

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 8日現在

機関番号：11501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22710158

研究課題名（和文）低負荷・高精度な爆発シミュレータの開発

研究課題名（英文）A High Accuracy/Low Computational Cost Explosion Simulator

研究代表者

桑名 一徳（KUWANA KAZUNORI）

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：30447429

研究成果の概要（和文）：低負荷・高精度な爆発シミュレータの開発のために、漏洩拡散モジュールおよび火炎伝播モジュールの開発そして各モデルの妥当性の確認を行った。漏洩拡散モジュールでは、配管等から漏洩した可燃性液体が微粒化、蒸発して生じた可燃性気体が空気と混合し、爆発性の混合気が形成される過程をモデル化した。火炎伝播モジュールでは、不安定性による火炎伝播速度の上昇をフラクタル次元を用いて表現するモデルを構築した。また、フラクタル次元を容易に求める方法について検討した。

研究成果の概要（英文）：To develop a high accuracy/low computational cost explosion simulator, a leakage/diffusion module and a flame propagation module were developed and validated. The leakage/diffusion module considers the atomization and evaporation of a combustible liquid out of a ruptured pipe and simulates the formation of a combustible vapor cloud. The flame propagation module considers the acceleration of flame due to hydrodynamic instability based on a fractal concept. Methods to easily determine the flame fractal dimension were also discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：爆発・事故・被害予測・数値流体力学・予混合火炎・不安定性

1. 研究開始当初の背景

化学工場などで爆発事故が多く報告されており、死者も後を絶たない。爆発事故の未然防止には被害予測が重要であり、数値流体力学（CFD）計算が用いられることが多い。しかし、爆発のように大空間で起こる現象を対象としつつ、燃焼反応を伴う火炎伝播計算

を精度よくかつ効率よく計算するのは困難であり、精度または効率性のいずれかを犠牲にせざるをえないという状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、計算負荷が小さく、爆発被害を正確に予測できる実用的な爆発シミュ

シミュレータの開発である。爆発被害の正確な予測のためには火炎伝播速度の正確な予測が不可欠であり、火炎伝播速度の急上昇の主要な原因は火炎不安定性による火炎面積（反応面積）の急上昇である。そこで本研究では、火炎不安定性を考慮し、CFD 計算と連結できる火炎伝播速度の評価モデルを新たに構築し、計算格子間隔が大きくても火炎伝播速度を正確に予測できるシミュレータを開発した。さらに、可燃性物質の漏洩と火炎伝播を異なるモジュールを用いて計算することにより計算効率の向上を図った。

3. 研究の方法

(1) 可燃性物質が漏洩・拡散する様子を計算するモジュールを開発した。可燃性気体の拡散は比較的簡単に計算できるが、相変化を伴いながら可燃性蒸気が拡散する過程のシミュレーションは容易ではない。そこで、配管等から噴出する可燃性液体が微粒化、蒸発し、さらに可燃性蒸気が拡散するプロセスをシミュレーションできるモデルを構築した。

(2) 可燃性気体と空気の混合気中の火炎伝播挙動を計算するモジュールを開発した。爆発のような大規模火炎伝播現象で特に重要になると考えられる流体力学的不安定性の影響を考慮した火炎伝播モデルを構築した。このモデルでは火炎のフラクタル性を考慮した。さらに、火炎のフラクタル次元を容易に求める方法について実験および理論の両面から検討した。

(3) 以上で構築したモデルによる予測結果を過去の実験データおよび本研究で実施した実験の結果と比較し、モデルの妥当性を検証した。また、漏洩拡散モジュールに関しては、漏洩した液体の微粒化挙動を表すモデルパラメータの値の決定方法について、実験データと比較しながら検討した。火炎伝播モジュールに関しては、火炎の不安定性による火炎伝播速度の加速現象をシミュレーションで再現できることを確認した。

4. 研究成果

(1) 液体の微粒化および蒸発過程をモデル化するために、液体を液滴の集合として考え Lagrange 的に取り扱った。漏洩個所と直径が等しい液滴が噴出すると仮定し、噴出速度は想定される圧力差より計算した。液滴は主として Kelvin-Helmholtz 不安定性により分裂し微粒化するとした。分裂後の液滴径は Kelvin-Helmholtz 不安定性の分散関係にお

いて成長速度が最大となる波長に比例するとした。さらに、液滴分裂の特性時間は分散関係の時間指数より求めた。これらの値（液滴径および特性時間）を決定するための比例定数はモデル定数として取り扱った。これらのモデル定数は実験結果との比較から決定することができる。本モデルでは、さらに、可燃性液体の蒸発による液滴径の減少も考慮した。蒸発速度の計算には可燃性蒸気の飽和蒸気圧および Sherwood 数の既往の実験式を用いる方法を検討した。ここで構築した漏洩拡散モデルは基本的には既存のモデルを組み合わせて、本研究の目的に合うように修正しつつ適用したものである。

(2) 爆発の CFD 計算では対象とする計算領域が最低でも数メートル規模となるため、低負荷のシミュレーションを達成するためには、計算格子間隔を大きくせざるを得ない。このとき、不安定性による火炎面積の増大（およびそれによる火炎伝播速度の上昇）をどのようにモデル化するかがキーポイントであり、本研究で新規モデルを構築した。

爆発事故は静止気体中かそれに近い状態で起こることが多いため、気流の乱れによる火炎面積の増大はそれほど重要ではない。しかし、爆発時のように火炎スケールが大きくなると、流体力学的不安定性による火炎面積の増加を考慮しなければならない。流体力学的不安定性は燃焼に伴う温度上昇による密度変化に起因する不安定性で、この不安定性により乱れた火炎はフラクタル的な構造を持つことが知られている。そこで、フラクタル次元を用いて火炎面積の増加を表し、燃焼反応速度をモデル化した。このモデルを用いると反応進行度 c の式は次のようになる。

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla c = (\rho D)_{\text{eff}} \nabla^2 c - C_r R^{d-2} \left[1 + S_1 \left(c - \frac{1}{2} \right) \right] |\nabla c|$$

ここで、 $(\rho D)_{\text{eff}}$ は流体力学的不安定性による有効拡散係数、 d はフラクタル次元、 R は火炎半径、 C_r と S_1 はモデル定数である。ただし、この式では、流体力学的不安定性以外の乱れの要因を考慮していない。なお、この式およびこれ以下では、層流燃焼速度 S_L 、密度と分子拡散係数の積である ρD （一定と仮定）、未燃気体密度 ρ_u を用いて無次元化して考える。有効拡散係数の値は、球対称の系における解が自己相似的になるように定めた。これは、流体力学的不安定性の影響により火炎がフ

ラクタル的になるためである。

このモデルを用いて球対称一次元の系における火炎伝播挙動をシミュレーションした結果を図1に示す。横軸は着火点からの距離で縦軸は反応進行度(未燃側で $c = 0$, 既燃側で $c = 1$ となるスカラー量)と半径方向速度 u_r である。反応進行度が0~1に変化する r の範囲が火炎帯に相当するが、時間の経過とともに火炎帯の厚さが増加している様子がわかる。これは、流体力学的不安定性による火炎の乱れを表している。また、時間の経過とともに半径方向速度が上昇している。これは、火炎伝播速度の上昇によるものである。

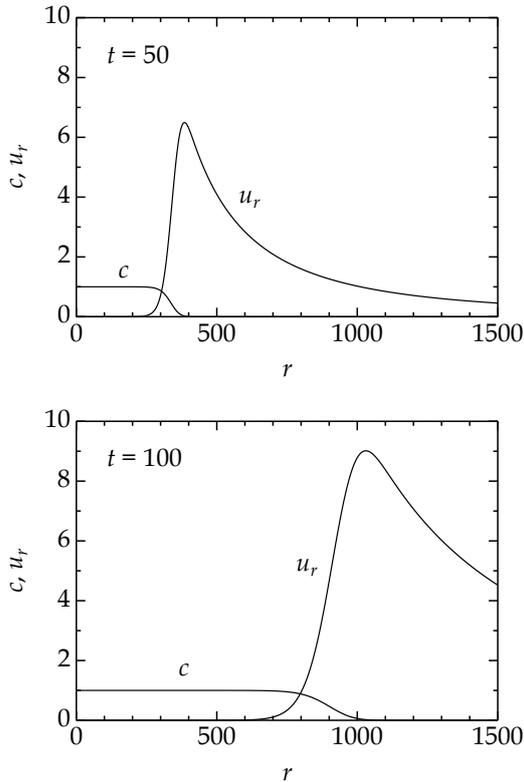


図1 火炎伝播挙動の計算結果

図1に示した $t = 50, 100$ の反応進行度の計算結果を、横軸を r/R としてプロットしたものを図2に示す(R は火炎半径)。図2の横軸は自己相似変数で、火炎構造が自己相似的であれば、各従属変数が r/R のみの関数として表されるはずである。図2より、異なる時間に対しても反応進行度が r/R の同一の関数として表されることがわかり、火炎構造が自己相似的になっていることを確認できる。流体力学的不安定性の影響下の火炎はフラクタル的なので、自己相似的な構造を持つはずである。このような自己相似性を再現できることが本モデルの最大の特徴である。

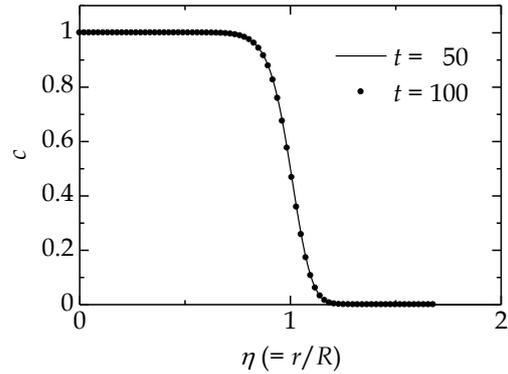


図2 計算結果の自己相似性の確認

本モデルにより計算された火炎半径の時間依存性を図3に示す。通常火炎伝播では火炎半径は時間に比例するが、図3では火炎半径が時間の $3/2$ 乗に比例している。このような時間依存性はフラクタル的な火炎伝播の特徴であるが、本モデルでも再現することができた。なお、図3の直線の傾きはフラクタル次元 d に依存する(図3は $d = 7/3$ とした場合の結果)。本モデルではフラクタル次元をモデルパラメータとして取り扱っているため、各条件におけるフラクタル次元の決定方法を確立する必要がある。これについて以下で検討する。

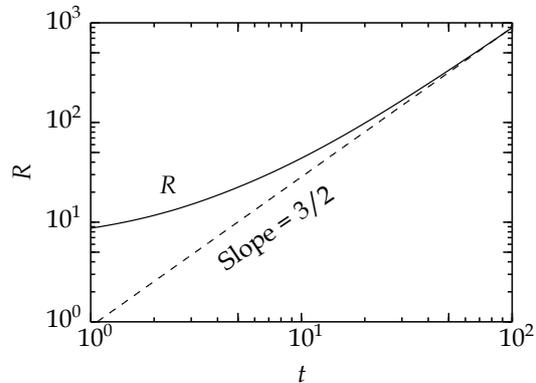


図3 火炎半径計算結果の時間依存性

既往の研究では、フラクタル次元は大規模な爆発実験またはその数値シミュレーションにより測定されることが多かった(図3のような火炎半径の時間依存性を測定すればフラクタル次元を逆に求められる)。しかし、このような方法は実験コストが高く、フラクタル次元データの蓄積の観点から最適とはいえない。そこで本研究では、数値シミュレーションおよび実験の両面から、フラクタル次元を容易に求める方法について検討した。

まず数値シミュレーションによる方法だが、従来のように球状火炎伝播を対象とすると、時間の経過とともに火炎半径が大きくなり計算負荷が増す。そこで本研究では、火炎スケールを固定できる平面火炎伝播シミュレーションの結果からフラクタル次元を求める方法を検討した。まず、先ほどの反応進行度の式から流体力学的不安定性をモデル化した部分を取り除き、火炎が乱れながら伝播する様子を直接数値計算した。これにより得られた火炎形状の例を図4に示す。この図は、火炎スケール L_y を100~500と変化させて計算した結果である。火炎スケールの増加とともに乱れのスケールも増加している様子がわかる。これはフラクタル的な火炎構造の特徴であるが、これにより火炎スケールとともに火炎面積も増加し、火炎伝播速度も上昇する。計算により得られた火炎スケールと火炎伝播速度の関係を図5に示す。

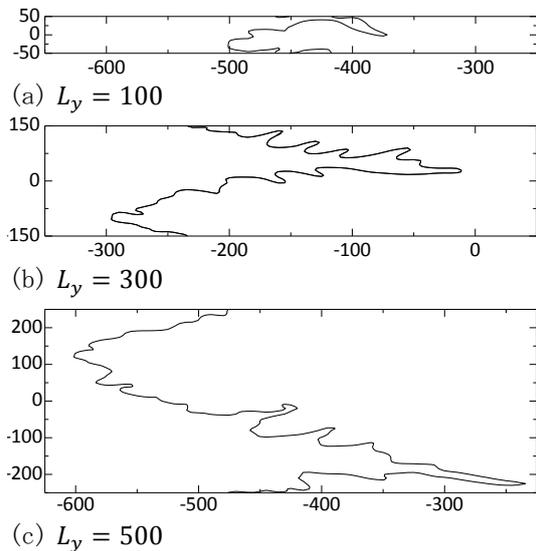


図4 数値計算により得られた火炎形状

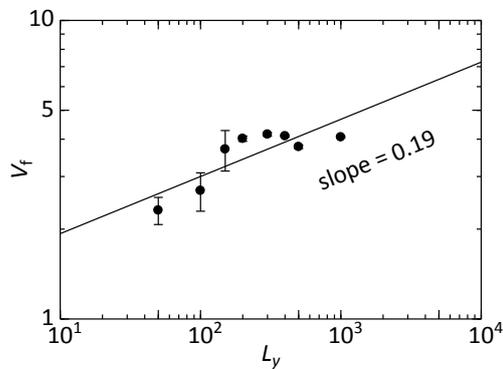


図5 火炎伝播速度と火炎スケールの関係

火炎伝播速度が火炎面積に比例することに着目すると、図5のような火炎伝播速度のスケール依存性からフラクタル次元を計算することができ、この条件では $d = 2.38$ と求められる。この方法は、従来のような球状火炎伝播計算と比べると非常に簡便である。また、火炎伝播速度のスケール依存性からフラクタル次元を求める以外に、火炎形状のフーリエ解析(図6)やボックスカウント法(図7)によるフラクタル次元の算出も試みた。いずれの方法でも、ほぼ等しいフラクタル次元が得られることを確認した。

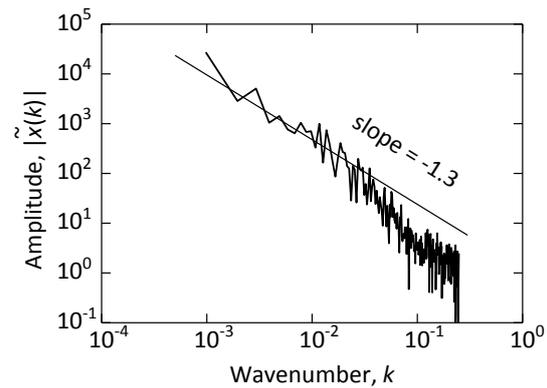


図6 火炎形状のフーリエ解析によるフラクタル次元の決定

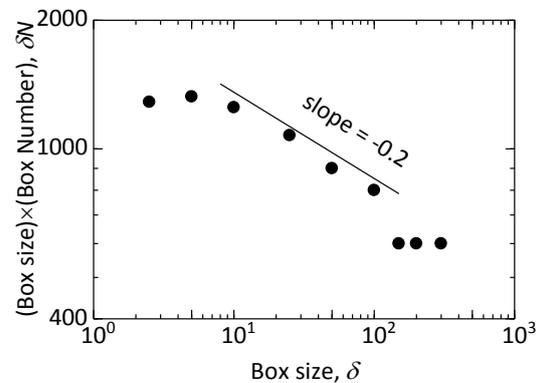


図7 ボックスカウント法によるフラクタル次元の決定

最後に、小規模火炎伝播実験によるフラクタル次元の測定方法について説明する。従来の方法では実験的に図3のような火炎半径の時間依存性を測定していた。この方法で精度よくフラクタル次元を求めるためには(図3の曲線の傾きが一定値に収束するためには)、火炎半径がかなり大きくなるまで待たねばならず、大規模な実験が必要であった。しかし、小規模実験の火炎形状の解析などからフ

フラクタル次元を求めることができれば、フラクタル次元の測定が飛躍的に容易になる。そこで、小規模火炎伝播実験[1]で得られた火炎形状に対してフラクタル解析を実施した。まず、高速度カメラにより撮影された火炎系画像を画像処理し、火炎の輪郭を検出した。このようにして得られた火炎形状に対してフラクタル解析を実施し、フラクタル次元を求めることができた(図8)。図8は測定された火炎の輪郭の長さ l と火炎半径 r の関係を示すが、この図のように両対数グラフ上の傾きが1.1の場合はフラクタル次元を2.1と求めることができる。

