

## 論文の内容の要旨

**論文題目** STUDY FOR LES OF TURBULENT PREMIXED COMBUSTION  
FLOWS BY USING DYNAMIC SUBGRID *G-EQUATION* FLAMELET MODELS  
**和訳** (ダイナミックサブグリッド *G*方程式火炎片モデルに  
よる乱流予混合燃焼流れの LES に関する研究)

氏名 朴 南燮

乱流予混合燃焼の解析は、高効率燃焼器の開発において非常に重要である。環境保存の観点から、ガスタービン燃焼器の低 NO<sub>x</sub> 化が進められている。その方法として希薄予混合燃焼方式が採られることが多い。乱流燃焼場を数値解析する場合、解法を選択肢として DNS、LES、RANS が挙げられる。しかし、DNS は比較的簡単な燃焼場に限定されており、工学上重要な実用燃焼機器内の高レイノルズ数流れ場における燃焼の非定常挙動を解明するには、現在の計算機の能力を考慮すると LES が最適と思われる。また、実用燃焼器内の予混合乱流燃焼 LES に適用可能な燃焼モデルとしては火炎片モデルに基づき火炎面の伝播を表す *G* 方程式が挙げられる。最近では *G* 方程式の LES における高精度なモデルとしてダイナミックサブグリッド燃焼モデルが提案されているが、まだ複雑な実用燃焼場には適用されていない。このような背景から本研究では、ダイナミックサブグリッド *G* 方程式モデルを用いた実用燃焼器内の乱流予混合燃焼流れの LES における適切な燃焼モデルの検証と開発を目的としている。

予混合燃焼には、火炎面がそれに垂直な方向に伝播していくという性質があり、この特性は次の *G* 方程式によって表現できる。(Kerstein ら, 1988)

$$\rho \frac{\partial G}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial G}{\partial x_j} = \rho S_L |\nabla G| \quad (1)$$

反応進行度  $G$  は 0 から 1 の範囲の値で、 $G=0$  が未燃気体、 $G=1$  が既燃気体を表わす。式(1)の右辺は、火炎面に垂直な方向に火炎が伝播することを示しており、その伝播速度は層流燃焼速度  $S_L$  である。

乱流燃焼場を LES によって近似的に解析する際には火炎伝播項に対して乱れの影響を適切にモデリングする必要がある。すなわち、LES では乱流変動によって細かくしわ状になった火炎面を空間平均により滑らかに近似するため火炎面の見かけの面積が減少し、 $G$  方程式においてはフィルター操作を施した  $|\nabla \bar{G}|$  が過小に評価される。その効果は、たとえば、次のようにサブグリッド・スケールの乱流火炎速度、 $\bar{s}_T$  を導入し、フィルターを施した式で表現することができる。(Menon 1996)

$$\frac{\partial \bar{G}}{\partial t} + \frac{\partial u_j \bar{G}}{\partial x_j} = \bar{s}_T |\nabla \bar{G}| \quad (2)$$

$$\frac{\bar{s}_T}{S_L} = 1 + \alpha \left( \frac{\bar{u}'}{S_L} \right)^n \quad (3)$$

ここで、 $\bar{u}'$  はサブグリッドスケール(SGS)変動速度の二乗平均、 $\alpha$ 、 $n$  はモデル係数であり、モデリングする必要がある。しかし、現状の  $\bar{s}_T(u')$  に関する理論解析と実験データは必ずしも一致せず  $\bar{s}_T$  における普遍的なモデルが求められていない。そのなか最近では Im ら(1997)によって燃焼場におけるモデル係数を動的に決定するダイナミック SGS 燃焼モデルが提案されている。

本研究ではまずチャンネル内予混合乱流燃焼流れにおいてダイナミックサブグリッド燃焼モデルを適用して数値解析を行うことでそのモデルの有効性について検討している。また実用燃焼器内の複雑な乱流予混合燃焼流れの LES に対するダイナミック SGS 燃焼モデルの適用可能性を検証するため保炎器廻りとバックステップ背後の流れにおいて安定化された予混合燃焼流れの LES 解析を行い、実験結果と比較することでそのモデルの有効性を確認した。

チャンネル内予混合乱流燃焼流れに対する燃焼モデルの有効性については、予測された乱流火炎速度を燃焼反応速度にアレニウス型モデルを用いた Bruneaux の DNS の計算結果と比較することで示す。シミュレーション結果より、従来の  $G$  方程式における研究では cusps による数値的な不安定さが問題視されたが、LES においては  $G$  方程式の SGS フラックス が cusps 問題を抑制する効果があることがわかった。

保炎器廻りの予混合燃焼流れの LES 解析では, Sjunesson によるチャンネル内三角柱形状の保炎器により安定化された予混合火炎の実験体系を解析対象とする. 入口から流速 40 [m/s], 温度 600 [K], 当量比 0.6 のプロパン, 空気予混合気体が供給される. レイノルズ数は 31,300 である. 本研究では低 Mach 数近似を施した質量保存式, 運動量保存式, エネルギー保存式および火炎伝播を表わす G 方程式を用いる. 基礎変数のフィルタリングには Favre 平均を用いている. LES における G 方程式は次式となる.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{G}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{G} \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \gamma_j^{SGS}}{\partial x_j} + \bar{S}_L |\nabla \tilde{G}| \quad (4)$$

(4) 式を解析するには右辺の SGS スカラー流束  $\gamma_j^{SGS}$  と  $\bar{S}_L |\nabla \tilde{G}|$  はモデリングしなければならない. G 方程式の火炎伝播項  $\bar{S}_L |\nabla \tilde{G}|$  に対しては, Im のサブグリッド・スケールモデルを用いて以下の定式を与えている.

$$\bar{S}_L |\nabla \tilde{G}| = \bar{S}_T |\nabla \tilde{G}| \quad (5)$$

$$\bar{S}_T / S_L = 1 + C_\alpha (q / S_L)^n \quad (6)$$

$$C_\alpha = (S_L)^n \left[ \widehat{|\nabla \tilde{G}|} - |\nabla \tilde{G}| \right] / \left[ Q^n |\nabla \tilde{G}| - q^n \widehat{|\nabla \tilde{G}|} \right] \quad (7)$$

ここで, n はモデル係数で, 本計算では 1 とした. q と Q はグリッドフィルターとテストフィルターにおける各々のサブグリッド・スケール乱流強度である. ただし,  $\widehat{(\quad)}$  はテストフィルターを示す.

(6) 式を用いた乱流予混合燃焼場の LES 解析では, サブグリッド・スケールの乱流火炎速度を求める時にサブグリッド・スケールの乱流強度をモデリングする必要があり, Im は Bardina のスケール相似モデルを用いて与えている. しかし, そのスケール相似モデルは実用燃焼器内燃焼 LES に有効ではあるが, 高解像度な格子分割が必要とされることから, より普遍的な乱流火炎速度モデルが望ましいと思われる. そして, 本研究ではサブグリッド・スケール乱流強度を用いる代わりに層流火炎厚みとサブグリッド乱流拡散を導入して物理的な導出がより容易な新たな乱流火炎速度モデルを提案し, さらにそのモデルの保炎器廻りの予混合燃焼流れへの有効性を確認している. その新たな乱流火炎速度モデルは以下の定式を与えている.

$$\bar{S}_T / S_L = 1 + C_\beta (D_{sgs} / S_L l_F)^n \quad (8)$$

$$C_\beta = (S_L l_F)^m \left[ \overline{|\nabla \hat{G}|} - |\nabla \hat{G}| \right] / \left[ \overline{D_{sgs}^m |\nabla \hat{G}|} - D_{sgs}^m |\nabla \hat{G}| \right] \quad (10)$$

ここで、 $l_F$  は層流火炎厚み、 $D_{sgs}$  はサブグリッド乱流拡散で、本研究では  $D_{sgs} \approx \Delta^2 |\tilde{S}|$  としてモデル化する。指数  $m=0.5$  とした。

計算条件に関しては、計算コードはデカルト座標系に staggered 格子を用いて、対流項と拡散項の空間差分に 2 次精度中心差分、時間差分には 2 次精度 Adams-Bashforth スキームを用いた。圧力の解法には HSMAC 法を用いた。計算格子数は  $25h \times 3h \times 1.2h$  (保炎器の高さ  $h=0.04m$ ) の解析領域に対して  $120 \times 60 \times 16$  の格子点を用いた。壁面近傍では spalding 則による人工的壁面速度境界条件を採用した。流出部では対流流出境界条件、スパン方向には周期境界条件を用いた。解析は、Im の燃焼モデルを用いた検証計算においては乱流モデルにおけるモデル係数  $C_s$  を 0.1, 0.18 として与えた場合とダイナミックモデルで求めたの場合の 3 ケースに対して行った。また、新たな SGS 燃焼モデルの検証計算においては乱流モデルにダイナミックモデルを適用して計算を行った。その結果として以下のような知見を得た。

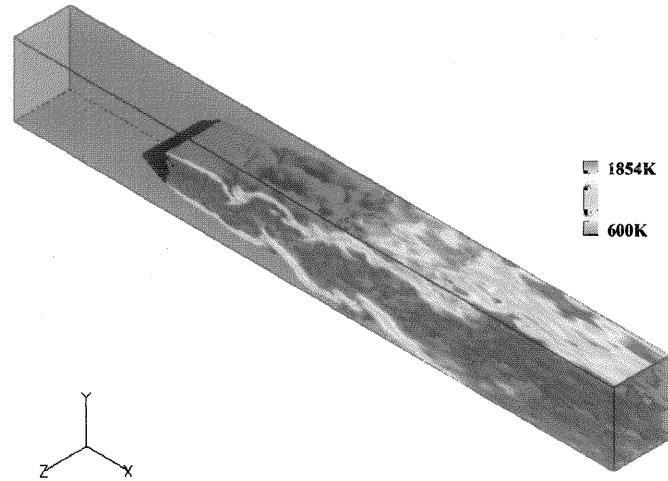
- (1) 両方のダイナミックサブグリッド燃焼モデルは温度および速度分布をよく再現しており、実用燃焼器内燃焼 LES における燃焼モデルとして、定性的、定量的に有効であることを確認した。
- (2) ダイナミックに計算された燃焼モデル係数は火炎面上で一定な値に収束し、燃焼モデル係数における不安定性の問題は無かった。
- (3) 流れ場解析に関しては、本計算でのダイナミックモデルによるモデル係数はブラフボデイ下流で 0.18~0.2 程度であることから非燃焼せん断流で従来推奨される 0.1~0.12 より大きく評価するのが望ましいと考えられる。

バックステップ流れにおける予混合燃焼流れの LES 解析では、Pitz ら(1983) による実験体系を解析対象とする。入口から流速 13.3 [m/s], 温度 293 [K], 当量比 0.57 のプロパン、空気予混合気体が供給される。出口圧力は 0.1 [MPa] である。レイノルズ数は 22,100 である。計算格子は  $12.24h \times 2h \times 2h$  (ステップの高さ  $h=0.0254m$ ) の解析領域に対して  $251 \times 52 \times 20$  の格子点を用いた。壁面近傍で no-slip 条件を用いた。解析は非燃焼の場合と燃焼の場合のそれぞれに対する LES 計算を行い、両方の流れの構造を比較した。解析結果では速度および乱流強度分布また燃焼場での温度分布等が実験結果をよく再現し、バックステップ流れにおける乱流予混合火炎の構造を捕えることができた。

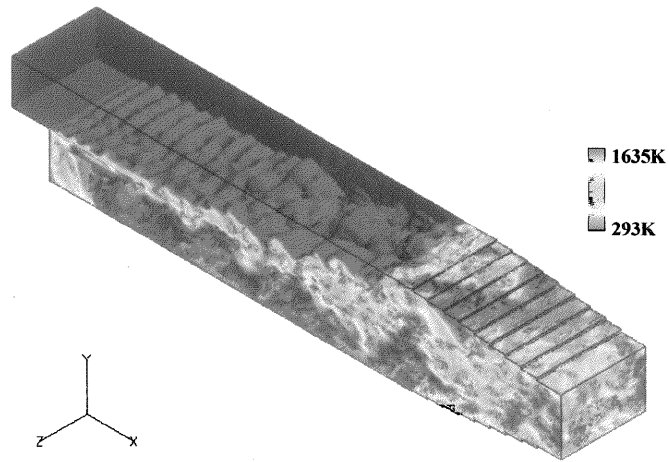
一方、乱流予混合火炎の構造を定量的に表わすものとして、近年フラクタル

次元が実験的に評価され、乱流予混合火炎構造が明らかにされつつある。本研究では、LES 燃焼モデルに乱流予混合火炎のもつフラクタル特性を導入した燃焼モデルを評価することをもうひとつの研究目的とする。Gouldin(1987)は、乱流火炎のフラクタル特性を応用して、乱流燃焼速度のフラクタルモデルを提案している。Gouldin のモデルでは、フラクタル上限スケールを乱流積分スケール、フラクタル下限値を Kolmogorov スケールとして与えている。しかし、LES 版のフラクタルモデルにおいてはフラクタル下限スケールが未知である。本研究ではフラクタル下限スケールを LES においてモデリングした Kolmogorov スケールとして表現し、それに伴うモデル定数を動的に決定するダイナミック SGS フラクタルモデルを提案する。モデルの評価は、保炎器廻りの予混合燃焼流れに対する LES 検証計算を行い、そのモデルの有効性を確認した。

本研究では、実用燃焼器内の乱流予混合燃焼 LES に適した燃焼モデルの評価と開発を目的とし、G 方程式燃焼モデルによる乱流予混合燃焼流れの LES は実用燃焼器内の燃焼流れの解析に有効な手法であることを示した。2つのタイプの燃焼モデル、Im のモデルとフラクタルモデルを検証及びその改良を行った。Im のモデルに対しては、物理的な導出がより容易なモデルを提案し、フラクタルモデルに対しては、フラクタル下限スケールをダイナミックに決定するモデルを提案し、その有効性を示した。LES における乱流火炎速度の決定にモデル定数を動的に算出するダイナミックモデルを適用した。本研究で用いた LES 解析手法は、実用燃焼器内の予混合燃焼流れの数値解析に有効であると考えられる。



(a)



(b)

Figure. Snapshots of predicted instantaneous temperature distribution by LES (a) turbulent premixed flame around bluff body (b) turbulent premixed flame over backward-facing step