

回転タンク内振動格子乱流の可視化実験

奥出 雅人 (12116750), 長松 孝行 (11216627)

指導教官 森西 洋平 助教授

1 目的および背景

回転系における乱流の例としてタービンなどの流体機械や惑星大気に見られる流れが挙げられる。本研究では、流体機械の性能向上や流れに関連する研究として、回転系で最も基本的な流れ場の1つである回転系振動格子乱流に注目する。本研究では、回転タンク内で乱流生成格子を振動させることによって一様乱流場を生成し、流れ場に及ぼす回転の効果を調べる。

回転タンク内の振動格子乱流を対象とした研究が過去に Hopfinger^[4] らによって行われている。しかし、彼らの研究では回転系振動格子乱流の統計平均量に及ぼす回転の効果に関して詳しく調べられていない。そこで本研究では回転振動格子乱流の統計平均量に及ぼす回転の効果を検討することを目的にする。まずは、Hopfinger らの実験と定性的に一致するのかを確認するため可視化実験を行う。さらに染料を用いた拡散実験を行い拡散速度の回転による変化を調べる。

2 可視化実験

本研究では、トレーサ法の中の懸濁法を用いる。懸濁法とは、トレーサ粒子をあらかじめ流体中に一様に混ぜておき、流れによるトレーサ粒子の動きで流線を調べる方法である。トレーサ粒子（アルミニウム粉末）を含む流れにハロゲンスリット光（幅 6mm）を当て、それに直交する方向からデジタルビデオカメラで動画撮影を行った。

2.1 実験装置と座標系

Fig.1 に本研究で用いる実験装置を示す。Fig.2 には動画撮影した断面を表すための座標系を示す。撮影する断面はタンク回転軸に平行で、かつ回転軸を含む $r-z$ 断面とタンク回転軸に直交する $r-\theta$ 断面である。 $r-z$ 断面の可視化実験では静止からの撮影、 $r-\theta$ 断面の可視化実験ではカメラをタンク上部に固定し、回転系からの撮影を行った。

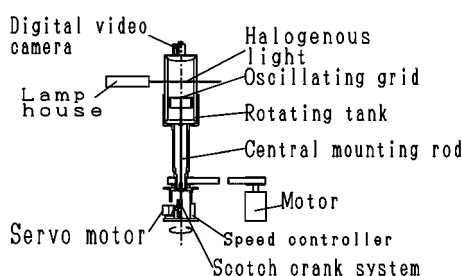


Fig. 1: 実験装置

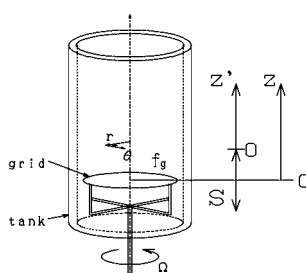


Fig. 2: 座標系

3 格子形状の検討

3.1 本年度の格子

回転タンク内の振動格子によって生成される乱流は一様であることが望ましい。昨年度製作した乱流生成格子を Fig.3 の左側に示す。昨年度の乱流生成格子は振動格子軸と格子が格子面中心の一点で接合されていたため、振動させると格子中心から強い上昇流が発生し、タンク内にはっきりとした2次流れが生じるものだった。

本年度製作した乱流生成格子を Fig.3 の右側に示す。本年度は振動格子軸の影響を少なくするため、振動格子軸を格子から離し4点で格子と接合させる格子形状を提案し設計および製作を行った。

本研究では格子によって生成された乱流場の一様性を可視化実験によって定性的に調べる。

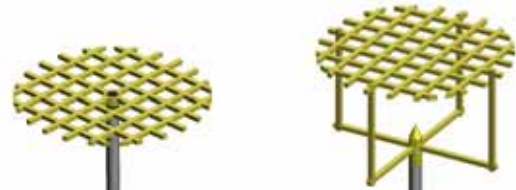


Fig. 3: 昨年度の格子と本年度の格子

3.2 昨年度と本年度の振動格子によって生成される流れ場の違い

昨年度の格子による流れは、格子面中心からの強い上昇流を伴う2次流れを含んでおり、またその流速も非常に速いためタンク内の流れが一様とは考えにくい。

一方、本年度製作の格子による流れには格子面中心からの強い上昇流はみられず、それに伴う2次流れも確認されなかった。昨年度との格子形状の違いは格子面から振動格子軸を離れたことであるので、昨年度製作の格子による2次流れは振動格子軸の影響を強く受けていたことが再確認された。

また、本年度製作の格子による流れには格子の片側からのゆっくりとした上昇流が生じており、それに伴う大きなゆっくりとした2次流れが生じている。この流れが生じた理由としては回転軸に対して格子面が完全に垂直な面となっていない可能性がある。この点については今後改善の余地があるが、2次流れは非常にゆっくりとした流れであるのでタンク内流れは一様乱流に極めて近いと考えられる。

4 回転が乱れに及ぼす影響

4.1 r-z 断面

$r-z$ 断面においてタンクに回転を与えたときの大きな流れの変化は、タンク中央付近に静止状態では見られなかった縦構造が現れることである。

20[rpm] ではタンク壁面近傍には縦構造とは異なる速い流れが存在している。また中心部の流れは、周りに比べ非常にゆっくりとした流れである。しかし、40,60[rpm] と回転を増していくと、タンク壁面近傍に見られた流れ、および中心部に存在したゆっくりとした流れはしだいにその幅を狭め60[rpm] では見られなくなり、縦構造がタンク全体に広がる。

タンク内の流れは、主に格子付近の乱れた流れとその上部にみられる縦構造により構成されている。縦構造領域がタンク内で増加し、その結果格子による乱れ構造の領域が圧迫されると考えられる。これはタンクの回転数を増加させるにつれて、格子により生じている乱れ領域の幅が狭くなる様子から確認できる。

4.2 $r-\theta$ 断面

タンクに回転を与えた時の大きな変化は格子から離れた領域で $r-\theta$ 断面内の渦が現れたことである。

渦が比較的長時間観察されることからその領域は準2次元的な渦構造をもつことが分かる。一方、格子近傍では長時間観察される渦は見られなかったので流れは3次元的な渦構造になっているということがいえる。

回転数 20[rpm] では、タンク中心付近に渦（主にサイクロニック渦）が生じ、タンク壁面付近には壁面に沿ったアンティサイクロニックな大きな流れが存在する。回転数 40[rpm] では渦の範囲は外側に広がり、壁面に沿ったアンティサイクロニックな流れは範囲を狭め、さらにこのアンティサイクロニックな渦にサイクロニック渦が乗って移動するようになる。これらの渦と壁面に沿う流れの間にはせん断によって生じたと考えられるアンティサイクロニック渦が観察された。回転数 60[rpm] では渦構造（主にサイクロニック）がタンク全体に広がり、アンティサイクロニックな流れが消滅する。又、高回転になるにつれて渦の数が増え、渦間隔が狭くなる。このことは Hopfinger らの論文でも述べられている

5 遷移点周りの流れ

タンク内の乱流強度の定量的な測定結果より、タンク内の乱流エネルギーは格子から離れるにつれ減衰するということが森^[3]の研究により分かっている。また、その中で乱流エネルギーの減衰法則が変わる点（ z 方向）があるということも指摘されている。その位置を本研究では遷移点と呼ぶ。遷移点は回転数が増加するにつれ格子に近づくという傾向がある。これは上でも述べたように回転の増加によりタンク内で縦構造の流れが支配的になり、格子近傍の乱れが圧迫された結果と考えられる。各回転速度で流れの変化を観察した結果、遷移点下方では変動が激しく渦構造ははっきりとは分らないが、遷移点を境に上方では流速が遅くなり、渦構造が比較的長時間観察されることが分かった。

6 拡散実験

拡散実験は注入流脈法を用いる可視化で行う。注入流脈法は定まった位置からトレーサを注入し、そのトレーサの動きによって流れ場の観察を行う方法である。水流ではインクや水溶性染料などがトレーサとして用いられている。拡散実験では追従性の高いトレーサが必要なので本実験では、蛍光インクを使用する。

また、本研究での拡散実験はデジタルビデオカメラを用いた動画撮影を行い、その動画をもとに拡散速度を測定する。

7 拡散実験結果

拡散の様子を染料を用いて動画撮影した。タンク上部に注入された染料は一部の縦渦によって吸い込まれ、時間の経過とともに準2次元縦渦構造領域のみに広がることが確認された。このことから準2次元縦渦構造領域から壁面付近のアンティサイクロニックな流れへ拡散は起こらないことが分かった。

図4に回転角速度 $\Omega=0, 20, 40, 60$ [rpm] での r 方向拡散速度 V_{Dr} と軸方向距離 z の関係を示す。図4より振動格子

から離れるにつれて拡散速度が遅くなることが確認できる。また、回転角速度の変化に伴う r 方向拡散速度 V_{Dr} の減衰の傾向に変化は見られないので、 r 方向拡散速度 V_{Dr} への回転の影響はあまりないものと考えられる。

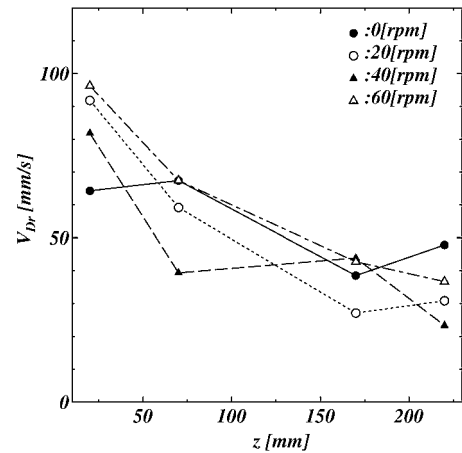


Fig. 4: r 方向拡散速度

8 まとめ

- 格子に改良を加えた結果、昨年の格子よりも様な乱流場ができた。
- タンクに回転を与えるとタンク中心付近に縦渦（準2次元構造）が発生し、タンク壁面付近には壁面に沿ったアンティサイクロニックな流れが確認された。
- 回転角速度を上げるにつれて準2次元縦渦構造領域はタンク壁面側へと広がり、回転角速度が 60rpm になるとタンク壁面にあったアンティサイクロニックな流れがなくなる。
- 振動格子付近の3次元構造の流れと準2次元縦渦構造領域の境界付近に遷移点があることが分かった。
- $r-\theta$ 断面の動画により遷移点を越えると流速は遅くなり、準2次元構造の渦が顕著に観察できた。
- 染料の拡散速度計測実験において、格子の振動中心から軸方向に離れるにつれて半径方向拡散速度が低下することが確認された。
- 準2次元縦渦構造領域からタンク壁面のアンティサイクロニックな流れへは拡散が起こらないことが分かった。

9 主な参考文献

- [1] 佐藤嘉浩, 「回転系振動格子乱流の実験的研究」, 卒業論文, (2003)
- [2] 流れの可視化学会, 「新版流れの可視化ハンドブック」, 朝倉書店, 184-190 (1986)
- [3] 森義英, 「回転タンク内振動格子乱流の実験的研究」, 修士論文, (2004)
- [4] 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.