

リスク最小化制御実行中の 車線変更時の安全性に関する 実験的考察

自動車安全研究部
上席研究員 児島 亨

講演内容

1. 背景・目的
2. 実験方法
3. 実験結果
4. 実験結果から得られた知見
5. 自動車基準調和世界フォーラム会議への提案
6. まとめ

1. 背景・目的

- 高速道路等において60km/h以下で作動し、同一車線内の走行に限定したレベル3の自動運転システム(**Automated Lane Keeping System**)では、システムからの運転操作引継ぎ要求にドライバーが応じなかった場合等に、**危険最小化制御(Minimum Risk Manoeuvre、以下、MRM)を実行**
⇒車線内で減速、停止
- 路肩等、より安全な場所へ停止するため、MRM中の車線変更の必要性を国連の専門家会議(R157ALKS-SIG)にて議論
- 退避可能な路肩等が存在しない場合には、低速側の車線へ車線変更した後、車線内で停止する可能性
⇒MRM作動中の**後方車両との速度差、減速タイミング等**について慎重な検討が必要

本研究では

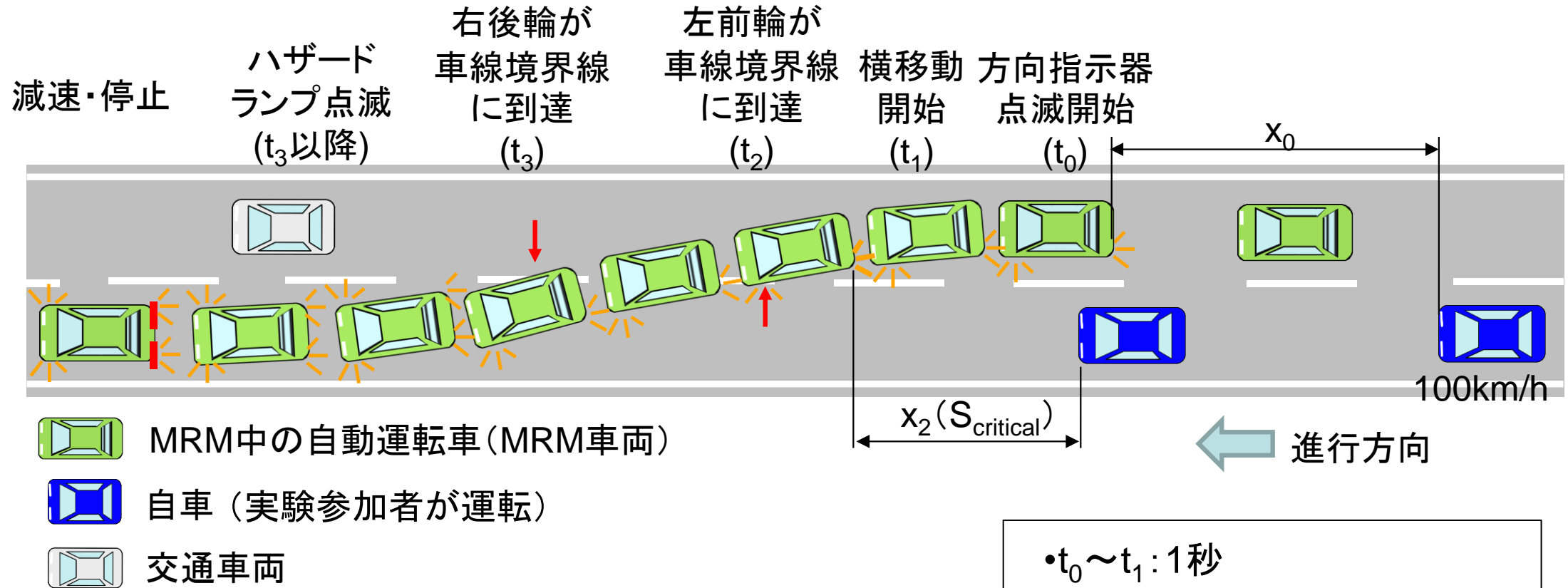
- MRM作動中の自動運転車(以下、MRM車両)が第2車線から第1車線へ車線変更(Lane Change、以下、LC)し、第1車線上で停止する場面において、

- 第1車線後方から接近する車両との**速度差**
- MRM車両の**減速度**
- MRM車両が**減速を開始するタイミング**

等を変えた場合に、後方車両ドライバの衝突回避行動へ与える影響を評価

- 評価にはドライビングシミュレータを使用

2. 実験方法 — 実験場面 —



- $t_0 \sim t_1$: 1秒
- $t_1 \sim t_2$: 2秒
- $t_2 \sim t_3$: 3秒
- t_0 時点の自転車速度: 100km/h

2. 実験方法 —MRM中の車線変更及び減速方法—

MRM中の車線変更及び減速方法として、3つのケースを想定し、実験で検証

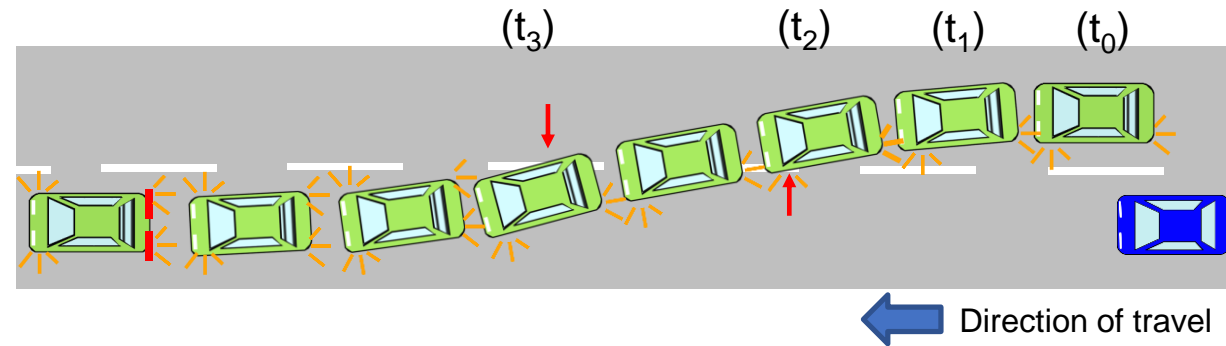
ケース	MRM車両の振舞い	メリット(MRM車両にとって)	懸念点(後方車両にとって)
ケース1	①車線変更中に減速 ②車線変更終了後に停止	より短時間(短い距離)で 停止可能	減速中の車両が自車の前 に入ってきた後に停止して も衝突を回避可能か？
ケース2	①速度を低下 ②車線変更 ③減速・停止	前方を検知するセンサの 機能低下等によってMRM が作動した場合に有効	速度差が大きく、遅い車両が 自車の前に入り、減速・停止 しても衝突を回避可能か？
ケース3	①速度差が小さく車間時間が 短い状況で車線変更 ②減速・停止	交通量が多く、十分な 車間時間を取りづらい 場面で有効	自車の直前に入ってきた 車両が減速・停止しても 衝突を回避可能か？

2. 実験方法 —MRM中の車線変更及び減速方法—

3つのケースの実験条件

<ケース1>

- t_0 におけるMRM車両の速度を**100km/h**
- t_0 よりMRM車両は減速開始（減速度一定）
- 減速度は **$1 \sim 4\text{m/s}^2$** の間で4水準設定



<ケース2>

- t_0 におけるMRM車両の速度を**50km/h**（車線変更終了まで速度一定）
- t_3 以降に **4m/s^2** （一定）で減速
- MRM車両の減速開始タイミングを“ t_3 と同時”～“ t_3 から4秒後”の間で5水準設定

<ケース3>

- t_0 におけるMRM車両の速度を**100km/h**（車線変更終了まで速度一定）
- t_3 以降に **4m/s^2** （一定）で減速
- 減速開始タイミングを“ t_3 と同時”～“ t_3 から3秒後”の間で4水準設定

相対距離(x_2)については、R79 ACSFカテゴリC(自動車線変更機能)における $S_{critical}$ の式を用いて計算により設定

$$S_{critical} = (V_{rear} - V_{ACSF}) \cdot t_B + (V_{rear} - V_{ACSF})^2 / (2 \cdot a) + V_{ACSF} \cdot t_G$$

$S_{critical}$: t_2 時点における相対距離[m]

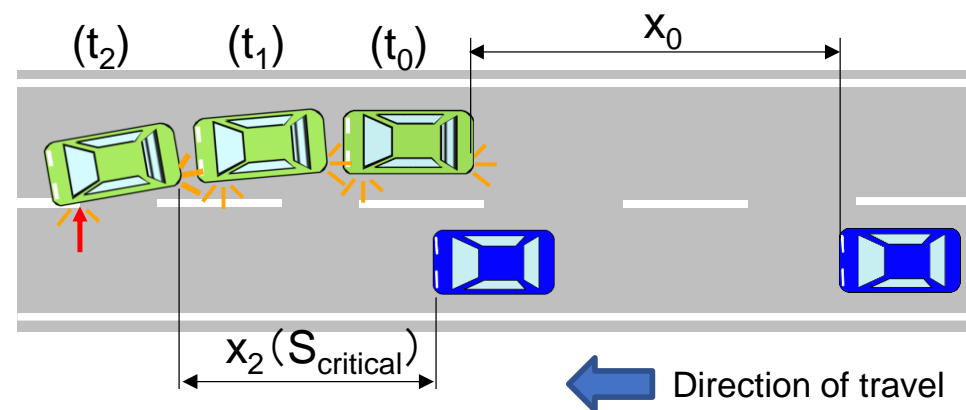
V_{ACSF} : ACSF車両の速度[m/s] \Rightarrow MRM車両の速度

V_{rear} : 後方車両の速度[m/s]

t_B : 後方車両に期待する減速開始タイミング[s] (t_2 から**0.4秒後**)

a : 後方車両に期待する減速度[m/s²] (**3m/s²**)

t_G : 後方車両が減速を終了するまでの間の最小車間時間[s] (**1秒**)



➤ ケース1～ケース3において、 $S_{critical}$ の式から x_2 を計算する際の前提条件を設定

<ケース1>

- MRM車両の速度(式中の V_{ACSF})が**減速度に応じて時間とともに変化**
- 後方車両は t_2 から**0.4秒後に $3m/s^2$** で減速を開始(停止まで継続)
- 車間時間の最小値は**約1秒**

<ケース2>

- 後方車両は t_2 から**0.4秒後に $3m/s^2$** で減速開始。速度差が0km/hとなった時点で減速終了
- MRM車両が**減速を開始してから0.4秒後に $3m/s^2$** で減速を再開
- 車間時間の最小値は**約1秒*** ※MRM車両が減速を開始するまでの間に速度差が0km/hとなる条件のみ

<ケース3>

- x_2 は**車間時間1秒**相当(27.8m)

➤ t_0 時点の相対距離(x_0)についても計算により設定→**実験時は x_0 を統制**

2. 実験方法 —その他の実験条件等—

- 実験場面に到達するまでの間(5~6分)、交通車両が自車の前方で車線変更するダミーイベントを1走行につき数回実施
- MRM車両がLCを開始後、第2車線後方より複数の交通車両が接近(ドライバは右方向への操舵による衝突回避が困難)
- 実験参加者は日常的に自動車を運転する**20代~50代の20名**で構成(男性9名、女性11名)
- 全員が**全ての実験に参加**(実験参加者内計画)
- 当研究所の「**人間を対象とする実験に関する倫理規程**」に基づき実施
- 同意書への署名を実施

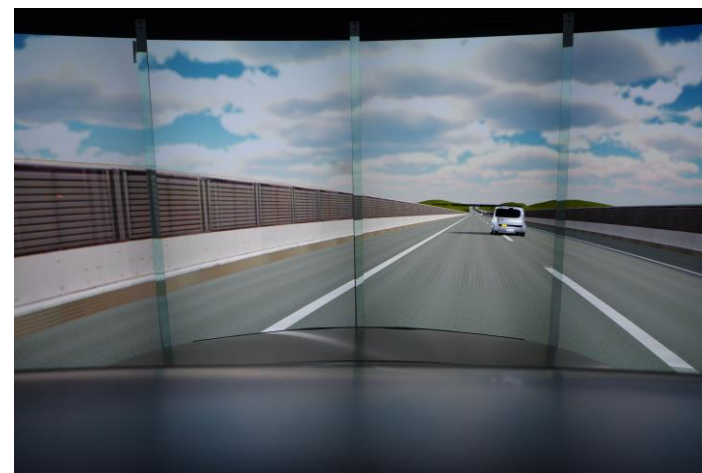
2. 実験方法 ードライビングシミュレータ概要ー



外観



運転席



スクリーン画像例(前方画像)

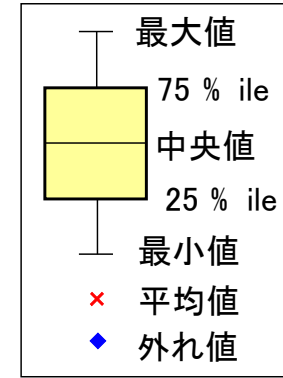
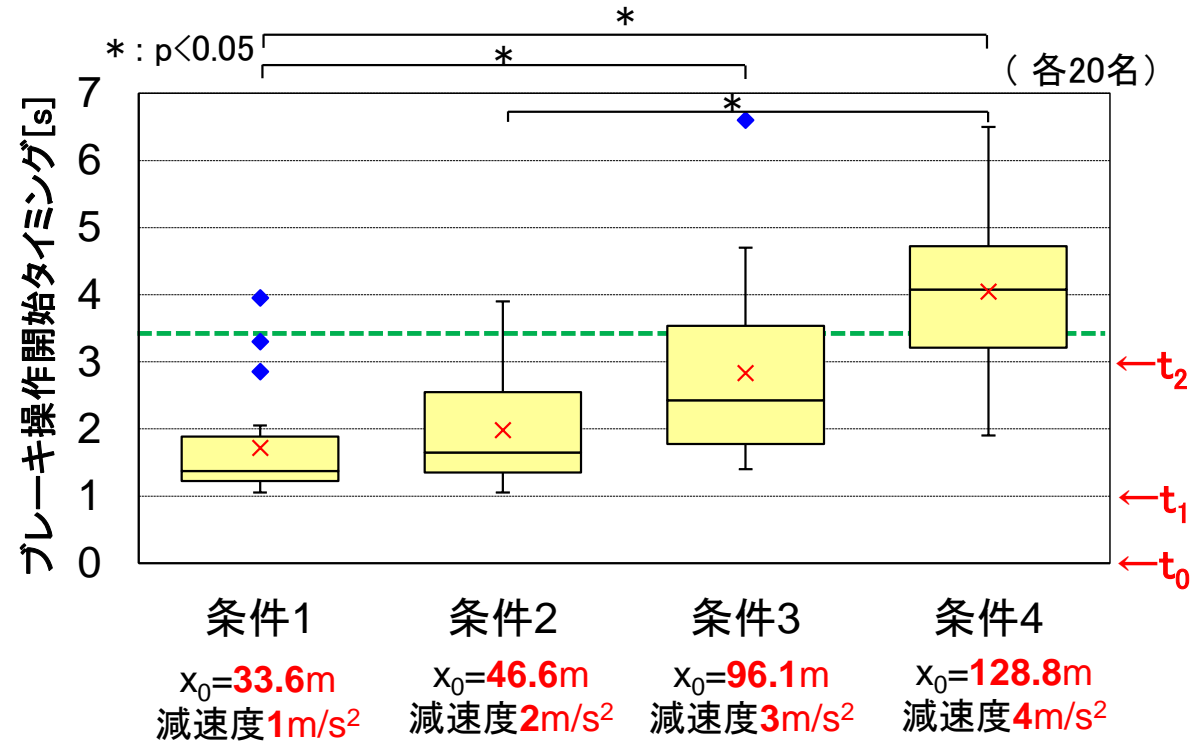
<特長>

- 小型乗用車の車体(クローズドボディ)を使用
- 解像度の高い映像を描画可能
- 車両に発生する加速度等を現実に近い形で体感可能

3. 実験結果－ケース1 自転車ブレーキ操作開始タイミング－

＜ケース1の懸念点＞
減速中の車両が自転車の前に入ってきた後に停止しても衝突を回避可能か？

■ t_0 時点の速度
MRM車両: 100km/h
後方接近車両: 100km/h
■ MRM車両の減速開始: t_0

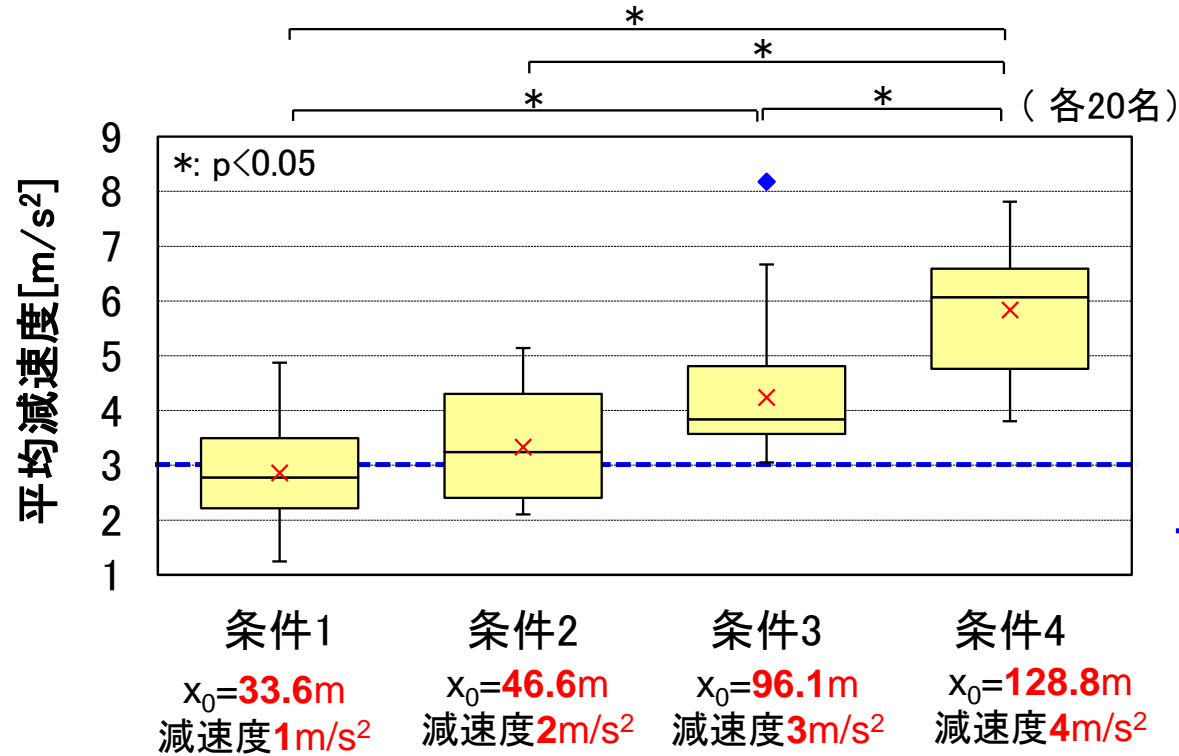


----- $S_{critical}$ の式において後方接近車両の減速開始を期待するタイミング (t_2 から0.4秒後)

• LC開始 (t_0) 時点の相対距離 (x_0) が長い条件3、条件4は、条件1、条件2よりもMRM車両の減速度の値が大きいかかわらずブレーキ操作開始が遅れた
⇒ 自転車から遠いことにより、衝突の危険性を認識するまでにより多くの時間を要したためと推定

3. 実験結果－ケース1 自車の平均減速度－

＜ケース1の懸念点＞
減速中の車両が自車の前に入ってきた後に停止しても衝突を回避可能か？

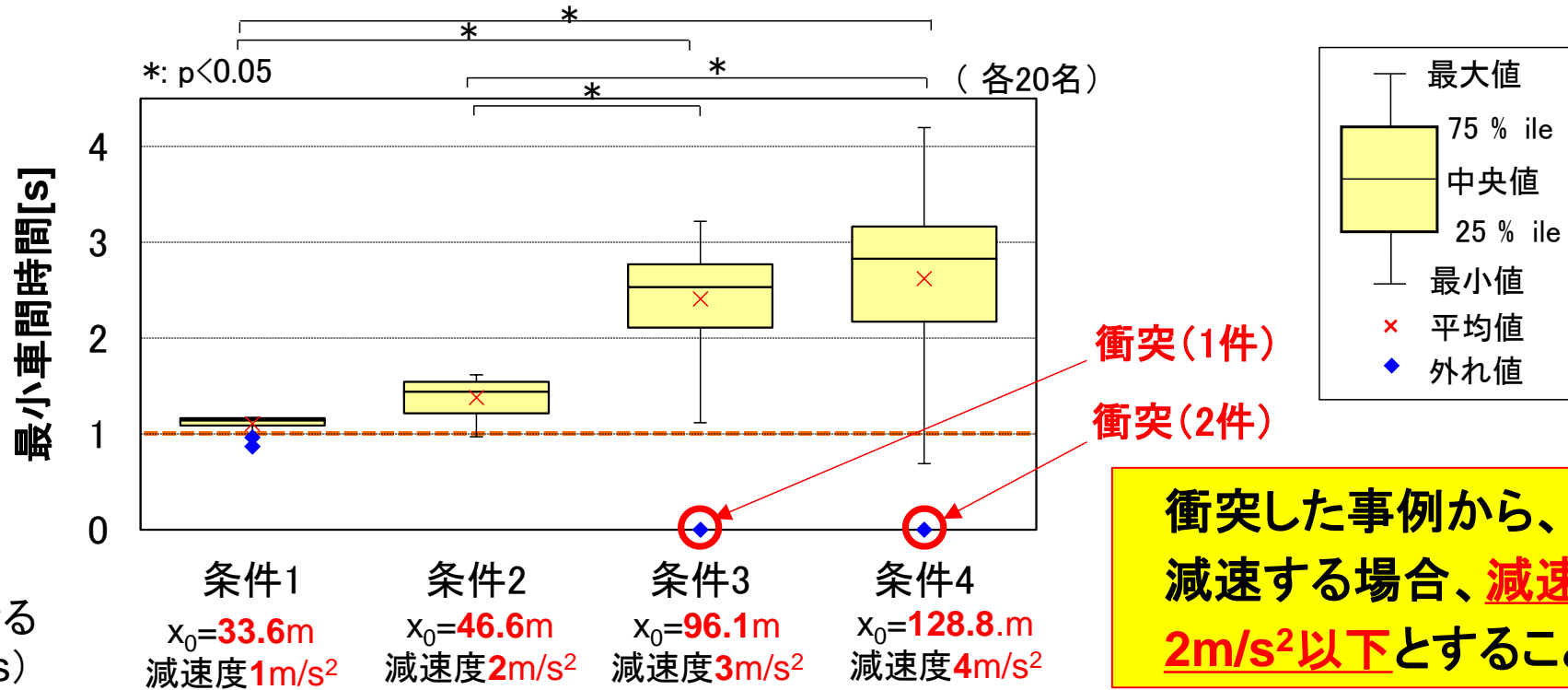


----- S_{critical}の式において後方接近車両に期待する減速度(3m/s²)

- MRM車両の減速度の値が大きい条件3、条件4は条件1、条件2よりも平均減速度の値が大きく、S_{critical}の式で後方車両に期待する3m/s²よりも大きい
⇒ブレーキ操作開始が遅れたことによる影響

3. 実験結果－ケース1 自転車とMRM車両の最小車間時間－

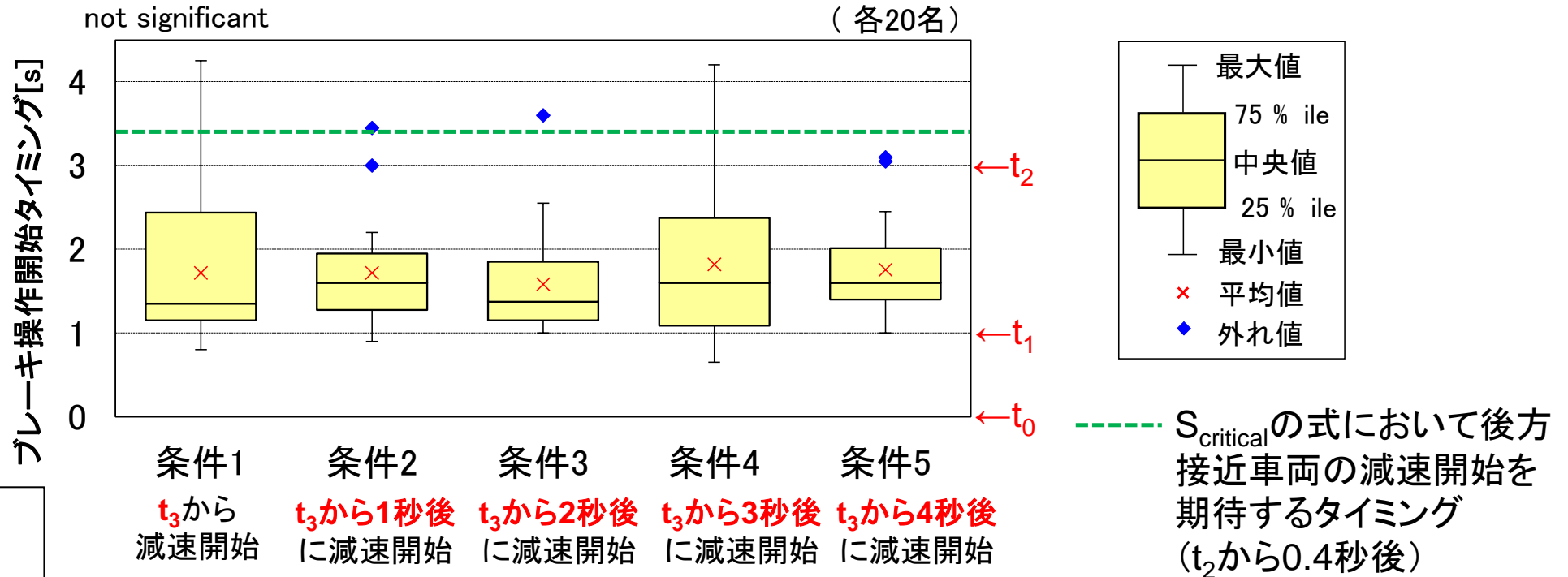
＜ケース1の懸念点＞
減速中の車両が自転車の前に入ってきた後に停止しても衝突を回避可能か？



- 条件3及び条件4において衝突が発生⇒ブレーキ操作開始の遅れが衝突の要因
- 衝突した事例以外では、条件3、条件4は最小車間時間がより大きい値
⇒LC開始時点における相対距離が長かったことに加え、少しでも早く安全な車間距離を確保すべく、より高い減速度で減速したドライバーが存在したため

3. 実験結果－ケース2 自転車ブレーキ操作開始タイミング－

＜ケース2の懸念点＞
 速度差が大きく遅い車両が自車の前に入り、減速・停止しても衝突を回避可能か？

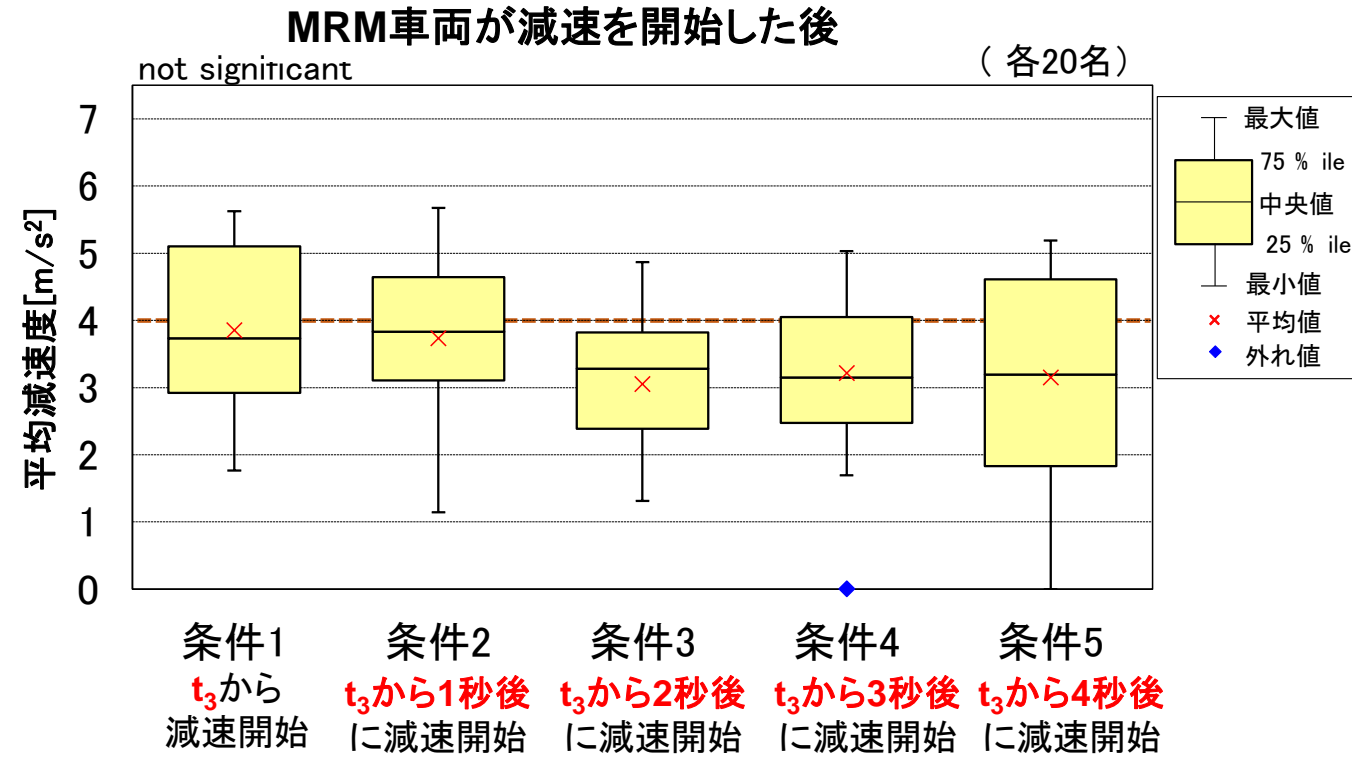
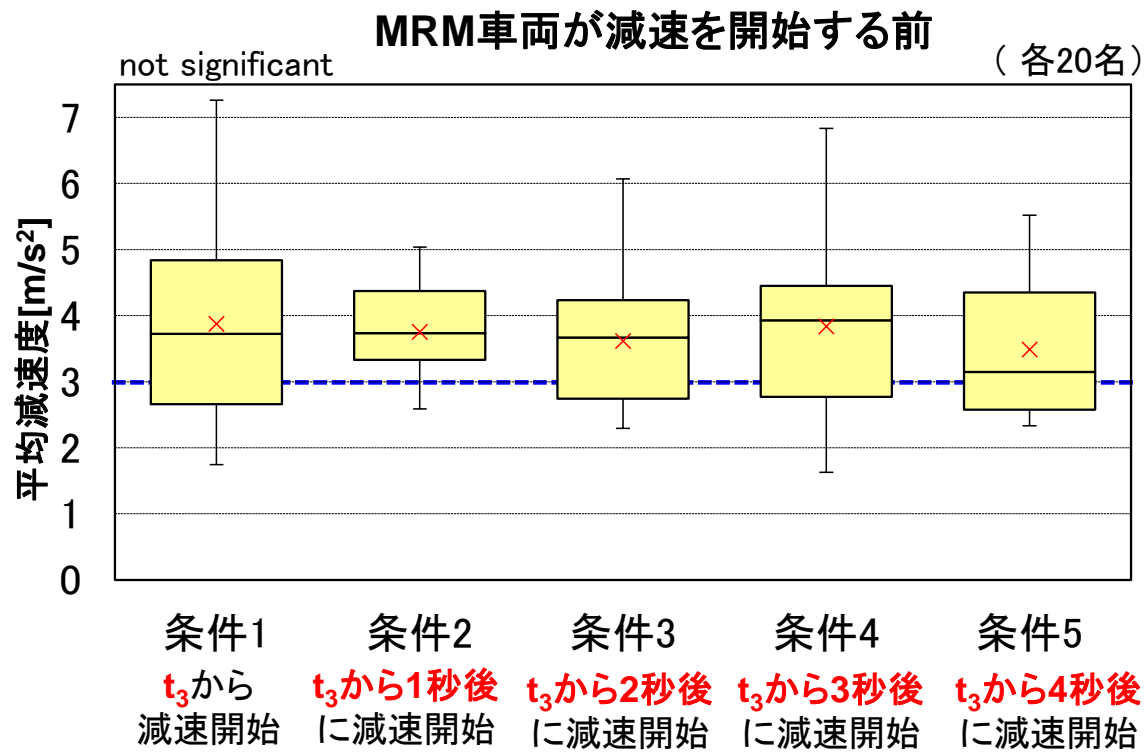


- t_0 時点の速度
 MRM車両: 50km/h
 後方接近車両: 100km/h
- t_0 時点の相対距離 (x_0): 94.1m
- MRM車両の減速度: 4m/s²

• 全ての条件において、 $S_{critical}$ の式で想定する減速開始タイミング (t_2 から0.4秒後) よりも1秒以上早くブレーキ操作を開始
 ⇒ 速度差 (50km/h) が大きかったことから、後方車両のドライバーは、より短時間で衝突回避が必要であると判断

3. 実験結果－ケース2 自転車平均減速度－

＜ケース2の懸念点＞
速度差が大きく遅い車両が自転車の前に入り、減速・停止しても衝突を回避可能か？



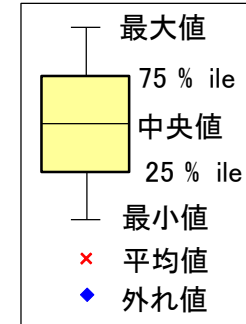
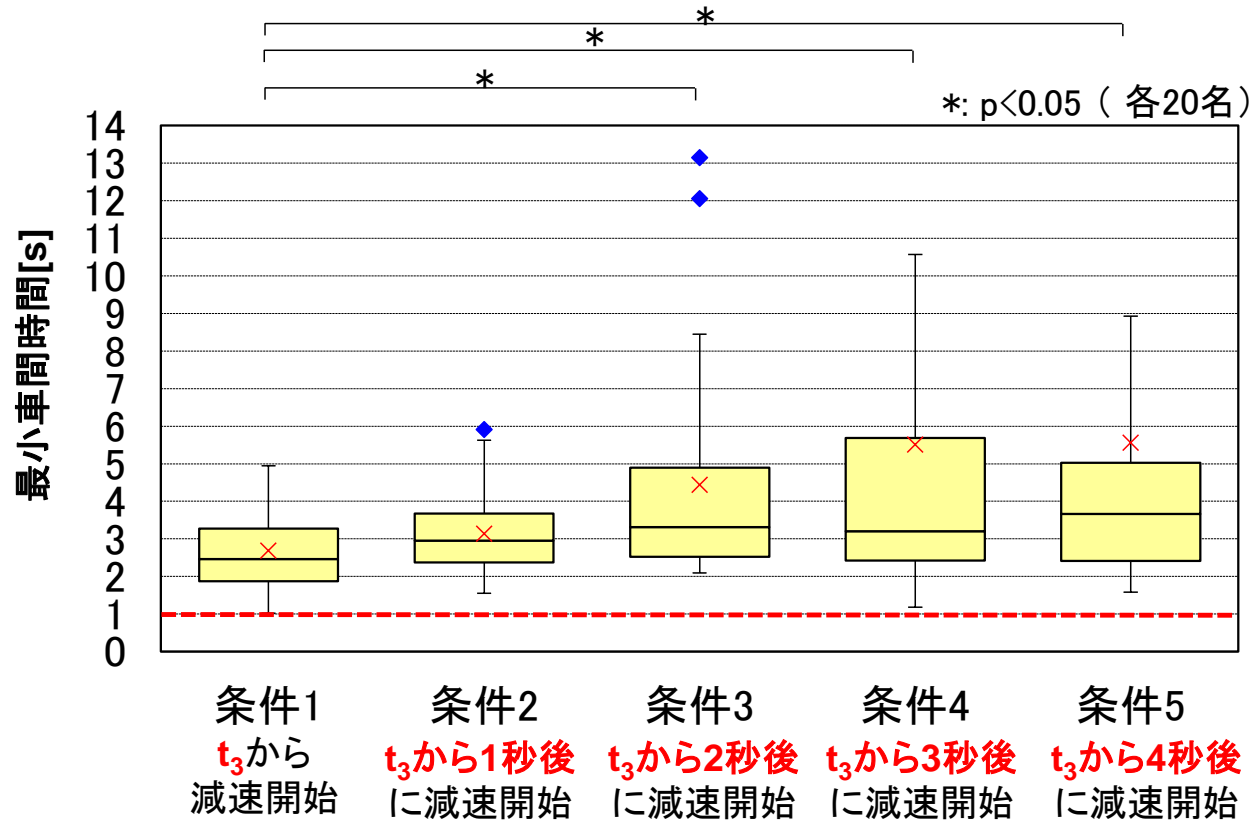
----- $S_{critical}$ の式における後方接近車両の減速度 ($3m/s^2$)

----- MRM車両の減速度 ($4/ms^2$)

- MRM車両の減速を開始前は、 $S_{critical}$ の式で想定する $3m/s^2$ と同等またはより大きい値
- MRM車両の減速開始後は、**LC終了後、2秒以上経過してから減速を開始した条件3～条件5はやや小さい**(MRM車両が減速を開始した時点で自転車速度が $50km/h$ 以下)

3. 実験結果－ケース2 自車とMRM車両の最小車間時間－

MRM車両が減速を開始した後



----- $S_{critical}$ の式における
最小車間時間(1s)※

※条件3～条件5に適用

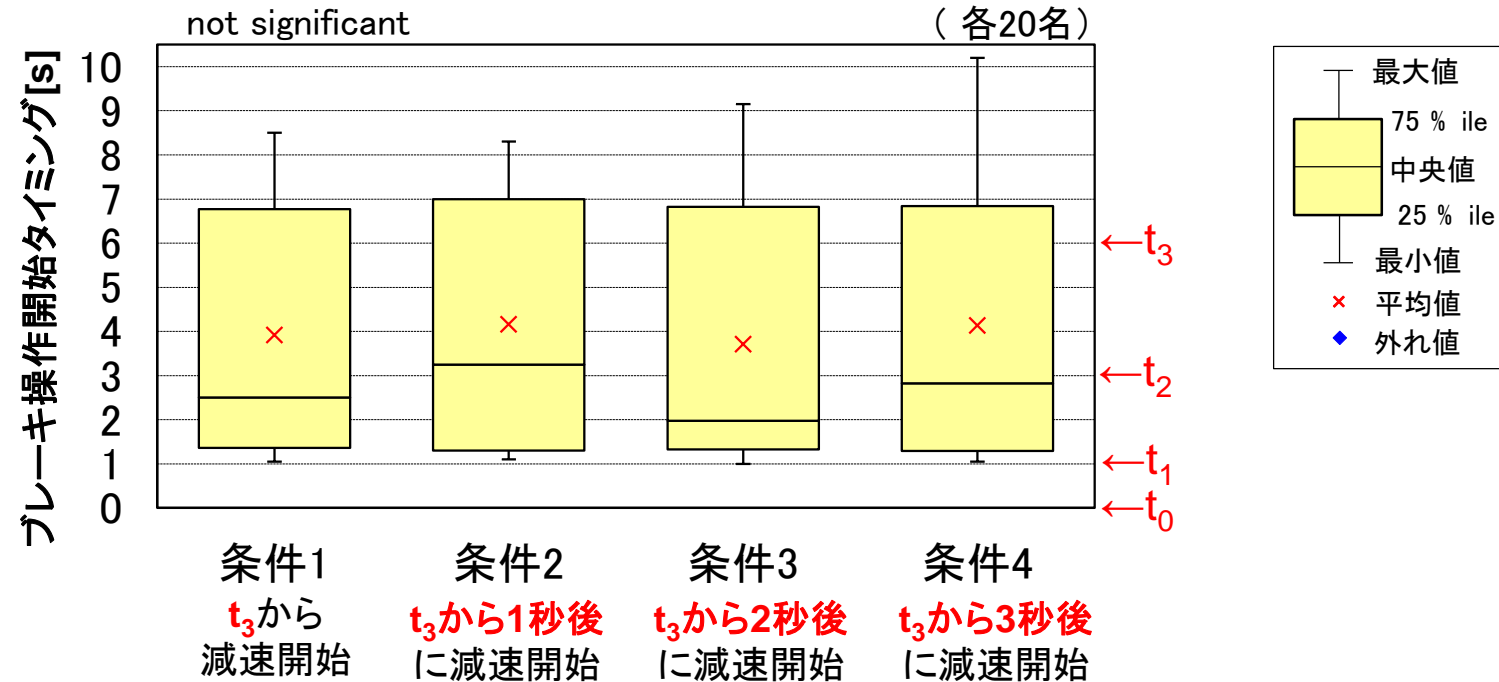
＜ケース2の懸念点＞
速度差が大きく遅い車両が自車の前に入り、減速・停止しても衝突を回避可能か？

- LC終了後、2秒以上経過してから減速を開始した条件3～条件5は最小車間時間が増大(有意な差)
⇒ 後方車両のより安全な衝突回避に効果的

3. 実験結果－ケース3 自車ブレーキ操作開始タイミング－

＜ケース3の懸念点＞
自車の直前に入ってきた
車両が減速・停止しても
衝突を回避可能か？

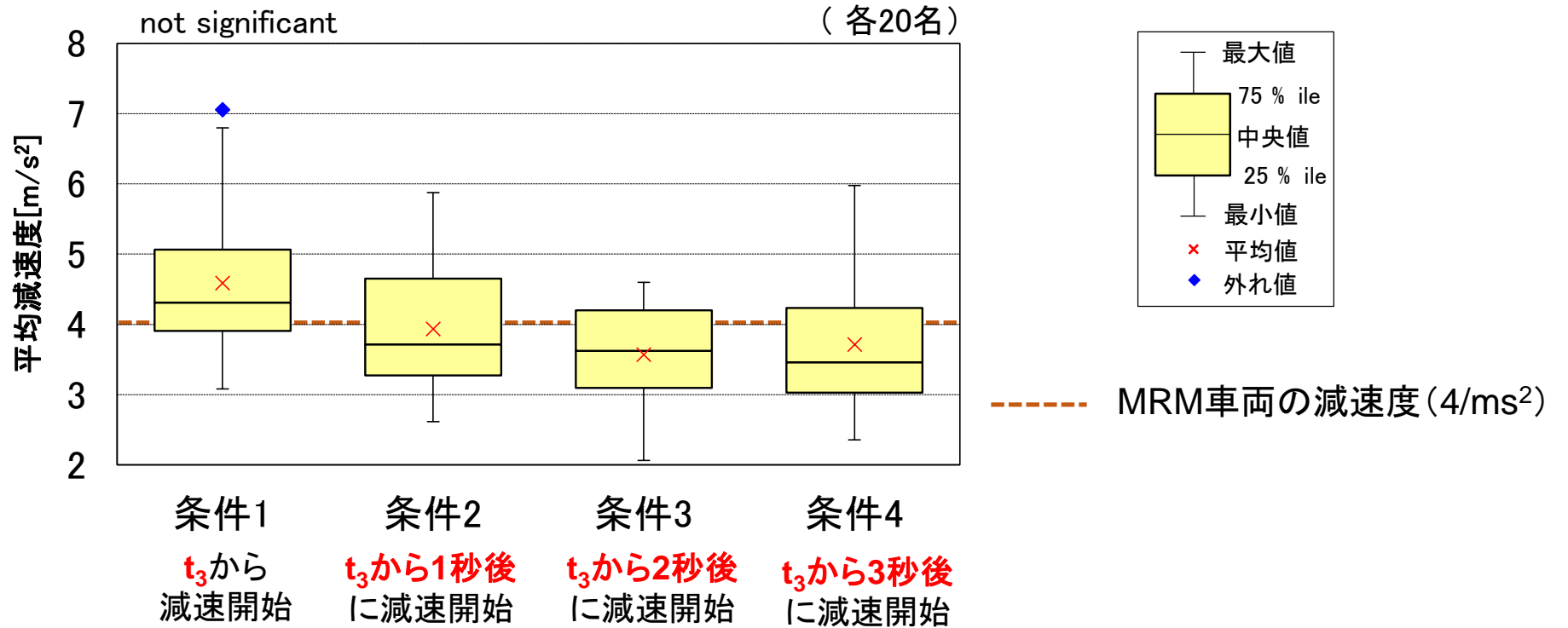
- t_0 時点の速度
MRM車両：100km/h
後方接近車両：100km/h
- t_0 時点の相対距離 (x_0)：27.8m
- MRM車両の減速度：4m/s²



- ケース1、ケース2に比べ、データがより広範囲に分布
⇒ LC開始 (t_0) 時点で速度差が無く、車間時間が1秒あったことから、速やかに対応したドライバもいる一方、LC終了 (t_3) までブレーキ操作を行わなかったドライバも存在

3. 実験結果－ケース3 自転車平均減速度－

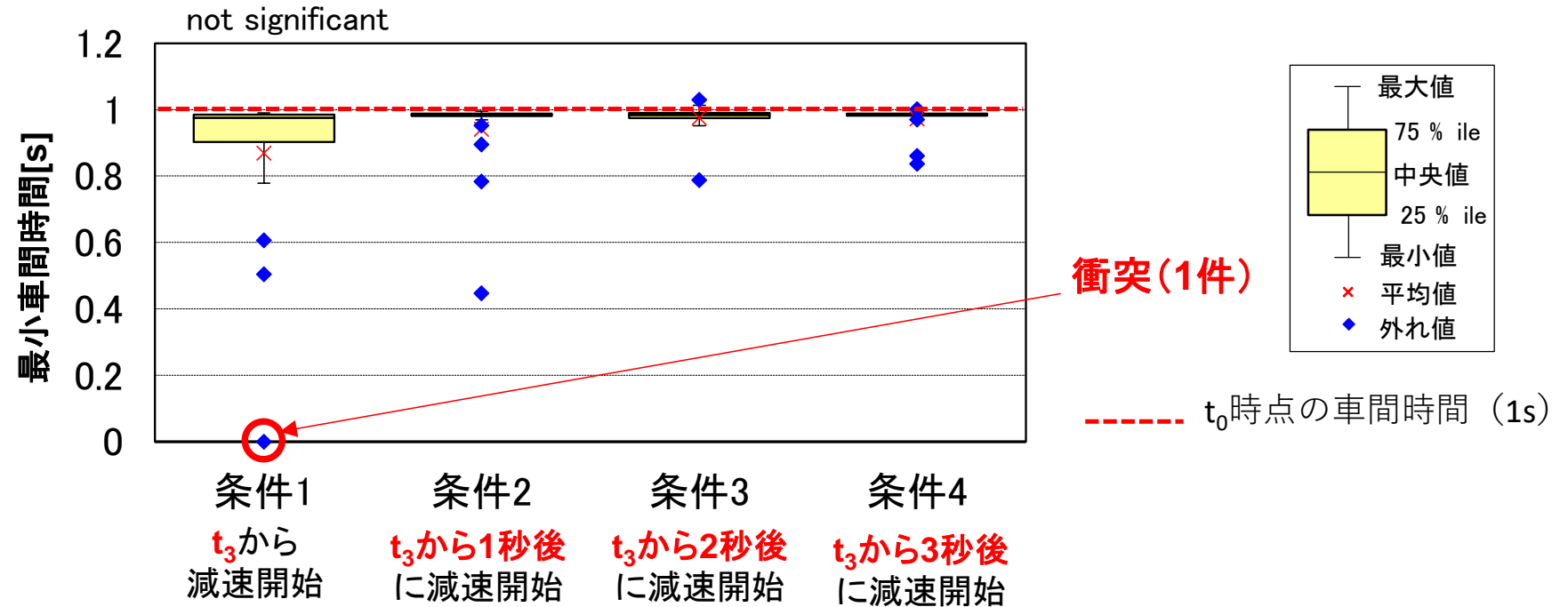
＜ケース3の懸念点＞
自転車の直前に入ってきた
車両が減速・停止しても
衝突を回避可能か？



