

jh130026-MD04

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、圧力変動に基づき大規模構造の条件付けをおこなう。

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独自に報告しているが、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いたい。DNS データに基づき SS の特徴を明らかにし、風洞実験による実験的手法から 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、特定の場合を除き、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。通常取り扱いとして、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。また、SS がエネルギースペクトル型へ与える影響を調査する。

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拠点名および役割分担

拠点名：名古屋大学情報基盤センター

役割分担

辻 義之：研究総括、統計量計算

山本 義暢：数値計算、統計量計算

石井 克哉：数値計算アルゴリズム

荻野 正雄：数値計算大規模データ可視化

高橋 一郎：数値計算大規模データ可視化

恒吉 達矢：物理実験、データ処理

猿渡 祥悟：数値計算、データ処理

(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

(1) 研究成果の詳細について

3.1 凍結乱流仮説に関する数値的検証

解析対象と計算条件

解析対象は、2次元チャンネル乱流場である。計算条件を表1に示す。ここに上付き添え字+は摩擦速度(u_τ)と動粘性係数(ν)により無次元化された値であることを示す。解析領域は主流方向へ境界層厚の20倍以上と指摘されている大規模構造を捉えるために、主流方法に $51.2h$ (h , チャンネル半値幅), スパン方向に $8h$ の領域を確保した。

数値計算手法

計算手法は擬スペクトル法に基づき、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次精度中心差分を使用した。また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。

時間積分長とデータベース間隔

時間積分長さは、流れ場が十分に発達したとみなした後、時間間隔 $\Delta t^+ = 0.0184$ で72万ステップ(バルク平均速度による移流距離: $265h$ 程度)行うこととした。そして本研究では大規模構造の時空間構造を解析するために、鉛直方向に約100点において、速度・圧力・温度のデータを、散逸率(ϵ)と動粘性係数による時間スケール(コルモゴロフの時間スケール: T_K)の最小値程度である、 $\delta t^+ = 2.3$ 間隔で保存し、時空間データベースを作成した。

表1 計算条件

$Re_\tau = u_\tau h / \nu$: Turbulent Reynolds number, $Pr = \nu / \alpha$: Prandtl number, N_x, N_y, N_z : grid number for stream, vertical, and spanwise direction, $\Delta^+ = u_\tau \Delta / \nu$

Re_τ	Pr	N_x, N_y, N_z	$\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$
1000	5	3200, 1032, 1152	16.0, 0.5-2.0, 6.9

凍結乱流の仮説を用いたスペクトル解析

一般に乱流計測においては、高解像度かつ広範囲な領域における空間情報を得ることは困難である。空間に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。そこで通常に取り扱いとして、局所平均流速を用いて時間軸を空間軸に変換し、空間情報を得る。つまり、場所 (x, y, z) における時刻 t の速度は、 Δt 時刻前の場所 $(x - U\Delta t, y, z)$ の速度が移流(速度: C)したもとする。

$$u(x, y, z, t) = u(x - C\Delta t, y, z, t - \Delta t) \quad (1)$$

この仮定を用いることにより、時系列データから空間データを構成することが可能となる。この凍結乱流の仮説を検討するために、以下に主流乱流成分(u)に対し、以下の式(2)及び(3)で示す主流方向あるいは時間方向への1次元フーリエ変換を行い、

$$U(k_x, y, z, t) = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} u(x_i, y, z, t) \exp(-ik_x x), \quad (2)$$

$$x = i\Delta x, \Delta x = \frac{L_x}{N_x}, k_x = \frac{2\pi l}{L_x}, l = -\frac{N_x}{2}, \dots, \frac{N_x}{2} - 1,$$

$$U(x, y, z, \omega) = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} u(x, y, z, t) \exp(-I\omega t), \quad (3)$$

$$t = it\Delta t, \Delta t = \frac{T}{N_t}, \omega = \frac{2\pi m}{T}, m = -\frac{N_t}{2}, \dots, \frac{N_t}{2} - 1,$$

次式(4)及び(5)に示す、各鉛直断面における波数スペクトル $E_{uu}(k_x, y)$ 及び周波数スペクトル $E_{uu}(\omega, y)$ を求めた。

$$E_{uu}(k_x, y) = \frac{1}{N_t N_z} \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_z} U(k_x, y, z, t) U^*(k_x, y, z, t) \frac{L_x}{2\pi}, \quad (4)$$

$$E_{uu}(\omega, y) = \frac{1}{N_z N_x} \sum_{k=1}^{N_z} \sum_{i=1}^{N_t} U(x, y, z, \omega) U^*(x, y, z, \omega) \frac{T}{2\pi}, z = k\Delta z. \quad (5)$$

