

高レイノルズ数乱流現象解明のための計算・実験科学研究ネットワーク形成



1. 研究背景：高レイノルズ数乱流輸送現象の解明とその工学的応用

高レイノルズ数流れ 実在流れのレイノルズ数領域は図1に示す通り、非常に広範囲に及ぶ($Re_\tau = O(10^2 - 10^6)$). しかし現在の乱流モデルは高レイノルズ数特性を反映できていない (図4参照).

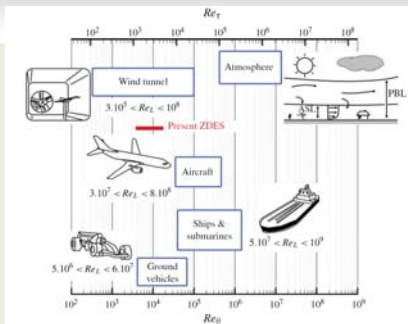


図1 実在流れのレイノルズ数とDNS研究. Deck et al. J. Fluid Mech. (2014) より引用. Re_τ : 摩擦速度(u_τ)と境界層厚(h)に基づくレイノルズ数

直接数値計算 高レイノルズ数流れのスケージング則を解明する上では、流れ場の最小スケールから最大スケール (図3参照) を直接計算する直接数値計算 (Direct Numerical Simulation, DNS) が最も有効である。

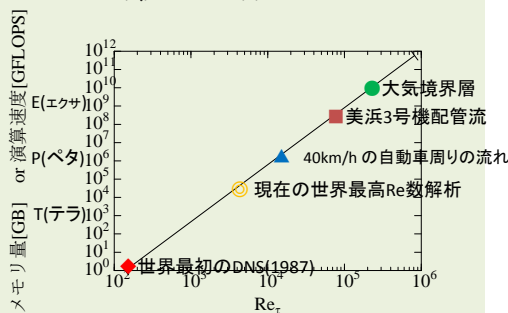


図2 DNSに必要な計算資源

技術的課題と問題点 乱流のDNSにおいては精度の観点からは、スペクトル法が最も最適であるが、近年の超並列スーパーコンピュータでは高効率演算が難しい (実行効率: 3%程度)。また日本は世界最高性能クラスのスーパーコンピュータ「京」及び「地球シミュレータ」を有するが、**1課題あたりの割り当て資源は、米国の1/5程度**であり、世界最大規模DNSの実行において障害となっている。

表1 チャンネル乱流場における世界最大規模DNS¹⁾

	Re_τ	L_x/h	L_y/h	L_z/h	$N_x(\Delta x^+)$	$N_y(\Delta y^+)$	$N_z(\Delta z^+)$	#grids	Numerical method	
1	Lee & Moser	5200	8π	2	3π	10240 (12.7)	1536 (0.5-0.3)	7680 (6.4)	0.12×10^{12}	Fourier + B-spline

1) Lee, Malaya, and Moser (2014), Petascale Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow on up to 786K Cores, SC13, <http://dx.doi.org/10.1145/2503210.2503298>.

- タイムステップ数: 650,000, 2.75[s/step], 665[Tflop/step]
- 計算コスト: 260 million core-hours¹⁾.
- IBM Mira の70%を20日間占有する規模
- 「京」一般公募の計算資源: 500万ノード時間
- 5万ノード使用 (全体の62%) の場合、100時間 ≈ 約4日間

本研究の目標 本研究では、世界最大規模のDNSデータベース構築及びその応用のための、計算科学・計算機科学・実験科学研究ネットワーク形成を目指す。

2. 研究内容

1) 世界最大規模直接数値計算コード開発

低容量・低計算負荷アルゴリズムの検討、通信及び演算のオーバラップ化、ハード特性に応じた通信手法の最適化 (目標: 実行効率: 15%以上かつ、60Tflop/s 以上の実行演算速度)

2) DNSデータベースポスト処理手法開発

想定するデータベースは、1物理量: 1.6[TB]に達し、その可視化及び乱流統計処理 (乱流モデル評価を含む) を効率的に実施するためのポスト処理手法を開発する。

3) 実験手法高度化

点計測手法における凍結乱流仮説の適用範囲の拡充、経験的固有関数直交法 (POD) による画像計測法 (PIV法) の高度化。上記を評価するために不可欠なDNSデータベースの時間・空間分解能の算出

3. 高レイノルズ数特性とその再現性

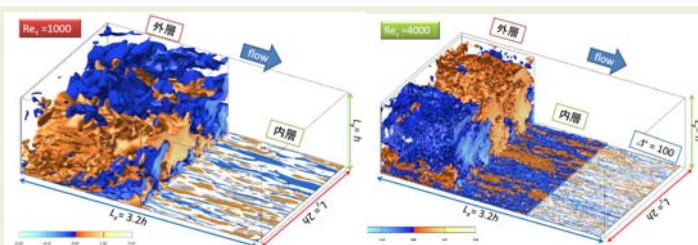


図3 高レイノルズ数チャンネル乱流場における階層構造

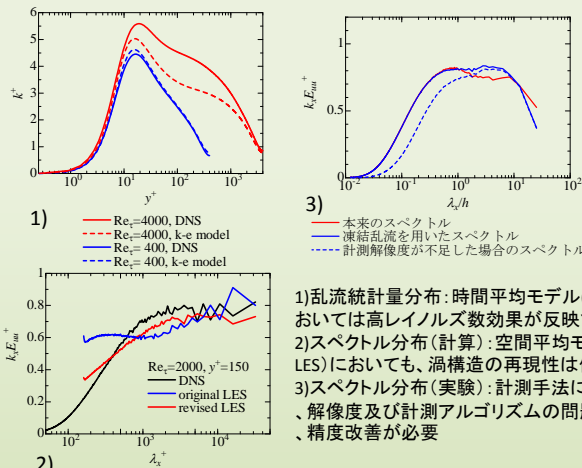


図4 現在の乱流モデル及び計測手法の問題点

- 1) 乱流統計量分布: 時間平均モデル(RANS)においては高レイノルズ数効果が反映できない
- 2) スペクトル分布 (計算): 空間平均モデル (LES) においても、渦構造の再現性は低い
- 3) スペクトル分布 (実験): 計測手法においても、解像度及び計測アルゴリズムの問題により、精度改善が必要