

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02064

研究課題名（和文）理想的な振動格子乱流の生成と乱流拡散過程の解明に関する実験および数値的研究

研究課題名（英文）Experimental and numerical study on generation of ideal oscillating grid turbulence and turbulence diffusion process

研究代表者

森西 洋平（Morinishi, Yohei）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40222351

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：振動格子乱流について実験および数値計算を用いて調べた。実験装置には、二次流れ抑制のためのいくつかの工夫を施した。数値計算では、インフルエンス・マトリックス法と領域分割法を使用し、振動格子乱流用の高速DNSアルゴリズムを構築した。

本研究での実験装置の工夫により、二次流れの影響がかなり抑制され、理想的な流れ場に近づいた。また、わずかな回転を加えるだけで二次流れは大幅に減少する事も示した。DNSの流れ場は二次流れの影響が現れない理想的なものであるが、乱流強度の減衰挙動について実験とDNSで良く一致する結果が得られた。さらに、実験とDNSで得られた流れ場を用いて振動格子乱流の乱流構造を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の地球温暖化やそれに伴って生じる自然災害、例えば集中豪雨、台風、および竜巻等の発生や進路予測について、その信頼性は現状では十分とは言えない。これら乱流に深く関わる現象に対しては、個々の現象の探求はもちろん必要であるが、乱流に共通な本質的要素を理解するため、特に基礎研究が重要である。本研究で取り上げた振動格子乱流は乱流の本質である非線形干渉から生じる乱流拡散を調べるのに適した乱流場である。従って、本研究で示した実験装置の工夫や新たな計算アルゴリズムの構築は、乱流研究の今後の発展に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：The turbulence generated by grid oscillation was investigated experimentally and numerically. Some devices were added to the experimental apparatus for reducing the inherent secondary flow. The fast algorithm for the DNS of the oscillating grid turbulence was composed based on the influence matrix and domain decomposition methods.

The effect of the secondary flow on the turbulence was reduced by the devices in the experiment. It was also revealed that a slight system rotation drastically reduced the secondary flow. The decay behavior of the experimental turbulence intensity was well corresponding to that of the DNS, where the DNS flow field was ideal in the sense that there is no secondary flow. The turbulence structure of the oscillating grid turbulence was further investigated by using the experimental and numerical flow fields.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 振動格子乱流 実験計測 DNS

1. 研究開始当初の背景

乱流を理解する上で格子乱流は最も基本的な流れ場モデルとしてしばしば取り上げられる。格子乱流のうち、格子通過乱流 (grid through turbulence) と振動格子乱流 (oscillating grid turbulence) は平均せん断が存在しない乱流場の代表でありしばしば混同されるが、それぞれ乱流散逸と乱流拡散が重要で本質的に異なる乱流場である。つまり、格子通過乱流は風洞による一様流中に置かれた乱流生成格子の後流に生じる乱流で、一様流と共に移動する座標系から観察すると一様等方的な乱流が時間的に散逸する。一方、振動格子乱流はタンク内で振動する乱流生成格子によって生じる乱流で、乱流生成格子と平行な面上で準一様等方的な乱流が遠方へ向けて拡散 (空間減衰) する。

格子通過乱流については Comte-Bellot and Corrsin (JFM, 1971) を代表として多くの実験的研究が実施され、乱れの減衰則等について統一見解が得られている。一方、振動格子乱流についても Thompson and Turner (JFM, 1975) 以降いくつかの実験的研究が実施されているが、従来の実験データの乱流拡散挙動には大きなばらつきが見られる。振動格子乱流の実験データのばらつきの主な原因はタンク内に生じる二次循環流れの影響とされ、これまでも二次循環流れの抑制が試みられているが、非常に基本的な乱流場にも拘わらず振動格子乱流に対する信頼できる実験データはいまだ得られていないのが現状である。

実験に代わる乱流の研究手段として、近年は乱流の直接数値計算 (direct numerical simulation, DNS) が使用される様になり、これまでに一様乱流、乱流混合層、平行平板間乱流、円管内乱流、境界層乱流、等において大規模な DNS が実施され乱流統計量や乱流の組織渦構造が解析されている。実はこれらの流れ場は、少なくとも 2 方向に高速フーリエ変換 (fast Fourier transform, FFT) を導入した高速ポアソン解法あるいはそれに準じた高速解法が適用できる流れ場であり、NS 式の大規模数値計算である乱流 DNS を高速に実施可能としている。ここで、乱流生成格子と平行な方向に周期境界条件を課した乱流の DNS が実施できれば、二次循環流れを完全に除去した理想的な振動格子乱流が実現される。しかしながら、乱流生成格子の形状を正確に再現した乱流 DNS に対して高速ポアソン解法をそのまま適用する事は困難であり、何等かの工夫が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、

- A) 実験における理想的な振動格子乱流場の実現、
- B) 振動格子乱流に対する高速 DNS アルゴリズムの構築と大規模 DNS の実施、
- C) 実験および DNS データによる乱流拡散過程のメカニズムの解明、

を目的として研究を実施した。

まず A) では、現有の実験装置 (図 1) を改良し、従来の振動格子乱流の実験的研究において曖昧にされてきた二次循環流れの影響を徹底的に排除し、理想的な振動格子乱流場に対して PIV (particle image velocimetry) による実験計測を行い、より信頼性の高い実験データを取得する。B) については、これまでトポロジー的に 1 つの直方体領域で構成される流れ場に適用が限定されてきた高速ポアソン解法による大規模乱流 DNS をより複雑なトポロジーの乱流場へ

拡張し、振動格子乱流に対する高速DNSアルゴリズムを構築した後、本流れ場のDNSデータを取得する。C)では、以上により取得される振動格子乱流の実験およびDNSデータから、乱流拡散の挙動を解明する。

3. 研究の方法

A) 実験における理想的な振動格子乱流場の実現：

二次循環流れを抑制したより理想的な振動格子乱流場を実現するため現有的実験装置を改良した。まず乱流生成格子(図2)は、平面性を確保するためウォータージェット加工で製作されたものとし、タンク壁面との対称性も十分に確保し、タンク壁面との隙間 δ もできるだけ狭くして($\delta = 5\text{ mm}$)壁面との干渉防止のローラーを設置した。格子間隔 M と角棒径 d の比は $M/d = 5$ とし(この場合の遮蔽率は36%で一様性は十分に確保される)、 $M = 50\text{ mm}$ 、格子振動ストローク $S = 60\text{ mm}$ 、格子振動周波数

$f_g = 2\text{ Hz}$ で振動格子乱流の実験を実施した。タンク内には乱流生成格子とタンク壁面とのすき間から生じる二次循環流れを遮断するため一番外側と外から二番目の格子棒との間に内箱を設置した。乱流生成格子の支持肢には断面が流線形となるようにキャップを設けた。このようにして生成される振動格子乱流の速度場について x - z 断面(鉛直断面)および x - y 断面(水平断面)を光切断し、各断面の流れの可視化およびPIV計測を実施した。PIV計測によって得られた速度場データを統計処理し、二次循環流れが十分に抑制されていることを確認した後、各種乱流統計量を算出した。

B) 振動格子乱流に対する高速DNSアルゴリズムの構築と大規模DNSの実施：

高速DNSアルゴリズムの構築には高速ポアソン解法の導入が必須である。そのため、流れ場を乱流生成格子の上下と乱流生成格子のすき間の直方体領域に分割し(図3)各直方体領域に高速ポアソン解法を適用した後、インフルエンス・マトリクス法(図4)を用いて各領域の解を結合し、流れ場全体の解を得る。インフルエンス・マトリクス法はポアソン方程式の線形性を利用した行列解法で、計算領域を高速化可能な直方体

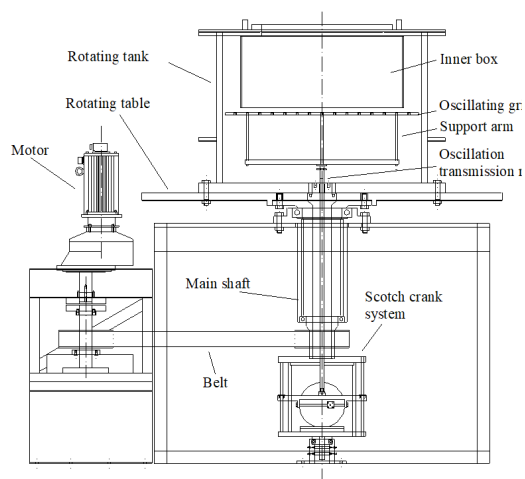


図1. 現有の振動格子乱流の実験装置概略図。

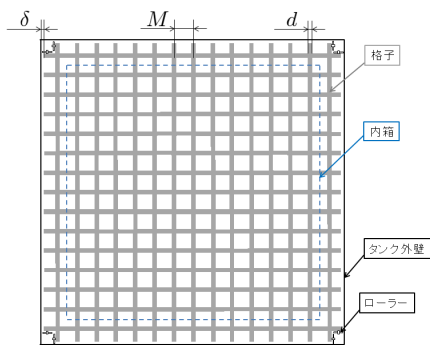


図2. 乱流生成格子の改良。乱流生成格子はウォータージェット加工で製作し平面性を確保する。

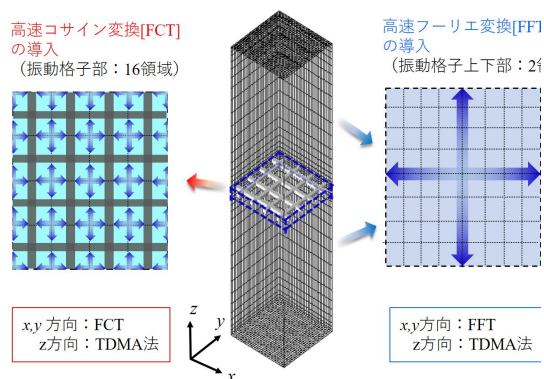


図3. 領域分割と各領域に対する高速コサイン変換および高速フーリエ変換を用いた高速ポアソン解法の導入。各領域の解はインフルエンス・マトリクス法で結合する。

領域と境界領域に分解して解いた後に解を結合する。各領域に対する高速ポアソン解法としては、乱流生成格子の上下の直方体領域について水平方向に高速フーリエ変換、乱流生成格子のすき間の直方体領域について水平方向に高速コサイン変換、またそれぞれの領域の鉛直方向には三重対角行列解法を適用する直接法とした。振動格子乱流のDNSは実験と同じ条件 ($M/d = 5$ 、 $M = 50$ mm、 $S = 60$ mm、 $f_g = 2$ Hz) で実施した。

C) 実験およびDNSデータによる乱流拡散過程のメカニズムの解明：

PIVによる鉛直断面および水平断面の速度場実験データおよびDNSデータを用いて乱流統計量を算出した。DNSは水平方向一様条件で実施され二次循環流れは存在しないため、まずは実験およびDNSデータを比較し、実験データにおける二次循環流れの影響の有無を判断した。また得られた乱流統計平均量から乱流拡散過程のメカニズムを検討した。

4. 研究成果

図5に鉛直方向平均速度分布の実験結果を示す。アンサンブル平均は x - y 方向と時間 t について取られ、代表速度 $f_g S$ で無次元化されている。図には、本研究課題以前に実施された静止系の結果 (Previous (2016) ($\Omega = 0$ rpm)) と本研究の結果 (Present ($\Omega = 0, 1, 2, 3$ rpm)) が示されている。本研究課題以前の結果は鉛直方向平均速度が z 方向に大きく変化し、実験装置固有の二次流れの影響を受けている。一方、対応する本研究の静止系の結果 ($\Omega = 0$) では、値の変化が小さくより一様な速度分布となり、本研究での実験装置に対する工夫の効果が現れたものと考えられる。さらに、わずかな回転 ($\Omega = 1$ rpm) を加えるだけで二次流れは大幅に減少する。なお、静止系での二次流れの乱流統計量への影響はほとんど見られず、例えば図6の水平方向2点相関係数 $R_{x,u,t}$ (x 方向変動速度 u の縦相関係数、アンサンブル平均は時間 t で取られ、2点相関の距離を x としている) は遠方に向かって滑らかに0へ漸近する分布となっている。

オリジナルA問題 (A_1 の部分が高速解法適用不可)

$$Ap = q \quad \text{又は} \quad \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} p = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$$

B問題 (高速解法適用可)

$$B\bar{p} = \bar{q} \quad \text{又は} \quad \begin{bmatrix} B_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \bar{p} = \begin{bmatrix} \bar{q}_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$$

B問題を利用したオリジナルA問題の解

$$Cw = q_1 - A_1\bar{p}$$

$$Bp = \begin{bmatrix} \bar{q}_1 + w \\ q_2 \end{bmatrix}$$

ここで、インフルエンス・マトリクス C

$$C = A_1 B^{-1} \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}$$

図4. インフルエンス・マトリクス法の概略。本来解きたいA問題では A_1 が領域の境界に対応する部分で高速化不可。インフルエンス・マトリクス C を予め計算し保存しておけば、高速に解けるB問題を2回解くことでA問題の解が得られる。

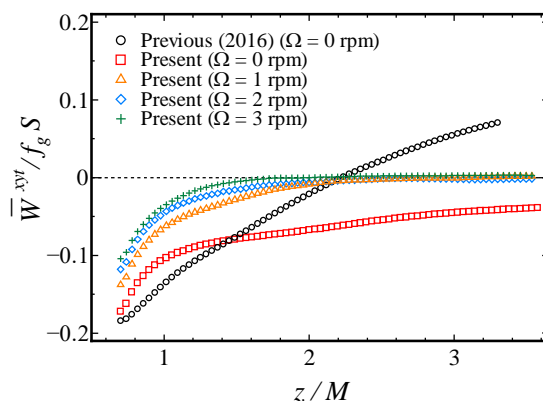


図5. 鉛直方向平均速度分布 (実験結果)

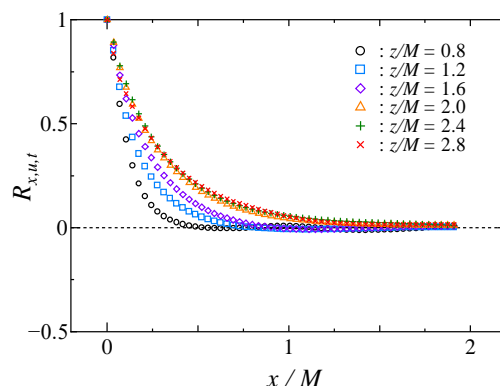


図6. 水平方向2点相関係数 (実験結果)

図7に x 方向乱流強度 u'_{rms} の鉛直方向分布の実験結果 ($\Omega = 0, 2 \text{ rpm}$) と DNS 結果 ($\Omega = 0, 2 \text{ rpm}$) との比較を示す。この乱流強度は格子最近傍測定点での乱流強度の値 u'_0 で無次元化されている。図より、実験と DNS の乱れの減衰挙動は良く対応している事が判る。また、DNS の結果は無次元時刻 $t = 480-490$ と $t = 490-500$ の間のアンサンブル平均によるものが示されているが、遠方でわずかな違いを除いて両者は良く一致しており、統計的定常状態に達している事が判る。

振動格子乱流の乱流拡散に関し、乱流エネルギー輸送方程式中の乱流拡散項を実験データから計算した静止系 ($\Omega = 0$) および回転系 ($\Omega = 1, 2, 3 \text{ rpm}$) の結果の鉛直方向 (z) 分布を図8に示す。この結果から、乱流拡散項は $z/M = 1$ でピークを持ち、それより振動格子に近い領域で回転の効果を受けることがわかる。

図9に DNS の結果から鉛直方向渦度を可視化した結果を示す。(a)が静止系 ($\Omega = 0$) の結果、(b)が回転系 ($\Omega = 2 \text{ rpm}$) の結果である。回転系の回転軸は鉛直方向である。静止系の結果では、格子近傍に微細な渦構造が生成され、その渦が遠方へ拡散されている様子が判る。一方、回転系では、格子のごく近傍では静止系と同様であるが、遠方に向かって渦構造が回転軸方向に伸長されている。このような回転による渦構造の伸長が、図8に見られる乱流拡散項の値を変化させているものと考えられる。

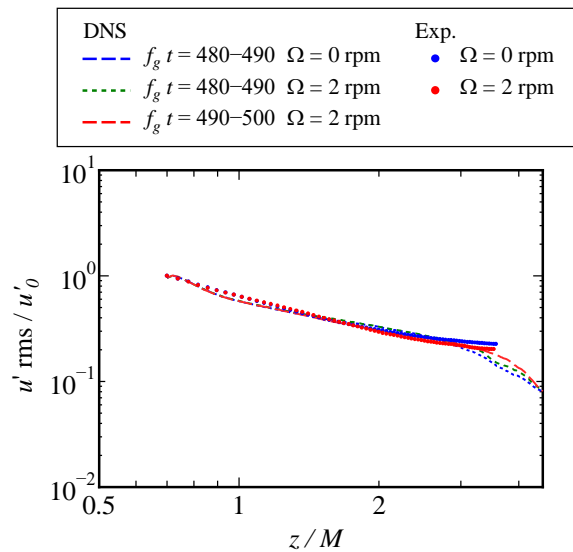


図7．乱流強度分布の実験と DNS との比較

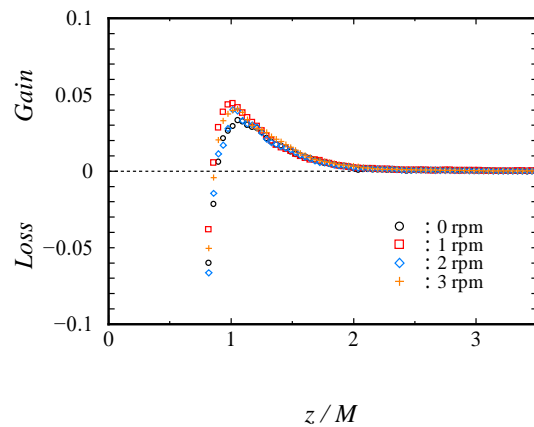
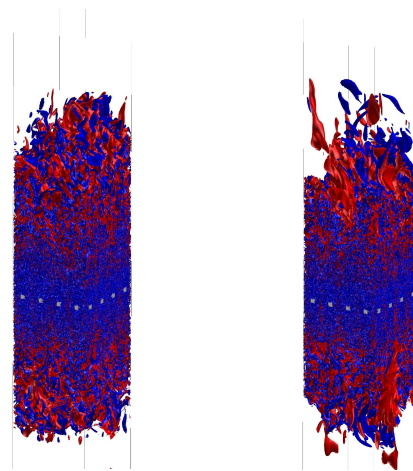


図8．乱流拡散項の鉛直方向分布 (実験結果)



(a) 静止系 (b) 回転系 ($\Omega = 2 \text{ rpm}$)

図9．鉛直方向渦度の可視化 (DNS の結果)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 丹羽勇貴, 山田格, 森西洋平
2. 発表標題 高振動ストロークにおける振動格子乱流の二次流れ抑制の検討
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田格, 田村英之, 森西洋平
2. 発表標題 振動格子乱流DNSにおける適切な格子解像度および振動ストロークの影響の調査
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田晃一, 山田格, 森西洋平
2. 発表標題 振動格子乱流における弱い回転による二次流れ抑制の検討
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野琉輝, 山田格, 森西洋平
2. 発表標題 振動格子乱流DNSにおける弱い回転が乱流構造に与える影響の調査
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022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
研究 分担者	玉野 真司 (Tamano Shinji) (40345947)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13903)	
研究 分担者	山田 格 (Yamada Toru) (40772067)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教 (13903)	

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
---------	---------