- LC終了後、2秒以上経過してから減速を開始した条件3、条件4は減速度の値が小さい
⇒ LC終了後のハザードランプ点滅に反応し、早めにブレーキ操作を開始

3. 実験結果－ケース3 自転車とMRM車両の最小車間時間－

＜ケース3の懸念点＞
 自転車の直前に入ってきた
 車両が減速・停止しても
 衝突を回避可能か？



- 条件1において衝突が発生(1件)
 ⇒ブレーキ操作開始タイミングの遅れが衝突の要因
 ⇒LC終了から減速開始までの間に、2秒以上ハザードランプ点滅による注意喚起が重要

4. 実験結果から得られた知見

1) 車線変更先の後方から接近する車両との相対距離

- ACSFカテゴリCの $S_{critical}$ の式及びパラメータを用いて算出可能
- $S_{critical}$ の式を用いて t_2 以外の任意の時点 (例: t_0 時点) における相対距離を算出することも可能

$$S_{critical} = (V_{rear} - V_{ACSF}) \cdot t_B + (V_{rear} - V_{ACSF})^2 / (2 \cdot a) + V_{ACSF} \cdot t_G$$

$S_{critical}$: t_2 時点における相対距離[m]

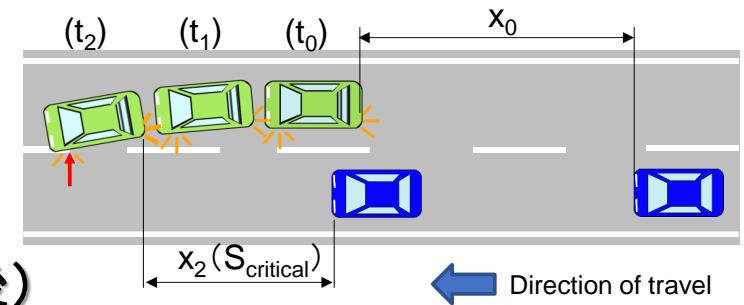
V_{ACSF} : ACSF車両の速度[m/s] ⇒ MRM車両の速度

V_{rear} : 後方車両の速度[m/s]

t_B : 後方車両に期待する減速開始タイミング[s] (t_2 から0.4秒後)

a : 後方車両に期待する減速度[m/s²] (**3m/s²**)

t_G : 後方車両が減速を終了するまでの間の最小車間時間[s] (**1秒**)



4. 実験結果から得られた知見

1) 後方車両との相対距離

- 車線変更中にMRM車両を減速させる場合、 $S_{critical}$ の式における V_{ACSF} が時系列に変化し、後方車両との速度差が時間の経過とともに大きくなる点を考慮することが必要
- 後方車両との間に速度差が無く、速度一定で車線変更を行う場合には、 $S_{critical}$ の式における $t_G=1$ 秒を距離に換算して $S_{critical}$ とすることが可能

実験で取得した後方車両の対応(減速開始タイミング、減速度)は、 $S_{critical}$ の式中のパラメータとは必ずしも一致しないが、一定の条件下では後方車両は衝突を回避可能
⇒ $S_{critical}$ の式及びパラメータを使用して必要な相対距離を算出することの妥当性を確認

4. 実験結果から得られた知見

2) MRM中の車線変更方法

- ① 車線変更中に減速する場合、**減速度が 2m/s^2 以下**であれば後方車両は衝突を回避可能
- ② 先ず速度を低下させる場合、 50km/h (一定)で車線変更を実行しても後方車両は衝突を回避可能
- ③ 速度差が無く、一定の速度で車線変更を行う場合、車間時間が1秒あれば後方車両は衝突を回避可能
- ④ 車線変更終了後に減速を行う場合、ハザードランプ点滅等による**報知を2秒以上行った後に減速を開始**※することが必要

※前方に差し迫った危険が生じ、危険を回避するため直ちに減速せざるを得ない場合を除く

5. 自動車基準調和世界フォーラム会議への提案

- 実験結果をR157ALKS-SIGで報告、減速を伴う車線変更に関する要件追加を提案
- R157の改正ドラフト(文書番号:GRVA-12-51)に下記の規程が追加された

5.2.6.7.5. In case **the ALKS decelerates the vehicle during a lane change procedure** into a regular lane of traffic, **this deceleration shall be factored in when assessing the distance to a vehicle approaching from the rear, and the deceleration shall not exceed 2 m/s^2** , except for the purpose of avoiding or mitigating the risk of an imminent collision or when required to ensure reaching the target stop area during an MRM.

How the provisions of this paragraph are implemented in the system design shall be demonstrated to the Technical Service during type approval.

5.2.6.7.6. Where **there is not sufficient headway time for the vehicle behind at the end of the lane change procedure, the ALKS shall not increase the rate of deceleration for at least 2 seconds after the completion of the lane change procedure**, except for the purpose of avoiding or mitigating the risk of an imminent collision, when required to fulfil other requirements of this regulation (e.g., to adapt to changing speed limits, maintain sufficient following distance), or to ensure reaching the target stop area during an MRM.

How the provisions of this paragraph are implemented in the system design shall be demonstrated to the Technical Service during type approval.

6. まとめ

- MRM中の自動運転車が車線変更し、第1車線上で停止する場面において、後方車両のドライバの衝突回避行動を計測するドライビングシミュレータ実験を実施
- 実験で取得したデータを基に、MRM中の後方車両との相対距離及び車線変更に関する知見を整理
- 実験結果を国連の専門家会議(R157ALKS-SIG)で報告、減速を伴う車線変更に関する要件追加を提案

ご清聴ありがとうございました