

# 通信周期制御によるショックウェーブ抑制手法

鈴木 理基<sup>1,a)</sup> 重野 寛<sup>1,b)</sup>

**概要:** 交通渋滞改善の取組では、減速動作が後方に伝播するショックウェーブ現象を抑制し、事故や故障車による渋滞を抑制することが重要である。抑制方式は発生抑制手法と伝播抑制手法に分類され、併用によって高い効果が期待される。しかし、渋滞が起きやすい高車両密度時には通信負荷が高く、十分な効果が得られず、各方式を単独で使用するよりも悪化する恐れがある。本稿では、発生抑制手法と伝播抑制手法を併用し、高通信負荷時に各手法が通信損失によって発生させるショックウェーブ伝播速度を予測、比較し、最大値を優先して低減するように通信性能を制御することで効果的にショックウェーブを抑制する併用手法を提案する。そして、提案方式をシミュレーションにより通信性能とショックウェーブ抑制効果の観点から既存方式と比較し、有効性を示したので、以下に報告する。

## Shockwave Propagation Reduction Method Controlling Transmission Interval

MASAKI SUZUKI<sup>1,a)</sup> HIROSHI SHIGENO<sup>1,b)</sup>

**Abstract:** In this paper, we propose a combination shockwave reduction method. A shockwave is a wave of deceleration, which is generated by a heavily braking vehicle and propagates toward the upstream. Because the shockwave may cause a traffic congestion, the shockwave reduction method would be an important solution for the traffic congestion. The shockwave reduction method is categorized into the occurrence reduction method and the propagation reduction method. The combination of both methods is expected to effectively reduce the shockwave because each method has unique merits and demerits. However, under the dense traffic condition, the combination method easily causes the network congestion compared with single method. The combination method, consequently, may degrade the reduction performance. Hence, we propose a novel combination method, which enables vehicles to estimate the shockwave velocity due to the communication loss and to control the transmission interval to reduce the estimated shockwave velocity. The proposed method is evaluated through the computer simulations in terms of the network performance and the shockwave reduction performance.

### 1. はじめに

交通改善の取組は種々あるが、中でも渋滞を低減することは最も重要な課題のひとつである。渋滞は大きくふたつに分類される。ひとつは地理的、道路構造のボトルネックに起因し、渋滞の先頭が特定の地点に定まっている渋滞で

ある。これを本稿では固定渋滞と呼ぶ。固定渋滞は発生地点が予めわかっているため、インフラを用いた渋滞抑制方式 [1], [2] が検討されている。もうひとつは一時的に交通量が容量を超過したとき、あるいは一時的に道路容量が低下したときに、ある車両が起点となる渋滞である。これを本稿では突発渋滞と呼ぶ。突発渋滞は発生地点が特定できないため、車車間通信を用いて渋滞を抑制する。特に、突発渋滞発生時は前方を走行する車両の減速動作が後方に伝播するショックウェーブ現象 [3] が直接の原因となるので、

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Keio University  
a) masaki@mos.ics.keio.ac.jp  
b) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

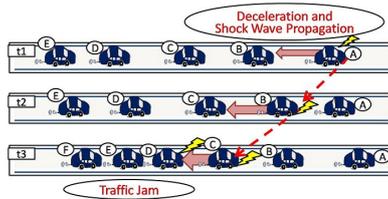


図 1 ショックウェーブが渋滞を引き起こす例

Fig. 1 Example of traffic congestion caused by shockwave

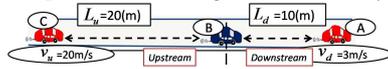


図 2 ショックウェーブ伝播速度の計算例

Fig. 2 Example of shockwave calculation

車車間通信を利用してショックウェーブ現象の発生や伝播を抑制する手法 [4], [5] が検討されている。

本稿は、代表的なショックウェーブ伝播抑制手法である拡張ビーコン方式と発生抑制手法である CACC 方式を併用し、効果的にショックウェーブを低減することを目的とする。高車両密度時に両手法を併用すると無線帯域の輻輳によりパケットロスが発生し、各車両で走行制御を行うための情報が不足し、ショックウェーブ抑制効果が悪化する場合がある。本稿では交通状況と通信状況に応じて拡張ビーコン方式と CACC 方式の通信周期をそれぞれ動的に調整することで、効果的にショックウェーブを抑制する。

## 2. ショックウェーブ抑制手法

ショックウェーブは後方車両に伝播し、渋滞を引き起こす場合がある。その例を図 1 に示す。図では車両 A から E が道路上を走行している。時刻  $t_1$  に車両 A が減速し、その減速動作が後方車両に波として伝播していく。この現象をショックウェーブ現象という。時刻  $t_2$  には車両 B が減速し、時刻  $t_3$  には車両 C が減速する。ショックウェーブは速度を増加させながら伝播する場合があります。図の例では時刻  $t_3$  で車両 D にも減速が伝わり、局所的に交通スループットが低下し、渋滞が発生する。

一般的にショックウェーブ伝播速度と後続車両の減速量の大きさには正の相関がある [6] ため、ショックウェーブ伝播速度を抑制することが渋滞を低減するうえで重要である。ショックウェーブの抑制手法はショックウェーブの伝播速度を小さくする手法（伝播抑制手法）とショックウェーブの発生を抑制する手法（発生抑制手法）に分類される。

### 2.1 伝播抑制手法

ある車両を通過するショックウェーブ伝播速度  $w$  は式 1 で示される [5], [6]。

$$w = \frac{q_d - q_u}{k_d - k_u} = \begin{cases} 0 & \left( \frac{|N_d|}{L_d} - \frac{|N_u|}{L_u} = 0 \right) \\ \frac{\frac{1}{L_d} \sum_{l \in N_d} v_d(l) - \frac{1}{L_u} \sum_{l \in N_u} v_d(l)}{\frac{|N_d|}{L_d} - \frac{|N_u|}{L_u}} & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $q$  は交通スループット、 $k$  は密度、 $u$  は観測地点の上流、 $d$  は観測地点の下流、 $v$  は車両の速度、 $L$  は道路長、 $N$  は車両台数をそれぞれ示す。図 2 に例を示す。図の例では、車両 A から C が図中に示す速度と車間距離で道路上を走行している。車両 B を通過するショックウェーブ伝播速度は式 2 で与えられる。

$$w = \frac{q_d - q_u}{k_d - k_u} = \frac{3/10 - 20/20}{1/10 - 1/20} = -14 \text{ m/s}. \quad (2)$$

伝播抑制手法の代表的な方式に、拡張ビーコン方式 [4][7] がある。拡張ビーコン方式では車両同士が位置、速度情報に加えて車間距離、走行レーン、ショックウェーブの発生フラグや伝播速度の情報を交換し、ショックウェーブが車両に到達する前にゆるやかに速度調整し、ショックウェーブ伝播速度を低減する。伝播抑制手法は発生抑制手法に比して広範囲に抑制効果を示すが、効果が小さい。

### 2.2 発生抑制手法

発生抑制手法の代表的な手法に CACC[5][8][9] がある。CACC は複数の車両が車群を形成し、小さい車間距離を保ったまま高速移動する。先行車両と一体となって加減速するため、車群内でショックウェーブが発生しない。そのために車両間では短周期の情報交換ならびに低キックバック遅延の情報伝達が必要である。したがって、車群を形成可能な車両台数の上限は低く 5 台から 10 台程度とされ、伝播抑制手法に比して影響範囲は小さい。

### 2.3 伝播/発生同時抑制のメリット/デメリット

両手法の長所短所から、効果的にショックウェーブを抑制するためには、伝播手法と発生手法を併用することが望ましい。しかし、伝播抑制手法と発生抑制手法を組み合わせた方式はまだ検討されていない。特に渋滞が発生しやすい高車両密度時には、通信要件を満たせず抑制効果ならびに範囲が低下する恐れがある。拡張ビーコン方式の性能低下時には事前の速度調整が不足し、ショックウェーブが抑制されないまま伝播する。CACC 方式の性能低下時には安定した車群走行を維持できず、車群安定性が低下し、加減速動作が増幅しショックウェーブを引き起こす [10]。以上から、通信損失の影響を小さくするように、ショックウェーブの伝播と発生を同時に抑制することが、突発渋滞を抑制するうえで重要である。

## 3. 提案

本稿では、ショックウェーブの発生ならびに伝播を効果的に抑制するため、発生抑制手法と伝播抑制手法を併用する。通信の輻輳発生時には、通信量を制限する必要がある。ショックウェーブ伝播速度を小さくするようにそれぞれの通信性能を制御することで、ショックウェーブ抑制効果の低下を抑える。そのため通信輻輳発生時にまず、拡張ビー

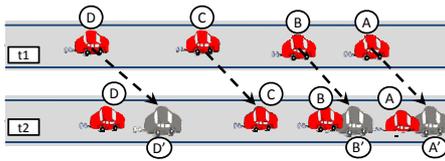


図 3 拡張ビーコン通信損失によるショックウェーブ発生例  
Fig. 3 Shockwave caused by ExBeacon communication loss

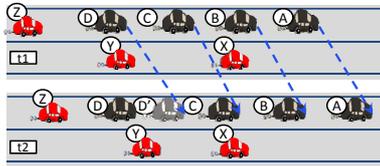


図 4 CACC 通信損失によるショックウェーブ発生例  
Fig. 4 Shockwave caused by CACC communication loss

コンの性能低下によって伝播するショックウェーブ伝播速度と、CACC の性能低下によって発生するショックウェーブ伝播速度を算出する。そして、ショックウェーブ伝播速度が小さくなるように拡張ビーコンと CACC の通信周期をそれぞれ調整する。提案方式は通信性能低下時における抑制効果の低下を小さくする。

### 3.1 ショックウェーブ伝播速度の算出

各車両は周囲の車両から情報を受信する毎に、直前に受信した情報とあわせて各方式の通信損失によるショックウェーブ伝播速度を算出する。拡張ビーコン方式ならびに CACC 方式の通信損失時に発生するショックウェーブ伝播速度  $w_{loss}$  は、式 3 から算出する。

$$w_{loss} = w_{actual} - w' \quad (3)$$

ここで、 $w_{actual}$  は実車両位置から算出されるショックウェーブ伝播速度、 $w'$  は最後に受信した情報から予測される通信損失が無い場合の周囲車両、自車両位置ならびに速度から算出されるショックウェーブ伝播速度を示す。

図 3 に拡張ビーコンの損失によるショックウェーブ伝播例を示す。図では、車両 A から D が道路上を走行し、各車両は通信範囲内を走行し、拡張ビーコンを定期的に交換する。時刻  $t_1$  から  $t_2$  の間に拡張ビーコン通信が損失すると、時刻  $t_2$  では車両 C が予測する車両 A, B ならびに D の位置や速度と実際に各車両が走行する位置や速度が異なる場合がある。車両 C における  $w_{loss}$  を算出するとき、 $w_{actual1}$ 、 $w'_{ExBeacon}$  は式 4, 5 から算出される。

$$w_{actual} = \frac{V_{B'}/D_{B'-C} - V_{D'}/D_{C-D'}}{1/D_{B'-C} - 1/D_{C-D'}}, \quad (4)$$

$$w'_{ExBeacon} = \frac{V_B/D_{B-C} - V_D/D_{C-D}}{1/D_{B-C} - 1/D_{C-D}}, \quad (5)$$

ここで  $D_{i-j}$  は図中の車両 A から D について車両  $i$  と  $j$  の車間距離を示し、 $V_i$  は車両  $i$  の速度を示す。

図 4 に CACC の通信損失によりショックウェーブ発生

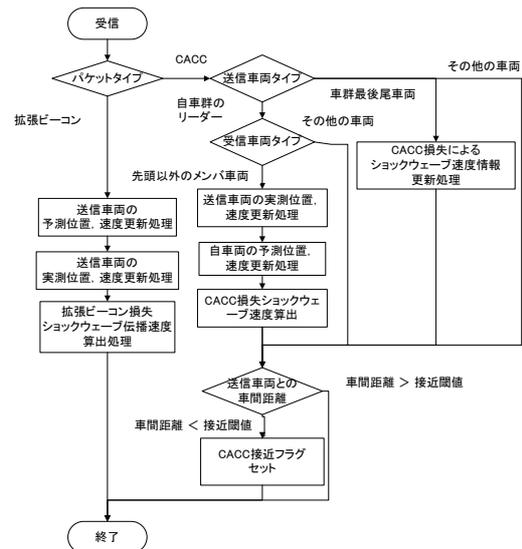


図 5 情報受信時のショックウェーブ伝播速度の算出処理フロー  
Fig. 5 Execution flow of shockwave propagation velocity when receiving information

例を示す。図では、車両 A から D, X から Z が直線道路上を走行し、車両 A から D が車群を形成する。時刻  $t_1$  から  $t_2$  の間に車両 D に到達する CACC 通信を損失すると、車群は安定性を失い、車両 D の位置は通信成功時の車両 D' の位置とずれる。車両 D は CACC 通信を受信する度に周囲車両の位置から通信成功時の車両位置を算出し、CACC 通信の損失によるショックウェーブ伝播速度を算出する。車両 D における  $w_{loss}$  を算出するとき  $w_{actual}$ 、 $w'_{CACC}$  は式 6, 7 から算出される。

$$w_{actual} = \frac{V_C/D_{C-D'} - V_Z/D_{D'-Z}}{1/D_{C-D'} - 1/D_{D'-Z}}, \quad (6)$$

$$w'_{CACC} = \frac{V_C/D_{C-D} - V_Z/D_{D-Z}}{1/D_{C-D} - 1/D_{D-Z}}, \quad (7)$$

ここで  $D_{i-j}$  は図中の車両 A から Z について車両  $i$  と  $j$  の車間距離を示し、 $V_i$  は車両  $i$  の速度を示す。

通信損失によるショックウェーブ伝播速度算出処理は各方式の情報受信時に受信車両が実行する。その処理フローを図 5 に示す。受信情報が拡張ビーコンの場合、まず直前に受信した位置、速度情報から送信車両の受信時刻における予測位置、速度を算出する。次に、受信情報から送信車両の実測位置、速度情報を更新し、拡張ビーコン損失によるショックウェーブ伝播速度を算出する。受信情報が CACC 通信の場合、まず送信車両タイプを検査する。送信車両が自車群のリーダーの場合、受信車両タイプを検査する。受信車両が車群メンバだった場合、受信情報から送信車両の実測位置、速度情報を更新し、自車両の予測位置、速度を更新し、CACC 通信損失によるショックウェーブ伝播速度を算出する。受信車両が車群メンバでない場合は、何も処理しない。送信車両が車群最後尾車両の場合、送信車両の属する車群の CACC 通信損失によるショックウェーブ伝

播速度を更新する。送信車両が車群メンバの場合、何も処理しない。送信車両、受信車両タイプに関わらず、送信車両との車間距離を検査し、閾値よりも小さければ CACC 接近フラグをセットする。

### 3.2 通信周期調整

提案方式では、各車両が自律的に伝播抑制手法と発生抑制手法の通信周期を決定する。発生抑制手法ならびに伝播抑制手法の通信周期  $T$  は式 8 から算出する

$$T = B \times (1 + L \times A \times R), \quad (8)$$

ここで、 $B$  は基本通信周期、 $L$  は情報損失率、 $A$  はショックウェーブ伝播速度係数、 $R$  は相対ショックウェーブ伝播速度係数を示す。情報損失率  $L$  は式 9 から算出する。

$$L = 1 - \frac{P}{M}, \quad (9)$$

ここで、 $P$  は受信情報数を示す。受信情報数は、車群内他車両から受信する CACC 通信パケット数である。 $M$  は希望受信数を示し、単位時間に受信する CACC 通信パケット数を通信周期と車群構成車両数から算出する。パケット損失率が大きいほど  $L$  が大きくなり、通信周期は長くなる。見込みショックウェーブ伝播速度係数  $A_{CACC}$  ならびに  $A_{ExBeacon}$  は式 10 ならびに 11 から算出する。

$$A_{CACC} = \max\left(\frac{W_{ExBeacon} - \alpha_1}{\alpha_2}, 0\right), \quad (10)$$

$$A_{ExBeacon} = \max\left(\frac{W_{CACC} - \alpha_1}{\alpha_2}, 0\right), \quad (11)$$

ここで、 $W_{CACC}$  ならびに  $W_{ExBeacon}$  はショックウェーブ伝播速度を示し、 $\alpha_1$  はノイズ除去値を示し、 $\alpha_2$  は重み変数を示す。 $\alpha_1$  ならびに  $\alpha_2$  は予備実験により決定する。 $W_{CACC}$  の絶対値が大きいほど拡張ビーコン通信周期が長くなり、 $W_{ExBeacon}$  の絶対値が大きいほど CACC 通信周期が長くなる。相対ショックウェーブ伝播速度係数  $R_{CACC}$  ならびに  $R_{ExBeacon}$  は式 12, 13 から求める。

$$R_{CACC} = \frac{W_{ExBeacon}}{W_{CACC} + W_{ExBeacon}}, \quad (12)$$

$$R_{ExBeacon} = \frac{W_{CACC}}{W_{CACC} + W_{ExBeacon}}, \quad (13)$$

ここで、 $W_{CACC}$  ならびに  $W_{ExBeacon}$  はショックウェーブ伝播速度を示す。 $W_{CACC}$  に比して  $W_{ExBeacon}$  が大きいほど CACC 通信周期が大きくなり、逆であれば、拡張ビーコン通信周期が大きくなる。

各方式の情報通信周期決定処理は各車両が情報送信直後に実行する。その処理フローを図 6 に示す。各車両は送信後、車群近傍走行フラグを検査する。車群が近傍を走行している場合、ショックウェーブ伝播速度係数ならびに相対ショックウェーブ伝播速度係数を算出する。次に、受信情報から情報損失率を取得し、通信周期を算出する。最後に、通信周期から次回送信時刻を算出し、終了する。

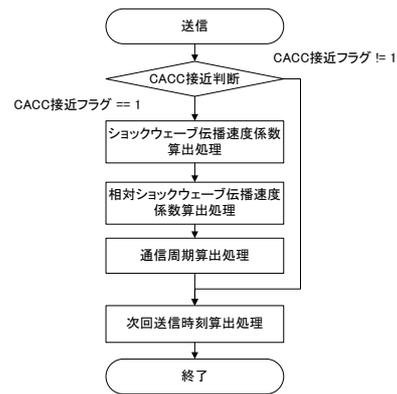


図 6 情報送信時の通信周期決定処理フロー

Fig. 6 Execution flow of transmission interval decision when sending information

## 4. 提案方式の評価と考察

提案方式をコンピュータ・シミュレーションにより既存方式と比較評価し、考察する。本シミュレーションでは、ショックウェーブ発生抑制方式と伝播抑制方式の特徴を確認し、発生方式と抑制方式を併用した場合に、高車両密度時の性能が低下することを確認する。そして、提案方式が両手法を併用するため、低車両密度時に各方式を単独で使用する場合よりも高い性能を示すことを示し、高車両密度時に通信性能の低下を改善することでショックウェーブ抑制効果の低下を抑えることを示す。

### 4.1 比較対象ならびにシミュレーション条件

事故や故障を想定し、ある車両が道路の中央で急減速し、道路上に停車する意図的に渋滞が起りやすい状況を作り、車両の流入量を変化させた場合に既存方式ならびに提案方式が渋滞に与える影響を評価する。

そのため、シミュレーション環境には通信シミュレータ Scenargie 1.5[11] ならびに交通流シミュレータ MATES[12] を並列実行する環境を用いた。主なシミュレーション条件を表 1 に示す。道路モデルは高速道路を想定した信号の無い片側 2 車線の直線道路とし、道路上を走行する全車両は無線通信機を搭載するものとした。1 台の車両は故障車を想定して、流入時に他車両と同様の走行モデルで走行するが、道路の中央で急減速し停車する。シミュレーションの測定時間は 1300 秒で、測定開始から 100 から 200 秒後に故障車が流入し、測定開始から 1000 秒後に車両の流入を止める。10%の車両は CACC 通信を行い、車群を形成する。車群走行に必要な通信は文献 [8] に準じ、CACC 通信では 78byte の情報を 20msec で交換することを想定し、CACC 通信が損失した場合は、文献 [10] のモデルにしたがって走行するものとする。また、車群のリーダー車両と車群に参加しない車両は拡張ビーコン通信を行い、ショックウェーブ伝播抑制を行う。拡張ビーコンは文献 [4] に準

表 1 シミュレーションパラメータ

Communication	
Simulator	Scenargie 1.5
Packet size	78Bytes(CACC)
Initial transmission interval	128Bytes(Ex-Beacon)
	20msec(CACC)
	100msec(Ex-Beacon)
PHY layer	802.11p
Modulation scheme	OFDM (QPSK 1/2)
Transmission power	20dBm
Band frequency	5.9GHz
Bandwidth	10MHz
Bit rate	6.0Mbps
Propagation model	ITU-R_P.1411
$\alpha_1, \alpha_2$	1.5, 1
Traffic	
Simulator	MATES
Size of vehicles(W, L, H)	2.5, 12, 3.8
Number of platoon members	10 vehicles
Road length	10 km
Number of lanes	2 lanes (One way)
Expected speed	60 to 120 km/h
Driver model	IDM

じ、128byte の情報を 100msec 間隔で交換することを想定する。本シミュレーション条件での、見通しの良い場合の車両の通信半径が約 500m であり、CACC 接近閾値は 400m とする。CACC 通信と拡張ビーコン通信は同一のチャンネルを使って通信する。

評価指標として情報取得数、情報取得率、平均ショックウェーブ伝播速度、最大ショックウェーブ伝播速度を測定する。通信周期を調整することで通信負荷が低減し、情報取得数ならびに情報取得率が改善することを確認する。そして、効果的にショックウェーブ伝播速度を低減することで平均ショックウェーブ伝播速度ならびに最大ショックウェーブ伝播速度を低減することを確認する。

情報取得数  $P$  は CACC 通信ならびに拡張ビーコン通信の packets を通信範囲内の車両から受信した回数である。情報取得率  $I$  を式 14 に示す。

$$I = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{(P_{CACC(k)} + P_{ExBeacon(k)})}{(P'_{CACC(k)} + P'_{ExBeacon(k)})}, \quad (14)$$

ここで、 $P_k$  は車両  $k$  から受信した情報数、 $P'_k$  は車両  $k$  が受信すべき情報数、 $N$  は道路上を走行する車両台数を示す。平均ショックウェーブ伝播速度  $w_{average}$  を式 15 に示す。

$$w_{average} = \frac{\sum_{k=1}^N w(k)}{N}, \quad (15)$$

ここで、 $w_k$  は車両  $k$  を通過するショックウェーブ速度を示し、 $N$  はショックウェーブを観測する車両台数を示す。最大ショックウェーブ伝播速度  $w_{max}$  を式 16 に示す。

$$w_{max} = \{m \in W \mid m \geq a, \forall a \in W\}, \quad (16)$$

ここで、集合  $W$  は車両 1 から  $N$  が観測したショックウェーブ伝播速度の集合、 $w_{max}$  は集合  $W$  の最大元である。取得情報率は CACC 通信と拡張ビーコン通信を通信周期調整せずに併用する方式 (以下、単純併用方式) と提案方式を比較し、平均ショックウェーブ伝播速度と最大ショックウェーブ伝播速度は拡張ビーコン方式と CACC 方式、CACC 通信と単純併用方式ならびに提案方式を比較する。

## 4.2 結果と考察

### (a) 情報取得率と情報取得数

図 7 に車両流入量を変化させたときの車両平均情報取得率を示す。単純併用方式、提案方式ともに車両流入量の増加に伴って情報取得率が低下する。空いている交通状況とされる、車両流入量が 100 vehicles/h/lane のときには、両手法ともに約 1.0 の取得率を示し、手法間に差は無い。車両密度が低いと通信負荷が小さく、帯域に余裕があるためである。しかし、車両密度の増加に伴って手法間に性能差があらわれ、車両流入量が 500 vehicles/h/lane の時には提案方式が 0.77 を示すのに対し、単純併用方式は 0.66 を示し、性能を改善している。これは、提案方式が輻輳の発生に伴って通信周期を大きくするため、通信負荷が低下し、情報取得率を改善するためと考えられる。

図 8 に車両流入量を変化させたときの車両平均情報取得数を示す。単純併用方式、提案方式ともに車両流入量の増加に伴って情報取得数が低下する。空いている交通状況とされる、車両流入量が 100 vehicles/h/lane のときには、両手法ともに約 50packets/s の取得数を示し、手法間に差は無い。これは、両抑制手法が基本周期で通信した場合の値に近く、情報取得率の測定と同様に車両密度が低いと通信負荷が小さく、帯域に余裕があるためである。車両流入量が 500 vehicles/h/lane のときに、提案方式は単純併用方式よりも約 9.4%高い平均情報取得数を示す。

図 7 と図 8 から、提案方式は車両密度が高く通信負荷が高い場合に通信周期を大きくすることで情報取得率を改善すると同時に情報取得数を改善することがわかる。これは、提案方式によって通信レートが低下するが、それ以上に輻輳の影響を低減でき、スループットが改善し通信性能の低下を抑えることを意味する。

### (b) 平均、最大ショックウェーブ伝播速度

図 9 に車両流入量に対する平均ショックウェーブ伝播速度を示す。全方式に共通して、車両流入量の増加に伴ってショックウェーブ伝播速度が増加することがわかる。

車両流入量が多い場合、CACC 方式が最も高い平均ショックウェーブ伝播速度を示し、車両流入量が 500 vehicles/h/lane のときに 4.5m/s である。これは、CACC が車群内でのショックウェーブ発生を抑制する手法であり、車群走行に参加していない車両のショックウェーブ伝播を抑制しないためである。さらに、CACC 通信損失が発生すると車群からショックウェーブが発生するため、他方式と比べて高い値を示す。単純併用方式も同様の理由から高車両流入量時に高い平均ショックウェーブ伝播速度を示す。拡張ビーコン方式を併用しているため、CACC 方式のみ使用した場合よりも低い値を示すが、CACC 通信の損失時に車群からショックウェーブが発生するため、拡張ビーコン方式のみ使用した場合よりも高い値を示す。

高車両流入量時に拡張ビーコン方式は CACC 方式のみを使用した場合よりも低い平均ショックウェーブ伝播速度を示し、車両流入量が 500vehicles/h/lane のときに 3.3m/s

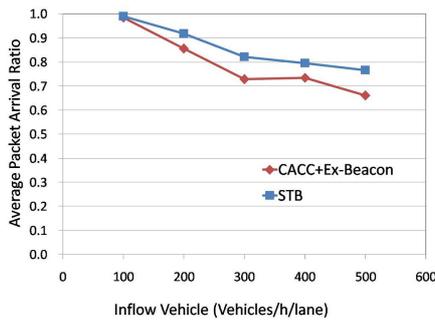


図 7 車両流入量に対する平均情報取得率  
 Fig. 7 Average information arrival ratio against vehicle inflow

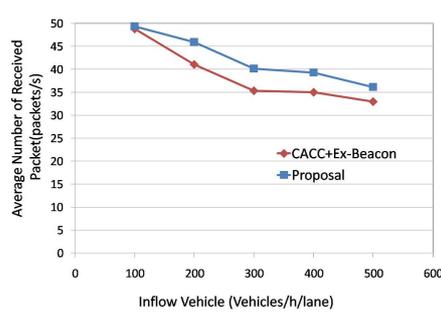


図 8 車両流入量に対する平均情報取得数  
 Fig. 8 Average number of received packet against vehicle inflow

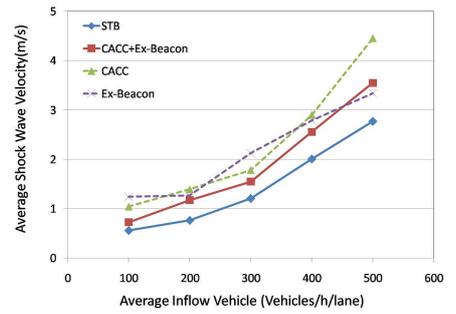


図 9 車両流入量に対する平均ショックウェーブ伝播速度  
 Fig. 9 Average shockwave propagation speed against vehicle inflow

である。これは、CACC 通信周期に比して拡張ビーコン通信周期が長いこと、通信負荷の影響を受けにくいと考えられる。しかし、車両流入量が小さい場合には、拡張ビーコン方式は他の方式に比して高い平均ショックウェーブ伝播速度を示す。これは、拡張ビーコン方式による抑制効果が、CACC 方式に比して小さいためと考えられる。

提案方式はいずれの車両流入量においても、他方式に比して低い平均ショックウェーブ伝播速度を示し、車両流入量が 100vehicles/h/lane のときに 0.56m/s、500vehicles/h/lane のときに 2.8m/s を示す。車両流入量が小さい場合には拡張ビーコン方式の効果と CACC 方式の効果と同時に得られるため、単純併用方式と同様に低い値を示す。車両流入量が高い場合には、単純併用方式の性能は大きく低下するのに対して、提案方式は性能低下を抑えている。情報取得率と情報取得数の結果と合わせて、車両流入量が大きく通信性能が低下する場合に、提案方式は単純併用方式に比して通信性能の低下を抑えるため、ショックウェーブ抑制効果の低下を抑えると考えられる。

## 5. おわりに

本稿ではまず、ショックウェーブ発生抑制手法と伝播抑制方式の特徴を確認した。次に単純併用方式が両手法の利点を併せ持つため、低車両密度時に高いショックウェーブ抑制効果を示すが、高車両密度時に通信性能の低下に伴ってショックウェーブ抑制効果が低下し、発生抑制方式ならびに伝播抑制方式を単独で使用した場合よりも低い効果を示すことを確認した。本稿では、通信負荷の高い高車両密度時に、各手法の損失によって発生するショックウェーブ伝播速度が小さくなるように通信周期を制御することでショックウェーブ抑制効果の性能低下を抑えることを確認した。この結果によって提案方式が突発渋滞発生時の渋滞の影響を抑制することが期待される。

## 参考文献

- [1] Xu, Y., Wu, Y., Wu, G. and Sun, L.: Data Collection for the Detection of Urban Traffic Congestion By VANETs, *Asia-Pacific Services Computing Conference (APSCC)*, pp. 405–410 (2010).
- [2] Henrik Schumacher, C. P. and Slottke, E. N.: A simulation study of traffic efficiency improvement based on Car-to-X communication, *Proceedings of the sixth ACM international workshop on VehiculAr InterNETworking*, pp. 13–22 (2009).
- [3] Ahn, S. and Cassidy, M.: Freeway Traffic Oscillations and Vehicle Lane-Change Maneuvers, *Transportation and Traffic Theory*, pp. 691–710 (2007).
- [4] Huang, D., Shere, S. and Ahn, S.: Dynamic highway congestion detection and prediction based on shock waves, *ACM VehiculAr InterNETworking*, pp. 11–20 (2010).
- [5] Calvert, S., van den Broek, T. and van Noort, M.: Modelling cooperative driving in congestion shockwaves on a freeway network, *IEEE Intelligent Transportation Systems*, pp. 614–619 (2011).
- [6] Hegyi, A., Schutter, B. D. and Hellendoorn, J.: Optimal Coordination of Variable Speed Limits to Suppress Shock Waves, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 6, No. 1 (2005).
- [7] Zhang, J., Boitor, A. and Ioannou, P.: Design and evaluation of a roadway controller for freeway traffic, *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 543–548 (2005).
- [8] Seki, K., Hamaguchi, M.: Inter-vehicle Communication for Truck Platooning (2nd report), Technical report, Vol.2010-ITS-43, No.5 (2010).
- [9] van Arem, B., van Driel, C. and Visser, R.: The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics, *IEEE Intelligent Transportation Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 429–436 (2006).
- [10] Lei, C., van Eenennaam, E. M., Klein Wolterink, W., Karagiannis, G., Heijenk, G. J. and Ploeg, J.: Impact of Packet Loss on CACC String Stability Performance, *ITS Telecommunications*, pp. 381–386 (2011).
- [11] Ohwada, Y., Maeno, T., Kaneda, S., Hisanaga, R. and Takai, M.: Realistic ITS Simulation with Scenargie Simulator, *IPSJ DICOMO*, pp. 233–234 (2008).
- [12] Yoshimura, S., Nishikawa, H. and Moriyasu, S.: Development of Multi-Agent Traffic and Environmental Simulator MATES, *Proceedings on Japan Society for Simulation Technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 228–237 (2004).