

特集 実用燃費向上を目的とする車車間通信を利用したACC制御*

Adaptive Cruise Control Using Vehicle-to-Vehicle Communication for Improvement in Fuel Economy in Actual Traffic

伊佐 治和美
Kazuyoshi ISAJI

津留 直彦
Naohiko TSURU

森川 翔
Shou MORIKAWA

Conventional ACC cannot detect the traffic situation other than the preceding vehicle. For this reason, ACC will accelerate vehicles more than the velocity of vehicles in a traffic jam. Vehicles needlessly accelerate and decelerate, thus reducing fuel economy.

In this report, we examined an ACC system which suppresses unnecessary acceleration by using vehicle-to-vehicle (V2V) communication. As a result, we confirmed that such ACC improves practical fuel economy in actual vehicle evaluation and simulation.

Key words : Vehicle-to-Vehicle Communication, Fuel Economy, Adaptive Cruise Control

まえがき

地球温暖化防止が叫ばれてから久しく、政府は2020年までの温室効果ガス1990年比25%削減という従来目標の下方修正作業に着手したものの、自主的な削減努力を進めると同時に、今後本格化する京都議定書延長後の枠組み議論の中で主導的な役割を果たす意向を示している。日本では温暖化の主因といわれるCO₂の約20%は自動車の原因と言われており、その排出量は増加傾向にあり¹⁾、CO₂排出量低減は急務となっている。乗用車の燃費が10%向上すれば全CO₂排出量の1%が低減可能との試算もあり²⁾、自動車の省燃費技術の開発はその重要性を増している。

筆者らは、ドライバの認知・判断・操作の結果としての車両状態量から、例えば不注意な操作といったドライバ状態を見積るものとして接近離間状態評価指標 K_{dB} を提案し³⁾、この指標を用いてエキスパートドライバの減速開始タイミング、スムーズな減速パターンのモデル化を行ってきた^{4) 5) 6)}。

さらに一般ドライバの個人差・個人内差を考慮した追従挙動のモデル化をおこない、 K_{dB} を用いたACC (Adaptive Cruise Control, 以下 K_{dB} -ACCと略す) モデルと一般ドライバ相当の追従挙動モデルを用い、高速道路路上の車群において先頭車両が減速したときの後続車両の挙動をシミュレーションで評価した結果、 K_{dB} -ACCを使用した後続車両の速度低下が少なく、燃料消費量の低減を図ることができることを報告し⁷⁾、また

一般道における先行車両に対する追従走行においても、一般ドライバの70%にとって K_{dB} -ACCを用いることにより燃費の良い走行ができることを報告した⁸⁾。

しかし、一般にミリ波レーダ、LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) 等の自律センサを用いたACC制御では先行車両以外の交通状況を把握できないため、自車両進行方向遠方の道路路上に渋滞があっても先行車両が遠方の渋滞に関係なく加減速行動をおこなうとこれに追従してしまい、自車両もむだな加減速行動を強いられ、燃費の悪化を招くことになる。

不必要な加減速や渋滞等の交通流により発生しているむだな燃料消費をITS (Intelligent Transport Systems) により軽減させようとする試みとして、NEDO (独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) による、大型トラック車群において車間距離を詰め、空気抵抗を減少させることで省燃費効果を得る自動運転及び隊列走行がある⁹⁾。しかし、大型トラックに対し比較的空力性能のよい乗用車での燃費改善効果は未知数である。本報では乗用車にも適用可能な燃費改善策として車車間通信 (Vehicle-to-Vehicle Communication, 以下V2Vと略す) の利用を検討した。

車車間通信を用いた車群安定性に関する先行研究として、自車両が属する車群で複数の先行車両から車車間通信によって車速や位置等の情報を取得し車群安定性を保つACCがある¹⁰⁾。一方、NHTSA (米国運輸省道路交通安全局) では車車間通信の普及が車両安全シ

*2012年7月24日 原稿受理

システムの適用範囲を拡大できるものとして2013年までに技術及び潜在的な課題を検討する¹¹⁾としている等、各国で車車間通信実用化に向けた取り組みが活発に行われている。しかし、車車間通信を活用した車両モデルによる省燃費効果に言及した報告事例は見当たらない。

本報では、車車間通信を利用することで不要な加速を抑えるACC制御を検討し、実車評価およびシミュレーションにより実用燃費向上効果を確認すると共に、燃費向上効果の理由を明らかにする。

1. K_{dB} -ACC, 車車間通信利用型ACC概要

1.1 接近離間状態評価指標 K_{dB}

Fig. 1に示すように先行車両に対し車間距離 D [m], 相対速度 V_r [m/s]で追従走行している場面において、ドライバの網膜上に投影される先行車両の見かけ上の面積 S [m²]は (1) 式のようにあらわされる。

$$S \propto \frac{1}{D^2} \quad \dots (1)$$

先行車両の見かけ上の面積 S [m²]の時間変化率 dS/dt は (2) 式のようにあらわすことができ、これを先行車両の面積の時間変化率 K [1/m²·s]とする。

$$\frac{dS}{dt} \propto \frac{d}{dt} \frac{1}{D^2} = -2 \times \frac{V_r}{D^3} = K \quad \dots (2)$$

この先行車両の面積の時間変化率 K をデシベル表示し、自車両の100 [m]前方を $V_r = -0.09$ [km/h]で接近してくる先行車両の面積の時間変化率 K_0 [1/m²·s]をドライバが面積変化に気づくことができる最小検出限界とし、(3)式のように $K_0 = 5 \times 10^{-8}$ [1/m²·s]のときの値を0 [dB]とし、(4)式のようにあらわす指標を接近離間状態評価指標 K_{dB} [dB]と定義する。また、 K_{dB} に対し先行車両速度 V_p [m/s]を用いてドライバの危険感を補正した補正接近離間状態評価指標 $K_{dB,c}$ を(5)式とする。

$$K_0 = -2 \times \frac{V_r}{D^3} = -2 \times \frac{(-0.09)}{3.6} / 100^3 = 5 \times 10^{-8} \quad \dots (3)$$

$$K_{dB} = \begin{cases} 10 \times \log_{10} \left(\frac{K}{K_0} \right) \operatorname{sgn}(-V_r) \\ = 10 \times \log_{10} \left(4 \times 10^7 \times \frac{V_r}{D^3} \right) \operatorname{sgn}(-V_r) \\ \quad \left(4 \times 10^7 \times \frac{V_r}{D^3} > 1 \right) \\ 0 \\ \quad \left(4 \times 10^7 \times \frac{V_r}{D^3} \leq 1 \right) \end{cases} \quad \dots (4)$$

$$K_{dB,c}(a) = \begin{cases} 10 \times \log_{10} \left(4 \times 10^7 \times \frac{V_r - aV_p}{D^3} \right) \operatorname{sgn}(-V_r + aV_p) \\ \quad \left(4 \times 10^7 \times \frac{V_r - aV_p}{D^3} > 1 \right) \\ 0 \\ \quad \left(4 \times 10^7 \times \frac{V_r - aV_p}{D^3} \leq 1 \right) \end{cases} \quad \dots (5)$$

1.2 加減速開始タイミングモデル

従来から提案しているエキスパートドライバの緊急時の減速開始タイミングをモデル化したFig. 2に示すブレーキ判別式をFig. 3に示すように Δc [dB]だけオフセットした{ブレーキ判別式 + Δc } [dB]を K_{dB} -ACCの減速開始タイミングとし、{ブレーキ判別式 + Δc - I } [dB]をエンジンブレーキ開始及び加速目標（加速終了）とした。 Δc は一般ドライバの通常追従走行時における Δc 分布の中央値にならない、 $\Delta c = -3$ [dB]を使用した。また加速開始の条件は、Fig. 3に示す加速目標（加速

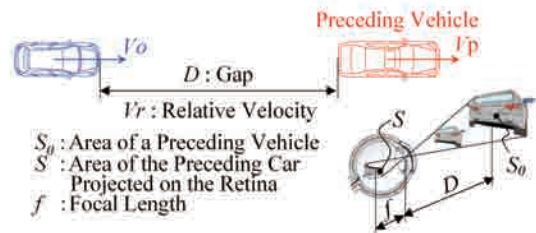


Fig. 1 Vehicle-Following Situation and Visual Input on Retina

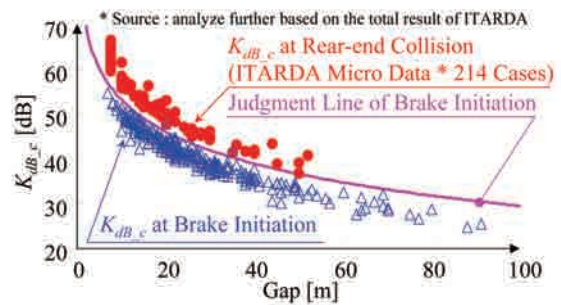


Fig. 2 Judgment Line of Brake Initiation

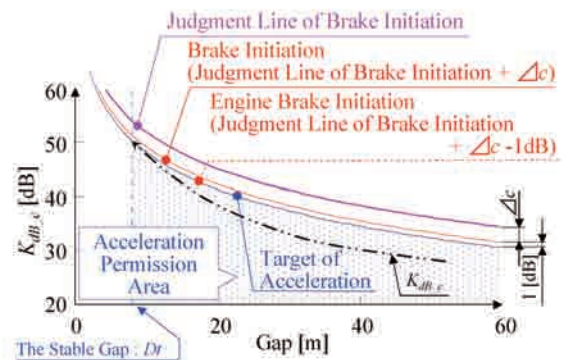


Fig. 3 Judgment of Acceleration

終了) よりも二点鎖線で示す現在の $K_{dB,c}$ が下回っているときとした。加速は加速目標ライン上で $V_r = 0$ [m/s]となる安定車間距離 D_r [m]で終了する。

ブレーキ判別式は (6) 式である。

$$K_{dB,c}(a) = b \times \log_{10} D + c$$

$$= -22.66 \times \log_{10} D + 74.71 \quad \dots (6)$$

$$a = 0.2, b = -22.66, c = 74.71$$

1.3 減速プロファイルモデル

K_{dB} -ACCの減速プロファイルモデルとしてエキスパートドライバの減速行動を模擬し、減速開始タイミングを起点とした数式モデルで表される減速プロファイルを用いた⁵⁾。つまり、Fig. 4で示すように、減速開始後の K_{dB} の距離微分値が一定となる特徴から、減速開始後の K_{dB} の目標値 $K_{dB,t}$ [dB]は (7) 式で与えられる。

$$K_{dB,t}(D(t)) = \frac{-13.03}{D_0} \times D(t) + K_{dB,0} + 13.03$$

D_0 : 減速開始時点の距離 $\dots (7)$
 $K_{dB,0}$: 減速開始時点の K_{dB}

この式と K_{dB} の定義式(4)から目標相対速度 $V_{r,t}$ [m/s]は (8) 式となる。

$$V_{r,t} = -2.5 \times D(t)^3 \times 10^{\left(\frac{K_{dB,t}(D(t)) - 10}{10}\right)} \quad \dots (8)$$

目標相対速度と現在の相対速度の差分を一定の時間で除した値を減速度出力とした。

1.4 加速プロファイルモデル

加速プロファイルは前述のFig. 3に示す加速目標 $K_{dB,c}$ そのものを加速度出力の目標とするモデルとし、加速目標から算出される目標相対速度と現在の相対速度の差分を一定の時間で除した値を加速度出力とした。

1.5 車車間通信利用型ACCモデル

自車両との車間距離 D [m]に存在する速度 V_p [km/h]を持つ先行車両とは別に、Fig. 5に示す自車両より距離 D_c [m]先を走行中の、速度 V_c [km/h]をもち自車両と車速や位置情報の通信が可能な車両(以下、通信車両と略す)を設定した。但し、 $D_c > D$ である。

本報においては、車車間通信利用型ACCは1.2節～1.4節で示した K_{dB} -ACCモデルを基本とし、通信車両速度 V_c を受信し、(9)～(11)式によって定義する上限速度 V_{max} [km/h]以上に加速させないロジックを加えたモデ

ルとした。

自車速度 V_o [km/h]が V_{max} を上回る場合、エンジンブレーキ相当の -0.3 [m/s²]減速を行う。ここで、 $V_{c'} = V_c + 5$ [km/h]であり、 V_p が $V_{c'}$ と近い状態のときに最大で $V_r = 5$ [km/h]までは加速許可とした。

$V_p > V_{c'}$, かつ $V_o > V_c$ のとき

$$V_{max} = V_o \quad \dots (9)$$

$V_p > V_{c'}$, かつ $V_o \leq V_c$ のとき

$$V_{max} = V_c \quad \dots (10)$$

$V_p \leq V_{c'}$ のとき

$$V_{max} = V_p + 5$$
 [km/h] $\dots (11)$

V_p が $V_{c'}$ より大きい場合、Fig. 6 ①のように V_o に対して先行車両が加速しても $V_{max} = V_o$ とし加速せず、Fig. 6 ②のように先行車両が V_{max} より減速すると従来の K_{dB} -ACCと同様の減速制御を行う。また、Fig. 6 ③のように V_p が $V_{c'}$ より小さい場合は $V_p + 5$ [km/h]を V_{max} とする。

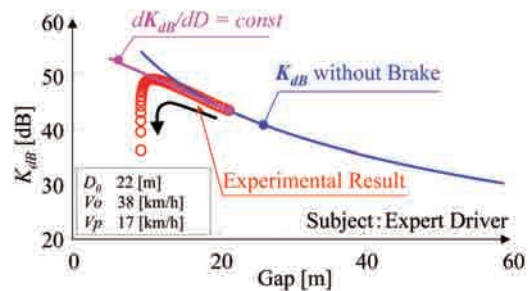


Fig. 4 K_{dB} Management of Expert Driver

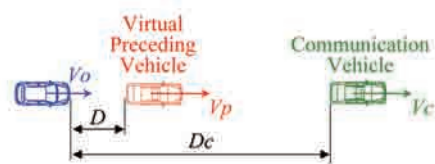


Fig. 5 Placement of the Communication Vehicle

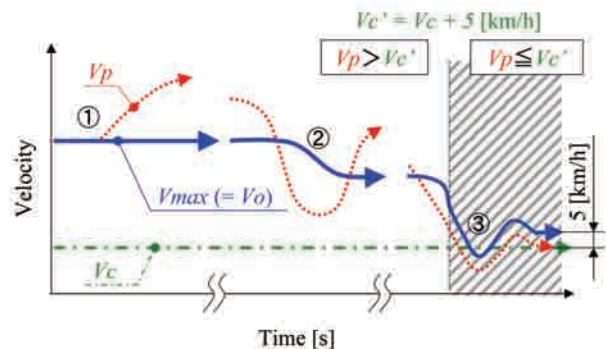


Fig. 6 Definition of Maximum Velocity (V_{max})

Table 1 Experimental Result (All)

No.	Average of Fuel Economy [km/L]	D_c [m]	V_c [km/h]	Pattern of the Preceding Vehicle [km/h]	V2V
1	12.08	1000	60	80-90	Off
2	13.02	1000	60	80-90	Off
3	13.51	1000	60	80-90	On 3G
4	13.03	1000	20	80-90	Off
5	14.05	1000	20	80-90	On 3G
6	11.23	500	60	80-90	Off
7	13.52	500	60	80-90	On WSU
8	8.77	500	60	80-100	Off
9	13.79	500	60	80-100	On WSU
10	11.58	1000	60	80-100	Off
11	13.76	1000	60	80-100	On 3G

2. 実車評価

2.1 実車評価条件

実車評価はFig. 5に示すように、速度 V_o の自車両(4.3Lセダン系乗用車)と、速度 V_c の通信車両(2.5Lセダン系乗用車)を用いて実施した。自車両初期速度 $V_{o_initial} = 80$ [km/h], ACCのセット車速 $V_{o_set} = 100$ [km/h]とした。先行車両の走行状態のバラツキに起因する燃費の差異が生じないように、先行車両の速度プロファイルを同一とする必要があるため速度 V_p [km/h]の先行車両は仮想先行車両とした。 K_{dB} -ACCモデル内に、Fig. 7左部分に示す速度プロファイルを仮想先行車両の速度プロファイルとして組込んだ。 K_{dB} -ACCモデルを搭載した自車両は繰り返し同じ速度プロファイルの仮想先行車両に追従することが可能であり、試験の再現性は高い。ACC制御は仮想先行車両に対して行うものとした。仮想先行車両の自律センサ(前方監視センサ)が認識可能な距離は150 [m]とした。仮想先行車両の速度プロファイルは、通信車両が仮想先行車両の自律センサ認識範囲外にいるときは、“5秒間現在の速度を保持 \Rightarrow V_{max} まで加速 \Rightarrow 5秒間 V_{max} を保持 \Rightarrow 80 [km/h]まで減速 \Rightarrow 5秒間80 [km/h]を保持 \Rightarrow . . .”を

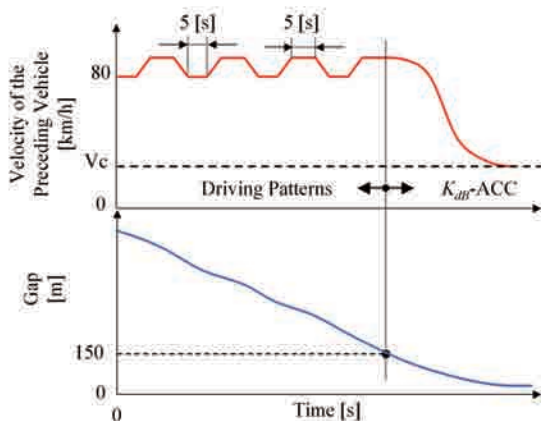


Fig. 7 Pattern of the Preceding Vehicle Velocity

繰り返し、通信車両が自律センサ認識範囲に入ったときには1章で述べた K_{dB} -ACCによるFig. 7右部分に示すように減速制御を行うプロファイルとした。自車両と仮想先行車両の初期車間距離は、Fig. 4に示すように加速目標ライン上で $V_r = 0$ [km/h]となる安定車間距離 D_t [m]とした。

Fig. 8は通信車両との距離 D_c [m], 通信車両速度 V_c [km/h], 先行車両速度 V_p [km/h], 先行車両加減速度 $G_{x,p}$ [m/s²], および車車間通信の有無での評価パターンの組み合わせを示したものである。通信機は通信車両との距離によって車車間通信機(Wireless Safety Unit, 以下WSUと略す)および第3世代移动通信システム(以下3Gと略す)を使用した。

燃料消費量 [L]はエンジン回転数 N_e [rpm], シフト位置 P_s [-], スロットル開度 θ_{th} [deg], 自車両速度 V_o [km/h]の関数として算出した。

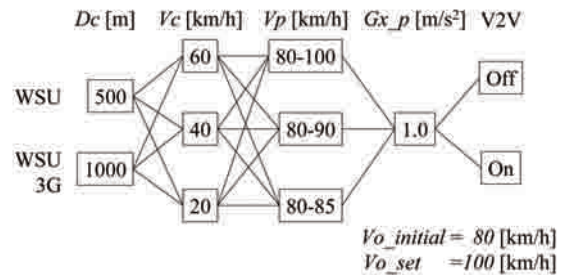


Fig. 8 Pattern of Experiment



Fig. 9 Experimental Proving Ground

Table 2 Experimental Result (According to condition)

V_c [km/h]	D_c [m]	V_p [km/h]	No.		Average of Fuel Economy [km/L]		Fuel Economy Improvement Rate [%]	
			V2V Off	V2V On	V2V Off	V2V On		
60	500 (WSU)	80-90	6	7	11.2	13.5	20.4	20.0 (Average)
		80-100	8	9	8.8	13.8	57.2	
	1000 (3G)	80-90	1	3	12.1	13.5	11.8	
			2	3	13.0	13.5	3.8	
		80-100	10	11	11.6	13.8	18.8	
			4	5	13.0	14.1	7.8	

評価はFig. 9に示す，デンソー網走テストセンター高速周回路で行った。

2.2 実車評価結果

Table 1に評価結果を示す。これを同一条件で従来の K_{dB} -ACCに対する車車間通信利用型ACCの燃費改善効果を平均効果として整理したものがTable 2である。評価の中には，通信車両と自車両の走行軌跡の不一致，通信車両と自車両の速度の不一致などによる通信車両の推定走行距離の誤差が大きく通信車両の位置推定がうまくいかず，仮想先行車両が通信車両を追い越してしまうというような現象も生じたため，それらのデータは除外した。また，Table 1, Table 2の平均燃費は自車両と通信車両の車間距離 D_c が150 [m]となるまでの区間の燃料消費量より算出した。

Fig. 10は通信車両速度 $V_c = 60$ [km/h]，通信車両と

の距離 $D_c = 500$ [m]，先行車両速度パターン $V_p = 80 \leftrightarrow 100$ [km/h] の場合の車車間通信無/有 (No.8/No.9) を比較，Fig. 11は $V_c = 60$ [km/h]， $D_c = 1000$ [m]， $V_p = 80 \leftrightarrow 100$ [km/h] の場合の車車間通信無/有 (No.10/No.11) を比較したものである。グラフは上から通信車両速度・仮想先行車速度・自車速度，通信車両との車間距離，自車両平均燃費，車車間通信無しに対する車車間通信有りの場合の燃費向上率を示したものである。

Table 2示すようにFig. 10, Fig. 11に示した例を含め，いずれの条件でも燃費向上効果を確認することができた。

2.3 実車評価の課題

実車評価では自車両と通信車両の車間距離 D_c が150 [m]となる時点での車車間通信による燃費向上効果を

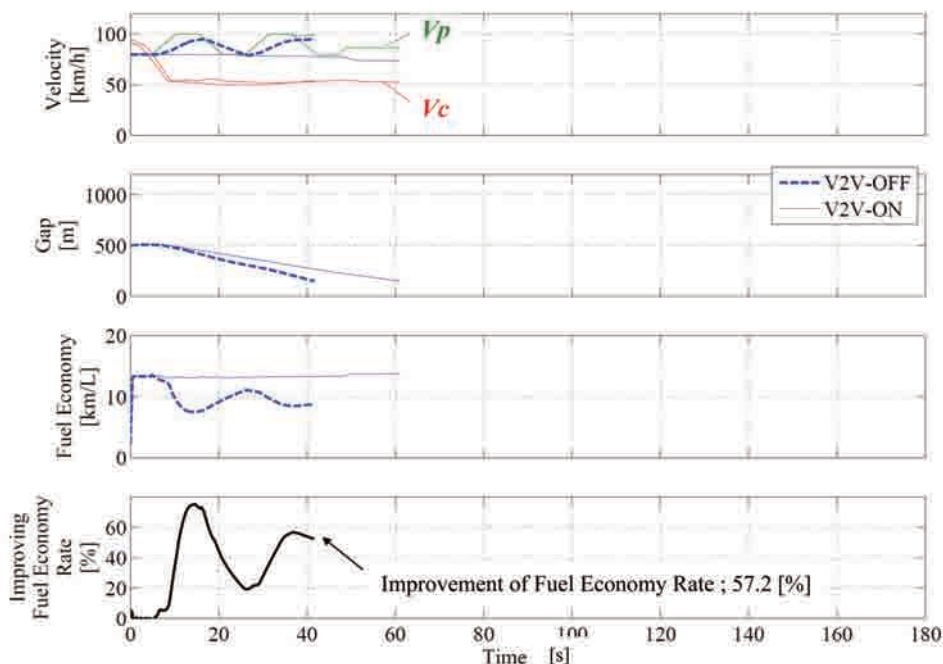


Fig. 10 $V_p = 80$ to 100 [km/h], $D_c = 500$ [m]

確認することができたが、Fig. 10およびFig. 11最下段の燃費向上率のグラフより分かるように、通信車両に追い付くまでの時間が短く車車間通信無しの場合の平均燃費が安定しないことにより燃費向上率は変動し、比較する時点によって燃費向上率は大きく変わってしまう。

そこで平均的な燃費向上率を確認するために、通信車両を無限遠方相当に配置し、平均燃費が安定した時点での車車間通信有りの場合と車車間通信無しの場合との燃費をシミュレーションにて比較することとした。

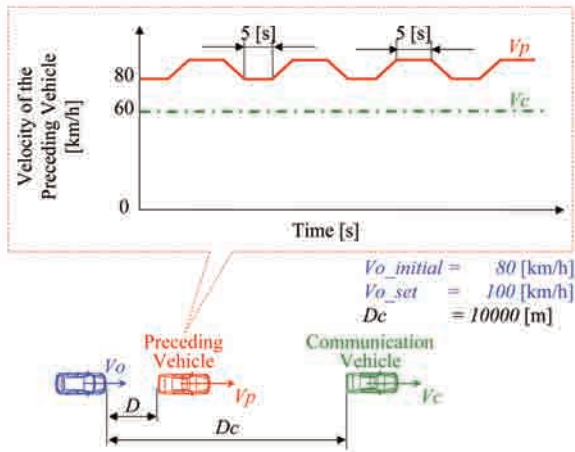


Fig. 12 Simulation Conditions

3. 安定時の平均燃費シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

シミュレーションはFig. 12に示すように通信車両、先行車両、自車両の3車両で走行開始し、自車両初期速度 $V_o_initial = 80$ [km/h]、ACCセット車速 $V_o_set = 100$ [km/h]と、通信車両速度 $V_c = 60$ [km/h]一定、通信車両との車間距離 $D_c = 10000$ [m] (無限遠相当)でおこなった。自車両と先行車両の初期車間距離は2章の実車評価と同様に安定車間距離 D_t とした。先行車両の速度パターンも2章の実車評価と同様に $V_p = 80 \Leftrightarrow 85, 80 \Leftrightarrow 90, 80 \Leftrightarrow 100$ [km/h]の3水準、加減速度 $G_{x_p} = 0.3, 1.0, 2.0$ [m/s²]の3水準とし、シミュレーション時間は平均燃費が安定するのに十分な時間である1000 [s]とした。

3.2 シミュレーション結果

Fig. 13に先行車両加減速度 $G_{x_p} = 0.3$ [m/s²]時の車車間通信有りの場合と、車車間通信無しの場合の先行車両速度 $V_p = 80 \Leftrightarrow 85, 80 \Leftrightarrow 90, 80 \Leftrightarrow 100$ [km/h] 時のシミュレーション結果を示す。

先行車両の周期的なパターン走行に追従してしまう従来の K_{dB} -ACC に対して車車間通信利用型ACCの平均燃費の方が良かった。

このとき車車間通信利用型ACCは先行車両の加減速に追従することなく一定速度で走行しており、これはCC (Cruise Control) の燃費向上率と等価ということになる。

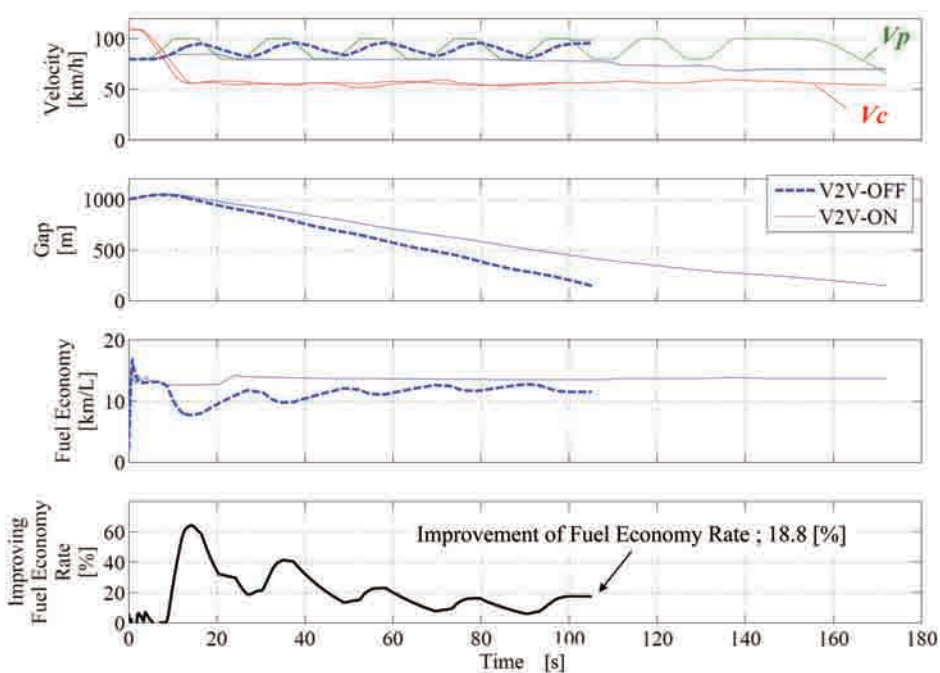


Fig. 11 $V_p = 80$ to 100 [km/h], $D_c = 1000$ [m]

Table 3 Fuel Economy Improvement Rate in Case of V2V Communication Versus the Conventional K_{dB} -ACC

Pattern of Preceding Vehicle Velocity [km/h]	Decelerations and Accelerations of Preceding Vehicle [m/s ²]			
	0	0.3	2.0	0
80-100	0.0	25.8	34.6	36.5
80-90	0.0	19.3	25.3	26.1
80-85	0.0	11.9	12.6	12.7

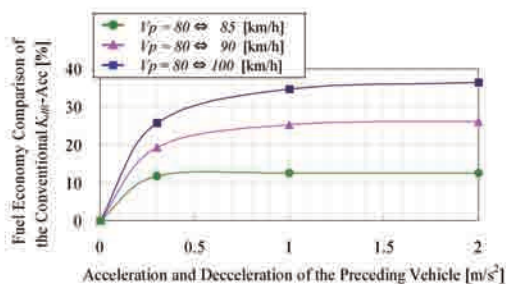


Fig. 14 Improvement Effect of Fuel Economy according to Preceding Vehicle Velocity

Table 3に全9条件における、従来の K_{dB} -ACCに対する車車間通信利用型ACCの燃費向上率を示す。Fig. 14は横軸を先行車両加減速度としたときの、各速度パターンにおける燃費向上率である。

シミュレーションをおこなった9条件では12 ~ 36 [%]の平均燃費向上を確認することができた。

以上のように、ACC制御で加減速し先行車両に追従するようなシチュエーションにおいて、一定速度で走行した場合の先行車両の加減速度別に燃費向上率を定量化することができた。

むすび

- 1 車車間通信利用型ACCの実車評価およびシミュレーションにより、加減速を繰り返す先行車両に対してむだに追従せず、一定速で走行することにより燃費が向上することを明らかにし、燃費向上効果を定量化した。
- 2 一定速度による燃費向上効果とは、見方を変えれば高速道路などで従来のACC制御により先行車両に追従するために加減速をおこなうよりも、先行車両の加減速に関係なくドライバーが自由に設定車速を変えられるCCを用いて自分のペースで一定速度を維持して走行の方が燃費が良いということになる。
- 3 今回の検討では安定時の平均燃費を知るため通信車両との車間距離を無限遠相当としたが、どの程度遠方の車両の情報を車車間通信で得るのがドライバーのフィーリングに合うのかの検討は今後の課題である。

さらに、車車間通信により先行車の速度、操舵角の情報を得ることによりワインディング路等を含む一般道へのACCの拡張を検討していく。

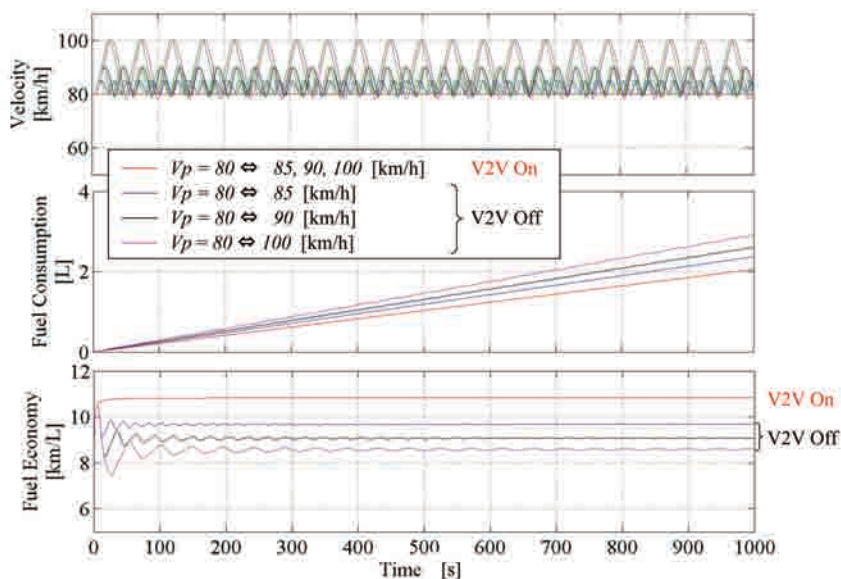


Fig. 13 Simulation Result of Preceding Vehicle Velocity Pattern (Preceding Vehicle Acceleration and Deceleration 0.3 [m/s²])

<参考文献>

- 1) 近藤美則：カタログ燃費と実用燃費－運転の仕方によって燃費はどれくらい変わるのだろうか？－，国立環境研究所ニュース，Vol.20, No.3, pp.7-9, (2001)
- 2) 誰にでもできるエコ運転術講師マニュアル，(社)日本自動車連盟
- 3) 伊佐治和美，津留直彦，和田隆広，今井啓介，土居俊一，金子弘：前後方向の接近に伴う危険状態評価に関する研究（第1報），自動車技術会論文集，Vol.38 No.2, pp.25-30, (2007)
- 4) Wada, T., Doi, S., Imai, K., Tsuru, N., Isaji, K., and Kaneko, H., "Analysis of Drivers' Behaviors in Car Following Based on A Performance Index for Approach and Alienation", SAE Transactions, Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, SAE paper 2007-01-0440, pp.306-320, (2008)
- 5) Wada, T., Doi, S., Imai, K., Tsuru, N., Isaji, K., and Kaneko, H., "Characterization of Expert Drivers' Last-Second Braking and Its Application to A Collision Avoidance System", IEEE Transactions (2010)
- 6) 伊佐治和美，津留直彦，和田隆広，土居俊一，金子弘：接近離間状態評価指標を用いたブレーキ開始タイミングの解析，自動車技術会論文集，Vol.41, No.3, pp.593-598, (2010)
- 7) 森川翔，加藤一郎，伊佐治和美，津留直彦：接近離間状態評価指標を用いた追従挙動モデルの提案，自動車技術会論文集，Vol.41, No.2, pp.189-194, (2010)
- 8) 伊佐治和美，津留直彦，森川翔：接近離間状態評価指標(K_{dB})を用いたACCによる実用燃費改善，自動車技術会論文集，Vol.43, No.3, pp.789-764, (2012)
- 9) 青木啓二，森田康裕：自動運転・隊列走行システムの開発（第1報），自動車技術会学術講演会前刷集，No.94-09, pp.1-4, (2009)
- 10) 山本吉典，瀬戸陽治，永井正夫：車車間通信を利用した車群安定ACCの研究，日本機械学会論文集（C編）73巻726号，No.06-7027, pp.379-384, (2007)
- 11) "NHTSA Vehicle Safety and Fuel Economy Rulemaking and Research Priority Plan, 2011-2013", NHTSA, (2011)

<著者>



伊佐治 和美
(いさじ かずよし)
研究開発3部
ドライバ特性研究，安全運転支援システムの開発に従事



津留 直彦
(つる なおひこ)
研究開発3部
ドライバ特性研究，安全運転支援システムの開発に従事



森川 翔
(もりかわ しょう)
デンソーテクノ（株）
ドライバモデル，安全運転支援システムの開発に従事