

平成 21 年 3 月 18 日現在

研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2007 ~ 2008
 課題番号： 19710140
 研究課題名 (和文) 低圧閉鎖環境における火災被害の予測とその物理機構の解明
 研究課題名 (英文) Prediction and analysis of physical process of fires in enclosed, low-pressured environment
 研究代表者
 中村祐二 (NAKAMURA YUJI)
 北海道大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号： 50303657

研究成果の概要： 本研究は、航空機および宇宙基地などで用いられる「低圧閉鎖空間」における火災危険性に関する基礎知見を得ることを目的としている。これまでの研究において、低圧場においては常圧場よりも少ない酸素分圧で自発着火が達成されることを実験的に示すことに成功したものの、その着火促進が熱輸送などの物理過程で支配されるのか、それとも化学反応などの化学過程に支配されるのかが十分に理解できないうちにいた。本課題ではこの理解を深めることに特化し、実験および解析の両面から設定目標を達成しようとするものである。低圧チャンバを用いて着火限界マップを作成し、その振る舞いについて理論的アプローチにより解明を試みた。その結果、低圧限界付近を除いては過去の理論解析の成果（純粋な拡散場での自発着火、淀み点流れ場における自発着火）に漸近することを示すことに成功した。また、3次元数値解析により着火時間によって場が拡散場から淀み点流れ場に時々刻々推移してそれらを分けることを明確に示し、低圧場での着火機構について物理過程によって多くを説明できることを示した。低圧着火限界付近は化学過程が支配的となるため、さらなる検討が必要である。微量ラジカル成分を検知できる計測システムの設置、ならびに着火を引き起こす微量な活性ラジカルの出現過程を明確に予測できる簡略化素反応モデルの発展が望まれる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	0	2,200,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	360,000	3,760,000

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： 火災・事故，低圧環境

1. 研究開始当初の背景

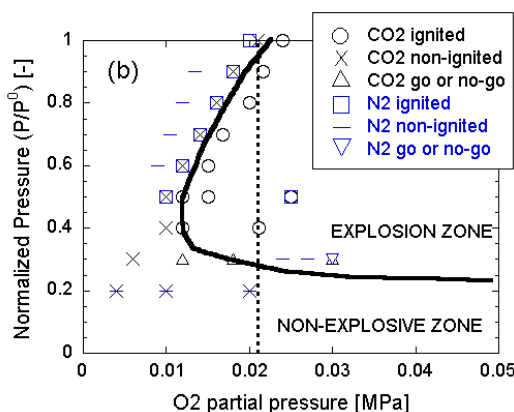
1960年代における燃焼研究において、低圧場でのガス燃焼特性（着火限界など）が盛んに研究された。実験系は混合気を一様に

詰めた燃焼チャンバ内部の圧力を固定し、周囲から熱を加えて高温にして一様着火を起こす。その中で代表的な水素 酸素予混合気においては、ある低圧領域では着火が促進さ

れることが明らかにされた。化学反応の専門家の多大な貢献により、その要因は「第3体反応の弱化によるラジカル (= 反応活性基) 消費が低圧場で遅くなる」ことが確かめられた。ただしあまりに低圧になると (分子同士の衝突数が減り) 壁とラジカルとの衝突確率が増え、ラジカル失活をもたらす、最終的には着火しなくなる。このように、「ある圧力範囲 (ただし常圧以下) で着火が促進される」のは、上記2つの過程 (第3体反応弱化による残留ラジカルの増加、壁によるラジカル失活) のせめぎあいである。

これをガス燃焼ではなく火災原因としての固体燃焼 (または液体燃焼) に置き換えると、事態はそう簡単にはならない。というのも、酸化剤を含まない固体の着火は気相で起こるものの、それが起こる領域は「固体表面付近」に限られる。前述の通り、低圧になれば第3体反応の弱化により着火しやすくなるが、着火現象そのものが固体表面近くで起こるとすれば、表面でのラジカル失活も起こりやすいことになる。一方で、固体の着火過程では表面付近の温度・濃度場が時々刻々と変化するため、「輸送過程が着火現象に寄与」する。加熱表面からの熱損失は圧力低下に伴い減じるため、固体表面付近に熱が淀みそこの燃焼反応を促進させる。これらの相反する効果のため、「固体着火の場合、低圧にすると着火しやすいかどうかは定かではない」。研究代表者が知る限り、ガス着火に関する研究例は多いものの、固体 (あるいは液体) の低圧着火の研究は殆ど存在しない。研究代表者らは最近その解明を行おうと基礎的な研究を始めた先駆者である。

