慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	自動車の車間距離制御システムの研究動向
Sub Title	
Author	大前, 学(Omae, Manabu)
Publisher	慶應義塾大学湘南藤沢学会
Publication year	2014
Jtitle	交通運輸情報プロジェクトレビュー No.23 (2014.) ,p.28- 33
JaLC DOI	
Abstract	現在, 自動車においては, 前走車との車間距離を維持するアダプティブクルーズコントロールが実用化されており, 近年では, 車車間通信情報を導入した協調型アダプティブクルーズコントロールの実用化に向けた開発が進められている。また, 実証実験では, 4台の大型トラックの車間距離4mでの隊列走行の実証デモが2013年に実施されている。自動車の車間距離制御においては, 単に自車が車間距離を保つだけでなく, 車群として力学的に安定な挙動となるような制御を行う必要がある。本報告では, 自動車における車間距離制御の動向と車群の力学的安定性に焦点を当てた制御の考え方について報告する。
Notes	2014年度慶應義塾大学JR東日本寄附講座報告書 慶應義塾大学交通運輸情報プロジェクト その1 : JR東日本寄附講座担当教員の活動報告
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO92001006-00000023-0028

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

自動車の車間距離制御システムの研究動向

大前　学
(慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科)

概要：
現在，自動車においては，前走車との車間距離を維持するアダプティブクルーズコントロールが実用化されており，近年では，車車間通信情報を導入した協調型アダプティブクルーズコントロールの実用化に向けた開発が進められている．また，実証実験では，4台の大型トラックの車間距離4mでの隊列走行の実証デモが2013年に実施されている．自動車の車間距離制御においては，単に自車が車間距離を保つだけでなく，車群として力学的に安定な挙動となるような制御を行う必要がある．本報告では，自動車における車間距離制御の動向と車群の力学的安定性に焦点を当てた制御の考え方について報告する．

1．はじめに

自動車の自動運転は，自動車交通の安全化，効率化のための究極の技術である．従来，自動車の自動運転は，センシング，情報処理の信頼性等の技術的な課題に加え，法制度の問題があり，実用化が難しい技術とされてきた．しかし，2013年に発表された政府の成長戦略の一つに自動車の自動走行技術の開発が挙げられたこと，2020年のオリンピックまでに「世界一安全な道路交通社会」を実現するという目標等により，状況が大きく変わってきた[1]．法制度の問題では，危険時にドライバーが介入して安全を維持し，その責任を負う自動運転は，ドライバーの安全運転義務を定める道路交通法第70条に違反するものではないと解釈され，現行法の枠内で，自動運転車の公道走行が可能となった．このような緊急時にドライバーが操作介入を行い，安全の責任を負う自動運転を「ドライバー支援型自動運転」と呼ぶ．現実に，自動車メーカーが開発中の「ドライバー支援型自動運転」車両が，通常の手続きでナンバープレートを取得して公道での実証実験やデモ走行を行っている[2][3]．このような自動運転を取り巻く環境の変化に加え，車間維持支援システム（Adaptive Cruise Control system, ACC），車線維持支援システム（Lane Keep Assist system, LKA），衝突防止システム（Pre-Crash Safety system, PCS）等の運転支援技術が実用化されている今日の技術水準を鑑みると，2020年前後における高速道路上の自動運転の実用化が現実味をおびてきた．

自動車の車間距離制御は，自動運転の運転操作（操舵，駆動，制動）のうち，駆動，制動の自動運転技術である．1990年代頃は，主に交通容量の拡大を目的とした車間距離制御技術が注目され，様々な研究が報告されてきた．ここで明らかになったことの一つは，短い車間距離で安定に走行するためには，車車間通信が必須であるということである[4]．その後，研究開発のトレンドは，短車間距離走行の実現ではなく，単体車両で実現可能（車車間通信が不要）でかつ，安全運転支援やサグ渋滞の防止等を主目的とする車間維持支援システム（Adaptive Cruise Control，以下ACCと呼ぶ）に移った[5]．近年では，短車間距離走行が空気抵抗の低減につながり，省燃費のニーズに応えるものとして，再び短車間距離の走行が注目され，2008年度～2012年度に実施された『エネルギーITS推進事業』[6]では，4台のトラックによる車間距離4mの隊列走行，および，その効果として15%の燃費低減効果が実証された[7]．本稿では，車車間通信を用いて極めて短い車間距離を自動制御により実現して走行する形態をACCによる走行とは区別し，隊列走行(Platooning)と呼ぶ．図1，図2に隊列走行の様子の写真を示す．近い将来に実用化される自動運転においては，その車間距離制御は，ACCと同様，車両単体のセンサにより，比較的長めの車間距離を維持するものとなることが予想されるが，その後は，自動車同士の協調により，より短い車間距離，制御範囲（加減速の大きさ）を実現し，交通容量の拡大や空気抵抗の低減に寄与することになると考えている．以下では，自動車の自動運転における車間距離制御に焦点を当て，その動向や考え方を概説する．

図1 トラックの隊列走行（車間距離4m）

図2　小型EVの隊列走行（車間距離0.3m）

2．一定車間距離制御と一定車間時間制御

自動車の車間距離制御の目的は，自車の前方を走行する自動車（前走車）に対して，所定の車間距離を維持するように，車両の駆動力，制動力を発生させることである．ここで，維持する目標車間距離 L_{des}[m]は，次の式で表される．

$$L_{des} = hv + L_{safe} \tag{1}$$

ここで，h は車間時間[s]，v は車両速度[m/s]，L_{safe} は，固定値（h あるいは v がゼロの時の車間距離）[m]である．

目標車間距離の設定において，h=2 程度の走行が人間の運転に近い車間距離の取り方となる．ACC による車間時間の設定も 1.3～2.4[s]程度の範囲である．例えば，L_{safe}=2, h=2 とすると，車間距離は 10m/s（36km/h）で 22m，20m/s（72km/h）で 42m となる．このように目標車間距離を速度に比例するように設定する制御を，本稿では一定車間時間制御と呼ぶ．目標車間距離に速度に比例する項を導入することで，人間の運転に近い（違和感の少ない）車間距離の取り方になる．また，減速時には，車間距離が短くなり，加速時には車間距離が長くなるため，上手に制御すれば，前走車よりも小さな加減速で走行できる．図２は，これを模式的に示したものであり，車群先頭車の加速に対して，後述する一定車間距離制御の理想的な後続車の加速度応答は先頭車と同一になる（図２右側）が，一定車間時間制御の場合は後続車になるほど小さな加速度となる（図２左側）．なお，最終的な速度は先頭車と同じになるため，各車両の加速度の時間積分値は同じである．また，自動車の車載センサーで得られる情報（車間距離，相対速度）で，制御パラメータを適切に設定すれば，車群として力学的に安定な制御ができる特徴がある[4]．一方で，この方式では，交通容量の拡大[8]や，空気抵抗の低減効果が薄い．

ここで，h=0 とすれば，速度に依らず一定の車間距離を維持する制御となり，本稿では，一定車間距離制御と呼ぶ．この制御は，主に隊列走行の制御に適用されており，L を短くすることで，大きな交通容量を実現し，空気抵抗の低減効果も期待できる．例えば，自動車の車長を 5m，L_{safe}=2[m]とすれば，時速 100km/h で交通容量は１レーンあたり 10000 台/h となる．人間運転で実現できる交通容量が１レーンあたり，2000 台/h 程度であることを考えると，5 倍の交通容量を実現できることになる．交通量に対して交通容量が大きくなる場合，渋滞が低減することはもちろん，混雑による無駄な加減速が減少し，加減速に伴う無駄なエネルギー消費が低減する．また，車間距離が小さいため空気抵抗が大きく低減し，これも省エネ効果をもたらす．一方で，一定車間距離制御は，自動車の車載センサーで得られる情報（車間距離，相対速度）で，制御パラメータをどのように設定しても車群として力学的に安定な制御ができず，この実現のために車車間通信により，前走車の加速度指令値等の情報を取得し制御に用いる必要がある[9]．

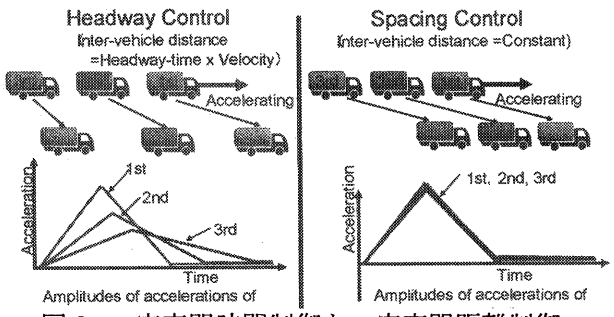

図２ 一定車間時間制御と一定車間距離制御

3．車間距離制御とストリングスタビリティ

この章では，車間距離制御と車群としての力学的に安定性について述べる．第２章において，一定車間時間制御では，車載センサから得られる情報のみで車群としての安定な制御が可能であり，一定車間時間制御では，車群としての安定な制御を実現するためには，車車間通信情報が必要であることを述べた．ここで，車群としての安定な制御とは，複数の車両が車間距離制御により走行している状況において，ある車両の車間距離の変動が，後続に増幅伝播しない制御ということである．これはストリングスタビリティと呼ばれ，従来，車間距離制御系は，ストリングスラビリティを満たすように設計されるべきとされている．ストリングスタビリティを数学的に表現すると，図３の i 番目の車両前方の車間距離を r_i, i+1 番目の車両の車間距離を r_{i+1} とした場合に，その前方の車間距離，後方の車間距離間の伝達関数 $G_R(s)$は，r_i，r_{i+1} をラプラスへ変換したもの（$R_i(s)$, $R_{i+1}(s)$）の比となり，

$$G_R(s) = \frac{R_{i+1}(s)}{R_i(s)} \tag{2}$$

となる．ここで s はラプラス演算子である．全ての周波数において，そのノルムが１以下となることが，ストリングスラビリティを満たすということと等価である．これは，以下のように表すことができる．

$$|G_R(j\omega)| \le 1 \quad \forall\omega \tag{3}$$

ここで，j は虚数単位である．なお，前方の車間距離，後方の車間距離間の伝達関数は，前走車の速度，後続車の速度間，および前走車の加速度，後続車の加速度間の伝達関数と同じである[10]．ACC においては，速度増幅率という指標が用いられることがあるが[11]，伝達関数のノルムが全ての周波数において１以下であれば，その伝達関数のステップ応答はオーバーシュートしないので，前走車のステップ状の速度変化に対する後続車の速度増幅率は 100%であると言える．

車間距離制御において，i 番目の車両の加速度を，目標車間距離との誤差，前走車との速度の誤差（相対速度）をフィードバックして制御する場合，i 番目の車両の加速度は，

$$a_{des_i} = K_1(r_i - hv_i - L_{safe}) + K_2(v_{i-1} - v_i) \tag{4}$$

となる．ここで，K_1 は車間距離誤差のフィードバッ

クゲイン（以下，車間距離のフィードバックゲインと呼ぶ），K_2 は速度の誤差に対するフィードバックゲイン（以下，相対速度のフィードバックゲイン呼ぶ）である．この場合，前方の車間距離，後方の車間距離間の伝達関数は，

$$G_R(s)=\frac{K_2 s+K_1}{s^2+(K_2+K_1 h)s+K_1} \tag{5}$$

となる．ここで，相対速度のフィードバックゲイン K_2 を $1/h$ とすると，この伝達関数は K_1 の値に依らず

$$G_R(s)=\frac{1}{hs+1} \tag{6}$$

となる．この伝達関数のノルムが全ての周波数において1以下となることは自明であるため，h がゼロ以外，すなわち，車間時間一定制御ではストリングスタビリティを満たすことが可能であると言える[4]．また，このような伝達関数が式(6)のように，ならなくとも，式(3)を満たせば良く，文献[12]によると，その場合の条件は，

$$K_2>\frac{2-k_1 h^2}{2h} \tag{7}$$

となる．実際の車両では，車両の加速度は，制御器の目標加速度を指令に対して遅れを持つ．この遅れは，乗用車では0.2秒程度，大型車では0.5秒程度である．この遅れを時定数 τ の一次遅れ特性で近似した場合（以下では，この特性を加速度応答特性と呼ぶ）に，式(3)の右辺により，目標加速度を決定し車両を制御する場合，前方の車間距離，後方の車間距離間の伝達関数は，

$$G_R(s)=\frac{K_2 s+K_1}{\tau s^3+s^2+(K_2+K_1 h)s+K_1} \tag{8}$$

となる．文献[12]では，ストリングスタビリティを満たす制御パラメータの条件として，

$$K_2+hK_1\le\frac{1}{2\tau} \quad \text{かつ} \quad 2hK_2+h^2K_1>2$$

または，

$$K_2+hK_1\ge\frac{1}{2\tau} \quad \text{かつ} \quad \left(K_2-\frac{1}{2\tau}\right)^2<\left(\frac{h}{\tau}-2\right)K_1 \tag{9}$$

であることが述べられている．ここで，ストリングスタビリティを満たす制御パラメータが存在する条件は，

$$h\geqq 2\tau \tag{10}$$

であり[13,14]，ストリングスタビリティを満たすことができる最小の車間時間は，車両の加速度応答特性に依存する．例えば，加速度応答の時定数が 0.5 秒の場合，車間時間が1秒以上である必要がある．なお，駆動力応答の時定数が 0.5 秒の場合に，車間時間を下限である1秒とした場合，K_2=1 以外では，ストリングスタビリティを満たせず，制御パラメータ設定が制約を受ける．

現在市販車に搭載されている ACC の制御パラメータは公開されておらず，どのような制御が適用されているか不明である．文献[11]では，市販車の ACC のパラメータを実走により推定した結果が公開されており，A 群(K_1=約 0.025，K_2=約 0.41)，B 群(K_1=約0.024～0.03，K_2=約0.24～0.31)，C群(K_1=約0.065～0.088，K_2=約 0.23～0.26）に分類されている．このパラメータの興味深い点は，式 (8) にパラメータを代入して，最大ノルムを計算すると，いずれもストリングスタビリティを満たしていないことである．但し，A 群のパラメータによる伝達関数の最大ノルム 1.0054 であり，1 に対する超過量はごくわずかである．いずれにおいても，相対速度のフィードバックゲイン K_2 が小さく設定されており，ストリングスタビリティを満たさない状態になっている．この原因としては，車載センサーにより取得した相対速度の誤差や，違和感の抑止を考慮した設定となっているからであると考える．

ストリングスタビリティを満たせていない制御により ACC で走行した場合，どのような現象が起こるか，ということについて述べる．ストリングスタビリティを満たさない制御では，前走車の速度変動が後続車に増幅伝搬する．例えば，前走車が時速 100km から 60km に減速した場合，後続車の速度は，オーバーシュートしてしまい（例えば時速 58km になる），その後前走車と同じ 60km になる．後続車に続く後続車は，さらにオーバーシュートが大きくなり（例えば時速 56km になる），その後，前走車と同じ 60km になる．このように後続車に行く従いオーバーシュートが大きくなり，いずれは渋滞となる．手動運転によって生じるサグ渋滞も，このような運転の特性に起因すると言われている．すべての車両にストリングスタビリティを満たさない ACC が搭載されており，かつ交通量が多い場合，ある車両に速度変化が起こると，その速度変化が後続車に増幅伝播することに渋滞が発生する．交通量が少ない場合は，連続的なオーバーシュートが常に前走車の最大値を超えるとは限らず（例えば，車間距離が制御目標値よりも大きく，前走車の加減速の影響を受けない場合など），ストリングスタビリティを満たしてなくても渋滞にならない．

図4は，シミュレーションにより，ストリングスタビリティと交通量と速度変化の増幅伝搬の様子の示したものである．ACC で走行中に先頭車が減速した場合に，先頭車から５台置きに１０台分の速度を表している．上段は，ストリングスタビリティが満たされている場合である．中段は，ストリングスタビリティが満たされておらず，かつ交通量が多い場合の結果であり，渋滞に至っている．下段は，ストリングスタビリティが満たされていないが，交通量が少ない場合であり，渋滞に至っていない．

表1は，筆者の研究室で行ったシミュレーション結果である．このシミュレーションでは，流入量に応じて均等の間隔で走行している車両に対して，先頭車の速度を1km 区間時速 100km から 60km とした場合の交通流を評価している．その際に，渋滞が発生・拡大し，回復できない状態にならない最大の流入交通量を求めている．ここで，ACC の制御パラメータとして，車間時間を２秒とし，先に述べた文献[11]の A 群，B 群，C 群に相当する制御パラメータおよび，ストリングスタビリティを満たす制御パラメ

ータによるACC走行を評価した．車長5m，一定部車間距離(L_{safe})2m，車間時間(h)2秒の場合，時速100km, 60km/hにおける理論的な交通量の最大値(交通容量)は，それぞれ1524台/h, 1382台/hである．ストリングスタビリティを満たさず，かつ，車間距離の伝達関数のノルムが大きいACC（B群，C群）では，速度変動の増幅による渋滞発生により，時速60km時の交通容量よりも少ない流入量でも，先頭車の速度変動の増幅伝搬により渋滞となり，それが拡大することを確認した．一方，ストリングスタビリティを満たしているACCでは，時速100km/h時の交通容量に近い流入量においても，先頭車の速度変動による影響が渋滞とならずに回復する．また，ストリングスタビリティを満たしていないが，伝達関数の最大ノルムの1に対する超過量がわずかなACC（A群）でも，時速100km/h時の交通容量に近い流入量まで渋滞とならずに回復することを確認した．ストリングスタビリティを満たしていないACCは，その満たせていない度合（車間距離の伝達関数の最大ノルムの1に対する超過量）に従い，速度変動がある状況で実現できる交通量が低下する．大量普及を想定したACCを考える場合，速度変動の増幅による渋滞発生は，自動制御による運転している利点を損なうものであり，制御パラメータの調整により，ストリングスタビリティを満たした制御にすることが望ましいと考える．

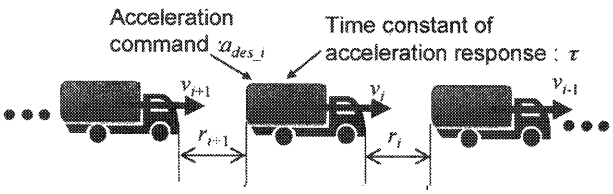

図3　車間距離制御アルゴリズム

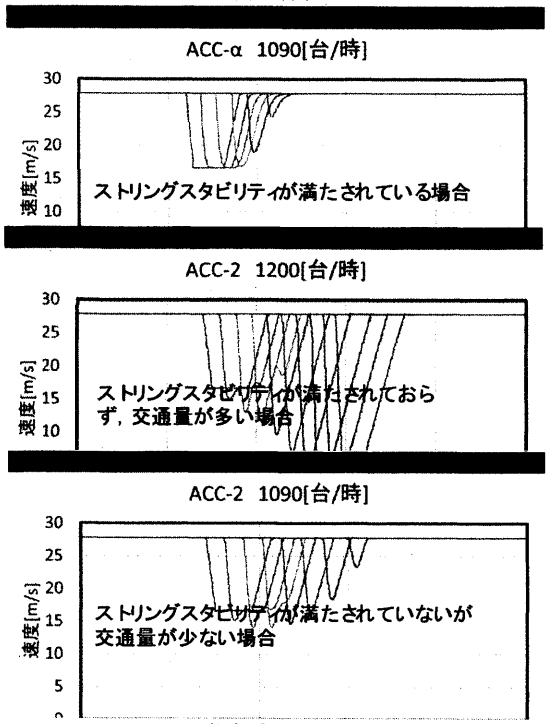

図4　速度変化の増幅伝搬

表1　ACC走行シミュレーション結果

ACC制御パラメータ			車間距離の伝達関数の最大ノルム	渋滞が発生し拡大する流入量[台/h]
	K1	K2		
A群	0.025	0.41	1.005	1440
B群	0.030	0.30	1.035	1241
C群	0.075	0.25	1.060	1090
ストリングスタビリティを満たす制御パラメータ	0.25	0.50	1	1500 ※渋滞発生せず

3．協調型アダプティブクルーズコントロール

現在，ACCの高度化として，車間距離制御に車車間通信情報を用いる協調型アダプティブクルーズコントロール（Cooperative Adaptive Cruise Control, 以下CACCと呼ぶ）の開発が進められている[10,15-25]．2013年に，エネルギーITS推進事業の成果の一つとして，4台の大型トラックによるCACC走行(車間時間は0.7秒)が実証された[10,24,25]．図5に大型トラックのCACC走行の写真を示す．また同年，ITS世界会議においては複数のメーカーの乗用車によるCACCの高速道路走行デモが実施された．CACCは，車車間通信を用いることにより，より短い車間時間での走行と制御範囲（加減速の大きさ）の拡大を実現するものである．簡単には，前走車の加速度等の高次の運動情報を取得し，制御に反映させることで，前走車の加減速に対して遅れの無い追従を行う，と考えてよい．ストリングスタビリティにおけるCACCの効果を考えてみると以下のようになる．

例えば，車間距離制御の目標値を以下のように決定することを考える[10]．

$$a_{des} = F_1(a_P) + K_1(L - hv - L_{safe}) + K_2\{F_2(v_P) - v\} \tag{11}$$

ここで，

a_{des}：自車の目標加速度[m/s^2]
a_P車車間通信で得られた前走車の加速度[m/s^2]
v_P車車間通信で得られた前走車の速度[m/s]
v：自車の速度[m/s]
L：レーダーで検出した車間距離[m]
$F_1(a_P)$: a_Pを$(\tau s+1)/(hs+1)$でフィルタリングすることを意味する
$F_2(v_P)$：v_Pを$1/(hs+1)$でフィルタリングすることを意味する
h：車間時間［s］
L_{safe}：安全のための車間距離[m]
τ：自車の加速度応答の一次遅れ時定数[s]
K_1，K_2：フィードバックゲイン

である．この場合，前方の車間距離，後方の車間距離間の伝達関数は，

$$G_R(s) = \frac{1}{hs+1} \tag{12}$$

となり，すべての周波数において，ノルムが1以下であることが自明な伝達関数となる[10]．この伝達関数の中には，K_1，K_2が含まれていないため，スト

リングスタビリティとは独立に制御パラメータを調整することができる．すなわち，ストリングスタビリティを考慮せずに，車間距離が定常値に至る際の過渡特性等を独立に調整することが可能である．また，車車間通信を用いない場合，ストリングスタビリティを満たす K_1, K_2 が存在する最小の車間時間は，2τ であるが，この場合，車間時間の制限はない．ただし，フィルタのノルムが1を超えないようにするためには，$h \geqq \tau$ である必要がある．

車車間通信を用いることで，車間時間 h が小さくても容易にストリングスタビリティを満たすことが可能となり，より短い車間距離での走行が可能となる．一方で，車車間通信を使う場合，前走車の情報の特定が重要な課題となる．もし，何らかの処理の誤りにより，実際に追従している前走車の情報ではなく，他の車両（例えば，前走車の隣のレーンを走行している車両）の情報を，前走車からの情報と誤認識して制御した場合，危険な事象が発生する可能性がある．数多くの車が情報を発信する場合，その中から追従対象の前走車の情報を特定しなければならない．車車間通信情報に GPS 等で計測したの位置情報を含めて送受信を行えば，前走車の識別はある程度可能であるが，GPS の位置情報の誤差やサンプル周期，自動車は毎秒 20～30m程度移動すること，自動車の横方向の車間距離は短いことなどを考慮すると，GPS の位置情報のみに頼った識別では十分ではないと考える．エネルギーITS 推進事業で開発された CACC では，位置情報を用いて，前走車の ID を特定した後，その ID 宛てに後部に搭載したランプの発光要求を行い，その発光をドライバーが確認（同一車線上の追従対象の前走車のランプが発光していることを確認）することで，CACC 制御を開始するようにしていた[25]．

車車間通信に用いた車間距離制御を行う CACC は，車間時間を 0.7～1 秒程度で運用されるものと考えられるが，車間時間をゼロに近づければ，短車間距離（例えば 4m）の隊列走行システムへの進化の可能性を持つものである．しかし，車間距離が短い隊列走行においては，前走車が近すぎて前方の道路線形が把握できないため，操舵も自動化する必要があり，また車間距離が短すぎて緊急時にドライバーが対応できないため，CACC から隊列走行への進化には，システムが運転の責任を持つ完全自動運転システムと同じ水準の信頼性を持ち，完全自動運転実現ための非技術的課題とと同様の課題の克服が必要となる．

図5　大型トラックの CACC 走行

4．まとめ

本稿では，自動車の車間距離制御の動向とその考え方について述べた．自動車の自動運転の実用化が現実のものとなりつつあり，その大量普及時の交通容量を決めるのは車間距離制御である．自車が安全に走行するのであれば，車間距離を十分に長くとれば良い．しかし，すべての自動運転車が過度に通常走行時の車間距離や，停止後の再発進時の車間距離を過度に大きくとれば，交通容量は現状よりも小さくなってしまう可能性がある．CACC が容易にストリングスタビリティの問題を解決するように，通信を用いた車両同士の協調技術は，自動運転車の大量普及時に，より効率的な交通を実現するために必須の技術である．現在，精力的に開発が進められている自律自動運転技術の開発も重要であるが，大量普及時に，安全に加え，自動車交通の効率化という恩恵を受けられるよう，高度な協調制御技術を開発していくことが重要であると考える．

参考文献

[1] IT 総合戦略本部 新戦略推進専門調査会道路交通分科会資料，「官民 ITS 構想・ロードマップ（概要）」，(2014). http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/senmon_bunka/douro/dai6/siryou2.pdf

[2] 日経スマートコンソーシアム記事，「夢の『オートパイロットシステム』（自動車の自動運転）実現への道のり」，(2014).

[3] 仁木 恵太郎，高度運転支援，自動車技術会フォーラムテキスト，pp.29-37,(2014).

[4] D. Swaroop, J. K. Hedrick, C. C. Chien, P. Ioannou, A Comparison of Spacing and Headway Control Laws for Automatically Controlled Vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol.23, No.8, (1994), pp.597-625.

[5] A. Vahidim, A. Eskandarian, Research Advances in Intelligent Collision Avoidance and Adaptive Cruise Control, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.4, No.3, (2003), pp.143-153.

[6] 新エネルギー・産業技術総合開発機構，エネルギーITS 推進事業，http://www.nedo.go.jp/content/100079701.pdf

[7] 河島 宏紀，鈴木 儀匡，青木 啓二，森田 康裕，自動運転・隊列走行システムの開発（第2報），自動車技術会春季学術講演会前刷集，No.83-13,(2013), pp.1-4.

[8] H. Raza, P. Ioannou, Macroscopic Analysis of Traffic Flow of Automated Vehicle, Advances in Intelligent Transportation System Design, SAE Sp-1285, Paper No.972655, (1997), pp.25-34.

[9] 大前 学，小木津 武樹，清水 浩，車車間通信を利用した車両内情報の共有による小型電気自動車の高密度隊列走行に関する研究，自動車技術会論文集，Vol.39, No.4, (2008), pp.7-13.

[10] 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，Vol.44, No.6, (2013), pp.1509-1515.

[11] 日高 健，北岡 広宣，北浜 謙一，志田 充央，藤本 浩，金須 則之，小池 弘之，江口 純司，加世山 秀樹，加藤 哲也，ACC を活用した高速道路サグ部の交通流円滑化，自動車技術会論文集，Vol.44, No.2, pp.765-770,

(2013).
[12] Chi-Ying Liang, Huei Peng, Lingyun Xiao, Feng Gao, Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String Stability, Vehicle System Dynamics, 31 (1999), pp.313-330.
[13] Jing Zhou, Huei Peng, String Stability of Adaptive Cruise Control Systems with Servo-loop Dynamics, Journal Automotive Safety and Energy, Vol. 1 No. 1,(2010), pp.30 -39.
[14] Lingyun Xiao, Feng Gao, Practical String Stability of Platoon of Adaptive Cruise Control Vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.12, No. 4,(2011), pp.1184-1194.
[15] F. Bu, H. Tan, J. Huang, Design and Field Testing of a Cooperative Adaptive Cruise Control System, Proceedings of American Control Conference, (2010), pp.4616-4621.
[16] L. Güvenç et. al., Cooperative Adaptive Cruise Control Implementation of Team Mekar at the Grand Cooperative Driving Challenge, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 13, No. 3, (2012), pp.1062-1074.
[17] G. Naus, R. Vugts, J. Ploeg, R. Molengraft, M. Steinbuch, Cooperative Adaptive Cruise Control, Design and Experiments, Proceedings of American Control Conference, (2010), pp.6145-6150.
[18] G. J. L. Naus, R. P. A. Vugts, J. Ploeg, M. J. G. Molengraft, M. Steinbuch, String-Stable CACC Design and Experimental Validation: A Frequency-Domain Approach, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 9, (2010), pp.4268-4279.
[19] B. Arem, J. G. Driel, R. Visser, The Impact of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic-Flow Characteristics, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, No. 4, (2006), pp.429-436.
[20] W. J. Schakel, B. Arem, B. D. Netten, Effects of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic Flow Stability, Proceedings of 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, (2010), pp.759-764.
[21] J. Ploeg, B. T. M. Scheepers, E. Nunen, N. Wouw, H. Nijmeijer, Design and Experimental Evaluation of Cooperative Adaptive Cruise Control, Proceedings of 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, (2011), pp.260-265.
[22] V. Milanés, S. E. Shladover, J. Spring, C. Nowakowski, H. Kawazoe, M. Nakamura, Cooperative Adaptive Cruise Control in Real Traffic Situations, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, (2013), DOI: 10.1109/TITS.2013.2278494.
[23] 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渋滞抑制に向けた取組み, 自動車技術会春季学術講演会前刷集 No.50-14, (2014),pp.1-4.
[24] 三島 康之, 小西 正, 田近 秀騎, 佐藤 広充, 櫻井 陽一, 菅沼 直樹, 加藤 晋, 星名 悟 , 4 台の大型トラックによる CACC 制御システムの開発, 自動車技術会春季学術講演会前刷集 No.55-13, (2013),pp.1-4.
[25] M. Omae, R. Fukuda, T. Ogitsu, W. Chiang, Control Procedures and Exchanged Information for Cooperative Adaptive Cruise Control of Heavy-Duty Vehicles using Broadcast Inter-Vehicle Communication, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, Vol.12, No.3.(2014).