

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 5月24日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21681022

研究課題名（和文） 電線燃焼における定常・非定常性をわける理論の構築と検証

研究課題名（英文） Study on the “Steadiness” of Flame Spreading of Electric Wires: Verification of Dominant Factor for Melting and Gasification Processes during Cable Fires

研究代表者

中村 祐二 (NAKAMURA YUJI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50303657

研究成果の概要（和文）： 電気ケーブルを模擬した金属導体に薄いポリマー（ポリエチレン）被覆を施した試料の燃焼過程の定常性を評価するため、電線燃焼試験および理論構築を試みた。燃焼過程の高速度画像から簡略モデルを採用することが適切と判断されたため、導体がある場合でもB定数理論が成立し得るかどうかの評価を行った結果、その有効性を確認することに成功した。実験結果からは溶融部体積の非定常性を含めた熱バランスを検討し、定常状態がどのような条件で達成されるのかを解明した。以上の研究成果より、定常性が発現する物理過程を見出すことに成功した。

研究成果の概要（英文）： Steadiness of flame spread over electric wire has been studied experimentally as well as numerically (theoretically). With precise visualization and temperature measurement of wire during the flame spreading event, it is understood what is the mechanism to lead the unsteadiness and what is the condition to reach steadiness of the system. To verify this consideration, Pe- Λ correlation has been proposed and the verification is fulfilled. Applicability of B-number theory to describe wire combustion character was ensured via microflame study. Direct numerical simulation methodology was developed based on VOF method and enthalpy-porosity method and the precise prediction of growing event of heated molten polymer was successfully accomplished.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
平成22年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
平成23年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
年度			
総計	19,900,000	5,970,000	25,870,000

研究分野： 火災物理学, 燃焼学

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： 電気火災, 火炎燃え拡がり, 溶融ポリマー

1. 研究開始当初の背景

(1)研究の背景と動機 近年の非ハロゲン系の電気ケーブル(電線)火災においては被覆材が溶融する難燃性ポリマーを用いる場合がある。

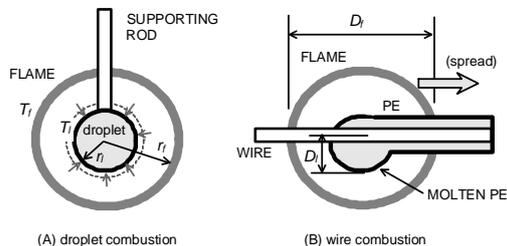
この系における電線燃焼過程とは、ポリマー燃焼時に導体との熱の授受を伴う複雑な熱および物質輸送を伴う化学反応流れという極めて複雑なものとなるが、一般的な熱的に薄い固体燃焼

の燃え拡がり位置付け、系の特性値として燃え拡がり速度を定義してそれにより燃焼性の評価を行えるとしていた。ところが、申請者は低圧場という特殊な空間での火災物理現象(=低圧火災と呼ばれる新分野)を探究する過程において、溶融するポリマーが燃焼過程中に肥大化して落下することが確かな事実であることを突き止めるに至った。この事実は、従来の概念同様、上記燃え拡がりが「定常現象」とすることが厳密に正しいかどうかの判断をしなければならないことを示唆する。

(2)本研究の意義と価値 上記で述べたとおり系の固有値として燃え拡がり速度が与えられないということは、環境条件のみで材料評価ができない可能性を意味しており、従来そのように評価してきたものがどの程度信頼がおけるものなのかを再評価する必要が生じる。そのためには、まずは定常現象にならない理由を解明し、定常・非定常をわける臨界条件を与える物理過程が何なのかを明確にすることが求められる。この検討を通じて、前記の工学応用へ貢献することができる(本研究の応用性)。一方、学術的にはなぜ固有値問題にならないのかを検討することとなり、これは極めて興味深い問題である。最終的には溶融部の時間発展を解析的に取り扱う(=具体的にはサイズの時間変化のソース項に正の増加分を加える)系にしたうえで、定常解(0次解)に補正項(1次解)を加える形で整理される準定常解を得ることになると想定されるが、その理論構築のための必要確認事項を実験的に求めておくことは必要である。このように、本研究では溶融を伴いながら燃焼する固体物質の汎用火災特性評価を行うための基礎研究としての価値がある(本研究の価値)

2. 研究の目的

本研究では、特に溶融部の形成過程までを考慮に入れることで、この燃え拡がり現象の定常・非定常性を分ける臨界条件を支配する要素について明確にすることを目的とする。また、定常性を与える条件を理論的に検討するための整備を行う。



ここで上記の「整備」について簡単に説明を加える。電線上記に示すように液滴燃焼を考慮すると、懸垂線を金属心線と読み替えれば燃焼系は液滴燃焼のものと同様であることが想定される。液滴燃焼ではB定数理論を用いて液滴の燃焼特性を評価するが、同じ理論を電線燃焼に

も導入するためには、いくつかの大胆な仮定を認める必要がある。その中で最も大きなものは、懸垂線の影響である。一般的な液滴燃焼では「懸垂線は燃焼特性に影響を与えない」ことであるのに対し、電線燃焼ではこれに相当するものがむき出しになった導体であるので、むしろ積極的に導体(液滴問題での懸垂線)を伝わる熱の授受がある場となる。このような状態でB定数理論が破綻しないかどうかを精密に評価する。また、将来的な広がりを考慮して溶融過程を直接数値シミュレーションで追跡する手法の開発を行い、溶融現象に対する理論モデルの検証ができるよう多方面から整備を行う。

3. 研究の方法

(1)実験的アプローチ 1 mm以下の導体を模擬した金属線に薄いポリエチレン被膜を施した「模擬電線(以下、単に電線と称する)」を作成し、それを用いた燃焼試験を実施した。実験実施内容は主に以下のものがある。①溶融ポリマー内部の流動状態の規則性の有無の確認(高速度カメラによる)、②電線燃焼時の溶融部体積の時間変化の追跡ならびにその時間発展特性の把握、③電線内部の熱バランスを考慮するための温度計測手法の開発、ならびにそれを用いた燃焼時熱バランス評価。

(2)解析的アプローチ ④B定数理論に関する評価試験、⑤溶融状態の生成と溶融部落下過程を直接的に表現するポリマー溶融モデルの開発および直接数値シミュレーションの実施を行った。前者については簡略化のためマイクロバーナ上に形成される球形火炎(マイクロフレイム)を用いて検証を行う。後者の検討においては、本学大型計算機に設置された汎用熱流体解析ソフトのFLUENTを用いた。溶融部がガス相の中を自由に動ける自由界面問題を扱うが、自由界面の記述にはVOF法を、固体と溶融部との間の流動抵抗にはEnthalpy-porosity法を適用した。詳細は次節に述べる。

4. 研究成果

(1)高速度カメラを用いて溶融部内部の流動の規則性について観察したところ、従来想定していたバルクの回転流動を明確に捉えることができず、むしろ流動はかなりランダムであることがわかった。導体を通じた急激な熱投入による溶融部端付近での気泡の生成、気泡の移動、表面での破裂に伴う表面波の発生などの極めて興味深い複雑な物理現象が電線燃え拡がり過程で観察されたが、それらをすべてモデル化することは難しいこと、本研究で対象とする「定常・非定常を分ける」特性には二次的にしか作用しないと考え、それらの詳細素過程をあるバルクの物理量で代表させるモデル化を適用することにした。ここではこれ以上は言及しないが、溶融ポリマー内部の気泡生成挙動は極めて興味深く、

特に気泡崩壊に伴うガス発生がマイクロな燃焼挙動に及ぼす影響はこれまで報告例がない。

(2)電線燃焼時に観察される溶融部の非正常性については、溶融部の体積変化の時系列挙動を緻密に解析を行った。一例を図Aに示す。図から明らかなように、溶融部体積は時間とともに「線型に」増加してゆく。この事実は、もともと溶融速度とガス化速度とがある一定の不釣り合いになることが原因であることを暗示する。

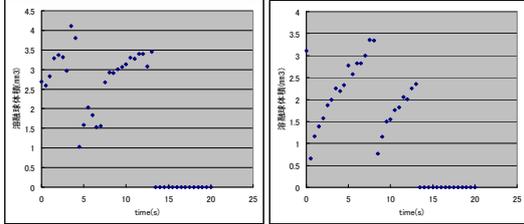


図 A 30kPa 下における溶融体積の時間変化 (金属線種 左: NiCr, 右: Cu)

(3)上記推定を実測データで示すため、電線に熱電対を取り付けて燃え拡がり時に電線内部に形成される温度分布の測定を試みた。導体を模擬した金属線は0.5mm、一方の熱電対は0.1mm以下であるため、その取り付けが著しく困難を極めた。一般にスポット溶接などで熱電対を溶着させるが、導体種が(細い)銅線ではすぐに熱が周囲に散逸してしまい、溶着できない。いくつかの工夫を加え、火炎が通過しても熱電対が外れないように接合した。

これにより燃え拡がり過程における金属線内部の温度分布を得ることに成功した(下図 B 参照)。これまで銅線の温度分布を積極的に計測した例は皆無であり、このデータ取得そのものが極めて大きな成果であった。

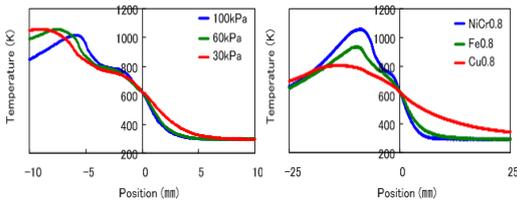


図 B 左: NiCr 線での低圧下での温度分布, 右: 30kPa での各種電線の温度分布

この結果から、未燃ポリマーの加熱は火炎からの直接加熱が支配要因となることがわかった。導体の熱伝導率が大きな銅であっても金属線を伝わる熱量と火炎から加熱される両はほぼ同程度となり、金属線を伝わる熱伝導のみの効果では未燃部の加熱速度、すなわち火炎燃え拡がり速度が整理できないことがわかった。一方で、溶融ポリマー分解速度は金属線を伝って流入する熱量が支配的であるため、火炎が予熱する速度と、金属線を伝ってガス化を促進させる速度が同程度のときに(溶融部が時間的に体積増大をせずに)いわゆる「定常」燃え拡がり現象が達成

されることがわかった。

このことを端的に表す理論モデルとして、燃え拡がり現象を記述し得る一次元熱伝導モデルを提案した。具体的には、無次元パラメータ(Peと Λ :詳細は下記参照。これらの中に火炎からの熱流入ならびに金属線を通じた熱伝導の効果を含めている)で整理することに等しい。このときポリマー厚み

$$\frac{d^2 T^*}{dx^{*2}} = Pe \frac{dT^*}{dx^*} + \Lambda \left(\frac{dT^*}{dr^*} \right)_{r=r_c}$$

$$Pe \equiv \frac{L|V_{sp}|}{a_c} \left(\because a_c = \frac{\lambda_c}{\rho_c C_c} \right) \quad \Lambda \equiv \frac{L^2}{R} \frac{2\pi_c \lambda_s}{A_c \lambda_c}$$

整理した結果の一例を図Cに示す。図よりあらゆる電線種で整理できることを確認できる。現時点のモデルでは観測値として得られる火炎長さ Λ と燃え拡がり速度という2つの未知数の関係が得られているにすぎないため、今後は分解反応特性を考慮することで初期値からいずれともを予測できるようなモデルとしたい。

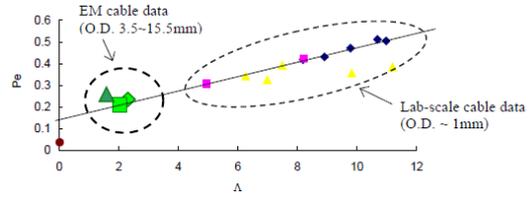
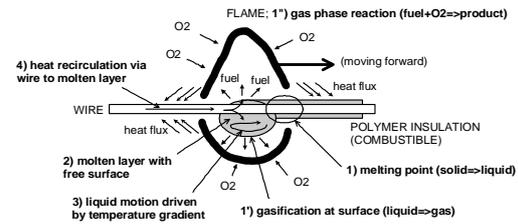


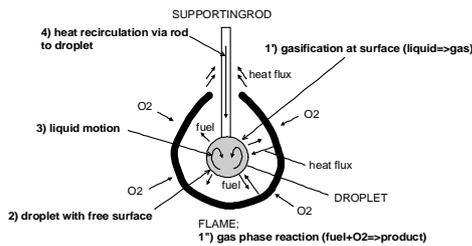
図 C 一次元熱伝導モデルにより得られる Pe- Λ 相関関係

(4)溶融部を液滴に見立てた燃焼理論を構築するための準備として本対象に対してB定数理論が適用可能かどうかを調査した。具体的には懸垂線に相当するものが電線燃焼の場合の導体であり、火炎と導体との間には積極的な熱の相互作用が存在する(下図参照)。



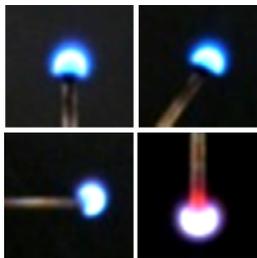
一般に液滴燃焼では懸垂線と液滴との間の熱のやりとりをできるだけ小さくするために熱伝導率ならびに熱容量の小さな細い材質(たとえばSiCファイバなど)を用いることで場を点対称一次元場と仮定して液滴燃焼特性の把握を理論的に予測する。もし懸垂線との間に積極的な熱的な相互作用があると、単純な一次元問題ではなくなる。この改善は数式上で何とでもなるが、懸垂線がたとえば太いと現象がすでに点対称と考えることが不適切となる場合も十分あり得る。液滴でのモデル図を以下に示す。熱のやり取り

を考えると、既出の電線燃焼と酷似していることがわかる。これが液滴理論を応用して電線燃焼特性を得ようとした動機になる。



さて、ここでの興味は、「球形の火炎の一部に熱をやり取りする物体があり、本質的に火炎が一次元ではない場合」であっても、液滴の古典理論であるB定数理論が適用可能かどうかを調べることにある。論理が破綻しなければ電線燃焼のモデルにB定数理論を取り込むことは可能であるし、論理が破綻するならばもともとそのようなモデル化は適さないことになる。

この検証のため、溶融ポリマーを被燃焼物とするとガス化量、ガス化速度を測定することが難しいため、極細バーナ先端からガスを低流量噴き出して燃料を出口から「染み出させた」状態を考えることにする。このような極細バーナから燃料を噴き出して形成される火炎は数ミリサイズで球形になることが知られており、液滴燃焼とほぼ同等の特性を持つものと期待される(このことをマイクロフレームと呼ぶ)。



左図:マイクロフレーム(燃料はメタン)バーナ径は 0.7mm で $Re \sim O(1)$ の流速で周囲に吹き出すと向きによらず球形を保つ火炎が形成される

ガス燃焼の場合、定義によればB定数は存在しない(正しく言えば無限大)。というのも、そもそもB定数とは液体あるいは固体燃料の燃焼のしやすさを表現するために導入された材料物性値であり、「ガス化に必要な熱量とガス化後の発熱量」の割合を示したものである(したがってB定数が大きな材料は燃焼しやすい)。ガス燃料の場合は相当する分母がゼロ(もともとガス化されているので不要)なので、B定数は無限大である。

しかしマイクロフレームの研究によれば、火炎を保たせるためにはある「最低流量」が必要であるとされている。すなわち、「それだけ燃料を放出しないと燃焼持続ができない」。その量とはとりもなおさずバーナによって熱を吸われる分に相当するため、ここでは分母を「バーナがもたらす熱吸収量」とすることでB定数を定義した。この拡張B定数を従来の液滴燃焼理論における火炎半径や燃料消費量の予測式(Bにより一意に決まる)を代入し、マイクロフレーム半径、導入流

量という実測値と比較してみると、十分議論できるレベルで合致することがわかった。たとえば燃料消費量の値は実測値よりも理論値は5倍程度の差があるが、バーナ(つまり火炎と根tのやり取りをする媒体)の存在により拡散係数が見かけ大きくなったものと考え(～有効拡散係数として定義することによってその差を補うことができる。重要なのは、定性的な傾向は十分再現することができることを確認できたことにある。これにより、導体が火炎に突き刺さるようにして燃焼している電線燃焼でも(修正)B定数理論が成立するであろうことが確認できた。

(5)溶融現象にまつわる非定常挙動(溶融部の拡大および自重による落下)を直接数値シミュレーションにより再現するための解析手法を開発した。溶融界面はその境界位置が移流によって比較的自由に動くことができるいわゆる自由界面である。その溶融部の形成は化学反応による液化(相変化)過程をモデル化する必要がある。自由界面追跡には VOF 法を、溶融部の形成ならびに流動再現は enthalpy-porosity 法を採用した。解析は汎用熱流体コードである FLUENT を用いた。得られた結果の一例を以下図 D に示す。

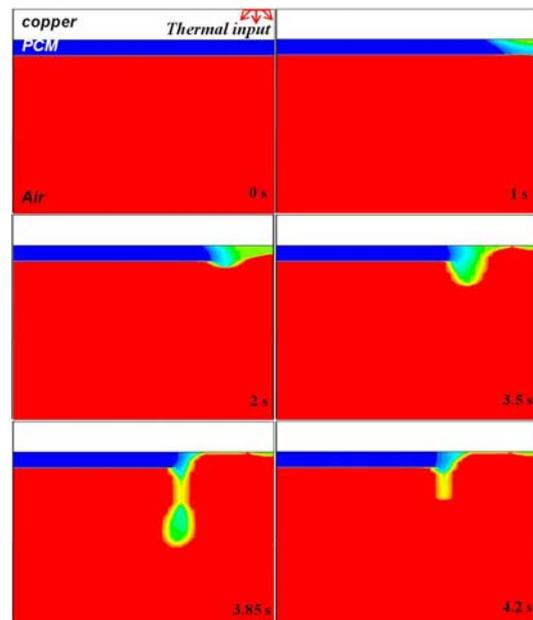


図 D 溶融過程の直接数値シミュレーション

計算領域右上に加熱源が配置してあり、白色の金属を模擬した板の下に溶融可能な物体(PCM と表記)が張り付いているとする。図は固体部が青色、溶融部が緑色、気相が赤色になるように色づけしたものである。図からわかるように、時間経過に伴い、溶融部が成長して集まり、下に垂れて落ちる様子が明確に再現されている。パラメトリックスタディを行うことで、自由界面追跡モデルの有無(=溶融部の変形の有無)により溶融速度が変化するなど、溶融部の流動を無視すると実際の現象を正しく予測・再現できない

ことが示唆された。現状のモデルでは溶融のみでガス化まで含めていないが、今後はガス化をモデルに含めて燃焼に至る状態を再現したい。なお、火災関連研究で溶融物体の流動をともに数値的に取り扱う例は著しく少なく、我々以外では FEM 法に基づく一例のみ(ポルトガルのグループ)に限られる。FEM 法では変形に対する自由度はあるが、内部流動をさせるのは苦手である。特に溶融物内部の流動は溶融過程に少なからず影響を及ぼすことが予想されるので(事実、マランゴニ効果を含めると若干溶融過程が変化することは確認済)、その意味では我々の成果は世界を先導するものであると自負している。

上記成果に加え、溶融部のサイズ変化がもたらす落下による火災被害の拡大、非定常変化のうち最も特長的で重要な着火から燃え拡がりまでの遷移過程に関する実験および理論解析を行い、広く電線燃焼の非定常性を議論できる環境の整備を行った。電線燃焼に関する定常・非定常をもたらす要因を包括的に調べて得られた知見は極めて有益である。今後もさらに発展させた理論(特にスケール効果を含めた理論)へと拡張してゆきたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Huang, X., Nakamura, Y., and Williams, F. A., "Ignition-to-spread Transition of Externally-heated Electrical Wire", Proc. Combust. Inst., to be published (査読有) .
- ② Takahashi, S., Takeuchi, H., Ito, H., Nakamura, Y., and Fujita, O., "Study on Unsteady Molten Insulation Volume Change during Flame Spreading over Wire Insulation in Microgravity", Proc. Combust. Inst., to be published (査読有)

[学会発表] (計 18 件)

- ① Kim, YK., Hossain, A., and Nakamura, Y., "Heat Transfer and Dynamic Motion of Phase Change Material in Melting and Dropping Process", Proc. The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC8), Incheon, Korea (2012.3), GSF32-011 (on USB). (査読有)
- ② Huang, X., Nakamura, Y., and Williams, F. A., "Flame Spread over Electrical Wire with Various Oxygen Concentrations", Proc. Spring 2012 Meeting, Western States Section of the Combustion Institute, Arizona (AZ), USA (2012.3), 056FR-0029 (on

CD-ROM). (査読有)

- ③ 薄木太一, 中村祐二, 若月薫, "溶融したポリエレンが持つ可燃物に対する着火特性", 日本機械学会北海道学生会第 41 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, 札幌 (2012.3), pp.333-334. (査読無)
- ④ 中野多聞, 中村祐二, 若月薫, "急速加熱による電線被覆の燃焼・溶融挙動に関する研究", 日本機械学会北海道学生会第 41 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, 札幌 (2012.3), pp.335-336. (査読無)
- ⑤ Kim, YK., Hossain, A., and Nakamura, Y., "Modeling of Melting in Consideration of Convection Diffusion Effect inside Liquid Matter", Proc. 7th SNU-HU Joint Symposium, Seoul, Korea (2011.11), pp. 59-62. (査読無)
- ⑥ Kim, YK, Hossain, A., and Nakamura, Y., "Numerical Simulation of Melting and Dropping of Phase Change Material (PCM) induced by Localized Thermal Input", Proc. 1st International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering (MMPE), Kanazawa, Japan (2011.10), pp.L-8-1 to L-8-6. (査読有)
- ⑦ Huang, X., Nakamura, Y., and Williams, F. A., "An Experimental Study on Ignition of Electrical Wire", Proc. Fall 2011 Meeting, Western States Section of the Combustion Institute, Riverside (CA), USA (2011.10), 11F-55 (on CD-ROM). (査読有)
- ⑧ 金洋均, Hossain Akter, 中村祐二, "ポリマーの局所加熱による溶融流動過程の数値シミュレーション", 日本混相流学会年会講演会 2011 講演論文集, 京都 (2011.8), pp.334-335. (査読無)
- ⑨ Iwakami, J., Nakamura, Y., Wakatsuki, K., and Hossain, A., "Mechanism of Flame Spread of Electrical Cables", Poster Colloquium at 10th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS 2011), Maryland, MD USA (2011.6), Tue-#25. (査読有)
- ⑩ 中村祐二, 巖上純也, 若月薫, "EM ケーブルの自立延焼特性に関する実験的検討", 平成 23 年度日本火災学会研究発表会概要集, 東京 (2011.5), pp.196-197. (査読無)
- ⑪ Nakamura, Y., and Hirasawa, T., "Microflame: As a Model of

Droplet/Spray Combustion", Proc. 7th International Conference on Flow Dynamics (ICDF2010) (OS1: invited talk), Sendai Japan (2010.11), pp.22-23. (査読無) (招待講演)

- ⑫ 巖上純也, 中村祐二, 若月薫, 伊東弘行, 藤田修, "電線被覆材ポリエチレンの燃焼量に対する周囲雰囲気圧力変化の影響", 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, No.10-25 長岡 (2010.10), pp.93-94. (査読無)
- ⑬ Iwakami, J., Nakamura, Y., Wakatsuki, K., Ito, H., and Fujita, O., "Novel Approach of Space Fire Research: Utilizing Low Pressure to Simulate Microgravity Fire", Proc. 8th Japan-China-Korea Workshop on Microgravity Sciences for Asian Microgravity Pre-symposium, Sendai, Japan (2010.9), p.16. (査読有)
- ⑭ 中村祐二, 東谷圭祐, 若月薫, 伊東弘行, 藤田修, "低圧環境下における電気ケーブル延焼現象に関するモデリング", 平成 22 年度日本火災学会研究発表会概要集, 札幌 (2010.5), pp.84-85. (査読無)
- ⑮ 巖上純也, 中村祐二, 東谷圭祐, 若月薫, 伊東弘行, 藤田修, "熔融過程の電線被覆材の挙動の非定常性についての考察", 平成 22 年度日本火災学会研究発表会概要集, 札幌 (2010.5), pp.82-83. (査読無)
- ⑯ Nakamura, Y., Azumaya, K., Wakatsuki, K., Ito, H., and Fujita, O., "Experimental Study of Flame Spread over Electric Cables at Low Pressure", Sixth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Leeds, UK (2010.4), paper#38-2. (査読有)
- ⑰ Nakamura, Y., Azumaya, K., Wakatsuki, K., Ito, H., and Fujita, O., "Effect of Wire Scales on Spread Behavior in Sub-atmospheric Pressure", Proc. 6th International Symposium on Scale Modeling (ISSM-6), Hawaii, USA (2009.9), paper# 1-08 (on USB). (査読有)
- ⑱ Nakamura, Y., Azumaya, K., Ito, H., and Fujita, O., "Flame Spread over Electric Wire in Space Environment: Steady or Unsteady ?", Proc. 27th International Symposium on Space Technology and Science (27th ISTS), Tsukuba, Japan (2009.7), 2009-h-23 (on USB). (査読有)

[図書] (計 1 件)

- ① Kim, YK., Hossain, A., Kim, S., and

Nakamura, Y., "A Numerical Study on Time-dependent Melting and Deformation Processes of Phase Change Material (PCM) induced by Localized Thermal Input", Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling, InTech Open Access Publisher, Croatia, Chapt 23, pp.523-540 (2011.9) (査読有)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

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

講演依頼

- ① 日本機械学会 RC-D9:次世代流体解析ソフトウェアの高機能化と産業界への普及展開に関する研究分科会 (依頼講演, 札幌) (2011.10) 「加熱されるポリマーの熔融・落下過程を考慮した非定常数値シミュレーション」
- ② 平成 23 年度消防防災科学論文優秀賞 受賞記念講演 (招待講演, 東京) (2011.10) 「電線延焼現象に対する理論予測法の提案」
- ③ COMSOL カンファレンス 2010 東京, 招待講演 (2010.12) "Numerical Simulation of Liquefying Process of Solid PCM by using COMSOL Multiphysics"
- ④ Worcester Polytechnic Institute (Department of Fire Protection Engineering), Invited Seminar (USA) (2010.11) "Electric Cable Fires: Ongoing Research on Small-Scale Flame Spread Tests"
- ⑤ 日本燃焼学会つくば地区燃焼応用研究委員会依頼講演, つくば (2009.11) 「極限状態における燃焼現象の解明に向けて」
- ⑥ 第 51 回北大祭 公開講義 (2009.6) 「宇宙防災研究の最前線 ~宇宙火災を地上場で模擬するための「あの手・この手」~」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 祐二 (NAKAMURA YUJI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 50303657

(2) 研究分担者

(該当なし)

(3) 連携研究者

(該当なし)