

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

複数台のカメラを用いたPIV測定

指導教員 山根 優太
有波 裕貴 助教



研究目的

可視化画像から気流速度を解析する手法として、**粒子画像流速測定法**^{文1)} (以下PIV※¹⁾が挙げられる。

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3 [m] × 3 [m]程度**に測定範囲を拡大し、家庭用エアコンが設置された実験用チャンバーにおいて等温時の測定を行っている。

※1 PIV : Particle Image Velocimetryの略称。流れの中に微細なトレーサ粒子を混入させ、その動きを動画として撮影し、個々の微粒子あるいは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方法の総称。

文1) 可視化情報学会 : 「PIVハンドブック」森北出版株式会社、2002年

文2) 本多、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2 フレーム間隔をパラメータとした解析」日本建築学会学術講演梗概集、2021年

研究目的

本研究では、新たに作成した実験用チャンバーを対象に**測定範囲の拡大**を行う。

流れの可視化及びPIVによる**定量的な風速ベクトルの解析**を行い、**実大室内空間の気流性状**の把握を目的とする。

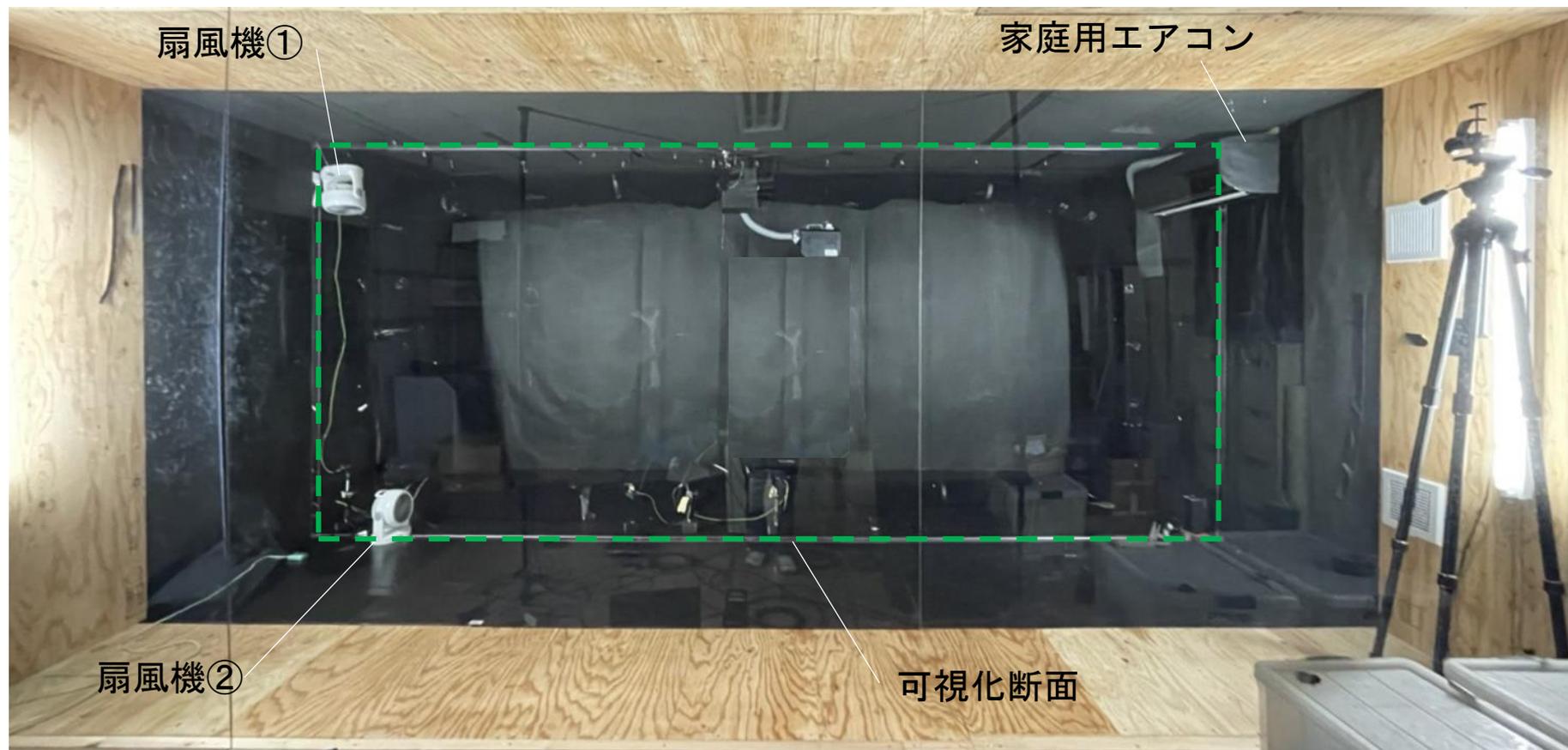


図 対象とする実験用チャンバーの写真

実験概要

実験用チャンバーは5,000 [mm] (幅) × 2,200 [mm] (高さ) × 3,000 [mm] (奥行き) であり、1つの壁面は撮影のため透明なアクリル板で作成する。

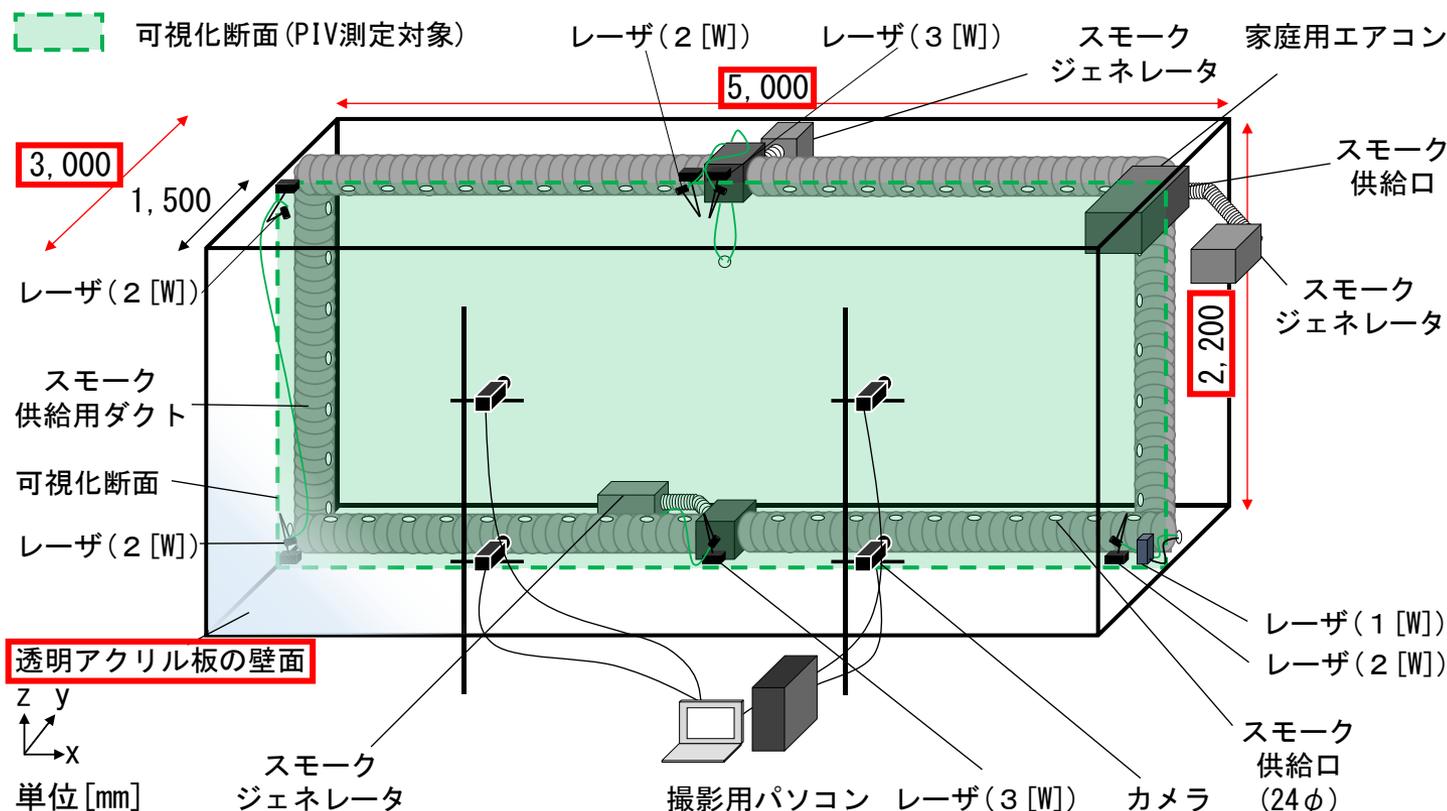


図1 対象とする室内空間の概要 (case1)

実験概要

PIV測定対象はチャンバーの**中心の鉛直断面** ($y=1,500$ [mm]) とする。

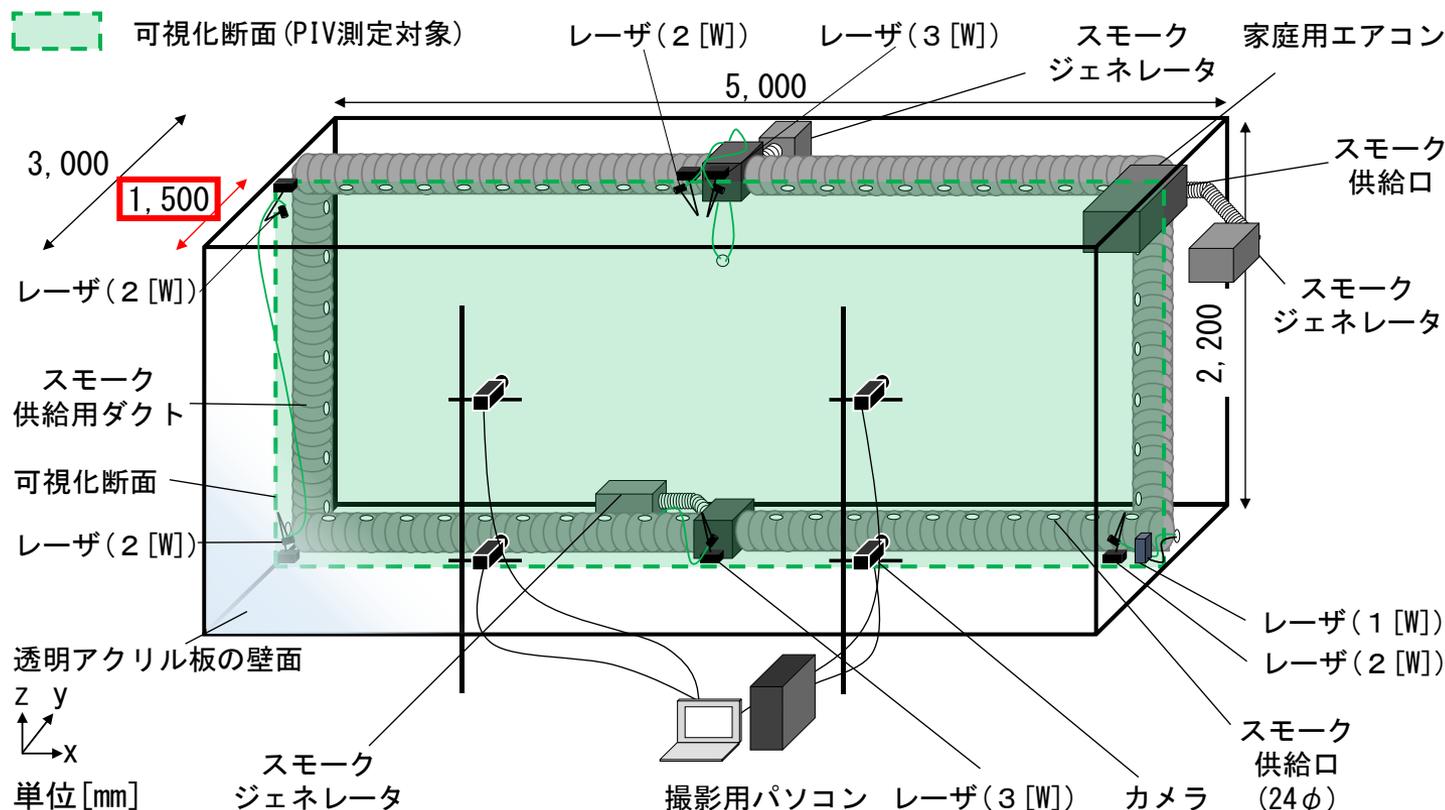


図1 対象とする室内空間の概要 (case1)

実験概要

右側壁面上部に設置された家庭用エアコンは**送風運転**（吹出風
向
下向き38[°]）とする。

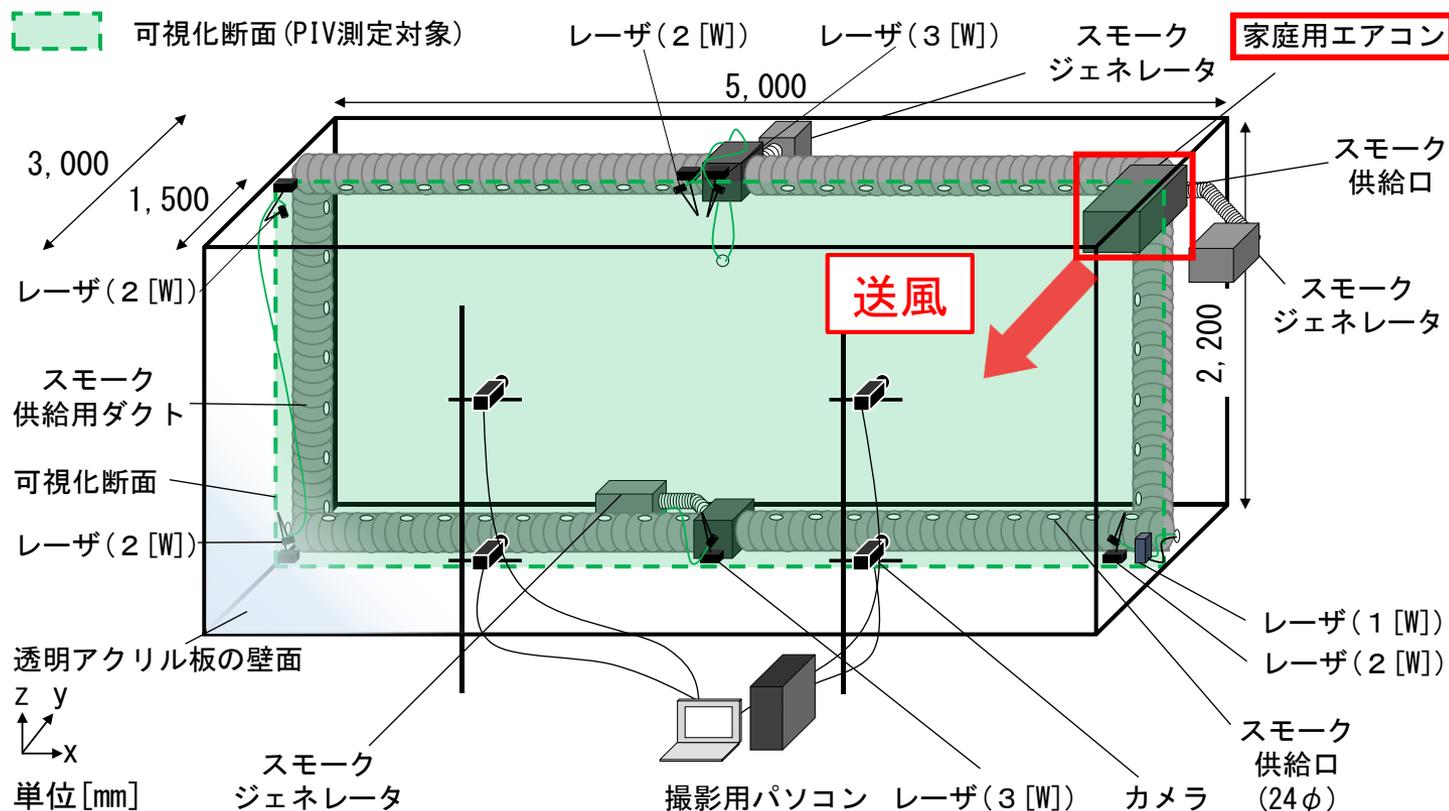


図 1 対象とする室内空間の概要 (case1)

実験概要

実験は**等温**で行う。実験条件は、case1:家庭用エアコンのみを稼働させる場合とcase2:家庭用エアコンと扇風機2台を稼働させる場合の2 caseとする。

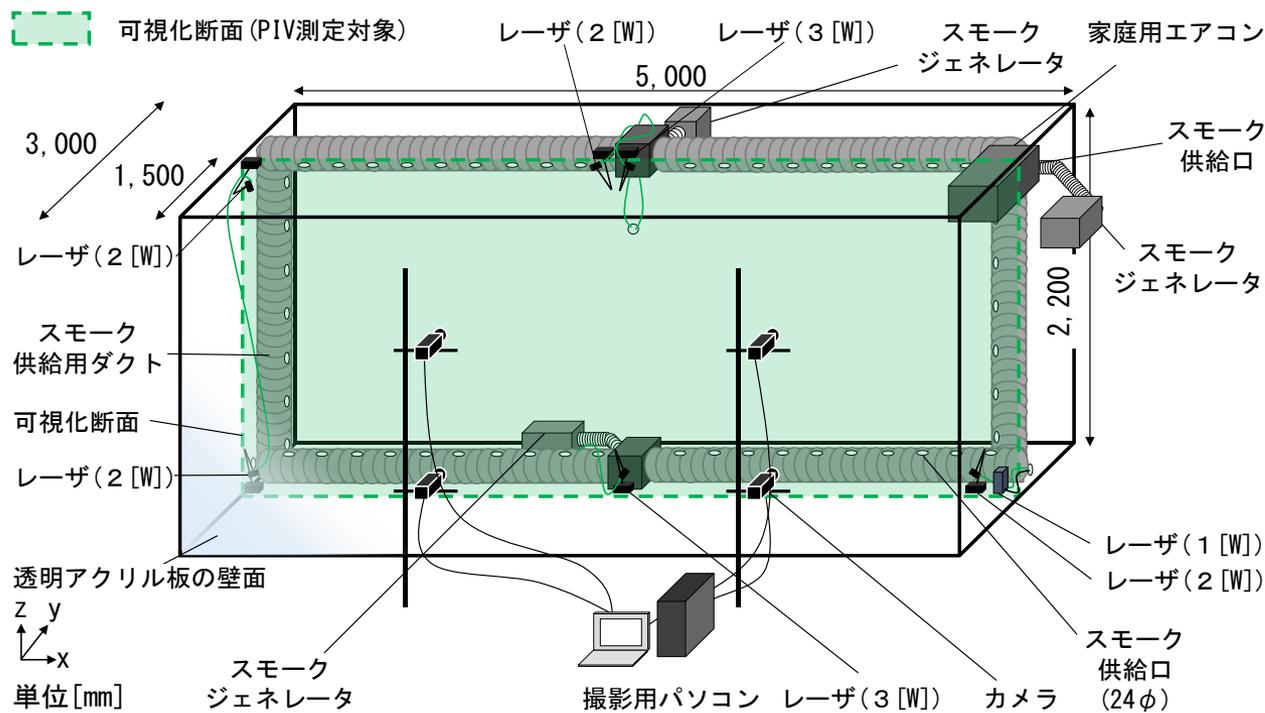


表 実験条件

	気流場の生成方法
case1	家庭用エアコン
case2	家庭用エアコン+扇風機2台

図1 対象とする室内空間の概要 (case1)

実験概要

実験は等温で行う。実験条件は、**case1: 家庭用エアコンのみ**を稼働させる場合と**case2: 家庭用エアコンと扇風機 2 台**を稼働させる場合の 2 case とする。

