

危険運転速度の検討

東京農工大学

毛利 宏

略 歴

1982.3 東京大学工学部機械工学科卒業

1984.3 東京大学大学院修士課程修了

1984-2010 日産自動車

- ・ 車両運動性能向上システムの研究開発
 - ・ 後輪操舵システム
 - ・ 電動パワーステアリングシステム
 - ・ ステアバイワイヤシステム, 他
- ・ 運転支援, 自動運転システムの研究開発
 - ・ レーンキープシステム (Pro Pilot) 他

企業
27年間
(約2/3)

2010-2013 山梨大学

2014-2023 東京農工大学

- ・ 自動運転
 - ・ 車両運動性能
 - ・ 人間-車両システム (ヒューマンマシンインターフェース)
 - ・ 交通安全・事故分析
- に関する研究・開発

大学
14年間
(約1/3)

2024- 東京農工大学 産官学連携研究員として共同研究等に従事

1. 高速で運転が難しくなる理由

制動に関する基本事項

操舵に関する基本事項

2. 危険運転速度の定量化

定量化が難しい理由

検討の前提：参考文献紹介

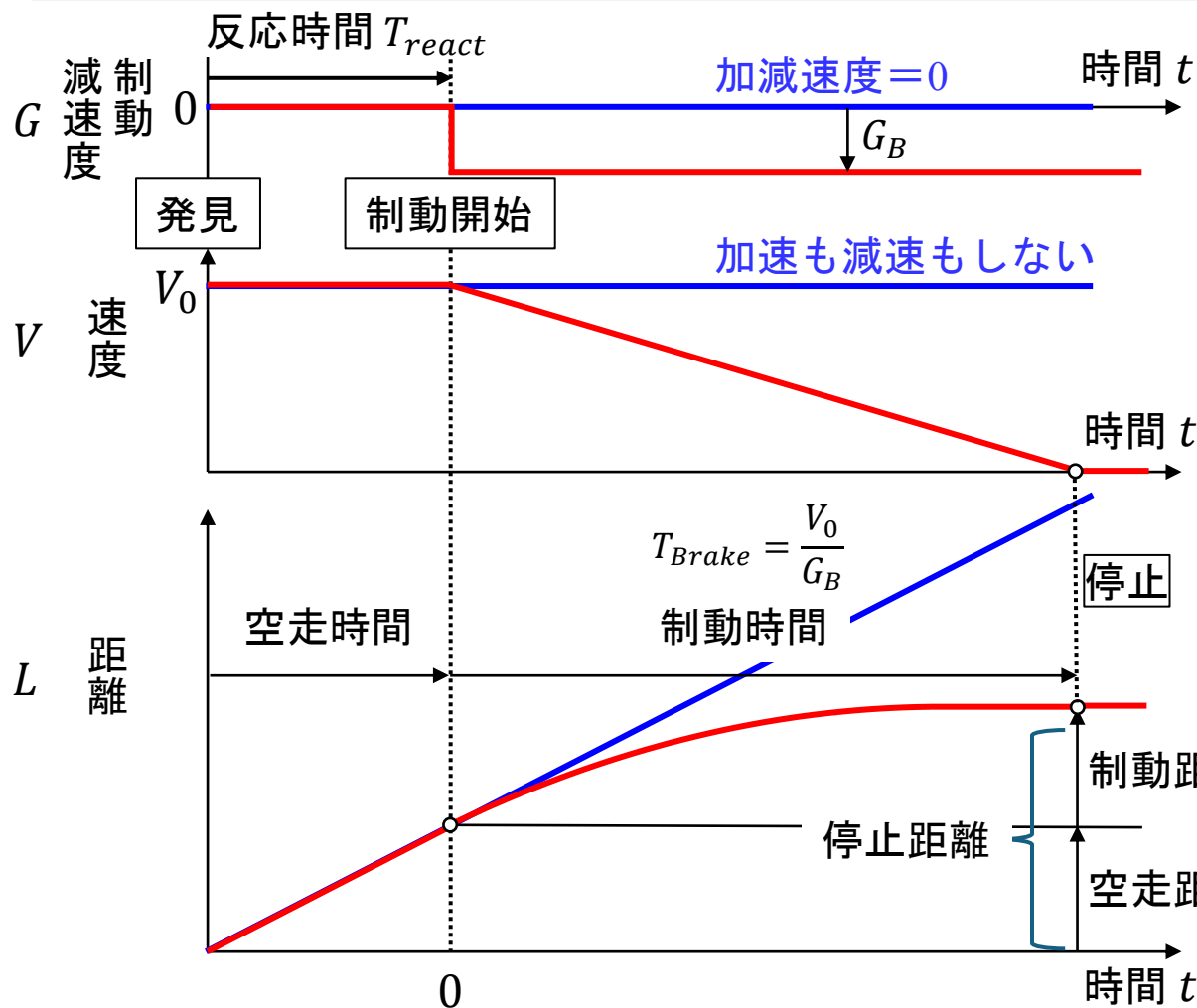
定量化の方法

危険運転速度の計算結果

3. まとめ

「制動減速度」と「速度」，「停止距離」の関係

(制動に関する基本事項)



制動で停止に要する時間 $t = \frac{V_0}{G_B}$
 停止 $\Rightarrow V = 0$

$$V = V_0 - G_B t = 0$$

代入して
整理

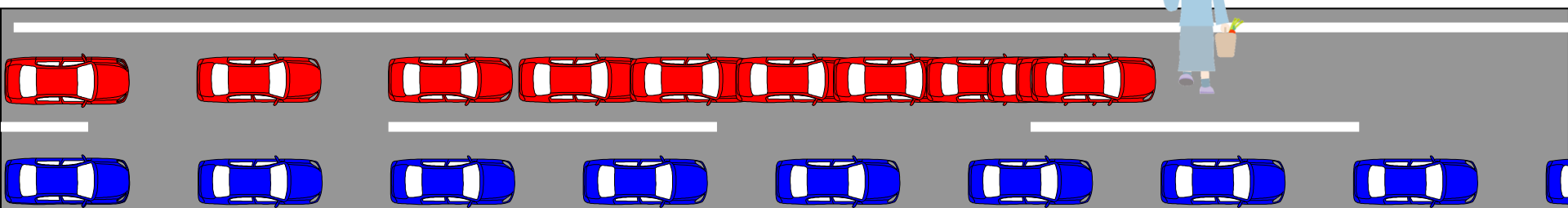
$$L = V_0 t - \frac{1}{2} G_B t^2$$

$$L_{Brake} = \frac{V_0^2}{2G_B}$$

車速の2乗

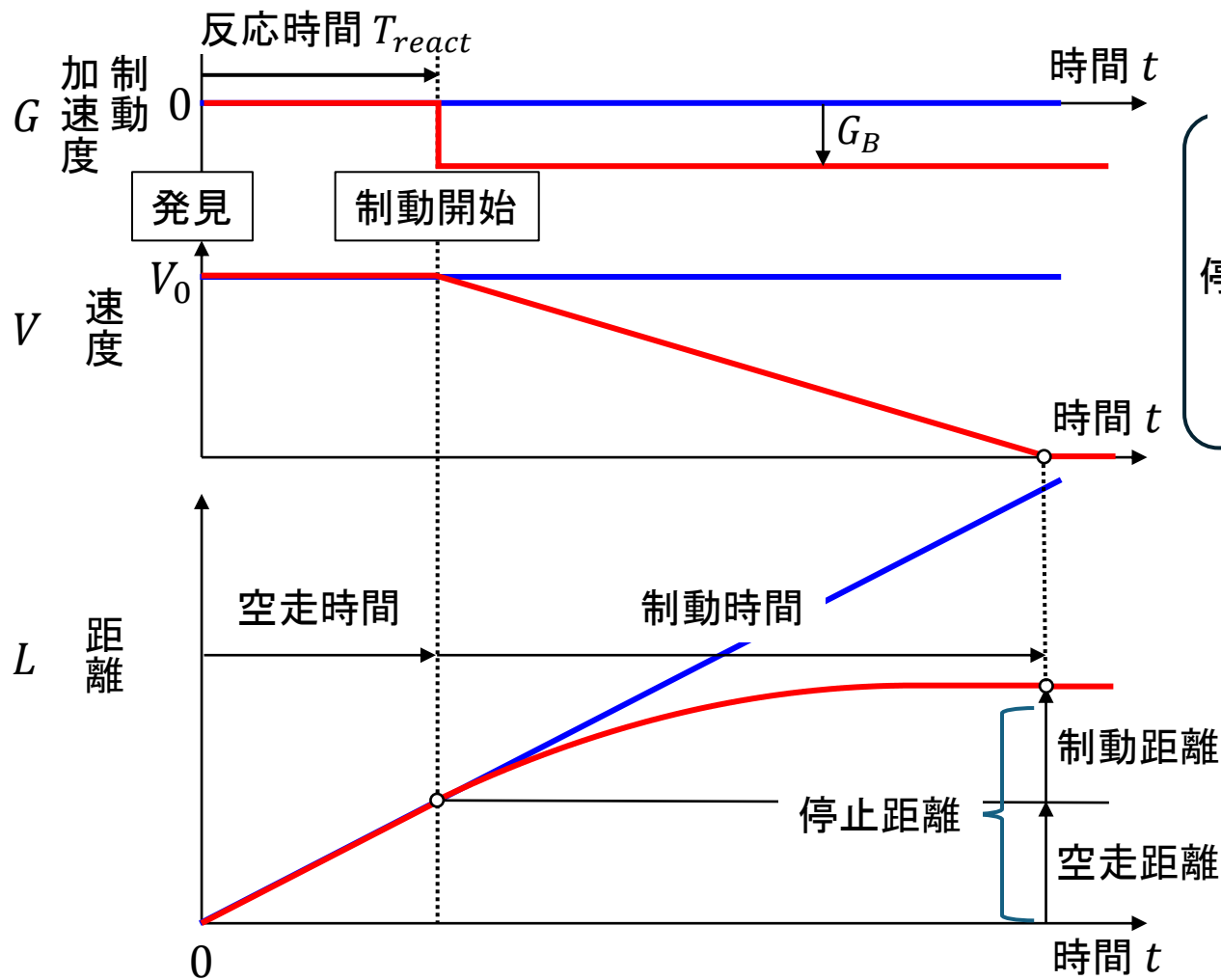
$$L_{Lag} = V_0 \cdot T_{react}$$

車速の1乗 (比例)



「制動減速度」と「速度」，「停止距離」の関係

(制動に関する基本事項)



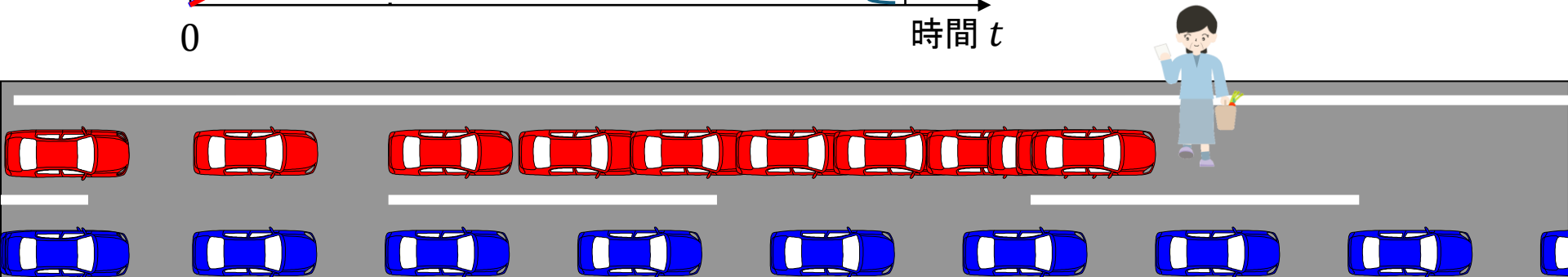
まとめると,

車速の1乗

車速の2乗

停止距離 = 空走距離 + 制動距離

$$L_{stop} = V_0 \cdot t_{react} + \frac{V_0^2}{2G_B}$$

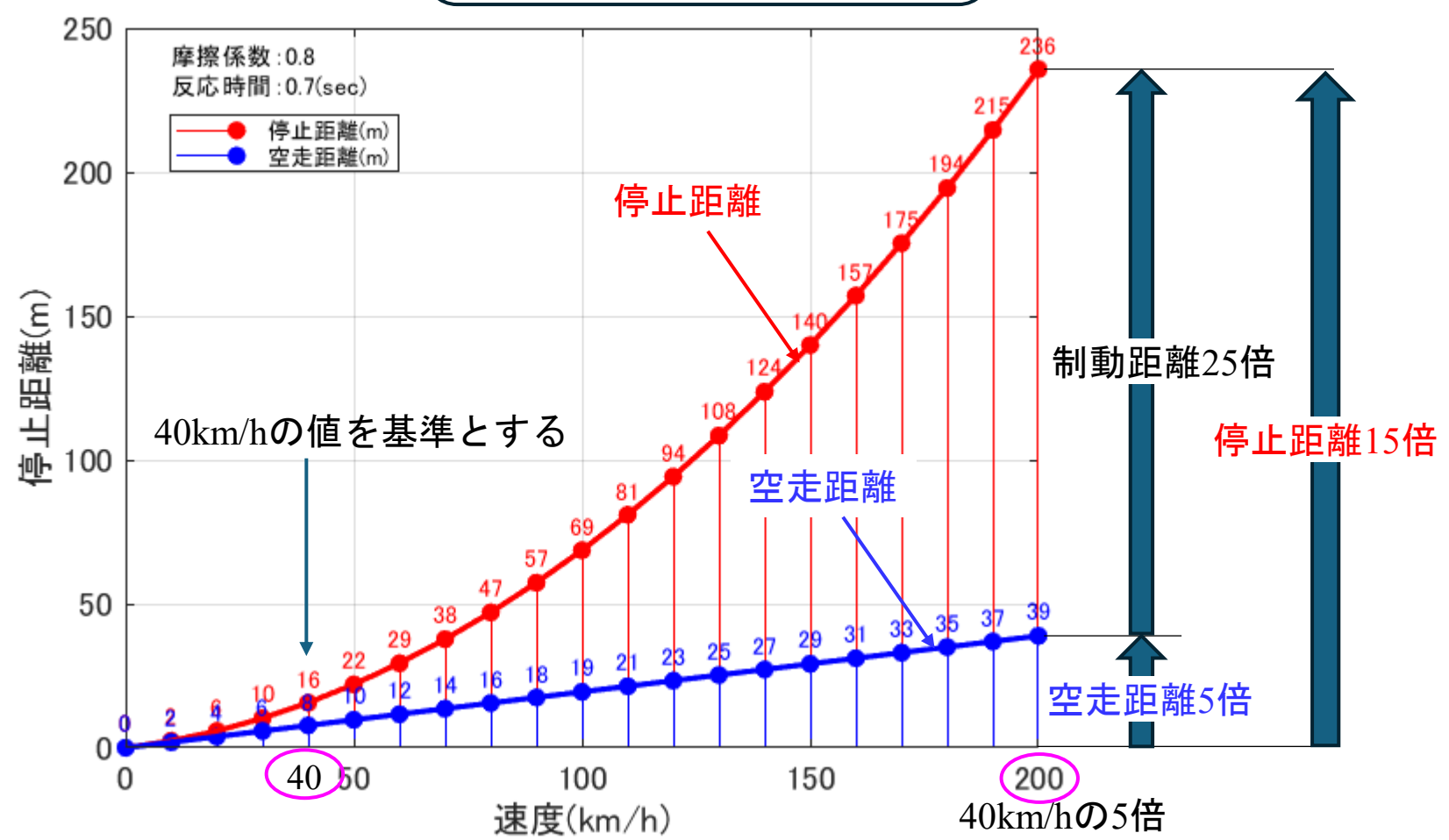


車速の1乗
(比例)
 車速の2乗

停止距離 = 空走距離 + 制動距離

$$L_{stop} = V_0 \cdot t_{react} + \frac{V_0^2}{2G_B}$$

発生できる加速度 G_B は
路面摩擦係数で決まる。
0.8Gを想定
(乾燥アスファルト)



停止距離の値（資料）

（制動に関する基本事項）

車速(km/h)	停止距離(m)	空走距離(m)	制動距離(m)
0	0.0	0.0	0.0
10	2.4	1.9	0.5
20	5.9	3.9	2.0
30	10.3	5.8	4.4
40	15.7	7.8	7.9
50	22.0	9.7	12.3
60	29.4	11.7	17.7
70	37.7	13.6	24.1
80	47.0	15.6	31.5
90	57.4	17.5	39.9
100	68.7	19.4	49.2
110	80.9	21.4	59.5
120	94.2	23.3	70.9
130	108.4	25.3	83.2
140	123.7	27.2	96.5
150	139.9	29.2	110.7
160	157.1	31.1	126.0
170	175.3	33.1	142.2
180	194.4	35.0	159.4
190	214.6	36.9	177.6
200	235.7	38.9	196.8

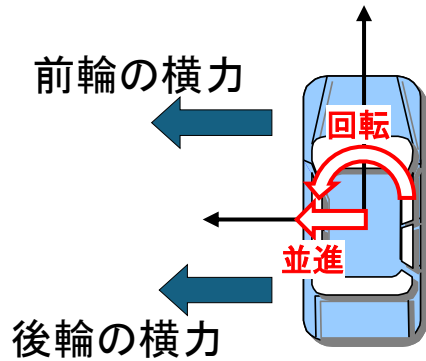
反応時間 0.7秒

摩擦係数 0.8 で計算

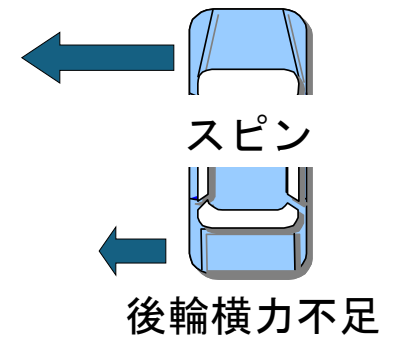
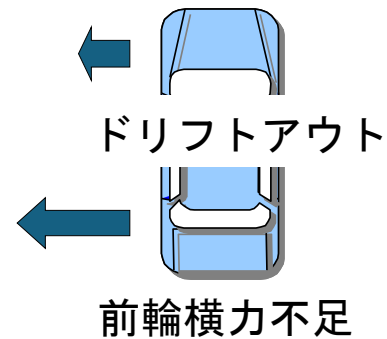
操舵に関する基本事項

横方向運動は **2** 自由度（並進，回転）
安定性の考慮も必要.

⇒ 制動に比べて
扱いが難しい



通常運転では，前後の横力が
上手くバランスしている



制限速度でも，操作によっては不安定になる.



2 種類の要因

車速増加に伴って操舵が難しくなる要因

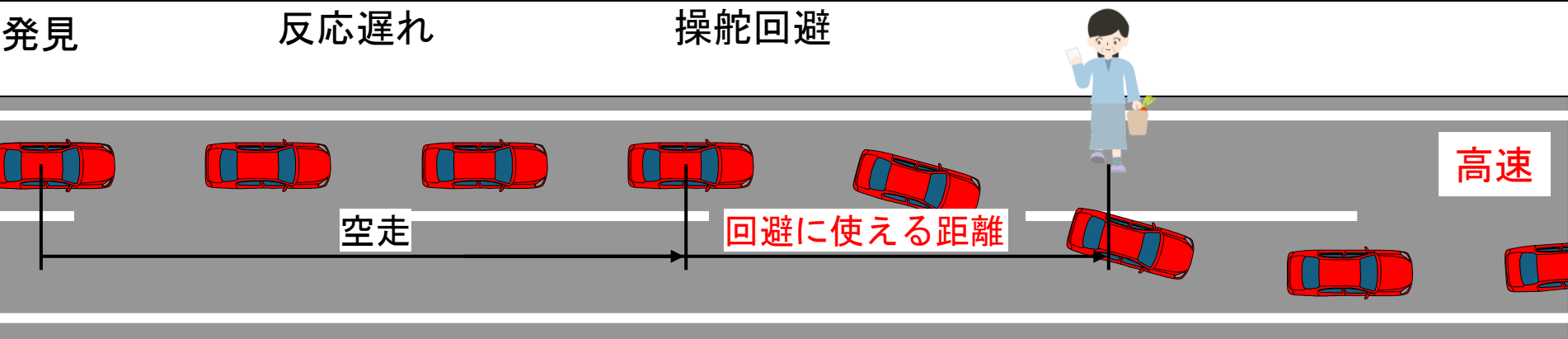
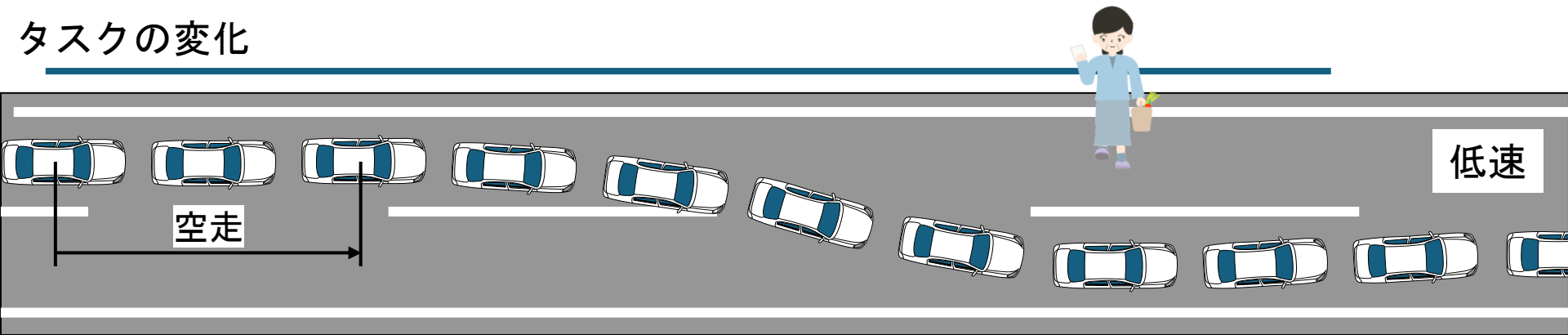


タスクが変わる
(厳しくなる)



車両特性が変わる
(応答, 収束性, 安定性低下)

タスクの変化



発見 反応時間は低速と同じ 反応遅れ 操舵回避

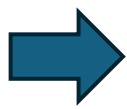
回避に使える距離（時間）が短くなる.



短時間の横移動が要求される.



大きな横加速度が早く必要！



高速では、速く、正確な操舵が必要

この理由は？

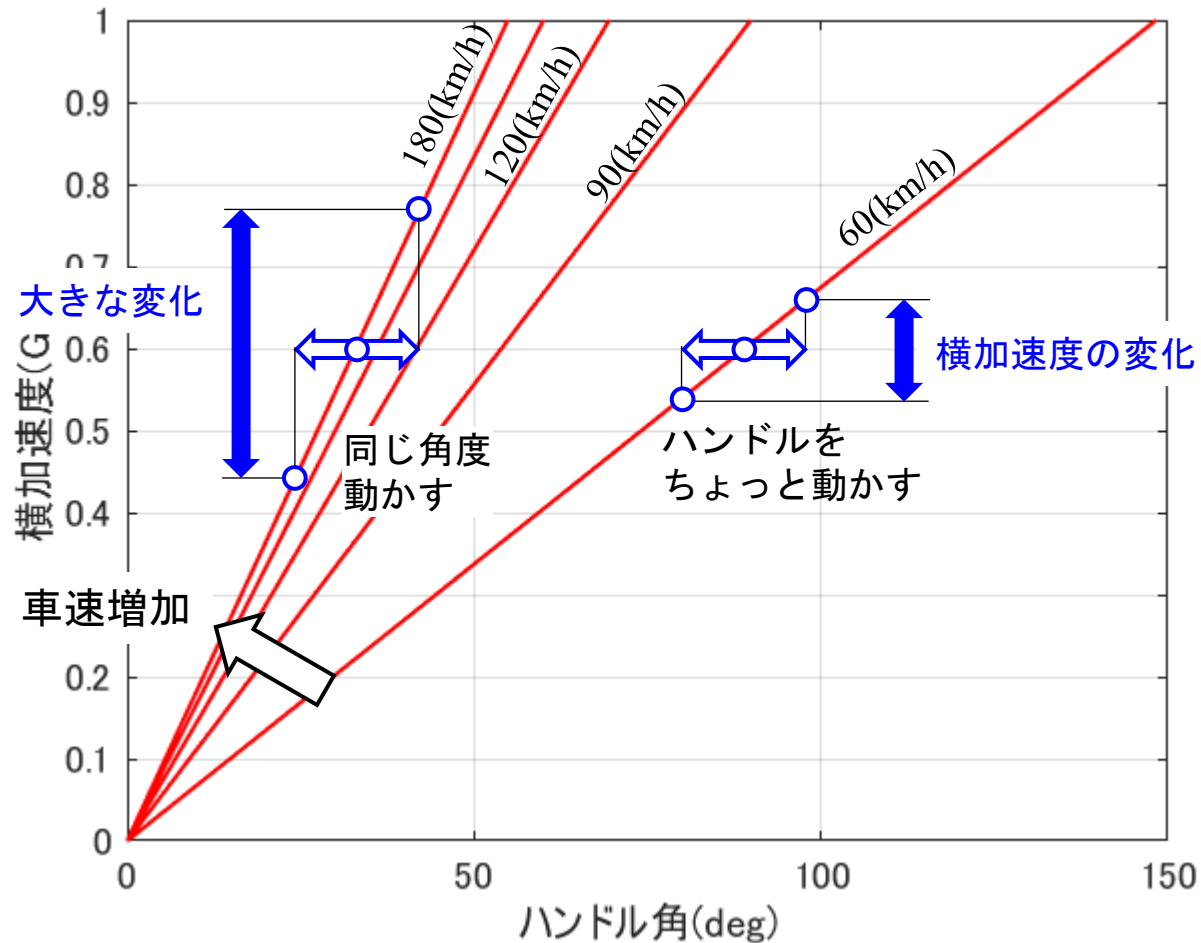


高速では、ハンドル角に対して横加速度が敏感.



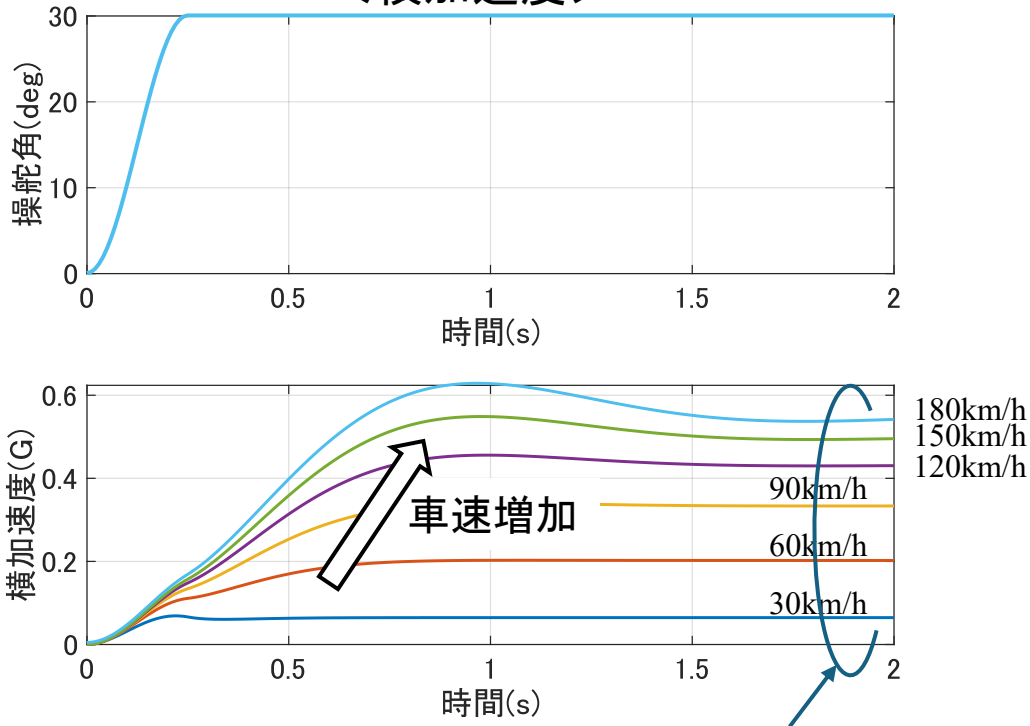
「高速でのハンドル操作は慎重に」 ⇨ 日常的に経験.

丁寧で、正確なハンドル操作が必要.



高速では，応答性，収束性が低下する.

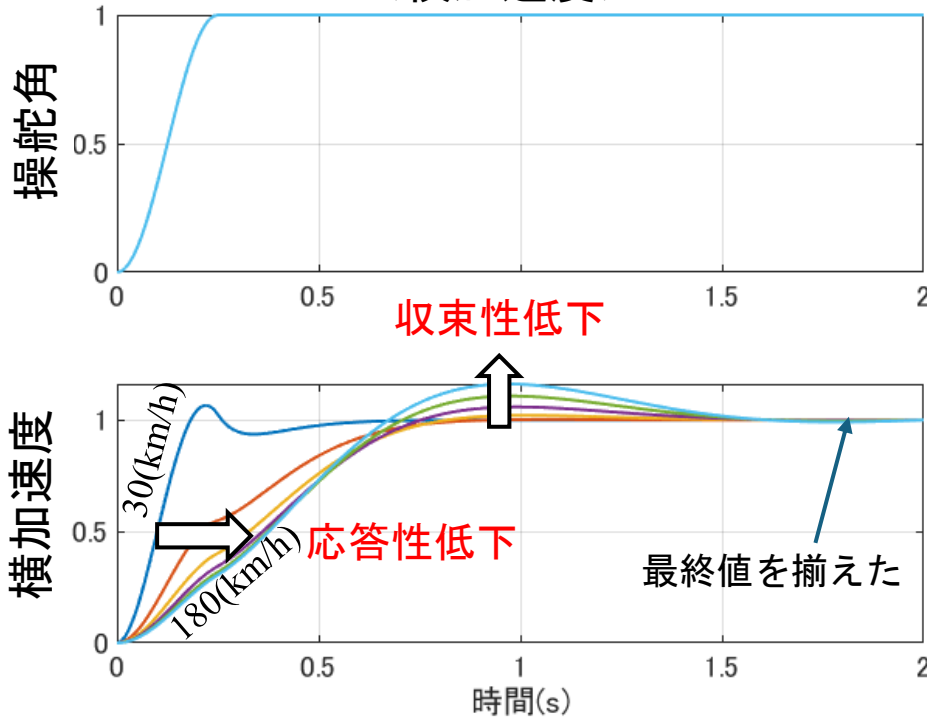
＜横加速度＞



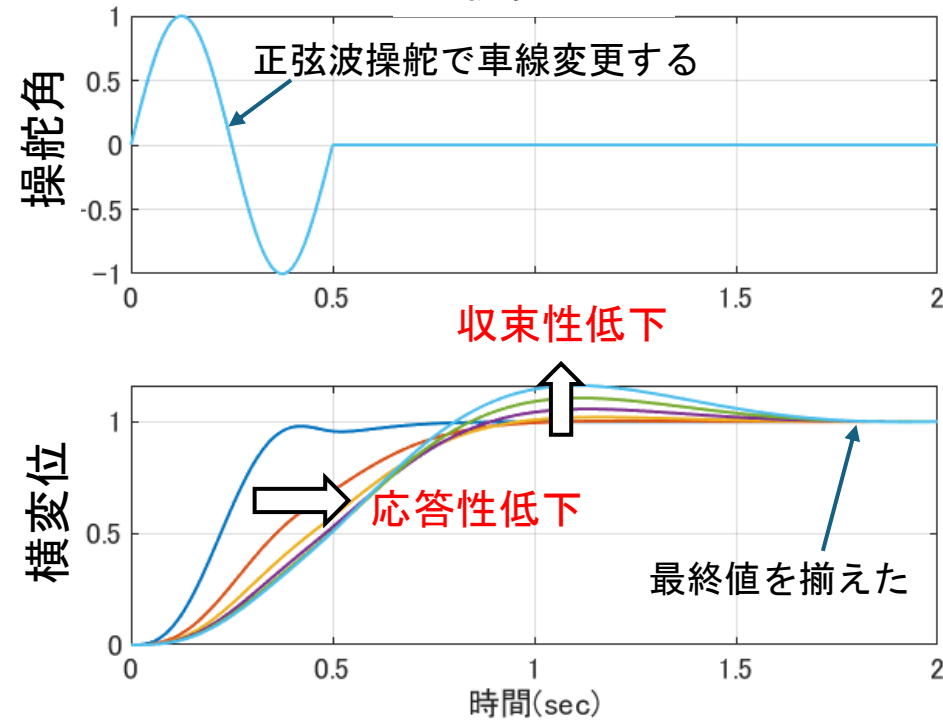
最終値を同じにする

高速では、応答性、収束性が低下する。

＜横加速度＞



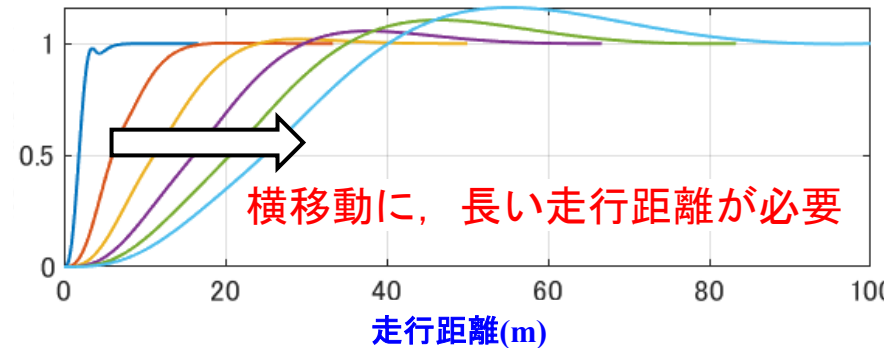
＜横変位＞



ゆっくり操舵していても、間に合わない



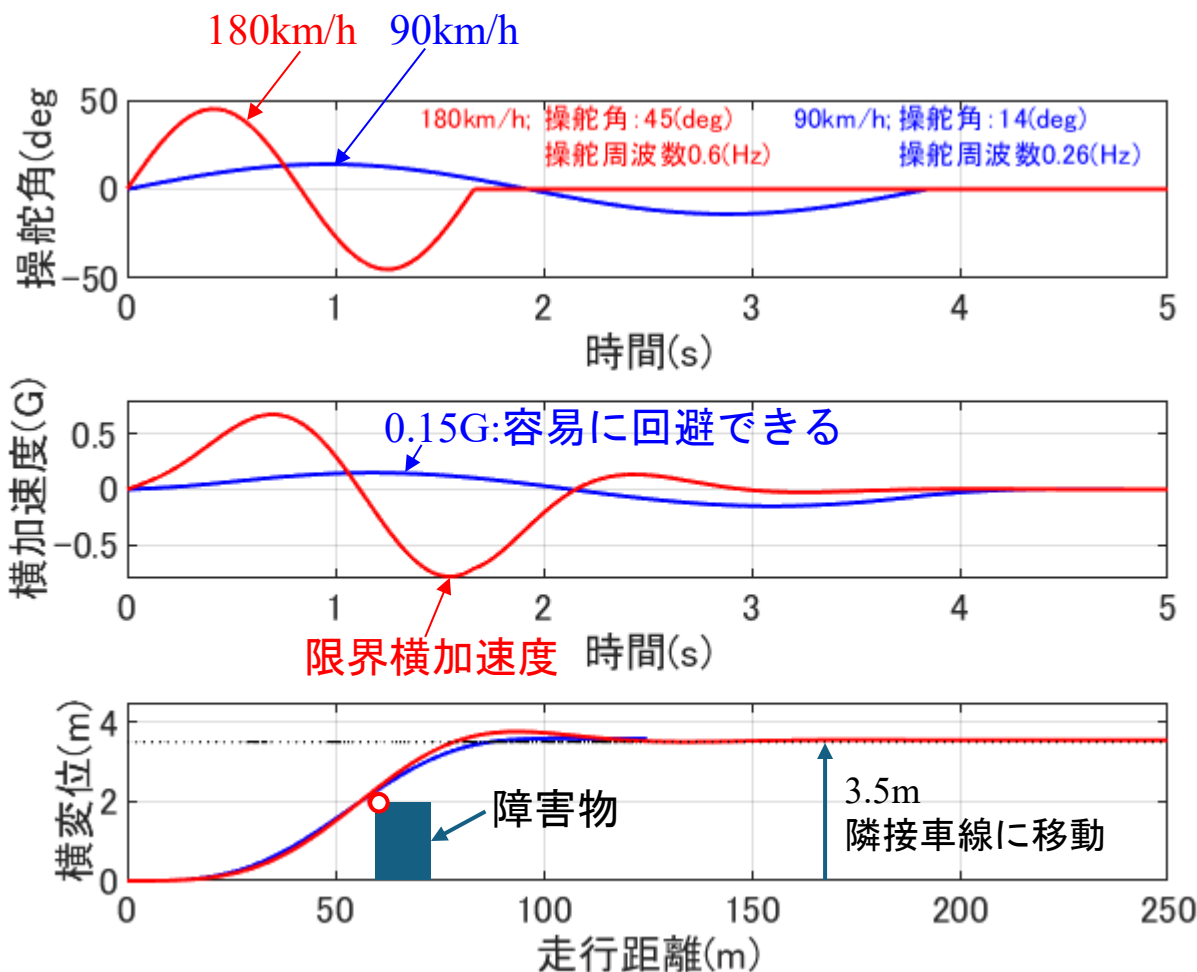
横変位



正弦波操舵入力を仮定（空走時間はゼロとする）

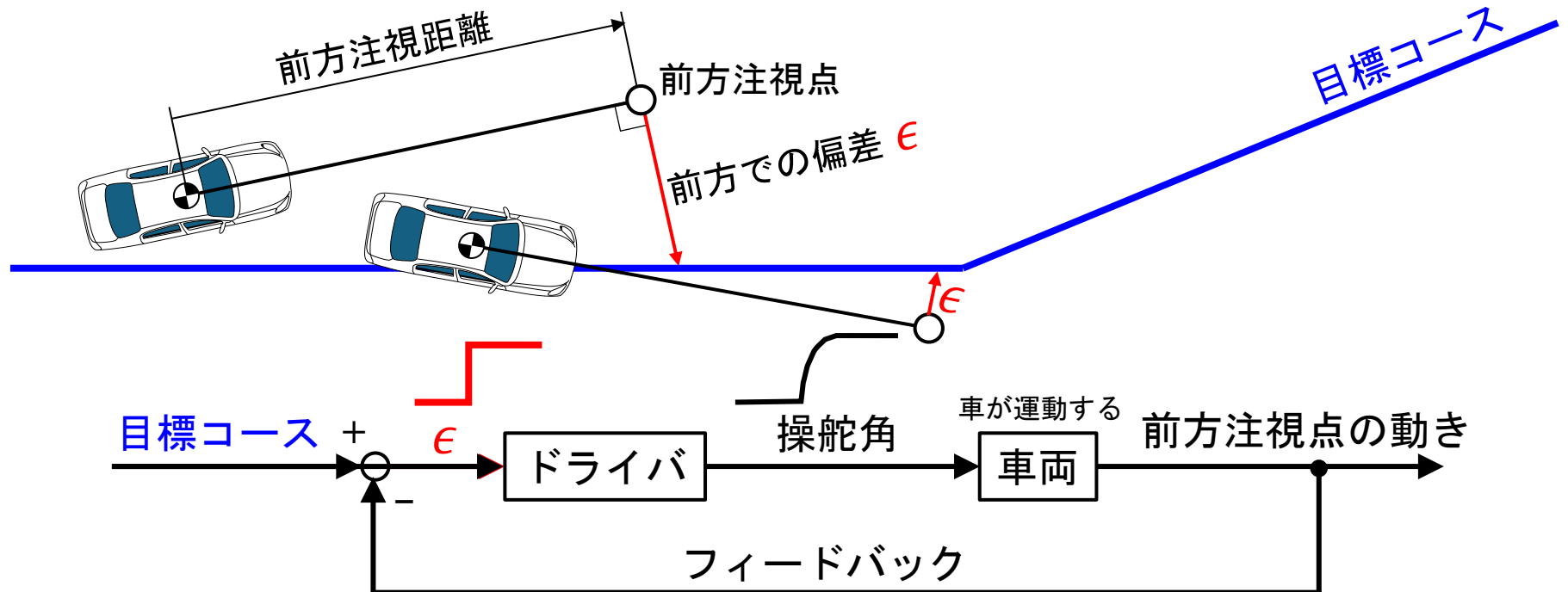
速く，正確に操舵する必要がある．

ここまでは，車両単体の性能 ➡ ドライバの特性も含めて考えてみる



ドライバを含めて考える

ドライバモデル：前方注視モデル



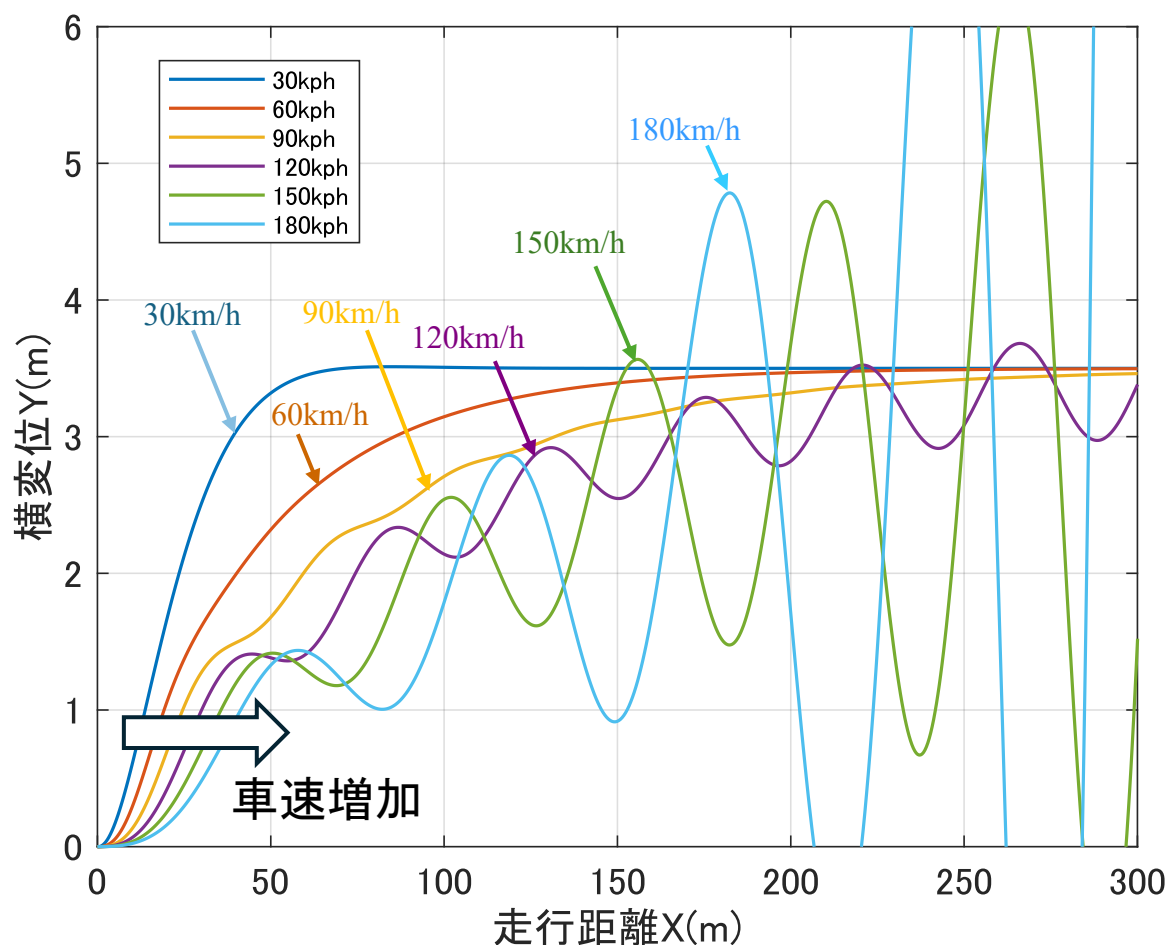
- ・ 前方での偏差 ϵ をなくすように操舵. 例) (ハンドル角) = (係数) $\times \epsilon$
- ・ ドライバの応答遅れ特性も考慮.
- ・ 必ずしも人間がこのような方法で運転しているわけではないが,
- ・ 人間の運転操作の特徴を, 比較的うまく表現できている.

ドライバモデルを用いた計算結果（例）

障害物を見つけて、速やかに車線変更する。（反応時間=0）

速度増加と共に、

- ・ 横移動するのに、長い走行距離が必要になる。
- ・ 軌道が振動的になり、不安定になる。



その他の基本事項

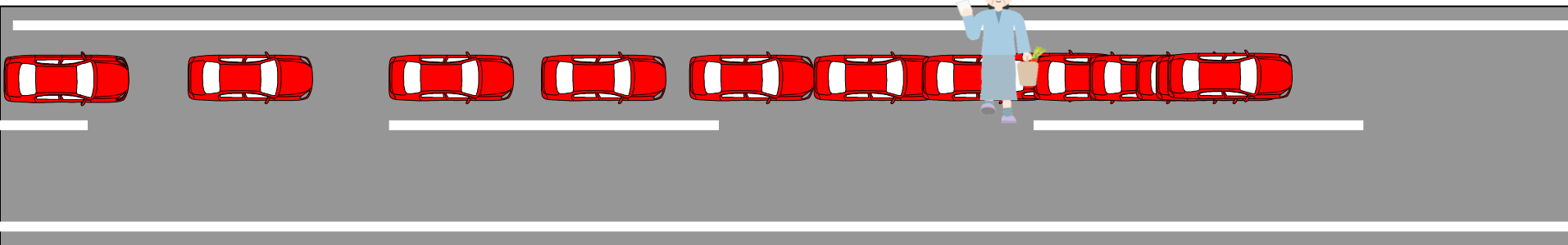
ブレーキとハンドルの両方を操作した場合

(制動と操舵の**複合入力**)

制動力
操舵角 } の大きさ、タイミングで様々な挙動が変わる。⇒ **複合入力は、扱いが難しい**

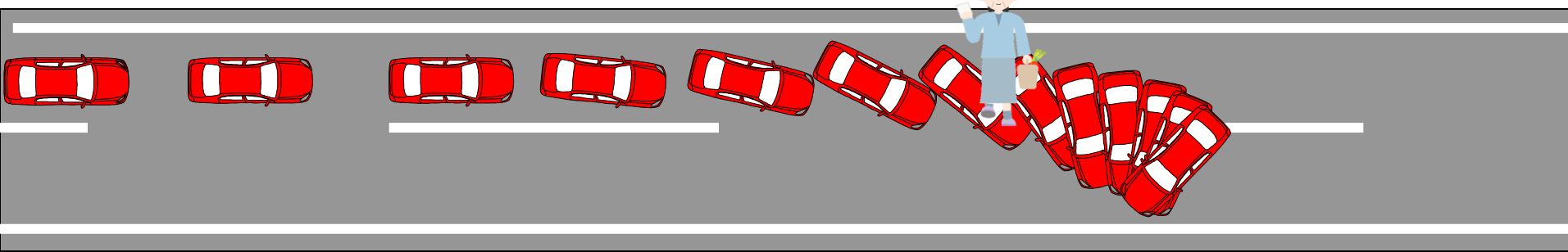
例) 強い制動力を加えて、操舵した場合

ハンドルが効かない



例) 操舵してから緩ブレーキをかけた場合

大きな横すべりが発生



ブレーキとハンドルはどちらが有利か？

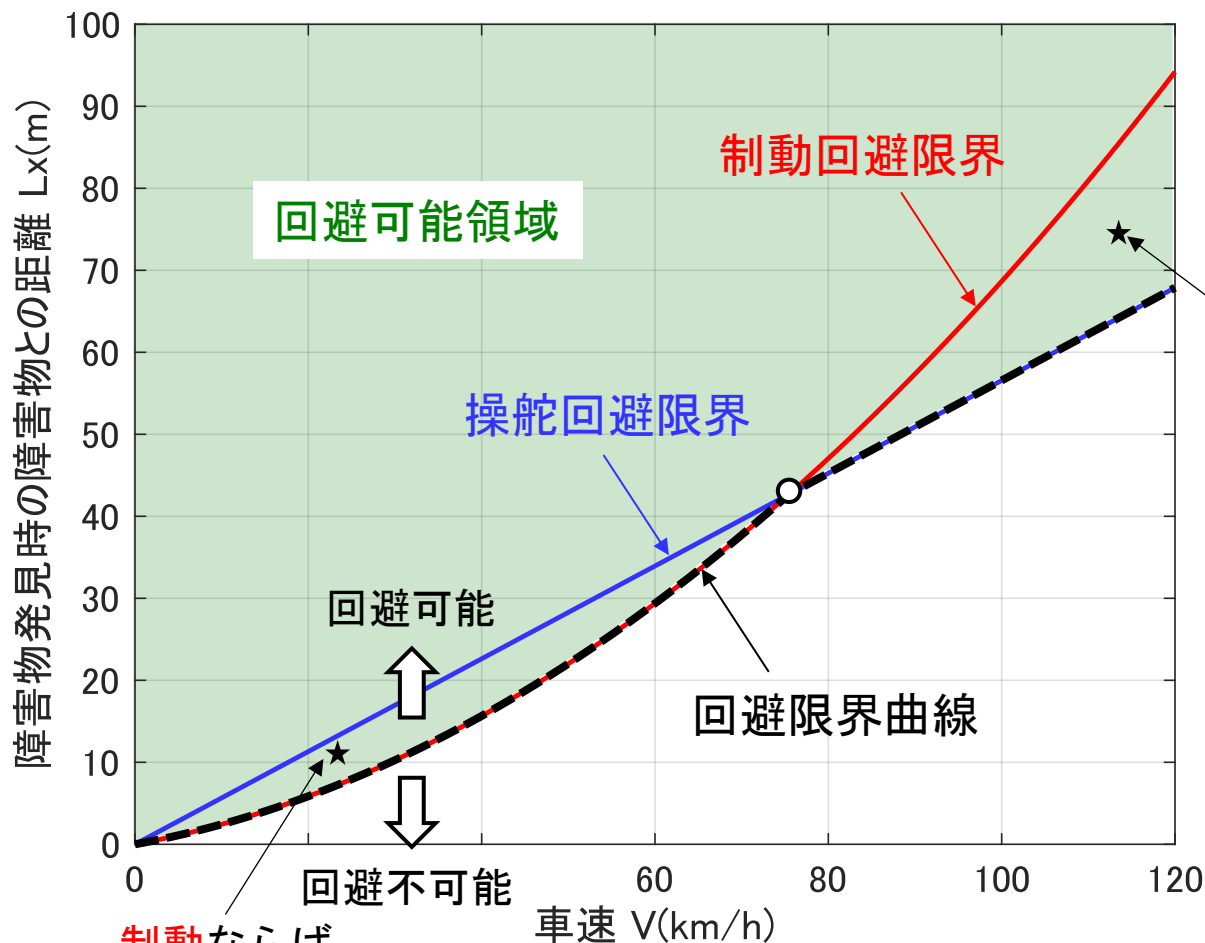
回避限界曲線

定性的には、

低速は**制動** (ブレーキ)
高速は**操舵** (ハンドル) } で回避するのが有利

操舵回避幅： 3.5m
反応時間： 0.7秒
路面摩擦係数： 0.8

遠くに出現



目の前に出現



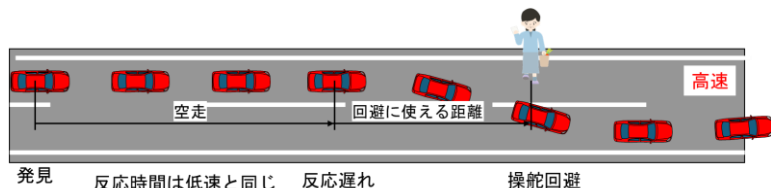
前半のまとめ

高速で危険性が高まることを、**定性的**には示すことができる。

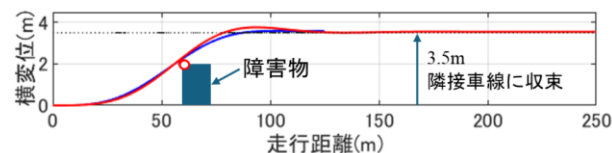
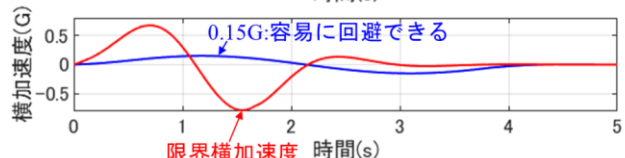
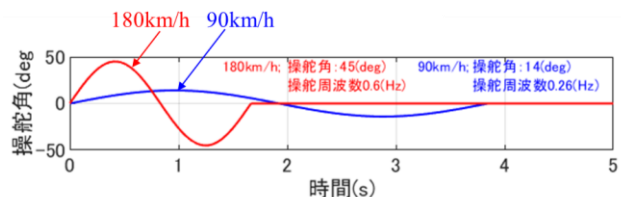
- ・ 高速になると、危険回避は難しくなる。

難しくなる理由

要求されるタスクが変わる
(厳しくなる)

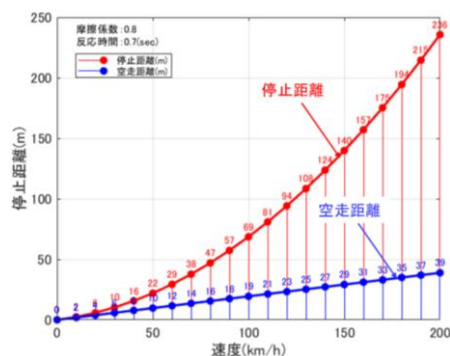


回避に使える距離、時間の減少

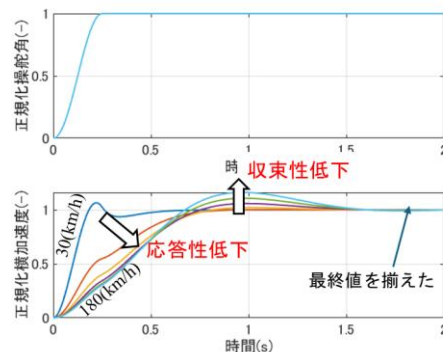


速く、正確な操舵の要求

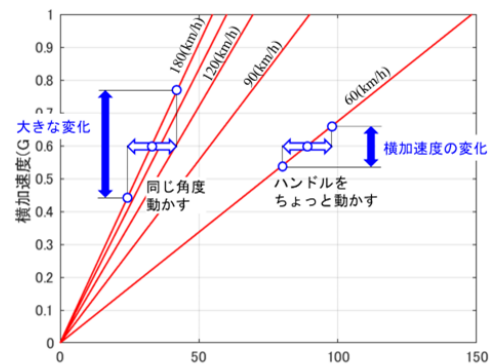
車両特性が変わる
(応答, 収束性, 安定性**低下**)



