

高速道路における勾配影響を受ける場合の 渋滞回避システムの提案と評価

畔柳英健[†] 井手口哲夫[†] 奥田隆史[†] 田学軍[†]

近年、自動車社会ではカーナビやETCなどの車載器が普及してきた。しかし、これらの車載器（情報系）と自動車の制御系は未だに相互連携が行われていない。そこで、現在の自動車社会に顕在する事故や渋滞問題の解決、また、よりよい自動車社会の実現のために、今後、自動車の制御系と情報系との間に、安全性と信頼性を伴った相互連携の確立が必要になる。

本研究では、今後の自動車システムにおける通信ネットワーク系に関する車両の内部および外部において扱われる情報に対する安全性および信頼性を保証するための情報フローベースモデルの確立を目的とする。情報フローベースモデルを考察する上で、車両が走行する環境には様々なものがあるが、本稿ではまず高速道路における渋滞回避を実現する情報フローベースモデルの確立を目指す。

ETCの普及により、以前は高速道路の渋滞の3割を占めていた料金所部での渋滞はほとんど解消されたが、次いで多くを占めていた上り坂およびサグ部での渋滞は現在の高速道路の渋滞の6割以上を占めている。

そこで本稿では、路車間通信を利用して路側機から走行車両に対し勾配情報を伝送し、その勾配情報から適切な加速を自動制御することにより、ドライバーの勾配に対する認知に関わらず上り坂およびサグ部での渋滞を回避することを目的とした渋滞回避システムについて提案し、その有効性をシミュレーションにより論じる。

Proposal and Evaluation of the Traffic Congestion Avoidance System in the case of Affected by Grade on Motorways

EIKEN KUROYANAGI[†] TETSUO IDEGUCHI[†]
TAKASHI OKUDA[†] TIAN XUEJUN[†]

1. はじめに

近年、自動車社会ではカーナビゲーションシステムやETCに代表されるような車載機器が普及し、それらの通信によって渋滞情報などのVICS情報の取得や、高速道路での自動料金徴収などが可能になっている。

しかし、現状の自動車システムは車両内部の制御系と車両外部の情報系（車々間通信、路車間通信、広域移動無線通信によるインターネットなど）が個別に対応され、相互の情報連携は行われていない。また、車両外部の情報系相互間においても情報連携は行われていない。すなわち、制御系と情報系の相互をつなぐのはドライバーである人間であり、ヒューマンエラーによる事故や渋滞が発生する。そこで、それらの問題の解決のため、また、これからのよりよい自動車社会のために、自動車の制御系と情報系との間に、安全性と信頼性を伴った相互連携の確立が必要になる。

本研究は、今後の自動車システムにおける通信ネットワーク系に関する車両の内部および外部において扱われる情報に対する安全性および信頼性を保証するための情報フローベースモデルの確立を目的とする。

情報フローベースモデルを考察する上で、車両が走行する環境には様々なものがあるが、本稿ではまず高速道路に

おける渋滞回避を実現する情報フローベースモデルの確立を目指す。

日本の渋滞の現状として、渋滞による損失時間は年間38.1億人時間（国民1人あたり年間約30時間）にのぼり、経済活動の阻害、交通事故の増加、沿道環境の悪化などをもたらしている[1]。

ETCが導入される以前の平成12年当時、高速道路における渋滞の3割は料金所部で発生していた[2]が、ETCの普及により、今は料金所部での渋滞はほとんど見かけなくなった。それに対し、現在の高速道路における渋滞発生の一の原因である[3][4][5]上り坂およびサグ部での渋滞が緩和されないのは、その性質に問題があると考えられる。

サグ部とは具体的に100m進むと1m上昇または下降しているぐらいの坂道で[6]、ドライバーはこの勾配に気づかないことがある。すると、車両の速度がゆっくりと低下し、後続車両との車間距離が詰まり、後続車両はぶつからないようにブレーキを踏む。そしてこのブレーキが後続車両に波及して、やがて渋滞になってしまう。

上り坂およびサグ部での渋滞は、まずドライバーが周りの状況（ここでは緩やかな勾配）に気づかず、それに適した制御を行えないことが原因となっている。

そこで本稿では、勾配情報を、路車間通信を用いて路側機から走行車両へと伝送し、車両がその情報から適切な速度を維持できるように自動的に加速制御を行う渋滞回避シ

[†] 愛知県立大学 情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology
AICHI PREFECTURAL UNIVERSITY

システムを提案し、シミュレーション実験によってその有効性の検討を行う。ここでの勾配情報とは、勾配のある道路の位置情報と勾配の大きさの情報を含むものとする。

2. 渋滞回避システム

近年、上り坂およびサグ部における渋滞の回避・解消のため、標識や自発光式ペースメーカー[7]、ACCによる方法などが提案・実現されており、一定の効果を上げているが、ITS 通信技術を利用したものはまだ実現されていない。今後、ITS 通信技術を利用した渋滞回避・解消方法が実現できれば、さらに渋滞の少ない自動車社会が実現できると思われる。

現在実現されている、勾配の影響を認知させるための標識や自発光ペースメーカーは、ドライバーがこれらを認知しなければ効果がない。一方、路車間通信を用いれば確実に勾配の影響をドライバーに認知させることができ、さらに勾配情報からドライバーを介さずに適切な加速を自動で制御することが可能である。そこで、この路車間通信を用いることにより、勾配情報を路側機から車両に通知し、その勾配情報から勾配影響に対して適切な加速制御を自動で行う渋滞回避システムを考える。この渋滞回避システムの一連の流れを以下に示す。

1. サグ部開始地点で路側機から路車間通信により勾配情報を受信
2. 受信した勾配情報から計算した勾配影響に応じた加速を自動で制御
3. サグ部終了地点で路側機から勾配情報を受信し、自動制御を終了

この渋滞回避システムの自動加速制御は、完全制御と一部制御に分けられる。完全制御ではドライバーは一切制御を行う必要がなく、自動で加減速が行われる。このため、路車間通信だけでなく車々間通信も用いて先行車両、後続車両と位置情報、速度情報、加速度情報などを通信する必要がある。一方、一部制御は勾配影響を受ける場合、路側機から勾配情報を受信し、その勾配影響の大きさに応じた加速のみを自動で制御する。すなわち、ドライバーは勾配影響を意識する（勾配の大きさに応じてアクセルの踏み具合を調節する）ことなく、それまでの適切な速度を維持することができる。

本稿では、路車間通信を用いた勾配情報の通知による渋滞回避の有効性の検討を行うため、一部制御を対象とする。

3. 提案評価方式

3.1 システムモデル

片側1車線である直線高速道路（対向車線は考慮しないものとする）において、ある区間をサグ部とし、その区間を走行する車両は勾配に応じた勾配影響（負の加速度）を受ける。その区間中における自動制御として、表 3.1 に

示すように次の3種類を比較する。

表 3.1 勾配影響下での3通りの自動加速制御

CASE1	自動制御をおこなわない場合
CASE2	勾配影響と同じ大きさの加速度を自動で制御する場合
CASE3	勾配影響の大きさの一定の割合の加速度を自動で制御する場合

CASE1 では自動制御を行わないので、この場合において1章で述べた上り坂およびサグ部における渋滞を再現できるモデルを実装し、以降の CASE2, CASE3 と比較評価する。

CASE2 では勾配影響として受ける負の加速度と同じ大きさの正の加速度を、ドライバー自身が制御している加速度に加える形で自動制御を行う。例えば勾配影響下で-10の加速度がかかる場合、10の加速度を自動で加える制御を行う。この場合、ドライバーの勾配影響の認知に関らず、勾配影響を自動制御で打ち消すことになるので、渋滞を回避できることは想像できるところであるが、実際にシミュレーションを行うことによってその有効性の確認を行う。

CASE3 では CASE2 と同様に自動制御を行うが、加える加速度の大きさを、勾配影響として受ける負の加速度の大きさの一定の割合とする。例えば勾配影響下で-10の加速度がかかる場合、一定の割合を0.6とするなら、6の加速度を自動で加える制御を行う。この場合、車両が受ける勾配影響を緩和することになる。

3.2 ドライバモデル

このようなシステムをシミュレーションする際に、車両の追従走行をどのように実装するかという問題がある。そこで役に立つのがドライバモデルである。ここでは、代表的な追従走行モデルとして IDM と最適速度モデルについて説明する。なお、本稿では自然渋滞に分類される上り坂およびサグ部における渋滞の再現のため最適速度モデルをシミュレーション内に実装する。

3.2.1 IDM

IDM(Intelligent Driver Model)[8]は、2000年に Treiber, hennecke, helbing によって提案された追従走行モデルである。IDM はそれぞれの車両に対して動的に位置や速度を決定する。このモデルの加速度および必要車間距離を次式に示す。

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = a \left[1 - \left\{ \frac{v_i(t)}{v_{max}} \right\}^4 - \left\{ \frac{\delta}{\Delta x_i(t)} \right\}^2 \right]$$

$$\delta = \Delta x_{min} + \left[v_i(t)T + \frac{v_i(t)\{v_i(t) - v_{i+1}(t)\}}{2\sqrt{ab}} \right]$$

a は加速度、 b はブレーキ時に快適であろう減速度、 δ は安全距離、 Δx_{min} は先方車両のバンパーから自車両のバンパーまでの最小距離、 T は車頭時間、 $v_i(t)$ は自車両の速度、 $v_{i+1}(t)$ は先行車両の速度である。

3.2.2 最適速度モデル

最適速度モデル(Optimal Velocity Model)[9]は坂東らによって提案され、交通流の自然渋滞形成を再現する強力なモ

デルとして知られており、車間距離を参照して1台1台の車両の加速度が決められる運動方程式で記述されるモデルである。最適速度モデルは、車両の次のような性質をモデル化したものである。

- 前方に車両が存在しなければ
自分の走りたい最高速度で走行する
- 前方に車両がいたら、
車間距離によって決まる最高速度で走行する
- 現在の速度と、最適速度の差によって加速度を決める
最適速度モデルは車両*i*について次式で表される。

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\}$$

ここで、 $V(\Delta x_i)$ は最適速度、 $x_i(t)$ は時間*t*における車両*i*の位置、 Δx_i は時間*t*における車両*i*の車間距離、 a は感度パラメータである。加速度は*a*に比例し*a*が大きいほど早く最適速度を達成する。また、最適速度モデルには最適速度関数 $V(\Delta x_i)$ という概念がある。以下に最適速度関数 $V(\Delta x_i)$ を示す。

$$V(\Delta x_i) = \tanh(\Delta x_i - x_c) + \tanh(x_c)$$

このとき x_c は安全車間距離である。図 3.1 に $\Delta x_i = x, x_c = 2$ とした場合の最適速度関数 $V(\Delta x_i)$ の概形を示す。

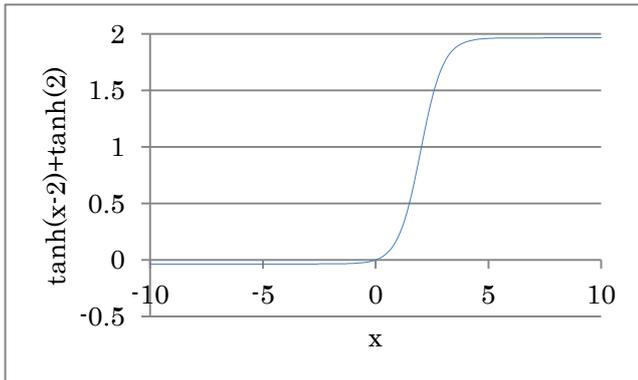


図 3.1 最適速度関数 $V(\Delta x_i)$ の概形 ($\Delta x_i = x, x_c = 2$)

この図 3.1 から最適速度関数 $V(\Delta x_i)$ は車間距離 Δx_i が無限に大きくなった場合に最高速度に達し、車間距離 Δx_i が限りなく小さくなった時に最低速度となるような関数となることがわかる。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション方法

このシミュレーションのためにマルチエージェントシミュレータを用い、3.1 節で述べた CASE1 から CASE3 の場合の比較評価を行う。マルチエージェントシミュレータには、Artisoc2.6[10]を用いる。

4.1.1 Artisoc における空間

Artisoc における空間定義は X 軸：2000 とする。現実空間は X 軸：20km となるので、Artisoc 上の空間における 1 間隔は 10m となる。勾配影響を受ける区間は 15km 地点～17km 地点の 2km、Artisoc のシミュレーション刻みは 0.1s

とする。

4.1.2 シミュレーション条件

道路は直線高速道路（片側 1 車線）とする。車両サイズは一般的な車両サイズである 5m とし、勾配影響と制御係数はシミュレーション時に決定する。生成車間距離と安全車間距離は、車両速度 80km/h 時における一般的な停止距離 76m[11]より十分小さく、3.1 節の CASE1 で現実に近い渋滞が発生するよう、それぞれ 60m、45m とする。なお、路車間通信は理想的な通信が確保されると仮定する。以上を含め本シミュレーションモデルにおけるパラメータを表 4.1 に示す。

表 4.1 シミュレーションパラメータ

道路	直線高速道路（片側 1 車線）
勾配影響区間	15km 地点～17km 地点
走行モデル	最適速度モデル
車両サイズ	5[m]
最高速度	80[km/h]
最高加速度	2.0[m/s ²]
最低加速度	-8.0[m/s ²]
生成車間距離	60[m]
安全車間距離	45[m]
勾配影響	g' [m/s ²]
勾配影響係数	β
認知確率	p [%/ステップ]
制御係数	α

4.1.2.1 本シミュレーションで使用する最適速度モデル

本シミュレーションで使用する最適速度モデルの式を以下に示す。

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\}$$

$$a = \frac{2.0}{80}, \frac{8.0}{80}$$

$V(\Delta x_i) = 40\{\tanh(\Delta x_i - 45) + \tanh(45)\}$
 $\{\tanh(\Delta x_i - 45) + \tanh(45)\}$ の概形を図 4.1 に示す。

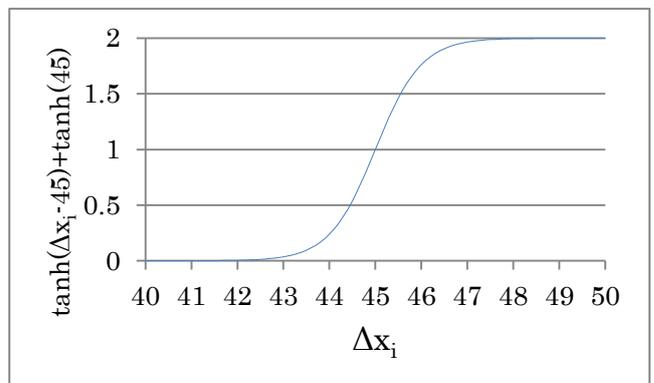


図 4.1 $\{\tanh(\Delta x_i - 45) + \tanh(45)\}$ の概形

$\{\tanh(\Delta x_i - 45) + \tanh(45)\}$ はこの図のように0から2の値をとるので、それに係数40を積算し、最適速度が0から80の値をとるようにする。

$\{V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt}\}$ は最適速度から車両の現在の速度を減算したもので、-80から80の値をとる。この値が負の場合、 a は8.0/80をとり、正の場合2.0/80をとる。これにより、加速度の範囲が-0.8~2.0になる。

4.1.2.2. 勾配の大きさと勾配影響 g'

一般的なサグ部の「100m進むと1m上昇する」勾配の大きさ θ は、 $\tan^{-1}(1/100)$ であり、この勾配から受ける勾配影響 g' は、重力加速度を 9.8m/s^2 とすると、 $9.8\sin\theta = 9.8/\sqrt{10001}$ となる。本シミュレーションではこの勾配影響を単純に0.098とし、同様にこの勾配影響が0.196, 0.49となる場合においてもシミュレーションを行う。

4.1.2.3. 勾配影響係数 β

勾配影響下において、走行車両はドライバーの認知状態と勾配の大きさから $-\beta g'[\text{m/s}^2]$ の加速度を受ける。この β は、ドライバーが勾配影響を全く認知できずに一切補償的行動をしない場合は1、勾配影響を認知し、その勾配影響に応じた適切な制御を行っている場合は0となる。一般に勾配区間におけるドライバーの認知状態は、 β が $0 \leq \beta \leq 1$ の範囲にあるものと考えられる。また、ドライバーが勾配影響を徐々に認知して適応していくのならば、 β は1から0へと変化するものと考えられる[12]。

そこで、ドライバーが勾配影響を認知してから適応するまで、 β を次の線形関数で表されるものとする。

$$\beta(t) = \begin{cases} 1 & (t < T') \\ 2 - \frac{t}{T'} & (T' \leq t < 2T') \\ 0 & (2T' \leq t) \end{cases}$$

ここで、 t は車両が勾配にさしかかってからの経過時間、 T' は車両が勾配にさしかかってからドライバーが勾配影響を認知するまでの時間とする。すなわち、勾配影響を認知するまでの時間と勾配影響を認知してから完全に適応するまでの時間は同じとなる。 $\beta(t)$ の概形を図4.2に示す。

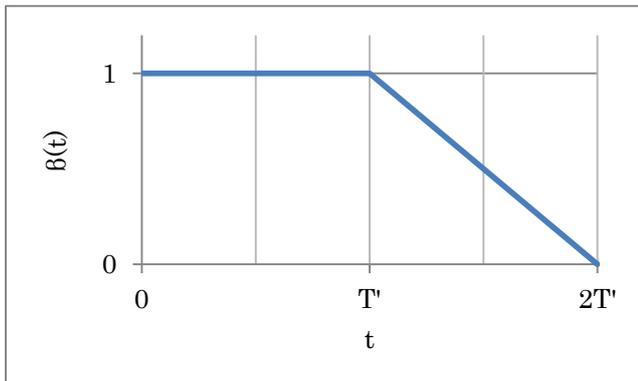


図 4.2 $\beta(t)$ の概形

4.1.2.4. 認知確率 p

認知確率の単位は[%/ステップ]としているので、本シミュレーション上では0.1s毎の認知確率となる。この認知確率は勾配影響の大きさと車両速度の低下に応じた値をとる。具体的には、勾配影響 g' が0.049, 0.098, 0.196の時、認知確率の基本値はそれぞれ0.5, 1, 2となり、さらに速度が最高速度から5km/h低下する毎に1増える。 $g' = 0.098$ における p の概形を図4.3に示す。また、同様の条件で p の単位時間を0.1s毎から1s毎に変換した $p'[\%/s]$ の概形を図4.4に示す。

図 4.3 p の概形

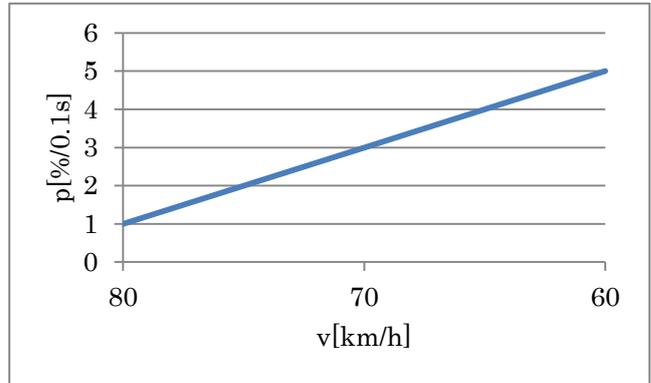


図 4.3 p の概形

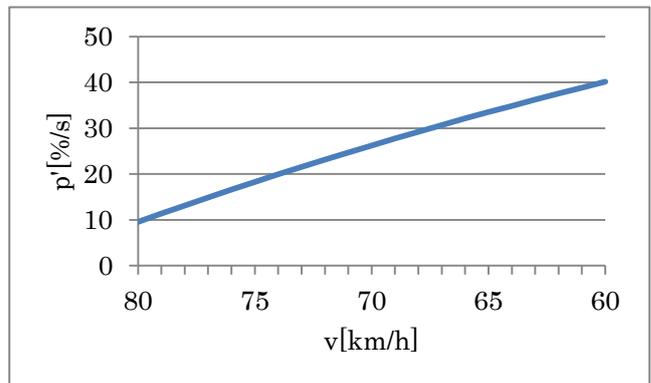


図 4.4 p' の概形

4.1.2.5. 制御係数 α

走行車両は勾配影響下において $-\beta g'$ の加速度を受ける。渋滞回避システムではこれに対し自動的に加速度 $-\alpha g'$ をドライバーの加減速制御に加える形で制御を行う。ここで、 α は $0 \leq \alpha \leq 1$ の範囲で値をとり、3.1節のCASE1では $\alpha = 0$ 、CASE2では $\alpha = 1$ 、CASEでは $0 < \alpha < 1$ となる。本シミュレーションでは、 α を0から1まで0.2刻みで変化させ、シミュレーションを行う。

4.2 評価方法

以上より、本稿では3種の勾配影響($g' = 0.049, 0.098, 0.196$)に対し、6種の制御係数($\alpha = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$)を与えて計18パターンのシミュレーションを行う。

シミュレーションの内容として、シミュレーション終了条件を

- 事故の発生
- 渋滞長1km以上の停止渋滞が発生
- 先頭車両が勾配にさしかかってからシミュレーション内時間で1時間経過

のうちのいずれかと設定したシミュレーションをそれぞれ50回実行し、その中での事故発生数、渋滞発生数、先頭車両が勾配にさしかかってから問題（事故あるいは渋滞）が発生するまでのシミュレーション内時間の平均を結果として出力する。

4.3 シミュレーション結果

4.3.1 勾配影響 $g' = 0.098$ の場合

勾配影響 $g' = 0.098$ の場合の事故発生数、渋滞発生数のグラフを図 4.5 に、問題発生平均時刻のグラフを図 4.6 に示す。

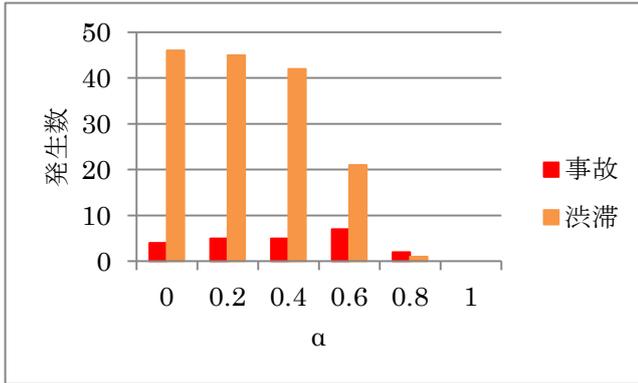


図 4.5 $g' = 0.098$ の場合の事故・渋滞発生数

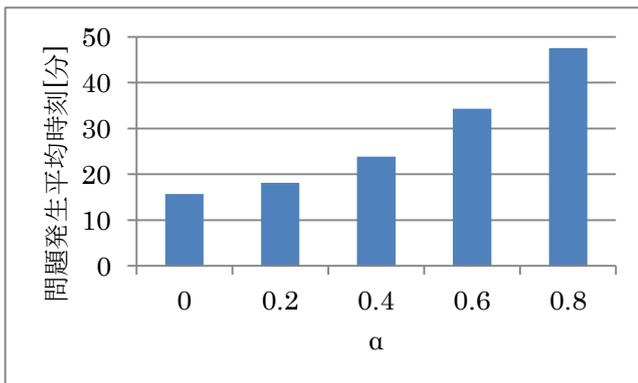


図 4.6 $g' = 0.098$ の場合の問題発生平均時刻

制御係数 α を0 (CASE1 の自動加速制御なしの場合) から0.4まで大きくすると、わずかではあるが渋滞発生数が減っていることがわかる。また、 α を0.6まで大きくすると、渋滞発生数が自動制御なしの場合に比べて半分以下まで減っていることがわかる。しかし一方で事故発生数が少し増えている。この理由として、事故の発生がシミュレーション内で悪い条件が重なった場合に起こるイレギュラーな結果であるため、渋滞ほど自動制御による効果が生まれにくいこと、事故が発生する以前に発生していた渋滞の発生を回避することにより、結果として事故の発生の機会が増えてしまったことなどが考えられる。 $\alpha = 0.8$ の場合には事故も渋滞もほとんど発生せず、 $\alpha = 1$ では事故、渋滞共に全く発生していない。これは、勾配影響を受けている間、勾配影響と同じ大きさの加速度を自動的に制御するため、事故や渋滞が発生するきっかけが生まれにくいためである。

問題発生時刻も α を大きくしていくに従い大きい値をと

っており、自動加速制御の効果があることがわかる。

4.3.2 勾配影響 $g' = 0.196$ の場合

次に、勾配影響の大きさが4.3.1項の倍となる $g' = 0.196$ の場合の事故発生数、渋滞発生数のグラフを図 4.7 に、問題発生平均時刻のグラフを図 4.8 に示す。

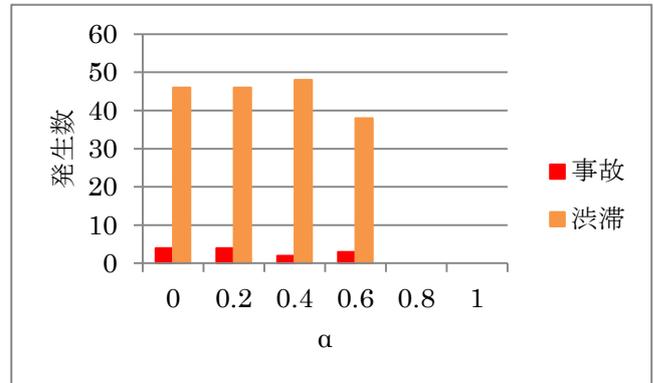


図 4.7 $g' = 0.196$ の場合の事故・渋滞発生数

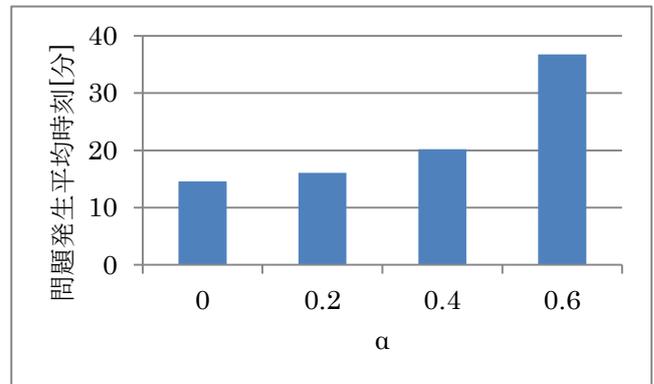


図 4.8 $g' = 0.196$ の場合の問題発生平均時刻

上の結果と比べると、 α を0から0.4に大きくしても、全く事故、渋滞発生数が減っていない。これは、元の勾配影響が大きいことから、 α の値が小さいと4.3.1の結果の自動加速制御なしの場合とほとんど同じ勾配影響を受けるためであると考えられる。 α を0.6にしても渋滞発生数の減少は少ないが、0.8の場合では事故、渋滞発生数が共に0になっている。これは勾配影響が緩和され、かつ勾配が大きいことより認知確率 p が車両速度の減少なしで4.3.1の場合より高い値をとるためである。

問題発生時刻は α が0.4の場合と0.6の場合とで結果の値に倍ほどの差がある。よって、この勾配影響 $g' = 0.196$ の場合でも $\alpha = 0.6$ で効果が出ると言える。

4.3.3 勾配影響 $g' = 0.049$ の場合

最後に、勾配影響の大きさが $g' = 0.049$ となる場合の事故発生数、渋滞発生数のグラフを図 4.9 に、問題発生平均時刻のグラフを図 4.10 に示す。

図 4.9 からわかるように、勾配が小さいこの場合では、事故発生数が他の結果より非常に多いことがわかる。これは、勾配が小さいこと、速度の減少がよりゆるやかに進むことにより、勾配にさらに気づきにくくなるが、速度は確実に低下し車間距離が詰まるためである。このような事故、

渋滞のきっかけが勾配影響を受ける道路上のあらゆる地点で発生するため、渋滞だけでなく、事故の発生数が増加すると考えられる。また、この場合でも $\alpha = 0.6$ で渋滞回避の効果があり、0.8で事故、渋滞発生数共に0となっている。

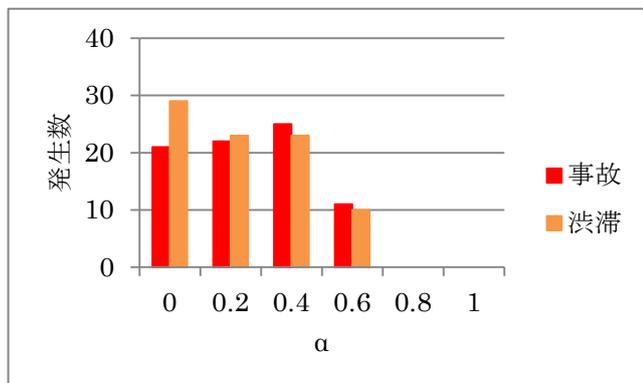


図 4.9 $g' = 0.049$ の場合の事故・渋滞発生数

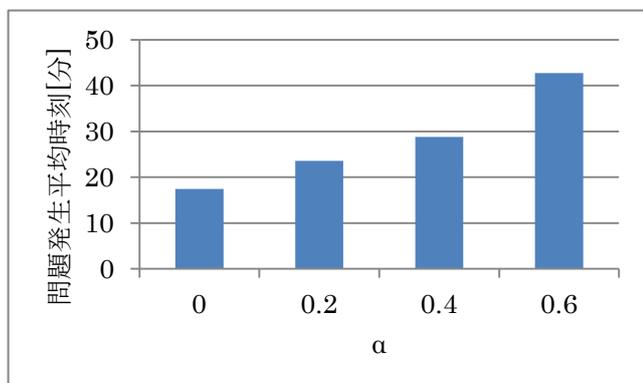


図 4.10 $g' = 0.049$ の場合の問題発生平均時刻

以上の結果より、どの大きさの勾配でも、CASE2 の場合では事故、渋滞発生数を共に0にすることができるとわかる。また、CASE3 の場合には制御係数 α の値を大きくするほど事故、渋滞発生数を減少させ、それらが発生するまでの時間も長くでき、特に $\alpha = 0.6$ から大きな効果があり、 $\alpha = 0.8$ でCASE2の場合とほとんど変わらない十分な効果が得られることがわかる。

よって、勾配影響を受ける場合の渋滞回避について、路車間通信を用いて高速道路の勾配情報を車両に伝送することの有効性を示すことができる。

5. まとめ

本稿では、路車間通信を用いた勾配影響を受ける場合の渋滞回避システムについて、マルチエージェントシミュレータである Artisoc を用いてシミュレーションを行い、渋滞回避システムの有効性について、自動加速制御なしの場合、勾配影響と同じ大きさの自動加速制御を行う場合、勾配影響の大きさの一定の割合の自動加速制御を行う場合の3ケースを比較した。自動加速制御なしの場合で発生していた事故および渋滞は、勾配影響と同じ大きさの自動加速制御を行う場合に発生しなくなることが確認できた。また、勾

配影響の大きさに対し、その0.6の割合で自動加速制御を行う場合に渋滞回避の効果があり、0.8の割合で十分な効果があることが確認できた。このことより、高速道路において勾配影響を受ける場合の渋滞回避に、路車間通信を用いて勾配情報を伝送することの有効性を示すことが出来た。

今後の課題として、最適速度モデル以外の様々なドライバモデルでのシミュレーション、路車間通信が範囲・失敗率を持つ場合、摩擦係数が小さい（急ブレーキが効きにくい）道路の場合でのシミュレーションを行う必要がある。

また他に、今回は車々間通信を用いなかったが、車々間通信をも用いたより高度な渋滞回避システムの検討などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、平成25年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)(24500087, 24500088)の支援を受けて行った

参考文献

- [1] 国土交通省道路局, 『渋滞の現状と施策体系』, <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/tdm/Top03->
- [2] 国土交通省, 『ETC 普及による渋滞の低減』, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-perform/h18/09.pdf>.
- [3] NEXCO 東日本, 『道路管理運営事業』, <http://www.e-nexco.co.jp/activity/safety/detail/07.html>.
- [4] NEXCO 西日本, 『渋滞原因解説』, <http://www.w-nexco.co.jp/traffic/info/trafficjam/comment/index2.html>.
- [5] NEXCO 中日本, 『サグおよび上り坂部』, <http://www.c-nexco.co.jp/traffic/jam/cause/cause01.html>.
- [6] 西成活裕, 『渋滞学』, 新潮選書, 2007.
- [7] NEXCO 東日本, 『自発光式ペースメーカーの施行設置・検証』, http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/press_release/tohoku/h24/0806/pdf/s/01.pdf.
- [8] Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D.: Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E*, Vol.62, No.2, pp.1805(2000).
- [9] Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A., Sugiyama, Y., et al.: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, *Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics*, Vol.51, No.2, pp.1035(1995).
- [10] Artisoc2.6 Mas コミュニティ, <http://mas.kke.co.jp/modules/tinyd0/index/php?id=8>.
- [11] 警察庁交通局, 『わかる身につく交通教本』, 財団法人全日本交通安全協会, 2012.
- [12] 大口敬, 小沼良一, 『勾配影響を考慮した追従挙動モデルの比較分析』, 土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.34, pp.171(2006-12).