

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560190

研究課題名(和文)フラクタル構造体によって発生する乱流の減衰およびエネルギー移動機構の実験的解明

研究課題名(英文) Experimental study on decay and energy transfer mechanism of turbulence generated by fractal structure.

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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：乱流エネルギー輸送機構を実験的に解明するためには、渦度方程式に現れる渦度生成項に現れる速度勾配全成分を同時に調べる必要がある。そこで、本研究では、速度勾配全成分を同時測定可能でかつ小型の8線式熱線プローブを開発し、その有用性を明らかにした。

一方、小型風洞でシェルピンスキー四面体というフラクタル構造体から生成された乱流の減衰特性を調査し、構造体の多重性に依らず、乱流減衰が二種類のべき乗則に従う領域とそれを繋ぐ指数則に従う遷移領域に、普遍的にまとめられることを見出した。

研究成果の概要(英文)：Compact 8-sensor hot wire probe has been developed, in order to investigate the turbulence energy transfer mechanism. The probe has an ability to measure simultaneously all components of velocity tensor, which appears in the production term of vorticity equation.

According to the measurement in our small wind tunnel, turbulence generated by the fractal structure called Sierpinski tetrahedron has three stages of decay process. First and last stages follow the power law decay, while in-between stage follows the exponential law. It is found that this pattern can be scaled by the n -th power of number of multiplicity of fractal structure.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流

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、Imperial College London の Vassilicos ら(2007)⁽¹⁾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⁽²⁾。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。この発見については、名古屋大学の酒井らのグループも大きさの異なる同形のフラクタル格子で実験的数値的に確認がされている⁽³⁾。

しかし、その形状は人工的で自然界の乱流を理解する上で有用か疑問であった。申請者は、これまで粒子拡散(基盤(C)17560144, 2005~2006)や乱流混合(基盤(C)20560156, 2008~2010)の研究で科研費を獲得し、自然界で花粉や黄砂が拡散する実際の乱流の特長に関心があった。植物学では、葉の空間分布のフラクタル次元が2次元であること⁽⁴⁾が最近分かっており、この次元と同じ数学的なフラクタル構造体としてのシェルピンスキー四面体を使えば、自然界で生成される乱流の特徴や境界条件の違いによる乱流減衰および乱流エネルギーのスケール間の輸送機構を解明でき、その知見を乱流混合の設計や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

自然界の境界(山の端、樹木の分岐、雲など)は、フラクタル(自己相似)の特徴を持っていることが知られている。21世紀になり、フラクタル形状の物体を通過して生成される乱流の減衰機構が、従来の実験室や乱流理論で説明されていたものと異なっていることが報告されている。本研究では、乱流の減衰の際に、起こっている様々なスケールの間でおこるエネルギーのやり取りについて、速度勾配テンソルの全成分を同時に測定できる多線式熱線流速計を開発し、速度勾配などの微小スケールの統計量と速度などの大スケールの統計量の関係を調べられるようにすること、フラクタル境界によって生成される乱流の流れ方向の減衰のより普遍的な法則を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

3.1 シェルピンスキー四面体

本研究では、フラクタル構造体として、先行研究のような、2次元平面内に自己相似形の支柱が広がっている型ではなく、3次的に広がっている構造物の中で、シェルピンスキー四面体を選んだ。私たちの身近にあるフラクタルな構造物には樹木があり、樹木を風がぬけることによって、大気下層での乱れの要因の一つとなっている。その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。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)。このフラクタル次元は正確に2であり、樹木の葉の空間分布のよいモデルとして取り扱える。この物体によって生成される乱流を調べることにより、先行研究での知見が先行研究で用いたフラクタル格子に特有なものか、フラクタル境界によって発生する乱流の特性なのかを検証した。

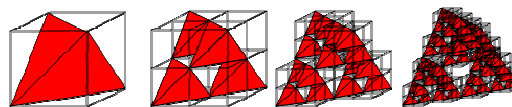


図1 シェルピンスキー四面体の生成

3.2 多線式熱線流速計の開発

速度勾配を計測できる熱線プローブは古くは Kovaznay の渦度プローブ⁽⁵⁾がある。これは流れ方向の渦度のみ測定で切る。その後、X型プローブを4組組み合わせたものが渦度3成分を測定するためにされている。速度勾配全成分を測定するためのプローブもわずかであるが考案されており、それは、熱線を9本⁽⁶⁾ないし12本⁽⁷⁾組み合わせた構成となっている。本研究では、前出の4Xプローブを参考に、Xプローブを三線プローブに置き換え、隣同士の熱線を共有させることで、8線で速度勾配全成分を測定できるプローブを設計開発した(図2参照)。

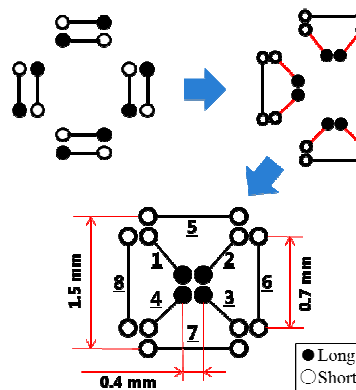


図2 多線式プローブの考案

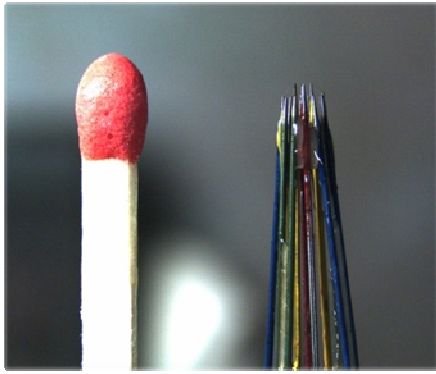


図3 実際に作成したプローブ (右)

3. 3 乱流減衰則の検証実験

乱流減衰則の検証には、小型風洞を用いた (測定洞全長 3m, 流路断面 13cm×13cm). 上流に、繰り返し段数の異なるシェルピンスキー四面体 (2, 3, 4 段) を設置し、乱流を初期からフラクタル状に生成させ、その下流への乱流構造の変化を調べる. これが、従来の正方格子で生成する乱流との違いである. 正方格子の場合、格子の寸法の乱れが下流で相互作用しながら発達し定常な乱流となり減衰し、その乱流エネルギーの減衰は、距離にほぼ-1 乗に比例している.

4. 研究成果

4. 1 8 線式熱線プローブ

直径 3 μ m 長さ 0.7 mm の感知用熱線を 8 本 1.5 mm 四方の中に集中して、プロング (熱線支持柱) に張るため、構造による干渉などの影響は免れない. 使用熱線はタングステンである. 研究の遂行中に、当初のプローブ形状から改良が加えられ、8 本の熱線は全て傾斜してプロングにスポット溶接されている. 初めに、これらの熱線の流れに対する角度の出力特性を調べた. 流速と熱線出力電圧の間には、King の法則が成り立っていることを始めに確認した. King の法則を基に、電圧と速度の関係を線形化し、線形化した信号 e^* に対して、ピッチ角 ϕ および回転角 ψ の間の関係を検定により以下の式で近似できることを見出した.

$$e^* = \left(\frac{u}{U_6} \right) \{ (1 + \alpha_1 \psi^2) + \alpha_2 \psi \cos(\phi + \phi_1) + \alpha_3 \psi^2 \cos(2\phi + \phi_2) \}$$

(1)

ここで U_6 は本実験検定時の最大流速、 α_1 , α_2 , α_3 , ϕ_1 , ϕ_2 は検定によって決まる定数である.

速度および速度勾配の推算法であるが、始めは、図 2 の 4 つの三角形の熱線の組でそれぞれ 3 線式プローブの方法で速度を推定し、

各組の速度ベクトルの差より、速度勾配を推算した. 流れ方向の勾配については、テイラーの凍結乱流の仮説を採用して求めた. しかし、この方法は、熱線の位置関係を十分に考慮しておらず最良の方法ではないことがわかった. そこで、この位置関係を考慮し、各熱線の中心位置での速度を、プローブ全体の中心からの距離で速度勾配を用いてテイラー展開して予測した. これらを各線での近似式に代入し、線形化した信号と近似式による予測の差の 2 乗の総和が最小となるように、速度、速度勾配は繰り返し計算プログラムで算出することで、8 線式プローブによる速度および速度勾配の測定精度は前者に比べ格段に向上した. プローブの有効性は、円柱後流の速度分布を測定し、既に公表されている実験データとの比較で検証した.

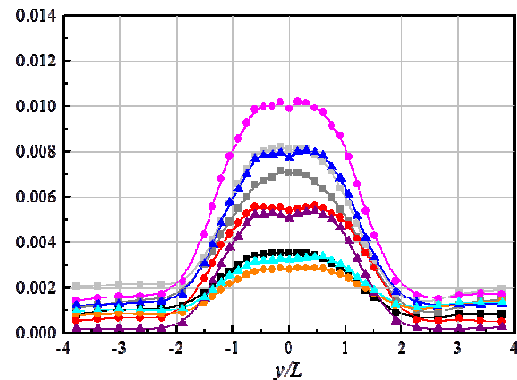


図4 円柱後流の速度勾配の rms 値の分布

図 4 より、他の研究者 (Zhou & Antonia 1999 4X プローブ) の結果とも同等結果を示した. しかし、残念ながら、新型プローブの改良に時間を予定より費やしたため、シェルピンスキー四面体後流での測定を実施できなかった.

4. 2 フラクタル生成乱流減衰の普遍則

先行研究では、フラクタル格子の最小寸法 t と最大寸法 T の比によって定義された後流干渉長さ (T^2/t) で減衰パターンが普遍的に整理され、減衰の初期に指数法則に従う部分が観測され、その後すぐにべき乗則に遷移していくことが報告されている.

本研究では、この研究を基に、シェルピンスキー四面体でもどのような減衰傾向および長さスケールがあるか検証を行った.

検証を行うために、乱流エネルギーの対数の流れ方向の勾配を調査した. この勾配は乱流減衰が指数則に従うときは傾きゼロ (水平) となり、べき乗則に従うときはべき乗の指数に比例した傾きとなる.

本研究の結果は、先行研究と多少異なる結果となった. まず、減衰パターンについてであるが、乱れが最大となつてからの減衰は 3 段階に分けられる. 初段と最終段はべき乗則に従い、その中間段は指数関数則に従う. 各

段での断面の速度分布を調べると、初段のべき乗則は、シェルピンスキー四面体直後の後流の発達によるものと推察される。一方最終段のべき乗則は、十分に発達した従来の乱流が減衰する場合と同様である。中間段では、初期の後流による分布から風洞内で壁から境界層の発達で、流路中心部の速度が大きくなっていく遷移域にあたり、中心部での平均速度勾配はほぼ平らになっており、平均せん断による乱流の生成はないものの、流れ垂直方向の乱流拡散が乱流エネルギーの変化に寄与していることが測定結果より推察され、乱流カスケードに依らない減衰を実現していると考えられる。

段数を変化させたシェルピンスキー四面体の結果は、先行研究の後流干渉長さでは上手く整理できなかつた。この長さスケールを再解釈して、シェルピンスキー四面体全体の高さ H と四面体最小要素の高さ M の比を使って $(M/H)^p$ を導入すると両者ともそれぞれの形状のデータを統一的に整理できることが判明した。先行研究では $p=1$ 、本研究では $p=2/3 \sim 3/4$ 。図5に、この考えを導入して、エネルギーの対数の勾配の逆数の変化を示す。図より、シェルピンスキー四面体の場合、指数関数則に従う領域が、先行研究の場合に比べより明確に出現しているように見える。4段のシェルピンスキー四面体でデータが最下流で急に上がっているのは、流路長が十分ではなく、出口の流れの影響が出ているものと考えている。また、段数が増える程（自己相似な状態の多重度が増すほど）、乱流の減衰が遅くなり、下流の方まで初期の影響が及ぶことが示唆される。自然界では、フラクタルの度合いは実験で調査した段数よりも数段は大きく、それは、自然界のフラクタル境界で発生した乱流は、かなり下流までその影響を残しているということであり、この影響の有無を検証することは、今後の大気汚染の予測の向上に繋がる可能性を示している。

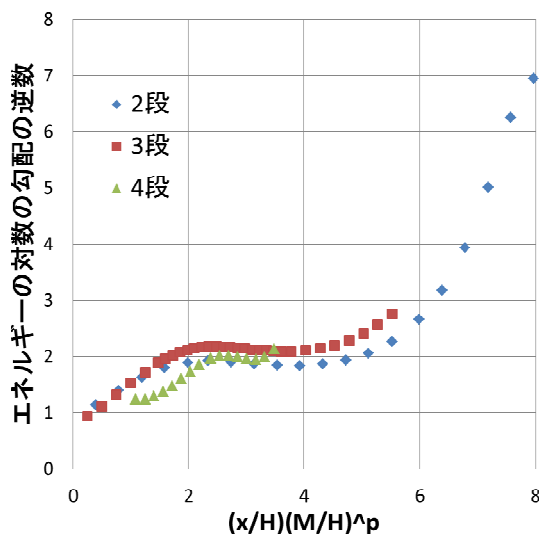


図5 エネルギーの対数の勾配の逆数 ($p=2/3$)

以上、本助成により、乱流の基礎研究を深化させるための新型のプロブ開発とその有用性、フラクタル境界によって生成される乱流のより一般的な整理方法について、重要な知見が得られた。

引用文献

- 1) Hurst, D. & Vassilicos J. C. 2007 Physics of Fluids 19(3) 035103
- 2) 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) Sakai, S. et al. 2009 Turbulence, Heat and Mass Transfer 6
- 5) Kastrinakis, E.G. & Eckelmann, H. 1983 J. Fluid Mech., 137, 165-186
- 6) Honkan, A. & Andreopoulos, H. 1997 J. Fluid Mech., 350 29-96
- 7) Vukoslavec, P. & Wallace, J.M. 1996 Meas. Sci. Tech., 10 1451-1461

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1件)

- ① 菱川詠二, 矢野匠馬, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊 「8線式熱線プロブによる速度勾配全成分の測定」 ながれ 33 2014 pp479-482
<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=33-6tokushu3.pdf&dir=15>

[学会発表] (計4 + 5 + 3件)

- ① 加藤嵩章, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊 「標準格子およびシェルピンスキー四面体を通して発生する乱流の減衰の比較」 日本機械学会東海支部第64期総会講演会 2015年3月13日~14日 中部大学
- ② 矢野匠馬, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊 「速度勾配テンソル測定用8線式熱線プロブの開発と改良」 日本機械学会東海支部第64期総会講演会 2015年3月13日~14日 中部大学
- ③ 菱川詠二, 矢野匠馬, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊 「速度勾配全成分測定用8線式熱線風速計の開発および改良」 第12回日本流体力学会中部支部講演会 2014年11月7日 三重大学
- ④ 菱川詠二, 矢野匠馬, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊 「8線式熱線プロブによる速度勾配全成分の測定」 日本流体力学会年会 2014 2014年9月15日~17日 東北大学
- ⑤ T.Ushijima, 'Dependence of iteration-number on energy decay in turbulence generated through Sierpinski tetrahedon', 3rd ESPRC-ERCOFTAC Workshop turbulent flows generated/ designed in multiscale. fractal ways: fundamentals and

application 2014 年 3 月 27 日～28 日,
Imperial College London, U.K.

⑥ 伊藤開, 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乱流の下
流へのエネルギー減衰機構の調査」第 11 回
日本流体力学会中部支部講演会 2013 年 12
月 16 日 名古屋大学

⑦ 斎藤良太, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川
豊「8 線式速度勾配測定用プローブの開発と
円柱後流測定への応用」第 91 期日本機械学
会流体工学部門講演会 2013 年 11 月 9 日～
10 日 九州大学

⑧ 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬俊
幸, 長谷川豊, 牛島達夫「乱流生成方法によ
る格子乱流の基本特性を変える試み」日本流
体力学会年会 2013 2013 年 9 月 12 日～13 日
東京農工大学

⑨ 菱川詠二, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川
豊「シェルピンスキー四面体後流に発生する
乱流特性の繰り返し段数による依存性」日本
流体力学会年会 2013 2013 年 9 月 12 日～14
日 東京農工大学

⑩ 伊藤開, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊
「種々の三次元フラクタル構造体の後流乱
流の減衰特性について」日本機械学会第 90
期流体工学部門講演会 2012 年 11 月 17 日～
18 日 同志社大学

⑪ 加藤勇樹, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川
豊「シェルピンスキー四面体後流に発生する
乱流統計量の空間分布測定」日本機械学会第
90 期流体工学部門講演会 2012 年 11 月 17
日～18 日 同志社大学

⑫ 伊藤開, 牛島達夫, 鈴木博貴, 長谷川豊
「シェルピンスキー四面体後流で生成する
乱流の流れ方向成分乱れ特性について」日本
流体力学会年会 2012 2012 年 9 月 16 日～18
日 高知大学

〔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