

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289204

研究課題名(和文) 延焼拡大過程を考慮した二層ゾーン火災拡大予測モデルの開発

研究課題名(英文) development of two-layer zone models considering fire spread process

研究代表者

原田 和典 (Harada, Kazunori)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90198911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：大規模建物では全館避難時間が長くなり、避難中に建物内の一部の室でフラッシュオーバーが起こり、延焼拡大する可能性が潜在している。このような状況には、現状の二層ゾーン煙流動予測モデルは十分に対応できない点がある。本研究では、二層ゾーン煙流動計算の改良のため、強い火源にも対応可能な計算アルゴリズム、壁面での反転流を考慮した煙層降下速度、ダブルスキン内の煙流動等の煙挙動の予測方法を検討した。燃焼性状に関しては、実在可燃物の燃焼性状、区画内の放射熱のフィードバックを考慮した火源の発熱速度の予測、材料の燃え拡がり特性の測定とモデル化を行った。

研究成果の概要(英文)：In large buildings, evacuation tends to take much time. Flashover and subsequent spread of burning may happen during evacuation. Such a situation is not properly addressed by existing two-layer zone model of smoke transport. In this study, investigations were carried out on the subjects of algorithm of smoke transport calculation to be applicable to strong fire source, back layering smoke flow turned by wall surfaces, smoke transport in double-skin layer. As to burning behavior, study were made on a model of burning progress of a realistic object, increase of burning due to feedback effect from enclosures, measurement and modelling of fire spread over material surface.

研究分野：火災安全工学

キーワード：二層ゾーンモデル 壁面での反転流 ダブルスキン 実在可燃物 放射熱のフィードバック 材料の燃え拡がり

1. 研究開始当初の背景

建築物の火災安全設計においては、避難計画と消防活動戦略を立てて、廊下から階段を経て外部に至る避難経路や、防災センターから非常用エレベータや階段を経て火点に向かうための消防隊進入経路の計画が行われる。設計が妥当であるかどうかを定量的に判断するためには、火災性状予測に基づいて、避難計画と消防活動計画のストーリーが無理なく成立するかどうかを検証することになる。

そのための法的枠組みは、2000年の建築基準法で規定された避難安全検証法や2009年に改正された消防法における消防活動拠点の技術基準等で規範的な方法が導入され、実務に供されている。しかしながら、建築物の超々高層化や大規模平面化を考えると、従来の規範的な方法をすべての建築物に適用することは技術的に妥当でない。

例えば、超々高層ビルや、夜間の病院などでは、避難開始が遅れやすく、全館の避難者を同時に収容するだけの階段がないこともあって、全館避難に要する時間が長くなる。すると、全館避難中に建物内の一部の室でフラッシュオーバーが起こり、延焼拡大する可能性が潜在している。また、高齢者・身障者を考えると、従来型の階段を使った避難ではなく、エレベータ避難や籠城避難等の可能性が検討されつつある。

このような状況を踏まえると、現状の二層ゾーン煙流動予測モデルは、基本的には初期火災を対象としているため、十分には対応できていない点がある。

2. 研究の目的

建築物の火災安全設計では、出火室および出火階からの在館者の避難と、出火階への消防隊の進入経路を階ごとに計画するのが通常の方法である。いわゆる普通の中高層のビルであれば、現状の方法でそれなりの安全性を確保することができ、二層ゾーンモデルなどの設計ツールが設計現場では広く使われている。しかし、近年の建物の超・超高層化や平面大空間化を考えると、建築物全体を考慮した延焼拡大と煙流動を予測し、制御する設計が必要である。本研究では、大規模建築物の火災（延焼および煙）の進展について、現状での知見が不足している課題を抽出して実験を行い、二層ゾーンモデルを改良することを目的とする。

3. 研究の方法

3.1 二層ゾーンモデルの計算アルゴリズムの改良

二層ゾーン建物内煙流動モデル BRI2002 (以下、既存モデル) では、基本的には初期

火災で比較的小さな火源からの煙流動性状を想定して計算をするモデルである。そのため、強いブルームや換気支配に移行するような大きな火源に対しては数値解が振動を起こしやすいことが指摘されている。

そのため、換気支配型へ遷移する条件を与えた場合の数値的不安定の原因を特定し、その改善案を提案することで換気支配遷移後も安定した結果を得るための改良を行なった。

3.2 反転流を考慮した煙層降下速度

二層ゾーンモデルでは発生する煙量は火源の火災ブルームの巻き込みのみに依存すること、煙層は瞬時に水平方向に拡散し、均一に降下することを仮定している。しかし、大平面空間では、天井流での空気の巻き込みが煙の体積増加に影響を与えることが懸念されており、二層ゾーンモデルによる予測では煙層降下を過小評価する恐れがある。さらに、天井流が壁面に衝突した後に生じる天井流の下を火源に向かって戻る流れ（以下、反転流）が、天井流の空気の巻き込み量（以下、天井流量）や温度に影響を及ぼすことが考えられる。無限水平天井下における天井流の巻き込み性状の研究は行われているが、反転流に着目した研究は少なく、知見が乏しい。

そのため、反転流形成時の天井流の巻き込み性状に着目した模型実験を実施した。図1に実験装置を示す。幅 7.16m × 奥行 7.16m の水平天井を設置した。

壁を2面設置する条件では区画の四周の1辺の中央を起点として「く」の字に、3面設置する条件では「コ」の字に壁を設置し、反転流を形成させた。壁を4面設置する条件では、水平天井の四周に床面から 0.6m よりも上の部分に壁を設置した。

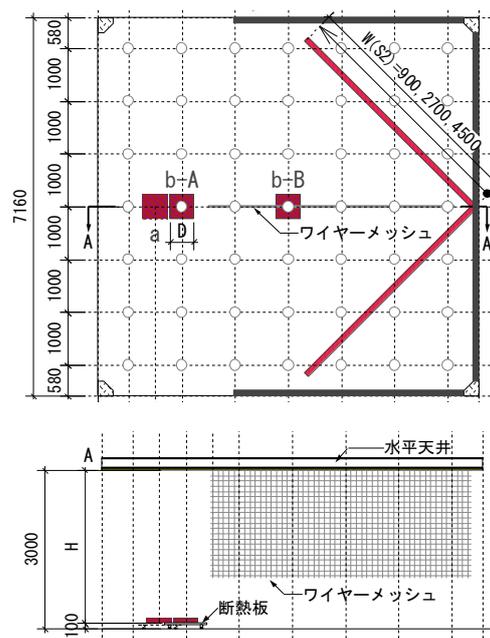


図1 反転流実験の概要

3. 3 ダブルスキン内煙流動性状

建物外壁をガラスで覆うダブルスキン建築では、外壁とガラスとの間にできる中空層で換気や日射熱の吸収を行って省エネルギー性の向上を目指している。中空層を意図的に暖めて煙突効果により上昇気流を生じさせ、居室からの自然換気を促すことは合理的であるが、火災時にはダブルスキンが煙の伝播経路となり、早期に上階へ煙を拡散させる恐れがある。

上階への煙の流入はダブルスキンに生じる圧力分布に依存するが、これはダブルスキン内の質量と熱の収支から導くことができるはずである。そこで、ダブルスキン及びそれに接続する居室への煙流動性状を把握するため模型実験を行った。図2に実験装置を示す。

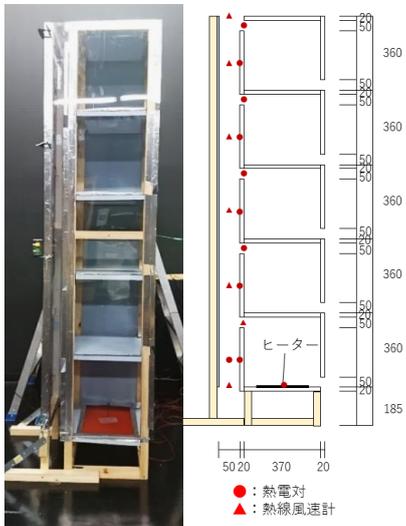


図2 ダブルスキンファサードの煙流動測定装置

3. 4 実在可燃物の燃焼性状

実在の可燃物は、三次元の立体形状をしており、燃焼面の拡がりも三次元となる。そのため、材料素材で測定した一次元の燃え拡がり速度を使って実在可燃物の燃え方を予測するため、燃焼面形状を円、三角形、放物線などの単純な図形の組み合わせで近似し、火炎伝播速度に応じて図形を拡大させるモデルを検討した。

3. 5 区画内の放射熱のフィードバックを考慮した火源の発熱速度の予測

燃焼物に比べて十分広い室であれば、可燃物の燃焼は戸外等の自由空間と大差ない。しかし、実在の建築空間であれば、壁や天井があり、これらの室内表面が高温になると放射熱を射出する。その結果として、燃焼物へ戻ってくる入射熱流（以下、外部放射）が増加する。外部放射が増加すると、燃焼そのものが激しくなり、さらに外部放射が増加するという連鎖が生じる。

室内での燃焼性状を考慮した火災性状予測を行うためには、燃焼物への外部放射を考慮して、自由区間での発熱速度を適宜割り増す必要がある。

割り増し方法の考え方を図3に示す。天井下への火炎の展炎部、煙層、高温になった壁表面などが放射源となり、これらから燃焼物への外部放射が増える分だけ、燃焼物の熱分解速度を増加させる定式化を行なう。

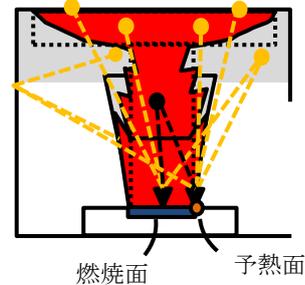


図3 燃焼物への放射熱のフィードバック

3. 6 材料の燃え拡がり特性の測定とモデル化

内装材料の安全性を区分する現行規定では、不燃材料は20分、準不燃材料は10分間の燃焼発熱量を決めているが、燃え拡がりの速さは考慮されていない。しかし、室の延焼拡大の観点からは、単位面積当たりの発熱速度と燃焼面積の積で評価するのが合理的である。実務的には、単位面積当たりの発熱速度はコーンカロリメータで測定されているが、燃え拡がり速度の測定はほとんど行われていない。

そのため、汎用的に使われているコーンカロリメータを用いて、火炎伝播速度を測定し、その結果を二層ゾーンモデルへ入力する方法を検討した。

4. 研究成果

4. 1 二層ゾーンモデルの計算アルゴリズムの改良

既存の二層ゾーンモデル（以下、既存モデル）における計算フローを図4に示す。これをフラッシュオーバーおよび盛期火災に至る条件でも計算できるように拡張するために、2つの問題点を抽出した。ひとつはゾーンの質量と化学種の質量分率を定常状態で近似したときに成立する関係式から正規化燃料/空気比 Φ を略算していること、もうひとつは、ゾーン方程式の時間積分において陽解法の一つであるルンゲ-クッタ法を近似的に用いている点である。

これらの問題点に対して、準定常近似を用いることなく、正規化燃料空気比を煙層への未燃ガスと酸素の供給速度から求めることとした。また、ゾーン方程式の時間積分にお

いては、完全陰解法として各ステップ毎に反復して収束計算をするスキームに改めた。その結果、図5に示すように数値振動を抑制して、安定解を得ることができた。

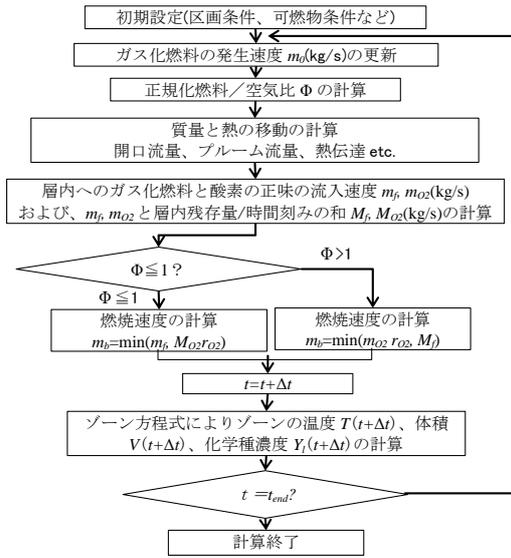


図4 既存の二層ゾーンモデルにおける計算フロー

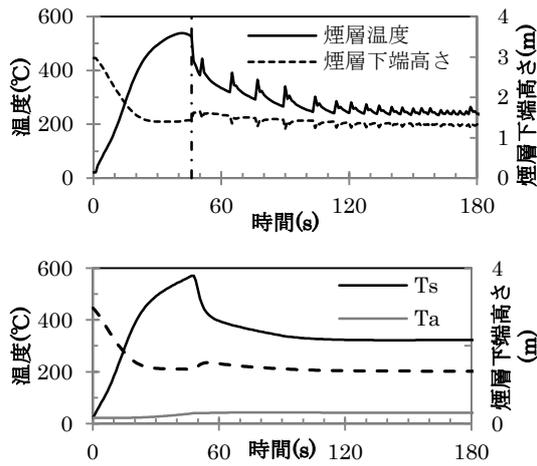


図5 煙層温度と煙層下端高さの計算 (上: 改良前、下: 改良後)

4. 2 反転流を考慮した煙層降下速度

図6に2面壁(天井高さ $H=2.00\text{m}$ 、火源直径 $D=0.45\text{m}$)、図7に3面壁($H=2.01\text{m}$ 、 $D=0.45\text{m}$)での鉛直温度分布を示す。火源に近い位置(水平距離 $r=1.5\text{m}$)では壁幅による煙層厚みの差異は顕著に見られず、無限天井における煙層厚さに近かった。壁幅が増すほど、あるいは壁に近い位置ほど、天井面付近で均一な温度分布を示す領域が厚くなり、その温度も高くなった。最高温度が生じる高さは煙層厚さが増すほど低くなった。

図8に煙層高さを示す。壁幅が大きいほど形成される反転流の厚みおよび形成距離は増加した。壁に近い位置ほど形成される反転流の厚みは厚く、壁から遠ざかるにつれて徐々に薄くなり、無限天井下の天井流の厚

みに収束した。

実験結果に基づき、図9のように煙の伝播性状を3つのフェーズに分け、フェーズ1(天井流が進行中)、フェーズ2(反転流が進行中)を含む予測モデルを構築した。

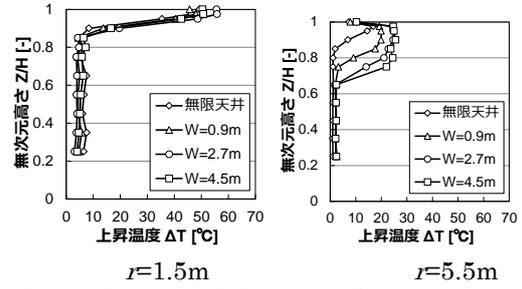


図6 鉛直温度分布 (2面壁、 $H=2.00\text{m}$ 、 $D=0.45\text{m}$)

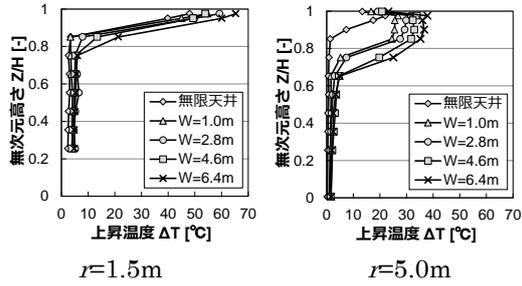


図7 鉛直温度分布 (3面壁、 $H=2.01\text{m}$ 、 $D=0.45\text{m}$)

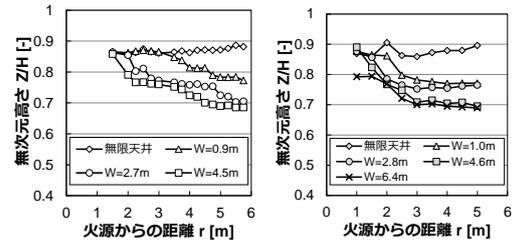


図8 煙層厚さ ($D=0.45\text{m}$)

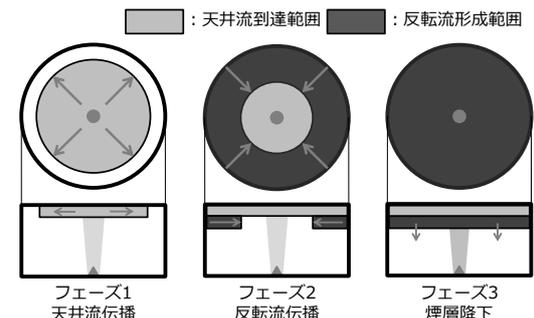


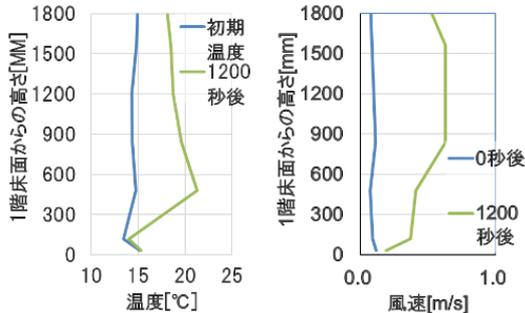
図9 煙層が形成されるまでのフェーズ

4. 3 ダブルスキン内煙流動性状

模型の1階を火災室と想定し、床面に幅 250mm ×奥行 300mm のシリコンラバーヒーターを設置し、変圧器により通電する電力量を調整することで火災室内を温め、ダブルスキンに流入する煙を再現した。測定結果を図10に示す。温度は1階天井高さで最大になり、それよりも上では熱損失により指数関数的に減衰する。風速は2階から4階部分ではほ

ば一定であり、居室部分との混合は少ない。最上階では風速が少し低下しており、上端から放出される部分での混合が予期される。

流入した熱流量に対してダブルスキン頂部から流出した熱流量の割合は約 72%であり、残りはガラス部分等からの熱損失となっている。



(a) 温度 (b) 風速

図 10 ダブルスキン内の温度と風速

4. 4 実在可燃物の燃焼性状

実在可燃物の燃焼性状予測モデルの概念を図 11 に示す。実在可燃物を直方体形状で近似し、燃焼に伴う形状変化を追跡しながら、各時刻における燃焼面の面積を求め、単位面積あたりの発熱速度を掛けて発熱速度とするモデルである。

このモデルを、500mm 角の軟質ウレタンの燃焼に適用した結果を図 12 に示す。発熱速度の測定値と予測値は、良好に一致している。このことにより、可燃物の形状による発熱速度の違いをある程度は予測が可能となった。

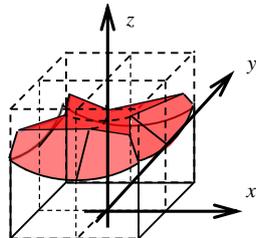


図 11 可燃物の燃焼拡大モデル

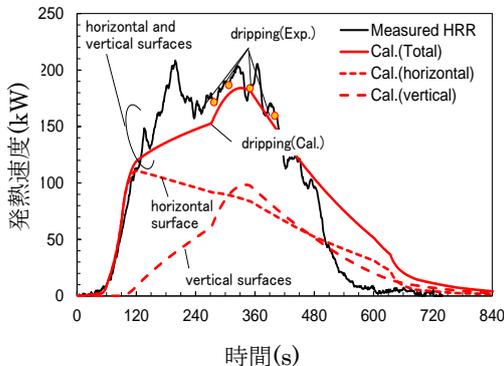


図 12 ウレタンブロック (500mm 角) の発熱速度の測定値と予測値

4. 5 区画内の放射熱のフィードバックを考慮した火源の発熱速度の予測

ウレタンマットレス (50×50×500mm) を自由空間で燃焼させた時の発熱速度を既知として、同じマットレスを模型箱 (幅 840mm×奥行 1680mm×高さ 840mm) の中に入れて燃焼させた結果を予測した。結果を図 13 に示す。自由空間では、点火後 100 秒で 50kW の発熱速度となるが、模型箱内に入れて燃やすと、60 秒ころから発熱速度の増加が顕著となり。最大値は 120kW となる。

計算では、模型箱内の煙層と火炎等からの放射熱のフィードバックを考慮することで、発熱速度の増加を予測することができた。

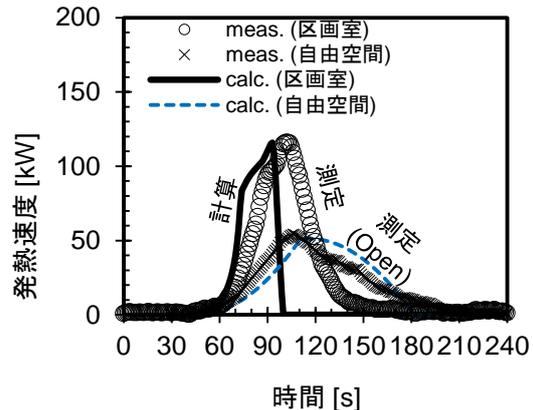


図 13 発熱速度の予測結果

4. 6 材料の燃え拡がり特性の測定とモデル化

コーンカロリメータでは、着火時間、着火限界熱流束を求めることができ、標準的な方法ではないが、試験体を鉛直に設置することも可能である。このことを利用して LIFT 試験 (鉛直着火および側方火炎伝播試験) のように火炎伝播速度を測定することを試みた。試験体は密度 20kg/m³ の軟質ポリウレタンである。この試験体をコーンヒーターで加熱し、端部に着火させて、その後の燃え拡がり位置を目視およびビデオ記録により特定し、燃え拡がり速度を求めた。

測定結果を図 14 に示す。標準 LIFT 装置と縮小 LIFT 装置の相関は良好であり、燃え拡がりに関わるパラメータを既存のコーンカロリメータ試験装置で測定可能であることを示した。

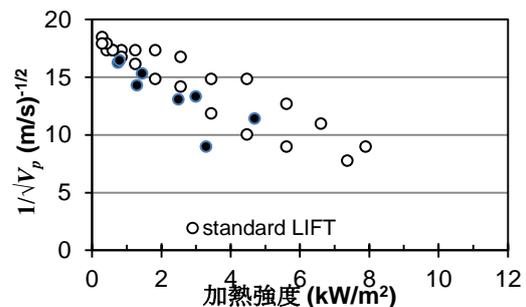


図 14 火炎伝播速度と加熱強度の関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

①土橋常登, 原田和典, コーンカロリメータ試験装置と着火性試験装置における材料表面の熱伝達, (社)日本建築学会環境系論文集, 第80巻, 第709号, pp.193-200, 2015年3月

[学会発表] (計 39 件)

① Kazuhiko Ido, Junghoon Ji, Yoshifumi Ohmiya, Ken Matsuyama, Kazunori Harada, A Simple Method of burning and surface flame spread of a cubical-shaped polyurethane foam block, NIST-IR 1189, pp. 58 and 236, National Institute of Standards and Technology, May, 2015

② Junghoon Ji, Kazunori Harada, Yoshifumi Ohmiya, Masaaki Noaki, Yichul Shin, Burning of a Polyurethane Foam Block Close to a Wall and a Corner depending on Separation Distance, IFireSS - Int. Fire Safety Symposium, pp. 473-482, Coimbra, 2015.4 (reviewed by full paper)

③ Kazunori Harada, Ken Matsuyama, Kazuhiko Ido, Masaaki Noaki, Sungchan Lee, Jaeyoung Lee, Burning of Polyurethane Foam Block In ISO Room Compartment, IFireSS - Int. Fire Safety Symposium, pp. 493- 502, Coimbra, 2015.4 (reviewed by full paper)

④ Junghoon Ji, Kazunori Harada, Masaaki Noaki and Yoshifumi Ohmiya, Modelling of Flame Tilt Angle towards Wall Surface from a Solid Combustible, Book of Poster Abstract, 10th Asia-Oceania Symp. on Fire Science and Technology, Tsukuba, book of poster abstract, pp. 37-38, 2015/10/6-8 (reviewed by extended abstract)

⑤ Kazuhiko Ido, Kazunori Harada, Yoshifumi Ohmiya, Ken Matsuyama, Masaki Noaki, and Junghoon Ji, Algebraic Equations for Calculating Surface Flame Spread and Burning of a Cubical-Shaped Polyurethane Foam Block, Chapter 43, Proceedings of 10th Asia-Oceania Symp. on Fire Science and Technology, Springer, pp. 427-435, 2016.10 (reviewed by full paper)

⑥ Tatsuya Tarumoto, Junghoon Ji, Tsuneto Tsuchihashi, Kazunori Harada, Woon-Hyung Kim, Kye-Won Park, and Jong-Hoon Kim, A Procedure for Measuring Flame Spread Properties of Materials by Cone Calorimeter, Chapter 60, Proceedings of

10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Springer, pp. 587-595, 2016.10 (reviewed by full paper)

⑦ SungChan Lee and Kazunori Harada, A Validation Study of Existing Formulas for Determining the Critical Heat Release Rate for Flashover, Chapter 64, Fire Science and Technology 2015 - the Proceedings of 10th Asia-Oceania Symp. on Fire Science and Technology, Springer, pp. 631-638, 2016.10 (reviewed by full paper)

⑧ Tsuneto Tsuchihashi and Kazunori Harada, The Effect of Specimen Thickness on Critical Heat Flux and Effective Thermal Inertia Calculations Using Cone Calorimeter and Ignitability Test Apparatus, Chapter 73, Fire Science and Technology 2015 - the Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Springer, pp. 715-722, 2016.10 (reviewed by full paper)

⑨国内学会における発表 (32件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

原田 和典 (HARADA, Kazunori)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90198911

(2)研究分担者

大宮 喜文 (OHMIYA, Yoshifumi)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号: 10287469

仁井 大策 (NII, Daisaku)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 50414967

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし