



都市環境気候図作成のための街路空間の風環境評価に関する研究

竹林, 英樹

(Citation)

日本建築学会環境系論文集, 80(715):795-801

(Issue Date)

2015

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003543>



都市環境気候図作成のための街路空間の風環境評価に関する研究

EVALUATION OF WIND ENVIRONMENT IN STREET CANYON
FOR USE IN URBAN CLIMATE MAP

竹林 英樹*

Hideki TAKEBAYASHI

Ventilation in street canyons contributes to mitigation of extremes in the thermal environment in urban areas. In previous studies, a strong relationship between the gross building coverage ratio and the spatial average wind velocity at pedestrian level has been confirmed. In this study, the relationship between wind environment and street canyon characteristics was analyzed using CFD and a GIS tool. Spatial average wind velocity is explained better by the open space ratio rather than the gross building coverage ratio in grids more than 250 m square grid. It means that the open space ratio is more direct indicator to spatial average wind velocity. Spatial average wind velocity averaged in the area of about 250 to 1,250 m square grid is meaningful. In this scale, it is possible to extract the typical characteristics of wind environment in the street canyon. When the evaluation scale is less than 100 m square, the wind environment in street canyons is best evaluated by more specific indicators (e.g., building height and road width) rather than spatially averaged indicators.

Keywords : Wind environment, Urban climate map, Street canyon, Urban morphology

風環境, 都市環境気候図, 街路空間, 街路形態

1. はじめに

都市環境気候図（クリマアトラス）は、都市の気候要素の解析結果を統合して作成され、気候解析結果を地図形式で表現することで、都市計画や地域計画に寄与することを想定した、情報、評価ツールであると位置づけられる¹⁾。Ren ら²⁾は都市環境気候図の研究に関するレビューを行い、地表付近の熱環境と密接に関係するクリマトープ³⁾の分類は主に土地利用と結びつけて実施されると考察した。しかし、地表付近の風環境の空間的な分類方法に関しては、十分な研究が行われていない。既往研究では、街区及び街路に関する様々な特性値（例えば、空気の通り道（の幅や長さ）、建蔽率、建物高さ、街路幅、高さとの比、街路方位、建物の配置、オープンスペース面積、緑地面積など）が地表付近の風環境と結びつけて分析されており、一部の研究成果は香港の大気換気評価（air ventilation assessment）として実用的に利用されている⁴⁾。

街路空間の換気は、熱及び汚染物の拡散により都市空間の環境改善に寄与するとともに、暑熱環境下の体感温度の低減にも貢献する。街区及び街路の形態と街路空間の風環境（換気）との関係を把握することの重要性は、多くの研究者により指摘されている^{5~8)}。Kubota ら⁹⁾は22の日本の住宅街区を対象として風洞実験を実施し、グロス建蔽率と歩行者レベルの平均風速の間に強い相関があることを明らかにした。Ng ら⁴⁾は香港において同様の傾向を確認した。著者ら¹⁰⁾は、道路幅、建物高さ、主風向と道路方向の関係、グロス建

蔽率、建物高さのばらつき、を指標として街路空間の風通しとの関係を分析し、オープンスペースの重要性、建物高さのばらつきが風環境の改善に寄与する可能性、などについて考察した。

本研究では、これらの知見を踏まえ、大阪市を対象として街路空間内の風環境をCFDにより計算し、その結果と街区の形態を示す特性値との関係を分析し、都市環境気候図作成のために、街路空間の風環境に対して支配的なパラメータを特定することを目的とする。なお、街区及び街路に関する特性値には、道路幅、建物高さなどの評価点毎に特有の値と、グロス建蔽率、建物高さのばらつきなどの空間平均値として算出される値がある。都市環境気候図は、空間的な分類結果を示すものであるため、本研究では、グロス建蔽率などの空間平均値を指標とし、空間平均風速（各スケールでの街路空間の地上2m高さでの面平均風速）を評価の対象とする。この観点より、計算領域、格子間隔を選定した。

2. 計算方法と結果

計算条件を表1に示す。日本建築学会のガイドブック¹¹⁾を参照し、著者らの既往研究¹⁰⁾に従って設定した。乱流モデルには標準k-εモデルを用いた。計算に用いた汎用CFDソフトウェア（STREAM version8）の都市空間への適用にあたり、ガイドブックの検証用データベース¹¹⁾により検証を行った。

計算領域を図1に示す。大阪市（223km²）を50の2,500m四方

* 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻
准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Arch., Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr.Eng.

の対象領域（縁辺部は適宜調整）に分割した。建物形状データは大阪市により整備されたものであり、汎用 GIS ツール（ArcGIS）により解析した。建物高さは用途毎に階高を設定して階数と掛け合わせて算出した。街路樹、自動車、看板、人体などは再現されていない。大阪市に隣接した市の建物形状データは、地図データと航空写真を用いて再現した。

対象領域 5-4 を例に計算領域の設定方法を示す。図 2, 3 に対象領域 5-4 の計算領域平面と断面を示す。Field 1 は全計算領域、Field 2, 3 は建物形状を再現した計算領域、Field 3 は 2,500m 四方の解析対象領域である。事前の検討に基づき、相互に隣接する解析対象領域内の計算結果がスムーズに接続できるように、解析対象領域の四周 500m の範囲まで建物形状を再現した（Field 2）。計算領域の設定が計算結果に悪影響を及ぼさないように、十分に大きな計算領域を設定した（Field 1）。特に、風下側の影響に配慮して大きく設定した（風上と側面 2,500m, 風下 5,000m）¹⁰。鉛直方向も十分に大きく設定し、計算領域は 11,000m×8,500m×550m である。格子間隔は、建物を再現した領域（Field 2, 3）で 10m×10m×1m とし、その外側（Field 1）及び建物最高高さ（161m）より上部では徐々に広がる不等間隔とした。平面的に 10m 以下の建物や街路の形状は再現されないため、オフィス街区、住宅地区、幹線道路、公園、などのある程度大括りの土地利用の特徴を反映させることを想定している。図 4, 5 に対象領域 5-4 の平面、断面の格子分割を示す。

図 6, 7 に大阪管区気象台（大阪市の中心付近、図 1 の 6-5 に位置する）における夏期（2009 年、2010 年の 8 月 1 日～8 月 31 日）晴天日（62 日中 36 日）の風配図と海風が吹いている期間の風速の頻度分布を示す。晴天日の基準は 1 mm 以上の降水がなく、平均雲量が 8.5 未満であった日とし、風向が西、西南西であるときを海風進入時と定義した。夏期晴天日には終日西南西、西の海風が卓越している。海風が吹いている期間の平均風速は 3.2m/s であった。流入境界条件には基準高さ 47m（大阪管区気象台風速計高さ）で 3.2m/s の西風（海風を想定）を与えた。日射等による発熱に起因する上昇気流の影響も考慮する必要があると考えられるが、8 月の過半数を占める夏期晴天日には比較的大きな風速の海風が卓越するため、海風を前提として、建物形状による地上付近の風環境の特徴を把握することが優先されるとの立場で等温解析の検討を行った。

地上 2m の風速の計算結果を図 8 に示す。50 の解析対象領域の計算結果を接続したものである。実際には海岸付近と市街地内で流入する接地境界層の風速分布は異なるため、各領域に応じて適切なプロファイルを設定する必要がある。しかし、風上領域の土地利用等に応じて領域毎にプロファイル进行调整するための根拠は明確でないため、中心市街地のプロファイルに相当する 1/4 乗則を全領域に対して適用した。従って、海や河川から直接市街地に流入する風速は実際より小さく算出される傾向にあると考えられる。相互の領域の接続部分に相当する流入、流出プロファイルの整合性を確認して計算結果の接続を行った。境界付近に大きなオープンスペースがまたがって存在する場合などに解析対象領域の四周 500m 範囲での建物形状再現では適切な流入風速が設定されない場合が確認されたが、街路空間内の風速分布に関しては、レベル差なく再現されていることを確認した。海、河川、公園などのオープンスペースの風速が大きく、市街地内の風速が小さいことが確認される。

Table1 Calculation conditions

Turbulence model	Standard k-ε model
Pressure solution	SIMPLEC method
Advective term	Up-wind difference scheme
Inflow boundary	Power-law, 3.2m/s at 47m high, power: 0.25, turbulence intensity: 0.35
Outflow boundary	Zero gradient condition
Up, side boundary	Free-slip condition
Wall, ground surface	Generalized log-law
Grid resolution	10m x 10m x 1m in the target area
Total mesh number	About 2.6 million in whole objective area horizontally

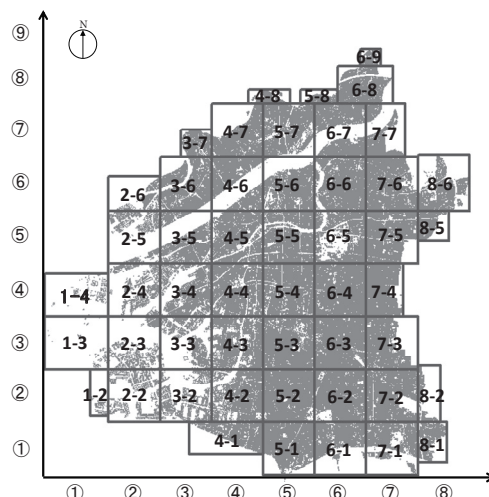


Fig.1 Objective area

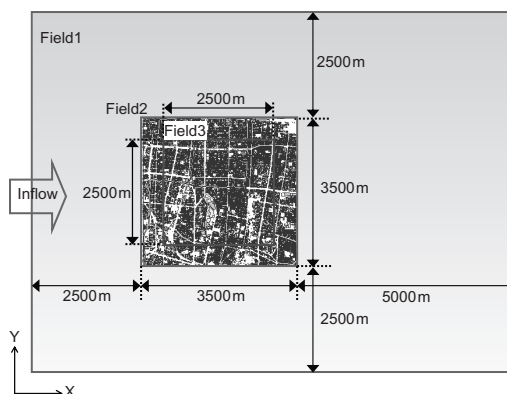


Fig.2 Plan of calculation domain in the target area 5-4

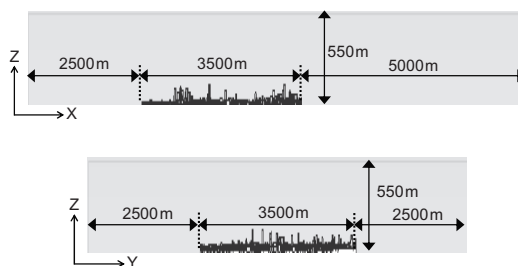


Fig.3 Cross section of calculation domain in the target area 5-4

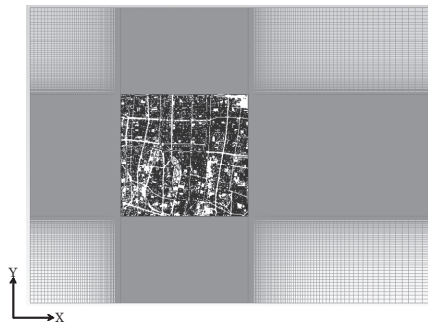


Fig.4 Plan of calculation mesh in the target area 5-4

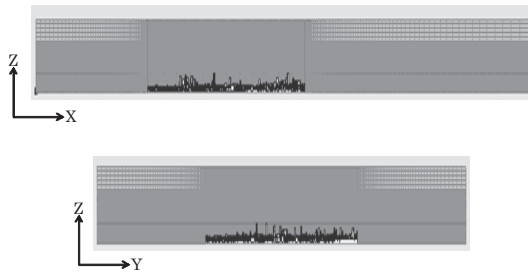


Fig.5 Cross section of calculation mesh in the target area 5-5

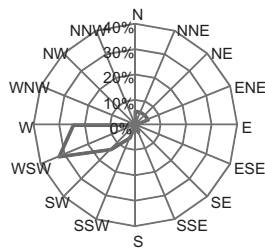


Fig.6 Wind rose at Osaka observatory in summer fine days

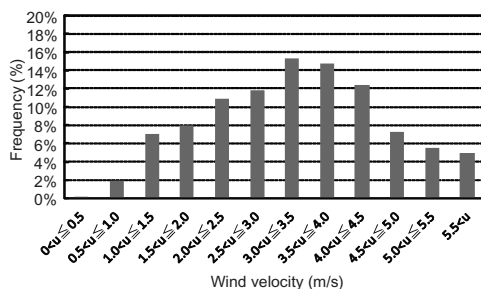


Fig.7 Frequency of wind velocity at Osaka observatory when the sea breeze is blowing in summer fine days

3. 解析方法と結果

3.1 街区の構成要素

街区の構成要素は、まず、風速の計算結果が存在しない建物と、風速の計算結果が存在する非建物に区分される。更に、非建物を道路、建物周辺のオープンスペース、独立したオープンスペース（河川、公園、独立した駐車場など）に分類した。街区の構成要素の分類を図9に示す。建物周辺のオープンスペースには、各敷地内のアプローチ、駐車場、庭、植栽などが含まれる。街区の分類は、計算に用いた10m格子のデータに基づいて実施した。図9のBuilding,

Road, Space around building, Open space の割合を、グロス建蔽率 Gross building coverage ratio, 道路率 Road ratio, 建物周辺のオープンスペース率 Space around building ratio, オープンスペース率 Open space ratio と定義する。

著者らは先行研究において、最高建物高さ、平均建物高さ、グロス建蔽率、高さ方向平均グロス建蔽率、風上側見付面積率、建物高さのばらつき、などの街区の特徴量と空間平均風速との関係について重回帰分析を行い、200m四方以上で平均された空間平均風速は、主にグロス建蔽率が支配的なパラメータであることを特定した。その結果を踏まえて、上記の構成要素の割合を指標に選定した。

3.2 空間平均風速と街区構成要素との関係

10m格子で計算された全ての非建物領域の地上2mの風速の計算結果を100m, 250m, 500m, 1,250m, 2,500m四方毎に平均した。各スケールの格子分割を図10に示す。空間平均風速は、非建物の構成要素における水平成分風速の平均値である。100m四方で平均した空間平均風速には、建築面積の大きい建物が存在する場合などに、極端に少ない母数の平均値が含まれる場合がある。500m四方で平均した空間平均風速と街区構成要素との関係を図11に示す。グロス建蔽率よりオープンスペース率による回帰式の決定係数が大きい。

この理由を考察するために、グロス建蔽率30%を境界として区分し、グロス建蔽率と空間平均風速の関係を検討した（図12）。グロス建蔽率が30%未満では、グロス建蔽率と空間平均風速の間に負の相関が確認され、建物が建て込むと空間平均風速が小さくなる。しかし、グロス建蔽率が30%以上では、両者に明確な関係が確認されず、グロス建蔽率に関わらず風通しは良くない。グロス建蔽率毎の各構成要素の割合を図13に示す。グロス建蔽率が30%未満では、グロス建蔽率の増加に伴いオープンスペース率が減少するが、グロス建蔽率が30%以上になると、オープンスペース率はあまり変化せず、小さな値である。従って、500m四方で平均した空間平均風速との回帰式の決定係数は、グロス建蔽率よりオープンスペース率による場合に大きくなったと解釈される。なお、図12において空間平均風速が回帰式より大きく外れている箇所（極端に大きな平均風速）が存在する。それらは、500m四方内にまとまったオープンスペースが含まれるメッシュが該当する。河川や公園などのまとまったオープンスペースを含むメッシュでは、空間平均風速の空間代表性が担保されない可能性を示唆している。この点については次章で検討する。

各スケール毎に平均した空間平均風速に対する各街区構成要素による回帰式の決定係数を表2に示す。2,500m, 1,250m四方で平均した空間平均風速に対しては、グロス建蔽率による回帰式の決定係数がオープンスペース率による場合より若干大きい。オープンスペース率を用いても十分に説明できる。逆に、500m, 250m四方で平均した空間平均風速に対しては、オープンスペース率による回帰式の決定係数が若干大きく、オープンスペース率を用いた方がより説明されやすい。100m四方で平均した空間平均風速に対しては、いずれの構成要素を用いても説明は困難である。以上より、250m四方以上で平均した空間平均風速は、グロス建蔽率を用いるよりオープンスペース率を用いる方がより説明されやすいと考察された。空間平均風速に対してオープンスペース率がより直接的な指標であることを反映していると考えられる。

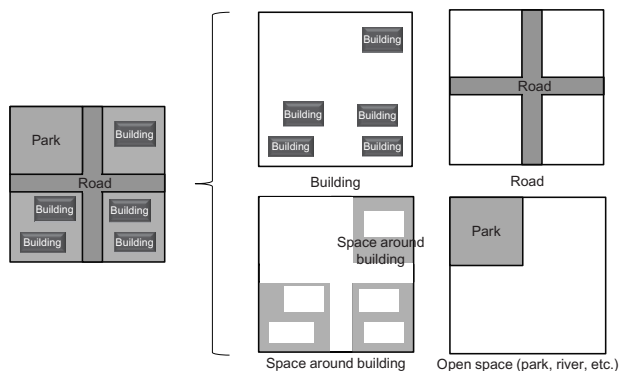


Fig.9 Classification of urban block components

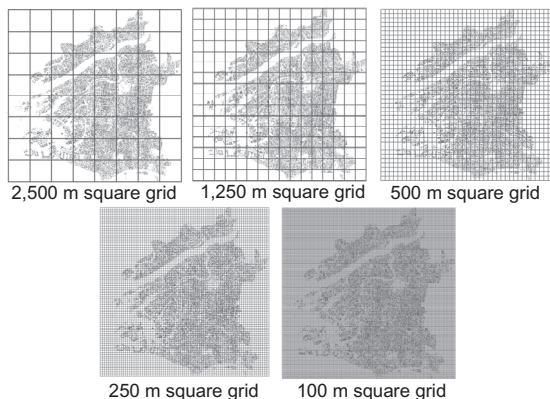


Fig.10 Grid partitioning in each scale

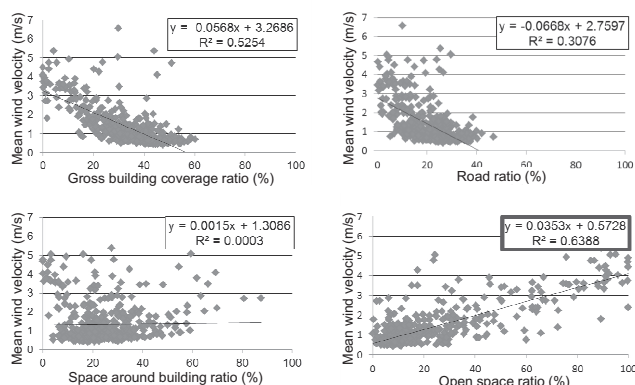


Fig.11 Relationship between urban block component ratio and spatial average wind velocity at the height of 2m on all non-building area, averaged in 500m square

Table2 Determination coefficient by each urban block component ratio to spatial average wind velocity at the height of 2m on all non-building area averaged in each scale

	2,500m	1,250m	500m	250m	100m
Gross building coverage ratio	0.83	0.79	0.53	0.40	0.16
Road ratio	0.56	0.54	0.31	0.17	0.01
Space around building ratio	0.12	0.01	0.00	0.00	0.01
Openspace ratio	0.76	0.74	0.64	0.46	0.16

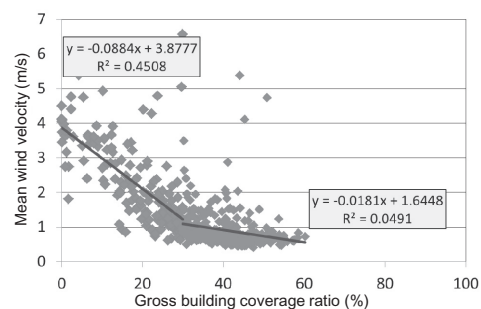


Fig.12 Relationship between gross building coverage ratio and spatial average wind velocity at the height of 2m on all non-building area, averaged in 500m square

4. 空間平均風速の空間代表性

都市環境気候図は都市計画や地域計画に寄与することを想定して作成されるため、より一般的な表現で作成されることが望ましい。特定の地域の平均風速として評価結果が提示されると直観的にイメージし易いため、本研究においても空間平均風速を用いる。ただし、前章で指摘した通り、空間平均風速を算出する空間内にまとまったオープンスペースが存在する場合には、空間平均風速が極端に大きくなる場合があり、その空間の代表であると見なすことが出来ない可能性がある。そこで、空間平均風速の空間代表性について以下で議論する。

500m, 2,500m 四方の地上 2m の風速の計算結果の例を図 14 に示す。500m 四方の計算結果を正規分布で近似した場合の決定係数は十分に大きく ($R^2=0.91$)、空間平均風速が当該空間の平均的な風環境を代表している。しかし、2,500m 四方の計算結果を正規分布で近似すると決定係数は小さくなり ($R^2=0.66$)、近似曲線と風速の頻度分布との乖離も明確に確認される。一般的に風速の時間変動特性の近似に用いられるワイブル分布により近似すると決定係数は大きくなり ($R^2=0.92$)、近似曲線と風速の頻度分布も比較的一致する。なお、これらの近似は共に最小二乗法により回帰した。

各スケール毎に地上 2m の風速の計算結果を正規分布とワイブル分布により近似した場合の決定係数を算出した。決定係数が 0.7 以上となった領域の割合を表 3 に示す。いずれの分布も 100m 四方の場合に適用することは困難である。図 14(b)に示されるように、領域内に特定の風速のピークを有する可能性が高くなる 2,500m 四方の場合に決定係数が 0.7 以上となる領域が少ない。正規分布よりワイブル分布による近似の精度が高いことが示されたが、ある程度一般的な風環境の特性が抽出できる 250m から 1,250m 四方の場合には、空間の代表値として空間平均風速を用いることが許容されると考察された。

Table3 The ratio of areas where the determination coefficient approximated by Normal, Weibull distribution is more than 0.7

	2,500m	1,250m	500m	250m	100m
By Normal distribution	25%	50%	55%	51%	29%
By Weibull distribution	75%	81%	83%	78%	37%

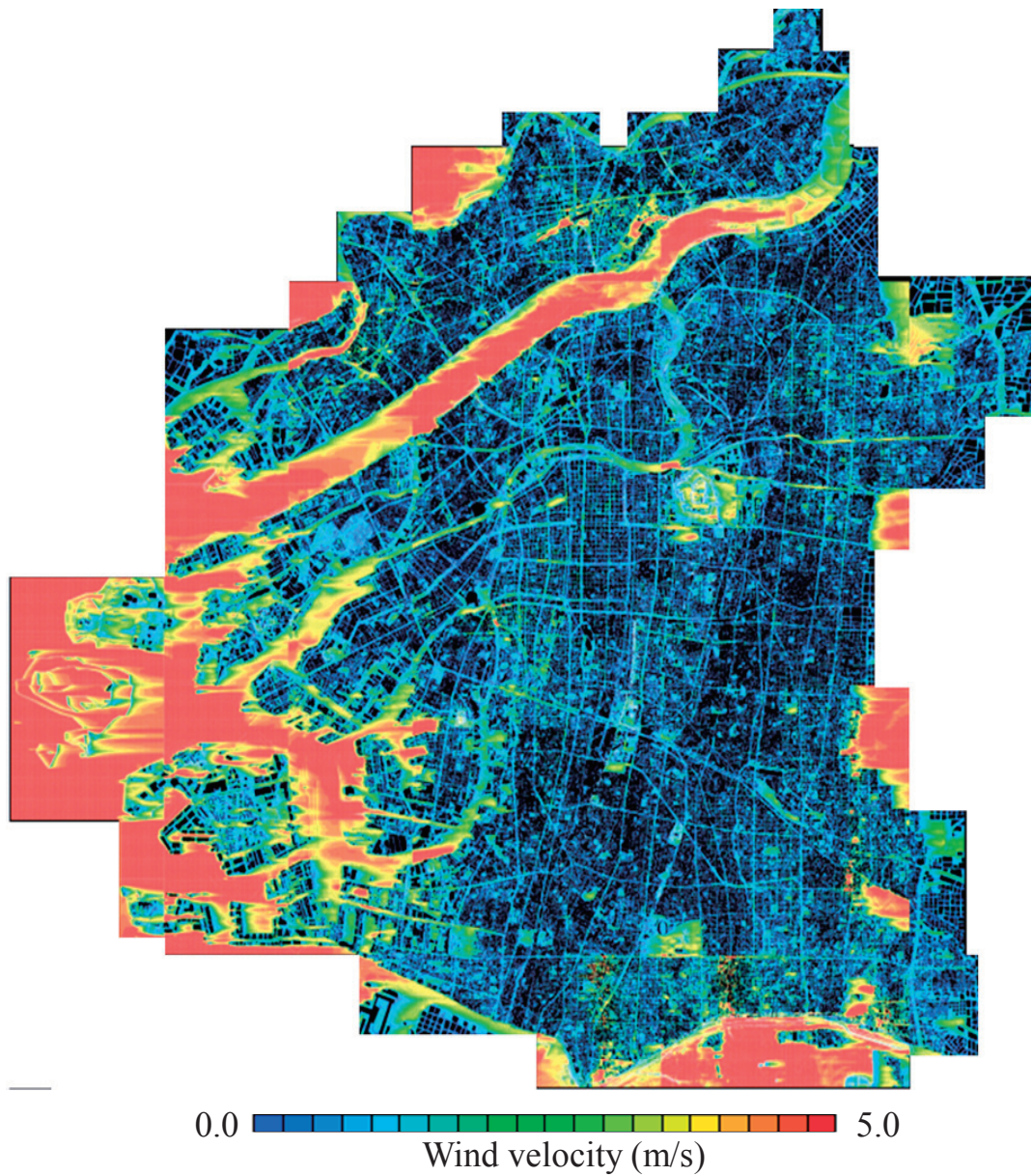


Fig.8 Calculation results of wind velocity at the height of 2m on all non-building area

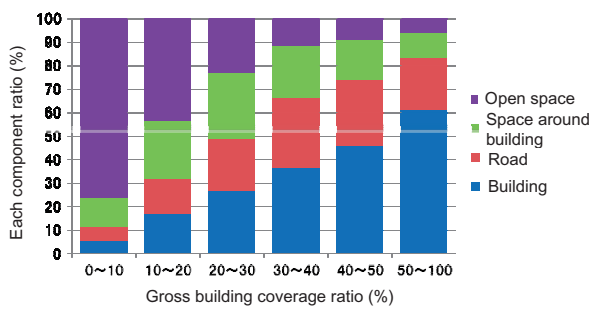


Fig.13 Relationship between gross building coverage ratio and the other urban block component in grids 500m square

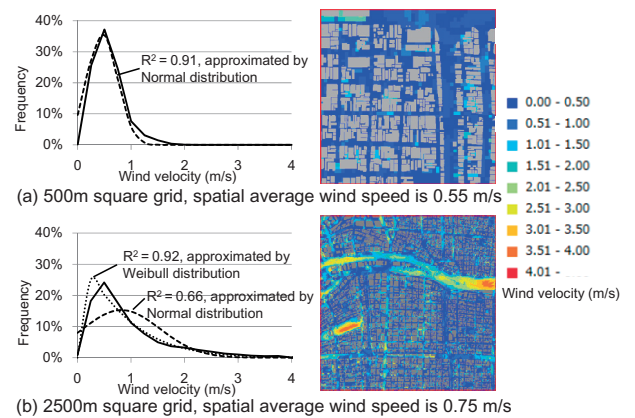


Fig.14 Frequency distribution of wind velocity at the height of 2m on all non-building area, and its approximation in grids 500m and 2,500m square

5. まとめ

本研究では、大阪市を対象として街路空間内の風環境を CFD により計算し、その結果と街区の形態を示す特性値との関係を分析し、都市環境気候図作成のために、街路空間の平均的な風環境に対して支配的なパラメータを考察した。

250m 四方以上で平均した空間平均風速は、グロス建蔽率を用いるよりオープンスペース率を用いる方がより説明されやすいと考察された。この理由は、グロス建蔽率が 30%以上になると空間平均風速との関係が確認されなくなるためであり、オープンスペース率は空間平均風速に対してより直接的な指標であるといえる。

特定の地域を代表する風環境の指標として空間平均風速の空間代表性について検討した。ある程度様な風環境の特性が抽出できる 250m から 1,250m 四方の場合に、空間の代表値として空間平均風速を用いることが許容されると考察された。この理由は、空間平均風速を算出する空間内にまとまったオープンスペースが存在する場合に、空間平均風速の代表性が担保されなくなるためである。

なお、100m 四方以下のスケールでは、空間平均風速だけでなく、グロス建蔽率、オープンスペース率などの空間平均指標にもばらつきが大きくなるため、道路幅、建物高さなどの評価点毎に特有の指標と評価点毎の風速の関係を直接的に評価する必要がある。著者らは既報において、2.5m メッシュでの計算結果を用いて両者の関係を考察している¹⁰⁾。

謝辞

本研究で使用した建物データは大阪市より提供頂きました。本研究の一部を修士論文として取り組まれた山田俊明氏、渡辺梓氏、奥啓介氏、松田真由子氏に謝意を表します。本研究は公益財団法人大林財団の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) J. Baumüller, U. Hoffmann, U. Reuter: Climate booklet for urban development, Ministry of Economy Baden-Wuerttemberg, Environmental Protection Development, 1992
- 2) C. Ren, E. Y. Ng, L. Katschner: Urban climatic map studies: a review, International Journal of Climatology, Vol.31, pp.2213-2233, 2011
- 3) 森山正和, 竹林英樹: 正規化植生指標 (NVI) と一次元熱収支モデルに基づいたクリマトープ図の作成手法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 518 号, pp.61-65, 1999.4
- 4) E. Ng: Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities - air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong, Building and Environment, vol.44, pp.1478-1488, 2009
- 5) T. R. Oke: Street design and urban canopy layer climate, Energy and Buildings, Vol.11, pp.103-113, 1988
- 6) L. J. Hunter, I. D. Watson, G. T. Johnson: Modeling air flow regimes in urban canyons, Energy and Buildings, Vol.15-16, pp.315-324, 1990/91
- 7) G. S. Golany: Urban design morphology and thermal performance, Atmospheric Environment, Vol.30, pp.344-465, 1996
- 8) A. Zhang, C. Gao, L. Zhang: Numerical simulation of the wind field around different building arrangements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.93, pp.891-904, 2005
- 9) T. Kubota, M. Miura, Y. Tominaga, A. Mochida: Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods, Building and Environment, Vol.43, pp.1699-1708, 2008
- 10) 竹林英樹, 山田俊明, 森山正和: 街区の空間特性が街路空間の風通し環境に及ぼす影響, 気候資源としての風の利用を目的とした街路形態と街路空間の風通しの関係の分析 その2, 日本建築学会環境系論文集, 第 670 号, pp.1087-1092, 2011.12
- 11) 日本建築学会: 市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブックーガイドラインと検証用データベースー, 日本建築学会, 2007.7

EVALUATION OF WIND ENVIRONMENT IN STREET CANYON FOR USE IN URBAN CLIMATE MAP

*Hideki TAKEBAYASHI**

* Assoc. Prof., Dept. of Arch., Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr.Eng.

The urban climate map is an information and evaluation tool used to integrate urban climate factors and town planning considerations by presenting maps of climate analysis. A spatial classification for ventilation near the ground surface has not been established. A number of features (e.g., air path, building ground coverage and building bulks, building height/street width ratio, street orientation, layout of building disposition, open spaces and greenery areas) have been linked to ventilation. Some study results were also used in an air ventilation assessment of Hong Kong. Kubota et al. carried out a wind tunnel experiment in 22 residential Japanese neighborhoods and concluded that there is a strong relationship between the gross building coverage ratio and the spatial average wind velocity at pedestrian level. In this study, the wind environment in a street canyon in Osaka City was calculated using CFD. The relationship between the wind environment and street canyon characteristics was analyzed using CFD calculation results and a GIS tool, in order to identify the predominant indicators of the wind environment.

The standard $k-\epsilon$ turbulence model was selected for use in the simulation. A general purpose computational fluid dynamics software was used for calculation. The area of interest was all of Osaka City (223 km²), which was divided into 50 target areas 2,500 m square. Data about individual building shapes handled using a GIS tool, was provided by Osaka City Office. The height of each building was calculated by multiplying the floor height from each building use by the number of stories specified in the data of each building. Smaller objects (e.g., trees, signs, cars, human bodies) could not be reproduced. The size of the calculation domain was 11,000 m x 8,500 m x 550 m. Grid resolution in the objective domain is 10 m x 10 m x 1 m. The grid intervals increase gradually horizontally and. Wind speed (3.2 m/s) for westerly wind 42 m above the ground, with a power law vertical profile (power: 0.25), were the inflow boundary conditions set.

Calculated results for 10 m square grids were averaged for 100 m, 250 m, 500 m, 1,250 m and 2,500 m square grids. Grid partitioning at each scale is shown in Figure 10. Spatial average wind velocity was calculated from all calculated results of horizontal wind velocity, without the solid points (such as buildings) in each square grid. Therefore, in the case of a 100 m square grid, the spatial average wind velocity might be calculated from an extremely low number of wind velocity calculation results. The relationship between the urban block component ratio and the spatial average wind velocity averaged over grids 500 m square is shown in Figure 11. Spatial average wind velocity is better explained by the open space ratio rather than the gross building coverage ratio.

When the gross building coverage ratio was less than 30%, the spatial average wind velocity decreased with the increase of this ratio. In contrast, when the gross building coverage ratio was more than 30%, spatial average wind velocity was almost constant and the open space ratio was almost constant. The spatial average wind velocity was explained by the open space ratio in grids more than 250 m square. It means that the open space ratio is more direct indicator to spatial average wind velocity.

Spatial average velocity averaged in the area of about 250 to 1,250 m square grid is meaningful. In this scale, it is possible to extract the typical characteristics of wind environment in the street canyon. Two or more peaks of wind velocities occur in more larger scale.

When the evaluation scale is less than 100 m square, the wind environment in street canyons is best evaluated by more specific indicators (e.g., building height and road width) rather than spatially averaged indicators (e.g., gross building coverage ratio).

(2014 年 11 月 19 日原稿受理, 2015 年 6 月 11 日採用決定)