

超流動乱流における大規模自己相似構造

Large Scale Self-similar Structure in Superfluid Turbulence

○佐々 成正, 原子力機構計セ, 東京都台東区東上野 6-9-3, E-mail:sasa.narimasa@jaea.go.jp

叶野 琢磨, 原子力機構計セ, 東京都台東区東上野 6-9-3, E-mail:kano.takuma@jaea.go.jp

町田 昌彦, 原子力機構計セ, JST-CREST, 東京都台東区東上野 6-9-3, E-mail:machida.masahiko@jaea.go.jp

Narimasa SASA, CCSE JAEA, 6-9-3, Higashiueno, Taito-ku, Tokyo

Takuma KANO, CCSE JAEA, 6-9-3, Higashiueno, Taito-ku, Tokyo

Masahiko MACHIDA, CCSE JAEA, JST-CREST, 6-9-3, Higashiueno, Taito-ku, Tokyo

Numerical simulations of homogeneous isotropic superfluid turbulence are performed to investigate vortex structure and statistical properties. Large scale structure of quantized vortices is very similar to that of Navier-Stokes turbulence. However, inertial range is found to be narrow by bottle neck effect of vortex cascade.

本研究では、一様等方的な超流動乱流がどのような統計則に従うのか、また、どのような渦構造を持っているのかを解明するため、大規模数値シミュレーションによる解析を行った。

超流動乱流では渦の循環が量子化されている点がナビエ-ストークスの乱流とは異なっている。すなわち、循環が1種類の渦しかない系において、乱流時の渦構造や Kolmogorov 則等の統計則がどうなるか、必ずしも自明でないため興味を持たれる。

液体ヘリウム等の超流動状態は平均場近似が成り立てば Gross-Pitaevskii (GP) 方程式で記述される。我々は空間3次元 GP 方程式

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\nabla^2 \psi - \mu \psi + g |\psi|^2 \psi, \quad (1)$$

の直接数値シミュレーションを行って系の統計的性質の詳細を調べた。数値計算スキームとして、空間微分を FFT、時間発展を2次のシンプレクティック法 (スプリットステップフーリエ法) を使って計算している。さらに、方程式 (1) において波数 $k=2$ 以上のモードはカットオフするという条件で数値計算を行っている。これは、量子渦芯より小さな波長に対応するモードは熱的励起に変換するであろうという仮定に基づく近似である。

系のメッシュ数を 256^3 , 512^3 , 1024^3 , 2048^3 ($x = y = z = 1/8$) に対して行い、主に系のサイズに対する慣性領域の伸びの依存性を比較した。超流動乱流の計算においては循環が1種類で最低限必要な空間解像度の大きさは決まっているため、空間メッシュ (x) を固定しメッシュ数のみ増やしている。

系の初期条件としては、計算領域の各辺をそれぞれ8等分し、各点に乱数を与えそれを補間で滑らかにつないだ関数を初期位相として選んでいる。そのとき全ての点で、 $|\psi| = 1$ としている。数値計算ではその初期値から出発し、緩和過程 (減衰乱流) に対応するシミュレーション結果の解析を行っている。

Fig. 1 はそれぞれの緩和過程において、 $5/3$ 乗則の成り立つ領域 (慣性小領域) が一番長くなった状態でのエネルギースペクトル $E(k)$ をプロットしたものである。ここでのエネルギースペクトル $E(k)$ は仮想的な速度場

$$\mathbf{v} = \text{Im}[\psi^* \nabla \psi] / |\psi|, \quad (2)$$

の非回転成分のに対応したものである。Fig. 1 から系が大きくなるにつれて、慣性小領域が長波長方向へ広がっていくことがわかる。一方、短波長方向へはこぶのような形状が現れて $5/3$ 乗則からずれてしまっていることがわかる。これは通常の一様等方性乱流に見られない特徴である。講演ではこのずれの原因について考察を行いたい。

Fig. 2 は 1024^3 メッシュの数値シミュレーションにおいて、慣性小領域が一番広がった状態に対応した量子渦の分布図である。Fig. 2 では渦芯をプロットしている。渦の分布は一様でなく (自己相似的な) クラスター構造を作っているのが特徴的である。超流動乱流においては、循環が1種類の量子渦しか存在しないが、それらは絡まることで通常乱流の渦状態に似た状態を形成していることが判明した。

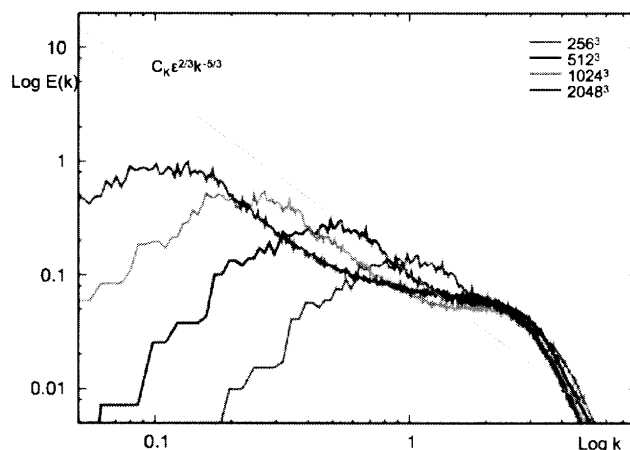


Fig. 1 エネルギースペクトル $E(k)$

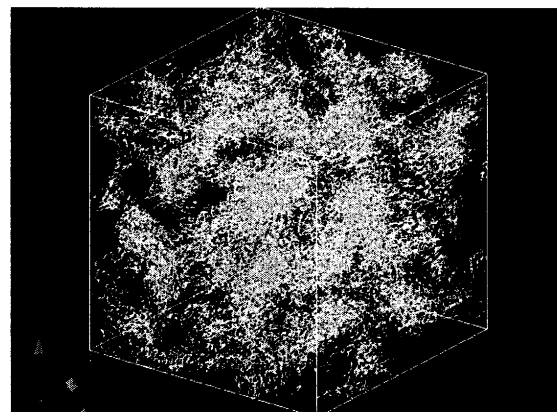


Fig. 2 量子渦の分布 [1024^3 の場合、渦芯プロット]