

超高層建築物の設計風速評価に向けた都市上空風況把握のための検討

佐々木 澄

(技術研究所)

Investigation of Wind Conditions over an Urban Area for Evaluation of Design Wind Speed for Super High-Rise Building

Kiyoshi Sasaki

東京都中央区京橋の清水建設本社屋上に設置したドップラーライダーにより、東京の都市上空の風況を長期間観測している。これまでの検討により、200mを超える上空においても周辺の高層建築物の影響が大きく、風向によって風況が大きく異なることが分かっている。その後の継続した計測でも同様の傾向が見られ、特に北寄りの風向の際に風向傾度や風速の鉛直分布の若干の変化が見られた。周辺建物の影響を検討するために風洞実験を実施し、周辺建物自体の影響だけではなく、さらに風上の市街地で形成される気流の違いが建物の風下への影響範囲に寄与していることが分かった。

Long-term observation of wind conditions at high altitude over central Tokyo have been conducted using Doppler lidar. Upper wind conditions have been found to differ greatly depending on the influence of surrounding buildings. In order to examine these influences, wind tunnel experiments were conducted. The upper wind speed changed depending on the presence of buildings located relatively far away. Additionally, wind profile on the windward of surrounding buildings affects the range of wind speed reduction in leeward area.

1. はじめに

都市の風況を予測・評価するために用いる基準となる風速については、日本建築学会荷重指針・同解説¹⁾に示されている、地表面の状態を考慮した地表面粗度区分別の鉛直分布が用いられることが一般的である。但し、最新版である2015年版において、「高さ250m以上の高高度における風速は観測を行うなど慎重に検討すべき」という記載があり、掲載されている風速の鉛直分布には高さ300m以上は図示されていない。そのため、超高層建築物の設計において風に関する検討を行う際には、上空風況の把握が重要となっている。

近年では都市をはじめとする各所でドップラーライダーを用いた上空風況把握のための観測例が多く見られ、日本風工学会では研究会活動を通して事例がまとめられた²⁾⁴⁾。文献²⁾にまとめられた事例の中にも含まれているが、筆者らも既報⁵⁾で報告したように上空風況の長期観測を実施しており、現在も継続している。既報では、データの取得率等の上空風観測における特徴を整理するとともに、都市上空の平均風速の鉛直分布に影響を与える要因として、大気安定度や風速レベル、周辺建

物群といったものを挙げている。特に設計風速検討の際に重要となる高風速条件のみを抽出した場合でも周辺建物群の影響は確認された。

本報では、都市の上空風況の把握のために、継続して計測したデータに基づく風況の経年変化の有無の検討や、強風が発生した台風時の上空風速についての紹介、周辺建物の影響に関して風洞実験を用いて検討した結果について報告する。

2. 観測概要

観測の詳細に関しては既報⁵⁾に記した。観測は2017年5月に開始し現在も継続中であるが、2022年11月～2023年4月までの期間は機器のハードメンテナンスを実施したため欠測となっている。

ドップラーライダーでは設定した仰角で東西南北の4方向と真上への計5本のビームを約4～5秒間隔で逐次発射し、その直線上の視線風速から各成分の風速を算出している。データのサンプリング周期は測定器のヘッドの回転速度に依存するため4～5秒であり、1回の計測(10分間)で最大140個程度のデータを取得することができる。データの有効性については、大気条件等の影響を受ける射出されたレー

レーザーの反射強度に閾値を設けて判断している。また、風速の算出のためには5本全てのレーザー上の視線速度が必要となり、エアロゾル粒子の減少や降雨の影響等の理由により、ある方位角の1本のレーザー上の視線速度が取得できない場合、次にその方位角のデータが取得できるまでは風速のデータは無し、という扱いとなる。そのため、エアロゾルの少ない冬季や大雨の時などは欠測となる時間帯が多くなる。

3. 観測結果

既報と同様、取り扱うデータについては10分間で取得可能なデータ数(最大140個程度)のうち、半分(70個)以上のデータが取得できた時間帯、高度のみとしている。以下で示す風速とは、特に注釈が無い場合は10分間の平均風速のことである。

3.1 各年の風況比較

1年分のデータが揃っている2018年～2021年の4年間の風況の比較として、各年の風配図を図-1に、

風速の鉛直分布の比較を図-2に示す。なお、本データは最低観測高度である150mから高さ500mまでのデータが全て揃っている時間帯を抽出している。風配図では風向別の割合を求める分母として高さ150mにおける各年のデータ数を用いた。風速の鉛直分布は高さ150m～500mの平均風速が10m/s以上の高風速となるデータのみを抽出している。全データの鉛直分布の他、高さ150m～500mまでの平均風向が北東～北西のものを北寄りの風、南東～南西のものを南寄りの風としてそれぞれの鉛直分布も併せて示した。風速の鉛直分布の図は両対数軸で書かれている点に注意されたい。

風配の傾向では全体の形は各年とも概ね類似しているが、2021年は高度別の出現頻度の現れ方が他の年と若干傾向が異なっており、150m、200m高さの北、北西の出現頻度が高めとなっている。南寄りの風では年毎で最大頻度の現れる風向などは若干異なるが高度別に見ると、2021年を除いて南の風向では150m(青)の出現頻度が最高で高度が上がるほど頻度が低くなっていた。南南西では全ての年で150m

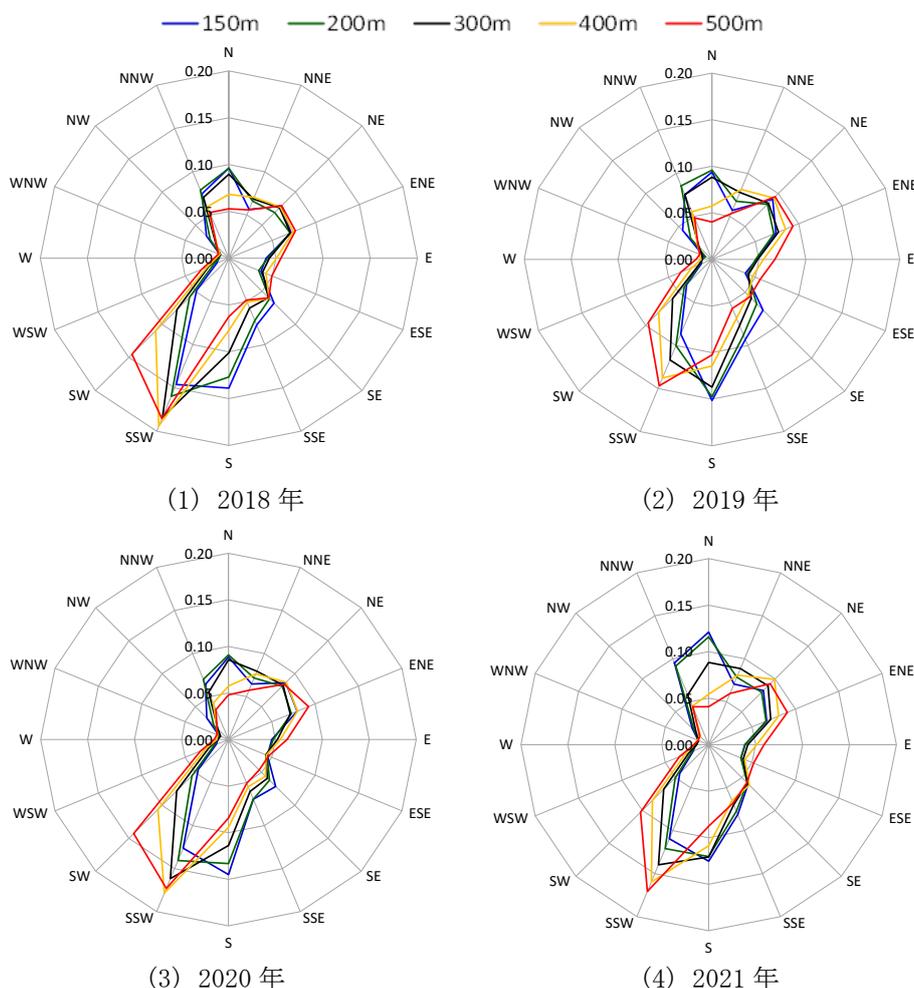


図-1 風配図(高さ150mにおける各年のデータ数に対する各風向のデータ数の割合)

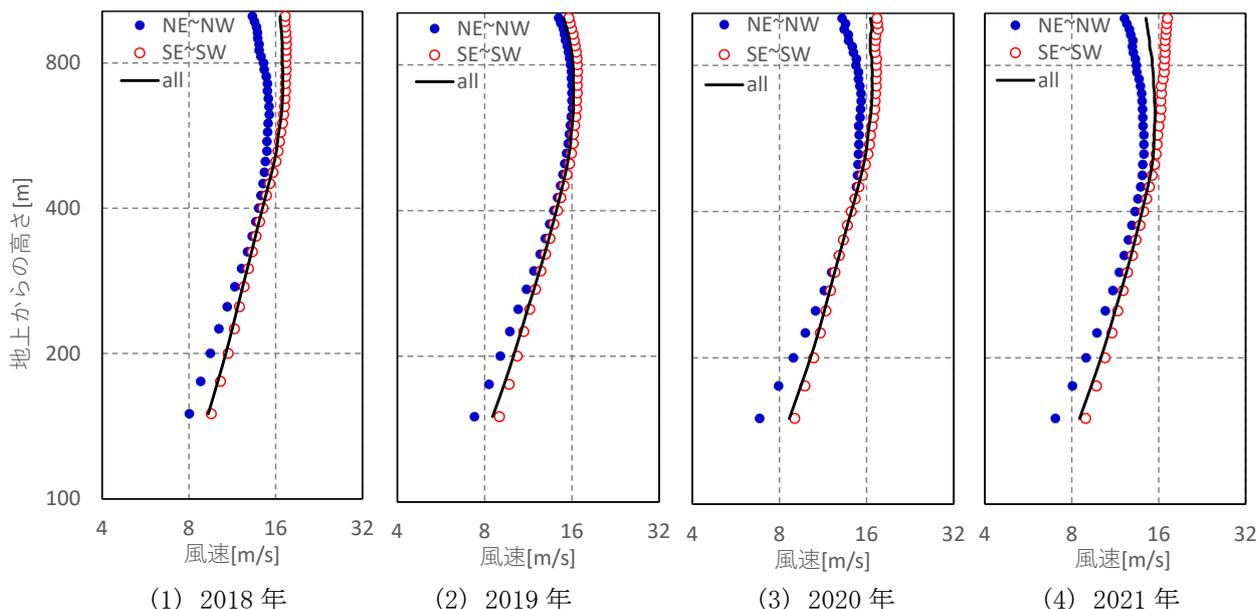


図-2 風速の鉛直分布

が最も低く、400m(橙)、500m(赤)がほぼ同程度であるが高度が高いほど頻度が高い、という傾向は変わっていない。一方、北寄りの風を見ると、2021年を除いて北西では150mが200m(緑)よりも頻度が高く、逆に北北西では150mの方が200mよりも低くなっている。特に2019年では2020年比べて顕著に現れているように見える。2021年では北西の頻度が非常に低く、北北西では150mの頻度が200mよりも高かった。

風速の鉛直分布(図-2)を見ると、抽出された全データの結果では風速の大きさではそれぞれの年で若干の違いが見られるが、傾向はよく一致しており、データ取得率が高い南寄りの風の影響が全データに反映されていることが良く分かる。また、北寄りの風の場合は上空に行くほどデータ取得率が下がり、結果として600mより上空では平均風速が徐々に低くなっていく傾向が見られた。風向別の結果を見ると、北寄りの風の場合には低高度では風速の低下が顕著に表れており、既報でも指摘した通り、いずれの年においても北側から西側に建つ東京駅周辺の高層建物群の影響を受けていることが分かる。さらに、2018、2019年に比べて2020、2021年の方が全体データに比べて低高度での風速が低下する(青丸が黒線から離れる)様子が若干ではあるが見られる。図-1に示した北西側の風配の変化やこの風速低下は、機器設置後も観測場所の北西方向にあたる東京駅周辺で高層建物の建設が続いた影響であると考えられる。南寄りの風の場合、べき乗則のべき指数にあたるグラフの傾きはそれぞれの年で大きな差は見られなかった。傾きから推定されるべき指数は、周辺建

物の影響が大きい北寄りの風では0.5~0.68と大きな値で差が見られ、これらの影響も含めた全てのデータでのべき指数は0.4~0.5程度であった。

3.2 台風時の上空風速

観測期間の中で強風が発生した台風時の風況として、高さ300mにおける高風速が発生した時間帯順に、各高度の風速、風向についてまとめたものを表-1に示す。ここで示す風向とは、150m~500mまでの平均風向である。空欄は降雨などの影響により欠測している時間帯、高度となる。

最も強い風が吹いたのは2019年の台風19号が通過した際であり、高さ300mで38.4m/s、400mで40.9m/sであった。今回は高さ300mの風速順に、一つの台風で最も大きかった時間帯を抽出しているため、他の高度ではより風速が高い時間帯もあった点に注意されたい(例:高さ400mでの最大値は同じく2019年台風19号時で、43.5m/s)。参考として、気象官署(東京管区气象台)東京:北の丸公園、観測高さ35.3m))で表-1に示した台風時に観測された風速と、この風速から地表面粗度区分別にそれぞれのべき指数で上空300mの風速を推定した結果を表-2に示す。表示順は表-1に合わせている。風速の大小関係でいうと、2018年台風24号の際のドップラーライダの観測値が低めとなっていた。その他の台風に関しては、気象官署での観測結果と同様の順となっていた。また、気象官署で観測された風速から高さ300mの上空風を推定した場合、2018年台風24号と2017年台風21号の際の地表面粗度区分Vで推定した結果が、ドップラーライダで観測さ

表-1 風速の鉛直分布[m/s]

	150m	200m	250m	300m	350m	400m	450m	500m	風向	事象
2019/10/12 21:30	28.6	32.2	34.9	38.4	39.8	40.9	42.5		S	台風19号
2019/9/9 4:00	30.1	33.4	35.4	36.8					NE	台風15号
2018/10/1 1:00	27.0	30.1	34.0	35.3	37.0	38.3	39.6	41.8	SSW	台風24号
2017/10/23 5:00	18.0	20.7	23.0	25.9	28.3	29.0	29.9	31.0	S	台風21号
2017/9/18 1:30	16.6	19.8	22.1	25.1	28.7	31.8	33.5	34.5	S	台風18号

表-2 気象官署で観測された最大風速と推定される上空300mの風速[m/s]

事象	観測データ	地表面粗度区分		
		Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
2019年台風19号	17.8	27.3	31.7	37.6
2019年台風15号	15.4	23.6	27.4	32.6
2018年台風24号	18.2	27.9	32.4	38.5
2017年台風21号	13.7	21.0	24.4	29.0
2017年台風18号	11.7	17.9	20.9	24.7

れた結果よりも大きな値となっていた。地表面粗度区分Ⅳで推定した場合、いずれの台風の場合でもドップラーライダで観測された値の方が大きめの値となっており、地表面粗度区分Ⅴで推定した場合には上記のようにドップラーライダの観測値を超えるものもある他、比較的近い値となっていた。

表には示さないが、春一番や低気圧の通過に伴い台風以外でも強風が吹いた事象では、高さ300mで20~25m/s程度の風が吹いている時間帯もあった。なお、観測概要にも示した通り、ドップラーライダでは降雨の影響やエアロゾルが少ない場合には欠測が増えるため、台風時の高高度のデータや冬季の強い北風のデータ等は十分に取得できていないと考えられる。

4. 周辺建物の影響検討のための風洞実験

周辺建物の影響を検討するために、ドップラーライダ設置建物を中心とした半径1kmの範囲を縮尺1/1000の模型で再現し風洞実験を実施した。作成した模型写真を図-3に示す。模型作成に使用した建物データは2019年7月に購入したものである。

4.1 上空の風速計測⁶⁾

ドップラーライダ設置建物のある位置の上方の風速を、UV型の熱線風速計を用いて高さ150mm~600mm(実高さ150m~600m)まで25mmピッチで

計測した。実験気流は建築物荷重指針における地表面粗度区分Ⅲを再現した勾配流とした。データのサンプリング周波数は1kHzとし、実時間10分間相当で平均したもので分析を行った。

観測により周辺建物の影響が顕著に現れていた北寄りの風向のうち、北西(315°)~北(360°)までの風向を5°ピッチ変更し計測したデータより求めた高さ方向の風向の変化を図-4に示す。上層部では流入気流とほぼ同一の風向となっているが、下層部では流入気流に比べて変化が見られた。これは北西側500m~1,000mにある東京駅周辺の高層ビル群の影響と考えられ、北に近い風向では東寄りに、北西に近い風向では西寄りに変化していることが分かる。また、影響が及んでいる高度も風向により異なる



図-3 模型写真

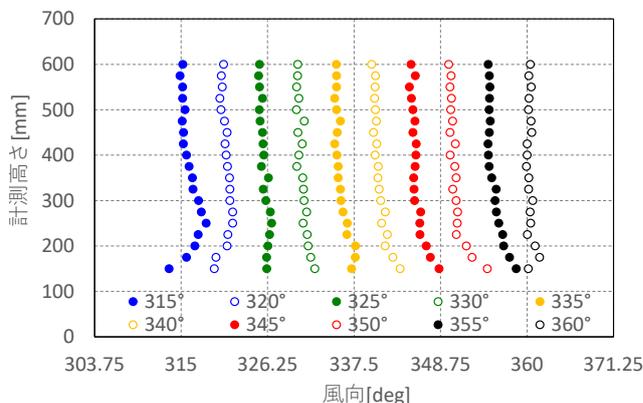
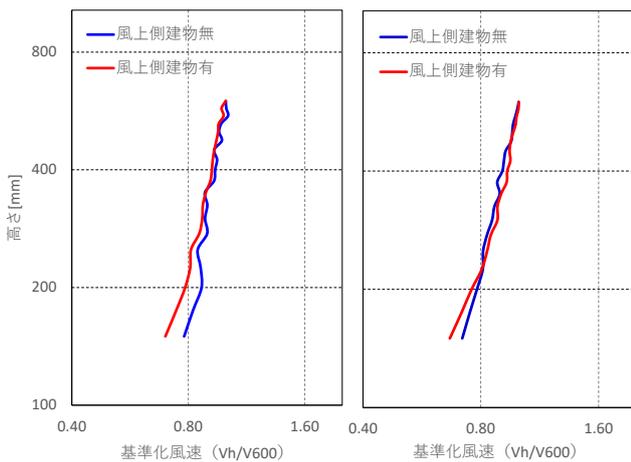


図-4 測定高さ別の風向(風洞実験)

り、風向が315°では高度400m程度までは流入風向との差異が見られた。但し、観測結果では北～北西方向では風向別の風向頻度にも影響があるように見られたが、風洞実験ではそのような大きな風向変化は見られない。観測結果には弱風のデータも含まれており、周辺建物の影響の他、気象場による風向変動の影響等もあると考えられる。

周辺建物が風速の鉛直分布に与える影響を検討するために、高層建物が林立する北側ではなく、約1km南側に離れたところに建つ、ドップラーライダー設置建物よりも50mほど高い建物(高さ約150m)を取り除いた条件で同様の測定を行った。風速の鉛直分布の測定結果を図-5に示す。なお、取り除く建物は作成した円盤(図-3)の端に近い位置にあることから、本検討ではより風上側の気流の影響を検討するために実験気流を地表面粗度区分Ⅳに変更した条件でも実施した。図は両対数軸で整理し、横軸は高さ600mm(実スケールで600m)の風速で各高さの風速を基準化した値を示している。結果を見ると、



(1) 地表面粗度区分Ⅲ (2) 地表面粗度区分Ⅳ
図-5 測定高さ別の風向 (風洞実験)

風上側建物無の条件では下層部でいずれの実験気流においても風速が低下していることが分かる。その程度は地表面粗度区分Ⅲの方が大きく、さらに高さ方向でもより高いところまで影響が現れていた。この結果より、上空では1km程度離れた高層建物でも風況に及ぼす影響があることや、その風上側の市街地により形成される気流によりその影響度合いが変わる可能性が示唆された。

4.2 PIV 実験による検討

図-3に示した実験模型を用いて、風速分布を面的に計測できる手法であるPIV(Particle Image Velocimetry)により超高層建物が風下側の風況に与える影響について検討した。検討対象は東京駅近傍の地上高さ約200mの建物とし、地上から実高さで約180m(実験では約180mm)の位置にレーザーを照射し、水平断面の風速分布を計測した。実験気流として地表面粗度区分Ⅲの他、より顕著な違いを検討するために一様流でも実施した。PIV検討用の画像の撮影範囲は約500mm×500mm、撮影間隔は1,000fps(1秒間に1,000枚の画像)とし約6秒間撮影した。撮影範囲と瞬間的な流れ場を図-6に示す。

全実験データを平均した風速分布を図-7に示す。なお、ここで示す値は測定高さでの流入気流の風速で基準化した風速比の分布となっている。結果を見ると、図-6に示した瞬間的な流れ場でも顕著に見られるように、検討対象建物の風下側に風速低減領域が広がり、側面の風下側にはやや高風速の領域が形成されている。また、撮影領域の北側(図の上側)には風上側の建物等と考えられる増速域が形成されていた。顕著な風速低減領域の広がりや実験気流の違いで異なり、地表面粗度区分Ⅲに比べて一様流の方がより後流まで広がり、かつ風向に対しての直交

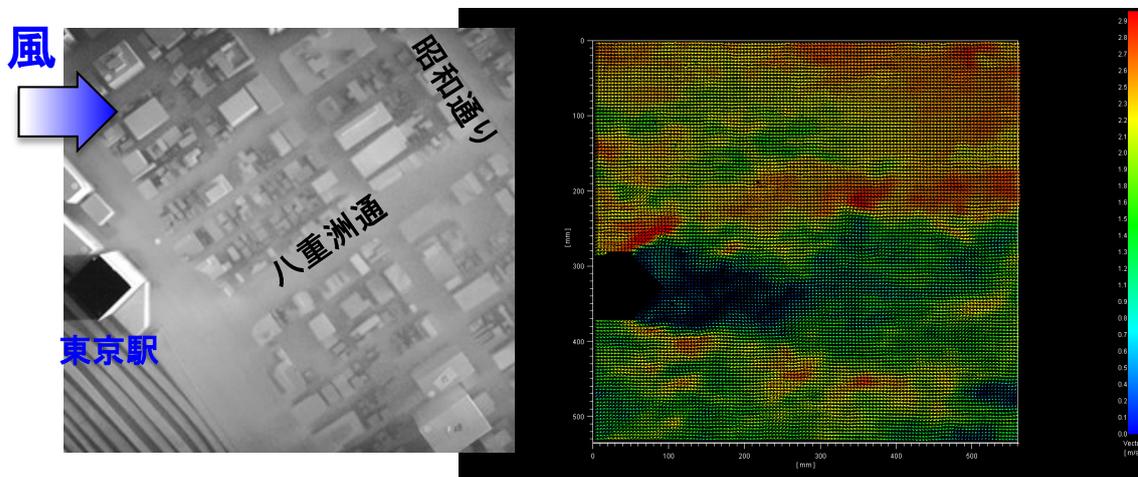


図-6 PIVの撮影範囲と瞬間的な流れ場

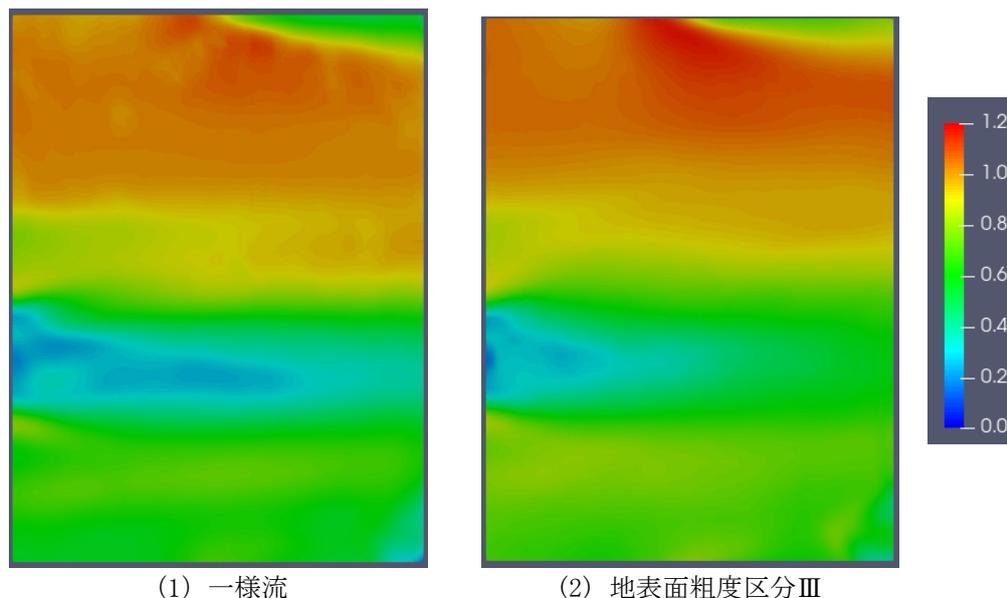


図-7 平均風速分布 (基準化風速分布)

方向の広がりやや狭くなっていることが分かる。風速低減領域に関する結果は、乱れが大きい気流ほど風下側への影響が小さくなる、という熱線風速計での実験結果と一致するものである(図-5)。今回使用したPIVシステムの撮影限界の500mm角での計測であったため、より広範な影響については検討できないが、高度によっては風下側にさらに広く影響している可能性も考えられる。

一般に、風の乱れは上空ほど小さくなると考えられることから、周辺に比べて高い超高層建築物を計画する際には、近隣の建物の影響以外にも風上側に建つ同様の超高層建物の影響を受ける可能性が示唆されるものである。風洞実験では再現が難しい広範囲の影響を検討するために数値解析も実施しており、今後、超高層建物に対する風の影響を検討する際に考慮すべき周辺建物の範囲やその程度を明らかにするよう、引続き検討したいと考えている。

5. まとめ

超高層建築物の設計風速評価に向け、都市上空の風況把握を目的としてドップラーライダーを用いた長期間の観測結果を継続して実施している。本報では観測結果の経年比較や強風発生時の観測データを紹介した。また、観測結果で見られた上空風況に影響を与えている周辺建物の影響を検討するために、2種類の風洞実験を実施した結果を示した。

1) 長期観測における風況の大きな経年変化はないが、風向別に周辺建物の影響が顕著に見られる結果となった。

- 2) 台風時のデータも取得でき、気象官署の観測結果から推定される上空風速よりも大きめとなる傾向が見られたが、一部条件では推定値が観測値よりも大きくなっていた。
- 3) 風洞実験により周辺の建物や遠方の超高層建物が上空風況に影響を与えていることを確認した。
- 4) 実験気流を変えた条件で検討した結果、周辺建物の影響度合いや範囲が変化し、乱れの少ない気流ほど影響範囲が広がる可能性が示された。

<参考文献>

- 1) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 2015
- 2) 佐々木澄, 赤星明紀, 石田泰之, 大塚清敏, 菊本英紀, 岸田岳士, 中島慶悟, 山中徹: 各機関の観測概要, 日本風工学会誌, 第49巻2号, pp. 79-84, 2024
- 3) 山中徹, 佐々木澄, 中島慶悟, 松井正弘: ドップラーライダーにより観測した強風時の風の性状, 日本風工学会誌, 第49巻2号, pp. 89-93, 2024
- 4) 菊本英紀, 赤星明紀, 石田泰之, 佐々木澄, 中島慶悟, 山中徹: ドップラーライダーを活用した日常風(強風から中弱風)性状の観測, 日本風工学会誌, 第49巻2号, pp. 94-101, 2024
- 5) 佐々木澄, 野津剛, 酒井佑樹: ドップラーライダーを用いた東京都心部の高高度風況の長期観測, 清水建設研究報告, 第98号, 2020
- 6) 佐々木澄, 松井正宏, 野津剛, 酒井佑樹: 東京都心部の上空風況の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.67-68, 2021