



# 自動運転・隊列走行の 実現に向けて

—自動運転技術の開発状況について—

青木啓二（日本自動車研究所）

## 自動運転車開発の動き

安全・安心で環境にやさしいモビリティ社会の実現を目指して、路車間通信を利用した安全運転支援システムや自動運転車の開発等、自動車と情報通信との融合による新しい自動車交通システムの開発が進められている。特に自動運転車はドライバの認知・判断・操作といった運転操作を補助する運転支援システムに代わる次世代のシステムとして期待されており、日、米、欧を中心に研究開発が進められている。

欧州ではEUが自動運転車の開発を重要テーマとして位置付け、国家プロジェクトとして取り組んでおり、実用化に向け着実な成果を上げている。また米国においてはグーグルが自動運転車の実用化に向け開発を行っており、ネバダ州で成立した自動運転車免許に関する新制度での免許取得に向け、公道での自動運転実験を行っている。

一方、我が国においては大型トラックの自動走行による安全で環境にやさしい物流輸送システムの実現を目指した開発プロジェクトが進められている。このプロジェクトは「エネルギー ITS」<sup>1)</sup>と呼ばれ、高速道路を走行する大型貨物車からのCO<sub>2</sub>排出量を削減するとともに高速道路の交通流の円滑化をはかることを目的としたプロジェクトである。きわめて近接した車間距離での走行により空気抵抗が低減し燃費が向上することはすでに知られている<sup>2)</sup>が、ドライバによる手動運転により、近接した車間距離で走行することは人間の運転能力や安全性を考えるときわめて困難<sup>3)</sup>である。現在エネルギー ITSでは車間距離4mでの隊列走行を実現するための自動運転技術を開発するとともに自動運転車を製作し、



図-1 自動運転・隊列走行

図-1に示すような隊列走行実験を行うなど、自動運転・隊列走行の実用化に向けた開発を進めている。本稿ではエネルギー ITSで開発されている自動運転・隊列技術や海外での自動運転車開発状況を紹介するとともに、自動運転・隊列走行の実用化に向けた取り組みについて紹介する。

## 隊列走行による省エネ効果

隊列走行による省エネ効果を検証するため、まず数値流体シミュレーションによる3台隊列走行時の空気抵抗値をもとに3台隊列走行時の燃費向上率を求めた。図-2は、速度80km/h、車間距離4mでの隊列走行時の圧力分布と燃費向上率を示したものである。空気流体シミュレーションの結果、単独走行に対する車間距離4m隊列走行時の空気抵抗低減率は、先頭車と最後尾車では約25%、中間車では約50%であり、得られた空気抵抗低減率をもとに隊列走行の燃費向上率を算出した結果、約15%の省エネ効果が得られることが確かめられた。この

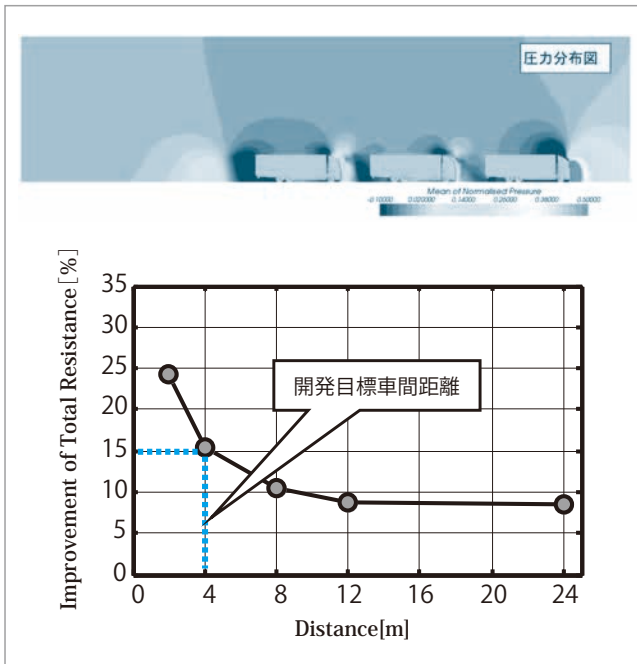


図-2 隊列走行時の圧力分布と燃費向上率

結果をもとにエネルギー ITS では、車間距離 4m の隊列走行の実現が開発目標として定められた。

## 隊列走行制御システム

車間距離 4m での隊列走行を実現するには近接車間距離走行のための精密な車間距離制御のみならず、車線に沿っての走行を可能とする車線維持制御や周辺を走行する一般車両との衝突を回避するための衝突防止制御等の高度な走行制御が必要になるとも

に、制御システムが故障した場合のドライバーによる運転操作が期待できないため、制御システムには高い信頼性と安全性が求められる。

## ■ 車線維持制御システム

車線維持制御システムは、走行区画白線と前輪タイヤとの間隔が常に一定になるようタイヤ操舵角度を自動制御するもので、図-3 にその制御システム構成を示す。

区画白線と前輪タイヤとの間隔を正確に検出するとともに太陽光や雨による影響をさけるため、小型カメラが路面に対してほぼ垂直に車両側面に取り付けられている。図-4 にカメラとカメラ画像を示す。このカメラ画像より区画白線がリアルタイムで認識されるとともに白線と前輪タイヤ間の距離（以下横偏差）が 1～2cm の精度で検出される。検出された横偏差を用いて車両運動モデルに基づいた非線形制御アルゴリズムにより最適な前輪タイヤ角度が算出されるとともに、ステアリングコラムに取り付けられた操舵モータにより前輪タイヤが操舵される。また曲線部を走行する場合、人間が真下の白線を見ただけでは運転できないのと同様、フィードバック制御だけでは制御系の遅れ要素等のため、走行速度が高くなるにつれ制御性が低下し、最終的には白線を追従できなくなる。この問題を解決するため、道路の曲率に応じてあて舵を行うフィードフォワード制御が同時に行われている。

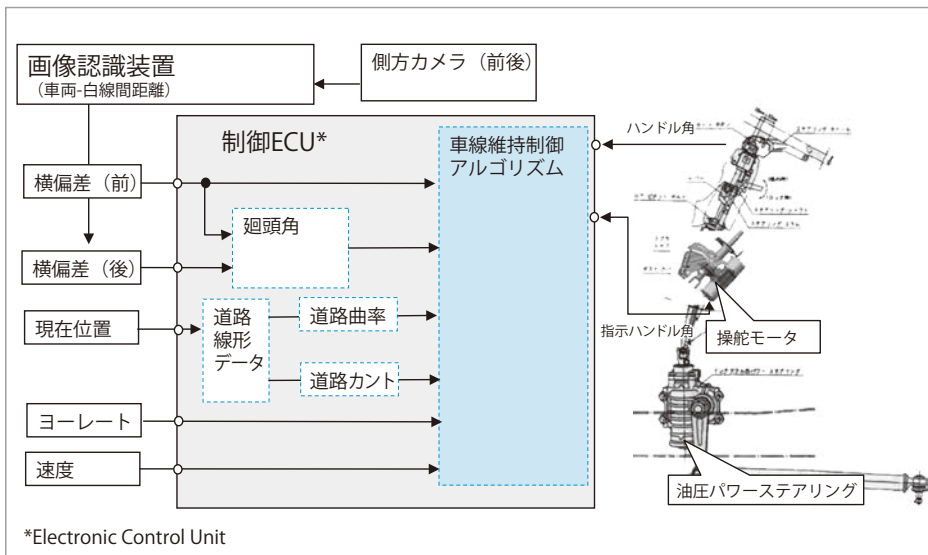


図-3 車線維持制御システム構成

## ■ 車間距離制御システム (ACC)

レーダ等を用いて前方を走行する車両と自車との車間距離を速度に応じた安全な車間距離に保持する ACC (Adaptive Cruise Control) はすでに実用化され多くの車両に搭載されているが、前方車両が急ブレーキをか

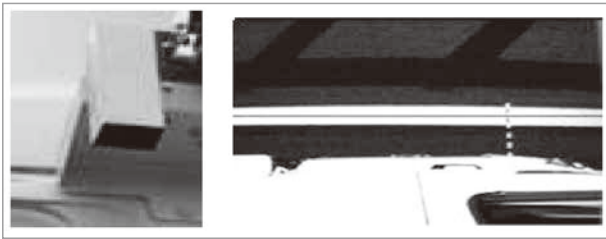


図-4 白線認識カメラとカメラ画像

けた場合の安全性はドライバーに任されている。車間距離情報だけの制御では、前方車の減速度の発生開始から車間距離に変化が現れるまでには大きな遅れ時間が発生するとともに自車の減速が発生するまでの遅れが起こるため、衝突を防止するには長い車間距離が必要となる。

この問題を解決するため、隊列走行では前方車両の速度情報や加速度情報を後続車に通信を用いて伝送し、この前方車情報と車間距離を用いて車間距離制御を行う CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) が開発されている。図-5 にその CACC のシステム構成図を示す。

先頭車の速度や加減速度が 20ms ごとに後続車に送信され、車間距離を一定にするため後続車の速度は常に先頭車と同じ速度になるよう制御されると

もに速度制御誤差により発生する車間距離誤差が車間距離センサからの情報をもとに補正される。

### 安全性・信頼性の向上

隊列走行では制御システムが故障した場合、ドライバーによる運転操作が期待できないためきわめて信頼性の高いシステムを構築する必要がある。現在、自動運転車についての国際的な安全性・信頼性基準は定められていないが、電気・電子機器に関する国際標準規格 IEC 61508 では自動制御機器に対し、故障率が 10<sup>-8</sup>/Hr 以下の SIL4 の安全性レベルが要求されている。

自動運転・隊列走行では SIL4 レベルの安全性が求められると考えると、機器の高信頼化のみならず制御装置の冗長化やフェイルセーフ化が必要になると考えられる。以下隊列走行で行われている安全性技術について簡単に紹介する。

#### ■ レーザレーダ式白線検出技術

画像認識による白線検出ではトンネルの出入り口部や橋梁部のような急激な照度変化が発生する場所

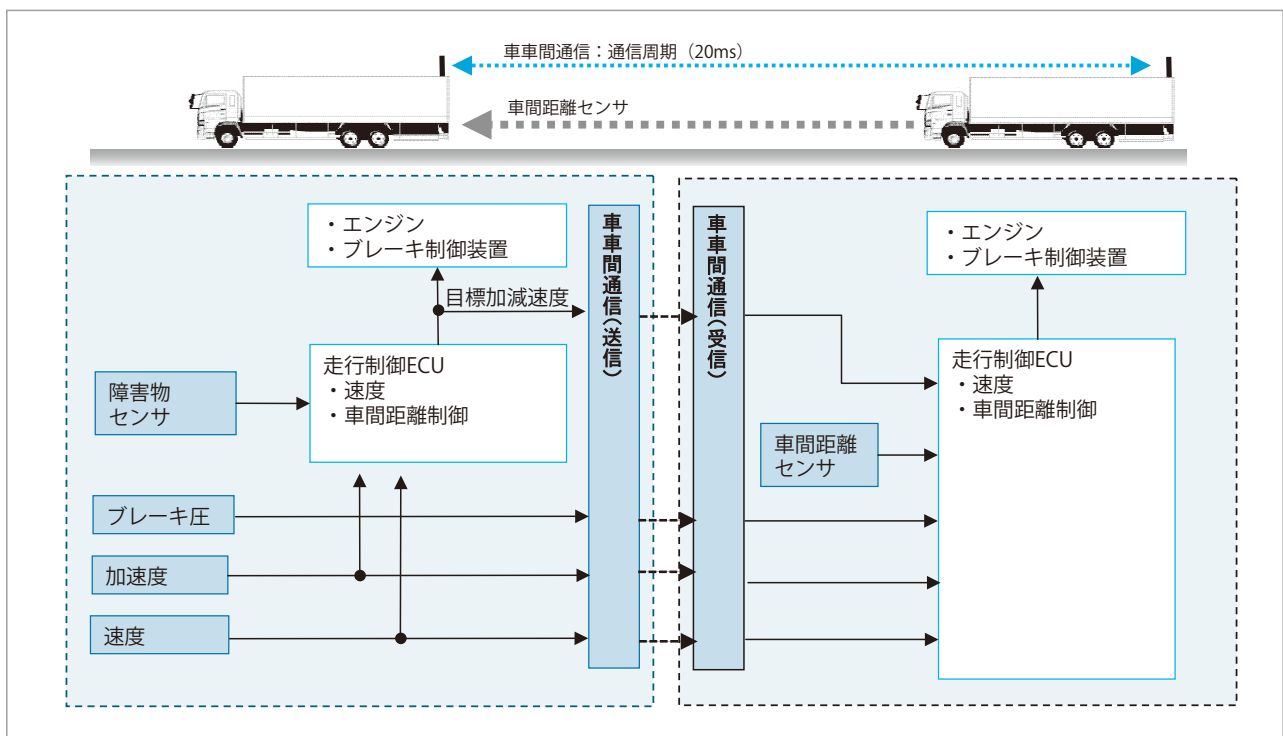


図-5 CACC 車間距離制御システム構成

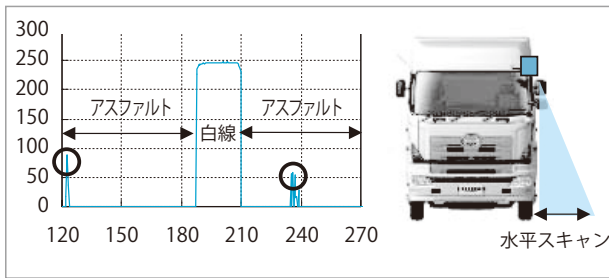


図-6 レーザ光路面反射強度

で、カメラの性能上一時的に画像が得られなくなる場合が発生するため、画像認識の補完として、レーザレーダ方式の白線認識技術を開発している。この方式ではスキャンされたレーザ光を路面に照射し、白線とアスファルトの反射率の違いにより発生する反射強度差をもとに白線位置が検出される。

図-6に実際の路面からのレーザ受光反射強度を示す。

汚れた白線や白線以外の反射物がある場合のSN比低下も想定し、水平スキャンニングと垂直スキャンニングによる3次元データを用いたパターン認識により白線検出を行っている。

### ■ 車車間通信の2重化

電波障害による通信不良を回避するため、電波と光を用いた信頼性の高い2重化車車間通信システムを開発している。図-7に2重化車車間通信システム構成を示す。

無線系通信としては、車車間通信の実験免許が

付与されている5.8GHz帯DSRC（Dedicated Short Range Communication）を用いて主系の車車間通信システムを構成している。使用している通信プロトコルはCSMA/CA（Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance）で数ミリ秒ごとに送信を行う同報型通信である。無線系データ更新周期は20ミリ秒のため同一データを5回連続して送信する5連送通信を行い、99%以上の非常に高いパケット到達率（1回当たりの送信の成功確率）を達成している。

光通信系では赤外線を用いた送受一体型の通信ユニットの開発を行った。光通信系では同報通信が困難なため、車両先端部通信ユニットで受信したデータと自車のデータを結合して後端部の通信ユニットから後続車両に送信するポップアップ型の通信方式が採用されている。

### ■ 車両制御ユニットのフェイルセーフ化

自動運転車の安全性を考える上で信頼性以上に重要な課題が装置故障した場合のフェイルセーフ化である。特に車両制御ユニット（以下車両制御ECU）に使用されるマイクロプロセッサが故障もしくは暴走した場合のフェイルセーフ化はきわめて重要である。このため、鉄道の信号保安装置ATC（Automatic Train Control）で実用化されているフェイルセーフコンピュータの設計概念に基づいた車両制御ECU（Electric Control Unit）を開発した。図-8に製作さ

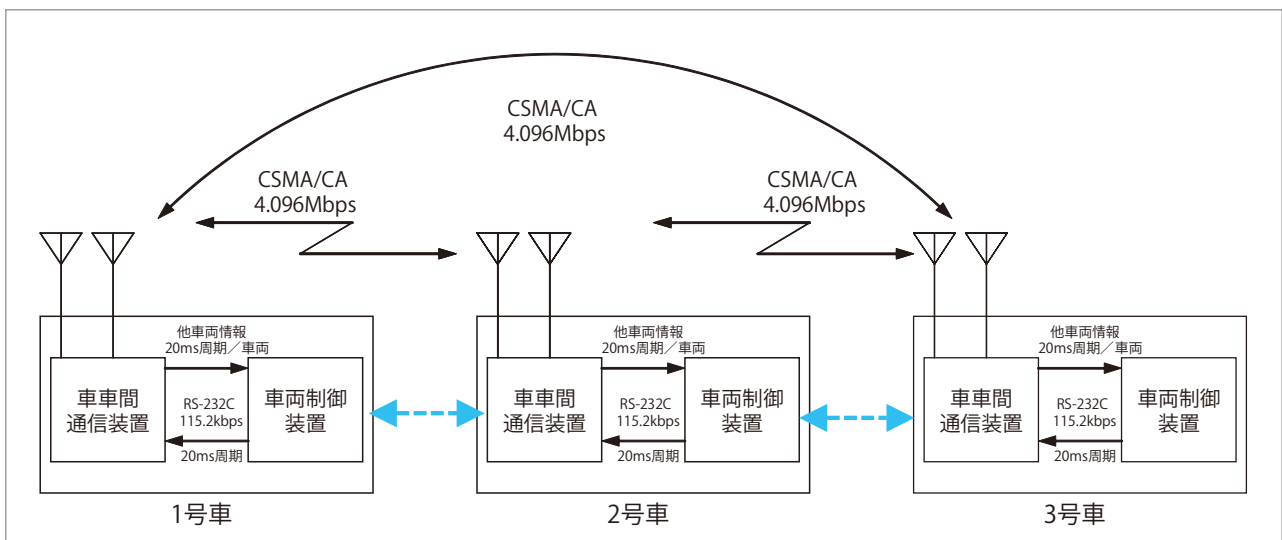
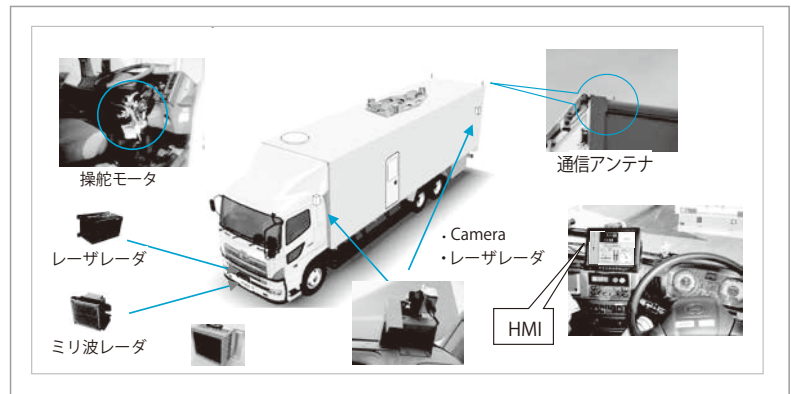
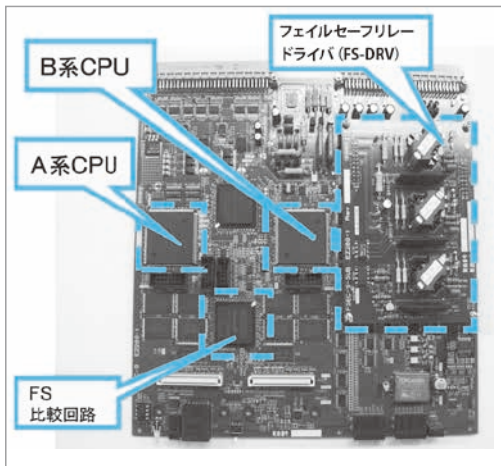


図-7 車車間通信の2重化





▲図-9 隊列実験車構成

◀図-8 フェイルセーフ CPU ボード

制御装置名		冗長度	方式
センサ系	白線認識装置	2	・カメラ／レーザーレーダの2重化
	車間距離・障害物検出装置	2	・76GHzミリ波レーダ／3Dレーザーレーダの2重化
アクチュエータ系	操舵制御装置	2	・PM同期モータ
	ブレーキ制御装置	2	・EBS (Wabco社)
車車間通信		2	・5.8GHzDSRCおよび光車車間通信
車両制御ECU		2	・フェイルセーフECUの2重化

表-1  
隊列実験車  
装置構成

れた CPU ボードを示す。

CPU ボードはメイン、サブの2系のCPUとメモリ部、比較器およびリレー回路から構成され、メイン、サブ2個のCPUで演算された演算結果が比較器にて比較され、演算結果が不一致の場合、メインCPUの出力と外部制御機器の結線はリレー回路にて自動的に遮断される。これによりCPUが故障やノイズ等により誤動作した場合、異常値が外部制御機器に送出されるのを防止している。

## 隊列走行実験車と制御性能

### ■ 隊列実験車の概要

図-9に製作された隊列実験の構成を示す。

車間距離センサとして76GHzミリ波レーダとレーザーレーダがフロントグリル部に装着されている。また白線認識用として小型カメラとレーザーレーダがキャビンルーフに取り付けられている。また前輪タイヤをステアするための操舵駆動モータがステアリングシャフト部に装着されている。

車車間通信器の送受信アンテナは見通しの良い荷物室ルーフの後端部に設置されている。

表-1に実験車に搭載されている制御機器の冗長度と主な仕様が示されている。主要な制御機器は基本的に並列2重または待機2重系で構成されている。

### ■ 制御性能および省エネ評価

半径180Rの曲線部を持つ全長3.2kmのテストコースと供用開始前の新東名高速道路を使用して隊列走行実験が行われた。

車線維持の制御性能は直線部で±15cm、曲線部で±20cmと高精度な結果が得られている。またCACC車間距離制御では先頭車が0.5Gで急減速した場合においても車間距離制御性能は±1.0m以内で十分近接車間距離の隊列走行に対応できる性能を示している。

また表-2に新東名高速道での車間距離10mにおける燃費評価結果を示す。最後尾車の効果がやや多いもののほぼシミュレーション結果と同程度の効果が得られている。

	単独走行比燃費改善率（新東名高速）			
	先頭車	中間車	最後尾車	隊列平均
単独走行（CC*）	1.0	1.0	1.0	
隊列走行	+7.5%	+18%	+16%	+14%

\*Cruise Control

表-2 隊列走行省エネ効果



図-10 グーグル自動運転車

## 海外での自動運転・隊列走行の取り組み

米国ではグーグルが交通事故ゼロを目指し自動運転車の開発を進めている。図-10にグーグル自動運転車の外観を示す。ナビとの連動により自立走行を行いながらルーフに装着されたレーザレンジファインダやミリ波レーダにて障害物を検出し自動運転を行うシステムである。現在10万km以上の公道実験を完了し、ネバダ州で成立した自動運転免許制度での自動運転免許取得を目指している。

また欧州では自動運転・隊列走行の実現を目指し、「KONVOI<sup>4)</sup>」や「SARTRE<sup>5)</sup>」(SAfe Road TRain for Environment)と呼ばれるシステムが開発されている。「KONVOI」はエネルギーITSの自動運転・隊列走行システムときわめて類似したシステムで、開発された実験車を用いてアウトバーンを使用し車間距離10mでの4台隊列による約3,000kmの走行実験を完了している。図-11に「KONVOI」の走行実験の様子を示す。

「SARTRE」はトラックと乗用車混在の隊列走行で特徴は手動運転された先頭の大型トラックを自動運転のトラックや乗用車が数台追尾するシステムにある。追尾車の省エネ化とほかの一般車両の割り込み



図-11 「KONVOI」走行実験（アーヘン大学 Web サイト引用）



図-12 「SARTRE」走行実験（SARTRE Web サイト引用）

を防止するために隊列内の車間距離は6m程度に制御される。なお、この自動運転車は白線を追従するのではなく先行車両と自車との横方向のずれをステレオカメラで認識して自動操舵制御を行うシステムで、図-12に示すように、高速道路において大型トラック2台乗用車2台の5台隊列走行実験が行われた。

## 実用化に向けた取り組み

自動運転・隊列走行の実用化には技術面以外にも法令面、社会的受容面、物流事業面等解決すべき課題がさまざま残されている。また海外では公道での自動運転実験が広く実施されているが我が国では法令の制約上公道での実験が行えず、複雑な走行環境での技術的知見や社会的受容性を得ることが困難な状況にあるため、近未来から遠未来を想定した3

### 3. 自動運転・隊列走行の実現に向けて—自動運転技術の開発状況について—

種類の隊列走行コンセプト X, Y, Z について実用化の検討がなされている (図-13)。

コンセプト X と Y は、既存の高速道路での実用化を想定したものであり、すべての車両にドライバーが乗車し、縦方向や横方向の運転操作の支援を行う。一方コンセプト Z は自動運転専用道路を想定したもので、自動運転を前提としたシステムである。

また国土交通省を中心にオートパイロットプロジェクトが進められており、ここでは自動運転を用いたアプリケーションのビジネスモデルや道路形態等、自動運転の実用化に対する課題や要件整理等の検討が行われている。図-14 に、国土交通省内に設置された次世代 ITS に関する勉強会で検討された自動運転のロードマップを示す。

自動運転の実現には克服すべき課題が多く残されているものの、自動運転・隊列走行の実現に向け技術面を含め国内外において着実な活動が進められている。

#### 参考文献

- 1) 青木, 森田 : 自動運転・隊列走行システムの開発, 自動車技術会秋季大会前刷り集, Vol.5926.
- 2) Shladover, S. E. : Demonstration of Automated Heavy Duty Vehicles (Path Research Report).
- 3) Hoeger, R. : Selective Automated Driving as a Pivotal Element to Solve Safety (15th ITS World Congress).

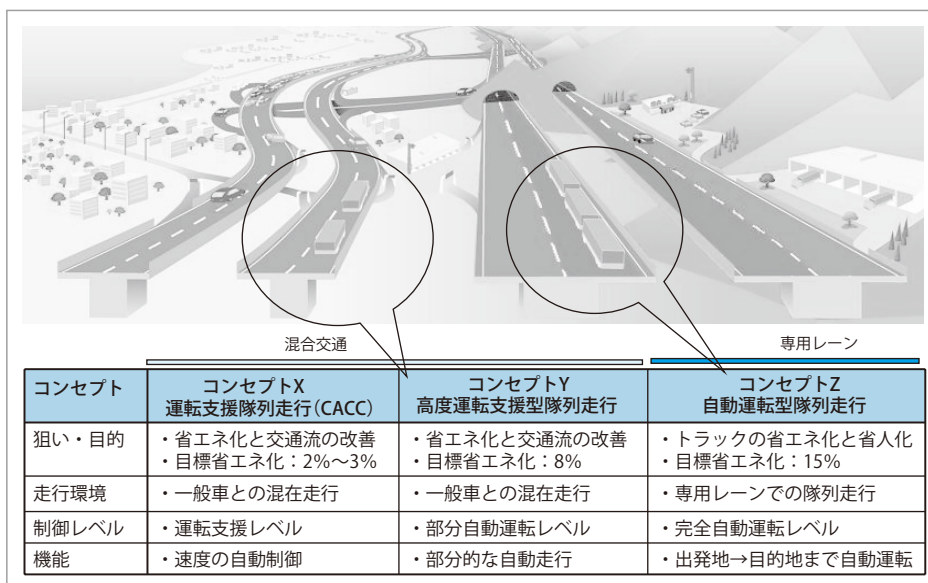


図-13 隊列走行コンセプト

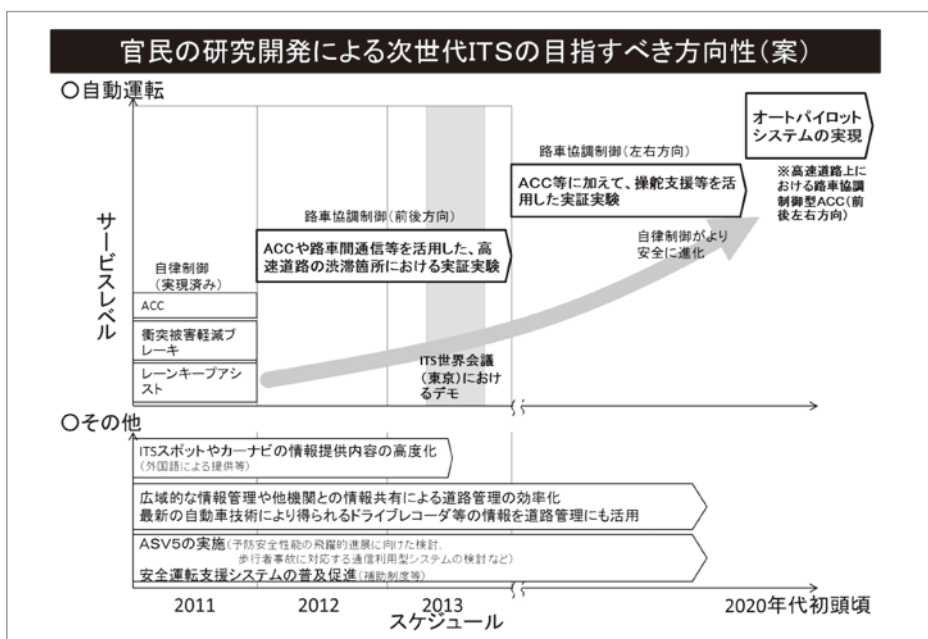


図-14 自動運転ロードマップ (国土交通省 Web サイト引用)

- 4) Bergenhen, C. : Challenge of Platooning on Public Motorway (17th ITS World Congress).
- 5) Kunze, R. : Organization and Operation of Electronically Coupled Truck Platooning (18th ITS World Congress). (2012年12月17日受付)

青木啓二 kaoki@jari.or.jp

1971年トヨタ自動車入社後自動運転バス IMTS の開発に従事。2008年日本自動車研究所に Outreach, エネルギー ITS プロジェクトに従事。