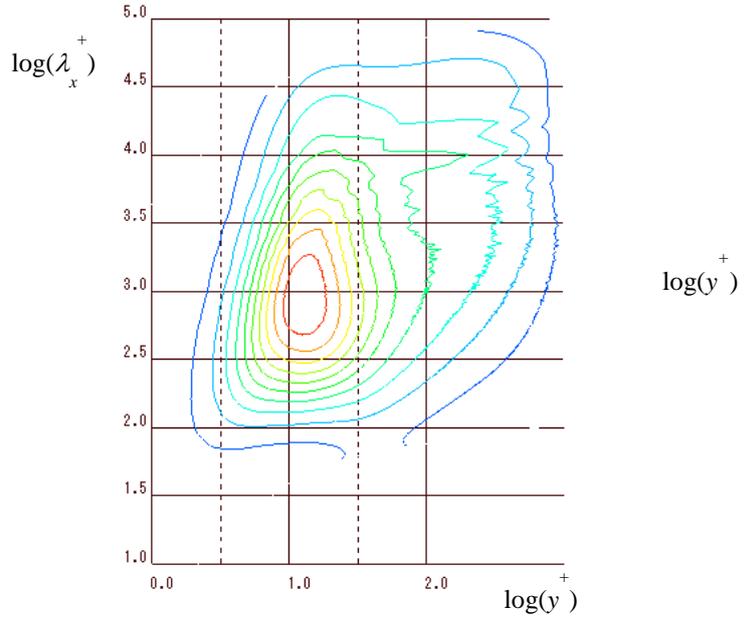
ここに上付き添え字*は複素共役を意味する。

ここで凍結乱流の仮説により、移流速度に各断面での局所平均速度 ($u_m(y)$) を用いると、周波数スペクトルを次式(6)に示す波数スペクトルに変換できる。

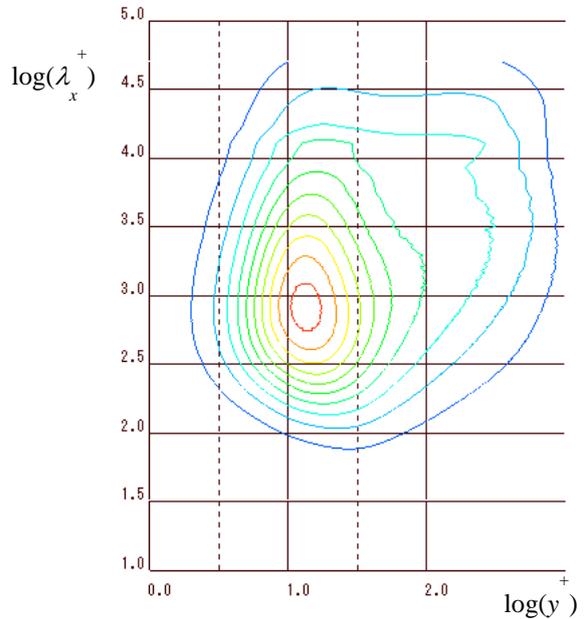
$$E_{uu}^F(k_x, y) = u_m(y) E_{uu}(\omega, y), k_x = \frac{\omega}{u_m(y)}. \quad (6)$$

図 1 に主流方向変動速度の Pre-multiplied spectrum (PMS) のコンタを示す。図 1-(1)に示す凍結乱流の仮説により時系列データにより求めた PMS は、図 1 -(2)の本来の波数スペクトルと比較し、壁近傍においては、波長を過小評価していることが確認できる。また乱れのピークが出現するバッファ層においては、ピーク部分で波長を過大評価している。一方、大規模構造が出現する壁遠方の長波長部分では、本来の波数スペクトルと比較的よく一致していることがわかる。ただし PMS の値が 1.0 の外側から 4 番目のラインにおいては、分布形が明らかに異なっている。

図 2 にバッファ層及び対数層における散逸スペクトルを示す。移流速度に平均速度を用いた凍結乱流場においては、平均速度が大きい対数層において、散逸スペクトルが十分に減衰せず、高波長でのスペクトルの跳ね上がりが確認できる。本研究では、時間刻みにコルモゴロフの時間スケールを用いたが、凍結乱流場の解析においては、 $C\Delta t$ による空間解像度において、十分な解像度を確保する必要があることを示している。

