

## 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 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：22560162

研究課題名（和文） 圧縮性コヒーレント構造型1方程式サブグリッドモデルの開発研究

研究課題名（英文） Development investigation of a new one-equation-type coherent structure subgrid-scale model for compressible turbulent flows

## 研究代表者

岡本 正芳 (OKAMOTO MASAYOSHI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90293604

## 研究成果の概要（和文）：

この研究では、圧縮性乱流場に対するラージ・エディ・シミュレーションにおける新たなコヒーレント構造型1方程式モデルを提案した。そのモデルの有効性を検討する目的の直接数値計算のデータベースとして、等温壁を有する圧縮性チャンネル乱流、断熱壁を有する圧縮性チャンネル乱流、等温壁を有する正方形ダクト内圧縮性乱流を作成した。そのデータベースを利用して、アプリオリテストとアポステリオリテストを実施し、本モデルの予測能力が高いことを検証した。

## 研究成果の概要（英文）：

In the present study, a new one-equation-type coherent structure subgrid-scale model for compressible turbulent flows, which is needed on the large eddy simulation, was proposed. For the purpose of verifying the prediction ability by means of the present model, we calculated the direct numerical simulations for the turbulent compressible channel flows with the isothermal walls, those with the adiabatic wall, and the turbulent compressible flows through the square duct constituted by the four isothermal wall, and performed a priori and a posterior tests for the present model. From results of the above tests, we suggested that the present model can reproduce the DNS databases.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	2,400,000	720,000	3,120,000
23年度	500,000	150,000	650,000
24年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流、圧縮性流れ、ラージ・エディ・シミュレーション、サブグリッドスケールモデル、直接数値計算、乱流統計理論

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、連成問題といった流れ場と他の現象（燃焼、化学反応、音響など）が組み合わさった問題が実用面で重要になって

きて、それまで伝統的に利用されてきたアンサンブル平均型モデル解析（RANS）よりも予測性能の高いラージ・エディ・シミュレーション（LES）の実用面での活用が強く期待

されるようになってきている。LES では以前の壁関数を使用するもの（スマゴリンスキーモデル等）から、2回のフィルター操作によるモデル定数の自発的な決定方法であるダイナミック手法が確立され、非圧縮性乱流解析では頻繁に LES が実行されるようになってきた。しかし、複雑流れへの適用ではこのダイナミック手法におけるフィルター操作自体が複雑な手続きになるため、最近ではこの困難を含まない乱流のコヒーレント構造に着目したコヒーレント構造モデルが慶応大学の小林先生により提案されている。

これら非圧縮性乱流場に対するサブグリッドスケール (SGS) モデルの進展に比べて、圧縮性乱流場の SGS モデル開発は遅れているのが現状である。航空機に代表されるような高速流の解析では特に計算負荷の高い直接数値計算 (DNS) は不可能であり、LES の適用が期待されている。また、近年音の解析も盛んになってきたが、非圧縮性流体解析と Lighthill の音響解析を組み合わせた方法が主流となっている。しかし、音波と流れ場の相互作用を正確に解くためにはこの方法では不可能であり、圧縮性流体解析が必要になる。これらの点からも圧縮性流れ場の LES 解析の必要性は今後高まっていくと思われるので、圧縮性乱流場に対する SGS モデル開発は高い重要性をもっている。

## 2. 研究の目的

非圧縮性乱流場では運動エネルギーが分子粘性による散逸で熱エネルギーへ変換される現象は正確に捉える必要がない。しかし、圧縮性乱流場では密度変化だけでなく、速度場によって構成される運動エネルギーが粘性散逸により内部エネルギーへと変換され直接温度・圧力場を変える。そして、圧力場の変化と温度依存性を有する分子粘性や分子拡散の変化により直接的および間接的に速度場が変化させられる。これらの効果を的確に取り扱える SGS モデルは現状では提案されていない。

そこで、より精密にこれらの現象に対応できる SGS モデルを開発する。粘性係数や拡散係数を級数展開によって乱流統計理論に組み込んだ新たな理論解析と、DNS と LES の数値計算によってモデル開発を実行する。特に、SGS モデルの実用面への高い適用性を確保することと SGS スケールからの影響を取り扱うため、壁関数やダイナミック・フィルター操作を使用しないコヒーレント構造型 1 方程式 SGS モデルを開発する。

## 3. 研究の方法

この研究の研究方法としては次の 3 点を組み合わせて新たな SGS モデル開発を遂行していく。

- ① 新たな理論解析によるモデリングの検討
- ② DNS データを利用したアプリオリテスト
- ③ SGS モデルを組み込んだ LES の結果と DNS の比較 (アポストリオリテスト)

まず、理論研究では乱流統計理論である TSDIA を採用する。TSDIA は Kraichnan が提案した直接相関近似理論 (DIA) に Yoshizawa がスケール分離の概念を組み込んで提案された理論であり、RANS と LES におけるモデリングやスペクトル情報などで大きな成果を上げてきた。これまでの経験から、SGS モデルの導出の際には理論に現れるカットオフ長さにフィルター長という既知スケールを利用できるため、RANS の場合より精巧なモデリングが期待できる。分子粘性率や拡散率に関する級数展開を組み合わせることによって新たな手法で TSDIA 理論解析を遂行し、モデル表現を理論的に導出する。モデル表現の根幹には壁関数を必要としないコヒーレント構造型渦粘性モデルを使用する。

検証対象とする DNS では、等温壁だけで構成される圧縮性チャンネル乱流、断熱壁と等温壁を有する圧縮性チャンネル乱流、等温壁を有する正方形ダクト内圧縮性乱流について実行する。等温壁と断熱壁を有するチャンネル乱流ではそれぞれの壁面効果をどのようにモデルに反映させるかを検討する。正方形ダクト内乱流では平均レベルでも 3 次元性を持った流れ場であり、強い 3 次元性に関してモデルがどれくらい有効性を持っているかを調査する。これらの流れ場での DNS データにフィルター操作を施してモデル表現の有効性をチェックするアプリオリテストを初めに実施する。さらに実際に提案した SGS モデルを利用した LES (アポストリオリテスト) を実施し、DNS 結果と平均量に関する比較を行う。また、構造などについても検討する。以上のように総合的にコヒーレント構造型 1 方程式 SGS モデルの評価を行う。

また、DNS と LES においては擬スペクトル法と高次精度中心差分法を使用して解析する。物理量の壁面漸近挙動の解像の点で圧縮性乱流場では壁でより密な格子を使用する必要があるため高い計算負荷が予想されるが信頼性のある計算を実施する。

## 4. 研究成果

本研究において開発する圧縮性コヒーレント構造型 1 方程式 SGS モデルでは非圧縮性乱流の SGS モデルにおいても必要となる SGS 応力  $\tau_{ij}$  と、SGS 応力との関連性が強い SGS フラックス  $h_i$ 、分子粘性係数の温度依存性のためモデル化を必要とする GS 応力  $\bar{\sigma}_{ij}$ 、GS フラックス  $\bar{q}_i$ 、エネルギー保存則を意味する方程式においてモデル化が必要となる SGS 温度膨張相関項  $\Phi$ 、SGS 応力歪相関項

$\Pi$  と、さらに SGS エネルギー  $K_{SGS}$  の輸送方程式をモデル化する必要がある。

本研究で開発した SGS モデルの具体的な表現における各項は以下のようにまとめられる。

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \bar{\rho} K_{SGS} \delta_{ij} - 2\mu_{SGS} \left( \bar{s}_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \delta_{ij} \right)$$

$$h_i = -\frac{\mu_{SGS}}{\text{Pr}_T} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i}$$

$$\bar{\sigma}_{ij} = 2\bar{\mu} \bar{s}_{ij} - \frac{2}{3} \bar{\mu} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

$$\bar{q}_i = \frac{\bar{\mu}}{M^2 \text{Pr}(\gamma-1)} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_i}$$

$$\Phi = (\gamma-1) \frac{\partial h_j}{\partial x_j}$$

$$\Pi = C_\epsilon \frac{\rho K_{SGS}^{3/2}}{\Delta} + 2\bar{\mu} \frac{\partial \sqrt{K_{SGS}}}{\partial x_j} \frac{\partial \sqrt{K_{SGS}}}{\partial x_j}$$

また、 $\mu_{SGS}$  は SGS 渦粘性率であり、以下のように書く。

$$\mu_{SGS} = C_A \Delta^2 \bar{s} \left( \frac{|Q_2|}{E} \right)^{3/2}$$

ここで、 $\bar{s}$  は GS 歪テンソルの大きさ、 $E$  は GS 速度勾配テンソルの大きさ、 $Q_2$  は GS 速度勾配テンソルの第二不変量である。このモデルにおいて表れたモデル定数は以降の検証研究からなる最適化処理と乱流統計理論から導出された結果を利用して、 $C_A=0.1$ 、 $\text{Pr}_T=0.911$ 、 $C_\epsilon=0.84$  と決定した。

一方、SGS エネルギーのモデル化された輸送方程式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_{SGS}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial K_{SGS}}{\partial x_j} = & -\frac{\tau_{ij}}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\Pi}{\bar{\rho}} \\ & + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\bar{\mu} + C_d \mu_{SGS}) \frac{\partial K_{SGS}}{\partial x_j} \right\} \end{aligned}$$

とした。表れたモデル定数  $C_d$  は検討してきた流れ場での結果に対する依存性はあまり大きくなく、理論値に近い 1.0 と設定した。

これらのモデル表現での妥当性を検討するため、等温壁を有する圧縮性チャンネル乱流と断熱壁を片側に設けた圧縮性チャンネル乱流の DNS データを用いてアプリオリテストを実行した。SGS 応力や SGS フラックスにおけるモデル表現は線形渦粘性表現となっているため、相関性は必ずしも高いものではないが、計算安定性を重視して採用した。また、その他のモデル表現は瞬間場において比較しても非常に高い相関性が確認できた。

特に、SGS 応力歪相関項のモデルでは上式

で示したように 2つの要素から構成されている。その瞬間場相関の結果は図 1 のように非常によく DNS を提案した SGS モデルは再現できている。項毎の役割をみていくと、第 1 項は SGS 散逸率のモデリングにおいてもよく利用される項であるが、岡本-吉田の圧縮性自由乱流におけるアプリオリテストからはモデル表現が正定値であるため、DNS に対する相関性の低さが報告されている。第 2 項は Okamoto により非圧縮性 1 方程式型 SGS モデルにおいても提案された項で壁への漸近挙動の改善されることが知られている。壁からの距離における相関性を示した結果である図 2 をみると、壁近傍の粘性低層では第 2 項により、壁から離れた領域であるバッファ層から対数層にかけては第 1 項により比較的高い DNS との相関が確認できた。

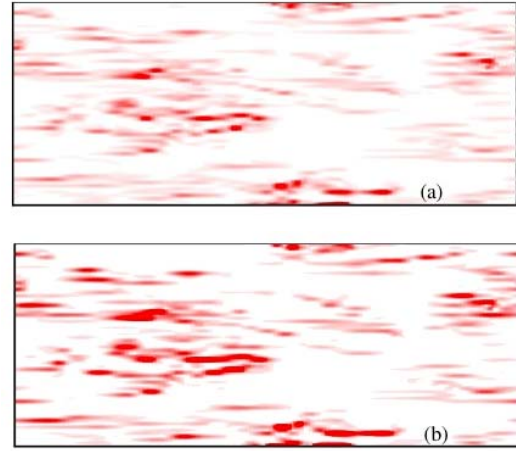


図 1  $\Pi$  の瞬間場分布 ( $y^+=5$ ,  $M=2$ ), (a) DNS, (b) model. 赤領域：正值、青領域：負値。

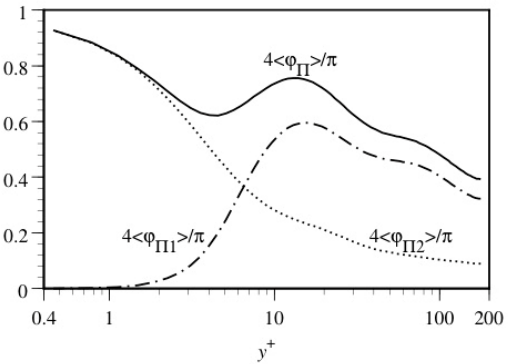


図 2  $\Pi$  の相関角結果。

このモデルの実際面における LES の予測能力を検証すべく、アポステリオリテストを実行した結果、図 3 の平均速度分布のように本モデルの予測性能はかなり精度が高いことが等温壁のみおよび断熱壁を含む場合でも圧縮性チャンネル乱流から確認することができた。また、レイノルズ応力や温度フラック

スなど他の平均諸量についてもその予測性能は同様の妥当性がみられた。

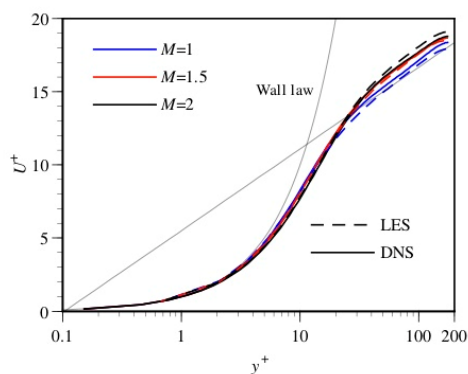


図3 平均速度  $U$  の比較。

さらなる、検証検討を行う目的から様々な等温条件を課した正方形ダクト内圧縮性乱流のDNSも実行している。その一部である全壁面が同一温度の等温壁の場合、マッハ数が高くなるほど流路内部が高温化し、分子粘性率が大きくなるため、2次流れが弱体化することや、それにより図4に示すようにコーナーへの平均主流の張り出しが弱くなるなどの効果が確認されており、現在モデルによるその再現性についてさらなる検討している。

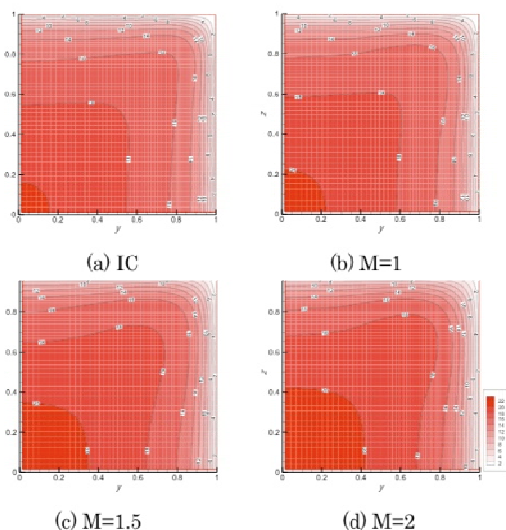


図4 DNSによる主流方向平均速度分布。

## 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1件)

- ① 岡本正芳、池本晃史、佐野智哉、等温壁を有する圧縮性チャンネル乱流のDNSデータによる圧縮性一方程式型SGSモデルに関する研究、日本機械学会論文集(B編)、査読有、77、2011、pp.1747-1757。

[学会発表] (計11件)

- ① 森川康平、岡本正芳、時間発展型非圧縮性乱流境界層に対する直接数値計算、日本機械学会東海学生会学生員卒業研究発表講演会、2013/3/19、三重大学(三重県)
- ② 梅原誠貴、岡本正芳、圧縮性正方形ダクト内乱流に対する数値解析的研究、日本機械学会年会、2012/9/14、金沢大学(石川県)
- ③ 前田薫平、岡本正芳、圧縮性一方程式型SGSモデルによる断熱壁を有する圧縮性チャンネル乱流の数値予測、日本機械学会東海支部講演会、2012/3/16、名古屋工業大学(愛知県)
- ④ 梅原誠貴、岡本正芳、等温壁を有する圧縮性正方形ダクト内乱流の直接数値計算、日本機械学会東海学生会学生員卒業研究発表講演会、2012/3/14、名古屋工業大学(愛知県)
- ⑤ 前田薫平、岡本正芳、断熱壁を持つ圧縮性チャンネル乱流での圧縮性一方程式型SGSモデルに対するアプリオリテスト、日本機械学会年次大会、2011/9/12、東京工業大学(東京都)
- ⑥ M. Okamoto、Direct Numerical Simulation for Streamwise Rotating Turbulent Flow Through a Square Duct、ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference、査読有、2011/7/27、浜松コンベンションセンター(静岡県)
- ⑦ 富松佳史、岡本正芳、線形外力による圧縮性一様等方性乱流の直接数値計算、日本機械学会東海支部講演会、2011/03/15、豊橋技術科学大学(愛知県)
- ⑧ 前田薫平、岡本正芳、断熱壁を有する圧縮性チャンネル乱流の数値解析的研究、日本機械学会東海支部講演会、2011/03/15、豊橋技術科学大学(愛知県)
- ⑨ 岡本正芳、分子拡散効果を組み込んだパッシングスカラー乱流場の理論解析、理論応用力学講演会、2011/03/10、東京工業大学(東京都)
- ⑩ 前田薫平、岡本正芳、断熱壁を有する圧縮性チャンネル乱流の直接数値計算数値流体力学シンポジウム、2010/12/20、慶応義塾大学(神奈川県)
- ⑪ 岡本正芳、主流方向系回転正方形ダクト内乱流の直接数値計算、日本機械学会流体部門講演会、2010/10/30、山形大学(山形県)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本正芳 (OKAMOTO MASAYOSHI)

静岡大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90293604

- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし