

外力によって誘起される定常渦構造

— 回転流体中の振動格子乱流 —

九州大・総理工 杉原裕司 (Yuji SUGIHARA)
本地弘之 (Hiroyuki HONJI)
右田昌士 (Masato MIGITA)
松永信博 (Nobuhiro MATSUNAGA)

1. はじめに

流体に作用する外力としては、一般に重力、遠心力、コリオリ力、電磁気力等が挙げられる。これらの外力が系を貫いている場合、流体中には定常渦構造が形成されることが多い。

今回、回転テーブル上に搭載された振動格子乱流水槽を用いて、コリオリの力を受ける乱流の特性を実験的に調べた。回転系における流体運動では、"Taylor-Proudmanの定理"の効果によって、回転軸方向の流体運動が拘束を受ける。そのため、振動格子乱流の様な等方性の強い乱れも二次元化し、テーブルの回転周期に比べて十分に寿命の長い準定常渦構造が形成される¹⁾。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概略図を示す。回転テーブルは直径1.0mの円形で、0～1.0Hzの間で回転数を調節できる。テーブル上に直径20cm、深さ40cmの円形振動格子乱流水槽が搭載されている。格子は、棧の幅 d が5mm、メッシュ間隔 M が2.5cmの正方角柱格子であり、これを正弦鉛直振動させることによって乱れを発生させた。格子振動の周波数 f は2.0と4.0Hz、振幅 S は2.0と4.0cmであった。テーブルの回転周波数 Ω は0、0.1、0.4、0.8Hzで変化させた。変動速度は、レーザー流速計を実験室系に固定し、回転している水槽中にレーザー光を入射して測定した。得られた流速データより剛体回転の成分を差し引いて乱れ成分を求めた。乱れの統計量の鉛

直分布はレーザー・プローブを鉛直方向にトラバースすることによって求めた。測定は、振動中心より4.0cmから15cmの間で行われた。円形水槽内の流体運動を側面より観察した場合、その像はレンズ効果によって歪むことになる。そのため可視化実験においては、円形水槽を矩形水槽の中に入れ、2つの水槽の間を作業流体で満たした実験装置を用いた。回転テーブル上に固定されたスライドプロジェクターによるスリット光を側面より挿入し、アルミ粉を用いて乱流構造を可視化した。ビデオカメラはテーブルに固定され、回転系における渦の挙動を撮影した。また、染料（フルオレセインナトリウム水溶液）をトレーサーとする可視化実験も行ったが、この際にはレーザー計測用の円形水槽が用いられ、実験室系より写真撮影を行っている。

3. 実験結果および考察

3.1 可視化実験の結果

写真1 の(a)～(d)はそれぞれ、 $f = 2.0\text{Hz}$ 、 $S = 2.0\text{cm}$ で、 Ω を0Hzから0.8Hzへ連続的に変化させた場合における振動格子乱流中の組織渦構造をアルミ粉を用いて可視化したものである。(a)の場合、乱れの様相は空間的に無秩序で、等方的な乱流場が形成されていることがわかる。Spin-up過程にある(b)、(c)より、乱流構造の二次元化は水槽中心部より始まり、徐々に側壁方向に進行していくことがわかる。一定角速度で回転している(d)の場合、秩序的に配置された渦構造が形成される。この渦構造の形成は、回転流体の”Taylor-Proudmanの定理”の効果によるものと思われる。この定理は比較的遅い流れの回転流体に成立するものであり、その効果が乱流においても見られるのは非常に興味深い。

3.2 乱流計測の結果

図2 の(a)と(b)は、それぞれ $\Omega = 0\text{Hz}$ から0.8HzへとSpin-upさせた場合と、逆に0.8Hzから0HzへとSpin-downさせた場合の $z = 8.0\text{cm}$ における水平流速の時系列を示したものである。 $u = 0$ の部分が $\Omega = 0\text{Hz}$ の時であり、テーブル回転時には剛体回転の成分が時系列に含まれるために絶対流速がシフトしている。 $z = 8.0\text{cm}$ の位置においては、 $\Omega = 0\text{Hz}$ の時には流速変動

の振幅が大きい、回転の効果が効く場合には振幅が比較的小さくなることがわかる。

図3は、 $f = 4.0\text{Hz}$ 、 $S = 4.0\text{cm}$ に固定した測定において得られた変動流速の水平成分の乱れ強度 u' を f 、 S を用いて無次元化し、 Ω/f をパラメータとして z/M に対してプロットしたものである。図中に示された実線は、Hopfinger & Toly²⁾によって提案された乱れ強度の経験式

$$u' / f S = 0.250 (S / M)^{1/2} (z / M)^{-1} \quad (1)$$

を表している。ただし、 z は格子の振動中心から鉛直上方に取られた座標である。静止時の乱れの分布はこの経験式によく従っている。 Ω/f が0.025の場合、静止系の時よりも乱れが鉛直上方に輸送されないことがわかる。 $\Omega/f = 0.1$ 、 0.2 と系の回転数が増加するに従って、鉛直方向に乱れの分布が一様化していく。このことより、回転の効果は、回転数が比較的小さい時には乱れの拡散を抑制し、回転が大きくなると促進させる性質をもつことが明らかとなった。この結果は、回転流体中での乱流混合速度が回転数が小さい時には静止状態より遅くなり、回転数が大きい時には速くなるというMasuda³⁾の指摘を直接的に指示するものである。

図4は、変動流速の鉛直成分の乱れ強度を無次元化し、 z/M に対してプロットしたものである。図中の実線は、Hopfinger & Tolyの実験結果において w' が u' のおよそ1.05倍であることを考慮して(1)式を1.05倍した経験式を示している。鉛直方向の乱れ強度の分布では、水平方向の分布よりも回転の影響が顕著に現れている。 w'/fS の場合も u'/fS 同様に回転数が比較的小さい時には乱れの拡散が抑制されることがわかる。

4. まとめ

回転系振動格子乱流中に形成される組織的な渦構造を実験的に調べた。その結果、回転が遅いときには乱れの拡散が抑制され、速いときには促進されることがわかった。

参考文献

- 1) Hopfinger, E.J., Browand, F.K. & Gagne, Y.(1982) J. Fluid Mech., **125** , 505-534.
- 2) Hopfinger, E.J. & Toly, J.A.(1976) J. Fluid Mech., **78** , 155-175.
- 3) Masuda, A.(1983) Rep. Res. Inst. Appl. Mech.,Kyushu Univ., **XXXI** , No. 97 , 29-45.

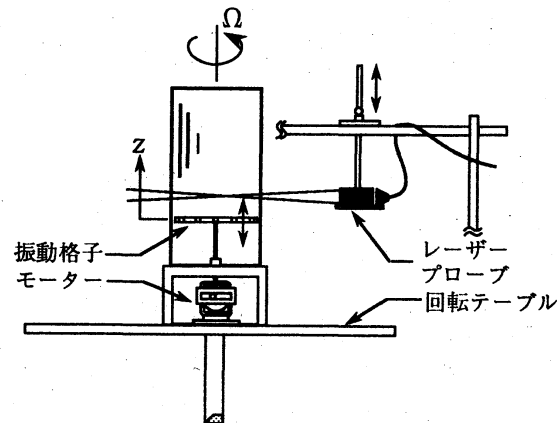
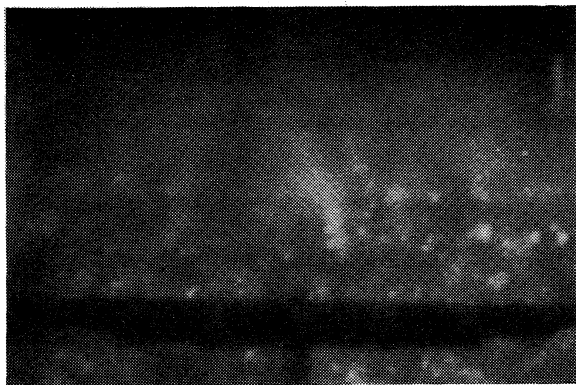


図1 . 実験装置の概略図



(a) 0 Hz



(b) Spin-up (1)

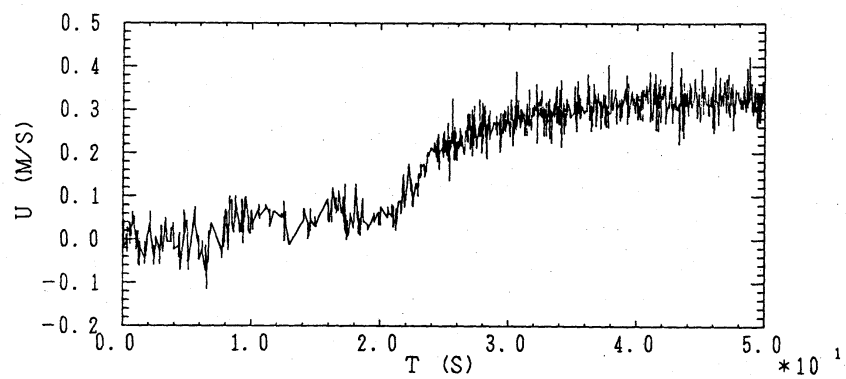


(c) Spin-up (2)

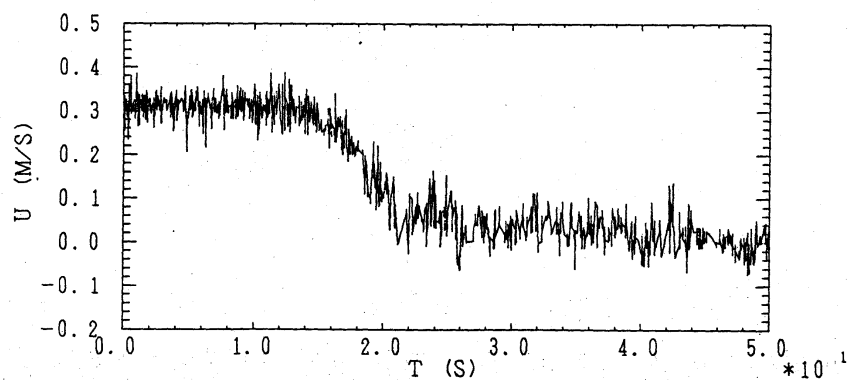


(d) 0.8 Hz

写真1 . 振動格子乱流の可視化

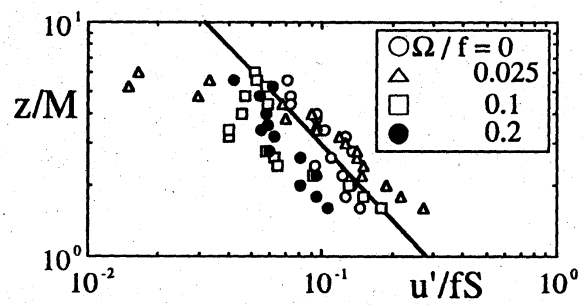
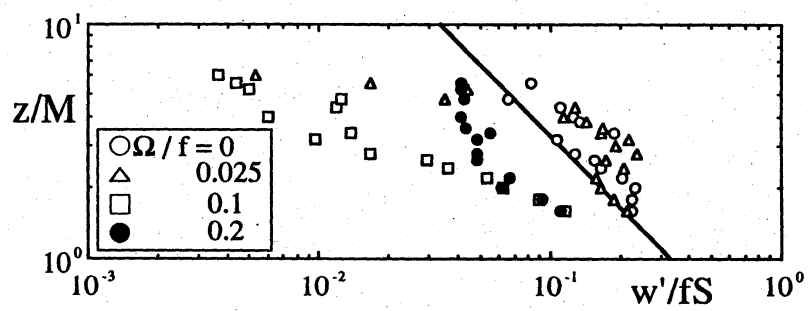


(a) Spin-up



(b) Spin-down

図2. 流速時系列

図3. u' の鉛直分布図4. w' の鉛直分布