

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560156

研究課題名（和文）時間フィルターに基づくハイブリッド乱流方程式の解析とモデリング

研究課題名（英文）Analysis and modeling of hybrid turbulence equation based on temporal filtering

研究代表者

半場 藤弘（HAMBА FUJIHIRO）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20251473

研究成果の概要（和文）：空間フィルターを用いてチャンネル乱流の速度方程式の解析を行った。RANS と LES 領域の界面近くで、非可換性による付加項が応力揺らぎや乱流エネルギー収支で重要な役割を果たすことがわかった。また時間積分を用いた新しい長さスケールを導入し、渦拡散率と渦粘性率の輸送方程式を理論的に導いた。レイノルズ応力、渦粘性率、長さスケールがそれぞれの輸送方程式の生成項を通じて密接に関連することが示された。

研究成果の概要（英文）：Analysis of the velocity equation in turbulent channel flow was made using spatial filtering. It was shown that the extra term due to the non-commutivity plays an important role in the stress fluctuation and the turbulent energy budget near the interface between the RANS and LES regions. A new length scale was introduced using the time integral to derive theoretically the transport equations for the eddy diffusivity and the eddy viscosity. The Reynolds stress, the eddy viscosity, and the new length scale were shown to be closely related to each other via the production term of each transport equation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：流体物理学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流モデル、RANS、LES、ハイブリッドモデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来の乱流モデルの欠点

乱流の大きな特徴は大小さまざまなスケールの渦運動が含まれることであるが、自然界や工学分野で見られる高レイノルズ数乱流において、大小すべての渦運動を数値的に解くことは困難である。そこで何らかの方法で小さい渦をモデル化し、大きな渦や平均場

だけを数値的に解くことが必要である。その際乱流によって実効的な粘性率が増大し（渦粘性率）、速度場や熱・物質の拡散が大きく促進されるため、渦粘性率などの輸送係数を正確に予測する必要がある。歴史的に見るとまず長時間平均に基づくレイノルズ平均モデル（RANS）が開発されてきた。ほとんどの渦をモデル化するため計算量は少ないという

長所があるが、複雑なモデルが必要であり、普遍的なモデル化が難しいという欠点がある。一方、計算機の発達に伴いラージ・エディ・シミュレーション (LES) が開発され、最近では実用計算に使われつつある。LES では計算格子より小さい渦だけをモデル化し、計算量が多いが精度の良い予測が可能となる。将来の計算機の発展を考えれば、LES だけで高レイノルズ乱流の実用計算が可能という予測があった。しかし、物体の表面 (壁面) の近くでは非常に小さい渦が存在し、それらを解像するため多大な格子点数が必要となり、その制限のため LES といえども高レイノルズ数の壁面乱流の計算は近い将来でも困難であるという認識が広がっている。

(2) ハイブリッド乱流モデルの特徴

上記の欠点を克服するため、RANS と LES の双方の長所を生かし、壁近くの境界層は既往の RANS モデルを用い、壁から離れた非定常乱流は LES で正確に解くという、RANS と LES のハイブリッド計算法が提案され、開発されつつある。その代表的なものは約 10 年前に航空分野の研究で提案された DES (detached eddy simulation) である。この方法がうまくいけば、壁近くの格子点数の制約が緩和し高レイノルズ数乱流の LES が可能となり、実用的に非常に重要である。そのため DES を初めさまざまな RANS/LES ハイブリッド計算法が開発され、種々の流れに適用されつつある。既存の RANS、LES に加えてハイブリッド計算は乱流に関する国際シンポジウムの重要なトピックの一つとなり、またワークショップなども開かれている。

