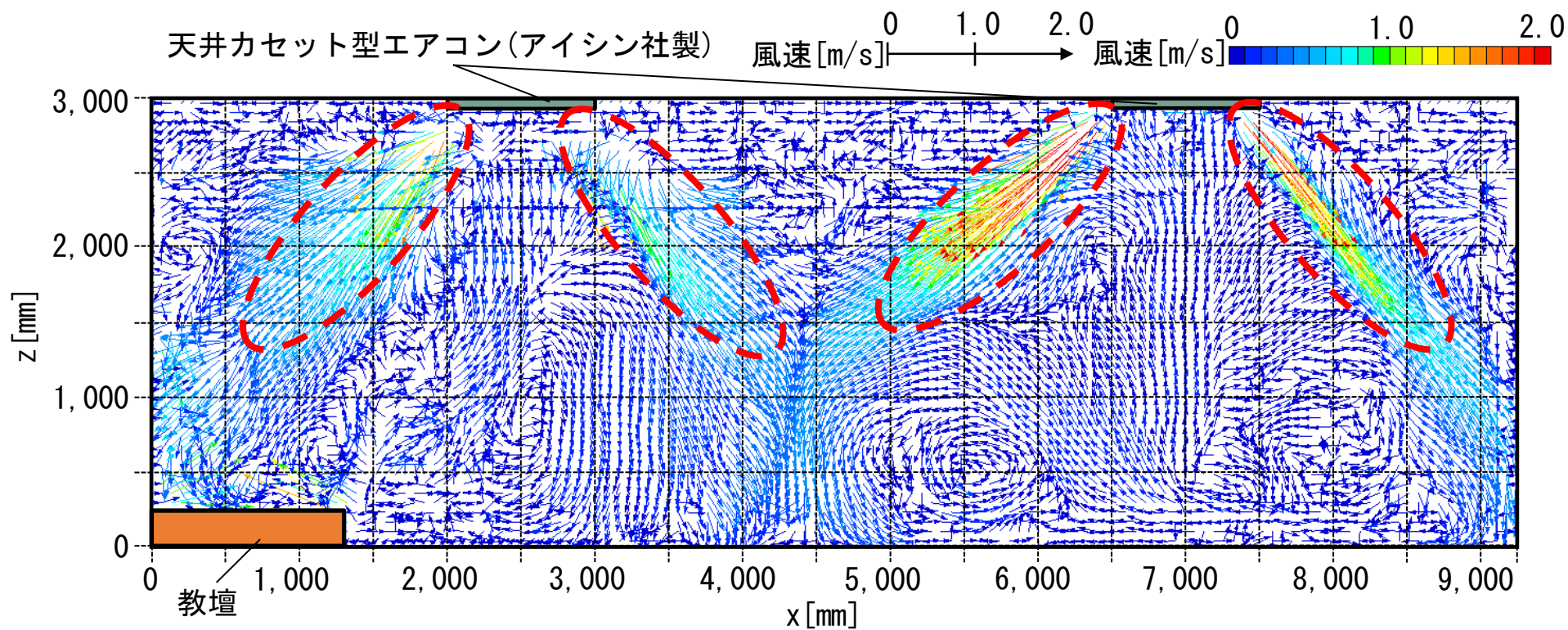


(a) case2 (風向 2)

図 3 代表的なcaseにおける平均風速ベクトル分布

実験結果：case3 (風向 4)

各エアコン吹出部分の中心で風速は1.4~2.0[m/s]となる。

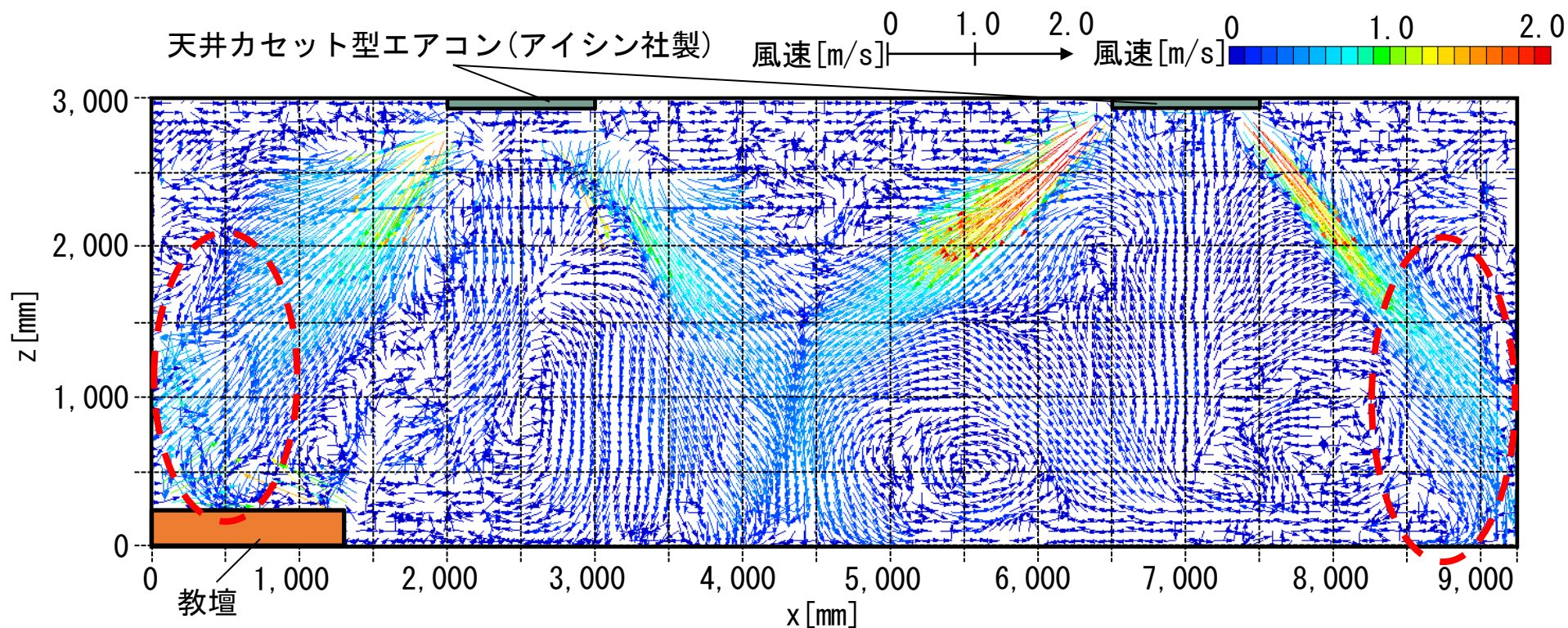


(a) case3 (風向 4)

図 3 代表的なcaseにおける平均風速ベクトル分布

実験結果：case3 (風向 4)

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
付近に風速約0.7 [m/s]で到達する。

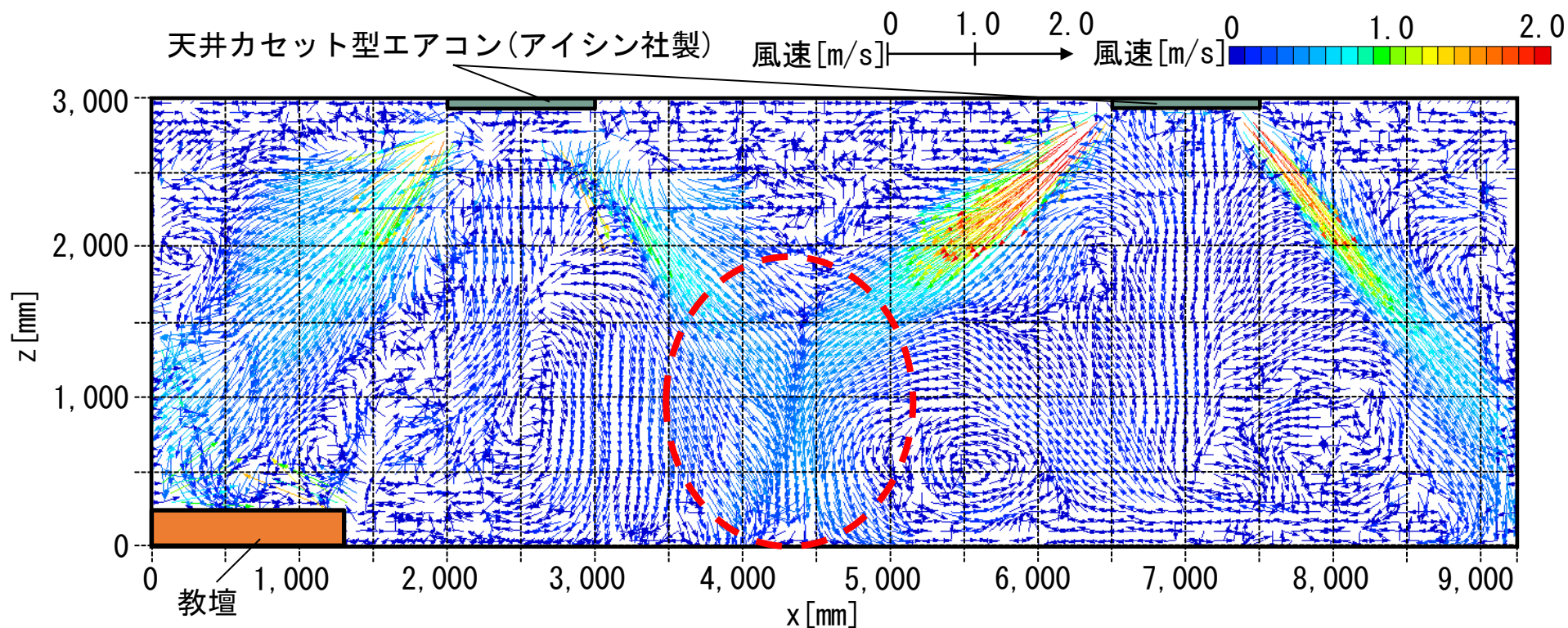


(a) case3 (風向 4)

図 3 代表的なcaseにおける平均風速ベクトル分布

実験結果: case3 (風向 4)

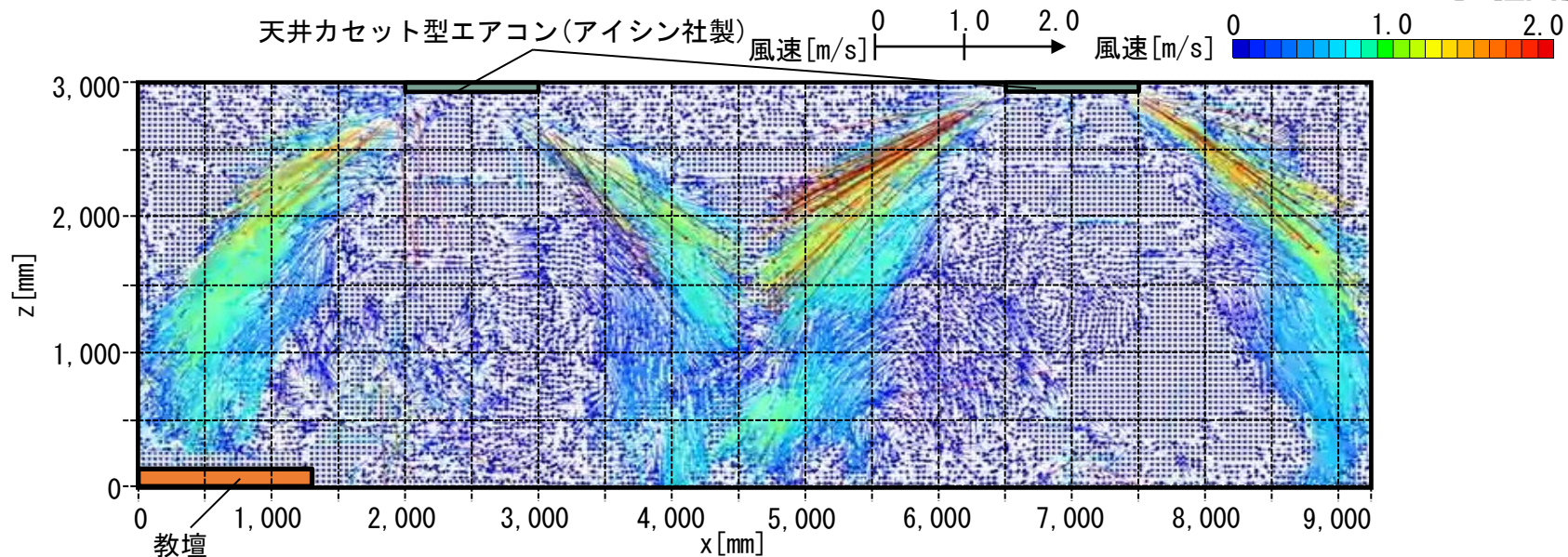
測定対象空間中央に向かう **2つの吹出気流** は中央から床面にかけて衝突し、床面付近で **左右に風速約0.6 [m/s]** で流れる。



