

## 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 5 月 31 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2013

課題番号：22510176

研究課題名（和文）避難信頼性解析に基づく大規模集客施設の防災計画再設計システムの開発

研究課題名（英文）Development of disaster prevention planning re-design system of large-scale customer gathering facilities based on evacuation reliability analysis

研究代表者

白木渡（SHIRAKI WATARU）

香川大学・工学部・教授

研究者番号：30032288

研究成果の概要（和文）：本研究では、緊急事態で効果を発揮する「Live Design（救命設計）」の考え方、及び避難者の複雑な挙動を把握可能な「セルオートマトン（CA）」手法、さらに避難者間の情報交換が可能な「マルチエージェント（MA）」手法を導入して、以下の3事業を行った。①市販のパソコンで利用できる「避難シミュレーションシステム」の開発。②開発したシステムを「都市高速道路」、「地下街」、「大規模公園」の大規模集客施設に適用して、各施設の既存の防災対策マニュアルの再構築、避難誘導計画の再設計。③再設計された避難誘導計画に基づいた実践的な防災教育・避難訓練方法の提案。

研究成果の概要（英文）：“Live Design” is an effective concept in an emergency. “Cellular automata (CA)” technique is a simulation procedure that can reproduce complex behavior of the evacuee. “Multi agent (MA)” technique is a simulation procedure that can reproduce the information exchange between evacuees. In this study, evacuation simulation systems using the concept of Live Design, CA and MA were developed. And existing countermeasures manuals and the evacuation conduct plans for large-scale customer gathering facilities such as “Urban expressway”, “Underground shopping center”, and “Large-scale parks” were restructured using the developed simulation systems. Practicing disaster prevention education and the method of the evacuation drill based on a new evacuation conduct plan were proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：複合新領域

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：①防災計画再設計、②大規模集客施設、③避難信頼性解析、④セルオートマトン法、⑤マルチエージェントシステム

## 1. 研究開始当初の背景

不特定多数の人々が数多く集まる大規模集客施設（鉄道駅、空港、病院、学校、地下街、劇場、競技場、ショッピングセンター、レジャーランド、公園、高速道路など）、施

設設計上は想定外に当たる巨大地震や突発的なテロ攻撃を受けた場合、ニューヨークの貿易センタービルの大惨事が繰り返されることになる。既存の防災対策マニュアルではこのような想定外の事態へは対応不能であ

る。しかし、巨大地震（東海、東南海、南海地震）の発生が、今後 30 年以内に 50~80% の高い確率で発生することが危惧されており、また最近の犯罪・テロ事件の傾向を見ると放火や爆弾・生物化学テロの発生がいつ起きても不思議ではない状況にある。この現状を踏まえると、人々の安全確保はもちろん、地域の重要施設の事業継続という観点から、大規模集客施設の防災対策の見直し・再構築は不可欠であり、重要かつ緊急の課題である。

## 2. 研究の目的

緊急事態で効果を発揮する「Live Design (救命設計)」の考え方、及び避難者の複雑な挙動を把握可能な「セルオートマトン (CA)」手法、さらに避難者間の情報交換が可能な「マルチエージェント (MA)」手法を導入して、市販のパソコンで利用できる「避難シミュレーションシステム」を開発する。そして、開発したシステムを従来の防災計画では対応不能な事態の発生が危惧されている「都市高速道路」、「地下街」、「大規模公園」の大規模集客施設に適用して、各施設の既存の防災対策マニュアルの再構築、避難誘導計画の再設計を行う。さらに、再設計された避難誘導計画に基づいた実践的な防災教育・避難訓練方法を提案する。

## 3. 研究の方法

本研究では、これまで検証の困難との理由で、被害想定、防災対策、避難誘導等の危機管理対応がなされて来なかった3つの大規模集客施設「都市高速道路」、「地下街」、「大規模公園」を対象として、避難シミュレーションシステムを活用して既存の防災対策を再設計するシステムを開発し、実践的な防災・減災教育・訓練方法を提案する。具体的には、以下の4つの研究項目を実施する。

- 1) CA と MA による大規模集客施設の避難シミュレーションシステムの構築
- 2) 大規模集客施設の避難安全解析・避難信頼度評価
- 3) 大規模集客施設のハード・ソフト性能評価と避難性能マトリックスの作成
- 4) 防災対策・避難誘導計画の再設計と実践的防災教育・訓練方法の提案

以下に本研究において導入した概念、手法に関して概説する。

### (1) Live Design

従来の防災の考え方は、大地震のように予想困難な大災害に対し、建物や構造物自体の耐震性能を向上させて被害の軽減を図るというものである。しかし、アメリカ・ニューヨークで発生した同時多発テロに見られるように、最新の防災設備が整っているはずの世界貿易センタービルにおいてさえ多数の死傷者の発生を防げなかった。この事件を契

機に、米国コロンビア大学の Dasgupta 教授により、テロや大地震のように予想困難な大災害に対しては、建物の被害軽減を図るだけでなく、災害発生時に IT 技術を効果的に活用し、Live (リアルタイム) で情報収集を行い、その情報をもとに最適な避難経路の確保および避難経路への誘導を行って人的被害の軽減を図るというソフト防災の考え方が提唱された。

Live Design による防災の主な観点は、

- 1) 災害時の安全性の確保
- 2) 災害時の情報伝達方法の検討
- 3) 事前防災教育の実施

が挙げられる。これらを考慮しハード防災だけでなく減災というソフト防災の観点からも構造物の設計、維持、管理の在り方を考えるのが Live Design である。

### (2) CA (セルオートマトン)

CA は空間的なセルの離散的な格子で構成されており、各セルは、有限な状態の1つを有し、以前の時間ステップにおける状態と近傍の状態、ならびに遷移規則によってその状態を変化させる。

CA の特徴を以下の 1)~8) に示す。

- 1) 空間的に離散である。
- 2) 時間的に離散である。
- 3) 離散状態をとる。
- 4) セルの均一性。
- 5) 同期的な状態更新。
- 6) 決定論的な規則。
- 7) 空間的に局所的な規則の適応。
- 8) 時間的に局所的な規則の適応。

### (3) MAS の概要

MAS (Multi-Agent System) とは、自律した複数の主体が相互に依存しあうシステムであり「エージェント」と「環境」から構成される。エージェントは自律した行動主体であり、環境はエージェントに影響を及ぼす対象である。高速道路における避難行動においては、個々の避難車両が持つ行動特性により、様々な避難行動が出現する。それらの相互作用により、全体的な避難行動が決定されると考えられる。そこで、避難車両・避難者等をエージェント、周辺の空間を環境と考え、MAS でモデル化することによって、避難行動全体に及ぼす影響を把握することができる。そこで本研究では、MAS を用いて高速道路における避難行動をモデル化する。

### (4) 避難信頼度

避難信頼度も性能設計体系のもとに整理されるのが望ましい。2001 年 4 月に土木学会から刊行された「環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン」は、設計において経済性や安全性、使用性、施工性、環境負荷、景観などの要求機能や要求性能を階層構造で定義したものである。避難に関わる信頼性は

前述の安全性に属すると考えられるが、この安全性は主にハード面での性能、例えば、地震の大きさに対する設計のレベルなどを示すものであり、防災教育により避難時間が短くてすむ、あるいは事前の防災対策により緊急対応がうまくいくなどのソフト面での性能は含まれていない。そこで本研究では、要求すべき性能として避難信頼性を付加した対応を検討する。

本来、安全性に関する性能 (Rs) は、式(1)に示すように、ハード面の性能 (R1) とソフト面の性能 (R2) の両者により議論されるべきであると考えられる。

$$R_s = f(R_1, R_2) \quad (1)$$

ハード面の保有性能、例えば耐震性が高ければ避難に対して要求される時間が長くなり、避難信頼度が向上する。また、ソフト面での性能、例えば、緊急時対応の充実、防災教育・訓練の実施などが高ければ避難時間を短くできるので避難信頼度が向上する。このように、ハード面での信頼性が高くない場合でもソフト面での信頼性を向上させることによって施設の安全性を確保できるし、重要な施設はハード面の性能のみならず、ソフト面でも高い性能を確保することで施設のより高い信頼度が確保できる。そこで、避難信頼度 (避難信頼性) の定義では、ソフトな性能とハードな性能の両方を考慮する。避難信頼度  $P_e$  は、避難完了時間  $T$  (確率変数) が避難要求時間  $T_R$  以下になる確率として、式(2)で定義される。

$$P_e(T < T_R) = FT(T_R) \quad (2)$$

ここに、 $FT(\cdot)$ :  $T$  の累積分布関数で、避難シミュレーションにより求める。

施設の場合、避難安全検証法では、排煙設備や排煙窓の有無、扉の防煙性能、天井高さ、給気口、内装仕上げ材の種類、床面の段差なども避難時間に影響するとしている。また、避難信頼度を避難完了時間で定義した理由は、以下の通りである。

- ・緊急時は人命保護が最優先と考える場合、全員の避難が無事完了した時点で避難信頼度は100%とする考え方は受容されやすい。
- ・ハード面での対策、例えば施設の耐震化が図られ、耐震性能が向上すれば、部材が損傷を受けても倒壊するまでの時間が長くなり、避難に費やすことができる時間 (避難要求時間) が長くなる。
- ・事前に防災教育を実施する、あるいは出口までの標識の設置などを行えば、避難がスムーズに進行し、避難完了時間が短くて済む。一方、施設に存在する人数が極端に多くなった場合は、避難がスムーズに進行しない可能性が高くなり、避難完了時間は長くなる。このように、避難完了時間を用いれば、定量化が困難とされてきたソフトな防災対策についてもその効果を定量化できる。

#### (5) 避難性能マトリックス

シミュレーション等により避難信頼度が算出されると図-1に示すハード面の信頼性とソフト面の信頼性の2種類の指標による避難性能マトリックスを用いることにより、施設等の避難における多段階の状態において信頼性を評価可能なる。

例えば、ハード面の信頼性を施設の耐震性能 (現行の耐震基準をどの程度満足しているか等) とソフト面の信頼性を避難に関わる要因 (事前防災教育の有無、案内標識の設置程度等) によりランク分けを行い、施設等の現状、避難信頼度をマトリックス上にプロットすることにより、施設の避難性能を評価することが可能となる。

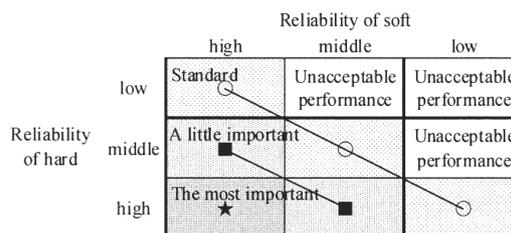


図-1 避難性能マトリックス

図-1から明らかなように、耐震性能が低い場合でもソフト面での避難対策がなされていけば、標準レベルに位置づけられる。一方、ハード面で十分な耐震性能を有しておれば、ソフト面での信頼性が低くても避難完了までの時間が十分に確保できるものと考えられる。以上のように、対象施設のハード面とソフト面での避難信頼度が算出できれば、マトリックス上へプロットが可能となり、合意形成等に活用できる。

#### 4. 研究成果

##### (1) CA・MAによる避難シミュレーションシステムの開発

本研究において開発した避難シミュレーションシステムの例として図-2にCAを用いた大規模公園の避難シミュレーションシステムの例、図-3にMAを用いた都市高速道路の避難シミュレーションシステムの例を示す。

これらの避難シミュレーションシステムを用いることにより、状況を変化させ避難者・避難車両数、避難時間等を推定することが可能であり、施設等における避難安全解析・避難信頼度評価に活用できる。さらに、避難者の行動に関するルール、地図、施設等のシミュレーション対象に合わせた環境を準備する事により、他の都市高速道路、大規模集客施設に対してシミュレーションを実施することが可能である。



図-2 大規模公園の避難シミュレーションシステム

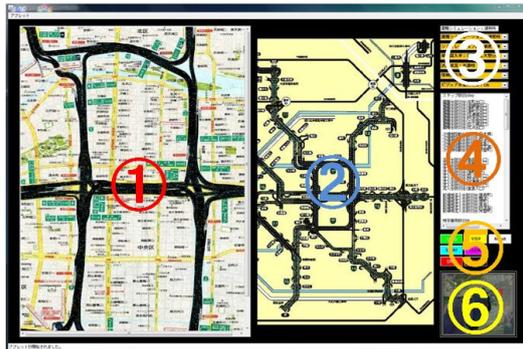


図-3 都市高速道路の避難シミュレーションシステム

(2) 避難シミュレーションシステムを活用した避難信頼度評価および避難性能マトリックス

開発した避難シミュレーションシステムを地下街に適応し、避難信頼度の評価および避難性能マトリックスを作成した事例を示す。

シミュレーションの対象とした地下街の面積は、約 2,300 m<sup>2</sup>であり、時間帯により避難者の数と属性を変化させ、どの時間帯が避難時に危険となるかの検証を行った。シミュレーションに設定する人数を閑散時は 200 人、混雑時は 800 人とし、その中間として 400 人、600 人を設定する。避難者属性は、通常(normal)、追従(subordinate)、遅延型(slow)の 3 種類を設定した。

避難信頼度は、避難時間  $t_{\text{escape}}$  における避難率を本シミュレーションに用いる避難信頼度と定義する。ここでいう避難率は、避難完了人数を初期状態の避難人数で除したものである。また、避難人数が変わると、 $t_{\text{escape}}$  も変わるため、時間を無次元化表示した。

避難信頼性性能評価マトリックスは、避難人数と属性の割合について、high, middle, low の 3 段階のランクに分類する。表-1 に避難人数のランク分類基準、表-2 に属性の割合のランク分類基準、表-3 にシミュレーションから得られた避難信頼度、図-4 にシミュレーションの対象とした地下街の避難性能マトリッ

クスを示す。なお、その他、シミュレーション条件、ルール等の詳細に関しては、〔雑誌論文⑤〕を参照いただきたい。

表-1 避難者数によるランク

	High	Middle	Low
Evacuation number	800, 600	600, 400	400, 200

表-2 避難者属性の割合によるランク

	High	Middle	Low
normal	100%, 75%	75%, 50%	50%, 25%
subordinate	75%, 50%	50%, 25%	25%, 0%
slow	50%	25%	0%

表-3 避難信頼度のランク

evaluation sign	evacuation reliability
◎	0.70~
○	0.65~0.70
△	0.60~0.65
×	~0.60

normal	High	Middle	Low
High	◎	○	△
Middle	○	○	△
Low	○	○	○

subordinate	High	Middle	Low
High	△	△	○
Middle	○	○	○
Low	○	○	○

slow	High	Middle	Low
High	×	△	○
Middle	×	△	○
Low	△	○	○

図-4 避難性能マトリックス

図-4 の避難性能マトリックスから、避難人数と属性の割合において、通常型の割合が高ければ、避難人数に無関係に避難信頼性が高い。しかし、通常型の割合が低くなるに従って、避難人数による影響が出始める。また、避難人数が少なくなるに従って、避難信頼性が高くなる傾向にあることが分かる。

(3) 防災対策・避難誘導計画の再設計と実践的防災教育・訓練方法の提案

東日本大震災以降、従来の防災対策・避難誘導計画に代わり、その有効性が着目されている危機管理対策として、企業における事業継続計画 (Business Continuity Plan) の策定が進められている。そこで、本研究では開発した避難シミュレーションシステムを活用した、防災対策・避難誘導計画の再設計と実践的防災教育・訓練方法として、高速道路における BCP 策定支援の事例として緊急車両の走行路確保に関する事例を示す。

研究対象とした高速道路事業者の BCP においては、3 時間以内に「状況の把握」を実施することを目標とし、必要な交通規制、残存車両の避難誘導、負傷者救護等の実施が示されている。これらを実施するために、緊急車両等により高速道路本線上のパトロールによる状況把握・点検を実施し、残存車両や被

害状況を把握することとしている。そのため、緊急通行車両が被災後に迅速な点検を可能にするための対応策を検討しておく必要がある。そこで、シミュレーションを用いて、地震による事故車両もしくは道路破損等の被災状況と渋滞状況を再現し、迅速な点検を可能にするための対応策について検討を行う。なお、対応策は、情報掲示板や車載ラジオ等を通じた災害情報発信について検討し、対応策の評価指標は、式(3)に示す緊急通行車両が走行するための車道(緊急車道)の交通密度  $Dt$  を考慮し、対応策の有効性を検証する。

$$Dt = Cz / Dr \quad (3)$$

式(3)において、 $Cz$  は時刻  $t$  における緊急車道の残存車両数、 $Dr$  は緊急車道の総距離である。また、 $Dt$  の評価については、表-4 の被災箇所数の差異を考慮した2ケース、さらにケースごとに(1)情報発信なし、(2)情報発信ありの2パターンを考慮し行った。シミュレーションの設定条件を以下に示す。

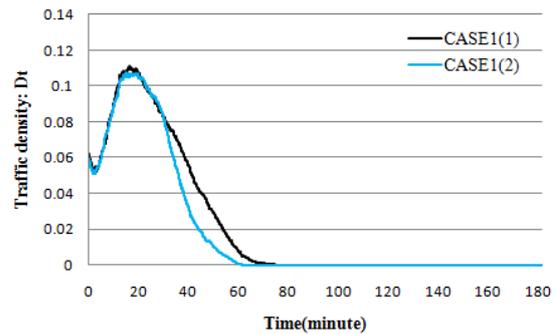
- ・災害発生：シミュレーション開始と同時
- ・被災箇所：ランダムに決定
- ・災害情報の発信：災害発生から30分後
- ・流入制御：災害発生から10分後
- ・発信対象：残存車両の30%
- ・緊急車道：追い越し車線(総距離10km)
- ・車両混入率：普通車95%, 大型車5%
- ・初期車両エージェント数：2000台
- ・2次災害の発生：考慮しない
- ・時間帯：交通量の多い夕方時を想定
- ・平均流入車両数：2400台/h
- ・シミュレーション回数：各ケース10回ずつ

なお、車両の行動ルール等の詳細に関しては、[雑誌論文④]を参照いただきたい。

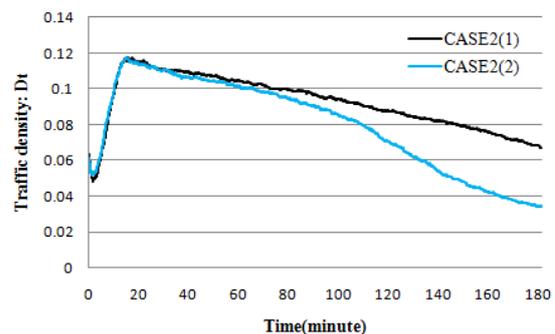
表-4 シミュレーション条件

	Number of the suffering point	Transmission of disaster information
CASE1(1)	1	Not transmitted
CASE1(2)	1	Transmitted
CASE2(1)	10	Not transmitted
CASE2(2)	10	Transmitted

図-5に各ケースにおける  $Dr$  の推移状況を示す。被災箇所が1箇所では災害情報発信を実施したCASE1(2)については、情報発信後に  $Dr$  の値が急激に減少し、発信から60分後には  $Dr$  の値は0となり、緊急車道が完全に確保されたことが分かる。情報発信を実施しなかったCASE1(1)についても、流入制御を実施した効果により、 $Dr$  の値が徐々に減少し、被災から約80分後に緊急車道が確保されているが、CASE1(2)と比較すると20分程遅い事



(a) CASE1



(b) CASE2

図-5 シミュレーション結果

が確認できる。

また、被災箇所が10箇所のCASE2についても、情報発信を実施することにより、実施しない場合よりも  $Dt$  の現象速度が速いことが分かる。しかし、3時間経過後においても、 $Dt$  の値は0になっておらず、緊急車道は完全に確保されていない。シミュレーション実行時の様子を確認すると、被災箇所が増加することで渋滞が発生しやすくなり、災害情報を車両が受信しても、流入車線に向かう移動が行えないことが主な原因であった。

以上の結果から、1箇所では事故車両が発生した場合では、災害情報発信処理は緊急通行車両用の車道確保に効果的であり、阪神高速道路BCPにおいて3時間以内の実施を目標としている状況把握点検を迅速に実施可能になることを本シミュレーションで検証できた。一方で、複数の被災箇所が発生した場合については、災害情報を発信しても、緊急車道の完全な確保は困難であることが判明した。渋滞の発生が常態化している環状線では、実際に大規模な地震が発生した場合、車両の急な減速等により複数の車両事故が発生する可能性が高いと予測されている。そのため、高速道路管理者は、その被災状況においても、迅速に状況把握点検を実施可能にする対応策を提案する必要がある。

以上のように、本事業において、CA と MA による大規模集客施設の避難シミュレーションシステムを開発し、大規模集客施設の避難安全解析・避難信頼度評価および大規模集客施設のハード・ソフト性能評価と避難性能マトリックスの作成し 防災対策・避難誘導計画の再設計と実践的防災教育・訓練方法の提案を行った。今後の課題としては、シミュレーションの精度の向上、シミュレーションの利便性の向上が挙げられる。

#### 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 9 件)

- ①山脇正嗣、白木渡、井面仁志、保田敬一、都市高速道路の災害時交通シミュレーションの開発と事業継続計画策定への活用、安全問題研究論文集、査読有、Vol.5、2010、55-60
- ②保田敬一、白木渡、井面仁志、山脇正嗣、MSS を考慮した高速道路の安心性能に関する基礎的研究、安全問題研究論文集、査読有、Vol.5、2010、49-54
- ③山脇正嗣、白木渡、井面仁志、保田敬一、災害時交通シミュレーションを利用した都市高速道路の BCP 策定に関する一考察、第 25 回信頼性シンポジウム講演論文集、査読無、2010、136-141
- ④山脇正嗣、白木渡、井面仁志、保田敬一、都市高速道路の BCP 構築支援シミュレーションシステムに関する基礎的研究、JCOSSAR 2011 論文集、査読有、7、2011、384-390
- ⑤山脇正嗣、白木渡、井面仁志、保田敬一、交通シミュレーションを活用した都市高速道路上の救命活動支援に関する一考察、材料、査読有、61、2012、141-147
- ⑥保田敬一、寅屋敷哲也、伊藤則夫、白木渡、堂垣正博、セル・オートマトンによる地下街の避難信頼性評価に関する一考察、材料、査読有、61、2012、125-132
- ⑦保田敬一、白木渡、井面仁志、山脇正嗣 高速道路の安心性能向上に関する基礎的研究、土木学会論文集 F6 (安全問題)、査読有、67、2012、I\_161-I\_166
- ⑧山脇正嗣、白木渡、井面仁志、保田敬一、交通シミュレーションを活用した都市高速道路 BCP 策定支援に関する研究、土木学会論文集 F6 (安全問題)、査読有、67、2012、I\_95-I\_100
- ⑨Hitoshi Inomo, Wataru Shiraki, Keiichi Yasuda, Masashi Yamawaki, PROPOSAL OF TSUNAMI MEASURES IN URBAN EXPRESSWAYS BY SIMULATION, The 7th China-Japan-Korea Joint Symposium

on Optimization of Structural and Mechanical Systems, 2012, CD-ROM(7p)

[学会発表] (計 6 件)

- ①井面仁志、白木渡、政策策定のための土木/交通シミュレーション、材料学会信頼性部門委員会、2010 (招待講演)
- ②山脇正嗣、白木渡、井面仁志、川上順子、保田敬一、都市高速道路を対象とした避難シミュレーションシステムの開発、日本材料学会第 59 期学術講演会、日本材料学会、2010
- ③松原雄三、白木渡、井面仁志、高潮災害時の避難シミュレーションデータベースシステムの構築と活用、平成 22 年度土木学会四国支部技術研究発表会、土木学会、2010
- ④山脇正嗣、白木渡、井面仁志、保田敬一、災害時交通シミュレーションを利用した都市高速道路の BCP 策定に関する一考察、第 25 回信頼性シンポジウム、日本材料学会、2010
- ⑤井面仁志、白木渡、山脇正嗣、保田敬一、シミュレーションを活用した都市高速道路における津波対応策の提案、日本材料学会第 61 期学術講演会、日本材料学会、2012
- ⑥井面仁志、白木渡、松原雄三、長谷川修一、野々村敦子、高潮・津波災害予測シミュレーションに基づく避難情報提供システムの開発、第 26 回信頼性シンポジウム、日本材料学会、2012

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

白木渡 (SHIRAKI WATARU)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：30032288

(2) 研究分担者

井面仁志 (INOMO HITOSHI)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：90294735