

令和7年度  
修士学位論文

# 路側機を利用した災害時の自律分散型情報 共有手法

An Autonomous Distributed Information Sharing  
Method Using Roadside Units During Disasters

西村 直人

指導教員 横山 和俊

2026年2月27日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻  
情報学コース

# 要 旨

## 路側機を利用した災害時の自律分散型情報共有手法

西村 直人

近年、路車間通信 (V2I) や車々間通信 (V2V) に代表される ITS 技術は、安全運転支援や交通円滑化に加え、災害時の情報共有や避難支援への応用が期待されている。しかし、地震や津波などの大規模災害時には通信インフラが断絶し、従来の中央集約型情報共有システムが機能しなくなる可能性が高い。既存研究では、V2V 通信や RSU (路側機) を用いた DTN 環境下での情報共有手法が提案されているが、多くの V2I 手法は中央サーバへの依存を前提としており、通信断絶時の継続的な情報共有には課題が残る。また、中央サーバに依存せず、地域内で自律的に情報共有を行う V2I モデルは十分に検討されていない。そこで本研究では、通信インフラ断絶下においても動作可能な自律分散型 V2I 情報共有モデルを提案する。提案手法では、各 RSU が独立して情報を管理し、走行車両をデータキャリアとして利用することで、車両移動を介した RSU 間の情報伝搬を実現する。提案手法の有効性を検証するため、交通シミュレーションツール SUMO を用いて実都市道路網上に災害時避難シナリオを構築し、車両台数を変化させながら、「情報拡散なし」、「中央制御型 V2I」、および「自律分散型 (提案手法)」の 3 方式を比較した。評価指標には、全車両の避難完了時間および経路再探索回数を用いた。評価の結果、通信インフラ断絶環境下においても、車両を介して RSU 間で情報が伝搬し、提案手法が避難完了時間の短縮に寄与することを確認した。以上より、提案する自律分散型 V2I 情報共有モデルは、通信インフラが利用できない災害環境下においても有効に機能し得ることを示した。

**キーワード** 路車間通信, 自律分散システム, 災害情報共有, 避難支援, 交通シミュレーション

# Abstract

## An Autonomous Distributed Information Sharing Method Using Roadside Units During Disasters

Nishimura Naoto

In recent years, Intelligent Transportation System (ITS) technologies, such as Vehicle-to-Infrastructure (V2I) and Vehicle-to-Vehicle (V2V) communications, have been expected to contribute not only to safe driving support and traffic efficiency, but also to information sharing and evacuation assistance during disasters. However, during large-scale disasters such as earthquakes and tsunamis, communication infrastructures are likely to be disrupted, causing conventional centralized information-sharing systems to fail.

Previous studies have proposed information-sharing methods based on V2V communication and Delay Tolerant Network (DTN) environments using roadside units (RSUs). However, many V2I-based approaches assume dependence on a central server, which makes continuous information sharing difficult under communication disruptions. Moreover, V2I models that enable autonomous information sharing within a local area without relying on a central server have not been sufficiently investigated.

In this study, we propose an autonomous distributed V2I information-sharing model that can operate even under communication infrastructure disruptions. In the proposed method, each RSU independently manages information, and moving vehicles are utilized as data carriers to enable inter-RSU information propagation through vehicle mobility.

To evaluate the effectiveness of the proposed method, disaster evacuation scenarios

were constructed on a real urban road network using the traffic simulation tool SUMO. In the evaluation, the number of vehicles was varied, and three approaches were compared: no information dissemination, centralized V2I, and the proposed autonomous distributed method. The evaluation metrics were total evacuation completion time and the number of route re-planning events.

The results confirm that even in environments where communication infrastructure is unavailable, information can be propagated among RSUs via vehicles, and the proposed method contributes to reducing evacuation completion time. These findings indicate that the proposed autonomous distributed V2I information-sharing model can function effectively in disaster environments where communication infrastructure is unavailable.

***key words*** Vehicle-to-Infrastructure Communication, Autonomous Distributed System, Disaster Information Sharing, Evacuation Support, Traffic Simulation

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
<b>第 2 章</b>	<b>関連技術</b>	<b>3</b>
2.1	ITS と V2X 通信技術 . . . . .	3
2.2	路側機 (RSU: Road Side Unit) . . . . .	4
2.3	ディレイトレラントネットワーク (DTN) . . . . .	5
2.4	SUMO および TraCI . . . . .	5
2.5	関連研究 . . . . .	6
2.5.1	杉野らの研究 . . . . .	6
2.5.2	Yahara らの研究 . . . . .	7
2.5.3	本研究の位置付け . . . . .	8
<b>第 3 章</b>	<b>提案手法</b>	<b>9</b>
3.1	提案モデルの概要 . . . . .	9
3.1.1	従来の DTN 研究との差異 . . . . .	10
3.2	ハイブリッド動作モデル . . . . .	11
3.2.1	中央制御型 RSU モード . . . . .	12
3.2.2	自律分散型 RSU モード . . . . .	12
3.3	情報管理と伝搬方式 . . . . .	13
3.3.1	通行実績マップ . . . . .	13
3.3.2	情報伝搬プロセス . . . . .	14
3.4	通信制御および切替条件 . . . . .	15
3.4.1	中央制御型から自律分散型への切替 . . . . .	15
3.4.2	自律分散型から中央制御型への切替 . . . . .	15

## 目次

3.5	提案手法の特徴 . . . . .	16
<b>第4章</b>	<b>シミュレーション実験</b>	<b>17</b>
4.1	実験環境 . . . . .	17
4.1.1	シミュレータおよび開発環境 . . . . .	17
4.1.2	対象地域 . . . . .	17
4.2	シミュレーションにおける処理 . . . . .	19
4.2.1	情報交換処理 . . . . .	20
	車両からRSUへの情報アップロード . . . . .	20
	RSUから車両への情報配信 . . . . .	20
4.2.2	車両の閉塞検知とUターン動作 . . . . .	21
	閉塞の検知 . . . . .	21
	Uターン動作 . . . . .	21
4.3	RSUの配置 . . . . .	21
4.3.1	ノードベース配置方式 . . . . .	21
4.3.2	RSU設置台数 . . . . .	22
4.4	シミュレーションシナリオ . . . . .	23
4.4.1	災害発生と避難開始 . . . . .	23
4.4.2	道路閉塞の発生 . . . . .	24
4.4.3	通信モードの設定 . . . . .	25
4.5	実験条件 . . . . .	25
4.5.1	車両台数 . . . . .	25
4.5.2	重みパラメータ . . . . .	26
4.5.3	実験条件のまとめ . . . . .	27
4.6	評価指標 . . . . .	27
4.6.1	避難完了時間 . . . . .	27

## 目次

4.6.2	経路再探索回数	28
<b>第5章</b>	<b>実験結果および考察</b>	<b>29</b>
5.1	概要	29
5.2	避難完了時間の比較	29
5.3	経路再探索回数の比較	31
5.4	中央制御型と自律分散型の比較	32
5.4.1	避難完了時間	32
5.4.2	自律分散型における情報伝搬の遅延特性	32
5.4.3	交通集中	33
5.4.4	立ち往生の発生	34
5.5	車両台数別の分析	34
5.5.1	車両台数 643 台 (VN=1) の場合	34
5.5.2	車両台数 1,286 台 (VN=2) の場合	35
5.5.3	車両台数 1,929 台 (VN=3) の場合	35
5.6	考察	35
<b>第6章</b>	<b>おわりに</b>	<b>37</b>
6.1	本研究の成果	37
6.2	今後の課題	38
6.2.1	ハイブリッド運用の自動制御と通信パラメータの最適化	38
6.2.2	実環境での検証と災害シナリオの多様化	39
6.2.3	セキュリティおよび情報鮮度の管理	39
6.3	むすび	39
	<b>謝辞</b>	<b>40</b>
	<b>参考文献</b>	<b>41</b>

# 目次

2.1	V2X 通信の概要	4
3.1	提案システムの全体構成図	10
3.2	自律分散型 RSU による情報拡散モデル	13
3.3	通行実績マップ	14
4.1	対象地域（高知県香南市吉川町の一部地域）	18
4.2	避難所配置図	19
4.3	RSU 配置図	23
4.4	道路閉塞配置図	24
5.1	通信モード別の避難完了時間	30
5.2	通信モード別の経路再探索回数	31

# 表目次

3.1	従来の DTN 研究と提案手法の比較 . . . . .	11
4.1	道路網の構成 . . . . .	18
4.2	エッジコストに基づく通行状態の判定基準 . . . . .	20
4.3	車両台数の設定 . . . . .	26
4.4	重みパラメータの設定 . . . . .	26
4.5	シミュレーション実験条件の概要 . . . . .	27
5.1	通信モード別の避難完了時間 (秒) . . . . .	30
5.2	通信モード別の経路再探索回数 (回) . . . . .	31

# 第 1 章

## はじめに

近年、路車間通信（Vehicle-to-Infrastructure: V2I）や車々間通信（Vehicle-to-Vehicle: V2V）に代表される ITS（Intelligent Transport Systems）技術は、安全運転支援や交通事故削減、交通流の円滑化を目的として発展してきた。これらの技術は主に平常時の交通利便性の向上を目的として利用されてきたが、近年では地震や津波などの大規模災害発生時における情報共有や避難支援への応用についても注目されている。

2011 年の東日本大震災では、避難者全体の約 57 %が自動車を利用して避難したことが報告されている [1]。高齢者や要支援者にとって自動車は現実的かつ重要な移動手段であり、災害時においても自動車避難の需要は高い。円滑な避難行動を実現するためには、道路の被災状況や通行可否、避難所周辺の混雑状況などの情報を迅速に共有することが不可欠である。

しかしながら、大規模災害時には通信トラフィックの急増や基地局設備の損壊により、携帯電話網やインターネットなどの通信インフラが断絶する可能性が高い。その結果、中央サーバを前提とした従来の情報共有システムでは、被災地域内での継続的な情報共有が困難となる。このような背景から、通信インフラが利用できない状況下においても、地域内で自律的に情報共有を継続可能な仕組みの構築が求められている。

既存研究では、V2V 通信を用いたアドホック型の情報拡散手法 [2] や、RSU（Road Side Unit：路側機）を活用した DTN（Delay/Disruption Tolerant Network：遅延・途絶耐性ネットワーク）環境下での情報共有手法 [5] が提案されている。しかし、V2V 通信は車両密度や通信範囲に強く依存するため、交通量が少ない状況では情報伝達が途絶しやすいという課題がある。一方、RSU を用いた V2I 通信に関する研究の多くは中央サーバによる統合管理を前提としており、通信インフラが断絶した際には情報共有機能が停止するという問題を

抱えている。

そこで本研究では、通信インフラ断絶下においても動作可能な自律分散型 V2I 情報共有モデルを提案する。提案手法では、各 RSU が中央サーバに依存せず独立して情報を管理し、走行中の車両を情報の搬送主体（データキャリア）として利用する Store-Carry-Forward 方式（情報の蓄積・搬送・転送を車両の移動によって行う方式）により、RSU 間の間接的な情報伝搬を実現する。

また、高知県香南市吉川町の一部地域の道路網を対象とした災害時避難シミュレーションにおいて、以下の 3 方式を比較評価する：

1. 情報拡散を行わない場合
2. 中央制御型 V2I システム
3. 自律分散型 V2I モデル（提案手法）

この比較評価により、車両をデータキャリアとして利用した RSU 間情報伝搬が、避難行動の効率化および避難完了時間の短縮に与える効果を定量的に明らかにする。

本論文の構成を次に示す。

第 2 章では、ITS および V2X 通信技術、RSU、DTN、研究の評価実験に使用する交通シミュレータ SUMO、ならびに関連研究について述べる。第 3 章では、本研究で提案する自律分散型 V2I 情報共有モデルの概要および動作方式について説明する。第 4 章では、シミュレーションシステムの構成、実験シナリオ、実験条件および評価指標について述べる。第 5 章では実験結果を示した上で考察を行う。最後に、第 6 章において本研究の成果と今後の課題についてまとめる。

## 第 2 章

# 関連技術

本章では、本研究の基盤となる ITS および V2X 通信技術、RSU、ならびに通信断絶環境下でのデータ伝送技術である DTN について概説する。また、本研究の評価実験に使用する交通シミュレータ SUMO および制御インターフェース TraCI の概要を述べる。最後に、災害時情報共有に関する関連研究を概観し、本研究の位置付けを明らかにする。

### 2.1 ITS と V2X 通信技術

ITS (Intelligent Transport Systems : 高度道路交通システム) は、車両、道路、通信などの要素を統合し、交通の安全性および効率性を向上させることを目的としたシステムである。ITS の実現において、車両間や車両とインフラ間で情報をやり取りする通信技術である V2X (Vehicle-to-Everything) が中心的な役割を担っている。V2X は通信対象に応じて以下のように分類される。

- **V2V (Vehicle-to-Vehicle)** : 車両同士が直接通信を行い、危険予知情報や渋滞情報を共有する方式。通信距離が短くリアルタイム性が高い一方、通信範囲が限定され、車両密度に依存するため情報の伝達範囲に制約がある。
- **V2I (Vehicle-to-Infrastructure)** : 道路沿いに設置された RSU を介して情報の送受信を行う方式。広域的な情報収集や集中管理に適しており、交通状況の把握や災害時の避難支援への応用が期待されている。
- **V2P (Vehicle-to-Pedestrian)** : 車両と歩行者間で通信を行い、歩行者の安全確保を支援する方式。

## 2.2 路側機 (RSU: Road Side Unit)

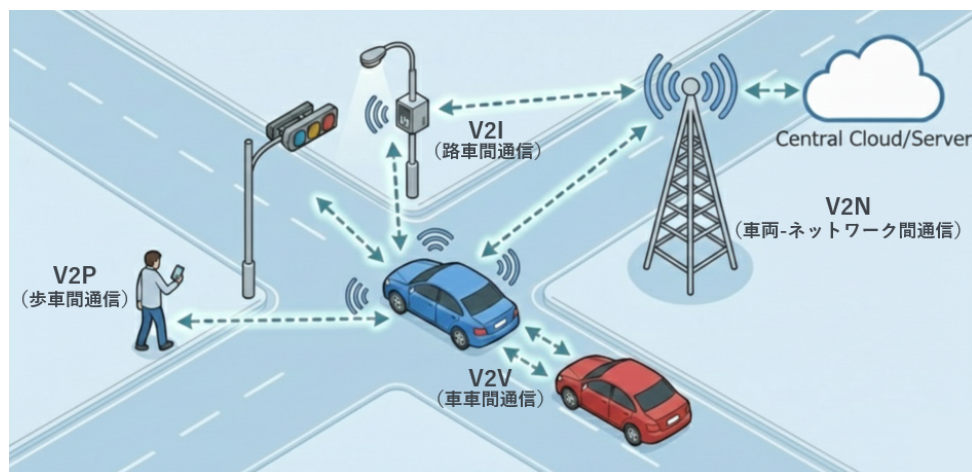


図 2.1 V2X 通信の概要

- **V2N (Vehicle-to-Network)** : 車両がセルラーネットワークを介してクラウドサーバと通信を行う方式. 広域の情報取得が可能であるが, 通信インフラへの依存度が高い.

本研究では, V2I 通信に着目し, RSU を活用した情報共有システムを提案する. V2I 通信は, RSU を通信の中継点として活用することで広範囲にわたる情報伝達が可能であり, 災害時の避難支援に適していると考えられる.

## 2.2 路側機 (RSU: Road Side Unit)

路側機 (RSU: Road Side Unit) は V2I 通信を実現するために道路沿いに設置される通信装置であり, 走行中の車両との間で無線通信を行う. 平常時においては, RSU は中央サーバやクラウドシステムと接続され, 車両から収集した走行情報や交通状況, 位置情報などを集約・管理するとともに, 各車両へ必要な情報を配信する役割を担う. 複数の RSU をネットワークで接続することにより, 広域にわたる交通情報の統合や一元的な交通制御が可能となり, 交通円滑化や安全運転支援を目的とした ITS サービスの基盤として利用されている. 具体的な活用例として, 交差点やカーブなど見通しの悪い箇所において, RSU が周辺車両の位置や進行方向を把握し, ドライバーからは視認できない死角車両の存在を通知することで, 出会い頭事故の防止が期待されている. また, 信号機情報や渋滞情報, 工事規制情報な

## 2.3 ディレイトレラントネットワーク (DTN)

どをリアルタイムに提供することで、走行時の利便性向上や運転負荷の軽減にも寄与する。このように、RSU は平常時において安全性および利便性の向上を目的とした多様な用途で活用されており、ITS の中核を担うインフラとして重要な役割を果たしている。しかしながら、災害発生時には電力供給の停止や通信回線の断絶により、中央サーバとの接続が途絶する可能性がある。このような状況においても情報共有を継続するためには、RSU が独立して動作し、近隣の車両との間で情報を交換できる仕組みが必要となる。

## 2.3 ディレイトレラントネットワーク (DTN)

DTN (Delay/Disruption Tolerant Network : 遅延・途絶耐性ネットワーク) は、常時接続が困難なネットワーク環境において情報を伝達するための技術である。DTN では、ノードがデータを一時的に保持 (Store) し、移動 (Carry) した後、通信可能な他のノードに転送 (Forward) することで、情報を段階的に拡散する。この「Store-Carry-Forward」方式は、移動体を通信媒体として利用するため、災害時や過疎地域など通信インフラが不安定な環境において有効である。例えば、ある地点で道路閉塞情報を取得した車両が、別の地点まで移動した後にその地点の通信機器へ情報を受け渡すことで、直接通信できない離れた地点間でも情報伝達が可能となる。従来のインターネット等のネットワークでは送信者から受信者までの通信経路が常に確立されていることを前提とするが、DTN はこのような常時接続を前提としないため、通信インフラが部分的あるいは全面的に機能していない環境においても利用可能である。

## 2.4 SUMO および TraCI

本研究のシミュレーション環境には、交通シミュレータ SUMO (Simulation of Urban MObility) を使用する。SUMO は、ドイツ航空宇宙センター (DLR) が開発したオープンソースの微視的 (ミクロスコピック) 交通シミュレータであり、個々の車両の走行挙動、信号制御、経路選択、交通密度の変化などを高精度に再現できる。

## 2.5 関連研究

TraCI (Traffic Control Interface) は、SUMO が提供する外部制御用 API であり、Python や Java などのプログラミング言語からシミュレーションをリアルタイムに制御できる。本研究では、TraCI を用いて各車両と RSU 間の通信処理、情報の送受信、および経路の再計算を実装する。これにより、通信方式の違いが避難行動に与える影響を定量的に評価することが可能となる。

## 2.5 関連研究

災害時における車両を用いた情報共有および避難支援に関する研究は多数行われている。本節では、代表的な研究を概観し、本研究の位置付けを明らかにする。

### 2.5.1 杉野らの研究

杉野らは、震災時の自動車避難において、災害情報の種類と情報拡散手段の組み合わせが避難行動に与える影響を検討した [2]。この研究では、災害情報として道路閉塞、渋滞、津波被災リスクの 3 種類を定義し、情報拡散手段として人伝、ラジオ、SNS、V2V の 4 種類をモデル化した上で、高知県香南市の沿岸部を対象とした交通シミュレータ SUMO によるシミュレーションを実施し、被災車両数を指標として各手段の有効性を評価した。

4 種類の情報拡散手段はそれぞれ異なる特性を持つ。人伝は対向車線上の車両に直接入手した情報を拡散する方式であり、発見地点からの距離に応じて拡散成功率が低下する。ラジオは幹線道路の情報のみを 5 分間隔で全車両に拡散する方式であり、信頼性が高い一方で非幹線道路の情報には対応できない。SNS は位置情報付きの投稿により全道路の情報をリアルタイムに拡散できるが、デマ情報の混入が問題となる。V2V は無線通信機器を搭載した車両間で通信範囲 70m 以内に位置する車両と情報を共有する方式であり、大量のデータを送受信でき通信インフラへの依存度が低い一方で、拡散範囲が周辺に限定される。

評価実験では、災害情報の考慮パターンを (a) 道路閉塞のみ、(b) 道路閉塞と渋滞、(c) 道路閉塞と津波被災リスク、(d) 全情報の 4 パターンに分け、情報拡散手段を単体で使用した

## 2.5 関連研究

場合と 3 種類以上を組み合わせた場合の被災車両数の割合を比較した。

主要な結果として、以下の知見が得られた。情報拡散手段を単体で使用した場合、道路閉塞のみを考慮するシナリオでは V2V が最も被災車両数を削減した。これは、V2V が近隣の道路閉塞情報を大量に共有でき、経路変更後に再び道路閉塞に遭遇する車両が少なかったためである。一方、渋滞を考慮に加えた場合、人伝と V2V の有効性が極端に低下した。拡散範囲が狭いため遠方の渋滞情報を取得できず、経路変更後の渋滞遭遇率が高くなったことが原因である。また、津波被災リスクを考慮した場合、沿岸部での被災車両数は減少したが、内陸部への避難車両の集中により新たな渋滞が発生し、全体としての改善は限定的であった。

複数の情報拡散手段を組み合わせた場合、SNS を含む組み合わせではデマ情報の拡散力が強まり、被災車両数の削減が確認できなかった。SNS を使用しない組み合わせでも、V2V 単体での被災車両数と大きな差は確認できなかった。これらの結果から、災害情報の種類によって有効な拡散手段が異なること、考慮する災害情報が多くなるほど経路変更回数の増加によりデマ情報の影響力が大きくなることが明らかとなった。

この研究は、災害情報と情報拡散手段の親和性を定量的に評価した点で重要な成果である。一方で、情報拡散手段として V2V 通信を採用しているため車両密度や通信範囲に依存する課題が残されており、また通信インフラの断絶を想定した場合の SNS やラジオの利用可能性についても検討の余地がある。

### 2.5.2 Yahara らの研究

Yahara らは、異種 DTN (Heterogeneous DTN) を用いた災害時の避難行動と情報拡散の相互作用について研究した [5]。この研究では、Wi-Fi/Bluetooth (短距離広帯域) と LoRa (長距離狭帯域) を組み合わせた異種 DTN ベースの災害情報共有システムを提案し、セルラオートマトン (格子状の空間上でセルの状態遷移により現象を再現する計算モデル) ベースのシミュレーションモデルにより、損壊道路情報の伝播と避難者の移動の相互影響を分析した。主要な知見として、情報を取得した避難者が迅速に避難所へ向かうことで後方の

## 2.5 関連研究

避難者に情報が届かなくなる「置き去り現象」が発見された。また、損壊道路付近や混雑する道路セグメント付近の交差点に固定中継ノードを設置することで避難完了時間が短縮されることが示された。一方で、固定中継ノードが中央サーバの一部として動作している点、格子状トポロジでの検証であり実地図での検証が行われていない点、徒歩避難のみを対象としている点が課題として残されている。

### 2.5.3 本研究の位置付け

これらの研究は、V2V 通信や DTN を用いた情報拡散手法の有効性を示している一方で、いくつかの課題が残されている。まず、V2V 通信は車両同士の直接通信を前提とするため、車両密度に強く依存し、交通量が少ない状況では情報伝達が困難となる可能性がある。また、既存の V2I 通信に関する研究の多くは中央サーバへの接続を前提とした集中管理型の構成を採用しており、通信インフラが断絶した場合にはシステム全体が機能しなくなるという耐障害性の課題を抱えている。さらに、RSU を自律分散的に運用し、車両を情報の搬送主体（データキャリア）として活用する研究は限定的であり、通信断絶環境下における V2I 型情報共有モデルについては十分な検討が行われていない。本研究は、これらの課題に対し、RSU を中央サーバに依存せず自律的に動作させ、車両をデータキャリアとして活用することで、通信インフラ断絶時においても情報共有を継続可能な V2I モデルを提案する。さらに、実際の都市道路網（高知県香南市吉川町の一部地域）を用いた車両避難シミュレーションにより提案手法の有効性を定量的に評価する点において、既存研究とは異なる新規性を有する。次章では、この概念に基づく提案手法の詳細について述べる。

## 第 3 章

# 提案手法

本章では，本研究で提案する自律分散型 V2I 情報共有モデルの概要と動作方式について述べる．

### 3.1 提案モデルの概要

本研究では，災害発生時に通信インフラが断絶した状況においても，地域内で情報共有を継続可能な自律分散型 V2I 通信モデルを提案する．本モデルは，通信インフラの状態に応じて動作方式を切り替えるハイブリッド構成を採用している．平常時には中央サーバを介した集中管理型（中央制御型）として動作し，災害により通信インフラが断絶した際には，各 RSU が独立して動作する自律分散型へと移行する．これにより，災害の規模や被害範囲に依存せず，地域単位での情報伝達を維持可能な耐障害性の高い通信基盤を実現する．

図 3.1 に提案システムの全体構成を示す．平常時には中央サーバが全 RSU のデータを統合管理し，災害時には各 RSU が独立して動作するとともに，車両を介して情報を伝搬する構成となっている．

### 3.1 提案モデルの概要

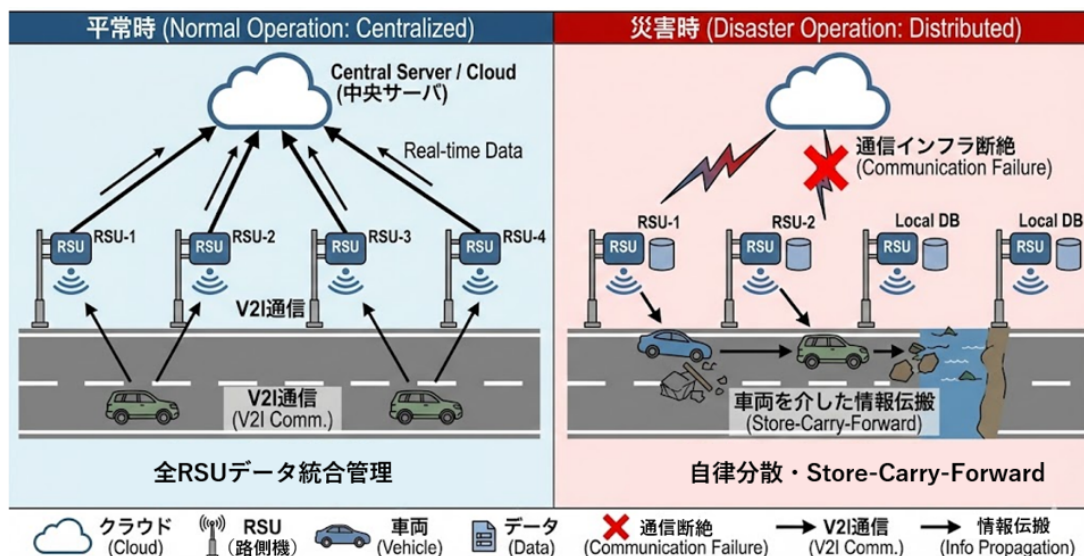


図 3.1 提案システムの全体構成図

#### 3.1.1 従来の DTN 研究との差異

提案手法は DTN の基本概念である Store-Carry-Forward 方式を採用しているが、従来の DTN 研究とは設計思想が根本的に異なる。表 3.1 に従来の DTN 研究と提案手法の比較を示す。

### 3.2 ハイブリッド動作モデル

表 3.1 従来の DTN 研究と提案手法の比較

項目	従来の DTN 研究	本研究 (提案手法)
目的	宛先ノードへメッセージを配送	各 RSU の情報を最新に更新
設計思想	エンドツーエンドのルーティング	場所中心の情報同期
ネットワーク構築	必要 (中継パスを構築)	不要 (構築しない)
宛先指定	必要 (特定ノード)	不要
RSU の役割	中継局 (バケツリレーの一部)	ローカル情報蓄積地点
車両の役割	メッセージの運搬者	情報の更新者 (通過時に RSU 情報を更新)
孤立環境での動作	経路構築困難により配送失敗のリスク	車両の通過のみで機能

従来の DTN 研究は、特定の宛先ノードへメッセージを配送するためのエンドツーエンドのルーティングを主眼としており、中継パスの構築が必要であった。一方、提案手法では特定の宛先を持たず、各 RSU が保持する情報を車両の通過に伴って更新・同期する「場所中心の情報同期」を設計思想として採用している。この設計により、ネットワークの構築やルーティングプロトコルを必要とせず、車両が RSU の通信圏内を通過するだけで情報共有が実現される。孤立環境においても、従来の DTN では経路構築が困難となり配送が失敗するリスクがあるのに対し、提案手法では車両の物理的な通過のみで情報伝搬が機能するため、より堅牢な情報共有が可能となる。

### 3.2 ハイブリッド動作モデル

提案システムでは、通信インフラの状態に応じて以下の 2 つのモードを動的に切り替える。

## 3.2 ハイブリッド動作モデル

### 3.2.1 中央制御型 RSU モード

通信インフラが利用可能な状態では、各 RSU は広域ネットワークを介して中央サーバと接続される。避難所情報、道路の通行可否情報、被災状況などのデータは中央サーバ上で統合的に管理される。各 RSU は定期的に検知したデータを中央サーバへ送信し、中央サーバは全域の情報を集約・最適化した上で各 RSU へ再配信する。車両は RSU を経由して常に最新の広域情報を受信できるため、全体最適化された経路選択が可能となる。

この構成の利点は、広域にわたり一貫した情報提供が可能であり、情報の正確性と更新頻度を高く維持できる点にある。一方、中央サーバまたは通信経路が断絶した場合にはシステム全体の機能が停止するという課題を有する。

### 3.2.2 自律分散型 RSU モード

災害により中央サーバとの接続または通信インフラが断絶した場合、各 RSU は自律分散型モードへ移行し、独立した情報管理主体として動作する。このモードでは、各 RSU は中央サーバから切り離され、それぞれが独立した情報管理ノードとして機能する。各 RSU はローカル知識ベースを保持し、自身の通信圏内で得られた通行実績情報や被災情報を蓄積する。

車両は走行中に RSU と V2I 通信を行い、RSU から道路状況情報（通行実績マップ）を取得するとともに、自身の走行履歴や検知した被災情報を RSU へ提供する。車両が情報を保持したまま移動し、別の RSU と通信することで、物理的に離れた RSU 間での情報伝搬が実現される。すなわち、車両が情報の搬送主体（データキャリア）として機能し、DTN における Store-Carry-Forward 方式による情報伝達が行われる。

図 3.2 に自律分散型 RSU による情報伝搬モデルを示す。車両が RSU 間を移動しながら情報を搬送・共有することで、直接通信が不可能な RSU 間においても、車両の移動を介した情報の同期が可能となる。

### 3.3 情報管理と伝搬方式

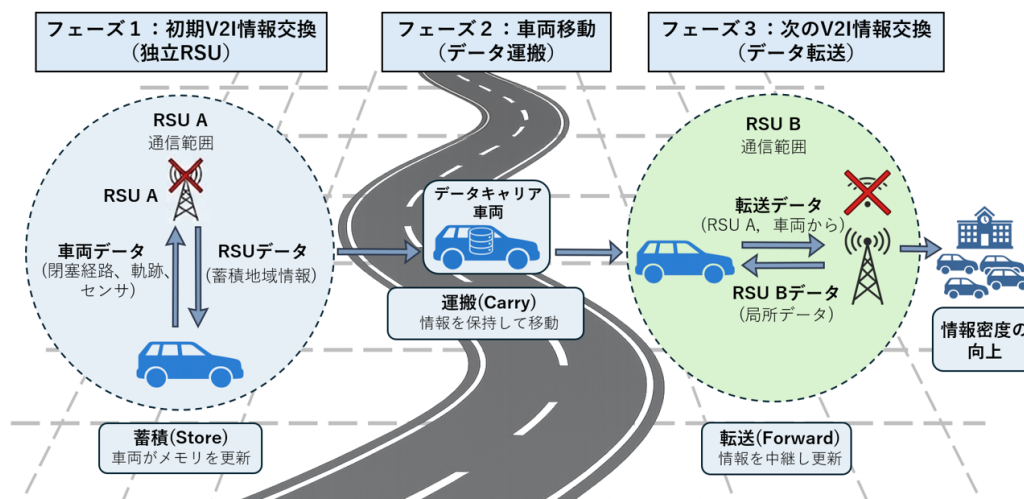


図 3.2 自律分散型 RSU による情報拡散モデル

## 3.3 情報管理と伝搬方式

### 3.3.1 通行実績マップ

本研究では、道路の通行可否状態を管理するためのデータ構造として「通行実績マップ」を定義する。通行実績マップは、各道路リンク（エッジ）に対して通行状態を記録したものであり、RSU および車両の双方が保持する。通行状態は、車載センサ（カメラや LiDAR 等）および車両の走行状況に基づいて以下のルールにより判定される。

1. **通行可能**：車両が道路リンクを通過し終えた場合、当該リンクは「通行可能」と判定される。
2. **通行不能（閉塞）**：車両が道路リンク上で U ターンを行った際に、車載センサなどにより前方の障害物（倒壊物や瓦礫等）が検知された場合、当該 U ターンは閉塞に起因するものと判断され、当該リンクは「通行不能（閉塞）」と判定される。これにより、経路選択に伴う通常の U ターンと閉塞による U ターンが区別される。
3. **渋滞**：道路リンク上の車両密度が閾値を超えた場合、当該リンクは「渋滞」と判定される。

### 3.3 情報管理と伝搬方式

この判定方式により、車両が走行しながら道路の被災状況を検知・記録することが可能となる。

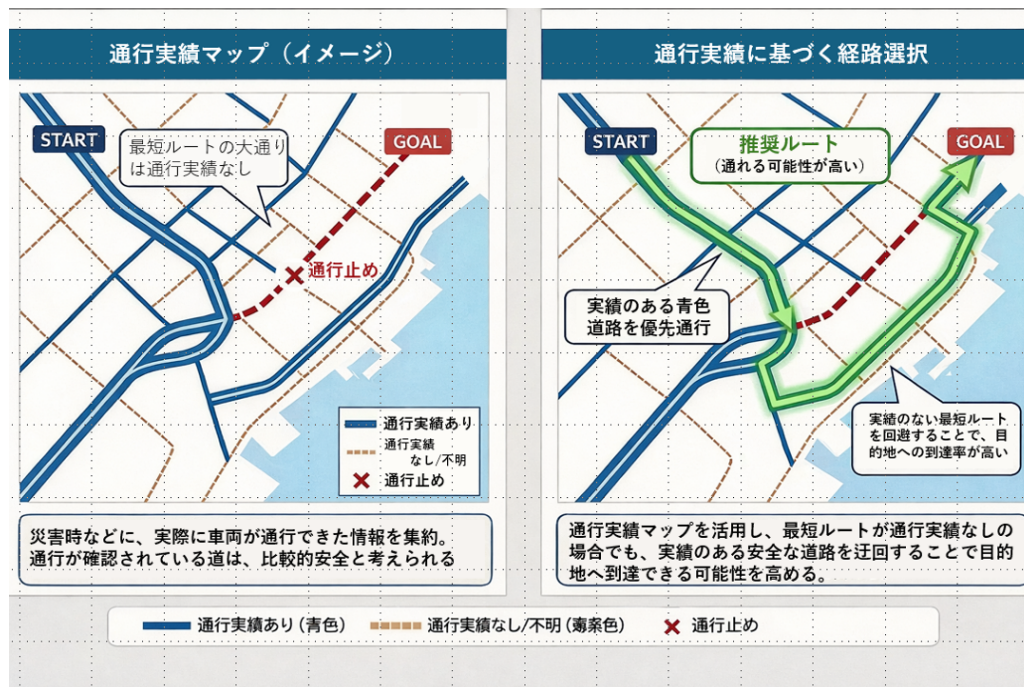


図 3.3 通行実績マップ

#### 3.3.2 情報伝搬プロセス

情報交換は以下の 3 つのフェーズで実施される。

■フェーズ 1：情報の取得と蓄積（Store） 車両が RSU の通信圏内に入ると、RSU は自身が保持する通行実績マップ（閉塞情報、渋滞情報等）を車両へ送信する。車両は受信した情報を自身の保持するマップと統合し、車載メモリに蓄積する。同時に、車両は自身の走行履歴および検知情報を RSU へ送信し、RSU のローカル知識ベースを更新する。このフェーズにより、車両は出発地点周辺の RSU から地域の道路状況に関する情報を取得し、保持する。

■フェーズ 2：車両移動による情報の搬送（Carry） 車両は目的地（避難所）へ向かって移動しながら、フェーズ 1 で蓄積した情報を保持し続ける。移動中、車両は自身の走行デー

### 3.4 通信制御および切替条件

タを記録し、通過した道路の状況（通行可能、閉塞、渋滞等）を随時更新する。この間、車両は情報の搬送主体（データキャリア）として機能し、物理的な移動によって情報を運搬する。

**■フェーズ 3：情報の転送と共有（Forward）** 車両が別の RSU の通信圏内に到達すると、フェーズ 1 で蓄積した他 RSU 由来の情報およびフェーズ 2 で記録した自身の走行実績を、新たな RSU へ転送する。RSU はこれらの情報を受信して自身のローカル知識ベースを更新し、後続の車両への提供に備える。これにより、直接通信できない RSU 間においても、車両の移動を介した間接的な情報共有が実現される。

このサイクルを繰り返すことで、情報は車両の移動に伴って段階的に伝搬し、地域全体で道路状況の共有が実現される。

## 3.4 通信制御および切替条件

提案システムでは、通信インフラの状態を定期的に監視し、状態に応じて中央制御型と自律分散型を自動的に切り替えるシステムを想定している。切替条件を以下に示す。

### 3.4.1 中央制御型から自律分散型への切替

RSU は中央サーバに対して定期的にハートビート信号を送信する。一定時間以上にわたり中央サーバからの応答が得られない場合、RSU は通信インフラの断絶と判断し、自律分散型モードへ移行する。

### 3.4.2 自律分散型から中央制御型への切替

通信経路が復旧し、中央サーバからのハートビート応答が一定時間以上継続して受信された場合、RSU は中央制御型モードへ復帰する。復帰時には、自律分散型モードで蓄積したローカル情報を中央サーバへ同期（アップロード）し、情報の整合性を確保する。

この切替機構により、通信断絶から復旧までの過渡期においても情報の欠落を最小限に抑

### 3.5 提案手法の特徴

え、継続的な情報提供を実現する。

## 3.5 提案手法の特徴

本節では、提案モデルの主要な特徴をまとめる。

■**通信インフラ非依存性** 各 RSU が独立して動作し、車両を情報の搬送主体として活用することで、携帯電話網やインターネットが広範囲で断絶した状況においても情報共有を継続できる。

■**Store-Carry-Forward 方式による広域伝搬** RSU 間で直接通信が不可能な場合においても、車両が物理的に移動することで情報を搬送するため、疎なネットワーク環境においても広域にわたる情報伝搬が可能である。

■**ハイブリッド構成による実用性** 平常時には高精度な中央制御型として動作し、災害時には耐障害性の高い自律分散型として動作することで、既存の ITS インフラを有効活用しつつ、災害時の情報共有継続性を確保する。

## 第 4 章

# シミュレーション実験

本章では、提案手法の有効性を検証するために構築したシミュレーション環境、実験シナリオ、および評価指標について述べる。

### 4.1 実験環境

#### 4.1.1 シミュレータおよび開発環境

交通シミュレータには SUMO (Simulation of Urban MObility, Version 1.21.0) を使用し、外部制御インターフェースとして TraCI (Traffic Control Interface) を用いた。シミュレーション制御プログラムは Python 環境で実装した。シミュレーションの 1 ステップは 1 秒に相当する。

#### 4.1.2 対象地域

実験対象地域には、南海トラフ地震による津波被害が想定される高知県香南市吉川町の一部地域の道路網を選定した。地図データは OpenStreetMap (OSM) より取得し、SUMO のネットワークファイル形式に変換して使用した。

対象エリアは沿岸部を含む市街地であり、図 4.1 に OSM より取得した地図を、表 4.1 に道路網の構成を示す。避難所は高台に位置する指定緊急避難場所を設定した。図 4.2 に避難所の配置を示す。緑色で示されたエッジが避難所として設定された道路区間である。

## 4.1 実験環境

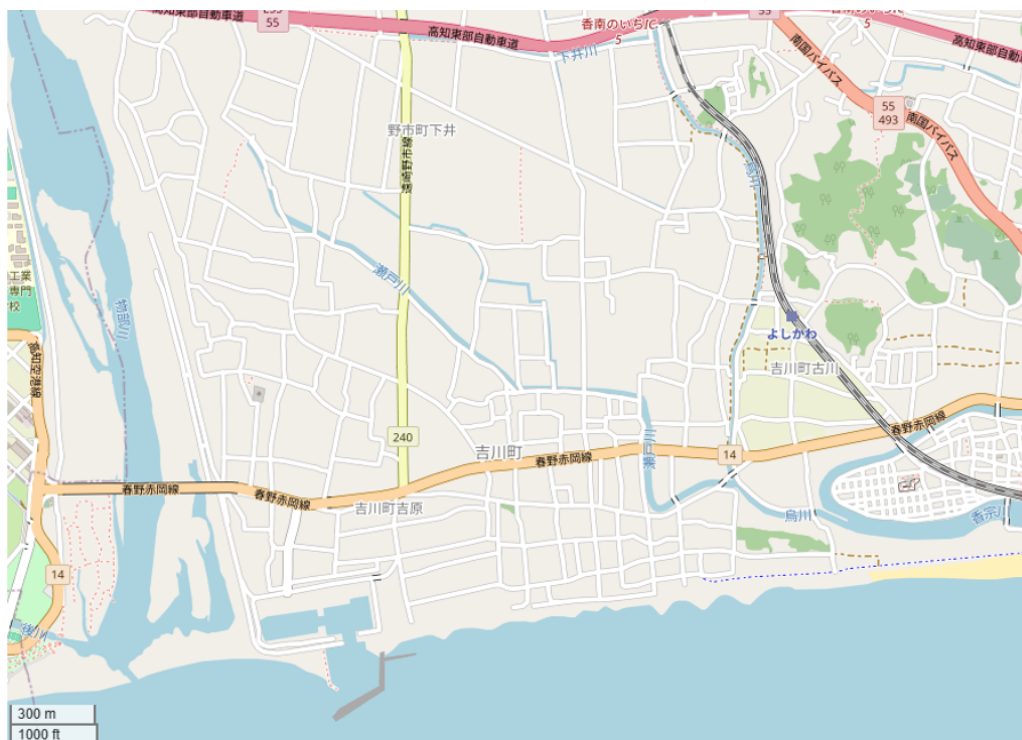


図 4.1 対象地域（高知県香南市吉川町の一部地域）

表 4.1 道路網の構成

項目	数量
エッジ（道路区間）数	643
ノード（交差点）数	220
避難所	高台の指定緊急避難場所（14箇所、反対車線を含め 28 エッジ）

## 4.2 シミュレーションにおける処理

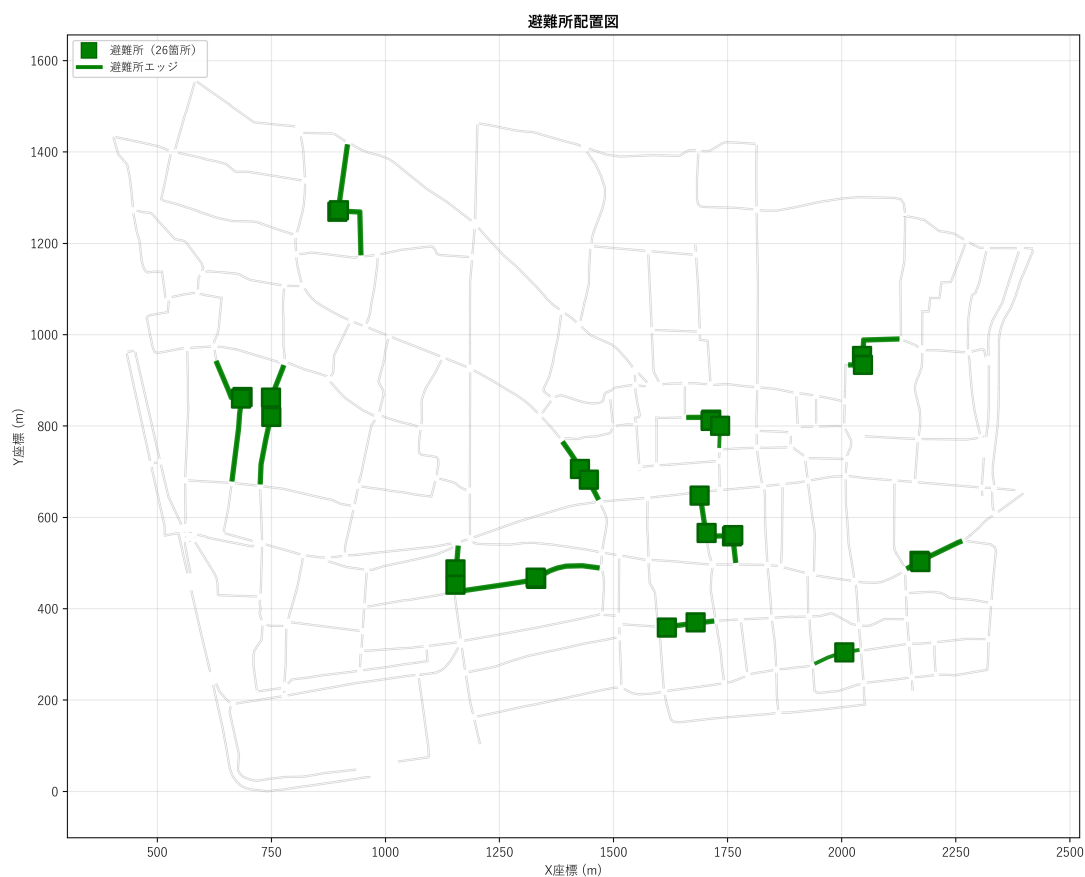


図 4.2 避難所配置図

## 4.2 シミュレーションにおける処理

前節で述べた SUMO および TraCI を用いて、提案する自律分散型 V2I 通信モデルを Python 環境で実装した。本節では、シミュレーション上での主要な処理について述べる。

本シミュレーションでは、各道路区間（エッジ）に対して経路探索用の重み（以下、エッジコスト）を設定している。エッジコストの初期値は各エッジの通行所要時間であり、閉塞や渋滞が検知された場合にはペナルティとして大きな重みが加算される。車両はエッジコストの総和が最小となる経路をダイクストラ法により計算し、最寄りの避難所を目指して走行する。

## 4.2 シミュレーションにおける処理

### 4.2.1 情報交換処理

第3章で述べた Store-Carry-Forward 方式による情報伝搬は、車両から RSU への情報アップロード処理と、RSU から車両への情報配信処理の2段階で実現される。

#### 車両から RSU への情報アップロード

車両が RSU の通信圏内に進入した際、車両が保持する走行履歴およびエッジコスト情報が RSU へ送信される。RSU は受信したデータに基づき、表 4.2 に示す判定基準でローカル知識ベースを更新する。

表 4.2 エッジコストに基づく通行状態の判定基準

条件	判定結果
$cost \geq LW$	閉塞（通行不能）
$SW \leq cost < LW$	渋滞
$cost < SW - 10$	渋滞解消

ここで、 $SW$  および  $LW$  は重みの閾値パラメータであり、詳細は 4.5.2 節で述べる。閉塞情報は最優先で処理され、一度閉塞と判定されたエッジは渋滞や渋滞解消の判定で上書きされない。

#### RSU から車両への情報配信

RSU は自身のローカル知識ベースを、通信範囲内の全車両に対して配信する。配信は閉塞情報、渋滞情報、渋滞解消情報の順に優先度をつけて行われる。車両は受信した情報に基づきエッジコストを更新し、現在の経路上に閉塞または渋滞エッジが含まれる場合、ダイクストラ法による経路再探索を実行する。

## 4.3 RSU の配置

### 4.2.2 車両の閉塞検知と U ターン動作

#### 閉塞の検知

車両は事前に閉塞情報を保持していない限り、閉塞箇所を通行可能な道路として認識し、通常どおり走行する。車両が閉塞エッジに物理的に到達し、通行不能であることを検知した時点で、当該エッジを閉塞として自身の知識ベースに記録する。この情報は、以降の V2I 通信時に RSU へ報告され、他の車両への共有に利用される。

#### U ターン動作

閉塞を検知した車両は、当該エッジ上で U ターンを行い、来た道を引き返す。SUMO における U ターンは、交差点での方向転換として処理される。このとき、SUMO の交通ルールに基づき、U ターン動作には以下の優先順位が適用される。

- 直進および左折の車両が最も高い優先順位を持つ
- 右折の車両が次に高い優先順位を持つ
- U ターンの車両は最も低い優先順位が割り当てられる

この優先順位の設定により、U ターンを試みる車両は、交差点において直進・右折・左折の車両がすべて通過するまで待機する必要がある。この動作特性は、特定の道路構造において車両の滞留や立ち往生を引き起こす要因となり得る。その詳細な発生メカニズムについては、第 5 章にて実験結果に基づき分析する。

## 4.3 RSU の配置

### 4.3.1 ノードベース配置方式

本研究では、RSU を道路網のノード（交差点）に設置する方式を採用した。交差点に RSU を配置する理由は以下のとおりである。

### 4.3 RSU の配置

- **通信効率の向上**：交差点は複数の道路が交わる地点であり，多方向からの車両と通信可能
- **情報収集の効率化**：交差点を通過する車両から多様な経路の情報を収集可能
- **設置の現実性**：実際の RSU 設置においても，信号機や道路標識と併設しやすい交差点が選択されることが多い

各 RSU は，設置されたノードの座標位置を中心として，半径 100m の円形通信範囲を持つ。通信範囲内に位置する車両とのみ V2I 通信が可能である。

#### 4.3.2 RSU 設置台数

本実験では，RSU を主要交差点（幹線道路の結節点）に 17 台設置した。これは対象地域のノード総数（220）に対して約 7.7%のカバー率に相当する。RSU 設置ノードの選定は，事前の調査に基づき，交通量の多い主要交差点およびボトルネックが発生しやすい交差点を優先的に選択する方針とした。本実験で使用した RSU 設置位置を図 4.3 に示す。RSU は主要交差点 17 箇所に設置し，各 RSU の通信範囲（半径 100m）を円で示している。

## 4.4 シミュレーションシナリオ

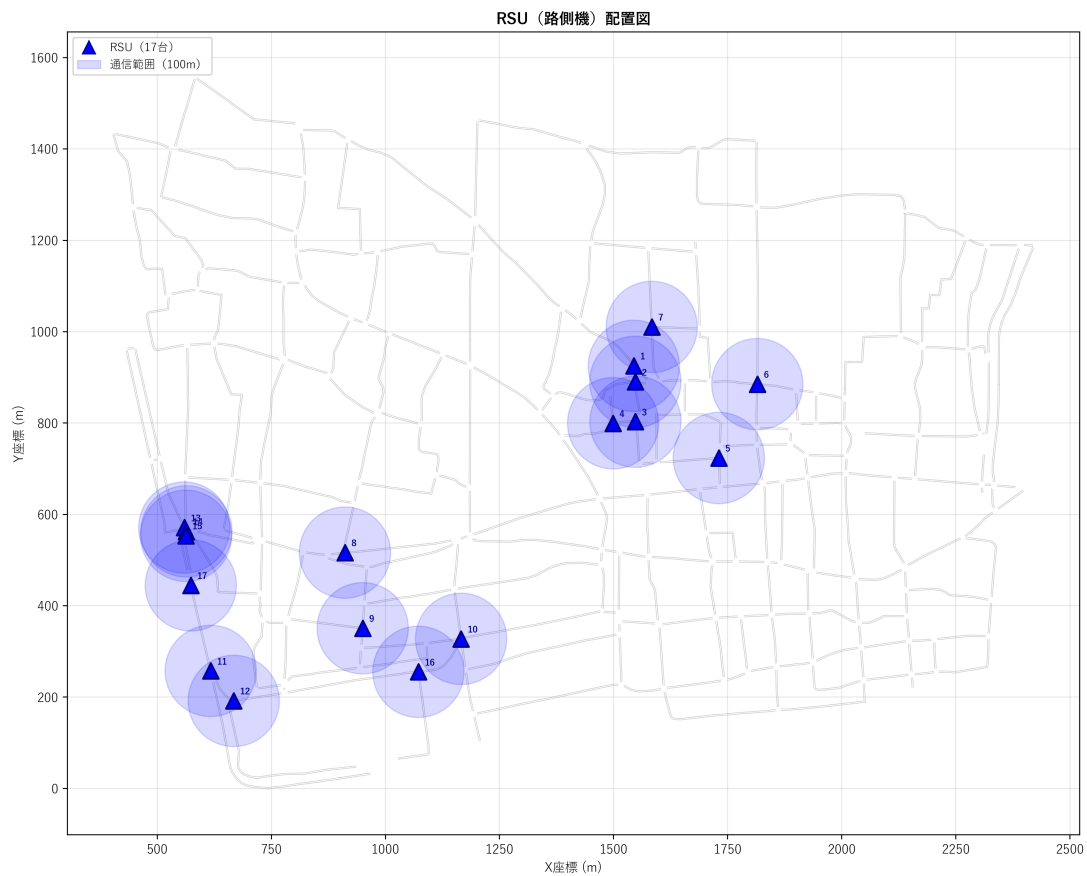


図 4.3 RSU 配置図

## 4.4 シミュレーションシナリオ

本実験では、大規模災害発生直後の避難行動を模擬するため、以下のシナリオを設定した。

### 4.4.1 災害発生と避難開始

シミュレーション開始時点 ( $t = 0$ ) で全車両が同時に避難行動を開始する。この時点では道路の閉塞情報は車両に周知されておらず、各車両は全エッジが通行可能であると仮定した初期エッジコストに基づき、ダイクストラ法で算出された最寄りの避難所への最短経路を走行する。

## 4.4 シミュレーションシナリオ

### 4.4.2 道路閉塞の発生

家屋倒壊や災害による被害を想定し、特定の道路リンク（エッジ）を通行不能（閉塞）状態に設定する。本実験では、事前の調査により避難行動への影響が大きいと判断された21箇所を閉塞箇所として選定した。閉塞箇所は幹線道路および生活道路を含み、シミュレーション開始時点から閉塞状態とした。

車両は閉塞箇所に物理的に到達するか、またはV2I通信により閉塞情報を事前を取得するまで、当該道路が通行可能であると認識する。閉塞箇所に到達した車両は、通行不能を検知した時点で当該エッジを閉塞として自身の知識ベースに記録し、Uターンを行って引き返す。記録された閉塞情報は、以降のV2I通信時にRSUへ報告される。本実験で設定した21箇所の道路閉塞の配置を図4.4に示す。閉塞箇所は赤色で示され、幹線道路および生活道路の両方を含む。

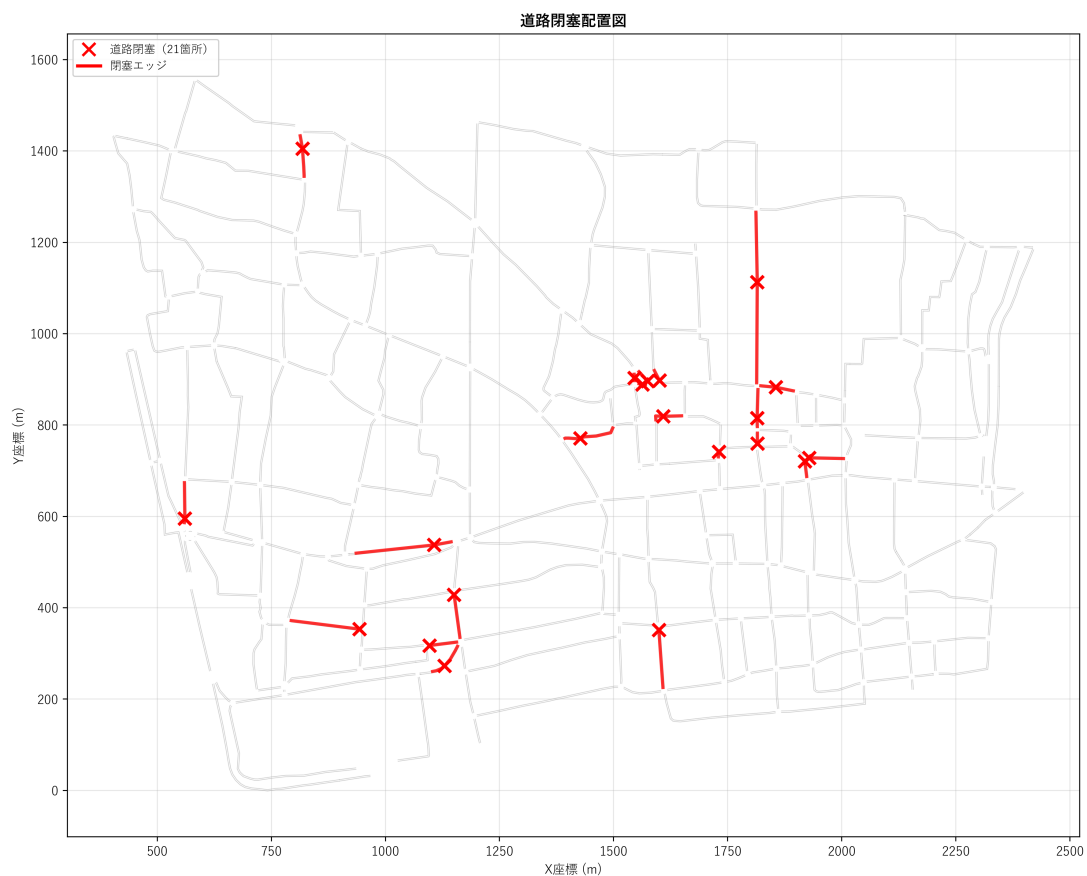


図 4.4 道路閉塞配置図

## 4.5 実験条件

### 4.4.3 通信モードの設定

本実験では、以下の3つの通信モードを比較対象として設定した。

**情報拡散なし (no\_info)** V2I 通信を行わず、車両は閉塞箇所到達して初めて通行不能を認識する。

**中央制御型 (centralized)** 全 RSU が中央サーバを介して即座に情報を共有できる理想的な通信環境を想定。いずれかの車両が検知した閉塞情報が、全 RSU を経由して全車両に即時配信される。

**自律分散型 (distributed)** 通信インフラが断絶した状況を想定。各 RSU は独立して動作し、車両の Store-Carry-Forward 方式のみで情報を伝搬する。これが本研究の提案手法である。

## 4.5 実験条件

### 4.5.1 車両台数

交通密度の影響を評価するため、車両台数を表 4.3 に示す3段階に設定した。

対象地域が属する高知県香南市吉川町の人口は 1,397 人、世帯数は 831 世帯である [6]。また、高知県における 1 世帯当たりの自家用車保有台数は約 1.7 台である [7]。これらの統計データに基づく当該地区の自動車保有推定台数は以下のとおりである：

$$831 \text{ 世帯} \times 1.7 \text{ 台/世帯} \approx 1,413 \text{ 台} \quad (4.1)$$

本シミュレーションでは、対象道路網のエッジ数 (643) を基準として車両台数を設定した。各エッジから出発する車両数 (VN) を 1~3 台に変化させることで、表 4.3 に示す3段階の交通密度を実現した。高密度条件 (VN=3 : 1,929 台) は、推定保有台数 (約 1,413 台) を上回る値であり、地区内の車両に加えて通過交通や近隣地区からの流入車両が存在する状況を想定している。中密度条件 (VN=2 : 1,286 台) は、推定保有台数に近い値であり、地区内のほぼ全車両が避難を行う場合を想定している。低密度条件 (VN=1 : 643 台) は、東

## 4.5 実験条件

日本大震災において避難者の約 57%が自動車を利用した実績 [1] を踏まえ、保有車両の一部が避難に使用される場合を想定した条件である。

表 4.3 車両台数の設定

パラメータ	車両台数	説明
VN=1	643 台	各エッジから 1 台出発 (低密度)
VN=2	1,286 台	各エッジから 2 台出発 (中密度)
VN=3	1,929 台	各エッジから 3 台出発 (高密度)

車両は各エッジの始点から出発し、エッジコストに基づきダイクストラ法で計算された最寄りの避難所への最短経路を走行する。車両の最高速度は 9 km/h に設定した。これは、東日本大震災における自動車避難時の平均移動速度が約 9 km/h であったとする調査結果 [3] に基づいている。また、災害発生直後を想定し、信号機は全消灯の状態とした。

### 4.5.2 重みパラメータ

経路探索における重みパラメータを表 4.4 に示す。

表 4.4 重みパラメータの設定

パラメータ	説明	設定値
$SW$	渋滞の重み	$10^5$
$MW$	中程度の障害重み	$10^8 (= SW \times 10^3)$
$LW$	閉塞 (通行不能) の重み	$10^{11} (= MW \times 10^3)$

これらの重みにより、閉塞エッジを最優先で回避し、次いで渋滞エッジを回避するような経路選択が実現される。 $MW$  は  $SW$  と  $LW$  の間に設けた中間閾値であり、エッジコストが渋滞と閉塞のいずれに該当するかを判定する境界として使用される。重みの大小関係は  $SW < MW < LW$  であり、閉塞情報は常に渋滞情報より優先される。

## 4.6 評価指標

### 4.5.3 実験条件のまとめ

本実験における主な実験条件を表 4.5 にまとめる。

表 4.5 シミュレーション実験条件の概要

項目	設定値
シミュレータ	SUMO 1.21.0 / TraCI
1 ステップ	1 秒
対象地域	高知県香南市吉川町の一部地域 (643 エッジ, 220 ノード)
車両台数	643 台, 1,286 台, 1,929 台
車両出発	全車両が $t = 0$ で同時出発
車速	各道路の最高速度 (9 km/h) [3]
信号機	全消灯
閉塞箇所数	21 箇所
RSU 配置方式	ノードベース配置 (交差点に設置)
RSU 設置台数	17 台
RSU 通信範囲	100 m
V2I 通信間隔	10 秒 (10 ステップ)
通信モード	情報拡散なし / 中央制御型 / 自律分散型

## 4.6 評価指標

提案手法の有効性を定量的に評価するため、以下の指標を用いる。

### 4.6.1 避難完了時間

全車両が避難所に到着するまでに要した時間 (秒) を測定する。この時間が短いほど、迅速な避難が実現できたことを示す。避難完了時間は、情報共有の効果をも最も直接的に示す指

## 4.6 評価指標

標である。

### 4.6.2 経路再探索回数

シミュレーション中に実行された経路再探索の総回数を測定する。この指標は、情報共有により不要な経路変更がどの程度削減されたかを示す。

経路再探索は以下の2種類に分類される。

- **事前回避型 (Proactive)** : V2I 通信により閉塞情報を事前を取得し、当該エッジに到達する前に経路を変更。効率的な避難行動を示す。
- **事後対応型 (Reactive)** : 閉塞箇所に物理的に到達し、U ターン後に経路を変更。非効率な避難行動を示す。

情報共有が有効に機能している場合、事前回避型の割合が増加し、事後対応型の割合が減少することが期待される。

次章では、これらの条件下で実施したシミュレーション実験の結果を示し、提案手法の有効性について考察する。

## 第 5 章

# 実験結果および考察

### 5.1 概要

本章では，第 4 章で設定したシミュレーション環境を用いて実施した実験結果について述べる．本実験では，閉塞箇所および RSU 設置箇所の組み合わせについて複数のパターンを検証した．本章では，その中から代表的な 1 パターンの結果を示し，情報拡散なし，中央制御型，および自律分散型（提案手法）の 3 つの通信モードを比較することで，提案手法の有効性を評価する．評価指標としては，避難完了時間および経路再探索回数を用いた．

### 5.2 避難完了時間の比較

図 5.1 に，各通信モードにおける避難完了時間の比較結果を示す．

## 5.2 避難完了時間の比較

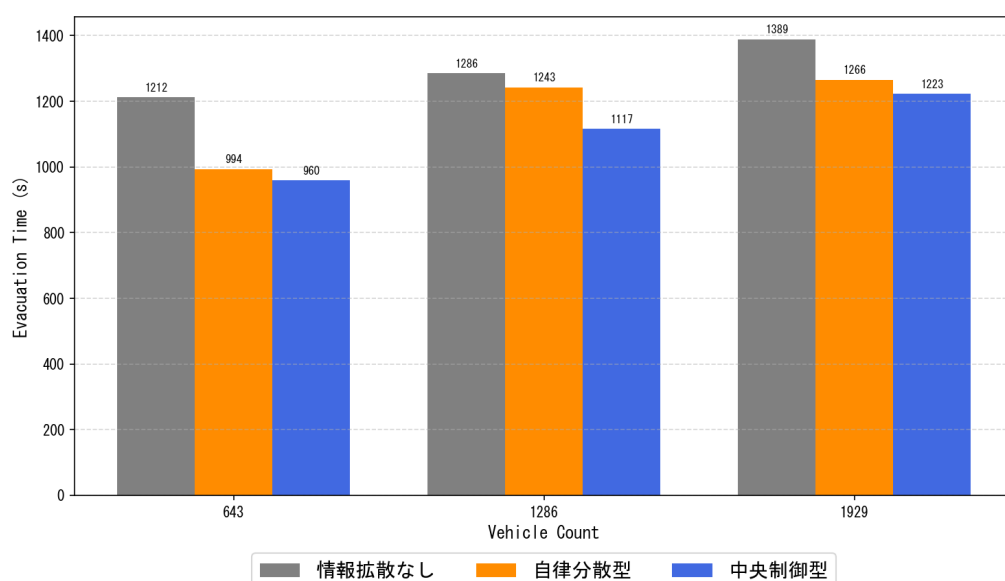


図 5.1 通信モード別の避難完了時間

表 5.1 に各条件における避難完了時間の数値を示す。

表 5.1 通信モード別の避難完了時間 (秒)

車両台数	情報拡散なし	中央制御型	自律分散型
643 台	1,212	960	994
1,286 台	1,286	1,117	1,243
1,929 台	1,389	1,223	1,266

実験の結果、車両台数に関わらず、情報共有を行わない場合と比較して、V2I を利用した情報共有を行った場合に避難完了時間が短縮される傾向が確認された。

情報拡散なしの場合、車両は道路閉塞箇所に物理的に到達して初めて通行不能を認識するため、U ターンや迂回を伴う経路変更が発生する。一方、V2I を導入した場合には、車両は閉塞箇所に到達する以前に RSU から閉塞情報を取得できるため、事前に回避経路を選択することが可能となる。この結果、不要な進入や無駄な移動距離が抑制され、避難完了時間の短縮につながったと考えられる。具体的には、車両台数 1,929 台の条件において、情報拡散

### 5.3 経路再探索回数の比較

なし（1,389 秒）に対して中央制御型は 1,223 秒（約 12.0%短縮），自律分散型は 1,266 秒（約 8.9%短縮）であった。

### 5.3 経路再探索回数の比較

図 5.2 に、各通信モードにおける経路再探索回数の比較結果を示す。

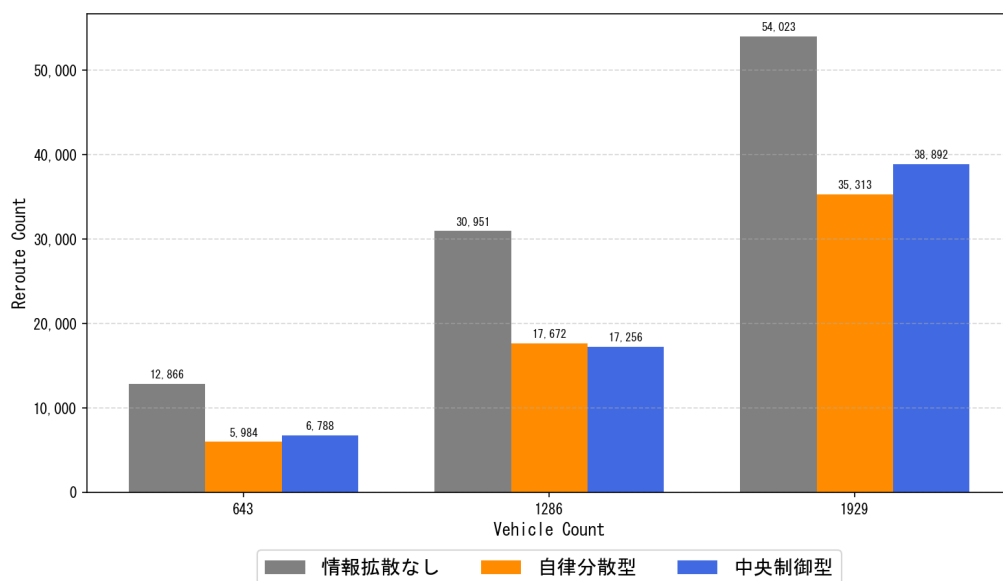


図 5.2 通信モード別の経路再探索回数

表 5.2 に各条件における経路再探索回数の数値を示す。

表 5.2 通信モード別の経路再探索回数（回）

車両台数	情報拡散なし	中央制御型	自律分散型
643 台	12,866	6,788	5,984
1,286 台	30,951	17,256	17,672
1,929 台	54,023	35,313	38,892

V2I 導入によって避難完了時間の短縮とともに、経路再探索回数の大幅な減少が確認された。車両台数 1,929 台の条件では、情報拡散なしの 54,023 回に対して中央制御型は 35,313

## 5.4 中央制御型と自律分散型の比較

回（約 34.6%減少）、自律分散型は 38,892 回（約 28.0%減少）であった。情報拡散なしの場合、車両は閉塞箇所到達時に初めて経路を再計算するため、多数の経路再探索が発生する。V2I を導入した場合、事前に閉塞情報を取得することで最初から適切な経路を選択できるため、経路再探索回数が減少したと考えられる。経路再探索回数の減少は、不要な移動距離および移動時間の削減を意味し、避難効率の向上に直結する。

## 5.4 中央制御型と自律分散型の比較

### 5.4.1 避難完了時間

中央制御型は全 RSU が即座に情報を共有するため、最も効率的であり、実験結果においても最短の避難完了時間を示した。一方、提案手法である自律分散型は、中央制御型と比較すると避難完了時間は増加するものの、中央制御型に近い性能を達成した。例えば、車両台数 643 台の条件では、自律分散型の避難完了時間は 994 秒であり、中央制御型の 960 秒と比較して約 3.5%の差に留まった。車両台数 1,929 台の条件においても、自律分散型は 1,266 秒であり中央制御型の 1,223 秒と比較して約 3.5%の差であった。いずれの条件においても、情報拡散なしの場合と比較して避難完了時間を短縮できており、車両を介した Store-Carry-Forward 方式が有効に機能したことを示している。

### 5.4.2 自律分散型における情報伝搬の遅延特性

自律分散型では、閉塞情報の伝搬に車両の物理的な移動が必要となるため、中央制御型と比較して情報共有に構造的な遅延が生じる。この遅延特性について分析する。

自律分散型において、ある閉塞箇所の情報が他の車両に共有されるまでには、先行車両が閉塞箇所に到達して U ターンを行い、RSU の通信圏内まで移動し、RSU が閉塞情報を受信してローカル知識ベースを更新した後、後続車両がその RSU の通信圏内に進入して情報を取得するというプロセスを経る必要がある。

この構造により、閉塞箇所と RSU の位置関係が情報伝搬効率に大きく影響することが確

## 5.4 中央制御型と自律分散型の比較

認められた。閉塞箇所が RSU から離れている場合、先行車両が U ターン後に RSU まで戻るのに時間を要するため、後続車両への情報提供が遅延する。その間に閉塞箇所へ向かう後続車両は、情報を取得できないまま同じ閉塞箇所に到達し、同様に U ターンを余儀なくされる。

さらに、先行車両の経路選択によっては、閉塞情報が RSU に蓄積される機会自体が失われる場合があることも確認された。具体的には、先行車両が閉塞箇所です U ターンした後、RSU の手前で別の経路へ分岐した場合、当該先行車両は閉塞情報を保持したまま RSU の通信圏内を通過しないため、RSU に情報が蓄積されない。この結果、後続車両がその RSU を通過しても閉塞情報を取得できず、最終的に同じ閉塞箇所に到達して U ターンを余儀なくされる。

このように、自律分散型では情報が特定の RSU に局所的に蓄積されるため、車両の経路と RSU の配置の組み合わせによって情報取得の可否が左右される。この課題に対しては、RSU 間で車両を介した情報伝搬が十分に行われるまでの時間的猶予が必要であり、RSU 設置密度の向上や主要分岐点への RSU 配置が有効な対策として考えられる。この特性は、閉塞が発生しやすい箇所（狭隘道路、橋梁、トンネル等）や避難所の近傍に RSU を設置することで、情報伝搬の遅延を軽減できる可能性を示唆している。

### 5.4.3 交通集中

中央制御型は情報共有速度で優れる一方で、全車両が同一の最新情報に基づいて一斉に経路選択を行うため、経路選択の同期による弊害も確認された。具体的には、多数の車両が特定の「その時点での最適経路」に殺到し、避難所周辺や特定のボトルネック箇所で激しい渋滞が発生するケースが見られた。この結果、個々の車両が最適行動をとったにもかかわらず、全体としては避難時間が遅延するという社会的ジレンマ（個人にとっての合理的選択が集団全体では非効率な結果をもたらす現象）が生じる可能性が確認された。

## 5.5 車両台数別の分析

### 5.4.4 立ち往生の発生

一部の実験ケースにおいて、立ち往生（デッドロック）の発生が確認された。これは、閉塞箇所でも U ターンしようとする車両と、別方向から走行してくる車両が同一の狭いエリアで混在し、互いの進路を塞ぎ合うことで発生する。特に、U ターン車両は SUMO の交通ルールにおいて最も低い優先順位が割り当てられているため、対向方向からの直進車両が継続的に流入する間は U ターンを実行できず、ループ内の車両密度が増加して最終的にデッドロックに至る。この現象は自律分散型に限らず情報拡散なしの条件でも発生しており、閉塞箇所周辺での車両行動に起因する構造的な問題である。このような現象は、実環境においても災害時の混乱下で発生し得るリスクであり、RSU の配置戦略や交通制御の観点から対策を検討する必要がある。また、V2V 通信など車両間で直接情報を交換する手段を併用することで、RSU の通信範囲外においても閉塞情報を事前に共有でき、立ち往生の発生リスクを低減できる可能性がある。

## 5.5 車両台数別の分析

車両台数（VN=1, 2, 3）ごとの実験結果について分析する。

### 5.5.1 車両台数 643 台（VN=1）の場合

車両台数 643 台の場合、道路の混雑度は低く、車両間の干渉は最小限であった。自律分散型の避難完了時間は 994 秒であり、中央制御型の 960 秒との差はわずか 34 秒（約 3.5%）に留まった。また、情報拡散なし（1,212 秒）に対しては約 18.0%の短縮を示しており、3 条件の中で最も高い短縮率であった。この条件下では、道路混雑が少ないため車両の移動が円滑に行われ、データキャリアとしての機能が効率的に発揮されたと考えられる。また、この条件下では、避難完了時間を決定づける主な要因は避難所から遠方に位置する車両の移動距離であった。遠方の車両が閉塞箇所に到達して迂回を強いられるか、V2I 通信により閉塞情報を事前に取得し回避経路を選択できるかが、避難完了時間を左右する主要な要因であった。

## 5.6 考察

### 5.5.2 車両台数 1,286 台 (VN=2) の場合

車両台数 1,286 台の場合、道路の混雑度が上昇し、閉塞箇所周辺での渋滞が発生しやすくなった。中央制御型の避難完了時間は 1,117 秒であり情報拡散なし (1,286 秒) に対して約 13.1%の短縮を示した。一方、自律分散型は 1,243 秒であり、短縮率は約 3.3%にとどまった。自律分散型の短縮幅が VN=1 の場合と比較して小さくなった要因として、車両密度の増加に伴う閉塞箇所周辺での渋滞発生により、データキャリアとなる車両の移動が阻害され、情報伝搬に時間を要したことが考えられる。

### 5.5.3 車両台数 1,929 台 (VN=3) の場合

車両台数 1,929 台の場合、道路の混雑度がさらに上昇し、複数箇所での渋滞が発生する状況となった。自律分散型の避難完了時間は 1,266 秒であり、情報拡散なし (1,389 秒) に対して約 8.9%の短縮を示した。VN=2 の場合 (約 3.3%短縮) と比較して短縮率が回復した要因として、車両密度の増加によりデータキャリア数がさらに増え、閉塞箇所周辺での渋滞にもかかわらず情報伝搬の機会が増加したことが考えられる。一方、この条件下では避難完了時間を決定づける主な要因は避難所周辺のボトルネックであった。多くの車両が一斉に避難所へ殺到することで、避難所入口付近で激しい渋滞が発生し、これが避難完了時間を律速する結果となった。情報共有により閉塞箇所は回避できたものの、最終的な避難所への到着においては、物理的な道路容量の限界による影響が大きく現れることが確認された。

## 5.6 考察

以上の実験結果から、以下の知見が得られた。

1. **V2I 通信による情報共有の有効性**：情報拡散なしの場合と比較して、V2I を利用した情報共有により避難完了時間が短縮され、経路再探索回数が減少することが確認された。これは、事前に閉塞情報を取得することで不要な経路変更を回避できるためである。

## 5.6 考察

2. **自律分散型モデルの実用性**：提案する自律分散型 V2I モデルは、中央制御型と比較すると避難完了時間は増加するものの、通信インフラ断絶環境下においても情報共有を継続できる。車両をデータキャリアとして活用する Store-Carry-Forward 方式により、RSU 間の直接通信ができない場合においても情報伝搬を行うことができた。
3. **車両密度と情報伝搬効率の関係**：車両密度が高いほどデータキャリアとなる車両数が増加し、自律分散型における情報伝搬効率が向上する傾向が確認された。

これらの結果から、提案する自律分散型 V2I 通信モデルは、通信インフラ断絶環境下においても有効に機能し、災害時の避難支援における情報共有基盤として有望であることが確認された。

# 第 6 章

## おわりに

### 6.1 本研究の成果

本研究では、通信インフラが断絶した災害環境下においても情報共有を継続可能な自律分散型 V2I 通信モデルを提案し、その有効性を交通シミュレーションにより評価した。

提案モデルは、通信インフラの状態に応じて中央制御型と自律分散型を切り替えるハイブリッド構成を採用している。平常時には中央サーバを介した集約的な情報統合を行い、災害時には各 RSU (Road Side Unit) が独立して動作する自律分散型通信へ移行する。特に、車両を情報の搬送主体 (データキャリア) として利用する Store-Carry-Forward 方式を導入することで、通信インフラが断絶した状況においても RSU 間の間接的な情報共有を実現できることを示した。

高知県香南市吉川町の一部地域の道路網を用いた避難シミュレーションの結果、以下の知見が得られた。

1. **V2I 通信による情報共有の有効性**：情報共有を行わない場合と比較して、V2I を利用した情報共有により避難完了時間が短縮され、経路再探索回数が減少することが確認された。これは、車両が閉塞箇所到達する前に RSU から情報を取得し、事前に回避経路を選択できるためである。
2. **自律分散型モデルの実用性**：通信インフラが断絶した自律分散型構成においても、車両を介した情報伝搬により情報共有が継続された。中央制御型と比較すると避難完了時間は増加するものの、情報拡散なしの場合と比較して有意な改善が確認された。これによ

## 6.2 今後の課題

り、従来の中央制御型では機能停止に陥る状況下においても、提案手法は避難支援を継続可能であることが示された。

3. **車両密度と情報伝搬効率の関係**：車両密度が高いほどデータキャリアとなる車両数が増加し、自律分散型における情報伝搬効率が向上する傾向が確認された。これは、Store-Carry-Forward方式の特性として、移動体の数が情報伝搬速度に直接影響するためである。

これらの結果から、提案する自律分散型 V2I 通信モデルは、通信インフラが利用できない災害環境下においても有効に機能し、地域単位での情報共有と避難行動支援に寄与する有望な手法であることが明らかとなった。本研究は、既存の V2I インフラを防災・減災分野へ応用する新たな方向性を提示するものである。

## 6.2 今後の課題

本研究では、シミュレーションを通じて提案手法の基本性能を検証したが、実用化に向けてはいくつかの課題が残されている。以下に今後の発展の方向性について述べる。

### 6.2.1 ハイブリッド運用の自動制御と通信パラメータの最適化

本研究では、中央制御型と自律分散型の動作をシナリオ条件として固定的に設定したが、実運用環境では通信状態が時間的・空間的に変動することが想定される。そのため、RSU がバックホール回線の状態を監視し、閾値に基づいて自律的にモードを切り替える制御機構の実装が必要である。また、RSU の通信範囲、情報更新間隔、および設置密度は情報拡散効率に影響を与える重要なパラメータであり、道路網の特性や想定される災害シナリオに応じた最適化が求められる。

## 6.3 むすび

### 6.2.2 実環境での検証と災害シナリオの多様化

本研究の評価はシミュレーション上で実施したものであり、実際の無線通信における遅延やパケットロスなどの物理的影響は考慮していない。また、道路閉塞のみを災害状況として設定したが、実際の災害では建物倒壊、火災延焼、液状化など複合的な要因が同時に発生する。今後は、実機 RSU および車載端末を用いたフィールド実験による検証と、より現実的な災害シナリオの構築を目指す。

### 6.2.3 セキュリティおよび情報鮮度の管理

災害時の混乱に乗じた誤情報の拡散や悪意ある通信を防止することは、避難支援システムにおいて重要な課題である。また、Store-Carry-Forward 方式では古い情報がネットワーク内に滞留し続ける可能性があるため、情報の鮮度管理も必要となる。今後は、情報の真正性を検証するための認証機構や、データに生存期間 (TTL: Time To Live) を付与して古い情報を自動的に破棄する仕組みについて検討する。

## 6.3 むすび

本論文では、大規模災害時における通信インフラ断絶問題に対し、路側機と車両が協調して自律的に情報共有を行う新たな V2I モデルを提案した。シミュレーション実験を通じて、本手法が通信インフラ断絶下においても避難支援に有効であることを示した。今後は、前述した課題に取り組み、実用性を備えた防災情報基盤としての確立を目指す。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，指導教員及び主査を担当していただいた高知工科大学 横山和俊教授には，心より感謝いたします。またお忙しい中，本研究の副査をお引き受け頂きました同学群福本昌弘教授，高田喜朗教授のお二方に感謝申し上げます。さらに，研究室の同期，後輩の方々には多くご教授頂きました。心より感謝いたします。

# 参考文献

- [1] 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会, “平成 23 年度 東日本大震災における避難行動等に関する面接調査（住民）”, 内閣府, 気象庁, 総務省消防庁, 2012.
- [2] 杉野修弥, 横山和俊, “災害発生時における津波リスクと情報拡散手段の組み合わせを考慮した避難手法の評価”, 第 31 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.248-252, 2023.
- [3] 国土交通省都市局街路交通施設課・都市計画課, “東日本大震災の津波被災現況調査結果（第 3 次報告）～津波からの避難実態調査結果（速報）～”, <https://www.mlit.go.jp/common/000186474.pdf>, (参照 2025-01-24).
- [4] 総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課 新世代移動通信システム推進室, “自動運転の実現に向けた総務省の取組”, [https://www.sip-adus.go.jp/evt/workshop2020/file/cv/07CV\\_05J\\_Ebara.pdf](https://www.sip-adus.go.jp/evt/workshop2020/file/cv/07CV_05J_Ebara.pdf), (参照 2025-01-16).
- [5] Yudai Yahara, Arata Kato, Mineo Takai and Susumu Ishihara, “On Interactions between Evacuation Behavior and Information Dissemination via Heterogeneous DTN”, *Journal of Information Processing*, Vol.30, pp.120-129, 2022.
- [6] 高知県香南市, “地区別人口・世帯数”, 香南市ホームページ, <https://www.city.kochi-konan.lg.jp/soshikikarasagasu/shiminhokenka/konanshinogaiyo/1/2493.html>, (参照 2025-08-15).
- [7] 高知県, “高知県主要指標第 10 章運輸・通信”, 高知県統計書, [https://www.pref.kochi.lg.jp/doc/2023syuyousihyou/file\\_contents/s10\\_I.pdf](https://www.pref.kochi.lg.jp/doc/2023syuyousihyou/file_contents/s10_I.pdf), (参照 2025-08-15).