

PLATEAUデータベースを用いた日本の都市の建物幾何 パラメータの統計解析

田中, 琳央
九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7358374>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 修士, 修士
バージョン :
権利関係 :



令和 6 年 度

修 士 論 文

PLATEAU データベースを用いた
日本の都市の建物幾何パラメータの統計解析

九州大学大学院総合理工学府

総合理工学専攻

機械・システム理工学メジャー

都市環境科学研究室

田中 琳央

指導教員 池谷 直樹 (捺印または署名)

提出年月日 令和 7 年 2 月 4 日

目次

謝辞	- 1 -
1 序論	- 2 -
2 方法	- 18 -
2-1 PLATEAU	- 18 -
2-2 CityGML	- 22 -
2-2-1 概要	- 22 -
2-2-2 CityGML ファイル名形式	- 23 -
2-2-3 CityGML フォーマットデータの構造	- 25 -
2-2-4 CityGML データ ファイルの建物データ	- 28 -
2-3 理論的背景	- 30 -
2-3-1 平均測定高さ	- 30 -
2-3-2 建物平面面積指数	- 31 -
2-3-3 標準偏差	- 31 -
2-3-4 歪度	- 32 -
2-3-5 尖度	- 32 -
2-3-6 確率密度関数 (PDF)	- 32 -
2-3-7 z スコア (z-score)	- 34 -
3 結果	- 34 -
3-1 この調査に含まれる都市	- 34 -
3-2 建物の数	- 35 -
3-3 平均測定高さ	- 38 -
3-4 建物高さの標準偏差	- 41 -
3-5 建ぺい率	- 44 -
3-6 確率密度関数 (PDF)	- 45 -
3-7 z スコア (z-score)	- 47 -
4 考察	- 51 -

4-1 4 大都市	- 51 -
4-1-1 データ解析	- 51 -
4-1-2 モデル適用	- 60 -
4-2 日本全国 106 都市	- 62 -
4-2-1 都市の分類	- 63 -
4-2-2 データ解析	- 64 -
4-2-3 モデル適用	- 70 -
5 将来展望	- 73 -
6 結論	- 74 -
7 参考文献	- 1 -
付録 A: CityGML データファイルの全体構造	i
付録 B: 札幌大通郵便局の CityGML データを含む XML ファイル	i
付録 C: i-UR 情報で使用されているコード一覧	i
付録 D: 106 都市の 1km×1km メッシュごとの (a) 建物数 N [個]、(b)平均測定高さ h [m]、(c)測定高さの標準偏差 σh [m]のカラーマップ	i
付録 E: 大都市における平均測定高さに対する都市幾何学パラメーターの散布図	i
付録 F: 中都市における平均測定高さに対する都市幾何学パラメーターの散布図	i
付録 G: 小都市における平均測定高さに対する都市幾何学パラメーターの散布図	i
付録 H: 大規模都市における平均測定高さに対する標準偏差を用いたモデル比較	i
付録 I: 中規模都市における平均測定高さに対する標準偏差を用いたモデル比較	i
付録 J: 小規模都市における平均測定高さに対する標準偏差を用いたモデル比較	i

謝辞

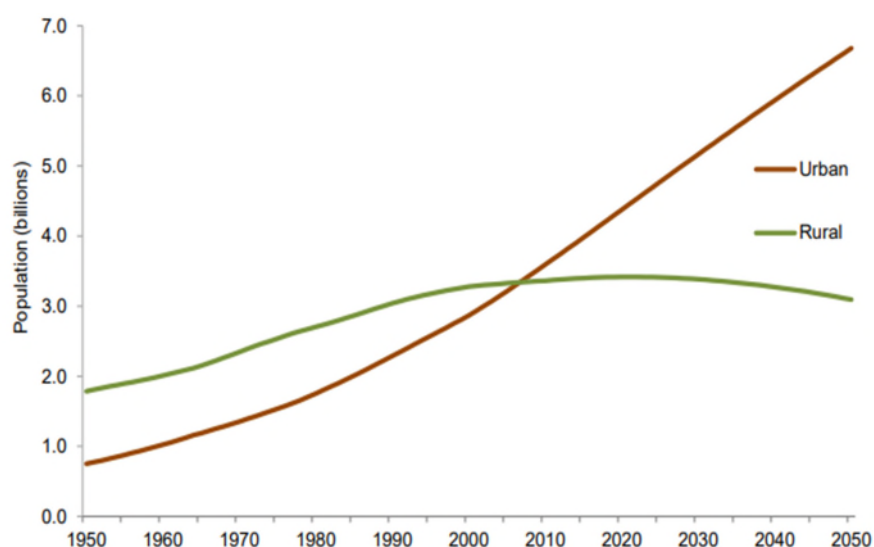
本研究を実施するにあたり、重要なデータを提供していただいた国土交通省に感謝したい。また、一貫してご指導と多大なご支援をいただいた池谷教授と、研究を進めるにあたり、学術面でも社会面でもご支援をいただいた同僚の方々にも感謝申し上げたい。

本論文は第一著者の修士学位論文である。

1 序論

2018 年のデータに基づく国連の調査によると、世界人口の 55% が都市部に居住しており、この割合は 2050 年までに 68% に増加すると予測されている（図 1）。農村部から都市部への人口移動に加え、全体的な人口増加も相まり、2050 年までにさらに 25 億人が都市部に居住することが見込まれている[1]。この人口の変化は、特にアジアやアフリカを中心に世界の多くの地域で都市化を引き起こす可能性があるが、中国ではすでに数十年にわたりその現象が見られている[2]。このような状況の中、国連は都市部での生活の質を向上させるために、持続可能な土地利用計画および管理を推進している。この取り組みは、都市が直面する課題の解決を目指しており、その中には水管理 ([3], [4], [5])、大気汚染 ([6], [7], [8])、および騒音公害 ([9], [10]) も含まれている。

これらの課題の中でも、ヒートアイランド現象（HIE）は都市気候の最も顕著な特徴の一つとして認識されている[11]。Kleerekoper らは、ヒートアイランド現象（HIE）の原因として 7 つの異なる要因を提案しており、その中には、都市部の建物の間に熱



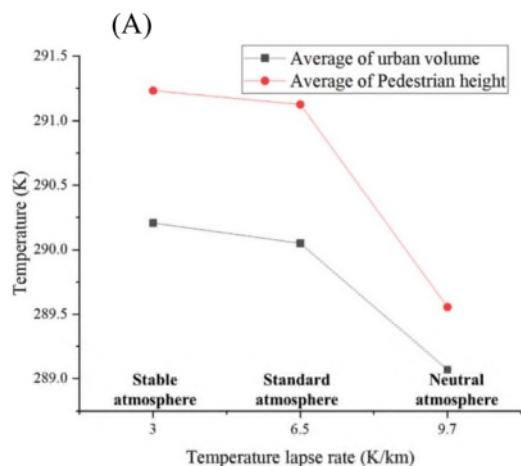
出典 United Nations, “2018 Revision of World Urbanization Prospects,” 2019. より引用

図 1. 2018 年のデータに基づく外挿を含む、1950 年から 2050 年までの都市部および農村部における世界人口 [1]

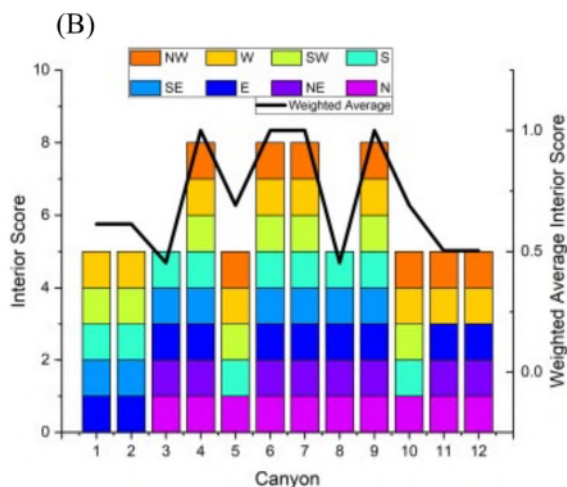
が閉じ込められ、都市域内に蓄積されることが挙げられる [12]。その結果、ヒートアイランド現象（HIE）は地表面温度を上昇させ、大気環境や都市部に居住する住民の健康に影響を与える変化を引き起こす[13]。ヒートアイランド現象（HIE）による都市化が大気に及ぼす影響は、より持続的で激しく、頻繁に発生する深刻な熱波を引き起こす[14]。これにより、都市部の住民は熱波の影響を受けやすくなり、多くの犠牲

者を生じる可能性がある。Song らの報告によると、高層建築物が多い地域に住む住民は、緑地が多い地域に住む住民よりも熱波関連の死亡リスクが高いことが示されている[15]。Santamouris らは、都市部の高い周囲温度が脆弱な人々や高齢者の健康に悪影響を及ぼす可能性があることを示唆している[16]。Paravantis らは、ギリシャ・アテネにおける熱波とヒートアイランド現象（HIE）によって引き起こされる高温が、65 歳以上の人々の心血管および呼吸器系死亡率に与える影響を分析した [17]。その研究では、日別の死亡率が最も高いのは 35～40℃ の間であることが明らかになった。また、Heaviside らは、2003 年にイギリス・ウェストミッドランズを襲った熱波の際、ヒートアイランド現象が熱関連死亡率全体の約 50% に関与している可能性があることを示した[18]。これらの研究が示すように、都市部のヒートアイランド現象は、世界的に都市住民の熱関連死亡率に寄与している。このような住民の健康への悪影響を軽減するためには、ヒートアイランド現象を抑制する都市設計を行うことが極めて重要である。

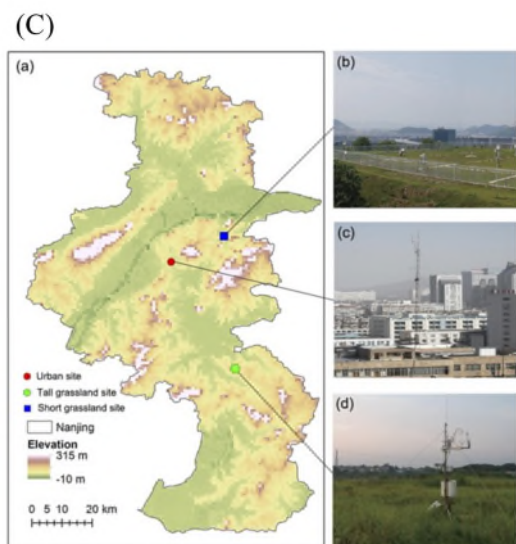
解決策として、都市部内の空気力学を変えることで、熱が閉じ込められ蓄積されるのを防ぐことが可能である [19]。都市の空気力学はさまざまなパラメーターで記述されるが、それらの中でどのパラメーターが最も重要な役割を果たすかを特定するのは困難である。このようなパラメーターの調査は、通常、計算シミュレーションを使用して行われる。



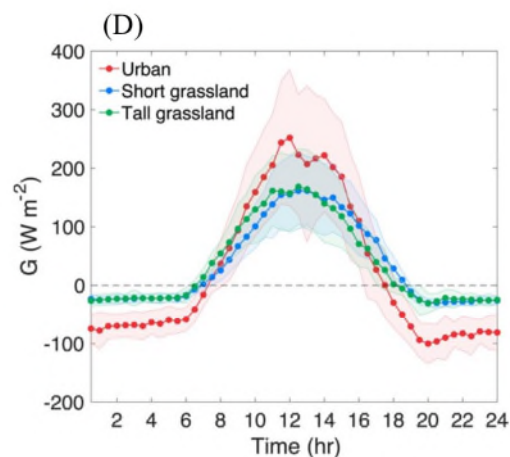
出典 Y. Jing, H.-Y. Zhong, W.-W. Wang, Y. He, F.-Y. Zhao, and Y. Li, "Quantitative city ventilation evaluation for urban canopy under heat island circulation without geostrophic winds: Multi-scale CFD model and parametric investigations," *Build Environ*, vol. 196, p. 107793, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107793. より引用



出典 S. Sen and J. Roesler, "Wind direction and cool surface strategies on microscale urban heat island," *Urban Clim*, vol. 31, p. 100548, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100548. より引用



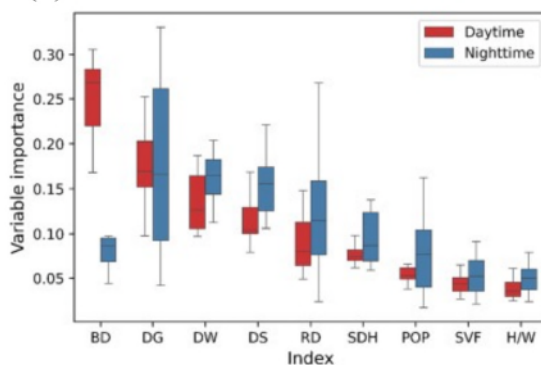
出典 L. Wang, D. Li, N. Zhang, J. Sun, and W. Guo, "Surface Urban Heat and Cool Islands and Their Drivers: An Observational Study in Nanjing, China," *J Appl Meteorol Climatol*, vol. 59, no. 12, pp. 1987–2000, Dec. 2020, doi: 10.1175/JAMC-D-20-0089.1. より引用



出典 W. Peng, R. Wang, J. Duan, W. Gao, and Z. Fan, "Surface and canopy urban heat islands: Does urban morphology result in the spatiotemporal differences?," *Urban Clim*, vol. 42, p. 101136, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101136. より引用

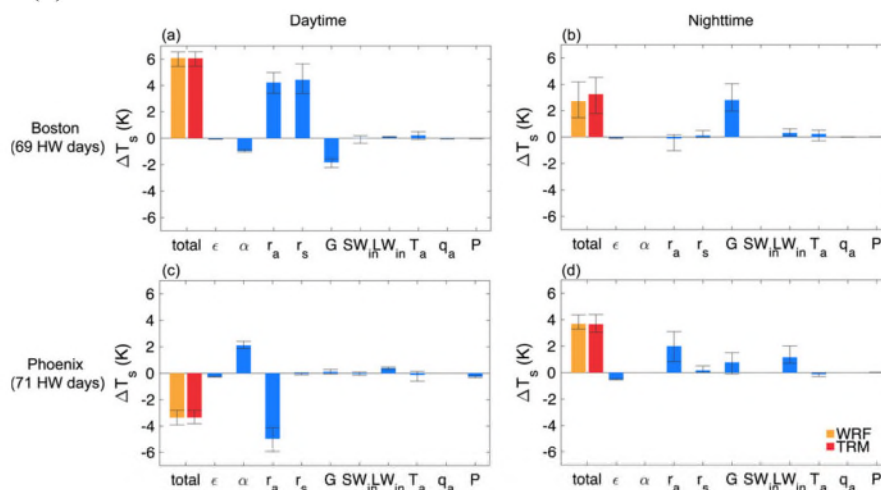
図2 (A) 気温減率の影響を受けた温度分布 [20](B) 風向に基づく都市峡谷の内部スコアとその確率重み付き平均内部スコア [21](C) 南京市の地図、(b)短草地サイト、(c)都市部サイト、(d)高草地サイトを示す [22](D) 地面熱フラックスの日変化の平均値、影の部分は標準偏差を示す [23]

(E)



出典 L. Wang and D. Li, "Urban Heat Islands during Heat Waves: A Comparative Study between Boston and Phoenix," *J Appl Meteorol Climatol*, vol. 60, no. 5, pp. 621–641, May 2021, doi: 10.1175/JAMC-D-20-0132.1.より引用

(F)



出典 P. Cohen, O. Potchter, and A. Matzarakis, "Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments," *Applied Geography*, vol. 37, pp. 1–10, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.apgeog.2012.11.001.より引用

図2 (E) 都市形態学的パラメータの重要度スコア。BE, DG, DW, DS, RD, SDH, POP, SVF, H/Wは、それぞれ建物密度、緑地からの距離、水域からの距離、駅からの距離、道路密度、グリッド内の建物高さの標準偏差、人口、スカイビュー係数、建物の縦横比を表す [24](F) 都市ヒートアイランド (UHI) に影響を与える各属性の重み ΔT_s , ϵ , α , r_a , r_s , G , SW_{in} , LW_{in} , T_a , q_a , P は、それぞれ都市と農村の気温差、地表放射率、地表アルベド、空気動力抵抗、都市地表抵抗、熱蓄積、入射短波放射、入射長波放射、下層大気の潜在温度、下層大気の比湿、気圧を表す [25]

Jing らは、多スケール都市気流を定量化するために、理想化された高レイノルズ数多孔質メディア都市モデルと多スケール計算流体力学（CFD）を用いた方法論を採用、都市の HIE に対するさまざまな要因の重要性を評価し、主要な要因が熱フラックスと気温減率であることを発見した（図 2 A）[20]。Sen らは、シカゴ（米国）の仮想的な都市ブロックを使用し、風、都市形態、反射面を同時に考慮して、これらが都市ヒートアイランド（UHI）の強度に与える影響を調査した（図 2 B）[21]。この研究結果によると、マイクロスケールの UHI 強度はモデル内の位置や風向によって異なることが分かった。Wang らは、中国南京の観測データを使用して、地表 UHI（sUHI）および地表都市冷却アイランド（sUCI）の生物物理的および大気的要因を二重抵抗メカニズムを用いて説明した[22]。この研究では、都市部は短草地帯と比較してより強い sUHI 効果を経験したが、高草地帯と比較すると中程度の sUHI 効果を経験した。（図 2 C および D）Peng らはケーススタディとして北九州市を用い、異なる都市形態パラメーターと UHI 効果（地表 UHI およびキャノピーUHI で表される）との相関を比較した[23]。北九州市は空間的に非常に不均一な都市地域を持つため選ばれた。彼らは、日中、地表 UHI およびキャノピーUHI の両方が、駅までの距離や水辺などの「外部」パラメーターよりも、建物密度や建物高さの標準偏差などの「内部」都市形態パラメーターによってより大きな影響を受けることを発見した（図 2 E）。また、日中と夜間での UHI 効果の強度の比較は別の研究グループによって行われた。Wang らは、対照的な気候を持つアメリカの 2 都市（ボストンとフェニックス）における熱波中の UHI 強度を、Weather Research and Forecasting（WRF）モデルを使用して比較した[24]。彼らは、2 都市の空気力学的抵抗および都市表面抵抗が、地表 UHI および地表近くの空気 UHI の強度に異なる影響を与えることを観察した（図 2 F）。

前段で述べた研究は、都市全体における UHI（都市ヒートアイランド）の影響に焦点を当てていた。一方で、歩行者ゾーンのようなさまざまな微気候条件を対象とすることも可能だ[25]。都市の一部である歩行者ゾーンもまた、UHI の影響を受けており、都市住民の生活の質がある程度低下する原因となっている [26], [27]。したがって、歩行者ゾーン上の空気力学を研究することは、都市生活の改善につながる可能性がある [28]。

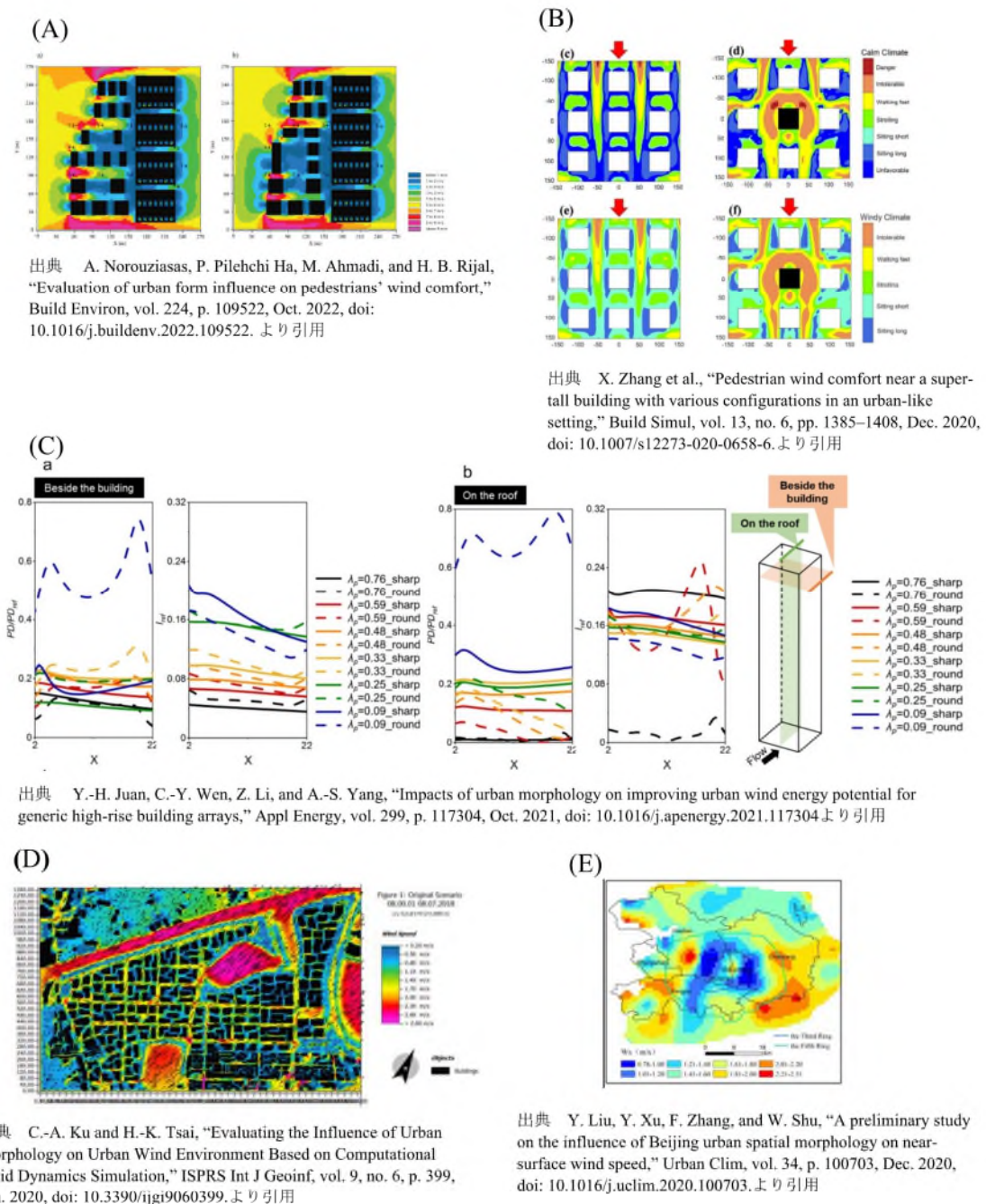
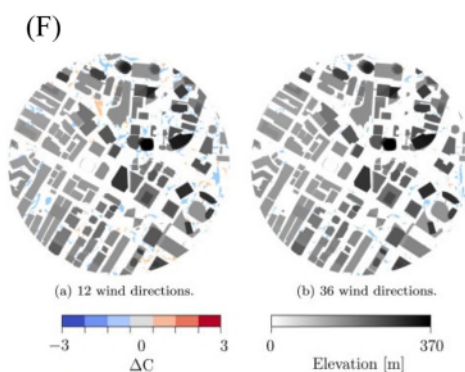


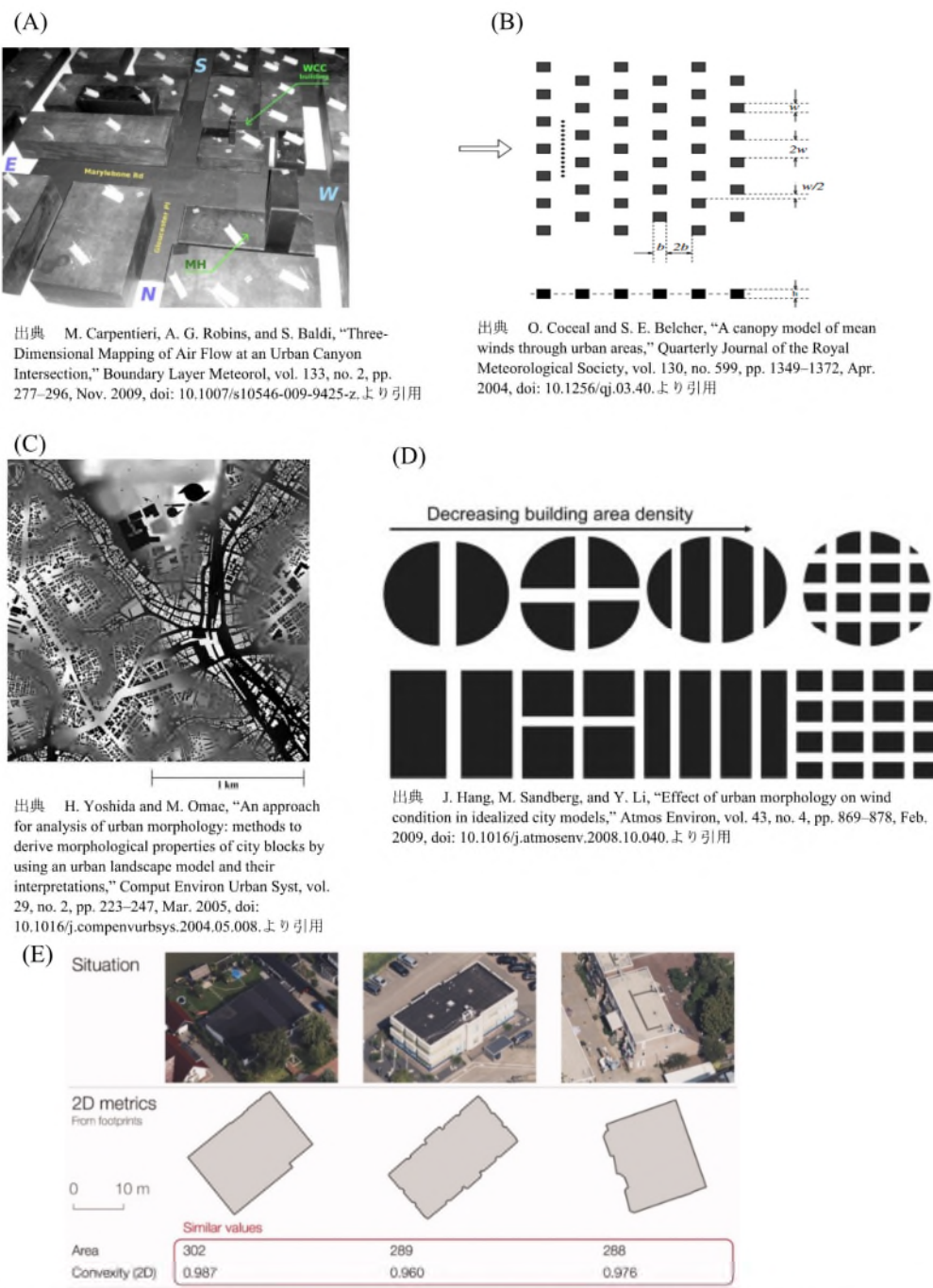
図3 (A) 風速：(a) 基本モデル (M1)、(b) 最適モデル (MOPT) [41]. (B) 風環境快適性：(左上) SQB周辺、(右上) SQU周辺の穏やかな気候下での風快適性、(左下) SQB周辺、(右下) SQU周辺の強風気候下での風快適性 [42]. (C) λ_p は平面密度。建物横および屋根上における鋭角/丸角の建物形状別の予測風力密度プロファイル (a, b) [43] (D) 台湾北部では、更地、農業用池、及び高速道路上でより高い風速が観測される [44]. (E) 中国北部平原における高さ10mでの年間風速 [45].



出典 T.-O. Hågbo and K. E. T. Giljarhus, "Sensitivity of urban morphology and the number of CFD simulated wind directions on pedestrian wind comfort and safety assessments," *Build Environ*, vol. 253, p. 111310, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111310より引用

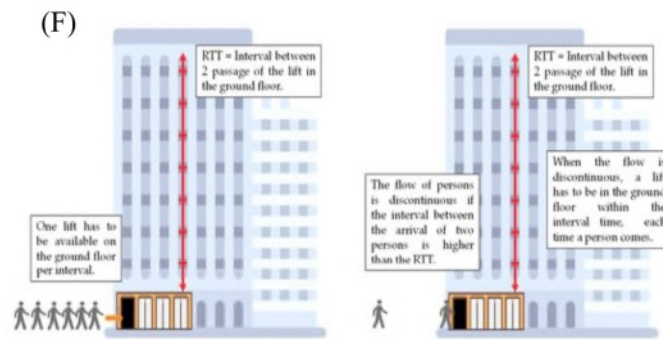
図3 (F) 歩行者風快適性分類の差異。色付きのカラーバーは歩行者風快適性クラスの差異を示し、グレースケールのバーは建物の高さの標高を示している [46]

多くの要因の中で、都市部の風プロファイルは屋外の熱的快適性に大きな影響を与える ([29], [30])。風プロファイル、すなわち空気力学は、建物の形態によって強く影響を受ける ([31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40])。Norouzi らは、歩行者の屋外熱的快適性を定量化するためのフレームワークを提案し、都市形態が風速に影響を与え、それによって都市の空気質が変化することを示した (図 3 A) [41]。Zhang らは、建物の平面アスペクト比や正面面積などの建物配置が風向に大きく影響することを発見した (図 3 B) [42]。Juan らは、高さ 400m の超高層ビル近くでの歩行者の風快適性に注目し、丸みを帯びた建物が鋭いエッジを持つ建物よりも風エネルギーの可能性が高いことを証明した (図 3 C) [43]。都市の土地利用も風速に影響を与える。Ku らは計算流体力学 (CFD) を用いて、北台湾の裸地、農業用池、そして高速道路沿いで高い風速が観察されることを示した (図 3 D) [44]。また、中国北部平原では、西に山脈を抱える地形の影響で、都市化が都市部の平均風速を減少させる一方、農村部では増加させた [45]。8 つの異なる都市形態パラメーターの中で、床面積比 (FAR)、正面面積指数 (FAI)、および空の見え率 (SVF) が風速に大きく寄与していた (図 3 E)。興味深いことに、Hågbo らは、都市形態の複雑性が歩行者風快適性の評価に必要な風向の数に影響を与えないことを発見した [46]。前段で議論した UHI 効果と同様に、都市部の風プロファイル、または都市空気力学は、土地利用や建物形態を含む多くの要因によって影響を受ける。都市部の風の空気力学的プロファイルに最も影響を与える要因を特定するために、さまざまなモデルや方法論が開発され、適用されている。研究モデルについて言えば、一般的に、都市空気力学の研究に適用されるモデルには 2 つのグループがある。次段では、この 2 つのモデルグループについていくつかの例を交えて説明する。



出典 M. Kham, J.-F. Semblat, P.-Y. Bard, and P. Dangla, "Seismic Site-City Interaction: Main Governing Phenomena through Simplified Numerical Models," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, no. 5, pp. 1934–1951, Oct. 2006, doi: 10.1785/0120050143.より引用

図4 (A) 最も単純なDAPPLEサイトモデル。建物が平らな屋根を持つ単純なブロックとして簡略化され、幾何学的スケール係数1:200で表現されている [48] (B) 簡易都市モデル。このモデルを用いて横方向の平均値が計算され、空間的に平均化された風速が決定された [49] (C) 渋谷の地形とその建物のフットプリントが色と陰影で示されている [50] (D) 世界的に観測される可能性のある簡略化された都市形状 [51] (E) 上部：2Dモデルの例、下部：3Dモデルの例 [52]



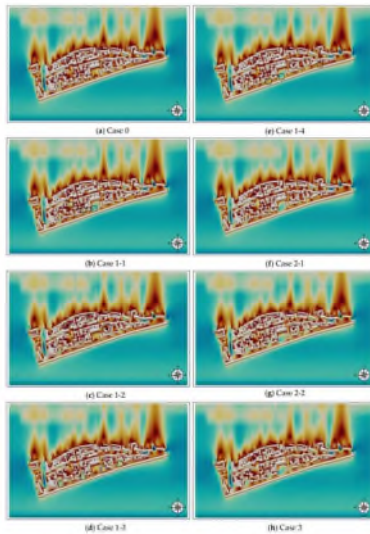
出典 S. M. Murshed, A. Duval, A. Koch, and P. Rode, "Impact of Urban Morphology on Energy Consumption of Vertical Mobility in Asian Cities—A Comparative Analysis with 3D City Models," *Urban Science*, vol. 3, no. 1, p. 4, Dec. 2018, doi: 10.3390/urbansci3010004.より引用

図4 (F) この研究で推定されたリフト1基あたりのリフトカーの数 [57]

最初のモデルは「簡略都市モデル」と呼ばれる。Robins らによると、簡略都市モデルは一般的に建物を表す立方体で構成される [47]。また、簡略都市モデルはケース固有であり、普遍的な適用が難しい、言い換えれば、その適用範囲が非常に限定的であることも指摘される。その名の通り、簡略都市モデルで考慮されるパラメーターもまた限られる。この議論は、いくつかの最近の研究結果によって支持されている。Carpentieri らは、複雑な 3 次元都市ロケーションを定義するための平均流れ、乱流、流れの経路を調べるために簡略都市モデルを適用した (図 4 A) [48]。彼らの実験は、交差点の上流地域で観察される流れの複雑さを強調することができたが、都市キャノピー内外の流れの強い相互作用を同一モデル内で考慮することが課題になった。Conceal らは、都市地域内および上空の平均風を空間的に平均化した簡略都市モデルを作成した (図 4 B) [49]。このモデルは、立方体粗さ要素の均一なキャノピー上での平均風プロファイルの風洞測定と、立方体粗さ要素の効果的粗さ長との比較を成功裏に行った。しかし、セクショナル抗力係数を無視すると、農村境界層に関連する風の減速と立方体粗さ要素のキャノピーの間で不一致が生じた。Yoshida らは、都市ブロックモデルと呼ばれる簡略都市モデルの一種を適用し、日本の渋谷地域の各建物ブロックをその形態に基づいて分類した (図 4 C) [50]。しかし、データとモデルの適用範囲の限界が、より広い地域での手法の適用を妨げると指摘した。Hang らは、理想化された都市モデル内の風の挙動を調査するためのシミュレーションを行った [51]。単純な円形モデルと長方形モデルを構築し、2 つの異なるモデル内での風の動態がそれぞれのモデルによって異なることを観察した (図 4 D)。その制約にもかかわらず、簡略都市モデルは理想化された特性を持ちながらも地震研究に適用されたこともある [52]。Martilli らは、実際の都市データから 2 次元 (2D) の簡略形態と 3 次元 (3D) の簡略形態を導出した [53]。2D 形態は建物の位置、形状、サイズを記述するデータを含むモデルであり、3D 形態は流体流シミュレーション、不動産管理、都市計画などを行うための意味的および幾何学的情報を含むモデルである (図 4 E) ([53], [54],

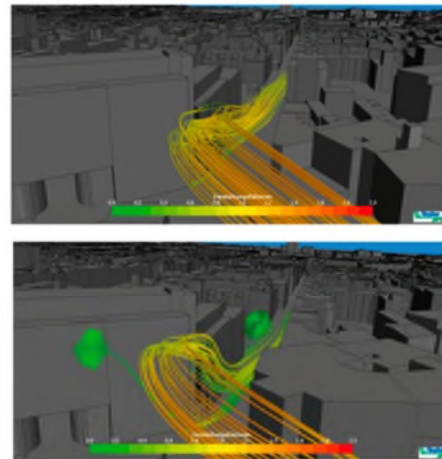
[55], [56])。これら 2 つのモデルの精度を評価するために、スカイビューファクターを実データと比較した [53]。その結果、2 次元形態が実データに近いスカイビューファクターを提供できることが分かった。ただし、Murshed らは、アジアの都市における垂直移動に関連するエネルギー消費についての洞察を簡略 3D モデルを用いて得ることができた (図 4 F) [57]。都市間での垂直移動によるエネルギー消費は大きく異なり、建物の形状や使用状況の影響を調査するための他のパラメーターを開く余地がある。これらすべての研究事例にもかかわらず、前述のように簡略都市モデルは、作成者が研究を容易にするために設定した厳しい条件に起因する課題に直面している。Ruá らが指摘するように、簡略都市モデルの適用は、モデルを構築するために利用可能な情報が限られているため、実際の都市を反映した実践的なケースでは機能しないことが分かっている [58]。

(A)



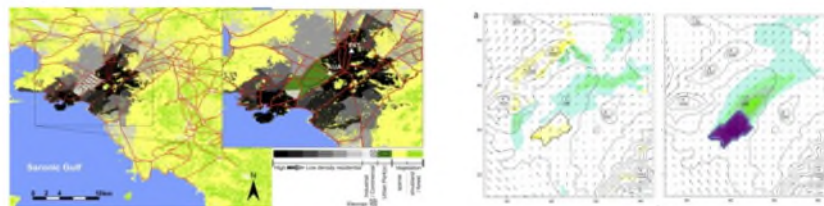
出典 Y. Huang, R. Tu, W. Tuerxun, X. Jia, X. Zhang, and X. Chen, "A Community Information Model and Wind Environment Parametric Simulation System for Old Urban Area Microclimate Optimization: A Case Study of Dongshi Town, China," *Buildings*, vol. 14, no. 3, p. 832, Mar. 2024, doi: 10.3390/buildings14030832.より引用

(B)



出典 W. Loibl, M. Vuckovic, G. Etminan, M. Ratheiser, S. Tschannett, and D. Österreicher, "Effects of Densification on Urban Microclimate—A Case Study for the City of Vienna," *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 511, Apr. 2021, doi: 10.3390/atmos12040511.より引用

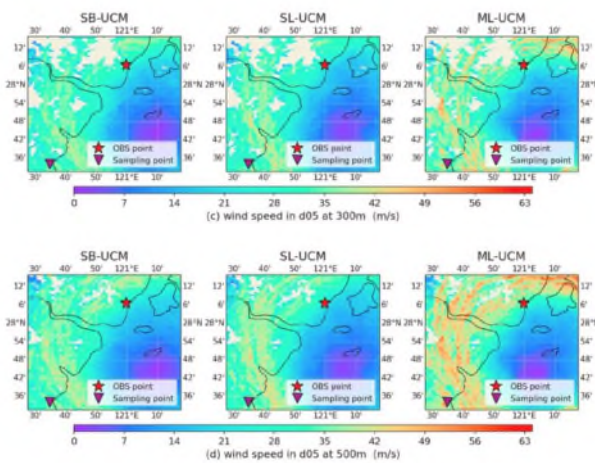
(C)



出典 G. Papangelis, M. Tombrou, A. Dandou, and T. Kontos, "An urban 'green planning' approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. A case study of Athens, Greece," *Landsc Urban Plan*, vol. 105, no. 1–2, pp. 174–183, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.12.014.より引用

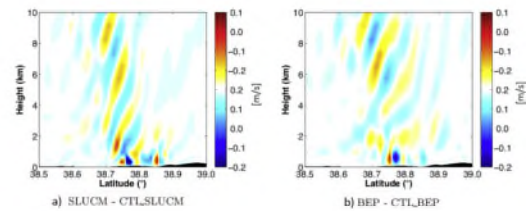
図5 (A) 風環境シミュレーションから得られた風速分布、風速、無風地域の割合、および風速分散の解析 [61] (B) 南西風がその強度を変化させ、強度が上から下にかけて増加する様子 [62] (C) 左：エレオナスを黒い四角で強調表示したアテネの地図。中央：エレオナスを工業地域とした場合の都市最高気温と、エレオナスを仮想公園に置き換えた場合の最低公園気温の温度差（昼間）。右：夜間の温度差 [64]

(D)



出典 Y. Zhang, S. Cao, L. Zhao, and J. Cao, "A case application of WRF-UCM models to the simulation of urban wind speed profiles in a typhoon," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 220, p. 104874, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jweia.2021.104874.より引用

(E)



出典 J. C. Teixeira, J. Fallmann, A. C. Carvalho, and A. Rocha, "Surface to boundary layer coupling in the urban area of Lisbon comparing different urban canopy models in WRF," *Urban Clim*, vol. 28, p. 100454, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100454.より引用

図5 (D) 異なる高度における風速場。SB-UCM、SL-UCM、ML-UCMはそれぞれ、スラブ型、単層型、および多層型UCM（都市キャノピーモデル）を表す [66]
(E) 垂直風擾乱。（左）SL-UCMと（右）多層建物効果パラメータ化（ML-UCMの一種）から導出されたデータ [67]

簡略都市モデルとは対照的に、実都市モデルや仮想都市モデルは、ビッグデータ、人工知能、モデリング、その他の技術、さらにはセンサーや低消費電力広域ネットワーク技術を活用して、物理的およびグローバルな動態をデジタル形式でリアルタイムに表現することで、簡略都市モデルよりもはるかに大規模なデータベースを備えている [59]。たとえば、都市情報モデリング（CIM）は、スマートシティ構築のための都市管理に適用される仮想的なエンティティおよびサブシステムである [60]。CIMを使用して、Huang らは UHI 効果の文脈において、Laozheng 地域で風環境のパラメトリックシミュレーションを実行するシステムを確立した [61]。彼らの研究では、建物密度が風速と負の相関を持つ一方で、無風地域の割合と正の相関を持つことが判明した（図 5 A）。Loibl らは CIM を用いて、ウィーンにおける密集化が微気候、気流、快適性、およびエネルギー需要に及ぼす影響を調査した [62]。彼らは、南西から風が吹く場合、特定の交差点での風速が密集化によって減少することを報告した（図 5 B）。ただし、図 5 A および B に示されるように、CIM がカバーできる範囲は都市全体を調査するには限られている。

気象学的により大規模なスケール（メソスケールなど）で都市シミュレーションが実行される場合、Weather Research and Forecast (WRF) モデルと呼ばれる別のモデルが適用される [63]。Papangelis らは、ギリシャのアテネ中央部近くに位置する

工業地域 Eleonas を仮想的に公園に置き換えた際の効果をシミュレーションで示した [64]。結果として、仮想的な公園の導入が既存の公園や海風とともに Eleonas を冷却するのに寄与することが予測された (図 5 C)。同様に、都市キャノピーモデル (UCM) は、統計的アプローチに基づいて地域の土地利用タイプをパラメータ化することで、地域の風場をシミュレートすることができる [65]。Zhang らは、WRF に統合された 3 つの異なる UCM を用いて台風の風プロファイルをシミュレートしようとした [66]。各モデルは、速度を含む台風の風プロファイルをさまざまな高度でシミュレーションする際に異なる挙動を示した (図 5 D)。Teixeira らは、単層および多層の UCM を比較して、WRF におけるリスボンの都市境界層の動態を評価した [67]。彼

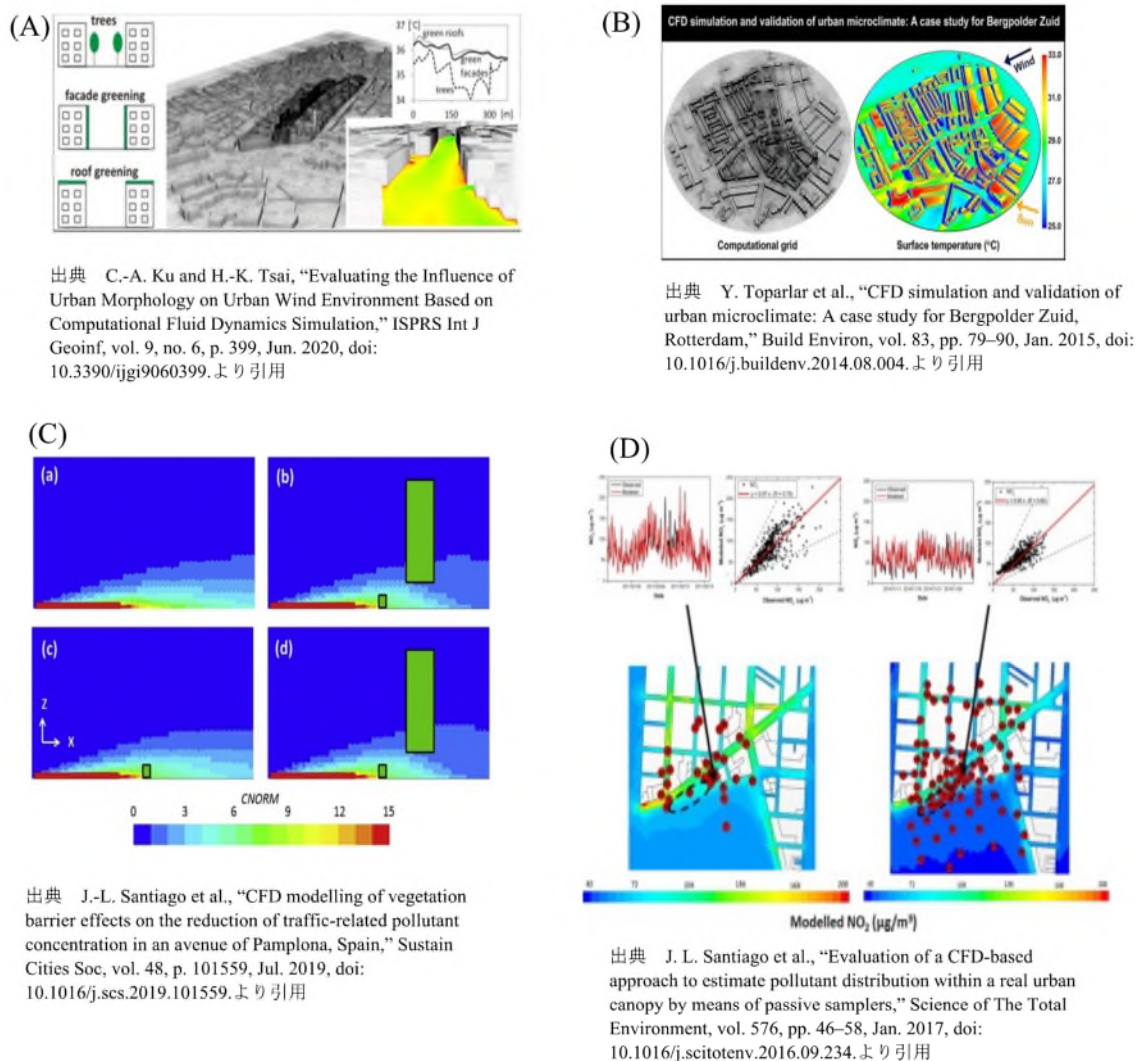


図6 (A) オランダ・アーネムにおける街路樹、壁面緑化、および屋上緑化の空気温度冷却効果の評価 [68] (B) Bergpolder Zuidにおける (左) 計算格子および (右) 計算された地表面温度 [73] (C) 垂直断面の正規化された濃度分布図: (a) BASE、(b) base、(c) 樹木なし、(d) 新しい樹木 [74] (D) シミュレーションデータ (赤い線) が実験データに重ねられたもの。 (左) 2011年のデータおよび (右) 2014年のデータ [75]

らは、多層 UCM が単層のものよりもリスボンの都市境界層をよりよく表現できることを発見した（図 5 E）。

前述のモデルは、いずれも計算負荷を軽減し、計算速度を向上させるために風の流れプロファイルに一定程度の近似を伴う。しかし、コンピュータの性能向上や専用ソフトウェアの増加により、数値流体力学（CFD）は風工学の分野で風場を調査するための一般的なツールとなっている（[68], [69], [70], [71], [72]）。Gromke らは、オランダのアーネムにあるストリートキャニオンで、3 つの異なる都市冷却方法を評価するために、CFD シミュレーションで使用する定常状態のレイノルズ平均ナビエーストークス（RANS）方程式を適用した [68]。結果に基づいて、街路樹が最も効果的に気温を下げることができ、その次にファサード緑化、最も効率が低いのは屋根緑化であることを結論付けた（図 6 A）。Toparlal らは、UHI 効果に苦しむ微気候を推定するためのアプローチの精度を測定するために、CFD シミュレーション手法の一種である 3D 非定常レイノルズ平均ナビエーストークス（URANS）シミュレーションを実施した [73]。この手法では、伝導、対流、放射による熱伝達も考慮された。この方法は実験データから平均偏差がわずか 7.9%であり、CFD が正確な都市微気候を生成できることを示している（図 6 B）。CFD を使用すると、大気汚染の移動もシミュレーションでき、Santiago らは、植生バリアが大気汚染に与える影響を調査した [74]。彼らの研究によれば、大型の生垣や大きな樹木のバリアは、都市内での空気力学的および沈着効果に影響を与える可能性があることが示された（図 6 C）。さらに、彼らはマドリード（スペイン）のような交通量の多い都市で、二酸化窒素（NO₂）の濃度マップを高解像度で計算する同様の研究を実施した [75]。結果として得られたマップは、トンネルや道路分岐点などのゾーンにおける不一致はあるものの、実験データから得られたマップと似た傾向を示した（図 6 D）。

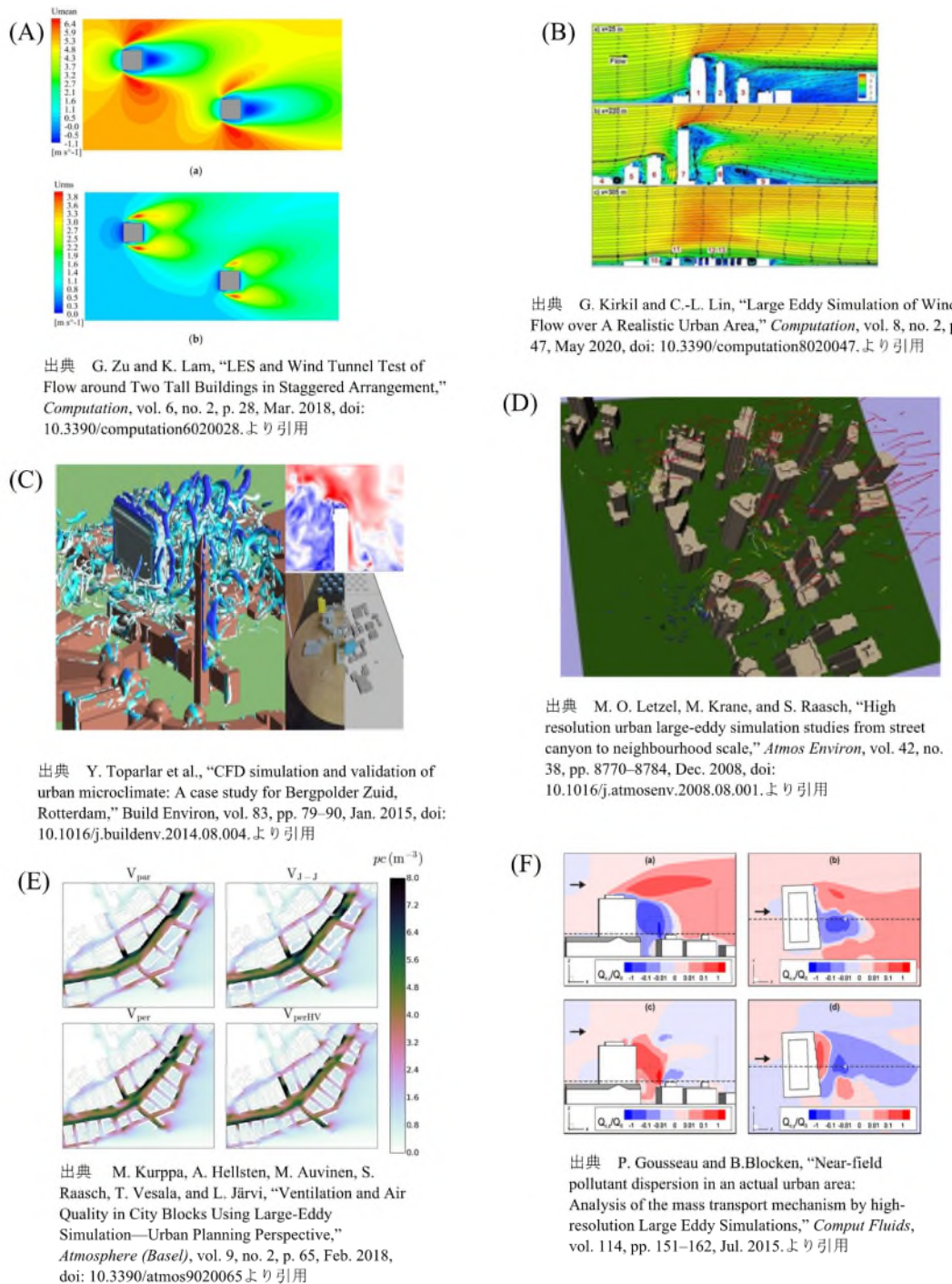


図7 (A) LESによって生成された建物高さの半分での時間平均された平均および二乗平均平方根の水平流れ場 [79] (B) 異なる形態の建物上の風の流線図で、正のy方向は南を指す [80] (C) バーミンガム大学キャンパス上の乱流流入プロファイルの予測 [73] (D) 新宿の風シミュレーションのスニペット (t = 1時間54分) [82] (E) 一般的な流入条件下で高さ4mにおける粒子濃度の40分間の時間平均 [83] (F) 無次元対流質量流束の等高線 (aおよびb: 流れ方向、c: 垂直方向、d: 横方向) [84]

その他の中でも、ラージ・エディ・シミュレーション (LES) を用いた CFD シミュレーションは、障害物内外での風の乱流性変動を効果的にシミュレートすることができる [76]。LES は高解像度で乱流を解析するモデルであり、流れを大規模渦 (エディ)

と小規模渦に分け、大規模渦を空間時間依存的に計算する一方、小規模渦はサブグリッドモデルとして扱う〔77〕,〔78〕。LES は様々な都市形態のスケールに適用可能である。Zu らは、交互配置された 2 棟の建物周囲の流れのプロファイルを調査するために LES を適用した〔79〕。シミュレーションでは、建物間隙の一貫した流れ、上流の尾流の横方向への振動、そしてそれが下流の建物まで蛇行する様子が再現された（図 7 A）。Kirkil らは、オクラホマシティのダウンタウン地域での風流れに関する高解像度の LES を実施した〔80〕。その結果、建物の高さおよびその分布が風流れのパターンに最も影響を与えることが示された（図 7 B）。Vita らは、バーミンガム大学キャンパスを模した現実的な 3D モデルにおける乱流流入と幾何学的モデルが流れのパターンに与える影響を分析した（図 7 C）〔81〕。彼らは、乱流プロファイルにおいて積分長さスケールが最も影響を受けるパラメータであることを特定したが、乱流特性が流入の平均風速や乱流強度にほとんど影響を及ぼさないことも確認した。Letzel らは、PALM（並列化されたラージ・エディ・シミュレーションモデル）を用いて、近隣スケールでのケーススタディを実施する適用性を示した〔82〕。彼らの研究では、新宿のパッシブ・ラグランジュ分散アニメーションを生成し、乱流流れの特徴、上流流れ、および間欠性を明らかにした（図 7D）。LES は、都市交通に関連する移動する大気汚染源の影響を研究するためにも利用できる。Kurppa らは、PALM を使用して、4 種類の異なる都市ブロック構造における大気汚染物質の移動をシミュレートした〔83〕。彼らの研究によれば、街路樹が汚染物質の拡散を複雑にし、大気の安定性が表面の粗さに関係なく汚染物質の濃度レベルを制御することが示された（図 7 E）。Gousseau らは、モントリオール市中心部での汚染物質の拡散を研究するために LES を適用した（図 7 F）〔84〕。驚くべきことに、彼らのシミュレーション結果は、孤立した単純な建物周囲の拡散ケースといくつかの類似性を共有していた。

CFD や LES などの手法を用いた試行錯誤により、都市を構成する建物の幾何学的パラメータを活用し、都市表面と大気の運動量、熱、水蒸気の交換量を精度よくモデル化する試みが行われてきた。

このような都市の上空大気との相互作用をモデル化する方法の一つとして、最後にバルク法を紹介する。バルク法は、都市域を巨視的に捉え、空気力学パラメータを用いて都市表面と大気の物理量のやり取りを表現する手法である〔85〕。空気力学パラメータには、例えば、建物に作用する抗力を定量化するバルク抗力係数、温度や物質濃度などの輸送を評価するバルクスカラー輸送係数、輸送特性を長さスケールとして表現する粗度長、障害物によって平均風速がゼロになる高さを示すゼロ面変位などが含まれる。

しかしながら、これまでの実験や数値モデル[40]では、都市の空気力学パラメータをモデル化する試みは行われてきたものの、その一般性を担保するために単純化されたモデル群が多用されてきた。実際の都市形態を忠実に反映した幾何模型を用いた研究は少なく、また、実街区を対象とした空気力学パラメータのモデルも限られた都市域に対してのみ適用されている。そのため、都市表面の詳細な幾何学的特徴が空気力学パラメータに与える影響を把握するためには、正確な都市幾何学データを用いてその関係を明らかにすることが求められる。

さらに、現状、日本における主要都市について、空気力学パラメータに大きく影響すると予想される都市建物の幾何学的パラメータがどのような統計的特性を持つのかについては十分に調査されていない。近年、衛星技術の発展に伴い、都市の 3D データベースを活用することで、都市を構成する代表的な幾何形状パラメータを明らかにすることが可能になりつつある。このように、実街区の 3D モデルを使用した研究が進展してきているが、持続可能な都市開発を実現するためには、街全体のような大規模な範囲を対象にしたシミュレーションの必要性が指摘されている。

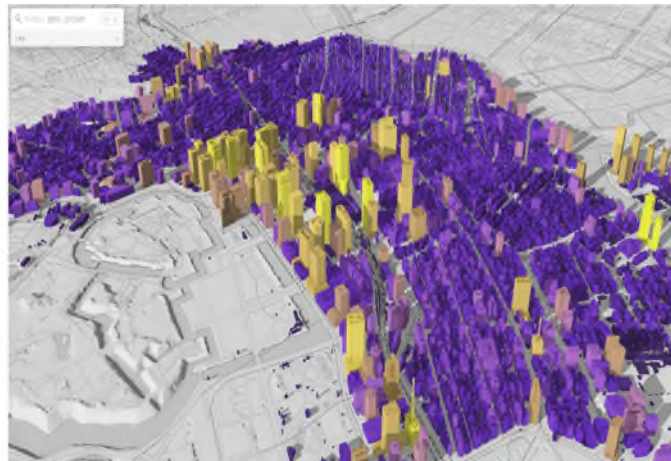
そこで本研究では、既往研究において提案された空気力学パラメータモデルの適用可能性を調査することを念頭に、その基礎的検討として、日本の主要都市における建物形状データベースである PLATEAU を活用し、都市幾何学データを抽出した。そして、登録された 217 都市のうち、東京、名古屋を含めた 106 都市の幾何特性を把握することを目的として統計解析を実施した。

2 方法

2-1 PLATEAU

本研究では、日本の都市形態データを取得するための唯一のデータソースとして PLATEAU を使用した。このプロジェクトは、都市形態データのオープンプラットフォームとして、2020 年に国土交通省が主導して開始された。このデータは、都市機能

(A)



出典 I. T. and T. Ministry of Land, “Project
PLATEAU | The Initiative of Digital Twin in

(B)

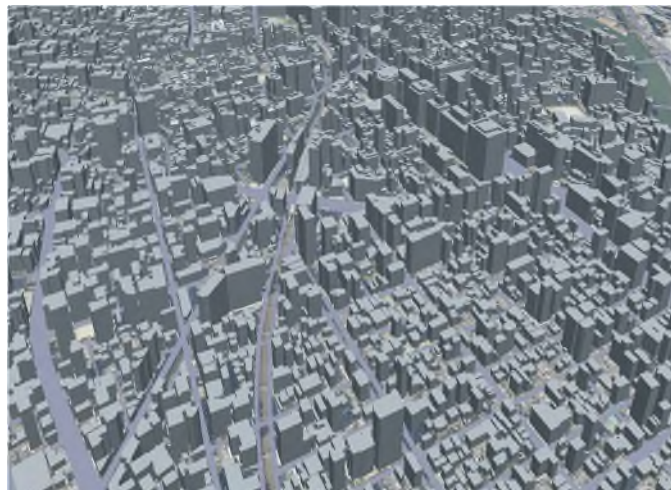


図 8 (A) PLATEAU VIEW を使用して、利用可能な都市形態データに基づき生成された三次元都市モデル [86] (B) PLATEAU VIEW によって生成された福岡市中央区の都市中心部の三次元都市モデル (PLATEAU VIEW_Chuo-ku, Fukuoka_Buildings & Roads_lod2)

の管理や統合、持続可能な都市開発のための三次元都市モデルの生成に利用可能である [86]。PLATEAU のデータは、専用に開発されたアプリケーション「PLATEAU VIEW」を使用して三次元モデルとして可視化できる (図 8)。

さらに、これらの三次元モデルは、図 9 に示されるように色分けすることが可能である。東京の新宿地区の建物は用途 (図 9 (A)) および高さ (図 9 (B)) に基づいて分類されている。同様に、福岡の博多地区の建物も用途 (図 9 (C)) および高さ (図 9 (D)) に基づいて色分けされている。また、PLATEAU のデータはシミュレーションを実行するためにも利用可能である。

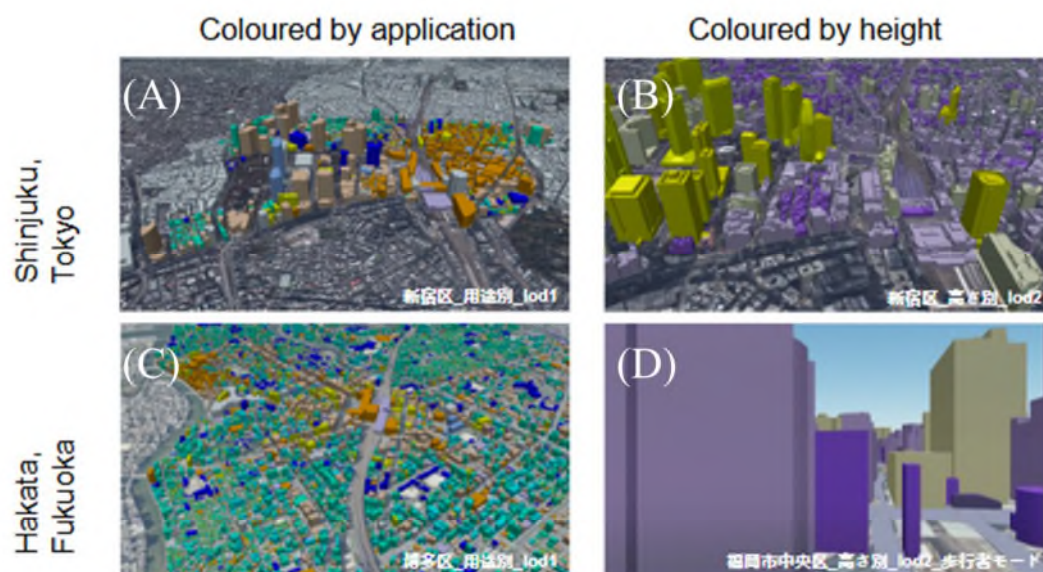


図9 東京・新宿の三次元都市モデル (A) 建物用途別および (B) 高さ別、ならびに福岡・博多の三次元都市モデル (C) 建物用途別および (D) 高さ別に色分けされたもの。すべてPLATEAUプラットフォームで入手可能なデータから生成された。

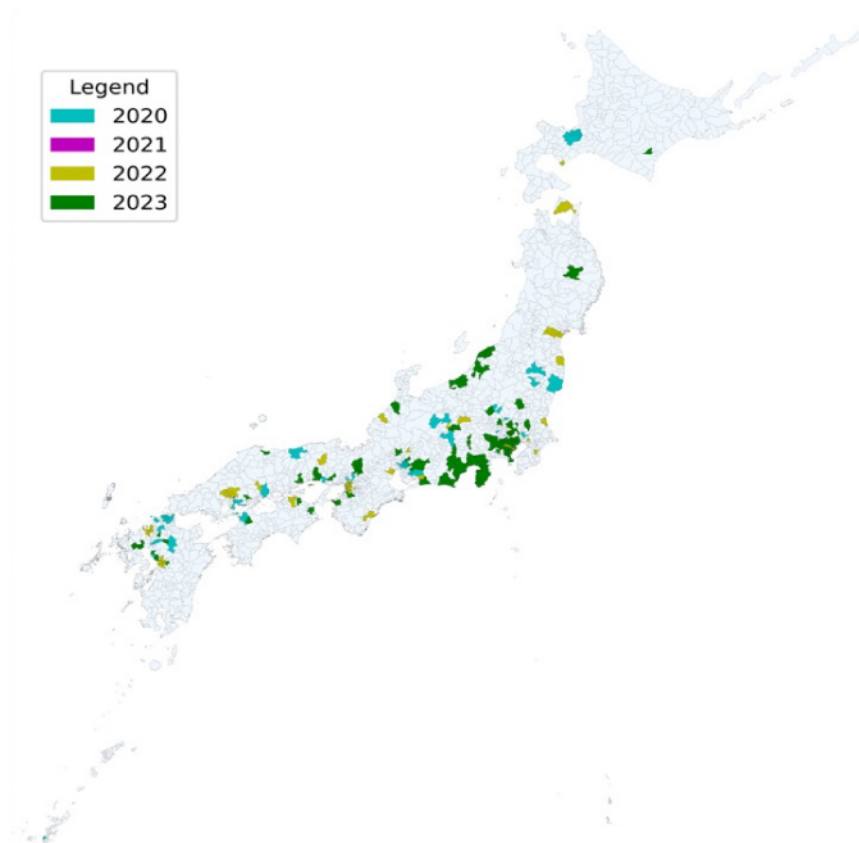


図10 過去4年間にPLATEAUに登録された都市を示す日本地図

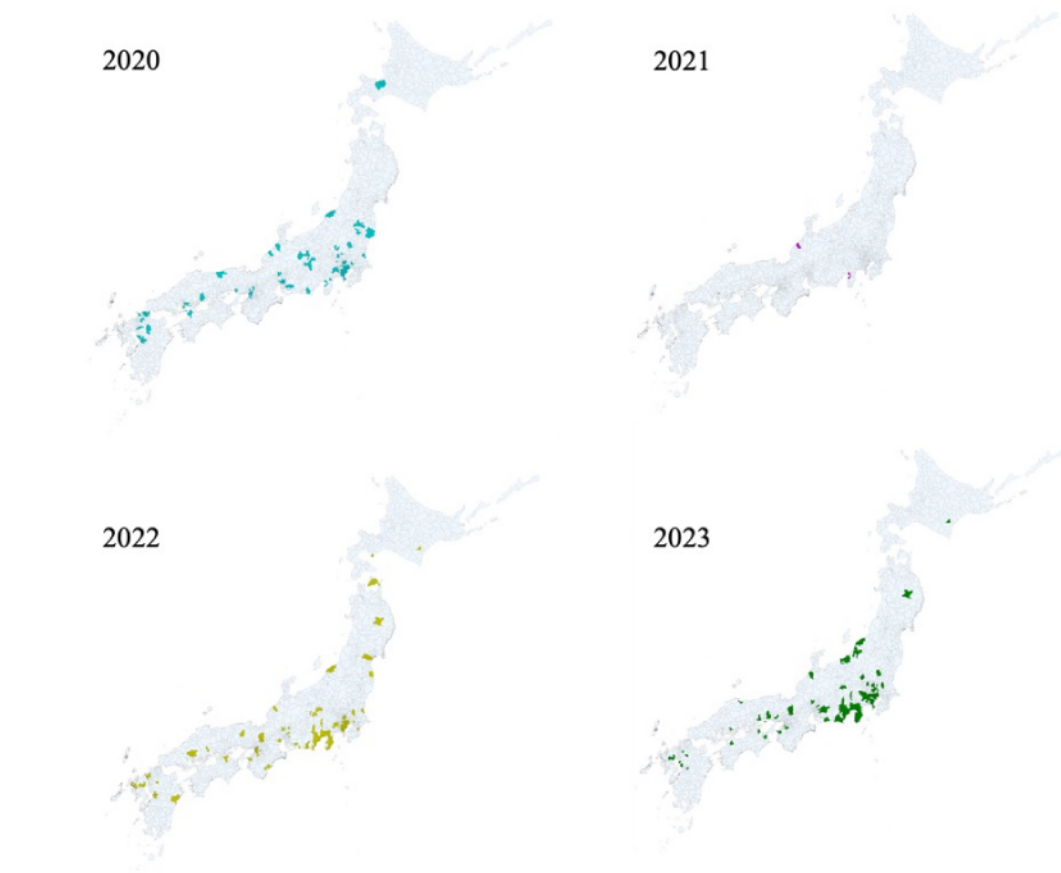


図11 PLATEAUに登録された都市の登録年度ごとの色分け

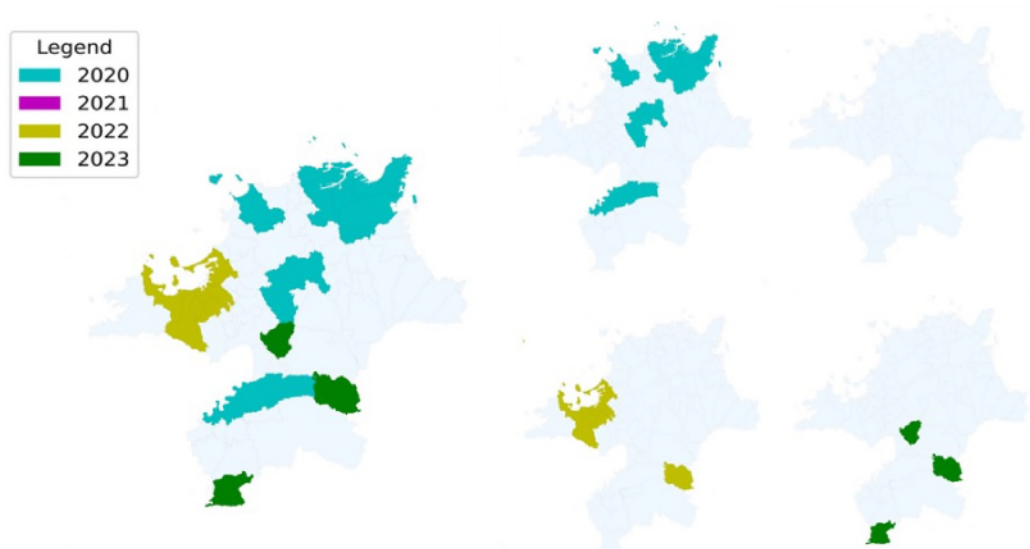


図12 福岡県におけるPLATEAUに登録された都市の登録年度ごとの色分け

PLATEAU のデータ量は依然として増加しており、図 10 には、本研究で使用したデータを基に生成された 2020 年以降に登録された都市が示されている。図 11 によれば、2020 年には 54 都市、2021 年には 56 都市、2022 年には 127 都市、2023 年には 196 都市が登録されている [87]。2027 年までには、利用可能な都市の数は 500 に達する見込みである。図 12 には、福岡県内の都市を登録年度ごとに色分けしたエリアが示されている。このデータは Python プログラミング言語と互換性があり、データ形式は CityGML 3.0 である。XML パッケージを使用することで、データの抽出および分析が可能である。

2-2 CityGML

2-2-1 概要

上記のように、PLATEAU プラットフォームから取得されたデータは、CityGML と呼ばれるデータ形式に準拠している [77]。CityGML (GML は Geography Markup Language の略) は、三次元都市モデリングにおけるオープンジオグラフィカルコンソーシアム (OGC) の標準に基づく初のオープンデータモデルであり、その高い幾何学およびセマンティック情報により、広く普及している ([88], [89])。また、このモデルにはデジタル地形モデル、建物や橋、トンネルを含む敷地、植生、水域、交通施設、信号機、交通標識、看板などの都市家具に関する有用な情報も含まれている [89]。このモデルは、すでに多くの研究で利用されている ([90], [91], [92], [93], [94])。

次のセクションでは、CityGML についてさらに詳細に議論する [95]。

2-2-2 CityGML ファイル名形式

表 1 CityGMLファイル名の構成要素

構成要素	説明
メッシュコード	標準地域メッシュコード
地物接頭辞	地物の接頭辞。表 3に示したいずれか
CRS	適用される空間参照系のEPSGコード。 「6697（日本測地系2011における経緯度座標系と東京湾平均海面を基準とする標高の複合座標参照系）」か「6668（日本測地系2011における経緯度座標系）」のいずれか。ほとんどが6697で、土地利用や都市計画区域などの高さを必要としないデータに関してのみ6668
オプション	さらに分割するときのオプション。 洪水浸水想定区域の場合は、洪水予報河川及び水位周知河川ごとにファイルを分割するため、河川コード（半角数字10桁）を記載する
op	オープンデータであることを示す「_op」という文字列そのもの

出典 <https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc03-1/> より引用

表 2 メッシュコード

種類	1辺の長さ	表記例	概要
1次メッシュ	約80km	5339	20万分の1地勢図の1図葉の区画。4桁のコード
2次メッシュ	約10km	5339-45	1次メッシュを経緯度それぞれ8等分したもの。2万5千分の1地勢図の1図葉の区画。8等分したものを下から0、1、…X、左から、0、1、…Yと番号を付け、「-XY」と付番する
3次メッシュ (基準地域メッシュ)	約1km	5339-45-25	2次メッシュを経緯度それぞれ10等分したもの。PLATEAUにおいて建築物が格納されている区画
2分の1地域メッシュ (分割地域メッシュ)	約500m	5339-45-25-1	3次メッシュを経緯度それぞれ2等分したもの。2分の1にしたものの左下の区域を「1」にして反時計回りに「1」「2」「3」「4」で付番する。4次メッシュとも呼ばれる
4分の1地域メッシュ (分割地域メッシュ)	約250m	5339-45-25-1-3	2分の1地域メッシュを経緯度それぞれ2等分したもの。2分の1にしたものの左下を「1」にして反時計回りに「1」「2」「3」「4」で付番する。5次メッシュとも呼ばれる

出典 <https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc03-1/> より引用

各 CityGML ファイルには名前があり、その形式は「メッシュコード_地物接頭辞_CRS_オプション_op」という事前定義された形式に従っている。ファイル名内の各部分の説明概要は表 1 に示す。メッシュコードは統計地図（jSTAT MAP）によって定義され、その例が表 2 に示す。地物接頭辞は CityGML データファイルが作成される

表 3 地物ごとの接頭辞

地物集合	接頭辞
建築物、建築物部分、建築物付属物、及びこれらの境界面、開口部	bldg
道路	tran
都市計画決定情報	urf
土地利用	luse
洪水浸水想定区域	fld
津波浸水想定	tnm
土砂災害警戒区域	lsld
高潮浸水想定区域	htd
内水浸水想定区域	ifld
都市設備	frn
植生	veg
地形（起伏）	dem

出典 <https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc03-1/> より引用

対象物の種類を表し、その一覧が表 3 に示す。建物の場合、地物接頭辞は「bldg」となる。

「CRS」は特定の CityGML データファイルで適用される空間参照系の EPSG コードを指す。多くの場合、CRS には 2 つの選択肢がある。1 つは 6697 で、これは日本測地系の経度および緯度の複合座標系と、東京湾の平均海水面を基準とした標高を使用する場合に適用される。もう 1 つは 6668 で、これは日本測地系 2011 における経度および緯度の座標系を指す。この場合、大多数の CityGML データファイルは 6697 が適用される。6668 は、CityGML ファイルが土地利用や都市計画地域に関連する高さデータを含まない場合にのみ適用される。

「オプション」は、さらに細分化が必要な場合にファイル名に付加される。例えば、洪水予測や水位通知に関連するデータファイルが、河川による洪水リスクのある地域に関連する場合、CityGML データファイルをさらに分類するために 10 桁の河川コードが付与される。CityGML ファイル名の最後の部分である「op」は、ファイルがオプションデータのみを含む場合に適用される。

2-2-3 CityGML フォーマットデータの構造

CityGML データファイルの全体構造は、次の 4 つのセクションで構成されている。XML 名前空間の定義、座標系および範囲情報、テクスチャと外観に関する情報、そして特徴情報である（付録 A 参照）。

CityGML データファイルでは、異なるモジュールの組み合わせによって要素名や属性の所属を識別するために XML 名前空間を適用している。この組み合わせは CityGML データファイル自体の「コア」情報である。このセクションは「core:CityModel」から始まる。構成するモジュールは 5 つある。GML モジュールは、建物を含むオブジェクトの位置と形状に関する GML 仕様を規定する。Core モジュールは CityGML の共通の特徴を定義する。BLDG モジュールは建物モデルを定義し、APP モジュールはオブジェクトのテクスチャを決定するモデルの外観を定義する。URO モジュールは、ドラフト版都市再生技術仕様に基づいて建物の属性情報を定義する。このデータは CityGML データと共に使用されて CityGML データファイルを構築するために適用される [96]。このセクションでは、各モジュールが定義される参照が付与され、付録 A に示す。

CityGML データファイルのコア情報を明示した後には、位置情報も定義される。この情報には、座標系の種類、経度、緯度、および高さの範囲が含まれる。このセクションは、付録 A に示されているように「gml:boundedBy」で始まり、終わる。座標系は「gml:Envelope srsName」で示され、「srsDimension」はデータがどの次元であるかを定義する。「gml:lowerCorner」と「gml:upperCorner」は、それぞれ緯度、経度、高度の最小値と最大値を示す。値の順序はデータファイル全体を通して変わらない。

座標に関するセクションの次には、CityGML データファイルで扱われるオブジェクトの外観と形状に関する情報のセクションがある。このセクションは「app:appearanceMember」で始まり、終わる。外観の詳細度は、詳細度レベル（LOD）によって異なり、現在では LOD0 から LOD4 までの範囲がある。その違いは図 13 に簡単に説明されている[97]。以下の段落では、LOD0 から LOD2 に焦点を当てる。



出典 <https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc01-2/> より引用

図13 LODによる詳細度の違い

LOD0では、オブジェクトは上から見た際の屋根または床の輪郭に基づいて投影される。それぞれ CityGML ファイル内で「bldg:lod0FootPrint」（床の輪郭）または「bldg:lod0RoofEdge」（屋根の輪郭）として設定される。

LOD1では、建物モデルは表面テクスチャ情報を実装したソリッドとして構築される。CityGML では、LOD1 は「bldg:lod1Solid」で設定され、表面テクスチャ情報は「gml:exterior」で提供され、ソリッドの面は「gml:Polygon」で定義される。

LOD2では、ソリッドオブジェクトの各面が壁、屋根、床として認識され、テクスチャに関する情報が付与される。さらに、建物を覆う天井、外部天井の下の床、外部および天井と屋根の穴を覆う部分にも情報を付与することが可能である。LOD2 は

「bldg:lod2Solid」で設定され、LOD1で適用された属性に加え、「bldg:GroundSurface」、「bldg:WallSurface」、「bldg:RoofSurface」を設定することでソリッドの面をCityGMLデータファイル内で区別である。表4には、ソリッドオブジェクトの面をどのように認識し、定義するかの概要を示す。

表4 LOD2で定義できる要素

要素	識別
bldg:WallSurface	建築物の外周を構成する面（外壁）
bldg:RoofSurface	主に建築物の上部を覆う構造
bldg:GroundSurface	建築物が地表に設置された面
bldg:OuterCeilingSurface	建築物の外側を覆う部分であり、天井としての機能を有する部分
bldg:OuterFloorSurface	建築物の外側を覆う構造の一部であり、床としての機能を有する部分
bldg:ClosureSurface	建築物の屋根、外壁、外部天井、外部床面に開口部が存在するが、開口部内の詳細なデータ作成が不要である場合に、開口部を閉じるために便宜上設けられた面

出典 <https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc03-3/>より引用

CityGML データファイルの全体構造の最後のセクションでは、建物そのものやその周囲に関する情報が提供される。これには、道路、地形、土地利用、都市計画の決定、災害リスク、都市施設、植生などが含まれる。各特徴の情報は、最終セクション内の小さなセクションで提供され、「core:cityObjectMember」で始まり、終わる。小セクションの数は、CityGML データファイルの名前で定義される単一メッシュ内で見つかる特徴の数と同じである。この中には建物に関する情報も含まれる。

次のセクションでは、特徴情報に焦点を当て、建物情報についてさらに詳しく議論する。

2-2-4 CityGML データ ファイルの建物データ

セクション 2-2-1 で述べたように、CityGML のデータは XML 形式で保存され、ユーザーがテキストエディタで開いて編集することができる。このセクションでは、[95]に基づき、機能情報に焦点を当てるために「札幌大通郵便局」を付録 B として参照し、CityGML データの構造を視覚的に示す例としても利用する。

表5 CityGML データファイルにおける各要素の記述

要素名	CityGML記述
建物高さ	<bldg:measuredHeight uom="m">29.4</bldg:measuredHeight>
地上階数	<bldg:storeysAboveGround>6</bldg:storeysAboveGround>
地下階数	<bldg:storeysBelowGround>1</bldg:storeysBelowGround>
建ぺい率	<gen:measureAttribute name="建ぺい率"> <gen:value uom="percent">80</gen:value>
容積率	<gen:measureAttribute name="容積率"> <gen:value uom="percent">800</gen:value>
フロア面積	<uro:totalFloorArea uom="m2">260.39</uro:totalFloorArea>
敷地面積	<uro:buildingFootprintArea uom="m2">260.39</uro:buildingFootprintArea>
屋根の面積	<uro:buildingRoofEdgeArea uom="m2">395.77</uro:buildingRoofEdgeArea>

出典 <https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc03-3/>より引用

CityGML データでは、各ファイルが gml ID によって定義される。付録 B では、この gml ID が「bldg.: Building」として示されるが、データファイルによっては「urf: DistrictsAndZones」と表示される場合もある。3次元都市モデルでは、UUID と特徴の接頭辞が適用され、建物に ID が付与される。更新時には gml ID が変更されること

があり、gml ID は各 CityGML データファイルに固有であるため、同じ建物に異なる gml ID が割り当てられる場合がある。

gml ID のセクションの後には、gml 名が続く。この gml 名には、建物に名前がある場合、その実際の名前が「gml: name」として示される。付録 B では、この gml 名は「札幌大通郵便局」と記される。

gml 建物名の後には、CityGML データにおいて「gen: stringAttribute」として示される一般属性が続く。一般属性の例として「building ID」があり、これは各建物に一意に付与される ID である。gml ID とは異なり、各建物には 1 つの building ID が割り当てられ、更新に関係なく変更される。building ID の形式は「市コード-建物-連番」と定義される。付録 B では、この building ID は「01100-bldg-344507」として、「gen: value」によって記載される。building ID 以外の一般属性は、PLATEAU の標準仕様や各都市の仕様によって定義される。付録 B の一般属性は、「01100_2020_specification_op.xlsx」や pdf ファイルを含む「札幌市、北海道の 3D 都市モデル拡張製品仕様」ファイルに記載される。これらはすべて CityGML ファイルに含まれている。

一般属性セクションの後には、建物情報に関するセクションが続く。このセクションには、建物の高さ、ジオメトリ、建物に付随する住所など、前のセクションよりも詳細な建物情報が記載される。要求される詳細度に応じて、このセクションには異なるレベルの詳細情報が記載される。このセクションの内容には、研究において重要な役割を果たす可能性のある属性がいくつか含まれている。表 5 は、そのようなパラメータの概要を示す。

CityGML データファイルの最終セクションは、i-都市再生技術仕様（i-UR）に関する情報を記載している。これは、都市計画基本調査中に収集された建物の属性や特徴を指し、「Building_buildingStructureType.xml」というコードリストに基づいてエンコードされる。例えば、耐火建築物には「613」というコードが付与されている。このコードリストの一部は付録 C に示されている。

2-3 理論的背景

各日本の都市の一般的な都市形態のプロファイルを把握するために、以下のパラメーターに関する基礎的なデータ分析を実施した。まず、各登録済みの日本の町における建物の高さ、位置、建物の数を含むデータファイルを(<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/plateau>) からダウンロードした。ダウンロードしたデータは、元の生データを処理するよりも効率的なデータ処理を可能にするために変換した。この処理の過程で、本研究のために以下のパラメーターを計算し、調査した。

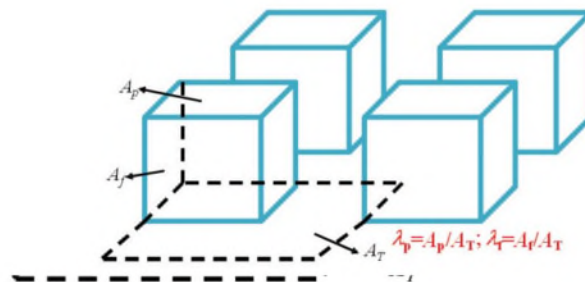
2-3-1 平均測定高さ

本研究では、各都市をサンプルとして認識した。そのため、以下の式における記号はすべてサンプルに対応している。PLATEAU データでは、建物の測定された高さ、絶対零高（海拔）として定義された標高が個別に登録されている。単純に測定された高さを用いることで、都市エリア jjj を離散化するために使用されたグリッドのセル iii 内の平均測定高さ j , $\overline{h_{ij}}$ を以下の式で算出した：

$$\overline{h_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_{ij}}{n_j} \quad (1)$$

ここで、 h は測定された建物の高さを示し、 n は都市 j における建物の総数を表す。

2-3-2 建物平面面積指数



出典 L. Chen, J. Hang, M. Sandberg, L. Claesson, and S. Di Sabatino, "The Influence of Building Packing Densities on Flow Adjustment and City Breathability in Urban-like Geometries," *Procedia Eng.*, vol. 198, pp. 758–769, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.07.127.
https://www.mlit.go.jp/en/toshi/daisei/plateau_en_2.htmlより引用

図14 平面領域指数 λ_p の定義 [99]

Grimmond と Oke は、建物平面面積指数 λ_p を、建物の平面面積 (A_p) と総床面積 (A_T) の比率として定義している [98]。図 14 は、この指数のグラフィカルな定義を示している。この値は、都市の密集度を定量化するためによく使用される。これは、街路の高さと幅の比率が街路内の流動パターンに影響を与えることが証明されているため、一般的に合意されている指標である [99]。

$$\lambda_p = \frac{A_p}{A_T} \quad (2)$$

2-3-3 標準偏差

平均建物高さ $\overline{h_{ij}}$ に基づいて、以下の式を用いて表面的および実際の値の標準偏差 S を計算することが可能である：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{ij} - \overline{h_{ij}})^2}{n_j - 1}} \quad (3)$$

ここで S は測定された建物高さを使用して計算される標準偏差である。高さの均一性の程度を示すものでもある。

建物の高さの分布を正規分布としてプロットできる場合、標準偏差はベルカーブの幅を表し、分布の特徴を象徴するものとなる。建物の高さの分布についてさらに洞察を得るために、追加のパラメータを計算した。

2-3-4 歪度

歪度（Skewness）は、正規分布曲線がどの方向に傾いているかを示す値である。歪度係数 τ は次のように定義される [100]:

$$\tau = \frac{\overline{h_{ij}^3}}{S^3} \quad (4)$$

ここで τ は地面からの建物の高さに基づいた歪度を示す。

2-3-5 尖度

尖度（Kurtosis）は、分布の尾部と中央ピークがその高さと厚さに関してどのように現れるかを測定する指標である [101]。尖度係数 κ は以下のように定義される [100]:

$$\kappa = \frac{\overline{h_{ij}^4}}{S^4} \quad (5)$$

2-3-6 確率密度関数 (PDF)

確率密度関数（PDF）は、特定の結果が発生する確率を定義する統計関数である。より正確には、PDF は、結果がデータセットの分布内で二つの基準の間に収まる確率を与える。例えば、建物の高さに対する PDF は、建物がその高さ範囲内に収まる確率を提供できる。通常、PDF 曲線はベル型であり、その下にデータセットの確率が描かれる。PDF を簡単に説明するために、このセクションではまず確率の数学的概念を紹介し、次に PDF に焦点を当てる。

数学的な言葉で言うと、結果は実数範囲 $R_x = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$ を持つ離散的な確率変数 X である [86]。この範囲は、前述の基準を表す。その後、 X が x_k である確率は次のように定義される：

$$P_X(x_k) = P(X = x_k) \text{ for } k = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

ここで、範囲は有限または可算無限である。各結果、または離散的な確率変数には異なる確率があり、その確率をそれぞれの離散的確率変数 X に対してプロットすることができる。得られる曲線は、離散的確率変数の確率分布を示す。これは、確率変数が相関しない、または互いに独立している場合に当てはまる。もし一連の確率変数が均等な確率を持つ場合、その確率分布を表す関数は累積分布関数（Cumulative Distribution Function, CDF）と呼ばれ、次のように定義される：

$$F_X(X) = P(X \leq x), \text{ for all } x \in \mathbb{R} \quad (7)$$

ただし、確率変数が連続的である場合、それは実数線上で重ならない区間の集合になる。したがって、特定の値を示し、その確率を定義することが不可能になる。つまり、

$$P_X(x) = 0 \text{ for } x \in \mathbb{R} \quad (8)$$

この問題を解決するために、連続的な確率変数の確率は、値の範囲を使用して記述する必要がある。これを数学的に表現すると、 $F_X(x)$ が区間 $(0, x]$ における累積確率であり、 $F_X(x + \Delta)$ が区間 $(0, x + \Delta]$ によって与えられる別の累積確率であると仮定する。この場合、連続的な確率変数 X が x と $x, x + \Delta$ の間にある確率は次のように表される：

$$P_X(x < X < x + \Delta) = F_X(x + \Delta) - F_X(x) \quad (9)$$

式(9)の両辺を Δ で割ると、

$$f_X(x) = \lim_{\Delta \rightarrow 0^+} \frac{P(x < X < x + \Delta)}{\Delta} \quad (20)$$

もし x で微分可能であれば、

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} = F'_X(x) \quad (31)$$

式(11)は、PDF の定義である。この関数はほとんどすべての $x \in \mathbb{R}$ において連続的である。PDF は確率の密度であり、その単位は単位長さあたりの確率である。PDF の条件については[102]に記述されている。

2-3-7 z スコア (z-score)

z スコアまたは z スケールは、値が平均値からどの程度、どの方向に逸脱しているかを示す偏差の度合いである。言い換えれば、それは値と平均値との間の標準偏差の数である。負の z スコアは、値が平均値より下であることを意味し、正の z スコアは値が平均値より上であることを示す。

3 結果

3-1 この調査に含まれる都市

モデルの適用可能性を評価する前に、可能な限り多くの都市からデータセットを構築することが基本的に必要である。そのため、図 10 に示すように、測定された高さに

関するデータを 106 都市から収集した。このセクションでは、それらの都市のうち 4 都市を例として取り上げる。すべての都市を含むデータについては、付録 D を参照してほしい。

3-2 建物の数

建物の数は重要なパラメータであり、その増加は密集した公共空間の換気に影響を与える可能性があるため選定された。[87]. 図 15 は、(A)札幌、(B)東京 23 区、(C)京都、(D)大阪における建物の数を示している。色分けは、建物の数を 10 段階に分類しており、色が濃いほどメッシュ内に登録された建物の数が多いことを示している。この色分けは、PLATEAU に登録された建物のサイズおよび絶対数に依存するため、分類の範囲は都市ごとに異なる。しかし、どの都市においても、分類の開始点である建物の最小数は 2 に設定されている。最大建物数は都市によって異なり、札幌では最大 3376 棟、東京では 6104 棟、京都では 6412 棟、大阪では 6988 棟である。札幌では、2098 棟以上の建物が存在する大規模な地域が 2 つある。1 つは緯度 42.97 から 43.05、経度 141.3250 から 141.5000 の間に位置し、もう 1 つは緯度 43.0600 から 43.1700、経度 141.1875 から 141.4500 の間に位置している。さらに、緯度 42.9500 から 43.0000、経度 141.3000 を通る地域にも 2098 棟以上の建物が存在する。しかし、緯度 43.1125、経度 141.3375 付近の地域では、周囲に比べて建物数が少ない。また、緯度 42.9875、経度 141.4625 付近でも周囲より建物数が少ない地域が存在する。東京では、市の南東部では建物数が 2 から 1358 棟である一方、それ以外の地域では 1358 棟以上が見られる。市域は北西方向に広がり、U 字型を形成しており、5426 から 6104 棟の建物がある地域が見られる。緯度 35.6500 以東、経度 139.7500 以南では、他の地域に比べて建物数がかなり少ない。京都では、3563 棟以上の建物が存在する地域は緯度 34.9750 から 35.1000 の間に位置している。5699 から 6412 棟の建物がある地域は、緯度 35.0000 以上の経度 135.7500 に沿って見られる。大阪では、5435 から 6988 棟の建物が存在する地域が、緯度 34.6750 以下に多く見られるが、緯度 34.7170 から 34.725、経度 135.5500 から 135.5600 の間を除くと、上記の地域よりも建物数が少ない。市域は経度 135.4300 以東に広がっている。

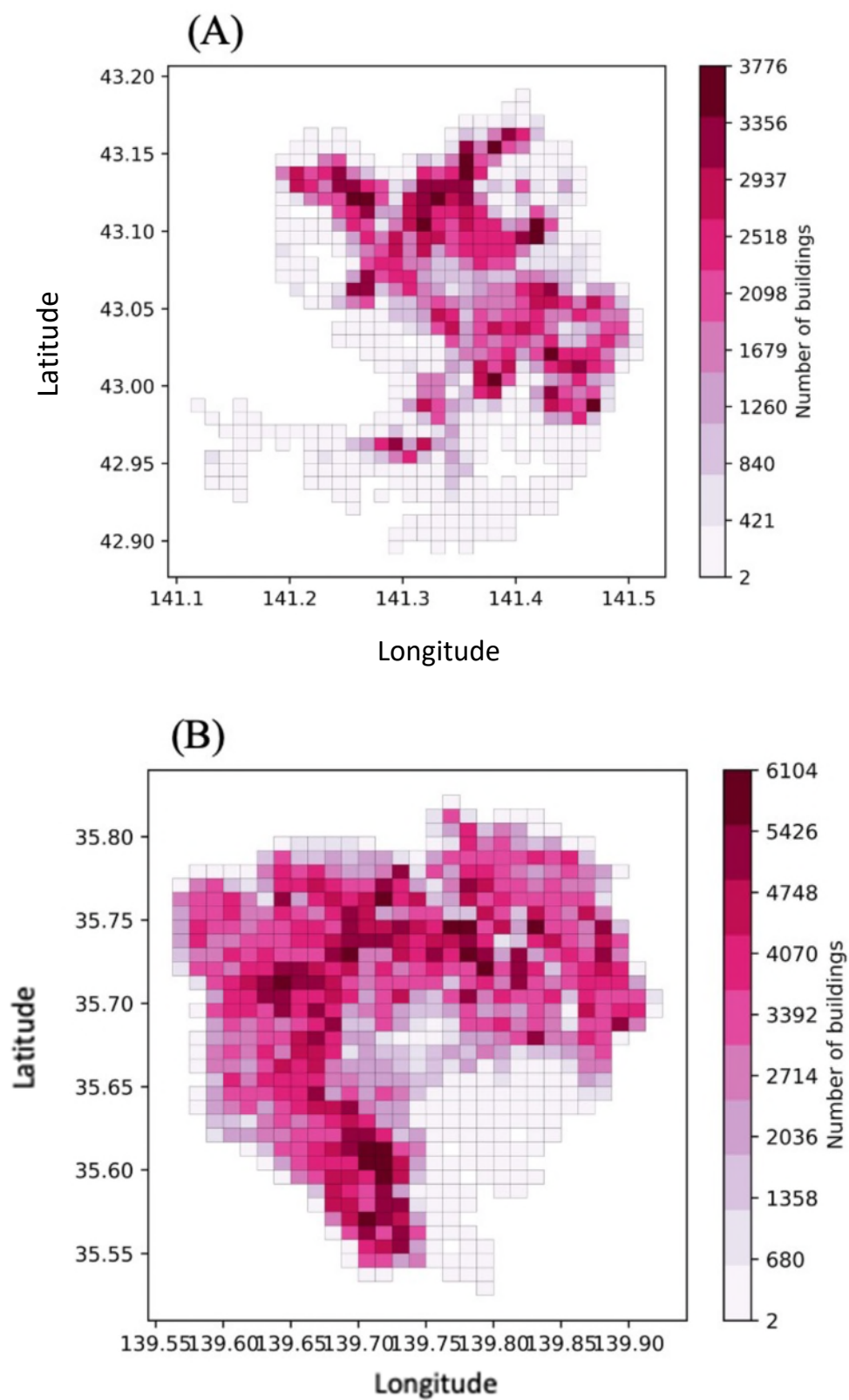


図15 (A)札幌と(B)東京23区で登録された建物の数

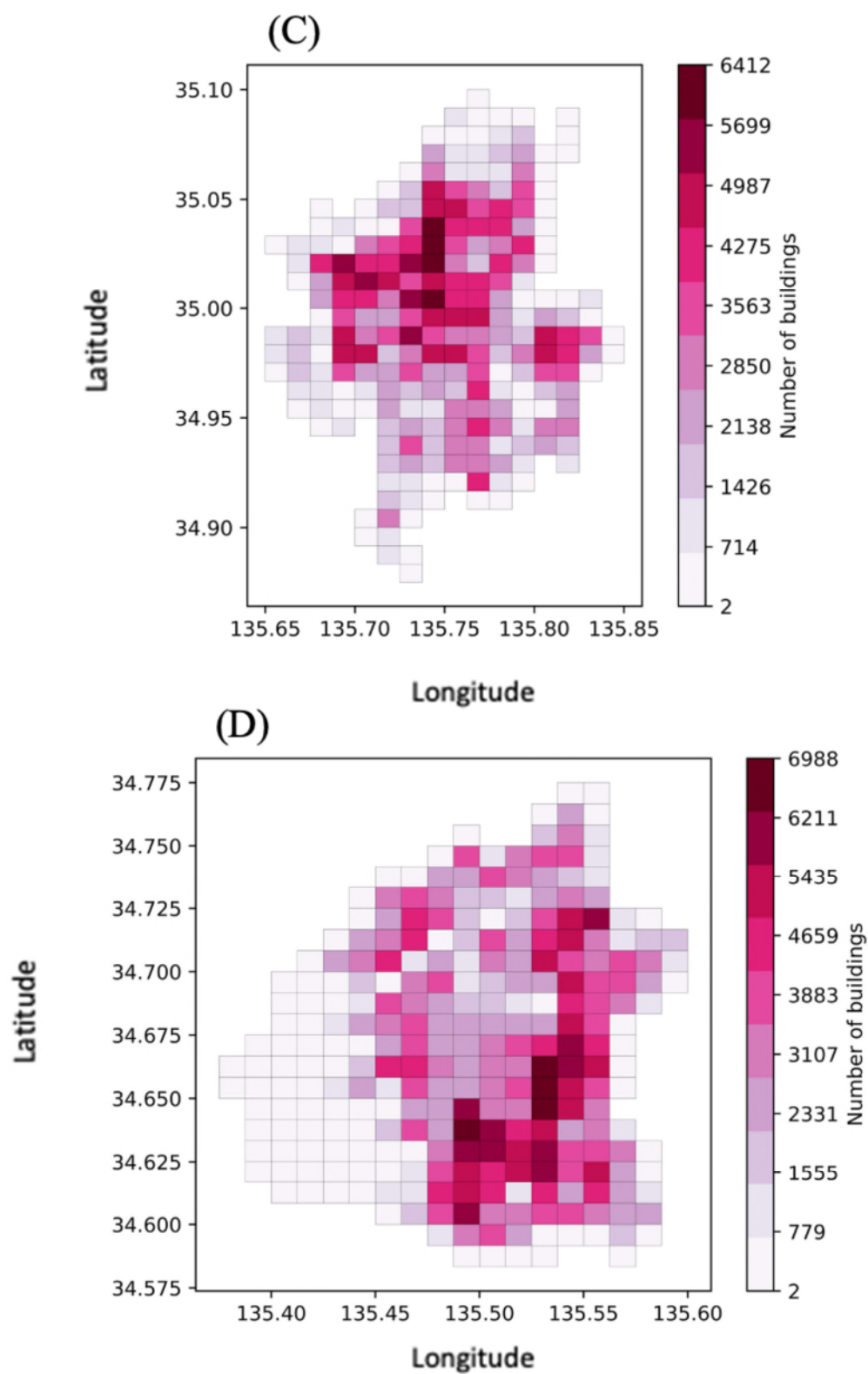


図15 (C)京都と(D)大阪で登録された建物の数

3-3 平均測定高さ

図 16 は、(A)札幌、(B)東京 23 区、(C)京都、(D)大阪における平均建物高さを示している。この平均建物高さに基づいて、標準偏差、最大値、最小値が計算された。どの都市においても、平均建物高さの分類は 0～40m の範囲で実施されている。札幌では、平均建物高さが 28～36m の地域が、緯度 43.05～43.175、経度 141.3375～141.3625 の間に見られる。この中心部を囲む形で、平均建物高さが 8～20m の地域が、緯度 43.0125～43.1125、経度 141.2500～141.4750 の間に広がっている。その周囲には、平均建物高さが 4～8m、時折 8～16m の地域が多く存在している。東京では、平均建物高さが 36～40m の地域が 1 箇所だけあり、それは緯度 35.6833～35.6917、経度 139.7500～139.7625 の間に位置している。この中心部を囲む形で、20～36m の地域が広がり、その外側には 8～20m、さらにその外側には 4～8m の地域が同心円状に展開している。また、緯度 35.6333～35.6500、経度 139.7625～139.7750 の範囲には、平均建物高さが 32～36m と 0～4m の地域が存在している。京都では、全体的に平均建物高さが 4～8m または 8～12m の地域が多い。ただし、緯度 35.0333～35.0417、経度 135.8000～135.8125 の範囲には、28～32m の平均建物高さを持つ唯一の地域がある。もう一つの例外として、緯度 34.9583～34.9667、経度 135.6875～135.7000 の範囲には、0～4m の平均建物高さを持つ地域がある。大阪では、平均建物高さが 24～28m の地域が 2 箇所あり、それぞれ緯度 34.6967～34.6983、経度 135.5000～135.5250 で区切られている。この地域は、外側に向かうにつれて、16～24m、12～16m、最終的に 4～8m の地域に囲まれている。ただし、例外的に平均建物高さが 0～4m の地域が 2 箇所存在する。一つは、緯度 34.6500～34.6517、経度 135.4000～135.4125 の範囲であり、もう一つは、緯度 34.6733～34.675、経度 135.3875～135.4000 の範囲である。

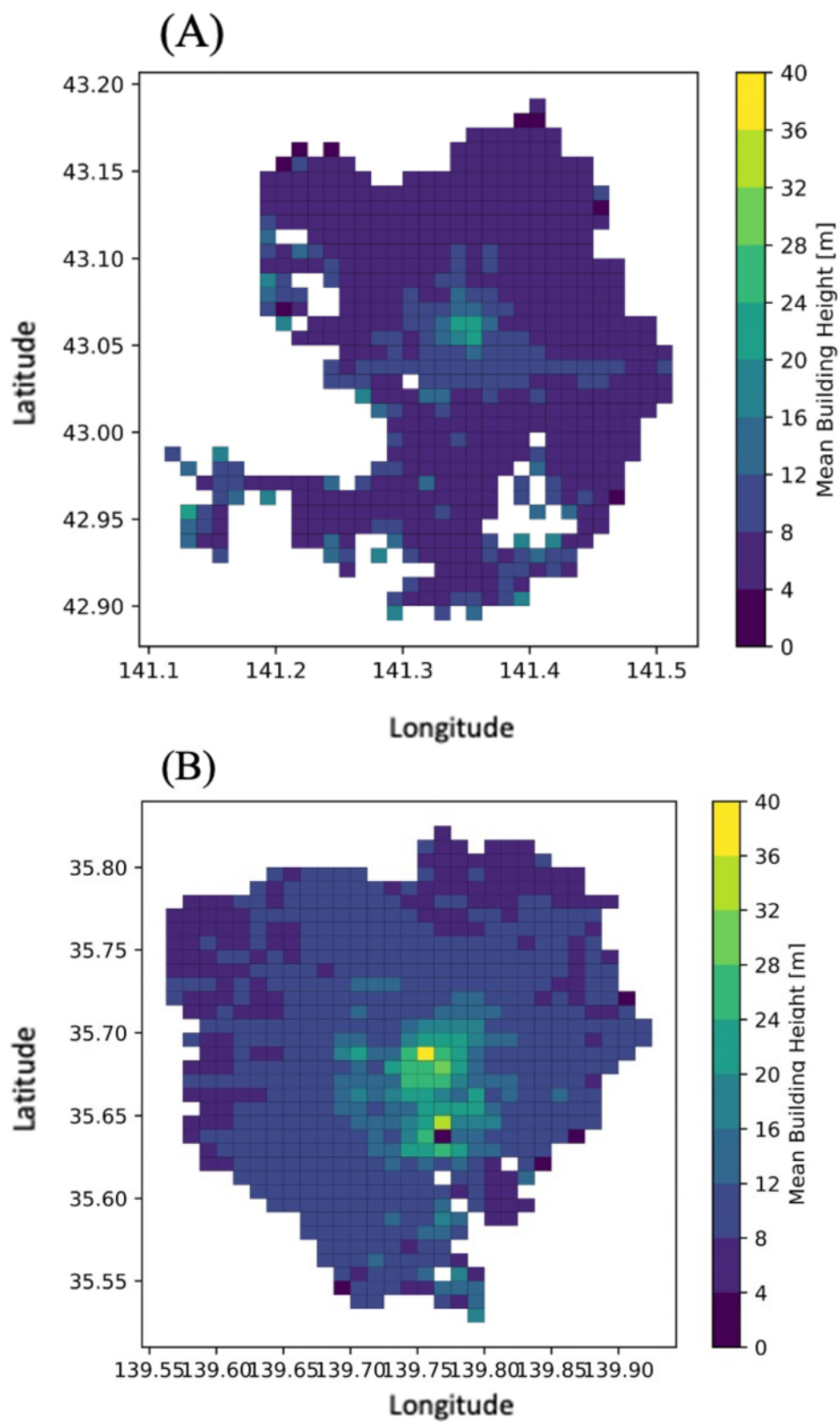


図16 (A)札幌と(B)東京23区で登録された平均測定高さ

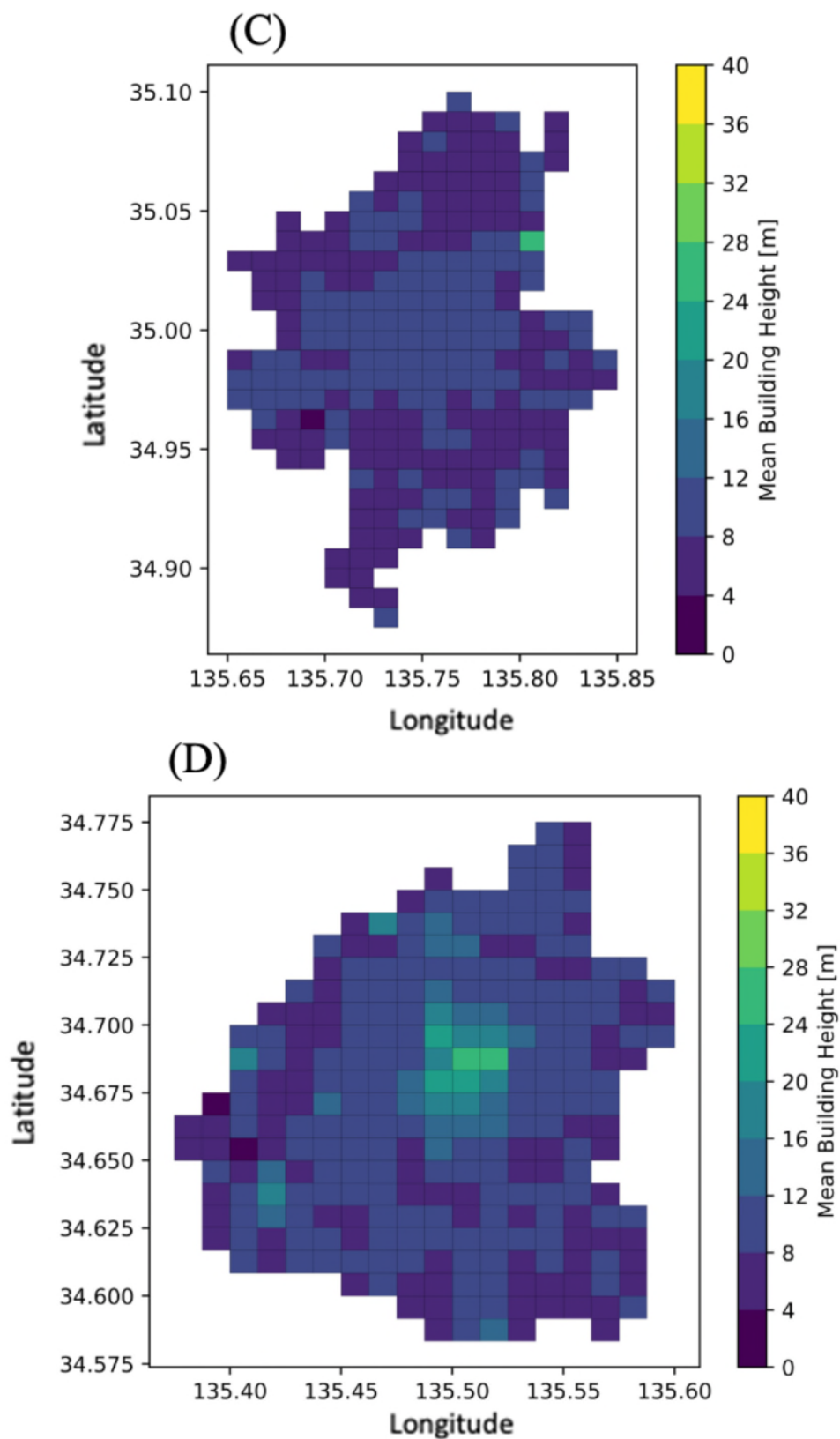


図16 (C)京都と(D)大阪で登録された平均測定高さ

3-4 建物高さの標準偏差

図 17 は、4 都市における測定された建物高さの標準偏差を示している。分類範囲は 0 から 30 であり、全ての都市で 3 ごとに分類が行われている。札幌市の大部分は、標準偏差が 3～6 または 6～9 の範囲内である。しかし、標準偏差が 21～24 の地域が、緯度 43.1125～43.1750 および経度 141.3375～141.3625 の間に見られる。この地域は、標準偏差が 15～21、9～12、6～9、3～6 の範囲の地域に同心円状に囲まれている。東京では、札幌市と同様に、ほとんどの地域が標準偏差 3～12 の範囲内に収まる。ただし、標準偏差が 21～30 の地域が、緯度 35.6167～35.6917 および経度 139.6875～139.8125 の間に多数存在する。この範囲は、緯度 35.6083 を境に 2 つの領域に分けることができる。京都では、標準偏差が 15 を超える地域は見られず、最大で標準偏差 15 が、緯度 34.9083～34.9167 および経度 135.7625～135.7750 の範囲内で確認される。また、標準偏差が 9～12 の地域は 1 か所のみで、これは緯度 34.9833～35.0167 および経度 135.7500～135.7750 の範囲内に位置している。この地域は、標準偏差が 3～9 の地域に囲まれている。大阪市の全体では、標準偏差が 3～9 の範囲に収まる地域が多く、標準偏差が 0～3 の地域も確認できる。標準偏差が 27～30 の範囲に該当する地域は 2 か所ある。1 つは、緯度 34.6267～34.6283 および経度 135.4125～135.4250 の範囲内で、もう 1 つは緯度 34.6983～34.7000 および経度 135.4875～135.5000 の範囲内である。前者は、標準偏差が 3～18 の範囲の地域に囲まれており、後者を囲む地域は標準偏差が 9～27 の範囲である。

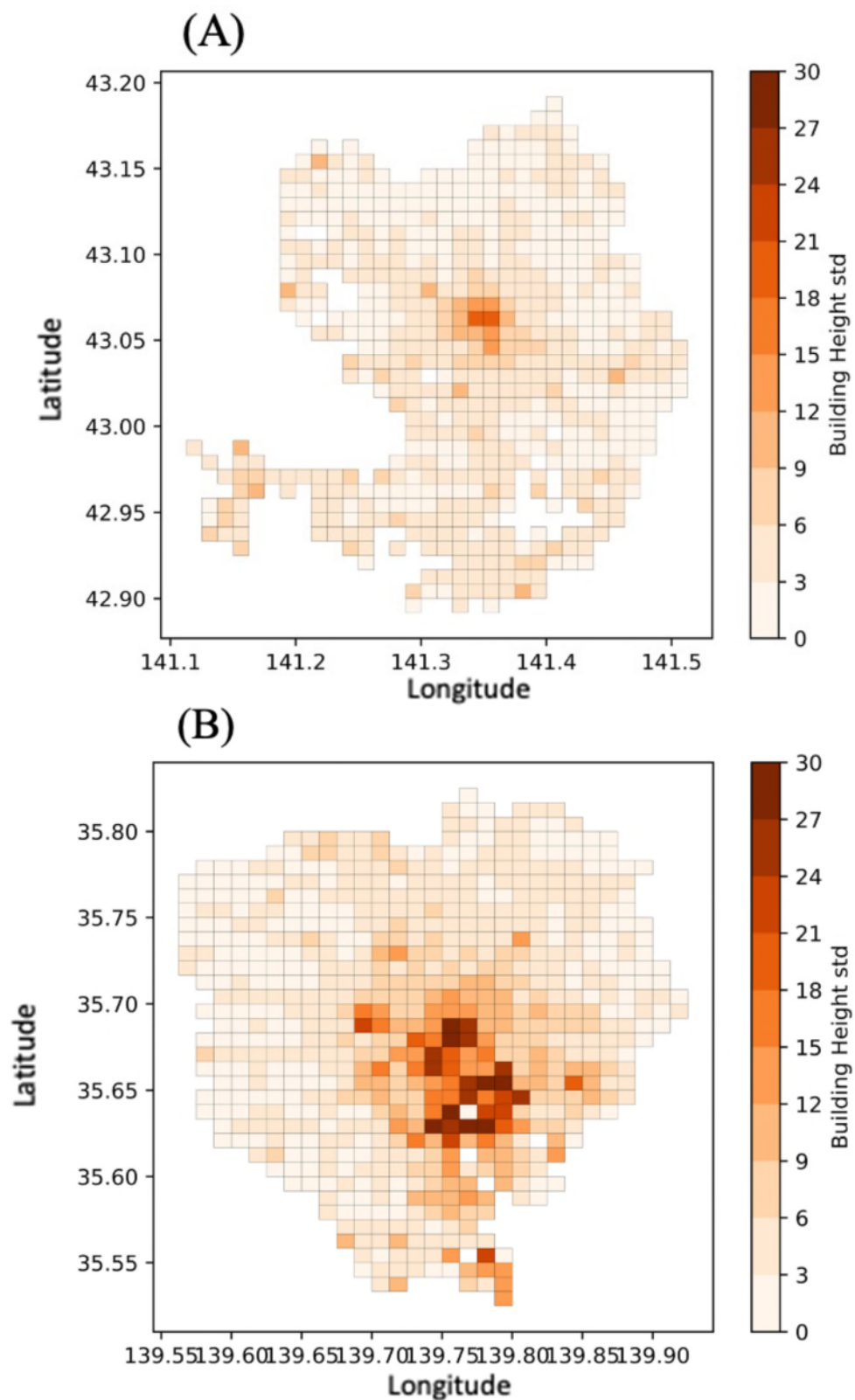


図17 (A)札幌と(B)東京23区で測定された建物高さの標準偏差

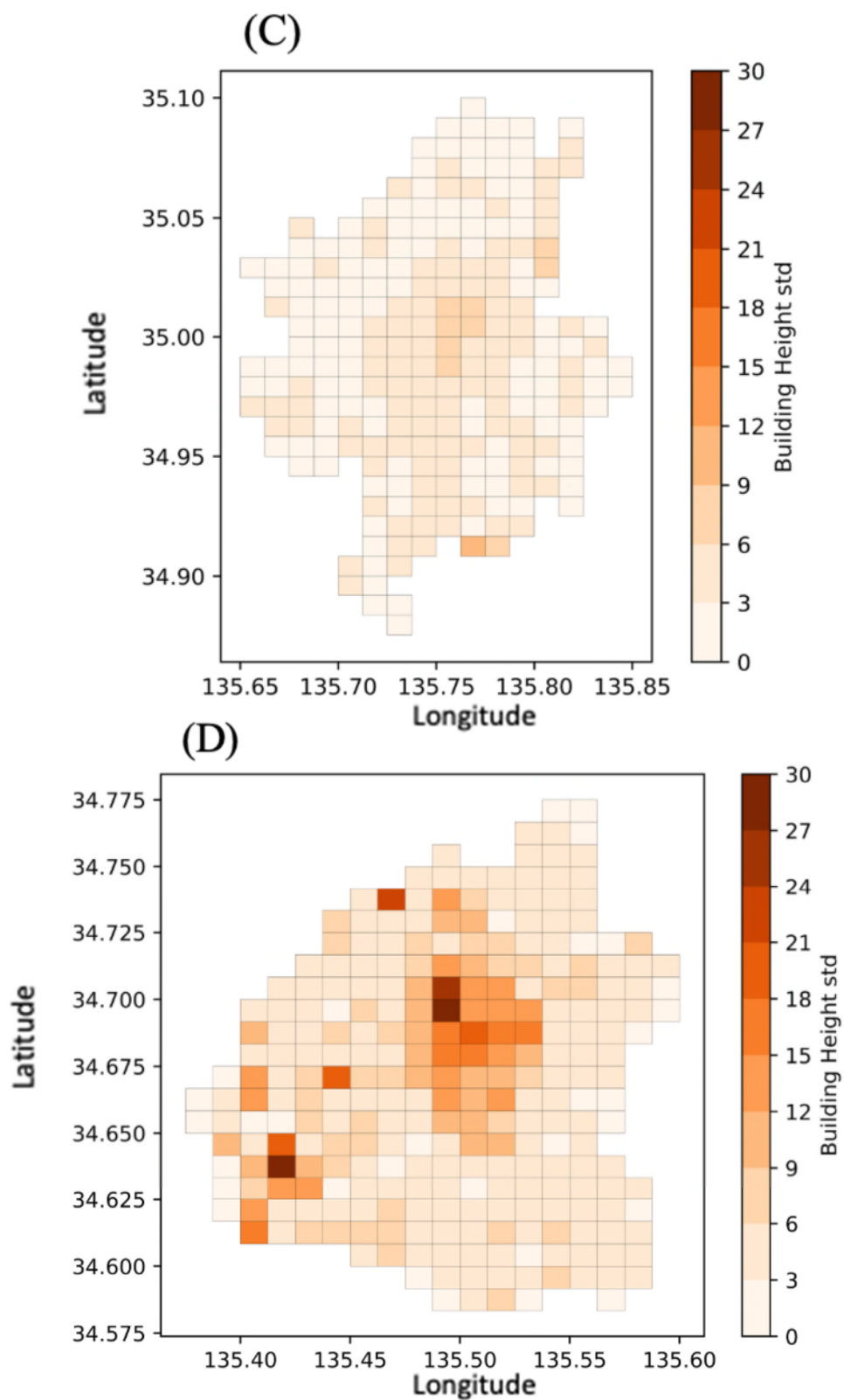


図17 (C)京都と(D)大阪で測定された建物高さの標準偏差

3-5 建ぺい率

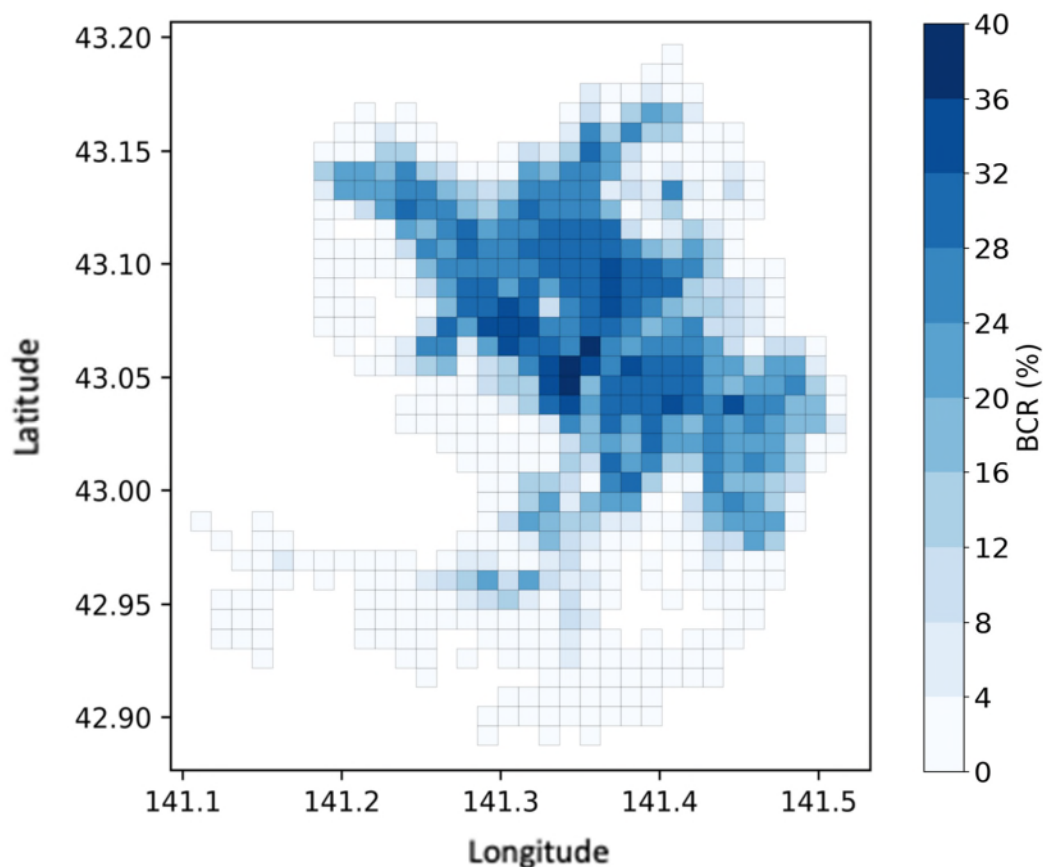


図18 札幌市内における区画ごとの建物敷地面積

図 18 は、予備結果として札幌で計算された建ぺい率を示している。指数の範囲は 0% から 40% であり、色分けは 4% ごとに变化する。全体として、緯度 43.0500 および経度 141.5500 に近づくにつれて建ぺい率が増加する。緯度 42.9875 から 43.1125、経度 141.5375 から 141.5500 で囲まれた区域、および緯度 43.1750 から 43.1125、経度 141.5500 から 141.5625 で囲まれた別の区域は、建ぺい率が 36% から 40% の間で最も高い。建ぺい率が 28% から 32% の範囲にある区域は、緯度 43.1000 と経度 141.5500 が交差する点の周辺に広がっている。同じ指数範囲の別の区域が、緯度 43.0500 と経度 141.4000 が交差する点の周辺にも存在する。建ぺい率が 12% を超える区域は、緯度 43.2125 まで北方向に広がっている。緯度 42.95 より南では、建ぺい率が 12% 未満の区域が主に札幌を占めている。

3-6 確率密度関数 (PDF)

図 19 は、札幌、東京 23 区、京都、大阪における計測建物高さに対する確率密度関数 (PDF) のヒストグラムを示している。このヒストグラムでは、建物高さを 1m ごとに区分けし、その分布を表している。全体的に、各都市のヒストグラムは正の歪度を持ち、高い建物高さの方向に裾が広がる傾向を示している。札幌市では、建物の高さは 2~35m の範囲内に分布している。その中で最も確率密度が高い建物高さは 6~7m であり、確率密度は 0.25 を超える。一方で、平均値は 7.15m である。次に高い確率密度を持つ高さは 7~8m で、確率密度は 0.15 を少し下回る。また、3~4m の高さも比較的確率が高く、確率密度は 0.10 をわずかに上回る。東京 23 区では、建物の高さは 0.10 ~332.90m の範囲に分布している。43~44m の範囲では建物が存在する確率はないものの、44~45m の範囲では建物が存在する可能性がある。最も確率密度が高い建物高さは 7~8m で、確率密度は 0.25 を超える。次に高い確率密度を持つ高さは 6~7m で、確率密度は 0.15 を上回る。三番目に確率が高い高さの範囲は 9~10m であり、確率密度は 0.10 未満である。平均高さは 9.40m である。京都市では、計測建物高さの範囲は 0.40 ~136.0 m と、4 都市の中で最も狭い。しかしながら、最も確率が高い建物高さは 8~9m で、確率密度は 0.25 に少し届かない。次に確率密度が高い高さは 7~8m で、確率密度は 0.15 を上回る。三番目に高い高さの範囲は 9~10m で、確率密度は 0.15 を少し下回る。平均高さは 8.19m である。大阪市では、建物の高さの分布範囲は 0.70~328.40m と最も広い。この中で最も確率密度が高い建物高さは 7~8m であり、確率密度は 0.175 を超える。次に高い確率密度を持つ高さは 6~7m で、確率密度は最も高い範囲よりは低いですが、それでも 0.175 を上回る。三番目に確率が高い高さの範囲は 12~13m で、確率密度は 0.15~0.175 の間にある。また、3~4m の高さも高い確率を持ち、確率密度は 0.050~0.075 の間である。平均高さは 9.22m である。

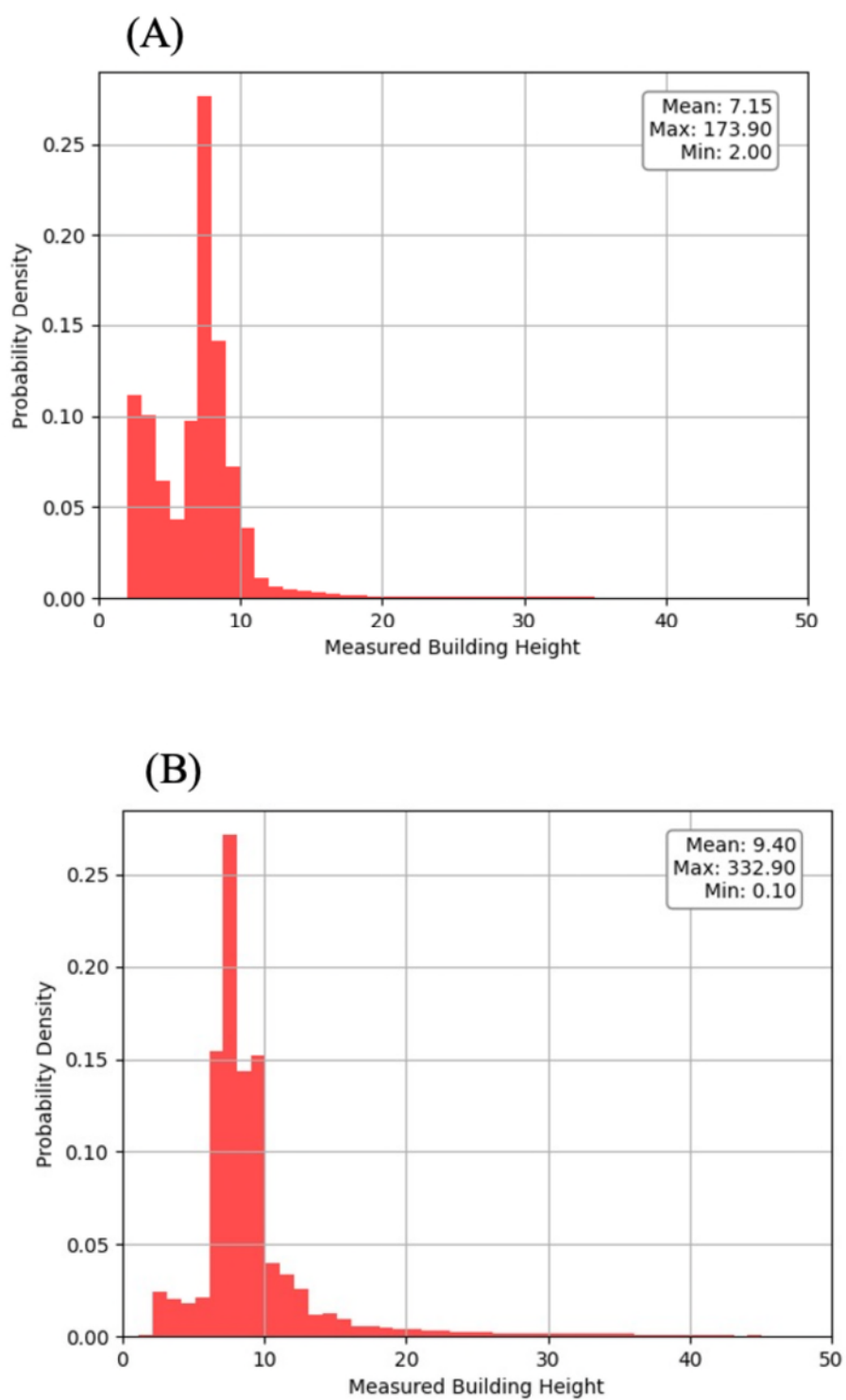


図19 (A)札幌と(B)東京23区で測定された建物高さの確率密度を示すヒストグラム

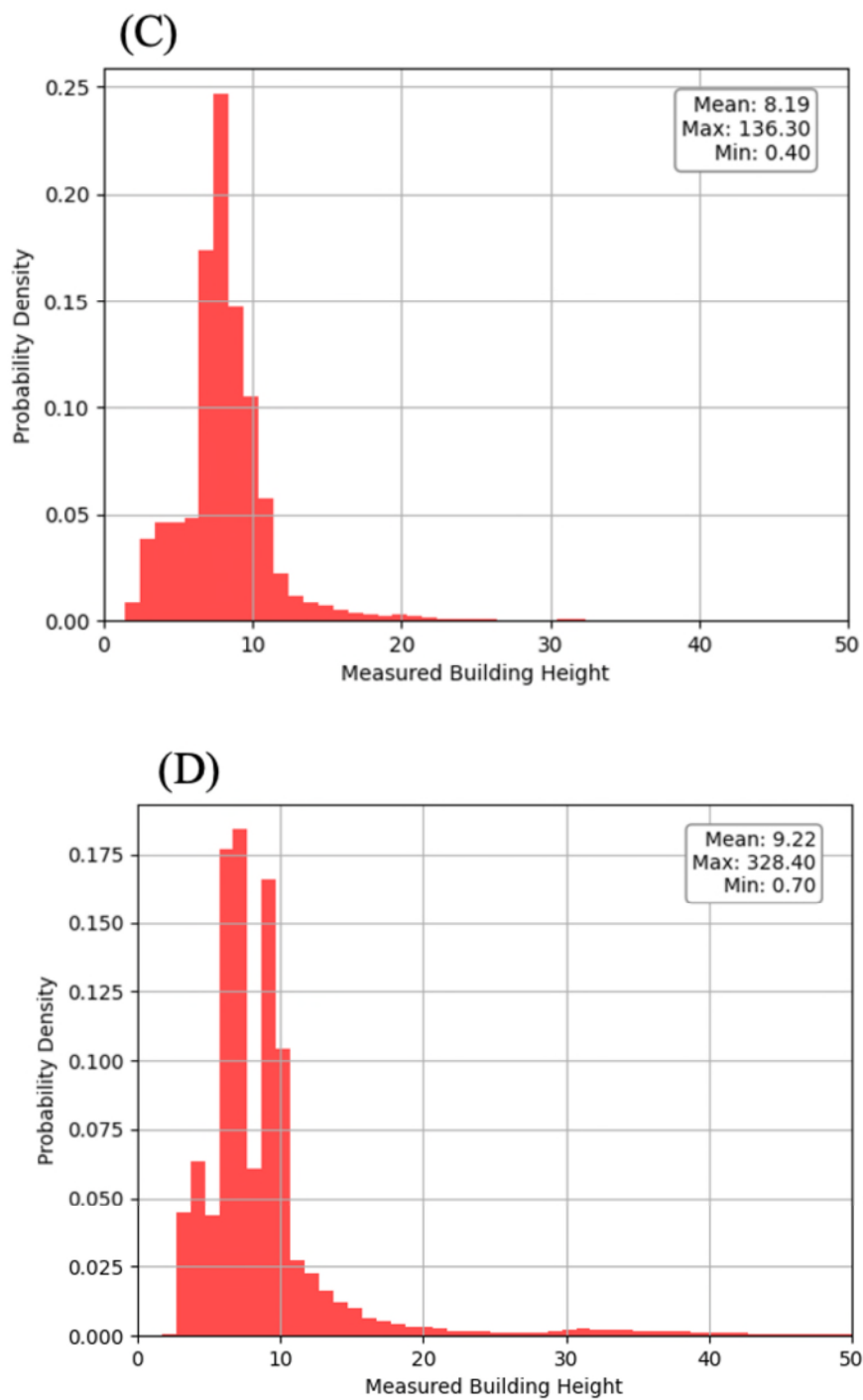


図19 (C)京都と(D)大阪で測定された建物高さの確率密度を示すヒストグラム

3-7 z スコア (z-score)

図 20 は、測定された建物高さ、その平均値、および標準偏差に基づく z スコアに対する頻度を示す。各ピークをつなげることで、ヒストグラムの輪郭を描くことが可能

であり、それはベル型の曲線に似ている。札幌市では、 z スコアがわずかに負の側と 0 付近に、最も高いベル型の曲線と次に高いベル型の曲線を描くことができる。これらの曲線は互いに近い位置にある。東京 23 区では、札幌と同様に、 z スコアの負の側と 0 付近に 2 つのベル型の曲線がある。ただし、札幌とは異なり、これらの曲線は互いに離れている。これらの曲線はどちらも正の歪みを示している。京都市では、札幌や東京 23 区とは異なり、 z スコアの負の範囲に広くて低いベル型の曲線があり、 z スコアが 0 付近に狭くて高いベル型の曲線がある。この曲線は z スコアの正の範囲に尾を引いている。大阪市では、 z スコアの負の範囲に 2 つのベル型の曲線があり、最後の 1 つは z スコアが 0 付近にある。 z スコアが 0 から最も離れた負の範囲の曲線は最も頻度が低く、狭い形状をしている。一方、負の範囲にあるもう 1 つの曲線は最も高い頻度を含んでいる。 z スコアが 0 付近にある曲線は 2 番目に高い頻度を示している。

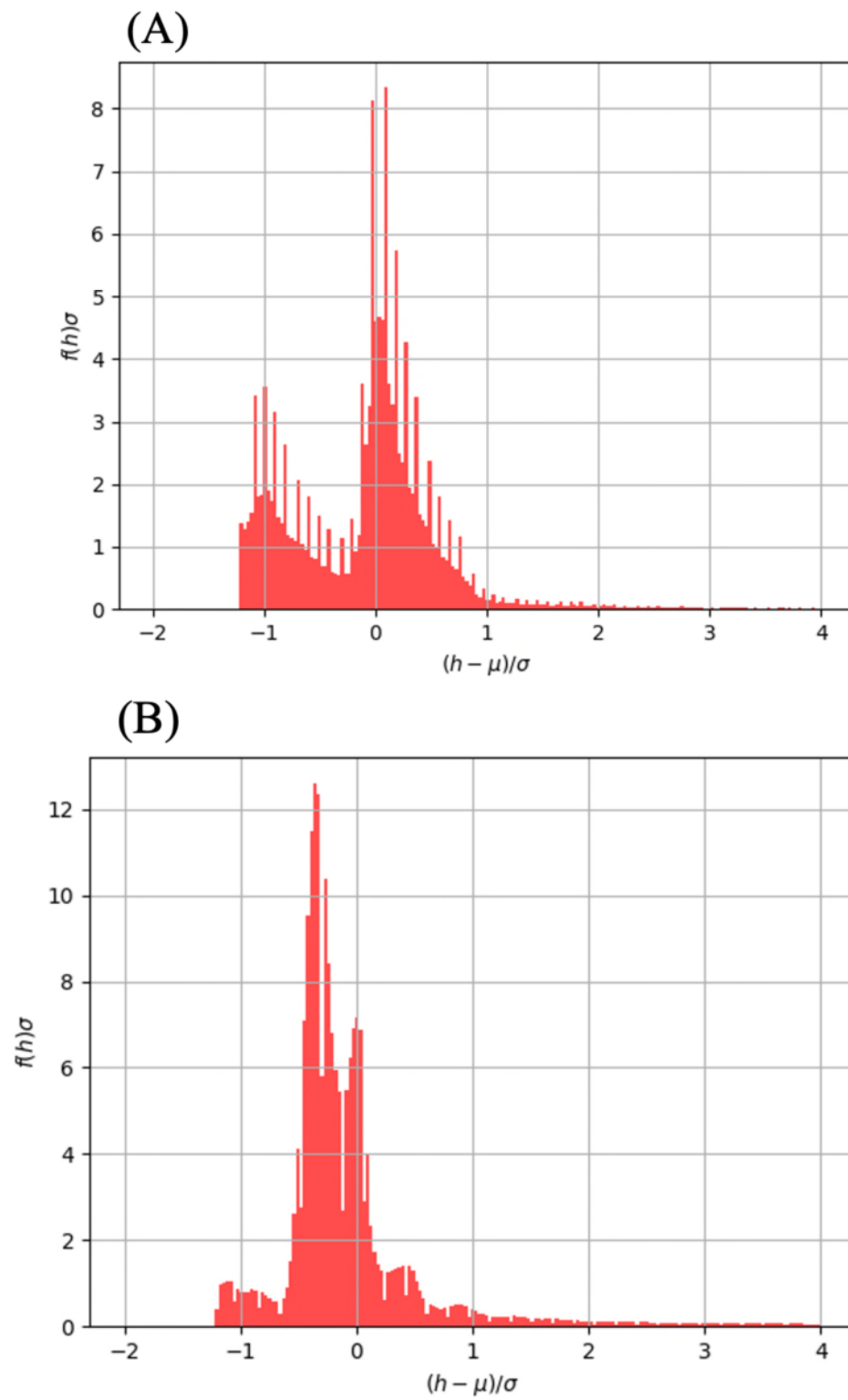


図20 (A)札幌と(B)東京23区で測定された建物高さの確率密度を示すZスコアのヒストグラム

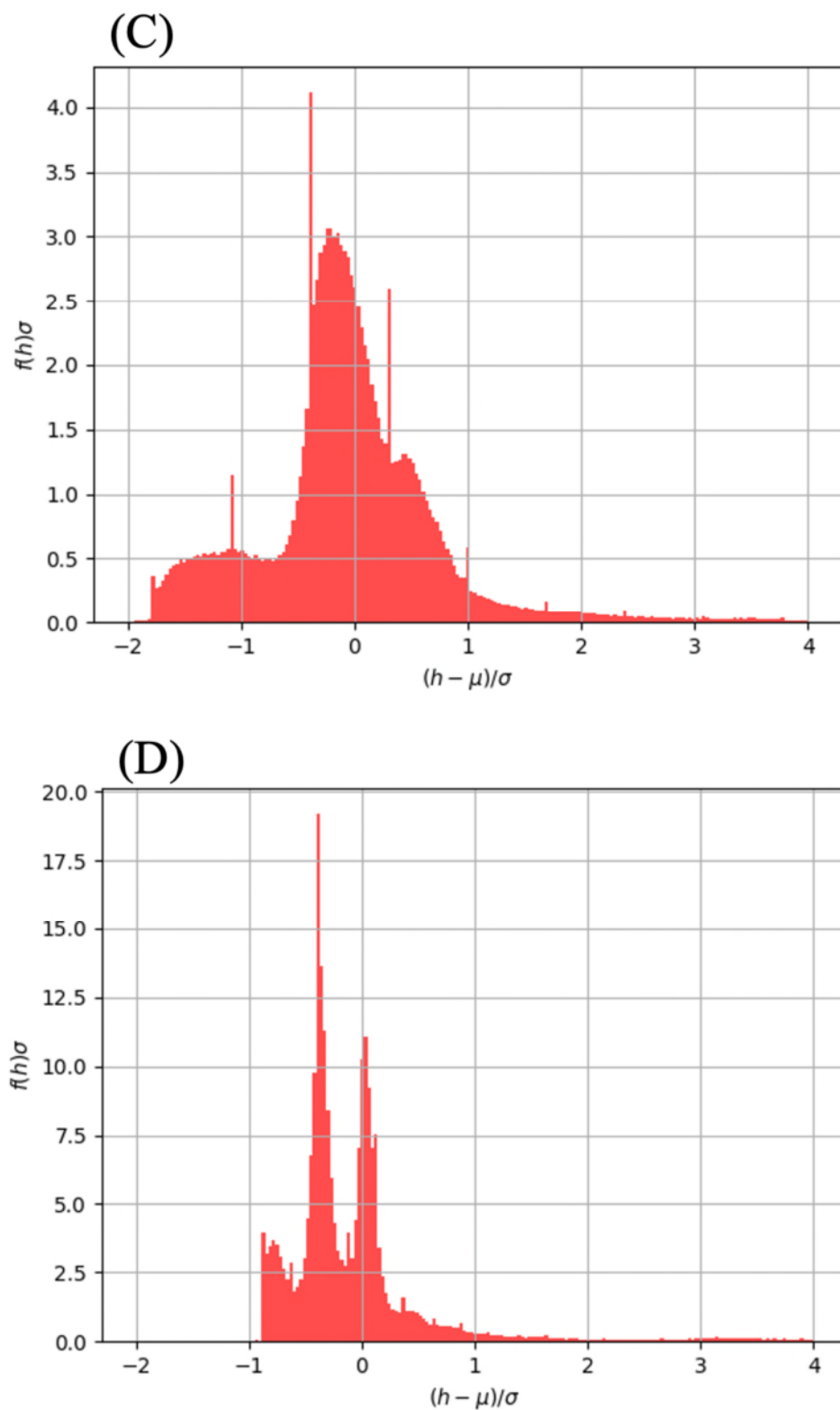


図20 (C)京都と(D)大阪で測定された建物高さの確率密度を示すZスコアのヒストグラム

4 考察

4-1 4 大都市

まず、各都市の都市形態データを比較し、それぞれの都市に特徴的な都市形態の傾向があるかどうかを確認する。その際、該当する文献を用いて、データがそのような傾向を示す可能性のある理由を明らかにする。次に、各都市のデータ傾向を他の都市と比較し、共通点や相違点を発見する。最後に、PLATEAU で利用可能な他の都市データとともに、それらのデータを過去の研究で提案されたモデルに統合し、モデルのさらなる適用可能性を調査する。

4-1-1 データ解析

札幌では、川原らの研究によると、都市化が意図的に最小限に抑えられ、その結果として都市がコンパクトになるように設計されている [88]。川原らによって「立地適正化計画区域」と分類された地域の輪郭は、図 15 (A) において少なくとも 840 棟の建物が存在する地域の形状とほぼ一致している。一方で、「集約型住宅誘導区域」と分類された地域の輪郭と、平均測定建物高さが少なくとも 12m 以上の地域の形状は、図 16 (A) において高い一致性を示している。さらに、PLATEAU に登録されている札幌市全体の輪郭は、都市化制限区域として分類された地域の輪郭と概ね似通っている。緯度 43.1125、経度 141.3375 付近の建物数が周辺よりも少ない地域は、主に「都市機能誘導区域」として分類される地域に対応している。この地域内には北海道大学があり、周辺の住宅地域と比較して建設される建物の数が制限されている可能性がある [89]。さらに、札幌駅も近隣に位置し、大型商業施設が集積しているため、奥村らによってこの地域は商業区域として分類されている。緯度 43.0500 から 43.1750、経度 141.325 から 141.375 の範囲では、建物の数が少ないにもかかわらず、平均測定高さとその標準偏差は周辺地域よりも大きく、これは図 15(A)、図 16(A)、図 17(A) に示されているように、高さが異なる商業ビルの存在による可能性がある。また、図 18 によると、同じ範囲は札幌市内で最も高い建ぺい率を持ち、緯度 42.9500 以下の地域に比べて商業地域での建物密度が高いことを示している。平均測定高さの標準偏差は札幌駅周辺のエリアほど大きくはないが、緯度 42.9875 度、経度 141.4000 度付近には、平均測定高さが 8~12m の建物が少なくとも 1679 棟存在する。同じエリアの建ぺい率は 20~36% であることが図 18 に示されており、各建物が広い面積を占めている可能性を示唆している。これらはすべて、大谷地流通業務団地の存在を示している。

図 15 (A) に示される緯度 42.9875、経度 141.4625 付近の 2～840 棟の建物がある地域では、図 16 (A) は平均測定建物高さが 4～8m で均一である一方、図 17 (A) は標準偏差が 0～3 であることを示しており、類似した高さの建物が存在していることを示唆している。公開されている地図を用いた慎重な観察では、この地域内に流通センター内の倉庫が存在することが確認され、それが類似した高さの建物が少ない理由と考えられる。また、図 15 (A)、図 16 (A)、図 17 (A) において緯度 42.95、経度 141.4 を中心とする白色領域は、羊ヶ丘カントリークラブを含む山岳地域に起因している。札幌市内のその他の少なくとも 840 棟の建物が存在する地域は、奥村らによって住宅地として考えられている。

東京では、図 15 (A) における緯度 35.6833、経度 139.7500 付近（千代田区が位置すると考えられる地域）に 2～2036 棟の建物があり、周辺の U 字型地域と比較してかなり少ない建物数となっている。この地域の建物数の少なさは、皇居の存在に関連している可能性がある[90]。また、港区、中央区、江東区に対応する地域には 2～1350 棟の建物があり、U 字型地域とは顕著に対照的である。しかし、図 16 (B) によると、千代田区および港区の平均測定建物高さは 24～40m の範囲にあり、図 17 (B) ではこれらの区の標準偏差が 12～30m の範囲で変動しており、図 15 (B) で示される U 字型地域よりも大きいことが分かる。秋葉らは、港区、中央区、江東区の主な土地利用を公共、商業、産業とし、一方で図 15 (B) 内の U 字型地域の区は主に住宅用途であると分類している[91], [92]。具体的には、千代田区は主に官公庁、一般オフィス、教育および文化施設に利用されており、港区と中央区は主に教育文化施設および一般オフィスで占められ、南江東区は公園、福祉施設、交通および空地で構成されている[92]。これは、公的、商業および産業用途のために主に利用されている千代田区およびその隣接区では、高さが高く多様な建物が少数存在している一方、周辺の住宅用途の区では建物数が多く、高さが低く均一であることを示している。

図 15 (C)、図 16 (C)、図 17 (C) はすべて京都市の輪郭を描写しており、建物が概ね京都盆地の形状に沿っていることを示している[93]。盆地内では、図 15 (C) において、5699 棟から 6412 棟の建物が存在する地域は小さく、柴田らによって分類された工業地域に該当している [94]。図 16 (C) と図 17 (C) は、平均測定建物高さが 12～16m の建物が占める地域で標準偏差が高い傾向にあり、柴田らによって商業または工業地域に分類された区域が見られる。特に、図 17 (C) に示される標準偏差が 12～15m の範囲は、柴田らによって商業地域に分類された区域に該当する。一方、図 16 (C) において平均測定建物高さが 4～8m の建物が占める地域では、図 17 (C) が標準偏差を 0～3m または 3～6m と示しており、これらの地域は主に住宅用途に利用されている[94]。図 16 (C) において、平均測定建物高さが 28～32m の地域（緯度

35.0333 ～ 35.0417、経度 135.8000 ～ 135.8125 の間に区切られた地域) は、PLATEAU プロジェクトのデータ生成時に誤って建物と認識された可能性がある比叡山によるものである。オンラインマップを使用した観察によれば、図 17 (C) で標準偏差が 9～12m の唯一の地域は、大学建物が畑地内に存在するため、高さの大きな変動が生じていることが原因である。

大阪市は大阪平野に広がっている [95]。図 16 (D) において平均測定建物高さが 16～28m の地域は、図 17 (D) で標準偏差が 15～30m の範囲にある地域と重なっている。しかし、図 15 (D) は、この地域の建物数が緯度 34.6750 よりも低い地域に見られる建物数より少ないことを示している。中島らによると、建物数が少なくても平均高さおよびその標準偏差が大きい地域は、一般的に商業およびオフィス用途に分類される [95]。一方、建物数が 6211 棟から 6988 棟 (図 15 (D))、平均測定建物高さが 4～12m (図 16 (D))、標準偏差が 3～6m (図 17 (D)) の地域は主に住宅地域に分類される。これらの情報は、商業およびオフィス用途の地域では、比較的小規模な建物数でありながら高さが高く多様であるのに対し、周辺の住宅地域では建物数が多く、高さが低く均一であることを示している。

測定された建物の高さデータに基づき、各都市の確率密度関数 (Probability Density Function, PDF) および z スコアを生成した。図 19 は PDF ヒストグラムを示し、(A) 札幌、(B) 東京 23 区、(C) 京都、および (D) 大阪の結果をそれぞれ示している。大都市として予想される通り、東京 23 区と大阪では、図 19 (B) および (D) において札幌と京都 (それぞれ図 19 (A) および (C)) よりも長い正の尾が見られる。一方で、札幌と京都は短い尾を持つ傾向がある。特に京都では建物の高さに制限が設けられているため、4 都市の中で最も古典的なベルカーブに近い PDF を示すことが予想される。

しかし、すべての都市に共通して、建物の高さが 2m から 10m 程度の範囲に収まる確率が、20m 以上の高さである確率よりも高いことが示されている。これは、すべての都市で建物の大部分が図 16 に示された平均値より低い可能性を示唆している。この傾向は、図 20 に示される測定された建物の高さの z スコア ((A) 札幌、(B) 東京 23 区、(C) 京都、(D) 大阪) にも反映されている。東京と大阪では、異なる z スコアで鋭いピークが観察されており、これは公共施設やオフィス用の高層建物が中心部に存在し、それが平均値を押し上げる一方で、周辺部には住宅用建物が存在していることに起因すると考えられる。

図 20 (B) は、負の z スコア範囲に広がるピークを示しており、平均値より低い高さを持つ建物が多様に存在することを示している。一方、京都では最も頻度が高い z スコアが 0 に最も近く、建物の高さが比較的均一であることが図 15 (C) に描写されている通り示されている。札幌では他の都市ほど明確に分離されたピークは観察されず、最も高いピークは京都と同様に z スコアが 0 に近く、東京や大阪よりも建物の高さの変動が小さいことを示している。

東京 23 区と大阪では、図 20 (B) および(D) において視覚的に分離されたピークが示されており、札幌や京都に比べて限られた地域内で高さの異なる建物が隣接している可能性が高いことを示唆している。これらの発見から、現実の都市に近い都市形態を再現するためには、均一な建物の高さを用いた都市モデルの構築は受け入れがたいことが示されている。

しかし、PLATEAU データベースから取得できるデータには、実際のデータとの間に若干の不一致が含まれている可能性が懸念されている。特に、図 19 (D) では、大阪で測定された最大高さが 328.40m で、最小高さが 0.70m であると述べているが、大阪、さらには日本全体で最も高い建物であるあべのハルカスの高さは 300m である [112]。さらに、東京で最も高い建物は、タワーである東京スカイツリー（高さ 634m）であり、もう一つのタワーである東京タワーは 332.5m である。しかし、図 19 (B) では、東京で最も高い建物の高さが 332.90m と示されている ([113], [114])。この違いの原因として、いくつかの要因が考えられる。第一に、PLATEAU に登録されたデータは、2022 年までにいくつかの高層建物が反映されていない可能性がある。しかし、あべのハルカスは 2014 年に完成しており、本研究で使用されたデータは 2022 年に利用可能となったものに基づいている [115]。したがって、PLATEAU プラットフォームで利用できるデータがどれほど最近のものであるかを調査し、最新の都市形態に関する情報を含む必要がある。第二に、衛星画像解析から PLATEAU データベースへのデータ抽出中に、タワーとして分類された建物が本研究で調査された対象構造に含まれている可能性がある。実際、東京で測定された最大建物高さは東京タワーの高さと非常に似ている。さらに、札幌で最も高い構造物は札幌 JR タワーで、その高さは 173.0m であり、図 20 (A) に示されている最大測定高さに近い [116]。しかし、京都タワーの高さは 131m であり、これは京都で最も高い構造物であるが、この値は図 20 (C) には反映されていない [117]。これらはすべて、いくつかのタワーが居住可能な建物として認識されている可能性が高いことを強く示唆しており、これは建物分類に

反するものである[118]。第三に、PLATEAUデータベースのデータは、まだ建設されていない、または建設予定の建物の形態情報を反映している可能性がある。しかし、この議論を検証するにはさらなる調査が必要でありが、これは本研究の焦点ではない。

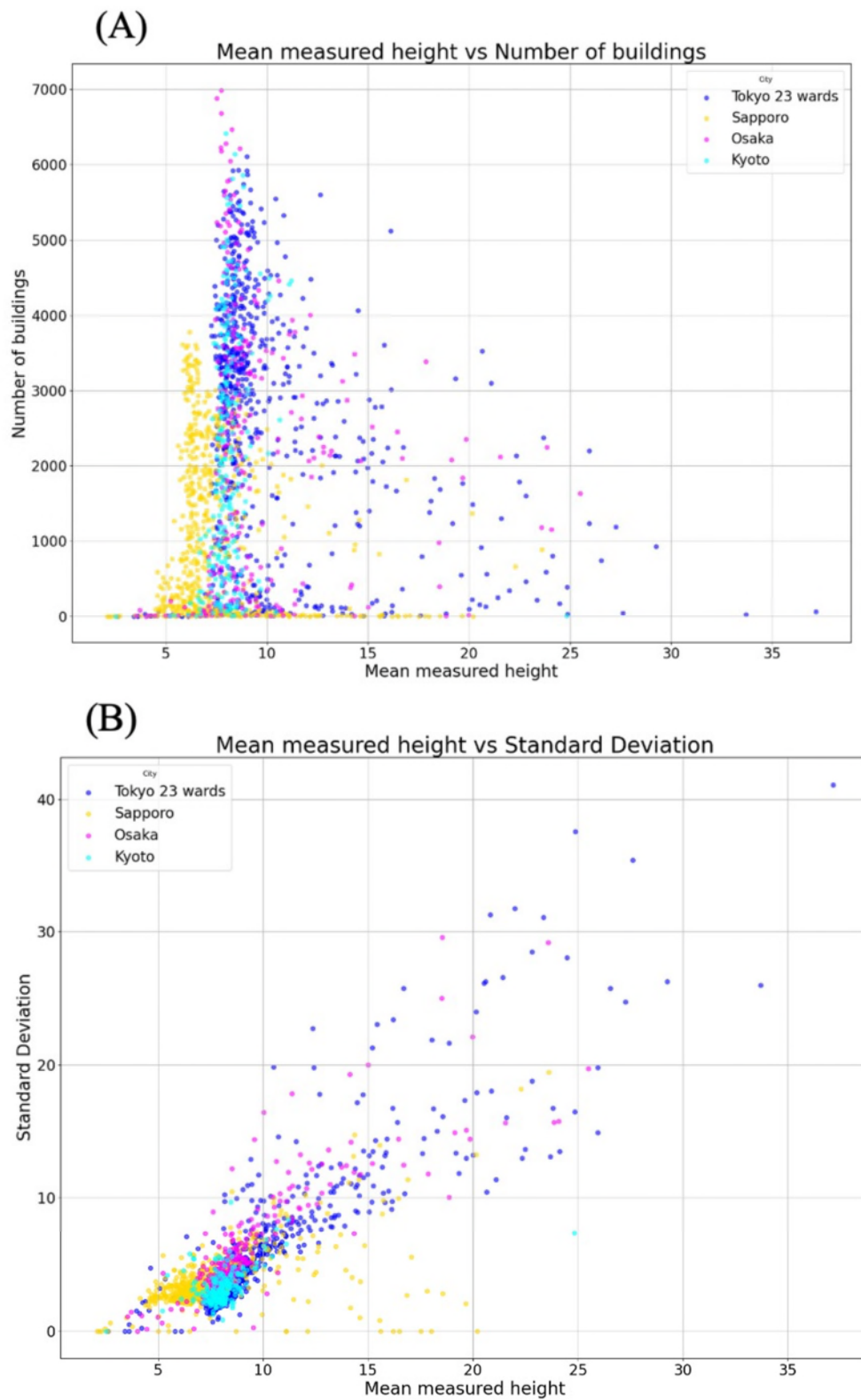


図21 建物の平均測定高さを横軸に取り(A) 建物数 (B) 標準偏差を4都市プロットした散布図

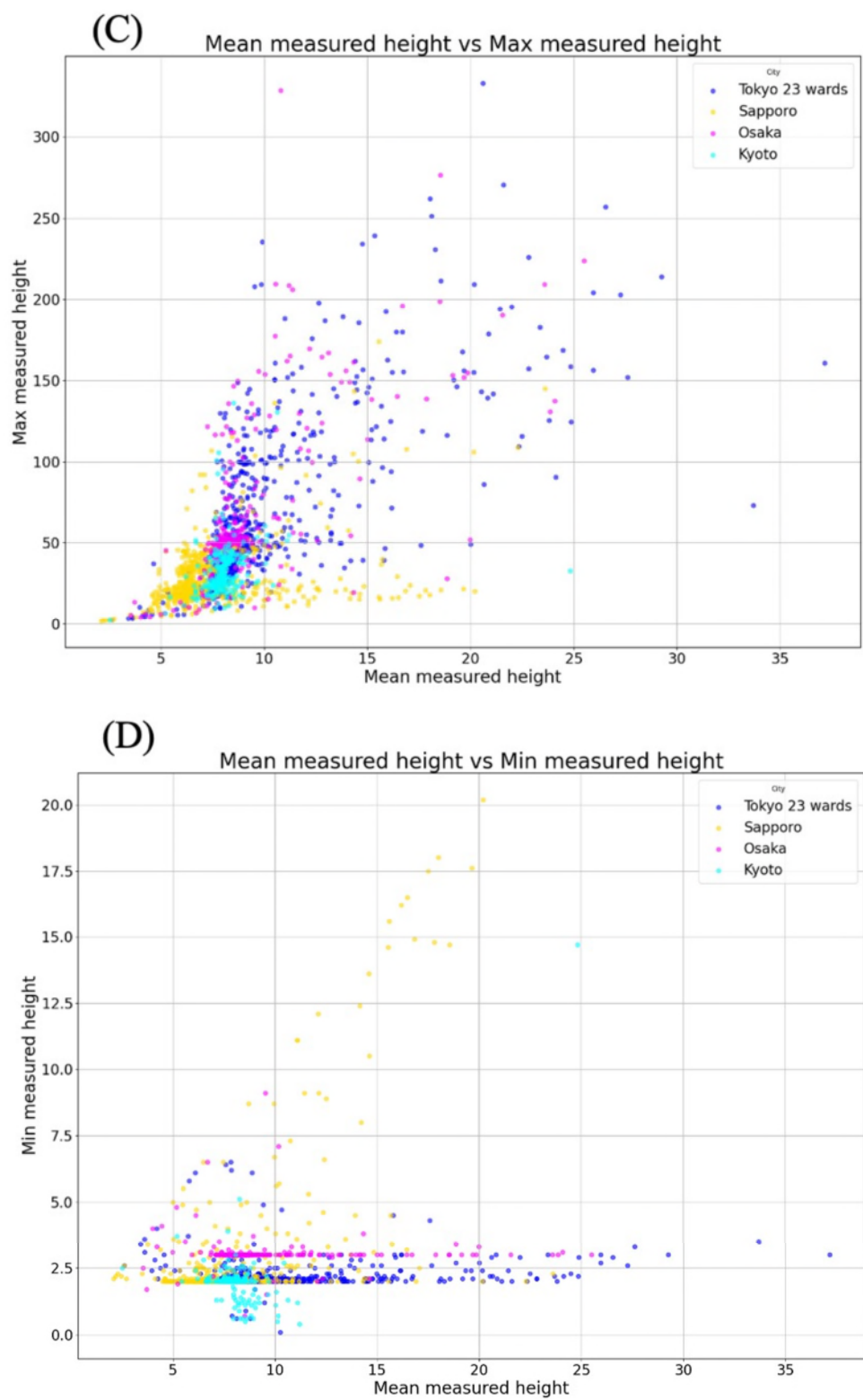


図21 建物の平均測定高さを横軸に取り(C) 最大測定高さ (D) 最小測定高さを4都市プロットした散布図

PLATEAU データから抽出されたデータに基づき、まず札幌、東京 23 区、京都、大阪のデータを散布図に組み合わせ、一般的な傾向があるかどうかを調査した（図 21）。1 つの点は、これら 4 都市のグリッドによって作成された 1 つのセルを表している。図 21（A）が示すように、4 都市の建物の大部分は高さが 5～10m の範囲にあり、この傾向は図 21（D）を除く他の散布図にも反映されている。興味深いことに、札幌の建物の大部分は、他の 3 都市よりも平均測定高さが低いことが明らかになった。図 21（B）と図 21（C）はいずれも、平均測定高さが 5～10m の間で正の相関を示しており、図 21（B）は、平均測定高さが 15m まで正の相関を示している。これは、多くの建物が図 21（A）で示される測定高さの範囲に収まることを考えると、測定高さが高くなるほど平均値から逸れる可能性があることを示唆している。しかし、図 21（D）は、札幌を除く 4 都市の建物の大部分が最小測定高さ 2.3m であることを示している。これらの結果は、最大および最小の高さを持つ建物の存在が標準偏差を生み出すことを示唆している。標準偏差と平均測定高さとの正の相関は、最大測定高さに由来する可能性があり、一方で相関の強さは最小測定高さに起因する可能性がある。

図 21（D）に見られるように、札幌では平均測定高さと最小測定高さがほぼ等しい点が存在し、これは最小高さ付近の範囲内に収まる建物が少数しか存在しないことを示唆している。図 21（B）で 15 m より高いとほとんど相関が見られず、これは、各平均測定高さの周囲でさまざまな測定高さが存在することを示している。このことは、図 21（C）で観察されるように、異なる最大測定高さが各平均測定高さでプロットされることに起因している。

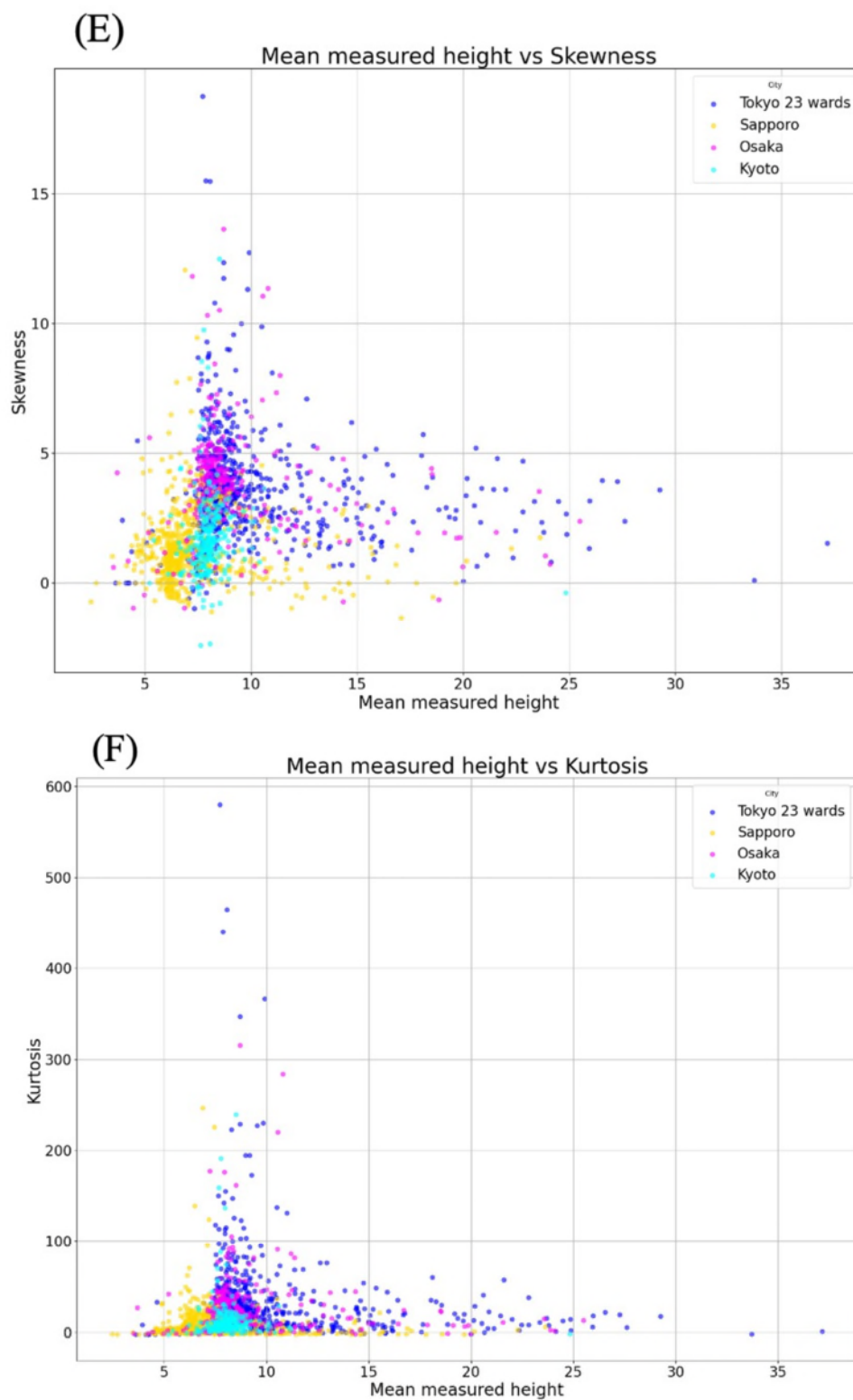


図21 建物の平均測定高さを横軸に取り (E) 歪度 (F) 尖度を4都市プロットした散布図

図 21 (E) は、4 都市のグリッドセル間の歪度を示し、大部分は平均測定高さ 5～10m の間で正の歪度を示している。これは、図 21 (A) とよく似ている。しかし、負の歪度を示すグリッドセルも存在し、主に京都と札幌のセルで見られる。これは計算中のエラーに起因する可能性があり、式 (3) および式 (4) から負の値を得ることは数学的に不可能である。ただし、経験的には、グリッドエリア内の建物の数が、その測定高さが高くなるにつれて増加する場合、負の歪度が観察される可能性がある。図 21 (F) は、式 (5) を使用して導出された尖度を示している。予想通り、図 21 (E) とは異なり、負の値は見らない。尖度が非常に高いグリッドセルがいくつか存在し、それらは平均測定高さ 5～10m の間にあるほとんどのセルと比較して大きな変動を示している。これは、建物の測定高さが多様であることを示し、図 21 (C) および図 21 (D) で観察されるように、平均測定高さの範囲内で最大および最小測定高さが異なる値を持つことに関連している。

4-1-2 モデル適用

図 21 (B) および (C) に示されるように、標準偏差と最大測定高さは、他のパラメータに比べて平均測定高さとの相関が比較的強いことが分かった。そのため、Kanda らによって以前提案されたモデルの適用可能性を調査した [40]。

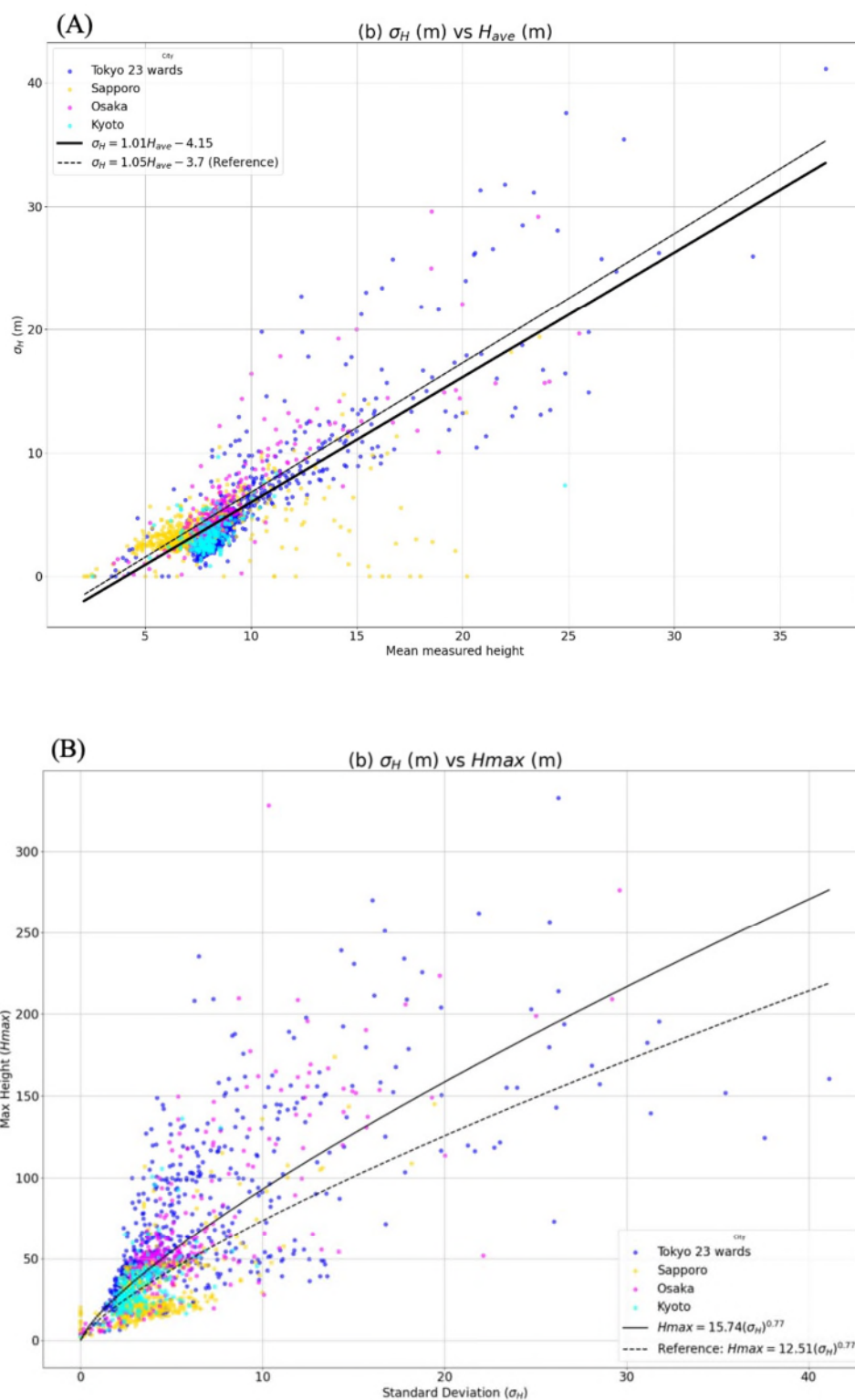


図22 4都市における平均測定高さに対する(A)標準偏差、(B) 標準偏差に対する最大測定高さの散布図。選択されたパラメータおよび黒い線で示されたモデルは、[31] の神田モデル

図 22 では、図 21 (B) および (C) のデータと各モデルを組み合わせた。青、黄、ピンク、シアンの点は、それぞれ東京 23 区、札幌、大阪、京都のメッシュごとのデー

タを表している。図 22 (A) の散布図は、標準偏差と平均測定高さのデータ傾向を示している。一方で、私たちのデータは以下の回帰式を示した：

$$\sigma_H = 1.01H_{ave} - 4.04 \quad (12)$$

ここで、 σ_H は測定高さの標準偏差、 H_{ave} は平均測定高さを表す。他方、Kanda モデルは以下の式を提案している。：

$$\sigma_H = 1.05H_{ave} - 3.7 \quad (13)$$

この 2 つの回帰線は、平均測定高さの低い範囲では互いに近い位置にあるが、平均値が増加するにつれて距離が大きくなる。これは、4 つの主要都市間で建物高さの制限がある場合に、Kanda モデルが大きな可能性を持つことを示唆している。しかしながら、私たちの回帰線は Kanda モデルよりも低い位置にある。これは、標準偏差が他の 3 都市よりも一般的に小さい京都を含めたことが原因である可能性があり、Kanda モデルがすでに中大規模都市よりも小さい標準偏差を持つことが本研究で観察されている中小都市には適用しにくい可能性を示唆している。

図 22 (B) は、最大測定高さとの平均値のデータ傾向を示している。私たちのデータは以下の回帰曲線を示した：

$$H_{max} = 16.01(\sigma_H)^{0.77} \quad (14)$$

ここで、 H_{max} は最大測定高さを表す。一方、Kanda モデルは以下の式を提案している。

$$H_{max} = 12.51(\sigma_H)^{0.77} \quad (15)$$

ほぼすべての平均測定高さにおいて、私たちの回帰曲線は Kanda モデルよりも高い位置にある。これは、画像解析中に居住可能な建物として認識された塔が含まれている可能性があるためと考えられる [118]。したがって、Kanda モデルが他の主要都市のデータに適用可能である可能性は依然としてある。

4-2 日本全国 106 都市

これまで、焦点は日本の 4 大都市に置いた。しかし、日本にはさらに多くの都市が存在し、それは PLATEAU データベースに登録されている日本の都市数についても同様である。217 都市のうち、データ分析に適した 106 都市が利用可能であることが判明した。そのため、以降はこれらの都市に関するデータについて主に議論する。

4-2-1 都市の分類

表6 都市階級の定義

都市階級	定義
大都市	政令指定都市と東京都区部
中都市	大都市を除く人口15万人以上の市
小都市	人口15万人未満の市町村

より多くの洞察を得るために、これらの106都市は、総務省が定期的を実施している「家計調査」

(https://urldefense.com/v3/_https://www.stat.go.jp/data/kakei/2004np/04nh01.html_!!OzAIPA!CN8VE3v6ON5FiX6uqGXAsAxTzi-

[_rsIMVvKhbTjn6Ooz88P1XvvQPzUdpGQB8CCoJRMQ0VdltwArzHSS7A\\$](https://urldefense.com/v3/_https://www.stat.go.jp/data/kakei/2004np/04nh01.html_!!OzAIPA!CN8VE3v6ON5FiX6uqGXAsAxTzi-_rsIMVvKhbTjn6Ooz88P1XvvQPzUdpGQB8CCoJRMQ0VdltwArzHSS7A$)) に基づいて、表6に示すように3つのクラスに分類された。大都市（大型都市）は日本の政令指定都市および東京23区を指し、中規模都市（中型都市）は人口15万人以上の大都市以外の都市、小規模都市（小型都市）は人口15万人未満の都市を指する。表7

にはこの定義に基づく都市名が記載されている。それぞれ、大都市 16 都市、中規模都市 23 都市、小規模都市 67 都市が該当する。

4-2-2 データ解析

4 大都市のデータを用いた分析と同様に、106 都市を含むように、他の 102 都市のデ

表7 106市町村の都市階級分類

大都市			中都市			小都市		
1	広島市 (Hiroshima-shi)	17	福山市 (Fukuyama-shi)	40	安城市 (Anjo-shi)	73	益城町 (Mashiki-machi)	
2	北九州市 (Kitakyushu-shi)	18	いわき市 (Iwaki-shi)	41	朝来市 (Asago-shi)	74	南相馬市 (Minamisouma-shi)	
3	川崎市 (Kawasaki-shi)	19	金沢市 (Kanazawa-shi)	42	熱海市 (Atami-shi)	75	三島市 (Mishima-shi)	
4	熊本市 (Kumamoto-shi)	20	柏市 (Kashiwa-shi)	43	筑前町 (Chikuzen-machi)	76	茂原市 (Mobara-shi)	
5	京都市 (Kyoto-shi)	21	春日井市 (Kasukai-shi)	44	茅野市 (Chino-shi)	77	毛呂山町 (Moroyama-cho)	
6	名古屋市 (Nagoya-shi)	22	郡山市 (Koriyama-shi)	45	府中市 (Fuchu-shi)	78	宗像市 (Munakata-shi)	
7	新潟市 (Niigata-shi)	23	熊谷市 (Kumagaya-shi)	46	藤枝市 (Fujieda-shi)	79	むつ市 (Mutsu-shi)	
8	大阪市 (Osaka-shi)	24	久留米市 (Kurume-shi)	47	袋井市 (Fukuroi-shi)	80	長泉町 (Nagaizumi-cho)	
9	さいたま市 (Saitama-shi)	25	松本市 (Matsumoto-shi)	48	蓮田市 (Hasuda-shi)	81	新座市 (Niiza-shi)	
10	堺市 (Sakai-shi)	26	松山市 (Matsuyama-shi)	49	東伊豆町 (Higashiizu-cho)	82	日進市 (Nisshin-shi)	
11	相模原市 (Sagami-hara-shi)	27	室蘭市 (Muroran-shi)	50	東村山市 (Higashimurayama-shi)	83	小城市 (Ogi-shi)	
12	札幌市 (Sapporo-shi)	28	那覇市 (Naha-shi)	51	日田市 (Hita-shi)	84	岡谷市 (Okaya-shi)	
13	仙台市 (Sendai-shi)	29	西東京市 (Nishitokyo-shi)	52	鉾田市 (Hokota-shi)	85	大町町 (Omachi-cho)	
14	静岡市 (Shizuoka-shi)	30	沼津市 (Numazu-shi)	53	飯塚市 (Iizuka-shi)	86	御前崎市 (Omazeki-shi)	
15	東京23区 (Tokyo 23 wards)	31	岡崎市 (Okazaki-shi)	54	池田市 (Ikeda-shi)	87	堺市 (Sakai-shi)	
16	横浜市 (Yokohama-shi)	32	大牟田市 (Omura-shi)	55	伊那市 (Ina-shi)	88	佐久市 (Saku-shi)	
		33	高松市 (Takamatsu-shi)	56	伊東市 (Ito-shi)	89	更別村 (Sarabetsu-mura)	
		34	高槻市 (Takatsuki-shi)	57	磐田市 (Iwata-shi)	90	摂津市 (Settsu-shi)	
		35	豊中市 (Toyonaka-shi)	58	伊豆の国市 (Izunokuni-shi)	91	清水町 (Shimizu-cho)	
		36	つくば市 (Tsukuba-shi)	59	加賀市 (Kaga-shi)	92	下田市 (Shimoda-shi)	
		37	宇都宮市 (Utsunomiya-shi)	60	掛川市 (Kakegawa-shi)	93	白河市 (Shirakawa-shi)	
		38	四日市市 (Yokkaichi-shi)	61	加古川市 (Kakogawa-shi)	94	白石町 (Shiroishi-cho)	
		39	横須賀市 (Yokosuka-shi)	62	函南町 (Kannami-cho)	95	裾野市 (Susono-shi)	
				63	柏原市 (Kashiwara-shi)	96	忠岡町 (Tadaoka-cho)	
				64	河津町 (Kawazu-cho)	97	武雄市 (Takeo-shi)	
				65	菊川市 (Kikugawa-shi)	98	玉名市 (Tamana-shi)	
				66	桐生市 (Kiryu-shi)	99	館林市 (Tatebayashi-shi)	
				67	甲府市 (Kofu-shi)	100	津島市 (Tsuishima-shi)	
				68	湖西市 (Kosai-shi)	101	戸田市 (Toda-shi)	
				69	広北町 (Kohoku-machi)	102	鳥取市 (Tottori-shi)	
				70	熊野市 (Kumano-shi)	103	豊川市 (Toyokawa-shi)	
				71	呉市 (Kure-shi)	104	うきは市 (Ukiha-shi)	
				72	牧之原市 (Makinohara-shi)	105	八千代市 (Yachiyo-shi)	
						106	焼津市 (Yaizu-shi)	

ータ分析が実施され、その結果が図 23 に視覚化されている。図 23 では以下の散布図が表示されている：(A)建物数と平均測定高さ、(B)測定高さの標準偏差と平均測定高さ、(C)最大測定高さと平均測定高さ、(D)最小測定高さと平均測定高さ、(E)歪度と平均測定高さ、(F)尖度と平均測定高さ。それぞれ、灰色、オレンジ、青色の点が、小規模都市、中規模都市、大都市のメッシュ内で計算された都市形態学的値の 1 つを表している。106 都市の 1km×1km メッシュごとの建物数、平均測定高さ、測定高さの標準偏差のカラーマップについては、付録 D を参照し、都市分類ごとに別々に分けら

れた都市幾何パラメータの散布図を見るには、大都市については付録 E、中規模都市については付録 F、小都市については付録 G を参照してほしい。

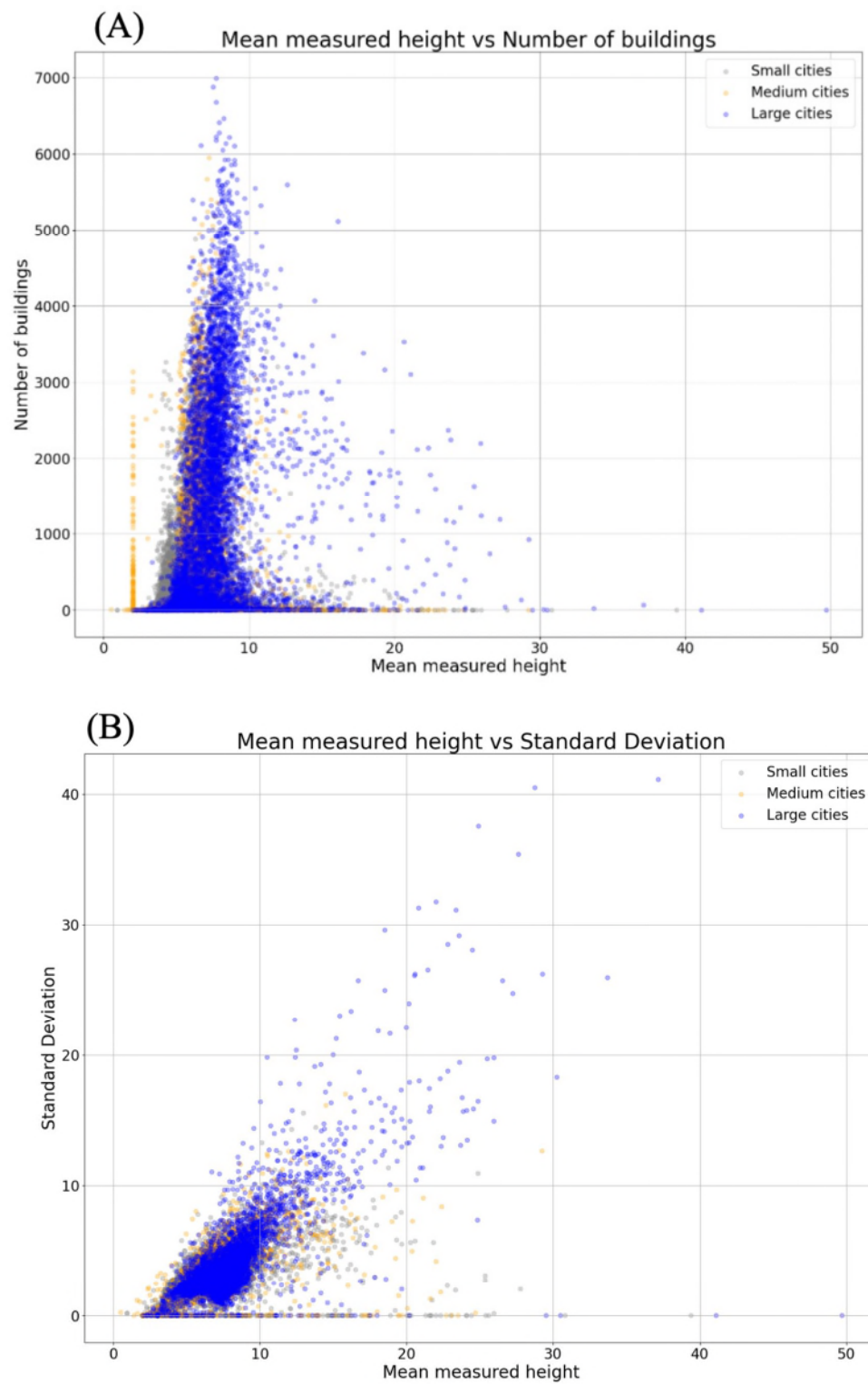


図23 建物の平均測定高さを横軸に取り(A) 建物数 (B) 標準偏差を106都市プロットして都市サイズで比較した散布図

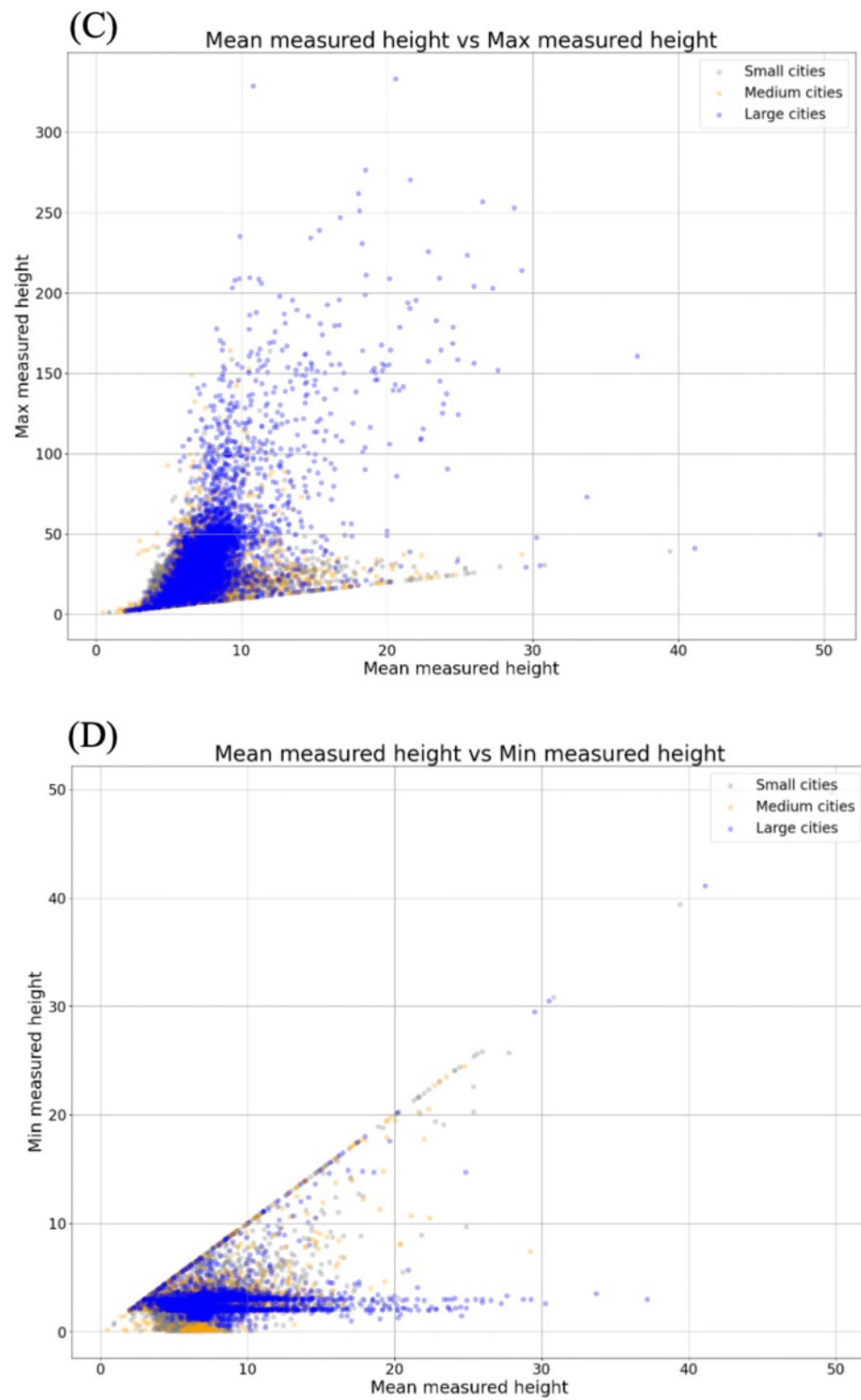


図23 建物の平均測定高さを横軸に取り(C) 最大測定高さ (D) 最小測定高さを106都市プロットして都市サイズで比較した散布図

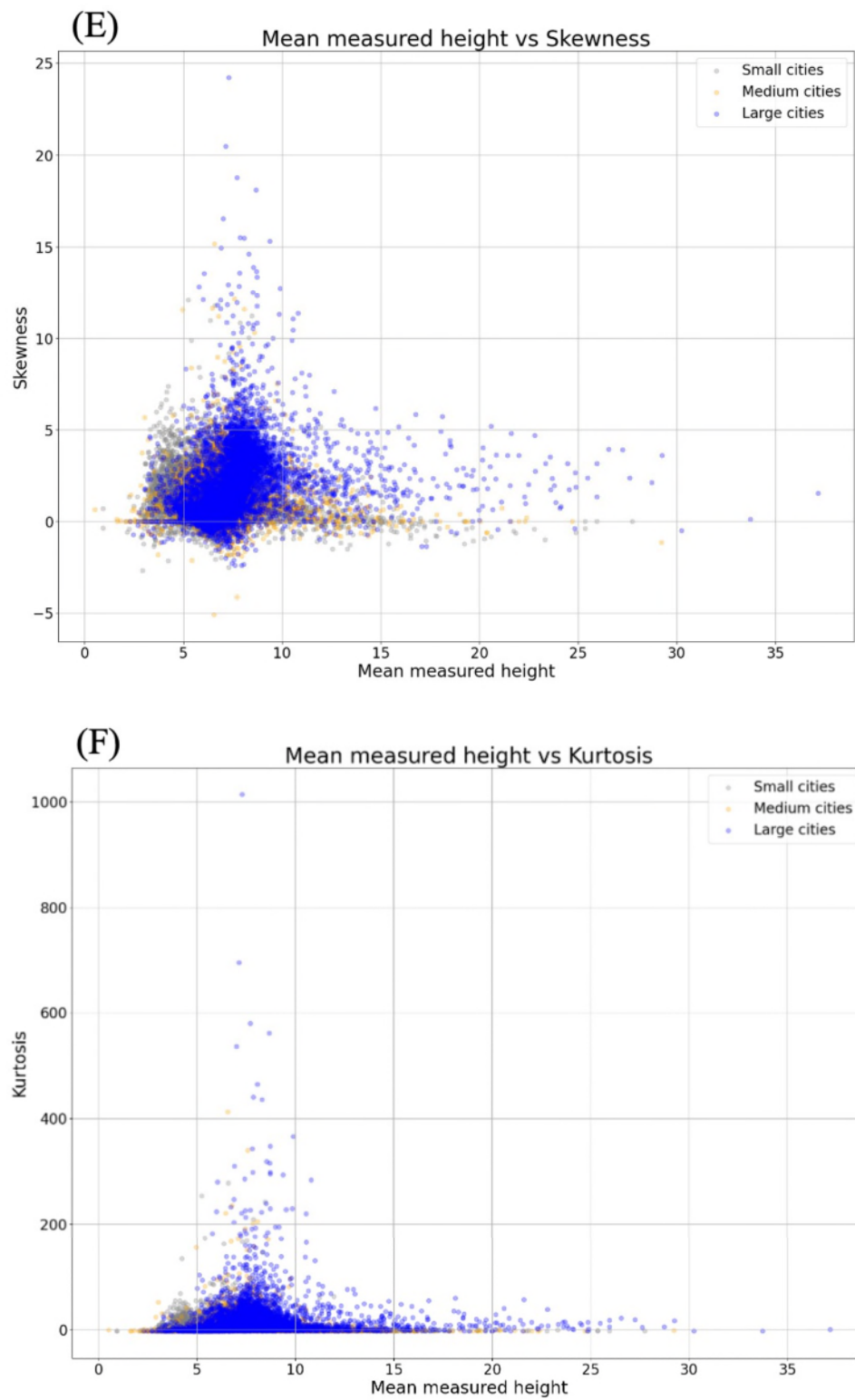


図23 建物の平均測定高さを横軸に取り (E) 歪度 (F) 尖度を106都市プロットして都市サイズで比較した散布図

図 23 (A) は、都市規模が大きくなるにつれて、建物数が最も多い平均測定高さが徐々に高くなることを示している。また、異なる都市クラス間で建物数が最も多い値も増加する。一方で、図 23 (C) が示すように、観測可能な建物高さの幅広いバリエーションがあり、大都市を表す点が全都市クラスの中で最も広範に分布している。中規模都市や小規模都市の最大測定高さは大都市ほど顕著ではないが、それらの点も平均測定高さの低い範囲で大都市と同様に広がっている。図 23 (A) および図 23 (C) のこれらの観測結果は、平均測定高さを超える建物が多く存在する可能性を示している。その結果、図 23 (A) と同様の傾向が図 23 (E) に見られ、都市規模が大きくなるにつれて歪度が大きくなることが示されている。同様の傾向は図 23 (F) にも見られ、各都市クラスの平均測定高さの周りにベル曲線の頂点を描くことができ、多くの建物が平均値に近い高さを持つ可能性があることを示唆している。

図 23 (C) における点群の「底部」および図 23 (D) における対角線上で観察される比例相関に注目してほしい。これらの「線」は同じ原因による可能性が高い。両図では、最大、最小、および平均測定高さが同等または類似しており、同じメッシュ内の建物数が限られているため、高さのバリエーションが制限され、図 23 (B) で標準偏差が 0 の線に沿ったパターンが観測されている。この比例相関は、小規模都市で特に一般的であり、平均測定高さが増加するにつれて顕著になる。図 23 (C) および図 23 (D) の比例線に沿って平均測定高さが低い方向に進むと、中規模都市や大都市を表す点も見らる。これは市街地外に見られるメッシュである可能性がある。市街地の外縁部では、図 15、16、18 で観測されたように、商業地や高層建築物のある居住地域はほとんど見られず、その代わりに市街地よりも一般的に均一な建物高さを持つ住宅地が支配的である。しかし、小規模都市では、図 23 (D) の多くの点が広範に散らばる一方で、中規模都市および大都市の点は平均測定高さの軸にほぼ水平に集中している。

図 23 (C) および図 23 (D) で観測される大都市の最大および最小測定高さの大きな差は、図 23 (B) で観察されるパターンにつながる可能性があり、大都市のより高い範囲の平均測定高さでより大きな標準偏差が導かれている。すべての都市クラスで、標準偏差と平均測定高さの間には正の相関が観察され、すべての都市において、平均測定高さが高くなるほど標準偏差の値が大きくなる可能性が高いことが示されている。これは図 16 および図 18 で観察された傾向でもある。

4-2-3 モデル適用

札幌、東京 23 区、京都、大阪の都市幾何データを使用して分析を行ったように、図 23 (B) および (C) を用いて、神田らが提案したモデルの適用可能性を検討した。図 24 は、すべての都市分類を含む結果を示している。ただし、都市分類ごとに回帰直線を別々にプロットした散布図を確認するには、大都市は付録 H、中都市は付録 I、小都市は付録 J を参照してほしい。

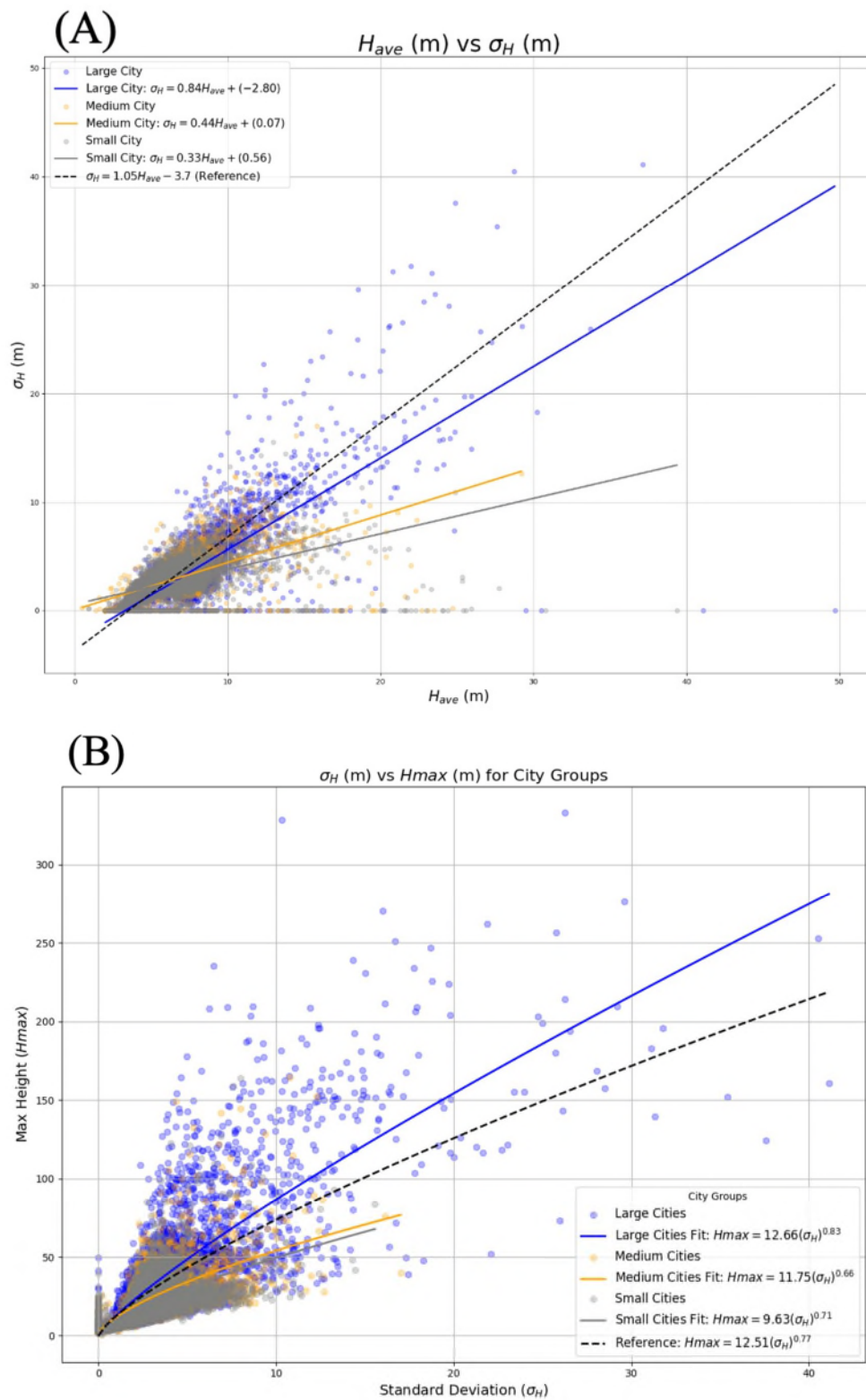


図24 大都市における(A)平均測定高さに対する標準偏差、(B) 標準偏差に対する最大測定高さの散布図。選択されたパラメータおよび黒い線で示されたモデルは、[31] の神田モデル

図 24 (A) は、各都市クラスの回帰直線を示している。青、オレンジ、灰色の曲線はそれぞれ、大都市、中都市、小都市における標準偏差と平均値のデータ傾向の回帰直線を表している。黒の破線で参考として神田モデルを示した。それぞれの回帰曲線の式は以下の通りある。

$$\sigma_H = 0.84H_{ave} - 2.80 \quad (16)$$

$$\sigma_H = 0.44H_{ave} + 0.07 \quad (17)$$

$$\sigma_H = 0.33H_{ave} + 0.56 \quad (18)$$

式 (16)、(17)、(18) はそれぞれ、大都市、中都市、小都市を表している。興味深いことに、式 (16) では、係数が大幅に小さくなった一方で切片が増加しており、他の大都市では測定された建物の高さの偏差が小さいことを示している。これは、すでに図 15 (A) で札幌や京都のデータ点が標準偏差の低い範囲に集中していることから予想されていた。

式 (16)、(17)、(18) を比較すると、都市規模が大きくなるほど、測定された建物の高さの標準偏差が小都市よりも大きくなることがより明確になる。神田モデルは東京や名古屋の都市幾何データに基づいているため、中都市や小都市では標準偏差を過大評価する可能性が高い一方で、大都市ではより適切に標準偏差を推定できる傾向にある。ただし、それでも値を過大評価する傾向が残っている。

図 24 (B) は、3つの都市分類ごとのメッシュごとの平均測定高さに対する標準偏差の傾向を、回帰曲線とともに示し、凡例は図 24 (A) と同じである。それぞれの回帰曲線の式は以下の通りである：

$$H_{max} = 12.66(\sigma_H)^{0.83} \quad (19)$$

$$H_{max} = 11.75(\sigma_H)^{0.66} \quad (20)$$

$$H_{max} = 9.63(\sigma_H)^{0.71} \quad (21)$$

ここで、式(19)、(20)、(21)はそれぞれ大都市、中都市、小都市に対応している。興味深いことに、式(14)と比較すると、係数と指数が異なっており、係数は神田モデルに近くなった一方で、指数は提案モデルよりも大きい。これは、他の大都市が、少なくとも東京や大阪に比べて最大測定建物高さが低いことを示している。しかし、式(20)と(21)は神田モデルとはあまり似ていない。これは、中都市や小都市におけるデータポイントが、より高い最大測定高さの方向に広がっていないため、予想される結果である。これらの観察結果は、神田モデルが中都市や小都市よりも、大都市のデータに適していることを示している。これは、神田モデルが東京や名古屋といった大都市のデータに基づいて構築されているため、予想される結果である [31]。

5 将来展望

この研究は、主に PLATEAU に登録されたデータセットを活用し、建物の測定高さに関する平均値と標準偏差に重点を置いている。また、他の多様なパラメータを取り入れることで、既往研究で提案されたさらなる多様な空気力学パラメータモデルの適用可能性についても検討することができる。

例えば、建ぺい率 λ_p および正面面積指数 λ_f を計算し、その結果を Kanda らが提供したモデルとの比較によって実データへの応用を検討することが可能である。さらに、PLATEAU のデータに基づいて平面面積指数 λ_p を計算した後、粗さ体積密度（無次元） ρ_r を Weibull 分布に実装することでシミュレーションし、その結果を Hagishima らが公開したものと以下の式を用いて比較することができる [119]。

$$\rho_r = \lambda_p * \exp \left[- \left(\frac{z/H}{\phi} \right)^\gamma \right] \quad (22)$$

ここで、 H は建物の平均測定高さ（m）、 z は測定された高さ（m）、 γ および ϕ はワイブル分布のパラメーターを表す。

抗力係数 C_d は、Kanda らによる研究 [120] によれば、平面率 λ_p に敏感に反応することが確認されている。PLATEAU データを用いて計算された λ_p を使用することで、以下の式で表される C_d の適用性が実際の都市において検証可能である。:

$$C_d(z) = \frac{\tau_0}{0.5 \rho_{air} U_{ref}(z)^2} \quad (23)$$

ここで、 τ_0 は都市域における総表面せん断応力を表し、 $U_{ref}(z)$ は参照高度における平均流速を示す。この参照高度の流速データは、PLATEAU データから取得することができる [121]。

モデルのテストとは別に、PLATEAU データセットの登録都市数の多さから、都市の幾何学的研究に関するシミュレーションを実施できる都市数が増加することが大いに期待できる。しかし、PLATEAU に登録されているデータの精度は、さらなる研究に広く適用する前に緊急に改善される必要がある。

これらの観点から、本研究が、対象となる都市の数を拡大し、この情報をもとに、どのような幾何パラメータが空力特性に影響を与えるかを調査するための第一歩となることを期待している。

6 結論

今後数十年で、都市部に居住する人口が増加すると予想されている。ヒートアイランド現象の顕在化により、特に都市部では極端な高温を経験しやすいことが多くの報告で強調されている。都市部での人口増加に対して、持続可能かつ快適に居住可能な方法を模索するためには、都市を構成する建物の幾何学的パラメータにより、都市表面と大気の運動量、熱、水蒸気などの交換量を精度よくモデル化する必要がある。

こうした都市の上空大気の干渉をモデル化する方法の一つバルク法がある。都市域を巨視的に捉え、空気力学パラメータにより都市表面と大気の様々な物理量のやり取りを表現する方法である。空気力学パラメータとは、建物に作用する抗力を定量化したバルク抗力係数、媒体内のスカラー量（温度、物質濃度、エネルギーなど）の輸送または移動を定量化したバルクスカラー輸送係数、これらの輸送量を長さスケールとして表現した概念的な高さである粗度長、障害物により平均風速が理論的にゼロになる地面からの高さを表すゼロ面変位のことである。

しかし、これまでの実験や数値モデルにおいて、都市の空気力学パラメータをモデル化することは試みられてきたが、既往研究ではモデルの一般性を担保するため、実際の都市形態を忠実に反映した幾何模型ではなく、単純模型群が用いられることが多かった。また、実街区を対象とした空気力学パラメータのモデルも提案されているが、対象としている都市域は限られている。そのため、都市表面の詳細な幾何学的特

微が空気力学パラメータに与える影響を把握するためには、正確な都市幾何学データと空気力学パラメータの関係を把握することが必要である。

しかしながら、現状日本にある主要な都市について、空気力学パラメータに大きく影響すると予想される都市建物の幾何学的パラメータがどのような統計的特性を持つのかは十分に調査されていない。そこで本研究では、既往研究において提案された空気力学パラメータモデルの適用可能性を調査することを念頭に、その基礎的検討として日本の主要都市における建物形状データベースである PLATEAU を活用し、都市幾何学データを抽出し、登録された 120 都市のうち東京、名古屋を含めた 106 都市の幾何特性を把握する事を目的として統計解析を実施した。

そのために本研究では、PLATEAU プラットフォームに CityGML 形式で保存されているデータセットから次の都市幾何学パラメータを可視化した：建物の数、平均・最大・最小の測定高さ、標準偏差。それらの値を使用して、測定高さに関する PDF、 z スコアの歪度、および尖度も計算された。

まず、結果は札幌、東京 23 区、京都、大阪の 4 つの主要都市を例として提示した。建物数、平均測定高さ、標準偏差は、商業および特に東京の行政区域で、周辺の住宅地域よりも大きい傾向があることが明らかになった。この傾向は過去の研究と一致している。PDF では、各都市の平均および最小測定高さにはわずかな違いが見られる一方で、最大値には大きな差があった。最も頻繁に観測された高さは、すべて平均値より低く、 z スコアプロットに反映されていた。歪度はすべて正であることが明らかとなり、最も頻繁な高さが最小測定高さに近いことが証明された。尖度も類似した傾向を示し、建物数、平均、および標準偏差プロットに共通するパターンが予測された。次に、6 つの異なる都市幾何学パラメータの組み合わせによる散布図が、4 都市について生成されました：建物数に対する平均測定高さ、標準偏差、最大・最小測定高さ、歪度、尖度の範囲が、メッシュごとにプロットされた。この散布図では、札幌だけが他の 3 都市よりも平均測定高さが低いクラスターを形成するという例外を除いて、類似した傾向が明らかになった。これらの散布図から、平均値に対する標準偏差と最大測定高さのプロットが Kanda モデルに適用された。その結果、係数の違いはあるものの、データは Kanda らによって提案された回帰曲線と類似することが示され、このモデルが 4 都市に適用可能であることが示唆された。

同じ都市幾何学パラメータが、他の 102 都市についても計算され、散布図に可視化され、合計で 106 都市が対象となった。さらなる洞察を得るために、それらは日本の国勢調査で適用される定義に従って分類された。大都市の散布図は札幌、東京、京都、大阪で明らかになったものと似たパターンを示した。中小都市もまた、建物数、歪度、尖度と平均測定高さの散布図において似たパターンを示した。しかし、中小都市は、最大および最小測定高さ、標準偏差と平均測定高さの関係において大都市とは明確に異なる挙動を示した。特に小都市では建物数が限られているため、高さの多様性が制限される可能性があると考えられる。

神田モデルの比較も、106 都市すべての各都市内メッシュごとに、最大測定建物高さと平均値に対する標準偏差のデータ傾向を用いて行った。その結果、神田モデルは中小都市よりも大都市に適していることが明らかになった。これは、提案されたモデルが東京と名古屋という大都市の都市幾何学データを用いて構築されており、他の 2 つの都市クラスを反映することが本質的に難しいと考えられる。

PLATEAU データベースに登録されているより多くの都市の幾何学的および空気力学的パラメータを分析することで、これまでの異なる研究によって提案された他のモデルが、より多くの実在する都市に適用可能であるかを調査することが可能になりえる。しかし、実在する都市をより正確に反映した結果を得るためには、PLATEAU 上のデータの精度を向上させる必要がある。本研究が、対象となる都市の数を拡大し、既存のモデルの適用性と精度をこれらの実在都市に評価するための第一歩となることを期待している。

7 参考文献

- [1] United Nations, "2018 Revision of World Urbanization Prospects," 2019.
- [2] G. Chaolin, W. Liya, and I. Cook, "Progress in research on Chinese urbanization," *Frontiers of Architectural Research*, vol. 1, no. 2, pp. 101–149, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.foar.2012.02.013.
- [3] T. T. Nguyen *et al.*, "Implementation of a specific urban water management - Sponge City," *Science of The Total Environment*, vol. 652, pp. 147–162, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.168.
- [4] R. R. Brown, N. Keath, and T. H. F. Wong, "Urban water management in cities: historical, current and future regimes," *Water Science and Technology*, vol. 59, no. 5, pp. 847–855, Mar. 2009, doi: 10.2166/wst.2009.029.
- [5] S. Chen, P. He, B. Yu, D. Wei, and Y. Chen, "The challenge of noise pollution in high-density urban areas: Relationship between 2D/3D urban morphology and noise perception," *Build Environ*, vol. 253, p. 111313, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111313.
- [6] A. M. Dewan, Md. H. Kabir, K. Nahar, and Md. Z. Rahman, "Urbanisation and environmental degradation in Dhaka Metropolitan Area of Bangladesh," *International Journal of Environment and Sustainable Development*, vol. 11, no. 2, p. 118, 2012, doi: 10.1504/IJESD.2012.049178.
- [7] J. S. Apte and C. Manchanda, "High-resolution urban air pollution mapping," *Science (1979)*, vol. 385, no. 6707, pp. 380–385, Jul. 2024, doi: 10.1126/science.adq3678.
- [8] N. Zanaty, A. Eldesouky Mohamed, and N. Nabil, "Respiratory health assessment of outdoor workers exposed to urban air pollution based on satellite observations," *Remote Sens Appl*, vol. 36, p. 101292, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rsase.2024.101292.
- [9] S. Stansfeld, M. Haines, and B. Brown, "Noise and Health in the Urban Environment," *Rev Environ Health*, vol. 15, no. 1–2, Jan. 2000, doi: 10.1515/REVEH.2000.15.1-2.43.

- [10] J. P. Bello *et al.*, "SONYC," *Commun ACM*, vol. 62, no. 2, pp. 68–77, Jan. 2019, doi: 10.1145/3224204.
- [11] L. Yang, F. Qian, D.-X. Song, and K.-J. Zheng, "Research on Urban Heat-Island Effect," *Procedia Eng*, vol. 169, pp. 11–18, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.10.002.
- [12] L. Kleerekoper, M. van Esch, and T. B. Salcedo, "How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect," *Resour Conserv Recycl*, vol. 64, pp. 30–38, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.06.004.
- [13] Q. Weng, "Fractal Analysis of Satellite-Detected Urban Heat Island Effect," *Photogramm Eng Remote Sensing*, vol. 69, no. 5, pp. 555–566, May 2003, doi: 10.14358/PERS.69.5.555.
- [14] G. A. Meehl and C. Tebaldi, "More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century," *Science (1979)*, vol. 305, no. 5686, pp. 994–997, Aug. 2004, doi: 10.1126/science.1098704.
- [15] J. Song, Y. Lu, T. Fischer, and K. Hu, "Effects of the urban landscape on heatwave-mortality associations in Hong Kong: comparison of different heatwave definitions," *Front Environ Sci Eng*, vol. 18, no. 1, p. 11, Jan. 2024, doi: 10.1007/s11783-024-1771-z.
- [16] M. Santamouris and D. Kolokotsa, "On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe," *Energy Build*, vol. 98, pp. 125–133, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.050.
- [17] J. Paravantis, M. Santamouris, C. Cartalis, C. Efthymiou, and N. Kontoulis, "Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece," *Sustainability*, vol. 9, no. 4, p. 606, Apr. 2017, doi: 10.3390/su9040606.
- [18] C. Heaviside, S. Vardoulakis, and X.-M. Cai, "Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK," *Environmental Health*, vol. 15, no. S1, p. S27, Dec. 2016, doi: 10.1186/s12940-016-0100-9.
- [19] C. Yuan, A. S. Adelia, S. Mei, W. He, X.-X. Li, and L. Norford, "Mitigating intensity of urban heat island by better understanding on urban

morphology and anthropogenic heat dispersion,” *Build Environ*, vol. 176, p. 106876, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106876.

- [20] Y. Jing, H.-Y. Zhong, W.-W. Wang, Y. He, F.-Y. Zhao, and Y. Li, “Quantitative city ventilation evaluation for urban canopy under heat island circulation without geostrophic winds: Multi-scale CFD model and parametric investigations,” *Build Environ*, vol. 196, p. 107793, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107793.
- [21] S. Sen and J. Roesler, “Wind direction and cool surface strategies on microscale urban heat island,” *Urban Clim*, vol. 31, p. 100548, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100548.
- [22] L. Wang, D. Li, N. Zhang, J. Sun, and W. Guo, “Surface Urban Heat and Cool Islands and Their Drivers: An Observational Study in Nanjing, China,” *J Appl Meteorol Climatol*, vol. 59, no. 12, pp. 1987–2000, Dec. 2020, doi: 10.1175/JAMC-D-20-0089.1.
- [23] W. Peng, R. Wang, J. Duan, W. Gao, and Z. Fan, “Surface and canopy urban heat islands: Does urban morphology result in the spatiotemporal differences?,” *Urban Clim*, vol. 42, p. 101136, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101136.
- [24] L. Wang and D. Li, “Urban Heat Islands during Heat Waves: A Comparative Study between Boston and Phoenix,” *J Appl Meteorol Climatol*, vol. 60, no. 5, pp. 621–641, May 2021, doi: 10.1175/JAMC-D-20-0132.1.
- [25] P. Cohen, O. Potchter, and A. Matzarakis, “Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments,” *Applied Geography*, vol. 37, pp. 1–10, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.apgeog.2012.11.001.
- [26] J. Fahed, E. Kinab, S. Ginestet, and L. Adolphe, “Impact of urban heat island mitigation measures on microclimate and pedestrian comfort in a dense urban district of Lebanon,” *Sustain Cities Soc*, vol. 61, p. 102375, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102375.
- [27] P. P.-Y. Wong, P.-C. Lai, C.-T. Low, S. Chen, and M. Hart, “The impact of environmental and human factors on urban heat and microclimate variability,” *Build Environ*, vol. 95, pp. 199–208, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.09.024.

- [28] X. Shi, Y. Zhu, J. Duan, R. Shao, and J. Wang, "Assessment of pedestrian wind environment in urban planning design," *Landsc Urban Plan*, vol. 140, pp. 17–28, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.landurbplan.2015.03.013.
- [29] M. Taleghani, "Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2011–2018, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.010.
- [30] P. Höppe, "The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment," *Int J Biometeorol*, vol. 43, no. 2, pp. 71–75, Oct. 1999, doi: 10.1007/s004840050118.
- [31] M. Kanda, A. Inagaki, T. Miyamoto, M. Gryschka, and S. Raasch, "A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces," *Boundary Layer Meteorol*, vol. 148, no. 2, pp. 357–377, Aug. 2013, doi: 10.1007/s10546-013-9818-x.
- [32] S. A. Zaki, A. Hagishima, J. Tanimoto, and N. Ikegaya, "Aerodynamic Parameters of Urban Building Arrays with Random Geometries," *Boundary Layer Meteorol*, vol. 138, no. 1, pp. 99–120, Jan. 2011, doi: 10.1007/s10546-010-9551-7.
- [33] C. W. Kent, S. Grimmond, D. Gatey, and K. Hirano, "Urban morphology parameters from global digital elevation models: Implications for aerodynamic roughness and for wind-speed estimation," *Remote Sens Environ*, vol. 221, pp. 316–339, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.rse.2018.09.024.
- [34] Chao Yuan, Leslie Norford, Rex Britter, and Edward Ng, "A modelling-mapping approach for fine-scale assessment of pedestrian-level wind in high-density cities," *Build Environ*, vol. 97, pp. 152–165, Dec. 2016.
- [35] Yoshihide Tominaga, "CFD simulations of turbulent flow and dispersion in built environment: A perspective review," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 249, Apr. 2024.
- [36] HONG CHENG and IAN P. CASTRO, "NEAR WALL FLOW OVER URBAN-LIKE ROUGHNESS," *Boundary Layer Meteorol*, vol. 104, pp. 229–259, Nov. 2002.

- [37] Aya Hagishima, Jun Tanimoto, Koji Nagayama, and Sho Meno, "Aerodynamic Parameters of Regular Arrays of Rectangular Blocks with Various Geometries," *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 132, pp. 315–337, Jun. 2009.
- [38] Azli Abd Razak, Aya Hagishima, Naoki Ikegaya, and Jun Tanimoto, "Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment," *Build Environ*, vol. 59, pp. 56–65, Aug. 2013.
- [39] T. Kawaminami, N. Ikegaya, A. Hagishima, and J. Tanimoto, "Velocity and scalar concentrations with low occurrence frequencies within urban canopy regions in a neutrally stable shear flow over simplified urban arrays," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 182, pp. 286–294, Sep. 2018.
- [40] Manabu Kanda, Atsushi Inagaki, Takashi Miyamoto, Micha Gryschka, and Siegfried Raasch, "A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces," *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 148, pp. 357–377, Apr. 2013.
- [41] A. Norouzasas, P. Pilehchi Ha, M. Ahmadi, and H. B. Rijal, "Evaluation of urban form influence on pedestrians' wind comfort," *Build Environ*, vol. 224, p. 109522, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109522.
- [42] X. Zhang *et al.*, "Pedestrian wind comfort near a super-tall building with various configurations in an urban-like setting," *Build Simul*, vol. 13, no. 6, pp. 1385–1408, Dec. 2020, doi: 10.1007/s12273-020-0658-6.
- [43] Y.-H. Juan, C.-Y. Wen, Z. Li, and A.-S. Yang, "Impacts of urban morphology on improving urban wind energy potential for generic high-rise building arrays," *Appl Energy*, vol. 299, p. 117304, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117304.
- [44] C.-A. Ku and H.-K. Tsai, "Evaluating the Influence of Urban Morphology on Urban Wind Environment Based on Computational Fluid Dynamics Simulation," *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 9, no. 6, p. 399, Jun. 2020, doi: 10.3390/ijgi9060399.
- [45] Y. Liu, Y. Xu, F. Zhang, and W. Shu, "A preliminary study on the influence of Beijing urban spatial morphology on near-surface wind speed," *Urban Clim*, vol. 34, p. 100703, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100703.

- [46] T.-O. Hågbø and K. E. T. Giljarhus, "Sensitivity of urban morphology and the number of CFD simulated wind directions on pedestrian wind comfort and safety assessments," *Build Environ*, vol. 253, p. 111310, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.111310.
- [47] M. Carpentieri and A. G. Robins, "Influence of urban morphology on air flow over building arrays," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 145, pp. 61–74, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.jweia.2015.06.001.
- [48] M. Carpentieri, A. G. Robins, and S. Baldi, "Three-Dimensional Mapping of Air Flow at an Urban Canyon Intersection," *Boundary Layer Meteorol*, vol. 133, no. 2, pp. 277–296, Nov. 2009, doi: 10.1007/s10546-009-9425-z.
- [49] O. Coceal and S. E. Belcher, "A canopy model of mean winds through urban areas," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 130, no. 599, pp. 1349–1372, Apr. 2004, doi: 10.1256/qj.03.40.
- [50] H. Yoshida and M. Omae, "An approach for analysis of urban morphology: methods to derive morphological properties of city blocks by using an urban landscape model and their interpretations," *Comput Environ Urban Syst*, vol. 29, no. 2, pp. 223–247, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.008.
- [51] J. Hang, M. Sandberg, and Y. Li, "Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models," *Atmos Environ*, vol. 43, no. 4, pp. 869–878, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.10.040.
- [52] M. Kham, J.-F. Semblat, P.-Y. Bard, and P. Dangla, "Seismic Site-City Interaction: Main Governing Phenomena through Simplified Numerical Models," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, no. 5, pp. 1934–1951, Oct. 2006, doi: 10.1785/0120050143.
- [53] A. Martilli, "On the Derivation of Input Parameters for Urban Canopy Models from Urban Morphological Datasets," *Boundary Layer Meteorol*, vol. 130, no. 2, pp. 301–306, Feb. 2009, doi: 10.1007/s10546-008-9345-3.
- [54] A. Labetski, S. Vitalis, F. Biljecki, K. Arroyo Ohori, and J. Stoter, "3D building metrics for urban morphology," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 37, no. 1, pp. 36–67, Jan. 2023, doi: 10.1080/13658816.2022.2103818.

- [55] G. Nys and R. Billen, "From consistency to flexibility: A simplified database schema for the management of CityJSON 3D city models," *Transactions in GIS*, vol. 25, no. 6, pp. 3048–3066, Dec. 2021, doi: 10.1111/tgis.12807.
- [56] J.-P. Virtanen, K. Jaalama, T. Puustinen, A. Julin, J. Hyyppä, and H. Hyyppä, "Near Real-Time Semantic View Analysis of 3D City Models in Web Browser," *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 10, no. 3, p. 138, Mar. 2021, doi: 10.3390/ijgi10030138.
- [57] S. M. Murshed, A. Duval, A. Koch, and P. Rode, "Impact of Urban Morphology on Energy Consumption of Vertical Mobility in Asian Cities—A Comparative Analysis with 3D City Models," *Urban Science*, vol. 3, no. 1, p. 4, Dec. 2018, doi: 10.3390/urbansci3010004.
- [58] M. J. Ruá, P. Huedo, V. Civera, and R. Agost-Felip, "A simplified model to assess vulnerable areas for urban regeneration," *Sustain Cities Soc*, vol. 46, p. 101440, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101440.
- [59] G. Wu, H. Tang, Y. Deng, H. Wu, and C. Lin, "A Data Driven Approach to Measure Evolution Trends of City Information Modeling," *Journal of Urban Development and Management*, vol. 1, no. 1, pp. 2–16, Nov. 2022, doi: 10.56578/judm010102.
- [60] G. White, A. Zink, L. Codecá, and S. Clarke, "A digital twin smart city for citizen feedback," *Cities*, vol. 110, p. 103064, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.cities.2020.103064.
- [61] Y. Huang, R. Tu, W. Tuerxun, X. Jia, X. Zhang, and X. Chen, "A Community Information Model and Wind Environment Parametric Simulation System for Old Urban Area Microclimate Optimization: A Case Study of Dongshi Town, China," *Buildings*, vol. 14, no. 3, p. 832, Mar. 2024, doi: 10.3390/buildings14030832.
- [62] W. Loibl, M. Vuckovic, G. Etminan, M. Ratheiser, S. Tschannett, and D. Österreicher, "Effects of Densification on Urban Microclimate—A Case Study for the City of Vienna," *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, no. 4, p. 511, Apr. 2021, doi: 10.3390/atmos12040511.
- [63] S. Leng, S.-W. Li, Z.-Z. Hu, H.-Y. Wu, and B.-B. Li, "Development of a micro-in-meso-scale framework for simulating pollutant dispersion and

wind environment in building groups,” *J Clean Prod*, vol. 364, p. 132661, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132661.

- [64] G. Papangelis, M. Tombrou, A. Dandou, and T. Kontos, “An urban ‘green planning’ approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. A case study of Athens, Greece,” *Landsc Urban Plan*, vol. 105, no. 1–2, pp. 174–183, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.12.014.
- [65] H. Kondo, Y. Genchi, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, H. Yoshikado, and H. Komiyama, “Development of a Multi-Layer Urban Canopy Model for the Analysis of Energy Consumption in a Big City: Structure of the Urban Canopy Model and its Basic Performance,” *Boundary Layer Meteorol*, vol. 116, no. 3, pp. 395–421, Sep. 2005, doi: 10.1007/s10546-005-0905-5.
- [66] Y. Zhang, S. Cao, L. Zhao, and J. Cao, “A case application of WRF-UCM models to the simulation of urban wind speed profiles in a typhoon,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 220, p. 104874, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jweia.2021.104874.
- [67] J. C. Teixeira, J. Fallmann, A. C. Carvalho, and A. Rocha, “Surface to boundary layer coupling in the urban area of Lisbon comparing different urban canopy models in WRF,” *Urban Clim*, vol. 28, p. 100454, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.uclim.2019.100454.
- [68] C.-A. Ku and H.-K. Tsai, “Evaluating the Influence of Urban Morphology on Urban Wind Environment Based on Computational Fluid Dynamics Simulation,” *ISPRS Int J Geoinf*, vol. 9, no. 6, p. 399, Jun. 2020, doi: 10.3390/ijgi9060399.
- [69] Y. Dai, C. M. Mak, Z. Ai, and J. Hang, “Evaluation of computational and physical parameters influencing CFD simulations of pollutant dispersion in building arrays,” *Build Environ*, vol. 137, pp. 90–107, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.04.005.
- [70] N. Nazarian and J. Kleissl, “CFD simulation of an idealized urban environment: Thermal effects of geometrical characteristics and surface materials,” *Urban Clim*, vol. 12, pp. 141–159, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.uclim.2015.03.002.

- [71] M. Shirzadi, M. Naghashzadegan, and P. A. Mirzaei, "Improving the CFD modelling of cross-ventilation in highly-packed urban areas," *Sustain Cities Soc*, vol. 37, pp. 451–465, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2017.11.020.
- [72] Yoshihide Tominaga, "CFD simulations of turbulent flow and dispersion in built environment: A perspective review," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 249, Apr. 2024.
- [73] Y. Toparlar *et al.*, "CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam," *Build Environ*, vol. 83, pp. 79–90, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.08.004.
- [74] J.-L. Santiago *et al.*, "CFD modelling of vegetation barrier effects on the reduction of traffic-related pollutant concentration in an avenue of Pamplona, Spain," *Sustain Cities Soc*, vol. 48, p. 101559, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101559.
- [75] J. L. Santiago *et al.*, "Evaluation of a CFD-based approach to estimate pollutant distribution within a real urban canopy by means of passive samplers," *Science of The Total Environment*, vol. 576, pp. 46–58, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.234.
- [76] H. Nakayama, T. Takemi, and H. Nagai, "Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations," *Atmospheric Science Letters*, vol. 13, no. 3, pp. 180–186, Jul. 2012, doi: 10.1002/asl.377.
- [77] S. Wang *et al.*, "Chemical Tomography in a Fresh Wildland Fire Plume: A Large Eddy Simulation (LES) Study," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 126, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.1029/2021JD035203.
- [78] Y. Jiang and Q. Chen, "Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 89, no. 13, pp. 1155–1178, Oct. 2001, doi: 10.1016/S0167-6105(01)00106-4.
- [79] G. Zu and K. Lam, "LES and Wind Tunnel Test of Flow around Two Tall Buildings in Staggered Arrangement," *Computation*, vol. 6, no. 2, p. 28, Mar. 2018, doi: 10.3390/computation6020028.

- [80] G. Kirkil and C.-L. Lin, "Large Eddy Simulation of Wind Flow over A Realistic Urban Area," *Computation*, vol. 8, no. 2, p. 47, May 2020, doi: 10.3390/computation8020047.
- [81] G. Vita, S. A. Hashmi, S. Salvadori, H. Hemida, and C. Baniotopoulos, "Role of Inflow Turbulence and Surrounding Buildings on Large Eddy Simulations of Urban Wind Energy," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 19, p. 5208, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13195208.
- [82] M. O. Letzel, M. Krane, and S. Raasch, "High resolution urban large-eddy simulation studies from street canyon to neighbourhood scale," *Atmos Environ*, vol. 42, no. 38, pp. 8770–8784, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.08.001.
- [83] M. Kurppa, A. Hellsten, M. Auvinen, S. Raasch, T. Vesala, and L. Järvi, "Ventilation and Air Quality in City Blocks Using Large-Eddy Simulation—Urban Planning Perspective," *Atmosphere (Basel)*, vol. 9, no. 2, p. 65, Feb. 2018, doi: 10.3390/atmos9020065.
- [84] P. Gousseau and B. Blocken, "Near-field pollutant dispersion in an actual urban area: Analysis of the mass transport mechanism by high-resolution Large Eddy Simulations," *Comput Fluids*, vol. 114, pp. 151–162, Jul. 2015.
- [85] A. HAGISHIMA, J. TANIMOTO, S. SUENAGA, N. IKEGAYA, K. MAEDA, and K. NARITA, "WIND TUNNEL EXPERIMENT ON BULK SCALAR COEFFICIENT OF URBAN-LIKE ROUGHNESS," *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, vol. 73, no. 632, pp. 1225–1231, 2008, doi: 10.3130/aije.73.1225.
- [86] Hossein Pishro-Nik, *Introduction to Probability, Statistics, and Random Processes*. Kappa Research, LLC, 2014.
- [87] R. Li, Y. Zhang, and Y. Cui, "Assessment of Outdoor Pedestrian Ventilation Performance While Controlling Building Array Scale and Density," *Sustainability*, vol. 15, no. 8, p. 6742, Apr. 2023, doi: 10.3390/su15086742.
- [88] N. KAWAHARA, "A CASE STUDY ON HOUSING LOCATION GUIDANCE IN A COMPACT CITY IN SAPPORO, JAPAN," Nov. 2024, pp. 187–198. doi: 10.2495/SDP240161.

- [89] K. Okumura, T. Ogoshi, T. Asada, M. Arimura, and T. Arreeras, "Development of downscaling method using the RBF network assessing the hourly population inflow: A case study of the Sapporo urban area," *Asian Transport Studies*, vol. 6, p. 100019, 2020, doi: 10.1016/j.eastsj.2020.100019.
- [90] E. Chiba, Y. Ishida, Z. Wang, and A. Mochida, "Proposal of <sc>LCZ</sc> categories and standards considering super high-rise buildings suited for Asian cities based on the analysis of urban morphological properties of Tokyo," *JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW*, vol. 5, no. 3, pp. 247–268, Jul. 2022, doi: 10.1002/2475-8876.12269.
- [91] Y. Akiba, S. Wang, M. Sato, and H. Shima, "Impact of Land-Use Differences on Block-Size Distribution in Tokyo," *J Physical Soc Japan*, vol. 92, no. 10, Oct. 2023, doi: 10.7566/JPSJ.92.104801.
- [92] K. Shiraishi and T. Terada, "Tokyo's urban tree challenge: Decline in tree canopy cover in Tokyo from 2013 to 2022," *Urban For Urban Green*, vol. 97, p. 128331, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ufug.2024.128331.
- [93] K. Oda, C. D. D. Rupprecht, K. Tsuchiya, and S. R. McGreevy, "Urban Agriculture as a Sustainability Transition Strategy for Shrinking Cities? Land Use Change Trajectory as an Obstacle in Kyoto City, Japan," *Sustainability*, vol. 10, no. 4, p. 1048, Apr. 2018, doi: 10.3390/su10041048.
- [94] J. Kang, S. Hirabayashi, and S. Shibata, "Urban Forest Ecosystem Services Vary with Land Use and Species: A Case Study of Kyoto City," *Forests*, vol. 13, no. 1, p. 67, Jan. 2022, doi: 10.3390/f13010067.
- [95] K. Nakajima, Y. Takane, Y. Kikegawa, Y. Furuta, and H. Takamatsu, "Human behaviour change and its impact on urban climate: Restrictions with the G20 Osaka Summit and COVID-19 outbreak," *Urban Clim*, vol. 35, p. 100728, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100728.

付録 A: CityGML データファイルの全体構造

```

1  <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2  <core:CityModel
3      xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml"
4      xmlns:core="http://www.opengis.net/citygml/2.0"
5      xmlns:bldg="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0"
6      xmlns:app="http://www.opengis.net/citygml/appearance/2.0"
7      xmlns:uro="http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/toshisaisei/itoshisaisei/iur/uro/1.4"
8  ∨  ...略...
9  >
10
11  <!-- ②座標系と範囲の情報 -->
12  ∨  <gml:boundedBy>
13  ∨      <gml:Envelope srsName="http://www.opengis.net/def/crs/EPSG/0/6697" srsDimension="3">
14          <gml:lowerCorner>43.055019234646984 141.34946871285302 9.522777652574995</gml:lowerCorner>
15          <gml:upperCorner>43.06696208463957 141.36368789297552 166.0998221</gml:upperCorner>
16      </gml:Envelope>
17  </gml:boundedBy>
18
19  <!-- ③テクスチャ（アピランス）に関する情報 -->
20  ∨  <app:appearanceMember>
21      テクスチャの参照に関する情報
22  </app:appearanceMember>
23
24  <!-- ④地物の情報 -->
25  ∨  <core:cityObjectMember>
26      1つの地物の情報
27  </core:cityObjectMember>
28  ∨  <core:cityObjectMember>
29      1つの地物の情報
30  </core:cityObjectMember>
31      ...地物の数だけ続く...
32
33  </core:CityModel>
34

```

付録 B: 札幌大通郵便局の CityGML データを含む XML ファイル

```

1  <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2  <core:CityModel
3      xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml"
4      xmlns:core="http://www.opengis.net/citygml/2.0"
5      xmlns:bldg="http://www.opengis.net/citygml/building/2.0"
6      xmlns:app="http://www.opengis.net/citygml/appearance/2.0"
7      xmlns:uro="http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/toshisaisei/itoshisaisei/iur/uro/1.4"
8  >
9      <!-- ②座標系と範囲の情報 -->
10
11      <gml:boundedBy>
12          <gml:Envelope srsName="http://www.opengis.net/def/crs/EPSSG/0/6697" srsDimension="3">
13              <gml:lowerCorner>43.055019234646984 141.34946871285302 9.522777652574995</gml:lowerCorner>
14              <gml:upperCorner>43.06696208463957 141.36368789297552 166.0998221</gml:upperCorner>
15          </gml:Envelope>
16      </gml:boundedBy>
17
18      <!-- ③テクスチャ（アピランス）に関する情報 -->
19
20      <app:appearanceMember>
21          テクスチャの参照に関する情報
22      </app:appearanceMember>
23
24      <!-- ④地物の情報 -->
25      <core:cityObjectMember>
26          <!-- ①地物のID -->
27          <bldg:Building gml:id="BLD_66f7a0ab-4a8a-4e53-a8ee-dc59ec0b5cb3">
28
29              <!-- ②名前 -->
30              <gml:name>札幌大通郵便局</gml:name>
31              <!-- ③汎用属性 -->
32              <gen:stringAttribute name="建物ID">
33                  <gen:value>01100-bldg-344507</gen:value>
34              </gen:stringAttribute>
35              <gen:stringAttribute name="kisokey">
36                  <gen:value>0101000020100101</gen:value>
37              </gen:stringAttribute>
38              <gen:stringAttribute name="AreaSerachKey">
39                  <gen:value>010100002</gen:value>
40              </gen:stringAttribute>
41          </bldg:Building>
42      </core:cityObjectMember>
43  </core:CityModel>

```

```

39         <gen:value>010100002</gen:value>
40     </gen:stringAttribute>
41     <gen:stringAttribute name="KeyCode">
42         <gen:value>478847</gen:value>
43     </gen:stringAttribute>
44     <gen:stringAttribute name="様式Aキー">
45         <gen:value>0101000020100101</gen:value>
46     </gen:stringAttribute>
47     <gen:stringAttribute name="現況図250">
48         <gen:value>09-09</gen:value>
49     </gen:stringAttribute>
50     <gen:stringAttribute name="編集年度">
51         <gen:value>2019</gen:value>
52     </gen:stringAttribute>
53     <gen:stringAttribute name="分割年度">
54         <gen:value>2019</gen:value>
55     </gen:stringAttribute>
56     <gen:stringAttribute name="大ゾーン番号">
57         <gen:value>01</gen:value>
58     </gen:stringAttribute>
59     <gen:stringAttribute name="中ゾーン番号">
60         <gen:value>01</gen:value>
61     </gen:stringAttribute>
62     <gen:stringAttribute name="小ゾーン番号">
63         <gen:value>00002</gen:value>
64     </gen:stringAttribute>
65     <gen:stringAttribute name="敷地番号">
66         <gen:value>01001</gen:value>
67     </gen:stringAttribute>
68     <gen:stringAttribute name="棟番号">
69         <gen:value>01</gen:value>
70     </gen:stringAttribute>
71     <gen:measureAttribute name="駐車場面積">
72         <gen:value uom="m2">331</gen:value>
73     </gen:measureAttribute>
74     <gen:measureAttribute name="建ぺい率">
75         <gen:value uom="percent">80</gen:value>
76     </gen:measureAttribute>
77     <gen:measureAttribute name="容積率">
78         <gen:value uom="percent">800</gen:value>
79     </gen:measureAttribute>
80     <gen:stringAttribute name="建物用途名_基礎">

```



```

79      </gen:measureAttribute>
80  ✓    <gen:stringAttribute name="建物用途名_基礎">
81      <gen:value>通信施設</gen:value>
82    </gen:stringAttribute>
83  ✓    <gen:stringAttribute name="建物用途名_動態図">
84      <gen:value>J_官公庁施設</gen:value>
85    </gen:stringAttribute>
86  ✓    <gen:stringAttribute name="建物用途_大分類">
87      <gen:value>00_母屋</gen:value>
88    </gen:stringAttribute>
89  ✓    <gen:stringAttribute name="建物用途_中分類">
90      <gen:value>d_工業</gen:value>
91    </gen:stringAttribute>
92  ✓    <gen:stringAttribute name="建物用途_小分類">
93      <gen:value>i_都市運営施設</gen:value>
94    </gen:stringAttribute>
95  ✓    <gen:stringAttribute name="建物用途_細分類">
96      <gen:value>83_通信施設</gen:value>
97    </gen:stringAttribute>
98  ✓    <gen:stringAttribute name="建物構造">
99      <gen:value>耐火構造</gen:value>
100   </gen:stringAttribute>
101  ✓    <gen:genericAttributeSet name="石狩川水系豊平川洪水浸水想定区域（計画規模）">
102  ✓      <gen:stringAttribute name="規模">
103          <gen:value>L1</gen:value>
104        </gen:stringAttribute>
105  ✓      <gen:stringAttribute name="浸水ランク">
106          <gen:value>1</gen:value>
107        </gen:stringAttribute>
108  ✓      <gen:measureAttribute name="浸水深">
109          <gen:value uom="m">0.470</gen:value>
110        </gen:measureAttribute>
111    </gen:genericAttributeSet>
112  ✓    <gen:genericAttributeSet name="石狩川水系豊平川洪水浸水想定区域（想定最大規模）">
113  ✓      <gen:stringAttribute name="規模">
114          <gen:value>L2</gen:value>
115        </gen:stringAttribute>
116  ✓      <gen:stringAttribute name="浸水ランク">
117          <gen:value>2</gen:value>
118        </gen:stringAttribute>
119  ✓      <gen:measureAttribute name="浸水深">
120          <gen:value uom="m">0.547</gen:value>
121    </gen:measureAttribute>

```



```

120         <gen:value uom="m">0.54</gen:value>
121     </gen:measureAttribute>
122     <gen:measureAttribute name="継続時間">
123         <gen:value uom="hour">0.000</gen:value>
124     </gen:measureAttribute>
125 </gen:genericAttributeSet>
126 <bldg:class codeSpace="../../../codelists/Building_class.xml">3002</bldg:class>
127 <bldg:usage codeSpace="../../../codelists/Building_usage.xml">454</bldg:usage>
128 <bldg:yearOfConstruction>1966</bldg:yearOfConstruction>
129
130 <!-- ④建物の情報 -->
131 <!-- (1) 形状など -->
132 <bldg:measuredHeight uom="m">29.4</bldg:measuredHeight>
133 <bldg:storeysAboveGround>6</bldg:storeysAboveGround>
134 <bldg:storeysBelowGround>1</bldg:storeysBelowGround>
135 <bldg:lod0RoofEdge>
136     ...LOD0の幾何形状...
137 </bldg:lod0RoofEdge>
138 <bldg:lod1Solid>
139     ...LOD1の幾何形状...
140 </bldg:lod1Solid>
141 <bldg:lod2Solid>
142     ...LOD2を構成する面の幾何形状...
143 </bldg:lod2Solid>
144 <bldg:boundedBy>
145     <bldg:WallSurface gml:id="...">
146         <bldg:lod2MultiSurface>
147             ...LOD2の壁の幾何形状...
148         </bldg:lod2MultiSurface>
149     </bldg:WallSurface>
150 </bldg:boundedBy>
151     ...略...
152 <bldg:boundedBy>
153     <bldg:RoofSurface gml:id="...">
154         <bldg:lod2MultiSurface>
155             ...LOD2の屋根の幾何形状...
156         </bldg:lod2MultiSurface>
157     </bldg:RoofSurface>
158 </bldg:boundedBy>
159     ...略...
160 <bldg:boundedBy>
161     <bldg:OuterCeilingSurface gml:id="...">
162         <bldg:lod2MultiSurface>
163             ...LOD2の外装天井の幾何形状...
164         </bldg:lod2MultiSurface>
165     </bldg:OuterCeilingSurface>
166 </bldg:boundedBy>
167     ...略...
168 <bldg:boundedBy>
169     <bldg:GroundSurface gml:id="...">
170         <bldg:lod2MultiSurface>
171             ...LOD2の接地面（床）の幾何形状...
172         </bldg:lod2MultiSurface>
173     </bldg:GroundSurface>
174 </bldg:boundedBy>
175
176 <!-- ⑤i-UR（i-都市再生技術仕様（案））の情報 -->
177 <uro:buildingDetails>
178     <uro
179

```

付録 C: i-UR 情報で使われているコード一覧

```

1  <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2  <gml:Dictionary
3    xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
4    xmlns:gml="http://www.opengis.net/gml"
5    xsi:schemaLocation="http://www.opengis.net/gml
6                        http://schemas.opengis.net
7                        /gml/3.1.1/profiles/SimpleDictionary/1.0.0/
8                        gmlSimpleDictionaryProfile.xsd"
9  v  gml:id="Building_buildingStructureType">
10
11    <gml:name>Building_buildingStructureType</gml:name>
12
13  v  <gml:dictionaryEntry>
14  v    <gml:Definition gml:id="id1">
15        <gml:description>木造・土蔵造</gml:description>
16        <gml:name>601</gml:name>
17    </gml:Definition>
18  </gml:dictionaryEntry>
19
20  v  <gml:dictionaryEntry>
21  v    <gml:Definition gml:id="id2">
22        <gml:description>鉄骨鉄筋コンクリート造</gml:description>
23        <gml:name>602</gml:name>
24    </gml:Definition>
25  </gml:dictionaryEntry>
26
27  v  <gml:dictionaryEntry>
28  v    <gml:Definition gml:id="id3">
29        <gml:description>鉄筋コンクリート造</gml:description>
30        <gml:name>603</gml:name>
31    </gml:Definition>
32  </gml:dictionaryEntry>
33
34  v  <gml:dictionaryEntry>
35  v    <gml:Definition gml:id="id4">
36        <gml:description>鉄骨造</gml:description>
37        <gml:name>604</gml:name>
38    </gml:Definition>
39  </gml:dictionaryEntry>
40
41  v  <gml:dictionaryEntry>
42  v    <gml:Definition gml:id="id5">
43        <gml:description>軽量鉄骨造</gml:description>
44        <gml:name>605</gml:name>

```

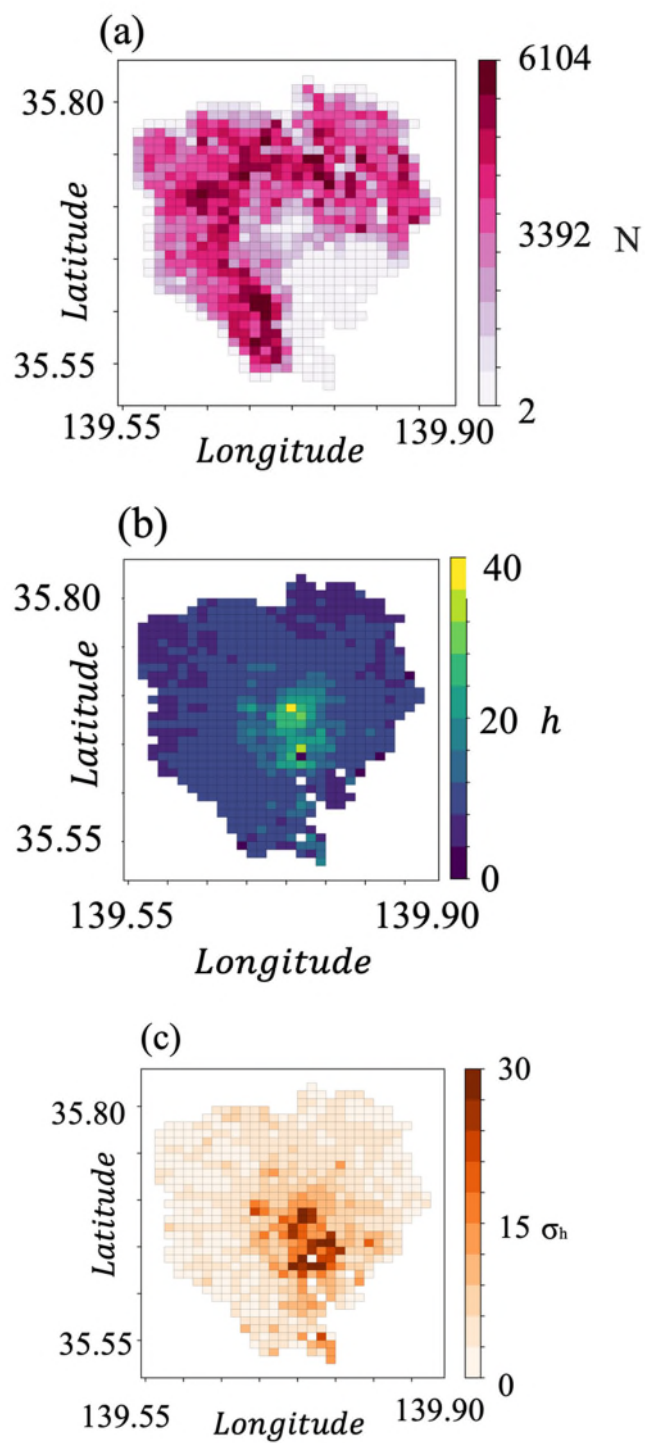
```

40
41  ∨    <gml:dictionaryEntry>
42  ∨        <gml:Definition gml:id="id5">
43              <gml:description>軽量鉄骨造</gml:description>
44              <gml:name>605</gml:name>
45          </gml:Definition>
46      </gml:dictionaryEntry>
47
48  ∨    <gml:dictionaryEntry>
49  ∨        <gml:Definition gml:id="id6">
50              <gml:description>レンガ造・コンクリートブロック造・石造</gml:description>
51              <gml:name>606</gml:name>
52          </gml:Definition>
53      </gml:dictionaryEntry>
54
55  ∨    <gml:dictionaryEntry>
56  ∨        <gml:Definition gml:id="id8">
57              <gml:description>非木造</gml:description>
58              <gml:name>610</gml:name>
59          </gml:Definition>
60      </gml:dictionaryEntry>
61
62  ∨    <gml:dictionaryEntry>
63  ∨        <gml:Definition gml:id="id7">
64              <gml:description>不明</gml:description>
65              <gml:name>611</gml:name>
66          </gml:Definition>
67      </gml:dictionaryEntry>
68
69      <!-- 札幌市用の追加拡張コード -->
70  ∨    <gml:dictionaryEntry>
71  ∨        <gml:Definition gml:id="id9">
72              <gml:description>簡易耐火</gml:description>
73              <gml:name>612</gml:name>
74          </gml:Definition>
75      </gml:dictionaryEntry>
76
77  ∨    <gml:dictionaryEntry>
78  ∨        <gml:Definition gml:id="id10">
79              <gml:description>耐火</gml:description>
80              <gml:name>613</gml:name>
81          </gml:Definition>
82      </gml:dictionaryEntry>
83
84  </gml:Dictionary>
85

```

付録 D: 106 都市の $1\text{km} \times 1\text{km}$ メッシュごとの (a) 建物数 N [個]、(b) 平均測定高さ h [m]、(c) 測定高さの標準偏差 σ_h [m] のカラーマップ

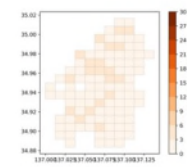
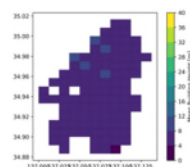
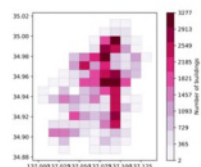
(参考)



番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

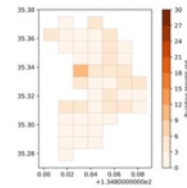
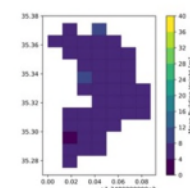
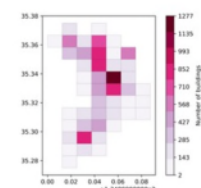
1

安城市
(Anjo-shi)



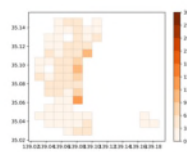
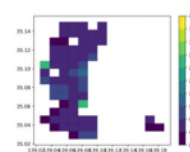
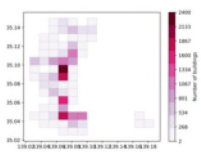
2

朝来市
(Asago-shi)



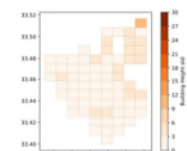
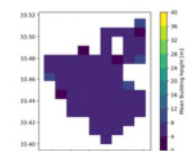
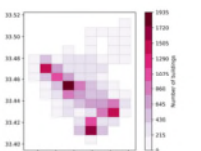
3

熱海市
(Atami-shi)



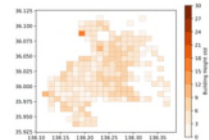
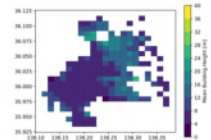
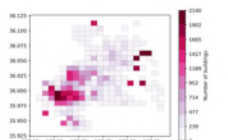
4

筑前町
(Chikuzen-machi)



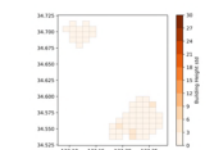
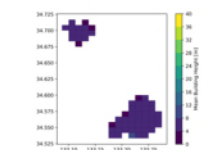
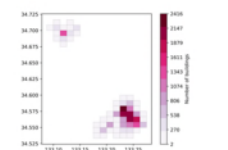
5

茅野市
(Chino-shi)



6

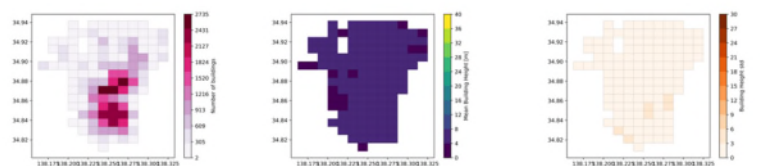
府中市
(Fuchu-shi)



番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

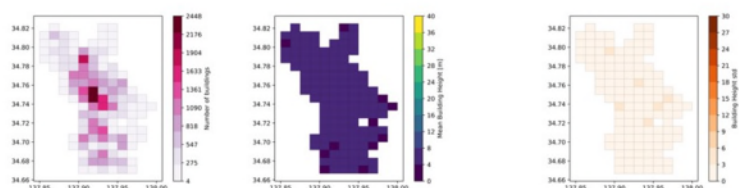
7

藤枝市
(Fujieda-shi)



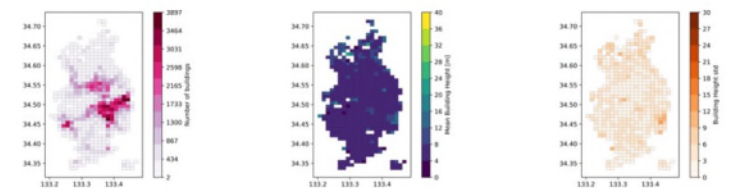
8

袋井市
(Fukuroi-shi)



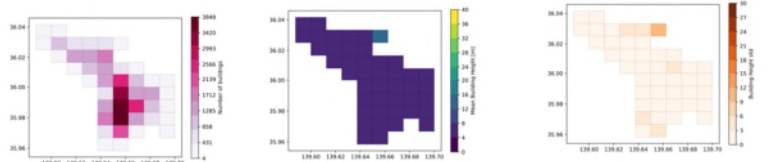
9

福山市
(Fukuyama-shi)



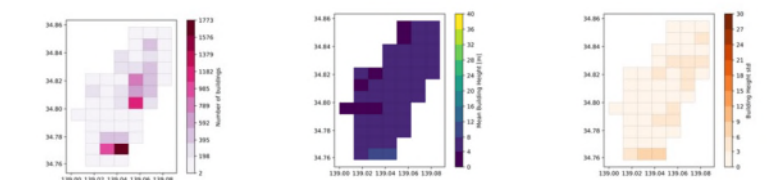
10

蓮田市
(Hasuda-shi)



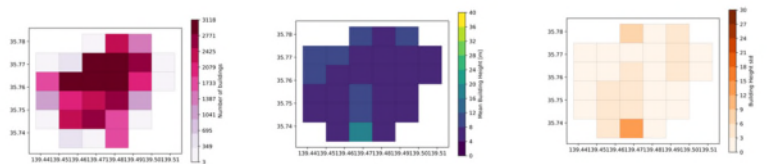
11

東伊豆町
(Higashiizu-cho)



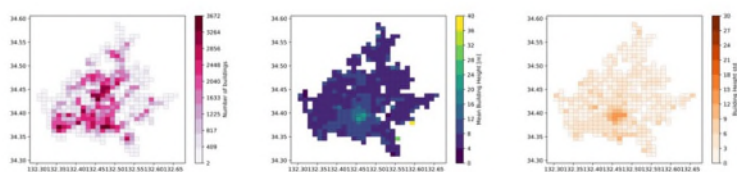
12

東村山市
(Higashimurayama-shi)

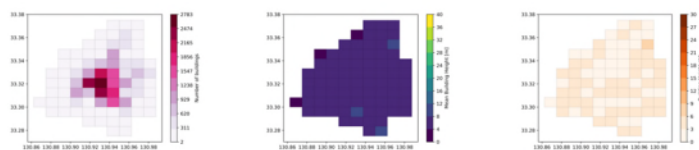


番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

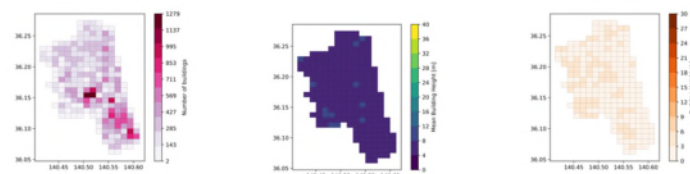
13 広島市
(Hiroshima-shi)



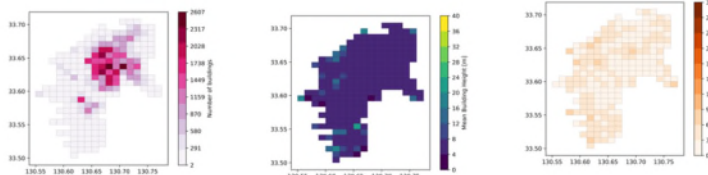
14 日田市
(Hita-shi)



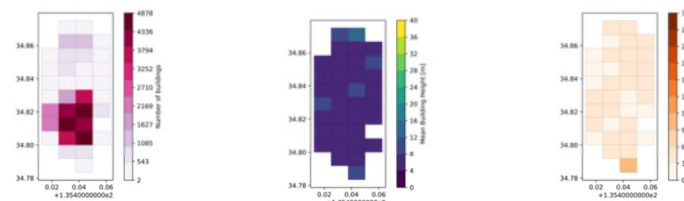
15 鉾田市
(Hokota-shi)



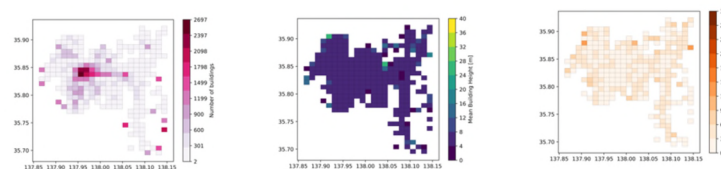
16 飯塚市
(Iizuka-shi)



17 池田市
(Ikeda-shi)

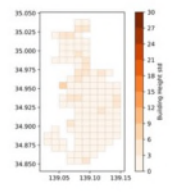
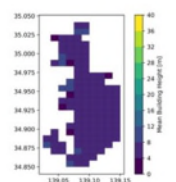
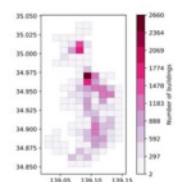


18 伊那市
(Ina-shi)

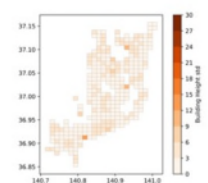
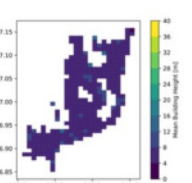
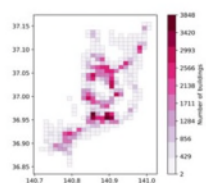


番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

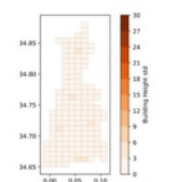
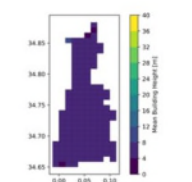
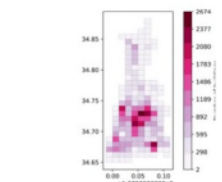
19

伊東市
(Ito-shi)

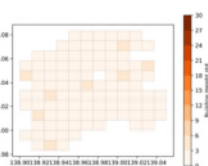
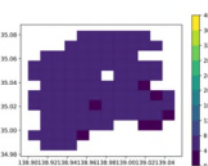
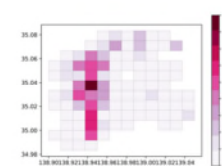
20

いわき市
(Iwaki-shi)

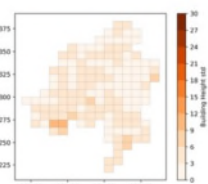
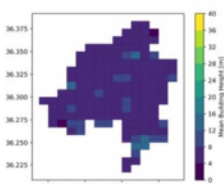
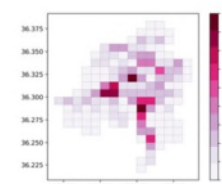
21

磐田市
(Iwata-shi)

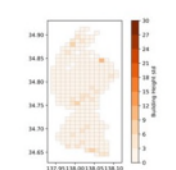
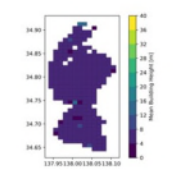
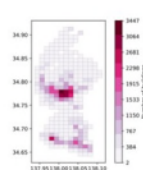
22

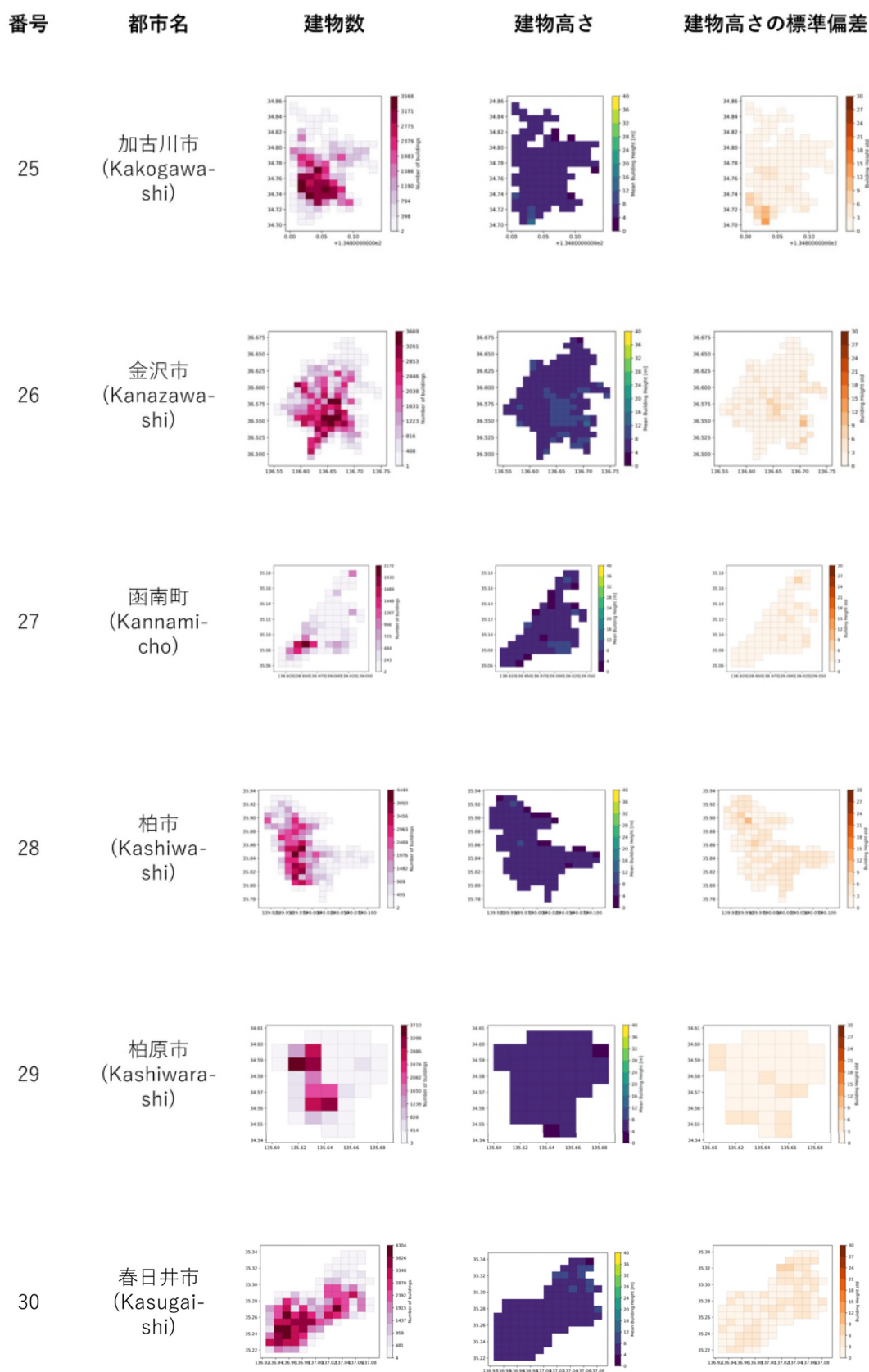
伊豆の国市
(Izunokuni-shi)

23

加賀市
(Kaga-shi)

24

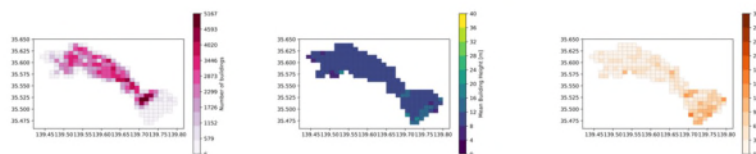
掛川市
(Kakegawa-shi)



番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

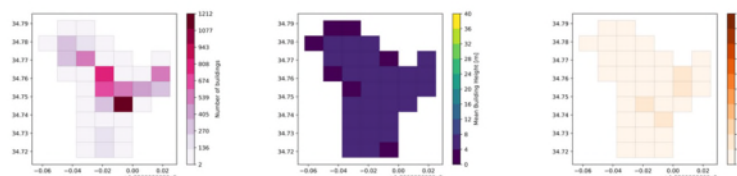
31

川崎市
(Kawasaki-shi)



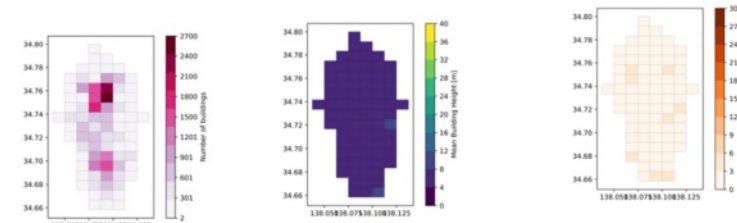
32

河津町
(Kawazu-cho)



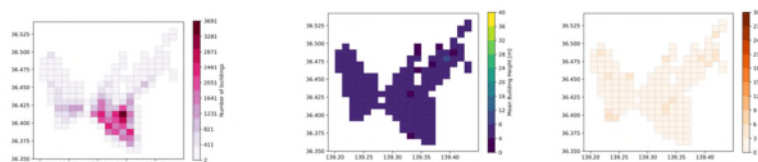
33

菊川市
(Kikugawa-shi)



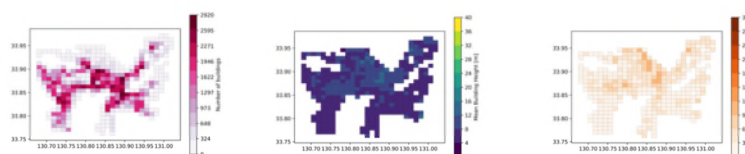
34

桐生市
(Kiryu-shi)



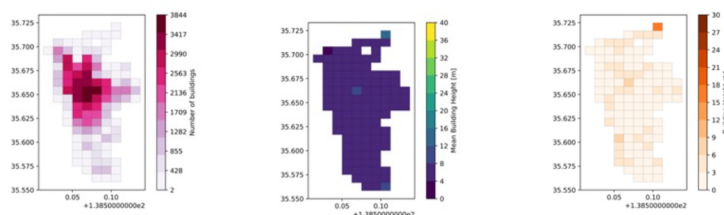
35

北九州市
(Kitakyushu-shi)



36

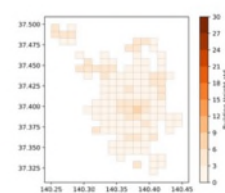
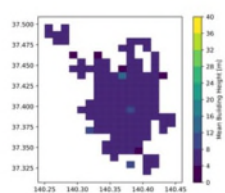
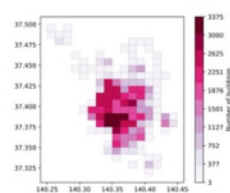
甲府市
(Kofu-shi)



番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

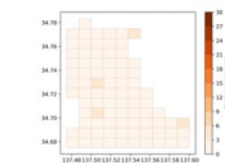
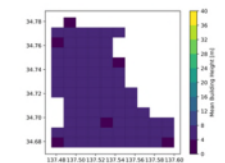
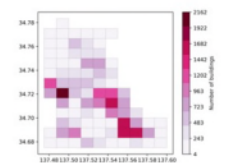
37

郡山市
(Koriyama-shi)



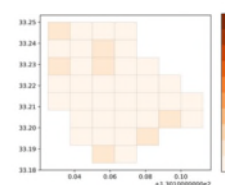
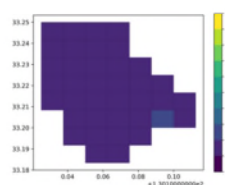
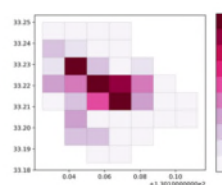
38

湖西市
(Kosai-shi)



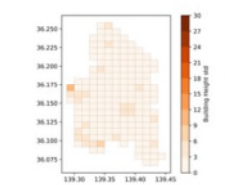
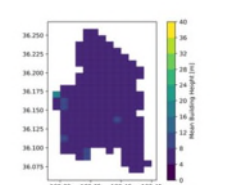
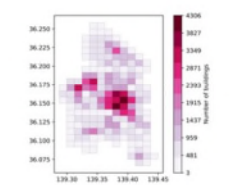
39

広北町
(Kouhoku-machi)



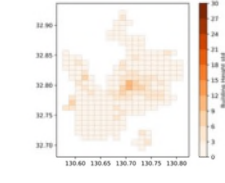
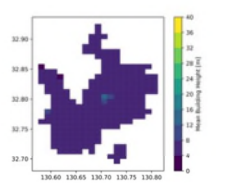
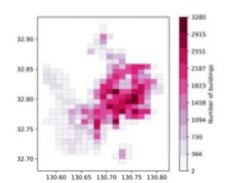
40

熊谷市
(Kumagaya-shi)



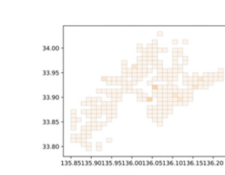
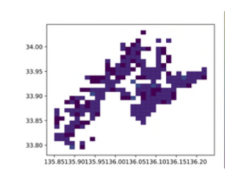
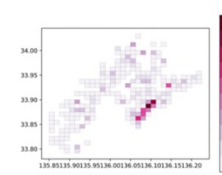
41

熊本市
(Kumamoto-shi)



42

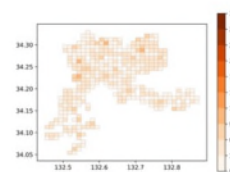
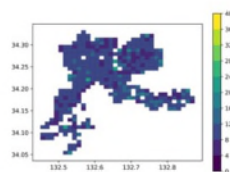
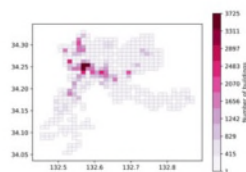
熊野市
(Kumano-shi)



番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

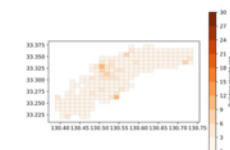
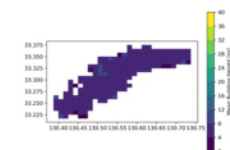
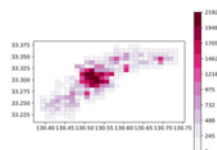
43

呉市
(Kure-shi)



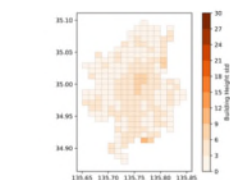
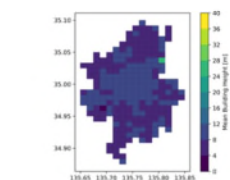
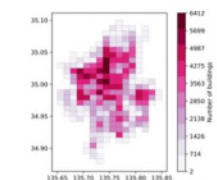
44

久留米市
(Kurume-shi)



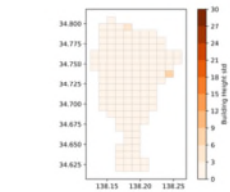
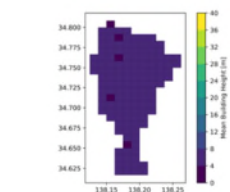
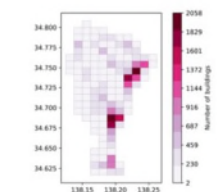
45

京都市
(Kyoto-shi)



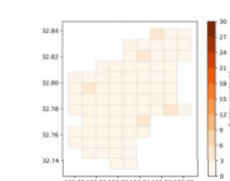
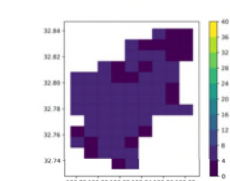
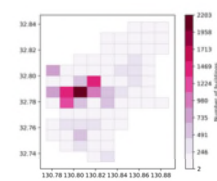
46

牧之原市
(Makinohara-shi)



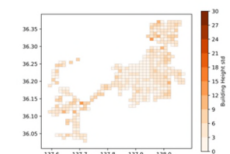
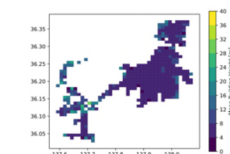
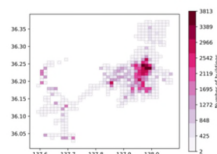
47

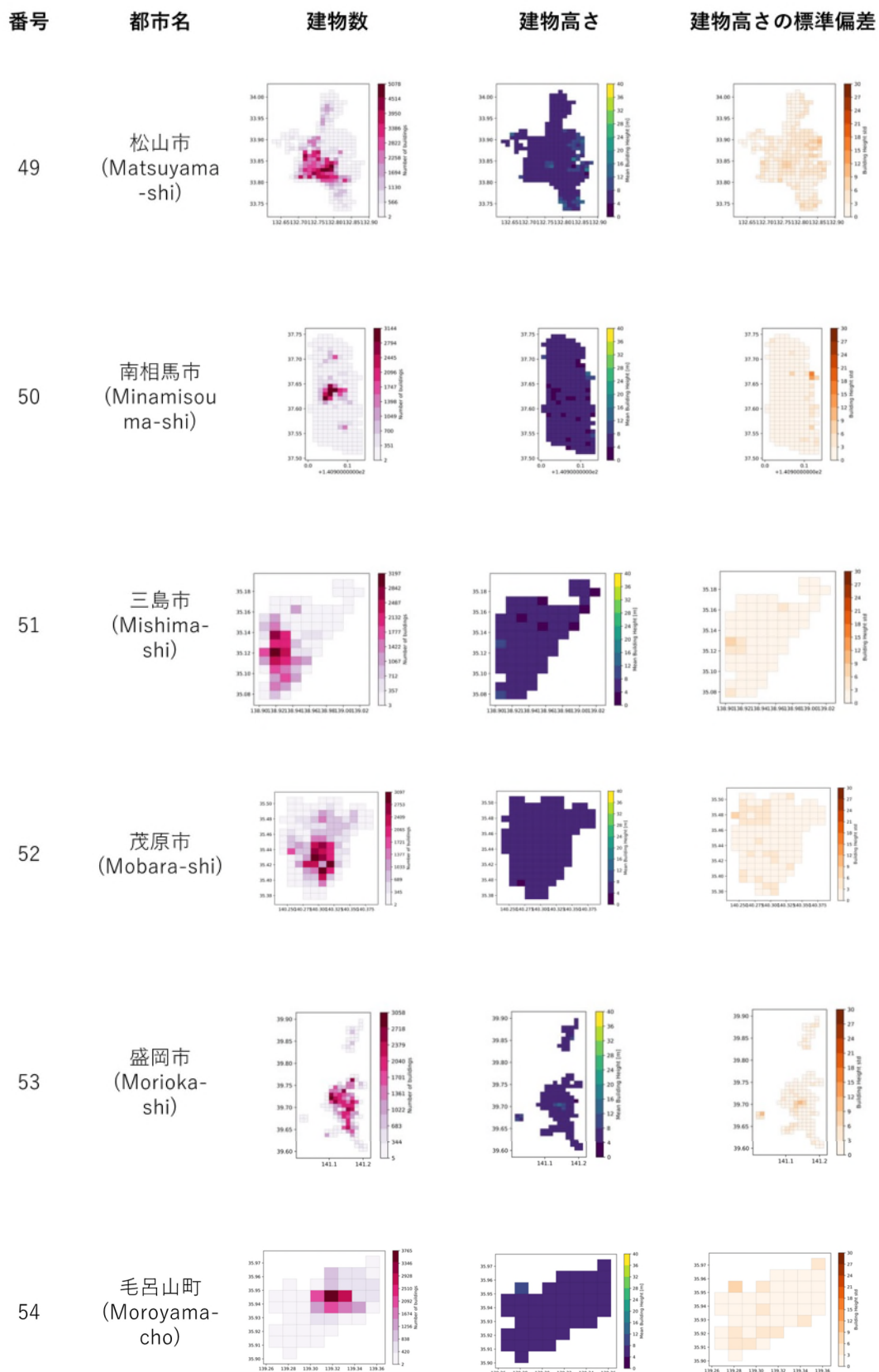
益城町
(Mashiki-machi)



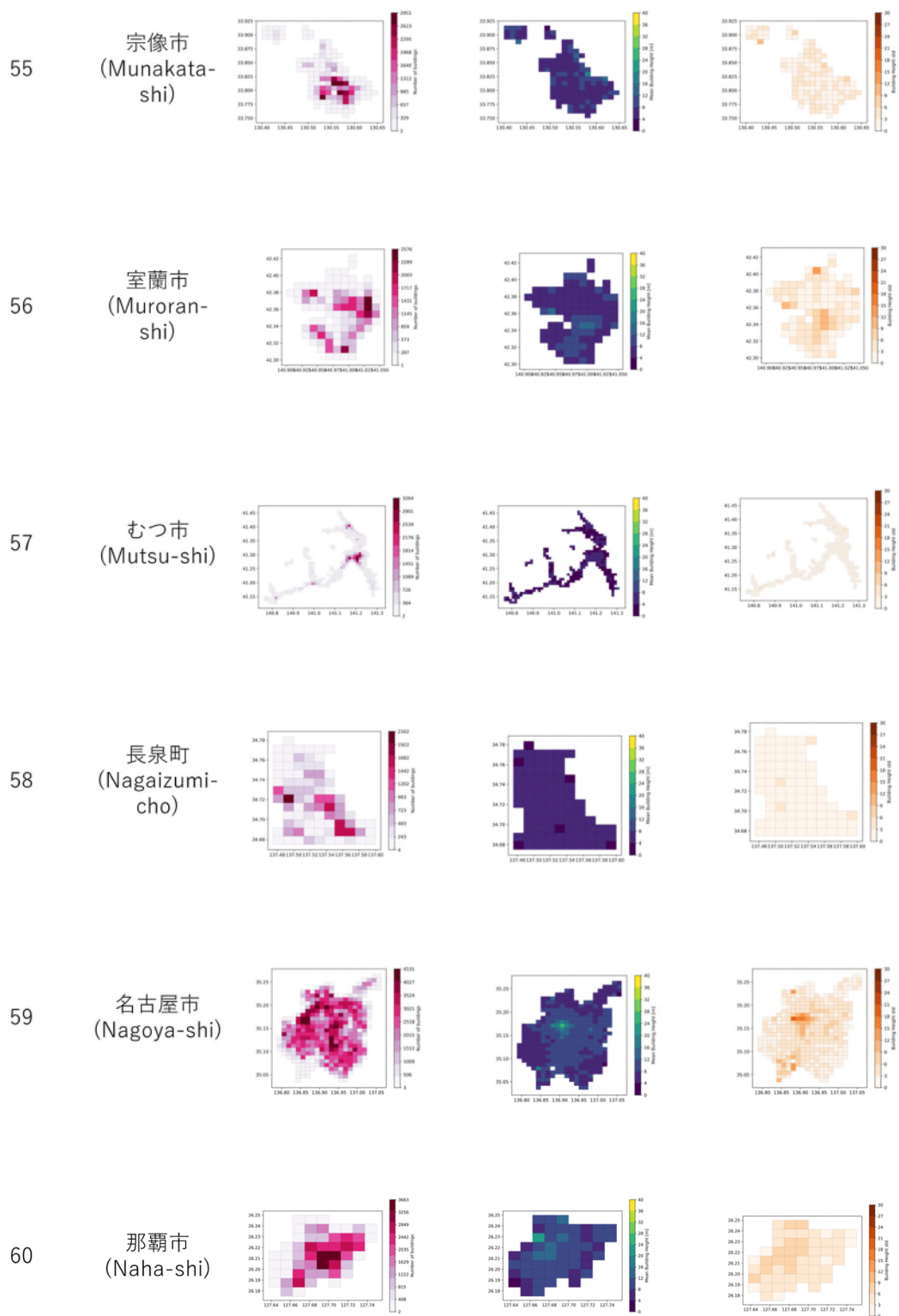
48

松本市
(Matsumoto-shi)



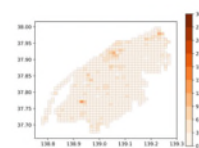
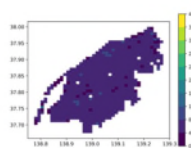
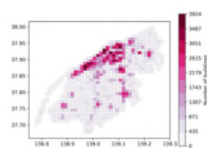


番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

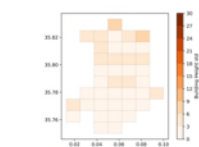
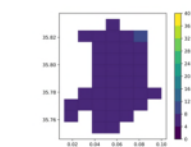
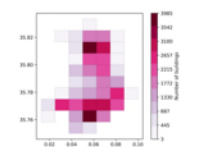


番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

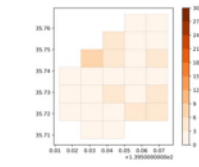
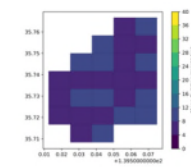
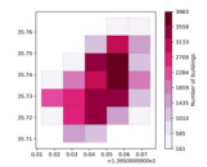
61

新潟市
(Niigata-shi)

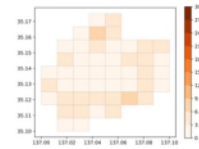
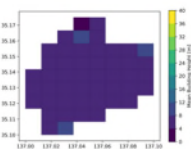
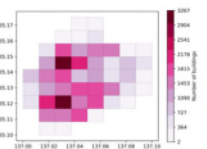
62

新座市
(Niiza-shi)

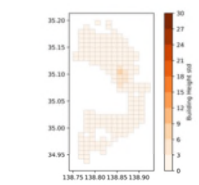
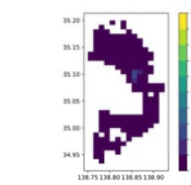
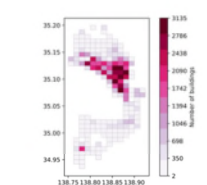
63

西東京市
(Nishitokyo-shi)

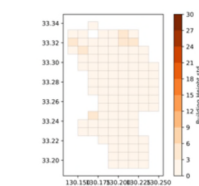
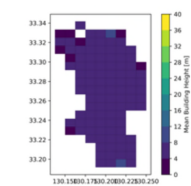
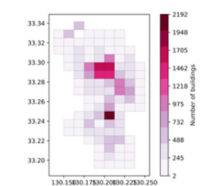
64

日進市
(Nisshin-shi)

65

沼津市
(Numazu-shi)

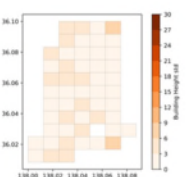
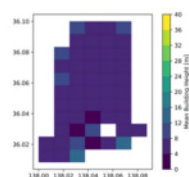
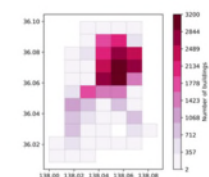
66

小城市
(Ogi-shi)

番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

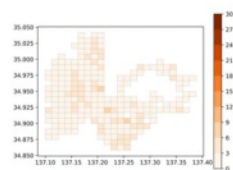
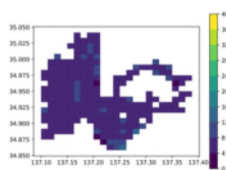
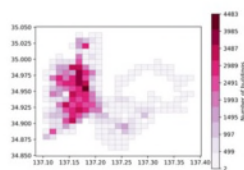
67

岡谷市
(Okaya-shi)



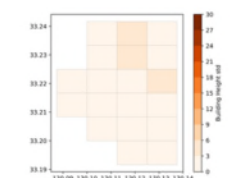
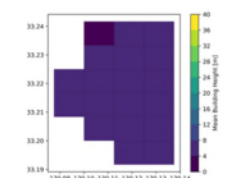
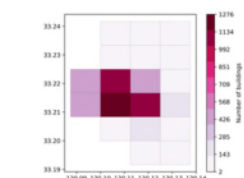
68

岡崎市
(Okazaki-shi)



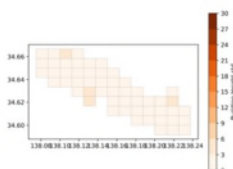
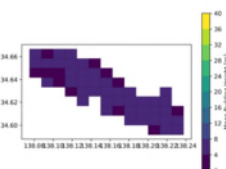
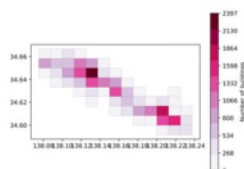
69

大町町
(Omachi-cho)



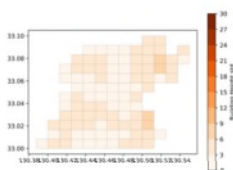
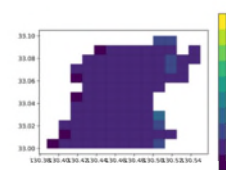
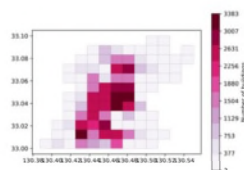
70

御前崎市
(Omazaki-shi)



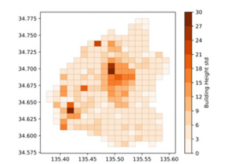
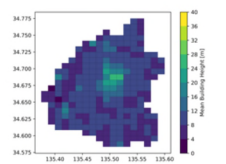
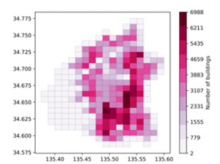
71

大牟田市
(Omuta-shi)

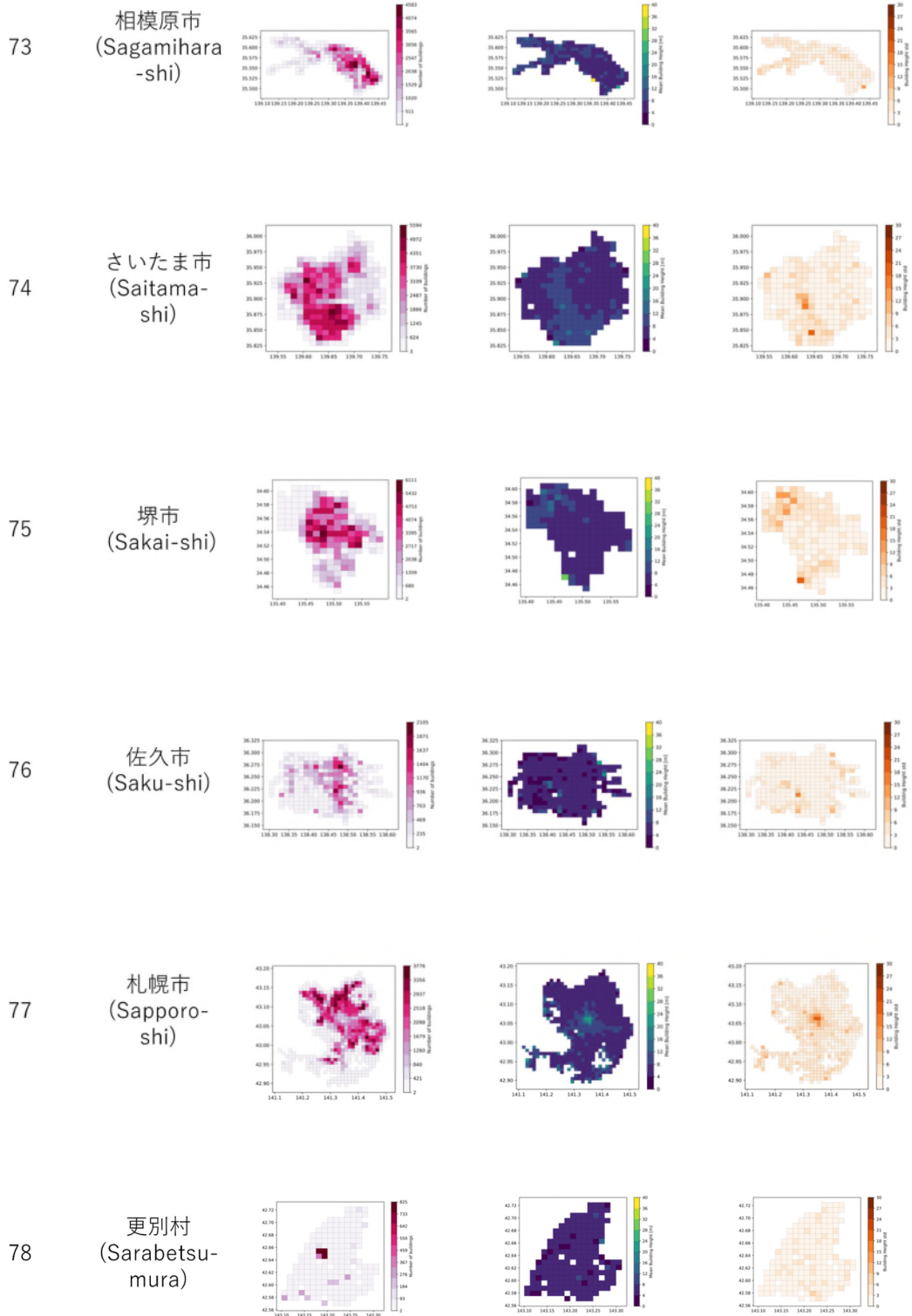


72

大阪市
(Osaka-shi)



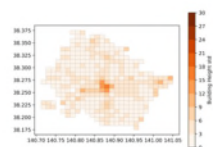
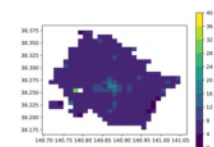
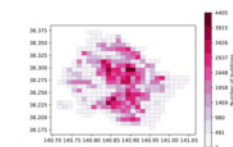
番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差



番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

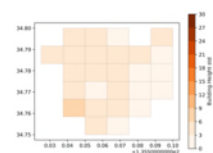
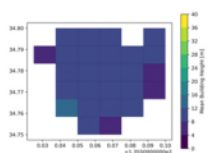
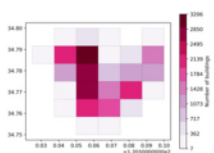
79

仙台市
(Sendai-shi)



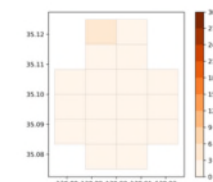
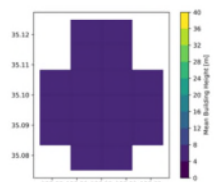
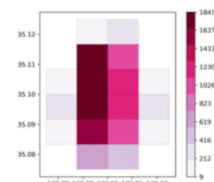
80

摂津市
(Settsu-shi)



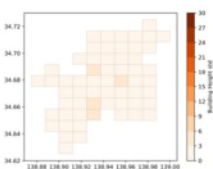
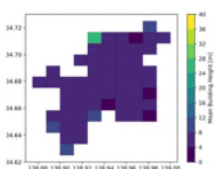
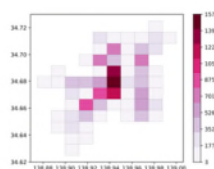
81

清水町
(Shimizu-cho)



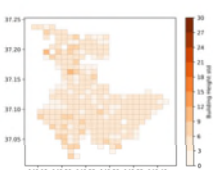
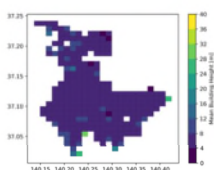
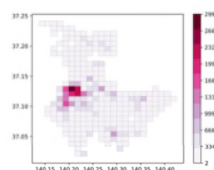
82

下田市
(Shimoda-shi)



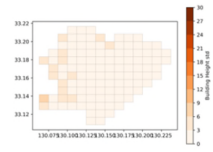
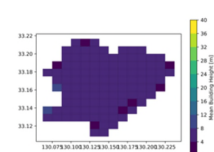
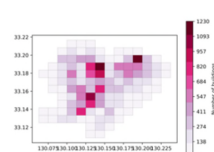
83

白河市
(Shirakawa-shi)

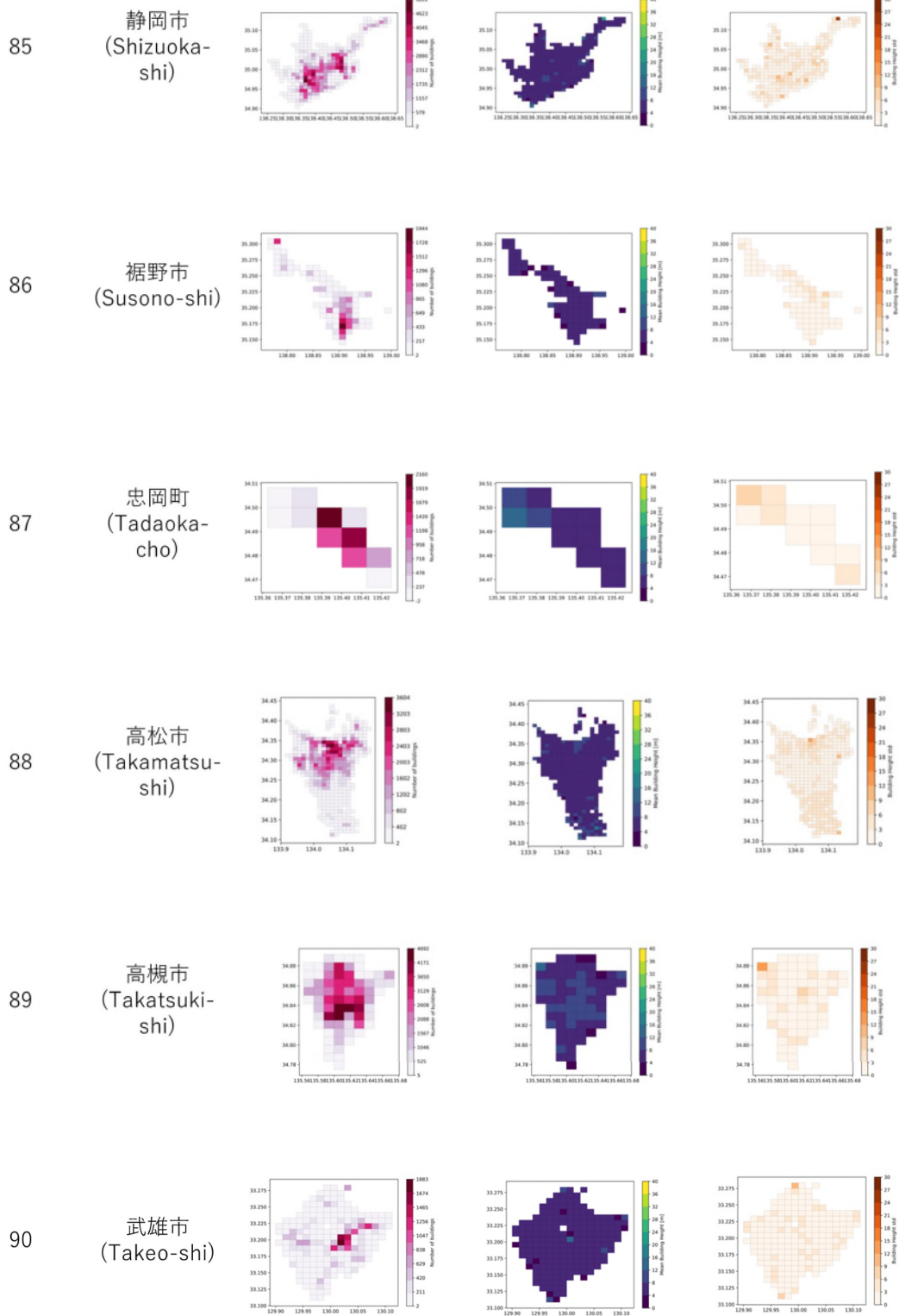


84

白石町
(Shiroishi-cho)

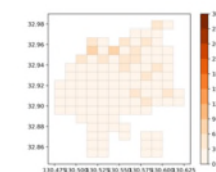
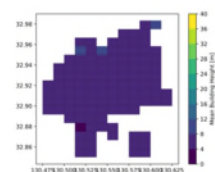
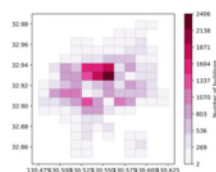


番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

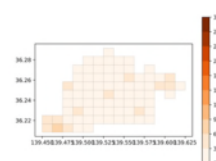
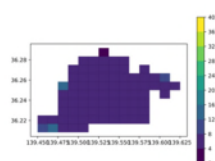
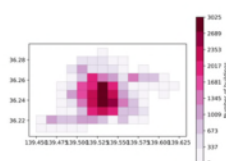


番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

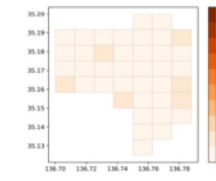
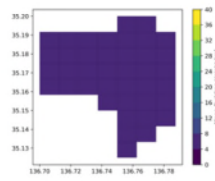
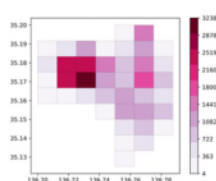
91 玉名市
(Tamana-shi)



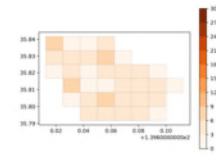
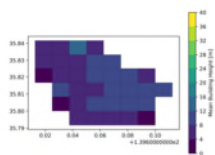
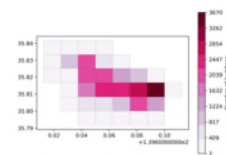
92 館林市
(Tatebayashi-shi)



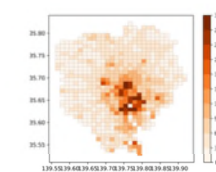
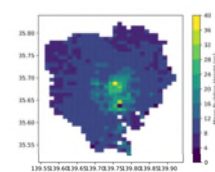
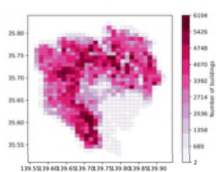
93 津島市
(Taushima-shi)



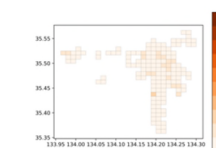
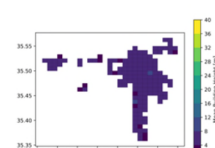
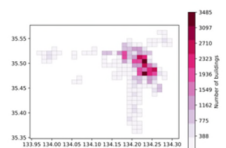
94 戸田市
(Toda-shi)

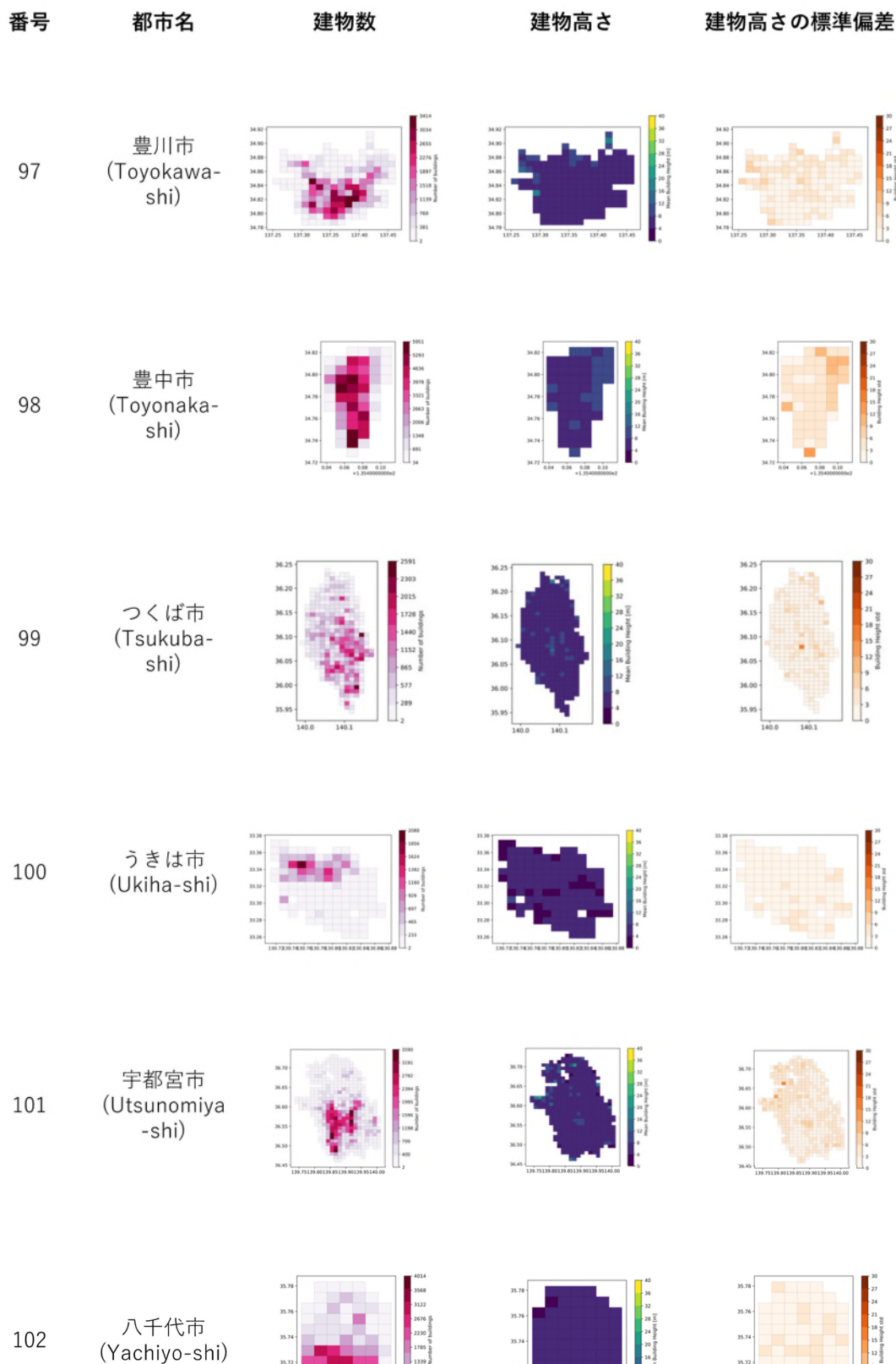


95 東京23区
(Tokyo 23 wards)



96 鳥取市
(Tottori-shi)

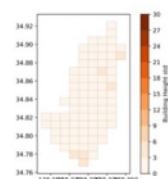
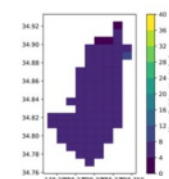
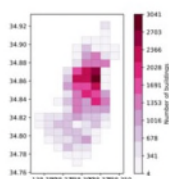




番号 都市名 建物数 建物高さ 建物高さの標準偏差

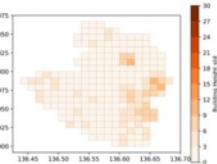
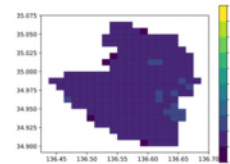
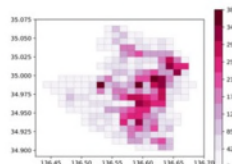
103

焼津市
(Yaizu-shi)



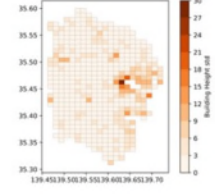
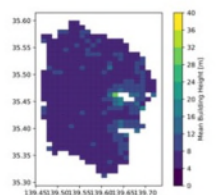
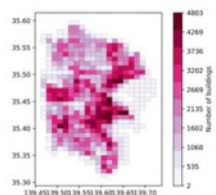
104

四日市市
(Yokkaichi-shi)



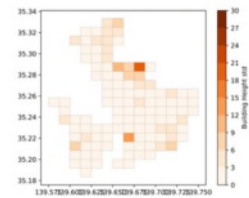
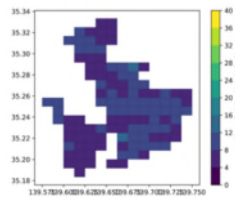
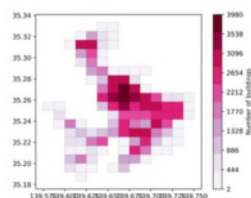
105

横浜市
(Yokohama-shi)

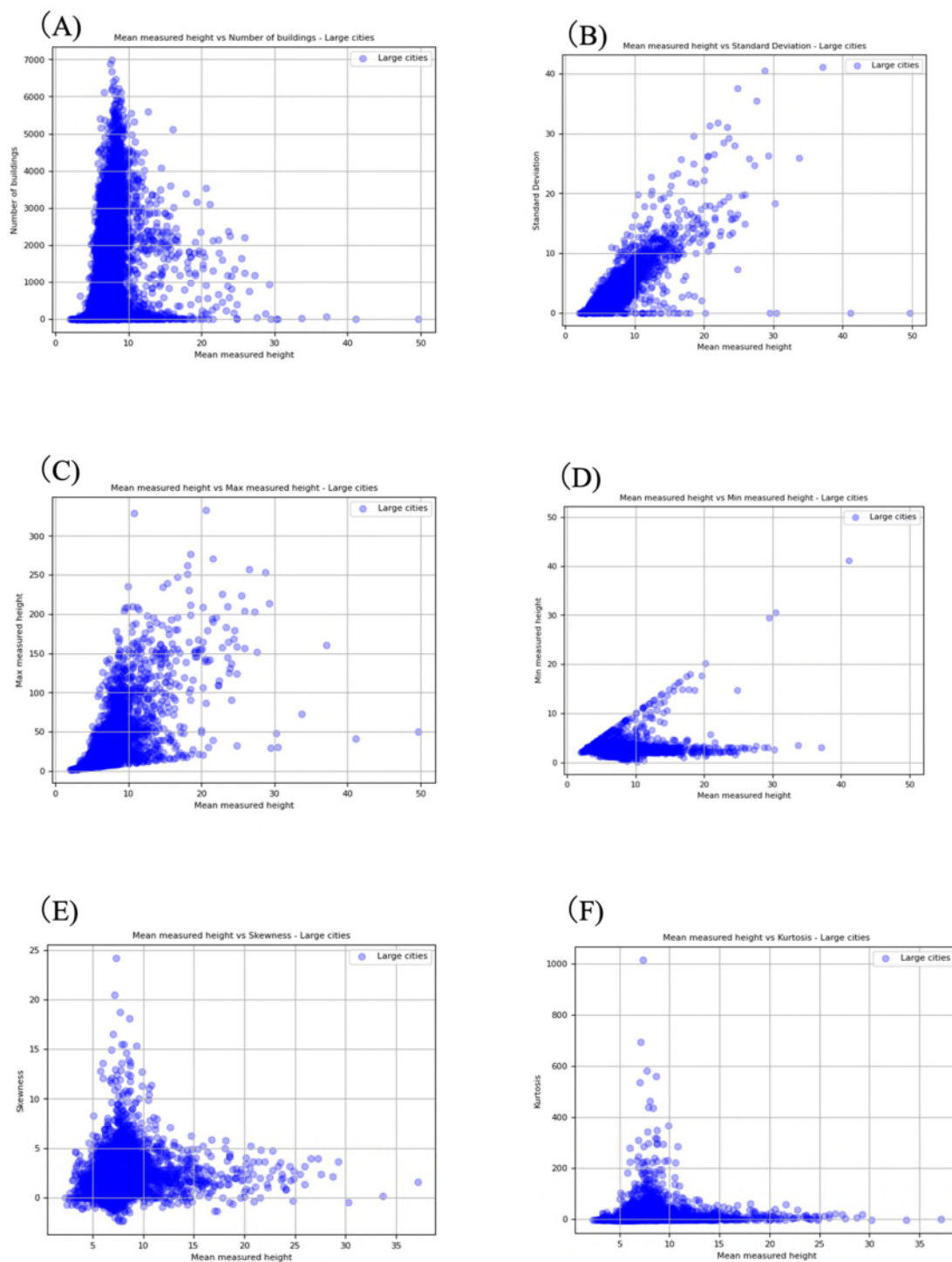


106

横須賀市
(Yokosuka-shi)

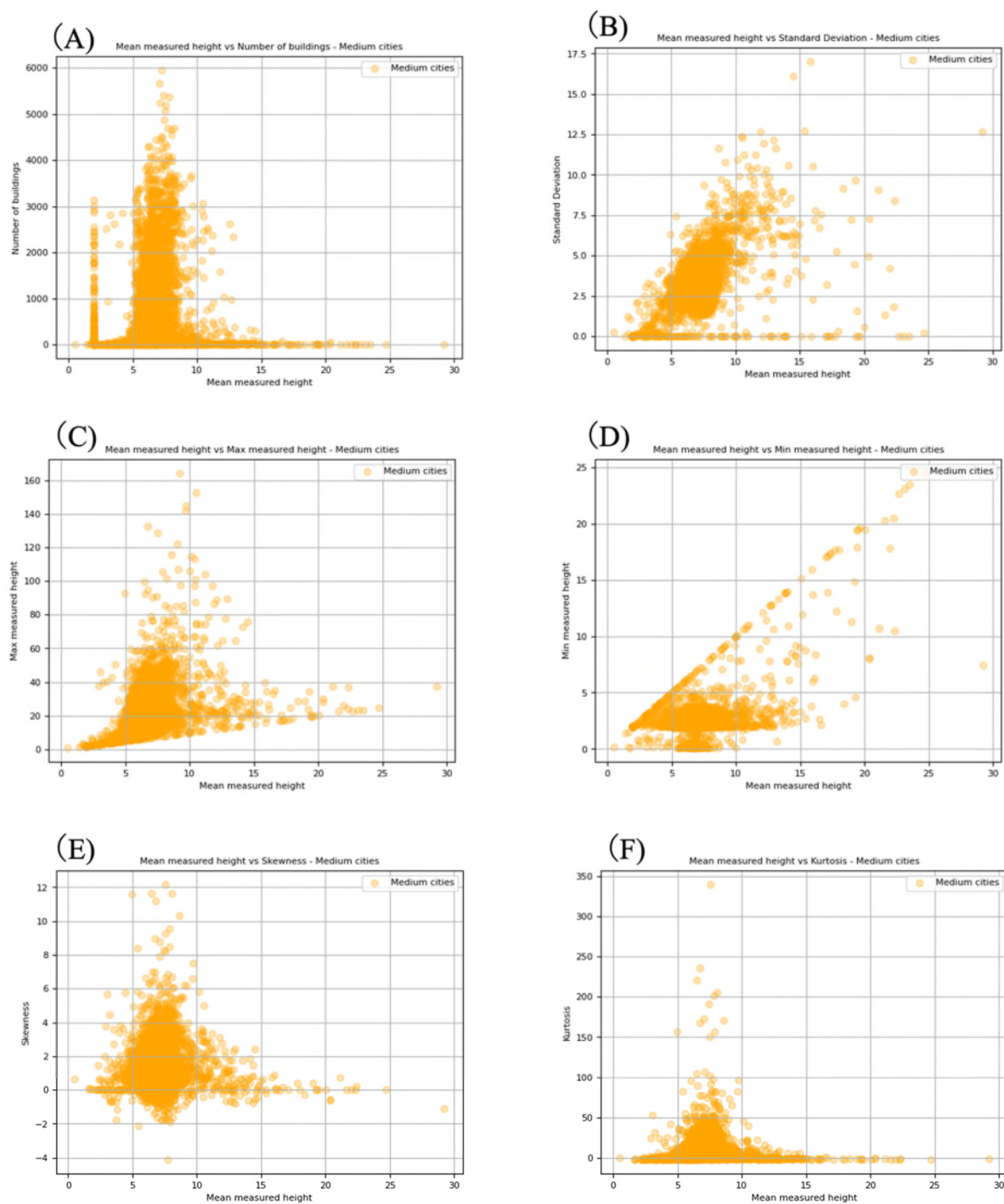


付録 E: 大都市における平均測定高さに対する都市幾何学パラメーターの散布図



付録E 大都市における建物の平均測定高さを横軸に取り(A) 建物数 (B) 標準偏差 (C) 最大測定高さ (D) 最小測定高さ (E) 歪度 (F) 尖度をプロットした散布図

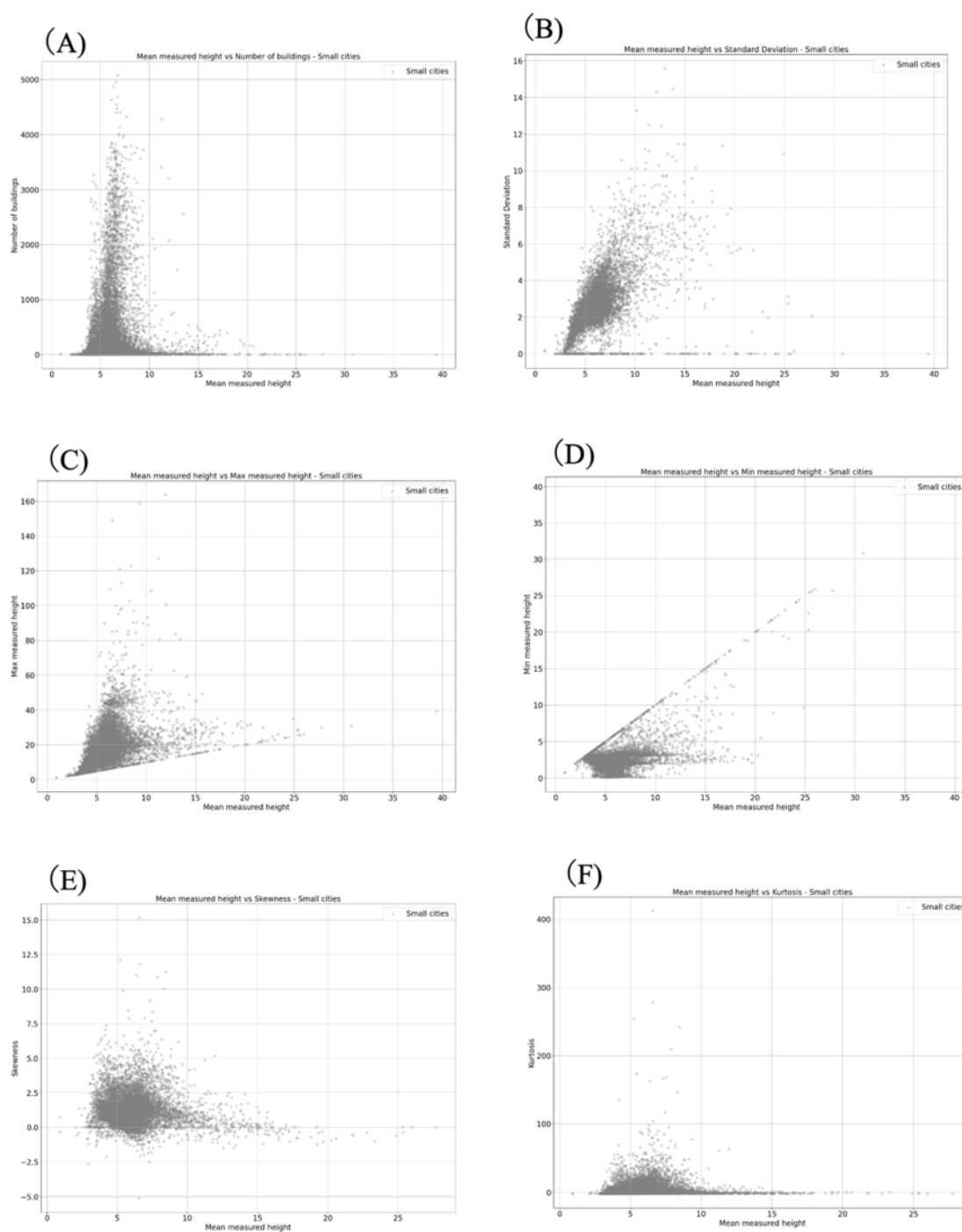
付録 F: 中都市における平均測定高さに対する都市幾何学パラメーターの散布図



付録F 中都市における建物の平均測定高さを横軸に取り(A) 建物数 (B) 標準偏差 (C) 最大測定高さ (D) 最小測定高さ (E) 歪度 (F) 尖度をプロットした散布図

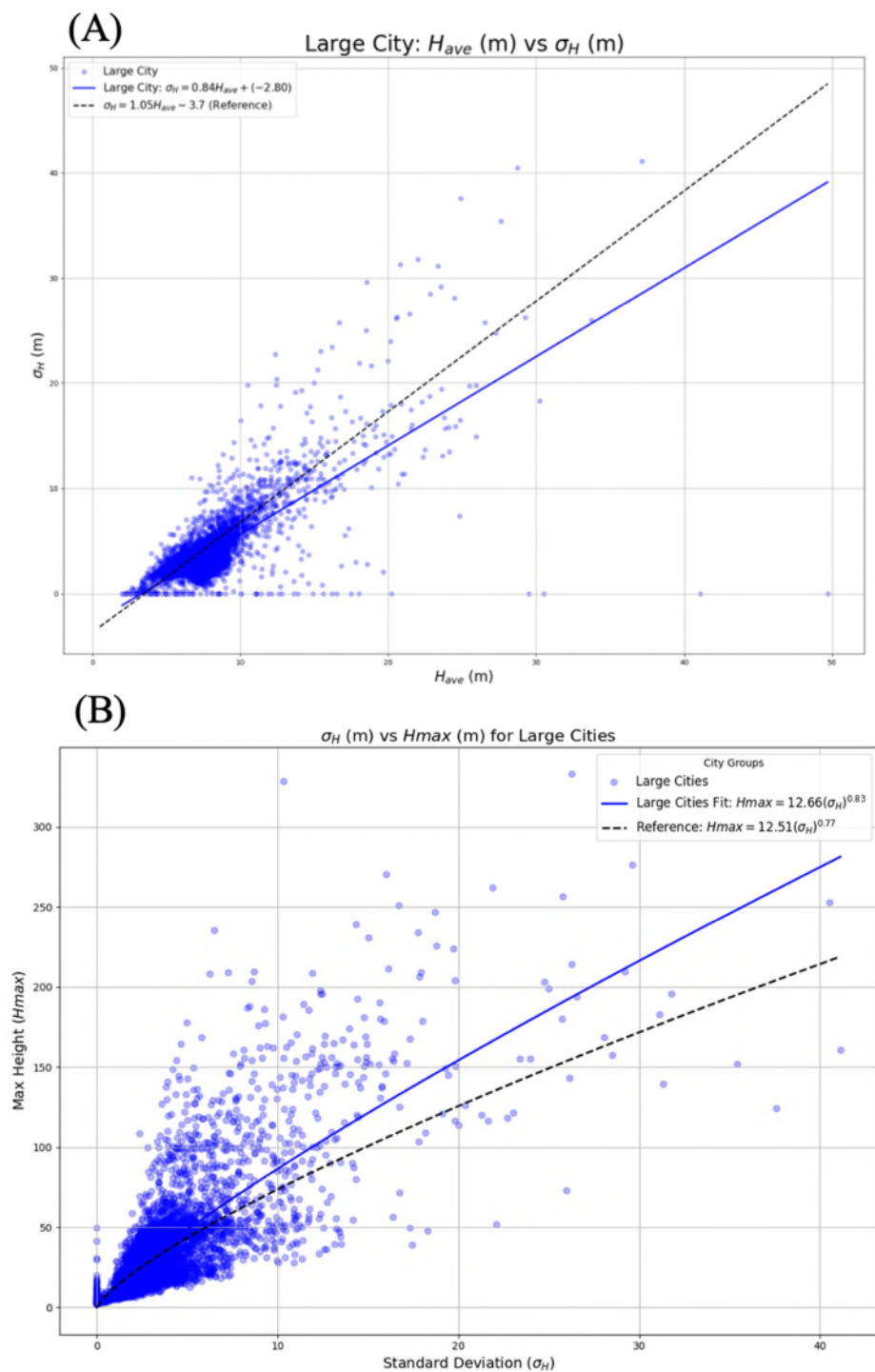
付録 G: 小都市における平均測定高さに対する都市幾何学パラメーターの散布

図



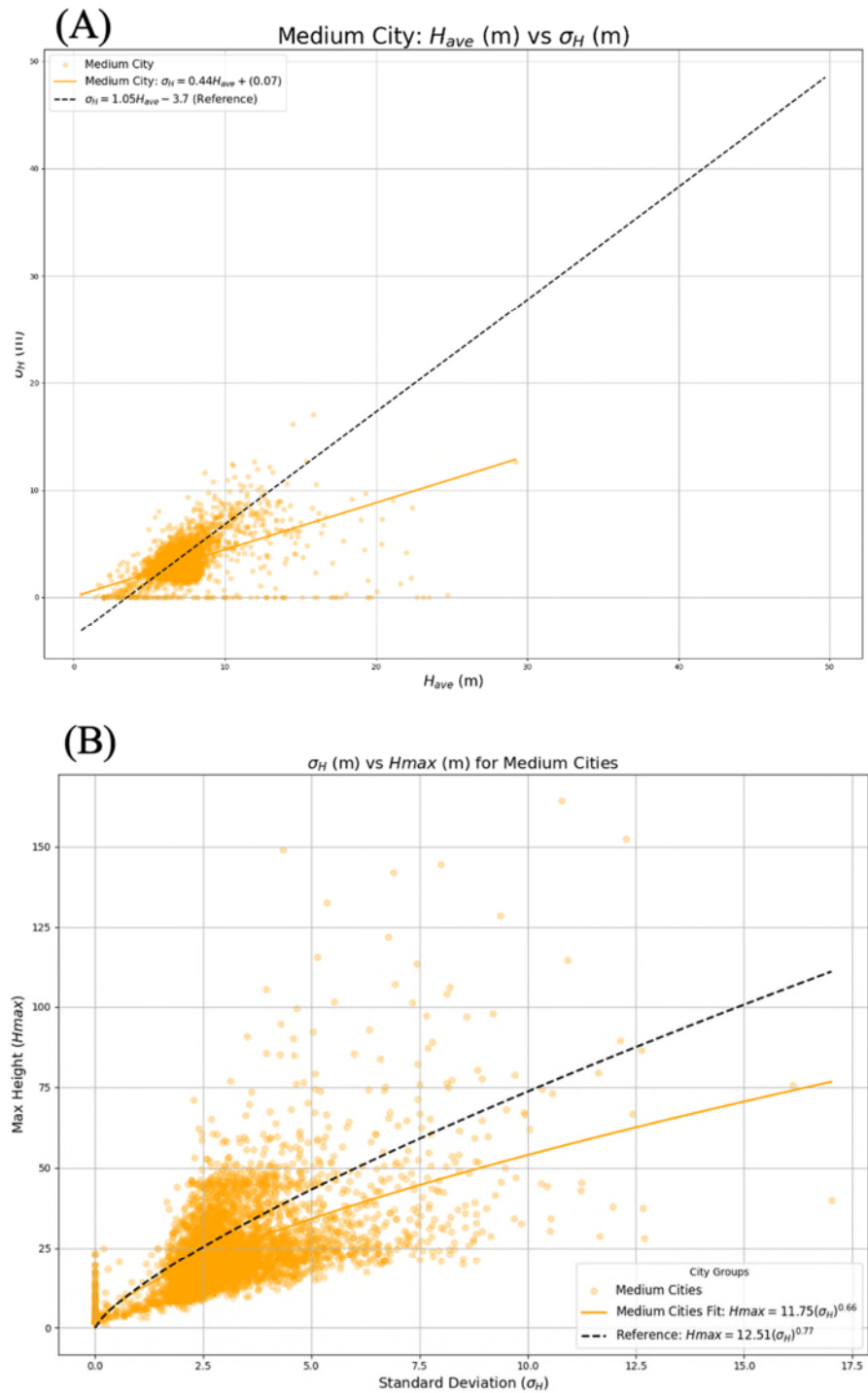
付録G 小都市における建物の平均測定高さを横軸に取り (A) 建物数 (B) 標準偏差 (C) 最大測定高さ (D) 最小測定高さ (E) 歪度 (F) 尖度をプロットした散布図

付録 H: 大規模都市における平均測定高さに対する標準偏差を用いたモデル比較



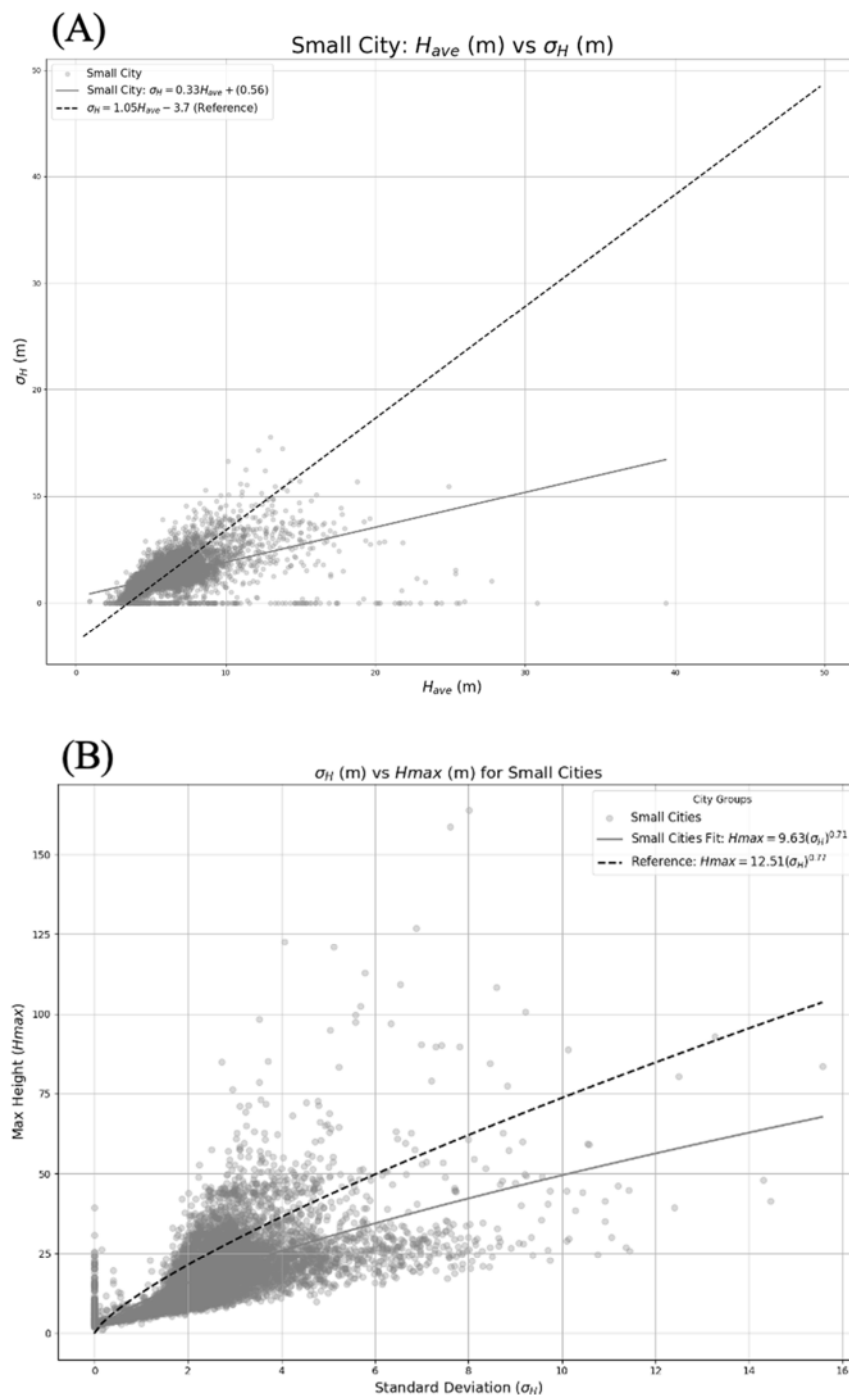
付録H 大都市における(A)平均測定高さに対する標準偏差、(B)標準偏差に対する最大測定高さの散布図。選択されたパラメータおよび黒い線で示されたモデルは、[31]の神田モデル

付録 I: 中規模都市における平均測定高さに対する標準偏差を用いたモデル比較



付録I 中都市における(A)平均測定高さに対する標準偏差、(B)標準偏差に対する最大測定高さの散布図。選択されたパラメータおよび黒い線で示されたモデルは、[31]の神田モデル

付録 J: 小規模都市における平均測定高さに対する標準偏差を用いたモデル比較



付録J 小都市における(A)平均測定高さに対する標準偏差、(B)標準偏差に対する最大測定高さの散布図。選択されたパラメータおよび黒い線で示されたモデルは、[31]の神田モデル