

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 4 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760459

研究課題名（和文）文化財建築物に適用される地震火災対策の実効性向上に関する研究

研究課題名（英文）On the Improvement of Measures for Fires Following Earthquakes Applied to Historical Buildings

研究代表者

樋本 圭佑 (HIMOTO KEISUKE)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：90436527

研究成果の概要（和文）：

本研究では、物理的知見に基づき構築された延焼モデルを利用することで、文化財建築物を地震火災の被害から守るために整備される各種対策の有効性を、定量的に評価する手法の開発を行った。本評価手法では、周辺市街地で発生した火災が評価対象となる文化財建造物に燃え広がるまでの流れをイベントツリーの形で整理し、各事象の発生確率を考慮したモンテカルロシミュレーションを行うことで、市街地における特定の建物の焼失リスクの評価を行っている。さらに、開発した評価手法を利用することで、現行の地震火災対策の課題を整理し、それらの実効性を向上させるための方策を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The evaluation method for the risk of historical buildings located in densely-built urban areas was developed by using the physics-based urban fire spread model formerly developed by the authors. The new method is based on the Monte Carlo Simulation with the variable parameters on ignition following earthquake, fire-fighting activity, structural damage due to seismic motion, and weather. With the new method, effectiveness of measures for fires following earthquake applied to the actual historical buildings was analyzed and the points of improvement were discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：地域安全計画

科研費の分科・細目：都市計画・建築計画

キーワード：歴史的町並み、町並み保全、防災計画、火災安全計画

1. 研究開始当初の背景

文化財建築物を保全することは、わが国の固有の文化を継承する観点から特別な重要性を有している。特に、京都のように木造密集市街地の中に文化財建築物が点在する都市で大規模な地震が発生すれば、併発する市

街地火災により文化財建築物が焼失してしまう危険性が高い。一度焼失してしまった文化財建築物の再建は困難であり、こうした事態を避けるためにも、万全の態勢を整えて地震火災の発生に備える必要がある。

放水銃や可搬ポンプなどの放水機材の利

用を想定した消火活動体制の整備や、ドレンチャー等の散水設備の配置といった「消火系対策」は、文化財建築物の地震火災対策の中でも最も一般的なものとして広く導入が進められてきた。この大きな理由として、建物意匠に及ぼす影響が軽微なため、文化財建築物の文化的価値の保全と火災安全の両立を図る上で、「消火系対策」の採用が効果的であることが挙げられる。しかし、「消火系対策」は、消火活動従事者による手動操作を伴うものが多く、その効果は、従事者の能力などの不確実要因に左右される。また、従来の「消火系対策」の仕様は、定量的な外力を想定して決められたものではなく、具体的にどの程度の火災を防ぐことができるのか、必ずしも明らかになっている訳ではない。以上のような課題については、これまで十分な検討を経ないまま、対策の整備が進められてきた。

2. 研究の目的

本研究では、文化財建築物を地震火災の被害から守るために整備される各種対策の中でも、建物管理者や周辺地域住民による消火活動体制の整備や、ドレンチャー等の散水設備の配備といった「消火系対策」に着目し、これらによる地震火災抑止効果を組み込んだリスク評価手法の開発を行う。さらに、同手法を用いて、実在する文化財建築物の地震火災リスク評価を行い、従来の「消火系対策」の課題を整理すると同時に、その実効性を向上させるための方策を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 地震火災リスク評価手法の開発

研究代表者らは、これまでに、地震火災の物理的延焼性状予測モデル（延焼モデル）の開発を進めてきた。本延焼モデルでは、地震火災を複数の建物火災の集合と捉え、他の建物火災の熱的な影響下における個々の建物の火災性状を予測することで、市街地全体の火災延焼性状の予測を行っている。ここでは、

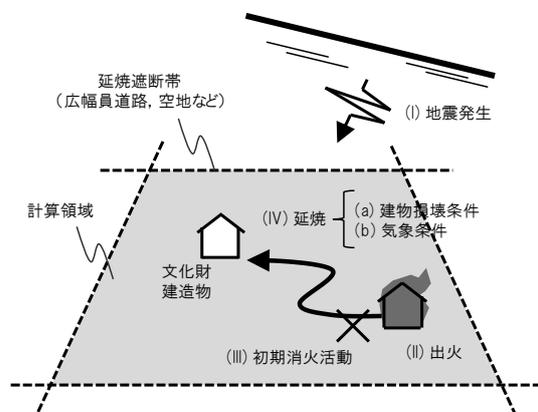


図1 文化財建築物が焼失するまでの流れ

本延焼モデルを活用することで、文化財建築物の地震火災リスクを定量的に評価する手法を開発した。

本研究では、地震による火災の発生から、市街地を火災が拡大し、文化財建築物に燃え移るまでの流れを図1に示すように整理した。すなわち、文化財建造物の被害の発生確率は、「(I) 地震の発生の有無」、「(II) 出火の発生の有無」、「(III) 初期消火活動の成否」、「(IV) 延焼の発生の有無」の4つの排反事象を考え、それらの発生確率の組み合わせから求めることができる。すなわち、「(I) 地震」が発生し (p_E)、周辺市街地で「(II) 出火」が発生し (p_I)、「(III) 初期消火活動」が失敗し (\bar{p}_{FF})、対象となる建造物まで「(IV) 延焼」が発生 (p_S) した場合に、文化財建造物が焼失するものと考えた。ここでは、地震延焼火災によって特定の建物が焼失する確率を焼失リスク R_k と定義することとし、これを文化財建造物が曝されている危険性の尺度とみなす。このとき、焼失リスク R_k は次式より評価することができる。

$$R_k = p_{E,k} \cdot \sum_{i=1}^M [p_{I,i} \cdot \bar{p}_{FF,i} \cdot p_{S,i}] \quad (1)$$

ここで、 k は想定する地震の種別、 i は地震種別 k の下での出火件数、 M は計算領域内で想定される最大の出火件数である。

上式(1)で定義される焼失リスク R_k は、各事象の発生確率を考慮したモンテカルロシミュレーションにより評価する。物理的延焼モデルは、「(II) 出火」が起こり、「(III) 初期消火活動」が失敗した後に発生する延焼火災の拡大予測と、その結果もたらされる文化財建造物への「(IV) 延焼」の発生予測に利用する。ただし、出火件数や出火場所といった「(II) 出火」に関する条件が定まったからといって、市街地火災の延焼性状が一意に決まるものではない。ここでは、建物の火災性状や建物間の火災拡大性状に影響を及ぼす「(IV-a) 地震動による建物損壊条件」と「(IV-b) 気象条件」の各不確実要因を延焼予測計算に反映させることで、文化財建造物への「(IV) 延焼」の発生確率 p_S を評価する。

(2) 地震火災時の消火活動モデルの開発

文化財建築物の「消火系対策」の有効性を検証することを目的として、地域住民が可搬ポンプを利用した場合の消火活動の効果と、沿道に散水設備を設置した場合の火災延焼抑止効果を評価できるように、物理的延焼モデルに改良を加えた。

可搬ポンプの利用については、まず火災室へ散布された水が蒸発する際の物理的 fire 抑制効果に着目し、これを一層ゾーン概念に基づく区画火災性状の基礎方程式へと適

用した。具体的には、(A) 高温の区画内ガスと混合した水分が高温となって蒸発し、潜熱が消費されることで区画内ガスが冷却される効果（区画内ガスの冷却効果）、(B) 蒸発した水分が多量の水蒸気となって気相に放出されることで、区画内の酸素濃度が低下し、発熱速度の低下がもたらされる効果（区画内ガスの希釈効果）、(C) 可燃物表面で水分が蒸発することで温度が低下し、可燃物の熱分解が抑制されることで、燃焼面積の減少がもたらされる効果（可燃物表面の冷却・湿潤効果）、を新たに組み込んだ。また、消火活動にあたる地域住民の行動についてもモデル化を行うこととし、一般に複数棟存在する火災建物のうち実際に消火活動の対象となる建物の選択、当該建物に対する活動開始時間ならびに活動継続時間を併せて予測可能なモデルとした。以上により、出火から、火災覚知、消火活動、鎮火へと至るまでの一連の過程を、当該地域の地域消防力や消防水利等の整備状況を踏まえて予測可能とした。