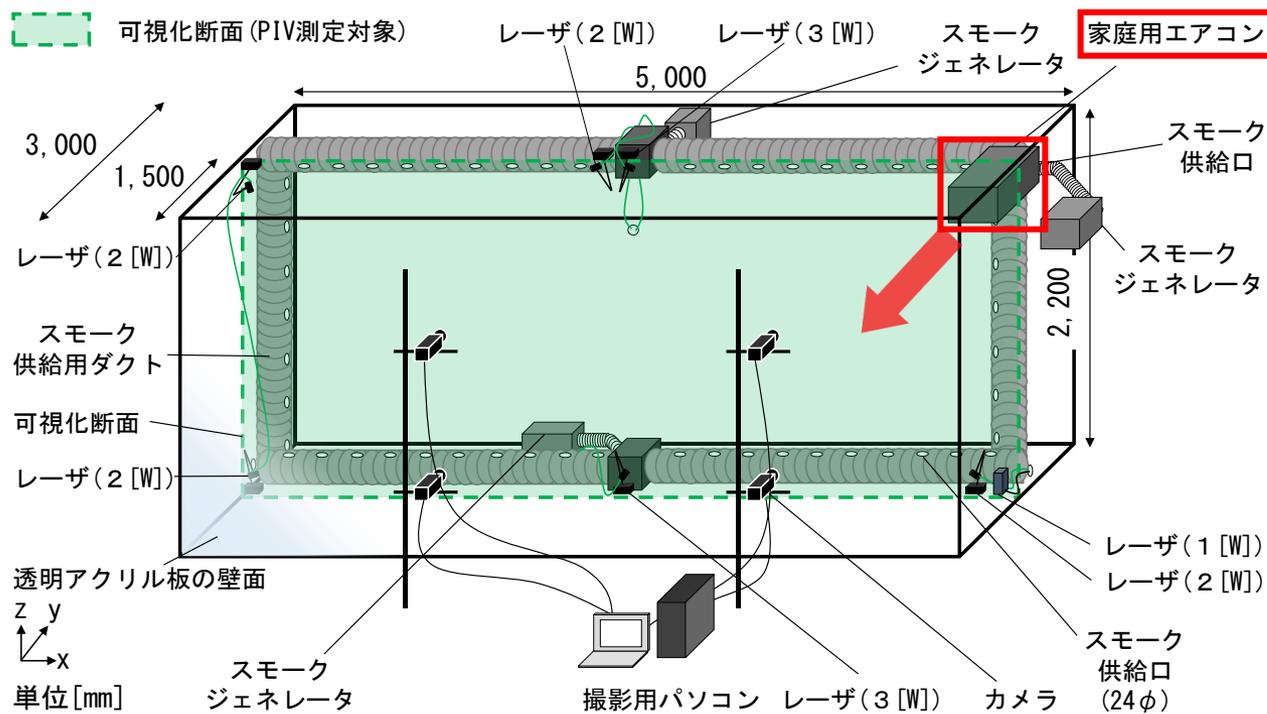


表 実験条件

	気流場の生成方法
case1	家庭用エアコン
case2	家庭用エアコン+扇風機 2 台

図 1 対象とする室内空間の概要 (case1)

実験概要

実験は等温で行う。実験条件は、case1: 家庭用エアコンのみを稼働させる場合と **case2: 家庭用エアコンと扇風機2台**を稼働させる場合の2 caseとする。

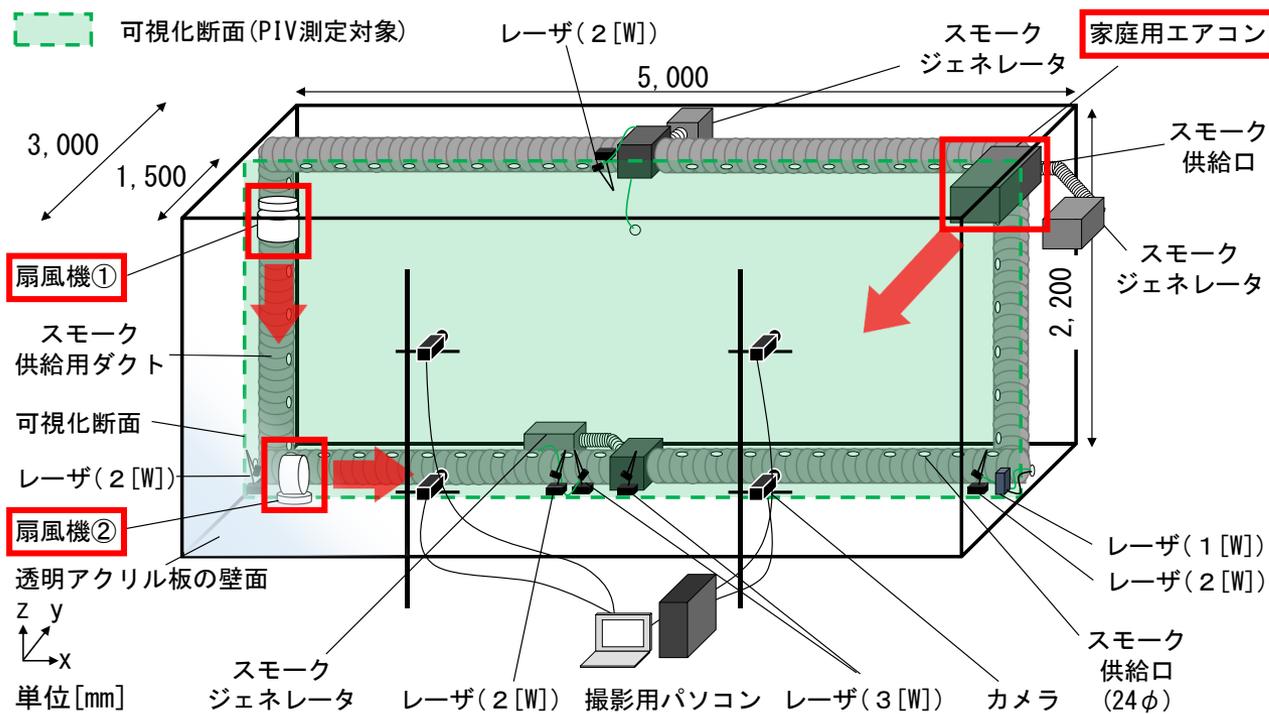


表 実験条件

	気流場の生成方法
case1	家庭用エアコン
case2	家庭用エアコン+扇風機2台

図1 対象とする室内空間の概要 (case2)

実験概要

扇風機の風向は**扇風機①**を下向き、扇風機②を右向きとする。

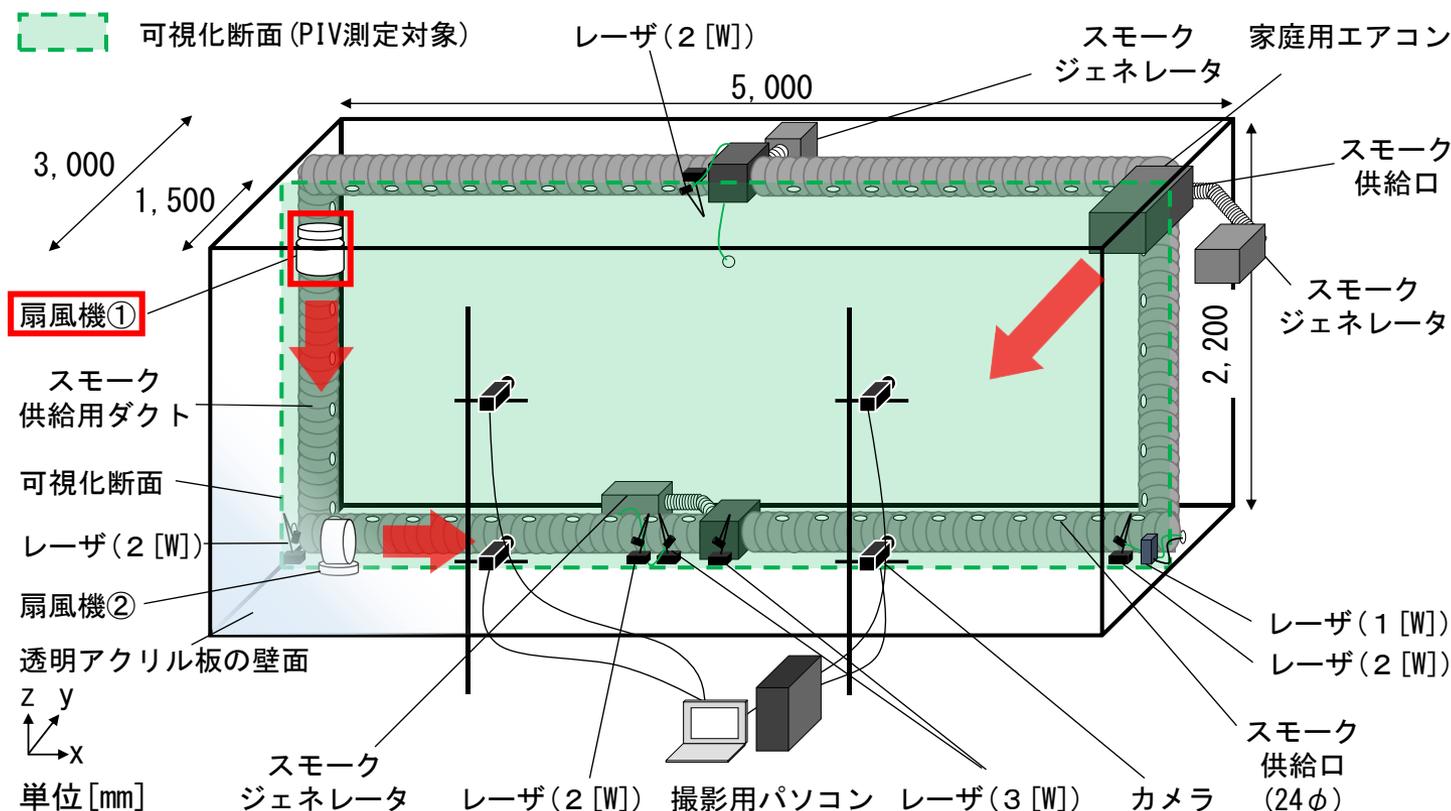


図1 対象とする室内空間の概要 (case2)

実験概要

扇風機の風向は扇風機①を下向き、**扇風機②を右向き**とする。

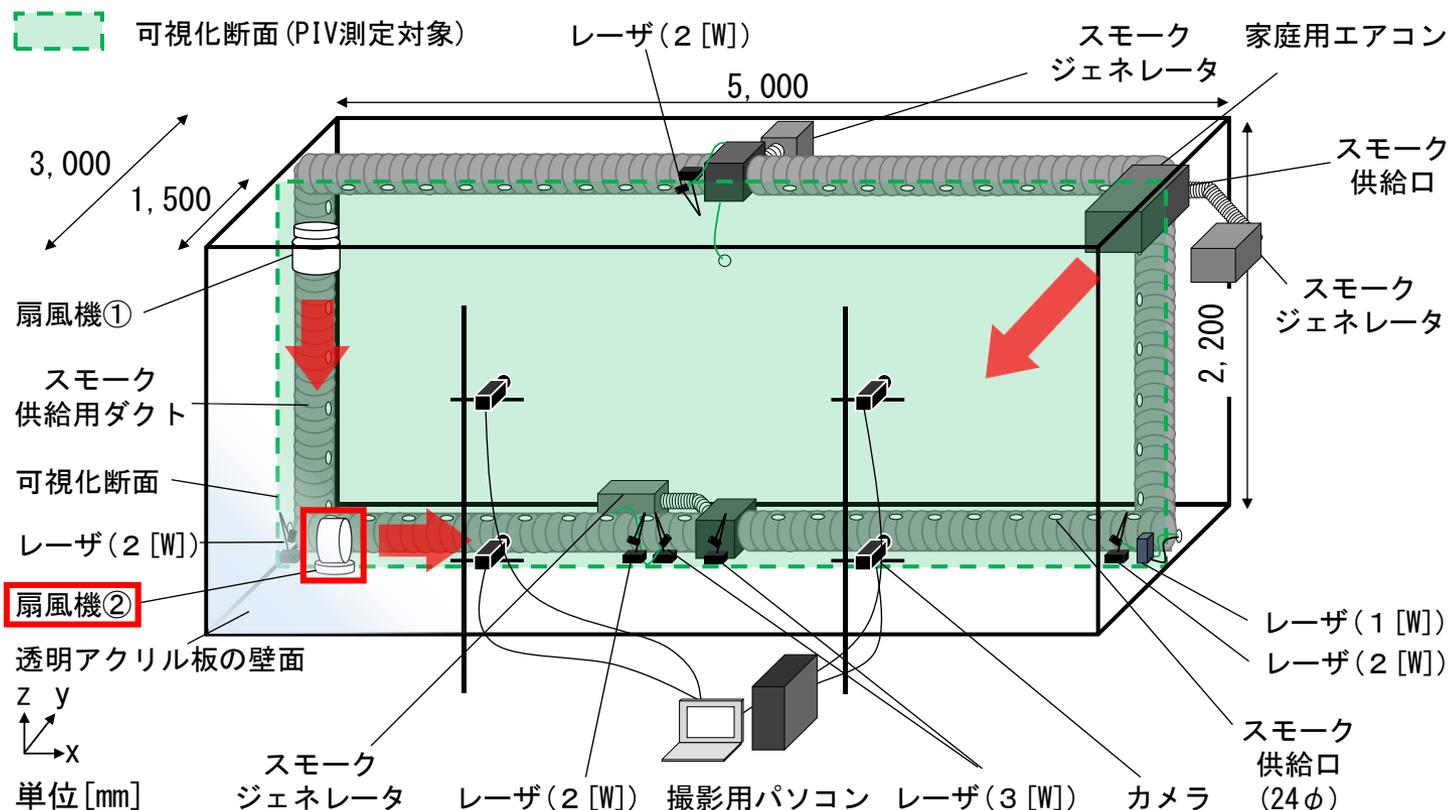


図1 対象とする室内空間の概要 (case2)

PIV測定の概要

シート状レーザーは複数台設置し、照射断面を一致させる。

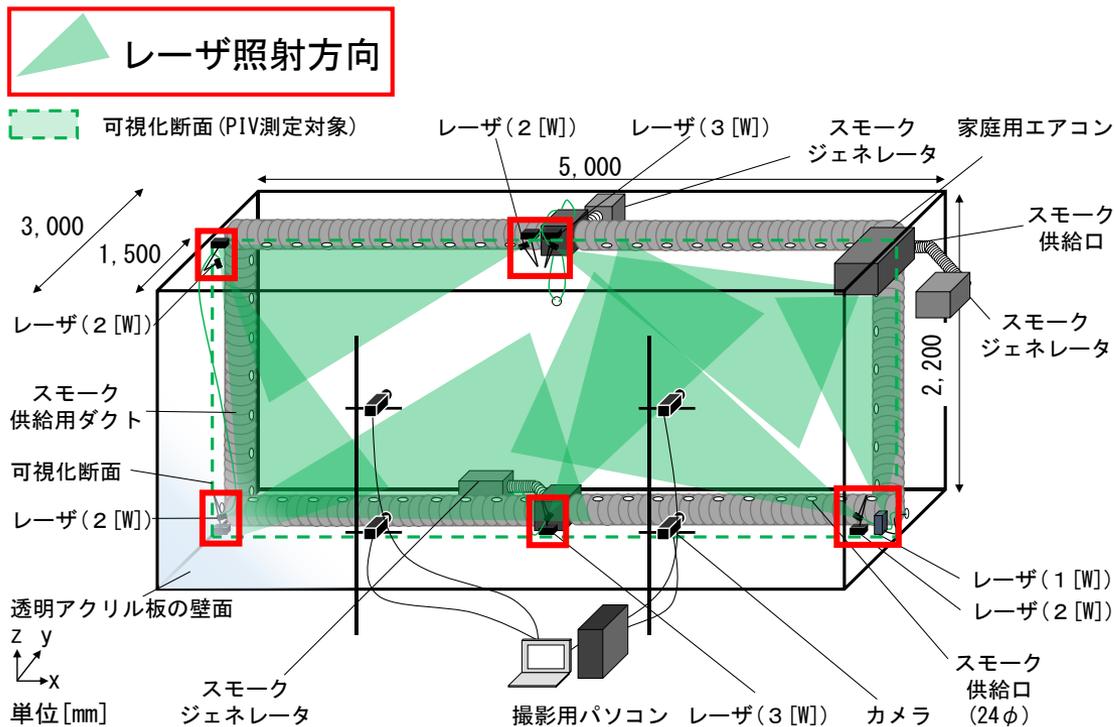


表 1 測定機器の概要

カメラ		産業用カメラ × 4台	
レーザー	出力 : 3 [W]	DPGL-3W × 2台	LD励起 : YAG/YVO ₄ レーザー 波長 : 532[nm]
	出力 : 2 [W]	DPGL-2W × 4台	
	出力 : 1 [W]	G1000	
スモークジェネレータ		Antari FOG MACHINE Z-1200 II	
		DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002 × 2台	
解析ツール	カメラ制御	ARGO StreamPix ver. 8.4	
	PIV解析	FlowExpert ver. 1.2.13	

図 1 対象とする室内空間の概要 (case1)

PIV測定の概要

シーリングには、**スモークジェネレータ**を複数台使用する。

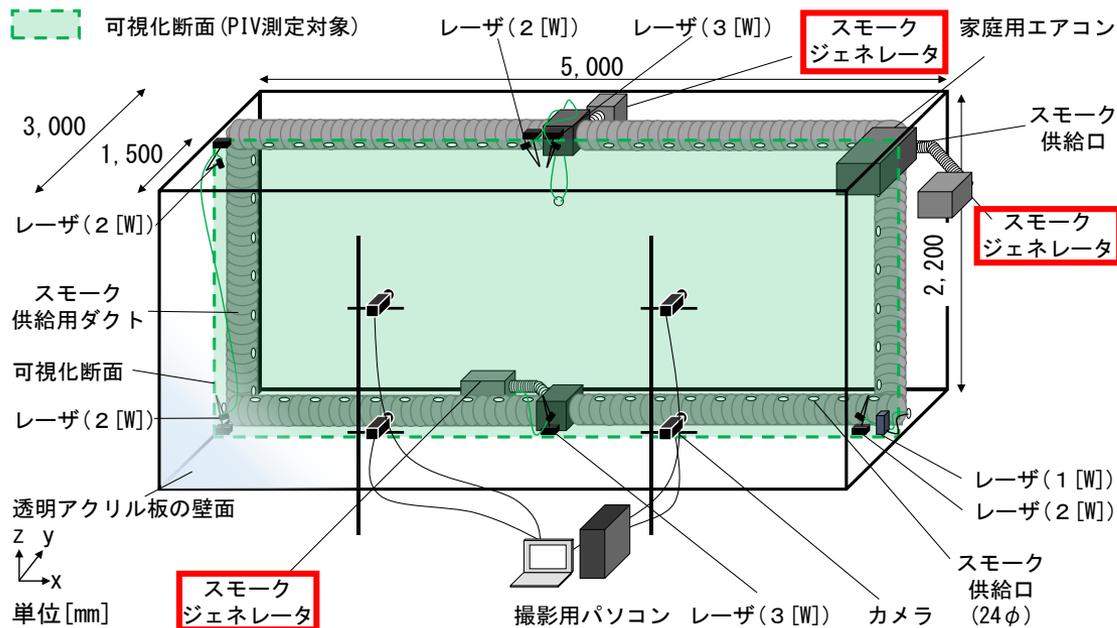


図1 対象とする室内空間の概要 (case1)

表1 測定機器の概要

カメラ		産業用カメラ×4台	
レーザー	出力：3 [W]	DPGL-3W×2台	LD励起： YAG/YVO ₄ レーザー 波長：532[nm]
	出力：2 [W]	DPGL-2W×4台	
	出力：1 [W]	G1000	
スモークジェネレータ		Antari FOG MACHINE Z-1200 II DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002×2台	
解析ツール	カメラ制御	ARGO StreamPix ver. 8.4	
	PIV解析	FlowExpert ver.1.2.13	

PIV測定の概要

スモークの供給は、**チャンバー内を周回するダクトとエアコンの吸込口から行う。**

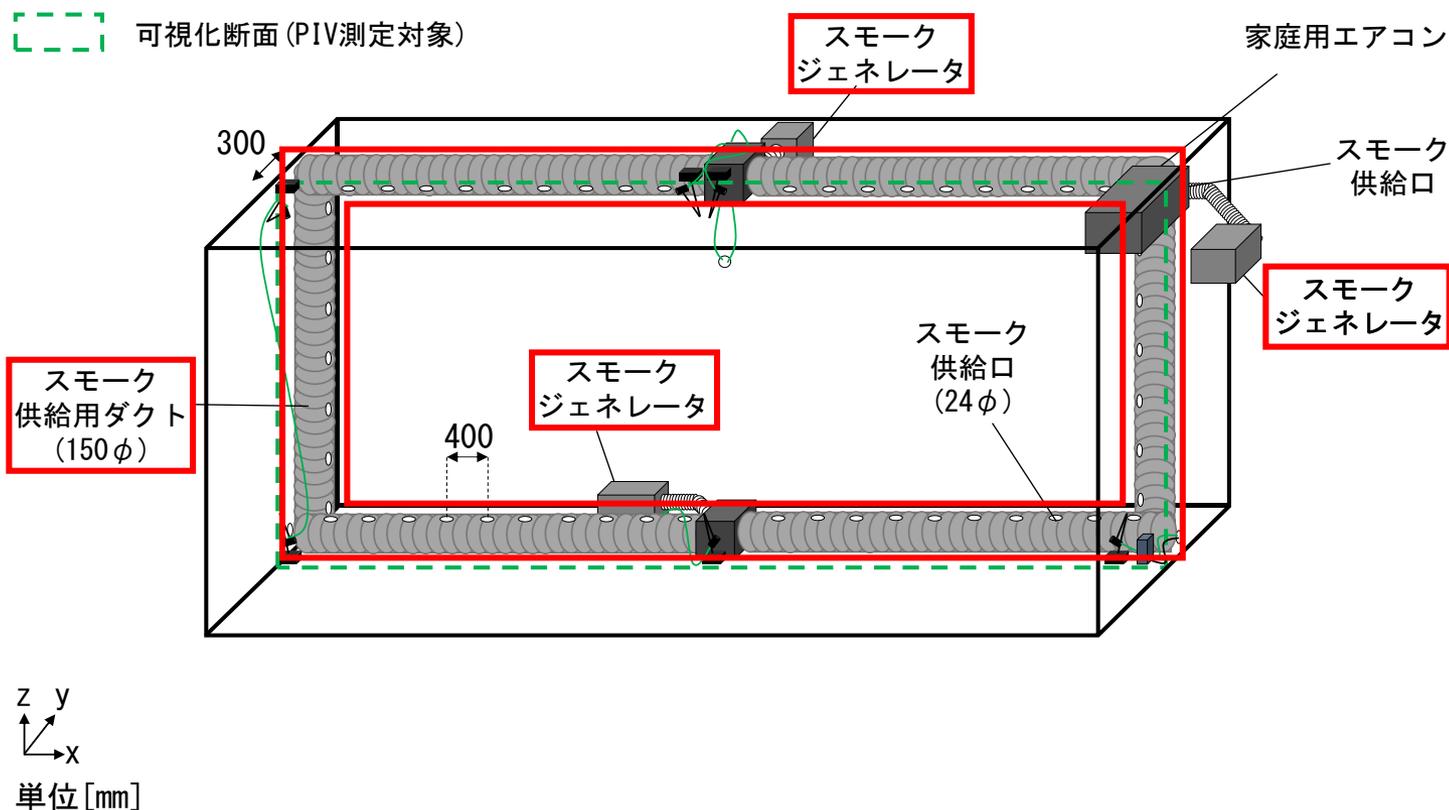


図 1 対象とする室内空間の概要

PIV測定の概要

流れの中にスモークを混入させて、シート状レーザで可視化し、同期された**カメラ4台**で撮影することで**可視化画像**を取得する。

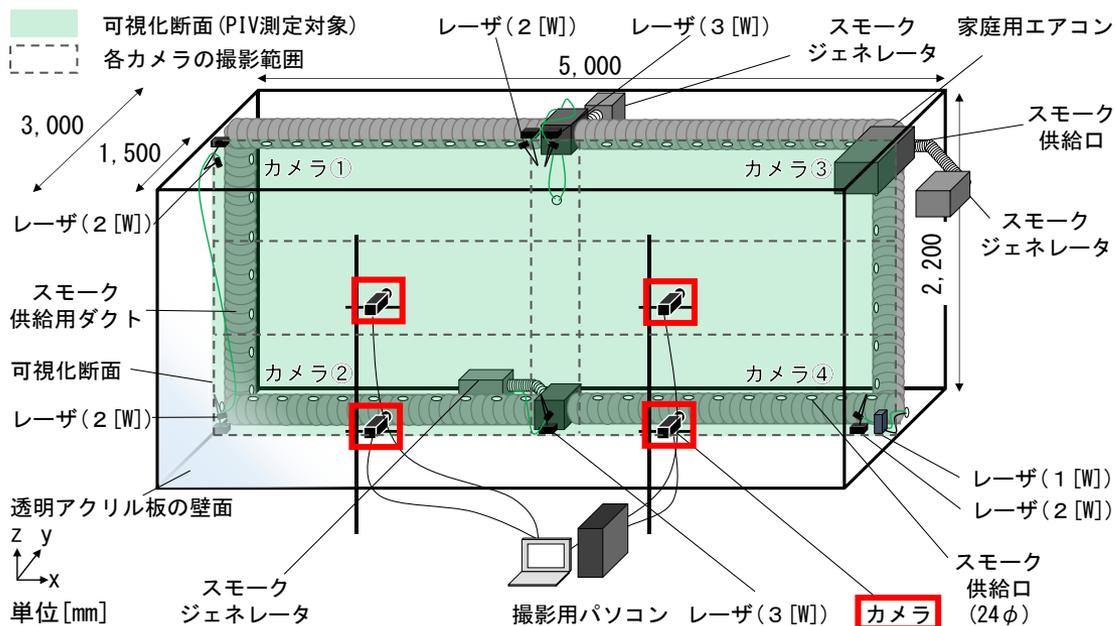


表 1 測定機器の概要

カメラ		産業用カメラ × 4台	
レーザ	出力 : 3 [W]	DPGL-3W × 2台	LD励起 : YAG/YVO ₄ レーザ 波長 : 532[nm]
	出力 : 2 [W]	DPGL-2W × 4台	
	出力 : 1 [W]	G1000	
スモークジェネレータ		Antari FOG MACHINE Z-1200 II DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002 × 2台	
解析ツール	カメラ制御	ARGO StreamPix ver. 8.4	
	PIV解析	FlowExpert ver. 1. 2. 13	

図 1 対象とする室内空間の概要 (case1)

PIV測定の概要

撮影では測定対象領域全体を **4分割**し、それぞれの範囲に対して1台ずつカメラを配置する。

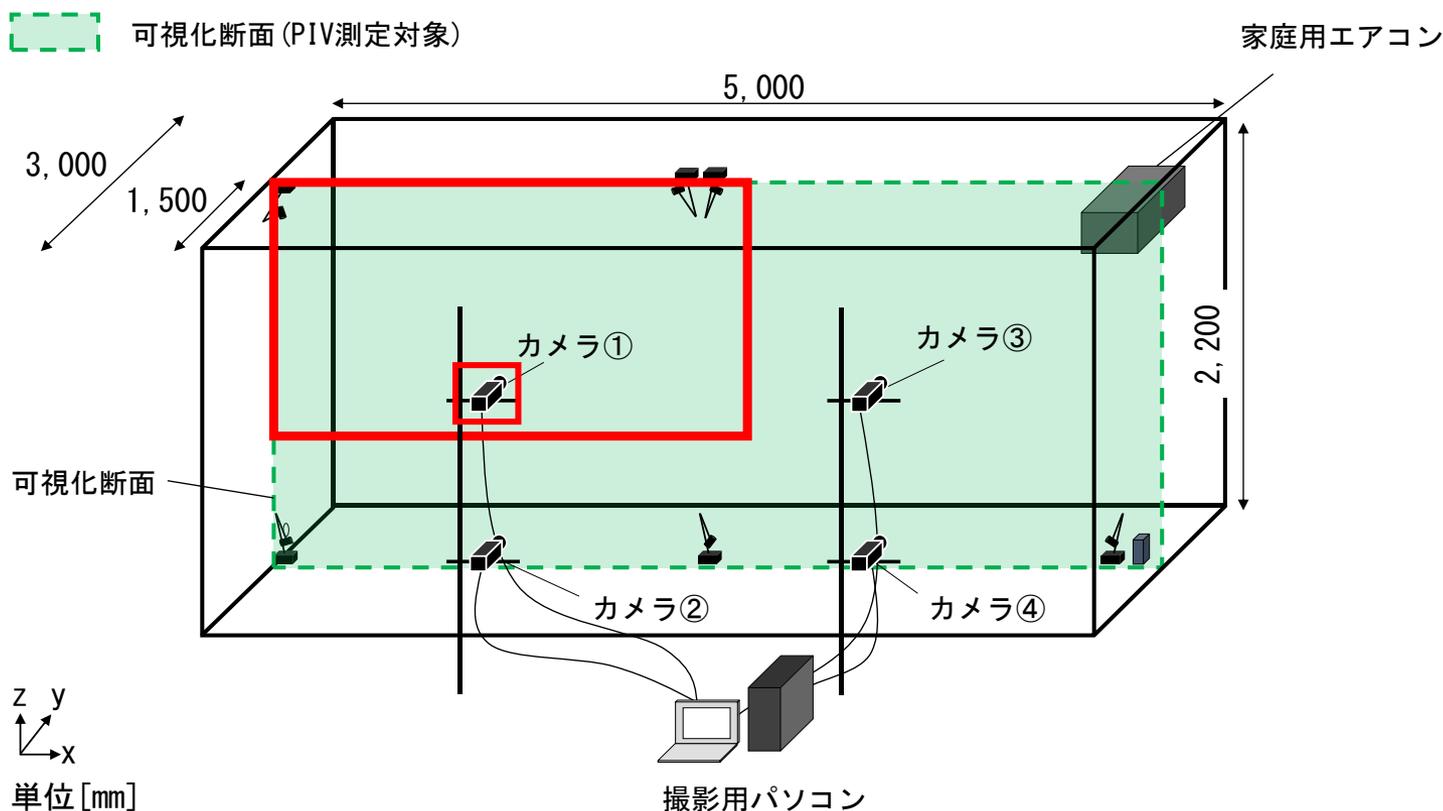


図1 対象とする室内空間の概要

PIV測定の概要

撮影では測定対象領域全体を **4分割**し、それぞれの範囲に対して1台ずつカメラを配置する。

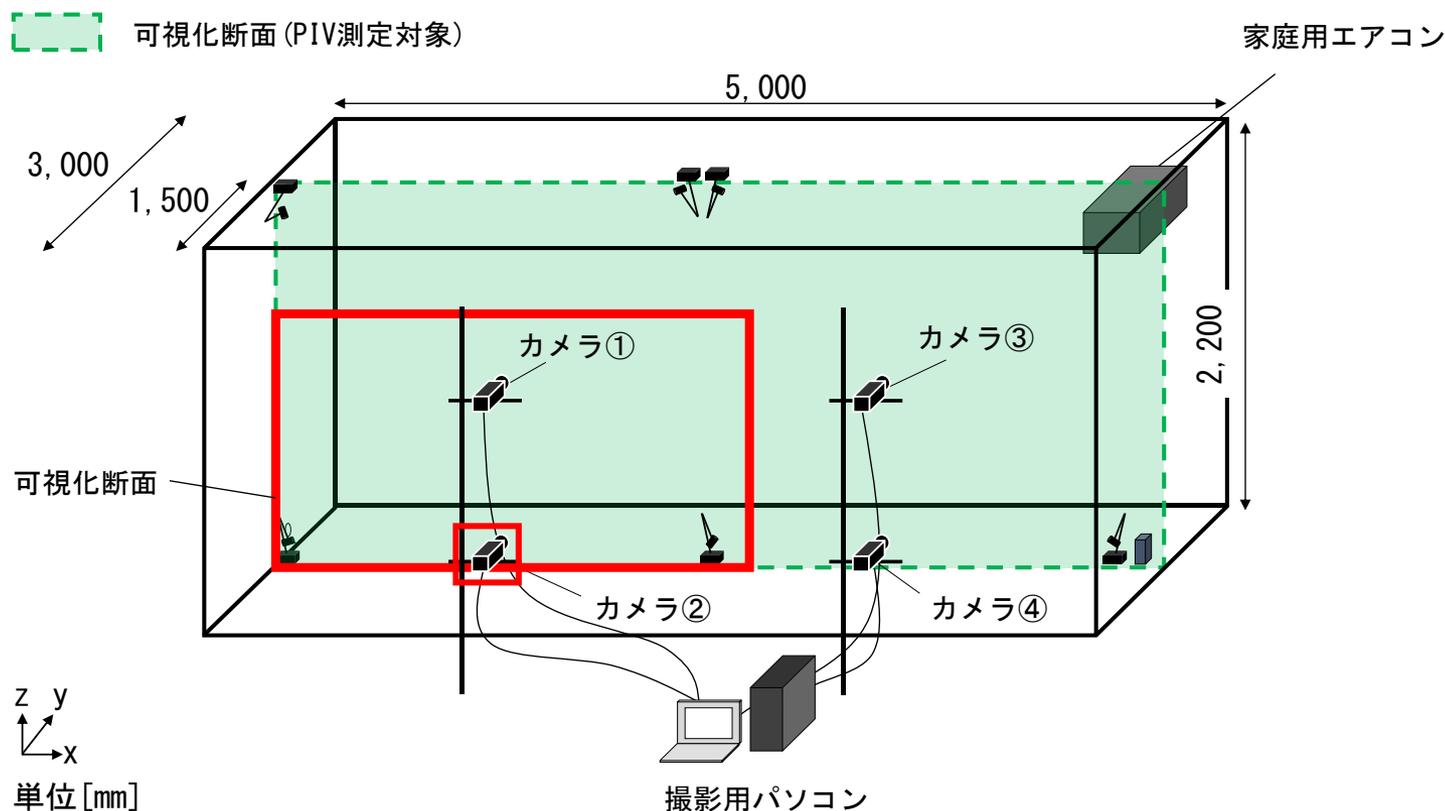


図1 対象とする室内空間の概要

PIV測定の概要

撮影では測定対象領域全体を **4分割**し、それぞれの範囲に対して1台ずつカメラを配置する。

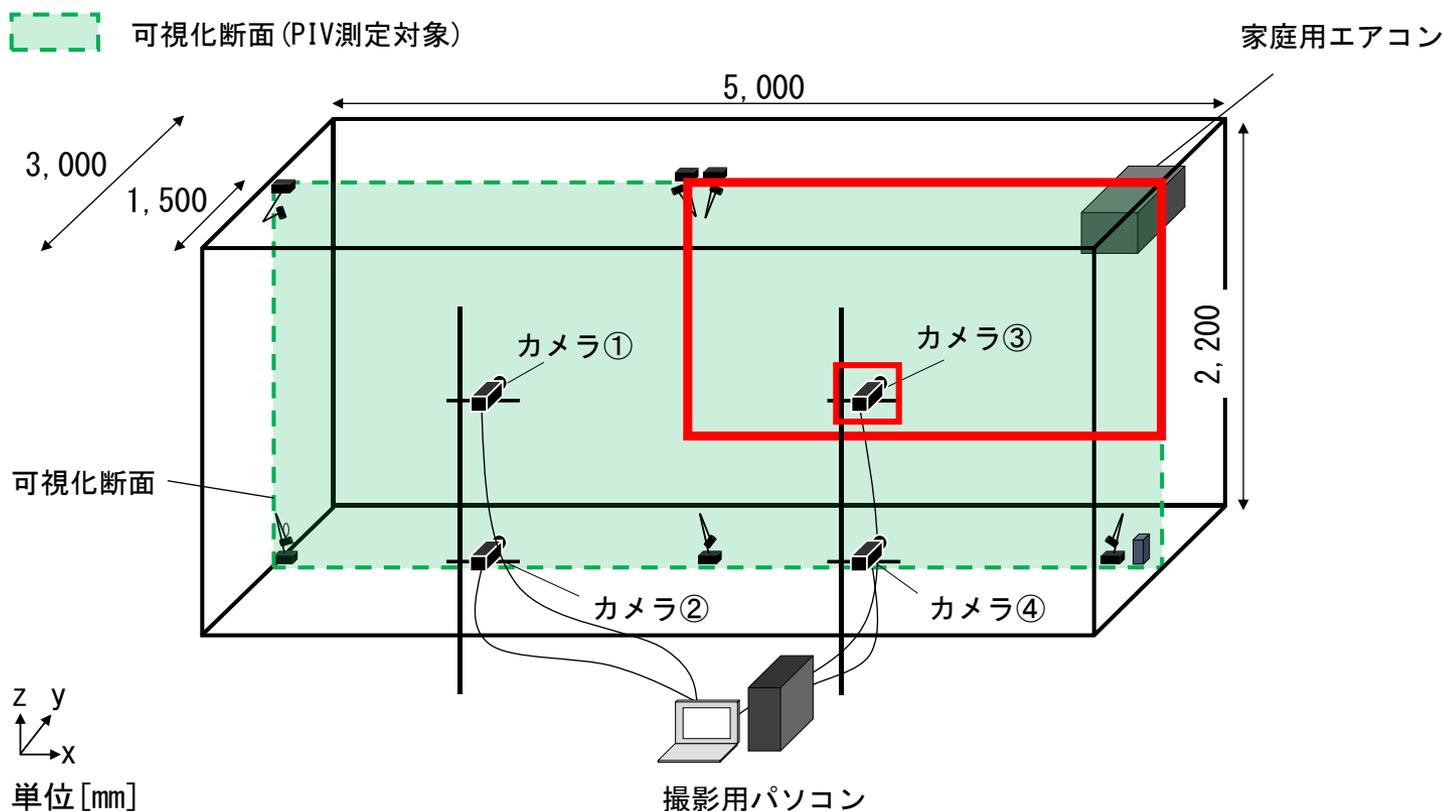


図 1 対象とする室内空間の概要

PIV測定の概要

撮影では測定対象領域全体を **4分割**し、それぞれの範囲に対して1台ずつカメラを配置する。

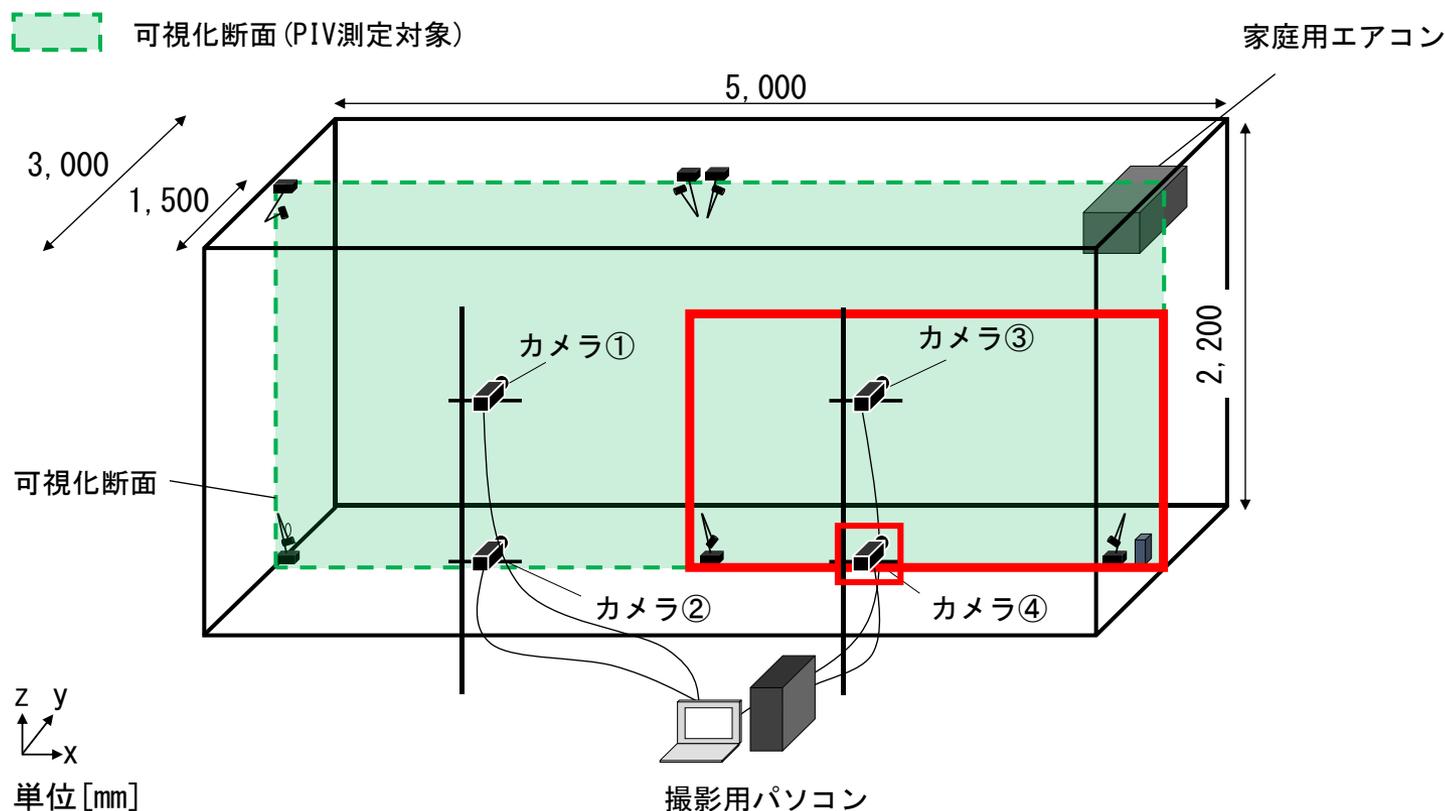


図1 対象とする室内空間の概要

PIV測定の概要

得られた可視化画像のPIV解析には**FlowExpert ver. 1.2.13**を用いる。

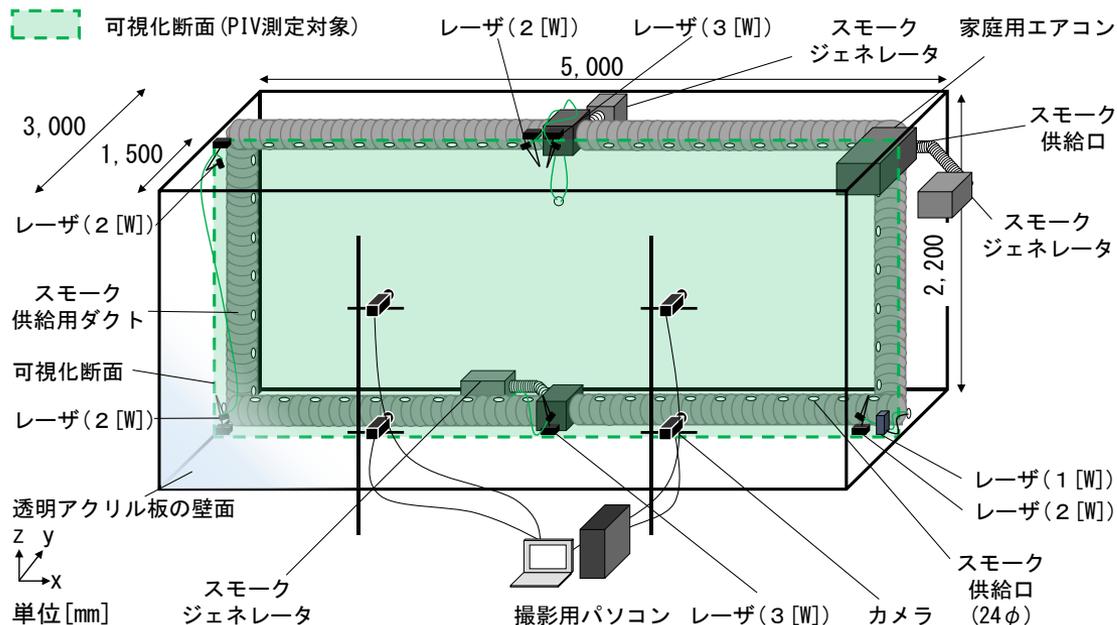


図 1 対象とする室内空間の概要 (case1)

表 1 測定機器の概要

カメラ		産業用カメラ × 4台	
レーザ	出力 : 3 [W]	DPGL-3W × 2台	LD励起 : YAG/YVO ₄ レーザ 波長 : 532[nm]
	出力 : 2 [W]	DPGL-2W × 4台	
	出力 : 1 [W]	G1000	
スモークジェネレータ		Antari FOG MACHINE Z-1200 II	
		DAINICHI PORTA SMOKE PS-2002 × 2台	
解析ツール	カメラ制御	ARGO StreamPix ver. 8.4	
	PIV解析	FlowExpert ver. 1.2.13	

PIVのキャリブレーション値※²は**1.39 [mm/pixel]** である。

表 2 PIV測定パラメータ

対象断面	鉛直断面 (y=1,500[mm])								
実験case	case1				case2				
カメラ1台の画像サイズ[pixel]	1,920×1,200								
キャリブレーション値※ ² [mm/pixel]	1.39								
対象領域[mm]	5,000×2,200								
撮影時のフレーム間隔[fps] ([msec])	120 (8.33)				125 (8)				
シャッタースピード[sec]	1/125								
解析時のフレーム間隔[msec]	8.33	16.66	33.32	49.98	8.00	16.00	32.00	48.00	
検査領域※ ³ [pixel]	40×40								
探査領域※ ⁴ [pixel]	±18				±24				
解析可能風速※ ⁵ [m/s]	1 [pixel]あたり	0.167	0.083	0.042	0.028	0.174	0.087	0.043	0.029
	最大風速	3.004	1.502	0.751	0.501	4.170	2.085	1.043	0.695

※² 撮影画像の画素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、撮影断面に校正用のプレートを設置し、実際の距離が画像上で認識できる様に撮影して求める。

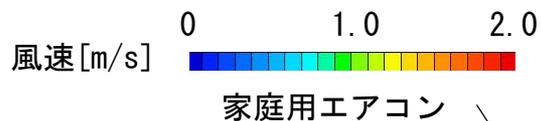
※³ 輝度分布を比較する領域の画素数。

※⁴ 検査領域の輝度分布と類似性の高い領域を探査する画素数。±18[pixel]の場合、検査領域の上下左右に18[pixel]加算した領域を探査領域とする。

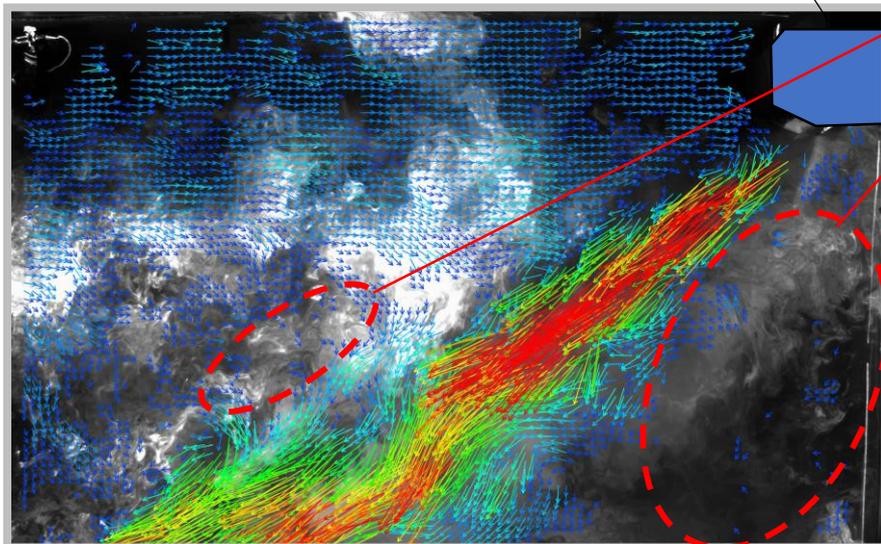
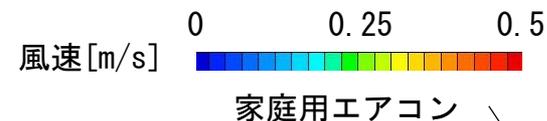
※⁵ 解析可能風速は撮影フレーム間隔8.33[msec]、探査領域±18[pixel]とした場合、最小値は1.39[mm/pixel] (キャリブレーション値) ÷ 8.33[msec] × 1 [pixel] = 0.167[m/s]、最大値は1.39[mm/pixel] ÷ 8.33[msec] × 18[pixel] = 3.004[m/s]となる。

PIV測定パラメータ

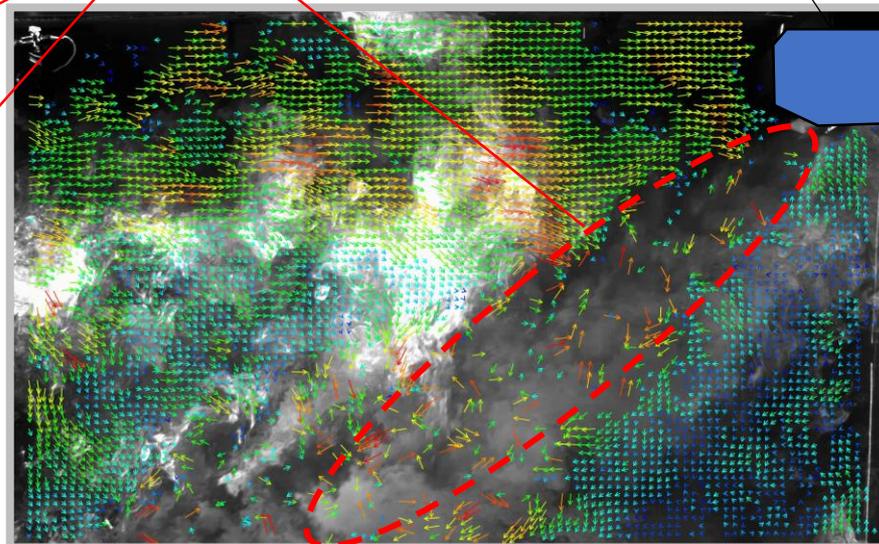
実大室内空間では風速の速い部分と遅い部分が混在するため、測定対象面内で適切なPIV解析条件が異なる可能性がある。



解析可能風速
範囲外の領域



(a) 解析時のフレーム間隔8.33 [msec]



(b) 解析時のフレーム間隔49.98 [msec]

動画 異なるフレーム間隔におけるPIV解析

PIV測定パラメータ

そのため、全てのカメラにおいて、**解析時のフレーム間隔**を変化させてPIV解析※⁶を行う。

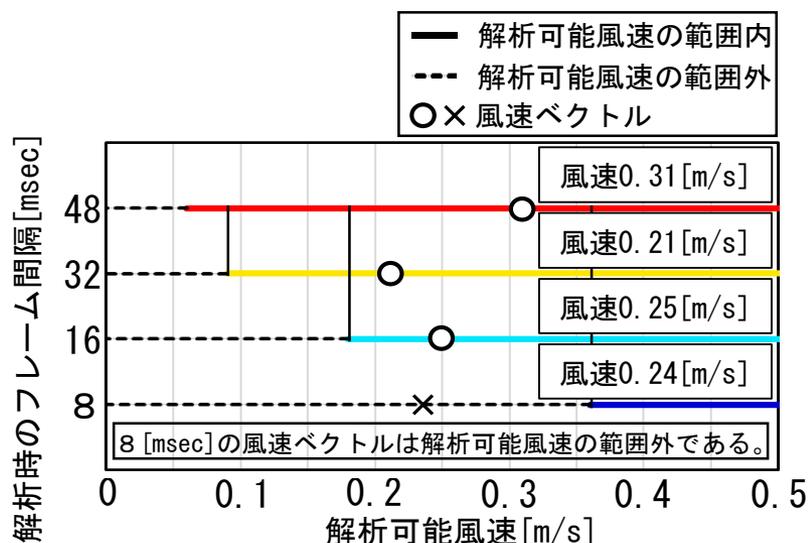
表2 PIV測定パラメータ

対象断面	鉛直断面 (y=1,500[mm])								
実験case	case1				case2				
カメラ1台の画像サイズ[pixel]	1,920×1,200								
キャリブレーション値※ ² [mm/pixel]	1.39								
対象領域[mm]	5,000×2,200								
撮影時のフレーム間隔[fps] ([msec])	120 (8.33)				125 (8)				
シャッタースピード[sec]	1/125								
解析時のフレーム間隔[msec]	8.33	16.66	33.32	49.98	8.00	16.00	32.00	48.00	
検査領域※ ³ [pixel]	40×40								
探査領域※ ⁴ [pixel]	±18				±24				
解析可能風速※ ⁵ [m/s]	1 [pixel]あたり	0.167	0.083	0.042	0.028	0.174	0.087	0.043	0.029
	最大風速	3.004	1.502	0.751	0.501	4.170	2.085	1.043	0.695

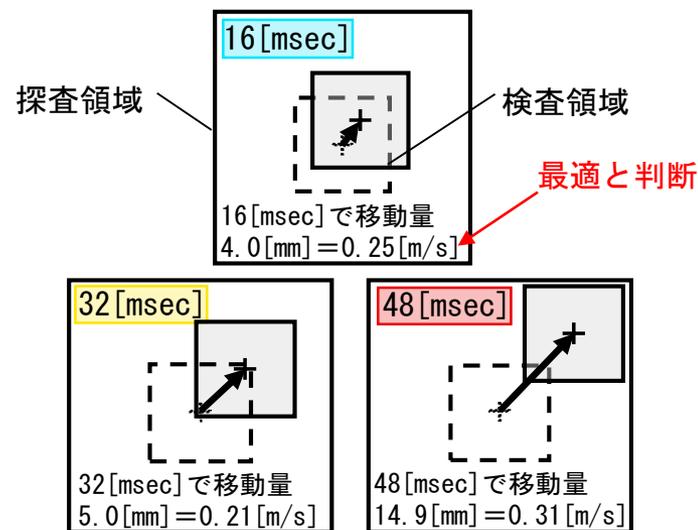
※⁶ 風速の遅い気流場ではフレームをスキップさせ、解析時のフレーム間隔を長くすることで粒子群の移動の把握が正確となり、1時刻目の画像パターンと相関の高い画像が2時刻目の画像パターンから得られると考えられる。

最適と考えられる風速ベクトルの選択方法

最適と考えられる風速ベクトルは、既往の研究^{文2)}の手法を用い、解析可能風速の範囲内で算出された風速ベクトルの中から、**最小の移動量^{※7}**で算出されたものを選択する^{※8}。



(a) 解析可能風速の範囲外のベクトルの削除



(b) 風速ベクトルの算出に用いられた移動量の比較

図 最適と考えられる風速ベクトルの選択方法

文2) 本多、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2 フレーム間隔をパラメータとした解析」日本建築学会学術講演梗概集、2021年

※7 最小の移動量は、1時刻目の検査領域内の粒子群の形状と2時刻目の探査領域から探し出された粒子群の形状の変化が小さく、妥当な風速ベクトルを算出できると考えられる。

※8 解析可能風速の範囲内の風速ベクトルが存在しない場合は、例外的にサブピクセル解析で算出した風速ベクトルを選択する。

PIV解析結果の合成方法

各カメラの撮影範囲には、**重複する領域**が存在する。重複する領域では、各測定点毎に算出された風速成分を平均してPIV解析結果を合成する。

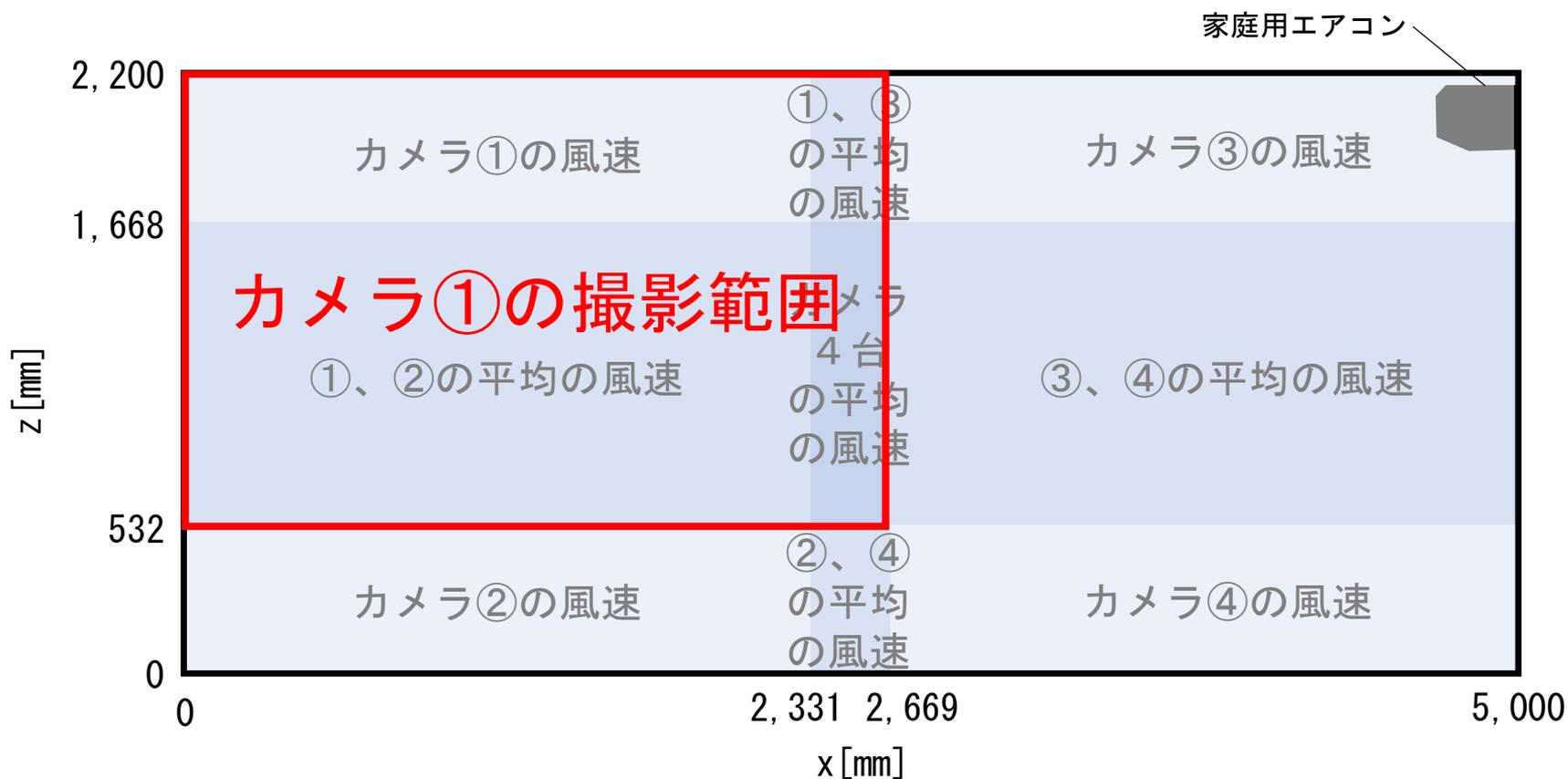


図2 可視化画像の各範囲におけるPIV解析結果の合成方法

PIV解析結果の合成方法

各カメラの撮影範囲には、**重複する領域**が存在する。重複する領域では、各測定点毎に算出された風速成分を平均してPIV解析結果を合成する。

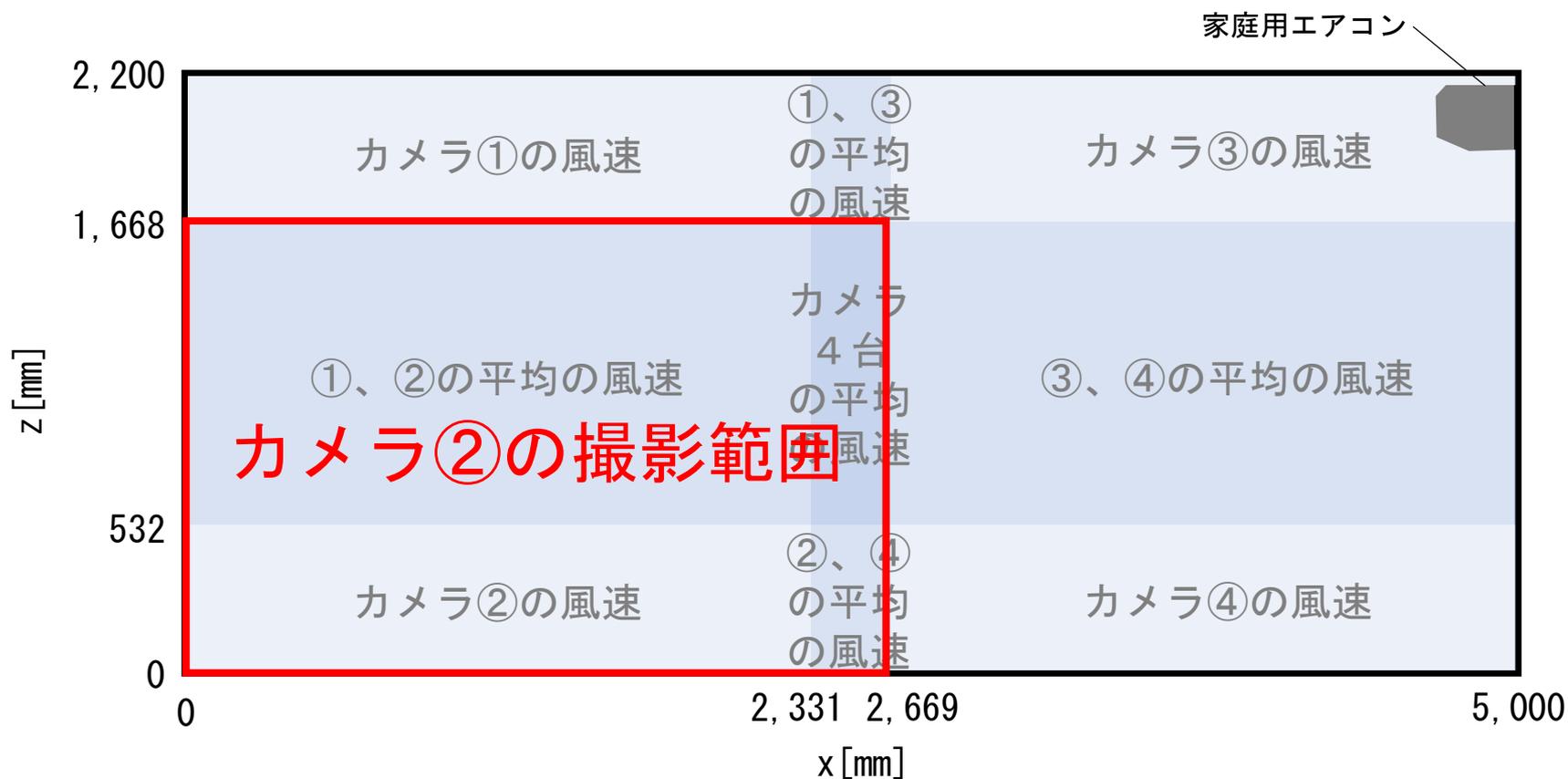


図2 可視化画像の各範囲におけるPIV解析結果の合成方法

PIV解析結果の合成方法

各カメラの撮影範囲には、**重複する領域**が存在する。重複する領域では、各測定点毎に算出された風速成分を平均してPIV解析結果を合成する。

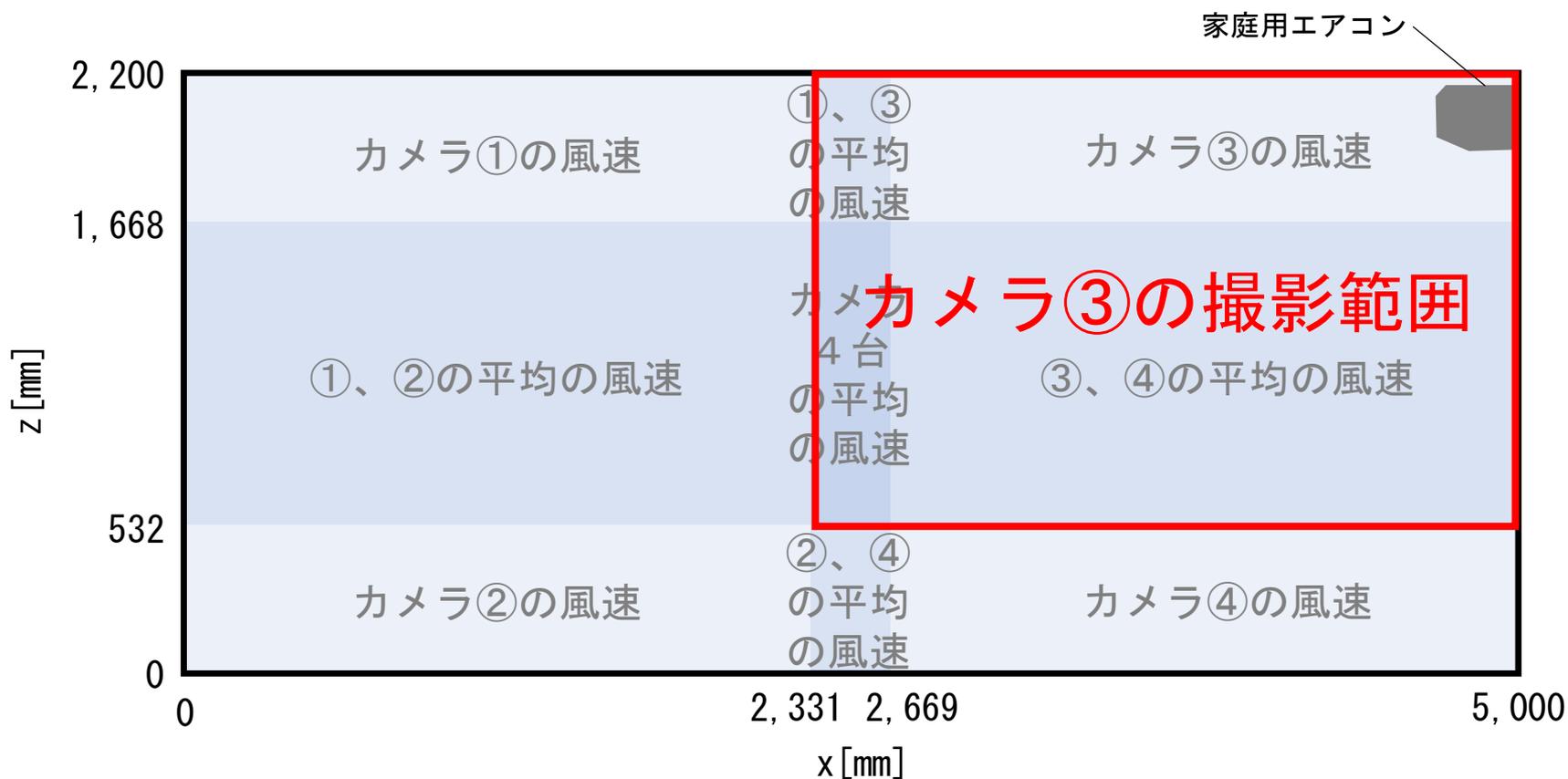


図2 可視化画像の各範囲におけるPIV解析結果の合成方法

各カメラの撮影範囲には、**重複する領域**が存在する。重複する領域では、各測定点毎に算出された風速成分を平均してPIV解析結果を合成する。

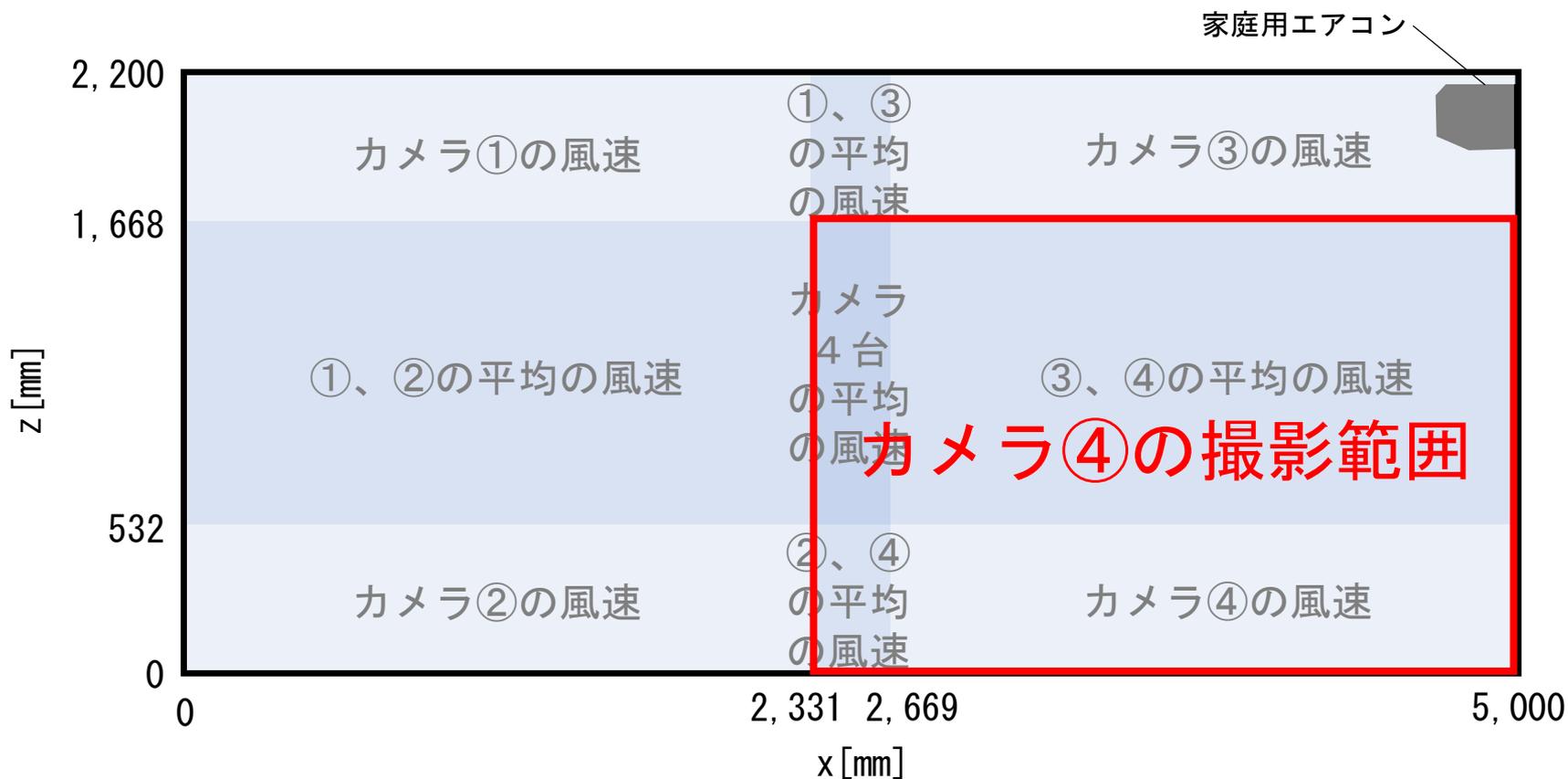


図2 可視化画像の各範囲におけるPIV解析結果の合成方法

各カメラの撮影範囲には、重複する領域が存在する。重複する領域では、各測定点毎に算出された風速成分を平均してPIV解析結果を合成する。

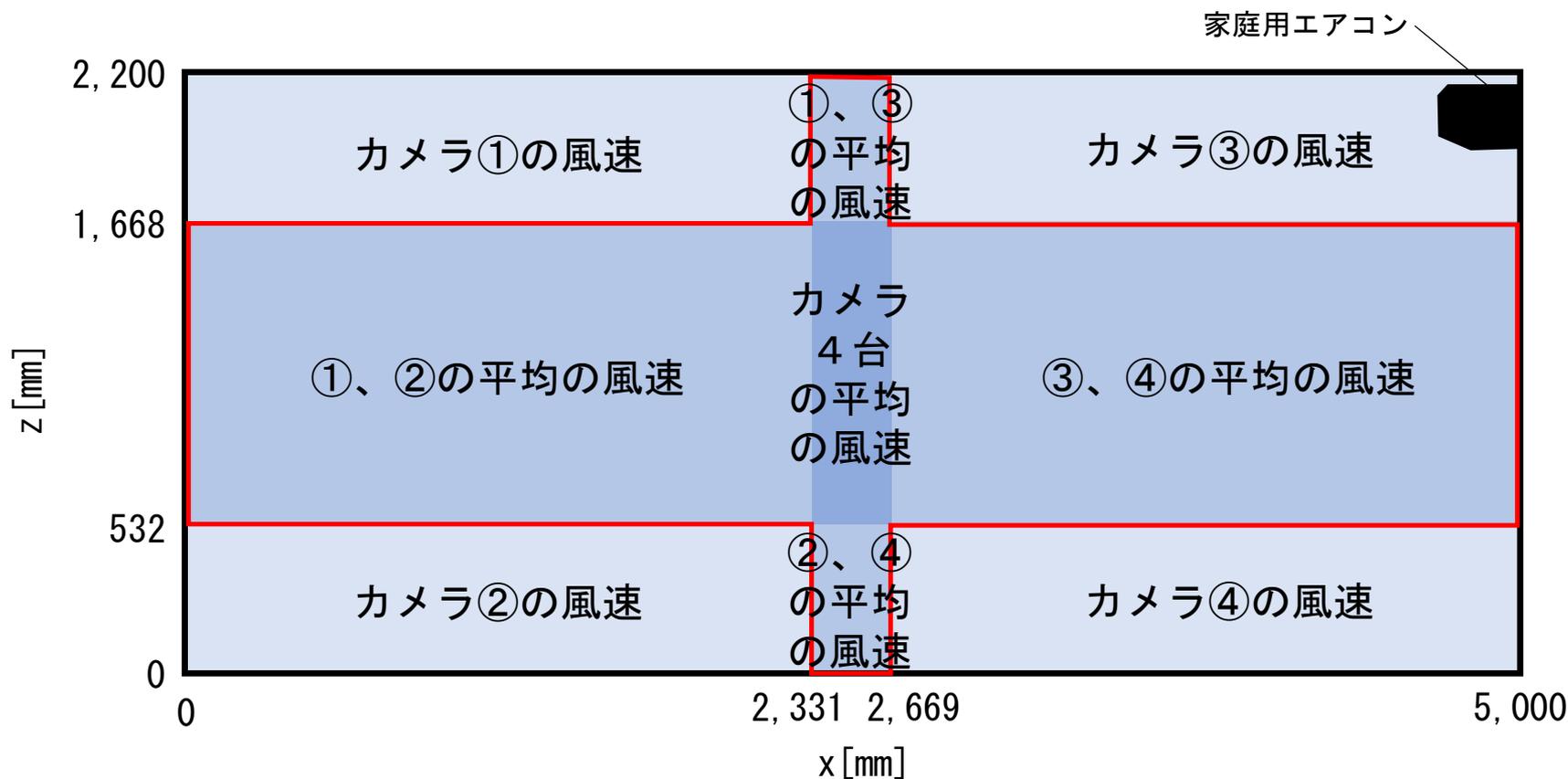
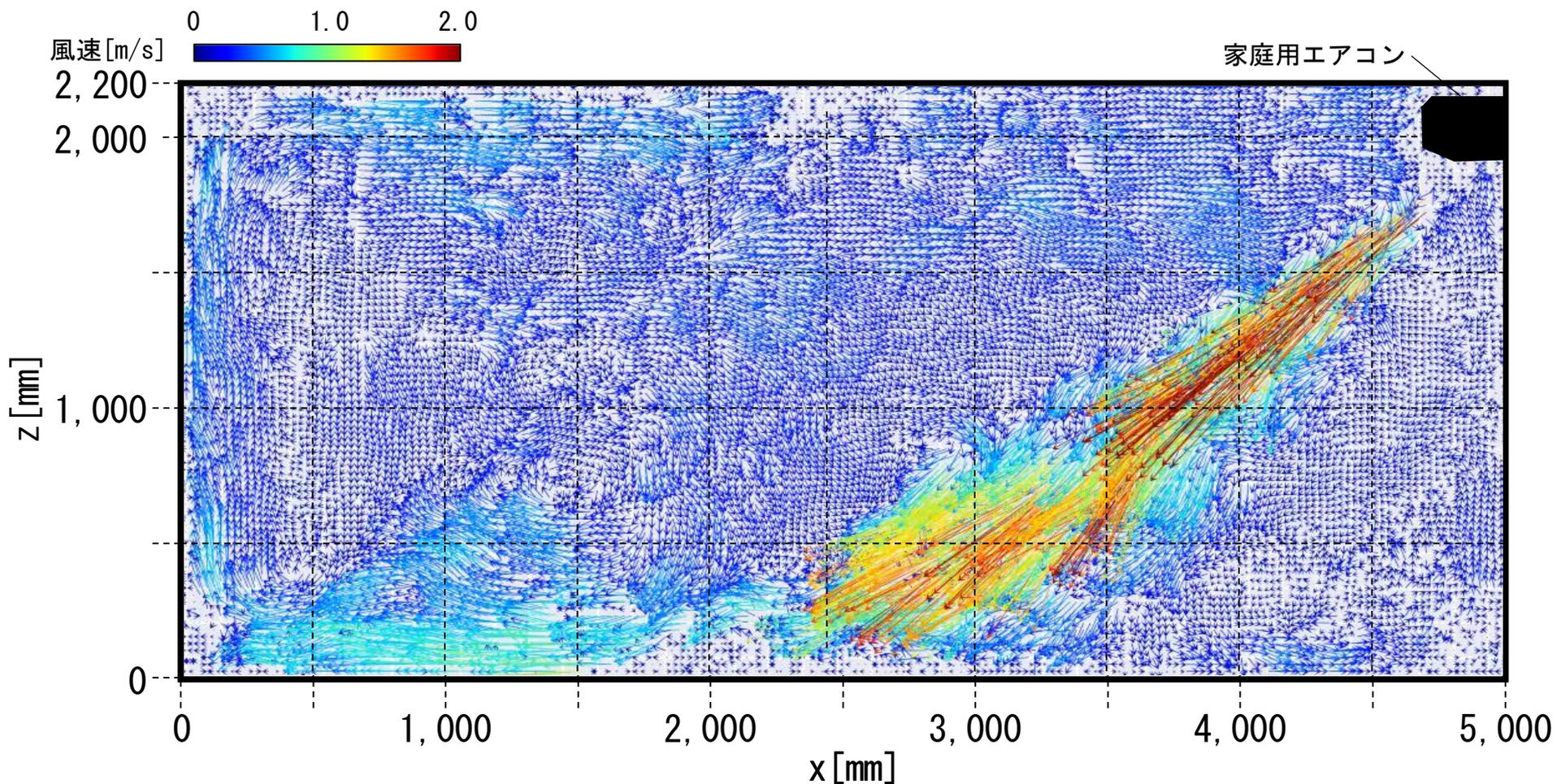


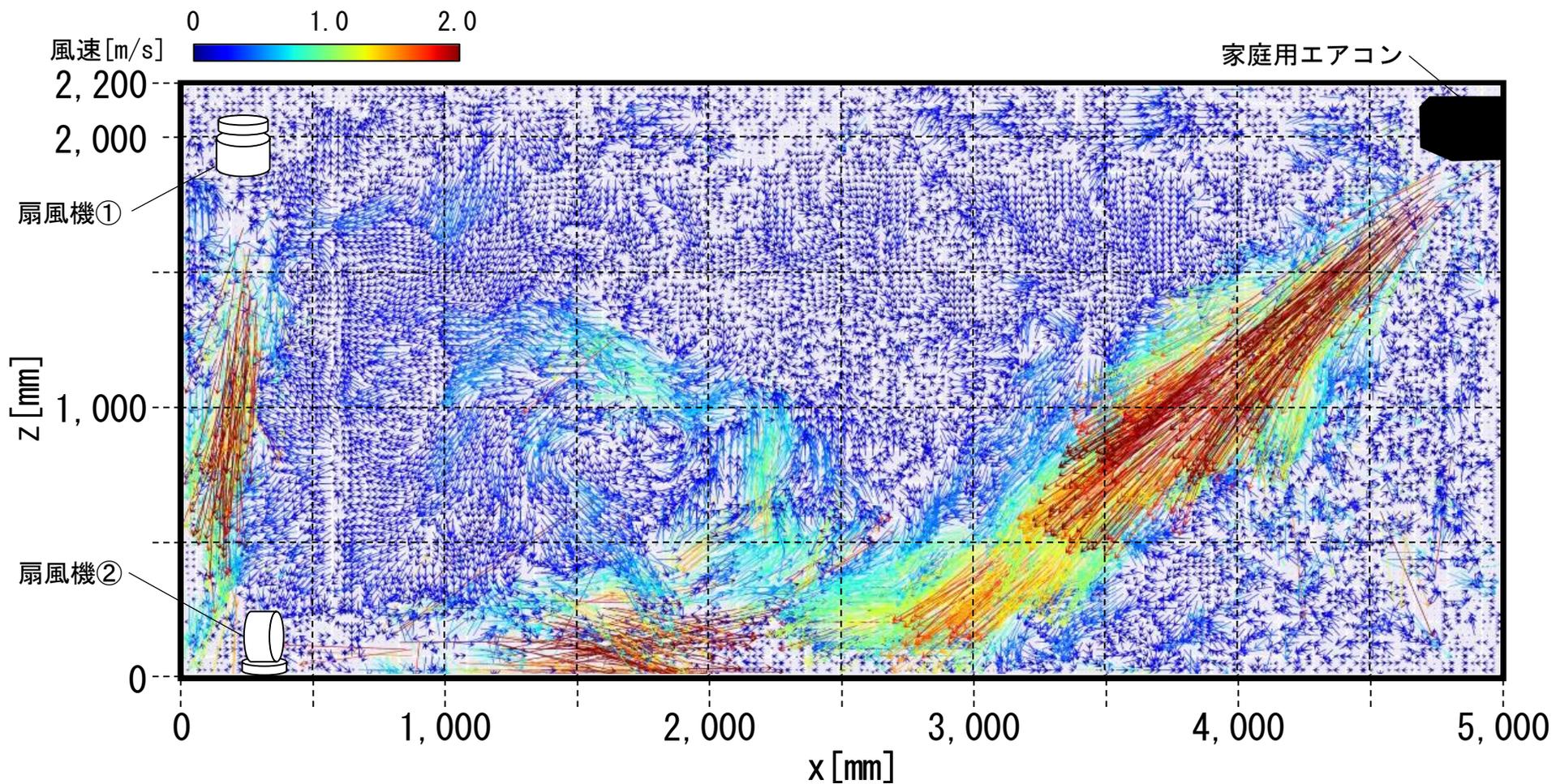
図2 可視化画像の各範囲におけるPIV解析結果の合成方法

実験結果 (a) case1



(a) case1 (家庭用エアコン)
動画 PIV解析結果

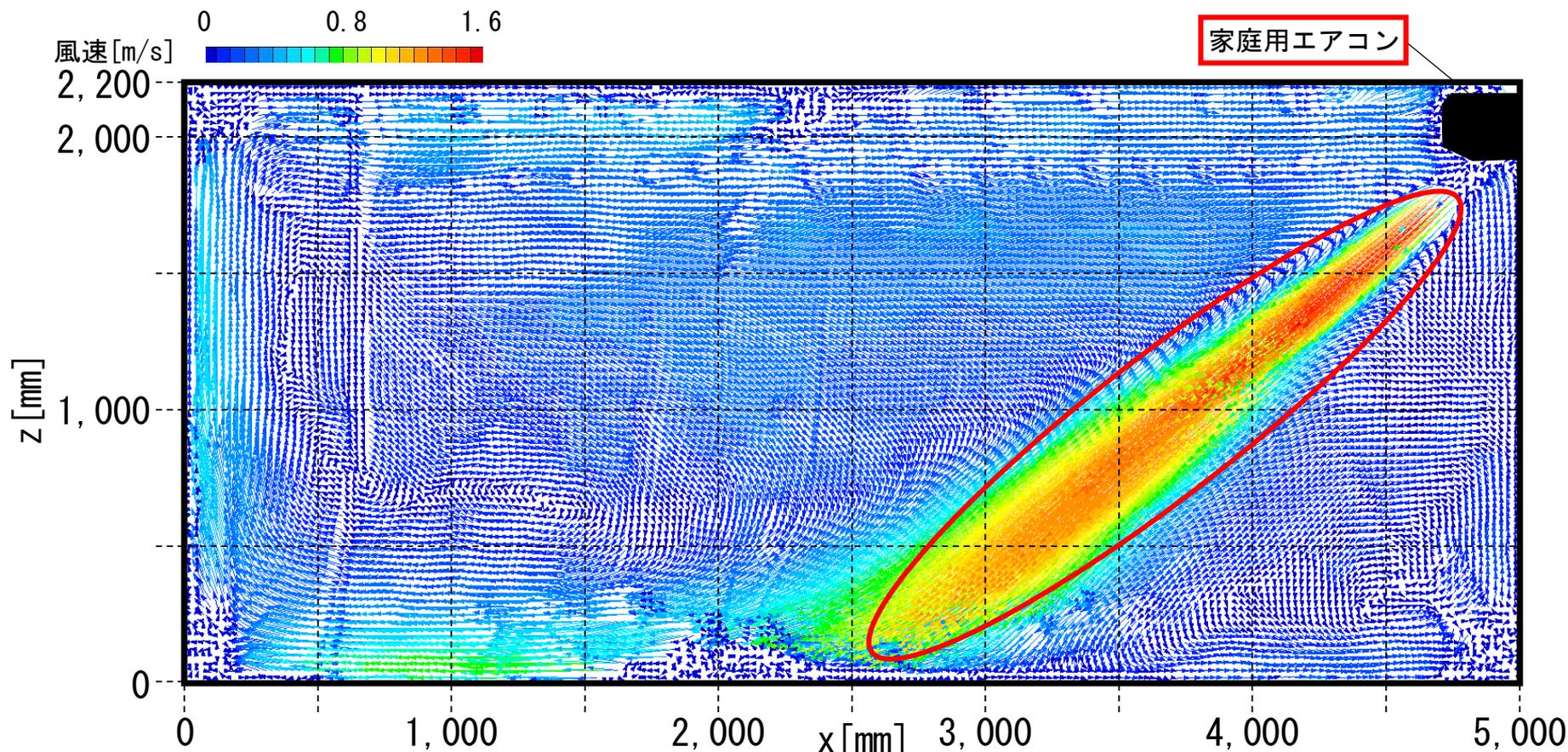
実験結果 (b) case2



(b) case2(家庭用エアコン+扇風機 2台)
動画 PIV解析結果

実大室内空間の気流性状 (b) case2

エアコンの吹出部分で約1.2~1.6[m/s]、左下床面付近で約0.6~0.8[m/s]、左側壁面付近で約0.5~0.7[m/s]の風速が算出される。



(a) case1 (家庭用エアコン)

図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

エアコンの吹出部分で約1.2~1.6[m/s]、左下床面付近で約0.6~0.8[m/s]、左側壁面付近で約0.5~0.7[m/s]の風速が算出される。

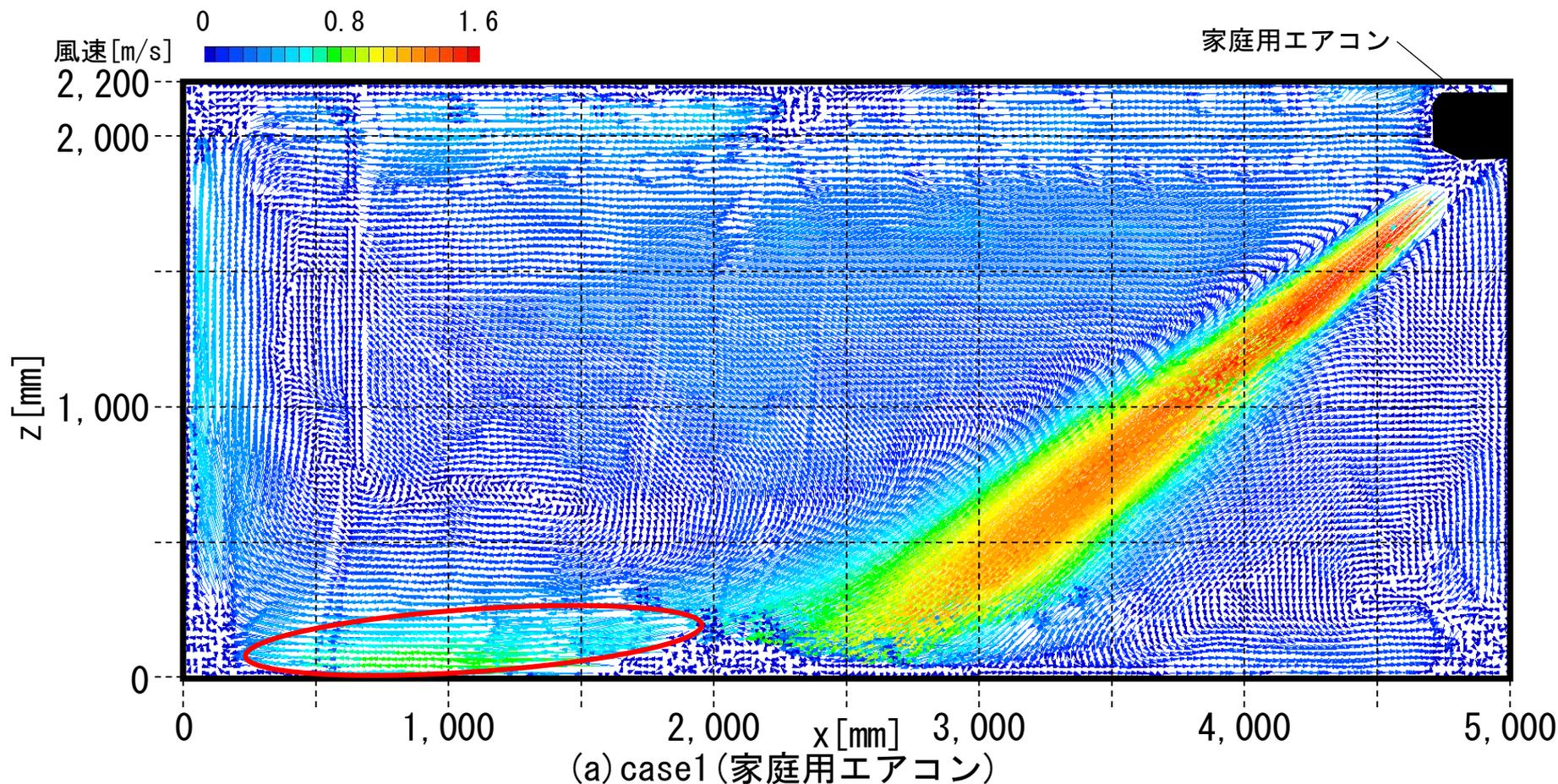


図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

エアコンの吹出部分で約1.2~1.6[m/s]、左下床面付近で約0.6~0.8[m/s]、**左側壁面付近で約0.5~0.7[m/s]**の風速が算出される。

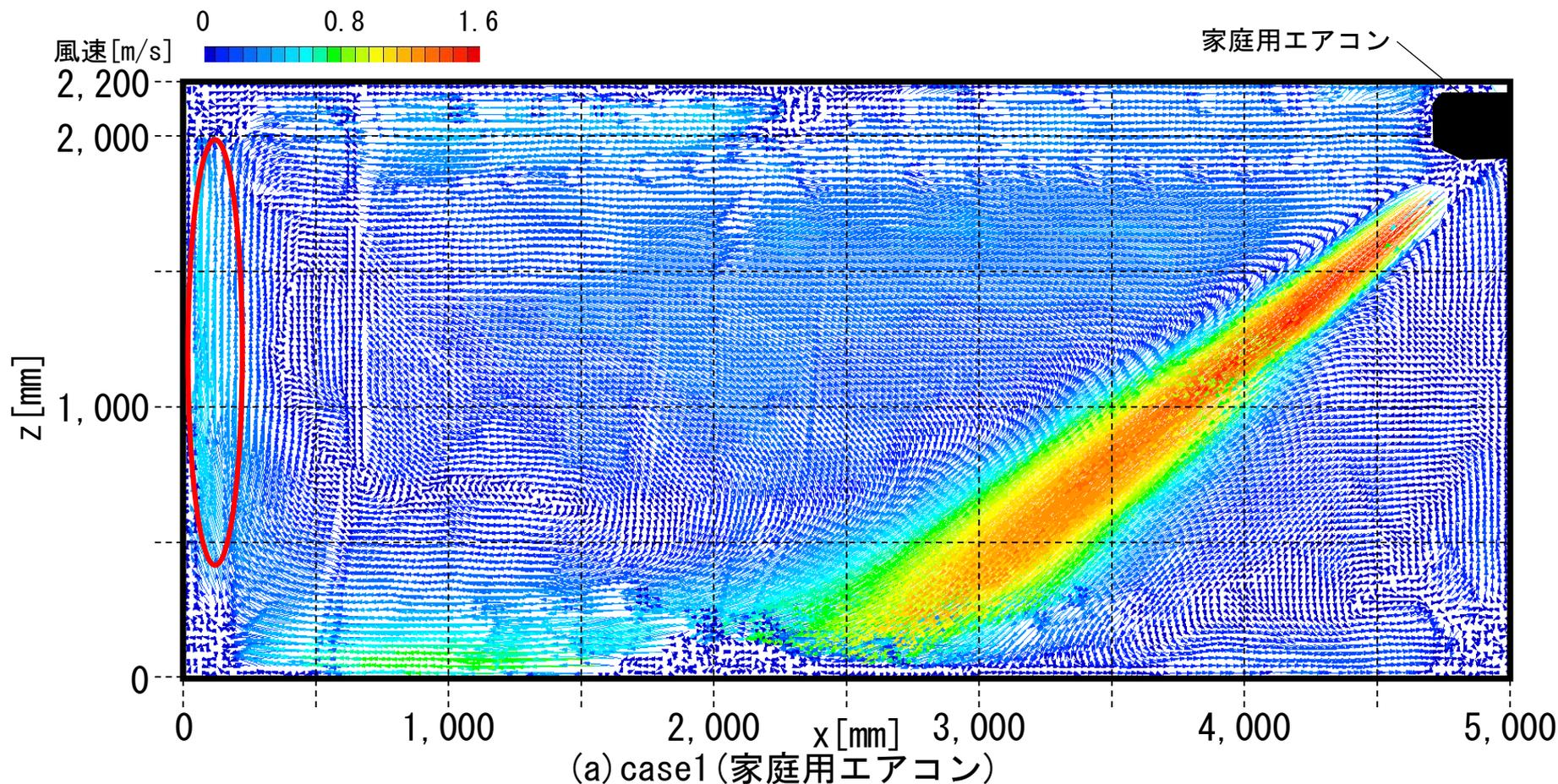
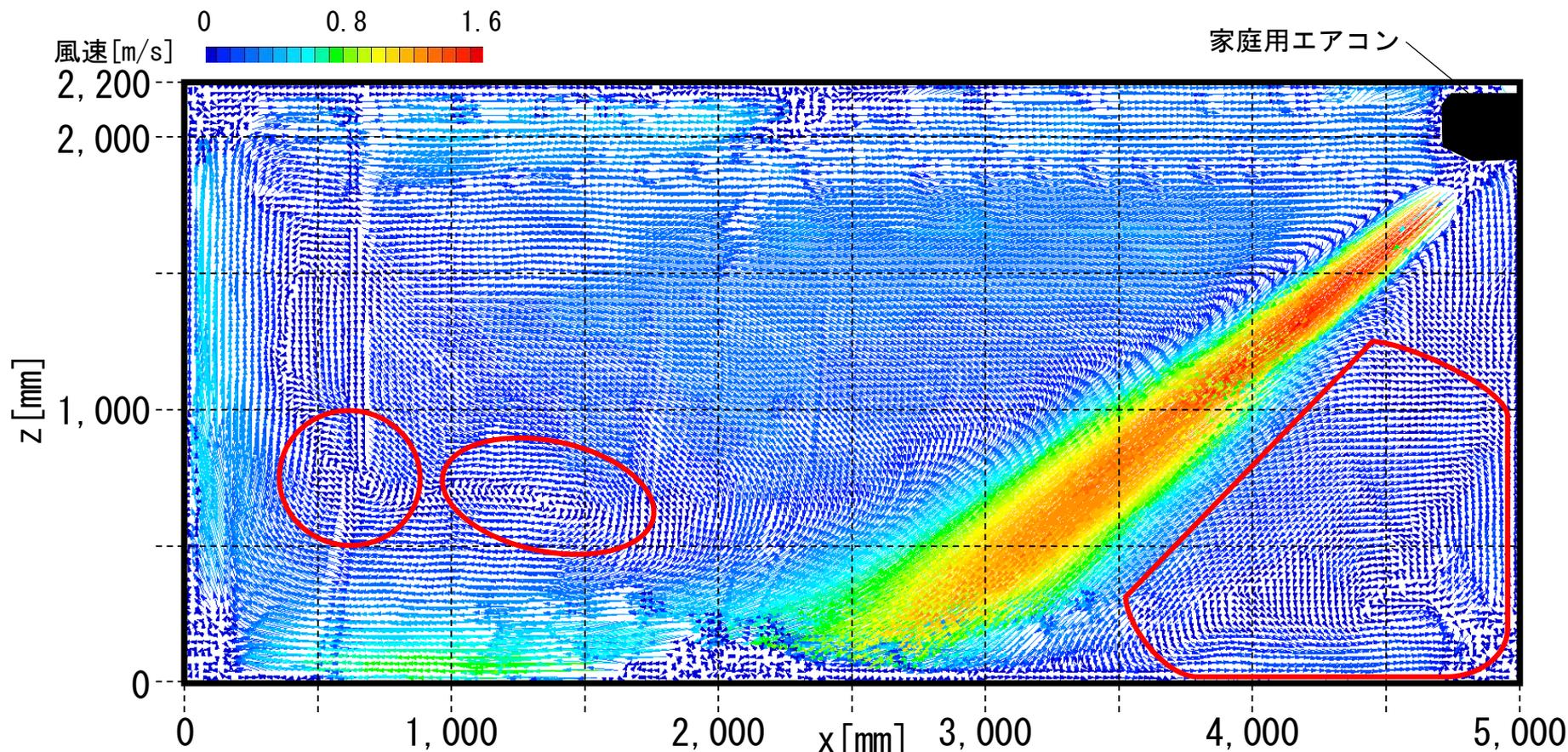


図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

床面に到達した気流が左右に分かれて左右の壁面に衝突する。室の左下と右下付近には、**定常的な渦**が形成される。

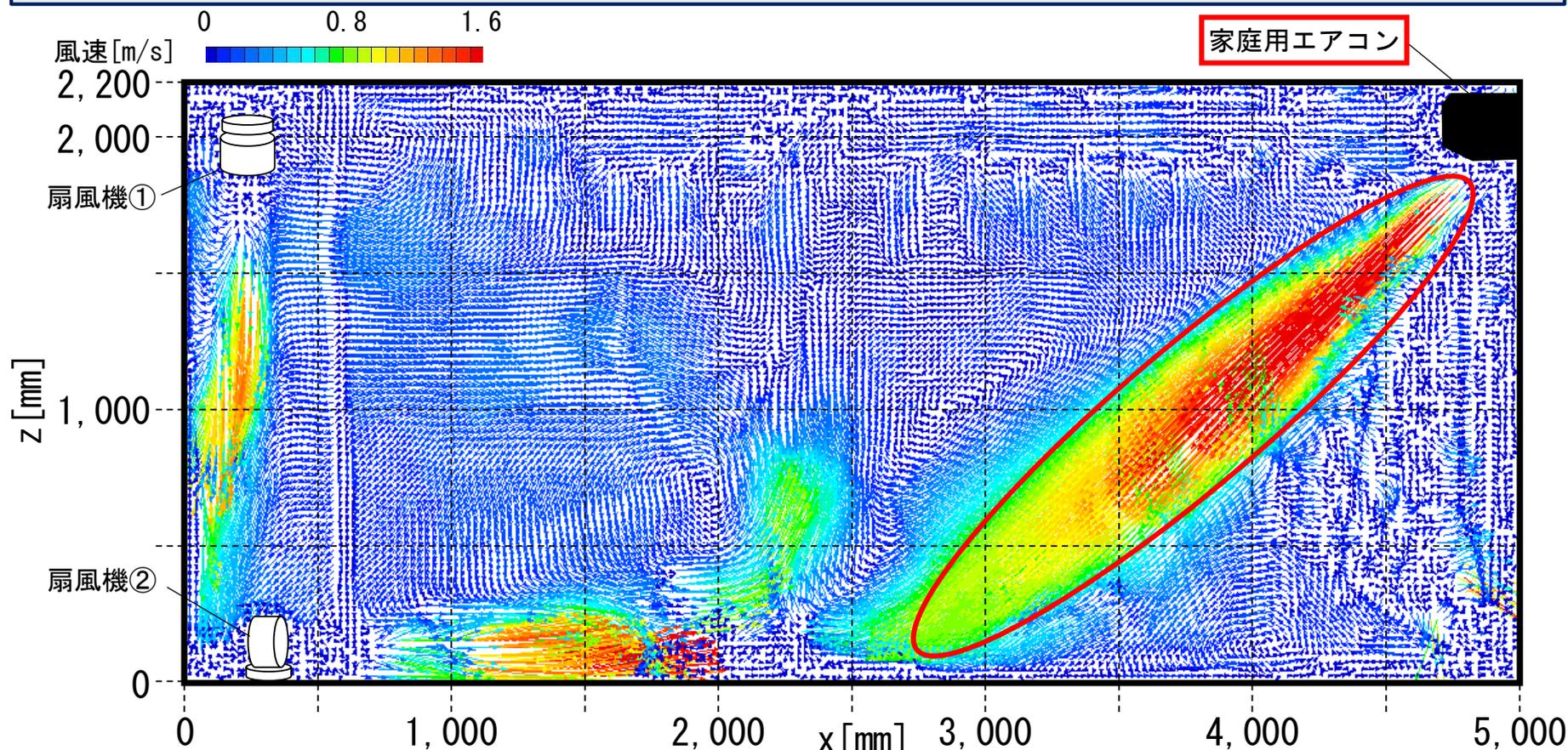


(a) case1 (家庭用エアコン)

図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

エアコンの吹出部分で約1.5~1.9[m/s]、扇風機①の吹出部分で約1.0~1.4[m/s]、扇風機②の吹出部分で約1.1~1.6[m/s]の風速が算出される。

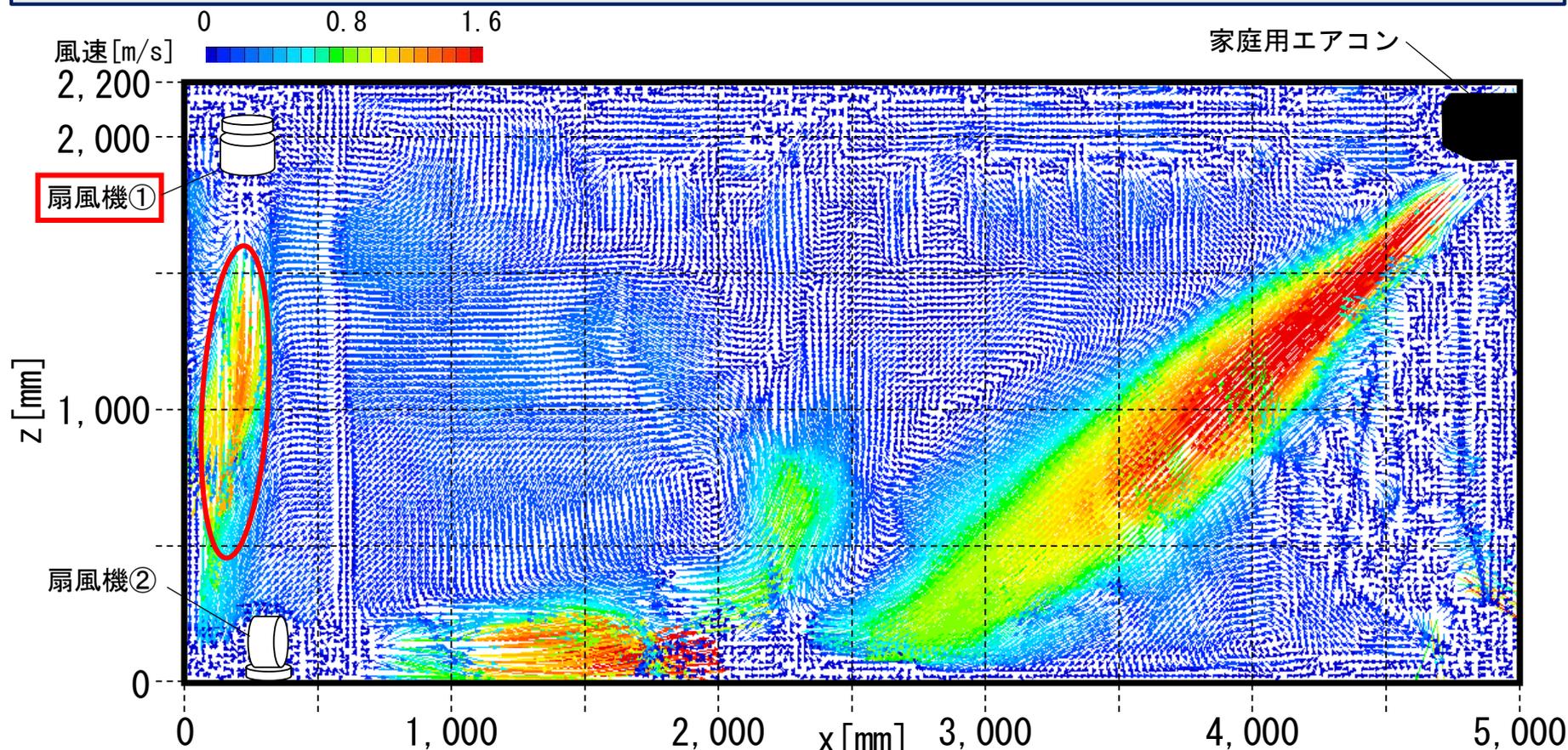


(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機2台)

図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

エアコンの吹出部分で約1.5~1.9[m/s]、**扇風機①の吹出部分**で**約1.0~1.4[m/s]**、扇風機②の吹出部分で約1.1~1.6[m/s]の風速が算出される。

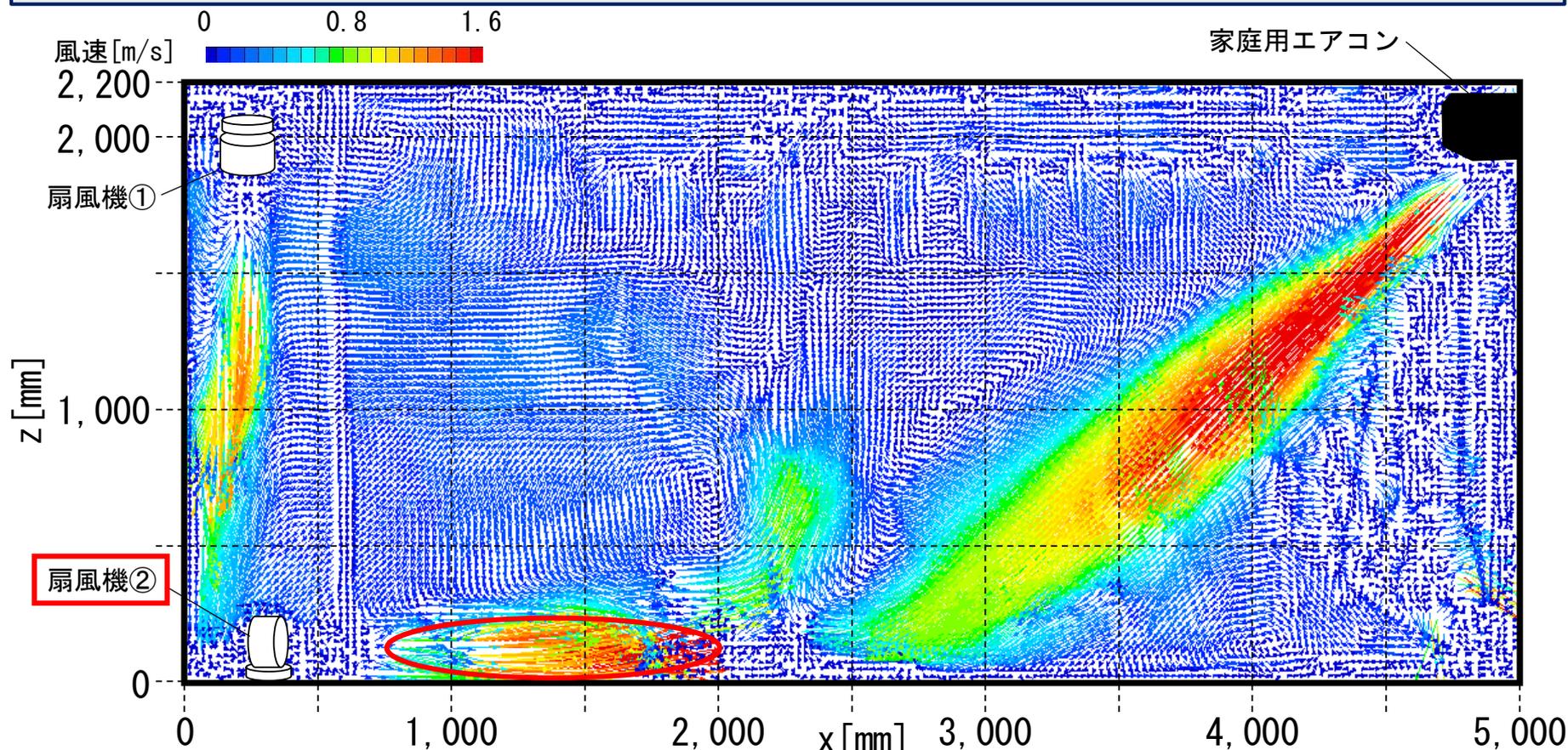


(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機2台)

図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

エアコンの吹出部分で約1.5~1.9[m/s]、扇風機①の吹出部分で約1.0~1.4[m/s]、**扇風機②の吹出部分で約1.1~1.6[m/s]**の風速が算出される。

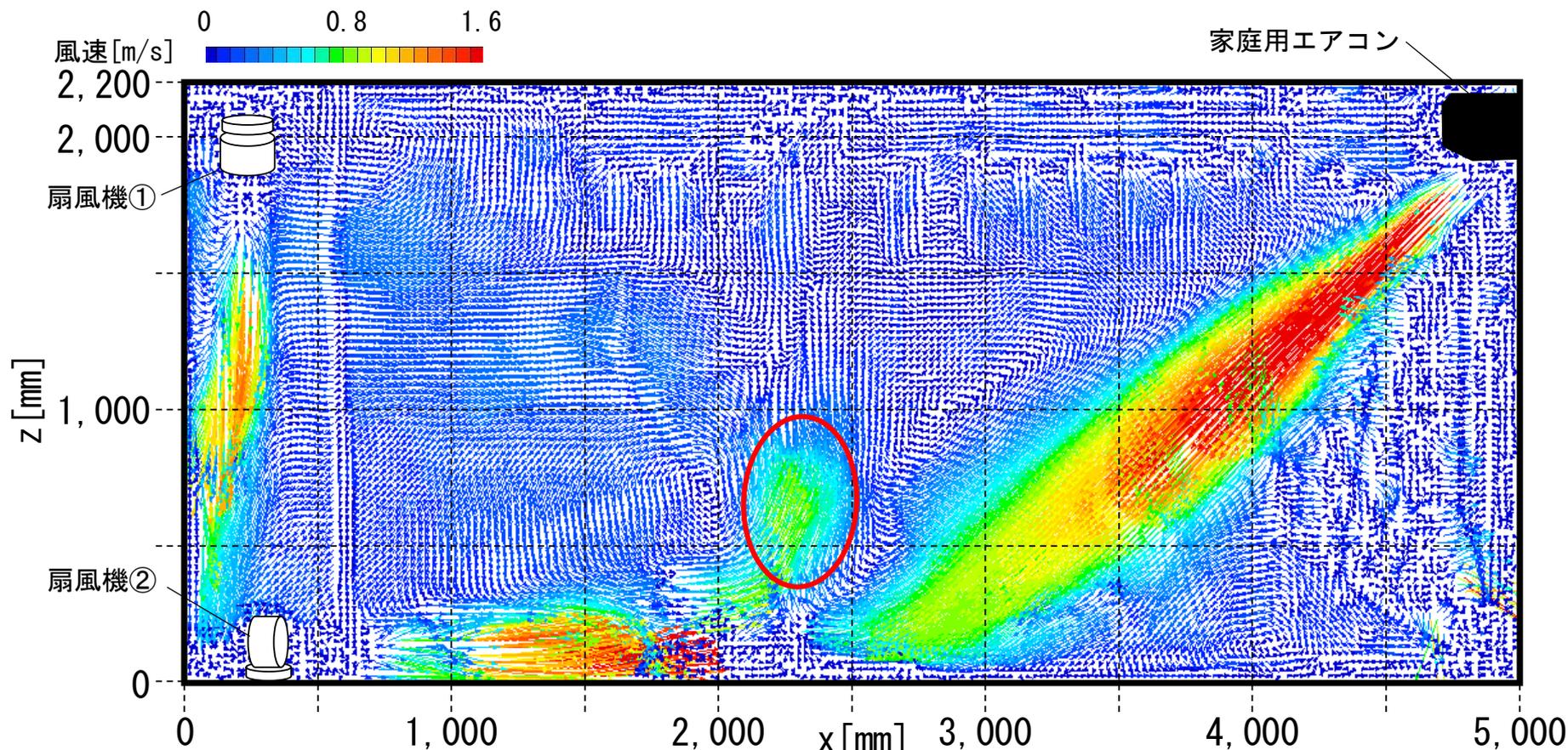


(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機2台)

図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

エアコンの吹出気流と扇風機②の吹出気流が室中央で衝突し、
 風速約0.5~0.8[m/s]の上向き気流が生じる。

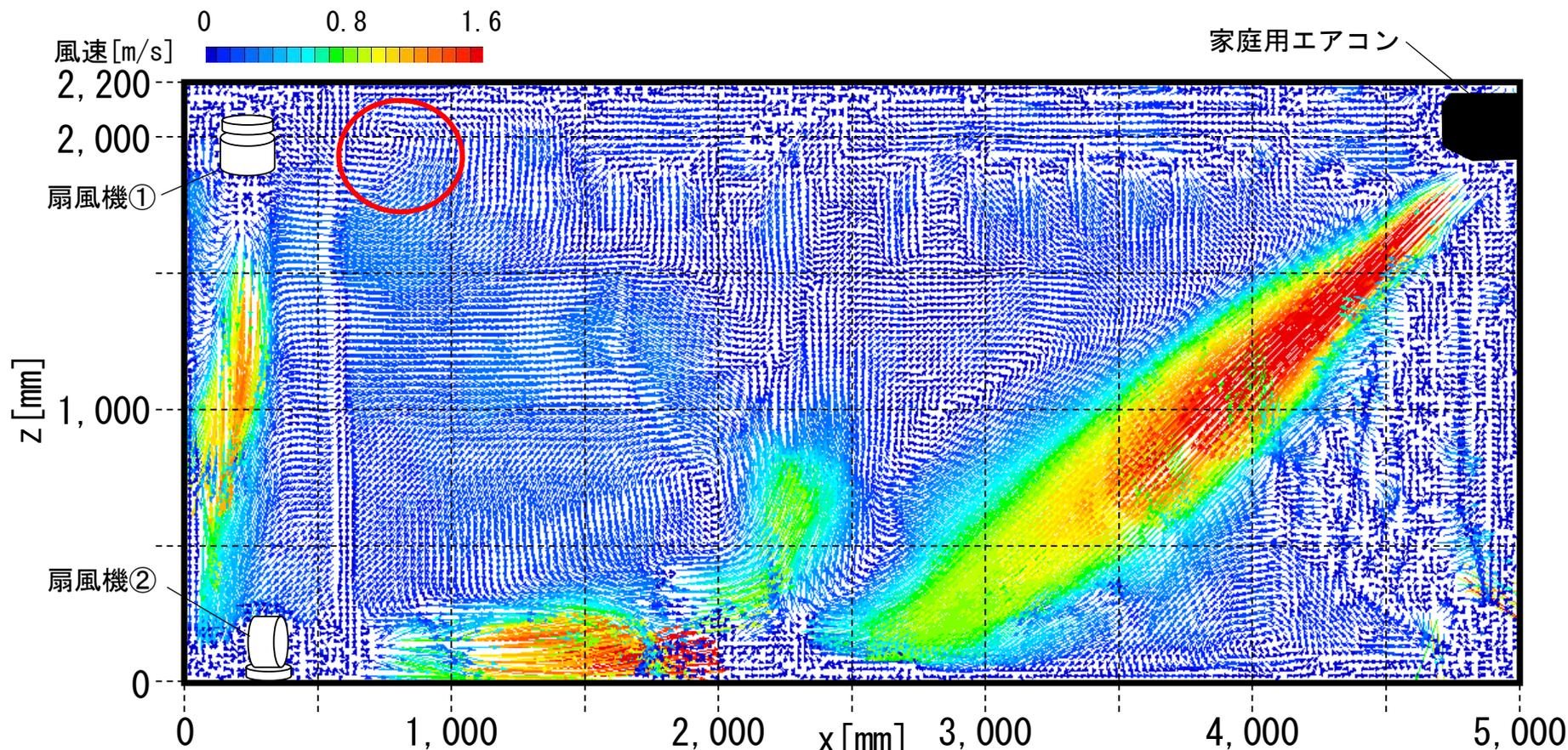


(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機2台)

図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

扇風機①の吸込口付近、室の右下付近、室中央で生じた上向きの気流の左右には、**定常的な渦**が形成される。

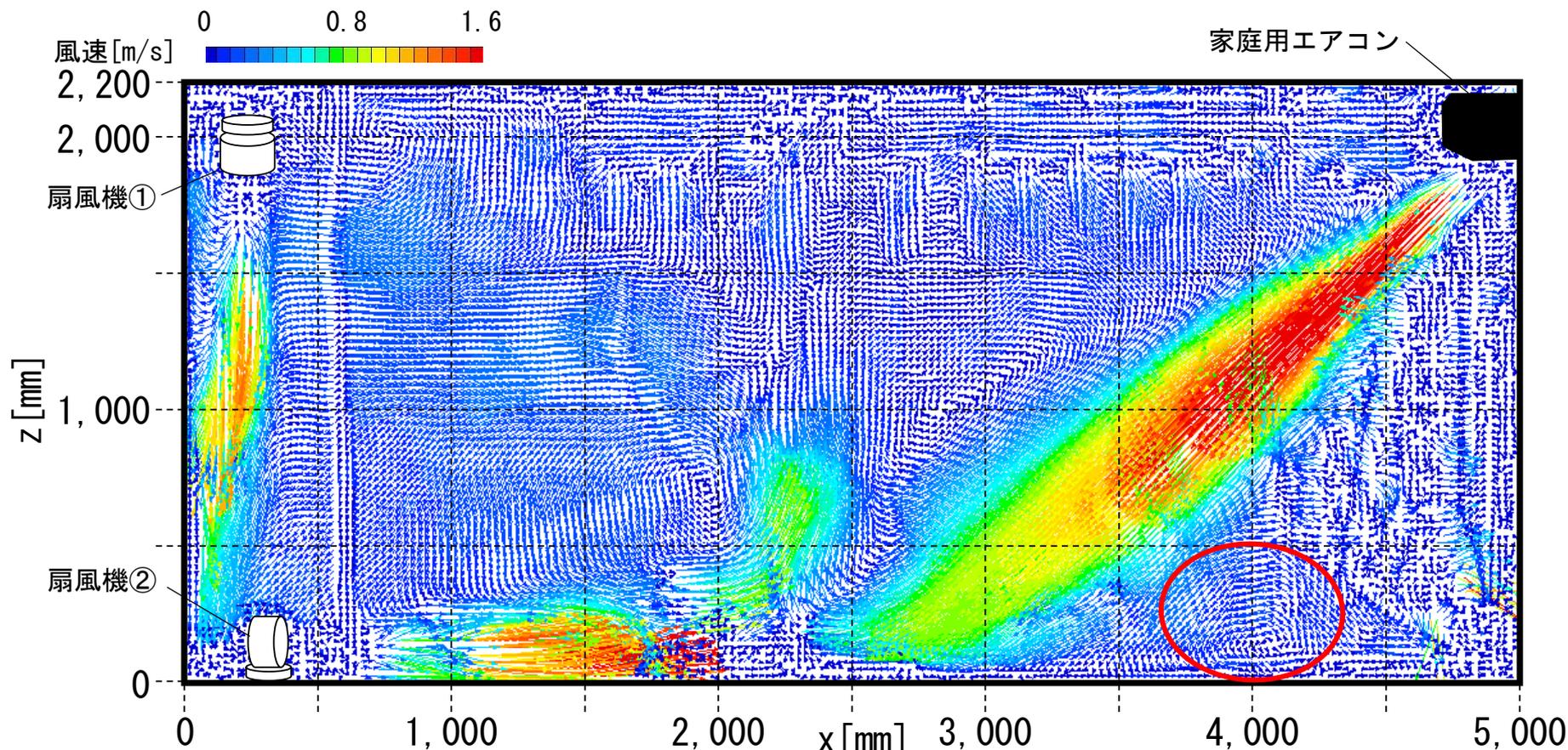


(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機2台)

図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

扇風機①の吸込口付近、**室の右下付近**、室中央で生じた上向きの気流の左右には、**定常的な渦**が形成される。

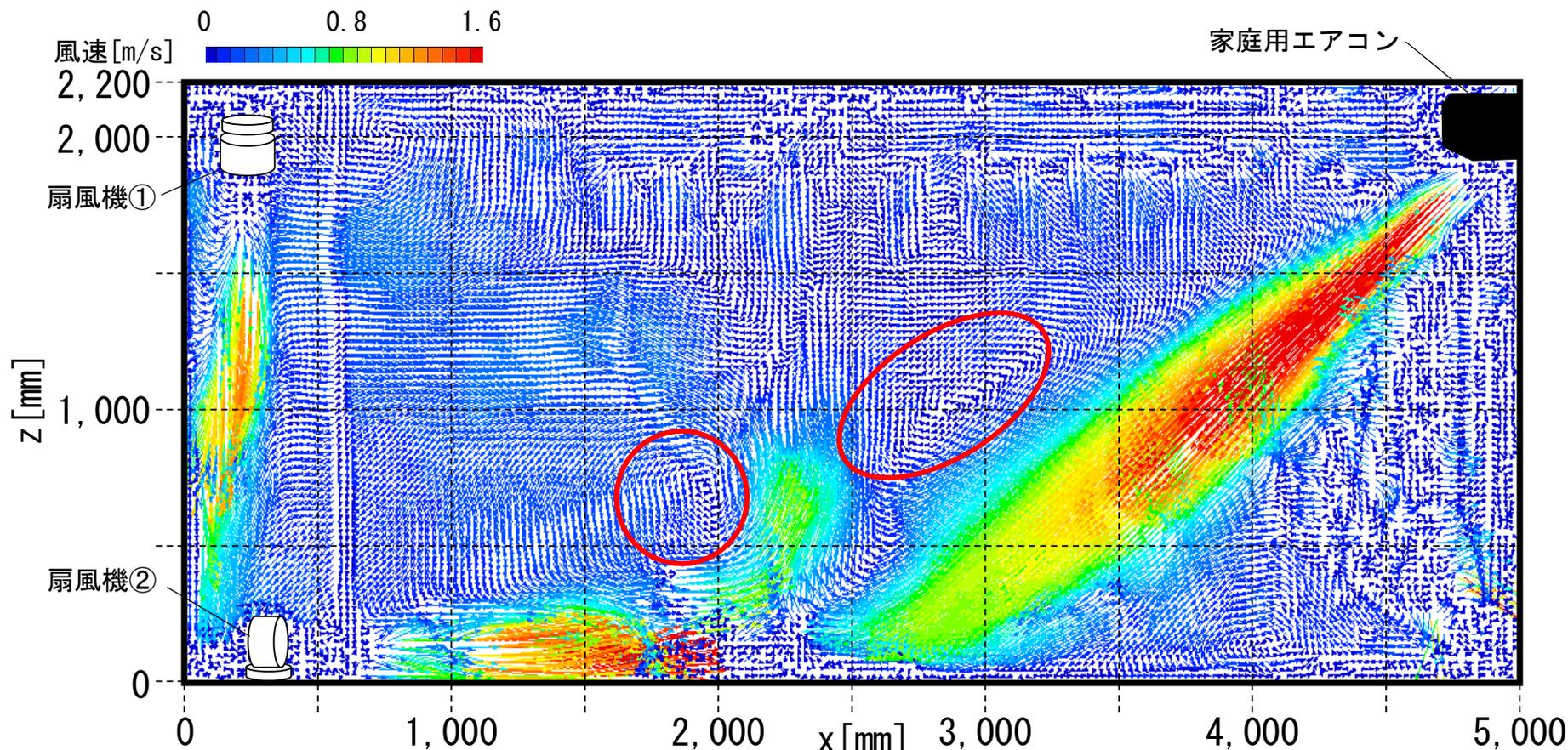


(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機2台)

図3 平均風速ベクトル分布

実大室内空間の気流性状 (b) case2

扇風機①の吸込口付近、室の右下付近、室中央で生じた上向き気流の左右には、定常的な渦が形成される。



(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機2台)

図3 平均風速ベクトル分布

フレーム間隔の空間分布 (a) case1

フレーム間隔の空間分布は、**測定点毎**に最適と考えられる風速ベクトルとして選択されたフレーム間隔のうち、**最も多く選択されたフレーム間隔**を表示する。

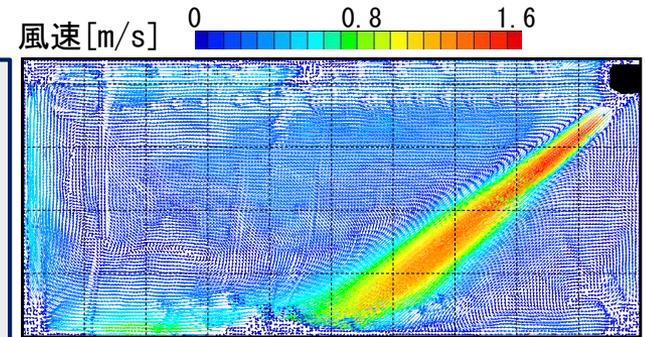
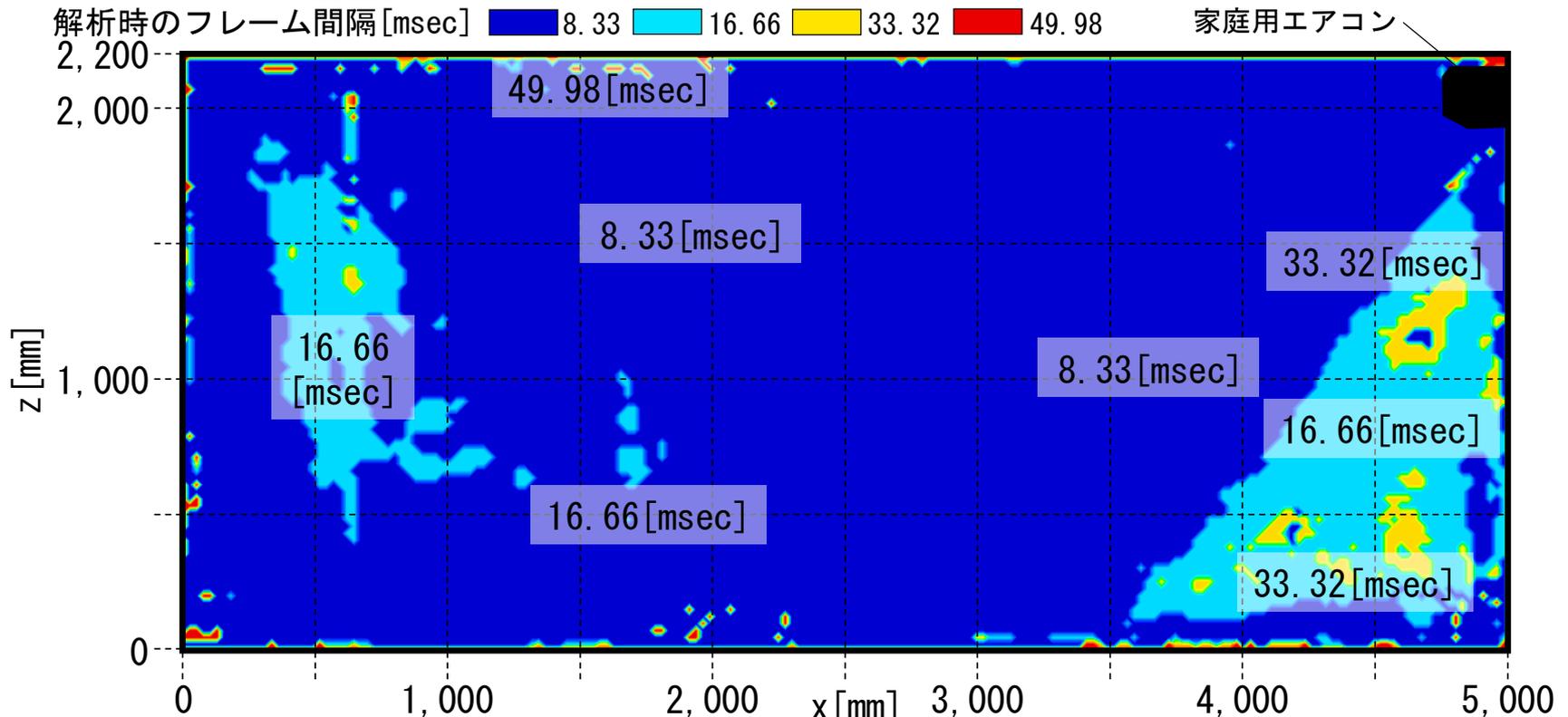


図3 平均風速ベクトル分布
家庭用エアコン



(a) case1 (家庭用エアコン)

図4 最適と考えられる風速が選択されたフレーム間隔の空間分布

フレーム間隔の空間分布 (a) case1

case1では、**広い範囲**で比較的速いフレーム間隔である**8.33[msec]**の風速ベクトルが選択される。

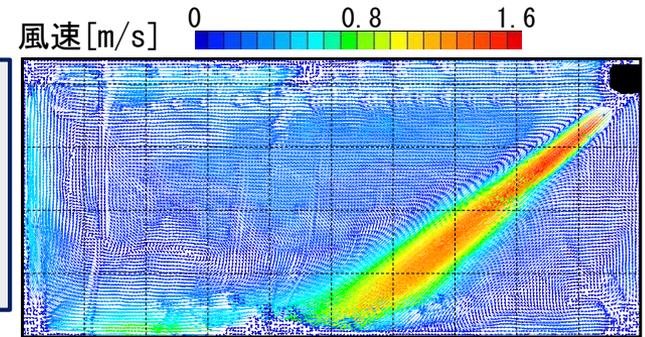
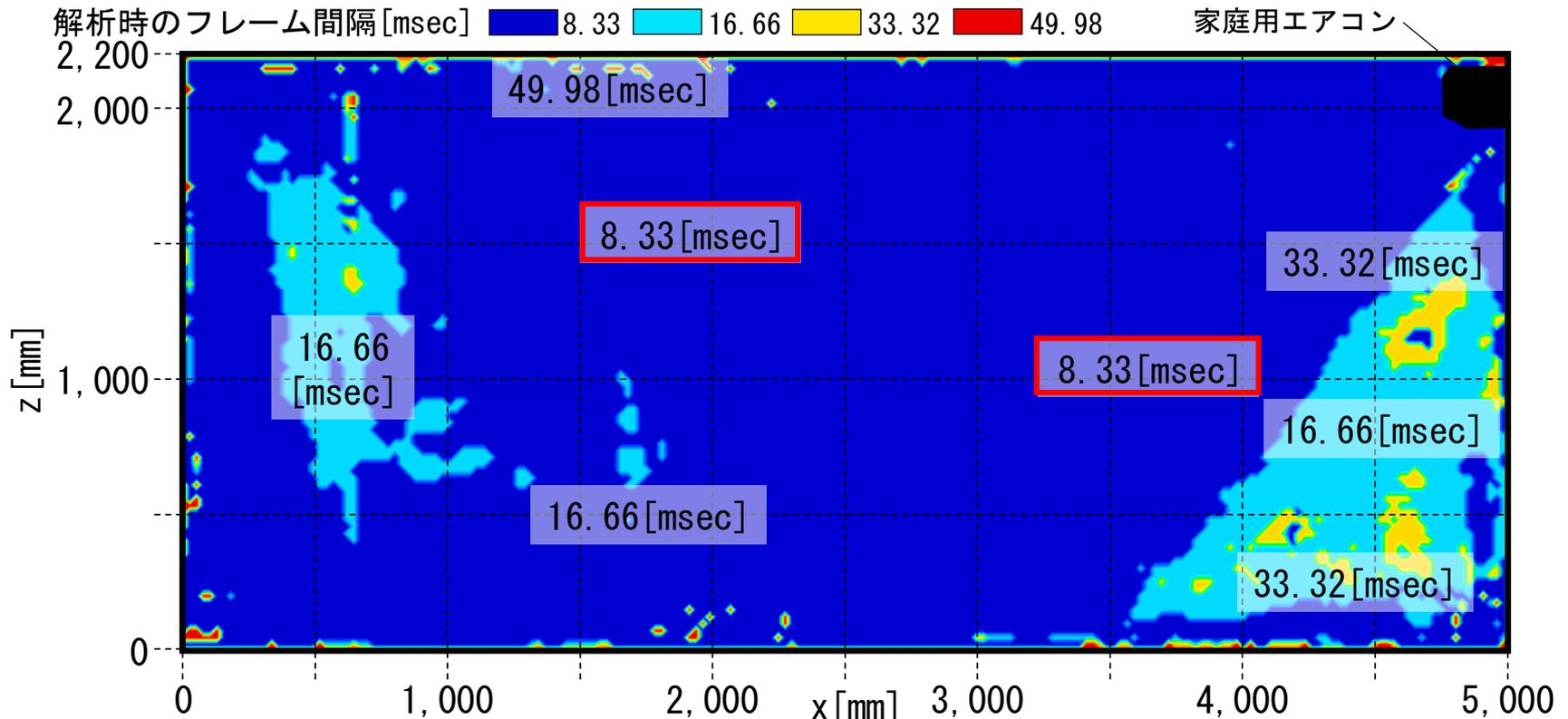


図3 平均風速ベクトル分布
家庭用エアコン



(a) case1 (家庭用エアコン)

図4 最適と考えられる風速が選択されたフレーム間隔の空間分布

フレーム間隔の空間分布 (a) case1

室の右下、左側付近の風速の変動が比較的大きい箇所や風速の遅い範囲では、遅いフレーム間隔である**16.66~49.98[msec]**の風速ベクトルが選択される傾向がある。

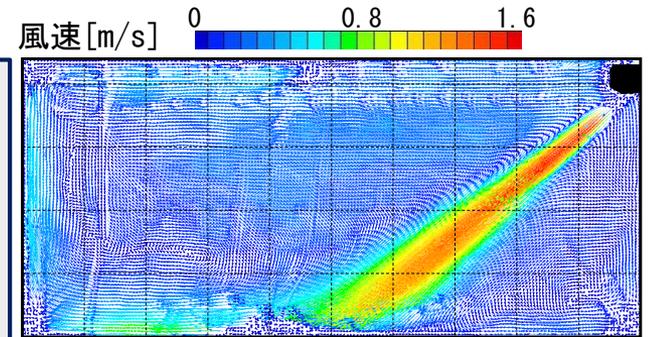
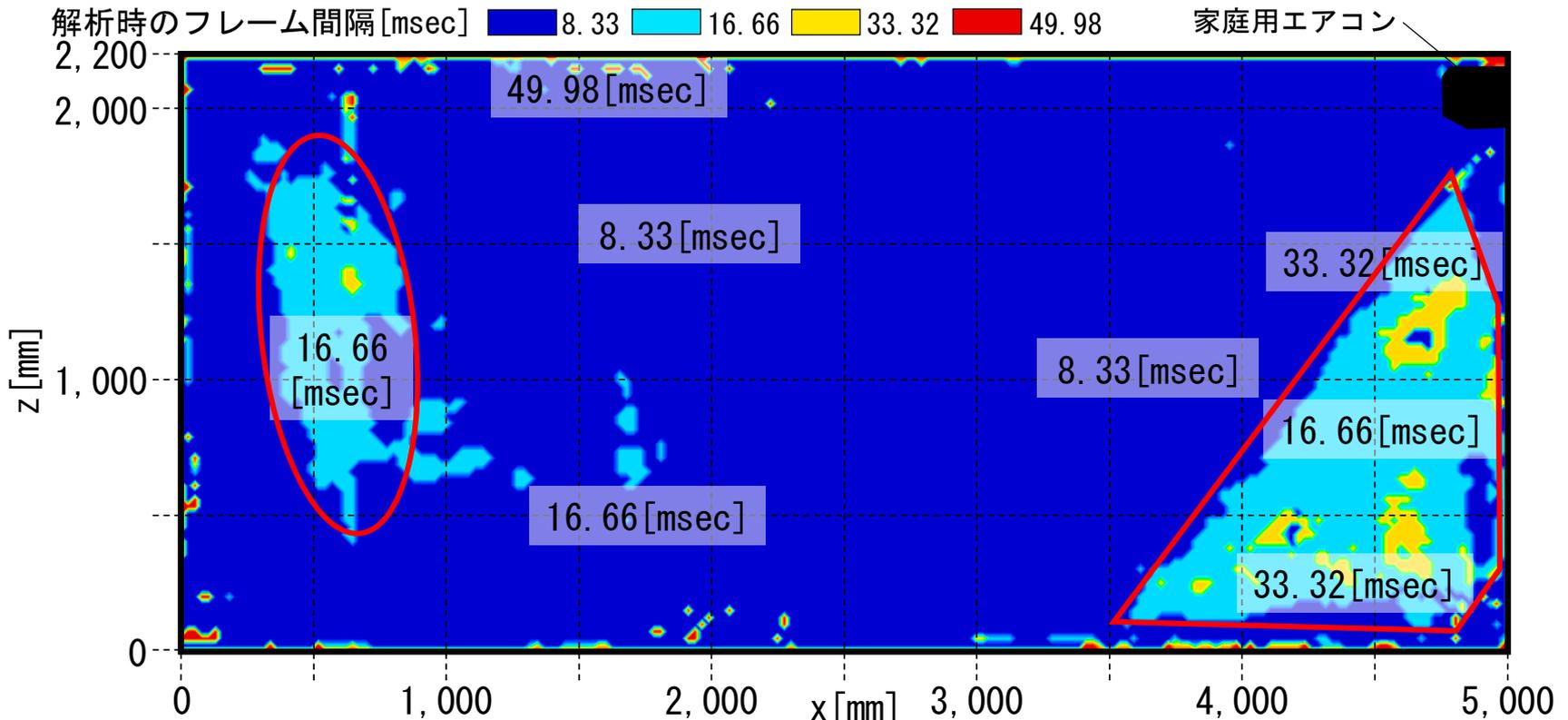


図3 平均風速ベクトル分布
家庭用エアコン



(a) case1 (家庭用エアコン)

図4 最適と考えられる風速が選択されたフレーム間隔の空間分布

フレーム間隔の空間分布 (b) case2

case2においても、**広い範囲**で比較的速いフレーム間隔である **8 [msec]** の風速ベクトルが選択される。

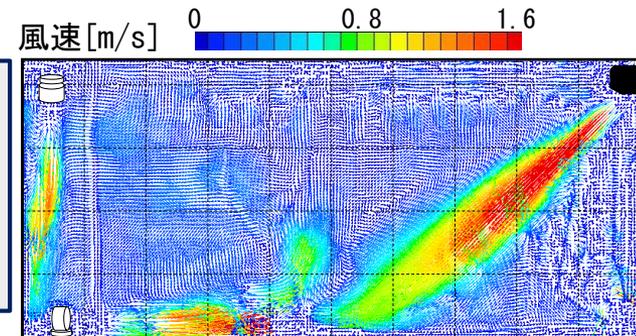
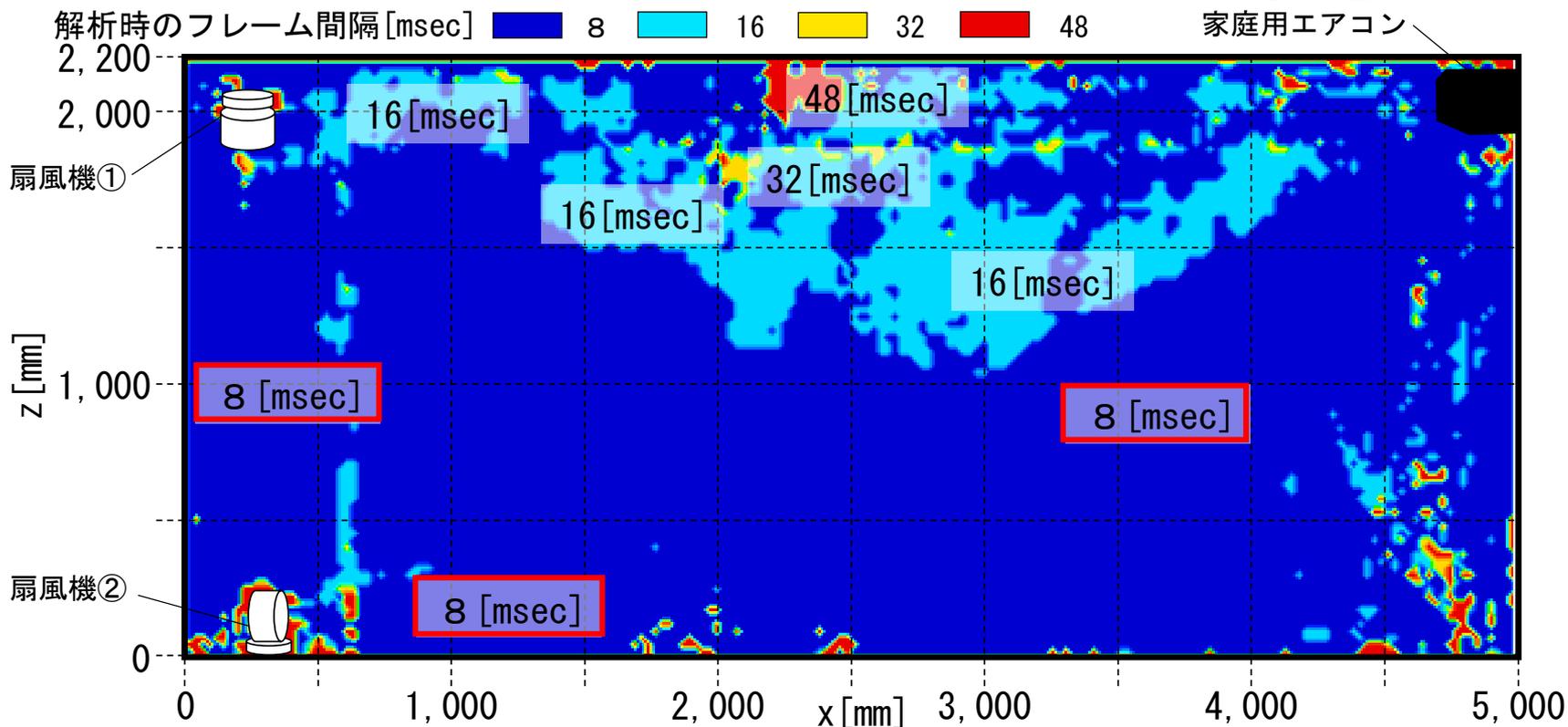


図3 平均風速ベクトル分布
家庭用エアコン



(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機 2台)

図4 最適と考えられる風速が選択されたフレーム間隔の空間分布

フレーム間隔の空間分布 (b) case2

天井面付近の風速の変動が比較的大きい箇所や風速の遅い範囲では、遅いフレーム間隔である16~48[msec]の風速ベクトルが選択される傾向がある。

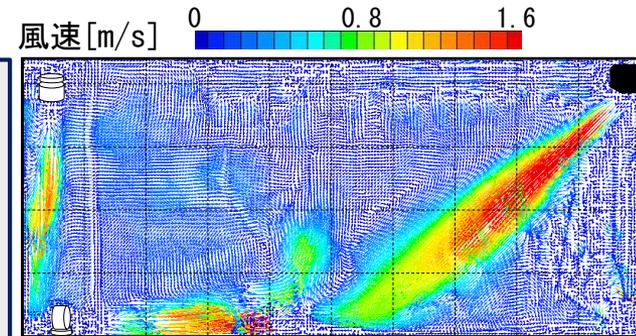
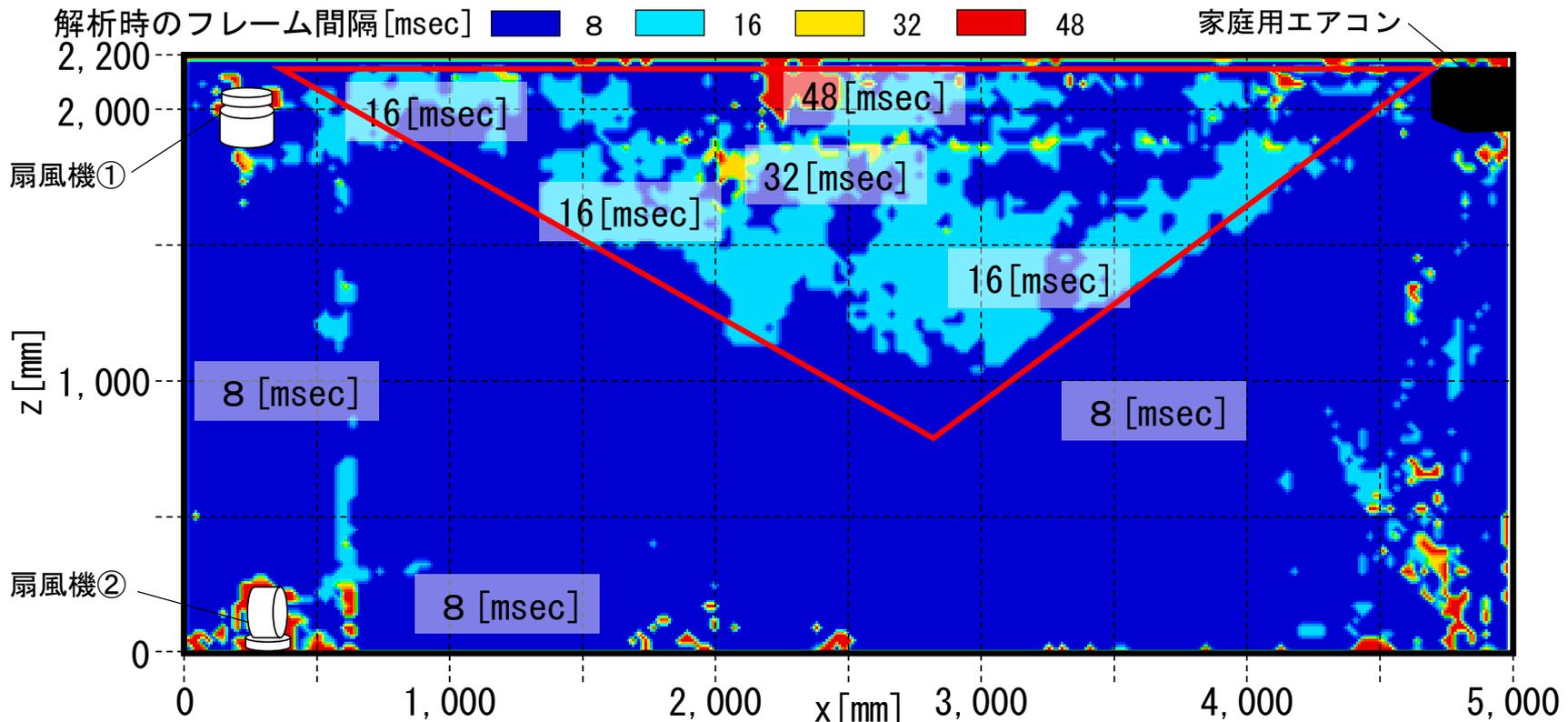


図3 平均風速ベクトル分布
家庭用エアコン



(b) case2 (家庭用エアコン+扇風機2台)

図4 最適と考えられる風速が選択されたフレーム間隔の空間分布

- ① case1 (家庭用エアコン) では、エアコンの吹出気流が床面に到達した後、左右に分かれて左右の壁面に衝突する。室の左下、右下付近には、定常的な渦が形成される。
- ② case2 (家庭用エアコン+扇風機 2 台) では、エアコンの吹出気流と扇風機②の吹出気流が室中央で衝突し、上向きの気流が生じる。室中央で生じた上向きの気流の左右には、定常的な渦が形成される。
- ③ 測定領域の広い範囲で比較的速いフレーム間隔である 8、8.33[msec] の風速ベクトルが選択される。風速の変動が比較的大きい箇所や風速の遅い範囲では、遅いフレーム間隔である 16 ~ 49.98[msec] の風速ベクトルが選択される傾向がある。