

jh140011-NA08

高 Re 数壁乱流における大規模組織構造の動力学と物質輸送に果たす役割の解明

辻 義之 (名古屋大学)

高レイノルズ数壁乱流中の大規模組織構造が運動量や物質の輸送に果たす役割を数値計算データの解析を通して明らかにする。可視化手法に基づく、現象の理解を進める。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

名古屋大学情報基盤センター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

辻 義之：研究の総括
山本義暢：数値計算の実施及び解析
石井克哉：計算アルゴリズムの改善
荻野正雄：計算結果の可視化
高橋一郎：計算結果の可視化
恒吉達矢：物理実験・データ統計処理
佐野正幸：計算データ統計処理
猿渡祥悟：計算データ統計処理

2. 研究の目的と意義

壁面に沿って発達する流れ(乱流境界層)には、様々な長さスケールを有する渦構造(組織的構造)が存在することが古くから知られ、境界層中の乱れエネルギーの生成や散逸に重要な役割をはたしている。近年、直接数値計算(DNS)の結果から、スパン方向へ時空間的に揺らぎながら、流れ方向へ 20δ (δ は境界層厚さ)程度の大きさをもつ構造が対数領域から粘性低層に存在することが、豪州の研究グループにより報告されている。このようなスパン方向への運動を含み、流れ方向へ大きなスケールを持つ構造は、従来の組織構造の概念を超えるもので Super Structure(SS と略記する)と名付けられた。SS は乱流境界層中の平均速度プロファイルのみならず、運動量やエネルギーの輸送にも大きな影響を与えることが予想される。申請者はこれまで、凍結乱流仮説に基づき実験的に SS を抽出する方法の妥当性を DNS との対比から考察してきた。本年度からは、SS が壁乱流で果たす役割の具体的な描像を明らかにしたい。壁近く

での物質輸送(熱、スカラー)や運動量輸送には、SS の時空間内での運動が関連していると予想される。また、対数領域における SS が壁近くへ及ぼす影響を明らかにする。SS は壁近くのストリークの相互作用から壁面でのせん断応力生成への関与も指摘されている。その過程を明らかにすることから、壁面でのせん断応力の低減方法について考察する。高レイノルズ数流れ場での物理実験と数値計算との比較を重視すること、数値計算における大規模データの可視化方法、計算アルゴリズムの高速化を併せて実施し、異分野研究の相互の利点を生かした研究を実施する。

Super Structure(SS)が注目された背景には、SS が対数領域や外層の構造が壁近く粘性低層まで影響を及ぼしていることが、数値計算による詳細な可視化画像から明らかにされたことによる。一方で、実験計測においても粒子画像計測法(PIV法)のソフト面およびハード面での進展により、SS の可視化が進められている。SS の長さスケールやゆらぎの大きさ、発生頻度なども詳しく調査できる段階に差し掛かっている。SS が数値計算のみで確認されるものではなく、実際の乱流場においても実在すること、その空間スケールが境界条件の影響をどのように受けるか、初期条件への依存性を調査する。壁乱流中の組織構造は、長く「盲人象を評す」の寓話に例えられるように、明確な描像は得られていない。SS の挙動を明らかにすることは、壁乱流中の組織構造に対する新たな知見を与えてくれる。また、SS が壁近くの壁面せん断応力や物質輸送に果たす役割を数値的に明らかにすることは、摩擦抵抗の低減、効率的な熱輸送の手段を開発することにつながる。基礎物理の観点からは、普遍的な平均速度分布が形成される要因、カルマン定数との関連を議論できると期待される。高レイノルズ数実験と数値計算を並行して行い、SS に関してその両者を詳細に比較した研究は皆無であり、測定精度の向上や数値境界条件の取り扱いに関する進展が期待される。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

申請者の大半が同一の大学に所属するため、基盤センターとの情報交換が親密にできた。トラブルへの対応、研究上の問題解決への議論、ならびに有益なアドバイスを適宜に得ることができ、スムーズに研究を遂行することができた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

大規模数値計算の結果に基づき、凍結乱流仮説の検証および検証に必要となる実験データとの整合性を整えるために必要となる項目の精査をおこなってきた。図 1 には流れ方向速度 PMS の等値面を示した。内層変数での無次元化時間 T^+ は、スペクトルの計算に要した時間である。無次元化時間の増加に伴って、外層の等値面がより明確に構成されることが分かる。これは、大規模構造 SS の抽出、統計量を安定させるためには、当初予定していた以上の長時間の時系列データが必要となることが明らかになった。

