

# 回転タンク内振動格子乱流の実験的研究

森 義英 (14416087)

指導教官 森西 洋平 助教授

## 1 緒言

回転系乱流はタービンやポンプ等の流体機械の流れに関する問題のみならず、地球物理に関しても重要視されている。本研究では回転系乱流のうちで最も基本的なものの一つである回転タンク内の振動格子乱流を実験的に研究する。

回転タンク内の振動格子乱流を対象とした先駆的な研究が Hopfinger ら<sup>[1,2]</sup>により行われている。この研究では、主に可視化実験により回転による流れ構造の変化が調べられているが、乱流統計平均量に関してはあまり触られていない。これはタンク内の2次流れにより回転軸に直交する面内の一様性が十分でなかったためと推察される。著者らも同様の問題に直面した。そこで本研究では、格子の支持棒を工夫し、回転タンク内でより一様な振動格子乱流を生成し、可視化実験を通して回転による流れ構造の変化を、また LDV 計測実験を通して乱流統計平均量に及ぼす回転の効果を調べる。

## 2 実験装置

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。アクリル製の円筒容器 (内径 242[mm], 高さ 600[mm]), 乱流生成格子 (6[mm] 角柱, メッシュサイズ 30[mm]) および格子振動装置はモーターで一体回転する。回転軸と格子軸は振れが 0.05[mm] 以内になるように同軸調整されている。流速測定には自作の LDV システム (He-Ne レーザー, 4[mW], 前方散乱型) を用いる。

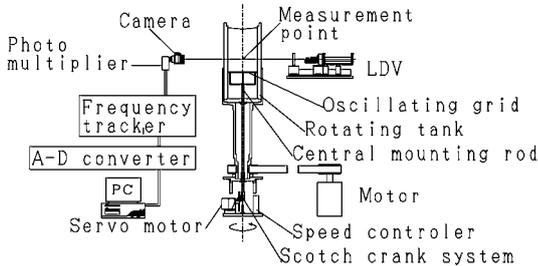


Fig. 1: Experimental apparatus

次に乱流生成格子 (振動格子) について述べる。本研究では流れ場は回転軸に直交する面内 ( $r-\theta$  面内) で一様であることが望ましい。しかし、Hopfinger ら<sup>[1,2]</sup>と同様に振動格子を回転軸上で支持すると<sup>[3]</sup>強い2次流れを生じることがわかった。その原因を可視化実験により調べた結果、回転軸上に設置された格子支持棒により生じる強い上昇流 (噴流) が2次流れを誘発していることがわかった。そこで、本研究では振動格子の支持を格子の縁の4点に改めることにより、タンク中心部で  $r-\theta$  面内がより一様となる流れ場を達成した。以下の実験はこの格子を用いて得られた結果である。なお、本報で示す結果は格子振動ストローク  $S=40$ [mm], 格子振動周波数  $f_g=4$ [Hz], 回転角速度  $\Omega=0\sim 80$ [rpm] に対するものである。また、座標原点を回転軸上の振動格子の振動中心にとり、軸、半径および周方向をそれぞれ  $z, r, \theta$  とする。

## 3 可視化実験による流れ場の観察

本実験装置で生成される流れ場を可視化実験を通して観察する。可視化手法にはトレーサー粒子法を用い、トレーサー粒子にはアルミ粉を用いる。撮影にはビデオカメラを

用い、6[mm] 幅のハロゲンスリット光で可視化された断面の動画撮影を行った。

### 3.1 回転による $r-z$ 断面内の流れ場の変化

回転軸を含む  $r-z$  断面内での可視化実験を行った。格子の支持方法を変更した結果、変更前に格子軸付近で見られた強い上昇流が消滅し、2次流れの抑制が確認された。次にタンクを回転させて流れ場の観察を行った。ただし、観察は静止系から行った。回転を加えると、格子から  $z$  方向にある程度離れた領域で縦渦状の構造が確認された。また、回転角速度が大きくなるにつれて縦渦構造の発生する領域が格子に近づくことが確認された。

### 3.2 回転による $r-\theta$ 断面内の流れ場の変化

回転軸に直交する  $r-\theta$  断面内での可視化実験を行った。ここでは、回転系からの撮影を行った。回転を加えない場合には、格子による噴流状の流れが確認された。これは3次元的な渦構造を持つと考えられる。 $z=130$ [mm] の断面では、回転を加えると準2次元的な渦構造が明確に現れ、3次元的な渦構造が準2次元的な渦構造へ変化することが確認された。また、回転角速度が大きくなるにつれて準2次元的な渦の直径が小さくなり、渦の数が増加する傾向が見られた。格子から離れた領域では、 $z$  の異なるいずれの  $r-\theta$  断面でも同様の渦構造の変化が見られたことから、回転により生成される渦構造は準2次元的な縦渦構造であると考えられる。以上の可視化結果から得られた回転タンク内の渦構造の模式図を Fig.2 に示す。

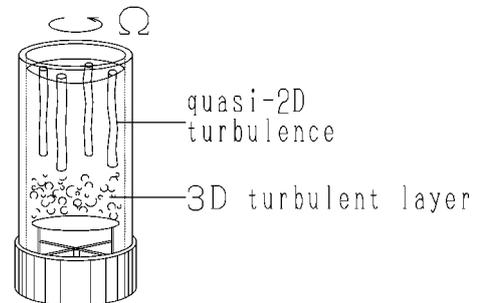


Fig. 2: Schematic representation of the vortex field

## 4 乱れの LDV 計測

LDV 計測実験を行い、乱れの分布に及ぼす回転の効果を定量的に調べる。LDV 計測はサンプリング周波数  $f_s=10$ [kHz] で行われ、105[s] 間のデータからアンサンプル平均値が算出される。

### 4.1 流れ場の一様性

流れ場の一様性を確認するために、まず軸方向平均流速  $U_z$  の半径方向分布を測定した。その結果、タンク内壁近傍以外で正でほぼ一定値、またタンク内壁近傍では内壁に近づくにつれ値が減少することが確認された。また、軸方向乱流強度  $u'_z$  の半径方向分布についても、タンク中央部でほぼ一定値、タンク内壁近傍で分布形状が変化することが確認された。これらはタンク中心部で上昇しタンク内壁近傍で下降する2次流れの存在を示すものである。しかし、タンク中心部の平均流速はほぼ一定で最大格子振動速度の6%程度であるので、非常に緩やかな2次流れで

ある．以上より，生成される流れ場はタンク中央部ではほぼ一様とみなし，以下  $r=0[\text{mm}]$  での計測結果で回転の効果を検討する．

#### 4.2 乱れの分布に及ぼす回転の効果

本節では周方向および軸方向乱流強度の軸方向分布を測定し，乱流強度および乱流エネルギーに及ぼす回転の効果を調べる．回転角速度  $\Omega=0$  での乱流強度の結果を Fig.3 に示す．なお，縦軸には乱流強度  $u'_i$  を最大格子振動速度  $V_g|_{\text{max}}$  で無次元化したもの，横軸には軸方向距離  $z$  を格子メッシュサイズ  $M$  で無次元化したものが示されている．図より，周方向，軸方向ともに両対数グラフ上で乱れが

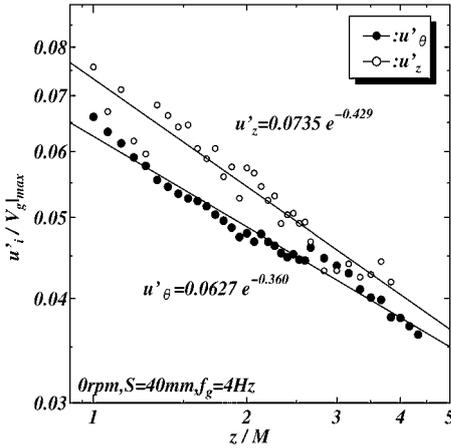


Fig. 3: Effective of rotation on turbulent intensity

直線的に変化することがわかる．そこで，本研究では減衰法則として次式に示す指数法則を適用する．

$$u'_z = az^{-b} \quad (1)$$

ここで， $a$ ， $b$  は実験データの最小二乗近似から求め，特に  $b$  を減衰指数と呼ぶ．周方向成分の減衰指数  $b$  は 0.360，軸方向成分は 0.429 であり，軸方向成分の空間的な減衰が大きいことがわかる．また，周方向成分は比較的直線状に分布しているのに対して軸方向成分では値が変化していることが確認できる．これは 2 次流れによる影響と考えられる．

次に，回転角速度  $\Omega=0 \sim 80[\text{rpm}]$  での乱流エネルギーの結果を Fig.4 に示す．なお，縦軸には乱流エネルギー  $K$  を最大格子振動速度の 2 乗  $(V_g|_{\text{max}})^2$  で無次元化したもの，横軸には軸方向距離  $z$  を格子メッシュサイズ  $M$  で無次元化したものが示されている．図より，低回転角速度では

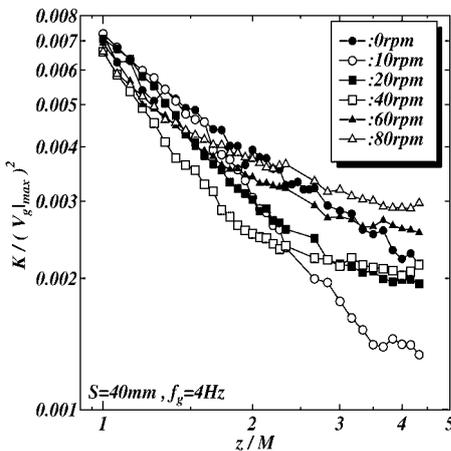


Fig. 4: Effective of rotation on turbulent energy

両対数グラフ上で乱流エネルギーが直線的に変化することがわかる．さらに，高回転角速度での実験データを見ると，減衰曲線は両対数グラフ上で 2 つの直線で近似できることがわかる．このことから，高回転角速度では減衰挙動の変化する点があると考えられる．本研究ではこの点を遷移点と呼ぶ．減衰挙動および遷移点を評価するために，式 (1) の指数法則を適用する．この遷移点を見積もった結果を Fig.5 に示す．回転角速度が増加するにつれ遷移点が格

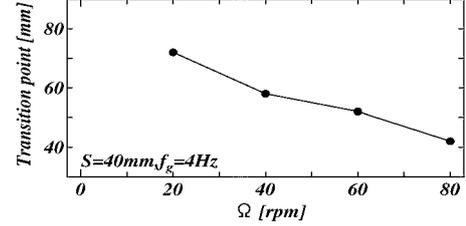


Fig. 5: Effect of rotation on transition point

子に近づくことがわかる．また，減衰指数の変化を Fig.6 に示す．格子付近での減衰挙動は回転角速度が増加すると

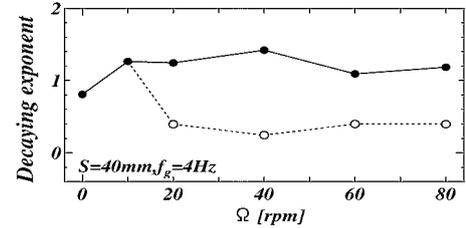


Fig. 6: Effect of rotation on decaying exponent

減衰指数が増加し， $\Omega=40[\text{rpm}]$  で最大値をとり，さらに回転角速度を増加させると減衰指数が減少する．遷移点以降の減衰指数はほぼ一定で約 0.4 である．

#### 4.3 遷移点付近での渦構造の変化

前節で見積られた遷移点付近の渦構造を  $r-\theta$  断面内の可視化実験で確認した．振動格子からの距離が遷移点よりも大きくなると，準 2 次元的な渦構造が確認された．このことから，遷移点より格子側の領域では振動格子の影響が強い 3 次元的な渦構造を持ち，遷移点を境に回転が流れ場を支配する準 2 次元的な渦構造へと変化することがわかる．

#### 5 結言

本研究では回転タンク内の振動格子乱流を可視化実験および LDV 計測実験により検討した．

可視化実験から，回転系では振動格子の影響の強い 3 次元的な渦構造を持つ領域と回転が流れ場を支配する準 2 次元的な渦構造を持つ領域の存在が確認された．

LDV 計測実験から，乱れの空間的な減衰は指数法則で表現でき，高回転角速度では減衰指数の変化する遷移点の存在することが確認された．この遷移点は 3 次元的な渦構造と準 2 次元的な渦構造を持つ領域の境界点であり，回転角速度が増加すると格子側へ近づく．

#### 参考文献

- [1]E.J.Hopfinger,F.K.Browand and Y.Gagne,Tubulence and waves in a rotating tank,J.Fluid Mech.,vol.125,(1982),pp505-543.
- [2]M.Mory and E.J.Hopfinger, Rotating turbulence evolving freely from an initial quasi 2D state, Lecture Notes in Physics, N230,16-18,Proc. of Macroscopic modelling of turbulent flows(Eds.U.Frish et al.),(1984),pp218-236.