

博士論文

車車間通信による情報共有の効果  
に関する研究

2016年6月

大西 亮吉



## 論文の内容の要旨

本論文では、交通容量の拡大に向けた車両側の方策として 1) 協調型隊列走行と 2) 交通情報共有に着目し、実現に必要となる車車間通信による情報共有の効率化手法の提案、および効果に関する研究成果を報告する。またその応用として 3) 災害時情報共有に関する研究成果についても報告する。主要な成果は、比較的単純な 4 つの方策（境界条件設定、まとめ送り、重複送信抑制、サマリ参照）の組み合わせによって、実用面で効果的な情報共有システムを構築可能であることを示したことである。本論文は 6 章で構成される。

第 1 章は「序論」であり、研究の背景と目的、論文の構成について述べる。

第 2 章は「車車間通信の基礎と技術課題」と題し、車載無線機の概要や車車間通信の必要性、車車間通信によるネットワーク技術について解説した。車車間通信によるネットワーク技術の課題として、アプリケーションが必要とする機能（情報共有）と従来研究で主に研究対象とされてきた機能（情報転送）が合わない点を指摘。アプリケーションの効果的な実現に向けて、車車間通信による情報共有の効率化を研究方針とした経緯について述べた。

第 3 章は「車車間通信による協調型隊列走行の効果」と題し、協調型隊列走行の実現に必要となる、通信結果に基づいて隊列を編成する方策について論じた。隊列のグループや通信周期のサイクルを境界条件として設定し、隊列内の他の車両に対する受信可否(ACK)をまとめ送りすることで、隊列内の車両間で通信状況を把握する方法を提案した。更に、通信状況の変化の際には、単純な行動規則に基づいて各車両が自律的に対処することで、適応的に隊列を編成する方法を提案した。一般的な交通流シミュレータと通信シミュレータを互い違いに作用させるシミュレーション評価手法により、通信品質に応じた隊列編成を行い、搭載率が高いほど速度が向上する効果を確認した。この結果に基づき、交通容量の理論上の増加を確認した。従来の評価手法と異なる点は、2 つの要素シミュレータを互い違いに作用させる点である。この交互計算によって発生する誤差は実用観点で軽微であることを示し、評価の妥当性について確認した。

第 4 章は「車車間通信による交通情報共有の効果」と題し、交通情報の共有を効果的に実現するために、情報をできるだけ多く、速く、且つ広範囲に拡散する方策について論じた。このような最善努力には、車両における計算量もバランスよく満足することのできる仕組みが必要であり、情報のまとめ送りと重複送信の抑制といった単純な方法を組み合わせる手法を提案した。情報をランダムに選んで送る工夫の無い単純な手法（工夫無し）、及び通信帯域の制約を無視して全ての情報を送る理想的な手法（効率化限界）と共にシミュレーション上での比較を行い、提案手法は単純手法並みの計算量で、理想的手法に迫る性能を示す効果を確認した。特に発生後 2～5 分の情報に対する改善幅が大き

く、有用な情報の流通を促進する様子が確認した。シミュレーションにおける実行時間の差が、情報共有のアプリケーションにおける計算時間の差の総和と見なせる点について示し、計算時間の評価における妥当性について確認した。これにより有用な情報を供給し、経路案内のステークホルダとの協業によって交通容量の増大を達成する足がかりを作った。

第5章は「車車間通信による災害時情報共有の効果」と題し、被災者が発する情報を車両がハブとなって都市規模で拡散する方策について論じた。近隣の車載無線機同士が、自身の保有情報に関するサマリ (Bloom Filter) を共有し、サマリを参照して相手の保有しない情報を優先的に送ることで情報共有を効率化する手法を提案した。第4章で論じた交通情報共有よりも桁違いに大規模に実施する必要があり、本研究の難しさはその有効性を検証するためのシミュレーション手法の確立にあった。そこで、避難所内の車車間の情報共有は事前シミュレーションによって予め作成した通信結果パターンを参照し、避難所間の車両移動に伴う情報伝搬を確率的に求める時系列シミュレーション手法を提案した。事前シミュレーションは並列計算が可能であることから、一か月程度の実用的な時間で解を求めることができた。その結果、相手の保有しない情報を優先送信する提案手法は、倍速で情報伝搬する効果が確認できたが、範囲の拡大には通信内容だけでなく記憶内容の効率化が必要であるという課題も確認した。従来の評価手法と異なる点は、車両が数量として扱われ、情報伝搬が確率的に計算される点である。避難所間の車両の移動に伴う情報の移動における、確率計算の再現性は自明であるが、避難所内における車車間通信では、通信結果パターンを線形補間して参照する際に誤差が発生する。この線形補間によって発生する誤差は軽微であることを示し、評価の妥当性について確認した。交通量データの設定により、都市固有のシミュレーション評価を実施する方法も示した。

第6章は「結論」であり、本研究のまとめと今後の展望について論じた。以上を要するに、本研究は、車車間通信による情報共有の効率化技術について、適応性や最善努力といった異なる要件を満たす理論と、数キロメートルから都市レベルまで異なる規模のシミュレーション評価の両面で研究を行ったものであり、提案手法それぞれについて有効性を示した。また無線機はそのままの使用を前提とし、アプリケーション固有の要件は、4つの単純な情報共有の方策の組み合わせによって満足できることを示しており、本研究の一般性も示した。ハードウェアである無線機のライフサイクルは、アプリケーションと比較して長いため、この一般性、つまり情報共有の方策が無線機との間に入って多様なアプリケーションの要件を満足できることはライフサイクルのギャップの解消にも有用であると考えられる。これらの成果を将来システムへ導入する方策について述べた。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本論文の構成	3
第2章	車車間通信の基礎と技術課題	4
2.1	概要	4
2.2	車車間通信の基礎	4
2.2.1	車載無線機の概要	4
2.2.2	車車間通信が有効と考えられるケース	6
2.2.3	車車間通信のネットワーク化に関する従来研究	7
2.3	車車間通信の課題	9
2.3.1	車載機の普及	9
2.3.2	技術的な制約	9
2.3.3	アプリケーションの要求とのミスマッチ	10
2.3.4	データ指向型ネットワークの登場	10
2.4	研究の方針	11
第3章	車車間通信による協調型隊列走行の効果	13
3.1	概要	13
3.2	前提	13
3.2.1	背景	13
3.2.2	目標	14
3.2.3	前提条件	15
3.3	課題	16
3.3.1	通信状況の把握に関する従来研究	16
3.3.2	通信状況変化時への対処に関する従来研究	17
3.4	課題解決の方策	17

3.4.1	Group ACK の提案.....	17
3.4.2	Group ACK による効率化の調査.....	19
3.4.3	通信成否状況の変化に応じた隊列編成.....	22
3.5	シミュレーション評価.....	29
3.5.1	統合シミュレータの概要.....	30
3.5.2	隊列走行シミュレーションに関する研究事例.....	30
3.5.3	隊列走行シミュレータの構築.....	31
3.5.4	通信結果に基づいた隊列編成の実現性の検証.....	37
3.5.5	シミュレーションによる特性評価.....	44
3.5.6	シミュレータの実行特性の評価.....	58
3.5.7	シミュレーション結果の信頼性に関する考察.....	59
3.6	まとめと今後の課題.....	59
第 4 章	車車間通信による交通情報共有の効果.....	61
4.1	概要.....	61
4.2	前提.....	61
4.2.1	背景.....	61
4.2.2	目標.....	62
4.2.3	前提条件.....	63
4.3	課題.....	64
4.3.1	交通情報共有に関する従来研究.....	64
4.4	課題解決の方策.....	65
4.4.1	リンク情報のライフサイクル.....	65
4.4.2	重複送信抑制.....	66
4.4.3	まとめ送り.....	66
4.5	シミュレーション評価.....	68
4.5.1	シミュレータの構築.....	68
4.5.2	提案方式の情報共有の効率化に関する評価.....	71
4.5.3	提案方式のスケラビリティに関する評価.....	77
4.5.4	計算時間評価の妥当性に関する考察.....	77
4.6	まとめと今後の課題.....	80

第5章 車車間通信による災害時情報共有の効果 .....	81
5.1 概要 .....	81
5.2 前提 .....	81
5.2.1 背景 .....	81
5.2.2 目標 .....	82
5.2.3 前提条件 .....	83
5.3 課題 .....	84
5.3.1 車車間通信のシミュレーションに関する従来研究 .....	84
5.3.2 疫学のシミュレーションに関する従来研究 .....	85
5.4 課題解決の方策 .....	86
5.4.1 車載 Wi-Fi を利用した災害時情報共有手法の提案 .....	86
5.4.2 確率密度を導入したシミュレーション技術 .....	88
5.4.3 事前シミュレーション .....	89
5.4.4 時系列シミュレーション .....	92
5.5 シミュレーション評価 .....	94
5.5.1 車車間通信に関する実験条件 .....	94
5.5.2 シミュレーションの設定値 .....	95
5.5.3 提案方式の情報共有の効率化に関する評価 .....	98
5.5.4 シミュレーションの妥当性に関する考察 .....	100
5.5.5 シミュレーション規模に対する実行時間の推定 .....	105
5.5.6 より現実的なシナリオの設計方法 .....	106
5.6 まとめと今後の課題 .....	108
第6章 結論 .....	109
6.1 本研究のまとめ .....	109
6.2 今後の本研究分野の展望 .....	111
謝辞 .....	113
発表文献 .....	114
参考文献 .....	117

# 目次

図 1.1 交通がスムーズに流れることで期待できる恩恵.....	1
図 1.2 交通流円滑化の効果と課題 .....	2
図 1.3 交通容量拡大に向けた車両側の方策 .....	3
図 2.1 MANET の主なルーティングプロトコルとその分類 .....	8
図 3.1 協調型隊列走行のイメージ .....	14
図 3.2 協調型隊列走行による交通容量改善の課題構造.....	15
図 3.3 通信途絶判定時間と途絶発生率の関係 .....	16
図 3.4 車載通信機のメッセージフォーマット .....	18
図 3.5 車車間通信の GROUP ACK の例 .....	20
図 3.6 短縮 ID の競合解決例.....	20
図 3.7 競合解決に要したサイクル数の平均値 .....	21
図 3.8 競合解決に要したサイクル数の割合（短縮 ID 長 5BIT, 車両 32 台のケース） .....	21
図 3.9 隊列内通信成否の確認に必要なサイクル数.....	22
図 3.10 隊列通信における車両の状態遷移モデル.....	23
図 3.11 隊列形成前.....	25
図 3.12 隊列形成後.....	25
図 3.13 隊列合流前.....	26
図 3.14 隊列合流後.....	26
図 3.15 通信障害の検知.....	27
図 3.16 通信障害の場合の隊列の編成.....	28
図 3.17 隊列への車両の割込み.....	28
図 3.18 隊列からの車両の離脱.....	29
図 3.19 シミュレーション要素の連携イメージ .....	30
図 3.20 隊列走行シミュレータのアーキテクチャ.....	31
図 3.21 隊列走行シミュレータの実装.....	32
図 3.22 キャプチャ効果の動作例 .....	33
図 3.23 アプリケーションにおけるメッセージフォーマット.....	34
図 3.24 受信電力に対するパケット到達率のグラフ .....	37
図 3.25 メンバの通信障害・回復のシナリオ .....	38
図 3.26 車両の動作ログ（状態遷移） .....	40
図 3.27 通信障害時の車両の動作ログ .....	41



図 3.28 通信回復時の車両の動作ログ.....	42
図 3.29 非通信車両の割込・離脱のシナリオ.....	43
図 3.30 車両の動作ログ（状態遷移）.....	44
図 3.31 シミュレーションエリア.....	45
図 3.32 通信距離に対する通信結果の内訳（対向車両無しのケース）.....	46
図 3.33 通信距離に対する通信結果の内訳（対向車線が渋滞停止のケース）.....	46
図 3.34 隊列内通信距離の発生割合（対向車両無しのケース）.....	47
図 3.35 隊列内通信距離の発生割合（対向車両無しのケース）.....	47
図 3.36 隊列内車両数の発生割合.....	48
図 3.37 車両速度の発生割合.....	49
図 3.38 車両数の時間推移.....	49
図 3.39 車間時間の発生割合.....	50
図 3.40 車両加速度の発生割合.....	50
図 3.41 通信距離に対する通信結果の内訳.....	54
図 3.42 隊列内車両数の発生割合.....	54
図 3.43 隊列参加車両数の時間推移.....	55
図 3.44 通信車両隣接率と隊列参加率の関係.....	55
図 3.45 車両速度の発生割合.....	56
図 3.46 車両数の時間推移.....	56
図 3.47 車間時間の発生割合.....	57
図 3.48 車両加速度の発生割合.....	57
図 3.49 通信車両数とデータ量の関係.....	58
図 3.50 データ量と所要時間の関係.....	59
図 4.1 交通情報共有のイメージ.....	62
図 4.2 交通情報共有による交通容量改善の課題構造.....	62
図 4.3 情報伝達システムの動作フロー.....	65
図 4.4 位置情報の相対表現の例.....	67
図 4.5 まとめ送りのデータ構造.....	68
図 4.6 シミュレーションエリアの道路構造と信号サイクル.....	69
図 4.7 シミュレーションエリア内の車両数の時間推移.....	70
図 4.8 平均情報数の時間推移（搭載率 10%）.....	73
図 4.9 平均情報数の時間推移（搭載率 1%）.....	73
図 4.10 拡散範囲に対する平均情報数の効率化限界比分布（搭載率 10%）.....	74
図 4.11 拡散範囲に対する平均情報数の効率化限界比分布（搭載率 1%）.....	74
図 4.12 経過時間に対する平均情報数の効率化限界比分布（搭載率 10%）.....	76
図 4.13 経過時間に対する平均情報数の効率化限界比分布（搭載率 1%）.....	76
図 4.14 搭載率に対する搭載車両数の推移.....	78
図 4.15 搭載率に対する平均情報数の推移.....	78
図 4.16 搭載率に対するシミュレーション実行時間.....	79

図 4.17 情報伝達システムの動作フロー（時間差の発生個所） .....	79
図 5.1 車載通信機を活用した災害時情報共有のイメージ .....	82
図 5.2 災害時情報共有による都市規模でのメッセージ展開の課題構造 .....	83
図 5.3 災害時情報共有サービス .....	86
図 5.4 車載 Wi-Fi インタフェースの状態遷移 .....	87
図 5.5 サイクルで管理された情報送信 .....	88
図 5.6 シミュレーションモデル .....	89
図 5.7 ノード内通信結果パタンの例 .....	89
図 5.8 事前シミュレーションの動作フロー .....	91
図 5.9 時系列シミュレーションの動作フロー .....	93
図 5.10 車車間通信の実験条件 .....	94
図 5.11 避難所における車両 120 台の駐車例 .....	95
図 5.12 ノード内車両数の発生割合 .....	97
図 5.13 メッセージ ID5047 の伝搬の時間推移 .....	98
図 5.14 総メッセージ数の時間推移 .....	99
図 5.15 総メッセージ数－終了時全車両保有率のグラフ .....	103
図 5.16 メッセージ種類数－終了時全車両保有率のグラフ .....	103
図 5.17 総メッセージ数－終了時全車両保有率のグラフ .....	104
図 5.18 メッセージ種類数－終了時全車両保有率のグラフ .....	104
図 5.19 事前シミュレーションの動作フロー .....	105
図 5.20 ノード間のリンクの交通量の設定例 .....	107
図 5.21 伝搬マップを同尺の地図に重ね合わせた様子 .....	107
図 6.1 多段分散データ処理基盤のイメージ .....	112

## 表目次

表 2.1 ITS 用車載無線機の標準仕様一覧.....	5
表 3.1 評価条件 .....	19
表 3.2 評価条件 .....	22
表 3.3 シミュレーションの設定値 .....	36
表 3.4 隊列編成の基本動作 .....	39
表 3.5 交通容量の補正 .....	51
表 3.6 シミュレーションの設定値 .....	53
表 4.1 シミュレーションの主な設定値 .....	71
表 5.1 事前シミュレーションの設定項目と設定値 .....	96
表 5.2 時系列シミュレーションの設定項目と設定値 .....	96
表 5.3 参照キーの組合せ例 .....	97
表 5.4 総メッセージ数の増加が収束する日数 .....	99
表 5.5 事前・時系列シミュレーションの計算時間 .....	100
表 5.6 事前シミュレーションの設定項目と設定値 .....	102
表 6.1 情報共有システムの提案において用いられた手法 .....	109



# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

交通がスムーズに流れることにより、図 1.1 に示すような経済的・環境的恩恵が期待できる。

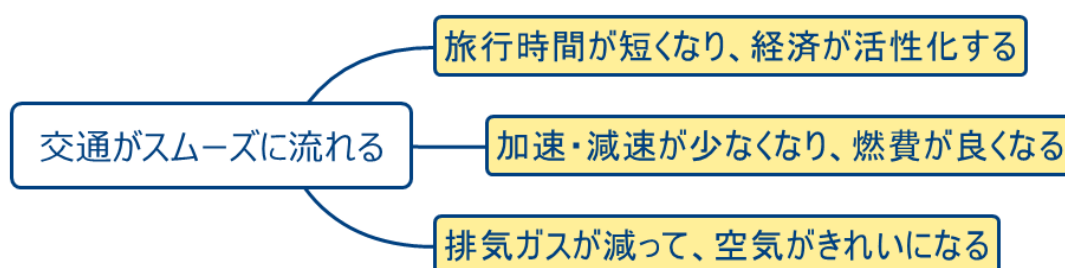


図 1.1 交通がスムーズに流れることで期待できる恩恵

旅行時間の短縮によって、経済の活性化が期待できる。国土交通省の調査 [28]によれば、1年間の渋滞による時間の損失は、約 50 億時間（2009 年）と推定され、これは国民 1 人あたり約 1 週間の労働時間に相当する。平均賃金による時間価値から金額換算すると約 11 兆円の損失であり、これは GDP の約 2%に相当する。わずかな改善であっても、その効果は大きい。

加速・減速の少ない運転によって、燃費が良くなることが期待できる。省エネルギーセンターの調査 [29]によれば、巡航時の速度変動を抑制することにより、燃費を約 3.4%削減できる。自動車によって消費された石油（ガソリン・軽油）は約 80 百万キロリットル（2014 年） [30]であり、原油の輸入価格はキロリットルあたり 3 万円前後で推移 [31]していることから、改善効果は約 800 億円に相当すると考えられる。日本は原油の 99.7%（約 210 百万キロリットル、2014 年）を輸入に頼っており、その 4 割が自動車によって消費されていることを考えても、改善の意義は大きい。

排気ガスが減って、空気がきれいになることが期待できる。国土交通省の調査 [32]によれば、渋滞により走行速度が 20km/h から 60km/h に増加すれば、二酸化炭素排出量は約 4 割減少できる。自動車によって排出された二酸化炭素は約 225 百万トン CO<sub>2</sub>（2013 年）であり、日本国全体の 17%（1311 百万トン）を占める [33]。2006~2012 年の 7 年間で総額 1562 億円の国費を投じて、炭素クレジット 97 百万トンを購入 [34]していることから、改善効果は約 600 億円に相当すると考えられる。この排出権取引は、京都議定書の効力が 2012 年に失われたことで、事実上崩壊したとされる。しかし、カリフォルニア州のように自動車メーカーに独自の排出規制を課す動きも出てきており、実際にテスラモ

ーターズは排出ゼロの車両販売で得た「環境ポイント」を他の自動車メーカーへ売却して、約 40 億円（2012 年）の利益を得たとされる [35]。もちろん経済合理性だけではなく、大気汚染による死者が 700 万人 [36]に上り、交通事故による死者 125 万人 [37]の 4 倍を超えていることも考えても、改善の意義は大きい。

まだ他にもありそうだが、これだけみても交通がスムーズに流れることの意義は極めて大きい。一般に、その手立てとして交通容量の拡大と交通需要の抑制が考えられる。交通容量の拡大は、走行や経路を改善する車両側の努力によるものと、信号や道路を改善するインフラ側の努力が挙げられる。交通需要の抑制には様々な施策が存在するが、代表的なものとして公共交通の利用を促すマルチモーダル交通や、時間的・地理的なピークシフトを行うための動的なプライシングが挙げられる。交通流円滑化の効果と課題のイメージを図 1.2 に示す。筆者は自動車メーカーにおいて研究を進めてきた経緯から、交通容量拡大に向けた車両側の方策について主に取り組んできた。本論文では、交通容量を渋滞発生時の臨界点となる交通量と定義する。

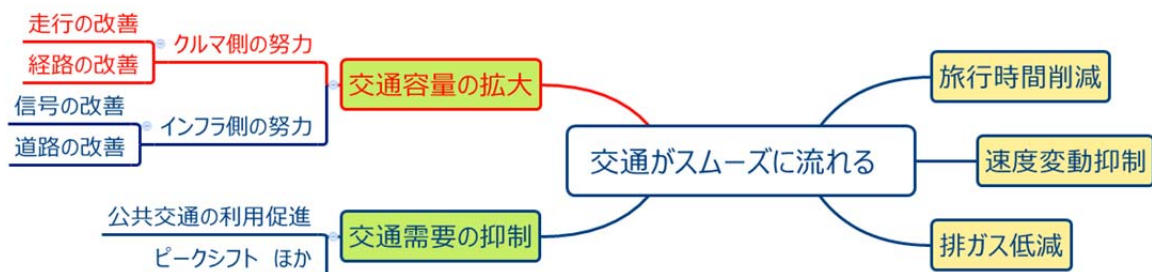


図 1.2 交通流円滑化の効果と課題

交通容量の拡大に向けた車両側の方策として、初期の頃は車両単体による改善が進められた。車載センサを利用した、適応クルーズコントロール (ACC) による自律的な走行の改善や、車載センサとデジタル地図を利用したナビゲーションシステムの静的な案内による経路の改善が行われた。コンシューマ製品においてセルラーや無線 LAN の使用が一般的になり、無線機の小型化・高性能化・低廉化が進んだ結果、車両に無線機を搭載し、車両と固定網側インフラとの通信や車車間通信を利用した方策が新たに検討されはじめた。車両と固定網側インフラとの通信を利用した方策の主な例として、路側機による上り坂手前での加速支援や、データセンタを介した交通情報の共有が挙げられる。車車間通信を利用した方策の主な例として、同じ進行方向の車両同士で協調した隊列の走行や、周辺の車両によるローカルな交通情報の共有が挙げられ、いずれも車両間の情報共有が必要となる。交通容量拡大に向けた車両側の方策の構造を図 1.3 に示す。これらの方策は競合するわけではなく、互いに補完的であるため、どの取組みも重要である。限られた研究リソースの関係から、まずは車両側の方策となる車車間通信による情報共有について、優先的に研究を進めてきた。その成果を本論文で報告する。

交通容量拡大に向けた車車間通信による情報共有について、2009 年から応用研究を進めてきた中で、2011 年に東日本大震災が発生した。この地震の被害は甚大で、例えば KDDI の保有する、本州を東西に走る 3 つの基幹網のうち 2 本が切断 [38]し、また被災地域では設備の損壊や停電、輻輳によって

公衆通信網は2週間にわたり使用不能な状態 [39]となった。被災者の通信手段は奪われ、親類縁者の安否確認で避難所の掲示板は埋め尽くされる状況に陥った。そういう状況の中で、何か自分にできることがないか考え、これまでの研究成果の応用にたどり着いたのは自然な流れであった。そうして、平常時に交通容量の拡大のために利用する車車間通信を、災害時には被災者間の情報共有に利用する可能性について研究を進めた。この成果についても、本論文で報告する。

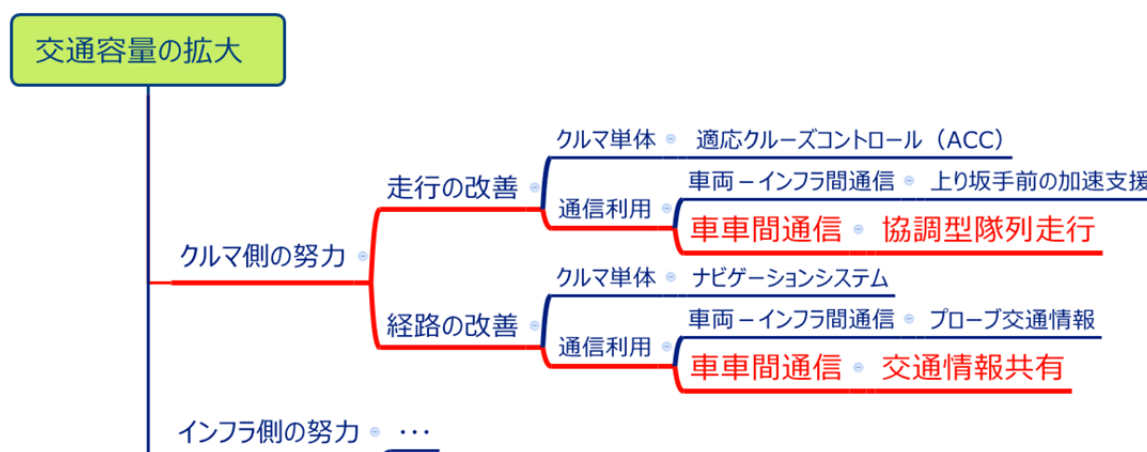


図 1.3 交通容量拡大に向けた車両側の方策

## 1.2 本論文の構成

本論文では、車車間通信による情報共有の応用として、交通容量拡大に寄与する 1) 協調型隊列走行と 2) 交通情報共有、加えて、3) 災害時情報共有に関する研究成果を報告する。本研究の主要な成果は、「比較的簡単な手法で、実用面で効果的な情報共有システムを構築可能であることを示したこと」である。本論文は以下の章で構成される。

第2章では、車車間通信に関する従来研究や技術課題、それを踏まえた本論文の研究方針について述べる。交通容量の改善に向けて、第3章では車車間通信を利用した隊列走行（協調型隊列走行）の実現を目標とし、通信結果に基づく隊列編成の方策とその効果について論じる。第4章では経路案内に必要な交通情報の流通改善を目標とし、計算量を抑えて有用な交通情報を共有する方策とその効果について論じる。災害時の応用として、第5章では車車間通信を利用して都市規模で被災者間の情報を共有することを目標とし、情報共有の効率化や実用時間で都市規模の評価を行うための方策とその効果について論じる。第6章では結論として、本研究のまとめと今後の展望について述べる。

## 第2章 車車間通信の基礎と技術課題

### 2.1 概要

本章では、車車間通信の基礎として、車載無線機の概要、車車間通信が有効と考えられるケース、車車間通信のネットワーク化に関する従来研究について述べる。その上で、車車間通信の課題として、車載機の普及、技術的な制約、アプリケーションの要求とのミスマッチについて指摘した上で、近年のデータ指向型ネットワークの登場について述べる。以上を踏まえて、本論文の研究方針について述べる。

### 2.2 車車間通信の基礎

車両には移動するという根源的な役割があり、その通信手段は無線に依存するところが多い。関連する興味深い例として、IEEEのVehicular Technology Societyについて述べる。このソサイエティの主な研究テーマは、その名が示す車両技術よりも、むしろ無線技術である。1949年のデトロイトにおける設立当時、警察車両の双方向通信の必要性から、陸上無線の車載利用に関する研究をテーマとしており、このような名称になったとされる [40]。このように車両と無線の歴史は半世紀に渡る。

#### 2.2.1 車載無線機の概要

ラジオやセルラーといった従来の広域無線のほかに、最近ではDSRCや無線LANといった狭域無線が一般的な車両に搭載されはじめ、車車間の通信による新たなサービスが期待される。このような狭域無線は、放送事業者や通信事業者が直接関与せず、通信量に応じた支払いが不要で任意の情報をやり取りできるというメリットがある。

##### 2.2.1.1 DSRC

DSRCはDedicated Short Range Communicationの略で、高度交通システム(ITS: Intelligent Transport System)専用の狭域無線通信を示す。車両は、道路インフラや他の周辺車両と通信を行い、料金収受や衝突防止、自動運転などを実現することが考えられている。通信遅延や到達率の保証の必要性から、専用周波数の利用、固定の送信周期、メッセージ長の上限值という制約が一般的であり、道路に物理的に収容可能な車両台数に基づいて容量設計されている。利用する周波数やメッセージ様式等は地域や目的によって異なる。例えば、日本ではETC(電子料金収受)において5.8GHz帯、安全運転支援用途に700MHz帯が割り当てられており、欧米では5.9GHz帯となる。ITU勧告(M.2084 [41])では、DSRCに関する各地域のDSRCの標準仕様について規定しており、表2.1のようにまとめられる。PHY/MACは同様であるが、周波数や送信電力などは地域によって異なる。



表 2.1 ITS 用車載無線機の標準仕様一覧

パラメータ	欧州 ETSI	米国 IEEE	日本 ARIB	韓国 TTA
周波数帯域	5 855-5 925 MHz	5 850-5 925 MHz	755.5-764.5 MHz	5 855-5 925 MHz
周波数帯域幅	10 MHz	10 MHz or 20 MHz	< 9 MHz	< 10 MHz
送信出力	< 33 dBm EIRP		10 dBm/MHz	23 dBm
変調方式	BPSK OFDM, QPSK OFDM, 16QAM OFDM, 64QAM OFDM	64-QAM-OFD M 16-QAM-OFD M QPSK-OFDM BPSK-OFDM 52 subcarriers	BPSK OFDM, QPSK OFDM, 16QAM OFDM	BPSK OFDM, QPSK OFDM, 16QAM OFDM, Option: 64QAM
前方誤り訂正	Convolutional coding, rate = 1/2, 3/4, 2/3	Convolutional coding, rate = 1/2, 3/4	Convolutional coding, rate = 1/2, 3/4	Convolutional coding, rate = 1/2, 3/4
送信レート	3Mbit/s, 4.5Mbit/s, 6Mbit/s, 9Mbit/s, 12Mbit/s, 18Mbit/s, 24Mbit/s, 27Mbit/s	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 and 27Mbit/s for 10MHz channel spacing 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 and 54Mbit/s for 20MHz channel spacing	3Mbit/s, 4.5Mbit/s, 6Mbit/s, 9Mbit/s, 12Mbit/s, 18Mbit/s	3, 4.5, 6, 9, 12, 18Mbit/s, Option: 24, 27Mbit/s
MAC方式	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA	CSMA/CA,
多重方式	TDD	TDD	TDD	TDD

700MHz 帯高度道路交通システムは、路車・車車間通信による安全運転支援に関わる情報提供を目的とする。主に衝突回避の用途に、混雑した交差点での支援に足るように設計されている。標準規格 ARIB STD-T109 [42]で仕様が定義されており、動作周波数帯は 755.5~764.5MHz、無線アクセスは IEEE802.11p に準拠し、無線 LAN と同様にキャリアセンス型の方式 (CSMA/CA) で動作する。100 ミリ秒周期で無線ブロードキャストを行い、300m 程度の見通し内通信距離を確保する。この通信距離は緊急車両の警告灯目視要件を参照して設定されている。本論文では、メッセージフォーマットについて ITS 情報システム推進会議のガイドライン (ITS FORUM RC-006) [43]を参照しており、これは本研究を実施していた当時、参照可能な最新の規格であった。メッセージサイズは 399 ビットで、車両の走行位置・速度・進行方向等の定型の基本情報に加え、任意のアプリケーションで自由に利用可能なデータ領域 160 ビットを含む。なお、最新のメッセージフォーマットに関するガイドライン (ITS FORUM RC-013) は文献 [44]で参照可能である。主な変更は可変長のフォーマットで、最小値 288 ビット、最大値 800 ビットとなった点である。自由領域は最大で 480 ビットまで拡張することができる。この自由領域の活用は、本論文の主なテーマのひとつとなるが、サイズの制限そのものが議論の対象であり、サイズの変更による影響はないものとする。本システムは 2015 年に商用化され、トヨタ自動車より ITS Connect の名称で市販車への搭載が開始された [45]。

### 2.2.1.2 無線 LAN

車内に持ち込まれたスマートフォンなどの一般的なユーザデバイスと、車載機が無線 LAN を介して接続し、音楽やナビゲーションなどの情報をやり取りすることも考えられている。更に車外の公衆無線 LAN スポットと接続することで、インターネット上のサーバとも情報をやり取りすることができる。ライセンス不要の帯域を使用するため、一般的に定額の接続料以外に、データ量に応じた課金はされない。2014 年にトヨタ自動車のナビゲーションシステム T-Connect に標準で搭載され、車外の KDDI の公衆無線 LAN スポットに自動接続するように設定されている [46]。本田技研工業もソフトバンクと共同で車載通信機器 V2X ユニットの開発し、2015 年度中にタクシー会社やバス会社に提供し、公衆無線 LAN スポットへの接続や車車間通信の市場開拓に向けた実証実験の開始を予定している [47]。

### 2.2.2 車車間通信が有効と考えられるケース

交差点での安全支援や高速道路のサグ部（下り坂から上り坂に変わる部分）における渋滞解消 [48] など、特定の場所の課題解決には路側の通信インフラ（路側機）を利用した方が効率的であるとされる。実際に都内で路側機が設置された交差点は 2015 年 10 月時点で 5 か所、2016 年 4 月時点で 27 か所である。導入や運用コストの制約のため、安全支援に効果的な場所に優先して設置される。

このため、特定の場所によらないケースやインフラの利用が困難なケースでは車車間通信が有用であると考えられており、路車間通信と同程度に自動車業界の関心も高い。特定の場所によらないケースとして、レンタカーグループや連結バスなど特定の相手との隊列走行が考えられる。インフラの利用が困難となるケースには、新興国での交通情報の共有や災害でインフラが損壊した際の情報共有が考えられる。他にも急を要さない車両情報などは、車車間通信の過程で情報の整理統合を図り、情報量を削減してデータセンターへアップロードするといった利用も考えられる。

### 2.2.3 車車間通信のネットワーク化に関する従来研究

車車間通信は、車両の移動により通信可能な相手が絶えず変化する課題を抱える。車車間通信のネットワーク化について、2000年代にモバイルアドホックネットワークの技術を適用する研究開発(VANET)が盛んに行われてきた。

#### 2.2.3.1 モバイルアドホックネットワーク

モバイルアドホックネットワークとは、複数の移動可能な無線機によって、即席で構築されるデータ通信のネットワークのことである。米国の国防高等研究計画局 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) のプロジェクト Packet Radio Network (PRNet) [49]が最初の取組みとされ、1973年から10年に渡り、SRIやBBNが中心となって戦場における無線パケット通信の研究が行われた。1970年代後半にはアマチュア無線においても無線パケット通信の利用が始まり、アマチュア局の相互中継による情報伝送も行われた。

1990年代に入るとインターネットコミュニティにおける研究が活発化し、1997年にIETF (Internet Engineering Task Force) にMANET (Mobile Ad-hoc Network) WGが設置され、技術仕様の標準化の取組みが開始された。MANETでは主に3つのステップ、1) 宛先の発見 (Discovery), 2) 宛先までの通信経路の設定 (Routing), 3) 通信経路に沿った情報の転送 (Forwarding) によって、モバイルノード間の情報伝達を実現する。ネットワーク構造(トポロジ)の変化に対する通信経路の設定が中心的な課題であり、代表的なルーティングプロトコルとして、フラットな構造のOLSR [50], DSR [51], AODV [52]や階層的な構造のZRP [53]が挙げられる。フラットな構造のMANETは無線メッシュネットワークとも呼ばれる。OLSRは通信経路を常時構築するのに対し、DSRやAODVは通信が必要となった場合に経路を構築する。DSRは経路に関する全情報を送信元が保持するのに対し、AODVは中間ノードが次の中間ノードの情報を保持する。主な性能指標は、経路構築の効率や情報転送の効率、情報の伝達率、情報伝達の所要時間で互いにトレードオフの関係にあり、ネットワークの構造や規模、トポロジの変化量など様々なパラメータで検討されてきた。例えば、ZRPはクラスタ化によってネットワークサイズを抑えて規模拡張性を確保するが、トポロジの変化量が大きい場合には無駄が多くなる。OLSRは情報伝達時間を抑える代わりに、一定の制御通信量が常に発生する。DSRは経路に関する情報量を抑える代わりに、トポロジ変化が大きい場合には無駄が多くなる。結果、フラットな構造のOLSR, DSR, AODVはそれぞれインターネット標準として勧告化され、更にOLSRv2 [54], DSRとAODVを併せたAODVv2 [55]として第二世代の標準化へ進んだ。

IETFではネットワークトポロジに基づく手法が検討されていたが、他方ではノードの地理的な位置情報を利用した研究も進められた [56]。GPSの普及によって、ノードが自身の位置情報を把握できるようになり、この位置情報を用いた通信経路の設定が中心的な課題となる。初期の代表的なプロトコルにGPSR [57]がある。このプロトコルでは、宛先ノードや隣接ノードの位置情報を事前情報として持っており、宛先に一番近い位置に存在する隣接ノードへ情報を転送する。自身よりも近い隣接ノードがない場合にも、右折等の決められたルールに基づいて迂回することで転送を続ける。経路構築が不要となる代わりに、迂回路の発生により情報転送の効率が低下する。以上、これまで取り上げてきたMANETの主なルーティングプロトコルとその分類を図2.1に示す。

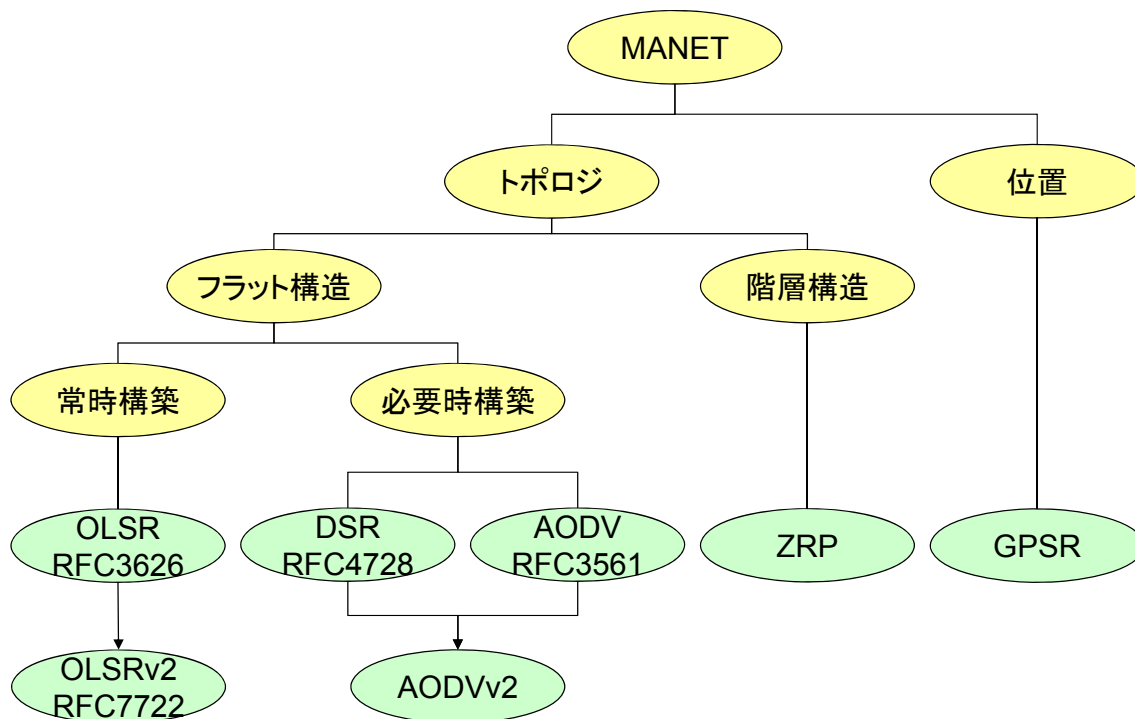


図 2.1 MANET の主なルーティングプロトコルとその分類

2000 年代後半には、情報を転送する途中で 4) 情報を蓄積 (Store) して持ち運ぶ工夫が加わり、時間的・空間的なネットワークの不連続性に対して耐性を備える、蓄積運搬型のネットワークの研究が登場した [58]。このネットワークは、一般に途絶・遅延耐性ネットワーク、あるいは DTN (Disruption/Delay Tolerant Network) と呼ばれ、NASA の惑星間インターネットの研究から発展してきたとされる。惑星間インターネットは、地上局と宇宙空間に展開する移動局 (宇宙ステーションや人工衛星、惑星上の探索機など) で形成され、星の陰に隠れている時間に情報蓄積を行う必要がある。そこでトランスポート層とアプリケーション層の間にバンドル層と呼ばれる中間層を用意し、永続的な記憶領域へのアクセスを可能とした。IETF の関連組織で先行的な調査を担う IRTF (Internet Research Task Force)において、2007 年に標準化 [59] [60]され、2014 年に IETF に DTN WG を設置して実用に向けた標準化 [61]を進めている。途絶という表現から暗黙のうちに宛先ノードの存在を前提とし、MANET ルーティングの拡張と見なすこともできる。

### 2.2.3.2 車車間通信によるモバイルアドホックネットワーク

車車間通信による MANET に関する研究は、2000 年頃に開始した。ドイツの FleetNet プロジェクトにおける研究 [62]ではネットワークシミュレータ ns-2 を用いて、高速道路のシナリオ (2 車線対向) における DSR (トポロジベース) と GPSR (位置ベース) の比較を行い、情報伝達率の点で位置ベースの手法が優れていることを確認している。やがて、車車間通信による MANET は VANET (Vehicular Ad-hoc Network) と呼ばれるようになり、2004 年には ACM において年次の研究ワークショップ ACM VANET が始まった。実用化については、欧州に業界団体 C2CCC (Car 2 Car Communication Consortium)が設立して検討が進められ、2007 年にシステム概要 [63]を発表、2013 年に欧州標準 [64]に採録された。ネットワーク層とトランスポート層のプロトコルは

GeoNetworking と呼ばれ、宛先ノードを特定した位置ベースの情報転送（ユニキャスト）、および特定のエリアへのブロードキャスト、トポロジベースのブロードキャストの機能が提供される。

## 2.3 車車間通信の課題

車車間通信のネットワークが位置ベースのルーティングプロトコルで標準化されて3年が経過したが、このプロトコルを利用した具体的なアプリケーションはまだ登場していない。理由として、車載機の普及や技術的な制約が考えられるが、一番大きな原因は、アプリケーションの要求とのミスマッチと考えられる。

### 2.3.1 車載機の普及

総務省のITS無線システムの高度化に関する研究会の報告書 [65]では、国内での700MHz帯DSRCの普及予測が示されており、ETCの普及を参照した上位推計と、VICSの普及を参照した下位推計、その中間値となる中位推計がある。中位推計によると、導入開始から3年目の普及率は2%程度であるが、6年目10%、10年目30%、14年目50%となり、90%程度で収束するものとみられている。車車間通信によるネットワークについて、インターネットを代替するような常時接続のユースケースを想定すれば、3年目2%程度の普及では何の役にも立たないように思われる。

しかし、数%の普及でも有用とされるアプリケーションが研究によって明らかにされている。路車間通信については、交差点での安全支援や高速道路サグ部の加速支援が挙げられる。交差点での安全支援は、システムの利用者が直接利益を得るタイプのアプリケーションであり、車載機の普及との直接の関係はない。高速道路サグ部の加速支援は、システム利用者にサグ部手前で適切な車線利用を促すことで、交通流全体の改善を図ることができる。国土交通省の研究会の報告 [48]では、5%の搭載率で総渋滞損失時間の8%の削減が可能であるとする。渋滞による経済損失11兆円を考えると、わずかな改善であっても社会的な影響は大きい。

車車間通信については、隊列走行や交通情報共有が挙げられる。隊列走行もバスなどの特定の集団において利用する場合 [66]は、車載機の普及と直接関係ない。交通情報共有については、少ないサンプル数でもそれなりに交通状況の推定が可能である。FleetNetの研究 [67]で、レーン辺り7.5台/kmという疎な交通量の高速道路シナリオにおいて、2%の搭載率で5km先の情報を5分以内で入手できることがシミュレーション上で確認されている。このように低普及率の場合も、路車間通信・車車間通信それぞれに有用なユースケースが存在しており、普及率の低さは、直ちに車車間通信のネットワークを無価値であると結論づけるほどの課題ではないというのが、業界の一般的な認識である。

### 2.3.2 技術的な制約

MANETはキャリアセンスのアクセス方式における隠れ端末の問題から、中継数に反比例してスループットが低下することが分かっており、シミュレーション [68]や無線機を使用した実験 [69] [70]の結果が数多く報告されている。車車間通信についても、FleetNetの研究 [71]で無線機を使用した結果が報告されている。これはMAC層における課題であるため、トポロジベースでも位置ベースでも、上位層のルーティングプロトコルによらず発生する。したがって、仮に無線機が100%普及したとしても、このような技術的な制約を意識せずに、いわゆる通常のインターネットアクセスを代替・

## 第2章 車車間通信の基礎と技術課題

補完するような常時接続のユースケースを想定することは難しいと考えられる。実際に、ACM VANETも2008年にVehiculAr inter-NETworkingというインターネットアクセスを意識した名称に変更となり、2013年には最終回を迎えて役割を終えた。このように、車車間通信におけるMANETルーティングの応用は研究面で停滞したと考えられる。

このような制約を克服してMANETの実用化を目指した事例に、無線LAN技術仕様IEEE802.11sがある[72]。無線LANアクセスポイント間のメッシュネットワーク機能を提供し、経路制御はMAC層において行う。HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)と呼ばれる経路制御方式で、事前にSpanning Tree型の経路構築を行い、通信時に経路がない場合は、通信品質を考慮したオンデマンド型の経路探索(RM-AODV)を行う。中継時のスループット低下を抑えるために、輻輳制御やマルチチャンネル機能を有する。IEEE802.11sは、実は大変な難産であった。標準化までの一般的な期間が4年程度であるのに対し、2004年にタスクグループが発足してから、2011年に標準仕様が策定されるまで7年も要している。また、一般にIEEE802.11において仕様が策定された後は、Wi-Fi Allianceにおいて製品規格を協議し、規格適合性や相互接続性のテスト仕様に基づく業界標準を定めて、テスト認定を受けた製品がWi-Fiのロゴをまとして市場に登場する。しかしながらIEEE802.11sは、Wi-Fi Allianceにおいてタスクグループ(Mesh)が立ち上がったものの、途中で立ち消えとなってしまった。これは実用面で二つの課題を抱えるためと考えられる。IEEE802.11sはアクセスノード、中継ノード、ゲートウェイノードが定義されているが、これらのノード機能を全て具備し、頻繁に機能の活性を変動させる必要があり、大変に煩雑であった。また無線LANの接続認証後にAP間で情報のフラッティングが必要であり、すれ違い通信のような短期間のトポロジ変化に対する追従が困難であった。結局、IEEE802.11sの商用化はうまくいかず、今のところ大規模な実装事例はない。むしろ後発のWi-Fi Awareのように単純にビーコンですれ違い通信を行うものが、3年程度の協議で商用化されている。

### 2.3.3 アプリケーションの要求とのミスマッチ

汎用のネットワークは技術的な制約から困難であることから、アプリケーションをある程度想定したネットワークについて考える。低普及でも有用とされる車車間通信のアプリケーションは隊列走行や交通情報共有である。ここで必要とされる通信は、ある車両が特定の車両に宛てて個別に情報を転送するものではなく、近隣の車両同士が互いに情報を共有するためのものである。つまり、アプリケーションが必要とする車車間通信は、情報転送ではなく情報共有であり、ネットワークルーティングではなくデータベース同期である。つまり、これまで研究されてきた車車間通信のネットワークルーティングや特定のエンド間のマルチホップ伝送は、そもそもアプリケーションの要求になかったということである。DTNはノードにデータベースを具備するが、時間的・空間的な不連続性に補うためのものであり、情報転送を前提としている点ではMANETのルーティングと本質的に同じである。

### 2.3.4 データ指向型ネットワークの登場

ノード間の情報共有において、共有したい情報(、あるいは共有したくない情報)の指定は可能である。このように欲しい情報を指定して通信を行うデータ指向型のネットワークが近年になって提唱され始めた。そのきっかけはパロアルト研究所が2009年に発表したNDN[73]とされる。NDNではコンテンツを、その属性の階層構造に基づいて、ネットワーク内に分散配置を行う。更に、コンテンツに対して属性構造をURIで表現した名称を付与し、名称による参照を可能とする仕組みを提案して

いる。その後、全米科学財団 NSF の次世代インターネットプログラム FIND (Future Internet Design) に採択され、大体的な研究が進められた。他には、欧州枠組みプロジェクトの PURSUIT, SAIL, COMET, CONVERGENCE [74] や 2011 年に募集がかけられた DARPA プログラムの CBMEN (Content Based Mobile Edge Network) [75] [76] など複数の類似研究が進められた。日本では、NICT の新世代ネットワーク戦略プロジェクトの一つとして、コンテンツ指向ネットワークプロジェクトが進められている。

データ指向ネットワークはまだ初期の研究段階で、一定の見解に定まっていない。呼び方も {Information | Content | Data} {Centric | Based | Driven | Aware} {Network | Architecture} の組み合わせで様々な存在する。MANET におけるネットワークルーティングの研究との主な違いは、データの送信者は必ずしも受信者を想定していない点である。単なるフラッディングではなく、受信者がデータを取りに来ることもあり、データの出版 (Publish) と購読 (Subscribe) という表現がよく用いられる。この特徴から、出版購読型モデルやセッションレス通信、非同期メッセージングなどとも呼ばれる。同様の考え方は古くから存在し、分散データベースやコンテンツ配信ネットワーク (CDN)、P2P ネットワークにも関連する部分があるなど、要素技術にあまり目新しいものもない。例えば、CBMEN プログラムの中で BBN によって開発された CASCADE [77] [78] は、戦場において複数の部隊がすれ違った際に、それぞれが予め設定する興味フィルタを交換し、相手の興味にあうデータを送信する。この興味フィルタは Bloom Filter の形態をとり、相手の保有しない情報を把握して、優先的に送信することで情報共有の効率化を行う。また情報の所在は、分散ハッシュテーブルによって複数のノードに分散して管理されるが、この手法は P2P ネットワークでは既に一般的である。オーバーレイネットワークの一種とみなすことが現段階では適切であるように思えるが、例えば NDN では IP 層の置き替えを予め提案しており、一概にそうとも言いきれない側面もある。ここで強調したい点は、このような流れの中で MANET も情報転送に留まらず、情報共有の効率化の研究が始まってきたという点である。

## 2.4 研究の方針

以上の経緯を踏まえて、車車間通信が有用される次の 3 つのアプリケーションをそれぞれサブテーマとし、従来検討されてきたネットワークルーティングではなく、情報共有そのものに着目して効率化の研究を行った。

1. 協調してスムーズな走行をする協調型隊列走行
2. 混雑を回避するために周辺の情報を把握する交通情報共有
3. 災害時に安否情報や物資要否情報の仲介を行う災害時情報共有

ここで、3 つのサブテーマにおける本論文の貢献範囲を述べる。1) 協調型隊列走行では交通容量を改善する効果まで研究する。走行制御を含むほとんどの技術要素が自動車メーカーの役割として完結しており、一貫した研究が比較的容易である。一方、2) 交通情報共有では計算量を抑えてリンク速度情報を素早く広範囲に豊富に伝える効果について研究する。得られた情報に基づいた経路案内に関する

## 第2章 車車間通信の基礎と技術課題

ステークホルダは主にナビゲーションメーカーであり、経路案内は単体で独立した大きな課題である。本論文では経路案内の研究は対象外とし、したがって、経路案内による交通容量の改善効果には言及しない。3) 災害時情報共有も情報を素早く広範囲に伝える効果について研究する。都市規模に対応したシミュレーション評価手法の提案を行うが、本論文では実際に存在する都市の交通流データを利用した評価を行わない。これらの交通流データを提供するステークホルダは主に行政であり、一個の独立した大きな課題である。但し、シミュレーション評価手法はこれらの交通データを利用することは可能であり、その方法については言及する。

これらなるべく簡単な方法で実現する。3つのサブテーマはそれぞれ別々の方法となるが、以下の4つの方法からいくつかを組み合わせることで実現している。

1. 仲間やタイミングを決めて、情報をやり取りする（境界条件設定）
2. 1回の通信で複数の情報をまとめて送る（まとめ送り）
3. 送ったり受け取ったりした情報はしばらく送らない（重複送信抑制）
4. 保有情報に関するサマリを共有し、相手が持たない情報を優先的に送る（サマリ参照）

本研究の主要な成果として、比較的簡単な手法で実用的な情報共有システムを構築可能であることを示す。適応制御や最善努力といった異なるアプリケーションの要件に対し、情報共有の効率化の考え方が有効であることを示す。そして、無線機はそのまま変更せずに使用し、アプリケーション固有の要件は、単純な情報共有の方策によって一般に満足できることを示す。



## 第3章 車車間通信による協調型隊列走行の効果

### 3.1 概要

交通容量を増加させるための車両側の努力の一つに、通信を利用した隊列走行がある。隊列走行における速度変化時の車間のズレを軽減することができるため、隊列内の車間を詰めることが可能となる。その分、隊列外の自由走行の車間が広がって速度が増加し、結果として交通容量の増加が期待できる。通信を利用した隊列走行を実現するためには、通信結果に基づいて、隊列を編成する方法が課題となる。本研究では、隊列のグループや通信周期のサイクルを境界条件として設定し、隊列内の他の車両に対する受信可否(ACK)をまとめ送りすることで、隊列内の車両間で通信状況を把握する方法を提案した。更に通信状況の変化の際には、単純な行動規則に基づいて各車両が自律的に対処することで、適応的に隊列を編成する方法を提案した。一般的な交通流シミュレータと通信シミュレータを互い違いに作用させるシミュレーション評価手法により、通信品質に応じた隊列編成を行い、搭載率が高いほど速度が向上する効果を確認した。この結果に基づき、交通容量の理論上の増加を確認した。従来の評価手法と異なる点は、2つの要素シミュレータを互い違いに作用させる点である。この交互計算によって発生する誤差は実用観点で軽微であり、評価の妥当性を確認した。

本章に対応する学術論文は[1][2]、学会発表は[5][6][11][12]、特許は[13][14][15]となる。

### 3.2 前提

本章の背景と研究の目標、前提となる条件について述べる。

#### 3.2.1 背景

前方の車両を自動的に追従し、同一の車線を縦列に並ぶ走行である隊列走行について、数多くの研究がなされており [79]、近年では自動運転の実用化に向けた動きも加速している。このような走行によって、運転者を運転操作から解放するとともに、車間距離の短縮による輸送効率の向上や環境負荷の軽減（燃費向上、排ガス低減）が期待される。

車載無線機の登場に伴い、車車間通信による隊列走行を実現する提案がなされている。前方レーダと無線機で得られた先行車両の情報を元に自車両の走行を制御する手法 [80]は、一般的に協調 ACC (Cooperative Adaptive Cruise Control)と呼ばれる。さらに進んだ形態として、複数の車両間で通信して互いに走行状態を把握し、自車両の走行を制御する手法が考えられる。より高度で柔軟な制御が可能となり、例えば、隊列内で協調した加速度制御 [81]や、高速道路での合流 [82]や隣接車線への

割り込み [66]などが提案されている。このような走行を、本論文では協調型隊列走行と呼ぶ。イメージを図 3.1 に示す。

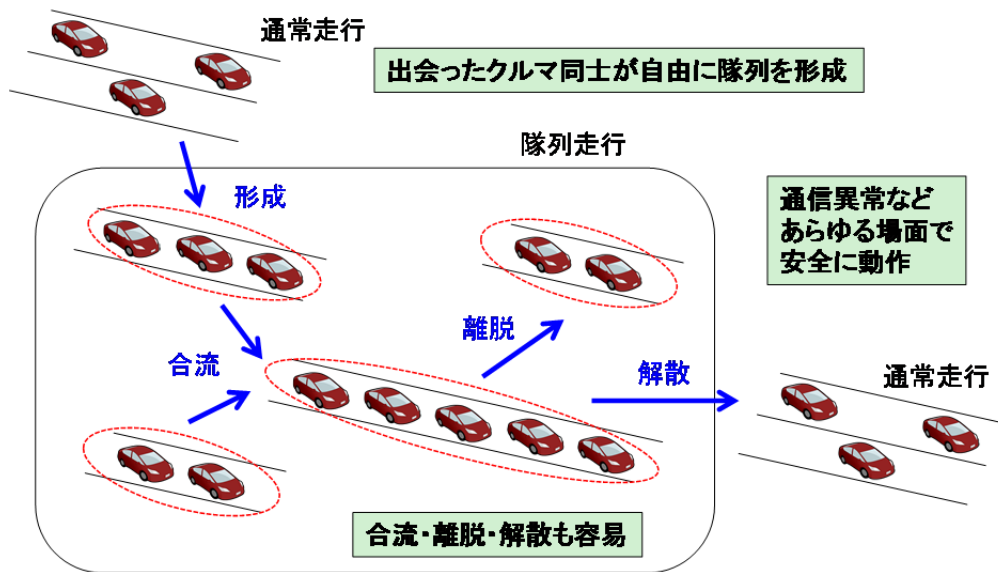


図 3.1 協調型隊列走行のイメージ

### 3.2.2 目標

車車間通信による協調型隊列走行で、交通容量を改善することを目標とする。課題の構造を図 3.2 に示す。一般的に交通量の増加に対して、旅行時間が加速的に増加する関係が知られており、BPR 関数と呼ばれるリンクパフォーマンス関数の一種で説明される [83]。実証的な研究が積み重ねられており、標準的なパラメータも提案されている。単位長当たりの旅行時間は平均速度の逆数で求めることができるため、速度が増加すれば交通容量が増加することがこの関数によって理論的に説明される。運転者による自由走行の際に、前方の車両との距離が広いほど速度が増加する振る舞いは Generalized Force Model [84]としてモデル化されており、一般的に広く引用されている。このモデルでは自由走行時に最高速度へ近づくよう目標加速度を設定するが、先行車両との距離や速度差に応じて減速する要素も含む。隊列走行の隊列内の車間を詰めることができれば、自由走行する先頭車両の前方車間が広がるため、速度が増加する効果が期待できる。隊列内の車間を詰めるためには、先頭車両の速度変化の際に後続車両の位置のズレが発生しないようにする必要がある。文献 [81]によれば、通信を利用して隊列内の車両間で協調して加速度を設定することで、この車間のズレを減少できることが確認されている。

以上、既存研究の結果から、通信を利用した隊列走行を行うことで交通容量の増加できることが分かった。そこで、本論文では通信を利用した隊列走行（協調型隊列走行）の実現に向けて、通信結果に基づく隊列の編成を課題に設定する。

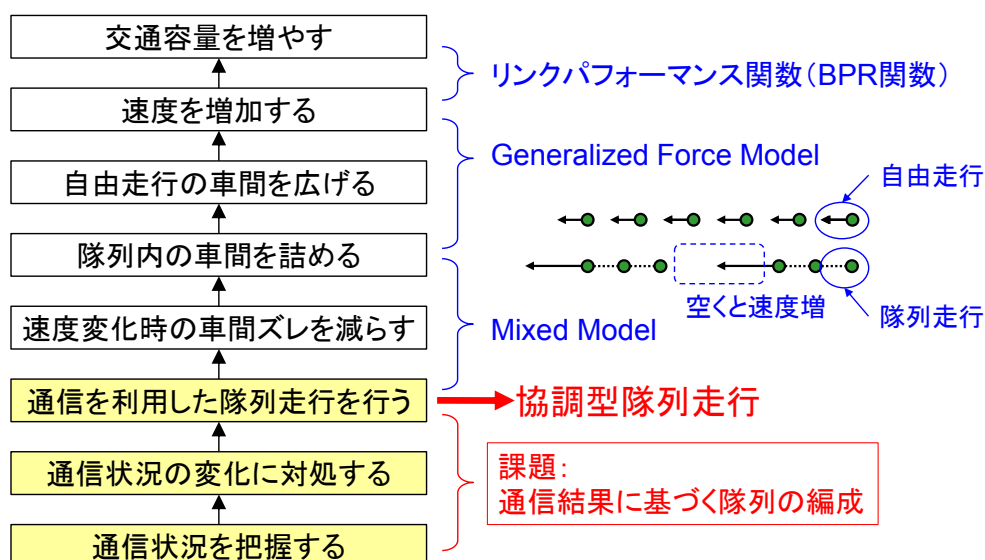


図 3.2 協調型隊列走行による交通容量改善の課題構造

### 3.2.3 前提条件

ここでの通信は標準規格 ARIB STD-T109 [42]に準拠した、日本における安全支援用途の無線機の利用を想定する。無線アクセスは、IEEE802.11p に準拠し、0.1 秒周期で無線のブロードキャストを行うビーコン型の通信である。300m 程度の見通し内通信距離を確保できるように設計されている。メッセージサイズは 399 ビット [43]であり、車両の走行位置、速度、進行方向などの予め定義されたデータ領域 239 ビットと、任意に利用可能なデータ領域 160 ビットで構成される。

協調型隊列走行では、隊列はできるだけ長く維持したい要求と、通信のフェール（途絶）にはできるだけ早く対処したい要求とが相反する。そこで、1) 4 回連続の通信エラーで途絶判定とし、2) その発生率を 5 時間程度に 1 回以下とすることを、実用条件として設定した。条件 1) は、従来のレーダのみを利用した走行制御よりも短い車間を実現することを目指したものである。通信途絶に 0.4 秒かかった場合、加速度発生に必要な 0.3 秒程度の時間を加えて、0.7 秒程度で走行制御を行うことができる。先行する車両の位置を通過するまでの時間を車間時間と呼ぶが、0.7 秒の走行制御の遅延は、0.7 秒の車間時間を可能とすることを意味する。従来のレーダクルーズコントロールは、主にレーダの検出性能の理由から、一般に 1~2 秒程度の車間時間を想定しており、通信を使ってより機敏に反応することで、隊列内の車間の短縮化が見込める。条件 2) は、一回のトリップの継続性の観点から、総合的に決定されたものである。具体的には、トリップ時間や給油間隔、休憩間隔などを考慮している。図 3.3 は通信途絶判定時間と途絶発生率の関係を机上計算で求めたものだが、これによれば、条件 1), 2)は、隊列内の車間通信は 95%以上のパケット到達率が必要という条件に置き換えることができることが分かる。

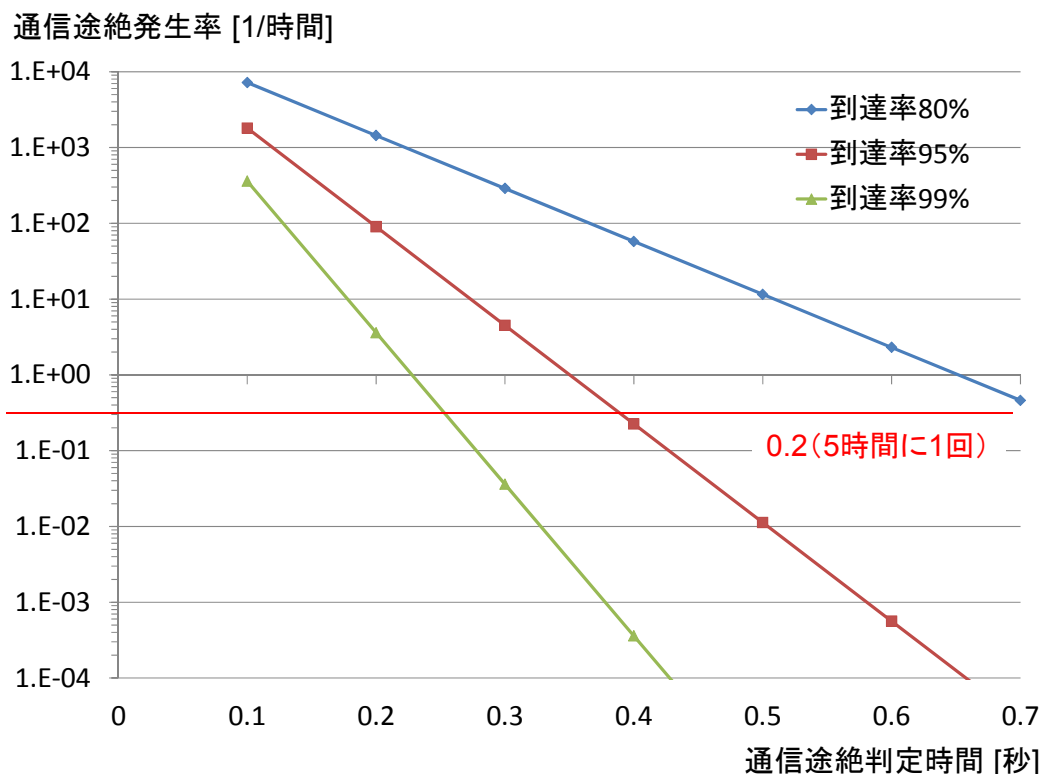


図 3.3 通信途絶判定時間と途絶発生率の関係

### 3.3 課題

通信結果に基づく隊列の編成を実現するためには、通信状況を把握して、通信状況の変化に対処する必要がある。隊列走行に関する研究成果を解説した文献 [79]においても、無線通信の障害管理を重要な研究課題の一つとして挙げている。また通信機を搭載した車両（通信車両）と搭載しない車両（非通信車両）の混在環境が想定され、隊列への非通信車両の割込の対処も必要となる。

#### 3.3.1 通信状況の把握に関する従来研究

隊列内の車両は互いの無線ブロードキャストに対して受信応答（ACK）を送りあうことで、通信の成否を把握することができる。単純には、N 台の車両で隊列走行を行う場合、他の N-1 台の車両へ順に ACK を送信することが考えられる。しかし、一定の周期で送信する車車間通信の場合、2 台以上の車両が毎周期行う送信に対して、そのままでは ACK を毎周期返信することはできない。

文献 [85]では、隊列走行の要件として通信の ACK を挙げており、代表的な研究例として、Reliable Neighborcasting Protocol (RNP) [86]を紹介している。RNP は時間管理されたトークンリング型の通信プロトコルである Mobile Reliable Broadcast Protocol (M-RBP) [87]をベースとしており、ブロードキャストグループと呼ばれる、互いに直接通信可能な無線機のグループを形成する。グループ内ではトークン送信順のリストを共有する必要がある。参加や離脱の際のリストのメンテナンスは、合意によって行なわれる。M-RBP においてトークンを保有する車両は、ブロードキャストによって次の 3 つの機能を同時に果たす。

1. メッセージの送信車両へ ACK または NACK（再送要求）の送信
2. 直前にトークンを送信した車両へ ACK の送信
3. 次の車両へトークンの送信

再送が必要な場合は次のブロードキャストのタイミングで追加的に実施される。トークンの送信順を、送信タイミングの順に並べることで、メッセージの送信車両は他の車両からの ACK を 1 送信周期で手に入れることができる。しかし、1 台の車両のブロードキャストではなく、本論文の隊列走行のように互いにブロードキャストを行い、通信成否の確認を行う場合は、グループ内の車両台数分の ACK 送信が必要であり、所要時間は単純な ACK と同じである。

文献 [66]のように、通信成否の確認を不要とみなすのに十分な通信の信頼性を得るため、同一周期内で同一情報を複数回送信する方法も考えられている。しかし、車車間通信において、一定周期で固定長のパケットを無線ブロードキャストする方式が採用されている理由の一つに、システム容量、つまり所定の通信到達率以上で通信可能な車両数の確保にある。車両数台の小規模な実験では有効だが、無線規格に違反し、システム容量確保の前提が崩れる点で実際の運用では利用できず、本質的な解決にはならない。要するに混雑時の電波干渉への対応検討に至っていない。

### 3.3.2 通信状況変化時への対処に関する従来研究

通信状況変化時への対処には、通信状況の把握が必要となる。協調型隊列走行における通信状況の把握は確立しておらず、したがって、通信状況変化時への対処に関する従来研究も確認されていない。

## 3.4 課題解決の方策

隊列内の通信状況を把握する課題については、隊列を組む車両を互いの通信範囲内に限定し、他の車両に対する ACK を毎周期まとめてブロードキャストすることで、効率化を行う手法を提案する。この通信方法を Group ACK と呼ぶ。

更に、通信状況の確認結果に基づき、隊列を適切に編成する課題については、情報の受け手である各車両の自律行動による手法を提案する。車両には単純な行動指針を与えて、無線ブロードキャストの受信という環境を介して協調を行うことで全体として隊列編成という解を得るマルチエージェント型のシステム設計とする。

### 3.4.1 Group ACK の提案

隊列の形成については 3.4.3 で述べ、ここでは既に隊列が形成されているものとして話を進める。まず隊列の先頭車両をリーダー、後に続く車両をメンバと定める。隊列のリーダーが各ブロードキャストにサイクル番号を付与し、メンバはリーダーから受信したサイクル番号を自身の次のブロードキャストに付与する。これにより車車間の通信に、グループという空間的境界とサイクルという時間的境界を導入することができる。

本論文では文献 [43]の車載無線機の利用を想定し、図 3.4 のようなメッセージフォーマットを設計した。このメッセージを 0.1 秒周期でブロードキャストする。通信に必要な情報は、車両 ID、隊列 ID、

### 第3章 車車間通信による協調型隊列走行の効果

サイクル番号，そして隊列内に所属する車両 ID とその車両の前の送信に対する ACK のリスト (Group ACK) であり，車両 ID 以外は 160bit の任意に利用できる領域に記述される．Group ACK に利用可能なデータ領域は隊列 ID 4bit やサイクル番号 7bit を除いた 149bit であり，車両 N 台×(16+1)bit < 149bit により，自車を含む車両 8 台までが 1 回のメッセージのブロードキャストで ACK を送れる計算となる．それ以上の車両数の場合は，複数回のメッセージのブロードキャストに分けて行う必要が出てくる．この場合は，単純に ACK を送る手法と同様に毎周期の通信成否の確認は行うことができず，断続的なものとなる．隊列の編成や，車両の加減速制御も，このメッセージから得られる情報を利用しており，これ以外の通信は行われない．

項目		bit
車両ID		16
位置		70
速度・進行方向		17
その他情報		136
任意に利用できる領域		160
隊列ID(無所属+15グループ分)		4
サイクル番号(128サイクル分)		7
Group ACK (車両N台分)	車両ID	16xN
	ACK	1xN
合計		399

図 3.4 車載通信機のメッセージフォーマット

図 3.5 は，車両 4 台の隊列走行における車車間通信の Group ACK の例を示す．車両 A がリーダーで，車両 BCD がメンバである．現在 23 番目のサイクルでリーダー車両 A がブロードキャストを送信した様子が図 3.5 左側であり，その後メンバ車両 B がブロードキャストを送信した様子が図 3.5 右側である．図中の表は車両からブロードキャストされるメッセージを示し，他の図においても同様である．紙面の都合から，説明に必要な部分に適宜限定して記述する．

車両 ID が走行順に並んでおり，それに対応する形で ACK も並ぶ．ACK は，前回のサイクル (22 番目) に対する結果であり，0 の場合に未受信，1 の場合に受信，または自身であることを示す．このようにして，リーダーとメンバは走行順に車両 ID を共有し，互いに ACK を確認することができる．

#### 3.4.1.1 Group ACK における短縮 ID の利用

Group ACK では 1 回のメッセージで 8 台までの ACK を含むことができるが，より多くの車両の ACK を含むための拡張として，Group ACK の車両 ID の記述に着目し，下位ビットに限定して短縮された ID として利用する方法を提案する．Group ACK のデータ効率化のメリットと引き換えに，ID 競合の発生頻度が増加するデメリットが考えられる．そこで ID 競合の解消方法も合わせて提案する．隊列内の車両に自車両と同一の ID を発見した時に，自車両が競合する車両の中で最も前方を走行する場合は，競合した ID を使用し続け，そうでない場合は，隊列において未使用の ID からランダムに

選択して使用する。なお、リーダー車両は先頭を走行するため、車両 ID が変更されることがなく、このことは隊列の安定性に寄与する。

車両 5 台の隊列走行における短縮 ID の競合解決の例について図 3.6 を用いて説明する。ここでは、16 ビットの車両 ID を A-b のように記述し、A を上位 12 ビット、b を下位 4 ビットとする。リーダー車両 A-g は、図 3.6 上部のように Group ACK の車両 ID の下 4 ビットのみを記述して送信する。車両 2 番目 T-h と 4 番目 O-h、5 番目 G-h が競合している。メンバ車両は、リーダーのメッセージから自身の ID の競合を判断する。その後、図 3.6 下部のように競合する車両の中で最前方を走っている車両 2 番目 T-h は ID を維持し、後方の 4 番目 O-e と 5 番目 G-j は、隊列内で未使用の ID からランダムに選択する。これを繰り返すことで短縮 ID の競合を解決した上で使用することができる。

### 3.4.2 Group ACK による効率化の調査

隊列内通信成否の確認について、Group ACK がどの程度効率化できるのか調べた。評価はプログラムを自作して行った。隊列は形成済みで、車両移動は行わないものとする。また通信はすべての車両に 100%到達するものとし、電波伝搬のシミュレーションは行わないものとする。まず始めに、短縮 ID を利用した際のデメリットである ID 競合について、解決に要した時間を調べた。本来はこの解決も 0.1 秒以内で完了できるに越したことはない。しかし ID 競合の解消は初回のみ行えばよい点、隊列の形成は急ぐ必要がない点を考慮すると、解決中は隊列を形成するが、解決が終わるまで車間を詰める走行制御を保留する運用で、解決時間を許容できると考える。続いて、隊列内の車両数に対して通信成否の確認に要した時間について、単純な ACK、Group ACK、それに Group ACK に短縮 ID を使用したものを調べた。なお、時間についてはサイクル数で表現する。1 サイクルは隊列内のすべての車両が 1 回のメッセージをブロードキャストすることを意味する。つまり、1 サイクルはブロードキャスト周期 0.1 秒に相当する。ブロードキャスト数、メッセージ数という表現も考えたが、車両一台当たりの数なのか、隊列内車両の総和なのか曖昧になることを避けるため、単純な ACK に対しても便宜的に隊列単位という意味でサイクル数という表現を用いる。

#### 3.4.2.1 短縮 ID を利用した際の競合解決時間の評価

評価条件を表 3.1 に示す。短縮 ID 長や隊列内車両数を変えて、競合解決に要したサイクル数の平均値を調べた結果は図 3.7 のグラフとなる。平均サイクル数は、短縮 ID 長 5bit、車両数 32 台の場合に最大 3.05 となった。平均サイクル数が最大となった短縮 ID 長 5bit、車両数 32 台の場合の試行回数に占める割合を図 3.8 に示す。5 回のサイクル数、つまり 0.5 秒で競合を解決できることが分かる。

表 3.1 評価条件

短縮 ID 長	1~16 bit
隊列内車両数	1~60 台
乱数を変えた試行回数	100,000 回

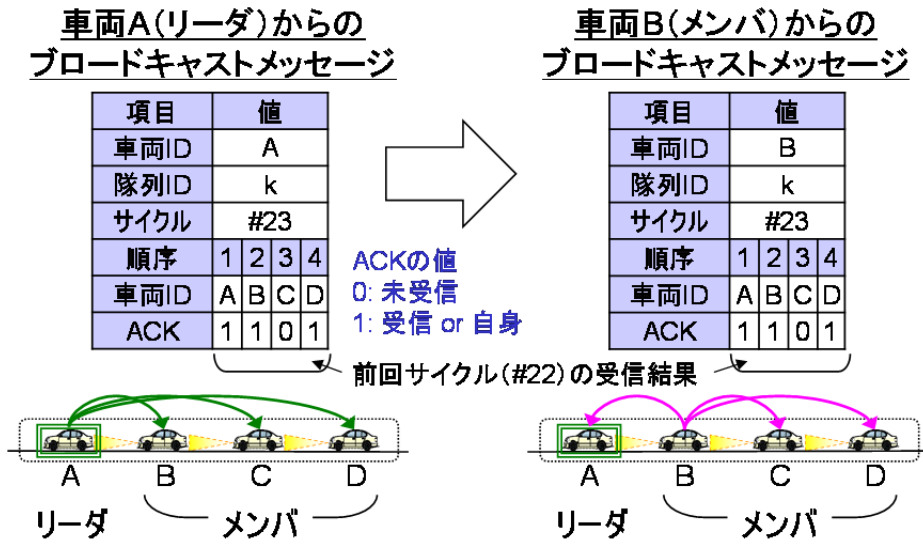


図 3.5 車車間通信の Group ACK の例

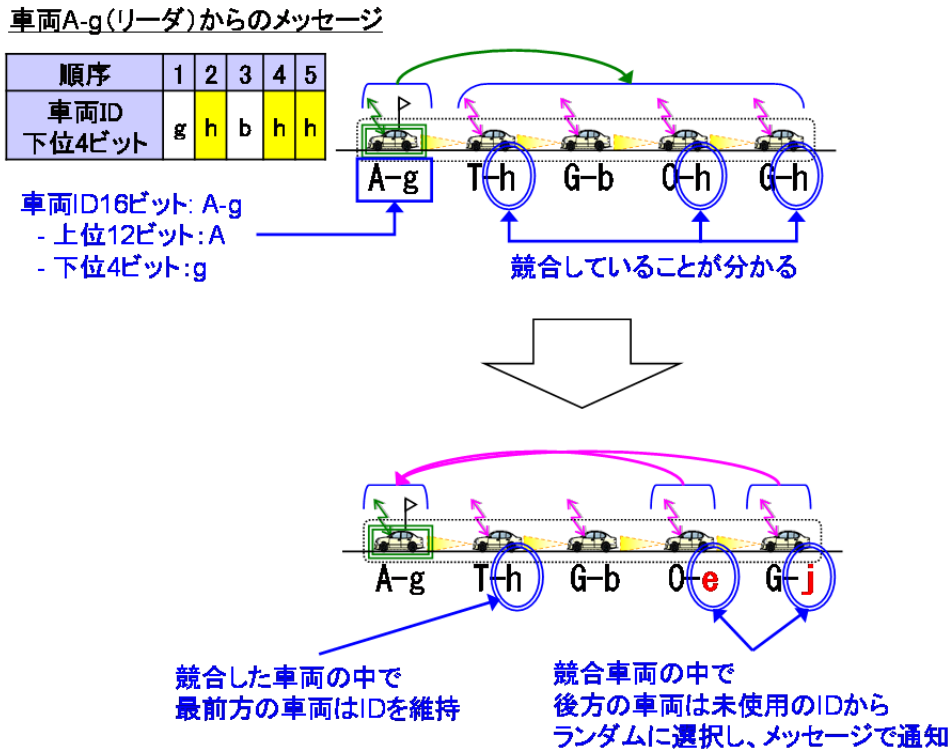


図 3.6 短縮 ID の競合解決例



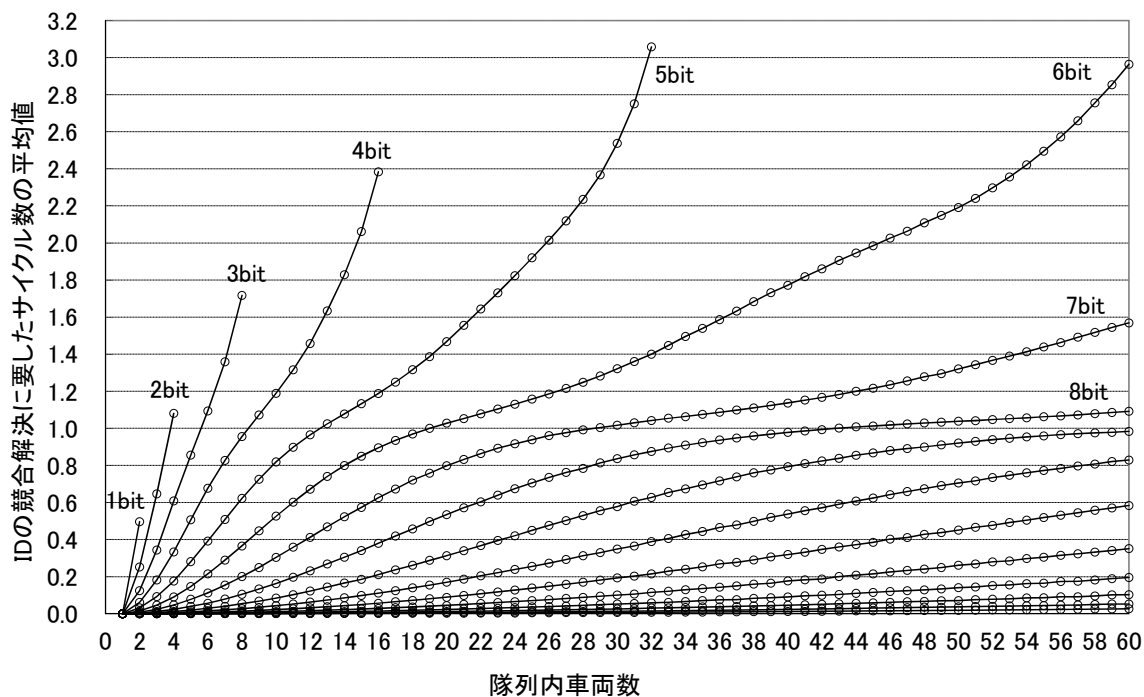


図 3.7 競合解決に要したサイクル数の平均値

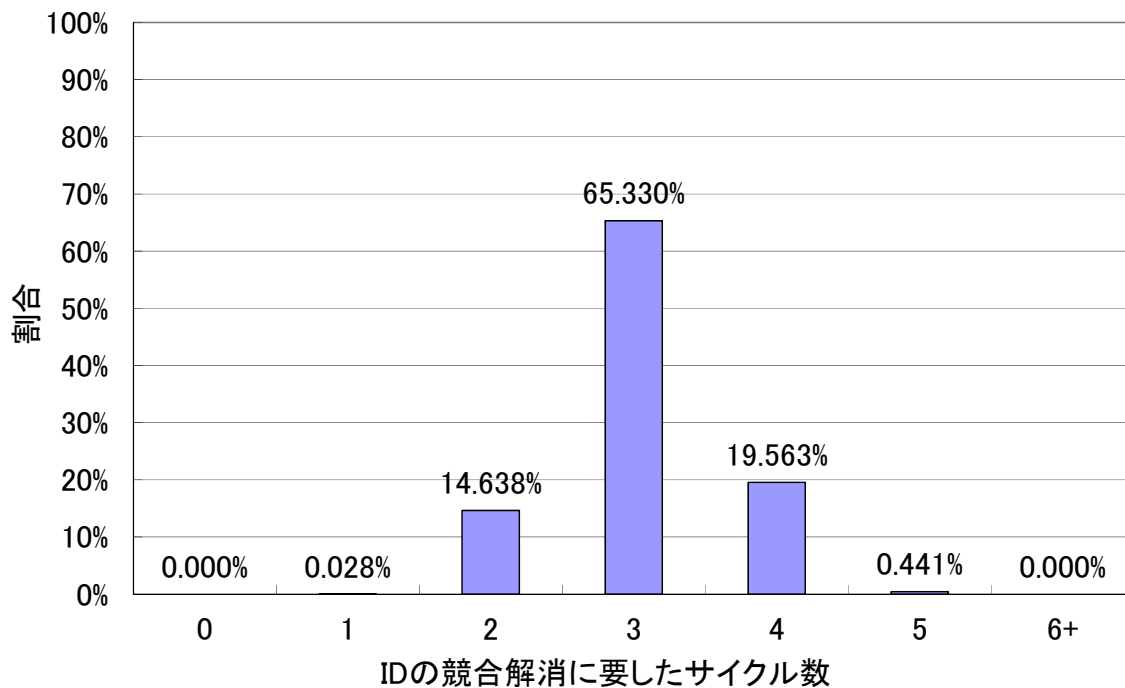


図 3.8 競合解決に要したサイクル数の割合  
(短縮 ID 長 5bit, 車両 32 台のケース)

### 3.4.2.2 Group ACK の効率性の評価

続いて、隊列内の車両数に対する通信成否の確認に必要なサイクル数について計算を行った。評価条件は表 3.2 の通りとなる。Group ACK で利用する ID 長は標準 16 bit と短縮型の 6bit について調べた。ここで ID の競合は解決済みとする。単純 ACK では 1 メッセージにつき 1 つの ACK を送信する。Group ACK でまとめ送りを行うが、メッセージに収まり切れない場合は、複数のメッセージに分割して送信する。隊列内車両数を変えて、通信成否の確認に要したサイクル数を調べた結果が図 3.9 となる。1 サイクルで通信成否の確認を終えることのできる車両数は、単純 ACK では 2 台であるのに対して、Group ACK で 8 台、6 ビットの短縮 ID の使用で 21 台となる。このように単純 ACK に対して Group ACK+短縮 ID は通信成否の確認の効率化がなされていることが確認できた。

表 3.2 評価条件

Group ACK で利用可能なデータ領域	149 bit
Group ACK の ID 長	6, 16 bit
Group ACK の ACK 長	1 bit

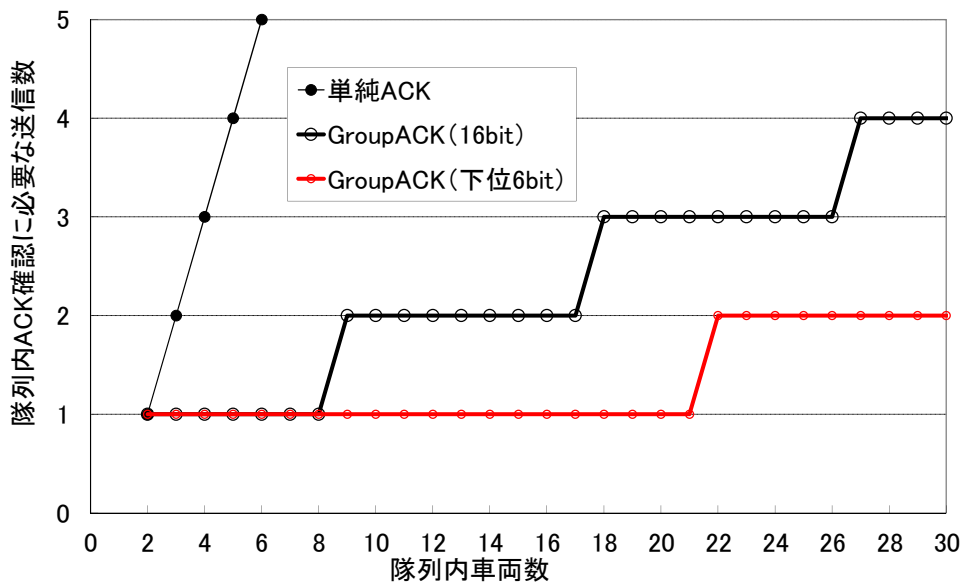


図 3.9 隊列内通信成否の確認に必要なサイクル数

### 3.4.3 通信成否状況の変化に応じた隊列編成

Group ACK によって把握した通信成否状況の変化に対する、隊列の編成方法について紹介する。ここで、リーダーとメンバで送信するメッセージのフォーマットに違いはないが、説明を簡単にするためにリーダーのメッセージを HB メッセージ、メンバのメッセージを MR メッセージと呼ぶ。(ちなみに、HB とは Heart Beat, MR とは Membership Report の略である。) また位置関係に関する用語の定義を説明する。同一の車線を縦列に並んで走行する状況で、ある車両からみて進行方向を「前方」、逆を「後方」。前方で間に車両を挟まずに接している対象(車両・隊列)を「先行」、後方で接している対象を「後続」、接していることを「隣接」。隊列の一番前を走る車両を「先頭車」と呼ぶ。

### 3.4.3.1 車両の状態遷移

図 3.10 のような、車両の状態遷移モデルを考案した。システム開始後、車両はリーダーとなって自身のみが所属する隊列を開始する。前方の隊列からの HB メッセージに自車両の ID を発見した場合は、特に問題がなければその隊列のメンバとなる。リーダーと無線機によって先行車を特定するが、これに失敗した場合に車両は新しい隊列を開始してリーダーとなる。（先行車特定については 3.4.3.2 で詳しく述べる。）

割込や通信障害の際にはその発生地点の直後の車両が新しい隊列を開始することで隊列は分割され、やがて事態が解消された場合は、分割した隊列が再び合流して安定状態に落ち着く方針とする。また、隊列が分割した場合は、一定時間お互いのメッセージを無視する仕組み（除外設定）によって、行動の後戻りを抑えることができ、安定的に遷移して隊列を編成する。提案のシステムは、情報の受け手である各車両の自律行動によって構成される。単純な行動指針が与えられ、無線傍受という環境を介して間接的に協調を行うことで全体として解を得るマルチエージェント型のシステム設計となる。各車両が自律性を保持するため、先行車との距離の維持を最優先させるなどのフェールセーフなシステムとの好相性も期待される。

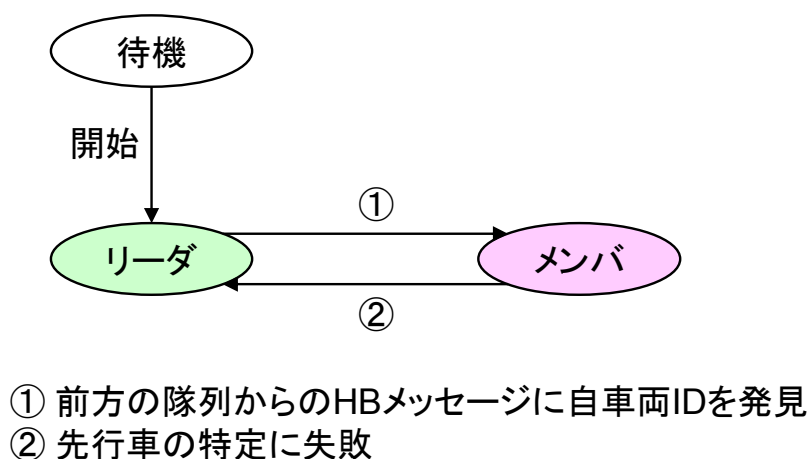


図 3.10 隊列通信における車両の状態遷移モデル

### 3.4.3.2 隊列の形成

システム開始後、車両はリーダーとなって自身のみが所属する隊列を開始する。前後に隣接する 2 つの車両が別の隊列のリーダーとして存在する場合を考える。まず後続車がリーダーと無線通信の情報から先行車を特定して、その旨を記載した HB メッセージを送信する。リーダーでは前方に隣接する車両、つまり先行車の位置が分かるが、車両 ID は不明である。無線通信は車両 ID と位置が分かるが、隣接性については不明である。位置情報を照合することで、先行車の車両 ID が特定することができる。これを「先行車特定」と呼ぶ。

先行車は後続車からの HB メッセージを受けて、新しい隊列のリーダーとなって隊列 ID やサイクル番号を定義し、後続車を Group ACK のメンバとして加えた HB メッセージを送信する。後続車は前方の隊列から受信した HB メッセージに自車両 ID を発見した場合、その隊列のメンバとなって、MR メッセージを送信する。これにより隊列を形成することができる。隊列内の走行順に車両 ID と ACK

### 第 3 章 車車間通信による協調型隊列走行の効果

をペアで並べたフィールドに加えて、隊列外の先行車（走行順 **F**）や後続車（走行順 **R**）についても用意する。このフィールドを利用して、隊列を形成する前に隣接性や通信成立性を確認する。

図 3.11 の例では、車両 **B** が車両 **A** を先行車として特定し、隊列外先行車（**F**）に記録して **HB** メッセージを送信する。車両 **A** はこの **HB** メッセージを受けて、車両 **B** を隊列外後続車（**R**）に記録して **HB** メッセージを送信する。車両 **A** と車両 **B** の隣接性と通信成立性を確認できたので、図 3.12 のように車両 **A** は車両 **B** を **Group ACK** にメンバとして加えた **HB** メッセージを送信する。車両 **B** はこの **HB** メッセージを受けて、車両 **A** の隊列に参加して、**MR** メッセージを送信する。

#### 3.4.3.3 隊列の合流

複数の車両を含む 2 つの隊列が隣接する場合を考える。先行隊列のリーダー車両は、後続隊列に所属する全ての車両のメッセージを受信し、隣接性と通信成立性が確認でき、且つ全ての車両をメンバに加える余裕があると判断した場合に、それらを **Group ACK** のメンバとして加えた **HB** メッセージを送信する。後続隊列の車両は、前方の車両から受信した **HB** メッセージに自車 **ID** を発見すると、その隊列のメンバとなって **MR** メッセージを送信する。別の隊列に参加した場合は、一定時間、以前の隊列には戻らない設定とする。これを除外設定と呼ぶ。結果、後続隊列は消滅する。図 3.13 の例では、先行隊列のリーダー **A** が、隣接性や通信成立性の確認が取れた後続隊列に所属する車両 **DEF** のメッセージを受信した状況を示す。リーダー **A** は後方隊列の車両をすべて加えてもメンバ数上限内と判断した結果、図 3.14 のように、車両 **DEF** をメンバに加えた **HB** メッセージを送信する。車両 **DEF** はその **HB** メッセージを受信して先行隊列のメンバとして参加し、**MR** メッセージを送信する。

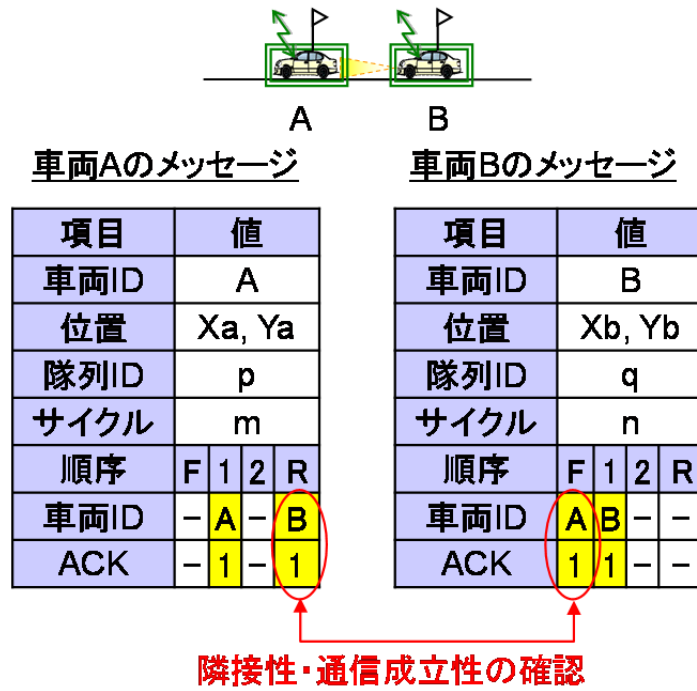


図 3.11 隊列形成前

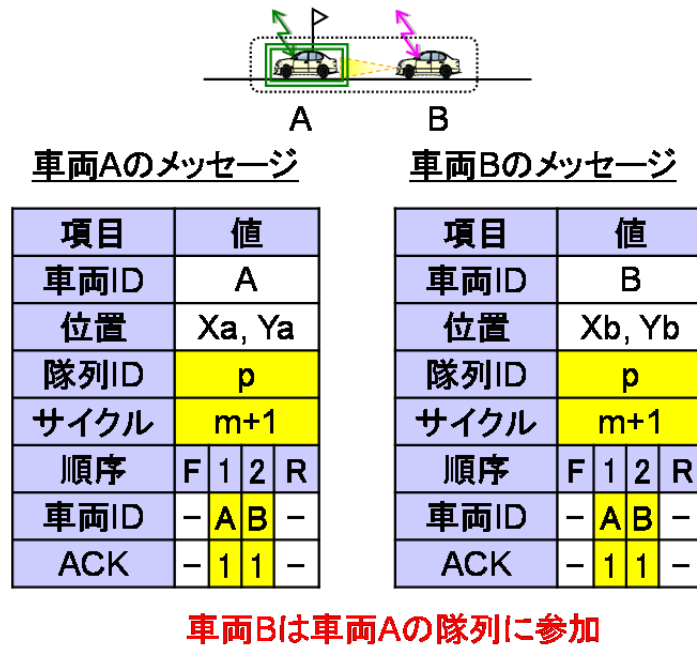


図 3.12 隊列形成後

順序	F	1	2	3	...	R
車両ID	-	A	B	C	-	D
ACK	-	1	1	1	-	1

順序	F	1	2	3	...	R
車両ID	C	D	E	F	-	-
ACK	1	1	1	1	-	-

隣接性・通信成立性の確認

車両Aが後続隊列の全ての車両D,E,Fのメッセージを受信

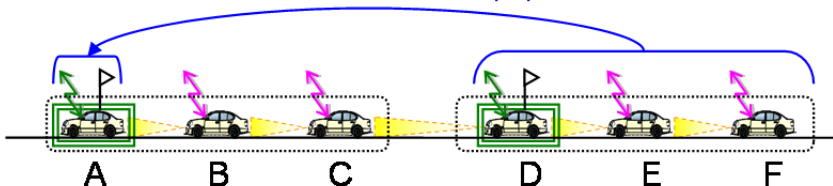
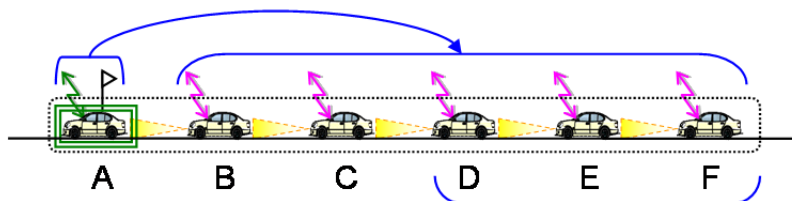


図 3.13 隊列合流前

車両Aのメッセージ

順序	F	1	2	3	4	5	6	...	R
車両ID	-	A	B	C	D	E	F	...	-
ACK	-	1	1	1	1	1	1	...	-

車両Aが後続隊列の全ての車両をメンバに含めたHBメッセージを送信



後続隊列に所属する車両は車両Aの隊列に参加

図 3.14 隊列合流後

### 3.4.3.4 通信障害の検知とその対処方法

続いて、通信障害の検知とその対処方法について、図 3.15、図 3.16 を用いて説明する。車両は、以下の条件によって通信障害となった車両の検知を行う。

#### (1) 送信障害となった車両の検知

ある車両に対する自身の ACK が偽。且つ、他車両からも、その車両に対する ACK が偽。

#### (2) 受信障害となった車両の検知

ある車両からの情報で、全車両、または不特定多数の車両に対する ACK が偽。

通信障害車両の後続車は、自らをリーダーとする新しい隊列を開始する。そして、自車両よりも後方の元の隊列のメンバ車両を自身の隊列のメンバに加えた HB メッセージを送信する。後方の車両は前方車両から自車両 ID のある HB メッセージを受信したため新しい隊列へ参加して MR メッセージを送信する。元の隊列のリーダーは、新しい後続隊列のリーダーとなった元メンバからの HB メッセージを受信した場合、当該車両とその後方のメンバ車両を隊列から除いて HB メッセージを送信する。

図 3.15 の例は、車両 C が通信障害となった場合のメッセージの特徴を示す。(i)送信障害の場合には車両 C からのメッセージが届かない上に、他の車両のメッセージで車両 C に対する ACK も偽(0)となる。(ii)受信障害の場合は、車両 C からのメッセージで全車両、または不特定多数の車両に関する ACK が偽となる。このような場合、図 3.16 のように①車両 C の直後の車両 D が、リーダーとなって新しい隊列の開始し、後方のメンバ車両 E を自身の隊列のメンバに加えた HB メッセージを送信。これを受信して、車両 E は車両 D の隊列に参加して MR メッセージを送信。②一方車両 A はメンバだった車両 D の HB メッセージを受信して、メンバから車両 DE を除いた HB メッセージを送信する。車両 C も通信障害の理由により、車両 A のメンバから除かれる。隊列のリーダー車両に通信障害が発生した場合も、後続車のリーダー化によって同様に対処される。電波干渉が発生した場合は、その程度に応じて次第に隊列が分割される。除外設定として、隊列から除かれた車両は一定時間メッセージを無視される。したがって、図 3.16 の車両 C が通信可能になっても、除外設定中であれば、2 つの隊列に分割された状態は維持される。除外設定終了後に、合流を繰り返して再び一つの隊列となる。

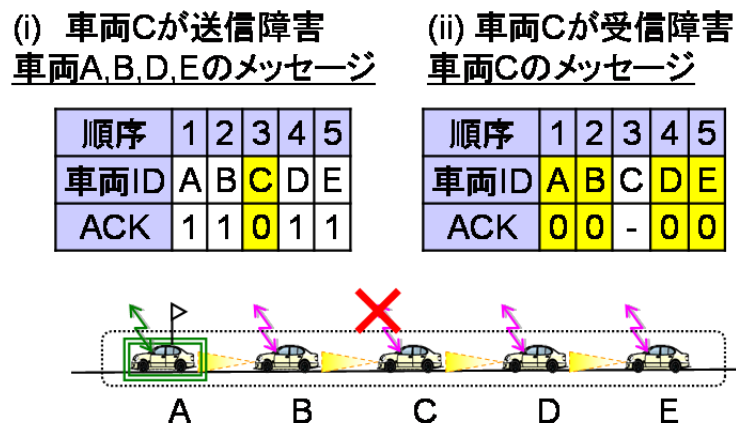


図 3.15 通信障害の検知

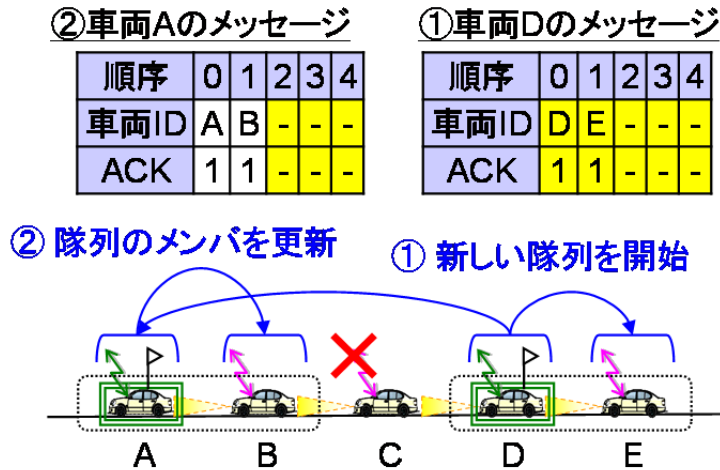


図 3.16 通信障害の場合の隊列の編成

### 3.4.3.5 隊列に対する車両の割込と離脱

最後に隊列に対する車両の割込や離脱について図 3.17, 図 3.18 を用いて説明する。隊列内に車両が割り込んだ場合、後続の車両は、レーダで検出した新しい車両の位置にマッチするような隊列内の車両を特定できなくなる。通信状態の変化を検出する課題について、後続のメンバは通信障害を検知する場合と同様の方法で車両の割込を検出し、新隊列のリーダーとなって後方車両をメンバに加える。割り込み車両が通信可能な場合は、前方隊列へメンバとして参加するか、或いは新しい隊列のリーダーとなって後続隊列を加えることになり、メンバ数が上限以内であれば、互いの除外設定を終えた後で一つの隊列となる。

図 3.17 の例では、車両 ABDE が隊列を形成しており、車両 B と D の間に車両 C が割り込んできた様子を示す。車両 D はレーダでは車両 C の位置( $X_c, Y_c$ )に車両を検出するが、この割り込み車両 C の位置は、通信で得られた隊列内の車両 ABE のどの位置にもマッチしないと判断する。その結果、図 3.16 と同様に車両 AB と車両 DE の 2 つの隊列に分割する。車両 C が通信可能な場合は、車両 AB の隊列へ参加するか、新隊列のリーダーになって車両 DE をメンバに加えることになり、メンバ数が上限以内であれば、除外設定終了後に合流して一つの隊列となる。

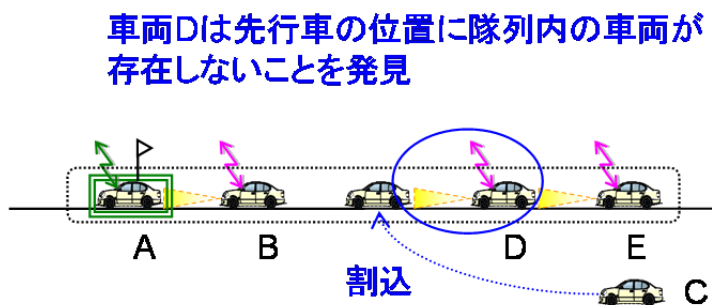


図 3.17 隊列への車両の割込み



隊列から通信車両が離脱した場合、離脱した車両の後続車は、同じ隊列に属する新しい先行車をリーダーと通信で特定し、Group ACK から離脱車両を除いた MR メッセージを送信する。リーダー車両はこれを受信して、離脱車両を除いた HB メッセージを送信してメンバに通知する。

図 3.18 の例では、車両 ABCDE が隊列を形成しており、車両 C が離脱した様子を示す。車両 D は新たな先行車として車両 B を特定する。その結果、車両 D は車両 C を除いた MR メッセージを送信し、これを受信して、リーダー車両 A も車両 C を除いた HB メッセージを送信する。リーダー車両が離脱した場合は、2 番手を走行している車両は通信先行車が消失するため、新たな隊列のリーダーとなって後方のメンバを加える。

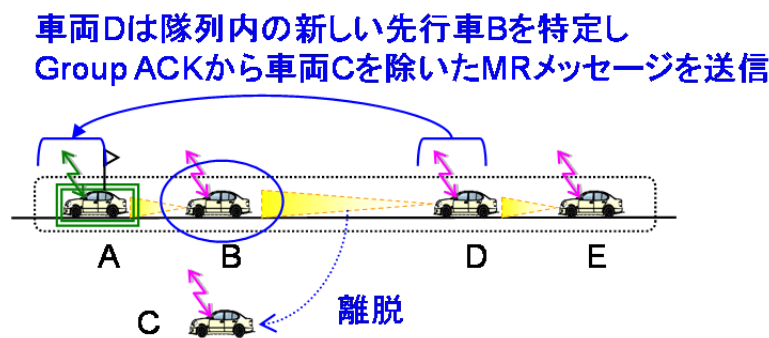


図 3.18 隊列からの車両の離脱

一方、離脱した車両も先行車が消失するため、新たな隊列のリーダーとなって後方のメンバを含めた HB メッセージを送信する。タイミングによっては後方のメンバが離脱車両を除外する前にこの HB メッセージを受信することも考えられるが、その場合は、一時的に離脱車両の隊列のメンバとなる。しかし、離脱車両の直後の車両は、離脱車両を先行車として特定できないため、やがてリーダーとなって新しい隊列を開始し、除外設定終了後に、離脱車両を除いた一つの隊列となる。通信障害の発生と、非通信車両の割込は、それぞれ別の課題として設定したが、研究の結果、通信障害の発生の対処と同じ方法で非通信車両の割込も解決できることが分かった。このことはシステムの単純化に寄与する。

### 3.5 シミュレーション評価

隊列走行システムの評価は、無線通信を利用した交差点安全支援システムを評価するためのシミュレーション手法 [88][12] を応用して行った。本手法は、ITS アプリケーション、交通流、ネットワーク、電波伝搬の各要素シミュレーションを統合したもので、効率的、且つ普遍的な枠組みについては、日本自動車研究所が事務局となって設立された「ITS 通信系シミュレータ評価検討委員会」 [89]、 「ITS 統合シミュレーション環境構築検討委員会」 [90] において検討を進められてきた。

これらの知見に基づいて隊列走行シミュレータを構築し、協調型隊列走行の諸特性（通信特性・隊列特性・走行特性）を定量的に評価した結果を紹介する。

### 3.5.1 統合シミュレータの概要

統合シミュレータは、通信を利用した ITS アプリケーションの有効性や成立条件検証のために、交通流、通信、電波伝搬、及び評価対象となる ITS アプリケーションの 4 つの要素シミュレーションを連携させたシミュレーションを可能とする。図 3.19 に連携イメージを示す。

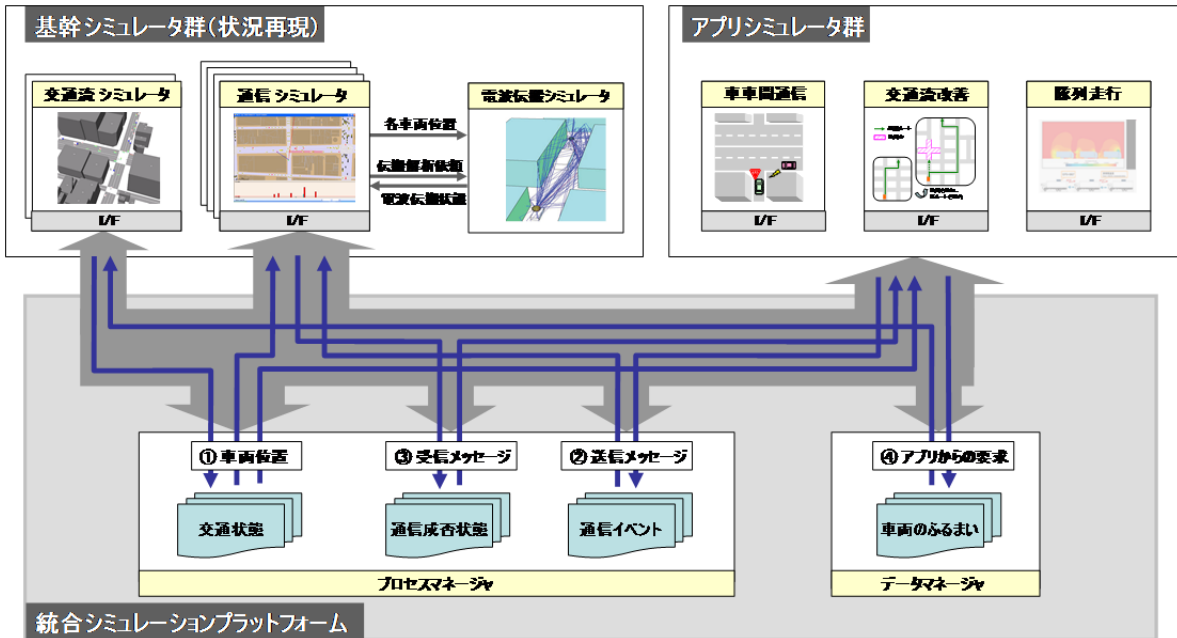


図 3.19 シミュレーション要素の連携イメージ

まず、交通流シミュレータによって各車両位置を求める。アプリシミュレータでは、車両の位置関係から発生すべき通信を生成し、通信シミュレータに通信の成否や遅延を照会する。通信シミュレータは、ネットワーク上の送信車両と受信車両間の電波伝搬品質について電波伝搬シミュレータに照会する。電波伝搬シミュレータは、送信車両と受信車両の位置に加えて、回りの建物等の構造物および車両形状なども考慮して電波伝搬品質を計算して回答する。通信シミュレータは、得られた伝搬品質からパケットエラー率を算出し、これと乱数によりパケット到達すなわち通信の成否や遅延を決定して回答する。アプリシミュレータはこの通信に関する情報を用いて、車両の動作を決定する。

統合シミュレータは、ひとつのソフトウェアとして密に組み合わせるのではなく、それぞれ単体で動作する要素シミュレータを、TCP ソケット通信を介して統合プラットフォーム上で疎に組み合わせる手法を採用している。このことによりシミュレーション時間の増加が見込まれるが、インタフェース部分の開発のみで既存の要素シミュレータを利用することができ、シミュレーション技術の進化にあわせた性能向上や、対象となる ITS アプリケーションの評価要件に対して適切な選択が可能となる。

### 3.5.2 隊列走行シミュレーションに関する研究事例

Arem らは文献 [80]において、通信と前方レーダを用いた協調 ACC の走行安定性や交通流の改善効果について、MIXIC と呼ばれるマイクロ交通流シミュレータを利用して評価を行っている。先行車両の追従制御について詳しく述べられており、特に制御係数については、先行車両の速度変化に対する自車速度の収束時間の考察がなされている。更に、車線数減少による合流が発生するシナリオにおい

で、普及率に対する交通流の特性を調べている。4レーン×5kmの道路に7,600台/時の車両の流入があり、1レーンあたり流入量は1,900台/時となる。3.5km地点で進行方向最左翼のレーンが終了するが、1.35km手前で警告が与えられるため、ドライバーは右隣のレーンへ移動を開始する。最後まで車線変更する機会が得られなかった車両はシミュレーションエリアから取り除かれて、その数はカウントされる。追従で車間を詰めている場合は合流が阻害され、合流後も速度や交通流において改善効果が見られないと報告しており、今後の課題として、(i) (複数車両の前方追従の結果としての) 隊列長の制限、(ii) 合流部に路側機を置いて車間拡張指示、(iii) 協調合流システムの検討を挙げている。

このようなシミュレーションによって走行や交通流に関する特性の評価が可能となるが、文献 [80] では通信障害が発生しないという前提でなされている。また、先行車両のみの追従であり、隊列の形成や隊列による協調動作は検討されていない。本論文では、交通流と無線通信を統合したシミュレーションにおいて、通信を利用した隊列の協調動作について評価を試みる。

### 3.5.3 隊列走行シミュレータの構築

隊列走行シミュレータのアーキテクチャについて、シナリオ、センシング、コントロールの3つに大別した構成で検討した。シナリオは、道路データと交通データによって定義される情報であり、道路データは道路・交差点の形状や制限速度、信号機設定などを含み、交通データはOD（出発点Oと到着点Dの組み合わせ毎の交通量）や車種などを含む。センシングは、自車両や周辺車両の情報を取得するための機能であり、GPS/INSやレーダ、そして無線通信によって構成される。コントロールは、センシングによって得られた情報を元に隊列を編成し、加速度を決定する機能である。隊列制御と走行制御で構成され、隊列制御が本論文の提案に相当し、走行制御は隊列を構成する車両の自動的な追従、またはドライバーによる追従となる。図 3.20 にデータの流れも含めたアーキテクチャを示す。

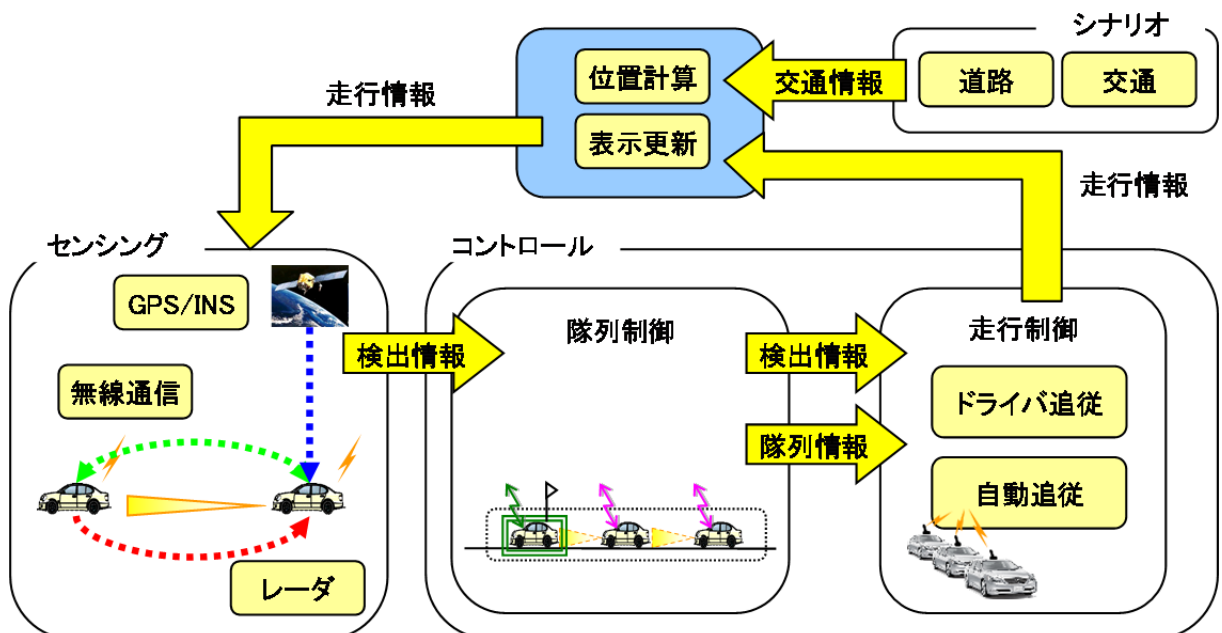


図 3.20 隊列走行シミュレータのアーキテクチャ

### 第3章 車車間通信による協調型隊列走行の効果

このアーキテクチャを交通流シミュレータ MATES [91]と無線ネットワークシミュレータ Scenargie [92]を統合プラットフォーム上で結合させて実装を行った。MATES は1台の車両が自律したエージェントとして実装されたシミュレータで、すべての車両とその他の条件（道路形状、信号機など）を含む環境に対して、車両毎に相互作用を行うマルチエージェントのモデルを採用している。筆者らはこれに外部から特定の車両に対する加速度設定を受け付ける機能拡張を行い、ドライバによる走行と隊列走行が混在した交通流のシミュレーションを可能にした。なお、隊列走行もマルチエージェントをベースに設計されており、個々の車両は自律的に対応するため連携が容易である。Scenargie は文献 [89]において他のシミュレータ（ns-2, Qualnet）と詳細に比較検討されている。その結果として、Scenargie は隠れ端末問題の取り扱いがより現実的であり、更に通信ノード数の増加（8~400台）に対して、シミュレーションの所要時間やメモリの使用量の点で優れた性能を示している。

要素シミュレータの機能分担は次の通りとなる。センシングや隊列制御、自動追従（加速度計算）で構成される隊列走行システムについては Scenargie の無線機能を利用して新たに実装を行い、ドライバ追従（加速度計算）は MATES に予め備わっている機能を利用した。この関係で、道路データや交通データに加えてドライバ追従の設定を MATES に、センシングや隊列制御、自動追従の設定を Scenargie にシナリオとして与えている。図 3.21 に隊列走行シミュレータの実際の構成を示す。交通流と通信のシミュレーションは交互に実施され、その周期は通信周期から 100 ミリ秒とした。交互計算が結果に与える影響については 3.5.7 にて考察する。

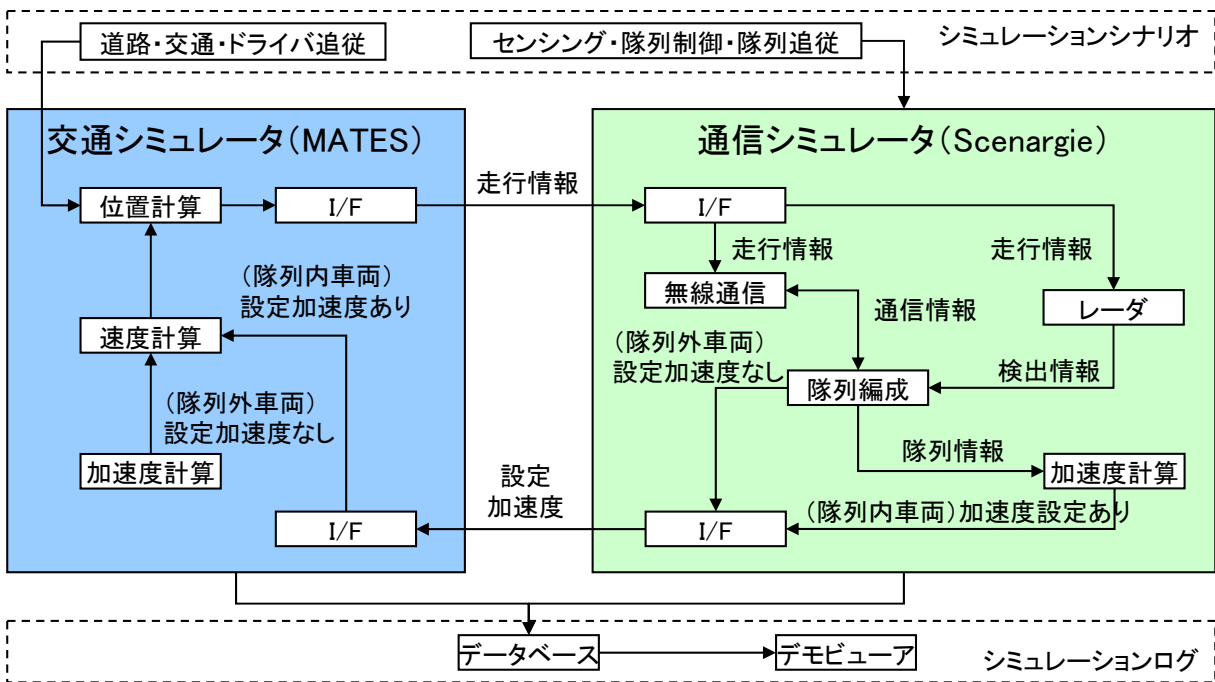


図 3.21 隊列走行シミュレータの実装

隊列制御については既に説明を行っているため、それ以外の主要な機能として、センシング（無線通信、測位システム(GPS/INS)、レーダ）、そして走行制御（ドライバによる走行、隊列における走行）について説明する。

### 3.5.3.1 無線通信の設計

無線通信は、Scenargie が提供するモジュールに設定値を与えて使用した。物理層・データリンク層は、IEEE802.11p [93]の規格にしたがって設定している。また、無線 LAN において一般的に実装されているキャプチャ効果も Scenargie はサポートしている。これは図 3.22 に示すように受信中のフレーム A よりも一定以上高い電力のフレーム B を検知した際に、弱い電力のフレーム A の受信を取りやめて、強い電力のフレーム B の受信を開始する機能である。通信負荷の非常に高い状況においても近傍通信が可能となる様子を、筆者らは 100 台の無線機を使用して確認している [5]。隊列走行では比較的短い距離の通信を必要とするため、この効果は特に重要である。また電波伝搬モデルについては 2 波モデルを使用し、電波の回折や遮蔽は、今回のシミュレーションの対象外とした。

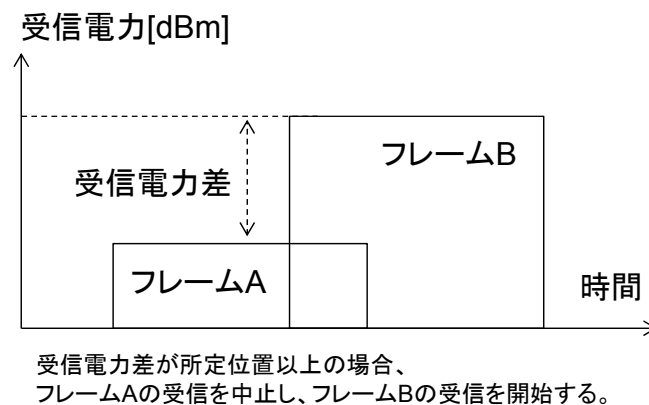


図 3.22 キャプチャ効果の動作例

アプリケーションのメッセージフォーマットは、図 3.23 のように設定した。アプリケーション層での通信速度はメッセージ 399bit を 0.1 秒周期でブロードキャストする量となる。前方・後方の判定は通信から得られる進行方向が同じ車両に限定し、対向車線上の車両とは区別されるものとする。

### 3.5.3.2 測位システムの設計

測位システムについて、GPS（衛星測位システム）と INS（ジャイロなどの慣性航法システム）は一体的に取り扱い、自車両の走行状態（位置、速度、加速度、進行方向）を推定する機能について検討した。INS の機能により、測位ロスは生じない仕様とする。簡易的な設計として、MATES から得られた実際の走行情報の入力に対して測位誤差は与えず、そのまま走行情報を出力する。

### 3.5.3.3 レーダの設計

レーダは先行車両の走行情報を得る機能として設計した。MATES の内部で、各車両は先行車両の ID を保有しているため、この情報を外部へ提供する拡張を行った。進行方向を中心とする所定の距離・角度の扇形エリアをレーダ検出範囲とし、MATES から得られた先行車両がレーダ検出範囲内に存在する場合は、その車両の位置情報を取得するが、この情報には車両 ID は含まれない。実際には、カメラ画像によって白線検知を行い、同じレーンにいる車両を検出するなど様々なアルゴリズムが考えられるが、このような簡易的な設計とする。また、レーダのロストや誤差は与えない仕様とする。

フィールド	bit
フィールド・フォーマットのバージョン	8
送信先車両識別番号(車両ID)	16
宛先車両識別番号	16
送信元の種別	4
測地系	2
水平方向の誤差	8
高さ方向の誤差	8
送信元の位置	70
速さ	8
進行方向	9
車両のシフトポジション	3
ブレーキランプ状態	2
ウinker-SW状態	2
ハザードSW状態	2
緊急自動車の緊急走行状態	1
営業車両の発車合図	1
営業車両の停車合図	1
進行方向直近の交差点の位置	70
アプリケーションのメッセージ表現の番号	8
任意に使用できる領域	160

協調型隊列走行システムの追加フィールド

フィールド	bit
隊列ID(無所属+15グループ分)	4
サイクル(127サイクル)	7
Group ACK: 車両ID下位4ビット (8台分+隊列外前後2台分)	50
Group ACK: ACK	
走行制御用情報 ・実加速度 ・車速 ・要求加速度(FF+FB) ・車間距離(先行車) ・相対速度(先行車) ・先行車捕捉フラグ ・目標車間距離 ・目標相対速度 ・先行車特定フラグ	95

図 3.23 アプリケーションにおけるメッセージフォーマット

### 3.5.3.4 ドライバによる走行の設計

走行制御は、一般に追従目標とする車両の加速度（フィードフォワード制御）に対して、先行車両との速度差や車間距離の目標値との差を減少させるような加速度（フィードバック制御）を加えて、最終的な自車両の加速度を決定する。ドライバによる走行では、交通流シミュレータ MATES の機能を利用した。この機能は Generalized Force Model [84]を参照しており、発生加速度は式 3.1 によって求められる。これは前方車両が存在しないと仮定した自由走行時の加速度に先行車の影響による減速度を与えて算出する。先行車の影響による減速度は式 3.2 によって求められる。これは先行車との距離に応じた減速度と自車両が先行車よりも速い場合に速度差に応じた減速度の成分で構成される。

### 3.5.3.5 隊列における走行の設計

隊列における走行では、先行車両を追従目標とするもの [80]や隊列内の車両で協調して仮想的な車両を仕立て、それを追従目標とするもの [81]などが考えられている。先行車両を追従目標とする [80]の制御式は、式 3.3 のように記述される。今回の自動追従では、隊列の先頭車両を追従目標とする単純な設計とし、この設計の妥当性は今回評価の対象外とする。式 3.3 を拡張して、式 3.4 を考える。これにより隊列のメンバは、先頭車両となるリーダーを追従目標とし、更に各メンバの先行車両との速度差や目標車間距離との差を減じるように加速度を調節する。この制御には、最小車間距離や、最大速度、最大・最小加速度の制限も与えられるよう設計した。制御係数は文献 [80]において最も安定的であると評価された値を使用する。また、ある隊列に隣接する先行隊列が存在する場合には、後続隊列のリーダーは文献 [80]と同様に先行車両、つまり先行隊列の最後尾の車両を追従する仕様とする。

$$\text{式 3.1} \quad \frac{dv}{dt} = \frac{v^0 - v}{\tau} + f_{\text{自車両, 先行車}}$$

$$\text{式 3.2} \quad f_{\text{自車両, 先行車}} = \frac{V - v^0}{\tau} - \frac{\Delta v \Theta(\Delta v)}{\tau'} \exp\left(\frac{-(s - s(v))}{R'}\right)$$

それぞれの変数の定義, 及び設定されたパラメータについて, 以下に列挙する.

$$V = v^0 \left(1 - \exp\left(\frac{-(s - s(v))}{R}\right)\right): \text{先行車との距離による減速度}$$

$v^0$ : 希望速度 (制限速度)

$s$ : 車間距離

$s(v) = d + Tv$ : 速度に依存した安全距離

$v$ : 自車両の速度,  $v_f$ : 先行車の速度

$\Delta v = v - v_f$ : 先行車との速度差

$$\Theta(\Delta v) = \begin{cases} 0 & \Delta v \leq 0 \text{ (先行車よりも遅い)} \\ 1 & \Delta v > 0 \text{ (先行車よりも速い)} \end{cases}$$

$\tau = 2.45$  秒: 加速時間,  $\tau' = 0.77$  秒: 減速時間,  $T = 0.74$  秒: 反応時間

$R = 5.59$  m: 加速作用範囲,  $R' = 98.78$  m: 減速作用範囲

$d = 1.38$  m: 停車時の車間距離

$$\text{式 3.3} \quad a_{ref\_d} = k_a \cdot a_p + k_v \cdot (v_p - v) + k_d \cdot (r - r_{ref})$$

$a_{ref\_d}$ は自車両の要求加速度,  $a_p$ は先行車両の加速度,  $v_p - v$ は先行車両との相対速度,  $r - r_{ref}$ は先行車両との車間距離と目標車間距離との差,  $k_a$ ,  $k_v$ ,  $k_d$ はそれぞれ制御係数となる.

$$\text{式 3.4} \quad a_n = k_a \cdot a_0 + k_v \cdot (v_{n-1} - v_n) + k_d \cdot (r_n - r_{ref})$$

隊列内の  $i$  番目を走行する車両について, 加速度 $a_i$ , 速度 $v_i$ , 先行車両との車間距離 $r_i$ として定義する.  $i = 0$  の場合は, 先頭車両となる.

3.5.3.6 シミュレーションの設定値

シミュレーションの主な設定値を表 3.3 に示す。特に断りのない限り、これらの値が用いられる。無線通信は ARIB STD T109 [42]を参照して設定する。通信距離は 300m、通信速度は 6Mbps で設計される。通信開始時に 0~99 ミリ秒の範囲でランダムなオフセット時間を入れた。隊列の上限台数は 5 台であり、隊列外先行車・後続車を含めた 7 台の Group ACK となる。よって、隊列内の通信成否の確認は短縮 ID を使用することなく 1 サイクルで行うことができる。通信障害は 4 サイクル分連続して障害を検知した場合に判定することとした。隊列を構成する台数には制約があり、上限値を超えるような合流は行なわれない。また車間距離や速度・加速度にもそれぞれ制約があり、この制約を超えるような値が要求された場合には、制約の上限値、または下限値に設定される。またシミュレータにおけるビットエラー特性は、車両 2 台の実験結果データから設定した。実験データは、図 3.24 のように受信電力対パケット到達率の形で得られる。青い点が実験値で赤色の線がその平均の値になる。

表 3.3 シミュレーションの設定値

機能	設定項目	設定値
無線通信	中心周波数（帯域幅）	720MHz(8.3MHz)
	電波伝搬モデル	二波モデル
	アンテナパターン@設置高	無指向性 2dBi@1.5m
	送信出力	20dBm
	最小受信電力	-85dB
	キャプチャ受信電力差	10dB
	変調方式	1/2QPSK-OFDM
	伝送速度	6Mbps
	送信周期（1 サイクル）	100 ミリ秒
	パケットサイズ	100 バイト
レーダ	検出範囲	100m, 前方 30 度
隊列制御	隊列の上限台数	5 台
	通信途絶の判定時間	0.4 秒
	隊列の除外時間	10 秒
	合流時の通信確認時間	2 秒
走行制御	隊列追従制御係数	$k_a=1.0, k_d=0.1, k_v=0.58$
	設定車間時間	隊列：0.7 秒, ドライバ：1.3 秒
	最大・最小加速度	隊列：最大 1.5m/s <sup>2</sup> , 最小-3.9m/s <sup>2</sup> ドライバ：最大 3.0m/s <sup>2</sup> , 最小-5.0m/s <sup>2</sup>
	最大速度	115km/h
	最小車間距離	2m
	車体長	5m



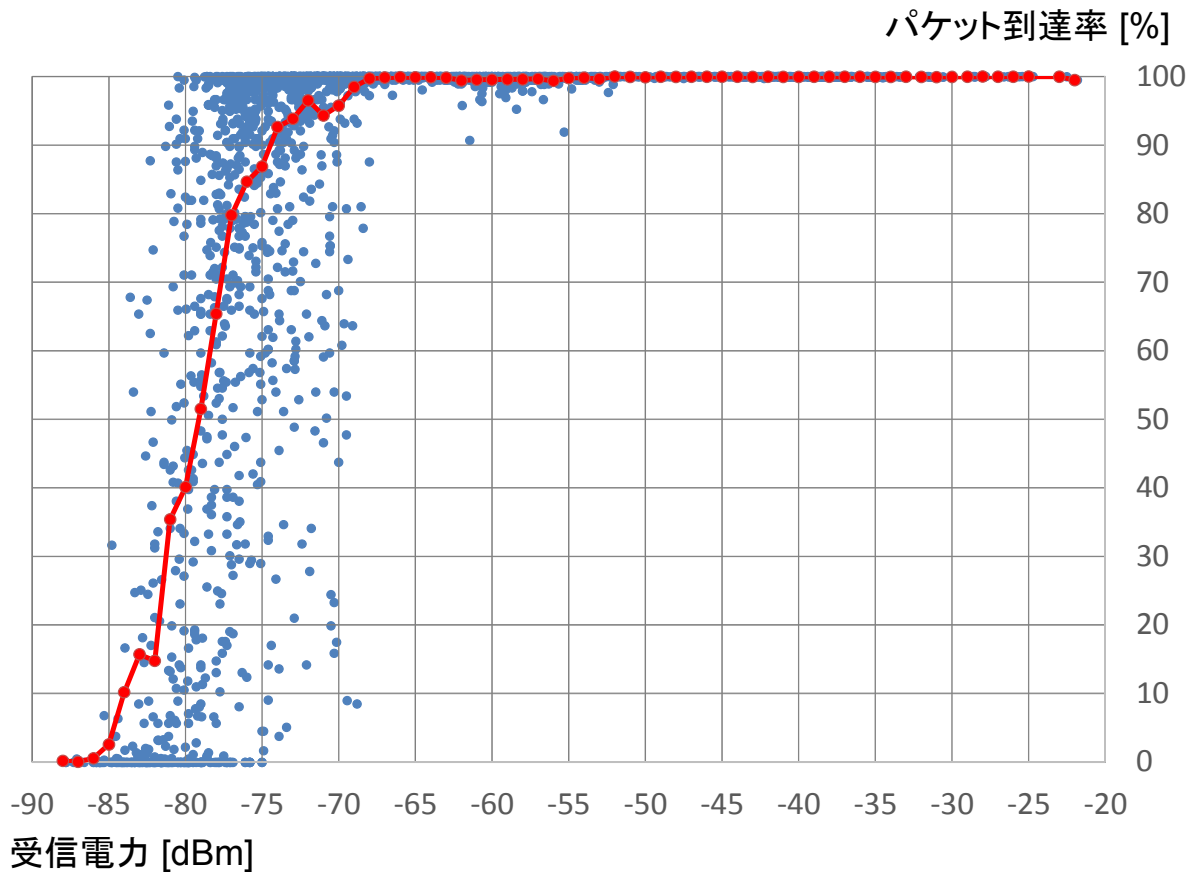


図 3.24 受信電力に対するパケット到達率のグラフ

最小受信電力以下のパケット到達率は0として計算した。パケット到達率からビットエラー率への感算では、正常に受信できたパケットはビット誤りが無いものとして、式 3.5 よりビットエラー率  $b$  を導出した。なお、本計算におけるパケット到達率  $p$  は、パケット受信中に他のパケットによる干渉や、端末の移動によるフェージングが生じていない、つまり時刻ごとに SN 比が変動していないことを前提とする。

$$\text{式 3.5} \quad p = (1 - b)^n$$

$p$ : パケット到達率,  $b$ : ビットエラー率,  $n$ : パケットのビット数

#### 3.5.4 通信結果に基づいた隊列編成の実現性の検証

シミュレーションによって、通信結果に基づいた隊列編成の実現性の検証を行った。本検証では走行制御機能を見捨て、シナリオで設定された二点間の等速直線運動を行う。車両は点で表現され、車間距離は車両中心間距離に相当する。静止時には車間距離が 10m、隊列は一行に並ぶようにシナリオを設定した。表 3.4 に示す 16 ケースの基本動作をについてシミュレーションを行い、すべてにおいて設計通りの動作を得られることを確認した。本検証では、代表的なケースであるメンバ車両の通信障害と回復、非通信車両の割込と離脱を取り上げて説明する。

### 3.5.4.1 メンバの通信障害と回復

メンバの通信障害と回復のシナリオを図 3.25 に示す。先頭から順に通信車両 1,2,3,4,5 が 10m 間隔で配置され、車両 1 が進行方向の先頭となる。各車両は静止し、20 秒目に車両 3 に送信・受信の障害が発生、40 秒目に回復する。

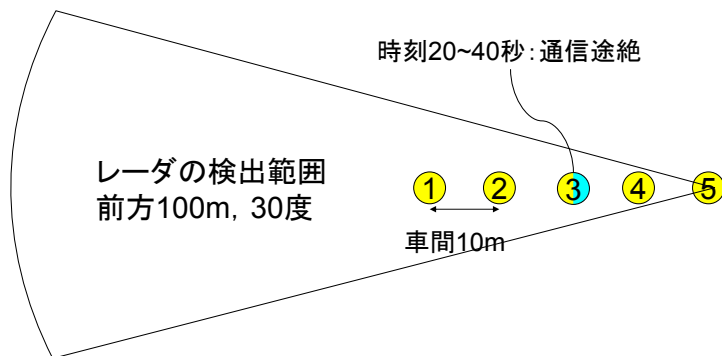


図 3.25 メンバの通信障害・回復のシナリオ

車両の状態遷移ログを図 3.26 に示す。説明に必要なログを抜粋し、意味については図中に青字、特に重要な情報は赤字で記載した。本シナリオでは、0.5 秒付近で車両が一斉に開始し、1 秒目に車両 1 の隊列 6 に車両 2,3,4,5 がメンバとなって参加して、以後安定状態となる。開始直後に車両 1 と車両 4 が隊列 6、車両 2 と車両 5 が隊列 11 で隊列 ID が競合している。車両はサイクル番号の連続性を確認しており、隊列 ID が同じでもサイクル番号の違いによって別な隊列とみなす補助機能を追加した。20 秒目に車両 3 の通信機能が停止すると、0.4 秒かけて通信障害を判定し、20.4 秒目に車両 4 が車両 5 を加えて新しい隊列 1 を開始し、車両 3 も新しい隊列 5 を開始する。40.0 秒目に車両 3 の通信機能が回復すると、車両 1 は 40.1 秒目に車両 3、40.7 秒目に車両 4, 5 を自身の隊列 6 へ加える。

図 3.27 を用いて、通信障害時の状態遷移の契機となる事象、通信の内容や成否について説明する。20.0 秒目に車両 3 に通信障害が発生すると、20.1 秒目より車両 1 の車両 3 に対する ACK が偽に変化する。車両 4 は 0.4 秒かけて通信障害を検知し、先行車特定に失敗したとして、車両 5 を加えた新しい隊列 1 を開始して HB メッセージを送信する。車両 5 は車両 4 からの HB メッセージを受信すると状態を隊列 1 のメンバとする。なお動作ログ中ではメッセージの送信と受信を両方記述すると説明が冗長になるため、メッセージの送信は省略して、受信側のみ記述する。

一方で車両 1 は車両 4 からの HB メッセージを受信すると、自身の隊列 6 から車両 4, 5 を除く。更に車両 3 の通信障害も検知し、自身の隊列 6 から車両 3 も除く。車両 1 は隊列のメンバを更新した HB メッセージを送信し、車両 2 も隊列のメンバ情報を更新する。通信障害を起こした車両 3 も先行車特定に失敗して、新しい隊列 5 を開始する。

図 3.28 は通信回復時の動作ログを示す。車両 3 は 40.0 秒目に通信が回復すると、車両 2 の MR メッセージの受信により先行車を特定し、隊列外先行車に設定して HB メッセージを送信する。40.1 秒目に車両 1 は車両 3 の HB メッセージを受信して、互いの隊列の隣接性と通信の成立性を確認すると、車両 3 を自身の隊列 1 に加えた HB メッセージを送信する。車両 3 は前方の隊列 1 の HB メッセージに自身の車両 ID を発見すると、隊列 1 に参加して、MR メッセージを送信する。40.6 秒目にかけて

車両 1 は車両 4,5 の隊列との隣接性・通信の成立性を確認し、40.7 秒目に車両 4,5 を自身の隊列 1 に加えた HB メッセージを送信する。車両 4,5 は前方の隊列 1 の HB メッセージに自身の車両 ID を発見し、隊列 1 に参加して、MR メッセージを送信する。

表 3.4 隊列編成の基本動作

シナリオ		初期状態	状態変化	終了状態
隊列形成	1	【□】■	【□】■ ←【□】	【□】■【□】
	2	【□】■【□】	【□】■【□】 ←【□】	【□】■【□□】
隊列合流	1	【□□】	【□□】 ←【□】	【□□□】
	2	【□□□】	【□□□】 ←【□□】	【□□□□□】
上限数の制約		【□□□□□】	【□□□□□】 ←【□】	【□□□□□】【□】
割込	1	【□□ □□】	<div style="text-align: center;">■</div> 【□□↓□□】	【□□】■【□□】
	2	【□□ □□】	<div style="text-align: center;">【□】</div> 【□□↓□□】	【□□□□□】
離脱	1	【□□】■【□□】	<div style="text-align: center;">【□□】■【□□】</div> <div style="text-align: center;">↓</div>	【□□ □□】 <div style="text-align: center;">■</div>
	2	【□□□□□】	<div style="text-align: center;">【□□□□□】</div> <div style="text-align: center;">↓</div>	【□□ □□】 【□】
	3	【□□□□□】	<div style="text-align: center;">【□□□□□】</div> <div style="text-align: center;">↓</div>	【□□□□□】 【□】
通信障害	1	【□□□□□】	【□□■□□】	【□□】■【□□】
	2	【□□□□□】	【■□□□□】	■【□□□□】
通信回復	1	【□□】■【□□】	【□□】□【□□】	【□□□□□】
	2	■【□□□□】	□【□□□□】	【□□□□□】
電波干渉発生		【□□□□□】	【□□□□□】 <div style="text-align: center;">←◎◎◎◎◎</div>	【□】【□】【□】【□】【□】 ◎◎◎◎◎
電波干渉消滅		【□】【□】【□】【□】【□】 ◎◎◎◎◎	【□】【□】【□】【□】【□】 ←◎◎◎◎◎	【□□□□□】

□:通信車両 ■:非通信車両 ◎:電波干渉発生車両  
 【】:隊列の範囲 ←:車両の移動

```
■ 車両1の隊列6に車両2,3,4,5が参加
0.491447876[s] 4: state=leader group=6 cycle=16
→ 時刻[s] 車両4が: リーダ状態 隊列6 サイクル16
0.493749830[s] 2: state=leader group=11 cycle=62
0.494092128[s] 3: state=member leader=2 group=11 cycle=62
→ 時刻[s] 車両3が: メンバ状態 リーダ車両2 隊列11 サイクル62
0.515296898[s] 5: state=leader group=11 cycle=122
0.519900806[s] 1: state=leader group=6 cycle=84
0.607314459[s] 5: state=member leader=4 group=6 cycle=17
0.748019823[s] 4: state=member leader=2 group=11 cycle=64
0.748019857[s] 5: state=member leader=2 group=11 cycle=64
1.036242618[s] 2: state=member leader=1 group=6 cycle=88
1.036242651[s] 3: state=member leader=1 group=6 cycle=88
1.036242685[s] 4: state=member leader=1 group=6 cycle=88
1.036242718[s] 5: state=member leader=1 group=6 cycle=88

■ 車両4が新しい隊列1を開始、車両5が参加
20.417805523[s] 4: state=leader group=1 cycle=28
20.418094234[s] 5: state=member leader=4 group=1 cycle=28

■ 車両3は新しい隊列5を開始
20.429981051[s] 3: state=leader group=5 cycle=115

■ 最初に車両3、続いて車両4,5が車両1の隊列6へ参加
40.124515386[s] 3: state=member leader=1 group=6 cycle=18
40.756885144[s] 4: state=member leader=1 group=6 cycle=23
40.756885177[s] 5: state=member leader=1 group=6 cycle=23
```

図 3.26 車両の動作ログ (状態遷移)

```

■ 車両3に通信障害発生、車両1の車両3に対するACKが偽に変化
20.001962407[s] 4: recv=hb src=1 group=6 cycle=114 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1,3/1,4/1,5/1
  → 時刻[秒] 車両4が: HBメッセージ受信 送信車両1 隊列6 サイクル114
    隊列外先行車=無し 隊列外後続車=無し
    GroupACK(車両ID/ACK)=1/真, 2/真, 3/真, 4/真, 5/真
20.117250672[s] 4: recv=hb src=1 group=6 cycle=115 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1,3/0,4/1,5/1
  → GroupACK(車両ID/ACK)=1/真, 2/真, 3/偽, 4/真, 5/真
20.257277937[s] 4: recv=hb src=1 group=6 cycle=116 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1,3/0,4/1,5/1
20.366625202[s] 4: recv=hb src=1 group=6 cycle=117 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1,3/0,4/1,5/1

■ 車両4が先行車特定に失敗、車両5を加えた新しい隊列1を開始
20.417805523[s] 4: ev=frontisnototherwisespecified
  → 車両4が: イベント発生=先行車特定失敗
20.417805523[s] 4: state=leader group=1 cycle=28
  → 車両4が: リーダ状態 隊列1 サイクル28

■ 車両5が車両4の隊列1に参加
20.418094234[s] 5: recv=hb src=4 group=1 cycle=28 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=4/1,5/1
20.418094234[s] 5: state=member leader=4 group=1 cycle=28

■ 車両1が自身の隊列6から車両4, 5を除く
20.418094301[s] 1: recv=hb src=4 group=1 cycle=28 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=4/1,5/1
20.418094301[s] 1: ev=hbfromamember
  → 車両1が: イベント発生=メンバからのHBメッセージ受信

■ 車両3も先行車特定に失敗、新しい隊列5を開始
20.429981051[s] 3: ev=frontisnototherwisespecified
20.429981051[s] 3: state=leader group=5 cycle=115

■ 車両1は車両3の通信障害を検知、隊列6から車両3を除く
20.500644597[s] 1: ev=excludemembersaftertimeoutedmember
  → 車両1: イベント発生=通信障害検知(ACKタイムアウト)
20.500971400[s] 2: recv=hb src=1 group=6 cycle=118 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1

```

図 3.27 通信障害時の車両の動作ログ

```

■ 車両3の通信が回復、車両1が車両3の隊列との隣接性・通信成立性を確認
40.033304121[s] 3: recv=mr src=2 group=6 cycle=17 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1
40.033304121[s] 3: ev=setfrontvehicle
→ 車両3が: イベント発生=先行車特定
40.033304121[s] 3: ev=setoutsidefrontvehicle
→ 車両3が: イベント発生=隊列外先行車設定
40.102387187[s] 1: recv=hb src=3 group=5 cycle=18 outfront=2/1
    outback=-1/0 member=3/1
40.102387187[s] 1: ev=setoutsidebackvehicle
→ 車両3が: イベント発生=隊列外先行車設定

■ 車両1が車両3を自身の隊列に追加
40.102387187[s] 1: merge=3,
→ 車両1が: 車両3を隊列に加えることを決定
40.124515386[s] 3: recv=hb src=1 group=6 cycle=18 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1,3/1
40.124515386[s] 3: state=member leader=1 group=6 cycle=18

■ 車両1が車両4,5の隊列との隣接性・通信成立性を確認
40.127012520[s] 1: recv=hb src=4 group=1 cycle=57 outfront=3/1
    outback=-1/0 member=4/1,5/1
40.127012520[s] 1: ev=setoutsidebackvehicle
40.688567045[s] 1: recv=mr src=5 group=1 cycle=61 outfront=3/1
    outback=-1/0 member=4/1,5/1

■ 車両1が車両4,5を自身の隊列に追加
40.707977045[s] 1: merge=4,5,
40.756885144[s] 4: recv=hb src=1 group=6 cycle=23 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1,3/1,4/1,5/1
40.756885144[s] 4: state=member leader=1 group=6 cycle=23
40.756885177[s] 5: recv=hb src=1 group=6 cycle=23 outfront=-1/0
    outback=-1/0 member=1/1,2/1,3/1,4/1,5/1
40.756885177[s] 5: state=member leader=1 group=6 cycle=23

```

図 3.28 通信回復時の車両の動作ログ

### 3.5.4.2 非通信車両の割込と離脱

非通信車両の割込・離脱のシナリオを図 3.29 に示す。先頭から順に通信車両 1,2,4,5 が並んでいる。隊列から側方 50m 離れた位置に存在する非通信車両 3 が 10~20 秒目にかけて車両 2,4 の間に割り込み、30~40 秒目にかけて側方 50m の位置へ退出する。車両 3 が隊列に割り込んだ時に、車両中心間距離が 10m となるように配置されている。

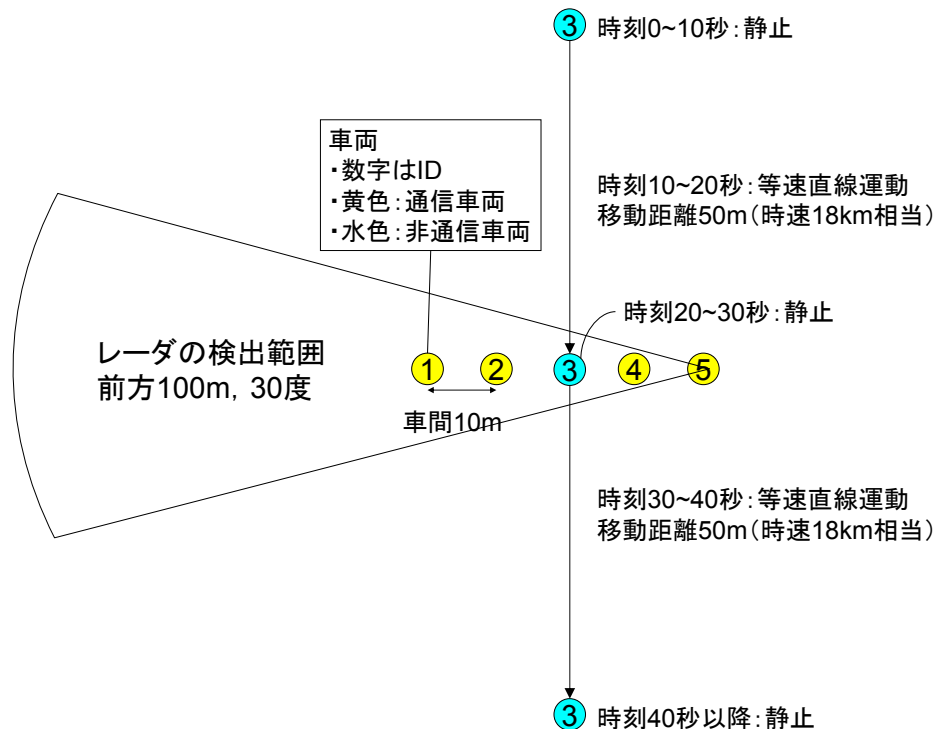


図 3.29 非通信車両の割込・離脱のシナリオ

車両の状態遷移ログを図 3.30 に示す。本シナリオでも、0.5 秒付近で車両が一斉に開始し、1 秒目に車両 1 の隊列 6 に車両 2,4,5 がメンバとなって参加して、以後安定状態となる。20 秒目にかけて、非通信車両 3 が車両 2,4 の間へ割込むと、車両 4 が車両 5 を加えて新しい隊列 1 を開始する。30 秒目から車両 3 が離脱すると、車両 4, 5 は車両 1 の隊列 6 に参加する。非通信車両の割込・離脱による隊列の分割や合流は、通信の障害発生と回復の際の隊列の分割・合流と同様の動作となるため、詳細なログの確認は省略する。

以上のシナリオから、割込や通信障害の際にはその発生地点の直後の車両が新しい隊列を開始することで隊列は分割され、やがて事態が解消した場合は合流を行って安定状態に落ち着く様子を確認した。図 3.10 に示した隊列通信を利用した車両の状態遷移モデル、つまり①前方の隊列からの HB メッセージに自車両 ID を発見したらその隊列のメンバ、②先行車の特定に失敗したら新しい隊列を開始してリーダーという単純な行動指針によって、通信障害の発生や非通信車両の割込を含む複雑な隊列の動作を実現できることを示した。

```

■ 車両1の隊列6に車両2,4,5が参加
0.491447876[s] 4: state=leader group=6 cycle=16
0.493749830[s] 2: state=leader group=11 cycle=62
0.515296898[s] 5: state=leader group=11 cycle=122
0.519900806[s] 1: state=leader group=6 cycle=84
0.607314328[s] 5: state=member leader=4 group=6 cycle=17
0.653192428[s] 2: state=member leader=1 group=6 cycle=85
1.036238490[s] 4: state=member leader=1 group=6 cycle=88
1.036238523[s] 5: state=member leader=1 group=6 cycle=88

■ 車両4が新しい隊列1を開始、車両5が参加
19.477184162[s] 4: state=leader group=1 cycle=43
19.477574094[s] 5: state=member leader=4 group=1 cycle=43

■ 車両4, 5が車両1の隊列6に参加
31.740378213[s] 4: state=member leader=1 group=6 cycle=79
31.740378246[s] 5: state=member leader=1 group=6 cycle=79
    
```

図 3.30 車両の動作ログ (状態遷移)

### 3.5.5 シミュレーションによる特性評価

高速道路のシナリオで、無線機搭載率 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% に対して、通信による隊列走行がどのような特性を示すか、前述のシミュレータを用いて調べた。

#### 3.5.5.1 高速道路のシナリオ

シミュレーションエリアは、図 3.31 に示すような道路長 2km、3 車線の対向流で、通信車両は上部 3 車線 (隊列レーン) において隊列を形成し、下部 3 車線 (負荷レーン) では隊列を形成せず、単に通信負荷を与える役割とした。定常状態を測定するために隊列レーンの始点・終点の 500m 区間は除き、始点から 500m~1,500m 地点の 1km 区間を計測エリアとした。計測に関する詳細は後述する。車線は外側から順に A,B,C とし、1 時間あたりの流入車両数、及び目標とする標準速度を以下のように設定した。

- A レーン (外側) : 流入車両数 800 台/時, 標準速度 80km/h
- B レーン (中央) : 流入車両数 1,600 台/時, 標準速度 100km/h
- C レーン (内側) : 流入車両数 2,100 台/時, 標準速度 115km/h

文献 [94]では、渋滞発生時における東名高速下り大和地区の交通量と速度の関係を紹介している。上記の A~C レーンの流入車両数と標準速度は、一般的な高速道路の自由流のワーストケースに近い値となるよう、渋滞臨界点手前の状態を参考にして設定した。電波の回折や遮蔽のシミュレーションは行わないため、通信特性は無線機の密度 (距離・台数) に依存する。したがって、車両密度を固定し、搭載率を変化させることで、無線機の密度を変えて評価を行なった。



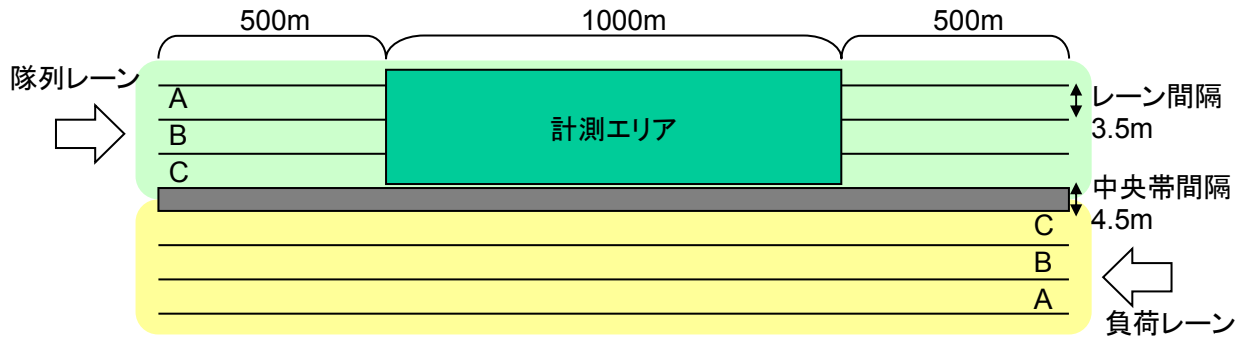


図 3.31 シミュレーションエリア

### 3.5.5.2 通信負荷に対するパケット到達率

システム搭載率 40%において、通信距離に対するパケット到達率を調べた。また不達の場合は、その内訳も調べた。負荷レーンに対向車両がない場合の結果が図 3.32、負荷レーン（対向車線）が渋滞で停止している場合の結果が図 3.33 である。隊列レーンの車両数は図 3.38 によれば 90~100 台程度であり、負荷レーンが渋滞で停止している場合の車両数はおよそ 350 台となる。搭載率 40%とした積極的な理由としては、現実的な搭載率である点、消極的な理由としては、これ以上の普及率は現実的な計算時間で解を得るのが難しかった点が挙げられる。3.2.3 前提条件ではパケット到達率 95%という隊列走行の実用条件を設定している。対向車両がない場合は、300m 程度までこの条件を達成することができるが、対向車線が渋滞で停止している場合は 100m まで縮退する。通信負荷が高い状況においても近傍のパケット到達率が改善されているのは、キャプチャ効果の実装によるものである。隊列走行では比較的近傍の車両との通信が必要であるため、この実装は重要である。

### 3.5.5.3 通信負荷に対する隊列内通信距離の割合

このような通信負荷の有無による隊列内通信距離の割合は図 3.34 と図 3.35 の結果となった。対向車両がない場合は 100m を超える通信も 2.2%程度存在するが、渋滞停止した場合には、通信の失敗が積みあがることもなく 0.8%へ減少した。隊列内到達率は、対向車両のない場合が 99.9%、渋滞停止した場合で 97.6%と、いずれも隊列内到達率 95%要件を達成している。通信結果による隊列編成の状態遷移が機能し、電波干渉時の通信障害に対処している様子が確認できた。通信負荷の有無による隊列内車両数の変化について調べた結果は図 3.36 である。対向車線が渋滞停止した場合は、隊列が縮小している様子が確認できる。そもそも搭載率 40%で 100m を超える通信の割合は少ない。仮に時速 100km とすると車間距離は 30m 程度であり、100m を超えるためには 4 台以上の隊列が必要である。通信車両が 4 台以上の連続する搭載車両が走行する確率は、搭載率が 40%であることから単純計算で約 3%であり、図 3.36 で確認される程度にまれであることは想定できる。

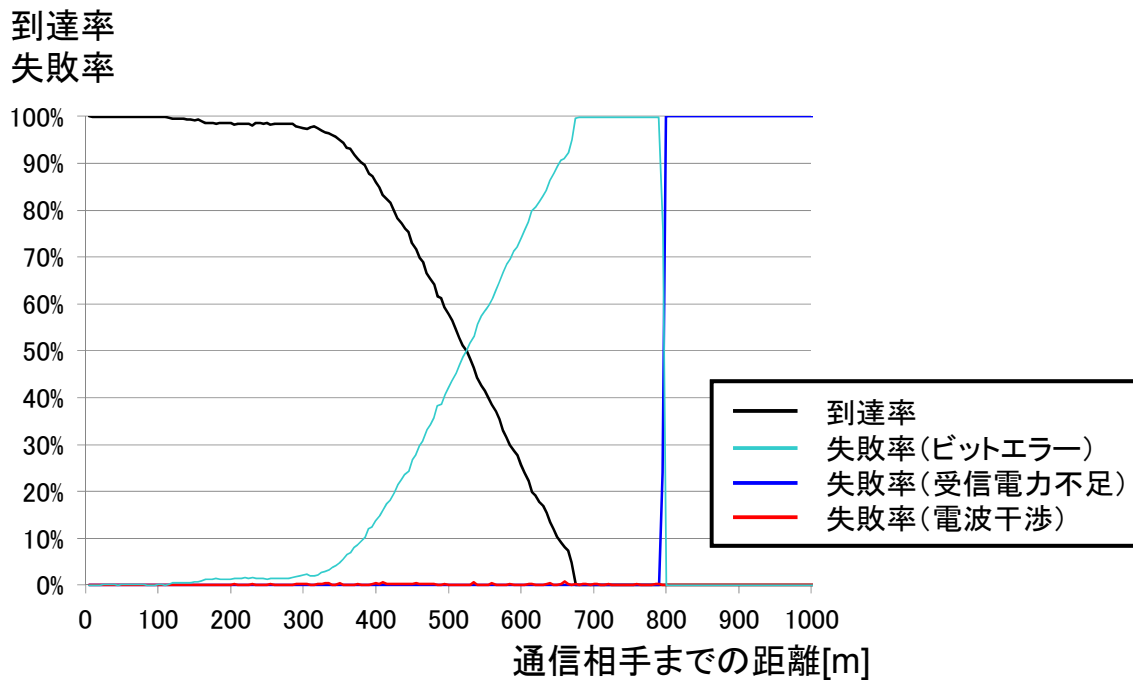


図 3.32 通信距離に対する通信結果の内訳 (対向車両無しの場合)

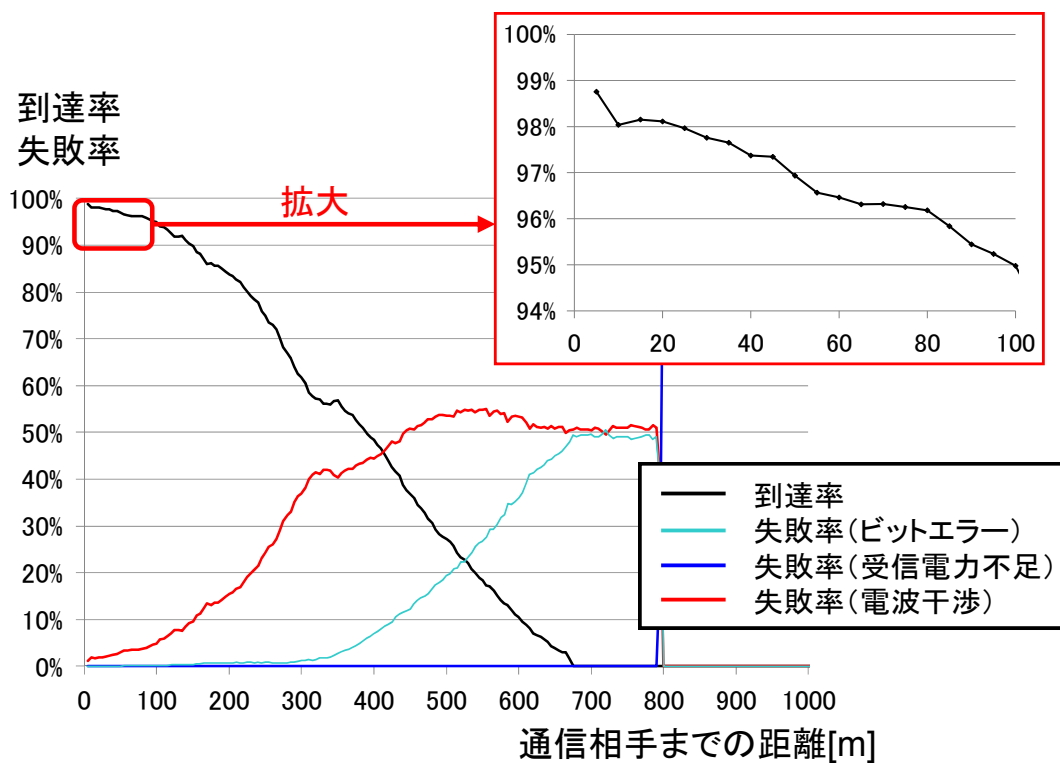


図 3.33 通信距離に対する通信結果の内訳 (対向車線が渋滞停止の場合)

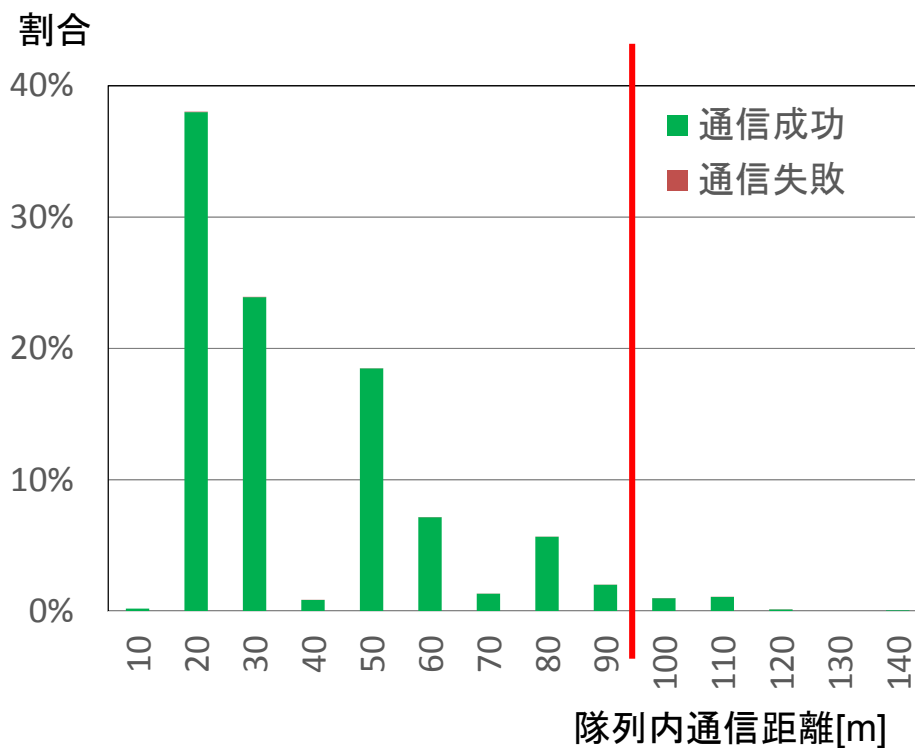


図 3.34 隊列内通信距離の発生割合（対向車両無しの場合）

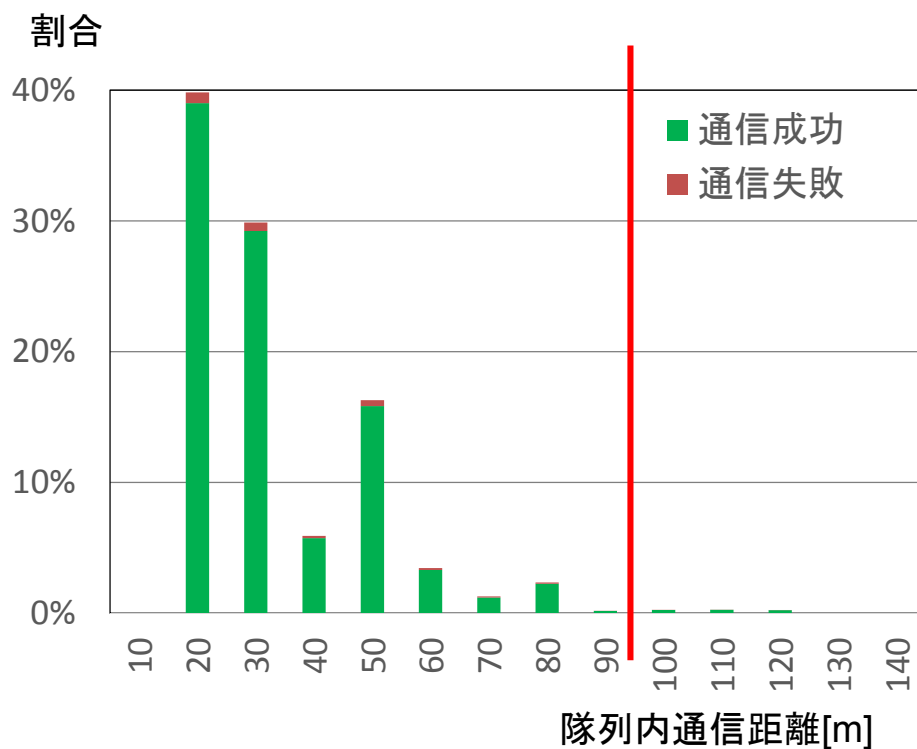


図 3.35 隊列内通信距離の発生割合（対向車両無しの場合）

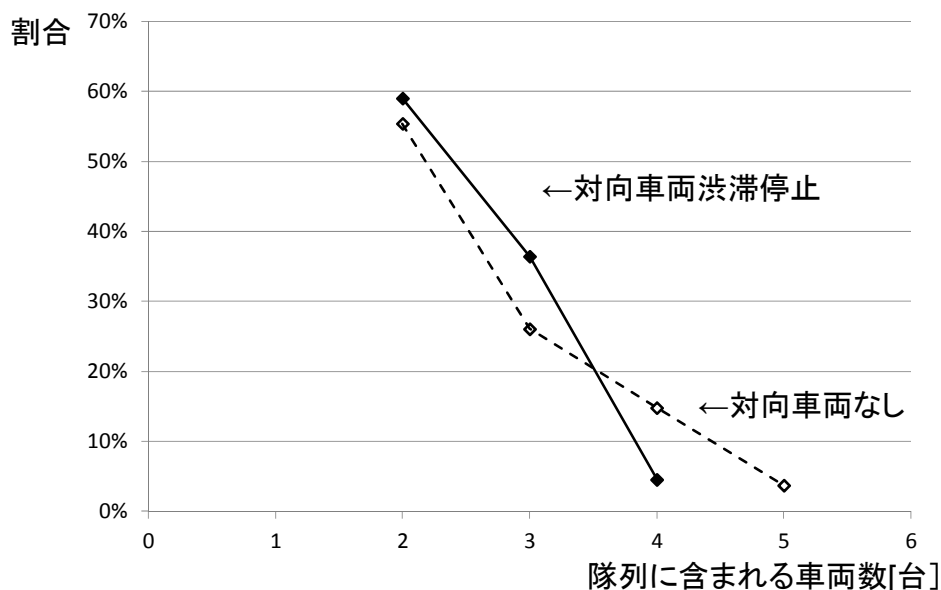


図 3.36 隊列内車両数の発生割合

#### 3.5.5.4 搭載率に対する走行性能の変化

続いて、隊列レーンと同じ渋滞臨界点手前の状態の自由流を設定し、搭載率に対する走行性能の変化を調べた。本シナリオでは、通信負荷の影響を調べる目的ではないため、負荷レーンの交通流を設定しない。車両速度の発生割合は図 3.37 の結果となった。搭載率に対する車両速度の平均値は(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) = (87, 88, 94, 98, 101, 114)[km/h]であり、搭載率が高いほど車両速度が高い傾向が確認できた。搭載率の増加に応じて適切に隊列が編成され、速度の増加に寄与している様子が確認できた。

他の指標についても調べる。車両数の時間推移は図 3.38 の結果となった。経過時間が 100 秒以降の平均値は(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)=(101, 100, 96, 93, 89, 82)[台]であり、搭載率が高いほど車両数が減少する傾向が確認できた。これは一定の流入量に対して、隊列形成による速度上昇により隊列レーンの車両の滞在時間が減少したことによると考えられる。

車間時間の発生割合は図 3.39 の結果となった。0.8 秒と 1.8 秒付近に大きな山が存在数するが、前者が隊列走行、後者がドライバによる走行と考えられる。搭載率が高いほど短い車間距離の割合が多くなる傾向が確認でき、隊列走行が増加していることが分かる。但し、搭載率 100%の場合の車間距離は 1.6~1.8 秒辺りの割合が多い。図 3.38 の結果によれば、搭載率 100%の場合には全ての車両が最高速度付近で走行しているため、車間が縮まらないためと考えられる。搭載率 40%, 60%, 80%の場合、2.0 秒付近にも小さな山が確認できる。これは隊列先頭車を含めたドライバによる追従と考えられる。搭載率 0%における車間時間は 1.7 秒辺りであることから、隊列内の車間距離が短くなったことにより、自由走行の車間が広がっている効果が確認できた。

車両加速度の発生割合は図 3.40 の結果となった。搭載率が高いほど、加速度幅が減少する様子が確認できた。隊列内で連携した走行により、走行安定性も改善されていることが分かる。このことは搭乗者の快適さに寄与する。

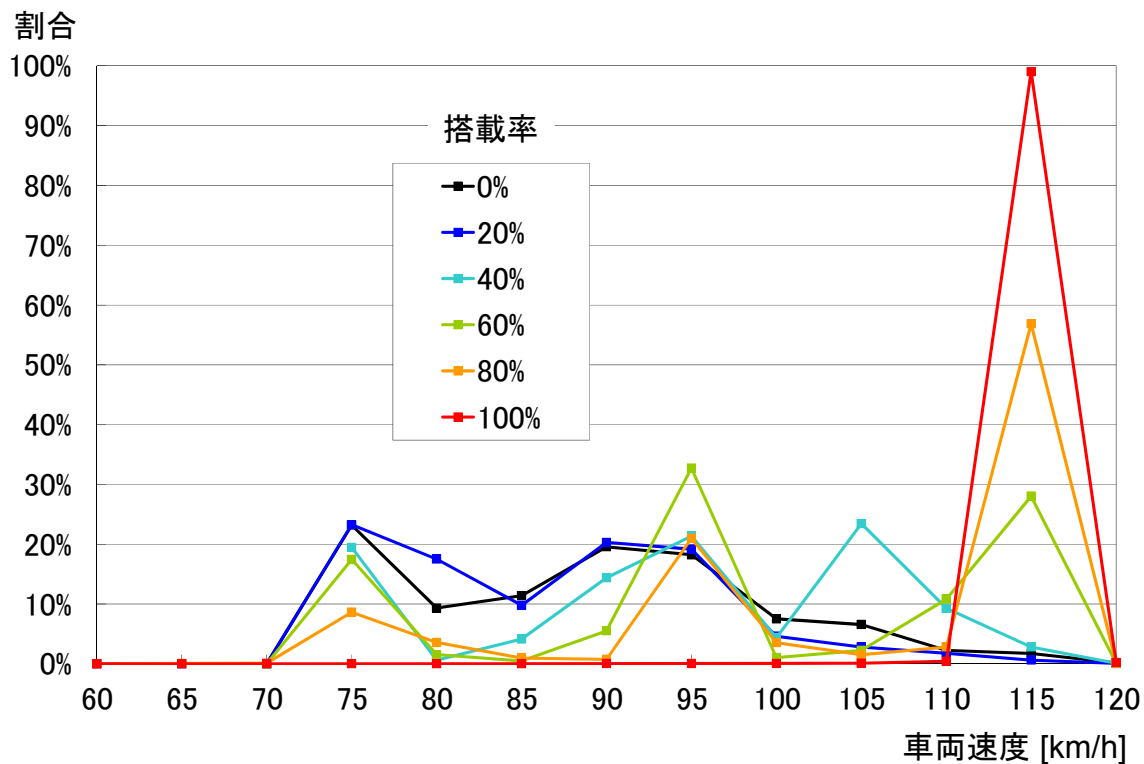


図 3.37 車両速度の発生割合

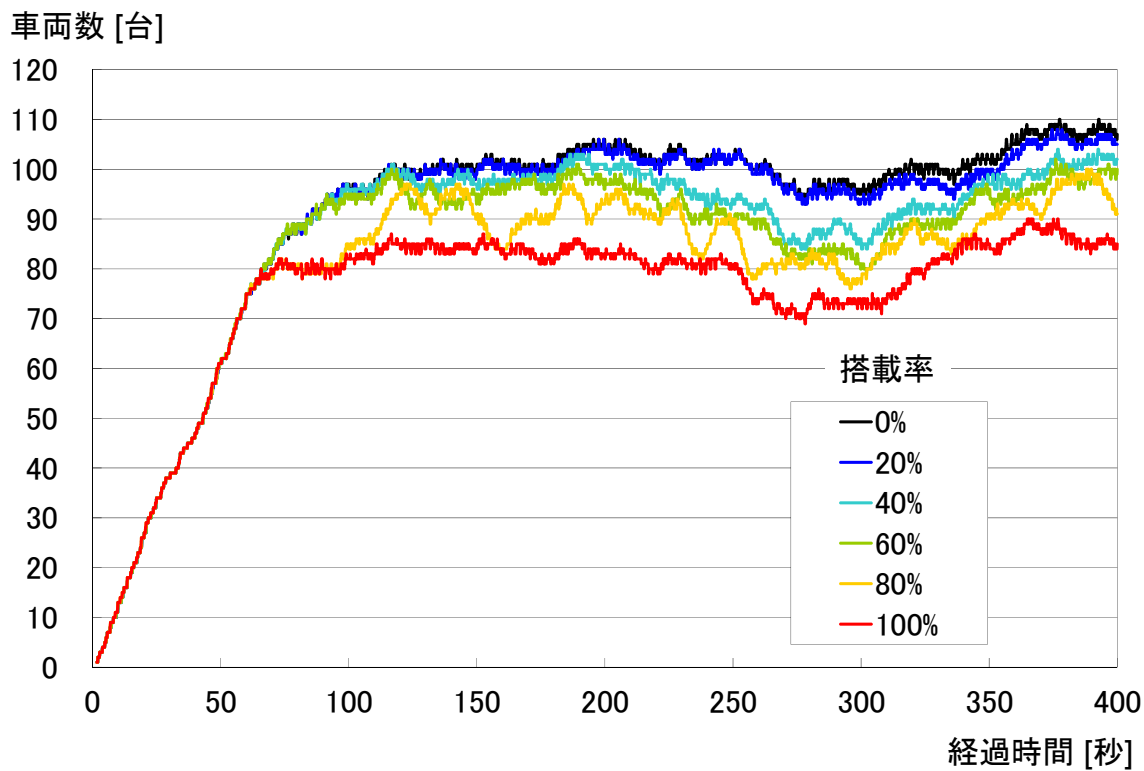


図 3.38 車両数の時間推移

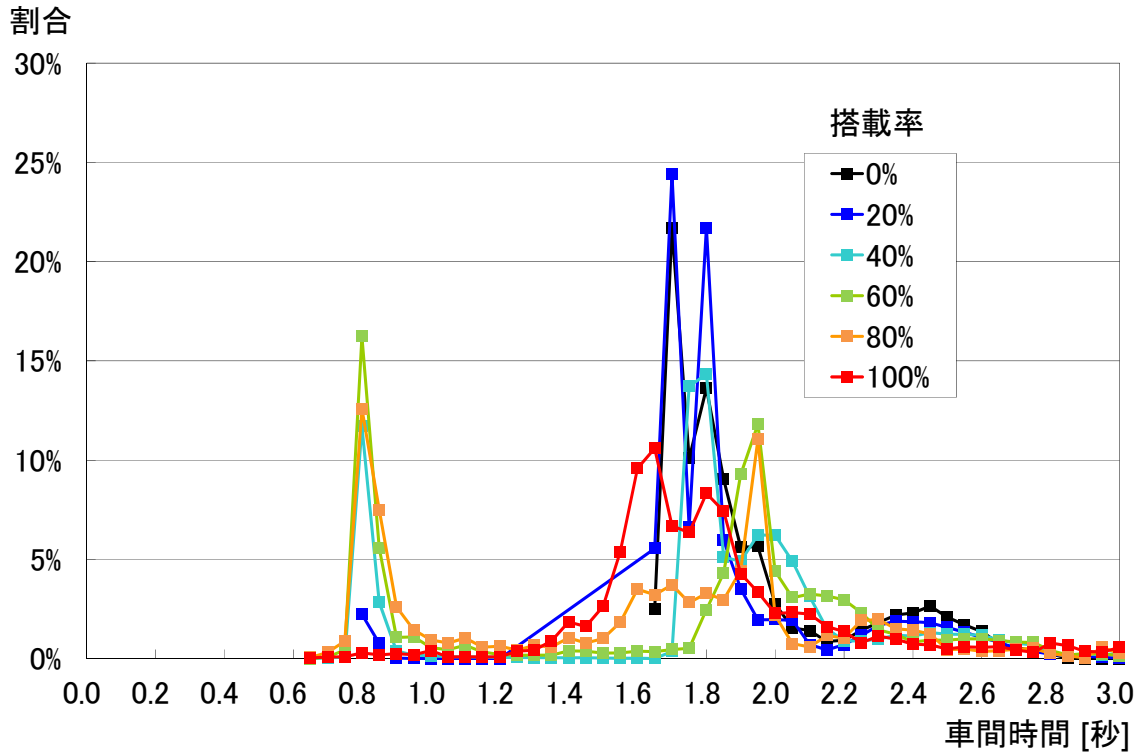


図 3.39 車間時間の発生割合

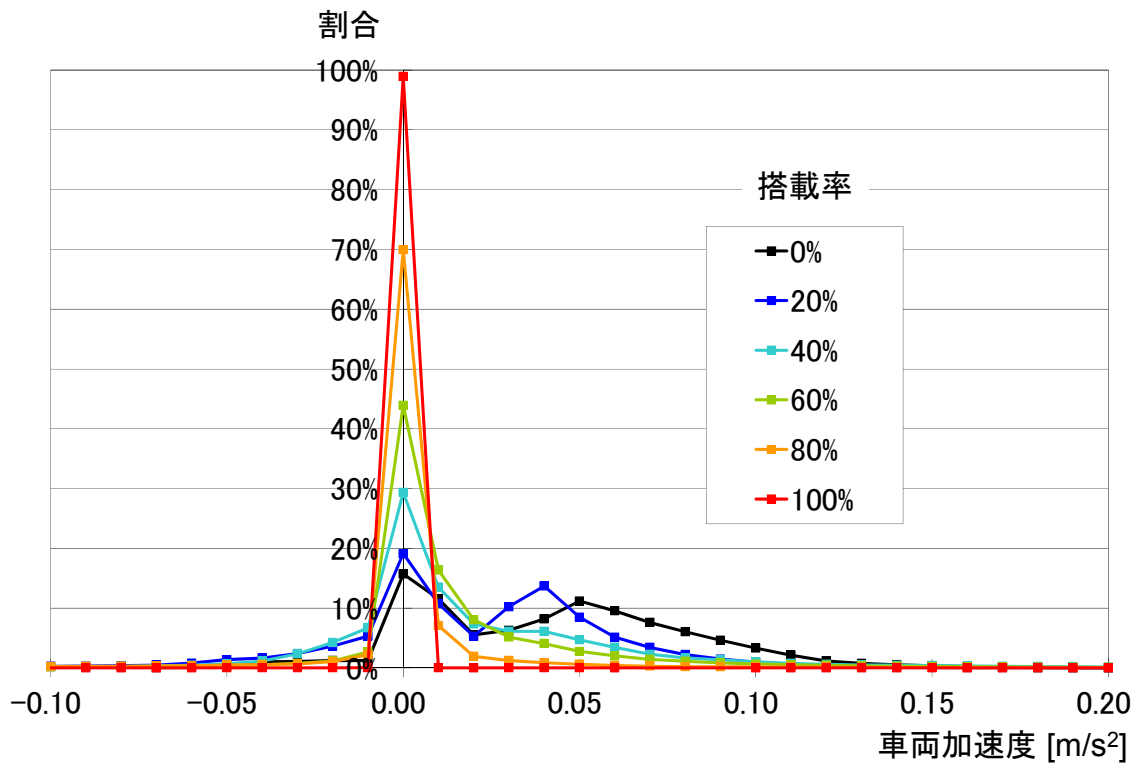


図 3.40 車両加速度の発生割合

## 3.5.5.5 速度増加に対する交通容量の推定

隊列走行による速度増加によって交通容量がどの程度改善されたのか、式 3.6 の BPR 関数を用いて推定する。

$$\text{式 3.6} \quad t_a(X_a) = t_{a_0} \times \left( 1 + \alpha \left( \frac{X_a}{C_a} \right)^\beta \right)$$

旅行時間  $t_a = 1[\text{km}] / \text{平均速度}[\text{km/h}]$   
 自由旅行時間  $t_{a_0} = 1[\text{km}] / \text{最高速度 } 115[\text{km/h}]$   
 交通量  $X_a = 4500[\text{台/h}]$   
 交通容量  $C_a[\text{台/h}]$   
 パラメータ 標準値  $\alpha = 0.48, \beta = 2.82$

図 3.37 における搭載率に対する車両速度の平均値は(0%, 20%, 40%, 60%, 80%) = (87, 88, 94, 98, 101, 114)[km/h]であり、この場合の交通容量は(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) = (5214, 5282, 5951, 6460, 7131, 33000)[台/h]となる。搭載率 100%の場合は旅行時間と自由旅行時間がほぼ等しく、 $1/C_a \approx 0$ となるため交通容量は特異に大きな値を示す。よって、BPR 関数は式の性質上、自由走行に近い場合の再現性は難しいと考えられる。ここで、BPR 関数上では、隊列はまとめて1台の扱いとなっており、隊列内の車両数分を増やす補正が必要と考えられる。式 3.7 による交通容量の補正結果を表 3.5 に示す。車両数、隊列数、隊列内車両数は、シミュレーションの結果、計測エリア内で観測された 100-400 秒の間の平均値となる。搭載率 0%に対する、搭載率 20%の交通容量の増加度は 5%で、搭載率 40%以降は相応の改善効果が見込めることが期待できる。

$$\text{式 3.7} \quad C'_a = C_a \frac{N - M + M \times N_{platoon}}{N}$$

表 3.5 交通容量の補正

搭載率	0%	20%	40%	60%	80%
補正前交通容量 $C_a$ [台/h]	5214	5282	5951	6460	7131
車両数* $N$ [台]	49	48	45	43	42
隊列数* $M$ [台]	0	1.33	4.71	7.67	8.82
隊列内車両数* $N_{platoon}$ [台]	0	2.31	2.57	2.84	3.08
補正後交通容量 $C'_a$ [台/h]	5214	5473	6929	8580	10246
対搭載率 0%比	1	1.05	1.33	1.65	1.97

\* 計測エリア内、100-400 秒の平均値

## 3.5.5.6 効果の一般性の確認

異なる設定値によるシミュレーションも行った。北米において利用可能な無線機を想定した評価であったが、異なる設定値を用いた場合でも同様の効果を得られるという、一般性を示すために併せて報告する。シミュレーションの主な設定値を表 3.6 に示す。シミュレータにおけるビットエラー特性の設定は行わなかった。隊列長は 10 台に拡大しているが、メッセージフォーマットが隊列外先行車・

### 第3章 車車間通信による協調型隊列走行の効果

後続車を含めた12台分のGroup ACKを許容すると仮定する。交通流は、隊列レーン、負荷レーン共に同じ渋滞臨界点手前の状態の自由流を設定し、システム搭載率に対する変化を調べた。搭載率100%での、通信距離に対する通信結果の内訳を図3.41に示す。計測エリア内に存在する受信車両によって測定し、送信車両は全エリア対象とする。今回の条件ではビット誤りはなく、600mを超えるあたりから最小受信電力-85dB以下となって受信失敗となる。また3.5.5.4のシナリオと異なり、本シナリオは負荷レーンにも交通流が存在するが、電波干渉の影響は発生していないことが分かる。

隊列内の車両数の割合を図3.42に示す。搭載率40%の場合、隊列長6台のケースが3%程度存在するが、図3.36と同様の傾向を示す結果となった。搭載率の増加に伴い隊列のサイズが大きくなる傾向が確認できるが、搭載率100%の場合でも各サイズが同程度に存在する。隊列の上限台数を超える合流は行なわないため、このような特性を示すものと考えられる。隊列へ参加する車両数の時間推移を図3.43に示す。リーダーが計測エリア内に存在する隊列を計測対象とする。搭載率に対する100~400秒の区間平均値は(20%, 40%, 60%, 80%, 100%)=(2.0, 7.1, 14.9, 23.3, 32.0)であり、搭載率100%での隊列参加車両数32.0で割って求めた隊列参加率と、簡易的な計算で求めた通信車両の隣接率を比較したグラフを図3.44に示す。この計算内容は、搭載率を考慮した乱数によって生成した通信車両と非通信車両を一列に並べていき、通信車両と隣接する通信車両の数を求めた。隊列参加率は若干下回るが全体としては同等の傾向を示しており、隣り合う通信車両同士で設計通り隊列を形成する様子が確認できる。

車両速度の発生割合は図3.45の結果となった。搭載率に対する車両速度の平均値は(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)=(84, 86, 93, 97, 100, 108) [km/h]であり、搭載率の増加に応じて適切に隊列が編成され、速度の増加に寄与している様子が確認できる。車両数の時間推移は図3.46の結果となった。経過時間が100秒以降の平均値は(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)=(201, 200, 197, 194, 191, 186)[台]であり、搭載率が高いほど車両数が減少する傾向が確認できる。

車間時間の発生割合を図3.47、車両加速度の発生割合を図3.48に示す。計測エリア内の走行車両を対象とする。図3.47左側の車間時間では0.6秒付近と1.8~2.0秒付近に山が現れ、搭載率が高いほど0.6秒付近へ山がシフトするが、搭載率100%では低くなだらかな山となる。搭載率100%の場合は、ほぼ全ての車両が隊列に参加して6割の車両が最高速度に達して加速できず、車間を詰められないためと考えられ、図3.48においても加速度されていない様子が確認できる。

以上の結果から、無線機やその他の設定値が異なる場合でも、通信状況を把握して適切に隊列を形成する方法で、同様に走行が改善されるという効果の一般性を確認できた。



表 3.6 シミュレーションの設定値

機能	設定項目	設定値
無線通信	中心周波数 (帯域幅)	5890MHz (10MHz)
	電波伝搬モデル	二波モデル
	アンテナパタン@設置高	無指向性 0dBi@1.5m
	送信出力	20dBm
	最小受信電力	-85dB
	キャプチャ受信電力差	10dB
	変調方式	1/2QPSK-OFDM
	伝送速度	6Mbps
	送信周期 (1 サイクル)	100 ミリ秒
	パケットサイズ	100 バイト
レーダ	検出範囲	100m, 前方 30 度
隊列制御	隊列の上限台数	10 台
	隊列の除外時間	5 秒
	合流時の通信確認時間	2 秒
走行制御	隊列追従制御係数	$k_a=1.0, k_d=0.1, k_v=0.58$
	設定車間時間	隊列 : 0.5 秒, ドライバ : 1.4 秒
	最大・最小加速度	隊列 : 最大 2.0m/s <sup>2</sup> , 最小-3.0m/s <sup>2</sup> ドライバ : 最大 3.0m/s <sup>2</sup> , 最小-5.0m/s <sup>2</sup>
	最大速度	120km/h
	最小車間距離	2m
	車体長	5m

到達率・失敗率

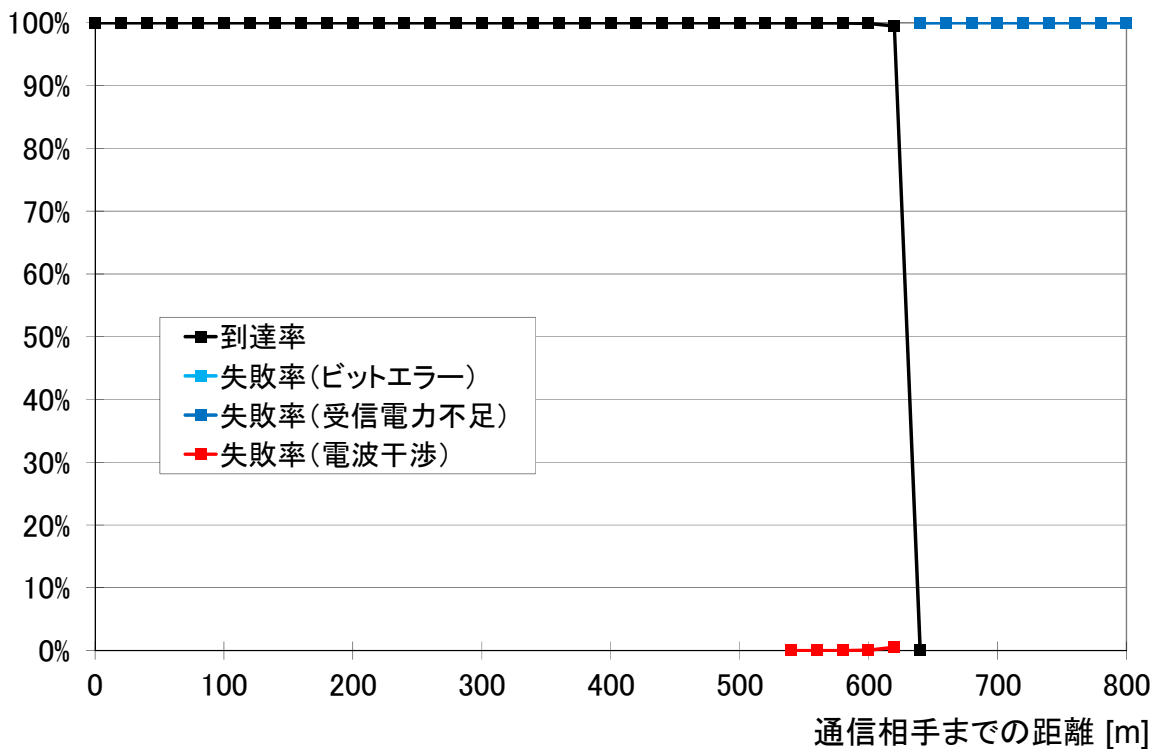


図 3.41 通信距離に対する通信結果の内訳

割合

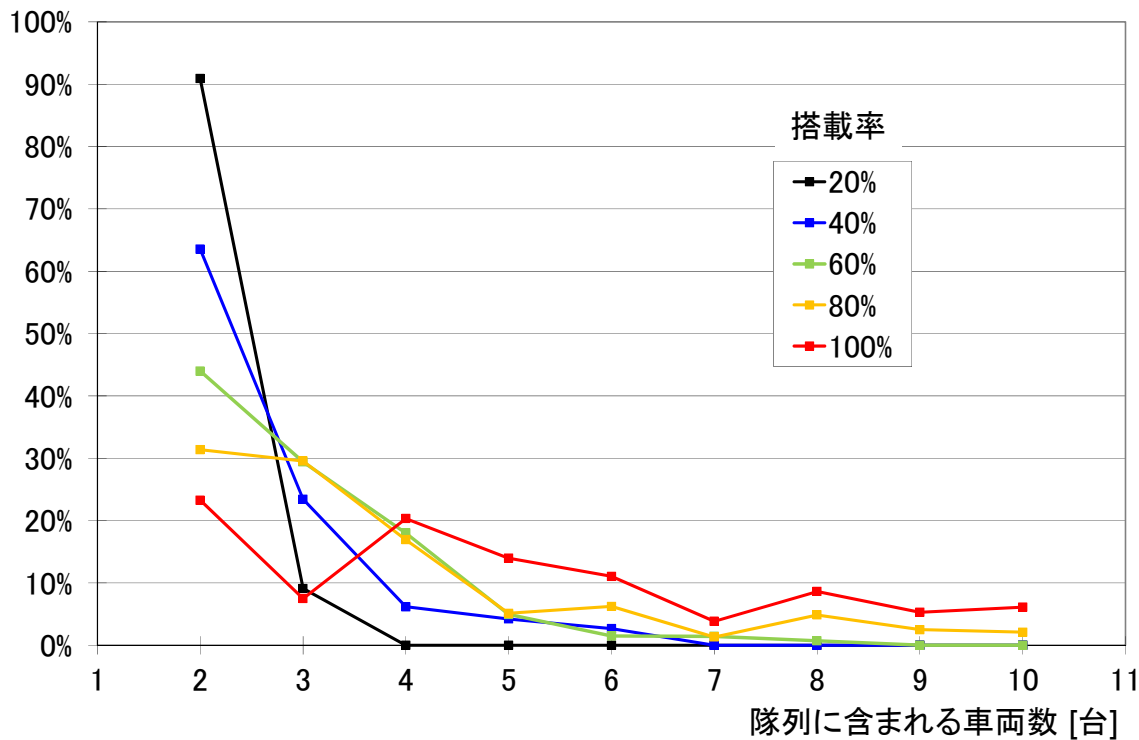


図 3.42 隊列内車両数の発生割合

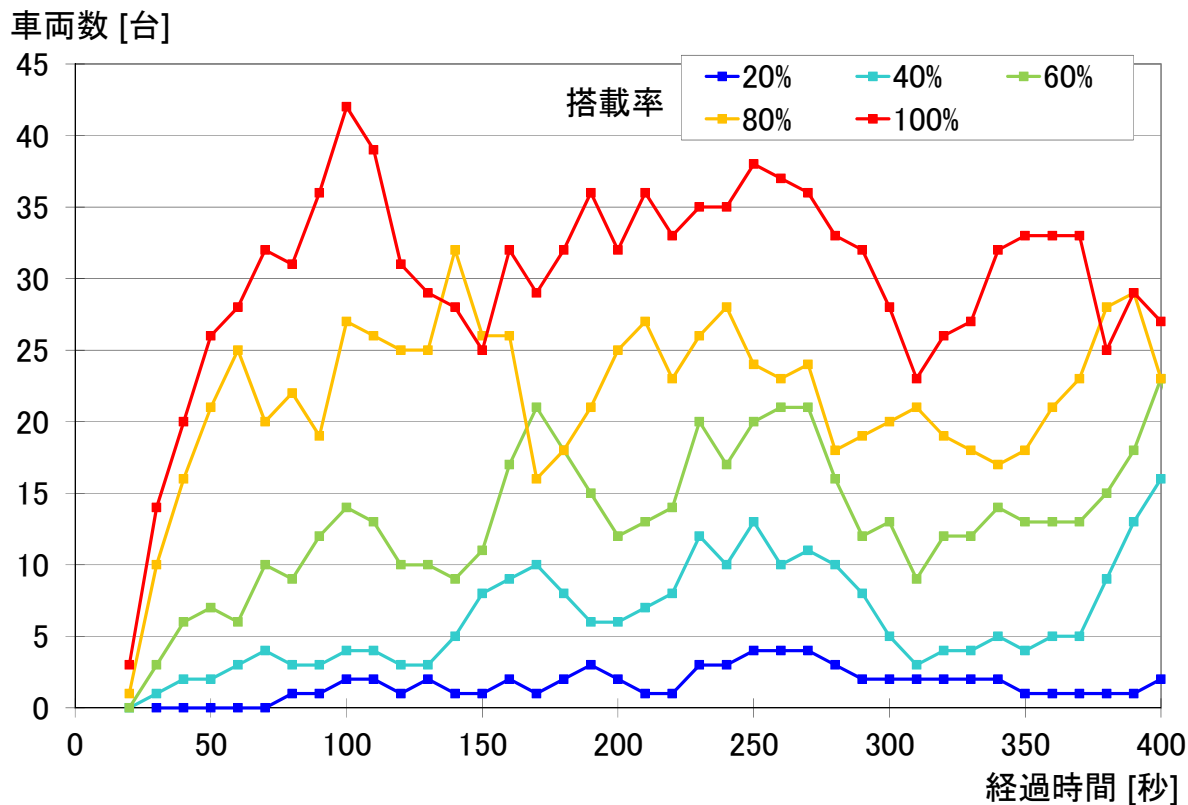


図 3.43 隊列参加車両数の時間推移

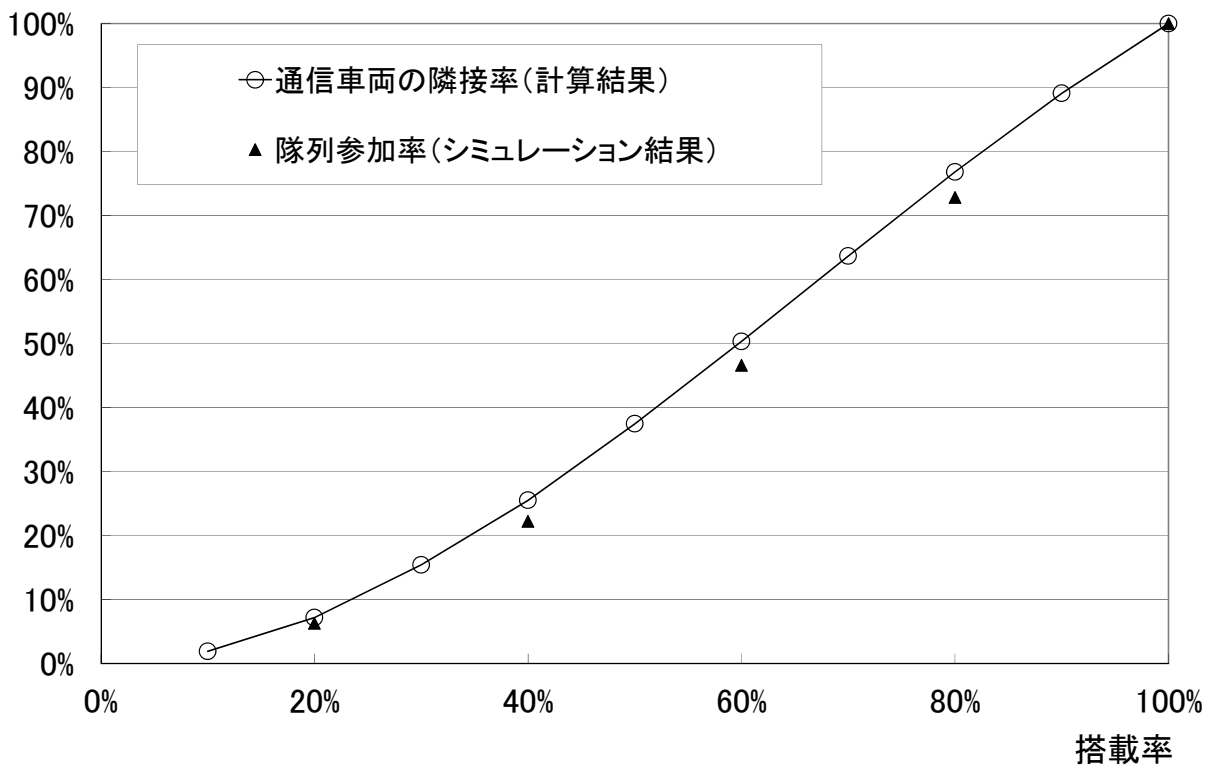


図 3.44 通信車両隣接率と隊列参加率の関係

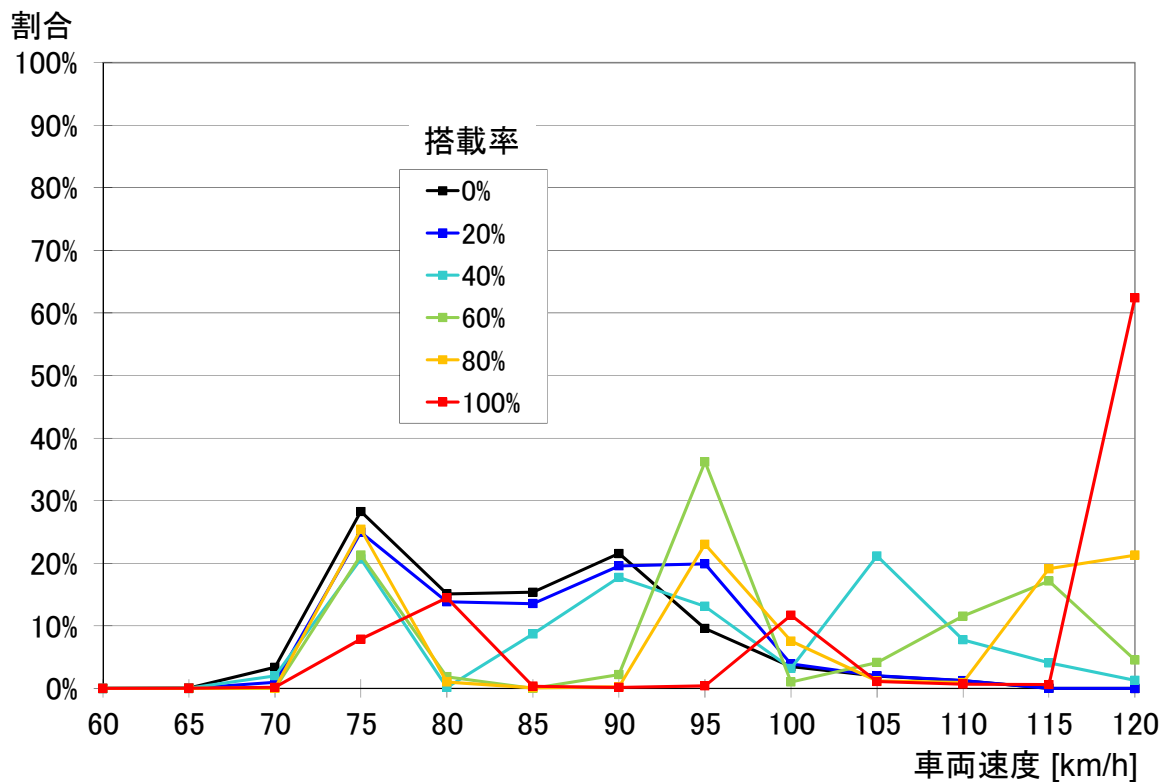


図 3.45 車両速度の発生割合

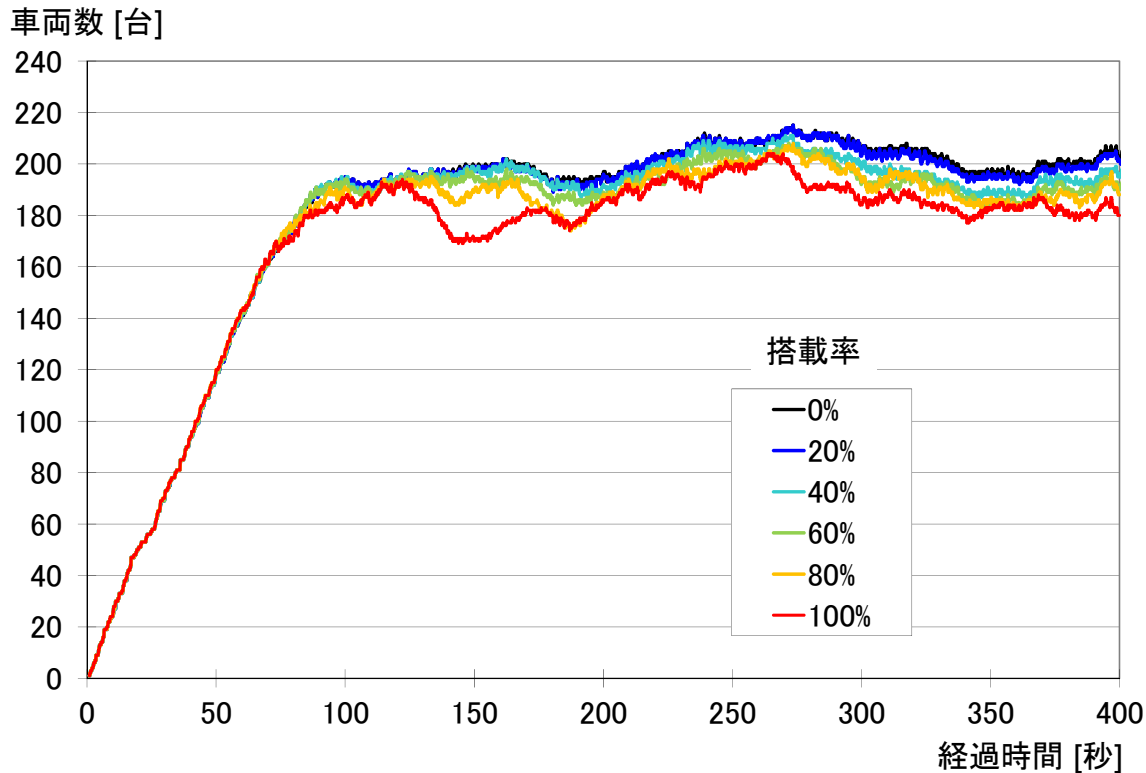


図 3.46 車両数の時間推移

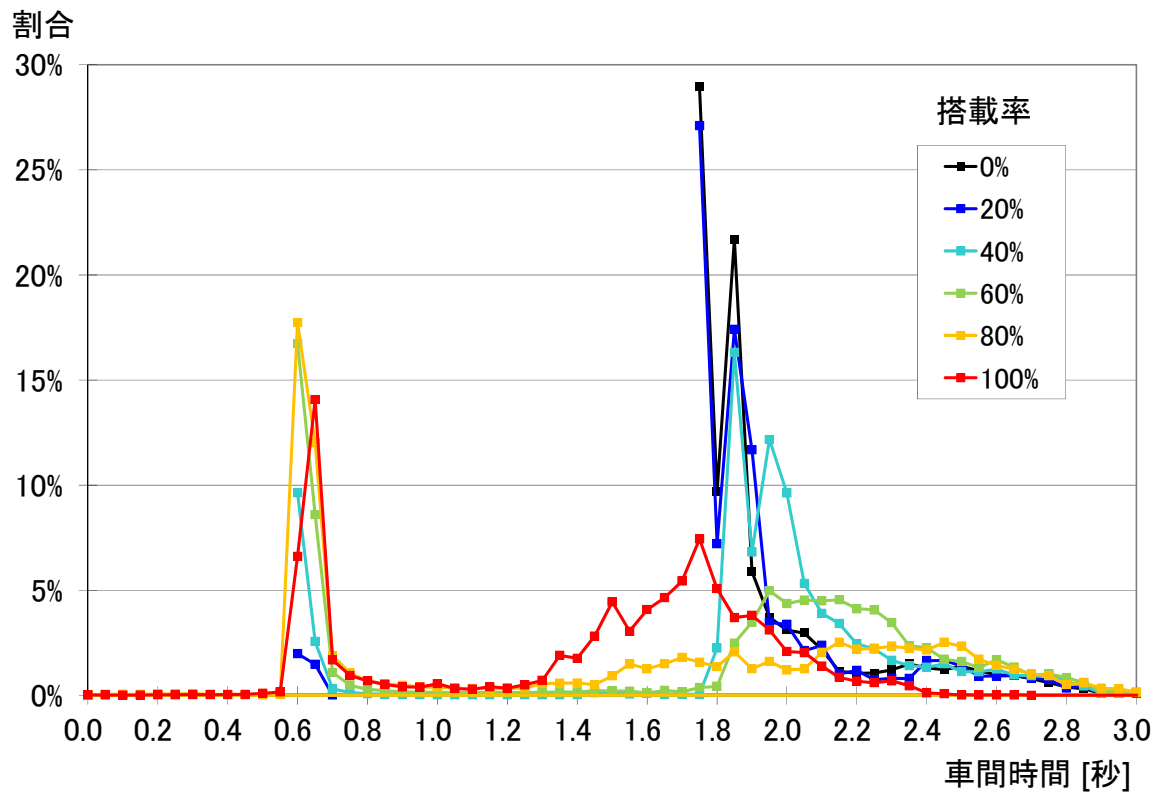


図 3.47 車間時間の発生割合

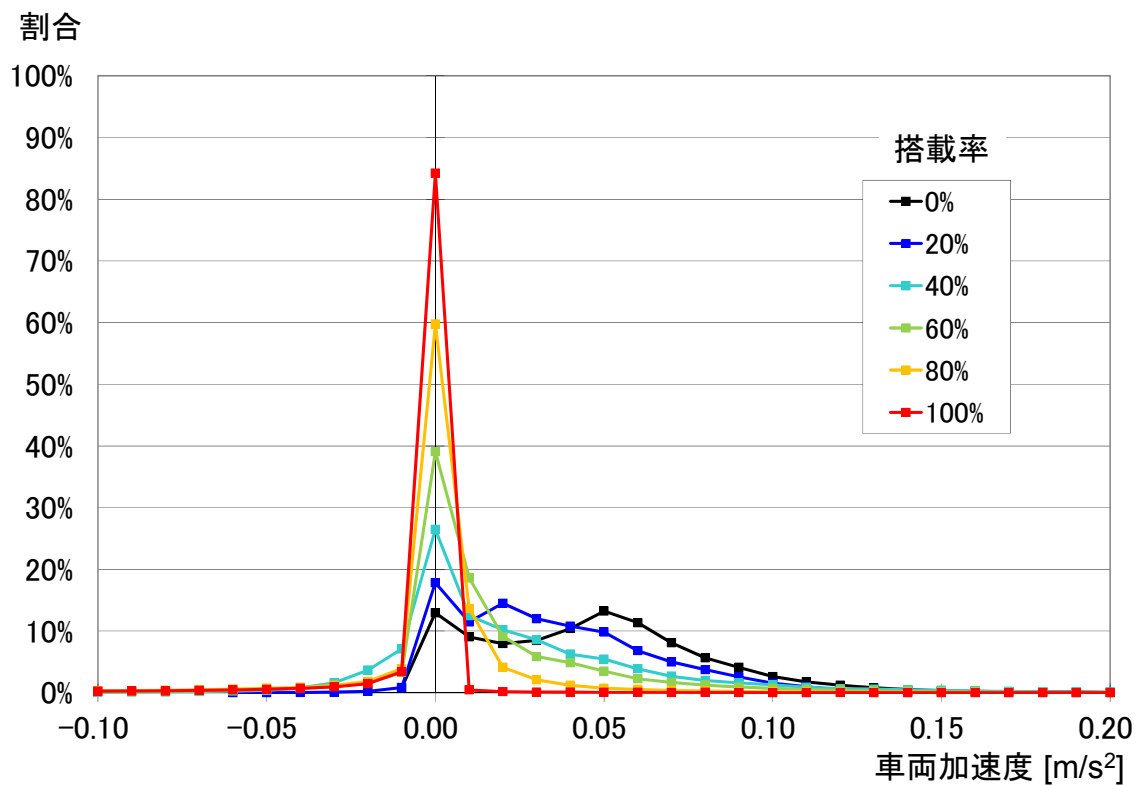


図 3.48 車両加速度の発生割合

### 3.5.6 シミュレータの実行特性の評価

本シミュレータの実行特性について紹介する。実行環境は次の通りとなる。CPU: Intel Xeon X5570 (2.93GHz), メモリ: 12GB, 記憶容量: 4TB, OS: CentOS release 5.3 (Final), データベース: PostgreSQL 8.4.4. なお, 本シミュレータはマルチスレッドには対応していない。シミュレーションシナリオは 3.5.5.6 を対象とする。

通信車両数の 100~400 秒の区間平均値は凡そ(20%, 40%, 60%, 80%, 100%) = (36, 80, 113, 156, 186)であった。この通信車両数の区間平均値に対する本シミュレータで生成したデータ量のグラフを図 3.49 に示す。データ量は通信車両数の 2 乗のオーダーで増加する様子が確認でき, 1 回の送信に対して複数の無線機が受信することの影響が, 本シミュレータの記録において支配的と考えられる。

これらのデータ量に対するシミュレーション, 及び解析に要する時間のグラフを図 3.50 に示す。いずれの所要時間もデータ量に比例する様子が確認できるが, 解析に要する時間がシミュレーション時間に対して 10 倍程度大きいことが分かった。

今回の評価では, シミュレーションの高速化以上に, 解析の効率化が重要であると考えられる。1 回のシミュレーションで全ての通信状況を記録して解析の自由度を高めるよりは, 解析内容を踏まえて限定的, 且つ合理的に記録したほうが, 後日解析内容を追加して再度シミュレーションを行なったとしても効率が良い可能性がある。

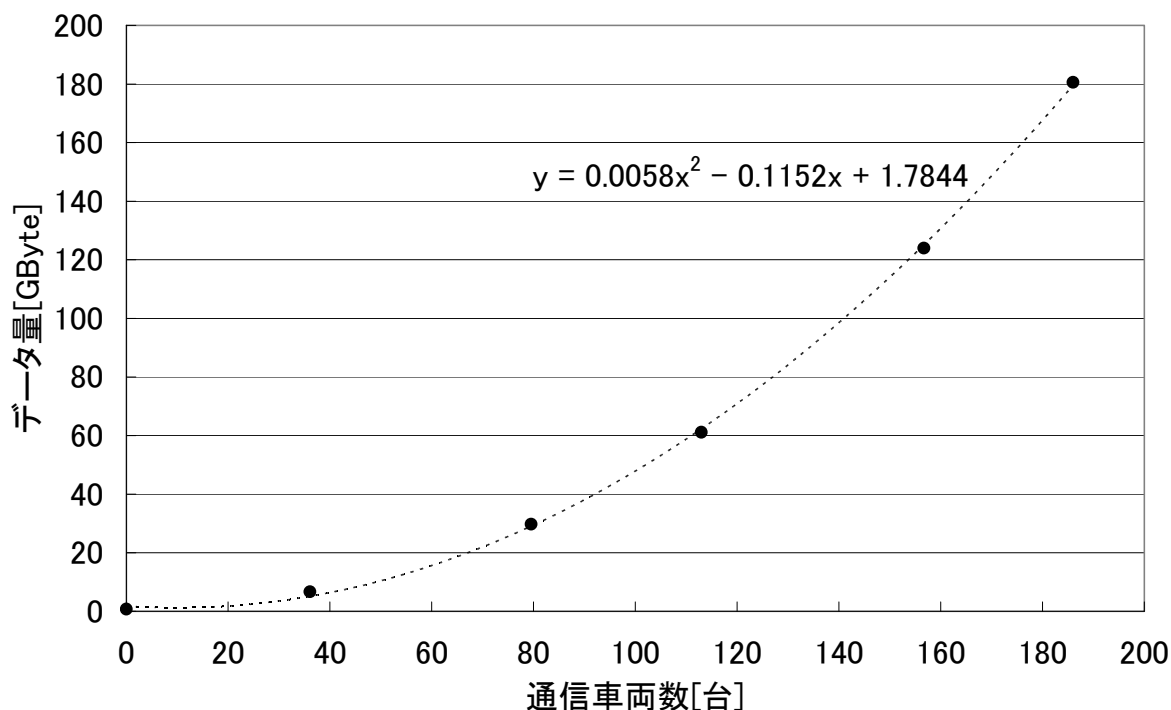


図 3.49 通信車両数とデータ量の関係

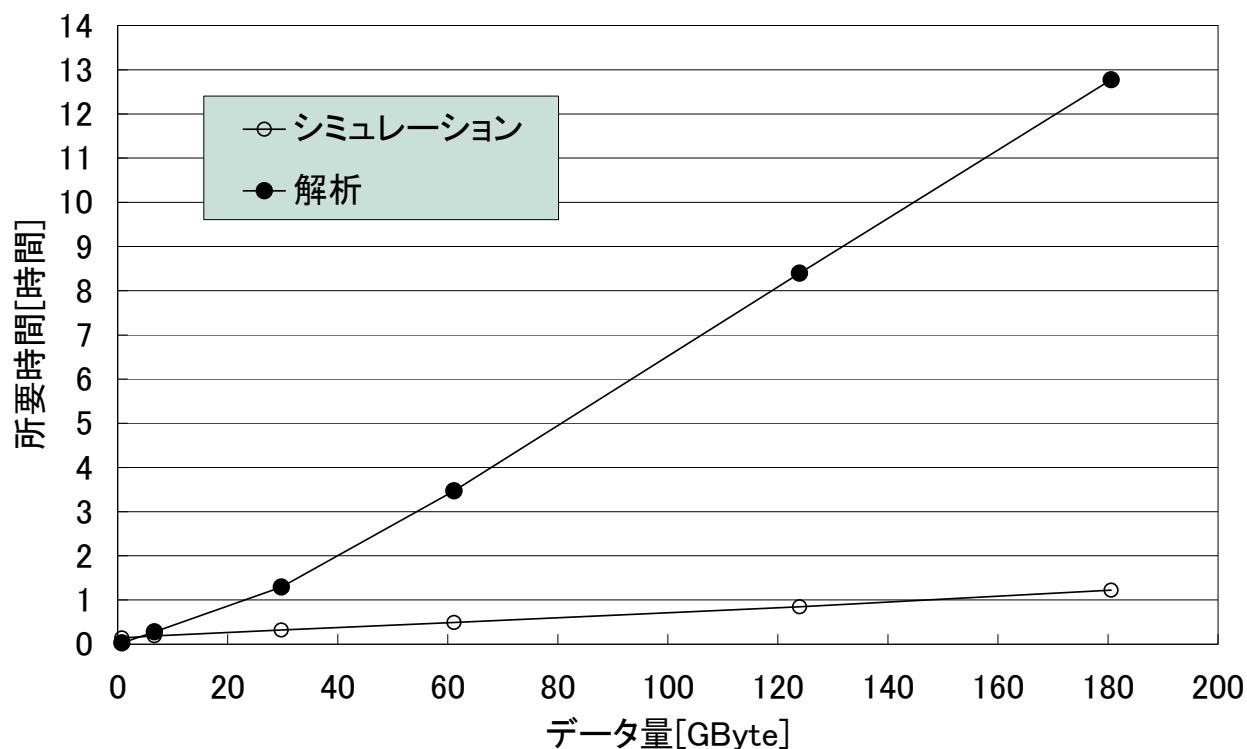


図 3.50 データ量と所要時間の関係

### 3.5.7 シミュレーション結果の信頼性に関する考察

交通流シミュレータや通信シミュレータには従来研究で実績のあるものを利用しており、本研究での差分は、交通流シミュレーションと通信シミュレーションを 0.1 秒周期で交互に実施する点に限られる。最大速度 115km/h の場合、ノード位置に関して最大で約 3.2m の進行方向の誤差が発生するが、直接影響を受けるのは、無線通信の減衰計算（ビットエラー）となる。図 3.33 の結果によれば、隊列内の通信距離 100m 程度では減衰の影響はほとんど現れていない。したがって、交通流と通信の 0.1 秒毎の交互計算によって発生する 3m 程度の距離の誤差は実用観点で軽微であり、評価は妥当であると考えられる。

## 3.6 まとめと今後の課題

車車間通信による協調型の隊列走行で、交通容量を増加することを目標とし、通信結果に基づいて隊列を編成する課題に取り組んだ。グループやサイクルの境界条件で通信状況をまとめて把握し、通信状況の変化の際には、予め決められた単純な行動規則に基づいて、各車両が自律的に対処することで隊列を編成する方法を提案した。交通流シミュレータと無線通信シミュレータを統合プラットフォーム上で連携させたシミュレーションで評価を行った結果、通信結果に基づいて適切に隊列を形成し、通信混雑時には隊列長を適応的に縮小する効果を確認した。またシステムの普及によって走行が改善する効果が確認でき、交通容量の増加量についても理論計算で推定した。具体的には 20%普及で 5%、40%搭載で約 3 割の交通容量の増加が見込めることが分かった。異なる設定値においても同様の結果

### 第3章 車車間通信による協調型隊列走行の効果

が得られるという一般性や、シミュレーションの交互計算によって発生する誤差は実用観点で軽微であることから、評価の妥当性についても確認した。

今後に向けた課題として、多様な走行環境への適用が挙げられる。今回の実験条件では、高速道路の開放空間のシナリオに限られたが、実用化に向けてはトンネルなどの閉鎖空間も考慮しなければならない。更に一般道路への適用を考えた場合は、ストリートキャニオンと呼ばれる建物に挟まれた複雑な半閉鎖空間も考慮する必要がある。これらの異なるチャンネルモデルに対する評価が課題となる。また測位やレーダのロストや誤差が発生しないことを前提としたが、現実には発生する。この場合、提案手法では先行車特定の失敗となって隊列が分離する。隊列をできるだけ長く維持するためには、これらの発生率を下げる努力も必要となる。測位のロストや誤差については、ロボットの制御方法に用いられる自己位置推定と環境地図作成の技術(SLAM: Simultaneous Localization and Mapping)の応用で対処する方法が考えられる。レーダのロストや誤差については、カメラやレーザレンジスキャナなどを併用した、センサフュージョンによって対処する方法が考えられる。カメラはレーンキープアシストの走行車線認識に利用されており、カーブにおける同一走行車線上の先行車両を検知するためには、レーダの他にカメラも追加したセンサフュージョンが必要となる。

前提条件では無線機は標準的な規格の利用に限定しているが、これを改良提案していくことも課題として考えられる。筆者らは文献 [13]において、車両周辺情報を利用した無線機の設定の調整方法を発明提案している。無線機の設定（変調方式、パケットサイズなど）と周辺環境（チャンネルモデル、車両速度、受信出力など）の様々な組み合わせからスループットや遅延、到達率などの通信性能の教師データを収集し、周辺環境に対して最適な無線機の設定を行う仕組みの提案となる。これを評価検証することも課題として考えられる。

そのほかには、割り込みや離脱に対する評価が考えられるが、これらは高速道路の合流箇所や車線減少箇所における側方合流支援の設計とペアにして検討することが望ましいと思われる。各種設定値に対する評価、評価指標の充実（走行情報やスリップストリーム効果を考慮した環境性能）など、効率的、且つ普遍的な評価方法については、継続的な検討が望まれる。



## 第4章 車車間通信による交通情報共有の効果

### 4.1 概要

交通容量を増加させるための車両側の努力のもう一つに、通信を利用した交通情報の共有がある。各車両は交通情報を共有することで、現状の交通状況を推定することが可能となる。そして旅行時間の短い経路を選択して進むことによって、全体的に交通が平準化して旅行時間が短くなり、交通容量の増加が期待できる。本研究では、交通容量の改善に向けて交通情報の流通の改善を目標とする。ここで、豊富で新鮮で多様な渋滞情報が流通されれば、ドライバ自身を含む経路案内のステークホルダにとって有用であることを前提とする。車載機の計算資源は有限であるため、豊富で新鮮で多様な情報を流通させる努力において、その計算量を抑える努力も課題となる。本研究では、情報のまとめ送りや重複した情報を一定時間送信するのを控えるといった単純な方法の組み合わせを考案した。シミュレーション上で、工夫のないケースや理想的に保有する情報を全て送るケースとの比較を行い、提案手法は、工夫無しのケースに近い計算時間で、理想的なケースのおよそ9割の情報量を流通させることが確認できた。特に発生後2～5分の情報に対する改善度が大きく、有用な情報の流通を改善する様子が確認した。シミュレーションにおける実行時間の差が、情報共有のアプリケーションにおける計算時間の差の総和と見なせる点について示し、計算時間の評価における妥当性について確認した。

本章に対応する学術論文は[3]、学会発表は[7]となる。

### 4.2 前提

本章の背景と研究の目標、前提となる条件について述べる。

#### 4.2.1 背景

交通情報、とりわけ渋滞に関する情報は、車両を運行するドライバにとって有用である。渋滞情報は、道路側に設置されたセンサで測定された車両の交通量や、車両に搭載されたセンサで測定された位置や速度などのプローブ情報を集めて分析することで生成される。これらの情報は、例えば路側センサであれば有線網、車載センサであればセルラー網を介して情報センタに集められ、渋滞情報を形成し、道路情報掲示板やカーナビゲーションシステム、あるいはウェブサイトを通じてドライバへ提供される。ドライバは混雑状況を把握することで、渋滞を回避した快適な運転が可能となる。より多くのドライバが回避行動を行うことで交通流の負荷分散が促進され、旅行時間短縮、排ガス低減、エネルギー効率改善などの効果が期待される。

## 第4章 車車間通信による交通情報共有の効果

このようなドライバーへの交通情報提供の将来像として、車載無線機を活用した車車間交通情報共有に着目する。車車間通信の利用により、セルラー網を利用できない状況においても、車両は近隣の車両とすれ違いのタイミングで交通情報を交換し、周辺の状況を把握することが期待できる。セルラー網を利用できない原因には、主にコスト上の理由で車両が通信装置を持たない場合、通信圏外を走行している場合、あるいは大災害の発生により通信網が損壊した場合などが考えられる。特に大災害の発生後、2011年3月11日の東日本大震災のように道路インフラも甚大な被害にあうことが考えられ、そのような状況で通行実績のある道路情報を、インフラに頼らない車車間通信によって情報を共有することは、セルラー網が復旧するまでの初動の避難行動や救助活動に有効であることが期待できる。イメージを図4.1に示す。

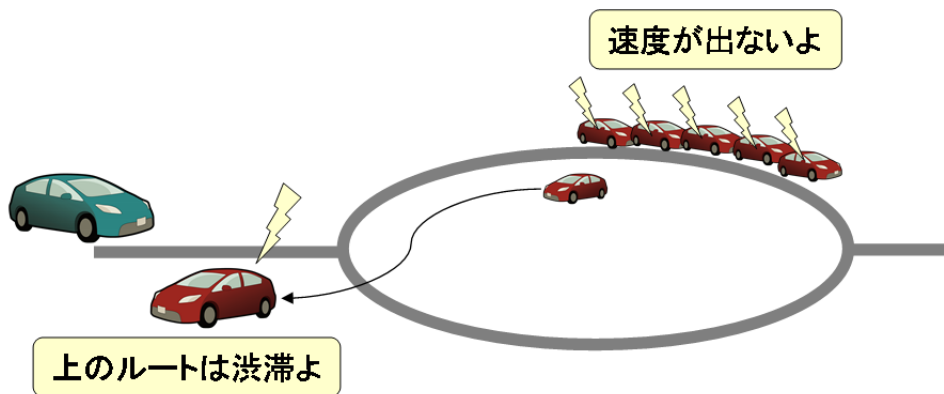


図 4.1 交通情報共有のイメージ

### 4.2.2 目標

車車間通信による交通情報共有で、交通容量を増加させることを目標とする。課題の構造を図4.2に示す。

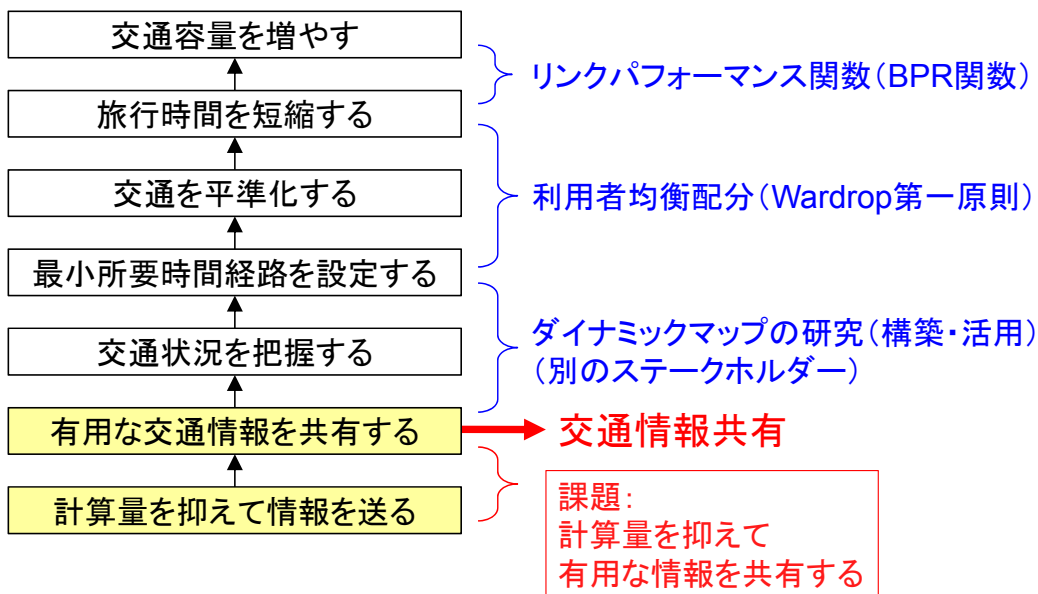


図 4.2 交通情報共有による交通容量改善の課題構造

旅行時間の短縮によって交通容量を増加する点については、3.2.1 背景と同様に BPR 関数によって説明できる。各車両が最小所要時間となる経路を設定することで、交通が平準化し、旅行時間が短縮する点は、Wardrop 第一法則と呼ばれる利用者均衡配分 [83]として説明される。各車両が最短旅行時間を追求することで、利用される経路の旅行時間は皆等しく、他の経路の旅行時間以下となるとされる。ここで、均衡配分は個別最適の集合で全体最適ではないため、総旅行時間を最小化し、交通容量を最大化するわけではない点には注意されたい。

有用な交通情報の入手により現在の交通情報を把握して、最短旅行時間となる経路を設定する仕組みについては、近年ではダイナミックマップの構築・活用として研究されている。例えば、内閣府の2015年度委託事業「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）・自動走行システム」の検討課題のひとつにダイナミックマップがある。変化する交通状況を動的な地図として把握する試みで、ここでのダイナミックマップには歩行者情報、渋滞情報、交通規制情報、路面情報などが含まれる。動的情報、準動的情報、準静的情報、静的情報に分類され、それぞれ1秒、1分、1時間、1か月以内の取得が要件とされている。本研究が対象とする交通情報は、準動的情報に位置づけられており、1分以内の取得が要件とされる。この時間的要件は相当大まかなものであり、またこの時間を過ぎても、効用が全くなくなるわけではない。そのため、本研究では5分くらいまでは渋滞情報は有用であると解釈する。地図の構築や地図を利用した経路案内は、実際のビジネスでは、デジタル地図やナビゲーションシステムの製造メーカーが主なステークホルダとなって推進している。例えば、SIPのダイナミックマップテーマの受託企業は三菱電機、アイサンテクノロジー、インクリメントP、ゼンリン、トヨタマップマスター、パスコ、三菱総合研究所の7社であり、自動車メーカーは含まれない。自動車メーカーの立場を想定して進められた経緯から、車車間通信による有用な交通情報の共有を、車載機の計算量を抑えて実現することを本研究の課題に設定し、これらのステークホルダの「現在の交通情報を把握して、最小所要時間となる経路を設定する」仕組みの実現へ貢献することを考える。

### 4.2.3 前提条件

ここでの通信も前章「第3章 車車間通信による協調型隊列走行の効果」と同様に標準規格 ARIB STD-T109 に準拠した、日本における安全支援用途の無線機の利用を想定する。車両は100ミリ秒周期で無線のブロードキャスト、つまり宛先を指定せず、無線の到達範囲内の不特定多数の車両に宛てたシングルホップの通信を行う。ブロードキャストされるメッセージには、車両のIDや運行情報（位置・速度・方向・車線）などの基本データセットの他に、アプリケーションが任意に利用できる160ビットのデータ領域が用意されている。通信機に手を加えずそのまま利用するものとし、任意に利用可能なデータ領域の活用を考える。通信システムの普及初期はすれ違い通信の機会が稀であり、また1回の通信で伝達できる情報量も有限であるため、通信のチャンスを効率的に利用する情報伝達の仕組みについて検討する。詳細なパラメータは、4.5において紹介する。

本研究では、様々な種類の交通情報の中でも渋滞情報を扱う。渋滞情報には主に点情報とリンク情報が存在する。点情報はその地点での瞬間速度であり、リンク情報は交差点間の区間平均速度である。区間平均速度は交差点間の道路リンク長を旅行時間で割ることで求められる。点情報は簡単に情報を生成できる一方で、大量に情報が発生する。また速度によって取得密度が変わるため、旅行時間の推定は単純ではない。これに対してリンク情報は、リンクの通過時間をリンクの生成に要するが、ひと

## 第4章 車車間通信による交通情報共有の効果

つのリンクにつき1件の情報として発生し、旅行時間の推定の際にはそのまま利用することができる。情報の発生量を抑えて簡単に利用できる特長を重視し、本研究ではリンク情報を対象とし、以降、このリンク情報を交通情報と呼ぶ。ここで交差点位置は、保有する地図情報などから予め正確に知っており、自車位置は、ナビゲーションシステムなどから正確に把握できるものと仮定する。交通情報共有の最も単純な方法は、0.1秒周期で保有するリンク情報からランダムに1件送信するというものである。

交通情報共有の実用要件については、ある閾値の前後で有効・無効と線引きできる性質のものではないため、できるだけ豊富で新鮮で広範囲の情報を得るという最善努力を設定する。但し新鮮さについては、前述のとおり、生成後5分以内の情報は特に有用とする。この最善努力には、できるだけ計算時間を抑えることも制約として含める。ここで車載機は市販のPCやタブレット端末と同等の性能を有するものと仮定する。従来の車載機は、厳しい動作環境や安定性の条件から比較的控えめな性能のデバイスとされてきた。しかし自動運転など高度化の要求から、数年のうちにテラビットオーダの車載品質のSSDや画像処理や行列演算に強いプロセッサが、LinuxベースのOS上で駆動することが見込まれるなど、小型化や軽量化の要件と向き合う市販のPCやタブレット端末等の性能と遜色がないレベルとなる見込みである。

### 4.3 課題

本論文では経路選択の課題は追求せず、交通情報の要件としては単純に、車両の保有する情報が新鮮且つ多様で、豊富であるほど、また計算量は少ないほどよいものとし、そのような最善努力の要件を満足する車車間の情報伝達方式を研究対象とする。

#### 4.3.1 交通情報共有に関する従来研究

車車間通信による交通情報共有に関する主要な先行研究として文献 [95] [96] に着目する。いずれも独自の工夫により情報を集約し、それぞれの想定需要に応えるように展開する情報伝達アルゴリズムを提案している。

文献 [95] では、道路地図を格子状のエリアに分割し、車両はエリアを通過後にエリア ID、入口リンク ID、出口リンク ID、エリアの旅行時間を含むエリア通過情報をブロードキャストする。この情報を受信した他の周辺車両は、走行中のエリア、または隣接エリアの情報の場合に限り保持する。これは全エリアの情報を保持するのが記憶容量の制約上困難であることを理由とする。同一エリア、同一リンクに関する複数の情報は統計的に集約されて一つの情報（統計情報）とすることで冗長性を抑制する。それ以外にも車両は定期的にブロードキャストしており、ナビゲーションシステムの予定経路上のエリア情報（需要情報）や、そうした需要の多いエリアや混雑のひどいエリアの情報を優先して伝達する。

文献 [96] では、道路地図をセル（計測単位区間）に分割し、車両はセルを通過後にセルの旅行時間が所定の閾値よりも大きい値の場合に渋滞情報を生成する。更に道路地図上に所定の円形エリアを設定し、生成された渋滞情報は車車間の中継（収束モード）によりエリアの中心方向へ伝達される。車両にて、同一のセル・時間・方向の渋滞情報が複数得られた場合は、一つの渋滞情報に統合すること

で冗長性を抑制する．統合数（品質レベル）が一定数を越えた渋滞情報は，その数量を示すレベル情報を車車間の中継（拡散モード）により所定の需要エリアへ伝達される．更に文献 [97]では前述の700MHz帯無線機を活用して，収束モードの動作検証を行っている．交通情報の伝達は，本来の用途である安全支援用通信（非IP）とは別のIP通信を用意して行う．EDCAによるアクセス制御よりも，SNMPで通知する仕組みの方が，安全支援用通信への悪影響が少ない点を紹介している．

いずれの研究も，情報の統合や需要の考慮により情報伝達の効用を高める工夫を行っているが，ランダムに情報を選択して伝達する方式（工夫無し）や全ての情報を伝達する方式（効率化限界）と比較して，どれほどの効果を得られるのか，計算量を必要とするのかは明らかにされていない．

#### 4.4 課題解決の方策

本研究は，前述の課題に対して2つの単純な効率化方式を組み合わせた解決を考え，工夫無しや効率化限界と比較した効果や計算量の違いを明らかにする．効率化方式のひとつは，送信または受信した情報の伝達を一定時間送信の対象外とする方式であり，「重複送信抑制」と呼ぶ．同じ情報の繰り返し伝達を避けることで，新鮮で多様な情報を展開する効果を期待する．もうひとつは，同じ交差点を端とする複数のリンク情報をまとめ送りする方式であり，「まとめ送り」と呼ぶ．豊富な情報を展開する効果を期待する．情報伝達システムの動作フローは図4.3に示す通りとなる．重複送信抑制とまとめ送りは，送信のタイミングで車載記憶装置からリンク情報を選択する部分にのみ作用する．

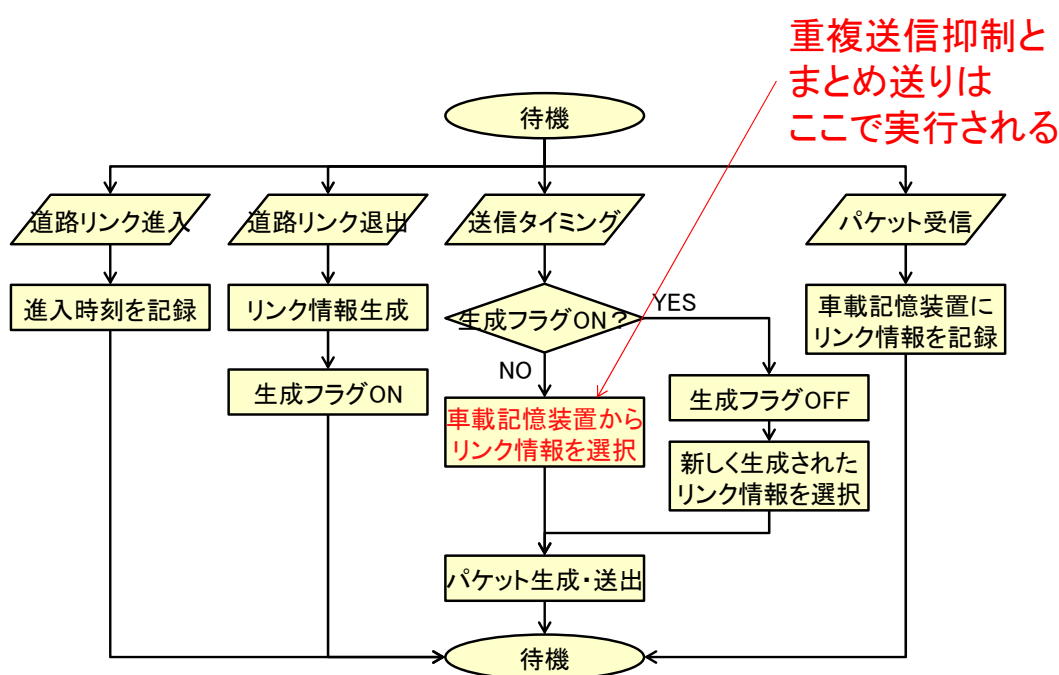


図 4.3 情報伝達システムの動作フロー

##### 4.4.1 リンク情報のライフサイクル

情報のライフサイクルとして生成と破棄，そして共有について説明する．リンク情報は，対象となる道路リンクの始点・終点位置，区間平均速度，終点位置を通過した時刻で構成される．道路リンク

## 第4章 車車間通信による交通情報共有の効果

は一般に交差点間の道路であり、ナビゲーションシステムで利用される地図データベースなどにおいて定義されるものとする。進行方向が異なる場合は区別され、位置や形態などの静的な情報も含まれる。地図データベースには独自に道路リンクとその ID を定義するものも存在するが、互換性の確保が困難であると考えて両端の位置座標で道路リンクを表現する方法を考えた。実際の利用では、リンク両端の位置から道路リンクを特定するためにはマップマッチングなどの補正処理が必要であると思われるが、本研究では情報共有の効率化を検討対象としており、位置精度に関する問題は扱わないものとする。GPS などの位置標定装置により道路リンクへの進入と退出を検知した際の時刻の差分により旅行時間を計測することができる。これと旅行距離から道路リンクの区間平均速度を求めることができ、リンク情報が生成される。新しくリンク情報を生成した場合は、生成フラグを ON にして車載記憶装置に記録する。リンク情報の生成時刻は、道路リンクの終点を通過した時刻とする。

リンク情報は有効とする時間やエリア（自車両の走行位置からの距離）が予め設定され、有効期間やエリアから外れた場合は破棄される。破棄は送信時に車載記憶装置から情報を選択する際に行うものでも、定期的な処理によるものでもよい。図 4.3 の動作フローでの記載は省略する。

車両は 100 ミリ秒周期で無線ブロードキャストを行う。送信タイミングで、リンク情報の生成フラグが ON の場合は、生成フラグを OFF に変えて、新しく生成されたリンク情報を優先的に送出する。それ以外の場合は、車載記憶装置に記録されている有効なリンク情報の中からランダムに 1 つを選択して送出する。一方、他の車両からのブロードキャストを受信した場合、車載記憶装置に同一の情報がなければ記録する。

### 4.4.2 重複送信抑制

自車両が送信した情報はもとより、他車両から受信した情報も一定時間送信の対象外とする。この工夫により、同一情報の冗長な伝達が抑制され、様々な情報に送信機会が与えられる効果が期待される。なお、保有する全ての情報が抑制されている場合は、通常通りランダムに選択して送出する。図 4.3 の動作フローでは、送信タイミングの割込後、生成フラグ ON ではない場合に車載記憶装置から有効リンク情報を選択する際に、送信抑制が機能する。

### 4.4.3 まとめ送り

文献 [98] の車車間通信用メッセージセットによれば、送信元の位置（要素 No.8~13, 15）は 70 ビットで表現される。この位置情報のデータ量をそのままリンク情報にも適用すると、リンクの始点と終点の位置だけで 140 ビットも使用することになり、任意に利用可能な領域（要素 No.45）の 160 ビットでは高々 1 つのリンク情報しか送信できない。そこで相対表現による節約した表現方法により、多くのリンク情報を送る方法について検討した。

前述の通り送信元の位置は伝達されるため、リンク情報の終点位置は送信元の位置の相対値、リンク情報の始点位置はリンクの終点位置の相対値で表現することでデータ量を削減できる。リンク情報の有効エリアを生成場所から周辺 12km 四方とし、一般的な車線幅が 7m であることから進行方向の分解能を意識して 3m 精度を設定する場合、南北方向 13 ビット、東西方向 13 ビットの計 26 ビットの相対値でリンクの終点位置を表現できる。リンクの始点位置はリンク終点位置の周辺 3km 四方エリアで設定する場合、南北方向 11 ビット、東西方向 11 ビットの計 22 ビットの相対値でリンクの始

点位置を表現できる．図 4.4 は位置情報の相対表現の例である．グリッドは緯度経度 1/10 秒間隔であり，東京を例にとると緯度 1 秒はおよそ 30.8m，経度 1 秒は 25m であるため，3m 程度の精度となる．パケットの送信点，送信対象となるリンクの始点と終点をそれぞれの座標をグリッド上の点に補正を行う．リンク終点は，パケット送信点に対する相対的な位置として，グリッドのマス数で表現することができる．図の例において，リンク終点はパケット送信点から西に 3 マス，北に 5 マスと表現される．リンク始点は，リンク終点に対する相対的な位置として，同様にグリッドのマス数で表現できる．図の例において，リンク始点はリンク終点から西に 6 マス，北に 3 マスと表現される．

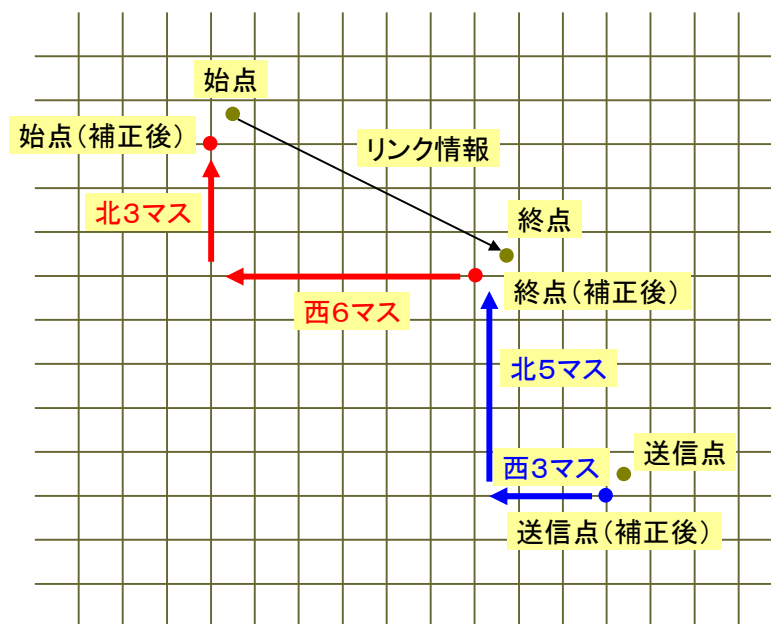


図 4.4 位置情報の相対表現の例

リンク情報の有効時間を生成時刻から 15 分とし 15 秒精度で 6 ビット，道路リンクの区間平均速度を 0-64km/h 超過の範囲とし 2km/h 精度で 5 ビット，更に伝達するリンク情報数を 2 ビットで示した場合，1つのリンク情報は 61 ビットとなる．更に道路リンクの終点位置を共有した場合，4つのリンク情報を 160 ビットで送れることが分かる．送信するリンク情報の選択は，まず 1つのリンク情報を選択し，そのリンク情報の終点位置を共有する別のリンクに関するリンク情報があれば，設定上限数までランダムに選択する．図 4.3 の動作フローでは，送信タイミングの割込後，生成フラグ ON/OFF に限らずリンク情報を選択した際に，更に終点位置を共有する他のリンク情報を追加選択する形で機能する．ここで終点の代わりに始点位置を共有してもよい．まとめ送りのデータ構造を図 4.5 に示す．

フィールド	bit
フィールド・フォーマットのバージョン	8
送信先車両識別番号(車両ID)	16
宛先車両識別番号	16
送信元の種別	4
測地系	2
水平方向の誤差	8
高さ方向の誤差	8
送信元の位置	70
速さ	8
進行方向	9
車両のシフトポジション	3
ブレーキランプ状態	2
ウィンカーSW状態	2
ハザードSW状態	2
緊急自動車の緊急走行状態	1
営業車両の発車合図	1
営業車両の停車合図	1
進行方向直近の交差点の位置	70
アプリケーションのメッセージ表現の番号	8
任意に使用できる領域	160

フィールド	Bit
終点位置【送信元の位置±12km四方@3m精度】	26
伝達リンク数【4リンク分】	2
始点位置1【終点位置±3km四方@3m精度】	22
経過時間1【15分間, 15秒精度】	6
平均速度1【0-64+km/h@2km/h精度】	5
始点位置2【終点位置±3km四方@3m精度】	22
経過時間2【15分間@15秒精度】	6
平均速度2【0-64+km/h@2km/h精度】	5
始点位置3【終点位置±3km四方@3m精度】	22
経過時間3【15分間@15秒精度】	6
平均速度3【0-64+km/h@2km/h精度】	5
始点位置4【終点位置±3km四方@3m精度】	22
経過時間4【15分間@15秒精度】	6
平均速度4【0-64+km/h@2km/h精度】	5

最小構成 61ビット

リンク1 (終点位置, 始点位置1, 経過時間1, 平均速度1)

リンク2 (始点位置2, 経過時間2, 平均速度2)

リンク3 (始点位置3, 経過時間3, 平均速度3)

リンク4 (始点位置4, 経過時間4, 平均速度4)

図 4.5 まとめ送りのデータ構造

## 4.5 シミュレーション評価

工夫のない単純な方式と効率化の限界となる理想的な方式との間で、情報の新鮮さ・多様さ・豊富さにおいて、この2つの効率化方式がどの程度の改善を示すのか、計算機上のシミュレーションで調べた。更にシミュレーション実行時間にも着目し、効率化に要する計算量についても調べた。工夫のない方式では情報をランダムに選択して送信するのに対して、効率化の限界となる方式ではパケットサイズが無限大となる理想状態を仮定して全ての保有データを送信する。ここで、効率化限界とは、重複送信抑制やまとめ送りの方式個別の限界ではなく、一般的な情報共有の効率化の限界を意味する。

### 4.5.1 シミュレータの構築

提案方式を実装した交通情報共有のアプリケーションシミュレータを新たに開発し、先に開発した統合シミュレーションプラットフォーム [88] [99]上で評価を行った。交通シミュレータには MATES [91]を利用する。MATES は車両のモビリティ情報を生成するために用いられ、通信結果を車両のモビリティにフィードバックすることは行わない。つまり、交通流は通信の結果で変化しない。通信シミュレータについては、通信距離 300m までをパケット到達率 100%、それ以降を到達不能とする、簡易的なものを新たに作成して利用する。また、電波干渉や遮蔽・回折・遅延の影響は考慮されない。

#### 4.5.1.1 評価シナリオの設定

銀座などの密集した都市部を想定し、その道路構造と信号サイクルは ITS 通信シミュレーションの標準的な評価シナリオを策定した文献 [100]のグリッド状道路モデル（マンハッタンモデル）を参考にして設定する。2km 四方のエリアに道路中心線間隔で 200m 毎に、東西方向に 9 本、南北方向に 9 本の道路が並行に配置する。東から西へ、北から南へ、奇数番目の道路が片側 2 車線、それ以外は片



側1車線である。エリアの辺縁には道路は存在しない。全ての交差点に信号を設置し、140秒の信号サイクルとする。その内訳は、青45秒、黄10秒、右折専用10秒、全方向赤5秒、赤70秒であるが、右折レーンは存在しないため、右折専用は赤信号と同じである。各交差点には最大で140秒のランダムな開始時間遅れを与える。道路構造と信号サイクルは図4.6の通りとなる。

交通流入量は渋滞の蓄積が発生しない程度に負荷の高い状況を想定し、毎時200台/レーンと設定する。車両の移動は直進のみとする。図4.6左の道路構造上には車両が配置されており、暖色系ほど低速であり、赤が停止であることを示す。図は開始から45分目の状況を示しており、渋滞の蓄積（グリッドロック）が発生していないことがわかる。シミュレーションエリア内に存在する車両数の時間推移は図4.7のグラフの通りとなる。経過時間15分（900秒）で車両は1400台程度で安定し、またシステム搭載車両数も搭載率（1%、10%）に応じた台数で推移する。車両速度の上限は60km/hに設定されており、平均は31.6km/hであった。

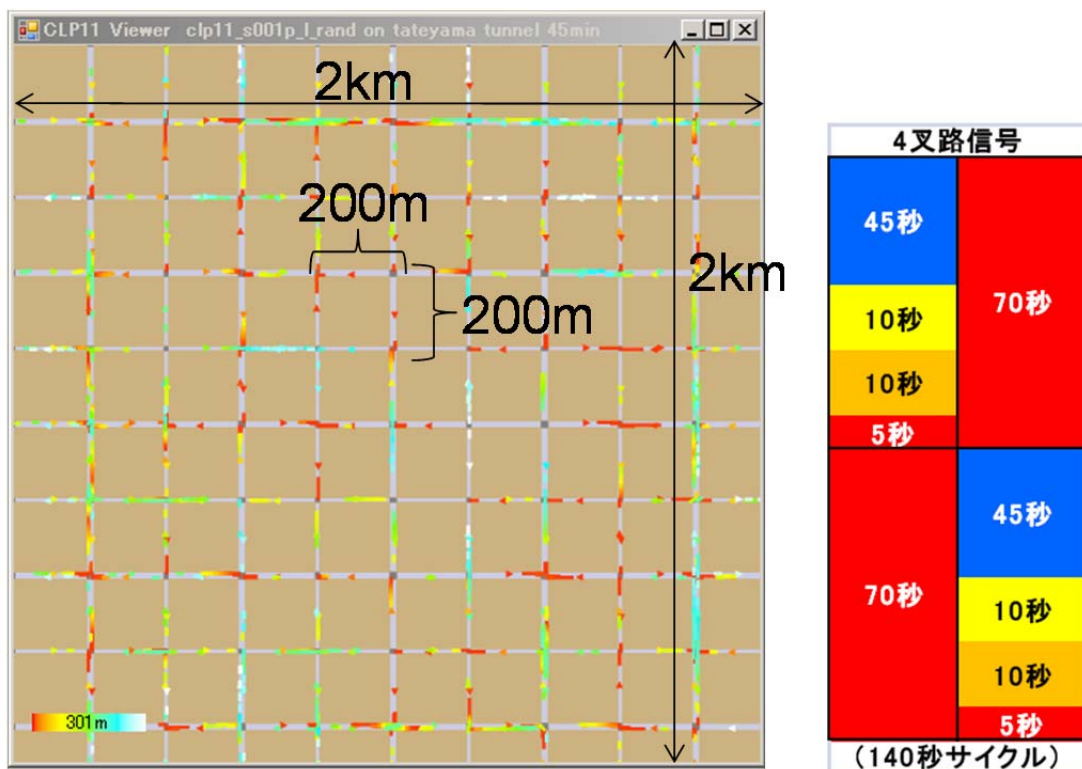


図 4.6 シミュレーションエリアの道路構造と信号サイクル

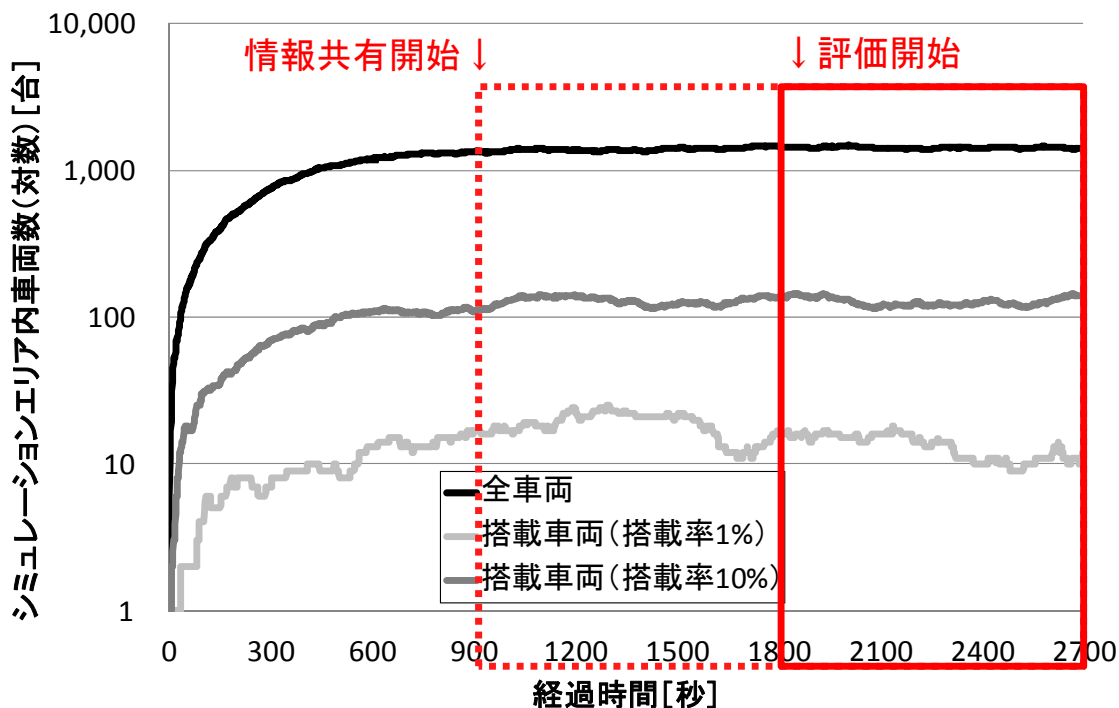


図 4.7 シミュレーションエリア内の車両数の時間推移

シミュレーションでは、1) 1つの情報をランダムに選んで送信する方式（工夫なし）、2) 重複送信抑制、3) まとめ送り、4) 重複送信抑制とまとめ送りを組み合わせた方式、5) 理想的に、送信タイミングに保有する全ての情報を送出する方式（効率化限界）の5つの方式を比較する。まとめ送りでは、終点位置を共有したリンク情報を最大4つまで送信できるが、将来アプリケーションを識別するためのフラグなどが入る可能性も考えられるため、本評価では余裕を持って3つまで送信できるものとする。システムの普及初期を想定して1%と10%のシステム搭載率について、車両が保有するリンク情報の豊富さ、多様さ、新鮮さに関する評価を行い、情報共有の効率化とその限界について調べる。車両数が安定的に推移する15分後に情報共有を開始、最初のリンク情報の有効期限を迎える30分後に評価を開始して、45分後にシミュレーションを終える。シミュレーションの設定値を表4.1に示す。重複送信抑制の場合に適用される送信抑制時間を10秒に設定している。平均速度が30km/h程度であることから、およそ80mの区間は再送が抑制されることになる。通信距離は300mであることから、対向ですれ違う場合でも、どの情報も少なくとも1回は抑制が解除されて送信の候補となりうる設定であり、過度な抑制を防止する。

表 4.1 シミュレーションの主な設定値

設定項目	設定値
システム搭載率	1%, 10%
送信周期	100 ミリ秒
情報の有効期限	最新 15 分間 (900 秒)
情報の有効エリア	周辺 12km 四方
シミュレーション時間	45 分間
情報共有時間	15-45 分目
評価時間	30-45 分目
通信距離対パケット到達率	[0m,300m]で 100% (300m,∞)で 0%
【まとめ送り】まとめ送り上限数	3 件
【重複送信抑制】送信抑制時間	10 秒
最大速度	60km/h (平均 31.6km/h)
車両流入量	200 台/h (約 1400 台で安定)

#### 4.5.2 提案方式の情報共有の効率化に関する評価

##### 4.5.2.1 豊富さの評価

リンク情報が豊富であることを、車両が保有するリンク情報の量が多いことと定義する。その指標として各車両が保有する情報数の平均値（平均情報数）を用いて、時間推移を調べた結果は図 4.8、図 4.9 の通りであった。

時刻（経過時間） $t$ において、車両  $ID=v$  の車両が保有する情報の数を求める関数を  $count(t,v)$  とする。ある時刻  $t$  に存在した、システムを搭載する車両数を  $V(t)$  とすると、時刻  $t$  における平均情報数  $C(t)$  は式 4.1 により求められる。

$$\text{式 4.1} \quad C(t) = \frac{\sum_v count(t,v)}{V(t)}$$

搭載率 10% の場合、評価時間（1800-2700 秒）の区間平均値は、効率化限界方式を 1 とした比で（効率化限界、重複送信抑制+まとめ送り、まとめ送り、重複送信抑制、工夫無し）= (1, 0.90, 0.87, 0.78, 0.75) であった。重複送信抑制とまとめ送りはそれぞれ補完的に効率化が可能であり、二つの提案方式を合わせることで情報数は効率化限界の 90% となり、工夫無しから 15% 増加したことが分かった。工夫無しから効率化限界までの改善余地は、効率化限界比で 25% 存在する。改善 15%/余地 25% の計算により、改善余地の 6 割まで提案手法が獲得できたと考えることもできる。情報量を豊富にする効果は確認できたが、搭載率 1% と 10% の効率化限界を比較すれば、普及初期は搭載率による影響が支配的であることも確認できた。

4.5.2.2 多様さの評価

リンク情報が多様であることを、車両の保有するリンク情報の発生地点が多岐に渡ることと定義する。その指標として、平均情報数の効率化限界方式を1とした比を用いて、情報の拡散範囲ごとに調べた結果は図 4.10、図 4.11 の通りであった。

リンク情報の拡散範囲は、情報の生成地点から車両の走行位置までの距離とし、50m 毎に集計する。時刻  $t$  において、車両  $ID=v$  の車両が保有する情報のうち、生成地点までの距離が  $[D_i, D(i+1))$  の範囲に存在する情報の数を求める関数を  $count(t, v, i, D)$  とする。ここで  $D$  は距離区間定数であり、集計単位の 50m となる。ある時刻  $t$  に存在した搭載車両数を  $V(t)$ 、評価時間を  $T$  とすると、距離区間  $[D_i, D(i+1))$  における平均情報数  $C(i, D)$  は式 4.2 により求められる。

$$式 4.2 \quad C(i, D) = \frac{\sum_t \frac{\sum_v count(t, v, i, D)}{V(t)}}{T}$$

効率化限界との比較を容易にするために、各方式の平均情報数を効率化限界の平均情報数との比で表現する。搭載率 10% の場合、情報生成地点までの距離の増加につれて、効率化限界に対する工夫なしの平均情報数の比がほぼ線形に減少している。500m 離れた所で生成された情報は(効率化限界, 重複送信抑制+まとめ送り, まとめ送り, 重複送信抑制, 工夫なし) = (1, 0.94, 0.92, 0.87, 0.84) であるのに対し、2000m 離れた所で生成された情報は、(1, 0.77, 0.71, 0.55, 0.50) であることが確認できる。重複送信抑制とまとめ送りはそれぞれ補完的に効率化が可能であり、二つの方式を合わせることで情報数は効率化限界比で 500m 離れた情報で 10% 増加, 2000m 離れた情報で 27% 増加することが分かった。増加量だけみれば遠方の距離の方が大きい, 改善余地における提案手法の獲得度は、500m 離れた情報で 62%, 2000m 離れた情報で 54% であり、遠方の距離に対して若干効果が減退することが分かった。

搭載率 1% の場合にはそのような特性が見られなかった。受信機会が極めて少なく全保有情報を送信する効率化限界の場合もランダムに1つ送信する工夫なしの場合も差が出なかったためと思われる。

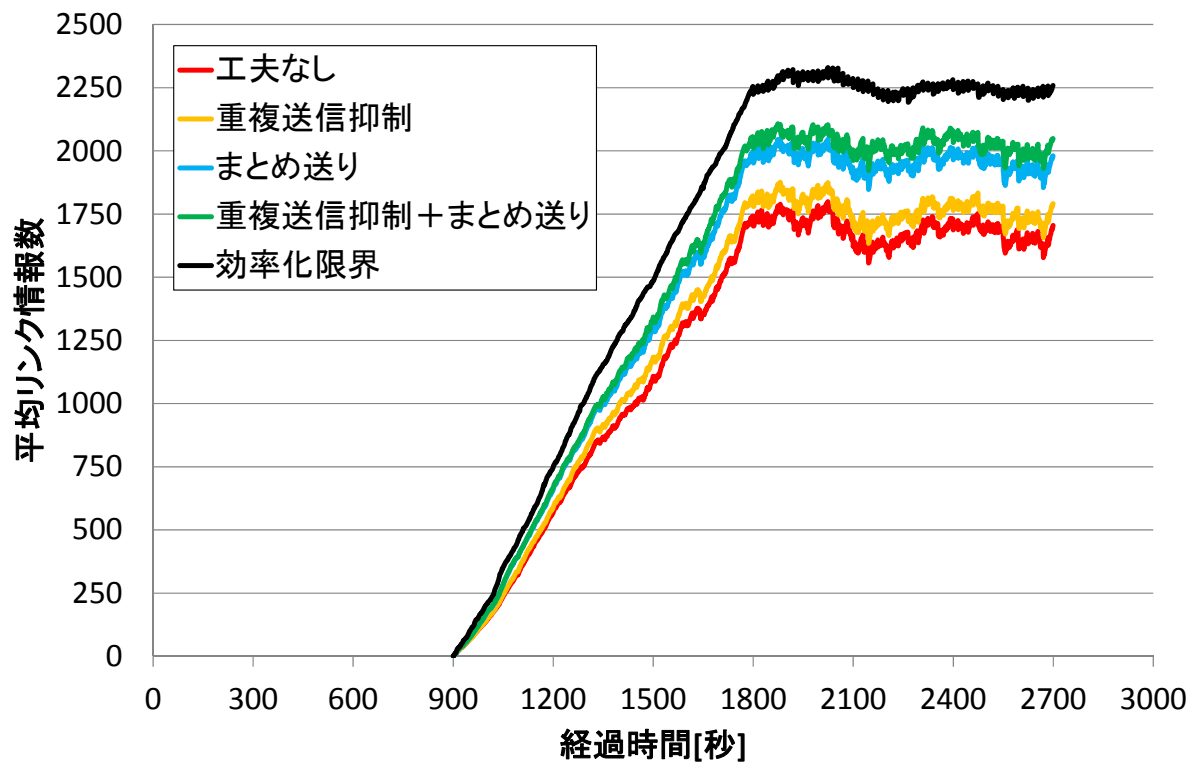


図 4.8 平均情報数の時間推移 (搭載率 10%)

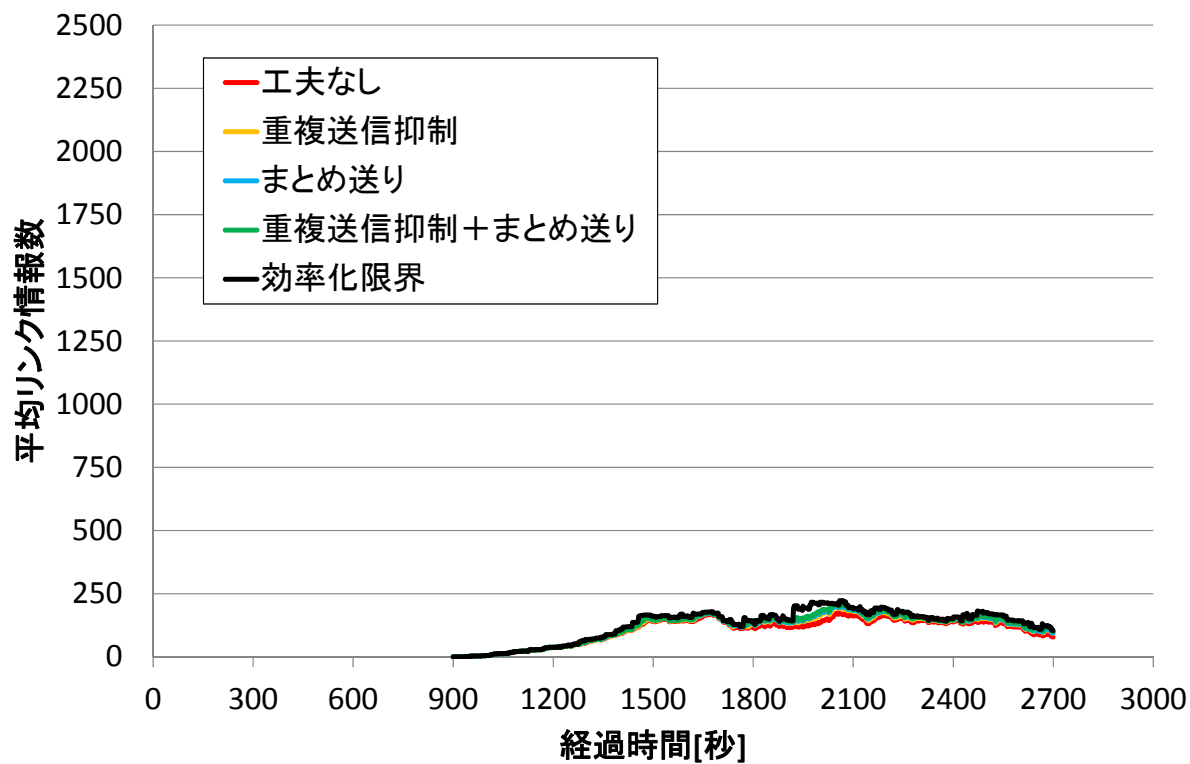


図 4.9 平均情報数の時間推移 (搭載率 1%)

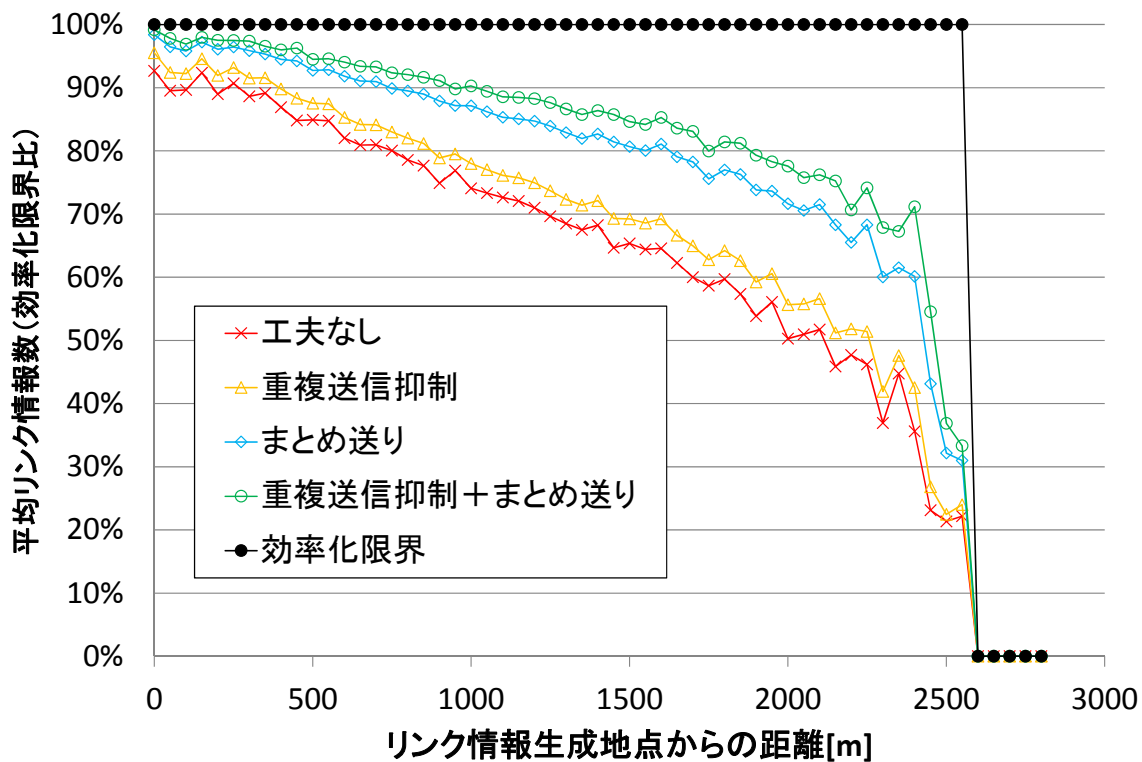


図 4.10 拡散範囲に対する平均情報数の効率化限界比分布 (搭載率 10%)

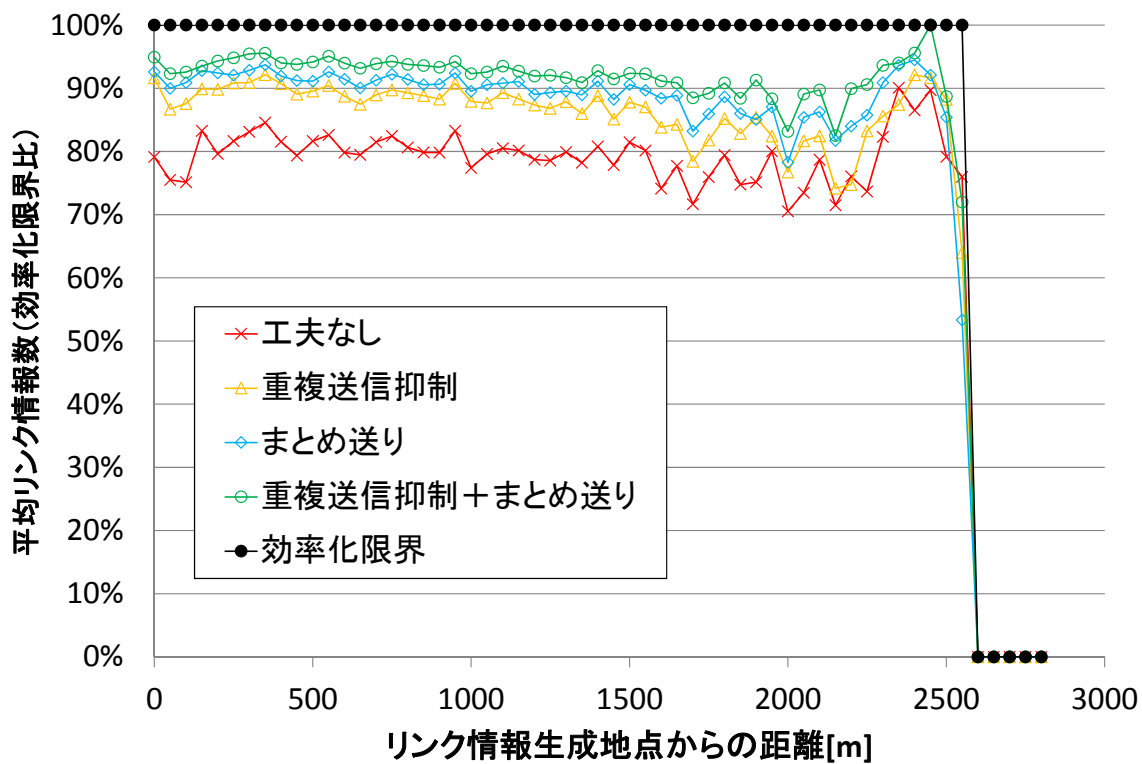


図 4.11 拡散範囲に対する平均情報数の効率化限界比分布 (搭載率 1%)

### 4.5.2.3 新鮮さの評価

リンク情報が新鮮であることを、車両の保有するリンク情報の発生時刻が新しいことと定義する。その指標として、平均情報数の効率化限界方式を1とした比を用いて、情報生成後の経過時間ごとに調べた結果は、図 4.12, 図 4.13 の通りであった。グラフは情報生成後の経過時間を60秒毎に集計している。式 4.2 の  $D$  を経過時間の区間定数として、集計単位の60秒とすれば、経過時間区間 $[D_i, D(i+1))$ における平均情報数  $C(i,D)$ を同様に求めることができる。効率化限界との比較を容易にするために、各方式の平均情報数を効率化限界の平均情報数との比で表現する。

搭載率10%の場合、情報生成後の経過時間の初期の増加につれて、効率化限界に対する工夫なしの平均情報数の比がほぼ線形に増加している。生成後経過時間60~120秒の区間の情報は(効率化限界, 重複送信抑制+まとめ送り, まとめ送り, 重複送信抑制, 工夫なし) = (1, 0.62, 0.49, 0.27, 0.24)であるのに対し、600~660秒区間の情報は、(1, 0.97, 0.96, 0.94, 0.92)であることが確認できる。重複送信抑制とまとめ送りはそれぞれ補完的に効率化が可能であり、二つの方式を合わせることで情報数は効率化限界比で生成後60~120秒の区間で経過した情報について38%増加、600~660秒の区間で経過した情報について5%増加を見込めることが分かった。改善余地に対する提案手法の獲得度について細かく見ていくと、(0~1分, 1~2分, 2~3分, 3~4分, 4~5分, 5~6分, 6分以降) = (13%, 50%, 83%, 93%, 92%, 87%, 74%) という結果であった。発生後2分以内の情報の改善は困難であるが、発生後2~5分で改善のピークを迎え、改善余地の88%を獲得することが分かった。このことから、1分程度の発生から間もない情報の増加は困難であったが、実用要件として設定した発生後5分以内の改善には効果的であることが確認できた。

搭載率1%の場合にはその差が見られなかった。同様に受信機会が極めて少ないためと思われる。

### 4.5.2.4 効果の一般性に関する考察

豊富さ、多様さ、新鮮さの指標において、重複送信抑制、及びまとめ送りはいずれも改善を示し、且つそれらを組み合わせて利用する場合も効果が減ることなく加算される様子が確認できた。但し4.4.2 重複送信抑制、4.4.3 まとめ送りで想定した効果、つまり重複送信抑制が新鮮で多様な情報を展開する特性、及びまとめ送りが豊富な情報を展開する特性は顕著には確認できず、どちらも効率化限界と工夫なしの差が大きい遠方の情報、新鮮な情報を増加する効果を確認した。また重複送信抑制よりもまとめ送りの方が、改善度が大きい結果となった。これは重複送信抑制が情報量を増加させない質的な改善であるのに対して、まとめ送りは情報量を増加させる量的な改善であり、シミュレーションが模擬する現実の利用環境においては、質的改善よりも量的改善の方が効果的であることを示す。

重複送信制御+まとめ送りの提案方式は、効率化限界に常に及ばない結果となっている。これは効率化限界方式が伝送速度の制限がない理想状態を仮定して保有情報を全て送信するのに対して、重複送信抑制+まとめ送りの方式は伝送速度の制限上、保有情報から一部を選択して送信するためと考えられる。したがって、この結果は条件に関わらず常に再現されると考えられる。

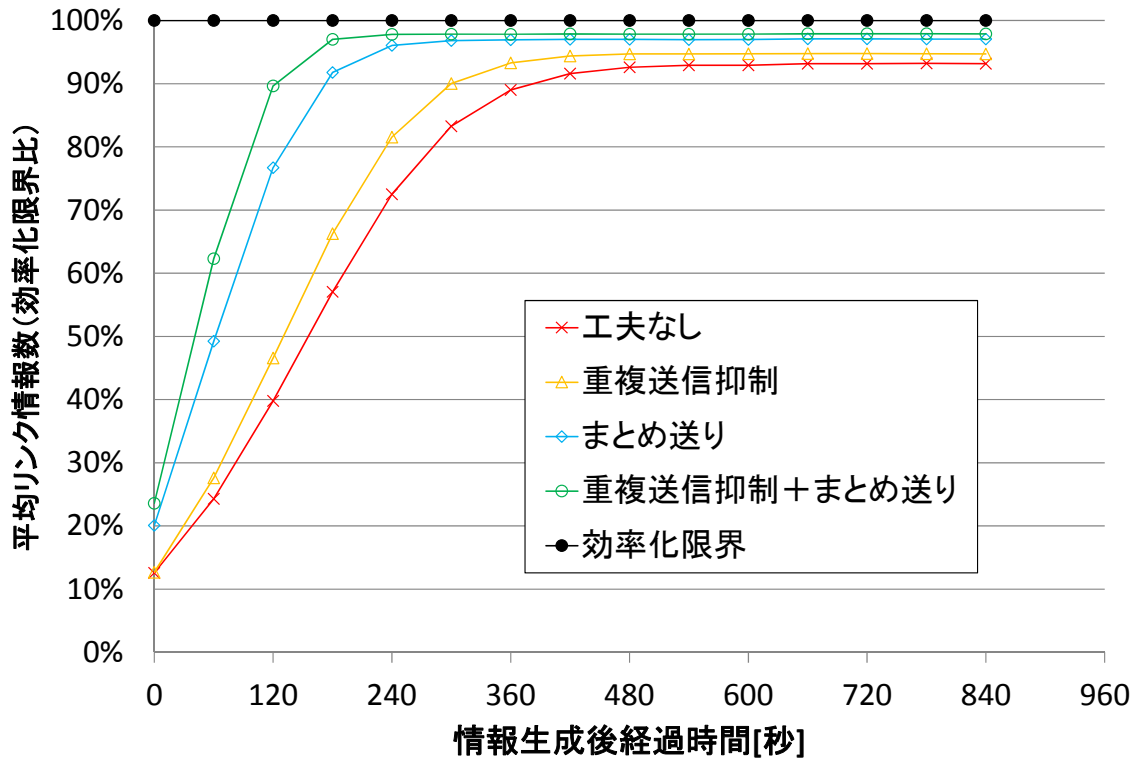


図 4.12 経過時間に対する平均情報数の効率化限界比分布 (搭載率 10%)

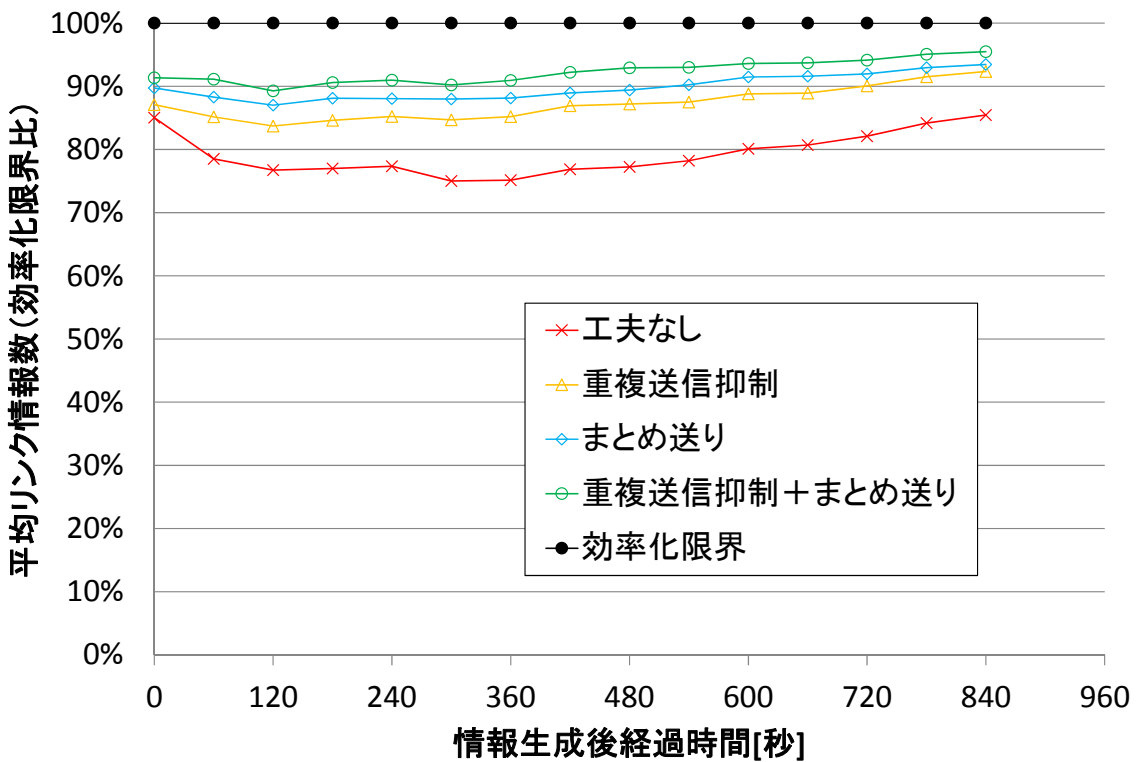


図 4.13 経過時間に対する平均情報数の効率化限界比分布 (搭載率 1%)



### 4.5.3 提案方式のスケラビリティに関する評価

更に、システム普及後の提案方式の規模拡張性に関する評価を行う。表 4.1 の条件のうちシステム搭載率を(1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100)[%]と変化させて、提案方式の規模拡張性に関する評価を、4.5.2.1 豊富さの評価で用いた平均情報数と、新たに各方式の計算量を示す指標としてシミュレーション実行時間に着目して行った。サーバの仕様は次の通りとなる。CPU: Intel Xeon X5675(3.07GHz), メモリ: 24GB, 記憶容量: 1TB, OS: Cent OS 6.3(Final), データベース: PostgreSQL 8.4.4. なお、本シミュレータはマルチスレッドには対応していない。

図 4.14 は搭載率とシミュレーションエリア内搭載車両数の関係であり、図 4.7 と同様の比例増加を示す。図 4.15 は搭載率と車両が保有する平均情報数の関係、図 4.16 は搭載率と 45 分間相当のシミュレーションの実行に要した現実の時間（シミュレーション実行時間）との関係を示す。搭載率 100%の効率化限界のシナリオは図 4.16 の傾向から 20 日程度の実行で終わる見込みがないため評価を行わなかった。図 4.15 の結果から、どの方式も搭載率に対して情報量は線形の増加傾向を示すことが分かる。工夫なしは効率化限界の 77%程度であり、重複送信抑制とまとめ送りを合わせた方式は効率化限界の 91%程度まで改善できることが分かる。実用的な観点での考察を試みると、工夫なしの方式が普及率 30%で達成する情報量は、重複送信抑制とまとめ送りを合わせた方式では普及率 25%で達成できることが分かる。文献 [65]の普及予測（中位推計）で考えると、10 年目で得られる情報量が、提案方式により 9 年目で得られることとなる。

図 4.16 の結果は各方式のシミュレーション全体の実行時間を示す。工夫なしの結果をベースラインとして、搭載率 10%で提案手法（重複送信抑制+まとめ送り）は 1.04 倍、効率化限界は 1.44 倍、搭載率 50%で提案手法は 1.1 倍、効率化限界は 7.4 倍となった。提案手法はいずれも送信時に特別な処理が発生するため、その分だけ工夫無しよりも大きい値をとることが考えられる。一方、効率化限界方式では伝送速度の制限がないため、搭載車両は全ての情報を送信し、且つ通信範囲に存在する他の搭載車両からの全ての情報を受信する。そのため、伝送速度の制限のある手法よりもはるかに多くの計算時間を要する。提案手法は、効率化限界と比較すれば、工夫無しと同程度の計算量であると言える。システム搭載率 10%の場合、提案手法は効率化限界の計算時間増加分の 1 割程度で実施できることが分かった。

以上のことから、重複送信抑制とまとめ送りを合わせた提案方式は、普及率の増加に対しても工夫なしの方式と同じ傾向の計算量の要求に留まり、高普及期においても低普及期と同等の情報量の改善を見込めることが確認できた。

### 4.5.4 計算時間評価の妥当性に関する考察

シミュレーション実行時間を実際の計算機上の計算時間と見なした評価の妥当性について考察する。比較対象（工夫無し・効率化手法 2 種・効率化限界）の間で、交通流シミュレータと通信シミュレータは同じ動作を行うため、ここで時間差は発生しない。動作が異なるのはアプリケーションの部分であり、図 4.17 に示すように送信情報の選択や受信情報の登録で時間差が発生する。車載機の性能は、シミュレーションに用いたような市販の PC と同様の性能を有するという前提において、シミュレーションにおける実行時間の差が、情報共有のアプリケーションにおける計算時間の差の総和と見なすことは妥当であると考えられる。

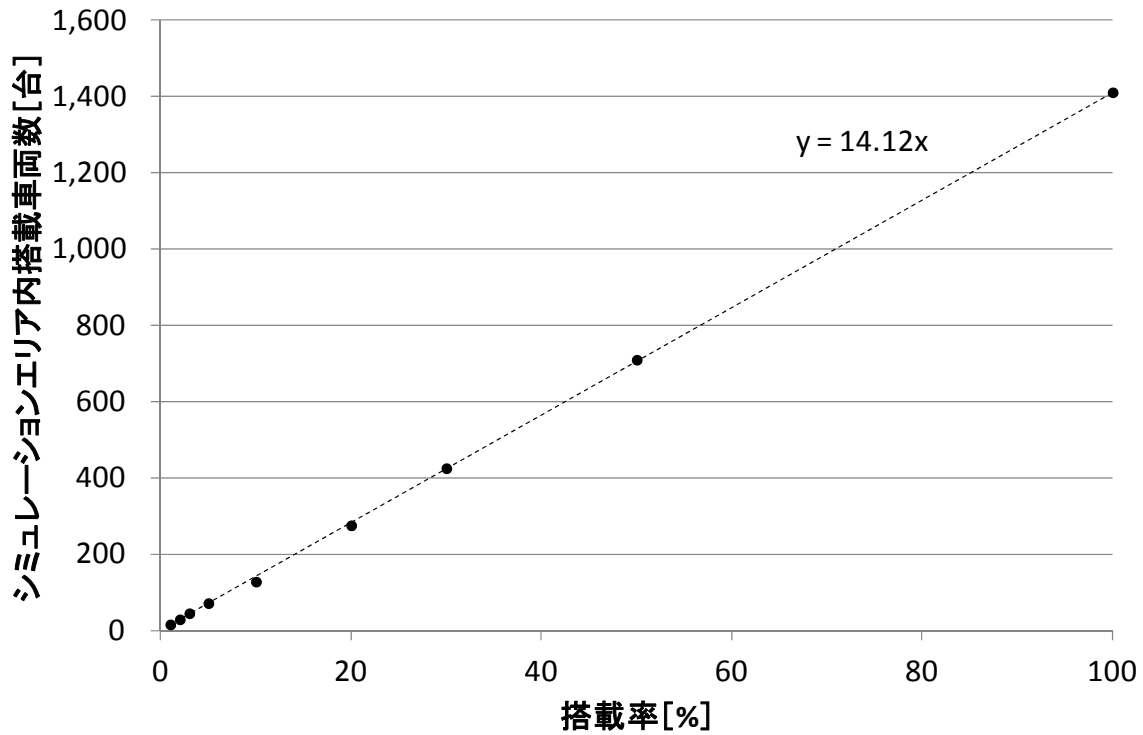


図 4.14 搭載率に対する搭載車両数の推移

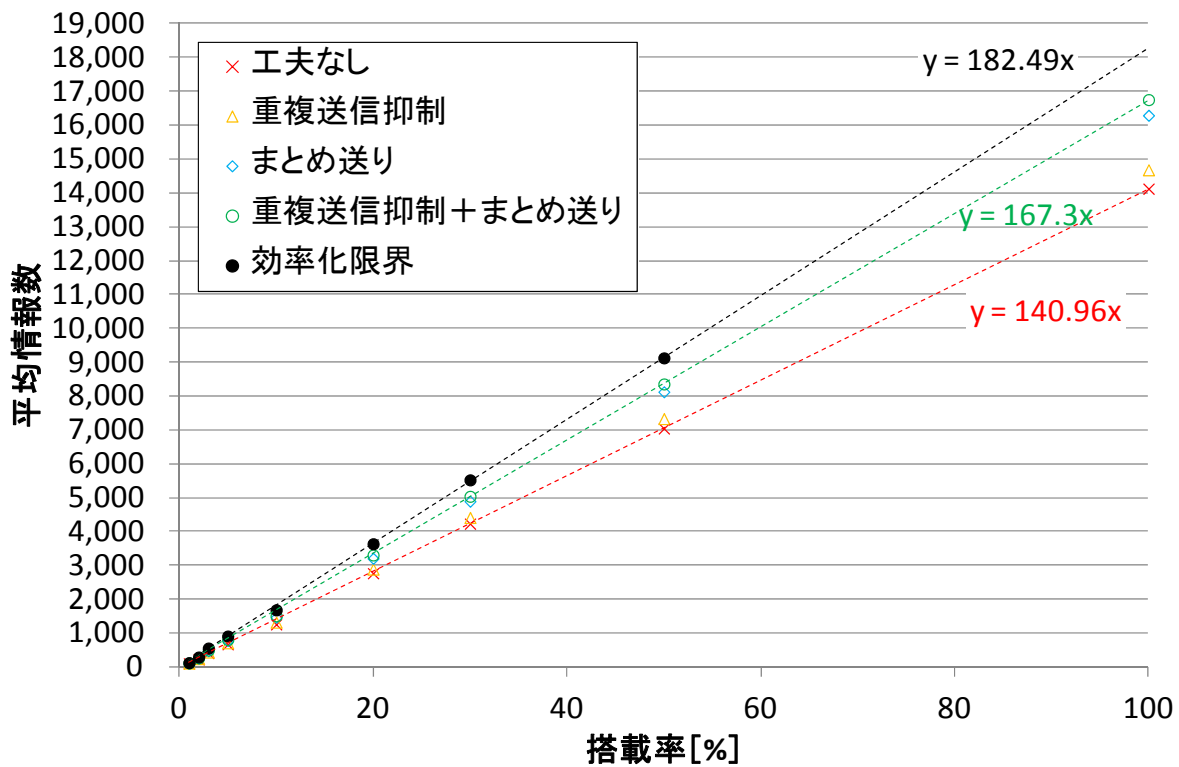


図 4.15 搭載率に対する平均情報数の推移

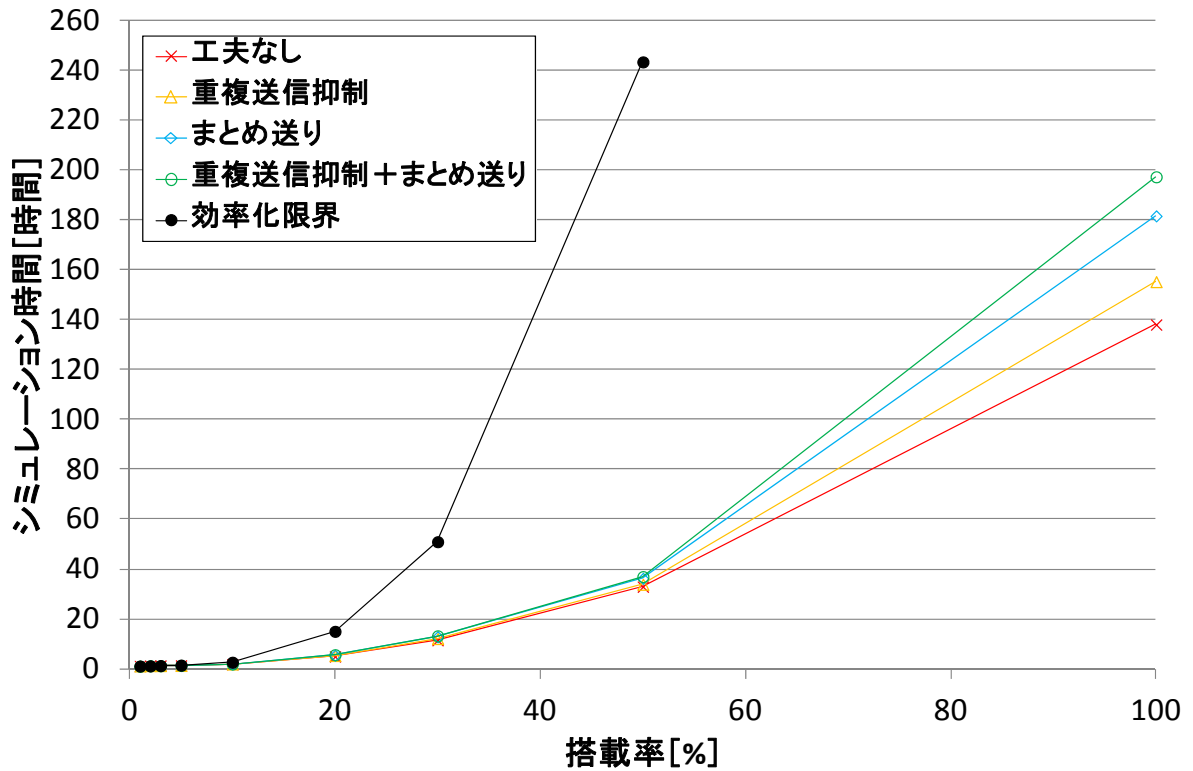


図 4.16 搭載率に対するシミュレーション実行時間

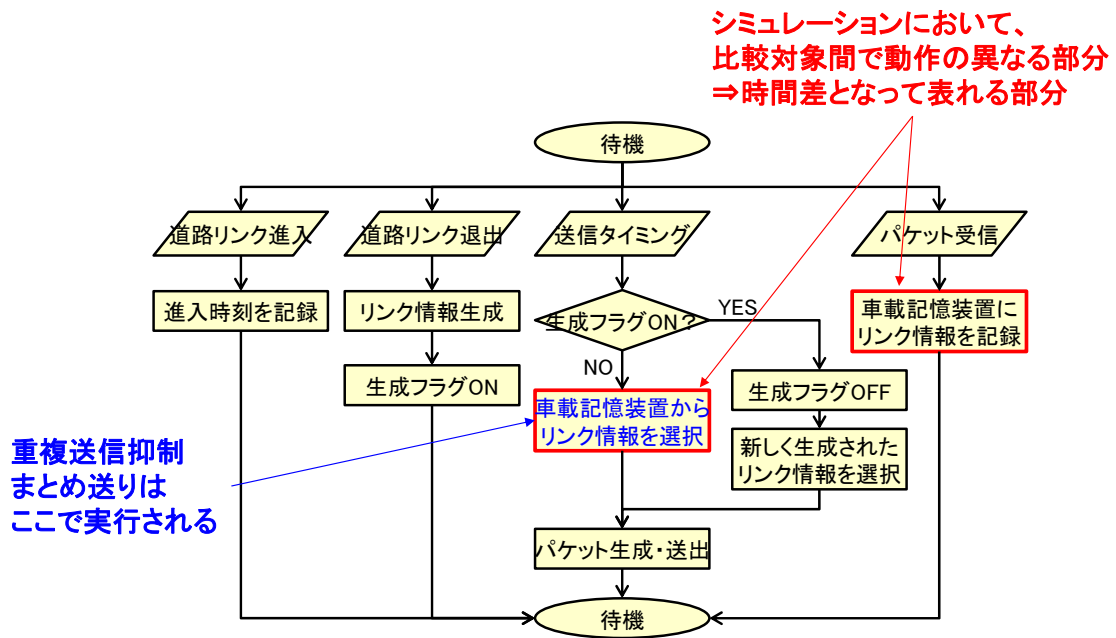


図 4.17 情報伝達システムの動作フロー（時間差の発生箇所）

## 4.6 まとめと今後の課題

交通容量を増加させるために、無線通信を用いて車両間で有用な交通情報を共有することを目標とし、計算量を抑えて有用な情報を共有するという課題の解決に取り組んだ。情報のまとめ送りや重複情報の抑制といった、比較的単純な効率化の方法を提案した。情報をランダムに選んで送るという「工夫無し」の方法、および理想的にパケットサイズの制約を無視してすべての情報を送るという「効率化限界」を示す方法と共に、シミュレーション上での比較を行った。その結果、システム搭載率10%の場合で、車両が保有する情報量が提案手法によって効率化限界の90%程度となった。工夫無しが75%程度なので、提案手法は15%増加、つまり改善余地の6割を獲得できることを確認した。特に2~5分以内の情報量の増加が大きく、改善余地の88%を獲得することから、実用要件とする5分以内の有用な情報を多く流通させる効果を確認した。また、これらの改善効果はシステム搭載率の増加に対しても維持されることも確認した。提案手法の計算に要する時間は、システム搭載率10%の場合で、工夫無しの方法よりも4%多い程度に留まることも確認できた。効率化限界の計算時間が44%多いことから、提案手法は効率化限界の計算時間増加分の1割程度で実施できることが分かった。シミュレーション実行時間を実際の車載機上の計算時間と見なした評価の妥当性の考察も行った。

今後の課題として、今回検討の対象外とした要素（電波伝搬、位置精度）の取り扱い、より現実的な評価シナリオ（普及率、交通流など）の設定、そして詳細な設計値（送信周期や重複送信抑制の抑制時間など）の評価が考えられる。特に、各方式において重複して受信する度合い、重複送信抑制とまとめ送りのそれぞれの方式の効率化の限界、重複送信抑制がまとめ送りよりも効率的となる条件等を調べることにより、更に提案手法の理解が進むものと思われる。今回は通信システムの普及初期を想定し、貴重なすれ違い通信機会の効率的利用を検討したが、今後普及が進んで混雑した状況を検討するには、電波干渉の影響の評価が追加が必要であり、ns-3などの一般的な通信シミュレータの利用が考えられる。本研究の情報共有ネットワークサービスによって得られた情報に基づいて、ナビゲーションシステムが最小の所要時間となる経路を設定することで、交通が平準化され、交通容量が増加する。そのような、高次のコラボレーション技術の研究が期待される。

## 第5章 車車間通信による災害時情報共有の効果

### 5.1 概要

車車間通信による情報共有によって、災害時に被災者間のメッセージの仲介を行うことが考えられる。本研究では都市規模で効率的に情報共有を行うことを目標とする。そのためには実用時間で都市規模の評価をすることが課題となる。確率密度を導入したシミュレーション手法を考案し、情報共有の倍速化の効果をおよそ一か月の計算で確認できた。シミュレーションの妥当性についても考察を行い、特に車車間の情報共有において、通信結果パタンの線形補間を行う場合の誤差を調べて、影響なしと見なせることを示した。

本章に対応する学術論文は[4]、学会発表は[8][9][10]、特許は[16][17][18]となる。本章の関連技術はアジア太平洋電気通信標準化機関（ASTAP）において提案を行っている。寄書は[19][20][21][22][23][24][25]である。委員会等の活動も行っており、発表文書は[26][27]である。

### 5.2 前提

本章の背景と研究の目標、前提となる条件について述べる。

#### 5.2.1 背景

先の東日本大震災ではセルラーを含む公衆通信網が切断し、本格的な復旧には1週間以上を要したことから、災害発生直後の通信手段の確保が課題であることが分かった [101]。仙台市の事例 [102] にも見られるように、安否確認を含む避難所での情報提供は主に掲示板への書き込み・張り紙によって行われ、書き込むスペースが不足して古い情報が削除されるケースも見られた。また被災者が家族や知人を探して避難所を転々とする様子も見られたが、避難所は仙台市内だけでおよそ300箇所も存在し、その活動は困難なものであった。このような掲示板を補完あるいは代替する形で、避難所に大容量の記憶装置を備えたサーバを立てて、安否情報を登録・蓄積・提供する方法も有用であると考えられる。ボランティアによるキーボード入力を介した情報登録、電光掲示板による情報提供などが考えられるが、サーバがWi-Fi機能を備えることにより、被災者がスマートフォンなどでサーバに直接アクセスして、安否情報を登録・閲覧することが可能となる。もちろん記憶容量にも制限があるが、手書きの掲示板に比べて古い情報が削除される事態は緩和され、更に検索機能を提供することによって、閲覧も容易になることが期待される。

一方、自動車のナビゲーションシステム(車載機)へのWi-Fiの標準搭載も進められている [46] [47]. 車載機がスマートフォンと繋がってナビゲーション機能の提供を受ける,あるいは車外のWi-Fiホットスポットと繋がって,車両の故障診断サービスや地図のアップデートサービスを受けるなど,多様なサービスが実現されている.更に車載機がWi-Fiを介して避難所のサーバに接続することができれば,自宅など避難所から離れた場所にいる被災者のスマートフォンから安否情報を受け取り,避難所まで運搬してサーバへ登録することが可能となる.もちろん,安否情報以外にも,必要物資や救護人に関する情報を伝えてもよい.更に車車間の情報共有により,より多くの避難所へ情報提供することが可能となり,究極的には被災者が避難所を尋ねてまわる必要がなくなることや,必要物資の運搬や救護がスムーズに行われることなどが期待できる.もちろん車両自体が可搬型の避難所サーバであってもよい.車両がガソリンから発電し,蓄電した電気を利用できることも特筆すべき利点である.

このような車載無線機を活用した災害時情報共有手法の実現に向けて,2016年1月に総務省内に「非常時のアドホック通信ネットワークの活用に関する研究会」 [103]が立ち上がった.初回冒頭の総務省説明資料中に記載された実現イメージを引用して,図5.1に示す.筆者は構成員として参加しており,本研究で得られた知見を携えて提言に臨む.

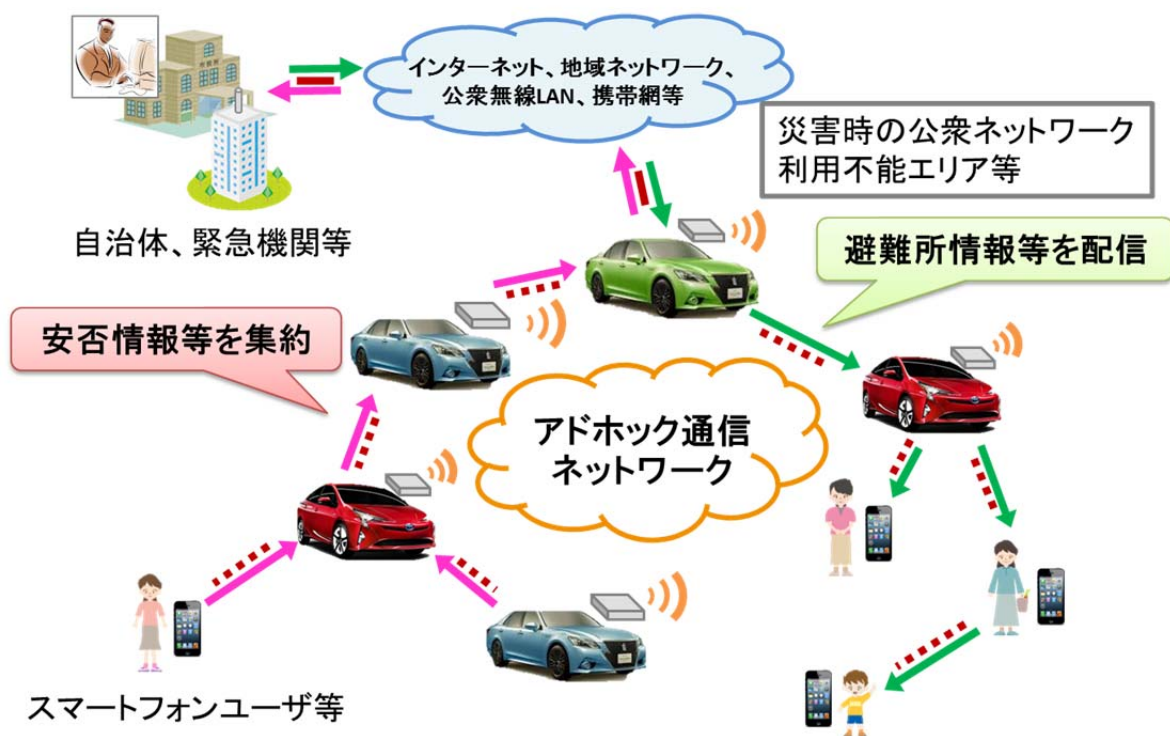


図 5.1 車載通信機を活用した災害時情報共有のイメージ

出典：総務省ホームページ ([http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000396275.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000396275.pdf))

### 5.2.2 目標

災害時の情報共有には,避難情報や救助情報など,ある程度決められたメッセージが狭いエリアで展開されるが,人命に関わるために急を要するユースケースと,安否情報や物資情報など,緊急ではないが様々なメッセージを広域かつ大量に展開するユースケースに大きく分けられる.交通情報につ

いては、道路インフラが損壊している状況が想定される。したがって前章の渋滞情報の5分以内が有用といった要件とは異なり、比較的広域かつ大量に情報を展開して、数日に渡って観測することが必要となり、後者のユースケースに近いと考えられる。また通信手段も、防災無線や衛星はもちろん、可搬型移動局、機能している無線基地局を介した端末間通信、ドローンに搭載された無線機、テレビ帯ホワイトスペースなど、様々な通信手段の利用が考えられるが、自動車メーカーにおいて研究を行ってきた経緯に加えて、ユーザのスマートフォンと容易に接続できるという特長も携えて、通信手段については車載 Wi-Fi の活用について着目する。また比較的単独での問題解決が可能である後者のユースケースへ優先的に取り組み、被災者の居場所や物資要否に関するメッセージを都市規模で展開させることを目標とする。課題の構造を図 5.2 に示す。

被災者の居場所や物資の要否などの情報がどのくらいの時間で展開されるか評価するためには、道路構造や交通量といった都市ごとに固有の構造を考慮する必要がある。災害発生時の交通状況については、自治体の防災担当や大学によって研究が進められている [104] [105]。車車間通信による災害時の情報共有によって被災者のメッセージを都市規模で展開させることで、これらのステークホルダの「都市ごとに固有の構造を考慮して、被災者の居場所や物資要否がわかるようにする」仕組みの実現へ貢献することを考える。

このように、通信を利用して災害時の被災者のメッセージを共有することで、被災者の居場所や物資の要否が分かるようになることが期待できる。そこで、車載機が他の車載機やスマホ、固定網とつながる仕組みや都市規模での評価を研究課題に設定する。

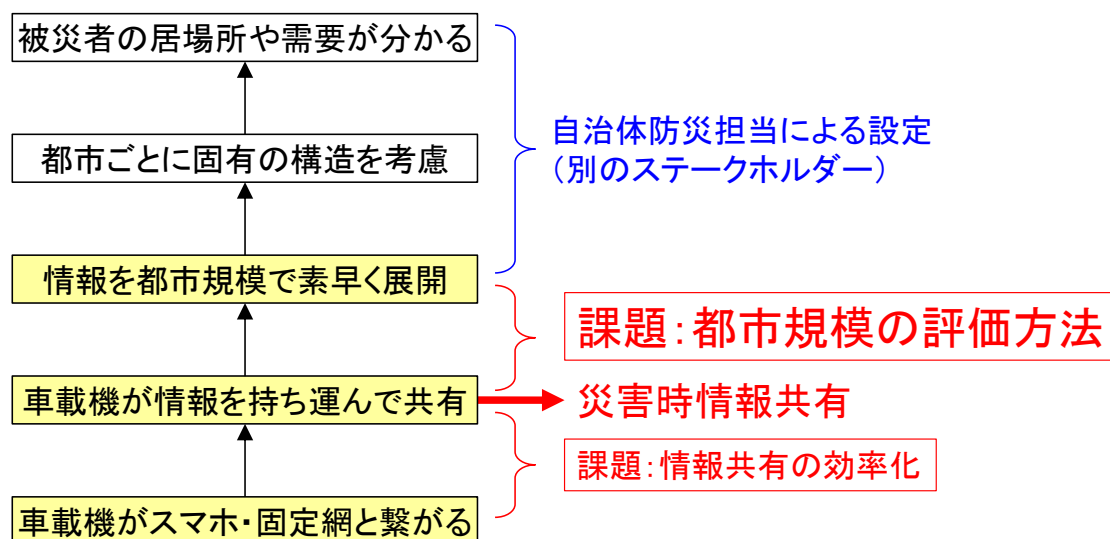


図 5.2 災害時情報共有による都市規模でのメッセージ展開の課題構造

### 5.2.3 前提条件

具体的には次のシナリオを想定する。大規模災害時に、避難所となった公共施設に住民が集まる。避難所には住民の所有車両や物資を運搬する車両も集まる。一部の車両は本論文で提案するシステムを保有する。避難所には十分な容量のデータベースや Wi-Fi アクセスポイントを備えた据え置き型のウェブサーバが存在し、住民や車両が発信する被災情報を記録して、住民からの照会に備える。簡単

## 第 5 章 車車間通信による災害時情報共有の効果

のため、このサーバは受信のみで、車両への発信は行わず、住民の発信した情報は避難所のサーバ以外に、避難所に存在する車両の中の少なくとも 1 台にも登録されるものとする。避難所内では車車間通信によって情報共有が行われ、車両が他の避難所へ移動することによって、情報が徐々に伝搬していく。そこで避難所内の車車間通信と避難所間の車両移動によって、出来るだけ早く、より多くの避難所に情報が行き渡ることを目標とする。これによって離ればなれになった家族や友人が、どこの避難所に避難しているのか、互いに確認することが容易となる。

文献 [106]によれば、被災した地理的管轄区内の全組織からの支援を受けて対応が必要となる危機レベル (Disaster, Catastrophe) では、通信事業者のインフラの機能停止が想定され、アドホック通信が必要とされる。その期間は約 300 時間と見積もられ、発災後 2 週間は有用と考えられる。本研究では 2 週間を想定期間とする。このような情報共有では、膨大な数のメッセージの発生が想定される。都心で大規模災害が発生し、東京都の人口を約 1350 万人 [107]のうち、1/3 の人が 1 週間に 10 件のメッセージを発信するとした場合のメッセージの発生量は、1 週間で 4500 万件となる。文献 [65]によれば、5 年で 7% 程度の車載機の普及が見込まれることから、5 年後の実用化を想定すれば、これらのメッセージを東京都の登録車両約 300 万台 [108]のうち 20 万台程度の車両が運搬することが考えられる。この規模を本研究の想定とする。

### 5.3 課題

車車間の情報共有の際に相手が保有する情報を送信するという無駄の発生により、情報伝搬が制限されることも考えられる。文献 [109]のように、通信相手に保有する情報を事前に知らせることにより、送信する情報を選別してフラグディングを効率化する手法が提案されている。しかし、このような情報伝搬の効率化について都市規模で評価する手法は確立されていない。

#### 5.3.1 車車間通信のシミュレーションに関する従来研究

車車間通信の性能評価には、コンピュータの仮想空間上に複数の車両をエージェントとして配置して取り扱う、マルチエージェント型のシミュレータが利用されてきた。このシミュレータの特長として、移動の表現、ランダム性の表現、空間 (密度) の描写、エージェントごとのパラメータ設定など、個々の状況を詳細に表現することが可能となる。

文献 [89]では、車車間通信による交差点安全支援での利用を想定した、通信シミュレータの性能評価を行っている。ns-2, QualNet, Scenargie を比較して、1km 四方の交差点エリアに車両 400 台、111 秒分のシミュレーション上の時間 (以下シミュレーション時間と呼ぶ) を計算するのに実際にかかった時間 (以下、計算時間と呼ぶ) は、Scenargie が最も短く 300 秒程度であること、そしてこのシナリオにおいて、計算時間は車両数に比例することが確認されている。つまり、本研究で想定する規模、車両 20 万台の 2 週間分のシミュレーションに単純計算で 2 万日近くかかることになり、実用的な時間で解決できない。

第 3 章では、車車間通信を用いた隊列走行のシミュレーション評価を実施した。2km 長の 3 車線高速道路エリアに車両が平均で 180 台程度存在し、シミュレーション時間 400 秒の計算時間は 1 時間強であった。文献 [89]の計算時間が車両数、シミュレーション時間に比例すると仮定すれば、Scenargie



の計算時間は8分程度と想定されるが、実際には大幅に時間をかかっており、これは隊列編成のアプリケーションも計算されているためと考えられる。第4章では、車車間のすれ違い時の通信による交通情報共有のシミュレーション評価を紹介している。評価シナリオは2km四方のエリアに車両約1400台が存在し、シミュレーション時間は45分である。同様にScenargieの計算時間は約7時間程度と想定され、これに情報共有のアプリケーションが再現されると更に時間がかかると考えられる。実際にこのシナリオではScenargie等の高度な通信シミュレータは使用せず、100ミリ秒毎に各車両が一斉にブロードキャストを行い、通信距離が300m以内の宛先であれば100%受信成功という簡略化された通信シミュレータを自作して使用した。それでも、車両約1400台、車両1台あたりの平均メッセージ数は約17000件、シミュレーション時間45分の計算時間は約200時間であった。

このように従来の車車間通信のシミュレーションは単純なアプリケーションであっても、数千台、数時間という規模が現実的に実行可能な範囲であると考えられる。一方で、本論文が扱う規模として車両20万台、シミュレーション時間は2週間を想定しており、現状では実施困難であると考えられる。これはマルチエージェント型のアーキテクチャが問題なのではなく、距離によって無線機間の通信成否をパケットごとに判定するというシミュレーション手法が、無線機台数の規模拡張性に弱いことに起因すると考えられる。

### 5.3.2 疫学のシミュレーションに関する従来研究

ここで発想を変えて、疫学分野の感染シミュレーションの手法について調べた。数式モデル、エージェントモデル、そして両者を合わせたハイブリッドモデルについて述べる。

数式モデルの中で、感染症の流行過程を記述する最も基本的なものに、SIRモデル [110]が挙げられる。Sは免疫のない感受性保持者(Susceptible), Iは感染者(Infected), Rは免疫保持者(Recovered)の3つの状態を模式化したものである。感受性保持者Sは感染者Iとの接触により感染者Iになる過程、感染者Iが時間の経過により免疫保持者Rとなる過程を式5.1で表す。

$$\text{式 5.1} \quad \begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta SI \\ \frac{dI}{dt} = \beta SI - \lambda I \\ \frac{dR}{dt} = \lambda I \end{cases}$$

ここで、 $\beta$ は感染力、 $\lambda$ は回復率を示す。計算モデルは少ないパラメータで大規模なシミュレーションが可能であるが、個別のシナリオ設定や状態把握は困難である。また文献 [111]によれば、予測を実施するためには伝搬能力と感染待ち時間、感染期間などの情報を詳細に得ておく必要があるとし、例としてインフルエンザの値として $\beta=0.48$ 、 $\lambda=3.5$ が提示されている。つまり数式モデルには実際の感染特性を反映した定数が必要となるため、未知の感染問題へはそのままでは使用できない。

このような数式モデルの課題を解決することを目指したのがエージェントモデルであり、文献 [112]の研究が挙げられる。前節の車車間通信のシミュレーションで述べたマルチエージェント型のシミュレーションと同様のものであり、実際に人をエージェントとして個別のシナリオ設定や状態把握

が可能である。しかし、病気は一種類であるのに対して、情報は多品種であるため計算の回数が高く、このままでは疫学と同規模のシミュレーションを実行することはできないと考えられる。

細かいシナリオ設定と個別の状態把握が可能な大規模シミュレーションを目指したのがハイブリッドモデルであり、文献 [113]の研究が挙げられる。局所的な感染には数式モデル、大局的な伝搬にはエージェントモデルを組み合わせることで実現する。文献 [113]の手法は疫学のモデルであるため、そのまま利用することはできないが、本研究ではハイブリッドモデルの考え方をを用いて、通信シミュレーションを局所的な情報伝搬に適用し、情報共有の効率化による情報の伝搬速度への影響について都市規模で評価する手法を提案する。

## 5.4 課題解決の方策

情報を都市規模で素早く展開して被災者の居場所や需要を周知するために、情報共有の効率化、およびその効率化の都市規模の評価の 2 つの課題について取り組む。情報共有の効率化は、相手の持たない情報を優先送信するという単純な手法を提案する。都市規模の評価は確率密度を導入してシミュレーション手法を提案する。以下、順に述べる。

### 5.4.1 車載 Wi-Fi を利用した災害時情報共有手法の提案

車載 Wi-Fi の利用を想定した災害時情報共有手法について述べる。車載機は自身の保有するウェブサーバ、及びそのアプリケーションによって、災害マニュアルのような静的な情報提供、及び掲示板のような動的な情報共有の 2 種類のサービスを提供する。被災者はスマートフォンなどのユーザ端末を Wi-Fi を介して車載機に接続し、予め用意されたドキュメントのダウンロードや、自身のメッセージの投稿、車載機が保有するメッセージの検索・閲覧を行う。車載機は他の車載機や避難所のサーバと相会した場合に保有情報を伝達する。災害地域の外に出て公衆通信網が利用可能となった場合はインターネット上のサーバへ伝達する。全てのメッセージには最初に登録された車両の ID や位置、タイムスタンプの情報なども属性として記録することができる。イメージを図 5.3 に示す。

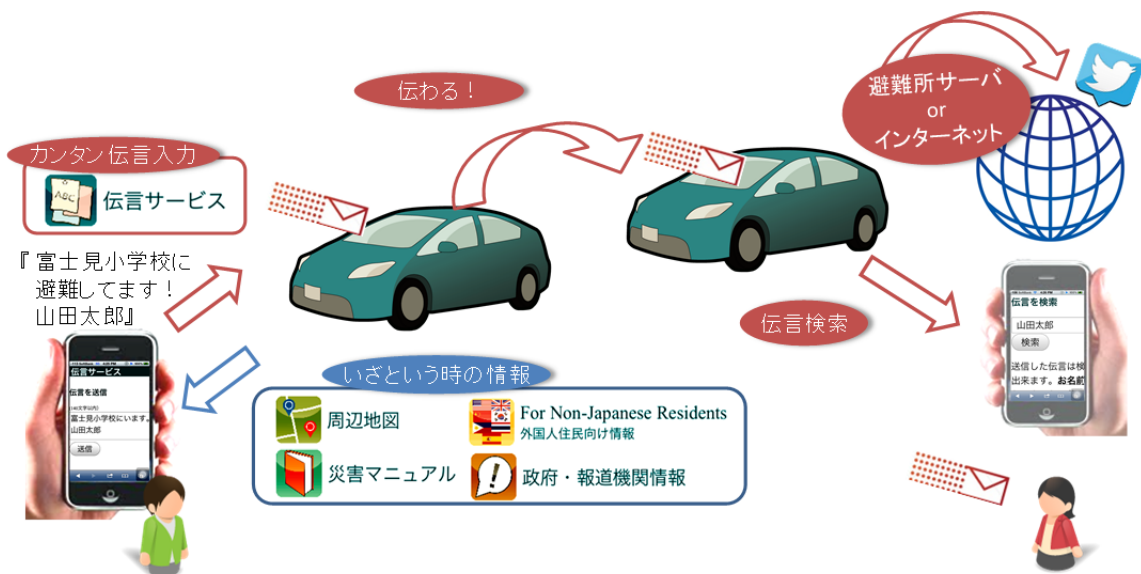


図 5.3 災害時情報共有サービス

車載機の Wi-Fi インタフェースの状態遷移を図 5.4 に示す。Wi-Fi Direct (Wi-Fi P2P Technical Specification) [114]の Group Owner 選出機能により、初期状態の車載機の集団の中から 1 台が基地局 (AP) となり、残りの車両は端末 (STA) となって、基地局と接続する。基地局の機能を持つ車載機をリーダー、端末をメンバ、接続するリーダーとメンバの集団をグループと呼ぶ。ユーザ端末はリーダーに接続して、ブラウザを利用してウェブベースのサービスを受けることができる。メンバは定期的にリーダーとの接続を解除して、固定網アクセスポイント (ネット AP と呼ぶ) を探索し、発見した場合は接続して保有情報をアップロードする。

電波干渉を軽減するため、グループ内では図 5.5 のようにサイクルで管理されたメッセージ送信を行う。リーダーは接続中のメンバを把握しており、それぞれの送信タイミングを決定して、各サイクルの初めにブロードキャストで指示する。メンバはリーダーから指示された順でブロードキャストを行う。ブロードキャストには、グループに提供するメッセージ情報の他に、車載機が保有する情報から生成した Bloom Filter をサマリ情報として含む。これらのサマリ情報によって、他の車両が保有しないメッセージ情報が明らかになるため、それらを優先して送ることができる。この通信の効率化によって、情報伝搬の速度向上が期待できる。

車載機は、データベースの空きがない状態で、自身の保有しない新しいメッセージを受信した場合は、受信メッセージと保有するメッセージの中からランダムに 1 件選択して削除する。これは、容量超過時も車庫間で分散して情報を保有する効果を期待する。またどの車両も同一のメッセージを重複して持たない設計とする。

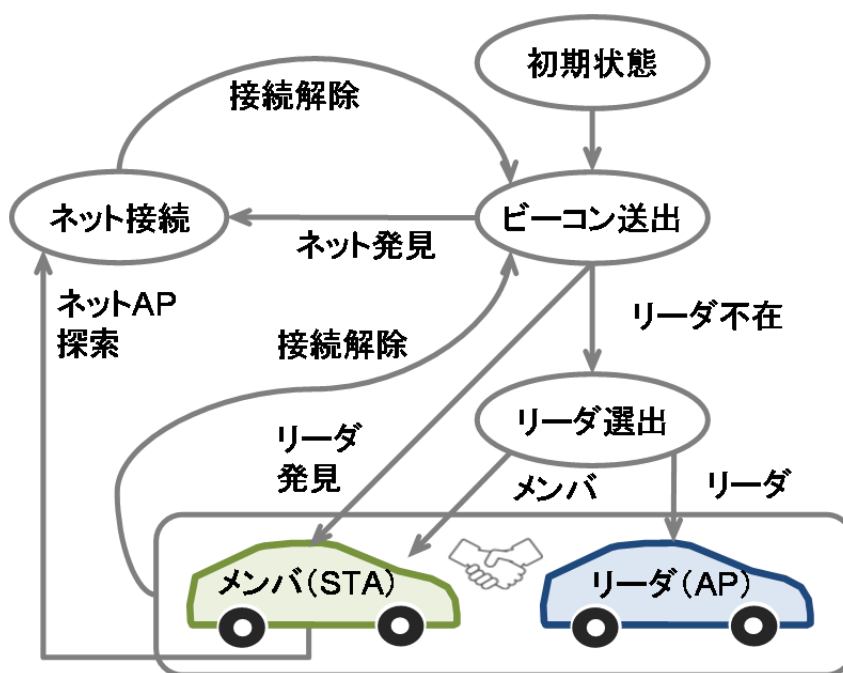


図 5.4 車載 Wi-Fi インタフェースの状態遷移

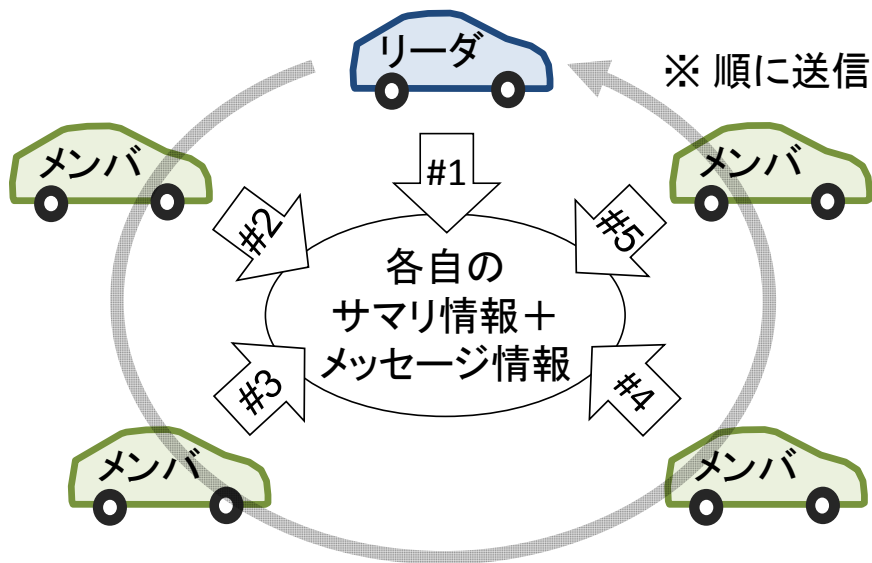


図 5.5 サイクルで管理された情報送信

#### 5.4.2 確率密度を導入したシミュレーション技術

避難所における車車間の情報共有において、相手の保有する情報を理解して伝達することの利点について、以下の 2 つのモデルを比較することで調べる。

##### (1) 単純モデル

自身の保有するメッセージからランダムに選択して送信。

但し、一度送信したメッセージは一定時間選択しない。（再送を一定時間抑制する。）

##### (2) 効率モデル

他の車両が保有していないメッセージの中からランダムに選択する。再送抑制も同様に行う。

ここで Bloom Filter は保有していない情報を保有しているとする偽陽性の発生が分かっているが、情報量に対して十分なビット長を確保すれば無視できる程度に発生が小さくなることが分かっている [115]。本論文では十分なビット長を確保できているものと仮定し、Bloom Filter そのものの効果的な運用方法は今後の課題とする。

情報の伝搬性能を評価するシミュレーションモデルについて説明する。避難所をノード、避難所間を結ぶ道路をリンクとする格子状のネットワーク構造を持ち、時系列のシミュレーションを行う。車両間のメッセージは、ノード内においてのみ送受信し（ノード内通信）、リンク上では行わない。そして車両が移動することでメッセージがノード間を移動する（ノード間移動）。1 タイムステップでノード内通信とノード間移動を順番に計算する。評価の対象は車両ではなくメッセージの伝搬であることから、メッセージを ID で管理して区別可能とする。一方で車両は区別せず、ノード内の存在数やノード間の移動量で表現する。

つまりノード内通信やノード間移動は、ノード内のメッセージの総数や種類数、車両数などをパラメータに含む確率モデルによって計算される。ここでノード内通信について、メッセージは病原菌と

異なり複数の品種が存在する、また車両の記憶容量には限界があるなど、既存の感染問題の数式モデルを適用することはできない。したがって、数式モデルの代わりに、想定される全てのパタンのノード内通信結果（感染数ヒストグラム）を予め計算し、時系列シミュレーション中ではその結果をテーブル参照した。この計算を事前シミュレーションと呼ぶ。これらのイメージを図 5.6 に示す。

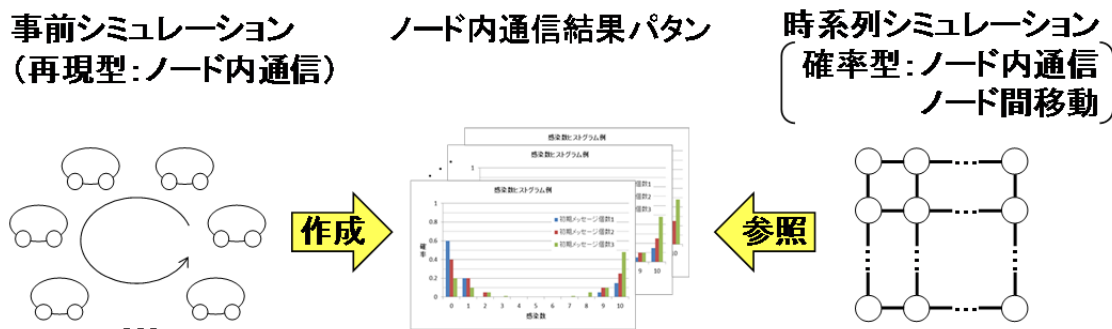


図 5.6 シミュレーションモデル

### 5.4.3 事前シミュレーション

事前シミュレーションでは、指定された時間（5分）内で各車両がブロードキャスト通信を繰り返し、避難所内に存在するメッセージ種類別のメッセージ数の変化を計算する。車両はメッセージを重複して持たないため、避難所内に存在する同種のメッセージ数の上限は、避難所内に存在する車両台数となる。ここで簡単のために、避難所内の全ての車両は互いに通信可能な範囲に存在すると仮定している。図 5.7 のようなノード内通信結果パターンを求める。

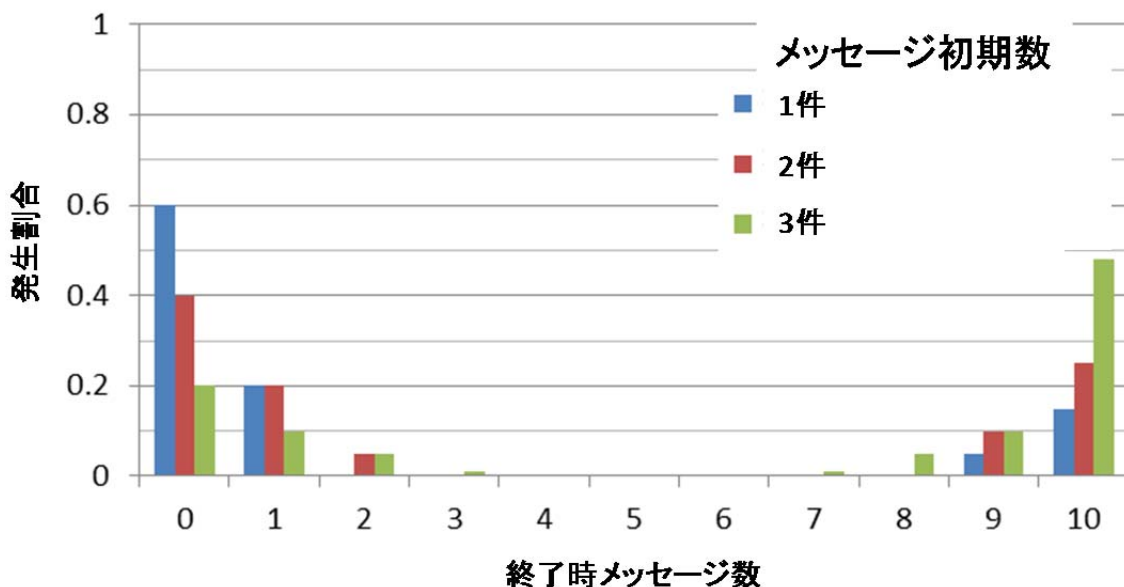


図 5.7 ノード内通信結果パタンの例

横軸はノード内通信結果としてのメッセージ数であり、縦軸はその発生割合となる。複数の系列が存在するが、これは開始時に避難所に存在していたメッセージ数（メッセージ初期数）、つまりその

## 第 5 章 車車間通信による災害時情報共有の効果

メッセージを持っていた車両数であり、これもパラメータの一つとなっている。図 5.7 の例では、メッセージ初期数の少ないものが消滅し、多いものが支配的になるようなイメージとなる。このような状況は各車両の保有するメッセージ量が飽和状態であるような場合に発生すると考えられる。時系列シミュレーションからは 4 つのキー、車両数、メッセージ初期数、メッセージ種類数、メッセージ総数でノード通信結果パターンを参照する。この参照キーの組合せの数だけパターンが用意されるが、自明なケースの除外や刻み幅の間の線形補間によってパターン数を抑える。除外される自明なケースには、メッセージの感染が完了する場合、メッセージコピーがほとんど進まないケース、現実には起こり得ないケースが含まれる。

事前シミュレーションの動作フローを図 5.8 に示す。図中の A, B, C は紙面の都合上、それぞれのつながりを表す。事前シミュレーションでは新たなメッセージの発生はなく、車両数も変化しない。繰り返しの説明になるが、車両は同一のメッセージを複数持たない。送信メッセージの選択方法について、前述の単純モデルと効率モデルの 2 方式から選択可能とする。メッセージ送信では無線通信の到達率の設定が可能であり、受信車両数を到達率で計算する。車両の保有できるメッセージ数には上限値があり、上限値に達した場合は、新規のメッセージを受け入れる際に、受け入れる件数分、保有するメッセージからランダムに選択して削除する。

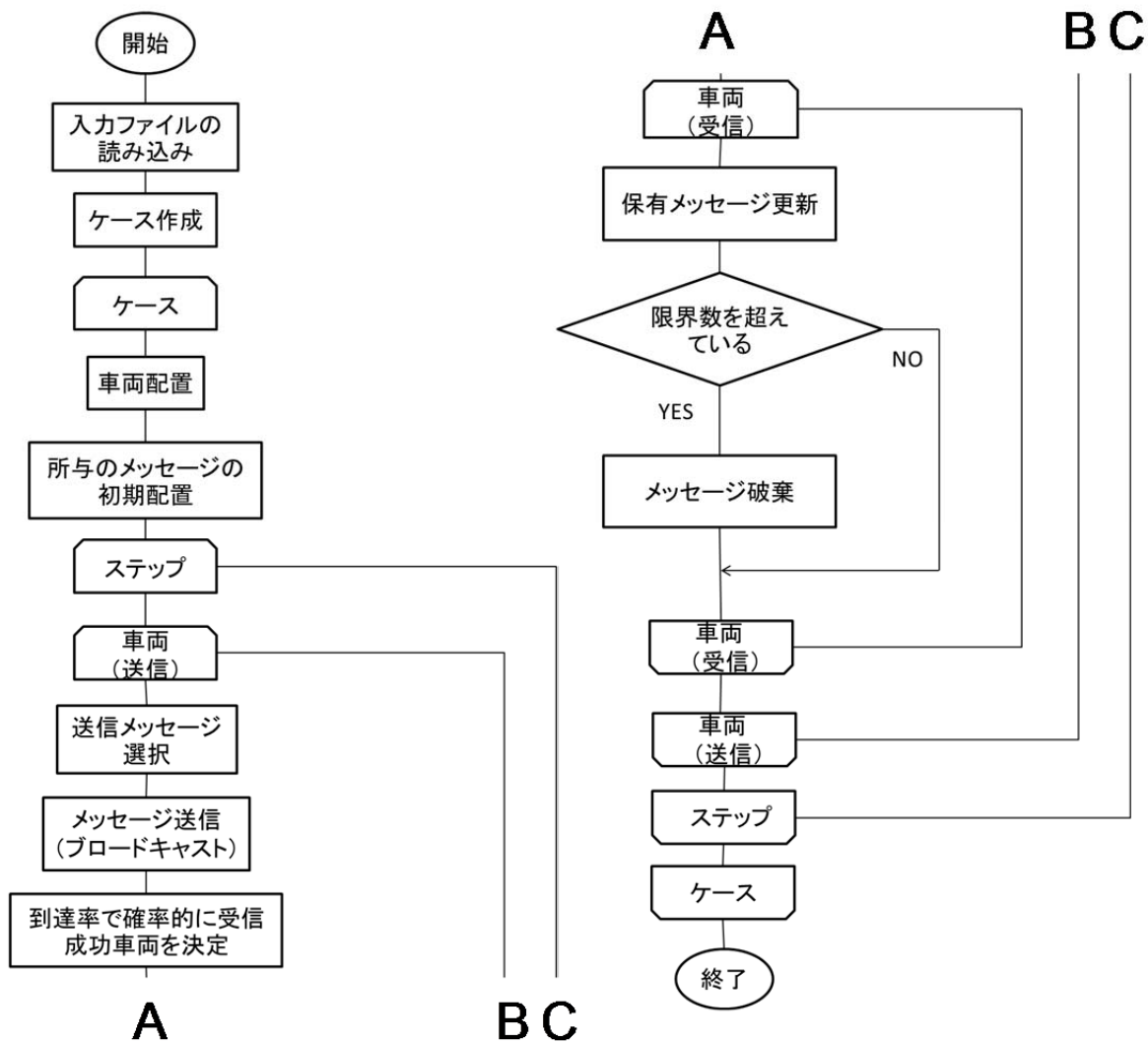


図 5.8 事前シミュレーションの動作フロー

#### 5.4.4 時系列シミュレーション

事前シミュレーションの結果を用いて、メッセージが伝搬する様子を調べる。特に次のような指標を調べる。

- 個別のメッセージに着目した伝搬ヒートマップ
- シミュレーションエリア内に存在する総メッセージ数の時系列変化

時系列シミュレーションの動作フローを図 5.9 に示す。図中の D, E, F はつながりを表す。シミュレーションでは、タイムステップ毎にノード内通信とノード間移動を順番に実行する。ノード内通信では各ノードでのメッセージ数の変化量を、メッセージの発生量やノード内通信結果パターンに基づいて決定する。メッセージの発生は、所定の単位時間当たりの発生量に従い、確率的に発生する（ポワソン発生）。ノード間通信では隣接ノードへのメッセージの移動量を決定する。ここで車両は個別に扱わず、数量として扱う。1 タイムステップで移動する距離は隣接する 1 ノード分とする。移動するメッセージは、ノード内の車両数、当該メッセージを保有する車両数、車両の移動割合から確率的に選択される。車両数  $N$ 、メッセージ ID= $i$  を保有する車両数  $n_i$ 、車両の移動割合  $p$  の場合、車両移動時にメッセージが移動する確率  $p_i$  は式 5.2 の通りとなる。

式 5.2 
$$p_i = \frac{n_i p}{N}$$

各ノードには最低でも 1 台の車両が残るものとし、メッセージ発生を取りこぼしが無いものとする。ノードに到着した車両が保有するメッセージは、ノードのデータベースサーバに記録される。なお、ネットワークの外周は閉じており、ネットワークの辺縁で車両もメッセージも消滅しないものとする。



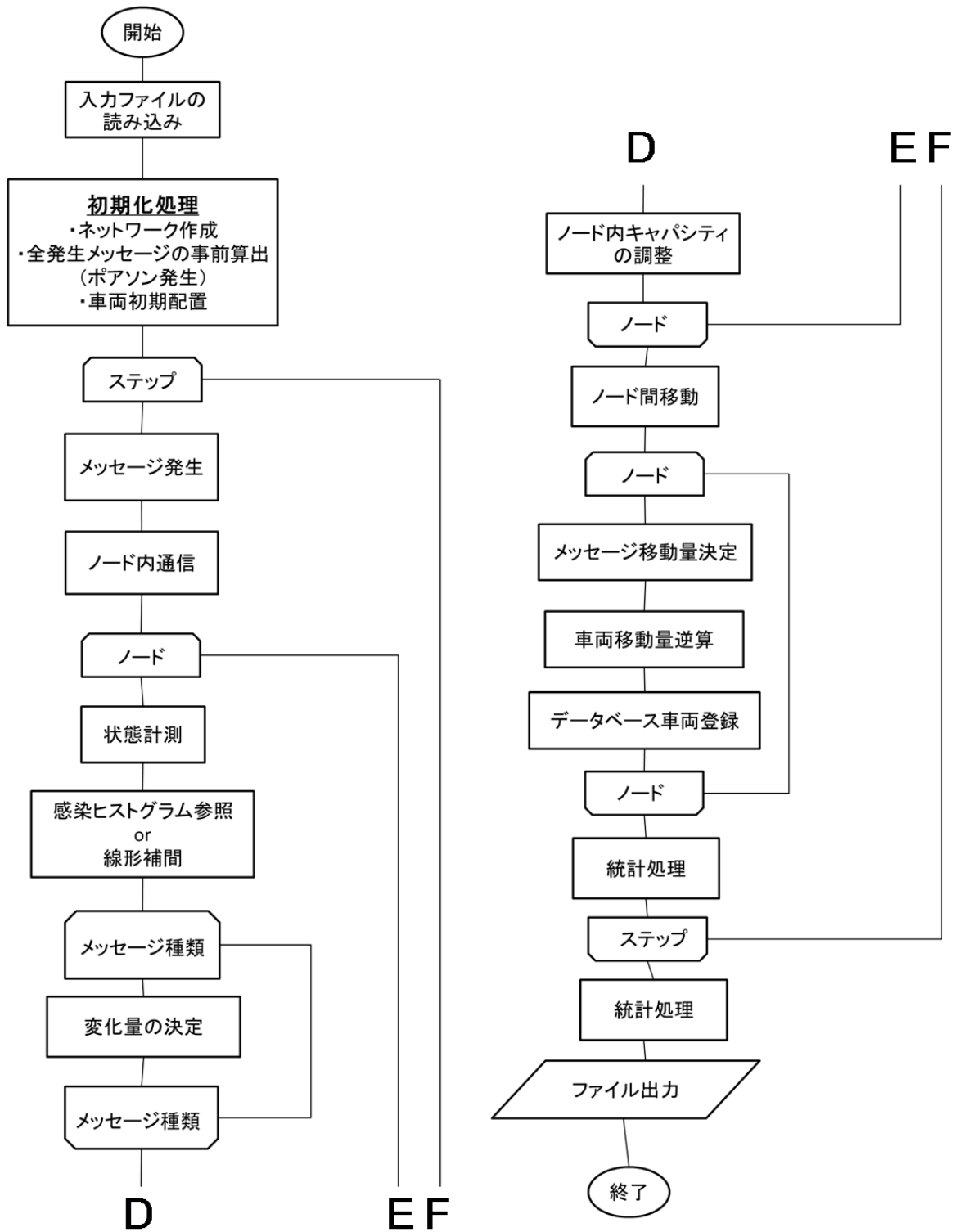


図 5.9 時系列シミュレーションの動作フロー

## 5.5 シミュレーション評価

### 5.5.1 車車間通信に関する実験条件

車車間通信に関する実験条件は次のようにまとめられる。イメージを図 5.10 に示す。

- ① 避難所にいる車両同士は無線の到達範囲内で一律到達率 80%  
電波伝搬（減衰，干渉，遮蔽など）の計算は行わない
- ② 車車間通信は道路上（リンク上）で行わない
- ③ 避難所間で，電波は到達しない

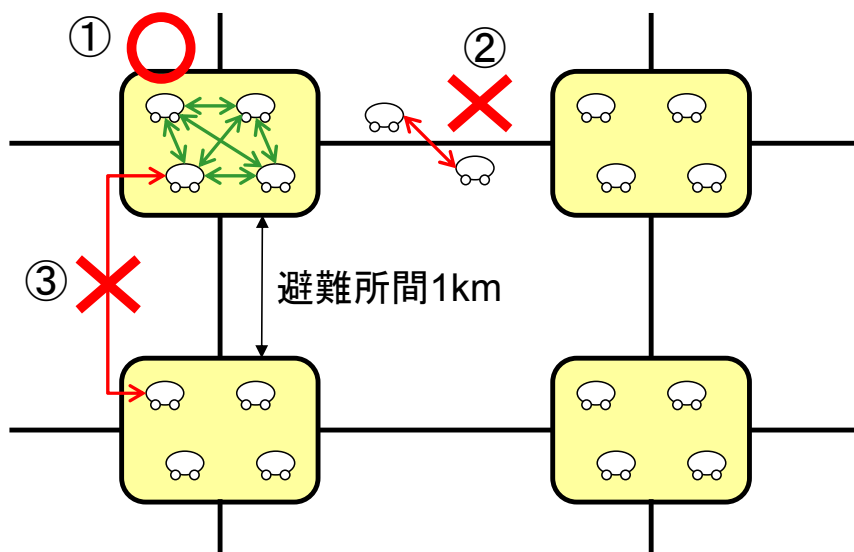


図 5.10 車車間通信の実験条件

実験条件①の現実性について述べる。一般的に入手可能な IEEE802.11n の無線 LAN 製品の測定値 [116]によれば，開空間において，通信距離 0m の際に 100Mbps 強であり，線形に減少し 80m で 60Mbps となる。今回のシミュレーションでは，避難所内のシステム搭載車両は高々 120 台であり，図 5.11 のようにまとめて駐車すれば，通信距離は最大で 84m 程度となる。平均 80Mbps として，電波の減衰を無視することはそれほど現実とかけ離れていないと考える。電波の干渉については一律到達率 80%で計算している。車両一台当たりの送信レート 2.4Mbps，車両 120 台という最大要求のケースでは，単純計算で 288Mbps の容量が必要となる。通信距離 80m とした場合，80Mbps の容量を得ることが出来，2.4GHz 帯で 3 チャンネル利用できるため，単純計算で 240Mbps の容量が利用可能である。したがって，制約 240Mbps/要件 288Mbps の計算により，最大要求の場合でも 80%程度の到達率を得ることができ，一律到達率 80%の前提は現実的な範囲と考える。電波の遮蔽の影響を考慮しない点については，屋外の駐車場は開空間であるというのは現実的に無理のない想定である。

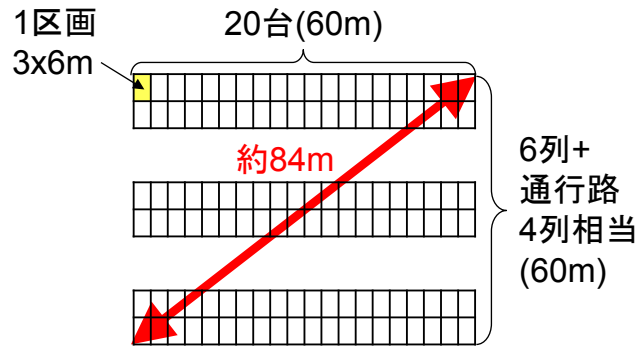


図 5.11 避難所における車両 120 台の駐車例

条件②について、同じ方向に走行する車両や交差点で停車中の車両の間で、現実的に通信は可能であるが、本評価ではこれらの通信を除いていることから、現実よりも厳しい結果が得られると考えられる。都市固有の交通状況の考慮は本研究の対象外としており、道路上での情報共有も同様に対象外とする。条件③については、前述の無線 LAN 製品でも 300m を超えたあたりで通信が不能となることから、問題ないと考えられる。

### 5.5.2 シミュレーションの設定値

このシミュレーションモデルについて、基本パラメータを次のように設定する。シミュレーションエリアを都心から 1 時間程度の通勤圏を想定した 50km 四方の領域とする。但し、人口、登録車両数、避難所数の統計はまとまった情報が得られやすいことから東京都の公表値を参考とする。ノードとなる避難所は 1km 間隔、合計 2500 箇所を格子状に配置する。小学校等の身近な大型公共施設へ徒歩 10 分程度で到達できる感覚から、このような密度とした。東京都の避難所の数はおよそ 2900 箇所 [117] ということで、現実的な密度であると考ええる。時系列シミュレーションは 1 日 18 時間の活動とし、タイムステップを 5 分間隔とする。車両が 1km のノード間を移動するおおよその時間から、このような時間間隔とした。メッセージの発生量は、1 週間で 4500 万件とする。東京都の人口約 1350 万人のうち、1/3 の人が 1 週間に 10 回発信する量として概算した。毎日 640 万件のメッセージが避難所に等分されて、ポワソン分布で発生するものとする。1 タイムステップ 5 分間で、ひとつの避難所でのメッセージ発生量はおよそ 12 件となる。東京都の登録車両数約 300 万台のうち、車載機を保有して災害対応可能な車両数を 20 万台とする。5 年後の実用化を想定して 7% 程度の普及を見込んだ。避難所は 2500 箇所存在するため、各避難所には災害対応車両が平均で 80 台程度存在することが期待できる。避難所から移動する車両の割合は日毎に増加する。開始時を 30% とし、日ごとに線形増加して 5 日目以降は 75% で固定とする。車両の記憶容量は 300 万件のメッセージを保持できるものとする。1 メッセージ 300 バイトとすると、だいたい 1GB の記憶領域を利用するものとする。なお、車両は同一のメッセージを重複して保有しないものとする。シミュレーションの設定項目と設定値はそれぞれ表 5.1、表 5.2 の通りとなる。

事前シミュレーションによって作成された感染数ヒストグラムのパターン数は設定値によって異なる。一例として、メッセージ送信数 20 件/回、記憶上限数 300 万件の場合の参照キーの組合せを表 5.3

第 5 章 車車間通信による災害時情報共有の効果

に示す。この場合 411,514 通りとなる。メッセージ種類数やメッセージ総数の刻みには幅があるが、結果を線形補間して使用するものとする。

時系列シミュレーションの結果、ノード内車両数の発生割合は図 5.12 のグラフの通りとなる。したがって、計算量削減のために車両数 40~120 台のパタンを求め、40 台以下のケースでは 40 台、120 台以上のケースでは 120 台の結果を使用するものとする。

表 5.1 事前シミュレーションの設定項目と設定値

分類	項目	設定値	備考
基本条件	試行回数	500 回	
	計算対象時間	300 秒	
送信	送信間隔	0.2 秒	
	メッセージ送信数	20 件/回 200 件/回	スループットはそれぞれ 240kbps, 2.4Mbps 相当.
	再送抑制時間	300 秒	
車両	車両数	40~120 台	
	メッセージ記憶上限数	300 万件 600 万件	データ量はそれぞれ 1GB, 2GB 相当.
	パケット到達率	80%	

表 5.2 時系列シミュレーションの設定項目と設定値

分類	項目	設定値	備考
基本条件	シミュレーション時間	3024	14 日分 1 日 18 時間, 1 ステップ 5 分
ノード	ノード数 (行数)	50	
	ノード数 (列数)	50	
	外周部幅	2	
	初期車両配置数	80 台	避難所に 200 台, 普及率 40%
	初期移動割合	0.0014	30%
	移動割合最大値	0.0035	75%
	移動割合変化最終ステップ	1081	5 日目以降は一定
メッセージ	メッセージ発生量	640 万件/日	ランダムなノードに ポワソン発生
車両	メッセージ記憶上限数	300 万件 600 万件	
	ノード内車両数上限	160 台	

表 5.3 参照キーの組合せ例

項目	設定内容			
送信数	20 (=S)			
記憶上限数	300 万 (=L)			
車両数	40		N	120
メッセージ 種類数	15,000	...	$\alpha \times 2^0$	15,000
	30,000		$(\alpha=S \times 750)$	30,000
	60,000		$\alpha \times 2^1$	60,000
	:		:	:
	$15,000 \times 2^{12}$		$\alpha \times 2^m$	$15,000 \times 2^{14}$
	$3,000,000 \times 40$		$L \times N$	$3,000,000 \times 120$
メッセージ 総数	15,000	...	$\alpha \times 2^0$	15,000
	30,000		$(\alpha=S \times 750)$	30,000
	60,000		$\alpha \times 2^1$	60,000
	:		:	:
	$15,000 \times 2^{12}$		$\alpha \times 2^m$	$15,000 \times 2^{14}$
	$3,000,000 \times 40$		$L \times N$	$3,000,000 \times 120$
メッセージ 初期数	1		1	1
	2		2	2
	:		:	:
	40		N	120

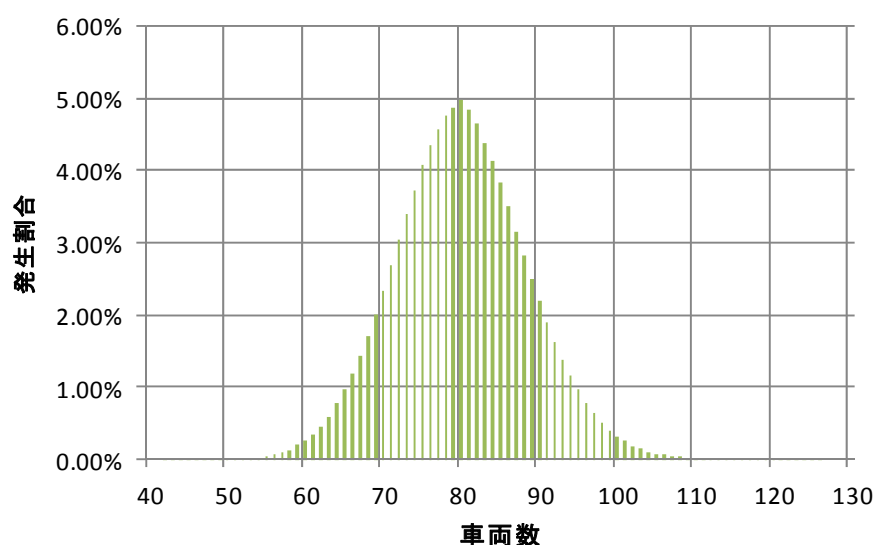


図 5.12 ノード内車両数の発生割合

5.5.3 提案方式の情報共有の効率化に関する評価

5.5.3.1 メッセージの伝搬ヒートマップ

中心付近の座標(26, 26), 開始直後のタイムステップ 32 で発生したメッセージ ID5047 を追跡し, ノードに初めて到達した日数を, 図 5.13 のようにヒートマップで示す. メッセージ毎に伝搬の様子を追跡することができ, 通信量の増加, 及び効率化によって伝搬速度が増加する様子や, 記憶容量の増加によって伝搬範囲が拡大する様子が確認できる. 0.2 秒毎に 200 件送信, 300 万件記憶のケースに着目すると, 単純手法の場合, 半域のエリアに 1 週間程度で伝達しているが, 効率手法の場合, ほぼ全域に 3 日程度で伝達することができることが分かる.

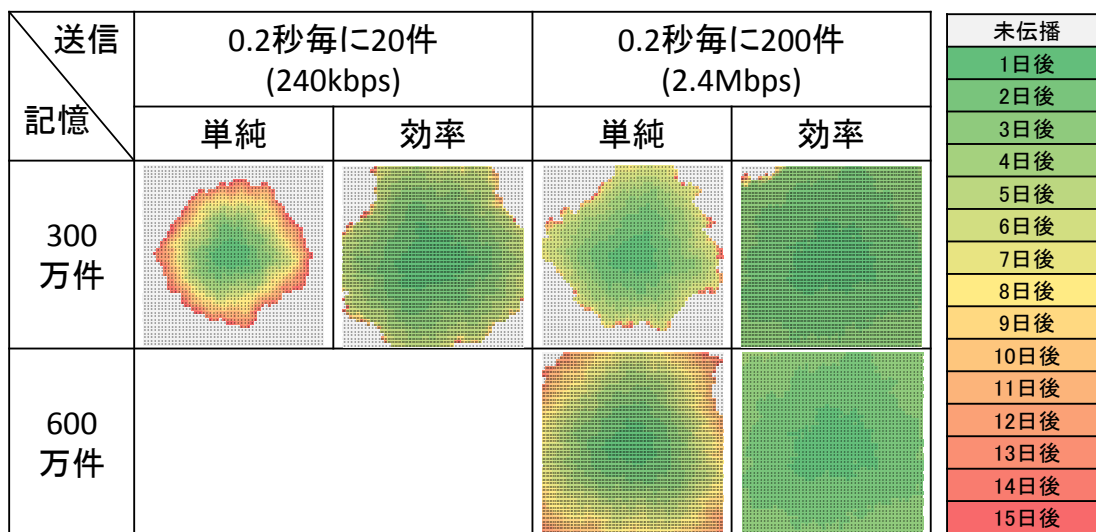


図 5.13 メッセージ ID5047 の伝搬の時間推移

図 5.13 のヒートマップでは全体の伝搬傾向を視覚的に理解することができるが, 定量的な比較は困難である. そこで, シミュレーションエリアに存在する総メッセージ数の時間変化も調べることで伝搬速度や伝搬範囲について考察する. 図 5.14 はその結果であり, 実線は効率モデル, 点線は単純モデルの推移を表す. 50×50 のシミュレーションエリアに加えて, 2 マス分の外周部のノードもカウントしているため, 実際には 52×52 のシミュレーションエリアで行った結果となっており, 車両やメッセージ数もその分増加している. いずれのグラフも単調増加を示し, やがて一定値に収束する様子が確認できる. 表 5.4 は図 5.14 の総メッセージ数が一定値に収束する日数を整理したものである.

図 5.14 の結果から, どの状態においても効率モデルは単純モデルの倍以上の速さで情報が伝搬することが分かり, 通信効率化の効果が確認できた. 図 5.13 のヒートマップと併せて考えると, 総メッセージ数が一定値に収束する日数でメッセージの伝搬が停滞する様子が分かる. 例えば, 送信数 200 件, 記憶上限数 300 万件, 単純モデルの場合, 約 7 日目には総メッセージ数が頭打ちになることが図 5.14 から読み取れる. 図 5.13 のヒートマップでも 8 日目以降の伝搬が停滞している様子が分かる. これは記憶容量が飽和し, メッセージの破棄が始まった結果と考えられる. また同じく図 5.14 の結果から, 記憶容量を 300 万件から倍の 600 万件に増加させると, 総メッセージ数の収束値も倍の値となることが分かった. 例えば, 送信数 200 件, 記憶上限数 600 万件, 単純モデルの場合, 約 12 日目

には総メッセージ数が頭打ちになるが、図 5.13 のヒートマップでも 13 日以降の伝搬が停滞している。したがって、継続的に伝搬範囲を拡大するためには、情報の分散配置を含む記憶の効率化が必要と考えられる。

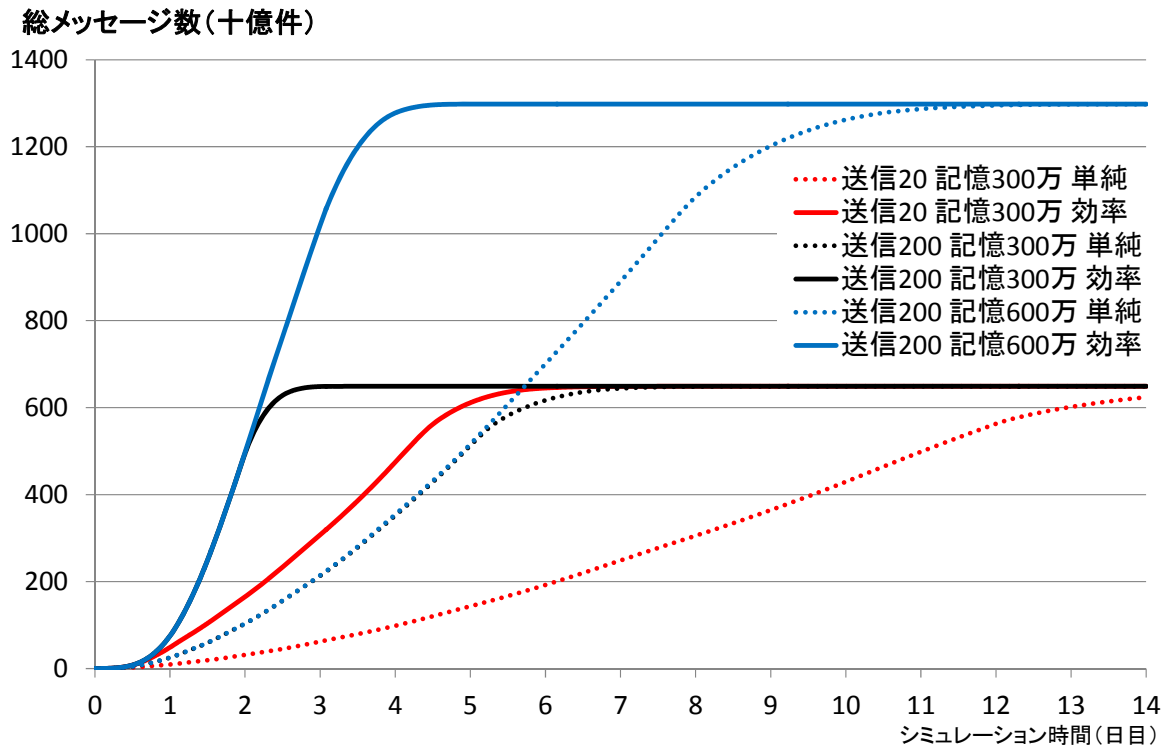


図 5.14 総メッセージ数の時間推移

表 5.4 総メッセージ数の増加が収束する日数

	送信		0.2 秒毎に 200 件	
	0.2 秒毎に 20 件		単純	提案
記憶	単純	提案	単純	提案
300 万件	14 日以上	約 6 日	約 7 日	約 3 日
600 万件			約 12 日	約 4 日

### 5.5.3.2 シミュレーション実行時間

シミュレーションには、クラウド上の共用計算機である Amazon Web Service を 40 台程度使用しており、スペックは CPU : Intel Xeon 2.5GHz, メモリ : 16GB, 記憶容量 : 210GB となる。事前シミュレーションと時系列シミュレーションの計算時間は表 5.5 の通りであった。例えば 0.2 秒毎に 200 件送信し、車載記憶容量が 600 万件の場合、事前シミュレーションに 10167 時間 (約 423 日)、時

## 第 5 章 車車間通信による災害時情報共有の効果

系列シミュレーションに 609 時間（約 25 日）を要した。しかし、事前シミュレーションの参照キーの各ケースは独立した計算となるため、複数のサーバで並列計算を行うことが可能である 40 台のサーバを使用することによって、約 11 日の計算時間で終わらせることができた。一方、時系列シミュレーションは並列計算が行えないため、1 台のサーバで実施しており約 25 日、全部で 1 カ月強の日数を要した。

表 5.5 事前・時系列シミュレーションの計算時間

記憶		送信		0.2 秒毎に 20 件		0.2 秒毎に 200 件	
		単純	効率	単純	効率		
300 万件	事前	120	2400	720	4167		
	時系列	74	306	127	463		
600 万件	事前			1500	10167		
	時系列			480	609		

単位：[時間]

共用計算機であるため、ここでは計算時間に関する厳密な考察は行わない。この結果で主張したいことは次の通りである。このように全体的には多くの計算時間を要するシミュレーションであっても、局所的な感染については予め並列計算を行ってテーブルを作成し、大局的な伝搬のエージェントモデルにおいてテーブルを参照することによって、1 台の計算機による連続的な計算時間を減らして実用的な時間で解を求めることが可能とであることを示した。クラウド上の計算機は望みの台数・時間だけ、比較的安価に利用可能となっており、これらを活用したシミュレーションにおいて、局所的な並列計算と大局的な時系列計算をハイブリッドに組み合わせる手法は有用であると考えられる。

### 5.5.4 シミュレーションの妥当性に関する考察

提案手法は、ノード内通信の事前シミュレーションにおいて、従来の車車間通信と同様に 2 つの無線機間におけるパケットごとの通信成否を計算する。提案手法と従来の車車間通信のシミュレーションの大きな違いはシミュレーションの規模であり、提案手法は避難所内という空間に限定されている点である。簡単のため避難所内において全ての車両間は通信距離内として、通信距離の考慮を省略した。もちろん、避難所に車両を適当に配置して詳細なシミュレーションを行うことも可能であるが、それでも前述の車両数は最大で 120 台、5 分の規模のシミュレーションであり、計算機の台数を増やせば実用的な時間で実行可能であると考えられる。シミュレーションの実行を実用的な時間に収めることができたのは、通信シミュレーションを簡略化したためだけでなく、以下の 4 つの新しい設定による。

- 通信シミュレーションの規模を避難所に限定



- 通信シミュレーションの様々な結果パターンを事前に並列計算し、時系列シミュレーションのノード内通信では通信結果パターンを参照
- 通信シミュレーションのパターンを指数関数的に増加するパラメータに限定し、中間的なパラメータについては結果を線形補間して利用することで、パターン数を削減
- 時系列シミュレーションではメッセージの移動を車両数とメッセージ数から確率的に計算し、車両を個別に取り扱わない。

この工夫によって、車両は個別の状態を持たず、量として扱われるため、車両と特定した追跡できない。しかし、メッセージは個別に扱われるため、伝搬の様子は追跡可能である。これらの設定の妥当性について、順に考察する、

#### 5.5.4.1 時系列シミュレーションから事前シミュレーションを分離する妥当性

本来はすべて時系列シミュレーションで行い、ノード内通信（避難所内の車車間通信）とノード間移動（避難所間の車両による情報運搬）のシミュレーションを交互に実施する。ノード内通信のタイミングでは全てのノード（避難所）において一斉に通信のシミュレーションを行い、ノード間移動のタイミングではすべてのノード間のメッセージ移動のシミュレーションを行う。i) 避難所間で電波は到達しない、ii) 車車間通信は道路上（リンク上）で行わない、iii) ノード内通信のシミュレーション中は車両の移動を行わないという3つの条件により、ノード内通信のシミュレーションは、ノード間で車両数やメッセージ数に影響を及ぼすことのない独立した系として取り扱ったとしても、シミュレーションと実際の通信に差異が生じないとみなすことができると考えられる。

すべてのノードで同一の方式であることも併せて考えると、このノード内通信を事前シミュレーションに分離することが考えられる。事前にノード内通信のシミュレーションを行い、取りうる全ての状態に対する結果を作り置きする。時系列シミュレーションの際には、各ノードで個別にノード内通信をシミュレーションして結果を求める代わりに、それぞれの状態をキーにして事前シミュレーションで求めた結果を参照することを考える。つまり、時系列シミュレーションの中で結果を求めるか、事前に求めた結果を時系列シミュレーションで参照するかの違いであり、事前シミュレーションに分離しただけで結果が変わることはない。このことから、事前シミュレーションの分離は妥当と考える。

#### 5.5.4.2 避難所内通信と避難所間移動を交互に計算することの妥当性

従来の車車間通信のシミュレーションにおいても離散時間で通信と移動を交互に計算するため、この点では本研究で新しい提案をしているわけではない。避難所間 1km を車両が移動する距離として 5 分程度要するというので、5 分間隔の交互計算となっている。仮にこれを 1 分間隔にした場合は、確率的に車両の移動量が 5 分の 1 となる。事前シミュレーションの時間は 5 分の 1 に減少し、時系列シミュレーションは 5 倍に増加することが考えられる。時間分解能の変化に対する、解の精度の変化量の特性評価は今後の課題とする。

#### 5.5.4.3 避難所内でメッセージの共有を確率的に計算することの妥当性

本シミュレーションでは取りうる全ての状態に対する通信結果パターンを求める代わりに、メッセージ種類数とメッセージ総数を 15000 件の 2 倍ずつ増やした値に限定した状態に対するパターンを求め、

## 第5章 車車間通信による災害時情報共有の効果

中間の値で参照する場合は結果の線形補間を行う。この線形補間の妥当性について、表 5.6 の設定で検証を行う。シミュレーションの開始時にメッセージ ID 0 を保有する車両数が 1 台、5 台、9 台、10 台の場合で、終了時に 10 台となる割合を調べた。

表 5.6 事前シミュレーションの設定項目と設定値

分類	項目	設定値
基本条件	試行回数	500
	計算対象時間	300 秒
送信	送信間隔	0.2 秒
	メッセージ送信数	20 件/回
	再送抑制時間	300 秒
	送信方式	単純モデル
車両	車両数	10 台
	メッセージ記憶上限数	300 万件
	パケット到達率	80%

総メッセージ数≪上限値 3000 万件 (=メッセージ記憶上限数 300 万×車両数 10 台) で、メッセージ種類数を固定して総メッセージ数の変化を調べた結果が図 5.15、総メッセージ数を固定して、メッセージ種類数による変化を調べた結果が図 5.16 となる。車両は同じ種類のメッセージを複数保有しないため、メッセージは種類数≦総数≦種類数×車両数となる。種類数=総数の場合は、開始時にメッセージを保有する車両数は 1 台しか存在しない。総メッセージ数 (図 5.15)、メッセージ種類数 (図 5.16) のいずれの変化に対しても、開始時に車両 10 台がメッセージを保有する場合は、終了時も車両 10 台となることが分かった。これはメッセージが破棄されなかったことを意味する。また開始時の保有車両数 1 台、5 台、9 台のいずれに対しても単調減少の傾向を示した。総メッセージ数に対しては若干下に凸の傾向となり、総メッセージ数 18 万件、開始時にメッセージ ID=0 を保有する車両数 5 台の場合に、最大で+2.5%の誤差となる。図 5.15,図 5.16 のいずれも 30000 件の 2 の倍数のプロット (塗りつぶし点) を線形補間しても、中間のプロット (中抜き点) との顕著な差は見られず、したがって、線形補間の影響は無視できるほど小さいものと考えられる。

総メッセージ数が上限値 3000 万件付近で、同様に総メッセージ数、メッセージ種類数に対する特性を調べた結果はそれぞれ図 5.17,図 5.18 となる。開始時に車両 10 台のケースは、図 5.15,図 5.16 と同様に 100%の値を取ったため省略する。単調減少の結果、縦軸の保有割合が 10%以下まで低下したことに注意されたい。メッセージ種類数については引き続き影響がないと考えられるが、総メッセージ数の下に凸の傾向が顕著となっており、車両 9 台、総メッセージ数 18 百万件の場合に、最大で 13%増となっている。開始時に車両 9 台が保有していたメッセージが終了時に車両 10 台が保有する割合が 1.21%であるところを 1.37%とする近似であり、差はわずかな値でありこちらも影響なしとみなすことができると考えられる。

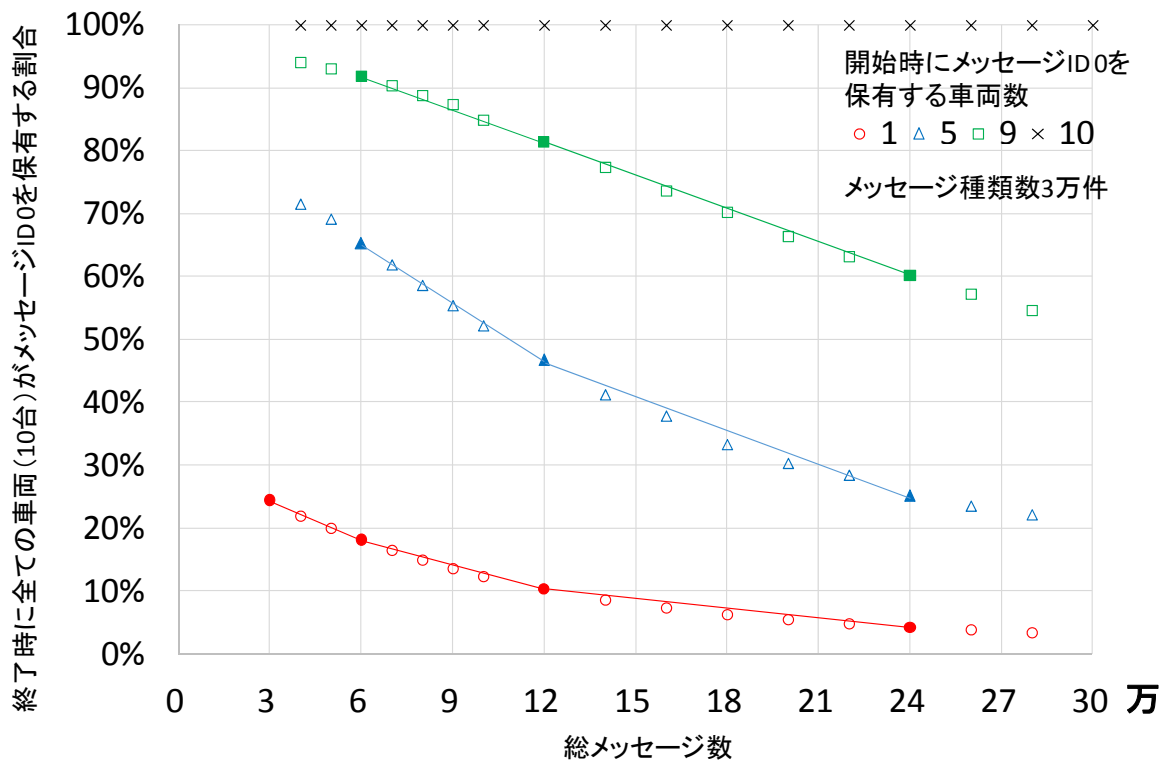


図 5.15 総メッセージ数－終了時全車両保有率のグラフ

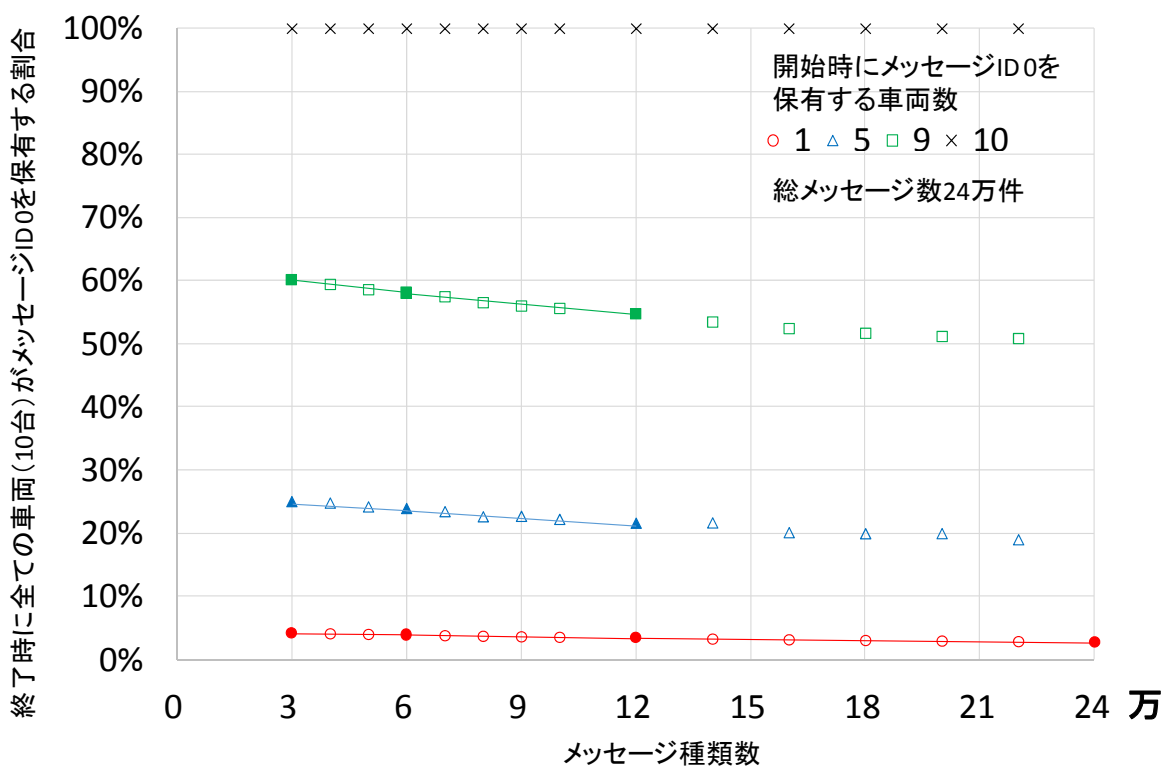


図 5.16 メッセージ種類数－終了時全車両保有率のグラフ

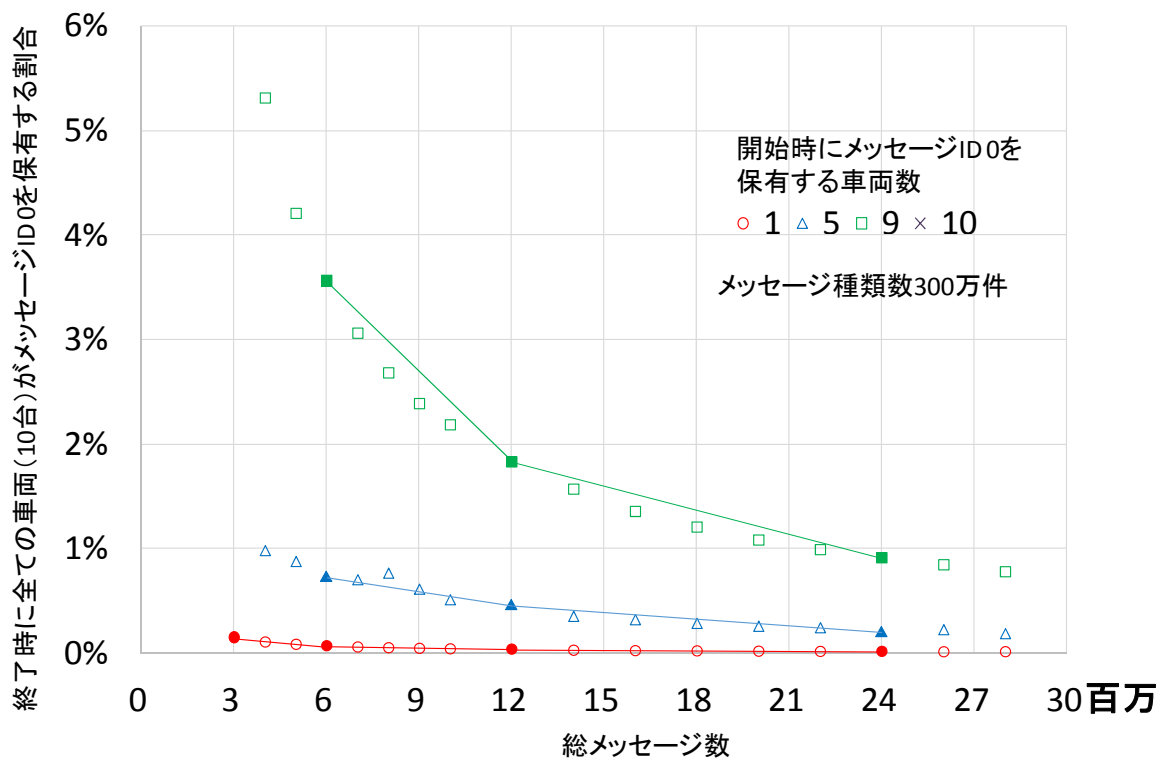


図 5.17 総メッセージ数－終了時全車両保有率のグラフ

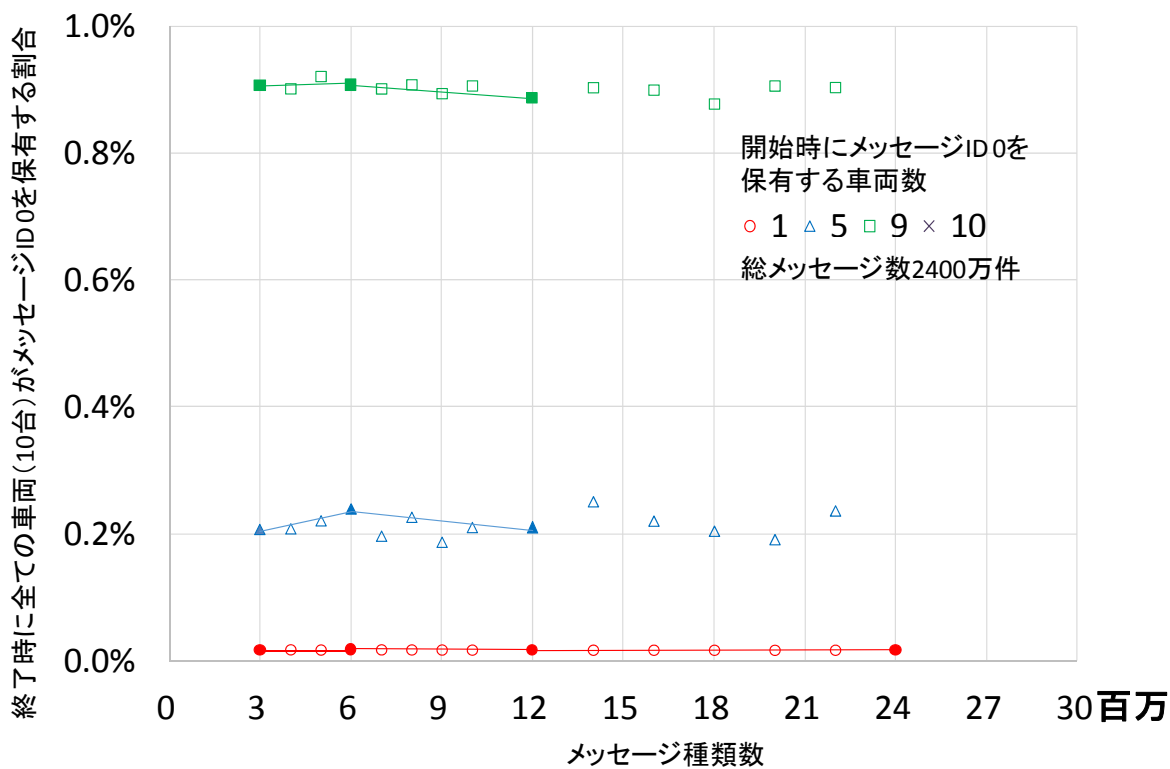


図 5.18 メッセージ種類数－終了時全車両保有率のグラフ

5.5.4.4 避難所間でメッセージの移動を確率的に計算することの妥当性

ノード内の車両数，当該メッセージを保有する車両数，車両の移動割合から，メッセージが移動する確率が式 5.2 で表現されるのは，車両が実際にメッセージを保有してノード間を移動する場合でも同じである．よって妥当であると考える．

5.5.5 シミュレーション規模に対する実行時間の推定

ノード数  $M$  と車両数  $N$  をシミュレーション規模として，実行時間の推定を行う．

まず，事前シミュレーションについて推定する．車両数  $n$  の場合の事前シミュレーションの実行時間  $T(n)$  は式 5.3 で表される．ここで， $\{T_i | i = 0 \sim 4\}$  は図 5.19 で示される各機能の一回あたり実行時間であり，機能間で大きな差はないものとする．

$$\text{式 5.3} \quad T(n) = T_0 + nT_1 + n(T_2 + nT_3 + nT_4) = O(n^2)$$

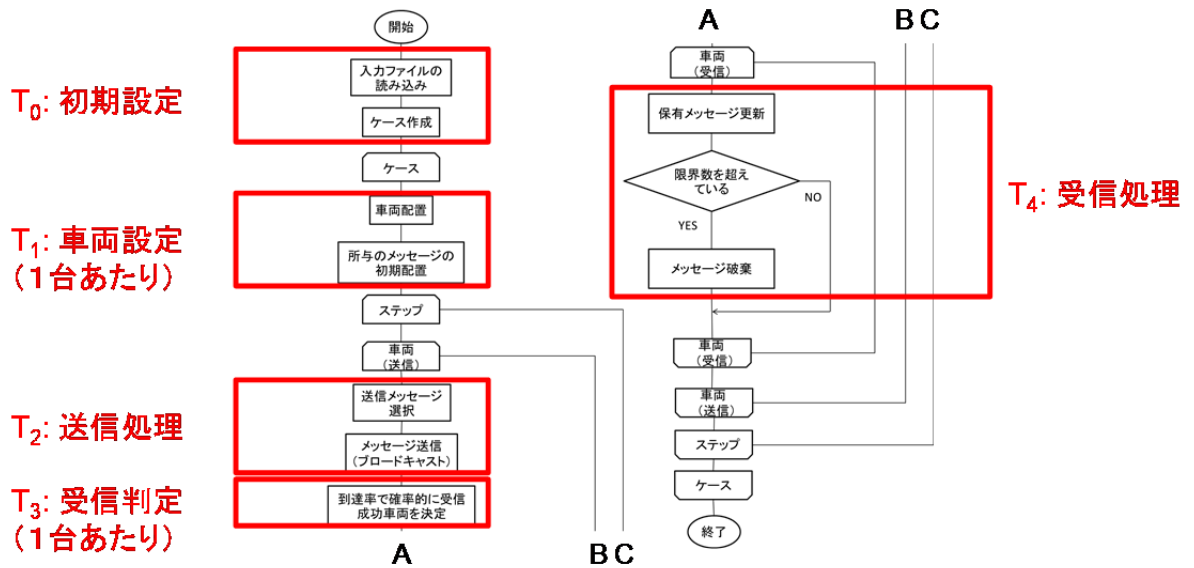


図 5.19 事前シミュレーションの動作フロー

車両数  $n$  の場合の事前シミュレーションのパタン数  $P(n)$  は表 5.3 の参照キー（車両数，メッセージ種類数，メッセージ総数，メッセージ初期数）の組み合わせとして，式 5.4 で表される

$$\text{式 5.4} \quad P(n) = 1 \times \log_2 \left( \frac{3000000}{15000} n \right) \times \log_2 \left( \frac{3000000}{15000} n \right) \times n = O(n(\log_2 n)^2)$$

シミュレーション全体の車両数  $N$  で，ノード数  $M$  の場合，ひとつのノードあたりの平均車両数  $A = N/M$  となる．ノード内車両数の発生割合は図 5.12 と同様に正規分布に従うことが考えられ，車両数  $A/2$  から  $3A/2$  までが参照キーとなる．したがって，事前シミュレーションの総パタン数の計算時間の合計は式 5.5 で求められる．事前シミュレーションの計算時間は  $O(A^4(\log_2 A)^2)$  となる．

$$\text{式 5.5} \quad \sum_{n=A/2}^{3A/2} (P(n) \times T(n)) = O(A) \times O(A(\log_2 A)^2) \times O(A^2) = O(A^4(\log_2 A)^2)$$

## 第 5 章 車車間通信による災害時情報共有の効果

時系列シミュレーションでは、車両数は単純に数量として扱われるため実行時間に影響を与えない。ノード毎に順番にノード内通信とノード間移動を計算するため、時系列シミュレーションの計算時間は  $O(M)$  となる。

このことからノード数  $M$  に対して、事前シミュレーションと時系列シミュレーションはトレードオフの関係にある。したがって、シミュレーション規模が拡大し、より広いエリアを扱うことを考えた場合でも、車両数の増加に対してノード数が同等に増加する場合、つまり車両密度が一定の場合、事前シミュレーションの時間に変化はない。時系列シミュレーションの実行時間は、ノード数に比例して増加すると考えられる。なお、本研究で想定した東京都通勤圏は、世界でも有数の過密都市である。このシナリオの計算を 1 か月程度で終えられたということは、他の車両密度の小さい都市でも、実用的な時間でシミュレーションが可能であると考えられる。

### 5.5.6 より現実的なシナリオの設計方法

提案したシミュレーション手法では、ノード間のリンクの交通量は時間ごとに設定可能である。図 5.20 はノード間のリンクの交通量の設定例である。赤坂小学校から麻布小学校へのルートは主に 3 通り存在し、交通量がそれぞれ 10 台/時、20 台/時、5 台/時であったとする。交通量データは OD データとも呼ばれ、地域に根差した交通センサスや、プローブ交通情報システムなどによって蓄積される。提案のシミュレーション手法では、合算して 35 台/時として設定することが可能である。

図 5.13 の結果の内、送信数 200 件、記憶上限数 300 万件、単純モデルの伝搬マップを同じ縮尺の地図に重ね合わせたイメージを図 5.21 に示す。新宿発のメッセージが約 1 週間で多摩川・外環道を越え、1 時間程度の通勤圏に浸透していく様子が確認できる。もちろん地図を重ね合わせただけで、今回のシナリオ設定では地図上の交通容量などの要素を一切考慮していないため、海の上まで伝搬する滑稽な図になっている。しかしシミュレータは、リンク、つまり避難所間の交通量は個別に設定可能であるため、海の上の避難所ノードを削除し、道路リンクの交通量をゼロと設定することで、海の上まで情報が展開する結果はなくなり、現実的な結果を得ることができる。

以上のことから、地域の交通状況を考慮したシミュレーションについては、交通量データを保有するステークホルダと協調して実施することが可能である。



図 5.20 ノード間のリンクの交通量の設定例

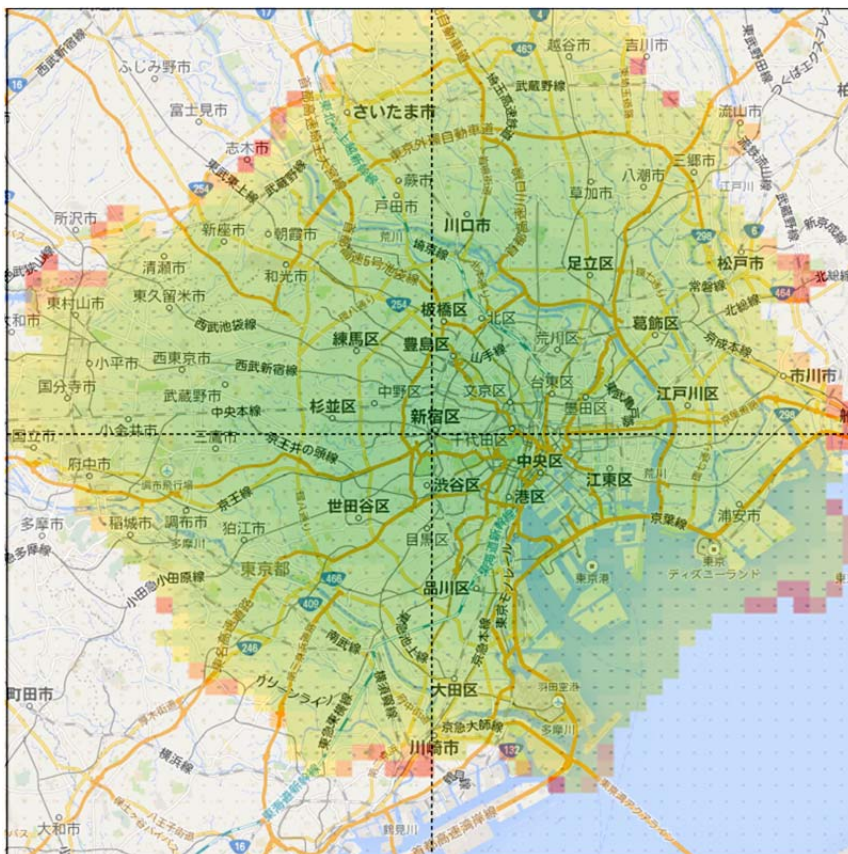


図 5.21 伝搬マップを同尺の地図に重ね合わせた様子

## 5.6 まとめと今後の課題

車車間通信による交通情報共有と同様の考え方で、災害時に車車間通信による情報共有を行い、安否情報や物資の要否に関する情報など被災者のメッセージを都市規模で拡散することを目標とし、情報共有の効率化、およびその効率化を都市規模で運用した場合の評価という課題の解決に取り組んだ。情報共有の効率化の課題に対して、車載機は自身の保有する情報から生成した **Bloom Filter** を、情報共有相手となる他の車載機へ事前に送信することにより、互いに相手の保有しない情報を把握することができ、その情報を優先的に送信する手法を考案した。都市規模で運用した場合の評価の課題とは次のようなものである。従来の自動車における無線通信のシミュレーションでは、通信可能距離内であれば 100%受信成功という大幅に簡略化されたものであっても、車両 1400 台、シミュレーション時間 45 分の計算時間は 200 時間程度となり、数十万台、数日間という都市規模の評価を実用的な時間で実行するのは困難であった。そこで、避難所における局所的な車両間の情報共有については、事前シミュレーションで様々なパターンを計算して結果のテーブルを作成し、そして大局的な評価については、避難所での情報共有はテーブルを参照し、避難所間の車両の移動に伴う情報の伝搬は確率的に行う時系列シミュレーション手法を新たに考案した。時系列シミュレーションでは、避難所をノードとするネットワークモデルとなり、ノード内の情報は個別の ID で管理を行い、車両は区別せずノード内の存在数とノード間の移動量で表現する。また事前シミュレーションのパターンも指数関数的に増加するパラメータに限定し、中間的なパラメータについては線形補間する方法を考案した。

これにより、メッセージの個別の伝搬の様子を追跡することができ、事前に相手の保有しない情報を把握できる効率モデルは、単純モデルよりも倍以上の速さで情報が伝搬する様子が確認できた。例えば、送信数 0.2 秒毎に 200 件、記憶上限数 300 万件の場合、単純モデルでは半域のエリアに 1 週間程度かかる伝達を、効率モデルはほぼ全域に 3 日で達成できた。車両の記憶容量の制約により、伝搬範囲が制限されることも分かった。

全体的には多くの計算時間を要する場合でも、局所的な並列計算と大局的な時系列計算をハイブリッドに組み合わせる手法により、複数の計算機を用いて実用的な時間で解を求められることを示した。例えば、送信数 200 件、記憶上限数 600 万件の場合、事前シミュレーション 423 日、時系列シミュレーション 25 日程度かかるが、事前シミュレーションは 40 台のサーバを並列使用することで 11 日程度の計算時間で終わらせることができ、並列計算のできない時系列シミュレーションの 25 日と合わせて、1 か月強の時間で解を求めることができた。更にシミュレーションの妥当性について考察を行い、特に事前シミュレーション結果の線形補間の誤差を調べて、影響なしと見なせることを示した。

今後の課題として、情報共有の伝搬範囲を拡大するために、通信内容を効率化するだけでなく、記憶内容も効率化することが考えられる。シミュレーションについては、道路や交通流などの交通動態の考慮などが考えられる。時系列シミュレーションにおける通信と移動の交互計算を短い時間で実施した場合の、解の精度の変化量も評価課題として残る。その他、道路上での通信の考慮、Wi-Fi Direct によるグループ編成の検証、**Bloom Filter** のオーバヘッドの検証なども考えられる。社会実装に向けて、国の重層的な災害対策のポートフォリオのひとつとして機能補完する必要がある。前述の総務省研究会の中間とりまとめ[28]では、本研究成果の効率モデルが含まれる見込みである。



## 第6章 結論

### 6.1 本研究のまとめ

本論文では、近年車両へ搭載され始めた無線機を用いた車車間通信による情報共有について研究を行った。主要な成果は、比較的簡単な手法で実用的な情報共有システムを構築可能であることを示したことである。つまり、簡単な手法の組み合わせで情報共有を効率化することによって、様々な要件や規模のアプリケーションを効果的に実現するという実用の観点からの取り組みであった。アプリケーションについては、交通容量の増加に向けた車両側の努力として、協調型隊列走行と交通情報共有に着目した。また同様の考え方で、通信インフラが利用不能になるほどの大災害発生時に、車両が被災者のメッセージを仲介する災害時情報共有についても着目した。情報共有システムの提案において用いられた手法は表 6.1 の通りとなる。

表 6.1 情報共有システムの提案において用いられた手法

	仲間とタイミングを決めて、情報をやり取り (境界条件設定)	1回の通信で複数の情報をまとめて送る (まとめ送り)	送受信した情報はしばらく送らない (重複送信抑制)	相手が持っていない情報を優先的に送る (サマリ参照)
協調型隊列走行	✓	✓		
交通情報共有		✓	✓	
災害時情報共有	(提案のみ)			✓

本研究の概要は以下の通りである。

第2章では、車車間通信のネットワーク化の基礎として、車載無線機から車車間通信によるモバイルアドホックネットワーク (MANET) に至るまでの技術を順に解説した。MANET のこれまでの研究は、通信経路の構築や情報転送に関するものであったが、車車間通信のアプリケーションで必要となる通信は主に情報共有であり、合わないことを課題として指摘。本研究のテーマを、車車間通信による情報共有の効率化に設定した経緯について述べた。

第3章では、車車間通信による協調型隊列走行の実現に向けて、通信結果に基づいて隊列を編成する課題に取り組んだ。グループやサイクルの境界条件で通信状況をまとめて把握し、通信状況の変化の際には、予め決められた単純な行動規則に基づいて、各車両が自律的に対処することで隊列を編成

## 第6章 結論

する方法を提案した。交通流シミュレータと無線通信シミュレータを統合プラットフォーム上で連携させたシミュレーションで評価を行った結果、通信結果に基づいて適切に隊列を形成し、通信混雑時には隊列長を適応的に縮小して、隊列内の通信到達率を維持する効果を確認した。またシステムの普及によって走行が改善する効果が確認できた。これらの結果に理論式を適用して、搭載率 20%で 5%程度、搭載率 40%で 3 割程度、交通容量の増加が見込めることが分かった。異なる無線機の設定値においても同様の結果が得られるという一般性や、シミュレーションの交互計算によって発生する誤差は実用観点で軽微であることから、評価の妥当性についても確認した。

第4章では、車車間通信による交通情報共有の実現に向けて、計算量を抑えて有用な交通情報を共有する課題に取り組んだ。情報のまとめ送りと重複した情報送信の抑制を組み合わせた方法を提案し、情報をランダムに選んで送るという「工夫無し」の方法、および理想的にパケットサイズの制約を無視してすべての情報を送るという「効率化限界」を示す方法と共にシミュレーション上で比較を行った。車両が保有する情報量について、工夫無しの場合に対する効率化限界の場合の増加分の 6 割程度を提案手法が獲得することが確認できた。特に発生後 2~5 分の情報に対する改善度が大きいことから、実際に有用とされる情報を多く流通させる効果を確認した。計算量については、搭載率 10%の場合で、工夫無しの場合に対する効率化限界の場合の増加分の 1 割程度に提案手法が留まり、その他の搭載率でも工夫無しの場合と提案手法が同傾向の計算量であることも確認できた。シミュレーション実行時間の差を、実際の車載機上の計算時間の差の総和の総和と見なした評価の妥当性も確認した。これにより有用な情報を供給し、経路案内のステークホルダとの協業によって交通容量の増大を達成する足がかりを作った。

第5章では、車車間通信による災害時の情報共有の実現に向けて、情報共有の効率化に取り組んだ。車載機は保有情報から生成した **Bloom Filter** を他の車載機へ送ることで、互いに相手の持たない情報が分かり、その情報を優先的に送信する方法を提案した。第4章で論じた交通情報共有よりも、桁違いに大規模に実施する必要があるため、本研究の難しさはその有効性を検証するためのシミュレーション手法の確立にあった。そこで、避難所内の車車間の情報共有は予め作成したパターンを参照し、避難所間の車両移動に伴う情報伝搬と併せて確率的に求める時系列シミュレーション手法を提案した。これにより、複数の計算機を使った並列計算が可能となり、従来手法であれば 2 万日かかるとされた計算をひと月程度の実用的な時間で求解できた。提案手法は情報伝達の速度を倍増する効果が確認できたが、継続的な伝達範囲の拡大には記憶内容の効率化も必要であることが分かった。シミュレーションの妥当性についても考察を行い、特に避難所における車車間の情報共有において、通信結果パターンを線形補間で利用する場合の誤差を調べた結果、わずかに有利に評価される傾向を明らかにした。

以上を要するに、本研究は、車車間通信による情報共有の効率化技術について、適応性や最善努力といった異なる要件を満たす理論、そして数キロメートルから大都市レベルまで異なる規模のシミュレーション評価の両面で行ったものであり、提案手法それぞれについて有効性を示した。また無線機はそのままの使用を前提とし、アプリケーション固有の要件は、表 6.1 に示すように単純な手法の組み合わせで満足できることを示しており、本研究の一般性も示した。

## 6.2 今後の本研究分野の展望

車車間通信を利用した走行制御システムは商品化に至っているが、直前を走行する車両のみと通信を行い、前方レーダの機能を補うレベルに留まっており、協調的な隊列走行と呼べるレベルには至っていない。車車間通信による協調型隊列走行の研究成果は、今後は自動走行システムのテーマの中で実用化に向けた検討が期待される。車車間通信による交通情報共有の研究成果は、自動走行システムのダイナミックマップのサブテーマ、特に准静的情報のレイヤにおいて実用化に向けた検討が期待される。交通容量の増加の実現のためには、ナビゲーションシステムや地図のメーカなど、経路案内に係る他のステークホルダとの協業が必須となる。

車車間通信による災害時情報共有の研究成果については、総務省の「非常時のアドホック通信ネットワークの活用に関する研究会」に構成員として参加し、社会実装すべき方策について協議してきた。第5章で提案した情報共有方式の良さが認められ、中間とりまとめ[28]では安否情報を伝達するユースケースにおける提案のベースとなる予定である。今後社会実装に向けて、実際の都市へ適用したシミュレーションを含む、実際の情報に即した検討や実証を予定するが、そのためには、自動車メーカや機器メーカ、システムベンダだけでなく、自治体や緊急対応機関、防災研究機関を含めた多くの関係者との連携が必須となり、総務省研究会等の枠組みにおいて強固な体制づくりが進められる。国の重層的な災害対策のポートフォリオのひとつとしての機能補完を目指したい。また日本のみならず、よく似た災害の発生する東南アジア諸国への展開も視野に置いて、アジア・太平洋電気通信標準化機関（ASTAP）へ8件の寄書で提案を行ってきた。自動車業界に対しては、2013年に東京で開催されたITS世界会議で、Wi-Fiに加えて、テレビ帯ホワイトスペースの周波数も利用した災害時情報共有システムのデモンストレーション[10]を行い、300名を超える体験者の実に9割が有用であると回答した結果を得ており、相応の手ごたえを得ている。

本研究の成果は、車とITのライフサイクルに関するギャップの解消にも寄与すると考えられる。アンテナや通信機等のハードウェアの換装は容易でないが、情報共有はソフトウェアで実装されており、書き換えによって容易に機能変更が可能である。したがって、この一般性は、アプリケーションとハードウェアの間のライフサイクルのギャップの解消にも有効と考えられる。

最後に本研究で考案したシステムの統合化に関する展望を述べる。本研究は車車間通信に焦点をあてて行われたが、車車間の疎通は直接通信以外に、無線基地局を介したもの、データセンタを介したものも存在する。また単に情報を送信するだけでなく、データセンタや固定網内エッジサーバ（無線基地局などに設置されたサーバ）、車載機において情報を処理しながら疎通を図ることも考えられる。このようなものを多段分散データ処理基盤と呼び、本論文で述べてきたような車車間通信による情報共有は、ローカルで完結する処理として、主要な構成要素の一部であると考えられる。イメージを図6.1に示す。

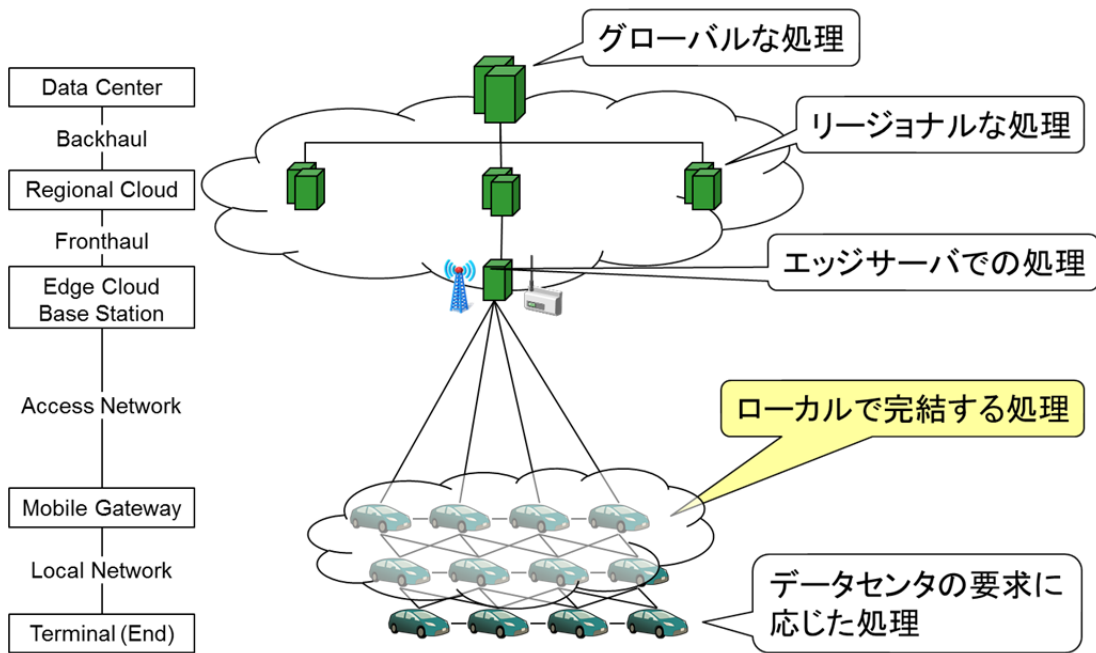


図 6.1 多段分散データ処理基盤のイメージ

将来的には、車載機単体のシステムで解決を図るのではなく、車載機・エッジサーバ・データセンタの各段において、どこで何をどの程度、通信・計算・記憶を行えば、コスト効率よく安定したサービスが実現できるのかを考える必要がある。このような配分は、サービスの要件によって変化するべきである。例えば、車両情報の収集や高精度な地図の作製や配信などは、緊急性はない代わりに膨大なデータ量を扱う必要がある。自動運転のための走行情報共有ではデータ量そのものは少ないが、緊急性がある。また実現時期によって利用できる技術や性能が変化するため、時期によっても配分を変えるべきである。このように動的なポートフォリオを意識することが大切であり、したがってセルラーがあれば車車間通信は不要であるとか、車車間通信のみであらゆる解決を目指すといった議論はあまり意味がないと考える。

インターネットや携帯電話の歴史から比べれば、いわゆるコネクティッドカーの研究は始まったばかりである。先人の努力をよく学びながら、研究開発の当事者として今後の発展をリードしたい。

## 謝辞

本論文の研究を進める中で多大なご支援を頂いた方々へ、感謝の意を表したい。

東京大学大学院工学系研究科の相田 仁教授には、忙しい時間を割いて頂き、論文内容の細部に渡る貴重なご指導を頂き、また審査に関する各種手続きで大変多くのご支援も賜った。情報理工学系研究科 浅見 徹教授、江崎 浩教授、生産技術研究所 瀬崎 薫教授、先端科学技術研究センター 森川 博之教授、情報基盤センター 中山 雅哉准教授には、研究の完成度を高めるために有効なご指導を頂いた。

本研究は、株式会社トヨタ IT 開発センターにおいて機会を与えられ、2009 年から 2016 年の間に実施されたものである。この間、同社の CTO を務められた東京大学名誉教授 齊藤 忠夫先生、および元上司で現在 KDDI 株式会社にて在籍する齋藤 雅弘氏、田中 英明氏には、本研究を進めるために必要なリソースやアドバイスなど様々なご支援を頂いた。特に元上司の吉岡 顕氏には、本研究を進めるために必要なリソースの確保をご支援頂き、また本研究の全ての内容に渡って直接ご指導を頂いた。トヨタ自動車株式会社の星野 正喜氏、志田 充央氏、根本 雄介氏、林 康博氏、村田 賢一氏には、コネクティッドカーの課題を密に議論をさせて頂き、研究の方向性を導き出すことができた。当時同じチームに所属した Onur Altintas 氏、渡部 聡彦氏、松本 真紀子氏と日々議論を行い、直接的な協力を得られたことで本研究の成果を得ることが出来た。

筆者は本研究に先立ち、2005 年から 2009 年の 4 年間、米国 Telcordia Technologies (現 Vencore Labs) へ駐在し、車車間通信によるネットワーク形成に関する共同研究を行った。当時の上司であった佐藤 一馬氏、同僚の疋田 敏朗氏、Rama Vuyyuru 氏、共同研究先のリーダであった Wai Chen 氏、その他多くの研究者との議論の中で、ネットワークの設計方法や検証方法など、本研究を進める上で必要となった知見の多くを得ることができた。そして、研究室の先輩である横山 明久氏に、博士論文執筆のきっかけを与えて頂き、これまで様々なアドバイスや激励によって強力に後押しをして頂いた。

両親からは、幼少の頃から学問の重要性を教わってきた。学問を通じて、世界人類に貢献することこそが、まさに本論文執筆の原動力となっている。このような活動を、妻の裕絵には理解頂き、物心両面から惜しみない支援や励ましを頂いた。3 歳になる息子の航太郎はたくさんおしゃべりをし、遊ぶことが必要な時期であったが、十分に時間を割いてあげられないときも多々あった。そんな時に、妻の両親から、親身なサポートを頂いた。

本論文は、以上の方々の協力なしには完成できなかったと感じている。皆様の多大なるご支援に対して、改めて深く感謝したい。よりよい交通の実現に一層貢献することで、そのご恩に報いたい。

大西 亮吉

## 発表文献

### 学術論文

- [1] 大西亮吉, 吉岡顕, “協調的隊列走行に向けた車群通信のシミュレーション評価,” 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.1, pp.184-193, 情報処理学会, 2012.
- [2] 大西亮吉, アルトウンタシュ オヌル, 吉岡顕, “車群通信による隊列走行の編成方法の提案,” 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.1, pp.184-195, 情報処理学会, 2016.
- [3] 大西亮吉, 吉岡顕, “700MHz 帯車車間通信による交通情報共有手法の検討,” 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.1, pp.161-170, 情報処理学会, 2015.
- [4] 大西亮吉, 松本真紀子, 渡部聡彦, 吉岡顕, “車載 Wi-Fi を利用した災害時情報共有手法のシミュレーション評価,” 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.2, pp.459-470, 情報処理学会, 2016.

### 学会発表（査読付き）

- [5] K. Ramachandran, M. Gruteser, R. Onishi, T. Hikita, “Experimental Analysis of Broadcast Reliability in Dense Vehicular Networks,” IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol.2, Issue 4, pp.26-32, IEEE, 2007.
- [6] R. Onishi, O. Altintas, Y. Nemoto, M. Shida, “An Efficient Bi-Directional Communication and Naming System for Cooperative Vehicle Platooning,” IEEE Workshop on Emergent Cooperative Technologies in Intelligent Transportation Systems co-located with IEEE Int. Conf. Intelligent Transportation System, IEEE, 2010.
- [7] 大西亮吉, 吉岡顕, “車車間通信による交通情報共有手法のシミュレーション評価,” マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム論文集, Vol.2012, pp.510-515, 情報処理学会, 2012.
- [8] 松本真紀子, 大西亮吉, 吉岡顕, 眞野浩, “無線 LAN を利用した車車間無線ネットワークの検討,” マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2013 論文集, Vol.2013, pp.383-388, 情報処理学会, 2013. ※優秀論文賞

- [9] 大西亮吉, 松本真紀子, 渡部聡彦, 吉岡顕, “車載 Wi-Fi の利用を想定した災害時情報共有手法の検討,” マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, Vol.2014, pp.152-158, 情報処理学会, 2014.
- [10] O. Altintas, K. Seki, H. Kremo, M. Matsumoto, R. Onishi, H. Tanaka, “Vehicles as Information Hubs During Disasters: Glueing Wi-Fi to TV White Space to Cellular Networks,” IEEE Intelligent Transportation Magazine, Vol. 6, Issue 1, pp.68-71, IEEE, 2014.

## 学会発表

- [11] 大西亮吉, アルトウンタシュオヌル, 吉岡顕, 志田充央, 根本雄介, “協調的隊列走行のための車群通信技術の検討,” 情報処理学会研究報告, Vol.2010-ITS-42, No.8, 情報処理学会, 2010. ※優秀論文賞
- [12] 吉岡顕, 大西亮吉, “ITS 通信アプリケーション評価用統合シミュレータ (企業展示),” 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2011, No.1, pp.1714, 情報処理学会, 2011.

## 特許

- [13] 大西亮吉, アルトウンタシュ オヌル, “無線通信装置および無線通信方法,” 特許第 5482822 号, 2014 年 2 月登録.
- [14] 大西亮吉, アルトウンタシュ オヌル, 星野 正喜, 志田 充央, “車群管理方法および隊列走行通信システム,” 特許第 5516070 号, 2014 年 4 月登録.
- [15] 大西亮吉, 志田充央, “隊列走行制御装置および隊列走行制御方法,” 特許第 5708367 号, 2015 年 3 月登録.
- [16] 大西亮吉, 難波利行, 山田哲, “車載通信装置, 車載通信システムおよび通信方法,” 特許第 5682610 号, 2015 年 1 月登録.
- [17] 大西亮吉, 松本真紀子, 吉岡顕, “データ送信装置, データ共有システム, データ共有方法, およびメッセージ交換システム,” 特許第 5799967 号, 2015 年 9 月登録.
- [18] 大西亮吉, 渡部聡彦, “データ共有システムにおける通信方法, データ共有システム, および通信ノード,” 特許第 5915629 号, 2016 年 4 月登録.

## 標準化寄書

- [19] R. Onishi, M. Mano, “Proposal of Standard Framework for Disaster Information and Communication System Using Vehicle as Communication Hub,” ASTAP-25/INP-30, 2014.
- [20] R. Onishi, M. Mano, “Information: Standard Framework for Disaster Information and Communication System Using Vehicle as Communication Hub,” ASTAP-25/INP-31, 2014.
- [21] Y. Chimura, R. Onishi, M. Mano, “Questionnaire on the Use-cases for the Disaster Information and Communication System Using Vehicles”, ASTAP-25/OUT-03, 2014.
- [22] R. Onishi, M. Mano, “Proposal of Making Standard Specification of Information and Communication System Using Vehicle during Disaster,” ASTAP-26/INP-25, 2015.
- [23] R. Onishi, M. Mano, “Summary: Answers to Questionnaire on the Use Cases for the Disaster Information and Communication System Using Vehicles,” ASTAP-26/INP-26, 2015.
- [24] Y. Chimura, R. Onishi, M. Mano, “Proposal of Update Draft: Requirements of Information and Communication System Using Vehicles during Disaster,” ASTAP-26/INP-27, 2015.
- [25] R. Onishi, Y. Chimura, M. Mano, “Proposal Change of Work Plan of Draft Recommendation of Information and Communication System Using Vehicle During Disaster”, ASTAP-27/INP-31, 2016.

## 委員会活動

- [26] マルチメディア応用専門委員会委員, “災害時の自動車を用いた情報通信システムの要求条件,” 技術レポート, TR-1063, 情報通信技術委員会, 2016.
- [27] 非常時のアドホック通信ネットワークの活用に関する研究会構成員, “中間とりまとめ,” 総務省, 2016.(発行予定)



## 参考文献

- [28] 国土交通省, “道路事業の効率的・効果的な実施について,” 2010.  
[参照先] <http://www.mlit.go.jp/common/000121194.pdf>
- [29] 省エネルギーセンター, “「エコドライブ 10 のすすめ」のタネあかし,”  
[参照先] [http://www.eccj.or.jp/recoo/eco10/eco10\\_con01.html](http://www.eccj.or.jp/recoo/eco10/eco10_con01.html)
- [30] “自動車燃料消費量統計年報 平成 26 年度分,” 国土交通省, 2015.
- [31] “第 2 部 第 1 章 第 3 節 一次エネルギーの動向,” 平成 26 年度エネルギーに関する年次報告,  
pp.121-147, 資源エネルギー庁, 2015.
- [32] “第 I 部 第 2 章 第 1 節 I-2 交通流の円滑化による二酸化炭素排出削減に向けた課題,” 平成  
19 年度国土交通白書, pp.23-24, 国土交通省, 2008.
- [33] 環境省・国立環境研究所, “2013 年度 (平成 25 年度) の温室効果ガス排出量 (確報値) につい  
て,” 2015.  
[参照先] <https://www.nies.go.jp/whatsnew/2015/honbun.pdf>
- [34] 環境省, “京都メカニズムクレジット取得事業の概要について,” 2013.  
[参照先] <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/credit/mat.pdf>
- [35] The Wall Street Journal, “電気自動車のテスラ、環境ポイントの売却益が 4050 万ドルに増加,”  
2013.  
[参照先] <http://jp.wsj.com/articles/SB10001424127887323596704578353640304557084>
- [36] World Health Organization, “An estimated 12.6 million deaths each year are attributable  
to unhealthy environments,” 2016.  
[参照先]  
<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/deaths-attributable-to-unhealthy-environments/en/>
- [37] World Health Organization, “Global status report on road safety 2015,” 2015.  
[参照先] [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/189242/1/9789241565066\\_eng.pdf?ua=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/189242/1/9789241565066_eng.pdf?ua=1)

- [38] 日経コミュニケーション, “「3つの基幹網のうち2つが切断」、KDDIが東日本大震災の被害と復旧状況を説明,” 2011.  
[参照先] <http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20110408/359264/>
- [39] “第1部 第1節 通信等の状況,” 平成23年版情報通信白書, pp.2-11, 総務省, 2011.
- [40] IEEE Vehicular Society, “History,”  
[参照先]  
[http://www.vtsociety.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=46&Itemid=61](http://www.vtsociety.org/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=61)
- [41] “Radio interface standards of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communications for Intelligent Transport System applications (Recommendation M.2084-0 (09/2015)),” ITU, 2015.
- [42] “700MHz帯高度道路交通システム 標準規格 ARIB STD-T109 (1.2版),” 電波産業会, 2013.
- [43] “700MHz帯を用いた運転支援通信システムの実験用ガイドライン (ITS FORUM RC-006 1.0版),” ITS情報通信システム推進会議, 2009.
- [44] “700MHz帯高度道路交通システム 実験用車車間通信メッセージガイドライン ITS FORUM RC-013 1.0版,” ITS情報通信システム推進会議, 2014.
- [45] トヨタ自動車, “ITS専用周波数を活用した世界初の運転支援システム ITS Connect を新型車に採用,” 2015.  
[参照先] <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/9652000>
- [46] トヨタ自動車, “新テレマティクスサービス「T-Connect」を発表,” 2014.  
[参照先] <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/3202079>
- [47] 日本経済新聞, “車同士で情報共有 ソフトバンク、ホンダと車載機器開発,” 2015.  
[参照先] <http://www.nikkei.com/article/DGXLZO90472490T10C15A8TI1000/>
- [48] 高速道路サグ部等交通円滑化研究会, “「高速道路サグ部等の渋滞箇所への効果的な交通円滑化対策の実現に向けて」中間とりまとめ,” 2015.  
[参照先] <http://www.nilim.go.jp/lab/qcg/japanese/2research/1field/36smoothingsag/>
- [49] J. Jubin, J. D. Tornow, “The DARPA Packet Radio Network Protocols,” Proceedings of the IEEE, Vol.75, Issue 1, pp.21-32, IEEE, 1987.
- [50] T. Clausen, P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) (RFC3626),” IETF, 2003.

- [51] D. Johnson, Y. Hu, D. Maltz, “The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4 (RFC4728),” IETF, 2007.
- [52] C. Perkins, E. Belding-Royer, S. Das, “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing (RFC3561),” IETF, 2003.
- [53] Z. J. Haas, M. R. Pearlman, P. Samar, “The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks (Internet Draft Version 4),” IETF, 2002.
- [54] T. Clausen, C. Dearlove, P. Jacquet, U. Herberg, “The Optimized Link State Routing Protocol Version 2 (RFC7181),” IETF, 2014.
- [55] C. Perkins, S. Ratliff, J. Dowdell, L. Steenbrink, V. Mercieca, “Ad Hoc On-demand Distance Vector Version 2 (AODVv2) Routing (Internet Draft Version 16),” IETF, 2016.
- [56] I. Stojmenovic, “Position-Based Routing in Ad Hoc Networks,” IEEE Comm. Mag., Vol.40, Issue 7, pp.128-134, IEEE, 2002.
- [57] B. Karp, H. T. Kung, “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks,” In Proc. of Mobicom 2000, pp.243-254, ACM, USA, 2000.
- [58] 鶴正人, 内田真人, 滝根智哉, 永田晃, 松田崇弘, 巳波弘佳, 山村新也, “DTN 技術の現状と展望,” 通信ソサエティマガジン, No.16, pp.57-68, 電子情報通信学会, 2011.
- [59] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, H. Weiss, “Delay-Tolerant Networking Architecture (RFC4838),” IRTF, 2007.
- [60] K. Scott, S. Burleigh, “Bundle Protocol Specification (RFC5050),” IRTF, 2007.
- [61] S. Burleigh, K. Fall, E. Birrane, “Bundle Protocol (Internet Draft Version 3),” IETF, 2016.
- [62] H. Füßler, M. Mauve, H. Hartenstein, M. Käsemann and D. Vollmer, "MobiCom Poster: Location-Based Routing for Vehicular Ad-Hoc Networks," ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, Vol.7, Issue 1, pp.47-49, ACM, 2003.
- [63] CAR 2 CAR Communication Consortium, “CAR 2 CAR Communication Consortium Manifesto Overview of the C2C-CC System (Version 1.1),” 2007.  
[参照先] <https://www.car-2-car.org/index.php?id=31>
- [64] ETSI, “ETSI TR 101 607 V1.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Cooperative ITS (C-ITS); Release 1,” 2013.

- [65] 総務省, “ITS 無線システムの高度化に関する研究会 報告書,” 2009.  
[参照先] [http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000025421.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000025421.pdf)
- [66] S. Tsugawa, S. Kato, K. Tokuda, T. Matsui, H. Fujii, “A Cooperative Driving System with Automated Vehicles and Inter-Vehicle Communications in Demo 2000,” In Proc. of IEEE Int. Conf. Intelligent Transportation Systems, pp.918-923, IEEE, USA, 2001.
- [67] L. Wischhof, A. Ebner, H. Rohling, “Information Dissemination in Self-Organizing Intervehicle Networks,” IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol.6, No.1, pp.90-101, IEEE, 2005.
- [68] P. Hofmann, C. An, L. Loyola, I. Aad, “Analysis of UDP, TCP and Voice Performance in IEEE 802.11b Multihop Networks,” In Proc. of 13th European Wireless Conference, France, 2007.
- [69] J. Li, C. Blake, D. S. J. De Couto, H. I. Lee, R. Morris, “Capacity of Ad Hoc Wireless Networks,” In Proc. of MobiCom2001, ACM, Italy, 2001.
- [70] M. Winkler, C. Palazzo, M. Bartolozzi, “TCP Throughput Measurements and Analysis in Wireless Multi-Hop Networks,” In Proc. of 14th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux, IEEE, Nederland, 2007.
- [71] A. Festag, H. Füßler, H. Hartenstein, A. Sarma, R. Schmitz, “FLEETNET: Bringing Car-to-Car Communication,” In Proc. of 11th World Congress on ITS, Japan, 2004.
- [72] 青木秀憲, 竹田真二, 柳生健吾, 山田暁, “IEEE802.11s 無線 LAN メッシュネットワーク技術,” NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol.14, No.2, NTT ドコモ, 2006.
- [73] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs, R. L. Braynard, “Networking Named Content,” In Proc. of CoNEXT2009, pp.1-12, ACM, Italy, 2009.
- [74] G. Xylomenos, C. N. Ververidis, V. A. Siris, N. Fotiou, C. Tsilopoulos, X. Vasilakos, K. V. Katsaros, G. C. Plyzos, “A Survey of Information-Centric Networking Research,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.16, Issue 2, IEEE, 2014.
- [75] “Broad Agency Announcement Content-Based Mobile Edge Networking (CBMEN),” Strategic Technology Office (STO), DARPA-BAA-11-51, DARPA, 2011.
- [76] DARPA, “Creating a Secure, Private Internet and Cloud at the Tactical Edge,” 2013.  
[参照先] <http://www.darpa.mil/news-events/2013-08-21>

- [77] T. Strayer, V. Kawadia, A. Caro, S. Nelson, D. Ryder, C. Clark, K. Sadeghi, B. Tedesco, O. DeRosa, "CASCADE: Content Access System for the Combat-Agile Distributed Environment," In Proc. of MILCOM2013, pp.1518-1523, IEEE, USA, 2013.
- [78] J. Khoury, S. Nelson, A. Caro, V. Kawadia, D. Ryder, T. Strayer, "An Efficient and Expressive Access Control Architecture for Content-based Networks," In Proc. of MILCOM2014, pp.2155-7578, IEEE, USA, 2014.
- [79] S. Shladover, "Automated Vehicles for Highway Operations (Automated Highway Systems)," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering, Vol.219, No.1, pp.53-75, Sage Publications, 2005.
- [80] B. Arem, C. Diel, R. Visser, "The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics," IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol.7, No.4, pp.429-436, IEEE, 2006.
- [81] M. Shida, Y. Nemoto, "Development of a Small-Distance Vehicle Platooning System," In Proc. of 16th World Congress on ITS, pp.1-8, Sweden, 2009.
- [82] X.-Y. Lu, H.-S. Tan, S. Shladover, J. Hedrick, "Automated Vehicle Merging Maneuver Implementation for AHS," Vehicle System Dynamics, Vol.41, No.2, pp.85-107, Taylor & Francis, 2004.
- [83] "交通ネットワークの均衡分析 - 最新の理論と解法," 土木学会, 1998.
- [84] D. Helbing, B. Tilch, "Generalized Force Model of Traffic Dynamics," Physical Review E, Vol.58, No.2, pp.133-138, APS, 1998.
- [85] T. Willke, P. Tientrakool, N. Maxemchuk, "A Survey of Inter-Vehicle Communication Protocols and Their Applications," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.11, No.2, IEEE, 2009.
- [86] N. Maxemchuk, P. Tientrakool, T. Willke, "Reliable Neighborcast," IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol.56, Issue 6, pp.3278-3288, IEEE, 2007.
- [87] T. Willke, N. Maxemchuk, "Coordinated Interaction Using Reliable Broadcast in Mobile Wireless Networks," Computer Networks, Vol.51, Issue 4, pp.1052-1059, Elsevier B.V., 2007.
- [88] 吉岡顕, 小佐井潤, 本多輝彦, "ITS 通信アプリケーション評価用統合シミュレータの開発," 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2007, No.1, pp.1762-1766, 情報処理学会, 2007.

- [89] 日本自動車研究所, “安全運転支援システムの通信系シミュレータに関するフィージビリティスタディ報告書－要旨－,” 機械システム振興協会, 2008.
- [90] 日本自動車研究所, “安全運転支援システムの統合シミュレータに関するフィージビリティスタディ報告書－要旨－,” 機械システム振興協会, 2009.
- [91] 吉村忍, 西川紘史, 守安智, “知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発,” シミュレーション, Vol.23, No.4, pp.228-237, 日本シミュレーション学会, 2004.
- [92] 大和田泰伯, 前野誉, 金田茂, 久永良介, 高井峰生, “Scenargie を用いた ITS シミュレーション,” 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2008, No.14, pp.233-234, 情報処理学会, 2008.
- [93] IEEE Computer Society, “Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments (IEEE Std 802.11p-2010),” IEEE, 2010.
- [94] 牧野浩志, 大内浩之, 平沢隆之, 山田康右, “車線利用率適正化によるサグ部交通渋滞の削減,” 土木技術資料, Vol.47, No.10, pp.38-43, 土木技術センター, 2005.
- [95] 寺内隆志, 柴田直樹, 安本慶一, 東野輝夫, 伊藤実, “渋滞緩和を目的とした車車間通信による混雑状況の伝播方式,” 信学技報, Vol.105, No.260(ITS), pp.37-42, 電子情報通信学会, 2005.
- [96] 佐藤雅明, 石田剛朗, 堀口良太, 清水克正, 春田仁, 和田光示, 植原啓介, 村井純, “実車両を用いたセンタレスプローブ情報システムによる道路交通情報生成アルゴリズムの提案と評価,” 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.189-198, 情報処理学会, 2008.
- [97] 伊藤寛, “700MHz 帯近距離移動体通信を使ったセンタレスプローブの開発と成果周知活動,” 自動車研究, Vol.33, No.10, pp.55-58, 日本自動車研究所, 2011.
- [98] 先進安全自動車推進検討会, “先進安全自動車 (ASV) 推進計画 報告書 ー第 4 期 ASV 計画における活動成果についてー,” pp.89-180, 国土交通省, 2011.
- [99] 吉岡顕, 大西亮吉, “ITS 通信アプリケーション評価用統合シミュレータ,” 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol.2011, No.1, pp.1714, 情報処理学会, 2011.
- [100] ITS シミュレータ利用促進検討委員会, “ITS 通信シミュレーション評価シナリオ (Ver1.2),” pp.88-89, 日本自動車研究所, 2013.
- [101] 大規模災害等緊急事態における通信確保の在り方に関する検討会, “大規模災害等緊急事態における通信確保の在り方 最終取りまとめ参考資料,” 総務省, 2011.
- [102] 今井建彦, “災害に強い ICT 情報政策の課題と展望,” 第 8 回先導的研究開発委員会ワークショップ, 先導的研究開発委員会, 2014.

- [103] 総務省, “非常時のアドホック通信ネットワークの活用に関する研究会,” 2016.  
[参照先] [http://www.soumu.go.jp/main\\_sosiki/kenkyu/adhocnw/index.html](http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/adhocnw/index.html)
- [104] 大口敬, 伊藤麻紀, 水田隆三, 堀口良太, “東京 23 区を対象とした大規模災害時交通シミュレーションと交通渋滞緩和策の評価,” 第 33 回交通工学研究発表会論文集, pp.273-278, 交通工学研究会, 2013.
- [105] 久下紗緒里, 塚口博司, 小川圭一, 安隆浩, “歴史都市における災害時の交通需要推計と災害時交通マネジメントに関する一考察,” 歴史都市防災論文集, Vol.6, pp.273-280, 立命館大学歴史都市防災研究センター, 2012.
- [106] 非常時のアドホック通信ネットワークの活用に関する研究会, “資料 2-2 加藤教授、西山准教授説明資料,” 総務省, 2016.
- [107] “2-3 地域別人口,” 東京都統計年鑑 平成 25 年, 東京都, 2013.
- [108] “4-6 地域別自動車保有台数及び有料駐車場数,” 東京都統計年鑑 平成 25 年, 東京都, 2013.
- [109] 山崎康広, 植田啓文, 小倉一峰, 山垣則夫, 藤田範人, “災害時利用を想定した DTN 分散型情報配信システムの開発とそのフィールド実証実験,” 信学技報, Vol.113, No.35(NS), pp. 31-36, 電子情報通信学会, 2013.
- [110] W. O. Kermack, A. G. McKendrick, “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics,” In Proc. of Roy. Soc. of London. Series A, Vol.115, No.772, pp.700-721, The Royal Society, 1927.
- [111] 西浦博, 稲葉寿, “感染症流行の予測: 感染症数理モデルにおける定量的課題,” 統計数理, Vol.54, No.2, pp.461-480, 統計数理研究所, 2006.
- [112] 合原一幸, 大日康史, 前田博志, “世界初の“通勤・通学の満員電車を考慮した新型インフルエンザ感染大規模解析用システム”を開発,” 2006.  
[参照先] <http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/publication/topics/2006/060111.pdf>
- [113] T. Yoneyama, S. Das, M. Krishnamoorthy, “A Hybrid Model for Disease Spread and an Application to the SARS Pandemic,” Journal of Artificial Societies and Social Simulation, Vol.15, Issue 1, No.5, JASSS, 2013.
- [114] “Wi-Fi Peer-to-Peer (P2P) Technical Specification v1.5,” Wi-Fi Alliance, 2015.
- [115] S. Pontarelli, M. Ottavi, “Error Detection and Correction in Content Addressable Memories by Using Bloom Filters,” IEEE Trans. on Computers, Vol.62, No. 6, pp.1111-1126, 2013.

- [116] バッファロー, “AOSS2 エアステーション ハイパワー Giga 11n/g/b 300Mbps 無線 LAN 親機,”  
[参照先] <http://m.buffalo.jp/product/wireless-lan/ap/wzr-300hp/>
- [117] 東京都防災ホームページ, “避難所及び避難場所,”  
[参照先] <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/bousai/1000029/1000316.html>
- [118] K. Ramachandran, G. M., R. Onishi , T. Hikita, “Experimental Analysis of Broadcast Reliability in Dense Vehicular Networks,” IEEE Vehicular Technology Mag., Vol.2, Issue 4, pp.26-32, IEEE, 2007.