

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05792

研究課題名(和文) 樹冠モデルとしてのフラクタル構造物の抵抗と後流乱流の関係に関する研究

研究課題名(英文) Study on drag and wake of fractal object as crown-tree model.

研究代表者

牛島 達夫 (USHIJIMA, Tatsuo)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50314076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：街路樹や防風林の役割を果たす樹木の風による抵抗のほとんどが樹木を覆う葉々の広がり(樹冠)によるものである。本研究は、樹冠の形状をほぼ同じフラクタル次元を持つシェルピンスキー四面体をモデルとして、樹木に掛かる抵抗および後流の速度分布を明らかにした。シェルピンスキー四面体の抵抗係数はほぼ一定となること、乱流の性質は最小要素(葉)の大きさで決まることが分かった。

研究成果の概要(英文)：Trees play a role as wind break and street shade. Wind drag exerted on tree is mainly due to foliage pattern or crown-tree. In this study, Sierpinski tetrahedron, of which fractal dimensions are almost the same, is taken as a model of crown-tree. Drag on the Sierpinski tetrahedron and its wake profile are revealed. It is found that drag coefficient is constant and that properties of wake turbulence are determined by the size of smallest element (or size of leaf).

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 乱流 フラクタル 森林学

1. 研究開始当初の背景

21世紀初頭から、フラクタル形状をした境界から生成する乱流が、通常研究されている乱流と異なるということが報告されており⁽¹⁾、Imperial College London の Vassilicos ら⁽²⁾ や名古屋大学の酒井ら⁽³⁾のグループは、実際に風洞を使って、フラクタル形状の格子から生成した乱流が通常の乱流と異なる場合があることを示した。一般的に知られている格子乱流では、乱流は、エネルギーが大きなスケールから小さなスケールへ順々に輸送されるカスケードによって減衰が起こる。その場合、乱流エネルギーは格子からの距離のほぼ-1乗に比例して減衰する。ところが、フラクタル形状をもつ格子から生成された乱流は、非常に大きな乱れ速度を示すだけでなく、乱流が減衰する過程で、テイラーマイクロスケールで定義された乱流レイノルズ数が下流に進むに従って減少するにも関わらず積分長とテイラー長の比が一定であり、乱流エネルギーも指数関数的に減衰することが報告されている。

これらについて、申請者は、フラクタル乱流(基盤(C)24560190, 2012~2014)の研究で科研費を獲得し、フラクタル形状によって発生する乱流では、通常の乱流減衰(平衡乱流)に達する前の非平衡状態の乱流が自己相似性の多重度が上がるに従って長時間/長距離に渡って維持されることを実験的に明らかにした。この事実は、公園や道路に植樹された林の下流では、樹木によって生成された非平衡な乱流によって、物質の拡散が起こっていることを示すものである。また、東日本大震災により、防災の意識は一層高まっているが、植樹はバイオシールドとして古くから減災・防災のために実施されてきた。季節風の強い、砺波平野、仙台平野、出雲平野では防風林として、家屋の周りに雑木林が造成されてきた。そこで、申請者は前述のフラクタル乱流の知識を応用し、防風林としての機能を持つ構造体としてフラクタル構造体に注目し、その風速と構造体への抵抗および構造体周囲の流れの関係を解明すれば、その知見を防風対策や都市の気流の制御に役立てることができるのではないかと着想に至った。

2. 研究の目的

近年、温暖化により、勢力の強い台風が数多く日本に来襲するようになった。その暴風にも関わらず、街路樹は、小枝などが千切れて、飛ばされることはあっても、倒れずに済んでいる。高レイノルズ数では、風の抵抗は風速の2乗で大きくなることが知られているが、樹木の場合は、高い風速でも風速に1に近いべき乗で比例しているという報告がある。樹木の抵抗の大部分は葉によって生じている。申請者は、葉が木の幹の周囲をフラクタル状に空間分布していること(樹冠の状態)に着目し、樹冠と同じフラクタル次元の人工物に

置き換えて、樹木のような物体の空気抵抗のメカニズムを樹木に掛かる抗力と後流乱流を測定することにより、明らかにしようとするものである。

3. 研究の方法

3.1 シェルピンスキー四面体

フラクタル構造物の周りの流れと抵抗の関係については、Johns Hopkins 大学の研究グループがフラクタル状に分岐した樹木の枝について数値計算⁽⁴⁾や実験⁽⁵⁾を行っている。また、Nedic ら⁽⁶⁾は外縁形状がフラクタルになっている板の流れと抵抗について報告している。しかし、これらは樹木の抵抗の主要因である葉の空間分布について検討されていない。樹木の葉の空間分布をフラクタル次元の一つであるボックスカウント次元を調べてみるとほぼ2であることが報告されている。樹木を風がぬけることによって、大気下層での乱れを生成している。そこで、本研究では、葉の空間分布とほぼ等しいフラクタル次元をもつ、シェルピンスキー四面体を樹木のモデルとして、この四面体に掛かる風抵抗および後流の調査を行う。

シェルピンスキー四面体は、元の四面体を、4つ頂点に接する一辺がその半分の長さの四面体で置き換えることを繰り返してできるフラクタル構造物である(図1参照)。実験ではこの操作を0~4回繰り返して作成したものを使用した。これらをそれぞれN0~N4と呼ぶことにする。代表長さには投影面積の平方根 \sqrt{A} を用いた。

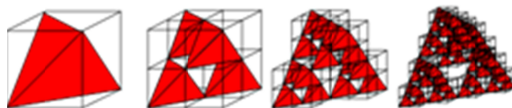


図1 シェルピンスキー四面体の生成

3.2 速度および抵抗測定法

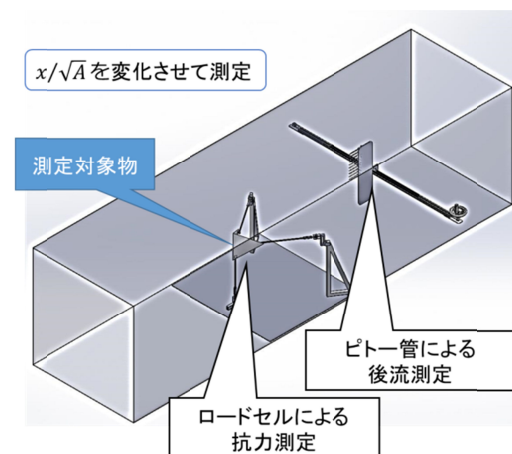


図2 実験装置

物体後流および物体抵抗の測定は、図2に示す80cm×80cm全長3mの風洞内で供試体の外部流れ U_e が5~25m/sの間で行った。

測定対象物は $\sqrt{A}=13\text{cm}$ (N0~N3)と26cm(N4)の4種類を用いた。各供試物体は3点支持で固定した。各支持台にロードセルを挿入

し、供試体に掛かる3分力を測定できるようにした。供試体の下流側には、3方向に移動可能なトラバースを用意し、10本のピトー管を垂直方向に並べ、これらをスパン方向に移動することで、供試体からの距離を変えながら、後流の速度分布を測定し、後流の幅や速度欠損を調べた。速度変動に関しては、供試体全体から生じる大規模な渦を捉えればよいと考え、ピトー管で測定をしていたが、ピトー管と圧力変換器を結ぶチューブ内で気柱共鳴による固有振動で変動が増幅されて測定されることがわかったので、一組のX型熱線流速計で供試体中心軸を通る垂線上のみ測定を実施した。

4. 研究成果

4.1 風による抵抗

一般に高レイノルズ数では、物体の抵抗は速度の2乗(運動エネルギー)に比例する(抵抗係数が一定である)ことが知られている。しかし、樹木の場合、風の抵抗が風速の2乗よりは1乗に近い指数で比例する(抵抗係数がレイノルズ数増大とともに減少する)ことが報告されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

図3に、本実験で使用した供試体の抵抗係数 C_D とレイノルズ数の関係を示す。比較のため円柱の抵抗係数も同時に示した。本実験のレイノルズ数の範囲では、一般的物体と同様に C_D 値は一定となった。大きさが2倍のN4の場合は、他より C_D 値が小さくなっている。円柱や球などでは臨界レイノルズ数を超えると後流の形状が大きく変化し、抵抗低減が起こること知られている。過去の樹木の実験はレイノルズ数が 10^6 のオーダーであり、本実験では、流速は強風域(15m/s以上)まで測定しているが、供試体のサイズが小さいため実際の樹木のレイノルズ数での測定が実現できず、樹木の抵抗の傾向を検証できなかった。

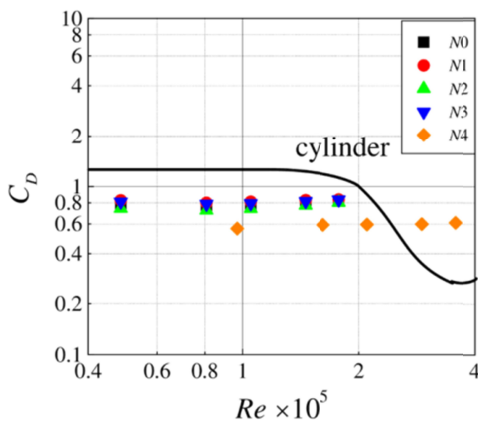


図3 抵抗係数

4.2 後流速度分布

図4に、最大欠損速度 Δu の下流への変化を

示す。フラクタル形状の繰り返しが多いほど最大欠損が大きくなることわかる。減少率も繰り返し数が多いほど小さくなっている。一方、後流の幅の代表値である半値幅(最大欠損の半分になる位置で決まる長さ)は図5に示したように、繰り返し数によらず同様の傾向で拡大している。また、同じ計測地点では、繰り返しの数が多いほど半値幅が小さくなっている。

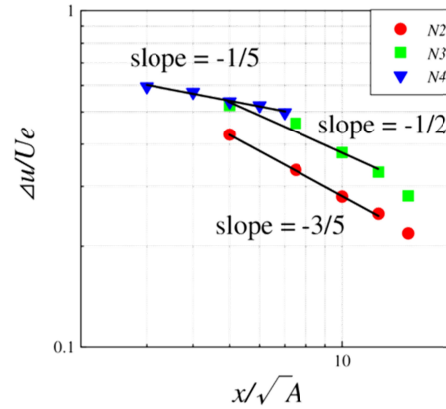


図4 最大速度欠損の減衰傾向

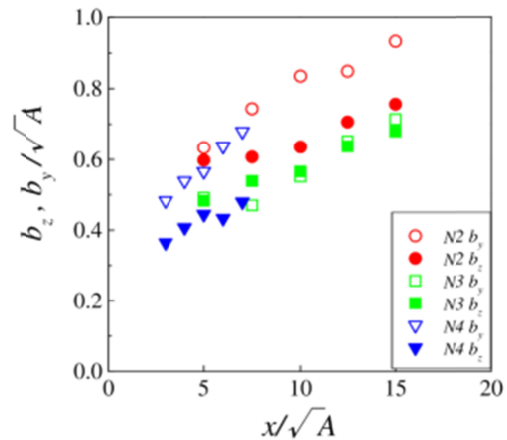


図5 半値幅の拡大傾向

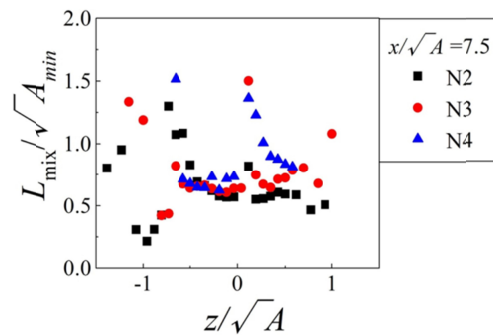


図6 混合長

図6に、熱線流速計で測定された平均速度勾配とレイノルズせん断応力から見積もった混合長をシェルピンスキー四面体の最小要素の大きさで無次元化したものを示す。図より半値幅の内側ではほぼ一致しており、乱

流渦の大きさがシェルピンスキー四面体の最小要素の大きさで決まることがわかる。これは、シェルピンスキー四面体の繰り返し数が大きいほど、シェルピンスキー四面体後流に存在する渦の大きさが小さくなり、このことと図4の速度欠損の減少率の低下が大いに関連していると推測される。

また円柱後流に観察されるような周期的な揺らぎもスペクトル解析から見られなかった。

4.3 後流と抵抗の関係

後流での運動量の変化から抵抗は見積もることができ、その値は、ロードセルによる抵抗の直接測定結果とほぼ一致した。前節で求めた速度欠損や半値幅を用い、速度分布がガウス分布に従うと仮定すると、抵抗係数は次式で見積もることができる。

$$C_D = \frac{2\pi\Delta u b_y b_z (1 - \frac{\Delta u}{2U_e})}{\ln 2 U_e A}$$

この式は C_D が半値幅に比例することを示し、この式の見積もりでは50~80%の過大評価となる。これは実際の後流域が比較的狭く尖っていることを意味する。

以上、本助成により、シェルピンスキー四面体を樹木のモデルとして扱い、樹木の風下での流れを理解するための知見を得た。実際の樹木では幹が揺らぐほどの強風でなくても高レイノルズ数の流れであり、そこで乱流の渦の大きさは葉の大きさ程度であり、これが後流の下流への発展にも深く関連していることが容易に想像される。

引用文献

- 1) Sakai, Y. & Vassilicos J.C. Eds., 2016 Fractal Flow Design: How to Design Bespoke Turbulence and Why (CISM International Centre for Mechanical Sciences), Springer
- 2) Hurst, D. & Vassilicos J.C. 2007 Physics of Fluids 19(3) 035103 Comte-Bellot, G. & Corrsin, S. 1971 J. Fluid Mech., 48, 273-337
- 3) 鈴木ら, 2013 日本機械学会論文集B編 79 (798) 115-125
- 4) Chester, S. et al. 2007 J. Comp. Phys., 225, 427-448
- 5) Bai, K. et al. 2013, Phys. Fluids, 25, 110810
- 6) Nedic, J. et al., 2013, Fluid Dyn. Res., 45, 061406
- 7) Mayhead, G.J. 1973, Agricultural Meteorology, 12, 123-130
- 8) Johnson, R.C. et al., 1982, J. Fluids Eng. 104, 25-30

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計3+3+2件)

Tatsuo USHIJIMA, Yutaka HASEGAWA, Hiroki SUZUKI, "Wake and drag of Sierpinski tetrahedral object as crown-tree model", 6th International Conference on Jets, Wakes, and Separated Flows, 2017年10月09日~2017年10月12日, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio, USA

小川卓也, 牛島達夫, 長谷川豊, 「シェルピンスキー四面体を通して生成される乱流の指数関数的減衰について」, 日本機械学会2017年度年次大会, 2017年09月03日~2017年09月06日, 埼玉大学

林龍汰, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊, 「シェルピンスキー四面体の後流と抵抗について」, 日本機械学会2017年度年次大会, 2017年09月03日~2017年09月06日, 埼玉大学

林龍汰, 牛島達夫, 長谷川豊, 「風洞中に設置したシェルピンスキー四面体の速度分布」2017年03月14日~2017年03月15日, 日本機械学会東海支部第66期総会・講演会, 静岡大学工学部

小川卓也, 牛島達夫, 長谷川豊, 「シェルピンスキー四面体を通して発生する乱流の乱流拡散項の調査」2017年03月14日~2017年03月15日, 日本機械学会東海支部第66期総会・講演会, 静岡大学工学部

加藤義貴, 牛島達夫, 長谷川豊, 「単電源で動作可能な定温度型熱線流速計回路の試作」2017年03月14日~2017年03月15日, 日本機械学会東海支部第66期総会・講演会, 静岡大学工学部

加藤嵩明, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊, 「シェルピンスキー四面体を通して生成される乱流の指数関数減衰領域の乱流特性」, 2015年11月07日~2015年11月08日, 東京理科大学金町キャンパス

Tatsuo USHIJIMA, "Decay law of turbulence generated by passing through Sierpinski tetrahedron", International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows 2015, 2015年06月15日~2015年06月18日, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牛島達夫 (USHIJIMA, Tatsuo)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50314076

(2) 研究分担者

鈴木博貴 (SUZUKI, Hiroki)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教
(2015年4月～, 山口大学・大学院理工学研究科・助教)

研究者番号：10626873

(3) 連携研究者

なし