

平成 22 年 6 月 9 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760119

研究課題名（和文）LESにおける乱流中のコヒーレント構造に基づく壁モデルの検討

研究課題名（英文）Study on wall model for LES based on coherent structures in turbulence

研究代表者

小林 宏充 (KOBAYASHI HIROMICHI)

慶應義塾大学・法学部・教授

研究者番号：60317336

研究成果の概要（和文）：乱流モデルのLESにおいて、乱流中に普遍的に存在するコヒーレント構造をもとにした壁モデルの開発を目的として、速度勾配テンソルの第2不変量で抽出した渦構造を無次元化したコヒーレント構造関数の性質を調べた。一様等方性乱流のみならずチャンネル乱流においても、同関数の平均値、分散、確率密度関数にレイノルズ数依存性がなく、壁からの距離のみに依存することから、壁モデルへの変数として利用可能であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：In LES of turbulence simulation, investigated were the statistical properties of a coherent structure function, which shows an eddy structure and is a normalized second invariant of velocity gradient tensor. It was found that for turbulent channel flows as well as homogeneous isotropic turbulence, the average, the variance, and pdf of the function are independent of Reynolds number, depend on the distance from a wall, and is available as a variable for a wall model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：乱流のモデリング

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体、計算物理、流体工学、数値流体力学、乱流モデル、LES、コヒーレント構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 現実に車の周りやガスタービンの燃焼器内など複雑な形状の計算においては、高解像度かつ高速な数値計算スキームがまだ存在しておらず、直接計算(DNS)を行うのは困難である。そのような非定常性が強く、複

雑な物体回りではLESは非常に有力なツールであるが、壁近くでは見かけのレイノルズ数が低下してしまい、LESモデリングの拠り所となる慣性小領域が存在せず、その効果をモデルに反映させる必要がある。一般に、壁関数と呼ばれる壁に近づくにつれて乱れがゼ

ロに漸近するような関数を考慮する。

(2) 小林は、乱流中に普遍的に存在するコヒーレント構造に着目し、壁への漸近性を満たす LES における Coherent Structure モデル (CSM) を提案した。一様等方性乱流、回転一様減衰乱流、急回転減衰乱流、平行平板間乱流、回転平行平板間乱流にそのモデルを適応し、これまでもっとも汎用性が高いと言われている Dynamic Smagorinsky モデル (DSM) と同等の結果が得られることを示した。本モデルは局所モデルであり、DSM のような一様平均を必要とせず、簡便で高速なモデルである。

(3) LES は有望であるが、残念ながらその適応は低および中レイノルズ数流れに、限定されている。さらに高レイノルズ数の流れ場に適用するには、壁近傍まで LES ですべて解くとすると、格子点の増大および計算時間の増大を招いてしまうのが、現状である。よって、壁モデルとの組み合わせが必要となる。

2. 研究の目的

(1) 乱流から速度勾配の第 2 不変量として抽出されるコヒーレント構造とエネルギー散逸率の関係について LES を前提に、粗視化した場合、空間構造およびそのアンサンブル平均など、瞬時値と統計量の両面から検討を行い、どのような関係が現れるかを調べる。

(2) 平行平板間において、中央と壁近傍でその関係の違いを明らかにする。

(3) 低レイノルズ数と高レイノルズ数流れにおける違いを明らかにする。

(4) コヒーレント構造をもとにした、レイノルズ数によらない、普遍的な壁モデルの開発。

3. 研究の方法

(1) 低レイノルズ数 ($Re=180$) の平行平板間流れの DNS を実行。

(2) LES のために様々な格子解像度で粗視化をした第 2 不変量 Q とエネルギー散逸率 ε の瞬時値のみならず、アンサンブル平均された統計量との関係を明らかにする。

(3) 可視化ソフトで Q や ε の空間配置および構造を詳細に検討して、壁のモデル化を検討。

(4) 高レイノルズ数平行平板間データの提供の協力を得ながら、レイノルズ数によらない普遍的な壁モデルを検討する。

(5) 壁近くの渦の粗視化に伴う散逸構造のモデル化を物理的手法に基づき行う。

(6) 作成した壁モデルを、高レイノルズ数平行平板間流れの LES に適用して、その性能を評価する。

4. 研究成果

(1) LES における壁モデルの開発のために、以前提案をしたコヒーレント構造関数の利用を考えた。コヒーレント構造関数は、渦の抽出によく用いられる速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q を、その速度勾配テンソルの大きさを無次元化したもので、最大値 1、最小値 -1 をとる。そのコヒーレント構造関数 $Q^\#$ の確率密度分布や平均値などの統計量を一様等方性乱流および平板間チャンネル乱流の直接計算を用いて調べた。図 1 に示すように、チャンネル乱流のコヒーレント構造関数の確率密度分布は壁座標において壁からの距離に応じてレイノルズ数によらず、良く一致することが分かった。

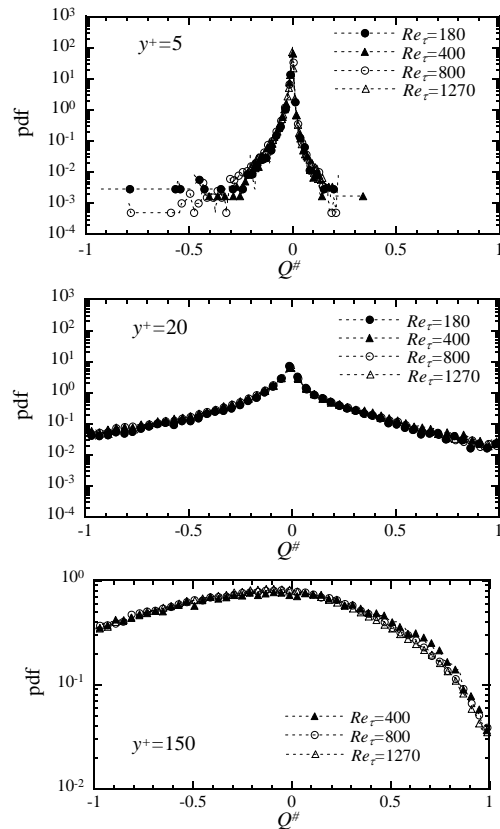


図 1 チャンネル乱流におけるコヒーレント構造関数 $Q^\#$ の確率密度関数 (pdf) の $y^+=5, 20, 150$ における分布

図 2 に一様等方性乱流およびチャンネル中央におけるコヒーレント構造関数の確率密度

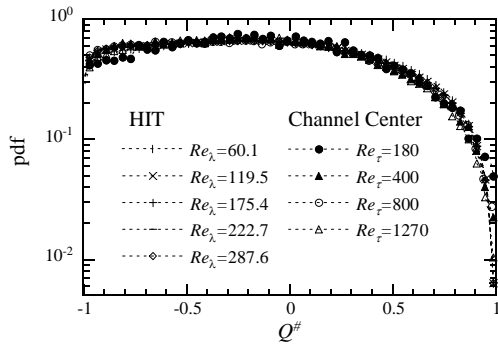


図 2 一様等方性乱流 (HIT) とチャンネル乱流におけるコヒーレント構造関数 $Q^\#$ の確率密度関数 (pdf) の分布

関数の分布を示す。一様等方性乱流の場合も、レイノルズ数によらず、確率密度関数が一致することが分かった。また、チャンネル中央の確率密度関数もレイノルズ数によらず、その分布は一様等方性乱流の確率密度関数と良く一致することが分かった。

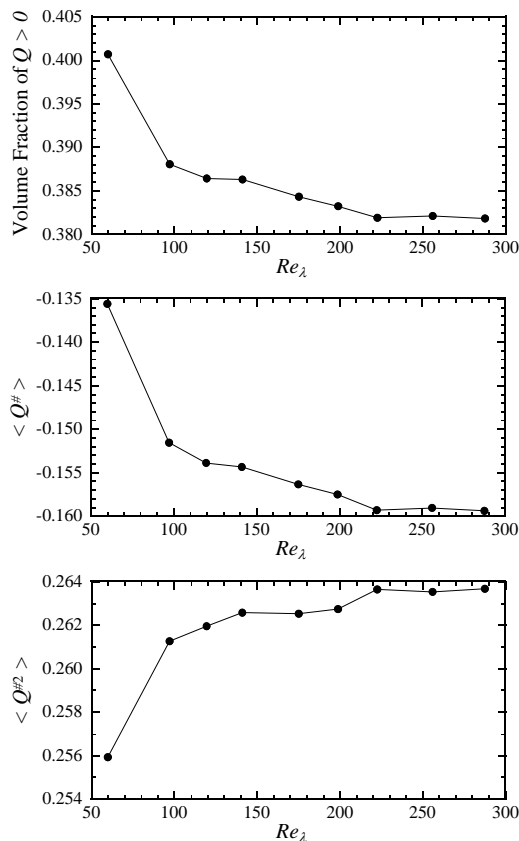


図 3 一様等方性乱流における正の Q 値の体積分率、 $Q^\#$ の平均値、その分散のレイノルズ数依存性

一様等方性乱流において、図 3 に示すように、正の Q 値の体積分率、 $Q^\#$ の平均値、その

分散は、レイノルズ数の増加とともにある値に収束することが分かった。

図 4 に示すように、チャンネル乱流において、コヒーレント構造関数の分散は、壁からの距離に応じて変化するが、レイノルズ数に依存しない分布となることが分かった。

(2) 壁モデルの必要性が、導電性をもつ流体に磁場を印可した際に得られる、通常の境界層よりも薄いハルトマン層をもつ電磁流体 (MHD) 乱流においても、顕著となることが分かった。バーガーズ渦に関して、コヒーレント構造関数の解析解を調べたところ、図 5 に示すように、渦度が強いところでは 1 となり、せん断が強いところでは、-1 となるデジタル的な振る舞いをするということが分かった。

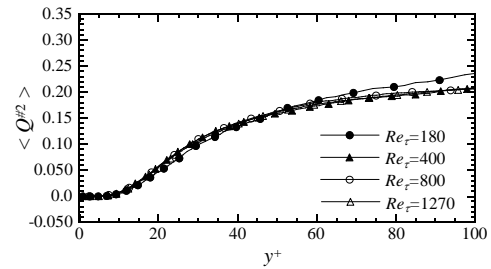


図 4 チャンネル乱流におけるコヒーレント構造関数 $Q^\#$ の分散の壁方向分布

実際の乱流は、孤立した渦ではないので、その分布が重なり、つながったものとなるが、レイノルズ数に依存せずに、構造を抽出することが分かった。そのような局所的な情報から得られた関数の平均値、分散、確率密度関数といった統計的性質に、レイノルズ数依存性がなく、壁からの距離に応じて、それらの値が決まることから、壁モデルへの変数として利用可能であることが分かった。

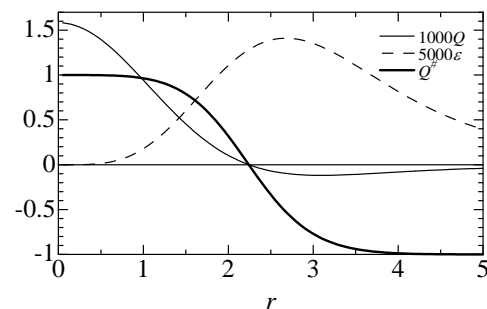


図 5 バーガーズ渦に対する第 2 不変量 Q 、エネルギー散逸率 ε 、コヒーレント構造関数 $Q^\#$ の解析解

(3) 本検討で得られたコヒーレント構造関数は、エネルギー散逸の構造と密接に関連している。その統計的性質がレイノルズ数に依

存しないことが明らかにされたが、アメリカ物理学会や第 6 回 Turbulence and Shear Flow Phenomena 国際会議における発表後、質問や問い合わせを受けて好評を得た。国内では、同関数を利用したモデルの成果によって日本流体力学会から竜門賞を受賞した。

(4) 今後、レイノルズ数に依存しないコヒーレント構造関数を用いた壁モデルが開発され、高レイノルズ数流れにおいても、少ない格子点数で高速に LES の実行が可能となり、乱流の物理的理解の発展とともに、実用的な工学応用への道を開く意義が予想される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 7 件)

- ① H. Kobayashi, Large eddy simulation based on the turbulence structure, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2010, 2010 年 3 月 28 日, ラスベガス (米国)
- ② 小林宏充, LES における局所空間相関を高めたコヒーレント構造モデル、日本物理学会、2009 年 9 月 28 日、熊本大学
- ③ H. Kobayashi, Y. Tominaga, T. Kubota, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Statistical properties of a coherent structure function for homogeneous isotropic turbulence and turbulent channel flows, 6th Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2009 年 6 月 22 日, ソウル国立大学 (韓国)
- ④ 小林宏充, 富永泰裕, 窪田泰助, 店橋護, 宮内敏雄, 一様等方性乱流およびチャンネル乱流におけるコヒーレント構造関数の統計的特性、第 22 回数値流体力学シンポジウム、2008 年 12 月 17 日、東京
- ⑤ H. Kobayashi, Y. Tominaga, T. Kubota, M. Tanahashi, T. Miyauchi, Statistical properties for homogeneous isotropic turbulence and turbulent channel flows using a coherent structure function, 61st Annual Meeting of Division of Fluid Dynamics of The American Physical Society, 2008 年 11 月 23 日, サンアントニオ (米国)
- ⑥ 小林宏充, 富永泰裕, 窪田泰助, 店橋護, 宮内敏雄, コヒーレント構造に基づく LES 壁モデルの予備的検討、流体力学会年会 2008, 2008 年 9 月 7 日、神戸

[その他]

ホームページ等

<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/0040/0007193/pblc1.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 宏充 (KOBAYASHI HIROMICHI)
慶應義塾大学・法学部・教授
研究者番号：60317336

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし