

講演 9. 自動運転車が車線変更する際に備えるべき危険回避能力に関する研究

自動車安全研究部 ※真鍋 裕輝 児島 亨 北田 幸一

1. はじめに

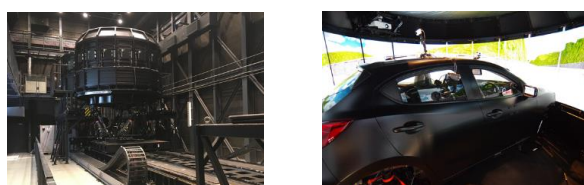
高速道路等で使用する自動運行装置に関する国連協定規則(UN-R157)において、自動運転車（乗用車）が追い越しのための車線変更（Lane Change、以下 LC）をおこなうことを可能とする改正案が採択されたり。UN-R157 において、自動運転車の危険回避能力は定量的な指標がない場合には Competent and Careful human driver（以下、C&C ドライバ）と同程度以上の危険回避能力を持たなければならないとされているため、自動運転車の危険回避能力を議論する上では C&C ドライバの運転行動の調査が必要となる。

本報告では、LC 時に危険事象に遭遇する一般ドライバーの運転行動を網羅的に調査し、危険事象の回避をおこなう際の運転行動の定量的な評価をおこなった。

2. 実験方法

2.1. ドライビングシミュレータ

本実験ではドライビングシミュレータ（以下、DS）を用い、実験参加者が LC をおこなう際に危険事象に遭遇する場面を再現した。実験に用いた DS の概観を図 1、仕様を表 1 に示す。17 枚の有機 EL パネルで水平方向に 360°覆われたポッドを、8m 並進台と 6 軸電動ユニットによって動かし、車両の動きを模擬した。



(a) DS の外観 (b) DS の内部と操縦席

図 1 DS の概観

表 1 DS の仕様

画面	サイズ	55 in
	解像度	1920 x 1080 ppi
	フレームレート	60 fps
	画面数	17
	水平視野	360°
並進装置	可動範囲	8 m
	最大加速度	$\pm 4 \text{ m/s}^2$
	可動範囲	$\pm 0.3 \text{ m}$
6 軸ユニット	可動範囲	$\pm 0.3 \text{ m}$
	最大加速度	$\pm 0.5 \text{ m/s}^2$

2.2. 実験場面

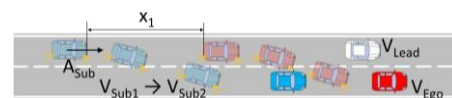
本調査の実験場面は、Validation Method for Automated Driving/ New Assessment Test Method²⁾の Annex2 において想定されている危険な運転場面から選定した。片側 2 車線の高速道路での実験場面を 3 種類と片側 3 車線での実験場面を 1 種類の合計 4 種類を設定した。図 2 に実験場面の概略図を示す。



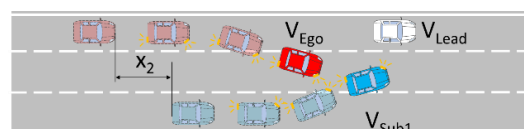
(a) LC1: 自車の LC と同時に先行車が減速開始し停止



(b) LC2: 自車の LC と同時に先行車も LC



(c) LC3: 自車の LC と同時に後続車も加速しながら LC



(d) LC4: 自車の LC と同時に 2 つ隣の車線の車両も LC

図 2 実験場面の概略図

ドライバーが運転する車両を自車（図表中 Ego）、自車に接近する車両を実験対象車（図表中 Sub）、自車が追い越しをするきっかけとなる低速の車両を先行車（図表中 Lead）と呼称する。なお、先行車が実験対象車である場合は、実験対象車の呼称を優先する。

＜実験場面 1（以下、LC1）＞（片側 2 車線）

第 1 車線上を 100km/h で走行する自車が、前方を 80km/h で走行する先行車（実験対象車）に追いつき、追い越す場面で、自車が方向指示器を点滅開始すると同時に実験対象車が減速を開始し停止（図 2(a)）。

＜実験場面 2（以下、LC2）＞（片側 2 車線）

100 km/h で走行する自車が前方の第 1 車線の低速の先行車（実験対象車）に追いつき追い越す場面で、実験対象車は自車の方向指示器点滅開始と同時、もしくは

は自車の白線到達と同時に第2車線へのLCを開始(図2(b))。

<実験場面3(以下、LC3)>(片側2車線)

自車が低速の先行車を追い越す場面で、自車後方で自車と同じ100 km/hで走行していた第1車線の実験対象車が、自車方向指示器点滅開始と同時に加速しながらLCを開始(図2(c))。

<実験場面4(以下、LC4)>(片側3車線)

自車が低速の先行車を追い越す場面で、自車と同じ100 km/hで第3車線(自車の2つ隣の車線)を走行する実験対象車が、自車の方向指示器点滅開始と同時にもしくは自車の白線到達と同時に第2車線へのLCを開始(図2(d))。

2.3. 実験条件

2.2節で示した実験場面の詳細条件を表2~5に示す。なお、表中無色の行は実験条件により変化するパラメータ、灰色でハッチングされた行は定数を示す。

表2 LC1の実験条件(先行車減速)

LC No.	1_1	1_2
D_{Sub} [m/s ²]	3	6
V_{Ego} [km/h]	100	100
V_{Sub1} [km/h]	80	80
V_{Sub2} [km/h]	0	0
V_{Other} [km/h]	100	100
l [m]	56	56
イベントトリガ	自車方向指示器	自車方向指示器

表3 LC2の実験条件(先行車もLC)

LC No.	2_1	2_2	2_3	2_4	2_5
V_{Sub1} [km/h]	80	80	60	60	60
イベントトリガ	自車白線到達	自車方向指示器	自車白線到達	自車方向指示器	自車方向指示器
実験対象車の方向指示器点滅有無	あり	あり	あり	あり	なし
V_{Ego} [km/h]	100	100	100	100	100
V_{Other} [km/h]	100	100	100	100	100
l [m]	56	56	56	56	56

表4 LC3の実験条件(後続車も加速しながらLC)

LC No.	3_1	3_2	3_3	3_4	3_5
A_{Sub} [m/s ²]	1.5	1.5	3	3	3
x_1 [m]	56	28	56	28	28
実験対象車の方向指示器点滅有無	あり	あり	あり	あり	なし
V_{Ego} [km/h]	100	100	100	100	100
V_{Sub1} [km/h]	100	100	100	100	100
V_{Sub2} [km/h]	130	130	130	130	130
V_{Lead} [km/h]	80	80	80	80	80
イベントトリガ	自車方向指示器	自車方向指示器	自車方向指示器	自車方向指示器	自車方向指示器

表5 LC4の実験条件(2つ隣の車線の車両もLC)

LC No.	4_1	4_2	4_3	4_4	4_5	4_6	4_7
イベントトリガ	自車白線到達	自車方向指示器	自車白線到達	自車方向指示器	自車白線到達	自車方向指示器	自車方向指示器
x_2 [m]	-20	-20	-4	-4	10	10	-4
実験対象車の方向指示器点滅	あり	あり	あり	あり	あり	あり	なし
V_{Ego} [km/h]	100	100	100	100	100	100	100
V_{Sub1} [km/h]	100	100	100	100	100	100	100
V_{Lead} [km/h]	80	80	80	80	80	80	80

ここで、 V_{Ego} は自車速度、 V_{Sub1} は実験対象車の初期速度、 V_{Sub2} は実験対象車が加減速をおこなう場合の加減速終了後の速度、 D_{Sub} は実験対象車が減速をおこなう場合の減速度、 A_{Sub} は実験対象車の加速度、 x_1 はLC3における自車と実験対象車の初期車間距離、 x_2 はLC4における自車と実験対象車の初期車間距離とした。 x_2 は自車前端から実験対象車後端の距離とし、自車と実験対象車は約4 mで横並びとなる。

20~50代の20名の男女が実験に参加した。1人の実験参加者は、表2~5に示した19種の条件をすべて走行することとした。参加者には定速走行装置を用いて100 km/hで走行し、低速の先行車に追いついた場合には追い越しのためにLCするよう教示した。

また、自車の車幅は1.57 m、車線幅は3.7 mとした。

3. 実験結果

以下に紹介する実験結果の有意差検定として、行動割合の比較では、2標本KS検定をおこない、Bonferroni補正をおこなった。分布の比較ではノンパラメトリックの順位和検定であるKruskal-Wallis検定をおこない、Steel-Dwass法による多重比較をおこなった。

3.1. LC1の結果と考察(前方の車両が減速)

LC1における実験参加者の行動割合を図3に示す。実験対象車の減速度の違いによって実験参加者の行動割合に有意差はみられなかった。ブレーキ操作する参加者は半数を超えたものの、完全に停止するケースは少なかった。

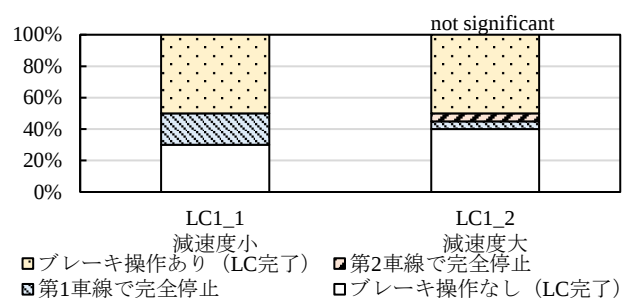


図3 実験参加者の行動割合(LC1)

次に、LCが完了した試行のうち、自車が実験対象車と衝突寸前まで接近した場合と、両者の距離に十分な余裕があった場合を比較した。ここで、乗用車用衝突被害軽減ブレーキの緊急制動の目安として提案された指標³⁾を参考に、衝突予測時間TTC(Time to Collision: 相対距離を相対速度で除した値、速度関係

に変化がなければ何秒後に衝突するかを表す指標) の最小値が 0.9 秒未満の場合を衝突寸前まで接近した状態であると判断した。

自車と実験対象車との最小 TTC が 0.9 秒未満の場合と 0.9 秒以上の場合の自車方向指示器点滅開始時の実験対象車との TTC (LC 開始時の TTC) を図 4 に示す。最小 TTC が 0.9 秒未満の場合は、LC 開始時の TTC は中央値で約 8 秒を下回っている。一方で最小 TTC が 0.9 秒以上の場合は、LC 開始時の TTC は中央値で 9 秒以上であった。速度差 20 km/h の先行車を追い越す場合には、TTC が 8 秒以上の状態から LC を開始すると、先行車が急減速した場合でも衝突の危険が高い状況に陥ることなく LC を完了することが可能であることがわかった。

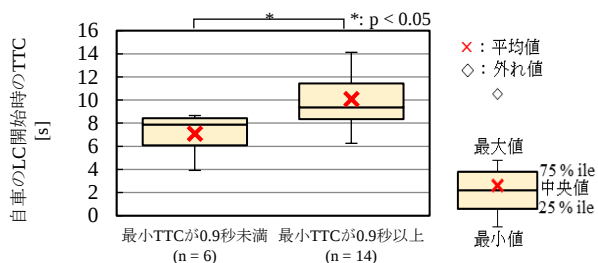


図 4 自車の LC 開始時の TTC (LC1)

3.2. LC2 の結果と考察 (前方の車両も LC)

LC2 における実験参加者の行動割合を図 5 に示す。LC2_5 において 1 件の衝突が発生した。図中の赤線で囲まれた部分は、実験参加者が LC を中断した場合を示している。図 5 より、LC2_2 および 2_4 では実験参加者の 70% 以上が LC を中断していることがわかる。LC2_2 および 2_4 は自車と実験対象車の方向指示器点滅開始が同時の条件であり、多くの実験参加者は先行車の方向指示器の点滅開始が自車とほぼ同時であった場合には、自車の LC を中断することがわかった。

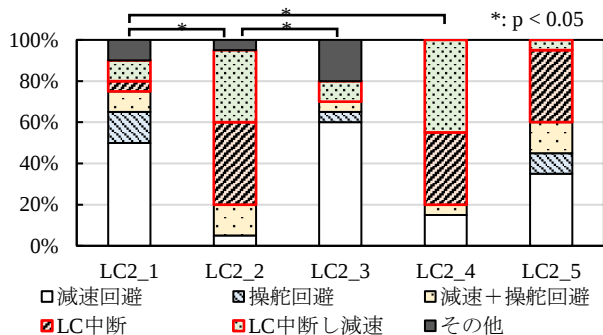


図 5 実験参加者の行動割合 (LC2)

また、本実験場面においては、全ての条件において、最小 TTC の 25 %ile 値が 0.9 秒を下回らず、多くの場合で衝突の危険が高い状況に陥ることはなかった。

3.3. LC3 の結果と考察 (後方の車両も LC)

LC3 における実験参加者の行動割合を図 6 に示す。図中の赤枠で囲まれた部分は実験参加者が LC を中断した場合を示している。図 6 より、LC3_2、LC3_4、LC3_5 では LC を中断する割合が 35 ~ 40 % となっており、LC3_1 および LC3_3 よりも LC を中断する割合が高くなっている。LC3_2、LC3_4、LC3_5 では自車と実験対象車の初期相対距離が約 28 m と非常に近く、実験参加者が後方車両の行動を認識していた可能性がある。

次に、LC3 の中で衝突の危険がより高い実験条件 ($x_1=28\text{ m}$ 、 $A_{\text{Sub}}=3\text{ m/s}^2$) である LC3_4 および LC3_5 で LC を中断した場合に関して、実験参加者が LC を中断した時点での実験対象車の横移動量を調べた結果を図 7 に示す。ここで、図 4 と同様に最小 TTC が 0.9 秒を上回った場合と下回った場合で比較した。図 7 より、最小 TTC を 0.9 秒以上確保できた場合には、ほとんどの場合で実験対象車が車線境界線に到達するまでに自車の LC を中断したことがわかる。このため、衝突の危険なく回避ができたドライバは、後方の車両の動きを認識していたため、素早く LC を中断できたと考えられる。

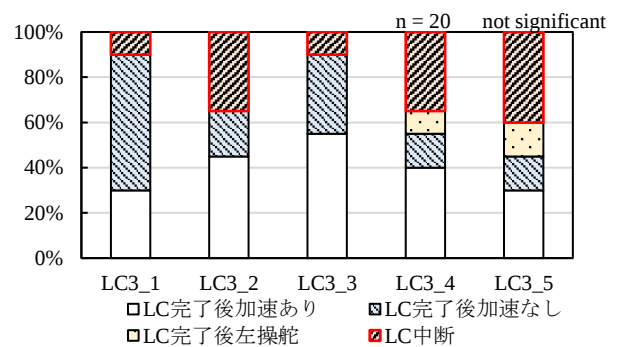


図 6 実験参加者の行動割合 (LC3)

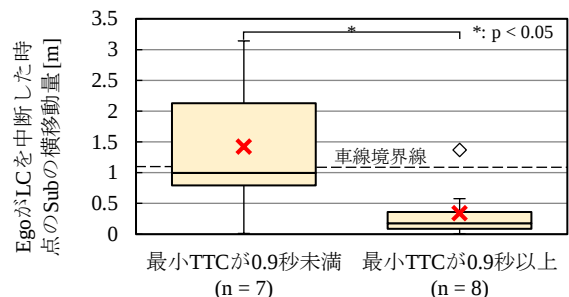


図 7 LC 中断時の実験対象車の横移動量 (LC3)

3.4. LC4の結果と考察(2つ隣の車線の車両もLC)

LC4における実験参加者の行動割合を図8に示す。図8は実験対象車と自車の位置関係ごとに比較した。ここで、LCの中断とは、自車が車線境界線に到達する前に方向指示器を消灯し、LCを断念した場合を指し、回避行動は左操舵・加速・減速を指す。図8より、実験対象車が自車後方にいる場合には回避行動をおこなわずにLCを完了する割合が約70%、実験対象車が自車前方の場合には回避行動もしくはLCの中断をおこなう割合が80%となり、自車と2つ隣の車線の車両のLCのタイミングが重なった場合には、より前方にいる車両のLCの実行を優先する傾向が確認された。なお、本実験場面では、LCを開始せず先行車に追従する参加者もいた。

一方で、実験対象車が真横にいるLC4_3、LC4_4、LC4_7は自車がなんらかの回避行動をおこなない限り衝突してしまう条件であるため、ほとんどの場合でLCの中断もしくは回避行動をおこなった。しかし、LC4_3で11件、LC4_4で1件、LC4_7で5件の衝突が発生した。LC4_3は実験対象車の行動開始トリガが自車の白線到達であり、実験対象車がLCのための横移動を開始した時点では自車のLCの手順がほとんど完了し、実験参加者の多くがすでに前方に注意を向けており、衝突回避行動が遅れたと考えられる。

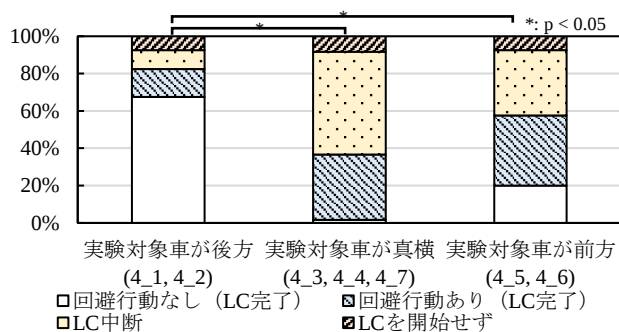


図8 実験参加者の行動割合 (LC4)

次に、LC4_3、LC4_4、LC4_7において、LC中の自車の右前輪が白線に到達した後に左操舵をおこなって元の車線に戻った場合の、左操舵時点の実験対象車の横移動量を調べた結果を図9に示す。ここで、衝突は合計17例あったが、加速したが衝突した2例と減速したが衝突した1例および回避行動なく衝突1例の合計4例は除いた。

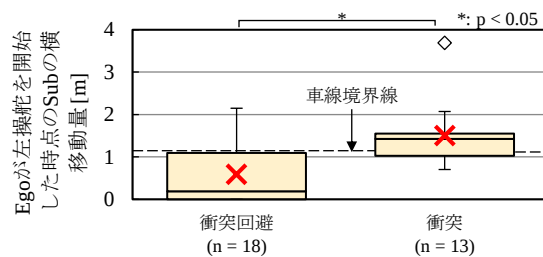


図9 自車が左操舵を開始した時点の実験対象車の横移動量 (LC4)

図9より、衝突を回避した例では25~75%ileで実験対象車が車線境界線に到達するまでに左操舵を開始できていることがわかる。一方で、衝突した場合にはほとんどの場合で実験対象車が第2車線に進入した後に左操舵を開始していることがわかった。

4. まとめ

LCを実行中に衝突の危険が高い状況に陥る場面をDSにより再現し、一般ドライバの危険回避行動に関する調査をおこなった。得られた結果の内、特に重要と考えられる点を以下にまとめる。

- ・ 自車がLCを開始する時点で先行車とのTTCを8秒以上確保していれば、自車のLC中に先行車が急減速した場合であっても衝突の危険なくLCを完了することができる(3.1節)
- ・ 自車のLC中に先行車もLCをおこなった場合は、優れたドライバは衝突の危険なくLCを完了することが可能である(3.2節)
- ・ ドライバは先行車の方向指示器を認識しており、先行車と自車の方向指示器点滅開始がほぼ同時であった場合には、多くのドライバが自車のLCを中断する(3.2節)
- ・ 自車のLC中に後続車が加速しながらLCをおこなった場合、優れたドライバは、後続車の横移動を認識して回避行動をおこなう場合がある(3.3節)
- ・ 自車の2つ隣の車線の他車両と第2車線を競合することになった場合には、他車両が車線境界線に到達するまでに元の車線に戻るための左操舵をおこなわなければ衝突の危険性が高くなる(3.4節)

参考文献

- 1) UN ECE: ECE/TRANS/WP.29/2022/59/Rev.1 (2022)
- 2) UN ECE: ECE/ TRANS/ WP. 29/ 2022/ 58 (2022)
- 3) Patrick Seiniger: AEB Car-Car and Pedestrian: Last Point To Steer For Various Cars and Speeds, AEBs 04-05 (2018)