

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03947

研究課題名(和文) 小型風洞での受動型高レイノルズ数等方性乱流発生装置の開発

研究課題名(英文) Research and development of passive-type high Reynolds number isotropic turbulence generator in small wind tunnel.

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：等方かつ高乱流レイノルズ数を実験する乱流発生格子の設計開発2つの設計概念(係留格子とフラクタル形状格子)で行い、前者は従来の乱流生成格子より乱れ強さおよび乱流渦径が大きく、等方性の成立度が高い乱流を実現できることがわかった。一方、後者は乱流の空間構造の特徴を格子形状に導入したにもかかわらず、想定した等方かつ高乱流レイノルズ数の乱流を試行した条件では実現できないことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体を格子状に係留して生成される乱流は、同じ代表長さの静的標準格子に比べ、大きな乱流強度と渦径(積分長径)を持つために、低風速で比較的容易に高いレイノルズ数を実現でき、微細渦の通過を高時間分解で測定可能となり、乱流現象の解明に有効である。工学的には入口境界条件に高い乱流強度の流れを設定し、物体への影響などを検証できる。例えば強風下、風車翼と同程度の大きさの渦と翼との相互作用などの調査に利用できる。

研究成果の概要(英文)：Passive grid in wind tunnel to generate high turbulence intensity and high turbulent Reynolds number has been developed by two different ideas. One is object-tethered grid and the other is grid with fractal edges. The former has achieved higher turbulence intensity and produces greater turbulent eddies than the standard static grid as well as sufficient degree of isotropy, while the latter is found to fail to produce an isotropic, homogeneous and high Reynolds number turbulence under the investigated experimental conditions, nonetheless fractal feature of spatial turbulence is directly incorporated.

研究分野：流体工学

キーワード：格子乱流 振動 フラクタル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

等方性乱流は乱流現象を理解する上での最も基礎的な流れ場の一つである。コンピュータの発達により、直接数値計算により多くの乱流特性が明らかになってきたが、これらを実験で検証することは難しい。等方性に近い乱流を生成するためには一般に角柱や丸棒を格子に組んだものが利用されるが、実験室レベルでは十分に高レイノルズ数の乱流を一樣流れ場で実現することは難しい。その問題を解決するために、多数のファンを組み合わせた送風機を利用したものや、格子に板状の翼をつけ、それらを積極的に振動させることで、流れをかく乱し、強制的に乱流を生成する装置が提案されており、一定の成功を収めている。しかし、これらの装置には欠点もあり、その一つは制御方法が十分に確立されていないことと、生成された乱れが等方性からかなり外れていることである。

一般に高レイノルズ数を実現するためには、代表長さまたは代表速度を大きくとればよい。しかし、実験室ではまず始めに大きさの制約があり、代表長さを大きくとることは難しい。続いて風速を上げることになるが、風速を上げると、乱流が粘性によって熱に変換される最小の渦径が小さくなり、実験によって、最小スケールの渦を解像した測定が測定に使用できるプローブの寸法とサンプリング周波数の両方の制約から困難になっていく。

2. 研究の目的

以上のことから本研究では低風速で乱流の最小渦を相対的に高解像で計測でき、かつ等方性の成立度が高く、乱れ強度が大きく、高乱流レイノルズ数を能動的な操作を必要とせずに実現できる乱流発生格子を設計開発し、その性能を評価することを目的とする。このような乱流発生装置ができると、乱流の微細渦の動力学の理解を深めることや、乱流強度が大きな流れ場内での物体との相互干渉などの理解に大いに役立つと期待される。

3. 研究の方法

乱流生成格子は、2つの異なった考え方で設計する。一般的な静的な格子は、丸棒や角柱を格子状に組んだものであり、渦の大きさは格子の間隔と丸棒や角柱の幅で決まり、丸棒や角柱から周期的に放出された渦の相互干渉により発達してできる乱流の最大スケールの積分長さは格子間隔の半分程度であることが知られている。そこで、第一の乱流発生格子は、格子によって乱流を生成するのではなく、格子は薄板で組み、できるだけ流れ場に影響が出ないようにし、格子間隔と同程度の物体を係留し、係留の揺動によって生じる放出渦で乱流を生成する。係留物体には、乱れの放出を促進するために、球ではなく、円柱を採用した。円柱自身の流体との相互作用による振動と、隣同士の円柱との衝突などにより、渦の放出が時間空間的にランダムに放出されることにより、乱流強度が大きくなり、乱流が等方性に近づくことが期待される。

大規模な直接数値計算の結果から、等方性乱流で乱流エネルギーが粘性によって熱に変換されるスケールの微細渦がクラスター状に広がっていることが知られている。また、乱流エネルギーは大スケールから小スケールまで粘性の影響を受けずに、普遍のべき乗則で輸送されることが知られている。更に、噴流乱流で周囲の流体と混合が生じるときの濃度の等値面はフラクタル状になっていることが知られている。これらを総合して、一つの線分を32個の8分の1の長さの線分で置き換え、それらの繰り返しによって、フラクタル次元が3分の5の凹凸のある稜線で構成された格子を導入する。この格子によって、微細な乱れが格子直下流からクラスター状に乱流の特徴をもって放出することが期待される。

以下、第一の格子を係留格子、第二の格子をフラクタル格子と呼ぶ。

以上、2種類の格子を設計製作し、熱線流速計を用いて、乱流特性を調べた。比較のために、格子の流れ方向の投影面積が流路断面積に占める割合(以下、格子遮蔽率)を等しくした角柱格子も作成し、本研究で開発した乱流の性能評価の基準とした。これらの格子を全長3m、流路断面積80cm×80cmの試験区間をもつ風洞の上流側に設置し、乱流特性を調査した。

4. 研究成果

4.1 係留物体の仕様(形状および寸法など)

係留格子については先行研究があり、水路にほぼ中立浮遊の球を係留し、等方性が高く、乱れ強度の大きな乱流の生成がされるという報告がある。

小型風洞を使った検証により、球より円柱の方が円柱の角にできるはく離および衝突の頻度でより大きな乱れが発生することがわかった。ここで用いた円柱の長さは円柱の中心軸を通る断面積が円の面積に等しくなるように設計されている。また、円柱および球の直径と同じ円板を格子状に配置した格子よりも乱れが大きいことも確認し、物体の揺動が乱れの増大に寄与していることを確認した。遮蔽率に関しては、遮蔽率が26, 36, 42%の場合について調べ、26, 36%の場合には係留物体が円錐振り子のように回転しており、42%の場合には衝突の影響で運動がランダムになることを観測した。動画撮影により、係留物体の遮蔽率を測定したところ、42%(円柱直径の円の面積が格子を占める割合)は、円柱が衝突回転で傾斜することなどとして、42%より実際は大きくなることもわかった。

本研究では、使用流体は空気であり、中立浮遊の物体を作成するのは非常に困難であり、重力の影響をできるだけ抑えるために、係留物体を中空で作成することと、流路断面内で発生する乱流が一様になるように重力の方向と流れの方向を一致させ、すなわち、鉛直下向き流れの試験風洞を製作し、実験を行った。その結果、ある程度の大きさ（ここでは直径 6cm の中空紙製円柱を 8cm 間隔で格子状に係留）であれば、水平流れについても、断面内での流れ場は一様であることが確認された。

4. 2 係留格子の乱流特性

係留格子での乱れ強度は、格子間隔基準で 25 倍の位置で、比較用静的格子の 4% に対して 7% であった。乱流エネルギーは一般にべき乗則に従って減衰することが知られており、十分に高いレイノルズ数ではその指数は 1.2 であることが理論および多くの実験で示されているが、本装置では係留格子・標準格子ともに約 1.4 であった。指数の差異の原因は不明であるが、少なくとも同じ風洞の同じ測定箇所では減衰則は乱流の発生方法に依らない。主流方向乱れとスパン方向乱れの比をみると係留格子は 1.06~1.08 に対し、標準格子は 1.0~1.02 である。乱流渦の大スケール側の指標である積分長さは静的標準格子が格子間隔の 50% であるのに対して係留格子は 75% で、50% 増である。係留格子では、静的格子に対して、乱れ強度と積分長さの両方を大きくすることができた為、風速 5m/s でもテイラー長さ基準の乱流レイノルズ数 170 を実現しており、最も引用される格子乱流結果 (Comte-Bellot 1966, 風速 10m/s) の乱れ強度 2%, 乱流レイノルズ数 72 より遥かに強い乱流を生成できることが示された。

大きな乱れ強度が実現できることがわかったので、1 点計測でよく利用される Taylor の凍結乱流について、流路断面内での 2 点速度相関を熱線流速計で直接測定したところ、横相関に大きな違いは見られなかったものの、縦相関は 2 点間距離が積分長さ程度より大きい部分で、自己相関の方が大きくなることがわかった。この原因は係留物体の低周波の振動によるものと考えられるが、自己相関で Taylor の凍結乱流仮説を使って、積分長さを見積もる場合は過大評価となることがわかった。また、2 次と 3 次の速度構造関数と Karman-Howarth の式を利用することで格子間隔の 10~20% の距離 (8~16mm, テイラー長さの 1~2 倍) の距離で乱流エネルギー散逸率を間接的に見積もることができるとを示した。

4. 3 フラクタル平板後流の乱流特性

フラクタル格子を調査する前に、単体のフラクタル平板の後流特性を調査した。後流の発展は一般に、最大欠損速度の減少と半値幅 (最大欠損の 1/2 までの範囲) の広がりによって評価される。それらは、物体からの距離のべき乗に比例し、その指数は軸対称物体では理論的に速度欠損が -2/3 乗、半値幅が 1/3 乗に従う。一方、先行研究で別のフラクタル次元の平板後流では -1 乗と 1/2 乗に従うという報告がある。本研究では、速度欠損が報告の指数に従うものとして、仮想原点を求め、それを元に半値幅のべき指数を評価したところ、本研究のフラクタル平板は報告されている指数より大きな指数、すなわちより早く、後流の分布が広がっていくことがわかった。これらからフラクタル次元を変更することで、後流の広がりを調整できることがわかった。

4. 4 フラクタル格子の乱流特性

フラクタル格子は、1 辺が 10cm の正方形平板に、3 節で説明したフラクタルパターンを 1 回施したもの (最小辺 1.25cm, 以下 N1) と二回繰り返し施したもの (最小辺 1.6mm, 以下 N2) を製作した。全長が約 20cm に十字架状になったフラクタル平板を、風洞内に 20 cm 間隔で格子状に配置した。風速 6m/s で乱流統計量を測定した。遮蔽率は 25% である。これは先行研究の別のパターンのフラクタル格子の場合と条件を合わせている。ほぼ等しい遮蔽率 (23%) の静的格子も準備した。乱れ強度は対応する静的格子に対して、わずかに大きいだけであった。フラクタル格子の結果の方が流れの非一様性が高い。フラクタル格子同士では乱れ強度は N2 の方が大きい。これは N2 の方が流れ場の非一様性が高く、平均速度勾配とレイノルズせん断応力による乱流生成が起きているためである。乱れ強度は断面方向成分の方が主流方向成分より大きいことは特筆すべきである。乱流エネルギーは単調に減少しており、その傾向はべき乗則ではなく、指数関数則に従っている。これは別のフラクタル格子の場合と同様である。積分長さは格子間隔の 25% と静的格子より小さな渦しか生成しないことがわかり、乱流レイノルズ数を高めるためには弱点となる。エネルギー収支を調べると、N1 では各項が単調に減少しているが、N2 では乱流エネルギーが局所的に大きな領域で乱流拡散項が正から負に転じている。乱流レイノルズ数は N1, N2 とともに約 120 で前者は単調減少、後者は一定となっている。フラクタルパターンの回数の違いで乱流の減衰がかなり異なることがわかった。積極的に捉えるならば、設定条件によって、混合を制御できるということになるが、当初の目的や予測からは外れる結果となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Kotaro WADA, Tatsuo USHIJIMA and Yutaka HASEGAWA
2. 発表標題 Movement of small objects tethered to grid in uniform flow and its turbulence properties
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 花井 暉, 牛島 達夫, 長谷川 豊
2. 発表標題 フラクタル形状の稜線を持つ平板の後流特性について
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田康太郎, 牛島達夫, 長谷川豊
2. 発表標題 小円柱を格子状に配置・係留した場合に発生する乱流について
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水谷琢磨, 牛島達夫, 長谷川豊
2. 発表標題 フラクタル形状の稜線を持つ平板の後流測定
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 牛島達夫, 和田康太郎, 平松伸太郎, 長谷川豊
2. 発表標題 格子に格子間隔と同程度の大きさの円柱を係留した場合の乱流特性について
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田康太郎, 牛島達夫, 長谷川豊
2. 発表標題 格子に係留した小物体の挙動と生成した乱流の関係について
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第70期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平松伸太郎, 牛島達夫, 長谷川豊
2. 発表標題 縦型風洞における小物体に係留した格子乱流
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第70期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古賀雄也, 牛島達夫, 長谷川豊
2. 発表標題 小円柱を格子状に係留した場合に発生する乱流について
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------