

領域気象モデル WRF を用いた風環境予測に関する研究

井 上 涼 木 梨 智 子 後 藤 暁
大 塚 清 敏 丹 原 千 里

A Study on Prediction of Urban Wind Environment Using the Weather Research and Forecasting Model

Ryo Inoue Satoko Kinashi Satoru Goto
Kiyotoshi Otsuka Chisato Tambara

Abstract

An appropriate reference wind is essential for assessing wind environment. However, it is not always possible to obtain suitable wind data observed near the target site that are not affected by obstacles. In this study, we investigated a method for applying WRF (Weather Research and Forecasting Model) results to reference wind data. We attempted to improve the prediction accuracy by modifying the WRF results with the CFD results. The cumulative frequency of the mean wind speed and the frequency of occurrence of wind direction at the observation station were well reproduced. The WRF simulations reproduced the actual wind environment better than the observational data, far from the target site. The results showed the applicability of the WRF wind environment prediction.

概 要

風環境の評価では、周辺地域を代表する風況データが必要不可欠であるが、対象地点から近く、かつ周辺の障害物の影響が少ない適切な風観測データが既存の観測網からは得られない場合がある。本研究では領域気象モデル WRF の解析結果を、風環境予測用風況データとして利用する方法を検討した。WRF 解析結果を、対象地点の周辺街区を詳細にモデル化した数値流体解析の結果を用いて補正することで、予測精度の向上を試みた。補正された WRF の 10 分間平均風速の累積頻度、平均風向の出現頻度は、関東地方の気象庁観測地点の風観測値を精度良く再現した。また、都内で独自に実施した観測地点を対象に、離れた既存観測地点の観測データと、対象地点の WRF 計算値で風環境評価を実施し、WRF 計算値を用いた方が実観測結果を精度よく再現できた。気象庁の観測地点から離れた地点の風環境評価に WRF 解析結果を適用し、その有効性を示した。

1. はじめに

中・高層建築物の建設計画時には、建設される建物による周辺風環境への影響を適切に評価し、歩行者等の安全性・快適性に配慮する必要がある。その際実施される風環境評価では、計画建物周辺の地域を代表する風（基準風）を設定する必要がある¹⁾。一般的には、計画地から数 km ほどの距離に位置する既存の観測所で、数年間以上連続して得られた風観測データが用いられる。しかし、観測所が計画地から大きく離れている場合や、観測値が周辺建物等の影響を顕著に受けていると見られる場合は、風観測データの基準風としての適用が難しいことがある。また、計画地から同程度離れた観測所が複数地点ある場合は、選定が困難なこともある。これらは、風環境評価の実務上の問題点として挙げられる。

最近では風環境評価以外の目的にも、風観測データが利用される事例が少なくない。計画初期段階の建物設計や、工事期間中に生じる近隣への粉塵飛散等の影響の予

測、竣工後の運営管理への情報提供などといった様々な場面で、計画地周辺の風観測データが利用される。そうした利用目的では、特定の時期の風向風速の時系列値を求められることが多いが、既存観測網の観測だけでは不十分な場合がある。

このような計画地周辺の風の状況を示すデータ（風況データ）が必要な場合の風観測データの代替として、領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting Model)²⁾ による数値計算の結果を利用する方法が課題解決の候補として挙げられる。義江ら^{3), 4)}はドップラーライダーで観測された上空の風観測データと WRF による風の予測結果を比較することで、WRF の計算結果が上空風の基準風として適用可能であることを示したが、地表面近くの風への適用性の検討はなされていない。

本研究では、風環境予測において適切な基準風を近隣の風観測から得ることができない場合、風観測データの代替として WRF を利用する方法について検討する。関東地方の気象庁による地上風観測データを検証用データ

として、WRF による風の予測精度の検証を行い、観測データの代替としての WRF の利用可能性を明らかにすることを目的とする。これまでの風環境評価では、地上 10 m 程度で観測されることが多い、気象庁による地上観測データがよく利用されている。実務上も、建物周辺の地上 1.5 m 等、低い高度の風況データが必要となる場合が多い。筆者らはこれまで WRF の利用可能性を、上空と地表面近くの風を対象に検討した⁵⁾が、本研究では地表面近くの風を対象とした。ただし、WRF の水平格子解像度は数 km であるため、そのままでは街区内の地表面近くの風を再現することが難しい。そこで本研究では WRF 解析に加えて、対象地点の周辺街区を詳細にモデル化した数値流体解析（以下、街区 CFD 解析と記す、CFD: Computational Fluid Dynamics)を行い、その結果により WRF の結果を補正する方法の適用を試み、有効性を検討した。

2. 方法

2.1 WRF 解析と街区 CFD 解析を用いた予測手法

WRF 解析と街区 CFD 解析を併用する、街区内の風の予測手法を用いる背景について説明する。

WRF では気象学でメソスケールとして分類される空間スケールである、水平方向に広さ 2~2000 km 程度の範囲、鉛直方向に地上から 10 km を超える高度までの風が 3 次元的に計算される。そこから得られる地表面近くの風の計算値は、建物などの障害物を陽的に解像せずに計算された結果である。一方で検証に用いる気象庁の地上風観測データは、街区スケール (~1 km) の範囲の建物等の障害物(地表面粗度要素)の影響を含んだものである。一般には両者の間には違いが生じるため、空間スケールが異なる風を結び付ける必要がある。

街区 CFD 解析からは対象地点を含む街区内の風速比分布が計算される。街区 CFD 解析で計算された対象地点における風速比と、個別の建物に影響される局所的な風向を用いて、上空の風の WRF 計算値を補正することで、広域な風況と、街区内の風の変化の影響の両方を考慮することができると考えられる。

