

jh240041

大西領 (東京工業大学 学術国際情報センター)

フラクタル樹木に対する大規模流体シミュレーション

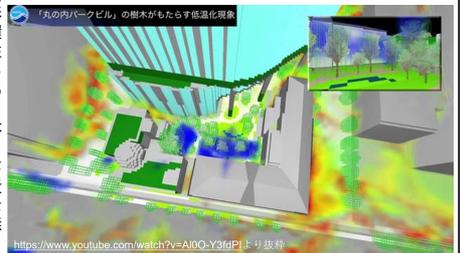


研究背景と目的

近年、熱中症は災害と認識されるようになっており、大きな社会問題の一つである。温暖化、都市化によるヒートアイランド現象、高齢化の進行により、今後さらに深刻化すると考えられ、効果的な対策が望まれる。歩行者の暑熱環境を緩和する効果が期待されるものとして、街路樹や公園樹木が挙げられる。樹木が熱・風環境に与える影響までを考慮して、歩行者レベルの微気象（人工物や人間活動の影響を強く受ける地表付近の気象現象）を精度良く予測できれば、歩行者に対する効果的な熱中症対策につながるかと期待される。これまで樹木の流体力学的研究は数多く行われているが、その全てが抗力係数の議論に限定され、後流領域のエネルギー散逸まで考慮するものは見当たらない。しかし、樹木はフラクタル形状を持つために後流にマルチスケール乱流が形成され、エネルギー散逸の非平衡領域が存在する可能性が高い。本研究では、樹木の流体力学的特性を大規模数値シミュレーションによって明らかにすることを目的とする。

研究の意義

現実の樹木は多種多様であり、樹種、樹形や樹齢によって、周囲の熱・風環境に与える影響（流体力学的特性）は異なり、樹木の影響を考慮した都市街路の熱環境予測法が求められる。樹木の抗力係数を一定と仮定した都市街区歩行者の深部体温変化を予測するシミュレーションが行われたが、街路樹のような孤立樹木はその後流かつ地表付近におけるミクロ視点での定量的な議論が必要である。抗力係数と無次元エネルギー散逸係数の樹種、樹形とレイノルズ数依存性の解明



「丸の内パークビル」の樹木がもたらす感温化現象

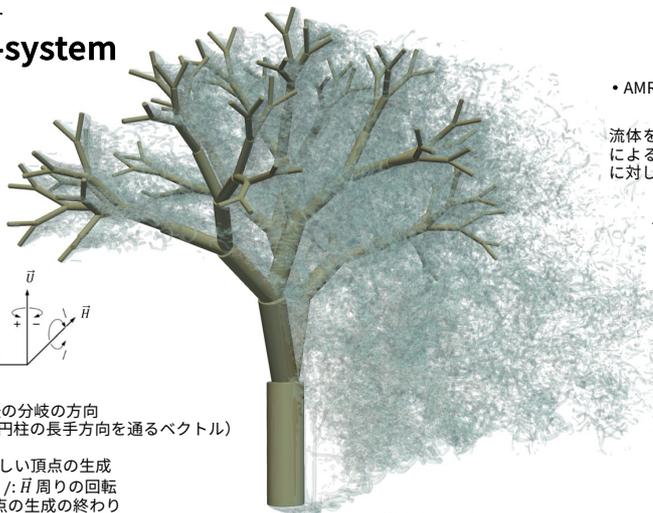
研究グループ

代表者 大西 領 (東工大)
副代表者 渡辺 勢也 (九大)
共同研究者 青木 尊之 (東工大)
共同研究者 YIN YUWEI (東工大)

フラクタル樹木とは

本研究では、枝の形状構造が自己相似性（部分が全体と相似な形を有している）という性質を有する樹木のことを呼ぶ。

フラクタル樹木周りの流れ



パラメトリック L-system

樹形の影響を明らかにするために、L-systemと呼ばれる、言語構造を記述するための表記法である生成文法を応用した樹形を記述する手法を用いる。分岐パターンを操作することで樹形を変化させ、分岐生成世代数nを操作することで複雑度を変化させる。

樹幹のパラメータ

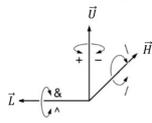
$$\omega: A(100, w_0)$$

枝の生成 (n回繰り返す)

$$p_1: A(s, w) : s \geq ! (w) F(s)$$

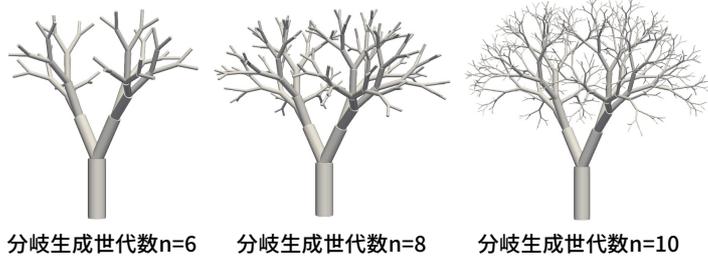
$$[+(\alpha_1)/(\varphi_1)A(s * r_1, w * qe)]$$

$$[+(\alpha_2)/(\varphi_2)A(s * r_2, w * (1 - q)^e)]$$



\vec{h} : 最後の分岐の方向 (枝の円柱の長手方向を通るベクトル)

A: 枝の生成規則を含む頂点、F: 枝と2個の新しい頂点の生成
s: 枝の長さ、w: 枝の直径、+: \vec{U} 周りの回転、/: \vec{h} 周りの回転
[: 次の分岐世代の頂点の生成の始まり、]: 頂点の生成の終わり
! (w): 枝の直径をwに設定

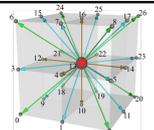


分岐生成世代数n=6

分岐生成世代数n=8

分岐生成世代数n=10

計算手法



• AMR法を含むCumulant-LBM法を使用*

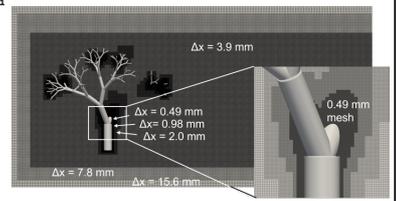
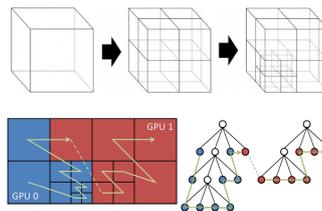
流体を離散速度を持った分布関数で表し、位相空間で並進と衝突による分布関数の時間発展を計算する。速度空間は複雑境界条件に対して最も高精度な3次元27速度 (D3Q27) モデルを使用する。

$$f_{ijk}(x + \xi_{ijk}\Delta t, t + \Delta t) = \frac{1}{\tau} f_{ijk}^{eq}(x, y, z, t) + \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) f_{ijk}(x, y, z, t)$$

f : 速度分布関数
ijk : 速度分布関数の方向
 ξ_{ijk} : 速度分布関数の速度
 τ : 緩和係数
 f^{eq} : 局所平衡状態の分布関数

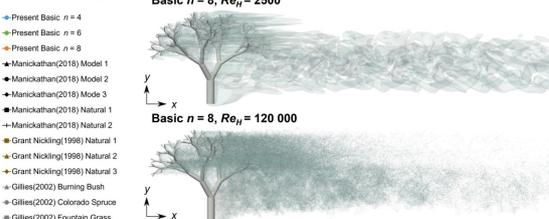
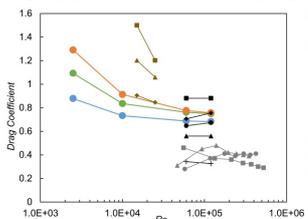
*Watanabe, S. & Aoki, T. 2021 Large-scale flow simulations using lattice Boltzmann method with AMR following free-surface on multiple GPUs. Computer Physics Communications 264, 107871.

樹木表面の境界層を解像するためには高解像度格子が必要である。後流領域にもある程度高い解像度が必要である。樹木表面近傍と後流領域のみ細かい格子を割当て、遠方では解像度を粗くすることができるAMR法を導入している。



Octree ベース AMR 法と、空間充填曲線に基づいた動的領域分割

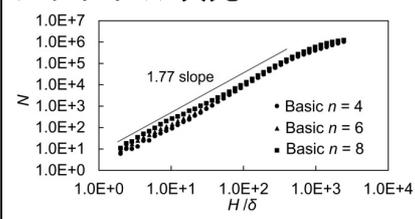
抗力係数の既往研究との比較



分岐生成世代数n=4, 6, 8の樹木モデルを使い、異なるレイノルズ数条件（風速条件）で抗力係数を算出し、既往研究の樹木抗力係数との比較を行った。計算結果は、高レイノルズ数 ($Re_H \geq 60,000$) で実験*と非常によく一致している。後流領域のレイノルズ数依存性もよく再現できている。

* Manickathan, L., Defraeye, T., Allegrini, J., Derome, D. & Carmeliet, J. 2018 Comparative study of flow field and drag coefficient of model and small natural trees in a wind tunnel. Urban Forestry & Urban Greening 35, 230-239.

フラクタル次元



樹形・樹種を定量的に評価するために、box-counting method*で樹木のフラクタル次元を算出した。本研究では、初期の段階でフラクタル次元が1.77の樹木モデルを使用する。

*Da Silva, D., Boudon, F., Godin, C., Puech, O., Smith, C. & Sinoquet, H. 2006 A Critical Appraisal of the Box Counting Method to Assess the Fractal Dimension of Tree Crowns. In Advances in Visual Computing, pp. 751-760. Springer.