特集

風による都市の暑熱環境の緩和

都市の風通し Urban Ventilation

竹林英樹*¹

Hideki TAKEBAYASHI

1. はじめに

風の道を確保するために建物の配置や形態が変更されるというドイツのシュツットガルトのプロジェクトが話題になり、シュツットガルト大学（当時はシュツットガルト市）のパウミュラー教授ほかにもその背景や実情を教えて頂くなかで、気候風土に配慮した都市計画を実現するために、クリマアトラス（都市環境気候図）が有効であることが教示された。日本では2000年に「都市環境のクリマアトラス」¹⁾が出版され、その後香港などでも作成されて有効に活用されている²⁾。

クリマアトラスは、クリマトープと呼ばれる特定の土地利用・土地被覆を示す局地気候単位、気候的特徴による地形分類（冷気の産出域、集積域、冷気流に対する障害物など）、気流交換（海のないシュツットガルトでは斜面冷気流、山谷風などの風の道）、人為的汚染源（交通、工場など）、などの地図集である。著者らは、地表面熱収支に基づくクリマトープ図の作成方法³⁾、山谷風や斜面冷気流の分析と熱環境緩和効果⁴⁾、都市の風通しの分析⁵⁾、についてドイツの先行事例^{6, 7, 8)}などを参考に検討を進めてきた。本稿では、これらのうちの都市の風通し（風の道）の検討事例について報告する。これまでの検討事例を再構成したため、事例によっては古いデータや解析結果が含まれることをご了承頂きたい。

2. 都市の風通しのポテンシャル

東京、大阪、名古屋などの日本の多くの都市は海に面して立地しており、典型的な夏期晴天日には海陸風循環の影響を受けている。特に日中は冷涼な海風が都市に吹き込むため、都市の気温上昇を抑制するとともに、外部空間の風通しの改善に寄与している。日本においては、このような外部空間の熱環境緩和に海風を積極的に利用する方策が、夜間の山風、冷気流、冷気のにじみ出し⁹⁾などの有効利用とともに、「風の道」として位置付けられると認識する。

大阪市から東大阪市の小学校の百葉箱に温度計を設置して測定した気温と海岸からの距離の関係を図1に示す¹⁰⁾。2000年8月の海風日を平均した14時の気温である。15km程度内陸と海岸付近で約3℃の差が確認される。海岸付近から内陸にかけた4箇所の送電鉄塔等に温度計、風速計を設置して測定した上空と地上の気温、風速を図2に示す¹¹⁾。上空、地上ともに海岸付近と内陸で日中に2℃程度の差があり、厚みを持った海風の気温低下効果が確認される。上空風速は2m/s程度海岸付近が大きい。海風の進入に伴い上空風速が増加し、上空へ輸送される顕熱流が増大して地上付近の気温が低く保たれると考察された。上空と地上の熱交換係数である総括対流熱伝達率をメソ気象モデルWRFにより計算した結果を図3に示す¹²⁾。

* 1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授 thideki@kobe-u.ac.jp
Associate Professor, Department of Architecture, Graduate school of Engineering, Kobe University

図1 海岸からの距離と14時の気温（2000年8月海風日平均，大阪市内の小学校百葉箱での測定結果）⁷⁾

図3 都市化状況を変化させた場合の海岸からの距離と総括対流熱伝達率（大阪地域，海風晴天日日中平均）¹²⁾

南港 (0km, 57m), 難波 (8km, 84m), 荒本 (17km, 45m), 石切 (21km, 42.5m), (海岸距離, 温度計設置高さ)
図2 海岸から内陸の4地点での上空温度, 地上気温, 上空風速の測定結果（大阪地域, 2006年8月平均）¹¹⁾

都市化（床面積が現状の倍になり人工排熱，建物高さが増加する想定）すると総括対流熱伝達率が減少し，海風の冷却効果を受け難くなるが，その影響は海岸付近から内陸への移動による影響より小さい。風上側の都市化が風下側に及ぼす影響はそれほど深刻に考える必要はないといえる。

3. 街区の構成要素の割合と風通しの関係

Ren ら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の分類は主に土地利用と結び付けて実施されると考察したが，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と指摘した¹³⁾。CASBEE-HIでは，敷地内の暑熱環境の改善効果を評価する Q_{HI} の風通しに関して以下の2項目が挙げられている¹⁴⁾。

①敷地周辺の風の状況を把握し，敷地内の歩行空間等へ風を導く建築物の配置・形状計画とする（工夫している（レベル4），していない（レベル2）の定性評価）

②芝生・草地・低木等の緑地や通路等の空地を設けることにより，風の通り道を確保する

②の定量評価の指標である（敷地内の）空地率は，一般的な水準（レベル3）が40%以上60%未満であり，レベル1:20%未満，レベル2:20%以上40%未満，レベル4:60%以上80%未満，レベル5:80%以上となっている。敷地内に風の通り道を確保して暑熱環境を改善するには，敷地の半分以上を空地にする必要があり，市街地内では厳しい条件であると認識される。

実際に大阪市内の街区の構成要素の分類を風通しとの関係に注目して検討すると¹⁵⁾，建物，道路，建物周辺のオープンスペース（上記の空地率に相当する），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）

に分類するのが適当であると考察された（図4）。これらの構成要素の割合（500m 四方のグロス建蔽率，道路率，空地率，オープンスペース率）と地上2mの（500m 四方の）平均風速の関係を図5に示す。Kubota らはグロス建蔽率と歩行者レベルの平均風速との間の強い負の相関を確認し¹⁶⁾，Ng も香港において同様の傾向を確認しており¹⁷⁾，この図においてもグロス建蔽率が増加すると風速が小さくなる傾向が確認される。ただし，オープンスペース率による近似直線の決定係数の方が若干大きく，空地率（建物周辺のオープンスペース率）との関係はあまり明確でない。

ここで，構成要素の割合，及び，平均風速を算出する際の対象面積の検討も必要となる。図6に2,500m, 1,250m, 500m, 250m, 100m の格子分割により大阪市内を区分した例を示す。各格子分割における各構成要素の割合と平均風速の決定係数を表1に示す。平均風速は，大阪市内全域を対象として典型的な夏期日中の気象条件（海風進入時）を想定し，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，格子分割毎に平均したものである。100m 格子で平均した平均風速には，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り，各構成要素の割合との間に関係性が確認されない。100m 格子の場合を除くと，2,500m, 1,250m 格子の場合にはグロス建蔽率の決定係数が大きい，全般的にはオープンスペース率により平均風速が説明される。

グロス建蔽率，オープンスペース率と平均風速の関係をより詳細に考察するために，グロス建蔽率30%を境界として区分した平均風速との関係を図7に示す。グロス建蔽率30%未満では，グロス建蔽率と平均風速の間に負の相関が確認され，建物が建て込むと平均風速が低下する。しかし，グロス建蔽率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。グロス建蔽率別の構成要素の割合を図8に示す。グロス建蔽率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30%以上では，オープンスペース率はあまり変化せず，小さな値である。このことが，500m 格子の場合の平均風速との決定係数が，グロス建蔽率よりオープンスペース率が大きくなった要因であると解釈される。図5において，平均風速が近似直線より極端に大きく乖離するデータが散見される。500m 格子内にまとまったオープンスペースが含まれる場合に該当し，平均化する格子間隔と平均風速の空間代表性に注意が必要である。

図4 街区の構成要素の分類

図5 500m 四方のグロス建蔽率，道路率，建物周辺スペース率（空地），オープンスペース率と地上2m 平均風速

図6 大阪市の2,500, 1,250, 500, 250, 100m での格子分割

表1 各格子分割の構成要素割合と平均風速の決定係数

	2,500m	1,250m	500m	250m	100m
建蔽率	0.83	0.79	0.53	0.40	0.16
道路率	0.56	0.54	0.31	0.17	0.01
空地率	0.12	0.01	0.00	0.00	0.01
OS 率	0.76	0.74	0.64	0.46	0.16

図7 500m 四方のグロス建蔽率と地上2m の平均風速

図8 500m 格子でのグロス建蔽率別の構成要素の割合

4. 道路幅，建物高さで街路空間の風通し

250m～2,500m 格子程度の街区における風通しは，構成要素の割合であるオープンスペース率，グロス建蔽率により説明されることが考察されたが，オープンスペースの配置によって平均風速が変化することも確認された。そこで，街区の平均風速ではなく，街路空間内の風通しに関して，道路幅，建物高さとの関係に注目して検討を行った⁵⁾。

大阪市内の特定の街区の計算結果より，道路幅と街路空間の平均風速比（上空風速に対する地上2m の風速の比）の関係を図9 に示す。平均風速は道路区間（交差点から交差点まで）毎に平均した値である。主風向に平行な道路では，道路幅の拡大に伴い風通しが改善される。主風向に直交する道路でも道路幅の拡大に伴い風通しが若干改善されるが，その効果は主風向に平行な道路より小さい。道路幅40～45m で風速比が小さくなったのは，渦が消滅するアスペクト比に相当したためであると考察された。主風向と22.5°，45°の角度を持つ道路においても，平行な道路ほどではないが道路幅の拡大に伴う街路空間の風通しの改善が確認された。

同様に当該道路両側の平均建物高さで街路空間の平均風速比の関係を図10 に示す。主風向に平行な道路では，平均建物高さの増加に伴い風通しが改善される。主風向に直交する道路でも平均建物高さの増加に伴い風通しが若干改善されるが，渦の発生状況の影響を受けている。なお，道路の両側にオープンスペースが存在する場合は建物高さ0m，片側や一部に存在する場合は0～5m に区分される場合が多く，主風向に直交する道路では片側にオープンスペースが存在すると，その部分の風通しが良く，街路空間の風通しも改善される。

5. 建物高さのばらつきで街路空間の風通し

街路空間の風通しの指標として，道路幅は対象とする道路区間においてほぼ一定であるが，建物高さは道路の

図9 道路幅と街路空間の平均風速比

(上：主風向に平行な道路，下：主風向と直交する道路)

図10 道路両側の平均建物高さ(上：主風向に平行な道路，下：主風向と直交する道路)

両側、隣接建物で異なる場合がある。

大阪市内の幾つかの街区の計算結果より、グロス建蔽率、建物高さのばらつきと平均風速比の関係を図11に示す。主風向に平行な道路、直交する道路ともにグロス建蔽率が減少すると風通しが良くなるが、平行な道路の方が顕著である。グロス建蔽率が同程度で平均風速比の異なる街区の状況を確認したところ、広幅員の道路を有して道路幅のばらつきが大きい街区で平均風速比が大きいことが考察された。

グロス建蔽率の小さい街区(50%未満)では建物高さのばらつきが増加しても平均風速比は増加せず、主風向に平行な道路では低下する。建物高さのばらつきにより生じる渦の影響により、平行な道路に沿って流れてきた風が弱められる場合があると考察された。グロス建蔽率の大きい街区(50%以上)では建物高さのばらつきが増加すると平均風速比は若干大きくなる。建物が密集した地域で建物高さにばらつきを与えると街路空間の風通し改善に繋がる可能性はあるが、オープンスペースが適度に確保された地域ではばらつきを与える必要性は低い。

建物間の高さのばらつきではなく、街区間の高さのばらつきと街路空間の風通しの関係を検討した。風上、対象領域のそれぞれの街区の高さは一様とし、対象領域と風上領域の高さの差と対象領域の平均風速比の関係を図12に示す。高さの差が大きいほど平均風速比が大きい。特に、対象領域が風上領域より高い場合に影響が大きい。対象領域が風上領域より高い場合には吹きおろしの風により主風向に平行な道路と交差点で風速比が大きくなり、風上領域が対象領域より高い場合には対象領域が負圧側になって風速比が大きくなることが確認された。

風上領域、対象領域の差だけでなく、図13に示す高さの異なる街区が平行、直交、千鳥に配置された場合の平均建物高さ(上)と対象領域の平均風速比(下)を図14に示す。風上領域で建物高さを変化させた場合の影響は小さい。対象領域で建物高さを変化させた場合には、平行配置と一様配置では平均建物高さが増大しなければ風通しは改善されないが、直交配置と千鳥配置では平均建物高さが小さい場合でも風通しは改善される。このときの街区内の風ベクトルを確認すると、建物高さが大きい街区の風上側の主風向と直交する道路に上空風が引き込まれて周辺に広がり、負圧側になった風下側の直交する道路にも周辺から風が引き込まれる様子が確認された。成田¹⁸⁾や萩島¹⁹⁾が指摘しているように、不均一な建物高さの場合に正圧域、負圧域が適度に形成され、風通しの改善に繋がると考察された。

主風向に平行な道路（左）と直交する道路（右）

平行道路のグロス建蔽率 50%未満（左）と 50%以上（右）

直交道路のグロス建蔽率 50%未満（左）と 50%以上（右）

図 11 グロス建蔽率，建物高さのばらつきと平均風速比

図 12 対象領域と風上領域の高さの差（対象－風上）と
対象領域の平均風速比

図 13 高さの異なる街区の

平行配置（左），直交配置（中央），千鳥配置（右）

図 14 平均建物高さとお対象領域の平均風速比
(上：対象領域，下：風上領域で変化させた場合)

6. まとめ

気候風土に配慮した都市計画を実現するために検討してきた、風通しのポテンシャル、250m～2,500m 格子程度の街区における構成要素の割合と平均風速の関係、道路幅、建物高さ、建物高さのばらつきと街路空間内の風通しの関係についての検討結果を整理した。主に文献 5, 11, 15 の内容を用いたため、詳細はそれらを参照頂きたい。

日本においては、外部空間の熱環境緩和に海風を積極的に利用する方策が、夜間の山風、冷気流、冷気のにじみ出しなどの利用とともに「風の道」として位置付けられると思われる。海風の進入に伴い上空風速が増加し、上空へ輸送される顕熱流が増大して、地上付近の気温が低く保たれると考察された。風上側の都市化が風下側に及ぼす影響はそれほど深刻に考える必要はないといえる。

250m～2,500m 格子程度の街区における風通しは、オープンスペース率、グロス建蔽率により説明されることが考察されたが、オープンスペースの配置によって平均風速が変化することも確認された。

主風向に平行な道路では、道路幅の拡大に伴い風通しが改善される。主風向に直交する道路でも若干改善されるが、その効果は小さい。主風向に平行な道路では、両

側の平均建物高さの増加に伴い風通しが改善される。主風向に直交する道路でも若干改善されるが、渦の発生状況の影響を受けている。主風向に直交する道路では片側にオープンスペースが存在すると、その部分の風通しが良く、街路空間の風通しも改善される。

建物が密集した地域で建物高さにばらつきを与えると街路空間の風通し改善に繋がる可能性はあるが、オープンスペースが適度に確保された地域ではばらつきを与える必要性は低い。不均一な高さの街区構成の場合に正圧域、負圧域が適度に形成され、風通しの改善に繋がると考察された。

謝辞

本報で紹介した内容は、神戸大学の森山正和名誉教授および森山、竹林研究室の学生（当時）との共同研究の成果の一部である。関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 「都市環境のクリマアトラス」, ぎょうせい, (2000)
- 2) Ng, E., and Ren, C., “The Urban Climatic Map, A Methodology for Sustainable Urban Planning”, Routledge, (2015)
- 3) Moriyama, M. and Takebayashi, H., “Making method of “Klimatope” map based on normalized vegetation index and one-dimensional heat budget model”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, pp.211-220, (1999)
- 4) 竹林 英樹, 森山 正和, 「夏季夜間における山麓冷気流の集積・流出過程に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, 第 558 号, pp.57-61, (2002)
- 5) 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)
- 6) VDI 3787 Blatt 1, “Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten fuer Staedte und Regionen (Environmental meteorology - Climate and air pollution maps for cities and regions)”, Berlin, Beuth Verlag, (1997)
- 7) VDI 3787 Blatt 2, “Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene fuer die Stadt- und Regionalplanung - Teil 1; Klima (Environmental meteorology – Methods for the human-biometeorological evaluation of climate and air hygiene for urban and regional planning at regional level - Part 1; Climate)”, Berlin, Beuth Verlag, (1998)
- 8) VDI 3787 Blatt 5, “Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft (Environmental meteorology - Local cold air)”, Berlin, Beuth Verlag, (2003)
- 9) 竹林 英樹, 森山 正和, 「実測調査による市街地内公園からの冷気のにじみ出し現象の解析」, 日本ヒートアイランド学会論文集, Vol.3, pp.34-39, (2008)
- 10) 竹林 英樹, 森山 正和, 「海風の影響を受けた都市ヒートアイランド現象」, 日本建築学会技術報告集, 第 21 号, pp.199-202, (2005)
- 11) 竹林 英樹, 森山 正和, 「上空気象データを用いた海風による気温低下効果の考察」, 日本建築学会環境系論文集, 第 643 号, pp.1099-1105, (2009)
- 12) 竹林 英樹, 岸本 貴, 「都市化が海風の冷却効果に及ぼす影響に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, 第 692 号, pp.775-779, (2013)
- 13) Ren, C., Ng, E. and Katzshner, L., “Urban climatic map studies: a review”, International Journal of Climatology, 31, pp. 2213-2233, (2011)
- 14) 日本サステナブル建築協会, 「建築環境総合性能評価システム CASBEE-HI (ヒートアイランド) 評価マニュアル (2017 年度版)」, (2017)
- 15) 竹林英樹, 「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」, 日本建築学会環境系論文集, 第 715 号, pp.795-801, (2015)
- 16) Kubota, T., Miura, M., Tominaga, Y. and Mochida, A., “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, 43, pp.1699-1708, (2008)
- 17) Ng, E., “Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities - air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong”, Building and Environment, 44, pp.1478-1488, (2009)
- 18) 成田健一, 「都市内河川の微気象的影響範囲に及ぼす周辺建物配列の影響に関する研究」, 日本建築学会計画系論文集, 第 442 号, pp.27-35, (1992)
- 19) 萩島理, 谷本潤, 末永啓, 池谷直樹, 前田一行, 成田健一, 「直方体粗度群の床面バレルスカラー係数に関する風洞模型実験」, 日本建築学会環境系論文集, 第 632 号, pp.1225-1231, (2008)