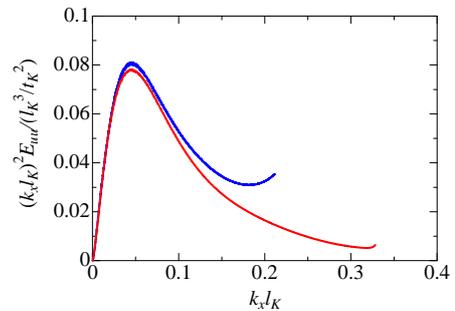


(1) frozen turbulence

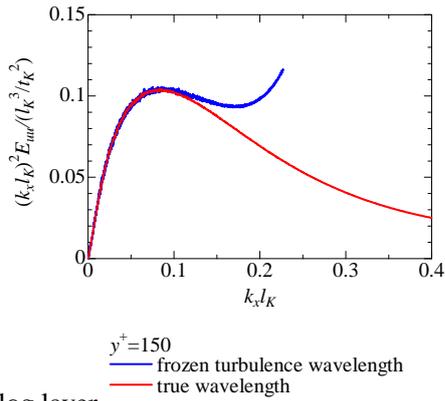


(2) real spectrum

Fig.1 Comparison of streamwise pre-multiplied spectrum, contour line: $k_x E_{uu}/u_\tau^2 = 0.2$ (blue), 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 (red)

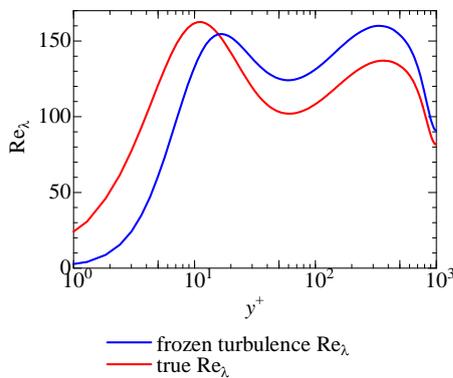


(1) buffer layer
 — $y^+ = 15$
 — frozen turbulence wavelength
 — true wavelength

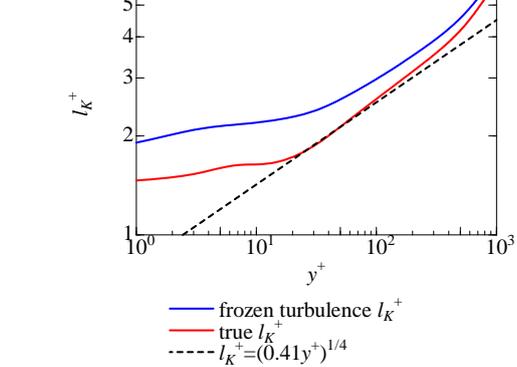


(2) log layer

Fig.2 Comparison of dissipation spectrum



(1) Reynolds number based on Taylor length



(2) Kolmogorov length

Fig.3 Comparison of Reynolds number based on Taylor length and Kolmogorov length

また図 3 にテイラー長レイノルズ数及びコルモゴロフ長の比較を示す。図 3-(2)に示すコルモゴロフ長の比較においては、凍結乱流場は等方性を仮定して求めている。コルモゴロフ長においては、非等方性が顕著な壁近傍では有意な差が確認でき

るものの、等方性の仮定がある程度成立すると考えられる壁遠方において、凍結乱流場と本来のコルモゴロフ長が漸近していることがわかる。一方同様に主流方向の変動速度により求めたテイラー長に基づくレイノルズ数の比較においては、壁垂直方向の全領域において近似精度が悪いことが確認できる。これは壁近傍では非等方性の効果に起因し、壁遠方では図 3-(2)に示した通り、空間解像度の影響により近似精度が落ちているものと推測できる。

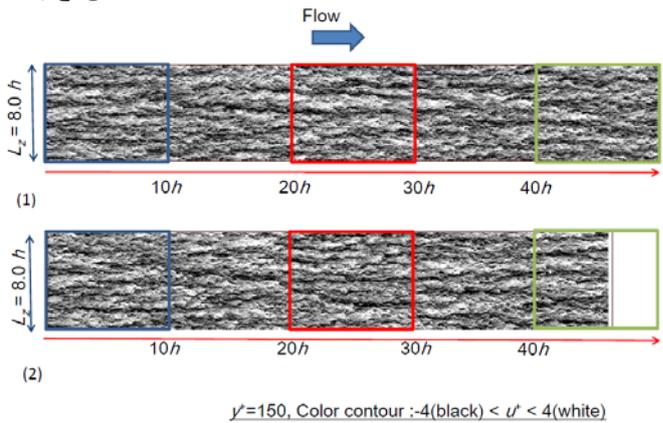


Fig.4 Comparison with instantaneous streamwise turbulence velocity, (1) real velocity field, (2) frozen turbulence field.

図 4-(1)に対数層付近($y^+=150$)における、瞬時の主流方向変動速度のコンタを示す。これによりスパン方向に高速・低速が交互に現れる縞構造の存在が確認でき、その主流方向長さは、 $10-20h$ 程度に達していることがわかる。そして図 4-(2)に図 4-(1)と同時刻において、凍結乱流を仮定して再構築した主流方向の変動速度のコンタを示す。凍結乱流を仮定した瞬時場においても、主流方向に $10-20h$ 程度に達する大規模構造の存在が確認できる。また図 4-(1)と(2)を比較すると、流下距離 $10h$ 程度までは両者の差異はほとんどないといえる。しかし流下距離が $20h$ を越えると明らかな差異が可視化によっても確認できることがわかる。つまり流下距離が長くなると、凍結乱流の近似が成立する頻度が多くなるといえる。

そこで瞬時場における凍結乱流場の近似精度を確認するために、瞬時場の本来の速度場と凍結乱流場との相関係数を図 5 に示す。流下距離が $5h$ を

超えると相関係数は 0.5 を下回り、 $12h$ を超すと相関係数は 0.2 程度に落ち着くことがわかる。これは図 4 に示す瞬時場の比較と一致する。また空間フィルターをかけ、比較的大きな構造の空間相間を検討すると、相関係数は高くなるものの、相関係数の減少する空間位置はほぼ同様であることがわかる。

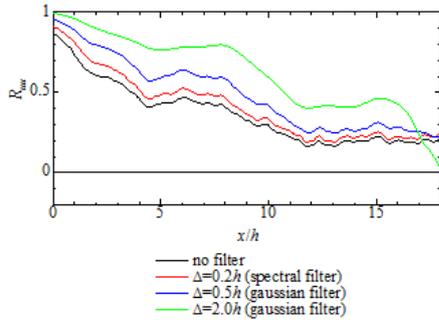


Fig.5 Correlation coefficient of real velocity field and frozen turbulence field

以上より、レイノルズ数 4 万程度(大規模構造の存在が確認できるレイノルズ数の下限)を対象とした DNS を行い、凍結乱流仮説の各種統計量及び空間相間解析による瞬時場の精度検証を行った。その結果、移流速度に平均速度を仮定した凍結乱流場においては、

- (1) PMS 解析においては、壁近傍では有意な差が生じるものの、大規模構造が出現する壁遠方では、比較的好い近似となっていることが確認できた。
- (2) また凍結乱流場解析における時間分解能においては、コルモゴロフの時間スケールではなく、移流速度と時間刻みの積による空間解像度を十分に確保する必要があると分かった
- (3) 瞬時場と凍結乱流場の可視化により、流下速度が $10h$ を超えると、両者に明らかな差異が生じることが分かった。またこれは相関解析においても同様の傾向を確認できた。
- (4) また空間フィルターをかけ大規模構造の瞬時場と凍結乱流場の相関解析を行った結果、相関値は高くなるものの、相関値の減少する空間位置に変化はないことが分かった。

3.2 変動圧力の解析と実験との比較

壁面圧力の確率密度関数

図 6 には、壁面近くの変動圧力の確率密度関数 (PDF) を示す。横軸は平均値と分散で無次元化されている。破線の放物線は分散 1 のガウス分布を示す。変動圧力は、間欠的に起こる大きな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。

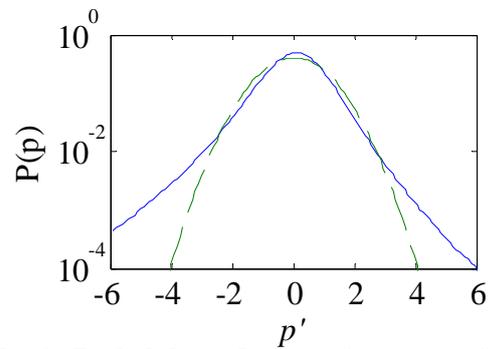


Fig.6 Probability density function of pressure fluctuation close to the wall. ($y^+=12.5$)

条件つき同時確率密度関数

図 7 には、温度と変動圧力、壁垂直方向の速度と変動圧力の同時確率密度関数を示す。温度場は壁垂直方向の速度と、弱い負の相関を持つようであるが、変動圧力場に関しては、相関はなさそうである。

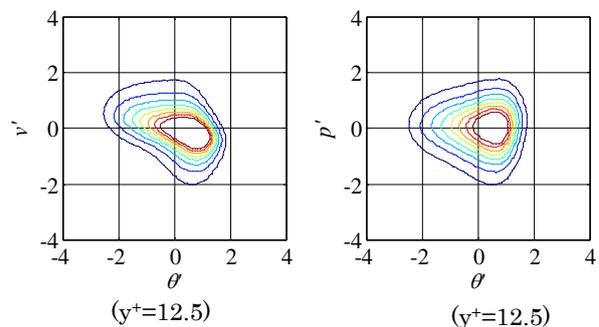


Fig.7 Joint probability density function. Vertical velocity fluctuation v.s. temperature, pressure v.s. temperature. Contourline:0.02,0.04,0.06,0.08,0.10,0.12,0.14,0.16

図 8 には変動圧力で条件づけた場合の、流れ方向及び垂直方向速度の同時確率密度関数を示す。条件付きは、変動圧力の正負の絶対値が、その標準偏差値の 3 倍を超えた場合とした。変動圧力が正の場合と負の場合で、速度場の構造が異なることが示唆される。また、垂直方向速度と温度場の同時確率密度関数では、同様の等値面の形状が確認できる。このことから、変動温度場は流れ方向速度と密接に関係していることが予想される。

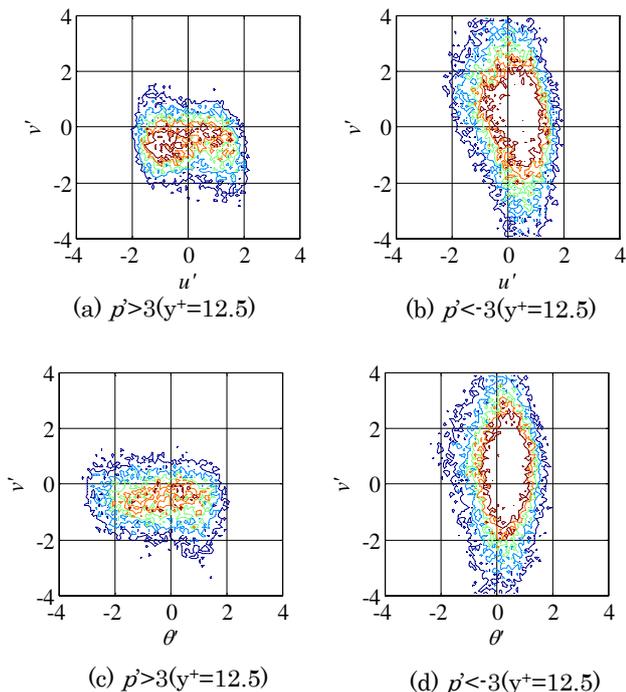
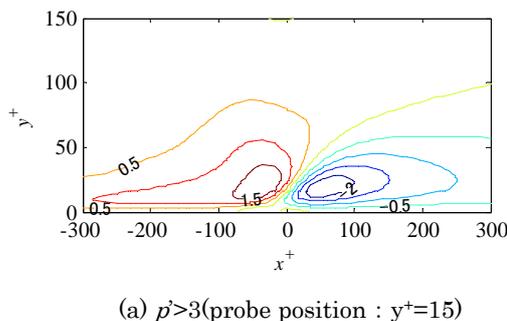


Fig.8 Joint probability density function conditioned by large pressure events. Vertical velocity fluctuation v.s. temperature, pressure v.s. temperature. Contour line: 0.0001, 0.0002, 0.0003, 0.0004, 0.0005

変動圧力による条件付き平均

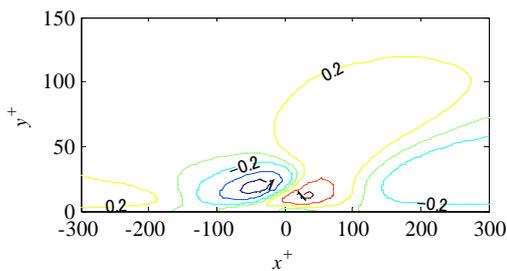
壁近くの変動圧力に起因する速度場の構造は、その正負の値によって異なることを同時確率密度関数の分布からみてきた。次に壁近くの変動圧力によって条件づけられた場合の流れ方向速度の空間的な広がり調べる (図 9 参照)。大きな正の変動圧力が観測される場合 (図 9 (a)) には、上流側で高速、下流側で低速変動をもたらす明確な速度せん断層が確認される。この速度せん断層の形成には、スパン方向の構造から説明ができる。これ

に対して、負の圧力で条件づけられた場合には、一見、まとまった構造の存在が観察できるが、その値は負の条件付けの場合の半分であり、構造自体も小さくなっている。今後、より詳細な解析する予定であるが、負の圧力変動は、乱流中の微細な渦構造との関連が指摘されており、壁近くにおいてもその影響は大きいと考えられる。



(a) $p' > 3$ (probe position : $y^+ = 15$)

Contour line:-2,-1.5,-1.0,-0.5,0,0.5,1.0,1.5



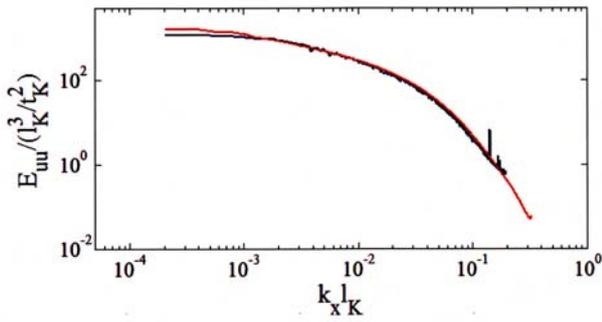
(b) $p' < -3$ (probe position : $y^+ = 15$)

Contour line:-1.0,-0.6,-0.2,0,0.2,0.6,1.0

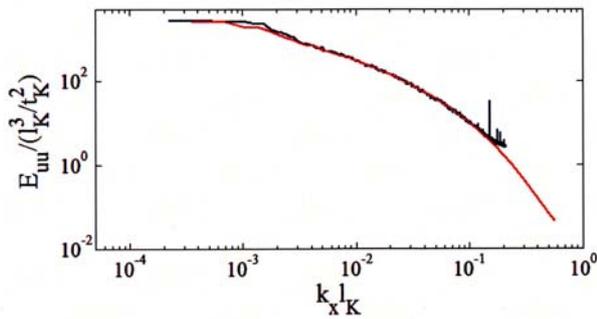
Fig.9 Contour plies conditioned wall pressure fluctuations.

実験データとの比較

図 10 には、流れ方向変動速度のスペクトルを比較した結果を示した。縦軸、横軸は Kolmogorov スケールで無次元化してある。数値計算では波数スペクトルとして、実験では凍結乱流仮説を用いて、波数スペクトルとしている。両者の一致は十分によいといえる。実験ではプローブの空間分解能が十分でないために、高波数まで解析できていない。壁近く (図 10 (a)) では、低波数での不一致がみられる。オーバーラップ領域 (図 10 (b)) では、全波数にわたって実験と数値計算との一致は良好である。つまり、凍結乱流仮説は、移流速度を局所平均速度とすることで、近似として成り立つことが確認された。



(a) Stream-wise energy spectrum at $y+=15$.
Red line:DNS, Blue line:experiment

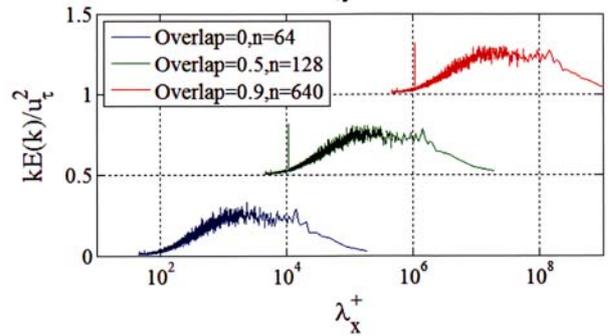


(b) Stream-wise energy spectrum at $y+=150$.
Red line:DNS, Blue line:experiment

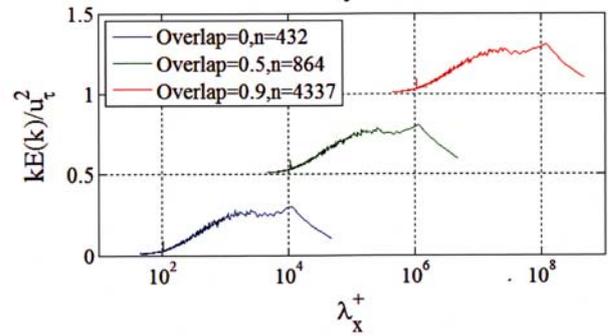
Fig.10 Comparison between DNS and experimental wave-number spectrum in channel flow.