しかし応用が進みつつある反面、方法としては未完成である。例えば DES の検証のためチャンネル乱流の計算が行われたが、壁近くの RANS 領域と壁から離れた LES 領域をつなぐ界面で、速度分布に不整合 (段差) が生じるといった欠点が明らかになった。また計算格子の粗密が計算結果に影響を及ぼすという問題も指摘されている。これらの欠点は DES にとどまらず、一般の RANS/LES ハイブリッド計算法に共通する課題であり、現在においてもその原因や改善方法は十分明らかにされていない。RANS/LES ハイブリッド計算は RANS と LES の計算領域をはっきり分け界面で物理量をつなげる方法と、計算領域を分けずパラメータを導入して RANS と LES モデルを連続的につなげるという方法もある。特に後者の場合は RANS と LES の中間的なモデル化が必要となる。

気象の分野でも RANS と LES の中間のモデル化が課題となっている。例えば水平方向が数千 km の日本全域の天気予報で用いる大気計算では水平方向の計算格子幅は数十 km となり、大気境界層の熱対流を直接扱うこと

は困難であり RANS に相当する静水圧モデルで計算する必要がある。一方水平距離が数 km の計算領域に限れば大気境界層の乱流を LES で解くことが可能である。ところが最近問題となっている局地的な豪雨を予報するには水平方向数 10km の計算が必要となり、ちょうど RANS と LES の中間となり、モデルや計算法が確立していない。

(3) ハイブリッド乱流方程式の解析の必要性

われわれはこれまでハイブリッド計算法の欠点であるチャンネル乱流の速度不整合の問題について取り組み、まず現象論的に改良する方法を提案した。つぎにフィルターと空間微分の非可換性による付加項を着目してその改良方法の妥当性を示した。しかしその方法の物理的根拠を正しく示すため、また方法を一般的な流れ場に適用するためには、流体速度の基礎方程式に立ち戻り、ハイブリッドフィルターの影響とモデル化について詳しく考察する必要性を痛感した。そこでまず DNS データに基づき基礎方程式の各項を調べることを行う。

2. 研究の目的

RANS と LES を組み合わせるハイブリッド乱流計算法の欠点を改良し、また物理的な妥当性を示すため、ハイブリッド乱流方程式の解析とモデリングを行う。チャンネル乱流の DNS データを用いて方程式の各項を解析し、得られた知見に基づいてモデル化を行う。まず最初に RANS と LES の領域を壁面に平行な界面で分割し、高レイノルズ数 LES の壁面モデルのためのハイブリッド乱流場の解析を行う。次に主流に垂直な界面で分割し、LES の流入条件となるハイブリッド乱流場の解析を行い、さらにレイノルズ応力項や付加項のモデルを提案する。

3. 研究の方法

チャンネル乱流などの単純形状の流れ場では壁面に平行な空間フィルターが使えるが、より一般的な流れ場では時間フィルターしか用いられない。そこで、まず空間フィルターと時間フィルターの乱流場への影響を調べ、共通点と相違点を明らかにし、時間フィルター場が壁面モデル化に有効かどうかを調べる。そして各フィルターに基づいたハイブリッド乱流方程式の基礎方程式の各項を DNS データを用いて評価し、非可換性による付加項の寄与と、RANS と LES の中間のレイノルズ応力のふるまいを調べる。とくに速度場だけでなく乱流エネルギーの輸送の観点から各項の寄与を調べモデル化の可能性を探る。

(1) チャンネル乱流のハイブリッド乱流場の解析

空間フィルターと時間フィルターを用いて壁面に平行な界面を設定してチャンネル乱流の DNS のデータを解析する。まずフィルター幅を壁面垂直方向に変化させて、壁近くでは格子幅より十分長いフィルターを課し RANS 領域とし、チャンネル中央では格子幅と等しいフィルターを課し LES 領域とし、それぞれグリッドスケール(GS)速度場とサブグリッドスケール(SGS)速度場の強度や空間構造を調べる。

そして GS 速度方程式を厳密に定式化し、SGS 応力項、および非可換性による付加項の強度や空間構造を調べる。特に界面近くの RANS から LES に切り替わる領域で、付加項の寄与の割合やレイノルズ応力項と速度歪みの対応関係を精査する。さらに乱流運動エネルギーの輸送方程式も考察し、フィルター幅の急激な変化に伴う GS エネルギーと SGS エネルギーのやりとりを調べる。

