

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560171

研究課題名(和文) スモルダリング燃焼の危険性評価方法の確立

研究課題名(英文) Evaluating the risk of smoldering combustion

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：狭い空間で固体を燃焼させスモルダリング燃焼性状を評価できる方法を提案した。この方法では、固体が有炎燃焼を起こさず、スモルダリング燃焼性状を選択的に評価できる。

スモルダリング燃焼時の燃焼割合や燃え拡がり速度は、火災の危険性評価において重要な指標である。本研究では、画像解析の手法を用いて燃焼割合等を定量化し、数値シミュレーションや理論解析の結果と比較できるようにした。

実験パラメータを考慮した理論解析を実施し、これらの影響を統一的に評価できる支配パラメータの有効Lewis数を定義した。実験結果および数値シミュレーションの結果から、有効Lewis数が支配パラメータであることを確認した。

研究成果の概要(英文)：A test method was proposed in which characteristics of smoldering combustion of a combustible solid can be evaluated without any influence of flaming combustion.

The fraction burned and the flame spread rate are important information in evaluating the risk of a fire. In this study, image analysis was conducted to quantify the fraction burned, the size of burned structure, and so on, enabling direct and quantitative comparison of experimental data with numerical and theoretical predictions.

A theoretical analysis was conducted considering experimental parameters to identify the governing parameter of the phenomenon, the effective Lewis number. It was demonstrated that the effective Lewis number can unify the influences of experimental parameters such as the oxidizer velocity and the oxygen concentration.

研究分野：火災安全科学

キーワード：火災 スモルダリング燃焼 燃え拡がり リスク評価

1. 研究開始当初の背景

スモルダリング燃焼(くん焼)は炎を伴わない燃焼であり、加熱され熱分解するとチャー(炭素分)が生成するような可燃性固体がスモルダリング燃焼することがある。このような可燃性固体が熱分解すると、ガス成分と固体成分(チャーおよび灰分)が生成するが、スモルダリング燃焼ではガス成分が気相で燃焼することはほとんどなく、チャー表面における酸化(表面燃焼)が支配的である。燃焼せずに放出されるガス成分のうち分子量が大きいものは、周囲雰囲気による冷却で凝縮し液滴群となる。これらの液滴群は光を散乱するので白く見え、これがいわゆる白煙である。スモルダリング燃焼は、有炎燃焼と比べると、低温で遅い反応であるが持続性が強く、消火したと思っても燃焼が継続していることも多い。タバコの燃焼は典型的なスモルダリング燃焼である。

タバコは建物火災の主要な原因の一つである。平成 27 年版消防白書によると全建物火災の約 10%がタバコによる出火であり、不適当な場所に放置されたタバコにより衣類や紙類が燃焼するという事例が多くみられる。衣類や紙類等はライター等の裸火で着火するとただちに有炎燃焼を開始することが多いが、タバコにより着火された場合は、まずスモルダリング燃焼する。この場合、スモルダリング燃焼が数分から数十分以上も継続し、火災が徐々に拡大する。そして、その後、有炎燃焼に遷移し、火災がさらに拡大する。

以上のことから、火災初期の被害拡大に関する知見を得るためには、可燃性固体のスモルダリング燃焼性状を理解することが不可欠である。しかし、衣類や紙類等を普通に燃焼させると有炎燃焼が生じてしまい、スモルダリング燃焼性状についての知見を得ることができない。多くの燃焼試験法が有炎燃焼を前提としていて、スモルダリング燃焼に特に着目した燃焼試験法や研究事例は、有炎燃焼と比較すると非常に限定的である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スモルダリング燃焼の危険性評価手法を確立することである。先に述べたように、多くの火災で炎を伴わないスモルダリング燃焼が生じていて、スモルダリング燃焼時の燃焼性状は有炎燃焼とは全く異なる。しかし、可燃性固体の燃焼性試験は有炎燃焼を前提としていることが多く、スモルダリング燃焼性の評価方法は確立されていない。

本研究では、スモルダリング燃焼の危険性を適切に、かつ簡便に評価できる方法を確立する。そのために、燃焼実験、理論解析、および数値シミュレーションを実施し、スモルダリング燃焼現象のメカニズムを解明するとともに、現象を支配するパラメータを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の大きな目的は、有炎燃焼ではなくスモルダリング燃焼を選択的に起こさせるような装置を用いて実験を行うことである。Olson ら[1]が宇宙環境(微小重力環境)で紙の燃焼実験を行ったところ、スモルダリング燃焼が観察された。これは、微小重力環境では自然対流が抑制され、それに伴う酸素の供給が制限されるためである。このように、酸素の供給が制限された環境で固体が燃焼すると、スモルダリング燃焼が起こりやすい。

一方、Zik ら[2]は、上下二枚の板の間の狭い空間に可燃性固体を水平に置き燃焼させるとスモルダリング燃焼することを見いだした。これは、狭い空間で燃焼させることにより浮力に伴う上昇気流を抑制できるため、微小重力環境と同様にスモルダリング燃焼が生じたものである。

本研究では、Zik らの実験[2]に着想を得て、狭い空間で可燃性固体を燃焼させることにより、スモルダリング燃焼の危険性を評価することを提案する。具体的に用いた装置を図 1 に示す。この装置では、上下二枚の板の間の狭い空間で可燃性固体を燃焼させることにより、スモルダリング燃焼を選択的に生じさせる。上側の板には耐熱ガラスを用い、上部からの観察を可能にした。一方、下側の板にはプレートヒーターを用いることにより、外部加熱がある条件での試験を可能にした。実際の火災では燃焼している可燃物の近傍に他の火源があることが多く、外部加熱がある条件での燃焼性状を把握することは重要である。また、ノズルを用いて酸素および窒素の混合気体を供給できるようにした。これにより、外部からの送風の影響(実際の建物火災では、エアコン等の影響に相当する)や酸素濃度の影響(建物火災では、火災の進行とともに部屋内の酸素濃度が変化することがある)を評価できるようにした。

図 1 のような装置を用いて、様々な条件におけるスモルダリング燃焼実験を実施するとともに、スモルダリング燃焼機構や支配パラメータに関して知見を得ることを目的とし、数値シミュレーションおよび理論解析を実施した。

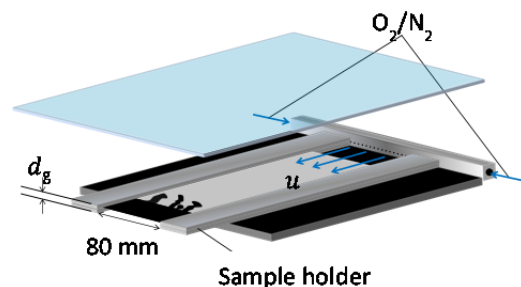
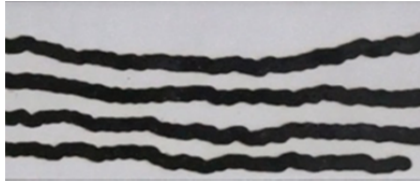


図 1 実験装置の模式図

4. 研究成果

(1) スモルダリング燃焼実験

図1のような装置を用いてスモルダリング燃焼実験を行うと図2のような燃焼挙動を観察できる。図の黒い部分はスモルダリング燃焼により可燃性固体(図2の場合は濾紙)が燃焼したところであり、白い部分は燃焼せずに未燃の固体が残ったところである。このように固体の一部が未燃のまま残るようなスモルダリング燃焼挙動は Zik ら[2]も観察しており、図2のような燃焼痕はフィンガリングパターンと呼ばれる。スモルダリング燃焼のように酸素供給が制限されている環境では、拡散による酸素供給により燃焼が維持されている。燃焼の進行とともに酸素濃度にばらつきが生じ、局所的に酸素供給がさらに低下すると消炎してしまう。このような局所消炎により、図2のようなフィンガリングパターンが形成される。



(a) $d_g = 7 \text{ mm}$, $u = 25 \text{ mm/s}$, $Y_{O,u} = 0.23$



(b) $d_g = 9 \text{ mm}$, $u = 25 \text{ mm/s}$, $Y_{O,u} = 0.23$



(c) $d_g = 10 \text{ mm}$, $u = 15 \text{ mm/s}$, $Y_{O,u} = 0.23$



(d) $d_g = 10 \text{ mm}$, $u = 25 \text{ mm/s}$, $Y_{O,u} = 0.23$

図2 濾紙のスモルダリング燃焼により観察された燃焼痕 (d_g は隙間幅、 u は酸化剤流速、 $Y_{O,u}$ は酸化剤流中の酸素質量分率)。燃え拡がり方向は左から右で、酸化剤流は右から左

図2より、隙間幅 (d_g) が小さい条件、あるいは酸化剤流速 (u) が小さい条件では、細い指が酸化剤流に向かって一直線に進行するようなフィンガリングパターンが得られる。そして、 d_g あるいは u が増加すると、

指太さが増加し、局所消炎や分裂が頻繁に生じるようになる。つまり、隙間幅や酸化剤流速は、スモルダリング燃焼に対して同様な影響を及ぼすと言える。

局所消炎およびそれに伴うフィンガリングパターンの形成は、条件により試料の燃焼割合が異なることを示している。燃焼割合や燃え拡がり速度は発熱速度(単位時間当たりの燃焼による発熱量)と密接な関係がある。スモルダリング燃焼による火災拡大挙動や有炎燃焼へ遷移する臨界時間などはスモルダリング燃焼時の発熱速度に影響されると考えられるので、燃焼割合および燃え拡がり速度に関する情報は火災安全上重要である。このうち燃え拡がり速度に関しては、定量的な評価が容易で、これまでの研究でも広く検討されてきた。一方、燃焼割合や、それに関連するフィンガリングパターンにおける指太さなどは、定性的に議論されることが多く、定量的な評価はほとんど行われてこなかった。また、燃焼割合や指太さの測定結果を数値シミュレーションや理論予測の結果と定量的に比較するような既往の研究はほぼ存在しない。

そこで本研究では、Olson ら[3]と同様な画像解析手法を用いて実験的に得られたフィンガリングパターンを定量的に評価することを試みた。また、得られた実験結果を理論解析および数値シミュレーションの結果と定量的に比較した。

本研究で用いた画像解析方法を図3に示す。まず図2のような燃焼痕の画像を二値化し、燃え拡がり方向に沿って、燃焼割合および指本数を求めた。そして、これらの結果から、平均指太さを求めた。各条件に対して10回の実験を行い、平均的な指太さおよび燃焼割合およびこれらの標準偏差を求めた。

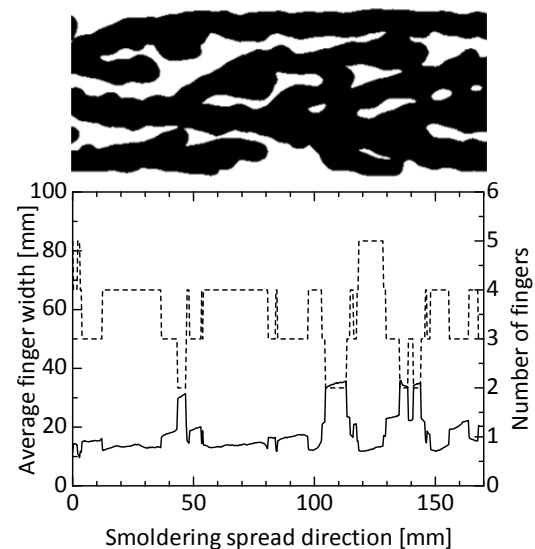


図3 二値化された画像と画像解析の結果例。実線が平均指太さで破線が指数(図2(b)の画像に対する解析結果)

(2) 数値シミュレーション

先述の通り、スモルダリング燃焼では、酸素の拡散現象に起因する不安定性によりフィンガリングパターンが生じる。Kuwana ら [4] は、スモルダリング燃焼によるフィンガリングパターンを再現できる最も単純な方程式系として、次のような二方程式系を提案した。

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \nabla^2 \bar{T} + \bar{W} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{Y}_O}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{Le_{\text{eff}}} \nabla^2 \bar{Y}_O - \bar{W} \quad (2)$$

ここで、①式はエネルギー保存式であり、②式は酸素の保存式である。 \bar{W} は反応項である。①および②式は無次元化されており、オーバーバーは変数が無次元であることを示している。この方程式系で現れる無次元パラメータのうち、 Le_{eff} (有効 Lewis 数と呼ぶ) がフィンガリングパターンに大きな影響を及ぼす [4]。

反応項として酸素に対する一次反応を仮定し、 $Le_{\text{eff}} = 0.15$ の条件で数値シミュレーションを実施して得られた結果を図 4(a) に示す。①および②式のモデルにより、実験と同様に、局所消炎や分裂からなるフィンガリングパターンを再現できることが確認できた。一方、 $Le_{\text{eff}} = 0.4$ の条件での数値シミュレーション結果 (図 4(b)) では、 $Le_{\text{eff}} = 0.15$ の場合と比較して指太さおよび燃焼割合が増加した。

以上のようにして得られた数値シミュレーション結果に対して図 3 の画像解析と同様な解析を行い、燃焼割合および指太さを Le_{eff} の関数として得た。



(a) $Le_{\text{eff}} = 0.15$



(b) $Le_{\text{eff}} = 0.4$

図 4 数値シミュレーションにより得られたフィンガリングパターン

(3) 理論解析

先の①および②式では、酸化剤流速の影響も隙間幅の影響も考慮されていない。したがって、図 4 のような数値シミュレーション結果と実験結果を直接定量的に比較することはできない。そこで本研究では理論解析を実

施し、実験結果および数値シミュレーション結果を定量的に比較できるようにした。本研究で採用した基礎方程式は以下の二式である。

$$\begin{aligned} (\rho_g c_g d_g + \rho_s c_s d_s) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g d_g u \frac{\partial T}{\partial x} \\ = (\lambda_g d_g + \lambda_s d_s) \nabla^2 T \\ + QW - 2h(T - T_u) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_g d_g \frac{\partial Y_O}{\partial t} + \rho_g d_g u \frac{\partial Y_O}{\partial x} \\ = \rho_g d_g D \nabla^2 Y_O - W \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 ρ は密度、 c は比熱、 d_s は可燃性固体の厚さ、 λ は熱伝導率、 h は熱伝達係数、 T_u は周囲雰囲気温度であり、添え字の g および s はそれぞれ気相および固相を表す。なお、熱伝達係数は上下二枚の板への熱損失の大きさを表すもので、Nusselt 数 Nu_D を用いて次のように表すことができる。

$$h = \frac{Nu_D \lambda_g}{2d_g} \quad (5)$$

⑤式は、熱損失の大きさが隙間幅 d_g に反比例することを示している。以上のモデルは Kagan ら [5] のモデルを拡張したものである (③および④式のモデルでは熱損失項が新たに追加された。これにより、隙間幅の影響を評価できるようになった)。

①・②式と③・④式を比較すると、酸化剤流速を考慮できる対流項 (③および④式の左辺第二項) および隙間幅を考慮できる熱損失項 (③式の右辺最後の項) が追加されている。これらにより、③・④式のモデルでは、酸化剤流速や隙間幅といった実験パラメータの影響を評価できる。

③および④式に対して線形安定解析を実施すると、次の分散関係 (擾乱の波長とその成長速度の関係式) が得られる。

$$\begin{aligned} \hat{\omega} = \left(\frac{\beta(1 - Le)}{2} + \ln \frac{1}{\bar{u}} + \frac{\beta \bar{h}}{2\bar{u}^2} - 1 \right) \hat{k}^2 \\ - 4\hat{k}^4 \end{aligned} \quad (6)$$

ただし⑥式は無次元化されており、 β は Zel'dovich 数 (無次元活性化エネルギー)、 Le は Lewis 数、 \bar{u} は無次元酸化剤流速、 \bar{h} は無次元熱伝達係数である。

一方、①および②式に対して同様な線形安定解析を実施すると次のような分散関係が得られる。

$$\omega = \left(\frac{\beta(1 - Le_{\text{eff}})}{2} - 1 \right) k^2 - 4k^4 \quad (7)$$

⑥および⑦式を比較すると、有効 Lewis 数

Le_{eff} を次のように定義すれば両式は同等なものになる。

$$Le_{\text{eff}} = Le - \frac{2}{\beta} \ln \frac{1}{\bar{u}} - \frac{\bar{h}}{\bar{u}^2} \quad (8)$$

この式は、酸化剤流速が小さくなると、あるいは熱伝達係数が大きくなると（隙間幅が小さくなると）有効 Lewis 数が小さくなることを示している。つまり、酸化剤流速と隙間幅が現象に対して同様な効果を持つことを示しており、少なくとも定性的には図 2 の実験結果と一致する。

なお、⑥式は擾乱の波数とその成長速度の関係を示したものであり、最も成長が速い波長 \hat{l}_{max} を次のように求めることができる。

$$\hat{l}_{\text{max}} (= \bar{u} \hat{l}_{\text{max}}) = \sqrt{\frac{32\pi^2}{\beta(1 - Le_{\text{eff}})/2 - 1}} \quad (9)$$

⑨式は、実験および数値シミュレーションにおいて観察された指太さを予測するものである。

(4) 実験、数値シミュレーションおよび理論解析結果の比較

実験および数値シミュレーションで得られた指太さと有効 Lewis 数の関係を図 5 に示す。また、⑨式の理論予測結果も同じ図に実線で示す。この図より、⑧式で定義される有効 Lewis 数を横軸に用いれば、様々な条件における実験結果および数値シミュレーションの結果を統一的に表せることがわかる。つまり、⑧式で定義される有効 Lewis 数こそが本研究で対象としたスモルダリング燃焼現象の支配パラメータであるといえる。

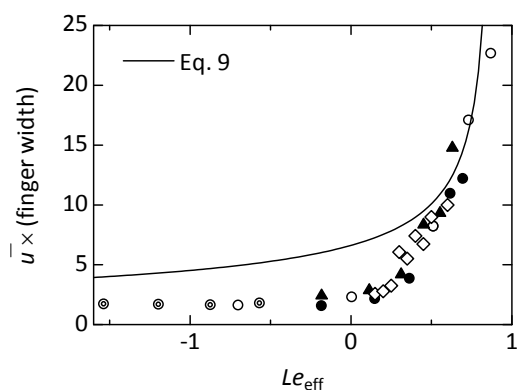


図 5 燃焼割合と有効 Lewis 数の関係 (●: d_g 変更, $u = 25$ mm/s, $Y_{O,u} = 0.23$ 、濾紙、○: $d_g = 10$ mm, u 変更, $Y_{O,u} = 0.23$ 、濾紙、◎: $d_g = 7$ mm, $u = 25$ mm/s, $Y_{O,u}$ 変更、濾紙、▲: d_g 変更, $u = 25$ mm/s, $Y_{O,u} = 0.23$ 、低密度紙、◇: 数値シミュレーション)

図 5 に実線で示した指太さの理論解析解 (⑨式) は、有効 Lewis 数が 0.3 程度以上の場合は実験および数値シミュレーションの結果とほぼ一致する。しかし、有効 Lewis 数が小さい条件では指太さを過大に見積もる傾向がある。これは、今回実施した線形安定解析は定常解に対する微小擾乱を考慮するものであり、実験や数値シミュレーションで特徴的な局所消炎を考慮していないためだと考えられる。

実験と数値シミュレーションで得られた燃焼割合と有効 Lewis 数の関係を図 6 に示す。燃焼割合についても、指太さ同様、有効 Lewis 数を用いて概ね整理できることがわかる。しかし、指太さと比較するとデータのばらつきが大きい。これは、燃焼割合は初期擾乱の影響を受けやすく、実験データのばらつきが大きいためだと考えられる。一方、指太さは初期擾乱の影響を受けにくく、同じ条件であれば同程度の結果を得ることができる。

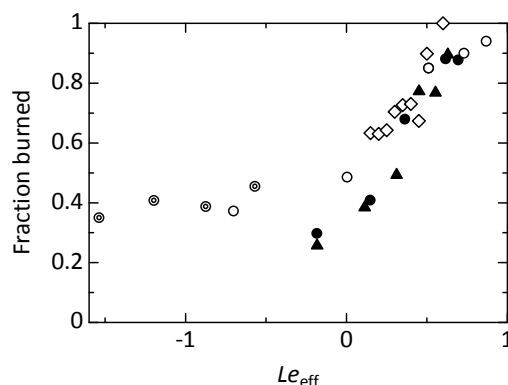


図 6 燃焼割合と有効 Lewis 数の関係 (用いた記号は図 5 と同じ)

(5) 成果のまとめ

本研究では、狭い空間で可燃性固体を燃焼させることによりスモルダリング燃焼性状を評価できる試験方法を提案した。この方法を用いれば可燃性固体が有炎燃焼を起こすことなく、スモルダリング燃焼性状を選択的に評価することができる。また、外部加熱や外部からの送風、雰囲気中の酸素濃度がスモルダリング燃焼性状に及ぼす影響を評価できるようにした。

スモルダリング燃焼が生じると、不安定性により局所消炎が生じ、燃焼割合が低下することがある。燃焼割合や燃え拡がり速度は、火災時の発熱速度と密接な関係があり、火災の危険性評価において重要な指標である。本研究では、画像解析の手法を用いて燃焼割合等を定量的に評価し、数値シミュレーションや理論解析の結果と比較できるようにした。

隙間幅や酸化剤流速、酸素濃度といった実験パラメータを考慮した理論解析を実施し、これらの影響を統一的に評価できる支配パラメータである、有効 Lewis 数を定義した。実験結果および数値シミュレーションの結

果を、有効 Lewis 数を用いて整理し、有効 Lewis 数が支配パラメータであることを確認した。

以上をまとめると、本研究では、可燃性固体のスマルダリング燃焼性状を定量的にかつ簡便に評価できる方法を提案し、また、理論解析により、スマルダリング燃焼現象を統一的に表せる支配パラメータを明らかにすることができた。

<引用文献>

- [1] S.L. Olson, H.R. Baum, T. Kashiwagi, Proc. Combust. Inst., 27 巻, 1998, 2525-2533
- [2] O. Zik, E. Moses, Proc. Combust. Inst., 27 巻, 1998, 2815-2820
- [3] S.L. Olson, F.J. Miller, S. Jahangirian, I.S. Wichman, Combust. Flame, 156 巻, 2009, 1214-1226
- [4] K. Kuwana, G. Kushida, Y. Uchida, Combust. Sci. Tech., 186 巻, 2014, 466-474
- [5] L. Kagan, G. Sivashinsky, Combust. Theory Modell., 12 巻, 2008, 269-281

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Y. Uchida, K. Kuwana, G. Kushida, 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 巻, 2015, 1957-1963
DOI:
10.1016/j.combustflame.2014.12.014

[学会発表] (計 9 件)

- ① K. Kuwana, K. Suzuki, Y. Tada, G. Kushida, Effective Lewis number of smoldering spread over a thin solid in a narrow channel, 36th International Symposium on Combustion, 2016 年 7 月 31 日～2016 年 8 月 5 日, ソウル (大韓民国) (発表確定)
- ② Y. Tada, K. Suzuki, H. Iizuka, K. Kuwana, G. Kushida, Quantitative study of fingering pattern created by smoldering combustion, 2016 年 4 月 25 日～2016 年 4 月 28 日, 合肥 (中華人民共和国)
- ③ 久永虎司, 榎田玄一郎, 桑名一徳, 固体のスマルダリング燃焼特性に与える無次元パラメータの影響, 日本機械学会東海支部 第 65 期総会・講演会, 2016 年 3 月 17 日～2016 年 3 月 18 日, 愛知工業大学 (愛知県豊田市)
- ④ 鈴木健太, 桑名一徳, 榎田玄一郎, 酸素濃度がスマルダリング燃焼に及ぼす影響, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015 年

11 月 16 日～2015 年 11 月 18 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

- ⑤ 多田悠樹, 鈴木健太, 桑名一徳, 榎田玄一郎, スマルダリング燃焼で生じるフィンガリングパターンの定量評価, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015 年 11 月 16 日～2015 年 11 月 18 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- ⑥ 久永虎司, 榎田玄一郎, 桑名一徳, スマルダリング燃焼の不安定性に与える無次元パラメータの影響, 第 53 回燃焼シンポジウム, 2015 年 11 月 16 日～2015 年 11 月 18 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- ⑦ H. Iizuka, K. Kuwana, G. Kushida, Heat loss effects on the smoldering combustion of thin solid, 10th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2015 年 7 月 19 日～2015 年 7 月 22 日, 北京 (中華人民共和国)
- ⑧ 飯塚洋行, 桑名一徳, 榎田玄一郎, 熱損失が薄い固体のスマルダリング燃焼に及ぼす影響, 第 52 回燃焼シンポジウム, 2014 年 12 月 3 日～2014 年 12 月 5 日, 岡山コンベンションセンター (岡山県岡山市)
- ⑨ Y. Uchida, K. Kuwana, G. Kushida, Parametric study on the smoldering combustion of a thin solid in a narrow space, 35th International Symposium on Combustion, 2014 年 8 月 3 日～2014 年 8 月 8 日, サンフランシスコ (アメリカ合衆国)

[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

榎田 玄一郎 (KUSHIDA, Genichiro)
愛知工業大学・工学部・教授
研究者番号: 8 0 1 5 3 2 8 7