T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	気象モデル・工学LESハイブリッド解析による極端気象下の強風・突風の再現と建築物被害推定
Title(English)	
著者(和文)	川口真晴
Author(English)	Masaharu Kawaguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11523号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:田村 哲郎,坂田 弘安,肖 鋒,佐藤 大樹,大風 翼
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11523号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

学位論文

気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析による極端気象下の強風・突風の再現と建築物被害推定

東京工業大学　環境・社会理工学院
建築学系　都市・環境学コース

川口真晴

目次

第 1 章　序論

1.1　研究の背景　1-1
1.2　既往の研究　1-6
1.2.1　台風等に伴う強風　1-6
1.2.2　竜巻等に伴う突風　1-7
1.3　研究の目的および論文構成　1-10

第 2 章　気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法の提案

2.1　緒言　2-1
2.2　気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法の枠組み　2-1
2.3　気象モデル解析　2-2
2.4　気象場の高周波成分の再生成計算　2-4
2.4.1　Nozawa and Tamura の方法　2-4
2.4.2　温熱効果の導入　2-6
2.4.3　温熱効果の表現に用いる物理量　2-8
2.4.4　高周波成分再生成の計算条件　2-10
2.5　建築空間 BCM-LES　2-11
2.6　結言　2-13

第 3 章　高周波成分再生成計算の検証

3.1　緒言　3-1
3.2　計算条件　3-1
3.3　結果　3-3
3.3.1　風速および温位の瞬間場による確認　3-3
3.3.2　時刻歴　3-5
3.3.3　エネルギースペクトル　3-7
3.4　考察　3-8
3.5　結言　3-9

第 4 章　実大気境界層の強風への手法適用

4.1　緒言　4-1

4.2　本章の目的と構成　4-2

4.3　気象モデル WRF による気象場の再現 (2012 年台風 4 号)　4-3

4.3.1　2012 年台風 4 号の概要　4-3

4.3.2　計算条件　4-5

4.3.3　結果　4-6

(a)　台風プロセス全体の再現　4-6

(b)　境界層プロファイルの再現　4-7

(c)　大気境界層内の構造　4-10

4.3.4　小結言　4-13

4.4　顕著な台風の強風に対するハイブリッド解析の概略 (2018 年台風 21 号)　4-14

4.4.1　2018 年台風 21 号の概要　4-14

4.4.2　ハイブリッド解析の概要　4-15

4.5　WRF/WRF-LES に基づく台風 21 号の大阪市街地ハイブリッド解析　4-17

4.5.1　気象場の再現　4-17

4.5.2　気象場の高周波成分の再生成　4-20

4.5.3　市街地での風速場・風圧場の解析　4-26

(a)　解析条件　4-26

(b)　気象場の導入の影響　4-27

(c)　風速プロファイルに基づく耐風基準との比較　4-32

(d)　建物被害との比較　4-34

4.6　NHM に基づく台風 21 号の大阪市街地ハイブリッド解析　4-39

4.6.1　気象場の再現　4-39

4.6.2　気象場の高周波成分の再生成　4-44

4.6.3　市街地における風速・風圧の解析　4-46

(a)　解析条件　4-46

(b)　風速の時刻歴　4-46

(c)　市街地内での乱れの統計的性質　4-49

(d)　ピーク風圧発生と流れの構造　4-51

(e)　平均風速・最大瞬間風速　4-54

(d)　建物被害との比較　4-58

4.7　結言　4-60

第５章　局地的突風を伴う極端現象への手法適用

5.1　緒言　5-1
5.2　本章の目的と構成　5-1
5.3　気象モデルによる解析　5-2
5.4　竜巻に対する高周波変動成分の再現　5-3
5.5　都市の地表面形状が竜巻に与える影響　5-5
5.6　地形変化のある中高層街区での竜巻渦の運動性と建物への作用　5-11
5.6.1　計算条件　5-11
5.6.2　地形の変化のある市街地での流れの構造　5-12
5.6.3　運動の変化について　5-14
5.6.4　中層建物表面での非定常圧力の分析　5-16
5.7　つくば竜巻の地表の流れ場の再現と被害推定　5-19
5.7.1　つくば竜巻の概要　5-19
5.7.2　北条地区における実現象の風速分布の推定　5-20
5.7.3　解析条件　5-21
5.7.4　流れ場の確認　5-23
5.7.5　地表付近の強風構造　5-26
5.7.6　被害分布とシミュレーションによる推定風速分布の比較　5-27
5.7.7　顕著な建物被害に関する要因分析　5-31
(a)　木造住宅の上部構造の飛散　5-31
(b)　集合住宅の窓サッシ被害　5-35
5.8　結言　5-38

第６章　結論

6.1　本論文での成果　6-1
6.2　今後の課題と展望　6-5

第1章

序論

1.1　研究の背景

近年の顕著な台風や竜巻などの極端気象では，強風・突風による様々な建築物の被害が発生し，その実態が詳細に記録された．

2018 年から 2019 年にかけて顕著な台風が日本に相次いで上陸し，大阪市をはじめ大都市中心部において，また千葉県南部の住宅地において，近年に例を見ない大規模な風害が発生した．2018 年の台風 21 号 (Jebi) は徳島県上陸時，最大風速 45 m/s (10 分平均値) の「非常に強い」勢力を保っており [1]，大阪府をはじめ全国で 9 万 7 千棟超の住宅と 6 千棟超の非住家の建物に被害をもたらした [2]．また被害傾向を示す風水災等による保険金の支払額はそれまでの最高額の 2 倍に迫る，約 1.1 兆円であった[3]．また 2019 年の台風 15 号 (Faxai) は，関東地方での観測史上最も高風速（10 分平均値で最大風速 40 m/s）を保って千葉県に上陸し[4]，千葉県を中心に全国で 7 万棟超の住宅で被害が発生し，そのうち全半壊に相当する深刻な被害も 4 千棟以上に及んだ[5]．さらに送電設備が被災し，完全復旧に約 16 日を要する大規模な停電[6]が発生した結果，それに伴う熱中症患者の死傷者の発生[7]など様々な関連災害が引き起こされた．市街地・住宅地の生活空間の安全性を確保する上で，このような大きな被害が発生した実際の極端気象の事例について，数値流体解析により被災した建物周辺や街区で発生する強風構造を再現し，発生しうる風速・風圧を定量的な評価すること，また被害発生に至った物理的なメカニズムを推定すること，さらに，それを踏まえて法令により定められる現行の建築物の風荷重基準や建築学会の示した指針等が適切であるかについて再検証を行うことは，喫緊の課題であるといえる．

竜巻やダウンバースト，ガストフロントなどの突風現象についても，日本国内での突風現象の気象学的特徴や突風の建物被害についての詳細な情報が徐々に蓄積されてきている．顕著な突風事象の発生時には，気象庁機動調査班や国立研究開発法人 建築研究所などによる現地調査が実施されている．また 2016 年以降は従来突風の強さの評定に用いられた藤田スケール[8]が，日本版改良藤田スケール[9]に切り替えられて運用が開始され，風工学的な知見に基づいて，よりきめ細やかな風速推定が可能となった．気象庁[10]によれば，日本国内では 1990 年以降，約 30 年間で藤田スケール F3 または日本版改良藤田スケールにおいて JEF3 に達していた可能性があるとされた竜巻は 6 件あり，離島で発生した 1 例を除き死傷者と大規模な住宅被害が発生している．また 2013 年 9 月 2 日にさいたま市で発生

した竜巻では 1700 棟を超える住家被害が生じたように，JEF2/F2 スケールの竜巻についても経路上に市街地が存在する場合に大きな被害が発生したケースも存在する．

しかしながら，このような局所的な突風現象では，現在の観測技術では地表近傍での建物スケールの現象の実態を明らかにする十分な観測データを得ることは困難であり，ほとんどの研究は被害発生後の現地調査や，既往研究として後述するシンプルな渦モデルを用いた研究室実験・数値実験に基づいて行われている．このため，建築物への空力的効果，現実の建築空間での流れの構造や被害発生プロセスなどは十分明らかになっていない．現行の建築基準法に関連する法令や日本建築学会による指針[11]では，上述のような建物への作用についての知見の不足に加え，一地点に対する発生確率が非常に小さいため，現象の性質に基づいた突風に対する風荷重の考え方は現時点では示されておらず，原子力発電所内の施設[12]などのごく一部の例を除き，突風の性質を考慮した耐荷重性能の評価はなされていない．しかしながら，今後はそれに準ずるような危険物を取り扱う施設や超高層建築物などの特殊な構造物，さらに建物の被害が社会の広範囲に波及することが想定されるインフラ設備や病院，防災の拠点となる公共施設や，研究機関，文化財施設，大人数を収容するような施設については科学的知見を基に安全性を検討したいというニーズがあると考えられる．なお，日本における竜巻の被害の発生確率については，田村ら[13]が Niino et al.[9]の竜巻の統計データに基づいて推定しており，一つの建物が竜巻等の突風被害に遭遇する確率を算出し，可住域においておよそ約 4 万年に一回，国内で最も高い遭遇確率を持つ都道府県である東京都において約 2.5 千年程度にとどまると報告している．一方で，この確率を市区町村スケールで見た場合には数年に一度から数百年に一度の発生確率となることから，都市防災・地域防災の対象としては十分備えるべきものであることが指摘されている．実例として宮崎県延岡市について述べる．図 1-1 は 1916 年（大正 5 年）以降に発生した竜巻の経路[15][16]である．過去約 100 年の間に十キロ程度の範囲の海岸から 5 件の竜巻が発生していることが確認される．また 2006 年 (平成 18 年) と 2019 年 (令和元年) の竜巻は酷似する経路をたどり，過去の竜巻も一部経路が重なることが認められることは興味深い．また世界的にみると，アメリカ合衆国における竜巻の多発地帯 Tornado Alley に位置する，Oklahoma 州を対象とする調査では，図 1-2 に示す黒線で囲まれた州都 Oklahoma 市を含む約 1500km^2 の範囲で 1880 年から 2017 年までの 137 年間に約 170 件の竜巻が発生していることことが報告されている．特に領域内の南部中央に位置する Moore 町においては 1993

年から 2015 年までの 22 年間に藤田スケール F4 または米国改良藤田スケール EF4 以上の竜巻被害が 5 件発生している．これらの分布のみからは，特定の場所でより竜巻が集中して発生することは結論できないが，大部分の地点では一度も被災しない一方で，150 年足らずの間に竜巻に 2 回，3 回以上被災している地点も多数あることが読み取れる．したがって竜巻被害が多発する地域において，ここの建物に求められる安全性や建物や資産の所有者の意思に応じて，積極的に人命や資産を守るための科学的知見に基づく合理的な耐風設計法を確立させることは重要であり，そのためには実際の竜巻の構造の地表近くの風速分布や渦構造，市街地の粗度など地表面の状態によるそれらの変化，また建物が受ける非定常な空気力の性質を明らかにすることが必要である．また都市・地域スケールでの防災においても，近年竜巻の被害に見舞われていない大都市での被害予測や防災計画の策定，市街地や地形などの地表の影響による竜巻の勢力の変化や経路の変化など建物空間における竜巻リスクを解明する研究に展開されることが期待される．

図 1-1　延岡市での竜巻経路　(左)大正 4 年から平成 18 年まで[15]，(右)令和元年[16]

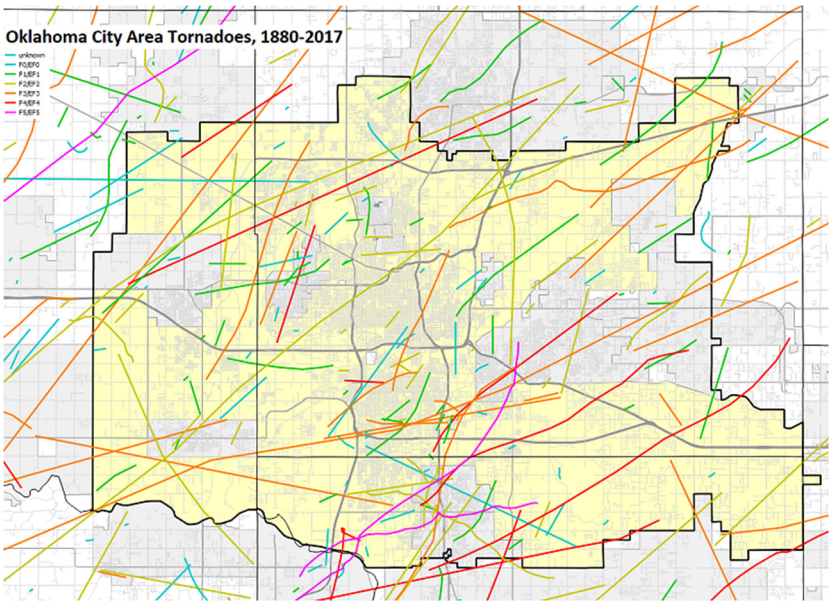


図 1-2　Oklahoma 市周辺 (南北約 30km 東西約 50km) の
1880 年から 2017 年までの竜巻被害[17]

次に，建築物の風荷重性能の評価の現状を概観する．現行の建築物の耐風性能評価は風洞実験や数値解析を用いて，検討建築物の周囲の都市化の状況などを表す粗度区分に応じて定められる平均風速と乱れの鉛直プロファイルを再現し，10 分間の定常乱流内で建物表面に発生する平均およびピークの風圧・風力に基づいて行われている．ここでは Van der Hoven のスペクトルギャップ[18]に基づいて定常乱流を用いており，気象場の強風構造やその時間的な変化の影響は考慮されていない．すなわち気象観測で得られた風速変動のスペクトルに周期 1 時間から 10 分程度の範囲にギャップ（谷）が見られ，ギャップよりも低周期側のピークを作る要因の乱流と，より長周期側のピークを作る日周期や低気圧などの気象学的要因は分離できることが想定されている．

しかしながら，竜巻をはじめとする局所的な突風現象のようなマイクロスケール擾乱 (現象のスケールが 1km オーダー未満のものを指す) では，時間的変化や空間的分布の変動が激しいため上述の考え方に基づいた評価は行えない．とくに竜巻では，数十から百メートル毎秒に達する旋回流が半径数十から百メートル程度の局所的な範囲で生じ，その内部では，数十メートル毎秒の上昇流・下降流が発生することに加え，通常の風圧力を上回る

数十ヘクトパスカルの負圧が生じる．また高速で移動するため，建物への作用も数十秒程度と極めて短い．図 1-3 の模式図[19]が示すように，流れの構造も境界層型の強風とは大きく異なっている．一方で台風のようなメソスケール擾乱(現象のスケールが 1000km から 1km のオーダーのものを指す)においても，台風の中心付近が通過する場合には，時間的な急速な変化が発生し，台風中心付近の壁雲の構造によって気象場に複雑な空間的な変動が形成されているため，理想的なスペクトルの分離が可能であるのか疑問が存在する．た例えば Wurman and Winslow[20]はレーダー観測によって，台風と同じ tropical cyclone で発生海域の異なるハリケーンの地表近傍の境界層内において図 1-4 に示すような，幅数 1km に満たないロール構造を持つ強風領域が筋状に分布している様子を観測した．Ito et al.は数値解析により，類似の台風の境界層内のロール構造を数種類に分類し，その生成メカニズムを明らかにしている[21]．Mashiko[22]はこれとは別に，Rossby 波に起因するとみられる台風壁雲内の鉛直な渦構造を持つ突風構造について報告している．

このような気象擾乱に基づく強風構造は，地表での局所的な被害発生の原因となっている可能性があることが以前より指摘されており，市街地における最大瞬間風速および，ピーク風圧への気象場の構造の寄与の評価は重要である．ゆえに市街地の建築空間の安全性評価についても，極端気象の気象場の時間的な変化や空間的構造の影響を再現した，より現実的な形で行われることが望まれる．

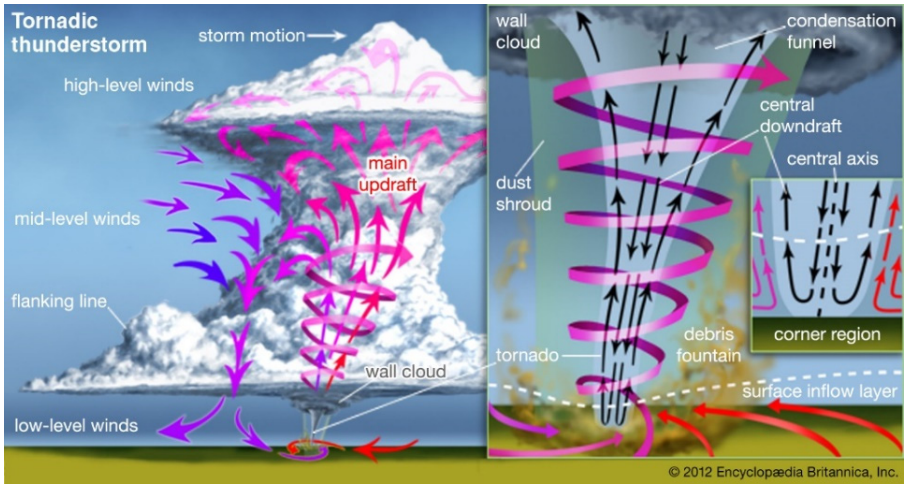


図 1-3　竜巻の流れ場の模式図[19]

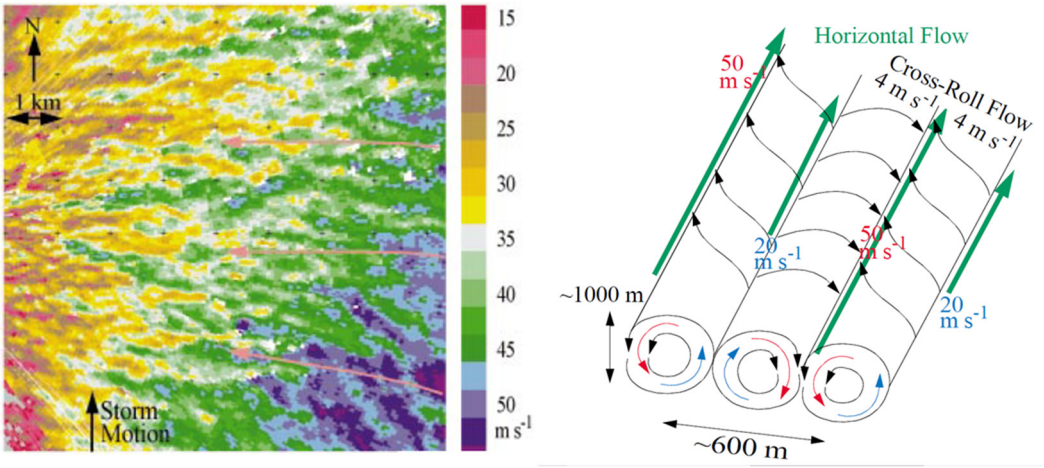


図 1-4　ドップラー観測に得られた大気境界層内の筋状の強風構造 [20]

1.2　既往の研究

この節では前述の極端気象発生時の市街地の安全性に関する既往研究として，台風などの強風に対する現行の建築物の安全評価に関する研究の概要と竜巻の突風の性質や建物への作用を明らかにするための研究を整理する．

1.2.1　台風等に伴う強風

強風については台風を含めて，現在は定常な境界層型の強風としての風洞実験や数値実験が行われ，それに基づいた設計体系が定められている．建築基準法は建築物の最低基準を規定するものであり，風荷重については 1950 年の制定時から，全国ほぼ一律で定められた建物高さに対する速度圧に建物形状等を考慮した風力係数を乗じることにより定められていたが， 1998 年に建築基準法の改正が行われ，2000 年に施行令や告示も当時の日本建築学会による建築物荷重指針(1993)に基づいて大幅に改定された．これにより外装材用風荷重が構造骨組み用風荷重から明確に区別化され，全国ほぼ一律であった速度圧を全国の気象官庁での観測データに基づいて定めた基準風速により算定されるようになった．このほか，都市化や海岸からの距離で決定される粗度区分，風力係数の例示の増加により，地域・周辺状況・建物の構造特性により応じた設計手法へと見直された．現行の風荷重規定は，基準構造骨組用荷重については施工令第 87 条と平成 12 年建設省告示 1454 号に，外装材用風荷重については施工令第 82 条の 4 と平成 12 年建設省告示 1458 号において定められ

ている．一方，建築学会の建築物荷重指針は法的な拘束力を持っておらず，設計者が建築物の最低限度の基準を満たした上で，適切な構造設計を行うための考え方や指針を示すものである．建物の使用期間や必要な安全性を考慮し，一般住宅で 50 年程度，高層建物などで 200 年程度など設計者の判断に基づいて定められる，設計用の再現期間（ある強度を持つ気象現象が再度起こるまでの期間）に対応する設計風速の計算方法や，より緻密な地表面粗度区分に基づいた平均風速のべき指数や乱流強度の鉛直プロファイル，さらにこれまでの風洞実験[例えば[23]-[25]]や数値解析[例えば[26]]による，告示には示されていない多くの建物の形状や屋根の形状に対する合理的な風力係数の決定方法を示している．

一方で近年，計算機の能力が飛躍的に向上したことに伴い，非定常な数値流体計算手法であるラージ・エディ・シミュレーション（LES）を用いた，実建物の耐風設計が実用化の域に達しつつあり，その環境整備が進められている．建築荷重指針の解説として出版された CFD 適用ガイド[27]では周辺建物に囲まれた高層建物の解析例において，平均・ピーク外圧係数[27]やモーメント係数[28]などが精度よく評価され，風洞実験と同等の現象の再現が定量的に可能であることが示されている．さらに精密な建物モデルを用いて風洞実験では正確に再現困難な細かなフィン型外装材を持つ建物周りの流れの構造を数値計算により解析した例なども報告されている[29]．しかしながら，極端気象発生時の影響評価について，現在の一般的な風洞実験装置では気象場の変動を取り入れることが困難であり，また，数値計算での耐風性能評価も原則として風洞実験の方法を模擬して行われている状況であり，まだほとんど行われていない．

1.2.2　竜巻等に伴う突風

竜巻等の局所的に発生するマイクロスケールの擾乱は，継続的でない，継続時間の短い急激な風速変動である突風を発生させる．このような突風現象については，地表付近の流れ場の構造および建物への作用を明らかにするため様々な研究が気象学および風工学，両側の見地から行われてきた．

竜巻の風速や気圧等の直接観測は極めて困難である．現在までに気象庁により地上観測網で捕捉されたことはなく 2006 年の延岡竜巻で被害経路上に位置した工場での風速観測結果[31][32]が一地点において偶然に測定された例が存在する程度である．間接的な測定手

法としてはドップラーレーダーを用いたリモートセンシングによる地表近傍の観測が長年行われてきた．特に米国においては，Koshiba and Wurman[33]や，Wakimoto et al.[34]などによって地表近傍の渦構造についても車載型のレーダーを用いて捉えられている．しかしながら，現在最も高性能な車載型レーダーのスキャン間隔は 7s 程度，空間解像度は 50m 程度[34]であり，移動中の竜巻の非定常な性質や建物スケールの現象を解明するためには必ずしも十分とは言えない．また市街地など地表の粗度が大きい場所については，観測数の蓄積や観測の困難さから知見が不足している．

竜巻通過後の現地調査は，観測結果が得られない場合も含めて，地表での被害発生時の風況を調べるために現在最も一般的に行われている活動である．藤田スケールや改良版日本版藤田スケールなどには，建物や屋外広告板，電柱，樹木など被害を示す damage indicator (DI) の状態によって，最大瞬間風速を評定する手法がまとめられている．このような被害から風速を推定する手法は実用性と多くの事例へ適用性が高い点で優位性があり，特に改良版日本藤田スケールでの風速の推定値は風工学の工学的知見による根拠が与えられているが，個々の DI の耐力のばらつきに基づく不確実性が相当に含まれること，また風速の最大値以外の時系列的な被害のプロセスについての情報が得られないという課題を抱えている．

風工学の分野では，より詳細な渦の性質や建物への作用を明らかにする目的で，比較的シンプルな渦モデルを用いた風洞実験や数値実験が広く行われており，一定の成果を上げている．Ward[35]や Haan et al.[36]は，装置上部での上昇流と地表面近くの収束流を調整することにより竜巻様渦を生成する風洞装置を製作した．これまでに，同様の風洞装置を用いて地表近傍の流れ場や渦構造のほか，Wang et al.[37]による市街地を想定した粗面上の流れ場や，Razavi and Sarkar[38]により地形の影響などを検討した研究が報告されている．また建物への影響評価についても，様々な建物形状，開口の有無，移動速度の影響などを考慮した竜巻直下の建物に働く圧力分布に関する実験が行われており，風洞実験の結果に基づいた fragility analysis についても報告がなされている[39]-[42]．数値実験においても，LES により，風洞装置を再現した条件や類似の条件での，シンプルな渦モデルを用いた竜巻渦の性質や，建物周りの流れ場や地形の影響について解明する試みが行われている[43][44]．なかでも Lewellen[45]は，比較的小さな地形の変化が，顕著な竜巻の強度と経路の変化をもたらすことを例示し，Forbes[46]などの実地調査で報告されたいくつかの地形と被害の関連を数

値解析上で再現した．また近年では，Bryan et al.[47]，Nolan et al.[48]，Dahl et al.[49]が気象モデルで生成した理想的に竜巻様渦の構造に，周期境界条件を課した別領域でのLESにより発達させた乱れを付加し，地表付近での竜巻様渦の構造を分析した結果を報告している．しかしながらこれらの実験的・数値的手法では，竜巻の気象場では，地表に形成されるガストフロントや，竜巻を取り巻く下降流 rear flank downdraft (RFD)，上空のメソサイクロンなど，竜巻のメカニズムにおいて重要な気象場の構造を十分に再現できないほか，個々の実現象との対応を議論することが困難である問題をはらんでいる．また気象学での竜巻とその環境場に関する数値解析による研究では，竜巻の発生や渦の強化について地表での摩擦や渦度の生成の影響が大きいことを指摘する研究結果[例えば[50]-[52]]が，場の傾圧性の効果を示す結果[例えば[53][54]]とともに，多数存在しており，竜巻の気象場と地表近傍の両方の条件を正確に表現しそれらの相互作用を適切に表現することの必要性が示唆される．

一方，気象モデル内で，竜巻の実現象を再現し，その構造や地表近傍の突風の性質を明らかにする試みについても若干例報告されている．Masiko[55][56]は気象モデル JMANHM を用いて周囲の気象場を再現した数値実験により，2012 年 5 月 6 日のつくば竜巻の再現に成功した．Mashiko and Niino[57]により水平解像度 10m 高解像度解析が実施され，地表付近での最高風速は竜巻が単一渦から複数渦に遷移する直前に半径が収縮する過程で発生したことなどが報告されている．このように気象場の数値解析では現実の物理過程を再現し，実観測では得ることの難しい現実的な竜巻渦構造の風速，圧力，渦度等などの空間分布や竜巻渦のメカニズムに関する知見が得られることから，竜巻の実態を明らかにするうえで非常に効果的な手法であると考えられる．しかしながら気象モデル単独では，建物の林立する市街地や住宅地の竜巻に対する影響の再現，また建物の周囲に形成される風速場や圧力場の解析は困難であり，この点については，乱流解析に特化した工学的なLES解析と組み合わせることで可能になると考えられる．

また建築空間の解析を気象場に基づいて行う際の問題として，気象モデルでの高周波成分の減衰が挙げられる．気象モデルでは地形を含めた実気象現象を安定に計算するため通常やむを得ず人為的な数値粘性の導入される結果，高周波変動成分が大きく減衰する．このことは気象場の変動を考慮した市街地の風速・風圧の推定に影響を与えることが考えられ，適切な乱流の再現手法と組み合わせて用いることが必要である．これまでにLESを用いた研究では，流入変動風の作成として，一様流から乱れを効率的に作り出す方法とし

て，風洞実験を模擬して長い区間を吹走させ境界層内の乱れを発達させる代わりに，Lund et al.の準周期条件を用いたリスケーリング手法を用いる粗面乱流境界層[58]や，これを改良した粗面乱流境界層[59]をより小さな領域で乱流を発達させる手法，また乱流統計値をターゲットとして数学的に物理的な乱流の性質を満たす変動を効率的に生成する手法[60]-[63]などの乱流生成の手法が開発されてきた．竜巻の研究にこれを適用させた例として，上述の Bryan et al.[47]，Nolan et al.[48]，Dahl et al.[49]が挙げられ，シンプルな渦モデルによる竜巻様渦に対して，周期条件を課した別領域の LES で発達させた乱流構造を付加する手法が取られている．しかしこれらの手法は時間的・空間的に風速場および温熱場が複雑に変化する実際の竜巻の構造に適用することは非常に難しい．

より流れ場に対して自由度の高い，物理的な高周波変動成分の再生成方法として，Nozawa and Tamura[64]は気象モデルと同じ空間を工学 LES でより細かい格子で計算した際に得られるべき高周波変動成分についての式を導出し，気象モデルの 3 次元風速場を与条件として，その空間変動を乱流モデルにより取り出して，風速場の高周波変動成分についての LES を実行する計算方法を提案した．この方法では，手法を適用する流れ場の非定常性や空間的な流れの構造の変化に関わらず，高周波変動成分を直接三次元的に生成させることができる．彼らは理想対流境界層に手法を検証し，流れ場のより細かい構造が生成されることを確認している．彼らの提案では高周波変動の方程式は風速場のみが考慮されているが，さらにこれを温熱場を考慮した方程式に拡張することで，竜巻のような極端気象の不安定かつ複雑な熱環境場の乱流生成にも適用できるようになることが推察される．

1.3　研究の目的および論文構成

本研究は，極端気象発生時の現実の市街地や住宅地に立つ建築物の現在の耐風設計において十分に考慮されていない気象現象の変動や強風構造を考慮した安全性評価と街区の被災推定手法の実現を目指して，気象場から地表の流れを一貫して解析できる数値解析手法の構築を行い，近年の極端気象事例についての解析を実施し，気象場を考慮した本手法による建築空間の安全性評価・被災推定への適用可能性を実証することを目的とする．

具体的には，顕著な台風を対象とした解析により気象場の構造を含む気流による市街地でのピーク風速・風圧の発生状況についての解析を行い，現行の設計規・基準との比較

を示す．現行の設計体系では検討されていない突風現象の一つ竜巻については，気象モデルにより得られる実現象に近い流れの構造による建築空間の解析を実現し，市街地や住宅地などの地表面粗度の影響を受けた地表近くの詳細な気象場の構造や建物に働く非定常圧力などを明らかにする．また建物の被災推定を行い実被害との比較を実施する．これらの結果を通して，現行の設計規・基準の再検討や将来の突風の空気力に対する合理的な設計手法を策定する上で，本手法により有用な基礎的検討データの提示することや都市・地域防災に資する被害予測を行うことが可能であることを示す.

本論文の構成を図 1-5 に示す．まず第 1 章では，近年の台風・竜巻の極端気象と建物被害の実態と耐風設計手法の現状について述べ，台風や竜巻の極端気象の構造を導入した市街地解析の必要性と実現上の課題を提示する．次に第 2 章では，気象場を考慮した建築空間の解析手法として「気象モデル・工学LESハイブリッド解析手法」の枠組みを示すとともに，構成する各数値計算の過程について記述する．特に極端気象の計算結果を市街地に導入する際に用いる温熱の影響を考慮した気象場の高周波変動成分の再生成手法を導出し考察を行う．続く第 3 章では，前章において新たに定式化し，ハイブリッド手法に導入した高周波変動成分の再生成計算の検証を対流境界層において行い，風速と温位の高周波成分が再生成されること，および乱流としての適切な性質を有することを確認する.

本論文の主論である第 4 章と第 5 章では，第 1 章から第 3 章までにおいて提案と検証を行った「気象モデル・工学LESハイブリッド解析手法」を，現行の耐風設計において通常最も強い風として考慮されている台風と，現状の設計体系外である局所的な突風現象の竜巻を対象に，建築空間での強風・突風，ピーク風圧の性状を解析する．ただし，台風と竜巻は建物周りに形成される風速場や圧力場が大きく異なり，発生する被害やそのメカニズムも異なる．さらに，解析結果の考察においても，台風では現行の法令や指針などとの比較に主眼があるのに対し，竜巻は現象としての性質や建物への作用の解明に重きを置くこととなり，観点が異なる．したがってこれらの気象現象は，別個の章に分けて，それぞれの知見を明らかにすることとする．第 4 章では，台風の実事例に対する市街地の安全性の検討を行う．初めに 2012 年台風 4 号について，気象モデル WRF/WRF-LES（WRF と LES の定式化を導入した WRF）を用いて気象モデルによる台風の再現性を検討する．続いて，顕著な被害をもたらした 2018 年台風 21 号について，本ハイブリッド解析を適用した上で，大阪市街地の解析を実施する．気象場の不確実性を考慮し 2 種類の気象モデル WRF/WRF-

LES と気象庁非静力学モデル（NHM）を用いて行う．地表近傍やその上でのピーク風速・風圧の発生プロセスにおける気象場の影響を，時刻歴や風速の平均・最大瞬間値の空間分布により示し，現行の建築基準や指針の定める風速鉛直プロファイルや乱流統計値との比較を行う．さらに高層建築物の建物表面圧力の分析を実施する．第 5 章では，本ハイブリッド手法により，気象モデル NHM[65]により再現された実現象に近い竜巻の構造により，竜巻の地表近傍の気象場や建物に対する作用を解明する．前半では，異なる地表条件での計算結果の比較を通して，市街地での地表の影響を受けた竜巻の構造および運動性を明らかにし，竜巻直下の建物に発生する風圧力と現行の強風時の耐風性能基準との比較を行う．後半では，つくば竜巻の再現解析を，大きな被害が集中して発生したつくば市北条地区について実施し，住宅地内に形成された地表近傍の強風構造，最大瞬間風速・最大の圧力低下についての知見を得ると同時に，本手法による竜巻の実被害の再現性を検証する．さらに顕著な被害が発生した建物に対して個別に被害発生の要因分析を実施する．

第 6 章では，本研究で得られた知見について総括を行い，今後本手法を用いて極端気象発生時の建築物の安全性評価や建築空間の被災推定を行う上での課題と展望について述べる．

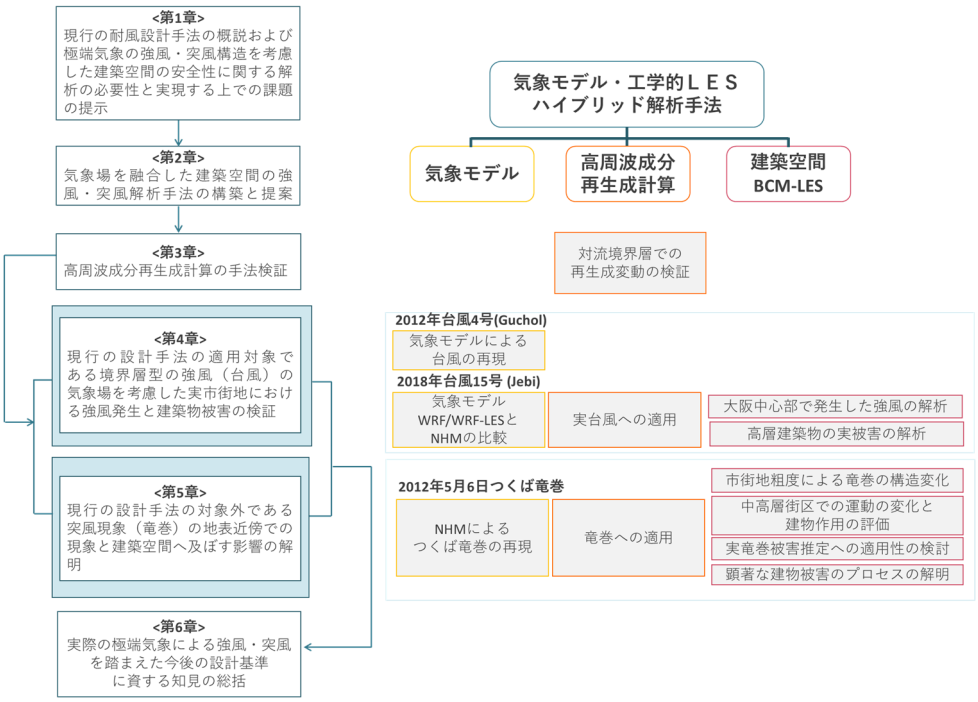


図 1-5　論文構成の概略

第 1 章　参考文献

[1] 気象庁. (2018). 2018 年台風第 21 号 JEBI (1821)位置表.

[2] 消防庁応急対策室. (2019). 平成３０年台風第２１号による被害及び消防機関等の対応状況 (第 10 報).

[3] 日本損害保険協会. (2018). 風水害等による保険金の支払い.

[4] 気象庁. (2019). 2019 年台風第 15 号 FAXAI (1915) 位置表.

[5] 消防庁応急対策室. (2019). 令和元年台風第１５号による被害及び消防機関等の対応状況（第 39 報）.

[6] 電力レジリエンスワーキンググループ. (2019). 台風 15 号に伴う停電復旧対応の振り返り（中間整理）.

[7] 朝日新聞. (2019). 千葉停電、熱中症の死者３人目「電源車が来ていれば…」.

https://www.asahi.com/articles/ASM9F6R9XM9FUDCB01W.html (2019/12/19)

[8] Fujita, T.T. (1971). Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. Satellite and Mesometeorology Research Project Research Report 91, The University of Chicago

[9] 気象庁. (2015). 日本版改良藤田スケールに関するガイドライン.

[10] 気象庁. 竜巻等の突風データベース.
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html (2019/12/19)

[11] 日本建築学会. (2015). 建物荷重指針・同解説 2015.

[12] 原子力規制委員会. (2017).原子力発電所の竜巻評価ガイドライン.

[13] 田村幸雄, 松本勝, 白土博通, 長尾文明, 河井宏允, 丸山敬, 西村宏昭, 植松康, 前田潤滋, 前田達夫, 石川智巳. (2008). 突風に対する各種構造物等の設計ガイドラインの研究. 竜巻等の実態および発生予測と対策: 平成 19 年度 科学技術振興調整費補助金 重要政策課題への機動的対応の推進 研究成果報告書.

[14] Niino, H., Fujitani, T., & Watanabe, N. (1997). A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993. Journal of Climate, 10(7), 1730-1752.

[15] 延岡市防災推進室. (2006). ぼうさい瓦版, 5. (文献[31]より引用)

[16] 国土地理院. 地理院地図.

https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1.0922tornado.html (2019/12/19)

[17] National Weather Service. Tornadoes in the Oklahoma City, Oklahoma area since 1890.

https://www.weather.gov/oun/tornadodata-okc

[18] Van der Hoven, I. (1957). Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. Journal of meteorology, 14(2), 160-164.

[19] Encyclopædia Britannica. Tornado. https://www.britannica.com/science/tornado (2019/12/19)

[20] Wurman, J., & Winslow, J. (1998). Intense sub-kilometer-scale boundary layer rolls observed in Hurricane Fran. science, 280(5363), 555-557.

[21] Ito, J., Oizumi, T., & Niino, H. (2017). Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. Scientific reports, 7(1), 3798.

[22] Mashiko, W. (2019). Wind gusts associated with mesovortices in the inner core of Typhoon GONI (2015). 10th European Conference on Severe Storms, 106

[23] 西村宏昭, 浅見豊, 高森浩治, 桶屋真志. (1992). 高層建物を対象とした変動風圧実験: その４．設計用風圧係数・風力係数. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 57-58.

[24] 神田亮, 丸田栄蔵. (1992). 陸屋根，切り妻屋根を有する低層建築物の設計用風圧係数に関する研究：その３．平均風圧係数と風向. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 119-120.

[25] 片桐順治, 川端三朗, 新堀喜則, 中村修. (1992). 隅欠を有する矩形断面柱の風圧性状に関する研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 47-48.

[26] 小野佳之, 田村哲郎, 片岡浩人. (2010). 楕円形状構造物に作用する極大負圧に関する LES 解析. 日本建築学科構造系論文集. 75(652), 1081-1087.

[27] 日本建築学会. (2017). 建築物荷重指針を活かす設計資料 2—建築物の風応答・風荷重評価／CFD 適用ガイド—.

[28] Hasama, T., Itou, Y., Kondo, K., Yamamoto, M., Tamura, T., Kawamoto, Y., & Yokokawa, M. (2015) Large-eddy simulation of wind pressure prediction for high-rise building on urban block. In: Proceedings of the 14th International Conference on Wind Engineering.

[29] 野津剛, 菊池浩利, 日比一喜. (2010). 風工学シンポジウム論文集, 293-298.

[30] 吉川優, 田村哲郎. (2016). 高層建物壁面に設置された鉛直フィン部材の風荷重評価—建築物の耐風設計のための非構造格子系 LES の構築（その３）—. 日本建築学会構造系論文集, 81(722), 665-674.

[31] 宮城弘守, 菊川裕規, 松井正宏, 曹曙陽, 田村幸雄. (2007). 2006 年台風 13 号に伴って発生した竜巻による延岡市の被害調査速報. 日本風工学会誌, 2007(110), 47-59.

[32] 山本晴彦, 岩谷潔, 高山成, 白水隆之, 土谷安司, 兼石篤志, 原田陽子, 東山真理子. (2008). 2006 年 9 月 17 日に宮崎県延岡市で発生した竜巻災害. 自然災害科学, 27(3), 291-306.

[33] Kosiba, K. A., & Wurman, J. (2013). The Three-Dimensional Structure and Evolution of a Tornado Boundary Layer. Weather and Forecasting, 28(6), 1552–1561.

[34] Wakimoto, R. M., Atkins, N. T., Butler, K. M., Bluestein, H. B., Thiem, K., Snyder, J. C., ... & Wurman, J. (2016). Aerial damage survey of the 2013 El Reno tornado combined with mobile radar data. Monthly Weather Review, 144(5), 1749-1776.

[35] Ward, N. B. (1972). The exploration of certain features of tornado dynamics using a laboratory model. Journal of the Atmospheric Sciences, 29(6), 1194-1204.

[36] Haan, F. L., Sarkar, P. P., & Gallus, W. A. (2008). Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications. Engineering Structures, 30(4), 1146–1159.

[37] Wang, J., Cao, S., Pang, W., & Cao, J. (2017). Experimental study on effects of ground roughness on flow characteristics of tornado-like vortices. Boundary-Layer Meteorology, 162(2), 319-339.

[38] Razavi, A., & Sarkar, P. P. (2018). Laboratory Study of Topographic Effects on the Near-surface Tornado Flow Field. Boundary-Layer Meteorology, 168(2), 189–212.

[39] Yang, Z., Sarkar, P., & Hu, H. (2011). An experimental study of a high-rise building model in tornado-like winds. Journal of Fluids and Structures, 27(4), 471–486.

[40] 喜々津仁密, 奥田泰雄, 河井宏允, 神田順. (2012). 竜巻通過時に低層建築物に作用する風力特性に関する実験的研究. In 風工学シンポジウム論文集 第 22 回 風工学シンポジウム論文集, 209-214

[41] Cao, S., Wang, M., & Cao, J. (2018). Numerical study of wind pressure on low-rise buildings induced by tornado-like flows. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 183, 214–222.

[42] Wang, J., Pang, W., Cao, S., Zhou, Q., & Liao, H. (2019). Fragility analysis of the roof structure of low-rise buildings subjected to tornado vortices. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 189, 45–55.

[43] Lewellen, W. S., Lewellen, D. C., & Sykes, R. I. (1997). Large-eddy simulation of a tornado's interaction with the surface. Journal of the Atmospheric Sciences, 54(5), 581-605.

[44] Liu, Z., & Ishihara, T. (2012). Effects of the swirl ratio on the turbulent flow fields of tornado-like vortices by using LES turbulent model. In: Proceedings of the 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications.

[45] Lewellen, D. C. (2012). Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. In Preprints, 26th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc. B (Vol. 4).

[46] Forbes, G. S. (1998). Topographic influences on tornadoes in Pennsylvania. In Preprints, 19th Conf. on Severe Local Storms, Minneapolis, 269-272.

[47] Bryan, G. H., Dahl, N. A., Nolan, D. S., & Rotunno, R. (2017). An Eddy Injection Method for Large-Eddy Simulations of Tornado-Like Vortices. Monthly Weather Review, 145(5), 1937–1961.

[48] Nolan, D. S., Dahl, N. A., Bryan, G. H., & Rotunno, R. (2017). Tornado Vortex Structure, Intensity, and Surface Wind Gusts in Large-Eddy Simulations with Fully Developed Turbulence. Journal of the Atmospheric Sciences, 74(5), 1573–1597.

[49] Dahl, N. A., Nolan, D. S., Bryan, G. H., & Rotunno, R. (2017). Using High-Resolution Simulations to Quantify Underestimates of Tornado Intensity from In Situ Observations. Monthly Weather Review, 145(5), 1963–1982.

[50] Davies-Jones, R. (2015). A review of supercell and tornado dynamics. Atmospheric Research, 158-159, 274–291.

[51] Schenkman, A. D., Xue, M., & Hu, M. (2014). Tornadogenesis in a High-Resolution Simulation of the 8 May 2003 Oklahoma City Supercell. Journal of the Atmospheric Sciences, 71(1), 130–154.

[52] Yokota, S., Niino, H., Seko, H., Kunii, M., & Yamauchi, H. (2018). Important Factors for Tornadogenesis as Revealed by High-Resolution Ensemble Forecasts of the Tsukuba Supercell Tornado of 6 May 2012 in Japan. Monthly Weather Review, 146(4), 1109–1132.

[53] Straka, J. M., Rasmussen, E. N., Davies-Jones, R. P., & Markowski, P. M. (2007). An observational and idealized numerical examination of low-level counter-rotating vortices in the rear flank of supercells. E-Journal of Severe Storms Meteorology, 2(8).

[54] Markowski, P., Richardson, Y., Rasmussen, E., Straka, J., Davies-Jones, R., & Trapp, R. J. (2008). Vortex lines within low-level mesocyclones obtained from pseudo-dual-Doppler radar observations. Monthly Weather Review, 136(9), 3513-3535.

[55] Mashiko, W. (2016). A Numerical Study of the 6 May 2012 Tsukuba City Supercell Tornado. Part II: Mechanisms of Tornadogenesis. Monthly Weather Review, 144(9), 3077–3098.

[56] Mashiko, W. (2016). A Numerical Study of the 6 May 2012 Tsukuba City Supercell Tornado. Part II: Mechanisms of Tornadogenesis. Monthly Weather Review, 144(9), 3077–3098.

[57] Mashiko, W., & Niino, H. (2017). Super High-Resolution Simulation of the 6 May 2012 Tsukuba Supercell Tornado: Near-Surface Structure and Its Evolution. Sola, 13(0), 135–139.

[58] Lund, T. S., Wu, X., & Squires, K. D. (1998). Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations. Journal of computational physics, 140(2), 233-258.

[59] Nozawa, K., & Tamura, T. (2001). Simulation of rough-wall turbulent boundary layer for LES inflow data. In: Proceedings of Turbulence and Shear Flow Phenomena Conference, 2, 443

[60] 飯塚悟, 村上周三, 持田灯, 李相山: 波数空間の 3 次元エネルギースペクトルに基づく LES のための流入変動風の生成, 生産研究, 49(1), pp.27-30, 1997.

[61] Jarrin, N., Prosser, R., Uribe, J. C., Benhamadouche, S., & Laurence, D. (2009). Reconstruction of turbulent fluctuations for hybrid RANS/LES simulations using a synthetic-eddy method. International Journal of Heat and Fluid Flow, 30(3), 435-442.

[62] Xie, Z. T., & Castro, I. P. (2008). Efficient generation of inflow conditions for large eddy simulation of street-scale flows. Flow, turbulence and combustion, 81(3), 449-470.

[63] Okaze, T., & Mochida, A. (2017). Large eddy simulation of non-isothermal flow around building Using Artificially Generated Inflow Turbulent Fluctuations of Wind Velocity and Air Temperature. Journal of Heat Is-land Institute International, 12, 2.

[64] Nozawa, K., & Tamura, T. (2012). Coupling method of WRF-LES and LES based on scale similarity model. In The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), Shanghai, China.

[65] 気象庁予報部. (2003) 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194pp

第2章

気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法の提案

2.1　緒言

第 1 章では極端気象の気象場は時間変動・空間変動が顕著であるため，通常の耐風性能評価で想定されているスペクトルギャップによる気象場の定常性の仮定を用いず，気象場の構造を直接導入し，および気象場から生成された乱流成分を含む流れによる評価を行うことが重要であることを述べた．第 2 章では，気象場を考慮して台風や竜巻などの極端気象発生時の市街地を解析する目的に資する解析手法として気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法を構築する．

顕著な台風や竜巻の気象場の構造の生成には，水平方向に数百キロ，高度 10km を超える範囲での風速・温熱場の実分布，水の雲物理に基づく相変化や循環などの大気科学的過程の再現が必要である．一方，市街地での建物周りの流れや圧力の実態を正確に再現し，被害推定を行うために個々の建物の詳細を解像できるスケールにおいて正確に再現する必要である．気象場の非定常な乱れに基づきながら両スケールの物理現象を適切に取り扱うためには，気象モデルと工学的LESのそれぞれの解析の特徴を活かし，適切な接続を行うことが重要である．また，接続時の課題として，気象モデルではほとんどの場合で，人為的な数値拡散や計算に用いられる数値スキームの影響により高周波変動成分が大きく減衰する点が挙げられ，市街地に発生する風速や圧力場変動の評価に影響を与える可能性があることからこれに対する対策が必要である．本手法では Nozawa and Tamura [1] による方法を改良した温熱場を考慮する方程式系により，複雑な温熱場・速度場の気象場の高周波変動成分の再生成を行い，気象モデルにおける高周波変動の減衰による影響の解消を図る．

以下の節では，複数の計算段階からなる「気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法」の全体の枠組みを示したのち，各段階での数値計算手法について説明する．

2.2　気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法の枠組み

図 2-1 に「気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法」の枠組みを概念的に示す．提案手法は「気象モデル解析」・「高周波変動成分再生成計算」・「建築空間 BCM-LES」の 3 段階の数値計算で構成される．

初めに実施する「気象モデル解析」では非静力学気象モデルを用いて，顕著の台風・竜巻発生時の周辺の実気象場から，台風の壁雲の構造や境界層の構造，また竜巻については，竜巻および親雲であるメソサイクロンの構造などを気象場の物理過程に基づいた計算により再現する．次に「高周波変動成分再生成計算」では，Nozawa and Tamura の方法に基づき，気象場に対して，その風速場と温熱場の構造に基づいて直接的に高周波変動成分の再生成と高解像度化を行う．最後に「建築空間 BCM-LES」では前段階で得られた高周波変動を含む気象場の風速場を建物空間の LES 領域に導入し，初期条件・境界条件とした建築空間に形成される強風・突風構造の解析し，建物表面での圧力変動の評価，建物の被災推定を行う．

これら 3 段階の計算を通して，気象場の構造と建築周りの流れとの相互作用を再現され，竜巻のような特殊な流れ場の再現が可能となり，また台風についても最大瞬間風速やピーク風圧をより正確に評価できることが期待される．

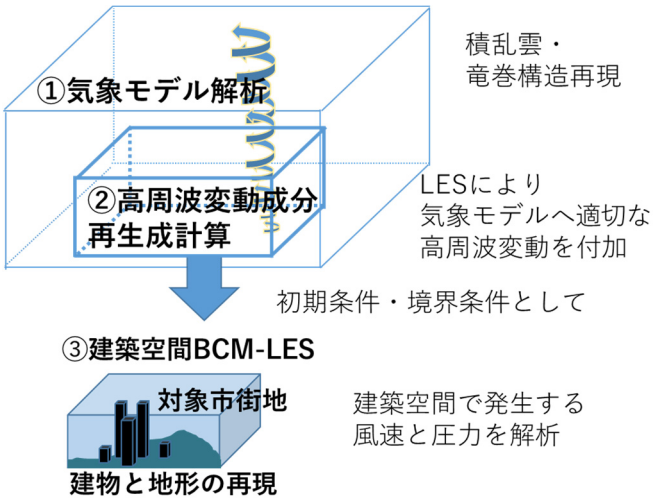


図 2-1　気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法の枠組み（竜巻のケースを例示）

2.3　気象モデル解析

本研究では，実極端気象を再現する気象モデルとして，気象庁数値予報課と気象研究所により開発された非静力学モデル（NHM モデル）[2]，および米国大気研究センター

(NCAR)と米国環境予測センターを中心とする Weather Research and Forecasting Project (WRF プロジェクト) によって開発された Advanced Research WRF version 3.8 (WRF モデル)[3]により得られた気象場のデータを利用している．NHM モデルと WRF モデルはいずれも完全圧縮性の非静力学モデルとしての定式化がなされており，雲内の水の存在状態や降水を予測するための精密な雲微物理のスキームが組み込まれている．この二点は極端気象の強い上昇流や顕著な降雨を含む積乱雲を再現する上で重要である．

従来，上記のような領域気象モデルは1km以上のメソスケールの解像度で大気境界層過程スキームとともに用いられていたが，近年では計算機の能力向上により，これよりも細かい解像度での解析も実施できるようになった．1 km 以上の解像度ではサブグリッドスケールのフラックスは鉛直一次元モデルで表されていたが，それよりも十分に細かなスケールでは乱流の効果により，局所平衡と等方性の仮定が期待できる 3 次元的なサブグリッドフラックスの輸送が顕著となる．このため気象モデルに LES タイプの乱流スキームを併用した定式化が用いられる．本研究の気象データ解析に関しては，NHM モデルでは1km以下の解像度で用いられており，常に LES を併用したモデルにより計算されている．WRF モデルについても，おおむね 1km 以下の解像度で実施する場合に乱流スキームを併用して計算し，この定式化によるモデルを WRF-LES モデルと呼称した．

本ハイブリッド手法に用いるオリジナルデータとしての気象モデルの解析では，高周波変動成分の減衰の発生が問題とがあるも一方で，高周波変動成分の再生成を行うためには，すでに気象場に基づいた大気乱流などの気象場の変動がある程度解像されていることが必要となることから，比較的高解像度で計算を行っている．本解析では気象場の乱れのスケールが数百メートルのオーダーである事を考慮し，気象モデルでは水平解像度50m程度程度の解析を実施した．

なお，気象モデルをおおよそ 1km から 100m 程度の解像度で用いて計算を行う場合の課題として，乱流スキームにより計算されるサブグリッドスケールフラックスが，大気境界層モデルに基づく鉛直一次元モデルでも，Smagorinsky モデルなどの等方性を仮定する通常の LES モデルであるでは正確に表現できないという，大気境界層の「グレーゾーン」の問題が Wyngaard[4]により指摘されている．気象モデルの乱流スキームを改良する研究[5]も精力的に進められているが，現段階では問題の解消には至っていない．一方 Rai et al.[6]は WRF を用いた実気象の計算結果から，メソスケールからマイクロスケールへのネスティ

ングを行う際，ネスティングドメインのグリッドサイズ比を大きくして(例えば 5 倍)，上記の解像度にかかるドメインを減らし，乱流モデルによらず格子を用いて直接計算を行うことで，「グレーゾーン」の影響を軽減できることを示している．本研究で用いる気象場のデータも，上記の解像度にかかる範囲では 5 倍の比較的大きなグリッドサイズ比を用いて計算された．

2.4　気象場の高周波成分の再生成計算

既に述べている通り，気象場の高周波変動は耐風性の評価において重要であるが大抵の気象モデルにおいて減衰することが，気気象モデルに基づいて耐風性能評価を行う上での課題となる．また，極端気象の気象場では台風の境界層内の循環構造や，竜巻の異なる温度の気流の衝突するガストフロントに伴う複雑な温熱構造が存在する．このような場の高周波変動成分の再生成を行う際には温熱場を考慮することが望ましいと考えられる．したがって，本研究では，Nozawa and Tamura [1]の風速場の高周波変動成分の再生成手法を，極端気象の実気象場への適用を念頭に置いて，温熱場と連立する形に拡張した．本節では，Nozawa and Tamura によるオリジナルの手法を説明した上で，本研究で改良された定式化の導出過程を記述する．

2.4.1　Nozawa and Tamura の方法

高周波変動成分の再生成を行いたい気象モデル (格子解像度 $\tilde{\Delta}$) の計算領域に対し，より高い格子解像度を持つ LES 領域 (格子解像度 $\bar{\Delta}$) を重合させて設定する．それぞれの格子系での流速場は，非圧縮 Navier–Stokes 方程式により近似できるとすると，気象モデルの解については，

$$\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{U}_i \tilde{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \tag{2-1}$$

より高い格子解像度の LES 領域の解については，

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \tag{2-2}$$

と表される．気象場は高レイノルズ流れであることから，分子粘性項は無視している．ここで，$\tilde{\tau}_{ij} = \widetilde{U_i U_j} - \tilde{U}_i \tilde{U}_j$，$\bar{\tau}_{ij} = \overline{U_i U_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j$はそれぞれの格子系でのサブグリッド（SGS）応力項である．これら以外のチルダ付きの物理量，オバーライン付きの物理量はそれぞれ気象モデル，LES のグリッドスケール（GS）成分であることを表す．

両式の差を取ると，以下の式になる．

$$\frac{\partial(\bar{U}_i - \tilde{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{U}_i \bar{U}_j - \tilde{U}_i \tilde{U}_j\right) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{P} - \tilde{P}) - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\tau}_{ij} - \tilde{\tau}_{ij}\right) \tag{2-3}$$

フィルター操作を全く行っていない流速Uから，気象モデルの格子での GS 成分 $\tilde{U}$ を除いた残差流速成分を u と定義する($u \equiv U - \tilde{U}$) と，この u のうち LES 格子によって解像される成分 $\bar{u}$ は両格子系の解像度差が十分あるとき，以下のようになる．

$$\bar{u} = \overline{U - \tilde{U}} = \bar{U} - \bar{\tilde{U}} \cong \bar{U} - \tilde{U} \tag{2-4}$$

したがって，式(2-3)を数値的に解くことで，LES 格子によって解像されるべき高周波変動成分$\bar{u}$を求めることができる．得られた変動 $\bar{u}$ をもとの気象モデルによる流れ場 $\tilde{U}$ と足し合わせることで，高周波変動成分の再生成された気象場 $\bar{U}$ を計算する．各流速成分の関係を図 2-1 に示す．

なお気象モデルのカットオフ波数が大きく，慣性小領域にある場合には，$\bar{u}$ は大規模な擾乱によるエネルギー保有領域成分の変動成分を含まず，平均が 0 となることが仮定できる．

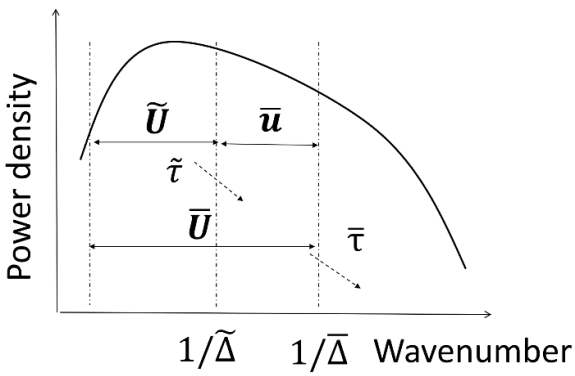


図 2-2 流速成分の関係

SGS 応力項$\tilde{\tau}_{ij} = \widetilde{U_i U_j} - \tilde{U}_i \tilde{U}_j$，$\bar{\tau}_{ij} = \overline{U_i U_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j$は，エネルギーカスケードにおける$\bar{u}$の波数帯域の成分に対する運動量のそれぞれ流入と流出に対応している．低波数側からのエネルギーの流入に当たる$\tilde{\tau}_{ij}$は Bardina et al.[7] による scale similarity モデルにより次式のように表現している．このモデルは，散逸性を持たないことから計算不安定性を有しているものの，DNS データベースとの相関性が高い．

$$\tilde{\tau}_{ij} = \widetilde{\tilde{U}_i \tilde{U}_j} - \tilde{\bar{U}}_i \tilde{\bar{U}}_j \tag{2-5}$$

また高波数側への運動量の流出に当たる$\bar{\tau}_{ij}$には平均的な散逸を表現するのに適した Smagorinsky モデルを用いている．

$$\bar{\tau}_{ij} = 2\nu_{SGS}\bar{D}_{ij} = (\mathrm{C_s}\bar{\Delta})^2|\bar{D}|\bar{D}_{ij} = (\mathrm{C_s}\bar{\Delta})^2\bar{D}_{ij}\sqrt{2\bar{D}_{ij}\bar{D}_{ij}} \tag{2-6}$$

ここで，$\nu_{SGS} = (\mathrm{C_s}\bar{\Delta})^2|\bar{D}|$は渦粘性係数，$\bar{D}_{ij}$はひずみ速度テンソルである．$\mathrm{C_s}$は Smagorinsky 定数 (本研究では 0.2)，$|\bar{D}| = \sqrt{2\bar{D}_{ij}\bar{D}_{ij}}$はひずみテンソル速度の大きさである．

さらに，再生成される変動$\bar{u}$が大規模な擾乱によるエネルギー保有領域成分の変動成分を含まないことを保証するため，$\bar{u}$に気象場スケールのフィルタリングを施した$\tilde{\bar{u}}$の時間平均が 0 に収束するよう，Goldstein et al.[8] の immersed boundary method の考え方に基づいて feed-back forcing により低波数成分をカットする以下の項を式(2-3)に付加する．

$$f_i(t, x_i) = \alpha \int_0^t \tilde{\bar{u}}_i(\tau, x_i) d\tau + \beta \cdot \tilde{\bar{u}}_i(t, x_i) \tag{2-7}$$

ここで，αとβは振動の固有周波数と減衰率を定めるパラメータであり，これらを調節することにより$\bar{u}$の低波数成分のみを減衰させることができる．

2.4.2　温熱効果の導入

温熱効果の導入は，Boussinesq 近似を導入した Navier–Stokes 方程式に基づいて，風速場の高周波変動成分の式の定式化を行った．またこれと連立する温熱の高周波変動成分の式の定式化を Nozawa and Tamura の方法に倣って行った．

Boussinesq 近似を導入した Navier–Stokes 方程式に基づいて，Nozawa and Tamura の方法と同様の風速の高周波成分の定式化を行うと以下の式が得られる．

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{U}_i\bar{U}_j-\tilde{U}_i\tilde{U}_j\right)=-\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{P}-\tilde{P})-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{\tau}_{ij}-\tilde{\tau}_{ij}\right)+\beta_{\mathrm{v}}\bar{\theta}g\delta_{i3}+f_i \tag{2-8}$$

ここで Boussinesq 近似により生じる浮力項には，$\bar{\theta}=\bar{\Theta}-\tilde{\Theta}$，すなわち LES で解かれる高周波変動成分を含む温熱量$\bar{\Theta}$と与条件としての気象モデルの粗格子に基づく温熱量$\tilde{\Theta}$の差で表される温熱場の高周波変動成分$\bar{\theta}$が含まれている．β_{v}は空気の体積膨張率，gは重力加速度，δ_{i3}は Kronecker のデルタである．空気の体積膨張率は鉛直プロファイルの最大値と最小値 (概ね差は 10K 以内) の平均値Θ_{e}によりβ_{v}=1/Θ_{e}と与えた．

式(2-8)に含まれる温熱場の高周波成分$\bar{\theta}$を求めるため，温熱場の高周波成分の定式化を行う．気象モデル格子系の温熱成分$\tilde{\Theta}$の輸送方程式は，高 Reynolds 数流れであることから，移流と乱流拡散のみを考慮して近似的に，

$$\frac{\partial \tilde{\Theta}}{\partial t}+\frac{\partial \tilde{\Theta}\tilde{U}_j}{\partial x_j}=-\frac{\partial \tilde{h}_j}{\partial x_j} \tag{2-9}$$

と表せる．また LES 格子系での温熱成分$\bar{\Theta}$については，次式で表せる．

$$\frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial t}+\frac{\partial \bar{\Theta}\bar{U}_j}{\partial x_j}=-\frac{\partial \bar{h}_j}{\partial x_j} \tag{2-10}$$

ここで，$\tilde{h}_j=\widetilde{\Theta U}_j-\tilde{\Theta}\tilde{U}_j$ と $\bar{h}_j=\overline{\Theta U}_j-\bar{\Theta}\bar{U}_j$は SGS 熱流束である．これら以外のチルダ付きの物理量，オバーライン付きの物理量はそれぞれ気象モデル格子系，LES 格子系のグリッドスケール（GS）成分であることを表す．

LES 領域の細密格子により解像される高周波成分 $\bar{\theta}$の式は，上の二式の差により次のように表すことができる．

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{\Theta U}_j-\tilde{\Theta}\tilde{U}_j\right)=-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\bar{h}_j-\tilde{h}_j\right) \tag{2-11}$$

本研究では，式(2-11)と，式(2-8)の風速場の式を連立させ，気象場の解析結果を与条件として与えながら，温熱の効果を考慮した高周波変動成分の再生成計算を行った．SGS 熱流束フラックスについては，風速場と同様に，$\tilde{h}_j$ を scale similarity モデル，$\bar{h}_j$ を Smagorinsky モデルにより表現した．

$$\tilde{h}_j=\widetilde{\Theta\tilde{U}}_j-\tilde{\tilde{\Theta}}\tilde{\tilde{U}}_j \tag{2-12}$$

$$\bar{h}_j=\nu_{SGS}/k_{SGS}\partial\bar{\Theta}/\partial x_j \tag{2-13}$$

ここで，k_{SGS} は乱流 Prandtl 数である．本研究では気象モデルにおいて広く採用されている Deardorff[9][10]の不安定境界層での値と一致するようにk_{SGS}=0.33 の定数として与えた．

2.4.3　温熱効果の表現に用いる物理量

工学スケールでの LES においては，Boussinesq 近似により風速場への温熱場の影響を考慮する場合，通常，温度を温熱量として用いて，着目する流体塊の環境場に対する温度差から流れに働く浮力の影響を考慮する．一方気象スケールの流れ場では，高度変化に伴って気圧が変化し，断熱膨張・圧縮が起こることで温度が変化する．またこのような鉛直方向の温度変化は実質的な浮力の発生や大気の安定度に影響を与えない．このような理由により気象モデルでは，断熱膨張・圧縮に対して保存する温熱量である温位を温熱の輸送方程式に用いられる．本研究のように，気象スケールの場において，Boussinesq 近似により風速場への温熱場の影響を考慮する場合も，気象スケールでの浮力の評価には，温位を用いることが一般には適切であると考えられる．

ただし実際の気象場では，流体塊が上昇して水蒸気が飽和すると雲が発生し，凝結熱が放出されるため，上空ほど温位が高くなる分布を持つ．このような場における大気の安定度や流体塊が受ける浮力を考える場合，相当温位がよく用いられる．この値は温位にその流体塊が持つ水蒸気を完全に凝結させた凝結熱を加えたものであり，高度の変化に伴う断熱過程に対して水蒸気の飽和状況に関わらず保存される．相当温位は，流体塊の持つ水分の量の影響を受けるが，通常は鉛直方向の凝結熱に比べて，通常水平方向の水蒸気量の空間空間による分布の影響は小さい．本研究においても，台風の境界層などについては，相当温位を Boussinesq 近似による流体塊の浮力を表す温熱量として用いることが可能であると考えられる．なお，竜巻で局所的なガストフロントが形成され著しい水の混合比の分布が存在するような場合などにはこの考察は当てはまらない．

実際に，本研究で行った NHM での 2018 年台風 21 号の解析結果を示す．図 2-3 に示すように鉛直断面の分布では，解析の時間帯において，凝縮熱の効果が温位分布に与える影響が大きい一方，図 2-4 の水平断面の分布からは，温位と相当温位の変動の構造はよく一致しており，水の混合比は空間的に比較的一様であることが確認される．

以上の考察からは，気象スケールの温熱場の物理量は，基本的には温位で表現されるが，凝結の発生する場では相当温位によってより適切に表されるものと考えられる．ただし，式(2-12)の高周波変動成分においては，雲内部で凝結の発生する領域に温位を用いた場合もその影響は限定的であると考えられる．第一に，鉛直方向に温位が上昇していることによる浮力の計算に対する影響については，式(2-12)では粗い格子と密な格子の差の形となっており，全体的なトレンドの影響は大半が取り除かれ，差の成分としては，小さな寄与のみが残ることが想定される（わずかに過大となる）．第二に，方程式が内部発生する熱を考慮できないことに起因する誤差が生じる可能性についても，凝結熱の発生の寄与は考慮する変動のスケールが小さくなるにしたがって小さくなり，十分な高周波成分に対しては移流と乱流拡散による効果に対して無視できると考えられ，低周波数のスケールでは気象モデルにより凝縮熱の影響を含む流れ場が与条件により決定される一方，高周波変動成分のスケールにおける凝縮熱の発生については乾燥空気同様に取り扱った方程式により移流と乱流拡散による効果のみを考えたとしても，妥当な近似を与えることが予想されるからである．

したがって本研究では，温熱の方程式を表現する物理量として，水の混合比の空間分布が比較的小さいことが確認された NHM の台風の解析結果の高周波変動生成に限って相当温位を用い，その他のケースについては，より一般的な方法として温位を用いて解析を行った．

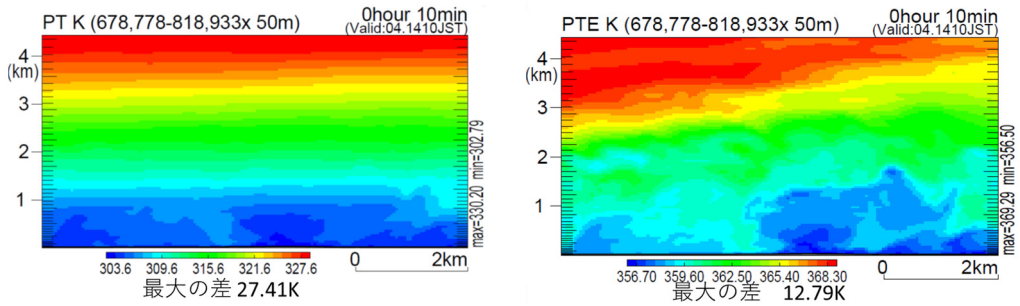


図 2-3　NHM による温位 PT（左）と相当温位 PTE（右）の海抜 50m における鉛直分布

(高周波再生成計算領域の NE-SW 対角線に沿った面)

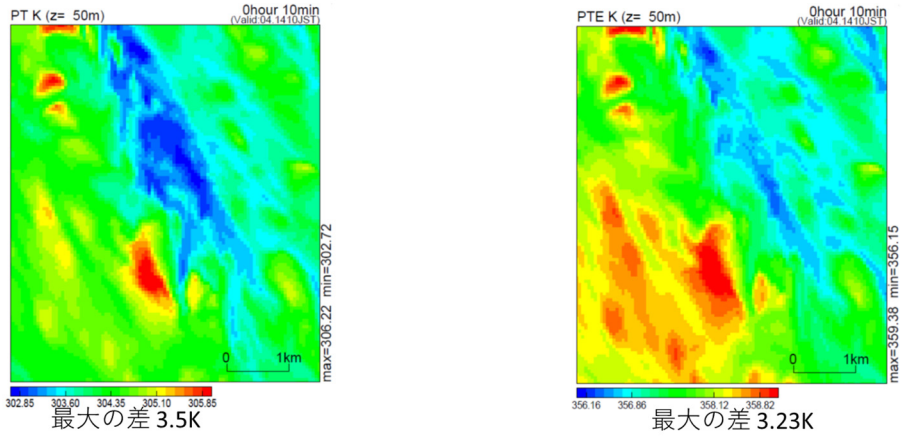


図 2-4　NHM による温位 PT（左）と相当温位 PTE（右）の海抜 50m における水平分布 (高周波再生成計算の領域の範囲)

2.4.4　高周波成分再生成の計算条件

この節では高周波成分再生成計算での各ケースで共通する，計算手法や空間離散化手法，時間積分法などの計算条件を表 2-1 に示す．表内に示した実際の格子幅比は実際の気象モデルの計算格子幅と LES の計算格子幅の比表し，一方，実効の格子幅比は気象モデルに対して scale similarity モデルで行うフィルタリング操作のフィルター幅である．前述のとおり，気象モデルでは高周波変動成分が大きく減衰するため，実効解像度は気象モデルの実格子のそれよりも数分の一程度となる．したがって，気象モデルの実効解像度に合わせて流れ場の構造を取り出すため，scale similarity モデルなどを計算するときに用いる気象場のフィルター幅を LES の格子に対して気象モデルフィルター幅の調節を行う．このフィルター幅は，気象モデルと LES の実効の格子幅比となる．またこの定式化は地形や建物など粗度の影響を反映させる方法が導入されていない one-way nesting となっており，地表の近傍への適用には課題が残っている．したがって今回は地表から少し離れた上空(60 m から 120 m 程度)までを計算領域とし，建築空間 BCM-LES の初期値と境界値を与える際に，この計算で得られた最下層よりも下の領域には，各位置での最下層の値に基づいたべき乗則プロファイルを与えた．地表付近では地形や建物による乱れによる影響が卓越することが期待される．したがってスピンナップの時間と境界からの距離を確保し，十分になじませた状態で計算を実施した．

表 2-1　高周波変動成分の再生成における共通計算条件

計算手法	fractional-step 法
空間離散化手法	4 次中心差分（速度場） 2 次中心差分（温熱場）
時間積分法	2 次 Adams–Bashforth 法（移流項） 1 次 Euler 陽解法（その他の項）
圧力解法	SOR 法
格子幅比 $\tilde{\Delta}/\bar{\Delta}$	2.0（実格子比）, 8.1（実効比）
気象データの LES 格子への補間方法	4 次 b-spline 補間（空間） 線形補間（時間）

2.5　建築空間 BCM-LES

気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析の最終ステップに当たる，市街地・住宅地における強風構造の解析および建物に作用する圧力の解析は，理研計算科学研究センターにより開発された BCM-LES を用いて行った．BCM-LES とは，階層型直交マルチグリッド格子システム (Building Cube Method; BCM) を採用した LES である．図 2-5 のように LES 領域を同サイズの立方体に分割したのち，八分木による分割を行い，それらの立方体 (Cube) 内に同数 (16^3) の内部計算格子 (Cell) を配置する．このような格子配置を用いることで，並列計算時の各ノードに対する負荷が平準化され，計算を効率的に実施できる[11][12].

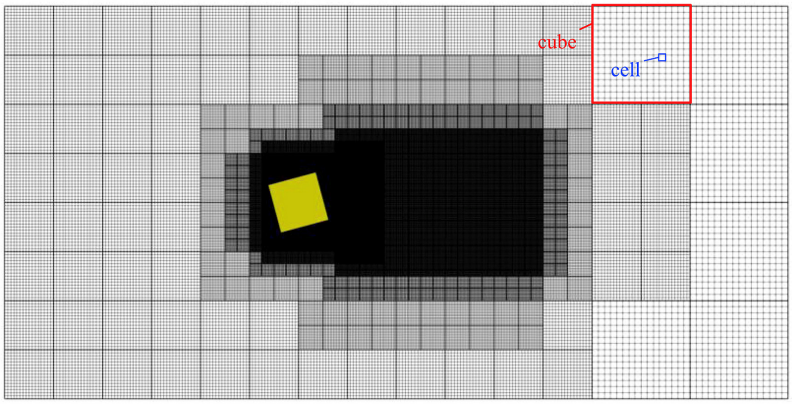


図 2-5　BCM-LES による格子分割の例[13]

また，建物や地形を表現する地表境界を表現する方法として，topology independent immersed boundary 法[14]が採用されており，流体計算格子内において物体表面の no-slip 条件が再現されている．これにより，ひとつひとつの建物配置に合わせて格子配置を変更したり，また物体形状ファイルに含まれるギャップや重なりを取り除いたりする修正が不要となり格子生成が大幅に効率化される．したがって BCM-LES は，市街地の広い範囲を領域として大型並列で数値流体計算において優れた性能を発揮することが期待される．

BCM-LES は Cao and Tamura[13]により角柱周りの詳細な解析から，流れ場の構造や圧力場についての検証が行われ，すでに Tamura and Kawai [15]によって実都市上空に形成されるコヒーレント構造についての分析などに用いられている．

BCM-LES では風速と圧力場が非圧縮性の連続の式と Navier–Stokes 方程式に基づき，faractional-step 法により計算され，温度場は考慮されていない．表 2-2 に示す計算に用いた数値スキームを示す．再生成された乱流を含む気象場は，この計算の初期条件および複数面の境界条件として与え，地表条件については，高解像度の衛星測量による 2m の精度のデータと，国土地理院の 5m 解像度の地形データを用いて再現した．

表 2-2　BCM-LES における共通計算条件

計算手法	fractional-step 法
空間離散化手法	2 次中心差分 (移流項は 1 次風上差分 5%付加)
時間積分法	2 次 Clank-Nicolson 法
圧力解法	Red/Black SOR 法
乱流モデル	Dynamic Smagorinsky モデル

2.6　結言

第 2 章では，極端気象発生時の市街地を解析するための気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法の枠組みを提案し，それぞれの数値計算の手法について記述した．

全体のハイブリッド解析手法の枠組みについては次のように要約される．

- 建物の安全性評価を行うことを目的に，極端気象の時間変動・空間変動の再現から市街地の非定常現象までを一貫解析するためには，地球大気の様々な物理過程の再現と，市街地での建物周りの乱流過程の正確な取り扱いの両面が必要である．また気象場，および気象場に基づく乱れを含む変動によるピーク風速・風圧の評価が重要であるが，気象モデルでは高周波変動成分が大きく減衰する問題が存在する．したがって本研究では「気象モデル計算」「高周波変動成分の再生成」「建築空間 BCM-LES」の 3 段階から構成される手法を提案する．

各段階の数値計算方法については，以下のとおりである．

- 積乱雲内の上昇流や雲微物理過程を正確に扱うことが可能な完全圧縮性の非静力学気象モデル NHM, WRF を用いて，大気乱流が一定程度再現された格子解像度 50m 程度の極端の気象場のデータを生成することとした．
- 約 1km よりも細かい解像度では，乱流による 3 次元的な SGS フラックスの影響が顕著になる事から LES 併用した定式化により計算を行った．1km から 100m の間の解像度は，通常の等方性乱流，局所平衡を仮定した LES では SGS フラックスの推定が正確に行えない大気境界層の「グレーゾーン」については先行研究を参考にして，その付近の解像度に対して大きなドメイン間の格子幅比を用いて接続することで影響の最小化を図った．
- 減衰した実気象場の高周波成分の再生成手法として，Nozawa and Tamura [1] の気象モデルで得られた 3 次元風速場に対する高周波変動生成法にならい，温熱場の高周波変動生成の定式化を行い，Boussinesq 近似を用いて風速と連立させることで，方程式系を拡張した．これにより温熱場を考慮して気象モデル風速場の高周波変動成分を 3 次元的に再生成する手法をハイブリッド解析に導入した．

温熱量としては一般には温位を，水の混合比の空間分布が小さい場合には相当温位を用いることとした.

- 市街地の強風・突風構造，建物に働く圧力場を計算する方法として，BCM-LES を採用した．階層型直交マルチグリッド格子による格子生成と immersed boundary 法を用いる本手法は，市街地等の大型並列の数値流体計算で課題となる計算負荷の分散とメッシュ生成に大きな優位性を有する.

第 2 章参考文献

[1] Nozawa, K., & Tamura, T. (2012). Coupling method of WRF-LES and LES based on scale similarity model. In The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), Shanghai, China.

[2] 気象庁予報部. (2003) 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194pp

[3] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note.

[4] Wyngaard, J.C., 2004. Toward numerical modeling in the "terra incognita". J. Atmos. Sci. 61 (14), 1816–1826.

[5] Shin, H. H., & Hong, S. Y. (2015). Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. Monthly Weather Review, 143(1), 250-271.

[6] Rai, R. K., Berg, L. K., Kosović, B., Mirocha, J. D., Pekour, M. S., & Shaw, W. J. (2017). Comparison of measured and numerically simulated turbulence statistics in a convective boundary layer over complex terrain. Boundary-layer meteorology, 163(1), 69-89.

[7] Bardina, J., Ferziger, J., & Reynolds, W. (1980). Improved subgrid-scale models for large-eddy simulation. In 13th Fluid and Plasma Dynamics Conference.

[8] Goldstein, D., Handler, R., & Sirovich, L. (1993). Modeling a no-slip flow boundary with an external force field. Journal of computational physics, 105(2), 354-366.

[9] Deardorff, J. W. (1972). Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers. Journal of the Atmospheric Sciences, 29(1), 91-115.

[10] Deardorff, J. W. (1980). Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. Boundary-Layer Meteorology, 18(4), 495-527.

[11] Nakahashi, K. (2003). Building-cube method for flow problems with broadband characteristic length. In Computational fluid dynamics 2002 (pp. 77-81). Springer, Berlin, Heidelberg.

[12] Nakahashi, K. (2005). High-Density Mesh Flow Computations with Pre-/Post-Data Compressions. 17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference.

[13] Cao, Y., Tamura, T., & Kawai, H. (2019). Investigation of wall pressures and surface flow patterns on a wall-mounted square cylinder using very high-resolution Cartesian mesh. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 188, 1-18.

[14] Onishi, K., Ando, Y., Nakasato, K., & Tsubokura, M. (2018). Evaluation of an Open-grill Vehicle Aerodynamics Simulation Method Considering Dirty CAD Geometries (No. 2018-01-0733). SAE Technical Paper.

[15] Tamura, T., & Kawai, H. (2018, August). Classification of Coherent Turbulent Structures over Actual City with Scattered High-Rise-Building Cluster. In 10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment. AMS.

第3章

高周波成分再生成計算の検証

3.1　緒言

第 2 章では極端気象現象下の市街地の風速場・圧力場を解析するための気象モデル・工学LESハイブリッド解析を提案し，その中で気象場の高周波成分再生成の温熱効果を考慮した定式化を行った．第 3 章では，極端気象への適用に先立ち，定式化を行った高周波成分再生成計算を理想対流境界層において検証した．WRF-LES により境界層の再現を行い，手法を適用した後，生成された変動について可視化や時系列，スペクトルにより解析を行う．

3.2　計算条件

対流境界層による検証に用いた計算領域を図 3-1 に示す．対流境界層は側方境界に周期境界条件を課した WRF-LES により作製した．領域の大きさは主流方向には 13 km，スパン方向 6.5 km，鉛直方向には 2 km であり，水平格子解像度は 50 m である．乱流スキームとして 1.5 次 TKE スキームを用いた．初期条件として領域全体に一様流速 10 m/s を与え，図 3-2 に示した温位分布を設定した．地表から 240 W/m^2 の熱流束を与えた．その他条件は表 3-1 に記す．

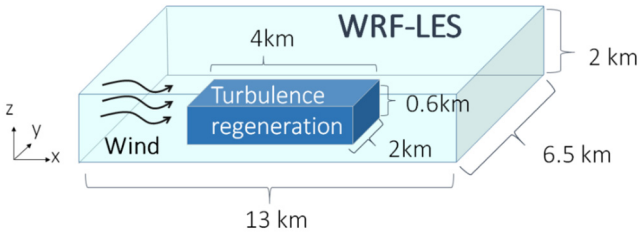


図 3-1　高周波成分再生生成計算の検証に用いた計算領域の模式図

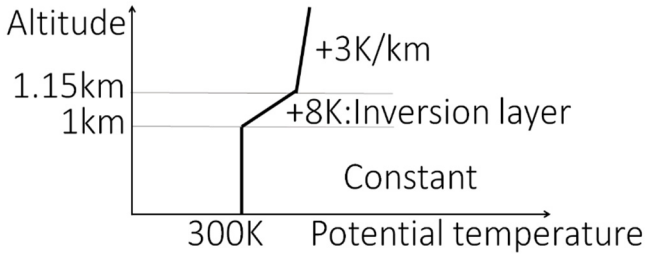


図 3-2　高周波成分再生生成計算の検証に用いた温位初期条件

表 3-1　WRF-LES による対流境界層計算条件

解析領域	13km（主流方向），6.5km（スパン方向）， 2km（鉛直方向，地表から 2km まで）
格子解像度	水平方向 50m，鉛直方向 38-44m
時間解像度	0.5s
乱流スキーム	1.5 次 TKE スキーム
境界条件	地表面境界：Monin–Obukhov モデル(風速場), 熱流束 240W/m^2(温位場) 主流・側面方向境界：周期境界条件, 上方境界：対流型境界条件
初期条件	一様 10m/s（風速），図 4.1（温位）

高周波成分再生成計算の計算領域は，主流方向 4 km，スパン方向 2 km，鉛直方向は海抜 333 m から 966 m までの約 600 m の範囲とした．その他の計算条件は表 3-2 に示す．なお，計算スキーム等のすべての計算で共通の条件は，すでに表 2-1 に示したとおりである，WRF-LES の計算では，境界層が計算開始直後から急速に発達し，モデル内の時間で 1 時間以内に境界層高さが 1km 以上となり安定な状態に成長した．WRF-LES の計算開始から 1 時間から 1 時間 20 分間までの間の風速および温位を 2.5 秒毎の出力値を保存し，これを高周波成分再生成計算に用いた．

表 3-2　対流境界層における高周波成分再生成の計算条件

解析領域	4km（主流方向），2km（スパン方向）， 633m（鉛直方向，高度 333m-966m）
格子解像度	水平方向 25m，鉛直方向 19-24m
時間刻み	0.025s
WRF データの入力	2.5 秒毎
初期条件	変動成分 0
境界条件	変動成分の勾配 0 (Neumann 条件)
乱流 Prandtl 数	0.33

3.3　結果

3.3.1　風速および温位の瞬間場による確認

高さ 439m での水平断面における風速と温位の変動生成状況を図 3-3 に示す.

風速場の各成分および温位のいずれについても，空間的に細かな変動が，領域の大部分（少なくとも流入面から約 1km 以降の領域）に発生し，風速の各成分と温位いずれにおいても気象場の構造に基づいて比較的速やかに変動が生成される様子が確認された．高さ 439m での水平断面における再生成した成分をもとの WRF-LES で計算した流れ場に付加する前後においての風速の成分と温位の比較を図 3-4，図 3-5 に示す．再生生成された成分によってそれぞれの場により細かい変動を再現する構造が付加されたことが確認された.

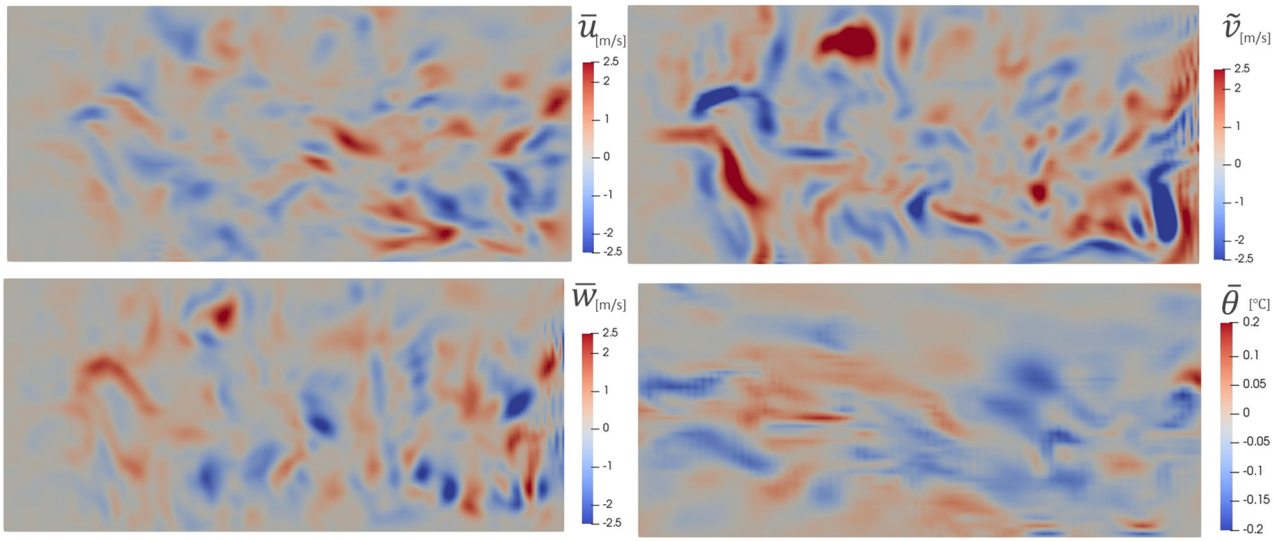


図 3-3　対流境界層にて再生成された高周波成分 (高度 439m)
$\bar{u}$：主流風速．$\bar{v}$：鉛直流速．$\bar{w}$：鉛直流速．$\bar{\theta}$：温位

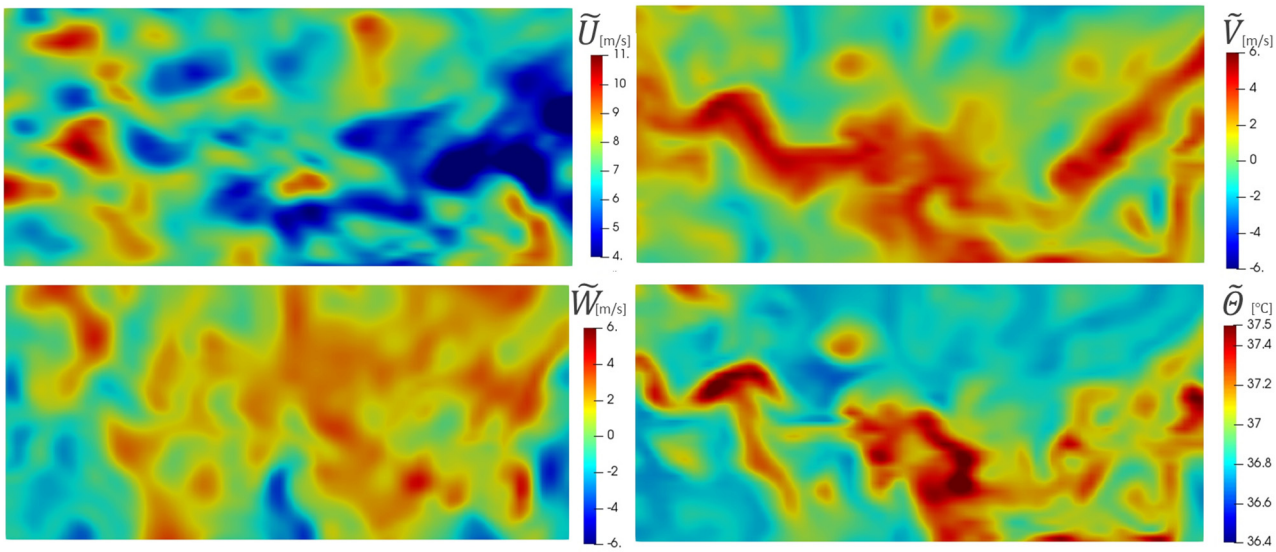


図 3-4　再生成前の風速場・温位場 (高度 439m)

$\bar{U}$：風速（主流方向）．$\bar{V}$：風速（鉛直方向）．$\bar{W}$：風速（スパン方向）．$\bar{\Theta}$：温位

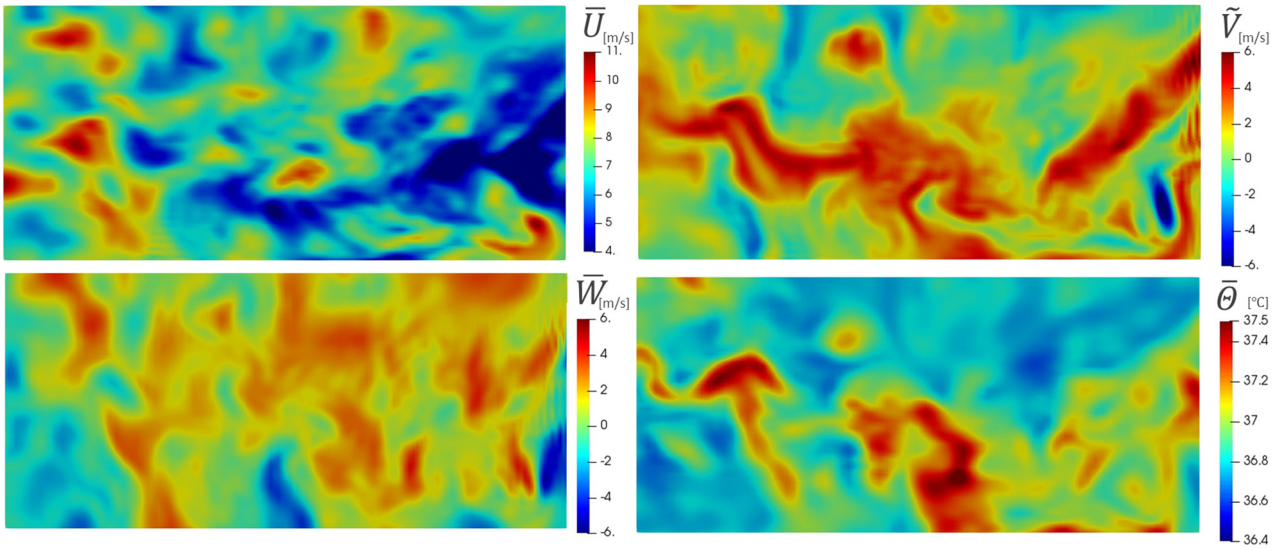


図 3-5　再生成後の風速場・温位場 (高度 439m)

$\bar{U}$：風速（主流方向）．$\bar{V}$：風速（鉛直方向）．$\bar{W}$：風速（スパン方向）．$\bar{\Theta}$：温位

3.3.2　時刻歴

図 3-6 と図 3-7 はそれぞれ風速の主流方向成分および鉛直方向成分の時刻歴である．それぞれの成分について異なる 2 つの高さにおける，変動付加前後での気象場での時刻歴および，付加された高周波変動を示す．主流方向成分，鉛直方向成分のいずれにおいてもそれぞれの高さでの時刻歴で，元の気象場よりも細かい変動が生成されていること，また元の WRF-LES により生成された対流境界層の変動に重層する形で生成された変動が付加されたことが確認された．

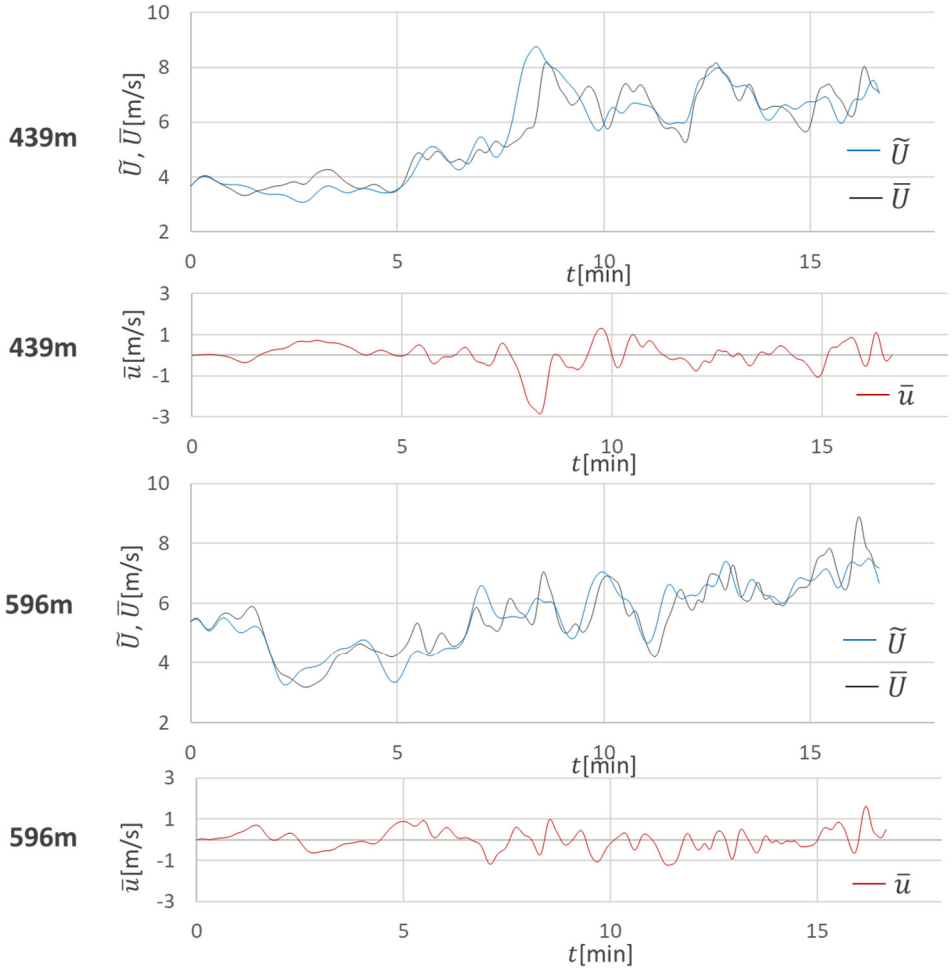


図 3-6　風速 (主流方向成分) の時系列 (高度 439m・596m)

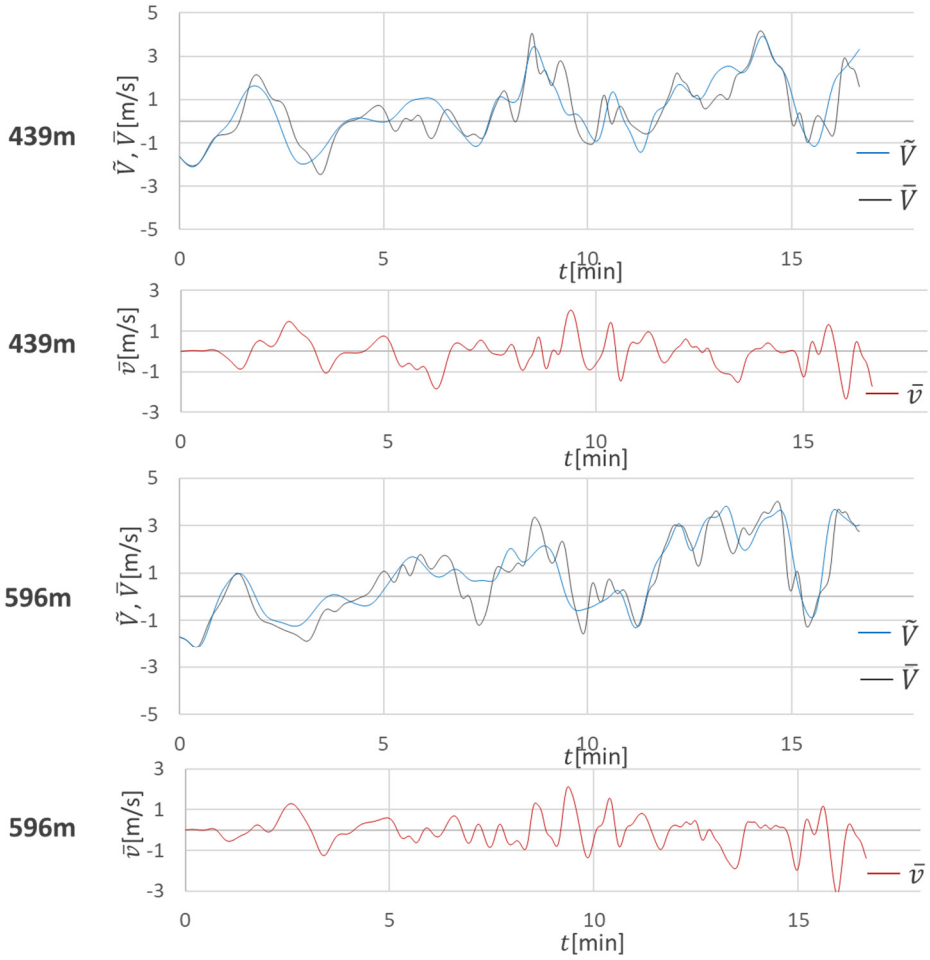


図 3-7　風速 (鉛直成分) の時系列 (高度 439m・596m)

3.3.3　エネルギースペクトル

再生成された変動成分の乱流としての性質を確かめるため，エネルギースペクトルを確認した．図 3-8 は高度 439m における風速（主流方向成分・鉛直方向）の図 3-7 の 5min から 15min の 10 分間の時刻歴に基づく再生成前の流速成分($\tilde{U}, \tilde{V}$)，再生成後の流速成分($\bar{U}$, $\bar{V}$)，付加された高周波変動成分($\bar{u}, \bar{v}$)のスペクトルである．

どちらの成分も再生成後の流速成分は再生成前の流速成分に比べて Kolmogorov の-5/3 乗則に沿ってスペクトルが広がったことが確認され，気象場の構造に対して適切な乱流の構造が付加され，より周波数帯域の広い流れ場が得られたことが確認された．

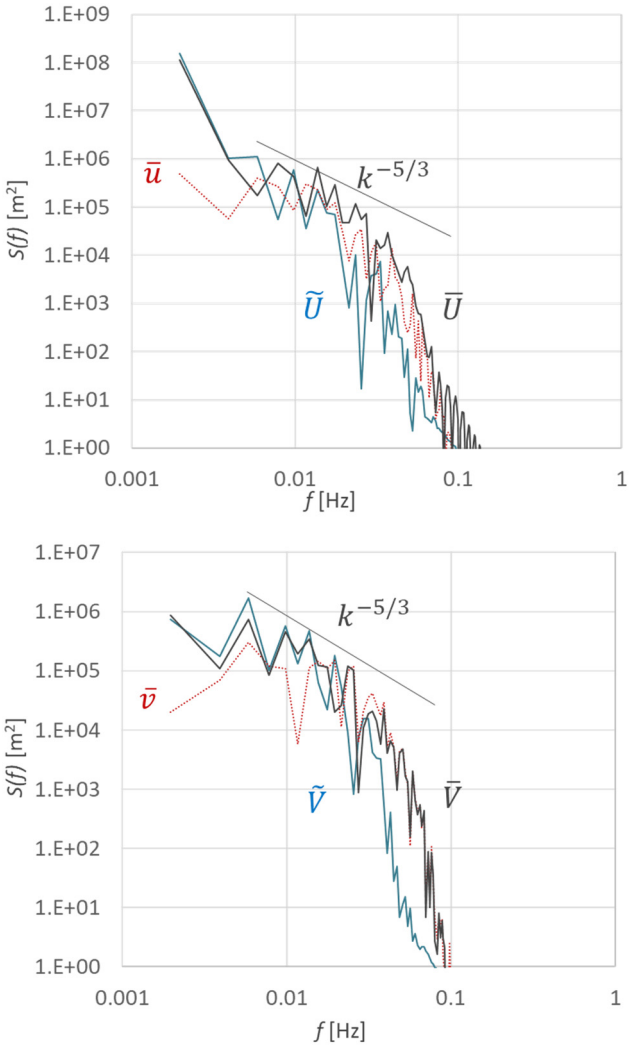


図 3-8　流速のエネルギースペクトル（主流方向成分 U・鉛直方向成分 V）

3.4　考察

本手法で用いている scale similarity モデルは GS スケールと SGS スケールのエネルギーの連続性を表現するモデルである．気象モデルにより解像されている比較的高周波な変動の構造に基づいて，式(2-12)に示した高周波変動成分の方程式の流入フラックスが規定される．これまでに領域気象モデルなどは，境界においてランダムな熱の初期変動を付加することで乱流を誘発する手法[1][2]が用いられており，同様の手法が市街地での計算にも適用[3]されている．しかしこのような手法では非物理的な構造から物理的な構造に遷移に要する吹走距離として，文献で確認された範囲では非強風時において 1.5 から 5 km 程度が必要としている．本手法はこれらの手法と比べると，生成される高周波変動成分は常に物理的な構造に基づいて生成される特徴があり，より早い段階において物理的な変動が生成されている．また高周波変動成分を付加する過程において，高周波変動成分の方程式が分離されていることにより気象場の構造が保持されることを保証でき，この点も利点のひとつであると考えられる．

気象モデル WRF-LES の格子解像度は 50 m であるが，図 3-8 に示したスペクトルから主流方向成分では 0.02Hz 付近，鉛直成分は 0.03Hz 付近から減衰が見られた．それぞれ 200 m から 300 m 程度の構造に対応し，実効の解像度は$6\tilde{\Delta}$程度であることが見積もられた．この値は，WRF 解析について Skamarock[4]が，また WRF-LES 解析についても Rai et al.[5]が報告している値とほぼ同等であり，WRF に共通する高周波変動成分の再現の難しさを示していると考えられる．変動成分の再生成後のスペクトルはそれぞれ相当伸長されており，また，高波数側での減衰も比較的緩やかとなっている．これらの減衰は，気象場のフィルター幅や，feed-back forcing 項，Smagorinsky 定数の最適化や，定式化・離散化の高次化などの工夫により，更に改善できるものと期待される．

3.5　結言

第3章では，２章で提案を行った極端気象に適用するための気象モデル・工学LESハイブリッド解析を構成する計算のひとつである温熱効果を考慮した高周波成分再生成手法について，解像度50mのWRF-LESにより再現した理想対流境界層において定式化の有効性の確認を行った．その結果として次の結論が得られた．

- 提案した温熱場を含む高周波成分の再生成手法の定式化により，気象場の構造より風速場と温位場それぞれの高波数変動が速やかに生成され，気象モデルの解析に対してより細かな構造が再現された．
- 風速場の主流方向成分と鉛直成分について，時刻歴をスペクトルにより解析を行った．高周波変動成分の付加した結果，低周波数側では気象場のスペクトルを保持したまま，Kolmogorov の-5/3 乗則に従ってスペクトルが高周波数側に拡大した．したがって，気象場の構造を再現したより広帯域な変動風速を持つ流れ場が得られ，生成された変動成分については適切な乱流の性質を持っていることが確認された．
- 考察において，本手法生成手法は，高周波変動成分が常に物理的な構造に基づいて生成される特徴があり，温度場のランダム振動などに基づく変動生成手法に比べ，より早い段階において物理的な変動が生成できる可能性が確認された．また高周波変動成分の方程式が分離されていることにより気象場の構造が保持されることを保証できる点についても本手法のもつ利点として考察された．

第 3 章参考文献

[1] Muñoz-Esparza, D., & Kosović, B. (2018). Generation of Inflow Turbulence in Large-Eddy Simulations of Nonneutral Atmospheric Boundary Layers with the Cell Perturbation Method. Monthly Weather Review, 146(6), 1889-1909.

[2] Lee, G. J., Muñoz-Esparza, D., Yi, C., & Choe, H. J. (2019). Application of the Cell Perturbation Method to Large-Eddy Simulations of a Real Urban Area. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58(5), 1125-1139.

[3] Kealy, J.C., Efstathiou G.A., Beare R.J, 2019. The onset of resolved boundary-layer turbulence at grey-zone resolutions, Boundary-Layer Meteorology 171 (1), 31–52.

[4] Skamarock, W.C., 2004. Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra.

Monthly Weather Review 132(12), 3019–3032.

[5] Rai, R. K., Berg, L. K., Kosović, B., Mirocha, J. D., Pekour, M. S., & Shaw, W. J. (2017). Comparison of measured and numerically simulated turbulence statistics in a convective boundary layer over complex terrain. Boundary-layer meteorology, 163(1), 69-89.

第4章

実大気境界層の強風への手法適用

4.1　緒言

実大気境界層の強風のうち，台風は日本において，だし風などの局地風が卓越する一部の地域を除いて建物被害をもたらす強風の主な成因となっている[1]．現行の建築基準法関連の法令や風荷重指針は，境界層型の強風を想定して，設計風速や構造・外装材用の風圧・風力係数が定められていることから，おおむね台風の強風を想定した建築物の再現期間に対応する設計風速を用いて，風圧・風力係数，また風応答などが風洞実験や数値解析により評価されているといえる．しかしながら，第 1 章において述べた通り，従来の設計手法では，通常 10 分間の評価時間を定めて気象場の影響を切り離したうえで定常な乱流の効果のみを考慮して行われている．

一方で，防災研究については気象モデルを用いたものも様々行われている．例えば西嶋[2]らは WRF の再解析(水平解像度 0.9km)に基づいて台風 21 号の推定風速と衛星写真から算出した屋根被害の発生率の関連について分析を行っている．しかし WRF モデルでは，市街地そのものの形態は再現できず，土地利用区分のカテゴリーに基づくラフネスパラメータによって地表での抗力が考慮されているため，地表付近の局所的な風況を正確に再現するという目的においては，何らかの方法で気象場を切り離した工学的な LES や RANS など数値計算手法により実施され，その場合の評価方法は前述の手法に準じたものであることが多い．例えば，Takemi et al.[3]は台風 21 号の大阪市街地での地表の風速の推定を，気象モデル WRF を用いたアンサンブル解析により台風通過時の上空でのピーク風速を推定し，上空のピーク風速を定常境界層の一様風速とする LES (2m 解像度)により大阪市中心部の解析を行っている．

しかしながら，第 1 章で指摘した通り，台風の中心付近では顕著な時間変化，境界層内に広がるロール状の強風コヒーレント構造や壁雲内で Rossby 波の影響により発生するとみられる鉛直渦の構造などの台風に起因する高風速構造が存在し，地表の突風の関連性が観測や数値計算により示唆されている．このような定常な境界層では見られないより大スケールの特徴的な風速場の構造が建物空間での強風発生に及ぼす影響は，従来の風洞実験，数値計算では再現することができないことから，検討はほとんど行われていない．これらの地表の建築空間への影響の評価は重要な課題である．

4.2　本章の目的と構成

第 4 章では，第 1 章から第 3 章までにおいて構築を行った気象モデル・工学的 LES ハイブリッド解析手法により，関西地方を中心に顕著な建物被害をもたらした 2018 年台風 21 号時の大阪市街地を再現した解析を行い，台風時の気象場の擾乱構造による市街地内のピーク風速やピーク風圧発生に対する影響，および市街地に発生する強風の分布特性への影響を明らかにする．また風速プロファイルや乱流統計値，建物表面での風圧分布について現行の設計基準・指針との比較した結果を示し，実被害との対応を分析する．

まず，ハイブリッド手法を台風に適用する前段階として，4.3 節から 4.4 節においては一般的な設定を行った気象モデル WRF により関東地方に強風被害をもたらした 2012 年台風 4 号(Guchol)を対象とする計算を行い，気象モデルによる台風時の気象現象の再現性を確認する．4.5 節から 4.7 節では，気象モデル・工学的 LES ハイブリッド手法により，2018 年台風 21 号(Jebi)の際の大阪市街地を再現した解析を報告する．本解析は気象場再現性の不確実性を考慮し WRF/WRF-LES と NHM の二つの気象モデルによる解析データに基づいて行う．4.5 節は解析の概要を述べており，4.6 節では気象モデル WRF/WRF-LES に基づく解析結果，4.7 節では NHM に基づく解析結果を示す．それぞれの章では，気象モデルにより再現された台風 21 号の気象場についての分析，高周波成分の再生成計算の結果を確認した上で，気象擾乱を含む流れ場を用いた市街地での強風分布や分析，および建物への作用の評価を行う．最後に，本章において得られた知見を 4.8 節においてまとめる．

4.3　気象モデル WRF による気象場の再現 (2012 年台風 4 号)

4.3.1　2012 年台風 4 号の概要

図 4-1 に台風の経路[4]を示す．2012 年台風 4 号は，65 km/h から 70 km/h の比較的速いスピードで 6 月 19 日午後 5 時に和歌山県に上陸し (中心気圧 960hPa，最大風速 35m/s)，「強い勢力」を保ったまま本州を通過した．6 月 20 日午前 0 時前後，東海・関東地方に最接近し，30m/s を超える最大瞬間風速(3 秒平均値) が市街地において記録された．また東京湾沿岸は 10 分平均値の風速が 25m/s を超える暴風にみまわれた．気象庁による風速観測[5]を表 4-1 に示す． 静岡県沼津市でプレハブ小屋の倒壊に巻き込まれた男性が 1 名死亡し 79 名が負傷した．また千葉市では図 4-2 に示す解体工事の安全パネルの崩壊などが発生したほか強風による家屋被害や倒木が全国的に発生した[6].

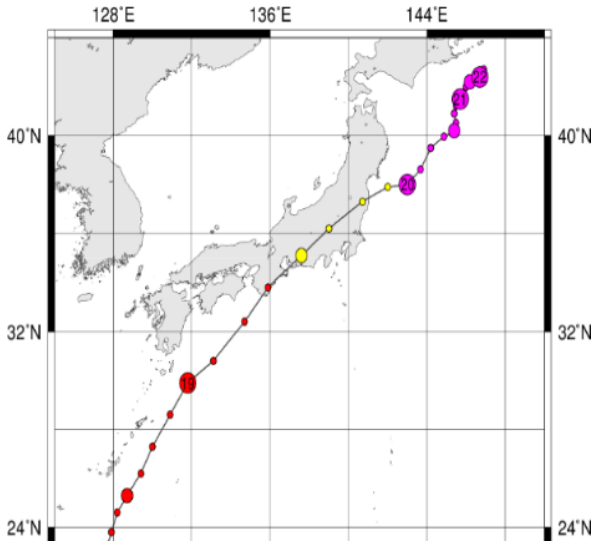


図 4-1　2012 年台風 4 号の経路（日本列島付近のみを表示，日付は世界協定時による）[4]

表 4-1　2012 年台風 4 号の気象庁による風速観測[5]

最大瞬間風速 (3 秒平均値)

観測地点	風速	発生日時 (日本時間，10 分単位で表示)
静岡	33.7 m/s	6/19　22:10
横浜	35.6 m/s	6/19　23:10
千葉	38.1 m/s	6/20　1:10

最大風速 (10 分平均値)

観測地点	風速	発生日時(日本時間)
羽田空港	25.4 m/s	6/19　22:50
江戸川臨海 (東京都)	26.0 m/s	6/19　23:20

図 4-2　2012 年台風 4 号により千葉市で発生した解体工事の安全パネルの崩落[6]

4.3.2　計算条件

台風の再現には気象モデル WRF および WRF-LES を用いた．初期条件の気象場を 5km 解像度のメソ数値予報モデル GPV（MSM）(水平 5km 解像度，鉛直 12 層) により与え，図 4-3 のように 4 つの計算領域を設定した．各領域は one-way ネスティングにより接続を行った．鉛直の格子間隔は全領域で共通であり，地表から 200 m の範囲では約 15 m のほぼ等間隔格子であり，高度 200 m から 2000 m の範囲では格子幅は徐々に 30 m まで拡大するように設定した．モデル上面は地表約 16.6km とした．解析領域の設定を図 4-3 に示す．領域 1，2 の WRF 領域の境界層スキームには Yonsei University スキームを，領域 3，4 の WRF-LES 領域の乱流スキームには 1.5 次 TKE クロージャースキームを用いた．その他の各領域の設定を表 4-2 に示す．

表 4-2　2012 年台風 4 号の各計算領域の設定

計算領域	格子数	水平解像度	計算時間 (日本時間)	時間刻み	モデル
1	376*376*144	4 km	6/19 15h–6/20 6h	2 s	WRF
2	211*211*144	1.3 km	6/19 15h–6/20 0h	1 s	WRF
3	211*211*144	267 m.	6/19 21h–6/20 0h	0.5 s	WRF-LES
4	151*211*144	88.9 m	6/19 21h–6/20 0h	0.5 s	WRF-LES

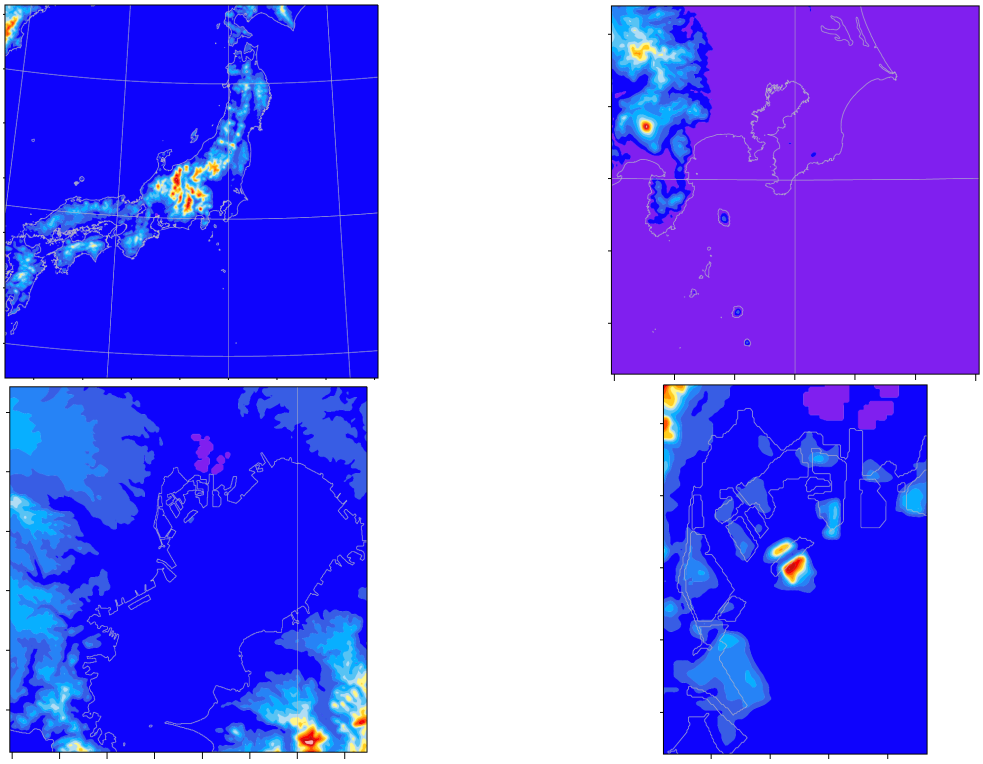


図 4-3　2012 年台風 4 号の計算領域設定.
左上：領域 1，右上：領域 2，左下：領域 3，右下:領域 4

4.3.3　結果

(a)　台風プロセス全体の再現

台風の再現性について，図 4-4 にシミュレーションの海面気圧分布と天気図[4]の比較を，図 4-5 に中心気圧の推移の比較を示す．本州通過の前後にわたって，台風の気圧分布をよく再現できており，中心気圧も計算初期においては，シミュレーション結果が 5hPa 程度高い傾向を示すものの，その後は実際の推移を追随する変化が見られた．これらの結果から台風の全体的な過程は比較的よく再現できていると判断される．

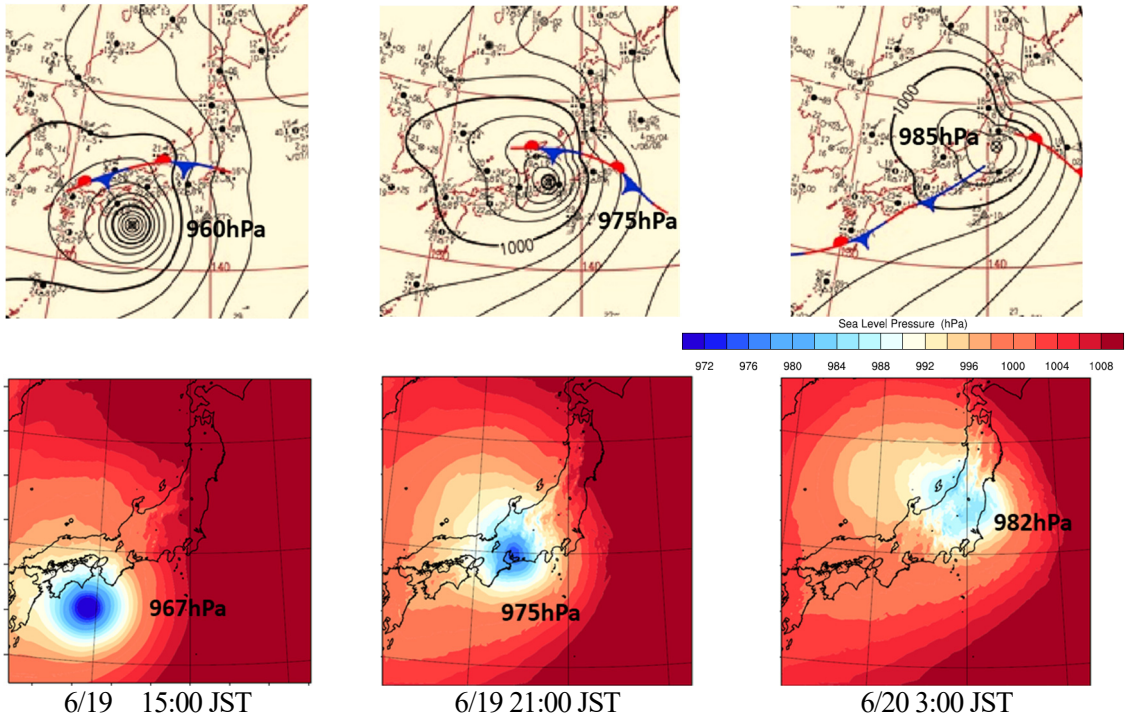


図 4-4　シミュレーションの海面気圧分布と天気図の比較

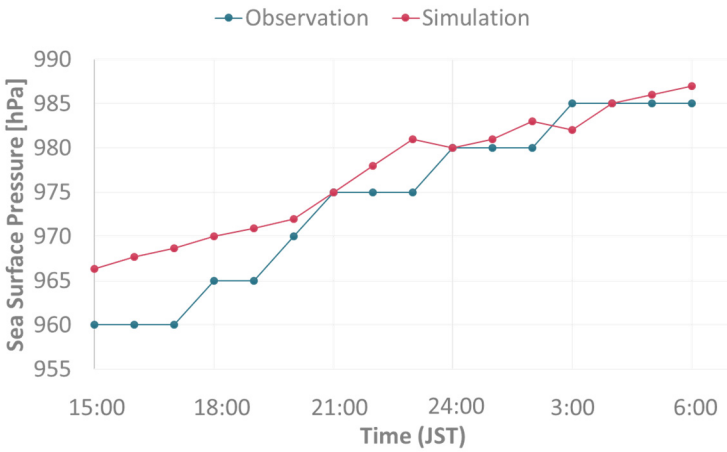


図 4-5　シミュレーションと実現象の中心気圧分布[4]の推移の比較

(b) 境界層プロファイルの再現

解析による境界層内の各高さにおける風速の時系列を，東京スカイツリーにおける観測との比較を行った．ただし観測は毎正時における瞬時値でしか得られていないため，おおよその対応の確認にとどまる．

観測値は小笠原計器製作所の風向・風速計により得られたもので，各高さで複数のポイント測定された．今回は塔体の影響を避けるため，30m では 180°（北を 0°とし時計回りを正とする），100m と 200m は 120°，285m は 240°，375m は 270°で測定された値を選び比較に用いた．解析値は，東京スカイツリーの位置を含む領域のうち最も内側にある領域 3 で得られたものを分析した．

表 4-3　風向・風速計の設置場所及び型番

Height	30m	100m	200m	285m	375m	480m
Type number	N36D+WU230MS	N36D+WU230MS	WS-A56	WS-A56	WS-A16	WS-A16
point	T20(60°) T60(180°) T100(300°)	T00(0°) T40(120°) T80(240°)	T00 T40 T80	T00 T40 T80	T30(90°) T90(270°)	T30 T90

図 4-6 は風向推移の東京スカイツリーの位置での各高さにおける解析値と実測値との比較である．周辺の気象庁地上観測点での結果も併せて示した．風向の解析値は，各高さにおいてよい一致が確認された，高度の上昇に従って風向変化の度合いが小さく，通過前後ともに地表よりも南寄りであるのは Ekman 層の影響であると考えられる．480m で測定された風向は，角度が正しく校正されていないことが原因でずれが生じていると考えられる．

図 4-7 は各高さでの風速推移の比較である．観測値は瞬間値でありその平均時間は不明である．解析結果としては前 10 分の平均値を示した．30 m から 200m の低層にかけては，シミュレーションでの解析値は実測値より 5 m/s 程度大きいが，おおむね実測の傾向を再現した．一方 285m, 300 m, 375 m では大部分の時間帯で解析値は観測値よりも大きくなった．480m では再びおおむね解析値と実測値は一致した．

図 4-8 は異なる 2 つの時刻での風速の鉛直プロファイルである．解析値は，台風の最接近 3 時間前の 21:00 頃にはほぼ指数 α=0.27 のべき乗則に沿ったものが得られ，最接近時刻付近 24:00 では地表付近での風速が増加し，べき指数が小さくなる傾向を示した．観測も大局的には同様の変化を示していると見ることができるが，400m から 200m の間で急速に風速が低下し，ピークが現れるプロファイルが得られた．これは設置状況や上流の建物の影響，瞬間値での値である

ことなど観測条件によるもの，台風の境界層の構造，逆転層，夜間安定境界層でしばしば観測される low-level jet の影響などの気象場によるものの両方が考えられたが今回の観測結果からは原因を特定することはできなかった．

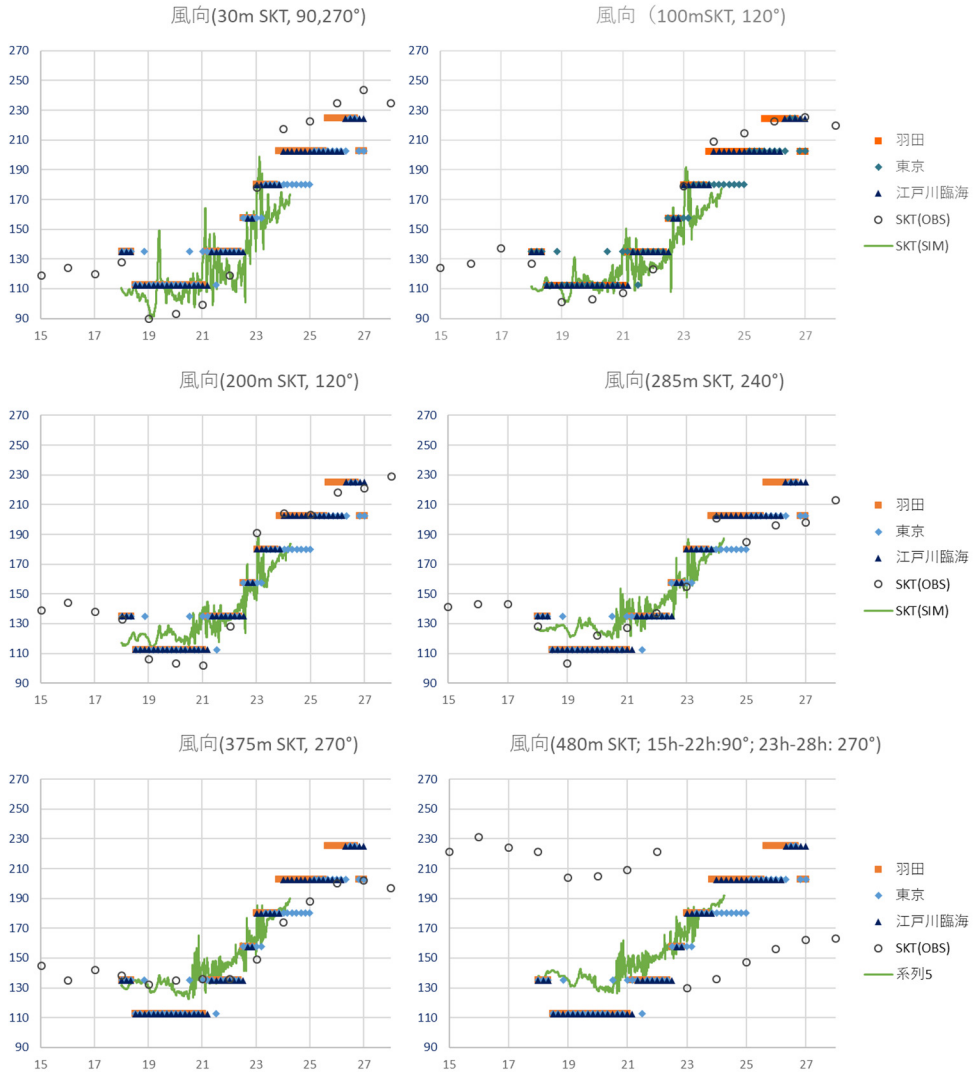
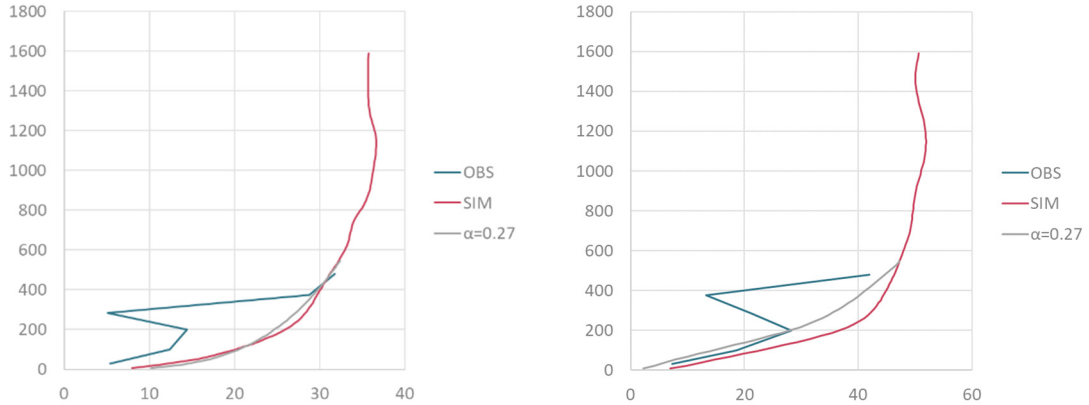


図 4-6　東京スカイツリーの位置での各高さにおける風向の推移．
縦軸は北を 0°とし時計回りを正とした角度[°]，横軸は日本標準時での 6/19 の時刻 (JST) [h]である．SKT (OBS)と SKT (SIM)はそれぞれ東京スカイツリーでの実測値およびシミュレーションでの推定値．周辺の気象庁地上観測(羽田，東京，江戸川臨海)の値を併せて示した．



6/19 21:00 (JST)　　6/20 0:00 (JST)

図 4-7　プロファイルでの風向の比較．縦軸は高さ[m]，横軸は風速[m/s]である．OBS は観測値，SIM は解析値．併せてべき指数 α=0.27 のプロファイルを示す．

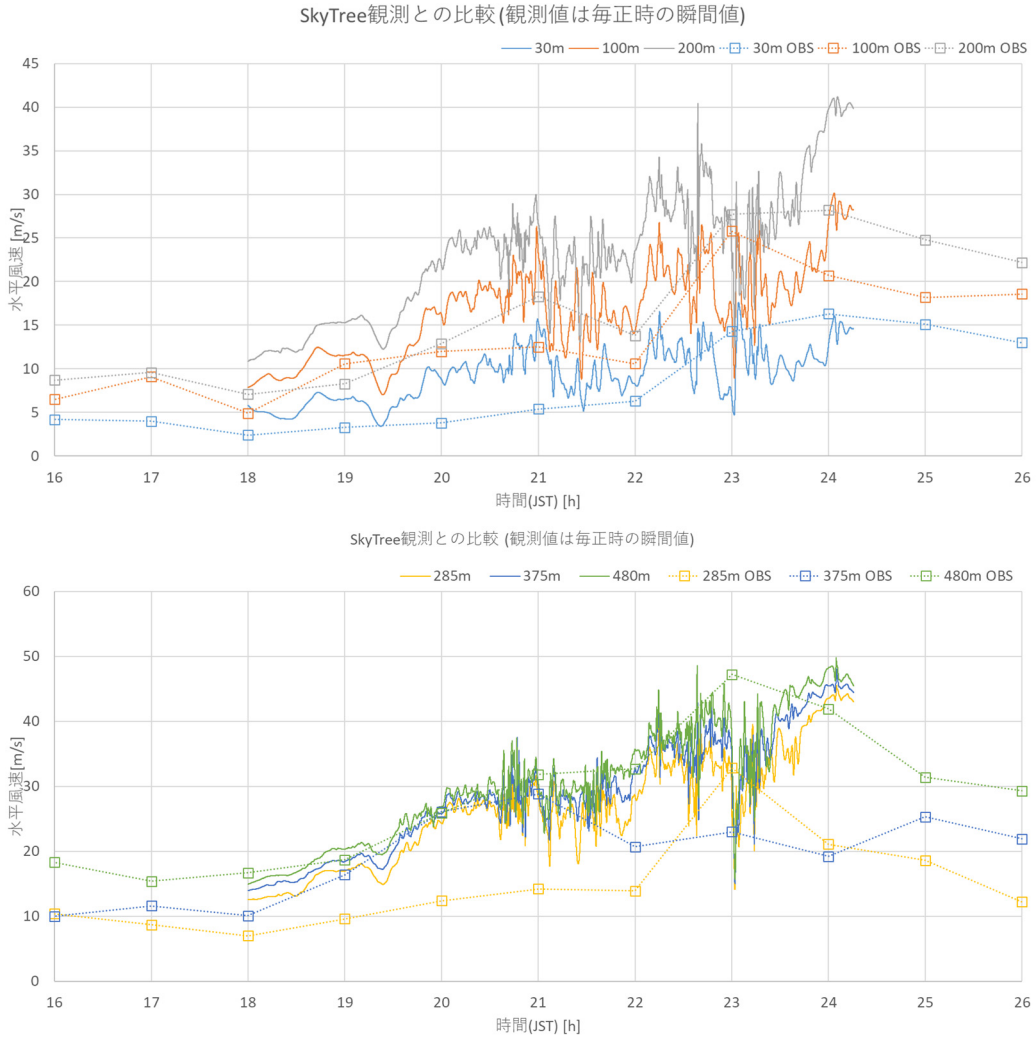


図 4-8　東京スカイツリーの位置での各高さにおける風速の推移．OBS は観測値である．

(c)　大気境界層内の構造

台風境界層内のロール構造などのコヒーレントな強風構造の発生について領域 4 の風速場より確認した．気象庁観測点（江戸川臨海，羽田）の 2 点における海抜 300m における領域 4 での風速の時刻歴を図 4-9 に示す．WRF を用いた領域 1，2 では計算時間通して緩やかな風速変動のみが見られる一方，WRF-LES を用いた領域 3，4 では，計算時間帯の一部で激しい変動を持つ時刻歴変動が生成された．図 4-10 は細かな変動が生成された 21:00 における海抜 300 m の風速の分布である．WRF-LES を用いた領域 3，4 では，筋状の強風構造が形成されており，これにより細かな変動を生じていることが確認された．図 4-11 の当該時刻前後の時系列の拡大図は，領域 4 では，領域 3 の構造に基づきさらに細かな変動が生成されたことが確認された．

一方，図 4-9 において細かな変動がほとんど再現されていなかった時刻も見られた．上流側に地形がある際には乱流が生成されやすい一方，高風速時や海からの流入などの場合には変動の発達が難しくなる傾向が確認された．海側からの流入である 6/20 0:00 付近については，図 4-12 に示す海抜 300 m の風速分布からは，領域 3 において乱れが生成される兆候は認められるものの十分な発達せず細かな構造は得られなかった．その結果，内部にネスティングされた領域 4 では，鉛直流速については多少の空間変動が生じたものの，水平風速では風速は領域全体にわたってほとんど一定値となった．図 4-13 に示す時刻歴の拡大図からも同様の傾向が読み取れる．

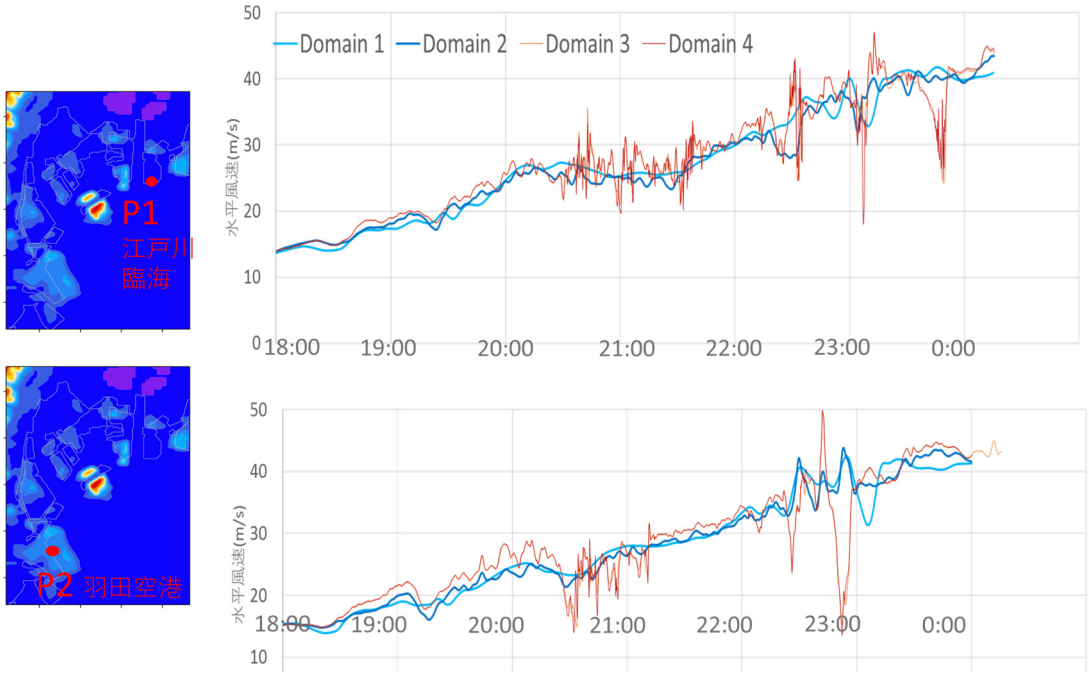
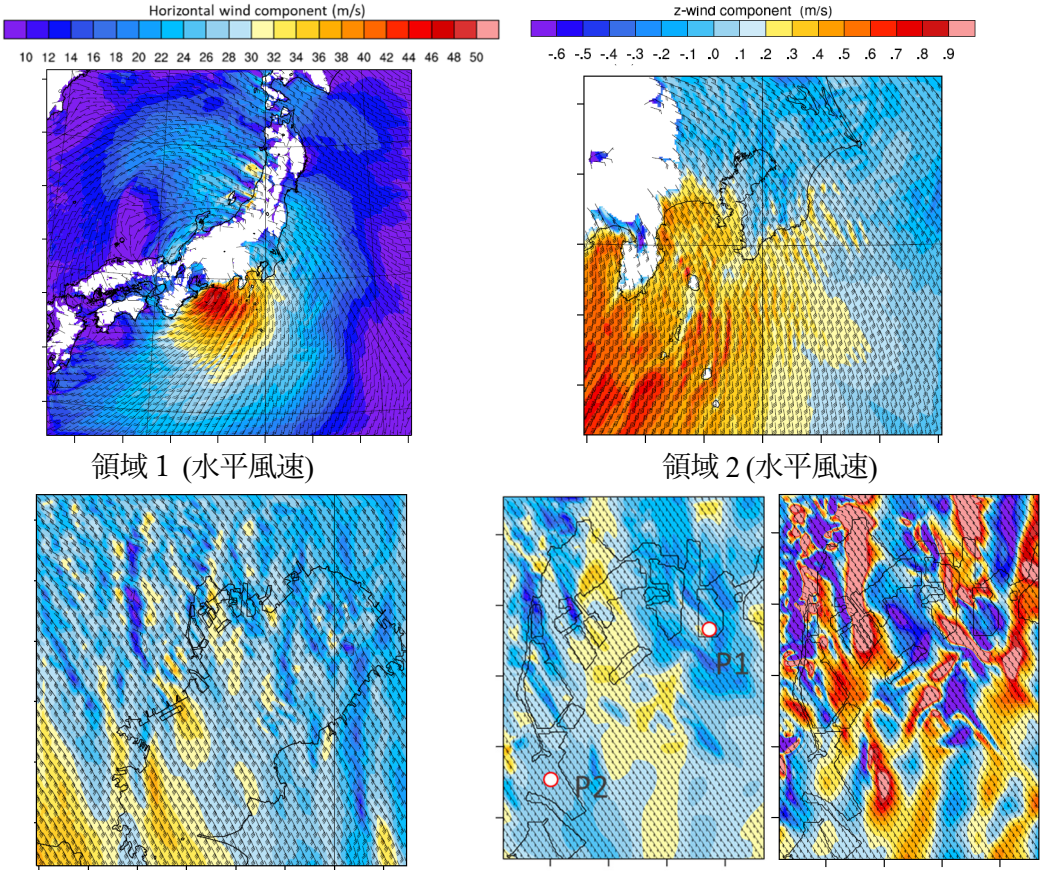


図 4-9　領域 1 から 4 までの時系列の比較 (海抜 300 m)



領域 1 (水平風速)　　領域 2 (水平風速)

領域 3 (水平風速)　　領域 4 (左：水平風速．右：鉛直流速)

図 4-10　6/19 21:00 (JST) における風速場 (海抜 300 m)

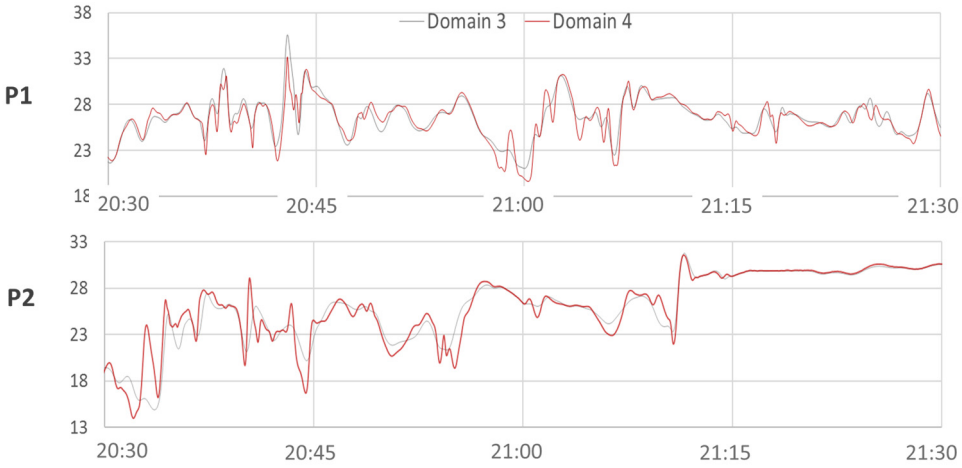
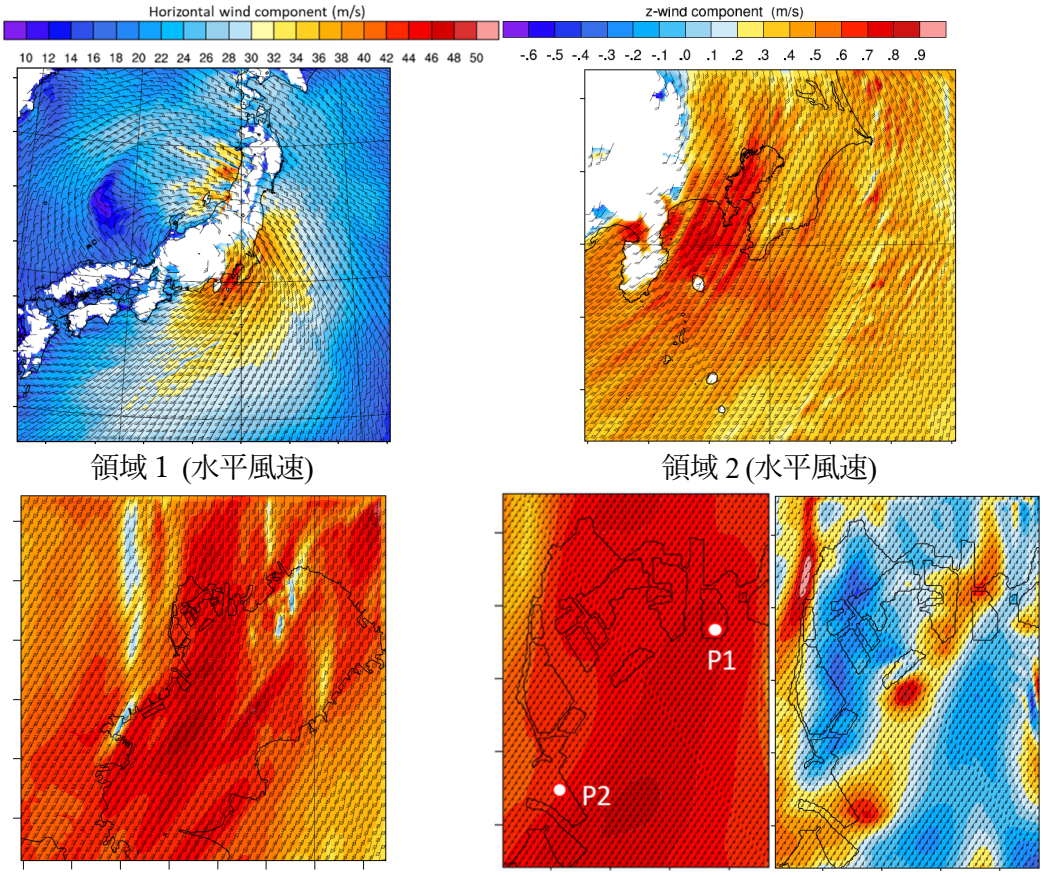


図 4-11　6/19 21:00 (JST) 付近の水平風速時系列（領域 3 ・ 4 のみ，海抜 300 m）



領域 1 (水平風速)　　領域 2 (水平風速)

領域 3 (水平風速)　　領域 4 (左：水平風速.　右：鉛直流速)

図 4-12　6/20 0:00 (JST) における各領域の風速場 (海抜 300 m)

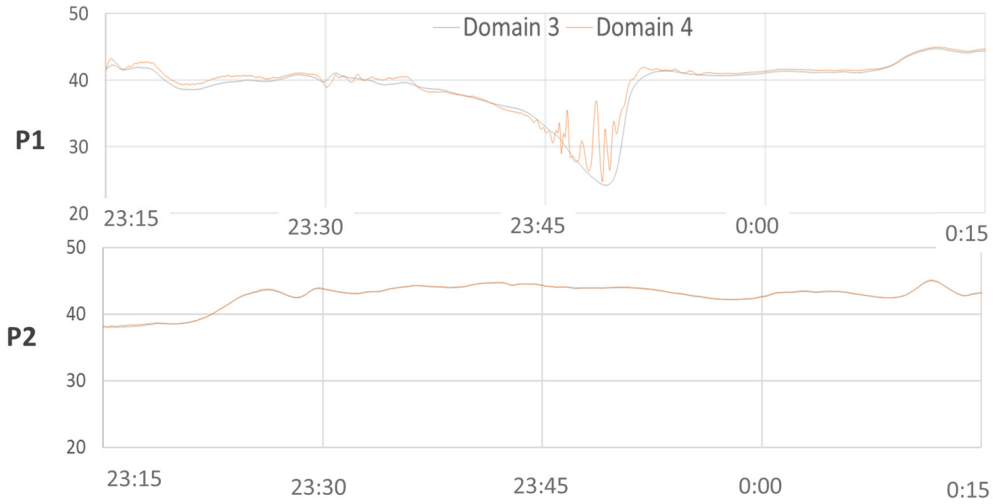


図 4-13　6/20 0:00 (JST) 付近の水平風速時系列（領域 3・4 のみ, 海抜 300 m）

4.3.4　小結言

2012 年台風 4 号について WRF/WRF-LES モデルを用いて台風の全体的な過程が再現されることを確認した.

大気境界層内の風向風速については，今回，使用可能な実観測データの制約や精度により十分な比較検討はできなかったものの，風向は実測値と観測値がよく一致した．上空では地表よりも風向の変化が小さくなり，Ekman 層の影響であると見られた.

風速についても 200m 以下や，400m の位置の結果は，おおむね時間方向の変化傾向を再現できたことを示した．しかし，400m から 200m 間では，観測において記録された急激な風速減少と極大ピークが観測され，このプロファイルが瞬間値などの観測条件の制約や設置状況などに影響を受けたものであるのか，実気象場の構造を反映したものであるのか，今回の解析からは明らかにすることはできなかった．今後も台風境界層のプロファイルの再現性については，別の物理量，多くの事例の比較など多面的な視点での観測データ分析の継続，および気象モデルで再現される台風境界層の風速場の性質に関する詳細な分析の継続により明らかにする必要があると考えられる.

また格子解像度 1km 未満の内部計算領域に対して LES スキームを用いたことで，計算時間の一部では細かな風速場変動が形成され，筋状の強風構造が確認された．一方で高風速時や流入風向が海からとなるケースにおいては気象モデル内での乱れの生成が抑制される傾向が見られ十分な変動が生成されなかった．気象モデル・工学的 LES ハイブリッド解析は，気象場の比較的高波数の空間変動に基づきより高周波変動を生成させるものであるため，期待される効果を発揮するためには気象場である程度の乱れの解像された状態で接続することが必要であり，台風への適用に際してこの点に留意する必要がある.

4.4　顕著な台風の強風に対するハイブリッド解析の概略 (2018 年台風 21 号)

4.4.1　2018 年台風 21 号の概要

気象庁[7]によると 2018 年台風 21 号 (Jebi, 最低中心気圧 915 hPa) は，9 月 4 日 12 時頃「非常に強い」勢力で徳島県南部に上陸した．上陸時の中心気圧は 950 hPa，最大風速は 45 m/s であった．「非常に強い勢力」を維持したままの日本への上陸は 1993 年台風 13 号以来 25 年ぶり[8]であった．その後，淡路島上空を通過し，4 日 14 時頃に兵庫県神戸市に再び上陸した．その後は「強い」勢力を保って近畿地方を縦断し日本海へ抜けた．この台風に伴い，西日本から東日本にかけては非常に強い風が吹き，全国約 930 の風の観測点のうち，100 地点で最大瞬間風速(3 秒平均値)は観測史上 1 位を更新し，53 地点で最大風速(10 分平均値)の観測史上 1 位を更新した．特に四国地方や近畿地方で猛烈な風を観測し，関西空港では最大風速 46.5 メートル、最大瞬間風速 58.1 メートルが観測された．大阪市内でも最大風速 27.4 m/s，最大瞬間風速 47.4 m/s が地上 24m の観測点において記録された．最大瞬間風速は 1934 年の室戸台風での 60m/s 以上，1961 年の第 2 室戸台風 50.6 m/s に次ぐ観測史上 3 位の記録[8]である．

被害については，消防庁応急対策室[9]によれば，死者 14 名，および負傷者 965 名の人的被害が発生した．一方で建物被害も記録的な発生となり，住家被害は，全壊 65 棟，半壊 833 棟，一部破壊 97,009 棟で，非住家被害は，公共建物 1,248 棟とその他 5,279 棟が報告された．建築物の被害例を図 4-14[10]に示す．奥田ら[10]によれば，建築物の強風被害の多くは外装材や付属物に発生した．大阪や京都の都市部ではランドマーク的建築物である梅田スカイビルや京都駅のアトリウム屋根などで外装材が風圧や飛翔物により損傷したほか，集合住宅や低層住宅でも屋根葺き材の被害が見られた．集合住宅の屋根ふき材は広い範囲に飛翔し周辺の自動車の損傷など連鎖的な被害をもたらした例も見られた．低層住宅の屋根葺き材被害の多くは瓦屋根で発生しており，特に築年数の古い土葺きの瓦屋根での発生が大半であった．またこのほかにも建築基準に関する法令で設計用風力係数が示されていない軒天井の被害，付属物の被害としてパネル状のベランダ手摺の支柱が風圧で外側に倒される被害の例を報告している．一方，建築研究所による現地調査では，外装材に被害が生じた結果，天井裏の風圧が増加し，室内に天井が脱落する被害など内装材への被害の発生につながった例が報告されている．

図 4-14　建物被害の例[10]

4.4.2　ハイブリッド解析の概要

気象モデルによる実気象現象の再現は，モデルやスキームの選択によって擾乱の構造や性質の再現性が変化したり，初期値や境界値の設定方法によって進路が変化したりするなど，通常の数値流体解析に比べ不確実性が大きい．したがって市街地の計算結果を考察する上では気象場の不確実性の考慮が必要となる．本研究ではこの台風の二つの気象モデル NHM と WRF/WRF-LES に基づく解析を行い比較し，今後気象場の不確実性を定量的に検討するためのデータを蓄積する．図 4-15 に WRF/WRF-LES の計算領域，図 4-16 に NHM の計算領域を示す．また図 4-17 に高周波成分再生成計算と BCM-LES の計算領域を示す(両気象モデルで共通である).

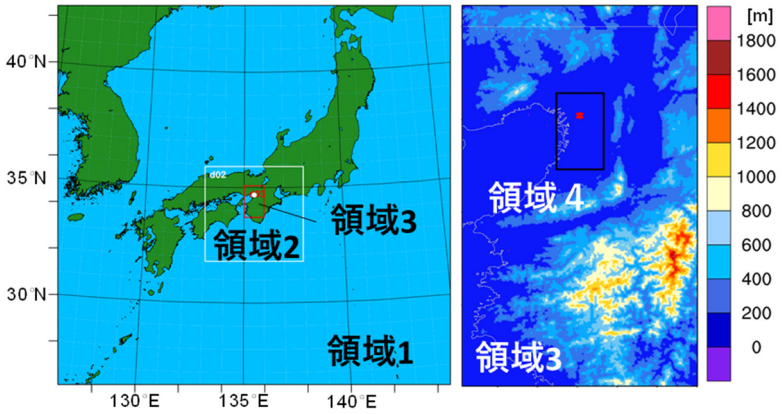


図 4-15　気象モデル WRF/WRF-LES 計算領域

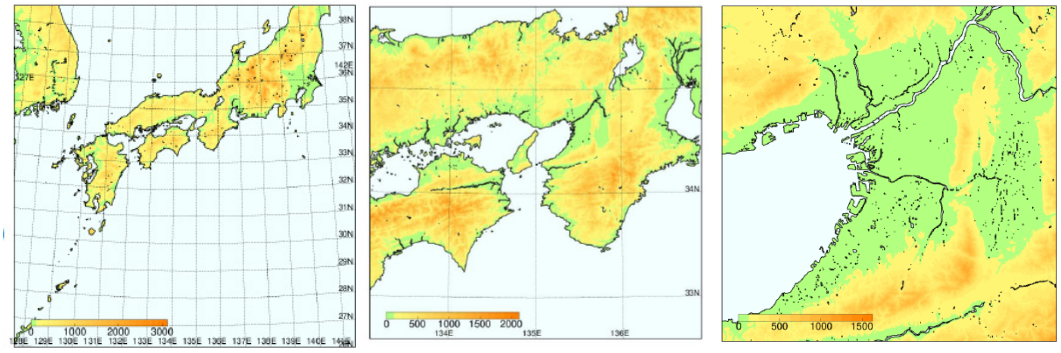


図 4-16　気象モデル NHM 計算領域　（左から順に領域 1，領域 2，領域 3 である．）

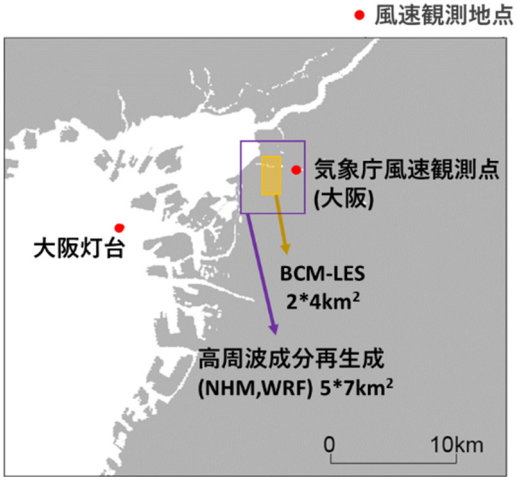


図 4-17　高周波変動成分再生成計算・BCM-LES 計算領域

4.5　WRF/WRF-LES に基づく台風 21 号の大阪市街地ハイブリッド解析

4.5.1　気象場の再現

気象モデル WRF および WRF-LES を用いた解析条件を表 4-4 および表 4-5 に示す．WRF/WRF-LES による解析では，気象モデルにより再現される台風の経路を実際のものに近づけるために GPV データに基づく nudging を行った．

表 4-4　2018 年台風 21 号 WRF/WRF-LES　各領域計算条件

領域	計算格子	水平解像度	計算時間	時間解像度	モデル
1	401*401*62	4.5 km	9/4 3h–9/5 3h	15 s	WRF
2	301*301*62	1.5 km	9/4 9h–9/4 16h	3 s	WRF
3	301*501*62	300 m	9/4 11h–9/4 16h	1 s	WRF-LES
4	301*501*81	60 m	9/4 12h–9/4 16h	0.2 s	WRF-LES

表 4-5　2018 年台風 21 号 WRF/WRF-LES 解析　主な数値スキームおよびデータ

境界層スキーム	MYNN レベル 3 モデル (領域 1・2)
乱流過程	1.5 次 TKE クロージャースキーム (領域 3・4)
気象場初期条件	GPV/NHM
海面温度	ECMWF ERA5
土壌水分量	ECMWF ERA5
地形データ	USG 30s　(領域 1・2) GSI 100 m (領域 3・4)

図 4-18 は台風の経路を示す．計算時間範囲全体にわたり台風の過程は概ね再現された．大阪市の最接近時刻(14:00 頃)付近での経路の空間的なずれは，西に 30km あった．通過時間に対するずれはほとんど発生しなかった．図 4-19 は最接近時刻付近での各領域の水平流速分布(地上 200m)である．WRF-LES の領域において細かい境界層内の乱れが生成され，大阪市上空では，流れ方向に伸びた組織的な構造が見られる．また上流に位置する紀伊山脈の地形効果より乱れの生成が促進されている様子が明瞭に見られる．

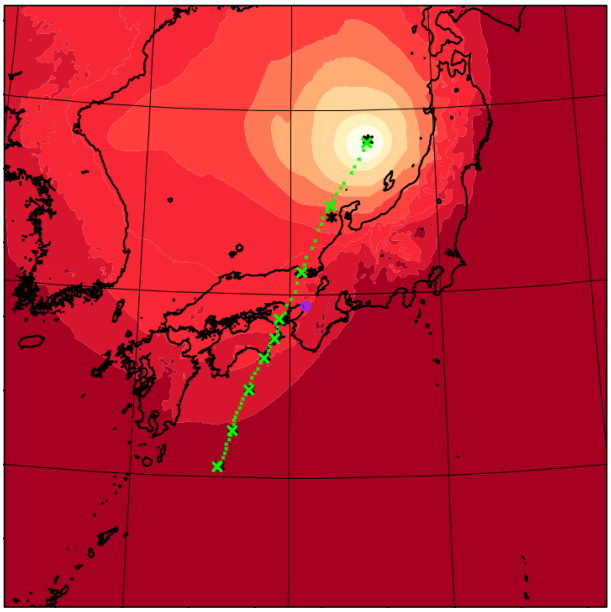
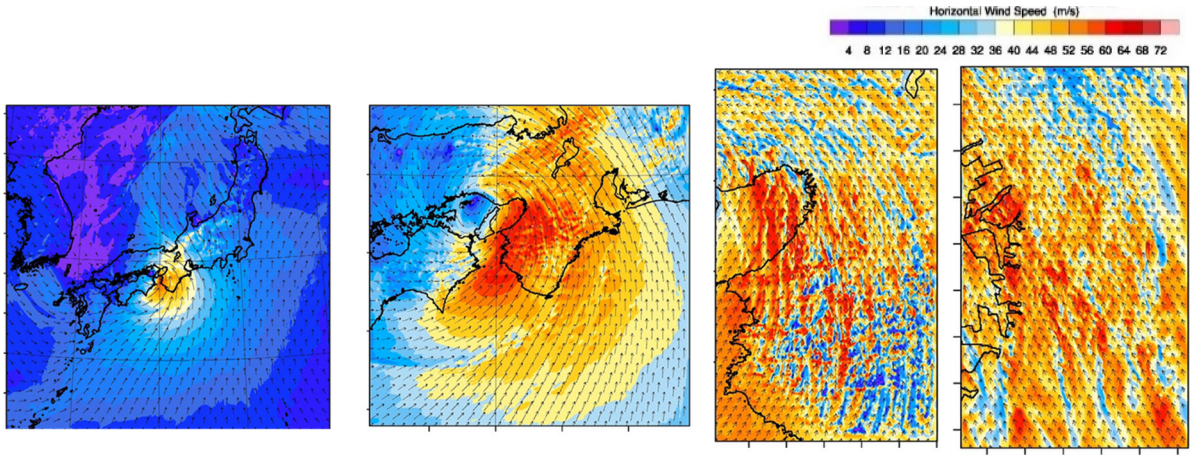


図 4-18　再現された台風経路(黒い＊は実際の台風の位置を表す)



Domain 1 (Δ=4500m)　Domain 2 (Δ=1500m)　Domain 3 (Δ=300m)　Domain 4 (Δ=60m

図 4-19　最接近時刻付近（14:00）の水平流速場

図 4-20 は領域 4 での大阪管区気象台の位置(地上 24m)における解析値の風速推移を示す．領域 4 の計算時間範囲を通して実現象とよく対応したが，観測値に比べ 5 –10 m/s 程度大きい傾向が見られた．瞬間値も実際の値よりも大きく，最大で 60m/s 程度であった．図 4-21 に各時刻での水平面での流れ場の構造を示す．ピーク付近までは比較的はっきり強い乱流が維持されているが，ピーク前後において海からの流入に変化したことによる乱流生成の抑制がこのケースでも確認された．本解析による風向の変化は，表 4-6 に示した気象庁の風速観測（大阪）をよく再現している．

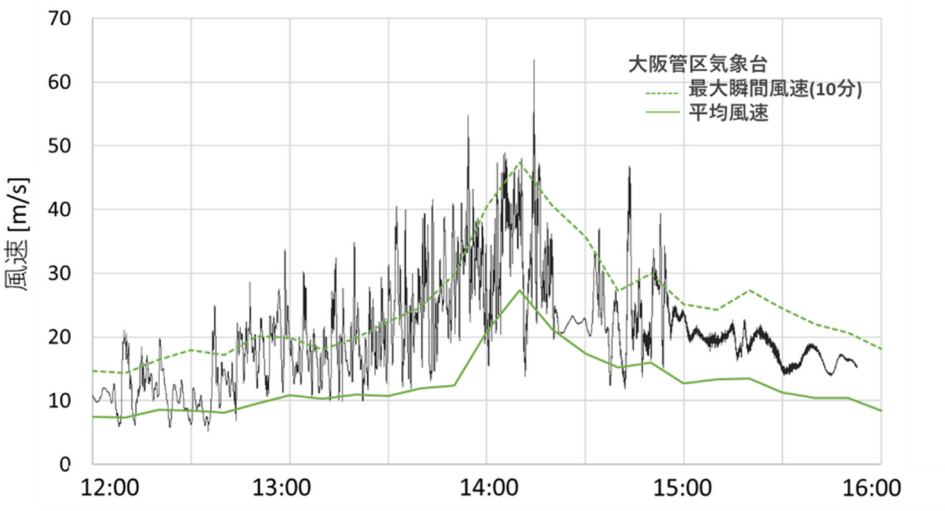


図 4-20　領域 4 における大阪管区気象台の位置での風速値（地上 24m）

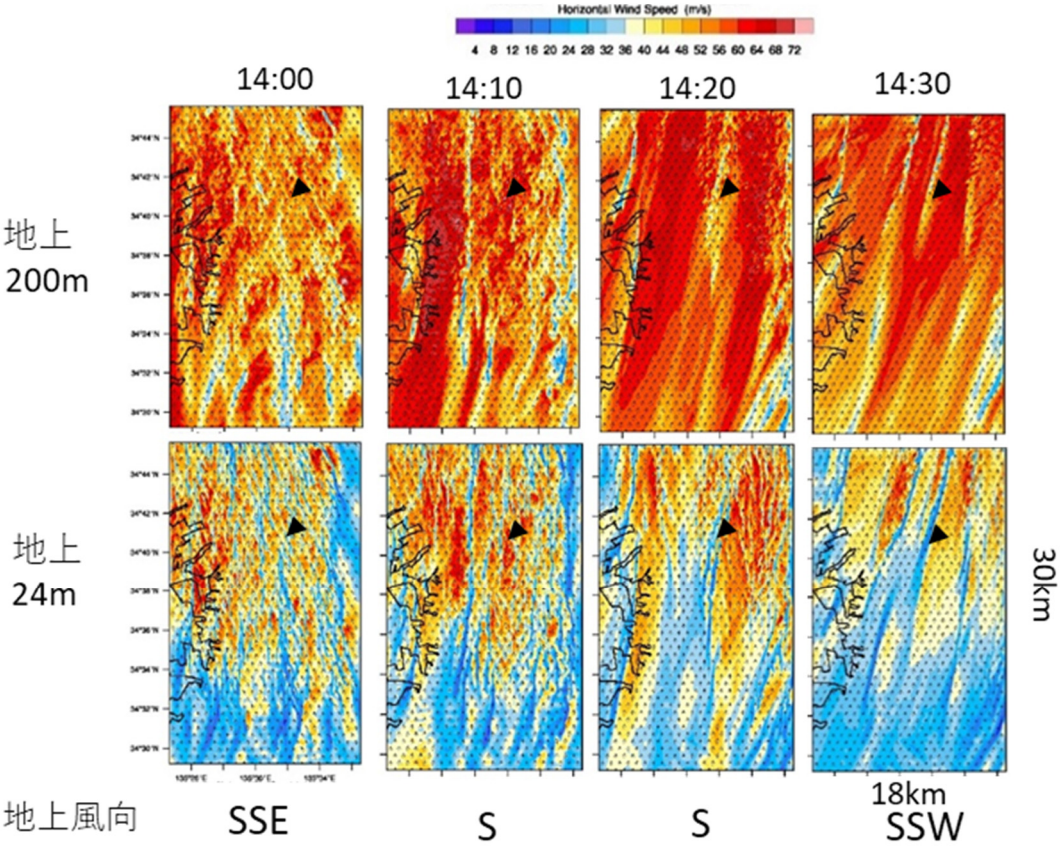


図 4-21　ピーク時刻以降の乱流構造の変化
(矢印は図 4-20 の時刻歴の位置を示す)

表 4-6　気象庁風速観測（大阪）

時間	平均風速(10 分平均値)		最大瞬間風速(3 秒平均値)		ガストファクター
	風速	風向	風速	風向	
13:40	11.9	ESE	24.7	ESE	2.08
13:50	12.4	SE	29.8	SE	2.40
14:00	20.9	S	40.5	S	1.94
14:10	27.3	SSW	47.4	SSW	1.74
14:20	21.2	SSW	40.6	S	1.92
14:30	17.4	SSW	35.7	SSW	2.05

4.5.2　気象場の高周波成分の再生成

WRF/WRF-LES により再現された気象場に対する高周波成分再生成計算の条件を表 4-7 に示す．各解析で共通の計算スキームは，表 2-1 に示した．

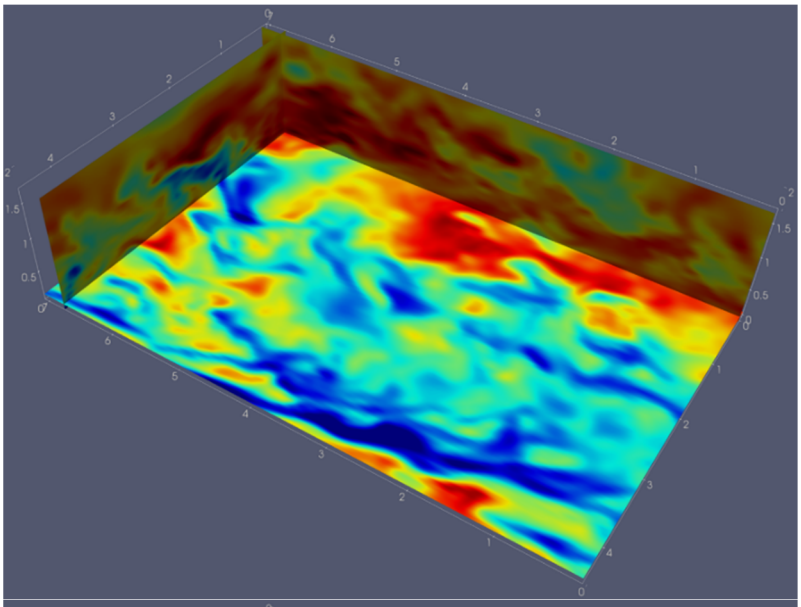
表 4-7　2018 年台風 21 号　WRF/WRF-LES に基づく高周波成分再生成計算

計算領域	7km(南北)*4.25km(東西)*約 1.69km(鉛直) (鉛直方向は地表 1.74km から 60m の範囲)
格子解像度	30 m
計算時間範囲	14:00:00 –14:15:00 (JST)
時間刻み	0.02s
気象場フィルター幅	8.2 $\overline{\Delta}$
フィードバックフォーシング項定数	$\alpha = -1.6 \times 10^{-3}, \beta = -3.0 \times 10^{-2}$

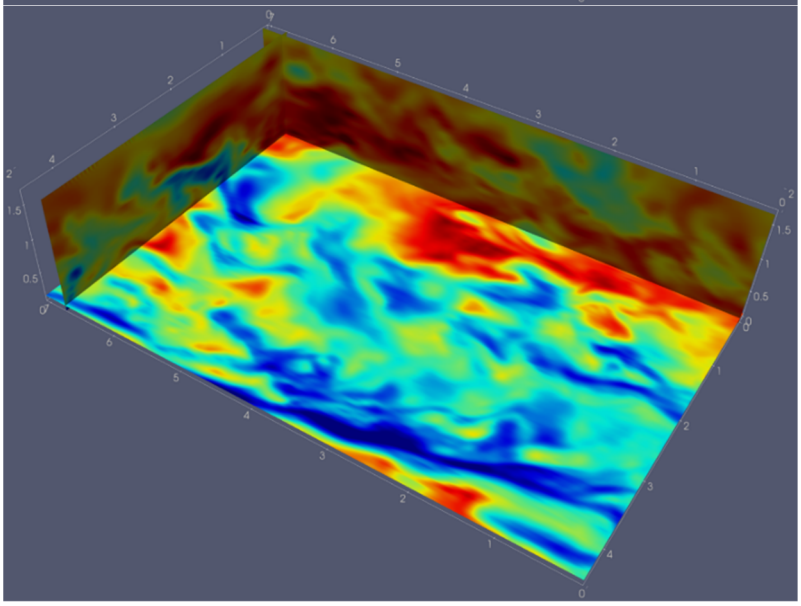
変動の生成の前後を比較した水平風速と鉛直流速の瞬間図をそれぞれ図 4-22 に示す．水平断面の高さは 150m である．水平断面の流れの構造を比較すると全体的の構造は大きく変わっていないものの，個々の構造の中にピークを再現する局所的な変動やより細かな風速の変動が再現された．鉛直流速ではより明瞭な変化が確認され個々の構造が収斂しより局所的な構造が再生成された．

図 4-23 に示す各高さにおける時刻歴からも元の非定常気象場へ高周波変動が付加されていることが確認された．図 4-24 に示すエネルギースペクトルは，Kolmogorov の-5/3 乗則に従い，慣性小領域が拡大したことが確認された．特にほとんど慣性小領域が再現されていなかった鉛直流速については顕著なスペクトルの回復が確認された．

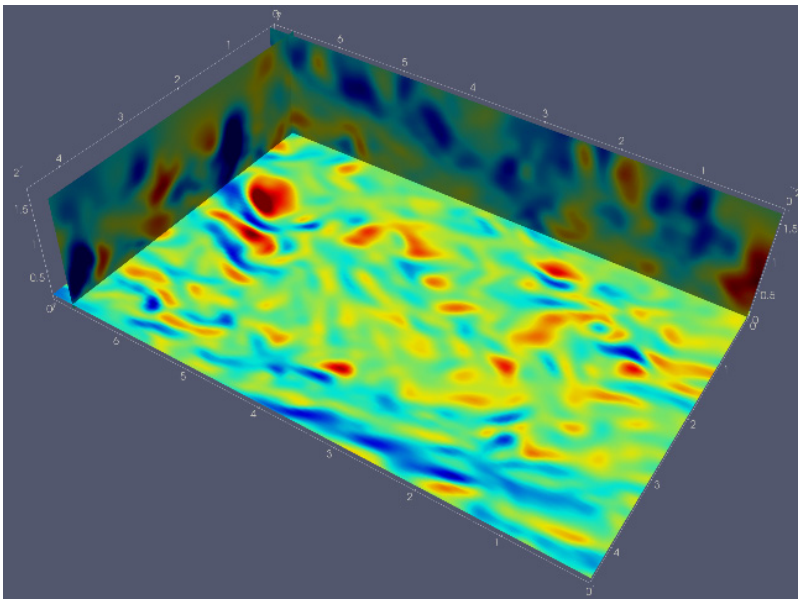
図 4-25 には再生成後に得られた高さ 100m, 400m,1000m での水平断面，および主流方向・スパン方向の鉛直断面を示す．水平断面からは，高さごとに大きく異なる構造が見られるほか，鉛直断面からは周期的な上昇流と下降流の循環流の構造，計算領域の上端(1.74km)に達する構造などの存在が確認された．



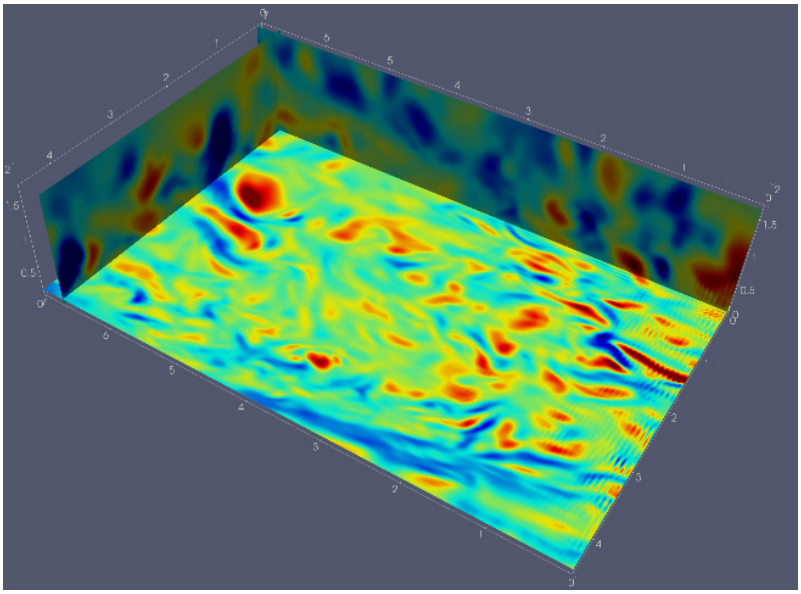
（水平成分，再生成前）



（水平成分，再生成後）



（鉛直成分，再生成前）



（鉛直成分，再生成後）

図 4-22　2018 年台風 21 号での風速場（水平成分）の高周波成分再生成

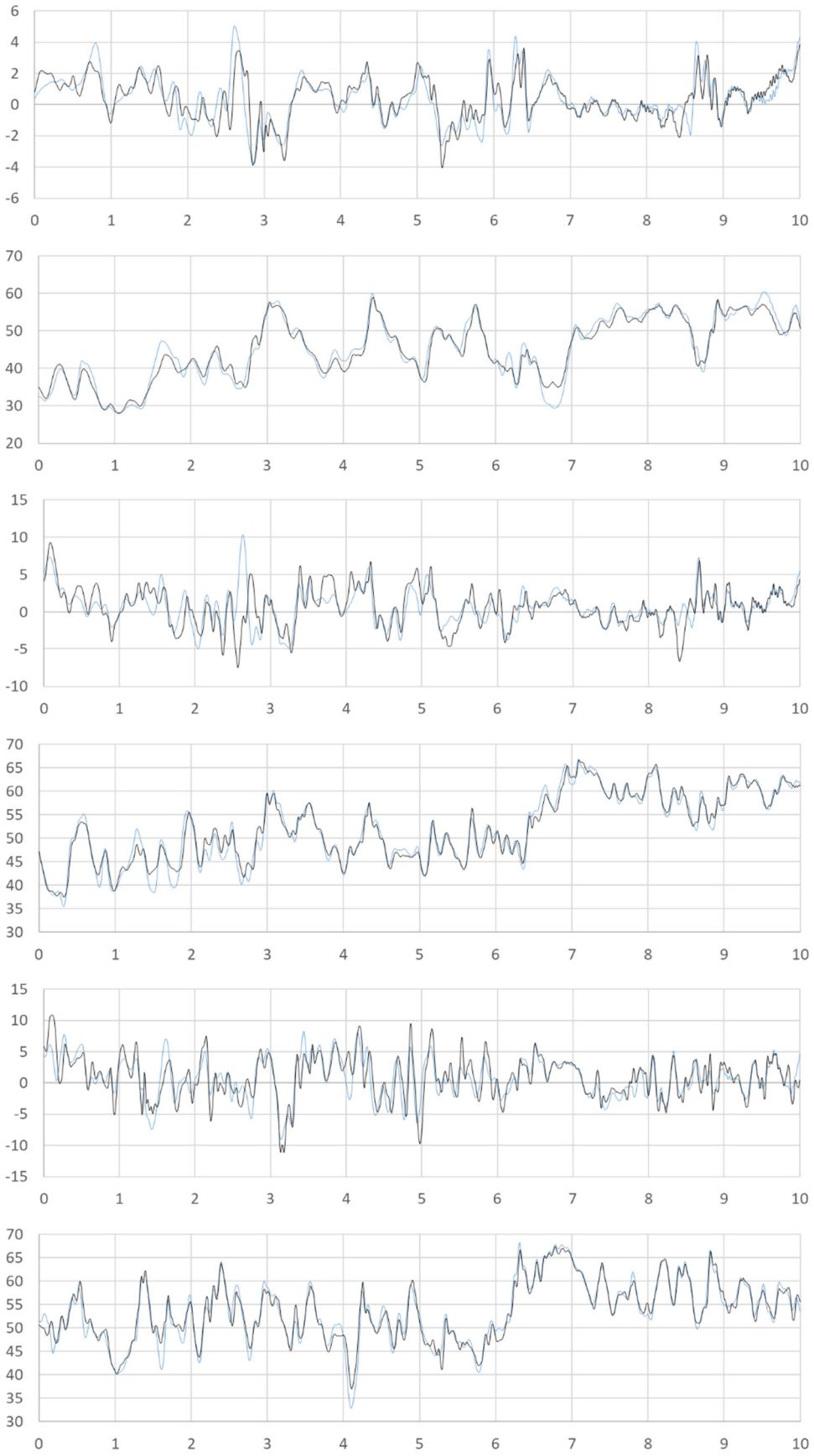


図 4-23　風速時刻歴　各高さ上段：鉛直流速，下段：水平風速
（縦軸：風速[m/s]，横軸：時間[min]；青：再生成前，黒:再生成後）

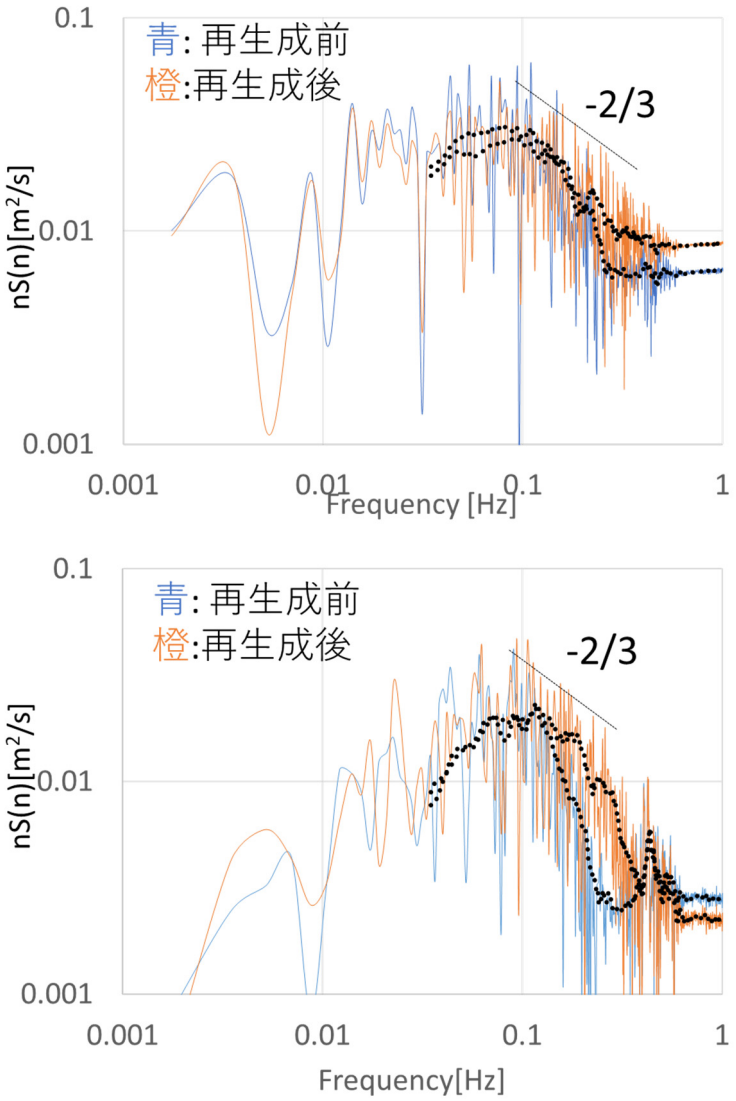
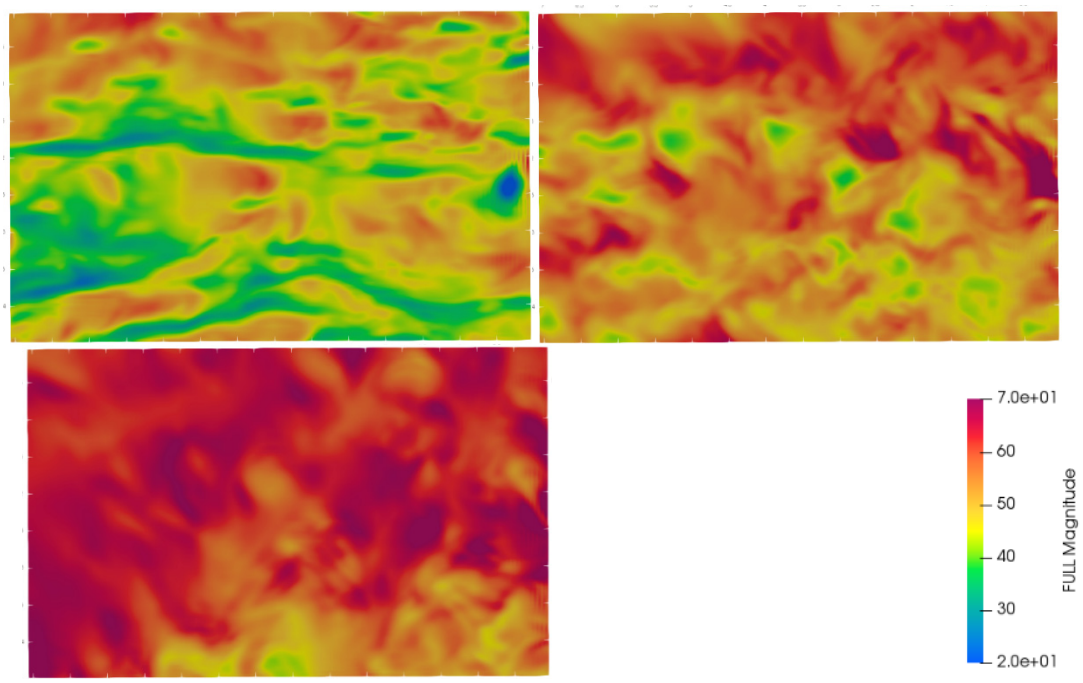
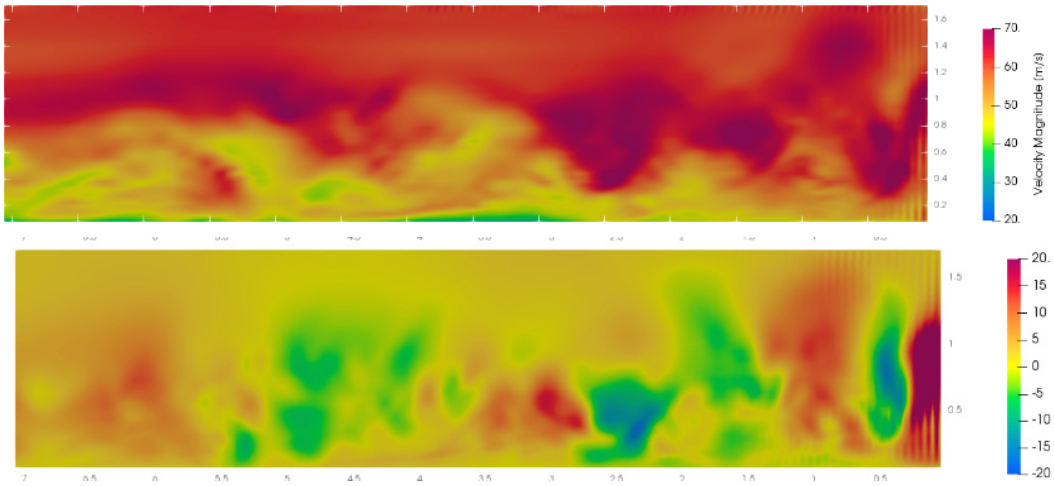


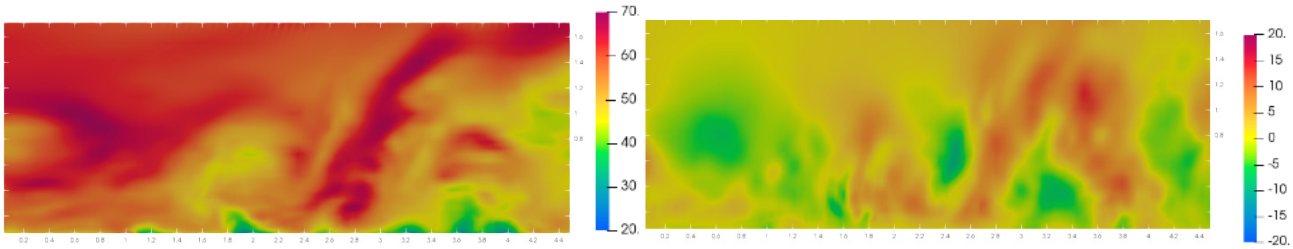
図 4-24 高さ 333m における風速の時間スペクトル
上：水平成分，下：鉛直成分.



水平断面での構造（左上：100m, 右上：400m, 左下:1000m）(水平風速[m/s])



主流方向鉛直断面（上：水平風速，下：鉛直流速）



スパン方向鉛直断面（上：水平風速，下：鉛直流速[m/s]）

図 4-25　高周波変動成分を付加した後の WRF/WRF-LES の気象場

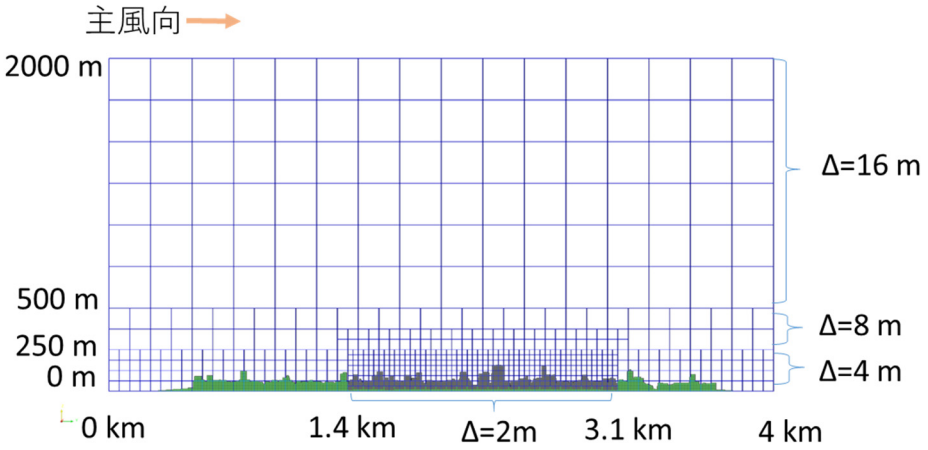
4.5.3　市街地での風速場・風圧場の解析

(a)　解析条件

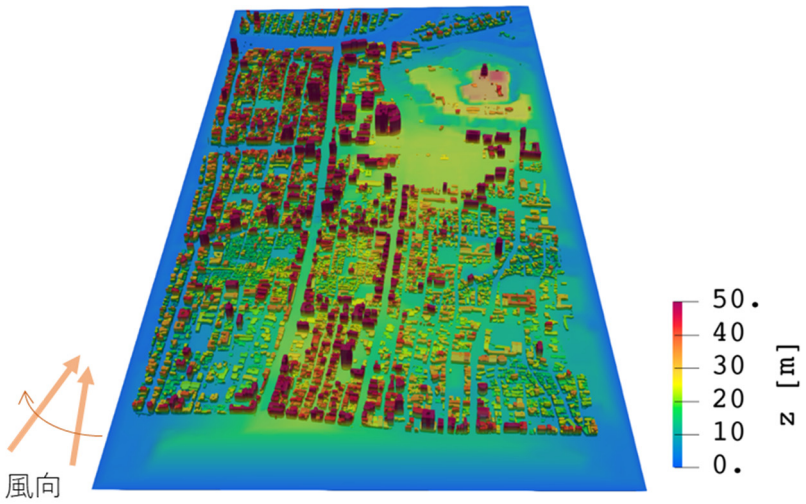
前節において高周波変動成分を付加した 2018 年台風 21 号の気象場データを大阪市中心部の地形と建物形状を再現した BCM-LES 領域に導入し，地表近傍の解析を実施した．図 4-26 に計算格子と建物と地形モデルを示す．解析領域の寸法は 4km (主流方向)×2km (主流方向)×2km (鉛直方向)である．BCM-LES はマルチグリッドシステムを採用しており，図では内部計算格子(Cell)を 16^3 個内包している外部計算格子(Cube)のみを示している．海抜 250m 以下全体に 4m 格子を配し，主風向(南)の流入境界から 1.4km から 3.1km の範囲には最小空間解像度である 2m の格子を配置した．

地表の境界条件については，建物形状は衛星測量データに基づく位置精度 2 m (水平方向) の高精度データ，地形は国土地理院の標高データ（空間解像度 5 m）を用いて，図 4-33 のように再現された．領域手前が南であり，右奥(北西)の大阪城にかけて細長い高台が続き，大阪城周辺が標高の最高地点である．領域中央付近において高さ 30m 程度の高層建物がストリートに沿って林立している．高さ 60m を超える建築物も，20 棟程度領域内に散在している(最も高い建物の高さは 132m)．一方，中低層住宅の集中する地区や公園など大小さまざまな建物の少ない場所も散在している．.

気象擾乱は南および東西の側方境界から与え，上方と後方は自由境界とした．主な条件を表 4-8 にまとめる．数値スキームなどの各解析で共通の項目については表 2-2 に示した．



(a)　格子配置



(b)　地形と建物の再現

図 4-26　計算領域

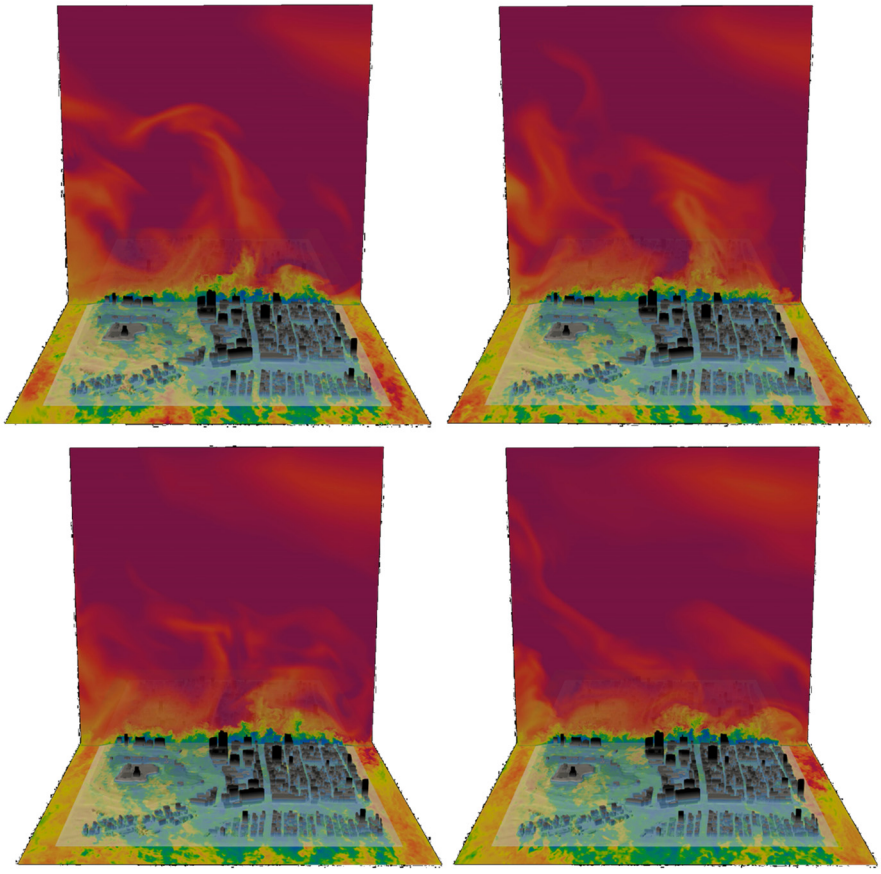
表 4-8　2012 年台風 21 号　BCM-LES 計算条件

計算領域	4km*2km*2km
最小格子解像度	2 m
格子数	約 1 億 2400 万格子
計算時間	5 min (WRF/WRF-LES に基づくケース)
時間刻み	0.005 s

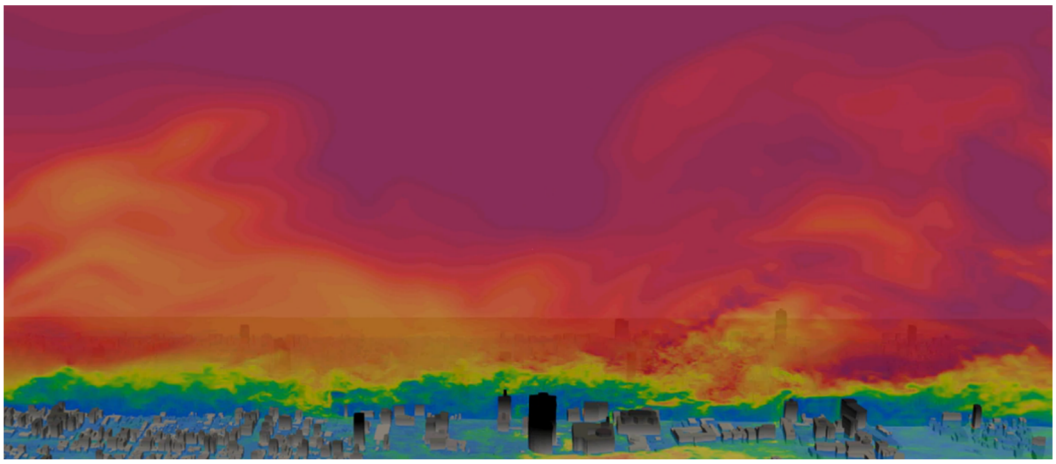
(b)　気象場の導入の影響

図 3-27 に鉛直断面における水平風速のスナップショットを示す．気象擾乱の構造は大きいもので高さ 1km に達し，流れの軸方向を持つ左右への回転を伴った大きな揺動が見られた．風速は激しい気象擾乱による大気の運動に伴って，上空から建物や地表近くまで風速が大きく変動する様子が見られた．図 4-28 は地図に示した大阪合同庁舎 55m 前方の大通り内から上空まで地上 500m, 100m, 50m, 20m における 4 つの高さでの水平風速の時刻歴である．隣り合う高さの変動を比較すると，非常にゆったりとした変動については上空から地表まで同様の傾向また変動が地表付近では遅れて観測される傾向が確かめられ，大きな気象擾乱の影響は，ストリート内まで到達することを示していることが示唆される．図 4-29，図 4-30 はそれぞれ異なる高さでの水平風速・鉛直風速の瞬間場を示したものである，地表では公園などの建物のない空間での増速

と，黒色で表示される高層建物の周辺での吹き下ろしによる顕著な強風の発生が確認される．また 50m，100m 付近では気象場の構造と散在する高層建物間での流れの構造が明瞭に相互作用する様子が確認された．



（スパン断面）



(主流断面)

図 4-27　スパン方向と主流方向の鉛直断面における水平風速の可視化

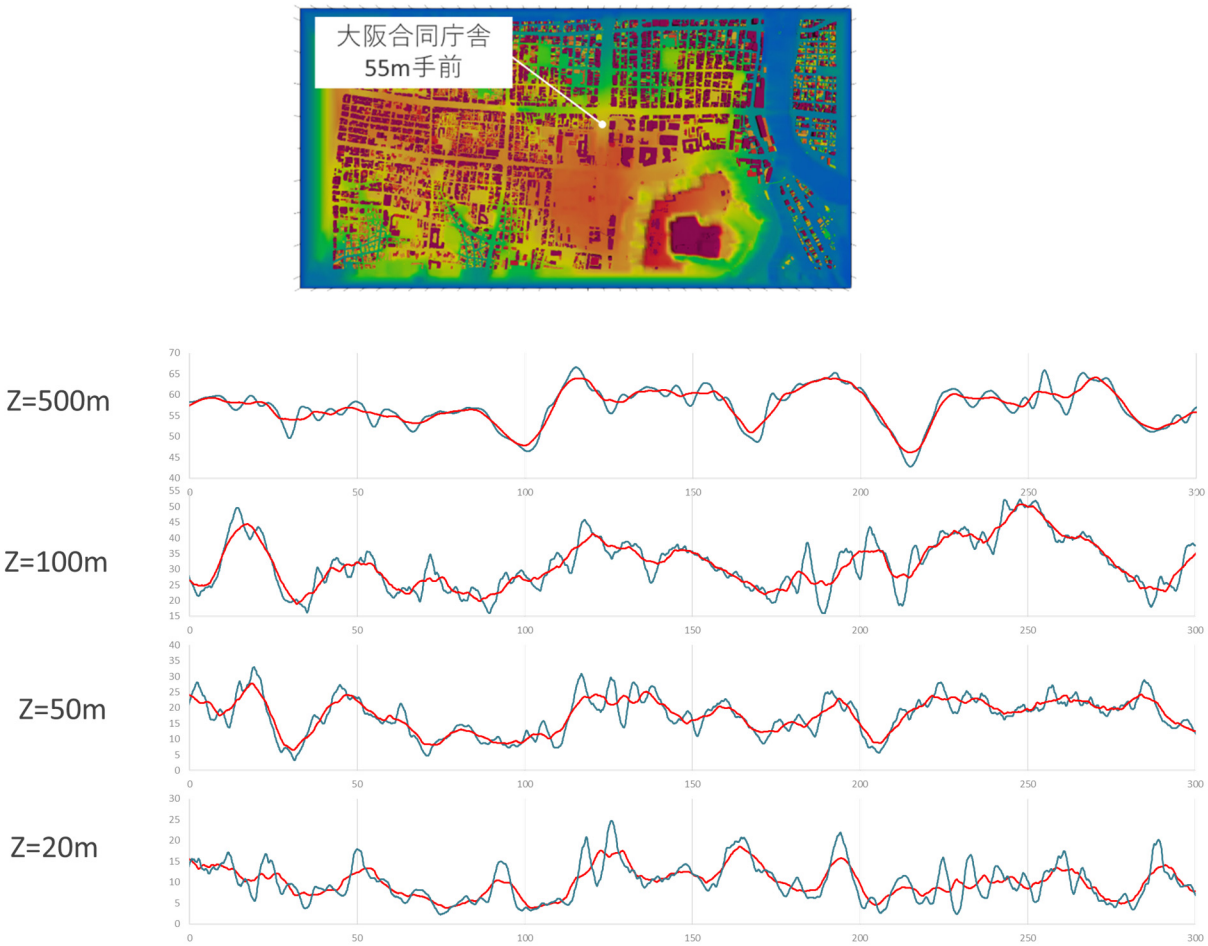


図 4-28　各高さでの時系列 (青線：3 秒平均，赤：20 秒平均)

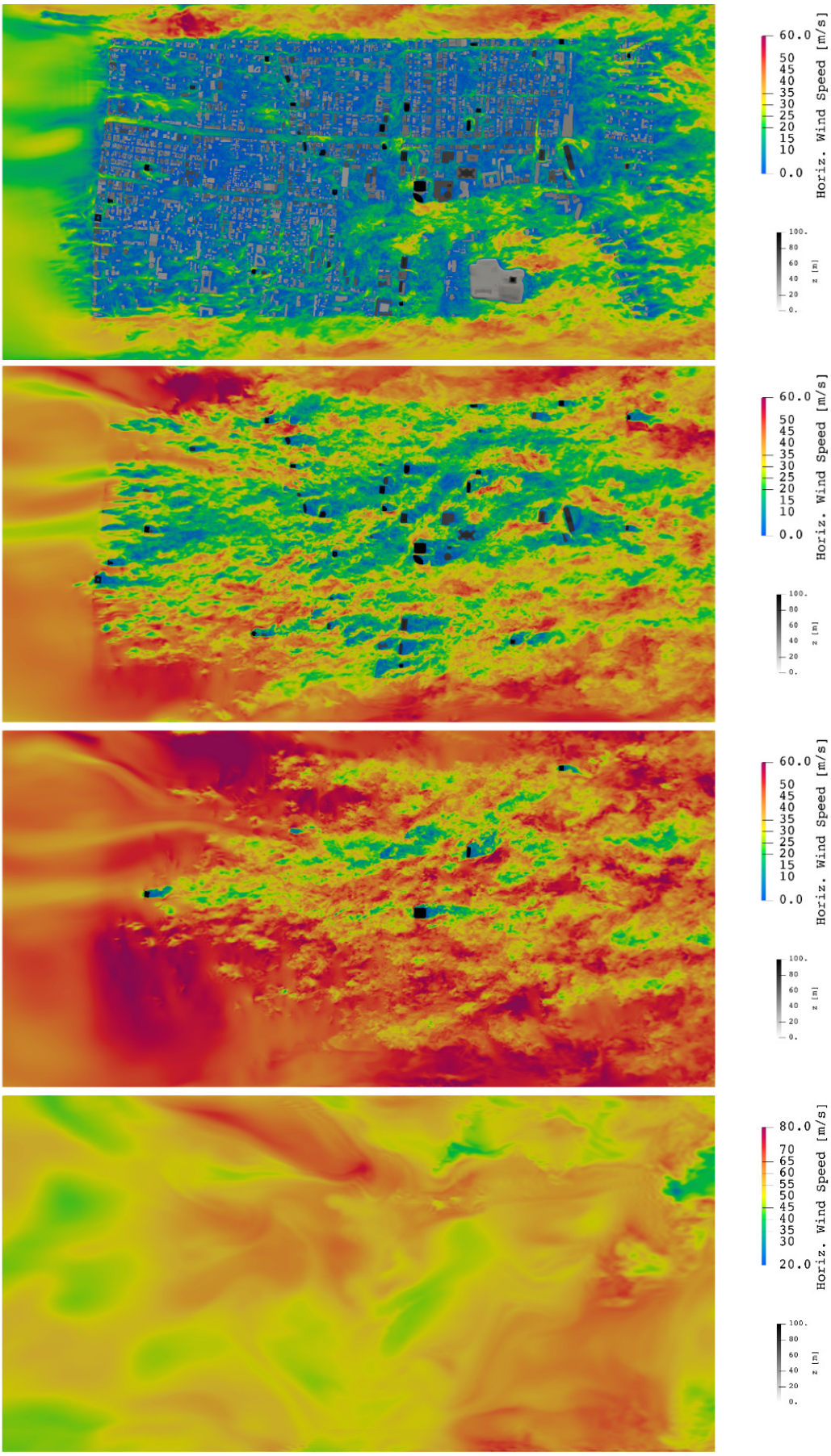


図 4-29　各高さでの水平流速の瞬間場 (上から順に地上約 10m, 50m, 100m, 300m)

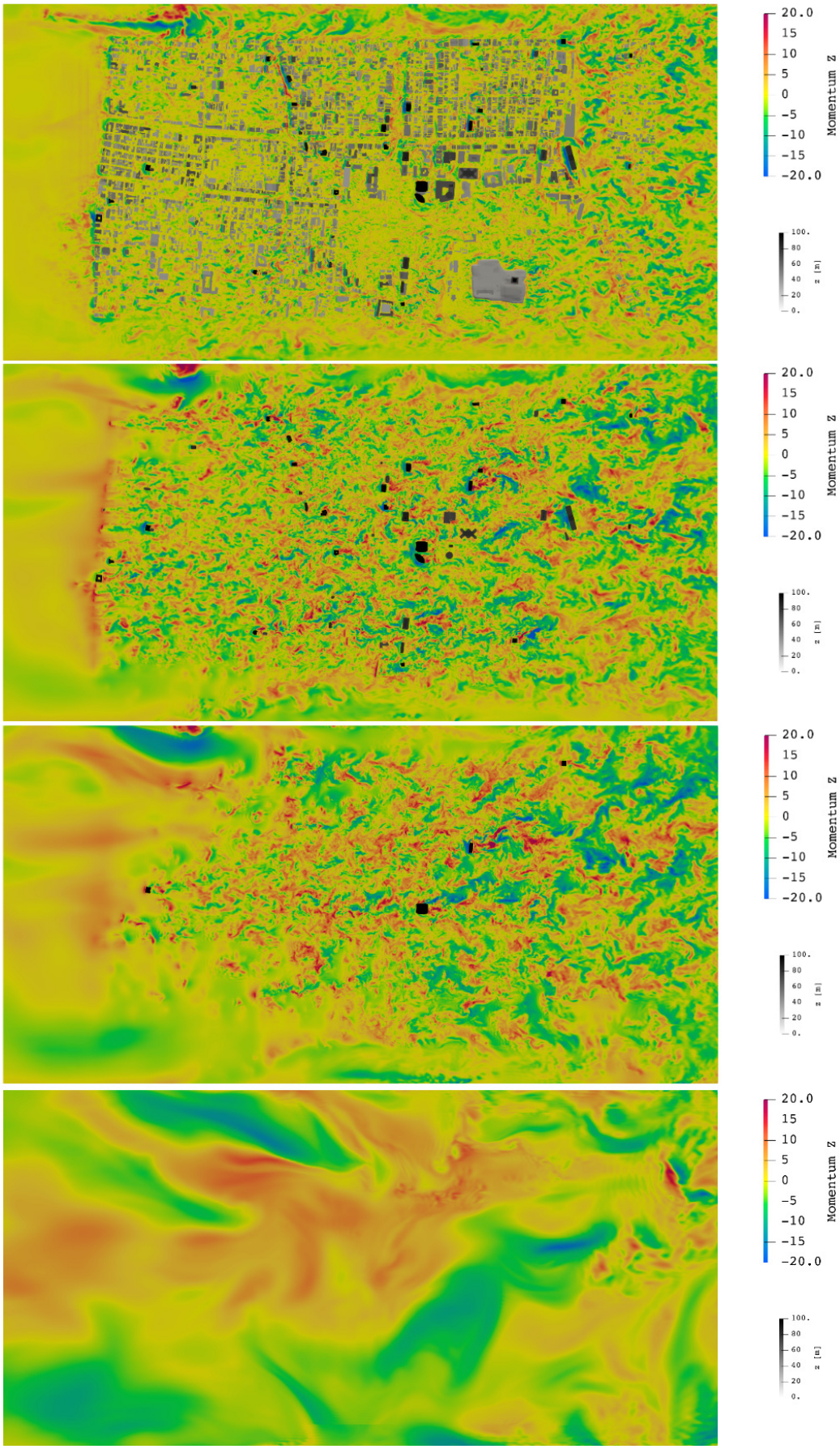


図 4-30　各高さでの鉛直流速の瞬間場(上から順に地上約 10m, 50m, 100m, 300m)

(c) 風速プロファイルに基づく耐風基準との比較

領域内の周辺の粗度の状況が異なる複数点における 5 分間の平均プロファイルおよび，その瞬間最大風速(3 秒平均値)のプロファイルを図 4-31 に示し，建築基準法に基づく平成 12 年建築省告示第 1454 号に示される粗度区分 III のプロファイル，日本建築学会の荷重指針[11]に示されている粗度区分 IV のプロファイルと比較した．気象庁観測点（大阪）での風速観測結果も併せて示した．なお告知では，瞬間風速のプロファイルは示されていないが，奥田ら[10]の方法により，式(4-1)の換算風速を求めた．

$$V_{III}{}' = V_0 \cdot E_{r(III)} \cdot \sqrt{G_{f(III)}} \tag{4-1}$$

ここでV_0は平成 12 年建設省告示第 1454 号に示す基本風速，$E_{r(III)}$と$G_{f(III)}$は同告示に示す平均風速の高さ方向の分布を表す係数とガスト影響係数である．

周辺の局所的な粗度状況によりプロファイルに違いが見られ，難波宮公園（Naniwa_N, Naniwa_S）および大阪城（Osaka_Castle）などの開けた場所では指針や告知よりも小さなべき指数のプロファイルとなった．また，低層住宅地内の学校の屋上で測定された気象庁の風速観測(大阪)と同程度の平均・最大瞬間風速が得られた． 一方，中心部の谷町筋（Tani_N,T Tani_C, Tani_S）沿いなどではより大きな速度欠損が確認された．

なお中大江公園（Nakaoe_Park）および大通り(Odori_W)内の点では，上空において，流れ方向に伸長した気象場の高風速が，比較的長時間にわたり連続的に作用し，その結果，おおむね地上 100 m より上空では告示および指針の風速を超過した結果が得られた．

図4-32 に海抜27m (地上約 10m) における最大瞬間風速（時間移動平均なし，評価時間 5 分間）の分布を示す．インターネット上の短文投稿サイトや動画投稿サイトなどに公開された情報をもとに，木や信号機の折損，城壁の剥落など，地表での被害が見られた場所を特定し，その位置を示している．被害が見られた場所のほとんどで局所的な 30m/s から 40m/s 程度の強風が発生したことが示された．また非定常解析であるため風向は時々刻々と変化が見られるものの最大瞬間の分布からは，中大江公園においての大木の根返りが発生した際と同じ風向(南東)から強い風が吹いたことが再現されるなど，市街地の形状再現による，局所的な強風の流れの構造の再現が可能である事が確認された．

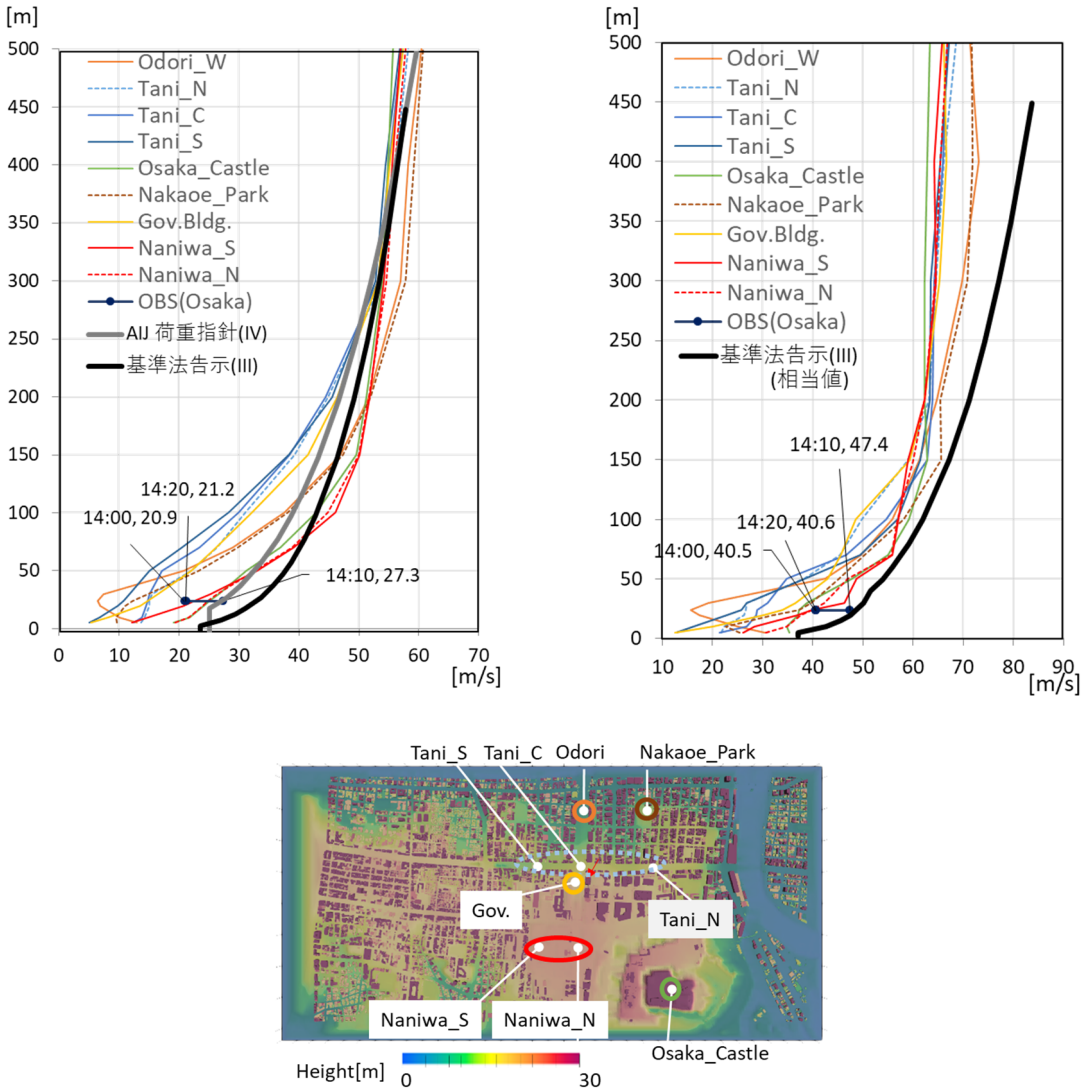


図 4-31　解析領域内での平均(5 分間)と最大瞬間風速の鉛直プロファイル

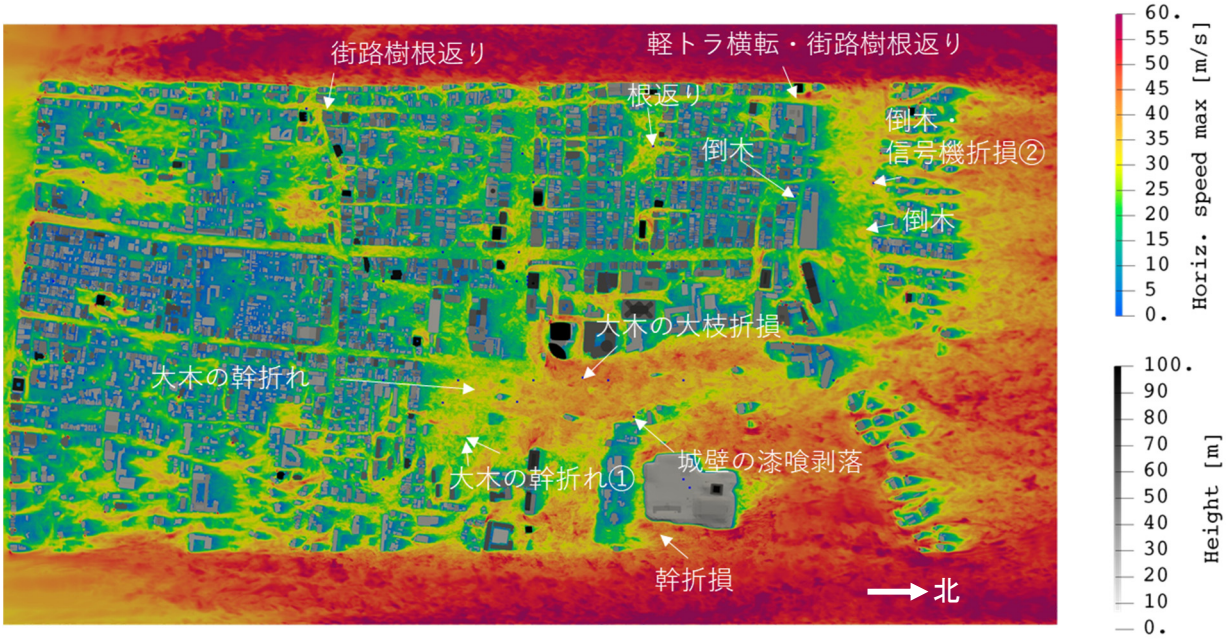


図 4-32　大阪市街地での海抜 27m(地上約 10m)における最大瞬間風速の分布
（5 分間，時間平均操作なし）

(d)　建物被害との比較

この節では，実際に解析領域において発生した建築物被害の原因について分析する．図 4-33 に示す，領域中心付近の大阪府合同庁舎 4 号館(地図中で Gov 右側の矢印で示された建物)において，風圧による窓の被害が高層階(12 階から 15 階の南面)で発生した．具体的の被害状況としては，図 4-34 が示すように 13 階において窓ガラスが破損し，12 階から 15 階にかけて窓枠が外れた．なお，この建物では 1 階の東面においても窓ガラスが破損する被害が発生しているが，衛星画像に基づいた建物形状データで，前方の高速道路や隣接建物との渡り廊下などが正しく表現されず，地表での流れが大きく異なっているため，今回は低層階の被害の解析は行わない．

図 4-35 に当該建物南面中央での 5 分間の時刻歴を高さごとに示す．計算のリスタート実行時に圧力場の振動が発生したため圧力場の一部データは棄却した．今回の解析で得られた南面上層階での正のピーク風圧は約 970Pa であった．このピーク風圧は，図 4-36 に示す建物前方の最大瞬間風速の分布の可視化から，上流側の建物の剥離せん断層の強風の作用により発生した可能性が高いものと考えられる．しかしながら図 4-37 に示した平成 12 年建設省告示第 1458 号により定められる壁面の帳壁のピーク外圧（正圧）の設計値約 2400Pa と比較すると大きく下回る結果であった．ただし気象場の構造や再現性に基づく不確実性が存在し，必ずしもピークの発

生を捉えられていない可能性があると考えられることから，NHM による気象解析データを用いた解析でも同様に当該建物の分析を行い，比較を行うこととする．

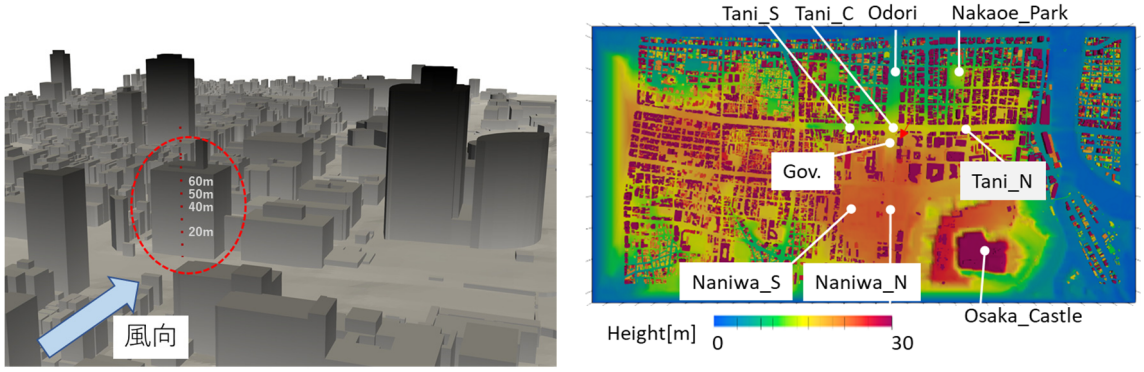


図 4-33　計算モデルの大阪合同庁舎 4 号館の位置と建物再現（Google Earth との比較）

13 階南面　　12-15 階南面　　1 階東面

図 4-34　大阪合同庁舎 4 号館での被害状況 [10]

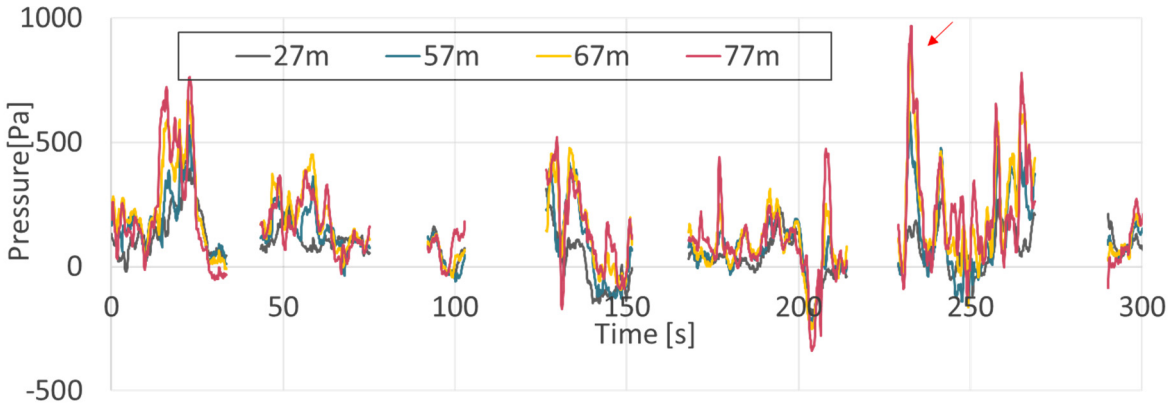


図 4-35　大阪合同庁舎南面中央での圧力時刻歴

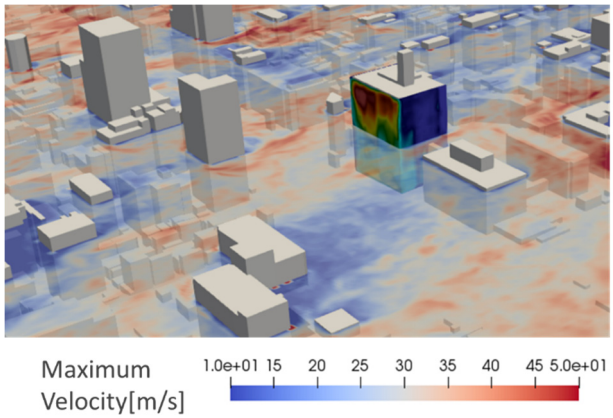
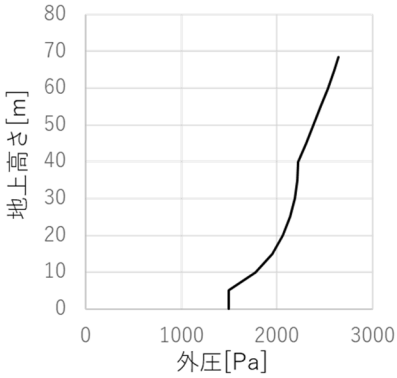
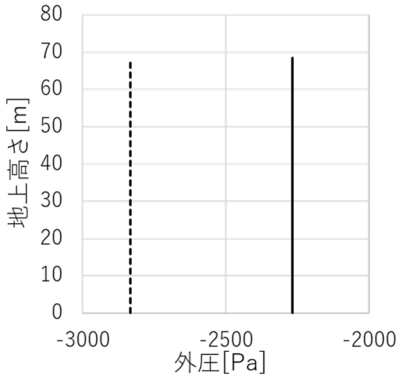


図 4-36 最大瞬間風速分布と圧力場の最大値の可視化



(b) 正圧



(b) 負圧（実線：一般部，波線：隅角部）

図 4-37　平成 12 年建設省告示第 1458 号に基づく大阪合同庁舎南面の各高さでの設計値

当該建物の周辺建物についても圧力ピーク値の発生状況を確認し，いくつかの高層建物については告示の設計値との比較を行った．図 4-38 は，空間の各点が経験した計算時間内の正圧の最大値および，負圧の最小値である．ただし一秒ごとの圧力の瞬時値による．広い範囲で絶対値が 1000Pa を超える正圧と負圧が見られ，また高層建築物では-1500Pa を超える負圧の発生が確認された．図 4-39 に示した合同庁舎の周囲で特に強い外圧の発生した高層建物 2 棟について，告示の定める風圧との比較を示す．図 4-40 は告示の定める外圧（正圧・負圧）の風圧力の値における等値面であり，告示の値の超過の有無を示している．なお，告示の定める風圧力は負圧については一般部と隅角部と分けて示されており高さ方向に一定である．これらを超過する範囲をそれぞれの値の等値面により水色と青で表示した．正圧については高さ方向に単調増加する分布をもつため今回は正圧の設計値が最も大きくなる各建物高さ（建物①（合同庁舎）68.5m，建物②118m，建物③132m）における値と，最も小さい地表面での値を超過する範囲をそれぞれ赤と桃色で表示した．正圧については，建物①から③において赤の領域は存在せず，

桃色の正圧領域が建物②と③において，高さ 60m 以上で発生したが，二次元圧力分布図からは，各高さにおいて，告示の正圧の超過は発生していなかった．負圧については建物②でのみ，わずかに曲面となっている風上右手側の側面隅角部の中央部から上部にかけて設計値を超過した．

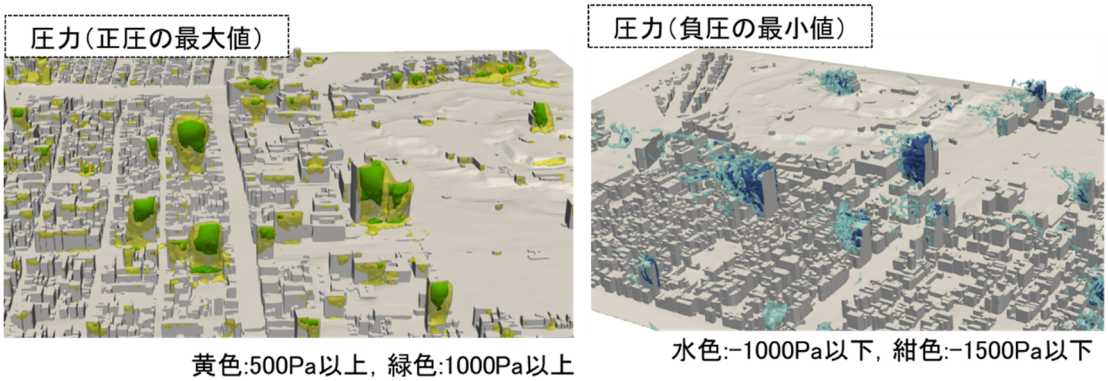


図 4-38　圧力（瞬間値）の最大値，最小値の空間分布

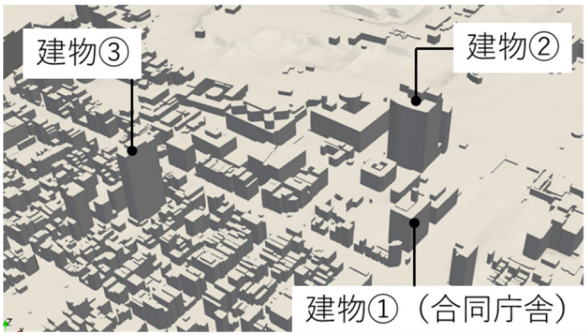
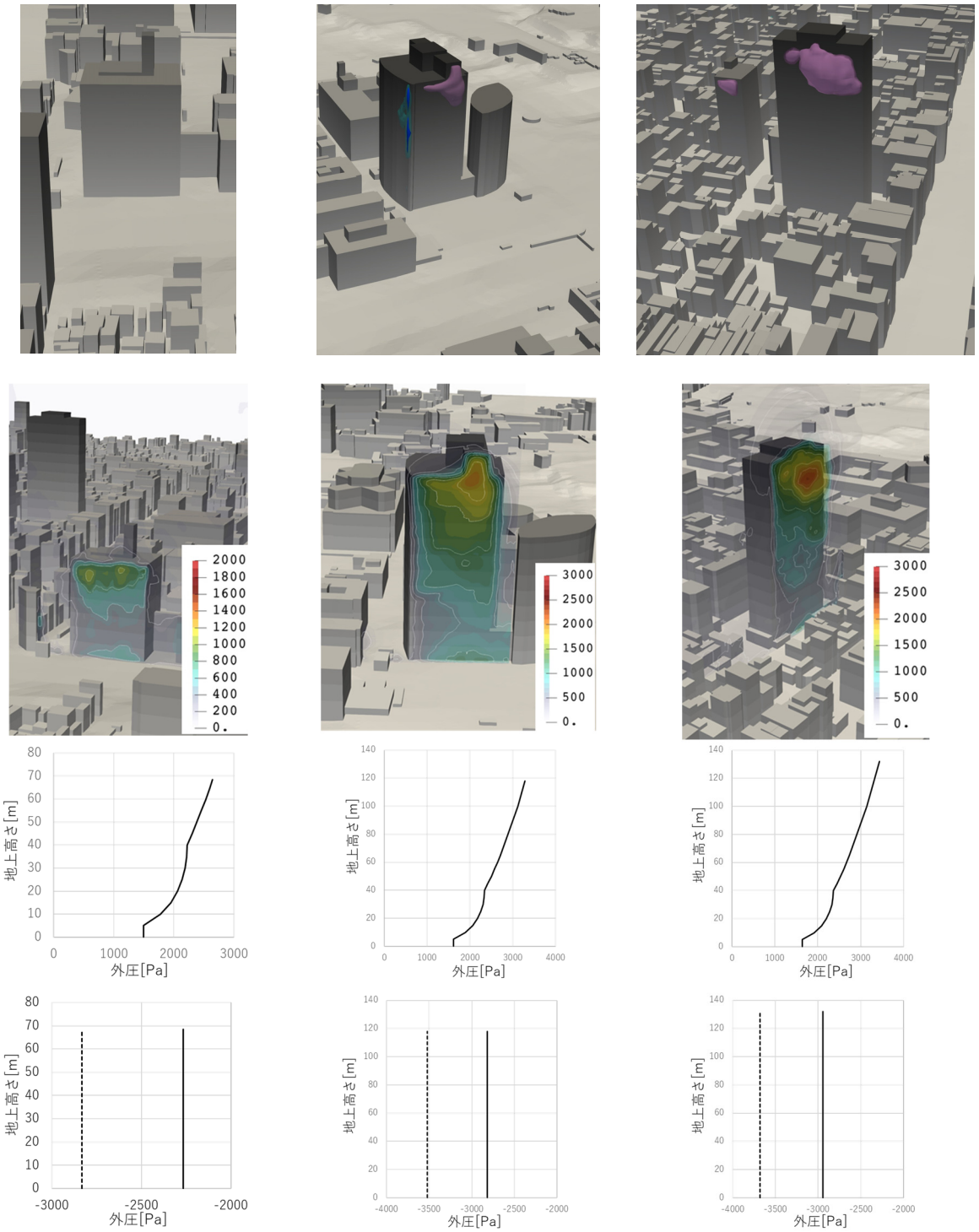


図 4-39　告示の定めるピーク風圧値との比較を行った高層建物



(a) 建物①　　(b) 建物②　　(c) 建物③

図 4-40　WRF/WRF-LES に基づく気象場での建物①から③についての基準法告示との比較．ただしいずれも時間平均操作なし，棄却データを含む 5 分間の時系列による．上段：告示に示す値を超過する圧力の発生領域の 3 次元可視化（桃色：地上 0m での告示正圧値の最小値，赤：建物高さでの告示正圧の最大値，水色：一般部負圧値，青：隅角部負圧値）．中段：正面圧の 2 次元可視化（コンター線：250Pa 毎），下段：告示の定める正圧と負圧のプロファイル (上図実線：正圧，下図実線：負圧一般部，下図破線：負圧隅角部),

4.6　NHM に基づく台風 21 号の大阪市街地ハイブリッド解析

4.6.1　気象場の再現

NHM モデルによる台風 21 号の解析結果は気象研究所・益子渉博士からの提供を受けた．各領域の計算条件を表 4-9，その他用いた主な数値スキームとデータを表 4-10 に示す．NHM では気象データによる Nadging は用いていない．

表 4-9　2018 年台風 21 号 NHM 解析の各計算領域の設定

計算領域	格子数	水平解像度	計算時間 (日本時間)	時間刻み
1	1401*1401*92	1 km	9/3 18h–9/4 17h	-
2	1401*1401*100	250 m	9/4 12h–9/4 15h10m	-
3	1401*1401*100	50 m	9/4 14h–9/4 14h50m	0.25 s

表 4-10　2018 年台風 21 号 NHM 解析　主な数値スキームおよびデータ

乱流過程	1.5 次 TKE クロージャースキーム(全領域)
雲微物理過程	Bulk-type with six water species (qv, qc, qr, qi, qs, qg)
表面層オプション	Beljaars and Holtslag (1991) モデル
気象場初期条件・境界条件	JMA メソ解析

図 4-41 は台風経路と中心気圧の実台風との比較である．気象モデル解析では経路が全体にわたってよく再現されている．大阪最接近時については，実際の経路からのずれは東方向に 15km 以内であり，WRF よりも小さい．時間については実現象より 25 分程度遅れて通過が見られた．中心気圧についても最接近時ではおおむね一致した．

風速の解析値を，大阪灯台と気象庁の風速観測点（大阪）で観測された風速との比較を行った．(前 10 分平均値による．気象庁の風速観測点は 3 秒平均値の最大瞬間風速も示した．)なお，解析は実現象より 25 分後にピークとなるため，観測に合わせてシフトした上で比較を示した．図 4-42 は計算時間全体での風速の変化を比較である．ここで示す解析値は領域 1 での 30 分毎の瞬時値である．大阪灯台の測定点は地上 53.1m であり，上流側は直ちに 10km 以上にわたり海上にあるのに対し，気象庁の風速観測点は地上 24 m で，低層住宅街内の学校の屋上に位置している．高さや粗度の条件は異なるが計算時間全体にわたって，いずれの地点でも観測値とおおむね一致する結果が得られた．

図 4-43 はピーク風速の時間帯の風速の比較である．観測値は領域 3 での瞬間値を連続的に示している．平均風速は大阪灯台と気象庁の風速観測点（大阪），いずれの点においてもよい一致が得られた．また，最大瞬間風速もおおむね観測と対応しているものとみられる．また海沿いの灯台の位置では台風の通過後，乱れの減衰が確認されたが，陸上の気象庁観測点の位置では乱流が維持された．

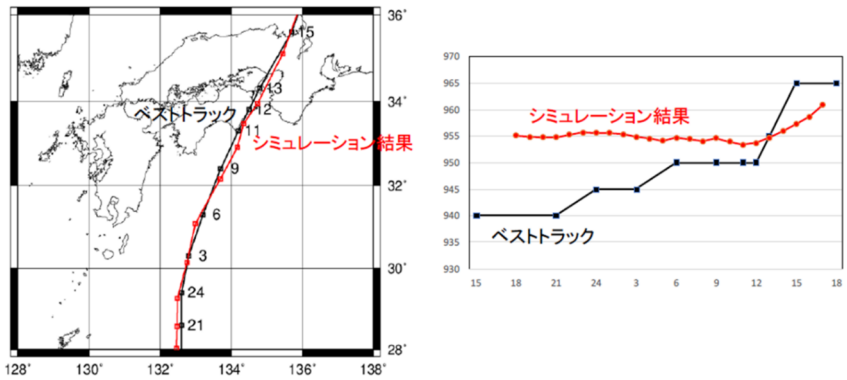
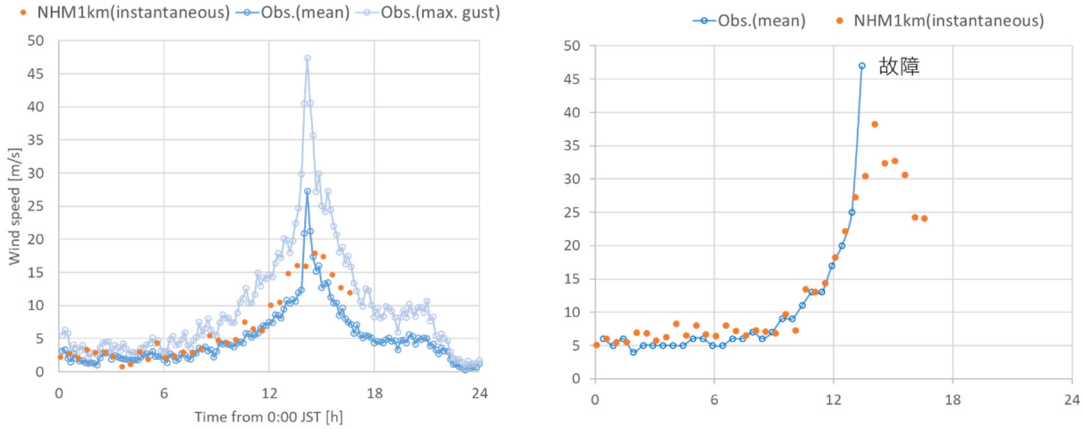


図 4-41　台風経路と中心気圧の比較



気象庁風速観測点 大阪（地上 24 m）　　大阪灯台（地上 53.1 m）

図 4-42　実観測との風速値の比較（全計算時間）

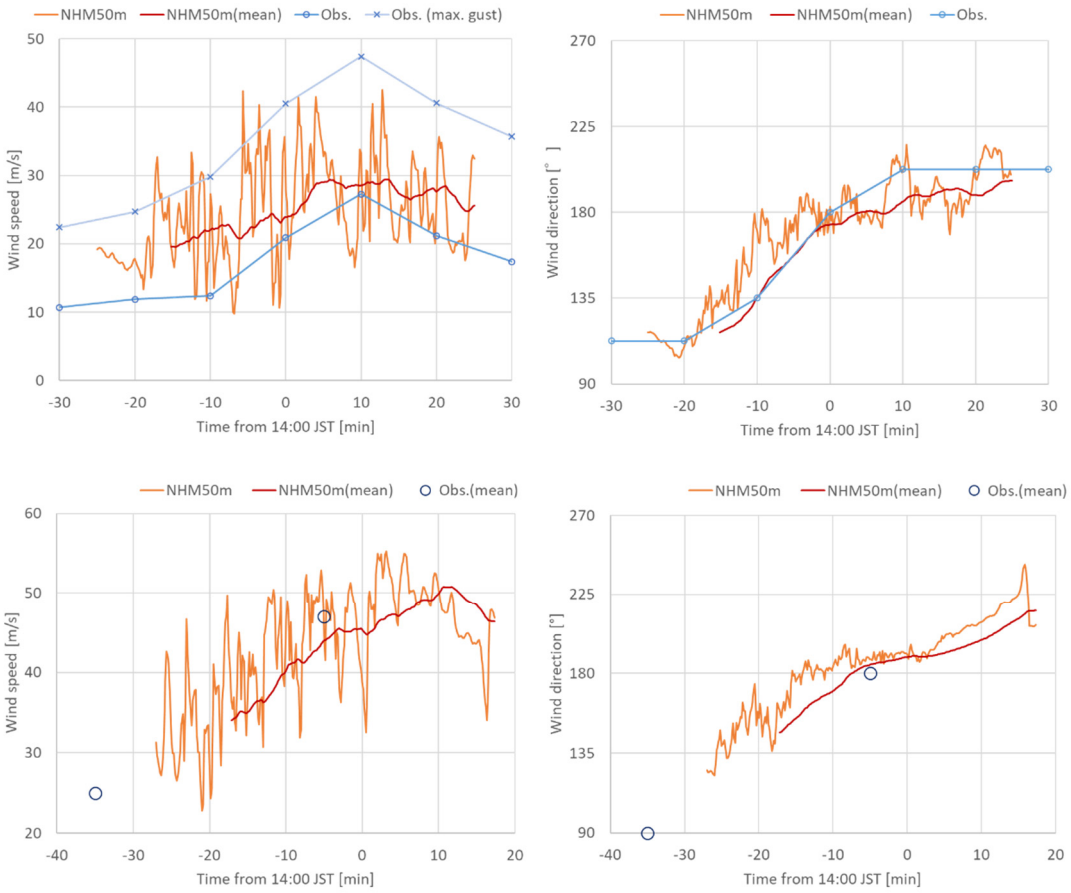


図 4-43　実観測との風速・風向の比較 （ピーク時刻付近）
上段：気象庁観測点(大阪)の風向風速，下段：大阪灯台の風向風速

図 4-44 は異なる高さでの風速の水平分布である．気象モデルにおいて乱れが相当程度解像されていることが確認され，地上 53m（53m AGL）程度の高さまでは筋状の強風構造は非常に細かく，海上の方が強風である様子が見られるが，300m AGL 付近になると最大風速半径付近での風速が大きくなりより大きな筋状の構造を形成していることが確認された．より上空の面の可視化からは台風の眼に当たる部分の面積が拡大し，最大風速半径もより外側に位置していることが推察された．

図 4-45 は大阪灯台の位置における，台風最接近付近の平均風速プロファイルである．解析内で地表での風速ピークとなる 14：40 付近のプロファイルでは 100 m から 200 m の低い高度で風速の極大ピークが見られた．図 4-46 に示す鉛直断面からは中心から遠い位置では風速のピークが約 1km から 2km 付近に位置しているが，台風中心に近づくにつれ徐々にその高さが下がっていること，最接近時刻では地表近くまで下がる様子が観察された．

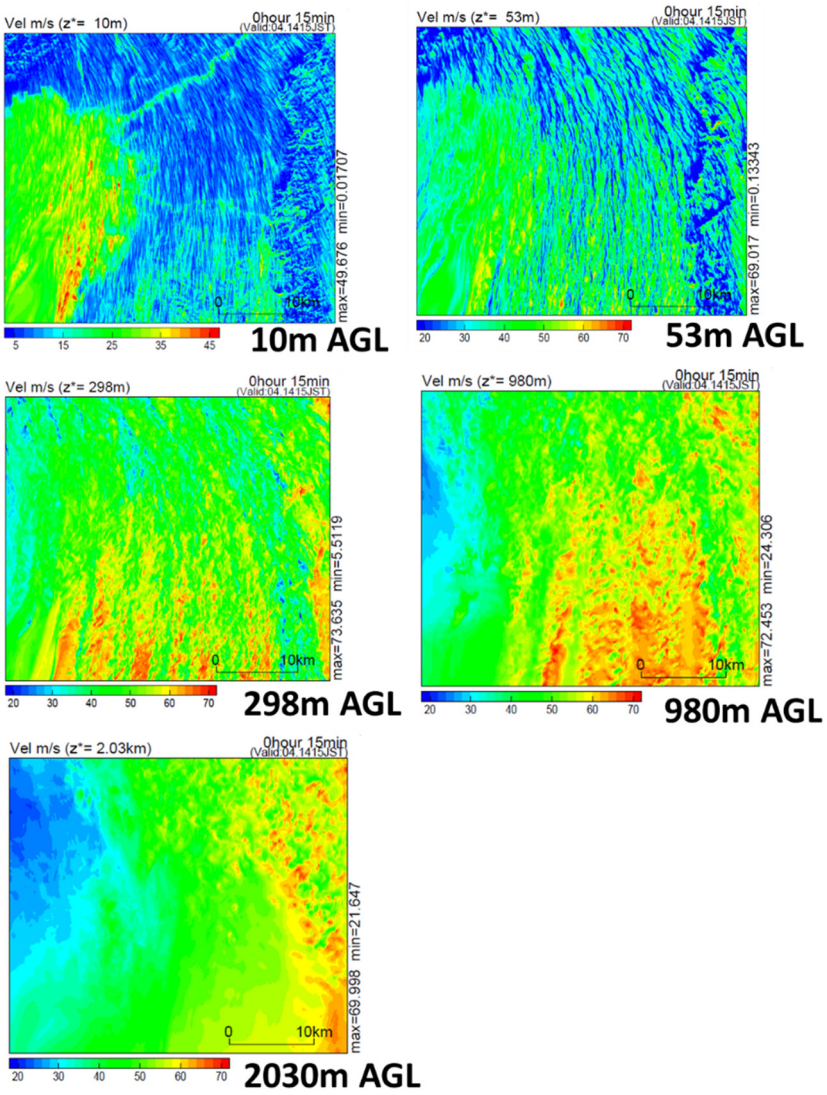


図 4-44　領域 3 における各高さでの水平風速分布

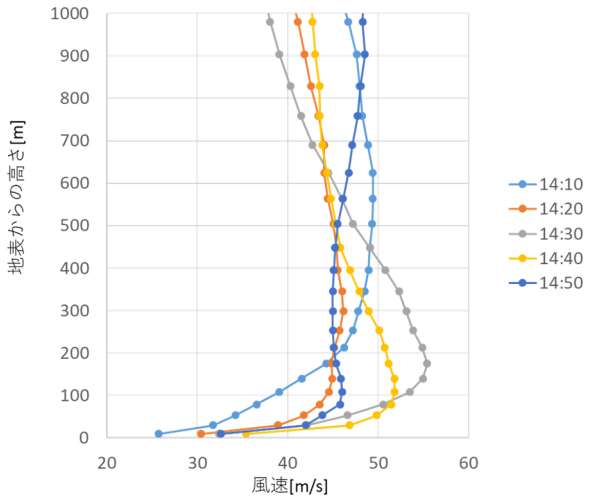


図 4-45　大阪灯台の位置における平均風速プロファイル

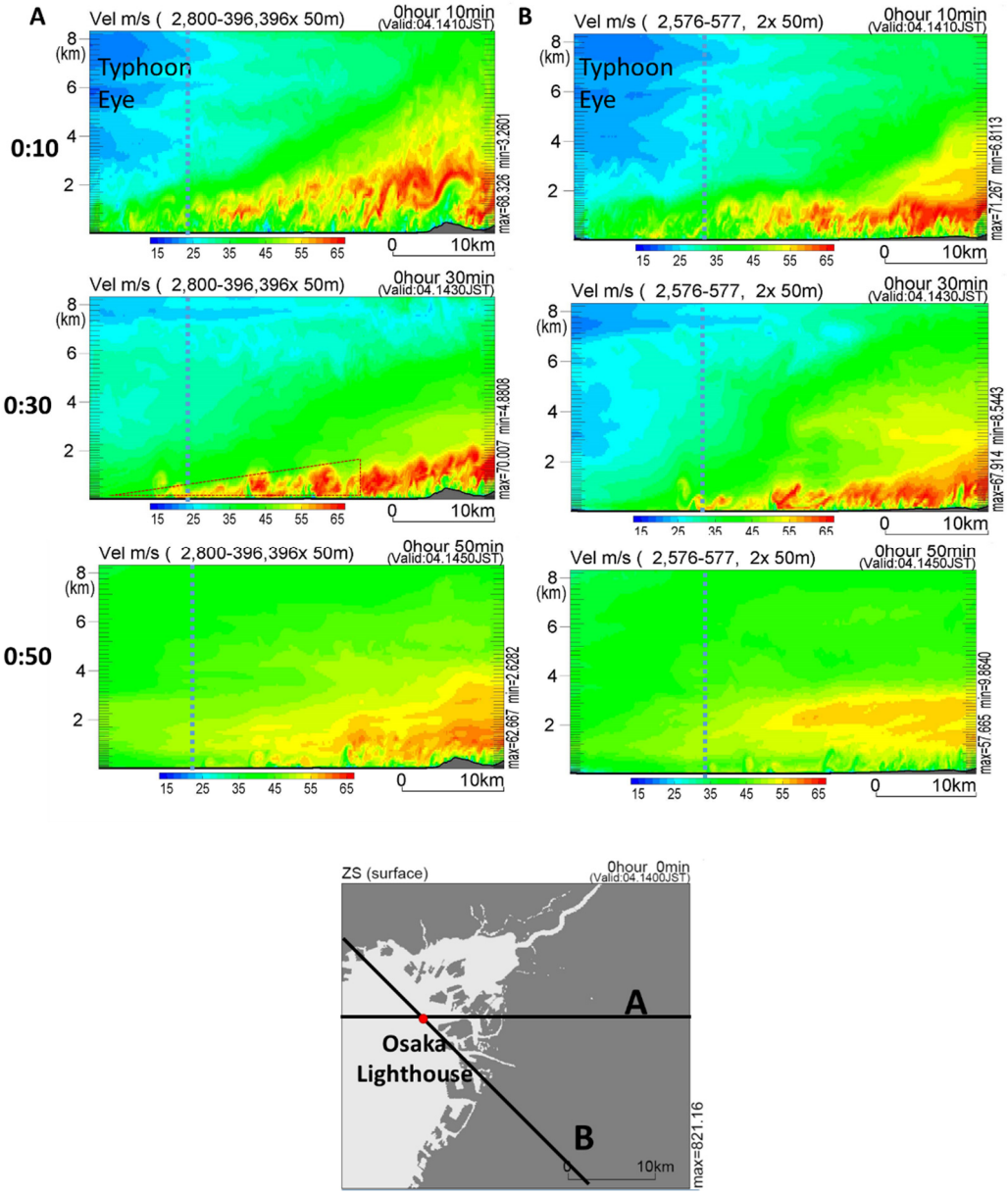


図 4-46　大阪灯台を含む鉛直断面内の水平風速 (青波線は大阪灯台の位置を示す)

4.6.2　気象場の高周波成分の再生成

NHM に基づく気象場に対する高周波変動成分の再生成計算は表 4-11 の条件により実施した．このケースでは気象場に対する scale similarity モデルのフィルター幅を $8.5\overline{\Delta}$とした．NHM の気象場についても，図 4-47 に示す時系列により，各高さでの流れ場に高周波変動成分が付加されたことが確認された．

表 4-11　2018 年台風 21 号 NHM に基づく高周波成分再生成計算

計算領域	7km(南北)*5km(東西)*約 2.3km(鉛直) (鉛直方向は地表 2.37km から 108m の範囲)
格子解像度	25m
計算時間範囲	14:05:00 –14:20:00 (JST)
時間刻み	0.02s
気象場フィルター幅	$8.5\overline{\Delta}$
フィードバックフォーシング項定数	$\alpha = -7.84 \times 10^{-4}, \beta = -4.52 \times 10^{-2}$

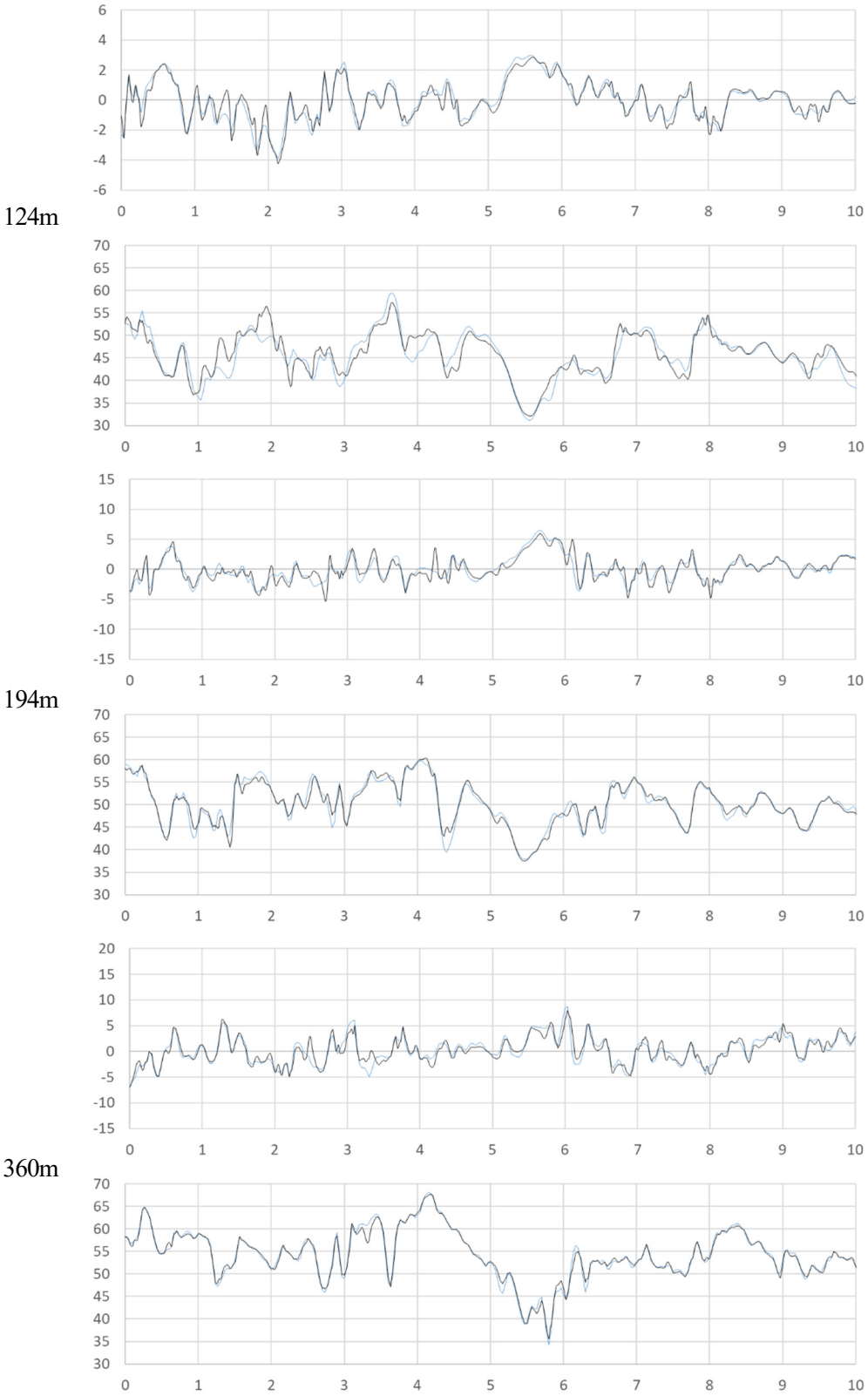


図 4-47　風速時刻歴　各高さ上段：鉛直流速，下段：水平風速

（縦軸：風速[m/s]，横軸：時間[min]；青：再生成前，黒:再生成後）

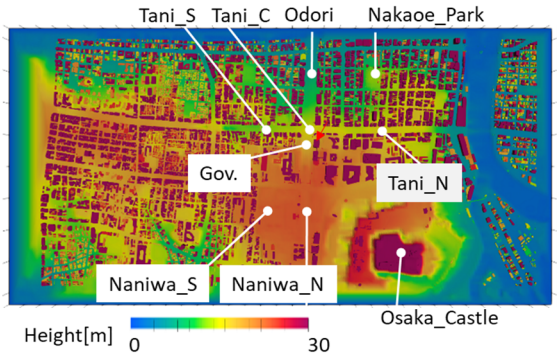
4.6.3　市街地における風速・風圧の解析

(a)　解析条件

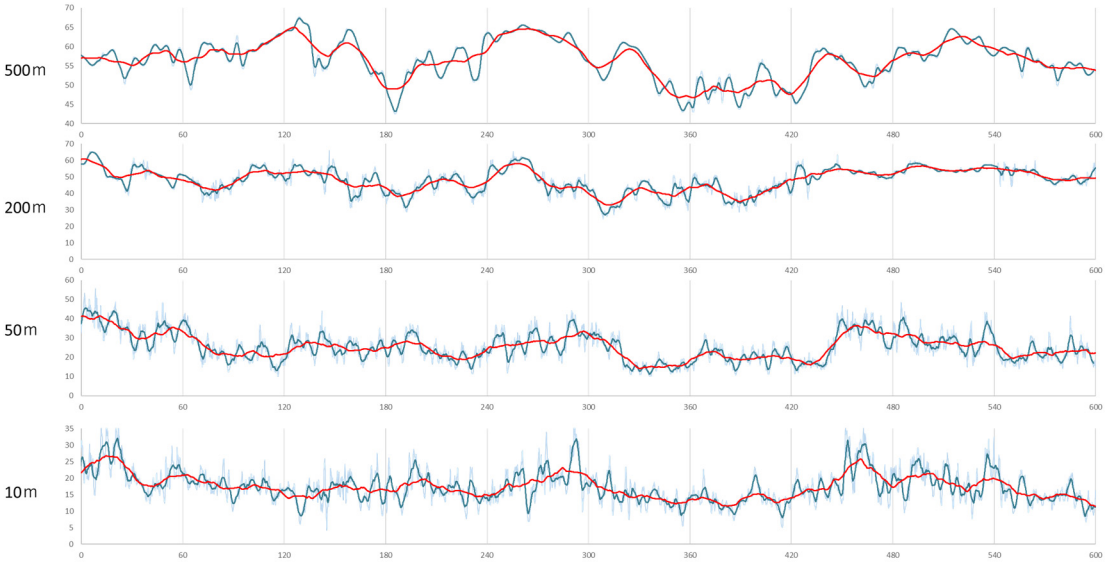
NHM の流れ場に基づき 10 分間の市街地の解析を実施した．地表モデルや格子配置，計算スキームなどその他の条件は WRF/WRF-LES に基づく解析と全て同じ条件である．

(b)　風速の時刻歴

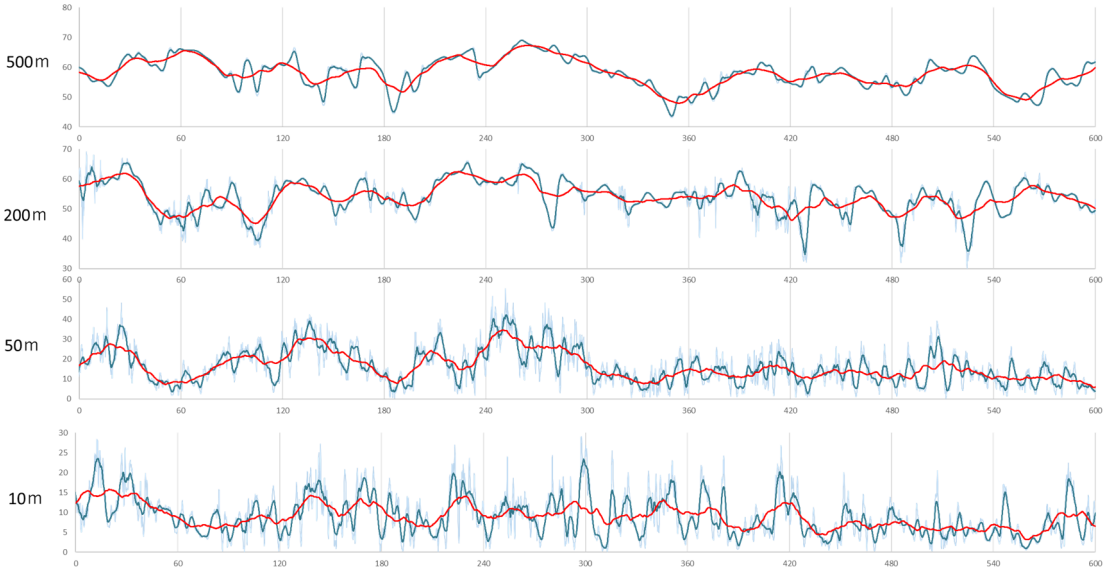
気象モデル NHM に基づく建築空間 BCM-LES により得られたプローブ点（Naniwa_N, Osaka_Castle, Gov, Tani_N）の位置での，地上高さ 500m，200m，50m，10m での時系列を図 4-48 に示す．赤線 20 秒平均値，青線は 3 秒平均値，水色線は 0.1 秒毎の瞬間値である．Naniwa_N, Osaka_Castle は比較的開けた場所，Gov は東西の大通り内部の点，Tani_N は南北の大通り内部の点であり周辺環境の特徴が異なるが，比較的瞬間風速が高い点である．これらの点での風速の 10 分間の統計値を表 4-12 に示す．また参考として，この計算領域から西側約 2km に位置する気象庁の風速観測点（大阪）で測定された最接近前後での風速も表4-13 に再度示す．4 点のうち，周辺の高層建物の影響により局所的な流れの影響を受ける Tani_N を除く 3 地点の時系列では，上空 20 秒平均値の緩やかな大規模な風速変動の傾向が地表付近にまで伝播した．また，気象場の影響により風速が上昇している時間帯に，ピーク風速が出やすい傾向が確認された．建物が少なくよく開けた土地である Naniwa_N，Osaka_Castle では特にその傾向が明確に確認される．Gov の 10 m, 50 m での時刻歴は，平均風速，最大瞬間風速は開けた場所よりは小さいものの，3 秒平均，平均なしの風速の時系列からも非常に鋭いピークが頻発する様子が確認される，Tani_N の 50 m の時刻歴では 3 秒平均の時刻歴の変動はあまり激しくない一方，平均なしの時刻歴は非常に鋭いピークを持つ傾向がみられる．構造や外装材の種類により対応する平均時間にが異なり，場合によっては実効的な最大瞬間風速の値がより大きくなる場合があると考えられ，構造への被害を詳細に検討するときには，この点についても慎重な取り扱いを行う必要があることが確認された．



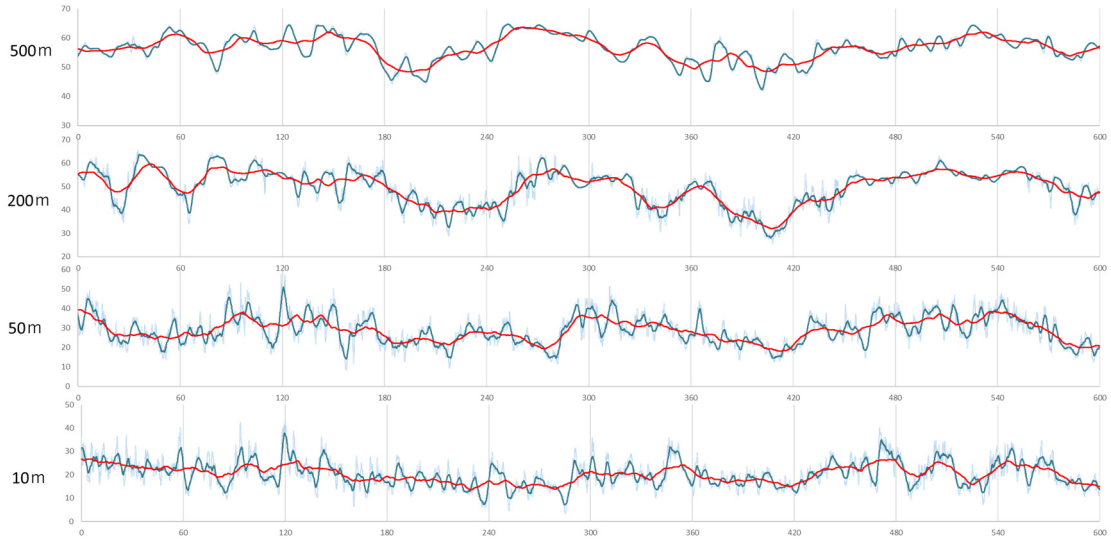
(a)　プローブ点位置



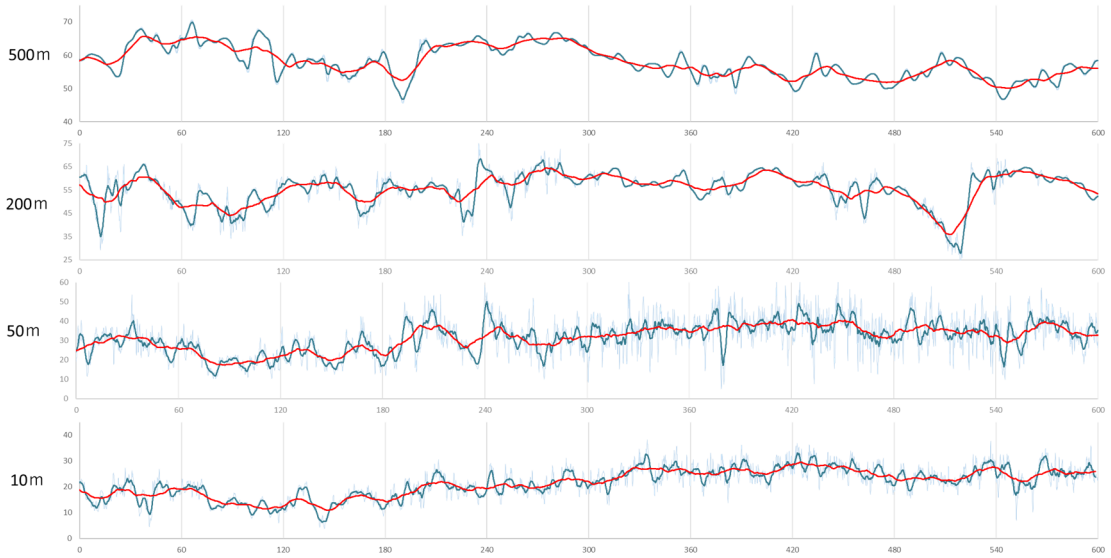
(b) Naniwa_N



(c) Gov



(d) Osaka_Castle



(e) Tani_N

図 4-48　プローブ点における各地上高さの時系列の風速変化

(水色：瞬間値，青：3 秒平均値，赤：20 秒平均値) (縦軸：風速[m/s]，横軸 [s])

表 4-12　プローブ点における風速の統計値（高さ 24m）

	Naniwa_N	Osaka_Castle	Gov	Tani_N
最大瞬間風速(3 秒平均値)	38.3	40.0	31.9	34.1
平均風速(10 分平均)	20.5	23.3	11.2	21.2
ガストファクター	1.87	1.72	2.83	1.61

表 4-13　気象庁観測点（大阪）における風速の実観測値（高さ 24m）

	14:00	14:10	14:20
最大瞬間風速(3 秒平均値)	40.5	47.4	40.6
平均風速(10 分平均)	20.9	27.3	21.2
ガストファクター	1.93	1.73	1.91

(c)　市街地内での乱れの統計的性質

ここでは，実市街地の実台風のケースの数値解析による，指針などとの比較が可能な解析結果の一例として，気象場の影響を受けた流れ場に基づく市街地内部で生じる瞬間的な風速変動による被害を考慮する際に重要である乱流の統計値を示す．図 4-49 に各プローブ点での瞬間風速(3 秒平均)の 10 分間時系列に基づく乱流強度の鉛直分布を示す．黒線は日本建築学会の風荷重指針（粗度区分 IV）の分布を示している． Naniwa_N や Osaka_Castle など開けた土地では地表付近まで風荷重指針の鉛直分布と良く一致した．一方，住宅密集地内の公園の Nakaoe や南北ストリート内の Tani_S，東西ストリート内の Gov では建物高さでは，風荷重指針乱流強度を大きく超える乱れが発生しており，特に WRF/WRF-LES において解析を行った窓ガラスの被害の発生した合同庁舎 55m 上流側の点である，Gov の点においては，前方建物の影響により極めて強い 0.5 程度の乱れが高さ 60m 付近まで発生しやすい傾向がある事が示された．一方で Tani_S と同じ南北ストリート内の高層建物増速域にある Tani_N については，風速は高いが乱流強度は抑えられる傾向が見られた．なおいずれの点でもおおむね地上 100m 以上では乱れの性質は風荷重指針に従っていることが確認された．

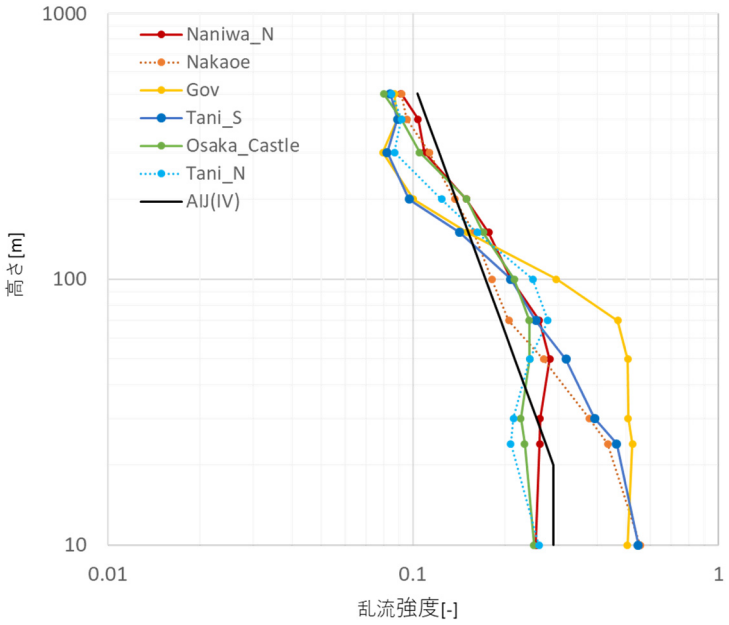
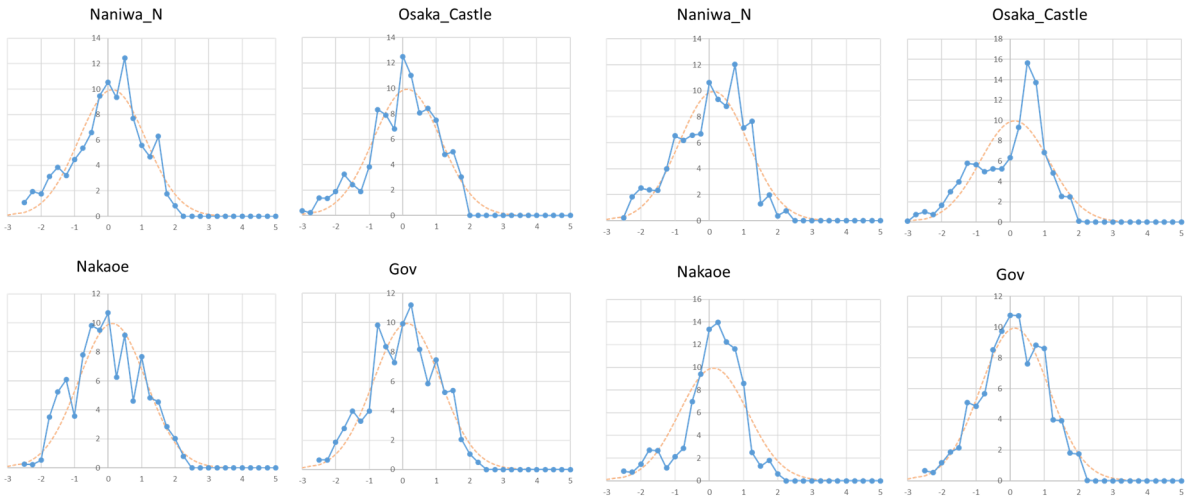


図 4-49　プローブ点における乱流強度の鉛直分布

図 4-50 に上空と地表における変動の性質の違いを明確にするためプローブ点（Naniwa_N, Osaka_Castle, Nakaoe, Gov）で得られた，高さごとの風速の確率密度分布を示す．縦軸は百分率であり，横軸の風速は平均値と標準偏差 σ により正規化している．気象場の変動の影響が強

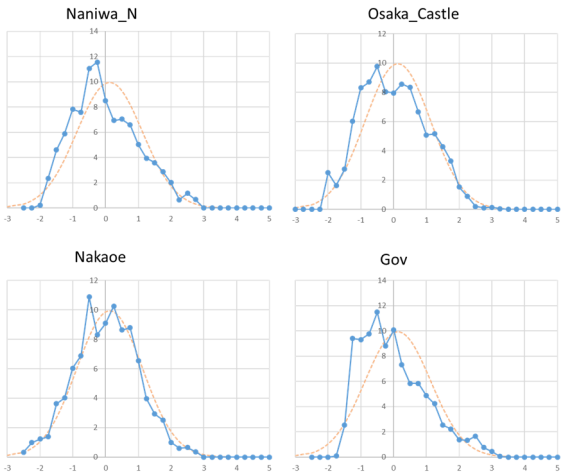
いと考えられる地上 500m，200m では，最頻値のピークは平均値より高風速側となるが，+2σより高い風速はほとんど発生しない．一方市街地内部にあり，周辺建物による変動形成の影響が強いと考えられる地上 50m，10m での分布は，最頻値のピークは対照的に，平均値よりも低風速側で発生する，一方高風速側の分布があまり落ちず，+2σ付近以上では正規分布を上回る発生確率となる傾向が見られた．

これらの違いは台風の境界層における風速変動の特徴および，その影響を受けた市街地での風速変動の一般的な特徴を示していると考えられる．

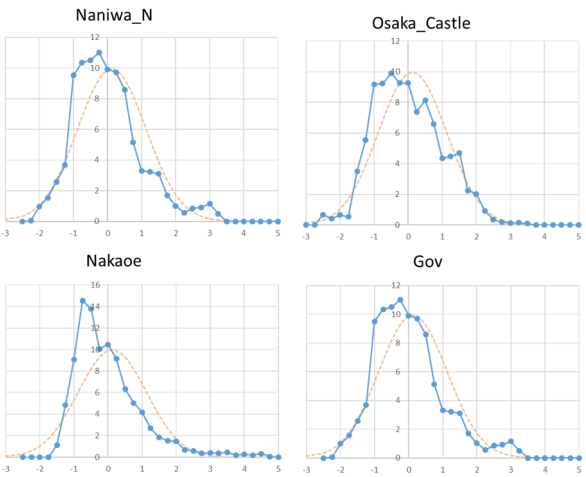


(a) 地上 500m

(b) 地上 200m



(c) 地上 50m



(d) 地上 10m

図 4-50 プローブ点における風速変化（横軸：平均値と標準偏差による無次元風速[σ]，縦軸：百分率[%]，波線は正規分布を示している）

(d)　ピーク風圧発生と流れの構造

WRF/WRF-LES に基づく解析でも述べた通り，大阪合同庁舎 4 号館では南面の 13 階の窓が風圧により破損し（地上約 50m），その上下の階では窓の脱落が発生した．ここでは当該建物のピーク風圧の発生状況についての確認を時刻歴と可視化により行った．図 4-51 は南面中央部の高さ 50m における風圧力の時刻歴（1 秒平均値）と図 4-48 の前方 55m 地点（Gov）における風速の時刻歴を併せて示したものである．NHM に基づく解析では，136s と 251s において，この建物で特に大きな正圧を記録しており，これら時刻の前後はより上空の 200m，さらには 500m 付近の上空風速も連動して変化しており他の時刻に対して比較的大きくなっていることが確認される．上空での風速が大きいことから，ピークが発生するわけでは必ずしもないが，顕著な風圧ピークの発生時には上空での風速が大きい傾向がみられ，これは上空の変動が地表に到達した場合にはより大きな乱れを生じピークを生じることに寄与していることによる可能性が示唆される．

上の二つの風圧ピークが発生した時刻の流れ場の構造を，それぞれ図 4-52 と図 4-53 に示す．いずれの時刻においてもプローブ点付近の上空には気象場に基づく高風速の構造が伸びていることが確認され，建物付近の高さでも，上空の風速構造により局所的に強まった風が，周辺建物の間を抜け高風速が正面から建物に作用していることが推測される．

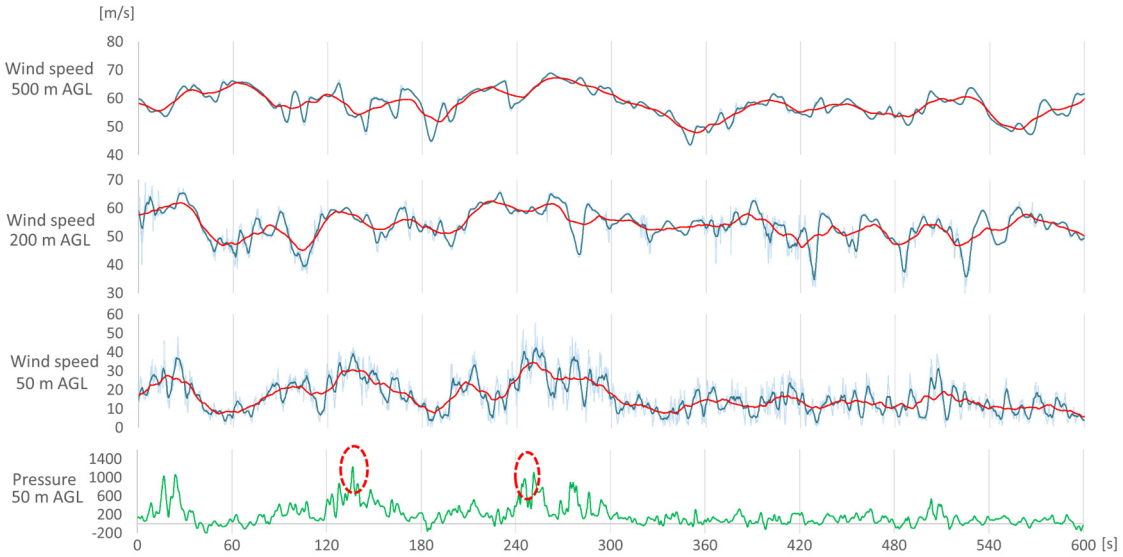


図 4-51　大阪合同庁舎 4 号館南面中央における風圧と
前方 55m(プローブ点 Gov)での各地上高さにおける時系列

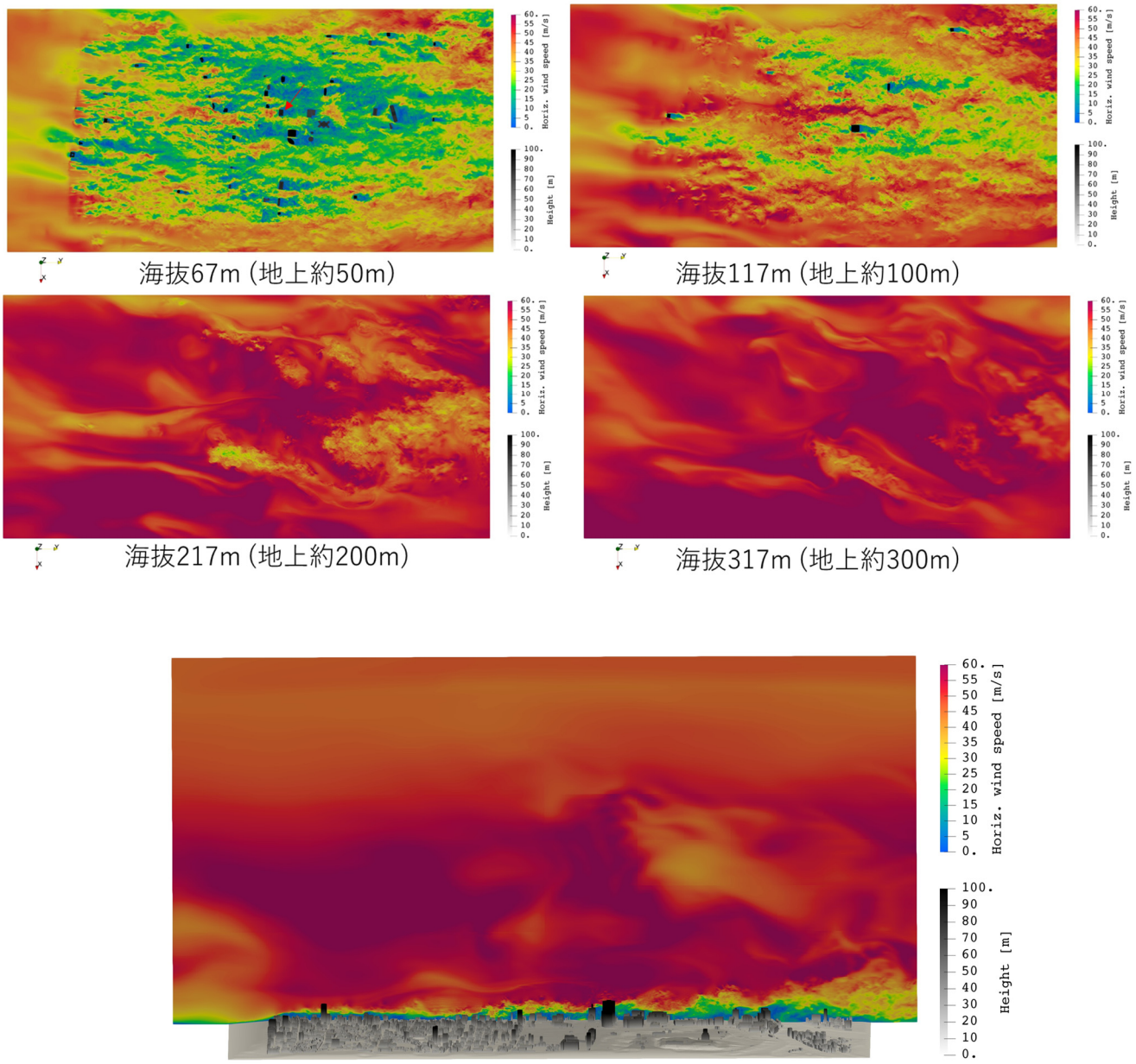
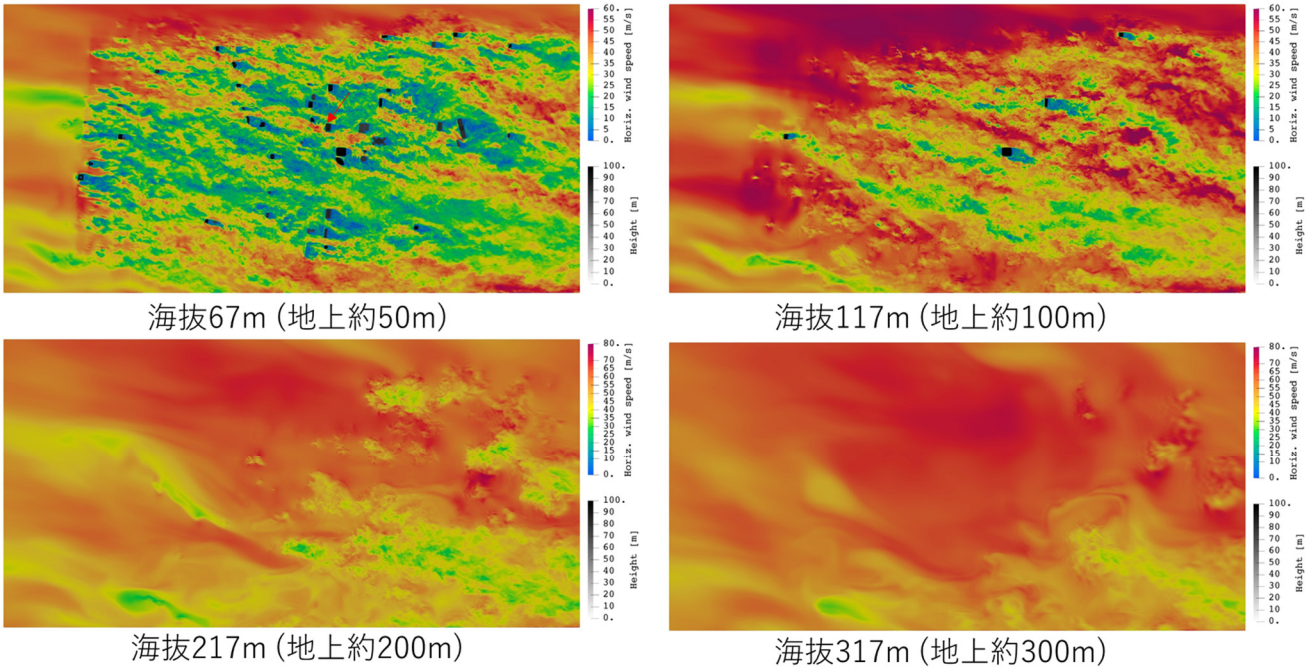


図 4-52　時刻 136s における各地上高さの水平断面 (赤矢印は建物位置)
および鉛直断面（当該建物中央）



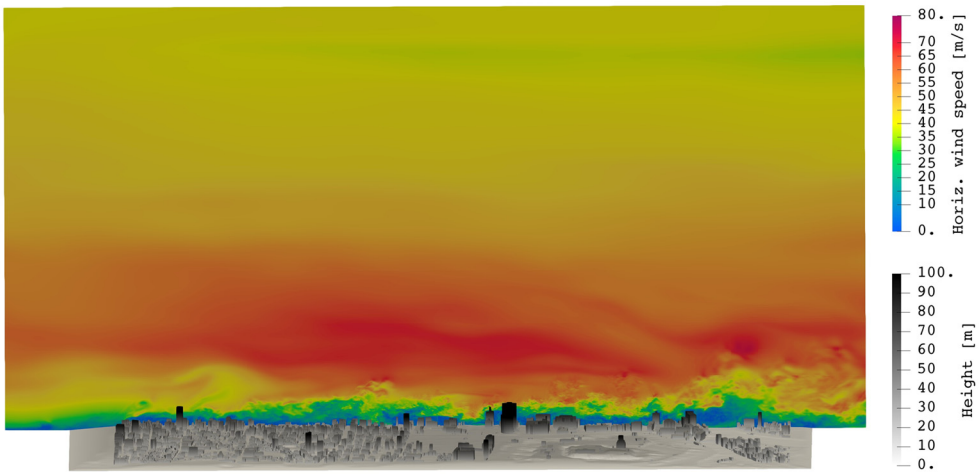


図 4-53　時刻 251s における各地上高さの水平断面 (赤矢印は建物位置)

および鉛直断面（当該建物中央）

(e) 平均風速・最大瞬間風速

解析を行った 10 分間での風速の平均値と 3 秒平均による最大瞬間値の水平分布をそれぞれ図 4-54，図 4-55 に示す．

平均風速について，地上約 10m の地表近傍付近では，建物が少なく開けている場所に加え，高層建物の周辺で顕著な局所的な高風速がカーブを描きながら発生し下流へ流れる様子が見られた．高さ 10m での告示の値 (27m/s) の超過はこのような場所の一部で発生している．地上約 50m，約 100m 付近では建物の後方 200m 程度で顕著な減速が発生し，建物の配置により市街地内に風速の高い場所と低い場所が固定され直線的に伸びる様子が明瞭に見られる．平均風向が WRF/WRF-LES に基づく解析ではほぼ真南だったのに対し，やや東寄りとなっている．また地上約 300m の上空風速においても 10m/s 程度の風速の変動が見られた．気象場の高風速の構造が流れ方向に伸びているため，その影響が 10 分の平均値においても残っていることが推察された．

最大瞬間風速については，地上約 10m では，平均風速と同様に開けた場所及び，高層建物の周囲で顕著な瞬間的な高風速が発生している一方，住宅地の内部でも比較的高風速が様々な風向で発生しており，平均風速の低い住宅地などでもガストファクターが高くなり 25m/s 程度の高風速が発生する可能性がある事を示唆している．ただし，地上付近では高さ 10m での告示の平均風速を換算した値（42.7m/s）を超える場所は極めて一部にしか認められない．地上約 50m および約 100m では，顕著な瞬間的な強風が，市街地内部を含む領域全体において建物程度の細い幅で建物の近傍を直線的に流下する様子が確認される．またその方向は主流方向に限られず，建物の周囲で様々な方向となっている．これは図 4-52，図 4-53 で見られた，気象場の流れ方向に伸びた風速変動に伴ってより局所的に形成された筋状の構造が建物の影響を受けながら局所流下したためであると考えられる．

図 4-56 に地上約 10m の最大瞬間風速分布と被害の発生場所の比較を示す．多くの被害の発生した場所において，風速 25-40m/s 程度の比較的高風速が推定されている．

図 4-57 は，周囲の粗度の状況が異なる様々な場所での風速の鉛直プロファイルである．粗度の小さく開けた土地にあるプローブ点（Naniwa_N や Osaka_Castle）では地上での風速は概ね気象庁の風速観測点(大阪)での値と平均値および最大瞬間風速値もおおむね一致した．これらの点では WRF/WRF-LES に基づく解析では上空の風速が基準法告示の値を上回ったが，NHM に基づく解析ではほとんど超過は認められなかった．一方，Tani_S, Gov, Nakaoe_Park において，上空の平均風速が比較的高くなり，地上約 100m 以上では告示風速値の超過が見られた．図 4-54 の

平均風速分布図からは，高さ 300m 付近でみられる流れ方向に伸びた気象場の強風構造の位置の影響が 100m 付近まで残り，Naniwa_N や Osaka_Castle の位置では風速が低く，また Tani_S, Gov, Nakaoe_Park で風速が高くなっていることが推察され，100m 付近までの告示の超過は上空の気象場によって主にもたらされている可能性があることが示された．

本解析では，最大瞬間風速のプロファイルも，上空における風速が特に強かった Nakaoe_Park などでは，奥田らの方法により換算した基準法告示に相当する最大瞬間値に逼迫したり，一部でわずかに超過することが示された．

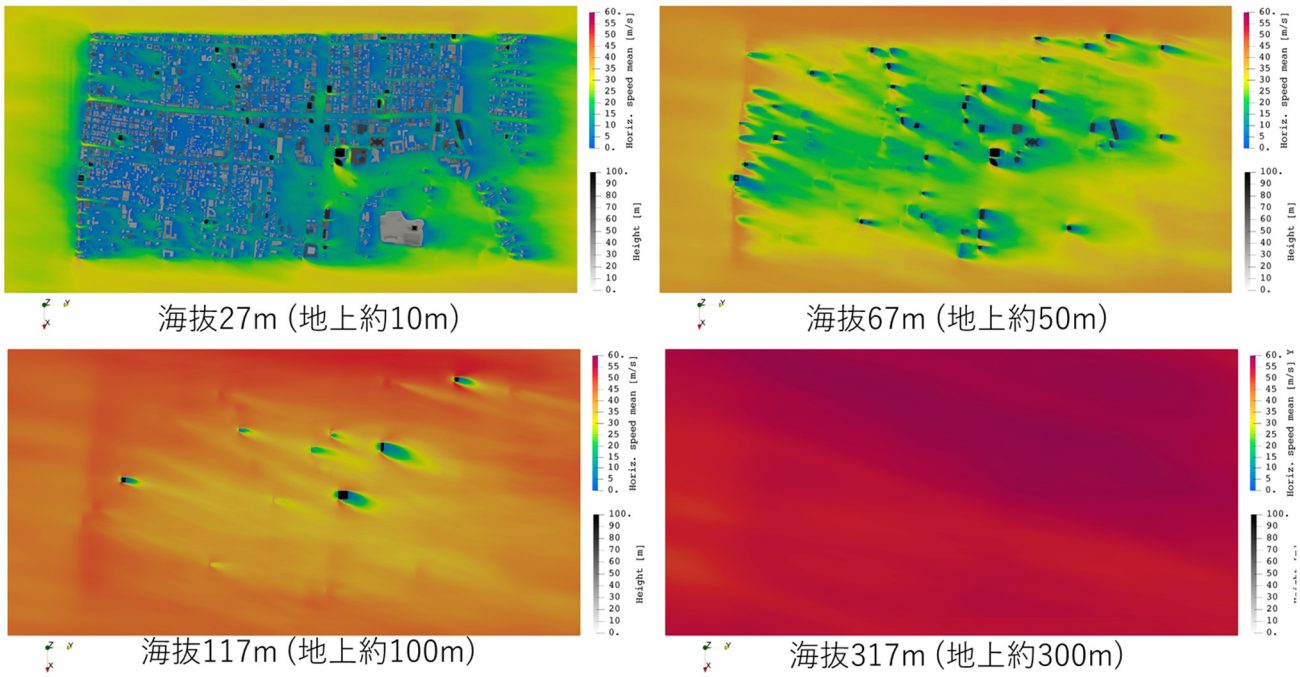


図 4-54　10 分間の平均風速の各高さでの水平分布

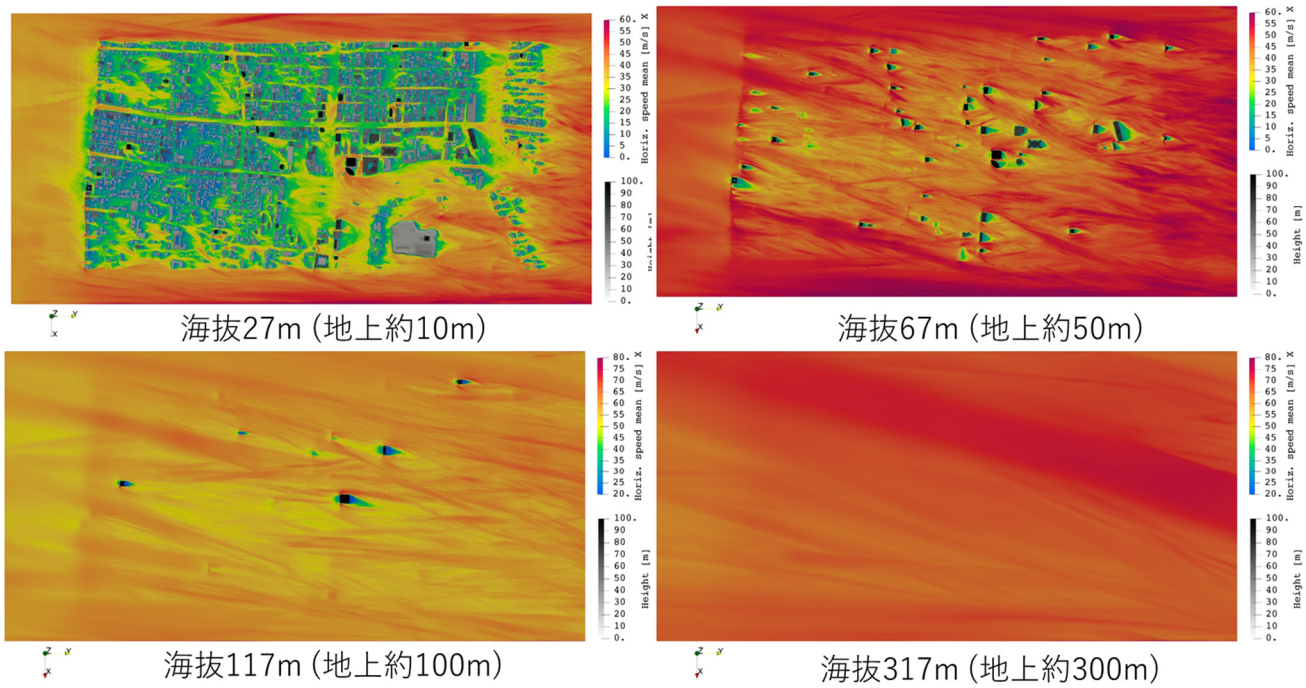


図 4-55　10 分間の最大瞬間風速(3 秒平均値)の各高さでの水平分布

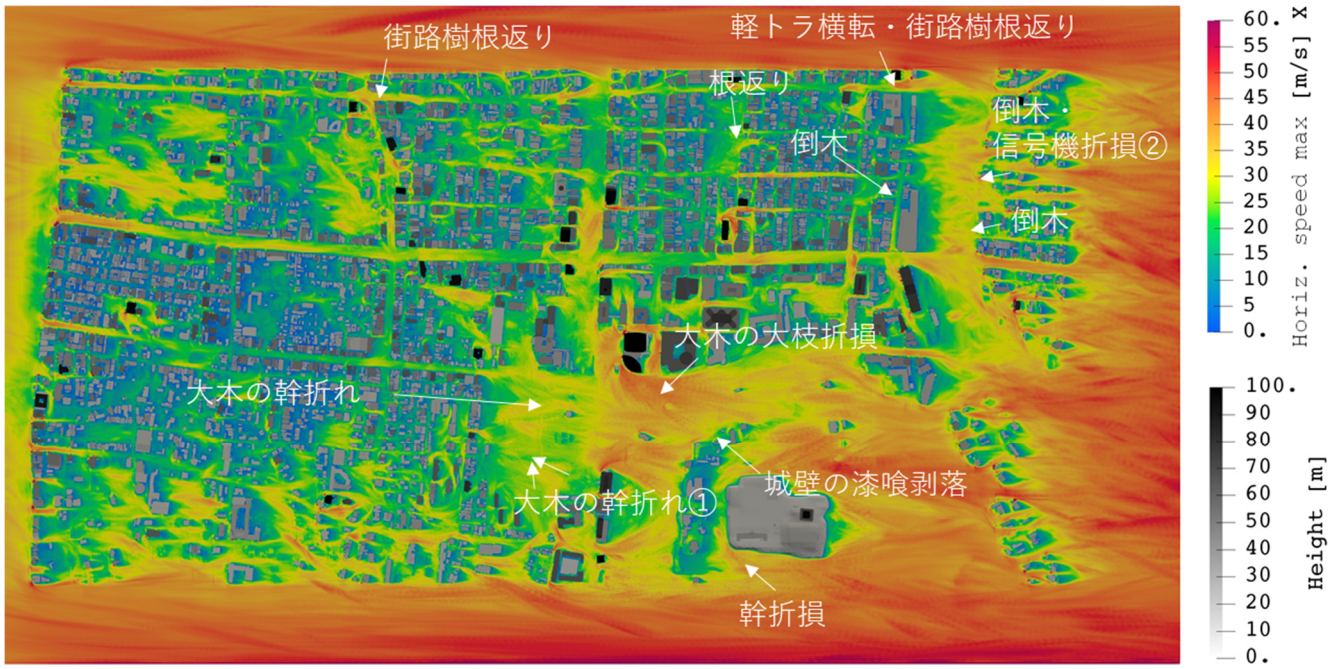


図 4-56　海抜 27m (地上約 10m)における最大瞬間風速(3 秒平均値) と地表近傍での被害の発生分布

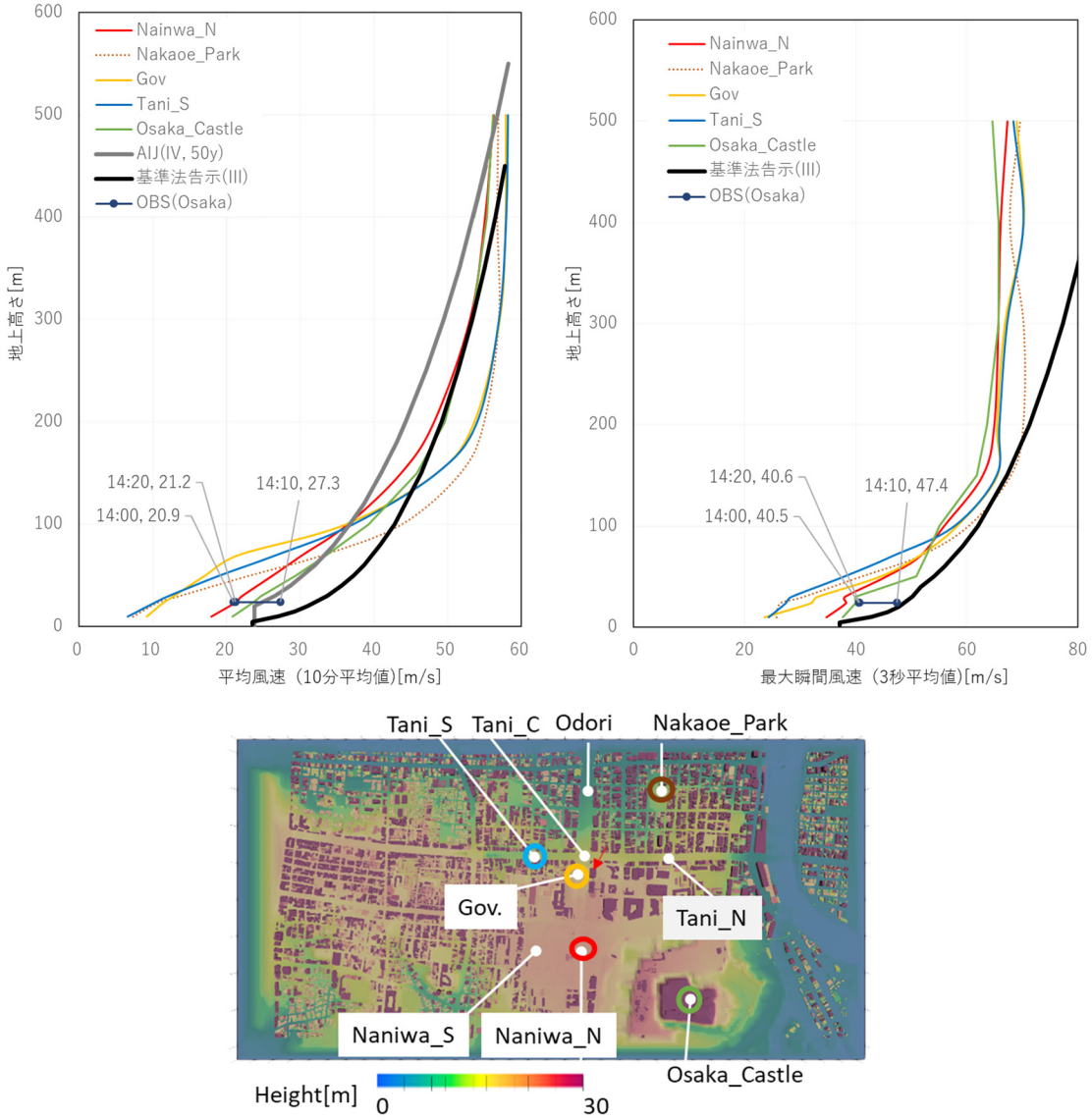


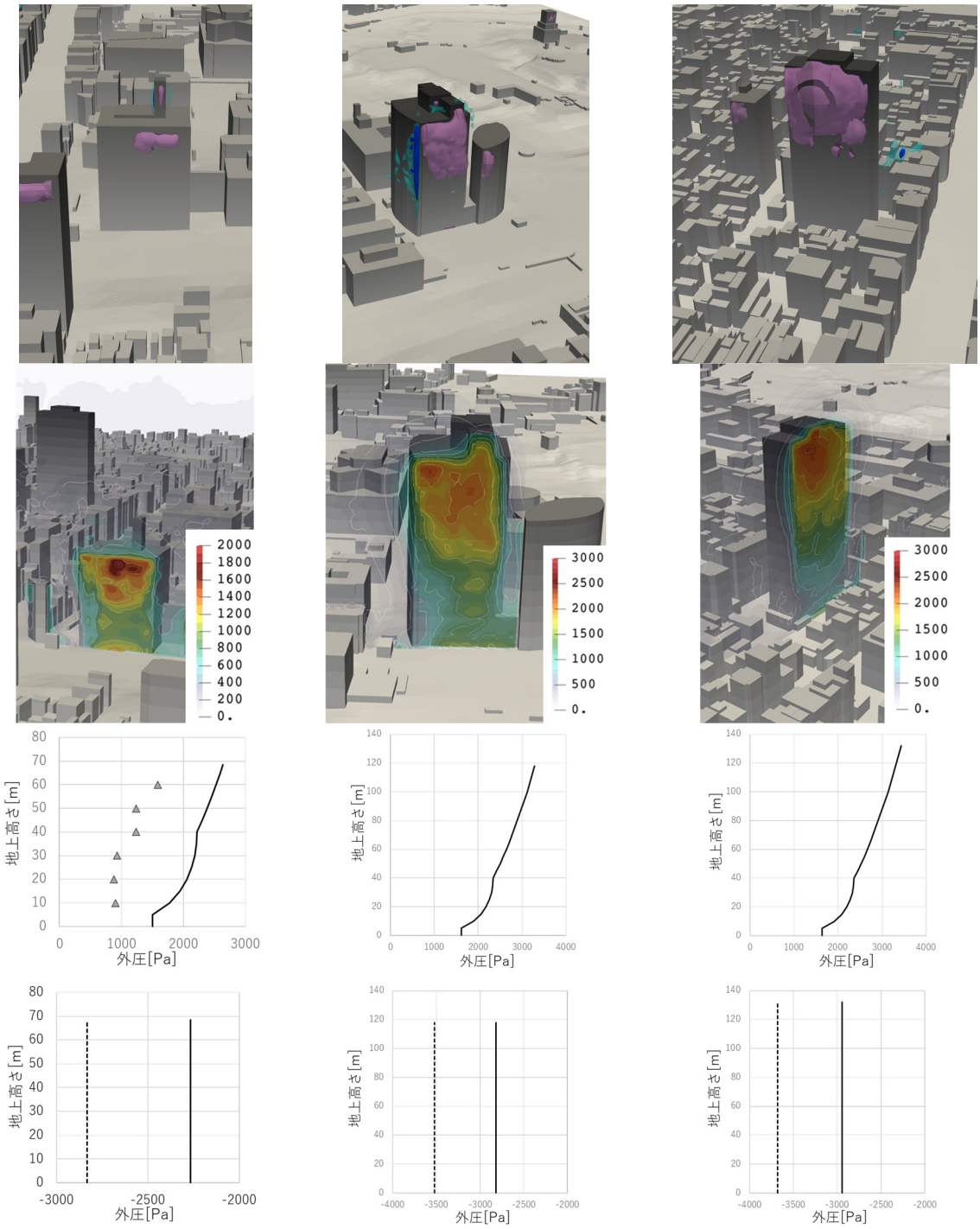
図 4-57　10 分間での平均風速および最大瞬間風速(3 秒平均値)の鉛直プロファイル

(d) 建物被害との比較

図 4-58 は，合同庁舎と周囲の高層建物における，告示を超える圧力の発生の有無を検討した．これらの建物は，WRF/WRF-LES に基づいて解析した図 4-40 の建物①から③と同一の建物である．いずれの建物においても NHM においても正圧の超過は発生しなかった．WRF/WRF-LES での解析と同様，建物②の風上右手側のわずかに曲率を帯びた側面の隅角部では負圧の超過が見られた．

建物①の合同庁舎は，NHM の解析による 10 分間連続の解析においても，高さ 50m におけるピーク風圧は 1300Pa 程度であり，告示の風圧を下回るものであった．いずれのモデルの解析も気象モデルの解析や BCM-LES における，実観測や地表の被害などとの比較により，一定の精度で実現象に近い地表での風速場や圧力場が再現されていることが期待されるが，当該建物においては告示を超える風圧が再現されず，被害をもたらした可能性のある流れ場の解明には至らなかった．

今回の NHM および WRF/WRF-LES に基づく 2 例の解析は，気象場の強風構造が地表付近での高風速やピーク風圧の発生に寄与することを示唆する結果を示したが，気象場の再現の不確実性や，このような構造に基づく流れ場の不確実性の影響の評価はまだ十分に行えていない．NHM の結果からは，特にこの建物の前方では，特に強い乱れが発生しやすい結果が得られていることから，さらなるアンサンブル解析をもとに，不確実性の定量化や確率的性質を行い，定量的な安全性評価や被害推定を行う必要があると考えられる．



(a) 建物①　　(b) 建物②　　(c) 建物③

図 4-58　NHM に基づく気象場での建物①から③についての基準法告示との比較．10 分間の時系列による．ただしいずれも時間平均操作なし．上段：告示に示す値を超過する圧力の発生領域の 3 次元可視化（桃色：地上 0m での最小正圧値，赤：建物高さでの最大正圧値，水色：一般部負圧値，青：隅角部負圧値）．中段：正面圧の 2 次元可視化（コンター線：250Pa 毎），下段：告示の定める正圧と負圧のプロファイル (上図実線：正圧，上図△プロット：建物①中央プローブ点でのピーク正圧の解析値，下図実線：負圧一般部，下図破線：負圧隅角部).

4.7　結言

第 4 章では実大気境界層での強風被害へ気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析を適用した．まず気象モデルによる台風の気象場の再現性を，WRF/WRF-LES モデルを用いた 2012 年台風 4 号の解析により検討した．その後，顕著な被害をもたらした 2018 年台風 21 号について，WRF/WRF-LES モデルと NHM モデルに基づくハイブリッド解析を実施し，大阪市街地での気象場の乱れを含む強風場による風速の分析や，建物被害の発生に関する分析を行った．

はじめに，気象モデルによる台風の気象場の再現性について次の結論を得た．

- 一般的な計算スキームを用いた WRF/WRF-LES モデルを用いた解析により，台風の全体的な運動と中心気圧の変化が再現された．また塔体観測結果と対応する風向の鉛直プロファイルが再現された．
- 風速の鉛直プロファイルについては，解析ではべき乗則に近いプロファイルであったのに対し，観測では 400-200m での急激な風速減少とその下においてやや増速するピークを含む特殊な傾向が見られ，十分には一致しなかった．データが瞬間値(平均時間不明)であるほか，塔体の影響を受けている可能性もあり，観測結果に十分な信頼性があると判断できなかった．今後も台風のプロファイルの信頼性の高い観測と，気象モデルにより再現されたプロファイルについて分析を継続することが必要である．以下の章での解析においても入手可能な風速観測データとの比較を実施する．
- LES を用いた気象モデルの計算領域では，地形による乱流生成の促進があった時間帯では，大気境界層内での細かい乱れの生成が確認された．

2018 年台風 21 号についての気象モデル・工学 LES ハイブリッド手法を用いた分析からは次の結論が得られた．

- 気象モデル WRF/WRF-LES と NHM の実現象の再現性については，2018 年台風 21 号の経路がよく再現され，大阪市内で得られた風向・風速の地上観測とも比較的よく一致することが確認された．また風上が陸上となる時間帯では境界層内の細かな風速変動が再現された．NHM モデルについては，海からの流入の時間帯においても，陸上では風速の細かな乱れが維持できることを確認した．

- NHM モデルでの台風境界層の構造について，接近する中で，高度 100m–200m 付近で，風速のピークが発生し，鉛直断面の可視化により台風の中心部付近では地表面上ごく近傍まで低下する様子が示された．また水平面の可視化からは台風境界層内に流れに沿った筋状の強風構造が再現されていることが確認された

- 高周波成分の再生成計算では，実台風境界層内においても高周波変動が再生成された．WRF/WRF-LES のケースにおいてエネルギースペクトル解析を実施し，Kolmogorov の-5/3 乗則に従ってスペクトルが伸長したことを確認した．

- 高度 1km 以上に達する激しい揺動を伴う循環，流れ方向に伸びた筋状の高風速構造などの気象場の構造が市街地の上空に導入され，時刻歴からは上空の気象場の高風速の影響が地表近くにも伝播し，ピーク風速及び風圧の発生に寄与することを示唆する結果が得られた．ピーク風速発生時の瞬間の流れ場からは，気象場の強風構造に基づいて市街地内でも，より小さな幅の直線的な高風速領域が形成されていることが確認された．

  台風 21 号の実台風の気象場を再現した数値解析による，指針等と比較可能な，大阪市市街地の乱れに関する統計的な情報として，NHM に基づくケースにおいて乱流強度の鉛直プロファイルを示した．また最大瞬間風速ではとらえられない乱れの性質を明らかにすることおよび，発生する乱れの不確実性を踏まえて，高度による風速確率密度分布の変化を示した．地表と上空では最頻値のピークと高風速側のテール分布の系統的な違いを確認した．乱流強度は概ね高さ 100m 以上では指針と一致したが，市街地内においては建築荷重指針を大きく超えており，特に合同庁舎前では高さ 60m 程度まで 50%程度の乱流強度が維持されていることが示された．

- NHM では 10 分間の解析に基づき平均風速と最大瞬間風速の実市街地内の空間分布が得られた．周辺に建物が少なく，よく土地が開けている大阪城（Osaka_castle）や難波宮公園(Naniwa_N, _S)でのプローブ点では，東に約 2km 離れた気象庁の風速観測点（低層住宅地の学校の屋上において測定）とほぼ同程度の風速が，平均値と瞬間値ともに推定された．高さ 10m の平均風速分布からはよく開けた場所や，高層建物の周辺と後方のストリートで告示(27m/s)を超える値が一部で発生した．最大瞬間風速の分布からは 3 秒平均値でおよそ 30m/s–40m/s の比較的高風速が実際の被害の発生場所の多くで推定された．告示の最大瞬間風速換算値(42.7m/s)を超過する場所は極一部にとどまった．

上空 50m–100m の最大瞬間風速分布からは市街地内部を含む領域の全域で，建物群の間を様々な向きに高風速構造が直線的に流下した痕跡が確認された．上空の気象場による増速による影響と高層建物周辺の流れの相互作用の両方を受けたものと見られる．

- NHM に基づく鉛直プロファイルを解析した結果，評価時間の大部分で上空の気象場の高風速の帯が通過した場所では，10 分程度の評価時間でも平均風速および最大瞬間風速分布にその影響が見られ，地上から概ね 100m 以上では告示の平均風速を広く超過すること，また奥田らの方法により求めた告示の最大瞬間風速の換算値に対しても逼迫したり，超過したりする結果が得られた．
- 建物表面の風圧力についての検討を行い，実被害の発生した大阪合同庁舎 4 号館の高層階南面での分析を行った．NHM, WRF/WRF-LES のいずれの気象解析データに基づく解析においても，再現された正の風圧ピーク値は告示の定める値を下回った．ただし，本研究では気象場を考慮した解析の数例であり，気象場の不確実性やその影響で市街地に発生する流れ場の完全な把握またその不確実性は明らかになっていない．今後，気象場の不確実性や乱れの確率的性質に関するアンサンブル評価をさらに充実させ，市街地における結果の定量的な信頼性を高めることが必要であると考えられる．

第 4 章参考文献

[1] 日本建築学会. (2017). 建築物荷重指針を活かす設計資料 2—建築物の風応答・風荷重評価／CFD 適用ガイド—.

[2] 西嶋一欽，河野祐哉，竹内崇，友清衣利子，野田博. (2019). 2018 年台風来襲前後に撮影された衛星写真の比較に基づき住宅の屋根被害率推定

[3] Takemi, T., Yoshida, T., Yamasaki, S., & Hase, K. (2019). Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. SOLA.

[4] 国立情報学研究所. 台風 201204 号 (GUCHOL).デジタル台風. http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/summary/wnp/s/201204.html.ja

[5] 気象庁. 過去の気象データ検索. https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index

[6] 朝日新聞. (2012). 台風４号、５人が重軽傷　最大瞬間風速、千葉で３８．１メートル　／千葉県 . 2012 年 6 月 1 日 朝刊.

[7] 大阪管区気象台. (2018). 平成 30 年台風第 21 号による 9 月 3 日から 5 日にかけての暴風・高潮等

[8] 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人建築研究所. (2018). 平成 30 年台風第 21 号に伴う強風による建築物等被害現地調査報告(速報).

[9] 消防庁応急対策室. (2019). 平成３０年台風第２１号による被害及び消防機関等の対応状況 (第 10 報).

[10] 奥田泰男, 喜々津仁密, 沖祐典, 高森浩治, ガヴァンスキ江梨, 八木知己, 野口恭平, 木村吉郎, 高橋弘樹, 大幢勝利, 吉田昭仁, 丸山敬. (2019). 各種構造物の被害. 平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究 平成 30 年科学研究費助成事業(特別研究速品被研究) 成果報告会資料.

[11] 日本建築学会. (2015). 建物荷重指針・同解説 2015.

第5章

局地的突風を伴う極端現象への手法適用

5.1　緒言

竜巻などの局地的突風現象は，台風などのメソスケールの擾乱と比べるとはるかに小さく稀な現象であるが，木造，金属造，レンガ造の建物の壊滅的な破壊や，コンクリート造の大型建物の外装材の飛散や飛来物による顕著な被害により，収容する人間の安全や命に差し迫った危険を及ぼしうる．第 1 章の既往の研究において整理した通り，ドップラーレーダーを用いた実現象の観測，突風現象直後の現地調査，竜巻とその環境場の気象シミュレーション，また簡易な渦モデルを用いた風洞実験装置や数値計算などにより竜巻渦と建物の解析などが行われ，それぞれの手法の改良が行われ，現象に対する知見を与えてきたが，実際的な竜巻の構造について，市街地などの実環境での地表での状況はまだほとんど明らかになっていない．

竜巻による建物被害を理解する上では，実環境中での竜巻の周囲において，地表近傍に形成される流れや圧力の構造，竜巻直下の著しい旋回流や上昇流，圧力場が，建物周囲の流れの構造と起こす極めて非定常性の強い相互作用，またこれらによる竜巻自身の運動や構造の変化等に着目し，明らかにすることが非常に重要である．気象学においても，このような実環境での地表付近の竜巻構造とその周辺の流れ場の解明は，地表からの渦度の供給に基づく，竜巻やその親雲である積乱雲等の発達や衰退へ及ぼす影響に関する議論において重要な知見となりうると考えられる．

5.2　本章の目的と構成

竜巻などの突風現象による風荷重の検討方法は建築法令や指針など公に公的な形では示されていないが，特殊な構造物や社会・地域における基盤施設の安全性の検討などにおいてニーズがあるものと考えられる．このような建築物の設計に加え都市防災や防災に役立つ合理的・科学的な知見を提供できることを期待し，第 5 章では，実際の気象モデルの解析で再現されたつくば竜巻時の竜巻構造を用いて，ハイブリッド手法による市街地の計算を実施し，都市や住宅地など，実環境中での竜巻の風速場・圧力場，また被害発生過程に関する分析と考察を行った．

ハイブリッド手法による気象場と高周波変動成分再生成の解析については 5.3 節および 5.4 節に示した．建築空間の安全性の解析に関しては，初めに，市街地などの都市における建物を有する地表面が与える影響を明らかにするため，5.5 節で平坦面・一様粗面上での竜巻の構造，形成される流れ場などの比較を行った．その後，実都市の建物への影響を想定するため，5.6 節で地形変化のある中高層街区内での竜巻の挙動，突風，建物への影響に関する解析を行った．最

後に，実被害の推定への適用性を確かめる目的で，5.7 節ではつくば竜巻の実際の経路内の大きな被害が集中して発生した北条地区に対して本ハイブリッド手法を適用し，実環境での風速場や圧力場の構造を明らかにし，被害分布との対応を推定した．その後顕著な被害の発生した建物の被害プロセスに関する推定も実施した．これらの解析により得られた結論を 5.8 節に示した．

5.3　気象モデルによる解析

気象モデルによる解析データ[1]は，気象研究所 益子渉博士からの提供を受けた．気象場の解析の概略を以下のとおりである．2012 年 5 月 6 日の発生したつくば竜巻の発生に至る過程から衰退までのプロセスを再現した解析で，NHM モデルにより JMA メソ解析データによる環境場を初期条件として行われた．計算領域は，水平解像度の異なる 4 つの領域（1km, 250m, 50m, および 10m）からなり，最外領域の 1km 解像度の領域の大きさは 1000 km 四方である．最内領域である 10m 解像度の領域の寸法は 40km×30km である．鉛直方向には 250 層配置され，地表からモデル上部(10,760m)まで格子間隔が 10m から 50m へ徐々に拡大する．最内領域での計算時間は 12:05–12:20(JST) の 15 分間であり計算時間間隔は 0.05s である．また乱流スキームには全領域において 1.5 次 TKE クロージャ―モデルが用いられた．

計算により，竜巻の環境場として rear flank downdraft (RFD) やガストフロントなどの構造も再現された．また，竜巻の親雲であるスーパーセルの構造，さらに C-バンドレーダーにより観測されたフックエコーとよく似た構造が再現され，観測と同様にフックエコーの先端において竜巻が生成された．なお解析は実現象よりも早く進行し，竜巻の発生時刻は 25 分ほど早かった．再現された発生場所は実際の場所から北に数キロ程度のずれだった．竜巻の経路長は実現象とおおむね一致し，解析の竜巻も実現象と同様に山のふもとにおいて減衰した．運動の向きと速度も実現象とおおむね一致した．気象モデルにより再現された竜巻の構造（Q 値の等値面 $Q=0.09s^{-2}$）を図 5-1 に示す．色付けは鉛直渦度（青-1s-1～赤+1s-1）であり回転の方向を示している．竜巻の地表付近には接線方向に伸びる渦が見られた．また渦の周囲では回転方向の異なる渦が多数上昇する様子が観察された．

なお Q 値の定義は，式(5-1)の通りである．

$$Q = \frac{1}{2}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \frac{1}{4}\left(|\text{Vorticity tensor}|^2 - |\text{Strain} - \text{rate tensor}|^2\right) \qquad (5\text{-}1)$$

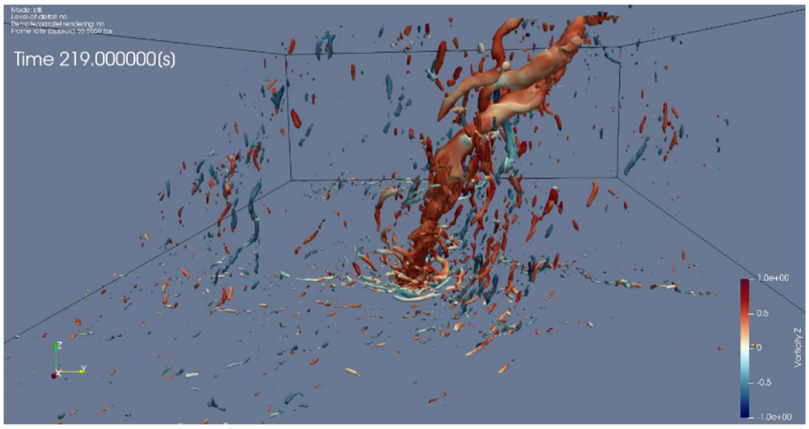


図 5-1　NHM モデルにより再現された竜巻渦の可視化

(Q 値等値面 Q=0.09s^{-2})

5.4　竜巻に対する高周波変動成分の再現

得られた竜巻の気象モデル出力結果を空間解像度 50m，時間間隔 1s で取り出し，3 次元の風速場，温位場に基づいて，高周波成分再生成計算を実施した．計算条件を表 5-1 に示す．

表 5-1　高周波変動成分再生成の計算条件

計算領域	水平方向：4km(南北)，6km（東西） 垂直方向：1.4km (海抜 76m-1.45km)
格子解像度	水平方向：25m　（均一） 垂直方向：約 4-20m（不均一）
時間ステップ間隔	0.005s
計算の時間範囲	12:12:00-12:17:00 JST（5 分間）

図 5-2 に風速場の鉛直場に対する高周波変動成分を示す．竜巻の流れ場において，それぞれの場所での構造に基づいて局所的な細かな変動が再現された．図 5-3 には生成された変動をもとの気象場に付加する前後での比較である．渦中心付近の竜巻の上昇流や，上昇流を後方から囲むように存在している下降流（RFD），また環境場の乱流の構造のいずれにもより細かな乱れの構造が再現された．

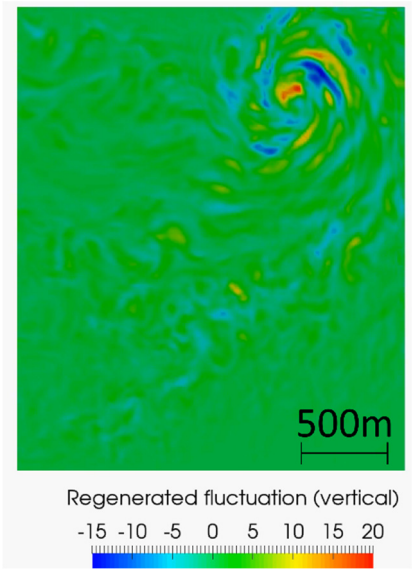


図 5-2　風速場に対する高周波変動成分の再生成(海抜 250m 面)

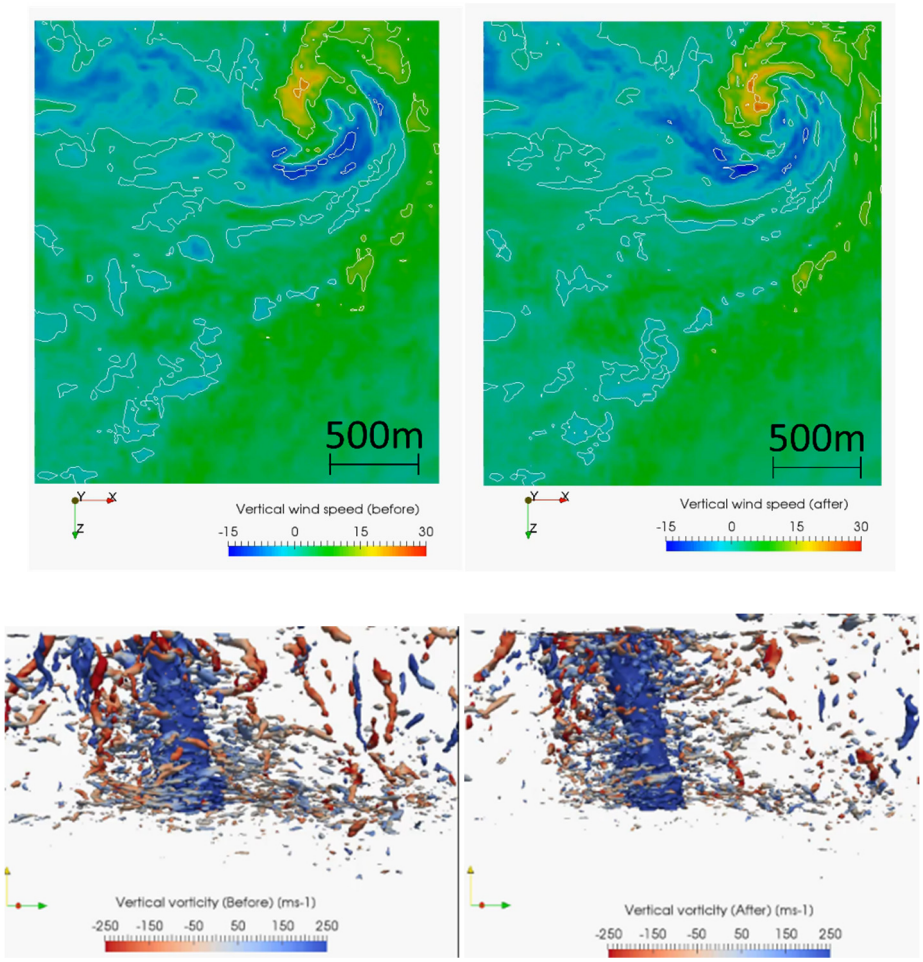


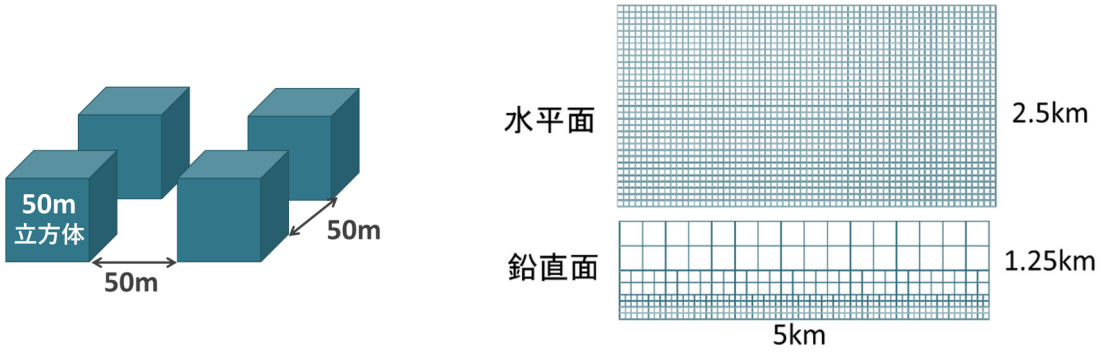
図 5-3　高周波成分の再生成前後の流れ場の比較

（左：再生成前，右：再生成後）

5.5　都市の地表面形状が竜巻に与える影響

建物を多数有する地表面形状が竜巻の構造に与える影響を明らかにするため，大都市を想定した平坦面と図 5-4(a)に示す 50m 立方体の粗度ブロック(建ぺい率 25%)の一様粗面の上を運動する竜巻構造を比較した．

計算領域は，東西 5km×南北 2.5km×鉛直 1.25km の範囲とした．計算格子は両ケースで共通であり図 5-4(b)に示す．図中にはマルチグリッドシステムの外側の格子(Cube)のみ示されており，各 Cube は 16^3 個の内部計算格子(Cell)を持つ．地表面での最小格子解像度は約 4.9m である．その他の計算条件は表 5-2 に示す．高さは地表面から海抜 1.25km までであり，竜巻およびその環境場である積乱雲内にある積乱雲内の low-level メソサイクロンの下端，ガストフロント，RFD などが領域に含まれている．市街地領域は約 1 分間のごく短時間の解析であるから，物理量として風速と圧力のみを計算している．熱の影響は考慮されていない．初期条件，西・南・北側の 3 面の側方境界（一様粗面のケースでは西と南の 2 面）および上部の境界条件として気象場の非定常現象を再現した．流入が少ない他の側方境界は自由境界とした．下部境界は地形と建物を STL 形状ファイルで表現されており，immersed boundary 法を用いて格子内の地表面を no-slip 条件で与えた．なお第 2 章で述べたとおり，海抜 79m（最下層格子点高さ）から地表面までの範囲については，地表の影響が卓越する範囲であり，初期値と境界値としては，最下層格子点高さのデータに基づきべき乗則(つくば竜巻の流れ場を用いたケースにおいてすべて α =0.184) によって値を与えた．スピンナップの時間と境界からの距離を取り十分に流れがなじむよう配慮した．



(a)　　(b)

図 5-4　(a) 50m 立方体粗度ブロックの配置．(b)計算格子

表 5-2　BCM-LES の計算条件 (平坦面・一様粗面)

計算領域	水平方向：2.5km (南北),　5km（東西）, 垂直方向：1.25km (海抜：0m-1.25km)
格子数	約 3900 万（平坦面ケース・ブロック面ケース）
時間ステップ	0.005s
計算時間	12:14:55–12:16:06 (1 分 11 秒間)

図 5-5 は NHM により出力されたオリジナルの構造と BCM-LES での地表条件が平坦面の時と，50m 立方体の一様粗面の時の同じ時刻の構造を比較している．渦構造は Q 値の等値面 (Q = 0.125, 1, 2 s^{-2})により表現した．平坦面では各時刻において，総括的にみてオリジナルの構造と非常に近い構造をもち，特に地表面では類似の構造を持つ水平渦が再現されている．より細かな構造的特徴を確認すると，オリジナルに比べて明らかに細かな構造が多数再現されているほか，地表での抗力が気象モデルより小さいためか，竜巻本体はオリジナルよりもやや太くまっすぐな構造を持ち地表面まで到達している．これに対し一様粗面上では，大きく構造の変化が見られた．市街地で多数の上方に伸びる渦が形成し，これが竜巻と接続しており，ブロック高さの約 6 倍(300m)以下では，竜巻渦の構造が局在化している様子が観察された．それよりも上部の竜巻構造については半径が収縮し，回転流の弱化が発生した．また，図 5-6 は鉛直流速分布である．一様粗面上では竜巻の渦構造が分裂して存在した付近において鉛直流速は上昇していることが確認できる．このことは，建物の地表の建物の配置により，竜巻の渦の収束性を生じ上昇流が強化されたものと考えられる．上昇流の強化は vortex-stretching の要因となり，平坦面よりも局所的には鉛直渦度を強める可能性もあることが考えられる．

建物近傍での渦の様子を確認するため，地表付近の渦構造を Q 値の等値面(Q=1.5, 3 s^{-2})により可視化した様子を図 5-7 に示す．地表付近で生成する渦は大きな渦度を持っていることから，上の竜巻渦の可視化よりも大きな Q 値を用いた．色付けは鉛直渦度であり回転の方向を示している．地表付近の渦は粗度ブロックの隅角部で生じており，竜巻の中心付近では上へ引き上げられており，竜巻本体の渦と一体となる様子が確認された．

次に，地表により近い場所での風速場と圧力場の変化を確認した．図 5-8 はストリート内の高さ 20m 風速場 (絶対値) の分布である．平坦面では最大半径と右側後方のガストフロント内の局所的な強風が見られるが，一様粗度ブロック内では強風構造の収束性が強まった．なお収束流ではあるものの，この竜巻の運動方向と竜巻渦の回転方向と進行方向の一致する，右側において風速がより高い傾向が確認された．図 5-9 は高さ 53m (粗面では屋根 3m 上) の位置での圧力分

布である．この時刻において，平坦面ではほぼ同心円状に低圧部が分布していたのに対し，粗度ブロック状では中心は負圧の中心はいくつかに分裂し存在していることが確認される．図 5-10 は圧力の鉛直断面を示す．地表で生じる渦との相互作用の結果，屋根面や側面に対して局所的に作用を及ぼしながら運動する様子が確認される．

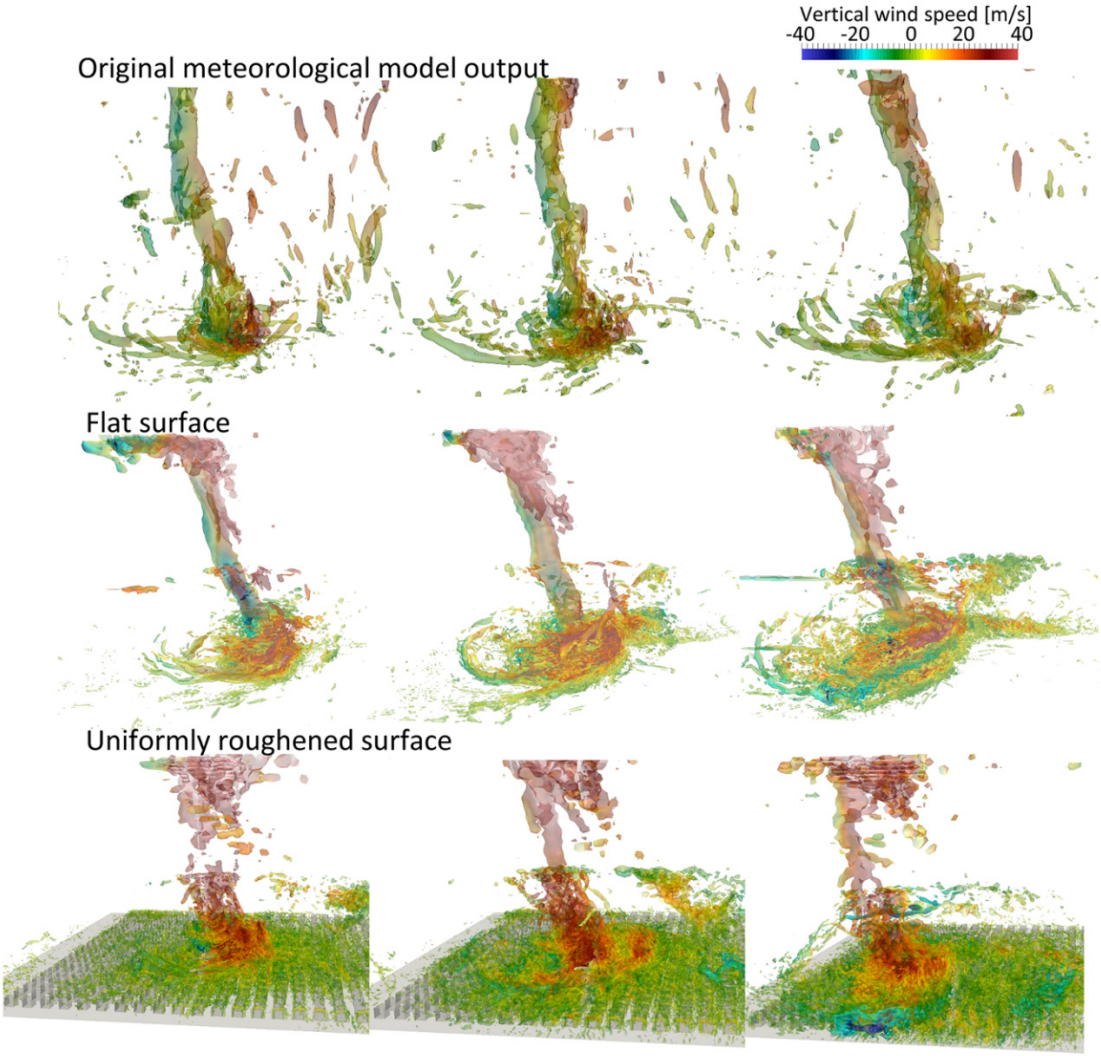


図 5-5　異なる地表面上の竜巻の渦構造の比較．(Q＝0.125,1,2; 上段：NHM 解析オリジナル，中段：BCM-LES 平坦面，下段：BCM-LES 一様粗面; 各段左から順に 12:13:25, 12:13:45, 12:14:04)

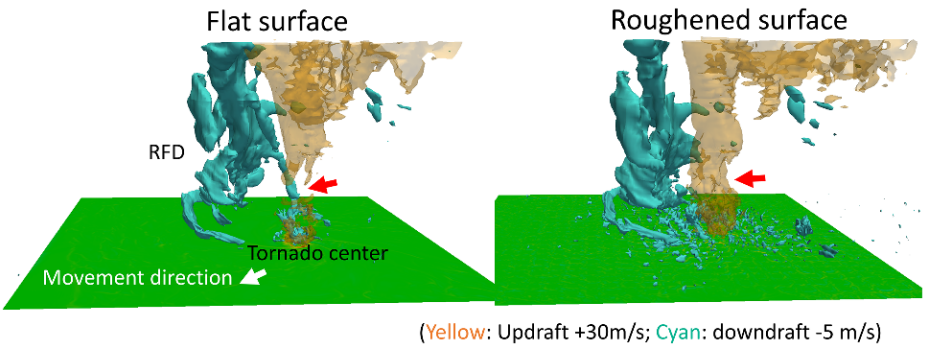


図 5-6　竜巻周辺の鉛直流速の分布の比較 (左：水平面，右：一様粗面)

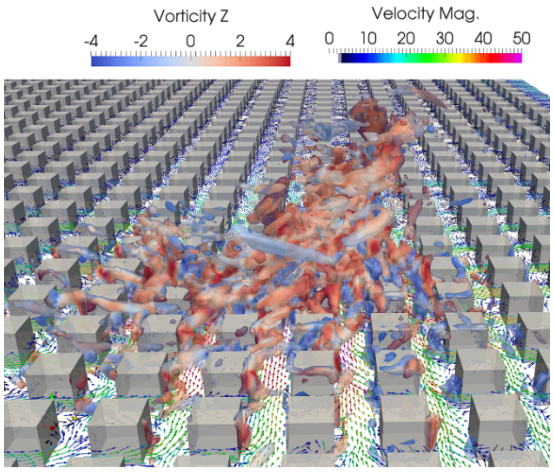


図 5-7 竜巻直下の粗度ブロック周りの渦構造

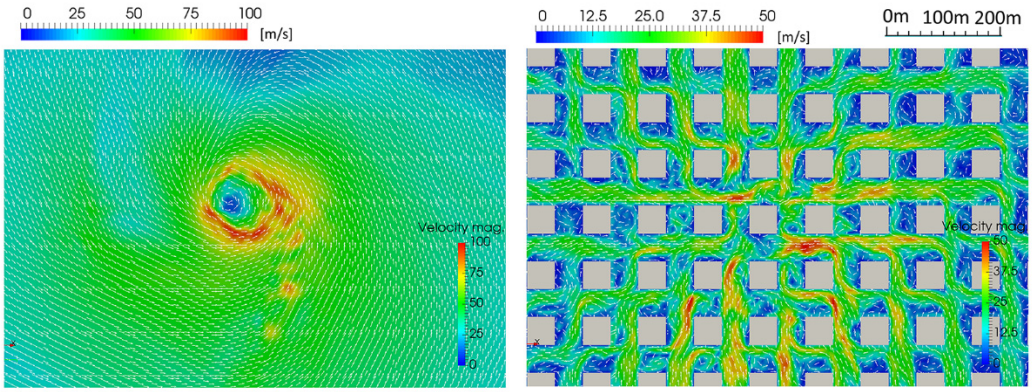


図 5-8　速度絶対値の水平分布（高さ 20m，12:13:05）

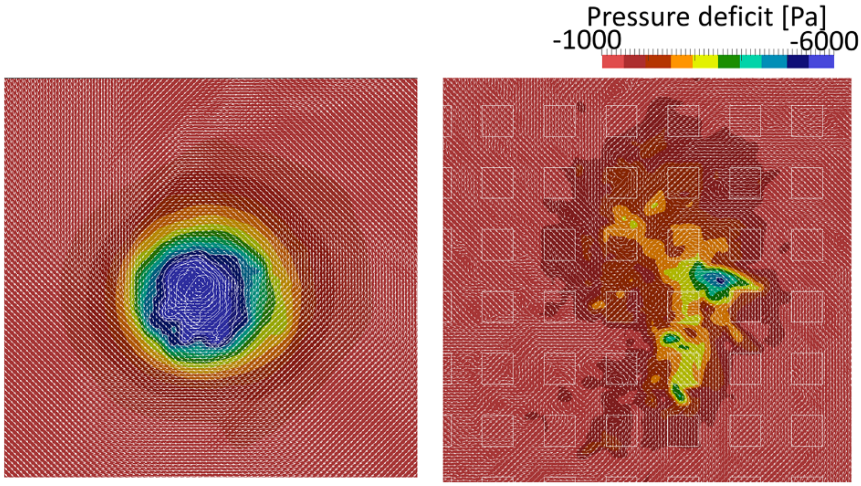


図 5-9　圧力の水平分布（高さ 53m，12:13:16）

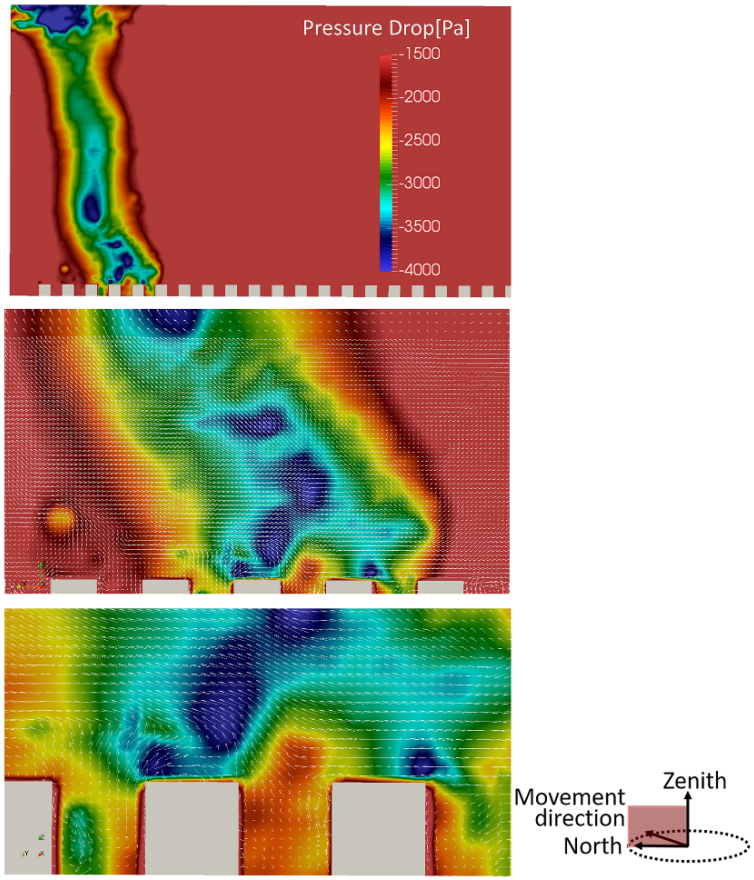


図 5-10 竜巻中心付近の圧力場の鉛直断面

次に，市街地内の突風の特徴を明らかにするため，風速の 1 秒間隔の出力により，高さ 20m での通過の間に記録された風速の瞬間最大値（時間平均操作なし)の分布を図 5-11 に示す．なお

竜巻は北東に移動し，図中では右下から左上への方向である．平坦面では，風速絶対値は竜巻運動の方向に沿って直線的に分布し，鉛直流速はサイクロイドのような曲線的な運動の軌跡が竜巻運動方向に見られた．一方，粗面のブロック内では，風速絶対値は竜巻の運動方向の左側では東西ストリートで南北ストリートより風速が顕著に大きく，また進路右側では南北ストリートで顕著な強風が吹いたことが示された．反時計回りの回転流が，収束性の強い流れとなる際，より中心に直接流れ込みやすい向きであるためであると考えられる．粗面での鉛直流速のピークはブロックの角に位置しており，ところどころでは角と角の間で高風速が連続している様子が見られた．地表から上空に引き上げられる渦構造あるいは竜巻の渦と対応することが示唆される．

それぞれの風速変動の時刻歴を図 5-12 に示す．図中の星印の点の位置での 1 秒毎の時刻歴である．竜巻通過時の，市街地内部での風速絶対値の時刻歴は平坦面に比べ顕著な低下がみられるがピークの付近では急激な増速がみられる．上昇流の時刻歴については流速の絶対値は大きな変化が見られず，粗面内では長時間にわたって，強い鉛直流の変動が継続して発生した．

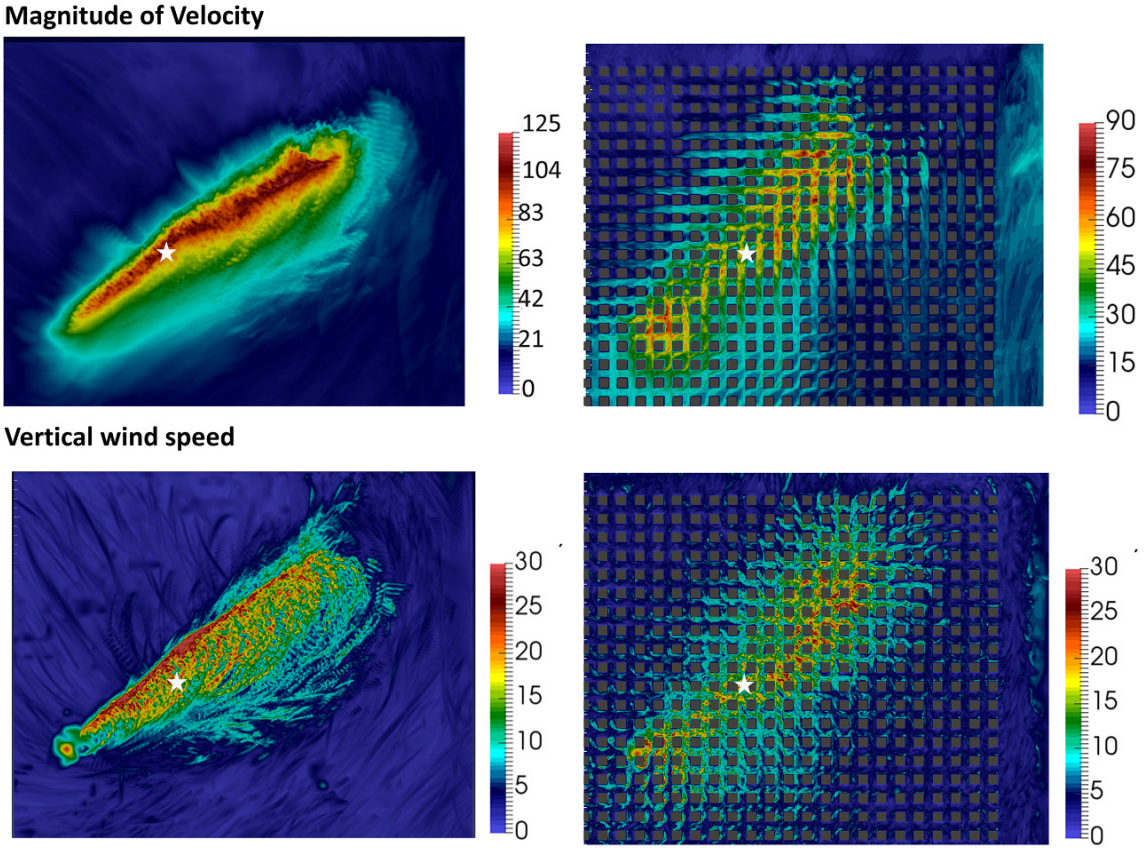


図 5-11　1 秒毎の出力に基づく風速の最大瞬間値(時間平均なし)の分布

（上段：風速絶対値，下段：鉛直流速）

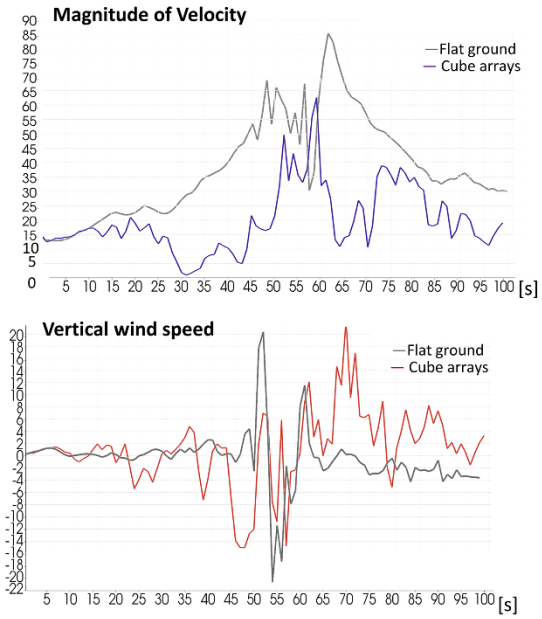


図 5-12　図 5 -11 の位置での風速変動（上：絶対値，下：鉛直流速）

5.6　地形変化のある中高層街区での竜巻渦の運動性と建物への作用

5.6.1　計算条件

5.6 節では実市街地の建物の竜巻被害を検討するため，中高層街区の実建物と実地形が再現された街区を地表面条件とする計算を行い，建物の周辺で形成される竜巻の流れ場，竜巻の運動性への地表の影響および建物表面に生じる圧力の時刻歴変化について解析を行った．

本ケースで使用した実中高層街区モデルの地表面モデルを図 5-13 に示す．地表モデルは東工大すずかけ台キャンパス内の建物の形状と地形に基づく．再現領域は半径 300m である．計算格子を図 5-14 に示す．この図でも BCM-LES マルチグリッド格子の外部計算格子のみを示している．計算領域の寸法は 5km（東西）×2.5km（南北）×1.25km（鉛直）で平坦面と一様粗面と同じある．実街区での計算条件は表 5-3 に示す．

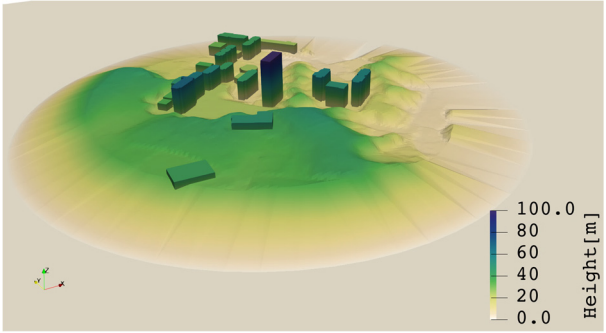


図 5-13　実中高層街区モデル

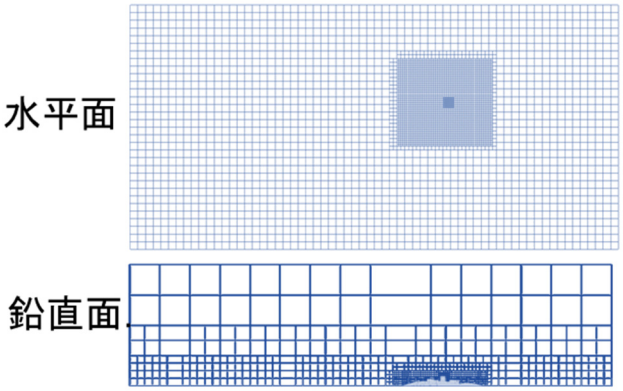


図 5-14　計算格子(実中高層街区モデル)

表 5-3　BCM-LES の計算条件 (実中高層街区モデル)

計算領域	水平方向：2.5km(南北),　5km（東西）， 垂直方向：1.25km (海抜：0m-1.25km)
格子数	約 1.37 億
時間ステップ	0.002 s
計算時間	12:14:55–12:16:06 (1 分 11 秒間)

5.6.2　地形の変化のある市街地での流れの構造

図 5-15 に実建物街区上に形成された地上約 50 m における竜巻中心の構造を示す．竜巻の旋回流は乱流であり，強い乱れが最大風速半径付近の高風速域内にも確認される．建物配置など地表の影響により渦中心付近の構造もいびつなものとなっており，渦中心がいくつかに分かれているように見える．図 5-16 には別の瞬間における建物周辺の流れを鉛直断面を示す．上空に比べ地表付近で水平風速．鉛直流速が最も大きく，建物の周囲で水平風速は 80m/s に達し，上昇流

は 10 m/s からところによって 40 m/s 以上の非常に強い値が確認される．また様々な鉛直，水平の局所的な循環が建物の周りで発生し，非常に複雑な風速場が形成されている．

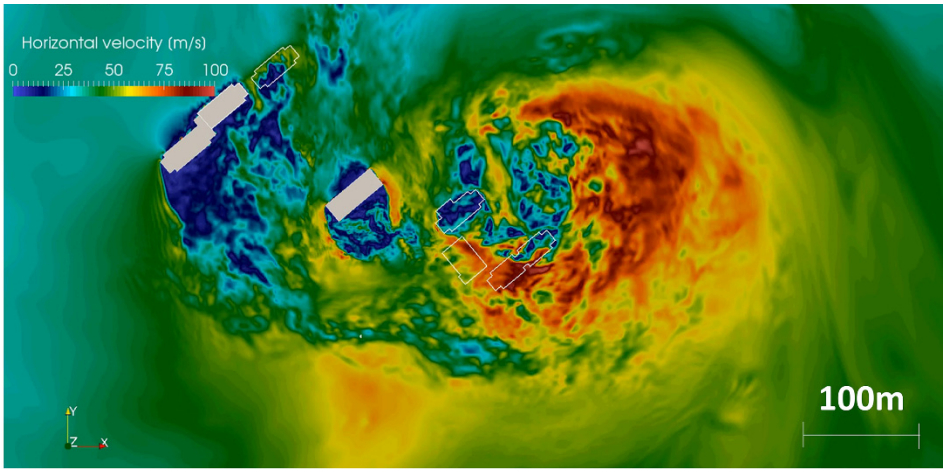


図 5-15　実中速街区内での水平流速分布（地上約 50 m）

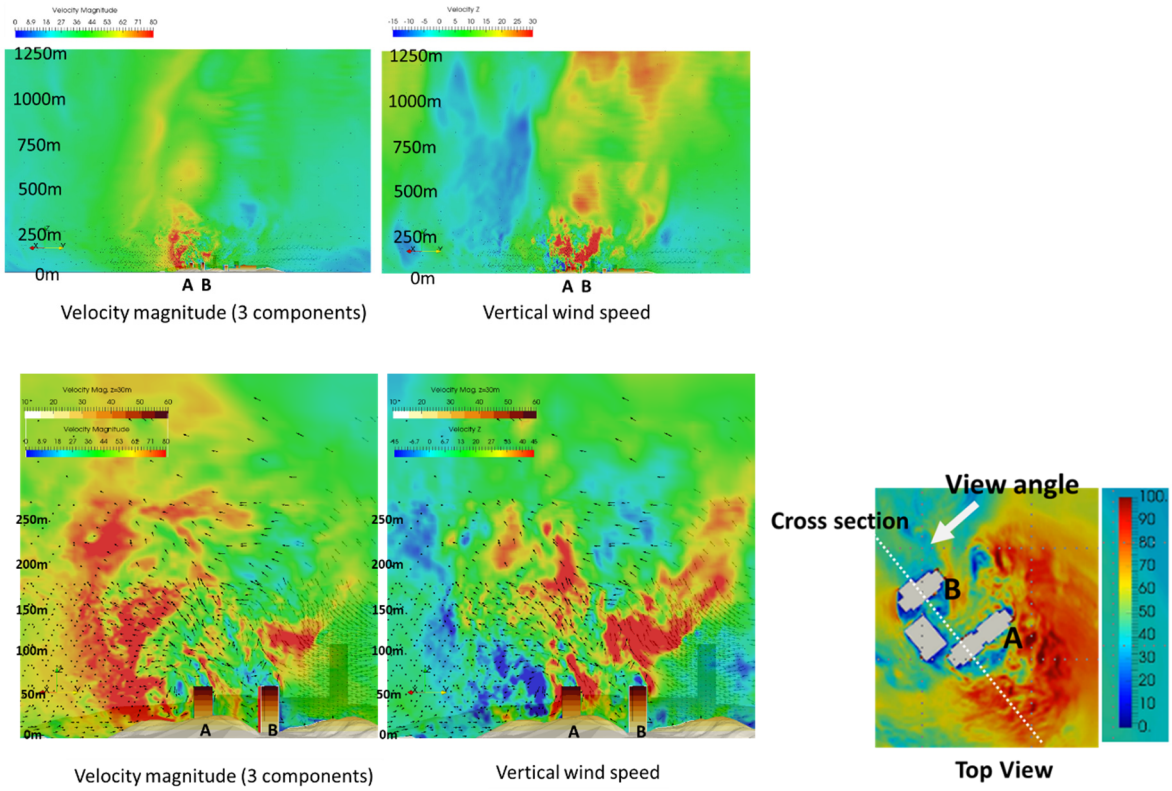


図 5-16　竜巻渦の鉛直断面の風速分布(左：絶対値，右：鉛直成分)

5.6.3　運動の変化について

図 5-17 に実中高層街区での建物を竜巻が建物の近傍を通過する際の運動の様子，2 秒ごとの中心位置と圧力の等値面(-55hPa)による竜巻の渦構造を示す．渦構造は実地形上で低圧部が揺動しながら運動する様子を示している．2 秒毎の竜巻中心位置の推移からは，平坦面での直進運動とは対照的に運動の方向と速度の変化が大きく変化しており，竜巻の渦が建物へ接近する間は大きく加速し，建物を離れる際にはしばらく滞留したことを示している．図 5-18 は，2 秒おきの竜巻の渦(圧力等値面 -55 hPa)を重ね合わせ，この建物に(a) 近づく時と(b) 離れる時について分けて示したものである．(c)は平坦面での(a)に対応する時刻である．これらの図より，今回の地形のある街区では，建物への接近時に地表付近の竜巻が加速し，離れる際に減速したことが確認され，この影響は建物高さの約 10 倍 (500m)以上の相当の高度まで波及していた．同時に影響の伝達がかなり速やかに起こったことを示している．

図 5-19 は建物周辺での Q 値による渦の可視化である．建物や地形から発生した渦は，上方に引き伸ばされ，通常の境界層とは大きく異なる低圧領域を形成している．今回の解析においては，竜巻は，このような地形や建物の影響で渦が発生し低圧になりやすいところへ運動する傾向が見られた．図 5-20 には建物および地形との影響による渦形成と竜巻渦の運動について例示する．なお図 5-20 下段のような地形により形成される水平な渦は，建物により生じる鉛直の渦に比べ，より長時間継続的に存在する傾向が見られた．

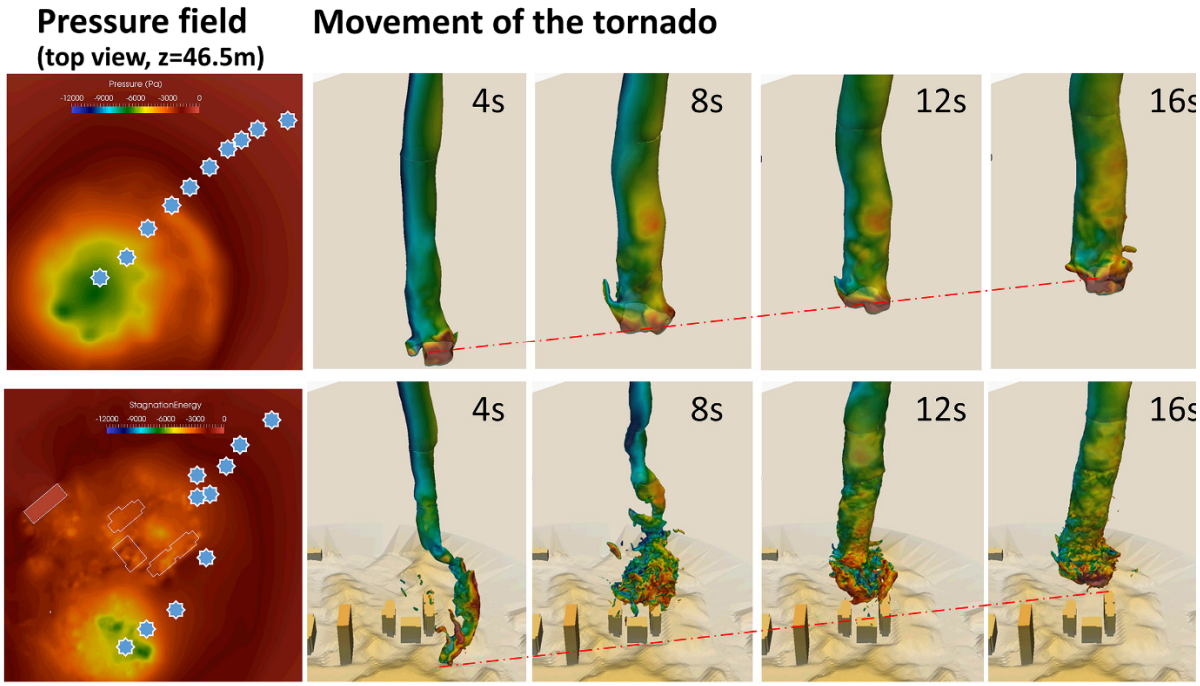


図 5-17　平坦面と実中高層街区での建竜巻渦(圧力-55 hPa 等値面)の 2 秒毎の中心位置の推移

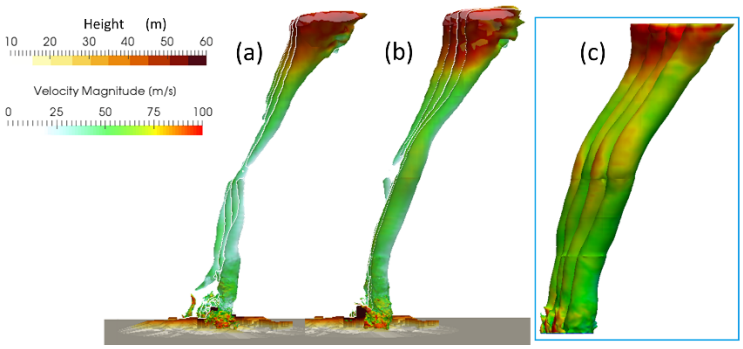


図 5-18　側面から見た竜巻渦の(a)建物に近づく時と(b)遠ざかるときの 2 秒ごとの位置.

(c)は平坦面での(a)の時刻に対応する運動

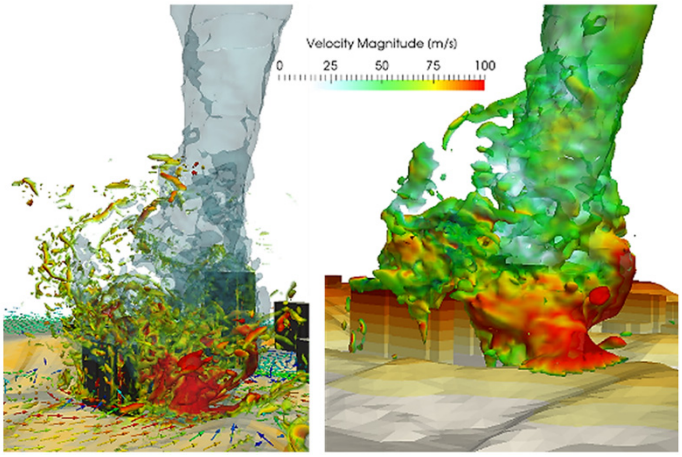


図 5-19　建物周りの渦構造

左：Q 値等値面（$Q=32s^{-2}$）紺色の半透明は圧力場を表示，右：圧力のみ(-55hPa)

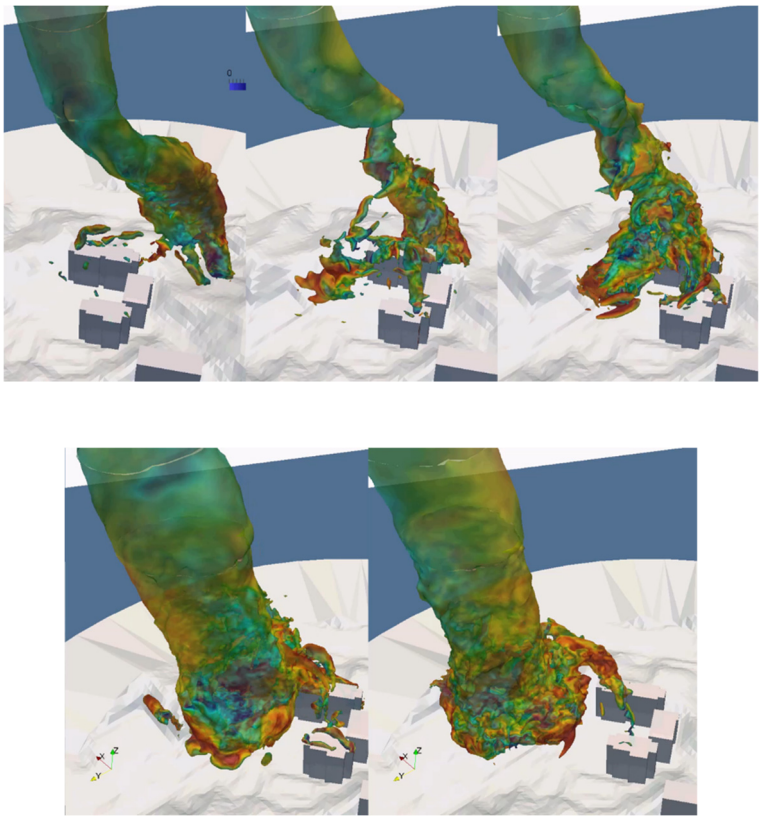


図 5-20　竜巻の周囲の建物や地形での渦形成（圧力等値面 -55 hPa）

上段：建物後方で発生した渦と運動の変化.

下段：尾根地形に沿って発生した渦と運動の変化.

5.6.4　中層建物表面での非定常圧力の分析

最後に当該街区内で竜巻が直接作用した建物について，風圧力の解析を行い，現行の設計基準での対応性について議論する．ここでは，最も大きな負圧が発生することが予想される屋上に着目し分析を行う．竜巻が通過する間の屋上高さ 2.6m 上空（地上約 46.6m）での圧力分布の変化を確認した結果，瞬間的に 130hPa を超える負圧が屋根内の異なる 2 か所で確認された．図 5-21 はそれぞれのピーク発生時の圧力瞬間場の可視化，およびそれぞれの点での速度場と圧力場の時系列である．気象庁の瞬間風速の定義（3 秒平均値）になるべく近い時間として，風速に対して 3.2 秒間の移動平均を施した結果を示した．圧力に対しては TVL 法[2]の考え方に基づいて，建物の部材の大きさに対する代表的な平均化時間を 1 秒としこれになるべく近い，1.2 秒の移動平均を施した結果も重ねてプロットした.

圧力の瞬間場の可視化からは，これらの点が隅角部の円錐渦内部に位置する事が確認された．発生に至るプロセスを確認した結果，点 A では，竜巻の本体の渦が．当該建物を含む 3 棟の建物の配置がコの字となっている内側へ回り込む途中で，風向が変化し円錐渦がより鋭角になる過程であった．渦の直径が小さくなり，角速度速度が増大した可能性が考えられる．点 B については竜巻渦が建物の後方で停滞が発生した期間(概ね 20s から 26s の間)であり，この円錐渦から常に建物後方の竜巻まで水平な渦の伸長が見られ，竜巻の負圧による影響を受けやすい状況であることが推察される．なおこの水平渦が切れた時刻に圧力の急激な上昇が見られた．また竜巻の建物後方での滞留が発生した時間帯において，点 A で上流側の建物の剥離せん断層が繰り返し作用する風向が維持された結果，強い瞬間風速が発生した．点 B では負圧のピークのタイミングと重なったため強い負圧が長い時間継続的に作用した．表 5-4 に風速(3 秒平均値)と圧力(1 秒平均値)のピーク値を示す．また以下で考察する外装材の設計値と対応する-60hPa の圧力を超過した時間の長さを示す．

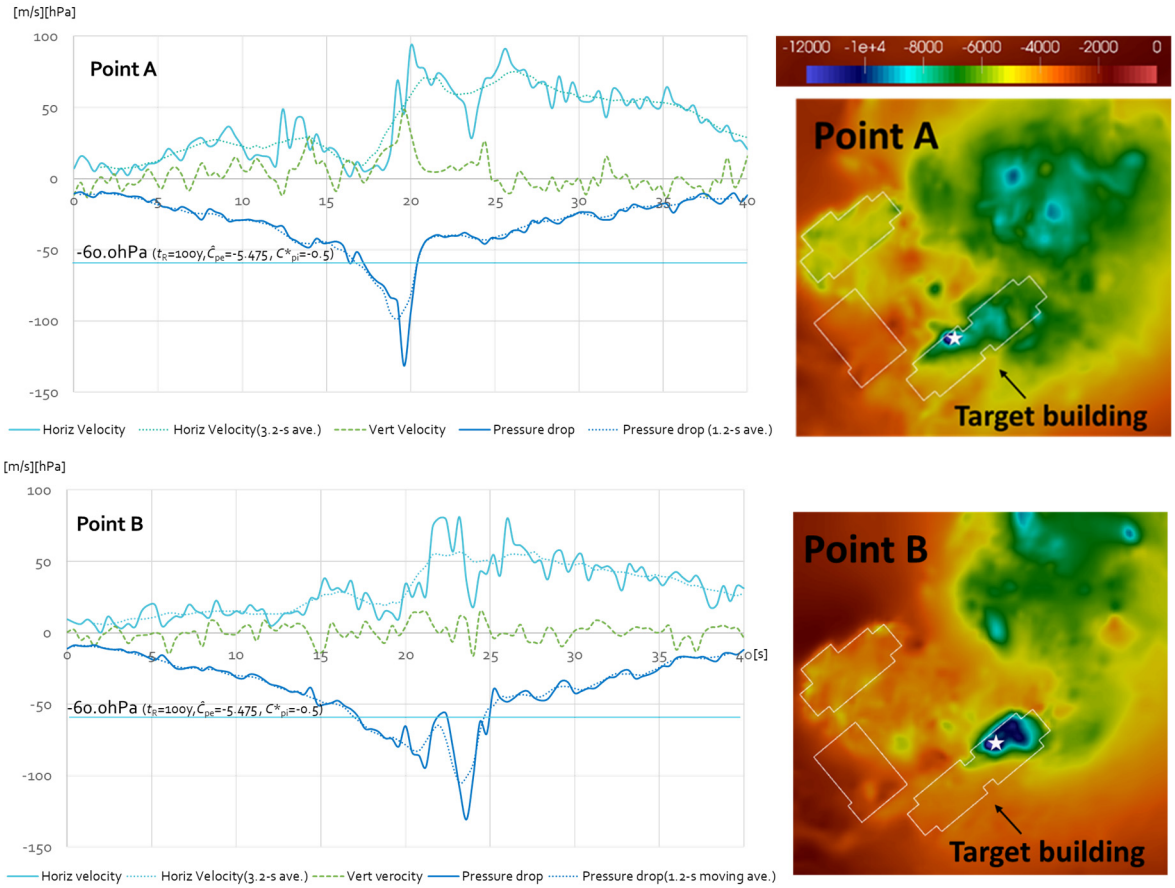


図 5-21　建物屋上でのピーク負圧発生点での時系列と発生時の圧力場：
中高層街区ケース(建物高さ 44m, 解析高さ 46.6m)

表 5-4　点 A，点 B でのピーク値と-60hPa 超の負圧継続時間

	ピーク圧力[hPa] （1.2s 平均値）	ピーク水平風速[m/s] （3.2s 平均値）	-60hPa 超の負圧継続[s](*陸屋根隅角部， 5m の外装材設計値，再現期間 100 年）
点 A	131 (98.6)	93.0 (74.8)	3.6
点 B	130 (105)	80.9 (56.7)	7.6

この風圧のピーク値と現行の法令による設計基準との比較を行う．藤田スケール F3 の突風による力では，鉄筋コンクリート造の建築物が大きな損傷を受ける可能性は低いため，今回は外装材の設計を対象とした．ここでは実際の立地である神奈川県横浜市を想定して，陸屋根隅角部に適用される設計値との比較を行った．この際に仮定した諸元を表 5-5 に示す．

表 5-5　竜巻が直接作用する中層建物について想定設計の諸元

地表面粗度区分		III
地形による割増 E_g		1
風速 [m/s]	告示 基準風速	34
	荷重指針 基本風速等	U_0=38，U_{500}=42
建物寸法 [m]		H44*W67*B17　（アスペクト比 1.31）
内圧変動の効果を表す係数 C^*_{pi}		- 0.5

これらの仮定に基づく平成 12 年建設省告示第 1458 号に基づく設計値は，単位面積当たりの設計風荷重は-34.8hPa となり，シミュレーションによる負圧に比べると極めて過小であった．荷重指針に従った場合は，建物のアスペクト比による場合分けがあり当該建物のようなアスペクト比 2 以下の建物の設計はピーク外圧係数が告示より厳しくなる．また荷重負担面積の考慮があり局部風圧低減係数が設定されている．荷重負担面積 5m^2 以上の外装材の設計値は，再現期間を 100 年および 500 年と仮定した場合，それぞれ-60.0hPa と-73.4hPa となった．再現期間 100 年の設計値に相当する負圧-60.0hPa を超過する時間は，表 4 に示した通り，点 A で 3.6 秒間，点 B で 7.6 秒間発生することが推定された．表 4 に示した解析値の負圧はいずれの設計値よりも低いことから，今回の設計を行った場合は，竜巻によって屋上隅角部の外装材に損傷が発生する可能性が高いと判断される．小さい部材の設計は局所的な負圧の影響をより強く受けることから，より高い耐風性が必要であり，さらに 1m^2 以下の部材について検討を行った．荷重指針に従って，対応する局部風圧低減係数を与えた結果，再現期間 100 年と 500 年での設計風圧はそれぞれ

-80.0 hPa, -97.9hPa であった．この場合についても，解析値の方が設計値よりも低くなり被害が発生する可能性があることが推定された．

5.7　つくば竜巻の地表の流れ場の再現と被害推定

5.7.1　つくば竜巻の概要

2012 年 5 月 6 日 12 時 35 分頃，茨城県常総市でスーパーセル型の竜巻が発生し，その後つくば市内を移動し，市内において多くの竜巻被害が発生した．被害経路は 17km，被害幅は最大 500m であった．気象庁は日本では過去に発生した最も強い竜巻と同等の藤田スケール F3 (約 5 秒間の平均で風速 70m/s–92 m/s) と評定した[3]．

図 5-22 に竜巻経路上の建物被害を示す．表 5-6 に示す通りつくば市では住宅の密集する北条地区において被害が集中して発生した．

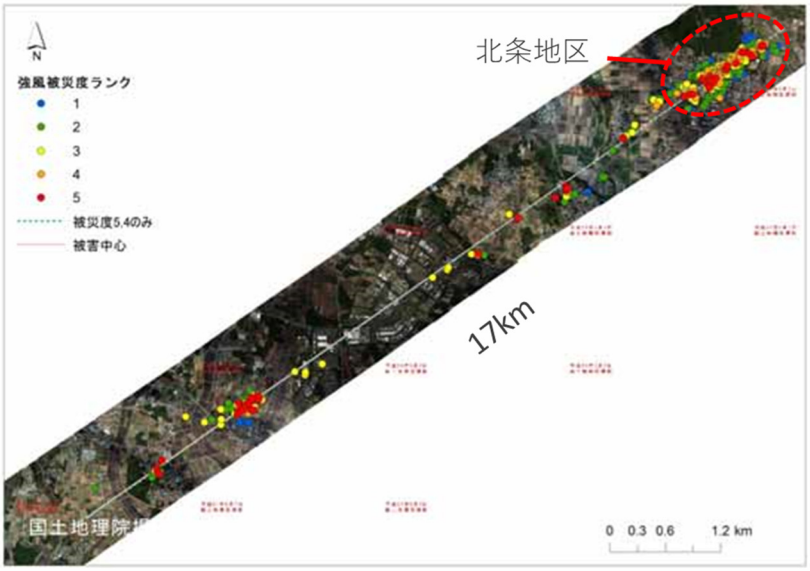


図 5-22　つくば竜巻　建物被害の分布 [4] (一部加筆)

表 5-6　つくば市内の住家被害[4]

	つくば市全体	北条地区
全住家被害棟数	651	456
うち全壊棟数	89	72

5.7.2　北条地区における実現象の風速分布の推定

北条地区では，国土技術政策総合研究所と建築研究所により，被災直後にすべての住宅の被害状況が現地調査と航空写真により調査され，各建物の被害は，表 5-7 に示す強風被害度ランク[5]によって評定が行われた．一方，喜々津ら[6]は木造住宅の構造部材や外装材の様々な被害の発生風速を耐力試験に基づいて推定しており，推定風速は各被害の推定風速は通常用いられるべき代表値と，上限値と下限値により整理された．これらの値は日本版改良藤田スケールにおける風速の評定方法として採用されている．各被災度ランクに対応する喜々津らの推定風速も表 5-7 に併せて示す．

本研究では，北条地区の被害調査の結果からコンクリート造と金属造の建物を除外したデータを木造として，喜々津らによる推定風速を組み合わせることで，つくば竜巻の北条地区での実現象における最大瞬間風速の分布を推定した．図 5-23 に北条地区における木造住宅の被害分布を示す．図中の建物 A ではべた基礎から上部構造全体の転倒，建物 B と建物 C では基礎から上の構造がすべて飛散する木造住宅の全壊が発生した．建物 D は 5 階建て集合住宅であり顕著な外装材被害の発生した．図 5-23 の建物 A から建物 D の建物の被害状況を図 5-24[4]に示す．本研究では，これらのうち木造住宅である建物 B，RC 集合住宅である建物 D についての被害推定を実施した．

表 5-7　強風被災度ランク[5]による木造住宅の被害例と対応する被害の発生風速[6]

ランク	被害の具体例	推定最大瞬間風速 (3 秒平均値) 代表値(下限値–上限値)[m/s]
1	住宅のテレビアンテナが曲がる．樋が落ちる．小枝が折れ，葉が飛ぶ	30 (20-35)
2	瓦がずれる．軒先やケラバなどで部分的(屋根面積の 30%未満)に瓦やシングル，金属屋根といった屋根ふき材が飛散する．太い枝が折れる	35 (25–50)
3	屋根の広範囲(屋根面積の 30%以上)で瓦やシングル，金属屋根といった屋根ふき材が飛散し，野地板の広い面が見える．部分的に窓ガラスが割れる．軽微な外壁が破損する．太い木が倒れる	45(30-60)
4	屋根の垂木や母屋が破損する．小屋組みが壊れる． 多くの窓ガラスが割れる．	65 (50–75)
5	家屋が倒壊する	75 (55–85)

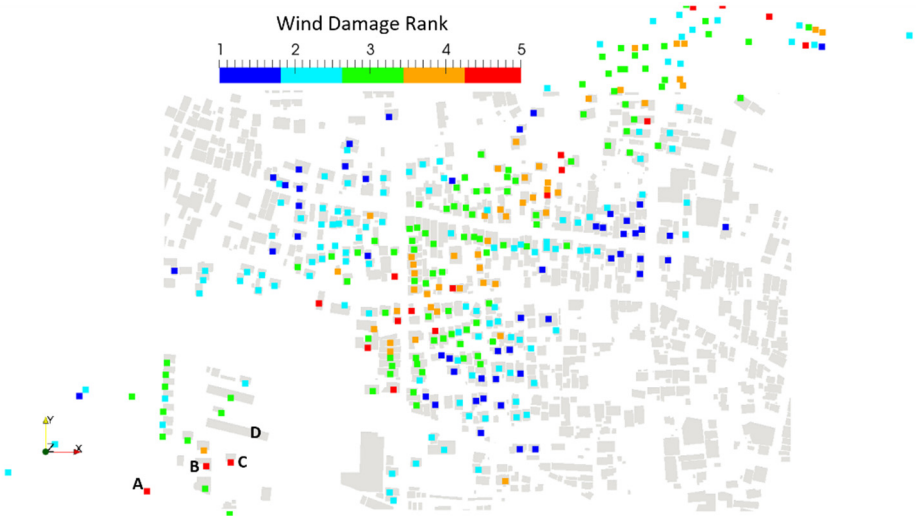


図 5-23　つくば市北条地区の被害分布．A，B，C は全壊の発生した木造住宅，D は顕著な外装材被害の発生した 5 階建て集合住宅の位置を示す．

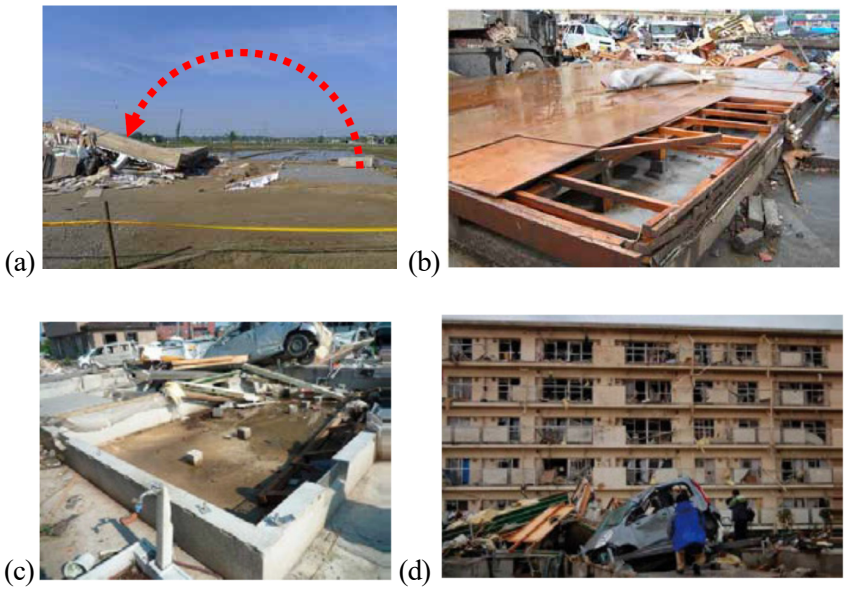


図 5-24 (a)–(d)　順に，図 5-23 に示した A から D の建物被害の状況[4]

5.7.3　解析条件

つくば市北条地区を対象とする BCM-LES の解析条件を表 5-8 にまとめる．図 5-25 に地表境界条件に用いたつくば市北条地区とその周辺の地形と竜巻を再現した地表モデルを示す．衛星測量データに基づく位置精度 2 m (水平方向) の建物形状高精度データ，国土地理院の標高データ（空間解像度 5 m）を利用し作成した．竜巻の経路を実際のつくば竜巻の経路と一致させるため，

図 5-11 右上の平坦面での風速絶対値の最大瞬間値の分布に基づいて，これが竜巻の被害経路と一致するよう，地形モデルを平行移動および角度移動（反時計回りに 2°）して調整し，北条地区への竜巻の導入を行った．今回は個々の建物について解析を行う住宅街の前方の顕著な建物被害発生場所において特に竜巻の運動方向が一致するように決定した．調整結果を図 5-26 に示す．気象場は初期値および境界値（上面と北面以外の側方 3 面）として導入された．図 5-27 に計算格子を示す．

表 5-8　BCM-LES 解析条件（つくば市北条地区）

計算領域	2.5 km (南北), 5 km (東西), 1.25 km (鉛直, 海抜 0 m–1250 m)　解析領域の平均標高 21m
計算格子数	約 9400 万格子
最小格子サイズ	0.61 m
計算範囲	12:14:55 – 12:16:15 (JST) (1m 20s)
時間刻み	0.002 s

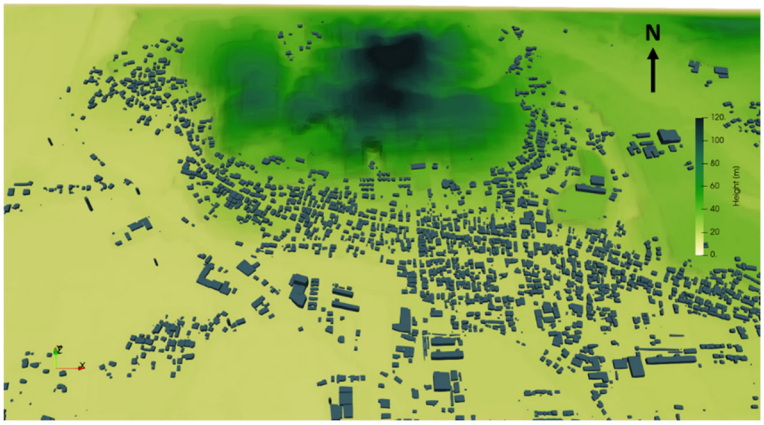


図 5-25　地形モデル(鳥瞰図)

図 5-26　導入する竜巻の位置と方向の調整状況

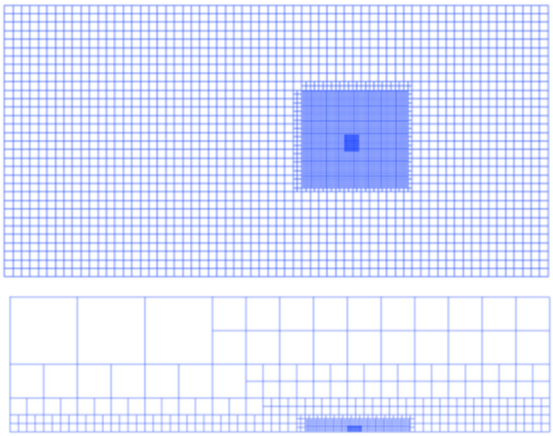


図 5-27　計算格子（上：水平断面，下：鉛直断面）

5.7.4　流れ場の確認

図 5-28 に，竜巻が，A から D の顕著な被害の発生場所付近に位置した瞬間の 3 次元の圧力分布を示す．上空の竜巻の構造はかなり揺動しているが，地表付近ではより直立した角度となっていた．建物の影響によって地表での流れの収束性が徐々に強まっていることを示している可能性がある．

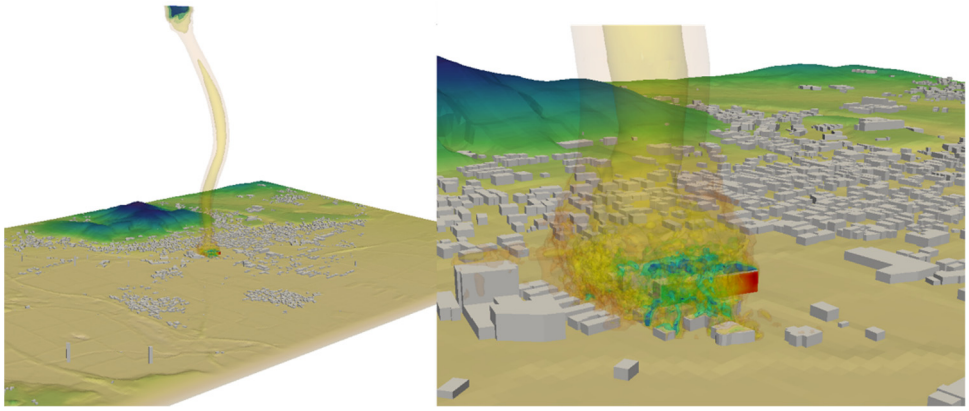


図 5-28　圧力等値面(-45, -50, -60, -70, -80 hPa) により示された竜巻の渦構造

図 5-29 および図 5-30 は北条地区に再現された竜巻の異なる高さにおける水平風速と鉛直流速の分布図である．水平面の高さは海抜 50, 100, 150, 200, 400, 800m であり，竜巻中心の位置では標高が約 25m であることからそれぞれ，おおよそ地上 25, 75, 125, 175, 375, 775 m に相当する．流れ場は高さにより大きな変化が見られた．水平風速の可視化からは，渦中心付近の風速では海抜 50m から 100m の地表近傍において最も風速が高いことが確認され，また気象場の構造に基づいた気流に基づき，地表の建物の影響を受けた流れ場や，より細かな中心付近での渦の構造が形成された．海抜 100m と比べると海抜 50m では竜巻の最大風速半径が顕著に収縮し，その内部に

強い乱れを見ることができる．流れ場の収束性も格段に高まっている．さらに竜巻の南側(図の下方)の建物において強風が連続的に発生し，竜巻中心に向かって流れに沿って伸びていることが認められる．より高い高度ではさらに渦の半径が大きくなり，中心が大きく北に移動している．鉛直流速はさらに高さによる構造の変化が顕著であり，地表付近では渦の中心では下降流が存在し，50m/s 以上の極めて強い上昇流が発達し，また局所的に 70m/s に達する上昇流の発達が見られた．また 100m より上空では竜巻の周囲を後方から取り囲む rear flank downdraft (RFD)の下降流と中心部の構造の両方が確認できる．200m 以上では中心の下降流は消失し，800m では上昇流の範囲が北に大きく広がり，low-level メソサイクロンへ遷移しつつある様子が確認される．結論として，現実的な竜巻の構造を含む流れ場が導入され，上空の気象場から，市街地において発生している流れ場の構造まで，各高さにおいて，乱流を考慮した竜巻構造が再現されていることが確認された．

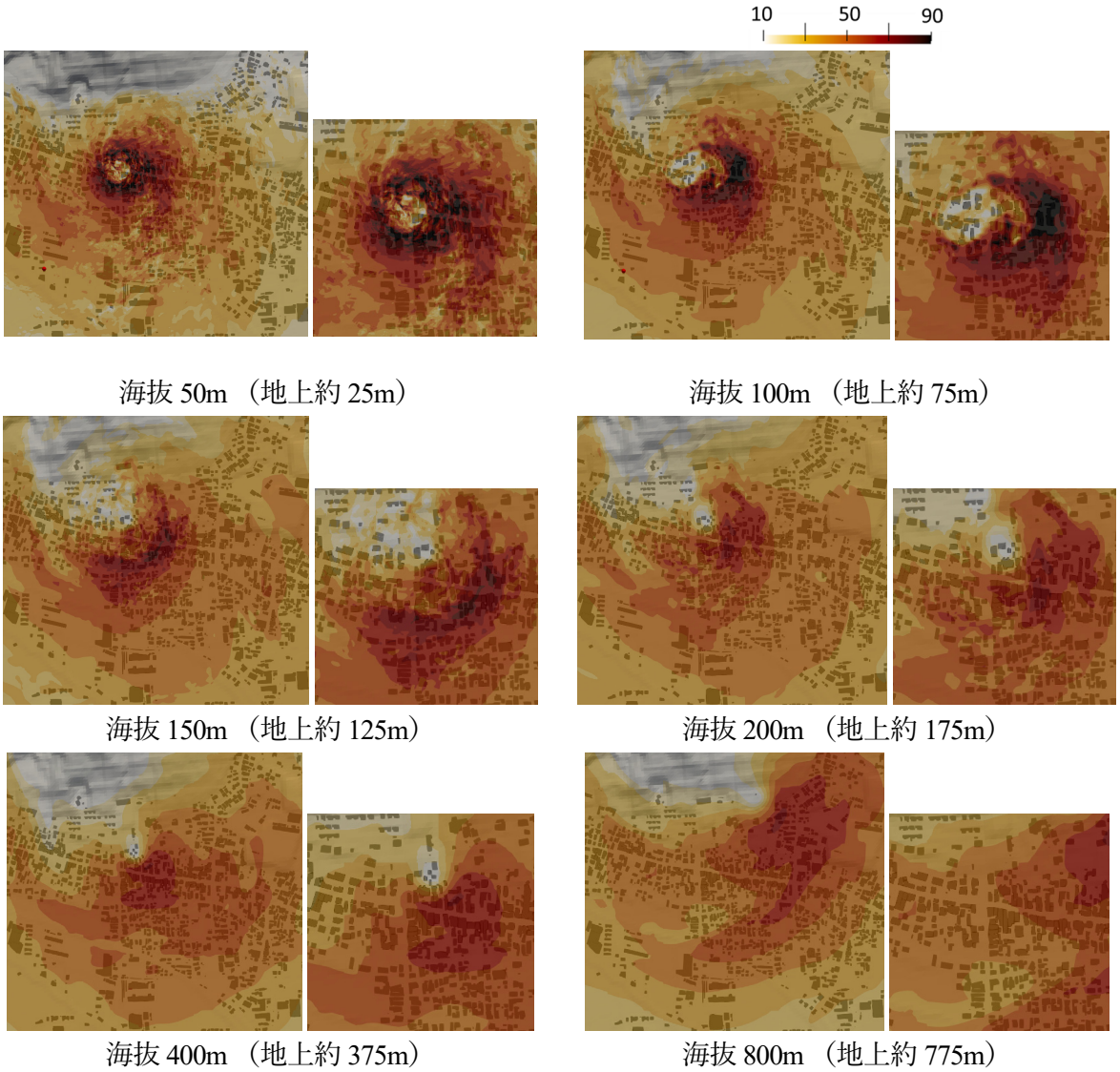
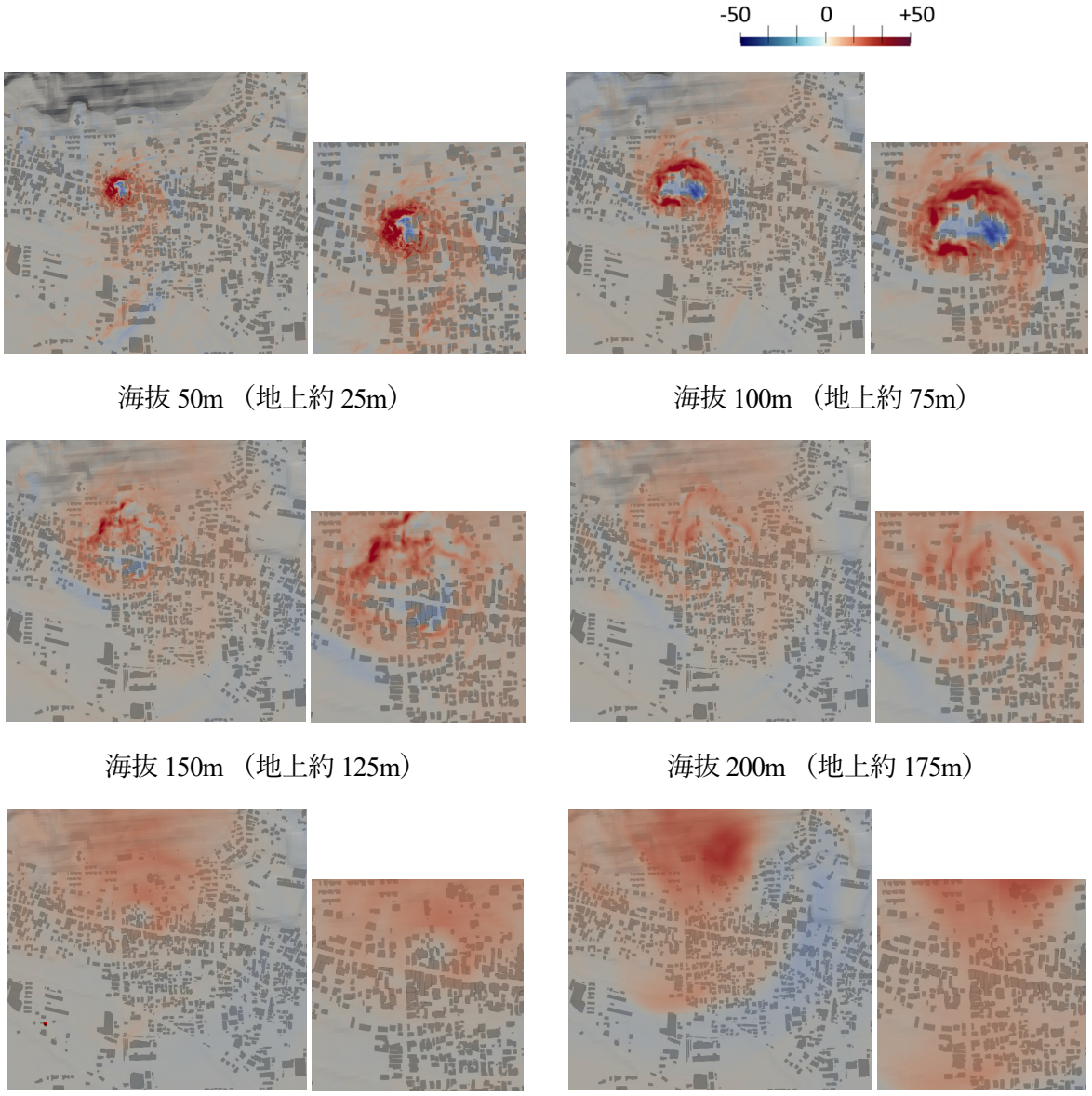


図 5-29　水平風速の分布



海抜 50m （地上約 25m）

海抜 100m （地上約 75m）

海抜 150m （地上約 125m）

海抜 200m （地上約 175m）

海抜 400m （地上約 375m）

海抜 800m （地上約 775m）

図 5-30　鉛直流速の分布

5.7.5　地表付近の強風構造

次に建物高さにきわめて近い高さの流れ場について着目した観察を行う．図 5-31 は Q 値 (Q = 20 s^{-2}) の等値面である．色付けは水平風速による．高い渦度を持つ渦は主に地表の近傍で存在しており，南側の大きな建物ほか，周辺の建物の影響で建物中心への収束流が形成された，さらにこれらの建物で生じた渦構造が竜巻中心へ伸びる様子が，はっきりと確認される．これらの渦は乱流の影響により激しく乱れているが平均的に水平な渦構造を持っている．

建物の屋根面に極めて近い風速として，北に向かって上昇する地形を考慮し，建物 B の位置で海抜 25 m (地上 9 m)であり北方向に 2 %の上昇勾配を持つ面での分布を図 5-32 に示す．また Q 値が 4 s^{-2} 以上である範囲を黒く印した．可視化図から非常にはっきりとした筋状の収束性の強い風速場が屋根上空において形成されていること，また Q 値の高い渦が建物から発生し，高風速と低風速の境界に沿って存在していることが読み取れる．したがってこれらのことから，周辺建物から竜巻の中心に伸びるロール状の渦構造により，上空と地表の運動量交換が生じ，顕著な風速差を持つ強風分布が生成されたことを示唆している．

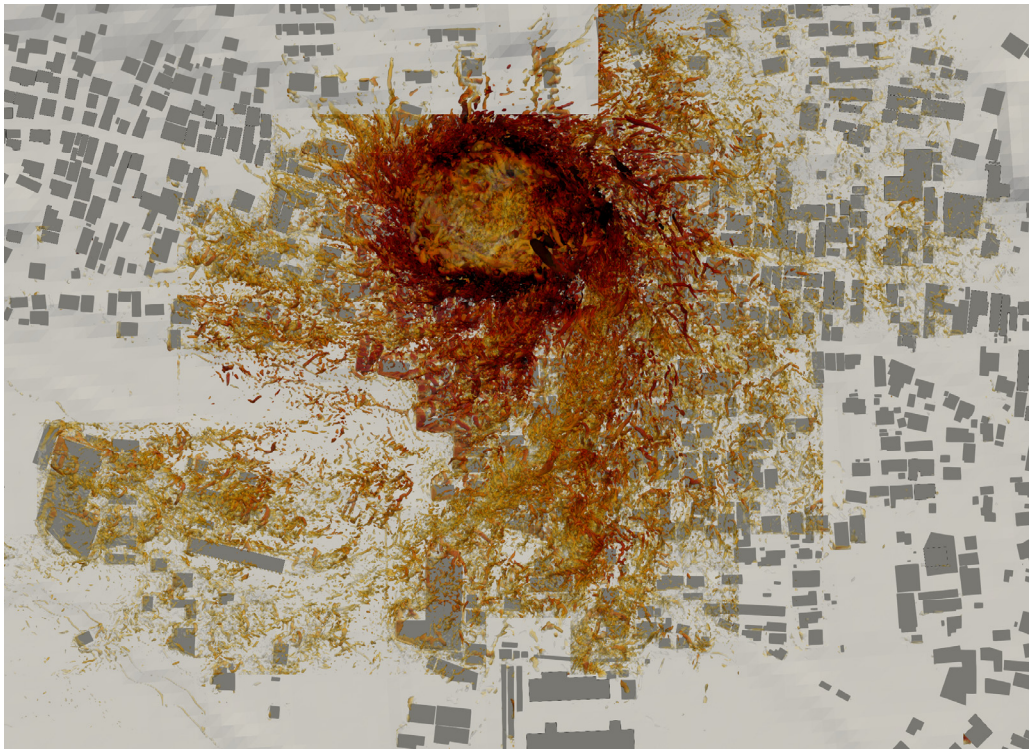


図 5-31　Q 値の等値面(Q=20s^{-2})

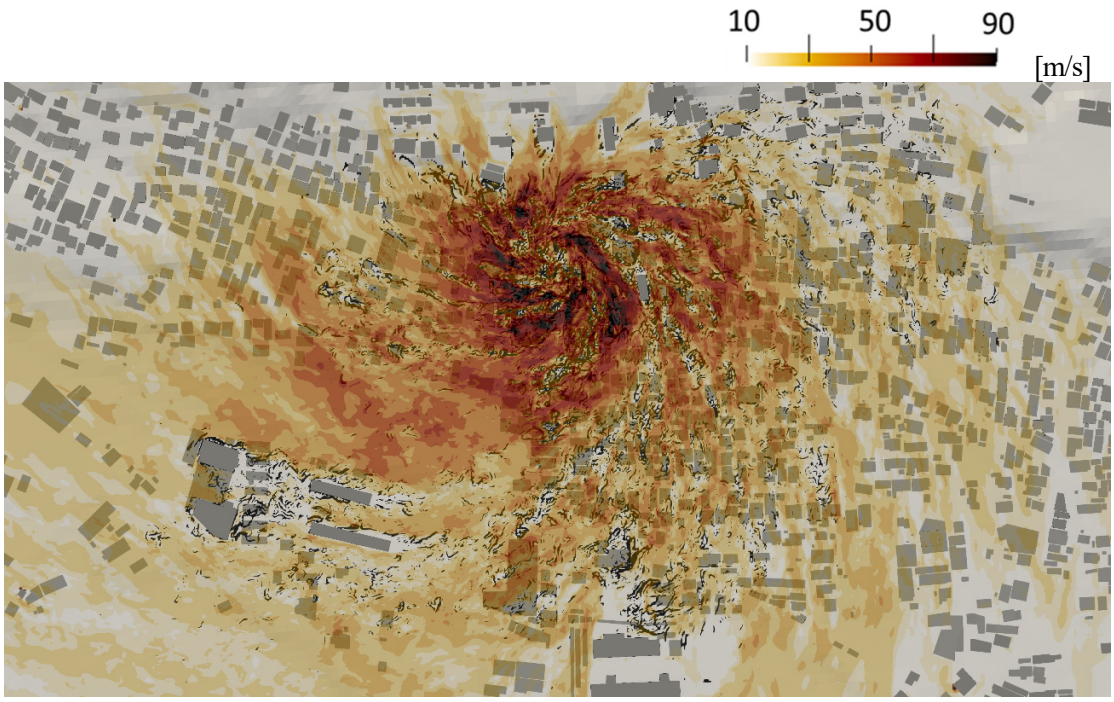


図 5-32　建物 B の位置で海抜 25m (地上 9m)であり北方向に 2%の上昇勾配を持つ面内の水平風速．Q 値が $4s^{-2}$ より高い範囲が黒く印されている．

5.7.6　被害分布とシミュレーションによる推定風速分布の比較

図 5-33 に計算時間全体の，海抜 30m (地上 15m 以下)における負圧分布と竜巻の被害分布の比較を示す．おおよそ実際の被害の発生位置に沿った竜巻の運動が再現されたている．またメカニズムは完全に明らかでないものの，竜巻の北条地区への導入時に平坦面での竜巻の運動に基づき図 5-26 に示すような経路となることを想定していたが，これよりも実際の経路に近い経路を移動した．このことは，北条地区の地表条件を用いた条件の違いによるものであり，地表の再現性の重要性を示唆している可能性がある．Lewellen[7]が様々な地形上で竜巻様渦の LES 解析を実施して示した，局所的な収束性による坂道での進路変化を説明するメカニズム等に加えて，実建物の配置による渦構造や，流れ場の収束性等の影響も，進路に影響を与えている可能性があると考えられる．

図 5-34(a)は，海抜 30m (地上約 15m～0m) での解析により得られた最大瞬間風速分布(3 秒平均値)と実際の竜巻被害分布の比較である．強風被災度ランク 3, 4, 5 の風速の代表値に対応する 45m/s, 65 m/s, 75m/s のコンターラインを重ねて示した．この最大瞬間風速は，空間内の各点での竜巻通過時の 0.2 秒間隔の瞬間値の出力に対し，3 秒の移動平均を施し取得した．竜巻経路に沿って，中心付近では常に 60 m/s を超える水平風速が連続的に分布し，80m/s を超える部分も多

く確認された．大規模な外装材被害に相当する強風被災度ランク 3 の被害と比較すると，解析値は被災度ランク 3 の被害分布よりも広がっていた．しかし，被害全体の発生場所に沿って風速変化が見られ，大きな被害が発生した場所ではより大きな風速を予測するなど，実際の建物の被害発生の傾向を概ねよく捉えられていると考えられる．さらに，上空の竜巻の実現象の再現性や現象の不確実性，また実際の建物の築年代によっての施工方法の違いや経年劣化など街区の特徴を考慮して考察することで，今回の結果をより厳密に検証することが可能であると考えられる．

構造被害に相当する強風被災度ランク 4 および 5 の被害と比較すると，被害幅は概ね 100-200m 程度でありこちらは実際の被害の発生幅の広がりを概ね再現した．ただ，集合住宅 D (矢印)を通過し，住宅街に入ってしばらく進むまでの間において，計算された竜巻経路の右側に実被害が集中する領域が見られる．このことは，わずかな気象場の構造や再現された街区の違い，建物と竜巻の相対的な位置関係などの違いにより竜巻渦の地表での運動性に違いが連続的に引き起こされた結果であると考えられる．したがって，この確率的である，建築空間における竜巻のカオス的なランダム性について，竜巻経路や気象場・乱流現象の不確実性に起因する影響をアンサンブル解析の実施により定量的に考慮を行い，建築空間におけるリスク評価や低減策のへ活かすために，建物形状や建蔽率など街区の特性と関連付けた解析や市街地での運動経路に解析がさらに行われることが望ましいと考えられる．

また最大瞬間風速分布において，直線的な特に強い風の領域が，進路左手では東西方向，進路右手では南北方向に伸びる傾向が確認される．これは図 5-11 に示した理想街区での最大瞬間風速の分布とよく対応しており，また図 5-23 に示した，周辺建物から発生する水平なロール状の渦構造の影響を受けている可能性もあることが推察される．

以上の結果から，本手法による解析結果は，概ね実際の外装材，構造の被害分布をとらえられていることから，今後建築空間で発生する運動や負圧形成のランダム性，気象場の再現性，地区年代に基づく建物情報や建物構造の考慮により，より精密かつ定量性の高い建物形状竜巻被害推定やリスク分布の推定として適用できる可能性は十分にあると判断される．

図 5-34(b)は経路の前半部分を拡大した海抜 30m(地上 15m 以下)における計算による最大瞬間圧力低下の分布(1 秒平均値)と竜巻の被害分布の比較である．最大瞬間圧力低下も 0.2 秒間隔の出力から，最大瞬間風速と同様の方法で算出された．竜巻の経路に沿って-55hPa 以下の負圧が連続的に見られた，経路中のいくつかの点では局所的に-80hPa 以下となっていた．概ね竜巻は直

進しているが，集合住宅 D (矢印) の通過時など周囲の建物配置によって，竜巻の運動の方向がわずかに変化していることが確認できる．また，竜巻の圧力低下のピークは，最大瞬間風速ピークの 30 m から 60 m 程度左側に位置している．

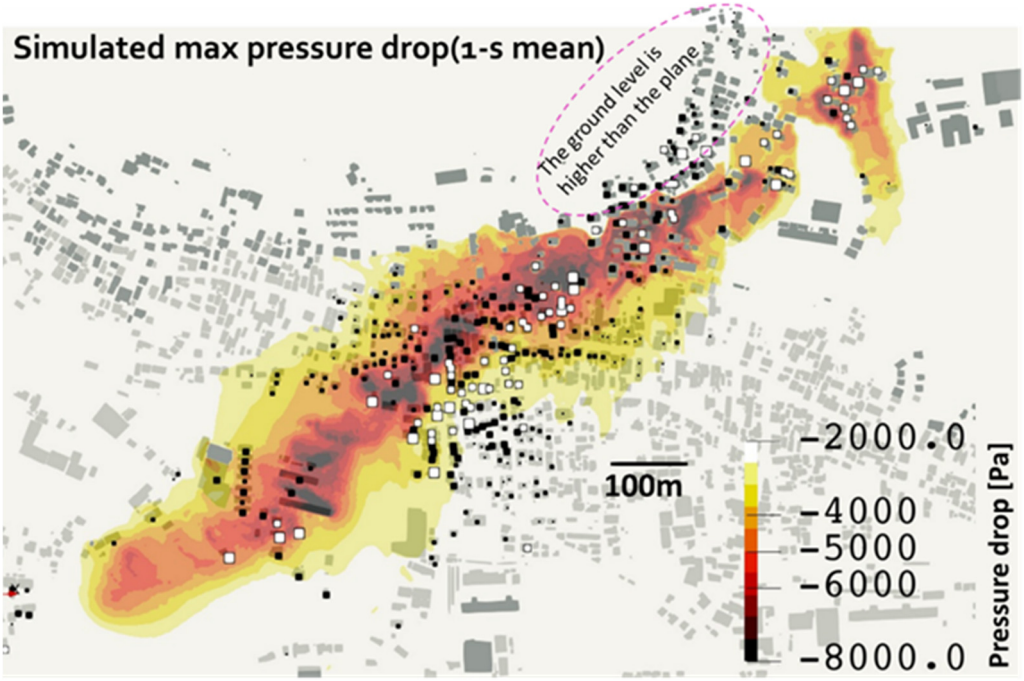
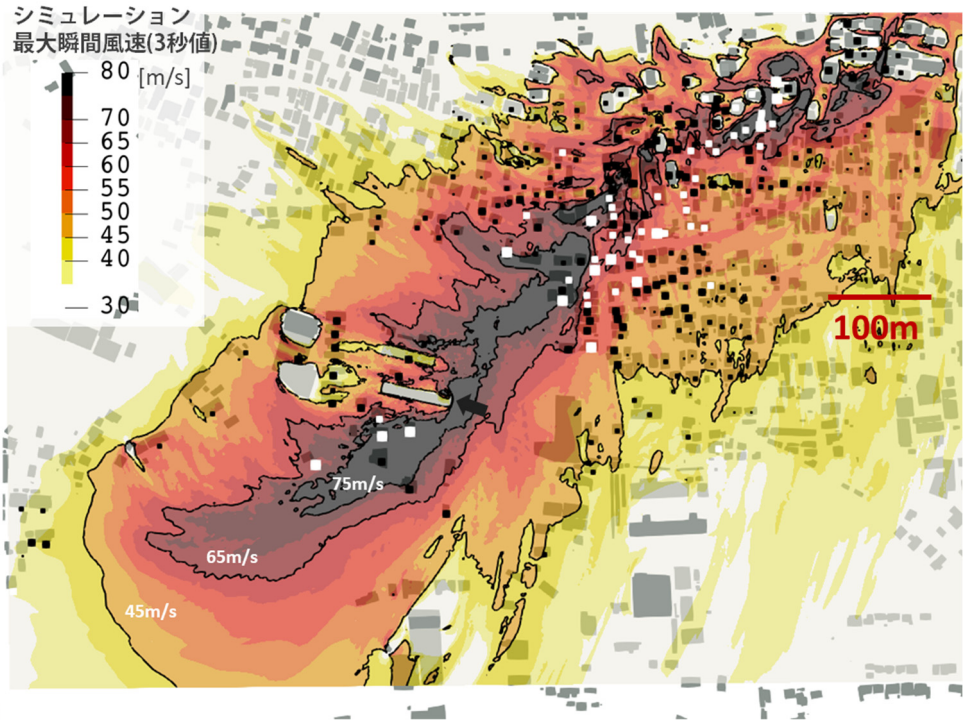
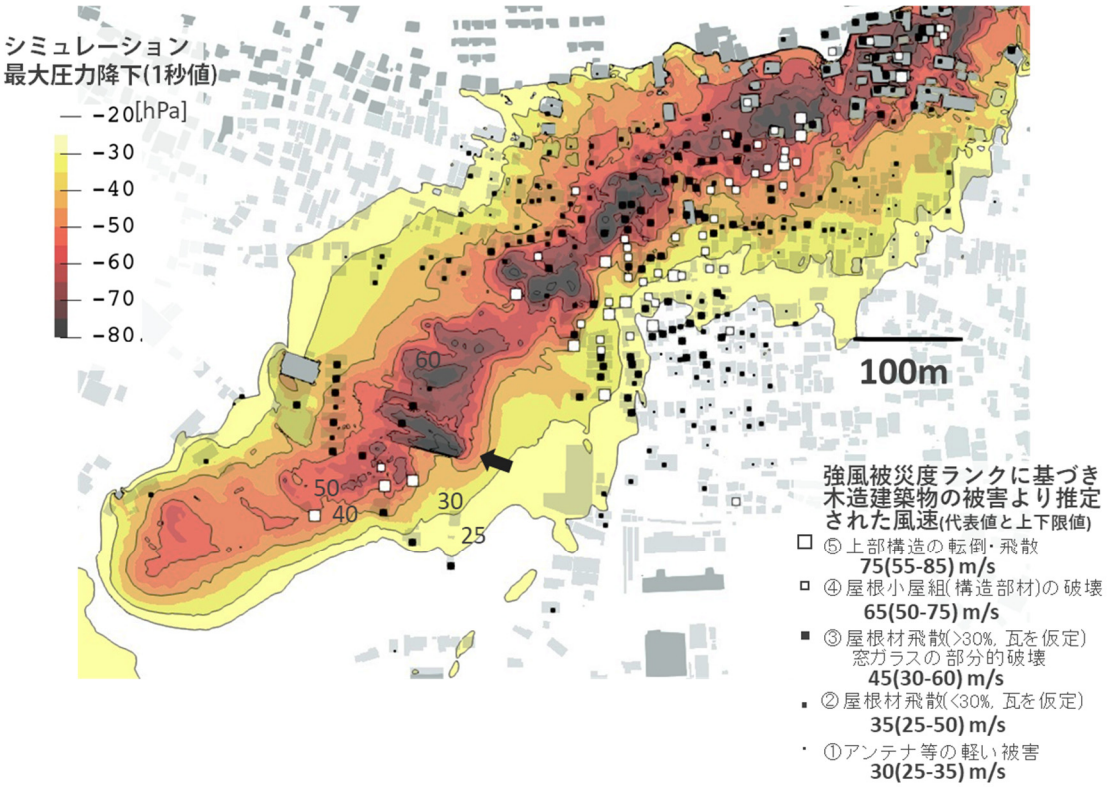


図 5-33　全計算時間でのピーク負圧の空間分布(1 秒平均)



(a)



(b)

図 5-34　(a) 計算された最大瞬間風速(3 秒平均値).　(b)最大瞬間圧力低下(1 秒平均値)の分布.

5.7.7　顕著な建物被害に関する要因分析

図 5-24 において既に示した通り，つくば竜巻は，北条地区の住宅街へ侵入する前に，その南側に立つ集合住宅とその周辺のいくつかの木造住宅において最も深刻な被害を引き起こした．この節では図に示した木造住宅の建物 B の構造被害と，集合住宅である建物 D の外装材被害についての被害の発生発生とプロセスについての推定を行う．

(a)　木造住宅の上部構造の飛散

建物 B では，竜巻の通過により屋根，壁，柱が飛散し，通過後に基礎と 1 階の床のみが残る被害を受けた．

まず，この建物に作用した流れ場と圧力場の性質を確認するため，建物位置での風速と圧力変化を確認した．壁の影響を避けこの位置を代表する風速値を得るため，建物屋根から 5m 上空において，屋根の範囲に当たる格子点 (約 400 点) の空間平均値を求め，さらにこれの 3 秒平均値を求めた．圧力については流体場の値からできるだけ正確に圧力を近似するため，壁から 1.5m 離れた位置での，屋根の範囲に当たる圧力の空間平均を求めた．これらの風速と圧力の値の時刻歴を図 5-35 に示す．水平風速のピーク 74 m/s (3 秒平均値) は 14 秒頃に発生した一方，屋根面に作用する圧力のピーク-65 hPa はそれより約 3 秒前の 11 秒頃に発生した．鉛直流速と風向の変化から，この圧力のピークは竜巻の中心の通過によるものであることが確認される．したがってこの 3 秒のギャップは，この建物の位置において竜巻の突風荷重が，ピーク風速ではなく竜巻本体の負圧によってもたらされたこと，さらにそれゆえにつくば竜巻のような強い竜巻において竜巻と対象建物の位置関係によっては，水平風速だけでなく竜巻本体負圧の考慮が，竜巻の被害を考慮する上で重要である事が示唆される．

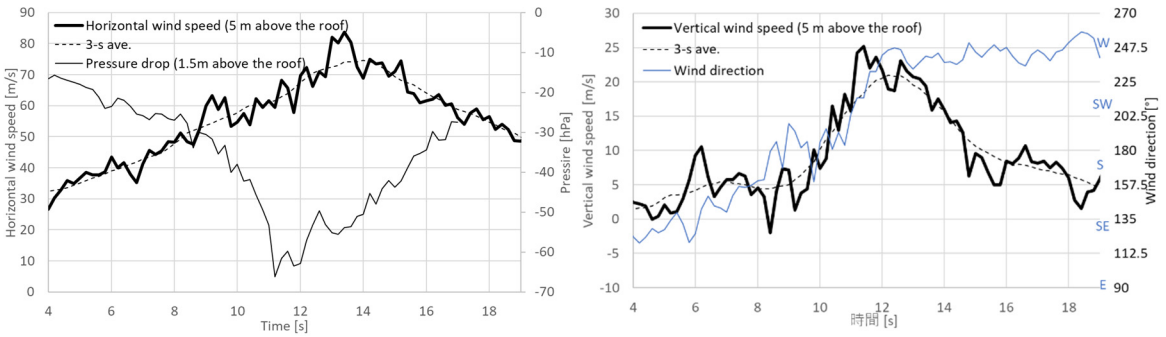
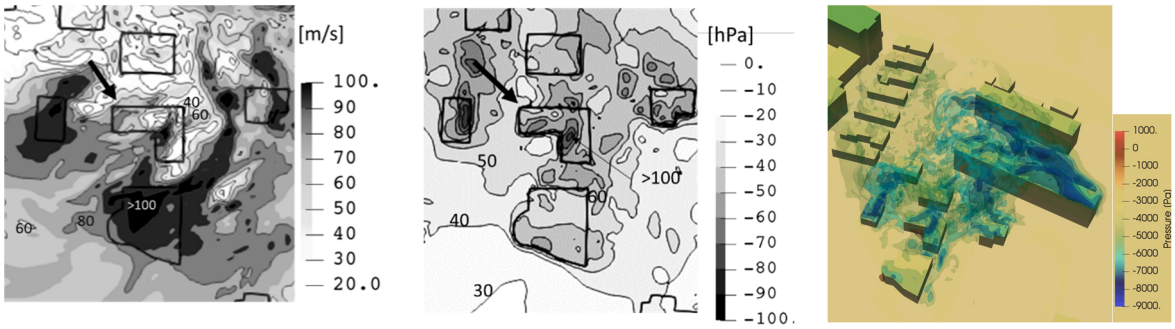


図 5-35　木造住宅 B の位置での(a) 水平風速と圧力の時刻歴，(b) 鉛直流速と風向の時刻歴．

この位置での空間的な風速・圧力の分布についても確認した．図 5-36 に示す． 3 次元の圧力場から竜巻の負圧の直下に建物がある様子が確認され上，風速と圧力の水平分布図からは，上に示した平均的な風速，圧力の変化に対して，局所的なピーク値はそれぞれ 100m/s，-100hPa に達していることが確認された．



(a)水平風速場(屋根上 5m)　　(b)圧力場(屋根上 1.5m)　　(c)圧力の 3 次元分布

図 5-36　木造住宅 B のピーク風圧時刻付近の瞬間の風速と圧力場.

破壊のプロセスを明らかにするうえではこのような局所的な圧力の分布などは非常に重要であり，空気力の時間的・空間的な変動を同時に考慮する解析を行うことが最も望ましいが，非常に複雑になるため，ここでは，建物 B が剛体であると仮定し，図 5-37 のように時間変動により生じる鉛直上向きの合力や正味の回転モーメントにより，以下の国総研[4]に示された竜巻の負圧の効果が顕著に関与するプロセスについて検討し，この住宅の構造破壊プロセスが進行するかどうかを検討した．

A.　正味の鉛直上向きの力による屋根接合部の破壊による屋根部分のみの飛散

B.　正味の鉛直上向きの力による基礎接合部の破壊による上部構造の飛散

C.　正味の回転モーメントによる上部構造の転倒（風向から北側接地面を軸と判断）

また被害の発生は次の条件により判断した．

- 空気力と建物自重の合力による緊結部の耐力の超過
- 空気力，自重，緊結力全ての力の寄与を考慮した際の正の回転モーメントの発生

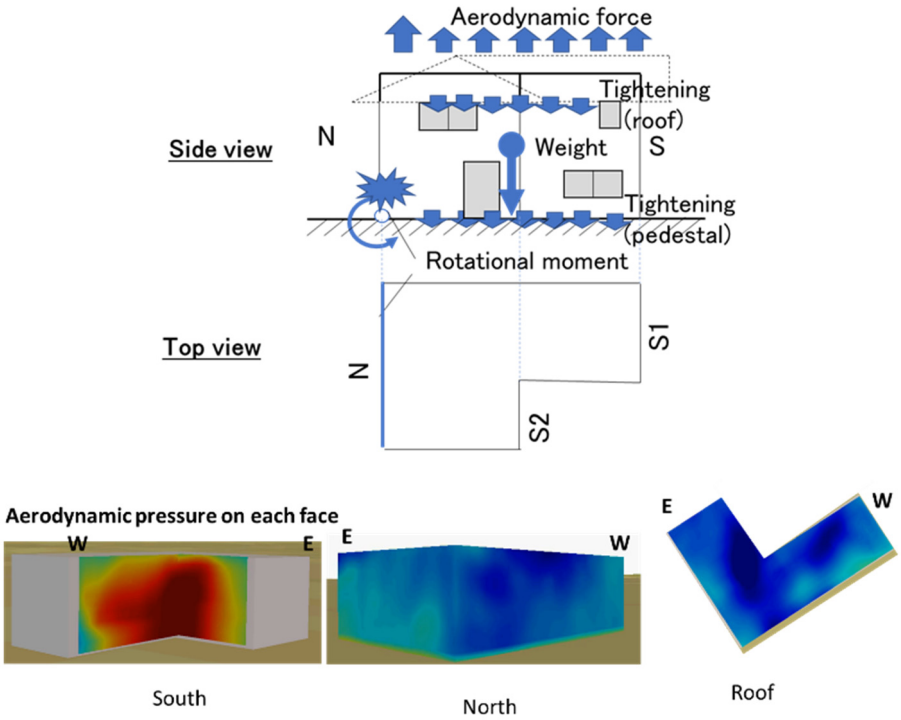


図 5-37　鉛直上向き合力および回転モーメントの模式図・圧力場の瞬間分布の例

被害要因分析に用いた仮定を表 5-9 に示す．木造住宅 B の設計仕様に関する資料は入手できなかったため，国総研[4]により示された木造 2 階建て住宅の木造住宅である建物 C の実際の設計仕様をもとに，一般的な木造住宅の設計値である事を確認しながら，床面積当たりの値を木造住宅 B に援用した．なお屋根の材質については航空写真[4]から金属屋根であることを判断した．また本来屋根の一部は寄棟屋根の形状であるが，解析に用いた建物モデルとの整合性を取るため，陸屋根として検討を行った．また自重と屋根と土台の緊結は均等に分布をしていることを仮定した．回転モーメントの軸は圧力のピークの時間の風向から回転開始時は北側の接地面であると判断した．図 5-38 に建物モデルの寸法と，回転モーメントに寄与する各面の略称を示す．

表 5-9　木造住宅 B の被害要因分析における仮定

面積[m^2]	S-1	45.11
	S-2	67.11
	N	111.8
	屋上	157.2
単位面積当たりの自重 [kg/m^2]	上部構造	2880
	屋根	187.0 (金属屋根)
緊結の最大耐力 [N/m^2]	上部構造	3540
	屋根	3540
床面積		屋根に同じ

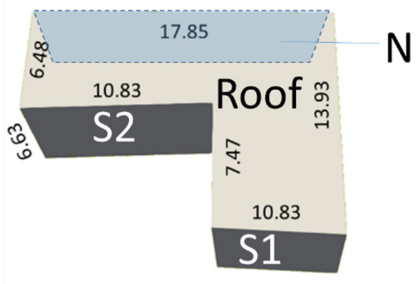
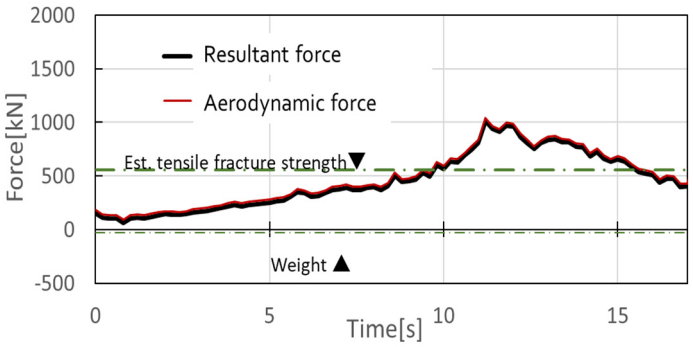


図 5-38　建物モデルの寸法と回転モーメントに寄与する面の略称

図 5-39 にシナリオ A から C に対応する，鉛直上向き合力または，正味の回転モーメントの時刻歴変化を示す．検討を行った 3 つのシナリオのうち，鉛直上向きの力による屋根の飛散を表すシナリオ A が最初に構造の破壊が 10 s 付近で発生する条件に達した．この時の負圧の値は-37 hPa である．またこの条件を 6s 間にわたり超過する状態が継続したことが示された．シナリオ A が発生し屋根が飛散した状態では，シナリオ B, C 被害が発生する可能性はほとんどないと考えられる．したがってこの場合に残りの上部構造の倒壊を引き起きした原因は竜巻の水平力によるものであることが想定される．一方，仮に屋根の緊結が十分な強度でありシナリオ A が発生しなかった場合は，次に起こりやすいと考えられる，住宅のモーメントの転倒であるシナリオ C が進展する可能性が高いと考えられる．シナリオ C の回転モーメントの図からは 11 s 付近から 1 s 程度正味の回転モーメントが正の値であることが確認でき，このシナリオは発生しうることが推定される．なお，上向きの力による柱脚金物の損傷を表すシナリオ B もわずかな時間，最大耐力を超えたが，シナリオ C が妨げられる一方，シナリオ B のみが進行する状況は想定することが難しく，このシナリオが現実に起こる可能性が低いと考えられる．

シナリオ A



シナリオB

シナリオC

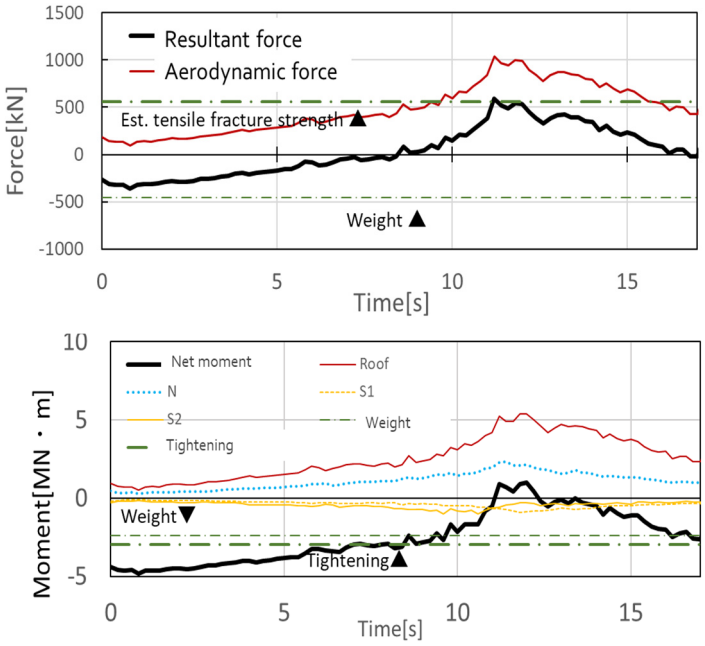


図 5-39　シナリオ A から C に対応する鉛直合力または回転モーメントの時刻歴

(b)　集合住宅の窓サッシ被害

建物 D は 5 階建てのコンクリート造のアパートであり，構造に対する被害は発生しなかったものの，バルコニーや窓などの外装材の深刻な被害が発生した．本研究では窓サッシ，すなわち窓面にどのような力がはたらき被害が発生したのかについて分析を行った．

建物 D における窓サッシの被害は，国総研[4]において報告が記されており，建物の南面と北面の被害状況をそれぞれ図 5-40(a)，図 5-41(a)に示す．窓サッシの被害は南面，北面のいずれも東側端部で最も深刻に発生していた．一方で，南について，ベランダの目隠しパネルの被害と比較すると，図 5-40(b)に示す通り中央付近が最も深刻で，東側端部は他の場所と比較すると被害が少なく分布に差異が見られ，また北面についても，竜巻のぶつかる面の裏側となる事から飛散物による被害は少なかったことが推定されるにも関わらず被災している．したがって，建物南面と北面での東端部付近での深刻な窓サッシの被害は，飛散物等ではなく主に竜巻の空気力によって発生した可能性が想定される．

図 5-40(c)，図 5-41(b)にシミュレーションで得られたそれぞれ南面，北面の表面圧力分布の時刻歴を示す．南面では，-50 hPa から-60 hPa 程度の負圧の発生が西端では見られたが，東端では-10 hPa から+10 hPa の間であり，この風圧力単独によりサッシの被害が発生することはあまり想定されない．これとは対照的に，北面では-50 hPa を超える負圧が広い範囲で広がり，とりわけ，

東端付近では-80 hPa から-100 hPa 程度の猛烈な負圧が作用していることが解析された．図 5-42[4] に示す北面の実際の被害の状況でも窓が外側に外れている様子が確認された．さらに，被害分布を注意深く確認すると，北面で被害の発生している区画の多くでは南面でも被害が発生している様子が確認される．これらの結果から，集合住宅 D の東端部付近の窓サッシの被害は，まず北面での非常に強い負圧が作用し北側の窓が損傷を受けた結果，室内圧が下がり南面でも差圧によって被害が発生したというプロセスが発生したことが推察される．以上の結果より竜巻下の住宅においける被害発生とそのプロセスに関する情報を本手法により得ることができた．

(a)

(b)

(c)

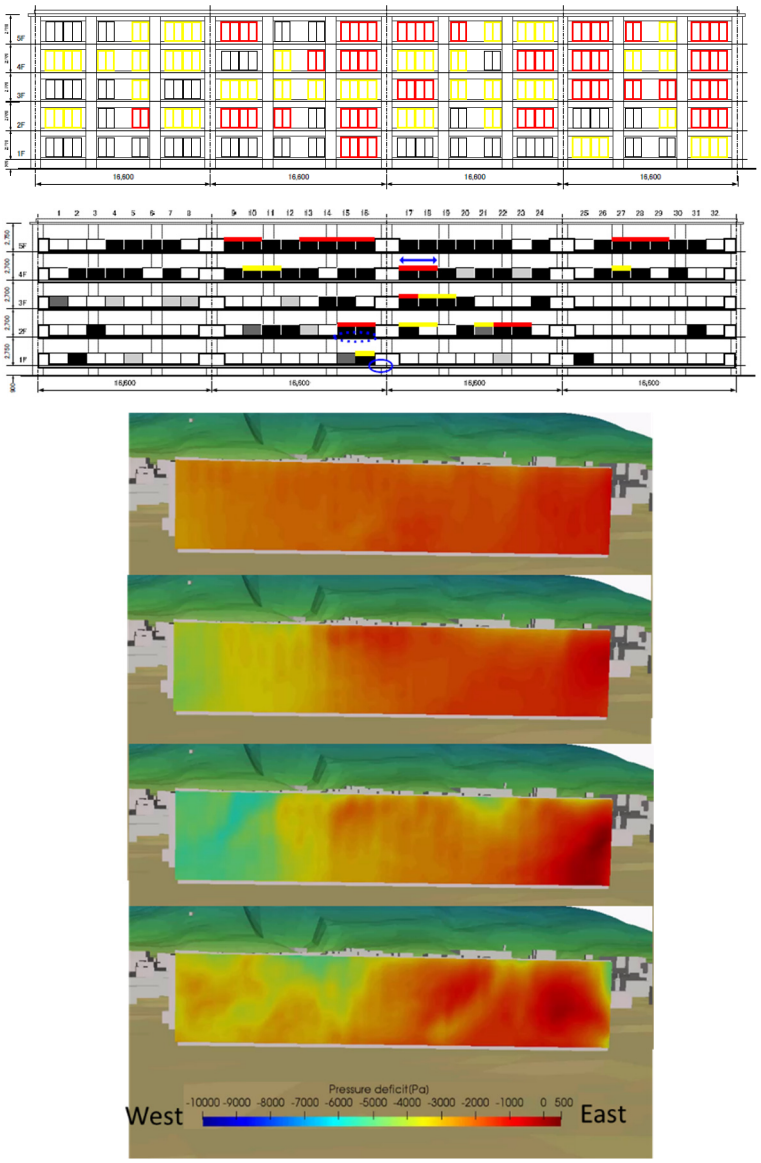
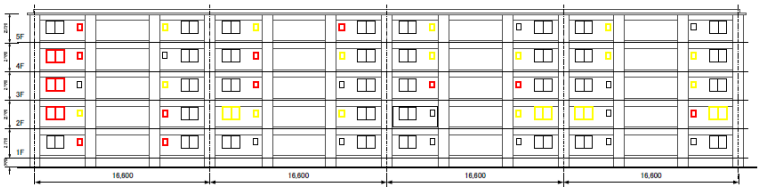


図 5-40　集合住宅 D 南面での被害．(a)窓サッシ．色は被害度を表す．黄色：窓ガラスの交換は可能だが，継続使用が不可能．赤色：窓ガラスの交換も継続使用も不可能．(脱落・飛散も含む) (b)バルコニーの目隠しパネルの被害．色は被害度を表す．薄灰：軽い衝突痕等．濃灰：著しい衝突痕等．黒：全面的に破壊．(c)シミュレーションによる瞬間の圧力場の時刻歴

(a)



(b)

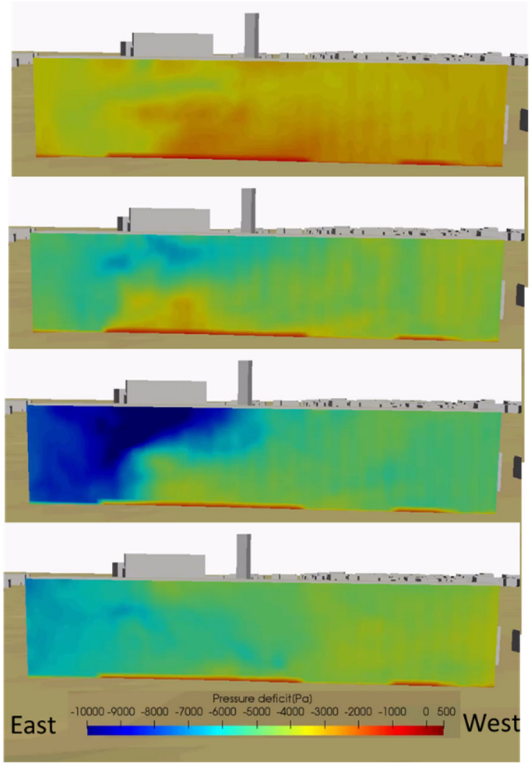


図 5-41　集合住宅 D 北面での被害．(a)窓サッシ．色は被害度を表す．黄色：窓ガラスの交換は可能だが，継続使用が不可能．赤色：窓ガラスの交換も継続使用も不可能．(脱落・飛散も含む) (b)シミュレーションによる瞬間の圧力場の時刻歴

図 5-42. 北面での被害の状況[4]

5.8　結言

第 5 章では気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析を竜巻に適用し，気象モデルにより周辺の気象環境から再現された現実的な 2012 年 5 月 6 日に発生したつくば竜巻の構造を用いて，これまでに前例のない，現実的な巻の渦構造と建物周りの流れの相互作用について数値計算を実施し，今後の突風現象に対する荷重指針や防災策の策定を行う際の基礎となる建築空間における流れ場や，建物に対するデータを得るための解析を行った．まず都市における粗度が竜巻の構造の変化とそのメカニズム，地表の流れ場に及ぼす影響を検討した．次に，地形や建物群が竜巻の運動に及ぼす影響を分析し，中層建築物への非定常圧力について現行風荷重指針による外装材設計値の比較をおこなった．さらに，実際のつくば竜巻で被災した住宅地を対象とした再現解析により，実低層住宅地での竜巻の構造や地表ごく近傍の流れの構造，発生する最高風速や最大の圧力低下の分布と実被害分布の比較に基づく推定の検証を行った．最後に，顕著な被害の発生した建物について空気力に基づく被害プロセスについての解析を実施した．

本章で得られた主要な結果を以下に示す．

- 平坦面上での高解像度な LES 解析において，気象モデルと類似した竜巻の変化が全体的に再現され，地表付近では竜巻渦を取り巻く微細な水平な渦が多数形成されたこととは対照的に，大都市を想定した 50m 立方体の一様粗面上での解析では，建物の隅角部で形成された渦が，上方に引き上げられ，竜巻構造と接続することで，ブロックの 6 倍の高さ以下の範囲では竜巻の渦構造が局在化して存在し，その上方においては竜巻渦の弱化が見られた．また地表付近では収束の強化に伴って上昇流の強化が発生した．本解析で竜巻は反時計回りの旋回流を持ち，等間隔に並ぶ立方体によって東西と南北方向に伸びるストリートが作られた粗面上を北東の斜め方向に進行した．進行方向の左側では東西，右側では南北のストリートにおいて風速が顕著に大きいことを示した．また上昇流の最大値は各ブロックの隅角部に多く見られ，建物の隅角部からの渦の引き上げ，竜巻の局在化と関連していることが示唆された．

- 地形の影響のある中高層街区での解析では，竜巻の運動の向きと速度の両方が大きく平坦面での運動から変化する様子が確認された．地表によってもたらされる運動の変化は建物高さの約 10 倍程度まで速やかに伝播した．また本研究での解析においては，地表や建物で渦形成が起こり低圧となっている場所に地表付近の竜巻全体の渦の運動が向かう傾向が見られた．

- 中高層街区内の建物に発生する屋上面でのピーク負圧を，告示と日本建築学会の風荷重指針(再現期間 100 年及び 500 年を想定)に基づいて比較検討した．シミュレーションで発生した

負圧のピーク値（1 秒平均値）は最大-105hPa であり，検討したすべてのケースで設計用ピーク風圧を超過した.

- つくば市北条地区の地形と建物を再現した解析では，上空の竜巻構造から実際の被災した住宅地内の流れの構造を再現した．屋根ごく近傍の高さにおいては，竜巻中心に向かう収束性の強い流れ場となっており，非常に明瞭な強風の筋状構造が確認された．この強風構造は，周辺の建物から生じた収束性の強い流れに沿って伸びるロール状の渦によって鉛直方向の運動量輸送が行われたことで形成されたことが推察された.

- 北条地区での被害経路に沿う竜巻の運動を再現した解析を行った．住宅地上空において，屋根近くの高さにおいて発生した最大瞬間風速(3 秒平均値)と最大瞬間圧力低下(1 秒平均値)を確認した結果，経路中心付近では連続的に最低でも 60 m/s の最大瞬間風速，-55 hPa のピーク負圧が分布し，ところによって 80 m/s, -80 hPa に達することが明らかになった.

- 数値計算での最大瞬間風速分布と，実際の木造住宅被害から推定された最大瞬間風速の分布と比較した．その結果，強風被災度ランク 3 の被害(顕著な外装材被害)は実被害より広がって推定されたものの，被害全体の発生幅やその変化をよく捉えており，特に大きな被害が集中した場所においてより大きな風速が推定される傾向が見られた．強風被災度ランク 4 と 5 の被害（構造被害）は概ね実被害幅と一致した．概ね実際の外装材，構造の被害の特徴をとらえられていることから，以下のような点をさらに考慮することで，本手法を用いた実用的な被害推定・リスク推定に適用できる可能性は十分にあると判断される.

- 竜巻渦中心の市街地内の経路の部分的な不一致が見られ，甚大な被害である木造構造の被害の分布についても不一致が一部で見られた．上空の竜巻の再現性や建物や地形との相対位置関係のわずかな差異により連鎖的に建築空間における渦構造などが変化し，運動に影響を与えたことが推察される．このような竜巻渦のカオスな建築空間内での挙動や建築物への作用のランダムな性質について，アンサンブル解析によりその統計的な性質を明らかにすることは実環境におけるリスクの評価や，突風荷重の指針や減災行動の策定においても重要である.

- 被害の推定を行う上では，建築空間で発生する運動や負圧形成のランダム性についての統計的な性質の知見に加え，竜巻の構造や勢力など上空の気象場の再現性，街区内の建築物の築年代による施工法の差異および経年劣化を考慮した検討を行うことの重要性が推察された.

- 計算で求めた空気力に基づいて，顕著な被害の見られた建築物の被災とそのプロセスに対する解析を行った．木造住宅の建物 B の上部構造飛散プロセスを一般的な木造住宅の設計値を仮定した解析を行った結果，竜巻の低圧による屋根被害が先行するシナリオが最も起こりやすく，その後壁面の水平力による倒壊したことが推測された．屋根が十分に緊結されていた場合については，回転モーメントによる上部構造の全体の転倒が進行したことが推定された．5 階建て RC 集合住宅の建物 D において，窓サッシの東側に集中した被害分布について検討した結果，下流側の北面の東端側で-80 hPa から-100 hPa の著しい負圧が形成されたことにより，上流側の窓サッシよりも先に損傷が発生し，その後室内圧が低下した結果，南側の窓サッシについても差圧で破壊した被害プロセスが推察された．

第 5 章参考文献

[1] Mashiko, W., & Niino, H. (2017). Super High-Resolution Simulation of the 6 May 2012 Tsukuba Supercell Tornado: Near-Surface Structure and Its Evolution. Sola, 13, 135-139.

[2] 塩谷正雄. (1992). 強風の性質—耐風設計に関連して．開発社

[3] 気象庁. (2015). 日本版改良藤田スケールに関するガイドライン.

[4] 国土交通省国土技術政策総合研究所. (2013). 平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生下建築物等の竜巻被害調査報告. 国土技術政策総合研究所資料 No. 703. 建築研究資料 No. 141.

[5] 奥田泰雄, 喜々津仁密, & 西村宏昭. (2006). 強風被災度ランク. In 風工学シンポジウム論文集 第 19 回 風工学シンポジウム論文集 (pp. 223-228). 一般社団法人 日本風工学会.

[6] 喜々津仁密, 中川貴文, 奥田泰雄, 脇山善夫, & 坂田弘安. (2017). 竜巻等突風の強さの評定に資する木造建築物の被害状態に基づく推定風速の検討. 日本建築学会技術報告集, 23(53), 325-330.

[7] Lewellen, D. C. (2012). Effects of topography on tornado dynamics: A simulation study. In Preprints, 26th Conf. on Severe Local Storms, Amer. Meteor. Soc. B (Vol. 4).

第6章

結論

6.1　本論文での成果

本研究では，顕著な台風や竜巻などの強風・突風を伴う極端気象を対象に，気象場を再現して，その効果を積極的に取り入れた建築物の耐風性能評価のための非定常数値計算手法を構築し，実際の過去の顕著な台風と竜巻を対象に市街地や住宅地などの建築空間における風速場・圧力場を解析し，建物被害の推定を行った．本研究で得られた主な知見を以下に述べる．

第 2 章では，極端気象現象の構造と市街地での流れや圧力場までを同時に構造できる数値計算手法の構築を行った．各スケールで重要な物理過程を再現するため，気象モデルと工学 LES の両方を用いて解析するハイブリッドアプローチを採用し，これらの接続の際に，気象場に基づく耐風性評価の上で問題となる，気象モデルにおいて減衰しやすい高周波変動成分を，気象モデルの風速と熱の 3 次元構造に基づいて再生成する手法をハイブリッド解析の枠組みに導入した．またこれら 3 段階の各計算計算手法の詳細の記述および計算条件の整理を行った．特に，気象モデルに対して高周波成分を再生成する方法については，非一様で複雑な風速場や温熱場を持つ極端気象の気象場に適用するため，気象場の風速場の 3 次元構造に基づいて風速の変動成分を生成する方法を Boussinesq 近似を用いて温熱場に拡張し，温熱効果を考慮した変動成分を生成できる定式化とした．気象モデルについては，ハイブリッド解析においては気象場に基づく乱流の解像が必要であることあることから，1km 以下の解像度で LES の定式化を併用し，格子解像度 50 m 程度まで計算を行う必要性があることを述べた．また LES による建築空間の解析では，実地形や多数の建物を含む領域の気流解析を行う必要があるため，建物を考慮した格子生成と計算負荷の平準化に対する解決策として，マルチグリッドシステムと，immersed bondary 法による地表条件の再現を採用した BCM-LES が市街地の解析に有効であることを示した．

第 3 章では，第 2 章で提示した温熱効果を含む高周波成分再生成手法を，WRF-LES により再現した解像度 50m の理想対流境界層の気象場のデータに対し適用し，定式化の有効性の検証を行った．本手法により，風速と温位の高周波変動成分が比較的速やかに生成され，それぞれの場により細かな構造を再現した．さらに，これによる時刻歴のスペクトル解析を行った結果，スペクトルが Kolmogorov の-5/3 乗則に従って高周波数側に拡大し乱流としての適切な性質を持っていることが確認された．時々刻々と変化する複雑な風速場と温熱場に適用できることに加え，変動が気象場の構造から乱流のエネルギーカスケードの性質をもとにして常に物理的に

計算されること，また高周波変動成分のみを解く形に方程式が分離されていることから，気象場の構造の保持を保証できる点も本手法のもつ利点であることを示した．

第 4 章では，構築と検証を行ったハイブリッド解析を実大気境界層に適用し，現行基準において想定される強風の主たる成因である台風の強風場について解析を行った．前半では，気象モデルによる台風の気象場の再現性の検証として，WRF/WRF-LES モデルを用いた 2012 年台風 4 号の解析を分析した．台風の全体的な運動と中心気圧の変化の再現，塔体観測結果と対応する風向のプロファイルが再現され，乱流生成を促進する山地などの地形が風上側にある時間帯などでは，LES を用いた気象モデルにおいても大気境界層内の細かな変動が再現されやすいことが確認できた．ただし風速プロファイルについては，本研究で用いた観測データでは十分な信頼性を確保できておらず，今後もより信頼性の高い観測データを用いた検討を継続する必要性を示した．

後半では，気象モデル WRF/WRF-LES と NHM 二つの解析結果に基づくハイブリッド解析を 2018 年台風 21 号の大阪市中心部を対象に実施した．ハイブリッド手法により，高度 1km 以上に達する循環や流れの方向に沿った強風構造，急速な風向やプロファイル変化などを伴う気象場の擾乱が市街地に導入されたことが確認され，気象場に基づく高風速が建物の高さや地表近傍まで輸送されることを風速の時刻歴により示した．また建物表面でのピーク風圧の発生にも寄与する可能性が示唆された．さらに気象場の主流方向に伸びた強風構造に基づいて，市街地内においても直線的に伸びたより細かな強風構造が形成される様子を可視化により示した．

NHM に基づく 10 分間の計算に基づいて平均風速と最大瞬間風速 (3 秒平均値) の空間分布を解析した．地表付近においては周囲に建物が少ない土地のよく開けた場所での解析値は，低層住宅地内での気象庁の風速観測(大阪)の値とおおむね一致した．また倒木など地表での実被害の発生した場所の多くでは解析においても 25m/s–40m/s 程度の比較的高い最大瞬間風速が推定される傾向が確認された．また開けた場所や高層建物の周辺や後方のストリートにおいて特に顕著な高風速が発生することが平均値，最大瞬間風速のいずれにおいても確認された．ごく一部では，告示による平均風速(27m/s，高さ 10m)および，告示換算値(42.7m/s，高さ 10m)の超過をしていることが確認された．また上空 100m 付近の最大瞬間風速分布からは，気象場のピーク風速は市街地の内部も含めて，解析領域の全体で高風速が様々な方向に直線的に流下した痕跡が確認された．また鉛直プロファイルから，上空の気象場の筋状の高風速が継続して通過した位置でのプ

ロファイルは，地上からおおむね 100m 以上で告示の設計用平均風速や瞬間風速換算値を超過しうることを示した．合わせて市街地の市街地内で得られた乱流統計値として地表面の粗度特徴が異なる場所での乱流強度プロファイルや，風速確率密度分布の高さによる変化についても示した．さらに，高層建物に形成される表面圧力の検討を行い，告示の負圧の超過が見られたことを示した．ただし高層階(高さ 50m 程度)で風上側の窓が風圧により損傷した大阪合同庁舎 4 号館では，今回の行った解析では，WRF/WRF-LES と NHM の解析値は告示を下回り，設計値の 6 割以下にとどまった．

以上の解析から，市街地の解析において気象場を考慮することの有効性を示す結果が得られ，また実際の顕著な台風について，現行の建築の規基準との比較可能な，風速や乱流統計値のプロファイルや空間分布のデータが得られた．本解析結果は，実気象を再現した解析の数例であり，気象場の不確実性やその影響を受けた市街地でのピーク値の発生に関する不確実性については定量化が重要である．確率的な側面を考慮することで，建築基準の改定の必要性有無の検討，さらに定量的な被災推定や市街地の安全性の評価など，より実際的な問題への適用が可能となることが期待される．

第 5 章では，提案したハイブリッド手法により，通常時の境界層と大きく異なる竜巻の，気象モデルによる現実的な竜巻構造に基づく建築空間のシミュレーションを実施した．これにより，市街地上空での竜巻の構造，建築空間内部の流れや渦構造，建物への空気力の作用などを評価した知見が以下に述べるように幅広く提示された．

前半では地形や建物など地表面の変化に着目した解析を行った．大都市を模擬した一様粗面における解析では，建物後流域で生じた渦が鉛直流により引き上げられて竜巻構造と接続することで，粗面上でブロック高さの 6 倍以下の範囲では竜巻の渦構造の局在化が起こる様子が見られた．北東に進行する竜巻において，進行方向の左では東西のストリート，右側では南北のストリートにおいて他方のストリートと比べて顕著に高い風速が発生する様子が確認された．地形の影響のある中高層街区での解析では，地形および建物により竜巻の運動の向きと速度が大きく変動し，その影響が速やかに建物高さの 10 倍程度まで伝播する様子が見られた．また本研究では，小さな地表や建物の隅角部など渦が形成されて低圧となっている場所に向かって竜巻の渦が移動する傾向が観察された．同街区内の建物屋上では，負圧が竜巻の一時的な停滞により長時間継続する様子が確認され，発生したピーク負圧を告示と日本建築学会の風荷重指針(再現期間 100 年及び 500 年)に示された設計値と比較した結果，シミュレーションで発生した最大の負圧のピーク値（1 秒平均値）-105hPa を検討したすべてのケースで設計用ピーク風圧を超

過した．以上の解析から，建築空間での竜巻渦および，地表でのピーク風速，竜巻と地表の流れ場の相互作用による建物での非定常圧力の形成に関する基礎的な知見が得られた．

後半では，つくば竜巻の実被害が多く発生した住宅地の北条地区での実現象を再現する解析を実施した．瞬間の流れ場から，建物高さにおいては収束性の強い流れ場が発生し非常に明瞭な強風筋状構造が確認された．この構造は，竜巻の周辺の建物において生じる水平渦が中心に向かって流れに沿って伸び，鉛直方向の運動量輸送を行った結果であると推察された．また住宅地内での最大瞬間風速と最大圧力降下の瞬間値が示され，経路に沿って，風速 60/s 以上, 圧力 -55hPa 以下の値が連続し，ところによっては 80m/s, -80hPa に達することが確認された．また反時計回りの回転を持ち北東に進むこの竜巻では，一様粗面で確認された進路の左側で東西方向, 進路右側で南北方向のストリートで強風が分布する傾向が確認された．

最大瞬間風速の推定値から被害の推定を行った結果，概ね実際の外装材，構造の被害分布をとらえられており，本手法を用いた実用的な被害推定・リスク推定に適用できる可能性は十分にあると判断された，具体的には次のとおりである．

- シミュレーションで推定された顕著な外装材被害(強風被災度ランク３)の範囲は実被害より広がっているものの，外装材や付属物など全体の被害の発生分布の幅やその変化に沿って推定風速が変化し，特に大きな被害が集中的に発生するところではより高風速が再現された．また構造被害(強風被災度ランク 4 または 5)については概ね実被害幅と一致した．
- 竜巻中心の住宅地内での経路は，一部，住宅地内での経路の局所的な揺らぎが見られた．上空の竜巻の再現性の他，建物や地形と竜巻渦との相対位置などのわずかな差異による建築空間での渦構造の変化が連鎖的に起こり，運動に影響を与えていると考えられる．このような竜巻渦の挙動は，上空の積乱雲による制約の存在するカオスでありランダム性を示している．建築空間のリスク評価や，突風荷重の指針や減災行動の策定には，このような竜巻の建築空間でのカオスな建築空間内での挙動や建築物への作用のランダムな性質について，アンサンブル解析によりその統計的な性質を明らかにすることが重要である．
- 被害の推定精度をさらに上げるためには，上述の建築空間で発生する運動や負圧形成のランダム性についての統計的な性質の知見に加え，竜巻の構造や勢力など気象場の再現

性，街区を構成する建物の築年代や経年劣化，建物構造についてのより正確な取り扱いが必要である．

顕著な被害の見られた建築物 2 棟に対して，建物に作用する外力に基づく，被災発生とそのプロセスについての推定を行った．木造住宅である建物 B の上部構造飛散については，竜巻の低圧により屋根被害が先行するシナリオが最も起こりやすいと考えられ，その場合壁面は水平力による倒壊が起こることが推定された．一方屋根の緊結が十分であった場合には回転モーメントによる倒壊が起こりうることが推定された．5 階建て RC 集合住宅建物 D において，東側に集中した窓サッシの被害については，下流側の北面で-80hPa から-100hPa に達する著しい負圧が形成されていたことから，北面で窓サッシ損傷が先行して発生し，室内圧が低下し差圧が大きくなったことで，外圧がそれほど低下していなかった南側の窓サッシも連鎖的に破壊した可能性が推察された．

本研究により，顕著な台風や竜巻などの極端気象によりもたらされる建築空間の風速や圧力場を，気象場の構造を導入して評価する手法が構築された．また以上の解析結果を通して，本手法によって従来の風荷重評価に比べ，実現象をより正確にとらえた解析が可能であることが示された．今後アンサンブル解析により気象場やそれに基づく市街地に発生するピーク値の持つ不確実性や，建物構造など建物の特性についての考慮を行うことで，より正確で定量的な安全性評価，都市・地域防災に資する被害予測が実施可能となることが推察される．さらに知見が蓄積されることより，現在あるいは将来の気候の影響を考慮した現行の設計規基準の妥当性の評価や，突風現象のもたらす空気力に対する合理的な設計手法を策定する上で有用な基礎的データを提示できることが期待される．

6.2　今後の課題と展望

本研究で構築した気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法を用いて今後実施可能である解析について述べ，実施上の課題について考察する．

第一に，顕著事象の発生時に本研究で提示したような極端気象の検証解析を行い，市街地・住宅地のピーク風速やピーク圧力の発生分布や乱れの特性を明らかにすること，また現地調査で取得が困難な場所や数キロオーダーの分布としての被災推定データ，さらに被害プロセスに関する時刻歴データの推定結果を，一週間程度の短期間で示せるようになると風速の評定や復旧の補助として有効になると考えられる．ただし現時点において竜巻については気象モデルに

よる再現解析は，初期条件や境界条件，スキーム等に対する依存性が高く非常に困難であるため，上述の検証は当面は台風が対象となることが考えられる．また現時点では比較的大規模なデータのポスト処理による最大瞬間風速の取得や流れ場の可視化データの取得に対して，計算と同等の時間を要していることから，処理を短縮するため，コードの並列化や，被害解析のルーチンをあらかじめ策定して必要なデータの出力をメインコードに組みこんだりすることでよりスピーディーな情報提供が可能になるよう，実用を踏まえたプログラムの改良も必要であると考えられる．

また定量的な推定を行う上で，気象現象の不確実性やその影響を受けた建築空間内での過程のもつランダム性，安全性の評価に重要な風速・圧力のピーク値の不確実性についての情報を示すことの必要性が本研究より示された．本研究の範囲ではその定量化の分析はまだ十分に行えておらず今後その影響を検討する必要がある．

気象場と市街地の流れの相互作用を評価する解析において，不確実性の中でも特に気象擾乱の構造の再現性と，擾乱と解析対象建物との相対的な位置関係，および擾乱の進路は，特に市街地と上空の流れの相互作用に変化を与え，その結果地表でのピーク値発生に大きな影響をもたらす可能性があり，着目する必要性があることが推察される．気象擾乱自体の構造の不確実性については，再現に用いる気象モデル，気象モデル内で用いるスキーム，初期時刻，海水温やデータなどの気象場再現時の計算条件を変更した解析を実施し，現象自体の実現象に対する再現性を考慮した上で，気象場・市街地の気流の両方のスケールにおいて生じる現象の不確実性がどの程度生じうるかを明らかにし，最終的な安全性評価における適切な取り扱いの仕方について議論する必要がある．また気象場と市街地の流れ場の相互作用，擾乱の進路の不確実性については，同一の気象場のデータを用いて，わずかな風向や，流れ場の導入位置の違いを与えた多数の解析を実施し，ピーク値の不確実性や確率分布，個々の解析における風速の確率分布の変化やその空間的な分布について明らかにすることなどを通して，必要なサンプル数の検討や，不確実性を含む安全性評価をより工学的に行うことが可能であると考えられる．

さらに，本研究では最大瞬間風速により概ねの被害の対応を検討したが，建物の被災発生やそのプロセスをより正確に捉えることを目的にした解析も有用であると考えられる．例えばより実際の建築物に近い構造を再現した建物モデルを用いて，本解析によって得られる建物に作用する動的な外力に基づいた弾塑性解析などを実施し，実際の建築物の損傷の発生プロセスを考慮した，より現実に近い被災の発生条件を明らかにすることができると考えられる．

第二に，本ハイブリッド手法を用いて実都市での顕著な竜巻・台風などを想定した被害の事前予測を行い，市街地のリスクの抽出や，減災対策に展開されることが望まれる．

事前予測を行う際には，本論文で行った事後の検証解析とは異なり，適切な検討を実現する初期・境界条件，解析等条件を設定する必要がある．

検討する解析条件については，まず初期条件・境界条件として与えられる気象場は，事前予測においても，最終的な市街地の解析結果に対して最も大きな影響を及ぼすことが考えられる．気象モデルにより再現される擾乱の性質として，強度，構造，大きさ，速度，進路など影響する可能性が考えられる要素は多数挙げられるが，現時点ではこれらすべての要素を任意に設定して本手法により検討することは難しい．したがって事前予想では，特に影響が大きいと考えられる，擾乱の強度・構造・進路に着目して，ターゲットシナリオを定め解析をすることを想定する．具体的には現行基準や観測記録から想定される最大級の事象や，更に一段階強い事象（猛烈な台風の上陸等）を検討強度とし，解析地点で最も被害が大きくなることが予想される進路で導入する．また擾乱の構造については，事後解析と同様に気象モデルの初期時刻や，スキーム等の違いより生じる気象現象の再現性に関する不確実性および，わずかな進路，導入位置変化で生じる気象場と建築空間の流れ場の相互作用に関する不確実性を明らかにするためのアンサンブル解析を行う．竜巻については再現成功例が極めて限られているため，気象場の不確実性は，当面は現存する再現データに基づいていくつかの時間帯のデータを用いて行うことが現実的と考えられ，一方で，地形や建物周りの渦と竜巻の渦構造の相互作用に着目した検討建物に対する擾乱の相対位置や進路についての市街地内での渦構造の不確実性の評価が重要となることが考えている．なお強風の耐風性を検討する上では将来の温暖化の進行シナリオを基に将来の上陸台風の最大風速の推定値などを参照することで，将来の気候変動を考慮した解析が行えるものと考えられる．これらの気象場のデータの取得方法については，本解析では，気象モデル解析と，高周波変動の再生成，市街地の解析はそれぞれ完全に独立して行われているため，任意の気象モデルによる顕著事象の解析をシナリオの風速場・温熱場のデータとして取り出し，高周波変動の再生成を行い，任意の市街地領域に接続することや，気象擾乱の進路や位置関係などを検討したいシナリオに合わせて解析することが可能である．したがって台風の場合については，建物情報が入手可能な範囲での過去の顕著な台風事象や，低緯度地域でのより強い台風のデータをシナリオとして用いることができ，実際に事象が発生した土地での解析をバリデーションとして行った上で，検討したい対象街区の解析に適用することが可能であると考えられる．バリデーションは行えないものの，全球モデルによる将来の気候予測の

ダウンスケールによって得られた台風のデータもシナリオの気象場の条件として用いることも可能である．

またその他の要素についても，可能な形で個別に考慮することが望ましい．例えば，擾乱の大きさなどの影響については本手法ではコントロールした解析を行うことが難しいが，気象モデルを用いた擾乱の内部構造の解明や観測による研究が進めば，検討すべきシナリオの選択などに反映できる可能性があると考えられる．

気象場の初期・境界条件のほかには，建築物周りのピーク風速や風圧に影響を与える検討すべき解析条件として，次に，気象場に基づく乱れの再現が挙げられる．そこでは周波数成分の分離と，数値粘性の効果を持つ項の取り扱いが重要であり，気象場の変動を取り出す実効の格子幅であるフィルターサイズと時間平均を 0 に漸近させる Feed back forcing 項の大きさの調整が重要である．これらはトライアンドエラーによって調整を行う必要があるが，スペクトル等をターゲットに再生成される高周波変動成分を調整することができる．

最後に，評価する建物の再現性ついても検討すべき項目として挙げられる．現状では衛星測量に基づく直方体などのシンプルな形状により街区内の個々の建物が表現されており，個々の建物の屋根形状や庇，ピロティや冠屋根といった外装材の特徴などは表現されていない．現在の解析でも，建築空間内の気流や，街区内での竜巻の運動を概ね再現できていると考えられるが，個々の建物にはたらく空気力のより詳細な検討や，実街区における竜巻の渦形成の運動性などの考察には一定の影響を持っていることが考えられる．また街区の構成する建物の築年数や工法による耐力のばらつきなどの建物要素についても被害判断する上では重要である．今後実市街地における被害推定を行うためには，これらの点を影響を検討する必要があると考えられる．

以上のような事前予測と事後検証を通して，極端気象発生時の建築空間の安全性に関する知見がより定量的，確率的な情報として蓄積されることにより，都市・地域防災に資する被害予測や，建築規基準の検討に有用な基礎的データとして活用されることが期待される．

本研究に関連する発表論文

【審査付論文】

1. Kawaguchi M, Tamura T, Kawai H, Mashiko W, “Analysis of tornado and near-ground turbulence using a hybrid meteorological model/engineering LES method”, International Journal of Heat and Fluid Flow, 80,108464 (2019)

2. Kawaguchi M, Tamura T, Kawai H, “A numerical investigation of building damage during 6 May 2012 Tsukuba tornado using hybrid meteorological model/engineering LES method”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (査読中)

【国際会議】

1. ○Kawaguchi M, Tamura T, Tao T, Kawai H, “Generation of Higher Frequency Components for Wind Gust by Fusion Analyses of WRF and LES —Cases of CBL, Tornado and Urban Canopy Flow”, APCWE9, Auckland, New Zealand, December 2017.

2. ○Kawaguchi M, Tamura T, Mashiko W, Tao T, Kawai H, “Meteorological Model/Engineering LES Hybrid Approach: Towards the Risk Assessment of Urban Areas in Strong Wind Events”, AMS 23rd Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Oklahoma, U.S.A., June 2018.

3. ○Kawaguchi M, Tamura T, Mashiko W, Tao T, Kawai H, “An Analysis of Tornado Using Meteorological Model and Engineering LES: Wind Gust Structures in the Urban Area and Its Impact on the Buildings”, ICUC10, New York, U.S.A., August 2018.

4. Kawaguchi M, ○Tamura T, Tao T, Kawai H, “LES Method for generating broad-banded turbulence for meteorological events”, The 12th International ERCOFTAC symposium on engineering, turbulence, modelling and measurements, Montpellier, France, September 2018.

5. ○Kawaguchi M, Tamura T, Kawai H, Mashiko W, “Tornado damage estimation of cities and buildings using meteorological model/LES hybrid method”, 29th Conference on Severe Local Storms, Stowe, U.S.A., October 2018.

6. ○Kawaguchi M, Tamura T, Kawai H, Mashiko W, “Numerical estimation of building damage in Tsukuba tornado 2012 using a hybrid meteorological mode/engineering LES method”, 10th European Conference on Severe Storms, Krakow, Poland, October 2019.

7. Kawaguchi M, ○Tamura T, “BCM-LES application to wind gust disaster under extreme meteorological events”, 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Seattle, U.S.A., November 2019.

【口頭発表】

1. ○川口真晴，田村哲郎，Tao Tao，河合英徳，「熱的効果を考慮した気象モデルから工学 LES への one-way ネスティング」，『日本流体力学会年会 2016』，名古屋，2016 年 9 月

2. ○川口真晴，田村哲郎，Tao Tao，河合英徳，「熱的効果を含めた気象モデル・工学 LES の融合解析」，『第 30 回数値流体シンポジウム』，東京，2016 年 12 月

3. ○川口真晴，田村哲郎，Tao Tao，河合英徳，Cao Yong，「気象モデル・LES 融合解析を用いた地表付近の突風時空間構造の推定」，『日本流体力学会年会 2017』，東京，2017 年 8 月

4. ○川口真晴，田村哲郎，Tao Tao，河合英徳，「極端気象下の市街地におけるリスク低減のための気象モデル・工学 LES の融合解析手法」，『2017 年度日本建築学会大会（中国）』，広島，2017 年 9 月

5. ○川口真晴，田村哲郎，Tao Tao，河合英徳，Cao Yong，「LES を用いた非定常な地表付近の突風・被害の推定」，『第 31 回数値流体シンポジウム』，京都，2017 年 12 月

6. ○川口真晴，田村哲郎，河合英徳，「気象モデルシミュレーションに基づく竜巻と実建物の力学的相互作用に関する LES」，『2018 年度日本建築学会大会（東北）』，仙台，2018 年 9 月

7. ○川口真晴，田村哲郎，河合英徳，「気象モデル/工学的 LES ハイブリッド手法による強風下の東京都心における乱流解析」，『第 32 回数値流体シンポジウム』，東京，2018 年 12 月

8. ○川口真晴，田村哲郎，河合英徳，「気象モデル・工学的 LES ハイブリッド手法 -2018 年台風 21 号通過時の大阪都心部におけるピーク風速の推定-」，『2018 年度日本建築学会大会（北陸）』，金沢，2019 年 9 月

9. ○川口真晴，田村哲郎，「数値予測による要因分析－2012 年つくば竜巻－」，『2019 年度日本建築学会大会（北陸）構造部門（荷重）パネルディスカッション「頻発する極端気象に対する強風被害調査・要因分析・荷重設定」』，金沢，2019 年 9 月

10. 川口真晴，○河合英徳，田村哲郎，益子渉「2018 年台風 21 号における大阪市街地の強風・風圧力特性 -気象モデル・工学 LES の適用-」，『第 33 回数値流体力学シンポジウム』，札幌，2019 年 11 月

謝辞

本研究を行うにあたり，始終，熱心懇切な御指導と御助言を賜りました恩師東京工業大学教授・工学博士・田村哲郎先生に深く感謝の意を表します．2015 年 4 月，修士課程生として研究室に所属して以来，私にとって新たな学問領域であった風工学と数値流体計算を基礎から手ほどきくださり，日々のディスカッションにおいては研究の進め方，論文の執筆をはじめ多くのことを熱心に御教授頂き，研究に対する誠実な姿勢を学ばせて戴きました．この五年間は何物にも代えがたい時間となりました．

本論文の審査において貴重な御助言と適切な御指摘を賜りました東京工業大学教授・工学博士・坂田弘安先生，同 教授・博士(理学)・肖鋒先生，同 准教授・博士(工学)・佐藤大樹先生および同 准教授・博士(工学)・大風翼先生に厚く御礼申し上げます．特に大風先生には合同ゼミにおいても多くの的確な御指導と御助言を戴きました．心より御礼申し上げます．

本研究全般にわたり，東京工業大学助教・博士(工学)・河合英徳先生より，研究を遂行する上での多くの御助言と心強い励ましを常に戴きましたことに，心より御礼申し上げます．

また，本論文の各章の解析は多くの方々の御指導，御協力のもと執筆することができました．

本ハイブリッド手法の構築にあたり，株式会社清水建設・博士(工学)・野澤剛二郎氏より，基となった高周波変動成分の生成方法についての御指導とプログラムを参考にさせて戴く御厚意を賜りました．ここに記して深く感謝の意を表します．

2012 年つくば竜巻と 2018 年台風 21 号の解析を行うにあたり，気象庁研究所・博士(理学)・益子渉氏より，気象モデル NHM による貴重な数値解析データをご提供戴き，さらに解析に対して多くの御助言を戴きました．ここに記して深く感謝の意を表します．

この台風と竜巻の解析結果については，東京大学名誉教授・理学博士・新野宏先生，気象庁研究所・博士(理学)・瀬古弘氏より，気象学的な観点からの示唆に富む御指摘，御助言を戴きました．ここに記して深く感謝の意を表します．

多くの時間を共にした田村研・大風研の諸先輩方，仲間の存在のおかげで，非常に充実した 5 年間の研究生活を送ることができました．

特に田村研究室・博士課程の陶韜さんには WRF を用いた解析を行う上で惜しみない御協力を戴きました．また竜巻と台風の研究を行う中で，日々行ったディスカッションを通して大きな刺激を戴きました．心より感謝の意を表します．

最後に，常に暖かく支えてくれた家族に心より感謝いたします．

2020 年 3 月

川口真晴