

超高層建物を対象とした風揺れ居住性評価用風速に関する研究

後藤 暁 大塚 清敏

Wind Speed for Evaluating Habitability to Wind-induced Vibration of High-rise Buildings

Satoru Goto Kiyotoshi Otuka

Abstract

In this study, a method to evaluate wind speeds for use in the habitability assessments of high-rise buildings against wind-induced vibration was considered. Numerical simulations were performed using a meteorological model (WRF), and the results were compared to the observed values by Doppler LIDAR (Light Detection and Ranging). The results from the WRF simulation exhibited good agreement with the observed values by Doppler LIDAR. From the results of the long-term WRF simulations, we calculated the one-year return period wind speeds and compared them to the recommendations of the Architectural Institute of Japan (AIJ). The same long-term calculations were performed for four districts in Japan, and in this paper, the distributions of the one-year return period wind speeds are presented.

概要

超高層建物を対象として、風揺れ居住性能を評価するための風速設定方法について検討した。都内においてドップラーライダーを用いた風観測を行い、2017年の台風18号時の強風について考察した。また汎用気象モデルによる数値シミュレーションをおこない、ドップラーライダーの観測記録との比較検証をおこなった。気象モデルによる結果はドップラーライダーの観測値と良い相関を示した。また、気象モデルの5年間の長期間計算から再現期間1年の風速を算定し、結果を日本建築学会の指針と比較した。気象モデルの結果と建築学会指針で示される風速は大きな違いは無く結果は妥当であると考えられる。国内の地方毎に同様の長期計算を実施し、再現期間1年の風速分布を示した。

1. はじめに

大型プロジェクトや超高層建物の計画においては、風を無視できない場合が多い。計画建物周辺の風環境(ビル風)や建物に作用する風荷重、風揺れ居住性などの検討が必要になる。風は隣接建物の位置や形状あるいは周辺地形により非常に大きく影響を受けやすいため、建物周りの気流を視覚的にとらえることは非常に重要であるが、風そのものは視認できず、雨滴・塵・煙などを媒介にして断片的に見える程度である。

近年では従来からの風洞実験に加えて数値流体力学(CFD: Computational Fluid Dynamics)に基づくコンピューターシミュレーション¹⁾を用いて現象を把握する場面が増えてきつつある。CFD解析では、非常に細かい間隔の格子で計算を行うため、風洞実験に比べて風速や風圧の詳細な分布を見ることが出来る。一方、これらの評価を行う際に基準となる流入風については、風観測記録の統計処理から評価されている。風環境評価の際の基準となる風については計画地近傍の気象官署や大気汚染局などの常時観測記録から、また建物の風揺れ居住性能評価

のための再現期間1年の風速²⁾は、全国の気象官署における観測記録に基づいて作成されている。これは長期にわたる常時観測記録が官署以外ではあまり行われていないためである。この常時風観測は高々地上数十mまでの、いわば地表付近の記録で、風速計自体が周辺建物の影響を受けたものとなっており、超高層建物に対応する上空風については地域を代表しているとは限らない。また、他に比較できる常時風観測記録が無いため、再現期間1年風速の検証については不十分な状況であるというのが現状の問題となっている。

近年、上空風の観測は地上からのリモートセンシングによる風観測が行われるようになってきている^{3),4)}。リモートセンシングによる風観測機器は、鉄塔のような構造物を必要としないため、測器の設置が容易であることが利点である。また、鉛直方向に多点の同時観測結果を得ることができるため、風の鉛直方向の分布の解明が期待されている。一方で気象モデル⁵⁾を用いたシミュレーションによる風速分布の把握が行われている。1年間の気象モデルのシミュレーションにより地域の風況の面的評価ができ、風力発電サイトにおける風車の最適配置や発電

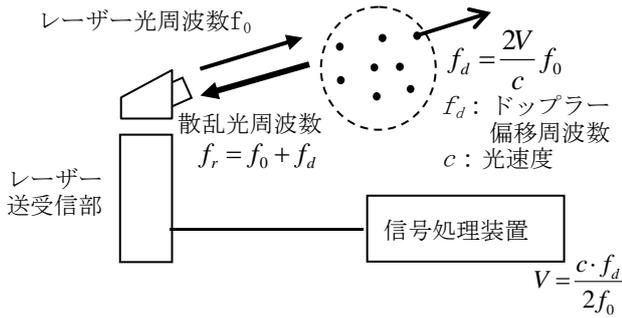


Fig. 1 ドップラーライダーの計測原理の模式図
Operating Principle of Doppler LIDAR

量予測に適用されている。

一方で、風揺れ居住性評価は再現期間1年の応答加速度により評価される。しかしながら超高層建物の風応答への寄与が大きい地上数百mでの建物頂部付近の風の状況については、観測記録が少ないことから十分な検証ができていない。

そこで本論では、超高層建物の風揺れ居住性を評価することを目的として、地上数百m上空の風の分布について検討した。汎用気象モデルによる数値シミュレーションを行い、計算結果を小型ドップラーライダーによる上空風観測結果と比較して検証した。その後5年間の気象モデルの長期計算結果に基づいて、再現期間1年の風速を算出し日本建築学会の指針と比較し、気象モデルの適用可能性について検討した。また、再現期間1年風速の等高線分布図を示し、上空風の平面的な風速分布について可視化した。

2. ドップラーライダーによる風観測

ドップラーライダーは近赤外レーザー光を大気中に照射し、その中に含まれるエアロゾルからの反射光のドップラー偏移をとらえ、その周波数変化から上空の風速・風向を求めるリモートセンシングの風観測装置である。小型ドップラーライダーはドップラーソーダ(音波によるリモートセンシング測器)や大型ライダーなど、従来のリモートセンシング測器に比べて、小型で携帯性に優れていること、また、測定時の騒音が無く周辺への影響がないことが大きな利点である。Fig. 1にドップラーライダーの計測原理を示す。ライダーは、複数方向に近赤外レーザー光を照射し、大気中のエアロゾルからの散乱光のドップラー偏移(f_d)から風速を求める。

2.1 ドップラーライダー観測と鉄塔風況観測の比較

本研究では、耐環境型小型ドップラーライダー(以降ライダーと呼称する)を用いた。測器の仕様をTable 1に示す。ライダーの観測精度を示すために、過去に行った秋田県能代港におけるドップラーライダー観測と、隣接する鉄塔での風観測(3杯風速計)の比較をFig. 2, Fig. 3 に示す。

Table 1 ライダー装置仕様
Specification of Doppler LIDAR System

レーザー波長	1.55 μ m帯 (アイセーフ帯波長) IEC 60825-1で規定される レーザークラス1M相当
走査方式	スイッチ切り替え
走査方向数	5方向
ドップラー速度測定範囲	-30m/s~30m/s
ドップラー速度精度	± 0.1 m/s以内
風向範囲	0~359.9°
風向風速更新レート	最速2秒以内

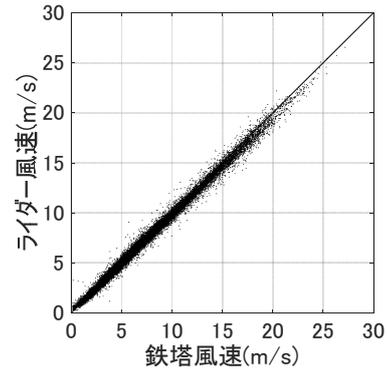


Fig. 2 鉄塔とライダー風速の関係⁴⁾
Relationship between 10minutes Mean Wind Speed of Tower and that of Lidar

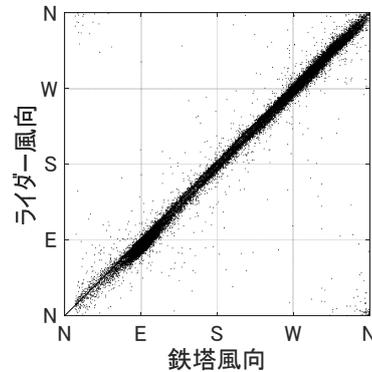


Fig. 3 鉄塔とライダー風向の関係⁴⁾
Relationship of Wind Direction between Tower and LIDAR



Photo 1 観測状況
Situation of Observation

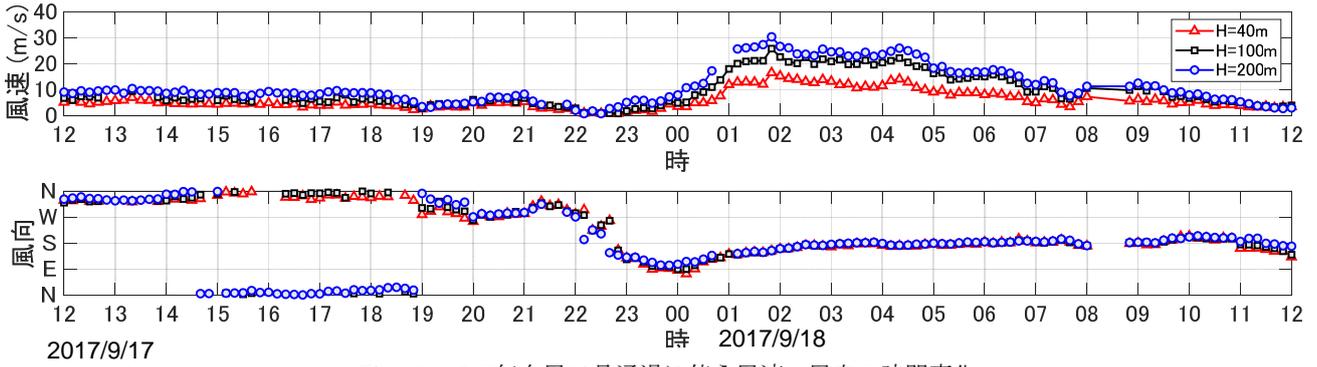


Fig. 4 2017年台風18号通過に伴う風速・風向の時間変化

Time Histories of Winds Speed and Direction at Several Heights Observed by the Doppler LIDAR

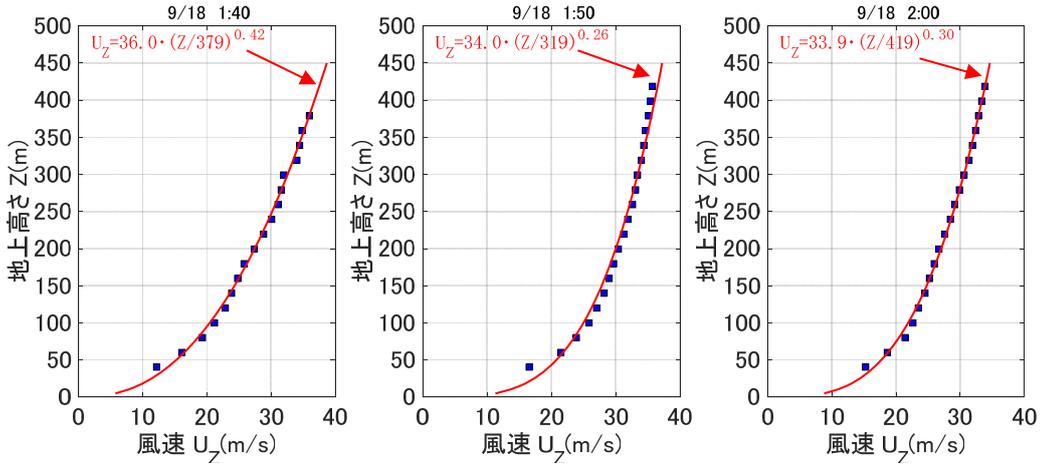


Fig. 5 10分間平均風速の鉛直分布

Vertical Profiles of 10minutes Mean Wind Speed

それぞれ、10分間平均風速および風向の関係である⁴⁾。海上で風の乱れが少ない場所での観測例であるが、鉄塔観測とライダーの両者は良い相関を示している。相関係数は0.99を越える。また、鉄塔風速に対するライダー風速の回帰係数は0.98であった。

2.2 台風通過時の風速の分布

2017年7月から2018年1月までの間、東京都江東区にライダーを設置して風観測をおこなった。設置の状況をPhoto 1に示す。観測高度は地上40mから420mまで20m間隔とした。観測期間中に2017年の台風18号の通過に伴う強風を観測することができた。台風18号は2017年9月17日に鹿児島県に上陸し、18日にかけて日本列島を縦断した。関東地方への影響が大きかったのは18日に日付が変わった頃から朝にかけてであった。地上40m, 100m, 200mでの10分間平均風速および風向の時刻歴をFig. 4に示す。最大風速は18日午前1時50分で、地上200mで30.4m/s, 地上40mで16.5m/sであった。風向は高さの違いによる差は大きくなく、当初北寄りの風であったが、近づくにつれて反時計回りに変化して、最大風速となった時間には南寄りの風となった。風速が最大であった時間帯の10分間平均風速の鉛直分布をFig. 5に示す。図中の■は観測値、赤線は観測値を高さのべき法則で近似した曲線である。基

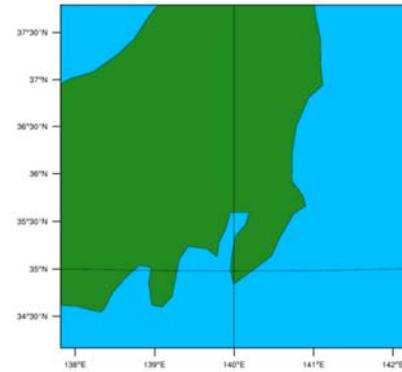


Fig. 6 計算領域(関東地方)
Calculation Domain (Kanto)

準高さとべき指数を未知パラメーターにして最小2乗法により近似した。近似曲線のべき指数は、9月18日1時40分から30分間で0.42, 0.26, 0.30となった。強風時では大気安定度は中立に近い状態になり、風速の鉛直分布形状は主として地表面の粗度により決定される。観測地点周辺は南側に東京湾があるものの、中高層の建物が立ち並ぶ都市域と扱ってよいと考えられる。建築学会「建築物荷重指針・同解説」⁶⁾(以降、建築学会指針と呼称する)で示される地表面粗度区分Ⅲ, Ⅳのべき指数はそれぞれ0.2, 0.27であるがそれらと比較すると、やや大きめの値

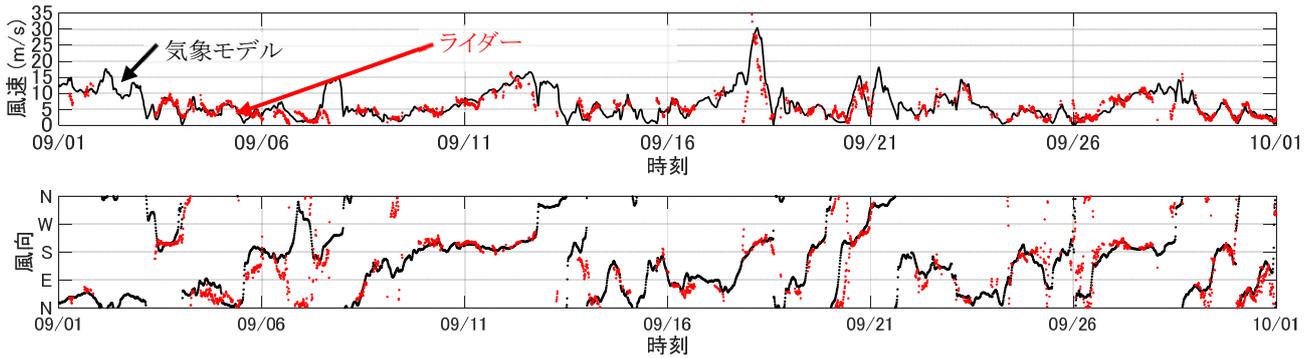


Fig. 7 ライダーと数値シミュレーションの時刻歴の比較

Time Histories of Wind Speed and Direction Results of Numerical Simulation and Observed by the Doppler LIDAR

であった。

3. 汎用気象モデルを用いた上空風の把握

3.1 汎用気象モデル(WRF)の概要

本報では汎用気象モデルWRF(Weather Research and Forecast Model)⁷⁾を用いて風の再現を試みた。WRFは米国の国立大気研究所(NCAR : National Center for Atmospheric Research)で開発された汎用気象モデルであり、気象業務および研究の両面で世界的に非常に広く使われている。

解析領域は400km四方とし、5kmの格子分割で計算を行った。関東地方を対象とした計算領域をFig. 6に示す。基本的な計算条件は文献5)にしたがった。また初期値とする客観解析値にはNCEP FNL再解析⁸⁾を用いた。計算にあたっては、境界層外部にナッジングを施して計算値が客観解析値から逸脱しないようにした。計算は1日を1単位とし、計算安定のための助走時間は9時間とした。解析結果は10分毎に出力した。

3.2 汎用気象モデルの結果の検証

汎用気象モデルの計算結果について、ライダーの観測結果と比較して検証をおこなった。地上360mにおける2017年9月1ヶ月間の毎10分の平均風速および風向の時刻歴をFig. 7に示す。気象モデルの解析値とライダー観測値はおおむね良好な対応を示している。2017年7月から12月までの気象モデルの解析結果と同時刻のライダーの10分間平均風速の関係をFig. 8に示す。ばらつきは比較的大きいものの両者の対応は良い。高風速側で気象モデルのほうが大きめの値を示している。相関係数は0.78、ライダー風速に対する気象モデルの回帰係数は1.16であった。風向別の出現頻度をFig. 9に示す。観測時期が夏季、秋季となったため、南寄りの風向の場合が多い。風向に関しては気象モデルとライダー観測値は良好な一致が見られる。

4. 風揺れ居住性評価用の風速

これまでの結果で、気象モデルを適用した上空風の推

定が妥当であることを示した。そこで気象モデルを用いた長期計算を実施して上空風の再現期間1年の風速を評価した。

4.1 再現期間1年風速の評価

計算は2013年から2017年の5年間について計算をおこなった。計算結果から地上350mにおける日最大風速を抽出して統計処理をおこない再現期間1年の風速を算定した。超過確率の算定にあたっては、日最大風速にHazenの方法を用いて超過確率を求めた。Hazenの方法は各々の日最大風速が独立とみなし、大きい風速から並べた順番と超過確率を関連づける方法である。(1)式に示す。

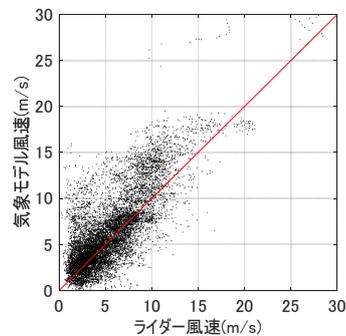


Fig. 8 ライダーと気象モデルの風速の関係
Relationship of Wind Speed between WRF and LIDAR

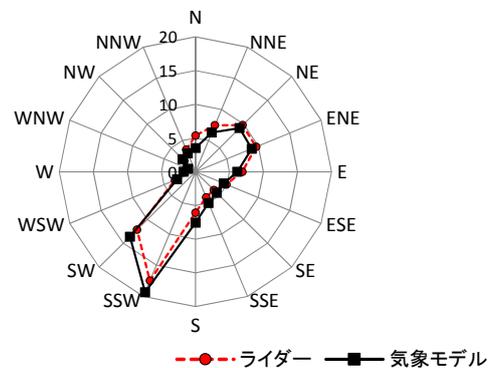


Fig. 9 風向別出現頻度
Wind Rose of WRF and LIDAR

$$P_i = 1 - \frac{N-i+\frac{1}{2}}{N} \quad (1)$$

ここで、 P_i : i 番目の風速の超過確率、 N : 全体の個数、 i : 大きい方から並べた風速の順位である。

また、日最大風速に基づく超過確率 P と再現期間 R (日)の関係は $R = 1/P$ である。

Fig. 10に東京都区内における再現期間と風速の関係を示す。計算結果の日最大風速から風速幅1m/sでの風速の頻度分布から得られる再現期間とHazenの方法による再現期間とは良く一致している。

4.2 再現期間1年風速の分布

東北、関東、近畿・東海、九州の各地域について2013年から2017年までの5年間の長期計算をおこなった。前項と同様の方法でいくつかの都市部を対象に算出した再現期間1年の風速をTable 2に示す。建築学会指針に基づく風速値を併記した。建築学会指針については2004年版と2015年版の両方について風速を算定した。表内の U_1 は建築学会指針に示されている再現期間1年の風速マップから抽出した風速(地表面粗度区分Ⅱ, 地上10m)の値(m/s)、 $U_{Z=350}$ は地表面粗度区分Ⅲとして算定した地上350mでの風速値(m/s)である。

建築学会指針は2015年の改訂で風速が大きくなる傾向が示されている²⁾。数値シミュレーションの結果は、都内および名古屋、大阪、熊本では建築学会指針と概ね同様の値であり、2004年版と2015年版の中間に位置する結果となった。仙台についても2015年の指針とほぼ同様の値となった。一方で、静岡と福岡では荷重指針に比べて小さい値、神戸では大きい値となっている。原因として、都内などに比べてこれらの3地点は山地が近接していることが挙げられる。

静岡における気象モデルと気象庁のウィンドプロファイラ(電波によるリモートセンシング装置)の観測記録の比較をFig. 11に示す。風速、超過確率とも比較的良好な相関を示しており、気象モデルの結果は上空(294m)の風の実況を捉えているといえる。建築学会指針では地上の気象官署での風速値に地表面の粗度のみによる高度補正をしているため、地形の影響による地面付近の風速の増加が上空までそのまま影響している事が考えられる。他の地点においては上空の実測記録が無いため検証は難しいが、同様に地上付近の風速は、地形の影響で上空風よりも増減の度合いがより大きい可能性がある。これは風速の鉛直分布形に影響を与える事を示している。本論における計算結果は、風揺れ居住性評価への適用は可能であると考えられるが、山地が接近しているなど地形影響の大きい地点に関しては地表面粗度以外に地形影響も考慮した鉛直分布形を評価する必要がある。

各地域の再現期間1年の風速の分布をFig. 12に示す。対象としている都市部の中では東北地方の太平洋側で比較的风速値が大きい。

5. まとめ

超高層建物の風揺れ居住性を評価するための上空風について、汎用気象モデルによる数値計算結果に基づいて検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 気象モデルの計算結果は、ドップラーライダーを用いた風観測と比べて妥当であった。
- 2) 気象モデルの長期計算結果による再現期間1年の風速の結果を、超高層建物の風揺れ居住性評価に適用することが可能である。
- 3) 山地に近接する場合、風速の鉛直分布に与える地形影響が大きくなる可能性のあることが示された。

建築学会指針では気象官署周辺の状況のみが考慮された風速値である。気象官署から離れた、地形影響が大きい地点での風速を考慮するためには気象モデルを

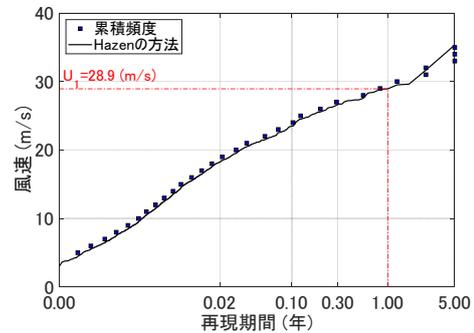
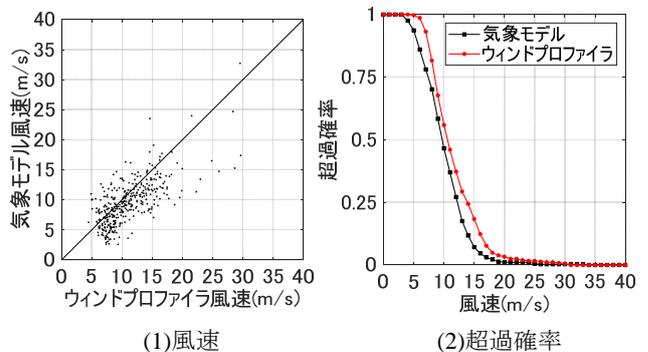


Fig. 10 再現期間と風速の関係(東京, 地上350m)
Relation between Return Period and Wind Speed

Table 2 風速の再現期間1年風速の比較
Comparison of 1 Year Return Period Wind Speed

	建築物荷重指針・同解説				気象モデル (Z=350m)
	2004年		2015年		
	U_1	$U_{Z=350}$	U_1	$U_{Z=350}$	
東京	17.5	28.3	19.5	31.5	28.9
仙台	19.0	30.7	20.0	32.3	32.5
静岡	18.0	29.1	19.5	31.5	25.2
名古屋	15.0	24.2	17.0	27.5	27.9
大阪	16.0	25.9	18.0	29.1	27.8
神戸	17.0	27.5	18.0	29.1	34.3
福岡	18.0	29.1	18.0	29.1	26.8
熊本	16.0	25.9	17.0	27.5	26.9



(1)風速 (2)超過確率
Fig. 11 静岡における気象モデルと
ウィンドプロファイラの比較(地上294m)
Comparison of WRF and Wind profiler at Shizuoka

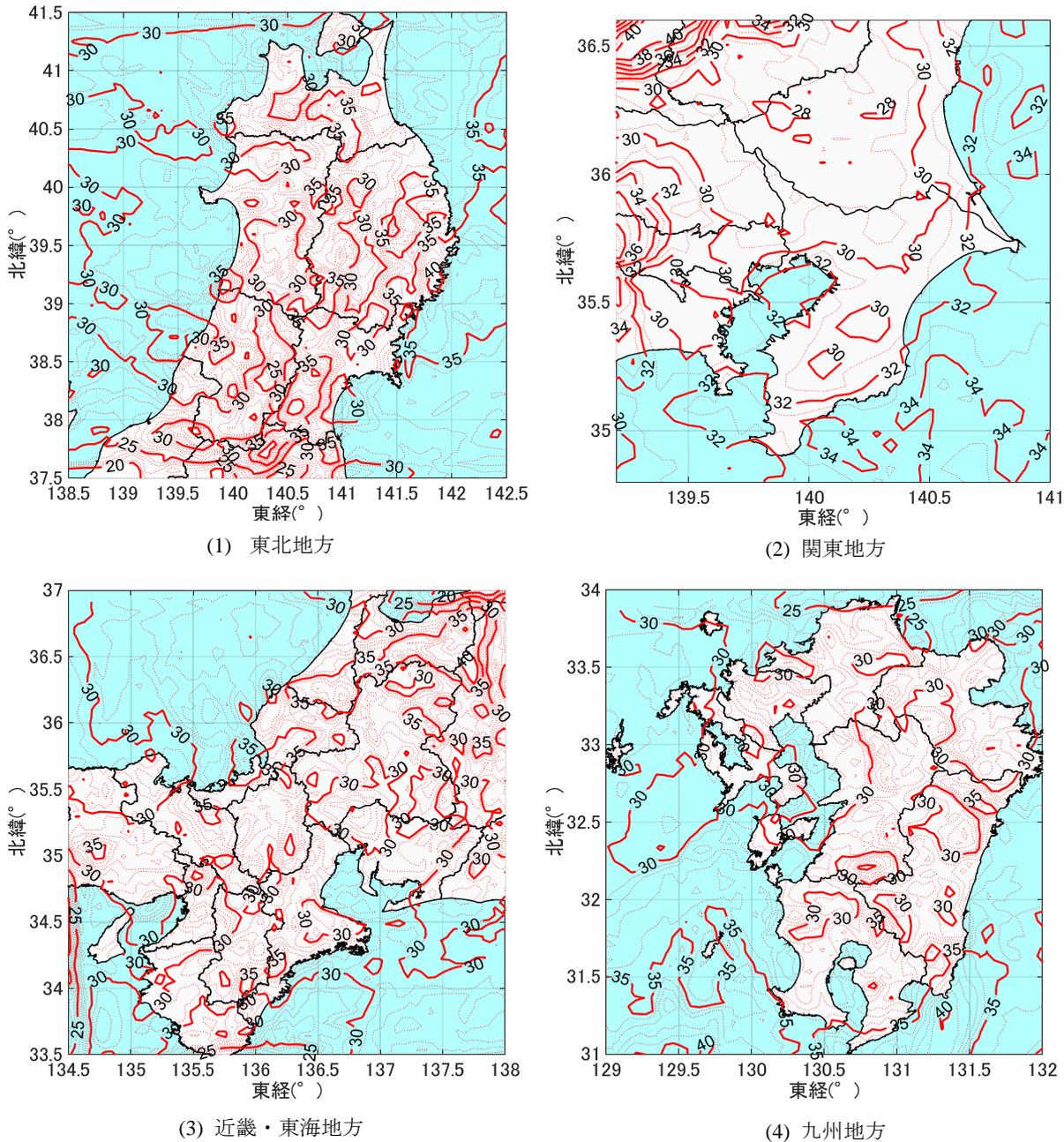


Fig. 12 地上350m高さでの再現期間1年の風速分布
Contours of 1 Year Return Period Wind Speed at 350m above the Ground

用いた上空風の評価が有効である。今後、上空風の実測および気象モデルの検証の積み重ねが必要である。

参考文献

- 1) 小野佳之, 他: 数値風洞「エアロダイナ®」による市街地における複雑形状建物の風荷重の予測, 大林組技術研究所報, No.79, 2015
- 2) 猿川明, 他: 風揺れ居住性評価のための再現期間1年の風速 その1, 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp. 121-122, 2016.8
- 3) 後藤暁, 他: 小型ドップラーライダー観測に基づく

- 東京上空の風の鉛直分布特性, 第22回風工学シンポジウム論文集, pp. 7-12, 2012.12
- 4) 後藤暁, 他: 簡易浮体に搭載したドップラーライダーによる洋上風況観測とその検証, 第24回風工学シンポジウム論文集, pp.25-30, 2016.12
- 5) 榎木康太, 他: 洋上風力発電のための沿岸域における風況予測技術, 大林組技術研究所報, No.82, 2018
- 6) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説(2015), 2015.2
- 7) Skamarock et al. : A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note, 2008
- 8) NCEP : FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, NCAR, 2000