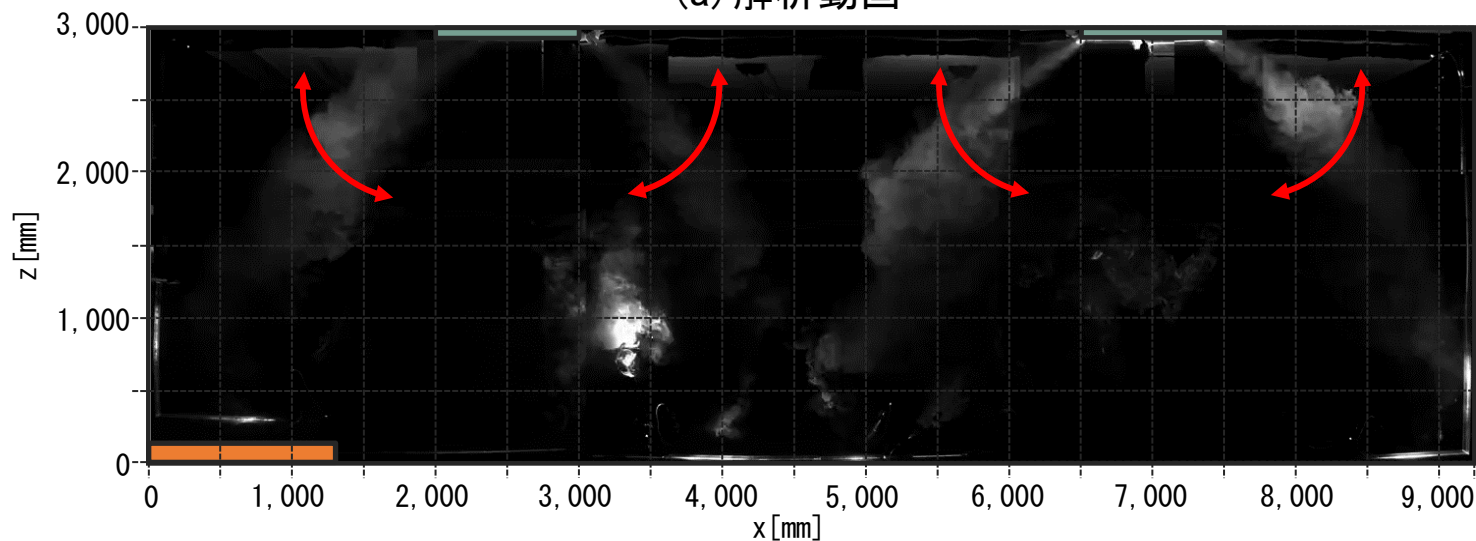
(a) case3 (風向 4)

図 3 代表的なcaseにおける平均風速ベクトル分布

実験結果: case4 (スイング運転)



(a) 解析動画



(b) 可視化動画

動画 case4 (スイング運転) における可視化・解析結果

まとめ

- ① case2(風向2)、case3(風向4)の各エアコン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caseでもエアコン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 case2(風向2)、case3(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気流が衝突する位置に違いはあるが、気流性状は概ね一致する。