

猛暑・洪水・強風適応型都市の創出に資する ピロティ空間の功罪の総合評価手法の開発

○研究代表者 東北大学 助教 石田 泰之
 共同研究者 東北大学 准教授 高橋 典之
 共同研究者 東北大学 教授 持田 灯

背景 豪雨・河川氾濫による被害の深刻化



2019年台風19号による洪水被害（長野県長野市）
日本経済新聞 2019.10.18



2022年8月の大雨による洪水被害（秋田県五城目町）
読売新聞online 2022.08.13

台風大型化や線状降水帯に伴う豪雨による河川氾濫や浸水被害の増加

背景 「流域治水」による水害対応

令和3年には「流域治水関連法」¹⁾が整備

従来
土木インフラによる氾濫の抑止
 = 河川堤防の強化、治水ダムの建設 など

近年
 土木インフラのみでの対応は困難
 △
氾濫を前提に流域全体で対策をとる流域治水²⁾⁻⁴⁾



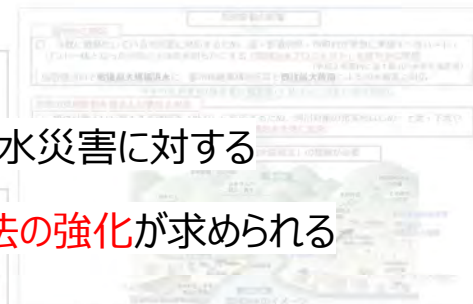
国土交通省ウェブサイト（2023.09.22閲覧）

- 1) 国土交通省、「流域治水関連法」、国土交通省ホームページ、https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_hoan/index.html（2023.09.22閲覧）
- 2) 土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会、提言「定平地等の水災害激甚化に対応した適応策推進場の重要課題」、日本学術会議、2020.6
- 3) 土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会、見解「気候変動に伴う水災害の頻発化・激甚化に対応して、今、科学・技術に求められるもの～将来の市街地土地利用のために～」、日本学術会議、2023.9
- 4) 日本建築学会、提言「激甚化する水害への建築分野の取り組むべき課題～戸建て住宅を中心として～」、2020.6

背景 「流域治水」による水害対応

令和3年には「流域治水関連法」¹⁾が整備

従来
土木インフラによる氾濫の抑止
 = 河川堤防の強化、治水ダムの建設 など
激甚化・頻発化する水災害に対する
 近年
都市や建築物の設計手法の強化が求められる
氾濫を前提に流域全体で対策をとる流域治水²⁾⁻⁴⁾



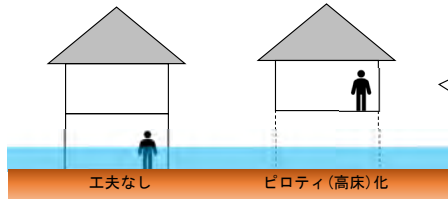
国土交通省ウェブサイト（2023.09.22閲覧）

- 1) 国土交通省、「流域治水関連法」、国土交通省ホームページ、https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_hoan/index.html（2023.09.22閲覧）
- 2) 土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会、提言「定平地等の水災害激甚化に対応した適応策推進場の重要課題」、日本学術会議、2020.6
- 3) 土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会、見解「気候変動に伴う水災害の頻発化・激甚化に対応して、今、科学・技術に求められるもの～将来の市街地土地利用のために～」、日本学術会議、2023.9
- 4) 日本建築学会、提言「激甚化する水害への建築分野の取り組むべき課題～戸建て住宅を中心として～」、2020.6

背景 建築的工夫の一つ「ピロティ」

“土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会”の見解(日本学術会議, 2023.9)³⁾

- 水を室内に入れない方法としては、敷地地盤の高上げ、**高床化**、外壁での止水、建物出入口部への止水板の設置、敷地全体への止水壁の設置などがある。
- 氾濫流の力を低減する方法としては、**ピロティ構造**といわれる、柱のみで一階部分を構築し、氾濫流による力が建築物に作用しないようにする方法がある。



ピロティがもたらす良い効果

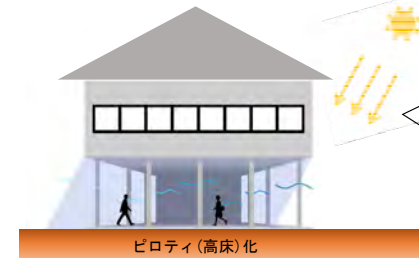
- 建物や家財を浸水から守る
- 作用する流体力の低減

3) 土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会, 見解「気候変動に伴う水災害の頻発化・激甚化に対応して、今、科学・技術に求められるもの～将来の市街地土地利用のために～」, 日本学術会議, 2023.9

