

1 2 - MD 0 4

壁乱流の大規模組織構造の解明がもたらすエネルギー高効率化への貢献

辻 義之 (名古屋大学)

概要 発達した壁乱流中に観測される大規模構造の挙動を数値計算および実験において観測し、相互比較する。長時間の時系列データに基づき、「凍結乱流仮説」の検証をおこない、大規模構造の運動を予測するうえで留意すべき事項を明らかにする。

1. 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(図1)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。これまで壁面圧力と境界層中の変動圧力との同時計測から、対数領域から外層にかけて大きな組織構造が存在することを報告しているが、SS と圧力計量に基づく組織構造との関連については不明であり、乱流統計量に与えるそれらの影響について詳細な解析を DNS にもとづいておこなう。DNS データに基づき SS の特徴を明らかにし、実験的手法から SS を抽出する客観的基準を提示する。SS は壁と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、実験や観測では、特定の場を除き、空間的な情報を得ることは困難である。空間の数点に設置した計測プローブからは、時間信号のみが取得され

るが、そこからは空間的な構造を正確に予測できるかどうかは不明である。通常の見取り図として、局所の平均流速を用いて時間軸を空間座標軸に変換することがおこなわれる。この方法は、実験流体力学の分野では「凍結乱流仮説」と呼ばれる。凍結乱流仮説はスペクトルなどの統計量に関しては近似的に成り立つことが受け入れられているが、SS のような大規模構造が存在することは、この仮説に新たな解釈が必要となることを示唆している。凍結乱流仮説を検証することは、室内での乱流実験のみならず大気乱流などの観測データ(時系列)を空間スケールに変換して解釈するための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とともに、スパン方向への運動を含め、流れ方向スケールの持続性、普遍速度分布との関連など新たな知見が得られるものと期待される。高レイノルズ数実験と数値計算を同一体系でおこない、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。

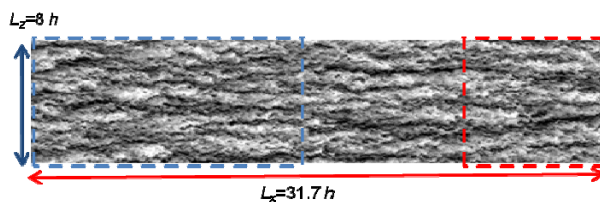


図1 凍結乱流の仮定を用いて再現した大規模構造:主流方向速度分布の可視化 $Re_\tau = 1000$ 摩擦速度で無次元化した流れ方向変動速度の小さな部分(負)を黒色、大きな部分を白色で表示してある。流れは左から右方向であり、壁面近くの対数領域を示してある。黒く伸びる帯状の構造が SS に対応する。これらの構造は、外層からのフットプリントとして壁近くまで存在が確認され、時間的にスパン方向に変動(ミャンダリング)する特徴がある。乱流エネルギー生成に寄与すると予想される。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名
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、
超大規模情報システム関連研究分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など
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。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

高レイノルズ数乱流実験と数値計算を同一体系で比較検討するための手法開発として、チャンネル乱流場 ($Re_\tau=1000$) を対象とした高精度乱流計測法、オイルフィルム法による底面せん断応力測定法、ならびに MPI 及び OpenMP によるハイブリッド並列化した直接数値計算手法の開発を実施し、その精度に関する比較検討を行った [d]。その結果、平均速度、変動 rms 値の空間分布は実験と DNS の結果がよく一致することを確認した。PMS 形状を比較したが、両者の一致は芳しくなかった。その原因は凍結乱流仮説の妥当性、Super Structure の影響、プローブ分解能の影響が考えられるが、個々の要因の定量的評価はできていない [c]。DNS データに関して、時間統計量を計算するには十分とは言えなかった。従って、より計算領域を大きくし、かつ長時間のデータの取得が必要であることがわかった。

室内実験等で指摘されている外層の高レイノルズ数効果を検討するには、 $Re_\tau=1000$ のレイノルズ数は、まだ小さい値であり、より高いレイノルズ数の計算に取り組む必要性を確認した。また、実験的手法として、圧力プローブの小型化による精度の向上、バックグラウンドノイズの除去方法を確立、壁近くでの計測分解能の補正方法を DNS データとの比較から開発した。実験データの信頼性を確認するため、数値計算との比較が必須であった。そこで JHPC 計算科学連携研究プロジェクトの協力を得て、直接数計算においては、主流方向の計算領域を大幅に拡大 ($L_x=12.8h \rightarrow 51.2h$, h :チャンネル半値幅) 及び圧力情報を抽出できるように改良した DNS コードを用い、世界最大級の大規模計算を実行し、空間情報: 2916x1032x1024、時間情報: 1280 点から構成される、速度・圧力・

温度の 4 次元データベースの構築 (総データ量: 140TB) を行った。これらのデータ解析を進める過程で、大規模構造 SS の抽出、可視化、統計量の算出に関して、幾つかの問題点があることが判明した。現在、それらの問題点を改善するための作業を計画、進めている。

3.1 凍結乱流仮説の検証

高レイノルズ数実験と同一体系 (図 2 実験体系、図 3 計算体系参照) で実施した壁乱流の直接数値計算における時空間 DNS データベースを用い、周波数スペクトルならびに波数スペクトルの PMS (Pre-Multiplied Spectrum) 比較をおこなった (図 4)。数値計算データを用いた凍結乱流仮説の検証では、小スケールの速度変動に関してはおおむね成り立っていること、大きなスケールでは統計量が安定せず、正確な議論ができないことがわかった。実験データとの比較からは、大きなスケールでの変動に相違がみられ、その原因を考察している。

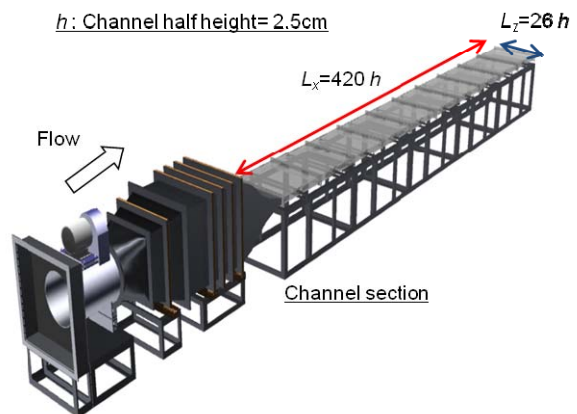


図 2 チャンネル流、実験体系

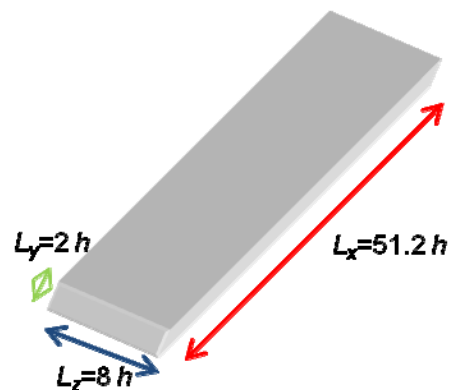


図 3 チャンネル流、計算体系

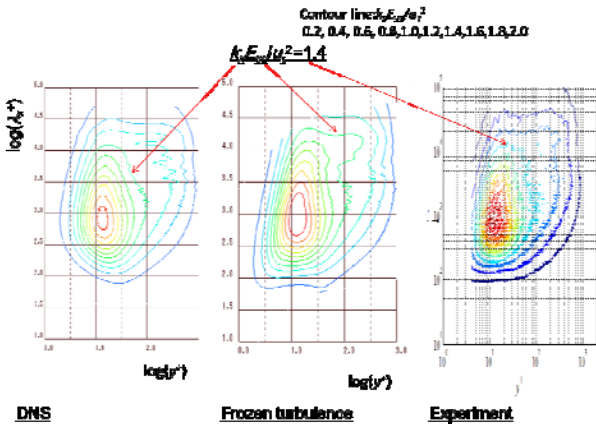


図 4 流れ方向速度の PMS の等値面
左から、数値計算（波数スペクトル）、数値計算（凍結乱流仮説）、実験データ（凍結乱流仮説）。

3.2 大規模構造の抽出

Super Structure (SS) の可視化抽出ならびに、凍結乱流仮説に与える影響を定量的に評価する。境界層厚さ δ の数十倍に及ぶ大規模構造の span 方向へのゆらぎの大きさ、壁せん断応力への寄与を評価する

図 5 には、凍結乱流仮説を用いた場合の SS を本来の空間分布と比較した結果を示した。短時間（図中の青い実線と波線の比較）では、両者の一致は良く、凍結乱流仮説は瞬時構造に関しても精度良く立っていることがわかる。しかし、時間の経過（赤い実線と波線の比較）とともに瞬時構造に相違が出始めることがわかる。統計量(PMS)としてみた場合には、その差異は小さく考えられる（後述）。

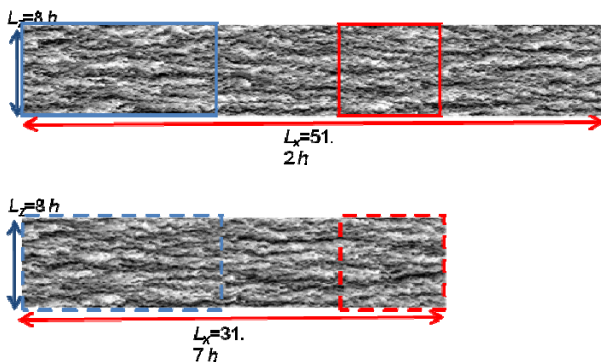


図 5 瞬時の大規模構造 SS の空間分布
上図は図 1 と同様の条件から SS を可視化した瞬時の結果。下図は凍結乱流仮説を用いて空間分布を可視化した結果。青色の実線および波線の領域、赤色の実線および波線の領域が空間構造に対応している。

瞬時の SS の空間構造を空間に固定された測定点からの時系列データを基に再構成する方法については、まだ十分に考察を進められていない。最も興味あることは、局所平均速度に代わり、空間スケールへ変換するための代表速度を定量化することである。対数領域までの壁近くまでは、局所平均速度の一定割合で近似できそうである。

3.3 プローブ空間分解能の補正

凍結乱流仮説の検証には、実験データ取得に際して、プローブ空間分解能が与える影響を評価し、補正する必要がある。同様のことは数値計算データにも当てはまるが、高レイノルズ数乱流では、実験プローブの分解能が問題となるため、その考察をおこなった。図 6 には数値計算データを用いて、流れ方向変動速度の標準偏差を摩擦速度で無次元化し、壁からの距離に対してプロットした結果である。壁近くでピーク値を持ち、外層に向かって徐々に減衰する傾向が認められる。記号の違いは、空間分解能をフィルターにより変化させた結果である。分解能が悪くなると、小さな速度変動が平滑化され、乱流強度が小さく見積もられる。この傾向は、PMS が空間分解能の影響を受けることを示唆しており、実験データとの比較に注意が必要である。

空間分解能の補正をおこなうための経験式が提案されている。速度変動の標準偏差の最大値を下付きの添え字 m を用いて表すと、

$$\frac{u_{rms}^2}{u_\tau^2} \Big|_m = A \log_{10} Re_\tau - B l^+ - C \left(\frac{l^+}{Re_\tau} \right) + D \quad (1)$$

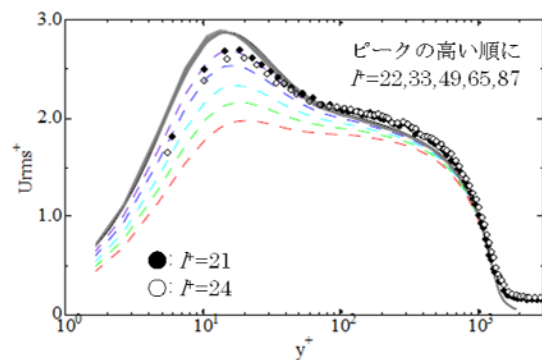


図 6 流れ方向変動速度の標準偏差を壁からの距離に対してプロットした結果（数値計算データ）。縦軸横軸は壁変数で無次元化されている。波線は空間分解能を変化させた場合に相当する。○、●は実験結果をあらわす。

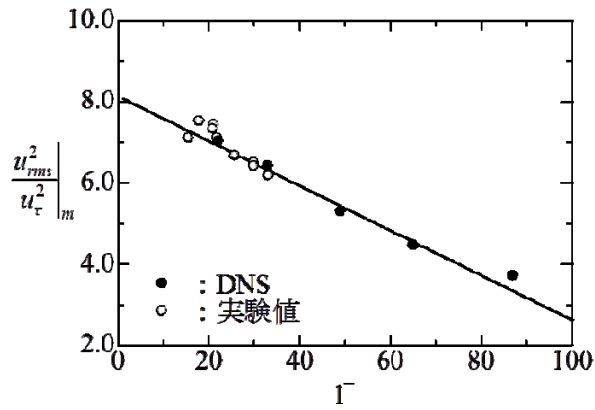


図 7 流れ方向変動速度の空間分解能依存性

空間分解能が悪くなる (l^+ が大きくなる) ほど、乱流強度は小さくなる。実線は式 (1) をあらわす。

ここで $A=1.0747$, $B=0.0352$, $C=23.0833$, $D=4.8371$ である。図 7 には、実験値と数値計算の空間分解能への依存性を比較した結果を載せた。いずれも式 (1) によく一致しており、凍結乱流仮説の検証に PMS を用いる補正として利用できる。圧力変動の標準偏差についても、数値計算と実験との比較からその補正法を考案した。詳細は[e]では発表をおこなった。

3.4 境界条件の影響

実験と数値計算を比較する場合には、境界条件の影響を考慮する必要がある。大規模構造は、チャンネル内の大部分に存在することが予想される。これまで、境界条件についての議論は成されてこなかったようである。特に非局所的な影響を受ける圧力変動に関して考察をおこなった。図 8 には、Skote と Jimenez らによっておこなわれた数値圧力変動の数値計算の結果（乱流境界層）をプロットしたものである。両者の計算方法は、出口境界条件の取り扱いが異なっている。乱流中の変動圧力にもその影響が現れており、壁近くと外層の傾向が全く逆になっている。詳しくは文献[a]にまとめた。また、実験においても、風洞の出口条件、バックグラウンドの騒音が圧力変動に大きく影響を与えることがわかった。これらを正確に除去することは難しいが、計測領域から離れた位置にレファレンスのプローブを置くことによって、補正が可能であることを簡略に説明する。

境界層中で計測される圧力を \tilde{p}_s 、境界層外の圧力を \tilde{p}_r 、壁面圧力を \tilde{p}_w とあらわす。それらの圧力は平均値と変動分に分解することができるが、変動圧力中には風洞内のバックグラウンドノイズ

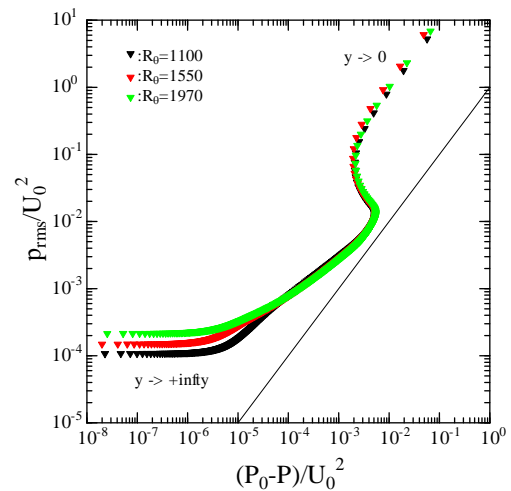
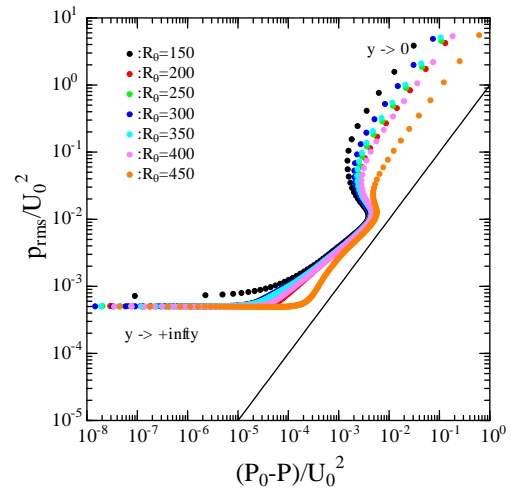


図 8 数値計算（乱流境界層）による乱流中の変動圧力と平均圧力の関係。下付きの 0 は、主流での値を示している。上図は Skote、下図は Jimenez らによる結果。壁近くと外層でレイノルズ数への依存性が全く逆になっている。

や境界条件の影響が自ずと含まれることになる。

$$\tilde{p}_s = P_s + p'_s, \tilde{p}_r = P_r + p'_r, \tilde{p}_w = P_w + p'_w \quad (2)$$

変動圧力に含まれるバックグラウンドの影響（変動圧力）を p'_b とあらわすことにする。バックグラウンドノイズは、3つの圧力には異なった値として含まれるであろうが、ここでは簡略のため同一の値が含まれていると仮定する。

$$p'_s = p''_s + p_b, p'_r = p''_r + p_b, p'_w = p''_w + p_b \quad (3)$$

図 9 には固定プローブ（壁からの位置を $y=120\text{mm}$ ；境界層厚さの 2 倍に固定）と移動プローブ、壁面圧力の相関を示した結果である。

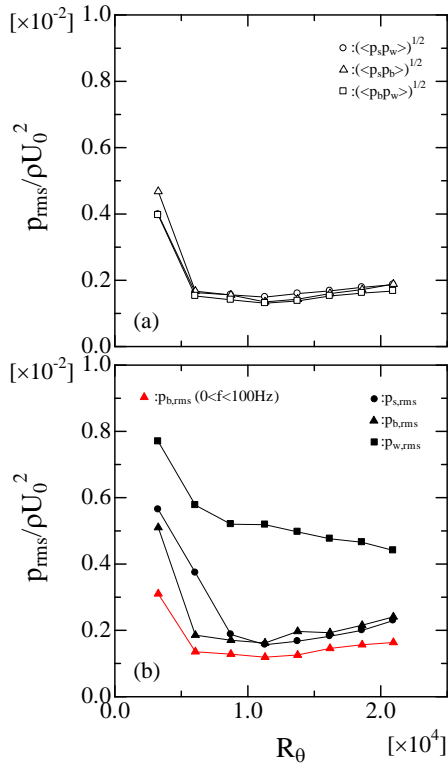


図 9 (a)バックブランドノイズのレイノルズ数に対する変化、(b)境界層外、境界層内、壁面での圧力変動の大きさ。赤色は低周波からの寄与を明確にした場合。

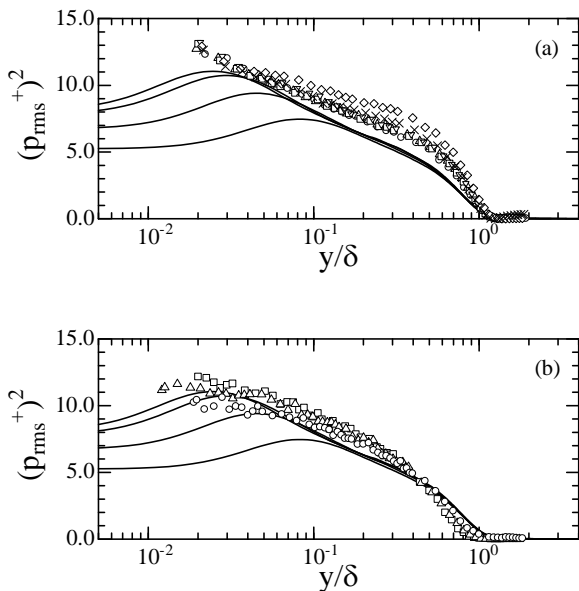


図 10 バックブランド補正をした変動圧力分布 (a)ストックホルム工科大学 (KTH) (b)メルボルン大学 (MEL) 実線は数値計算の結果。バックブランドの影響を補正することで両者の一致が確認できる。

$\langle p'_s p'_w \rangle \approx \langle p'_s p'_r \rangle \approx \langle p'_w p'_r \rangle$ であることから、風洞中で計測された圧力変動には、境界層内外にわたり、共通の変動が含まれていることが予想される。本研究ではバックブランドノイズを測定信号から取り除き、その統計量を調べることが目的である。しかし、バックブランドノイズの大きさを見積もるためには、風洞内での多くの位置で圧力を計測する必要がある。ここでは、よい簡略化をおこない、境界層外の固定プローブで計測された圧力をバックブランドノイズと仮定した。

図 9 (b)には固定プローブでの計測値を差し引いた場合の境界層内の圧力と壁での圧力のクロススペクトルを示した結果である。バックブランドノイズを差し引いた場合には、低波数で相関が小さくなっていることが分かる。つまり、風洞内の騒音や振動など計測値に共通に含まれている信号は低周波と予想される。

境界層中の変動圧力の rms 値の分布を図 10 に示す。縦軸は摩擦速度、横軸は境界層厚さで無次元化した壁からの距離である。実線は比較のために直接数値計算の結果 [4] を実線で示した。変動圧力の rms 値の算出は、バックブランドの影響や境界条件の相違を取り除くために、以下の式を提案した [3]。ここで、各係数 C_1, C_2 は風洞によって異なる。

$$p''_{s,rms} = p'_{s,rms} + C_1 \sqrt{\langle p'_s p'_r \rangle} + C_2 \quad (4)$$

外層付近で、 $(p_{rms}^+)^2 \propto \ln(y/\delta)$ の関係がレイノルズ数によらず確認される。実験データは、レイノルズ数に依存せず、1つの分布に載っているが、2つの風洞では少なからず異なっている。これは、式 (3) による補正が、境界層外の固定プローブのデータを基にしているためであり、より良い補正のためには、風洞内の複数点でのデータを基にする必要があると考えられる。式の導出経緯については、[a, c] に詳しく説明をおこなった。

図 10 の上段が KTH での計測、下段が MEL での計測である。前者は回流式の風洞、後者は吹き出し式の風洞である。MEL では、上流からの位置を 8m, 13m, 21m と変化させて計測をおこなった。風洞に近い 8m と出口に近い 21m では、同一の計測方法であるにもかかわらず、その分布傾向には明確な差異が認められた。これらは、風洞内の圧力の変動が、境界条件の影響によって変化していると考えるのが妥当と考えられる。

境界層内の圧力として壁面圧力の rms が多くの研究者によって報告されている。その値のレ

インルズ数に対する分布には大きなばらつきが認められ、その原因に関する議論が長らくおこなわれている。センサーを固体壁表面に設置するか、静圧孔を介して設置するか、静圧孔の大きさ深さの計測に与える影響が重要であることが指摘されている。しかし、風洞内の圧力は、図 9 から明らかなように、壁面にまで確実に影響を与えており、計測値にばらつきが大きい要因として、風洞依存の外装の圧力変動も無視できないと考えられる。

数値計算では、外部からのバックグラウンドノイズを心配する必要がないが、流れ方向への周期境界条件と初期条件は圧力変動に大きな影響を与えると考えられる。チャンネル流れ、円管流れと異なり、境界層は下流方向へ発達することから、周期境界条件を設定するためには、いったん流れを相似変換して上流に再度入れなおすことがおこなわれる（詳しいレビューは[a]を参照）。このような操作は、実験風洞の回流、吹き出しいずれの場合にと異なり、実験計測との相違をもたらす原因の 1 つと考えられる。また、上部での境界条件の設定に関しても、計算と実験の相違は無視できない。

以上のように凍結乱流仮説の検証に、数値計算と実験を比較する際には、大規模構造に大きく関与する境界条件の相違を考慮する必要があることが明らかとなった。計算実験との比較に関しては、おおむね当初の予定どおり研究を進められた。

3.5 DNS コードパフォーマンス

表 1 に今年度の DNS コードのパフォーマンスについてまとめた。

○ベクトル並列計算機：理論性能の 20%程度、最速：21TFLOPS(128 ノード)

○スカラ並列計算機：理論性能の 5%程度、最速：20TFLOPS(4096 ノード)

スカラ機においても、高速化により最大値ではベクトル機並の性能が得られるようになった。さらなる実行効率の向上が今後の課題と考えられる。

表 1 DNS コードパフォーマンス

	計算機	最大ノード数/メモリ量	MPI 並列数	AP	総並列数 [MPIxAP]	Rpeak [TFLOPS]	$R_{\text{peak}}/R_{\text{max}}$ [%]
名大	FX1	768/21TB	384	4	1536	1.06	6.95
東北大	SX-9	16/16TB	64	1	64	1.42	21.73
			256	1	256	6.50	24.81
JAMSILC	ES2	128/15TB	128	8	1024	21.14	20.16
理研	京	82944/1035TB	1024	8	8192	7.61	5.81
			2048	8	16384	13.03	4.97
			4096	8	32768	20.37	3.89

3.6 DNS コード/ポスト処理の並列化・高速化

(1) DNS コード

○領域分割：

1 次元及び 2 次元の領域分割法を適用

○alltoall 通信：

1 対 1 通信 (isend/irecive)、one-side 通信 (put)、集団通信 (alltoallv) の各手法を計算機タイプに応じて、使い分け

○shift 通信：

通信のスケジューリングを適用

(2) ポスト処理コード

○4 次元データベースに対応した、領域分割 (時間&y 方向) による完全並列化

→80TB データの統計処理が約 4 時間で可能 (FX1/128 ノード使用時)

(従来は、M9000 の共有メモリ型を利用)

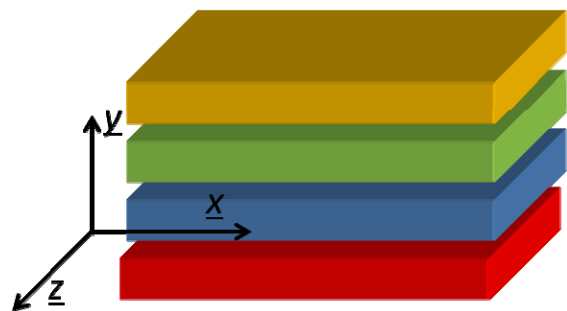


図 1 1 (a) 1-D domain decomposition (y-direction) < 4096 nodes

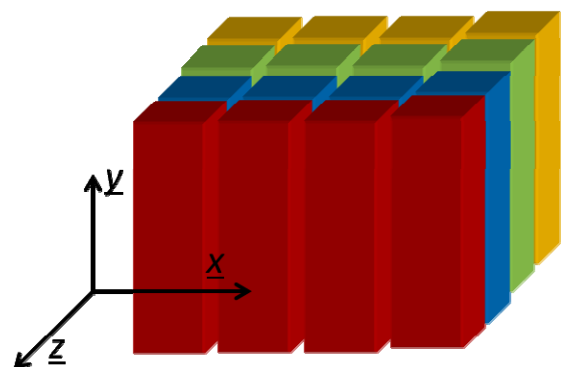


図 1 1 (b) 2-D domain decomposition (x, z-direction) > 2048 nodes

4. 今後の展望

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。しかし、計算規模・データ規模の拡大に加え、100T 超のデータベースとなったことから、時空間相関解析ならびに可視化解析において、さまざまな支障があることが判明した[d, i]。そこで、空間データを簡略化して保存し、より長時間の時系列データの取得を引き続きおこなっている。また、計算科学・大規模可視化に関する研究者を含めた研究体制での研究を継続している。

図 1 2 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。

現在、より長時間の時系列データを取得するために計算を実行中である。

図 1 3 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。

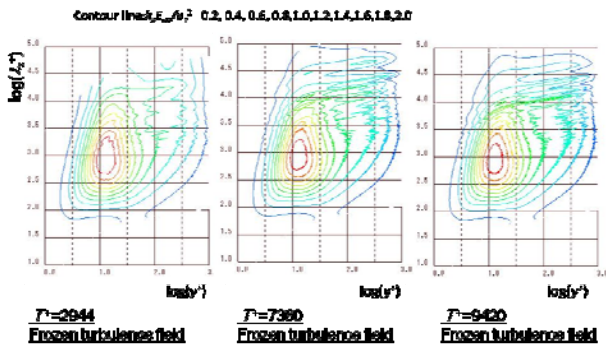


図 1 2 流れ方向変動速度の PMS 無次元化時間の影響が外層に現れている。

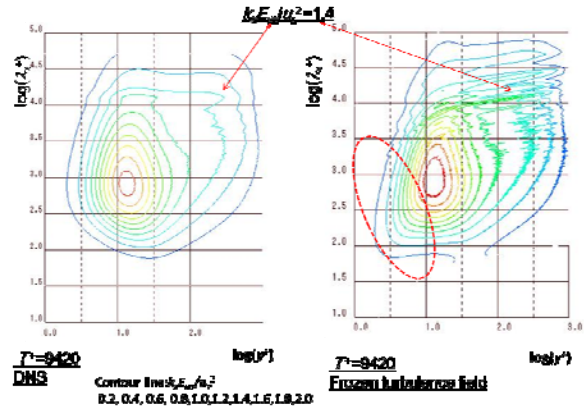


図 1 3 流れ方向変動速度の PMS 凍結乱流仮説の検証、壁近く（波線の領域）では、両者の差異が認められる。外層では、統計量が安定しないため、仮説の検証にはより長時間の時系列データの取得が必要である。

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調べていく予定である。また、大規模構造が壁との相互作用の過程で、どのように大きなせん断応力を発生するのかを、大規模構造自体を制御する観点から調査する予定である。

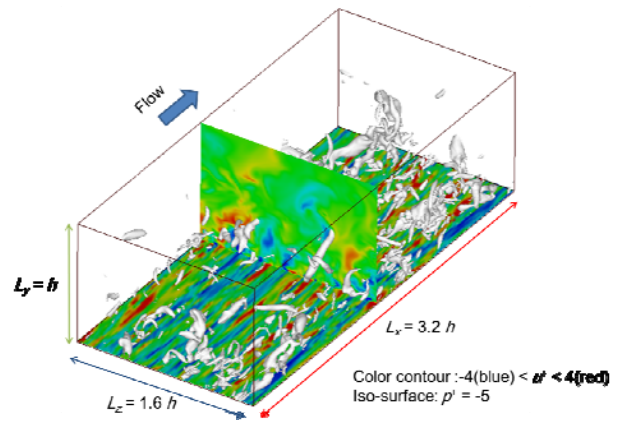


図 1 4 組織構造の可視化

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い。

図 1 4 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）との関連を推測できる。壁近くのストリークと凍結乱流仮説と関連はまだ明らかになっていないため、今後の課題である。

