

第6回「震災対策技術展」大阪，大阪市，2019年6月7日

都市にひそむ暴風リスクを理解するために： 2018年台風21号による暴風災害

竹見 哲也

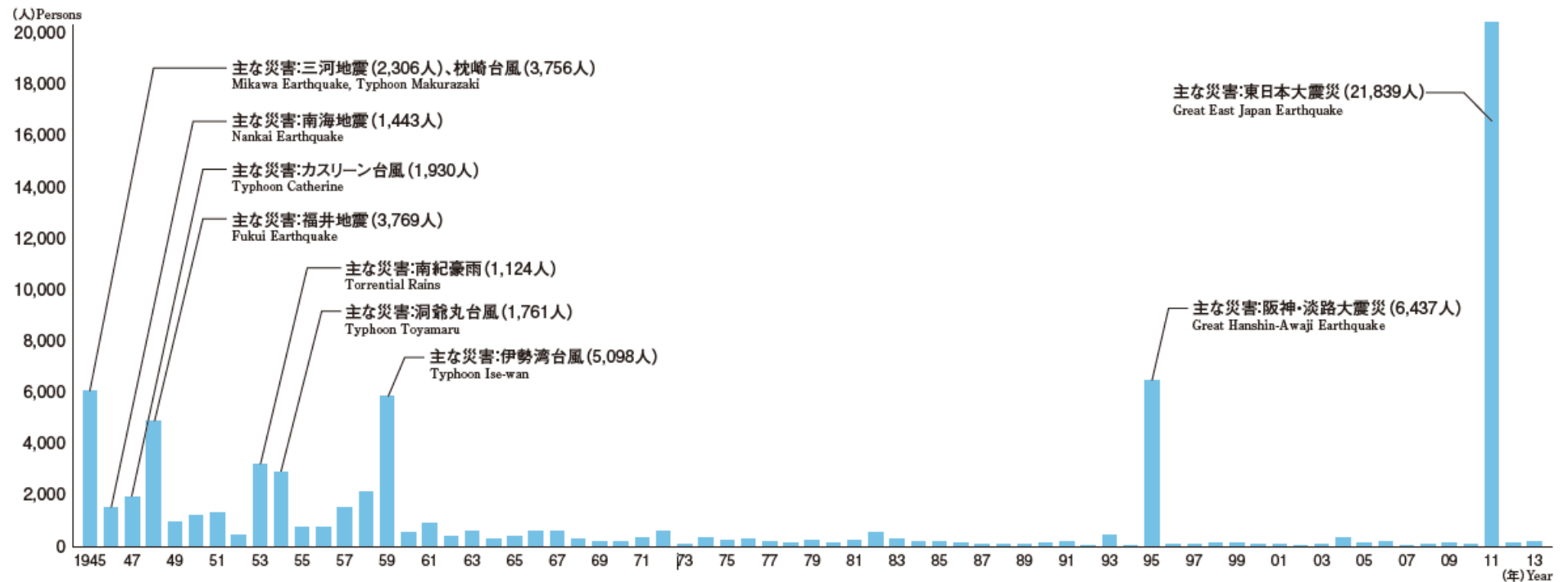
京都大学 防災研究所



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

日本の自然災害の被害の推移

自然災害による死者・行方不明者数の推移 The Number of Deaths and Missing Persons Caused by Natural Disasters



出典：防災白書 Source: White Paper on Disaster Management

※阪神・淡路大震災及び東日本大震災については、震災関連死を含む

Note: With regard to the Hanshin-Awaji Earthquake and the Great East Japan Earthquake, those figures include earthquake-related deaths.



歴史的な顕著台風

台風名	上陸・再接近日	死者・行方不明者数 (人)
室戸台風 (*)	1934.9.21	3036
枕崎台風 (*)	1945.9.17	3756
カスリーン台風	1947.9.15	1930
洞爺丸台風	1954.9.26	1761
伊勢湾台風 (*)	1959.9.26	5098

(昭和の三大台風)

災害のリスクとは

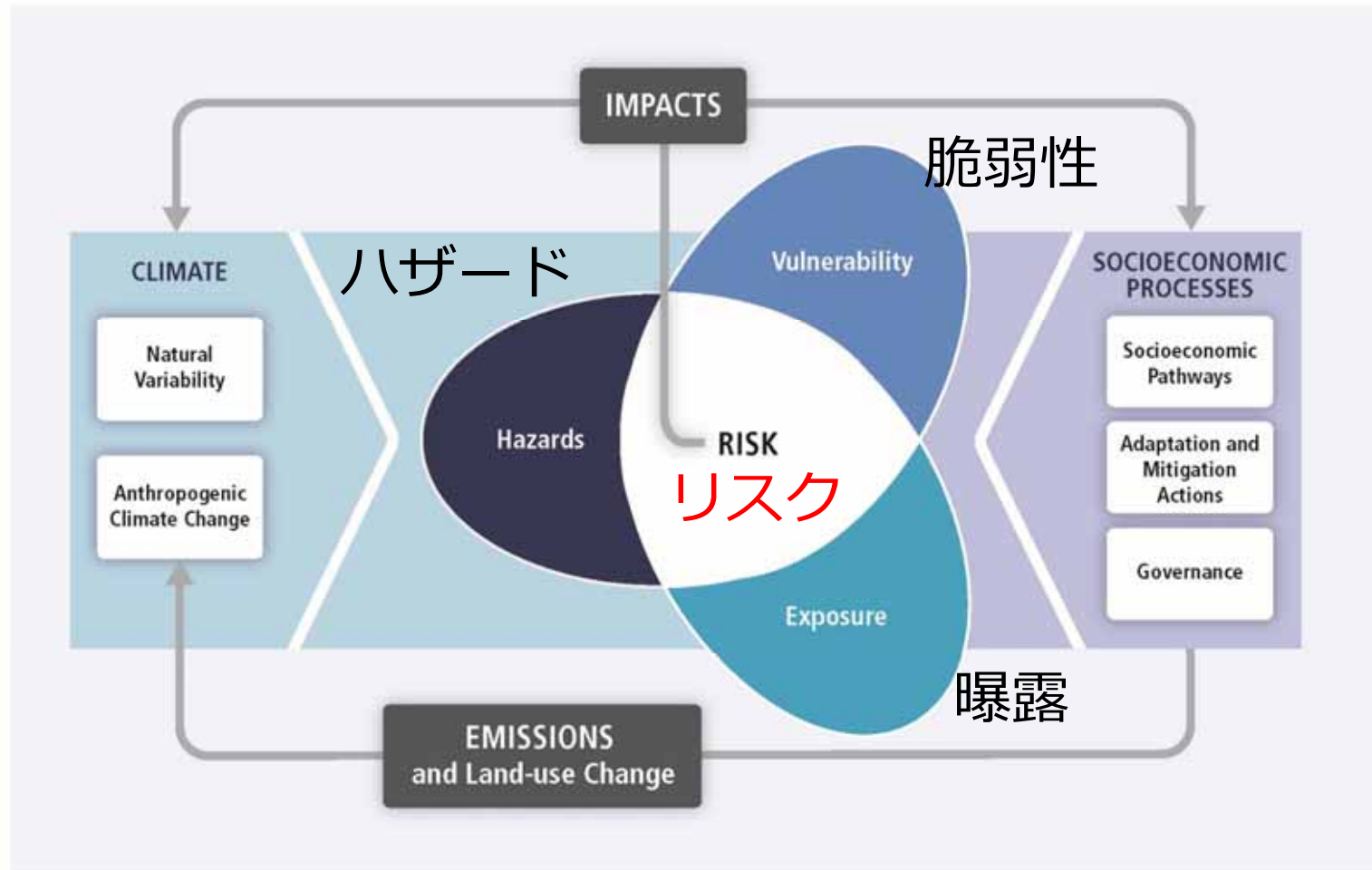


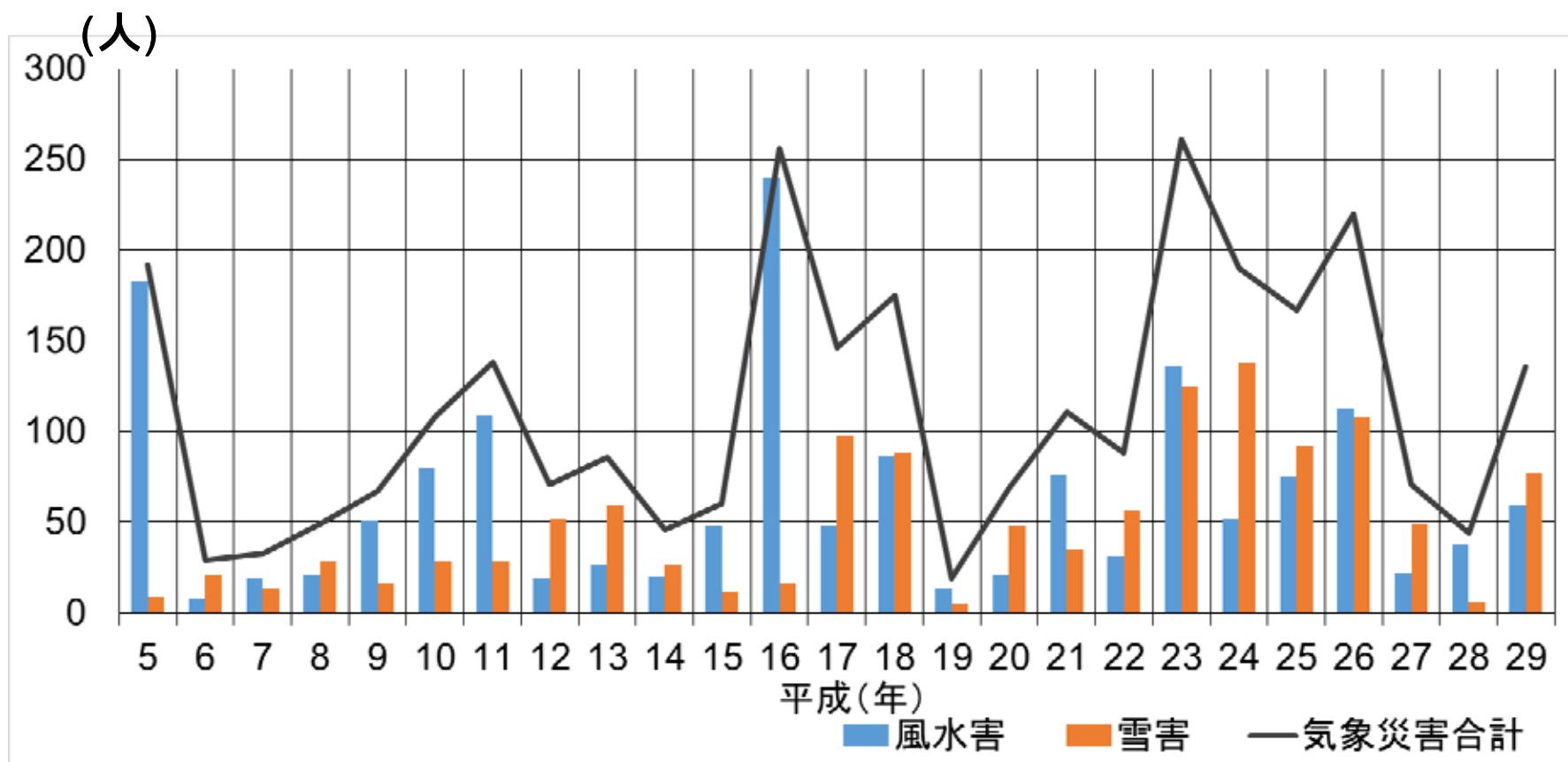
Figure SPM.1 | Illustration of the core concepts of the WGII AR5. Risk of climate-related impacts results from the interaction of climate-related hazards (including hazardous events and trends) with the vulnerability and exposure of human and natural systems. Changes in both the climate system (left) and socioeconomic processes including adaptation and mitigation (right) are drivers of hazards, exposure, and vulnerability. [19.2, Figure 19-1]

(気候変動に関する政府間パネル第5次報告書(WG2)より)

平成の顕著台風

台風名	上陸・最接近日	死者・行方不明者数 (人)
平成2年台風19号	1990.9.19	40
平成3年台風19号	1991.9.27	62
平成5年台風13号	1993.9.3	48
平成16年台風18号	2004.9.7	47
平成16年台風23号	2004.10.20	99
平成23年台風12号	2011.9.3	85
平成25年台風26号	2013.10.16	43

近年の気象災害による死者・行方不明者数



(内閣府「平成30年防災白書」より)

- 平成30年 死者・行方不明者数 (内閣府)
 - 平成30年7月豪雨：232名
 - 台風21号：14名

保険金支払額からみた災害

1970年～2015年の保険金支払額上位

順位	保険金支払額 (\$1 M)	犠牲者数	年月日	災害	国・地域
1	79,663	1,836	2005.8.25	ハリケーン・Katrina	米国、メキシコ湾、バハマ諸島、北大西洋
2	36,865	18,520	2011.3.11	地震 (M9.0)	日本
3	36,115	237	2012.10.24	ハリケーン・Sandy	米国、カリブ海諸国、カナダ
4	27,017	65	1992.8.23	ハリケーン・Andrew	米国、バハマ諸島
5	25,129	2,982	2001.9.11	同時多発テロ攻撃	米国
6	24,455	61	1994.1.17	カリフォルニア州ノースリッジ地震	米国
7	22,343	193	2008.9.6	ハリケーン・Ike	米国、カリブ海諸国、メキシコ湾ほか
8	16,853	185	2011.2.22	地震 (M6.1)	ニュージーランド
9	16,180	119	2004.9.2	ハリケーン・Ivan	米国、カリブ海諸国、バルバドスほか
10	15,799	815	2011.7.27	豪雨、洪水	タイ
12	9,823	51	1991.9.27	台風19号	日本

(Swiss Reinsurance Company Ltd.調べ, 2016年)

国内における保険金支払額による気象災害

風水害等による保険金の支払い

過去の支払保険金（災害例）

順位	災害名	地域	年月日	支払保険金（単位：億円）			
				火災・新種	自動車	海上	合計
1	平成3年台風19号	全国	1991年9月26日～28日	5,225	269	185	5,680
2	平成16年台風18号	全国	2004年9月4日～8日	3,564	259	51	3,874
3	平成26年2月雪害	関東中心	2014年2月	2,984	241	—	3,224
4	平成11年台風18号	熊本・山口・福岡等	1999年9月21日～25日	2,847	212	88	3,147
5	平成27年台風15号	全国	2015年8月24日～26日	1,561	81	—	1,642
6	平成10年台風7号	近畿中心	1998年9月22日	1,514	61	24	1,599
7	平成16年台風23号	西日本	2004年10月20日	1,112	179	89	1,380
8	平成18年台風13号	福岡・佐賀・長崎・宮崎等	2006年9月15日～20日	1,161	147	12	1,320
9	平成29年台風21号	全国	2017年10月21日～23日	1,146	71	—	1,217
10	平成16年台風16号	全国	2004年8月30日～31日	1,038	138	35	1,210

※ 一般社団法人 日本損害保険協会調べ

※ 千万円単位で四捨五入を行い、算出しています。

そのため、各項目を合算した値と合計欄の値が一致しないことがあります。

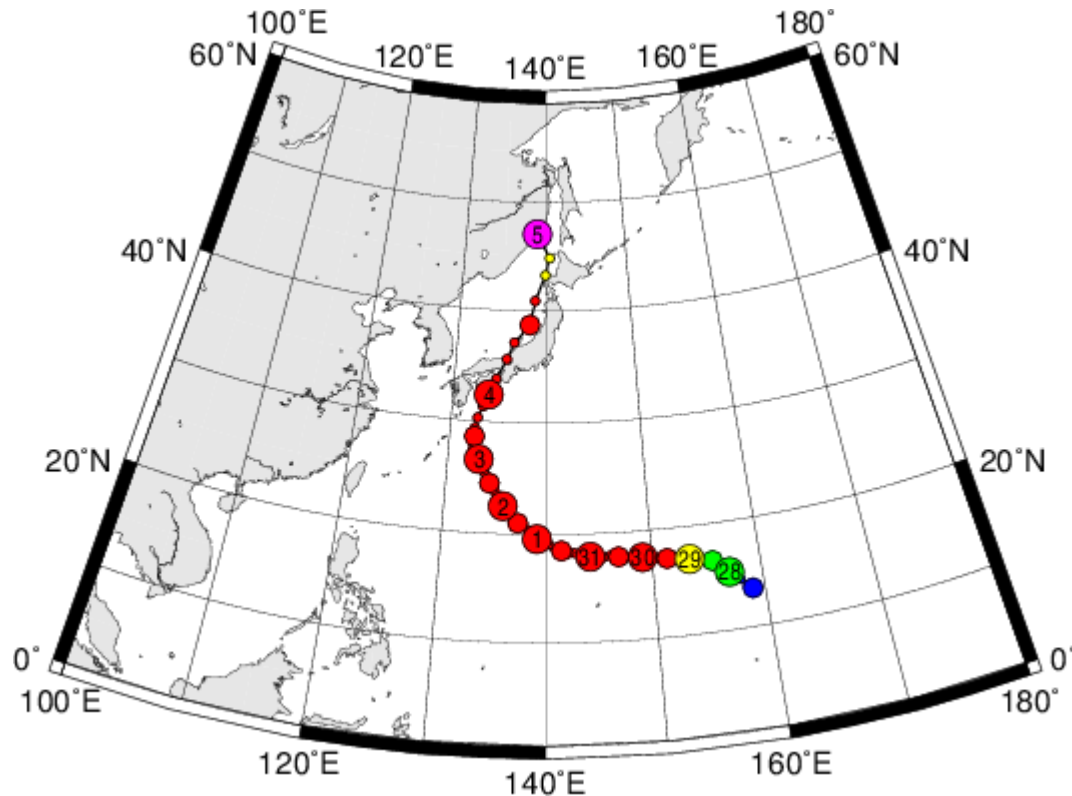
平成30年	時期	支払保険金（単位：億円）			
		車両	火災	新種（傷害）	合計
台風21号	9月上旬	750	8,790	158	9,698
台風24号	9月下旬	113	2,665	90	2,868

（日本損害保険協会による）

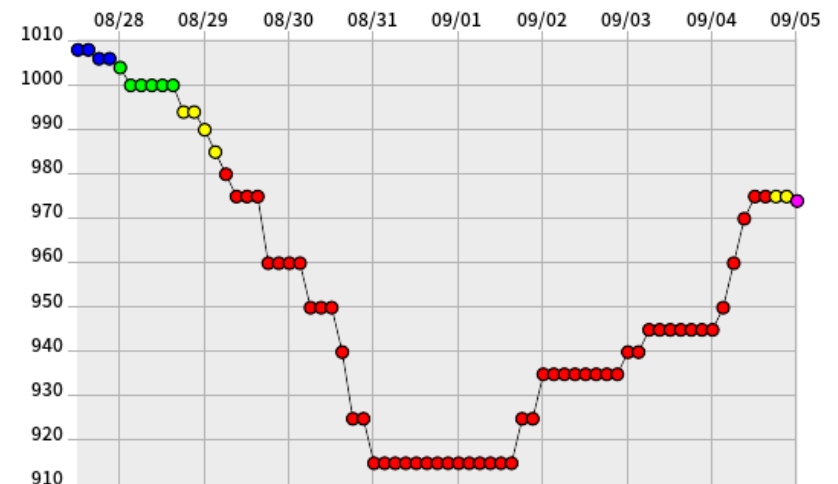


近畿地方で暴風をもたらした2018年台風21号

経路



中心気圧



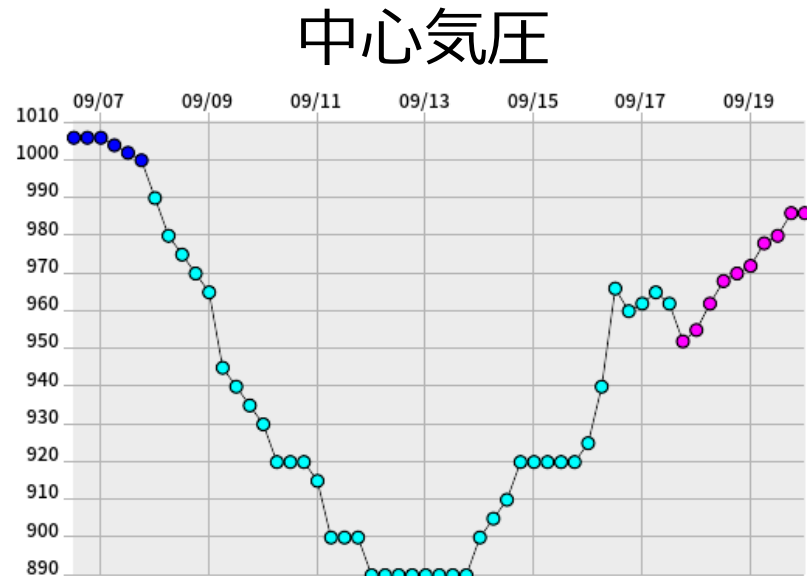
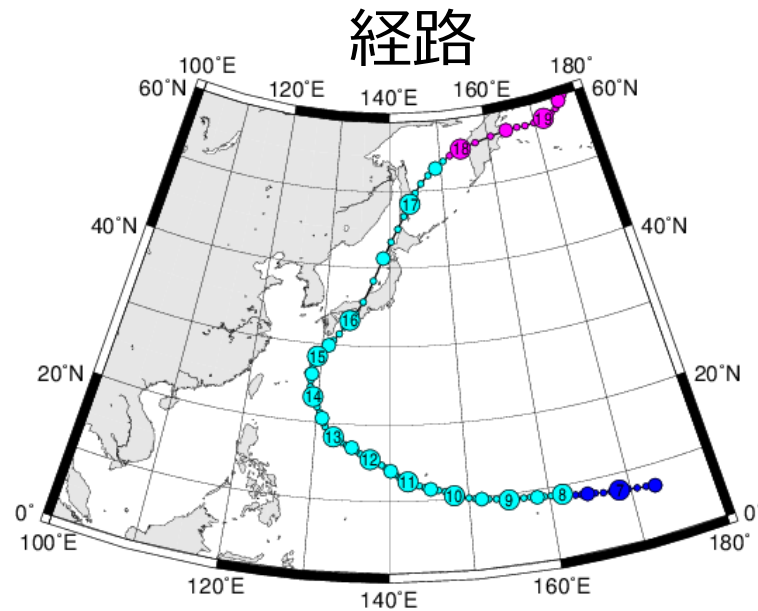
(「デジタル台風」より)

最大瞬間風速

大阪：47.4 m/s；関西空港：58.1 m/s；京都：39.4 m/s；神戸41.8 m/s

大阪湾岸域での最悪コースの台風

第二室戸台風（1961年台風18号）



（「デジタル台風」より）

最大瞬間風速

大阪：50.6 m/s；京都：34.3 m/s；神戸39.2 m/s

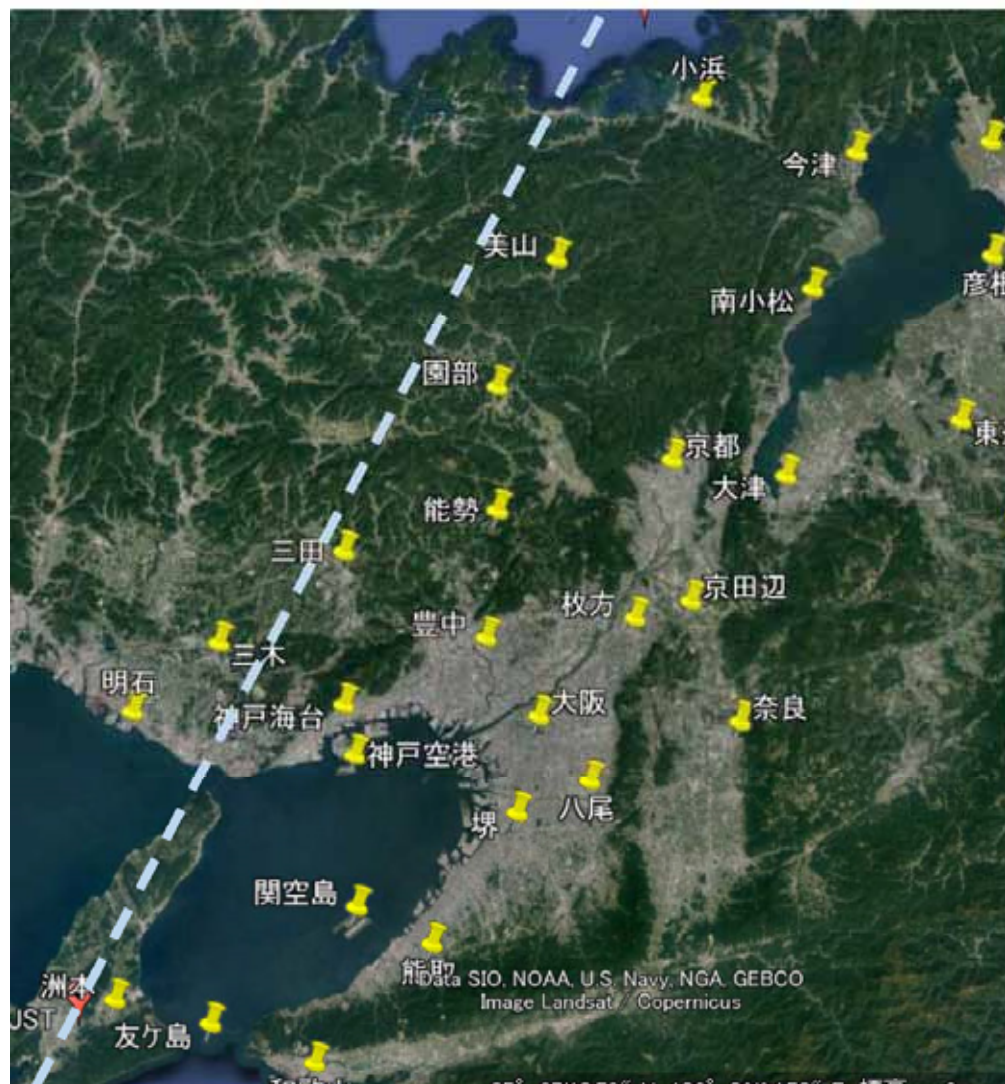
室戸台風（1934年）

最大瞬間風速

大阪：60.0 m/s；京都：42.1 m/s

突風率 = 最大瞬間風速 ÷ 平均風速

台風通過時の突風率



気象官署で観測された突風率

地点	突風率	10分風速 日最大	瞬間風速 日最大
堺	2.2	20.3	43.6
能勢	2.13	17.3	31.6
枚方	2.1	19.3	40.2
南小松	2.1	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
揖斐川	1.9	17.5	32.4
奈良	1.86	19.1	37.4
京田辺	1.84	18.7	34.4
勝山	1.83	20.1	38.9
徳島	1.82	18.5	32.7
長浜	1.82	19.3	33.6
敦賀	1.81	26	47.9
彦根	1.81	23.5	46.2

