

## 論文の内容の要旨

論文題目 数値シミュレーションによる可燃性ガスの  
爆発危険性解析

氏 名 富 塚 孝 之

### 1. 緒言

次世代の燃料として期待されている DME（ジメチルエーテル）は他の炭化水素燃料に比して煤や NO<sub>x</sub> が少なく、クリーンな燃焼特性が確認されている。しかし DME を取り扱うプラントや自動車およびスタンドなど実用的な面を考慮すると、DME の大量な輸送や貯蔵時における漏洩・拡散にともなう燃焼現象は平衡論に起因する燃焼特性だけでは予測できない影響が懸念される。また水素も燃焼生成物が水のみであるということからクリーンなエネルギーとして大きな期待が持たれているが、着火しやすく、発熱量も大きいため爆発の危険性が高い。一般にガス爆発と言われている現象は可燃性ガスと空気の予混合燃焼であり、火炎伝ばが進行するとともに火炎の不安定性から火炎面形状の乱れが発生、成長し、火炎伝ば速度が加速し、層流燃焼速度より大きくなることがわかっている。火炎伝ば速度の増加により圧力上昇速度が増大し、被害が拡大する可能性があるため、安全工学上、実用的なスケールにおける爆発特性を把握する事は非常に重要な課題である。爆風圧の上昇速度や最大圧力は火炎伝ば速度に大きく依存し、火炎伝ば速度は火炎面積に依存する。したがって、爆発計算を行うときは、火炎乱れの発生機構、特に不安定化機構を考慮していなければ、火炎伝ば速度を正確に計算することができない。ところが CFD による実用スケールの爆発計算で火炎の詳細な構造を直接計算することは不可能であるため、火炎構造を予測するモデルが必要になる。本研究の目的は火炎の不安定性による自発的乱れの成長といった、火炎伝ばの加速現象として重要な要素であるミクロな現象を考慮しつつ、安全工学上実用的なマクロスケールで数値解析が可能となる予混合燃焼モデルを確立することを目的としている。

### 2. 予混合燃焼モデル（火炎伝ばモデル）

Gostintsevら[1]は、火炎のフラクタル特性に着目し、過去の爆発実験で得られた火炎半径の時間変化の測定結果を分析し、漸近解析することにより次式を導いている。ここで  $R$  は火炎半径、 $R^*$  はフラクタル性が発現する火炎半径、 $t$  は時間、 $t^*$  は着火直

後から火炎半径が $R^*$ になるまでの時間であり、 $\kappa$ は熱拡散率、 $c_g$ はモデル定数である。

$$R = R^* + c_g \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^2 \frac{S_L^2 (t - t^*)^{3/2}}{\sqrt{\kappa}}$$

ここから $t^*$ が十分小さいと仮定し、火炎伝ば速度の式に変形すると次式のようにになる。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{3}{2} c_g \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^2 \frac{S_L^2}{\sqrt{\kappa}} t^{1/2}$$

上式は火炎伝ば速度がモデル定数 $c_g$ の他に、ガスの膨張率 $(\rho_u/\rho_b)$ 、層流燃焼速度( $S_L$ )および熱拡散率( $\kappa$ )といった可燃性ガスの物性で決定できることを示している。このように、火炎のフラクタル特性に着目することで、火炎のマイクロ構造をモデル化することが可能となる。モデル定数 $c_g$ が乱流燃焼のフラクタル特性を表す実験定数である。上の二式における火炎伝ばモデル定数 $c_g$ を評価する目的で、DME、LPGおよび水素の大規模燃焼実験[55]、[56]における火炎伝ばの測定結果から近似式を求めた。大規模燃焼実験は1辺5m~7mのビニールハウス内に可燃性ガスと空気の予混合状態を作り、中心で火花を着火させた。LPGおよびDMEの大規模燃焼実験から得たモデル定数 $c_g$ の平均値は $4.3 \times 10^{-3}$ 、水素では $1.6 \times 10^{-3}$ となり、実用可能なモデルが構築できた。

