

大規模数値シミュレーションを用いた建物風圧力の予測と竜巻の再現検討

ファム バン フック 野津 剛 菊池 浩利 長谷部 雅伸
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Large-Scale Simulation of Wind Load acting on Building and Tornado Flow Field

Pham Van Phuc, Nozu Tsuyoshi, Kikuchi Hirotooshi and Hasebe Masanobu

本研究では、単純形状建物および、周辺建物の影響が強い複雑形状建物を対象として大規模数値流体解析を実施し、風洞実験結果との比較により建物の接近流および建物に作用する風圧力を精度良く再現できることを確認した。また、竜巻が建物に接近する時の環境場を得るために、気象モデルを用いることにより、2012年5月6日に発生した竜巻の再現解析を実施した。気象観測データ等との比較により、高解像度で計算した気象モデルによりメソサイクロン構造とそこから発生した竜巻の再現を確認した。

A large CFD simulation has been conducted to investigate the prediction accuracy of wind load acting on buildings of simple and complex shapes. A good agreement has been found in comparison with the results of wind pressure experiment and simulated results using high resolution meshes. An effort has been made to obtain the real tornado flow field under reproducing a real tornado event on 6th May 2012 in Japan by using the meteorological model. Simulated meteorological parameters and tornado like vortex have been found in good agreement with observation results.

1. はじめに

近年日本では、竜巻による突風で建物等に甚大な被害が発生しており、内閣府の防災基本計画にも風水害に係る事象として竜巻などの突風が明記されている。2012年5月6日に北関東地域で竜巻等突風が発生し、つくば市では藤田スケールでF3と推定され、建物の倒壊や人的被害等をもたらした。しかしながら、現在の構造物の設計では原子力発電施設、LNGタンク、データセンター等、被災時の社会的波及効果の極めて大きい重要な施設等でも、竜巻等突風の特性を考慮せずに、従来の強風対策の考えを基に対応されている。そのため、竜巻に対する安全性に大きな懸念を抱いている。竜巻の特性、竜巻による被害の解明は建設分野において喫緊の課題となっている。

竜巻は、台風等による強風と異なり、その発生の局所性と突発性故に、いつどこで起きるか分からない事象であり、通常風の観測網での早期捕捉が難しく、実測データも非常に乏しい。竜巻の性質を把握するために、工学的な検討が1970年頃から竜巻状旋回流モデル¹⁾を用いた室内実験を中心に実施されているが、その殆どは実験施設の規模や計測装置などの制約により実スケールの1/1,000~1/10,000で行われている。そ

のため、生成された旋回流の渦構造や、建物レベルの地表面近傍流れ場の妥当性とその流れ場を受けた時の建物の風圧力の変化については不明な点が多く、このことが建物などの被害メカニズムの推定および被害低減策の提案を困難にさせる要因にも考えられている。

近年の計算機の性能向上や解析技術の進歩に伴い、高解像度メソ気象モデルの利用により、竜巻をもたらす積乱雲や竜巻の再現および竜巻の発生機構が解明されつつある²⁾⁴⁾。また、数値流体解析の大規模計算により、積乱雲のスケールと同等である数十kmの都市境界層気流や地上に建てられた構造物の風圧力の予測もなされている⁵⁾。これらの手法は実際の竜巻を再現して、その地上近傍流れ場の特徴と、それに曝された建物風圧力の変化、および竜巻による被害を検討できる有効な手法として期待されている。

そこで、本研究では、まず、被害等の検討に必要な建物に作用した風圧力の予測精度を検証するために、乱流境界層気流に置かれた風洞実験の再現を実施した。また、実際に発生した竜巻を対象として、気象モデルを用いた高解像度の数値シミュレーションを行い、観測データと比較するとともに、当時の竜巻環境場を再現するなど、竜巻等突風の評価ができる必要な基礎的検討を行った。

2. 大規模数値流体解析による建物風圧力の検討

竜巻の被害については、主に局所的かつ強い風圧力（局部風圧）の発生によるものと、飛来物の衝突によるものに分類できる。前者を回避できれば、建物の破損を軽減し、建物破損から生み出された飛散物を減らせるなど、竜巻の全体の被害も軽減できる。そのため、強風等と同様に竜巻に曝された建物の風圧力の予測やその特性の把握が重要となる。

建物の風圧力の予測は地上付近を対象として、実験や野外観測との比較より、風工学分野では数値流体解析を用いた多くの研究や検討が行われている。中でも、Large Eddy Simulation (LES)は有効な手法として確立されつつある⁶⁾。この手法は格子で解像できる grid scale の渦は直接計算し、格子解像度以下の sub grid scale (SGS)の渦はモデル化を行う乱流計算手法である。SGS モデルとしては Smagorinsky モデル⁷⁾や Coherent Structure Smagorinsky モデル (CSM モデル)⁸⁾等がある。以下の検討では、大規模数値シミュレーションを行うことができる CSM モデルを採用した。使用している計算コードは OpenFOAM⁹⁾である。

2.1 単純形状建物の検討

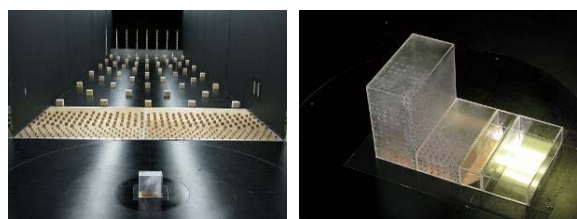
数値流体解析の精度を調べるために、風洞実験結果の再現計算を行った。実験は図-1(a)に示す回流式境界層風洞で行われた。用いた気流は縮尺 1/250、平均風速の鉛直分布べき指数が $\alpha=1/5$ である。風圧実験模型は長方体に低層部を付加してセットバックさせた建物である(図-1b)。表-1は対象とした模型の寸法である。風圧実験の測定点は左右対称な形状より、模型片側の領域(屋根面: R1, 2、壁面: W1, 2)のみとし、404点を屋根・壁面に配置した。実験風速は軒高相当 ($H=0.2m$) で 10.5m/s、乱れ強さは 17%程度である。また、局部風圧の最小ピーク値が発生する風向 ($\theta=350deg$)に対して解析を行った。なお、実験の詳細については文献 10 を参照されたい。

解析での気流生成は、風洞実験と同様に風上側にスパイヤーとラフネスブロックおよびフェンスを含めた風洞の助走路及び測定部分を忠実に再現した。図-2は解析領域の概要と計算境界条件である。解析領域は幅 3.5m×高さ 2.5m×長さ 30m である。境界条件としては軒高 H の風速 U_H が 10.5m/s になるように流入境界で $U_0=15m/s$ の一様流入風速を与え、流出境界では自由流出とした。風洞壁面や建物壁面上では no-slip 条件とした。また、計算格子の解像度の影響を調べるためには 2つの格子 (A, B) を用いた。図-3はそれぞれの格子の建物近傍の拡大図である。格子 A は水平

方向を 6.25mm ~100mm の間隔とし、格子 B では格子 A を細分化した(表-2)。

計算時間刻みを $\Delta t=0.001$ 秒とし、最初の 8 秒は助走計算とし、実時間換算で 10 分間の 10 サンプルに相当する 82.2 秒 ($T=8.22$ 秒の 10 波形) を解析時間とした。得られた圧力は平均化時間を実時間約 1 秒として移動平均を行い、10 個のアンサンブル平均の結果をピーク外圧係数として評価した。

図-4 は建物風上側 1.4m にある流入気流の平均風速および乱れ強さの鉛直分布である。本解析結果は建物荷重指針¹¹⁾ (AIJ) により定められた風速の鉛直分布の値および実験結果とほぼ一致する。



(a) 風洞内 (b) 実験模型

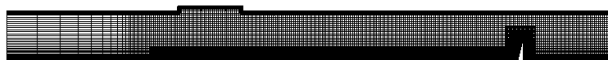
図-1 風洞内の写真と実験模型

表-1 建物モデルの寸法

B (mm)	200	
D (mm)	100	
H (mm)	200	
H1 (mm)	150	
H2 (mm)	50	
D1 (mm)	350	
θ (deg)	350	

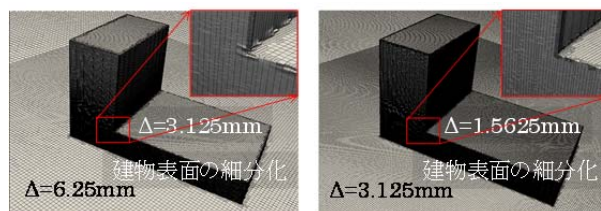


(a) 計算境界条件



(b) 全体計算格子の鉛直断面図

図-2 解析領域の概要



(a) 計算格子 A (b) 計算格子 B

図-3 解析モデル

表-2 計算格子の間隔と格子数

計算格子	水平(mm)	鉛直(mm)	格子数
A	6.25~100	0.5~100	3.3 千万
B	3.125~50	0.25~100	1.32 億

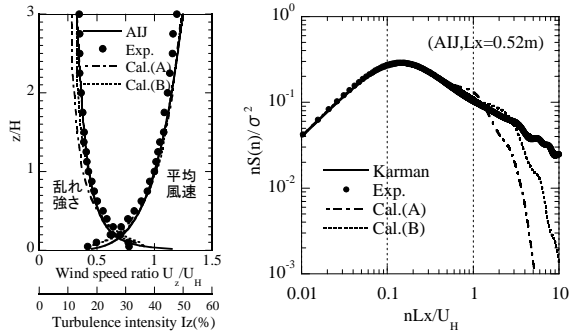


図-4 風速の鉛直分布 図-5 パワースペクトル

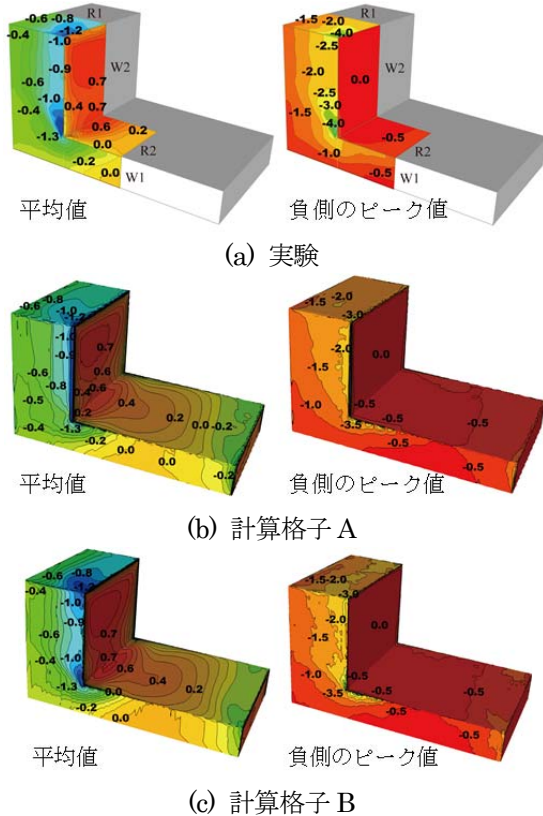


図-6 実験と解析による外圧係数の比較

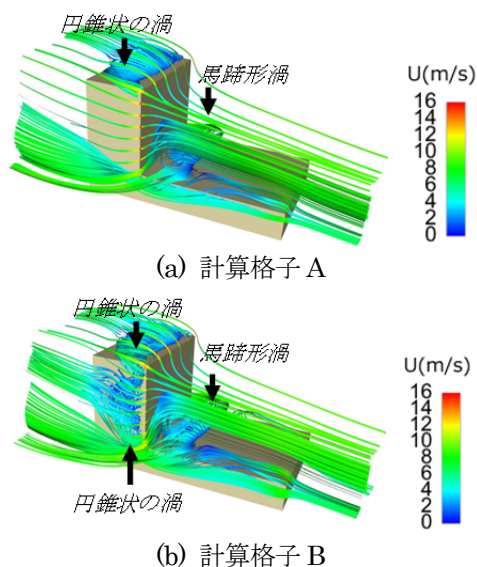


図-7 側面から見た建物近傍の平均流線

図-5 は軒高の主流方向風速変動のパワースペクトル密度と Karman スペクトルとの比較である。解析結果は実験結果と比べると無次元化周波数 $nLx/U_H=1$ 以上の領域において格子 A ではパワースペクトル密度は急激に減少しているが、格子 B では格子解像度の増加によって、 $nLx/U_H=2$ までの高周波数成分をより良く再現できた。ちなみに、格子 B は格子 A より空間解像度が 2 倍となり、高周波数成分の再現領域も 2 倍となることが理解できる。なお、乱れ長さスケール Lx の鉛直分布などの詳細は文献 12 を参照されたい。

図-6 は実験および解析から得られた外圧係数の平均値および負側のピーク値である。平均値の結果より、いずれの計算格子においても風向に概ね正対する壁面で 0.7、高層屋根面で -1.3 の局部負圧が再現され、実験結果と類似した結果となっているが、入隅部付近の側面での -1.3 の局部風圧の再現については格子 B の高解像度の計算格子を用いる必要があることが分かった。負側のピーク値についても格子 B の方が実験結果により近い値となる。

局部風圧の発生メカニズムを明らかにするために、建物近傍の平均流線の可視化を行った。図-7 は側面から見た各計算格子の結果から得られた平均流線を示したものである。格子 A では、地上付近の流れは低層屋根面の前縁角で剥離し、高層部からの吹き降しにより低層屋根の入隅部近傍で馬蹄形渦が生じており、その渦が巻き込みながら側面に流れていく。一方、格子 B では、入隅部近傍で生じた馬蹄形渦は側面に移流し、側面に円錐型渦が生成されている。その円錐渦の幅は約 12mm である。また、その幅は格子 A の格子幅の約 2 倍、格子 B の格子幅の約 4 倍である(円錐渦内には 4 格子がある)。すなわち、対象としたセットバックの建物において入隅部近傍の局部風圧を再現するためにはその近傍に生成された円錐渦の幅にくらべて格子幅は 3mm 程度(B/G7)より細分化する必要がある。これより大規模数値流体解析による計算の高解像度化の重要性が分かる。

2.2 周辺の強い影響を受ける複雑形状建物の検討

対象とした実建物は幅 63m、奥行き 34m の長方形平面を有する高層建物(高さ $H=106m$)である。建物の外壁には厚さ約 0.4m の耐震断熱パネルが配置されており、凹凸のある表面となっている。周辺には高さ 30m 程度の中層建物が密集している。図-8 に実験の写真と対象建物の一般階の平面と風圧計測位置を示す。実験では、模型縮尺を 1/400 とし、対象高層建物を中心に半径 600m 以内にある周辺建物を再現している。実験気流は地表面粗度区分Ⅲ(べき指数 $\alpha=0.2$)相当

としている。風向は周辺建物の影響が強いと思われる 60° に設定し、風圧実験を行った。

解析では、前節と同様にスパイヤーとラフネスブロックを含めた風洞の助走路および測定部分を忠実に再現した(図-9)。境界条件としては、軒高 H の風速が 10.5m/s になるように流入境界で $U_0=15\text{m/s}$ の一樣流入風速を与え、流出境界では自由流出とした。風洞壁面や建物壁面上ではno-slip条件とした。図-10は対象建物近傍での計算モデル外観とその拡大図である。対象建物周辺の計算格子は 0.5mm 以下まで細分化し、総格子数は約1.4億である。

計算時間刻みを $\Delta t=2.5 \times 10^{-5}$ 秒として、最初の3秒は助走計算とし、次の6秒(実時間で10分間相当)を評価時間とした。この評価時間は風洞実験での1サンプル長と等しい。得られた風圧は実験と同様に実時間0.5秒で移動平均を行い、外圧係数のピーク値と平均値を整理した。

図-11に対象建物近傍の高さ $z=0.2H$ 、 $0.4H$ 、 $0.6H$ 、 $0.8H$ での水平断面内の平均風速分布を示す。高さ $z=0.2H$ では、周辺の密集建物群の影響により、ほぼ街路に沿って流れている。高さ $z=0.4H$ と $0.6H$ は、殆どの周辺建物群の高さを上回っており、上流また後流に隣接する高層建物の影響のみが顕著に現れ、対象建物角から生じた剥離せん断層や上流側の高層建物からの剥離せん断層が大きく変形している。高さ $z=0.8H$ では、隣接高層建物の高さを上回るため、ほぼ対象建物単体での流れ場に近い流れが生じている。

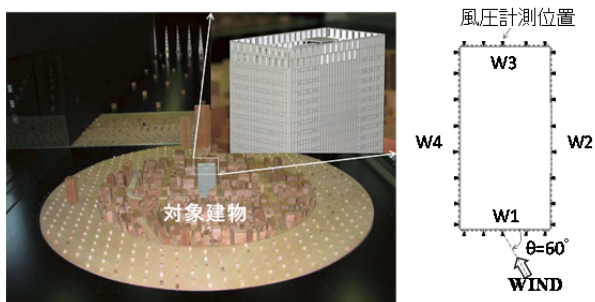


図-8 実験の様子と一般階平面での風圧計測位置



図-9 解析領域の鉛直断面

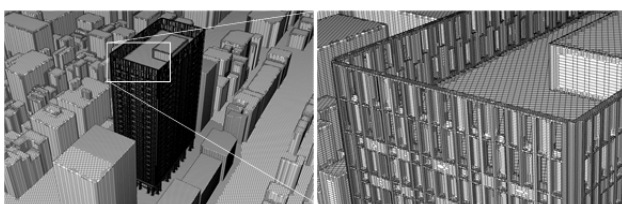


図-10 対象建物近傍の計算格子とその拡大図

図-12は数値解析による対象建物の平均外圧係数である。前面W1の右上部分に正圧、左下部分に負圧が、側面W4右部分に強い負圧が発生しており、隣接建物の影響により、建物壁面にやや特殊な風圧分布性状が示されている。

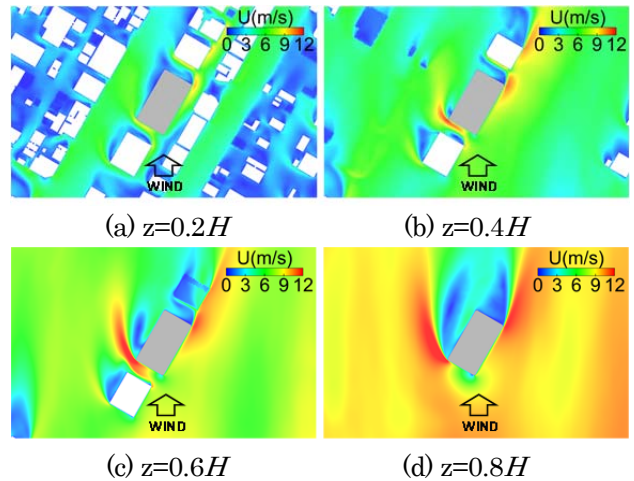


図-11 対象建物近傍の水平断面での平均風速分布

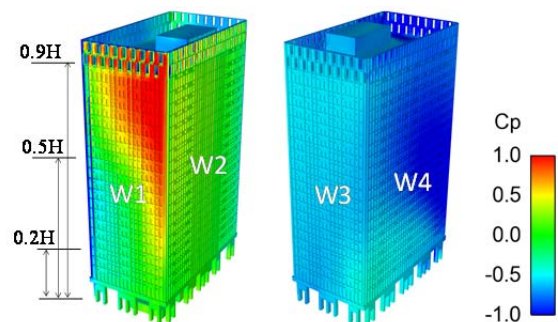


図-12 数値解析による平均外圧係数分布

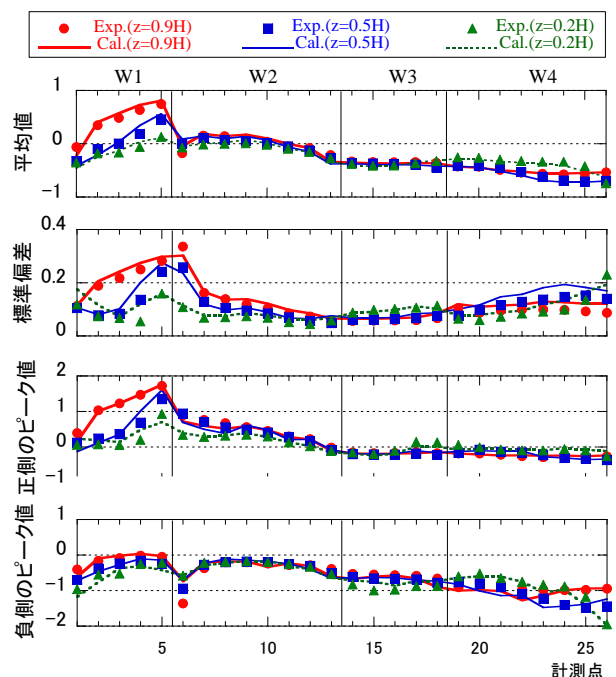


図-13 高さ $z=0.2H$ 、 $0.5H$ 、 $0.9H$ での外圧係数

図-13には風洞実験および数値解析による低層部と中層部および高層部(高さ $z=0.2H, 0.5H, 0.9H$)での外圧係数の水平分布を示す。壁面W2とW3の外圧係数は高さ方向に殆ど変化しないのに対して、壁面W1の外圧係数は、平均値、標準偏差、および正側ピーク値が高層部ほど大きくなっている。

また、壁面W4では低層部 $z=0.2H$ で大きな負側のピーク値-2(計測点26)が生じている。これらは図-11で見られた風上側にある隣接高層建物の影響によるものと考えられる。数値解析結果は実験結果とほぼ良い一致を示しており、大規模数値流体解析の妥当性が確認できた。

3. 気象モデルを用いた竜巻環境場の再現解析

竜巻などに置かれた建物の風圧力を予測するためには、建物に接近する竜巻場の突風の再現が必要となる。本章ではその突風を得るために2012年5月6日に発生した竜巻の再現計算を行った。解析にはメソ気象モデルWRF¹³⁾(Weather Research and Forecasting)を採用した。WRFは気圧、風、気温、水蒸気などで表せる大気の状態変化を流体力学や熱力学等の物理法則に基づいて解析できる計算コードである。

解析領域としては、まず、竜巻に起因する積乱雲の再現を目的とし、親領域の水平解像度を16.2km(d01)として5段階ネスティングより最終評価領域(d05)での水平解像度を200mとした。鉛直方向の気圧準拠座標については地表から60層を設定した(以下、解析領域Aと称する)。この解析領域の初期値・境界値にはNCEP-NFLの全球客観解析データを用いて、WRFの2wayネスティング解析を行った。計算期間は2012年5月6日09:00から24:00までの15時間とした。これにより初期値は竜巻発生時の約3時間前となる。海面温度には、FNLデータの表面温度を6時間毎に与えた。地形標高データはUSGSの緯度・経度30秒間隔の全球数値標高データと、より空間分解能の高い国土地理院数値地図-50m標高データを用いた。土地利用情報はUSGSデータを採用した。

竜巻の再現を目的とするために、解析領域Aの最終評価領域d05を親領域としてさらに2段階ネスティングより最終の水平解像度を50mとした。以下、解析領域Bと称する。初期値・境界値は解析領域A(d05)から計算された結果をマッピングした。また、解析はWRFのLESスキームを採用して1wayネスティングを行った(以下、WRF-LESとする)。

図-14に解析領域A(WRF, d01~d05)と解析領域

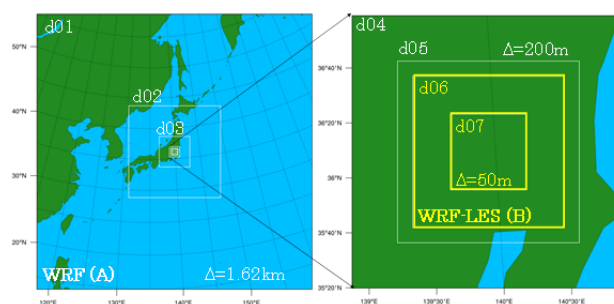
B(WRF-LES, d06~d07)を示す。各領域の中心緯度・経度は、つくば市に発生した竜巻の開始位置とした。これより発生された竜巻の周辺を局所的に高解像度化して計算できる。表-3は解析スキームである。

