

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23510231

研究課題名(和文) アクティブ制御乱流風洞を用いた大規模広域火災時の効果的な空中消火方法に関する研究

研究課題名(英文) Effective aerial firefighting against large area urban fire by actively controlled wind tunnel

研究代表者

菊川 裕規 (KIKUGAWA, Hironori)

大分工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：70321528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：阪神淡路大震災のような大震災時の市街地火災に、消防ヘリコプターによる迅速な空中消火に期待が寄せられているが、最適な消火方法についてはまだ明確にされていない。そこで、相似模型により空中消火を再現し、アクティブ制御風洞で気象条件を模擬して効果的な空中消火の方法について検証した。その結果、空中投下水による1回あたりの散布水量を増加すると最も効果的であることが明らかとなった。また、建物群や家屋間の樹木等にあらかじめ水を投下して延焼遮断帯を構築する可能性について検証した結果、ある一定の含水率を超えると延焼が阻止、または遅延させる効果があることが明らかとなり、市街地火災においても有効であると思われる。

研究成果の概要(英文)：In case of a great earthquake disaster, wide area urban fire would be expanded for lack of firefighting water supply from road destruction, hydrant damage and so on. If airplanes, such as a helicopter, can be used under specific conditions, it would be effective for firefighting. However, about the fire extinguish or deterrent effect by aerial firefighting, there is not enough research work for urban fire. Therefore, in this research, small model experiment was proposed and effective aerial firefighting against large area urban fire was verified. As a result of this research, it was revealed when increasing the airdrop water amount per trial is most effective. In addition, it was verified the possibility to build a fire blocking zone by previously water dropped in trees or the houses. Fire spread exceeds the reference moisture content is prevented. It became apparent to be effective in delaying the fire spread, it seems also applicable against urban fire.

研究分野：自然災害科学

キーワード：広域火災 空中消火 延焼阻止 大規模火災 相似模型 風洞実験 消防ヘリコプター 含水率

1. 研究開始当初の背景

平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災では、地震時の交通混乱や水利不足のため消防効果を発揮できず広域火災に発展した。現在でも、殆どの都市が木造密集地帯を抱えており、かつ地震発生度の高い都市が多いため広域火災の危険性が少なくない。このような状況下において空中からの消火活動、とりわけ滑走路が不要で空中停止できるヘリコプターからの空中散布水は非常に有効な消火手段である。しかしながら気象条件や地形特性などの自然環境、および火災規模や延焼速度などの火災状況に対応した最適な散布方法や効果的な消火方法などは未だ明確にされていない。

これまで研究代表者は、複数の送風機と振動翼をアクティブに制御し種々の気象条件を再現できる形式のアクティブ制御乱流風洞の開発を行ってきた。そこで、本風洞を用いて種々の気象条件に対する最適な水散布条件の基礎資料を提供できるものと考え本研究に着手した。

平成11年11月に大分市にて行われた自治省消防研究所(当時)主催の実大規模実験「市街地火災時における空中消火の延焼防止効果に関する研究」に共同研究者として応募者も参加した。本実験にて、実規模における消防ヘリコプターからの散布水性状、散布水の地表面における衝撃度、延焼防止効果等についての基礎データが得られたが、更なるデータを得るためには広大な場所や莫大な予算を必要とするため、以後実大規模実験は行われていない。

そこで、実規模実験より容易にしかも同等の結果が得られる小規模な模型装置を提案し、実規模実験との相似性を検討するための研究を行った。本研究は、平成13年度～14年度および平成19年度～22年度の科学研究費補助金より資金援助を受けている。本研究にて模型ヘリコプターを用いたダウンウォッシュ中における投下物の挙動について支配されている物理法則を明らかにし、実規模実験との相似性を明らかにした。



