

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02977

研究課題名(和文)火災・爆発シミュレーションに特化した燃焼反応データベースの構築

研究課題名(英文)Combustion-reaction database specialized for accidental fire/explosion simulations

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：火災・爆発シミュレーションに特化した燃焼反応モデルを整備し、火災・爆発シミュレーションの精度向上を図ることを目的とし研究を実施した。まず、実験および1次元詳細反応シミュレーションの結果をもとに総括反応モデルの速度パラメータを導出した。得られた総括反応モデルやほかの簡易反応モデルを用いた数値シミュレーションを実施し、実験結果や詳細反応シミュレーションの結果と比較した。これにより、反応モデルの妥当性を検証した。また、拡散火炎と予混合火炎の性質を併せ持つトリプルフレームを対象とし、状況に応じて最適な反応モデルを選択できる方法論について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to develop a combustion-reaction database specialized for numerical simulations of fire/explosion phenomena. Kinetic parameters of global reaction models were first determined based on the results of experiments and 1-D detailed-reaction simulations. Numerical simulations were then conducted using the obtained global models and other reduced reaction models to compare with the results of experiments or detailed-reaction simulations. A methodology was finally discussed to select the optimal reaction model depending on the local condition.

研究分野：安全工学、燃焼工学、火災・爆発安全

キーワード：火災 爆発 シミュレーション 燃焼反応

1. 研究開始当初の背景

火災・爆発事故は、一般家庭はもちろん工場等でも甚大な被害を及ぼすものである。例えば、危険物施設における火災・爆発等の事故は年間で500件以上発生しており、平成元年以降もっとも事故が少なかった平成6年と比べると、危険物施設数は減少しているにもかかわらず、事故発生件数は約2倍に増加している。

火災・爆発事故の未然防止には、起こり得る事故を想定し、その被害予測に基づいて適切な対策を実施することが重要である。火災・爆発事故の被害予測には数値シミュレーションが広く用いられているものの、予測精度が限定的である。乱流燃焼モデルを用いたシミュレーションは計算負荷が小さいが、詳細な火災構造を考慮できないためである。一方、乱流燃焼をモデル化せず詳細な火災構造を再現しようとする直接数値計算は、乱流燃焼モデルに依存しないため予測精度が高い。しかし、1ミリメートル以下のスケールである詳細な火災構造を再現しながら、火災・爆発のような大規模現象をシミュレーションするのは計算負荷が非常に高い。特に、数十～数百以上もある詳細な化学反応（素反応）を考慮するようなシミュレーションは計算負荷が極めて高く、これから数十年の間に現実的に実施できるようになるとは考えられない。したがって、直接数値計算を実施しながらも、燃焼反応としては簡略化された反応メカニズム（詳細反応モデルを縮約したもので、以後、簡易反応モデルと呼ぶ）や総括反応モデルを用いるといった手法が重要さを増すと考えられる。

内燃機関などを対象とした燃焼シミュレーションでも簡易反応モデルや総括反応モデルが広く用いられている。特に総括反応の速度パラメータに関しては、例えば燃焼速度の測定結果をもとに定められることが多い。しかし、火災・爆発シミュレーションは内燃機関シミュレーションとは捉えるべき現象が異なり、必ずしも燃焼速度の再現が最重要ではない。例えば可燃性気体と酸素が別々に供給される拡散燃焼（火災時の主要な燃焼形態）の火災形状は燃焼速度とはほぼ無関係である。この場合、むしろ消炎現象や燃え拡がり挙動などを正確に再現することのほうが大切である。

以上のことから、火災・爆発シミュレーションでは、火災・爆発に係る諸現象に特化した簡易反応モデルあるいは総括反応モデルを用いるべきである。さらに、火災・爆発シミュレーションでは局所的な条件に応じて捉えるべき現象（消炎や火炎伝播の加速現象など）が異なるため、状況に応じて最適な反応モデルや速度パラメータを選択しなければ予測精度を保てない。しかし、このような観点からの反応モデルおよび速度パラメータの整備はほとんど行われておらず、信頼できる火災・爆発シミュレーションを実施し

にくい状況であった。

なお、可燃性気体の燃焼反応については詳細反応モデルの研究が進んでいるが、固体の燻焼燃え拡がり現象（火災初期によくみられる現象）などでは、詳細な反応モデルがほとんど提案されておらず、総括反応の速度パラメータも十分検討されているとは言えない状況である。このような現象に関しては、幅広い条件で実験結果を再現できる総括反応パラメータを整備する必要がある。

2. 研究の目的

以上に記した背景のもと、本研究では、火災・爆発シミュレーションに特化した燃焼反応モデルを整備し、火災・爆発シミュレーションの精度向上を図ることを目的とした。本研究の成果によりシミュレーション精度が向上すれば、防災に役立つシステムの構築などに貢献できると期待される。

3. 研究の方法

上述の研究目的を達成するために、本研究では以下の3つの項目を実施した。

(1) 総括反応モデルの速度パラメータ導出

様々な可燃性物質を対象として、実験および1次元詳細反応シミュレーションの結果を基に、総括反応モデルの速度パラメータを導出した。

(2) シミュレーションの妥当性検証

複数の火災・爆発現象を対象とし、簡易反応モデルおよび総括反応モデル（本研究で導出したものおよび既存のモデル）を用いたシミュレーションを実施した。そして、実験結果あるいは詳細反応モデルを用いたシミュレーション結果と比較し、簡易／総括反応モデルの妥当性を検証した。

(3) 最適な反応モデルを選択する指針検討

状況に応じて最適な反応モデルを選択できる方法論について検討した。

4. 研究成果

ここでは、先に述べた3つの研究項目のそれぞれについて成果を述べる。

(1) 総括反応モデルの速度パラメータ導出

① 拡散火炎の消炎

可燃性気体と酸素が別々に供給される拡散燃焼は火災時の主な燃焼形態であり、その消炎特性は火災安全上不可欠なデータである。また、火災シミュレーションで消炎条件を正確に再現することは重要である。

本研究では、対向流1次元拡散火炎および噴流拡散火炎（いわゆるバーナ火炎）の消炎現象を対象とし、実験結果あるいは詳細反応シミュレーションの結果を再現できる総括一段反応の速度パラメータを検討した。対向流1次元拡散火炎に対しては、拡散火炎の

カラー散逸量応答性を表す理論[1]を用いてパラメータ導出を試み、バーナ火炎に対しては研究代表者が文献[1]を基に以前に構築した理論[2]を応用して検討した。この方法で導出した反応モデルにより、既存の速度パラメータを用いた数値シミュレーションよりも消炎現象をより精度よく再現できることを確認した。

②予混合火炎伝播の加速現象

可燃性気体と酸素があらかじめ混合されてから燃焼する予混合燃焼は、ガス爆発時の主要な燃焼形態である。予混合火炎には様々な不安定化機構が存在し、これらのために不安定化した火炎は皺状になる。すると反応面積が増加するので、見かけの伝播速度も上昇する。ガス爆発事故の被害は火炎伝播速度に大きく依存する（火炎伝播速度が速いほど爆風圧などの被害も大きくなる）ため、爆発シミュレーションで予混合火炎の不安定性およびそれによる加速現象を再現することは重要である。

予混合火炎の不安定性による加速現象を支配するのは伝播速度の火炎伸長率依存性であることが知られている。本研究では、予混合火炎の不安定性に関する理論モデル[3, 4]を応用して、詳細反応モデルにより得られた火炎伸長率依存性を再現できる総括一段反応の速度パラメータを検討した。なお、詳細反応モデルにより得られた火炎伸長率依存性が既往の実験結果とほぼ一致することは確認してある[4]。また、この方法により得られた速度パラメータを用いると、燃焼速度ベースの速度パラメータよりも精度よく火炎伸長率依存性を再現できることも確認できた。

③固体の燻焼燃え拡がり現象

住宅火災の出火原因の多くがタバコであり、一般のタバコ火災では、出火後、紙類などの可燃性固体表面に沿って火炎が燃え拡がる。このとき、通常は燻焼（炎を伴わない表面燃焼の一形態）燃え拡がりが生じる。したがって、初期火災のシミュレーションにおいては、燻焼燃え拡がりを精度よく再現することが重要である。

本研究では、酸素の供給速度や周囲への熱損失量を制御した燻焼燃え拡がり実験が可能な、狭い空間における燃え拡がり現象に着目した。固体の熱分解および酸化（燃焼）反応をモデル化し、燃え拡がり速度を精度よく予測することを試みた。

なお、消炎限界に近い（酸素の供給速度が小さい、あるいは熱損失が大きい）条件での燻焼燃え拡がりは不安定性を示すことが知られている。そして、燃焼不安定性がガス爆発時の火炎伝播速度に影響を及ぼす（先述）のと同様に、燻焼不安定性も燃え拡がり速度に影響を及ぼす。そこで、不安定な燻焼燃え拡がり挙動を再現することも目的として数

値シミュレーションを行った。結果は、下記(2)②に示す。

④その他（簡易反応モデルを含めた検討）

既往の研究では、多くの詳細反応モデルが提案されるとともに、それらの縮約方法も提案されている。本研究ではこれらの反応モデルの比較検討も行ったので一例を挙げる。メタンの反応モデルとして、①23 化学種・97 化学反応のもの、②30 化学種・150 化学反応のもの、③2 番目のモデルを DRG と呼ばれる手法で縮約した簡易反応モデルについて比較検討した（図1に①のシミュレーション結果を示す）。

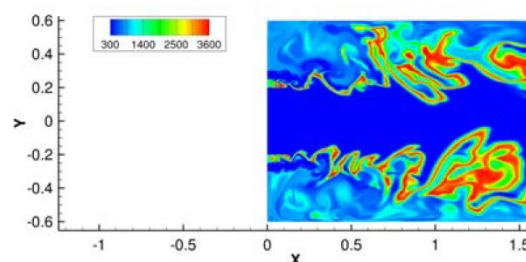


図1 火炎基部の非定常構造（学会発表 27）

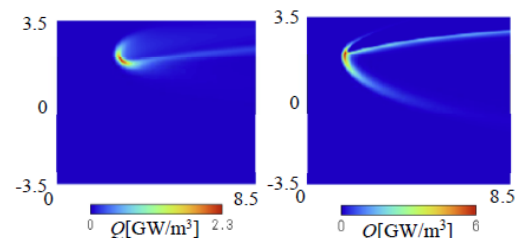


図2 トリプルフレームの発熱速度の比較
左：詳細反応、右：総括反応。画像のサイズはそれぞれ7 mm×8.5 mm（学会発表 11）

(2)シミュレーションの妥当性検証

①詳細反応モデルと総括反応モデルの比較

拡散火炎と予混合火炎の両方から成る、いわゆるトリプルフレーム（三重火炎とも呼ばれる）を対象として、詳細反応モデルと総括反応モデルの比較を行った。トリプルフレームは濃度勾配がある場で燃焼する場合などに生じ、三重点の挙動を正確に再現できれば、火炎伝播速度や燃え拡がり挙動、あるいは消炎特性を精度よく予測できると期待される。

詳細反応として、16 化学種・25 化学反応のものを考えた。一方、総括反応モデルとしては、文献[5]に記載されたものを修正して用いた。この総括反応は、広い濃度範囲で燃焼速度を再現できるように速度パラメータが定められており、濃度勾配中に形成されるトリプルフレームのシミュレーションに適している。両者の比較を図2に示す。得られたトリプルフレーム構造には若干の違いがあり、図2の左図（詳細反応モデル）では下

側の火炎構造がほとんど見られない。しかし、全体的な火炎構造や三重点の位置は総括反応によって詳細反応の結果を再現できている。このことは、トリプルフレイムの伝播速度などの特性値もほぼ再現できていることを示している。

②簡易反応モデルと実験結果の比較

(1)③に記した狭い空間における燻焼燃え拡がりについて、数値シミュレーション結果と実験結果の比較を行った。酸素供給速度 u および狭い空間の高さ h をパラメータとし、数値シミュレーションおよび実験により得られた燃え拡がり速度を図3に比較する。本研究で得た反応速度パラメータにより、実験結果をほぼ再現できていることがわかる。また、(1)③で記した通り、限界条件付近での不安定な燻焼燃え拡がり現象を数値シミュレーションで再現することも試みた。図4の上図が実験結果で、褐色部分は燻焼が生じた領域である。一方、白色の部分には未燃の可燃性固体（濾紙）が残った領域である。下図は同じ条件での数値シミュレーション結果であり、不安定な燻焼燃え拡がり挙動をほぼ再現できていることがわかる。

燻焼燃え拡がり現象の他にも、床面付近の燃え拡がりや有風下での液体燃焼などの火災現象を対象として、数値シミュレーションと実験を実施し、両者の結果を比較検討した。

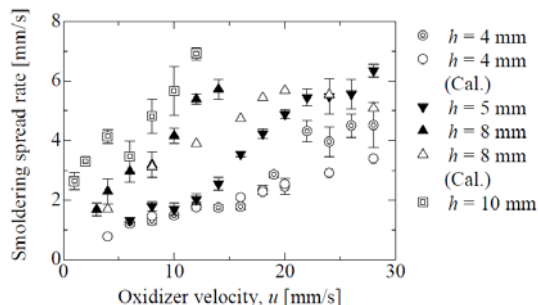


図3 数値シミュレーションおよび実験により得られた燻焼燃え拡がり速度の比較 (学会発表 38)

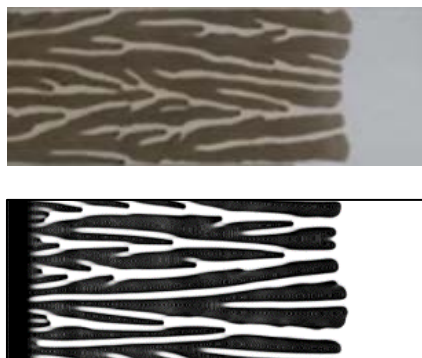


図4 限界付近の条件における燻焼燃え拡がりによるパターン形成の実験結果および数値シミュレーション結果の比較

(3)最適な反応モデルを選択する指針検討

火炎の局所的な情報から最適な反応モデルを選択する指針について検討した。

(2)①で述べたトリプルフレイムは、拡散火炎と予混合火炎から成り、両方の燃焼形態の特徴が狭い領域で共存する。したがって、ここでの検討に最適な燃焼形態だと言える。総括反応モデルにより得られたシミュレーション結果から、flame index と呼ばれるスカラー量[6]を求めた結果を図5に示す。この量が負の領域は拡散燃焼的であり、正の領域は予混合燃焼的である。また、この量の絶対値が反応速度に対応する。この情報をもとに、予混合燃焼領域では濃度勾配の存在や火炎伸長率から(2)①で述べた総括反応モデルや(1)②で述べた総括反応モデルを選択できる。また、拡散燃焼領域では、消炎（すなわち拡散火炎のスカラー散逸量応答性）を考慮できる総括反応モデル（(1)①参照）を選択できる。

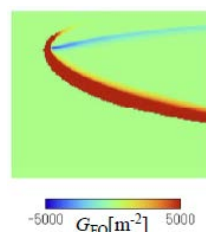


図5 Flame index の分布 (学会発表 11)

(4)その他（火災・爆発現象のスケール則の検討）

以上に述べた3つの項目に加えて、火災・爆発現象のスケール則について検討した。火災・爆発現象は複雑なスケール依存性を示すことが多いので、本研究で得られた知見を実際の火災・爆発シミュレーションに活用するためにはスケール則に関する知見が不可欠なためである。浮力流が支配的なプール火災および高速な火炎伝播が支配的なガス爆発現象を具体的な検討対象とした。検討の結果、プール火災における燃焼率の相似則、およびガス爆発時の火炎不安定性の相似則を明らかにできた。

<引用文献>

- [1] A. Liñán, Acta Astronaut. 1, 1974, 1007-1039.
- [2] K. Kuwana, N. Tagami, S. Mizuno, T. Ida, Proc. Combust. Inst. 32, 2009, 3115-3121.
- [3] J.K. Bechtold, M. Matalon, Combust. Flame 127, 2001, 1906-1913.
- [4] 佐藤実, 桑名一徳, 日本燃焼学会誌 56, 2014, 251-257.
- [5] C.K. Westbrook, F.L. Dryer, Combust. Sci. Tech. 27, 1981, 31-43.
- [6] H. Yamashita, G. Kushida, T. Takeno, Proc. Combust. Inst. 24 (1992) 311-316.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

1. Tomomi Sasaki, Kazunori Kuwana, Buoyancy effects on the shape of a small axisymmetric diffusion flame, Journal of Chemical Engineering of Japan, 査読有, 掲載決定
 2. Maika Goto, Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida, Shigetoshi Yazaki, Experimental and theoretical study on near-floor flame spread along a thin solid, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, 掲載決定
 3. Kazunori Kuwana, Kenta Suzuki, Yuki Tada, Genichiro Kushida, Effective Lewis number of smoldering spread over a thin solid in a narrow channel, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, 2017, 3203-3210
 4. Akira Matsugi, Hiroshi Terashima, Diffusive-thermal effect on local chemical structures in premixed hydrogen-air flames, Combustion and Flame, 査読有, 2017, 238-241
 5. 遊佐真弓, 船島康史, 増山紋加, 桑名一徳, 櫛田玄一郎, 濾過燃焼の低次元模型実験, 実験力学, 査読有, 2017, 217-222
 6. Hiroyuki Iizuka, Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida, Numerical analysis of heat loss effects on the smoldering combustion of a thin solid in a narrow channel, Journal of Chemical Engineering of Japan, 査読有, 2017, 535-541
 7. 大西博之, 桑名一徳, 火災旋風近傍の流れに関する研究, 日本燃焼学会誌, 査読有, 2016, 167-171
- ### 〔学会発表〕(計 4 4 件)
1. 飯塚洋行, 桑名一徳, 櫛田玄一郎, 狭い空間における薄い固体の燃え拡がり現象—一次元および二次元モデルの数値的比較・検討—, 平成 30 年度日本火災学会研究発表会, 2018
 2. 後藤舞香, 桑名一徳, 櫛田玄一郎, 矢崎成俊, 床面近傍での燃え拡がり実験と燻焼理論の比較, 平成 30 年度日本火災学会研究発表会, 2018
 3. 寺島洋史, 大門優, 根岸秀世, ロケット燃焼器における高圧メタン酸素燃焼場の解析, 日本流体力学会年会 2017, 2017
 4. 寺島洋史, 大門優, ロケット噴射器リセス長さや燃焼流れ場・性能との関係について, 第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017
 5. Kazunori Kuwana, Tatsuya Suzaki, Kozo Sekimoto, Yuji Nakamura, Kozo Saito, Large-scale wind-tunnel experiments and numerical study on moving-type fire whirls, 10th U.S. National Combustion Meeting, 2017
 6. Naoki Hayashi, Numerical simulation on heat release rate in triple point of triple flame, 11th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2017
 7. Tomomi Sasaki, Tatsuya Suzaki, Masayasu Shiozawa, Kazunori Kuwana, Fire whirl generated behind an L-shaped wall under the presence of a crosswind, 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2017
 8. Mayumi Yuza, Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida, Numerical study on the smoldering combustion of a thin solid considering the effects of heat loss and oxidizer velocity, 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2017
 9. Rikiya Yamada, Kazunori Kuwana, Ken Matsuyama, Dynamic similarity of fire whirls, 8th International Symposium on Scale Modeling, 2017
 10. Yurie Iriyama, Kazunori Kuwana, Moving fire whirls over line fires: similarity to rollup of vortex sheets, 8th International Symposium on Scale Modeling, 2017
 11. Kazunori Kuwana, Kenta Suzuki, Yuki Tada, Genichiro Kushida, Smoldering spread velocity along a thin solid in a narrow channel, 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2017
 12. Kazunori Kuwana, Shigetoshi Yazaki, A simple and fast method for solving flame evolution equations, 14th International Conference on Flow Dynamics, 2017
 13. 猪狩萌, 佐々木知美, 桑名一徳, L 字ついたて背面に形成される火災旋風に関する研究, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017
 14. 桑名一徳, 矢崎成俊, 2 次元火炎伝播における G 方程式の数値解法, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017
 15. 後藤舞香, 山田力也, 桑名一徳, 櫛田玄一郎, 床面近傍での可燃性固体の燃え拡がり, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017
 16. 増山紋加, 船島康史, 桑名一徳, 櫛田玄一郎, 燻焼燃え拡がりパターン形成, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017
 17. 多田悠樹, 遊佐真弓, 桑名一徳, 櫛田玄一郎, 狭い空間における燃え拡がり速度, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017
 18. 遊佐真弓, 桑名一徳, 櫛田玄一郎, 薄い固体の燻焼燃え拡がりに関する数値シミュレーション, 第 55 回燃焼シンポジウム, 2017
 19. 佐々木知美, 桑名一徳, 火災旋風基部に

- おける速度境界層のスケール効果, 混相流シンポジウム 2017, 2017
20. 山田力也, 桑名一徳, 沖永誠治, 松山賢, 火災旋風の火炎基部近傍における流れ場のスケール効果, 平成 29 年度日本火災学会研究発表会, 2017
 21. 桑名一徳, 矢崎成俊, 床面付近での不安定な燃え拡がり現象の数値計算, 日本応用数学会・第 13 回研究部会連合発表会, 2017
 22. Yuki Tada, Kenta Suzuki, Hiroyuki Iizuka, Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida, Quantitative study of fingering pattern created by smoldering combustion, 8th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, 2016
 23. 林直樹, 堰勇人, 山下博史, Triple flame の火炎構造に関する数値解析 (詳細素反応と総括反応の比較), 第 53 回日本伝熱シンポジウム, 2016
 24. Kazunori Kuwana, Kenta Suzuki, Yuki Tada, Genichiro Kushida, Effective Lewis number of smoldering spread over a thin solid in a narrow channel, 36th International Symposium on Combustion, 2016
 25. Tomomi Sasaki, Kazunori Kuwana, Shape of small-scale jet diffusion flame, 36th International Symposium on Combustion, 2016
 26. Tatsuya Suzaki, Tomomi Sasaki, Misaki Saito, Kazunori Kuwana, Fire whirl behind an L-shaped wall, 36th International Symposium on Combustion, 2016
 27. Kenta Suzuki, Kazunori Kuwana, Yuki Tada, Genichiro Kushida, Interface instability during smoldering spread over a thin solid, 13th International Conference on Flow Dynamics, 2016
 28. 桑名一徳, 榎田玄一郎, 船島康史, 床面付近での薄い可燃性固体の円形燃え拡がり, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016
 29. 船島康史, 多田悠樹, 鈴木健太, 桑名一徳, 榎田玄一郎, スモルダリング燃焼の数値シミュレーションによるフィンガリング不安定性理論の検証, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016
 30. 塩澤将康, 須崎竜也, 桑名一徳, 火災旋風の発生抑止方法に関する研究, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016
 31. 入山由里絵, 桑名一徳, 火災旋風発生時の火炎基部近傍における流れの構造, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016
 32. 須崎竜也, 佐々木知美, 桑名一徳, L 字ついで背面における火災旋風周囲の流れ場計測, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016
 33. 山田力也, 桑名一徳, 火災旋風発生時の火炎基部近傍における流れの構造, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016
 34. 多田悠樹, 鈴木健太, 桑名一徳, 榎田玄一郎, スモルダリング燃焼で生じるフィンガリングパターンに及ぼす実験パラメータの影響, 第 54 回燃焼シンポジウム, 2016
 35. 桑名一徳, 鈴木健太, 多田悠樹, 榎田玄一郎, 薄い固体のスモルダリング燃焼に関する安定解析, 日本機械学会・熱工学コンファレンス 2016, 2016
 36. 桑名一徳, 永澤沙織, 屋内火災の模型実験方法に関する考察, 日本実験力学会 2015 年度年次講演会, 2015
 37. 桑名一徳, ガス爆発被害予測に関する理論的検討, 日本機械学会・熱工学コンファレンス 2015, 2015
 38. Kazunori Kuwana, Theoretical prediction of flame propagation during a gas explosion, 12th International Conference on Flow Dynamics, 2015
 39. 加藤慶, 桑名一徳, 平沢太郎, 中村祐二, 複数のマイクロスロットフレームの干渉に関する研究, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015
 40. 佐々木知美, 桑名一徳, マイクロフレームの火炎高さに及ぼす浮力の影響, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015
 41. 阿部沙紀, 桑名一徳, マイクロフレームの消炎に関する数値解析, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015
 42. 齋藤美咲, 桑名一徳, 有風下における火災旋風の数値シミュレーション, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015
 43. 大西博之, 桑名一徳, 火災旋風近傍の速度分布, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015
 44. 松木亮, 寺島洋史, 化学反応と火炎伝播機構—水素およびプロパン二次元火炎の不安定性, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015
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：3 0 4 4 7 4 2 9
 - (2) 研究分担者
 - 寺島 洋史 (TERASHIMA, Hiroshi)
 - 北海道大学・工学研究院・准教授
 - 研究者番号：2 0 4 1 5 2 3 5
 - 林 直樹 (HAYASHI Naoki)
 - 神奈川工科大学・工学部・准教授
 - 研究者番号：0 0 3 7 7 8 3 9