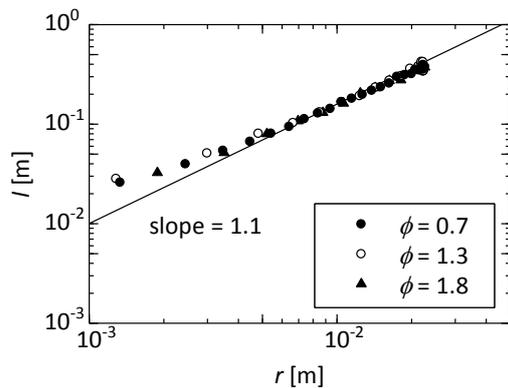


図8 火炎画像のフラクタル解析

(3) 以上のモデルについては、本研究で実施した実験および既往の実験の結果と比較して妥当性を評価した。可燃性物質の漏洩拡散による爆発性混合気の形成およびそれに続く火炎伝播の例として、本研究ではエタノールの蒸発、拡散およびエタノール蒸気と空気の混合気中の火炎伝播実験を実施した。また、漏洩拡散モジュールにおける微粒化モデルの検証およびモデルパラメータの検討のために、既往のデータ[2]を用いた。さらに、大規模ガス爆発実験の実験データを収集し(例えば文献[3])、本研究で構築した火炎伝播モジュールの予測結果と比較した。これらの比較検討の結果、本研究で構築したモデルが実験結果をおおむね再現できることを確認した。

本研究では、特に流体力学的不安定性に着目してモデル化を行った。これは静止気体中での大規模爆発においてはこの不安定性が支配的だと考えられるためである。しかし、可燃性気体の種類によっては流体力学的不安定性以外に拡散・熱的不安定性などの不安定性機構も火炎伝播挙動に影響を及ぼす。このような可燃性気体ごとの物性値の影響を

詳細に考慮することが今後の展望として挙げられる。また、本研究では、球状に火炎伝播する系のみを検証の対象とした。これは、これまでの実験がほとんどすべて球対称かそれに近い条件で実施されていたためである。しかし、爆発事故は必ずしも球対称な条件のみで起こるわけではない。したがって、非対称な条件での本モデルの予測結果を実験結果と比較しながら検証していくことが今後の課題である。

【参考文献】

- [1] 金佑勁, 茂木俊夫, 土橋律, 第49回燃焼シンポジウム, pp. 362-363 (2011)
- [2] R.D. Reitz, Atomization and Spray Technology 3, pp. 309-337 (1987)
- [3] R. Dobashi, S. Kawamura, K. Kuwana, Y. Nakayama, Proceedings of the Combustion Institute 33, pp. 2295-2301 (2011)

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4件)

- ① Y. Wada, K. Kuwana, "Propagation velocity and fractal structure of premixed flame during gas explosion," Journal of Chemical Engineering of Japan (掲載決定), 査読有, DOI: 10.1252/jcej.11we165
- ② Y. Wada, K. Kuwana, "A numerical method to predict flame fractal dimension during gas explosion," Journal of Loss Prevention in the Process Industries (掲載決定), 査読有, DOI: 10.1016/j.jlp.2011.11.006
- ③ K. Mukaiyama, K. Kuwana, "Scale effect of flame instability mechanisms on propagation velocity," Journal of Loss Prevention in the Process Industries (掲載決定), 査読有, DOI: 10.1016/j.jlp.2011.10.003
- ④ D. Takeda, W.K. Kim, Y. Wada, K. Kuwana, T. Mogi, R. Dobashi, "Toward risk assessment of explosion hazard: experimental determination of flame fractal dimension," Advanced Materials Research, 査読有, Vol. 320, 2011, pp. 151-155, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.320.151

[学会発表] (計4件)

- ① K. Mukaiyama, K. Kuwana, “Scale effect of premixed flame deflagration,” 4th International Symposium on Energetic Materials and Their Applications, 2011年11月16日, 自治会館 (沖縄県)
- ② 和田悠香里, 金佑勁、竹田大祐、桑名一徳、茂木俊夫、土橋律「小規模実験によるガス爆発時の火炎フラクタル次元の測定」化学工学会・第43回秋季大会, 2011年9月14日, 名古屋工業大学 (愛知県)
- ③ 向山健司, 桑名一徳「火炎伝播挙動における火炎面不安定性の影響」化学工学会・第43回秋季大会, 2011年9月14日, 名古屋工業大学 (愛知県)
- ④ K. Kuwana, Y. Wada, “Interface instability during premixed flame propagation,” 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, 2010年11月1日, 仙台国際センター (宮城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑名 一徳 (KUWANA KAZUNORI)
山形大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：30447429

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし