

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13867

研究課題名(和文)メガヘルツ超音波素子を用いた平均流のない擬一様等方性乱流場の生成

研究課題名(英文) Generation of quasi homogeneous isotropic turbulence with no mean flow using Megahertz ultrasonic transducers

研究代表者

長田 孝二 (Nagata, Koji)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：50274501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：水中にメガヘルツ超音波(周波数0.95 MHz)を照射した場合に発生する定常流(音響流)によって駆動される格子乱流水槽を設計・製作し、生成される乱流の特性を粒子画像流速計(PIV)を用いて計測した。格子サイズは格子間隔 $M=20$ mm、格子幅4 mm(遮蔽率36%)である。さらに、格子によって形成される流動場の特性を明らかにするため、有限差分法に基づく時間発展格子乱流場の直接数値計算(DNS)コードを新たに開発し、格子レイノルズ数10,000と20,000に対してスーパーコンピュータを用いて計算を行った。実験と計算結果より、メガヘルツ超音波により駆動される格子乱流場の特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A grid tank in which turbulence is generated by a grid and steady flow (i.e., acoustic streaming) when Megahertz (0.95 MHz) ultrasound is irradiated into a quiescent water is newly designed and manufactured. The characteristics of created turbulent flows are measured by using particle image velocimetry (PIV). The mesh length of the grid is $M=20$ mm and the thickness of the square bar is 4 mm, so that its solidity is 36%. In order to further elucidate the characteristics of the turbulent field, a numerical code for direct numerical simulation of temporally developing grid turbulence is newly developed based on the finite difference method. The calculations are conducted on a supercomputer for the mesh Reynolds numbers of 10,000 and 20,000. The characteristics of the turbulent flow are investigated by above-mentioned experiments and calculations.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 乱流 超音波 格子乱流

1. 研究開始当初の背景

乱流の基本特性であるエネルギーカスケードプロセスや一様等方性乱流のエネルギー減衰指数を調べるために、風洞あるいは水路を用いた格子乱流実験が行われてきた。しかし、通常の格子乱流には強い主流が存在し、また、空間発達する場であるため、一様等方性乱流に対する理論やボックス内乱流に対する直接数値計算(DNS)との乖離がある。一方、閉鎖ボックス内で平均流のない一様等方性乱流を生成する試みは古くから行われており、格子を振動させる方法が長年主流だった。しかし、この方法では振動する格子と壁面の相互作用によって強い二次流れが発生する(K. Nagata et al., J. Fluid Mech., 556: 329-360, 2006)。対向する二枚の攪拌翼を逆方向に回転させるもの(“Franch washing machine”)も同様に強い平均速度場が存在する(G. A. Voth et al., J. Fluid Mech., 469: 121-160, 2002)。気相においては、回転する格子を用いるもの(P. D. Friedman and J. Katz, Phys. Fluids, 14: 3059-3073)やスピーカによる音響励起を用いるもの(W. Hwang and J. K. Eaton, Exp. Fluids, 36: 444-454, 2004)が提案されているが、いずれも理想的な一様等方性乱流が生成されているとは言い難く、また、液相への適用も難しい。そこで、新たな手法による、閉鎖ボックス内での準一様等方性乱流の生成方法の開発が望まれていた。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究では、超高周波(メガヘルツ)超音波を水中に照射した際に生じる音響流(Y. Ito, K. Nagata and S. Komori, Phys. Fluids, 14: 4362-4371, 2002)に着目し、音響流と乱流格子を組み合わせることで閉鎖ボックス内に一様等方性乱流を生成する手法の提案、実験装置の設計製作、および生成される乱流場の特性を明らかにすることを目的とした。また、実験結果の検証および格子乱流の発達過程の調査のため、ボックス内で時間発展する格子乱流の直接数値計算コードを新たに開発し、計算を行った。

3. 研究の方法

(1) 実験

作製した実験装置の写真を図1に示す。超音波素子として株式会社カイジヨ 製ハイメガソニック7857T型(0.95 MHz)を用い、アクリル製水槽底部に設置した。これにより、水槽底部から上部に向けて音響流を発生させた。超音波素子の上部に乱流格子(格子間隔 $M=20\text{ mm}$, 格子幅 $d=5\text{ mm}$; 格子間隔 $M=10\text{ mm}$, 格子幅 $d=2.5\text{ mm}$)を設置し、音響流と干渉させることで格子上部領域に乱流を発生させた。速度場の計測には粒子画像流速計(DANTEC Streamline)を用いた。可視化光源には半導体固体レーザー(Omicron, FKLA-5000; 波長 $\lambda = 532\text{ nm}$, 最大出力 4

W)を、撮影には高速度カメラ(Phantom, V210)を使用した。トレーサ粒子には平均粒子径 $50\text{ }\mu\text{m}$, 比重 1.03 のポリエステル粒子を使用した。座標系の原点を乱流格子中心とし、スパン方向に y 軸、鉛直上方に x 軸をとった。



図1 作成した実験装置の外観

(2) 直接数値計算(DNS)

支配方程式である連続の式と Navie-Stokes 方程式を有限差分法に基づき離散化し、部分段階法を用いて解を求めた。格子間隔に基づくレイノルズ数を $Re_M = 10,000, 20,000$ とした。計算領域は立方体であり、全方向に周期境界条件を用いた(図2)。立方体の一辺の長さ l と格子数 N , 格子間隔 を表1に示す。初期条件を

$$U = \langle U \rangle + u, V = v, W = w$$

で与えた。ここで、大文字は瞬間値を、小文字は変動値を、 $\langle \rangle$ は平均値を表す。初期の平均流速は x 方向に一様、 y, z 方向には以下で与え、格子の後流を再現した。

$$\langle U \rangle = \begin{cases} U_0 \text{ (behind grid bars)} \\ 0 \text{ (in other locations)} \end{cases}$$

時間発展には三段階 Runge-Kutta 法を用い、ボックス内で時間発展する格子乱流場を計算した。

表1 計算領域、格子数および格子間隔

Re_M	l	N^3	格子間隔
10,000	20M	2304 ³	0.0087M
20,000	10M	2048 ³	0.0049M

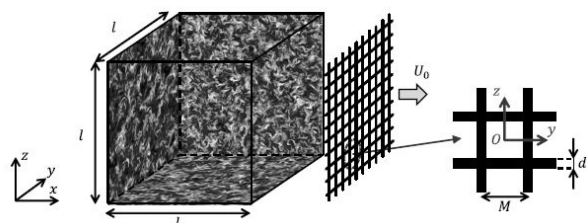


図2 計算の概要

4. 研究成果

(1) 実験結果および考察

予備実験の結果、格子間隔 $M = 10 \text{ mm}$ の格子では格子幅が小さく、生成される乱流強度が非常に小さかったため、ここでは $M = 20 \text{ mm}$ の結果のみを示す。

平均流速のスパン方向分布を図 3 に示す。 $x/M = 0.8$ においては乱流格子による後流の影響で平均流速が速い領域と遅い領域が交互にみられる。 $x/M = 3.2$ においては乱流拡散により分布の凹凸は減る一方で、 $y/M < 0$ の領域で平均流速が低くなっている。これは、図 4 に示すように、本計測で使用した超音波素子の特性上、発生する音響流の強さが不均一であることが原因として考えられる。

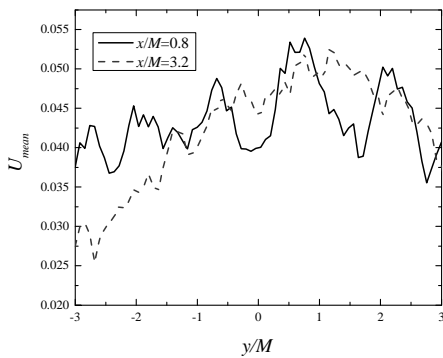


図 3 平均流速のスパン方向分布

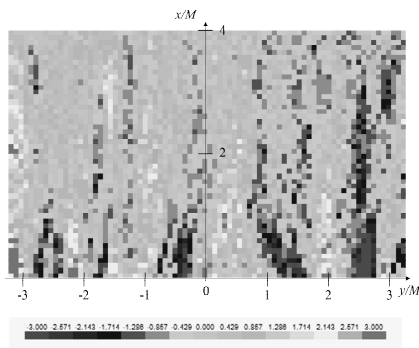


図 4 瞬間渦度のスパン方向分布

x 方向および y 方向の速度変動 rms 値のスパン方向分布を図 5(a), (b) にそれぞれ示す。rms 値は平均流速で無次元化されている。 u' と v' のいずれも格子に近い $x/M = 0.8$ の方が値が大きく、また、格子の後流の影響が残っているため分布にばらつきがある。 $x/M = 3.2$ においては分布のばらつきが減少すると同時に、 $x/M = 0.8$ よりも値が減少する。

大スケールの非等方性を表す指標である x 方向および y 方向の速度変動 rms 値の比、 u'/v' 、のスパン方向分布を図 6 に示す。図 6 より、音響流が弱い $y/M < -1$ の領域 (図 3 参照) を除外すれば $u'/v' = 1.5 \sim 2$ であり、通常の格子乱流で報告されている値 ($u'/v' = 1.1 \sim 1.4$) よりも非等方性が強い結果となった。

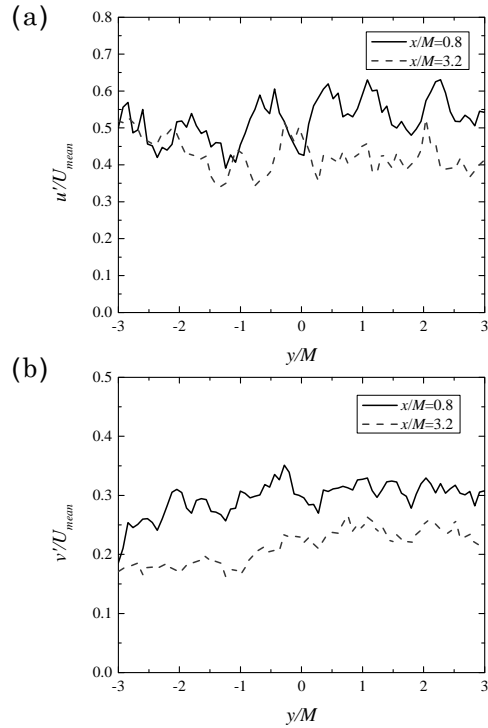


図 5 (a) x 方向および (b) y 方向の速度変動 rms 値のスパン方向分布

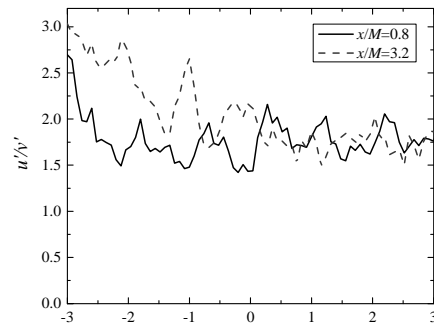


図 6 u'/v' のスパン方向分布

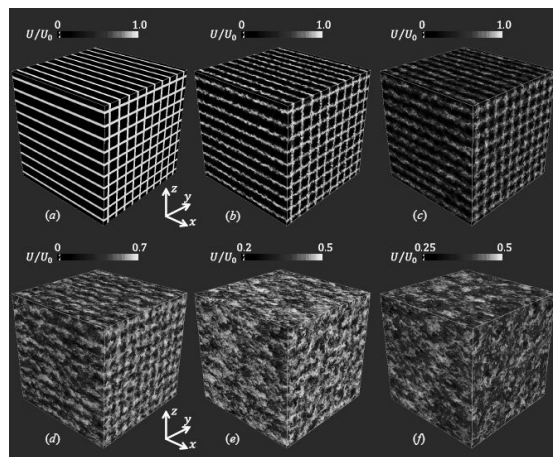


図 7 直接数値計算により計算した格子乱流の時間発展 (上段左 下段右) の様子

(2) 計算結果および考察

格子乱流の時間発展の様子を図7に示す。格子背後の後流を初期条件として、流体のせん断によって乱れがつけられ、一様等方的な乱流へと発達する様子がわかる。

速度変動 rms 値の時間発展を図8に示す。ここで $t/t_r = tU_0/M$ である。異なる線は異なる後流位置（格子中央、格子の交点等）での統計量を示す。これより、 $t/t_r = 7$ 程度までは乱れ場の一様性が低いことがわかる。一方、図9に示すように、等方性に関しては初期の段階から高い等方性を示すことがわかる。

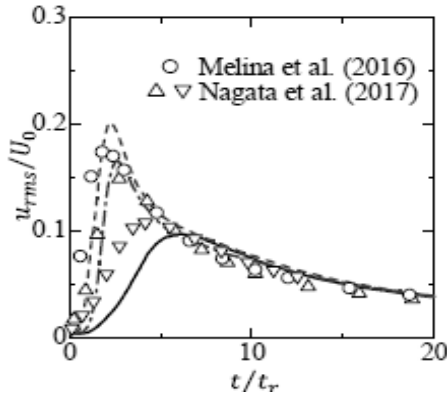


図8 速度変動 rms 値の時間発展

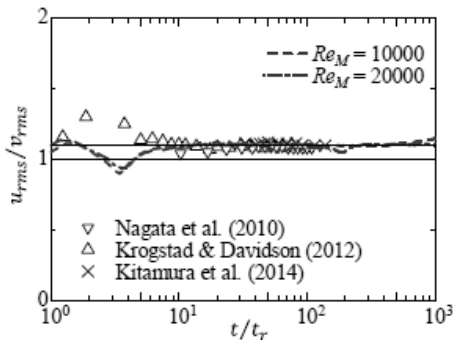


図9 速度変動 rms 値の比の時間発展

(3) まとめと今後の課題

本研究では、超高周波（メガヘルツ）超音波を水中に照射した際に生じる音響流と乱流格子を用いて閉鎖ボックス内に一様等方性乱流を生成する手法を提案し、実験装置の設計製作、および生成される乱流場の特性を明らかにした。類似の手法はこれまでに例がなく、本研究で初めて行われたものである。

実験の結果、格子を設置しない場合でも平均流速の0.3倍程度の大きな乱れが存在していることが明らかになった（図は省略）。この原因として、超音波が水槽底面全体から照射されるわけではない（図4）ため音響流が一様ではない（すなわち速度せん断が存在する）ことが考えられる。格子を設置することで、速度変動の大きさは同程度のままで変動値の空間一様性が向上した。しかし、この場

合も等方性はあまり高くない結果となった。等方性が高くない理由としては、本実験で用いた超音波素子によって駆動される音響流が弱く、格子レイノルズ数が小さかったためであると考えられる。

計算の結果、格子棒による後流が発達するとともに互いに干渉し、一応な準等方性乱流を形成していく過程が明らかになった。また、格子幅と流入流速に基づくレイノルズ数が10,000の場合には粘性の影響が強く表れ、レイノルズ数が20,000の場合と散逸特性が異なることがわかった（図は省略）。本研究で用いたメガヘルツ超音波（周波数0.95 MHz）と乱流格子の場合、生成される流れ場のレイノルズ数が非常に小さい（ $\sim 1,000$ ）ため、レイノルズ数を上げることが今後の課題である。上述のように、レイノルズ数が大きくなれば乱流の非等方性も改善されることが期待される。このためには、超音波素子の変更とより大きな水槽（従ってより大きな格子）を用いる必要があると考えられる。

本実験では、予算の都合上、装置底面のみ超音波照射板を設置して実験を行った。振動格子乱流水槽のように水槽側壁の両面に超音波素子と格子を設置することで、装置中央部により一様性の高い軸対称乱流場を生成できることが期待される（本研究で行った数値計算はこの条件に近いものである）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

K. Nagata, T. Saiki, Y. Sakai, Y. Ito and K. Iwano, Effects of Grid Geometry on Non-Equilibrium Dissipation in Grid Turbulence, Physics of Fluids, 査読有, Vol. 29, 2017, 015102
DOI: 10.1063/1.4973416

〔学会発表〕(計1件)

祭貴哲平, 長田孝二, 酒井康彦, 伊藤靖仁, 岩野耕治, フラクタル, 正方, マルチスケール格子による乱流場の空間発展と減衰特性に関する研究, 日本機械学会東海支部第65期総会・講演会, 2016年3月17日~3月18日, 愛知工業大学(愛知県・豊田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長田 孝二 (NAGATA, Koji)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50274501

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

岩野 耕治 (IWANO, Koji)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20750285

伊藤 靖仁 (ITO, Yasumasa)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40346078

酒井 康彦 (SAKAI, Yasuhiko)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20162274