

## 第6部

### 特集6 減災オープンプラットフォームARIA

廣井 慧、篠田 陽一

---



---

#### 第1章 はじめに

---



---

減災オープンプラットフォームARIAは、WIDE project発のサイバーフィジカルシステムである。我々はサイバーフィジカルシステムの重要な要素技術として、シミュレーション・エミュレーション連携技術を掲げ、世界各地で頻発する水害リスクを削減する、減災オープンプラットフォームARIAの開発を行っている。ARIAは、個別に運用されているシミュレータやシステムを、融合させてひとつのシステムとして運用するプラットフォームである。この連携により、氾濫の発生・拡大、被災者の移動など、これまで十分にわからなかった被害状況を従来より圧倒的に速く、把握・予測できる。さらに柔軟な連携のしくみにより、自治体や企業が自分たちのシステムを自由に接続し、実際の災害対応や訓練などの公共サービスへの活用やビジネス展開を可能にする。災害に関わるあらゆる組織を連携し、研究、開発、訓練、実用を連続的に推進するオープンイノベーションにより、高度な防災ITの普及と展開、減災の実現を目指す。

---



---

#### 第2章 減災オープンプラットフォームARIA

---



---

##### 2.1 サイバーフィジカルシステムにおけるシミュレーション・エミュレーション連携の必要性

サイバーフィジカルシステムとは、実世界で収集した観測データなどの情報を、コンピュータ技術を活用し、サイバー空間で解析することで、解析から得られる情報を産業の活性化や社会問題の解決を図るサービスおよびシステムを指す。これまで、サイバーフィジカルシステムの重要な要素技術として、組込みシステムやセンサネットワーク技術が注目されてきたが、我々は新たな技術と

してシミュレーション・エミュレーション連携を提唱したい。

シミュレーション・エミュレーション連携は、WIDE projectで行われているネットワーク技術やコンピュータ技術等の応用科学に限定されるものではない。我々が解決すべき社会課題は環境・エネルギー、医療福祉な多岐に渡るが、これらの社会課題を解決するあらゆる技術、例えば自然科学、社会科学、人文学など幅広い分野の学問から創出される叡智を統合的に扱うための技術である。

この連携の基本思想は次のように説明できる。従来のシミュレータ、システムは、ひとつのシミュレータ、システムの中にすべての機能を作り込むことが一般的であった(図1左)。例えば、防災におけるシミュレーション技術として、避難シミュレーションや氾濫シミュレーションによる被害予測があげられるが、これは、災害の程度、発生時刻、人口分布および人の移動など様々な条件を入力値として、被害量を出力し、災害死という社会課題の対応策へ活用される。

このようなシステムやシミュレーションを構築する場合、それぞれの機能、部品を実装する必要があり、開発コストの大きさから災害対応を必要とするすべての自治体、企業への導入を阻害する大きな要因となる。また、機能追加の必要性が出たとき、例えば、このシミュレータのなかに、新たなセンサを導入したいと考えたときなど、ほぼ全ての機能や部品の作り直しが必要となる。さらに、1つのコンピュータの中に複数の機能を盛り込むことによって生じる性能への影響は無視できない。入力条件を緻密にするほど、つまりフィジカルシステムとしての性能を向上させるほど、大規模化かつ高性能な動作環境が必要となる。

これに対して、提案アーキテクチャでは、連携基盤を用意し、それを介してシステム、シミュレータを協調実装させる構成をとる(図1右)。この構成を採用することで、それぞれの機能、部品で一番良いシステム、シミュレータを採用することが可能となる。さらに新しいセンサなど追加機能が必要になった場合であっても、全体を作り直す必要なく、拡張ができる。さらなる利点として、このような分散化の形態をとることで、処理のかかる機能、汎用的なコンピュータで処理可能な機能、と処理に合わせてマシンリソースを適切に分配できるようになる。

## 2.2 ARIAが実現する5つのイノベーション

ARIAは図2に示す5つのイノベーションに基づき設計した。

### 漸進的シミュレーションによるリアルタイム防災

暫定的な降水量を想定した事前推定が前提である現在の水害の被害予測に対し、我々は、個別運用が前提であったシステムやシミュレータの連携プラットフォームを開発する。シミュレーション・エミュレーション連携に基づく漸進的シミュレーション技術により、想定外の規模の水害にも実際の観測データを利用したうえでリアルタイムで対応し、災害対応に関わるすべての組織、人が協調して被害軽減に貢献できるプラットフォームにより、防災ITの飛躍的な発展に挑戦する。リアルタイムでの予測により、水害が予見された時点から、ダム放水調整、避難勧告準備/発表など観測データを鑑みた最適な対応策の検討ができ、被害軽減に貢献する。

### オープンプラットフォームによる既存システムの適用

柔軟な連携のしくみにより、自治体や企業が自分たちのシステムを自由に接続し、実際の災害対応や訓練などの

公共サービスへの活用やビジネス展開を可能にする。これは、自治体・企業の異なる既存システム、シミュレータと容易に制限なく連携可能であるばかりでなく、災害に関わるあらゆる組織を連携し、研究、開発、訓練、実用を連続的に推進するオープンイノベーションにより、高度な防災ITの普及と展開、減災の実現を示唆している。

### 多元的データによるデータフュージョン

現在の水害対応は、一部の危険個所における状況把握を優先しているため、広範囲な浸水の状況を十分に把握できていないという問題がある。センサネットワーク技術は環境、人間行動、都市構造など様々なセンシング資源について観測、収集、蓄積のそれぞれで発展を遂げているものの、実用を鑑みたとき、時間/空間の両軸から密なセンシングの実現は難しい。ARIAでは、時間/空間分解能の異なる多角的なデータを融合的に時空間解析し、解析結果を連携させることで様々な空間分解能のデータをフルに活用し、これまで困難であった実時間での被害予測を可能にする。

### クラウド化による投資効率の最大化

防災分野において、予防、応急、復旧の各フェーズで様々な防災システムが開発されている。しかし、防災システム自体は、直接の利益を生みまないため、安定的、継続的な導入、維持、運用を図るためにはそれぞれのコストを最小化することが求められる。ARIAは、相互連携するシステムで構成し、今日のITサービスがコスト削減のために利用している、クラウド実装を適用する。

### 防災システムへのユーザ参画

これまでの防災ITのシステムは一人一人の避難者、被災者を意識することはほとんどなかった。一方で、将来

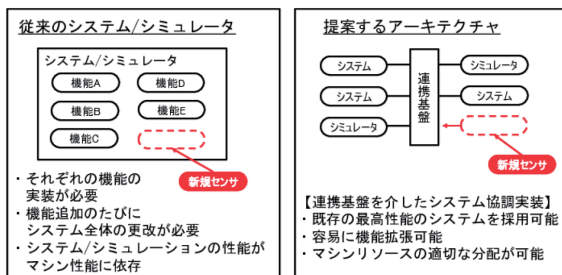


図1 従来のシミュレータと提案アーキテクチャ

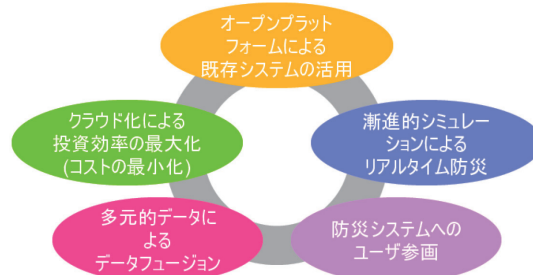


図2 ARIAの示す5つのイノベーション

的に、人の行動や特性、ニーズなど人間に関わる情報のデータ化が、多くの研究者の力で実現すると見込まれる。ARIAを利用して、これら人間に関わるデータと、既存、新規の要素防災技術を連携し、双方向の防災ITを実現する。

### 2.3 ARIAの基本設計

以上のシミュレーション・エミュレーション連携の概念を、防災における避難に関わるシステムに適用した基本設計が図3となる。防災分野では、ある機能に特化したシステムの開発が中心で、情報の共有・連携は常に大きな課題だった。従前は、それぞれの機関が個別に大規模システムを導入し予測を立てていた。図3に示すARIAの基本設計は、自治体や住民はシステム導入を必要とせずとも広く多くの人たちと情報を共有し、利用できる、さらに各機関の情報が補完しあうことで、情報の精度がさらに高まり、災害に関わる組織を先導する力をもつオープンイノベーションを示唆している。

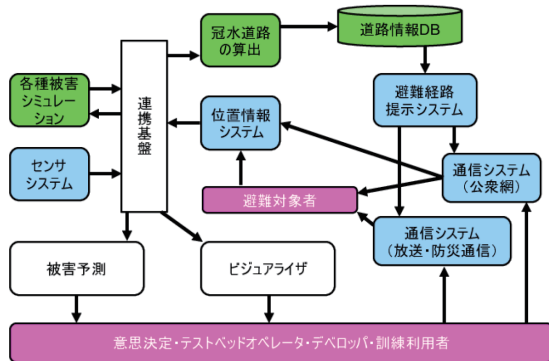


図3 ARIAの基本設計

ARIAでは、連携基盤が情報バスとして機能する。複数のサブシステムは、連携基盤を介して繋がり、シミュレーションやシステムで産出する現在の状況を共有する。図3で示す氾濫解析シミュレーションの結果は、連携基盤を介して道路冠水シミュレータに伝わり、道路の通行可否が道路情報DBで管理される。避難経路提示システムは、この道路情報を利用して安全な避難経路を計算する。避難対象者のシミュレーション内の避難者エージェントは、スマートフォンエミュレータを通じて、避難経路を検索する。連携の結果出力される被害者数など被害予測結果が即時出力される。このようにシステム、シミュレータを統合させることで、容易な連携や、目的の結果の高速な計算処理が可能になる。

### 2.4 ARIAが持つ本質的な特性

#### 2.4.1 拡張可能性・柔軟性

シミュレーション・エミュレーション連携を利用した減災オープンプラットフォームARIAは、単純な避難シミュレータではない。ARIAを構成している様々なシミュレーション、システムというものは、すべて実際のもの、実システムに置き換えることが可能であり、このことがARIAの本質的な特性を示している。

置き換えるシステムによって、ARIAは様々な目的を持ったシステムに変化する(図4)。すべてをシミュレータで構成した場合は、防災ITシミュレータとして動作する。例えば、新たな解析技術、シミュレータを防災ITシミュレータに繋げ、過去の災害のデータをもとにすべてのシミュ

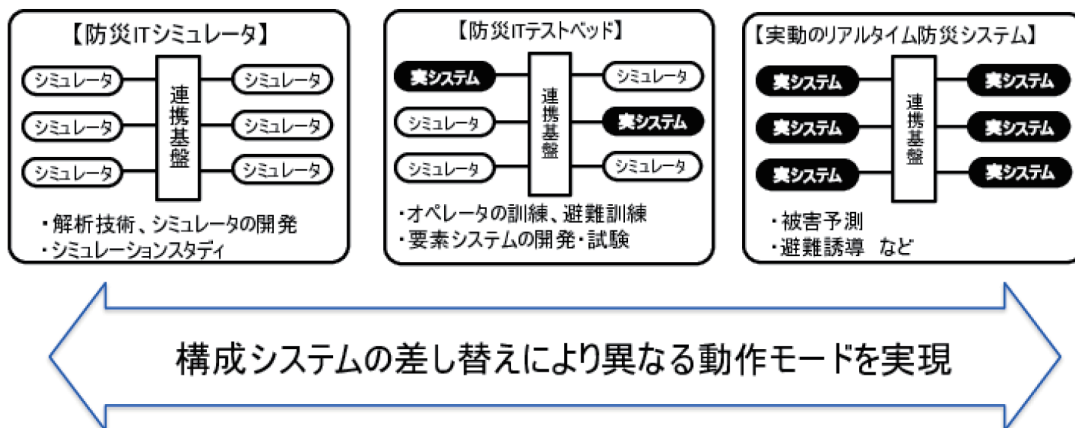


図4 ARIAの拡張可能性・柔軟性

レータを動作させる。災害研究ではデータが収集しにくい  
ため、解析技術やシミュレータの性能評価は、手間と  
コストのかかる大変な仕事であるが、この防災ITシミュ  
レータとして動作させることによって、評価環境を提供  
し、開発を促進できる見込みがある。

次に防災ITテストベッドとしての動作が考えられる。図3  
における基本設計では、避難対象者のシミュレーション  
は、マルチエージェントシミュレータで構成される。これ  
を、実際の避難者に置き換えると、避難訓練のプラッ  
トフォームになる。あるいは、センサシステムを実物に  
置き換えると、そのセンサシステムの研究開発や性能評  
価に用いることのできるテストベッドとしての動作が可  
能となる。さらに、すべてのシステムを実物にすると実  
働のリアル防災システムとしての動作が可能となり、被  
害予測と避難誘導のシステムとしての利用が考えられ  
る。このような拡張可能性・柔軟性をシステムとして実装  
できることが、ARIAの持つ特徴のひとつである。

### 2.4.2 プラットフォーム性

現在、ARIAの概念実証として、シミュレータ自体、シス  
テム自体を連携させる、技術における連携のプラッ  
トフォームとしての実装が完了している。我々は、技術連  
携のプラットフォームに留まらず、プラットフォームと  
して拡張を見込んでいる(図5)。次の段階として、この  
ARIAをシステムや解析手法の開発者、研究者、もしくは  
様々なサービスの提供者が連携できるプラットフォーム  
として構築することを目指している。そうすることで、  
たとえば開発者は、自分たちのシステム、解析手法の本  
質的な機能の開発に集中できる。これは、防災研究に関

わる研究開発の敷居を下げ、開発への自由な参画を促進  
し、開発スピードを向上させる可能性をもっている。

さらに、防災だけでなく異分野の連携プラットフォーム  
への拡張が見込まれる。概念実証では、河川洪水や内水  
氾濫に注力し開発を行ってきた。これを拡張し、土砂災  
害や地震災害など、他の災害に対してもプラットフォーム  
上のシステムを利用することができる。もちろん、被  
害の種類や避難の様相は、災害によって異なるが、人間  
がどこにいるか、また人々が持っている通信ツールはど  
の災害でも共通している。つまり、他の災害における、防  
災ITシミュレータ、防災ITテストベッドとして、共通して  
利用できるリソースを提供する。あるいは、自動運転な  
ど将来我々の社会に浸透するであろう新しい技術に対  
しても、データの容易な相互交換を実現でき、これらの技  
術を利用することで、新たな防災技術の可能性を社会に  
提供していくことが可能になる。

## 第3章 概念検証:リアルタイム被害予測システム

### 3.1 概要

これまでに述べた減災プラットフォームARIAについて、  
2019年度には水害に関する避難の技術連携プラッ  
トフォームとして概念実証を行ってきた。これは、実際の  
水害発生時に、河川水位や降水量などの実観測データ、  
予測データを利用した避難タイミングの参考となる根拠  
データ生成を目指し、氾濫解析シミュレータ、避難シミュ  
レータなど、水害の被害予測に用いる複数のシミュレー  
ションおよび通信エミュレータを連携動作させ、水害の



図5 ARIAのプラットフォーム性





連携基盤Smithsonianは、NICTの開発したシミュレーション・エミュレーション連携基盤であり、エミュレータとシミュレータの時刻同期などの実験の進行管理を担う連携マネージャと、Publish-Subscribeメッセージ交換を行うMQTTブローカ(Mosquittoを使用)で構成される[55]。利用した連携基盤はMQTTでデータを流通するため、MQTTでのデータ入力・出力を行うインターフェースを必要とするものの、データ形式の統一や新たな機能追加に伴う大幅なハードコーディングの書き換えの必要なく、汎用的なシミュレータ、エミュレータ、システムを連携できる。MQTTのトピックを指定することで、連携基盤で流通するデータを利用した計算が可能となる。

### 3.3 ARIAにおける各シミュレータ/エミュレータ/システム等の役割

連携するシミュレータ/エミュレータ/システム等の役割を表1に示す。また、代表的なシミュレータの概要について以下に述べる。氾濫解析シミュレーションでは、NILIM2.0を用いて複数通りの降雨パターンにおける浸水位の時系列データを算出し、複数の水害シナリオを作成した。作成した水害シナリオと河川水位、降水量の観測データを比較し、最も観測データと最も類似する水害シナリオを選択する。選択された水害シナリオでの浸水値はSmithsonianに送信される。

道路冠水シミュレータは、氾濫解析シミュレータから算出される浸水状況に応じて、通行不可能となった道路を逐次計算する。計算結果はSmithsonianを介して道路管理DBに送信され、通行不可能な道路など道路情報を更新する。道路情報管理DBは避難所の位置情報や対象地域の道路データを保持しており、このデータは対象地域の避難経路算出に用いられる。

避難シミュレータは、構造計画研究所製のマルチエージェントシミュレータartisoc[57]を使用する。artisocでは、対象地域の住民を移動者エージェントとし、氾濫解析シミュレータから算出される周囲の浸水状況に応じた行動をシミュレーションする。移動者エージェントはその位置や速度、入手情報などをもとに、行動を決定する。これにより避難の遅れや被害などを定量的に算出する。

スマートフォンエミュレータは、地域住民がもつスマートフォンの通信網および機能を模したエミュレータであり、避難情報の受信や避難経路の検索などのサービスを避難シミュレータ内のエージェントに提供する。避難経路の検索には、経路計算サーバが用いられる。浸水値に応じて更新された道路情報に基づいて、重み付きダイクストラにより、地域住民の避難所までの経路を計算し、スマートフォン上に提示する機能を持つ。

### 3.4 ARIAでの被害予測の流れ

提案システムの氾濫解析シミュレータは、NILIM2.0で算出した複数の水害シナリオと降水量、河川水位を比較し、最適なシナリオを浸水域の拡大過程として選定する。この氾濫解析シミュレータで計算される浸水域の拡大にしたがって、地域住民の行動エリアは制限を受ける。道路冠水シミュレータにて浸水域となるエリアに含まれる道路が算出され、通行不可能になると経路計算サーバがもつ道路情報管理DBに送られ、通行不可能となった道路を避けた経路計算結果(図8)が移動者エージェントに送られる。

避難シミュレータは、対象地域の人口分布に基づき、移動者エージェントを生成し、定められた避難所までの避難行動をシミュレーションする。移動者エージェントの避難開始のきっかけとなる避難情報の発表時間は避難シミュレータ上で指定できる。避難情報の発表により、移動者エージェントはスマートフォンエミュレータを経由

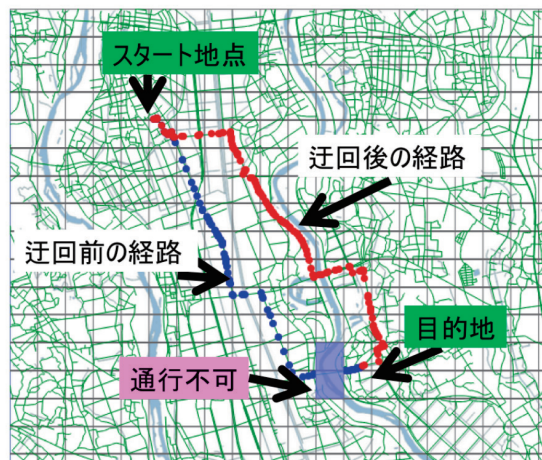


図8 経路計算結果

して、経路計算サーバから避難所までの避難経路を取得し、避難を検討する(図9左)。それぞれの移動者エージェントは異なる避難行動特性をもっており、行動特性の高いエージェントは避難情報の発表直後に避難を開始するが、低いエージェントは避難開始までに一定時間を要す。また、周囲のエージェントが避難行動を開始したことをきっかけに、避難を開始する行動特性も設定される。避難開始の際に、移動者エージェントの周囲が既に浸水していた場合は、移動者エージェントは避難することができない。

ARIAでは、浸水が通信環境に及ぼす影響を考慮し、被害者数等のデータを被害予測結果として算出する(図10)。浸水が進み、停電や基地局の故障が発生すると該当のエリアではスマートフォンエミュレータから、避難情報や避難経路の情報を受け取ることができなくなる。これは、移動者エージェントの避難開始や移動に影響する。避難中に浸水に遭遇した移動者エージェントや避難困難となった移動者エージェントは被害者数としてカウントする。この被害者数は、避難情報を発表したタイミングにより変化し、発表タイミングを変更してARIAによるシミュレーションを繰り返すことで、最小の被害量となる発表タイミングを見積もることができる。

上述の移動者エージェントの移動および氾濫解析シミュレーションで推定された浸水域は、ビジュアライザによりマップ上に表示される。このマップは、プロジェクションマッピングで対象地域の地形図をもとに作成したジオ

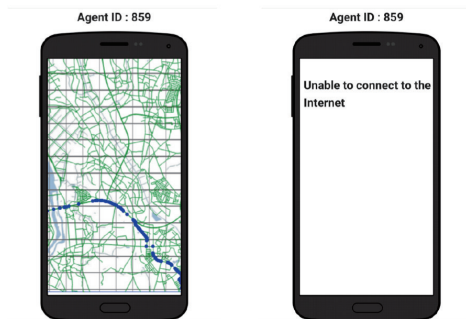


図9 スマートフォンでの経路検索結果  
(左:経路検索に成功した例、右:通信障害の発生で経路検索が行えなかった例)

ラマ上に投影する(図11)。ジオラマ上に、マーカを置くことで、カメラを介してARIAに被害データの入力を行うことができる。マーカは、河川の破堤箇所、内水氾濫の発生箇所、被害のあった基地局、人的被害の発生箇所などの被害データを設定できる。

例えば、水害発生時に新たに河川堤防の破堤が発生した場合、マーカをジオラマの該当箇所に置くことで破堤箇所の位置情報が連携基盤を介して、浸水シミュレータに送られ、浸水シミュレータは破堤箇所を起点とした氾濫流量と拡大過程を推定し、ARIAに反映させる。被害基地局のマーカは、その位置情報を避難シミュレータおよびスマートフォンエミュレータへ送り、基地局が担う通信エリアに存在する移動者エージェントに対して、避難情報や経路情報のやりとりを行えなくする(図9右)。そのため、該当の移動者エージェントは情報に基づいた避難行動が行えなくなる。

以上のように概念実証として、水害発生時に発生しうる状況をシミュレータ・エミュレータによって再現し、発生しうる被害量を定量的に示すことで、被害が最小限となる災害対応施策およびそのタイミングを把握するシステムを構築した。



図10 被害量の推定結果  
(左から避難完了者数、被害者数、最大浸水値、浸水面積を示す)



図11 ジオラマ上への表示



## 第4章 まとめ

本稿では、シミュレーション・エミュレーション連携技術に基づくサイバーフィジカルシステムとして、減災オープンプラットフォーム“ARIA”の設計思想とこれまでに構築した概念実証について述べた。ARIAは、個別に運用されているシミュレータやシステムを、融合させてひとつのシステムとして運用するプラットフォームであり、提

唱する5つのイノベーションにより、氾濫の発生・拡大、被災者の移動など、これまで十分にわからなかった被害状況を従来より圧倒的に速く、把握・予測できることが特徴となる。2019年度は技術連携のプラットフォームとして開発を行っている。今後は、これまでに構築したプラットフォームをより発展させ、防災ITテストベッドや様々な自治体、企業が利用できるステークホルダーのプラットフォームとしての実装を進めていく。

表1 開発した各シミュレータ/エミュレータ/システム等のARIAでの役割

名称	役割
観測データ収集システム	自治体、防災に関わる機関などの観測システム（降水・河川水位）から観測データを収集する。
氾濫解析シミュレータ	既存の氾濫解析シミュレーションで算出した複数の水害シナリオと降水量、河川水位を比較し、最適なシナリオを浸水域の拡大過程として選定する。
避難シミュレータ	対象地域の住民を移動者エージェントとし、氾濫解析シミュレータから算出される周囲の浸水状況に応じた行動をシミュレーションする。
スマートフォンエミュレータ	地域住民がもつスマートフォンの通信網および機能を模したエミュレータであり、避難シミュレータ内のエージェントはこのスマートフォンエミュレータを介して避難情報の受信や避難経路の検索などのサービスを利用する。
避難経路提示システム	道路冠水シミュレータ、道路情報管理DB、経路計算サーバの3つから構成される。道路冠水シミュレータにて、氾濫解析シミュレータから算出される浸水状況に応じて、通行不可能となった道路を逐次計算する。対象地域の道路の通行可否は道路情報管理DBにて管理・更新される。経路計算サーバは、道路上の浸水値を考慮した上で、地域住民の避難所までの経路を計算し、スマートフォンに提示する。
スマートフォン画面表示システム	エージェントのIDを指定することで該当エージェントのスマートフォン画面を表示する。スマートフォン画面として、避難経路提示システムから提供される避難経路を示した地図データが表示される。
被害予測結果表示システム	避難シミュレーションが保持する、各移動者エージェントの位置およびステータス（移動開始前、移動中、移動中止、移動完了）、および氾濫解析シミュレーションで算出される各グリッドの浸水値をもとに、避難完了数、被害者数、最大浸水値、浸水面積といった被害量に関するデータをグラフ化、表示する。
入力インタフェース	氾濫解析シミュレータでは予測できなかった河川洪水や内水氾濫の発生、および停電などの通信障害の発生について、ジオラマとマークを利用してARIAに内挿する。
可視化システム	各移動者エージェントの位置およびステータス、および各グリッドの浸水値をもとに、地図上に表示する。表示は、各シミュレータ/エミュレータのステップごとに実施される。



本開発の一部は総務省SCOPE（受付番号172106102）の委託およびJSPS科研費JP19K20414の助成を受けたものです。