解 説

路車協調による道路交通の改善

Improvement of Road Traffic by Road Vehicle Cooperation

保 坂 明 夫* *AHS 研究組合

Akio Hosaka* *AHSRA

1. は じ め に

自動車は道路という作業環境で動作する移動体である。従来は移動体としての自動車における知的機能はドライバーに依存していた。そのために多くの課題が発生している。これを改善するために智能化された自動車（スマートカー）と智能化された道路（スマートウェイ）により移動体と作業環境が協調する走行支援システムが実現されようとしている。本稿ではスマートカーとスマートウェイの協調による道路交通の改善について、①自動車交通の課題と智能化への期待、②課題解決の方向、③高知能化の進展、④自動車と道路インフラの特徴、⑤路車協調の考え方の順で述べる。

2. 自動車交通の課題と智能化への期待

自動車は出発地から目的地までのトータルで考えると大変便利な交通手段であり、社会生活の高度化に大きく貢献している。しかし、その普及に伴い交通事故などの安全性低下、交通渋滞による交通効率の低下、排気ガスによる環境への悪影響などの社会的課題が深刻になってきている。環境への影響は自動車の走行速度や加減速などの走行状態に大きく左右され、交通効率と連動するものである。自動車交通の主要課題は安全と効率と言える。交通事故による死者は約 1 万人、負傷者は約 100 万人でその経済的損失は年間約 4 兆円と言われている。交通渋滞も深刻でその経済的損失は年間約 12 兆円と言われている。これは個人にとっても社会にとっても大きな損失であり、早急の改善が必要である。

自動車交通は自動車本体の性能向上とともに、その作業環境である道路や駐車場の改善によって発達してきた。以下に作業環境の整備により自動車とその交通が大きく変化した例を示す。ドイツのシュツツガルト市にあるベンツ博物館には時代を画した自動車が展示されている。現在の

欧米の自動車は右側通行で左側（センターライン側）にハンドルが付いているが、ベンツの初期の自動車は右側（路肩側）にハンドルが付いていた。初期の自動車は馬車にエンジンを付けたものから始まっており、馬車の御者の位置が右側だったために自動車も右側にハンドルが付いた。当時は道路の事情が悪く路肩が脆弱であった。右側の路側に注意を払って走行しないと脱輪してしまうため右側を見やすい位置に御者が乗っていた。自動車の時代が進むと、道路が整備され路肩の条件が安定してくると、路肩に注意を払う必要が少なくなってきた。同時に自動車の走行速度や通行量が増加してくると、対向車や先の道路状態を確認しやすいセンターライン側である左側の方がドライバーの位置としてふさわしいことになり、左ハンドルが趨勢になった。

次の例はドイツのアウトバーンという高速道路の登場である。それまでは歩行者などの低速移動体と混在して自動車が走行していたために、高速走行が困難であった。アウトバーンは高速自動車専用道路の標準的形の最初のものである。自動車のみが走行できる専用道路で、インターチェンジにおいてのみ出入りする。今では当たり前の道路構造と通行形式であるが、これにより飛躍的に高速な自動車交通が実現された。その他にも交通信号や立体交差など交通の安全や効率を高めるための道路インフラが工夫され、自動車本体の高性能化と相まって自動車交通は改善されてきた。しかし、自動車台数の増加や利用場面の増加などに伴って前述の安全や効率に関する課題が登場してきている。従来からの物理的構造を主体としたインフラの機能向上や、車両の物理特性の向上では追いつかない状況になってきている。画期的に安全性や効率を向上させる対策が求められている。

自動車は高度な知的移動体である。その集合体の挙動が道路交通である。従来の道路交通においては運転機能における知能の大部分はドライバーに依存していた。そのための限界が顕在化してきている。これを改善するために、自動車およびその走行環境である道路インフラに高度な知能を持たせて走行支援を行い、安全で、円滑で、環境に調和した道路交通を実現する ITS (Intelligent Transportation

原稿受付 1999 年 4 月 23 日

キーワード: ITS, Driving Assistance, Smartcar, Smartway, Environment Perception, Road/Vehicle Cooperation

*〒 105-0003 東京都港区西新橋 2

*Minato-ku, Tokyo

図1 走行支援システムの基本ユーザサービス

Systems)の実現が期待されている。そのなかで自動車本体に知能を持たせる、インテリジェントな自動車(スマートカー)と走行環境である道路インフラに知能を持たせる、インテリジェントな道路(スマートウェイ)が協調する走行支援システムが研究開発されている。図1はAHS研究組合で検討された走行支援システムの基本ユーザサービスの体系である[1]。安全性向上と効率向上の目的に対して、自動車の基本的挙動である縦方向挙動、横方向挙動、交差挙動における基本的なユーザサービス(ドライバー支援)を体系的に記述したものである。これらの走行支援機能が求められている。

3. 課題解決の方向

自動車交通の改善を検討する軸はいくつかあるが、ここでは時間・空間的範囲の大きさと情報処理の程度について考えてみる。安全にかかわる運転は個別車両または周辺の数台の車両に関する問題が中心であり、時間・空間的範囲は大きくない。必要な情報処理のレベルも物理現象としての衝突の予測などでありそれほど高いレベルではない。このような運転を反射的運転と称する。効率にかかわる運転は集合体としての車両の問題が中心であり、時間・空間的範囲が大きい。情報処理については総合的判断や推論などの高いレベルが必要である。このような運転を思考的運転と呼ぶ(図2)。反射的運転とは反射神経による行動で、車線からはみ出さないように走行するためのステアリング制御や衝突防止のためのブレーキ制御などである。思考的運転とは大腦による思考結果に基づく行動で、目的地までの経路選択、到達時刻を考慮した速度調整、危険を予測した予防的運転などである(図3)。

図2 道路交通改善の検討軸

図3 反射的運転と思考的運転

まず安全に関する改善の方向について述べる。安全に関しては時間・空間的範囲は大きくない。個々の車両についてその車両の短時間に移動する時間空間の範囲の環境情報に基づく支援(反射的運転の支援)が重要である。交通事故の原因の大半はドライバーのミスによるものである[2]。ドライバーの主要な運転機能は走行環境の知覚、意志決定、操作である。すなわち、交通事故の原因の多くは認知(知覚)の誤り、判断(意志決定)の誤り、操作の誤りというドライバーのミスによるものである。これを改善するためには、図4に示すようにドライバーの知覚、意志決定、操作の各段階におけるミスをカバーする走行支援機能が必要である。いずれの段階を支援するにしてもまず環境の知覚が必要であり、環境の知覚が大変重要な要素である。現在研究開発されている走行支援システムの典型的機能を以下に示す。まず走行環境と自車両状態を知覚(検出および認識)して危険状態が近づいている場合に、ドライバーに危険の存在を知らせる「情報提供」という知覚支援を行う。情報が与えられても意志決定(判断や行動計画立案)が不適切な場合にはさらに危険に近づくので、早急な対処を促す「警報」という意志決定支援を行う。それでも十分な対

図4 支援レベルと環境情報の特徴比較

応が行われない場合には自動減速などの「操作支援」が実行される。

例えば前方車両に衝突するような場合には、システムが前方車両を検出し、車間距離と相対速度などから衝突の危険を認識する。ドライバーが自分の判断である程度の余裕をもって対処できるタイミングで前方車両の存在を「情報提供」する。余裕がなくなってくると、直ちに減速回避か操舵回避を促す「警報」が発せられる。それでもドライバーが十分な減速などの対応を行わない場合にはブレーキによる減速を支援する。ブレーキ操作支援で安全に停止して衝突を防止する。これが十分にできれば理想的であるが、完全なものの実現は困難であり、ドライバーの応答遅れを補うために短時間ブレーキを作動させ、以後はドライバーに制御を戻す支援や、突然の飛び出しなどに対して衝突時の衝撃をできるだけ軽減するために、衝突を回避できなくても緊急ブレーキを作動させるという考え方もある。

ベンツ社（現ダイムラークライスラー社）の調査研究 [3] によると、事故を起こしたドライバーが実際に危険を認識している時刻よりも 1 秒早く事態を認識して対処していれば 90% 程度の衝突事故は回避できるという知見が得られている。

情報提供が行われてドライバーが複雑な事態を認識して操作を開始するまでに 2.0~3.0 秒必要である。ドライバーが十分注意していて信号の変化などに反応してブレーキの操作を開始するまでに、アクセルペダルからブレーキペダルへの踏み換え時間も含めると 0.7~1.0 秒かかる [4]。これらの時間の中で知覚、意志決定、操作が的確に行われるかどうかで重大な事故に至るかどうかが決まる。数秒の時間余裕が安全に大きく影響する。走行支援システムはこの数秒の余裕をドライバーに提供することと的確な判断と操作を支援することにより大幅に安全性を向上することの一つの大きな目標にしている。衝突予測などは比較的簡単な物理現象に関する数式から導き出されるため、情報処理は比較的簡単なレベルで十分である。

次に渋滞に関する改善の方向について述べる。高速道路の渋滞に関してはサゲ（登り坂にさしかかる道路部）やト

図5 走行支援の形態

ンネル入り口などにおける減速の連鎖反応による渋滞など、ドライバーの運転に起因するものが多い。事故渋滞や事故などの見物による渋滞も人的要因である。高速道路における渋滞はドライバー行動に起因するものが多い。市街地における渋滞は交差点、合流部、車線減少部や駐車車両などによる交通容量のボトルネックの影響が大きい。しかし、全体としての適切な交通配分や混雑状況を考慮した経路選択などの時間・空間的交通分散によって改善される可能性がある。また、交差点や合流部で車両同士が連携してスムーズな流れを実現したり、車間距離を詰めて車群として連携しながら走行するなどの車両間の協調走行も渋滞の減少、交通効率の向上に有効である。都市部を走行している車両の乗員は一人のケースが非常に多い。物流に関しても小口の輸送が大変多い。車両 1 台あたりの乗員や積載量を多く（効率化）して移動する車両台数を減少させることも必要である。これらの渋滞減少や効率向上には、安全性向上のところで述べたような個々の車両の短時間の走行支援（反射的運転の支援）に加えて、車群としての走行の支援が必要である。車群の走行支援にはそれぞれの車両の行き先や関連地域の交通状況など、時間・空間的に広がりをもった情報とその情報を利用した支援機能（思考的運転の支援）が必要である。ここでの情報処理は多くの情報からの総合的判断や予測、推論などを含む高度なものが要求される。

これらの支援には、スマートカーで支援するものとスマートウェイが支援する形態がある。スマートウェイによる支援の場合は直接ドライバーを支援するケースと、スマートカーを介して支援するケースとがある（図 5）。

4. 高知能化の進展

従来の自動車は車両自身の状態を検出して運転支援を行っていた。例えば、ブレーキを操作したときに車輪がロックして横滑りするのを防止するために、車輪回転を計測してブレーキを制御するアンチロックブレーキシステムなど

である。そのほかにも多くの操作支援システムが実現されている。また、エアバッグのように事故発生時の被害を軽減する技術も適用されている。これらは自動車の中（タイヤを含む）のその時点での情報のみで動作している。しかし安全性や効率を飛躍的に向上させるためには反射的運転と思考的運転の両方を支援していく必要がある。安全性を大きく向上させるためには危険に遭遇する可能性を極力低くすることや、できるだけ上流で事故を予防することが必要である。効率を向上するためには個々の車両の走行を改善するとともに関係する全体的状況を認識、判断して適切な行動をとる必要がある。これらの支援には時間・空間的に広範囲の予測を含む、走行環境の知覚が必要である。現状車両の環境の認識、反射的運転の支援および思考的運転の支援に必要な環境の知覚の特徴を表1に示す。

現状車両のアンチロックブレーキなどでの支援における検出対象は自車両の挙動であり、検出する環境の範囲は自車両内やタイヤで接している地面の状態である。事象を把握する時間の範囲はその時点である。環境を観測する視点は車両の中に限られている。知覚に関する情報処理は数値計測処理程度である。

反射的運転の支援における環境の知覚は、事故につながる可能性が高い、周辺の状態である。空間範囲は数百メートルのオーダである。時間範囲は直前から今後車両が数十秒で到達する範囲である。1例として、時速100[km/h]で走行している車両の10秒先の到達地点は約270[m]先である。この程度の範囲の環境状態を知覚するための視点は自車両の上空100[m]程度であろう。鳥の視点といったところであろうか。なお、他の情報システムとのリンクは少なく、直接計測された環境情報から周辺状態とその後の状態の予測を行う。予測は加速度、速度、移動量と移動方向などを算出して衝突や道路からの逸脱を予測するものであり、情報処理レベルはそれほど高度ではない。

思考的運転の支援における環境の知覚は現在の自分の周辺から今後の進路で遭遇するであろうと予測される範囲である。これは極めて広域である。極端な例は数10日後の旅行の行き先の混雑状況予測などもある。空間範囲は一般的に数百キロメートル以下のオーダである。時間範囲は数分から数時間のオーダである。これらを見通す視点となる

表1 支援レベルと環境情報の特徴比較

項目	現状車両の支援	反射的運転の支援	思考的運転の支援
対象事象	自車両挙動	周辺状態	広域状態
空間範囲	自車両内	メートル	キロメートル
時間範囲	現時刻	秒	分～時間
視点	自車両内	自車両上空	高空
他とのリンク	なし	少ない	多い
情報処理	計測	単純予測	総合理解推論

とかなり高い上空で、気球や飛行機（あるいは人工衛星）などからの視点ということになるであろう。このような広域の予測を含む複雑な情報は一つの情報系だけでは入手困難であり、他の情報系とリンクして情報処理を行うこともある。例えば、混雑状況は天候状態に大きく左右されるため、交通量予測だけでなく天気予報も含めて旅行時間（到着時刻）を推定する。このように、情報処理は複雑で、総合的理解、判断、推論などが必要である。

5. 自動車と道路インフラの特徴

現状の支援システムでは環境の知覚は自車両の範囲であるため車載の車内情報システムだけであった。他の環境情報はドライバーが推測したりラジオなどの情報を聞いて得ていた。しかし、今後の走行支援システムは車両の周辺や広域の環境情報をシステムに組み込む必要がある。周辺車両などの環境情報を検出するセンサが搭載された車両（スマートカー）が必要である。車両からは見通せない範囲の情報や複雑な処理を要する情報も必要であるため道路インフラ（スマートウエイ）による環境情報検出・情報処理も必要になる。その特徴を比較検討する。表2にスマートカー（車載システム）とスマートウエイ（インフラシステム）の環境知覚における特徴比較を示す。

スマートカーに適用される環境の検出手段は光波、電波、音波などを利用した非接触式の車載センサである。これらは免許などを必要としないで誰でも使用できなければならず、送信出力は制限される。性能維持管理にも制約がある。取り付け位置は車体の範囲であり、視点（高さや視野角など）が制約される。天候の影響も受けやすい。例えば、雨天の走行で先行車が跳ね上げる水しぶき（スプラッシュ）は光学式センサの性能を著しく低下させる。冠水時や積雪時のレーン識別なども不可能である。車両を検出する場合の実用的な検出可能距離は良好な天候下で100[m]程度で

表2 車載システムとインフラシステムの特徴比較

○：優れている △：劣っている ×：不可能

項目	スマートカー	スマートウエイ
検出距離	△	○
視点の自由度	△	○
性能維持	△	○
利用可能場所	○	△
長時間信号処理	△	○
他情報とのリンク	△	○
車両周辺情報入手	○	△
広域情報入手	×	○
遠方、死角の情報入手	×	○
悪天候時の情報入手	×	○
個別事象判断	○	△
総合的判断	△	○

ある。歩行者検出はその半分以上の距離しか検出できない。したがって、車両周辺情報の入手には適しているが、遠く離れた地点や遮蔽物（道路側壁や他車両）の後ろの情報入手は不可能である。悪天候時の情報入手も不可能なものが多い。広域の情報を入手することも不可能である。

スマートウェイに適用される環境の検出手段も光波、電波、音波などを利用した非接触式のものであるが、その運用を専門家が行うことが可能であり、送信出力を上げたり、整備も専門的に行うことが可能である。また、設置個所はまったくフリーというわけではないが、自由度は高く、検出目的に合った視点が得られる。歩行者などの低速移動体には比較的長時間をかけた信号処理が可能である。悪天候時にも視点の自由度が高く、長時間の高度な信号処理が可能であり、影響を受けにくい。遠方や車から見た死角の情報の入手が可能である。アクティブな信号源を道路に埋設すれば、悪天候時の路面識別も可能である。ネットワーク化することにより広域の情報入手も可能である。スマートウェイのシステムは多くの情報を長時間かけて総合的に処理する総合的判断に適している。車両は高速に移動するため、スマートウェイから車両周辺情報を連続的に入手するのは困難である。車載システムはどこでも使用可能であるがインフラシステムは利用できる場所がインフラ設置個所に制限される。スマートカーの車載システムは移動中の検出・情報処理であるため高速で行う必要がある。また、他の情報システムとのリンクもとりにくい。そのため、個別事象判断には適しているが、総合的判断には不向きである。

車載システムとインフラシステムにはそれぞれ得意な機能と不得意な機能があり、どちらか一方だけで十分な走行支援機能を実現することは困難である。双方の特徴を活かした協調システムが必要である。

6. 路車協調の考え方

スマートカーとスマートウェイにはそれぞれ長所、短所があり、双方の特徴を活かして補完する協調システムが望まれる。前章で述べた特徴を総合すると、スマートカーは反射的運転の支援に適しており、スマートウェイは思考的運転の支援に適している。ただし、スマートカーは死角や遠方の環境を知覚することは不可能である。また、悪天候下での環境認識も不可能なことがある。反射的運転にもスマートウェイによる支援が必要である。以上をまとめると表3になる。

反射的運転の支援は車両周辺の状態を知覚して、短時間の間に実行されるものであり、スマートカーが中心の役割である。車載のシステムはいつでもどこでも利用できるため、適用範囲が広い。自動車は自立性の強い移動体であり、自動車自身で可能な範囲はインフラに依存しない自律型でカバーすべきである。ただし、車載のシステムには限界が

表3 車載システムとインフラシステムの役割分担

	反射的運転の支援	思考的運転の支援	死角の情報支援	悪環境の情報支援
車載システム	○	△	×	×
インフラシステム	△	○	○	○

○：主 △：副 ×：不可能

あり以下の内容はスマートウェイのインフラが支援すべきである。

①カーブや交差点で安全な走行に必要な範囲であるが、自動車からは見通せない（死角、遠方）範囲の環境の知覚
カーブの先の停止車両、交差点で右折しようとして停止している対向車の脇をすり抜けてくる2輪車などの知覚支援である。

②前方道路の路面状態（摩擦係数）の知覚

カーブやトンネル出口などドライバーが視認困難な場所で路面状態が滑りやすくなっていると重大な事故につながる可能性が高い。自動車は直下の路面状態を知覚することは可能であるが前方の路面状態変化を知るすべがない。

③悪環境下の知覚

雨霧雪などの悪天候や夕日などが直接目に入るような環境下では車載のシステムで車線位置などの環境を知覚することは困難である。悪環境に強いレーンマークなどが必要である。

思考的運転の支援は広域の情報を利用して行われるものであり、スマートウェイが中心的役割を果たすものである。群としての自動車交通の最適化は、個別の車両ではできないことである。前方道路の混雑情報、迂回路の交通状況などが得られれば適切な経路選択が可能である。道路交通状況がわかれば到着時刻が正確に予測でき、目的の時刻に無駄なく安全に到着するように速度調整を行うことも可能である。これらは渋滞の減少などの効率向上に寄与するだけでなく、余裕をもって安心して運転することができ、広い意味での安全性の向上にも寄与する。交差点や合流部において、上空から眺めて全体での最適解をもとめ、個々の車両に指示ができれば効率や円滑性を格段に向上することができる。全体交通需要などを勘案した経路配分や車線利用配分などはインフラでなければ適切にできないことである。

スマートカー自体が高度な交通状況センサになりうる。スマートカー単独では広域の環境情報を得ることはできないが、個々の車両の情報を集めると立派な広域情報になる。個々の車両の速度や旅行時間をインフラに伝え、それを集めて分析すれば交通状態の把握が可能である。停止した車両が停止位置などの情報をインフラや他車両に伝えれば、停止車両への衝突を効果的に予防することが可能である。プライバシーの問題があるが、路車協調一つの有効な形であり実現が期待される。

7. おわりに

深刻な道路交通の課題を解決するためには自動車とその群としての移動を高知能化する必要がある。高知能化されたスマートカーが必要であるが、自動車単体では不可能なことが多い。自動車の作業環境である道路を高知能化したスマートウェイがこれを解決することができる。スマートウェイとスマートカーが連携、協調して安全で効率的で環境にやさしい道路交通が実現できる。日本ではスマートカーの実現を目指す ASV (Advanced Safety Vehicle) やスマートウェイの実現を目指す AHS (Advanced Cruise Assist Highway System) が連携して高度な走行支援システムを実現するための研究開発が進められている。21 世紀初頭にはこれらのシステムが実現される見通しである。道路交通の飛躍的改善が図られることを期待する。

参考文献

- [1] 保坂, 中ノ森, 雨宮: “基本リクワイアメントを源流とした AHS の研究開発”, AHSRA REPORT, vol.2, pp.10-13, 1998.
- [2] 長山: “事故解析からみたヒューマン・エラー”, 自動車技術会, 人と車とエレクトロニクスシンポジウム資料, p.1-7, 1990.
- [3] K. Enke: “Possibilities for Improving Safety within the Driver-Vehicle-Environment Control Loop,” 7th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles Proceeding, p.789, 1979.
- [4] D. Shiner: 交通心理学入門—道路交通安全における人間要因, p.97-98, サイエンス社, 1987.

保坂明夫 (Akio Hosaka)

1946 年 5 月 2 日生。横浜国立大学工学部電気工学科卒業。日産自動車株式会社入社, エンジン電子制御, 自動運転, 運転支援などの電子情報技術研究開発に従事。1996 年 10 月 AHS 研究組合に出向, 走行支援システムの研究企画を担当。走行支援分野の国際標準化の日本エキスパート, IEEE, 自動車技術会, 計測自動制御学会などの会員。