(京都大学 石川裕彦教授 資料)

暴風のリスクの理解のために

身近な地域規模での気象外力の定量評価



数値モデルによるシミュレーションの役割が大事

山間部：複雑地形の適切な表現

都市部：都市構造の適切な表現

複雑地形・都市構造の表現性が、風速を定量的に再現する上で重要である



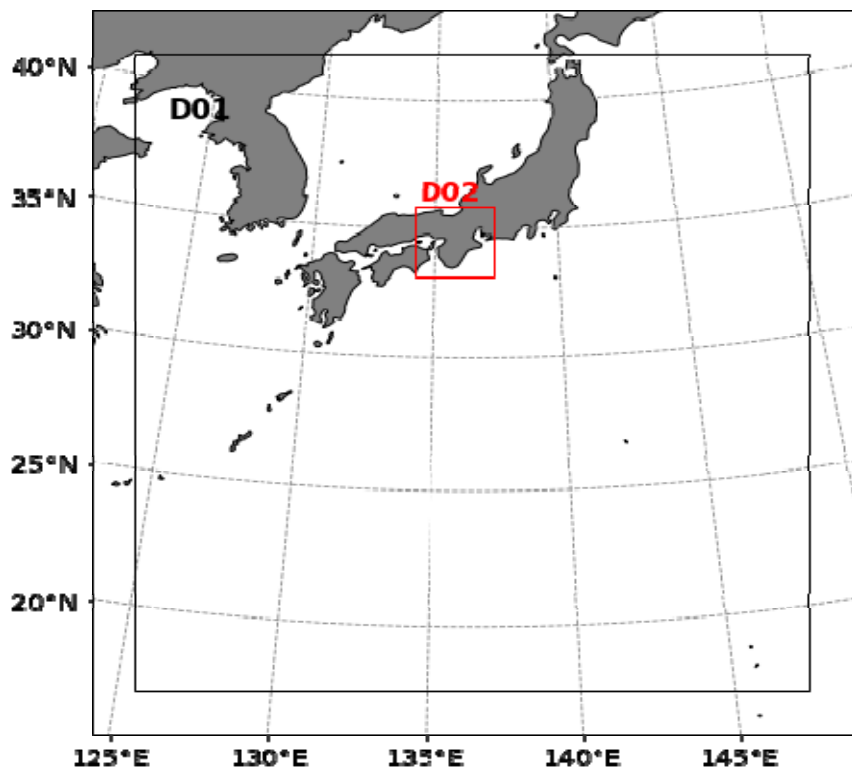
局地スケールかつ高分解能での数値シミュレーションが定量評価に必要不可欠

平成30年台風21号で解析

気象・都市気流の計算モデルのハイブリッド解析

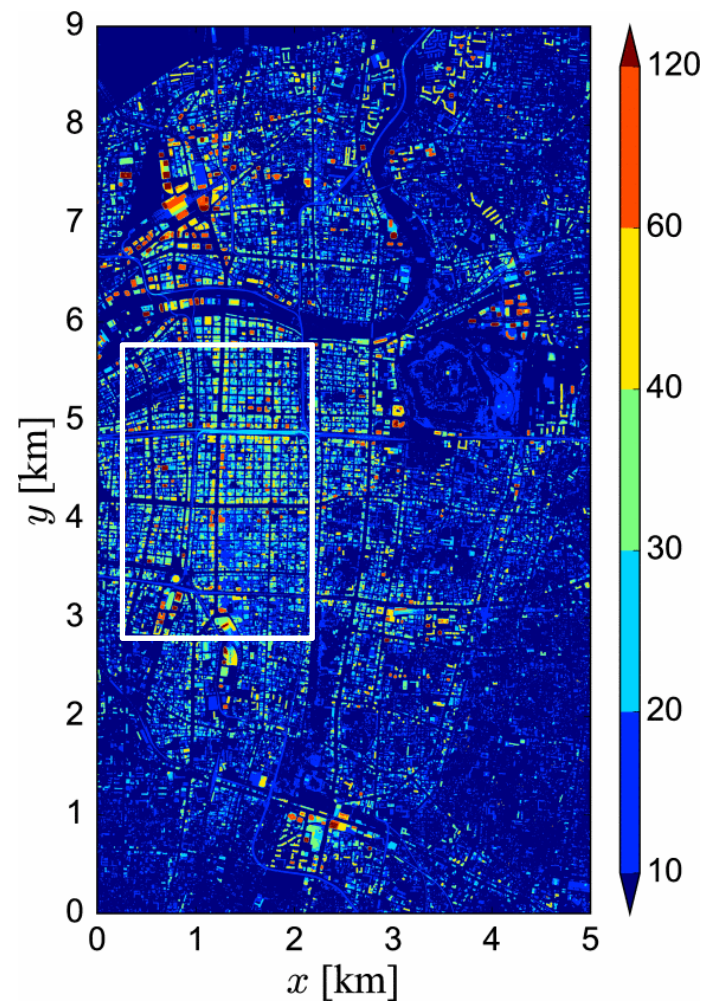
気象モデル計算領域：

D1: 4.5 km格子, D2: 900 m格子



都市気流計算領域：

2 m格子



建築物荷重指針・同解説（建築学会）

- 風速の鉛直分布：べき指数分布

$$U(Z) = U_{Z_0} \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha$$

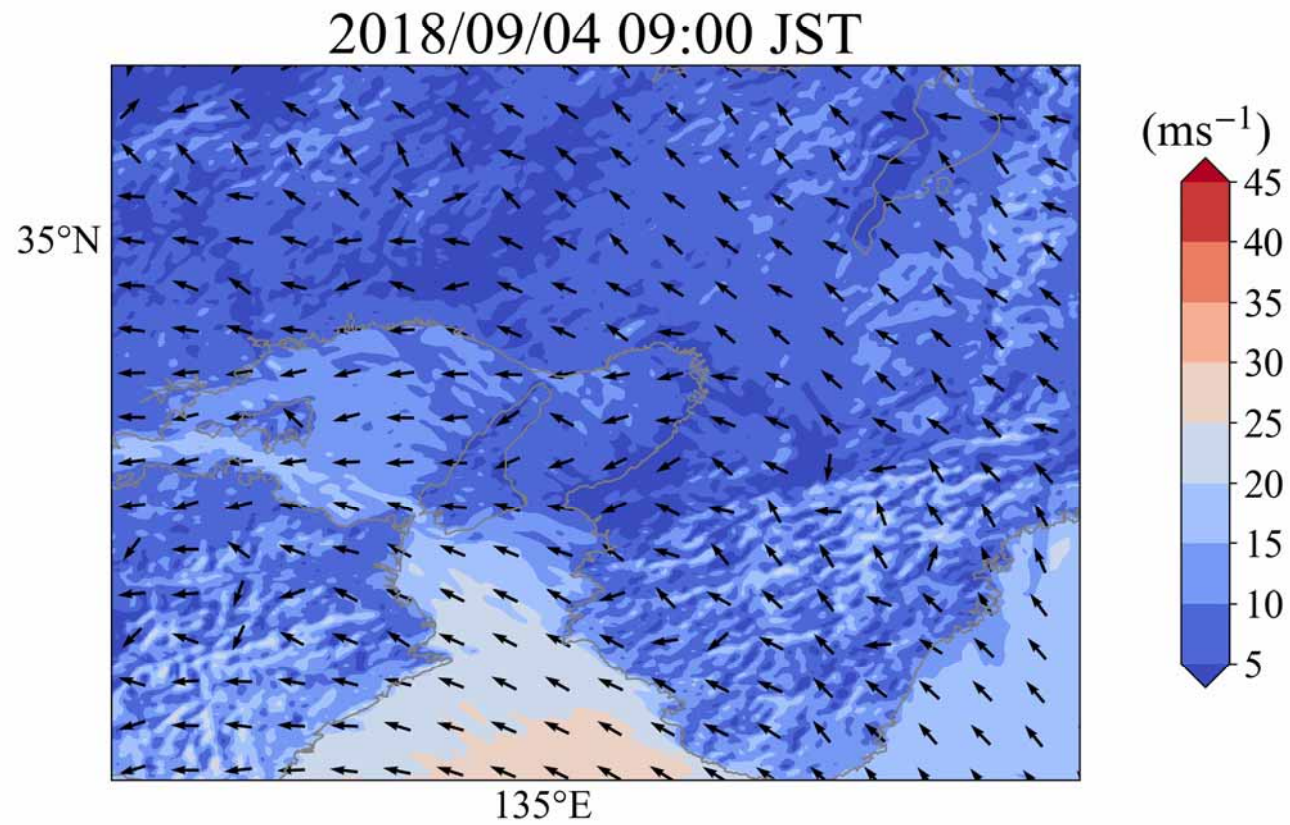
- 地表面粗度区分

I	海面または湖面のようなほとんど障害物のない地域	$\alpha = 0.1$
II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域、樹木・低層建築物などが散在している地域	$\alpha = 0.15$
III	樹木・低層建築物が多数存在する地域、あるいは中層建築物（4～9階）が散在している地域	$\alpha = 0.2$
IV	中層建築物（4～9階）が主となる市街地	$\alpha = 0.27$
V	高層建築物（10階以上）が密集する市街地	$\alpha = 0.35$

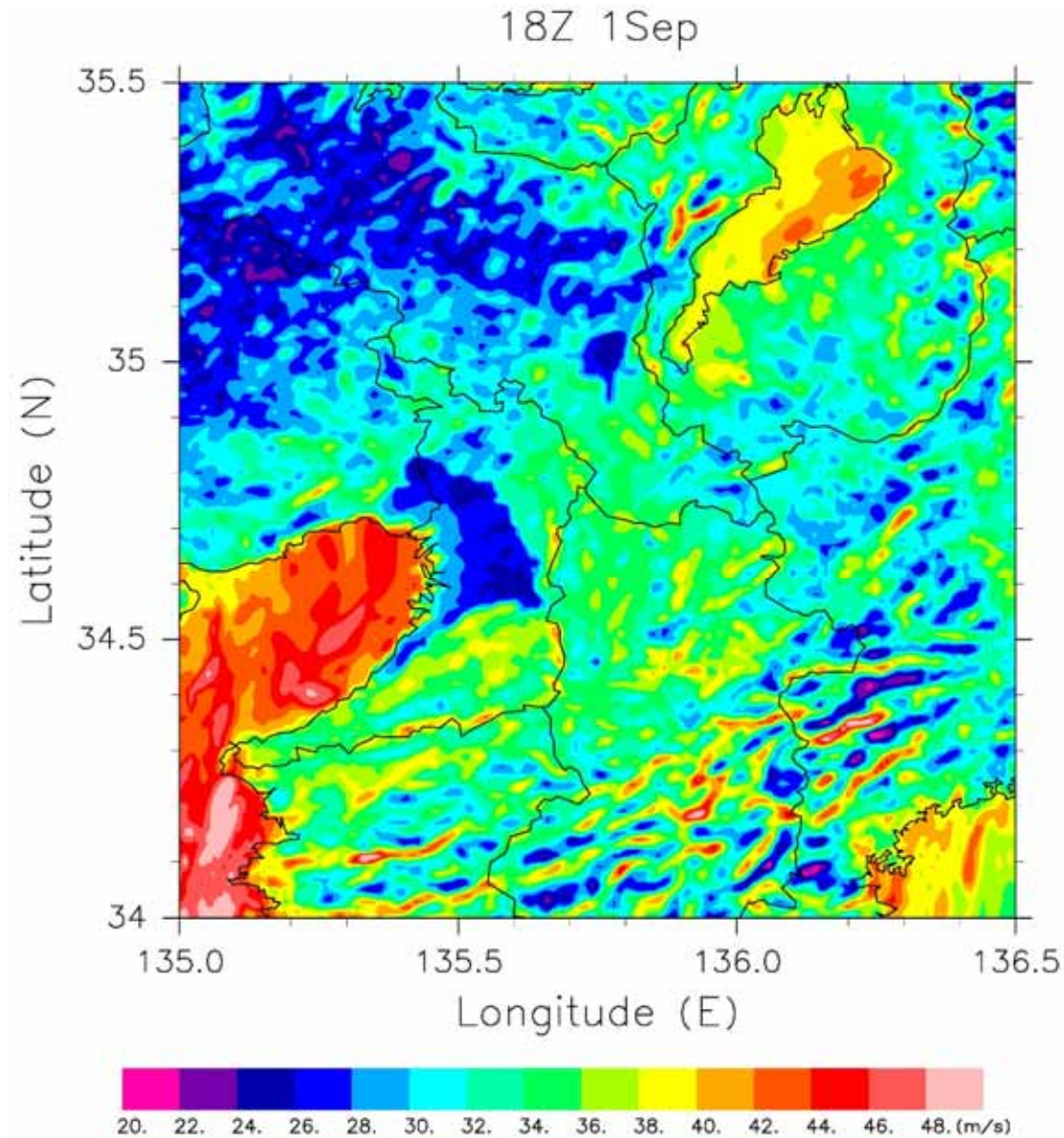


LES境界層上端高度（基準高度；326 m）の風速に対して地上高10 mでの風速は0.3倍となる。

気象モデルで再現した台風21号による強風分布



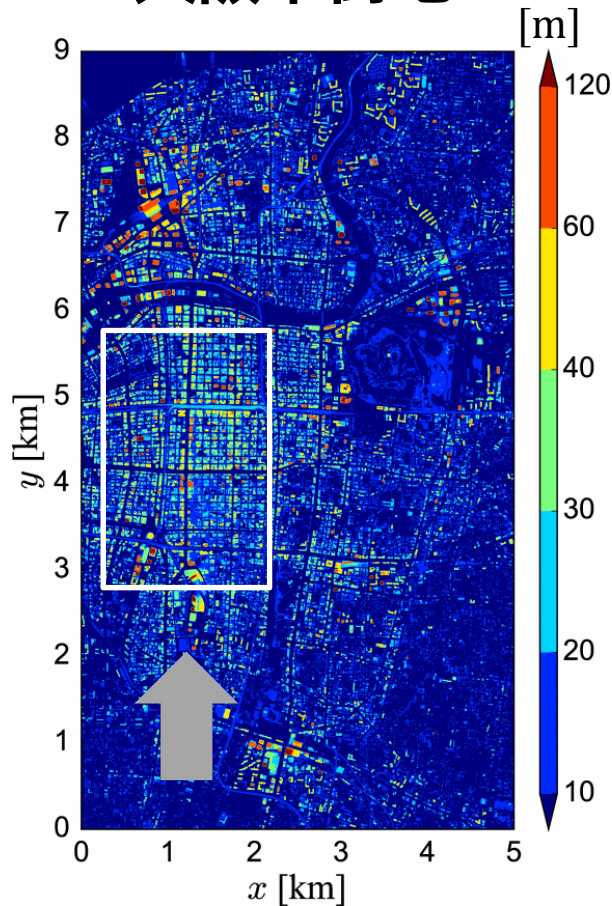
気象モデルで算出した地上での最大風速の表現



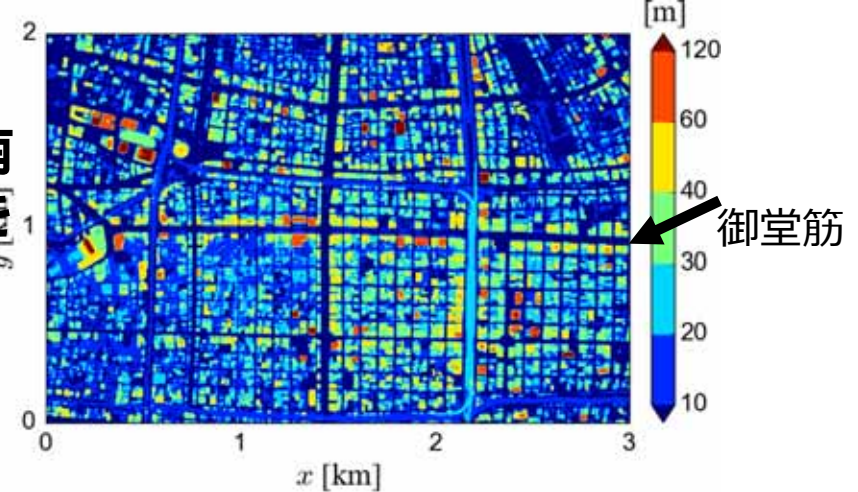
暴風リスクを市街地スケールで把握する

南北3 km・東西2 kmの範囲

大阪市街地



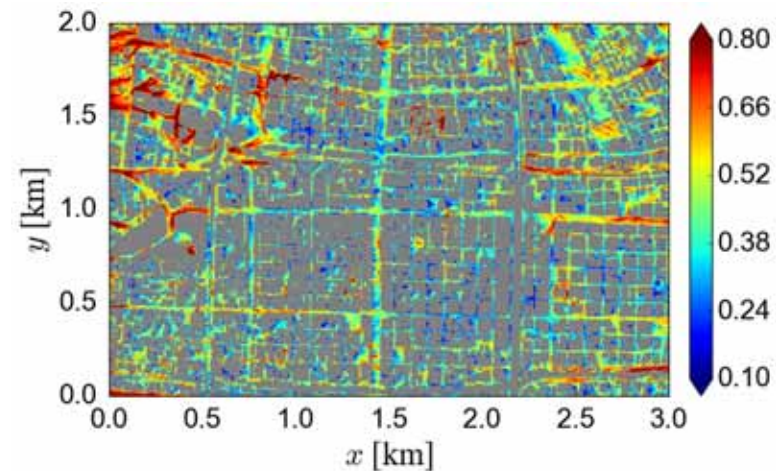
台風の南風条件を入力



U : 風速

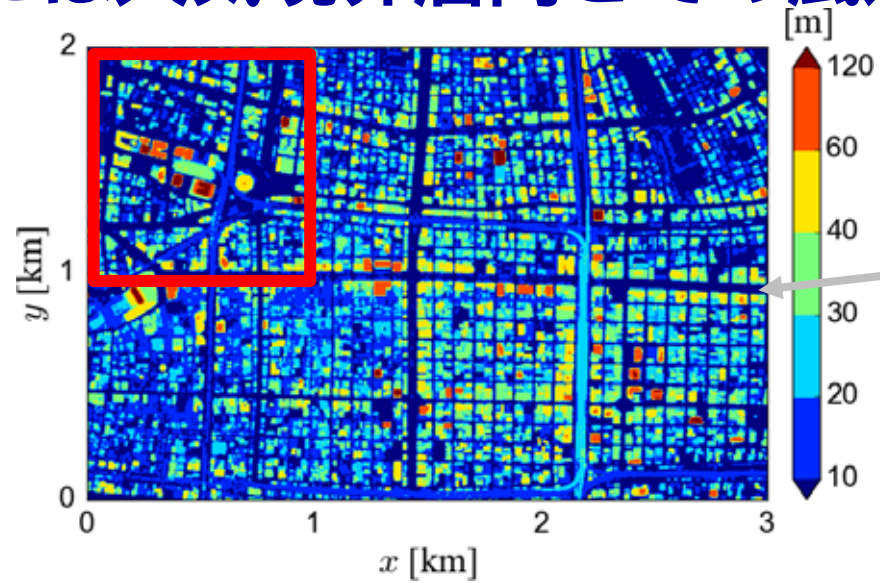
U_∞ : 境界層上端高度 (326 m) での風速

最大瞬間風速 U_{max}/U_∞



一般に、高層建物が密集する市街地では、上空約300 mでの風速に対し、地上ではその30%程度の風が吹く

瞬間的には大気境界層高さでの風速と同程度

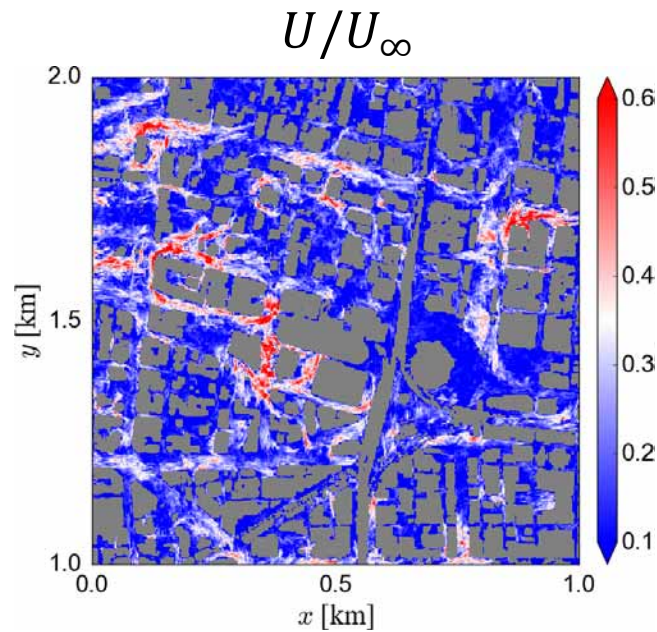


御堂筋通り

U : 風速

U_∞ : 境界層上端高度 (326 m) での風速

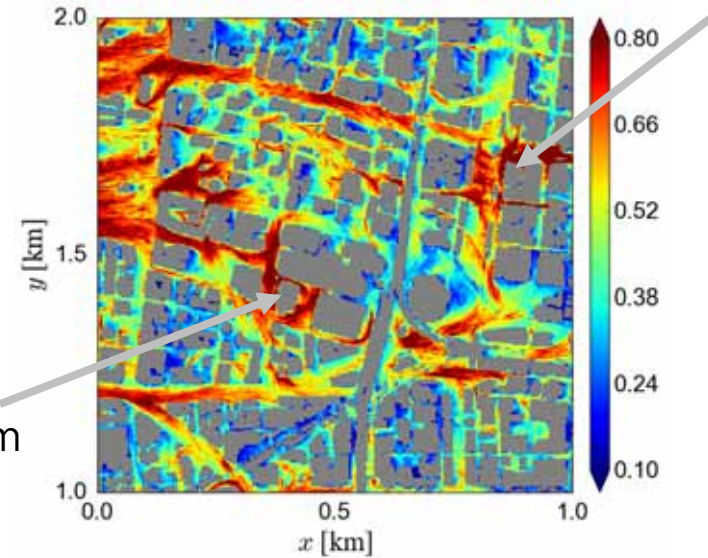
上空326 mでの風速に対する地上風速の比率

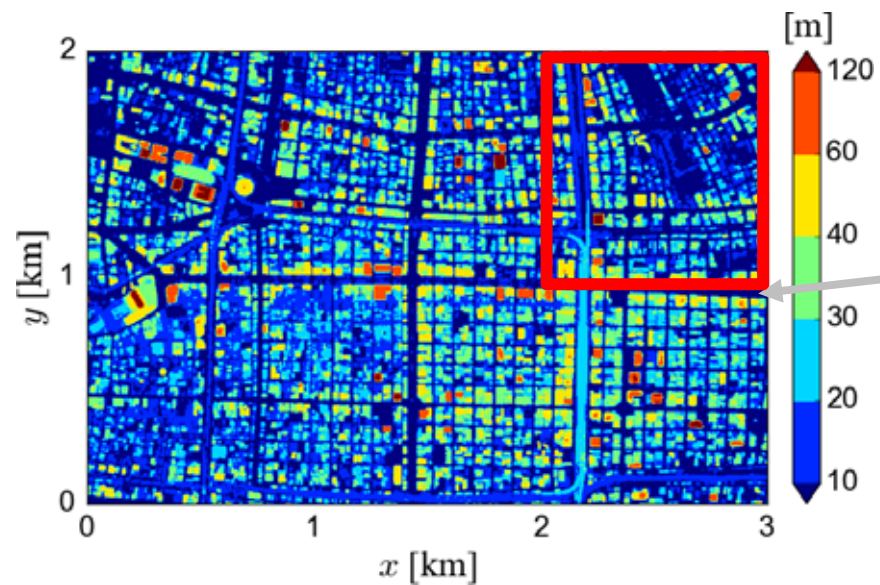


最大瞬間風速 U_{max}/U_∞

高度約136 m

高度約133 m



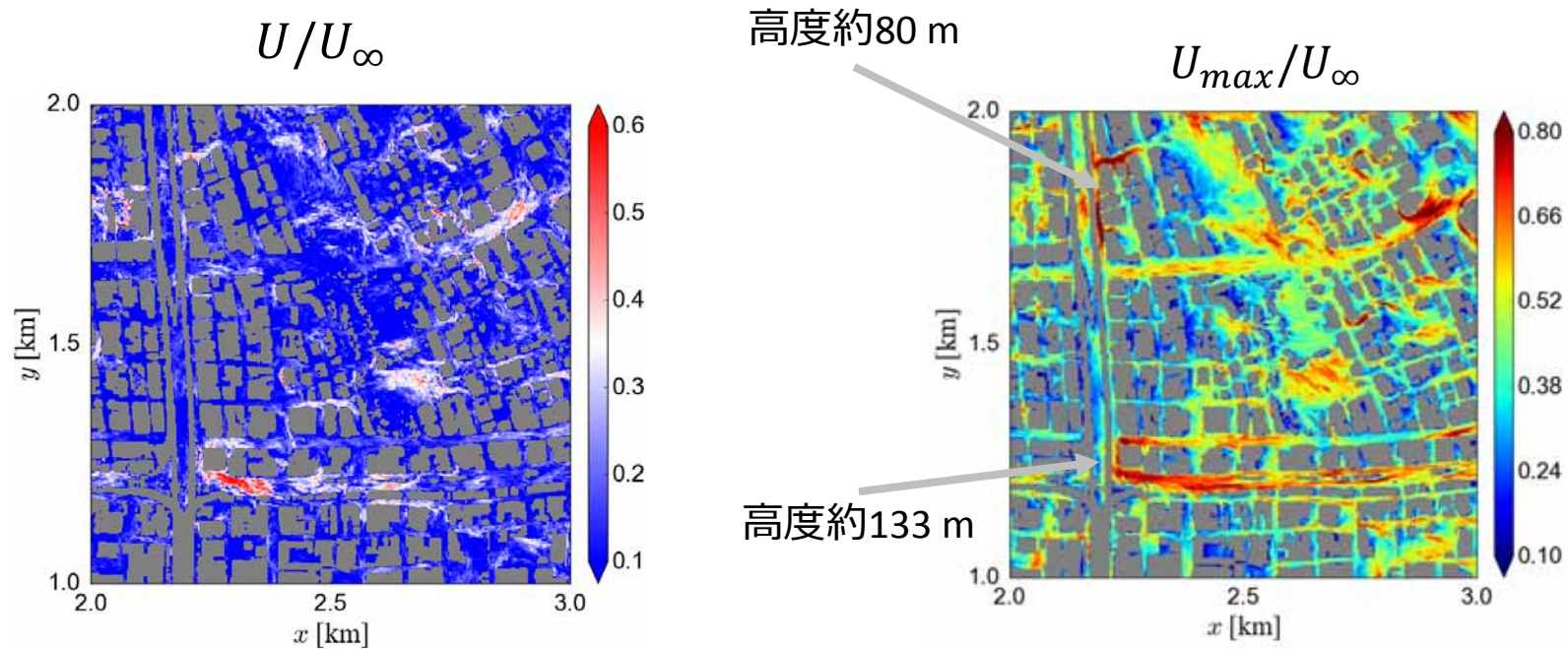


御堂筋通り

U : 風速

U_∞ : 境界層上端高度
(300 m)での風速

上空326 mでの風速に対する地上風速の比率



U/U_∞

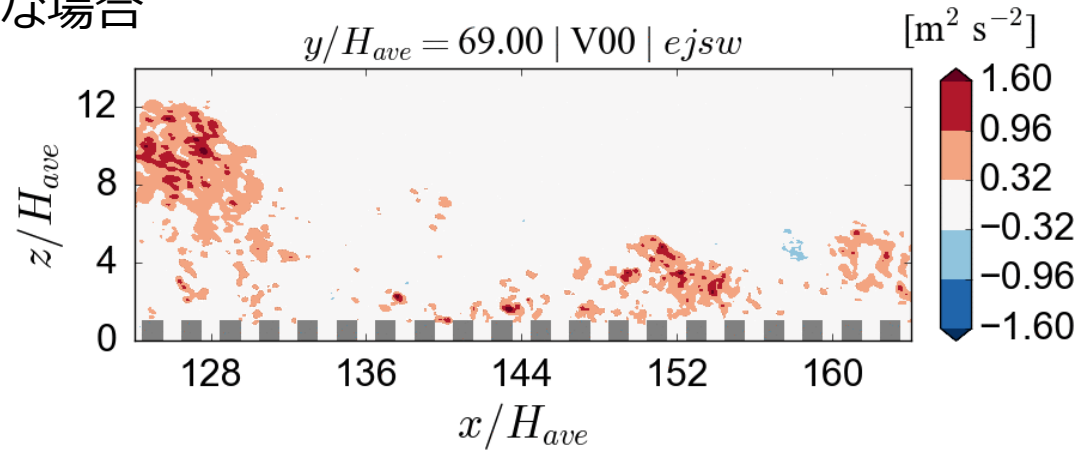
高度約80 m

U_{max}/U_∞

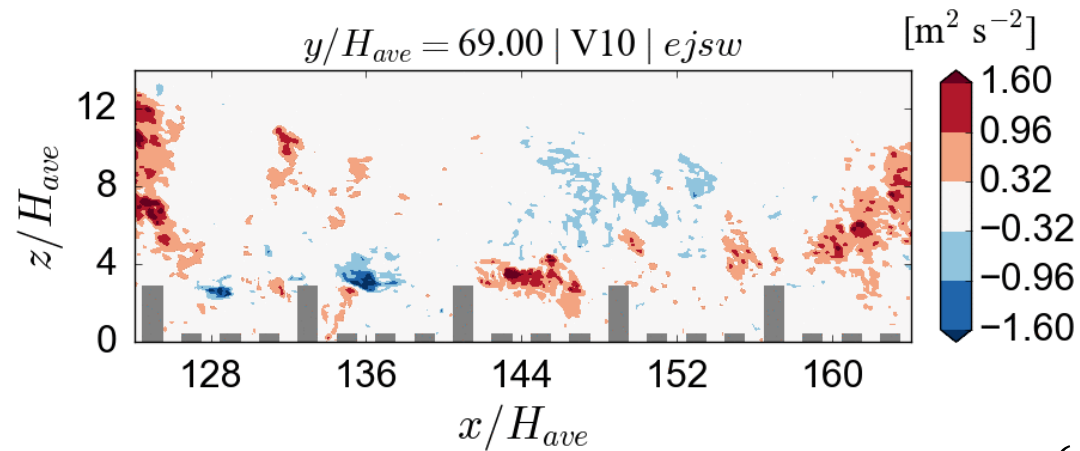
高度約133 m

建物高度のばらつきの影響

建物高さが均一な場合

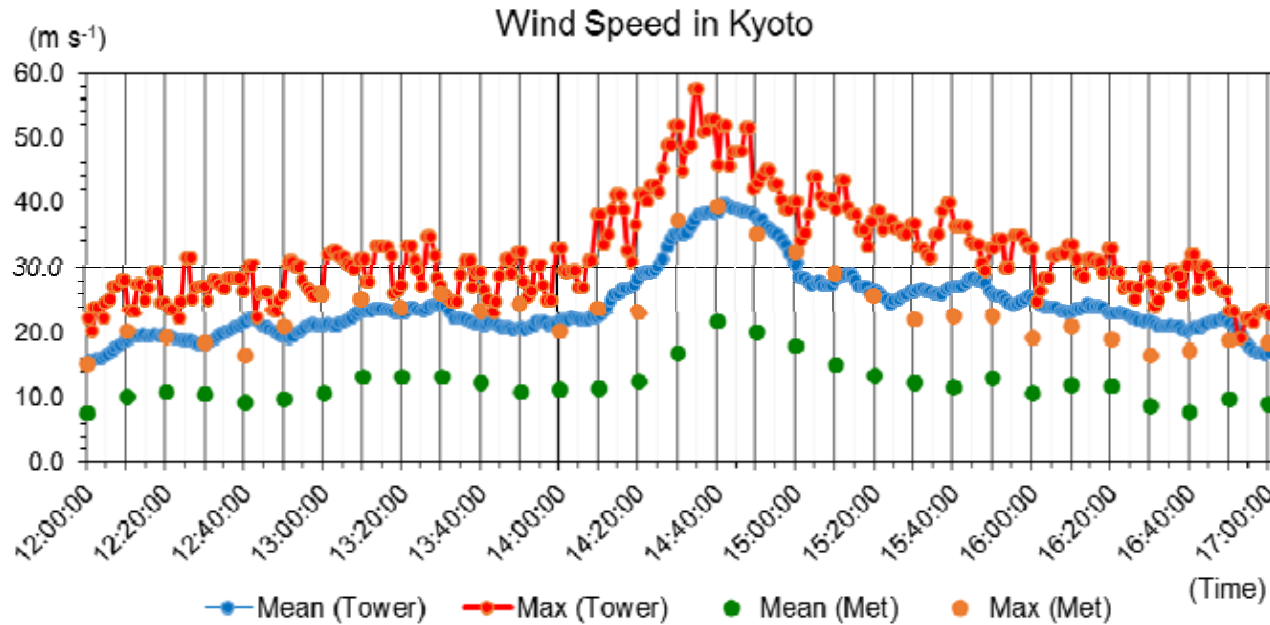


建物高さが不均一な場合



$\text{sgn}(w') \max(0, u'w')$
ejection $u' < 0, w' > 0$
sweep $u' > 0, w' < 0$

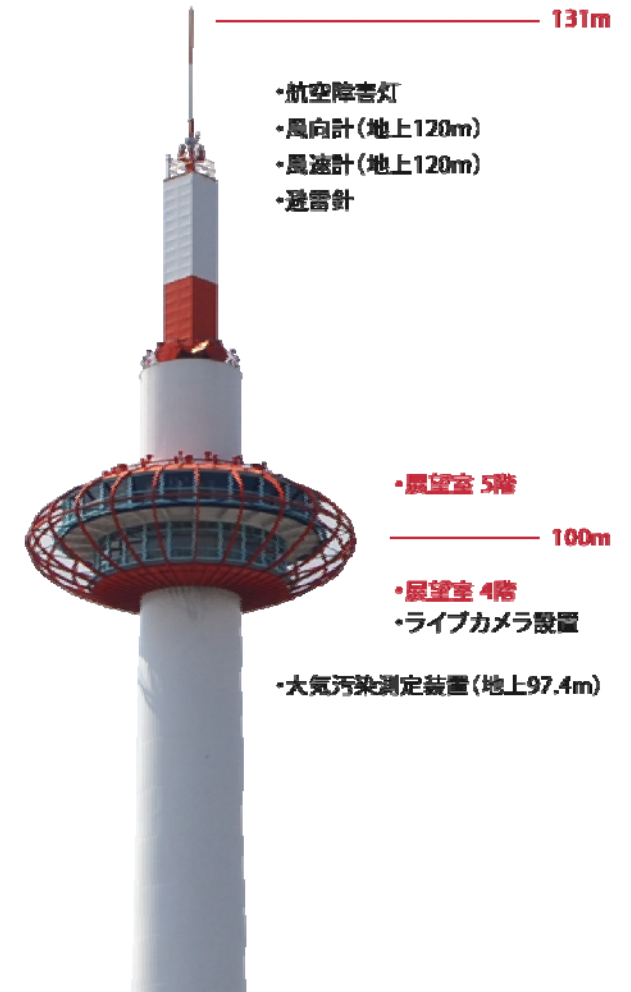
京都市内での暴風



最大瞬間風速

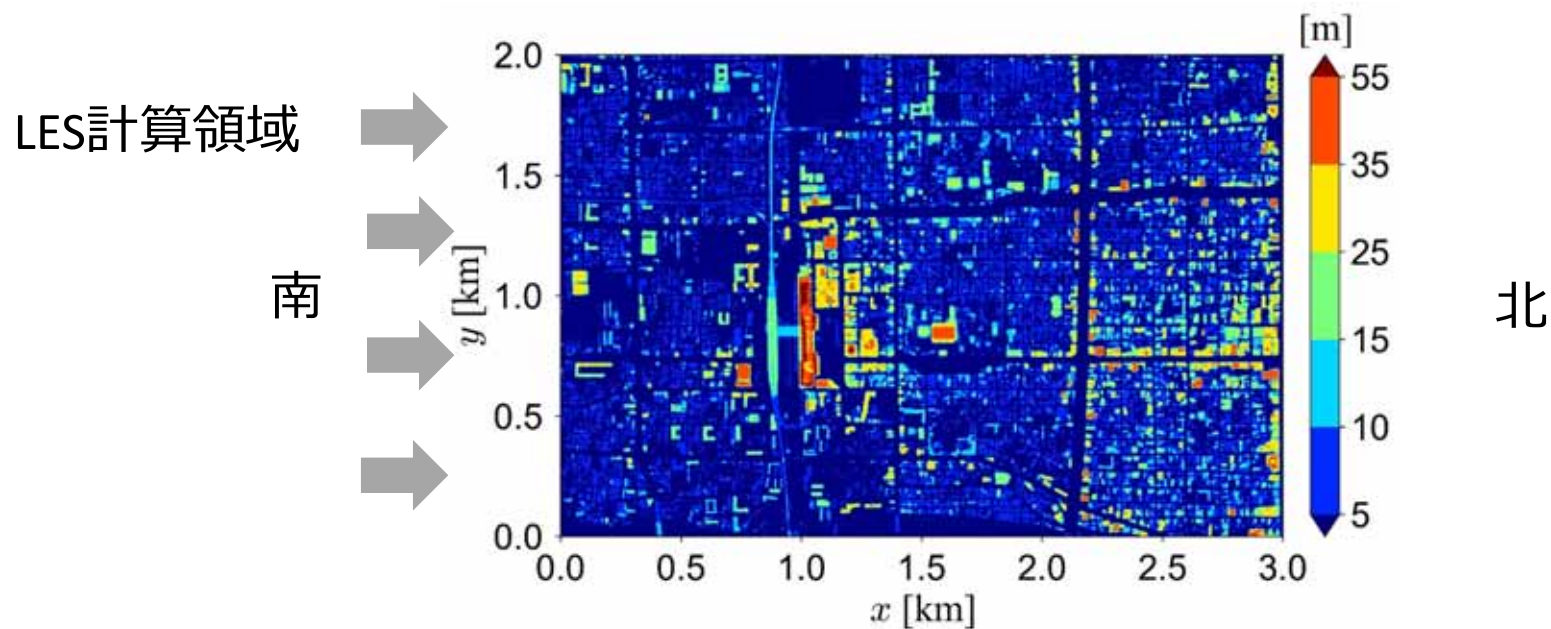
京都地方気象台：39.4 m/s (観測高17.6 m)

京都タワー（京都市環境局）：57.6 m/s (121 m)



(京都タワーHPより)

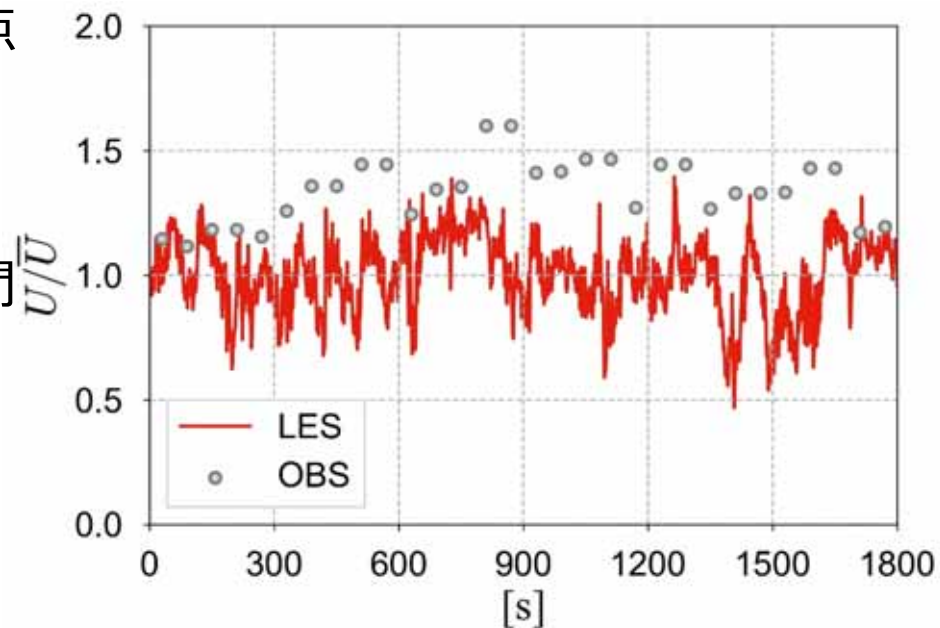
LES解析領域と再現精度



京都タワー観測点
での風速時系列

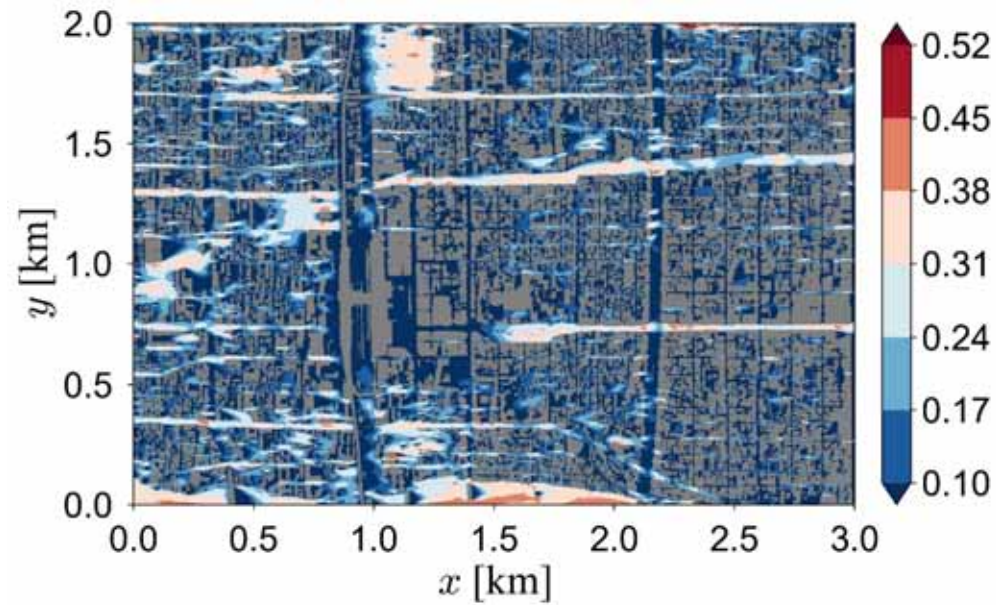
観測：1分値（平均風速・最大瞬間風速）

LES：1秒瞬間値

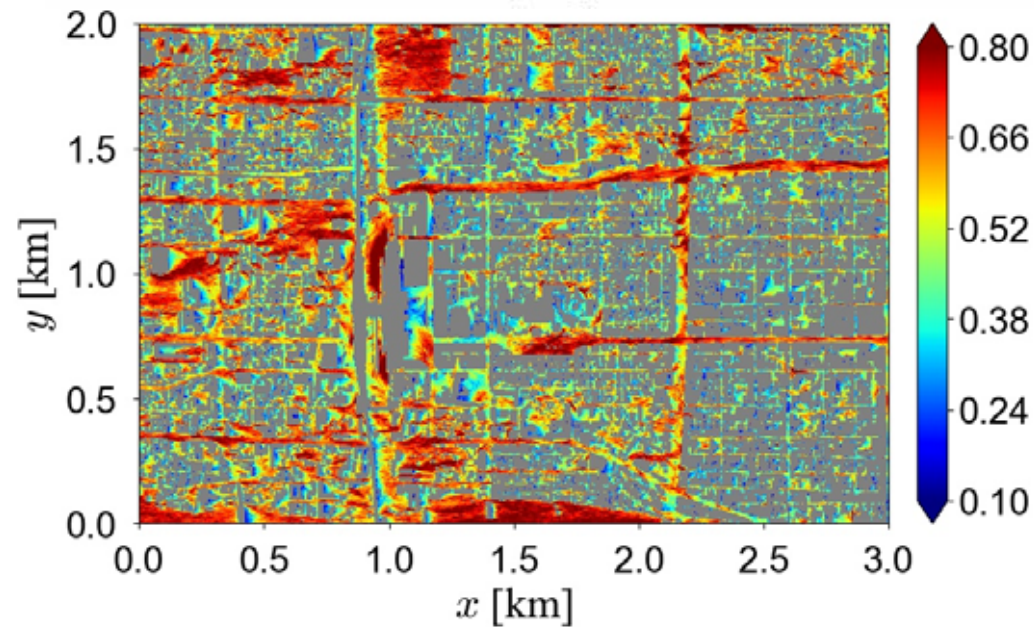


地上風速の平均値・最大値

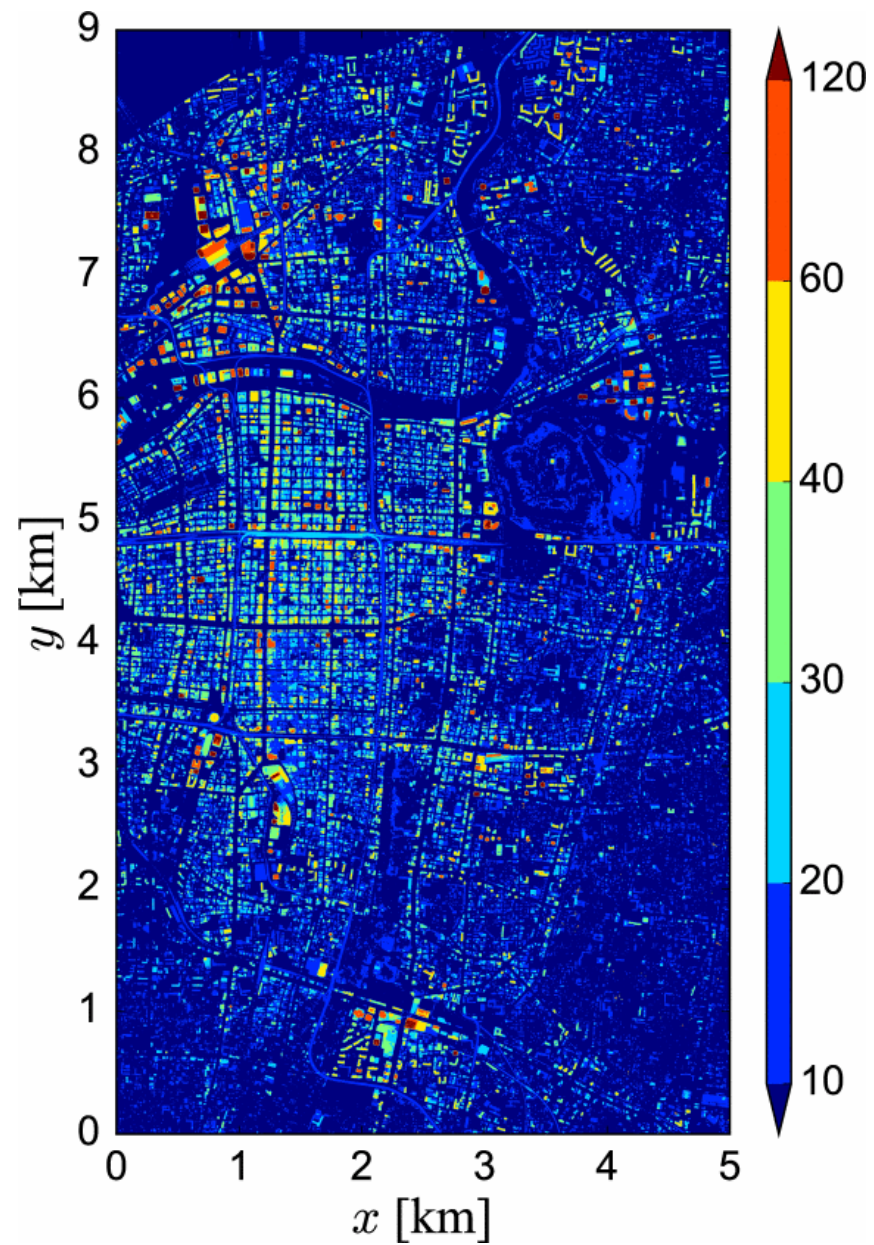
$$\bar{u}/U_\infty$$



$$U_{max}/U_\infty$$



都市における建物高さの不均一さ



都市街区の幾何学的形状を表す数量

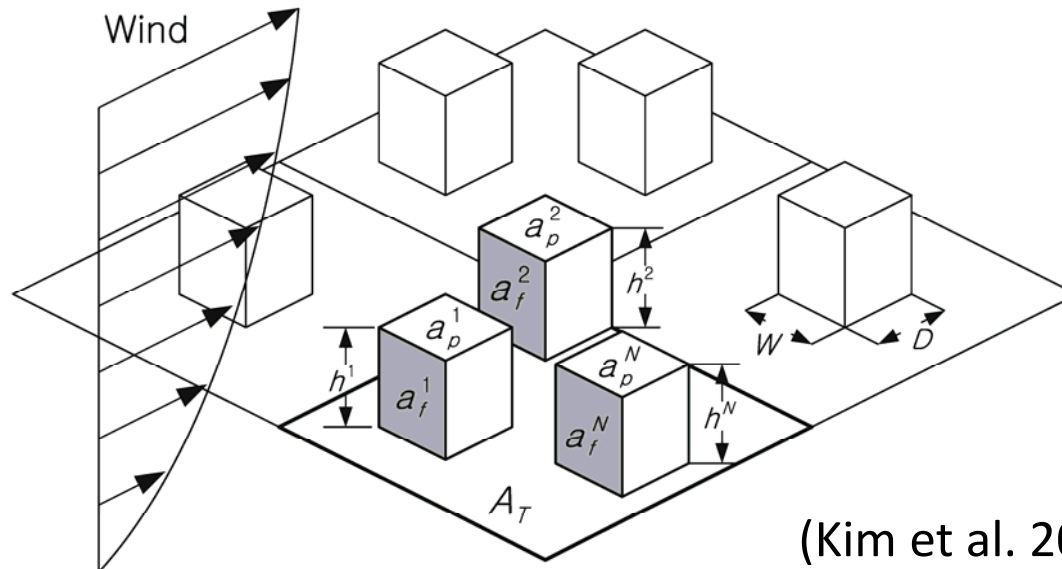
Plan Area Index :
単位面積あたりの建物の
屋根面総面積の比

$$\lambda_p = \frac{A_p}{A_T}$$

Frontal Area Index :
単位面積あたりの建物の
風上向き側面総面積の比

$$\lambda_f = \frac{A_f}{A_T}$$

立方体であれば、
 λ_f と λ_p は一致する。



(Kim et al. 2011)

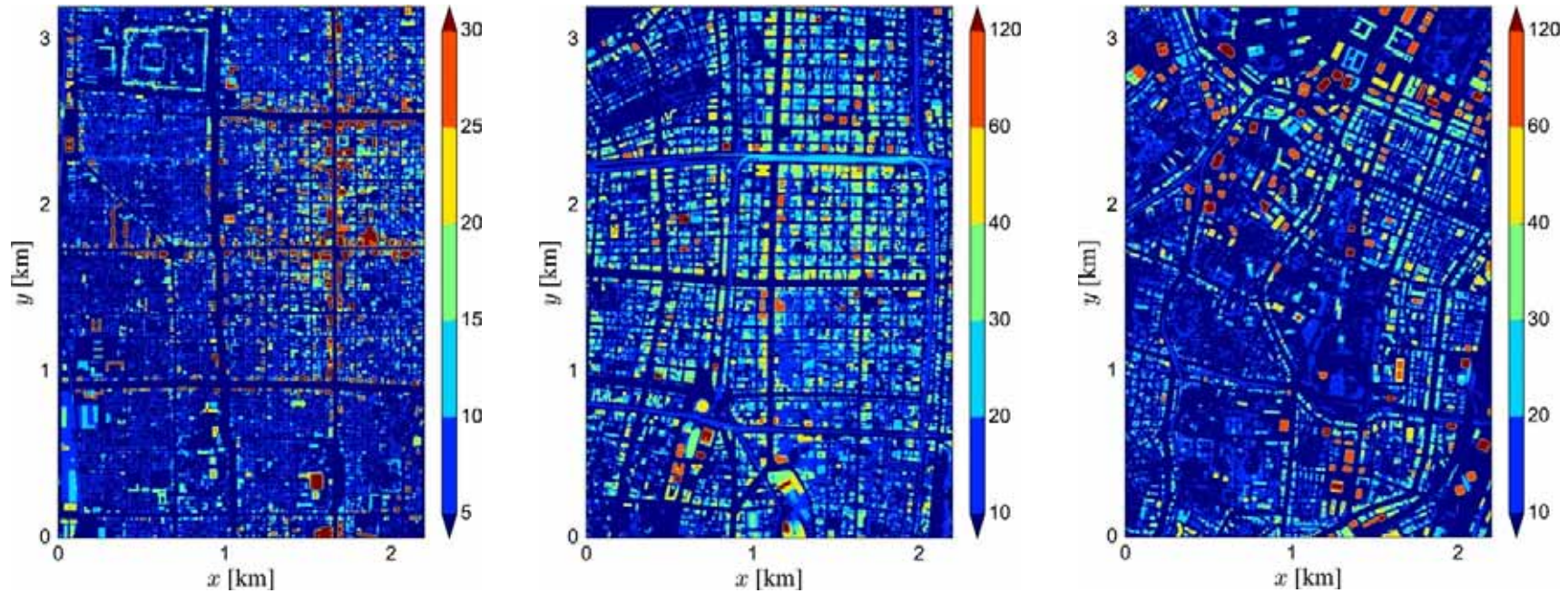
都市におけるビルの幾何学的配置

- 東京：
 - ビルの**平均高さ**はヨーロッパ都市並み
 - ビルの**密集度**もヨーロッパ並み
 - しかし、ビル**高さのばらつき**は米国都市並み

	London	Toulouse	Berlin	Salt Lake City	Los Angeles	東京
$h_{av}[m]$	13.6	15.3	18.6	16.3	51.3	18.4
$h_{sd}[m]$	5.0	6.1	4.3	14.1	51.5	17.2
h_{sd}/h_{av}	0.37	0.40	0.23	0.87	1.00	0.93
λ_p	0.55	0.40	0.35	0.22	0.28	0.49
λ_f	0.32	0.32	0.23	0.11	0.45	0.39

(Ratti et al. 2002; Nakayama et al. 2011)

京都・大阪・東京の比較

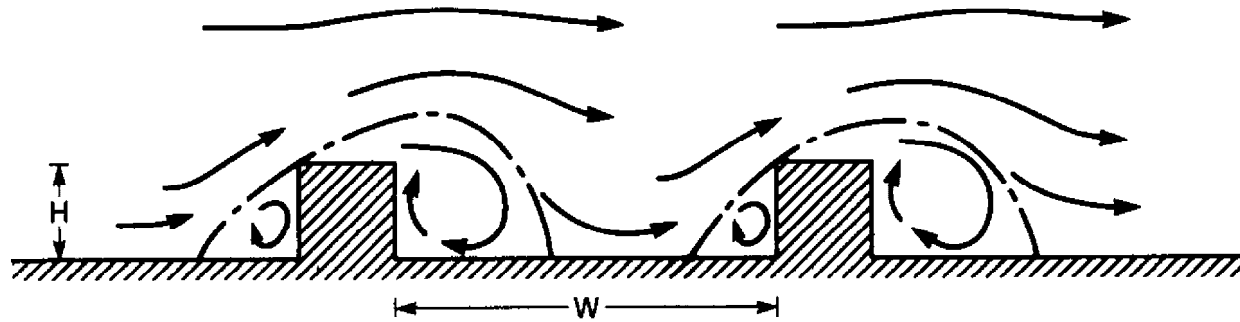


	H_{ave}	H_{max}	σ_H	V_H	λ_p	λ_f
京都	11.6	56.6	7.8	0.67	0.46	0.29
大阪	20.5	189	15.3	0.74	0.49	0.66
東京	20.3	283	21.6	1.05	0.53	0.45

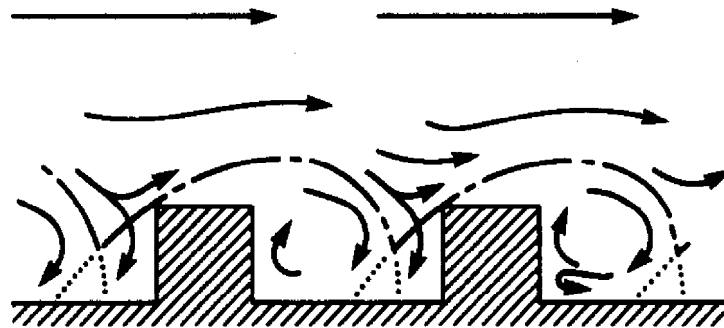
(Takemi et al. 2019b)

都市を想定した気流のパターン

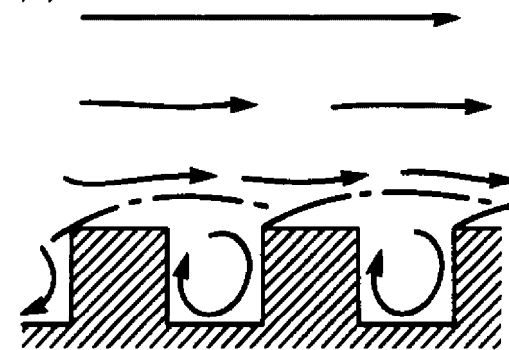
(a) Isolated roughness flow



(b) Wake interference flow



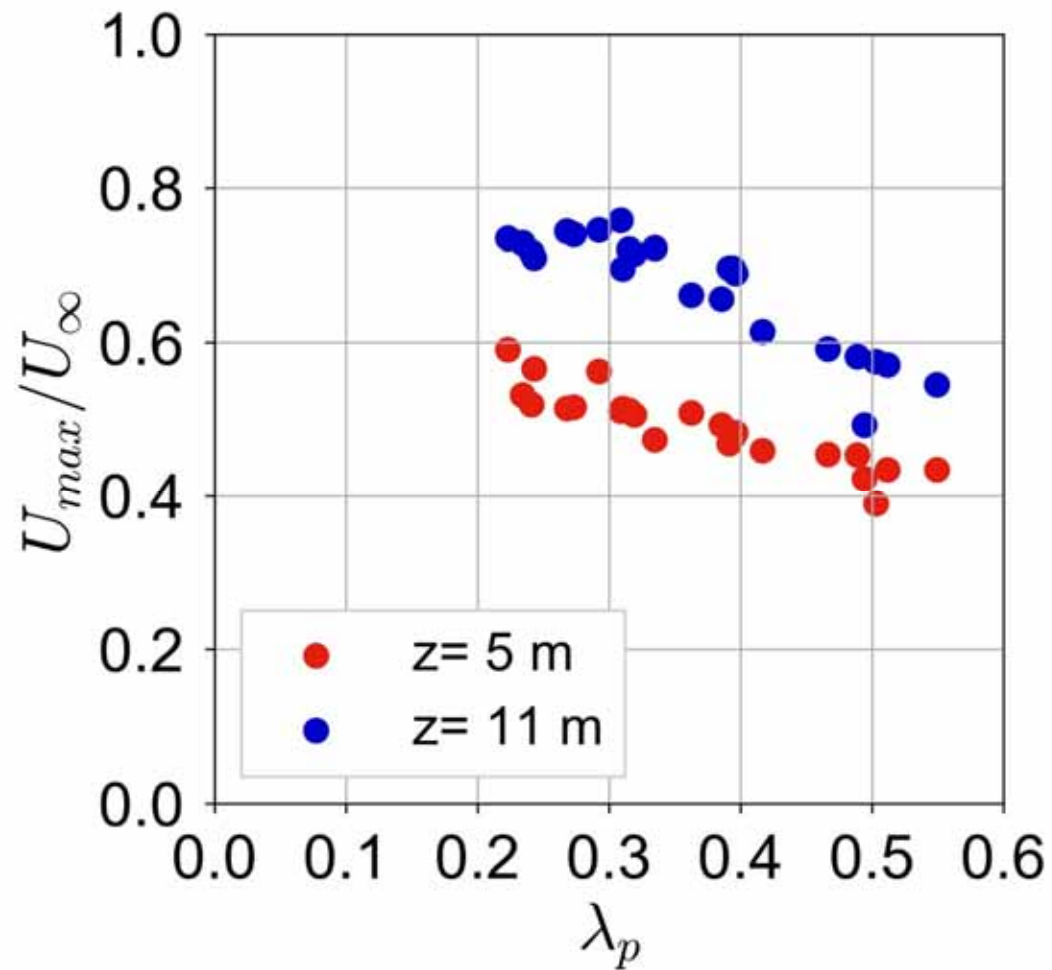
(c) Skimming flow



建物の密集度が変わると気流の
パターンも異なる

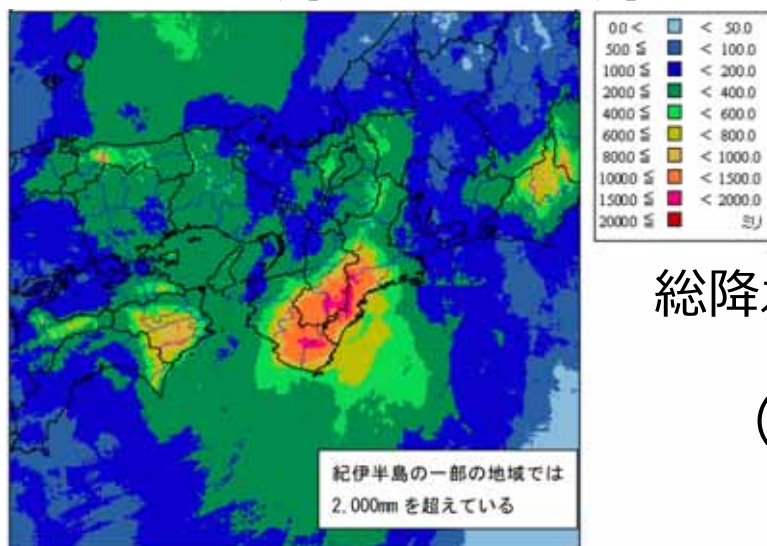
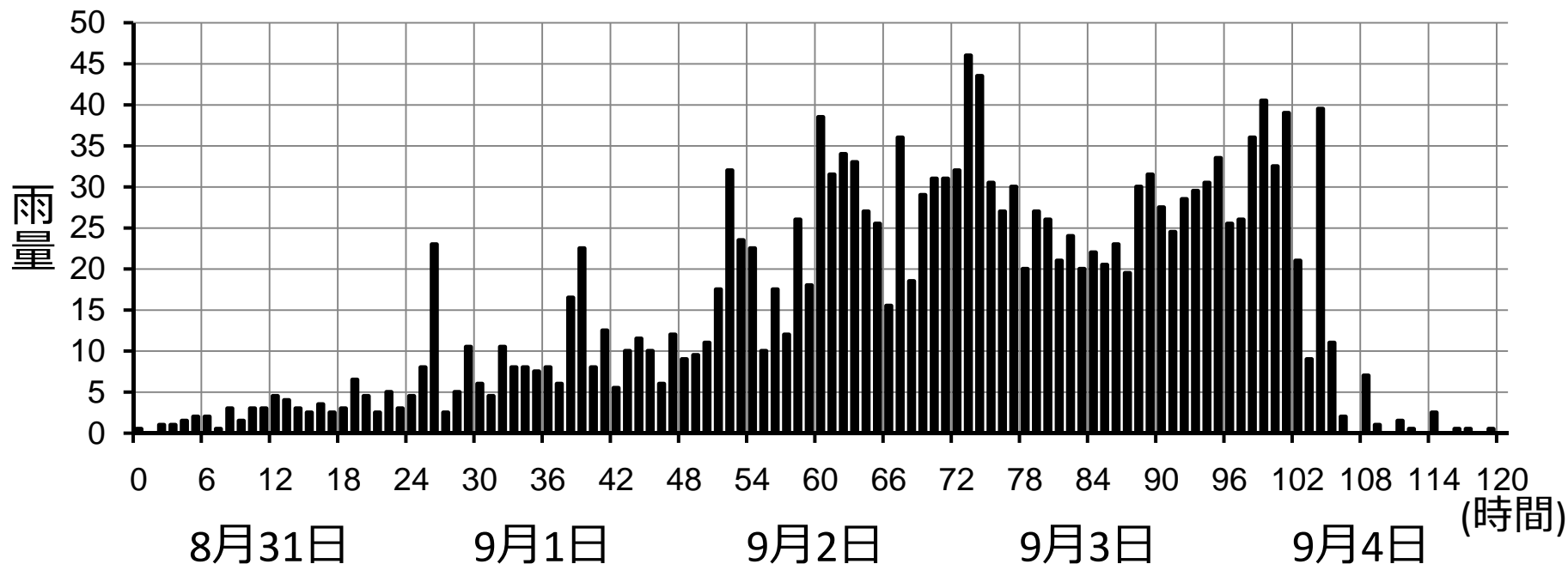
(Oke 1988)

最大瞬間風速は建物の密集度によって変わる



大雨台風：平成23年台風12号

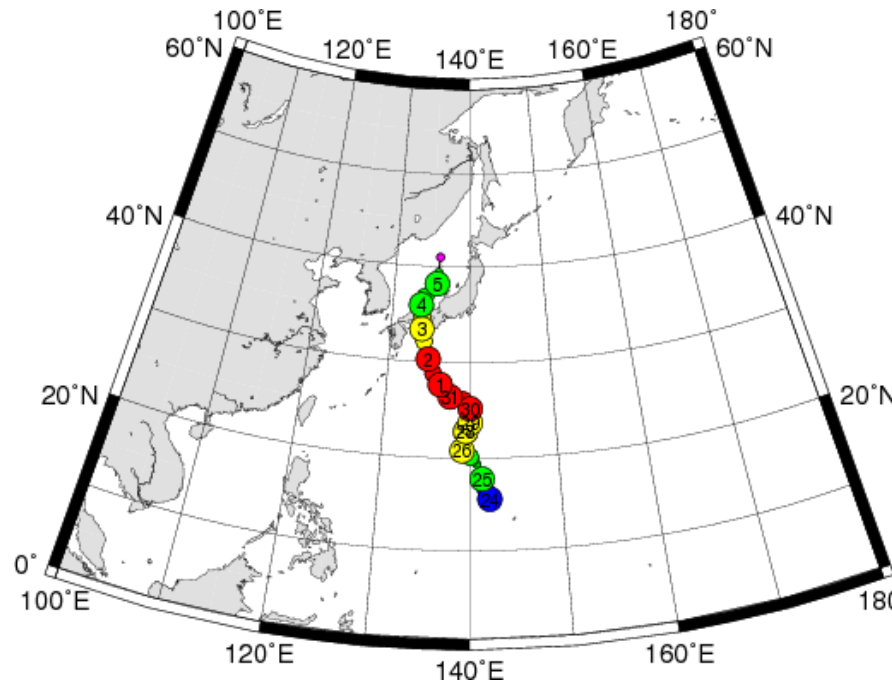
(mm) 2011年8月31日～9月4日の1時間雨量 (奈良県上北山アメダス)



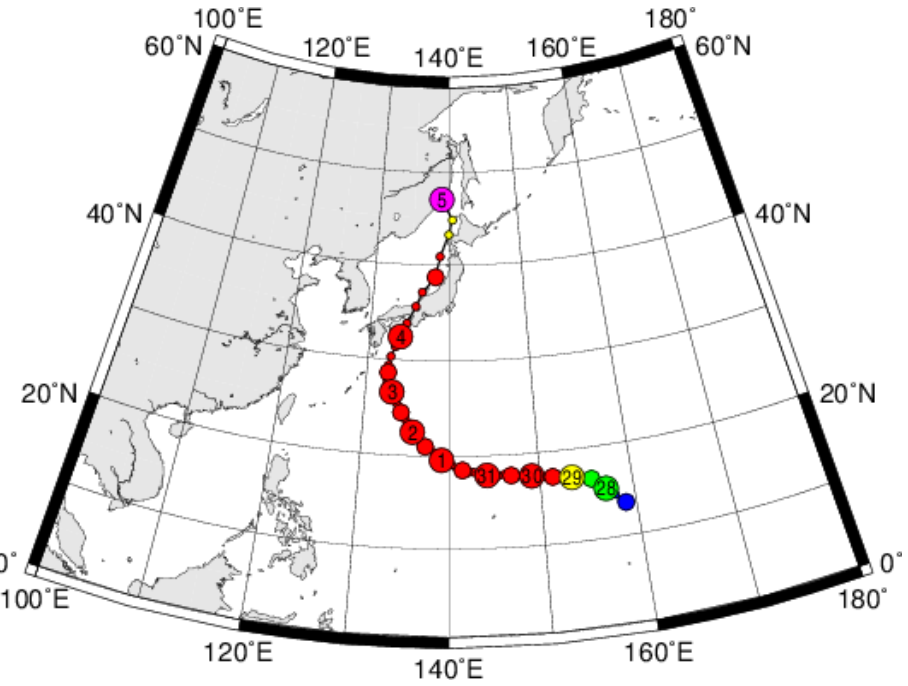
総降水量分布 (8月30日17時
～9月6日24時)
(気象庁報告書より)

台風経路

平成23年台風12号：
雨台風



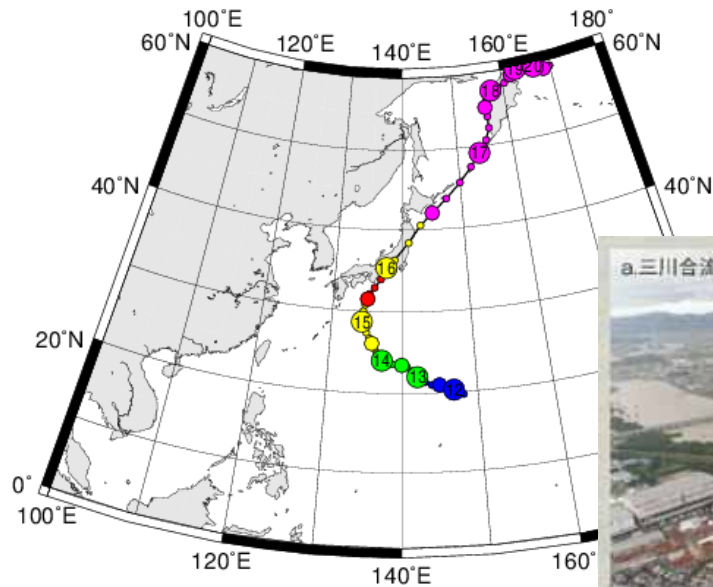
平成30年台風21号：
風台風



中心気圧の違いだけでなく、移動速度の
違いの影響も大きい

平成25年台風18号による近畿地方での大雨

経路が少し南に寄ると
大雨の可能性が高まる

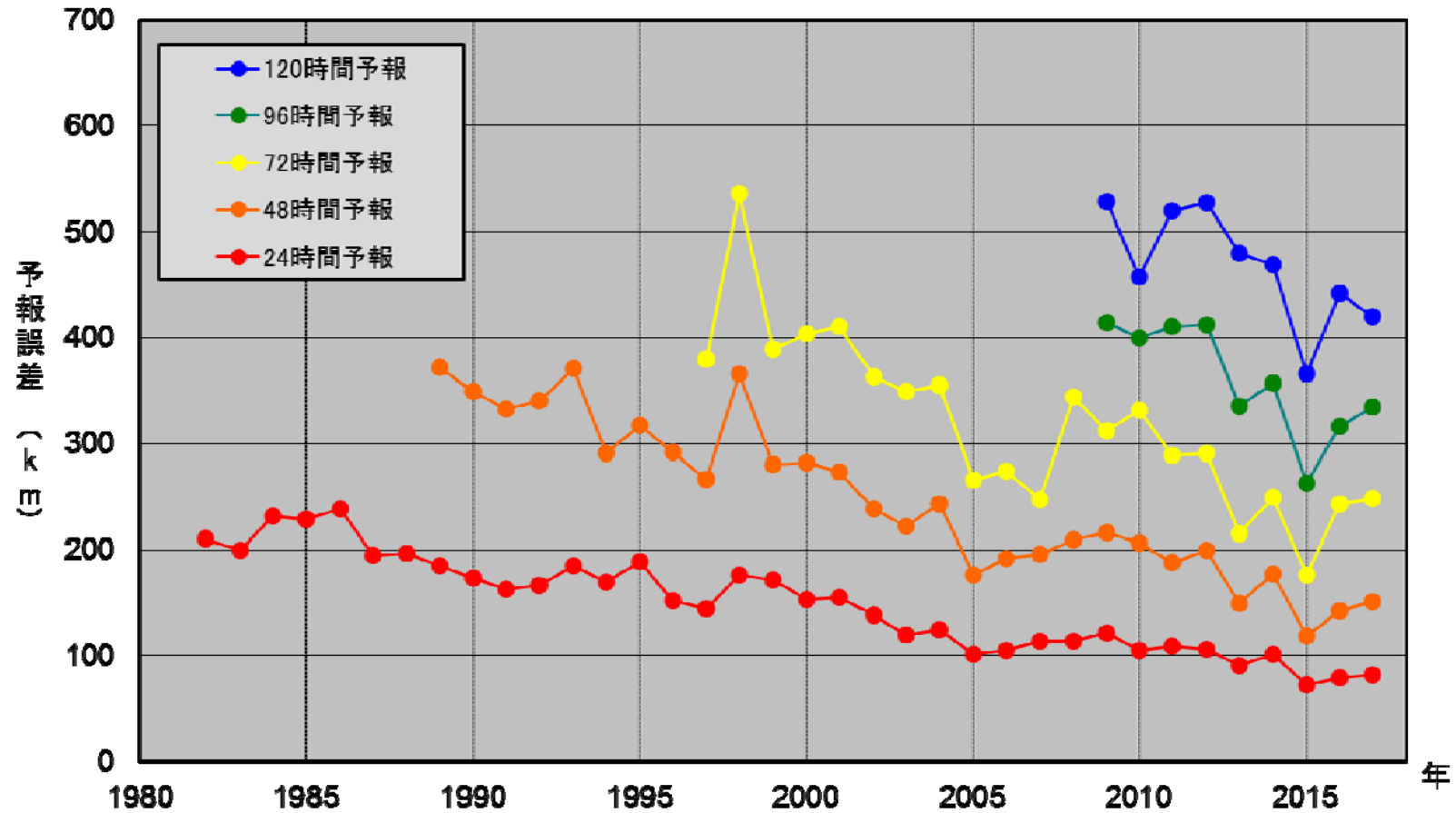


(デジタル台風より)



(京都大学防災研究所ニュースレターより)

台風進路の予報精度



台風進路予報(中心位置の予報)の年平均誤差

(気象庁より)

風の脅威：日本版改良藤田スケール (JEFスケール)

- 日本の建築物等の被害に対応させた突風の激しさを表す
- 被害の状況を、被害指標（何が）と被害度（どうなった）に当てはめる

■ 日本版改良藤田スケールの被害指標

木造の住宅又は店舗	鉄道車両
鉄骨系プレハブ住宅又は店舗	電柱
鉄筋コンクリート造の集合住宅	地上広告板
仮設建築物	道路交通標識
大規模な庇・独立上家の屋根	カーポート
鉄骨造倉庫	塀
木造の非住家建築物	木製・樹脂製・アルミ製フェンス、メッシュフェンス
園芸施設	道路の防風・防雪フェンス
木造の畜産施設	ネット(野球場・ゴルフ場等)
物置	広葉樹
コンテナ	針葉樹
自動販売機	墓石(悼石)
軽自動車	路盤
普通自動車	仮設足場(壁つなぎ材)
大型自動車	ガントリークレーン

(気象庁より)

階級	風速の範囲	主な被害の状況（例）
JEF0	25～38 m/s	<ul style="list-style-type: none"> ・木造住宅で、目視でわかる程度の被害、飛散物による窓ガラスの損壊が発生する。 ・自動販売機が横転する。 ・樹木の枝（直径2cm～8cm）が折れる。
JEF1	39～52 m/s	<ul style="list-style-type: none"> ・木造住宅で、比較的広い範囲の屋根ふき材が浮き上がる。 ・軽自動車や普通自動車が横転する。 ・通常走行中の鉄道車両が転覆する。 ・コンクリートブロック塀（鉄筋あり）が損壊したり、倒壊する。
JEF2	53～66 m/s	<ul style="list-style-type: none"> ・普通自動車（ワンボックス）や大型自動車が横転する。 ・鉄筋コンクリート製の電柱が折損する。 ・広葉樹の幹が折損する。
JEF3	67～80 m/s	<ul style="list-style-type: none"> ・木造住宅で、上部構造が著しく変形したり、倒壊する。 ・鉄筋コンクリート造の集合住宅において、風圧によってベランダ等の手すりが比較的広い範囲で変形する。 ・アスファルトがはく離・飛散する。
JEF4	81～94 m/s	<ul style="list-style-type: none"> ・工場や倉庫の大規模な庇において、比較的広い範囲で屋根ふき材がはく離したり、脱落する。
JEF5	95 m/s～	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄骨系プレハブ住宅や鉄骨造の倉庫において、上部構造が著しく変形したり、倒壊する。

まとめ

気象モデルと都市気流計算モデルを組み合わせたハイブリッド解析により、台風21号に伴う市街地内での暴風を定量的に評価した

高層ビルが林立する大都市の街区内では、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、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

台風の中心気圧だけでなく移動速度・経路の違いで、大雨・暴風のリスクが変わることに留意することが大切

Takemi, T., T. Yoshida, S. Yamasaki, K. Hase (2019). *SOLA*, 15, 22-27.

<http://doi.org/10.2151/sola.2019-005>