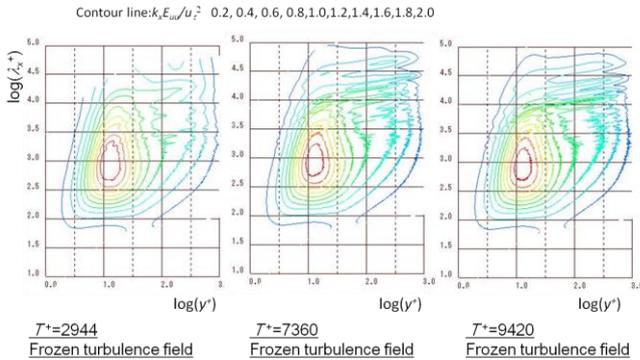


図 1 流れ方向変動速度の PMS 無次元化時間の影響が外層に現れている。

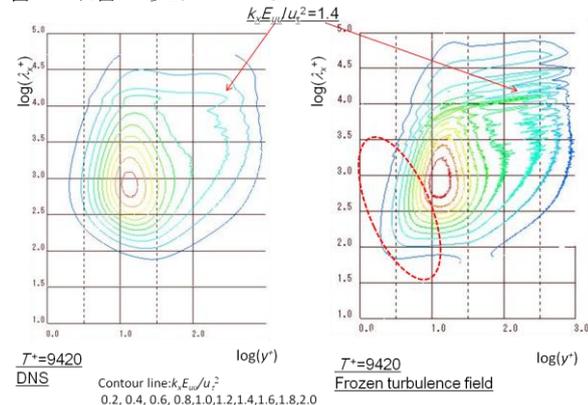


図 2 流れ方向変動速度の PMS 凍結乱流仮説の検証、壁近く（波線の領域）では、両者の差異が認められる。外層では、統計量が安定しないため、仮説の検証にはより長時間の時系列データの取得が必要である。

図 2 には、現状の最も長い時系列データを使用した際の凍結乱流仮説の検証結果を示す。内層付近では、PMS は十分に統計的にも安定に計算されて

いると考えられる。従って、両者の相違は、凍結乱流仮説が正確には成り立たない、もしくは現状で用いている対流速度が適切ではないことが考えられる。また、外層付近では、時系列データを用いたスペクトルが統計的に収束しているとは考えられない。従って、凍結乱流仮説の検証には、より長時間の時系列データの取得が必要である。

直接数値計算と同一条件の実験データとの比較から、両者の統計量がよく一致することを確認した。実験データの解析から、スペクトルが終息するために直接数値計算に必要となる時間の見積もりを行った。

本申請課題では、計算科学・大規模可視化の研究者との協力体制を築き、実験結果及び大規模データベースを用い、組織構造の抽出を介して、エネルギー輸送、壁面でのせん断応力の瞬時変動との関連を引き続き調査する。図 3 には、組織構造の可視化を示した。圧力が負圧になる領域の等値面と、流れ方向速度の大きさ（カラー表示）との関連が認められ、壁近くではストリークが確認できる。可視化に関しては、大規模データベースの取り扱いを引き続き検討する。

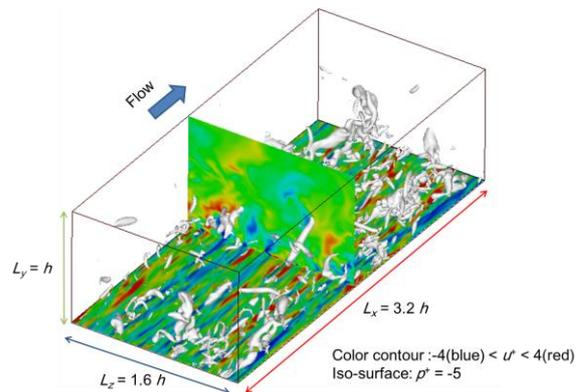


図 3 組織構造の可視化

直接数値計算コードに関して、高レイノルズ数効果が卓越するといわれている乱流レイノルズ数 8000 程度への拡張を視野に、ペタフロップス級超高速演算/超大規模データベース統計解析・大規模可視化への道筋をつけた。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 DNS データベース

・解析対象と基礎方程式

本研究における直接数値計算の解析対象は、一定の圧力勾配で駆動される 2 次元チャンネル乱流場である(図 5.1)。基礎方程式は、非圧縮性流体の運動方程式、連続式及びパッシブスカラを仮定した温度場の輸送方程式である。

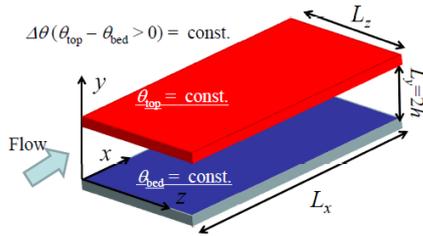


図 5.1 計算体系と座標系

・直接数値計算手法

擬スペクトル法に基づき数値計算を行った。空間離散化手法は、主流及びスパン方向にフーリエスペクトル法、壁垂直方向に 2 次精度の中心差分を使用し、主流及びスパン方向へのエイリアジング誤差は位相シフト法によりこれを除去した。時間進行は、対流項に 3 次精度 Runge-Kutta 法、粘性項に Crank-Nicolson 法、圧力項に Euler 陰解法を使用した。境界条件は、主流及びスパン方向に周期境界条件、壁面で no-slip 条件を課した。温度場に対しては壁温一定(上壁温度: θ_{top} > 下壁温度: θ_{bed})とし、主流及びスパン方向には周期境界条件を課した。

・計算条件

計算条件は、摩擦速度 u_τ とチャンネル半幅 h に基づくレイノルズ数 $Re_\tau = u_\tau h / \nu = 150, 1000$ 、温度場のプラントル数 Pr は 5 とした。表 5.1 に主流、壁垂直、スパン方向(x, y, z)の計算領域(L_x, L_y, L_z)、格子点数(N_x, N_y, N_z)、格子分解能($\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$)を示す。なお、上付き添え字の+は摩擦速度と動粘性係数により規格化した値であることを示す。

Table 5.1 計算条件(DNS データベース)

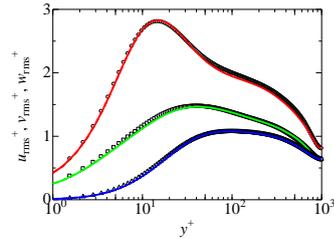
Re_τ	Pr	$L_x/h, L_y/h, L_z/h$	N_x, N_y, N_z	$\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$
150	5	51.2, 2, 8.0	432,182,144	17.8, 0.5-2, 8.3
1000	5	12.8, 2, 6.4	720,512,720	17.8, 0.6-8, 8.9

・計算精度の確認

本データベースの計算精度保証するために、解像度及び計算領域を変化させた解析を行った。解像度の影響を調べるためにコルモゴロフスケールをほぼ解像する Full Turbulence Simulation (FTS) のケース、計算領域の妥当性を調べるために主流及びスパン方向に大規模計算領域を確保したケースの 2 ケースとの比較を行った。この計算条件を表 5.2 に示す。

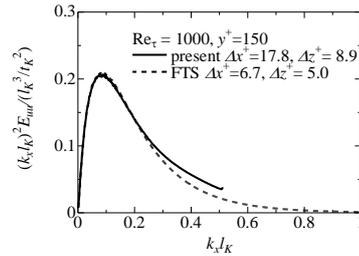
Table 5.2 計算条件(解像度及び領域依存性評価)

Re_τ	$L_x/h, L_y/h, L_z/h$	N_x, N_y, N_z	$\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$
1000	12.8, 2, 6.4	1920,1032,1280	6.7, 0.5-2, 5.0
1000	51.2, 2, 8.0	3200,1032,1152	16.0, 0.5-2, 6.9

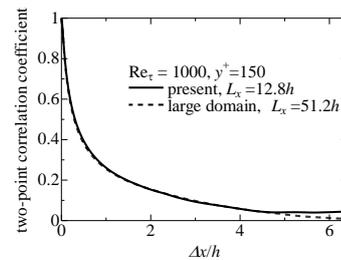


Symbol: \circ u_{rms}^+ , \triangle v_{rms}^+ , \square w_{rms}^+
 line: present, $\Delta x^+=17.8, \Delta z^+=8.9, L_x=12.8h, L_z=6.4h$,
 FTS, $\Delta x^+=6.7, \Delta z^+=5.0, L_x=12.8h, L_z=6.4h$,
 dot-line: large domain, $\Delta x^+=16.0, \Delta z^+=6.9, L_x=51.2h, L_z=6.9h$.

(1)乱流強度分布



(2) 散逸スペクトル



(3) 2 点間相関

図 5.2 解像度及び計算領域の妥当性

図 5.2 に解像度及び計算領域の影響を示す。図 5.2(2)に示すコルモゴロフスケール(コルモゴロフ長: l_K , コルモゴロフ時間: t_K)で規格化した散逸スペクトルは、最小スケール渦の再現性を示している。ここに k_x は x 方向の波数である。FTS のケースはコルモゴロフスケールを十分に解像していることが確認できる。この FTS の結果と本研究の DNS 結果を比較すると、 $k_x l_K > 0.4$ ぐらいから過剰評価の影響が少し見られるものの、散逸ピーク($k_x l_K = 0.1$)を含め良好に一致している。