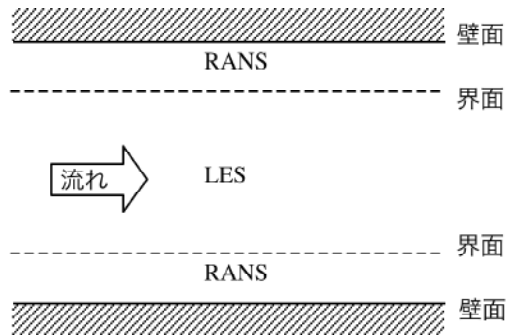


図1 壁面に平行な領域分割によるハイブリッド計算の模式図

次に RANS と LES を主流方向に切替え、界面で自発的に GS 速度乱れを発生させることができれば、LES の流入速度場の作成方法とみなすことができる。そこで、主流に垂直な界面を設定し、上流を RANS 領域、下流を LES 領域として分割しチャンネル流の DNS を解析する。GS と SGS 速度場の強度と空間構造、および GS 速度方程式中の SGS 応力と付加項の強度や空間構造を調べる。特に下流に行くにつれてどのように GS 速度エネルギーが回復するかに着目する。さらにここまでに DNS から得られた知見に基づき、かつ乱流の統計理論を用いて SGS 応力項と付加項のモデル化を試みる。GS 速度方程式のモデル化だけでなく、SGS 運動エネルギーの輸送方程式中の付加項すなわち GS 運動エネルギーとのやりとりを表す項のモデル化も試みる。

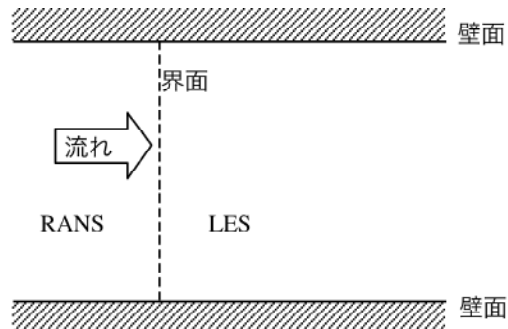


図2 主流に垂直な領域分割によるハイブリッド計算の模式図

(2) 速度の時間積分に基づく長さスケールの導入と乱流輸送方程式の解析

時間フィルターの代わりに速度の時間積分に基づく長さスケールを導入し、渦拡散率の輸送方程式を調べる。渦拡散率と長さスケール分散の輸送方程式の各項のふるまいをチャンネル乱流のデータを用いて考察する。さらに平均速度の発展に直結する渦粘性率の輸送方程式の定式化と解析を試みる。また、積分時間を変化させることで RANS と LES を結びつける長さスケールを定義し、その輸送方程式を導き、RANS と LES のハイブリッドモデルを導くことを試みる。また時間フィルターや時間積分はその経路が重要となる。座標変換によらない共変的な時間フィルターや時間積分を定義するため、共変的なモデルを導出できるように乱流理論の改良を進める。

4. 研究成果

(1) 壁面に平行な領域分割によるチャンネル乱流のハイブリッド乱流場の解析

空間フィルターを用いてフィルター幅を壁面垂直方向に変化させて、壁近くでは格子幅より十分長いフィルターを課し RANS 領域とし、チャンネル中央では格子幅と等しいフィルターを課し LES 領域とし、統計量を調べた。特に GS 速度方程式を厳密に定式化し、非可換性による付加項の強度や空間構造を調べた。その結果、RANS と LES の境界領域では付加項の揺らぎは無視できず GS 応力項と同程度の大きさを持っていること、空間構造についても付加項は応力項と同様の細かい渦の分布を持つことも示された。また乱流エネルギーの輸送方程式を定式化し考察した。境界領域において乱流拡散項の付加項が無視できない値をもち、SGS エネルギーから GS エネルギーへエネルギーが移っていることがわかった。以上のことから実際のハイブリッド計算において、GS 速度の方程式中に付加項の効果を入れる必要があること、また乱流運動エネルギーのモデル方程式を用いる場合は、乱流拡散項にも付加項を入れるべきであることが示された。

