

建築と屋外の風に関する様々な問題を解決する 数値シミュレーションツールの開発

将来のスーパー台風も想定できる数値風洞「Kazamidori[®]」の紹介

田中英之・畔上泰彦

昨今の台風被害の報道などから、将来の気候変動による台風勢力の強まりが実感となりつつあり、建物の耐風設計においてはこれまで以上に強風の影響を高精度に予測し、考慮することが求められている。そのための有用なツールである数値風洞に対する実用化の動きが建築分野でも進んでおり、本稿では、実務で使用している数値風洞の予測精度について紹介する。また、数値風洞と気象解析を連携させて2019年19号台風を対象に実施した現在気候下と将来気候下における数値実験結果についても紹介する。

キーワード：耐風設計, 数値流体計算, 風荷重, 風速, 気象解析, 台風

1. はじめに

近年、日本に上陸した2018年21号や2019年15号、19号などの台風によって、各地で大きな被害がもたらされている。今後、気候変動によって台風の勢力が強まることで¹⁾、これまで50年に1度の強さと想定されていた風速の発生頻度が、数十年先には増加するとの予測もあり、スーパー台風^{a)}の日本上陸も懸念されている。そのため、建物の設計においてはこれまで以上に強風の影響を高精度に予測し、考慮する必要がある。また、強風被害のリスクは周辺の建物の影響によっても増大するため、市街地スケールでも強風の影響を高精度に予測し、様々な建物に対する強風被害のリスクを低減することが求められる。

これまで、精度良く強風の影響を評価して建物の風荷重を算定するためには、評価する建物とその周辺市街地の模型をつくり、実際にその模型に風を当てて測定する風洞実験が行われてきた。近年では、日本建築学会の建築物荷重指針²⁾が2015年に改定され、建物に作用する風力の予測に、これまでの風洞実験に加えて数値流体計算(CFD: Computational Fluid Dynamics)の利用も明記された。さらに、2017年にはCFD適用ガイド³⁾が示され、2020年秋以降、一部の性能評価機関において数値流体計算の結果を耐風設計の性能評価で採用できるようになった。このような背景の中、実用的な数値流体計算ツールである数値風洞の開発が

進められており、建物の耐風設計に活用でき、過去や将来の台風も想定した強風被害リスクの評価が可能な数値風洞の計算結果について本稿にて紹介する。

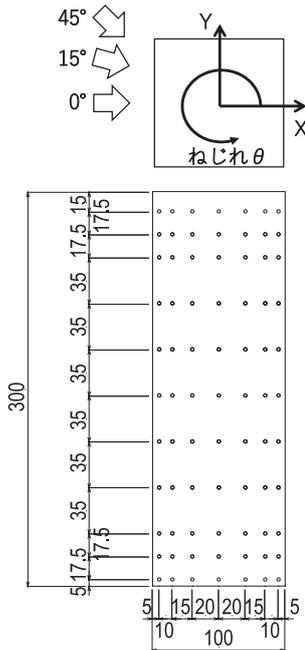
2. 技術概要

本稿で紹介する数値風洞は、建物の耐風設計支援を主目的として最適化したLarge Eddy Simulation(LES)による数値流体計算ツールである。時々刻々と変化する風の流れを計算できる手法を活用し、デジタル空間上で市街地を再現することで、設計対象となる建物だけでなく、周辺の建物に作用する風の力も予測できるため、市街地スケールなど広範囲にわたる強風被害リスクが把握できる。また、気象シミュレーションの結果と連携したことで、過去の特定の台風が上陸した際の市街地内の気象を再現できるだけでなく、将来気候下における台風のシミュレーションなども可能である。

3. 計算精度

建物の耐風設計において数値流体計算の利用が明記されたCFD適用ガイド³⁾では、外圧・風力係数の評価にLESを用いる場合に風洞実験と同等な妥当性のある結果を得るための条件等が示されており、計算ツールの信頼性を確認するための計算(検証1)から適切な計算手法を確認するための計算(検証2)まで段階的な確認計算の実施が事前に求められている。検証1は、単体単純形状建物(図1に示す幅 $B=0.1$ m、高さ $H=0.3$ mの正方形角柱)を対象としたベンチマー

a) スーパー台風：米国の合同台風警報センターが1分平均の最大地上風速で階級分けしている最大強度階級 super-typhoon (130 kts (≒ 66.9 m/s) 以上) の日本語訳⁴⁾



図一 1 ベンチマークテスト対象の正方形角柱と計算風向

表一 1 計算手法

解法	有限差分法 (FDM)
計算コード	Kazamidori [®]
流体式	Navier-Stokes 方程式
乱流モデル	LES
SGS モデル	標準 Smagorinsky, $C_s=0.12$
空間離散化	2次精度中心差分 +3% の1次風上差分
時間進行法	Adams-Bashforth method と Crank-Nicolson method の半陰解法
圧力解法	残差切除法
格子システム	不等間隔直交格子法 ^{5) ~ 9)}

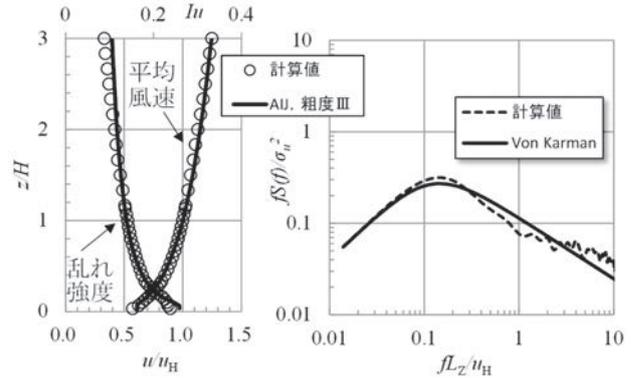
クテストの実施であり、風洞実験結果をもとにした判定範囲内に計算結果が収まること一つの指標となる。当該数値風洞では、検証 2 に相当する市街地を再現した多くの精度検証を実施しており^{例えは¹⁰⁾}、本章では、検証 1 のベンチマークテストを実施した結果を紹介する。

(1) 計算手法と条件

ベンチマークテストに用いた数値風洞の計算手法と計算条件を表一 1 と表一 2 にそれぞれ示す。表一 2 の計算条件は CFD 適用ガイドを満たすものとなっており、流入境界条件に設定する気流条件は実際の風洞測定洞を再現して生成した。その気流条件は図一 2 に示すとおりであり、平均風速と乱れ強度の鉛直分布と高さ $z/H=1.0$ における変動風速のパワースペクトル密度は、建築物荷重指針²⁾で示されている粗度区分 III の気流特性を精度良く再現できている。

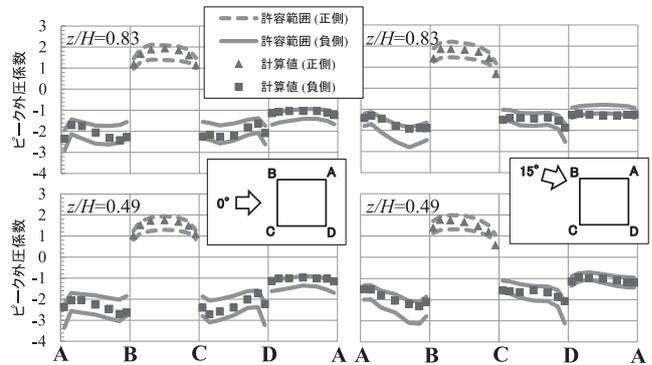
表一 2 計算条件

計算領域	$30B(x) \times 30B(y) \times 20B(z)$
計算格子数	約 1500 万
最小格子幅	$0.01B$
評価時間	40 秒 (実時間 10 分間相当 $\times 5$ 波)
時間刻み	$2.00E-5$ 秒
流入境界	図一 2 の流入変動風 $u_H = 10.1$ m/s
流出境界	移流境界条件
側・上方境界	勾配 0 条件
床・壁面境界	壁関数 (2 層モデル)



(a) 変動風の鉛直分布 (b) 変動風のパワースペクトル密度

図一 2 計算に用いた気流条件



図一 3 ピーク外圧係数 (左図: 風向 0° , 右図: 風向 15°)

(2) 計算結果

(a) 外装材用ピーク外圧係数の結果判定

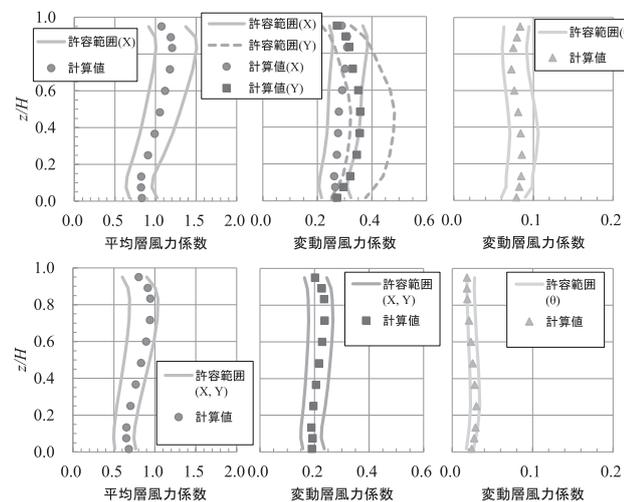
図一 3 に風向 0° と 15° の場合の水平断面でのピーク外圧係数の分布を示す。それぞれ上段が $z/H = 0.83$ 、下段が $z/H = 0.49$ におけるピーク外圧係数であり、併せて CFD 適用ガイドの許容範囲も示している。図一 3 より、計算結果は許容範囲内に収まっており傾向も良く捉えている。

(b) 構造用風力係数の結果判定

図一 4 に X 方向の平均層風力係数および X, Y 方向とねじれ θ の変動層風力係数の鉛直分布を示す。それぞれ上段が風向 0° 、下段が風向 45° における層風力係数であり、併せて CFD 適用ガイドの許容範囲も示

している。図—4では、いずれの結果も許容範囲内に収まっている。

図—3や図—4のように、CFD適用ガイドの単体単純形状建物を対象としたベンチマークテストでは、外装材用風荷重および構造骨組み用風荷重の検討に十分な信頼性の高い結果が得られている。



図—4 層風力係数 (上図：風向0°, 下図：風向45°)

4. 気象解析との連携

2019年10月12日、台風19号は大型で強い勢力を保ったまま伊豆半島に上陸した。この台風の大雨や暴風等により、関東甲信地方を中心に多くの被害を受けた。雨については、10日から13日までの総降雨量が神奈川県箱根で1000mmに達し、多摩川や千曲川といった一級河川の堤防が決壊するなどの被害が発生した。風については、東京都江戸川臨海では最大瞬間風速43.8m/sが記録されるなど、関東地方の7か所で最大瞬間風速40m/sを超える強風が記録された。さらに、1. で述べたように、台風の勢力は将来気候下でさらに強くなっていくことが示唆されており¹⁾、今後はこれまで以上に台風の雨や風による被害が甚大化する可能性が高いと考えられる。そこで本章では、東

京都の街区を対象に、2019年台風19号の再現実験と将来気候下での数値実験を行い、現在と将来気候下での街区内の風の流れ場を比較するとともに、建物面の風荷重の大きさを比較した結果を紹介する。

(1) 使用データ及び計算手法

気象解析は領域気象モデル Weather Research and Forecasting model (以下、WRF) を用いて行い、街区内の風の流れ場の数値流体計算には WRF の出力を初期値・境界値として、当該数値風洞を用いて行った。WRF の計算時間と計算条件は表—3、数値風洞の計算手法は表—1のとおりである。

(2) 計算結果

(a) 2019年19号台風の再現実験

台風19号が関東地方に接近、通過した10月12日の東京気象台の風速データを見ると最大風速16.8m/s、最大瞬間風速は41.5m/sであり、都心でも非常に強い風が吹走していたことが分かる。図—5には当日21時頃に最も風速が強くなった時間帯の観測値と数値風洞による計算値を示す。観測は図—6に示す計算対象街区の建物Bの屋上、地上約30mにて行い、3次元超音波風速計によって風速3成分の計測データを得た。図—5の観測値を見ると、21時4分ごろの風速が最も強く、ピーク値は27.7m/sを示している。WRFと数値風洞による再現実験による計算値を観測値と比較すると(図—5)、対象時間における観測値と計算値の平均風速はそれぞれ4.24m/sと4.29m/sであり非常に良く一致している。また、21時4分ごろに生じているピーク値もそれぞれ27.7m/s、26.6m/sと良く再現できている。

図—6(a)より、計算対象時間における街区内の地上2mの高さにおける風速の最大値を見ると、A駅前の大通りなどでは10m/s近い強い風が吹走している。また、図—7(a)において対象時間における建物壁面の風荷重のピーク値(正側と負側の風荷重の絶

表—3 計算条件 (WRF)

	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4	Domain5	Domain6
使用モデル	WRF-RANS 4.0.3					WRF-LES 4.0.3
初期値・境界値	NCEP-FNL					WRF-RANS
計算開始時刻	12月9日12時					10月12日21時
対象時間	12月12日12時～12月13日0時					12日21時～12日21時20分
鉛直層数	50層					
水平計算格子数	90×90	121×121	130×130	51×51	101×101	100×100
格子間隔	27km	9km	3km	1km	200m	40m

対値を比較し、より大きい値)を見ると、多くの建物壁面では、 -2.0 kN/m^2 以上 2.0 kN/m^2 以下の値を示しているが、高層建物の屋上等では -2.0 kN/m^2 以下のやや大きな負の値を示す部分もあることが分かる。

(b) 将来気候下における2019年19号台風の数値実験

2019年19号台風を対象に、将来気候下における数値実験を行った。本稿では疑似温暖化手法¹¹⁾を用いて計算を行った。気候シナリオはRCP8.5シナリオ¹²⁾下でのCoupled Model Intercomparison Project Phase5

(CMIP5)のGlobal Climate Model(GCM)の30メンバーアンサンブル平均値を用い、2090年代(2080-2099年)を対象に計算を行った。なお、関東周辺10月の現在気候と将来気候の気温差は約 4.1°C であることを確認している。

台風が本州に接近した際の気圧配置(図-8)を見ると、現在気候下(再現実験)では台風の中心気圧が約960 hPaなのに対し、将来気候下では約930 hPaと約30 hPa低くなることが分かった。次に関東地方の地上約160 mの風速(図-9(a))を見ると、現在気

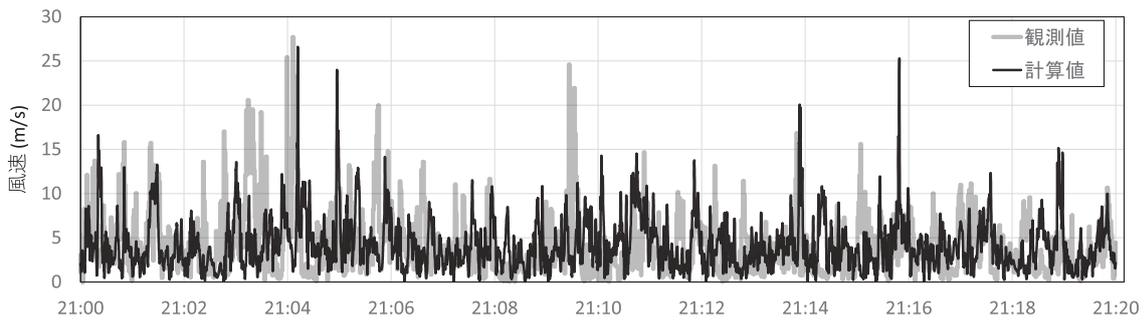
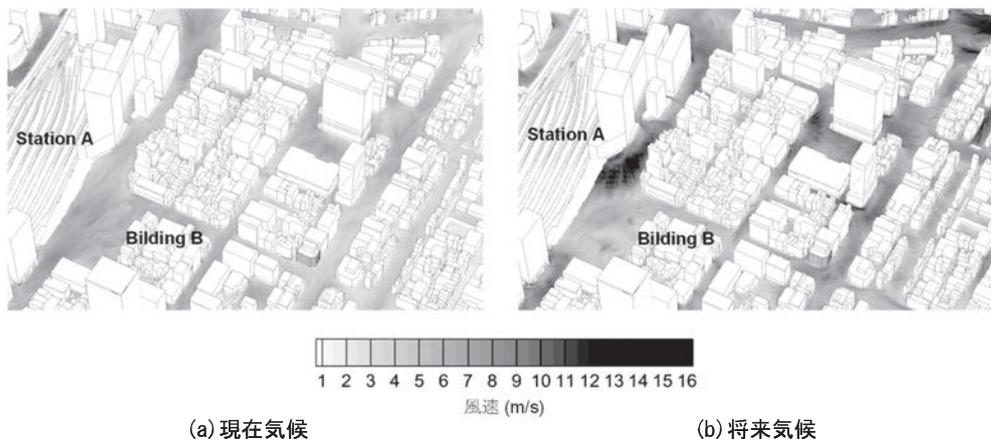


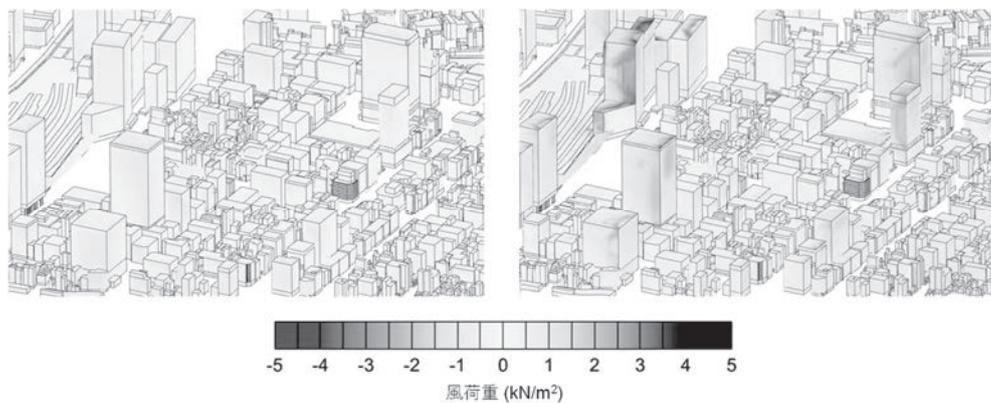
図-5 10月12日の建物B屋上の風速



(a) 現在気候

(b) 将来気候

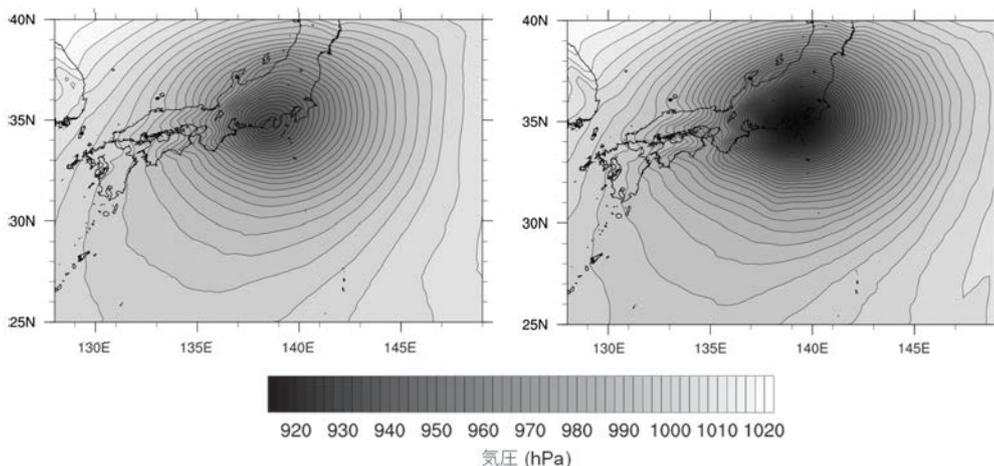
図-6 計算対象時間における地上2mの風速の最大値



(a) 現在気候

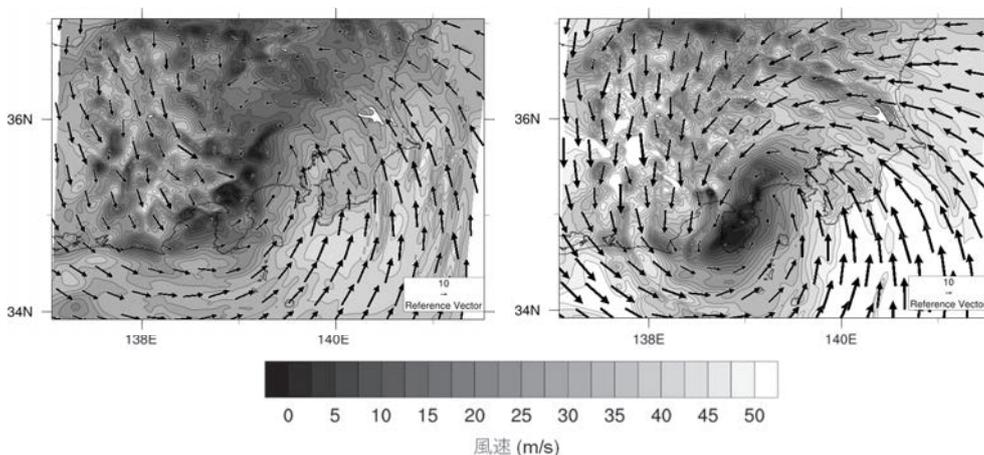
(b) 将来気候

図-7 計算対象時間における建物面の風荷重のピーク値



(a) 現在気候 (b) 将来気候

図一8 2019年19号台風を対象とした気圧配置



(a) 現在気候 (b) 将来気候

図一9 2019年19号台風を対象とした地上160mの風速

候下（再現実験）では東京都や千葉県の沿岸部等の風速が大きい地域では約 40 m/s の風速を示している。一方、将来気候下で計算した風速を見ると（図一9 (b)）、千葉県沿岸では約 52.5 m/s という非常に強い風速を示しており、内陸においてもほとんどの地域で 30 m/s を超える風速を示している。なお、現在気候下（再現実験）と将来気候下での数値実験では、台風の移動速度や進路が異なることに注意されたい。

将来気候下における WRF の数値実験で得られたデータを初期値・境界値として本数値風洞を用いて計算対象とした図一6、7の地上風速と建物面の風荷重の計算を行った。図一6 (b) に示す街区内の計算対象時間における地上風速の最大値に注目すると、多くの場所で風速 10 m/s を超え、場所によっては 16 m/s を超えるような風速を示している箇所もあることが分かる。また、対象時間における建物壁面の風荷重のピーク値（図一7 (b)）を見ると、正側では多くの建物壁面で、1.5 ~ 3.0 kN/m² の値を示している。一方、負

側では高層建物の屋上や隅角部を中心に、-4.0 kN/m² 以下の非常に大きな値を示している部分も多くあり、将来気候下では現在気候下よりも建物へ大きな風荷重が作用する可能性が高いと考えられる。

5. おわりに

建物の耐風設計に活用する目的で、時々刻々と変化する風の流れを計算できる数値風洞の実用化が進められている。数値風洞で日本建築学会の CFD ガイドラインで示されている単体単純形状建物を対象としたベンチマークテストを実施し、その計算結果から、耐風設計に活用できる信頼性の高い結果が得られた。

2019年19号台風を対象に、現在気候下と将来気候下において数値実験を行った。その結果、将来気候下では現在気候に比べ地上160mの風速が10m/s以上増加する地域が多く、沿岸地域では50m/sを超える強い風が吹く可能性がある。また、建物面の風荷重の

負側のピーク値は、 -4.0 kN/m^2 以下という大きな値を示す部分も多く発生する可能性があることが分かった。これらの結果から、今後更なる強風対策が必要であると考えられる。なお、今回の計算はある一つのケースを対象としたものであり、将来気候下における台風の性状や街区内の風の流れ場に関しては今後更なる数値実験を行う必要がある。

謝 辞

本稿で紹介した研究の実施に際し、筑波大学計算科学研究センター日下博幸教授と Quang-Van Doan 氏には貴重なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

JCM A

《参考文献》

- 1) Pachauri, Rajendra K., et al, Climate change 2014, synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ippc, 2014
- 2) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 3) 日本建築学会, 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, 2017
- 4) 坪木和久, スーパー台風, 天気, Vol.65, No.6, pp.73-75, 2018
- 5) 梶島岳夫, 不等間隔格子に適合する対流項の差分法, 日本機械学会論文集 (B 編), 65 巻, 633 号, pp.103-108, 1999
- 6) 森西洋平, 非圧縮性流体解析における差分スキームの保存特性(第2報, スタガードおよびコロケート格子系の差分スキーム), 日本機械学会論文集 (B 編), 62 巻, 604 号, pp.84-91, 1996
- 7) 松尾裕一, 桑原匠史, 池知直子, 中森一郎, BAMR 法に基づく並列 LES コードにおける計算効率の改善, 第 24 回数値流体計算力学シンポジウム, E4-5, 2010
- 8) 池野勉, 梶島岳夫, 境界植え込み法に整合するポアソン式の差分表現, 日本機械学会論文集 (B 編), 70 巻, 697 号, pp.1-7, 2004
- 9) 丸山敬, LES による粗面上の乱流境界層の数値計算, 風工学シンポジウム論文集, Vol.18, pp.57-62, 2004
- 10) Tanaka, H., Konno, N., Ohtake, K., Tsuchiya, N., Prediction Accuracy of Wind Forces Acting on High-rise Buildings in Urban Areas by Large Eddy Simulation, Proceedings of the Sixth International Symposium on Computational Wind Engineering in Hamburg, 2014
- 11) Kimura, F. and Kitoh, A., Downscaling by pseudo global warming method, The Final Report of ICCAP, pp.43-46, 2007
- 12) IPCC, Fifth Assessment Report : Climate Change 2013 (AR5) , 2013

【筆者紹介】

田中 英之 (たなか ひでゆき)
 (株)竹中工務店 技術研究所
 環境・社会研究部
 都市気候グループ
 主任研究員



畔上 泰彦 (あぜがみ やすひこ)
 (株)竹中工務店 技術研究所
 環境・社会研究部
 都市気候グループ
 研究員

