

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 20 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760431

研究課題名（和文） LES/RANSハイブリッドモデルへの変分マルチスケール法の適用

研究課題名（英文） Study on the application of the variational multiscale method to LES/RANS hybrid models

研究代表者

長谷部 寛（HASEBE HIROSHI）

日本大学・理工学部・専任講師

研究者番号：60366565

研究成果の概要（和文）：変分マルチスケール法（VMS法）に基づく最新の乱流モデルである time dependent subscales モデルに着目し、乱流の微細変動成分が評価される要素積分点の数を制御することで、LES 領域と RANS 領域を明確に区別しない新たな LES/RANS ハイブリッド乱流モデルの開発を試みた。チャンネル乱流において従来の VMS-LES モデルとの比較を行ったが、現段階では優位な差は認められなかった。しかし、積分点数の制御には改善の余地があり、また他のパターンの解析メッシュにおける検討も必要であると考えている。

研究成果の概要（英文）：In order to develop new LES / RANS hybrid turbulence models that do not clearly distinguish the region of RANS and that of LES, time dependent subscales model which is the latest model based on the variational multiscale models is focused on. Although, in a turbulent channel flow, it is compared with VMS-LES model, significant difference between two models was not observed at this stage. However, the number of integral points should be improved and it also should be studied in the other mesh patterns.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学／構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：乱流モデル、変分マルチスケール法、time dependent subscales モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) LES/RANS ハイブリッドモデルの問題点

代表的な乱流解析法である LES (Large Eddy Simulation) と RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) を混合した LES/RANS ハイブリッド乱流モデルは、LES よりも固体境界近傍のメッシュ数を削減でき、計算負荷が低減されることから、工学的な応用問題に用いられている。LES/RANS ハイブリッド乱流モデルは、固体境界近傍を RANS で、その外側の領域を LES で解く。しかしこのモデルは、RANS 領域と LES 領域の境界で、解の連続性が必ずしも保証されない問題を抱えている。

この問題は 2 つのモデルが対象とする乱流変動のスケールの違いに起因すると考えられる。RANS は乱流のエネルギー保有領域付近の大規模なスケールの変動から微小なスケールの変動までをモデル化する。一方で LES は、乱流の慣性小領域以下の微小なスケールの変動のみをモデル化する。そのため、このようなモデル化するスケールの大きさの異なるモデルの解を直接接続しようとする限り、解の連続性に関する問題は解消しないと考えられた。

(2) VMS 法に着目した背景

変分マルチスケール法 (VMS 法) は、解の関数空間をメッシュで解像できる粗いスケールと、それ以下の微細スケールの 2 つのスケールに分離し、粗いスケールは直接解き、微細スケールは解析的にモデル化して解く乱流解析法である。つまり、VMS 法ではモデル化される乱流変動のスケール範囲 (微細スケール) がメッシュサイズに依存する。

したがって、解析メッシュサイズに応じた微細スケールの近似方法を確立できれば、モデル化する乱流変動スケールを、LES のような微細スケールだけでなく、LES と RANS の中間的なスケール、RANS のような大規模スケールのように様々なモデル化スケールを設定することが可能となると考えた。その結果、LES 領域から RANS 領域へと連続的にモデルを変化させる新たな LES/RANS ハイブリッド乱流モデルを構築できると考えるに至った。

2. 研究の目的

(1) 粗いメッシュに対する従来の VMS 法の適用性の検討

VMS 法の特徴は、微細スケールを解析的に近似するところにある。発案者の Hughes らは摂動法に基づき、LES と同程度の乱流の微細変動スケールの解析解 (級数解) を導出し、それをモデル化している。しかしながら、Hughes らの VMS-LES モデルが、RANS で用いられるような粗い解析メッシュにおいてどのような結果を導くのか、十分に検討されていない。そこで本研究では、この点を検証する。

(2) 正方形角柱まわりの流れの微細変動成分の測定

将来的には、本研究で構築する解析法を、剥離を伴う物体まわりの流れの解析に適用する。正方形角柱まわりの流れは、流れのはく離や巻き込みなどその検証を行う上で流体力学的に多くの利点を有している。しかし、チャンネル乱流のように正方形角柱まわりの流れの変動成分に関する DNS データは公開されていないことから、自ら可視化実験に基づく PIV 解析を実施し、流れの変動成分および乱流統計量に関する情報を取得する。

(3) 粗いメッシュに対する最適な微細スケール近似方法の検討

VMS 法において、微細スケールを LES と RANS のモデル化範囲の中間的な位置や、RANS のモデル化範囲に設定するためには、それぞれの微細スケールにおける最適な近似方法を見出す必要がある。

具体的には、本研究では R.Codina らが提案した time dependent subscales モデルに

着目して、そのモデルの取り扱いを工夫することで様々な微細スケールの近似方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 効率的な解析の実現を目的とした MPI/OpenMP ハイブリッド並列計算法の導入

本研究では多数の解析をパラメトリックに実施することが想定された。また、将来的には大規模な解析を実施する必要がある。近年の大型計算機は、複数の計算ノードを有するだけでなく、1 つのノードの中に複数の計算コアを搭載した CPU を有していることが一般的である。したがってこのようなアーキテクチャーの計算機をより効率的に活用するためには、本研究で使用する流体解析コードを、これまで用いていた MPI に基づく並列計算法から、MPI/OpenMP ハイブリッド並列計算法へと改良する必要がある。本研究ではまずはじめにこの点に着眼して、解析コードの改良を測る。

(2) 正方形角柱まわりの流れの可視化実験に基づく PIV 解析

様々な微細スケールに適用可能な近似方法を構築するためには、流れの微細変動成分および乱流統計量に関する情報が必要不可欠である。チャンネル乱流のように DNS データベースが公開されているものであれば良いが、本研究で構築するモデルの最終的な対象は、はく離や再付着、巻き込みなどを含む流れであるが、そのような流れの乱流特性量はデータベースとして公開されていない。また、数値解析モデルの構築には 1 点だけの情報では不十分であるため、面的に情報を取得する必要がある。

そこで、構造基本断面である正方形角柱を対象として、可視化実験に基づく PIV 解析を実施し、流れの微細変動成分を面的に測定する。研究代表者はこれまでに正方形角柱の後流を対象とした PIV 解析を実施しているが、可視化実験の光源として用いているレーザーの出力が低く精度の良い結果は得られなかった。そこで本研究で導入する高出力のレーザー光源 (KANOMAX, CW532-3W) を用いて、その問題の克服を目指す。

(3) チャンネル乱流を対象とした従来の VMS 法の適用範囲の検討

様々な微細スケールの近似方法を検討するためには、従来の VMS 法 (VMS-LES モデル) の粗いメッシュへの適用性を把握しておく必要がある。そこで、チャンネル乱流を対象として、従来の VMS-LES モデルを用いた解析を実施し、粗いメッシュにおける結果を

検討する。比較対象として、東京大学熱流体工学研究室が無料で公開しているチャンネル乱流の DNS データベースを活用する。

(4) Time dependent subscales モデルを用いた様々な微細スケールに適用可能な近似方法の検討

従来の VMS-LES モデルでは、流れの微細変動スケール \mathbf{U}' を以下のようにモデル化する。

$$\mathbf{U}' \approx -\tau \mathbf{R}(\bar{\mathbf{U}}) \quad \dots (1)$$

ここで τ は安定化パラメータ、 $\mathbf{R}(\bar{\mathbf{U}})$ は方程式の残差である。一方で本研究で採用する time dependent subscales モデルは \mathbf{U}' を次式でモデル化する。

$$\frac{\partial \mathbf{U}'}{\partial t} + \frac{1}{\tau} \mathbf{U}' \approx -\mathbf{R}(\bar{\mathbf{U}}) \quad \dots (2)$$

どちらも \mathbf{U}' はガウス積分点において評価されるが、後者は時間に関する常微分方程式で表されることから、時間発展方程式を解くことで算出され、独立変数のようなものとなる。これは構造解析における internal variable と同一である。したがって、積分点数によって微細スケールの変動成分 \mathbf{U}' の精度は変わると考えられる。そのため、粗いメッシュでは通常よりも多くの積分点を配置してモデル化精度が向上するか検討する。

4. 研究成果

(1) MPI/OpenMP ハイブリッド並列計算法の導入結果

解析コードの内積演算部を MPI と OpenMP の両方を用いて並列化し、MPI のみで並列化した場合と比較した。なお使用したマシンのアーキテクチャは、2 ノードで各ノードに 8 コアの同一 CPU が搭載されたものであり、 $2 \times 8 = 16$ スレッド (プロセス) の並列計算が実行できる。

比較結果を図 1 に示す。解析規模の関係から 4 スレッド程度で並列化効率は頭打ちとなっているが、MPI と OpenMP のハイブリッド型の並列計算法でもスピードアップが確認された。ただし、8 スレッド以降はハイブリッド型が逆に計算時間を多く要する結果となったため、解析規模と並列計算のスレッド数については慎重に設定する必要があることが分かった。

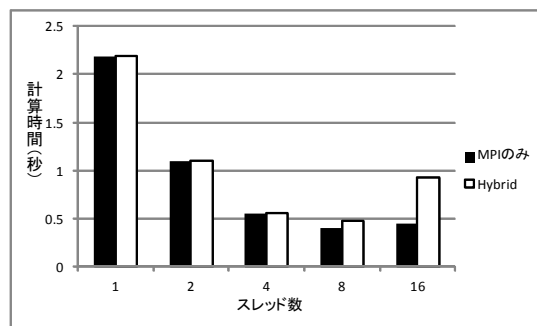


図 1 ハイブリッド型並列計算法の計算効果

(2) PIV 解析による正方形角柱まわりの流れの風速測定

本研究で構築するモデルの検証を実施するための参照データを取得するため、本研究で導入したハイパワーレーザーを用いて正方形角柱まわりの気流の PIV 解析を実施した。その一例を示す。

図 2 に示す角柱下方の代表点において PIV 解析を実施した結果が図 3 である。風洞風速は 0.5 m/s である。代表点が流れのはく離せん断層の外側に位置することから、測定される風速は風洞風速 (0.5 m/s) と一致することが想定されたが、おおむね良好な結果が得られた。ただし、若干精度の低い結果が得られる瞬間が垣間見られることから、撮影する可視化画像の質と解析のパラメーターについて検討を重ねる必要がある。なお、現時点でもこの正方形角柱まわりの気流の PIV 解析は継続して実施しており、精度向上と参照データの蓄積を継続的に実施している。



図 2 正方形角柱周辺気流の可視化画像と PIV 解析の代表点

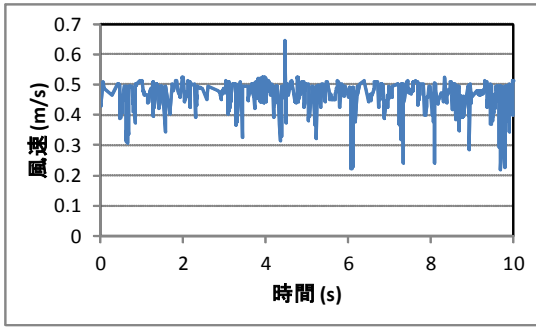


図3 PIV解析による測定風速

(3) チャネル乱流における従来の VMS-LES モデルと time dependent scales モデルの解析結果の比較

チャネル乱流を対象に、VMS-LES モデルと time dependent scales モデルの解析結果の比較を行った。比較対象とした DNS データは、東京大学熱流体工学研究室の $Re_\tau = 150$ の DNS データベースである。

解析領域サイズは流れ方向 4π 、奥行き方向 $4/3\pi$ 、高さ方向 2 として上下境界を壁面として扱った。メッシュ分割数は $8 \times 8 \times 16$ 分割と $16 \times 16 \times 32$ 分割の 2 パターンを実施した。現時点ではこの 2 ケースに着目しているが、今後より細かい $32 \times 32 \times 64$ 分割のメッシュについても検討を行う予定である。

図4にチャネル乱流の解析を実施し得られた主流方向の平均流速分布を示す。従来の VMS-LES モデルは 2 ケースのメッシュ（高さ方向 32 分割 [32mesh] と 16 分割 [16mesh]）の解析を実施した。なお、16 分割メッシュを用いた際の結果は後述する“16mesh(TDS)”の結果と重なっている。以上の結果から高さ方向を 32 分割すれば DNS データとほぼ一致する結果が得られることが分かった。

続いて高さ方向 16 分割のメッシュを対象に time dependent subscales モデルを用いて解析を行った。結果はグラフの“16mesh(TDS)”である。この時、積分点数は一般的な 8 点を採用した。図4から分かる通り、解析結果は従来の VMS-LES モデルとほぼ一致するものであり、結果の改善は見られなかった。

しかし、今回は積分点数を 4 点としたケースしか実施しておらず、今後は積分点数を増加させ、解の振舞いを検討する予定である。また、積分点数が最適化された構築された time dependent subscales モデルを、正方形角柱まわりの流れ解析に適用し、PIV 解析結果との比較を行うことでその有用性を検討する必要があると考える。

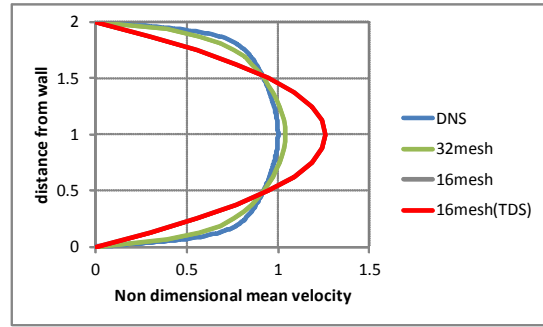


図4 チャネル乱流の解析結果
(主流方向平均流速分布)

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0件)

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
長谷部 寛 (HASEBE HIROSHI)
日本大学・理工学部・専任講師
研究者番号：60366565