解析精度を検討するために館野高層気象台の高層観測データと地上観測データ、および記録された竜巻被害中心線¹⁴⁾を用いた。

図-15は09:00頃においてNCEP-NFL全球客観解析データからマッピングされたWRF(A, d05)の初期値と高層観測データとの比較である。一方、図-16は21:00頃においてWRF(A, d05)解析から得られた結果と高層観測データとの比較である。WRF解析から得られた風向・風速、気温と相対湿度の鉛直分布は観測結果と良く一致することが分かる。

図-17には地上観測データとWRF(A, d05)から得られた結果との比較を示す。竜巻が発生している時刻に海面気圧の低下や風速の急増、地上気温の増加と相対湿度の低下が再現された等、観測とよく整合しており、当時の環境場の再現ができていたと考えられる。

図-18には12:30と13:00におけるWRF(A, d05)の計算から得られた渦度の等値面(0.02/s)と観測された竜巻被害中心線(赤い線)との比較を示す。竜巻被害中心線付近にはメソサイクロンに相当する幅20km複数渦が生成されている。12:30には竜巻被害中心線①、②(竜巻発生時12:35、12:40頃)のやや西側に鉛直渦が形成されて、13:00頃には被害中心線にほぼ沿って反時計回りに急成長しながら北東に進んでいる。



(a) 領域A (b) 領域B

図-14 解析領域の概要

表-3 WRFの主な解析スキーム¹⁵⁾

雲微物理過程	Lin (Purdue)
地表面	Monin-Obukhov
土壌-地表面	Unified Noah LSM
大気境界層	YSU
大気放射	RRTM (長波)、 Goddard (短波)
積雲パラメタリゼーション	Grell-Freitas

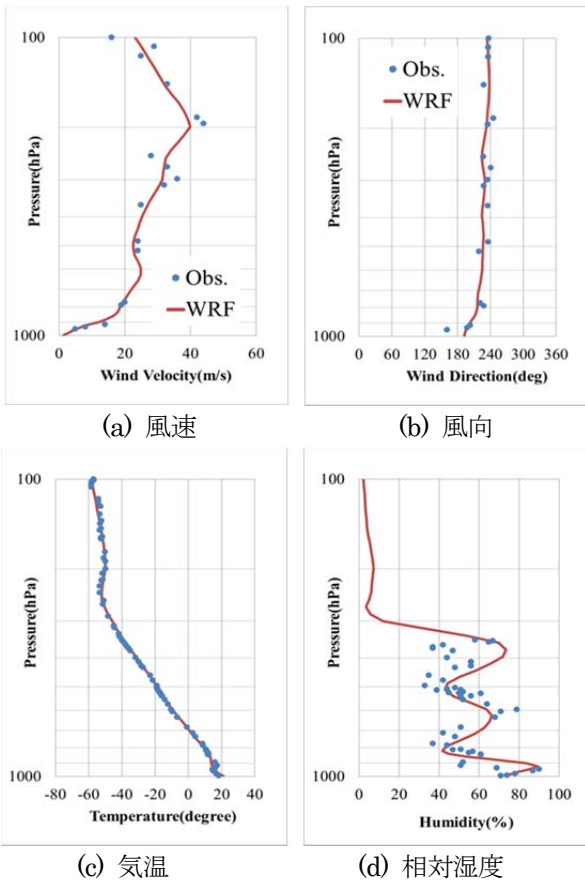


図-15 高層観測データとの比較 (09:00)

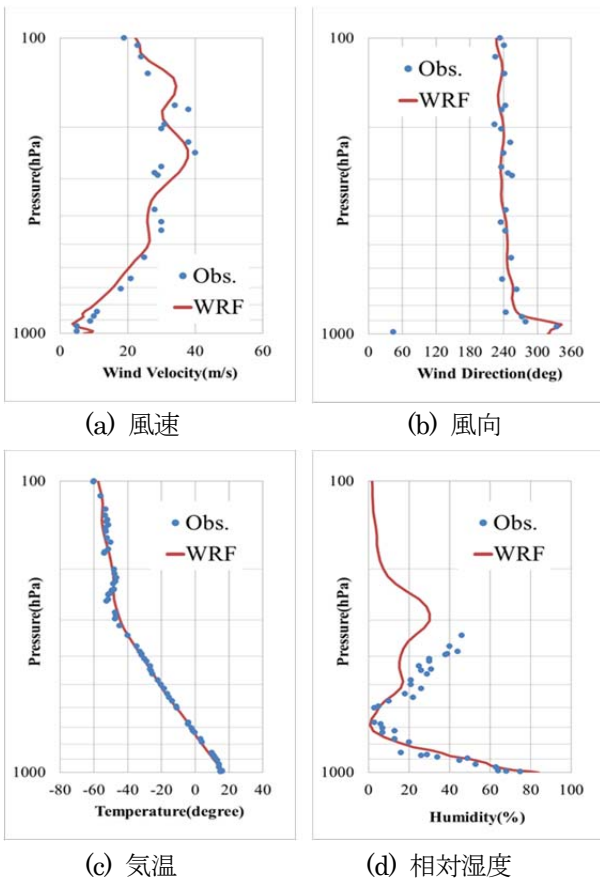


図-16 高層観測データとの比較 (21:00)

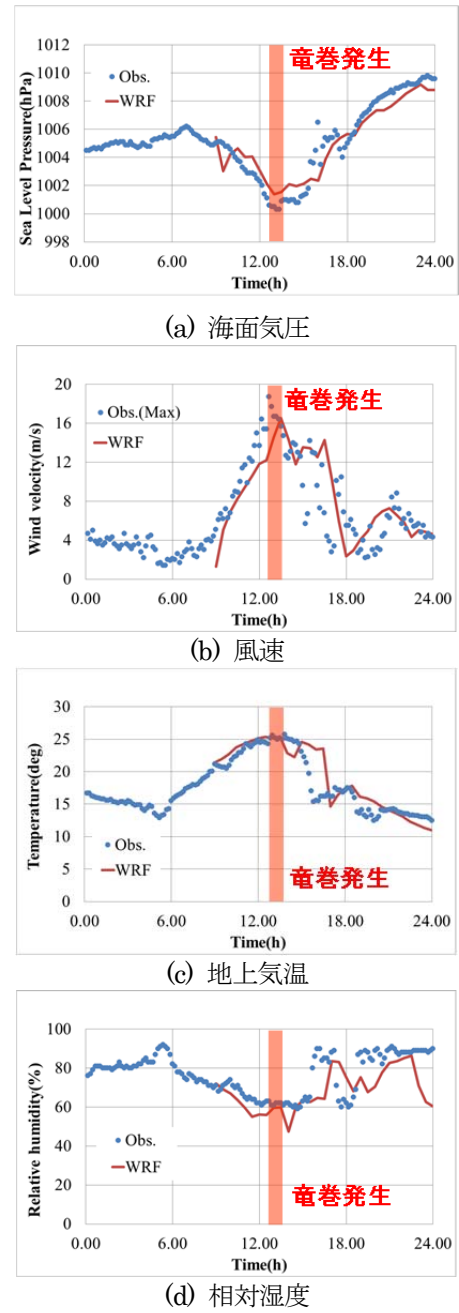


図-17 地上観測データとの比較

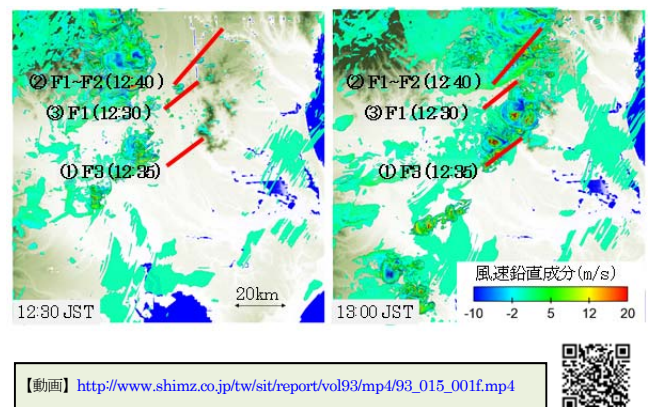


図-18 竜巻被害中心線との比較

図-19にはWRF(A, d05)から得られた12:50の地表面温度分布と生成された渦との関係を示す。なお、図-19(b)は図-19(a)にある点線の北西側から見た3次元拡大図である。周辺の大気は温度が低く、暖かい南西風が侵入することで、強い鉛直渦が形成されることが分かる。また、侵入してくる暖かい空気は渦の内部で上昇し、渦の西側から冷たい下降気流が水平に吹き出した等、竜巻をもたらすメソサイクロンの典型的な構造が示されている。なお、形成された渦内に20m/s以上の強い上昇流が発生していることが分かる。

図-20にはWRF-LES(B, d07)から得られた渦の等値面(値:0.05/s)を示す。被害地付近に地上に伸びる強い渦が形成されており、北東に進んでおり、実際に発生した竜巻に相当するものと考えられる。ただし、計算から得られた竜巻の風速は40m/s以上に達せず、実際の竜巻被害から推定された風速と比べてやや低い値となっている。今後は計算格子解像度の検討や使用している数値モデルの検討など、その要因を調べる予定である。

4. まとめ

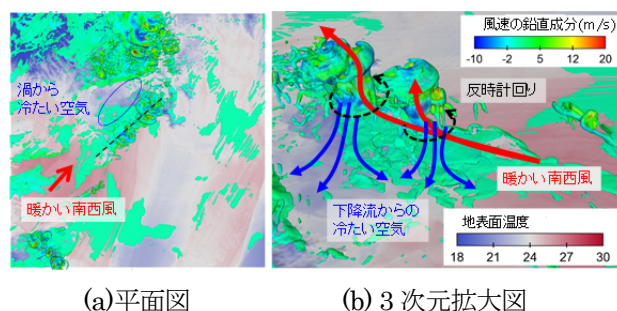
本研究では、大規模数値シミュレーションを用いた建物風圧力の予測精度を検証するため、乱流境界層気流に置かれた単純形状建物および、周辺建物の影響が強い複雑形状建物を対象として風圧実験の再現を実施した。高解像度の計算格子を用いることにより接近流また建物近傍の流れ場が実験結果と良い一致を示しており、解析による予測精度が高いことを確認した。

また、竜巻が建物に接近する時の環境場を得るために、2012年5月6日につくば市で発生したF3竜巻を対象として気象モデルWRFを用いることにより、その気象イベントの再現解析を実施した。気象観測データや竜巻被害中心線との比較により、高解像度化した気象モデルによりメソサイクロン構造とそこから発生した竜巻の再現を確認できた。

今後、メソ気象モデルと数値流体解析との連携解析により竜巻に曝された建物の風圧力とその特徴を評価する予定である。

謝辞

本検討は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」(課題番号: hp120051, hp140055)、また東京工業大学のTSUBAMEを利用して得られたものである。ここに記して謝意を表す。

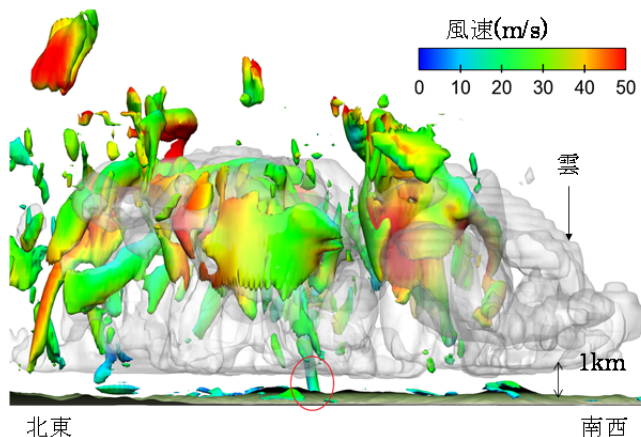


(a) 平面図 (b) 3次元拡大図

【動画】 http://www.shimz.co.jp/tw/sit/report/vol93/mp4/93_015_002f.mp4



図-19 地表面温度分布と生成された渦



【動画】 http://www.shimz.co.jp/tw/sit/report/vol93/mp4/93_015_003f.mp4



図-20 被害地域付近で地上に伸びる竜巻

<参考文献>

- 1) Ward, N.B.: "The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model", Journal of the Atmospheric Sciences, Vol.29, pp.1194-1204, 1972.
- 2) Noda, A.T. and H. Niino: Genesis and structure of a major tornado in a numerically simulated super cell storm: Importance of vertical vorticity in a gust front. SOLA, 1, pp.5-8, 2005.
- 3) 益子 渉: 2012年5月6日に発生したつくば竜巻の数値シミュレーション、日本気象学会大会講演予稿集, p.46, 2012.
- 4) 益子 渉: 超高解像度数値シミュレーションによる竜巻の詳細構造の解析、日本気象学会大会講演予稿集, p.180, 2014.
- 5) ファム バン フック、野津剛、菊池 浩利、日比 一喜、田村幸雄: LESによる実在市街地の風速鉛直分布と建物風圧の検討、日本風工学会誌、第40巻第2号、pp.215-216, 2015.
- 6) 田村哲郎、建物の耐風性能評価のためのLES、日本風工学会誌、Vol.121, pp.426-448, 2009.
- 7) Smagorinsky, J.: General circulation experiments with the primitive equations. The basic experiment, Monthly Weather Review, Vol.91, pp.99-164, 1963.

- 8) Kobayashi, H.: The subgrid-scale models based on coherent structures for turbulent channel flow, *Phys. Fluids* 17, 2005.
- 9) OpenFOAM: <http://www.openfoam.com/>
- 10) 菊池浩利、田村幸雄、日比一喜：セットバックした建物の局部風圧、風工学シンポジウム、 pp.317-319, 2010.
- 11) 日本建築学会：建物荷重指針・同解説、2015.
- 12) ファム バン フック、野津剛、菊池浩利、日比一喜：LESによる風洞気流の再現、日本風工学会誌、Vol.127, pp.203-204, 2011.
- 13) WRF: <http://www.wrf-model.org/index.php>
- 14) 気象庁：平成24年5月6日に発生した竜巻等について（中間報告その2）。気象庁ホームページ、<http://www.jma.go.jp/jma/press/1205/16c/toppu120516.pdf>, 2012.
- 15) WRF: WRF Users' Guide、Version 3.6, 2014.