2.2 WRF 解析の計算条件

領域気象モデル WRF²⁾ は、米国国立大気研究センター (NCAR, National Center for Atmospheric Research) で開発された汎用気象モデルであり、気象業務及び研究で広く使われている。WRF では大気の運動方程式、質量保存の式、熱・水蒸気・大気放射等の方程式を連立させて解くことで、大気の状態を数値的に予測することができる。

WRF 解析による対象地域は関東地方とした。全体の計算領域を Fig. 1 に、Domain 4 の計算領域を Fig. 2 に、計算条件を Table 1 に示す。計算領域は入れ子状に空間解像度が異なる 4 つの計算格子を設定し、双方向のネスティング計算とした。観測値との比較検証には、最も内

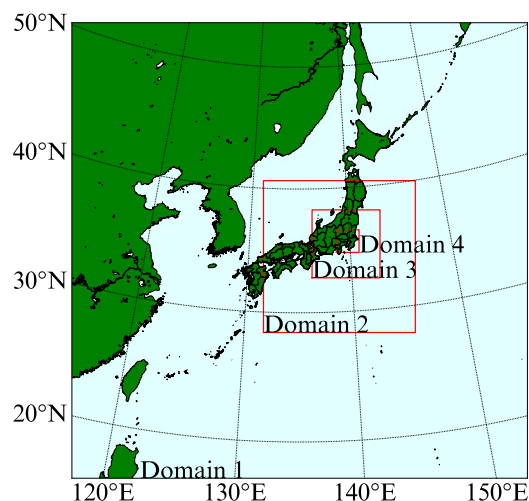


Fig. 1 WRF の計算領域 (Domain 1~4)

Computational Domains of WRF Simulation (Domain 1~4)

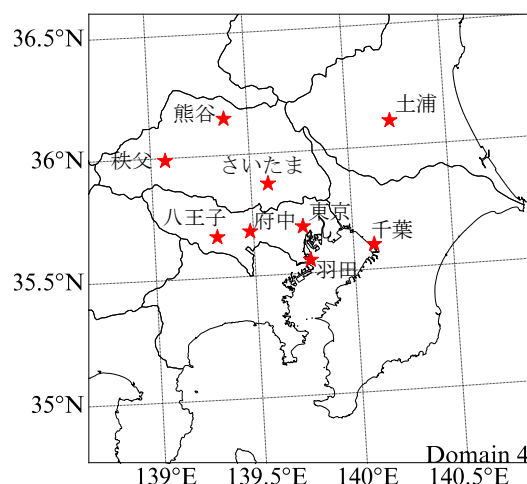


Fig. 2 WRF の計算領域と気象庁観測地点

Computational Domain of WRF Simulation,
Observation Sites Operated by Japan Meteorological Agency

Table 1 WRF 解析の計算条件

Model Setup for WRF Simulation

モデル	WRF (Ver 4.4.1)
対象期間	2022 1/1 ~ 2023 12/31 前月最終日 9 時~ 1 か月毎計算 (15 時間間走計算)
水平方向格子サイズ	Domain 1 : 27 km Domain 2 : 9 km Domain 3 : 3 km Domain 4 : 1 km
鉛直方向格子	鉛直 75 層 (最小格子間隔約 50 m)
タイムステップ	2, 3, 4 秒 (月による)
初期・境界条件	NCEP FNL ^⑥ (鉛直 32 層, 1.0°)
標高値	USGS GTOPO30 ^⑦
土地利用情報	USGS 24-category
雲微物理過程	WSM 6-class
長波放射過程	RRTM
短波放射過程	Goddard
地表面過程	Noah-MP Land Surface Model
大気境界層過程	YSU
積雲過程	Kain-Fritsch (Domain 1, 2)
ナッシング	ON (大気境界層より上層)

側の格子である Domain 4 の計算値を用いた(Fig. 2)。
Domain 4 の水平格子間隔は 1 km とした。対象期間は 2022~2023 年の 2 年間とし、1 か月単位で計算した。各月 1 日の前日の日本標準時 9 時を計算初期時刻として、15 時間の助走計算期間を設けた。結果出力は 10 分毎とした。初期・境界条件には 3 次元格子点気象データ（客観解析データ）である NCEP FNL 再解析⁶⁾を、地形データは USGS GTOPO30⁷⁾を用いた。客観解析データで与えられる気圧配置等の総観場(天気図に見られる程度の範囲)の時間変化に対し、WRF の予測があまり離れないようにするため、データ同化という方法を適用した。大気境界層より上空の自由大気中で、基礎方程式系にデータ同化のひとつであるナッジングを適用した。ナッジング係数は WRF のデフォルト値である $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ とした。

2.3 気象庁データ

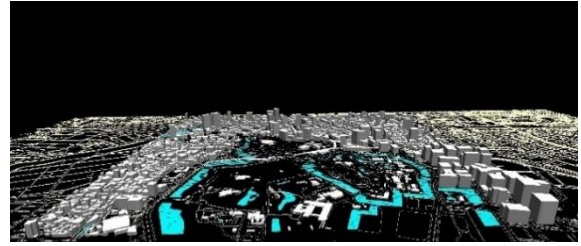
WRF 計算値の比較検証に使用したデータは気象庁観測地点の 10 分毎の風向風速データである。対象地点は東京、羽田、府中、八王子、さいたま、熊谷、秩父、千葉、土浦の 9 地点とした(Fig. 2)。

2.4 街区 CFD 解析の計算条件

街区 CFD 解析は、大林組の風環境シミュレータ「Zephyrus (ゼフィルス) ⑧」⁸⁾を用いた。計算領域は気象庁観測地点を中心とした 2 km 四方（東京のみ 2.6 km 四方）とした。最小水平格子間隔は 2 m とした。流入気流は日本建築学会の指針⁹⁾に基づき地表面粗度区分Ⅲ（東京はⅣ、羽田はⅡ）の境界層乱流とし、乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。計算領域の東京の例を Fig. 3 に、街区 CFD 解析の計算条件を Table 2 に示す。地形は考慮していない。

2.5 比較検証方法

3 種類の WRF 計算値について、各地点の風向風速の観測値に対する検証を行った。3 種類の WRF 計算値は(1)地上 10 m の風 (10 m WRF 計算値)、(2)地上 200 m の風 (200 m WRF 計算値)、(3)地上 200 m の風の WRF 計算値を、街区 CFD 解析から計算された気象庁観測地点観測高さでの風速比と局所風向で補正した観測高さ相当の風 (補正 WRF 計算値) である。(1)から、地表面粗度要素の影響を大きく受ける地表面近くの風の WRF による再現性を確認する。地上 10 m の WRF 計算値を、日本建築学会地表面粗度区分に従ったべき乗則を用いて観測高さに補正することで、観測値と比較した。(2)から、観測地点周辺の比較的広域な風況の再現性を確認する。(3)は、街区 CFD 解析の結果を用いて WRF 計算値を以下の式(1)(2)で補正したもので、地上付近の風速の再現性の向上を確認する。各対象地点について、事前に 22.5° 毎に計算領域に流入してくる方位を変えた風に対する計 16 ケースの街区 CFD 解析を行い、観測位置・観測高さにおける局所風向 $\theta_{CFD Local}$ 、及び地上 200 m の風速に対する観測



©2025 ZENRIN CO., LTD.(Z09KA 第 039 号)

Fig. 3 街区 CFD 解析の計算領域（東京）

Computational Domain of the CFD Simulation (Tokyo)

Table 2 街区 CFD 解析の計算条件
Model Setup for the CFD Simulation

解析手法	疑似圧縮性法 + Dual time stepping 法
格子系	有限体積法, 直交格子 + 重合格子 水平方向等間隔, 鉛直方向不等間隔
空間離散化	対流項: 3 次精度風上, その他: 2 次精度中心
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$
流入気流	地表面粗度区分Ⅲ（東京はⅣ、羽田はⅡ） の境界層乱流
水平方向 格子サイズ	領域 1: 20 m 領域 2: 10 m 領域 3: 5 m 領域 4: 2 m
鉛直方向 格子間隔	地上 10 m 付近は 2.0 m 地上 200 m 付近は 20.0 m
計算領域 (東京以外)	観測地点を中心として 領域 1: 2 km 領域 2: 1 km 領域 3: 600 m 領域 4: 300 m 四方
計算領域 (東京)	観測地点を中心として 領域 1: 2.6 km 領域 2: 1.5 km 領域 3: 750 m 領域 4: 350 m 四方

$$U_{WRF \text{ modified}} = R_{CFD Local} U_{WRF 200 m} \quad (1)$$

$$\theta_{WRF \text{ modified}} = \theta_{WRF 200 m} - \theta_{CFD inflow} + \theta_{CFD Local} \quad (2)$$

ここで、

$U_{WRF \text{ modified}}, \theta_{WRF \text{ modified}}$: 補正された WRF 計算値の風速, 風向

$U_{WRF 200 m}, \theta_{WRF 200 m}$: 地上 200 m の WRF 計算値の風速, 風向

$R_{CFD Local}, \theta_{CFD Local}$: 街区 CFD の観測地点の風速比, 局所風向 (観測地点の水平風速比成分で算出する風向)

$\theta_{CFD inflow}$: 街区 CFD の流入風向 (16 方位)

高さの風速の比 $R_{CFD Local}$ を求める。地上 200 m の WRF 計算値 $U_{WRF 200 m}$ に風速比 $R_{CFD Local}$ を乗じて観測高さの風に変換する補正を行う。この補正においては、WRF 計算値の風向 $\theta_{WRF 200 m}$ に最も近い街区 CFD 解析の流入風向 $\theta_{CFD inflow}$ を 16 風向の中から選択し、その風向の $R_{CFD Local}, \theta_{CFD Local}$ を採用する。補正された WRF 計算値 $U_{WRF \text{ modified}}, \theta_{WRF \text{ modified}}$ には、建物の存在による風速増加あるいは低減と、建物近傍の局所的な風向変化の影響が含まれている。

3. 結果

3.1 風速の累積頻度と風向の出現頻度

2022~2023 年の 10 分間平均風速の累積頻度, 10 分間平均風向の出現頻度について、WRF 計算値, 観測値を比較した。対象とした 9 地点（東京、羽田、府中、八王子、

さいたま、熊谷、秩父、千葉、土浦)の10分間平均風速の累積頻度,10分間平均風向の出現頻度をFig.4に示す。なお, Fig.4には, 平均風速の累積頻度の参考として, 風工学会の提案による風環境評価指標¹⁾で用いられている累積頻度55%, 99%に対応する平均風速の閾値も示した。風工学会の提案による平均風速に基づく風環境評価指標をTable3に示す。累積頻度55%の風速は年間の平均風速, 95%の風速は日最大平均風速の年間平均値にほぼ相当するとされている¹⁾。なお, この評価指

