

学位論文題名

A levelset approach for a premixed flame based on a
new concept of flame speed

(新しい火炎速度の概念に基づく予混合火炎モデルのためのレベルセットアプローチ)

学位論文内容の要旨

Due to stringent emission regulations, combustor design requires more accurate prediction of flame dynamics than was previously required, as well as a good estimation of the chemical reaction process. One of the approaches is solving turbulent combustion flows with LES using the flamelet concept instead of the detailed reaction which is difficult to calculate in the turbulence field. A G-equation in flamelet approach is introduced by Williams(1985) for premixed combustion. The LES coupled with the flamelet approach can be used as a practical prediction tool to aid in the design of combustors. However, the G-equation based on the level set approach has some critical weak points, and to overcome these points, previous researchers have applied additional techniques such as re-initialization to prevent distortion of the numerical solutions non-physically. To further develop the LES coupling with flamelet models, this problem in the G-equation model is need to be fixed.

This dissertation aims to propose a new level set approach to describe not only a flame' s surface but also the flame' s spatial distribution based on the new concept of the local flame speed. The new level set approach also can eliminate the numerical instability of the old G-equation. The new level set approach need to be validated in multi-dimensional cases.

In the first stage, this thesis studies the level set approach based on the re-initialization whose target function is sign distance function. On the other hand, the hyperbolic tangent function is assumed in the premixed flame. Coupling the two considerations, according to the procedure of re-initialization, the target function as hyperbolic tangent profile is chose and the new level set approach is obtained in different forms. The results numerical simulated by the three forms indicate that the different forms can obtain the indentified solutions. Also, three variations of the formulation are investigated, which correspond to the difference treatments of interface physics, the phase field approach, the non-linear interface convection and the conservation flux by variable viscosity. This consideration indicates that these models developed individually for the different physics, as crystal phase interface, flame propagation, thermal contact surface, etc. are essentially the same for numerical simulation of capturing

the sharp interface approximately. For our purpose, the form of the burgers equation is applied for the premixed combustion.

Further, we derived the mathematical formulation for a one-dimensional laminar premixed flame, where the steady flame has a finite thickness depending on the diffusion flux whose physical quantity such as temperature has a relation to index function . In physical meaning, the concept of local flame speed is introduced and also validated by the one-dimensional case. We evaluated the distribution of local flame speed with scalar based on the one-dimensional solutions of premixed flames obtained by the detailed chemical reaction GRI-Mech3.0 using CHEMKIN. The assumption that local flame speed shows the linear distribution can be acceptable. Based on the linear distribution of local flame speed, the modified G-equation can again be certified as the hyperbolic tangent profile.

In the final stage, the new level set approach is validated by the counter flow of fresh reactant to hot product. According to the different cases of simulations, the flame shape is changed with different equivalence ratio. In the counter flow case, considering the flame stretch effect, we also validated the new level set approach. It is proved that the proposed new approach of flame propagation is more suitable than the old G equation in the premixed flame. The new level set approach is available not only the flame surface but also the flame thickness. The numerical instability is also overcome even the first order upwind scheme is applied into the convection term. all in all, this new level set approach is more suitable to apply for the premixed flame than the old G-equation.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 島 伸 行
副 査 教 授 藤 田 修
副 査 教 授 渡 部 正 夫

学 位 論 文 題 名

A levelset approach for a premixed flame based on a new concept of flame speed

(新しい火炎速度の概念に基づく予混合火炎モデルのためのレベルセットアプローチ)

実用燃焼機設計における厳しい排出ガス規制に対応するため有害排出物の低減かつ高効率の両立が求められている。よって、燃焼器内の乱流燃焼の詳細な把握が必要とされ、数値計算の活用が期待される。そこでは薄い火炎構造を仮定したフレイムレット・アプローチと非定常乱流を扱うラージ・エディ・シミュレーションを連成した方法が注目されている。しかし、ガスタービン燃焼器などの予混合火炎に対して従来適用されている G-方程式モデルには数値的不安定を内在する問題点があった。そこで、本研究では、火炎モデルの数学的基礎となるレベルセット法における数値安定化法を再検討し、薄い火炎構造の解析に適した新しい定式化を提案するとともに、火炎の熱力学的モデルと関連づけて「局所火炎速度」なる新しい概念に基づく予混合火炎モデルを提案し、その有用性を検証した。

本論文の内容は以下の 6 章にまとめられている。

第 1 章では、本研究の対象となる予混合火炎とそのモデルに関する従来研究を概観し、本研究の目的と構成を示している。

第 2 章では、予混合火炎 G-方程式モデルの数学的基礎となるレベルセット法をとりあげ、代表的な数値安定化手段である再初期化法を再検討し、薄い火炎構造の解析に適した新しい定式化として火炎面厚み方向の分布関数にハイパボリック関数を適用した改良 G-方程式を導出した。また、レベルセット方程式と再初期化式とをペナルティ法で連成する簡便な解析法を併せて提案した。

第 3 章では、前章で導出された改良 G-方程式の数学的検討を行い、一般的界面現象の数学モデルとして知られるフェーズフィールド法、および、レベルセット法との関連性を示している。ここでは、改良 G-方程式がレベルセット方程式に界面伝搬速度の厚み方向分布と拡散効果を仮定することで一般的に導出されること、フェーズフィールド法での代表的方程式である Allen-Cahn 式およびレベルセット法での保存形式再初期化法と数学的に同等であることが結論された。また、それらいずれの定式においても、従来 G-方程式の数値的に安定な粘性解を与えることが数値検証により示された。

第 4 章では、2,3 章で導出された改良 G-方程式に基づく新しい予混合火炎モデルが提案された。ここでは、予混合火炎の熱力学的モデルにおいて従来定数とみなしていた火炎速度に対して火炎面厚み方向に分布を持つと仮定する「局所火炎速度」なる新しい概念を導入することで、熱力学的基礎式であるエネルギー方程式から改良 G 方程式を導出されることが示された。さらに、Inage らの先行研究に基づき、「局所火炎速度」が平面層流予混合火炎において線形分布近似できると予想し、メタン-空気/酸素予混合火炎の 1 次元詳細化学反応計算結果により実用的な精度で再現されることを検

証した。また、その検証結果から、従来の多くの研究において層流予混合火炎は広い予熱域と非常に薄い領域にのみ集中する化学反応帯(火炎面)により近似されると考えられていたのに対して、予熱域の多くの部分を含む広い領域が化学反応影響を表す線形的な局所火炎速度により支配されているという新しい知見を得た。

第5章では、上記の改良 G-方程式に基づく予混合火炎モデルの実証として、軸対称対向噴流による層流予混合火炎の3次元解析を行い、その有効性を検証した。従来 G-方程式との比較では、従来法に生じる数値的不安定が改良 G-方程式において解消し、従来法では安定計算不能な火炎速度の大きな条件においても数値粘性に依存しない数値解を得ることが示された。さらに、中心軸近似による一次元詳細化学反応による参照計算との比較により、改良 G-方程式が速度場、温度場に対して火炎面厚み方向分布を精度良く予測することが検証された。また、解析結果から、軸対称対向噴流のせん断効果による火炎速度依存性を示す Markstein 数の数値的予測を示した。

第6章では、上記成果をまとめて結論づけ、今後の研究指針を述べている。

以上のように本論文では、フレームレット・アプローチに基づく予混合火炎数値解析手法の問題を解決する改良 G-方程式を新たに導出し、併せて、予混合火炎における新しい熱力学的概念として「局所火炎速度」を提案した。これらは、3次元火炎解析においても従来の解析モデルに比較して数値的に安定かつ高精度な予測を実現した。この成果は、機械工学、特に燃烧学および計算工学の分野における大きな寄与であるとともに、界面現象に関する工学、物理学、数学にも応用可能な新たな知見を与えるものとして評価される。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。