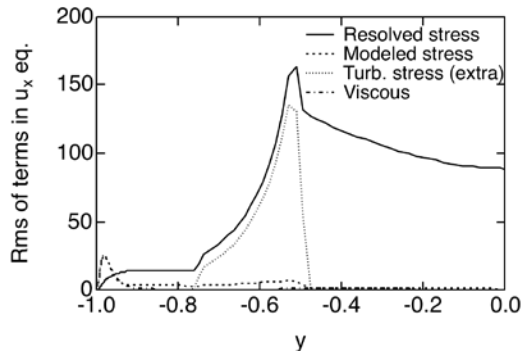


図3 チャンネル乱流における応力のゆらぎの壁垂直方向分布

(2) 主流に垂直な領域分割によるチャンネル乱流のハイブリッド乱流場の解析

空間フィルターを用いてフィルター幅を主流方向に変化させて、上流では格子幅より十分長いフィルターを課し RANS 領域とし、下流では格子幅と等しいフィルターを課し LES 領域とし、統計量を調べた。上流では SGS エネルギーが卓越し、下流に進むにつれ SGS エネルギーが減少しその代わりに GS エネルギーが増加し卓越することが示された。さらに非可換性による付加項の強度を調べ、RANS と LES の境界領域では付加項の揺らぎは無視できず GS 応力項と同程度の大きさを持っていることがわかった。また乱流エネルギーの輸送方程式では境界領域において移流項と拡散項の付加項が大きい値をもち、生成項や散逸項以上に大きい値を持つことが示された。その結果実際のハイブリッド計算において下流方向への GS エネルギーの増大を再現するには、生成項の修正でなく移流・拡散項の付加項の効果をきちんと取り入れる必要があることがわかった。

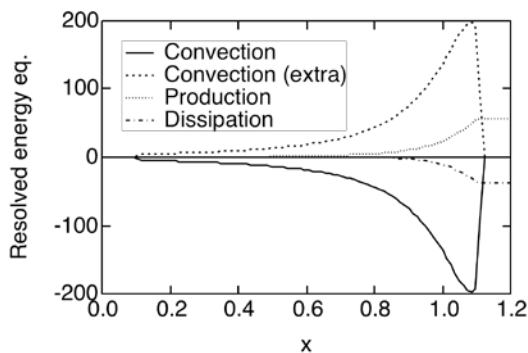


図4 チャンネル乱流における乱流エネルギー収支の主流方向分布

(3) 速度の時間積分による渦拡散率・渦粘性率の輸送方程式の解析

空間フィルターの代わりに時間フィルターによるチャンネル乱流の解析を試みたが、こ

のままではデータ解析に多大な時間がかかることが判明した。そこであらかじめ時間フィルターを組み込んだ変数の時間発展を解くことを考え、速度を時間積分することにより得られる新しい長さスケールを導入した。その結果、この長さスケールを用いて乱流の渦拡散率を定式化できることが理論的にわかり、チャンネル乱流のデータを用いて検証した。

次にスカラー輸送に伴う渦拡散率ではなく乱流運動そのものを表す渦粘性率を扱うため、運動量輸送に伴う速度を時間積分することで得られる新しい長さスケールを導入した。それを用いて渦粘性率を定式化し、チャンネル乱流のデータを使って渦粘性率の輸送方程式を解析し検証した。その結果、仮に平均速度勾配がなくてもレイノルズ応力すなわち乱流揺らぎ速度が渦粘性率を生成することがわかった。またレイノルズ応力、渦粘性率、長さスケール分散が生成項を通して密接に関係していることが示された。

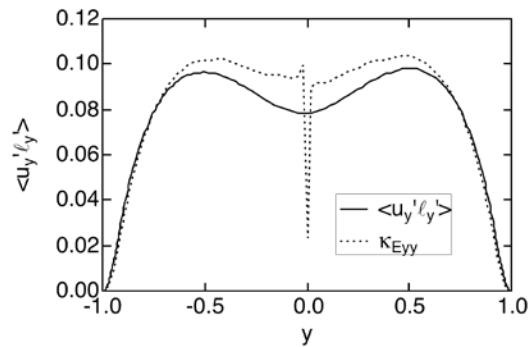


図5 チャンネル乱流における渦拡散率の分布

(4) 乱流理論による共変的なモデルの開発と逆時間方向の乱流拡散の解析

座標変換によらない共変的な時間フィルターや時間積分を定義するため、従来の乱流理論を改良し共変的なモデルを導出する理論的方法を構成した。特に非一様性の効果を取り込む方法の考察を行った。また時間積分の代わりに時間について逆向きに乱流方程式を解く方法の可能性を探った。拡散方程式を解くときの数値計算の不安定性を物理的に考察し、フィルターを用いて安定化させる方法を導出した。

(5) 成果の位置づけ・影響と今後の展望

まず空間フィルターを用いてチャンネル乱流の速度方程式を解析することにより、RANS と LES 領域の界面近くにおいて非可換性による付加項が応力の揺らぎや乱流エネルギーの収支で重要な役割を果たすことがわかった。これはハイブリッド乱流モデルの改良に大きな示唆を与える。特に主流方向に領域を

切り替える場合は、LES のための流入速度場の生成と密接に関係があると思われる。また時間フィルターの代わりに時間積分による新しい長さスケールを導入したことで、渦拡散率と渦粘性率の輸送方程式を理論的に導くことができた。これは RANS のモデリングの改良に大きな寄与をすると思われる。

今後は付加項のモデル化を行い、また積分時間を変えてハイブリッド乱流の渦粘性率を導くことが必要となり、これらはハイブリッド乱流計算の根拠づけと改良に貢献することが期待される。

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)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① F.Hamba, Exact transport equation for eddy diffusivity in turbulent shear flow, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 査読有, Vol.27, 2013, 掲載確定
- ② F.Hamba, S.Abe, D.Kitazawa, S.Kato, Filtering for the inverse problem of convection-diffusion equation with a point source, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.81, 2012, p.114401
- ③ F.Hamba, Analysis of filtered Navier-Stokes equation for hybrid RANS/LES simulation, Physics of Fluids, 査読有, Vol.23, 2011, p.015108

[学会発表] (計 18 件)

- ① 半場藤弘, 乱流の渦粘性率の局所近似と輸送方程式、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学 (広島県)
- ② F.Hamba, Transport equation for eddy viscosity in turbulence, International Computational Mechanics Symposium 2012, 2012 年 10 月 10 日、神戸大学 (兵庫県)
- ③ T.Ariki, F.Hamba, A statistical theory for inhomogeneous turbulent flow formulated in the mean-Lagrangian coordinates, 13th European Turbulence Conference, 2011 年 9 月 13 日、Warsaw, Poland
- ④ 半場藤弘, チャネル乱流における渦拡散率輸送方程式の解析、日本流体力学会年会 2011、2011 年 9 月 8 日、首都大学東京 (東京都)
- ⑤ N.Yokoi, Incorporation of helicity effects in sub-grid scale models, NORDITA Program on Dynamo, Dynamical Systems and Topology, 2011 年 8 月 5 日、Stockholm, Sweden
- ⑥ F.Hamba, Energy transfer of hybrid-filtered velocity field in

turbulent channel flow, Seventh International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2011 年 7 月 31 日、Ottawa, Canada

⑦ 半場藤弘, RANS/LES ハイブリッドフィルターの速度場のエネルギー輸送、第 24 回数値流体力学シンポジウム、2010 年 12 月 22 日、慶應義塾大学(神奈川県)

⑧ 半場藤弘, RANS/LES ハイブリッド計算のためのフィルター化された速度方程式の解析、日本流体力学会年会 2010、2010 年 9 月 9 日、北海道大学(北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

半場 藤弘 (HAMBA FUJIHIRO)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：20251473

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

横井 喜充 (YOKOI NOBUMITSU)
東京大学・生産技術研究所・助教
研究者番号：50272513