

渋滞削減のための CACC の有用性に関する研究

今枝 勇太 旭 健作 渡邊 晃

名城大学大学院 理工学研究科, 情報工学専攻

A study on effectiveness of CACC for reducing traffic jam

Yuta Imaeda Kensaku Asahi Akira Watanabe

Graduate School of Science and Technology, Meijo University

1 まえがき

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。図1に2002年と2011年の渋滞の総量とその原因の割合を示す。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激減した。しかし、下り坂から上り坂に変わる道路上の地形の一つである「サグ部」での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は改善されておらず、自動車交通の効率化における大きな課題となっている。

この「サグ部」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、相対速度を組み込んだACCの通信利用協調型車間距離制御装置(Cooperative Adaptive Cruise Control: CACC)がある。これらの技術を使うことで前方車両の減速による速度の低下の伝播を無くし、渋滞を改善することができる[1]。

既存の研究に、CACCを搭載したトラック4台を車間距離4[m]で隊列走行させる実験、研究が2013年2月にエネルギーITS推進事業で行われ、安全なCACC走行が実現できることが確認された[2]。しかし、実際の交通の場において、車群が4台のみの場合や、車群を形成している車両すべてがCACCを搭載しているという環境は想定しにくい。よって本研究ではより現実の道路交通に近づけるため、車群を10台以上で形成し、徐々に普及するであろうCACC搭載車が非搭載車と混在する環境を想定する。そして、車群の中のCACC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の普及率による渋滞改善効果と、CACCとACCの事故回避能力の差をシミュレーションにより検討した。

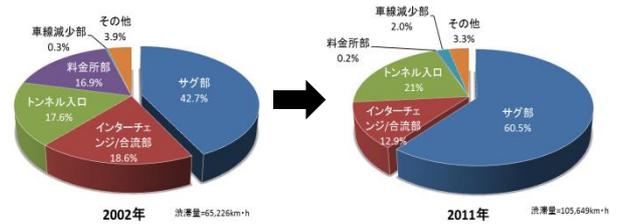


図1 2002年と2011年の渋滞の総量と原因の割合[3]

2 車群のモデル

まずCACC搭載車両とACC搭載車両、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。先行車両に追従する車両*i+1*の位置を $x_{i+1}(t)$ とすると、車両の加速度 $\ddot{x}_{i+1}(t)$ を、CACCの場合は(1)式で、ACCは(2)式、人間の場合は(3)式で与える[4]。

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_1 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_2 \{\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i+1}(t)\} \dots (1)$$

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} \dots (2)$$

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} \dots (3)$$

3つの式の左辺に含まれる 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。この遅れ時間とは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。また右辺の各項にかかっている k_1 と k_2 、 k_3 は制御ゲイン、 k_4 は人間の反応感度である。今後、これらの k をモデルパラメータという。

(1)式のモデルパラメータ k_1 がかかっている項は、分母が前方車両との距離の差(車間距離)となっており、この値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る。また、分子は前方車両との速度差となっており、この値は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。この項の特性は他の2つの式のモデルパラメータ k_3 と k_4 がかかっている項も同様である。(1)式にはもう1つ項があり、これは前方車両から通信で加速度情報を取得できるCACCのみに追加されている項である。この項は前方車両との加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。

3 CACC と ACC の渋滞改善効果の比較

3.1 シミュレーション環境

本研究の前提としていくつかのシミュレーションの環境を設定する。最初に、追いつけない直線の高速度道路の走行する車群(11台)を想定し、先頭の車両がブレーキをかけることで「サグ部」での無意識の減速を模倣する。次にシミュレーションでは、各車両を点とみなし、すべての車両が同一の速度90[km/h]で走っている状態から先頭車両が75[km/h]以下になるまで $-2[m/s^2]$ で減速をかける場合を想定する。加速度は空気抵抗、タイヤの転がり抵抗、エンジン性能を加味し、 $-2[m/s^2]$ と仮定する。また、先頭の車両は必ずCACC(通信装置)を搭載しているものとする。最後に、機械の遅れ時間 T_A を0.1[s]、人間の反応遅れ T_H を1.0[s]として計算する[5]。

普及率の計算の方法はCACC搭載車両を車群の2台目から順に増やしていくものとし、先頭の車両を除いた10台で普及率を計算する。これはCACC搭載車両がCACC搭載車両の直後でないとは通信が行えず、CACCの制御が行えないためである。

3.2 予備シミュレーションによるモデルパラメータ k の決定

モデルパラメータ k の値の決定を行った。各式のモデルの車両を、それぞれ11台でシミュレーションを行う。また、多くのドライバーは車間時間1.2[秒]で走行している[6]。よって、90[km/h]で走行する車両の車間距離は30[m]となる。この車間距離で固定し、 k の値を変化させ前方車両と衝突することなく、加速度の値が無意味に大きくならないように $-0.3[G]$ - $0.3[G]$ の間で推移させる。さらに、減速後の先頭車両と同じ速度に収束できたらシミュレーションの実行に成功したものとする。ACCの場合は成功した場合の k_3 の値の平均値をとり、このシミュレーションで使うモデルパラメータ k_3 の値を1つに決定する。また、人間のモデルパラメータ k_4 の値は平均値を採用と反応感度が非常に優秀になってしまうため、最大値をモデルパラメータ k_4 の値として決定する。CACCのモデルパラメータ k の値は k_1 と k_2 の組み合わせとなり、さらにこれらは取りえる範囲が存在する。このため、今回は範囲の重心を採用した。CACC搭載車両のシミュレーションした結果を図2に示す。

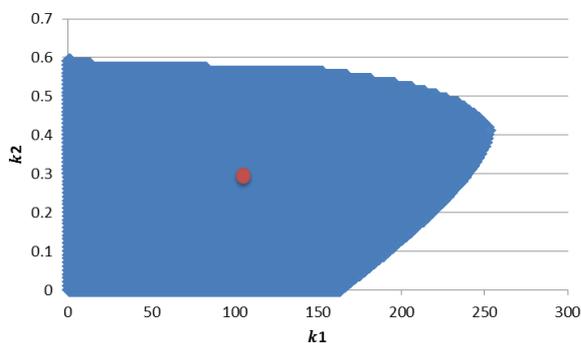


図2 CACCの k の値の組み合わせの分布

図2の横軸は k_1 の値、縦軸は k_2 の値をそれぞれ示す。また、図2はシミュレーションに成功した k_1 と k_2 の組み合わせである。重心を求めるにあたって5角形に近似し、重心を求めた。ACC

はシミュレーションした結果 k_3 の最小値が0.8、最大値が163.7となった。よって平均値の82.3を k_3 として採用する。人間のモデルパラメータの最大値は13.3であったため、この値を採用する。以上から各モデルパラメータ k を $k_1=104.4$ 、 $k_2=0.29$ 、 $k_3=82.3$ 、 $k_4=13.3$ と決定する。

3.3 普及率別の各車両の速度変化

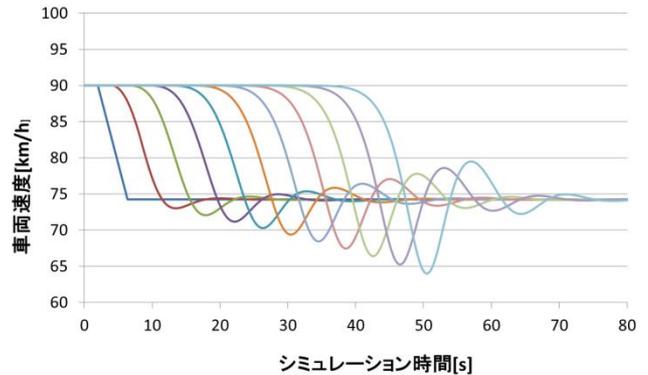


図3 人間のみの車群の速度変化

人間のみの車群の速度変化を図3に示す。図3の横軸はシミュレーション内の時間を、縦軸は車群の各車両の速度を示す。左の線から順番に先頭車両から後続車両の速度の変化を示す。人間のみの車群では、2台目速度の低下が発生しており、その速度の低下が3台目、4台目となるごとに大きくなりながら伝播していることが分かる。この伝播がサグ渋滞を引き起こす速度の低下の伝播である。先頭車両の減速後の速度は74.2[km/h]であるが、最後尾車両の最低速度は64.0[km/h]となり、10[km/h]以上の速度低下が伝播している。今回は11台でのシミュレーションだが、車群内の台数が50台、100台と車両が増えていくと伝播がさらに大きくなり渋滞が発生する。

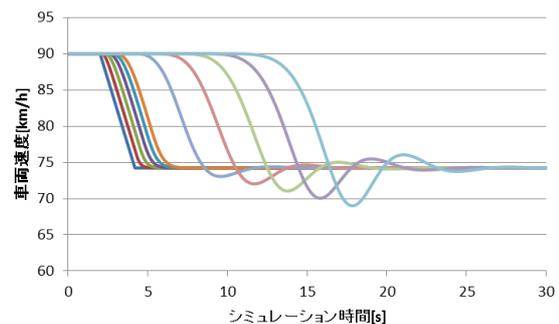


図4 ACCの普及率が50%の時の車群の速度変化

次にこの車群にACC搭載車両を前から順に挿入する。図4にACCの普及率が50%の時の車群の速度変化を示す。普及率が50%というのは、2台目から6台目までをACC車両に入れ替えたことを意味する。ACCを搭載している2台目から6台目のアンダーシュートの発生が抑えられており、図3と比べると最後尾車両の最低速度が69.0[km/h]となり、約5[km/h]の速度の低下を防いだ。

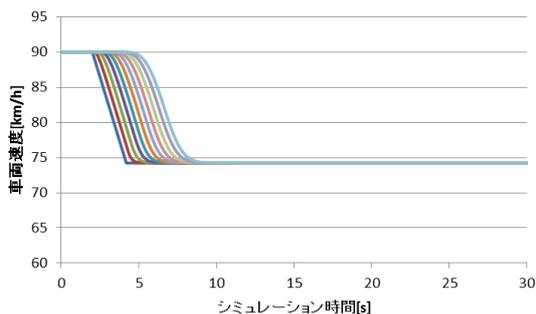


図5 ACCの普及率が100%の時の車群の速度変化

図5にACCの普及率が100%の時の車群の速度変化を示す。普及率が100%ということは2台目以降すべての車両をACC車両に入れ替えたことを意味する。最後尾車両の最低速度は74.2[km/h]であり、この速度は減速後の先頭車両の速度と全く同じなので、速度の低下の伝播がないことが分かる。

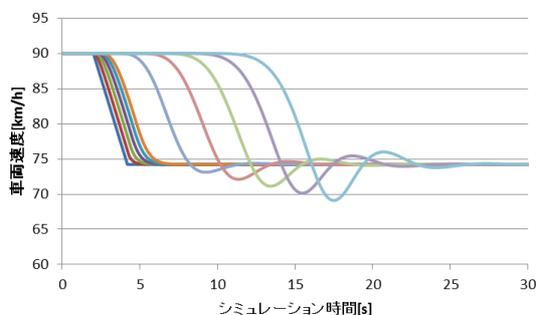


図6 CACCの普及率が50%の時の車群の速度変化

次にCACC搭載車両を前から順に挿入していく。図6にCACCの普及率が50%の時の車群の速度変化を示す。普及率が50%というのは、2台目から6台目までをCACC車両に入れ替えたことを意味する。図4のACC搭載車両が50%の時と同じように2台目から6台目のアンダーシュートが抑えられており、最後尾車両の最低速度が69.1[km/h]となり、速度の低下の伝播を約5[km/h]の速度の低下を防いだ。

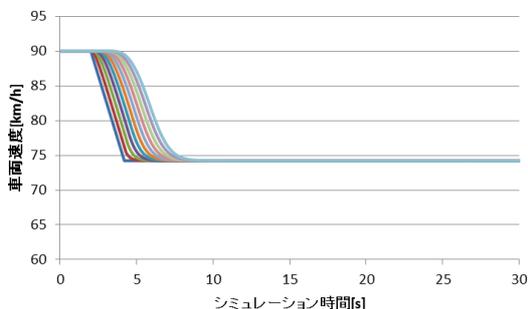


図7 CACCの普及率が100%の時の車群の速度変化

図7にCACCの普及率が100%の時の車群の速度変化を示す。普及率が100%ということは2台目以降すべての車両をCACC車両に入れ替えたことを意味する。図7から最後尾車両の最低速度は74.2[km/h]で速度の低下の伝播がないことが分かる。

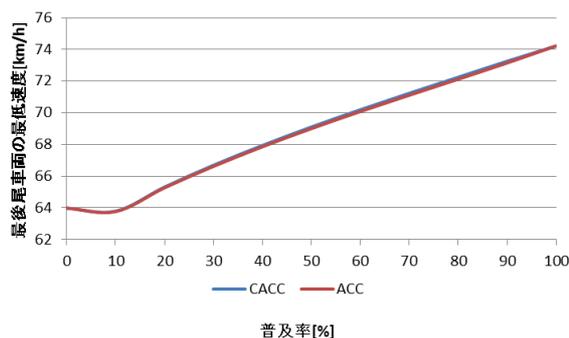


図8 普及率別の最後尾車両の最低速度

図8は各普及率別の最後尾車両の最低速度を示す。図8の横軸はCACC、ACCの普及率を、縦軸は車群の最後尾の車両の最低速度を示す。前方車両から各装置を搭載している車両を増やした場合、CACCとACCの最後尾車両の速度の変化に大きな違いは確認されなかった。よって、車間距離30[m]での渋滞改善効果はCACCとACCに差が出ないことが分かった。しかし、普及率に伴って最後尾車両の最低速度は上昇しており、ACCもCACCにも渋滞の改善効果があることが分かる。また、普及率が10[%]の時に普及率が0[%]の時よりも最後尾車両の最低速度が小さくなる。これは、人間の挙動を示す車両がほとんどを占める中、前方車両との速度を合わせるために先頭車両よりも大きな減速をACC、CACC共にかけており、その挙動に人間が過剰に減速をかけるために遅れの伝播が大きくなったと考えられる。

4 CACCとACCの事故回避能力の比較

CACCとACCは車間距離30[m]の場合、渋滞改善効果において大きな性能の差が出ないことが分かった。しかし、ACCに加えて通信装置を搭載しているCACCの利点は「通信装置で前方車両から加速度情報を受け取り、ACCに組み込むことでより精度の良い制御ができる」ということであり、ACCよりもCACCの方がより素早く前方車両の挙動を察知し、自車の制御ができるはずである[1]。つまり、前方車両の加速度情報を使った精度のよい制御により「ACCと比べて車間距離を短縮して」も衝突を回避できる、ということになる。そこで、CACCはACCに比べてどれほど車間を短くできるのかをシミュレーションにより検証した。

4.1 車間距離を短くするメリット

CACCによる短車間距離走行には2つのメリットがある。1つ目は車間距離を短くして走行することにより、1[km]あたりに入る車両の数が増加することによる道路容量増加効果である。2つ目は車間距離が短い隊列走行をすることで先頭車両以外の車両の空気抵抗が減り、省エネルギー効果を得られることである。以上のことから車間を短くして車の隊列走行をすることには大きなメリットがあるといえる。

4.2 シミュレーション環境

今回の実験のシミュレーション環境は追従能力の比較なので、最悪の交通状況を想定して行う。高速道路上で短い車間距離で

走っている場合に起こる事故の中で大きな被害を出すのは玉突き事故である。今回は先頭車両が 100[km/h]で走行中にある原因(動物の飛び出しなど)による急ブレーキとして-4.0[m/s²]の加速度で 50[km/h]まで減速した場合を玉突き事故に見立ててシミュレーションをする。変化させるのは車間距離と制御ゲインで、車間距離は 30[m]から 0.1[m]ずつ短くしていく。11 台すべてが前方車両と衝突することなく加速度の値が-0.5[G]~0.5[G]の間で推移し、減速後の先頭車両と同じ速度に収束できたら事故は起こらなかったものとする。

4.3 事故が起こらなかった場合の車間距離

4.2 節で決定したシミュレーション環境では人間の反応感度などの値にしても、前方車両と衝突し、事故を起こす車両がある。では、この環境ですべての車両が ACC を搭載している場合と、すべての車両が CACC を搭載している場合でシミュレーションする。

表 1 最短走行可能車間距離と制御ゲイン

	最短車間距離[m]	k_1 or k_3	k_2
CACC	5.7	32.9	0.4
ACC	12.9	53.7	

表 1 にこのシミュレーション環境で CACC と ACC が事故を起こすことなかった最短車間距離とその場合のモデルパラメータの値を示す。この環境で ACC の最短走行可能車間距離が 12.9[m]なのに対して CACC は 5.7[m]まで車間距離を短くして走行できることが分かった。ここから CACC は ACC よりも車間を短くすることができ自動車交通の効率化の観点では ACC よりも優れた能力を発揮することが分かる。

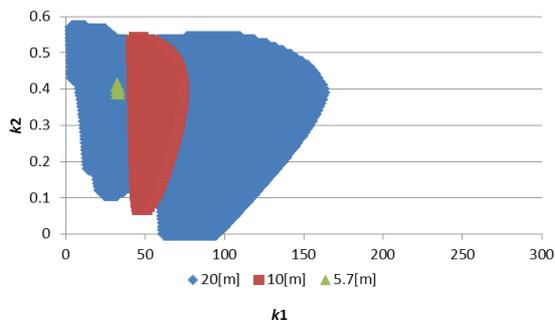


図 9 各車間距離での k_1 と k_2 の組み合わせの分布

また、図 9 に車間距離を短くしていき事故が発生しなかった場合の CACC のモデルパラメータ k_1 と k_2 の組み合わせを示す。青色の範囲は車間距離が 20[m]の場合に事故が発生しなかった組み合わせを示しており、赤色の範囲は車間距離 10[m]でも事故が発生しなかった組み合わせを示す。また、緑の範囲は車間距離が最短である 5.7[m]でも事故が発生しなかった範囲である。車間距離が 20[m]の場合では図 2 よりも組み合わせの分布は小さくなっている。さらに車間距離が 10[m]、5.7[m]となるにつれて範囲が狭まり、5.6[m]では事故が発生しないモデルパラメータの組み合わせは存在しなかった。また、車間距離 20[m]の分布では k_1 が 50、 k_2 が 0.1 付近に事故が発生しない組み合わせは存在していないが、車間距離 10[m]の分布では存在している。同じように

事故が起こらない最短車間距離である 5.7[m]のモデルパラメータの組み合わせは、車間距離 10[m]のモデルパラメータの組み合わせの分布外に存在する。よって、車間距離が長い分布が車間距離の短い分布を完全に内包しているわけではないことが分かった。よって、CACC のモデルパラメータを決定するには車間距離に応じて適切なモデルパラメータを決定する必要がある

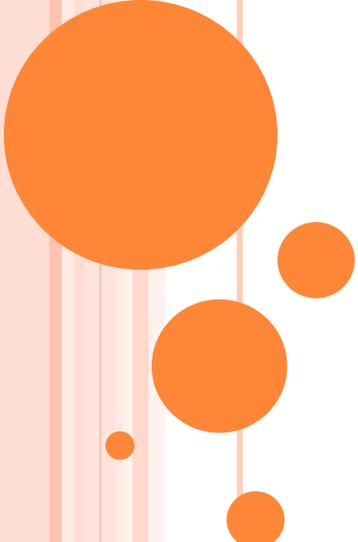
5 まとめと今後の課題

CACC は ACC と同じように「サグ部」の渋滞を改善できる可能性がある。また、CACC は ACC では事故が起きてしまうような状況であっても通信装置による精度の高い制御により事故を回避するだけではなく、さらに短い車間距離であっても走行することが可能である。

今後の課題として、今回のシミュレーションでは前方車両が通信装置を必ず持ち、CACC の機能が作動する車両を普及率の対象にした。しかし、前方車両が通信装置を有していないが、CACC の装置を持っている車両も普及率の対象に含めるような、より現実に近い計算を行う必要がある。加えて、今回のシミュレーションでは車車間の通信でのパケットロスや遅延などは 100%起こらない、と仮定して行っている。もしパケットロスや遅延が発生した場合、それがどのように制御に影響するのかをシミュレーションする必要がある。

文献

- [1] 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, 電学誌, 135 巻, 7 号, pp.433-436 (2015)
- [2] 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)
- [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] 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析-追従挙動モデルの整理と今後の展望-, 土木学会論文集, 660, pp.39-51, (2000).
- [5] 牧下寛: 自動車運転中の突然の危険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)



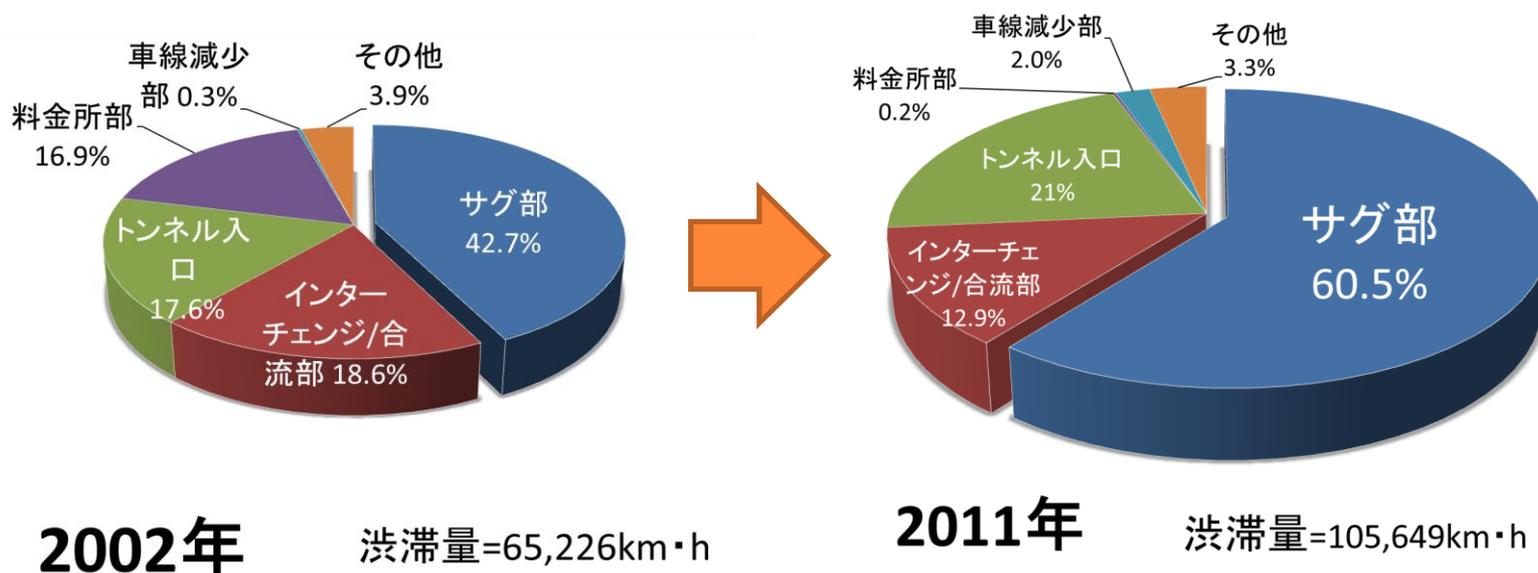
CACCの渋滞改善効果と追従能力 についての調査

名城大学大学院 理工学研究科 情報工学専攻

今枝 勇太 旭 健作 渡邊 晃

研究の背景

- 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



サグ渋滞

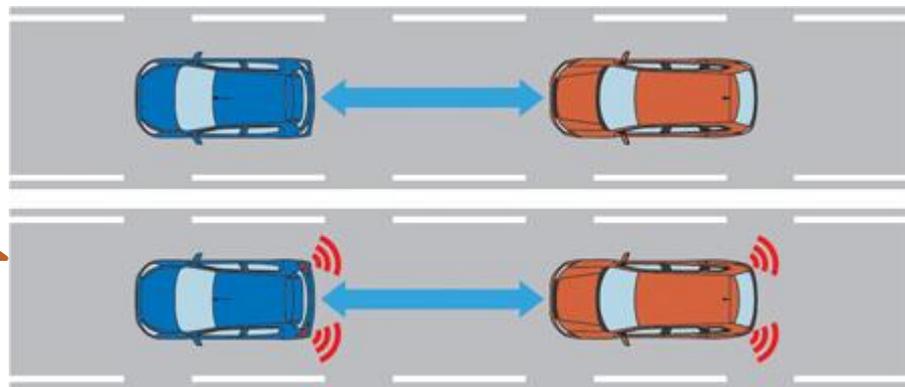
- 道路のV型地点を”サグ部”と呼ぶ
- 坂道での無意識な減速が後続車両に伝播することで発生
- 前方車両との速度差を無くし，渋滞の発生を防ぎたい



ACCとは何か？

- ACC: Adaptive Cruise Control
(車間距離制御装置)

前方車両の挙動の変化を、レーダーなどを使って取得する



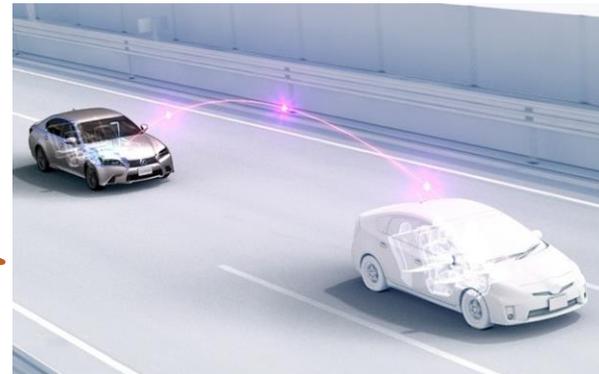
- ACCの特徴

- ACCはレーダーやカメラなどの技術を使い自車両の持っているセンサだけで自律制御する

CACCとは何か？

- **CACC: Cooperative** Adaptive Cruise Control
(通信利用協調型車間距離制御装置)

前方車両の加速度を利用し、自車の加速度を制御する

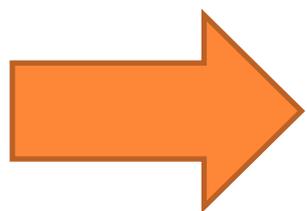


- **CACCの利点**

- 安全運転支援, 道路容量増加効果や空気抵抗の軽減による省エネルギー効果にも役立つ

研究の内容と目的

- 高速道路上では，前方車両の減速の影響により自然渋滞が発生する



CACCとACCによる渋滞改善効果を検証

- 普及率による渋滞改善効果の検証
- CACCとACCの追従性能の比較

シミュレーション環境の設定

- 車両の追従モデル
- 車間距離の設定
- 事前シミュレーションによる制御ゲインと反応感度の決定
- 普及率の考慮の方法



シミュレーション環境の設定

- 車両の追従モデル
- 車間距離の設定
- 事前シミュレーションによる制御ゲインと反応感度の決定
- 普及率の考慮の方法



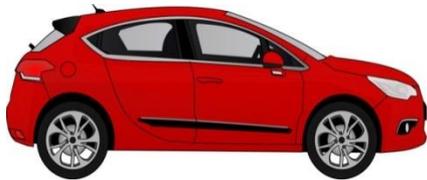
ACCの車両追従アルゴリズム

i+1番目

位置： $x_{i+1}(t)$

速度： $\dot{x}_{i+1}(t)$

加速度： $\ddot{x}_{i+1}(t)$

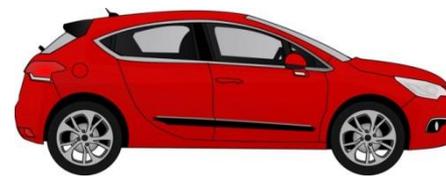


i番目

位置： $x_i(t)$

速度： $\dot{x}_i(t)$

加速度： $\ddot{x}_i(t)$



○ ACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

○ 人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

T_H : 反応遅れ[s] k_4 : 反応感度
 T_A : 機械遅れ[s] k_1, k_2, k_3 : 制御ゲイン

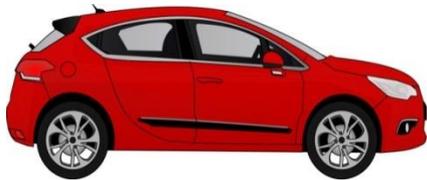
ACCの車両追従アルゴリズム

i+1番目

位置： $x_{i+1}(t)$

速度： $\dot{x}_{i+1}(t)$

加速度： $\ddot{x}_{i+1}(t)$



i番目

位置： $x_i(t)$

速度： $\dot{x}_i(t)$

加速度： $\ddot{x}_i(t)$



○ ACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

○ 人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

T_H : 反応遅れ[s] k_4 : 反応感度
 T_A : 機械遅れ[s] k_1, k_2, k_3 : 制御ゲイン

ACCの車両追従アルゴリズム

i+1番目

位置： $x_{i+1}(t)$

速度： $\dot{x}_{i+1}(t)$

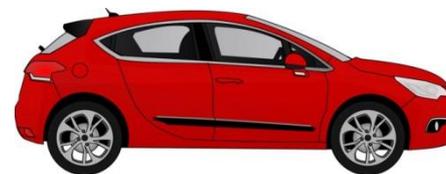
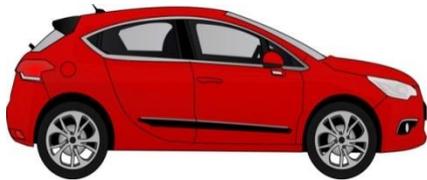
加速度： $\ddot{x}_{i+1}(t)$

i番目

位置： $x_i(t)$

速度： $\dot{x}_i(t)$

加速度： $\ddot{x}_i(t)$



○ ACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

車間距離を示している

○ 人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

T_H : 反応遅れ[s] k_4 : 反応感度
 T_A : 機械遅れ[s] k_1, k_2, k_3 : 制御ゲイン

ACCの車両追従アルゴリズム

i+1番目

位置: $x_{i+1}(t)$

速度: $\dot{x}_{i+1}(t)$

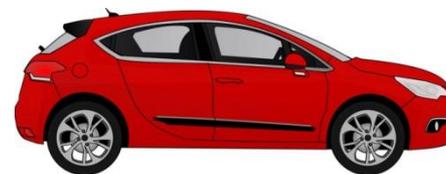
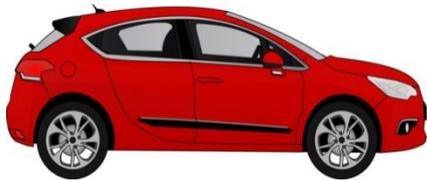
加速度: $\ddot{x}_{i+1}(t)$

i番目

位置: $x_i(t)$

速度: $\dot{x}_i(t)$

加速度: $\ddot{x}_i(t)$



ACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

速度差を示している

人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

T_H : 反応遅れ[s] k_4 : 反応感度
 T_A : 機械遅れ[s] k_1, k_2, k_3 : 制御ゲイン

ACCの車両追従アルゴリズム

i+1番目

位置: $x_{i+1}(t)$

速度: $\dot{x}_{i+1}(t)$

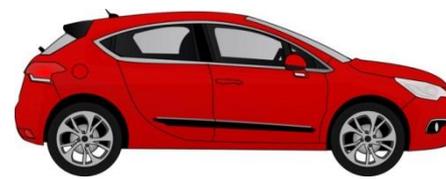
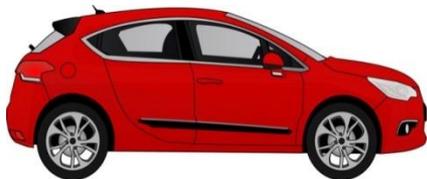
加速度: $\ddot{x}_{i+1}(t)$

i番目

位置: $x_i(t)$

速度: $\dot{x}_i(t)$

加速度: $\ddot{x}_i(t)$



ACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

何秒遅れて加速度が反映されるかを表す

人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

T_H : 反応遅れ[s] k_4 : 反応感度
 T_A : 機械遅れ[s] k_1, k_2, k_3 : 制御ゲイン

ACCの車両追従アルゴリズム

i+1番目

位置: $x_{i+1}(t)$

速度: $\dot{x}_{i+1}(t)$

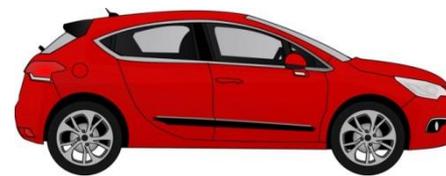
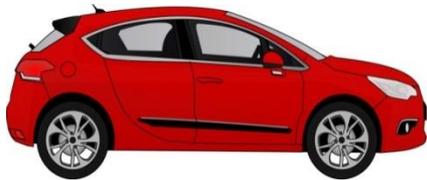
加速度: $\ddot{x}_{i+1}(t)$

i番目

位置: $x_i(t)$

速度: $\dot{x}_i(t)$

加速度: $\ddot{x}_i(t)$



ACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

次の加速度の大きさを決める定数

人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

T_H : 反応遅れ[s] k_4 : 反応感度
 T_A : 機械遅れ[s] k_1, k_2, k_3 : 制御ゲイン

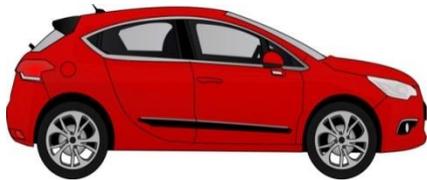
CACCの車両追従アルゴリズム

i+1番目

位置： $x_{i+1}(t)$

速度： $\dot{x}_{i+1}(t)$

加速度： $\ddot{x}_{i+1}(t)$

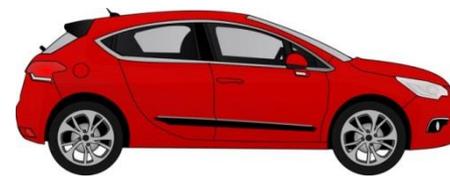


i番目

位置： $x_i(t)$

速度： $\dot{x}_i(t)$

加速度： $\ddot{x}_i(t)$



○ CACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_1 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_2 \{\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i+1}(t)\}$$

○ 人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

T_H : 反応遅れ[s] k_4 : 反応感度
 T_A : 機械遅れ[s] k_1, k_2, k_3 : 制御ゲイン

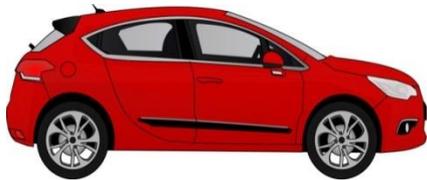
CACCの車両追従アルゴリズム

i+1番目

位置： $x_{i+1}(t)$

速度： $\dot{x}_{i+1}(t)$

加速度： $\ddot{x}_{i+1}(t)$



i番目

位置： $x_i(t)$

速度： $\dot{x}_i(t)$

加速度： $\ddot{x}_i(t)$



○ CACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_1 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_2 \{\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i+1}(t)\}$$

加速度的差

○ 人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

T_H : 反応遅れ[s] k_4 : 反応感度
 T_A : 機械遅れ[s] k_1, k_2, k_3 : 制御ゲイン

T_H (反応遅れ) と T_A (機械遅れ) の決定

- 反応遅れは人間が前方車両の挙動を知覚してから加速度(ブレーキやアクセル)に反映されるまでの時間
- 機械遅れは機械が前方車両の挙動をレーダーなどで察知してから加速度に反映されるまでの時間
- 今回 T_H は1.0秒, T_A は0.1秒とする



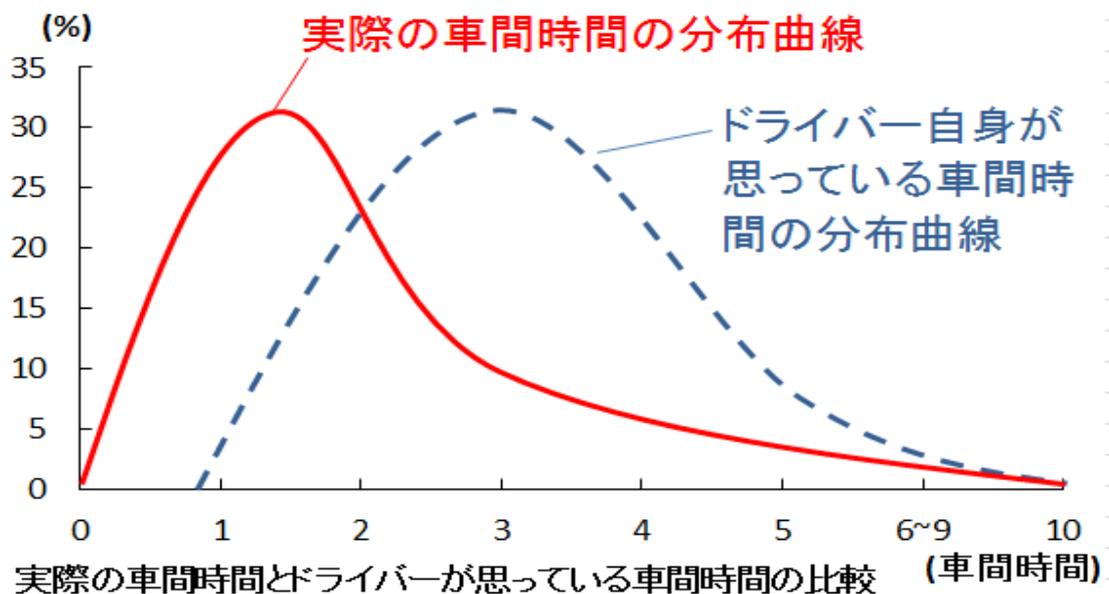
シミュレーション環境の設定

- 車両の追従モデル
- 車間距離の設定
- 事前シミュレーションによる制御ゲインと反応感度の決定
- 普及率の考慮の方法



高速道路上での車間距離

- 車間時間が1.2秒前後の人が最も多い
- 90 [km/h] で走行している場合，車間は30 [m] に相当する



シミュレーション環境の設定

- 車両の追従モデル
- 車間距離の設定
- 事前シミュレーションによる制御ゲインと反応感度の決定
- 普及率の考慮の方法



予備シミュレーションによる 各制御ゲインの決定

- 車両台数を11台，車間距離を30[m]とし，先頭車両が90[km/h]での走行状態から加速度-2[m/s²]で75[km/h]まで減速する
- 前方車両と衝突することなく全ての車両が同じ速度に収束できた場合，そのシミュレーションは成功とする
- 加速度が無意味に大きくなるように ± 3.0 [m/s²]を超える場合はシミュレーションを停止する



予備シミュレーションによる 各制御ゲインの決定

- ACCの制御ゲインと人間の反応感度を決定する
- それぞれの値について、シミュレーション成功時の範囲の平均値を採用する

	平均値
k_3	82.3
k_4	13.3

ACCの追従モデル

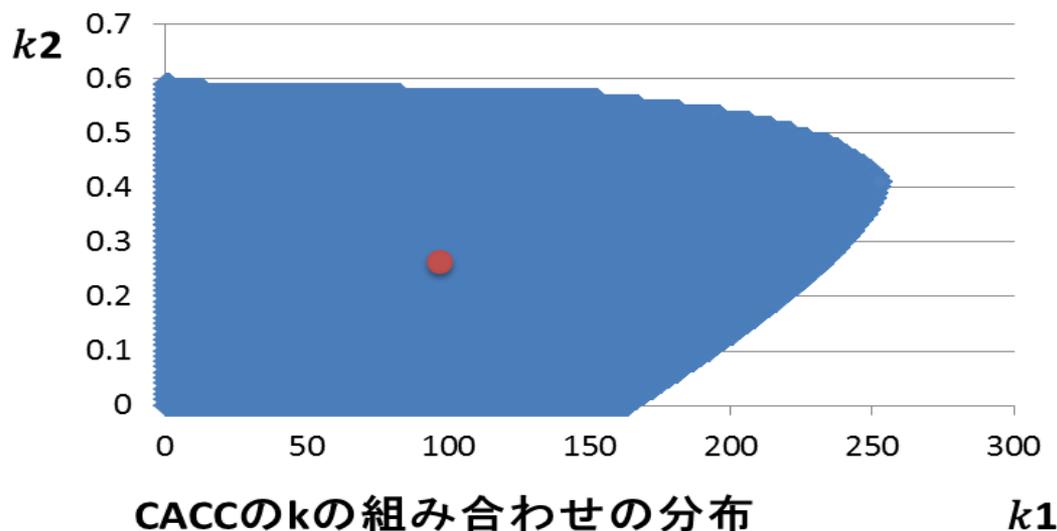
$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

予備シミュレーションによる 各制御ゲインの決定

- シミュレーションが成功する制御ゲインは
下図青色の範囲となる
- 今回は、この領域の重心を採用する



$$k_1=104.4$$
$$k_2=0.29$$

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_1 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_2 \{\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i+1}(t)\}$$

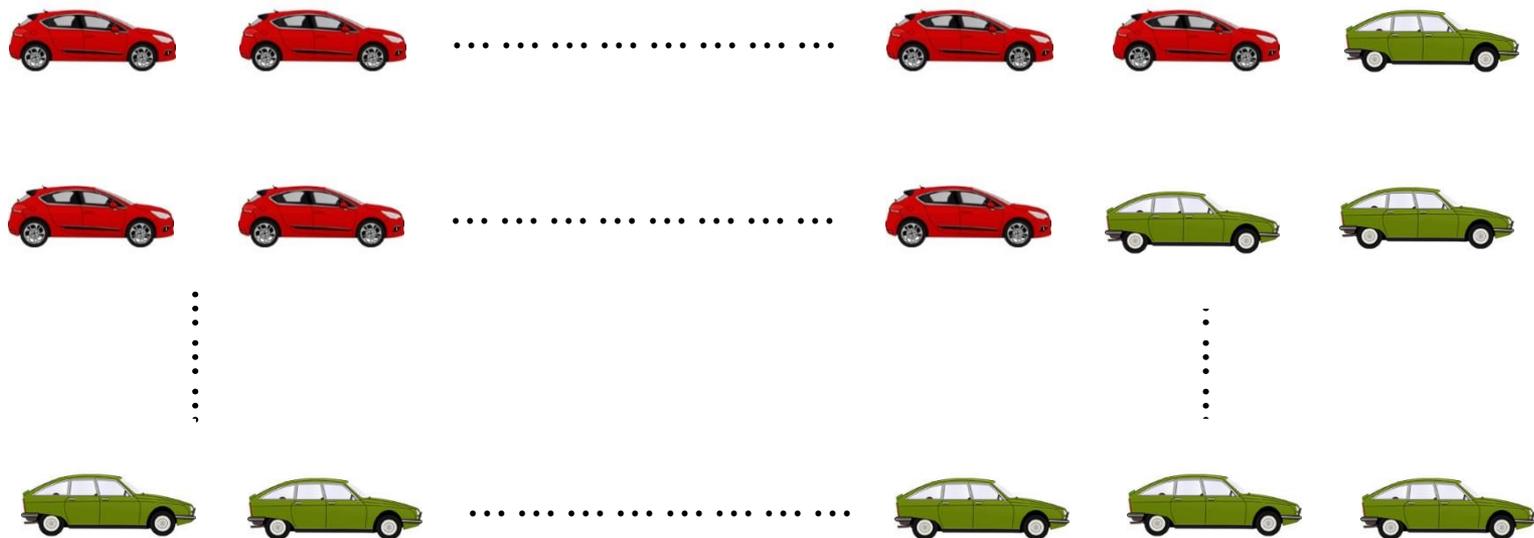
シミュレーション環境の設定

- 車両の追従モデル
- 事前シミュレーションによる制御ゲインと反応感度の決定
- 車間距離の設定
- 普及率の考慮の方法



普及率を考慮したシミュレーション環境

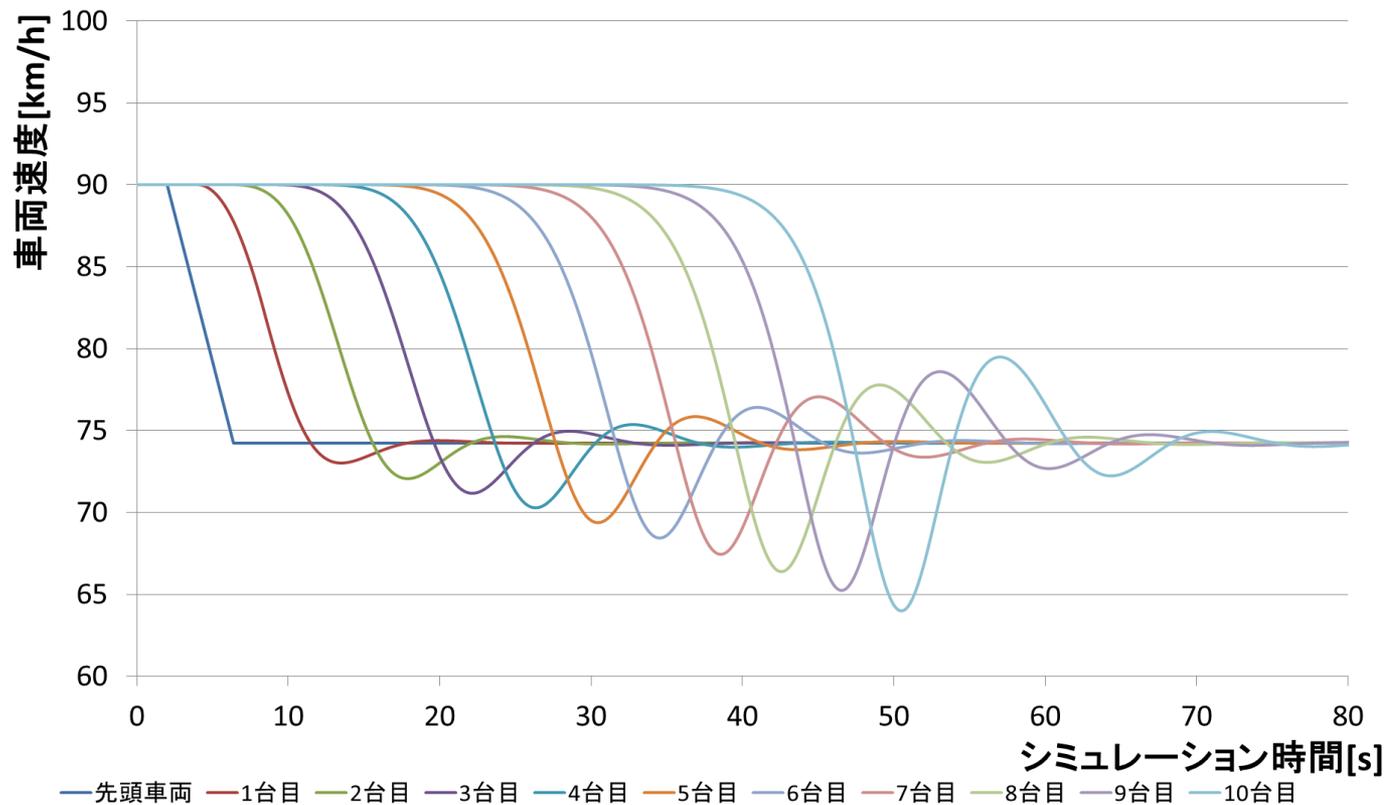
- 車両を点で考え先頭車両を除いた10台で普及率を計算する
- 2台目以降前から順にCACC搭載車を増やし普及率を10%ずつ増加する



普及率別のシミュレーションの環境設定

- 車両台数を11台，車間距離を30[m]とし，90[km/h]での走行状態から加速度 $-2[\text{m/s}^2]$ で75[km/h]まで減速する
- 前方車両と衝突することなく全ての車両が同じ速度に収束できた場合，そのシミュレーションは成功とする
- 加速度が無意味に大きくならないように $\pm 3.0[\text{m/s}^2]$ を超える場合はシミュレーションを停止する
- 各 k を $k_1=104.4$ ， $k_2=0.29$ ， $k_3=82.3$ ， $k_4=13.3$ としてシミュレーションを行う

人間の挙動モデルでのシミュレーション

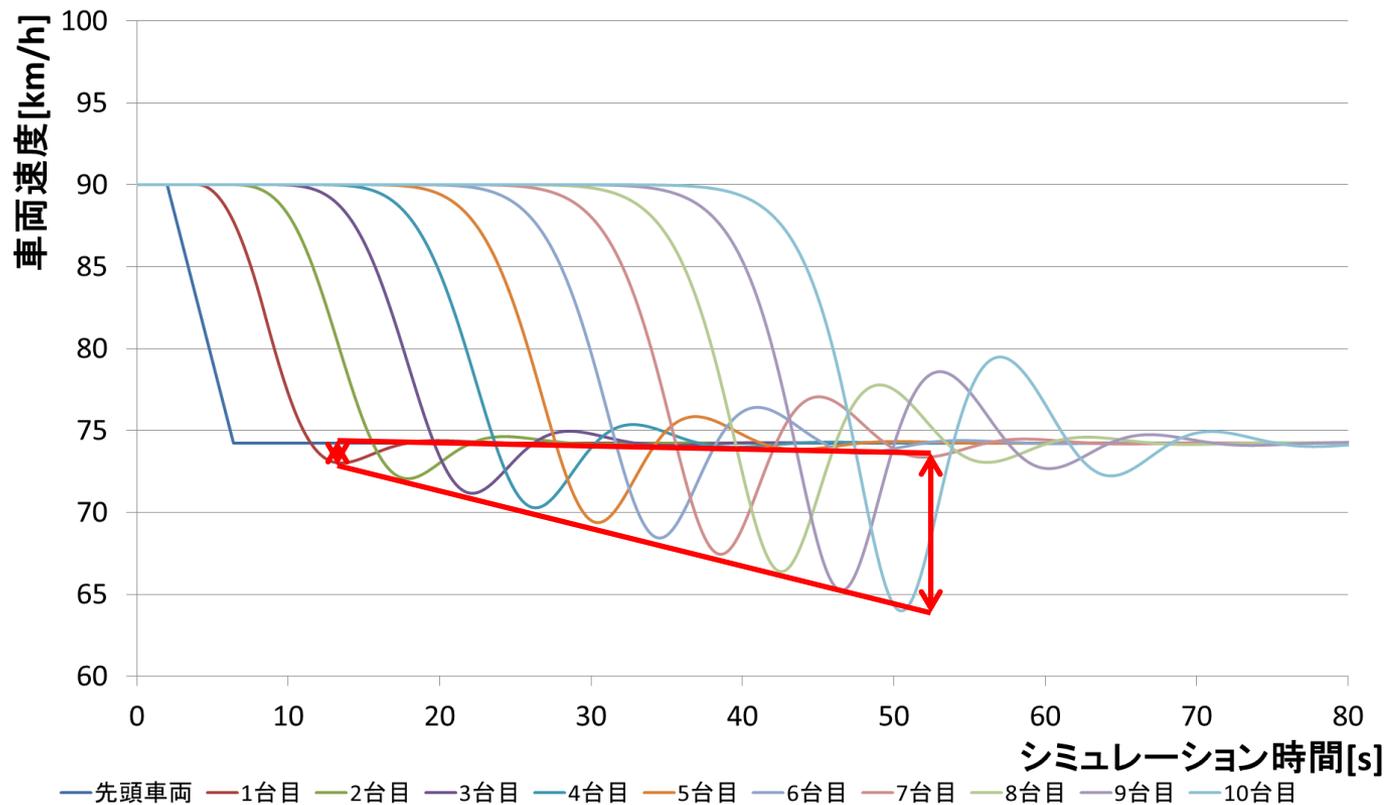


人間のみの車群の速度変化

人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

人間の挙動モデルでのシミュレーション

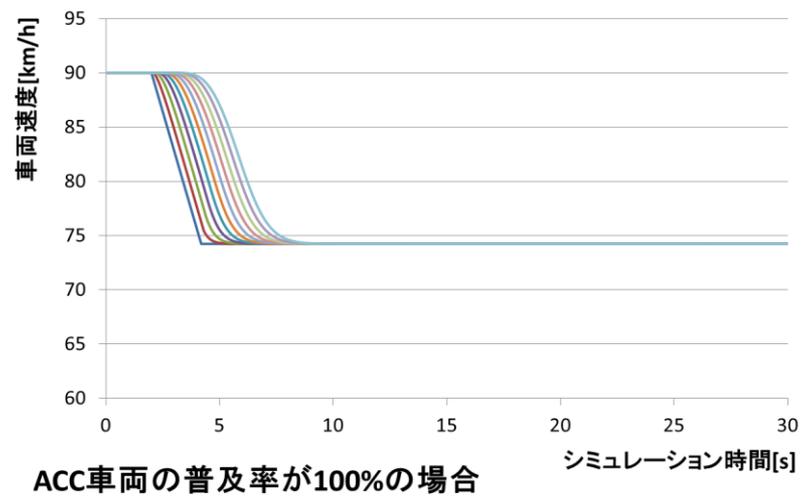
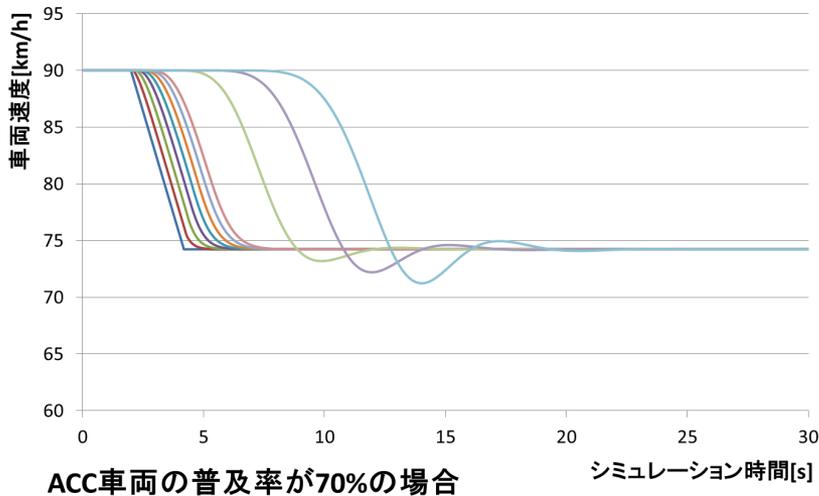
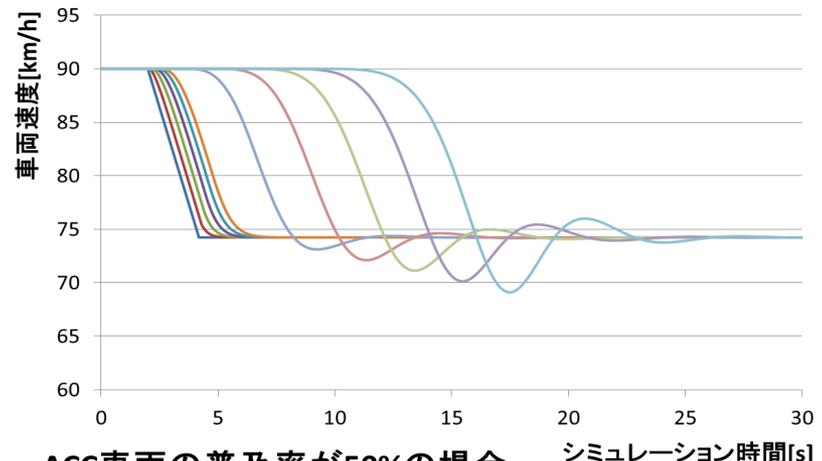
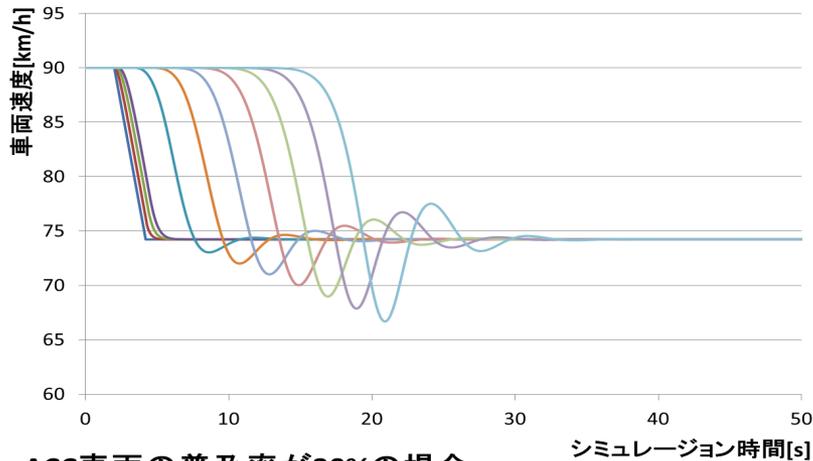


人間のみの車群の速度変化

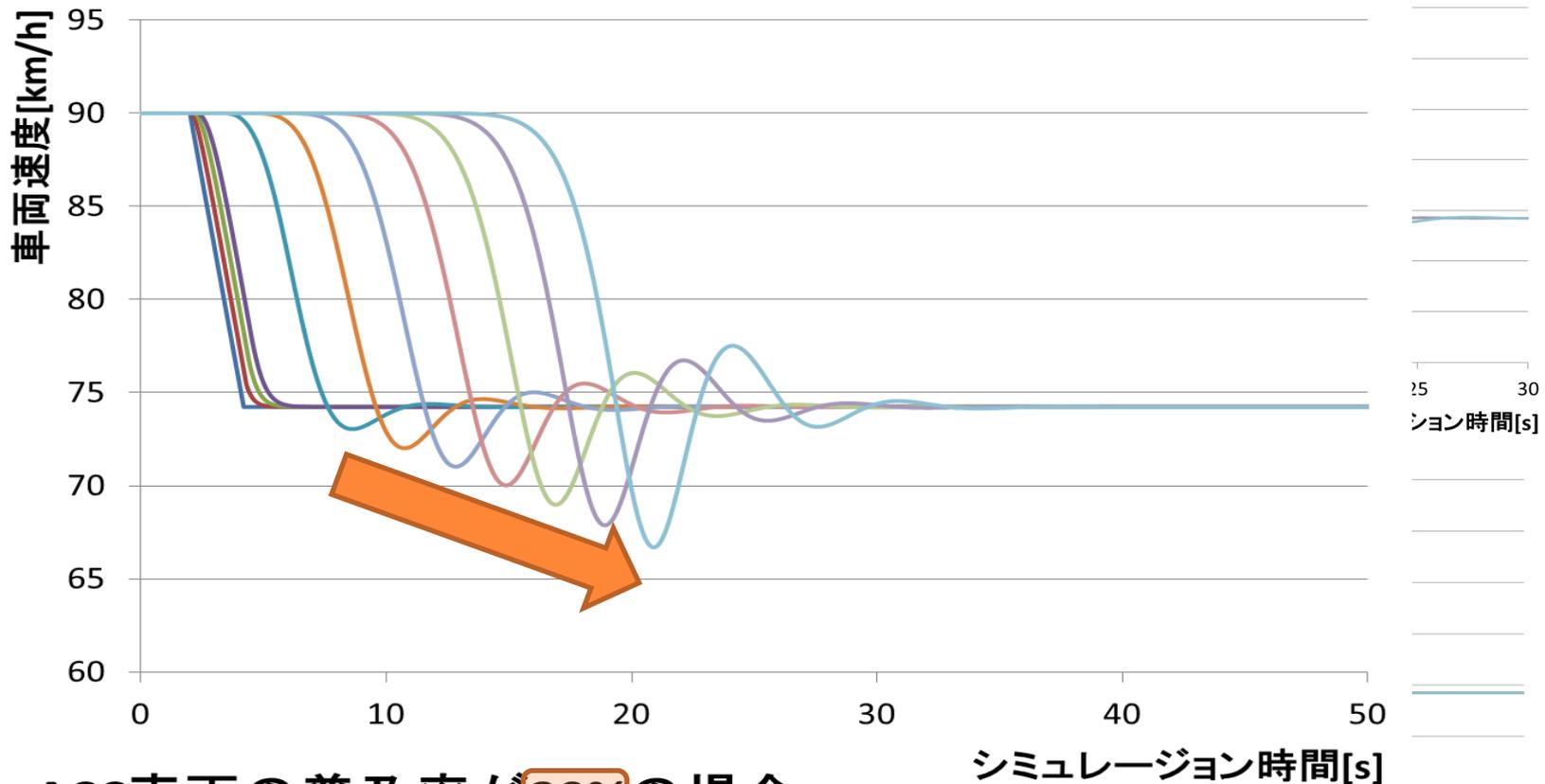
人間の追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_H) = k_4 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

ACCの普及率別の各車両の速度変化



ACCの普及率別の各車両の速度変化

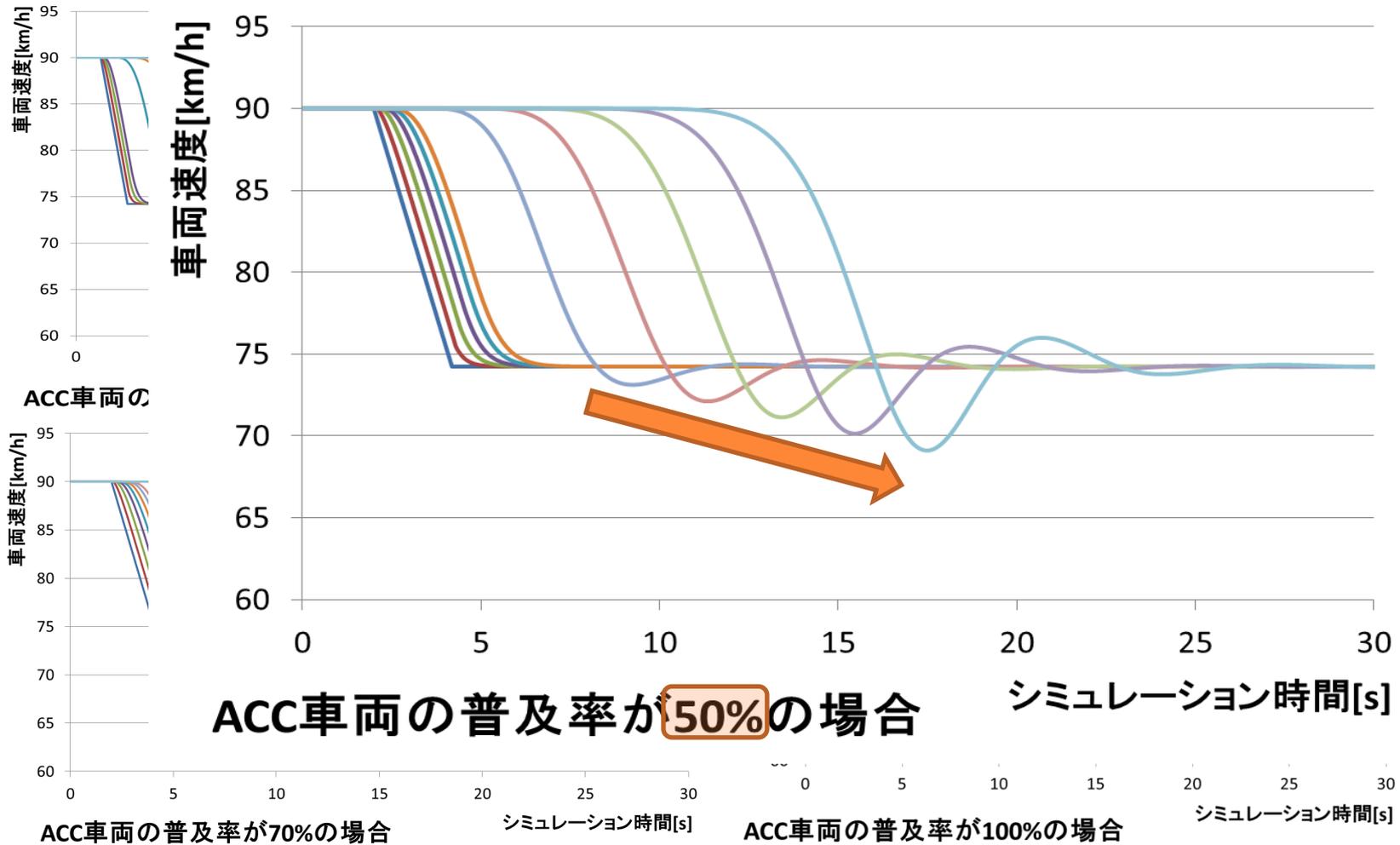


ACC車両の普及率が**30%**の場合

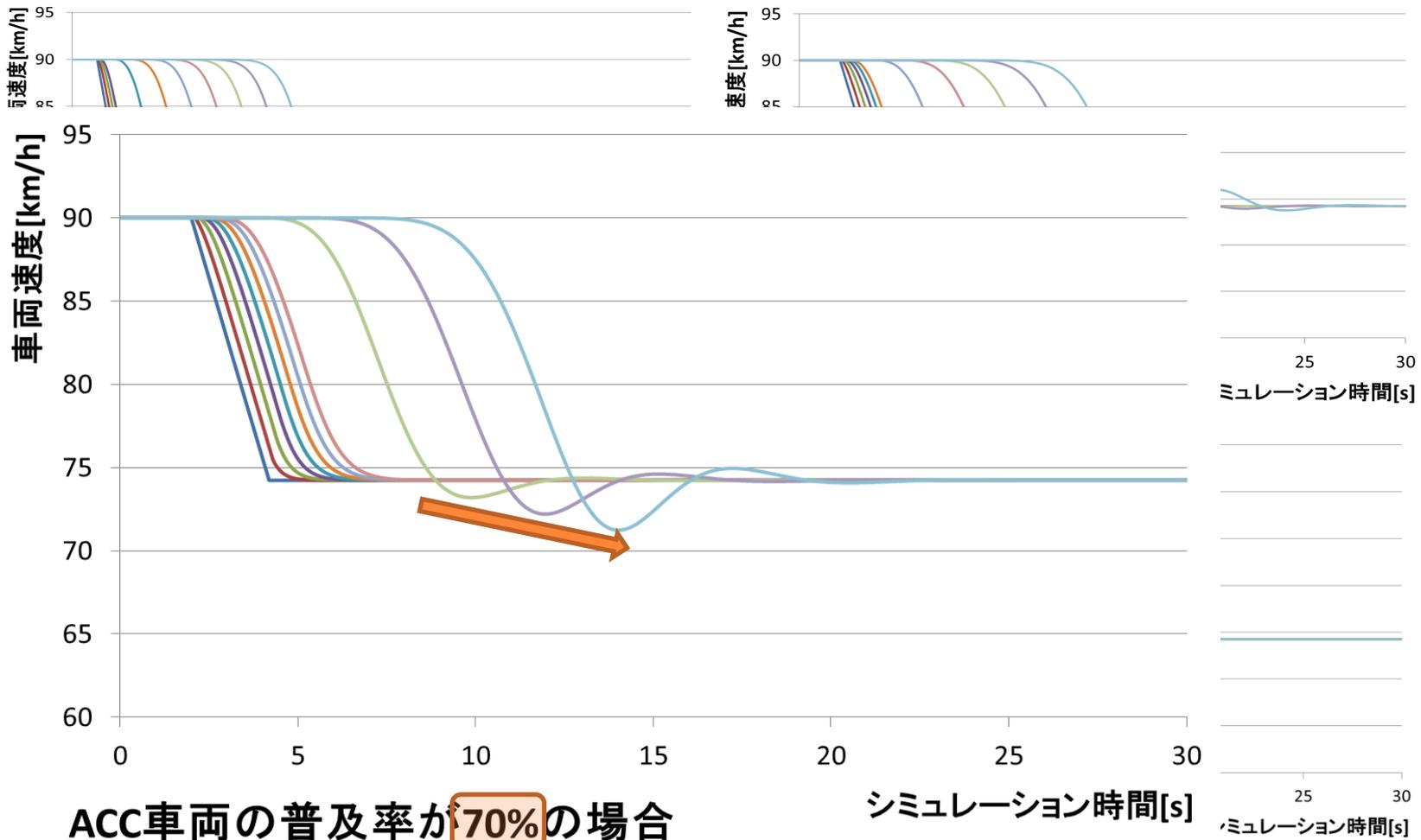
ACC車両の普及率が70%の場合

ACC車両の普及率が100%の場合

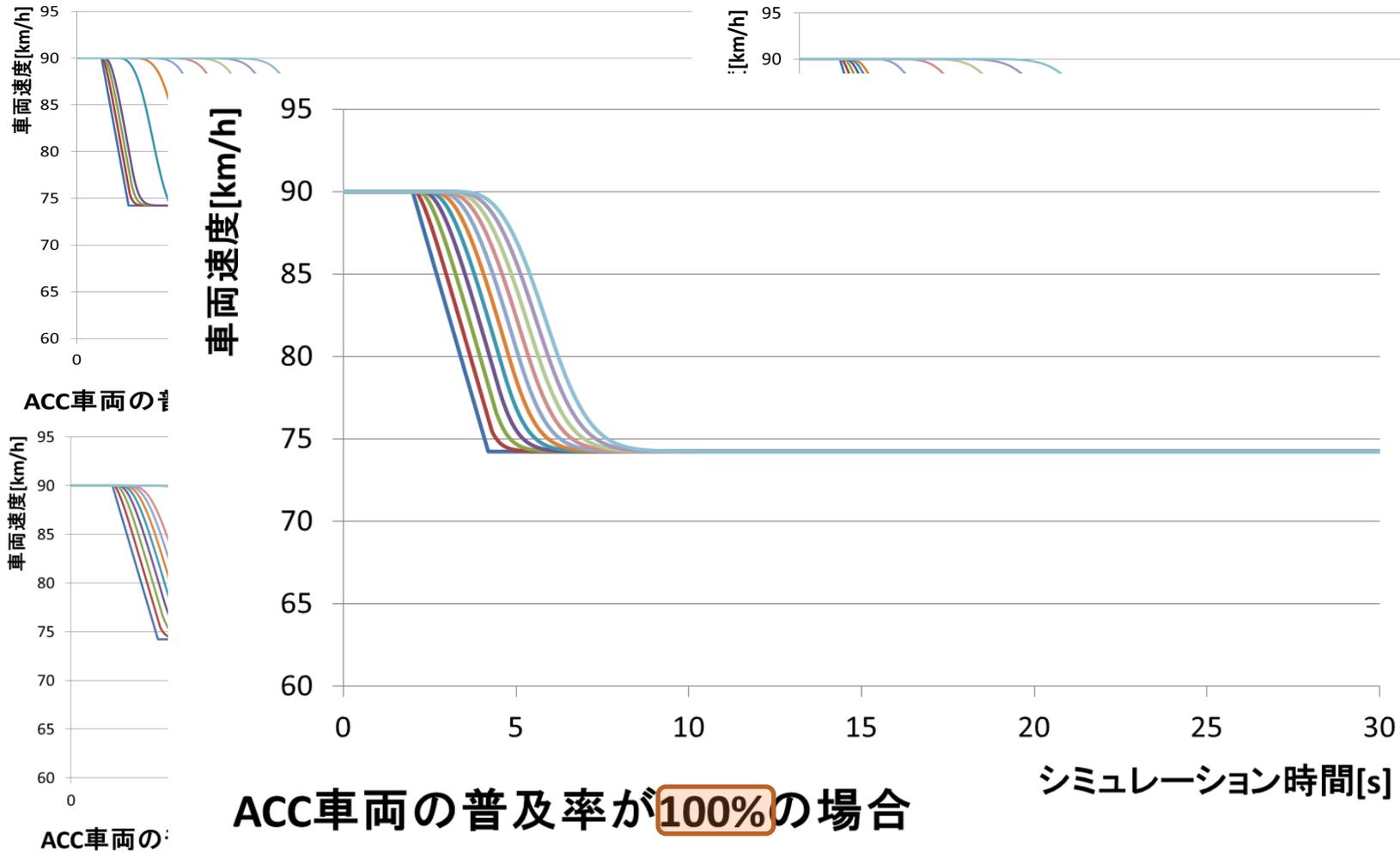
ACCの普及率別の各車両の速度変化



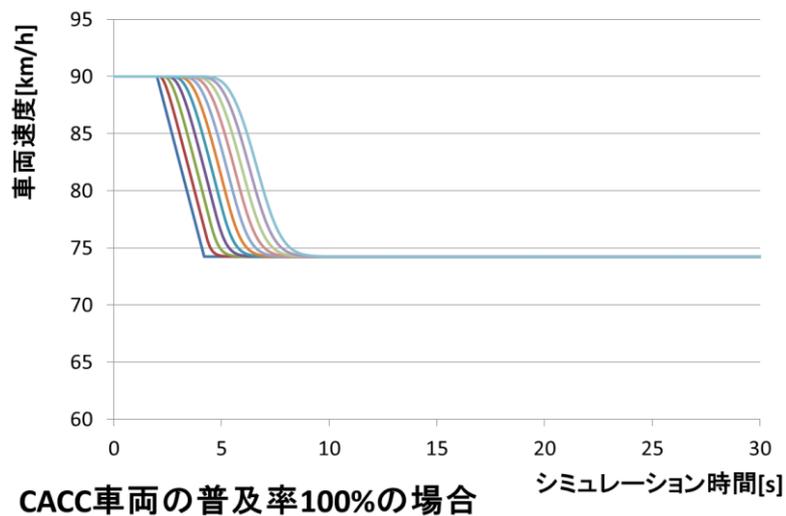
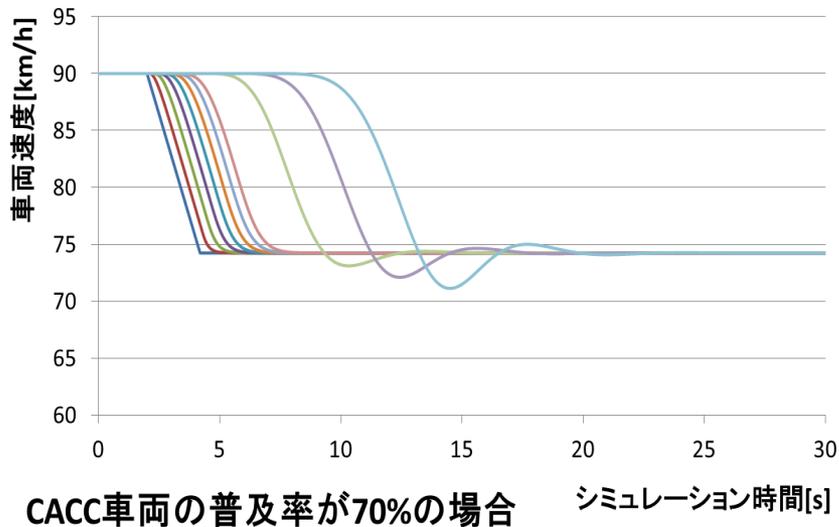
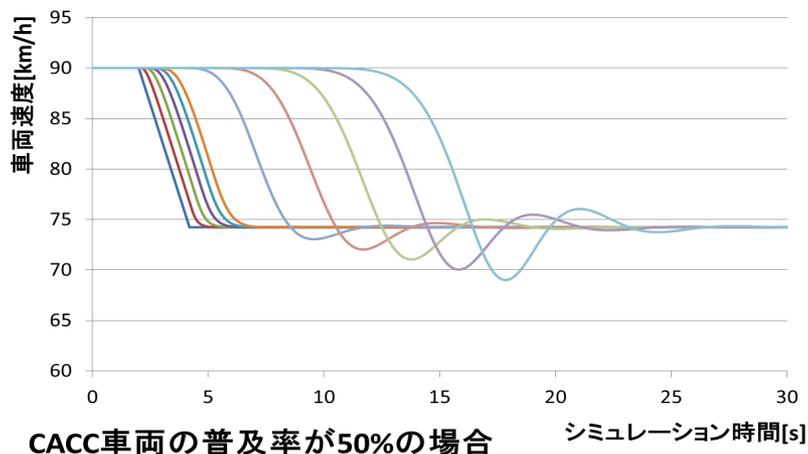
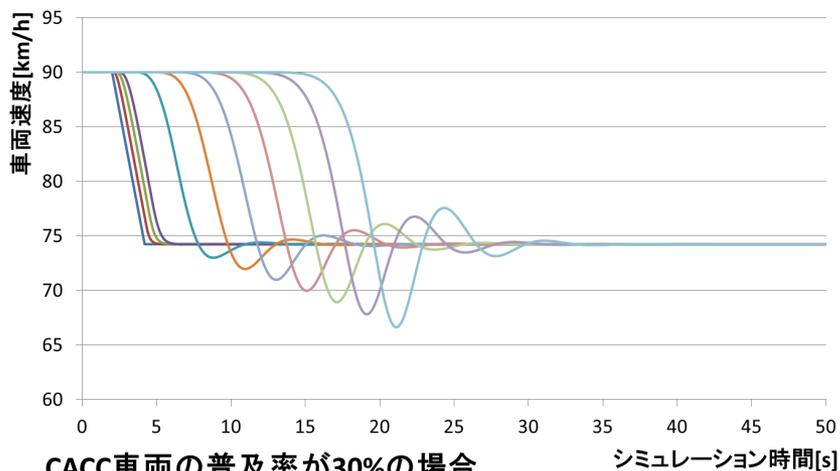
ACCの普及率別の各車両の速度変化



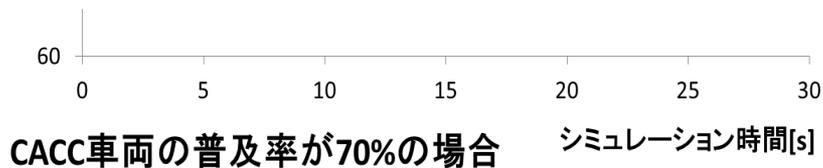
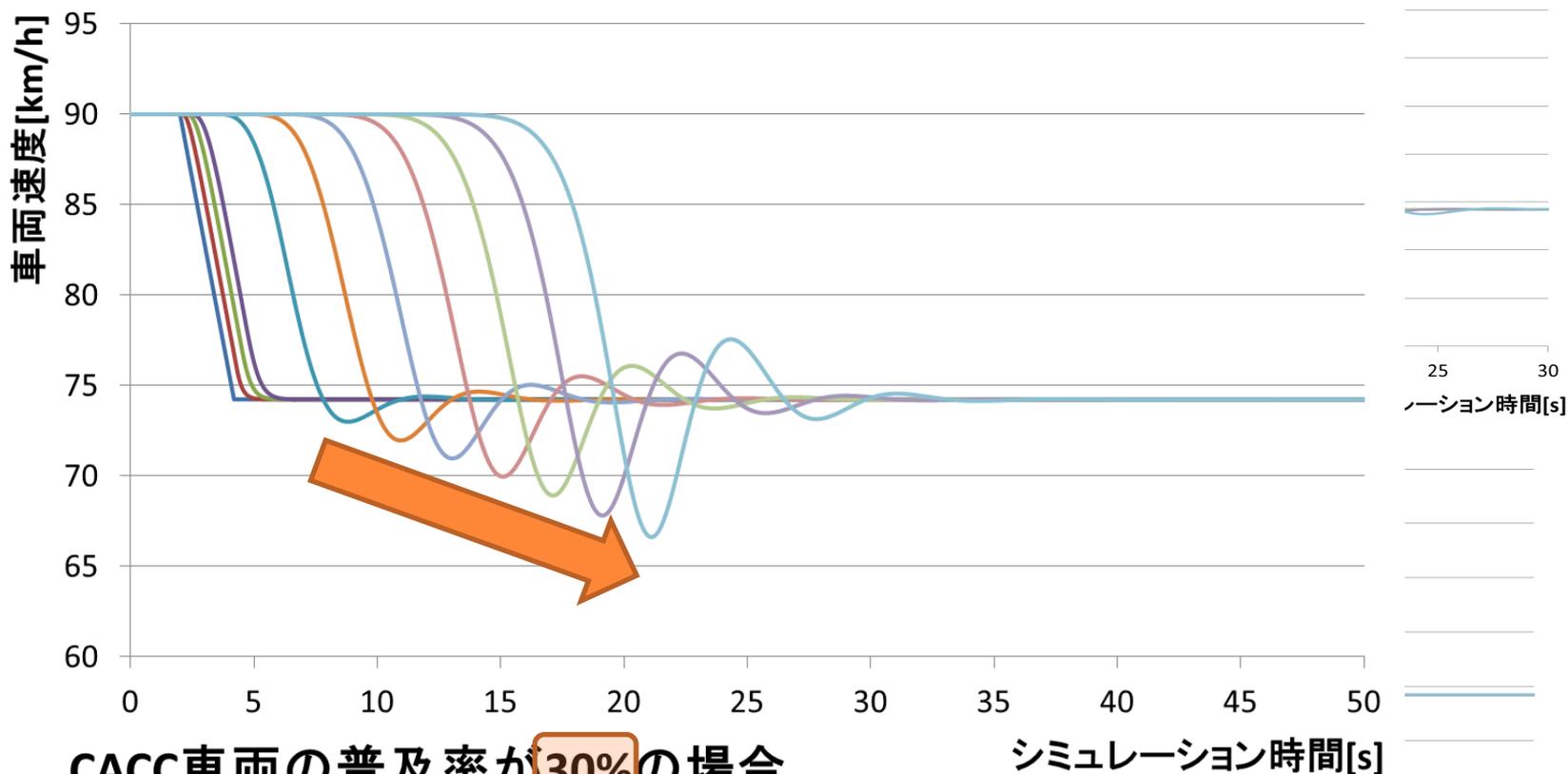
ACCの普及率別の各車両の速度変化



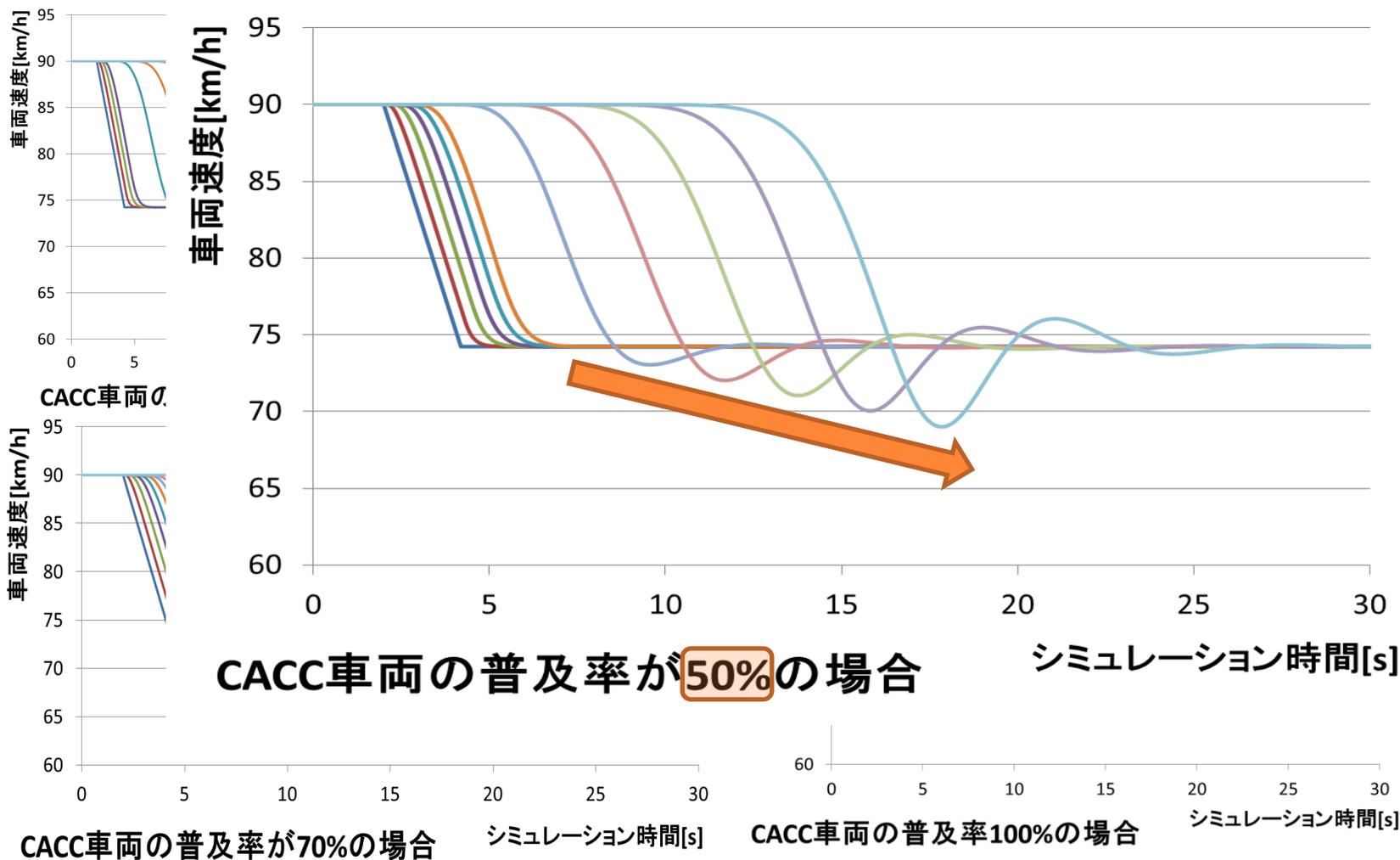
CACCの普及率別の各車両の速度変化



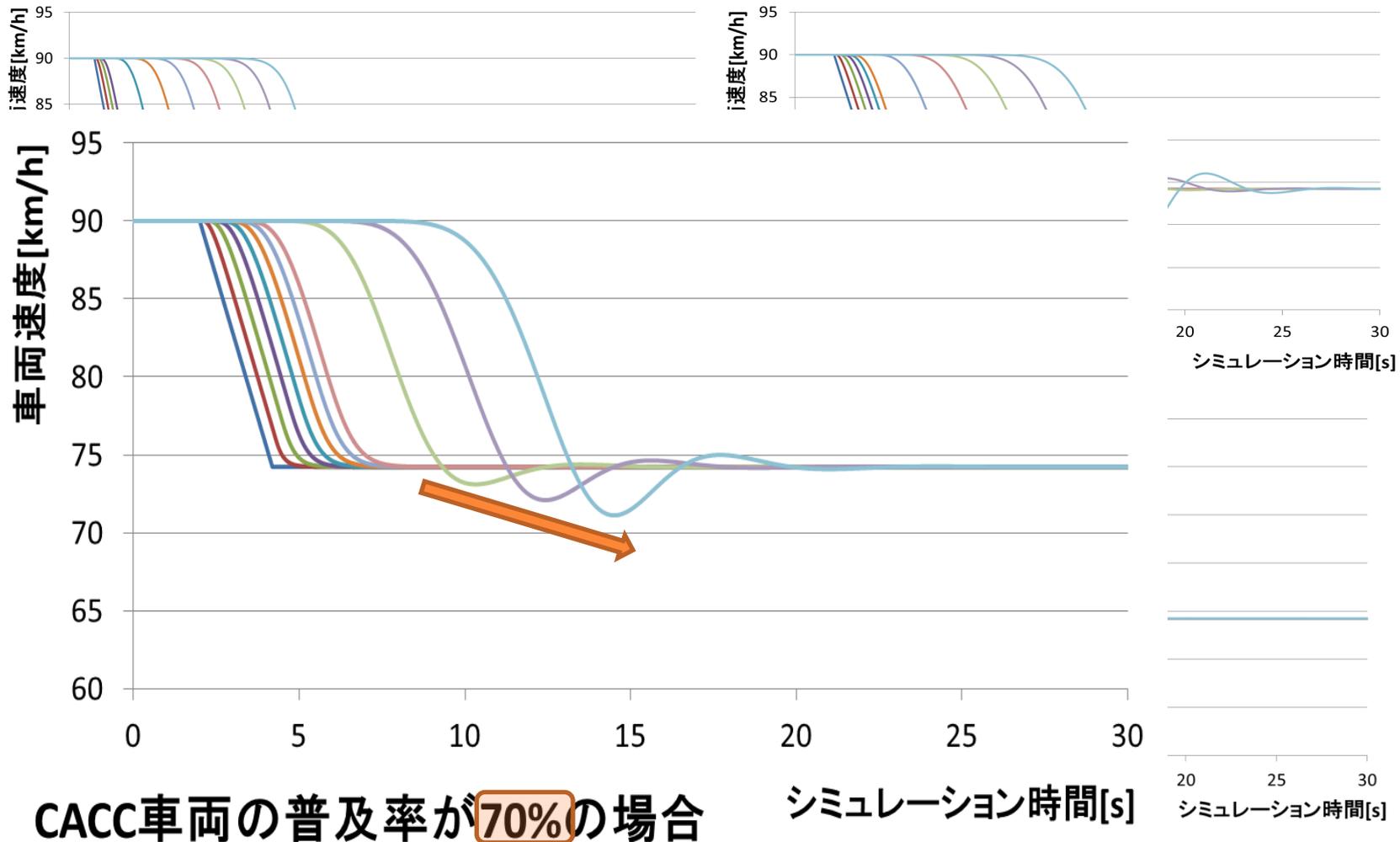
CACCの普及率別の各車両の速度変化



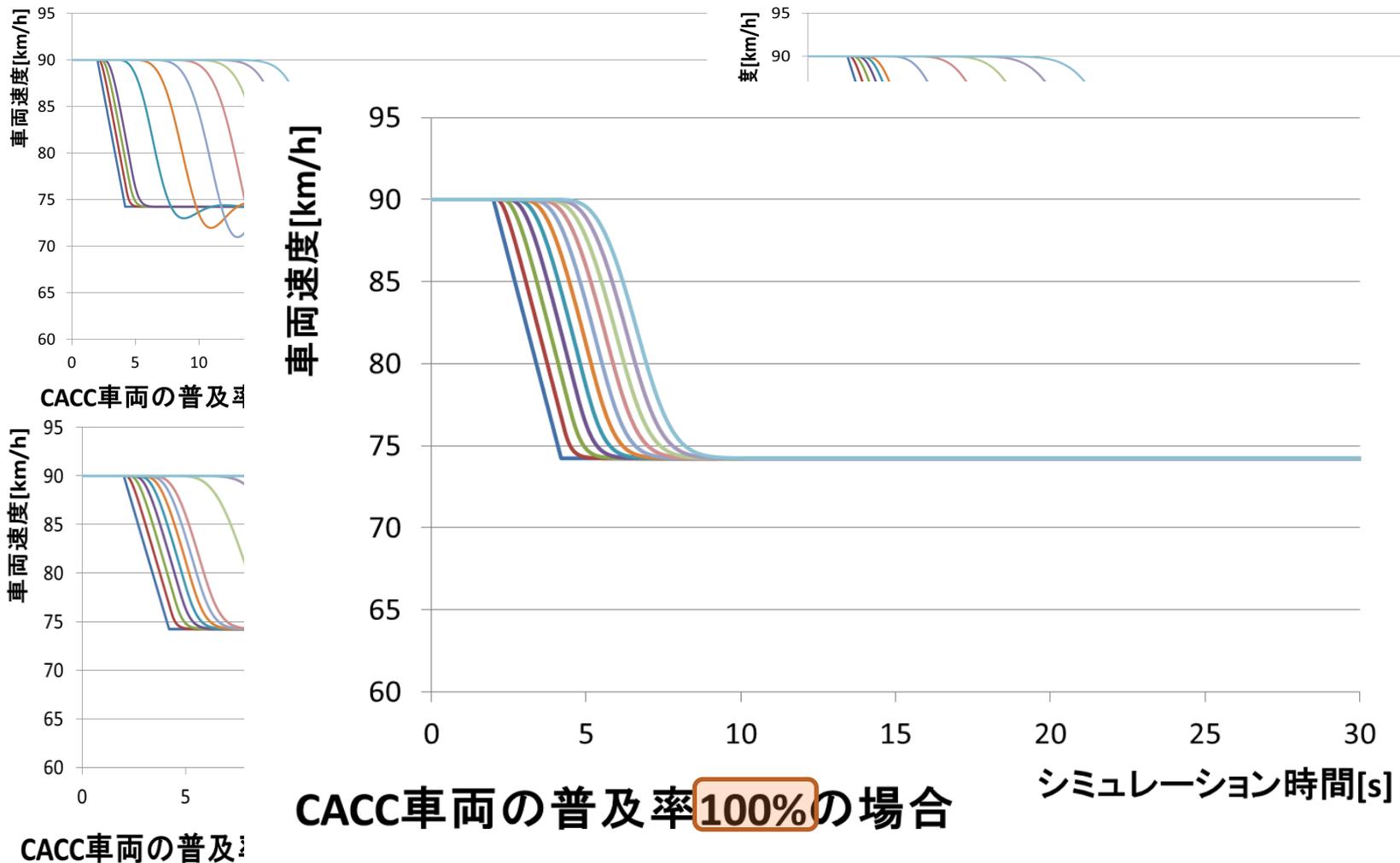
CACCの普及率別の 各車両の速度変化



CACCの普及率別の各車両の速度変化

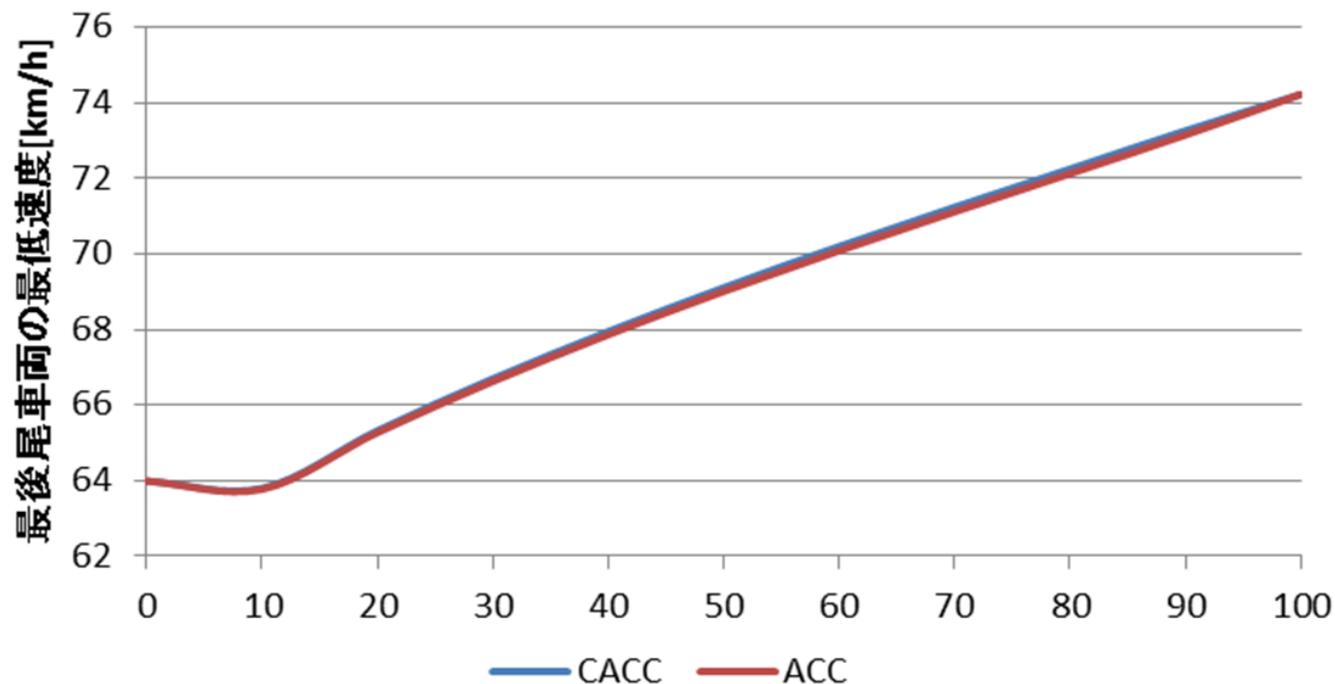


CACCの普及率別の各車両の速度変化



車群内の最小速度と普及率の関係

- 今回のシミュレーションでは，CACCとACCの差は無かった

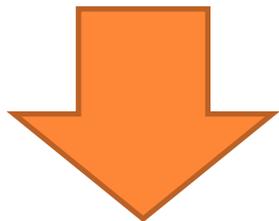


普及率別の最後尾車両の速度変化

普及率[%]

CACCとACCの追従性能の比較

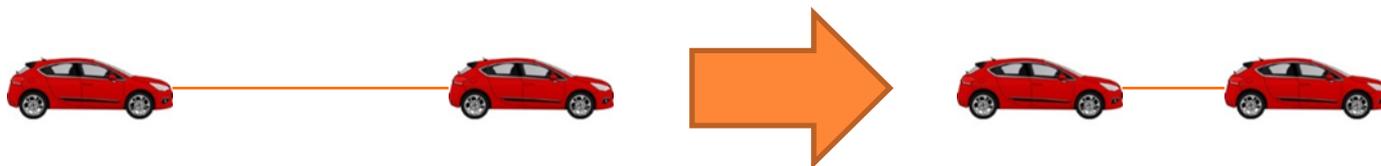
- 人間が自然と感じる車間距離30[m]では渋滞改善効果の差が小さい
- CACCは、前方車両の加速度を制御に取り入れるためより高い精度の制御が可能



- CACCは車間をより短縮して走行できるのが利点

追従能力の実験環境

- 高速道路での玉突き事故(11台)を想定する
- 先頭車両が100[km/h]での走行状態から加速度 $-4.0[\text{m/s}^2]$ で50[km/h]まで減速する
- 前方車両と衝突することなく全ての車両が同じ速度に収束できた場合、そのシミュレーションは成功とする
- 加速度が無意味に大きくなるように $\pm 5.0[\text{m/s}^2]$ を超える場合はシミュレーションを停止する



衝突しない車間距離と制御ゲイン

	最短車間距離 [m]	k_1 or k_3	k_2
CACC	5.7	32.9	0.4
ACC	12.9	53.7	

CACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_1 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_2 \{\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i+1}(t)\}$$

ACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

衝突しない車間距離と制御ゲイン

短い車間距離でも衝突しない

	最短車間距離 [m]	k_1 or k_3	k_2
CACC	5.7	32.9	0.4
ACC	12.9	53.7	

CACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_1 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)} + k_2 \{\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i+1}(t)\}$$

ACCの追従モデル

$$\ddot{x}_{i+1}(t+T_A) = k_3 \frac{\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)}{x_i(t) - x_{i+1}(t)}$$

普及率別の渋滞改善効果と追従能力のまとめと今後の課題

まとめ

- CACCやACCはサグ渋滞を改善できる可能性がある
- 車間距離が大きいとCACCとACCの渋滞改善効果の差は小さい
- ACCよりCACCの方が短い車間での走行が可能である

課題

- CACCの車両をバラバラに車群の中に挿入した場合の挙動の確認
- 車間を一定に保つ新たな項を追加し、さらに精密な制御にする