図 1 1 には、流れ方向変動速度の PMS を示した。スペクトルを計算するデータ個数とアンサンブル平均の回数 (n)、データのオーバーラップの割合を変化させた場合の比較である。アンサンブル平均の回数が少ないほど、スペクトルのバラツキは大きい。しかし、オーバーラップの割合は、スペクトル型を大きくは変化させないようである。

スペクトルを計算するデータ点の個数については、注意が必要である。データ点が少ないと、端点の影響がスペクトルに現れる。図 1 1 (b) には、データ点の個数が少ない場合のスペクトルを示す。本論文中で議論してきた第二ピークらしいものが確認される。しかし、このピークは、統計処理が要因のものであり、物理現象とは対応しない。また、凍結乱流仮説を用いることが原因でもないことを留意しなければならない。第二ピークの原因を凍結乱流仮説にあると報告している研究もあるが、解釈を注意する必要がある。



(a) long data are used for calculation.



(b) short data are used for calculation.

Fig.11 Pre-multiplied spectrum of stream-wise component at $y+=150$.

3.3 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 [MPI×AP]	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
JAMSTEC	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

3.4 DNS コード/ポスト処理の並列化・高速化

3.4.1 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

3.4.2 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)

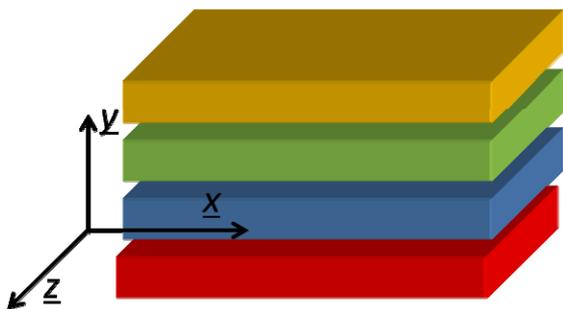


Fig.12(a) 1-D domain decomposition

(y-direction) < 4096 nodes

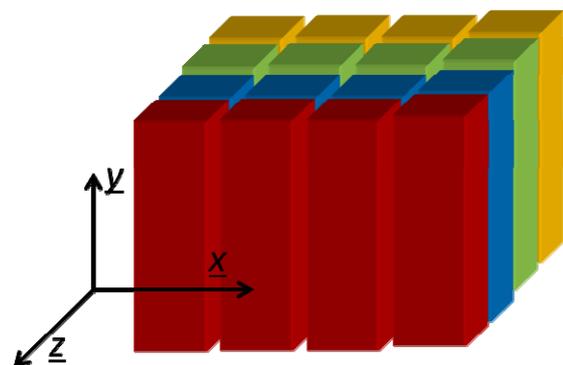


Fig.12(b) 2-D domain decomposition

(x, z-direction) > 2048 nodes

(2) 当初計画の達成状況について

数値計算データおよび実験データに基づき、凍結乱流仮説の検証をおこなってきた。高波数や慣性小領域の波数に関しては、十分な精度で、凍結乱流仮説が成り立つことを確認できた。しかし、低波数に関しては、まだ、十分な統計的安定性を得られていない。本研究で対象としている、Super Structure (SS)の抽出には、より長時間の時系列データを取得する必要がある。引き続き、計算を実行することで長時間データの取得を計画している。

数値計算では、時間分解能が十分でなかったため、Kolmogorov スケールの物理現象を解像できなかった。凍結乱流仮説には、大きなスケールの変動のみならず、小さなスケールでの仮説の妥当性をあわせて検証する必要がある。そこで、時間分解能を十分に保った再計算をすることを計画している。変動圧力の条件付き解析に関しては、レイノルズ数が大きくなった場合、外層にみられる大規模構造と壁近くの構造との分離をどのようにするのかを十分に考察できなかった。

4. 今後の展望

Super Structure は、乱流境界層中のレイノルズ応力の生成に大きな影響を与えられている。また、壁近くにまで影響を与えるため、壁面せん断応力とも密接に関連している。今後は、凍結乱流仮説により抽出したSSが、どのようにせん断応力と関連するのかを数值的、実験的に明らかにすることを計画している。この結果に基づき、SSを制御することから、せん断応力の低減を実現し、エネルギー効率の改善を実現するシナリオを提示したい。

名古屋大学情報基盤センターにおいて、計算結果の可視化に関する技術協力を得ている。今後は、複雑な流動現象、物理量の分布、動力学をリアルに表現する方法を模索できるようにさらなる研究協力をすすめる。例えば、センターに備えつけられている「円偏光式立体視システム」、「精細可視化システム」の利用を考える。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

1. 山本義暢, 高レイノルズ数大規模構造解析を対象とした壁水平方向高次精度差分法による直接数値シミュレーションの検討, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 79, No. 807 (2013), pp. 2409-2423.