燃焼モデルはZimontら[4][5][6]が提唱した反応進行度モデルを採用した。反応進行度 $c$ の輸送方程式の生成項には乱流燃焼速度が用いられる。火炎伝ば速度と乱流燃焼速度の関係は次式で表される。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} \right) S_T$$

ここで、 $S_T$ は乱流燃焼速度であり、フラクタル理論を導入により求めた火炎伝ば速度を代入することにより次式が得られる。

$$S_T = \frac{3}{2} c_g \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} \right) \frac{S_L^2}{\sqrt{\kappa}} t^{1/2}$$

このようにして、反応進行度モデルにおける生成項に火炎伝ばモデルによる乱流燃焼速度を導入することで、火炎の不安定性による自発的乱れを導入したフラクタル火炎伝ばモデルが確立された。

### 3. 実スケールモデルでの比較検証解析

前章で記したフラクタル火炎伝ばモデルの妥当性を確認する目的で、実スケールモデルの比較検証をおこなった。比較シミュレーションは前述のDME、LPGおよび水素の大規模燃焼実験に対して実施した。図3.1、3.2にはDMEおよび水素の大規模燃焼実験

との比較結果を示している。図3.2ではANSYS FLUENTに組み込まれている既存の乱流燃焼モデルによる結果も比較した。比較結果からわかるようにフラクタル火炎伝ばモデルによる予混合燃焼シミュレーションはDME-空気、水素-空気のいずれの爆発現象をよく再現出来ていると言える。

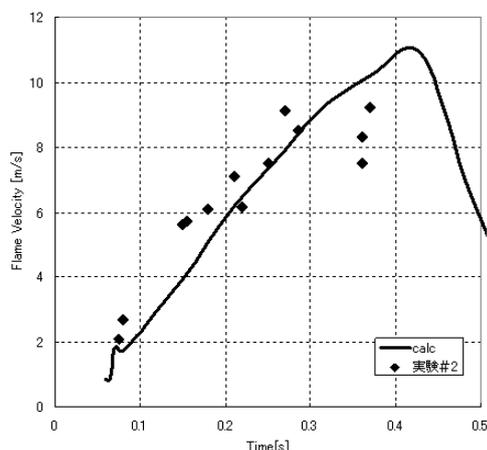


図3.1 DME大規模燃焼実験との比較結果

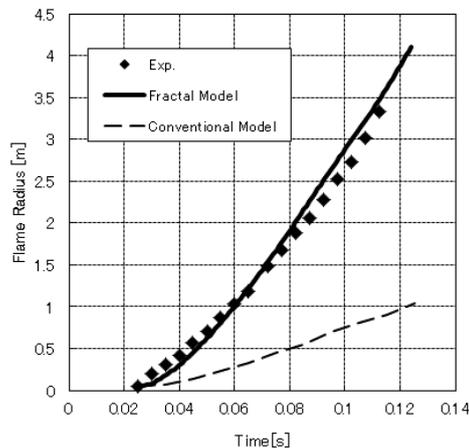


図3.2 水素大規模燃焼実験との比較結果

比較シミュレーションでは計算格子幅を 5cm でおこなったが、フラクタル火炎伝ばモデルの適応範囲を検討するため、初期濃度が水素大規模燃焼実験のケースに対し計算格子幅を 10cm、20cm、30cm、50cm と変えたケースを実施した。その比較結果として、

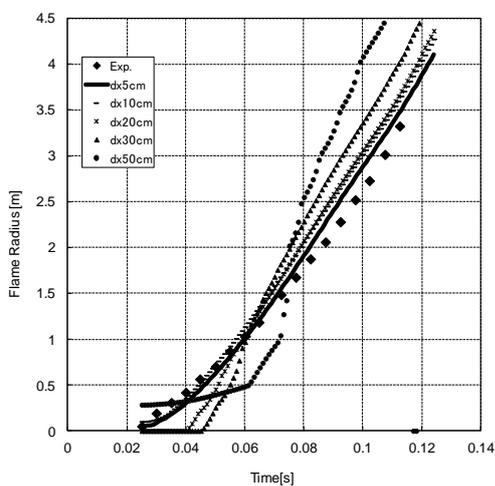


図3.3 計算格子幅の比較結果

火炎半径の時系列変化を計算格子幅 5cm の結果に重ね合わせたものを図 3.3 に示す。いずれのケースも火炎は全体的に初期は層燃焼速度で伝ばし、その後火炎の不安定性による自発的乱れが発生し、加速する結果が得られた。さらに、計算格子幅が大きくなるほど火炎の不安定性による自発的乱れの発生が遅くなる結果となった。これらより本研究の燃焼モデルでは、計算格子幅が20cm以下であれば爆発危険性の予測手法として妥当な解析結果が得られる事が示された。

#### 4. 爆発危険解析による安全性評価の適応事例

開発したフラクタル火炎伝ばモデルが、爆発危険予測ツールとして妥当な結果が得られることを確認する目的で、モデル DME スタンドの安全性を評価した。表 4-1 に事故シナリオ、シミュレーション条件と内容および安全性評価内容についてまとめた。DME

の漏えい・拡散および予混合燃焼シミュレーションは本研究で開発したフラクタル火炎伝ばモデルを用いることにより、火気離隔距離および保安距離の両者について、適切な評価結果を得ることができた。

表 4-1 モデル DME スタンドの安全性評価内容

	事故シナリオ	シミュレーション条件および内容	安全性評価
①DME 漏えい 拡散	配管に微小な亀裂やピンホールが生じ、DME が噴出する	配管からの DME 漏えい・拡散シミュレーションをおこないガスの濃度分布を予測	スタンド内における 1/4LEL 到達距離(火気離隔距離)を評価
②DME 予混合 爆発	大気中に漏えい・拡散した DME に着火し、予混合燃焼、爆発が生じる	拡散した DME の予混合燃焼シミュレーションをおこない、火炎および温度分布を予測	火炎到達距離(保安距離)を評価
		予混合燃焼シミュレーション結果から爆風圧解析をおこない、圧力の時間変化を予測	爆風圧の評価基準である 2kPa の到達距離(保安距離)を評価

## 5. 結論

火炎の不安定性による自発的乱れの挙動に対し、フラクタル理論を導入することによりモデル化することに成功し、マクロスケールで取り扱えるフラクタル火炎伝ばモデルを確立した。同モデルにおけるモデル定数も大規模燃焼実験結果を用いて評価し、妥当な値を得ることができ、実用的モデルが構築できた。大規模爆発実験との比較シミュレーションを実施し、精度良く予測できることを確認できた。また、計算格子幅は 20cm 以下であれば十分な精度が得られ、実用性の高いモデルであることが示された。さらに、モデル DME スタンドの安全性評価として、DME の漏洩・爆発事故シナリオを本研究のフラクタル火炎伝ばモデルを用いてシミュレーションをおこない、現実の問題の安全性評価手法として使用できることを実証できた。

## 6. 参考文献

- [1] Gostintsev, Y. A., Istratov, A. G., & Shulenin, Y. V. (1988). Combust Explosions and Shock Waves, 24, 563e569.
- [2] 高圧ガス保安協会, DME 燃料実用化基盤事業に関する報告書 (2005).
- [3] Wakabayashi, K. Nakayama, Y. Mogi, T. Kim, D. Abe, T. Ishikawa, K. Kuroda, E. Matsumura, T. Horiguchi, S. Oya, M., 2007, VOL 68; NUMB 1; ISSU 353, pages 25-28
- [4] V. Zimont, W. Polifke, M. Bettelini, and W. Weisenstein. J. of Gas Turbines Power, 120:526-532, 1998.
- [5] V. L. Zimont, F. Biagioli, and K. J. Syed. Progress in Computational Fluid Dynamics, 1(1):14-28, 2001.
- [6] V. L. Zimont and A. N. Lipatnikov. Chem. Phys. Report, 14(7):993-1025, 1995.