

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 24 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289034

研究課題名(和文) 回転系振動格子乱流における乱流拡散と渦構造に及ぼす回転効果の解明

研究課題名(英文) Effect of rotation on turbulence structure and diffusion in oscillating grid turbulence

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) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)： 実験および数値計算を用いて回転系振動格子乱流を調べた。実験は回転テーブル上に置かれた矩形タンク内で実施された。実験装置に対しては、装置固有の二次流れ抑制のためいくつかの工夫がなされている。数値計算では、ALEタイプの移動格子に対する自乗量保存形差分スキームを用いてナビエ・ストークス方程式が解かれている。

回転系では振動格子から離れた領域で準2次元的な渦構造が確認された。振動格子近傍では、静止系および回転系ともに、3次元的な渦構造が支配的である。標準的な乱流統計量と併せ、乱流減衰および回転によるその抑制も示された。回転系における準2次元的な渦構造の発達過程において、慣性波の伝播が特定された。

研究成果の概要(英文)： Oscillating grid turbulence subjected to system rotation was investigated experimentally and numerically. The experiment was carried out in a rectangular tank on a rotating table. For the experimental apparatus, some devices were introduced to inhibit the secondary circulation which is inherent in the system. In the numerical simulation, the Navier-Stokes equations were solved with the secondary conservative finite difference scheme on an ALE type moving grid.

The quasi-two-dimensional vortex structure was visualized for the region distant from the oscillating grid for the rotating flow, while three-dimensional vortex structure was dominant close to the oscillating grid for both stationary and rotating systems. The turbulence decay and its inhabitation by rotation were also indicated in addition to standard turbulence statistics. In the developing stage of the quasi-two-dimensional vortex structure in the rotating system, the inertial wave propagation was specified.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流

1. 研究開始当初の背景

乱流に対する回転の効果は流体機械や惑星大気の流れの理解に必要で、乱流の基礎のみならず工学や物理学の応用問題においても重要である。このような回転系の乱流はまず平均せん断(平均速度勾配)の有無によって分類できる。平均せん断が存在する回転系乱流に関しては回転による流れ場の安定性も含め解明されつつあるが、平均せん断が存在しない回転系乱流に関しては回転の効果が非線形効果を通してエネルギー輸送に影響を及ぼすため未解明な部分が多い。

平均せん断が存在しない基本的な乱流として、一様減衰乱流(homogeneous decaying turbulence)と振動格子乱流(oscillating grid turbulence)を挙げることができる。一様減衰乱流と振動格子乱流はしばしば混同されるが、それぞれ乱流散逸と乱流拡散が本質であり、異なる乱流現象である。また、振動格子乱流は乱流拡散が生じる方向に非一様な乱流場である。回転系でのこれらの乱流には回転軸方向に傾向した準2次元縦渦構造(quasi-two-dimensional longitudinal vortex, columnar eddy)の現れる事が知られているが、この構造は回転成層流に対するTaylor-Proudmanの定理では説明できないとされており、その生成や維持メカニズムについては現在も議論が続いている。

回転系一様減衰乱流の代表研究としてJacquin et al. (1990)による研究がある。この研究では回転円筒内の格子乱流(through-grid turbulence)に対して熱線流速計による速度計測が実施され、乱れへの回転効果は主に回転軸に直交する成分に働き乱れ減衰の抑制が現れる事、乱れの非等方性は1点統計量(レイノルズ応力等)よりも2点統計量(積分長さスケール等)に対して著しく現れる事、これらの回転効果はマクロ・ロスビー数が1よりも小さい場合に発現する事、等が示されている。回転系一様減衰乱流の乱流構造や準2次元縦渦構造の生成に関しては、時間と空間の変換を通して格子乱流と同一となる牽引格子乱流(towing-grid turbulence)で実験的研究が近年盛んに行われている。Davidson et al. (2006)は、準2次元縦渦構造の生成初期には線形効果(慣性波)が重要であると主張している。またMoisy et al. (2010)は、準2次元縦渦構造の維持には非線形効果(移流項)が重要であると主張している。なおMoisyらの研究グループでは近年、彼らが「Gyroflow platform」と呼ぶ回転系牽引格子乱流の大型実験装置(測定領域 $600 \times 600 \times 600$ mm)を構築し、回転系からのPIV計測により回転系一様減衰乱流の詳細な解析が精力的に進められている。

一方、回転系振動格子乱流についてはHopfinger et al. (1982)とDickinson & Long (1983)による先駆的実験研究がある。回転系

乱流における準2次元縦渦構造の存在はこれらの研究の可視化実験で示され、また熱線流速計で速度変動が計測されている。しかし、この時代の振動格子乱流の実験データには2次流れの影響が懸念され(Fernando & Silva (1993))、またせん断が存在しない回転系乱流の研究はその後より単純な回転系一様減衰乱流に移行したこともあり、乱流拡散に及ぼす回転の効果は十分に理解されていない。

研究代表者の研究グループでは、これまで回転系乱流の研究を精力的に実施してきた。平均せん断が存在しない回転系乱流の研究としては、まず回転系一様減衰乱流に対して、複素ヘリカル波分解を用いたDNSアルゴリズムの提案、回転系一様減衰乱流における乱れの非等方性の解析、および初期ヘリシティの影響の解析を実施してきた。さらに、いまだ十分に理解されていない乱流拡散に及ぼす回転の効果を知明するため、回転系振動格子乱流の研究を開始している。当初、Hopfinger et al. (1982)と同様の実験装置に2次流れ抑制の工夫を施して実験を実施したが、近年、さらに実験装置を大型化して2次流れの影響を無視できる程度まで抑制した回転系振動格子乱流の実験装置を構築し、現状をEuropean Turbulence Conference 14で報告している(Morinishi et al. (2013))。また、実験に対応した回転系振動格子乱流のDNS(直接数値計算)も開始している。このDNSでは、研究代表者がごく最近提案した移動格子に対する自乗量保存形の差分スキームが使用されており、振動格子の正確な表現を可能としている。

2. 研究の目的

本研究では、回転系振動格子乱流の実験とDNSを実施し、乱流拡散に及ぼす回転の効果、および回転系乱流に特徴的な準2次元縦渦構造の生成と維持メカニズムを明らかにする。回転系振動格子乱流の実験は、タンク回転角速度 Ω 、格子のメッシュ幅 M 、振動ストローク S 、振動周波数 f_g を変化させて実施する。そして、流れの可視化による渦構造の観察に加え、PIV計測による1点および2点乱流統計量を整理し、渦構造や各種乱流統計量で表現される乱流拡散に及ぼす回転の効果を知明する。さらに回転系振動格子乱流のDNSでは、実験とパラメータを合わせた数値計算を実施し、実験結果との比較を通して計算結果の信頼性を確認しながら、実験では得られない輸送方程式の各項の役割や渦構造に及ぼす回転の効果を知明する。

3. 研究の方法

3.1 実験方法

本研究で使用した実験装置の概略を図1に示す。実験装置は正方形断面の回転タンク(内部1辺800 mm、深さ610 mm)、振動格

子軸によって格子振動装置に連結された乱流生成格子（角柱幅 $d = 10\text{mm}$ 、格子メッシュサイズ $M = 50\text{mm}$ ）、およびベルトを介してこれらを一体回転させるモーターで構成されている。乱流生成格子は、格子の平面性を確保して二次流れの発生を極力抑制するため、アルミ平板からウオータージェット加工で穴を開け作成されている。また、二次流れの移流を遮断するため回転タンク内にはアクリル製の内箱（内部1辺 495mm 、高さ 280mm ）を設置し、さらに自由表面の影響が取り除かれている。

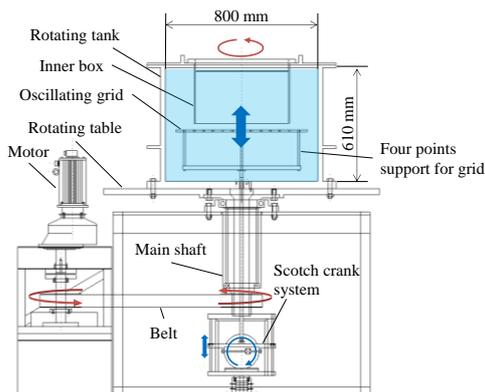


図1 実験装置概略

図1には本研究で使用した座標系も示されている。水平断面を x - y 断面、鉛直断面を x - z 断面とし、 x および y 軸の原点をタンク水平面の中心、 z 軸の原点を乱流生成格子の振動中心に設定している。

作動流体には温度を $20.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に制御した水、トレーサ粒子にはオルガソール（平均粒径 $50\ \mu\text{m}$ 、濃度 $30.8\ \text{ppm}$ ）を用い、 x - y および x - z 断面にレーザーシート光を照射し、高速度カメラで回転タンク内の流れの様子を回転系から動画撮影する。その後、可視化画像を基にPIV計測を行い、流速を算出する。

PIV計測の条件として、本研究で使用する高速度カメラの画素数は $1280 \times 1024\ \text{pixels}$ であり、撮影条件はフレームレートを $125\ \text{fps}$ 、シャッタースピードを $1/125\ \text{s}$ とした。撮影画像の空間解像度は x - y 断面が $0.11\ \text{mm/pixel}$ 、 x - z 断面が $14\ \text{mm/pixel}$ である。PIV計測条件は x - y 断面が計算格子 $14\ \text{pixels}$ 、検査範囲 $29\ \text{pixels}$ 、 x - z 断面が計算格子 $12\ \text{pixels}$ 、検査範囲 $25\ \text{pixels}$ とし、探査範囲は各条件で最適な範囲を用いる。また、 x - y 断面のPIV計測領域は $2.0M \times 2.0M$ ($= 100 \times 100\ \text{mm}^2$)、 x - z 断面のPIV計測領域は $4.0M \times 2.8M$ ($= 200 \times 140\ \text{mm}^2$) とする。

実験条件は、格子振動ストローク $S = 40\ \text{mm}$ 、格子振動周波数 $f_g = 2.0\ \text{Hz}$ と定め、タンク回転数 $\Omega = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30\ \text{rpm}$ 、と変化させて回転数による影響を調べる。

3.2 数値計算手法

本研究では、回転座標系における非圧縮性流体を考える。この流れ場の支配方程式として回転系で記述された連続の式とNS式を用いる。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \varepsilon_{ijk} \frac{1}{Ro} u_k$$

ここで、 t は時間、 x_i ($i = 1, 2, 3$) は空間座標、 u_i は x_i 方向の速度成分、 P は修正圧力（静圧と遠心力ポテンシャルの和）で、これらは代表速度 $f_g M$ と代表長さ M で無次元化されている。また、 $Re = f_g M^2 / \nu$ はレイノルズ数、 $Ro = f_g / 2\Omega$ はロスビー数である。なお、数値計算においては代表長さを M とすると計算格子の設定に都合が良いが、計算結果の整理や実験結果との比較においては代表長さを S とした格子レイノルズ数 $Reg = f_g S M / \nu = Re(M/S)$ および格子ロスビー数 $Rog = f_g S / 2\Omega M = Ro(S/M)$ を無次元数として採用する。

回転系振動格子乱流の数値計算を行うにあたり、空間離散化には移動格子に対する自乗量保存形差分スキーム、時間進行法には低容量型3段3次ルンゲ・クッタ法、圧力ベース解法にはSMAC法を用いる。また、圧力ポアソン方程式の解法として、内部反復にBiCGStab法を採用した多重格子法を用いる。

