

# 情報フローティングによる交通誘導に関する考察

宮北 和之<sup>†a)</sup> 柄沢 直之<sup>††</sup> 稲川 優斗<sup>††</sup> 中野 敬介<sup>††</sup>

## A Consideration on Traffic Guidance by Information Floating

Kazuyuki MIYAKITA<sup>†a)</sup>, Naoyuki KARASAWA<sup>††</sup>, Yuto INAGAWA<sup>††</sup>,  
and Keisuke NAKANO<sup>††</sup>

あらまし 情報フローティングとは、エピデミック通信における直接無線通信の送信を送信可能エリアだけに制限することにより、無秩序な情報拡散を防ぎながら指定された領域に入ってくる移動体に情報を伝達するための手法である。情報フローティングの応用として、災害等の影響により通信インフラが使えないような状況において、事故や工事のために進入できない領域に関する道路交通情報を配信し移動体に行動変化を促すことが考えられている。従来の研究では、この応用における情報フローティングが比較的単純なモデルにおいて理論的に評価され、その性質が明らかにされている。本論文ではより複雑なモデルとして格子状道路網を用いて、道路交通情報により移動体を進入制限エリアを迂回させるための情報フローティングを考える。この進路変更により影響を受ける道路やその交通量に着目し、特定の道路の極端な交通量の増加を防ぐために、移動体を空間的に分散させるための手法を考える。

キーワード エピデミック通信, 情報フローティング, 進入制限エリア, 交通誘導, 理論解析

### 1. ま え が き

エピデミック通信とは、移動体同士の直接無線通信による情報伝達と情報をもつ移動体の移動による情報の空間的な拡散を利用して情報を届ける手法である[1]~[3]。エピデミック通信は通信インフラを必要としないため、災害時等の通信手段として用いることができる。また、情報伝達が移動体の移動に依存するため、遅延をある程度許容する遅延耐性ネットワーク(Delay Tolerant Network: DTN)[2]を前提として使用されることが多い。

エピデミック通信により特定の領域(情報の宛先領域)の不特定の移動体に情報を配信することを考える場合に、エピデミック通信により無秩序に情報の拡散を行うと、その情報を必要としない地域にも情報が拡散するため、情報の無駄な拡散という問題が発生する。

このような問題を防ぐため、移動体が直接無線通信により送信できる場所を送信可能エリア(Transmittable Area: 以下 TA)だけに限定することで、TAにおける情報配信を継続しながら不必要な情報拡散を抑えることが考えられている。これは情報フローティング(Information Floating: 以下 IF)等と呼ばれ様々な研究が行われている[3]~[15]。

TAは必ずしも宛先領域と一致させる必要はないが、多くの場合TAと宛先領域は同一であり[5]~[15]、本論文でも同一であるとする。TAは、情報源が位置や大きさを設定することとする。このとき、周囲の道路状況や移動体の空間密度等を元にして不必要な情報拡散を抑えつつ情報配信を継続させるために、適切な値に設定する。情報源は、配信すべき情報と一緒に設定したTAの情報も送る。情報を受け取った移動体は、同時に受け取ったTAの位置の情報を元にして、自身の位置がTAに入っている間、他の移動体への送信を行う。ここで、各移動体は自身の位置をGPS等により把握できるという前提である。このようにして、目的のTAにおけるIFによる情報配信が可能になる。

IFの性能は移動体の移動に密接に関係するため、IFの研究においては、直線状移動モデルや平面上のランダムウォーク、ランダムウェイポイントモデル等の

<sup>†</sup> 新潟大学情報基盤センター, 新潟市  
Center for Academic Information Service, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

<sup>††</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市  
Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

a) E-mail: miyakita@cais.niigata-u.ac.jp

DOI:10.14923/transcomj.2017JBP3066

様々な移動モデルを仮定して、IF が十分に長い時間継続するための TA の大きさ等の解析が主に行われてきた [5]~[14]. これらの解析では、情報源（最初に情報をもっている移動体）が最初に TA に入るところから IF が始まると仮定している．その後は情報源が TA に入ることはなく、情報源以外の移動体同士の情報のやり取りだけで IF を継続させることやその評価を目的としている．

また、IF の応用として、通信インフラを使用せずに事故情報配信を行い、それによる交通誘導を行うことが考えられている [8], [10], [14], [15]. これらの応用では、事故現場から周辺に緊急事故情報配信を行うために、通信インフラに頼らず、移動体同士が IF により直接情報交換を行うことが考えられている．また、災害時において常設の通信インフラ（セルラ方式における固定網につながる基地局やインターネットにつながる無線 LAN のアクセスポイント等）が使えないような状況においても、事故情報配信や交通誘導のために IF を使うことが考えられる．

これらの研究は、1 次元の道路上における IF による事故情報配信の理論解析から始まり、図 1 のようなモデルにおける IF の継続時間の理論解析が行われている [8], [10], [14].

その後、文献 [15] では、事故情報を配信することにより移動体が事故現場を回避するような行動変化を行えるような状況を想定し、事故現場の手前の交差点で移動体が迂回できるように交差点の手前に TA を定め IF を行うことが考えられている．更に、[15] では図 2 のように事故現場に固定情報源（Fixed Source: 以下 FS）があることを想定しており、この点が [5]~[14] と大きく異なる点である．[15] で詳細に議論されているように、事故現場には事故車両または事故車両の運転手がいることが想定され、この運転手が IF を開始することもあるし、反対車線を走行する車両の運転手が IF を開始することもあるが、このようなことを想定して図 2 のように交差点の手前に FS が存在することが仮定されている．それにより、事故を起こした後に速やかに情報配信を開始することで、通信インフラを利用できない場合でも事故現場に近づくような移動体に事前に情報を渡すことができる [15]. この場合、IF による行動変化が更に IF に影響を及ぼすということも考慮に入れた理論解析と TA の設計について述べられている．具体的には、情報を受け取れない確率  $P_f$  と所望の  $P_f$  を実現するために必要な TA の大きさの理

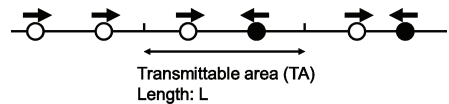


図 1 文献 [8], [10], [14] におけるネットワークモデル  
Fig. 1 Network model in [8], [10], [14].

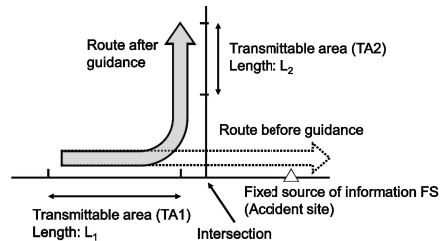


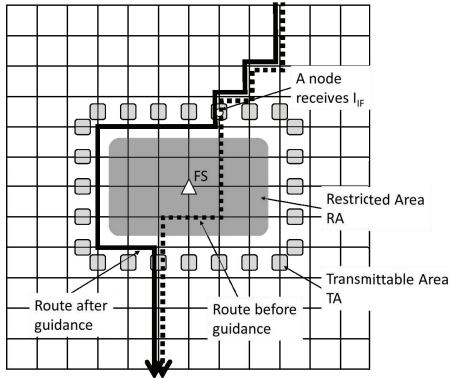
図 2 文献 [15] におけるネットワークモデル  
Fig. 2 Network model in [15].

論計算が行われている．

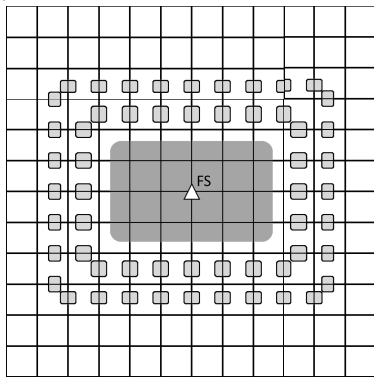
このように、[15] では、FS の存在と IF による移動体の行動変化を考慮しつつ IF を行うことを考えており、これらの要素を考慮した IF の特性解析は、IF に関する他の研究 [4]~[14] では行われていない．また、[15] では、図 2 のような単純な構造をより一般的な構造に拡張し、その性質を明らかにすることが課題として残されていた．

そこで、本論文ではネットワークモデルを図 3 のような格子状道路に拡張し、IF による情報配信による交通誘導を行うことを考え、理論的な手法とシミュレーションを用いてその性質を明らかにする．IF による交通誘導として、災害等により通信インフラが使えない場合に、建物の復旧作業や事故現場の修復等が行われていて進入することが制限される場所を、IF により周辺の移動体に伝えることを考える．このような進入が制限される領域を進入制限エリア（Restricted Area: 以下 RA）と呼び、RA を迂回することを促す情報  $I_{IF}$  を IF によって配信することとする．

ここで、基本的に RA は一般の人が入らないほうがよい場所であるので、一般の人全てが入らないようにできることが望ましい．しかし、後述するように、IF だけでは完全に進入を制限することはできない場合もある．もちろん、IF によって情報を受け取れなかった人には作業員が直接誘導するなど、また別の誘導も考える必要がある．ただし、災害時の通信インフラも使えないような状況において緊急に進入制限を行うための手段としては IF により高い確率で誘導できれば



(a) RA に垂直に向かう道路区間上に TA を設定



(b) RA に垂直に向かう 2 段の道路区間上に TA を設定

図 3 格子状ネットワークモデルと進入制限エリア  
Fig. 3 Lattice network model and a restricted area.

大きな助けになると思われる。ここで、RA と TA の設定は、例えば復旧作業や事故現場の作業員が行うことが考えられる。この場合、この作業員が FS となり、送るべき情報は RA の情報であり、その情報と一緒に IF に必要な TA の情報を送ることになる。図 3 のような格子状道路ネットワーク上を移動体が移動するが、図中の RA を迂回させるために、移動体は RA に到達する前に情報を受け取ることが望ましいので、RA の周囲に TA を定め、そこで IF を行うことにより移動体は RA に到着する前に進路を変更し、RA を迂回できる。

本論文では、図 3 のように RA に垂直に向かう道路区間に TA を設定することを考える。こうすることで、元々 RA を通過するように進んでいた移動体が必ず通過する道路区間に TA を設定できる。また、TA の範囲を拡大したい場合に直線的に伸ばすことで、文献 [15] で示されている既存の理論解析手法を応用して

移動体が情報を受け取れずに RA に進入してしまう確率  $P_f$  及び所望の  $P_f$  を実現するために必要な TA の大きさと段数を理論的に求めることができることを示す。

また、前述のように、災害時において通信インフラが使用できないような状況における復旧作業現場、工事現場などを RA として想定すると、RA の大きさとしては複数の道路区間で囲まれるような比較的広い領域が想定される。このような場合に移動体が TA において情報を受け取り RA を迂回することにより特定の地域に移動体が集中することを示す。これを考えるときに、理論計算とシミュレーション結果を用いる。

更に、混雑を軽減するために、当初設定した RA の他に大きめの RA を仮想的に設定し、迂回経路を複数種類にすることで混雑の抑制を行うことを考える。理論解析を基にしてこの手法の最適化を行い、シミュレーションにより混雑緩和への有効性を示す。

本論文では、[15] における図 2 のモデルを図 3 のように格子状に拡張しているものの、理論解析結果を利用した交通制御を考えているため、まだ比較的単純なモデルを考えている部分もある。しかし、この単純化によって考慮されない要因も幾つかあるので、シミュレーションにより、これらの要因を考慮した上での提案手法の評価も行う。

2. では、本論文で対象とする格子状ネットワークモデル及びその他の定義と仮定について説明する。3. では、RA の手前で移動体に情報を渡すための TA の設定について説明し、このように TA を設定した場合における  $P_f$  の解析手法、所望の  $P_f$  を実現するための TA の大きさと段数を示す。また、交通誘導の結果としてどの道路区間がどの程度混雑するかを、理論解析とシミュレーションにより示す。4. では、交通誘導の結果として生じる混雑を軽減するために複数種類の RA を確率的に提示するという手法を考え、シミュレーションにより評価する。5. では、単純化したモデルでは考えられていない幾つかの要因を考慮した上で、提案手法をシミュレーションにより評価する。最後に 6. で本論文をまとめる。

## 2. 定義と仮定

本論文では、図 3 のような格子状ネットワークを考える。隣り合った交差点の間には道路区間があるが、各道路区間には二方向の対向車線があるものとする。各道路区間の長さは  $a = 500$  m であり横 6000 m × 縦

6000 m の領域をサービスエリアとし、サービスエリアの中心に固定情報源 FS があるものとする。また、進入制限エリア RA は、FS を中心として、横方向の長さ  $x_{RA}$ 、縦方向の長さ  $y_{RA}$  の長方形とする。ここで、RA を内部に含むような道路区間の横方向の本数を  $n_x = 2 \lceil \frac{x_{RA}}{2a} \rceil$ 、縦方向の本数を  $n_y = 2 \lceil \frac{y_{RA}}{2a} \rceil$  とおく。

全ての移動ノードは一定速度  $v$  で進む車であり、サービスエリアの各端点から密度  $\lambda$  のポアソン過程に従って進入し、進入してきた辺とは別の辺上の端点へ向かって移動するものとする。サービスエリアを出るまでの経路はサービスエリアに進入してきた時点で決めているものとする。このとき、遠回りするように移動したり、来た道を戻ったりすることのないように、下記のような移動モデルを考える。移動方向に関して、下記の 4 種類の移動ノードが等しい割合（それぞれ  $\frac{1}{4}$ ）で存在しているものとする。

- $N_1$ : サービスエリアの左側または下側から進入し、各交差点で右または上に移動する。
- $N_2$ : サービスエリアの左側または上側から進入し、各交差点で右または下に移動する。
- $N_3$ : サービスエリアの右側または下側から進入し、各交差点で左または上に移動する。
- $N_4$ : サービスエリアの右側または上側から進入し、各交差点で左または下に移動する。

これらのノードは、各交差点において確率  $p_{turn}$  で曲がり、確率  $1 - p_{turn}$  で直進するものとする。このようにして決められた経路に沿って各ノードが移動した場合、全ての道路区間の各車線において、ノードの分布は密度  $\lambda$  のポアソン過程に従うことが容易に確認できる。

送信可能エリア TA は図 3 のように RA を囲むように設定する。具体的な設定については次節で説明する。IF によって配信する情報を  $I_{IF}$  とし、FS を通過したノードは FS から直接  $I_{IF}$  を受け取る。また、ノード同士での  $I_{IF}$  のやり取りをする際、送信側ノードが TA 内に存在しており、かつ送受信ノード間の距離が  $r$  以下の場合に、送信側ノードから受信側ノードに  $I_{IF}$  が渡される。 $r$  は直接通信可能距離である。

図 3(a) の点線の矢印のように RA の内部を通過するような経路を進む予定であったノードが、TA 近辺で他のノードから  $I_{IF}$  を受け取った場合、図 3(a) の実線の矢印のように RA を避けるように進路変更を行う。進路変更を行う際は、迂回を最小限にするために

RA の縁に沿った経路に変更するものとする。逆に、 $I_{IF}$  を受け取れなかった場合は、図 3(a) の点線の矢印のままの経路を進むことになり、RA の内部を通過することになる。

### 3. IF による交通誘導と混雑の発生

#### 3.1 TA の設定

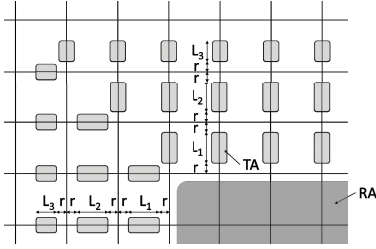
前節で説明した状況において、ノードが RA に進入することを防ぐための TA の設定を説明し、ノードが情報を受け取れずに RA に進入してしまう確率  $P_f$  及び所望の  $P_f$  を実現するために必要な TA の大きさと段数を理論的に求めることができることを示す。

本論文では、図 3 のように RA に垂直に向かうような道路区間に TA を設定することとする。こうすることで、元々 RA を通過するように進んでいたノードが必ず通過する道路区間に TA を設定できる。また、 $P_f$  を下げたいときには TA を広げる、あるいは増やすということが必要になるが、ここでは、一つの道路区間内で必要な大きさの TA を確保できない場合には、もう 1 段外側の道路区間にも TA を設定することとする（図 3(b)）。このように、TA の範囲を拡大したい場合に直線的に伸ばすことで、文献[15]で示されている既存の理論解析手法を適用して  $P_f$  を解析できるようにする。

具体的な TA の設定手法として、図 4(a) のように、RA に最も近い交差点から  $r$  だけ離れた位置から開始して、RA から離れる方向へ長さ  $L$  の TA を設定することを基本とする。ただし、一つの道路区間に設定できる TA の長さの上限を  $a - 2r$  とし、 $L$  がこれを超えた場合には、残りの長さの TA をもう 1 段外側の道路区間に設定することとする。つまり、RA に近い方から順に、 $\left\lceil \frac{L}{a-2r} \right\rceil - 1$  段目の道路区間までは長さ  $a - 2r$  の TA を設定し、 $\left\lceil \frac{L}{a-2r} \right\rceil$  段目の道路区間には長さ  $L - \left( \left\lceil \frac{L}{a-2r} \right\rceil - 1 \right) (a - 2r)$  の TA を設定する。こうすることで、元々 RA を通過するように進んでいたノードは、RA に進入する前に必ず 1 段目から  $\left\lceil \frac{L}{a-2r} \right\rceil$  段目までの TA を 1 回ずつ通過し、合計で長さ  $L$  の TA を通過することとなる。

上記のように、TA を設定する各道路区間において、両端からそれぞれ  $r$  以上の間隔を空けて TA を設定することになるが、この間隔を空けない場合、隣接した道路区間の IF が互いに影響するため、文献[15]の既存手法の適用が難しくなる。そのため、 $r$  以上の間隔





(a) 具体的な TA の設定

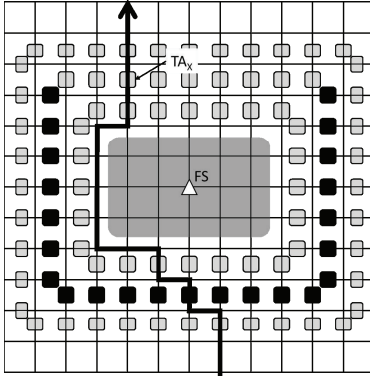
(b) 2 段目の TA の  $TA_x$  を内側から通過するノードが通る経路の例

図 4 説明のための図

Fig. 4 Figures for explanation.

を空けることとした。

### 3.2 $P_f$ の解析

次に、RA に進入しようとするノードが  $I_{IF}$  を受け取れず、実際に RA に進入してしまう確率  $P_f$  を考える。前述のように TA を設定した場合の TA の段数を  $n_l = \left\lceil \frac{L}{a-2r} \right\rceil$  とおくと、RA に進入しようとするノードは RA に進入する前に必ず  $n_l$  回だけ TA を通過することとなる。

$i = 1, 2, \dots, n_l$  に対して、 $i$  段目の TA で  $I_{IF}$  を受け取れない確率を  $P_{f,i}$  とおく。ここで、 $i$  段目というのは、RA に近い方から数えた段数であるとする。また、 $i$  段目の TA の長さを  $L_i$  とおく。前述のとおり、 $i = 1, 2, \dots, n_l - 1$  では  $L_i = a - 2r$ 、 $i = n_l$  では  $L_i = L - \left( \left\lceil \frac{L}{a-2r} \right\rceil - 1 \right) (a - 2r)$  である。 $P_{f,i}$  を厳密に解析するのは難しいので、ここでは安全側の近似として、 $P_{f,i}$  の上界の解析を行う。具体的には、以下の二つの近似を行う。

- $I_{IF}$  をもっていないある一つのノードが  $i$  段目の TA を外側から (RA に向かう方向に) 通過する状況を考える。このノードと同様に  $i$  段目の TA を外側

から通過するノードは、事前に  $I_{IF}$  をもっていることはしないこととする。なお、仮定より、全ての道路区間のノード密度は  $\lambda$  であるので、 $i$  段目の TA を外側から通過するノードの密度も  $\lambda$  となる。

- 図 4(b) を考える。 $TA_x$  は 2 段目の TA であるが、ここを内側から通過するノードは黒で塗られた TA (全て 2 段目) のいずれか一つを必ず通る。よって、少なくとも確率  $1 - P_{f,2}$  で  $I_{IF}$  を受け取る。しかし、黒い TA 以外も通過することもあるので、実際には  $TA_x$  を通る前に  $I_{IF}$  をもっている確率は  $1 - P_{f,2}$  以上になるが、ここでは簡単化のため、安全側の近似として  $1 - P_{f,2}$  を使う。同様に、 $i$  段目の TA を内側から通過するノードは確率  $1 - P_{f,i}$  で  $I_{IF}$  をもっていると仮定する。

なお、進路変更の仮定から、この TA をもともと内側から通る予定であったノードは進路変更してもしなくても結局通ることになるので、 $i$  段目の TA を内側から通過するノードの密度も  $\lambda$  となる。よって、 $i$  段目の TA を内側から通過し、かつ  $I_{IF}$  をもっているノードの密度は、 $(1 - P_{f,i})\lambda$  で近似的に計算する。

上の二つの仮定は、TA に  $I_{IF}$  をもって入るようなノードを実際よりも少なく見積もるものである。つまり、 $I_{IF}$  の継続のためには厳しめの近似になり、このような状況を仮定して TA を決めているので、これは安全側の近似となっている。

上記の二つの仮定から、長さ  $L_i$  の TA 上を  $I_{IF}$  をもたない密度  $\lambda$  のノード群と  $I_{IF}$  をもっている密度  $(1 - P_{f,i})\lambda$  のノード群が互いに逆方向に移動している場合に、 $I_{IF}$  をもたない方のノードが TA を通り抜けるまでに  $I_{IF}$  を受け取れない確率が近似的に  $P_{f,i}$  であることになる。

ここで、文献 [15] において、長さ  $L$  の TA 上を  $I_{IF}$  をもたない密度  $\lambda_1$  のノード群と  $I_{IF}$  をもっている密度  $\lambda_2$  のノード群が互いに逆方向に移動している場合に、 $I_{IF}$  をもたない方のノードが TA を通り抜けるまでに  $I_{IF}$  を受け取れない確率  $P'_f$  の厳密な理論解析が行われており、下記の式で計算される。

$$P'_f = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)e^{-\lambda_2(2L+r)}}{\lambda_1 + \lambda_2 e^{(\lambda_1 + \lambda_2)r}}. \quad (1)$$

以上のことから、本論文のモデルにおける  $P_{f,i}$  は、式 (1) に  $\lambda_1 = \lambda$ 、 $\lambda_2 = (1 - P_{f,i})\lambda$ 、 $L = L_i$  を代入し、下記の方程式の解として計算される。

$$P_{f,i} = \frac{(2 - P_{f,i})\lambda e^{-(1-P_{f,i})\lambda(2L_i+r)}}{\lambda + (1 - P_{f,i})\lambda e^{(2-P_{f,i})\lambda r}}. \quad (2)$$

また、 $P_f$  は 1 段目から  $n_l$  段目までの全ての TA で  $I_{IF}$  を受け取れない確率なので、

$$P_f = \prod_{i=1}^{n_l} P_{f,i} \quad (3)$$

となる。

### 3.3 $n_l$ と $L_i$ の計算

次に、 $P_f$  の所望の値  $P_{f,desired}$  が与えられた場合の、 $n_l$  及び  $L_i$  の計算法について考える。前述の  $P_f$  の解析を基にして、次の手順に従って  $n_l$  及び  $L_i$  を決定する。

**Step 1:** 一つの道路区間の TA における  $P_{f,i}$  の最小値を  $P_{f,min}$  とする。これを求めるために、 $L_i = a - 2r$  として、式 (2) の方程式を  $P_{f,i}$  について解く。この方程式を解析的に解くことは難しいので、ここでは数値的に解く。なお、式 (2) は 1 変数の非線形方程式であり、既存の数値解法で解くことができるが、本論文では Mathematica [16] の関数 NSolve により数値計算を行った。

**Step 2:**  $P_{f,min}^{n_l-1} > P_{f,desired}$  かつ  $P_{f,min}^{n_l} \leq P_{f,desired}$  を満たすような  $n_l$  を求める。これは、この不等式の解として、 $n_l = \left\lceil \frac{\log P_{f,desired}}{\log P_{f,min}} \right\rceil$  で計算される。

**Step 3:**  $n_l$  段目の TA の大きさ  $L_{n_l}$  を求める。式 (2) の  $i$  を  $n_l$  として  $L_{n_l}$  についての方程式を解くと、

$$L_{n_l} = \frac{\log \frac{2 - P_{f,n_l}}{P_{f,n_l} \left\{ (1 - P_{f,n_l}) e^{(2 - P_{f,n_l}) \lambda r} + 1 \right\}}}{2(1 - P_{f,n_l}) \lambda} - \frac{r}{2} \quad (4)$$

となる。ただし  $P_{f,n_l}$  は、 $P_f = \prod_{i=1}^{n_l} P_{f,i} = P_{f,desired}$  を満たすために  $P_{f,n_l} = \frac{P_{f,desired}^{1/n_l}}{P_{f,min}^{n_l-1}}$  とする。式 (4) で、 $P_{f,n_l}$  が大きい場合、若しくは  $\lambda$  が大きい場合には、 $L_{n_l} < 0$  になる場合もあるが、実際には  $L_{n_l} \geq 0$  である必要があるので、 $L_{n_l}$  の最小値として正の値  $L_{min}$  を定め、式 (4) で  $L_{n_l} < 0$  となった場合、 $L_{n_l} = L_{min}$  とする。これは、 $L_{n_l}$  を 0 とすると、この TA を認識するためにノードは自らの位置を連続的に把握し続ける必要が生ずる。実際には、自らの位置の計測や周辺のノードを探すためのビーコンの送信などを小さい時間間隔で行うことが想定される。そのため、 $L_{n_l}$  を 0 とすると、TA があるにもかかわらず認識されないこともあるので、TA にある程度の幅をもたせている。

### 3.4 交通誘導による混雑

本節では、交通誘導の結果としてどの道路区間がどの程度混雑するかを明らかにするために、交通誘導後における各道路区間の各車線のノード密度の解析を行う。ここでは、TA は十分大きく設定されていると仮定し、TA を通過したノードは必ず  $I_{IF}$  を受け取れる（つまり、 $P_f = 0$ ）ものとして考える。

最初に、RA の内部の道路を考える。上記の仮定により、RA を通過する予定であったノードは、RA に入る前に必ず  $I_{IF}$  を受け取り RA を避けるように進路変更することになるので、RA の内部の道路では交通誘導後のノード密度は 0 になる。

次に、ノードの進路変更によってノードの流れが変わるのは RA の内部と RA の周辺の道路区間上だけであるので、これら以外の道路については、交通誘導後であっても交通誘導前と同じくノード密度は  $\lambda$  となる。

最後に、RA の周辺の道路区間について考える。このような道路区間においてノード密度の厳密解を得るためには、進路変更による迂回も含めた全ての経路を考慮する必要があるが、ここでは上界を計算することで簡単な式が得られるので、これを用いて評価する。図 5(a) の  $\ell_0, \ell_1, \dots, \ell_{\frac{n_x}{2}-1}$  のように、RA の上側に存在し、左方向に進む車線の中で、FS よりも左側にあるものを考える。本論文の仮定では、FS を中心として上下左右に対称であるような状況を考えているので、上記の車線だけの解析を行えば、他の車線にも同様に適用できる。車線  $\cdot$  のノード密度の上界を  $\lambda_u(\cdot)$  で表す。

車線  $\ell_i$  について考える。交通誘導後に  $\ell_i$  を通過するノードは、下記の 3 種類に分類される。

- まず、当初から  $\ell_i$  を通る予定であったノードである。このようなノードは、交通誘導の結果どのような進路変更をしたとしても  $\ell_i$  は必ず通ることになるので、 $\ell_i$  におけるこのようなノードの密度は  $\lambda$  である。

- 次に、進路変更前の経路の中に、 $\ell_i$  の下側にあって RA の内部にある車線（図 5(b) の  $\ell'_1 \sim \ell'_{n_y-1}$ ）が含まれていたノードである。このようなノードの密度の合計は  $(n_y - 1)\lambda$  であり、このうちの半分が  $\ell_i$  を、残りの半分が RA の下側を通るように進路変更することになるので、結局  $\ell_i$  におけるこのようなノードの密度は  $\frac{(n_y-1)\lambda}{2}$  である。

- 最後に、進路変更前の経路の中に、 $\ell_i$  よりも右側において RA に上から入ってくる車線（図 5(b) の  $\ell''_1 \sim \ell''_{n_x-i-1}$ ）及び、RA の下へ出て行く車線の両方

が含まれていたノードの中で、前々項及び前項に該当しないノードである．このようなノードは進路変更することにより RA を左側または右側に迂回することになるが、これらのうち RA を左側に迂回したノードが  $\ell_i$  を通ることになる．このようなノードの密度の厳密解を得るためには RA の上から入ってきて RA の下へ出て行くような全ての経路を考慮する必要がある、式が複雑になるため、前述のとおりここではこのようなノード密度の上界を求める．上界の考え方として、 $p_{turn} = 0$  と近似的に仮定する．このように仮定することにより、 $\ell'_1 \sim \ell''_{n_x-i-1}$  から入ってきたノードは全て RA の下へ出て行くことになるため、本来の密度よりも大きめに見積もることになる．ここで、 $\ell''_{\frac{n_x}{2}-i}$  (FS の真上) から入ってきたノードは  $\frac{1}{2}$  の確率で RA を左側に迂回し、これよりも左 ( $\ell'_1 \sim \ell''_{\frac{n_x}{2}-i-1}$ ) から入ってきたノードは必ず RA を左側に迂回することになるので、結局  $\ell_i$  におけるこのようなノードの密度は  $\{(\frac{n_x}{2} - i - 1) + \frac{1}{2}\}\lambda$  となる．

以上の 3 種類のノードの密度を足し合わせることで、結局  $\ell_i$  における交通誘導後のノード密度の上界は、 $\lambda_u(\ell_i) = (\frac{n_x+n_y}{2} - i)\lambda$  となる．また、この式

からわかるように、RA の周辺の道路区間上の中でも RA の角の部分 ( $i = 0$ ) が最も混雑し、この部分のノード密度の上界は  $\lambda_u(\ell_0) = \frac{n_x+n_y}{2}\lambda$  となる．

本論文の 4. で考える混雑緩和手法の中では、IF による交通誘導後の各道路区間の各車線のノード密度の値が必要となる．上で導出した上界は安全側の状況を考えて導いたものなので、実際の値とは少し差が出る可能性があるが、数式で計算できるので 4. の混雑緩和手法におけるノード密度の計算部分に適用することを考える．詳細は 4. で述べる．

### 3.5 TA の段数、大きさと、道路区間の混雑状況の計算結果

ここまでで示した理論計算の結果は、TA の段数、大きさの決定と、道路区間の混雑する場所の推定に用いられるが、シミュレーション結果を用いて、その有効性を確認する．シミュレータは C 言語で自作し、2. の仮定のとおりノードの発生、移動、情報送信、進路変更等を行っている．評価において交通誘導後の各車線のノード密度を用いるが、これは、FS から  $I_{IF}$  を発信し始めた（交通誘導を開始した）5000 秒後から 1 秒ごとに 5000 秒間観測し、各車線に存在していたノード数の平均値を車線長  $a = 500$  m で除した値をその車線のノード密度として計算する． $v = 36$  km/h,  $r = 100$  m,  $p_{turn} = 0.5$ ,  $x_{RA} = 1800$  m,  $y_{RA} = 800$  m,  $P_{f,desired} = 0.005$ ,  $L_{min} = 10$  m とした．まず、ノード密度が小さい場合から大きい場合までを考え、TA の必要な段数、大きさについて確認する．同時に、交通誘導後のノード密度がどの領域において大きくなるかについても確認する．

ノード密度として、 $\lambda = 0.003 \text{ m}^{-1}$ ,  $\lambda = 0.008 \text{ m}^{-1}$ ,  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  を考える．このときの、 $P_f$  を  $P_{f,desired}$  よりも小さくするために必要な TA の段数  $n_l$  と各 TA の長さ  $L_i$  の数値計算結果を表 1 に示す．表 1 には、このような段数と長さの TA を用いたときの  $P_f$  のシミュレーション値も併せて示しているが、所望の  $P_{f,desired} = 0.005$  よりも小さい  $P_f$  を実現で

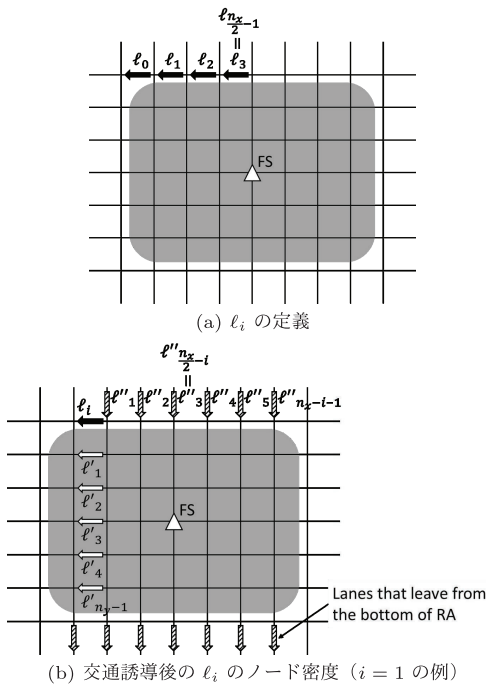


図 5 交通誘導後のノード密度の計算

Fig. 5 Computation of the node densities after traffic guidance.

表 1  $n_l$  と  $L_i$  の数値計算結果と、 $P_f$  のシミュレーション結果

Table 1 Numerical results of  $n_l$  and  $L_i$ , and simulation results of  $P_f$ .

$\lambda [\text{m}^{-1}]$	$n_l$	$L_1 [\text{m}]$	$L_2 [\text{m}]$	$L_3 [\text{m}]$	$P_f$
0.003	3	300	300	152.66	0.00167
0.008	1	214.61	—	—	0.00437
0.04	1	10	—	—	0

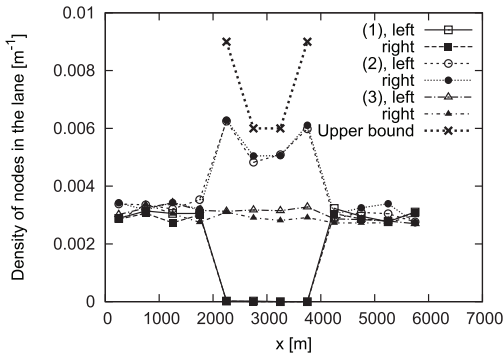


図 6 交通誘導後の各車線のノード密度 ( $\lambda = 0.003 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{\text{turn}} = 0.5$ )

Fig. 6 Node density of each lane after traffic guidance, where  $\lambda = 0.003 \text{ m}^{-1}$  and  $p_{\text{turn}} = 0.5$ .

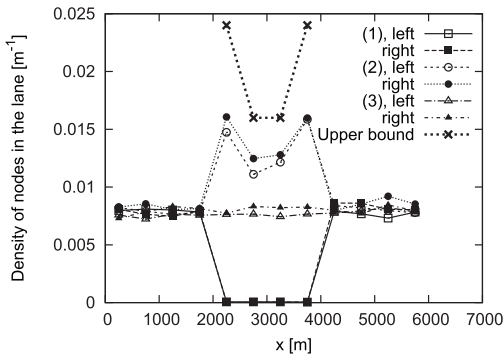


図 7 交通誘導後の各車線のノード密度 ( $\lambda = 0.008 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{\text{turn}} = 0.5$ )

Fig. 7 Node density of each lane after traffic guidance, where  $\lambda = 0.008 \text{ m}^{-1}$  and  $p_{\text{turn}} = 0.5$ .

きていることが確認できる。

図 6 は  $\lambda = 0.003 \text{ m}^{-1}$  の場合の交通誘導後の各道路区間の各車線のノード密度のシミュレーション結果である。ここで、RA の周辺の車線については、密度の上界  $\lambda_u(\cdot)$  の値も併せて示す。同様に、図 7 は  $\lambda = 0.008 \text{ m}^{-1}$  の場合の結果である。図 6、図 7 では、結果を見やすくするために、図 8 に示すように、(1) RA の内部を通るような車線、(2) RA の周辺を通るような車線、(3) RA の更に外側を通るような車線の三種類を抜き出し、それぞれ左方向の車線と右方向の車線に分けてノード密度の結果を示している。横軸は各車線の中心の  $x$  座標である。

図 6、図 7 の結果を見ると、 $P_f$  を  $P_{f,\text{desired}}$  よりも小さくするために必要な TA の段数、大きさを確保しているため、図 8 の (1) の RA 内部の各車線の密度がほとんど 0 になっていることが確認できる。また、

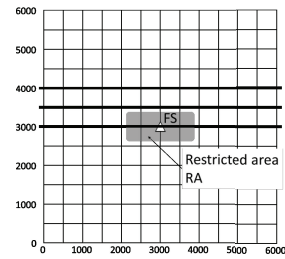


図 8 シミュレーションでノード密度を観測した領域  
Fig. 8 Regions for observation of the node densities in computer simulation.

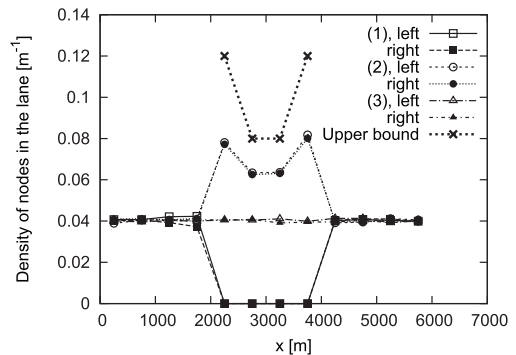


図 9 交通誘導後の各車線のノード密度 ( $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{\text{turn}} = 0.5$ )

Fig. 9 Node density of each lane after traffic guidance, where  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  and  $p_{\text{turn}} = 0.5$ .

図 8 の (3) の各車線の密度は交通誘導前の密度  $\lambda$  からあまり変化していないが、RA の周辺である図 8 の (2) の各車線の密度は他と比べて大きくなっていることと、この値が上界である  $\lambda_u(\cdot)$  の値よりも小さくなることが確認できる。以上のことから、TA の段数と大きさを **3.3** の手法によって定めることにより、RA の内部に進入してしまうノードの割合を目標値  $P_{f,\text{desired}}$  よりも小さくできることと、RA の周辺の密度が大きくなることが確認できる。

図 9 は上の二つの例よりも大幅に密度が大きくなっており、TA は 1 段で十分であることに加えて、TA の大きさも最低限でよい状況であり、前述のとおり  $L_1 = L_{\text{min}} = 10 \text{ m}$  としている。このような場合には、RA の周辺の密度が  $0.08 \text{ m}^{-1}$  を超えることもあり、これは平均車間距離に換算すると  $\frac{1}{0.08} = 12.5 \text{ m}$  という非常に短い距離であるため、IF による交通誘導によって大きな混雑を引き起こすことがわかる。図 10 は  $p_{\text{turn}} = 0.1$  とした場合の結果であるが、前述の上界の解析では  $p_{\text{turn}} = 0$  と近似的に仮定して解析を行っ



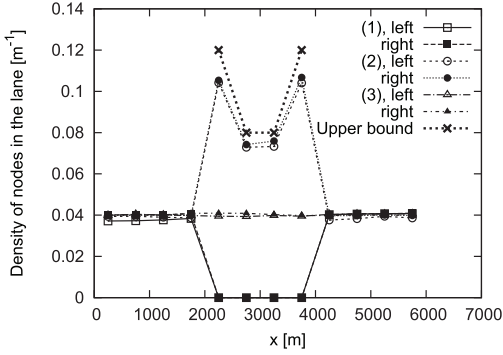


図 10 交通誘導後の各車線のノード密度 ( $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{\text{turn}} = 0.1$ )

Fig. 10 Node density of each lane after traffic guidance, where  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  and  $p_{\text{turn}} = 0.1$ .

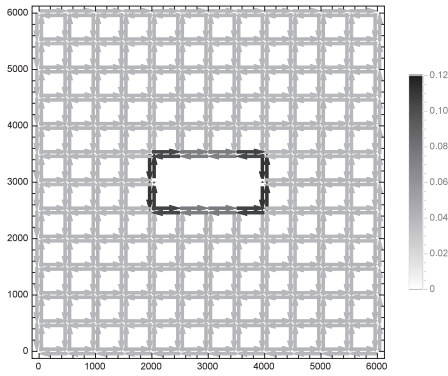


図 11 交通誘導後の各車線のノード密度の分布図 ( $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{\text{turn}} = 0.1$ )

Fig. 11 Distribution of the node density of each lane after traffic guidance, where  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  and  $p_{\text{turn}} = 0.1$ .

ており、図 10 ( $p_{\text{turn}} = 0.1$ ) は図 9 ( $p_{\text{turn}} = 0.5$ ) よりもこれに近い状況であるので、最も混雑している車線のノード密度は上界の値により近づいていることが確認できる。また、図 11 でどの道路区間で混雑が発生しているかを視覚的に示しているが、この図により場所ごとの密度差が確認でき、具体的には RA の周辺の道路が混雑することがこの図からも確認できる。

## 4. 混雑緩和のための手法

### 4.1 複数の RA の提示

前節で示したとおり、RA を避けるように各ノードが進路変更することにより、RA の周りの道路区間の車線においてノード密度が従来の数倍になり混雑が発生することがある。本節では、混雑の許容値  $\alpha$  ( $> 1$ )

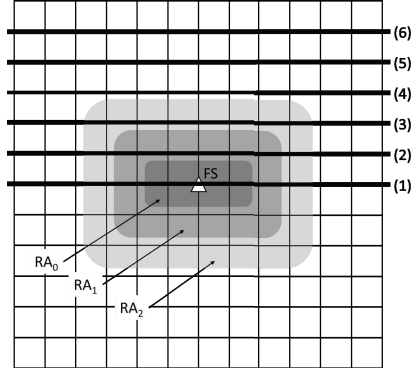


図 12 複数の進入制限エリアの設定例 ( $m = 2$ )

Fig. 12 Example of deployment of multiple restricted areas, where  $m = 2$ .

が与えられており、交通誘導後の全ての道路区間の各車線のノード密度を最大でも交通誘導前の  $\alpha$  倍、つまりノード密度の上界を  $\alpha\lambda$  に抑えたい場合を考える。このように混雑を軽減するため、本節では、本来の RA だけでなく、それ以外の複数の仮想的な RA も確率的に提示することを考える。このようにすることで、サービスエリア内に複数の RA の周辺があるということになるので、混雑する場所が分散されるということを目指すものである。具体的には、下記のような手法を考える。

本来進入を禁止したいエリア（前節までにおける RA）を  $RA_0$  とおく。  $i = 1, 2, \dots, m$  に対して、 $RA_0$  よりも上下左右に道路区間  $i$  本分拡大したエリアを  $RA_i$  とおく（図 12）。つまり、 $RA_i$  は、FS を中心として、横方向の長さ  $x_{RA} + 2ia$ 、縦方向の長さ  $y_{RA} + 2ia$  の長方形となる。本節で提案する手法は、ノードが  $I_{IF}$  を受け取った際に、確率  $p_i$  で  $RA_i$  が提示されるというものである。これを実現するために、一つのノードに提示されるのは 1 種類の  $RA_i$  だけであるが、 $I_{IF}$  の中には全ての  $RA_i$  ( $RA_0 \sim RA_m$ ) の情報を格納しておくことを想定している。 $RA_i$  を提示されたノードの集合を  $M_i$  とする。

まず、 $m$  及び  $p_i$  が与えられたときの各道路区間の各車線のノード密度を示す。 $M_i$  のうち  $RA_i$  の内側にいるノードの密度は 0 であると考ええる。 $M_i$  のうち  $RA_i$  の周辺の道路区間の車線  $\ell_k$  にいるノードの密度の上界を  $\lambda_u(\ell_k)$  とする。このとき、前節の解析と同様に  $\lambda_u(\ell_k) = \left(\frac{n_x + n_y + 4i}{2} - k\right)\lambda p_i$  であり、 $\max_k \lambda_u(\ell_k) = \lambda_u(\ell_0) = \frac{n_x + n_y + 4i}{2}\lambda p_i$  である。 $M_i$

のうち、これら以外の道路区間の各車線のノードの密度は  $p_i\lambda$  となる。

$RA_i$  の周辺の道路区間の車線のノード密度の上界のうち最大のを  $\Lambda_i$  とする。 $RA_i$  の内側には  $RA_0$  から  $RA_{i-1}$  があり、これらを提示されるノードの集合  $M_0$  から  $M_{i-1}$  のノードの一部が  $RA_i$  の周辺を通ることになり、それらの密度は  $p_0\lambda, p_1\lambda, \dots, p_{i-1}\lambda$  である。 $M_i$  のノードを考えたとき、 $RA_i$  の周辺で  $M_i$  のノードの密度の上界が最も大きい車線は  $\ell_0$  で、密度の上界は  $\lambda_u(\ell_0) = \frac{n_x+n_y+4i}{2}\lambda p_i$  である。よって、

$$\Lambda_i = p_0\lambda + p_1\lambda + \dots + p_{i-1}\lambda + \frac{n_x+n_y+4i}{2}p_i\lambda \quad (5)$$

で計算できる。

次に、混雑を効率的に緩和するための  $m$  及び  $p_i$  ( $i = 0, 1, \dots, m$ ) の定め方について考える。ここでは、 $i = 0, 1, \dots, m$  に対して  $\Lambda_i \leq \alpha\lambda$  を満たす必要がある。ここで、 $\Lambda_0 = \alpha\lambda, \Lambda_1 = \alpha\lambda, \dots$  と順番に  $p_0, p_1, \dots$  について解いていき、 $\sum_{i=0}^k p_i > 1$  となったときの  $k$  を  $m$  とし、 $p_m = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} p_i$  として終了する。このようにして、 $m$  と、 $p_0$  から  $p_m$  を求める。具体的には、 $i \leq m-1$  について

$$p_i = \frac{\alpha}{\frac{n_x+n_y}{2}} \prod_{j=1}^i \frac{\frac{n_x+n_y}{2} - 3 + 2j}{\frac{n_x+n_y}{2} + 2j} \quad (6)$$

となる。

なお、この手法における TA は、全ての  $RA_i$  よりも外側に設定する必要があるため、図 12 のように  $RA_m$  のすぐ外側に設定する。この場合、混雑が発生するのはあくまでも TA よりも内側の道路区間であり、TA が置かれる道路区間の車線の密度は全て  $\lambda$  なので、TA の設定手法は **3.** で述べたものと同様のものを使用できる。

#### 4.2 混雑緩和手法の計算結果

図 13 に混雑緩和手法を適用した場合の各車線のノード密度のグラフ、図 14 に交通誘導後の各車線のノード密度の分布図を示す。 $v = 36 \text{ km/h}$ ,  $r = 100 \text{ m}$ ,  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ ,  $x_{RA} = 1800 \text{ m}$ ,  $y_{RA} = 800 \text{ m}$ ,  $n_l = 1$ ,  $L_1 = 10 \text{ m}$  とした。混雑の許容値を  $\alpha = 2$  とし、これを実現するための  $m$  及び  $p_i$  を計算すると、 $m = 2$ ,  $p_0 = \frac{2}{3}$ ,  $p_1 = \frac{4}{15}$ ,  $p_2 = \frac{1}{15}$  となる。図 13 では、前節と同様にグラフを見やすくするため、図 12 に示しているように、(1)  $RA_0$  の内

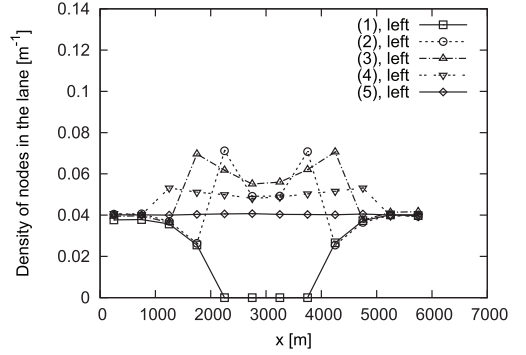


図 13 複数種類の進入制限エリアを用いたときのノード密度 ( $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ ,  $\alpha = 2$ )

Fig. 13 Node density of each lane for multiple restricted areas, where  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ , and  $\alpha = 2$ .

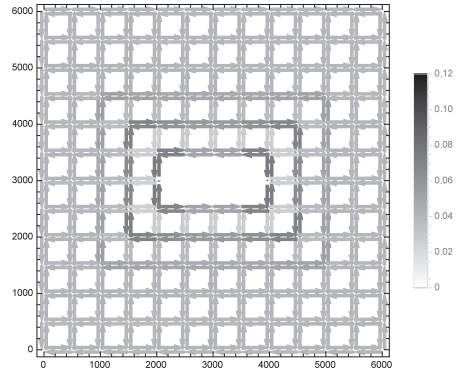


図 14 複数種類の進入制限エリアを用いたときのノード密度の分布図 ( $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ ,  $\alpha = 2$ )

Fig. 14 Distribution of the node density of each lane for multiple restricted areas, where  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ , and  $\alpha = 2$ .

部を通るような車線、(2)  $RA_0$  の周辺を通るような車線、(3)  $RA_1$  の周辺を通るような車線、(4)  $RA_2$  の周辺を通るような車線、(5)  $RA_2$  の更に外側を通るような車線の五種類を抜き出してノード密度の結果を示している。また、左方向の車線の結果だけを示している。図 13、図 14 を見ると、図 10、図 11 において極端に混雑していた道路区間のノード密度が小さくなり、全ての道路区間においてノード密度の許容値  $\alpha\lambda = 0.08 \text{ m}^{-1}$  以下の値を実現できている。

異なる  $\alpha$  の値における結果として、 $\alpha = 1.7$  としたときの結果を図 15、図 16 に示す。 $\alpha = 1.7$  を実現するための  $m$  及び  $p_i$  を計算すると、 $m = 3$ ,  $p_0 = \frac{17}{30}$ ,  $p_1 = \frac{17}{75}$ ,  $p_2 = \frac{68}{525}$ ,  $p_3 = \frac{27}{350}$  となる。図 15、図 16

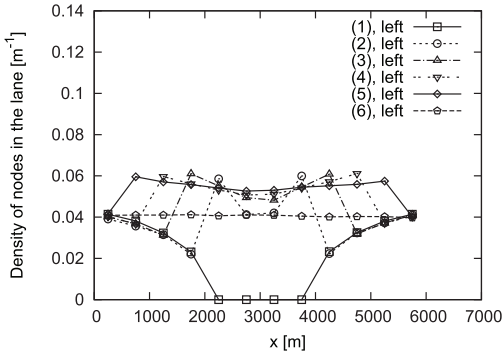


図 15 複数種類の進入制限エリアを用いたときのノード密度 ( $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ ,  $\alpha = 1.7$ )

Fig. 15 Node density of each lane for multiple restricted areas, where  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ , and  $\alpha = 1.7$ .

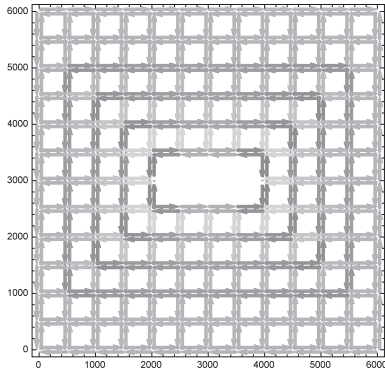


図 16 複数種類の進入制限エリアを用いたときのノード密度の分布図 ( $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ ,  $\alpha = 1.7$ )

Fig. 16 Distribution of the node density of each lane for multiple restricted areas, where  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$ ,  $p_{turn} = 0.1$ , and  $\alpha = 1.7$ .

を見ると、図 13、図 14 よりも更にノード密度を分散できており、全ての道路区間においてノード密度の許容値  $\alpha\lambda = 0.068 \text{ m}^{-1}$  以下の値を実現できている。

このように、TA の適切な設定と RA の複数提示により、混雑を抑制しつつ  $RA_0$  への進入も十分に抑制できており、提案した TA の大きさ、段数の計算手法、複数の RA の設定手法の有効性が確認できる。

## 5. 幾つかの要因を考慮した提案手法の評価

前節までで、理論解法を利用することを前提とした TA の設定手法及び混雑緩和手法を考えた。そのため、理論解法を導くために仮定された、2. で示したような比較的単純なモデルを仮定し、提案手法の評価を行っ

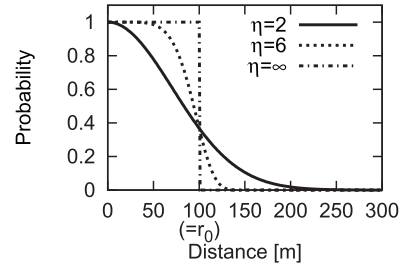


図 17 リンクモデル B  
Fig. 17 Link model B.

た。具体的には、ノード間距離が  $r$  以下であれば必ず情報伝達が行われ、全てのノードの速度が一定であり、交通誘導前において全ての道路区間のノード密度が均一であるような状況である。しかし、現実には、様々な要因により通信可能距離・速度・ノード密度も影響を受け、その結果ばらつきが生ずることもある。ここでは、前節までで考慮していなかった要因による提案手法への影響についてシミュレーションにより考察する。

### 5.1 確率的な無線リンクのモデルの影響について

2. の仮定では、二つのノードの距離が  $r$  以下であれば情報の伝達が行われるというモデルが仮定されている（ここではリンクモデル A と呼ぶ）。このようなモデルは、移動体だけで情報伝達が行われるマルチホップ無線ネットワークの連結性の研究 [17], [18] や IF の性能評価 [3], [5]～[15] などによく使われている。例えばマルチホップ無線ネットワークでは、移動体の位置関係がネットワークの連結性に関わるが、移動体の位置がランダムであるため連結性の性質を理論的に評価することは簡単ではない。更に、IF のように情報伝達が移動の影響を強く受ける場合を考えると、この場合の情報伝達は大変複雑なメカニズムになる。そのため、通信環境を単純化し、この複雑なメカニズムを中心に着目し、性能評価を行うことが行われてきた [3], [5]～[15]。

しかし、現実には、ある一定距離を境にして無線リンクによる情報伝達が急に行えなくなる訳ではない。ノード間の距離が  $r$  より短くても通信に失敗することもあるし、 $r$  より長くても通信に成功することもある。このようなことを考慮に入れた無線リンクのモデルが提案されている [19]。これをリンクモデル B と呼ぶ。これは、ノード間の距離  $x$  に対する通信成功率  $H(x)$  が、 $H(x) = \exp\{-(\frac{x}{r_0})^\eta\}$  で表され、図 17 のように  $x$  の増加に伴い、徐々に小さくなるというもの

である。 $r_0$  は送信電力や変調方式等によって決まる定数である。 $\eta$  は電波の減衰指数であり、自由空間モデルでは通常  $\eta = 2$  が用いられ、一般には  $\eta \geq 2$  の値が用いられる。このモデルで  $r_0$  を  $r$  に対応させると、ノード間の距離が  $r$  よりも小さい場合でも通信できないことがあり、逆に距離が  $r$  より大きい場合でも通信ができてしまう可能性もある。なお、 $\eta \rightarrow \infty$  のとき、 $x < r_0$  では  $H(x) = 1$ 、 $x > r_0$  では  $H(x) = 0$  となり、これはリンクモデル A と等価になる。

リンクモデル A において、あるノードから距離が  $r$  以下であるようなノードには情報を伝達できるが、時間が経過するとノード同士の位置関係が変化し、今までつながっていたノード間のリンクがなくなったり、新たなノード間にリンクができるため、情報をもっていなかったノードに新たに情報を伝達できる。そのため、新たなリンクの形成を見逃さないようにするため、短い時間間隔でビーコンを交換すること等によりトポロジーの変化を観測する必要がある。この時間間隔を  $dt$  とすると、前節まででは  $dt = 1$  秒としている。

ここで、3. で述べたように TA を設定し、リンクモデル A を用いた場合の  $P_f$  を  $dt$  を変えてシミュレーションにより求める。 $n_l$  及び  $L_i$  の値は、表 1 と同じ値を用いる。ただし、 $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  の場合は、表 1 では  $L_1$  の値が最低限の値  $L_{min} = 10 \text{ m}$  となっているが、 $dt \geq 2$  秒とすると  $vdt > 10 \text{ m}$  となるため、これでは明らかに TA が小さすぎて一度も送信しないまま TA を通り過ぎてしまうことがあるので、 $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  で  $dt = 2$  秒、 $dt = 3$  秒の場合はそれぞれ  $L_1 = 20 \text{ m}$ 、 $L_1 = 30 \text{ m}$  とする。結果を図 18 に示す。結果を見ると、 $dt$  を変えても、 $P_f$  にはそれほど大きな違いは見られないが、異なる密度に対しては  $P_f$  が若干異なる値をとっている。これは、密度が違えば表 1 のように TA の設定も異なるため、単に密度が違うことだけが原因ではないが、 $\lambda = 0.008 \text{ m}^{-1}$  の場合において  $dt \geq 2$  秒のときは、若干ではあるが  $P_f$  は目標値である  $P_{f,desired}$  を超えてしまうこともあり、そのため  $dt$  の値としては 1 秒程度にしておくのがよいと考えられる。

一方、リンクモデル B では、確率的な要因で情報伝達できないことが起こりうる。この場合、ノードは再度送信を試みることになる。ここでは、同じノードがあるノードに対して複数回の送信を試みるとき、これらの送信は独立であり、成功する確率は再送を行ったときの距離  $x$  に対して  $H(x)$  であるとする。確率的な

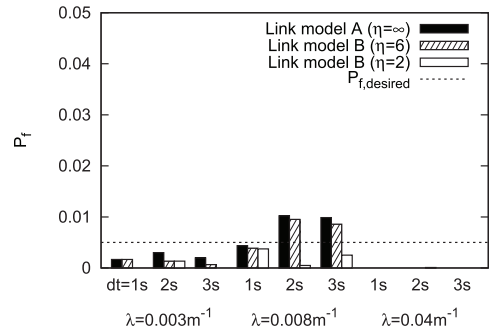


図 18 確率的な無線リンクモデルにおける  $P_f$  のシミュレーション結果

Fig. 18 Simulation results of  $P_f$  for a probabilistic wireless link model.

情報伝達の可否と再送を考慮するためリンクモデル B を想定した場合における IF の性能と、リンクモデル A を前提とした場合の IF の性能の間にどのような違いがあるのかをシミュレーションにより評価する。具体的には、リンクモデル B において上記のリンクモデル A におけるトポロジーを把握するための時間間隔  $dt$  ごとに情報伝達を行えるかをビーコンの送信等で試みることにし、実際に情報伝達が行えるかをリンクモデル B の  $H(x)$  で決めることとする。 $r = r_0 = 100 \text{ m}$  とし、 $n_l$  及び  $L_i$  の値は、表 1 と同じ値を用いて TA を設定し、 $P_f$  を求める。ただし、上記と同様に、 $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  で  $dt = 2$  秒、 $dt = 3$  秒の場合はそれぞれ  $L_1 = 20 \text{ m}$ 、 $L_1 = 30 \text{ m}$  とする。

図 18 には、リンクモデル B における  $P_f$  の結果も示している。結果を見ると、リンクモデル B においても、リンクモデル A と比較して  $P_f$  の値にあまり差はないことが確認できる。若干ではあるがリンクモデル B の方がリンクモデル A よりも  $P_f$  が小さくなっているのは、リンクモデル B では距離  $r$  を超えていても通信に成功することがあることと、仮に  $r$  よりもノード間距離が小さい場合に通信を行えなくとも再送により情報伝達を行えること等が原因であると考えられる。このような傾向から、リンクモデル B においては、通信可能距離がばらついていても、 $dt$  は 1 秒以下程度にしたときに、通信可能距離が一定である場合（リンクモデル A）における TA の設定法が利用可能であることがわかる。

## 5.2 ノードの速度のばらつきの影響

前節まででは、対向車線だけを考えたが、複数車線を考えると速度は車線ごとに異なる値となる。また、



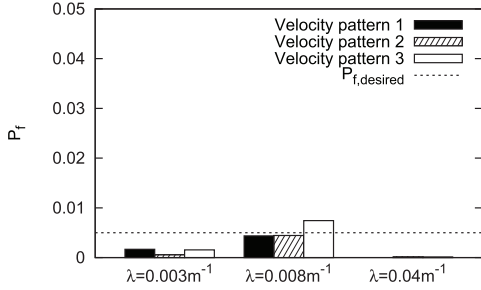


図 19 ノードの速度がばらついている場合の  $P_f$  のシミュレーション結果

Fig. 19 Simulation results of  $P_f$  in a case where velocities of nodes are not constant.

同一車線内でも速度はばらつく．これらを考慮して以下を考える．ただし，シミュレーションの簡単化のため，車線の幅の影響はここでは考えず，十分に小さいとしている．

- 速度パターン 1：全てのノードの速度が一定値 36 km/h である．
- 速度パターン 2：半分のノードの速度が [30, 40] km/h の一様分布に従い，もう半分のノードの速度が [40, 50] km/h の一様分布に従う．
- 速度パターン 3：半分のノードの速度が [30, 40] km/h の一様分布に従い，もう半分のノードの速度が [50, 60] km/h の一様分布に従う．

速度パターン 2 と 3 は各方向の道路の車線が 2 車線ずつあるような状況を想定しており，更に各車線でノードの速度がある程度ばらついているような状況である．

図 19 に， $P_f$  のシミュレーション結果を示す．ここでは通信可能距離は  $r = 100$  m 一定としており， $n_l$  と  $L_i$  の値は表 1 と同じ値を用いている．結果を見ると，速度がばらついている場合においても  $P_f$  の値が大きく変化することはないが，速度パターン 3 で  $\lambda = 0.008$   $\text{m}^{-1}$  の場合に  $P_f$  の許容値である  $P_{f,desired} = 0.005$  を超えてしまっていることがわかる．これらのことから，ノードの移動速度がある程度ばらついていても 3.3 の解析による  $n_l$  と  $L_i$  の値を用いて IF を適切に行うことはできるが，速度パターン 3 のように移動速度のばらつきが大きい場合には，ばらつきがない場合よりも  $n_l$  や  $L_i$  を大きく見積もる必要があることがわかる．

### 5.3 ノード密度のばらつきの影響

前節まででは，全ての道路区間においてノード密度も均一とした．ここでは，交通誘導前の各道路区間の

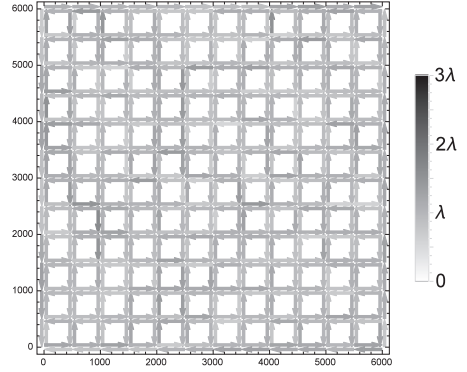


図 20 交通パターン 1

Fig. 20 Traffic pattern 1.

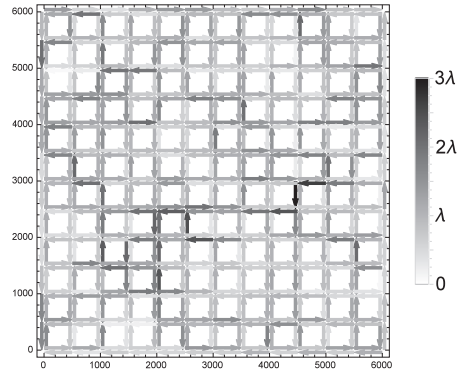


図 21 交通パターン 2

Fig. 21 Traffic pattern 2.

ノード密度がばらついている場合として，図 20，図 21 のような交通パターンを考える．これらの交通パターンは，サービスエリアの各端点から入ってくるノード密度は  $\lambda$  で一定であるが， $N_1$ ， $N_2$ ， $N_3$ ， $N_4$  の各種類のノードが各交差点に到達したときに曲がる確率をノードの種類と交差点によって異なる値とすることで得られたパターンである．各交差点で曲がる確率を図 20 では [0.25, 0.75] の一様分布，図 21 では [0, 1] の一様分布で与えている．

ノード密度がばらついている場合においても， $n_l$  と  $L_i$  の計算の考え方は基本的には 3.2，3.3 と同様である．以下に 3.2，3.3 と異なるところを含め， $n_l$  と  $L_i$  の計算を示す．

**Step 1:**  $i$  段目の TA は  $2(n_x + 2i - 1)(n_y + 2i - 1)$  個存在するが，この中の  $j$  番目の TA において RA に向かう方向のノード密度を  $\lambda_{1,i,j}$ ，RA から遠ざかる方向のノード密度を  $\lambda_{2,i,j}$  とおく． $i$  段目の  $j$  番目の

表 2 ノード密度がばらついている場合の  $P_f$  のシミュレーション結果Table 2 Simulation results of  $P_f$  for uneven traffic.

$\lambda$ [ $\text{m}^{-1}$ ]	交通パターン	$n_l$	$L_1$ [m]	$L_2$ [m]	$L_3$ [m]	$P_f$
0.008	1	2	300	10	—	0.000252
0.008	2	3	300	300	223.55	0.000000
0.04	1	1	10	—	—	0.000158
0.04	2	1	10	—	—	0.000916

TA で  $I_{IF}$  を受け取れない確率の最小値  $P_{f,i,j}$  を求めるために、 $L_i = a - 2r$  として、次の方程式を  $P_{f,i,j}$  について数値的に解く。

$$P_{f,i,j} = \frac{\{\lambda_{1,i,j} + (1 - P_{f,i,j})\lambda_{2,i,j}\}e^{-(1 - P_{f,i,j})\lambda_{2,i,j}(2L_i + r)}}{\lambda_{1,i,j} + (1 - P_{f,i,j})\lambda_{2,i,j}e^{\{\lambda_{1,i,j} + (1 - P_{f,i,j})\lambda_{2,i,j}\}r}}. \quad (7)$$

更に、安全側の近似として、 $P_{f,i,j}$  の  $j$  に関する最大値を求め、これを  $P_{f,i,max} = \max_j P_{f,i,j}$  とする。

**Step 2:**  $\prod_{i=1}^{n_l-1} P_{f,i,max} > P_{f,desired}$  か  $\prod_{i=1}^{n_l} P_{f,i,max} \leq P_{f,desired}$  を満たすような  $n_l$  を求める。

**Step 3:** 次の式により、 $n_l$  段目の TA の大きさ  $L_{n_l}$  を求める。

$$L_{n_l} = \max_j \frac{\log \frac{\lambda_{3,n_l,j}}{P_{f,n_l} \{\lambda_{2,n_l,j}(1 - P_{f,n_l})e^{\lambda_{3,n_l,j}r} + \lambda_{1,n_l,j}\}}}{2(1 - P_{f,n_l})\lambda_{2,n_l,j}} - \frac{r}{2}. \quad (8)$$

ただし、 $\lambda_{3,n_l,j} = \lambda_{1,n_l,j} + \lambda_{2,n_l,j}(1 - P_{f,n_l})$ 、 $P_{f,n_l} = \frac{P_{f,desired}}{\prod_{i=1}^{n_l-1} P_{f,i,max}}$  とする。式 (8) で  $L_{n_l} < 0$  となった場合は、 $L_{n_l} = L_{min} = 10$  m とする。

$n_l$  と  $L_i$  の解析結果と、 $P_f$  のシミュレーション結果を、表 2 に示す。この表から、各道路区間のノード密度が均一ではない場合においても、上記のような解析手法によって適切に IF を行うことができ、 $P_f$  の許容値  $P_{f,desired} = 0.005$  よりも小さい値を実現できていることがわかる。

次に、交通誘導前と交通誘導後の各車線のノード密度の比を、図 22、図 23 に示す。観測対象の車線は、図 8 における (1)、(2)、(3) に沿った車線である。図 22、図 23 はそれぞれ交通パターン 1 と交通パターン 2 の結果であり、どちらも  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  である。

これらの図を見ると、交通パターン 1 においては交通誘導によって最も混雑する車線でもノード密度はせいぜい交通誘導前の 2 倍程度であるが、交通パターン

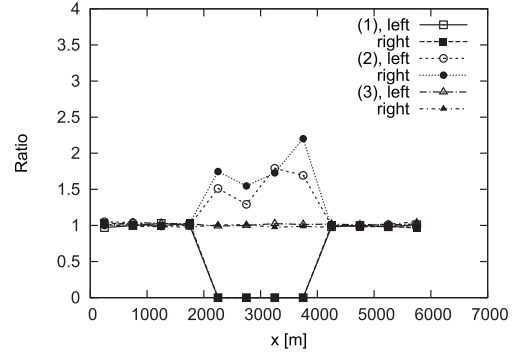


図 22 交通誘導前と交通誘導後の各車線のノード密度の比 (交通パターン 1)

Fig. 22 Ratio of node densities of each lane before and after traffic guidance in traffic pattern 1.

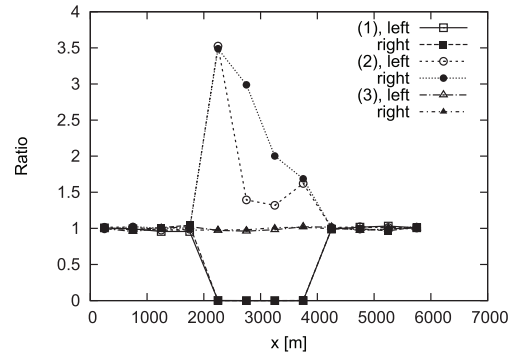


図 23 交通誘導前と交通誘導後の各車線のノード密度の比 (交通パターン 2)

Fig. 23 Ratio of node densities of each lane before and after traffic guidance in traffic pattern 2.

2 においては 3.5 倍程度になっている。ノード密度が均一の場合には最も混雑する車線でも交通誘導前の 3 倍以下という結果が得られていたため、これに比べるとノード密度が大きくばらついている場合は混雑が大きくなっている。

最後に、ノード密度がばらついている場合において、混雑緩和手法を適用したときの交通誘導前と交通誘導後の各車線のノード密度の比の結果を示す。図 24、図 25 はそれぞれ、交通パターン 1、交通パターン 2 における結果である。どちらも  $\lambda = 0.04 \text{ m}^{-1}$  である。 $\alpha = 2$  とし、4.2 と同様に、これを実現するための  $m$  及び  $p_i$  の値として、 $m = 2$ 、 $p_0 = \frac{2}{3}$ 、 $p_1 = \frac{4}{15}$ 、 $p_2 = \frac{1}{15}$  を用いる。観測対象の車線は、図 12 の (1)～(5) に沿った車線である。

図 24 を見ると、ノード密度のばらつきが比較的小さい交通パターン 1 においては、混雑緩和手法が有効

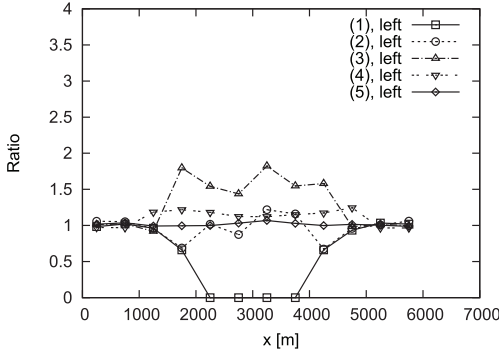


図 24 複数種類の進入制限エリアを用いたときの交通誘導前と交通誘導後の各車線のノード密度の比 (交通パターン 1,  $\alpha = 2$ )

Fig. 24 Ratio of node densities of each lane before and after traffic guidance for multiple restricted areas in traffic pattern 1, where  $\alpha = 2$ .

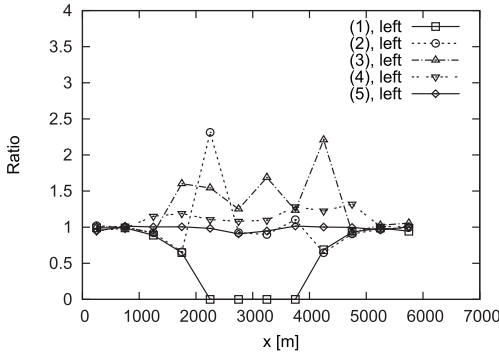


図 25 複数種類の進入制限エリアを用いたときの交通誘導前と交通誘導後の各車線のノード密度の比 (交通パターン 2,  $\alpha = 2$ )

Fig. 25 Ratio of node densities of each lane before and after traffic guidance for multiple restricted areas in traffic pattern 2, where  $\alpha = 2$ .

に働いており、各車線において交通誘導後は交通誘導前のノード密度の  $\alpha = 2$  倍以下に抑えられている。一方、図 25 を見ると、ノード密度のばらつきが大きい交通パターン 2 においては、混雑緩和手法を適用する前よりは混雑を緩和できているが、許容値である  $\alpha = 2$  倍の値は超えてしまっている車線が存在する。これらのことから、ノード密度のばらつきがあるような状況においても、それほどばらつきが大きくなければ、4. で示した均一な交通量を前提とした混雑緩和手法の考え方が有効であるが、ばらつきがある程度以上大きくなると別の考え方に基づいた混雑緩和手法を考える必要があることがわかる。これは今後の課題である。

## 6. む す び

本論文では、従来の研究で比較的単純なモデルで評価されていた IF による交通誘導を格子状道路において考え、TA の段数と大きさを理論的な手法により適切に定めることができることを示した。また、IF による交通誘導の結果、一部の道路に混雑が発生し空間的に移動ノードの分布が偏ることを示した。このような、進路変更による特定の道路区間における極端な交通量の増加を防ぐため、ノードを空間的に分散させることを考え、複数の RA を併用することにより偏りを改善できることを示した。

今後の課題として、より広いサービスエリアにおける RA と TA の設定による影響の考察や、より複雑な通信環境モデル、道路モデルにおける解析などが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 16K06344, 17K14679 の助成を受けたものである。

## 文 献

- [1] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks," Technical Report, Duke University, April 2000.
- [2] Z. Zhang, "Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay tolerant networks: Overview and challenges," IEEE Communications Surveys, vol.8, no.1, pp.24–37, 2006.
- [3] 中野敬介, "エビデミック通信, 情報フローティングと安全・安心," IEICE Fundamentals Review, vol.10, no.4, pp.282–292, April 2017.
- [4] A.V. Castro, et al., "Hovering information-self-organising information that finds its own storage," BBKCS-07-07, Technical Report, School of Computer Science and Information Systems, Birkbeck College, London, UK, Nov. 2007.
- [5] E. Hyttiä, J. Virtamo, P. Lassila, J. Kangasharju, and J. Ott, "When does content float? Characterizing availability of anchored information in opportunistic content sharing," IEEE INFOCOM, pp.3123–3131, 2011.
- [6] J. Ott, E. Hyttiä, P. Lassila, J. Kangasharju, and S. Santra, "Floating content for probabilistic information sharing," Pervasive and Mobile Computing, vol.7, no.6, pp.671–689, 2011.
- [7] E. Hyttiä, P. Lassila, J. Ott, and J. Kangasharju, "Floating information with stationary nodes," Eighth Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks (SpaSWin), pp.361–366, 2012.
- [8] B. Liu, B. Khorashadi, D. Ghosal, C.N. Chuah, and H.M. Zhang, "Analysis of the information storage capability of VANET for highway and city traffic,"

Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol.23, pp.68–84, 2012.

- [9] J. Virtamo, et al., “Criticality condition for information floating with random walk of nodes,” Performance Evaluation, vol.70, no.2, pp.114–123, Feb. 2013.
  - [10] B. Xie, Y.W. Chen, M. Xu, and Y.G. Wang, “Mathematical modeling of locally information storage capability of VANET for highway traffic,” Applied Mechanics and Materials, vols.373–375, pp.1914–1919, 2013.
  - [11] M.S. Desta, E. Hyytiä, J. Ott, and J. Kangasharju, “Characterizing content sharing properties for mobile users in open city squares,” 10th Annual IEEE/IFIP Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS), pp.147–154, 2013.
  - [12] M. Ciocan, C. Dobre, C.X. Mavromoustakis, and G. Mastorakis, “Analysis of vehicular storage and dissemination services based on floating content,” Proc. International Workshop on Enhanced Living Environments (ELEMENT 2014), 6th International Conference on Mobile Networks and Management (MONAMI 2014), Sept. 2014.
  - [13] 萩原 涼, 小倉一峰, 山崎康広, 大崎博之, “フローティングコンテンツ配信制御の提案および安定性解析,” 信学技報, CQ2015-21, July 2015.
  - [14] K. Nakano and K. Miyakita, “Information floating on a road with different traffic volumes between opposite lanes,” J. Advanced Simulation in Science and Engineering, vol.3, no.1, pp.97–113, Aug. 2016.
  - [15] K. Nakano and K. Miyakita, “Analysis of information floating with a fixed source of information considering behavior changes of mobile nodes,” IEICE Trans. Fundamentals, vol.E99-A, no.8, pp.1259–1268, Aug. 2016.
  - [16] Wolfram Research, Mathematica, <http://www.wolfram.com/mathematica/>.
  - [17] H. Takagi and L. Kleinrock, “Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals,” IEEE Trans. Commun., vol.32, no.3, pp.246–257, March 1984.
  - [18] P. Santi, “Topology control in wireless ad hoc and sensor networks,” ACM Comput. Surv., vol.37, no.2, pp.164–194, June 2005.
  - [19] O. Georgiou, C.P. Dettmann, and J. Coon, “Network Connectivity: Stochastic vs. Deterministic Wireless Channels,” 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC 2014), pp.77–82, June 2014.
- (平成 29 年 12 月 12 日受付, 30 年 3 月 31 日再受付,  
4 月 16 日早期公開)



会員.

## 宮北 和之 (正員)

平 17 長岡高専専攻科了. 平 22 新潟大学院博士課程了. 博士 (工学). 現在, 新潟大助教. 平 21 本会回路とシステム研究会優秀学生発表賞, 平 20, 21 IEEE Shinetsu Section Young Researcher Paper Award, 平 22 本会学術奨励賞受賞. IEEE



## 柄沢 直之 (正員)

平 8 新潟大・工・情報卒. 平 10 同大学院博士前期課程了. 現在, 新潟大助教. ネットワーク工学に関する研究に従事. 平 9 年本会論文賞受賞. IEEE, 日本シミュレーション学会, 電気学会各会員.



## 稲川 優斗 (学生員)

平 29 新潟大・工・情報卒. 現在, 同大学院博士前期課程在学中.



## 中野 敬介 (正員: シニア会員)

平元新潟大・工・情報卒. 平 6 同大学院博士課程了. 博士 (工学). 現在, 新潟大・教授. ネットワーク工学に関する研究に従事. 平 8 IEEE ICNNSP'95 論文賞, 平 9 本会論文賞受賞. 平 11–12 イリノイ大学客員研究員. 平 24 回路とシステム研専委員長, 平 30 安全・安心な生活と ICT 研専委員長. IEEE, ACM 各会員.