

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20310096

研究課題名 (和文) 市民の安全と都市機能確保のための多様な水害対策に関する研究

研究課題名 (英文) Study on various flood countermeasures for human safety and urban function management

研究代表者

戸田 圭一 (TODA KEIICHI)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70273521

研究成果の概要 (和文)：

実物大の階段・通路模型、車模型を用いて水害時の避難限界指標を作成した。統合型の都市水害モデルを用いて内水氾濫時の地下浸水解析を行い、避難限界指標を援用して地下空間の避難困難度ゾーンマップを作成した。小・中規模地下空間の浸水時の危険性も明らかにした。また内水氾濫解析と交通量解析を結びつけ、内水氾濫時の道路交通障害を評価できる手法を開発した。さらに都市水害対策として、地下空間を有効活用した治水施設の有効性を確認した。

研究成果の概要 (英文)：

We conducted evacuation experiments using full-scale staircase, passage and car models and studied the critical evacuation conditions. We analyzed underground inundation due to heavy rainfall and drew underground hazard maps based on the evacuation difficulty. Through the analysis, the danger of small underground space was made clear. Also, we developed a method which can predict traffic difficulties caused by urban inundation. In addition, through the wide investigation, we found that underground storage and tunnel systems are very effective to reduce urban inundation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	8,800,000	2,640,000	11,440,000

研究分野：防災水工学

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：都市水害、水害対策、地下浸水、内水氾濫、道路交通障害、避難、地下貯留施設

## 1. 研究開始当初の背景

内水氾濫・外水氾濫を問わず、都市域の水害「都市水害」が頻発している。

都市水害時には、地下空間や道路のアンダーパスが浸水して人命が奪われるような痛ましい事故が発生する危険性がある。また、

浸水のあおりによるライフラインの麻痺や都市交通の障害が、長時間にわたって市民の生活に大きな混乱をもたらす可能性も危惧される。このような都市水害の「怖さ」と「やっかいさ」に対してどう備えるか、また実際に起こったときにどう対応するかという都

市水害の「事前」「渦中」「事後」の対策が重要な課題であると考えられている。

これらの対策の重要性は認識されているものの、まだまだ概念的な話にとどまっているものが多く、定量的、具体的な議論が十分とはいえない状況であった。洪水氾濫の予測技術の研究成果を都市水害対策に結びつけることが喫緊の課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、都市水害を時系列でとらえ、その事象をつぶさにシミュレーション解析するとともに、都市水害が仮に発生したとしても、人の命をまもり、また都市機能の低下を最小限に抑えるための、多様できめ細かな都市水害対策を考えていこうとするものである。大きく、以下の3項目に分けられる。

- ・統合型都市水害モデルの高度化を進めるとともに、モデルを援用して都市水害事象の詳細を把握する。
- ・地下空間と道路のアンダーパスを主な対象域とし、都市水害モデル解析結果と避難限界指標をもとに、水難事故から市民をまもるためのハード・ソフト対策を提案する。
- ・都市水害発生時の交通障害に代表されるような浸水による混乱を軽減するための、総合的な水害対策について検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 地下空間を含む都市の水害モデルの高度化と危険度評価への適用

①地上の氾濫解析モデルと地下街空間の浸水モデルを統合して、豪雨による内水氾濫時に地下街内の浸水を詳細に予測できる手法を開発した。非構造格子を用いた平面二次元氾濫解析モデルと貯留槽をもとにした地下空間の浸水解析モデルを統合したモデルを神戸市三宮地区と三宮地下街に適用し、市販の下水道・内水氾濫解析ツールと平面二次元の地下街浸水解析モデルを統合したモデルを、大阪梅田地区と梅田地下街に適用した。モデルの概念図を図-1に示す。

②地下空間のスケールが浸水時の危険度に応じたような影響をもたらすかを検討するために、貯留槽を基にした地下空間の浸水解析モデルを用いて、地下室、小・中規模ビルの地下空間の浸水解析を実施した。

(2) 実物大の階段・通路・車模型を用いた避難限界指標の策定と避難対策への提言

①地下浸水を想定し、図-2に示すような実物大の階段・通路模型を用いて、高齢者の浸水時の避難限界を明らかにする実験を行った。男子学生の被験者の身体に特殊な器具を装着して高齢者を模した状況をつくりだした。実験では、階段上部の水槽からの越流水深が

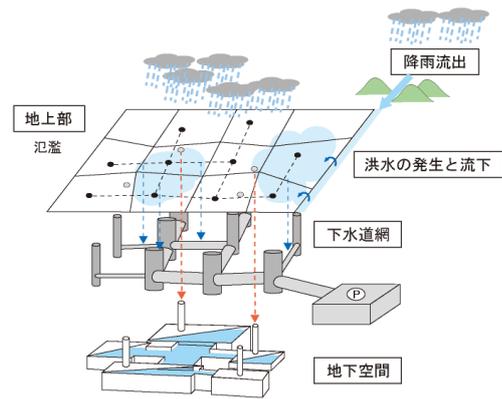


図-1 統合型モデルの概念図

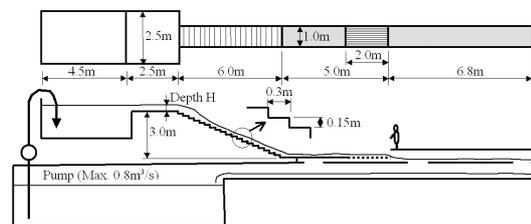


図-2 実験に用いた階段・通路模型



写真-1 階段部での避難実験の様子

地上氾濫時の水深に相当し、その水深を変化させて避難限界について検討した。実験の様子を写真-1に示す。

②内水氾濫時に、鉄道や道路高架下のアンダーパスや地下駐車場で浸水した車から避難するという事態は十分起こりえることであり、浸水した車からの脱出がどれほど困難かを明らかにするために、実物大の模型を用いた体験型の避難実験を行った。

写真-2のような水位を調節できる水槽の横に実物大の車を設置して、車内に水が入らないという条件の下で、様々な水深に対して被験者が車から脱出する際の難しさについて実験的に検討した。実験の様子を写真-3に示す。



写真-2 実物大の車模型と水槽



写真-3 車からの避難実験の様子

### (3) 都市部での内水氾濫時の道路交通障害予測と交通障害軽減対策

京都市域を対象に浸水時の道路交通の混乱の程度について考察し、またその結果をもとに交通障害軽減対策について検討した。

平常時の解析では、実測された OD データを用い、実際の道路状況に応じて設定した道路リンクの交通容量と走行時間などをもとに時間帯別の交通量配分を行い、交通量・混雑度・いくつかの地点間の所要時間を算出した。次に平面二次元の内水氾濫解析によって算出された浸水深分布に応じて、道路リンクの交通容量と走行時間を変化させ、平常時と同じ OD を仮定して同様の交通量配分を行った。そして両者で、道路の混雑度や地点間の所要時間を比較することにより、道路交通障害の程度を定量的に求めた。解析の手順は図-3 のとおりである。

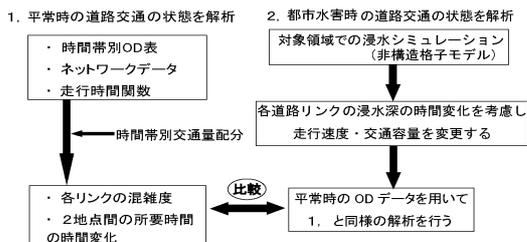


図-3 解析の手順

### (4) 地下空間を有効活用した治水対策施設の調査

都市水害の防止・軽減策として地下空間を有効活用した構造物による対策が進められている。地上での河川整備の制約が大きい状況にあって、それらへの期待は大きい。

今後、治水面で地下空間をいっそう有効活用することを想定し、地下の治水施設の事例について系統的、総合的な文献・資料調査解析を実施し、その現状や課題を分析した。また行政関係者への聞き取り調査も実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 地下空間を含む都市の水害モデルの高度化と危険度評価への適用

①統合型モデルを神戸市の三宮地区および三宮地下街に適用した。2005年の東京都神田川流域での短時間の大雨(3時間の総降雨量220mm以上)が対象領域に様に降ったとし、地下への入口では止水板を設置する時間的余裕がないとした条件下では、地下街にも浸水が拡がり、部分的には水深が20cmを越える箇所も見られた。

また大阪市の梅田地区ならびに梅田地下街では、時間雨量146.5mmを記録した2008年の愛知県岡崎市の豪雨が降ったとの条件で解析したところ、内水氾濫水が地下街に流入し、広域で浸水が発生する結果となった。また、解析で得られた浸水深と後で述べる高齢女性を対象とした避難限界指標を援用して試案的な避難困難度のゾーンマップを作成した。この種のマップは、浸水時の地下空間避難計画を策定するうえで有用なものとなる。

解析結果より、地下浸水の避難計画策定時に考慮すべき点は以下のとおりである。

- ・地上と地下街をつなぐ階段は多く存在しており、またどのように浸水するかは条件により異なってくる。利用者である避難者はどこが危険か把握していないので、地下街管理者は円滑に誘導できるように、管理エリア内、雨水排水機能の脆弱箇所を熟知しておくことが大切である。
- ・規模の大小に関わらず、地下街にはビルや地下鉄などが隣接しているため、利用客が多い。浸水が始まるまでの避難が必須であり、避難は短時間で進むなければいけない。利用客が分散し、出入口に停滞することがないように避難計画が重要である。

②小・中規模の地下空間として、仮想の地下室と、2種類のオフィスビル(Sビル、Nビル)の地下をとりあげて浸水解析を行った。想定した地下室は1辺15m四方、床面積225m<sup>2</sup>で、Sビルは小規模オフィスビルで地下2階建、床面積941m<sup>2</sup>、Nビルは中規模オフィスビルで地下2階建、床面積は5840m<sup>2</sup>である。Nビル

の地下1階には駐車場のスペースがある。

短時間豪雨による浸水時の避難困難度を三宮地下街と比較して検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・地下室は水深が急激に上昇するため、非常に短時間で、ドアが押し開けられない、または通路を歩けない状況となる。
- ・オフィスビルも短時間で危険となるが、とくに階段部での避難限界の影響で地下2階の危険度が高い。なお、Nビルの床面積はSビルの約6倍であるが、地下駐車場スロープからの流入量が多いため、危険度は同程度となったことから、地下駐車場には十分な注意が必要である。
- ・小・中規模地下空間では、出入口に止水板や段差を設置することが重要である。また、浸水対応の複数の避難経路設定が望まれる。

(2) 実物大の階段・通路・車模型を用いた避難限界指標の策定と避難対策への提言

①地上が氾濫し、地下への出入口を通じて地下空間が浸水した場合を想定し、階段・通路模型を用いた実験を行った。流水中を避難する体験実験結果に基づき、階段と通路部の避難困難度を統一の指標で評価する新たな指標として「比力」の使用が妥当であるという結論に達した。この「比力」は、流水から受ける力と水圧の両者を考慮できる指標である。ここでは、比力の単位幅あたりの大きさを用いており、流れの速度を  $v$ 、水深を  $h$ 、重力加速度を  $g$  とすると、単位幅比力  $M$  は、 $M=v^2h/g+h^2/2$  と表わされる。実験結果から、成人男性は、単位幅比力が  $0.125m^2$  を超えると安全な避難が困難となることがわかった。

わが国では高齢化が進んでおり、水害による被害者に占める高齢者の割合も増加しつつあることから、地下空間浸水時の高齢者避難の検討も必要と考え、高齢者体験セットを用いた避難体験実験を行った。その結果、高齢者（男性）は単位幅比力が  $0.100m^2$  以上になったとき安全な避難が困難になることがわかった。これらの結果をまとめたものが図-4であり、避難時の水深と流速を指標として安全な避難が可能な条件を提示することができた。なお、この指標は、地下空間の避難

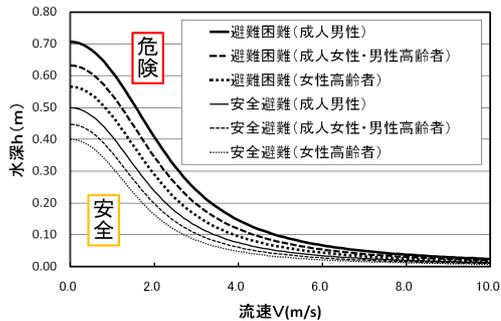


図-4 安全に避難できる水深と流速の関係

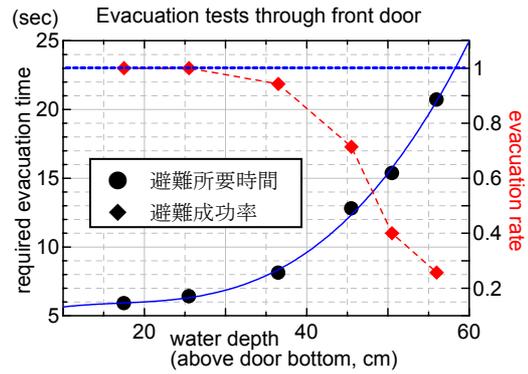


図-5 避難所要時間と避難成功率  
(横軸：水深、左縦軸：避難所要時間、右縦軸：避難成功率)

のみではなく、地上の浸水時や河川等の水難事故に関する安全性の指標としても適用可能である。

②実物の自動車を利用した避難体験実験を行った。水深が増加するにつれて、水没した自動車のドアに作用する水圧が増大し、押し開けが困難になる。さらに、座位での押し開けであり、立位に比して発揮できる力は小さくなる。図-5は35名の体験者による運転席ドアからの避難実験結果をまとめたものである。図の横軸は、ドア下を基準とした水深であり、これに32cmを加えると路面からの水深となる。路面からの水深が80cmを超えるとドアの押し開けが困難になることがわかる。なお、水没した車から何とか避難したとしても、水深の大きい条件下での避難を考えると、その後の歩行避難も難しい。

今回の実験結果をうけて、浸水時のアンダーパスへの車の侵入防止対策とともに、緊急避難に向けてドライバーの自助意識を向上させる必要がある。

(3) 都市部での内水氾濫時の道路交通障害予測と交通障害軽減対策

下水道や地下空間への浸水、詳細な地目特性を考慮した非構造格子モデルによる氾濫解析と時間帯別交通量配分を組み合わせることにより、内水氾濫の発生箇所や発生時刻に応じたかたちでの道路交通障害の予測を可能にした。対象とした京都市域で1999年の福岡水害時なみの短時間豪雨があった場合の解析結果を示す。図-6に内水氾濫時の混雑度を、図-7にいくつかの地点間での車両の移動時間の変化の様子を示す。市中で混雑する道路が増える様子が窺われる。また南北方向で地点間の所要時間も増加する。

また、短時間豪雨の発生時間帯によって道路交通障害の程度が異なってくることも明らかとなった。なお、モデル解析をとおして、道路交通障害対策の一つと考えられるアン

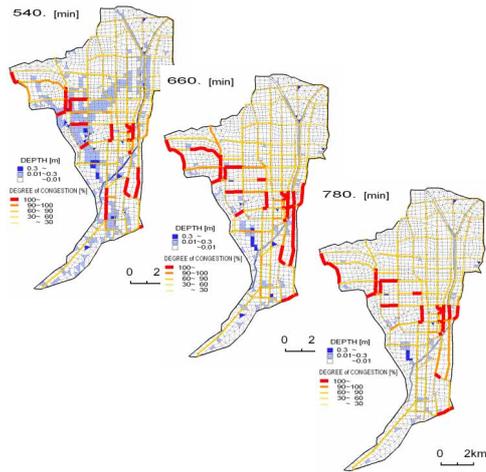


図-6 内水氾濫時の混雑度

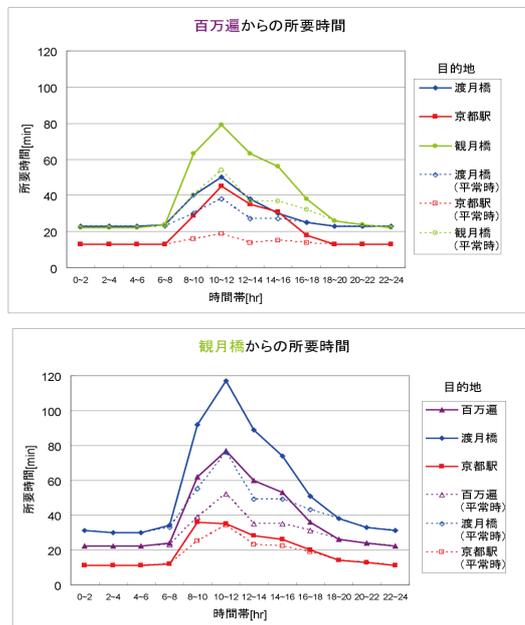


図-7 市内の2地点間の所要時間の変化

ダーパス部の排水能力増強策については、最大浸水深発生時の道路交通障害の軽減には有効でないものの、それ以降に継続する障害の軽減には有効であるとの知見も得られた。

#### (4) 地下空間を有効活用した治水対策施設の調査

都市水害のハード的な被害軽減策として、河川整備に加えて、雨水の一時貯留および放水路を通じての排水などの対策が講じられており、高度に都市化した地域では、地下空間を有効活用した雨水貯留施設、放流施設の設置事例が多数見られることが確認された。

調査の結果、地下治水施設のタイプは、大きく以下のように分類することができた。

(a) 流下タイプ：河川や幹線下水道のパイパ

スの機能を有するもの。

(b) 調節池タイプ：河川や幹線下水道へ流入する雨水流量を貯留し、調節するもの。

(c) 流出抑制タイプ：流域の雨水を貯留・浸透させて、雨水の河川や下水道への流出を抑制するもの。

上記の(a)に属するものとして、地下河川、地下放水路、下水道幹線(の新設)などがある。(b)に属するものには、幹線道路や公園、駐車場などの公共用地の地下を利用した大小様々な調節池がある。また流下タイプの施設の建設途中段階のものもこれに含まれる。(c)に属するものとして、学校の校庭や公園を利用するものがあり、また小規模な施設として雨水貯留槽や雨水浸透施設などがある。このような雨水貯留施設等については、工事費用の一部補助制度が設けられている自治体もあることがわかった。

大阪寝屋川流域や名古屋市などで、この10年間で調節池タイプの雨水貯留施設の設置事例が増加しており、内水氾濫対策に地下空間の積極的な活用が図られ、効果をあげていることが明らかとなった。また大阪府下の事例では、道路の立体交差事業にあわせて地下調節池が整備されているものも見られた。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 23 件)

① 戸田圭一：短時間豪雨と都市水害 — その特徴と対策 —、月刊推進技術、査読無、Vol. 25、No. 3、2011、pp. 4-7。

② 森兼政行、石垣泰輔、尾崎平、戸田圭一：大規模地下空間を有する都市域における地下空間への内水氾濫水の流入特性とその対策、水工学論文集、査読有、第 55 巻、2011、pp. S\_967-S\_972。

③ 井上知美、川中龍児、石垣泰輔、尾崎平、戸田圭一：内水氾濫による大規模地下街の浸水過程と避難の安全性に関する検討、水工学論文集、査読有、第 55 巻、2011、pp. S\_973-S\_978。

④ 川池健司、清水篤、馬場康之、中川一、武田誠：下水道を含めた氾濫模型実験による内水氾濫解析モデルの検証、水工学論文集、査読有、第 55 巻、2011、pp. S\_985-S\_990。

⑤ 高橋祐樹、石垣泰輔、馬場康之、戸田圭一：浸水した大規模駐車場からの避難に関する検討、地下空間シンポジウム論文・報告集、査読無、第 16 巻、2011、pp. 141-146。

⑥ 馬場康之・戸田圭一・実広拓史：地下に設置された治水対策施設に関する調査研究 (その 2)、地下空間シンポジウム論文・報告集、査読無、2011、pp. 147-152。

⑦ Asai, Y., Ishigaki, T., Baba, Y. and Toda, K.: Safety analysis of evacuation routes considering elderly persons during underground flooding, Journal of Hydro-

science and Hydraulic Engineering, 査読有, Vol.28, No.2, 2010, pp.15-21.

⑧ 中畑佳城、石垣泰輔、島田広昭、戸田圭一：可搬式ドア模型による浸水時避難体験実験と参加者の水防意識について、水工学論文集、査読有、第54巻、2010、pp.913-918.

⑨ 馬場康之、戸田圭一、実広拓史、井田隆久：地下に設置された治水対策施設に関する調査研究、地下空間シンポジウム論文・報告集、査読無、第15巻、2010、pp.133-140.

⑩ 深草新、戸田圭一、宇野伸宏：内水氾濫時の京都市域の道路交通障害予測、京都大学防災研究所年報、査読無、第52号B、2009、pp.673-681.

⑪ Onishi, Y., Ishigaki, T., Baba, Y. and Toda, K.：Criterion and its application for safety evacuation during underground flooding, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 査読有, Vol.27, No.1, 2009, pp.83-88.

⑫ 戸田圭一、馬場康之：水に強い都市・街を目指した取り組み、都市計画、査読無、No.278、2009、pp.45-48.

⑬ Kotani, K., Hirato, Y., Ishigaki, T., Shimada, H., Toda, K. and Horii, K.：Biomechanical analysis of walking through a hallway under flooded conditions, Journal of Physiological Anthropology, 査読有, Vol.28(1), 2009, pp.23-28.

⑭ 馬場康之、石垣泰輔、戸田圭一、中川一：水没した自動車からの避難に関する実験的研究、水工学論文集、査読有、第53巻、2009、pp.853-858.

⑮ 浅井良純、石垣泰輔、馬場康之、戸田圭一：高齢者を含めた地下空間浸水時における避難経路の安全性に関する検討、水工学論文集、査読有、第53巻、2009、pp.859-864.

⑯ 川池健司、中川一、今井洋兵、下水道を含めた氾濫模型実験による内水氾濫解析モデルの検証、水工学論文集、査読有、第53巻、2009、pp.859-864.

⑰ 戸田圭一、山本大介、米山望、大塚健太：地下空間スケールに着目した地下浸水の危険性について、地下空間シンポジウム論文・報告集、査読無、第14巻、2009、pp.153-158.

⑱ 深草新、戸田圭一、宇野伸宏：内水氾濫に起因する道路交通障害予測に関する研究、河川技術論文集、査読有、第14巻、2008、pp.223-228.

[学会発表] (計12件)

① 戸田圭一：地下空間の水害リスクマネジメント、2010年度日本建築学会大会(北陸)構造部門(応用力学)パネルディスカッション「建物のトータルリスク管理に向けて」、2010年9月9日、富山大学五福キャンパス.

② 戸田圭一：小・中規模地下空間の浸水時

の危険性に関する一考察、平成22年度土木学会全国大会、2010年9月2日、北海道大学札幌キャンパス.

③ 馬場康之：実物大模型による地下浸水時の避難体験実験の展開、平成22年度土木学会全国大会、2010年9月2日、北海道大学札幌キャンパス.

④ 戸田圭一：都市水害時の課題-市民の安全と都市機能の確保-、第14回関西大学先端科学技術シンポジウム、2010年1月29日、関西大学千里山キャンパス.

⑤ 戸田圭一：京都の街の都市水害、日本自然災害学会オープンフォーラム、2009年9月28日、メルパルク京都.

⑥ 馬場康之：地下空間を有効活用した治水対策施設の事例調査、平成21年度土木学会全国大会、2009年9月3日、福岡大学七隈キャンパス.

⑦ 石垣泰輔：可搬式ドア模型を用いた地下空間浸水時の安全避難に関する実験的検討、平成21年度土木学会全国大会、2009年9月3日、福岡大学七隈キャンパス.

⑧ 石垣泰輔：浸水体験実験による高齢者の地下空間避難困難度の検討、平成20年度土木学会全国大会、2008年9月10日、東北大学川内北キャンパス.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

戸田 圭一 (TODA KEIICHI)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：70273521

### (2) 研究分担者

石垣 泰輔 (ISHIGAKI TAISUKE)  
関西大学・環境都市工学部・教授  
研究者番号：70144392  
宇野 伸宏 (UNO NOBUHIRO)  
京都大学・大学院経営管理研究部・准教授  
研究者番号：80232883  
米山 望 (YONEYAMA NOZOMU)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号：90371492  
川池 健司 (KAWAIKE KENJI)  
京都大学・防災研究所・准教授  
研究者番号：10346934  
馬場 康之 (BABA YASUYUKI)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号：30283675

### (3) 連携研究者

小谷 賢太郎 (KOTANI KENTAROU)  
関西大学・システム理工学部・教授  
研究者番号：80288795