

タイヤバースト発生箇所によるドライバ運転行動の検討

安藝 雅彦¹⁾ 井梅 拓海¹⁾ 國枝 航輝¹⁾ 添野 航也¹⁾ 堀内 伸一郎¹⁾

Study on Driver's Driving Behavior Depending on the Occurrence Location of Tire Blowout

Masahiko Aki Takumi Iume Koki Kunieda Koya Soeno Shinichiro Horiuchi

This paper deals with the driver's driving behavior under a tire blowout using a driving simulator (DS) with a small motion platform. Two kinds of experiments were carried out using the DS: (1) To measure driver's driving behavior with regard to differences in occurrence positions of tire blowout, (2) To examine effectiveness of assist to driver by auditory information after the tire blowout. In the experiment (1), the driver's driving behavior at the time of blowout occurrence was measured as vehicle lateral deviation and steering angle for each of the blowout on front-right, front-left, rear-right, and rear-left wheels. In the experiment (2), auditory information (buzzer sound, voice guidance) was presented when a blowout occurred, and the driver's driving behavior was measured. Furthermore, the effect of audio presentation was investigated.

KEY WORDS: Safety, Active safety, Lane-keeping control, Tire Blowout, Driving support (C1)

1. ま え が き

近年、高速道路では車種を問わず、タイヤのバーストに起因した交通事故が増えてきている。走行中における突然のバーストは、車両の操縦安定性を低下させ、異常行動を引き起こし、重大な交通事故に発展する可能性が高い。それにもかかわらず、走行中のバーストに関する研究報告は極めて少ない⁽¹⁾。高速道路走行中にタイヤがバーストするとタイヤ径とコーナリングスティフネスの減少により車両動特性は急変するが、ドライバが動特性急変後の車両を正しく認知・判断・操作することは困難である。タイヤバースト時の安全性向上とドライバの負担軽減のため車線維持支援システム(LKAS)の研究開発が必要である。LKASの制御方式には操舵角制御方式と操舵トルク制御方式があり、タイヤバースト時のLKASは自動運転車両の信頼性確保のため操舵角制御方式の研究例はあるが⁽²⁾⁽³⁾、人間-機械系の支援システムである操舵トルク制御方式の研究は極めて少ない。これは制御対象の動特性急変時におけるドライバ操舵行動のモデル化指針と支援システムの設計指針が定まっていないことが理由と考えられる。

著者らはタイヤバースト発生時の運転支援システム提案のためにタイヤバースト発生時のドライバ挙動の調査を行い⁽⁴⁾、タイヤバースト発生直後の車線維持支援システムの研究⁽⁶⁾⁽⁷⁾を行ってきた。前報までは定置式ドライビングシミュレータを使用していたため、ドライバの反応が実際のものとは異なる懸念があった。そこで本報では可動式ドライビングドライビングシミュレータを使用し、(1)タイヤバースト発生箇所の違いによるドライバ挙動の調査、および(2)聴覚情報提示効果を検討したので報告する。

2. タイヤバースト後の車両運動

4輪のそれぞれでタイヤバーストが発生すると、左右の輪径差によりバーストの発生箇所によって図1のように幾何学的にバーストによる舵角が発生する。図1はそれぞれ(a)右前輪バースト、(b)左前輪バースト、(c)右後輪バースト、(d)左後輪バーストの場合で、車両の旋回方向はそれぞれ右方向、左方向、左方向、右方向となる。

後輪バーストの場合はバーストしたタイヤの方向と車両進行方向が逆向きになるため、ドライバに混乱を引き起こす可能性が考えられる。一方で、前輪バーストの場合はタイヤ横力の減少により操舵しにくくなることが予想される。そこで、第

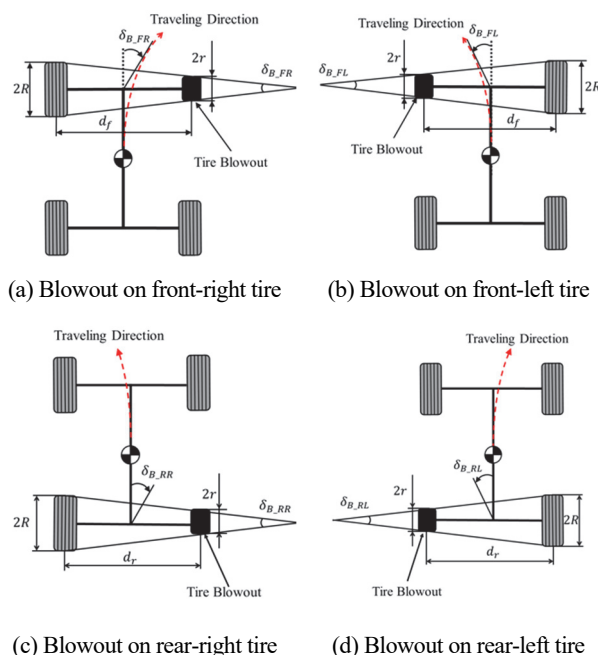


Fig. 1 Relationship between an occurrence location of the tire blowout and a traveling direction of vehicle

1) 日本大学理工学部(101-8303 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

一の実験として 4 輪それぞれのタイヤがバーストしたときのドライバ挙動を計測し、その特徴を考察する。

3. タイヤバースト発生時の聴覚情報提示

著者らの先行研究⁶⁾ではタイヤバーストを検知してすぐに車線維持支援制御を開始していた。実際にはタイヤバーストを検知後に車線維持支援制御のみではなく、聴覚情報や視覚情報の提示も併用されることが予想される。ここでは聴覚情報を提示した場合のドライバ挙動に限定し、その特徴を考察するために第二の実験として実施する。

先行研究⁶⁾ではドライバはタイヤバースト後、4 秒程度までは車線逸脱に対する回避行動、それ以降は車線維持行動を取る結果が多くみられた。そこで、車線逸脱に対する回避行動および車線維持行動に対して聴覚情報提示を行う。車線逸脱に対する回避行動に対する聴覚情報提示は短時間に行う必要があるため、ブザー音、音声案内 1(注意喚起)、音声案内 2(行動指示)の 3 種類、その後に車線維持行動に対する聴覚情報提示として状況説明 1 種類の聴覚情報を準備した。

- (1) ブザー音:バースト直後はブザー音(LDW 相当の音)を鳴らし、車線復帰後に「タイヤがバーストしました。落ち着いて車線に戻ってください。」という具体的な情報を提示する。
- (2) 音声案内 1 :バースト直後に「注意して走行してください。」と注意喚起し、車線復帰後に「タイヤがバーストしました。落ち着いて車線に戻ってください。」という具体的な情報を提示する。
- (3) 音声案内 2 :バースト直後に「車線に戻ってください」と具体的な行動指示を与え、車線復帰後に「タイヤがバーストしました。復帰した車線を維持してください。」という具体的な情報を提示する。

4. ドライビングシミュレータ実験

4.1. 実験装置

今回の実験に使用する実験装置の外観を図 2 に示す。本 DS 装置は Mechanical Simulation 製の研究用 DS プログラム CarSim Driving Simulator(以下 CarSim)および SENSODRIVE 製のステアリングコントローラ(SENSO-Wheel SD-LD)から構成される。シート下部には Wizapply 製モーションプラットフォーム(SIMVR 6DOF)が設置されている。さらにタイヤバースト発生時のドライバ行動計測のため外部カメラ(logicool 製 C920n HD PRO)を用いた。



Fig. 2 Driving Simulator with motion platform

4.2. DS 内におけるバーストの再現

車両モデルは C-Class, Hatchback 2012, タイヤモデルは 215/55/R17 を使用した。バーストを再現するため、バースト発生時刻でタイヤの半径をリム径に切り替えることでバースト時の走行状況を模擬した。さらにバースト発生後には文献(3), (5)に基づき、タイヤ横力とタイヤ縦力を 1/10 倍に減少させ、転がり抵抗を 30 倍に増加させた。

また、著者らの先行研究⁶⁾ではドライバを車線維持のタスクに集中させるために一定速度という仮定を用いていた。ここでは転がり抵抗によるヨーモーメントを生じさせるため、タイヤバースト後は一定速度の設定を解除し、徐々に減速させた。なお、DS 実験に際し、表 1 に示す CarSim 車両モデルのパラメータを用いた。

Table 1 Vehicle Parameters

Definition	Symbol	Unit	Value
Vehicle mass	M	kg	1500
Yaw moment of inertia	I	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	2500
Initial vehicle speed	V	km/h	100
Distance from CG to front/Rear axle	l_f / l_r	m	1.22/1.46
Front wheel cornering stiffness	K_1, K_2	N/rad	33536
Rear wheel cornering stiffness	K_3, K_4	N/rad	50036
Steering gear ratio	N	-	16.8
Equivalent Moment of inertia of steering wheel	J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.0332
Equivalent viscous friction coefficient of front wheels	C_h	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$	0.104
Trail length	ζ	m	0.0314
Front tread / Rear tread	d_f, d_r	m	1.45

4.3. 実験方法

インフォームドコンセントを得た運転免許を所有する 20 歳代 16 名を対象に、DS を用いた高速道路運転時のハンドル操作、車両軌跡を計測した。走行コースは図 3 のように片側 2 車線の高速道路(直線区間)を模擬した環境であり、タイヤバースト発生までは一定速度(100 [km/h])、発生後からは転がり抵抗により減速する設定とした。本実験は一般社団法人人間生活工学研究センターの倫理審査による承認を得て実施した。

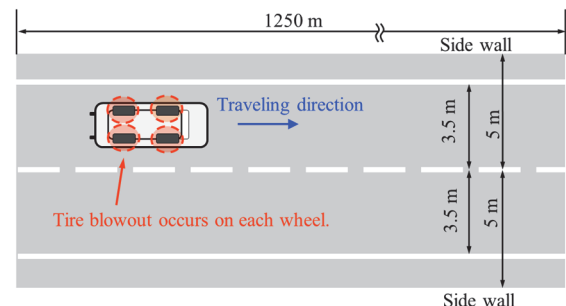


Fig. 3 Driving scenario

実験は (1) バースト発生箇所によるドライバ挙動の計測: 5 条件と (2) バースト発生時の聴覚情報提示効果の検討: 3 条件の 2 種類を, 実験(1)から実施するグループ(表 2)と実験(2)から実施するグループ(表 3)に分けて行った. 表 1 に実験(1)をはじめに実施する実験参加者の運転頻度や運転歴, 表 2 に実験(1)をはじめに実施する実験参加者の運転頻度や運転歴を示す. 各条件で実験参加者の運転頻度や運転歴などの偏りが比較的小さくなるようにグループ分けした. なお, 客観評価に用いるデータは初めてバーストを経験する実験のみとし, 2 回目以降にタイヤバーストを経験する実験は主観評価のみに用いた.

実験(1) タイヤバースト発生箇所によるドライバ挙動の計測

実験参加者にはハンドル操作のみを行い, 左側の車線を走行するように指示した. 実験参加者を初めに右前輪にバーストを発生させるグループ(3 名), 初めに左前輪にバーストを発生させるグループ(3 名), 初めに右後輪にバーストを発生させるグループ(2 名), 初めに左後輪にバーストを発生させるグループ(2 名)に分けて実験を行った. なお, バースト発生箇所が異なる以外, 実験内容は同じである. 1 回につき 45 秒程度の走行試験を, 走行条件を変えて 5 回実施した. 走行実験の内訳は, (1)バーストなし, (2)右前輪バースト, (3)左前輪バースト, (4)右後輪バースト, (5)左後輪バーストの 5 つである. 走行開始後 15 秒から 25 秒までの間にタイヤバーストを発生させ車両軌跡およびハンドル操作を記録した.

実験(2) タイヤバースト発生時の聴覚情報提示効果の検討

実験参加者にはハンドル操作のみを行い, 左側の車線を走行するように指示した. この実験では右前輪バーストのみを対象とした. 実験参加者を, 初めにブザー音を与えるグループ(2 名), 初めに音声案内 1 を与えるグループ(2 名), 初めに音声案内 2 を与えるグループ(2 名)に分けて実験を行った. 1 回につき 45 秒程度の走行試験を, 聴覚情報の条件を変えて 3 回実施した. 走行実験の内訳は, (1) バースト発生直後にブザー音を提示, (2) バースト発生直後に音声案内 1 (注意喚起)を提示, (3) バースト発生直後に音声案内 2 (行動指示)を提示, の 3 つである. 走行開始後 15 秒から 25 秒までの間にタイヤバーストを発生させ車両軌跡およびハンドル操作を記録した.

なお, 実験(1)と(2)を通じて, バースト発生などの事前情報は一切与えずに実験を行い, いずれかのバースト走行を経験後に改めて実験趣旨を説明した.

5. 実験結果

5.1. タイヤバースト発生箇所によるドライバ挙動の計測

(1) 右前輪バーストの場合

図 4 に右前輪バーストしたときの(a)車両横偏差, (b)ハンドル角を示す. 図 4 中には, 比較のため先行研究⁶⁾の結果(実験参加者 A, C, E, G, I)も破線で示している. 先行研究(図 4 破線)では定置式 DS を用いたためハンドル角の立ち上がりが比較

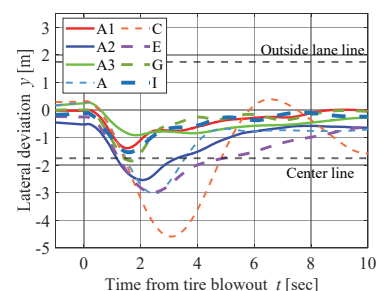
的ゆっくりであったのに対し, 今回の結果(図 4 実線)ではそれよりも速く立ち上がっている. その結果として車両横偏差の最大値が比較的小さく抑えられている. また, バースト後 4 秒程度経過して車線中央付近に復帰してからは素早い修正操舵

Table 2 Driver's information in the experiment (1)

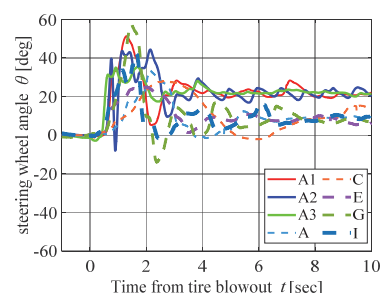
Driver	Driving experience	Driving frequency	Blowout Condition
A1	2 years	Once a month	Front right
A2	3 years	Three times a week	
A3	1 year	Once a month	
B1	2 years	Three times a week	Front left
B2	3 years	Three times a week	
B3	6 years	Three times a week	
C1	4 years	Once a month	Rear right
C2	3 years	Once a month	
D1	1 years	Less than once a month	Rear left
D2	3 years	Once a month	

Table 3 Driver's information in the experiment (2)

Driver	Driving experience	Driving frequency	Blowout Condition	Auditory Information
E1	2 years	Once a month	Front right	Buzzer
E2	1 year	Once a month		
F1	2 years	Three times a week		Voice guidance 1
F2	6 years	Three times a week		
G1	4 years	Once a month		Voice guidance 2
G2	3 years	Once a month		



(a) Lateral deviation



(b) Steering angle

Fig. 4 Lateral deviation and steering angle after the front right tire

が行われている。これは前輪の横力が減少したことで操舵しにくくなったのではないかと推測される。

(2) 左前輪バーストの場合

図 5 に左前輪バーストしたときの(a)車両横偏差, (b)ハンドル角を示す。右前輪バーストの結果と同様にハンドル角が速く立ち上がっており、ドライバは瞬時に対応できている。また、

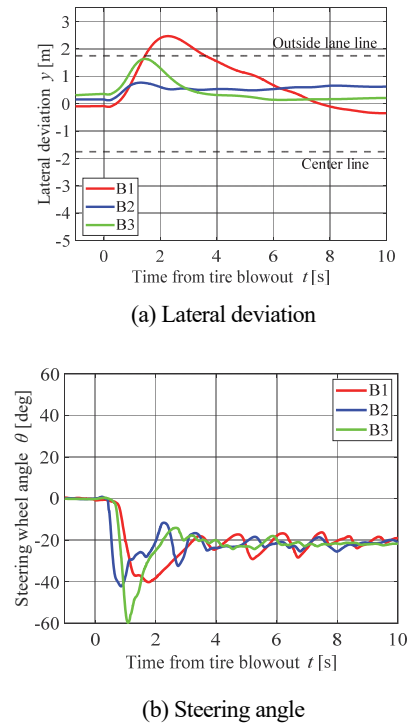


Fig. 5 Lateral deviation and steering angle after the front left tire

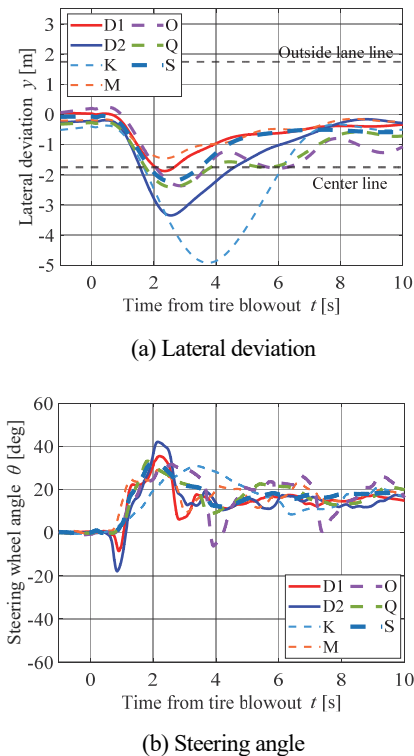
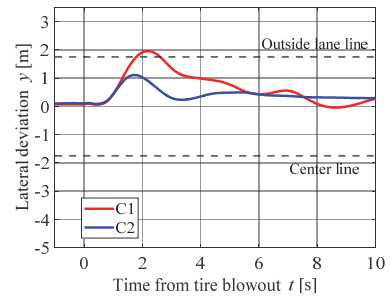
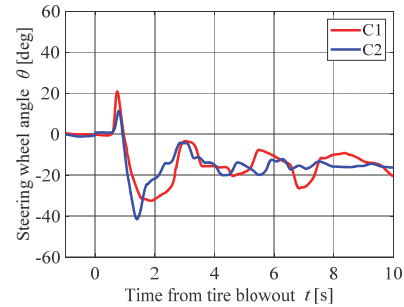


Fig. 6 Lateral deviation and steering angle after the rear left tire



(a) Lateral deviation



(b) Steering angle

Fig. 7 Lateral deviation and steering angle after the rear right tire
右前輪バーストの結果と比較しても、車両横偏差とハンドル角には大きな差異は現れていない。

(3) 左後輪バーストの場合

図 6 に左後輪がバーストしたときの(a)車両横偏差, (b)ハンドル角を示す。図 6 中には、比較のため先行研究⁽⁶⁾の結果(実験参加者 K, M, O, Q, S)も破線で示している。後輪バーストの場合、バースト直後は逸脱方向と同方向に操舵をしてしまう傾向がある。これは、後輪のバーストでは姿勢変化と逸脱方向の関係が前輪と反対であることが要因であろうと推測される。なお、先行研究(図 4 破線)では定置式 DS を用いたためこの傾向は観察されなかった。さらに、バースト後 4 秒程度経過して車線中央付近に復帰してからは、前輪バーストの場合とは異なりゆっくりとした修正操舵が行われている。

(4) 右後輪バーストの場合

図 7 に右後輪バーストしたときの(a)車両横偏差, (b)ハンドル角を示す。左後輪バーストの結果と比較しても、車両横偏差とハンドル角には大きな差異は現れていない。

(5) アンケート調査

4 種類のタイヤバーストを経験した後、実験参加者全員に「タイヤバースト後に最も運転しやすかった条件」と「タイヤバースト後に最も運転しにくかった条件」をアンケート調査した。

タイヤバースト後に最も運転しやすかった走行条件の回答で挙げられた理由として以下の意見が得られた。

- ・右前輪と回答した理由：「直感的に操作できた」、「対向車がいなかったことで恐怖感が少なかった」
- ・左前輪と回答した理由：「直感的に操作できた」、「路側帯

側は巻き込み事故の恐れがない」

- ・右後輪と回答した理由：「視線が上方向を向き、運転に支障がなかった」、「車線復帰しやすく、車線復帰後もそれを維持しやすい」、「後輪バーストの方が車線逸脱量は少なく感じた」、「比較的ハンドルが軽い」、「路側帯側は巻き込み事故の恐れがない」
- ・左後輪と回答した理由：「視線が上方向を向き、運転に支障がなかった」、「車線復帰しやすく、車線復帰後もそれを維持しやすい」、「対向車がなかったので恐怖感が少なかった」、「後輪バーストの方が車線逸脱量は少なく感じた」、「比較的ハンドルが軽い」

タイヤバースト後に最も運転しにくかった走行条件の回答で挙げられた理由として以下の意見が得られた。

- ・右前輪と回答した理由：「車線復帰後もハンドルが強くとられる感覚がある」、「前輪バーストの方が大きく傾く感覚がある」、「視線が下を向く」、「ハンドルが重い」、「他車の巻き込みが怖いので右へ出たくない」
- ・左前輪と回答した理由：「車線復帰後もハンドルが強くとられる感覚がある」、「前輪バーストの方が大きく傾く感覚がある」、「視線が下を向く」、「ハンドルが重い」、「壁が迫ってくる恐怖感・圧迫感がある」
- ・右後輪と回答した理由：「姿勢変化と旋回方向の関係が直感と異なり、ハンドル操作が混乱する」、「後輪バーストの方が浮遊感がある」
- ・左後輪と回答した理由：「他車の巻き込みが怖いので右へ出たくない」、「壁が迫ってくる恐怖感・圧迫感がある」、「姿勢変化と旋回方向の関係が直感と異なり、ハンドル操作が混乱する」、「後輪バーストの方が浮遊感がある」

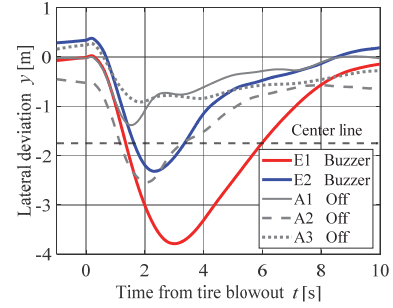
5.2. タイヤバースト発生時の聴覚情報提示効果の検討

(1) バースト発生時にブザー音を提示した場合

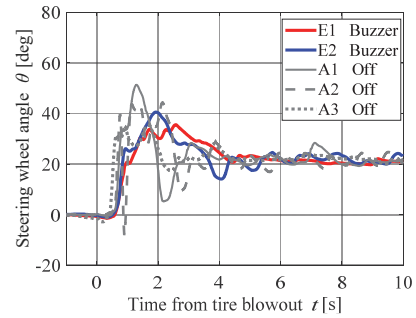
図8にバースト発生時にブザー音を提示した実験参加者 E1, E2 と聴覚情報提示なしの実験参加者 A1-A3 の(a)車両横偏差と(b)ハンドル角の時刻歴応答を示す。ハンドル角を比較すると、聴覚情報提示なしよりもブザー音を提示した方がハンドル操作が遅れる傾向にある。バースト発生直後にブザー音の提示だけでは情報が十分ではなく、ドライバの判断を鈍らせたと考えられる。

(2) バースト発生時に音声案内1を提示した場合

図9にバースト発生時に音声案内1(注意喚起)を提示した実験参加者 F1, F2 と聴覚情報提示なしの実験参加者 A1-A3 の(a)車両横偏差と(b)ハンドル角の時刻歴応答を示す。ハンドル角を比較すると、聴覚情報提示なしと音声案内1を提示した場合とでハンドル操作の反応時間に大きな違いは見られなかった。音声で注意喚起を行った場合はドライバへの負担は少なかったとみられる。

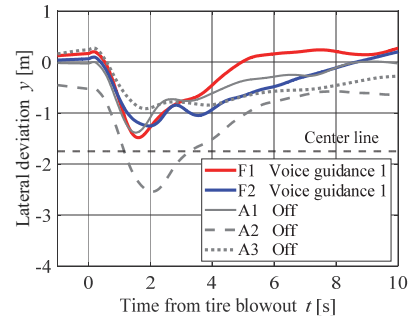


(a) Lateral deviation

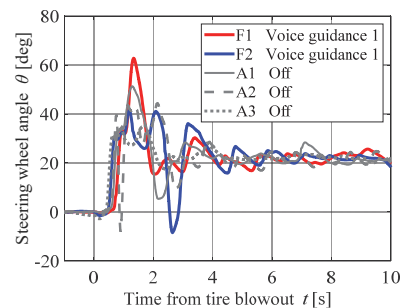


(b) Steering angle

Fig. 8 Lateral deviation and steering angle after the front right tire with auditory information (Buzzer)



(a) Lateral deviation



(b) Steering angle

Fig. 9 Lateral deviation and steering angle after the front right tire with auditory information (Voice guidance1)

(3) バースト発生時に音声案内 2 を提示した場合

図 9 にバースト発生時に音声案内 2(行動指示)を提示した実験参加者 G1, G2 と聴覚情報提示なしの実験参加者 A1-A3 の (a)車両横偏差と(b)ハンドル角の時刻歴応答を示す。ハンドル角を比較すると、聴覚情報提示なしと音声案内 2 を提示した場合とでハンドル操作の反応時間に大きな違いは見られなかった。音声で簡易的な行動指示を行った場合はドライバーへの負担は少なかったとみられる。

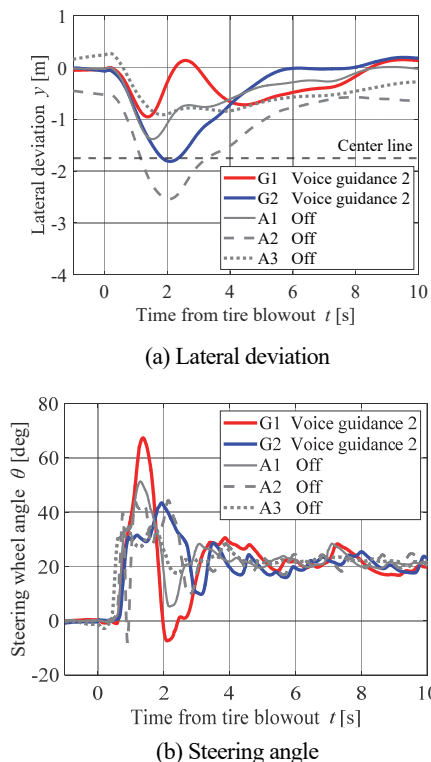


Fig. 10 Lateral deviation and steering angle after the front right tire with auditory information (Voice guidance2)

(4) アンケート調査

実験参加者全員に「運転しやすかった音声情報提示条件」と「運転しにくかった音声情報提示条件」をアンケート調査した。

運転しやすかった走行条件の回答理由として以下の意見が得られた。

- ・ブザーと回答した理由：「直感的に異常があったと分かった」、「言葉で言われるよりもブザーの方が分かりやすい」
- ・音声案内 1 と回答した理由：「具体的で急な指示は焦ってしまうため注意喚起がちょうど良い」、「人の声は安心感がある」
- ・音声案内 2 と回答した理由：「具体的な指示を出してくれたため落ち着いて運転できた」、「人の声は安心感がある」

運転しにくかった走行条件の回答理由として以下の意見が

得られた。

- ・ブザーと回答した理由：「ブザー音に驚きや恐怖を感じた」
- ・音声案内 1 と回答した理由：「何に注意するのかよく分からない」、「煩わしく感じた」
- ・音声案内 2 と回答した理由：「バースト直後に具体的な指示は聞き取れない」、「煩わしく感じた」

これらのアンケート結果より、音声案内 1 と 2 ではバースト発生下における心理的負担を軽減する可能性が期待できるため、視覚情報などの情報提示方法と合わせて使用する利用方法も考えられる。

6. まとめ

本報では可動式ドライビングドライビングシミュレータを使用し、(1)タイヤバースト発生箇所の違いによるドライバー挙動の調査、および(2)聴覚情報提示効果を検討した。(1)タイヤバースト発生箇所の違いによるドライバー挙動の調査において、前輪バーストの場合は前輪横力の減少による操舵のしにくさ、後輪バーストの場合は車体が傾斜する方向と車両の進行方向が異なることによる混乱があることが確認された。(2)聴覚情報提示効果検討において、聴覚情報ではドライバーの反応速度向上には寄与しにくい、心理的な側面での効果があることが推測される。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K04033 および一部 公益財団法人 JKA 自転車等機械振興補助事業 2023M-271 を受けて実施しました。

参 考 文 献

- (1) 本宮 嘉弘, 井上 浩史, 福山 邦男: 走行中のタイヤバーストが車両挙動に及ぼす影響, 日本機械学会第 13 回交通・物流門大会講演論文集, p.255-258 (2004).
- (2) Patwardhan, S. N. and Tan, H. S., and Tomizuka, M : Experimental results of a tire-burst controller for AHS, *Control Engineering Practice*, Vol.5, No.11, pp.1615-1622 (1997).
- (3) Wang, F., Chen, H., and Cao, D. : Nonlinear Coordinated Motion Control of Road Vehicles After a Tire Blowout”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.24, No.3, pp.956-970 (2016).
- (4) Aki, M.,: Investigation of Vehicle and Driver Behavior during Tyre Burst using Driving Simulator, *Proc. 26th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD2019)*, No.292, (2019).
- (5) Blythe, W., Day, T. D., and Grimes, W. D.: 3-Dimensional Simulation of Vehicle Response to Tire Blow-outs, *SAE Technical Papers*, 980221, pp.361-0375 (1998).
- (6) 高橋 直希, 安藝 雅彦, 堀内 伸一郎: タイヤバースト発生時の運転支援トルクによる車線維持制御の有効性, 自動車技術会論文集, Vol.54, No.3 (2023).
- (7) 安藝 雅彦, 高橋 直希, 堀内 伸一郎: タイヤバースト発生直後の車線維持支援システムに関する研究, Vol.54, No.6 (2023).