沿道散水設備については、市街地において炎上している建物から周辺の建物に対して放射伝達される熱エネルギーが、沿道散水により低減される効果を評価することとした。伝達される熱エネルギーの低減率は、被加熱面への散水速度に応じて決定することとし、これまでに実施した部材燃焼実験の結果をもとに値を設定した。

(3) 地震火災対策の実効性向上に関する検討

(1) および (2) で開発したリスク評価手法を、歴史的建造物が集まる町並み（加悦伝統的建造物群保存地区、韓国河回村）に適用した。リスク評価にあたっては、対象地域における住民の防災活動の状況や、利用可能な消火設備・水利の状況を現地調査によって明らかにした上で、地域の実態を反映したリスク評価を行った。ここから明らかとなった火災安全上の課題を解決するため、「消火系対策」を含むいくつかの対策案を示した。さらに、対策実施前後の地震火災リスクを比較分析することで、従来の地震火災対策の実効性を向上させる方策について検討した。

4. 研究成果

(1) 地震火災リスク評価手法の開発

開発したリスク評価手法を用いることで、京都市内にあるいくつかの文化財建造物を対象としたケーススタディを行い、複数の想定地震のもとでの各文化財建造物の焼失危険性について分析を行った。

図2は、計算対象とした京都市東山区内の市街地状況を示したものである。この中には、「八坂神社」、「高台寺」、「法観寺」、「地主神社」、「清水寺」、「六波羅蜜寺」、「建仁寺」といった重要文化財に指定される建造物を所

有する7社寺が立地している。この他にも、重要伝統的建造物群保存地区に指定される産寧坂地区や、独自の町並み保全の取り組みを進める祇園町南側地区などが含まれ、比較的良好に歴史的景観が保全されている。

一方で、これらを取り囲むようにして建ち並ぶ家屋には、防火性能が必ずしも高くはない低層木造が多い。このため、この中のいずれかの家屋で火災が発生すれば、隣接する家屋への延焼が起これり、大規模火災に発展しやすい。京都市第3次地震被害想定では、こうした大規模火災のきっかけとなる地震が、「(A) 花折断層」、「(B) 桃山-鹿ヶ谷断層」、「(C) 宇治川断層」、「(D) 榎原-水尾断層」、「(E) 光明寺-金ヶ原断層」、「(F) 有馬-高槻断層系」、「(G) 琵琶湖西岸断層系」、「(H) 南海・東南海地震」によって引き起こされる可能性があることを指摘している。

モンテカルロシミュレーションの結果得られた文化財建造物の焼失リスク R_k のうち、花折断層を震源とする地震が発生した場合の焼失リスク R_k を比較したものを図3に示す。 R_k の値には大きなばらつきが見られ、最大は六波羅蜜寺の0.101、最小は八坂神社の0.006であった。文化財建造物は、 R_k の低いグループ（八坂神社、高台寺、地主神社、清水寺）と、 R_k の高いグループ（法観寺、六波羅蜜寺、

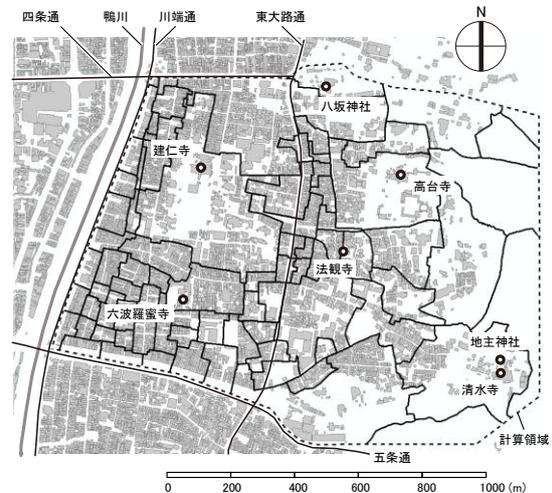


図2 京都市内の文化財建造物の立地状況

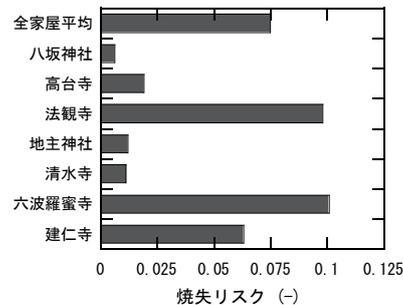


図3 各文化財建造物の焼失リスク

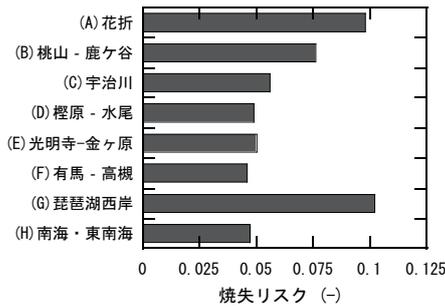


図4 法観寺の焼失リスク

建仁寺)に分けられるが、後者の焼失リスク R_k は、計算領域内の全家屋の平均0.075に比較的近い。このことは、後者に属する文化財建造物が、周辺の家屋と一体的に市街地を形成しており、火災による焼失の危険性を周辺の家屋と共有していることを示しているものと考えられる。

図4は、分析対象とした文化財建造物のうち法観寺に着目し、想定地震が異なる場合の焼失リスク R_k を比較したものである。これによると、「(G) 琵琶湖西岸断層系」の R_k が最も高く、「(A) 花折断層系」、「(B) 桃山-鹿ヶ谷断層系」の R_k がそれに続いている。これらの想定地震は、いずれも基準出火確率 $p_{ign,0}$ が高い部類に属している。しかし、「(G) 琵琶湖西岸断層系」の基準出火確率 $p_{ign,0}$ は「(A) 花折断層系」のそれより低いにもかかわらず、 R_k は最も高い。これは、「(IV-a) 建物被害率」の影響によるもので、「(IV-a) 建物被害率」が大きい「(A) 花折断層系」の場合には家屋形状が変わり、火災延焼が起り難くなっているためと考えられる。また、「(IV-a) 建物被害率」が小さい「(G) 琵琶湖西岸断層系」の場合、「(IV-a) 建物被害率」が大きい「(A) 花折断層系」の場合に比べて消火活動の機能障害は小さいと考えられることから、初期消火に失敗した後の消火活動を考慮しない本検討の下では、焼失リスクが過大に評価されているものと考えられる。

(2) 地震火災時の消火活動モデルの開発

改良を加えた延焼モデルを用いることで、いくつかの火災条件における消火活動の延焼抑止効果を検証した。

まず、同じ形状の2階建て建物が、121棟(東西方向に11棟、南北方向に11棟)、等しい隣棟間隔4mで格子状に並んだ、仮想的な市街地を対象としたケーススタディを行った。ここでは、消火活動の成否を左右する要因として、住民による火災の覚知時間と、消防水利の整備状況を取り上げ、これらの延焼防止上の効果について調べた。例えば、覚知時間が10分の場合に、利用可能な消防水利の数が焼失棟数に及ぼす影響を調べたとこ

ろ、消防水利が多いほど焼失棟数は小さく抑えることができたものの、消防水利が2基以下の場合の焼失棟数は、消防水利がない場合の焼失棟数と大差がなかった。

また、1976年に発生した酒田市大火の再現シミュレーションを行い、計算により得られた延焼動態を、実態調査の結果と比較した。この結果、消火活動は風横方向への延焼抑止に効果がある点など、延焼状況の定性的な特徴を計算により再現することができた。しかし、燃焼領域が小さい段階では、消火活動による延焼抑止効果が過大に評価された。一方、燃焼領域が大きくなってからは、消火活動による延焼抑止効果が過小に評価された。本モデルでは、燃焼領域の風下に形成される熱気流により、消火活動従事者の活動可能区域が制限されるが、これが実際よりも小さく評価されているため、燃焼領域が大きくなってからの延焼抑止効果が過小に評価されたものと考えられる。

(3) 地震火災対策の実効性向上に関する検討

ここでは、開発したリスク評価手法を、歴史的建造物が集まる町並み(加悦伝統的建造物群保存地区、韓国河回村)に適用し、地震火災対策の実効性を向上させるための方策について検討した。

与謝野町加悦地区は、2005年に重要伝統的建造物群保存地区に選定されている。これを受け、同町教育委員会では、2011年度までに地区防災計画の策定を進めており、その一環として火災対策の見直しを進めた。図5は、加悦地区とその周辺の市街地を対象とした火災延焼シミュレーションの計算結果の一例である。加悦地区では、低層の家屋が比較的密に連担して市街地を形成しており、大規模地震時には、広域にわたって延焼火災が発生する可能性が示された。加悦地区では、周辺で火災が発生した場合、消防団を中心に消火活動にあたる体制が整備されているが、地震火災時に使用可能な水利は老朽化しており、場合によっては使用できなくなることが



図5 加悦伝建地区周辺の計算例

考えられる。こうした検討の結果を踏まえ、貯水槽および送水管の耐震化や、地形の高低差をいかした自然流下式放水システムの導入といった対策を提案した。

韓国河回村は、2011年に世界文化遺産に指定された山村集落である。近年は、電気配線の短絡が原因とみられる火災が発生し、出火家屋を全焼するなどしていることから、火災対策の整備が急がれている。河回村では、家屋間の隣棟間隔が比較的広いものの、家屋の約半分が藁葺であり、気象条件によっては、飛び火等による火災延焼の発生が危惧されている。リスク評価の結果によると、集落内で何らかの原因により発生する建物火災に比べ、周辺で林野火災が発生した場合の方が集落全体に及ぼす影響が顕著であることが明らかとなった。しかし、最寄りの消防署からは遠く、火災時の消防隊到着までに30分程度かかることから、地域住民を主体とした消防体制の整備が不可欠であることを指摘した。一方で、住民の高齢化は顕著であることから、文化財ガイドや行政職員の協力も欠かせないものと考えられる。

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 12 件)

1. Himoto K, Tanaka T. A Model for the Fire-fighting Activity of Local Residents in Urban Fires, *Fire Safety Journal* (査読あり), (in press)
(10.1016/j.firesaf.2012.04.006)
 2. 樋本圭佑: 実大火災実験に見る木造建物の火災時倒壊危険性, 火災 (査読なし), Vol.62, No.1, pp.8-13 (2012.2)
 3. 樋本圭佑・田中哮義: 木造家屋群に取り囲まれる文化財建造物の地震延焼火災による焼失リスク, 日本建築学会計画系論文集 (査読あり), Vol.75, No.669, pp.2135-2142, (2011.11)
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/40019051171>)
 4. 樋本圭佑・田中哮義: 京都市内にある文化財建造物の地震火災による焼失リスク, 京都大学防災研究所年報 (査読なし), No.54, Vol.B, pp.1-12 (2011.10)
(<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/151092>)
 5. 豊田祐輔・谷口仁士・樋本圭佑・田中哮義: 東日本大震災に伴う岩手県南部・宮城県北部における文化財被害調査報告, 歴史都市防災論文集 (査読なし), Vol. 5, pp.315-322 (2011.7)
(<http://r-cube.ritsumei.ac.jp/handle/10367/2734>)
 6. 樋本圭佑・原田和典: 屋外からの火災性
7. 西野智研・樋本圭佑・田中哮義: 住民による消火活動を考慮した飛び火現象の確率論的予測モデルの開発, 日本火災学会論文集 (査読あり), Vol.60, No.2, pp.1-10 (2010.10)
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/10027656674>)
 8. 樋本圭佑: 伝統的な建築物と町並みの防火, 建築雑誌 (査読なし), Vol.125, No.1608, pp.44 (2010.9)
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007700945>)
 9. 樋本圭佑・向坊恭介・秋元康男・黒田良・北後明彦・田中哮義: 地震動による建物構造被害と火災加熱による損傷の進行を考慮した地震火災延焼性状予測モデル, 日本建築学会環境系論文集 (査読あり), Vol.75, No.653, pp.543-552 (2010.7)
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/40017226066>)
 10. 横山昇平・樋本圭佑・田中哮義: 建物部材単位の耐火性向上や防災水利整備といった歴史都市に適用可能な延焼火災対策とその評価支援システム, 歴史都市防災論文集 (査読あり), Vol.4, pp.13-20 (2010.7)
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/40017387860>)
 11. 井元駿介・大窪健之・樋本圭佑・田中哮義: 木造文化都市を守る「延焼抑止放水システム (WSS)」の配置計画に関する研究～京都市清水周辺地域での延焼シミュレーションによる評価を通して～, 歴史都市防災論文集 (査読あり), Vol.4, pp.21-28 (2010.7)
(<http://ci.nii.ac.jp/naid/40017387861>)
 12. 樋本圭佑・向坊恭介・山田真澄: 地震災害の統合的被害予測手法の開発に向けた検討, 京都大学防災研究所年報 (査読なし), No.53, Vol.B, pp.1-6 (2010.6)
(<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/129430>)

[学会発表] (計 27 件)

1. 金玖淑・樋本圭佑: 安東河回村の防災計画及び防災対策の運用について—世界遺産・安東河回村の持続可能な保存と活用のための火災安全性評価(その1)—, 日本建築学会関東支部研究発表会報告集 (2012年3月7日) (建築会館, 東京)
2. 金玖淑・樋本圭佑: 安東河回村における地域防災力について—世界遺産・安東河回村の持続可能な保存と活用のための火災安全性評価(その2)—, 日本建築学会関東支部研究発表会報告集(2012年3月7日) (建築会館, 東京)
3. Himoto K, Akimoto Y, Iwami T, Takeichi N,

Yasui N, Hiroi U, Deguchi Y, Nii D, Tsuchihashi T, Performance-based Design of Fire Safety Measure for the Group of Historical Buildings - An Attempt on Preserving Traditional Cityscape Left Behind by the Modernization, Proc. 24th World Congress of Architecture - UIA2011 Tokyo, pp.371-375 (2011年9月26日)(東京国際フォーラム, 東京)

4. 樋本圭佑・田中哮義：木造密集市街地の中に立地する文化財建造物の地震延焼火災による焼失リスク, 日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集 F-1, pp.867-868 (2011年8月23日) (早稲田大学, 東京)
5. 長谷川貴哉・北後明彦・樋本圭佑・田中哮義：震災被災地における防災性能の変化に関する研究 - 1995年と2010年の神戸市長田区周辺地域における延焼リスク評価を通して, 日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集 A-2, pp.243-244 (2011年8月23日) (早稲田大学, 東京)
6. Himoto K, Mukaibo K, Kuroda R, Akimoto Y, Hokugo A, Tanaka T. A Post-Earthquake Fire Spread Model considering Damage of Building Components due to Seismic Motion and Heating of Fire, Fire Safety Science, Proceedings of 10th International Symposium, pp.1319-1330 (2011年6月21日) (米国)
7. 向坊恭介・広瀬大祐・樋本圭佑・水上点晴：炭化による断面欠損を考慮した木造柱の座屈に関する研究, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.346-347 (2011年5月16日) (東京理科大学, 東京)
8. 長谷川貴哉・北後明彦・樋本圭佑・田中哮義：震災被災地における防災性能の変化に関する研究-1995年と2010年の神戸市長田区周辺地域における延焼リスク評価を通して, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.224-225 (2011年5月16日) (東京理科大学, 東京)
9. 樋本圭佑・田中哮義：文化財建造物の地震延焼火災による焼失リスク, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.174-177 (2011年5月16日) (東京理科大学, 東京)
10. 岸本元成・野秋政希・大宮喜文・樋本圭佑・田中哮義：複数室の火災拡大性状に関する研究 その2, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.54-55 (2011年5月16日) (東京理科大学, 東京)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

樋本 圭佑 (HIMOTO KEISUKE)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号 : 90436527

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし