

原子炉炉心稠密燃料集合体サブチャンネル内 冷却材直接乱流シミュレーション

平成18年1月6日

東京工業大学大学院
二ノ方 寿、奥村 剛征、Emilio Baglietto

日本原子力研究所
叶野 琢磨

テーマ概要

DNSによる数値乱流
データベースの構築



■ 複雑形状流路内乱流局所現象解明



■ 複雑形状流路内平均流速場
(RANS)乱流モデル改良



平均場乱流モデル改良
(RANSコード)

⇒ 全集合体乱流解析へ

背景

- 集合体内乱流微細構造データの不足
- 計測の限界
- DNS手法の限界の把握とCFDコード援用
- 局所DNS計算による乱流統計量分析
- RANS乱流モデルの係数調整の根拠付与
- LES解析コードへの情報提供
 - サブグリッドスケールモデル
- CFDコードによる全バンドル体系計算

DNSによる局所乱流詳細解析

- 計算格子: 非等間隔スタガード格子

- 空間差分

- 対流項: 2次精度Consistentスキーム
- その他の項: 2次精度中心差分

- 時間差分

- 2次精度Adams-Bashforth法

- 壁近傍粘性底層の細分化

- 非等間隔格子

$$\frac{y_j}{2\delta} = \frac{1}{2}(b-1) \left[\frac{a^{2j/N_y} - 1}{a^{(2j/N_y - 1)} + 1} \right], \quad j = 0, 1, 2, \dots, N_y$$

$a=(b+1)/(b-1)$ 、 $b=1.05$ 、 N_y は壁面垂直方向の格子数。

- 曲線座標系への拡張

- カートesian座標系から曲線座標系への変換
- 可能な限り直交曲線とする

- 無限本数燃料集合体体系を仮定した計算による計算能力の検証

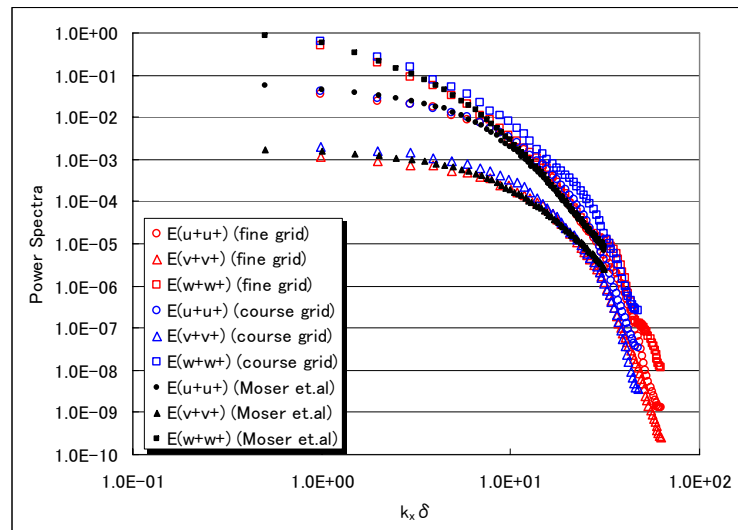
- 実験結果との比較検証
- 他の手法との相対的比較

エネルギースペクトル

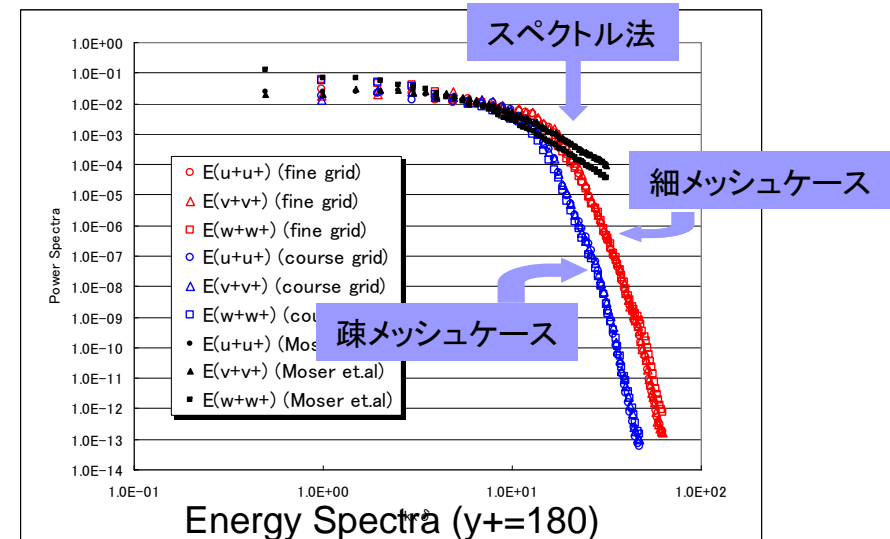
- 平行平板内流路壁近傍および乱流コア -

	計算体系	メッシュ数	Δx^+	Δy^+	Δz^+	$Re \tau$
細ケース	$3.2 \delta \times 2.0 \delta \times 6.4 \delta$	$128 \times 128 \times 128$	4.5	1.0~4.4	9	180
疎ケース	$3.2 \delta \times 2.0 \delta \times 6.4 \delta$	$75 \times 54 \times 96$	7.7	1.0~13.9	12	
Moser et al.	$4 \pi \delta \times 2 \delta \times 4/3 \pi \delta$	$128 \times 129 \times 128$	9.7	※7.2	4.8	

※channel中央での格子解像度



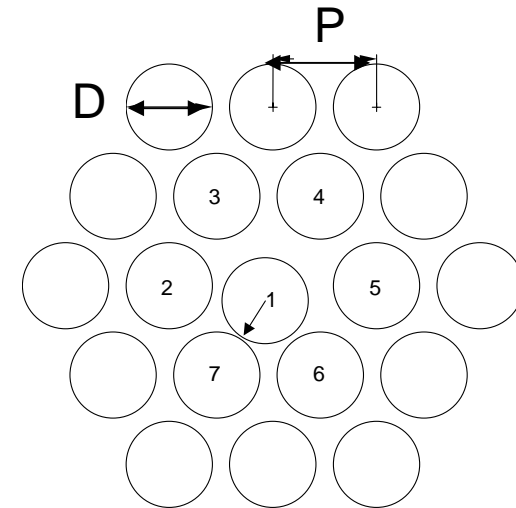
Energy Spectra (y+=5)



- 乱流境界層近傍は良好であるが、乱流コア部分は疎メッシュのため高周波成分のエネルギー散逸

稠密格子

- 原子炉炉心の冷却材(中性子減速材)の体積割合小⇒中性子のエネルギースペクトル硬:低減速炉心、高速炉
- $P/D < 1.1 \sim 1.2$
- 内部転換比高:長寿命炉心
- 冷却能力の確認



実体系燃料ピンバンドル例

曲線座標系への拡張

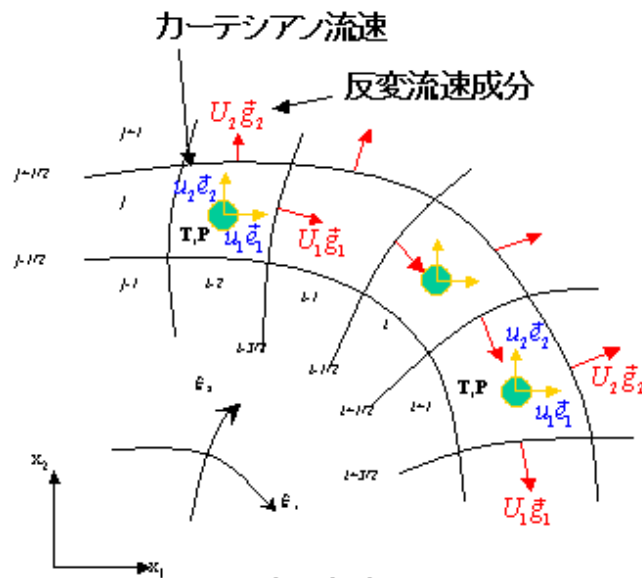


図1 コロケート格子

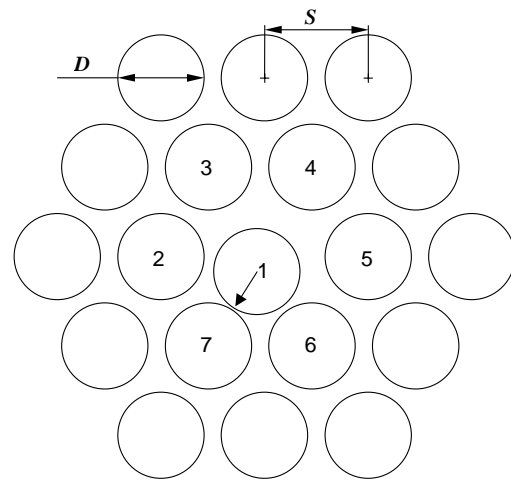
定式化

- 反変流速成分 $U^i = J \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} u_j$
- 質量保存式 $\frac{\partial U^i}{\partial \xi_i} = 0$
- 運動量保存式 $\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{J} U^j \frac{\partial u_j}{\partial \xi_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \frac{\partial P}{\partial \xi_j} + \frac{\mu}{\rho J} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left(G^{jk} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_k} \right)$
- エネルギー保存式 $\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{J} U^j \frac{\partial T}{\partial \xi_j} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left(G^{jk} \frac{\partial T}{\partial \xi_k} \right)$

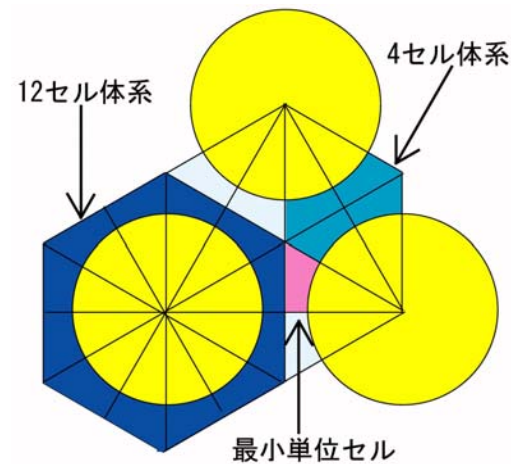
- 手順1. 格子中心において、対流項、粘性項より、仮の流速場を求める。
- 手順2. 格子境界において、仮の反変流速を、仮の流速場より補間して求める。
- 手順3. 圧力ポアソン式を解く
- 手順4. 求めた P^{n+1} より、新しい時間における反変流速と流速場が修正されて求まる。

無限大本数燃料集合体計算

- 12セル体系
- 周期境界条件: 上下流入流出面および側面

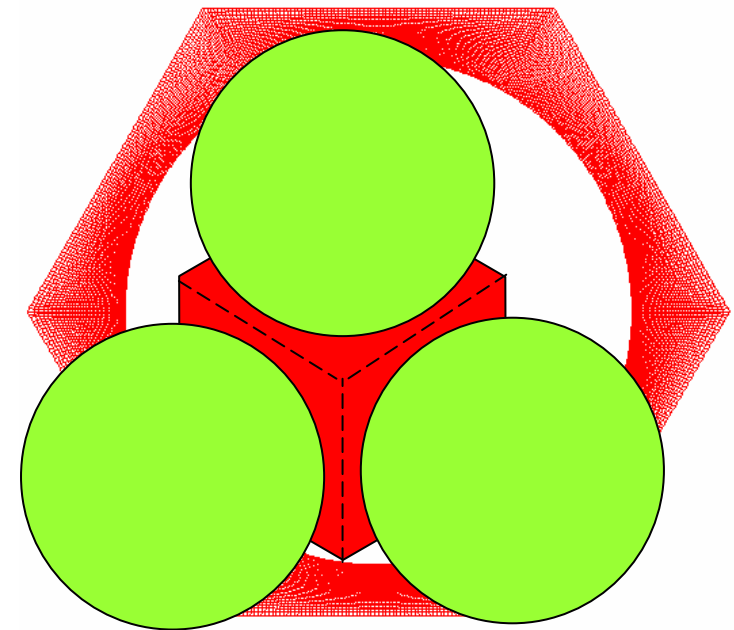


実体系燃料ピンバンドル例



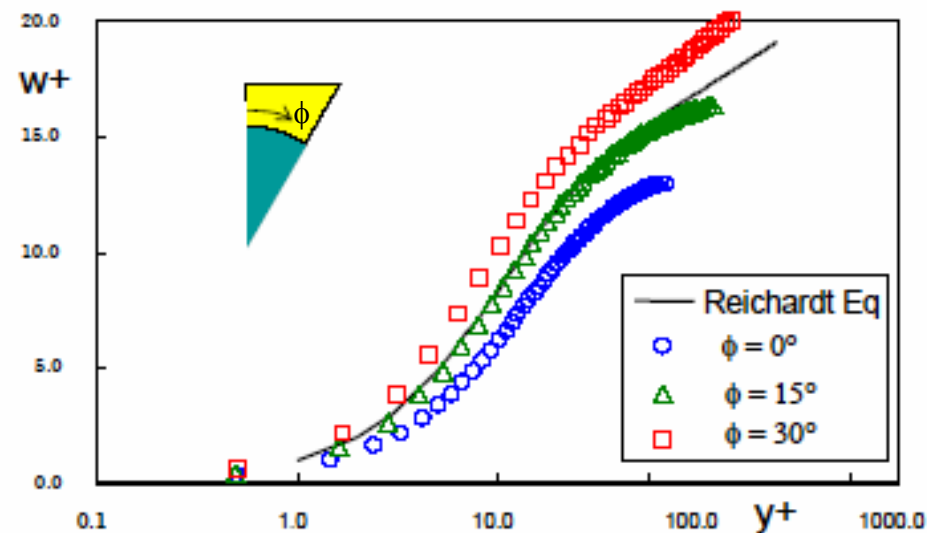
燃料ピン無限体系計算セル

Equivalent to



燃料ピン無限体系計算12セル計算格子(例)

軸方向流れ流速分布



DNSと壁関数による流速分布の比較
($P/D=1.05$; $Re=9,500$)

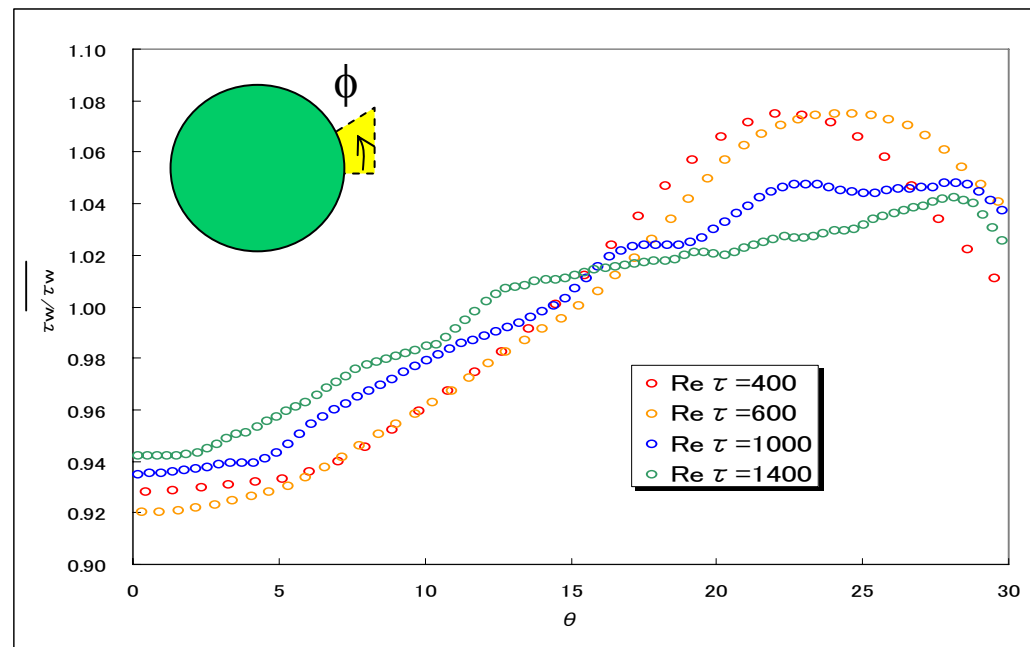
- 速度分布が周方向位置により異なる
- RANSコードにおける壁関数モデル適用性の問題点

壁せん断応力Re数、P/D依存性－1

- 壁せん断応力の計算値は壁際の速度分布に極めて敏感 \Leftrightarrow DNS結果の妥当性評価の指標
- 同一P/Dに対し、Re数減少させると(23,000 \rightarrow 6,000) :
 - $\tau_w / \tau_{w,av}$
 - 比較的一様な分布から最大と最小値の差大となる
 - $\tau_w / \tau_{w,av}$ 形状
 - Re=23,000と16,000で略同一 \Rightarrow 高Re領域での傾向 (参考:実験データ)
 - Reが低くなると形状変化が顕著となる:局所的層流と乱流の相互作用
- 実験事実: Re=23,760から56,000に増加させても形状は略一定(ただし低Re領域データは存在しない)

P/D 一定 (=1.2)、Re変化 (6,000~23,000)

壁せん断応力



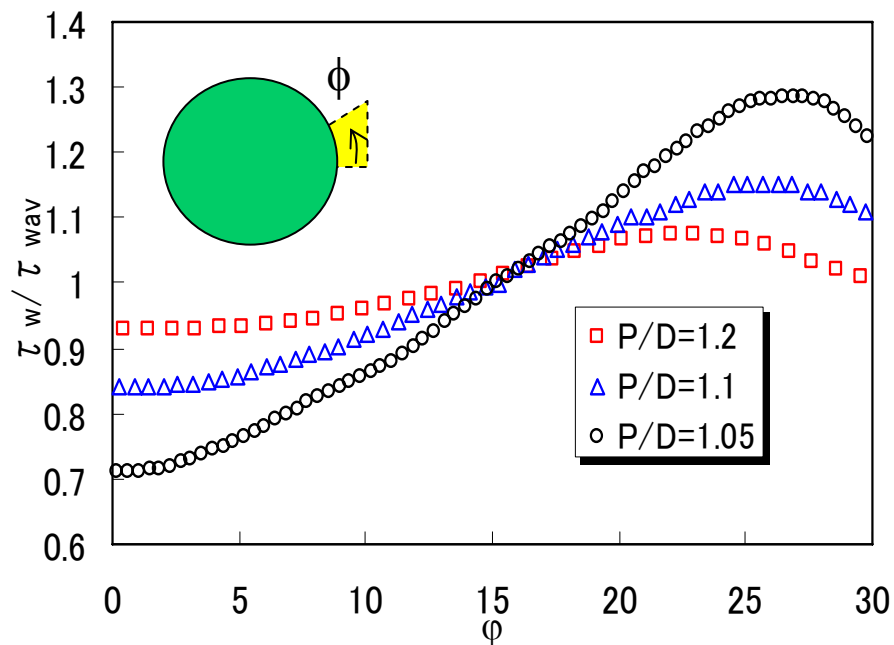
壁せん断応力分布のRe依存性 (P/D=1.2)
Re=6,000, 9,500, 16,000, 23,000

壁せん断応力Re数、P/D依存性－2

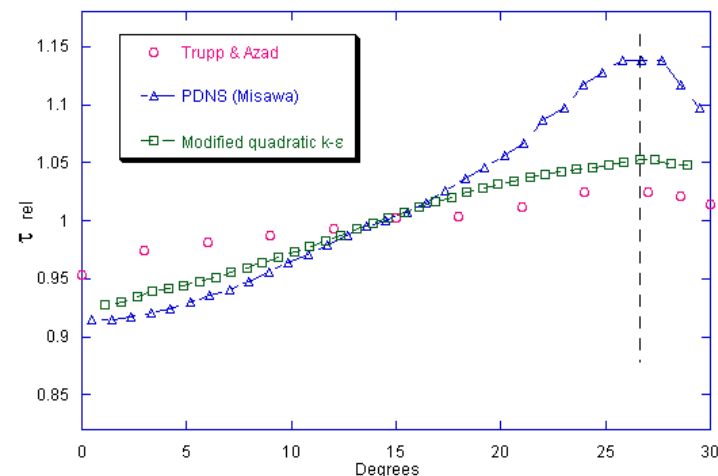
- Re数(一定)、P/D減少(1.2⇒1.05)の場合：
 - $\tau_w / \tau_{w,av}$ 増加
 - P/D=1.2 からP/D=1.1では急速な増加
 - より稠密になるP/D=1.05では、 $\tau_w / \tau_{w,av}$ の増加割合は減少する

Re一定(6,000)、P/D変化(1.2、1.1、1.05)

壁せん断応力



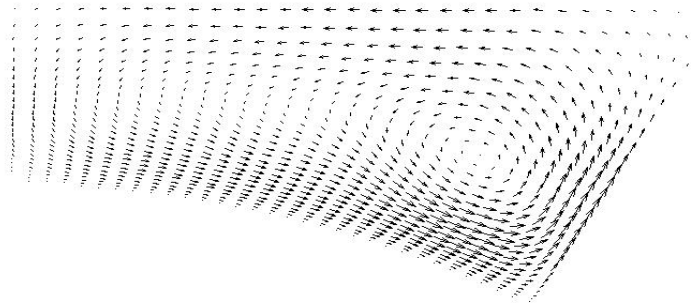
壁せん断応力分布のP/D依存性 (Re=6,000)



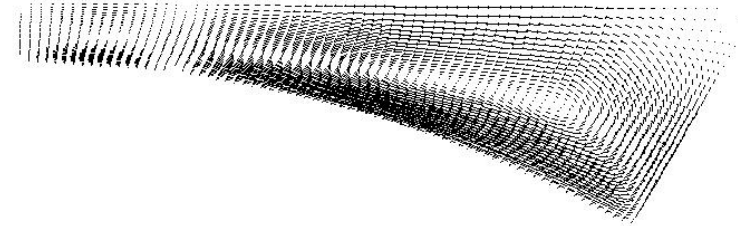
参考: P/D=1.2 Trupp et al
による実験値 (Re=24,000)
 $\phi=25^\circ$ 近傍にピークあり; 左図は
低Reであるが、傾向を再現

2次流れ分布による考察－1

- 同一Re数(6,000)に対する二次流れ分布形状の比較
(分布は十分長時間の平均)



P/D=1.2

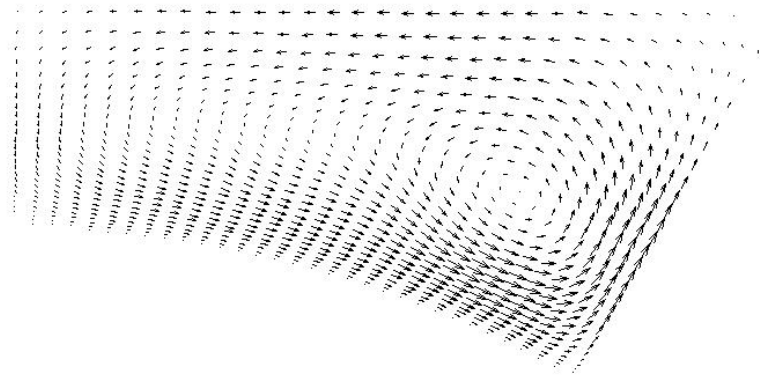


P/D=1.05

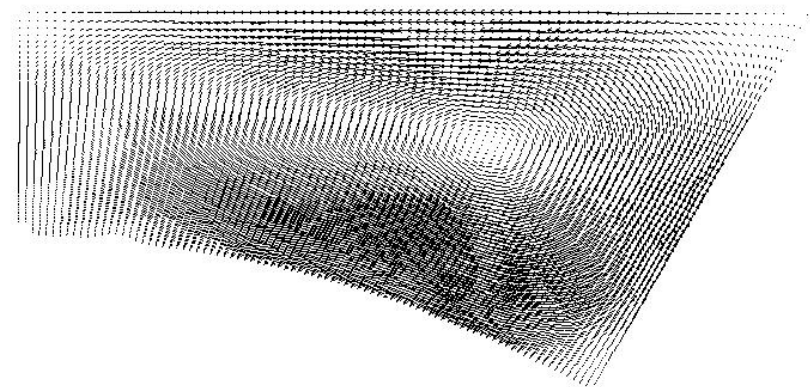
- P/D=1.2: 軸方向流速分布が壁近傍で発生した渦の影響をより強く受ける
- P/D=1.05: 壁の影響をより強く受けるため軸方向流速勾配が相対的に大きくなっていると考えられ、ギャップ領域での $\tau_w / \tau_{w,av}$ の増加が緩やかな原因となっている。
- 稠密格子の場合: 二次流れ以外のモメンタム輸送が考えられる。

2次流れ分布による考察－2

■ 同一P/D (1.2)に対する二次流れ分布形状の比較



Re=6,000




Re=2,3000

- 高Reでは安定な渦が形成
- P/D = 1.05に対する二次流れ分布形状の比較実施 ⇒ より顕著なRe数依存性が予想される
- 計算資源の最大活用



DNSによる現象の解明

- 実験的に取得が困難なデータのDNSによる供給の可能性が示された
- DNSによって、初めて稠密格子内局所乱流および低Re乱流領域における特性が示された
- 実験的に未踏の分野であり、今後、本DNSの検証が重要
- そのためには他のDNSによる比較検証、可能であれば実験的な検証が望まれる



今後の予定:

複雑形状流路内乱流データベースの構築

- 無限大本数ピンバンドルのサブチャンネル内乱流
DNS継続とデータベース化(P/D、Re)
- 偏心二重管内乱流DNSの実施(本年度)
- RANSモデル構築へのフィードバック(来年度予定)



結論

- DNSが得意とする低Re乱流領域は実験データが稀有であり、実験とDNSは相補的な意味を持つ
- サブチャンネル乱流データベース構築継続
- DNSデータ検証継続
- 稠密格子内高Re乱流、フローパルセーションの解明には、DNS計算負荷が問題、計算効率のさらなる向上が必要(ハード依存性大)
- 今後、二重管流路内乱流データを取得・分析し、RANS乱流モデル改良に資する
- RANSコードによる集合体解析の信頼性向上とDesign-by-Analysis手法の実用化