

回転水槽を用いた準二次元乱流における 非線形ダイナミクスの模擬実験

日大生産工(院) ○白井 ヒカル, 日大生産工 佐々木 真, 日大生産工 野邑 寿仁亞,
日大生産工 柴山 均, 日大生産工 皆川 裕貴,
九大 荒川 弘之, 名大 河内 裕一, 核融合研 小林 達哉

1. 背景・目的

準二次元乱流は日常に普遍的に存在しており、気象や海洋、惑星、磁場閉じ込めプラズマなど様々なところで引き起こされている。回転流体系や磁場閉じ込めプラズマでは、コリオリ力やローレンツ力の存在により、準二次元的乱流が発達し、非線形現象によって構造形成が引き起こされる。木星の縞模様や地球のジェット気流、偏西風、磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるゾーナルフローは同種の流れであり、ゾーナルフローは惑星大気や核融合プラズマのダイナミクスを支配する重要な流れである。ここで、回転流体系や磁場閉じ込めプラズマにおけるナビエストークス方程式は、数理的に同じ形であるため、生じる乱流は同じ性質を持つ。

上述のゾーナルフロー・乱流系の大域的観測は、困難を極める。例えば、核融合プラズマは中心温度が数億度と非常に高温であるため、内部の大域測定は非常に難しい。また、地球や木星では、衛星をいくつも打ち上げたりしなければならず、直接観測するには多くのコストが必要となる。ゾーナルフローと乱流の大域的相互作用の理解に向けた観測が必要不可欠となっている。

そこで本研究では、回転水槽を用いて、惑星などの回転流体系や磁場閉じ込め核融合プラズマにおける準二次元乱流の模擬を行い、ゾーナルフローや乱流の大域観測から非線形過程の詳細を明らかにすることを目指す。

2. 実験装置の開発

使用する回転水槽とレーザー装置の鳥瞰図と横から見た水槽の断面図をFig.1に示す。

回転台の大きさは $\phi 700\text{ mm}$ 、観測対象となる半球水槽は $\phi 300\text{ mm}$ である。半球水槽のみでは自立しないため、 $\phi 300\text{ mm}$ の円形水槽に半球水槽をはめ込む形で使用している。水槽上

部から撮影するためのカメラ固定器具をアルミフレームで作成しており、縦横自在に動かしてカメラが固定できるため任意の場所の水流を観測できるとともに、回転台とカメラの回転が連動していることによって解析も容易となっている。

半球水槽によって傾斜を作ることにより、流体の厚みを変えて空間の不均一性を作っている。この流体厚みの空間不均一性が実効的にコリオリ力の空間不均一性を生み出し、惑星大気におけるロスピード波や核融合プラズマにおけるドリフト波に対応する乱流を生み出す駆動源となる。加えて、円形水槽には約60°Cのお湯を、半球水槽には約20°Cの冷水を入れることで定常的な温度勾配を励起させている。

レーザー装置は1枚のブレッドボードの上に、レーザー装置、ミラー2枚、パウエルレンズを固定している。ミラー2枚を用いることでレーザー光の射出方向を制御しやすいものにしており、パウエルレンズによってレーザー光のビーム形状を円から横長一直線に変換している。レーザー装置は波長520 nmのものを使用している。水の流れを可視化するために、波長520 nmのレーザー光を吸収してオレンジ色に発光するトレーサー粒子(UVPM-S-BR-0.995 45-53 um)を水槽に多数投入している。粒子の密度は水槽内の水の密度に非常に近いため、水槽を回転させること以外に起因する粒子の運動は無視することができる。撮影する時には暗幕用いて日光や部屋のLEDの光を遮断するようにする。

Demonstration of nonlinear dynamics of quasi two-dimensional turbulence
by using a rotating tank

Hikaru Shirai, Makoto Sasaki, Junia Nomura, Hitoshi Shibayama, Hiroki
Minagawa, Hiroyuki Arakawa, Yuichi Kawachi, and Tatsuya Kobayashi

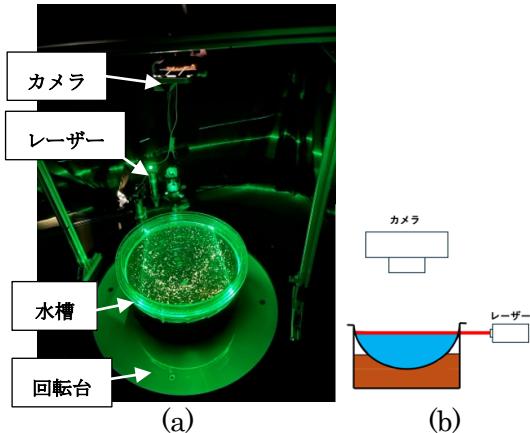


Fig.1 実験装置の外観(a)と水槽の断面図(b)

3. レーザーを使用した速度場推定

粒子画像流速測定法は流体中にトレーサー粒子を投入し、レーザー光を照射することで発光した粒子を撮影し、解析することで目に見えない気流や水流を可視化することができる。この解析結果からは2次元平面のみならず3次元の情報も取得でき、流体の方向と速度を解析することが可能となる。2枚の画像間での粒子移動量は相互相関関数によって求められる。

$$C_{fg}(\zeta) = \overline{f(x)g(x + \zeta)} \quad (1)$$

$f(x)$ と $g(x + \zeta)$ はそれぞれ画像の1枚目、2枚目の1次元関数を表している。この二つの関数の積和の平均を取ることで相互相関関数 C_{fg} が求められる。 ζ は粒子の移動量を表しており、これを変化させて相互相関係数が最大となる値を探す。(1)式では $f(x)$ と $g(x + \zeta)$ が最もよく一致する時に相互相関係数は最大となる。

4. 速度場推定とスケーリング則

実験から得られた動画を1秒ごとの画像に変換し、極座標変換した画像で解析を行う。

粒子画像流速測定法から3秒間の粒子の移動量をFig.2に示す。図の縦軸を半径、横軸を角度として速度場をベクトルで表示し、流体の動きを可視化した。これにより、流体が持つ非線形応力の評価が可能となった。

次に、エンストロフィーカスケードの様子をFig.3に示す。エンストロフィーは渦の強さの指標であり、二次元乱流における渦の遷移はコルモゴロフの-3乗則に従う。Fig.3の緑色波線がコルモゴロフの-3乗則の理論値を示している。実験結果が-3乗則の理論値に則っていることから、二次元乱流を特徴付けるメカニズムの存在を示唆している。

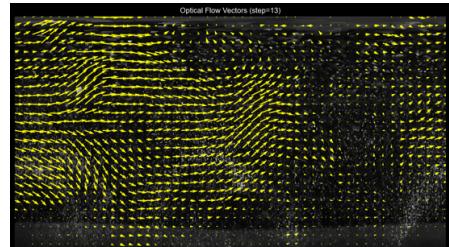


Fig.2 速度場の推定結果(1.47 rad/s)

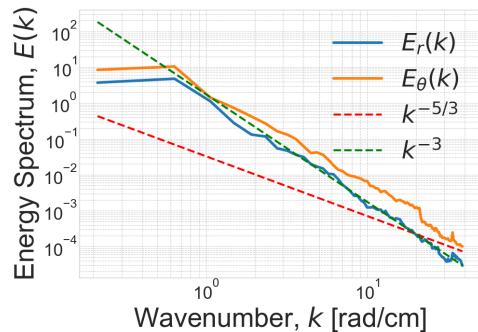


Fig.3 エンストロフィーカスケードのスケーリング則(1.05 rad/s)

5. まとめ

回転流体系や磁場閉じ込め核融合プラズマなどに見られる準二次元的乱流場の大域観測を目指し、回転水槽を用いた詳細観測装置を開発している。アルミフレームでカメラ固定器具を作成し、コンスタントに実験が行える環境を整えた。また、粒子画像流速測定法に基づく速度場推定からエンストロフィーカスケードの検討を行った。今後は、乱流の非線形力の評価を推進する。

参考文献

- 1) Boris, Galperin., & Read, Peter L. (2019). *Zonal Jets: Phenomenology, Genesis, and Physics*. Cambridge. Cambridge University Press.
- 2) 高橋芳文, 佐々木真, 回転水槽を用いた乱流現象の観測実験の立ち上げ, 日本大学生産工学部第 56 回学術講演会公演概要 (2023) p. 231–232.
- 3) 林洋介, 竹広真一, ロスピ一波(2 次元非発散 β 面) (2014)
- 4) 奥野章, 増田章, 地衡流乱流における β 効果の水平発散による抑制, 九州大学応用力学研究所所報 (2000) p. 31–39
- 5) 柳原潤, 明治大学 相互相関法,
<http://www.isc.meiji.ac.jp/~sakakiba/index.html>, 10/14/2024