

粒子画像流速測定法 (PIV) を用いた市街地の風環境に関する研究

吉弘 崇滉 指導教員 赤林 伸一 教授

1 研究目的

近年、大都市だけでなく地方都市の市街地でも建物の高密度・高層化が進んでおり風環境の悪化が予想される。このような高層建物周辺では、ビル風と呼ばれる都市環境問題の一つである風害が発生する可能性がある。ビル風とは周囲の建物に対して相対的に高層の建物が建設されることで、建設の前後で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。ビル風には上空の風が高層建物に衝突し地表面方向に流れ込むことで発生する吹き降ろしや建物隅角部で発生する剥離流、建物間での縮流などがある。また、風向・風速、建物の形状や周辺環境により局所的な風速の変化や気流の乱れが発生する。そのため、ビル風により歩行時に不快感を与えたり、持ち物などが飛ばされる等、地表面付近の風環境を悪化させる可能性がある。

従来風環境評価には多点サーミスタ風速計を用いた風洞実験が行われてきた。しかし、近年、流速を測定する有力な手法として、粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) が開発された。この手法は、流れ場に微小のトレーサ粒子を混入させ、シート状のレーザ光を照射することで、流れを可視化する。ハイスピードカメラで可視化した流れ場を撮影し、得られた連続する可視化画像をもとにトレーサ粒子の移動から気流速度を算出する。この手法は、従来の風速測定法とは異なり、流れに非接触で2次元平面の多数の測定点で時間的に連続な風速ベクトルを得ることができる。多数の流速測定点の平均風速、最大瞬間風速を短時間で計測できる利点がある。

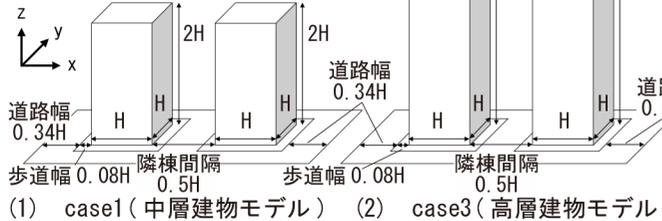


図1 建物モデルの概要

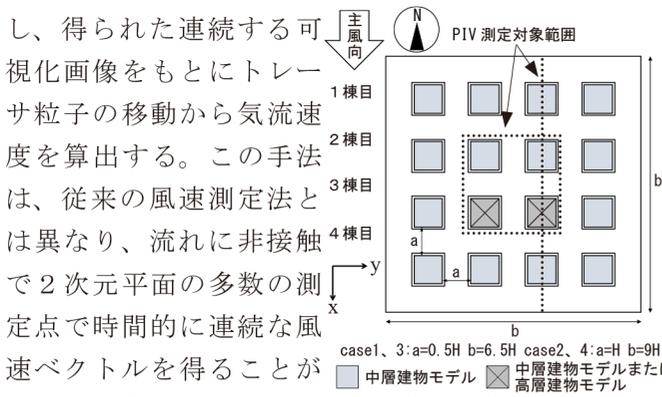


図2 実験対象建物モデルの配置

本研究では、新潟大学所有の可視化用風洞でPIV測定法を用いて密集市街地を模擬した建物モデルを対象に気流分布の測定を行う。建物配置や隣棟間隔及び風向の変化が地表面付近の気流性状に与える影響を風速速度分布及びガストファクター (GF=最大瞬間風速/平均風速) を用いて検討する。更に、PIV測定により得られた風速を使用して地表面付近の風環境を評価することを目的とする。

2 測定概要

2.1 実験対象：図1に建物モデルの概要、図2に実験対象建物モデルの配置を、表1に実験caseを示す。建物モデルの一边をH(50[mm])とし、H(奥行)×H(幅)×2H(高さ)の中層建物モデル、H(奥行)×H(幅)×4H(高さ)の高層建物モデルとする。case1、case2では全てを中層建物モデルとし、case3、case4では高層建物モデルを風上側から3棟目に2棟配置する。隣棟間隔^{*1}はcase1、case3で0.5H、case2、case4でHとする。建物モデルは4×4列の整列配置とし、全体のグロス建蔽率^{*2}は、case1、case3で約37.9[%]、case2、case4で

表1 実験 case

実験case	3棟目の建物モデル	隣棟間隔	風向	撮影断面
case1	中層建物モデル (高さ2H)	0.5H	N	水平断面
			NNE	
			NE	
			N	
case2	中層建物モデル (高さ2H)	H	N	水平断面
			NNE	
			NE	
			N	
case3	高層建物モデル (高さ4H)	0.5H	N	水平断面
			NNE	
			NE	
			ENE	
			E	
			ESE	
			SE	
			SSE	
			S	
			N	
NNE				
case4	高層建物モデル (高さ4H)	H	N	水平断面
			NNE	
			NE	
			ENE	
			E	
			ESE	
			SE	
			SSE	
			S	
			N	
N				

約 19.8[%] である。PIV 測定対象範囲は、鉛直断面は 1 棟目から 4 棟目の建物モデルの中心とし、水平断面は風上側から 2 棟目と 3 棟目の隣棟間の中心の地表面付近^{*3}($z=4.0[\text{mm}]$)とする。1 棟目の建物モデルに対し直交方向の風向を N とし、case1、case2 は点対象であるため 22.5° 毎の 3 風向 (N、NNE、NE)、case3、case4 は線対称であるため 9 風向の測定を行う。

2.2 実験機器の概要：表 2 に PIV 測定における測定機器の概要を示す。レーザの照射断面を一致させ、水平断面の可視化には出力 3 [W]× 2 台を、鉛直断面は出力 3 [W]× 2 台及び 2 [W]× 1 台のシート状レーザを同時に使用する。撮影にはハイスピードカメラ Photron FASTCAM-SA3 を、得られた可視化動画の PIV 解析には Flow-Expert Ver1.2.13 を用いる。

2.3 PIV 測定の概要：表 3 に PIV 測定パラメータを、図 3 に風洞と実験装置の概要を示す。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 $U \propto Z^{1/4}$ (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フレキシブルダクトから供給する。

3 解析結果

PIV 解析結果は、風洞内の基準高さ 0.2[m](高層建物モデル高さ)の風速である基準風速 2.2[m/s] に対する風速比で示す。GF は気象庁が定めた 10 分間の内 0.25 秒間隔で測定した値を 3 秒間で平均した瞬時風速の最大値と 10 分間の平均風速で除して算出される。本研究では上記の算出方法を参考に、PIV 測定で得られた 2 [ms] 毎の瞬時風速データ 27 個を平均した値を最大瞬間風速とし、撮影時間である 10.8 秒間の平均風速で除して GF を算出する。

3.1 鉛直断面 (風向 :N)

図 4 に各 case の鉛直断面風速比ベクトル分布を示す。
 (1) case1-4 (中層建物モデル、隣棟間隔 :0.5H) (図 4 (1))
 建物モデル上部を流れる気流は、瞬時風速比 0.3 程度で隣棟間に流れ込み、 $z=H \sim 2H$ まで流入する。吹き降ろ

しは地表面付近には到達しない。平均風速比分布では、隣棟間上部 ($x=3H \sim 3.5H$ 、 $Z=1.5H \sim 2H$) で 0.1 ~ 0.25 程度で渦を形成する。隣棟間下部 ($x=3H \sim 3.5H$ 、 $Z=0 \sim H$) では風向と逆向きの気流場や上空方向に流れる気流場を形成する。

(2) case2-4 (中層建物モデル、隣棟間隔 :H) (図 4 (2))
 建物モデル上部を流れる気流は、瞬時風速比 0.3 ~ 0.7 程度で隣棟間に流れ込み、瞬時風速比 0.3 程度で地表面付近まで到達する。隣棟間上部全域 ($x=4H \sim 5H$ 、 $z=H \sim 2H$) で平均風速比 0.3 程度の渦を形成し、隣棟間下部 ($x=4H \sim 5H$ 、 $z=0 \sim H$) では瞬時風速比 0.1 ~ 0.3 で風向と逆向きの気流場や上空方向に巻き上がる複雑な気流場を形成する。case1-4 と比較して、隣棟間隔が広がることで、周囲に高層建物が存在しなくても、吹き降ろしは地表面に到達する。

(3) case3-10 (高層建物モデル、隣棟間隔 :0.5H) (図 4 (3))
 高層建物モデルに衝突した気流が瞬時風速比 0.7 ~ 1.3 程度で隣棟間に流入し、瞬時風速比 0.4 ~ 0.7 程度で地表面まで到達する。隣棟間に流入直後は平均風速比 0.1 ~ 0.2 程度大きくなる。地表面の建物モデル壁面付近 ($x=3H \sim 3.5H$ 、 $z=0 \sim 0.25H$) では吹き降ろしによる影響で渦や巻き上げが発生する。

(4) case4-10 (高層建物モデル、隣棟間隔 :H) (図 4 (4))
 高層建物モデルに衝突した気流が壁面に沿って瞬時風速比 0.7 程度で流入し、瞬時風速比 0.7 ~ 1.0 程度で地表面まで到達する。隣棟間下部 ($x=4H \sim 5H$ 、 $z=0 \sim H$) では、平均風速比 0.3 ~ 0.4 程度で風向と逆向きに水平方向に流れ、2 棟目中層建物モデルに衝突し、瞬時風速比 0.4 ~ 0.7、平均風速比 0.3 ~ 0.4 程度で壁面

表 2 PIV 測定における測定機器の概要

Camera	ハイスピードカメラ	Photron FASTCAM SA3
Laser	DPGL-3W (水平断面、鉛直断面)	LD励起 : YAG/YVO ₄ レーザ 出力 : 3 [W] × 2 台 波長 : 532[nm]
	DPGL-2W (鉛直断面)	LD励起 : YAG/YVO ₄ レーザ 出力 : 2 [W] 波長 : 532[nm]
SoftWare	カメラ制御	Photron FASTCAM Viewer Ver 4.0.2.1
	PIV解析	Flow-Expert Ver 1.2.13

表 3 PIV 測定パラメータ

測定断面	水平断面		鉛直断面	
	case1, case3	case2, case4	case1, case3	case2, case4
画像サイズ[pixel]	1,024 × 1,024			
キャリブレーション値 [mm/pixel]	0.168	0.172	0.308	0.388
測定対象領域[mm]	172 × 172	176 × 176	316 × 316	398 × 398
測定時間[s]	10.8			
測定間隔	2[ms] (500 [fps])			
シャッター速度[s]	1/2000		1/1000	
検査領域[pixel]	25	24	14	11
探査領域[pixel]	±30 × ±30		±20 × ±20	

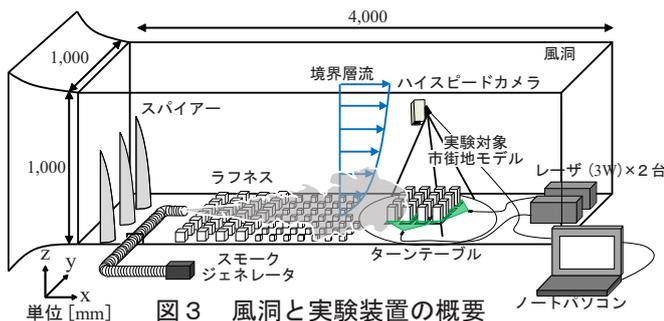


図 3 風洞と実験装置の概要

に沿って巻き上がる渦を形成する。隣棟間上部 ($x=4H \sim 4.5H$, $z=1.5H \sim 2H$) では、中層建物モデルでの剥離と吹き降ろしの影響で平均風速比 0.1 ~ 0.2 程度の小さな渦を形成する。case3-10 と比較して、隣棟間に流入する気流は平均風速比 0.2 程度小さくなるが、流速は低減せずに地表面に到達するため、吹き降ろしが地表面付近の風環境に大きな影響を与えている。

3.2 水平断面 ($z=4.0$ [mm])

図 5 に 5 分割した測定対象エリアを、図 6 に各 case の水平断面風速比ベクトル分布、図 7 に各 case の GF の分布を示す。

(1) case1-1 (風向 : N) (図 6 (1)、図 7 (1))

エリア A、C、E では平均風速比 0.4 ~ 0.6 程度で主風向に沿う流れである。エリア A、E では縮流の影響を受け壁面付近と比較して平均風速比は 0.1 ~ 0.2 程度大きくなる。GF はエリア A、C、E で 1.0 ~ 2.0 程度である。エリア B、D では測定対象範囲外の隣棟間から瞬時風速比 0.3 ~ 0.4 程度で流入しエリア全域を流れる。測定対象範囲外からエリア C へ流れる気流場や瞬時風速比 0.3 程度で渦を形成するなど複雑な気流性状となる。GF は 3.0 ~ 4.5 の領域が大部分を占

め、中層建物モデル壁面付近で 6.0 以上と大きくなる。

(2) case2-1 (風向 : N) (図 6 (2)、図 7 (2))

エリア A、E では、縮流の影響を受けエリア中心で平均風速比 0.4 ~ 0.5 程度、壁面付近で平均風速比 0.3 ~ 0.4 程度で隣棟間に沿う流れである。GF は 1.5 ~ 2.0 程度が大部分を占める。エリア B、D ではエリア C 及び測定対象範囲外から瞬時風速比 0.2 ~ 0.5 程度で流入出を繰り返す、瞬時風速比 0.3 ~ 0.5 程度でエリア全域に渦を形成する。また、局所的に瞬時風速比 0.2 ~ 0.3 程度の吹き降ろしが発生し、複雑な気流性状となる。GF は気流の乱れが大きいエリアのためエリア全域で 6.0 以上が大部分を占める。case1-1 と比較して、エリア A、C、E で平均風速比は 0.1 ~ 0.2 程度小さくなるが GF は概ね同様となる。GF が 6.0 以上の地点は、case1-1 のエリア B で約 16%、エリア D で約 34% であり、case2-1 ではエリア B で約 65%、エリア D で約 44% である。隣棟間隔が広がったことで、エリア B、D ではエリア全域で渦を形成する他に、吹き降ろしも到達し風環境の変化が大きい。

(3) case3-1 (風向 : N) (図 6 (3)、図 7 (3))

エリア A では平均風速比 0.4 ~ 0.5 程度、エリア C で

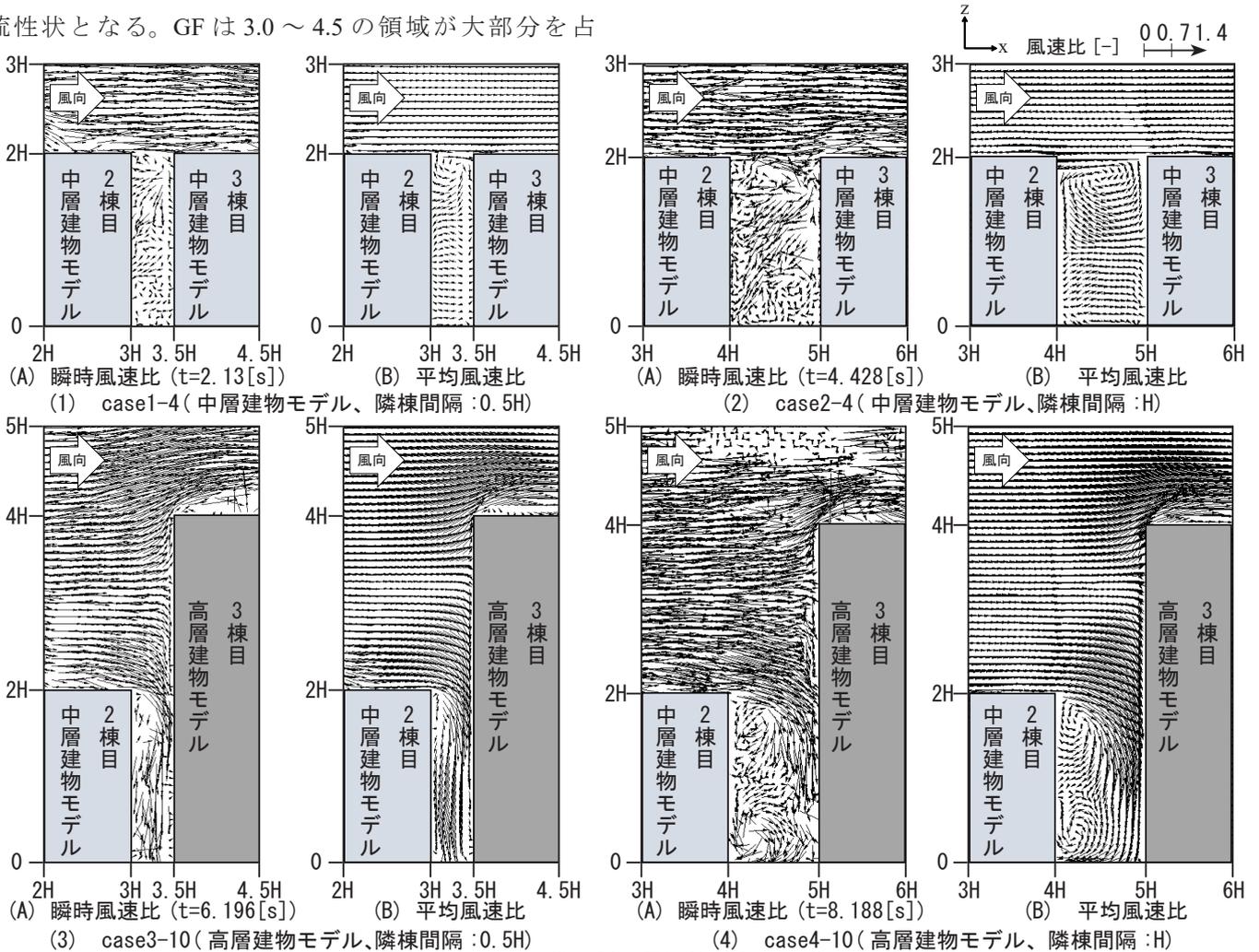


図 4 各 case の鉛直断面風速比ベクトル分布

はエリア B、D からの流入により気流の乱れが生じ平均風速比は 0.3 程度と小さくなる。エリア E ではエリア B、D で発生する吹き降ろしや縮流の影響を受け、瞬時風速比 0.3 ~ 1.0 程度と風速の変化が大きく、平均風速比は 0.5 ~ 0.6 程度であり、エリア C と比較して平均風速比は 0.2 程度大きくなる。GF は、エリア A、E で 1.5 ~ 2.0 程度と風速比の違いによらず概ね一定の分布となる。エリア C では、エリア中心で 1.5 ~ 2.0 程度であるが、エリア B、D、E の境界付近で GF2.0 ~ 2.5 と周囲と比較して高くなる。エリア B、D では、高層建物モデルによって生じた吹き降ろしはエリア中心に到達し、平均風速比 0.2 ~ 0.3 で放射状に広がりエリア C や測定対象範囲外に流れる。GF はエリア中心で 6.0 以上の地点が多く分布しエリア B、D で約 28% である。中層建物モデル壁面付近

では GF2.0 ~ 3.5 程度と周囲と比較して小さくなる。
(4) case4-1 (風向 : N) (図 6 (4)、図 7 (4))

エリア A、C、E では case3-1 とほぼ同様の気流性状となり平均風速比 0.3 ~ 0.4 程度、GF は 1.5 ~ 2.5 程度である。エリア B、D では、高層建物モデルによって生じた吹き降ろしは高層建物モデル壁面付近に到達し、平均風速比 0.3 ~ 0.4 でエリア全域に放射状に広がる。エリア全域に広がった吹き降ろしは、エリア C の中心まで瞬時風速比 0.5 程度で流れ込み、影響は顕著である。GF は吹き降ろしの中心で 6.0 以上であり、周囲は 2.5 ~ 3.5 程度である。case3-1 と比較して、吹き降ろしの到達地点が異なり、高層建物モデル側から中層建物モ

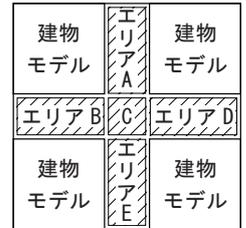


図 5 5分割した測定対象エリア

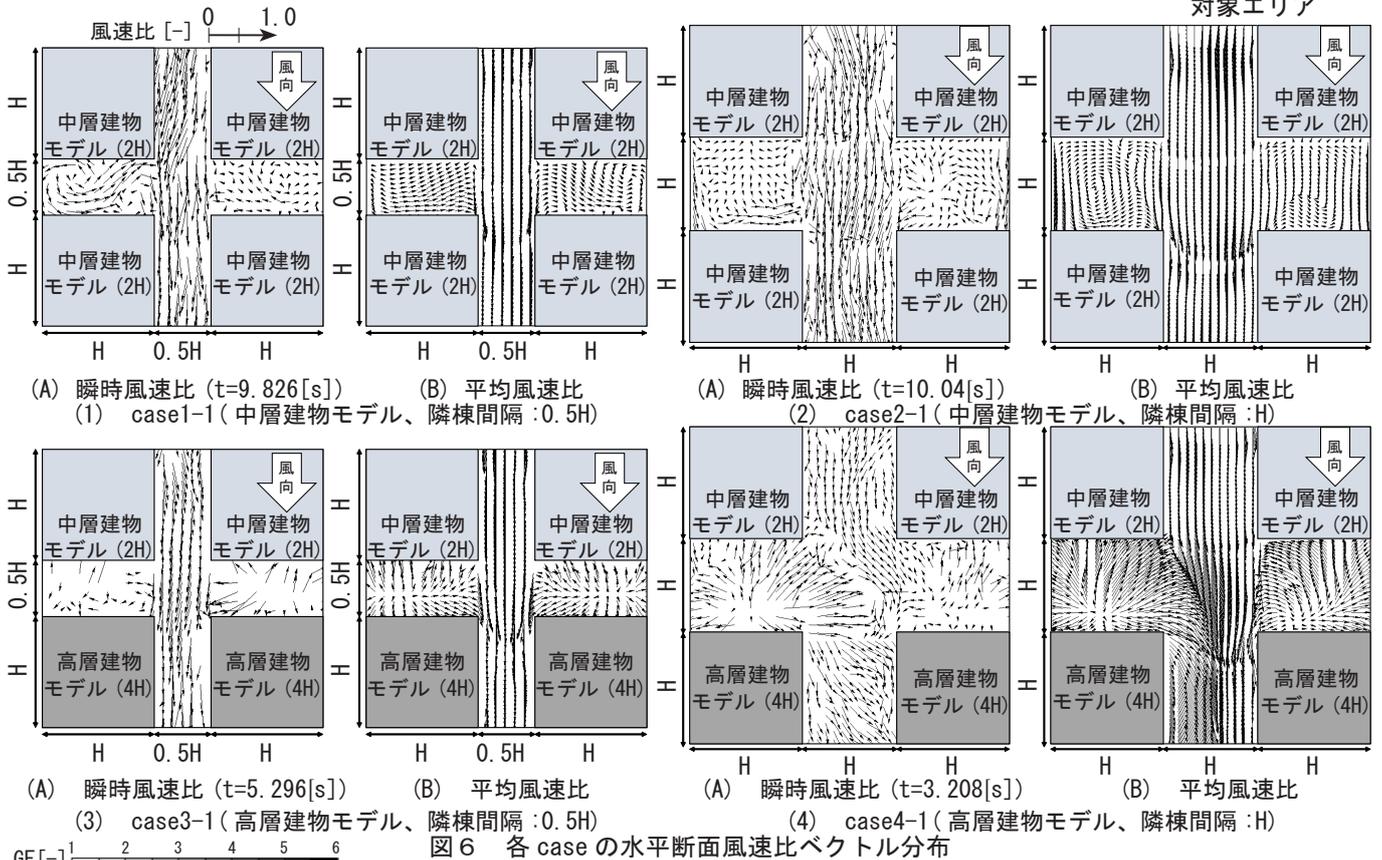


図 6 各 case の水平断面風速比ベクトル分布

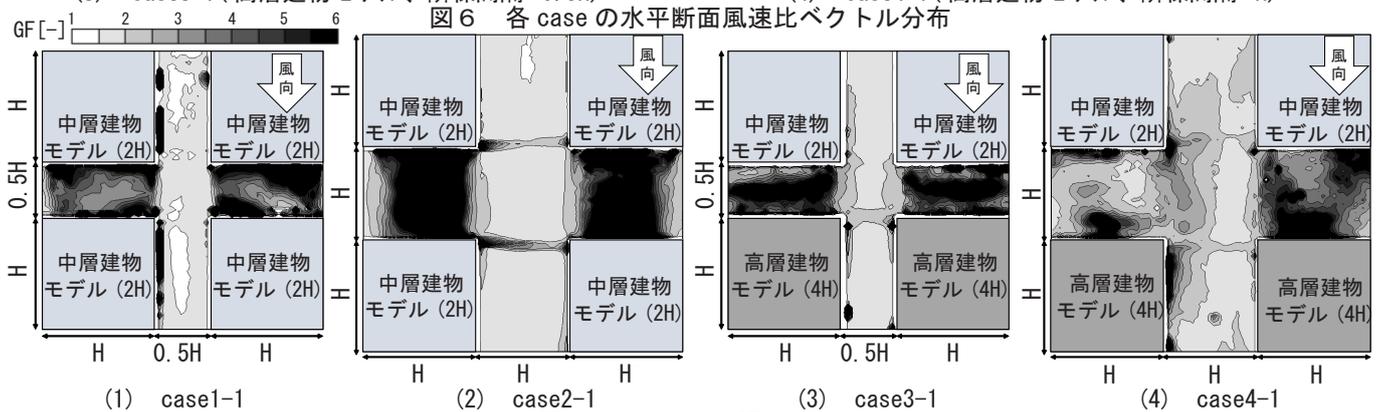


図 7 各 case の GF の分布

デル側へ風向と逆向きに放射状に広がる。また、隣棟間隔の広がり縮流の影響を小さくし、エリア E では平均風速比 0.2 程度小さくなる。

4 風速増加率^{*4}

図 8 に風向 N における風速増加率を示す。隣棟間隔に関わらずエリア A では風速増加率は 0.5 ~ 1.0 と僅かながら小さくなる。エリア C、E では、風速増加率 1.0 ~ 1.5 の地点が僅かにあるが、風速増加率 0.5 ~ 1.0 が大部分を占める。エリア B、D では、隣棟間隔 0.5H でエリア中心で風速増加率 0.5 ~ 1.5 の地点が多く、中層建物モデル壁面付近や測定対象範囲外との境界付近で風速増加率は高くなる。隣棟間隔 H では、風速増加率 5.0 以上の地点が大部分を占め、吹き降ろしの影響が顕著である。

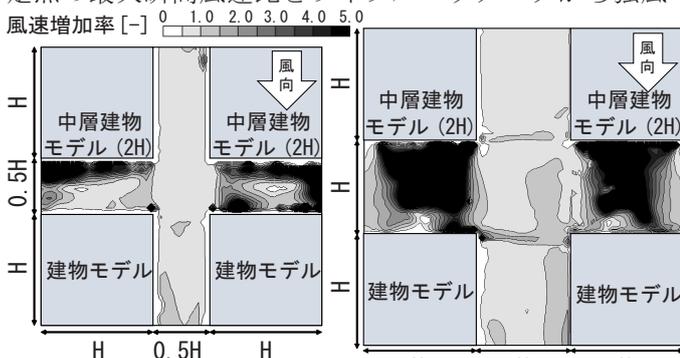
5 風速比と GF の関係

図 9 に各ケースにおける平均風速比と GF の関係を示す。case1、case2 は点对称のため 3 風向、case3、case4 は線対象のため 9 風向を合成した近似式^{*5}とする。最大平均風速比は case1 で 0.6 程度、case2、case3、case4 で 0.7 程度であり、建物配置や隣棟間隔の変化による大きな違いは見られず GF は 1.3 程度に収束する。GF は同風速比で case1、case2、case3、case4 の順に大きくなるが、case1 と case4 の GF の差は風速比 0.1 で 1.5 程度であり、風速比 0.2 で 0.75 程度である。実験対象市街地モデル全体の平均風速比と GF の関係は概ね同様である。風速比の小さい地点では、隣棟間隔の変化よりも、高さの異なる建物が周囲に存在することで GF は高くなると考えられる。各測定地点で比較すると、平均風速比 0.2 以下での GF は 2.0 ~ 15.0 以上とばらつきが大きい。

6 風環境評価

6.1 村上らによる風環境評価手法^{*1)}

表 4 風環境評価に用いるワイブルパラメータ^{*6}文²⁾(東京)、表 5 に村上らによる風環境評価基準を示す。村上らによる風環境評価では、PIV 測定で得られた各測定点の最大瞬間風速比とワイブルパラメータから強風



(1) case3-1 に対する case1-1 (2) case4-1 に対する case2-1
図 8 風向 N における風速増加率

の超過頻度を求め、表 5 に基づいて風環境を評価する。超過頻度 P_{jk} の算出式を式 (1) に示す。

$$P_{jk} = 1 - \sum_{i=1}^{16} D_i \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{U_k}{R_{ij} C_i} \right)^{K_i} \right\} \right] \quad \dots (1)$$

U_1 : 10[m/s],	R_{ij} : 点 j における風向 i の時の最大瞬間風速比 [-]
U_2 : 15[m/s],	C_i : 風向 i のワイブルパラメータ [m/s]
U_3 : 20[m/s],	K_i : 風向 i のワイブルパラメータ [-]

6.2 超過頻度

図 10 に各 case における風速 10[m/s] を超過する頻度を示す。10[m/s] を超過する頻度は、エリア全体の平均で case1 で 0.075[%]、case2 で 0.048[%]、case3 で 0.070[%]、case4 で 0.198[%] であり大変低い。風速 15[m/s]、20[m/s] を超過する頻度はほぼ 0[%] である。case1 ではエリア A、C が他のエリアと比較して超過頻度は高いが 1.0[%] 程度である。case2 ではエリア A が case3 ではエリア E で超過頻度は 0.6[%] 程度と大変低い。case4 では全てのエリアで風速 10[m/s] を超過する頻度が高くなる傾向があるが最大で 1.2[%] 程度である。case1、case2 のように全ての建物モデルが同一高さの場合は、隣棟間隔が狭いと最大瞬間風速の超過頻度は高くなると考えられる。case3、case4 のように周囲と比較して高層建物モデルが存在する場合は、隣棟間隔が広く、高層建物モデル間のエリアで最大瞬間風速の超過頻度は高くなると考えられる。

6.3 風環境評価結果

風速 10[m/s] を超過する頻度が case1 ~ case4 で 0.053 ~ 0.195[%] であり、風速 15[m/s]、20[m/s] を超過する頻度はほぼ 0[%] と大変低い。全ての case で許容される超過頻度を超えないため、case1 ~ case4 では風環境評価はランク 1 となり、測定対象範囲の風環境は適切な状況である。このことから、本研究で用いた密集市街地モデルでは、隣棟間隔や高さの異なる建物の配置の変化で吹き降ろしや縮流などのビル風が発生し、地表面付近の気流性状は変化するが、風環境の悪化は見られない。

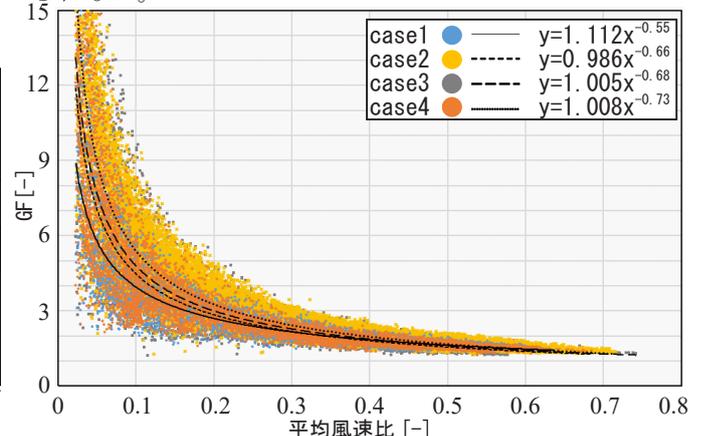


図 9 各 case における平均風速比と GF の関係

7 まとめ

7.1 鉛直断面（風向：N）

- 吹き降ろしは、case1 では地表面付近に到達しないが、case2 では瞬時風速比 0.3 程度、case3 では瞬時風速比 0.4～0.7 程度、case4 では瞬時風速比 0.7～1.0 程度で地表面まで到達する。
- 吹き降ろしにより case2 では建物モデル壁面付近 ($x=3H \sim 3.5H, z=0 \sim 0.5H$) で、case4 では隣棟間下部 ($x=4H \sim 5H, z=0 \sim H$) で瞬時風速比 0.4～0.7 程度で巻き上がる渦を形成する。

7.2 水平断面（風向：N）

- 風向 N において、隣棟間隔が広がることでエリア B、D では吹き降ろしや渦の形成が起こり、気流の乱れが大きく GF の大きい地点が増加する。
- 吹き降ろしは case3-1 では隣棟間中心から放射状に、case4-1 では風向と逆方向に流れる放射状の気流場を形成する。

7.3 風速増加率（風向：N）

- 隣棟間隔に関わらずエリア A、C、E では風速増加率 0.5～1.0 の地点が大部分を占め、エリア E の壁面付近で風速増加は 1.0～1.5 程度と大きくなる。
- エリア B、D では隣棟間隔 0.5H で風速増加率 1.0～1.5 程度であるが、隣棟間隔 H では風速増加率 5.0 以上が大部分を占め吹き降ろしの影響が顕著である。

7.4 平均風速比と GF の関係

- 隣棟間隔が広がり、高さの異なる建物が配置されることで同風速比でも GF の値は大きくなる。
- case1、case2、case3、case4 の順で GF は大きくなり、case1 と case4 の GF の差は風速比 0.1 で 1.5 程度であり、風速比 0.2 で 0.75 程度である。
- 隣棟間隔や高層建物モデルの配置により地表面付近の風速速度分布は変化するが、測定対象範囲における

表4 風環境評価に用いるワイブルパラメータ※6文2（東京）

方位	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
出現頻度 [%]	9.061	4.27	5.94	6.844	3.887	3.942	1.889	0.876
C	6.961	5.948	5.975	5.891	5.756	5.468	4.983	4.673
K	2.882	4.416	5.332	5.296	6.05	5.526	7.606	6.216
方位	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
出現頻度 [%]	16.89	3.285	10.129	0.411	0.164	0.493	4.708	27.211
C	6.312	6.915	7.309	5.078	8.042	6.345	7.797	7.556
K	4.421	3.712	4.008	6.108	2.484	2.608	3.275	4.387

表5 村上らによる風環境評価基準

ランク	強風による影響の程度	対応する空間用途の例	許容する強風のレベルと許容される超過頻度		
			日最大瞬間風速 [m/s]		
			10	15	20
			日最大平均風速 [m/s]		
			10/GF	15/GF	20/GF
1	最も影響を受けやすい用途の場所	住宅街の商店街 野外レストラン	10 [%] (37日)	0.90 [%] (3日)	0.08 [%] (0.3日)
2	影響を受けやすい用途の場所	住宅街、公園	22 [%] (80日)	3.6 [%] (12日)	0.6 [%] (2日)
3	比較的影響を受けにくい用途の場所	事務所	35 [%] (128日)	7 [%] (26日)	1.5 [%] (5日)
4		ランク3の条件を満たさない領域			

る平均風速比と GF の関係は概ね同様となる。

- 各測定地点で比較すると、平均風速比 0.2 以下での GF は 2.0～15.0 以上とばらつきが大きい。

7.5 風環境評価

- case1、case2 のように全ての建物モデルが同一高さの場合は、隣棟間隔が狭いと最大瞬間風速の超過頻度は高くなる。
- case3、case4 のように周囲と比較して高層建物モデルが存在する場合は、隣棟間隔が広く、高層建物モデル間のエリアで最大瞬間風速の超過頻度は高くなると考えられる。
- 最大瞬間風速 10[m/s] を超過する頻度が case1～case4 で 0.053～0.195 [%] であり、最大瞬間風速 15[m/s]、20[m/s] を超過する頻度はほぼ 0 [%] と大変低い。
- 隣棟間隔や建物形状の変化で吹き降ろしや縮流などのビル風が発生し、地表面付近の気流性状は変化するが、すべての case で風環境評価はランク 1 となり測定対象範囲の風環境は適切な状況である。

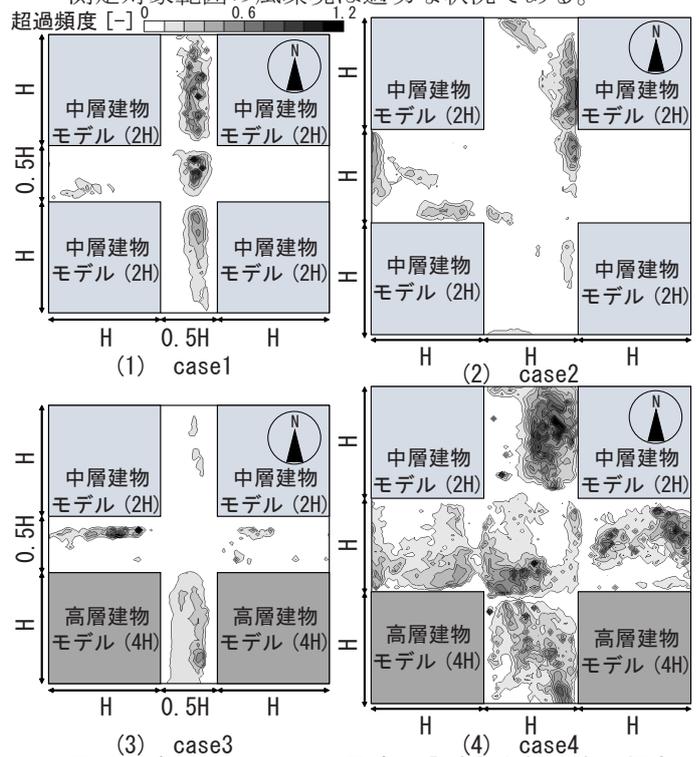


図10 各 case における風速 10[m/s] を超過する頻度

注釈)

- 隣棟間には歩道と道路を想定し、道路幅は case1、2 で 0.34H、case3、4 で 0.84H、歩道幅は 0.08H×2 [本] とする。
- 建物の建築面積の合計を道路等の公共用地を含めた全体面積で除したもの。
- 縮尺を 1/500 とすると、地上高さ 2.0[m] に相当する。
- 風速増加率は、各算出点において case1 に対する case3、case2 に対する case4 のスカラー風速の比として算出する。
- 壁面近傍では解析値が極端に小さい測定点が存在する。平均風速比と GF の近似式を作成する際、平均風速が小さい測定点で GF の値が極端に大きくなるため平均風速 0～0.05[m/s] 以下を削除して作成する。
- 風向の頻度分布の作成には標準気象データ（標準年）を用いる。

参考文献)

- 村上・岩佐・森川 「居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に関する研究：市街地低層部における風の性状と風環境評価に関する研究—III」日本建築学会論文報告集、1983 年
- 日本建築学会 「拡張アメダス気象データ」 鹿児島 TLO、2005 年
- 可視化情報学会編：PIV ハンドブック、森北出版株式会社、2002 年