

## 講演 4. 自動走行システムの安全性確保に関する基礎的研究

—故障発生時にドライバが手動操作を引き継ぐために必要な時間的余裕について—

自動車研究部

※児島 亨

波多野 忠

### 1. はじめに

自動運転（自動走行）システムには、①交通事故の削減、②交通渋滞の緩和、③環境負荷の低減、④高齢者等の移動支援、⑤快適性の向上という効果が期待され、世界一安全な道路交通社会を目指す我が国にとって、関連技術の開発やその普及に向けた環境整備は極めて重要であり、内閣府による SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）自動走行システム研究開発計画<sup>(1)</sup>においてもさまざまな研究テーマが掲げられ、実施されている。

表 1 に上記研究開発計画における自動走行システムの定義を示す。ドライバが運転操作に介入することを想定しないレベル 4 の完全自動走行システムを別とすると、自動走行中にシステムからドライバへ運転操作の主体が遷移（transition、権限委譲とも言う）する状況が発生する。システムからドライバへ運転操作の主体を安全かつ円滑に遷移させることは、レベル 2~3 の準自動走行システムにおける重要な課題の一つである。

本研究では、直接的な運転操作からは解放されるが周辺環境やシステムの状態をドライバが常時監視することを前提とするレベル 2 の自動走行システムを

表 1 自動運転レベル及びそれを実現する自動走行システム・運転支援システムの定義<sup>(1)</sup>

自動運転レベル	概要	注(責任関係等)	左記を実現するシステム	
レベル 1	加速・操舵・制動のいずれかをシステムが行う状態	ドライバー責任	安全運転支援システム	
レベル 2	加速・操舵・制動のうち複数の操作をシステムが行う状態	ドライバー責任 ※監視義務及びいつでも安全運転できる態勢	準自動走行システム	自動走行システム
レベル 3	加速・操舵・制動を全てシステムが行い、システムが要請したときはドライバーが対応する状態	システム責任(自動走行モード中) ※特定の交通環境下での自動走行(自動走行モード) ※監視義務なし(自動走行モード:システム要請)		
レベル 4	加速・操舵・制動を全てドライバー以外が行い、ドライバーが全く関与しない状態	システム責任 ※全ての行程での自動走行	完全自動走行システム	

ただし、いずれのレベルにおいても、ドライバーは、いつでもシステムの制御に介入することができる。

対象に、システムからドライバへ運転操作の主体が遷移する際に必要な時間的余裕について、ドライビングシミュレータ（以下、「DS」という。）実験の結果から考察することとした。遷移が発生する状況については、ドライバにとって予測が困難であり可及的速やかな対応が求められるシステムの故障発生時とした。

### 2. 実験方法

#### 2. 1. 本研究で対象とする自動走行システム

本研究で対象とする自動走行システムは、高速道路の走行車線においてシステムが周辺の交通車両を監視しながら車線維持及び追越しを自動で行う自動命令型操舵機能（以下、「自動操舵」という。）に定速走行・車間距離制御装置（Adaptive Cruise Control、以下、「ACC」という。）を組み合わせたシステムとした。本システムが正常に作動している間は、ドライバによるステアリングホイール（以下、「ハンドル」という。）、アクセル及びブレーキ操作は不要であり、ドライバはハンドルから手を離れた状態とした。

#### 2. 2. 実験場面について

本研究ではシステムからドライバへ運転操作の主体が遷移する場面として、システムに故障が発生することによって自動操舵を継続できなくなり、ドライバに可及的速やかかつ的確なハンドル操作が求められる状況として下記の 2 場面を設定した。

##### 1) カーブ走行中の故障発生（場面 1）

図 1 に実験場面の概要を示す。実験参加者は自動走行システムを使用して高速道路を走行する。第 1 車線の半径 300m の左カーブを速度 100km/h で旋回中に自動操舵の故障が発生し、音と表示による警報が行われる。故障によりカーブ走行に必要な操舵トルクが発生しなくなるため、前輪のセルフアライニングトルクによりハンドルは中立に戻ろうとする。ドライバがカ

ーブ走行を続けるためのハンドル操作を引き継がなかった場合は、車両はカーブの外側方向に車線を逸脱する。

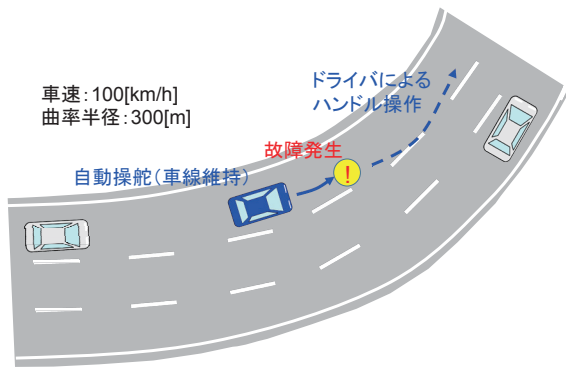


図1 実験場面の概要 (場面1)  
(カーブ走行中の故障発生)

図2及び表2は本実験場面における実験パラメータを示している。システムを停止する方法として、図2に示す case1 と case2 を設定した。本実験では例えば自動操舵に必要な操舵トルクを発生させるステアリング系アクチュエータ等の故障を想定しているが、故障通知の警報開始と同時に操舵トルクを 0 にする case1 に対し、case2 の場合は何らかのフェールセーフ手段により、旋回するために発生していた操舵トルクをある程度時間をかけて徐々に低下させることが可能なケースを想定している。次に、故障発生をドライバーに通知するための警報を開始してからシステムを停止するまでの時間は、表2に示す 0 秒、2 秒、4 秒の 3 水準を設定した。この時間は故障発生時にドライバーが手動操作を引き継ぐまでの時間的余裕に相当

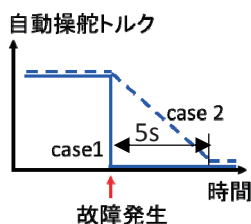


図2 自動操舵トルクを停止する方法

表2 実験条件一覧 (場面1)

自動操舵トルク停止方法	一定時間毎のボタン操作	故障を通知する警報開始からシステムを停止するまでの時間		
		0[s]	2[s]	4[s]
case 1	-	実施	実施	実施
	1分間隔	実施	-	-
	5分間隔	実施	-	-
case 2	-	実施*	-	-

\*故障通知警報開始時より操舵トルクを徐々に減少させる

するが、今回はシステムの作動を継続することが困難な故障発生を想定し、比較的短めの設定とした。更に、本場面では、表2の case 1 と 0 秒の組合せに限り、システムを継続して使用するためにシステムが正常に作動している間、定期的 (1 分間隔及び 5 分間隔) にシステム起動用のボタンを操作するタスクを行うケースについても実施した。

2) 車線変更中の故障発生 (場面2)

図3に実験場面の概要を示す。実験参加者は自動走行システムを使用して高速道路を走行する。前方車両を追い越すため、第1車線から第2車線へ車線変更している最中に自動操舵の故障が発生し、音と表示による警報が行われる。右方向へ操舵を開始し、第1車線から第2車線へ車両が横移動する間のほぼ中間地点 (ハンドルの舵角は 0 度付近) で操舵トルクを 0 にするため、ドライバーが車線変更を続けるためのハンドル操作を引き継がなかった場合には、車両は第3車線に向かって車線を逸脱する。

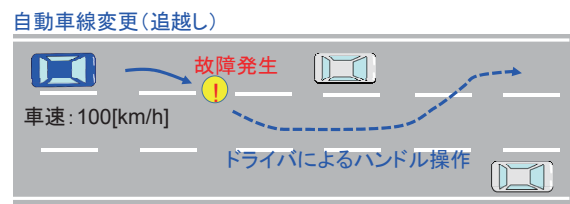


図3 実験場面の概要 (場面2)  
(車線変更中の故障発生)

図4及び表3は本実験場面における実験パラメータを示している。車線変更を開始してから終了するまでの時間 (車線変更時間) については、短いほど横移動の速い車線変更となる。今回の実験では 3 秒 (やや急いだ車線変更を想定) と 6 秒 (通常的車線変更を想定) の 2 水準を設定した。故障発生を通知する警報を開始

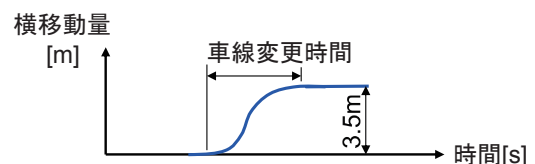


図4 車線変更時間の定義

表3 実験条件一覧 (場面2)

車線変更時間	故障を通知する警報開始からシステムを停止するまでの時間	
	0[s]	2[s]
3[s]	実施	-
6[s]	実施	実施

・自動操舵トルクを減少させる方法は図2に示すcase1で実施  
・一定時間毎にボタンを操作するタスクは実施せず

してからシステムを停止するまでの時間については、0秒と2秒の2水準を設定した。なお、4秒の条件については、車線変更を開始する前に警報を開始することとなることから、設定しなかった。

### 2. 3. その他の実験条件

表4及び表5は上記2つの実験場面において、故障が発生するまでの間（自動走行システムは正常作動）の走行時間、カーブ走行の回数及び追越しの回数を表したものである。故障発生までの走行時間が短い（約4分）シナリオは、システムの使用経験が短い状況において故障が発生した場合を想定し、カーブ走行及び追越しともに少ない回数とした。短時間のシナリオは各実験参加者の最初の実験として実施することとし、実験パラメータは、カーブ走行中の故障発生に関しては表2に示した組合せ中の“case1、0秒後停止、定期的なボタン操作無し”とし、車線変更中の故障発生に関しては表3に示した組合せ中の“車線変更時間3秒、0秒後停止”を実施することとした。一方、故障発生までの走行時間が長いシナリオ（約25～39分）は、システムの正常な作動を経験する時間（回数）が十分に多い状態において故障が発生した場合を想定し、カーブ走行及び追越しの回数を設定した。長時間のシナリオについては表2及び表3に示した全ての実験パラメータを実施した。長時間のシナリオを複数設定した理由は、毎回同じタイミングで故障が発生することによって、実験参加者が故障発生を待ち構えるようになることを抑制するためである。

なお、本実験ではレベル2の自動走行システムを対象とすること及び1回の走行時間がDS実験としては

表4 実験シナリオの時間及び作動回数（場面1）

		短時間	長時間		
実験シナリオの時間 (故障発生時点まで)		約4分	約25分	約30分	約35分
システムが正常に作動する間にカーブを走行する回数	半径300[m](左)	0回	5回	6回	7回
	半径500[m](左)	1回	5回	6回	7回
	半径800[m](右)	1回	10回	12回	14回
システムが正常に作動する間に追越しを実行する回数		3回	15回	18回	21回

表5 実験シナリオの時間及び作動回数（場面2）

		短時間	長時間		
実験シナリオの時間 (故障発生時点まで)		約4分	約26分	約32分	約39分
システムが正常に作動する間にカーブを走行する回数	半径300[m](左)	0回	0回	0回	0回
	半径500[m](左)	1回	8回	10回	12回
	半径800[m](右)	1回	8回	10回	12回
システムが正常に作動する間に追越しを実行する回数		3回	24回	30回	36回

比較的長いことから、実験中にドライバーの前方視線や注意力を妨害することを意図するサブタスクは実施しなかった。

図5は実験に使用した Human Machine Interface (以下、「HMI」という。)である。DSの車内に設置したスピーカーからの音（故障通知の警報音は2kHzの音を断続音形式（ピピピピ）で約1秒間）及びモニタ画面への表示によるHMIとした。自動操舵（図中ACSF）の故障を通知する際に、「手でハンドル操作してください」と表示することによって、ドライバーに求める手動操作がハンドル操作であることが伝わるようにした。

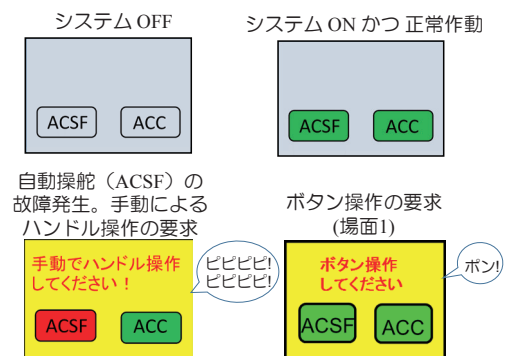


図5 実験に使用した HMI

図6にDSの外観及び運転席周辺を示す。本実験に使用したDSは小型乗用車の車体を使用しており、運転席及び操作系に関しては実車と同じである。また、各種の動揺装置により、ドライバーは旋回時や車線変更時の車両の運動を体感することが可能である。運転席右側のボタンを押すことにより、自動操舵とACCが同時に起動するものとした。なお、自動走行システムを使用中は、前方の道路線形及び車線変更中の進路に合わせ、DSのハンドルが転舵する方式とした。



図6 実験に使用した DS の外観及び運転席

### 2. 4. 実験参加者の構成及び手続き

実験参加者は日常的に運転を行う20代後半から70代前半の男女30名（男性17名、女性13名。そのうち、65歳以上の高齢者は男性2名、女性3名）で構成した。実験参加者に対し、書面と口頭で実験内容、



進行順序及び注意事項等について説明を行った後に、実験参加者の意思により同意書へ署名してもらった。また、本実験は独立行政法人自動車技術総合機構 交通安全環境研究所の「人間を対象とする実験に関する倫理規程」に基づき事前承認を得た後に実施した。

実験前の説明では、システムの機能について説明した後、システムを使用中は、危険を回避するために手動操作が必要であるとドライバ自身が判断した場合またはシステムの異常を通知する警報があった場合を除き、ハンドルから手を離した状態とするように教示した。また、実験を開始する前の練習走行では、最初に自動走行システムを使って走行し、システムの作動を体験してもらうとともに、オーバーライドについても体験してもらった。目安となる練習時間（10分程度）が経過した時点で、「システムの機能について理解した上で信頼して使うことができそうか？」を実験参加者に口頭で質問し、「YES」の回答が得られたら、次にDSの車両特性に慣れるための手動運転による練習を行った。なお、故障発生により運転操作の主体が遷移する場面については練習を行わなかった。

本実験では全ての実験参加者に対し、表2及び表3で示した全ての実験ケースを実施した。実験の順序は自動走行システムの使用経験が少ない状況を想定した短時間のシナリオを最初に行い、その後、長時間のシナリオに移ることとした。長時間のシナリオでは実験順序による影響を抑制するため、実験参加者毎に順序を変えて実施した。また、長時間のシナリオを2回実施する毎に10～15分程度（昼休みは1時間）の休憩を取ることとした。

## 2. 5. 計測するデータ及び解析方法

本実験では、運転操作に関するデータ及び車両の走行軌跡に関するデータを時系列に計測し、故障通知の警報が行われてからドライバがハンドルを握るまでの時間（以下、ハンドル反応時間とする）及び右前輪の車線逸脱量（カーブ走行の場面では第1車線と第2車線の、車線変更の場面では第2車線と第3車線の境界線に対する逸脱量）について、統計的に有意な差の有無を確認するため、有意確率を5%または1%として平均値の差の検定を行った。また、実験結果は実験参加者内要因として解析した。

## 3. 実験結果

本章では長時間のシナリオで取得した実験データ

について解析した結果を報告する。

### 3. 1. カーブ走行中の故障発生

図7は、全実験参加者の長時間シナリオのデータを用いて、実験条件の違いによるハンドル反応時間を比較した結果である。ハンドル反応時間は平均+標準偏差で1.0～1.3秒程度であり、有意確率5%で有意な差は見られなかった。図8は図7と同じ実験条件における右前輪逸脱量最大値を比較した結果である。ドライバにとって最も時間的な余裕が少ない“case 1、0秒後停止”の条件において、平均+標準偏差で約3.2mの車線逸脱となり、他の3つの実験条件に対し有意確率1%で有意な差となった。残りの3つの実験条件間については、いずれも平均+標準偏差では逸脱には至らず、有意確率5%で有意な差は見られなかった。

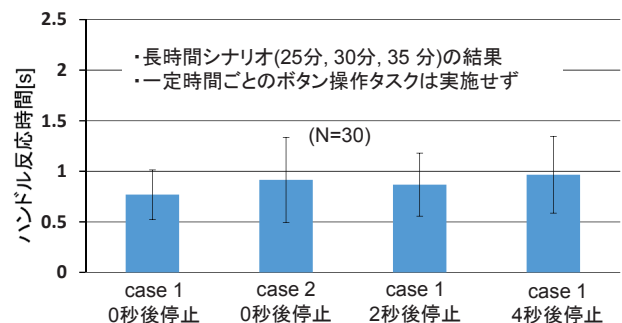


図7 ハンドル反応時間の比較

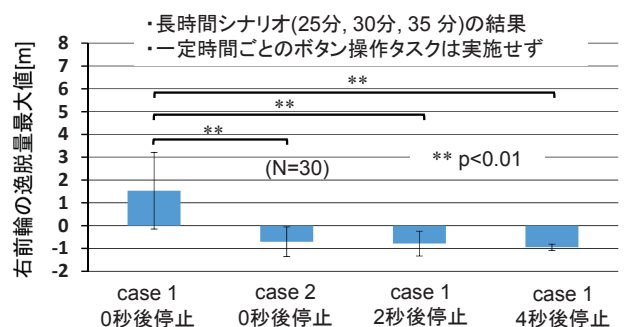


図8 右前輪の逸脱量最大値の比較

図9はHMIからのボタン操作要求に従って定期的にシステム起動用の押しボタン操作を行ったケースにおいて、故障通知の警報開始後にハンドルを握るべきところを誤ってボタンを操作した（または操作しようとした）人の数を集計した結果である。1分間隔のケースにおいては全体の43%に相当する13名においてボタンの誤操作が確認された。図10は1分間隔のケースで誤操作した13名についてハンドル反応時間を比較した結果である。ボタン操作を行わないケースと比較して、平均+標準偏差で1秒程度ハンドル反応

時間が増加しており、有意確率 5%で有意な差となった。また、図 11 は同じ 13 名について右前輪の逸脱量最大値を比較した結果である。ボタン操作を行わないケースと比較して、平均+標準偏差で車線逸脱量が約 3m 増加しており、有意確率 5%で有意な差となった。今回の実験結果は、ドライバがシステムを継続して使用することの意思表示として単純な操作を一定の間隔で続けると、ドライバにとって無意識の行動となり、突発事象に対する状況認識を誤るリスクがあることを示唆していると考えられる。

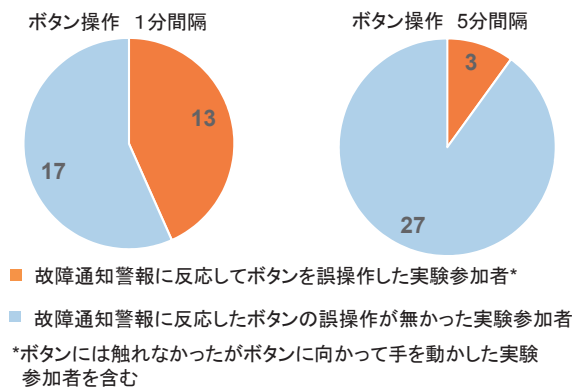


図 9 ボタンを誤操作した人数の比較

・長時間シナリオ(25分, 30分, 35分)の結果  
 ・実験条件: case 1、0秒後停止

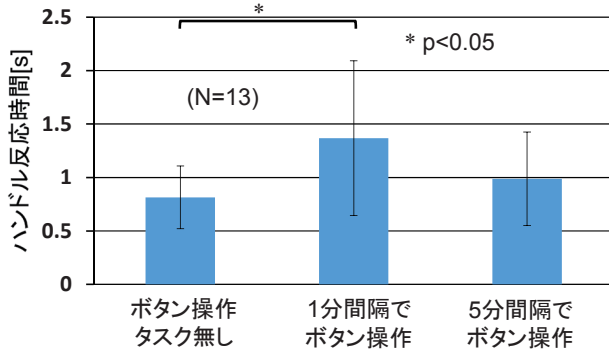


図 10 ハンドル反応時間の比較

・長時間シナリオ(25分, 30分, 35分)の結果  
 ・実験条件: case 1、0秒後停止

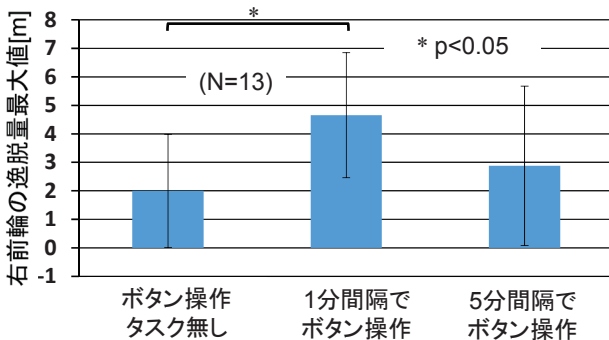


図 11 右前輪の逸脱量最大値の比較

以上の結果から、カーブ走行中の故障発生に関しては、故障通知の警報開始から 2 秒程度の間、旋回に必要なハンドル舵角が維持されることが望ましいが、それが困難な場合には、警報開始時点から自動操舵トルクを徐々に低下させる方法が、ハンドル操作を引き継ぐ際の時間的余裕を確保するために有効である。今回の実験では、警報開始から 5 秒かけて自動操舵トルクを徐々に低下させたところ、多くのドライバは車線から逸脱すること無く旋回を継続することが可能であった。なお、今回の結果は DS 実験の環境で得られたものであり、実際のシステムを使用中に故障が発生した場合のハンドル反応時間はより長くなる可能性もあると考えられる。

### 3. 2. 車線変更中の故障発生

図 12 は全実験参加者の長時間シナリオのデータを用いて、実験条件の違いによるハンドル反応時間を比較した結果である。ハンドル反応時間は平均+標準偏差で 1.0~1.8 秒程度であるが、“車線変更時間 6 秒、2 秒後停止”の条件は他の 2 つの条件よりもハンドル反応時間がやや長く、有意確率 5%で有意な差が見られた。図 13 は図 12 と同じ実験条件における右前輪逸脱量最大値を比較した結果である。ドライバにとって最も時間的余裕が少ない“車線変更時間 3 秒、0 秒後停止”の組合せにおいて、平均+標準偏差で約 1m の逸脱が見られた。この結果を他の 2 つのケースと比較すると、“車線変更時間 6 秒、0 秒後停止”に対しては有意確率 5%で有意な差となったが、逸脱量により大きな違いが見られる“車線変更時間 6 秒、2 秒後停止”に対しては有意確率 1%で有意な差となった。“車線変更時間 6 秒、0 秒後停止”及び“車線変更時間 6 秒、2 秒後停止”については、いずれも平均+標準偏差で逸脱まで至らなかった。なお、“車線変更時間 6 秒、2 秒後停止”の条件では、平均+標準偏差が負の値で絶対

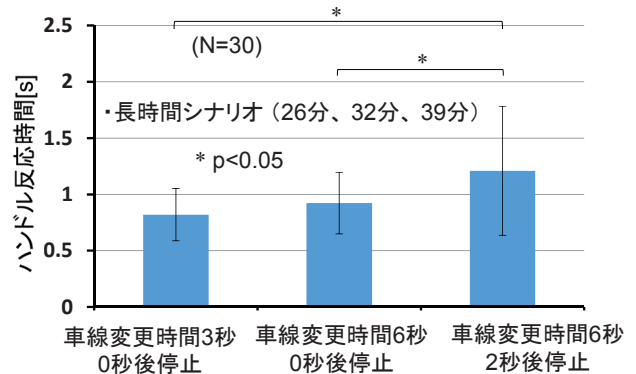


図 12 ハンドル反応時間の比較 (場面 2)

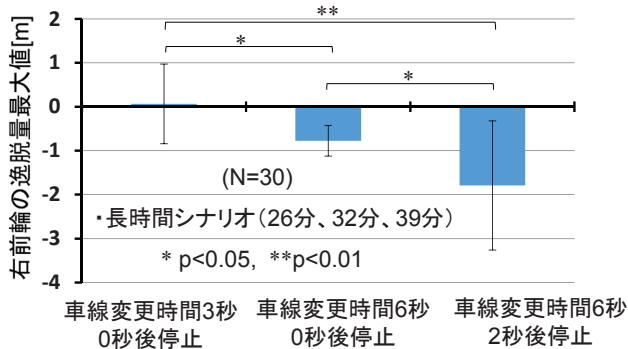


図 13 右前輪の逸脱量の比較 (場面 2)

値がより大きな値となっているが、これは一部の実験参加者が警報に反応してハンドルを握った後に車線変更を中止して第 1 車線に残ったためである。

以上の結果から、車線変更中の故障発生に関しては、ハンドル反応時間の実験結果 (平均値+標準偏差で 1.0~1.8 秒程度) から、故障通知の警報開始から 2 秒程度の時間的余裕が必要であると考えられる。時間的余裕を確保するための方法として、警報開始から 2 秒程度の間、システムによる制御が継続されることが望ましいが、それが困難な場合には、システムが正常な状態における車線変更時間をある程度長めに確保する方法が、ハンドル操作を引き継ぐ際の時間的余裕を確保するために有効である。今回の実験では、車線変更時間を 6 秒に設定したところ、警報開始と同時にシステムによる制御を停止しても多くのドライバーは車線から逸脱すること無くハンドル操作を引き継ぐことが可能であった。なお、今回の結果は DS 実験の環境で得られたものであり、実際のシステムを使用中に故障が発生した場合のハンドル反応時間はより長くなる可能性もあると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究は、DS を用いて一般のドライバーを対象に、ドライバーによる周辺環境及びシステムの監視が常時行われることを前提とした自動走行システム (自動運転レベル 2 に相当) を使用中に自動操舵機能の故障が発生し、手動操舵へ遷移する場面の実験を行った。ドライバーにとって可及的速やかに正確なハンドル操作が求められる状況として、カーブ走行中の故障発生及び車線変更中の故障発生 of 2 つの場面について実験を実施した。実験の結果から以下のことが分かった。

- ・ドライバーがハンドルから手を離している状態で自動走行システムの故障が発生した際に、ハンドル操作

を安全に引き継ぐためには、2 秒程度の時間的余裕が必要であると考えられる。

- ・時間的余裕を確保するための方法として、故障通知の警報開始から 2 秒程度の間、システムによる制御が継続されることが望ましい。その他の方法として、カーブ走行の場合には、警報開始後徐々に制御を停止する方法は有効である。今回の実験では、警報開始から 5 秒かけて自動操舵トルクを徐々に低下させたところ、多くのドライバーは車線から逸脱すること無く旋回を継続することが可能であった。また、車線変更の場合には、システムが正常な状態における車線変更時間をある程度長めに取る方法は有効である。今回の実験では、システム正常時の車線変更時間を 6 秒に設定したところ、警報開始と同時にシステムによる制御を停止しても多くのドライバーは車線から逸脱すること無く車線変更を引き継ぐことが可能であった。
- ・システムを継続して使用するために一定の時間間隔で単純な操作をドライバーに要求する方法は、緊急時にドライバーが状況認識を誤るリスクがある。

本研究は内閣府が実施する戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)・自動走行システムに関連した平成 27 年度国土交通省受託調査「自動走行システムの安全性確保に必要な HMI の要件に係る基礎調査」によるもので、本講演は調査結果を抜粋して報告するものである。

#### 参考文献

- (1) 内閣府：SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 自動走行システム研究開発計画 (2016)
- (2) SAE：Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, J3016-201401(2014)