図 5.2(3)は主流方向への 2 点間相関の比較を示す。大規模な計算領域($L_x = 51.2h$)を確保したケースと比較すると、本 DNS 結果は最大渦付近でわずかな差異が確認できるものの、全体的には良好に一致している。

従って、本研究の DNS において、解像度及び計算領域の影響は少ないと考えられる。実際、図 5.2(1)に示す乱流強度分布を比較すると、各ケース間において差異はほとんど見受けられないことがわかる。

・渦領域の定義

本研究では渦構造の定義として、式(5.1)に示す速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q が正 (> 0) となる領域を用いた。

$$\begin{cases} W_{ij} = \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \Omega_{ij} + S_{ij}, \\ \Omega_{ij} = (W_{ij} - W_{ji})/2, S_{ij} = (W_{ij} + W_{ji})/2, \\ 2Q = W_{ij}W_{ji} = \Omega_{ij}^2 - S_{ij}^2 = \Delta(p/\rho). \end{cases} \quad (5.1)$$

ここに W_{ij} は速度(乱流成分)勾配テンソル, Ω_{ij} は渦度テンソル, S_{ij} は変形速度テンソル, Q は速度勾配テンソルの第 2 不変量, p は変動圧力, ρ は密度を示す. つまり $Q > 0$ の領域は渦度成分が散逸成分を上回っている領域を意味する. この Q 値は式(5.1)に示すように, 圧力のラプラシアンから求めている.

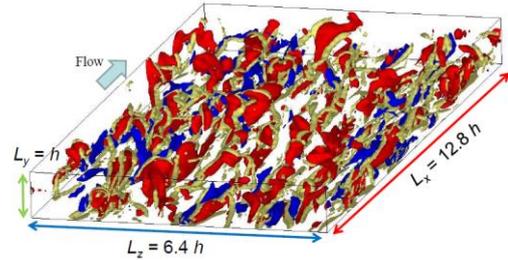
・渦構造の可視化方法

Robinson (1991) は圧力の低圧領域及び速度場の ejection ($u < 0, v > 0$)及び sweep ($u > 0, v < 0$)領域を可視化し, ejection 運動に誘起されたヘアピン上の構造(低圧領域)の存在を示している. 本研究の第 2 不変量に基づく渦定義においても同様の構造が出現するかについて検討を行った.

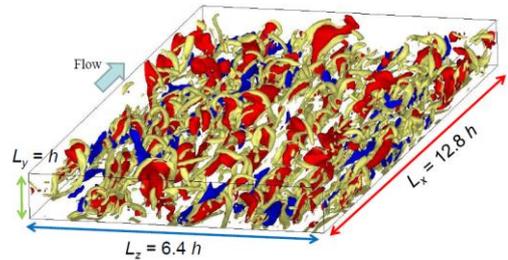
図 5.3(1)に $Q^+=0.02$ の等数値面(渦構造:黄色)及び $-u^+v^+(u < 0, v > 0) = 4.0$ の等数値面(ejection 領域:赤), 同様に $-u^+v^+(u > 0, v < 0) = 4.0$ の等数値面(sweep 領域:青)の可視化結果を示す. Robison の結果と同様に赤色で示した ejection 領域にまわりつく渦構造の存在が確認できる. しかしながらその渦構造は断片的で 3 次元的な構造が不鮮明であった. この原因としては可視化ソフトで等数値面を描画する際に, スペクトル法で計算された高解像度の空間微分が反映できないことが要因であることが判明した. そこで渦構造の可視化においては, 可視化ソフトにおける等数値面描画の計算精度に合わせたデータ補間を行った.

具体的には, Q 値に対し, 2 次元フーリエ変換を行い高波数成分に 0 を埋め込み, フーリエ逆変換により物理空間に戻すデータ補間を行った(空間解像度: $\Delta x^+=4.4, \Delta z^+=4.4$).

この補間した場合の可視化結果を図 5.3(2)に示す(図 5.3(1)と同時刻). データ補間を行うことにより, 本来の渦構造が明確に確認できるようになっていることがわかる. 従って本研究では, 可視化用の渦構造の補間を実施した.



(1) オリジナルデータ (Q 値: $\Delta x^+=17.8, \Delta z^+=8.9$)



(2) 補間データ (Q 値: $\Delta x^+=4.4, \Delta z^+=4.4$)

図 5.3 渦構造の可視化 $Q^+=0.02$ の等数値面(黄色), $-u^+v^+(u < 0, v > 0) = 4.0$ の等数値面(赤), $-u^+v^+(u > 0, v < 0) = 4.0$ の等数値面(青)

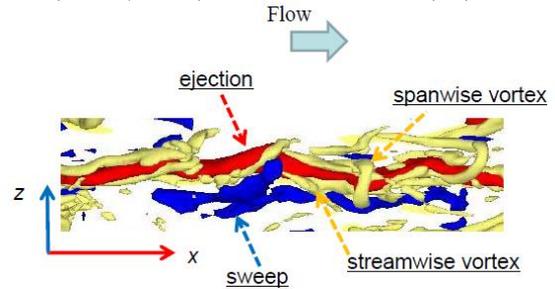
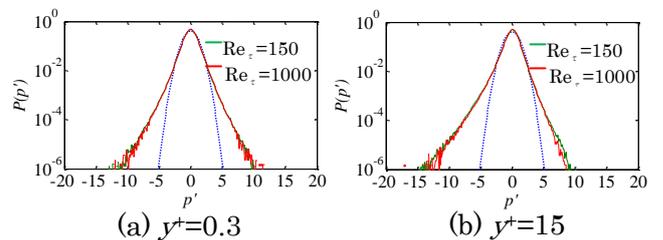


図 5.4 壁乱流における典型的な組織渦構造

図 5.4 に壁乱流における典型的な渦構造を示す. 流れ方向に軸を持つ縦渦(streamwise vortex)は ejection (低速ストリーク)と sweep (高速ストリーク)の間(速度せん断層間)に形成され, スパン方向に軸を持つ横渦(spanwise vortex)は低速ストリークの揺らぎに伴い ejection を跨ぐような感じで形成される.

5.2 流動場の統計解析

図 5.5 には, $Re_\tau = 150, 1000$ の時の壁面からの距離を変えたときの変動圧力の確率密度関数(PDF)を示す. プライムは標準偏差 σ で規格化したことを示している ($p' = p/\sigma$). 破線の放物線は分散 1 のガウス分布を示す.



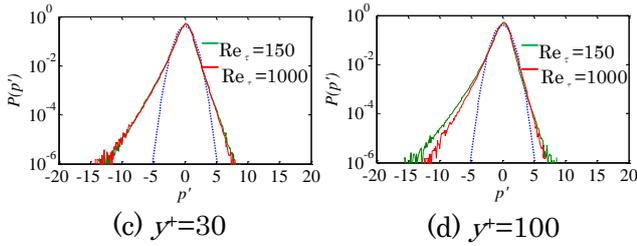


図 5.5 変動圧力の確率密度関数

変動圧力は、間欠的に起こる正負の大きな値が特徴的であり、そのため PDF のすそ野が広く伸びた分布が特徴的である。壁から離れると、正のすそ野はガウス分布に近づき、負の分布は、ほぼ同じ形を保つ。このことから、流動場の異なった構造が、正負の圧力変動に影響を与えていることが予想される。また、 $Re \tau = 150, 1000$ の結果を比較すると、 $y^+ < 30$ の壁面近傍では PDF の高圧及び低圧のすそ野は重なっている。従って、壁面近傍では PDF はレイノルズ数依存性を持たないことが分かる。

低圧側のすそ野が広く伸びた構造は渦構造と関連があると予想できる。それを検証するために Q 値によって条件づけをした圧力の PDF を求めた。これにより渦構造の分布と圧力の分布の相関を調べることができる。条件付けは $Q^+ < 0.1, Q^+ < 0.07, Q^+ < 0.05, Q^+ < 0.02$ とした。この条件付けでは、例えば $Q^+ < 0.1$ ならば、 $Q^+ > 0.1$ を満たす渦構造を除去すること意味し、渦構造を空間から除去していった場合に PDF がどのように変化するかを解析する。図 5.6 に $y^+ = 15$ における解析結果を示す。

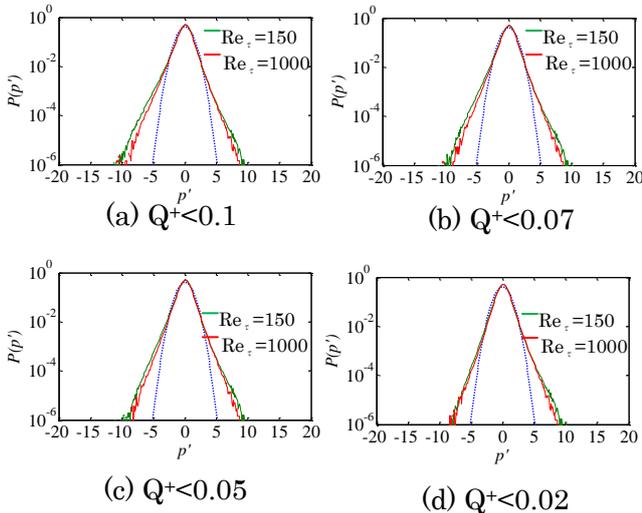


図 5.6 Q 値で条件づけられた確率密度関数

図 5.6 から、 Q 値の条件を絞っていくにつれて低圧側の分布がガウス分布に近づいている。このことは低圧領域が渦構造と相関をもっていることを示している。また、 Q 値の条件を変えても PDF の分布はレイノルズ数によらず一致していることが分かる。

図 5.7 に $Re \tau = 150, 1000$ の $y^+ = 15$ における圧力の主流方向の premultiplied spectrum (PMS) を示す。 k_x は主流方向の波数、 E_{pp} は圧力のエネルギースペクトル、 τ_w はせん断応力、 U_{max} はチャンネル中心の速度を表す。 図 5.7 (a), (c) はそれぞれ、内層、外層で規格化したものであり、(b) は波数を外層、PMS を内層で規格化したものである。 (b) より、 $Re \tau = 150, 1000$ で低波数側の分布は規格化によって一致していることが分かる。 壁面近傍の低波数の構造が外層の影響を受けるために波数は外層、PMS は内層で規格化されると考えられる。 しかし、高波数側の分布はいずれの規格化においても一致していない。 高波数側の分布は微細な渦構造に対応していると考えられる。 この結果は壁面近傍の渦構造の分布が内層、外層により規格化できないことを示している。

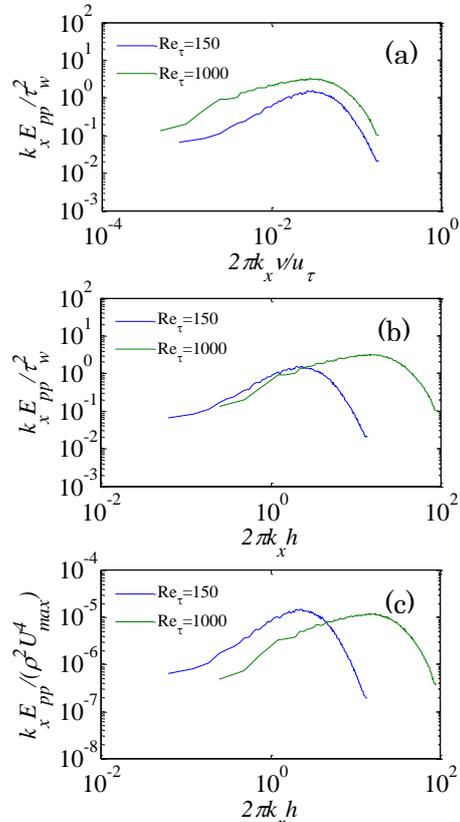


図 5.7 圧力の PMS 分布(x 方向)

図 5.8 に $Re \tau = 150, 1000$ の $y^+ = 15$ における圧力のスパン方向の PMS を示す。 (a), (c) はそれぞれ、内層、外層で規格化したものであり、(b) は波数を外層、PMS を内層で規格化したものである。 (b) によると、 $Re \tau = 150, 1000$ で低波数側の分布は規格化によって一致していることが分かる。 また、(a) によると、主流方向の圧力の PMS とは対照的に高波数側の分布が規格化によって一致していることが分かる。 これにより高レイノルズ数における微細な渦構造のスパン方向の分布が壁面近傍のスケールで評価できることが予想できる。

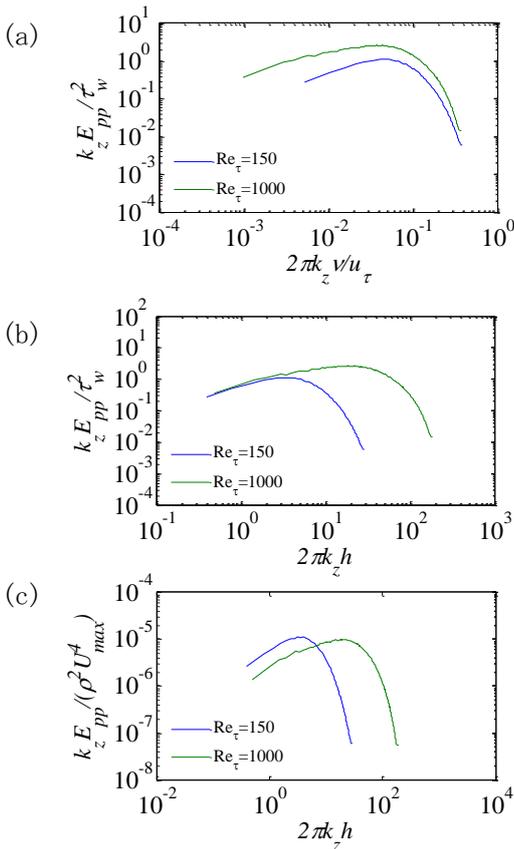


図 5.8 圧力の PMS 分布(z 方向)

