

2018年台風21号による暴風の解析

Analysis of Severe Winds due to Typhoon Jebi (2018)

竹見哲也・石川裕彦

Tetsuya TAKEMI and Hirohiko ISHIKAWA

Synopsis

This study investigated the severe winds occurred in the Kinki District and the surrounding areas during the passage of Typhoon Jebi (2018) that developed in September 2018. This typhoon has induced currently the most costly meteorological damages to Japan. The analyses of the surface observational data indicated that the gust factors in urban areas amount to 2.0 or greater, which are significantly higher than those typically known at meteorological stations in a climatological sense. The coupled analysis of both a mesoscale meteorological model and a large-eddy simulation model demonstrated that the maximum wind gust in the analysis area of Osaka City was estimated as 60-70 m/s, which is comparable to the wind speed at the height of about 300 m.

キーワード: 2018年台風21号, 暴風, 突風, 乱流, ラージエディシミュレーション

Keywords: Typhoon Jebi (2018), severe winds, gust, turbulence, large-eddy simulation

1. はじめに

2018年9月に近畿地方を縦断した台風21号により、大阪湾沿岸で高潮・高波が発生し、また近畿地方の広域で強風が吹き、建築構造物の被害、樹木の被害、電力網への被害、飛散物による被害、さらには関西空港の浸水といった様々な被害が生じた。日本損害保険協会の2019年3月22日付公表（日本損害保険協会、2019）によれば、この台風21号により生じた被害に対する各種損害保険の支払い総額は9698億円に達した。この額は、風水害による保険金支払額のこれまでの歴代第1位であった1991年台風19号の際の5680億円をはるかに超えるものとなった。

2018年台風21号は、近畿地方においてかつて大きな被害をもたらした1934年室戸台風や1961年第二室戸台風と似たコースを辿り、大阪市内の気象台観測点では、室戸台風の際の60.0 m/s、第二室戸台風の際の50.6 m/sに次いで観測史上歴代3位となる最大瞬間風速47.4 m/sが記録された。京都市内の気象台観測点での最大瞬間風速は39.4 m/sで、1934年室戸台風時の

42.1 m/sに次いで観測史上歴代2位の記録となったほか、関西空港では記録のある2003年以降では観測史上1位の58.1 m/sの最大瞬間風速が記録された。こういった暴風により、近畿地方の各都市では様々な形態の災害が発生した。大阪市内では、市街地を中心に建築構造物や街路樹・公園樹に大きな被害が生じた。

今回の台風21号による暴風災害は、現代の市街地が構築されて以降で生じた最悪の被害と言える。一般に、市街地内での風は、ビルの密集度合いや高層ビルの配置の影響を受け、場所によって大きく変化する。したがって、台風21号による強風は、市街地内では局所的に極めて強かった可能性がある。

本研究では、台風21号に伴う暴風の特徴を地上観測データおよび数値モデルにより調べる。最初に、地上気象観測点から算出した近畿地方での突風の状況について述べる。次に、暴風による市街地での被害状況について、大阪市難波で見られた状況を示す。さらに、気象モデルとLarge Eddy Simulation (LES)モデルとを併用して台風21号により生じた暴風を都市

Table 1 Gust factors at weather stations in the Shikoku and Kinki Districts on 4 September 2018

地点 Site	突風率 Gust Factor	日最大(Daily maximum)	
		10分平均風速 10 min wind [m/s]	最大瞬間風速 Max gust [m/s]
堺	2.20	20.3	43.6
能勢	2.13	17.3	31.6
川辺	2.11	23.4	42.2
枚方	2.10	19.3	40.2
南小松	2.10	16.3	32.2
東近江	2.01	16.5	31.7
大阪	1.95	23.7	47.4
熊取	1.93	26.6	51.2
京都	1.91	21.7	39.4
土山	1.87	18.6	33.2
米原	1.85	18.8	32.2
京田辺	1.84	18.7	34.4
長浜	1.82	19.3	33.6
彦根	1.81	23.5	46.2
三木	1.73	15.3	26.9
八尾	1.72	16.8	36.5
洲本	1.68	21.1	34.1
三田	1.68	18.7	29.4
豊中	1.66	18.3	38.1
今津	1.63	20.2	35.9
和歌山	1.60	37.6	57.4
南紀白浜	1.60	33.3	45.8
明石	1.46	25.2	31.6
神戸	1.43	23.0	41.9
友が島	1.36	42.5	51.8
関西空港	1.32	44.9	58.1
神戸空港	1.29	34.5	45.3

街区内の詳細な空間スケールで定量的に評価する。

2. 地上風の解析

気象庁の地上観測点アメダス、大阪市および京都市の自治体が保有する観測による地上風データを収集した。アメダス観測点では良好にデータ取得されていたが、自治体の環境観測点の多くで、台風の最接近時に一時記録が停止したため、台風に伴う最大風速の情報は十分には得られていない。そこでアメダス観測点のデータを対象に、台風が通過した9月4日の00:10JSTから9月5日00:00JSTまでの各10分間について、10分間の平均風速－瞬間最大風速の散布図を作成し、線形回帰を求めその傾きを突風率とした。

Table 1には、和歌山県、兵庫県、大阪府、京都府、滋賀県の気象庁観測点の中で、日最大平均風速が15

m/sを越える観測地点を、突風率の大きい順に並べた。堺(2.2)、枚方(2.1)、大阪(1.95)、京都(1.91)をはじめ、都市域の観測地点においても、大きな突風率が観測されている。表の突風率は一日のデータの線形回帰で得たものであるから、個々の10分間で見るとこの値よりも大きな突風率が実現している。これらの値は、教科書的に言われている値(1.5～2)の上限かそれを越える値であり、強風時に都市域で吹く突風に関して、改めて考察する必要があることを示唆する。

京都市街地における強風の実態を把握するため、気象庁によるデータの他、京都市環境局が保有する観測データを収集した。京都市環境局が保有する観測データのうち、京都タワーでの観測では、1分毎の平均風速および最大瞬間風速のデータが取得されていたため、台風通過時の突風の分析に使用した。京都タワーの観測高度は地上高121 mであり、地上とは風の吹き方や強さが大きく異なるであろう。Fig. 1に京都タワーおよび地上気象観測点での平均風速および最大瞬間風速を示す。地上気象観測点でのデータは、10分間隔での平均風速および最大瞬間風速である。期間中の最大瞬間風速は、地上気象観測点(観測高度17.6 m)では39.4 m/sであったのに対し、京都タワー観測では57.6 m/sに達した。また、Fig. 1に示した期間中の突風率は、地上気象観測では2.01 (Table 1とは算出期間が異なるため若干数値に違いがあることに注意)、京都タワー観測では1.33であった。

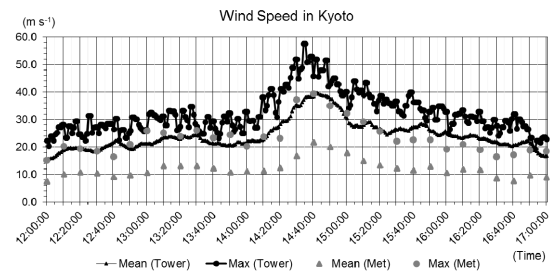


Fig. 1 Time series of mean and instantaneous wind speed at the Kyoto Tower site (triangles with solid line and black circles with solid line, respectively) and at the surface meteorological observation site (gray triangles and gray circles, respectively) from 1200 JST to 1700 JST 4 September 2018

このように、地上に近いほど、突風率は大きくなることが示唆される。これは、建物や構造物などの影響を受けて、地上に近いほど風速変動の幅が大きくなるためだと考えられる。さらにFig. 1から、地上での最大瞬間風速値は、高度121 mでの平均風速値とおおよそ同程度であることが分かる。このことから、

上空の強風が下向きに輸送され、地上付近での風が瞬間的に強まるという猫像が想定される。

3. 大阪市難波地区での被害状況

大阪市難波地区では、建物、看板、街路樹に多数の被害が見られた。南海難波駅前の周辺地区での現地被害調査時に撮影した写真を以下に示す。古い木造家屋の大破（Fig. 2）、建物の壁や看板・パネルの剥がれ（Fig. 3）、御堂筋沿いや南海難波駅前の広場の街路樹の被害（Fig. 4）など、限られた範囲ではあったものの、様々な被害が発生したことがわかる。

また、ここには写真を掲載しないが、JR難波駅周辺においても、街路樹の幹や枝が折れるといった被害が多数見られた。また、折れるまでには至っていないくとも、枝が極端に曲がった状態になった樹木もあった。これは強風が持続的に吹くことで、樹木が曲がってしまったものと思われる。



Fig. 2 A damage to an old house

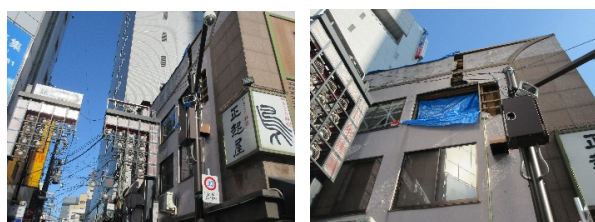
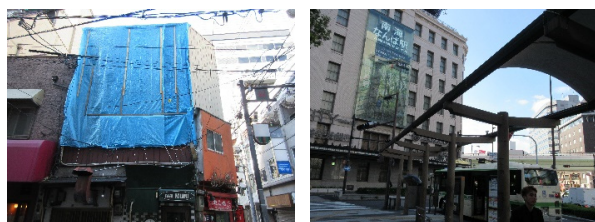


Fig. 3 Damages to houses and buildings



Fig 4 Damages to street trees

4. 気象モデル・LESモデルの融合による暴風の解析

気象モデルとLESモデルの融合により、実際の市街地で生じたと想定される暴風を定量的に評価することを試みる。気象モデルにより、台風21号の実際の気象場を数值的に再現する。一方、LESモデルでは、実際の市街地の建物・構造物の配置・高さのデ

ータを下端境界に設定することにより、実際の市街地での流れ場をシミュレーションする。この両者を接続することにより、市街地での風速を推定する。なお、本節で述べる結果は、Takemi et al. (2019)により速報的に得られた成果である。

4.1 数値シミュレーションの設定

台風など気象場の再現には、領域気象モデルである Weather Research and Forecasting (WRF) モデル (Skamarock et al., 2008) を用いた。計算領域は、4.5 km格子幅のDomain 1を設定して日本列島および周辺の北西太平洋の2500 km×2700 kmの範囲をカバーし、その内側に0.9 km格子幅のDomain 2を設定して近畿地方を中心とした300 km×300 kmの範囲をカバーするようにした (Fig. 5)。モデルの鉛直上端高度は20 hPaとし、鉛直方向の格子レベル数は56とした。地図投影図法は、ランベルト図法を用いた。また、モデルの地形はGTOPO30から作成し、土地利用の決定にはMODISに基づき分類された土地利用データを利用した。

モデルの初期値・境界値には、気象庁の全球予報モデルGSM解析値を用いた。Domain 1にスペクトルナッジングを課すことにより、総観場の効果をモデルに取り込むようにした。これにより、台風の経路の再現性が良くなることが期待できる。また、GSMの異なる解析時刻を計算開始時刻と設定することにより、計算開始時刻の違いによる台風の再現性の不確実性を考慮したアンサンブル計算を実施した。これにより、近畿地方で実際の気象条件の下で地形の影響を受けて吹く風を量的に再現することと試みた。

次に、市街地内での風を再現するために、Yoshida et al. (2018), Yoshida and Takemi (2018)によるLESモデルを用いた。これは、Nakayama et al. (2011)に基づき開発したLESモデルである。国際航業のGISデータを用いて大阪市街地（南北3 km・東西2 km）の実際のビル群を2 mメッシュでLESモデルに表現した (Fig. 6)。本計算領域の上流部にドライバー領域を設け、乱流を生成した。南風を想定し、計算領域と流入面を設定した。LESでは、5400秒分の計算を行い、最後の1800秒間を解析対象とした。

LESモデルでは、モデルで形成される境界層上端高度 ($z_{\infty} = 326$ m) の風速で無次元化し、都市キャノピー内での風速の時空間変動を精密に表現している。このLES無次元風速を、WRFで計算された高度 z_{∞} での風速 U_{WRF} (m/s)を基準値とし、実風速に換算した。すなわち、高さ z におけるLES無次元風速 U_z/U_{∞} を次式の通り台風時の風速 $U(z)$ (m/s)に換算する。

$$U(z) = \frac{U_z}{U_{\infty}} U_{WRF}$$

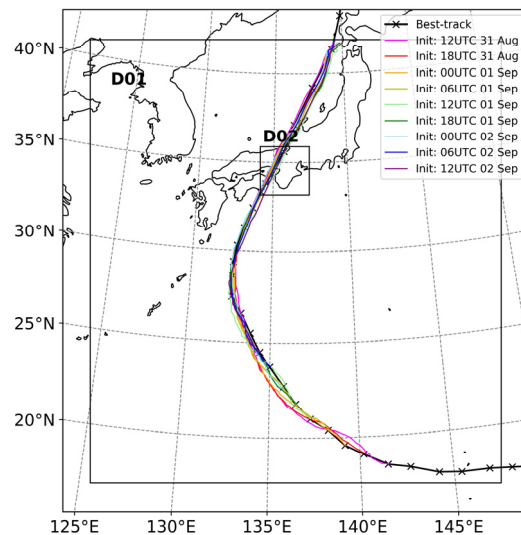


Fig. 5 Computational domains (D01 and D02) of the WRF simulations

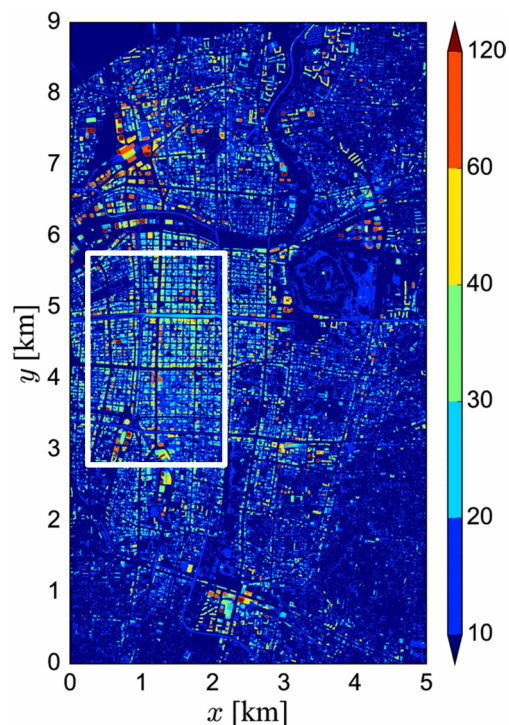


Fig. 6 The computational domain of the LES (white box) within Osaka City

4.2 結果

WRFモデルにより、異なる開始時刻であっても、台風の経路や強度の再現性は大きくは変わらず、すべてのケースで良好であった。Fig. 7は、Domain 2を中心とした範囲におけるWRFにより計算された台風の経路と観測値であるベストトラックとを示す。計算結果には多少のばらつきはあるものの、おおむね

良好な再現性だと言える．ここでは図示しないが，中心気圧や最大風速についても，WRF計算により良好な結果が得られた．

大阪市および関西空港島でのアメダス地上観測値と比べると，10分間の平均風速についてはWRFにより良く表現できていた (Fig. 8)．しかし，WRFでは瞬間値の再現は困難である．また，WRFでは，都市のビルや構造物は陽に表現されていないため，粗度の影響を受ける境界層の構造も再現することができない．Fig. 9は，WRF計算において2018年9月1日18 UTCを初期時刻としたケースの結果から，地点別に期間最大地上風速の分布を示したものである．大阪湾や琵琶湖といった水面では40 m/sを超える強風が表現されている一方，陸地では全般的にはそれより弱く，特に都市部での風速は20 m/s台となっている．大阪での気象台観測値47.4 m/sに比べると，WRFでは半分程度の強さの風しか表現できないことになる．気象モデルでは，粗度の取り扱いが粗度長というパラメータのみで表現され，都市の複雑な幾何学的形状は陽には表現されず，したがって粗度の影響による風速変動も表現されない．このように気象モデル単独では，市街地など複雑な地表面での風を定量的に評価するには限界がある．

そこで，粗度境界層での風の非定常かつ空間非一様な変動を量的に表現するために，建物を陽に解像したLESモデルを用いる．Fig. 10は，WRFとLESによる風速の鉛直プロファイルを示す．LESでは，下層100 mでビル群の影響を受け，高度が下がると風速が急減することが分かる．

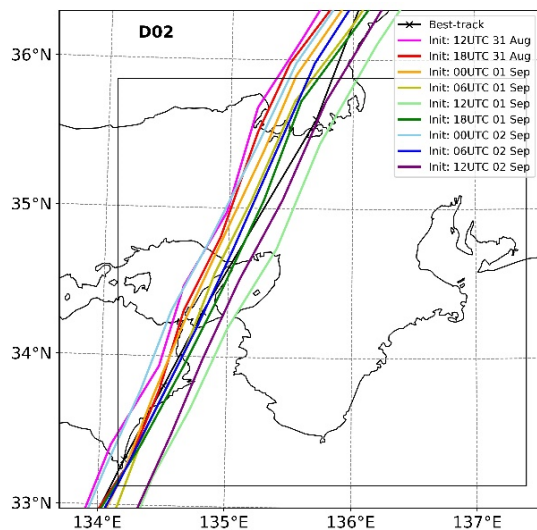


Fig. 7 The typhoon tracks in the best track (black line) and in the WRF simulations (colored lines)

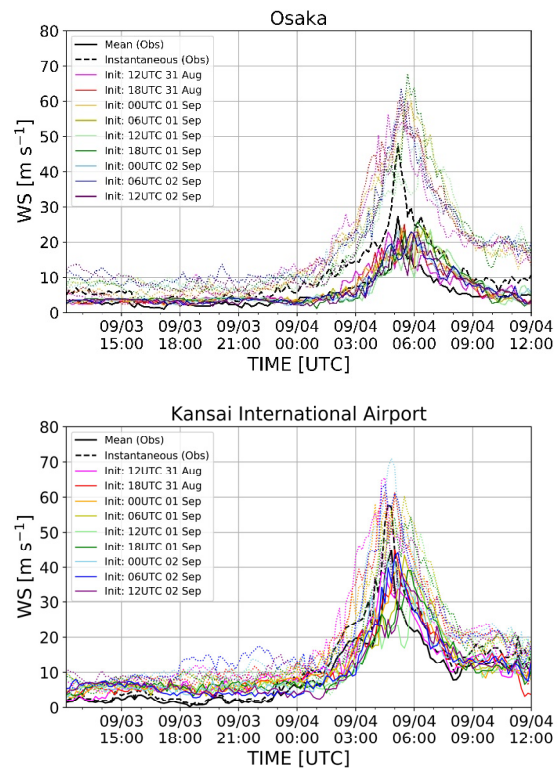


Fig. 8 Time series of the wind speeds at the Osaka meteorological observation site (upper panel) and at the Kansai International Airport site (lower panels). The observations are surface mean (black solid line) and maximum instantaneous (black dotted line) winds at the 1-min interval. The simulated results are indicated with color lines; solid lines for wind speeds at the 10-m height and dotted lines for wind speeds at the 326-m height

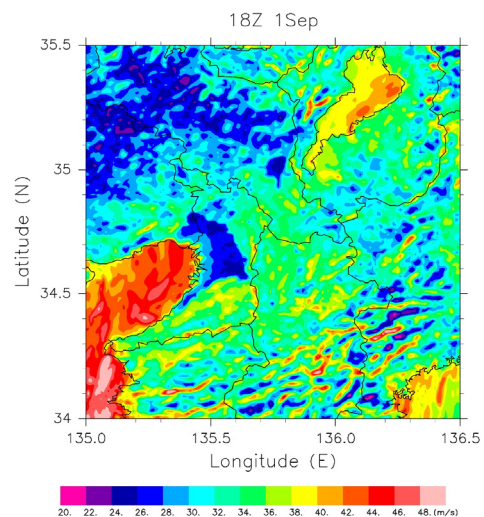


Fig. 9 The horizontal distribution of the simulated maximum surface wind speeds 2 during the simulated period. The case initialized at 1800 UTC 1 September 2018 was chosen

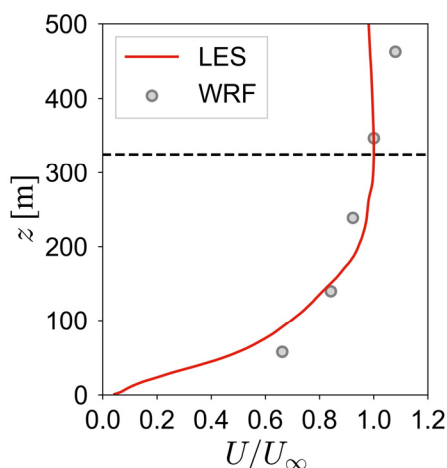


Fig. 10 The vertical profile of the simulated wind speeds in WRF (gray circles) and LES (red line)

Fig. 11は、LESの計算時間内で見られたメッシュ毎の風速の最大値の分布を示す。数値が1に近いほど上空 z_∞ の風と同じであることを意味する。Fig. 11から、0.8を超える場所が多数あり、ところによっては0.9を超えて1に迫るような地区もあることが分かる。

一方、WRFモデルによるシミュレーション結果から、台風の通過に伴って大阪市上空 z_∞ の高さでは、風速が最大で70 m/sに達していたと推定される。このことから、WRFでの高度 z_∞ の風速により、Fig. 11に示すLESの無次元風速を実風速に換算すると、市街地内では、場所によって、瞬間的に60 m/sから70 m/sにも迫る暴風が吹いていたと推定できる。

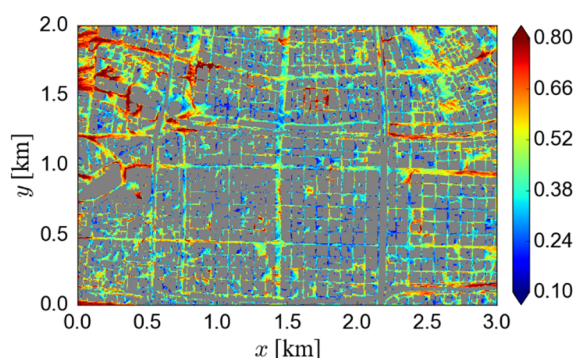


Fig. 11 The horizontal distribution of the ratio of the maximum instantaneous surface wind speed to the wind speed at the reference height in Osaka City

5. まとめ

本研究では、台風21号による暴風の特徴を把握するため、多くの強風害が発生した関西地方を対象に、

台風接近時の市街地での突風に着目した。気象観測データから突風率を算出し、地点別に突風率を調べた。堺における突風率の観測値である2.2をはじめとして、都市域の観測所では軒並み大きな突風率が観測された。

気象モデルWRFと建物解像乱流計算モデルLESとを組み合わせ、台風21号に伴う大阪市街地内での暴風を定量的に評価することができた。高層ビルが林立する大都市では、台風などの極端現象により極めて強い風が吹く可能性がある。近年の都市再開発、将来の気候変動を考慮し (Takemi et al., 2016)、大都市にひそむ暴風リスクを理解することが大切である。

今後は、大阪市その他、京都市など他の市街地での暴風リスクを評価する予定である。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費助成事業（特別研究促進費）「平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究」、環境再生保全機構環境研究総合推進費課題「気候変動に伴う都市災害への適応」（課題番号2-1905）の支援を受けて実施されたものです。大阪市・南海難波駅周辺地区での現地調査では、南新会・難波4丁目振興町会の山下年文氏にお世話になりました。京都タワーでの観測データは、京都市環境局より提供していただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 日本損害保険協会、「平成30年台風21号および台風24号に係る各種損害保険の支払件数・支払保険金（見込含む）等について」、http://www.sonpo.or.jp/news/release/2019/1903_03.html, (2019年6月11日閲覧)
- Nakayama, H., Takemi, T. and H. Nagai (2011): LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 50, pp. 1692-1712, doi: 10.1175/2011JAMC2567.1.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W. and Powers, J. G. (2008): A description of the Advanced Research WRF version 3, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-47 + STR, 113 pp.
- Takemi, T., Okada, Y., Ito, R., Ishikawa, H. and Nakakita, E. (2016): Assessing the impacts of global warming on meteorological hazards and risks in Japan:

- Philosophy and achievements of the SOUSEI program. Hydrol. Res. Lett., Vol. 10, pp. 119-125, doi: 10.3178/hrl.10.119.
- Takemi, T., Yoshida, T., Yamasaki, S., and 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, Vol. 15, pp. 22-27, doi:10.2151/sola.2019-005.
- Yoshida, T., Takemi, T. and Horiguchi, M. (2018): Large-eddy-simulation study of the effects of building height variability on turbulent flows over an actual urban area, Bound.-Layer Meteor., Vol. 168, pp. 127-153, doi: 10.1007/s10546-018-0344-8.

(論文受理日 : 2019年6月11日)