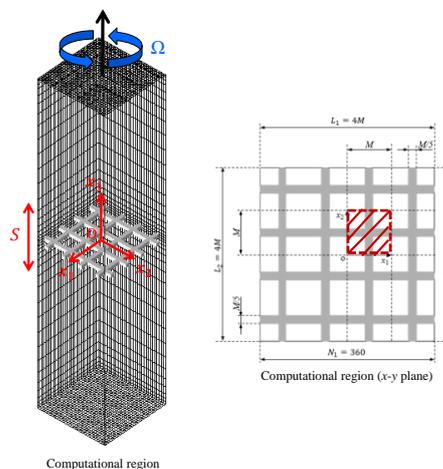


図2 計算格子

図2に計算格子を示す。回転系振動格子乱流の計算領域は、代表長さを格子メッシュサイズ M として、 $L_1 \times L_2 \times L_3 = 4M \times 4M \times 20M$ である。この領域内の計算格子数は、 $N_1 \times N_2 \times N_3 = 320 \times 320 \times 480$ と設定する。格子間隔は、水平方向に等間隔格子とする。鉛直方向には、乱流生成格子部で等間隔、乱流生成格子と上下壁面の間の領域では乱流生成格子面と上下壁面に向かって \tanh 関数で引き付けた不等間隔格子とする。流れ場の境界条件は、乱流生成格子表面と上下壁面にすべり無し条件、

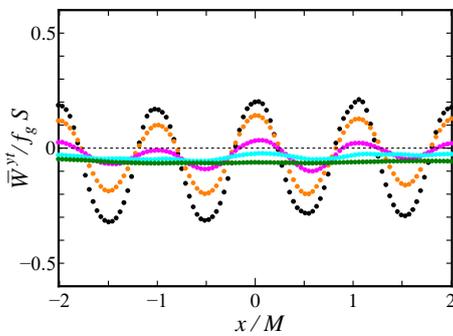
水平方向には周期境界条件とする。

格子棒幅は $d = M/5$ 、格子振動ストロークは $S = 4M/5$ 、格子の振動は $0.5 S \sin(2\pi f_g t)$ で与える。座標回転は鉛直方向のみに与える。そして、無次元時間刻み幅を $\Delta t f_g = 6.25 \times 10^{-4}$ 、格子レイノルズ数を $Reg = f_g S M / \nu = 4000$ 、格子ロスビー数を $Rog = f_g S / 2\Omega M = \infty, 0.51$ 、の条件で数値計算を実行する。 $Rog = \infty, 0.51$ の条件はそれぞれ実験での $\Omega = 0, 15 \text{ rpm}$ の条件に対応する。

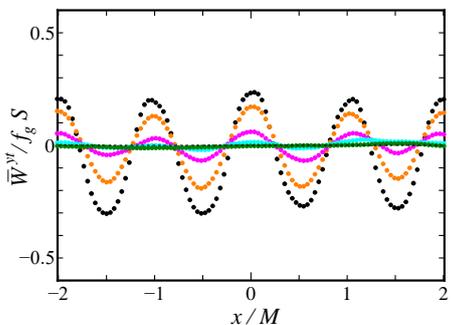
4. 研究成果

4.1 実験結果

まず、今回の実験装置における内箱の効果を確認するため、PIV による鉛直方向平均速度分布を図3に示す。図3 (a)が内箱無し、図3 (b)が内箱有りの結果である。まず図3 (a)より、今回作成した乱流生成格子によって、鉛直方向平均速度は乱流生成格子の位置に応じて規則的に変化し、また格子から離れた位置での分布には水平方向への平均速度勾配がほとんど見られないことが判る。これは、本研究において作成した乱流生成格子の平面性が向上したこと、またタンクと乱流生成格子のすき間を狭くすることで二次流れの発生が抑えられたことによる。しかし、図3 (a)からも判るとおり、乱流生成格子から離れた領域では、二次流れの影響によるわずかな下降流が見られる。この二次流れを遮断する目的で内箱を設置した結果が図3 (b)で



(a) 内箱無し



(b) 内箱有り

図3 鉛直方向平均速度分布

ある。図3 (b)から、内箱を設置することで、乱流生成格子から離れた領域での鉛直方向平均速度がほぼゼロとなる事が判る。

以上により、本実験装置によってより理想的な振動格子乱流の流れ場が生成できる事が確認されたので、P I V計測実験から乱れの減衰挙動を調べた。実験結果の一例として、水平方向乱流強度の鉛直方向分布を図4に示す。水平方向乱流強度の減衰則は、

$$\frac{u'_{rms}}{f_g S} = c \left(\frac{S}{M}\right)^{0.5} \left(\frac{z}{M}\right)^{-n}$$

によって整理されている。図4中には、本研究による結果に加え、振動格子乱流の代表的な実験結果も示されている。図4より、本研究による水平方向乱流強度の減衰挙動には、初期減衰および終期減衰の2つの減衰挙動が現れていることが判る。これは、比較的最近の実験であるWan (2016)およびUra et al. (1982)の結果と定性的に一致している。一方、振動格子乱流の先駆的研究であるHopfinger and Toly (1976)やCheng and Law (2001)の結果には終期減衰挙動が見られない。これらの実験では、鉛直方向平均速度分布が示されていないので断定はできないが、二次流れが

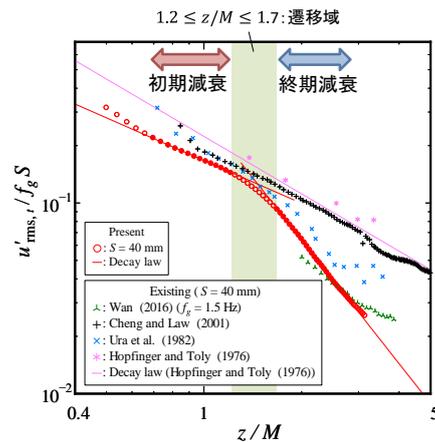
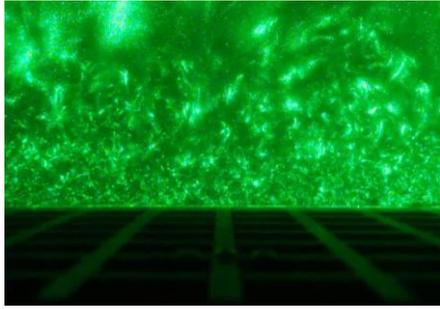


図4 水平方向乱流強度分布

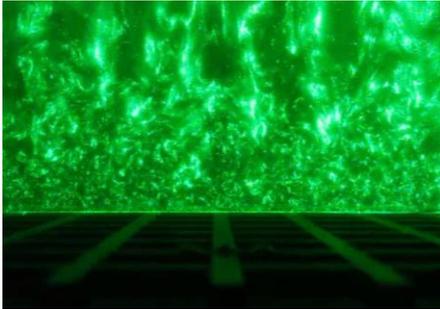
($M = 50 \text{ mm}, S = 40 \text{ mm}, f_g = 2 \text{ Hz}, \Omega = 0$)

表1 乱流強度の減衰則の定数と指数

Researchers		C	n
Present	Initial decay	0.19	0.74
	Terminal decay	0.32	2.16
Wan (2016)		0.14	1.22
Cheng and Law (2001)		0.23	1
Ura et al. (1982)		0.22	1.25
Hopfinger and Toly (1976)		0.25	1



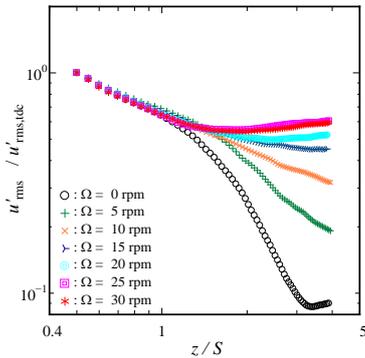
(a) $\Omega = 0$ rpm



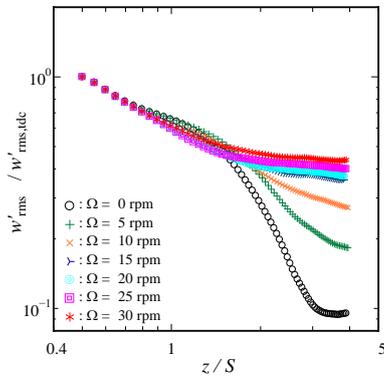
(b) $\Omega = 15$ rpm

図5 流れの可視化写真

($M = 50$ mm, $S = 40$ mm, $f_g = 2$ Hz)



(a) 水平方向乱流強度分布



(b) 鉛直方向乱流強度分布

図6 乱流強度分布

($M = 50$ mm, $S = 40$ mm, $f_g = 2$ Hz)

十分に抑制されておらず、二次流れによる移流によって乱れがより遠方まで運ばれた結果と考えられる。表1に、乱流強度の減衰則の定数 C と指数 n について、本研究の結果と従来の研究の結果を併せて示す。本研究の結果については、初期減衰に併せて終期減衰の結果も示されている。

次に、振動格子乱流における回転の効果を調べるため、静止系に加え回転系での実験を実施した。図5(a)および図5(b)それぞれに静止系 ($\Omega = 0$) および回転系 ($\Omega = 15$ rpm) での x - z 断面の流れの可視化写真を示す。静止系および回転系ともに、振動格子近傍には微細で3次元的な渦構造が存在する事が判る。一方、回転系では3次元的な渦構造の上方、つまり格子から離れた位置に、準2次元的な縦渦構造が生じている事が判る。

図6(a)および図6(b)それぞれに水平方向および鉛直方向乱流強度分布を示す。それぞれの図には、回転角速度を $\Omega = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30$ rpm とした結果が示されている。いずれの乱流強度成分についても、格子近傍では回転数に依らず単調に減衰する事が判る。一方、格子遠方では、回転数の増加に伴い乱れの減衰が抑制される様子が示されている。これは、図5の流れの可視化写真にも示されているとおり、回転系では格子から離れた位置に定在的な準2次元的な縦渦構造が存在する事による。

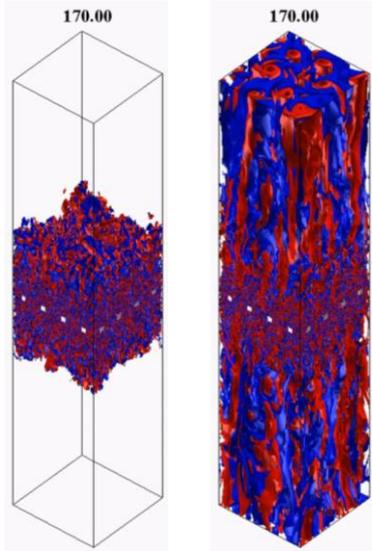
4.2 計算結果

図7に、鉛直方向渦度の等値面の計算結果を示す。図の赤色は正の値 (回転系ではサイクロニック渦)、青色が負の値 (回転系ではアンチサイクロニック渦) を示す。この図より、静止系および回転系ともに格子近傍では3次元的な渦構造、また回転系では格子から離れた位置で準2次元的な縦渦構造、という実験で観察された構造が再現されていることが判る。

図8に、回転系で準2次元的な縦渦構造が発達する過程での鉛直方向渦度の等値面 (同図(a)) と速度ベクトル線図 (同図(b)) を示す。

図8(a)より、準2次元的な縦渦構造はフィンガー状構造として振動格子から遠方へ広がる事が判る。また、準2次元的な縦渦構造の発達過程において図8(b)に見られるようなある角度を持って伝播する波が観察される。この波の角度は慣性波の分散関係式をほぼ満足しており、速度ベクトル線図によって捕えられた波は回転による慣性波と考えられる。

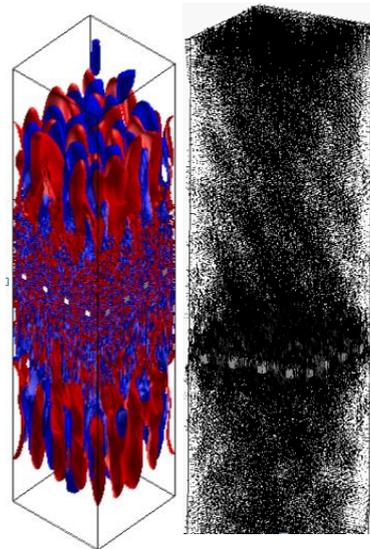
図9に、水平方向乱流強度分布について、数値計算結果 (DNS) と実験結果の比較を示す。図中の $Rog = \infty, 0.51$ はそれぞれ実験での $\Omega = 0, 15$ rpm に対応する。図9より、数値計算結果は実験で観察された回転による乱れ減衰の抑制をほぼ捕えている事が判る。一方、格子のごく近傍では数値計算結果



(a) $\Omega = 0$ (b) $\Omega = 15 \text{ rpm}$

図7 鉛直方向渦度の等値面

($M = 50 \text{ mm}$, $S = 40 \text{ mm}$, $f_g = 2 \text{ Hz}$ に対応)



(a) 渦度等値面 (b) 速度ベクトル線図

図8 準二次元的縦渦構造の発達過程での流れ構造

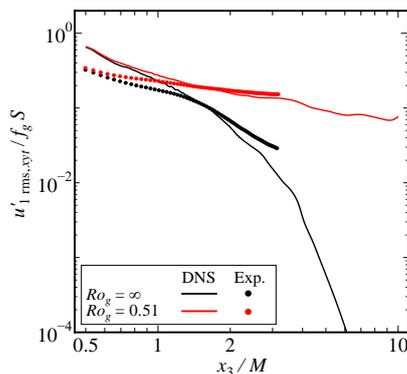


図9 水平方向乱流強度分布

($Ro_g = 0.51$ は $\Omega = 15 \text{ rpm}$ の実験に対応)

と実験結果との間に差異が見られ、定量的な議論を進めるには、数値計算に対して乱流生成格子の近傍でさらに格子解像度を高める必要のある事が判る。

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)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 高橋駿介, 田代英之, 玉野真司, 森西洋平, 回転系振動格子乱流の慣性波に関する数値解析, 第28回数値流体力学シンポジウム, 東京都・タワーホール船越, (2014. 12. 09-11), B01-3 (4p.).
- ② 木村充宏, 水落雅貴, 玉野真司, 森西洋平, 回転系振動格子乱流の乱流拡散と渦構造に関する実験的研究, 日本機械学会東海支部第64期総会・講演会, 愛知県・中部大学, (2015. 03. 14-15), 講演番号166 (2p.).
- ③ 水落雅貴, 木村充宏, 玉野真司, 森西洋平, 振動格子乱流の渦構造に及ぼす回転効果の実験的研究, 日本機械学会東海支部第65期総会・講演会, 愛知県・愛知工業大学, (2016. 03. 17-18), 講演番号230 (2p.).
- ④ 田代英之, 山田格, 玉野真司, 森西洋平, 回転系振動格子乱流の直接数値計算における乱流統計量に及ぼす格子解像度の影響, 日本機械学会東海支部第66期総会・講演会, 静岡県・静岡大学浜松キャンパス, (2017. 3. 14-15), 講演 No. 420(2p.).

[その他]

ホームページ

<http://flow-design-lab.web.nitech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森西 洋平 (Morinishi Yohei)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40222351

(2) 研究分担者

玉野 真司 (Tamano Shinji)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40345947

(4) 研究協力者

高橋 駿介 (Takahashi Shunsuke)

木村 充宏 (Kimura Mitsuhiro)

田代 英之 (Tashiro Hideyuki)

水落 正貴 (Mizuochi Masaki)