壁近くの変動圧力によって条件づけられた場合の速度の平均場を求めた。条件付けは壁面の変動圧力によりおこない、高压、低压になった時の周囲の主流方向変動速度を抽出した。また、平均を求めるときには、流れ場の対称性により数値が相殺されてしまうことを避けるため、中心位置の主流方向変動速度のスパン方向の勾配の正負により条件付けをした。平均を求めするのに用いたデータ点数は時間および空間方向に約 40 万である。高压は p' が 3 より大きい部分、低压は p' が -3 より小さい部分とした。

図 5.9 は $Re_\tau = 150$ における高压による条件付けをした場合の主流方向変動速度 u' の 3 次元図の分布、断面図を示したものである。(b) によると、高速、低速部分がスパン方向に揺らいていることが分かる。その揺らぎの大きさは内部変数表示で約 100 である。(c) によると、この構造は高さ方向にもある程度大きな構造を持っていることが分かる。これらの結果から、高压領域周囲には速度せん断層が存在していることが分かる。

図 5.10 は $Re_\tau = 1000$ における高压による条件付けをした場合の主流方向変動速度 u' の分布の 3 次元図、断面図を示したものである。(b)、(c) によると、壁面から離れた位置には主流及びスパン方向に内部変数表示で約 300 にわたる大きな高速領域が存在していることが分かる。これは高レイ

ノルズ数の時に見られる大規模な構造に起因するものと考えられる。(b)によると、壁面近傍には速度せん断層が見られる。その揺らぎの大きさは内部変数表示で約 100 であり、 $Re_\tau = 150$ の時に見られた構造と一致している。この結果は PMS の解析における壁面近傍の低波数の圧力分布が内層、外層で規格化されることに対応している。

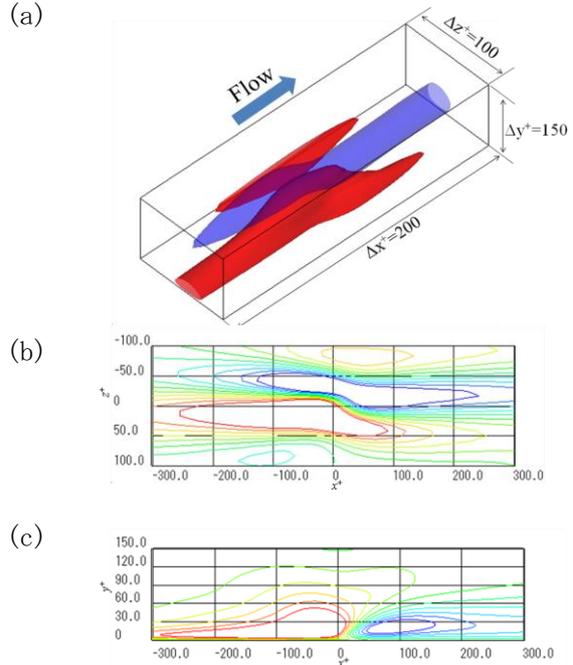


図 5.9 条件付き流動場平均 ($Re_\tau = 150$) (a) (blue: $u' = -0.5$, red: $u' = 0.5$) (b) xz 平面 (c) xy 平面 ($z^+ = 0$, contour increment = 0.2)

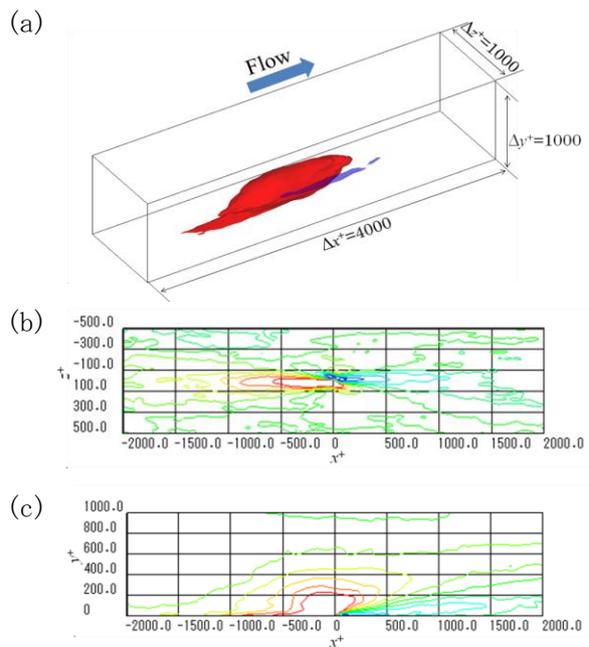


図 5.10 条件付き流動場平均 ($Re_\tau = 1000$) (a) (blue: $u' = -0.5$, red: $u' = 0.5$) (b) xz 平面 (c) xy 平面 ($z^+ = 0$, contour increment = 0.2)

チャンネル乱流場の DNS をもとに圧力に関する PDF, PMS の解析, および壁面圧力によって条件付けしたときの主流方向変動速度, Q 値の平均場の可視化を行った. その結果,

- (1) Q 値によって条件付けした PDF の解析により低圧領域と渦構造に相関があることが判明した.
- (2) PMS の解析により壁面近傍の低波数側の圧力分布は主流方向およびスパン方向の分布ともに内層と外層で規格化されるのに対し, 高波数側の圧力分布はスパン方向の分布のみ内層で規格化された. 低波数側の圧力分布は速度せん断層に対応しており, 高波数側の圧力分布は微細な渦構造に対応していることが予想される. そのため, この結果は壁面近傍の渦構造のスパン方向の分布が内層により規格化できることを示している.
- (3) 壁面圧力によって条件付けしたときの主流方向変動速度, Q 値の平均場の可視化により高圧領域周囲には速度せん断層が存在し, 低圧領域は渦構造の内部に存在していることを確認した. これらの事実は Scarano らの結果と定性的に一致している. また, 平均場の解析においては壁面近傍の渦構造と高圧, 低圧の相関にレイノルズ数効果は現れないことが分かった.

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

壁乱流における大規模組織構造の動力学を理解するために, 壁面圧力での条件付き平均をおこなった. 正の壁面圧力が大きくなる場合には, 速度せん断層が卓越すること, 負の場合には微細渦が大きな役割を果たすことを明らかにした. 今後は, このような構造が物質輸送に果たす役割を解析していく予定である.

壁面での圧力変動に関しては, 主流中 (外層) の大きなスケールの影響と, 壁近くの微細な渦構造の影響を受けることが古くから定性的ではあるが議論されてきた. DNS の可視化結果から, 実際にそのような渦構造の存在の可能性が示唆されており, 両者が壁面圧力の及ぼす影響を定量化することを計画している.

圧力のポアソン方程式を流体運動の基礎方程式を介して導くと, 平均速度勾と乱流変動に起因する項に分類される. 前者はせん断流れ特有であり, 壁乱流での特徴的な圧力変動を生み出す. 圧量の PDF は負のスキューネスを持つ間欠的な変動が特徴である (図 5.5 参照). しかし, 大きなスケールからの寄与は, PDF の正の部分に寄与することが最近の解析で明らかになった. この傾向は前述の外層の大きなスケールの影響との対応しており, 物理空間内での渦構造と統計量(PDF)との関連を具体的に明らかにできる可能性がある.

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

Y. Tsuji, Experimental evaluation of energy dissipation rate in turbulence, Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence, Nagoya University, Nagoya(Japan), March 10-12, (2014) (招待講演)

Yoshiyuki Tsuji, and Yoshinobu Yamamoto, Large scale and small scale interactions of pressure fluctuation in turbulent boundary layers, American Physical Society 67th annual DFD meeting, San Francisco, California(USA), Nov. 23-25, (2014), D26-8. (査読無)

Masayuki Sano ,Tatsuya Tsuneyoshi,Yoshinobu Yamamoto, Yoshiyuki Tsuji, Shear-layer Effect on Wall Pressure Statistics in Turbulent Channel Flow, American Physical Society 67th annual DFD meeting, San Francisco, California(USA), Nov. 23-25, (2014), D26-7. (査読無)

(4) 国内会議発表

辻 義之, 圧力統計量に基づく壁乱流中の組織構造, 京大数理研 研究集会「大スケール流体運動と乱流揺らぎ」, 2014 年 1 月 8 日(水)--10 日(金), 京都大学数理解析研究所

佐野 正幸, 恒吉 達矢, 山本 義暢, 辻 義之, チャンネル乱流場における速度せん断層が壁面圧力に及ぼす影響, 日本流体力学会 年会 2014 2014 年 9 月 15 日 (月) ~ 17 日 (水) 東北大学 川内北キャンパス

大沢直樹, 山本義暢, 辻 義之, RANS における高レイノルズ数大規模構造の寄与の再現性, 日本流体力学会流体工学部門講演会, 2014 年 10 月 25 日 (土), 26 日 (日), 富山大学 五福キャンパス

渡邊亮太, 山本義暢, 辻 義之, 高レイノルズ数チャンネル乱流場における大規模組織乱流構造の直接数値シミュレーション, 日本流体力学会流体工学部門講演会, 2014 年 10 月 25 日 (土), 26 日 (日), 富山大学 五福キャンパス