

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24310118

研究課題名(和文) ガス爆発時における伝播火炎のフラクタル次元

研究課題名(英文) Fractal dimension of propagating flame during an accidental gas explosion

研究代表者

桑名 一徳 (Kuwana, Kazunori)

山形大学・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) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：ガス爆発事故の被害予測の精度向上を目的とし、火炎のフラクタル次元を簡便に求められる実験方法や理論解析方法について検討した。実験では、同心二重円筒による一次元火炎発生装置を用い、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方法を確立した。この方法では、二重円筒間の狭い隙間にも可燃性ガスが存在するため、従来の大規模ガス爆発実験よりも簡便に実施できる。理論解析では、フラクタル次元が燃焼による体積膨張率に大きく依存することを明らかにし、体積膨張率からフラクタル次元を見積もる方法を確立した。本研究の成果により、ガス爆発のリスク評価を正確に、かつ簡便に実施できるようになると期待できる。

研究成果の概要(英文)：To achieve the goal of this study, improving the accuracy of damage estimation of an accidental gas explosion, experiments and theoretical analyses are conducted to develop a method to easily measure the flame fractal dimension. The experimental apparatus consists of two concentric cylinders, and a 1-D flame propagates within the narrow gap between them. The fractal dimension can be obtained from the scale dependence of flame propagation velocity. Since the volume of combustible gas used in the apparatus is limited by the narrow gap, the proposed method is safer and simpler than conventional large-scale experiment. Theoretical analyses indicates that the fractal dimension depends mainly on the volume expansion ratio due to combustion; a method is then developed to estimate the fractal dimension from the expansion ratio. It is expected that the risk assessment of an accidental gas explosion can be done more easily and accurately by utilizing the results obtained in this study.

研究分野：安全工学

キーワード：ガス爆発 リスク評価 火炎伝播 フラクタル次元

### 1. 研究開始当初の背景

ガス爆発事故を未然に防止するためには、想定される事故の発生確率や被害の程度を評価し、リスクの高いものから対策を実施することが重要である。

ガス爆発は火炎伝播を伴う現象である。可燃ガスと空気の混合気が何らかの原因で着火されると、着火源から火炎が球状に伝播する。このように球状伝播する火炎は、その規模が数十センチメートル程度以上になると、火炎の流体力学的不安定性のため、周囲気体に全く乱れが無くても乱流化する。このとき火炎構造がフラクタル的であり、フラクタル次元を用いて火炎伝播速度を表せることが1988年の研究[1]により明らかにされている。

一方、爆風圧などのガス爆発被害は、火炎伝播速度に大きく依存する[2]。したがって、ガス爆発被害を予測するためには火炎のフラクタル次元を知ることが第一歩である。火炎のフラクタル次元を測定する方法として、一般に、大規模ガス爆発実験が実施されてきた。このような大規模実験データから、火炎半径を時間の関数として両対数プロットし、その傾きからフラクタル次元が求められる。しかし、伝播初期の小規模火炎はフラクタル性を示さないため、フラクタル次元算出のためには(つまり、両対数プロットにおける曲線の傾きが一定値に収束するためには)、長時間の火炎伝播、つまり大規模(通常、半径1m以上)な火炎伝播を起こす必要がある。これは、実験的にも数値シミュレーション(数値実験)的にも非常に困難であり、フラクタル次元が測定された研究例は世界的にも数例しか報告されていなかった。

また、火炎のフラクタル次元に対する理論的な理解も十分ではなかった。火炎のフラクタル次元が可燃性混合気のどのような性質に依存し、どうすればフラクタル次元を理論的に予測できるかについても明確ではなかった。

以上のことから、火炎のフラクタル次元の実験的測定も理論予測も困難であり、したがって、ガス爆発事故の正確なリスク評価が困難な状況であった。

### 2. 研究の目的

#### (1) フラクタル次元の簡便な測定方法の確立

本研究の第一の目的は、大規模ガス爆発実験に依存しない、簡便なフラクタル次元測定方法を確立することである。この目的を達成するために、同心二重円筒装置を用いて一次元乱流火炎を発生させ、フラクタル次元を測定する。フラクタル次元を簡便に測定することができれば、様々な種類の可燃性ガスに対してフラクタル次元のデータベースを整備することができ、ガス爆発の被害予測に活用することができる。これにより、ガス爆発事故のリスク評価の精度向上が可能になり、ガス爆発事故の未然防止に貢献できる。

#### (2) フラクタル次元の理論予測方法の確立

第二の研究目的は、火炎のフラクタル次元に関する理論的理解を深めることである。フラクタル次元が可燃性混合気のどのような物性値にどのように依存するのかを明らかにできれば、火炎のフラクタル次元を簡便に予測することが可能になり、容易にガス爆発事故のリスク評価を実施できるようになる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験方法

まず、フラクタル次元の簡便な測定方法の確立へ向けた実験方法について記す。実験方法の模式図を図1に示す。この装置では同心二重円筒間の狭い隙間(10mm)に可燃性混合気を導入し、上端から着火することにより、下方への火炎伝播を観察するものである。

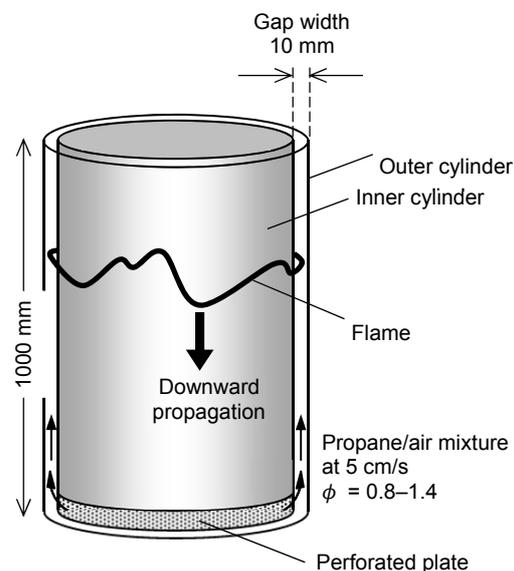


図1 実験装置の模式図

この装置を用いれば、曲線状の火炎、すなわち、一次元火炎を形成することができる。可燃性混合気は狭い空間のみに存在するため、大規模なガス爆発実験よりも安全に実施することができ、実験室でも十分に実験を行える。

用いる円筒のサイズ(直径)を変化させることにより、一次元火炎のスケールを変化させることができ、火炎伝播速度のスケール依存性を測定することができる。火炎伝播速度は火炎面積(本研究のような一次元火炎では火炎長)に比例するため、火炎面積のスケール依存性を求めることができ、この依存性からフラクタル次元を求められる。

#### (2) 理論計算方法

理論計算においても、実験と同様な一次元火炎を対象とし、実験と対応させるために周期的境界条件を課した二次元空間における火炎伝播を考慮する。通常の数値流体力学

(CFD) シミュレーションでは、二次元シミュレーションであったとしても火炎伝播計算は負荷が高く、様々な条件でシミュレーションを実施するのが困難である。そこで、火炎の位置を直接計算できる次の Sivashinsky 方程式[3]を数値的に解くこととした。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + 4(1 + \epsilon)^2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + \epsilon \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^2$$

$$= \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^\infty k dk \int_{-\infty}^\infty F(x', t) \cos[k(x - x')] dx' \quad (1)$$

ここで、 $F$ は火炎の $y$ 座標であり、パラメータ $\epsilon$ および $\gamma$ は次のように定義される。

$$\epsilon = \frac{Le_0 - Le}{1 - Le_0} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\rho_u - \rho_b}{\rho_u}, \quad 0 < \gamma < 1 \quad (3)$$

ただし、 $Le$ は可燃性混合気の Lewis 数、 $\rho_u$ は未燃気体密度、 $\rho_b$ は既燃気体密度である。また、 $Le_0$ は、拡散・熱的不安定性が中立となる Lewis 数である。パラメータ $\epsilon$ は拡散・熱的不安定性の程度を表し、 $\epsilon > 0$ なら拡散・熱的に安定、 $\epsilon < 0$ なら不安定である。一方、パラメータ $\gamma$ は燃焼による体積膨張により値が決まり、流体力学的不安定性の程度を表す。

計算領域の大きさを変化させながら(1)式を解くことにより、火炎伝播速度のスケール依存性を求めることができ、先に説明した実験と同様に、火炎のフラクタル次元を求めることができる。本研究では、フラクタル次元がパラメータ $\epsilon$ および $\gamma$ にどのように依存するか調べることにより、フラクタル次元の物性値依存性を明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 火炎伝播速度のスケール依存性

測定された火炎伝播速度の当量比依存性を図2に示す(プロパン・空気混合気)。 $l$ は火炎スケールであり、内円筒と外円筒間の隙間の中心線に沿った円周の長さである。同じ図に、詳細化学反応を考慮した一次元シミュレーションの結果も示す。一次元火炎伝播では火炎の乱れは一切生じないので、一次元シミュレーションの結果は、乱れが全くない場合の火炎伝播速度を表している。

同心二重円筒を用いた火炎伝播速度の測定結果も、乱れが全く生じない場合(一次元シミュレーション)と同様に、当量比が1.1付近で火炎伝播速度が最大になる。しかし、

同心二重円筒を用いた火炎伝播速度の測定結果は、一次元シミュレーションの結果よりも大きな値を示しており、火炎スケールが大きくなるにしたがい火炎伝播速度も増加することがわかる。これは、火炎スケールの増加とともに大きなスケールの火炎の乱れが生じるため、火炎面積がより増加するためである。

当量比1.0における、測定された火炎伝播速度のスケール依存性を図3に示す。なお、同じ図に理論予測結果も示してあるが、これについては後ほど検討する。図3からわかるように、火炎スケールが増加すると火炎伝播速度がべき乗的に増加する。これは、フラクタル的な性質を持つ火炎の特徴であり、図3のような両対数グラフの傾きから火炎のフラクタル次元を求めることができる。具体的なフラクタル次元の値については、理論解析結果との比較のところで検討する。

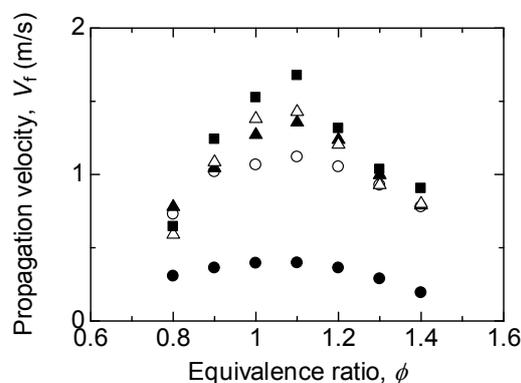


図2 測定された火炎伝播速度 (○:  $l = 188$  mm, ▲: 377 mm, △: 534 mm, ■: 754 mm) ●は詳細化学反応を考慮した1次元シミュレーションの結果を示す。

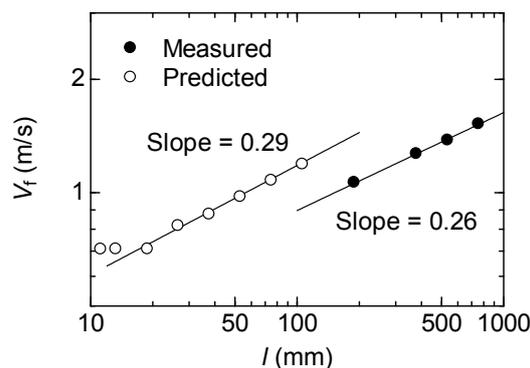


図3 火炎伝播速度のスケール依存性

##### (2) 理論解析結果

ここでは、本研究で用いる基礎式(1)の二つのパラメータ $\epsilon$ および $\gamma$ の影響について検討する。そのために、以下の四条件で計算を実施した。

表1 計算条件

| case | $\epsilon$ | $\gamma$ |
|------|------------|----------|
| I    | 0.5        | 0        |
| II   | 0          | 0.5      |
| III  | -0.5       | 0.5      |
| IV   | 0.5        | 0.5      |

Case I は拡散・熱的に不安定で流体力学的に中立な場合で、case II は拡散・熱的に中立で流体力学的に不安定、case III は拡散・熱的には安定であるが流体力学的には不安定、case IV は拡散・熱的にも流体力学的にも不安定な場合である。実際の燃焼では常に $\gamma > 0$ であり流体力学的に不安定であるが、本研究では現象のパラメータ依存性を解明する目的で仮想的に $\gamma = 0$ の条件 (case I) でも計算を実施した。

各条件における火炎形状を図4に示す。この図より、拡散・熱的および流体力学的な不安定性が火炎形状に及ぼす影響について次のようにまとめることができる。

- 拡散・熱的に不安定な火炎は小さいスケールの乱れを伴う。一方、拡散・熱的に安定な火炎は小さいスケールの乱れが抑制される。
- 流体力学的不安定性は、火炎に大きなスケールの乱れを発生させる。

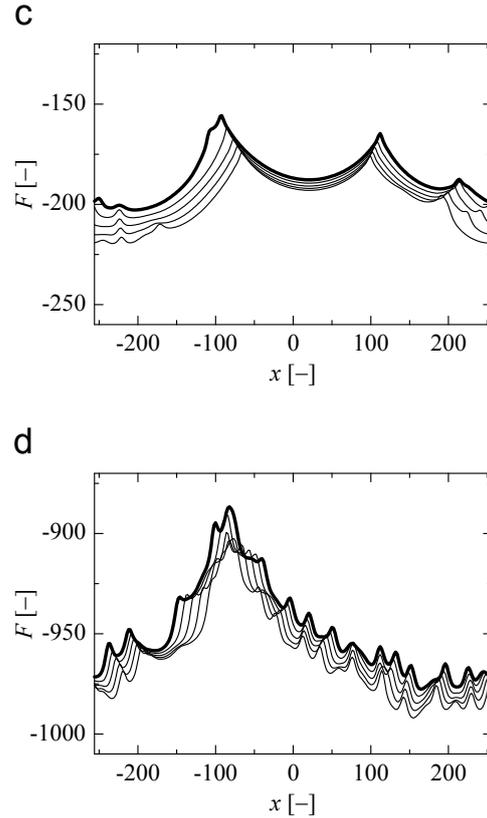
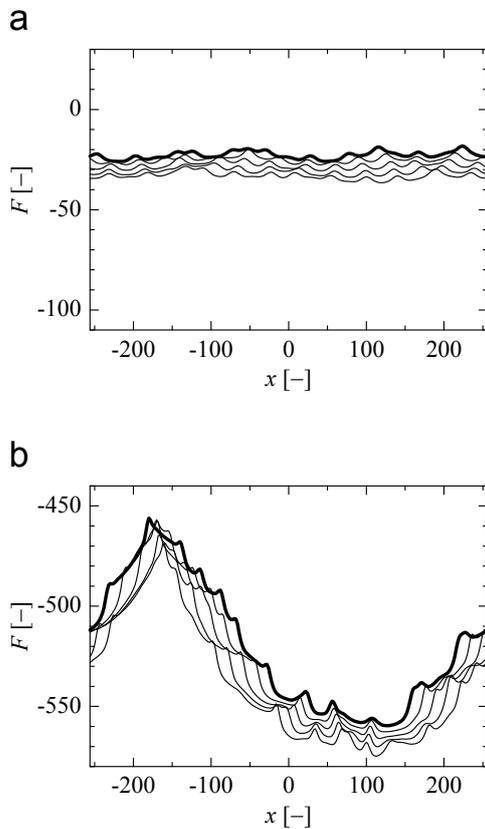


図4 (続き)

次に、火炎伝播速度のスケール依存性を図5の両対数グラフに示す。流体力学的不安定性が存在しない条件 (Case I) では、火炎スケールが増加しても火炎伝播速度がほぼ変化せず、火炎形状はフラクタル的ではないことがわかる。逆に流体力学的不安定性の影響下では、 $\gamma$ の値が等しければ、火炎伝播速度と火炎スケールの間に同様なべき乗則的な関係が見られる。図5の両対数グラフの傾きがほぼ等しいということは、火炎のフラクタル次元が等しいということである。つまり、拡散・熱的不安定性の有無は火炎伝播速度の絶対値や火炎スケールが小さい条件での挙動に影響するものの、フラクタル次元の値にはあまり影響しないということがわかった。

以上にまとめた理論解析結果から、火炎のフラクタル性は流体力学的不安定性により生じ、フラクタル次元に大きく影響するのはパラメータ $\gamma$ であることが明らかになった。 $\gamma$ の値は燃焼による体積膨張比により決まるので、体積膨張比がわかれば火炎のフラクタル次元をある程度予想できることになる。体積膨張比は熱力学的な量であり、様々な可燃性混合気に対してこの値を求めるのは比較的容易である。 $\epsilon = 0$ つまり拡散・熱的不安定性の影響を無視すると、フラクタル次元の $\gamma$ 依存性を容易に求められる[4]。 $\epsilon = 0$ の場合のフラクタル次元の $\gamma$ 依存性を図6に示す。図6の関係を用いれば、可燃性混合気のフラクタル次元を簡便に予測することができる。

図4 火炎形状の時間変化の様子。(a) case I、(b) case II、(c) case III、(d) case IV

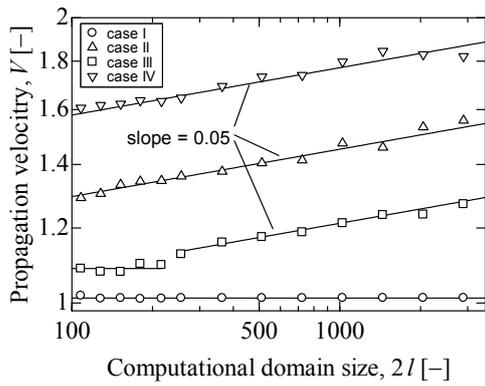


図5 各条件における火炎伝播速度のスケール依存性

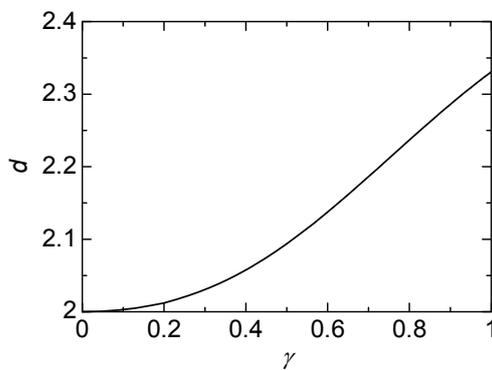


図6  $\epsilon = 0$  の場合のフラクタル次元の  $\gamma$  依存性

### (3) 実験結果と理論解析結果の比較

これまででは、実際の可燃性混合気の物性値を考慮せずにパラメータ依存性を定性的に評価してきた。ここでは、本研究で実施した実験と理論解析の結果を比較する。まず、当量比 0.9~1.2 のプロパン・空気混合気に対して理論解析に必要な物性値の値を評価した。 $\gamma$  の値は、未燃気体密度および化学平衡計算により求めた既燃気体密度から計算した。また、 $\epsilon$  の値は、対向流予混合火炎の一次元詳細化学反応計算結果より求めた混合気の Markstein 数から算出した。これらのパラメータを用いて火炎スケールを変化させながら火炎伝播速度を計算した。先の図3に計算結果例が示されている。火炎伝播速度の予測結果は、絶対値としては実験結果を上回っている。これは、実験においては火炎から内円筒および外円筒への熱損失が存在するためだと考えられる。一般に、熱損失により火炎伝播速度は最大 40 パーセント程度減少することが知られており、図3の結果はこのことと矛盾しない。このように、火炎伝播速度の絶対値に関しては、予測結果が実験結果を上回る傾向がある。しかし、火炎伝播速度のスケール依存性、つまり、図3の両対数グラフの傾きは理論予測結果と実験結果がほぼ一致している。今回の実験においては、火

炎スケールが変化したとしても熱損失の相対的な影響はあまり変化しないものと考えられる。プロパン・空気一次元火炎のフラクタル次元の当量比依存性について、実験結果および理論予測結果を図7に示す。予測結果が実験結果をわずかに上回る傾向があるものの、理論解析結果は実験結果とほぼ一致した。これにより、(1)式を用いた本研究での理論解析が妥当なものであると確認された。

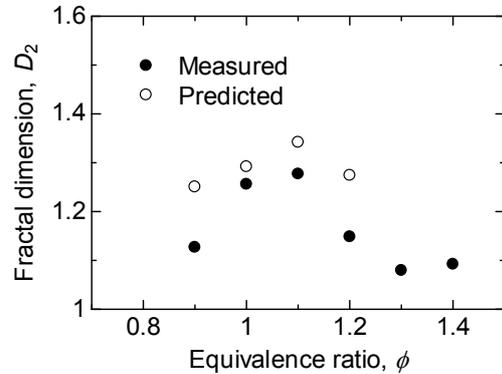


図7 プロパン・空気一次元火炎のフラクタル次元の当量比依存性

### <引用文献>

- [1] Yu. A. Gostintsev, A. G. Istratov, Yu. V. Shulenin, Combust. Explo. Shock Waves 24 (1988) 563-569.
- [2] R. Dobashi, S. Kawamura, K. Kuwana, Y. Nakayama, Proc. Combust. Inst. 33 (2011) 2295-2301.
- [3] G. I. Sivashinsky, Acta Astronaut. 4 (1977) 1177-1206.
- [4] K. Mukaiyama, S. Shibayama, K. Kuwana, Combust. Flame 160 (2013) 2471-2475.

### 5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計 5 件)
- ① Yosuke Uchida, Kazunori Kuwana, Experimental validation of Lewis number and convection effects on the smoldering combustion of a thin solid in a narrow space, Combustion and Flame, 査読有, 162, 2015, 1957-1963  
DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.12.014
  - ② Yoshiki Noguchi, Keizo Nakamura, Yosuke Hagiwara, Seiya Hitomi, Kazunori Kuwana, Flame Propagation and Fractal Dimension in a Concentric Double Cylinders Apparatus, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, 査読有, 14, 2014, s101-s104  
DOI: 10.11395/jjsem.14.s101
  - ③ 柴山史門, 桑名一徳, 拡散・熱的および流体力学的不安定性のスケール効果, 日本燃焼学会誌, 査読有, 56, 2014, 172-177
  - ④ Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida,

Yosuke Uchida, Lewis number effect on smoldering combustion of a thin solid, Combustion Science and Technology, 査読有, 186, 2014, 466-474

DOI: 10.1080/00102202.2014.883220

- ⑤ Kenji Mukaiyama, Shimon Shibayama, Kazunori Kuwana, Fractal structures of hydrodynamically unstable and diffusive-thermally unstable flames, Combustion and Flame, 査読有, 160, 2013, 2471-2475  
DOI:  
10.1016/j.combustflame.2013.05.017

[学会発表] (計 16 件)

- ① 萩原耀介, 人見誠也, 野口佳樹, 桑名一徳, 同心二重円筒装置における伝ば火炎の不安定性がフラクタル次元に及ぼす影響, 第 52 回燃焼シンポジウム, 岡山コンベンションセンター (岡山県岡山市), 2014/12/3
- ② Yosuke Uchida, Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida, Parametric study on the smoldering combustion of a thin solid in a narrow space, 35th International Symposium on Combustion, San Francisco, USA, 2014/8/5
- ③ 桑名一徳, 榎田玄一郎, 薄い固体のスマルダリング燃焼に関する安定解析, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, アクトシティ浜松 (静岡県浜松市), 2014/5/23
- ④ 柴山史門, 桑名一徳, 火炎面不安定性の影響下における火炎伝播速度とスケール依存性の数値解析, 第 51 回燃焼シンポジウム, 大田区産業プラザ (東京都大田区), 2013/12/6
- ⑤ 内田洋輔, 桑名一徳, 榎田玄一郎, 固体のスマルダリング燃焼のパラメータ依存性, 第 51 回燃焼シンポジウム, 大田区産業プラザ (東京都大田区), 2013/12/6
- ⑥ 桑名一徳, 茨木翔一, 大規模ガス爆発時の火炎伝播速度におよぼす浮力の影響, 第 46 回安全工学研究発表会, サポートホール高松 (香川県高松市), 2013/11/28
- ⑦ Yoshiki Noguchi, Keizo Nakamura, Yosuke Hagiwara, Seiya Hitomi, Kazunori Kuwana, Flame propagation and fractal dimension in a concentric double cylinders apparatus, 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 仙台市戦災復興記念館 (宮城県仙台市), 2013/11/4
- ⑧ 桑名一徳, 榎田玄一郎, 微小重力環境下での薄い固体に沿ったスマルダリング燃焼のモデル化, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2013, 弘前大学 (青森県弘前市), 2013/10/19
- ⑨ Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida, Y. Uchida, "Lewis number effect on

smoldering combustion of a thin solid," 8th Mediterranean Combustion Symposium, Çeşme, Turkey, 2013/9/10

- ⑩ 萩原耀介, 中村啓造, 人見誠也, 野口佳樹, 桑名一徳, 同心二重円筒装置における火炎伝ばとフラクタル次元, 日本実験力学会 2013 年度年次講演会, 由利本荘市文化交流館 (秋田県由利本荘市), 2013/8/20
- ⑪ 茨木翔一, 桑名一徳, 大規模ガス爆発の数値模型実験に向けた検討, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2013, 信州大学 (長野県長野市), 2013/8/9
- ⑫ Yosuke Uchida, Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida, Scale effect on the smoldering propagation over a thin solid: part I. experimental observations, 7th International Symposium on Scale Modeling, 弘前大学 (青森県弘前市), 2013/8/7
- ⑬ Kazunori Kuwana, Genichiro Kushida, Yosuke Uchida, Scale effect on the smoldering propagation over a thin solid: part II. a simple numerical model, 7th International Symposium on Scale Modeling, 弘前大学 (青森県弘前市), 2013/8/7
- ⑭ Shoichi Ibaraki, Kazunori Kuwana, Influence of gravity level on the speed of a premixed flame, 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, Gyeongju, Korea, 2013/5/21
- ⑮ Shimon Shibayama, Kazunori Kuwana, Effects of diffusive-thermal instability and hydrodynamic instability on the flame propagation behavior, 9th Asia-Pacific Conference on Combustion, Gyeongju, Korea, 2013/5/21
- ⑯ 茨木翔一, 桑名一徳, 予混合火炎伝播速度に及ぼす重力加速度の影響, 第 50 回燃焼シンポジウム, 愛知県産業労働センター (愛知県名古屋), 2012/12/5

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)

## 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

野口 佳樹 (NOGUCHI, Yoshiki)  
龍谷大学・理工学部・講師  
研究者番号: 1 0 3 5 1 3 4 7