図1 実機による空中消火実験

また、空中投下水が地表面に落下した際の衝撃度について、模型実験による相似法則の検証を行い、衝撃度の緩和方法について検討した。水塊の崩壊現象の様子を解析し、衝撃度の緩和に寄与する要因を明らかにし、気象条件の違いが空中投下水の挙動に与える影響について明らかにした。

さらに、近年の大規模地震に対する防災意識の高まりを受け、大規模広域火災時の空中消火効果向上に関する研究を進展させる計画である。明らかとなった相似法則に基づいた模型を用いて、火災を模擬した火災中に空中より水を投下することで空中消火効果向上および延焼防止効果向上のための効果的な空中消火方法を提案する。

消防ヘリコプターによる実規模の空中消火実験は、国内では自治省消防研究所(当時)において過去3回の実大規模実験が行われており、また国外においても米国NISTなどにより同様の実験が行われている。しかし、本研究のように気象条件を模擬できる風洞内において模型実験による空中消火に関する研究は、応募者の調べた範囲では見当たらない。

本研究は、研究代表者がこれまで行ってきたアクティブ制御乱流風洞を用いて気象条件を変化させることで、空中投下水の散布水性状を変化させる点に特色がある。鉛直風速分布、乱れ強度、乱渦スケールを変化させて任意の気流変動を再現できるアクティブ制御乱流風洞を用いて、任意の気象条件を風洞内に再現し、空中投下水の散布水性状をシミュレーションできるため、あらゆる気象条件下での再現性の高いデータを得ることが可能である。また、火災を模擬する風洞実験は例があるが火災と空中消火を組み合わせた風洞実験は例がなく独創的である。したがって、本研究により実大規模実験における多大な費用、実験場所、時間と人員等の制約を受けることなく、空中消火に関する基礎資料を提供できるものと期待できる。このため、大規模広域火災時の消火活動指針を構築する際の基礎資料として意義は大きい。

2. 研究の目的

平成23年度は、明らかとなった実規模実験との相似法則に基づいて、木材クリブを用いて単体の模擬家屋を製作し、模擬家屋を燃焼させて温度変化と燃焼過程を把握する。まず、実規模実験にて得られたデータを基に、空中投下水の散布水量、投下回数、投下間隔等を変化させ、実規模実験の再現を行う。次に、実規模実験では、空中投下を繰り返し行ったにも関わらず鎮火に至らなかったため、火災を空中消火のみで鎮火させるための条件を検討する。すなわち、実機のヘリコプターで一度に搬送できる水量には限界があるため、空中投下の投下回数や投下間隔を変化させて、効果的な鎮火方法について検討する。さらに、模擬家屋に予防的に水を空中散布し

た場合に延焼阻止効果について検討する。

平成24年度は木材クリブを用いた単体の模擬家屋について、アクティブ制御乱流風洞を用いて自然風、特に強風下での火災を想定した気象条件の際に、効果的な空中消火方法および延焼阻止効果の向上について検討する。

平成25年度は多数の模擬家屋により、住宅密集地の市街地を再現し、市街地密度と延焼速度の関係と空中消火による効果的な消火方法と延焼阻止方法について検討する。

平成26年度は多数の模擬家屋を用いて、住宅密集地における強風下での火災を想定して、効果的な空中消火方法および延焼阻止方法について検討する。住宅密集度と強風の状況からどの地域に空中消火を行えば効果的に広域火災が鎮火できるのか、延焼を防止できるのか検討する。したがって、大規模広域火災時に強風の影響により延焼が懸念されるような悪条件の場合においても、効果的な空中消火方法を提案することが目的である。

3. 研究の方法

これまでの研究成果で明らかとなった実規模実験の相似法則に基づいて模擬家屋を製作し、模擬家屋を燃焼させて温度変化と燃焼過程を把握する。次に、空中投下水の散布水量、投下回数、投下間隔等を変化させたとき、効果的な空中消火方法について検討する。初年度は単体の模擬家屋について現象を検討するが、次年度以降、住宅密集地の市街地を再現し、市街地密度と延焼速度の関係と空中消火による効果的な消火方法および延焼阻止方法について検討する。さらに、アクティブ制御乱流風洞を用いて自然風、特に強風下での火災を想定した気象条件の際に、効果的な空中消火方法および延焼阻止方法について提案する。

3.1 燃焼実験

安定した自然風を再現できる専用の風洞装置を製作し、自然風下での燃焼状況と温度変化の測定を行った。実験装置の概略図を図2に示す。点火位置は模擬家屋の風上側である。温度は熱電対で計測した。熱電対の位置は、模擬家屋の中央に3点（測定点A：高さ10mm、測定点B：高さ20mm、測定点C：高さ34mm）設置し、測定点Dを点火位置から最も遠い側面の高さ34mmの位置に設置した。模擬家屋は、実規模実験の家屋の大きさの50分の1スケールとした。風洞の送風機には、

表1 空中投下水の投下条件

	条件	SetA	SetB	SetC	SetD
実規模 実験	命中率	25%	25%	50%	50%
	投下間隔	3分	1分	3分	1分
模型 実験	投下回数	20回	20回	10回	10回
	消火期間	80秒	20秒	40秒	10秒

小型ファンを縦3行、横5列の計15個連結したものを使用した。送風機と風洞の連結部には一様な風を送るために、整流格子（奥行500mm）を設置している。風洞部の天井には、水を投下するために四角形（120mm×100mm）の天窗を設けた。送風機の制御にはインバータを使用し、ファンのモータへの入力周波数を変化させることで風速を調整する。ここで、浜田の式(1)を用いて自然風下での炎の傾き角度を一致させ、模型実験における相似則を考慮した風速を算出した。

$$\tan \alpha = \frac{4 \times D}{U^2} \quad (1)$$

ここで、Uは風速[m/s]、Dは物体の風向方向の代表長さ[m]、 α は炎の角度[deg]である。実規模実験の風向方向の長さD1と風速U1を代入すると炎の角度が算出される。模型実験に用いた模擬家屋の風向方向長さD2を代入して風速U²を求めると模型実験に必要な風速の設定条件として、軟風では0.48～0.76m/sとして燃焼時間と燃焼状況、および温度変化を観測し、消火活動を行わない場合の燃焼状態の変化について検証した。

3.2 消火実験

自然風下で燃焼する模擬家屋に水を投下し、温度降下と燃焼状況の観測を行い、消火効果と火災抑止効果を検証した。水の投下には、空中投下水の散布形状と投下水量を考慮した霧吹きを使用した。まず、無風下での実験を行い、次に風洞装置の送風機を駆動して自然風を再現した。軟風と疾風の温度変化は同じ傾向を示したため、ここでは疾風を再現せずに、軟風と強風を再現した。点火と同時に温度の計測を始め、模擬家屋中央の温度が700℃近くに達し家屋の大半が燃焼したら投下条件を変えて水を散布し、4つの測定点の温度が100℃を下回るまで温度変化を計測した。ここで、固体壁と流体の熱伝達に関する無次元数であるスタントン数を一致させるため、式(2)によって散水継続時間を0.17秒と設定して実験を行った。

$$St = \frac{\text{熱伝達}}{\text{蓄積熱}} = \frac{h}{C_p \rho l / t} \quad (2)$$

ここで、hは模擬家屋と投下水間の熱伝達率[W/(m²K)]、C_pは木材の定圧比熱[J/kgK]、 ρ は家屋の平均密度[kg/m³]、lは木材の高さで

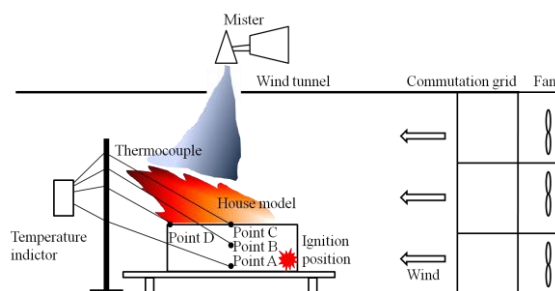


図2 実験装置概要

ある。水を投下する高さは、水投下時のヘリコプター高度を約 25m として、模擬実験では 50 分の 1 の高さである約 50cm とした。空中投下水の投下条件をまとめて表 1 に示す。4 つの投下条件の名称を、それぞれ SetA, SetB, SetC, SetD とする。

3. 3 延焼阻止実験

実規模実験の火災状況を再現するため、木材クリブを用いた模擬家屋を製作し、燃焼させて温度変化と燃焼過程を観測する実験を行った。実験装置の概略図を図 3 に示す。実規模実験の家屋の大きさを基準に 1/50 スケールの小型木材クリブ（縦 144 mm × 横 144 mm × 高さ 36 mm）に木材の床と壁を接着して相似模型を製作した。温度計測はデータロガーに接続した熱電対をステンレス管に通して行った。木材クリブの重量は、実規模実験の中央家屋の火災荷重から換算した可燃材重量が 7.8 t であるから、体積比を考慮し 62.4g とした。ここで、火災荷重とは実際に存在する可燃物量を、同じ発熱量の木材に換算して表現したものである。図 3 に示すように、模擬家屋を点火位置とは反対側の半分に水を含ませておき、燃焼時間、燃焼状況および温度変化を観測する。温度変化を観測する地点は、図 2 に示す ch1 から ch3 の 3ヶ所である。含ませる水の量を変えて同様の実験を行い、含水率による燃焼時間、燃焼状況および温度変化を比較する。含水率 u は以下の式で求めた。

$$u = \frac{W_w}{W_w + W_s} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

ここで、 W_s は家屋模型の乾燥重量、 W_w は家屋模型に含まれた水量である。

4. 研究成果

4. 1 燃焼実験結果

図 4 (a) に無風下、(b) に軟風下での燃焼温度変化のグラフを示す。図 4 (a) より、無風下においては測定点 A, B, C の燃焼温度がほぼ同時に上昇しており、測定点 D の温度が遅れて上昇している。これは点火点からの延焼が鉛直方向でほぼ同時に進行しているためと

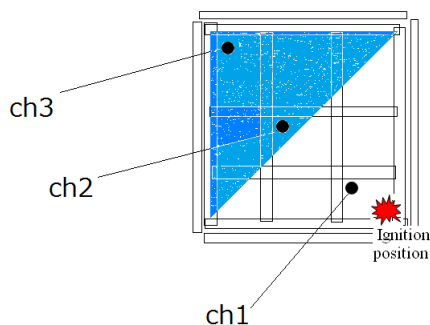
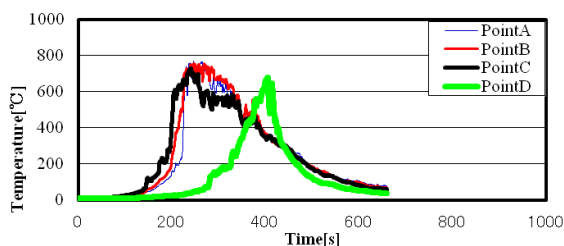
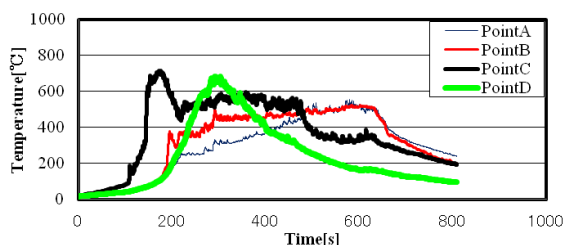


図 3 延焼阻止実験装置

考えられる。一方、図 4 (b) より、軟風下においては、測定点 C の温度が最初に上昇し、測定点 D の温度が次に上昇している。その後、測定点 B および A の順に温度が上昇している。これは、風の影響によって、火災の延焼が上部の火災部分から進行しており、建物模型内部への延焼は上部から進行しているためと考えられる。また、燃焼時間が無風下より約 100 秒以上長くなっている。これは、軟風により適度に酸素が供給され続けるため、安定した燃焼状態が長時間保たれるためと考えられる。

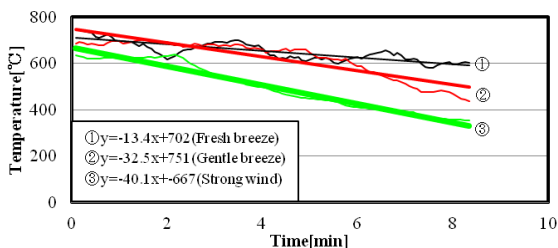


(a) 無風下での燃焼温度変化

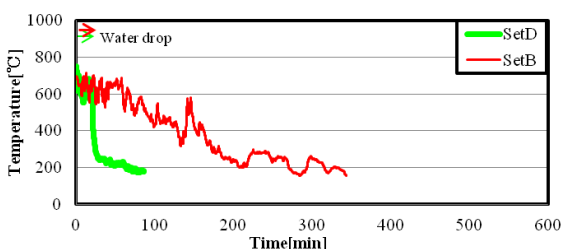


(b) 軟風下での燃焼温度変化

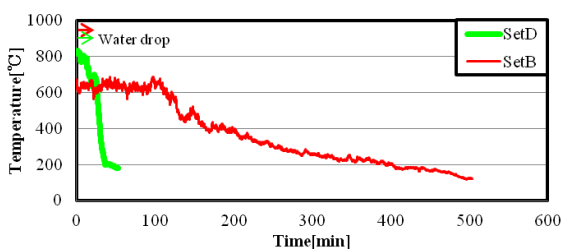
図 4 燃焼実験結果



(a) SetD における温度降下率



(b) 無風下での消火効果の比較



(c) 軟風下での消火効果の比較

図 5 消火実験結果

4. 2 消火実験結果

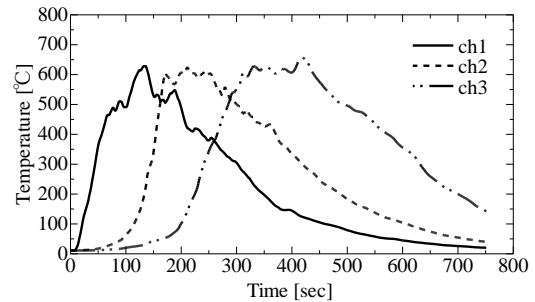
燃焼実験と同様の実験装置を用いて、燃焼する模擬家屋に空中から消火水を投下して消火活動を行った場合の実験結果について図5に示す。図の時間軸は、相似則を考慮して実規模実験に換算して示した。図5(a)は無風、軟風のいずれの風速下でも完全に消火を達成できた空中投下水の投下条件 SetD について、温度低下率の比較を示している。測定点はいずれも温度変化が最も読み取りやすい測定点Cとした。消火活動を行った直後の温度低下率を近似直線より求めると、無風下では $13.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、軟風下では $32.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、強風下では $40.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ であった。以上の結果より、同じ条件で水を投下した場合は、風速が大きい方が温度低下率が大きい、すなわち消火効果が高いことがわかった。

空中から投下水による消火活動を行う場合、より大量の水を数多く投下すると消火効果が高いと予想されるが、航空機を用いた空中からの消火活動を想定すると自ずと条件設定に限界がある。そこで、自然風の影響下においても、空中消火活動によって鎮火できる条件について検証した。航空機による可搬水量は変化できないと想定して、投下間隔と投下水の命中率を変化させた。

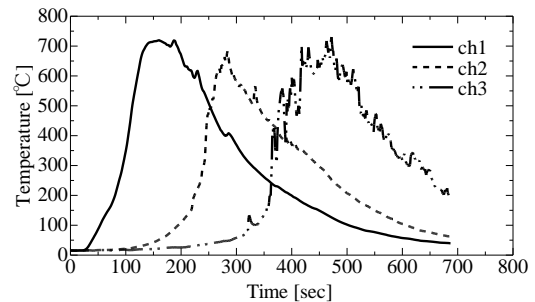
4. 3 延焼阻止実験結果

図6(a)に水を含ませない乾燥状態の家屋を燃焼させたときの温度変化を、(b)~(d)に含水率 20%、29%、37%で行った実験での温度変化をそれぞれ示す。図6(a)より乾燥状態の家屋を燃焼させたとき、着火点に近い ch1 から順に ch2、ch3 と温度が上昇していった。燃え尽きると、徐々に温度が下がっていった。図6(b)~(d)を比較すると、燃焼の最高温度が徐々に減少し、延焼するまでの時間が遅くなっている。図6(c)より含水率 29% では、延焼が水を含ませた範囲に到達すると、一時火炎が弱まったが、しばらくすると再び火炎が大きくなり全焼した。図6(d)より含水率 37% では、延焼が水を含ませた範囲に到達すると火炎が弱まっていき、やがてそれ以上延焼拡大することなく鎮火した。図7に燃焼状態の変化を示す。以上の結果から、含水率 30~37%以上で延焼阻止できることが分かった。また、含水率 30%以下の場合で延焼が阻止できない場合でも、延焼が水を含ませた範囲に到達すると、火炎が一時弱まり延焼時間を遅延させる効果があることが分かった。含水率 30%で延焼阻止が可能であると考え、実規模実験で用いた模擬家屋の場合に必要な水量に換算すると、延焼遮断帯の面積を 21.6m^2 とし、延焼遮断帯の火災荷重を $50\text{kg}/\text{m}^2$ すると、式(3)より、延焼措置に必要な水量は $21.4\text{kg}/\text{m}^2$ となる。実規模実験において、ヘリコプターがホバリング状態で水を投下した場合の散布密度は、約 $50\text{kg}/\text{m}^2$ であったことから、一回の投下で目標面積全体に水を撒くことができる。

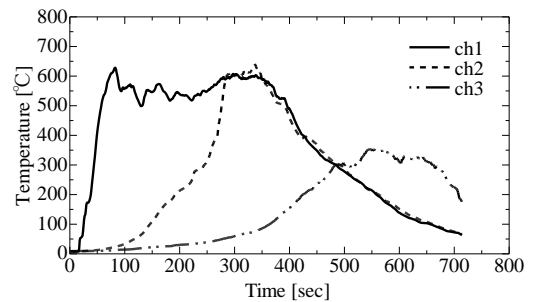
また、延焼遮断帯構築の際には燃焼中の火炎に空中から水を投下する場合より、燃焼前の場所へ水を投下するために投下水の命中率は格段に向上すると考えられる。実際の空中消火では、可燃物に付着した水も時間の経過とともに流下し、一部は蒸発して減少する。これらを考慮すると、延焼遮断帯を構築するためには、延焼がその地点に到達する直前に投下しなくてはならない。また、水を含みやすい木材廃屋や樹木等に繰り返し何度も投下する必要がある。これらの方法を用いれば延焼遮断帯構築が可能であると考えられる。



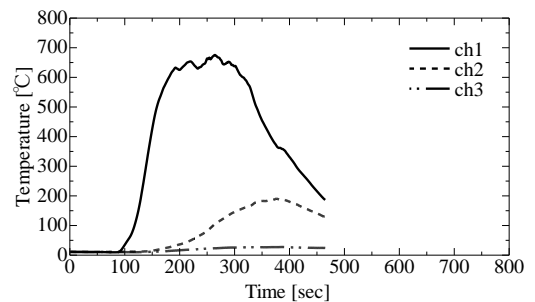
(a) 乾燥状態の燃焼温度変化



(b) 含水率 20% 状態の燃焼温度変化



(c) 含水率 29% 状態の燃焼温度変化



(d) 含水率 37% 状態の燃焼温度変化.

図6 延焼阻止実験結果

4. 4 まとめ

得られた研究成果は以下のとおりである。

(1) 模型ヘリコプターを用いてダウンウォッシュ中における投下物の挙動について支配されている物理法則を明らかにし、実規模実験との相似性を明らかにした。

(2) 相似法則に基づいて製作した模型の火炎中に空中より水を投下することで空中消火効果向上および延焼防止効果向上のための効果的な空中消火方法を提案した。

(3) 空中投下水の散布水量、投下回数、投下間隔等を変化させて効果的な空中消火の条件を求めた結果、1回あたりの散布水量を増やすことが最も効果的であることが明らかとなった。

(4) 道路や耐火建物の両側の建物群や樹林帯、家屋間の樹木等にあらかじめ水を投下することで、延焼遮断帯を構築することが期待される。含水率30%を超えると延焼が阻止され、市街地火災を想定した場合に延焼阻止が期待できることが明らかとなった。

(5) 含水率30%未満においても、火炎が一時的に弱まり、延焼を遅延させる効果があることが明らかとなった。



(a) 点火1分



(b) 点火5分後



(c) 点火8分後

図7 含水率37%状態の燃焼状態

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

① Hironori Kikugawa, Tadashi Konishi and Keita Hirano, Scale Modeling of Air-Dropped Water for Aerial Firefighting Against Urban Fire, Progress in Scale Modeling 2, 査読あり, Vol.2, 2015, pp.293-302.

〔学会発表〕(計6件)

① 菊川裕規, 吉田翔, 空中投下水を模擬した相似模型による延焼阻止効果, 平成26年度日本火災学会研究発表会, 2014年5月28日, 東京理科大学森戸記念館(東京都・新宿区). 査読なし

② Tomoya Sato, Hironori Kikugawa, Nobumasa Sekishita and Yuki Yonezawa, Characteristics of Temperature-fields and Flow-fields in a Heated Street Canyon by Scale Modeling, Seventh International Symposium on Scale Modeling (ISSM-7), 2013年8月7日, 弘前大学創立50周年記念会館(青森県・弘前市). 査読あり

③ Hironori Kikugawa, Takanobu Goto, Yuki Yonezawa, Nobumasa Sekishita and Kazuhiko Toshimitsu, Characteristics of flow and temperature field along a heated street canyon in the multiple-fan turbulence wind tunnel, BBAA7 (7th Bluff Body Aerodynamics and Applications) Colloquium, 2012年9月5日, Jin Jiang Tower, Shanghai (China). 査読あり

④ 菊川裕規, 山崎 賢, 井上靖浩, 相似模型による自然風中での空中投下水の消火効果, 平成24年度日本火災学会研究発表会, 2012年05月21日, 宇都宮東武ホテルグランデ(栃木県・宇都宮市). 査読なし

⑤ 後藤啓伸, 菊川裕規, 関下信正, 乱流風洞による加熱ストリートキャニオンの流れ場および温度場の特性, 日本機械学会九州学生会 第43回卒業研究発表講演会, 2012年3月12日, 佐世保高専(長崎県・佐世保市). 査読なし

⑥ Hironori Kikugawa, Nobumasa Sekishita, Syuichi Hayakawa, Yusuke Higashi and Hideharu Makita, Research on the characteristics of heated street canyons in turbulent wind tunnels, 13th International Conference on Wind Engineering (ICWE13), 2011年7月12日, Amsterdam (Netherlands). 査読あり

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊川 裕規 (KIKUGAWA Hironori)

大分工業高等専門学校・機械工学科
准教授

研究者番号: 70321528