特集

都市の風通し

樹木の植栽が都市の風通しや温熱環境に及ぼす影響

Effects of Tree Planting on Ventilation and Thermal Environment in Urban Area

吉田伸治*

Shinji YOSHIDA

1. はじめに

みどりは人類誕生以前より地球上に存在し、人類を含め多くの生物の営みに深く関わってきた。街路樹は我々が都市の中で「みどり」を身近に体感できる最も基本的な要素であり、都市空間における気温低下、水蒸気の放出、日射遮蔽、大気の浄化（光合成）、斜面地の保護、火災時の延焼防止、美観・景観の形成、レクリエーションの場の提供、動物への生活の場の提供等、物理的なものから心理的なものまで多岐にわたる機能が期待されている¹⁾。特に、近年深刻な都市のヒートアイランド現象の対策技術として最も頻繁に活用される。真夏の都心部で街路樹の樹冠が天空を覆う低温で適度な風通しのある快適な空間は「クールスポット」と呼ばれ、その必要性が広く認められている。

本稿では都市空間に不可欠な「みどり」と風通しに関して、計算流体力学 CFD による検討例を交えながら説明する。本稿前半では、植栽の屋外温熱環境に与える複合的影響の中での風通しの変化がもたらす影響の大きさを説明し、後半では、季節に応じた防風・利風を可能とする樹木帯形状に関するケーススタディの内容を紹介する。

2. 植栽が屋外空間の温熱環境に与える複合的影響

都市のヒートアイランド現象の対策技術を都市全体の

図1 植栽が夏季の温熱環境に与える複合的影響²⁾

マクロな視点で捉える場合、街路樹等の地表の「みどり」は設置された空間及びその周辺の気温を低下させるため、その現象の緩和に大きく貢献する点に疑いの余地は無い。しかし、近年、その問題への関心の高まりは、建物周辺や街路空間の様なミクロな空間スケールにおける夏季の温熱環境が耐え難いものとなり、その緩和が求められているためと考えられる。この様なミクロな空間スケールの視点から街路樹の建物周辺・街路空間の温熱快適性に与える影響を考える場合、その評価はやや複雑なものとなる。なぜなら、図1に示すように、街路樹の植栽は、日射遮蔽、照り返しの減少、気温低下という点では夏季の熱環境緩和に貢献する反面、風通しの悪化や湿気の増加といった悪化の要因も併せ持つためである^{2)~3)}。そのため、対策技術として街路樹の設置が夏季の屋外温熱環境をどの程度緩和可能か定量的に評価するのは難しく、CFD 連成数値解析に基づく総合的な屋外温熱環境評価技術の活用が最も有効と考えられる。

3. CFD 連成数値解析に基づく屋外温熱環境評価手法

3.1 評価手法の流れ

屋外温熱環境予測手法の流れを図2に示す²⁾。先ず、左端のプロセスにおいて各種入力条件 (Input data 1~3) より境界条件を設定する。次に中央のプロセスの前段階において放射計算を実行する。放射計算より得られた地表面や壁体表面の温度分布等を境界条件として与え、対流・湿気輸送連成 CFD 解析を行う。その結果、新たな風速、温度、湿度の分布が与えられ、これにより地表面、壁体表面からの顕熱輸送量や潜熱輸送量が変化し、地表面や壁体表面の熱収支も変わるので、この条件下で再び放射計算を行う。これら一連の操作 (中央のプロセス) の反復により CFD に基づく対流・放射・湿気輸送連成シミュレーションが完成する。解析の結果、風速、温度、湿度、平均放射温度 MRT (Mean Radiant Temperature) の空間分布が得られる。さらに人体の着衣量、

* 福井大学大学院工学研究科 准教授
Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Fukui

図2 屋外温熱環境におけるSET*予測のための連成解析のフローチャート

代謝量を仮定することにより温熱快適性の評価指標である新標準有効温度SET*⁹⁾の空間分布が計算される。

3. 2 植栽による環境形成の物理メカニズムを考慮した樹木モデルの組み込み

樹木が屋外の温熱空気環境形成に及ぼす影響には種々存在するが、主なものとして図3に示す3つが挙げられる。

- ① 樹木の流体力学的影響（風速低下と乱れの増加）
- ② 樹木による日射等の放射減衰の効果
- ③ 樹木からの蒸散による潜熱放散を含む熱収支への影響

このように、環境に対し複雑な影響を及ぼす樹木のモデル化については、単純なものから極めて複雑なものまで様々なものが提案されている^{9)~7)}。筆者らは、上述の屋外温熱環境評価手法への組み込み時の実用性に配慮した上で、それら3つの影響を考慮した樹木モデルを開発した³⁾。次章以降の解析ではこの樹木モデルを用いている。

4. 植栽の規模・種類の違いが屋外空間の風通し・温熱環境に及ぼす影響の数値解析

4. 1 解析対象・解析ケース

緑化の効果を検討するのに適切な街区モデルとして図4に示すものを設定した。ここでは立方体建物モデル（1辺30m）で構成される均等街区を想定している。東京の7月下旬午後3時の気象条件を選び、草地や樹木が街区の温熱環境に及ぼす影響を検討している。

解析ケースを表1ならびに図5に示す。case 1-1（地表面の草地率を10%とした場合（樹木なし））、case 1-2（地表面を全面草地（草地率100%）とした場合（樹木なし））、case 1-3（地表面全面草地+地上2mより上部に直径4mの樹冠をもつ樹木（樹種ニセアカシア、葉面積密度1.0 m²/m³）を5m間隔で均等に配置した場合）、の3ケースの解析が行

図3 環境緩和効果を組み込んだ樹木モデルの概念図

われた³⁾。なお、ここでは緑化や植栽の影響を比較するためやや極端なモデル化を行っている。

地表面の草地は芝生等の丈の低い緑地を想定し、その物理的影響は地表面の蒸発効率 $\beta^8)$ 、^{註1)}の増加に伴う潜熱放散の増加と、それに伴う顕熱量の減少により評価する。

また、建物間の相互反射の影響を考慮するため東西、南北に各々3個ずつ、合計9個の建物が並んだ空間を対象に放射計算を行い、解析領域中心の建物並びにその近傍の地表面、建物壁面温度をCFD計算の境界条件に使用した。また、対流計算における風速、温度、絶対湿度の水平方向の境界条件は周期境界条件を用いた。即ち、地表面・建物壁面で発生した熱や水蒸気は、全て上空境界より排出される。地表面、建物壁面における速度の境界条件には便宜的に一般化対数則²⁾を使用し、熱の境界条件としては対流熱伝達率型の壁関数を用いた。その他、計算条件・手法の詳細は文献3を参照されたい。

4. 2 風速ベクトル分布

風速ベクトルの水平分布（地上1.5m）を図6に示す。いずれのケースも建物間に循環流が生じており、これが後に示す気温分布に大きく影響する。case 1-3（全面草地、全面樹木）は樹木の風速低減効果により、樹木の存在し

図4 解析領域

表1 計算ケース

case	草地率 [%]	樹木の有無
case1-1	10	無し
case1-2	100	樹高 6.0[m] の樹木を 均等配置
case1-3

図5 解析ケースのイメージ

ない case 1-1 (草地率 10%、樹木なし)、case 1-2 (全面草地、樹木なし) に比べ、全般に風速が小さく、循環流域内で約 0.25m/s～0.5m/s の値となる。この風速の低下は後述する新標準有効温度 SET* を上昇させる方向に働く。

4. 3 地表面温度分布

各ケースの地表面温度分布の比較を図7に示す。case 1-2 は case 1-1 に比べ、草地の増加に伴う地表面からの潜熱発生増加により、日照部で約 14℃、日影部で約 6℃ 地表面温度が低下する。case 1-3 では、樹冠の日射減衰効果により、case 1-2 に比べさらに日照部で約 12℃、日影部で約 2℃ 地表面温度が低下する。case 1-3 の場合、草地からの蒸発散による潜熱放散に加え、樹冠の日射減衰効果により地表面での日射による熱取得量が減り、地表面温度は全体的に 26℃ 程度の値となり、気温よりも低い値を示す。樹木のモデル化のプロセスにおいていくつかの単純化があり予測精度に改善の余地があるにしても、ここに示すように樹木の温熱環境に対する影響の大きいことは明らかであると言える。

4. 4 気温分布

気温の水平分布 (地上 1.5m) を図8に示す。case 1-2 は case 1-1 に比べ、循環流域内で約 0.5～1.5℃ 気温が低く、草地からの蒸発散による気温低減効果が認められる。一方、case 1-3 は case 1-2 よりもさらに約 2.0～5.5℃ も気温が低下する。

3. 5 緑化の面積と種類の違いによる SET* の増減

新標準有効温度 SET* の水平分布 (地上 1.5m) を図9に示す³²⁾。case 1-1 と case 1-2 では日照部と日影部で SET* の値に顕著な差が生じる。case 1-1、case 1-2 では、共に日照部と日影部の SET* の差の最大が 14℃ となる。一方、case 1-3 では樹冠の日射遮蔽効果により、SET* は比較的均一とな

(1) case1-1 (草地率 10%、樹木なし)

(2) case1-2 (全面草地、樹木なし)

(3) case1-3 (全面草地、全面樹木)

図6 風速ベクトルの水平分布 (高さ 1.5m)

(1) case1-1

(2) case1-2

(3) case1-3

図7 地表面温度分布

り、34℃～38℃程度の値を示す。

また、図10は緑化の面積、種類の違いによる SET* の増減を調べたものである。図10(1)は、case 1-2 の SET* と case 1-1 の SET* の差である。この図から、case 1-1 から case 1-2 への草地面積の増加に伴う SET* の増減 (case 1-2 - case 1-1)

が分かる。図中の灰色の部分がcase 1-2においてcase 1-1に比べてSET*が減少する領域であり、白色の部分は逆に増加する領域である。草地の増加に伴い、case 1-2のSET*はcase 1-1に比べて多くの領域で最大約2℃低下し、温熱快適性は向上する。次に図10 (2) にcase 1-3とcase 1-2 のSET*の差 (case 1-3-case 1-2) を示す。この事例では樹木の配置に伴いSET*が上昇する領域 (白色の領域) の方がSET*が低下する領域 (灰色の領域) よりやや大きくなっており、樹木の配置により必ずしも夏季の快適性が向上するとは限らない結果になっている。

以上の解析結果をまとめると、本章の解析では草地面積の増加は温熱快適性を向上させ、樹木の配置は逆に快適性を悪化させる結果となった。このような結果となった要因は、case 1-3において地表全面に樹木を配置したことにより生じる過度の風速低下と湿度上昇が原因である。地表全面に樹木を設置するという、やや過剰なケースであることに留意する必要があるが、この結果は植栽による温熱環境緩和効果を期待する場合、樹木の適切な密度と配置に配慮する必要があることを示唆している。

次章では、この風通しの屋外温熱快適性に与える影響の大きさを踏まえ、季節に応じた防風・利風を可能とする樹木帯の配置を検討した解析例を紹介する。

5. 河川風の防風・利風を図るための樹木帯・フェンスの配置の検討

エコロジカルな都市づくりにおいて、河川沿岸や臨海部等の親水空間の利用が注目されている。河川や海洋上の新鮮冷気を街区に誘引することは夏季の屋外温熱環境の緩和に非常に有効である。また冬季には、冷風の流入を如何に抑制するかが屋外環境計画上重要となる。成田¹⁰⁾は、風洞実験により河川周辺の建物配列が街区の微気象に及ぼす影響を検討している。著者らもCFD解析により建物配置の変更の有無が河川からの冷風の取り入れに及ぼす影響を検討している¹¹⁾。本章では、河川沿岸において夏季は河川風を誘引し、冬季はそれを防止する様な樹木帯、フェンスの配置についての検討例を紹介する。

5. 1 解析概要

図11の河川とこれに沿った陸を解析対象とする。河川水面上の風向は季節によって異なる場合が多く、例えば関東地方の日中においては、夏は海から内陸へと上流に遡上し、冬は内陸から海へと下流方向に吹くことが多い。これを踏まえ、図11左側を海側、右側を内陸側と考え、夏は図中左から冬は逆に図中右から風が流入すると想定する。このような風向変化に応じて、夏の川風を陸地へ誘

図8 気温の水平分布
(高さ1.5m)

図9 SET*の水平分布
(高さ1.5m)

図10 緑地の種類と面積の違いによるSET*の増減
(高さ1.5m, 単位: °C)

・ 図中の灰色の領域は SET*の変化が負の値を示し、温熱快適性が向上したことを示す。

引し、且つ冬の川風の侵入を抑制するため、樹木帯をルーバー状に配置する。

樹木帯の構成樹種は、図12に示すシラカシ (高木)、ツツジ (低木) を想定する。ただし計算では幹は考慮されない。これらの樹木が流れ場に及ぼす影響を表2のパラメータによりモデル化する。

解析ケースを表3に示す。また、各ケースの樹木並びにフェンスの配置を図13に示す。case 2-0は植栽を全く配置しないケースである。case 2-1は高木のシラカシのみによる樹木帯を配置したケースである (図13(1))。case 2-2

では、歩行者空間の冬季の防風に配慮し、シラカシに加えてツツジを併用した樹木帯を配置する(図 13(2))。case2-3 では河川と陸地の境界付近の風の流れを効果的に制御するため、フェンスを併用する(図 13(3))。これらの解析により、樹木帯の構成の違いが流れ場、河川付近の新鮮空気の到達状況に及ぼす影響を検討する。

また本解析では河川近傍の空気は新鮮で冷涼であると想定する。そのため、特に夏季においてはこの冷気を陸地に誘引し、冬は逆にその流入を抑制したい。そこで、河川上に位置する流入境界(図 11 参照)からトレーサガスを放出した濃度解析を行い、その到達状況を比較する。その他の計算条件については文献12を参照されたい。

5. 2 風速変化率の水平分布

まず、全く植栽の無いcase2-0のスカラ風速に対するcase2-1~case2-3の値の比を算出した風速変化率により結果を分析する。図 14 が夏季における風速変化率の水平分布(高さ1.5m)を示しており、図 15 が冬季の結果である。図中の灰色の領域は風速変化率が0.2以下の領域であり、植栽による風速低下の大きな領域を表す。case2-1においては、夏は河川から離れた領域に、冬は逆に河川近傍に風速変化率0.2以下の領域が形成される。case2-2では低木の配置に伴い、case2-1に比べ風速変化率0.2以下の領域が大幅に増加する。フェンスを併用した樹木帯を用いたcase2-3では、夏の方が冬に比べて風速変化率が0.2以下の領域が若干増えるものの、場所によっては夏の方が

風速変化率の大きな値を示す領域も見られる。

5. 3 河川上の新鮮空気の樹木帯内部への到達状況

図 16 に夏季における河川付近からの流入空気の濃度分布と風速ベクトル分布を示す。図 17 が冬季の結果である。ここでの濃度の値は河川上の流入境界における値を1として基準化したものである。case2-1、case2-2では河川上においては夏の方が冬より高い値を示すものの陸上では夏冬ともにほぼ0~0.1程度の値を示し、河川上の空気が殆ど到達しない。一方、case2-3ではフェンスの配置に伴い、夏は河川から樹木帯内部へ、冬は樹木帯内部から河川に向かう強い流れが生じている。その結果、夏季の解析において風上から2列目と3列目の樹木帯の間でトレーサガス濃度が0.1~0.2程度の値を示し、逆に冬季は殆ど0の値となり、夏の利風と冬の防風が実現する。

6. まとめ

本稿では、CFD解析の例を踏まえながら、樹木の植栽が都市の風通しや温熱環境に及ぼす影響について説明した。街路樹にはヒートアイランド緩和、夏季屋外温熱環境の緩和に対する貢献が期待されている反面、対策技術として建築・都市空間の設計に効果的に組み込むためには解決すべき多くの課題がある。今後は、配置間隔、樹高、樹種、管理(剪定)方法の違いに対する評価、四季を通じた評価の視点が必要であり、実測、数値シミュレーションによる更なる検証等、研究の進展が期待される。

図 11 解析対象

表 2 樹木のパラメータ

	葉面積密度[m ² /m ³]	抗力係数[-]
シラカシ	4.00	0.4
ツツジ	8.80	0.2

表 3 解析ケース

case 0	樹木帯なしの場合
case2-1	高木のみにより構成される樹木帯を配置した場合
case2-2	高木、低木よりなる樹木帯を配置した場合
case2-3	case2-2 の樹木帯の一部の樹木をフェンスに変更した場合

図 12 本研究で使用する樹木モデルの形状

図 13 1列の樹木帯の内部における樹木及びフェンスの配置

図 14 夏季における風速分布 (地上 1.5m、風速変化率として示す)

[風速変化率 = (case2-1、2、3 のスカラー風速) / (case0 のスカラー風速)、斜線部：風速変化率が 0.2 以下の領域]

図 15 冬季における風速分布 (地上 1.5m、風速変化率として示す)

図 16 川の新鮮空気濃度分布と風速ベクトル分布 (夏季、高さ 1.5m)

図 17 川の新鮮空気濃度分布と風速ベクトル分布 (冬季、高さ 1.5m)

注1) 地表面の蒸発効率 β とは、地表面の濡れ具合を示しており、地表面が十分湿っている場合は 1 に近い値を、完全に乾燥している場合は 0 の値を示す。

注2) SET*は人体を暑熱環境に曝露して 1 時間後の皮膚温度、濡れ率を用いて算出された。ここで、歩行者の着衣量を 0.5clo (半袖シャツとズボンの着衣状態に対応)、代謝量を 1.5Met (ゆっくりした歩行と立位静止時の中間)と与え、人体の平均対流熱伝達率は Mitchel の式を用いて算出された。

参考文献

- 1) 森山正和編、ヒートアイランド対策の技術、学芸社出版、2004.8
- 2) 村上周三、CFD による建築・都市の環境設計工学、東京大学出版会、2000.9
- 3) 吉田伸治、ほか、樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討、日本建築学会計画系論文集、第 536 号、pp.87-94、2000.10
- 4) A. P. Gagge et al., A Standard Predictive index of human response to the thermal environment, AHSRAE Transactions, 92(1), 709-731, 1986

- 5) 平岡久司、樹木の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化に関する考察、日本建築学会計画系論文集、546 号、pp.53-60、2001.8
- 6) 大橋征幹、単独樹木周辺の気流解析に関する研究、日本建築学会環境系論文集、578 号、pp.91-96、2004.4
- 7) 花平愛、ほか、温熱環境改善のための樹木の蒸散作用モデルに関する基礎的研究、日本建築学会環境系論文集、598 号、pp.71-78、2005.12
- 8) 近藤純正、水環境の気象学、朝倉書店、1994
- 9) B. E. Launder et al., The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3, 269-289, 1974
- 10) 成田、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風洞実験、建築学会計画系論文報告集、第 442 号、27-35、1992.12
- 11) 大黒雅之、ほか、CFD を利用した屋外温熱空気環境設計手法に関する研究—川風の温熱空気環境改善効果の解析—、日本建築学会技術報告集、16 号、185-190、2002.12
- 12) 吉田伸治、ほか、CFD 解析による河川風の防風・利風を図るための樹木帯・フェンスの配置に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、D1、605-606、2003