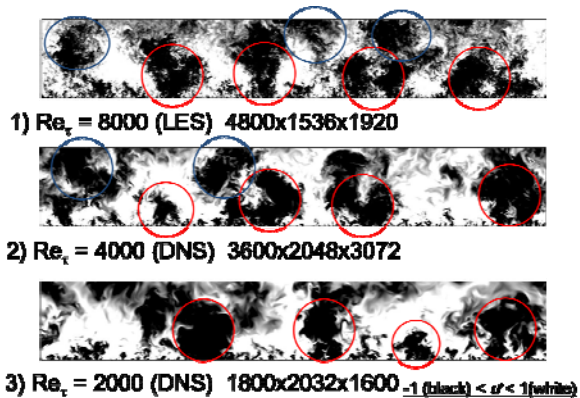


図 1 5 組織構造の可視化 : Re 数依存性

チャンネル断面における、流れ方向速度の等値面を図 1 5 に示す。レイノルズ数が低い場合には、チャンネル半幅にわたる大きな構造が確認できるが、レイノルズ数の増加とともに、チャンネル中央付近に新たなスケールの構造が形成される。高レイノルズ数における凍結乱流仮説を検証するうえで、考慮すべき点と考えられる。

今後は上記の点を考慮し、凍結乱流仮説の検証と大規模構造との関連を引き続き調査する。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

[a] Y. Tsuji, S. Imayama, P. Schlatter, P. Henrik Alfredsson, A. V. Johansson, I. Marusic, N. Hutchins, and J. Monty, Pressure fluctuation in high-Reynolds-number turbulent boundary layer: results from experiments and DNS, Journal of Turbulence, Vol. 13, No. 50, 2012, 1–19.

(2) 国際会議プロシーディングス

[b] Y. Wada, K. Goto, J. Yoshida and Y. Tsuji, On the definition of logarithmic region in zero pressure gradient turbulent boundary layers, XXIII ICTAM, 19-24 August 2012, Beijing, China, CD-ROM publication.

[c] Y. Tsuji and Y. Yamamoto, Correction of Pressure Data Close to the Wall in Turbulent Boundary Layer, DFD12 Meeting of The American Physical Society, 18-20 November 2012, San Diego, USA.

[d] Y. Yamamoto and Y. Tsuji, Discussion on frozen turbulence hypothesis in turbulent channel flow by means of large-scale DNS, 31st JSST Annual Conference JSST 2012 International Conference on Simulation Technology, Sep.27-28, 2012, Kobe, Japan.

(3) 国際会議発表

(4) 国内会議発表

[e] 後藤克基、和田裕貴、吉田 潤、山北智徳、辻 義之、川島英幹、低レイノルズ数乱流境界層における実験と数値計算との比較、日本流体力学会年会、9月16日～18日、高知大学。

[f] 和田裕貴、後藤克基、吉田 潤、山北智徳、辻 義之、川島英幹、乱流境界層における対数領域とカルマン定数に関する実験的考察、日本流体力学会年会、9月16日～18日、高知大学。

[g] 和田裕貴、後藤克基、吉田 潤、山北智徳、川島英幹、辻 義之、乱流境界層とチャンネル流れにおける平均速度分布の相違について、日本機械学会流体工学部門講演会、9月15日～16日、同志社大学。

[h] 辻 義之、今山慎太郎、乱流境界層中の圧力変動の計測とその補正、日本機械学会山梨講演会、10月27日、山梨大学

[i] 山本義暢、辻 義之、功刀資彰、大規模直接数値計算による凍結乱流の仮説の検討、計算工学会論文集(CD-ROM)、Vol. 17(2012)、12A0929220.

[j] 辻 義之、山本義暢、圧力統計量に基づく壁乱流の内層と外層の構造、研究集会「多重物理・多重スケール乱流現象の数理解」、京都大学数理解析研究所、1月9日～11日(2013)。

[k] Shen Feng, 藤城敦史, 辻 義之、円管乱流中における大規模組織構造の抽出の試み、九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割」、2月22日～23日(2013)。

[l] 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構造の寄与、九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割」、2月22日～23日(2013)。