

## 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 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21360291

研究課題名（和文） 都市大地震火災時の住民避難危険評価システムの開発

研究課題名（英文） Risk Assessment System for Residents Evacuation Fires Following A Severe Earthquake in Urban Area

研究代表者

田中 哮義（TANAKA TAKEYOSHI）

立命館グローバル・イノベーション研究機構・教授

研究者番号：70293959

研究成果の概要（和文）：

機構の物理的延焼モデルの計算手法を時間微分方程式をオイラー法で解く方法から、準定常状態に対する代数方程式を解く方法に変更することにより、延焼予測計算の高速化を実現した。被災地域を市街地火災から発生する火災気流による危険度と、避難者が安全な避難場所を志向する心理的志向から構成される非難危険度ポテンシャル場と考える地震火災時住民避難行動モデルを開発した。両者を統合して都市地震火災時の住民避難性状予測モデルを構築した。実務者が、地震火災に備えた住民避難リスクを評価し、また安全対策を講じる上での避難予測を容易に行えるようにするための住民避難危険度評価支援システムを構築した。

研究成果の概要（英文）：

A new urban fire spread model which is greatly improved in computation speed than the existing physics-based urban fire spread model was developed by replacing the method to solve time differential equations for building fire conditions with a method to solve algebraic equations for quasi-steady state of fire conditions. An urban residents evacuation model for post-earthquake fire scenario was developed assuming that a suffered area is a potential field on evacuation hazard which is formed by the hazard level due to fire induced plumes and the psychological orientation to safe refuge of city residents. Combining the two models, a model for predicting urban residents evacuation in case of post-earthquake scenario was developed. A user-friendly support system for assessing urban residents evacuation risk was constructed aiming to help practitioners with predictions of urban residents evacuation in post-earthquake fires.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2010 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011 年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：都市防災計画学

科研費の分科・細目：建築学、都市計画・建築計画

キーワード：地震火災、物理的延焼モデル、広域避難、避難モデル、避難危険度、避難者分布

## 1. 研究開始当初の背景

現在、東南海・南海地震など巨大地震の近

い将来の到来が確実視され、また伴って各地に内陸型の地震が頻発することが危惧され

ている。このような直下型大地震が都市部を襲った場合には同時多発的災害により市街地で多くの大火災が発生する可能性があることは、阪神大震災(1995)、福井地震(1948)、関東大震災(1923)をはじめ多くの事例で示されている。阪神大震災では不幸中の幸いとして、殆ど無風に近い気象条件であったため住民避難上の問題は特に注目されなかったが、低気圧が通過中の強風下で発生した関東大震災では死者だけでも10万人に上った。

現在の都市は過去に比較し建築物の防火性が向上した面はあり、地震火災が生じた場合の潜在的延焼速度は小さくなっているかも知れない。しかし一方で、現在の都市は過去は比較を絶するほど大規模化や高密度化が進行している。また都市内の車両交通量も増大し、道路は通常時の交通を捌くのにほぼ目一杯の状態である。このような状況下で地震火災が発生し、風に吹き倒された煙に市街地が暴露されたら住民の避難はどんな状況になるのか?心配されながら予測する術が無かった。

## 2. 研究の目的

以前は頻発していた都市火災も建物の不燃化や消防力の強化で平常時には極めて低頻度な災害となり、危惧されるシナリオは都市域が大地震に見舞われた時のみに殆ど限定される。しかし、阪神大震災からも窺えるように、通常時の消防力が損なわれたときには未だ大規模都市火災の危険が残存していることは明らかであり、地震火災時の住民避難についても事前の備えが必要である。

現代の都市は、市街地火災が頻発していた当時の都市とは、建物、市街地規模・密度・構成などが大幅に変貌しており、過去の経験は生のままでは参考にならない。本研究では現代の市街地条件の下で、どのような住民避難性状がもたらされる可能性があるかを妥当な精度で予測できる手法を開発し、それを用いて現代の都市に地震火災時の避難上どのような弱点があるかを診断し、またどの程度のリスクがあるかを評価する上で利用可能なツールを開発することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、先ず都市の地震火災に備えた避難施設計画や避難誘導計画を検討するためのツールとして「同時多発性地震火災時の都市避難性状予測モデル」を構築する。このモデルは

- (1) 現代の市街地条件の下での地震時同時多発火災の延焼予測
- (2) 延焼火災からの火災気流による避難経路の危険性評価
- (3) その危険の下での都市住民避難性状の予測

を統合したコンピューターモデルである。

そして、これをコンピューター画面を介したグラフィックインターフェースを通じて、都市の膨大な建物や道路のデータ、気象条件などの入力、計算結果の画像出力などを容易に行える「住民避難危険度評価支援システム」を構築する。

上記(1)の延焼モデルは、研究代表者・分担者等が開発を進めて来た「物理的市街地火災延焼予測モデル」で、従来火災延焼予測に広く用いられてきた「浜田式」と呼ばれる統計的マクロモデルとは全く異なり、火災安全工学技術を応用したモデルである。このモデルは酒田市大火(1976)および阪神大震災(1995)における火災事例と比較することで予測の妥当性を検証し、歴史的地区の延焼火災危険評価などに用いている。下図1は文化財建築が多く混在する京都東山地区市街地を対象とした延焼予測を画像化した例である。

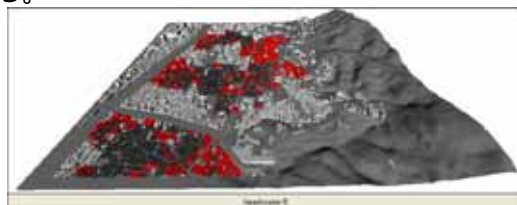


図1 京都・東山地区における延焼予測例

また(2)の避難経路の危険性評価は、地震火災から生ずる熱気流に曝される市街地における温度上昇予測に基づいて避難経路の危険性を評価するものである。そして(3)の都市住民避難は、被災市街地上に火災気流による危険度と都市内の安全な避難場所への都市住民の志向性が総合した避難危険度ポテンシャルを考え、避難者は選択可能な避難経路のうちポテンシャル勾配が最も大きいものを選択して避難するとして予測する。これら(2)、(3)の手法は酒田市大火、函館大火(1934)などを用いて比較、検証しながら関東大震災時の避難性状の再現が試みられるまでのところまで来ている。

上記の都市住民避難モデルにおける避難経路の危険評価の部分には、物理的延焼モデルが開発途上であったため、過去の大火の調査に基づく延焼動態図を用いていた。しかし、将来起こりうる都市地震火災のシナリオでの避難を対象とするのであるから当然延焼予測自体も組み込まなければならない。このためには既存の物理的延焼モデルの計算の高速化が必要となる。

また、「都市大地震火災時の住民避難危険評価システム」が実務的に有効なツールとして利用されるためには、延焼予測や避難性状予測には都市の建築物や道路ネットワークに関する膨大なデータを入力し、計算結果を理解し易く出力する「住民避難危険度評価支

援システム」の構築が必要となる。

#### 4. 研究成果

(1)物理的延焼性状予測モデルの計算高速化  
 物理的延焼モデルは市街地の延焼火災を、周囲の火災建物の火災による熱的影響下で燃焼する建物の集合と考える。図2の概念図に示すように、建物の室を検査体積(ゾーン)として質量、熱、化学種の保存を考えることで火災性状を予測する方程式を導き、これを解く。またこの火災により周囲の建物を受ける影響は輻射熱伝達、熱気流に曝されることによる対流熱伝達、火の粉である。これらの影響により未燃だった建物が着火条件を超えれば延焼し火災建物となる。延焼予測計算では、全ての建物の火災性状予測と周囲建物への影響の計算を時間ステップ毎に繰り返し、市街地に存在する建物の状態、すなわち未燃、燃焼中、燃え尽きを把握する。

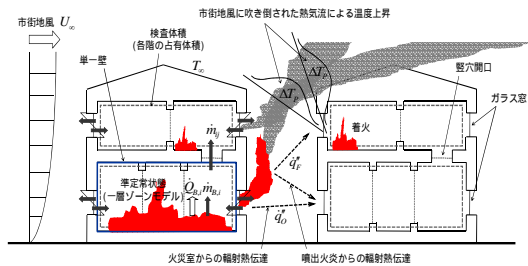
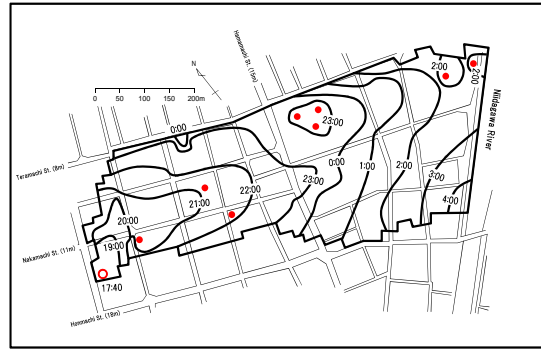


図2 物理的延焼モデルの概念

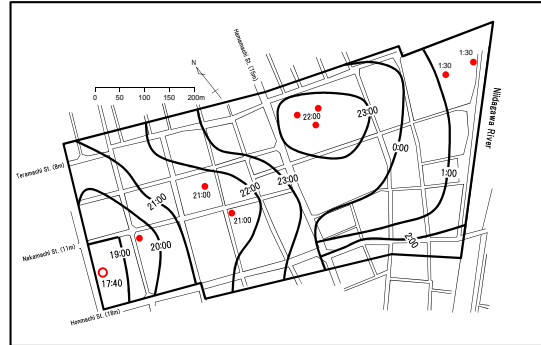
物理的延焼モデルの以前のバージョンでは、建物空間の火災性状を時間微分を含む微分方程式で表し、オイラー法を用いて解いていたが、急激な火災性状に対応するため時間ステップを小さくする必要があったため、計算に時間を要した。本研究ではこれを準定常式に置き換える手法を考案することで計算時間の大幅な短縮を図り、また避難性状予測に用いる延焼モデルに目的を絞ることで必要データの圧縮を図った。既往モデルとの比較を、図3には酒田大火の延焼予測について、また表1にはその計算所要時間について示している。計算速度は100倍以上にも向上した。

表1 既往モデルとの計算速度の比較 -

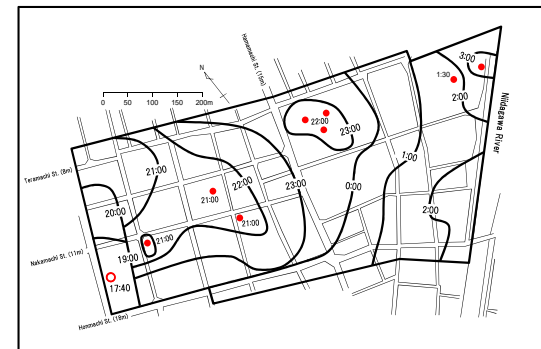
	本モデル	既往モデル
計算時刻	30.0 sec	0.2 sec
焼失建物数/計算対象建物数	1,973/2,158	1,959/2,158
出火から鎮火までの時間	10 hrs 55 min	10 hrs 30 min
時間ステップの合計	1,310	189,000
計算に要した時間	8 sec	1,080 sec
1ステップ計算の平均時間	0.0061 sec	0.0057 sec
確保した情報領域の推計値	11.39 MB	72.52 MB



(a)火災調査報告



(b)今回のモデル



(c)既往のモデル

図3 酒田市大火の延焼 - 調査と予測

#### (2)地震火災時の住民避難性状モデル

関東大地震火災時の避難予測を扱った研究は他にも無かった訳ではないが、避難をブロックする要因は単に火災の延焼のみが考えられていた。しかし、当時の航空写真を見ても市街地は風で吹き倒された火災の煙に広く覆われており、避難者はこの煙に覆われた市街地の中を避難する必要があったに違いない。一方で、上野公園や皇居前広場など火災から安全な避難場所は何十万人もの避難者で溢れた。本研究では、このような火災の煙による危険度の高さや安全な避難場所へ避難したいという心理的志向が被災地域上に避難上のポテンシャルを生じ、避難者はポテンシャル勾配の大きい方へ、すなわち最も早く危険が低下する方へ避難すると考える。図4はこのモデルの概念を示したものである。



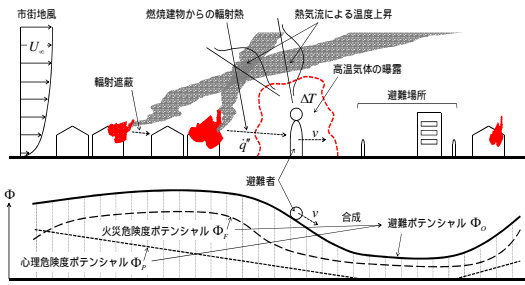
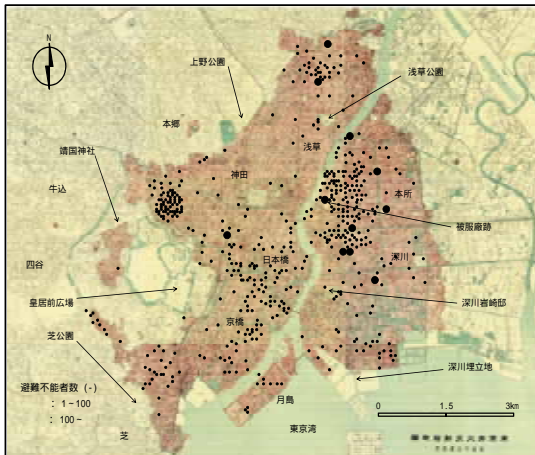
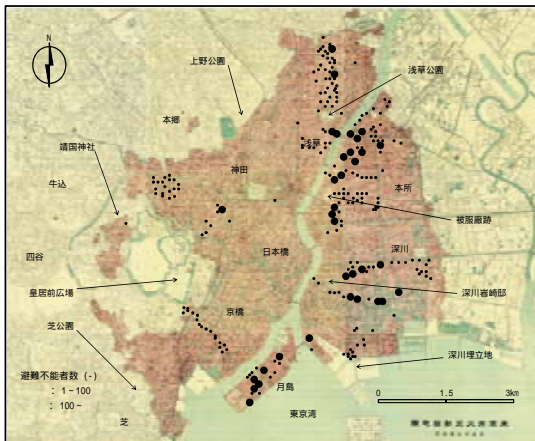


図4 避難危険度ポテンシャルの概念

このモデルを用いて、関東大震災時の死者発生位置を予測と調査報告で比較したものが図5である。予測は日本橋・京橋地区で死者が少なく、本所・深川で多すぎるが、これは当時の避難者分布を住民登録位置（夜間人口）で仮定していること、当時の家屋状況などのデータが乏しいことなどを考えれば止むを得ない誤差であろう。



(a)調査



(b)予測  
図5 関東大震災における死者分布

(3)住民避難危険度評価支援システム

実務者による地震火災の被害想定と、それを踏まえた対策立案を支援可能なツールとして「EQFire & Evacuation 1.0」を開発し

た。この開発においては、対策立案に関する実務者の作業を

市街地条件に関するデータセットの登録シミュレーションを実行する計算範囲の選択

計算モデルによる延焼・避難シミュレーションの実行

延焼動態・避難動態などの予測結果の可視化

対策立案による市街地条件の変更

の過程 ~ を繰り返して受け入れ可能な解を見出す作業と考え、また

- (1) データの入手容易性: 地域によらず標準的に入手可能で、コンテンツの更新が継続的に行われるデータを用いる
  - (2) 経済的制約・ライセンス制約の回避: 複数のオープンソースソフトウェアを組み合わせてシステムを構成
  - (3) 直感的な対策立案: 地図情報を視覚的に編集することで対策を立案できる
- の3点を重視して開発をおこなった。

図6に「EQFire & Evacuation 1.0」の概念を示す。

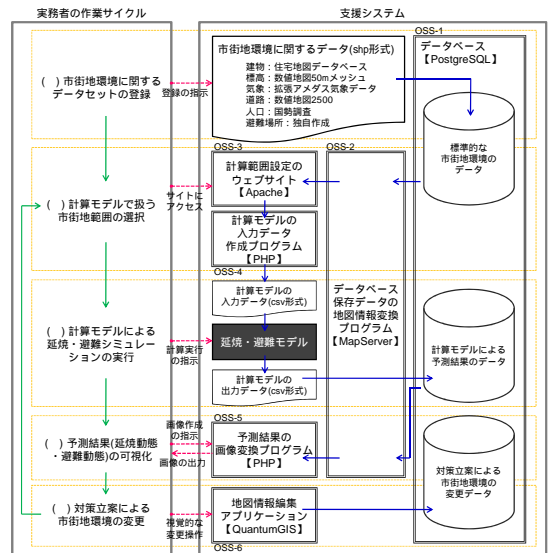


図6 地震火災時住民避難危険度評価システムの概念

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

T. Nishino, T. Tanaka, A. Hokugo, An Evaluation Method for the Urban Post-Earthquake Fire Risk Considering Multiple Scenarios of Fire Spread and Evacuation, Fire Safety Journal, (査読有), 54, 2012, 167-180

木全淳平, 樋本圭佑, 西野智研, 田中哮義, 全国的に整備される統計資料を利用した都市圏内就業者の時刻別空間分布の推定

-平日の京阪神大都市圏を対象としたケーススタディ-, 日本建築学会計画系論文集, (査読有), No.78, Vol.686, 2012, 891-898

Himoto K., Tanaka T., A Model for the Fire-fighting Activity of Local Residents in Urban Fires, Fire Safety Journal, (査読有), Vol. 54, 2012, 154-166

西野智研, 田中哮義, 北後明彦, 市街地避難の性状を支配する不確定要因の影響を考慮した地震火災リスクの評価に関する基礎的検討, 日本建築学会計画系論文集, (査読有), Vol.77, No.676, 2012, 1265-1274

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, (査読有), Vol.75, No.669, 2011, 2135-2142

T. Nishino, K. Himoto, T. Tanaka, Modeling of Recognition Degree of Refuge Areas by Kyoto City Residents in Post-earthquake Fire Event, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Fire Safety Science, (査読有), 2011, 173-185

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, (査読有), 2011, 1319-1330

西野智研, 樋本圭佑, 田中哮義, 地震火災時における住民の避難先選択のモデル化, 日本建築学会環境系論文集, (査読有), Vol.76, No.663, 2011, 469-477

T. Nishino, K. Himoto, T. Tanaka, A Probabilistic Model of Spot Fires in Urban Fire Considering Resident Firefighting, Proceedings of the 8th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, CD-ROM, (査読有), 2010

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, (査読有), Vol.60, No.2, 2010, 1-10

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, (査読有), Vol.75, No.653, 2010, 543-552

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, (査読有), Vol.4, 2010, 13-20

西野智研, 田中哮義, 樋本圭佑, 田中哮義, 準定常的な計算法を用いた都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発 - 地震火災時

の都市住民避難性状の推定に関する研究 -, 日本建築学会環境系論文集, (査読有), No.647, 2010, 9-18

横山昇平, 樋本圭佑, 田中哮義, GISをいた市街地火災延焼リスク評価システムの出力データ管理手法に関する検討, 歴史都市防災論文集, (査読有), Vol.3, 2009, 211-216

西野智研, 田中哮義, 樋本圭佑, 田中哮義, 準定常的な計算による都市火災延焼性状の簡易予測モデルの開発 - 地震火災時の都市住民避難性状の推定に関する研究 -, 歴史都市防災論文集, (査読有), Vol.3, 2009, 5-12

[学会発表](計 20件)

発表者名: 西野智研, 発表表題: 京都市直下型地震を想定した地震火災リスク評価, 学会名等: 日本建築学会, 発表年月日: 2012年9月14日, 発表場所: 名古屋大学(愛知県)

発表者名: 木全淳平, 発表表題: 社会生活基本調査に基づく都市圏内就業者の時空間分布の推定 平日の京阪神大都市圏を対象としたケーススタディ, 学会名等: 日本建築学会, 発表年月日: 2011年8月23日, 発表場所: 早稲田大(東京都)

発表者名: 樋本圭佑, 発表表題: 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, 学会名等: 日本建築学会, 発表年月日: 2011年8月23日, 発表場所: 早稲田大学(東京)

発表者名: 西野智研, 発表表題: 京都市地震火災を想定した住民の広域避難シミュレーション, 学会名等: 日本火災学会, 発表年月日: 2011年5月22日, 発表場所: 東京理科大学(東京)

発表者名: 岸本元成, 発表表題: 複数室の火災拡大性状に関する研究 その1 模型実験, 学会名等: 日本建築学会, 発表年月日: 2010年9月9日, 発表場所: 富山大学(富山)

発表者名: 木全淳平, 発表表題: 平日の京阪神都市圏における就業者人口の時空間分布推定, 学会名等: 日本建築学会大会, 発表年月日: 2010年9月9日, 発表場所: 富山大学(富山)

発表者名: 横山昇平, 発表表題: 歴史的市街地に適用可能な建物部材スケールの延焼火災対策評価支援システム, 学会名等: 日本建築学会大会, 発表年月日: 2010年9月9日, 発表場所: 富山大学(富山)

発表者名: 西野智研, 発表表題: 地震火災時避難場所に対する京都市住民の認知度の推定に関する研究, 学会名等: 日本建築学会, 発表年月日: 2010年9月9日, 発表場所: 富山大学(富山)

発表者名: Kimata J, 発表表題: A Day-long Spatio-temporal Distribution of

Commuters in Kyoto-Osaka-Kobe Metropolitan Area, 学会名等: International Symposium on City Planning 2010, 発表年月日: 2010年8月29日, 発表場所: 奈良女子大学(奈良) 発表者名: Imoto S, 発表表題: A Study on Installation planning of the "Water Shield System"-an Area-wide Water Discharge System for Protecting Historical Wooden City from Post-Earthquake Fire Spread, 学会名等: International Symposium on City Planning 2010, 発表年月日: 2010年8月29日, 発表場所: 奈良女子大学(奈良県) 発表者名: Himot K., 発表表題: Burn-down Risk of Designated Historical Buildings in Kyoto City under an Expected Post-Earthquake Fire Scenario, 学会名等: International Symposium on City Planning 2010, 発表年月日: 2010年8月29日, 発表場所: 奈良女子大学(奈良) 発表者名: T. Nishino, 発表表題: Evacuation Simulation of City Residents in Large-scale Urban Area in Post-earthquake Fire Scenario, 学会名等: International Conference on Emergency Preparedness, 発表年月日: 2010年9月, 発表場所: Birmingham(UK) 発表者名: Himoto K, 発表表題: A Model for Post-Earthquake Fire Spread Considering the Damage of Structural Members Concurrently Caused by Seismic Motion and Heating of Fire, 学会名等: Interflam 2010, 発表年月日: 2010年7月6日, 発表場所: Nottingham University (UK) 発表者名: T. Nishino, 発表表題: Evaluation of the Fire Safety Performance of Kyoto City in Post-earthquake Fire Scenarios, 学会名等: 12<sup>th</sup> INTERFLAM, 発表年月日: 2010年7月6日, 発表場所: Nottingham University (UK) 発表者名: Himoto K, 発表表題: Burn-down Risk of Historical Buildings in Kyoto under an Expected Post-Earthquake Fire Scenario, 学会名等: 10th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, 発表年月日: 2010年6月8日, 発表場所: Renaissance Seattle Hotel (USA) 発表者名: T. Nishino, 発表表題: Evacuation Behavior of over 10<sup>6</sup> Residents in Post-earthquake Fire Scenarios in Kyoto City, 学会名等: 10th International Probabilistic Safety

Assessment & Management Conference, 発表年月日: 2010年6月8日, 発表場所: Renaissance Seattle Hotel (USA) 発表者名: 西野智研, 発表表題: 飛び火現象の確率論的予測モデルに関する数値計算的考察, 学会名等: 日本火災学会, 発表年月日: 2010年5月18日, 発表場所: 北海道大学(北海道) 発表者名: T. Nishino, 発表表題: Validation of the Potential-based Evacuation Model of City Residents in Post-earthquake Fire, 学会名等: International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, 発表年月日: 2010年3月, 発表場所: Gaithersburg(USA) 発表者名: T. Nishino, 発表表題: Development of a Physics-based Model for Fire Spread in a Large-scale Urban Area Consisting of Over 10<sup>5</sup> Buildings, 学会名等: 9th IIASA-DPRI Conference on Integrated Disaster Risk Management, 発表年月日: 2009年10月, 発表場所: 京都大学(京都府) 発表者名: 西野智研, 発表表題: 準定常的な計算による建物火災性状の簡易予測モデルの開発, 学会名等: 日本建築学会, 発表年月日: 2009年8月27日, 発表場所: 東北大学(宮城)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 哮義 (TANAKA TAKEYOSHI)  
立命館グローバル・イノベーション研究機構・教授  
研究者番号: 70293959

### (2) 研究分担者

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

西野 智研 (NISHINO TOMOAKI)  
神戸大学・工学(系)研究科・助教  
研究者番号: 00609894

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

### (3) 連携研究者

円谷 信一 (TSUBURAYA SHINICHI)  
三菱重工(株)・神戸造船所・原子力プラント設計部・開発設計課