背景 建築的工夫の一つ「ピロティ」

「ピロティ」の温熱環境改善効果に関する研究

- ピロティが、屋外空間の都市温暖化への適応策として有効であることが報告⁵⁾



ピロティがもたらす良い効果

- ピロティ空間の風通し向上
- 日陰の形成

- 高床化工事に対する助成制度を設ける自治体も⁶⁾

5) Xiら: Study on the Influence of Piloti Ratio on Thermal Comfort of Residential Blocks by Local Thermal Comfort Adaptation Survey and CFD Simulations, Journal of Energy Procedia, 134, pp.712-722, 2017

6) 杉並区:「水害予防住宅 高床化工事の助成」, 2020-06-02, <https://www.city.suginami.tokyo.jp/guide/machi/chisui/1005071.html>

背景 建築的工夫の一つ「ピロティ」による悪影響

“土木工学・建築学委員会気候変動と国土分科会”の見解(日本学術会議, 2023.9)³⁾

- しかし、高速流浸水ではこの耐風設計で一般に考えられている風圧力を大きく上回る荷重が作用することもあり、今後関連する情報の充実が不可欠である。

ピロティ建物そのものを対象とした研究はなされている一方、

- ピロティ建物に作用する風圧力⁷⁾
- ピロティ建物に作用する津波波力⁸⁾

ピロティ建物が、その周辺の環境や周辺の建物に与える影響(ピロティの悪影響)は殆ど評価されていない!

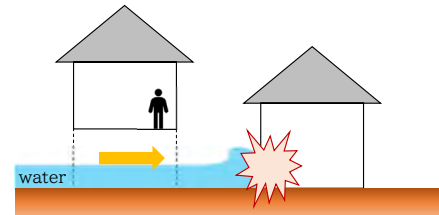
7) 中田ら:ピロティの有無による低層建物の風圧及び風力特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.167-168, 2008.9

8) 本田ら:ピロティ構造の部材に働く津波波力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.979-984, 2016

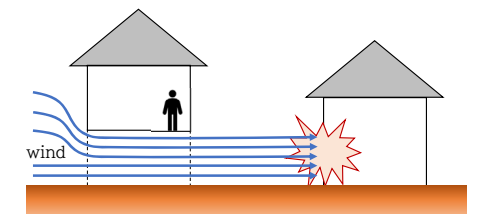
背景 建築的工夫の一つ「ピロティ」による悪影響

ピロティ建物そのものを対象とした研究はなされている一方、

ピロティ建物が、その周辺の環境や周辺の建物に与える影響(ピロティの悪影響)は殆ど評価されていない!



高速流浸水による下流側の領域・建物への悪影響



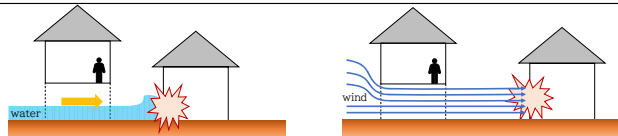
台風等の暴風時における風下側の領域・建物への悪影響

目的

「ピロティ空間の功罪の総合評価」に関して、現在、抜け落ちてしまっている
ピロティ空間の功罪の「罪」の定量化手法の整備 および 定量評価

ピロティを有する建築物が・・・

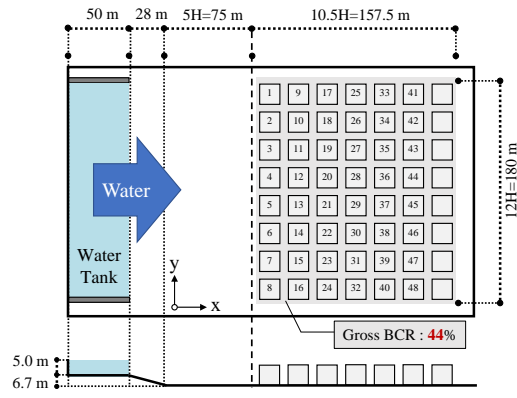
河川氾濫時：市街地内の水流分布、周辺建物が受ける水圧力
 稀な強風時：市街地内の風速分布、周辺建物が受ける風圧力
 に及ぼす影響を数値シミュレーション(CFD解析)により定量化



1. 研究の背景・目的
2. 河川氾濫時を対象とする水流解析による悪影響の定量化
3. 強風時を対象とする風解析による悪影響の定量化
4. 得られた知見・今後の展開



評価対象の市街地モデル



• 東京都において大きな浸水被害が予測されるエリアの一つである北千住エリア⁹⁾

▷ 氾濫時の浸水深5m以上



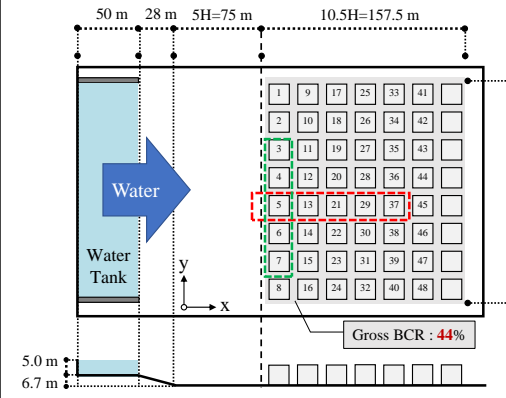
グロス建蔽率
 (建物密度)
 堤防の平均的
 な断面寸法

街区の条件設定の参考にした市街地 (©Google)

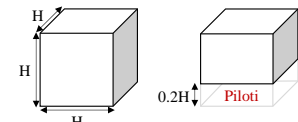


9) 足立区公式ホームページ:足立区ハザードマップ <https://www.city.adachi.tokyo.jp/kikaku/bosai/bosai/hazard-map-k.html>

解析ケース



Case	ピロティ建物 (No.)	評価建物 (No.)
Case_STD	None	5
Case_1×1	5	13
Case_1×2	5, 13	21
Case_1×3	5, 13, 21	29
Case_1×4	5, 13, 21, 29	37
Case_1×5	5, 13, 21, 29, 37	45
Case_2×1	4, 5	13
Case_3×1	4, 5, 6	13
Case_4×1	3, 4, 5, 6	13
Case_5×1	3, 4, 5, 6, 7	13



建物寸法：1.0H=15m
 ※ ピロティに柱等はない



SPH法による流体解析概要

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)

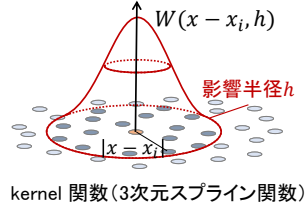
水塊を粒子に離散化し、粒子の物理量を近傍粒子の物理量の重みつき平均として近似するラグランジュ型の解法

物理量 $f(x)$ の離散化手法

$$f(x) \approx \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho_i} f(x_i) W(x - x_i, h) \quad \dots (1)$$

対象粒子の物理量 $f(x)$ は、近傍粒子 i の物理量 $f(x_i)$ を、重み関数 $W(x - x_i, h)$ を用いて平均化される。ここで、 m_i は粒子質量、 ρ_i は密度、 h は影響半径である。

m_i : 粒子質量
 ρ_i : 密度
 W : カーネル関数
 h : 影響半径



支配方程式

質量保存則 $\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (u_i - u_j) \nabla_i W_{ij} \quad \dots (2)$

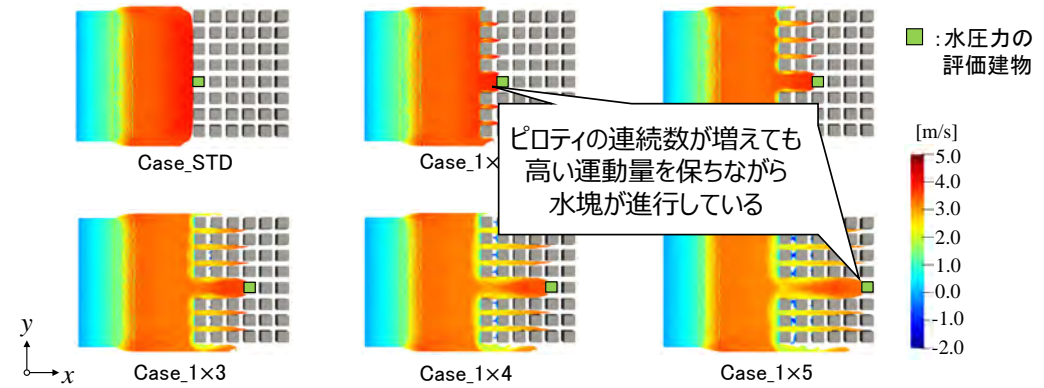
運動量保存則 $\frac{du_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + g \quad \dots (3)$

状態方程式 $P = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right], \quad \gamma = 7 \quad \dots (4)$

u : 流速 P : 圧力 g : 重力加速度 ρ_0 : 基準密度 c_0 : 音速 $\nabla_i W_{ij}$: 粒子 i における kernel 関数の勾配 Π_{ij} : 人工粘性項

市街地内における主流方向の水流速分布

評価建物到達時における水塊の流速分布



評価建物に水塊が到達する時刻の流速値

Case	Case_1×1	Case_1×2	Case_1×3	Case_1×4	Case_1×5
流速 [m/s]	3.89	3.82	3.69	3.56	3.44
Case_1×1に 対する比	1.0	0.98	0.95	0.92	0.88

- ピロティが5棟連続するケースでも、ピロティが1棟のみのケースの8割を超える流速を保持



ピロティの下流側に位置する建物に作用する水圧力を評価

下流側建物が受ける水圧力評価手法の提案

水圧係数 $C_{pwater}(t)$ の定義: 風圧力の評価法の応用

時刻 t における壁面に作用する水圧 $p_{water}(t)$ を、基準速度圧 $q_{in}(t_r)$ で除して求めた、基準化水圧力。
 $(t_r$: 最も上流側の建物壁面位置に水塊が到達した時刻 [s])

$$C_{pwater}(t) = \frac{p_{water}(t)}{q_{in}(t_r)} \quad \dots (5)$$

$$q_{in}(t_r) = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad \dots (6)$$



$p_{water}(t)$: ある時刻 t [s] において壁面に作用する水圧力 [N/m²]

$q_{in}(t_r)$: 基準速度圧 [N/m²]

t_r : 最も上流側の建物壁面位置に水塊が到達した時刻 [s]

v_0 : 主流方向流速 [m/s]

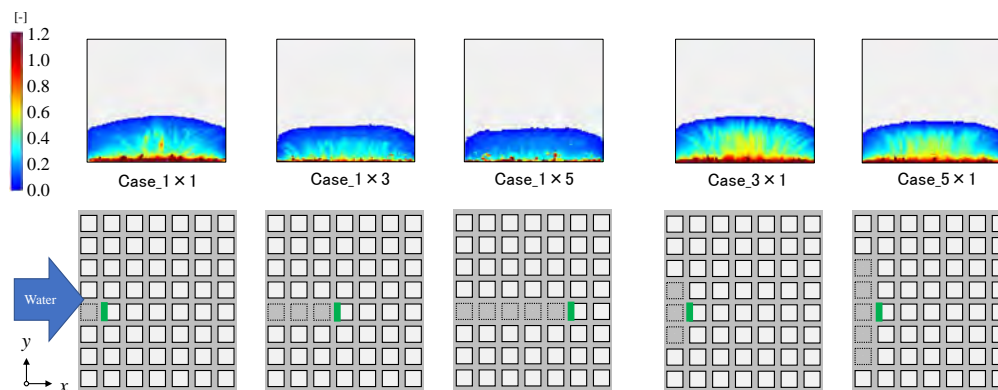
下流側建物が受ける水圧力評価手法の提案

ピーク水圧係数 $peak C_{p_{water}}$ による水圧力評価

解析時間内における水圧力の最大値 p_{water_Max} を $q_{in}(t_r)$ で除した、基準化水圧力。

$$peak C_{p_{water}} = \frac{p_{water_Max}}{q_{in}(t_r)} \quad \dots (7) \quad q_{in}(t_r) = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad \dots (6)再$$

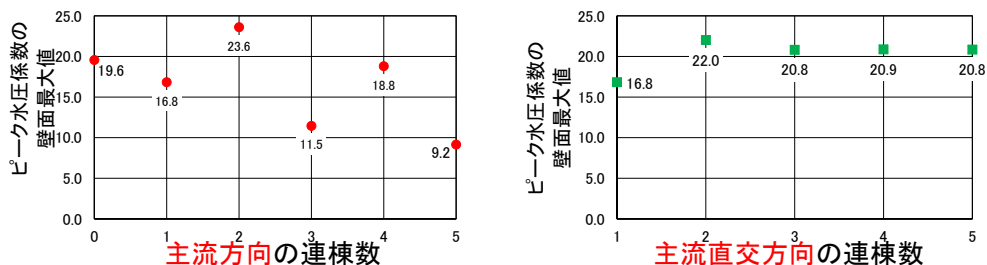
下流側建物が受けるピーク水圧 $peak C_{p_{water}}$



- 主流方向に連続: 水圧力を受ける面積が小さくなるが、底部には強い力が作用
- 主流直交方向に連続: 1棟のケースよりも強い力が作用する面積が増加

ピロティの連棟数とピーク水圧の関係

ピーク水圧係数 $peak C_{p_{water}}$ の壁面内最大値



- 局所的には基準水圧の9~23倍の水圧力が作用
▷ 水塊の流入流速によっては大きな被害に繋がる。
- 主流方向に連続: 減少傾向だが一定でない。
進入時に壁面で反射する水粒子間作用が単調で無い可能性。
- 主流直交方向に連続: 2棟以上連なることで、危険性が増加。

小結

- 水流体解析により、河川氾濫時の流速分布、水圧力評価を実施し、ピロティ建物が存在することによる、その周囲への影響を定量的に評価した。
- 河川側建物が浸水対策によりピロティ化することによって、水塊の流速によっては、その下流側建物の建築時には想定していない強い水圧力が作用する。
- 局所的に、河川側建物に作用する平均的な水圧力の9~23倍の力が作用する。
- ピロティ建物の配置によって、作用する水圧力に大きな差が表れた。

1. 研究の背景・目的
2. 河川氾濫時を対象とする水流解析による悪影響の定量化
3. 強風時を対象とする風解析による悪影響の定量化
4. 得られた知見・今後の展開

LESによる流体解析概要

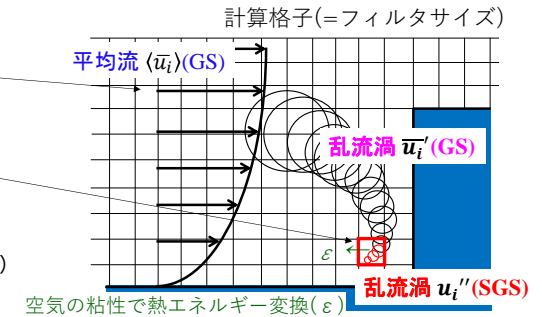
LES (Large Eddy Simulation)

オイラー型の解法で、空間にフィルタをかけてフィルタサイズより大きい渦を直接解き、小さい渦はモデル化して解く手法

計算格子より大きな渦 (Large Eddy)
= Grid Scale成分 \bar{f} ⇒ 直接解く。

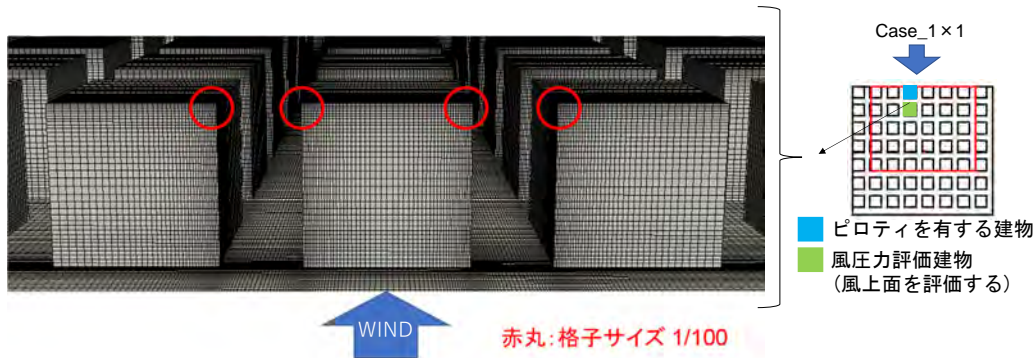
計算格子より小さな渦
= Sub-Grid Scale成分 f'' ⇒ モデル化して与える。

f : 変数 f の瞬時値
 \bar{f} : 瞬時値 f の格子内空間平均値 (空間フィルタを施した f)
 f'' : 格子内の空間変動 (空間平均値からのずれ ($f - \bar{f}$))
 $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値
 f' : 時間変動 (時間平均値からのずれ ($f - \langle f \rangle$))
 u_i : 風速ベクトルの3成分 ($i=1$:主流方向, $i=2$:主流直行方向, $i=3$:鉛直方向)



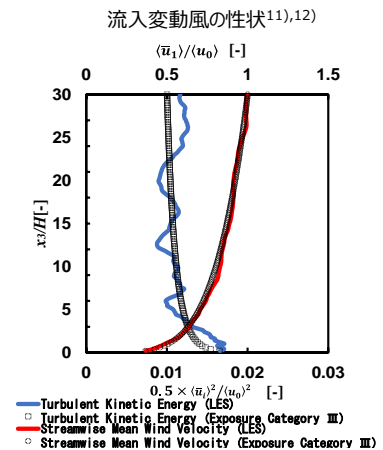
建物近傍の計算格子 (= フィルタサイズ)

風圧力評価建物は指針¹⁰⁾に基づいて分割
 ・建物幅を50分割、建物壁面角部は建物幅の1/100

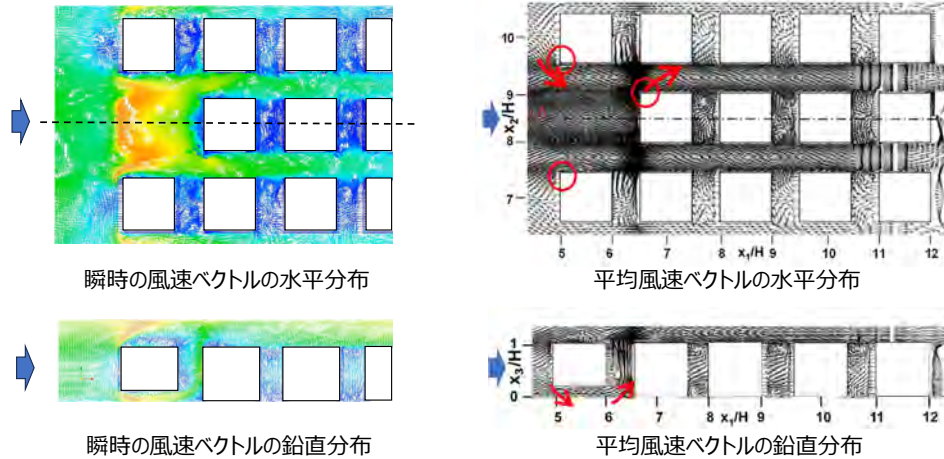


LESの解析条件

SGSモデル	WALEモデル
刻み時間	0.01 [s]
解析時間	助走計算180秒 + 本計算120秒(統計量取得時間)
移流項スキーム	2次中心差分(95%) + 1次風上差分(5%)
拡散項スキーム	2次中心差分
時間項スキーム	2次陰解法(アダムスモルトン法)
圧力解法	PISO法
流入条件	地表面粗度区分Ⅲをターゲットとする流入変動風 ^{11),12)}
流出条件	移流型境界条件(advective) $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + U_c \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_{out}} = 0$
側面・上空面境界条件	Slip壁 $\frac{d\langle \bar{u} \rangle}{dz} = 0, \frac{d\langle \bar{v} \rangle}{dz} = 0, \langle \bar{w} \rangle = 0$
壁面境界条件	Spalding則 $y^+ = u^+ + \frac{1}{E} \left[e^{ku^+} - 1 - ku^+ - \frac{1}{2}(ku^+)^2 - \frac{1}{6}(ku^+)^3 \right]$



Case_1×1における風速の空間分布

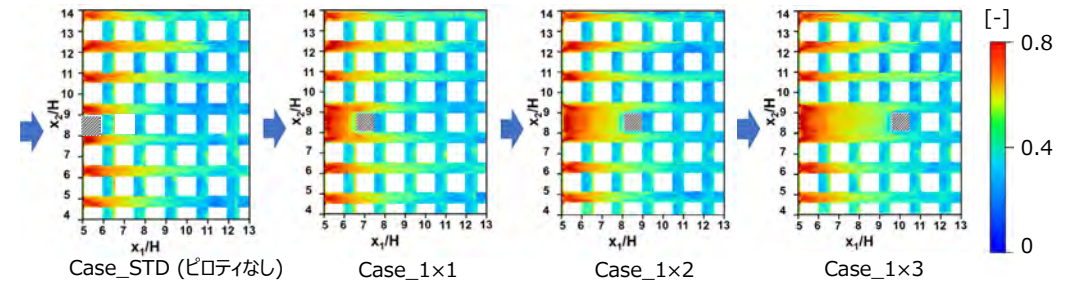


歩行者高さにおける風速の高風速値の分布

各位置における瞬時のスカラー風速の95%値, V_{95} :

最大値からカウントして上位5%に当たる高風速値

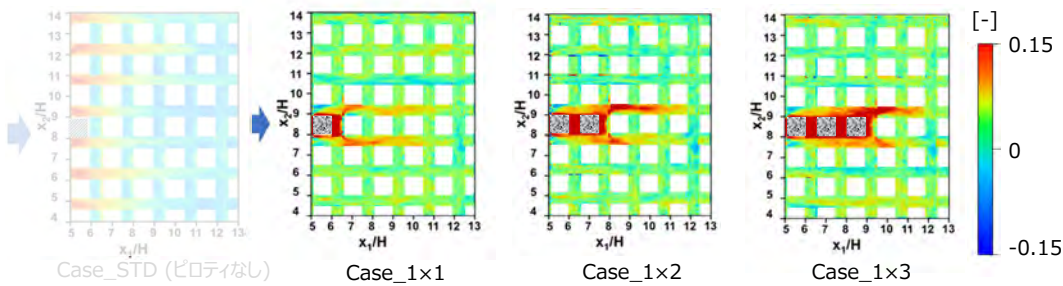
※ 建物の30倍上空(30H高さ)の平均風速で基準化



- ピロティ空間内の強風は、吹走距離が長くなるほど減少している。
- 風下建物のコーナー部で流れが剥離し高風速が発生。

増速域の空間分布

Case_STD(ピロティなし)に対して、風速が増加した領域



- ピロティ空間内の風速が増加。
⇒ 稀に発生する強風時には、屋外空間の危険性増につながる可能性が。

風下側建物が受ける風圧力の評価

風圧係数 $C_{pwind}(t)$ の定義

時刻 t における壁面に作用する風圧 $p_{wind}(t)$ を、基準速度圧 $\langle q_H \rangle$ で除して求めた、基準化風圧。

※ 壁面に接するセル(壁面第一セル)の風圧力の1.0秒移動平均値を用いた。

$$C_{pwind}(t) = \frac{p_{wind}(t)}{\langle q_H \rangle} \quad \dots (8)$$

$$\langle q_H \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle u_H \rangle^2 \quad \dots (9)$$



$p_{wind}(t)$: ある時刻 t [s] において壁面に作用する風圧力 [N/m²]

$\langle q_H \rangle$: 建物高さ(1H)の平均風速から求まる風圧力、基準速度圧

$\langle u_H \rangle$: 流入面の建物高さ(1H)における主流方向平均風速 [m/s]

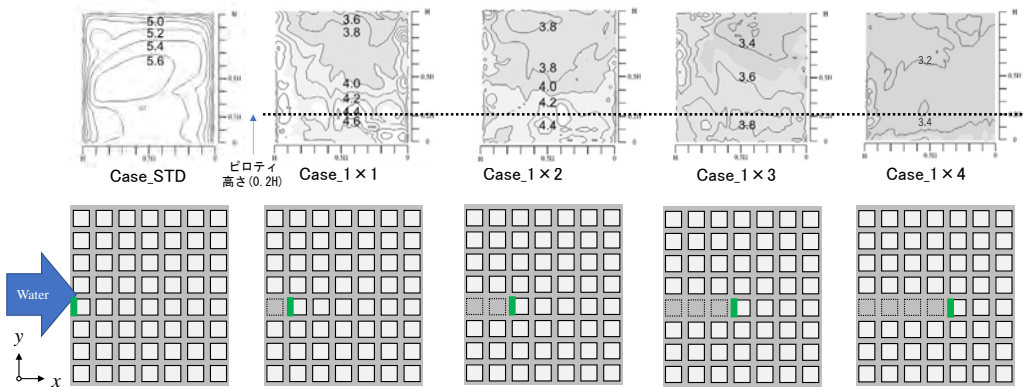
下流側建物が受ける水圧力評価手法の提案

ピーク風圧係数 $peak C_{p_{wind}}$ による水圧力評価

解析時間内における風圧力の最大値 p_{wind_Max} を $\langle q_H \rangle$ で除した、基準化風圧力。

$$peak C_{p_{wind}} = \frac{p_{wind_Max}}{\langle q_H \rangle} \quad \dots (10) \quad \langle q_H \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle u_H \rangle^2 \quad \dots (9)再$$

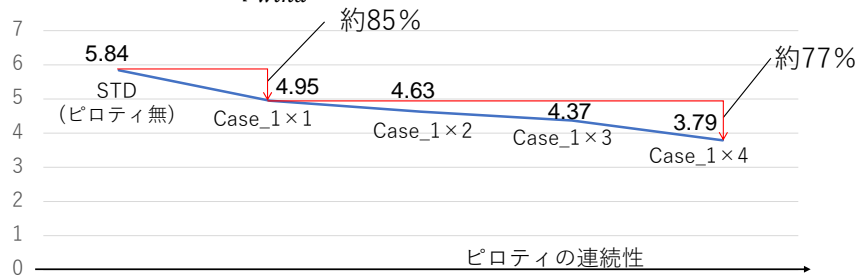
風下側建物が受けるピーク風圧 $peak C_{p_{wind}}$



- 4棟連続するケースにおいても、建物高さにおける平均的な風圧力の約3.4倍の力がピロティ高さ以下に作用する。

ピロティの連棟数とピーク風圧の関係

ピーク風圧係数 $peak C_{p_{wind}}$ の壁面内最大値



- Case_1x1の最大ピーク値は、ピロティの無い壁面上部に作用する力の約85%。
⇒ 高所の強い風圧力の8割以上の力が、ピロティ高さ以下の壁面に作用する。
- ピロティが連続することによる最大ピーク値の減少は緩やか。
⇒ ピロティが1棟のケースに対して、4棟のケースには約77%の力が作用。

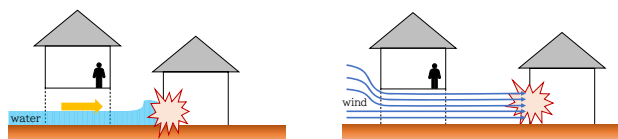
1. 研究の背景・目的
2. 河川氾濫時を対象とする水流解析による悪影響の定量化
3. 強風時を対象とする風解析による悪影響の定量化
4. 得られた知見・今後の展開

研究成果・得られた知見

「ピロティ空間の功罪の総合評価」に関して、現在、抜け落ちてしまっている。

ピロティ空間の功罪の「罪」の定量化手法の整備 および 定量評価

- ピロティ建物が、その下流側に位置する建物に及ぼす水圧力の定量化を提案
⇒ 風圧力の評価法を応用することで、風水害助長の影響を統一的に評価可能に。
- ピロティ建物が、周辺市街地および下流側建物に及ぼす悪影響を定量化。
- ピロティの配置変更により、その作用の程度が一様でないことを明らかにした。



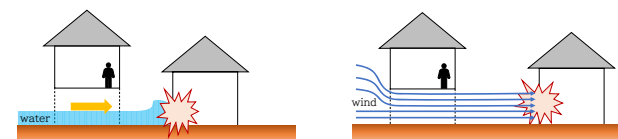
33

研究成果・得られた知見

「ピロティ空間の功罪の総合評価」に関して、現在、抜け落ちてしまっている。

ピロティ空間の功罪の「罪」の定量化手法の整備 および 定量評価

- 水圧力は、最も上流側にある建物に水塊が到達した際に働く水圧力の9~23倍の力が地面付近の底部に作用する。
- 風圧力は、最も風上側にある建物の風上面に作用する風圧力の6~8割の力がピロティ高さ以下の広い範囲に作用する。



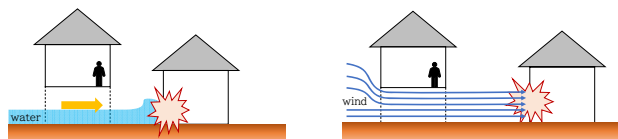
34

今後の展開

- 強い水圧力・風圧力が作用する要因の解明。
⇒ 効果的な対策法の提案につなげる。
- 実市街地における水圧力の評価。
⇒ 実市街地における知見の適用性の評価。



街区の条件設定の参考にした市街地
(©Google)



35

発表論文・受賞

1. 三富, 高橋, ピロティ形式RC造構造物に作用するコンテナの漂流衝突力時刻歴モデルの開発, コンクリート工学年次論文集, 44, 2, pp.19-24, 2022.7, [査読有](#)
2. 石田, 高橋, 荻原, 山根, 持田, ピロティが都市空間の風の流れ, 温熱環境, 河川氾濫流に及ぼす影響の分析 (その1) ピロティが歩行者空間の風環境及び建物の受ける風圧力に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 40777, pp.1679-1680, 2022.9
3. 浜崎, 石田, 千葉, 阿部, 持田, 擬似温暖化手法による台風大型化に伴う強風の発生頻度の変化の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 41017, pp.2165-2166, 2022.9
4. 三富, 高橋, 石田, 大野, 藤田, 持田, 洪水・強風発生時に建物ピロティが近隣の市街地に及ぼす影響に関する研究 (その1) 河川氾濫時における市街地内の水流分布及び建物の受ける水圧力への影響, 日本流体力学会年會講演論文集, 118, pp.1-6, 2022.9
5. 石田, 大野, 藤田, 高橋, 三富, 持田, 洪水・強風発生時に建物ピロティが近隣の市街地に及ぼす影響に関する研究 (その2) 強風発生時における歩行者空間の高風速発生及び周辺建物の受ける風圧力への影響, 日本流体力学会年會講演論文集, 161, pp.1-5, 2022.9
6. 大野, 藤田, 石田, 高橋, 持田, ピロティが周囲の風環境及び風下の建物の風圧力に及ぼす影響, 風工学シンポジウム講演梗概集, 27, pp.69-75, 2022.12, [査読有](#)
7. 浜崎, 石田, 持田, 領域気象モデルWRFによる平常時における風速の発生頻度の将来変化, 風工学シンポジウム講演梗概集, 27, pp.108-112, 2022.12, [査読有](#)

36

発表論文・受賞

8. 三富, 高橋, 石田, SPH法による流体解析を用いた市街地の水害評価に向けた検討 – 河川氾濫時にピロティ建物が市街地内の水流分布および周辺建物への水圧力に及ぼす影響 –, 日本建築学会技術報告集, 29, 72, pp.671-676, 2023.6, [査読有](#)
9. 三富, 石田, 高橋, 河川氾濫・強風発生時にピロティ建物が周辺市街地に及ぼす影響に関する研究 (その 1) 河川氾濫時にピロティ建物が市街地内の水流分布・周辺建物 に作用する水圧力に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2023.9
10. 大野, 藤田, 石田, 持田, 河川氾濫・強風発生時にピロティ建物が周辺市街地に及ぼす影響に関する研究 (その 2) ピロティの連続性による歩行者空間の風環境への影響の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2023.9
11. 藤田, 大野, 石田, 持田, 河川氾濫・強風発生時にピロティ建物が周辺市街地に及ぼす影響に関する研究 (その 3) ピロティの連続性とピロティの風下側に位置する建物に作用する風圧力の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2023.9

[受賞]

2023年度 日本建築学会 優秀修士論文賞

三富(石田、研究指導学生),

漂流物衝突を受けるピロティ形式建造物の構造応答評価および周辺市街地の耐水害性能評価に関する研究