(査読有)

(2) 国際会議プロシーディングス

1. Y. Yamamoto and Y. Tsuji, Reynolds Number Effects on Kinetic Energy Transfer from Outer Layer in Turbulent Channel Flows, American Physical Society 66th annual DFD meeting, Pittsburgh, Pennsylvania (USA), Nov. 24-26 (2013), Bulletin, L20-5.

2. Y. Tsuji and Y. Yamamoto, Probability density function of pressure in turbulent boundary layers, American Physical Society 66th annual DFD meeting, Pittsburgh, Pennsylvania (USA), Nov. 24-26 (2013), Bulletin, A20-9.

3. Y. Wada and Y. Tsuji, Logarithmic region of turbulent boundary layer from low to high Reynolds numbers, American Physical Society 66th annual DFD meeting, Pittsburgh, Pennsylvania (USA), Nov. 24-26 (2013), Bulletin, R19-10.

4. J. Yoshida, T. Yamakita, H. Kawashima, K. Iwamoto, M. Motozawa, Y. Kawaguchi and Y. Tsuji, Skin Friction Coefficient of Turbulent Boundary Layer over Rough Surface, The 14th Asia Congress of Fluid Mechanics - 14ACFM, October 15-19, 2013; Hanoi and Halong, Vietnam, CD-ROM (5 pages).

(3) 国際会議発表

1. Y. Tsuji, Large scale structures based on pressure in high-Reynolds number turbulent boundary layer, High Reynolds Number Boundary Layer Turbulence: Integrating Descriptions of

Statistical Structure, Scaling and Dynamical Evolution, University of New Hampshire, Durham, NH (USA), Nov. 20-22, (2013).

(4) 国内会議発表

1. 猿渡祥悟, 山本義暢, 辻 義之, LES における高レイノルズ数大規模構造の再現性に関する検討, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2013. 11. 9)

2. 渡邊亮太, 猿渡祥悟, 山本義暢, DNS データベースを用いた LES による高レイノルズ数大規模構造の精度検証, 日本機械学会関東支部山梨講演会 2013, No. 130-3, pp. 60-61.

3. 山本義暢, 辻 義之, スーパーコンピュータ京における乱流の大規模直接数値シミュレーション, 日本機械学会関東支部山梨講演会 2013, No. 130-3, pp. 64-65.

4. 山本義暢, 辻 義之, 高レイノルズ数チャンネル乱流における凍結乱流場の空間相間解析, 日本流体力学会年会 2013, 43. pdf.

5. 猿渡祥悟, 山本義暢, 辻 義之, スーパーコンピュータ京を用いた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解析, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, B06-1.

6. 和田裕貴, 今山慎太郎, 伊藤高啓, 辻 義之, 高レイノルズ数乱流境界層の対数領域における確率密度関数の自己相似性, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2013. 11. 9-10, 福岡), 0510.

7. 山北智徳, 吉田 潤, 後藤克基, 伊藤高啓, 川島 英幹, 辻 義之, 波状 粗面乱流境界層における摩擦抵抗係数の評価, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2013. 11. 9-10, 福岡), 0514.

8. 吉田 潤, 山北智徳, 後藤克基, 伊藤高啓, 川島 英幹, 辻 義之, 波状 粗面乱流境界層における組織構造に関する研究, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2013. 11. 9-10, 福岡), 0515.

9. 辻 義之, 山本義暢, 高レイノルズ数乱流境界

層における圧力計測：壁近くでの統計量補正法の提案，日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集（2013. 11. 9-10，福岡），0524.

10. 後藤克基，辻 義之，平板乱流境界層の外層速度スケールと摩擦損失係数に関する考察，日本流体力学会年会 2013.

11. 佐野正幸，恒吉 達矢，山本 義暢，辻 義之，数値計算による壁乱流の組織構造に関する研究，日本機械学会関東支部山梨講演会 2013, No. 130-3.

(5) その他（特許，プレス発表，著書等）