本研究課題「低圧固体着火に関する研究」は、研究代表者らにより世界に先駆けて行われているものであり、最近の航空機でのテロ対策、宇宙開発における安全性の確保などに役立つ。最近の成果として、**燃焼サンプルが**



図A 低圧場でのセルロース着火における着火限界。CO₂ 雰囲気またはN₂ 雰囲気ともに着火限界は低圧になるほど低酸素分圧側にずれる。36th COSPAR (宇宙科学会議、2006.7 北京)にて発表済。

セルロース材の場合には「ある低圧環境では着火しやすい」状況が存在することを世界で初めて示した (図A参照)。この事実は、火災研究として重要な知見であり、低圧場での火災安全性の評価に常圧場の結果をそのまま適用できないことを示唆する。本成果は既に国内外の学会などで公表しているが、NASA、JAXAなどの宇宙開発現場からの関心が特に強く寄せられている。このことは、これまでに低圧環境での安全性について基礎的な知見が著しく不足していることを裏付ける事実である。

2. 研究の目的

既発表では、被燃焼物である固体試料 (= 薄いセルロース紙) を垂直に支持して横方向からの放射加熱を行い、着火に至る状況を調べた。この場は典型的な時間発展型の境界層内部での着火問題であるが、流れ場の代表値が加熱スケールによって異なる (= 速度スケールの大きさにより現象が変化し得る)。より一般性ある結論を導くためには、そのようなスケール効果を除く、すなわち着火に依存する次元を一つ落とすことが有効である。そのため、本研究においては固体試料を水平に配置し、下方より着火をもたらす系へと変更し、一般性のある着火機構の解明を目指す。特に低圧限界付近での着火データの取得に注力し、精度の高い着火限界マップの取得を行うとともに、それに対する結果の解釈を理論的アプローチ (今回は既存の漸近解析結果および3次元非定常数値計算を併用) により行う。また、低圧着火限界付近の挙動に対する対策について考察を加えることを目的とした。

なお、計画当初は光学系を発展させた着火時間およびお位置の計測を行う予定であったが、決定時の配分額が予算額よりも減じたことで十分な装置配備ができず、変更を余儀なくされたことを付記しておく。

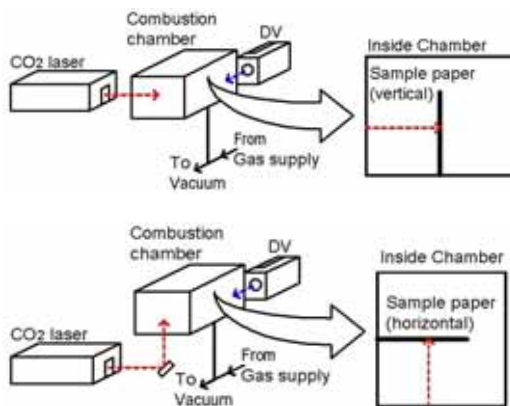
3. 研究の方法

燃焼チャンバに変更を加え、従来の垂直加熱方式から水平加熱方式とした。加熱に用いた方式などは従来と同様にCO₂ レーザによる輻射加熱であり、固体表面のみで吸収過程を行うとする (ガス相では吸収過程はないとする)。CO₂ レーザを導入するため、10.6 μmにて透過率の高いZnSe結晶を用いている。真空ポンプとガスラインを追加した漏れのないステンレス製の燃焼チャンバを用いる。漏れ試験は事前に十分に行い、全く遜色ないことを確認している。

固体試料は、従来どおり型番ADVANTEC社の#1を用いる。これはセルロースを主成分としたものであり、ばらつきが比較的少ない。これをデシケータに保管して水分を除去したのちに燃焼チャンバに設置して着火させる。燃焼雰

囲気は窒素と酸素の混合気であり、その配分および全圧を変化させることを様々な雰囲気条件を模擬する。40kPaで酸素濃度40%のガスを作成する過程を例にとり説明する。まず窒素により3回以上フラッシングを行い、最終的に内部に100kPaの窒素ガスを充填する。真空ポンプによりまずは60kPaとし、そこに40kPaの酸素を導入して全圧を100kPaとする。この状態で真空ポンプを作動させ、内圧を40kPaまで減圧する(それに従い、酸素分圧も減圧される)。これにより、低圧場における濃度混合条件に関わるエラーを一定にとどめることができる。0.2レーザは最大20W出せるものを用いるが、ここでは10W程度しか使わない。立ち上がり時間がかかるため、レーザのスイッチを入れた後、レーザをシャッターで遮断しておき、実験開始シグナルと同時にシャッターを開けることで瞬時に安定した出力を試料に照射できるようになっている。着火の様子は高速度カメラ(研究室に既存)またはデジタルビデオカメラで撮影し、気相における発光の有無により着火の有無を判定する。一つの条件において最低でも5回以上の実験を行い、再現性を確保する。

実験装置の改良箇所を図Bに示す。



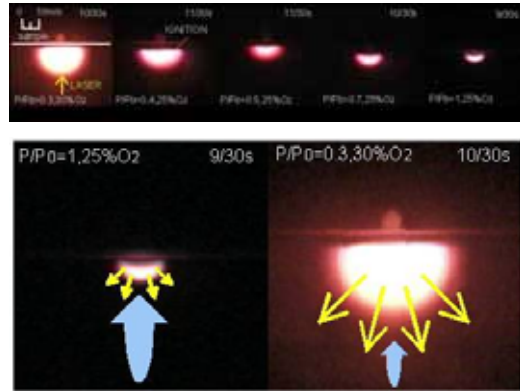
図B レーザ取り回し位置の変更(上:変更前(試料を垂直に配置),下:変更後(試料を水平に配置))

4. 研究成果

(1) 着火直後の火炎写真

図Cに低圧場における着火直後の火炎直接写真を示す。この図では比較のため酸素濃度は一定である(ただし低圧になるに従い酸素分圧は低下する)。図から明らかのように、全圧低下(図の右 左方向)に伴い、着火直後の火炎は大きくなり、浮力と逆方向への棒直が顕著に認められることがわかる(下図参照)。なお着火時間は低圧場ほど若干長くなる。デジタルビデオカメラの時間解像度は1/30s(1秒で30フレーム)であるため詳細は誤算範囲であるが、平均して1~2フレーム

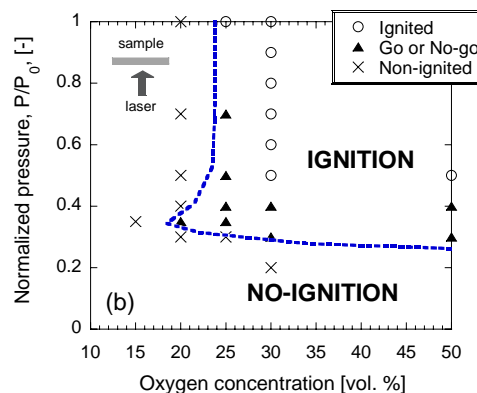
の遅れがあることは確認している。高速度カメラによる着火時間の解明を試みたものの、着火遅れ時間のばらつきは条件毎にかなりあるため、正確な計測は難しいと判断してここでの追及事項とはしていない。ただし傾向として低圧場の着火遅れ時間が長くなることは事実であることが確認できる。



図C 着火直後の火炎写真。上図左より30kPa~100kPa。酸素濃度は25%で固定。下図は全圧100kPa(左)と30kPa(右)を比較したもの。

(2) 低圧場での着火領域マップ

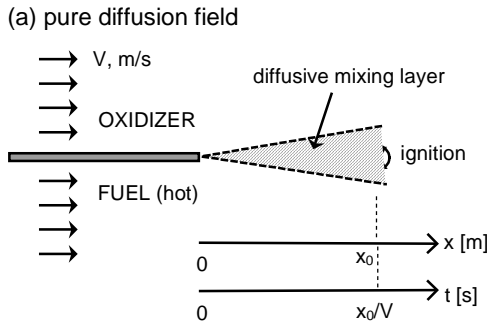
図Dに圧力および酸素濃度の物理平面における着火領域マップを示す。図からわかるように、従前の垂直配置着火では確認できなかったイレギュラーな着火の振る舞いが低圧着火限界付近にて確認できる。そこ以外は着火はほぼ酸素「濃度」で決まり、酸素分圧では決まらないこと(=これは従前と似た結果である)、しかし低圧になるほど酸素濃度で決まるとは言えないことがわかる。ここで単純な疑問が生じる - 一体なぜこのような境界カーブになるのだろうか? - これを支配する物理過程要素を明確にすべく、過去の着火理論からの推論を試みた。



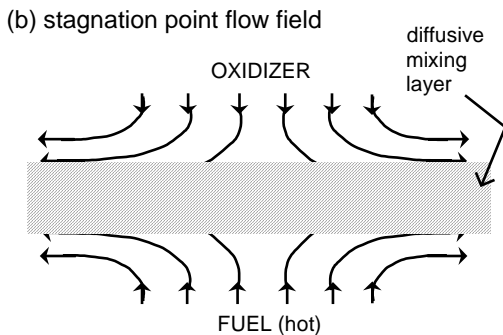
図D 着火限界マップ(試料水平配置)

4.3 古典理論からの推論

まずは純粋な拡散現象による自発着火現象（高温の燃料または酸化剤ガスが拡散にて出会い、混合しながら発熱反応を加速させて自発着火に至る系）を例にとって考える。この着火系のモデルは下記の通りであり、Linan&Crespo による漸近解析結果が利用できる（CST vol.14 (1976)）。便宜的にこの系での着火のことを「拡散場での着火」と呼ぶ。



一方で, Niioka による淀み点流れ場の解析例も存在する (C&F vol.18, 1981)。これは互いに対向して噴出された燃料（高温）および酸化剤が淀み面にて衝突し、噴射方向に垂直方向に抜け出す伸張を伴う流れ場である。この流れ場での着火系モデルを以下に示す。なお、便宜的にこの系のことを「淀み点着火」と呼ぶ。



互いの着火特性は漸近解析により解析解として与えられるが（詳細は文献参照のこと）、それより、(a) 拡散場での着火においては、着火特性を示す関数が酸素「濃度」の関数として決定されるため、着火限界を一つの着火特性とすると、「同じ酸素濃度のときに着火限界を迎える」という解釈をすることができる。すなわち、低压化に伴う着火限界がほとんど濃度で決まるという事実はこの結果を反映しているものと思われる。

一方で、(b) 淀み点での着火においては、同じく着火特性を示す関数は酸素濃度のみで決まるのではなく、対向衝突される質量（＝つまり流体の密度）にも依存する。具体的には速度で衝突させるほど着火が実現しにくいということを指す。酸素濃度と密度は

乗じた形で着火特性の一つのパラメータとして影響し、もしも流体を理想気体と仮定した場合は、そのパラメータは分圧を表すことに等しくなる。つまり、淀み点流れ場の場合、着火限界領域は酸素「濃度」では決まらず、むしろ酸素「分圧」で決まる。つまり図 D において双曲線状に限界値が決まることとなる。これらの解釈結果を図に書き加えると、以下のようなになる。図から、「概ね低压限界付近以外は Linan&Crespo モデルが、低压着火付近では Niioka のモデルに近いことがわかる。つまり、低压化になるに従い、拡散場の着火から淀み点流れ場の着火に移行しているものと解釈できる。この解釈は正しいのであろうか？以下、本疑問に対して検討を加える。

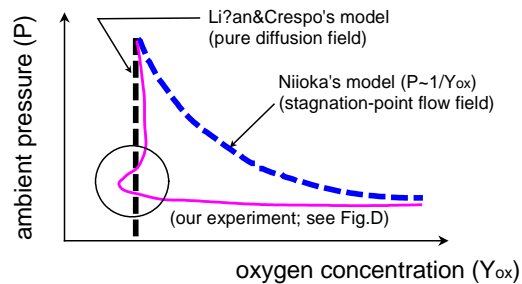


図 E 2つの理論解析で得られる着火限界曲線（点線）と実験値（細い実線）

まずは、拡散場の着火および淀み点流れ場での着火がどのような場を代表しているのか考えてみることにしよう。固体試料を CO2 レーザにより急速に加熱すると、すぐに熱分解温度に至り、燃料ガスが表面から雰囲気に向かって放出される。このとき、この燃料ガス（プリューム）は高温であるため、当初はそのまま噴出されつつ拡散するのみである。この過程で自発着火に至れば、拡散場での着火と考えることができる。ところがそこで着火しなかった場合、プリュームは次第に浮力を感じて上方に向かって動かされる。時間の経過に伴いその状態は顕著に観察され、最終的には燃料ガスと酸化剤ガスが対向流れとして安定することになる。ここで着火すると淀み点流れ場での着火に等しい。

以上をまとめると、着火時間がガス放出時間の直後であればプリュームが浮力を感じる前に着火したということになり、酸素濃度のみで自発着火が決まり、着火時間が長い場合、浮力による自然対流が発達して淀み点流れ場での着火に漸近する。このように、拡散場の着火と淀み点流れ場での着火は、着火時間の早い場合と遅い場合の両極限と考えられる。

ここで実験観測結果を再度引き合いに出して考える。実験結果の殆どが Linan&Crespo

の理論予測に合致するという事は、現在の着火系そのものが本質的に拡散場での着火に支配されていることを示唆する。確かにこの実験での加熱条件は10Wのレーザーで加熱開始から2秒程度で着火に至るといった比較的着火遅れ時間が短い。このことから上記の結果の解釈は妥当であろうと考えられる。また、実験事実として低圧場になるほど着火時間は長くなる事が指摘されたことを鑑みると、低圧場での着火では拡散場での着火とは若干異なり、むしろ淀み点流れ場での着火の振る舞いを含むと考えてよい。それが顕著に現れるのが(現在の加熱条件では最も着火しにくく着火時間が長くなり得る)低圧着火限界付近の振る舞い(30kPaでの着火限界が純酸素条件であること)に相当するのであろう。この解釈も上記に合致する。以上より、本実験で観測された着火系は古典理論の代表的な2例により概ねよく説明可能であることがいえる。

(3) 非定常3次元数値解析からわかること

上記で示したことが現象の根幹ではあるものの、実際には浮力による自然対流は時々刻々と強くなり、淀み点流れ場の状態は時間的に変化する。したがって上記で全て説明できると断言するには不十分である。そこでここで考える着火系に対して非定常3次元数値解析を実施した。化学反応には総括一段の有限反応速度モデルを用いた。解析の詳細は文献に譲る(発表成果の論文 参照のこと)。ここでは結果の一部を図FGに示す。典型的な例として常圧の場合と低圧の場合の例を比較する。常圧(図F)での着火では燃料ガスが固体から放出された直後にプリューム

の成長が認められる前に着火していることがわかる。流れ場からも淀み点流れ場はまだ形成されていない状態にて着火が実現されていることがわかる。その一方で図Gの低圧条件を課した場合では、着火時間が長くなり、その分だけプリュームが多く放出され、固体表面に押し付けられていることがわかる。流れ場を確認すると、明確に着火前において淀み点流れ場が形成されている。これからも理解されるように、着火時間が長くなるような条件(例えば加熱量が少ない場合など)にすれば、着火時間を強制的に長くすることができ、着火可能範囲は概ね酸素「濃度」で決まるという図Cとは異なり、酸素「分圧」で決まることが推測される。この推論を明確にする追試実験をして確認しておきたい。

(4) 化学過程支配領域の存在について

上記の説明では一つだけ説明できていない箇所がある。それは低圧着火限界付近で酸素濃度が低いところでは古典理論では説明できない奇妙な振る舞いをしていることにある。これについては、古典理論では扱いきれない範囲、すなわち物理過程が支配すると考えるのではなく化学過程が着火を支配する領域にあると考えるのが適切であろう。これを取り扱うために素反応モデルを着火解析に導入しようと試みたが、詳細反応モデルを3次元非定常流れ場と連成して解くのは解析時間が著しく増し、困難さも増える。そこで簡略化された素反応で着火を取り扱えるものがあるかどうかを調べた。しかしながら、現存する簡略化モデルでは着火前に発生する微量ラジカルの生成量を適切に予測できず、着火の状況を正しく捕らえることに不

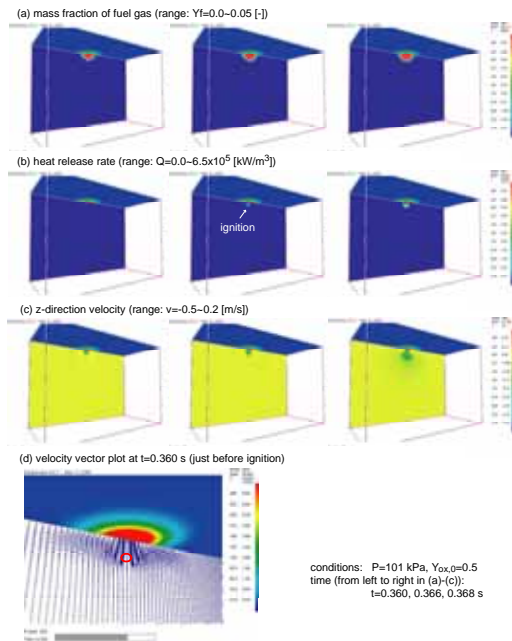


図 F 3次元非定常数値解析結果(常圧条件)

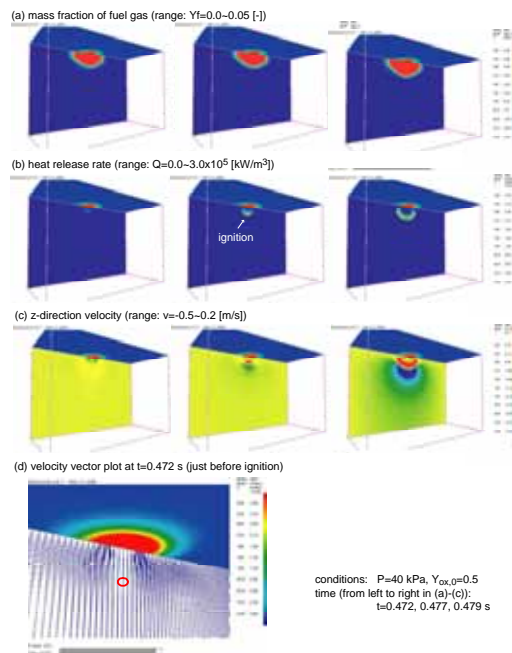


図 G 3次元非定常数値解析結果(低圧条件)

向きであることがわかった。現在、現存する反応モデルを改善するために反応過程のモデリングに従事している。これに関する成果についてはまた後日の機会に紹介できるよう全力で取り組みたい。

以上、実験・理論・解析を駆使することにより研究期間内に概ね満足できる成果を挙げることができた。これも一重に研究支援をしていただいたおかげである。当初計画からは資金不足のため達成できない点があったことは残念であるが、別の研究資金を充てながら今後も着実に進めてゆきたい。なお、低圧火災研究の実績が評価されて、日本マイクログラフィティ応用学会、日本燃焼学会の2つの学会から奨励賞をいただくことになった。改めて貴団体による手厚い支援に対して感謝申し上げます。次第である。

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2件)

Nakamura, Y., "Analytical and Numerical Study on Irradiated Ignition of Solid Combustibles in Sub-atmospheric Pressure", *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.3, No.1 (2008), pp.58-67. 査読有り

Nakamura, Y., and Aoki, A., "Irradiated Ignition of Solid Materials in Reduced Pressure Atmosphere with Various Oxygen Concentrations - For Fire Safety in Space Habitats", *Advances in Space Research*, Vol.41, issue 5 (2008), pp.777-782. 査読有り

[学会発表](計5件)

Nakamura, Y., "Effects of Low Pressure on Irradiated Ignition of Solid in a Stagnation-point Flow Field", *Proc. 9th International Symposium on Fire Safety Science*, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany (2008.9.23-24), on CD-ROM. 査読有り

Nakamura, Y., Azumaya, K., Yoshimura, N., Ito, H., and Fujita, O., "Ignition and Flame Spread over Wire Harness in Sub-atmospheric Pressure", *Proc. 9th International Symposium on Fire Safety Science*, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany (2008.9.23-24), on CD-ROM. 査読有り

中村祐二, 東谷圭祐, 伊東弘行, 藤田修, "低圧場での外部加熱による電線着火", 平成20年度日本火災学会研究発表会概要集,

2008.5.22 神戸大学 神戸 pp.136-137. 査読なし

Nakamura, Y., "Time-Dependent Mixture Formation and Heat Transfer over Irradiated Solid Combustibles in Sub-atmospheric Pressure Enclosure", *Proc. 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Conference and Summer Heat Transfer Conference*, Westin Bayshore Resort Hotel, Vancouver, Canada (2007.7.8-12), HTF-B1_#32656 on CD-ROM. 査読有り

Nakamura, Y., Aoki, A., Ito, H., and Fujita, O., "Effect of Reduced Pressure on Ignitability of Irradiated Cellulosic Paper", *Proc. 6th Asia-Pacific Conference on Combustion*, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan (2007.5.20-23), pp.202-205. 査読有り

[その他]

【ホームページ等】

<http://york-me.eng.hokudai.ac.jp>

【関連受賞(計2件)】

日本マイクログラフィティ応用学会奨励賞「低圧火災をはじめとした燃焼挙動の諸因子の影響に関する一連の研究」(2008.11)

日本燃焼学会奨励賞「極限環境における火災基礎研究」(2008.12)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村祐二 (NAKAMURA YUJI)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50303657

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし