

平成20年度 修士研究論文  
車車間通信を用いた経路情報共有と  
渋滞緩和手法の提案

指導教員  
松尾 啓志 教授

名古屋工業大学 大学院 工学研究科  
博士前期課程 情報工学専攻  
平成19年度入学 19417531 番  
貝嶋 浩次

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	交通シミュレーションモデル	3
2.1	ブロック密度法	3
2.2	ハイブリッドブロック密度法	6
第3章	協調カーナビ	9
3.1	概要	9
3.2	経路情報共有戦略	10
3.2.1	経路選択	10
3.2.2	各変数の意味	13
第4章	DR(Data Reliability)手法	14
4.1	概要	14
4.2	データの信頼度	15
4.3	データの配布	16
第5章	提案手法	20
5.1	車車間通信を用いた経路情報共有手法	20
5.1.1	経路情報の管理	20
5.1.2	経路選択	23
5.2	DR手法を適用した渋滞緩和手法	24
5.2.1	概要	24
5.2.2	期待混雑度表の作成	25

5.2.3	期待混雑度表の配布 . . . . .	27
5.2.4	期待混雑度表を利用した経路選択 . . . . .	30
<b>第6章</b>	<b>評価</b>	<b>34</b>
6.1	評価環境 . . . . .	34
6.2	予備評価 . . . . .	38
6.3	提案手法1 (車車間通信を用いた経路情報共有手法) の評価 . . . . .	45
6.4	提案手法2 (DR手法を用いた渋滞緩和手法) の評価 . . . . .	52
<b>第7章</b>	<b>まとめ</b>	<b>60</b>
	<b>謝辞</b>	<b>61</b>
	<b>参考文献</b>	<b>62</b>

# 第1章

## はじめに

近年，交通量の多い都市部での渋滞が問題となっている．国土交通省の報告によると，速度が1/4になると排気ガスが環境へ与える負荷は約2倍になり，渋滞による損失額は全国で約12兆円といわれている [1]．そのため，環境面，経済面から考えて渋滞の緩和は必要である．ここで問題となるのは，車両を分散させることにより渋滞の発生を回避できる状況にあるにも関わらず，局所的に車両が集中し渋滞が発生してしまうという点である．

交通流をスムーズにするために交通情報の配信サービスが提供されている．代表的なサービスにVICS ( Vehicle Information and Communication System ) [2] がある．VICSは，道路管理者や都道府県警察が収集した交通データをセンタへ転送し，センタが編集した交通情報をビーコンやFM多重放送を介してユーザへ提供するサービスである．ユーザはセンタが配信する交通情報を利用することで混雑している道路や目的地までの所要時間を知ることができる．また，インターナビVICS[3] やG-BOOK[4] など，センタが配信する交通情報を基に渋滞予測を行い，予測情報に基づいた経路選択を提示するサービスも既に提供されている．しかし，VICSではユーザに交通情報を提供するために一度センタが全ての交通データを収集しなければならず，交通データを集計してからユーザへ交通情報を配信するまでにはタイムラグが生じる．また，多くのユーザが交通情報に基づいて経路選択を行うと空いている道路に車両が集中してしまい渋滞が発生する可能性があることが指摘されている [5] ．

渋滞緩和や車車間通信を用いた情報共有手法がこれまでにいくつか提案されている．

各車両の通過予定経路を共有情報として扱い，共有情報に基づいて経路選択を行うことで渋滞を緩和できることを示した研究に協調カーナビ [6] がある．協調カーナビでは現在地，目的地，通過予定経路を含めた経路情報を共有することで渋滞を回避する手法で，通信機器を搭載していない車両がいる状況においても有効であることが示されている．しかし，協調カーナビでは経路情報を管理サーバへ転送し，編集した情報を配信することで共有する手法をとっているため，広域な範囲に適用することを考えると通信コストやインフラの整備，維持に課題がある．一方で，サーバを用いずに車両同士で通信を行う車車間通信を用いた情報共有手法が提案されている [7][8][9]．車車間通信を用いる各車両が測定した交通情報を他の車両に送信し共有することでリアルタイムに交通情報を知ることができる．車両の移動や通信距離などの制約により全ての交通情報を知ることが困難であるため，DR (Data Reliability) 手法 [7] のように有益な情報を優先的に送信し共有する枠組みも考えられている．しかし，これらの手法では，通信の衝突や情報の共有に関する評価は行われているが，車車間通信を用いて受信した情報を使って経路選択を行った評価は行われていない．

本研究では2つの手法を提案する．1つ目に，協調カーナビを基にした車車間通信を用いた経路情報共有手法を提案する．2つ目に，車車間通信を用いたデータ共有手法である DR 手法を適用した渋滞緩和手法を提案する．

本稿の構成は次の通りである．第2章で交通シミュレーションモデルを述べる．第3章で協調カーナビ，第4章で DR 手法について説明する．第5章で提案手法について述べる．第6章でシミュレーション評価と結果に対する考察を行い，第7章で結論をまとめる．

## 第2章

# 交通シミュレーションモデル

本章では、評価で用いる交通シミュレーションモデルについて述べる。本研究では、交通シミュレータ AVENUE(an Advanced & Visual Evaluator for road Networks in Urban arEas)[10] で採用されているハイブリッドブロック密度法 [11] を用いてシミュレーション評価を行う。ハイブリッド密度法は、交通流を流体近似したブロック密度法と、個別の車両属性を扱うために離散的な待ち行列モデルを組み合わせた手法である。

はじめにブロック密度法の内容を説明し、続いてハイブリッドブロック密度法への拡張方法について述べる。

### 2.1 ブロック密度法

ブロック密度法は道路をブロックと呼ばれる単位に分割し、流体近似した車両のブロック間の移動量を交通量 - 密度 ( $Q - K$ ) 関係と交通量の保存則を用いて求める動的な交通流シミュレーションモデルである。ブロック密度法では、図 2.1 のように、横軸を車両密度、縦軸を交通量にとり線形近似した  $Q - K$  曲線が設定される。 $Q - K$  曲線は道路のパラメータである交通容量  $Q_c$ 、ジャム密度  $K_{jam}$ 、自由流速度  $V_f$  で決定される。 $Q_c$  は単位時間あたりに道路を通過できる車両数の最大値、 $K_{jam}$  は車体の全長と車間距離により設定される単位距離あたりに存在できる車両数の最大値、 $V_f$  は道路の最高速度である。臨界密度  $K_c$  は交通量が最大となる車両密度で、図 2.1 より  $Q_c$ 、 $V_f$  から求められる。道路は一定の単位距離  $dL$  で区切られたブロックで分割される。ブロック長  $dL$  は 1 シミュレーション時間  $dt$  の間に自由流速度  $V_f$  で移動できる距離に等

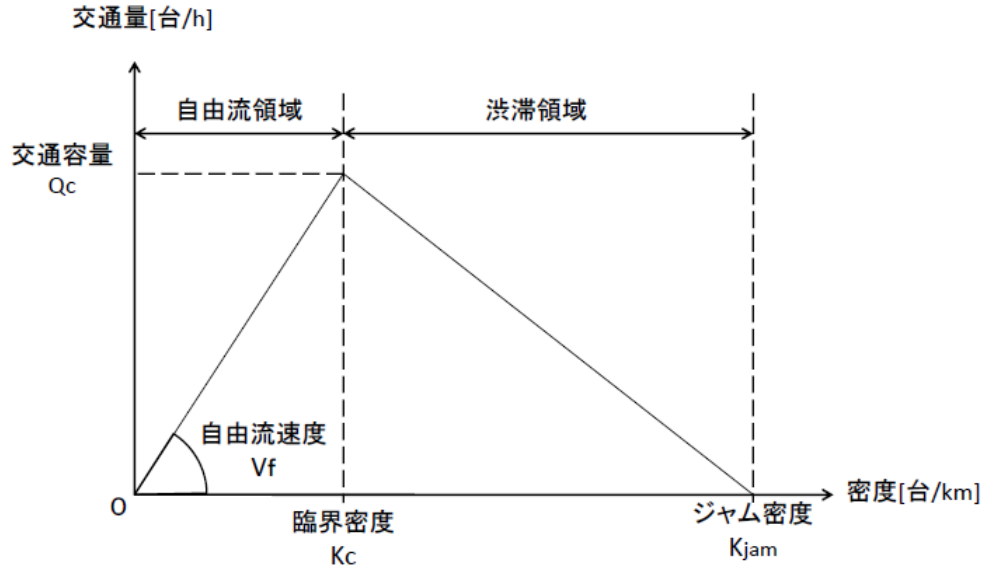


図 2.1: ブロック密度法が仮定する交通量 - 密度 (Q - K) 関数

しい。

ある 1 ブロックに着目し，それと隣接するブロック間を移動する交通量の計算方法を図 2.2 を用いて説明する．ブロックには道路の下流端から 1, 2, ... と昇順に番号が割り当てられる．ある時刻  $t$  におけるブロック  $i$  の密度は次の式で更新される．

$$A_i^{out}(t) = \min(K_i^c, K_i(t)) \frac{dL}{dt} \quad (2.1)$$

$$A_i^{in}(t) = \begin{cases} (K_i^{jam} - K_i(t)) \frac{dL}{dt} & (K_i(t) \leq K_i^c) \\ \frac{K_i^c(K_i^{jam} - K_i(t))}{K_i^{jam} - K_i^c} \frac{dL}{dt} & (K_i^c < K_i(t) \leq K_i^{jam}) \end{cases} \quad (2.2)$$

$$Q_{i+1,i}(t) = \min(A_{i+1}^{out}(t), A_i^{in}(t)) \quad (2.3)$$

$$K_i(t+1)dL = K_i(t)dL + Q_{i+1,i}(t)dt - Q_{i,i-1}(t)dt \quad (2.4)$$

式 (2.1) ~ (2.4) において，ブロック  $i$  の臨界密度は  $K_i^c$  で示す．同様に，ジャム密度は  $K_i^{jam}$ ，時刻  $t$  におけるブロック内の車両密度は  $K_i(t)$ ，単位時間当たりの流出可能量は  $A_i^{out}(t)$ ，単位時間当たりの流入可能量は  $A_i^{in}(t)$  で示す．また， $Q_{i+1,i}$  は時刻  $t$  におけるブロック  $i+1$  から  $i$  への単位時間当たりの流量を示す．

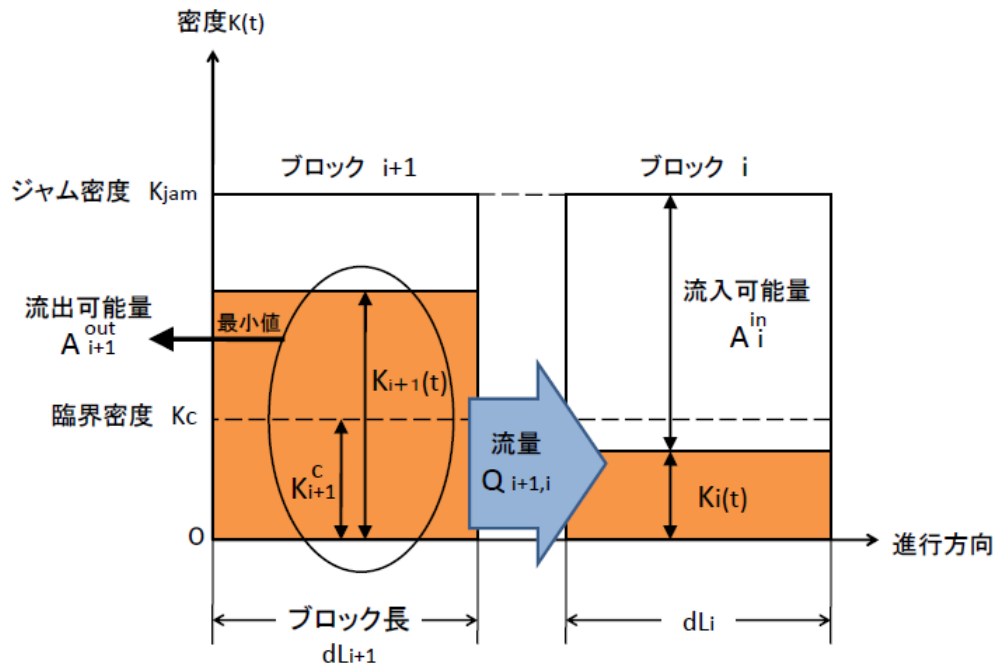


図 2.2: ブロック密度法の交通量の計算

式 (2.1) ~ (2.4) を用いた交通量の移動の計算過程を示す．はじめに，式 (2.1)，(2.2) より各ブロックの流出可能量，流入可能量をそれぞれ求める．式 (2.1) を用いて時刻  $t$  におけるブロック内の車両密度と臨界密度を比較し，最小値をブロックの流入可能量として求める．式 (2.2) で求めるブロックの流入可能量は，現在の時刻  $t$  におけるブロック内の状態が自由流領域と渋滞領域のいずれにあるかにより計算式が異なる．自由流領域 ( $K_i(t) \leq K_i^c$ ) にある場合，流入可能量はブロック内の空き領域に等しくなる．渋滞領域 ( $K_i^c < K_i(t) \leq K_i^{jam}$ ) にある場合，流入可能量は図 2.1 の渋滞領域の直線から定まる交通量になる．全てのブロックの流出可能量，流入可能量が求められた後，式 (2.3) によって隣接するブロック間の流量が計算される．流量は上流ブロックの流出可能量と下流ブロックの流入可能量の最小値をとる．式 (2.3) で求めた各ブロック間の流量を用い，次の時刻  $t+1$  での各ブロックの車両密度を式 (2.4) に従い更新する．式 (2.4) は交通量の保存則を示した式であり，現在の時刻  $t$  の車両数  $K_i(t)dL$  に上流ブロック  $i+1$  から流入する車両数  $Q_{i+1,i}(t)dt$  を加え，下流ブロック  $i-1$  へ流出する車両数  $Q_{i,i-1}(t)dt$  を引いた値が，時刻  $t+1$  におけるブロック  $i$  の車両数  $K_i(t+1)dL$  と



なる。

式(2.1)～(2.4)はブロック密度法における各道路の密度管理に関するものである。ブロック密度法では、各ブロックの流出可能量、流入可能量を計算した後に全てのブロックの車両密度を一括して更新するため、どの道路を最下流道路にするかという問題が生じない利点がある。

## 2.2 ハイブリッドブロック密度法

2.1節で述べた通り、ブロック密度法では車両を流体近似しブロック間を移動する流量は連続値として扱う。しかし、車両を流体近似したままでは経路選択や車両ごとに個別の属性を持たせる場合での評価が困難である。そこで、車両を流体近似で扱うと同時に離散車両として扱えるようにするためハイブリッドブロック密度法に拡張する。

ハイブリッドブロック密度法への拡張の基本的な考え方は次の通りである。はじめに、ブロック密度法により流量を求め、流量の小数点以下を切り上げた数の離散車両を上流ブロックから下流ブロックへ移動させる。その際に、切り上げにより生じる誤差を補正交通量として保存し、次のステップ以降に反映させる。交通量を補正することで、数ステップを通して交通の連続量と離散量の整合性を確保できる。また、車両を離散車両としても扱うため、異なる属性の車両が複数存在する環境において個別の車両の移動計算が容易になる。

ハイブリッドブロック密度法において、時刻  $t$  におけるブロック  $i+1, i$  間の離散車両移動量  $M_{i+1,i}(t)$  と補正交通量  $E_{i+1,i}(t)$  は次の式で示される。ただし、 $\text{RoundUp}()$  は切り上げ整数化の関数である。

$$M_{i+1,i}(t) = \text{RoundUp}(\max(0, Q_{i+1,i}(t)dt - E_{i+1,i}(t-1))) \quad (2.5)$$

$$E_{i+1,i}(t) = M_{i+1,i}(t) + E_{i+1,i}(t-1) - Q_{i+1,i}(t)dt \quad (2.6)$$

ハイブリッドブロック密度法における車両移動の計算例を図2.3に示す。図2.3の左半分は連続量の車両密度の変化と流量の移動を、右半分はブロック内に存在する離散車両が移動する様子を示している。初期時刻  $t_0$  ではブロック  $i+1$  に流体車両が2.0台、

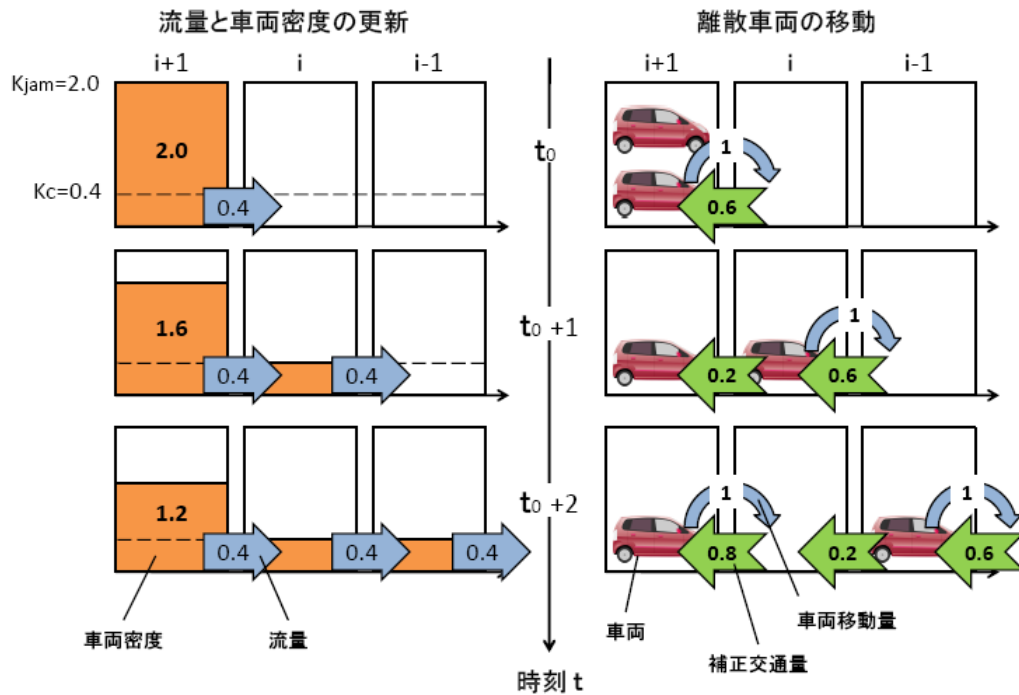


図 2.3: ハイブリッドブロック密度法の交通量の計算

分散車両が 2 台存在しており、時間が経過することにより下流ブロックに車両が流れていく。ここでは、各ブロックの臨界密度は  $0.4$  [台/km]、ジャム密度は  $2.0$  [台/km] とし、1 シミュレーション時間は 1 秒として説明する。なお、初期時刻  $t_0$  における各ブロック間の補正交通量は 0 である。

時刻  $t_0$  において、ブロック  $i+1, i$  間の分散車両移動量は式 (2.5) より

$$M_{i+1,i}(t_0) = \text{RoundUp}(\max(0, 0.4 - 0)) = 1[\text{台}]$$

となり、ブロック  $i+1$  にいる先頭の分散車両が下流ブロック  $i$  へ移動する。その際に式 (2.6) より、ブロック  $i+1, i$  間で

$$E_{i+1,i}(t_0) = 1 + 0 - 0.4 = 0.6[\text{台}]$$

の補正交通量が生じる。

次の時刻  $t_0 + 1$  では、先ほど生じた補正交通量を考慮しなければならない。ブロッ

ク  $i + 1, i$  間の離散車両移動量は

$$M_{i+1,i}(t_0 + 1) = \text{RoundUp}(\max(0, 0.4 - 0.6)) = 0[\text{台}]$$

となるため、ブロック  $i + 1$  にいる離散車両は下流ブロック  $i$  へ移動できない。この時、ブロック  $i + 1, i$  間の補正交通量は

$$E_{i+1,i}(t_0 + 1) = 0 + 0.6 - 0.4 = 0.2[\text{台}]$$

となり、離散車両が移動しなかった場合においても交通の連続量と離散量の誤差が補正されるため整合性が確保される。ブロック  $i$  にも車両が存在するため同様の計算をブロック  $i, i - 1$  間でも行う。

次の時刻  $t_0 + 2$  におけるブロック  $i + 1, i$  間の離散車両移動量は

$$M_{i+1,i}(t_0 + 2) = \text{RoundUp}(\max(0, 0.4 - 0.2)) = 1[\text{台}]$$

となるため、ブロック  $i + 1$  にいる離散車両は下流ブロック  $i$  へ移動する。この時、ブロック  $i + 1, i$  間の補正交通量は

$$E_{i+1,i}(t_0 + 2) = 1 + 0.2 - 0.4 = 0.8[\text{台}]$$

となる。

## 第3章

# 協調カーナビ

本章では各車両の現在地，目的地，現在地から目的地までの通過予定経路を含めた経路情報を共有し，共有情報に基づいて大域的に準最適な経路群を求める協調カーナビ [6] について述べる．

### 3.1 概要

現在，渋滞や交通規制等の交通情報をユーザに配信する情報通信システム VICS (Vehicle Information and Communication System) が導入されている．VICS から配信される交通情報をカーナビに利用することで，ユーザは渋滞を考慮した迂回路の経路検索や目的地到着時刻の予測が可能である．また，配信される交通情報から渋滞を予測し，予測情報に基づく経路を提示するサービスも既に提供されている．しかし，多くのユーザが交通情報に従って経路選択を行った場合，空いている道路へ車両が集中してしまい道路交通システム全体の効率が低下するという問題が指摘されている [5]．また，空いている道路への集中は交通情報を詳細にしても発生する．各車両が経路選択を行ってから混雑が発生するまでには時間的な隔りがあるため，交通情報だけで混雑を予測することは困難である．

現在空いている道路に車両が集中し渋滞が発生するという問題は「各車両がどの経路を通り現在地から目的地まで進むか」という情報を共有することで，近い将来車両が集中する可能性が高い道路を見積ることが可能である．そこで，各車両の現在地，目的地，現在地から目的地までの通過予定経路を経路情報として共有し，経路情報から

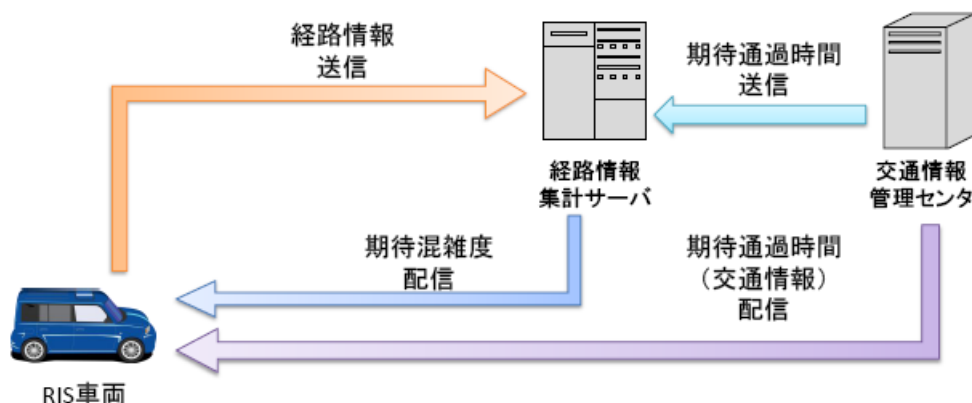


図 3.1: 協調カーナビの概略図

予測した混雑状況を基に経路選択を行う協調カーナビが提案されている。協調カーナビの概略図を図 3.1 に示す。協調カーナビにおいてユーザは経路選択に経路情報共有戦略 (RIS : Route Information Sharing) を用いる。RIS 戦略を用いて経路選択を行う車両を RIS 車両とする。RIS 車両は経路情報を経路情報集計サーバへ送信する。経路情報集計サーバは集計した経路情報と交通情報管理センターから配信される各道路の期待通過時間から、近い将来の混雑状況を示した各道路の期待混雑度を RIS 車両へ配信する。RIS 車両は配信された期待混雑度を基に経路を変更する。この時、RIS 車両は大域的な効率を考慮せず自身にとって最も効率が良いと判断した経路を選択する。

## 3.2 経路情報共有戦略

### 3.2.1 経路選択

協調カーナビにおいて、RIS 車両は経路情報集計サーバが経路情報と交通情報から算出する期待混雑度に基づいて経路選択を行う。経路情報集計サーバは次の手順で期待混雑度を算出する。

1. RIS 車両は現在地から目的地までの期待通過時間が最小となる経路を通過予定経路とし、現在地、目的地、通過予定経路を含めた経路情報を経路情報集計サーバ

へ通知する．道路  $l$  の期待通過時間 ( Expected Travel Time )  $ETT_l$  は交通情報管理センターが配信する交通情報に含まれる．

2. 経路情報集計サーバは RIS 車両から通知された経路情報を用いて各道路の通過重み ( Passage Weight ) を算出する．RIS 車両  $j$  の道路  $l$  に対する通過重みを  $PW_{l,j}$  と定義する．ある経路情報の通過予定経路に含まれる道路数が  $p$  本である場合，目的地から現在地までの各道路に 1 から  $p$  を昇順に割り当てる．各道路に割り当てられた番号を通過予定経路に含まれる道路数  $p$  で正規化したものを，その経路情報に対する各道路の通過重みとする．例えば，目的地を含む道路には番号 1 が割り当てられるため通過重みは  $1/p$  となる．通過予定経路に含まれない道路の通過重みは 0 である．
3. 経路情報集計サーバは，各経路情報から求めた通過重みを用いて各道路の総通過重み ( Total Passage Weight ) を算出する．道路  $l$  の総通過重みを  $TPW_l$  と定義する． $TPW_l$  は全ての RIS 車両の道路  $l$  に対する通過重みの総和であり式 (3.1) で求められる．ただし，式 (3.1) において， $RIS$  は RIS 車両の集合である．

$$TPW_l = \sum_{k \in RIS}^k RW_{l,k} \quad (3.1)$$

4. 経路情報集計サーバは各道路の期待混雑度を算出し，RIS 車両に配信する．道路  $l$  の期待混雑度 ( Expected Traffic Congestion ) を  $ETC_l$  と定義する． $ETC_l$  は先に求めた道路  $l$  の総通過重み  $TPW_l$  と道路  $l$  の期待通過時間  $ETT_l$  から式 (3.2) で求められる．ただし，式 (3.2) において， $a$  は正の定数である．

$$ETC_l = ETT_l \times (TPW_l + a) \quad (3.2)$$

5. 1 ~ 4 の処理を繰り返す．

式 (3.2) において，正の定数  $a$  の値を小さく設定すると  $TPW_l$  が  $ETC_l$  に与える影響が大きくなり， $a$  の値を大きく設定すると  $TPW_l$  が  $ETC_l$  に与える影響が小さくなる．

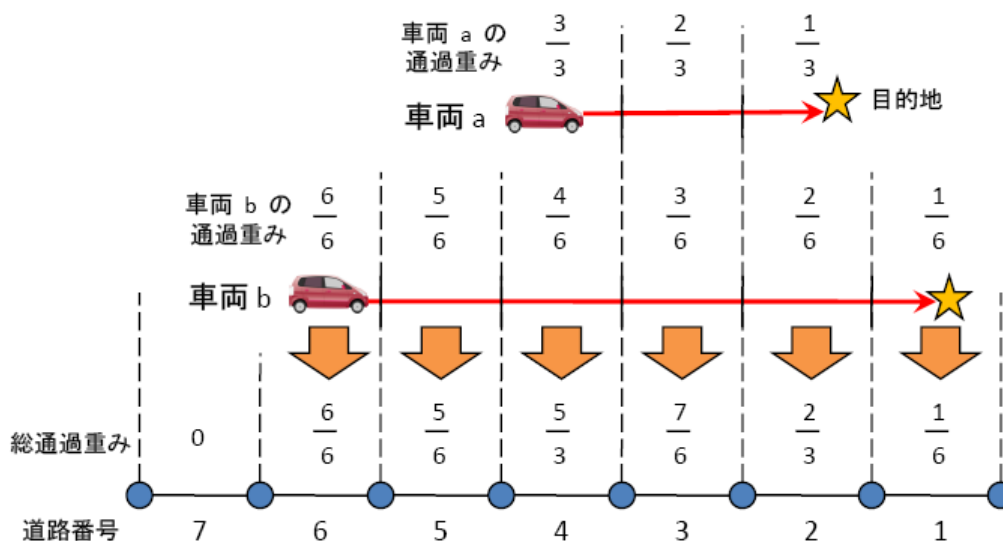


図 3.2: 各道路の総通過重みの算出例

RIS 車両は交差点に到達する度に経路情報集計サーバから配信される各道路の期待混雑度を基に、現在地から目的地までの期待混雑度の総和が最小となる経路を計算し、経路を変更する。

各道路の総通過重みの算出例を図 3.2 に示す。図 3.2 で車両から目的地を指した矢印は経路情報に含まれる通過予定経路である。例えば、車両 a は道路 4 上の現在地から道路 2 上の目的地まで道路 4, 3, 2 の順に通る予定であることを示す。車両 a の経路情報に対する各道路の通過重みは

$$PW_{1,a} = 0, \quad PW_{2,a} = 1/3, \quad PW_{3,a} = 2/3, \quad PW_{4,a} = 3/3 \\ PW_{5,a} = 0, \quad PW_{6,a} = 0, \quad PW_{7,a} = 0$$

と算出される。車両 a の通過予定経路に含まれない道路 1, 5, 6, 7 の通過重みは 0 である。同様に、車両 b の経路情報に対する各道路の通過重みは

$$PW_{1,b} = 1/6, \quad PW_{2,b} = 2/6, \quad PW_{3,b} = 3/6, \quad PW_{4,b} = 4/6 \\ PW_{5,b} = 5/6, \quad PW_{6,b} = 6/6, \quad PW_{7,b} = 0$$

と算出される。車両 a, b の通過重みから各道路の総通過重みは

$$TPW_1 = 1/6, \quad TPW_2 = 2/3, \quad TPW_3 = 7/6, \quad TPW_4 = 5/3 \\ TPW_5 = 5/6, \quad TPW_6 = 1, \quad TPW_7 = 0$$

と算出される。

### 3.2.2 各変数の意味

本項では、3.2.1項で定義した通過重み、期待混雑度について述べる。

通過重みは、RIS車両が現在地から通過道路に到達するまでの時間を考慮した各道路の交通量に対する影響力である。現在地に近い道路は、短い時間でその道路に進入し交通量を増加させる可能性があるため影響力が大きい。一方で、現在地から遠い道路は、その道路に進入するまでに時間を要するため、近い将来に与える影響力は小さい。したがって、現在地に近いほど交通量について影響を与える可能性が高いため通過重みを大きく設定する必要がある。

総通過重みは、各道路上に存在する車両群によって引き起こされる混雑状況を表す指標である。総通過重みが大きい道路ほど車両が集中する可能性が高いことを意味する。期待通過時間と総通過重みの積から求められる期待混雑度は、現在を含めた近い将来の混雑状況を表す指標である。現在空いており今後も通過する車両が少ない道路は期待混雑度は小さくなり、現在混んでおり今後も通過する車両が多い道路は期待混雑度は大きくなる。現在混んでいるが今後は通過する車両が少なくなる場合や、現在空いているが今後は通過する車両が多くなる場合は、前述した2つの間の値をとる。



## 第4章

# DR(Data Reliability)手法

本章では，車車間通信を用いた情報共有手法である DR(Data Reliability) 手法 [7] について述べる．

### 4.1 概要

VICS のようにセンタが情報を一度集計し配信するシステムでは，センタが各道路の情報の取得してから配信するまでにタイムラグが生じ，ユーザが最新の交通情報を取得することができない．また，道路上の端末の設置，ネットワーク網などのインフラの整備，維持に多くの費用がかかるため，全ての道路上を管理するには課題がある．これらの問題を解決するため，各車両に無線通信機器を搭載し，車両間でデータを共有する車車間通信を用いた情報共有に関する研究が行われている．車車間通信を用いた情報共有では，センタが情報を集計し配信されるのを待つ必要がなく，他の車両から情報をリアルタイムに取得できる．

各車両は道路上を高速で移動するため，車両同士が通信できる時間（通信可能時間）が限られる．そのため，自身にとって有益な情報を優先的に取得する必要がある．この課題を解決する手法として DR 手法が提案されている．DR 手法は，対向車両から限られた通信可能時間内に有益なデータを配布してもらうことで情報を共有する手法である．各車両は車載センサを用いて周辺の情報のセンシングを行いデータを生成する．その後，自身のデータ領域に作成データを保持する．データを要求する車両が対向車両に接続した場合，対向車両は自身のデータ領域にあるデータの中から要求車両

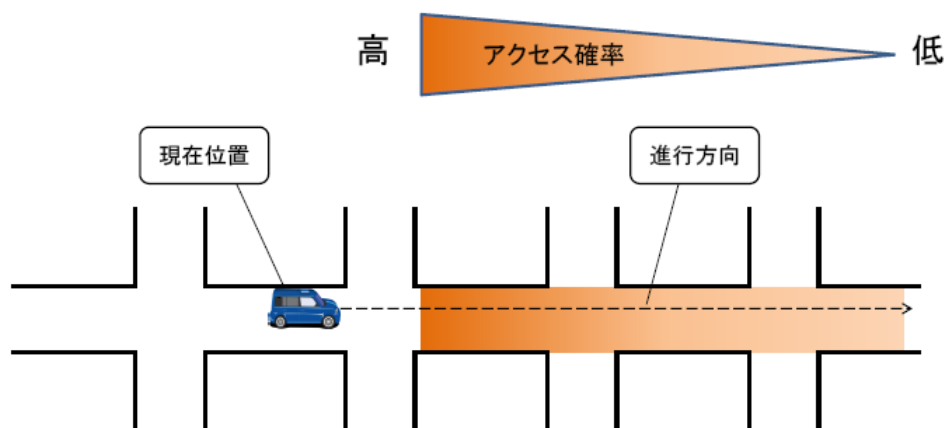


図 4.1: ユーザのデータアクセス特性

が将来アクセスする可能性が高いデータを優先的に配布する。

## 4.2 データの信頼度

車両間の通信可能時間は限られているため、車両は他の車両にデータを無制限に配布することができない。そのため、優先して配布するデータを何らかの方法で決定する必要がある。DR 手法では、図 4.1 で示すユーザのデータアクセス特性に基づいた信頼度を用いて優先して配布するデータを選択する。ユーザは、自身の通過予定経路上で作成されたデータを要求する。この時、アクセス確率が高い現在位置付近のデータほど頻繁に要求する。

ユーザのデータアクセス特性に基づいた信頼度  $R$  を式 (4.1) のように定義する。

$$R = E - (\alpha \times t_e + \beta \times d/v) \quad (4.1)$$

式 (4.1) において、 $E$  はデータの有効時間、 $t_e$  はデータが作成されてから経過した時間を示す。また、 $d$  は車両の現在位置からデータ作成位置までの距離、 $v$  は車両の移動速度を示す。すなわち、 $d/v$  は車両の現在位置からデータ作成位置までの移動所要時

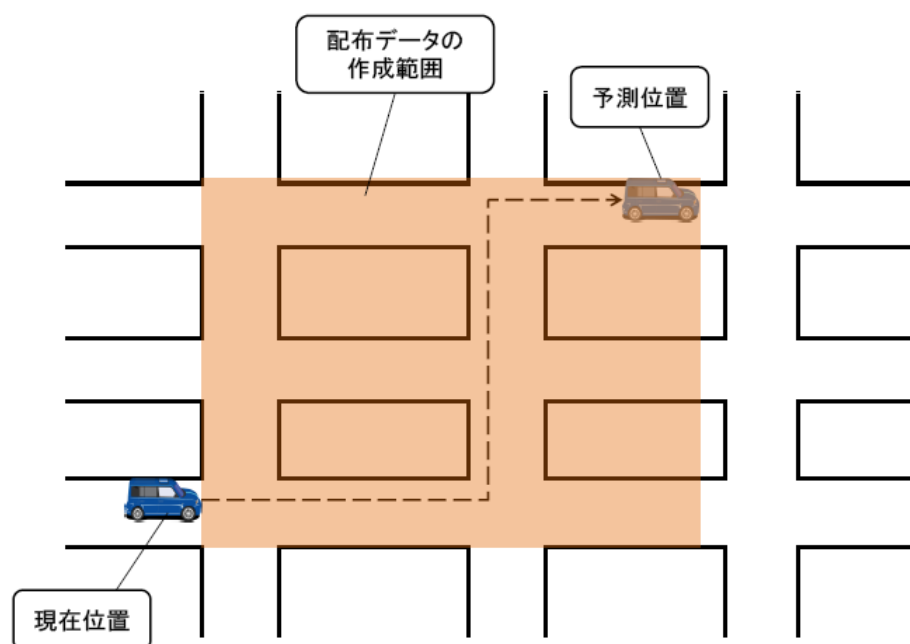


図 4.2: 要求する配布データの作成範囲

間である． $\alpha$  ,  $\beta$  は事前に設定される正の定数である．式 (4.1) より ,  $\alpha$  を  $\beta$  に対して相対的に大きい値に設定すると , 信頼度  $R$  はデータが作成されてから経過した時間に大きく影響する．一方で ,  $\beta$  を  $\alpha$  に対して相対的に大きい値に設定すると , 信頼度  $R$  は車両の現在位置からデータ作成位置までの移動所要時間に大きく影響する．作成されてからの経過時間が短く , 車両の現在位置から作成位置までの距離が近いデータほど信頼度が高くなる．

### 4.3 データの配布

自身がこれから移動する経路から移動してきた車両は , その経路に関するデータを持っている可能性が高い．そこで , DR 手法では , 対向車両と接続し将来アクセスする可能性の高いデータを配布するように要求する．その際 , 車両の現在位置と  $T_f$  秒後の予測位置を頂点とする矩形エリア内で作成されたデータを対向車両に要求する．図 4.2 の例では網掛けにの矩形エリア内で作成されたデータを要求する．

次に，データ配布の動作について説明する．ここでは，車両 A が対向車両 B に接続した場合を例にとる．

1. 車両 A は，自身の移動経路を基に  $T_f$  秒後に自身が到達している位置を予測し要求するデータの作成範囲を求める．また，自身が保持しているデータの中で要求するデータの作成範囲内で作成されたデータのリスト（保持データリスト）を作成する．車両 A は，自身の現在位置，予測位置，保存位置データリストを情報として含む配布要求パケットを対向車両 B に送信する．この動作は車両 B でも同様に行われる．
2. 車両 A は，対向車両 B から配布要求パケットを受信すると，自身の保存するデータの中で車両 B の現在位置と予測位置を頂点とする矩形エリア内で作成されたデータとそのデータの配布重要度のリスト（配布候補リスト）を作成する．ここで，データ  $D_i$  の配布重要度  $I_i$  は対向車両がデータ  $i$  を必要とする度合を示した数値であり，式 (4.2) によって求める．

$$I_i = \begin{cases} R_i & (i \notin S_H) \\ 0 & (i \in S_H) \end{cases} \quad (4.2)$$

式 (4.2) において， $R_i$  は 4.2 節の式 (4.1) で求められるデータ  $i$  の信頼度， $S_H$  は対向車両の保持データリストに含まれるデータの集合を示す．対向車両が保持するデータは配布の必要がないため，集合  $S_H$  に含まれるデータの配布重要度は 0 とする．一方，対向車両が保持していないデータは信頼度の高いデータほど有益であると考え，集合  $S_H$  に含まれないデータの配布重要度は信頼度の値と等しくする．

3. 車両 A は，対向車両 B と通信を切断するまで，配布候補リストに含まれるデータを配布重要度の高いデータから順に配布する．

DR 手法では，自身がこれから移動する経路から来る対向車両と接続し，将来アクセスする可能性が高いデータを配布しあうことで，互いにとって有益なデータを共有することが期待できる．また，配布重要度が高いデータから順に配布することで，限られた通信可能時間内で効率的にデータ配布を行うことができる．

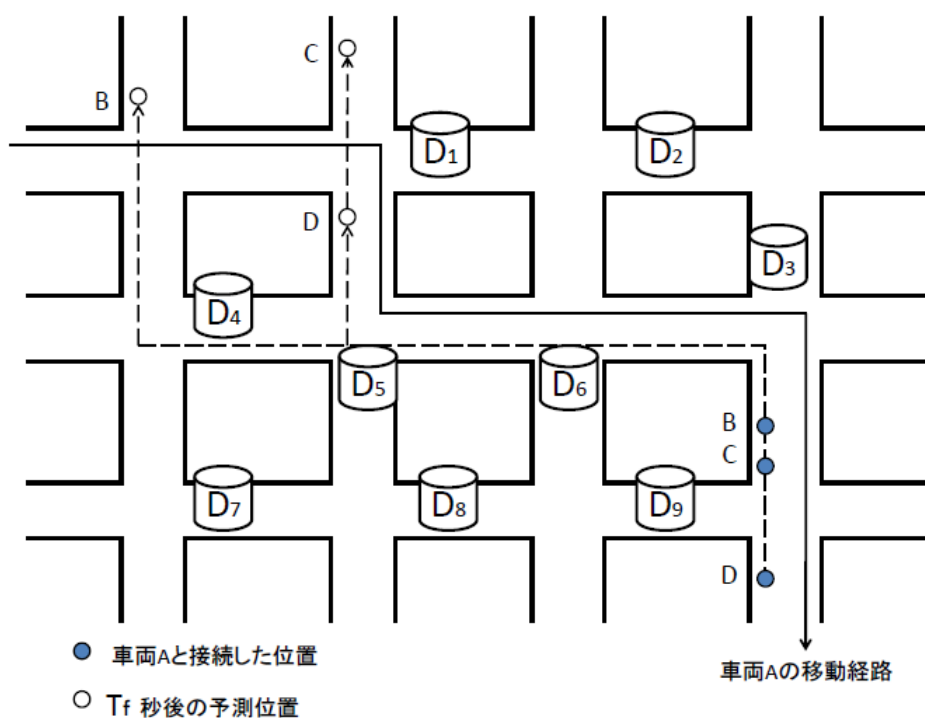


図 4.3: 車両の移動経路とデータの作成位置

図 4.3 の例を用いて DR 手法によるデータ配布の動作を示す．この例では，車両 A が対向車両 B, C, D の順に接続し，それぞれの車両に対してデータ配布を行う場合を考える．図 4.3 で示した実線の矢印は車両 A の移動経路，破線の矢印は対向車両 B, C, D のそれぞれの通過予定経路を示す．色つきの丸は対向車両 B, C, D が車両 A と接続した位置，白丸は対向車両 B, C, D がそれぞれ求めた  $T_f$  秒後の予測位置である．なお，車両 A は対向車両 B, C, D の配布要求パケットにより，それぞれの  $T_f$  秒後の予測位置については把握しているが，通過予定経路については把握していない．また，図 4.3 で示した円柱は，それぞれのデータの作成位置を示す．表 4.1 は，図 4.3 に存在する各車両が保持するデータのリスト，表 4.2 は車両 A の保持データの信頼度と各対向車両に対する配布重要度を示す．表 4.2 の“-”は，その対向車両が要求する矩形エリア内で作成されたデータではないため配布重要度を求めていることを示す．

車両 A が対向車両 B と接続した場合，車両 B が保持していないデータ  $D_2, D_3, D_4, D_5$  の配布重要度はそれぞれのデータの信頼度の値と等しく，車両 B が保持している

表 4.1: 保持データリスト

車両	データ
A	$D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_8$
B	$D_1, D_6, D_9$
C	$D_2, D_3, D_8$
D	$D_3, D_5, D_7$

表 4.2: データの信頼度と各対向車両に対する配布重要度

		$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_8$
信頼度		80	75	90	100	70	85
配布重要度	B	0	75	90	100	70	-
	C	80	0	0	-	70	-
	D	-	-	-	-	70	85

データ  $D_1$  の配布重要度は 0 となる。また、車両 B の要求する矩形エリア内で作成されていないデータ  $D_8$  の配布重要度は計算されない。車両 A は対向車両 B と接続している間、配布重要度の高いデータから順に配布する。例えば、表 4.2 より対向車両 B に対する配布重要度が最も高いのはデータ  $D_4$  であるため、車両 A が対向車両 B に一番最初に配布するデータは  $D_4$  となる。続けて  $D_3, D_2, D_5$  の順に対向車両 B との通信が切断されるまでデータを配布する。また、対向車両 C に対しては  $D_1, D_5$  の順に、対向車両 D に対しては  $D_8, D_5$  の順に通信が切断されるまでそれぞれの車両にデータを配布する。

DR 手法において、要求する配布データの作成範囲を設定する際に、 $T_f$  秒後の予測位置を求める。 $T_f$  の値を大きくすると、要求する配布データの作成範囲が広がる。これにより、多くのデータが配布候補となり、信頼度が高いデータを多く取得できる一方、移動経路から遠く離れた位置で作成された将来アクセスする可能性が低いデータも配布されてしまう。 $T_f$  の値を小さくすると、要求する配布データの作成範囲が狭くなる。これにより、データの配布候補が限定され、移動経路上で作成された将来アクセスする可能性が高いデータを取得できる一方で信頼度の低いデータも配布されてしまう。また、配布候補となるデータ数が少なくなるため、車両間で多種類のデータを共有できない。よって、 $T_f$  の値は適切に決定する必要がある。

## 第5章

# 提案手法

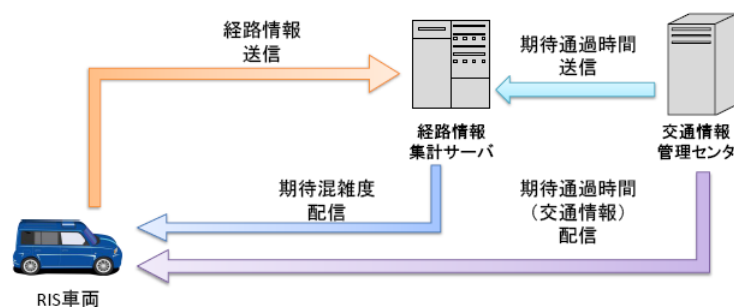
本章では，提案する車車間通信を用いた経路情報共有手法と DR 手法を適用した渋滞緩和手法について述べる．

### 5.1 車車間通信を用いた経路情報共有手法

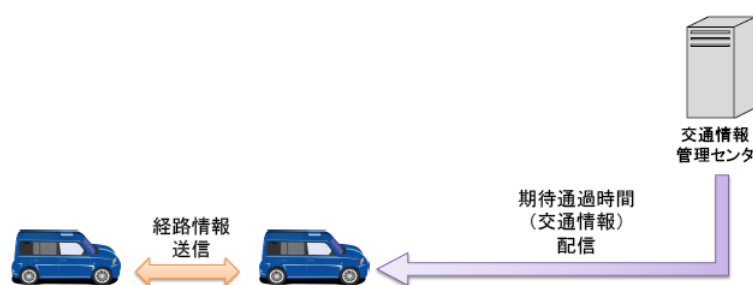
#### 5.1.1 経路情報の管理

3章で述べた協調カーナビ [6] による経路情報共有手法は，現在地，目的地，通過予定経路が含まれる経路情報を用いることで効率的な経路選択を行うことができる．しかし，協調カーナビを実現するためには，交通情報管理センタとは別に経路情報を集計するためのサーバが必要となり，その他にも経路情報を集計するために道路上に中継器の設置やネットワーク網のインフラの整備，維持などのコストが大きい．さらに，ある車両が別の道路に進入すると混雑状況が変わってしまうため，混雑情報の更新間隔は短くする必要がある．協調カーナビを広域な環境へ適用することを考えると通信コストが膨大になることが考えられ，実現には課題が多い．そこで，本稿では，各車両の経路情報を管理するサーバを設けずに車両間で互いに送信する，車車間通信を用いた経路情報共有手法を提案する．

提案する車車間通信を用いた経路情報共有手法の概略を図 5.1 に示す．図 5.1(a) は既存手法である協調カーナビ，図 5.1(b) は提案手法の概略を表す．なお，図 5.1(a) は 3.1 節で示した図 3.1 と同じである．既存手法である協調カーナビでは，経路情報共有



(a) 協調カーナビ (既存手法)



(b) 提案手法

図 5.1: 経路情報共有手法の比較

戦略を用いる RIS 車両は自身の経路情報を経路情報集計サーバへ送信していたが、提案手法では経路情報は車両間で互いに送信する。これにより、自身の近くにいる車両の経路情報をリアルタイムに取得することが可能である。既存手法では経路情報集計サーバが各道路の期待混雑度を配信していたが、提案手法では各車両が車車間通信により取得した経路情報を基に各道路の期待混雑度を求める。各道路の期待混雑度を求める際に必要となる期待通過時間は、交通情報管理センタが配信する交通情報を用いることで解決できる。

提案手法において、各車両は経路情報リストをそれぞれ管理する。他の車両から経路情報を受信した場合、送信車両  $j$ 、時刻  $t$ 、車両  $j$  の経路情報  $ROUTE\_INFO_j$  を自身の経路情報リストに書き込む。既に経路情報リストに書き込まれている車両から新たに経路情報を受信した場合は更新する。通信範囲外にいるなどして受信できなかった車両の経路情報は更新しない。受信した経路情報には有効時間  $E_{ri}$  を設け、最後に更新



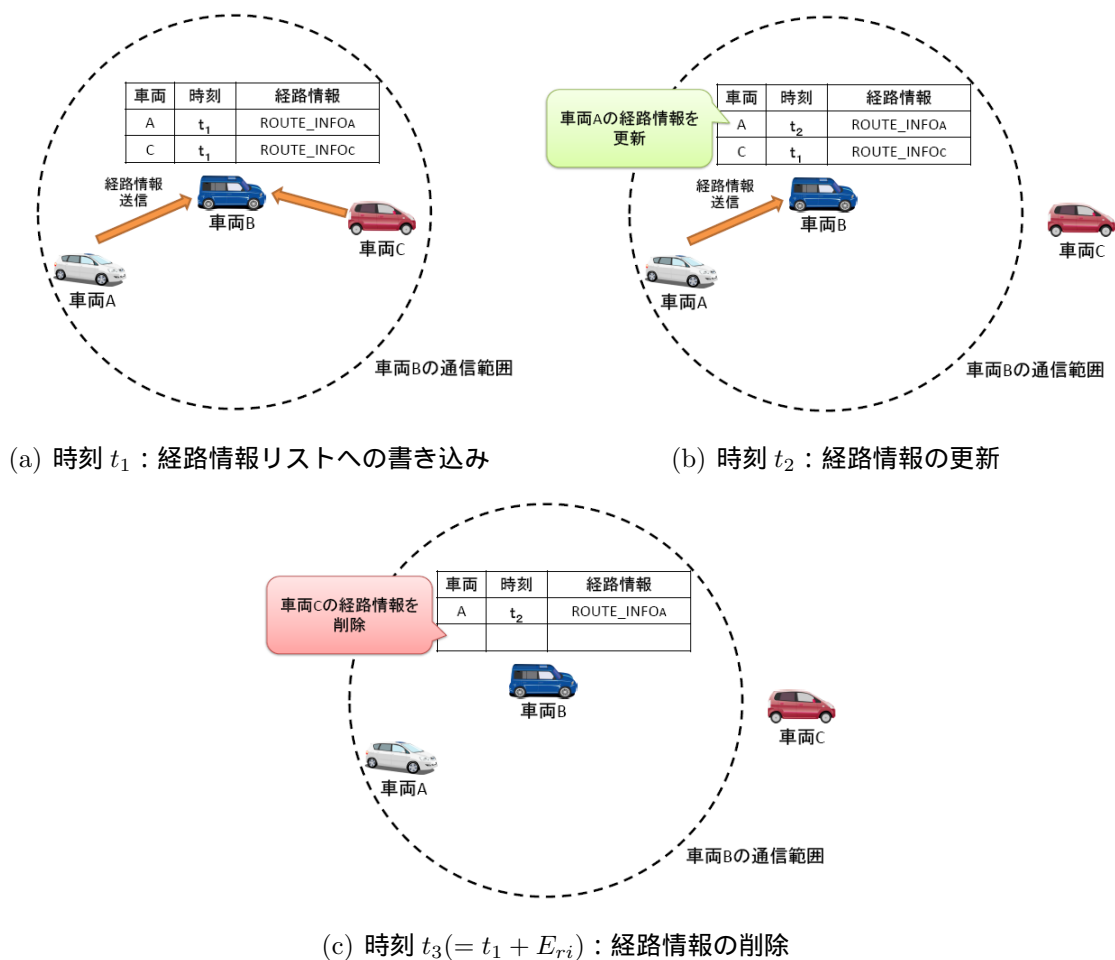


図 5.2: 経路情報リストの管理

されてから  $E_{ri}$  経過した車両の経路情報は信頼性が低くなったと判断し経路情報リストから削除する。

図 5.2 を例に経路情報リストの管理について説明する。この例では図 5.2 の車両 B を中心に説明し、破線で示した円は車両 B の通信範囲である。図 5.2(a) の時刻  $t_1$  において、車両 B は通信範囲内にいる車両 A, C から経路情報を受信し、車両 A, C の経路情報を自身の経路情報リストへ書き込む。図 5.2(b) の時刻  $t_2$  において、車両 B は通信範囲内にいる車両 A から新たに経路情報を取得し、車両 B は自身の経路情報リストに書き込まれている車両 A の経路情報を更新する。車両 C については、車両 B の通信範囲外におり経路情報を受信できないため、車両 C の経路情報は更新されない。図 5.2(c)

の時刻  $t_3 (= t_1 + E_{ri})$  において，車両 B が管理する経路情報リスト内の車両 C の経路情報は最後に受信した時刻  $t_1$  から経路情報の有効時間  $E_{ri}$  の時間が経過したため経路情報リストから削除する．

### 5.1.2 経路選択

提案手法では，各車両は車車間通信を用いて受信した他の車両の経路情報と交通情報管理センタから配信される交通情報を基に各道路の期待混雑度を算出し経路選択を行う．提案手法における動作は次の通りである．

1. 各車両は現在地から目的地までの期待通過時間が最小となる経路を通過予定経路とし，現在地，目的地，予定通過経路を含んだ経路情報を通信範囲内にいる車両へ送信する．既存手法の協調カーナビと同様に，道路  $l$  の期待通過時間  $ETT_l$  は道路交通情報センタが配信する交通情報を用いる．
2. 他の車両から経路情報を受信した場合，自身が管理する経路情報リストに受信した経路情報の書き込み，更新を行う．経路情報リストには送信車両  $j$ ，時刻  $t$ ，車両  $j$  の経路情報  $ROUTE\_INFO_j$  を登録する．登録した経路情報の有効時間は  $E_{ri}$  とし，登録した時刻から  $E_{ri}$  経過した経路情報はリストから削除する．
3. 自身が管理する経路情報リストを用いて各道路の総通過重みを算出する．ここで，車両  $c$  が知る車両  $j$  の経路情報に対する道路  $l$  の通過重みを  $PW_{c,l,j}$  と定義する．経路情報リストに登録されている，ある経路情報の通過予定経路に含まれる道路数が  $p$  本である場合，目的地から現在地までの各道路に 1 から  $p$  を昇順に割り当てる．各道路に割り当てられた番号を通過予定経路に含まれる道路数  $p$  で正規化したものを，その経路情報に対する各道路の通過重みとする．通過予定経路に含まれていない道路に対する通過重みは 0 である．
4. 経路情報リストに登録されている全ての経路情報から各道路の通過重みを求め，各道路の総通過重みを算出する．車両  $c$  が求める道路  $l$  の総通過重みを  $TPW_{c,l}$  と定義する． $TPW_{c,l}$  は車両  $c$  が経路情報リストに登録している車両の道路  $l$  に対する通過重みの総和であり，式 (5.1) で求められる．ただし，式 (5.1) において， $RILIST_c$

は車両  $c$  の経路情報リストに登録されている車両の集合である。

$$TPW_{c,l} = \sum_{k \in RLIST_c}^k RW_{c,l,k} \quad (5.1)$$

5. 各車両は、先に求めた各道路の総通過重みと交通情報管理センタから配信される期待通過時間を基に期待混雑度を算出する。車両  $c$  が求める道路  $l$  の期待混雑度を  $ETC_{c,l}$  と定義する。車両  $c$  における道路  $l$  の期待混雑度  $ETC_{c,l}$  は総通過重み  $TPW_{c,l}$  と期待通過時間  $ETT_l$  から式 (5.2) で求められる。ただし、式 (5.2) において、 $a$  は正の定数である。

$$ETC_{c,l} = ETT_l \times (TPW_{c,l} + a) \quad (5.2)$$

6. 各車両は、現在地から目的地までの期待混雑度が最小となる経路を選択する。  
7. 1~6 の動作を繰り返す。

提案手法において、道路の重み付けを含めた経路選択手法は基本的に協調カーナビと同じである。協調カーナビと提案手法の違いは経路選択に用いる各道路の期待混雑度について共通の認識を持っているかどうかという点である。協調カーナビでは、経路情報集計サーバは全ての RIS 車両の経路情報を集計し、各道路の期待混雑度を算出し配信するため、RIS 車両は共通の期待混雑度に基づいて経路選択を行う。一方で、提案手法は車車間通信により受信した経路情報から各道路の期待混雑度を算出しているため、各道路に対する期待混雑度は車両ごとによって異なる。

## 5.2 DR 手法を適用した渋滞緩和手法

### 5.2.1 概要

5.1 節において、協調カーナビを基礎とする車車間通信を用いた経路情報共有手法を提案した。しかし、車車間通信により受信できる他の車両の経路情報は通信範囲内に限られるため、近傍の車両から受信した経路情報に基づいて混雑予測を行うことになり、有効な経路選択を行えない可能性がある。また、通信距離が十分長くない場合、

進行方向にある道路が混雑している場合、混雑している道路上にいる車両から経路情報を受信できないため、現在発生している混雑を検知できない。車車間通信においても有効な経路選択を行うためには、自身の周辺にいる車両の経路情報だけでは不十分であるといえる。そこで、5.1 節で提案した車車間通信による経路情報共有手法に DR 手法を適用し、移動経路の混雑状況を考慮した経路選択を行うようにする。DR 手法を用いることで、進行方向にある道路上で発生している混雑を考慮した経路選択を行うことが可能であり、渋滞緩和が期待できる。

### 5.2.2 期待混雑度表の作成

車車間通信による経路情報共有手法では、通信距離が十分でない場合に通信範囲外で発生している混雑の検知が困難であるため、最新の混雑状況を把握できる情報を共有する必要がある。そこで、各道路の期待混雑度を格納した期待混雑度表を作成する。

期待混雑度表の作成方法を図 5.3 に示す。はじめに、自身が管理する経路情報リストに登録されている経路情報から各道路の総通過重みを式 (5.1) より算出する。各道路の総通過重みと交通情報管理センタから配信される期待通過時間から各道路の期待混雑度を式 (5.2) より算出する。ただし、 $a = 0$  とする。これは、経路選択の際に自身の経路情報リストを基に求める期待混雑度に使用されている定数  $a$  の影響を、期待混雑度表の値と重複させないようにするためである。求めた各道路の期待混雑度を格納した期待混雑度表を作成し、自身のデータ領域に保持する。車車間通信において、各車両は自身の近くの車両と対向車線の車両の経路情報を収集するため、作成した期待混雑度表を参照することで走行している道路の対向車線の混雑状況を把握することが可能である。また、配布する情報を経路情報リストではなく期待混雑度表としたのは 1) 経路情報リストを配布対象にすると経路情報数が多いほどデータサイズが大きくなる、2) 自身の経路情報リストとの重複確認を行う必要があり短時間に経路選択を行うことが困難、3) ある道路を通った車両から経路情報リストを全く受け取れなかった場合にその道路の期待混雑度は混雑状況に関わらず小さく見積もられる、という理由があるためである。図 5.4 は、車両 B が混雑している対向車線の経路情報を収集している状況を示す。車両 B は対向車線上の車両から経路情報を受信する。対向車線が混雑して

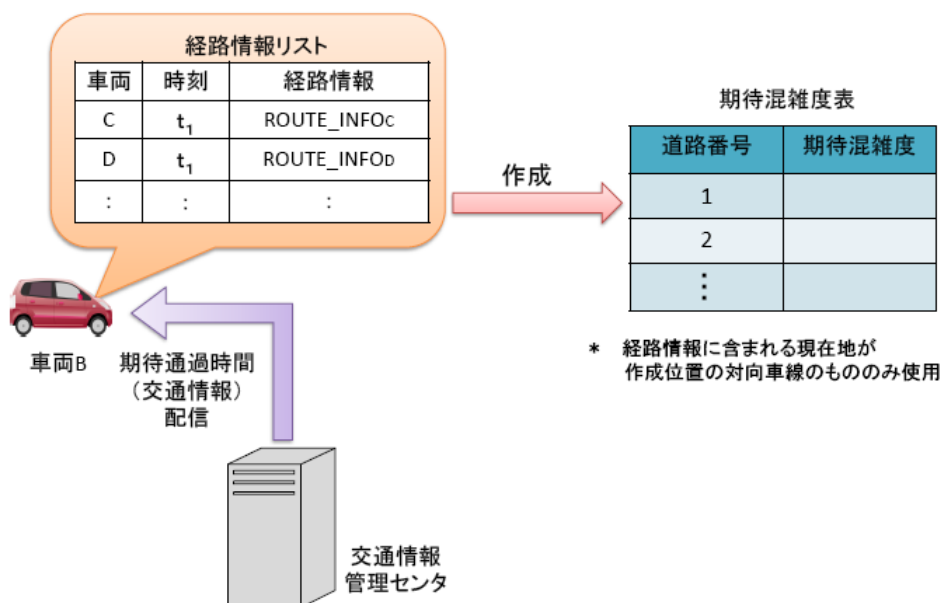


図 5.3: 期待混雑度表の作成

いるほど対向車線上にいる車両から受信する経路情報数が多くなるため、対向車線の総通過重みが大きくなり、総通過重みの影響を受ける期待混雑度も大きくなる。このことから、車両 B が作成した期待混雑度表には車両 B が走行している対向車線が混雑しているという情報が含まれる。車両 B が作成する期待混雑度表を混雑している道路へ進入しようとしている車両 A へ配布することで、車両 A は進入しようとしている道路が混雑していることを知ることができる。作成位置の対向車線の混雑状況を情報として残す必要があるため、通過重みの算出は経路情報に含まれる現在位置が作成位置の対向車線のものに限定する。

次に、期待混雑度表の作成時期について考察する。期待混雑度表の作成時間間隔を設定した場合、対向車線にいる全ての車両から経路情報を取得する前に期待混雑度表を作成してしまう可能性があり、混雑状況を正確に把握できない場合がある。そこで、期待混雑度表は交差点に差しかかった時に作成する。

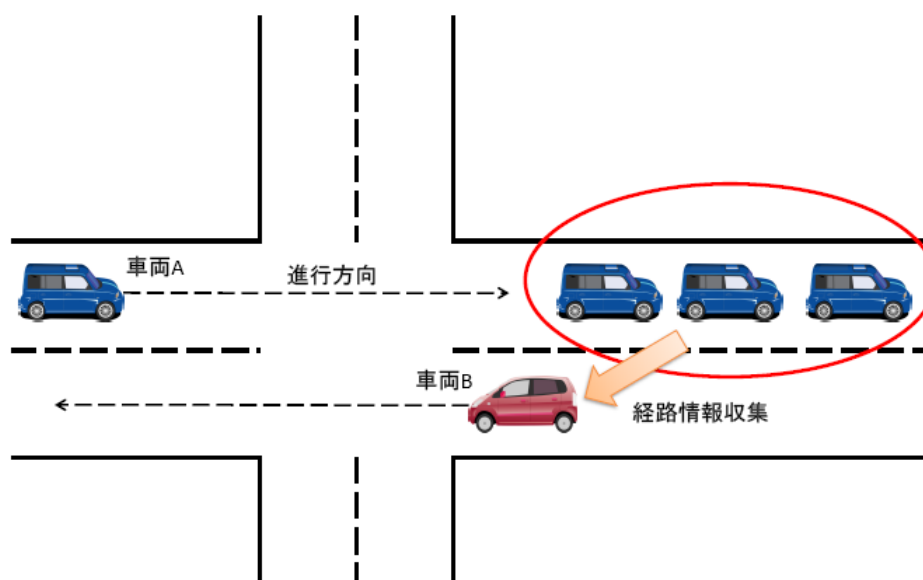


図 5.4: 対向車線上にいる車両の経路情報の収集

### 5.2.3 期待混雑度表の配布

5.1 節で提案した手法に DR 手法を適用させるため、対向車両に要求する期待混雑度表の作成範囲の指定エリアについて検討する必要がある。既存手法と提案手法の配布データの作成範囲の指定の一例を図 5.5 に示す。図 5.5(a) は 4.3 節で述べた DR 手法（既存手法）の指定方法。図 5.5(b) は提案手法に適用する場合の指定方法である。DR 手法では図 5.5(a) のように、現在から  $T_f$  秒後の位置を予測し、現在位置と予測位置を頂点とした矩形エリアを設定している。しかし、この方法に従い要求する期待混雑度表の作成位置を指定すると、迂回路となる道路で作成された期待混雑度表を要求対象から外すことになる。有効な経路選択を行うためには、進行方法の道路に加え迂回路の混雑状況も考慮する必要があるため、図 5.5(b) のように迂回路で作成された期待混雑度表も要求対象に含める。

次に、要求する期待混雑度表の作成範囲の絞りこみについて検討する。図 5.5(b) のように指定した期待混雑度表の作成範囲の中には、アクセスする可能性が低いため混雑状況を知る必要がない道路が含まれている。このため、期待混雑度表の配布重要度

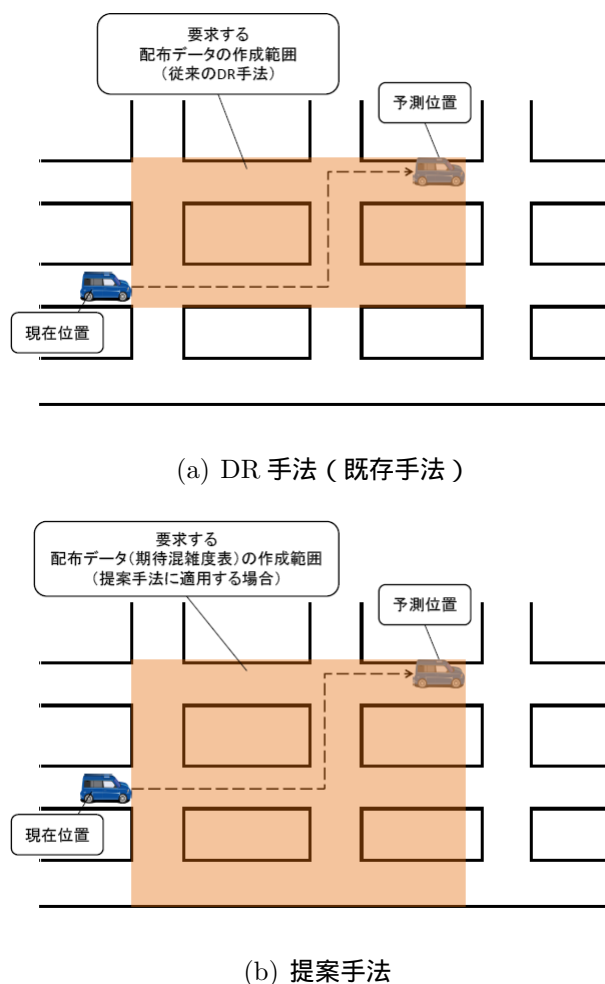
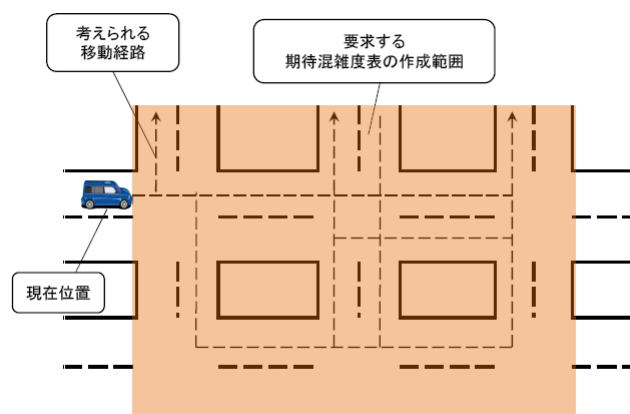


図 5.5: 要求する期待混雑度表 (配布データ) の作成範囲

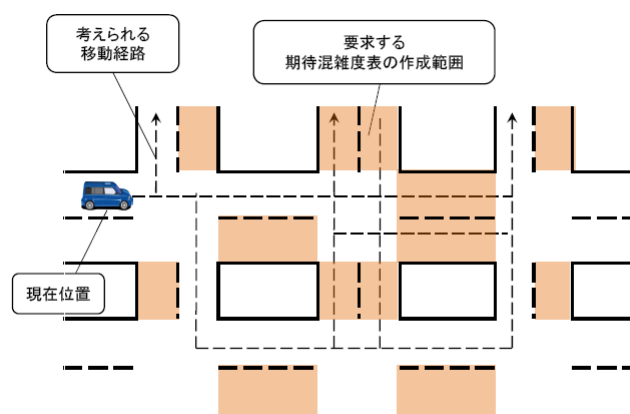
の高い順に配布を行うと必要のないものまで受け取る可能性がある．アクセスする可能性が高い道路の情報を多く受信できるようにするため，要求する期待混雑度表の作成範囲を絞りこむ必要がある．

要求する期待混雑度表の作成範囲を絞りこんだ例を図 5.6 に示す．図 5.6(a) は図 5.5(b) の現在位置付近を拡大した図で，破線は現在位置から  $T_f$  秒後の予測位置までに通過する可能性がある経路を示す．図 5.6(b) は図 5.6(a) で求めた考えられる経路から絞りこみを行った要求する期待混雑度表の作成範囲を示す．

現在位置から  $T_f$  秒後の予測位置に移動するまでに同じ交差点を 2 回以上通過しないという仮定をおいた場合に考えられる移動経路は図 5.6(a) の破線のとおりになる．し



(a) 要求する期待混雑度表の作成範囲内で考えられる移動経路



(b) 移動経路から指定した期待混雑度表の作成範囲

図 5.6: 要求する期待混雑度表の作成範囲の絞りこみ

たがって、破線が通っている道路の混雑状況を含む期待混雑度表を要求対象にし、該当しないものはその道路をアクセスする可能性が低いとため要求の対象から除外する。ある道路上で作成された期待混雑度表は、その道路の対向車線を走行する車両の経路情報を収集しているため、混雑状況を知りたい道路の対向車線で作成された期待混雑度表が要求対象となる。図 5.6(a) で示した移動経路から求めた要求する期待混雑度表の作成範囲は図 5.6(b) の通りである。

本節で提案した配布データの作成範囲の絞りこみを用いることで、対向車両からアクセスする可能性が高いデータを受信しやすくなると考えられる。一方、要求の対象



となるデータ数が減少するため、有益なデータが複数の車両間で共有されにくい可能性がある。広域な環境において多くの車両が有益なデータを共有するための配布手法の改善については今後の課題である。

#### 5.2.4 期待混雑度表を利用した経路選択

他の車両から配布された期待混雑度表には各道路の期待混雑度が格納されており、作成された道路の対向車線の混雑状況と対向車線にいた車両の通過予定経路に基づいた今後の混雑予測が示されている。現在地から遠い道路の情報が格納された期待混雑度表を経路選択に利用することで、より有効な経路選択を行うことが期待できる。

配布された期待混雑度表を利用した経路選択の方法を図 5.7 を用いて説明する。はじめに、現在から  $T_f$  秒後の予測位置を求め、現在地から予測位置まで移動する際に同じ交差点を 2 回以上通過しないという仮定をおいた場合に考えられる移動経路を求める。移動経路を求めたら通過する可能性がある道路の対向車線で作成された期待混雑度表を経路選択に利用する対象とする。例えば、現在位置、 $T_f$  秒後の予測位置が図 5.7(a) の場合、現在位置から予測位置までに移動する際に考えられる移動経路は破線で示した通りになる。この時、通過する可能性がある道路は破線が通っている 4 道路になるため、該当する道路の対向車線上で作成された期待混雑度表が経路選択に利用する対象となる。この例の場合、利用する期待混雑度表の作成範囲は図 5.7(a) で色がついている道路である。

次に、配布された期待混雑度表の中に利用する作成範囲内で作成されたものがあるかを確認する。経路選択に用いる期待混雑度表を 1 道路につき 1 つ選択する。1 つの道路上で作成された期待混雑度表を複数保持している場合、作成されてからの経過時間が最も短い期待混雑度表を採用する。図 5.7(b) は保持している期待混雑度表の作成位置を示す。図 5.7(b) のように指定した作成範囲の道路上で作成された期待混雑度表が揃っている場合、それぞれの期待混雑度表に格納されている各道路の期待混雑度の総和を求め、現在位置から目的地までの期待混雑度が最小となる経路を選択する。自身の経路情報リストと交通情報の期待通過時間を基に算出した期待混雑度と期待混雑度表に格納されている期待混雑度の総和を総期待混雑度 (Total Expected Traffic Congestion)

と定義する．車両  $c$  における道路  $l$  の総期待混雑度  $TETC_{c,l}$  は式 (5.3) で求められる．

$$TETC_{c,l} = ETC_{c,l} + \sum_{i \in USEDATA_c}^i DATA_{i,l} \quad (5.3)$$

式 (5.3) において， $ETC_{c,l}$  は 5.1.2 項の式 (5.2) で求める車両  $c$  の総通過重みと期待通過時間から求めた道路  $l$  の期待混雑度， $USEDATA_c$  は利用する期待混雑度表の集合， $DATA_{i,l}$  は期待混雑度表  $i$  に格納されている道路  $l$  の期待混雑度である．

図 5.7(c) のように，利用する期待混雑度表の作成範囲内の道路の中に保持していないものが存在する場合について考える．図 5.7(c) は，経路選択に利用するデータの作成範囲に含まれる 4 道路で作成された期待混雑度表が必要であるが，1 道路だけ保持していないことを示している．提案手法では，DR 手法に基づいて対向車両から通信可能時間内にできるだけ期待混雑度表を配布する手法をとっているため，通信可能時間や対向車線の交通状況によっては必要な期待混雑度表が全て揃わない場合が考えられる．期待混雑度表に格納されている各道路の期待混雑度は，作成位置の対向車線を走行していた車両の経路情報を基にしているため，保持していない作成範囲の対向車線の期待混雑度は他の道路に比べて相対的に小さくなる可能性が高い．したがって，期待混雑度表を保持していない作成範囲がある場合，その道路の対向車線の総期待混雑度に何らかの補正をかけた上で経路選択を行うのが妥当である．

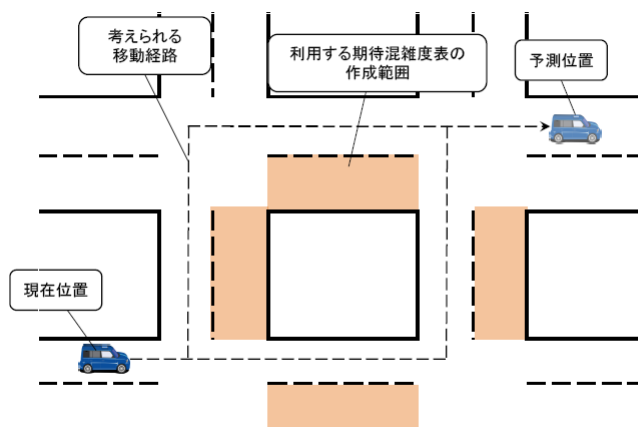
配布された期待混雑度表に格納されている期待混雑度から作成位置の対向車線の混雑状況がある程度推定できるため，その道路が空いている場合には進入し，混んでいる場合にはその道路を避けるよう判断できる補正をかけるのが望ましい．そこで，道路のパラメータである臨界密度を基準にして保持していない期待混雑度表の作成位置の対向車線に総期待混雑度の補正をかける．総期待混雑度の補正をかける道路  $j$  の道路長を  $L_j$ ，臨界密度を  $K_{c_j}$  とすると，道路  $j$  が臨界状態にある場合，すなわち車両密度が臨界密度に等しいと仮定した場合に道路  $j$  上に存在する車両数は  $L_j K_{c_j}$  である．ある車両に対する通過重みを求める時，現在位置の道路には 1 の通過重みが割り当てられるため，道路  $j$  上の全車両に対する道路  $j$  の総通過重みは車両数と等しい  $L_j K_{c_j}$  となる．よって，道路  $j$  にかける補正值  $C_j$  は式 (5.4) で求められる．

$$C_j = ETT_j \times L_j K_{c_j} \quad (5.4)$$

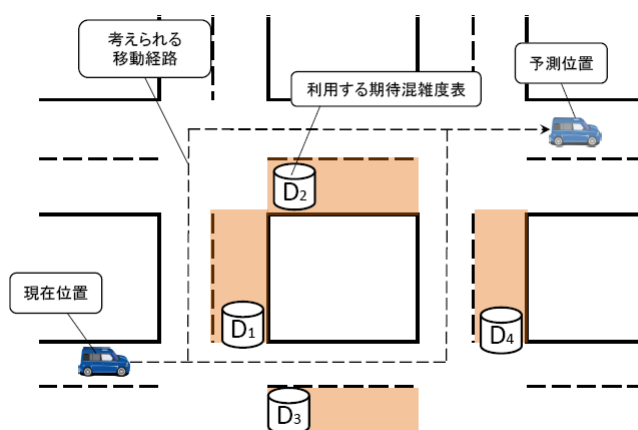
式(5.4)において、 $ETT_j$ は道路 $j$ の期待通過時間、 $a$ は正の定数である。道路 $j$ の対向車線で作成された期待混雑度表を保持していない場合、道路 $j$ の総期待混雑度 $TETC_{c,j}$ は式(5.5)で求められる。

$$TETC_{c,j} = ETC_{c,j} + \sum_{i \in USEDATA_c}^i DATA_{i,j} + C_j \quad (5.5)$$

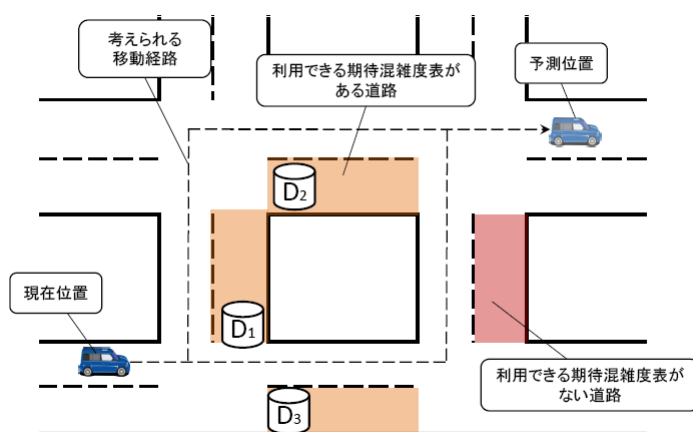
道路の臨界密度を基にした補正をかけることで、期待混雑度表を保持している作成位置の対向車線について、総期待混雑度が小さい場合はその道路は空いていると判断でき、総期待混雑度が大きい場合は混雑していると判断できるため、必要な期待混雑度表が全て揃っていない場合においても有効な経路選択を行うことが期待できる。



(a) 経路選択に利用する期待混雑度表の作成範囲



(b) 必要な期待混雑度表を全て保持している場合



(c) 保持していない期待混雑度表がある場合

図 5.7: 経路選択に利用する期待混雑度表の指定

## 第6章

### 評価

提案手法の有効性を確認するためシミュレーション評価を行った。本章では、評価環境、結果及び考察について述べる。

#### 6.1 評価環境

図 6.1 のような経路選択を 1 回行う単純な交通網を用いて評価する。各道路のパラメータを表 6.1、評価に用いる車両グループの出発地と目的地は表 6.2 の通りである。グループ A の車両は地点 1 を出発し分岐点に到達すると道路 2, 3, 4 の順に通過する経路 1、または道路 5, 6, 7 の順に通過する経路 2 のいずれかを通り地点 2 を目指す。経路 1 は経路 2 に対し距離が短いが交通容量が小さいため混雑した時の影響力が大きい。一方、経路 2 は距離は長いが交通容量が大きいため混雑した時の影響力は経路 1 に対して小さい。今回の評価で用いる交通網において、経路 1 は近道、経路 2 は主要道路とみなすことができる。グループ B の車両は地点 3 を出発し最短距離で地点 2 を目指す。グループ C の車両は地点 4 を出発し最短距離で地点 2 を目指す。各グループの需要と総出発車両数は表 6.3 で示した 2 パターンで評価する。パターン 1 は経路 1、パターン 2 は経路 2 の交通量が大きくなるため、それぞれの経路で混雑が発生しやすい場合を想定している。また、分岐点からグループ B, C との合流点まで距離があるため、提案手法では通信距離が短い場合に混雑を早い段階で検知できない可能性がある。今回の評価では、通信距離による影響についても検証を行う。また、今回の評価モデルは、車両を上手く分散させることで混雑の発生を回避可能な状況を想定してい

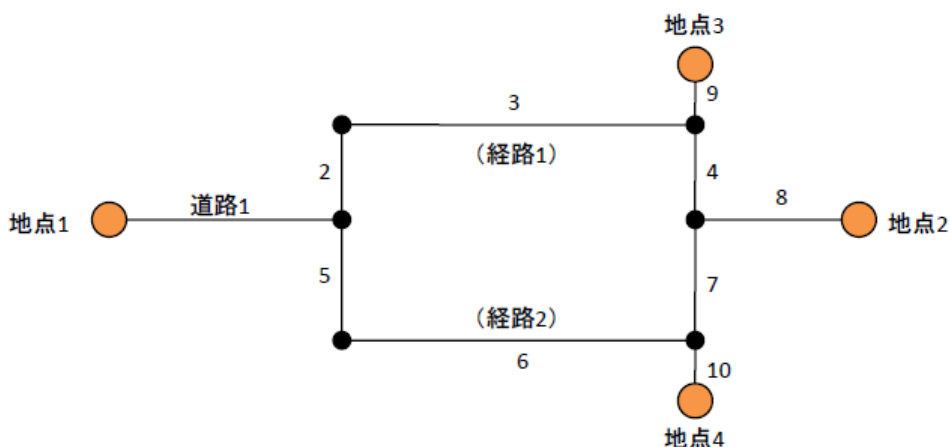


図 6.1: 評価に用いる交通網

る．需要は単位時間あたりに出発する車両を示した値で，需要の値が大きいほど単位時間内に出発する車両数が多くなるため，出発間隔が短くなる．車両の出発間隔は自身が所属するグループの需要の指数分布に従って決定する．出発間隔  $t$  [sec] を取る確率  $P(t)$  は式 (6.1) で求められる．ただし， $q$  [台/sec] は需要で，1秒あたりの出発車両数となっている点に注意する．

$$P(t) = q \times \exp(-tq) \quad (6.1)$$

また，今回の評価では次の仮定をおいてシミュレーションを行った．

- 交通シミュレーションモデルはハイブリッドブロック密度法を使用する．また，1シミュレーション時間は1秒とする
- 目的地に到着した車両は道路上から取り除く
- 各道路の期待通過時間（交通情報に相当）は交通情報管理センタがユーザに配信する方式を想定する．交通情報の更新間隔はVICISに従い300秒とする
- 提案手法との比較評価を行うため，協調カーナビにおいて経路情報集計サーバが配信する各道路の期待混雑度は1シミュレーション時間毎に更新する

- 協調カーナビ，提案手法の評価において，全ての車両は通信機器を搭載しているものとする
- 提案手法の評価において，自身の通信範囲内にいる全ての車両から経路情報を受信できる．通信の衝突は考えない

表 6.1: 各道路のパラメータ

道路番号	道路長 [m]	自由流速度 $V_f$ [km/h]	交通容量 $Q_c$ [台/h]	ジャム密度 $K_{jam}$ [台/km]	臨界密度 $K_c$ [台/km]
1	500	50	1200	200	24
2	200	50	800	200	16
3	600	50	800	200	16
4	200	50	800	200	16
5	400	50	1000	200	20
6	600	50	1000	200	20
7	400	50	1000	200	20
8	200	50	1200	200	24
9	50	50	800	200	16
10	50	50	1000	200	20

表 6.2: 評価に用いる車両の出発地と目的地

グループ	出発地	目的地	備考
グループ A	地点 1	地点 2	
グループ B	地点 3	地点 2	出発地から目的地までを最短距離で移動
グループ C	地点 4	地点 2	出発地から目的地までを最短距離で移動

表 6.3: 各グループの需要と総出発車両数

	グループ A		グループ B		グループ C	
	需要 [台/h]	総出発車両数 [台]	需要 [台/h]	総出発車両数 [台]	需要 [台/h]	総出発車両数 [台]
パターン 1	800	1600	400	800	0	0
パターン 2	800	1600	0	0	400	800



## 6.2 予備評価

提案手法の評価の前に，経路選択手法の基にしている協調カーナビの特性を知るため予備評価を行った．予備評価ではRIS戦略（協調カーナビ）の他にランダム，最短時間戦略（Shortest Time Route：ST）の計3種類の戦略を用いて比較評価を行った．ランダムは交通情報管理センタから配信される各道路の期待通過時間を考慮せず経路選択を行う戦略である．ST戦略は交通情報を基に期待通過時間が最小となる経路を選択する戦略である．表6.3に示した各パターンに対して10回試行し，経路選択を行うグループAの車両の平均旅行時間を比較した．また，RIS戦略において期待混雑度を求める際に用いる正の定数 $a$ は1.0とした．

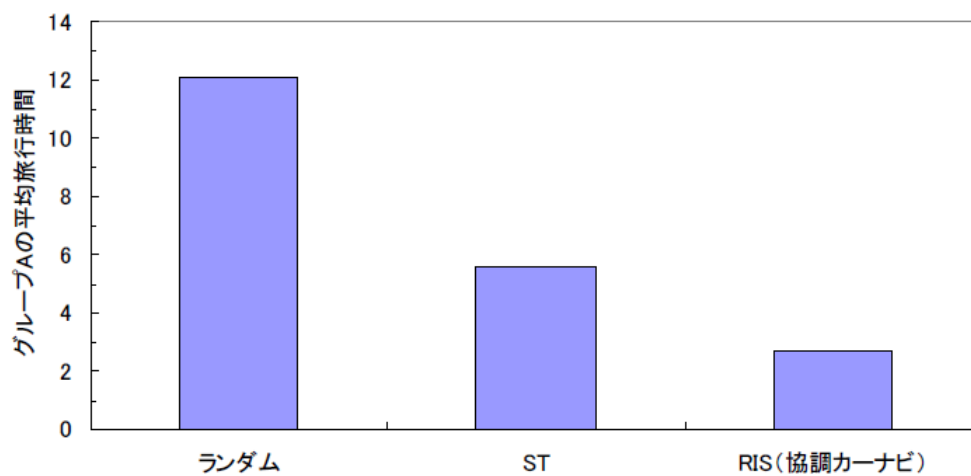
結果を図6.2～図6.6に示す．図6.2は各パターンにおけるグループAの平均旅行時間を示した図で，横軸は戦略，縦軸はグループAの平均旅行時間を示す．平均旅行時間は最短距離を自由流速度で移動した場合にかかる旅行時間を1に正規化している．図6.3は各戦略のグループAの累積出発車両数と各経路の流入量を示した図で，横軸はシミュレーション内の経過時間，縦軸は累積台数である．図6.4は各経路の期待通過時間の遷移をリアルタイムに示した図で，横軸は経過時間，縦軸は期待通過時間を示す．期待通過時間が初期値に対し相対的に高い程，その経路は混雑していることを意味する．図6.5は交通情報管理センタが配信する期待通過時間を示した図で，横軸は経過時間，縦軸は交通情報管理センタが配信する期待通過時間である．図6.6は協調カーナビにおいて経路情報集計サーバが配信する期待混雑度を示した図で，横軸は経過時間，縦軸は期待混雑度である．また，グループAの平均旅行時間以外はパターン1の結果のみ掲載する．図6.2より，RIS戦略は他の2戦略に比べパターン1，2ともに平均旅行時間が小さく渋滞を解消できていることがわかる．これは，RIS戦略では混雑しないよう車両を分散できていることを示している．

次に，各戦略の考察を行う．ランダムに経路選択を行う戦略では，交通情報に関わらず経路を選択するため選択の割合は図6.3(a)のように常に1:1になる．しかし，パターン1ではグループBの車両群が経路1の途中で合流するため，経路1の交通容量に対し交通量が大きくなるため混雑してしまう．ランダムでは，交通情報に関わらず

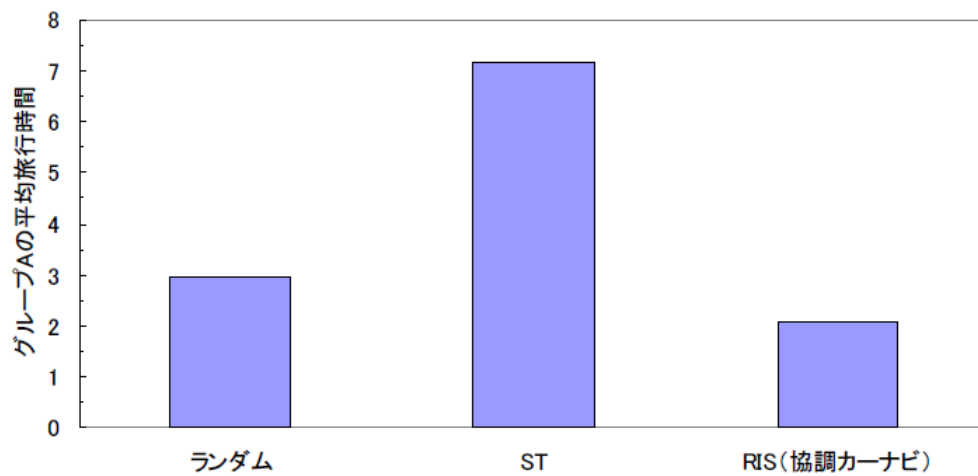
経路選択を行うため図 6.4(a) で示すように経路 1 での混雑が長期的に起きていることがわかる。このため、図 6.2(a) の通りパターン 1 では他の戦略に比べグループ A の平均旅行時間が大きくなったことがいえる。パターン 2 では経路 2 の交通容量が大きく混雑の影響がパターン 1 に比べ小さいことから、図 6.2(b) の通りグループ A の平均旅行時間は他の戦略と比べても十分小さい。

ST 戦略では、交通情報管理センタが配信する各道路の期待通過時間を基に、期待通過時間が最小となる経路を選択するため、1 つの経路へ車両が断続的に集中するハンチング現象 (hunting phenomenon) が発生していることが図 6.3(b) からわかる。この結果、図 6.4(b) より、混雑がそれぞれの経路で断続的に起きている。ハンチング現象はパターン 2 でも起きるため、パターン 1, 2 とともにグループ A の平均旅行時間が大きいことが図 6.2 より確認できる。

RIS 戦略 (協調カーナビ) では、図 6.3(c) よりグループ A の車両が分散されていることが確認できる。そのため、図 6.4(c) の通り経路 1, 2 とともに期待通過時間が大きく増加することなく目立った混雑は発生していない。また、図 6.6 より、経路 1, 2 の期待混雑度の大小関係は短い間隔で切り替わっていることから車両が分散できていることがいえる。以上の結果から、RIS 戦略では車両を分散し渋滞を緩和できていることがわかる。

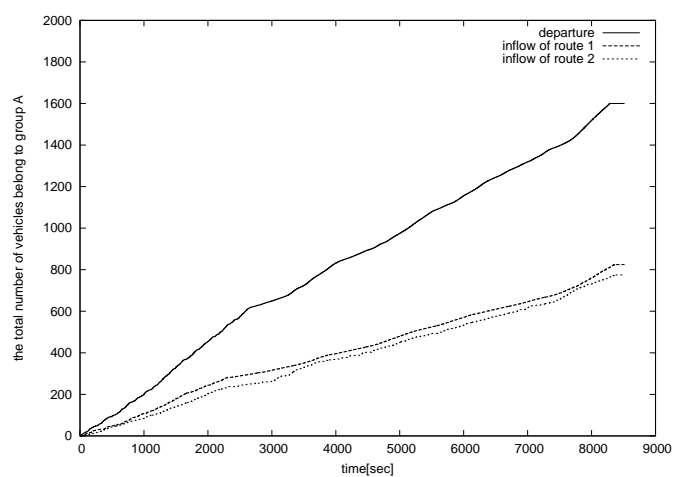


(a) パターン 1

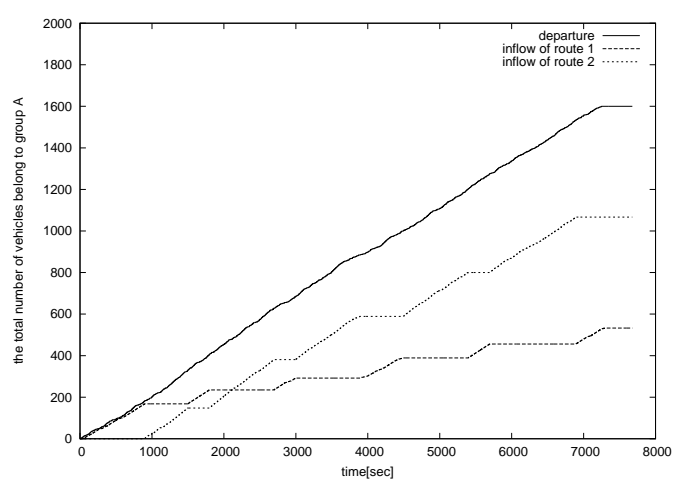


(b) パターン 2

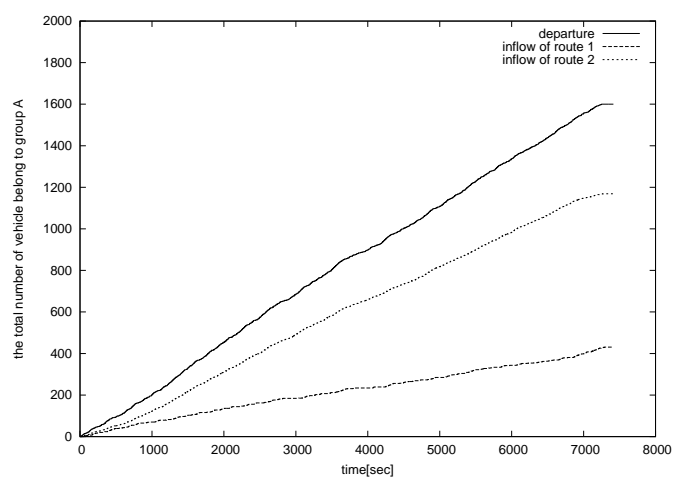
図 6.2: グループ A の平均旅行時間



(a) ランダム

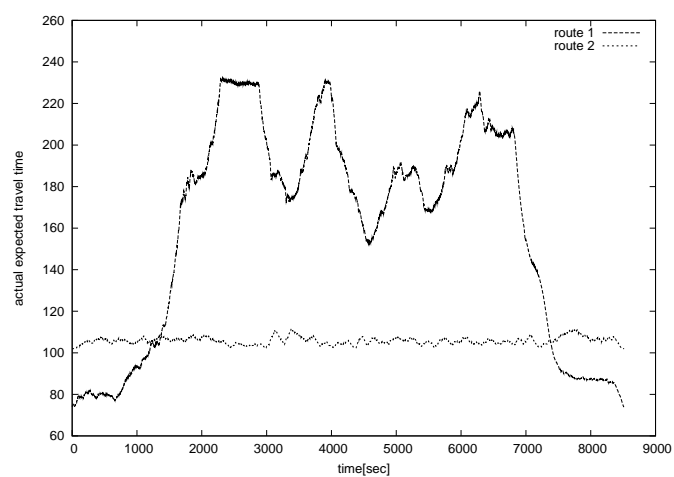


(b) ST

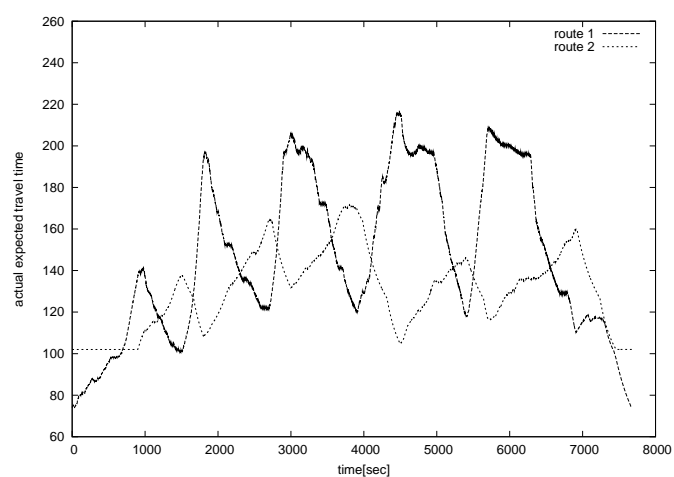


(c) RIS (協調カーナビ)

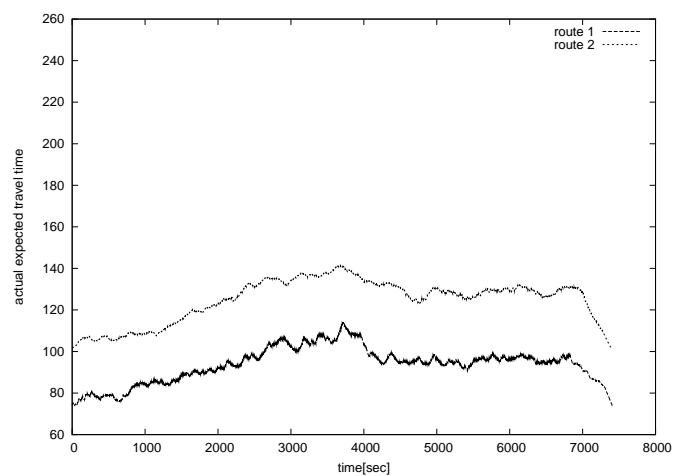
図 6.3: 累積出発車両数と各経路の流入量 (パターン 1)



(a) ランダム

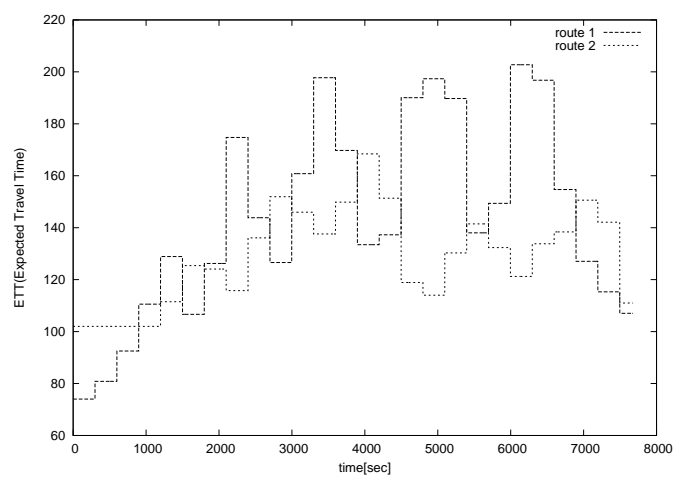


(b) ST

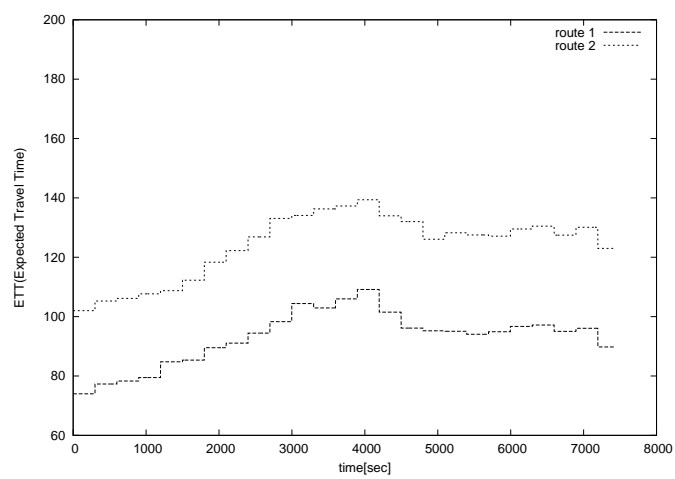


(c) RIS (協調カーナビ)

図 6.4: 各経路の期待通過時間の遷移 (パターン 1)



(a) ST



(b) RIS (協調カーナビ)

図 6.5: 交通情報管理センタから配信される各経路の期待通過時間 (パターン 1)

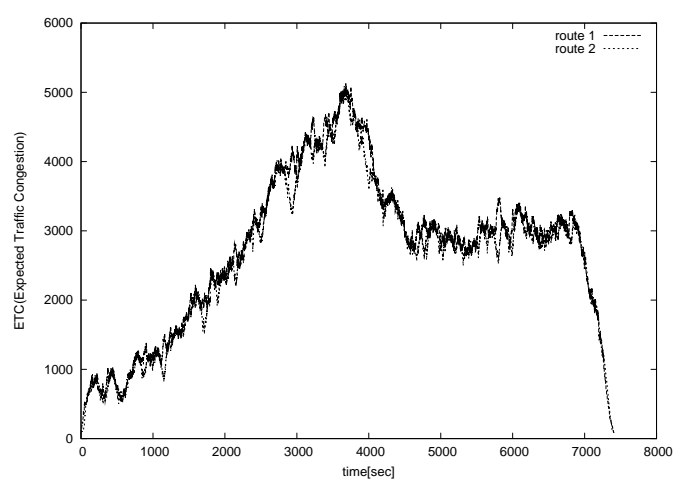


図 6.6: 経路情報集計サーバが配信する各経路の期待混雑度 (パターン 1)

### 6.3 提案手法 1 (車車間通信を用いた経路情報共有手法) の評価

5.1 節で提案した車車間通信を用いた経路情報共有手法の評価を行った。提案手法において通信距離が 50, 100, 200, 400, 500, 600, 800m の時の結果と協調カーナビ (集中型) の結果を比較した。予備評価と同様に表 6.3 に示した各パターンに対して 10 回試行し、経路選択を行うグループ A の車両の平均旅行時間を比較した。提案手法、協調カーナビともに期待混雑度を求める際に用いる正の定数  $a$  は 1.0, 受信した経路情報の有効時間  $E_{ri}$  は 60 秒とした。

結果を図 6.7~6.11 に示す。図 6.7 は各パターンにおけるグループ A の平均旅行時間を示した図で、横軸は通信距離、縦軸はグループ A の平均旅行時間を示す。横軸の指標に示した「集中型」は予備評価で行った協調カーナビの結果であり、平均旅行時間は最短距離を自由流速度で移動した場合にかかる旅行時間を 1 に正規化している。図 6.8 はパターン 1 におけるグループ A の累積出発車両数と各経路の流入量を示した図で、横軸はシミュレーション内の経過時間、縦軸は累積台数である。図 6.9 はパターン 1 における各経路の期待通過時間の遷移をリアルタイムに示した図で、横軸は経過時間、縦軸は期待通過時間を示す。パターン 2 のグループ A の累積出発車両数と各経路の流入量の遷移は図 6.10, 各経路の期待通過時間の遷移は図 6.11 にそれぞれ示す。

パターン 1 の結果について考察を行う。図 6.7(a) より、通信距離を長くすることで平均旅行時間が減少していることがわかる。これは、通信距離を長くすることで遠くで発生した混雑を早い段階で検知でき車両が分散できたためだと考えられる。図 6.8(a), 6.9(a) より、通信距離が 50m と短い場合は、シミュレーション開始から約 2000 秒経過したあたりから経路 1 で混雑が発生しているが、通信距離が短く混雑を早い段階で検知できないため、経路 1 への流入量が多く長期的に混雑が起きてしまっている。通信距離が 400, 800m と十分長い場合は、遠くで発生している混雑を早い段階で検知できるため図 6.8(b), 6.9(b) の通り、早い段階から車両が分散されている。この結果、図 6.9(b), 6.9(c) より、経路 1, 2 とともに期待通過時間の増加が抑えられていることが確認できる。今回の交通網の場合、通信距離が 800m では、経路選択を行う分岐点から経路

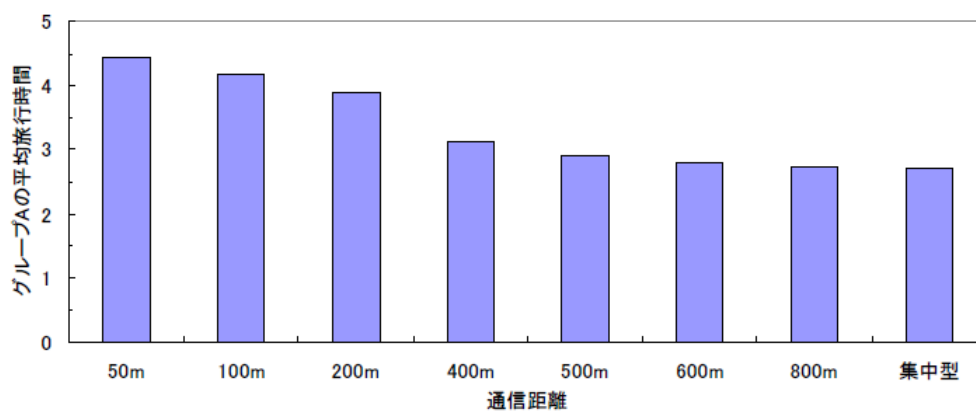


1, 2の合流点までが通信範囲に治まるため集中型に近い結果が得られた。全く同じ結果にならないのは、協調カーナビにおいて経路情報集計サーバが求める期待混雑度には自身の経路情報も考慮されているのに対し、提案手法で各車両が求める期待混雑度には自身の経路情報が考慮されていないためである。また、集中型の平均旅行時間と比較すると、通信距離が50mの場合は64.4%、400mの場合は15.6%増加した。ST戦略と比較した場合、通信距離が50mの場合は20.4%、400mの場合は44.0%減少した。

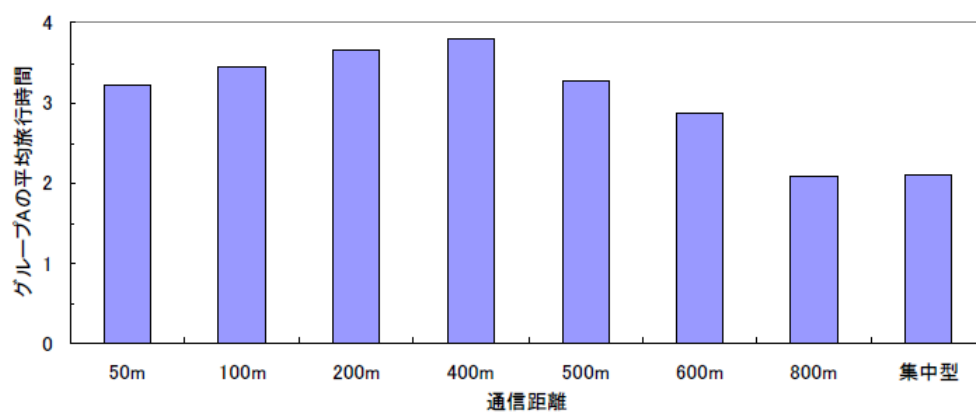
次にパターン2の結果について考察を行う。図6.7(b)より、通信距離を長くすると50mから400mの間では平均旅行時間が増加している。一方で400mから800mの間では平均旅行時間が減少している。このような結果になったのは、グループAの車両が分岐点に到達し経路選択を行う時に、その時点で経路1, 2上にいる車両から受信する経路情報よりも自身の後方を走行している車両から受信する経路情報の影響が大きいためだと考えられる。図6.11より、期待通過時間は経路1の方が常に小さいため、道路1を走行している車両は通過予定経路に経路1を選ぶ。通信距離が長い程、道路1を走行している車両から受け取る経路情報の個数が多く経路1の総通過重みが大きくなるため、経路1の期待混雑度が大きく見積もられることから経路2を選択する傾向が強くなると考えられる。このことは、図6.10(a), 6.10(b)で経路2の流入量が通信距離が50mの時よりも400mの時の方が大きいことからいえる。また、通信距離が400mの時に平均旅行時間が最も大きいのは、経路1にいる車両のうち道路2上にいる車両と道路3上いる車両の一部から経路情報を受信できるが、経路2からは道路5上の車両からしか経路情報を受信できないため、通過重みの割り当てに影響していることが要因の1つに考えられる。集中型の平均旅行時間と比較すると、通信距離が50mの場合は53.5%、400mの場合は81.4%増加した。ST戦略の平均旅行時間よりは小さいが、ランダム平均旅行時間と比較すると、通信距離が50mの場合は8.6%、400mの場合は28.3%増加していることから、十分に車両を分散できていないことがいえる。

提案手法の1つである車車間通信による経路情報共有手法は、パターン1ではST戦略よりも平均旅行時間を改善でき有効性を示せたが、パターン2では通信距離が十分長くないと効果が得られないことがわかった。これは、通信距離が短いと遠くで発生している混雑を早い段階で検知できないことと、後方の車両との競合を避けるため期

待通過時間が大きい経路を選択する傾向が強いためだと考えられる。

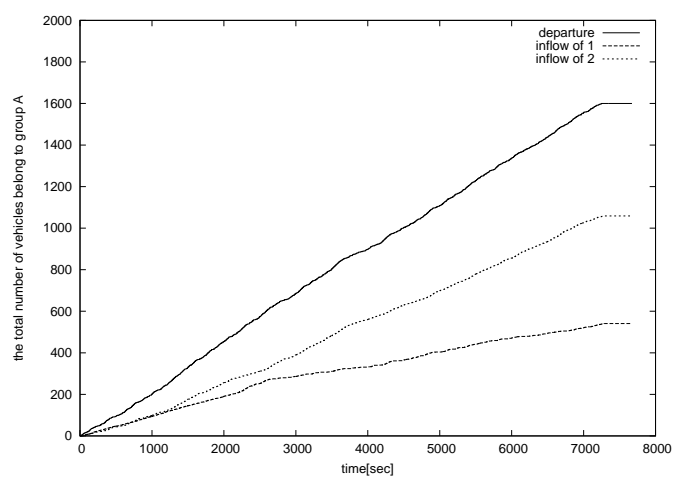


(a) パターン 1

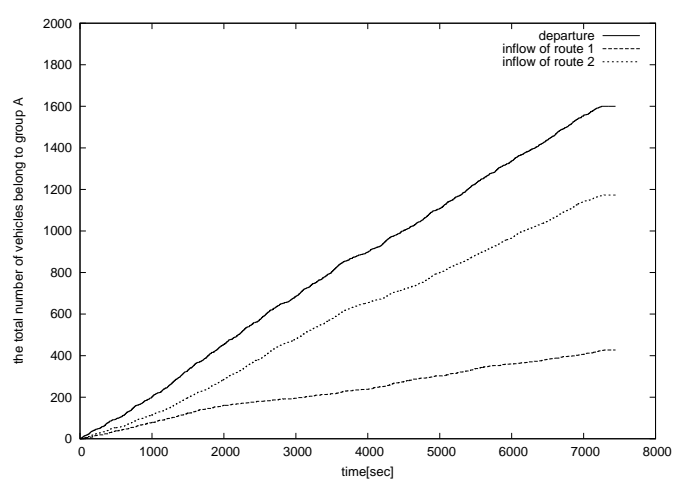


(b) パターン 2

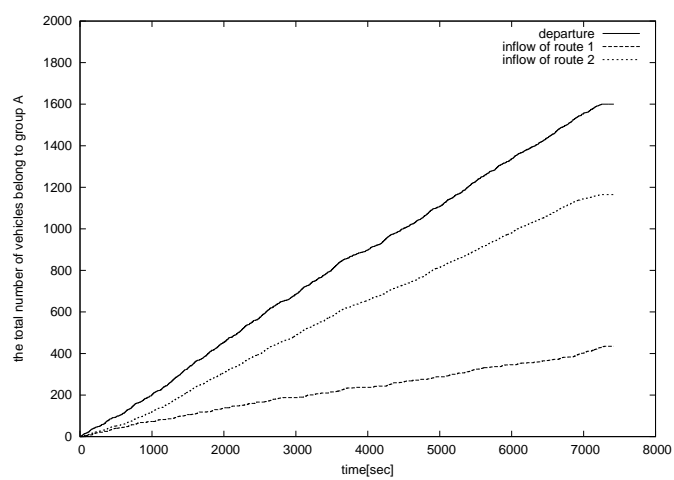
図 6.7: グループ A の平均旅行時間



(a) 通信距離 50m

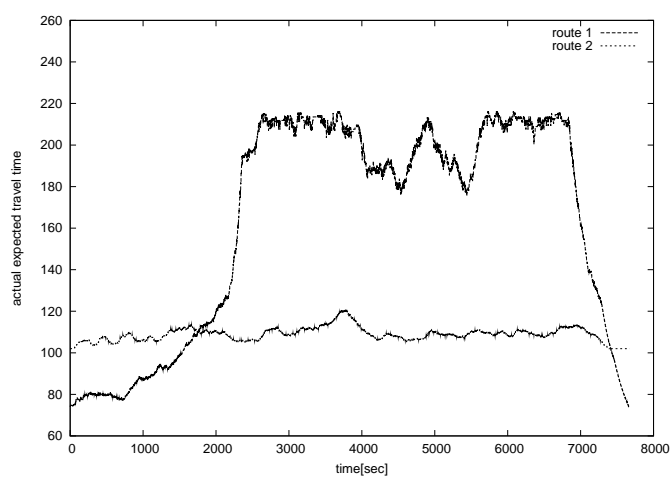


(b) 通信距離 400m

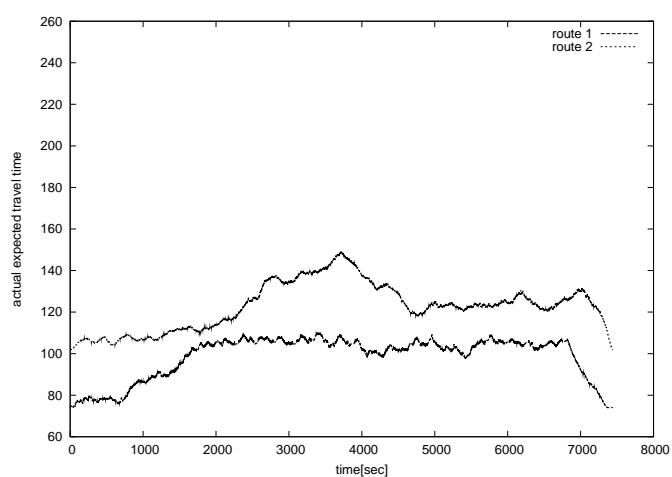


(c) 通信距離 800m

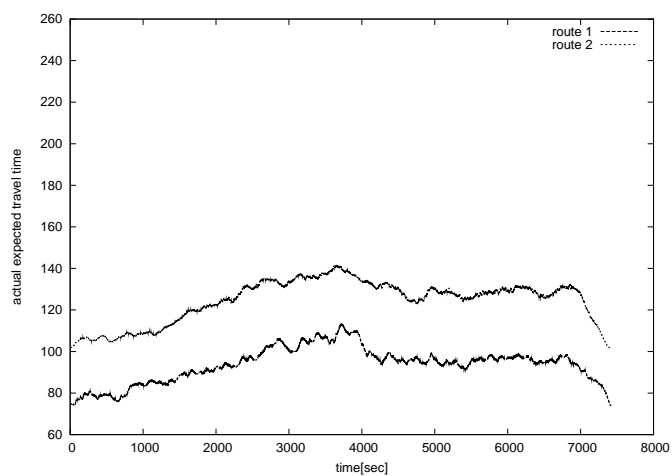
図 6.8: 累積出発車両数と各経路の流入量 (パターン 1)



(a) 通信距離 50m

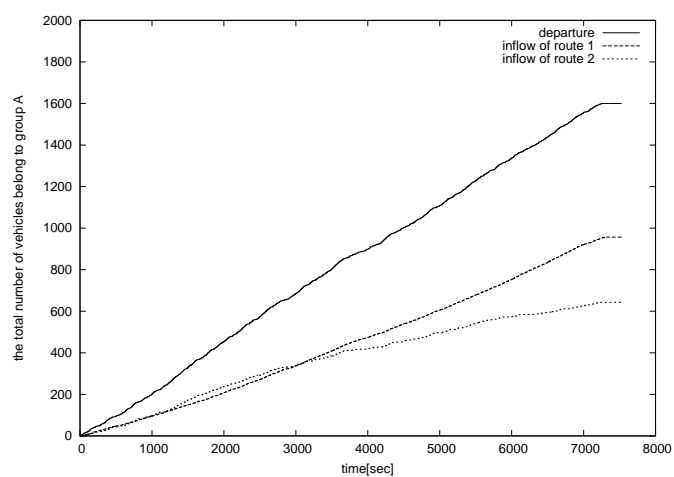


(b) 通信距離 400m

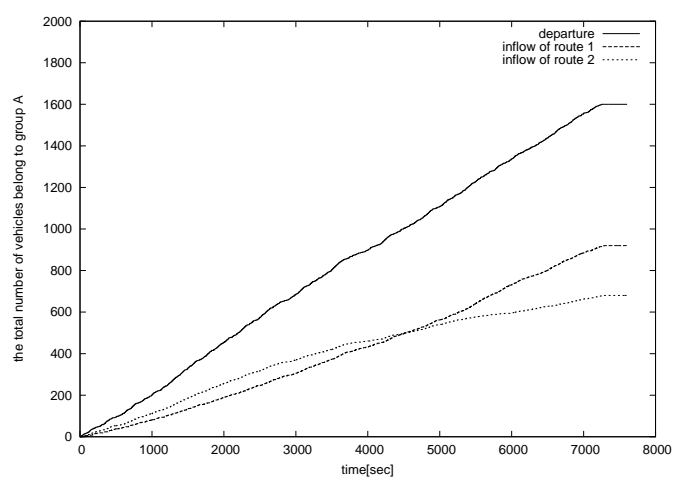


(c) 通信距離 800m

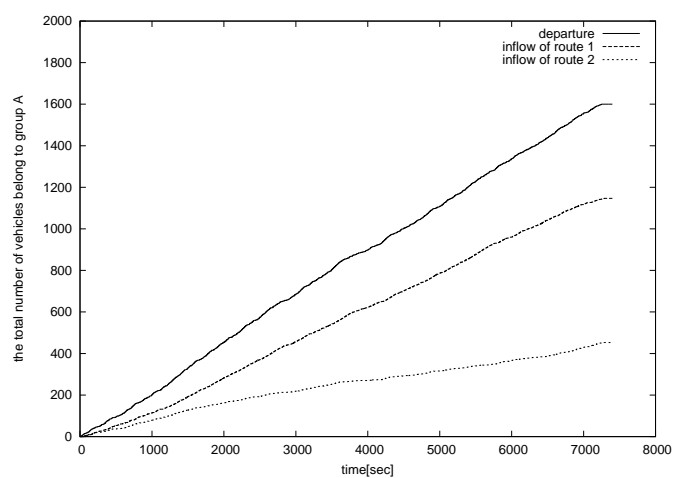
図 6.9: 各経路の期待通過時間の遷移 (パターン 1)



(a) 通信距離 50m

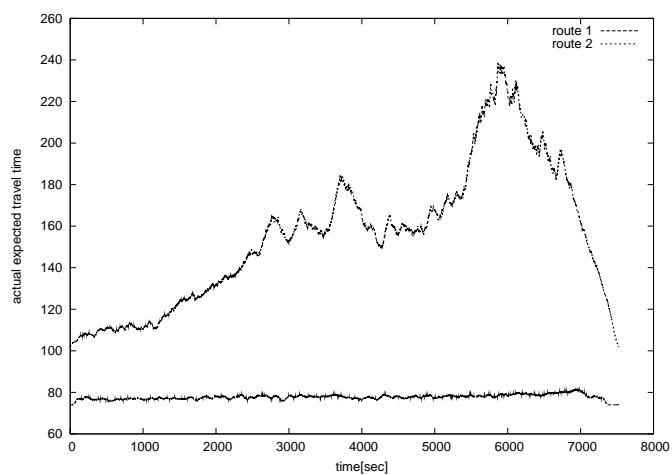


(b) 通信距離 400m

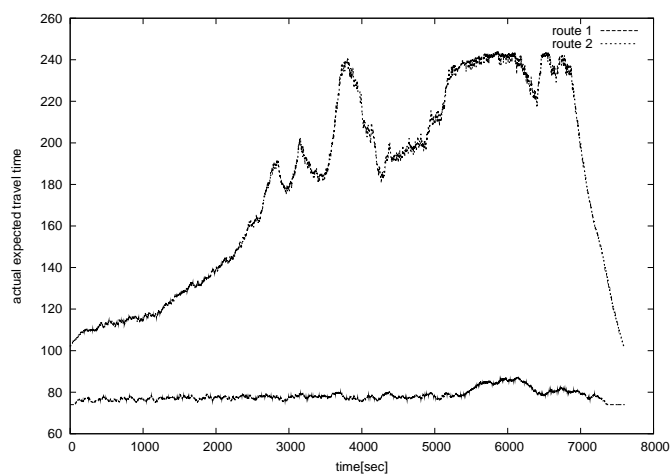


(c) 通信距離 800m

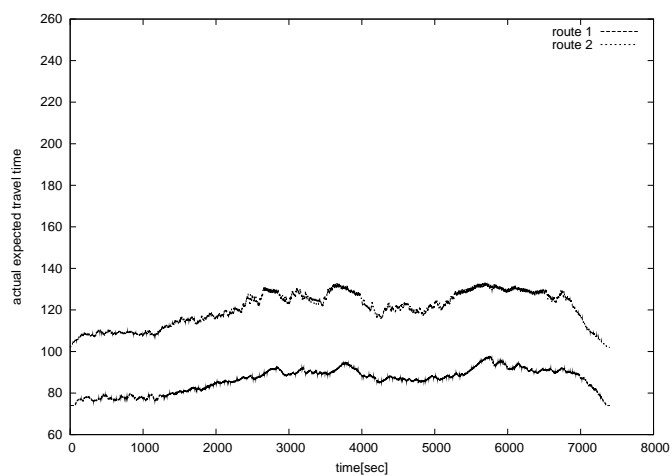
図 6.10: 累積出発車両数と各経路の流入量 (パターン 2)



(a) 通信距離 50m



(b) 通信距離 400m



(c) 通信距離 800m

図 6.11: 各経路の期待通過時間の遷移 (パターン 2)

## 6.4 提案手法2 (DR手法を用いた渋滞緩和手法) の評価

5.2節で提案したDR手法を用いた渋滞緩和手法の評価を行った。6.3節と同様に通信距離を変化させ協調カーナビの結果と比較した。表6.3に示した各パターンに対して10回志功氏、経路選択を行うグループAの車両の平均旅行時間を比較した。提案手法1, 2及び協調カーナビとも期待混雑度を求める際に用いる正の定数 $a$ は1.0とした。また、経路選択を行うグループAの車両に対し作成した期待混雑度表を配布する役割をはたす車両グループD, Eを追加して評価を行った。グループDの車両は経路1, グループEの車両は経路2を通過して地点2から地点1を目指すよう設定した。グループD, Eの出発地, 目的地, 移動経路の設定は表6.4, 需要と総出発車両数は表6.5の通りである。また、信頼度を求める際に用いる定数は $\alpha = 1.0, \beta = 0$ とした。配布した期待混雑度表がグループAの経路選択時まで保持できるように有効時間 $E$ は150秒とした。期待混雑度表の配布について、対向車両が通信範囲内に入った時点で接続を開始し、通信範囲内から出た時点で切断するとした。配布を行う車両は1車両に対して配布できる期待混雑度表は1秒あたり最大1つとした。

結果を図6.12~6.16に示す。図6.12は各パターンにおけるグループAの平均旅行時間を示した図で、横軸は通信距離、縦軸はグループAの平均旅行時間である。平均旅行時間は最短距離を自由流速度で移動した時の旅行時間を1に正規化している。図6.13はパターン1におけるグループAの累積出発車両数と各経路の流入量を示した図で、横軸はシミュレーション内の経過時間、縦軸は累積台数である。図6.14はパターン1における各経路の期待通過時間の遷移をリアルタイムに示した図で、横軸は経過時間、縦軸は期待通過時間を示す。比較のため、図6.13, 6.14とも提案手法1, 提案手法2, RIS (協調カーナビ) の結果を示す。提案手法1, 2の結果は共に通信距離が50mのものである。同様に、パターン2におけるグループAの累積出発車両数と各経路の流入量は図6.15, 各経路の期待通過時間を図6.16にそれぞれ示す。

図6.12より、パターン1, 2ともに提案手法2の平均旅行時間が提案手法1に対して通信距離が短い場合に大きく改善できた。特に、パターン2では、通信距離が400m以下の場合において、提案手法1では通信距離を長くしても効果が得られない問題があったが、提案手法2では改善できていることが確認できた。これは、配布された期

表 6.4: 情報配布用車両の出発地と目的地

グループ	出発地	目的地	備考
グループ D	地点 2	地点 1	必ず経路 1 を通過
グループ E	地点 2	地点 1	必ず経路 2 を通過

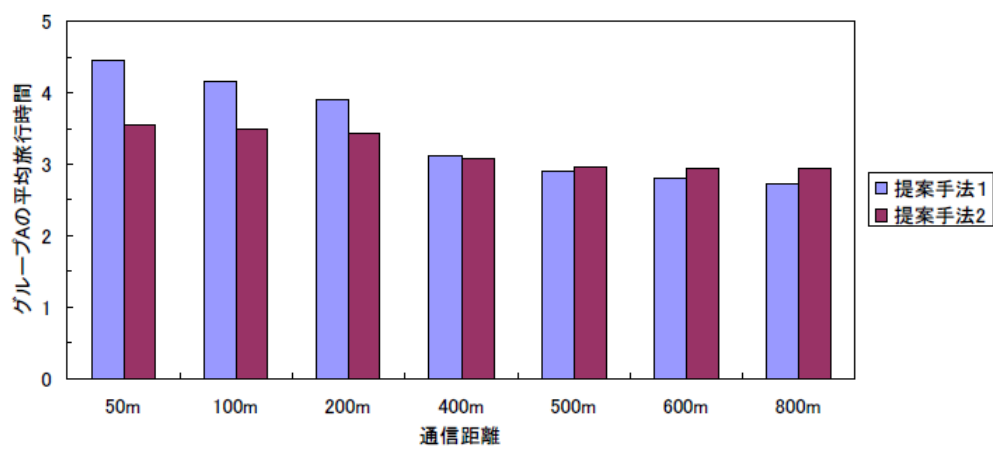
表 6.5: グループ D, E の需要と総出発車両数

	グループ D		グループ E	
	需要 [台/h]	総出発車両数 [台]	需要 [台/h]	総出発車両数 [台]
パターン 1, 2	100	200	100	200

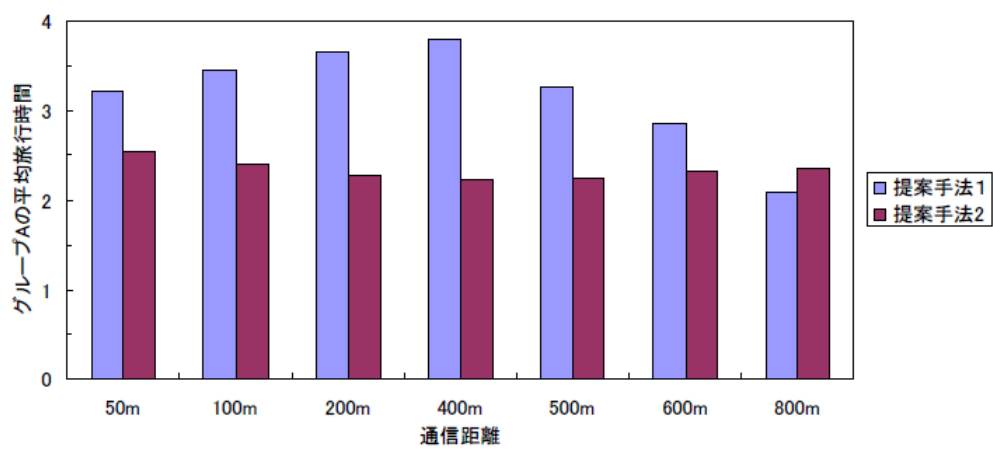
待混雑度表を利用することで混雑状況を考慮した経路選択を行えていることを示している。図 6.13~6.16 より、提案手法 2 では混雑している経路への流入が抑えられており、経路 1, 2 とも期待通過時間の増加量が小さいことから、車両が分散され混雑が緩和されていることがいえる。また、今回の交通網ではグループ A が経路選択を行う際には道路 2~7 のそれぞれの対向車線上で作成された期待混雑度表が必要であるが、通信距離が 50m の場合において経路選択時に必要な期待混雑度表を全て保持していた割合はパターン 1 では 72.9%、パターン 2 では 74.0%であった。一方で、通信距離が十分長い場合では、提案手法 1 よりも提案手法 2 の方が平均旅行時間が大きくなることが確認できた。これは、自身の通信範囲で混雑をリアルタイムに検知可能であるため、期待混雑度表を利用する効果が得られなかったためだと考えられる。

提案手法と予備実験で用いた戦略のパターン 1, 2 におけるグループ A の平均旅行時間をそれぞれ図 6.17(a), 6.17(b) に示す。提案手法 1, 2 の結果はともに通信距離が 50m のものである。RIS (協調カーナビ) に対し、提案手法 2 の平均旅行時間の増加量はパターン 1 で 31.1%、パターン 2 で 20.9%であった。しかし、他の戦略と比較すると、パターン 1 では ST 戦略に比べ 36.5%、パターン 2 ではランダムに比べ 14.5%改善され、通信距離が短い場合においても提案した車車間通信による渋滞緩和手法が有効であることを確認できた。



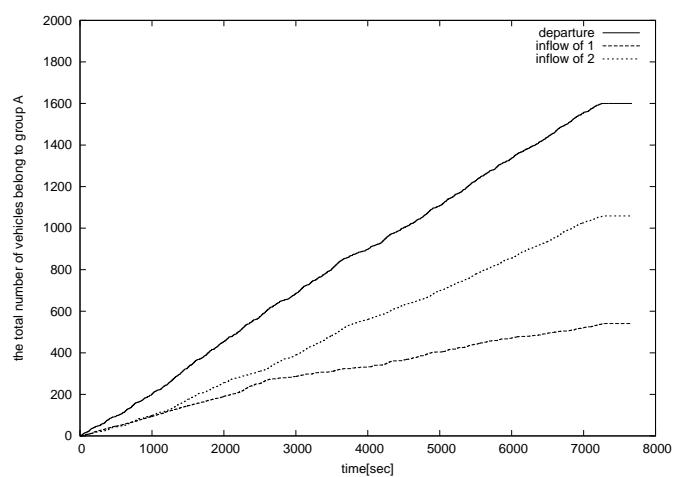


(a) パターン 1

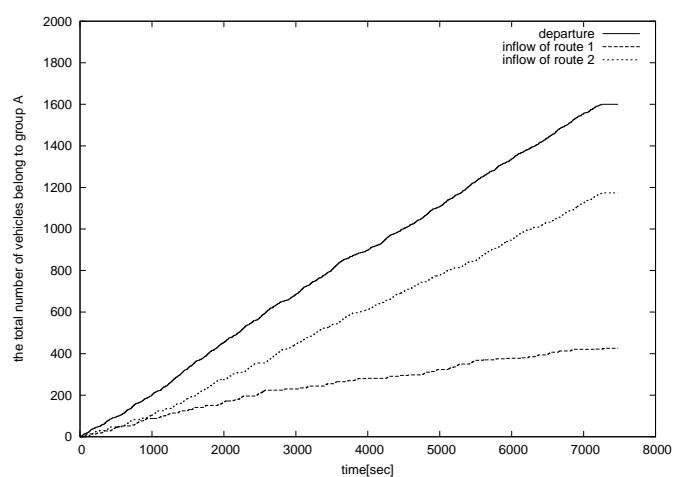


(b) パターン 2

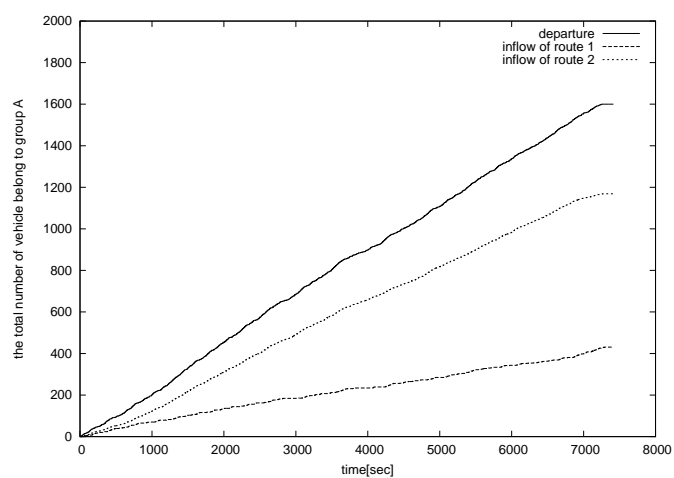
図 6.12: グループ A の平均旅行時間



(a) 提案手法 1 (通信距離 50m)

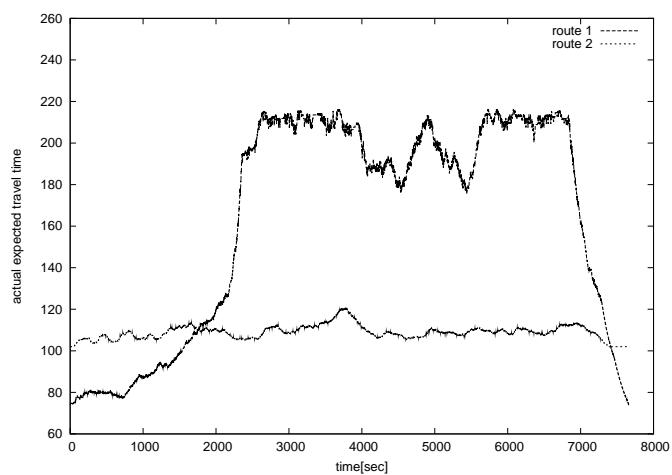


(b) 提案手法 2 (通信距離 50m)

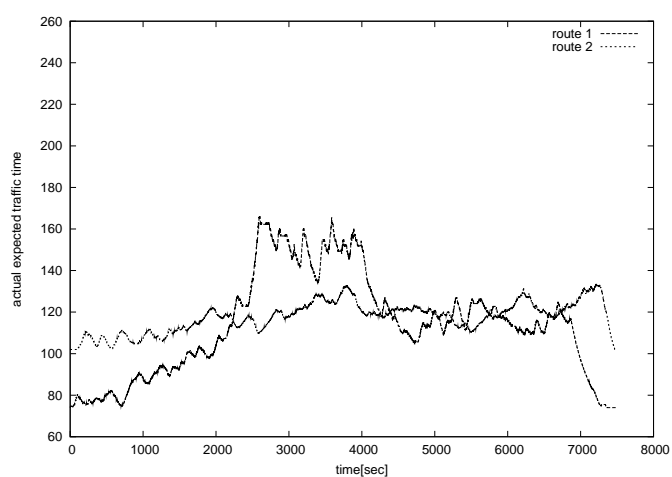


(c) RIS (協調カーナビ)

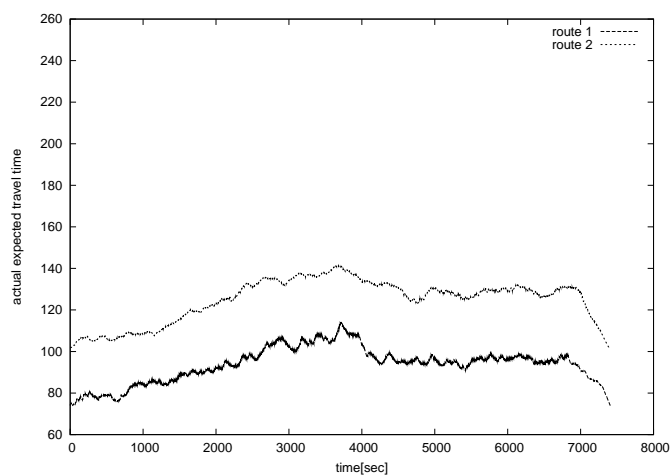
図 6.13: 累積出発車両数と各経路の流入量 (パターン 1)



(a) 提案手法 1 (通信距離 50m)

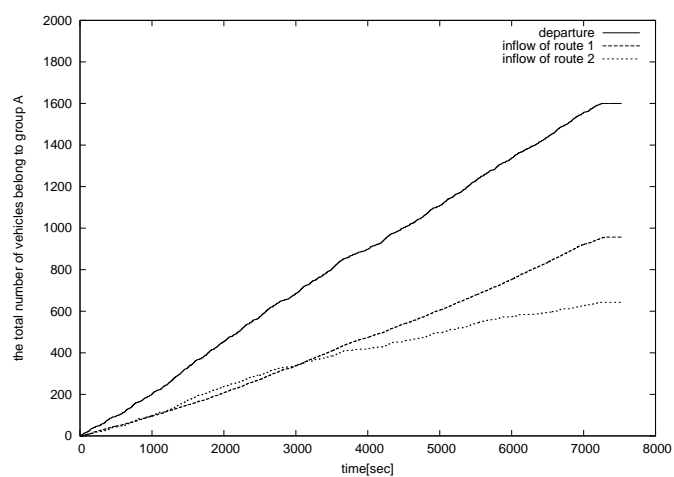


(b) 提案手法 2 (通信距離 50m)

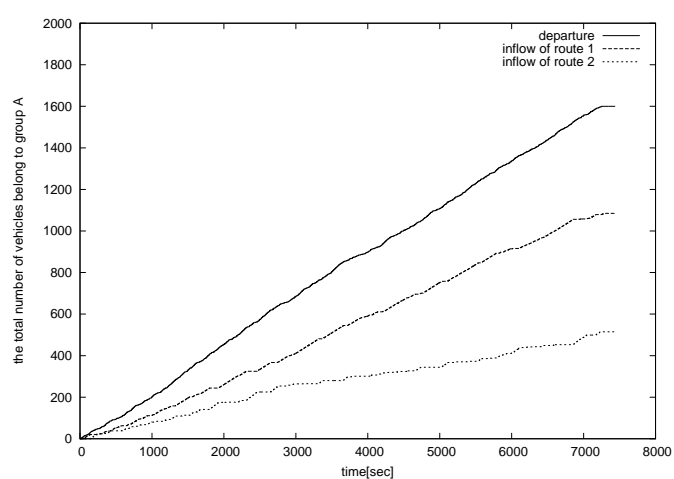


(c) RIS (協調カーナビ)

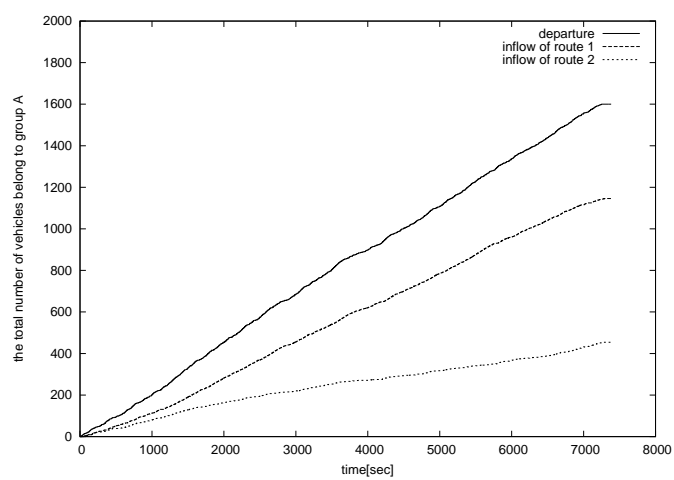
図 6.14: 各経路の期待通過時間の遷移 (パターン 1)



(a) 提案手法 1

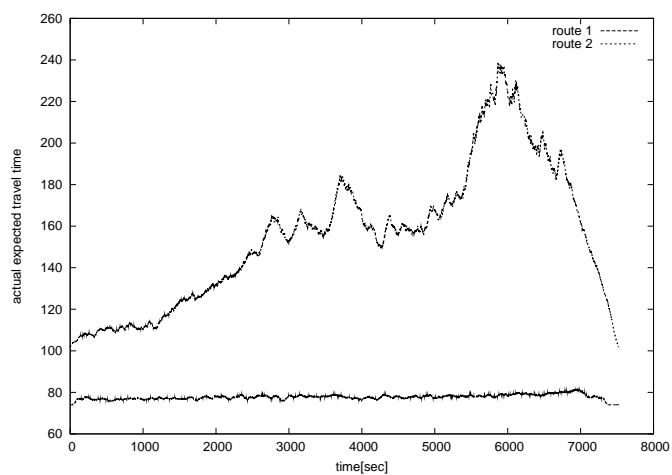


(b) 提案手法 2

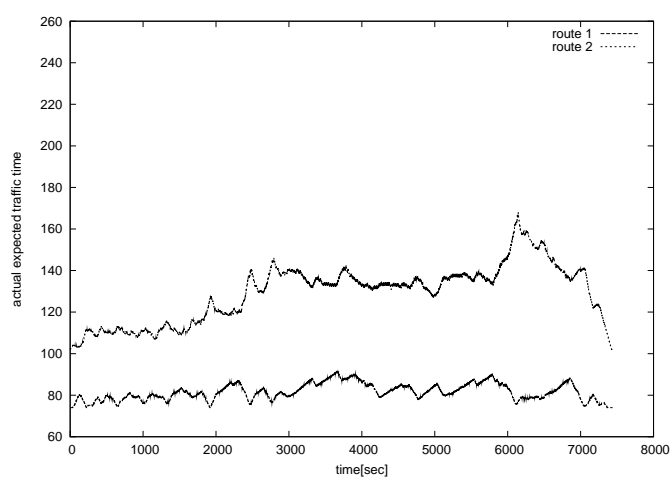


(c) RIS (協調カーナビ)

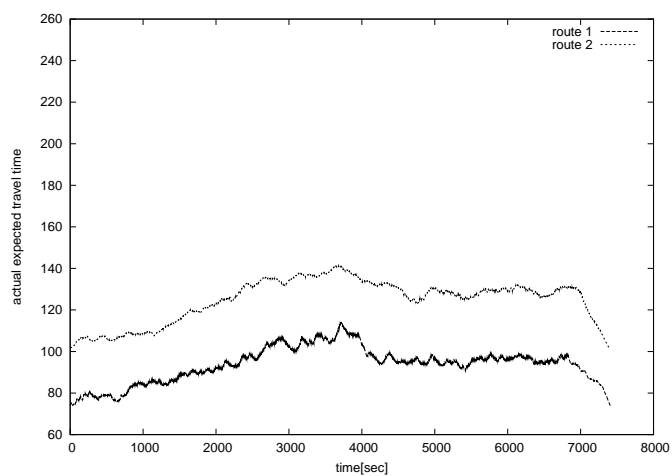
図 6.15: 累積出発車両数と各経路の流入量 (パターン 2)



(a) 提案手法 1

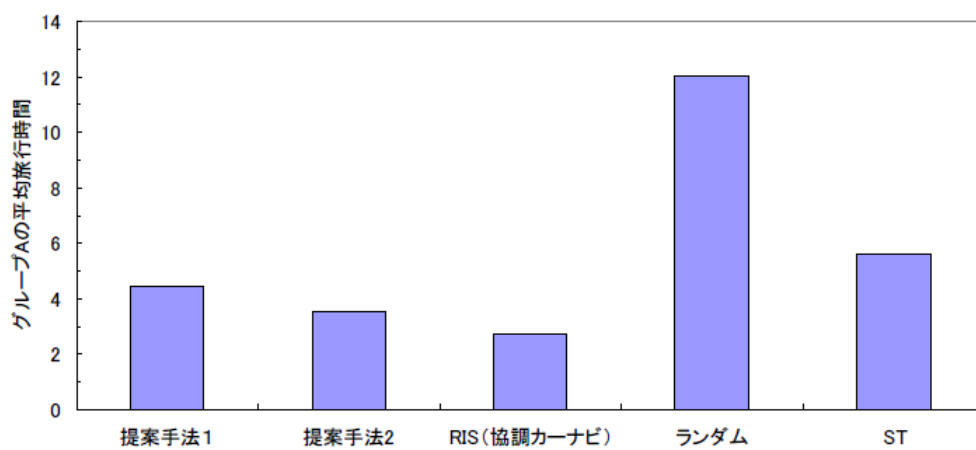


(b) 提案手法 2

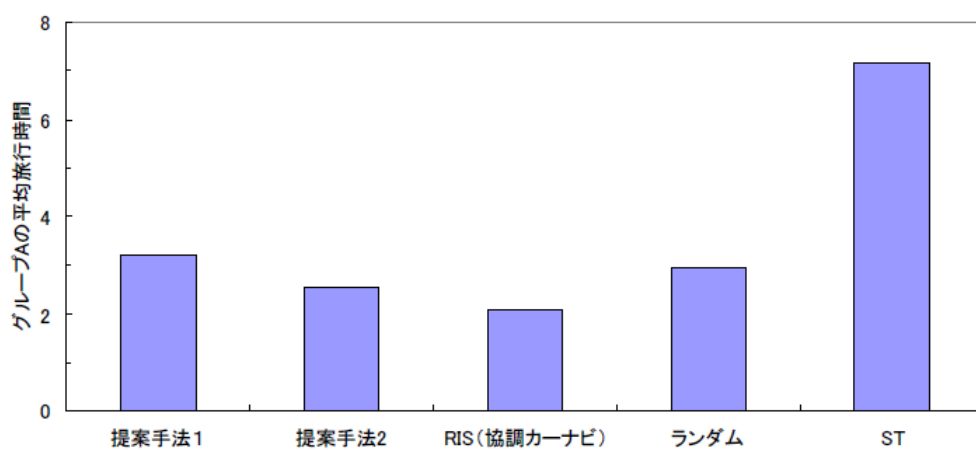


(c) RIS (協調カーナビ)

図 6.16: 各経路の期待通過時間の遷移 (パターン 2)



(a) パターン 1



(b) パターン 2

図 6.17: グループ A の平均旅行時間の比較 (提案手法は通信距離 50m)

## 第7章

### まとめ

本論文では、車車間通信を用いた経路情報共有手法と DR 手法を適用した渋滞緩和手法を提案した。

車車間通信を用いた経路情報共有手法では、協調カーナビを基に車車間通信により車両間で経路情報を共有することで混雑を回避した経路選択を行う検討した。

また、共有する情報が経路情報のみの場合、通信距離が短いと遠くで発生している混雑を検知できず有効な経路選択を行えない問題があったため、DR 手法を適用し必要な道路の混雑情報を共有し経路選択を行うよう改善した。

経路途中から別の車両群を合流させる評価モデルを用い、混雑状況を考慮した経路選択を行えるかを評価した結果、通信距離が短い場合においても混雑状況を考慮した経路選択を行うことができ、車両が分散されていることを確認した。また、ランダム、ST 戦略と比較して平均旅行時間が改善されたことを確認した。

今後は、通過重みの設定や期待混雑度表の作成時間を考慮した経路選択を行う必要がある。また、格子状網や放射状網など、より実地的な交通網で検討する必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり，多大な御尽力を頂いた松尾啓志教授，津邑公暁准教授，齋藤彰一准教授，松井俊浩助教に深く感謝致します．

また，本研究の際に多くの助言，協力をしていただいた松尾・津邑研究室，齋藤研究室の方々に深く感謝致します．



## 参考文献

- [1] 国土交通省. <http://www.mlit.go.jp>.
- [2] *VICS HOME PAGE*. <http://www.vics.or.jp>.
- [3] Internavi Premium Club インターナビ VICS. <http://www.premium-club.jp/technology/t1.html>.
- [4] *G-BOOK*. <http://g-book.com/pc/default.asp>.
- [5] Mahmassani H. S. and Jayakrishnan. System performance and user response under real-time information in a congested traffic corridor. *Transportation Research*, Vol. 25A, No. 5, pp. 293–307, 1991.
- [6] 山下倫央, 車谷浩一, 中島秀之. ”交通流の円滑化に向けた協調カーナビの提案”. *情報処理学会論文誌*, Vol. 49, No. 1, pp. 177–188, Jan 2008.
- [7] 佐合弘行, 篠原昌子, 原隆浩, 西尾章治郎. ”車車間通信を用いた情報共有のための配布履歴を考慮したデータ配布手法”. *日本データベース学会論文誌*, Vol. 7, No. 1, pp. 205–210, Jun 2008.
- [8] 新川崇, 寺内隆志, 木谷智哉, 柴田直樹, 安本慶一, 東野輝夫, 伊藤実. ”車車間通信を用いた渋滞情報集計システムにおける情報伝搬方式の改善”. *DICOMO2006 シンポジウム論文集*, pp. 225–228, 2006.
- [9] 西村豪, 小泉寿男, 澤本潤. ”車車間通信による車両情報を用いたリアルタイム交通流計測方式とその試作評価”. *情報処理学会 研究報告*, Vol. 2006, No. 121, pp. 65–70, 2006.

- [10] 道路網交通流シミュレーション (AVENUE). <http://www.kumagaigumi.co.jp>.
- [11] R. Horiguchi, M. Katakura, H. Akahane, and M. Kuwahara. "a development of a traffic simulator for urban road networks: Avenue". *Proceedings of Vehicle Navigation & Information Systems, Yokohama*, pp. 245–250, 1994.