

市街地を対象とした 建物周辺気流に関する研究

LES・PIVによる地表面居住域付近における
平均風速分布及びガストファクターの検討

指導教員

水越 裕紀

有波 裕貴 助教

研究目的

近年、商業地域における容積率の規制緩和や、特例容積率適用地区の指定による容積率の地区内移転などにより特定地域において土地が部分的に高密度利用されている。これらの地域では都市環境問題の一つであるビル風と呼ばれる風害が発生する可能性がある。

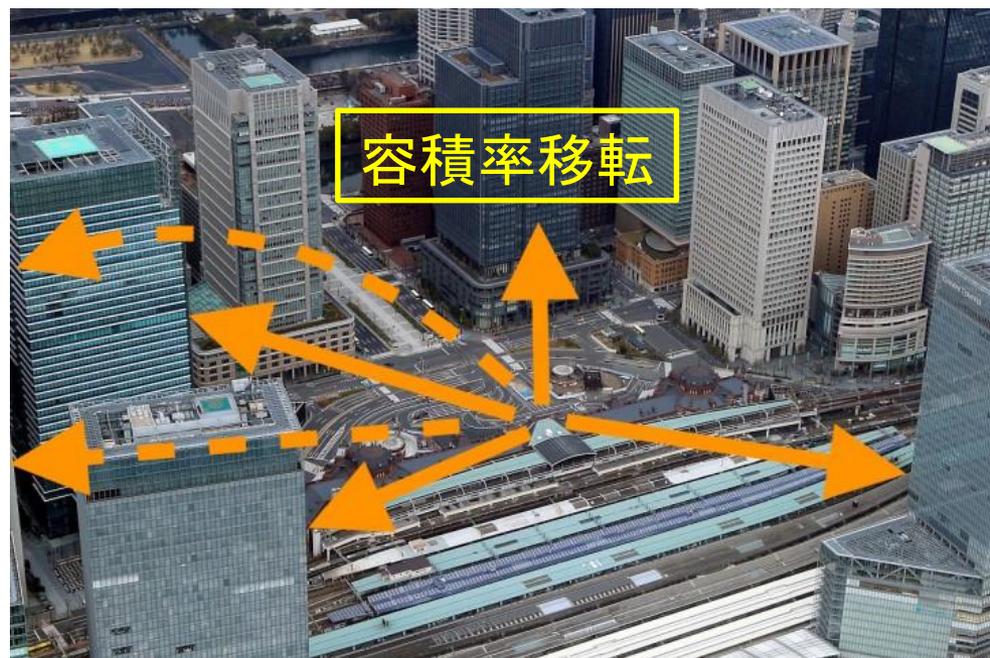


図 特例容積率適用地区における容積率移転のイメージ

研究目的

ビル風は周辺と比較して特に高層の建物が建設されることで、建物建設前後で建物周辺の地表面付近における強風の発生頻度が増加する現象である。

偏った状況で高密度利用されている地域におけるビル風を解明することは都市の風環境を検討する上で重要であると考えられる。

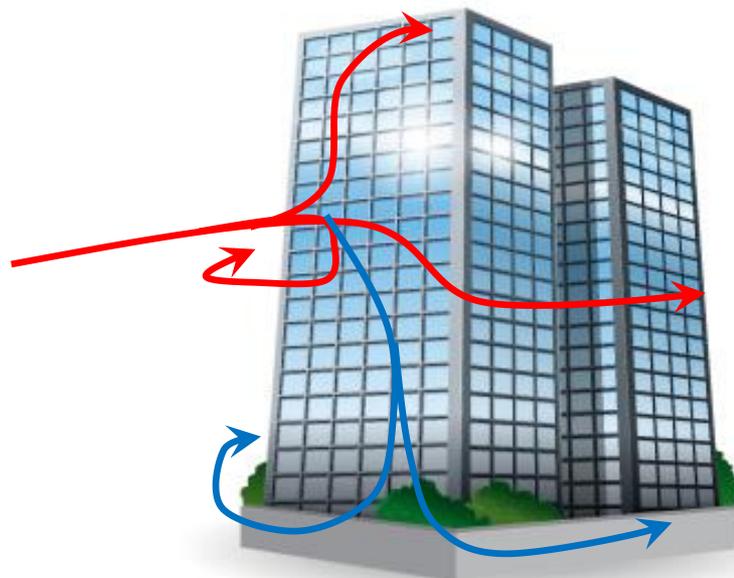


図 ビル風の三次元的な流れ構造のイメージ

研究目的

高さの異なる建物で構成された市街地では複雑な気流性状となる。本研究では、Large-Eddy Simulation (以下:LES) 及び粒子画像流速測定法 (以下:PIV) を用いてビル風によって生じる流れ場を検討するため、まず基礎的段階として単純な矩形建物が2棟組み合わせられたモデルを対象に平均風速及びガストファクター^{※1} (以下:GF) の空間分布を算出する。

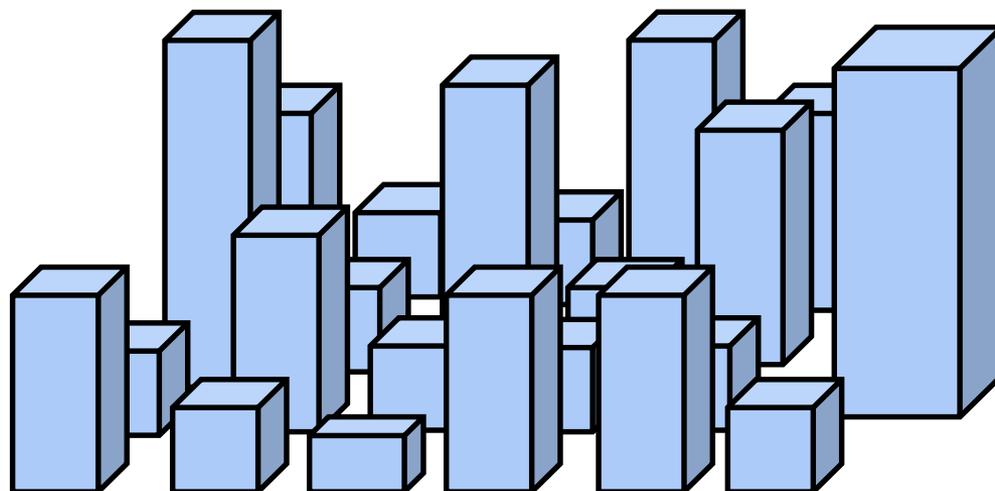
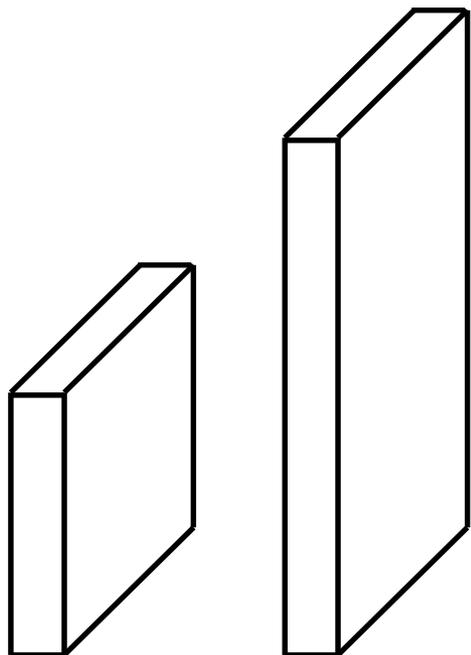


図 市街地イメージ

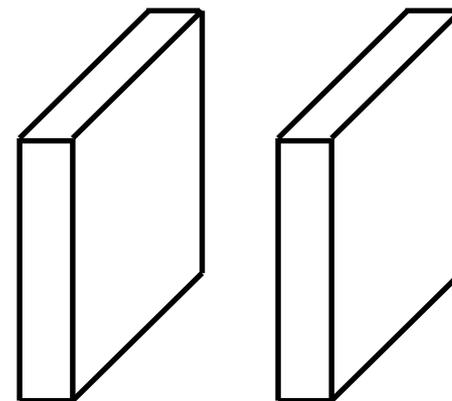
※1 ガストファクターとは、突風率を意味し、平均風速に対する最大瞬間風速の比で表される。

各建物モデルにおいて平均風速及びGFの空間分布を比較・検討することで、建物周辺の風環境を評価※²することを目的とする。



中層モデル 高層モデル

図 中層・高層モデル



中層モデル 中層モデル

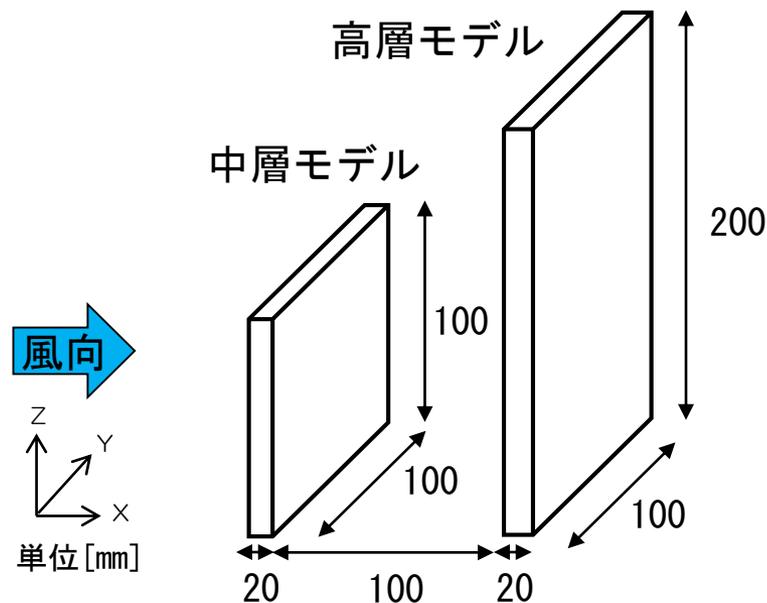
図 中層・中層モデル

※² 風環境は平均風速とGFから算出される最大瞬間風速の年間の累積頻度で評価する。

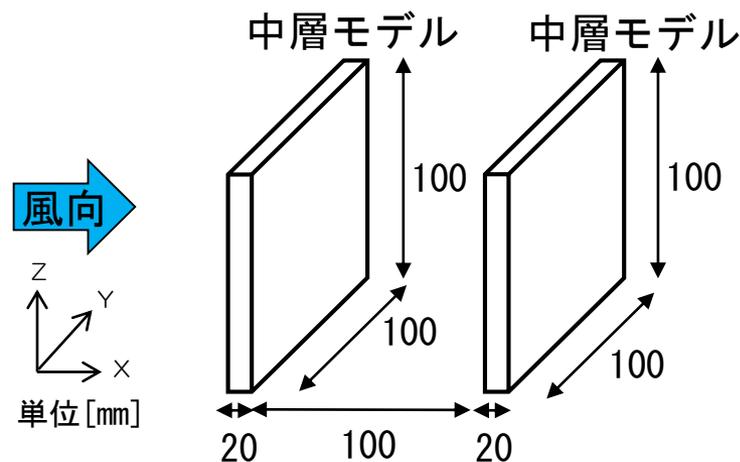
研究概要

表 1 実験及び解析case

	風上側建物モデル	風下側建物モデル	測定・解析断面
case1-1	中層(高さ100[mm])	高層(高さ200[mm])	水平断面
case1-2			鉛直断面
case2-1	中層(高さ100[mm])	中層(高さ100[mm])	水平断面
case2-2			鉛直断面



(a) case1(中層・高層)



(b) case2(中層・中層)

図 1 建物モデルの概要

実験・解析対象

建物モデルの寸法は20[mm] (幅) × 100[mm] (奥行き) × 100[mm] (高さ)の**中層モデル**と、20[mm] (幅) × 100[mm] (奥行き) × 200[mm] (高さ)の**高層モデル**とする。

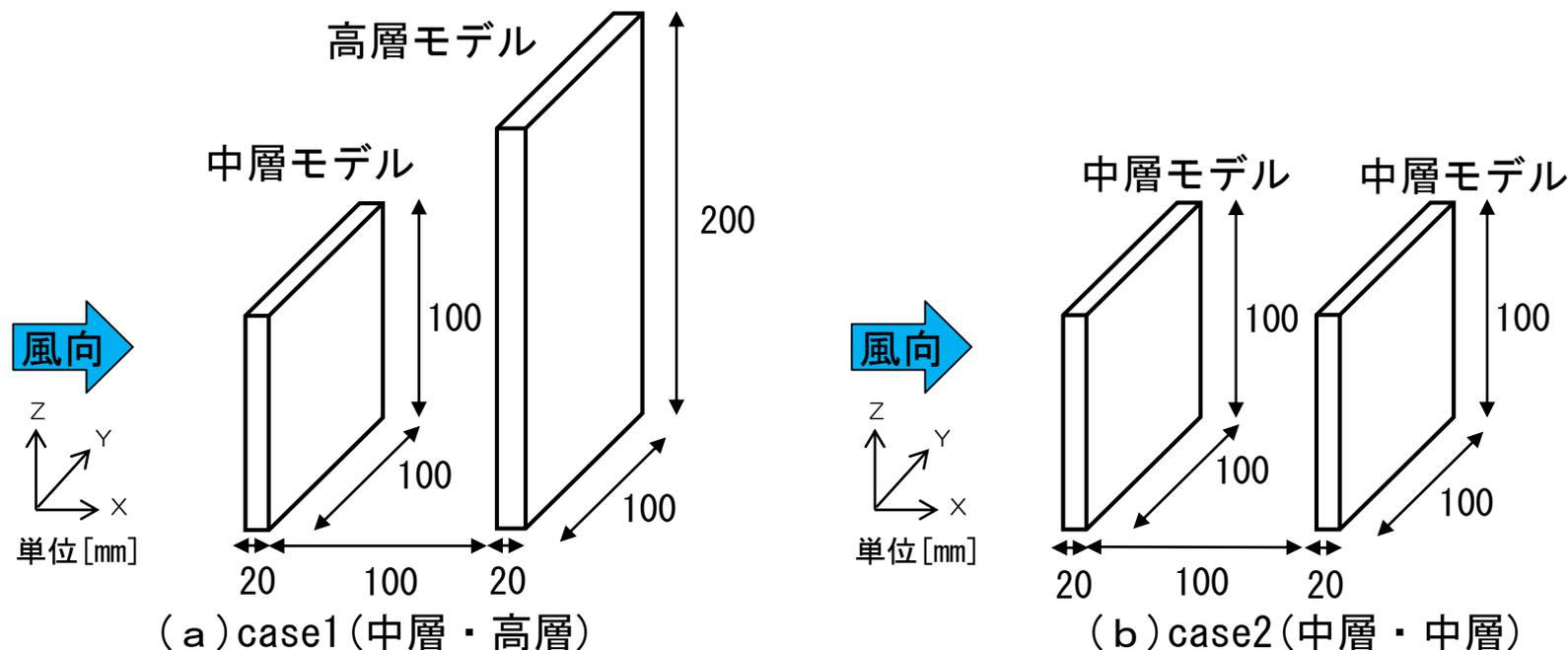


図1 建物モデルの概要

実験・解析対象

case1では風上側に中層モデル、風下側に高層モデルを、
case2では風上側と風下側に中層モデルを風向に対して直列
に配置する。両モデルの隣棟間隔はそれぞれ100[mm]とする。

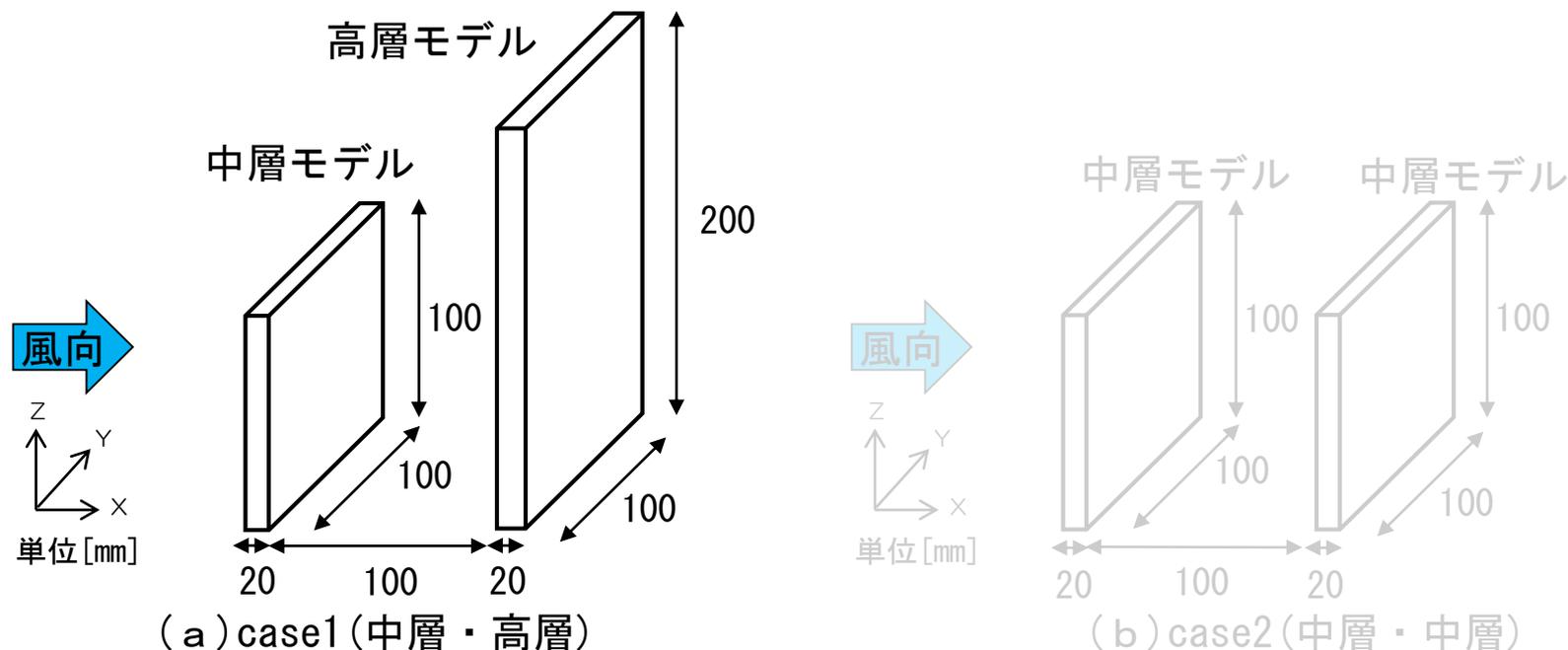


図1 建物モデルの概要

実験・解析対象

case1では風上側に中層モデル、風下側に高層モデルを、
case2では風上側と風下側に中層モデルを風向に対して直列
に配置する。両モデルの隣棟間隔はそれぞれ100[mm]とする。

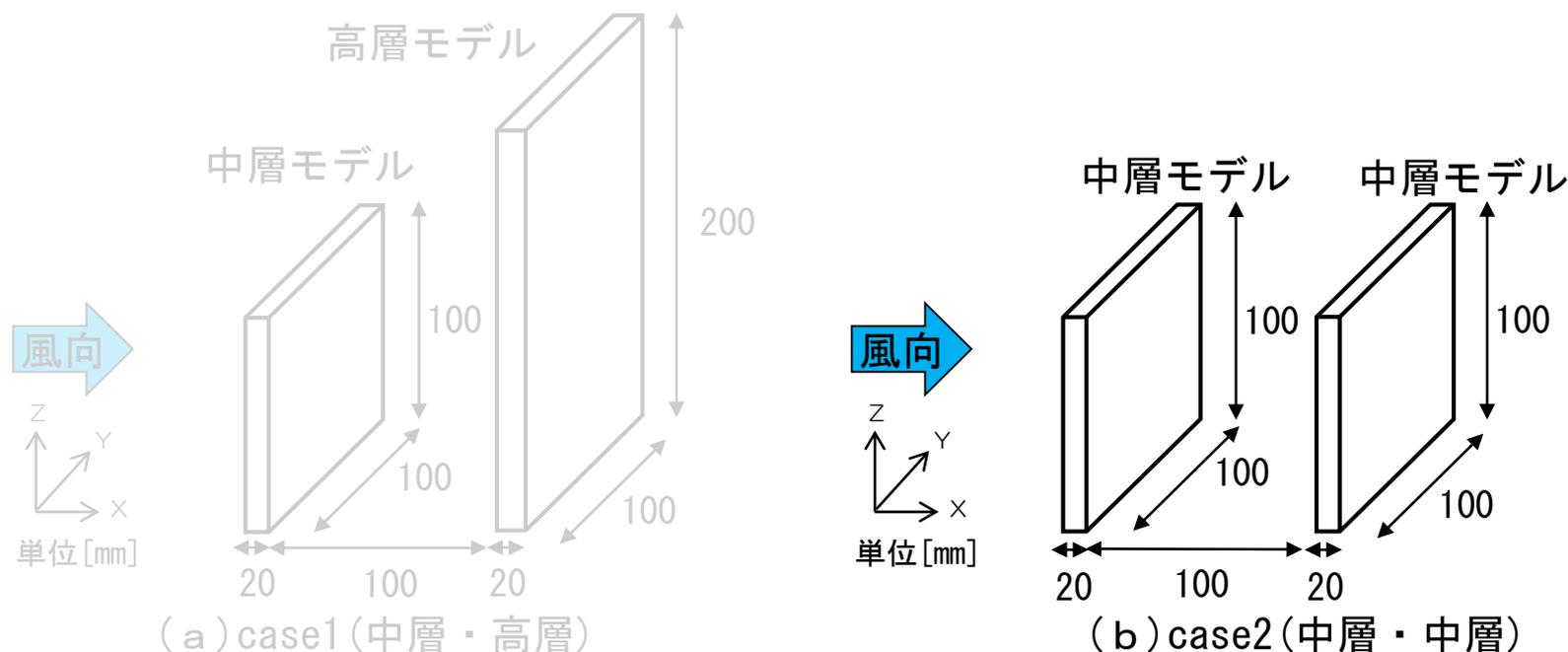


図1 建物モデルの概要

実験・解析対象

case1では風上側に中層モデル、風下側に高層モデルを、
case2では風上側と風下側に中層モデルを風向に対して直列
に配置する。両モデルの隣棟間隔はそれぞれ100[mm]とする。

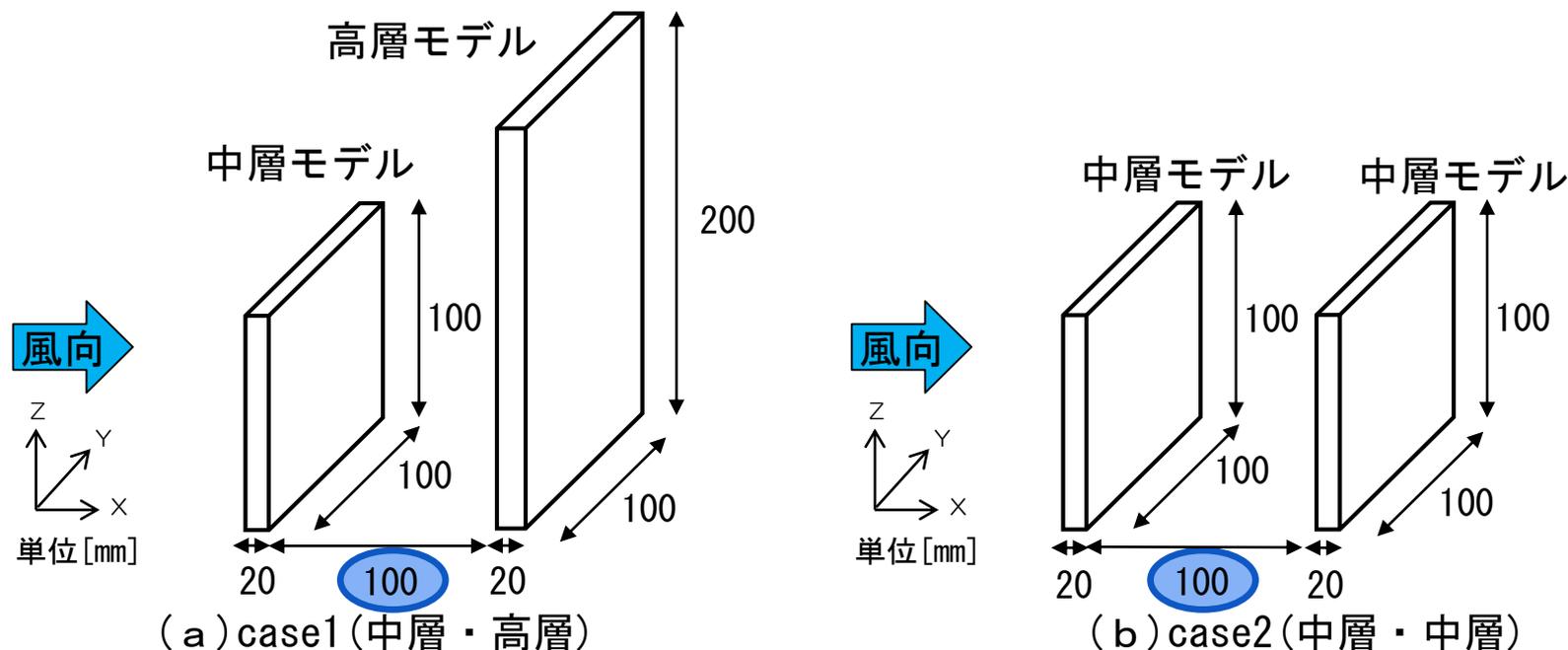


図1 建物モデルの概要

実験・解析対象

尚、実験・解析結果の表示断面は、**地表面付近※³** ($z=4.0$ [mm]) の水平断面と建物モデル中心 ($y=900$ [mm]) の鉛直断面とする。

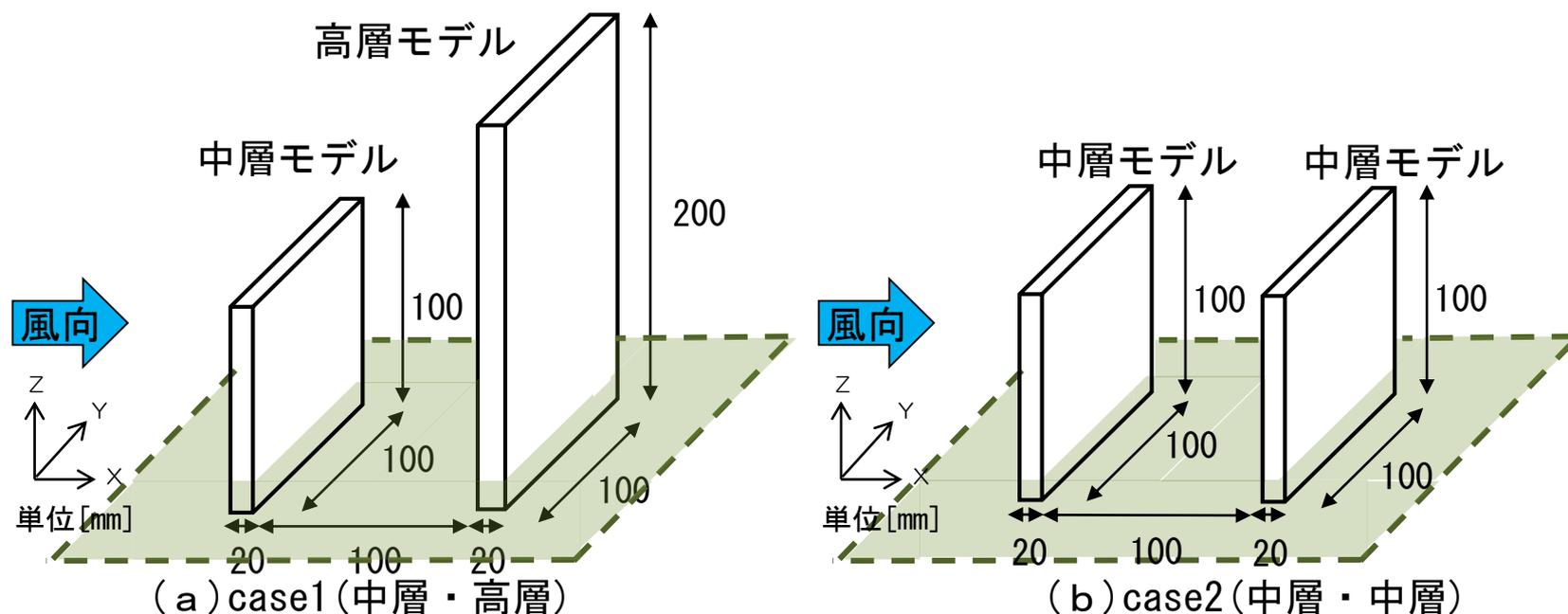


図1 建物モデルの概要

※³ 模型の縮尺を1/500とすると、地表面から2,000 [mm] の位置に相当する。

実験・解析対象

尚、実験・解析結果の表示断面は、地表面付近※3 ($z=4.0$ [mm]) の水平断面と建物モデル中心 ($y=900$ [mm]) の鉛直断面とする。

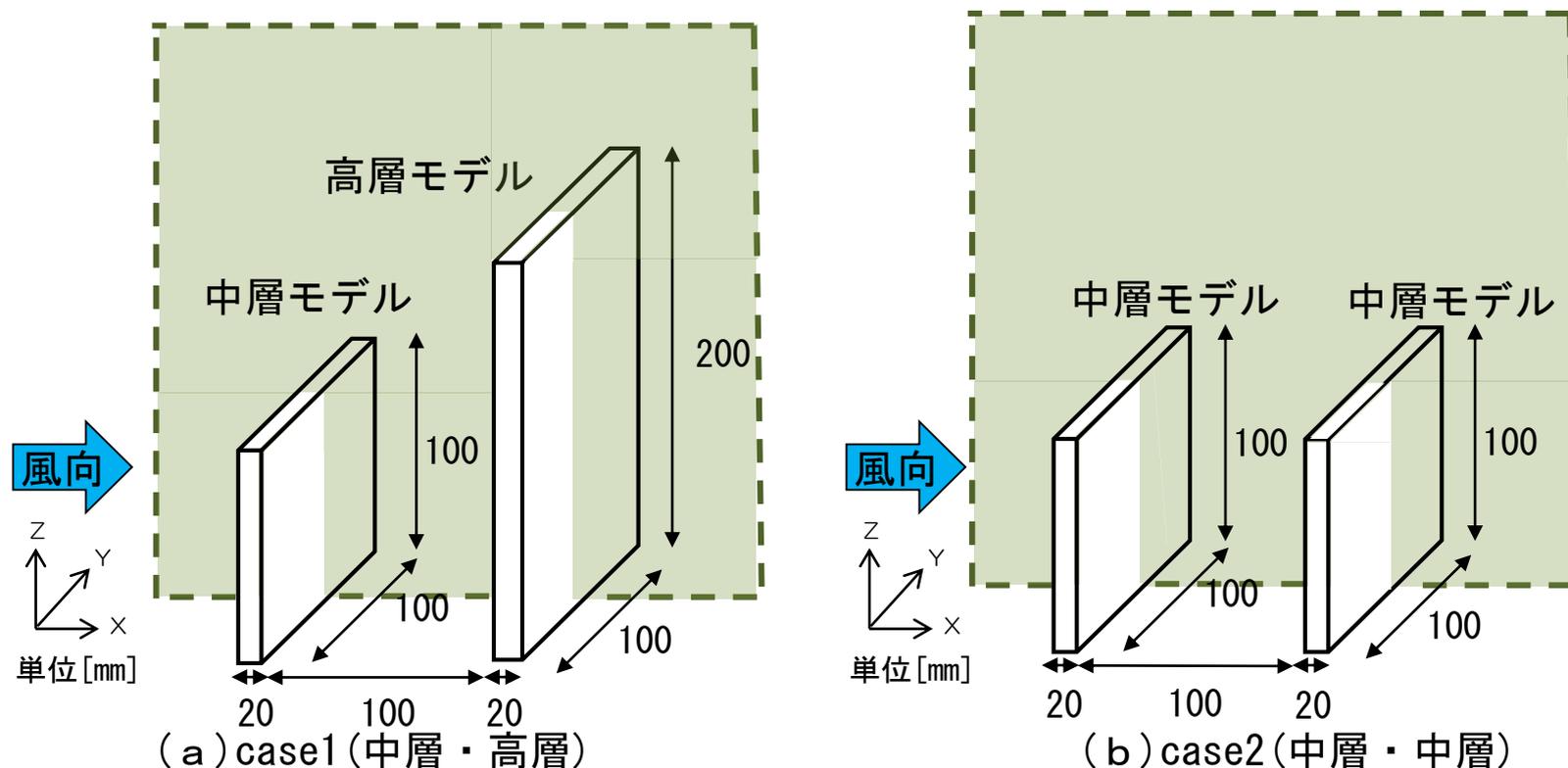


図1 建物モデルの概要

※3 模型の縮尺を1/500とすると、地表面から2,000 [mm] の位置に相当する。

表 2 LES解析条件

SGSモデル	Dynamic型 Smagorinskyモデル			
解析領域	7.8(x) × 1.8(y) × 1.8(z) [m]			
解析対象	中層モデル	0.02(x) × 0.1(y) × 0.1(z) [m]		
	高層モデル	0.02(x) × 0.1(y) × 0.2(z) [m]		
境界条件	流入	ドライバー領域で流入変動気流を作成する		
	流出	自然流出		
	壁境界	Ymin, Ymax, Zmax面	フリースリップ	
		Zmin面	拡張型	
流体と接する全ての面		Werner-Wengel		
解析時間 t	プレ解析 : t=0~4.0[s]、本解析 : t=4.0~10.0[s]			
時間刻み Δt	0.002[s]			
温度	等温			
最小メッシュ幅	case1	0.00016[m]		
	case2	0.0006[m]		
解析領域メッシュ数	case1	4,689,684=251(x) × 108(y) × 173(z)		
	case2	3,473,612=257(x) × 124(y) × 109(z)		

本研究におけるLES解析には汎用数値流体解析ソフト
STREAM ver. 12を使用する。

LES解析概要

LES解析では、**ドライバー領域**※4 を設け、流入変動気流を作成し、対象とする建物モデルに対して変動気流を流入させて**解析**※5 を行う。接近流の鉛直プロファイルは市街地を想定して、 $U \propto Z^{1/4}$ (U: 流速、Z: 高さ) とする。

- ※4 ドライバー領域とは、周期境界条件で変動気流流入境界条件を計算するために、建物風上側に設けた領域である。
- ※5 解析開始からの経過時間をtとし、計算開始後t=0~4.0[s]まで流入変動気流作成のためのプレ解析とする。t=4.0~10.0[s]までの計6.0[s]間を本解析の結果とする。

LES解析概要

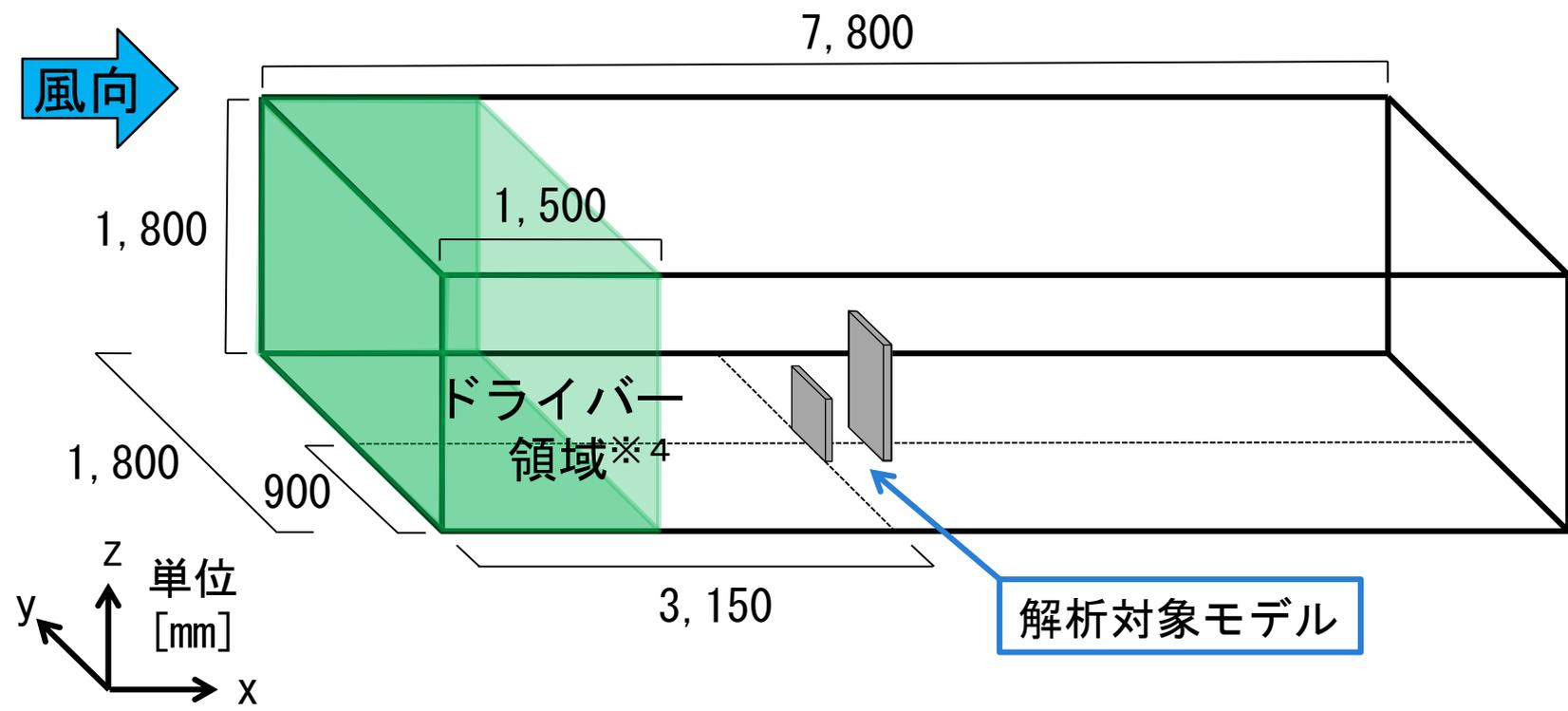


図 解析領域

解析領域は7,800[mm]（長さ）×1,800[mm]（幅）×1,800[mm]（高さ）の風洞模擬する。

※4 ドライバー領域とは、周期境界条件で変動気流流入境界条件を計算するために、建物風上側に設けた領域である。

PIV測定概要

表 3 PIV測定における実験機器の概要

Camera	ハイスピードカメラ	Photron FASTCAM SA3
Laser	DPGL-3W	LD励起Nd:YAG/YVO ₄ レーザ 波長: 532 [nm] 出力: 3 [W] 0~30 [kHz] で変調可能な連続光
	DPGL-5W	LD励起Nd:YAG/YVO ₄ レーザ 波長: 532 [nm] 出力: 5 [W] 0~30 [kHz] で変調可能な連続光
SoftWare	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer ver3. 3. 8
	PIV解析	Flow-Expert ver1. 2. 10

表 PIV解析のパラメータ

測定断面	case1 (中層・高層)		case2 (中層・中層)	
	鉛直断面	水平断面	鉛直断面	水平断面
画像サイズ [pixel]	1024 × 1024			
キャリブレーション値 [mm/pixel]	0. 421	0. 357	0. 421	0. 357
測定対象領域 [mm]	430 × 430	360 × 360	430 × 430	360 × 360
測定時間 [sec]	11	16	11	16
測定間隔	2 [ms] (500 [fps])			
検査領域 [pixel]	17 × 17	15 × 15	17 × 17	15 × 15
探査範囲 [pixel]	±11 × ±11			

PIV測定概要

実験は1,800 [mm] × 1,800 [mm] × 16,000 [mm] の大型境界層風洞※で行う。

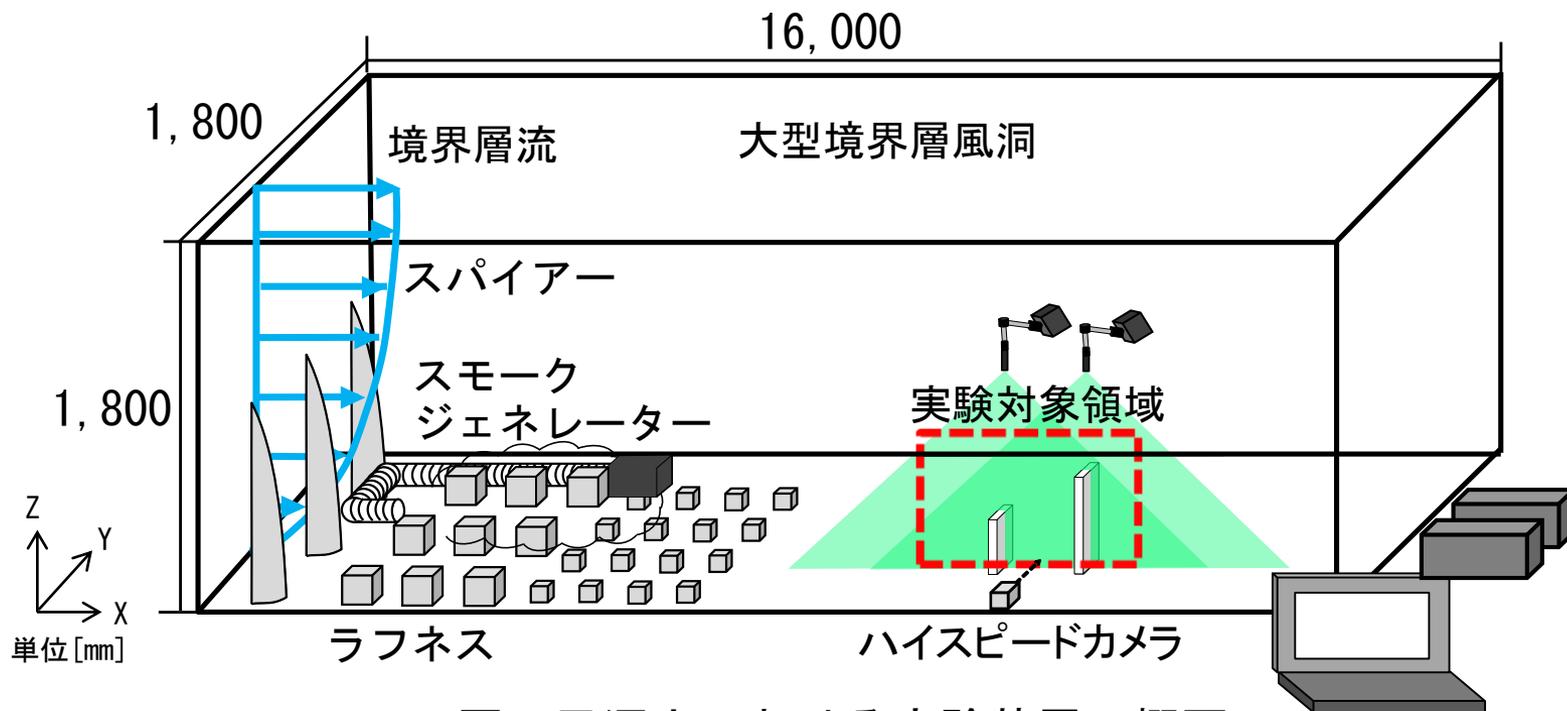


図 風洞内における実験装置の概要

※ 新潟工科大学所有の風洞。

PIV測定概要

風洞内の鉛直プロファイルは1/4乗則とする。PIVのキャリブレーション値※は、鉛直断面で0.42[mm/pixel]、水平断面で0.36[mm/pixel]である。

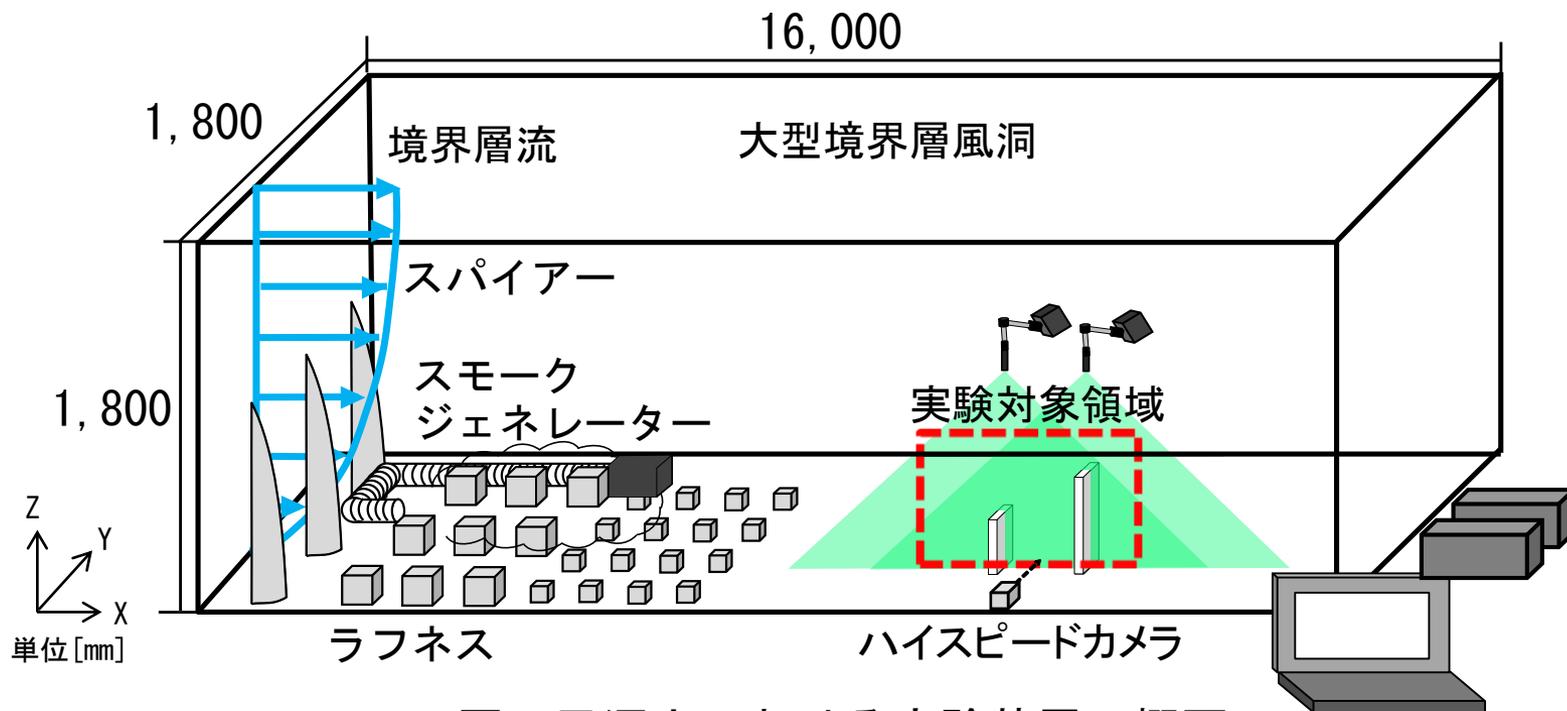


図 風洞内における実験装置の概要

※ 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、撮影断面に校正のプレートを設置し、実際の距離が画像上で認識できる画像を撮影し、求める。

GF算出方法

気象庁が定めるGFの算出方法は10分間の内、0.25秒間隔で測定した値を3秒間で平均した風速の最大値と10分間の平均風速の比により求められる。

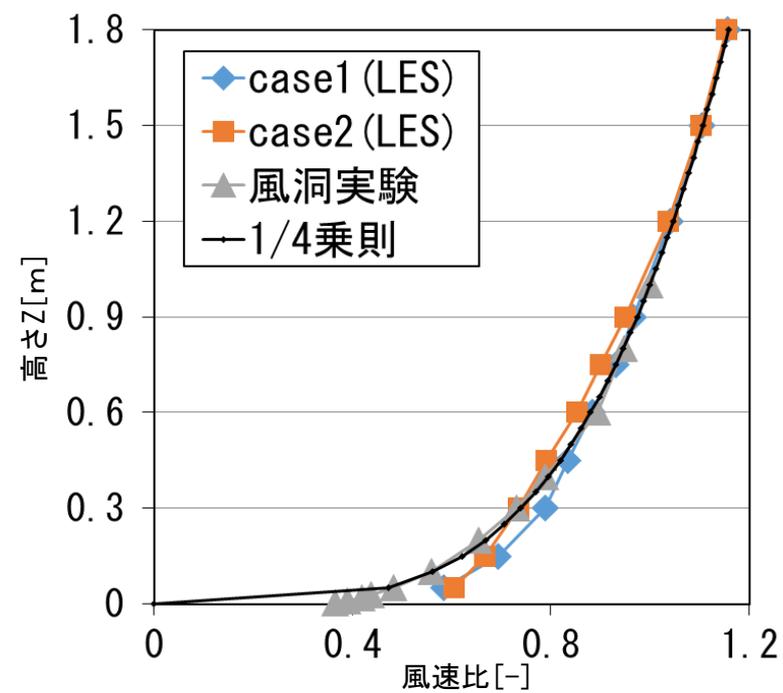
本研究では、この算出方法を参考に、下記のようにGFを算出する。

$$\text{LES: } \frac{30 [\text{ms}]}{6 [\text{s}]} = \frac{\text{データ15個 (2[ms]毎) を平均した瞬時風速の最大値}}{6 \text{秒間の平均風速}} = \frac{1}{200}$$

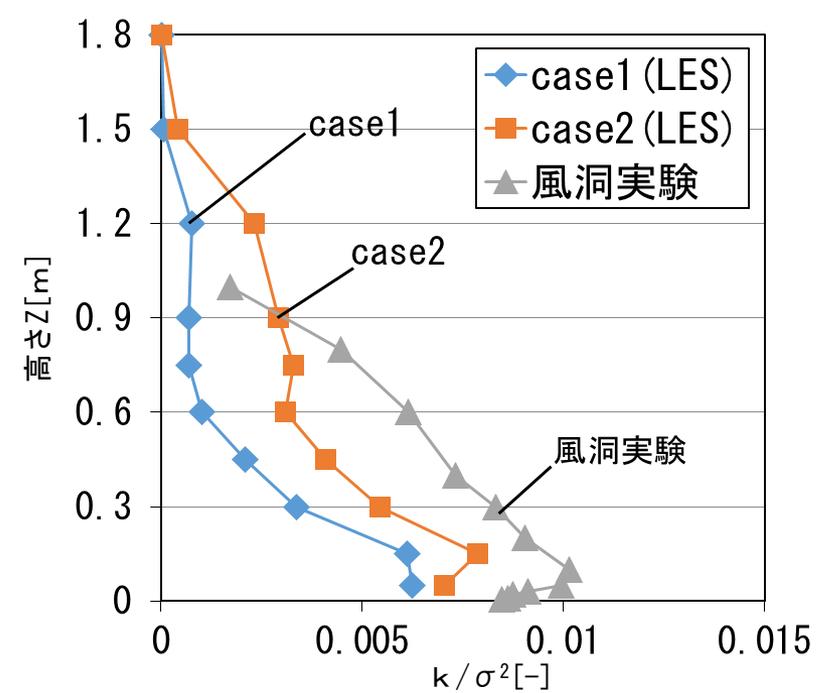
$$\text{PIV: } \frac{80 [\text{ms}]}{16 [\text{s}]} = \frac{\text{データ40個 (2[ms]毎) を平均した瞬時風速の最大値}}{16 \text{秒間の平均風速}} = \frac{1}{200}$$

$$\text{気象庁: } \frac{3,000 [\text{ms}]}{600 [\text{s}]} = \frac{\text{データ12個 (250[ms]毎) を平均した瞬時風速の最大値}}{600 \text{秒間の平均風速}} = \frac{1}{200}$$

LES解析結果とPIV測定と比較



(a) 風速比分布



(b) 乱流エネルギー分布

図2 流入変動気流の鉛直プロファイル
(ドライバー領域端部: X=1,500 [mm]、Y=900 [mm])

平均風速比^{※6}の鉛直分布は1/4乗則を基準とする流入プロファイルとほぼ同様である。乱流エネルギーの鉛直分布は風洞実験(PIV測定)と比較してLESが小さい傾向がある。

※6 解析結果は、各点の風速を基準高さにおける基準風速(5.0 [m/s])で除し、風速比として示す。

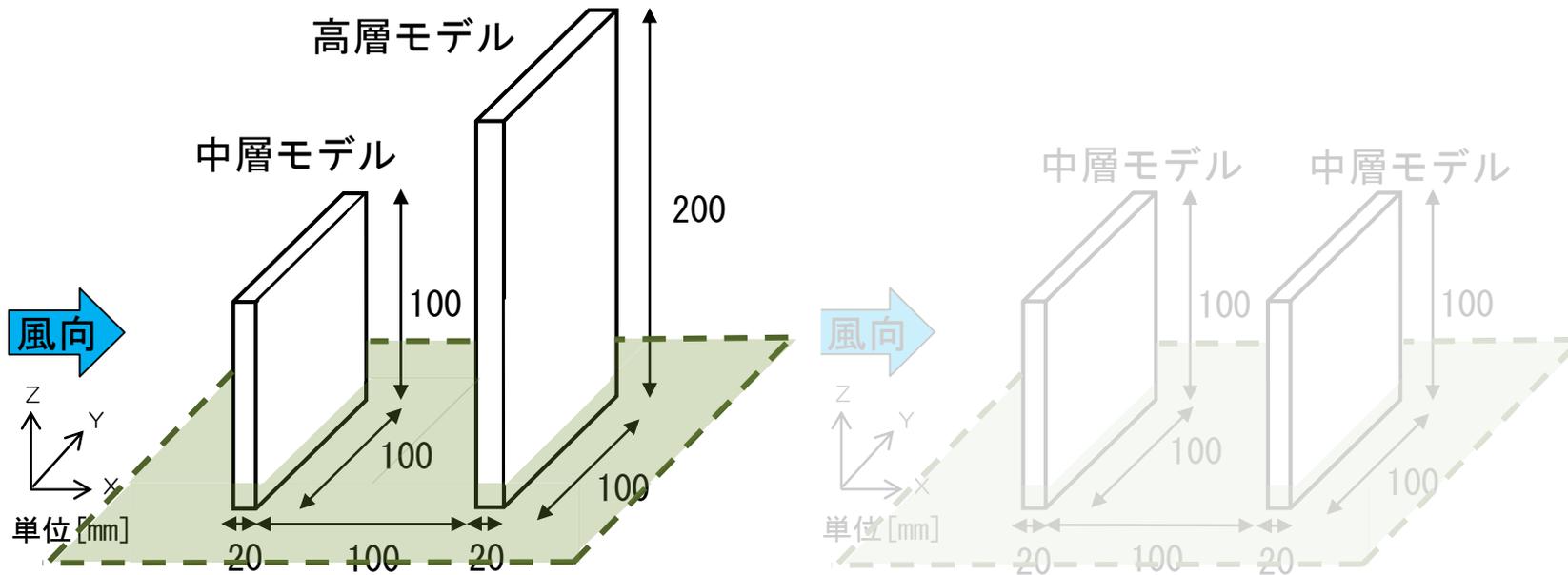
建物周辺気流分布の比較

実験・解析結果は風洞内の基準高さ1.0[m]の風速に対する風速比※⁷で示し、建物周辺気流分布を比較する。可視化断面上の2次元風速分布を測定したPIV測定結果と比較を行うため、LESの鉛直断面では流速のXZ成分の合成値、水平断面では流速のXY成分の合成値を用いて2次元風速比を算出する。

※⁷ case1・2の基準風速は1.0[m/s]である。ただしcase2の鉛直断面の平均風速比(図3(4))において基準風速は2.0[m/s]である。

表 1 実験及び解析case

	風上側建物モデル	風下側建物モデル	測定・解析断面
case1-1	中層(高さ100[mm])	高層(高さ200[mm])	水平断面
case1-2			鉛直断面
case2-1	中層(高さ100[mm])	中層(高さ100[mm])	水平断面
case2-2			鉛直断面

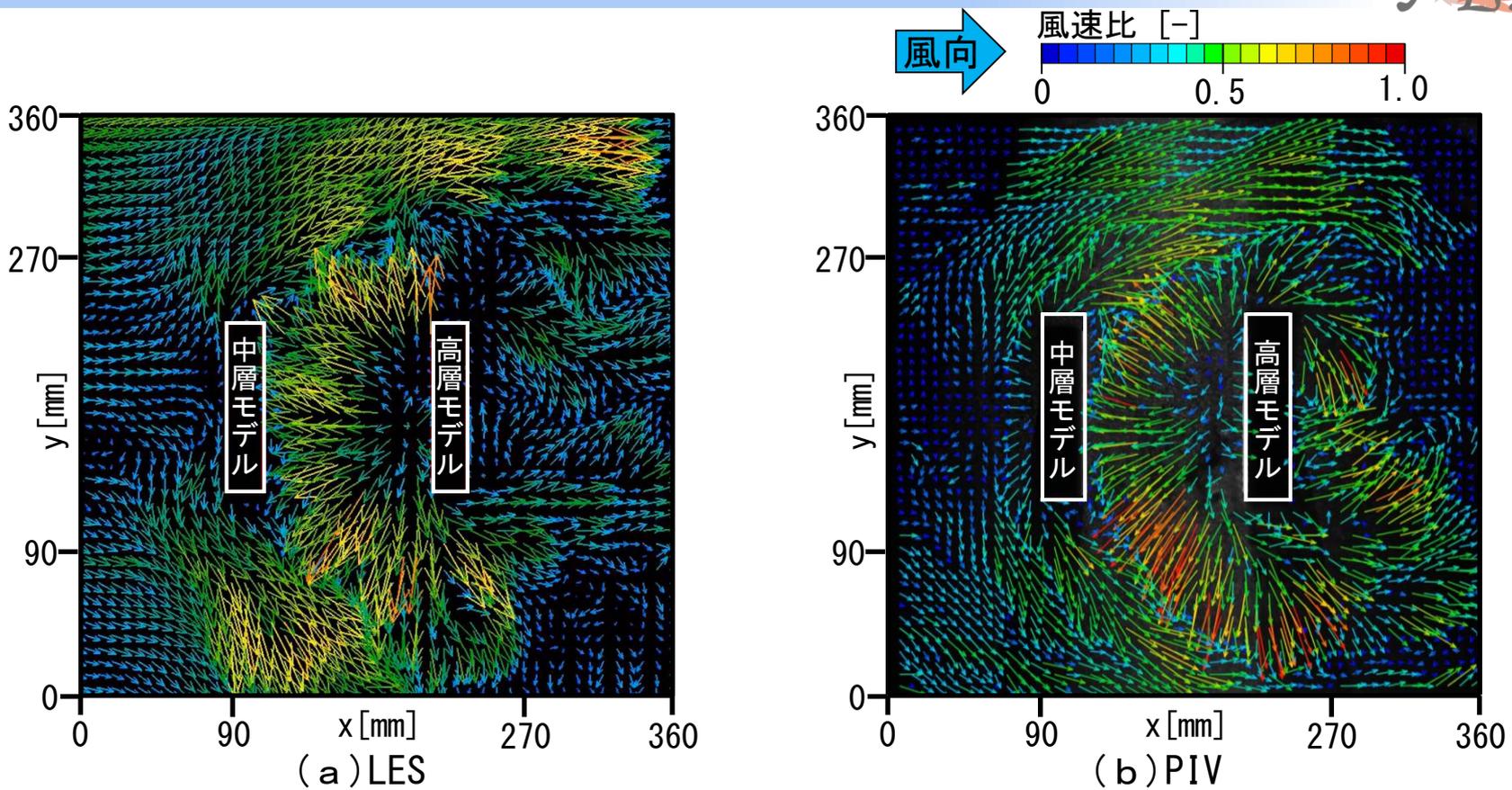


(a) case1(中層・高層)

(b) case2(中層・中層)

図 1 建物モデルの概要

case1-1



動画 case1-1の建物周辺気流の風速ベクトル分布

case1-1

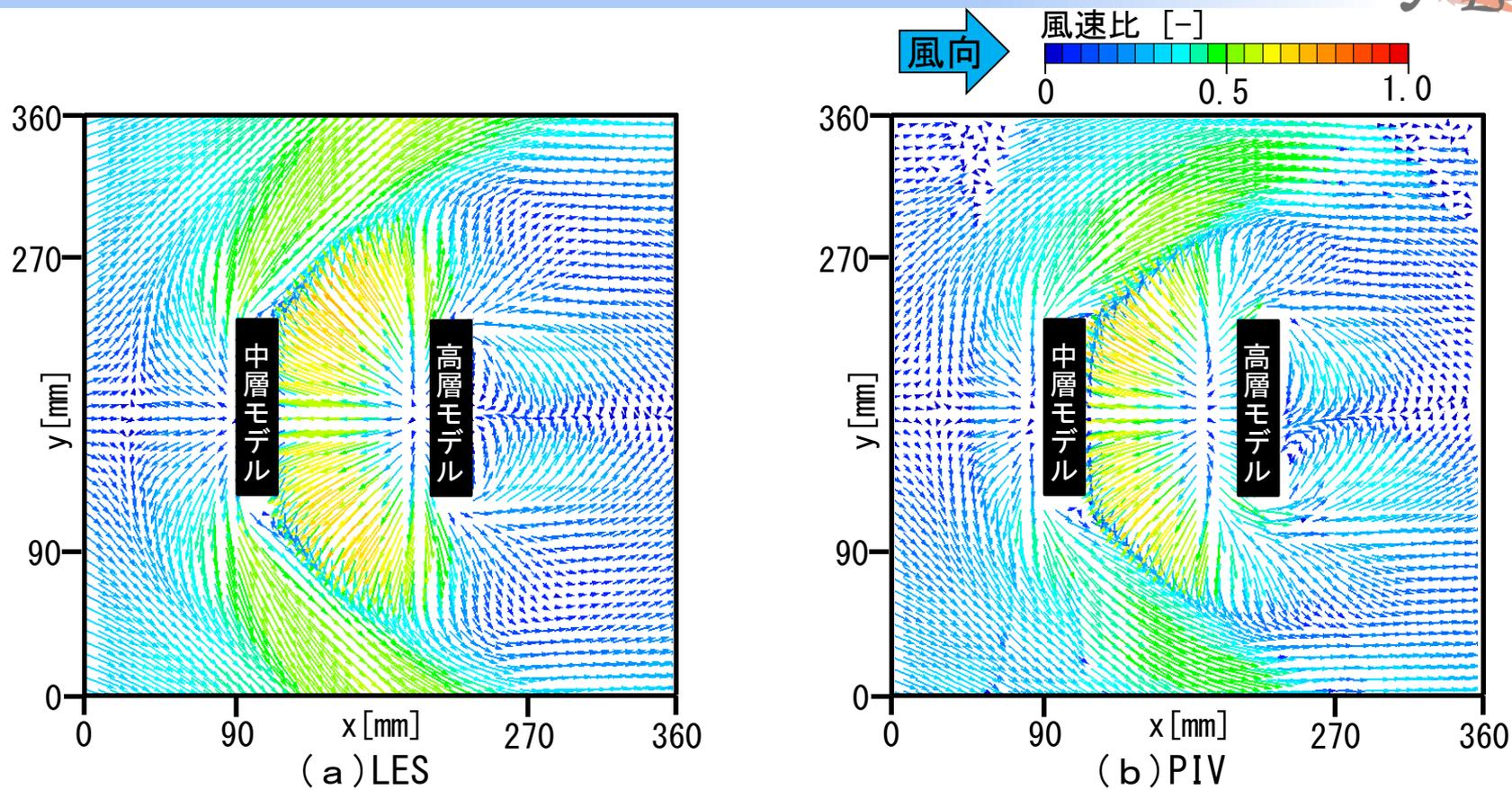
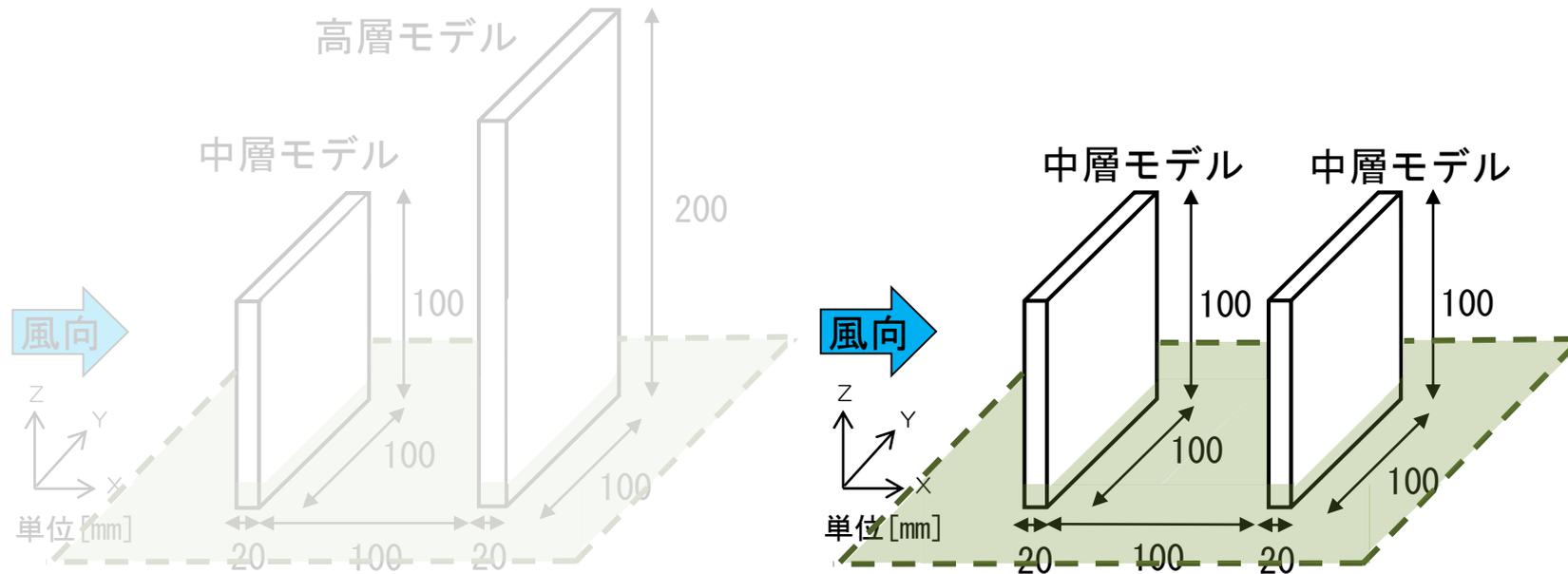


図 case1-1の建物周辺気流の平均風速ベクトル分布

LESとPIVによる全体の気流性状はほぼ一致する。

表 1 実験及び解析case

	風上側建物モデル	風下側建物モデル	測定・解析断面
case1-1	中層(高さ100[mm])	高層(高さ200[mm])	水平断面
case1-2			鉛直断面
case2-1	中層(高さ100[mm])	中層(高さ100[mm])	水平断面
case2-2			鉛直断面

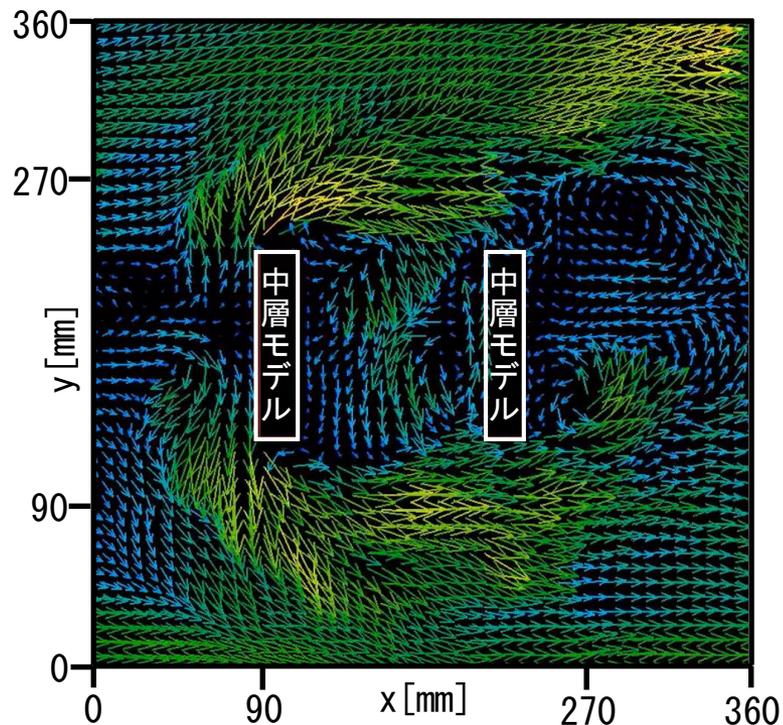


(a) case1 (中層・高層)

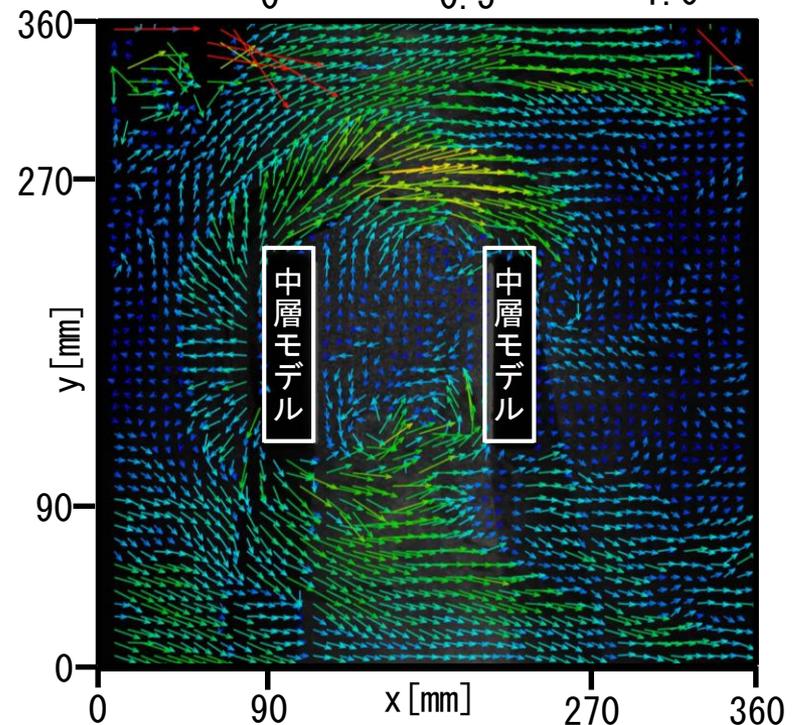
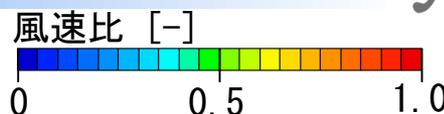
(b) case2 (中層・中層)

図 1 建物モデルの概要

case2-1



(a) LES



(b) PIV

動画 case2-1の建物周辺気流の風速ベクトル分布

case2-1

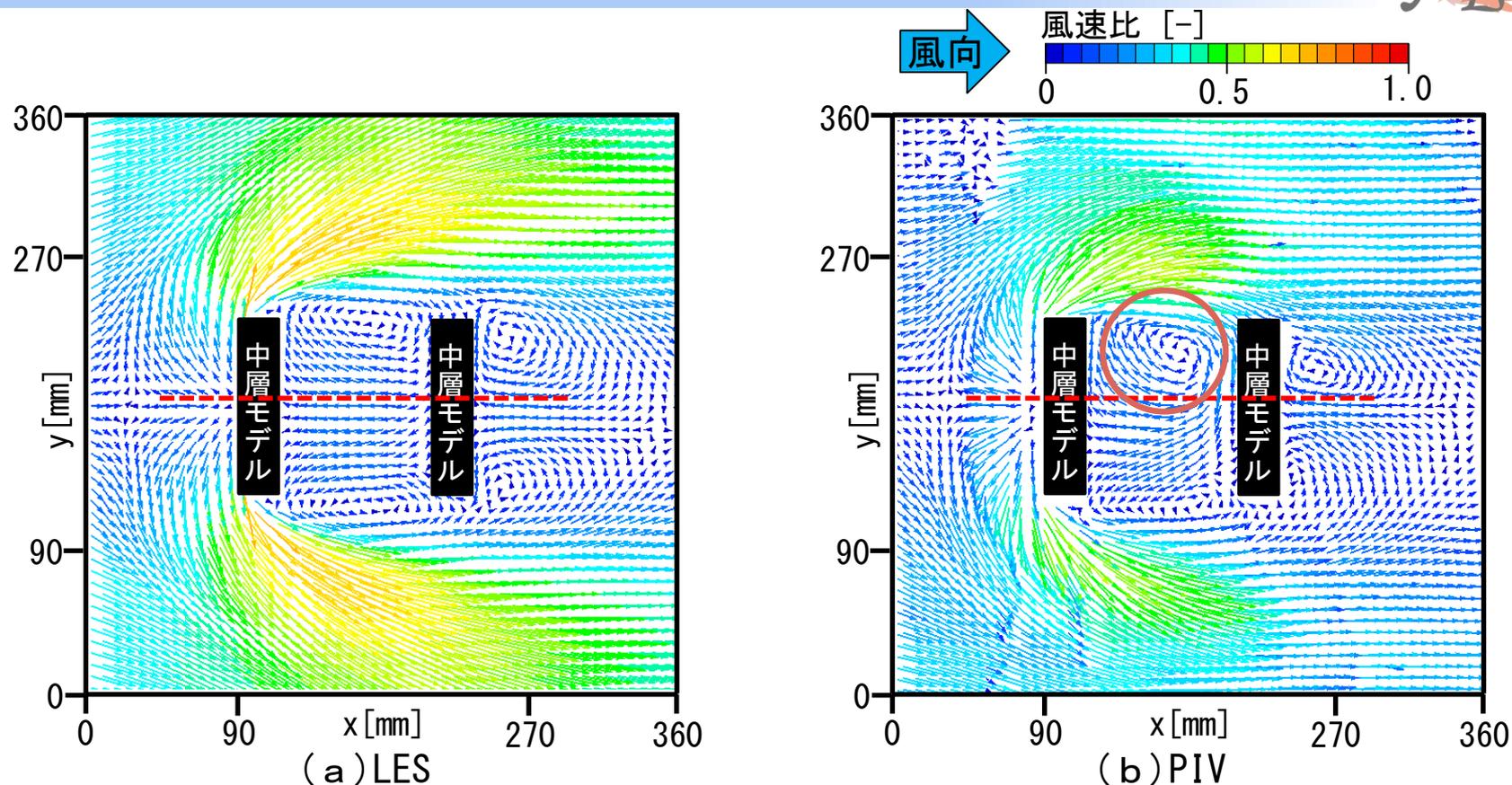


図 case2-1の建物周辺気流の平均風速ベクトル分布

LESとPIVによる全体の気流性状はほぼ一致する。case2-1におけるLESではモデル中心線を軸に対称な気流分布である一方で、PIVでは隣棟間へY軸方向から気流が流入し小さな循環流を形成する。

表 1 実験及び解析case

	風上側建物モデル	風下側建物モデル	測定・解析断面
case1-1	中層(高さ100[mm])	高層(高さ200[mm])	水平断面
case1-2			鉛直断面
case2-1	中層(高さ100[mm])	中層(高さ100[mm])	水平断面
case2-2			鉛直断面

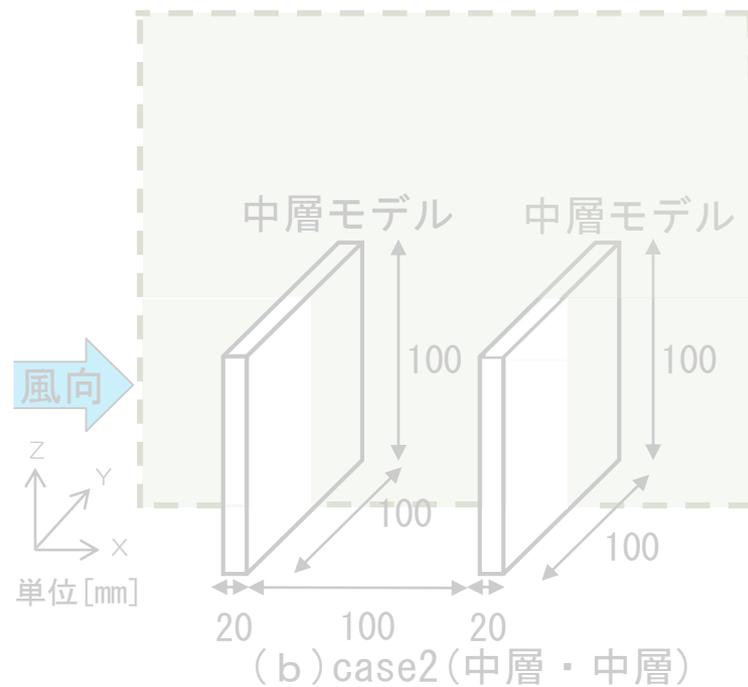
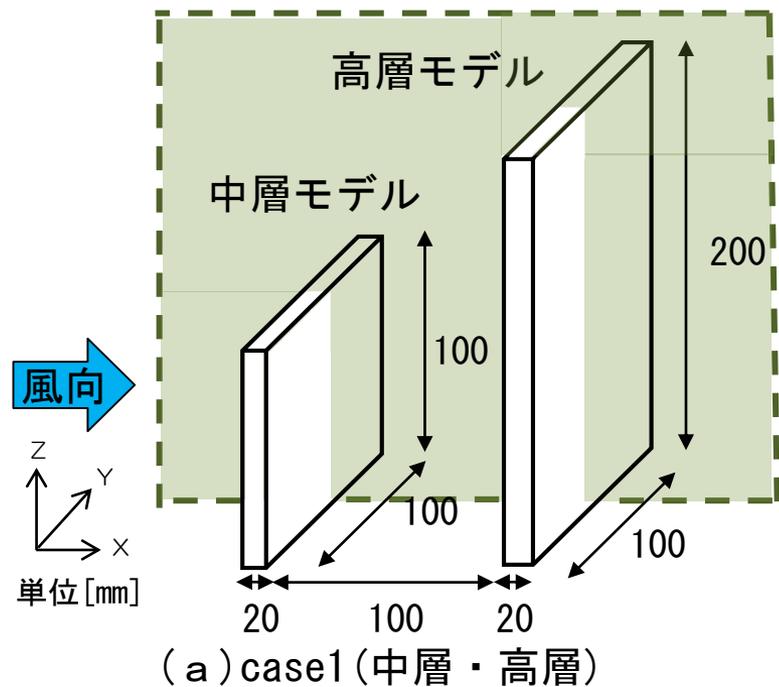
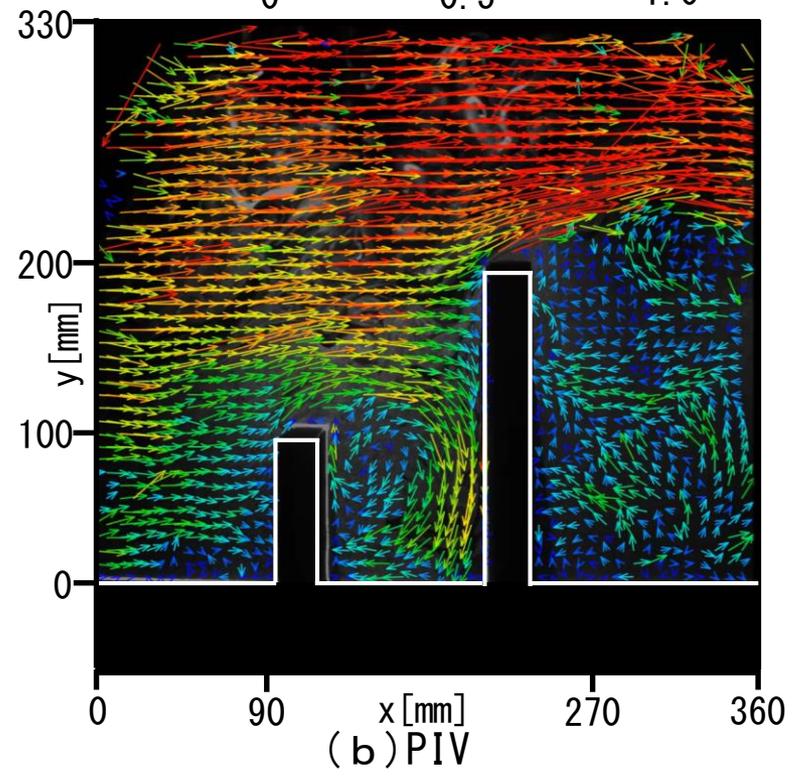
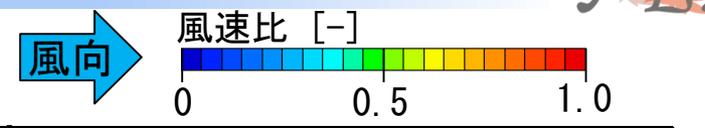
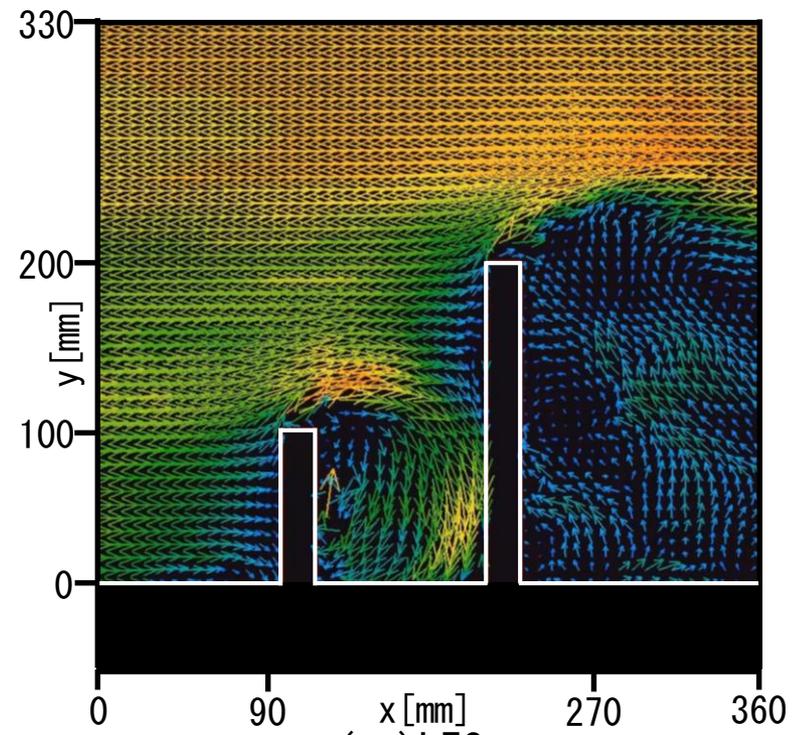


図 1 建物モデルの概要

case1-2



動画 case1-2の建物周辺気流の風速ベクトル分布

case1-2

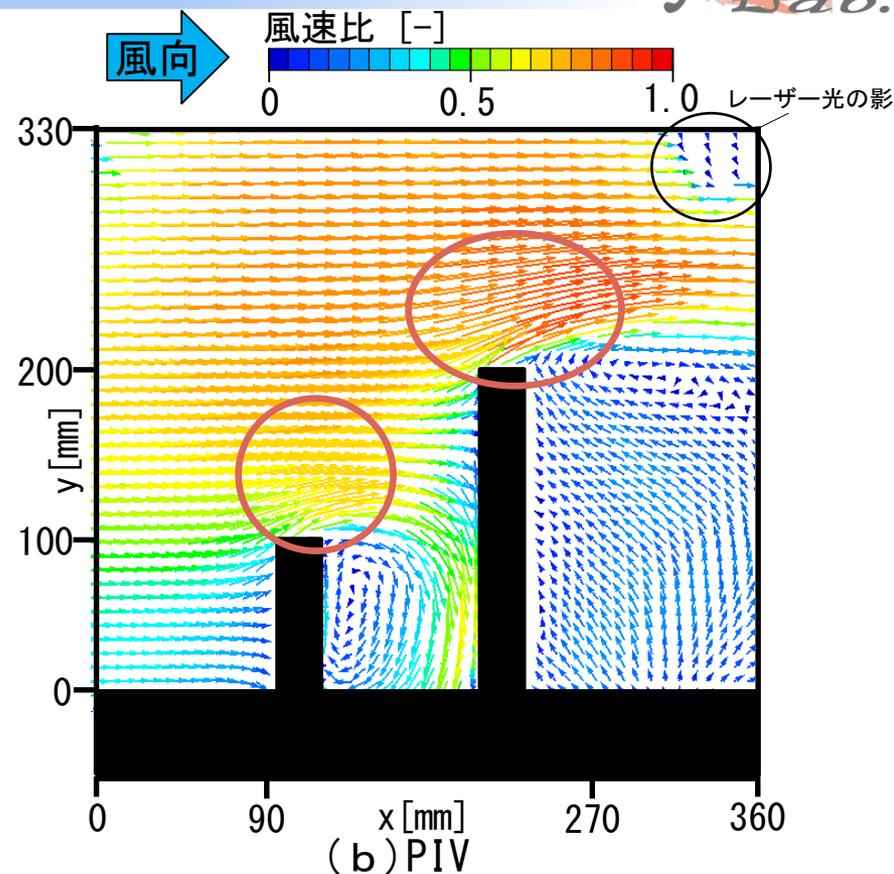
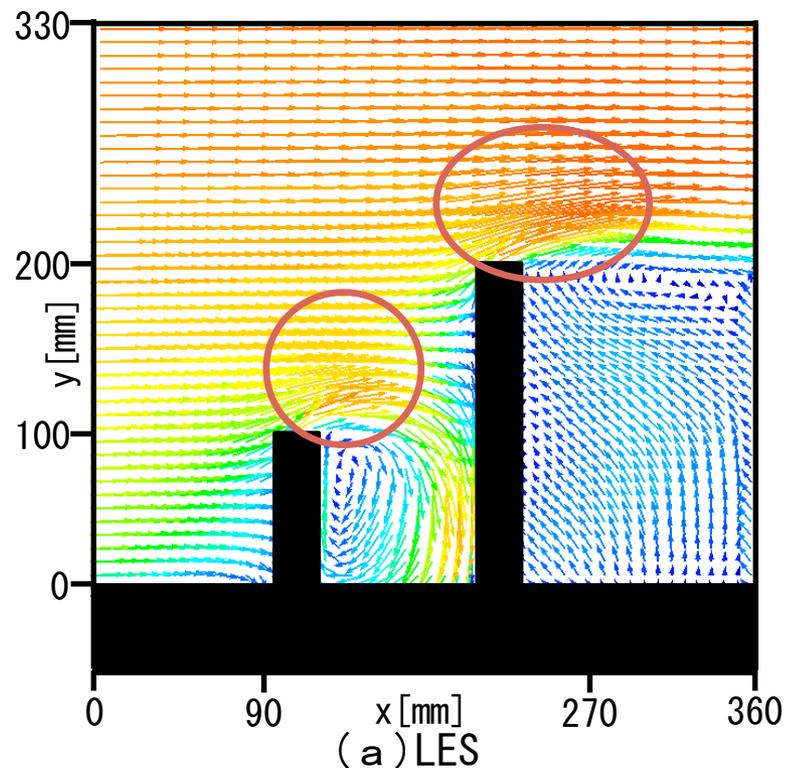
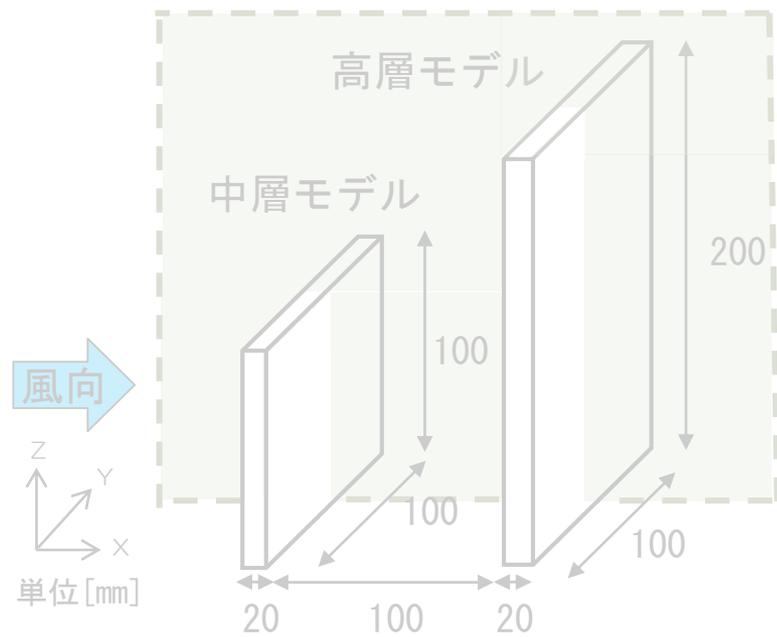


図 case1-2の建物周辺気流の平均風速ベクトル分布

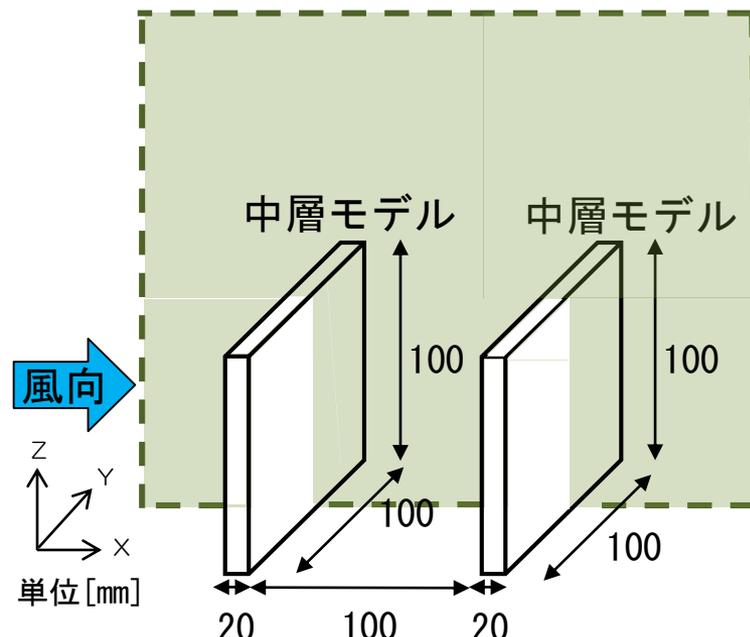
LESとPIVによる全体の気流性状はほぼ一致する。case1-2では中層・高層モデルの壁面上端部で剥離が生じる。

表 1 実験及び解析case

	風上側建物モデル	風下側建物モデル	測定・解析断面
case1-1	中層(高さ100[mm])	高層(高さ200[mm])	水平断面
case1-2			鉛直断面
case2-1	中層(高さ100[mm])	中層(高さ100[mm])	水平断面
case2-2			鉛直断面



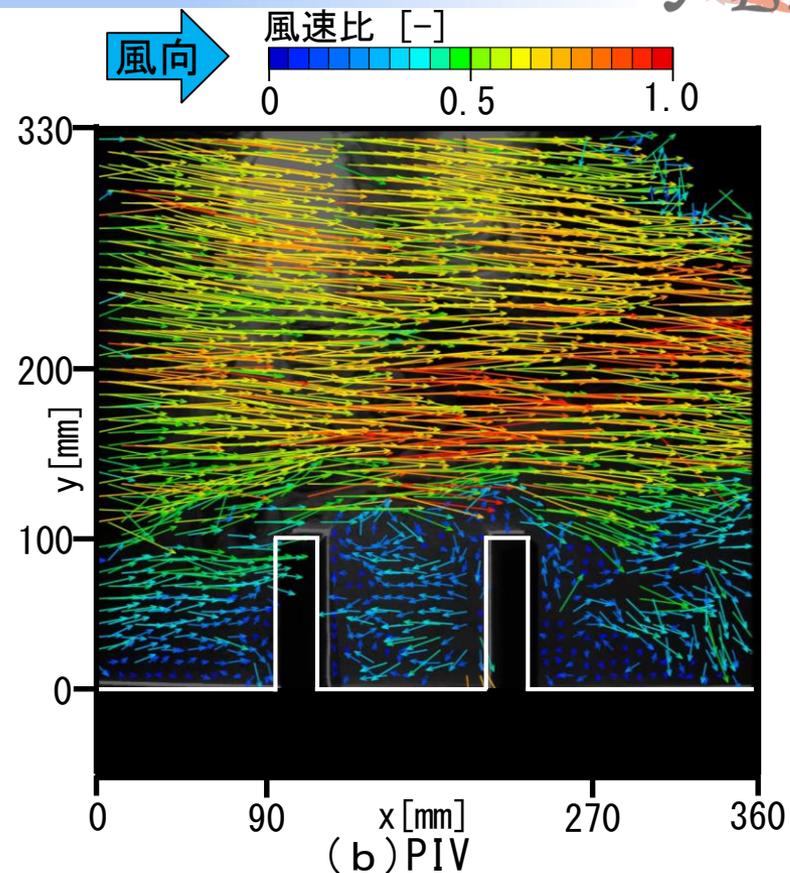
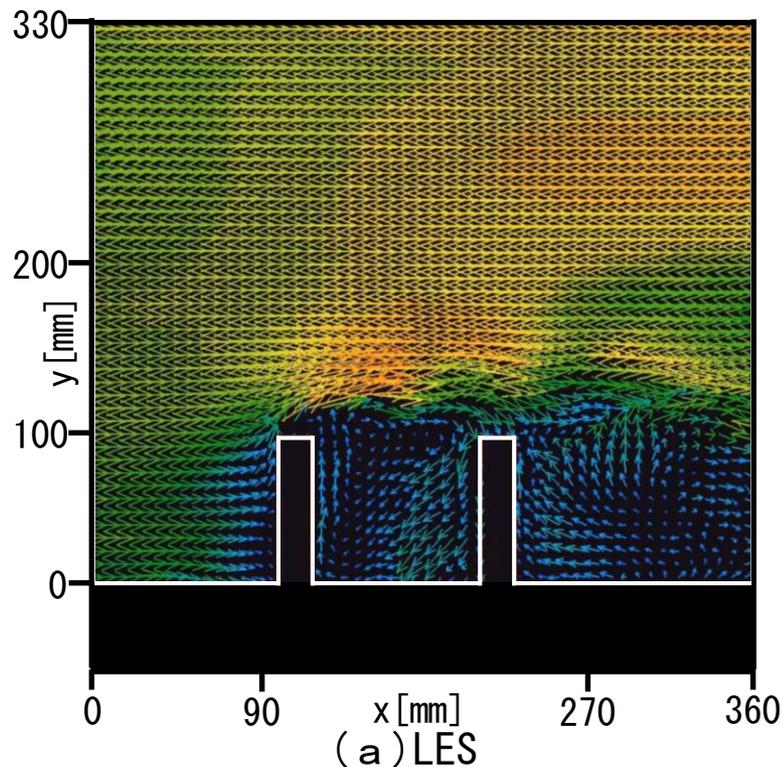
(a) case1 (中層・高層)



(b) case2 (中層・中層)

図 1 建物モデルの概要

case2-2



動画 case2-2の建物周辺気流の風速ベクトル分布

case2-2

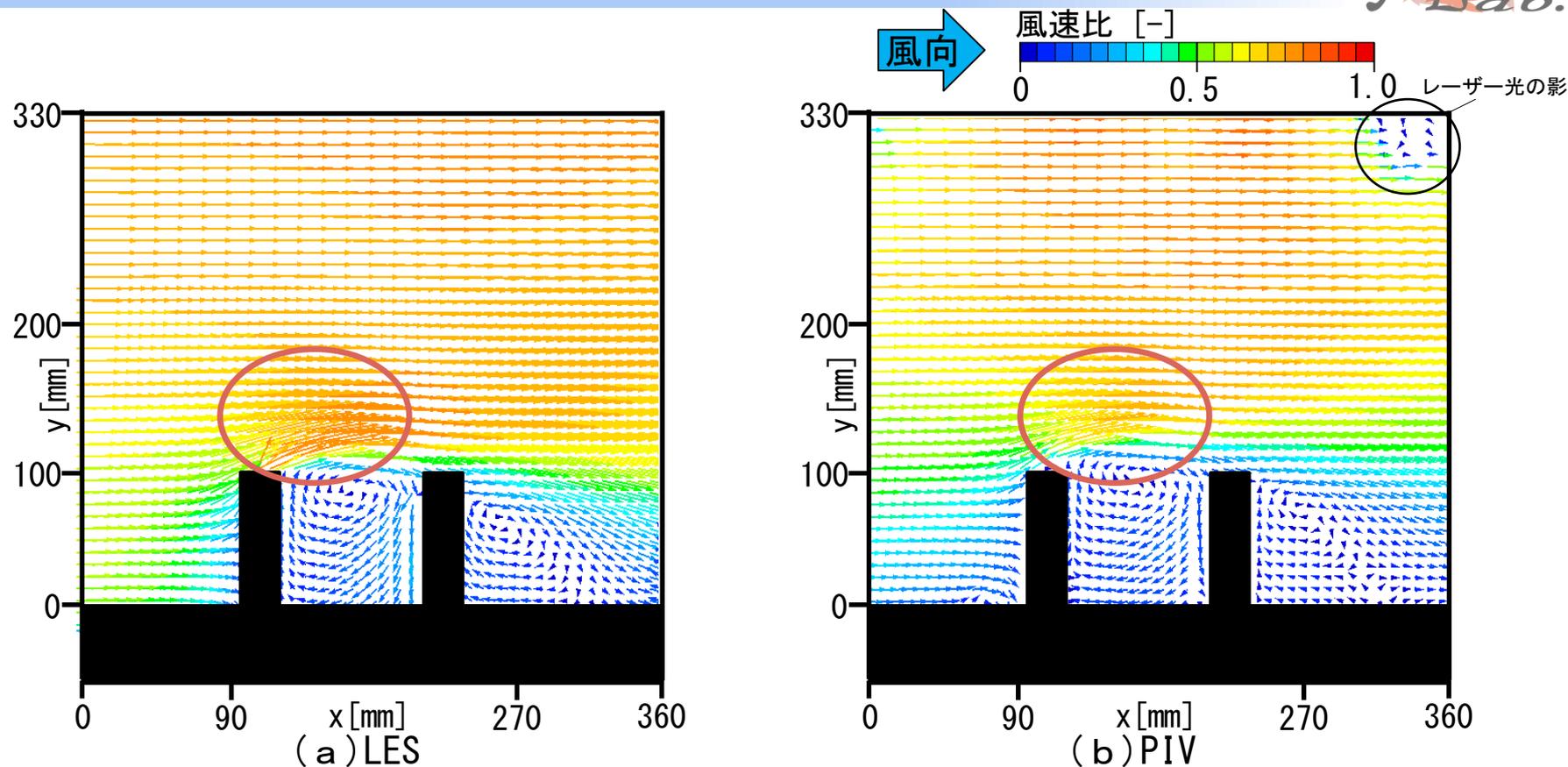


図 case2-2の建物周辺気流の平均風速ベクトル分布

LESとPIVによる全体の気流性状はほぼ一致する。case2-2では風上側中層モデルの壁面上端部のみ剥離が生じる。隣棟間の気流性状を比較すると、case1-2では風速比0.5~0.7の下降流が生じるがcase2-2では殆ど生じない。

GFの比較 (case1-1)

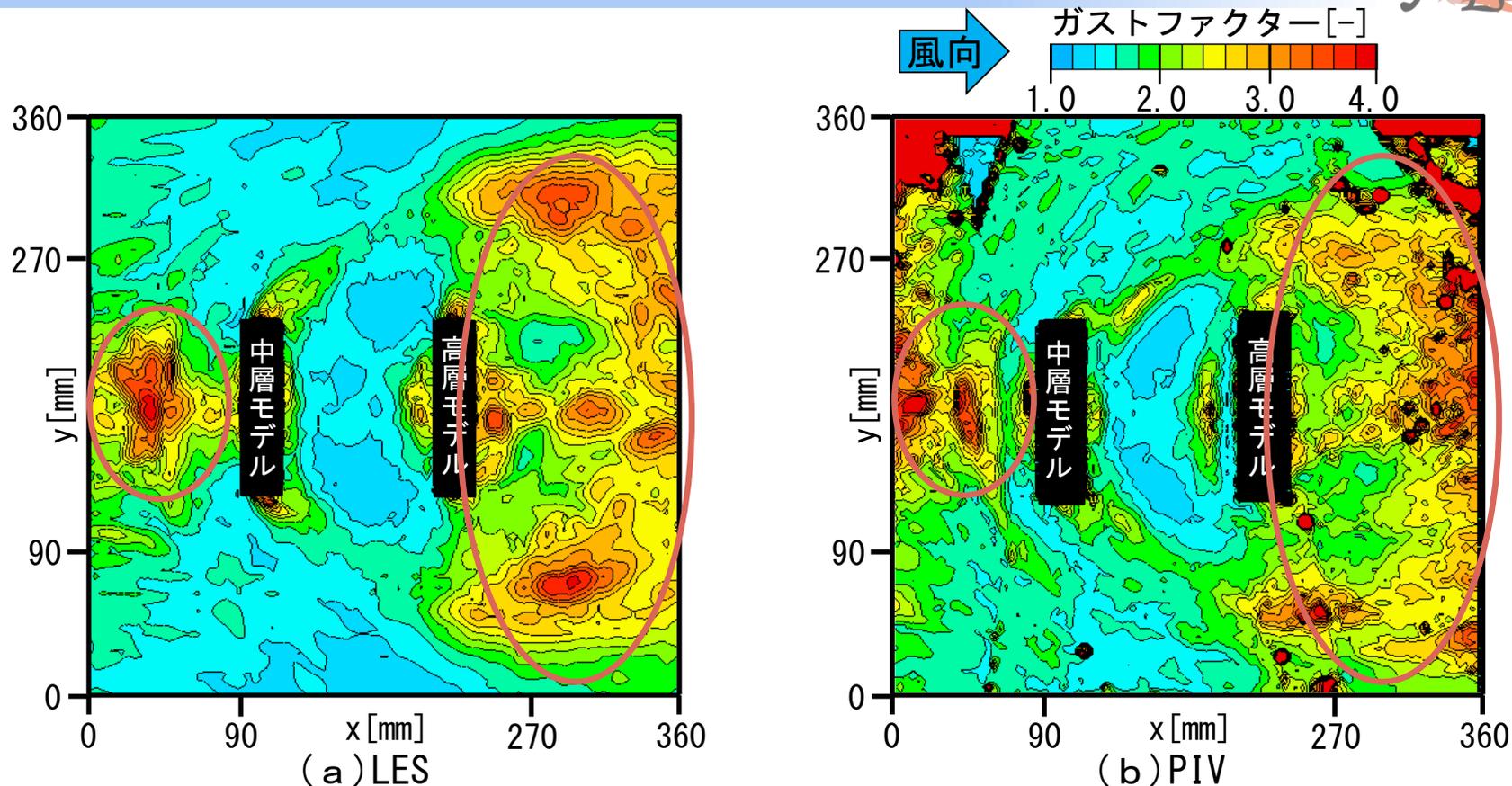


図 case1-1のGFの空間分布

case1-1ではLES・PIVともに風上側中層モデル前方 (X=40 [mm]、Y=180 [mm]) 及び風下側高層モデル後流域の広範囲でGFが比較的大きくなり2.6~3.4となる。

GFの比較 (case1-1)

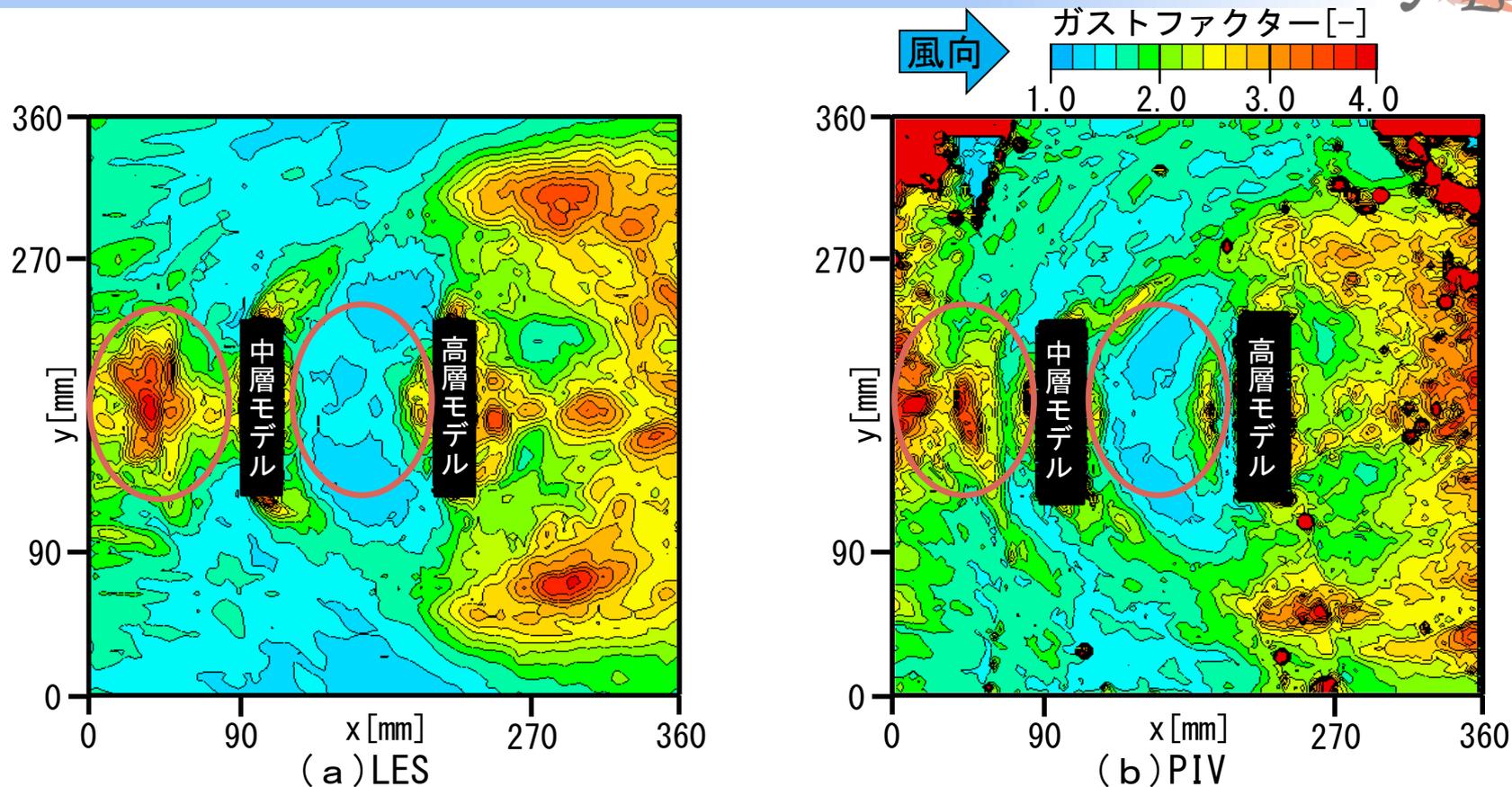


図 case1-1のGFの空間分布

高層モデル前方 (X=200 [mm]、Y=180 [mm]) でGFが大きくなる一方で、隣棟間ではGFは比較的小さく、1.0~1.6である。

GFの比較 (case2-1)

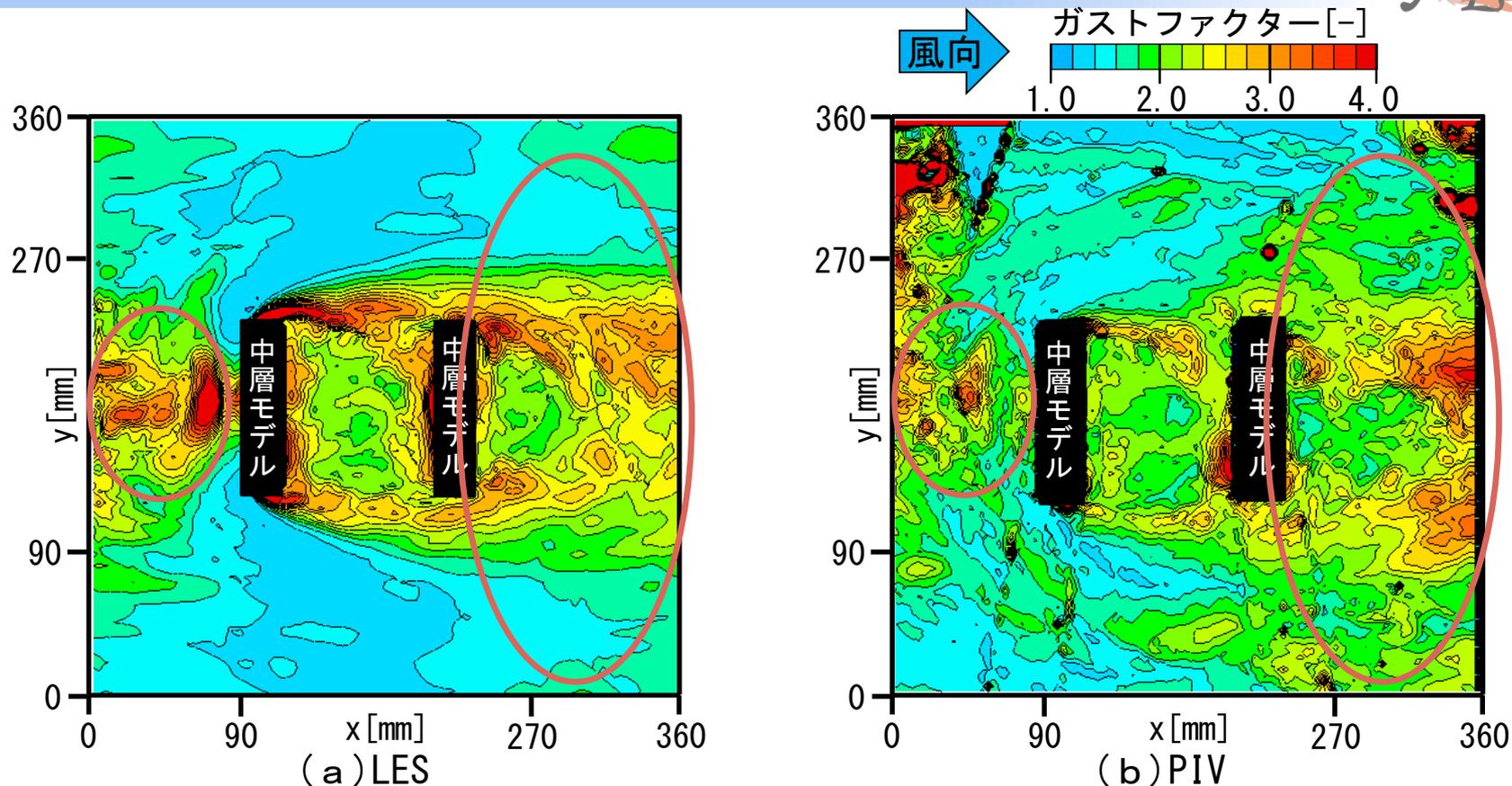


図 case2-1のGFの空間分布

case2-1ではcase1-1と同様に風上側中層モデルの前方 (X=40 [mm]、Y=180 [mm]) 及び風下側中層モデルの後流域の広範囲でGFが比較的大きくなる。

GFの比較 (case2-1)

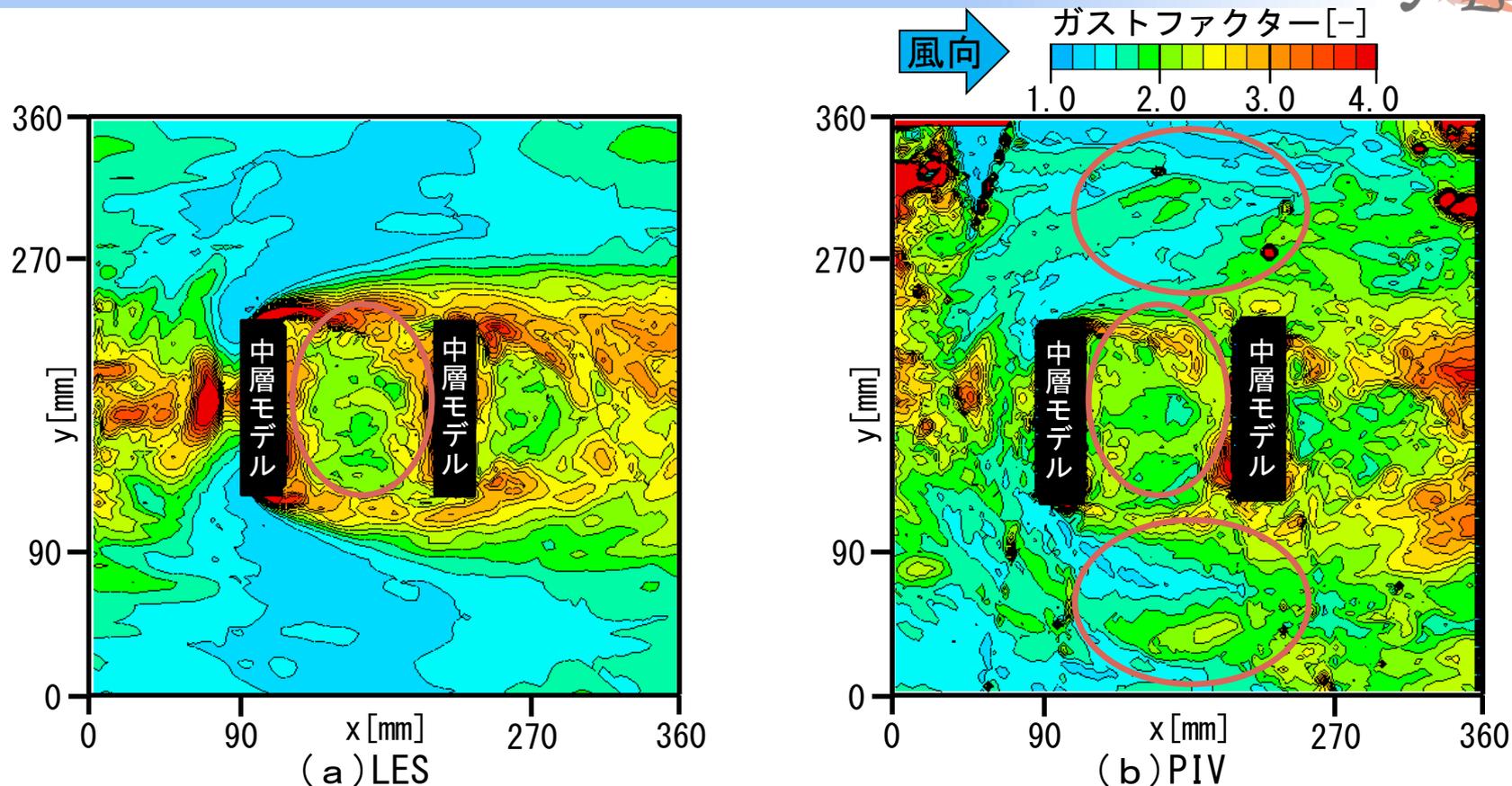


図 case2-1のGFの空間分布

隣棟間ではcase1-1と異なり、GFが2.0~2.6と比較的大きくなる。LESではGFが大きくなる範囲が建物モデル周辺に分布しているのに対し、PIVでは局所的にGFの大きい箇所が広範囲に点在する傾向がある。

4.1 LESとPIVによる建物周辺気流分布の比較

水平・鉛直断面ともに全体の気流性状はほぼ一致するがcase2-1の隣棟間ではLES・PIVの気流性状に違いが見られた。

4.2 GFの算出結果

- ①case1-1では風上側中層モデル前方及び風下側高層モデル後流域の広範囲でGFが比較的大きくなる。高層モデル前方で局所的にGFが大きくなるが隣棟間ではGFは比較的小さくなる。
- ②case2-1ではcase1-1と同様に風上側中層モデル前方でGFが比較的大きくなる一方で、隣棟間ではcase1-1と比べてGFが大きくなる。
- ③LESとPIVを比較すると、全体のGF分布は概ね一致しているが、剥離や吹きおろしの影響を受ける部分では差が生じている。