Table 3 平均風速に基づく風環境評価指標¹⁾

Wind Environment Assessment Criterion
Based on Mean Wind Speeds¹⁾

領域区分	累積頻度 55%の 平均風速	累積頻度 95%の 平均風速
領域A: 住宅地としての風環境, または比較的穏やかな風環境が必要な場所	$\leq 1.2 \text{ m/s}$	$\leq 2.9 \text{ m/s}$
領域B: 住宅地としての風環境, 一般的な風環境	$\leq 1.8 \text{ m/s}$	$\leq 4.3 \text{ m/s}$
領域C: 事務所街としての風環境, または比較的強い風が吹いても我慢できる場所	$\leq 2.3 \text{ m/s}$	$\leq 5.6 \text{ m/s}$
領域D: 超高層建物の足元で見られる風環境, 一般には好ましくない風環境	$> 2.3 \text{ m/s}$	$> 5.6 \text{ m/s}$

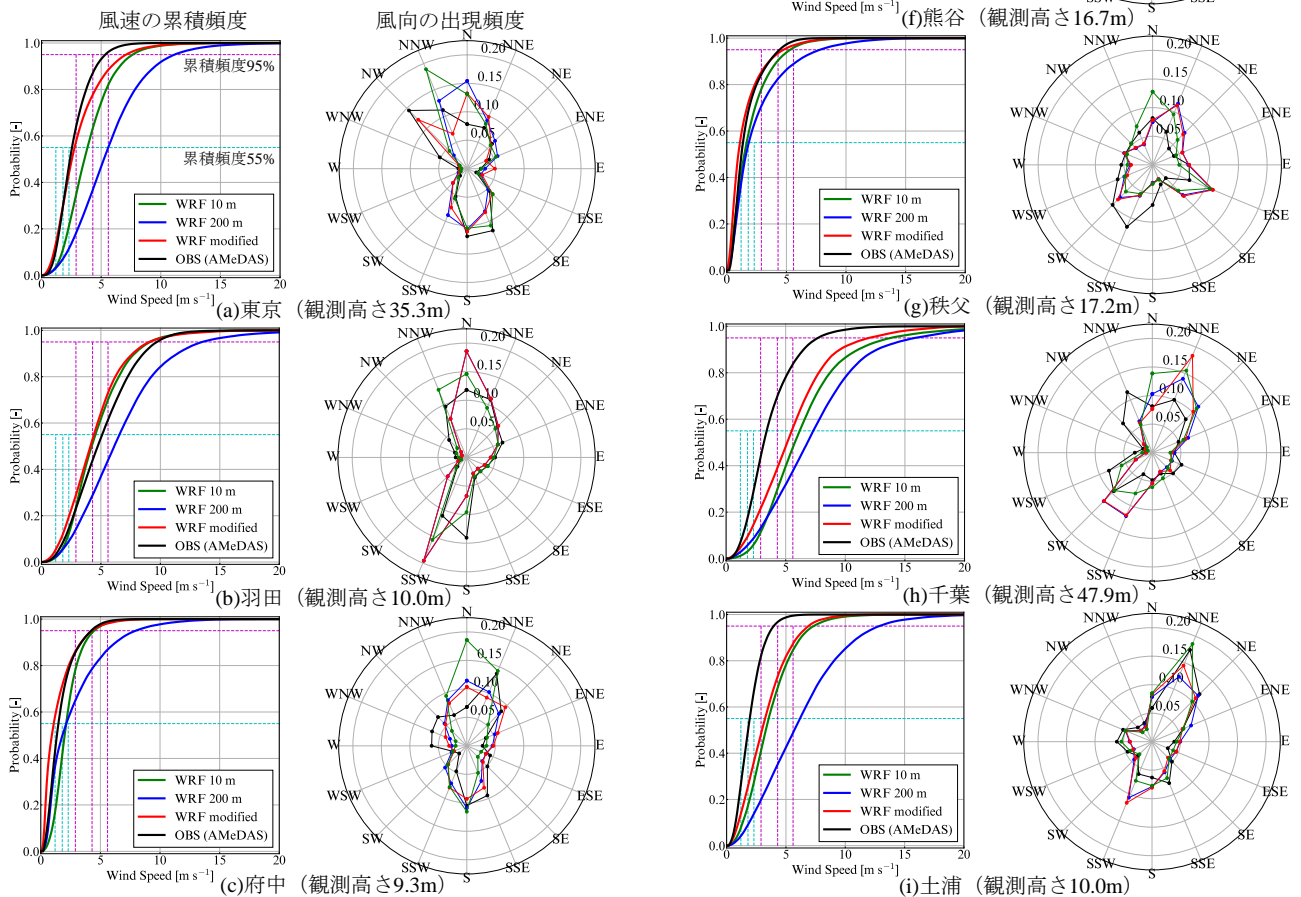


Fig. 4 2022~2023年の10分間平均風速の累積頻度, 10分間平均風向の出現頻度

The Cumulative Frequency of 10 Min Mean Wind Speed, the Frequency of Occurrence of Wind Direction in 2022~2023

標は地上 5 m の平均風速を対象としており、各観測地点の結果とは評価高度が異なるため風環境評価指標として直接用いることはできないが、WRF 計算値と観測値の差の目安とするための参考値として用いる。

風速の累積頻度について、東京、府中、八王子、さいたま、秩父では(3)補正 WRF 計算値が観測値と最もよく対応していた(Fig. 4)。これらの地点では、風環境評価指標の結果を決定する風速の累積頻度の閾値付近で、WRF 計算値と観測値の累積頻度が近い値になっていた。(2)200 m WRF 計算値を街区 CFD 解析で補正することにより、(3)補正 WRF 計算値が観測地点の風況をよく再現することを確認することができた。羽田、熊谷は(1)10 m WRF 計算値と(3)補正 WRF 計算値が同程度観測値と対応していた。高度や地表面粗度の影響を WRF 解析内で扱う気象学的方法(1)と、街区 CFD 解析結果から上空の風を補正するという工学的な方法(3)のどちらが風況をより再現できるかは、対象地点、あるいは対象期間によって異なるものと考えられる。一方で、千葉、土浦では、(1)~(3)のいずれも観測値とは大きく異なっていた。これは、WRF 解析に用いた初期・境界条件と観測値との差が大きく、WRF 計算値(1)(2)が観測値と大きく異なることが原因だと考えられる。あるいは、周辺の障害物による観測値への影響が原因である可能性も考えられる。

風向の出現頻度については、頻度の高い風向が観測と解析でいずれの地点でも概ね一致した(Fig. 4)。羽田、さいたま、熊谷、土浦では、(1)10 m WRF 計算値、(3)補正 WRF 計算値、観測値がほぼ同じ傾向の風向出現頻度を示した。特に羽田では、(2)200 m WRF 計算値と(3)補正 WRF 計算値の違いもほとんど見られなかった。これらの観測地点では、近くの街区に大規模・中高層建物が見られないため、街区 CFD 解析で得られた局所風向が流入風の風向とほぼ同じであったことを意味している。一方で、観測値との差が大きい風向が一部見られる地点も確認された(東京の N、府中の N、八王子の NE、WNW、千葉の NNE、土浦の NNE 等)。この原因のひとつには周辺の障害物の観測値への影響が大きい可能性も考えられる。

3.2 統計対象期間の依存性

風速の累積頻度は、統計対象期間を定め、その期間の風速の頻度を積算することで求められる。また WRF による計算結果は、初期・境界条件の客観解析データを元に、支配方程式系を時間積分して得られた値である。したがって平均風速の累積頻度は、設定した対象期間によって異なる。風環境評価に用いる風観測データは、数年に渡る長期間であることが望ましいが、本研究では計算コストを鑑みて、特定の 2 年間のみの解析を行っている。ここでは 2022~2023 年の 2 年間の計算結果を用いて、平均風速の累積頻度に対する統計対象期間の依存性について調べた。各統計対象期間における、累積頻度 55% 及び 95% の平均風速を Table 4 に示す。府中、八王子の 2 地点について示した。Fig. 4 より、観測値とよく対応した

Table 4 各統計対象期間における累積頻度 55% 及び 95% の平均風速

Mean Wind Speed of the Cumulative Frequency at 55 % and 95 % in each Periods

	対象 期間	累積頻度 55%の平均 風速 [m/s]	累積頻度 95%の平均 風速 [m/s]
WRF modified 府中 (観測値)	2022 2022	1.0 1.4	3.9 4.0
WRF modified 府中 (観測値)	2023 2023	2.8 2.4	6.7 5.3
WRF modified 府中 (観測値)	22-23 22-23	1.0 1.4	4.2 4.2
WRF modified 八王子 (観測値)	2022 2022	2.8 2.3	6.6 6.3
WRF modified 八王子 (観測値)	2023 2023	4.3 3.9	8.7 8.4
WRF modified 八王子 (観測値)	22-23 22-23	2.9 2.3	6.8 6.5

(3)補正 WRF 計算値を示した。比較した統計対象期間は 2022 年、2023 年の各 1 年間と、2022~2023 年の 2 年間の計 3 種類である。いずれの計算値も、累積頻度 95% に達する風速は 2023 年の方が少し大きい、対象期間の設定によって観測値との差が著しく異なる例は見られなかった。他の地点についても、同様の傾向を示した。今回対象とした 2 年間においては、統計対象期間の依存性は大きくないと考えられる。

3.3 ワイブル係数

風速の発生頻度は、ワイブル分布という確率分布で比較的良く近似できることが知られ¹⁰⁾、風環境の確率的評価では、風向別のワイブル分布が用いられる。ワイブル分布において、風速が V [m/s] 以下となる累積確率は以下の式で表される。

$$P(\leq V) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{V}{C} \right)^K \right\} \quad (3)$$

$P(\leq V)$: 10 分間平均風速が V [m/s] 以下となる累積確率

C : ワイブル係数 (尺度係数) [m/s]

K : ワイブル係数 (形状係数)

尺度係数 C は確率密度関数の広がり、形状係数 K は確率密度関数の形状を決めるものである。16 風向別の 10 分間平均風速から、最尤推定を用いて算出したワイブル係数を Fig. 5 に示す。羽田、さいたまの 2 地点について示した。(2)200 m WRF 計算値と(3)補正 WRF 計算値では補正の計算上、風速は異なるが、風向は大きくは変わらない。その結果、各風向の風速の発生頻度分布の形状はあまり変わらないため、形状係数 K はほぼ同じ値となっている。WRF 計算値と観測値で比較すると、対応しない風向も一部見られるが、いずれの地点でも(1)10 m WRF 計算値または(3)補正 WRF 計算値が観測値の C 、 K とよく対応していた。

ワイブル分布による近似の妥当性を調べるため、WRF 計算値の累積頻度と、その分布から近似したワイブル分

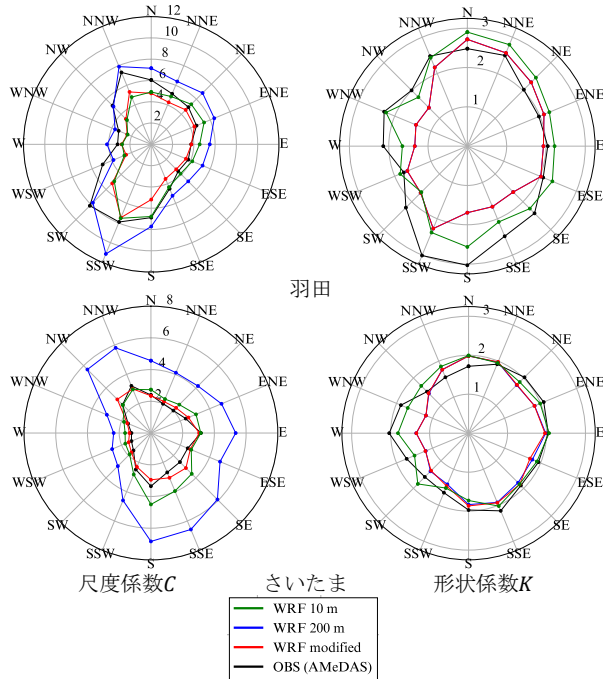


Fig. 5 2022~2023 年の 10 分間平均風速から求めた
ワイブル係数 (C (左), K (右))
Weibull Parameters (C (left), K (right))
Calculated from 10 Min Mean Wind Speed in 2022~2023

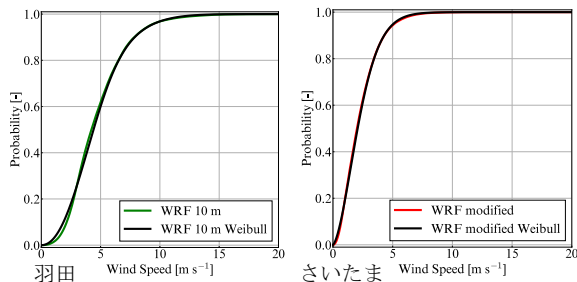


Fig. 6 2022~2023 年の 10 分間平均風速の WRF 計算値
の累積頻度と、ワイブル分布で近似した累積頻度
The Cumulative Frequency of 10 Min Mean Wind Speed of
WRF Results and the Cumulative Frequency Approximated
by Weibull Distribution in 2022~2023

布による累積頻度を Fig. 6 に示す。WRF 計算値は Fig. 4
において観測値とよく対応した(1)10 m WRF 計算値 (羽
田) と, (3)補正 WRF 計算値 (さいたま) とした。2 地点
とも WRF 計算値の累積頻度と、ワイブル分布による累
積頻度はよく対応していた。他の地点についても、同様
の傾向を示した。本研究の結果においても、ワイブル分
布による近似の妥当性が確認できた。

4. WRF 解析結果の適用

4.1 都内の公園での風観測

WRF 解析から得られた風況データの適用性を確認し
た。都内の公園で行った地上風観測^{11), 12)} で得られた風

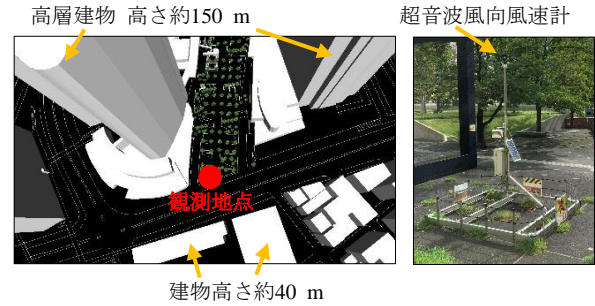


Fig. 7 都内の公園の風観測地点の状況
Observation Point in the Park in Tokyo

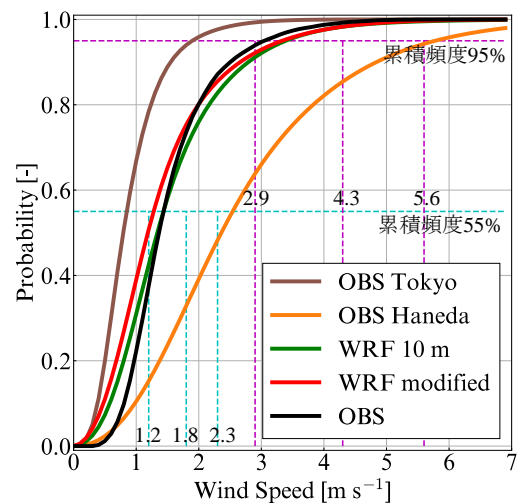


Fig. 8 都内の公園の風観測地点における
10 分間平均風速の累積頻度
The Cumulative Frequency of 10 Min Mean Wind Speed
in the Park in Tokyo

Table 5 都内の公園の風観測地点における
累積頻度 55% と 95% の平均風速及び風環境評価結果
Mean Wind Speed of the Cumulative Frequency at 55 %, 95 %,
Wind Environment Assessment Results in the Park in Tokyo

	累積頻度 55% の平均 風速 [m/s]	累積頻度 95% の平均 風速 [m/s]	風環境 評価結果
東京	0.8	1.8	A
羽田	2.5	5.7	D
WRF 10 m	1.4	3.3	B
WRF modified	1.2	3.3	B
現地観測値	1.4	3.0	B

速の発生頻度を、WRF 解析に基づいて予測した場合と、
風環境評価で一般に行われるように、評価対象地点の近
隣の気象庁風観測データを基準風として街区 CFD 解析
から予測した場合とで比較した。風観測は、東京都港区
の公園で 2022 年 9 月から 1 年間実施した。風観測地点
周辺の街区 CFD 解析用のモデルと、観測状況を Fig. 7 に
示す。観測地点は南北方向に約 400 m 広がる公園の南端
に位置し、南側には幅員約 30 m の道路が東西に通って
いる。観測地点の北側には高さ約 150 m の建物、南側に

は高さ約 40 m の建物が存在する。観測高さは 3.0 m である。風観測には 2 次元超音波風向風速計を用いて、サンプリング周波数 1 Hz で観測した。

風観測データ及び WRF 計算値について、2022 年 9 月から 1 年間の観測地点での 10 分間平均風速の累積頻度を Fig. 8 に示す。WRF 計算値として 10 m WRF 計算値((1)WRF 10 m), 補正 WRF 計算値((3)WRF modified)を用いた。(3)には、都内の公園を対象とした街区 CFD 解析の結果を用いた。計算条件は他の気象庁観測地点と同様である(Table 2)。風環境評価を行う対象地点すぐ近くに既存観測所が存在しない事例を想定し、基準風として少し離れた既存観測所を参照する場合も示した。近隣の既存観測所として、風観測を行った都内公園から数 km 離れた気象庁観測地点の東京(OBS Tokyo)と羽田(OBS Haneda)の観測データを用いた。風速の累積頻度は、都内公園での観測値に対しては観測結果から直接計算した(OBS)。それ以外の 4 つ(WRF 10 m, WRF modified, OBS Tokyo, OBS Haneda)に対しては、16 風向毎の風速頻度を近似したワイブル分布から、以下の式で全風向に対する風速の累積頻度を求めた。

$$P(\leq V) = 1 - \sum_{a=NNE}^N A(a) \exp \left\{ - \left(\frac{V}{C(a)R(a)} \right)^{K(a)} \right\} \quad (4)$$

$P(\leq V)$: 10分間平均風速がV以下となる累積確率

a : 基準の16風向 (NNE, NE, ENE, ..., N)

$A(a)$: 用いた風況データの風向出現頻度

$C(a)$: 16風向別に求めたワイブル係数 (尺度係数)

$K(a)$: 16風向別に求めたワイブル係数 (形状係数)

$R(a)$: 街区CFD解析の風速比結果

(用いる風況データの参照高さの風速に対する、観測地点の観測高さ3.0 mの風速の比率)

風速の累積頻度は、補正 WRF 計算値、10 m WRF 計算値を用いた場合が、都内の公園での観測値と最もよく対応していた(Fig. 8)。観測地点から数 km 離れた東京、羽田のデータを基準風として用いた場合はそれぞれ風速の過小、過大評価となった。都内公園と、東京、羽田では、周辺建物の状況や海岸からの距離が異なるため、風速の発生頻度が異なると考えられる。それぞれの累積頻度について、55%及び95%の平均風速を Table 5 に示す。Table 3 に基づいて求めた風環境評価結果も示した。都内の公園での観測値では風環境評価が領域 B であるのに対して、基準風として東京、羽田のデータを用いた場合はそれぞれ領域 A、D であり、観測値と異なる風環境評価結果となった。(3)補正 WRF 計算値、(1)10 m WRF 計算値を用いた場合は、観測値と同じ風環境評価結果である領域 B となった。ここで行った比較は、風環境評価にあたり、既存の風観測地点が計画地から離れている場合、WRF 計算値を基準風として適用した方が適切な風況の予測ができることを示している。

4.2 風環境調査の基準風としての適用例

実際の風環境調査に、WRF 解析結果を適用した例を紹介する。

調査地点と、その周辺の気象庁観測地点を Fig. 9 に示す。調査地点は東西方向に山があり、南北方向に平地が広がる谷状の地形になっている。調査地点の北方向に約 10 km、南方向に約 12 km 離れた地点に気象庁観測地点が存在する。しかし、いずれの気象庁観測地点も調査地点との距離が離れている点、調査地点周辺にある山や平地との位置関係が異なる点、海岸からの距離が大きく異なる点等、気象庁観測地点の風況の地形から受ける影響が、調査地点における影響と大きく異なることが懸念されたため、風環境調査に WRF 解析結果を利用することを検討した。

調査地点周辺での WRF 解析の妥当性を検討するため、



©OpenStreetMap contributors (一部追記)

Fig. 9 WRF 結果適用先計画地と周辺の気象庁観測地点
The Planned Construction Site for Application of WRF results, Observation Sites Operated by Japan Meteorological Agency

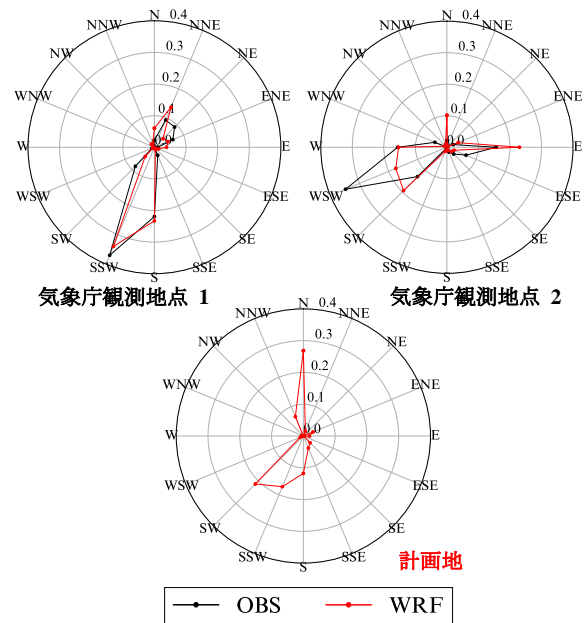


Fig. 10 2023 年の日最大平均風速の風向出現頻度
The Frequency of Occurrence of Wind Direction of the Daily Maximum Mean Wind Speed in 2023

周辺の気象庁観測地点 2 地点の観測データと、WRF によるこれら 2 地点の予測結果を比較した。使用したデータは WRF 計算値、気象庁観測データともに 2023 年の 1 年間である。気象庁観測地点の風観測高さが 10 m 付近であるため(1)10 m WRF 計算値を用いた。日最大平均風速の風向出現頻度を Fig. 10 に示す。気象庁観測地点 1, 2 とともに、頻度の高い風向が再現できていた。特に地点 1 の SSW, S, NNE や地点 2 の W, E 等の卓越風向が再現できており、対象期間の調査地点周辺において、WRF 解析の風況データの妥当性が確認された。WRF 解析の風況データから調査地点での日最大平均風速の風向出現頻度を確認すると、N と SW-S が卓越風向となっており(Fig. 10)、事前の予想通り、周辺の地形の影響を受けて気象庁観測地点とは異なる風況を示す可能性が高い。そのため本案件では、WRF 解析の風況データを適用して風環境調査を行うこととした。

4.3 風環境調査に適用するための課題

WRF 解析から得られる風環境予測用風況データの利用について、今後の課題を述べる。本研究で示した観測値との比較検証では、2 年の統計値を用いているが、風環境評価ではさらに長期間(5~10 年)の基準風データを使用することが望まれる。それに対応するためには、同様の期間を対象とした WRF 解析を実施する必要がある。また使用する基準風データは、最近の気候変化の影響や、計画地周辺の都市開発に伴う周辺状況の変化の影響を考慮する必要があるため、適切な使用が可能なのは調査を行う時点の直前の 5~10 年間である。すなわち、風環境調査時期に合わせて WRF 解析結果も随時更新される必要がある。また対象時期や対象地域によって、最適な計算条件が異なる可能性が考えられる。

本研究では、水平格子間隔 1 km で関東全域を網羅した 2022~2023 年の 2 年間の WRF 解析結果を使用した。風環境評価をはじめとする、実務における風況調査を行う頻度が高い都市圏では、同様の計算設定で WRF 解析結果を蓄積していくことが重要である。そのためには、直近の気候変化や周辺状況の変化を考慮し、最適な計算条件を検討しながら、5 年以上の長期間の解析をしていく必要がある。

また対象地点付近の地形や街区の状況によっては、WRF 計算値と観測値が大きく異なる地点も見られる。初期・境界条件の観測値との誤差、周辺の障害物による観測値への影響等の原因が考えられる。対象地点によって適切な補正方法を検討・選択し、精度を向上させていく必要がある。

5. まとめ

領域気象モデル WRF による数値解析結果の、風環境予測用風況データとしての利用可能性を検討した。WRF 解析と街区 CFD 解析を併用し、観測データとの比較検証

を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) WRF 計算値の 10 分間平均風速の累積頻度、平均風向の出現頻度は、関東地方の気象庁観測地点の風観測結果を精度良く再現した。対象地点によって、予測精度が良い WRF 計算値の高度や種類が異なっており、地点による特徴が見られた。
- 2) 対象地点から離れた既存観測地点の観測データと、対象地点の WRF 計算値を風環境予測の基準風としてそれぞれ用いた場合、WRF 計算値を用いた方が実観測結果を精度良く再現した。
- 3) 風観測地点から離れた評価地点の風環境評価に WRF 解析結果を適用し、その有効性を示した。

風環境調査に WRF 解析結果を適用していくためには、最新の風況を反映した結果を更新していく必要がある。今後は、風環境調査を行う頻度が高いと思われる都市圏を中心に WRF 解析を実施する予定である。

参考文献

- 1) 風工学研究所：ビル風の基礎知識，鹿島出版会，2005
- 2) Skamarock et al. : A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note, 2008
- 3) 義江龍一郎，三浦翔：領域気象モデル WRF に基づく風環境評価のための標準上空風データの整備，日本風工学会誌，Vol. 39, No.2, pp. 154-159, 2014
- 4) 義江龍一郎，三浦翔，望月政法：風環境評価のための標準上空風データの整備に向けた領域気象モデル WRF の検証，日本風工学会論文集，Vol. 40, No.4, pp. 113-122, 2015
- 5) 井上涼，後藤暁，木梨智子，大塚清敏：領域気象モデル WRF を用いた風況の予測に関する基礎的研究 関東・関西の事例，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 I，pp. 1935-1936, 2024.7
- 6) NCEP : FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, NCAR, 2000
- 7) U.S. Geological Survey : Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30), 1996
- 8) 片岡浩人，木梨智子，川口彰久：風環境シミュレータ「Zephyrus (ゼフィルス)」の開発，大林組技術研究所報，No. 64, pp. 49-54, 2002
- 9) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015
- 10) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：風力発電導入ガイドブック 2008, 2008.2
- 11) 片岡浩人，木梨智子，小野佳之：東京都内公園で観測した風の分析 その 1) 上空風に対する特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 I，pp. 1861-1862, 2024.7
- 12) 木梨智子，片岡浩人，小野佳之：東京都内公園で観測した風の分析 その 2) 観測地点の特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 I，pp. 1863-1864, 2024.7