

修士学位論文

論文題目 (邦文) ACCとCACCが渋滞改善に与える効果についての研究

(英文) Researches on the Effects of ACC/CACC that Improves
Traffic Jam

提出者 名城大学大学院理工学研究科

情報工学 専攻 修士 課程

学籍番号 153430004

氏名 今枝 勇太

指導教員 氏名 渡邊 晃

提出年月日 平成 29年 1月 30日

名城大学大学院理工学研究科

提 出 者 氏 名 等			
ふ り か な	いまえだ ゆうた		
氏 名	今枝 勇太		
生 年 月 日	1993 年 4 月 1 日 生	性 別	<input checked="" type="radio"/> 男・女
修了予定年月	平成 29 年 3 月 修了予定		

概要

高速道路上のサグ部やトンネル入り口で発生する渋滞は、自動車交通の効率化において大きな課題である。これらの渋滞の原因は、無意識な減速が後続車両に増幅して伝播するためである。その対策として車間距離、相対速度から自車の加速度を自動制御する車間距離制御装置(Adaptive Cruise Control: ACC)や前方車両の加速度情報を通信装置で伝達し、相対加速度を組み込んだ通信利用協調型車間距離制御装置(Cooperative Adaptive Cruise Control: CACC)が注目されている。本稿では CACC/ACC の両技術を普及率、測定誤差、最低車間距離の観点から、減速を模擬したシミュレーションを行うことにより、それらの渋滞改善効果について検証・比較する。

目次

1	はじめに	1
2	既存研究	2
2.1	ACC を活用した高速道路サグ部の交通流円滑化.....	2
2.2	通信利用レーダークルーズコントロールによる渋滞制御に向けた取り組み ...	3
3	CACC と ACC の渋滞改善効果の検証実験	5
3.1	研究の目的	5
3.2	追従モデル式	5
3.3	シミュレーション環境.....	6
4	シミュレーションの結果と考察.....	7
4.1	ドライバが操作する車両の速度変化.....	7
4.2	ACC の普及率別の各車両の速度変化	7
4.3	CACC の普及率別の各車両の速度変化	9
4.4	測定誤差を考慮したシミュレーション	11
4.5	最低車間距離を検証するシミュレーション	12
	謝辞.....	19
	参考文献.....	20
	研究業績.....	21

1 はじめに

ITS(Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム)の分野では自動車交通の効率化を主な目的として、1990年代から精力的にさまざまな研究開発が行われてきた。中でも高速道路の渋滞は自動車交通の効率化を図る上で避けては通れない課題である。料金所部での渋滞を改善するための取り組みとして、ETC(Electronic Toll Collection System: 電子料金収受システム)の普及による料金所部での渋滞の改善が図られた。その結果、2002年では渋滞の原因の約17%を占めていた料金所部での渋滞は2011年には0.2%まで激減した。しかし、「サグ部」や「トンネルの入り口」で発生する渋滞は、高速道路の渋滞の原因として約80%のウェイトを占めており、自動車交通の効率化における大きな壁である。

サグ部とは下り坂から上り坂に変わる道路上の地形の一つである。ドライバが上り坂を認知できず発生する無意識な減速が原因で後続車両に速度の低下が伝わり発生する渋滞をサグ渋滞と言う。トンネル入り口で発生する渋滞は、ドライバの視界に対する光度変化や圧迫感などの視環境の変化が起因している。この無意識な減速が原因で発生する渋滞の対策として車間距離、相対速度から自車の加速度を自動制御する車間距離制御装置(Adaptive Cruise Control: ACC)や、近年開発が進められている前方車両の加速度情報を通信装置で伝達し、相対加速度を制御に組み込んだ通信利用協調型車間距離制御装置(Cooperative Adaptive Cruise Control: CACC)が注目されている。本来、これらの技術は車間距離を維持するために開発されたものであるが、前方車両との車間距離を維持するだけでなく、前方車両の減速による速度の低下の伝播を抑制し、渋滞を改善する可能性がある。

本研究の目的は、CACC/ACCがどの程度普及していれば渋滞の抑制に効果があるのか、より渋滞改善効果が優れているのはどちらなのかを検証することである。そのため、車群内の全ての車両の速度変化をグラフ化し、先頭車両の減速による遅れの伝播がグラフのアンダーシュートとなって表われるので、その大きさによりCACCとACCの渋滞改善効果を比較する。また、CACC/ACCともに車間距離をどこまで短縮して走行できるかをシミュレーションで調査し、その最短車間距離を用いて道路容量を比較する。

CACC/ACCに関する既存研究である文献[1]では、現状のACCの特性を実測に基づきモデル式を決定、運用した結果が提言されている。その結果、すべてACC車の場合、渋滞削減率が最大50%程度であることが示されている。(渋滞削減率は40kmを下回る車の数を比較している)。このシミュレーション実験は、車両台数、車間時間は実交通流に近いものであったが、現在盛んに研究が行われているCACCとの比較がされていなかった。また文献[2]では、駆動方式、車種、パワー等が異なる4台でCACCによる隊列走行を行い、CACC

の渋滞改善効果を確認している。しかし、CACCの普及率は考慮されておらず、また4台のみによる車群の構成であるため、実交通流の環境とは乖離している。

本研究では車群を10台で形成し、徐々に普及するであろうCACC/ACC搭載車が非搭載車と混在する環境を想定する。そして、車群内のCACC/ACC搭載車両の比率を変化させながら、先頭車両がある速度から減速し別の速度へ変化するシミュレーションを行い、CACC/ACCの普及率による渋滞改善効果を比較した。またCACCとACCの違いを比較するため、渋滞改善効果を保ちつつ、どこまで車間距離を短縮して走行できるかの検証も行った。

2 既存研究

2.1 ACCを活用した高速道路サグ部の交通流円滑化

文献[1]では基礎実験として市販ACCの挙動把握とシミュレーションモデル構築のためのデータ収集を目的に実機による車群走行実験を行っている。実験に使用された車両台数は8台で、いずれもACCを搭載している。また、シミュレーションに使用するACCのアルゴリズムは、(1)式に示す目標車間時間から決まる車間距離の誤差、および相対速度から加速度を決定する一般的なモデルを用いている。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{i+1}(t+T) = & k_1\{x_i(t) - x_{i+1}(t) - L - T_m(\dot{x}_{i+1}) \cdot \dot{x}_{i+1}(t)\} \\ & + k_2\{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)\} - k_3g \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 x_i は前方車両の位置、 x_{i+1} は自車両の位置、 \dot{x}_i は前方車両の速度、 \dot{x}_{i+1} は自車両の速度、 L は車長、 $T_m(\dot{x}_{i+1})$ は自車両の速度から決まる目標車間時間、 T は遅れ時間、 g は重力加速度、 θ は勾配を示す。第1項は車間距離誤差、第2項は相対速度、第3項は勾配をそれぞれ示している。また k_1 は車間距離フィードバックゲイン、 k_2 は相対速度フィードバックゲイン、 k_3 は勾配への影響度合いを表す。

