

ラグランジュ的視点から探る高分子による乱流変動とその物理機構

小井手祐介（名古屋大学）

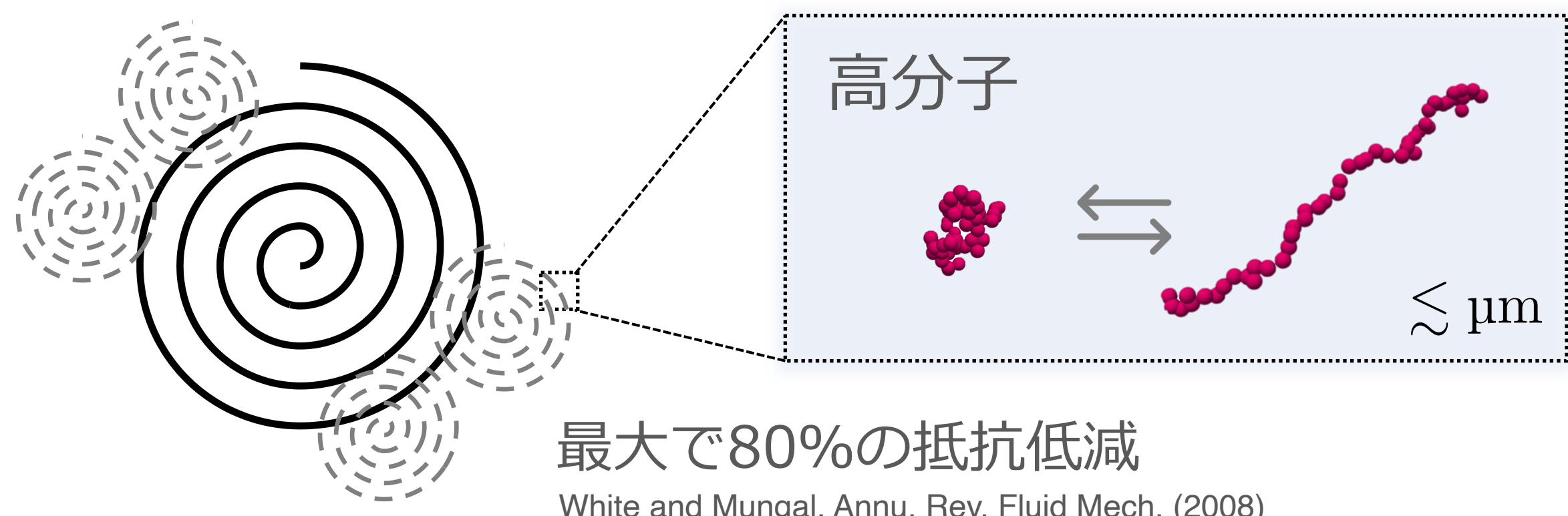
研究背景

高分子による乱流変動

Toms, Proc. 1st Int. Congr. Rheol. (1949), Lumley, Annu. Rev. Fluid Mech. (1969), Virk, AIChE J. (1975)

問題：乱流による摩擦抵抗の増加

▶1948年Tomsが高分子による乱流の抵抗低減を報告



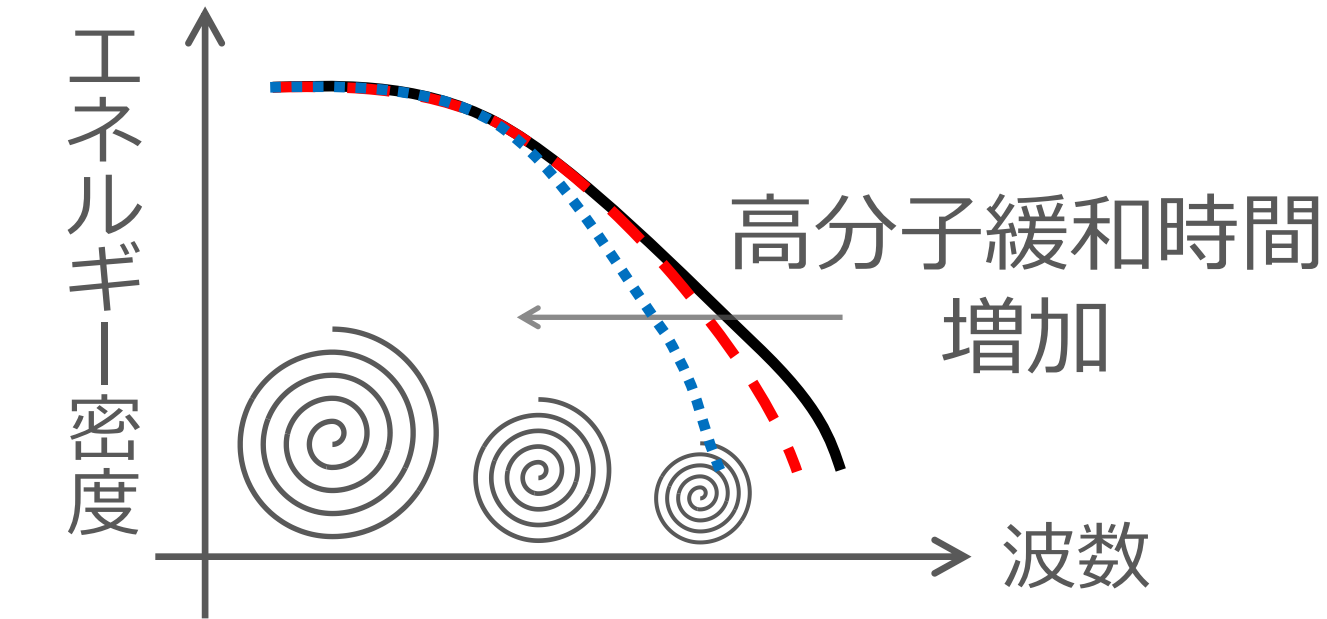
応用例：パイプライン，消防用放水設備，船舶

本研究の目的：高分子による乱流抑制の物理機構解明

現状：オイラー的な乱流変動に関する膨大な知見

オイラー統計

例：エネルギースペクトル



Valente et al., Phys. Fluids (2016), Rosti et al., Sci. Adv. (2023)

乱流中の渦構造



Stone et al., Phys Fluids (2004), Kim et al., J. Fluid Mech. (2007)

課題：ラグランジュ的な乱流変動の知見が不足

(1)：ラグランジュ速度

▶乱流の動力学，熱・物質輸送特性

(2)：高分子の形態のラグランジュ的追跡

▶高分子と乱流の動的な相互作用

数値計算手法

支配方程式：非圧縮性流体＋FENE-Pモデル

連続の式 $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

運動量保存 $\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right\} = -\nabla p + \mu^{(s)} \nabla^2 \mathbf{u} + \nabla \cdot \sigma^{(p)} + \mathbf{f}$

高分子応力 $\sigma^{(p)} = \mu^{(p)} [f(C)C - I]/\tau$, $f(C) = (L_p^2 - 3)/\{L_p^2 - \text{tr}(C)\}$

高分子形態 $\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) C - C \cdot (\nabla \mathbf{u}) - (\nabla \mathbf{u})^T \cdot C = -\frac{1}{\tau} [f(C)C - I]$



$\mu^{(s)}$ ：溶媒由来の粘度
 $\mu^{(p)}$ ：高分子由来の粘度
 τ ：緩和時間
 L_p ：最大伸長長さ

対象系

境界条件：3方向周期境界

外力：エネルギー注入率一定のランダム外力

格子点数： $N^3 = 512^3$

パラメータ： $Wi_\eta = \tau/\tau_\eta \in [0, 15]$
コルモゴロフ時間

数値解法

- 有限差分法
- SMAC法
- 拡張されたKurganov-Tadmorスキーム

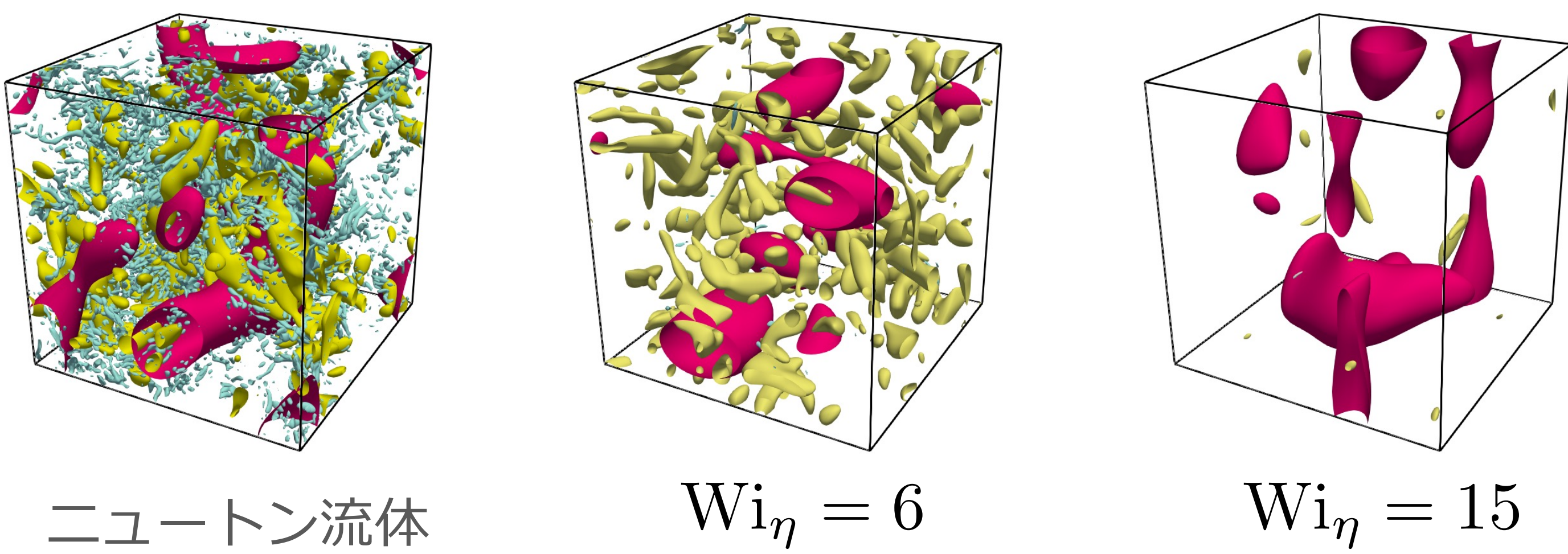
Vaithianathan et al., J. Non-Newtonian Fluid Mech. (2006)

これまでの成果

(0)：シミュレーションコード開発

渦構造の可視化

スケール分解したエントロフィーの等値面

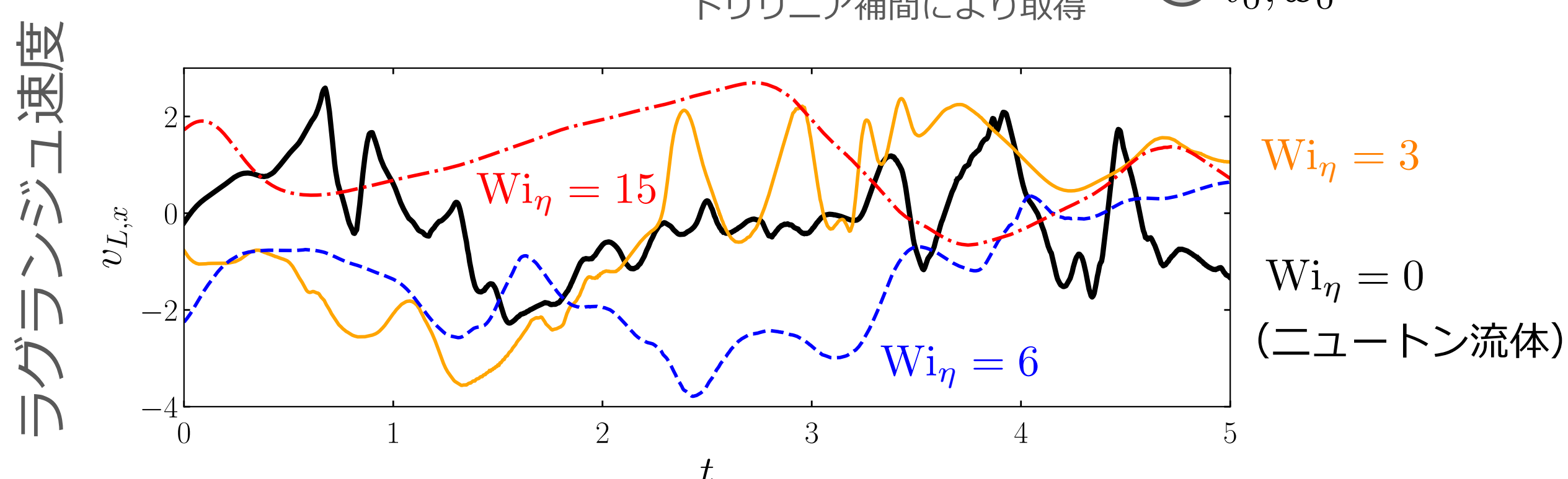


(1)：ラグランジュ速度のパワースペクトル密度

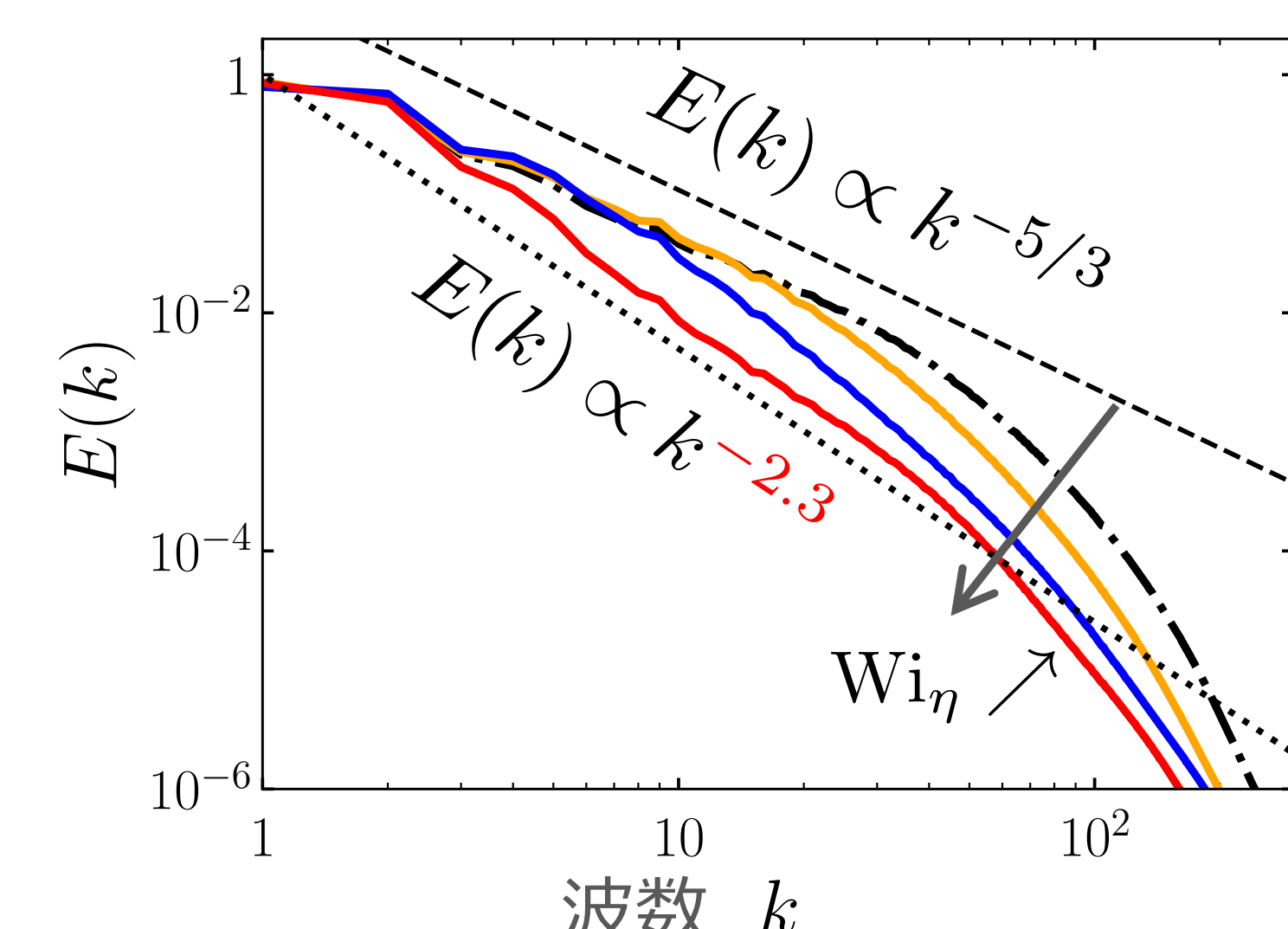
流体粒子の追跡

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_L(t|\mathbf{x}_0, t_0) = \mathbf{v}_L(t|\mathbf{x}_0, t_0) = \mathbf{u}(\mathbf{x}_L(t|\mathbf{x}_0, t_0), t)$$

ラグランジュ速度 オイラー速度
トリリニア補間により取得

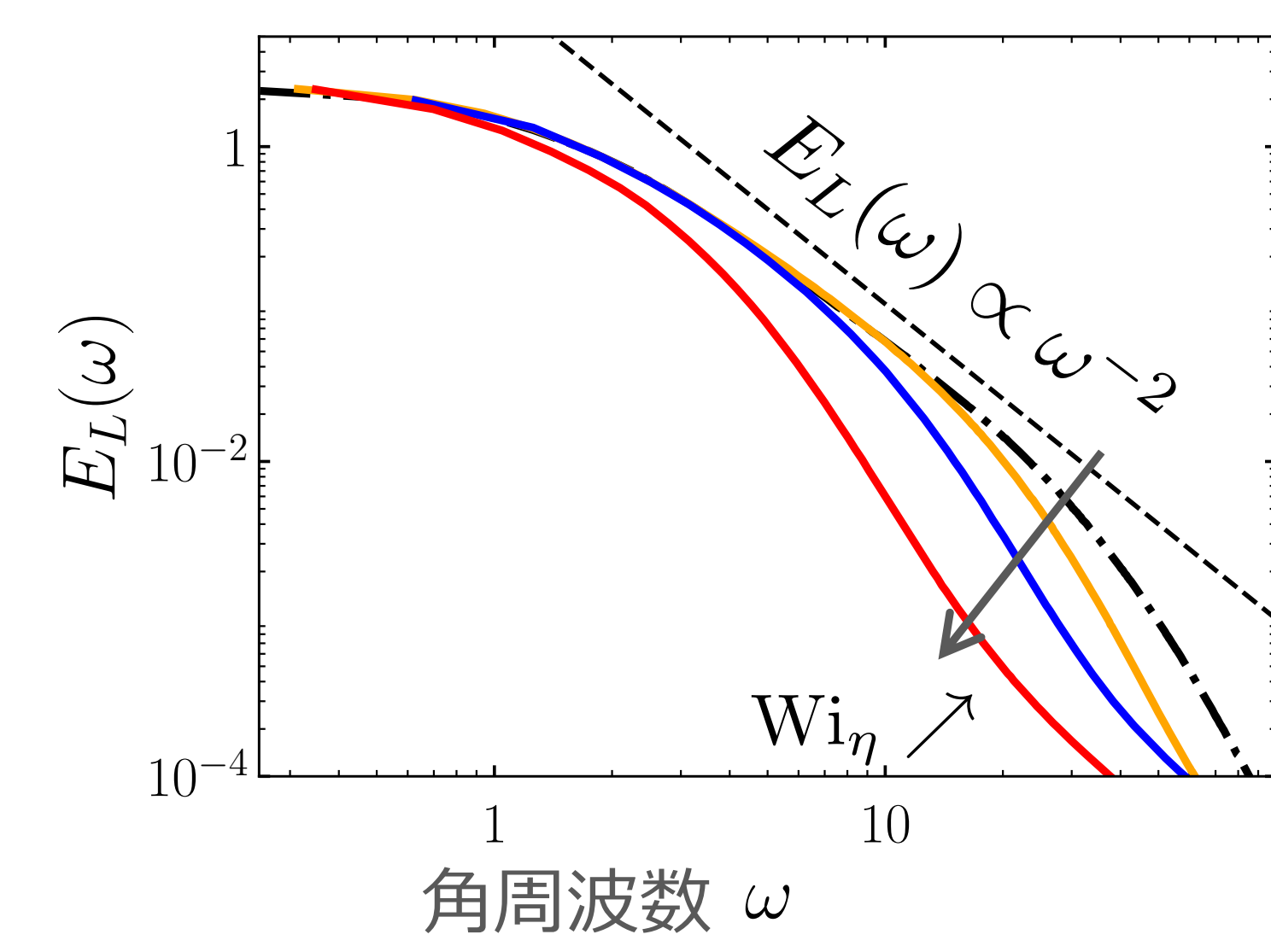


エネルギースペクトル



- 緩和時間の増加に伴い
小さな渦から抑制
- 高分子由来のべき則

パワースペクトル密度



緩和時間の増加に伴い
高周波成分から抑制



- 渦の階層構造との関係
- 高分子由来の関数形