また、ACCを車両のフィードバックゲインの特徴が、相対速度ゲインの大きなもの(グループA)、人の特性に近いもの(グループB)、車間距離ゲインの大きなもの(グループC)の3つのグループに分類している。グループBの人の特性とは、車間距離が小さくなったときに急ブレーキをかけて衝突を回避する機能を持つことである。しかし、(1)式にはこのような衝突回避機能を含んでいないので、これ以上近づいたら危険と判断される前方車両との距離閾値を設け、この距離閾値よりも車間距離が小さくなった場合は最大加速度で減速を行う改良を加えている。

シミュレーションの評価は、最後尾車両の速度がどこまで低下したかによって行っている。最後尾車両の速度の低下が抑えられれば、後続車両への影響も少なくなり、

渋滞になる可能性が少なくなると考えられる。

人の追従シミュレーションに ACC を混入させた場合の交通流への影響を評価したグラフを図 1 に示す。横軸は ACC の普及率を示し、縦軸は最後尾車両の速度を示す。同じ普及率でも ACC の位置を変えてシミュレーションをし、グラフのプロットが平均値、エラーバーは標準偏差を表している。人と ACC の増幅率を比較すると ACC の方が増幅率が小さいため、どのグループの ACC も速度の改善が見られた。しかし、増幅率の違いによって改善効果に大きな差があり、グループ A の車両の効果が大きいことが分かる。この結果から、相対速度ゲインの大きな ACC のモデル式が特に交通流改善効果があることが分かった。また、ACC のゲインの組み合わせに関係なく、普及することで差はあるが交通流の改善に効果があることも分かった。本文献では CACC の普及率による渋滞改善効果の比較がなされていない。

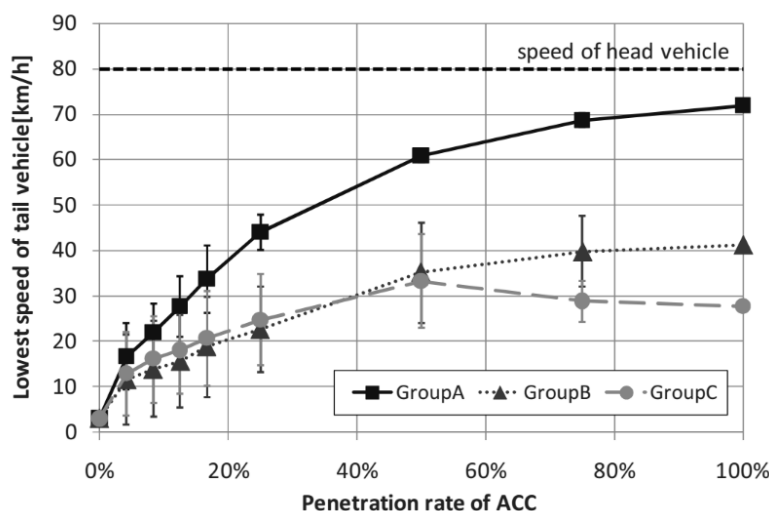


図 1 普及率別の最後尾車両の最低速度の関係[1]

2.2 通信利用レーダークルーズコントロールによる渋滞制御に向けた取り組み

文献[2]では、CACC の搭載による渋滞改善効果の検証を主な目的として実機によるデータの測定が行われている。走行実験に使用する車両はプリウス・レクサス GS(トヨタ), XV(富士重工業), アテンザ(マツダ)と駆動方式、車種、パワー等が異なる 4 台である。CACC により求められる自車の目標加速度 $a_{ref,d}$ は、(2)式により与えられる。

$$a_{ref,d} = k_v \cdot (v_p - v) + k_d \cdot (r - r_{ref}) + k_a \cdot a_p \quad (2)$$

ここでは v_p は先行車両速度、 v は自車両速度、 r_{ref} は目標車間、 r は測定車間、 a_p は先行車両加速度、 k_v は相対速度ゲイン、 k_d は車間距離ゲイン、 k_a は先行車両加速度ゲインをそれぞれ示す。目標加速度の算出は、ACC の自律センサによる車間距離、相対速

度に応じた目標値(フィードバック項)と、先行車両から通信で得られた先行車両加速度の反映分(フィードフォワード項)の加算により行う。各社との CACC 追従を実現せるにあたり、通信フォーマット、通信データの標準化を実施し、通信の基本的なフォーマットは平成 3 年より開始された国交省、学識経験者、自動車メカ等による「先進安全自動車(ASV)推進検討会」にて検討の通信規格を準用した。

CACC の高い応答性はモデル式(2)に示される通りフィードバック項よりも早くフィードフォワード項である先行車両加速度が立ち上がることで実現される。つまり、先行車両加速度は極力速やかに得られることが望まれる。各社間で、フィードフォワード項となる加速度の遅延やノイズ等に関する性能規定を共通化し、このデータを利用した制御および官能の調整については各社によるフィードバック項(ACC 制御)の調整での対応とした。

図 2 は 4 台の車両を「マニュアル走行」、「ACC 制御」、「CACC 制御」で隊列走行させ、その場合の加速度、速度、距離の変化をグラフ化したものである。上段中段のグラフのとおり、マニュアル走行では減速開始が遅延、車間維持のため後続車両ほど強い減速を行うことで車両速度の低下が惹起されるのに対し CACC 制御では先行車両の加速度情報により遅延が制御され車両速度の低下を発生させないことが分かる。このことから、CACC は車両の速度低下を加速度情報を利用することで防ぎ、渋滞の発生を抑制できる可能性があることが分かる。しかし、検証に使われた台数が 4 台と少なく、また普及率による渋滞改善効果については言及されていないことが課題として挙げられる。

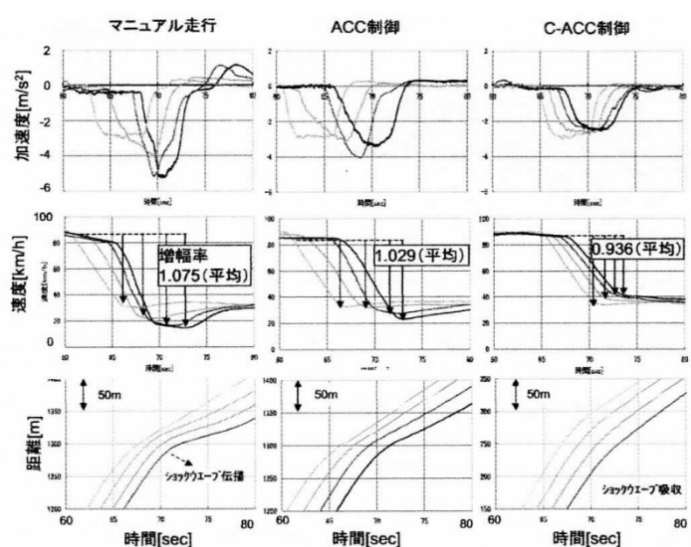


図 2 減速による各要素(加速度, 速度, 距離)の応答[2]

3 CACC と ACC の渋滞改善効果の検証実験

3.1 研究の目的

CACC/ACC がどの程度普及していれば渋滞の抑制に効果があるのか、より優れているのはどちらなのかを検証する。そこで、車群内の全ての車両の速度変化をグラフ化し、先頭車両の減速による遅れの伝播がグラフのアンダーシュートとなって表われるので、その大きさにより CACC と ACC の渋滞改善効果を比較する。また、CACC/ACC ともに車間距離をどこまで短縮して走行できるかをシミュレーションで調査し、その最短車間距離を用いて道路容量を比較する。

3.2 追従モデル式

CACC が動作する車両と ACC が動作する車両、人間の運転する車両の 3 種類の車両の追従モデルを示す。先行車両 i の位置を $x_i(t)$ とし、追従する車両 $i+1$ の位置を $x_{i+1}(t)$ とするとき、車両の加速度 $\ddot{x}_{i+1}(t)$ を、CACC の場合は(3)式で、ACC は(4)式、人間の場合は(5)式で与える。

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_1 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_2 \frac{\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_3 \left\{ 1 - \frac{T_m(t) \cdot \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} \right\} \quad (3)$$

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_5 \left\{ 1 - \frac{T_m(t) \cdot \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} \right\} \quad (4)$$

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_6 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_7 \left\{ 1 - \frac{T_m(t) \cdot \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} \right\} \quad (5)$$

式(3)-(5)の左辺に含まれる T_A と T_H はそれぞれ、機械の遅れ時間と、ドライバの反応遅れ時間を示す。機械遅れ時間とは機械が前方車両の挙動をセンサで察知してからブレーキをかけ始め、ブレーキが実際に効きはじめるまでの時間のことである。また、ドライバの反応遅れ時間とは人間が前方車両の挙動を認知し、ブレーキをかけることを思考・行動し、実際にブレーキが効きはじめるまでの時間のことを指す。また右辺の各項にかかっている $k_1 \sim k_5$ は制御ゲイン、 k_6, k_7 は人間の反応感度である。(3)式の制御ゲイン k_1 がかかっている項の分子は前方車両との速度差となっており、この値が大きくなるほど後続車両の遅れ時間後の加速度は大きくなる。この項の特性は式(4)、(5)の制御ゲイン k_4 と反応感度 k_6 がかかっている項も同様である。式(3)の第 2 項目は、通信により前方車両から加速度情報を取得できる CACC のみに与えられている項である。こ

の項の分子は前方車両との加速度差となっており、値が大きくなるほど後続車両の遅れ時間後の加速度は大きくなる。式(3)の第3項目と式(4)、(5)の第2項目は目標車間距離と測定車間距離との差を用いてフィードバック制御を行う項で、 $T_m(t)$ は自車両の目標車間時間を示す。車間時間とは、前方車両の位置に自車両が何秒後に到達するかを示すものである。既存技術のモデル式(1)、(2)との違いは、全ての項に前方車両との距離の差(車間距離)の逆数をかけている点である。車間距離が小さくなるほど後続車両の遅れ時間後の加速度は大きくなり、またその逆も言える。これは車間距離に応じて実質的に k を可変にしていることと同義であり、人間の特性を加えた式となっている。以下にシミュレーションを行う際のパラメータや環境の設定を述べる。

3.3 シミュレーション環境

本研究で想定するシミュレーション環境は以下の通りである。

- 追い越しのできない直線の高速道路を10台の車群で走行するものとし、先頭車両が適切なブレーキをかけることで無意識の減速を模擬する。
- 各車両は点とみなし、すべての車両が同一の速度90.0[km/h]で走っている状態から先頭車両が75.0[km/h]以下になるまで減速する。
- 加速度は勾配、空気抵抗、タイヤの転がり抵抗、エンジン性能を加味し、 $-1.0[\text{m/s}^2]$ とする。機械の遅れ時間 T_A を0.1[秒]、人間の反応遅れ T_H を1.0[秒]とする[6]。

事前シミュレーションにより制御ゲイン/反応感度 k を決定しておく。シミュレーションの条件として、以下のパラメータを設定する。

- 多くのドライバーは車間時間1.2秒で走行していることが知られている[5]。よって、90.0[km/h]で走行する車両の車間距離は30.0[m]となる。そこで車間距離の初期値はCACC/ACC/人間を問わず30.0[m]とする。
- k の値を変化させ、前方車両と衝突する場合や、人間の乗り心地を考慮し加速度の値が $-0.3[\text{G}] \sim 0.3[\text{G}]$ の間で推移できないような大きな状況になった場合はシミュレーションを中止し、その時の k 値は不適切と判断する。
- 先頭車両が減速後、後続車両が前項の状況に陥らず、先頭車両の減速後の速度と同じにできたらシミュレーションの実行に成功したものとし、この時の k 値は適切であったと判断する。

制御ゲイン/反応感度 $k_1 \sim k_7$ は、シミュレーションに成功した場合の各 k の値の平均値を採用した。この結果、各制御ゲイン/反応感度の値は $k_1=14.0$ 、 $k_2=2.0$ 、 $k_3=7.0$ 、 $k_4=15.0$ 、 $k_5=10.0$ 、 $k_6=13.0$ 、 $k_7=1.0$ となった。

最後に普及率の算出方法を説明する。CACC/ACC車両の普及率は車群内の車両10台のうち何台がCACC/ACCを搭載しているかで計算する。CACC/ACC車両を普及率別でランダムに車群に挿入することで車群を形成し、このシミュレーションを1000回

行う。その際に算出された各車両の速度の平均を求め、普及率別でアンダーシュートの大きさを比較する。ここで CACC 車両は前方車両が CACC 車両の場合のみ通信ができるという条件があるため、仮に前方車両が CACC 車両ではなかった場合は ACC の動作をするものとした。

4 シミュレーションの結果と考察

4.1 ドライバが操作する車両の速度変化

図 3 は、ドライバが操作する車両のみの車群の各車両の速度変化のグラフである、横軸はシミュレーション内の時間を示し、縦軸は速度を示す。また車群内の 10 台分の速度変化を 10 色で示している。車群にドライバが操作する車両しか存在しない場合、最後尾車両の速度が約 30[km/h]まで低下していることが分かる、この減速の影響がさらに後方の車両に伝搬することにより、渋滞が発生する。

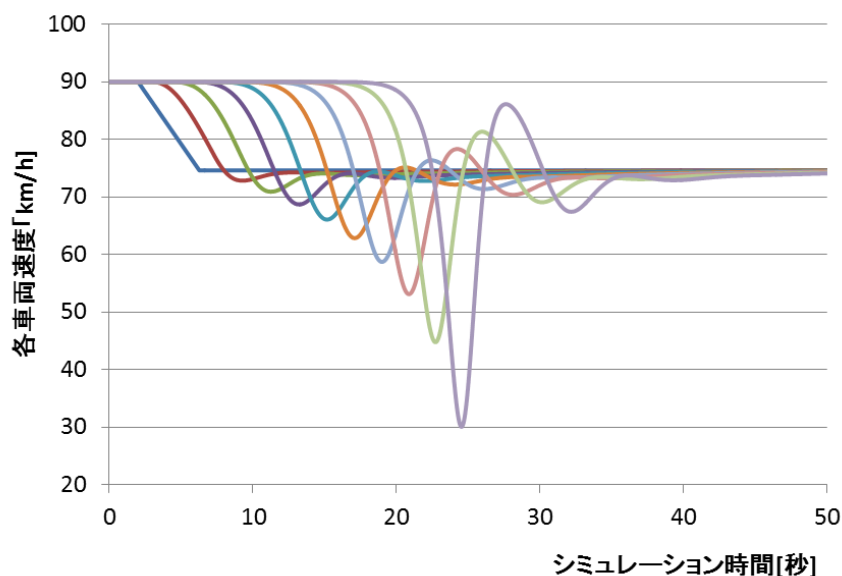


図 3 ドライバが操作する車両のみの車群の各車両の速度変化

4.2 ACC の普及率別の各車両の速度変化

図 4~7 は ACC の普及率別の各車両速度のグラフである。普及率が増加するにつれて車群の最後尾車両の最低速度が大きくなっていることが分かる。普及率が 100%になるとアンダーシュートが完全になくなり遅れの伝搬をしない。

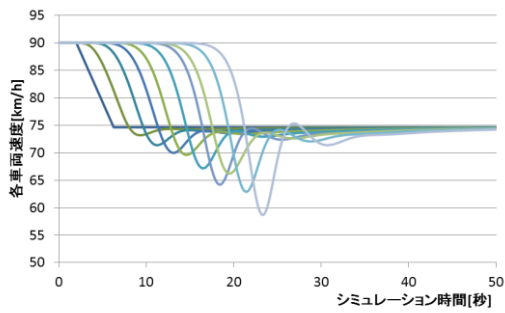


図 4 ACC の普及率が 20%時の各車両速度

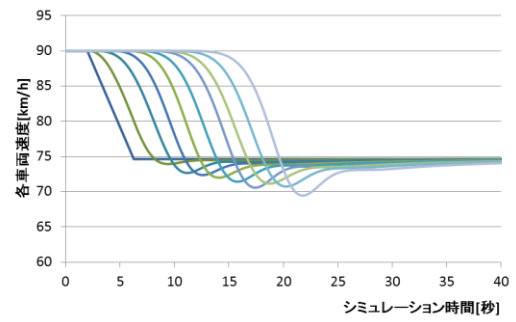


図 5 ACC の普及率が 50%時の各車両速度

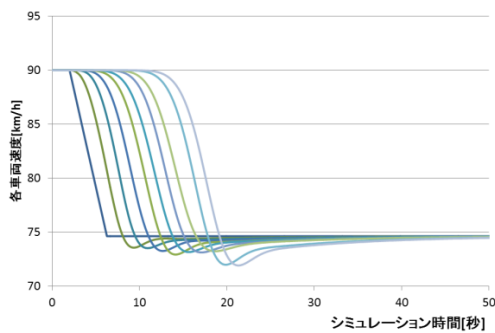


図 6 ACC の普及率が 70%時の各車両速度

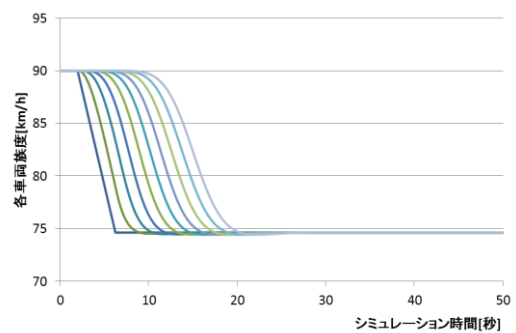


図 7 ACC の普及率が 100%時の各車両速度

図 8 は ACC の普及率別の車群内最後尾車両の最低速度のグラフである。横軸が ACC の普及率を示し、縦軸は最後尾車両の最低速度を示す。グラフから普及率が 10%~30% の場合の改善率（グラフの傾き）が大きく、普及率が 10% の場合では最後尾車両の最低速度は 51.2[km/h] となり、図 3 の最後尾車両の最低速度である 30[km/h] と比較すると約 47% 改善されていることが分かる。さらに普及率が 20% では最後尾車両の最低速度は約 59[km/h] となり図 3 の最後尾車両の最低速度である 30[km/h] と比較すると約 65% も改善される。このことから、20% 程度 ACC が普及するだけでも渋滞改善の効果があることが分かる。

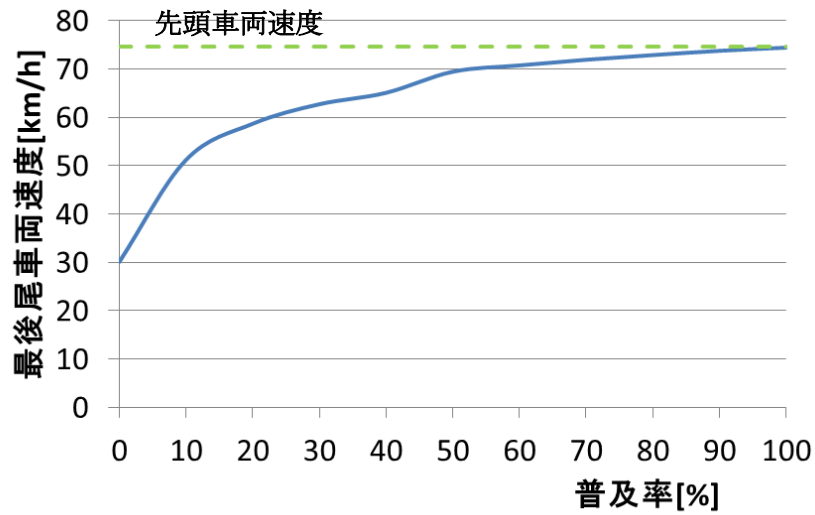


図 8 普及率別の最後尾車両の最低速度

4.3 CACC の普及率別の各車両の速度変化

図 9~12 は CACC 搭載車両の普及率別の各車両の速度変化のグラフである。横軸はシミュレーション時間を示し、縦軸は各車両速度を示す。CACC も ACC と同様に、普及率が増加するにつれて最後尾車両の速度が増加している。また、普及率が 100% になるとアンダーシュートがほとんどなくなり、遅れが伝播しない点も同様である。

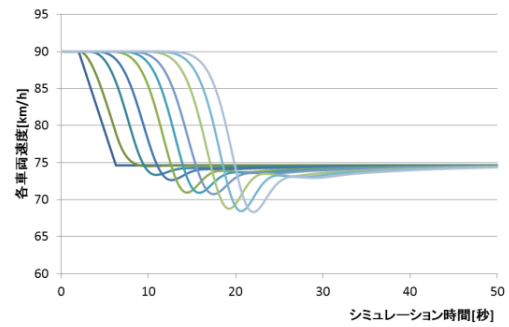
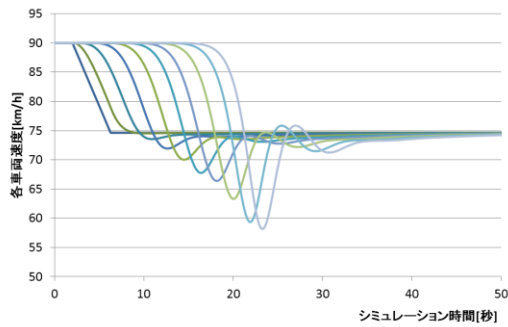


図 9 CACC の普及率が 20% 時の各車両速度 図 10 CACC の普及率が 50% 時の各車両速度

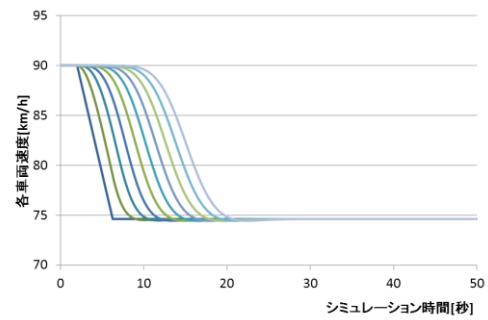
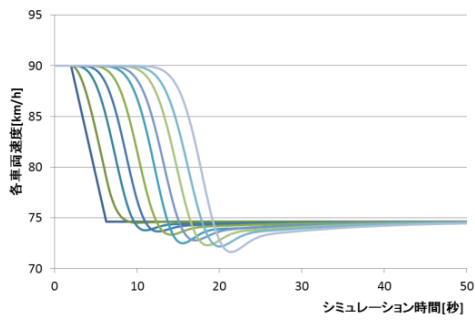


図 11 CACC の普及率が 70%時の各車両速度 図 12CACC の普及率が 100%時の各車両速度

図 13は CACC と ACC の普及率別の最後尾車両の最低速度を比較したグラフである。横軸は普及率を示し、縦軸は最後尾車両の最低速度を示す。グラフから、CACC と ACC の改善率には、ほとんど差がないことが分かる。また、図 1 と比較した際、普及率 100% の場合の最後尾車両の最低速度が増加し、アンダーシュートが完全になくなっているのは、今回のシミュレーションの k の設定が実測値ではなく理論値であることが大きく関わっているためだと考えられる。

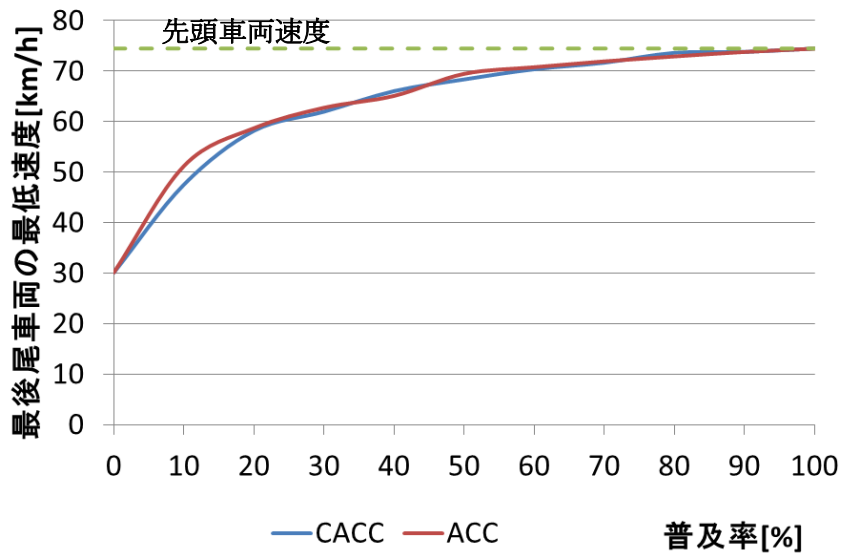


図 13 CACC と ACC の普及率別の最後尾車両の最低速度の比較

4.4 測定誤差を考慮したシミュレーション

前節で設定したシミュレーション条件では CACC と ACC の渋滞改善効果に明確な差が出ないことが分かった。よって、より現実に近づけたシミュレーション条件で渋滞改善効果に差が出るのかを調査した。CACC は通信により前方車両の加速度を誤差なく得られるが、ACC は測定による誤差を含むことで追従性能が劣化する可能性がある。そこで、ミリ波レーダーで車間距離を測定する際の測定誤差をモデル式(3)~(5)の車間距離に組み込んだシミュレーションを行い、CACC と ACC の速度変化を検証した。誤差を含むにあたって、測定値の移動平均を取る機能も追加しシミュレーションを行った。移動平均に使用するサンプル数は 5 つとする。5 つ以上のサンプル数で平均すると、距離の変化が小さくなりすぎるため、前方車両の減速を認識するのが遅くなりシミュレーションに成功しなくなるためである。測定誤差は文献[1]において速度が約 ± 0.6 [km/h] の範囲で推移するところから、移動平均を考慮に入れて車間距離に換算すると、車間距離の約 1.8% の誤差が出ていると考えられる。よって、車間距離の 1.8% で推移するようにランダムな正負の値をモデル式(3)~(5)の車間距離に組み込んだ。他のシミュレーション条件は前節の条件から一切変更せず、CACC と ACC の普及率が 100% の場合について各車両速度を比較する。

図 14 と図 15 は CACC/ACC の普及率が 100% の場合の測定誤差を含めた各車両速度を示したグラフである。CACC のモデル式では、速度の誤差の上限が 75.25[km/h]、下限が 74.15[km/h] であり、範囲が 1.1[km/h] であった。それに対し、ACC のモデル式では、速度の誤差の上限が 75.25[km/h]、下限が 73.95[km/h] であり、範囲が 1.3[km/h] であった。この結果から CACC は ACC よりも車両速度の誤差の範囲が狭く、より精度の良い制御ができていることが分かる。しかし、CACC/ACC とともに測定誤差により速度が変動するが、渋滞改善効果や追従の性能に悪影響を与えることはなく、誤差を加えたシミュレーションであっても CACC と ACC に明確な差はなかった。

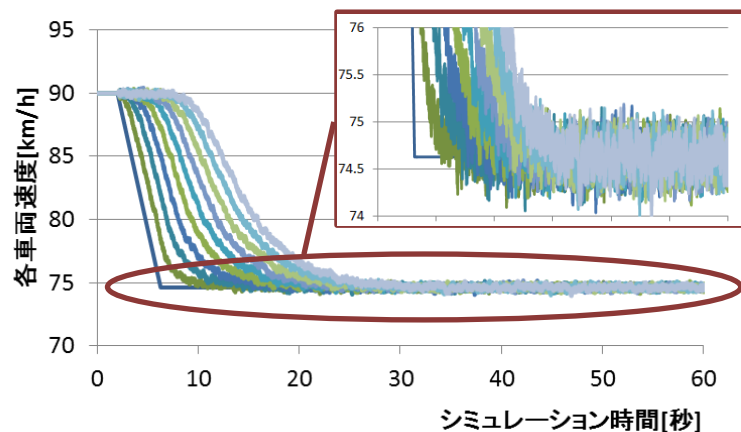


図 14 ACC の測定誤差を含めた各車両速度変化

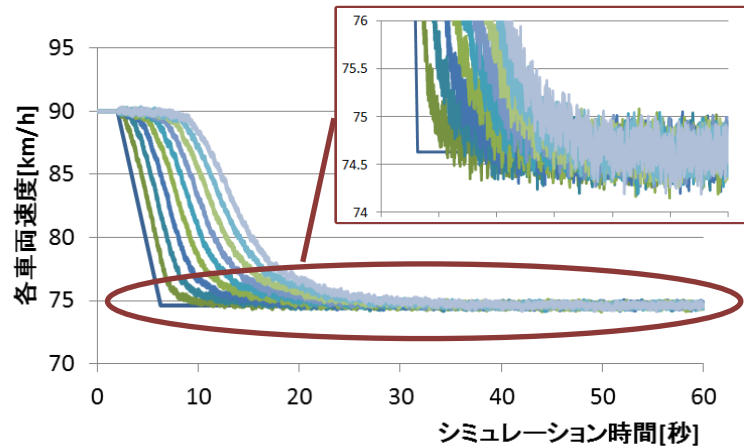


図 15 CACC の測定誤差を含めた各車両速度変化

4.5 最低車間距離を検証するシミュレーション

車間距離を人間の感覚や現在製品として出回っている ACC を基準にすると、車間時間 1.2 秒が最も標準的である。しかし、CACC は前方車両の加速度情報を用いた精密な制御により、さらに短い車間時間での走行を可能にしている。よって CACC は車間距離を短くして走行できることから、ACC よりも道路容量の増加効果が見込め、より渋滞改善効果が高いと考えられる。そこで、CACC と ACC の最短車間距離を「事故回避シミュレーション」として比較した。シミュレーションの条件を以下のように定める。

- すべての車両が同一の速度 90.0[km/h] で走っている状態から先頭車両が 60.0[km/h] 以下になるまで減速する。加速度は、前方車両がある原因で急ブレーキをかけたと仮定し $-3.5[m/s^2]$ とする。
- 目標車間時間を徐々に小さくしていき、前方車両と衝突する場合や、加速度の値が $-0.5[G] \sim 0.5[G]$ の間で推移できないような大きな値を取った場合はシミュレーションの実行に失敗としたものとする。
- 車間距離の測定誤差は ACC と CACC の性能の差にほとんど関係ないためこのシミュレーションでは考慮しない
- 上記以外のシミュレーション条件は、普及率を考慮したシミュレーションから変更しない

図 16~19 は CACC/ACC 搭載車両のそれぞれの普及率が 100% の場合の各車両速度と車間距離のグラフである。減速前の車間距離を、CACC のみで構成された車群と ACC のみで構成された車群で比較すると、約 0.59 倍車間距離を短縮して走行できることが分かった。100[m] あたりに走行できる車両台数に換算すると、ACC は約 8.0 台である

のに対し、CACCは約13.3台が走行できる。しかし、図16と図18のグラフから、急ブレーキの遅れが伝播してアンダーシュートが発生しており、渋滞が発生する可能性がある。

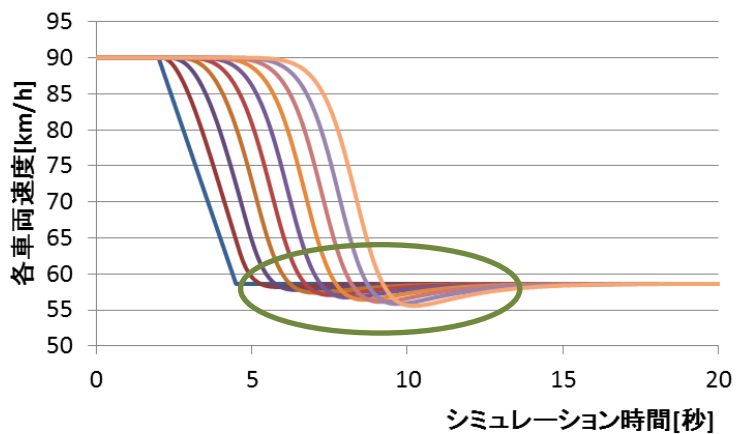


図16 車間時間0.5秒の場合のACC搭載車両の速度変化

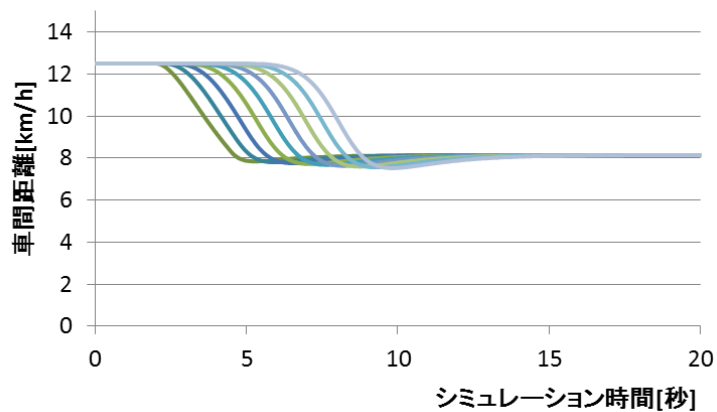


図17 車間時間0.5秒の場合のACC搭載車両の車間距離変化

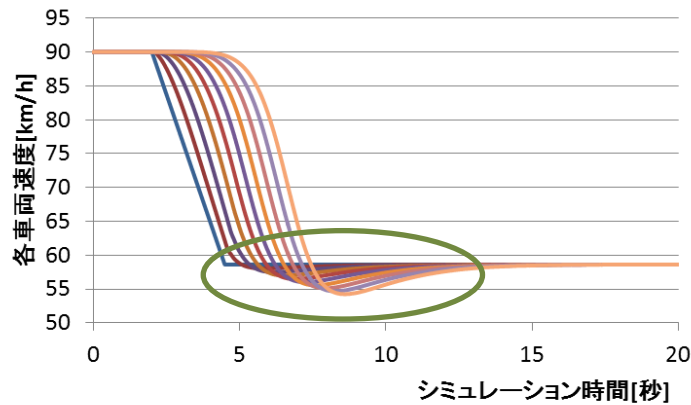


図 18 車間時間 0.29 秒の場合の CACC 搭載車両の速度変化

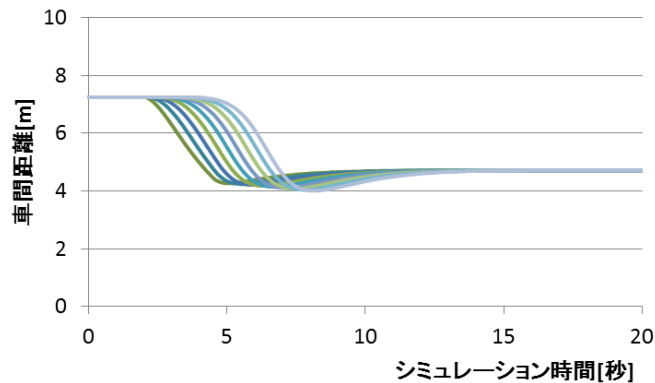


図 19 車間時間 0.29 秒の場合の CACC 車両の車間距離変化

ここで、CACC/ACC の制御ゲイン $k_1 \sim k_5$ を見直し、車間距離に適した値を再度決定する。事故回避シミュレーションと同じパラメータ設定で制御ゲイン $k_1 \sim k_5$ の範囲を求め、その平均値を調べる。その結果、 $k_1 = 15.0$, $k_2 = 2.0$, $k_3 = 0.5$, $k_4 = 20.0$, $k_5 = 5.0$ となった。これは車間距離を 30[m] に設定していた時と比べ、 k_3 と k_5 (車間距離ゲイン) が小さくなり、 k_1 と k_4 (相対速度ゲイン) が大きくなることになる。

図 20~23 は制御ゲインを変更した後の CACC/ACC の各車両速度と車間距離の変化のグラフである。図 16 と図 20, 図 18 と図 22 を比較すると、アンダーシュートがほとんどなくなり、遅れの伝搬に関しては改善されている。しかし、図 19 と図 23 を比較すると、車間距離ゲインを小さくしたことにより、速度に応じた車間距離に対する反応が鈍くなる。制御ゲイン変更前は減速し始めてから約 10 秒で車間距離が目標車間距離に達するが、制御ゲイン変更後は減速し始めてから 30 秒以上経過しても車間距離が目標車間距離に達しない。結果として、制御ゲイン k を車間距離によって変える必要があるが、減速の伝搬を防ぎながら CACC は ACC よりも車間距離を短縮して走行

することができる。しかし、CACCは車間距離を短縮して走行できるが、車間距離ゲインを小さくしなければならないため車間距離による加速度の変化が鈍くなり、車間距離が目標車間距離に達するまでに時間がかかることが分かった。また、文献[1]で示されていた「ACCは相対速度ゲインが大きなものほど性能が良い」という結果はCACCでも同じであるといえる。

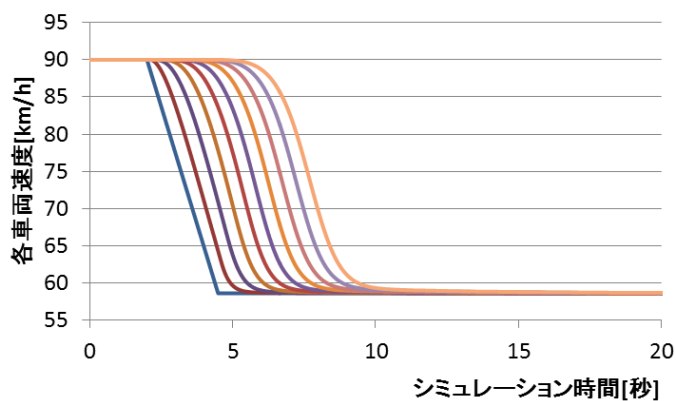


図 20 制御ゲイン変更後の ACC の各車両の速度変化

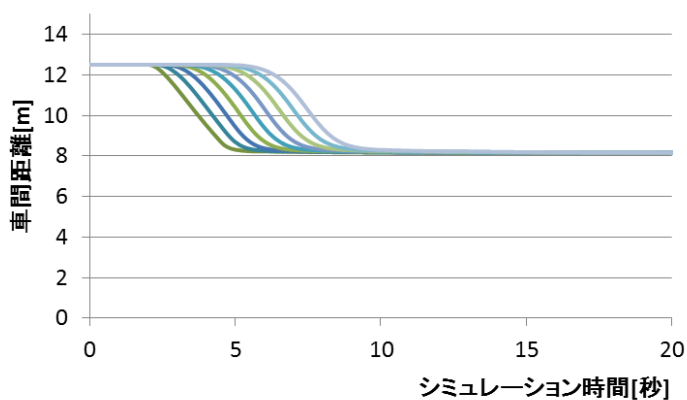


図 21 制御ゲイン変更後の ACC の車間距離変化

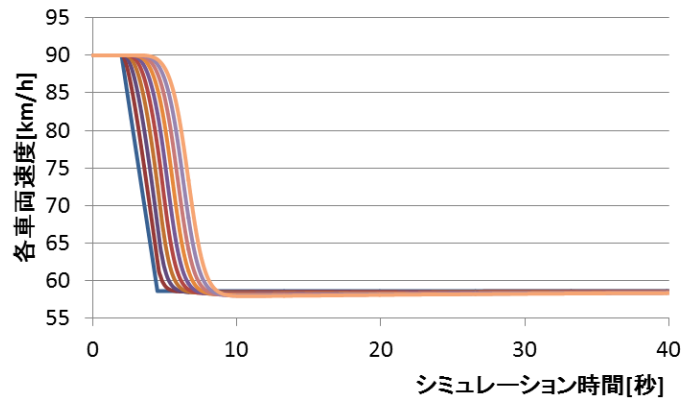


図 22 制御ゲイン変更後の CACC の各車両の速度変化

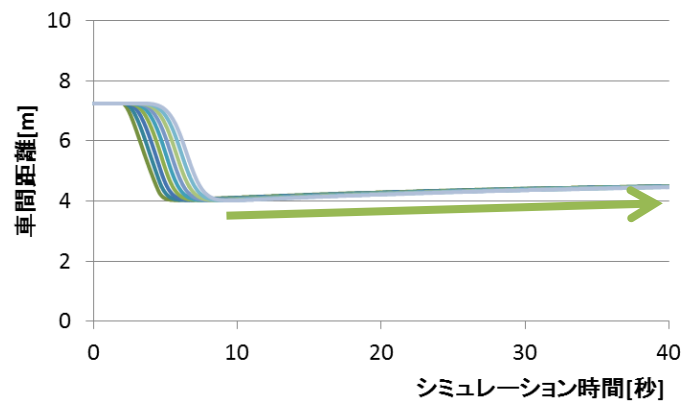


図 23 制御ゲイン変更後の CACC の車間距離変化

まとめと課題

本研究では、CACC と ACC の普及率ごと、測定誤差の有無、車間距離の短縮による渋滞改善効果についての検証をシミュレーションで行った。結果として、車間距離を人間のドライバと同程度にすると CACC と ACC の渋滞改善効果の差は小さいことが分かった。また、センサによる車間距離の測定に誤差を含めたシミュレーションにおいて、測定誤差による速度などの変化を自己のモデル式により補正できるため CACC と ACC の渋滞改善効果に大きな差は出ないことが分かった。しかし、目標の車間時間を小さくしていき、その車間距離に適切な制御ゲインを見つけることで、減速の遅れの伝播を防ぐことができ、CACC は ACC の約 0.63 倍の車間距離で走行できることが分かった。以上より、CACC は ACC と比べ、減速の遅れの伝播抑制効果の差は無いが、車間距離を短縮できることで道路容量の増加効果を生じ、渋滞の改善に貢献できることが分かった。

課題として以下のことが挙げられる。

- より現実に近い環境を想定する
- 車両の追従モデル式の更なる改良
- 渋滞改善の基準を減速の伝播ではなく「交通流」としてとらえる

より現実に近い環境とは、

- CACC のパケットロスや遅延を含めたシミュレーション環境の構築
- CACC の通信周期と CACC/ACC の距離測定周期の見直し
- 車種による個別加速度の設定
- 車線を増加し、割り込み車両などを考慮したシミュレーションの構築

などが挙げられる。

また、車両追従モデル式の改良に関しては、車長の概念の追加や、CACC の通信できる範囲を 1 台前方の車両だけではなく、2 台前方の車両にまで拡大する点が挙げられる。CACC は通信を使用した 2 台前方の車両の加速度情報を取得することで、1 台前方の車両から得られる情報よりも速度の変化を早く取得できるため、素早く自車両を制御できるのでより精密な制御が可能になり、車間距離をさらに短縮して走行が可能になると考えられるからだ。

渋滞改善の基準の見直しに関しては、今回の検証では、車両は最大 10 台までのシミュレーションであるが、実交通流では、さらに多くの車両によって成り立っており、渋滞の回数やその距離なども重要な評価基準になりえる。従って、より大規模なシミュレーションを行い、渋滞を「車両間での遅れの伝播」でとらえるのではなく、「ある区間での交通流」でとらえる必要がある。

謝辞

本論文は著者が名城大学大学院理工学研究科情報工学専攻修士課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。作成にあたり、丁寧かつ熱心なご指導をして頂いた同専攻教授の渡邊先生に深謝いたします。また、ご退職した後も研究に関する様々な知識や助言をして頂いた元同専攻教授津川先生に深謝いたします。副査として同専攻教授の中野先生、並びに、同専攻准教授の川澄先生、同専攻准教授の旭先生には、ご助言や本論文の細部にわたるご指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 日高健, 北岡広宣, 北浜謙一: ACC を活用した高速道路サグ部の交通流円滑化, 自動車技術会文集, 44(2), pp. 765-770 (2013).
- [2] 土井智之, 志田充央, 北浜謙一: 通信利用レーダークルーズコントロールによる受胎抑制に向けた取り組み, 自動車技術会春季学術講演会において発表 (2014).
- [3] 鈴木一史: 高速道路サグ部における渋滞対策サービスの研究開発, SAT テクノロジー・ショーケース, pp. 105-106 (2014).
- [4] 大前学: ACC (車間距離制御装置) と CACC (通信利用協調型車間距離制御装置) のアルゴリズム, 電気学会誌, 135 巻, 7 号, pp. 433-436 (2015).
- [5] 牧下寛: 自動車運転中の突然の危機に対する制御反応の時間, 日本人間工学会誌, 38(6), pp. 324-332 (2002).
- [6] 太田博雄: ASV 開発への交通心理学からの提言, 国際交通安全学会誌, 36(1), pp. 50-56 (2011).
- [7] 鈴木達也, 田崎勇一, 奥田裕之: 自動車システムにおける協調制御技術, 信学技報, 114(388), pp. 19-24 (2015).
- [8] 秋田英範, 京拓磨, 森川翔: 車両のセンタ制御アプリケーションを想定した通信の高信頼化技術の検討, 信学技報, 114(388), pp. 25-30 (2015).
- [9] 大前学, 小木津武樹, 福田亮子, 江文博: 大型トラックの協調型 ACC における車間距離制御アルゴリズムの開発, 自動車技術会論文集, 44 巻, 6 号, pp. 1509-1515 (2013).
- [10] S. Tsugawa: “Results and Issues of an Automated Truck Platoon within the Energy ITS Project”, Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, pp. 642-647 (2014).

研究業績

国際学会（査読あり）

- ① Y. Imaeda, K. Asahi and A. Watanabe: Traffic Jam Alleviation Effect by the Popularization of CCAC-equipped Cars, Proc. of The 9th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2016), 2016(10), pp. 1-2, Oct. 2016.

研究会・大会等（査読なし）

- ① 今枝勇太, 旭健作, 渡邊晃: CACC の普及率が交通流に与える影響, 平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会論文集 (CD-ROM) , 2015, ROMBUN No. D5-1 (2015).
- ② 今枝勇太, 旭健作, 渡邊晃: 渋滞削減のための CACC の有用性に関する研究, 第 13 回情報学ワークショップ 2015 (WiNF2015) 論文集 (CD-ROM) , No. C3-2 (2015).
- ③ 今枝勇太, 渡邊晃: ACC/CACC 技術を利用した渋滞改善効果の提案, 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-MBL-81, No. 6, pp. 1-22 (2016).

受賞歴

- ① 情報処理学会全国大会学生奨励賞 (2016 年 3 月)
今枝勇太, 旭健作, 渡邊晃: シミュレーションによる CACC の渋滞改善効果の調査, 第 78 回情報処理学会全国大会講演論文集, 78 巻, 3 号, pp. 3,373-3,374 (2016).