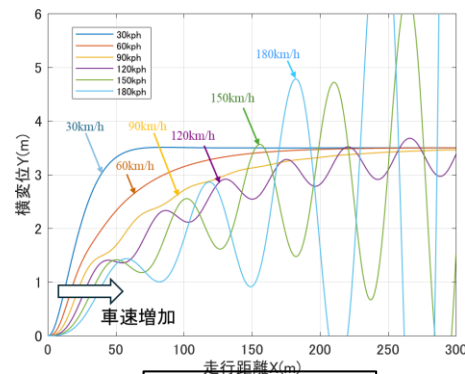
停止距離の増大



車両の応答性・収束性低下



横加速度感度の増大



不安定になる

1. 高速で運転が難しくなる理由

制動に関する基本事項

操舵に関する基本事項

2. 危険運転速度の定量化

定量化が難しい理由

検討の前提：参考文献紹介

定量化の方法

危険運転速度の計算結果

3. まとめ

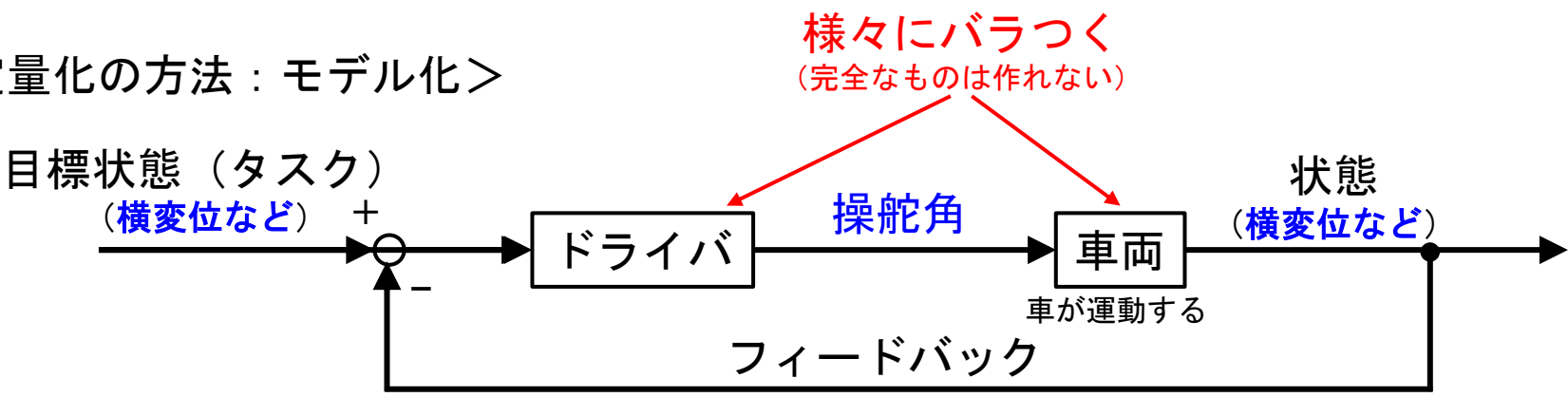
定量化のためのモデル化

どのようにすれば定量化できるか？

<定量化可能な条件>

- ・ 人間の操作・能力が，全員同一（ロボットと同じ，個人差はない．毎回同じ）
- ・ 車両特性も同一で，一定．（軽も大型車もバスもトラックも・・・いつも同じ）

<定量化の方法：モデル化>



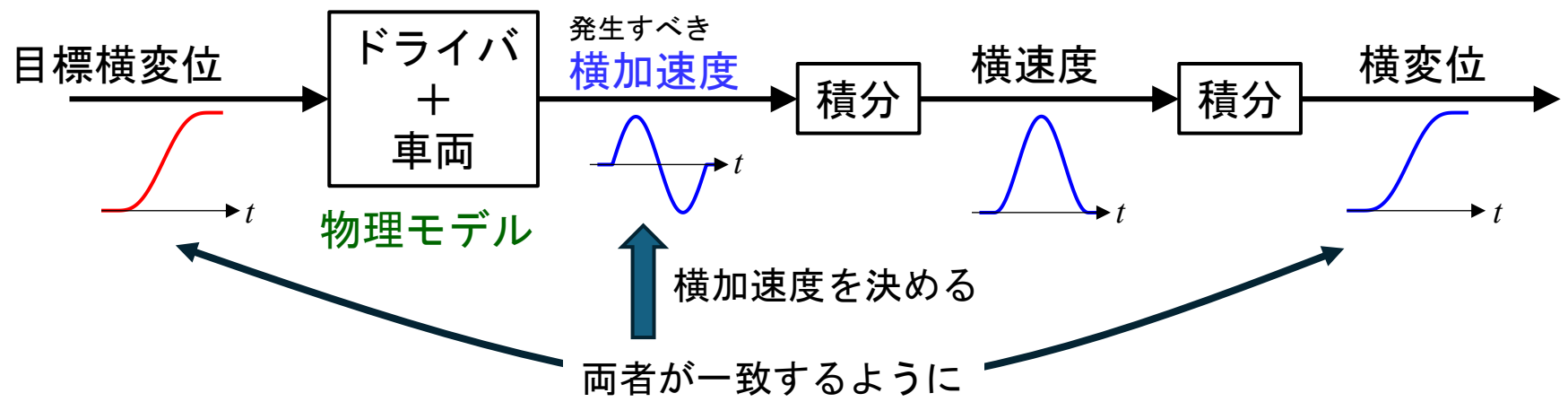
タスクを達成できない速度＝「危険運転速度」とすることが考えられる。

現実には，ドライバや車両の特性は同一，一定ではない。

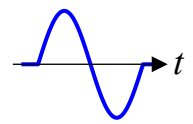
ドライバや車両を抽象化した「物理モデル」を用いる。

定量化のための「物理モデル」

目標状態：「○秒後に、□m横変位」 ➡ 発生すべき横加速度を求める。

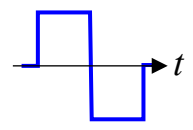


一般ドライバが普通に車線変更する時は、正弦波加速度



実験的エビデンスあり

実際には実現できないけど、
究極のドライバ+車両を想定する時は、矩形波加速度



理由は後ほど

検討の前提：過去の知見の整理
(参考文献の紹介)

反応時間について

Speed Management※：	標準的・代表的な数値として1.0秒を設定. 平均的な反応時間としては、0.7～1.5秒を例示
交通事故解析分野：	0.75秒，0.8秒を使う例が多い.
裁判などでの参考値：	0.7～1.0秒を使う例が多い.
参考文献の実験結果：	障害物の出現を知らない場合 0.66秒 ($\sigma = 0.17$) $\cong$ 0.7秒

今回の検討では，参考文献の実験結果を用いており，一貫性が必要.



0.7秒に設定した

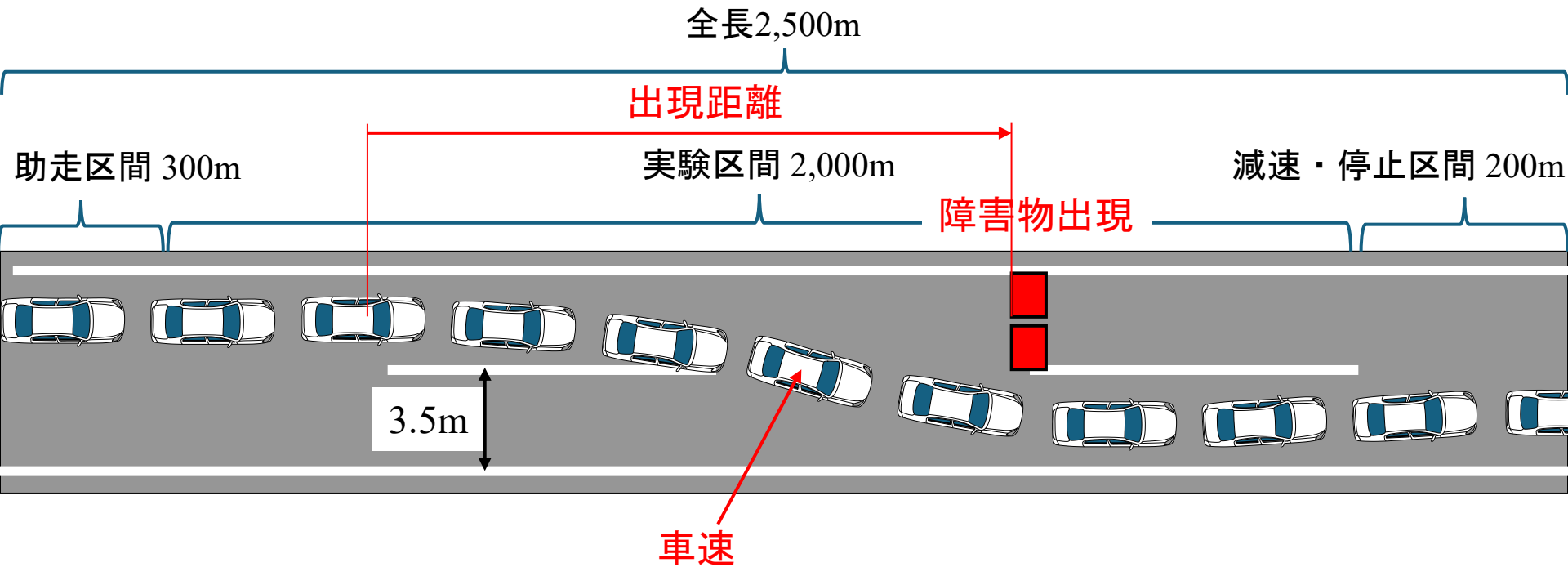
※ 世界で120万人以上が死亡. 国際的な危機意識，政策に科学的根拠を持たせる.

OECDおよびECMT（欧州交通大臣会議）が共同で発行. (2006)
走行速度の管理に関する包括的な国際報告書.

参考文献の実験

障害物を突然出現させて、回避操作の様子と成否を調査した。

「車速」と「出現距離」を変更した。



ドライバへの指示

原則：左側車線を走行

何かあったら、右への車線変更で対応。（ブレーキ操作は行わない）

事前情報に関する2条件

- 「予測条件」：障害物が出現することを知っている（位置やタイミングは知らない）
- 「不測条件」：障害物が出現することを知らない

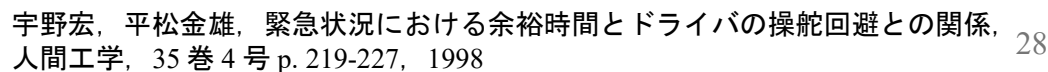
車速設定：3水準
40km/h
60
100

出現距離：6水準
(予測条件での実験)
60m前方
50
40
35
30
20

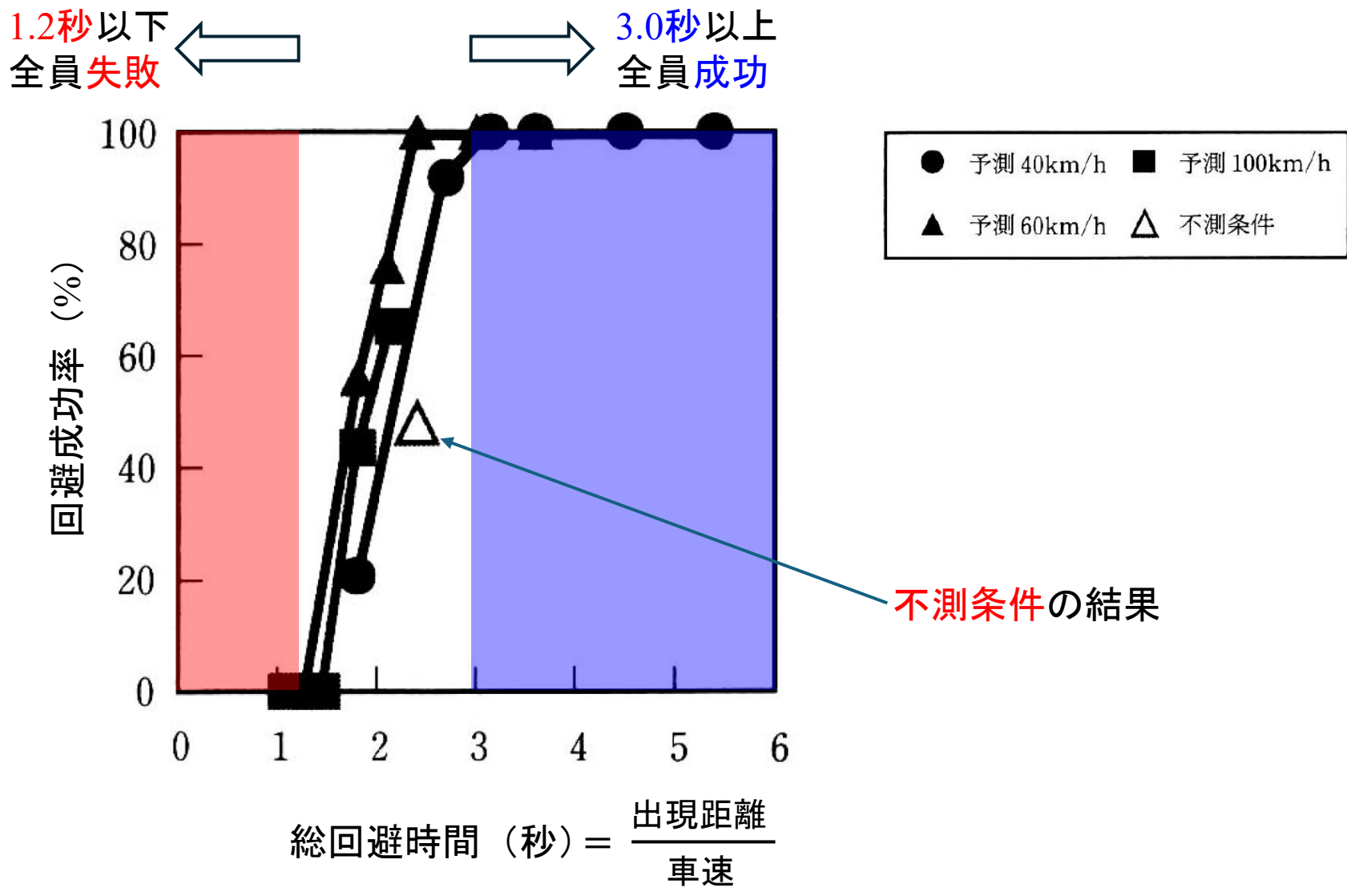
出現距離
車速
↓

総回避時間（秒） 0.72～5.40(sec) (予測条件)						
出現距離	60 m	50 m	40 m	35 m	30 m	20 m
速度 40 km/h	5.40	4.50	3.60	3.15	2.70	1.80
速度 60 km/h	3.60	3.00	2.40	2.10	1.80	1.20
速度 100 km/h	2.16	1.80	1.44	1.26	1.08	0.72

不測条件は60km/h, 40mの1仕様のみ

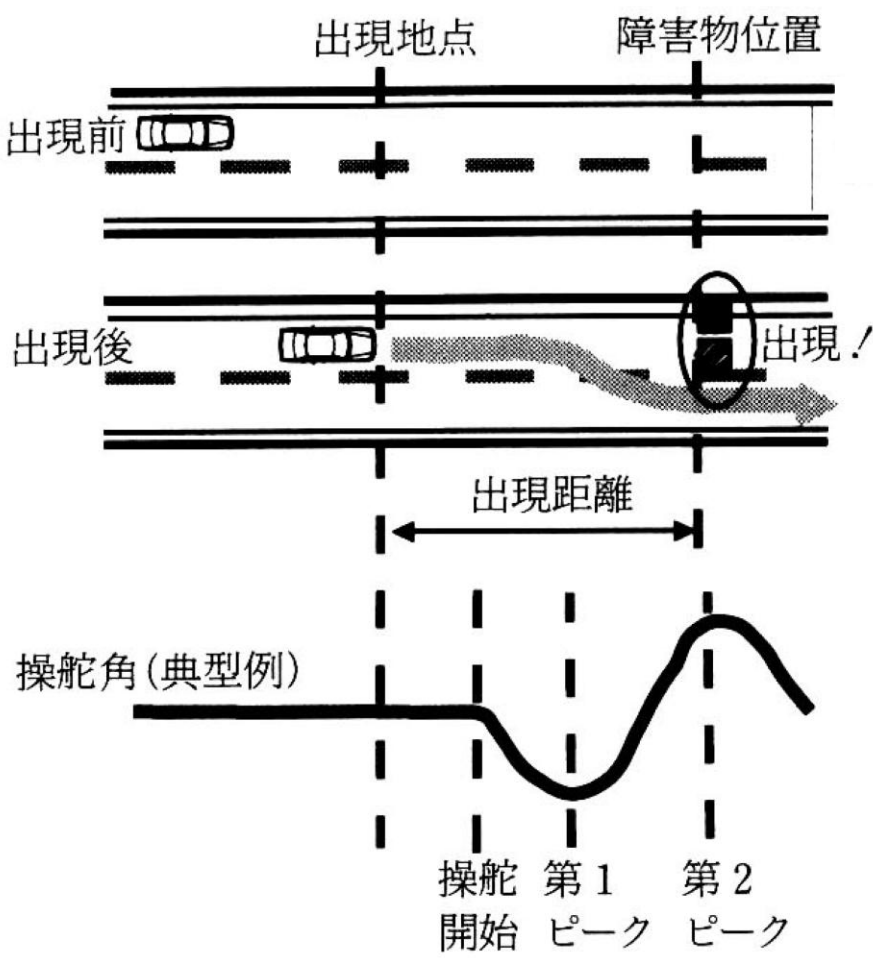


回避成否の境界は、1.2秒～3.0秒の間に存在する。（出現を知っていたら）



全ての走行において、共通して2つのピークが観察された。

➡ 一般ドライバの回避行動を、正弦波操舵でモデル化



障害物出現を知っている場合（位置やタイミングは知らない）

総回避時間3.0秒以上であれば，25名のドライバ全員が回避に成功できる

総回避時間1.2秒以下では，回避に全員が失敗.

反応時間の最小値は約0.3秒，操舵角速度の最大値は約500deg/s

障害物出現を知らない場合

知っていた場合に比べて，

- ・ 反応時間は長く，操舵角速度は小さい.
- ・ 結果として回避成功率が低下する

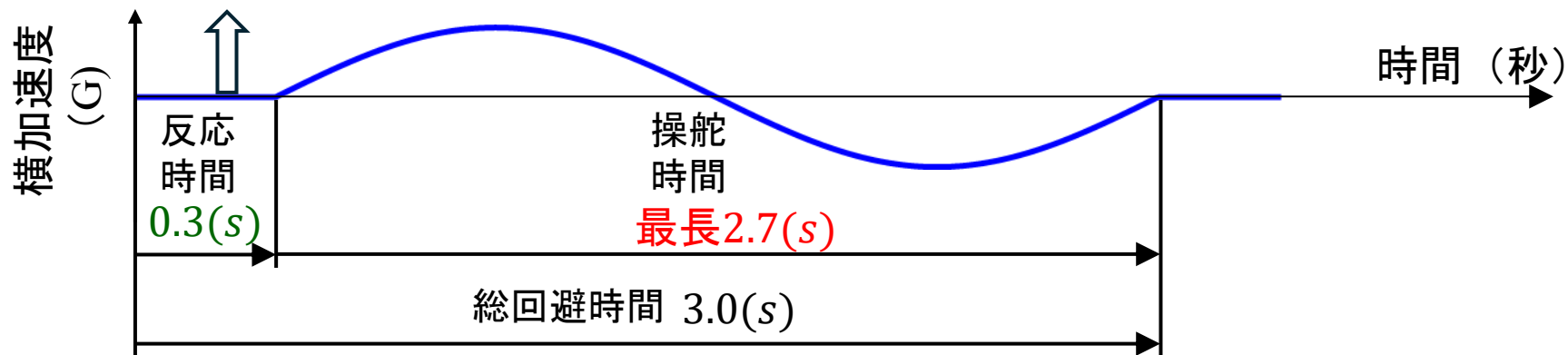
反応時間平均値は0.66秒 ($\sigma = 0.17$) $\cong$ 0.7秒

全員が成功する時間のパターンを考える（通常走行のパラメータ）

操舵時間2.7秒あれば誰でも回避できる。

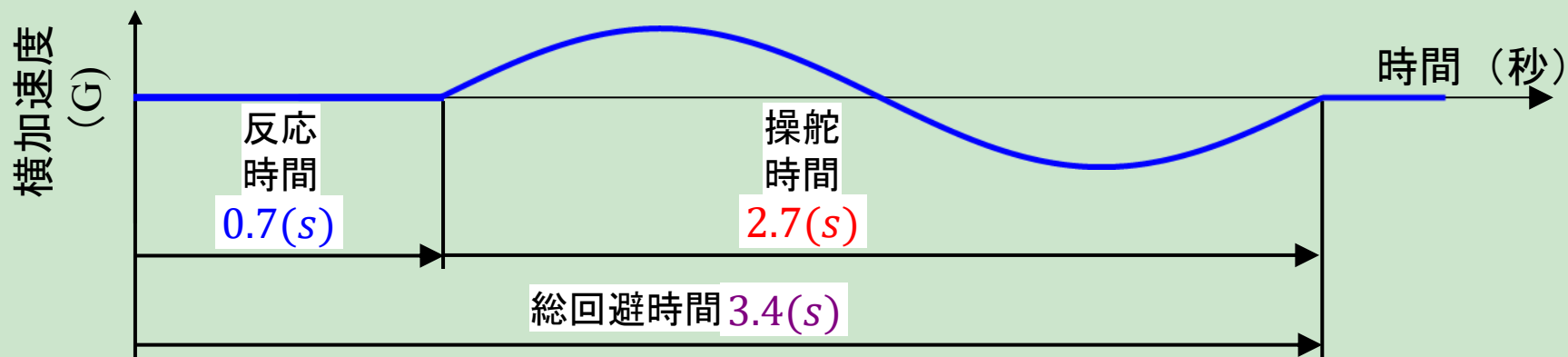


出現を知っている時の、最短反応時間=0.3秒



出現を知っていたら、3.0秒で誰でも回避可能 $\longleftrightarrow$ でも、知らないことを前提としたい。

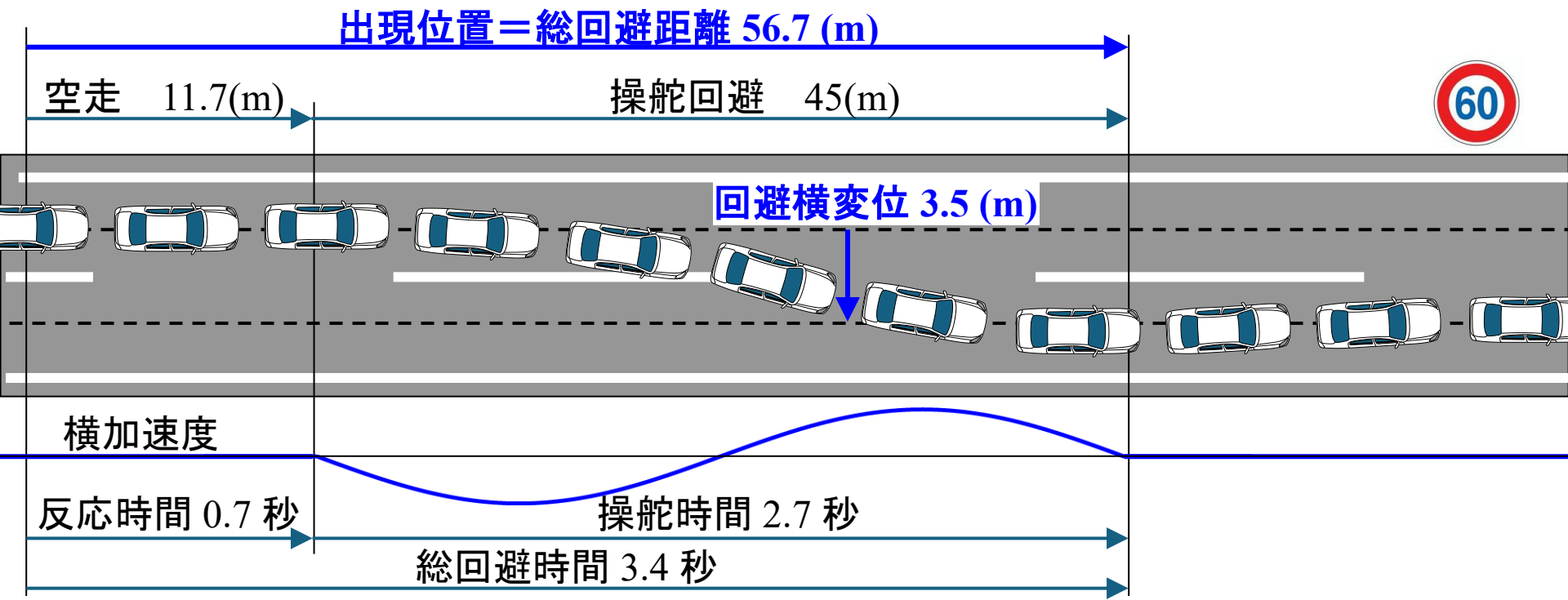
出現を知らない時の平均反応時間 0.66 ($\sigma = 0.17$)秒 $\cong$ 0.7秒



このパターンならば、全員が操舵回避できるはず。

想定する外乱空間の計算例 (通常走行のパラメータ)

総回避時間	T_1	3.4 秒	(実験にて全員回避可能)
反応時間	T_r	0.7 秒	(実験平均値)
操舵時間	T_s	2.7 秒	(実験にて全員回避可能)
回避横変位	D_1	3.5m	(隣接車線への移動を想定)

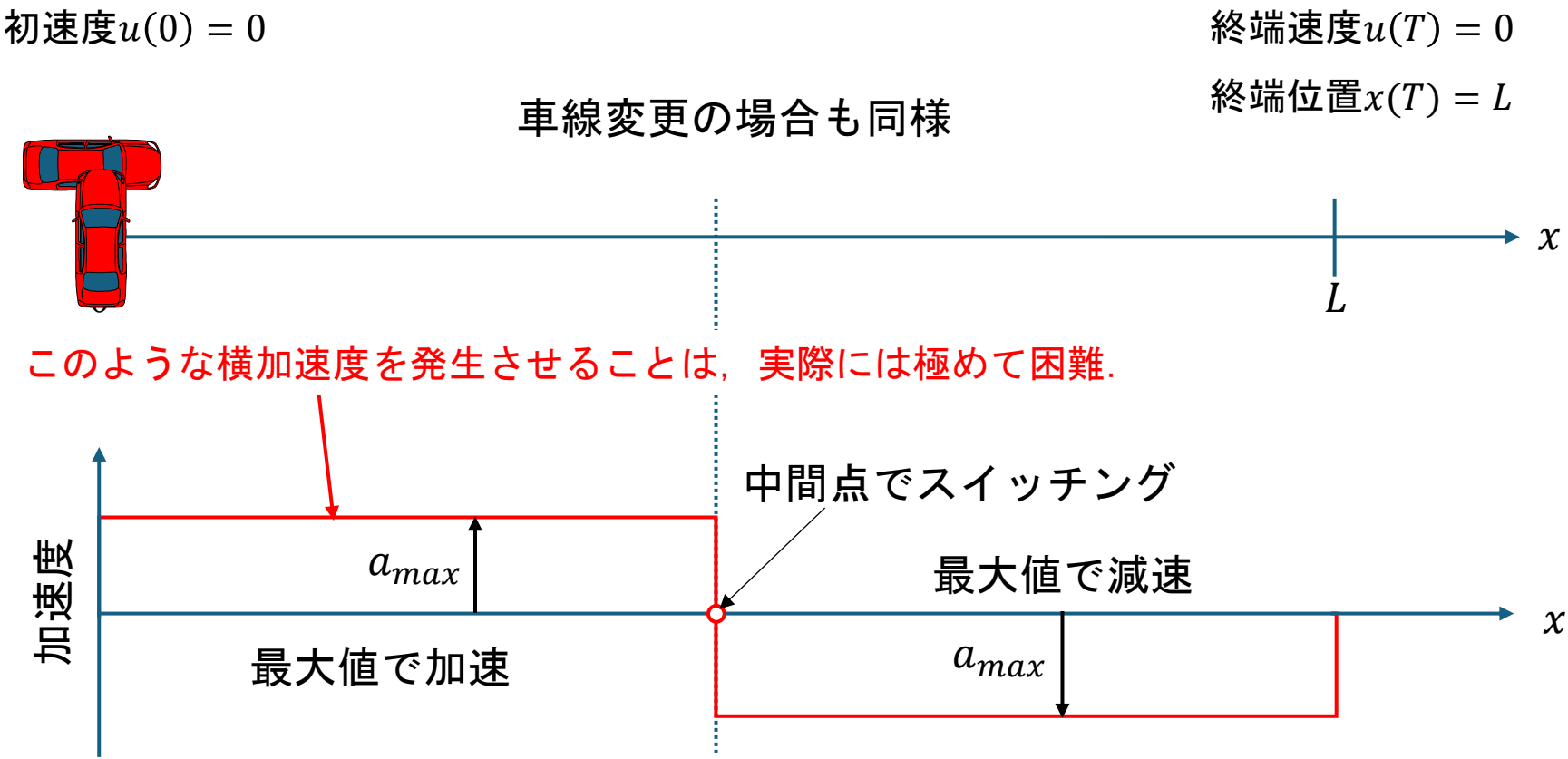


究極のドライバ+車のモデル化

矩形波横加速度  を用いる ➡ **最短時間で車線変更を保証.**
最高のドライバ+最高の車以上の性能!

最大加速度 $\pm a_{max}$ を出せる物体
距離 L を最短時間 T で移動する ➡ 加速度の最適制御方法は？.

Bang Bang 制御



定量化へのアプローチ

定量化へのアプローチ

<ステップ1>

外乱空間を想定する
(シーン, シナリオ) ➡ 例えば, 「衝突する対象の急な出現」 として表現



制限速度ならば, 誰でも回避できる「外乱空間」を生成

<ステップ2>

ステップ1の外乱を物理的に回避できない速度 = 「危険運転速度」と定義する.

「危険運転速度」の決め方（例）



制限速度
60km/h



60km/h 以下で誰でも回避できる外乱を想定

出現位置 $L_x = 56.7(m)$

ステップ1

60km/h道路の
想定外乱

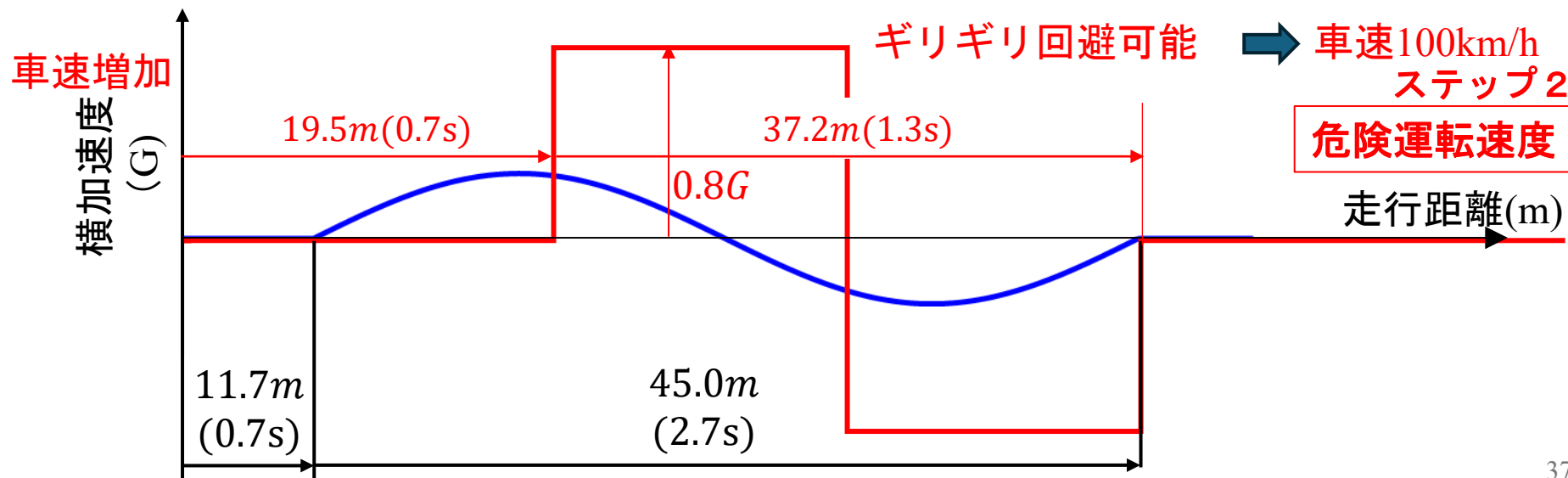
$D_y = 3.5(m)$

発見 反応遅れ
反応時間=0.7sec

操舵回避
操舵回避時間=2.7sec



過去の知見から
これならば誰でも回避できる。

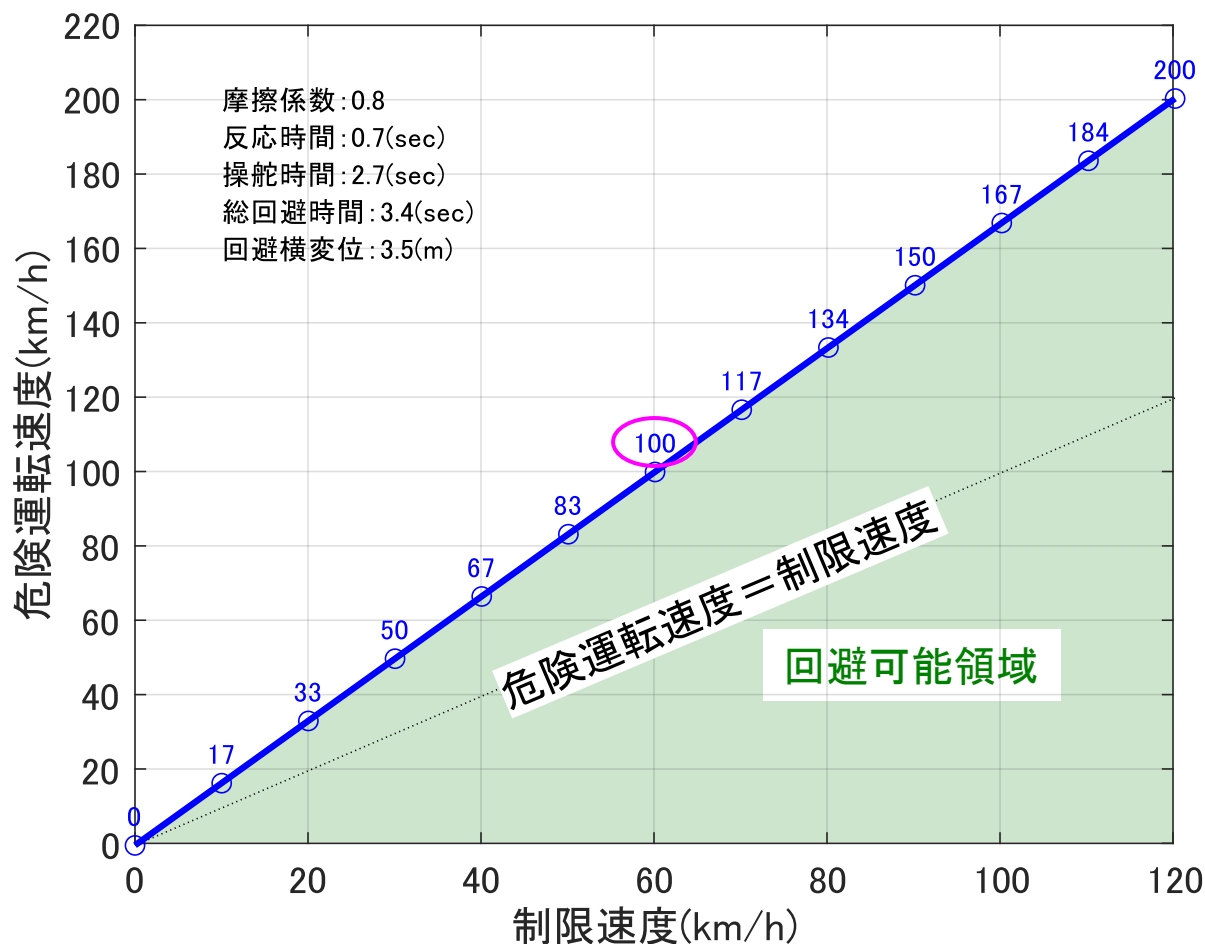


危険運転速度 計算結果（例）

危険運転は「究極のドライバ+車」を想定したため、高い危険運転速度となっていることに注意.

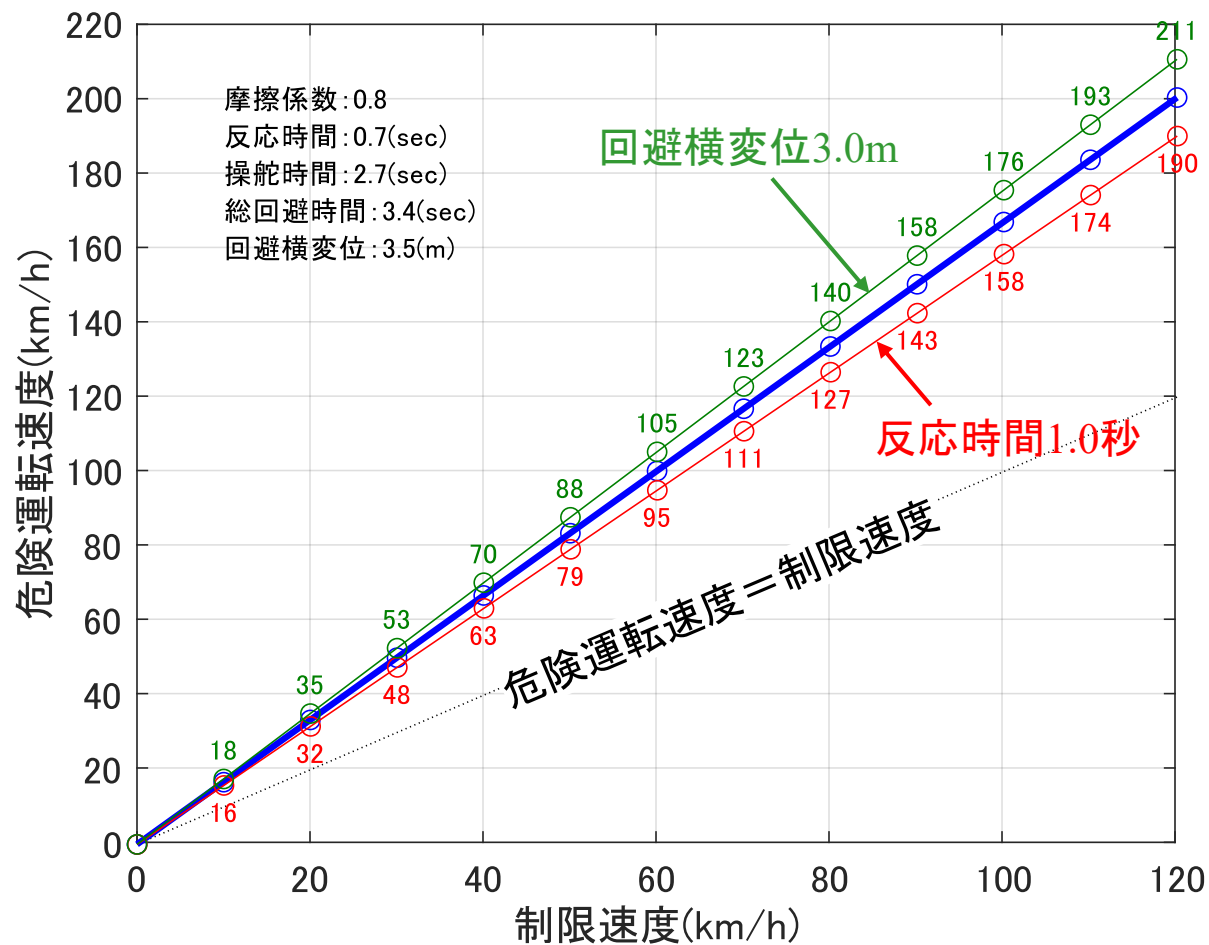
$$(\text{危険運転速度}) = (\text{係数}) \times (\text{制限速度}) : \text{掛け算の形}$$

1.67

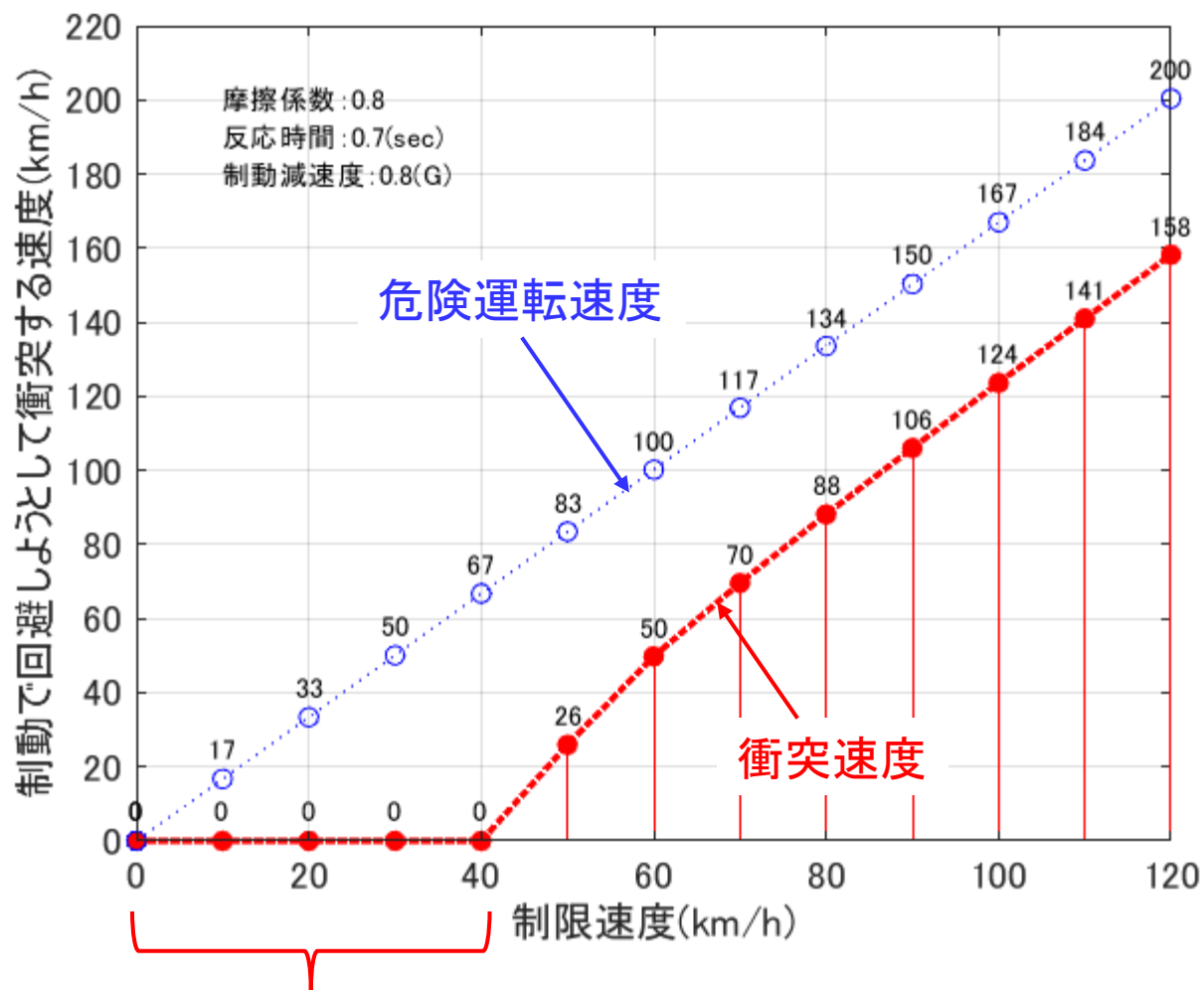


危険運転速度 計算結果（例）

（危険運転速度）＝（係数）×（制限速度）：掛け算の形



危険運転速度で走行中に**制動**で回避しようとしたら、何km/hで衝突するか？



操舵回避を前提とした外乱空間を、**制動**ならば危険運転速度でも回避できる

①**制動**でも回避できない速度を危険運転速度とする。

②**制動**回避を前提として、外乱空間を生成する。（説明は割愛）

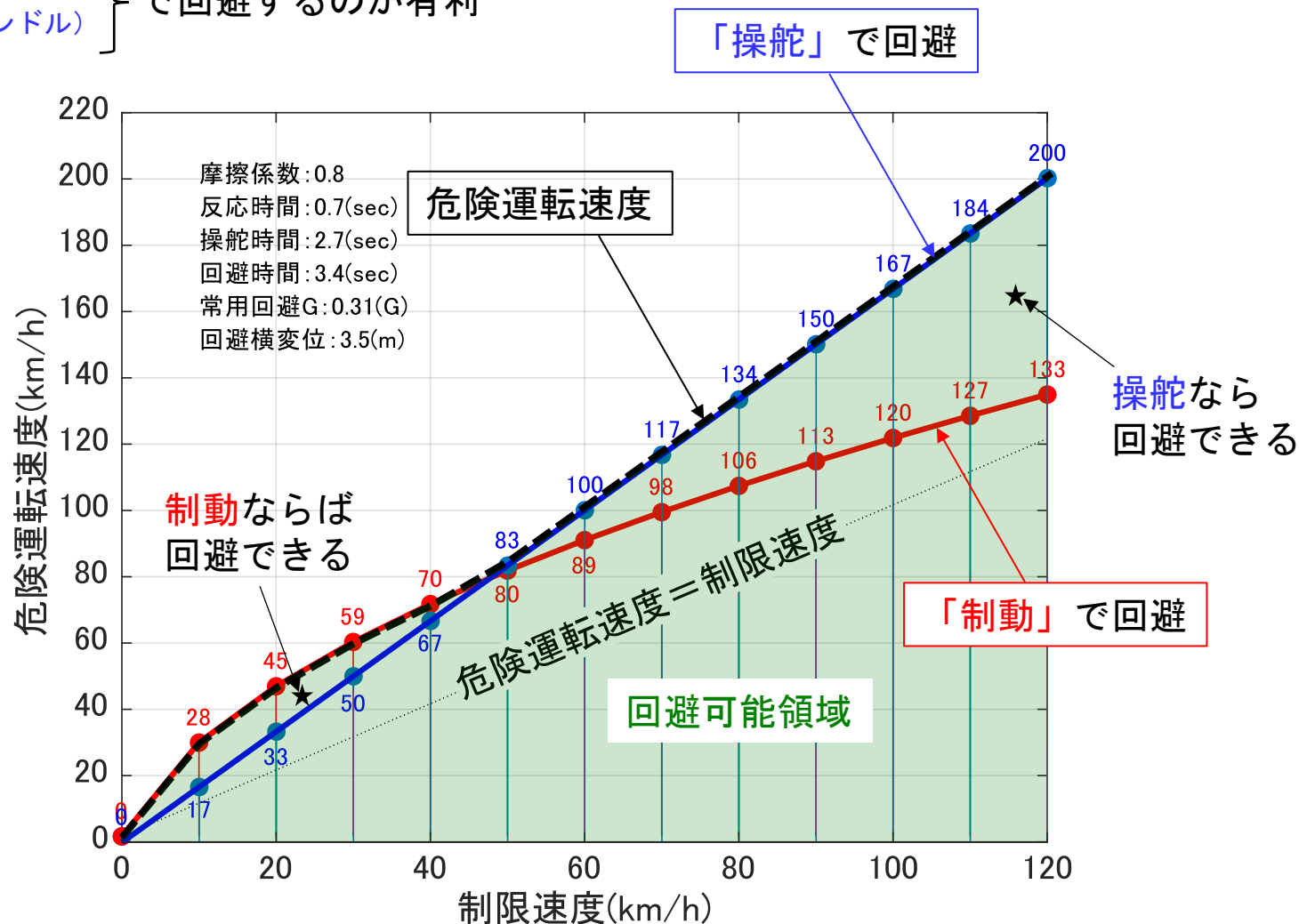
①「操舵回避」と「制動回避」の比較

通常運転では「操舵」回避することを前提として、外乱空間を生成した。

この外乱空間を「制動」で回避してみる。

低速は制動（ブレーキ）
高速は操舵（ハンドル）

で回避するのが有利



後半のまとめ

「危険運転速度」の定量化方法について検討した.

- ・ 定量化に資するドライバモデル, 車両モデルの合理的な定義は難しい.
- ・ 横加速度を出力とする「物理モデル」を用いた.

- ・ 以下の方法で, 危険運転速度を求めた.

<ステップ1>

制限速度内ならば, 誰でも回避できる「外乱空間」を生成.

<ステップ2>

ステップ1の外乱を回避できる最大速度を求める.

上記境界速度を「危険運転速度」と定義した.

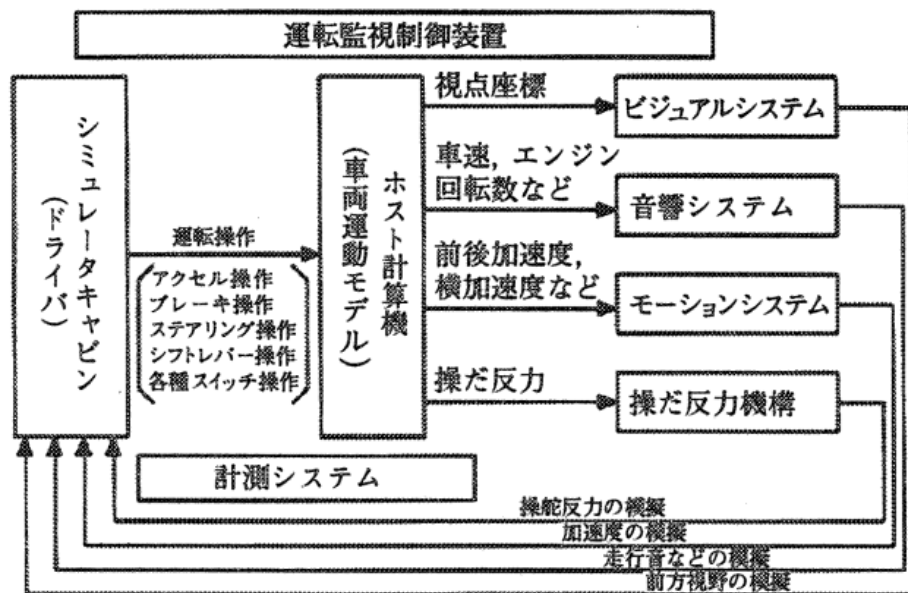
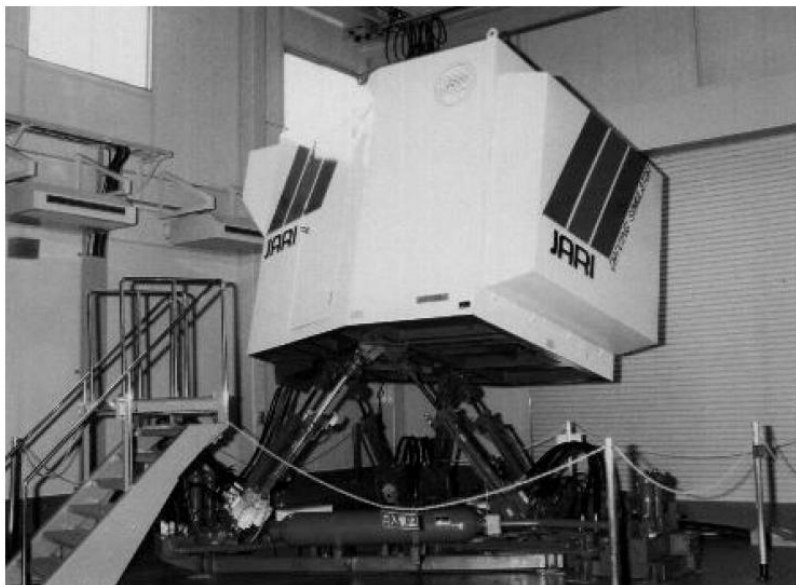
- ・ 過去の知見を参考に外乱空間生成, 危険運転速度計算のパラメータを設定した.

以上

ご清聴ありがとうございました



シミュレータの概要



- ・ 油圧アクチュエータによる可動機構あり
- ・ ドライバ操作反力あり
- ・ グラフィックス表示分解能0.045度
- ・ 音響あり（走行音などの模擬）
- ・ 1800ccクラス セダン型乗用車
(全長4650mm, 全幅1700mm, 全高1400mm)
(フロアセレクトAT車)

通勤や買い物のため日常的に自動車を運転しているドライバ

実験参加者数：25名

男性20名：平均年齢38.9歳（範囲 21～55歳）

女性 5名 平均年齢36.2歳（範囲 22～53歳）

運転歴 3～36年

実験実施時期：1995～1998と推測される（論文受付は1998.4）

「制動」を前提とした外乱空間と危険運転速度

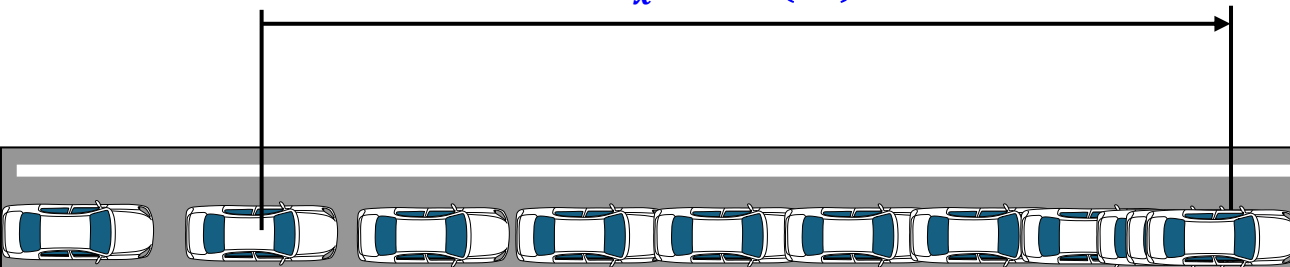


制限速度
60km/h

ステップ1

60km/h道路の
想定外乱

$L_x = 59(m)$



発見 反応遅れ
反応時間=0.7sec

制動回避操作

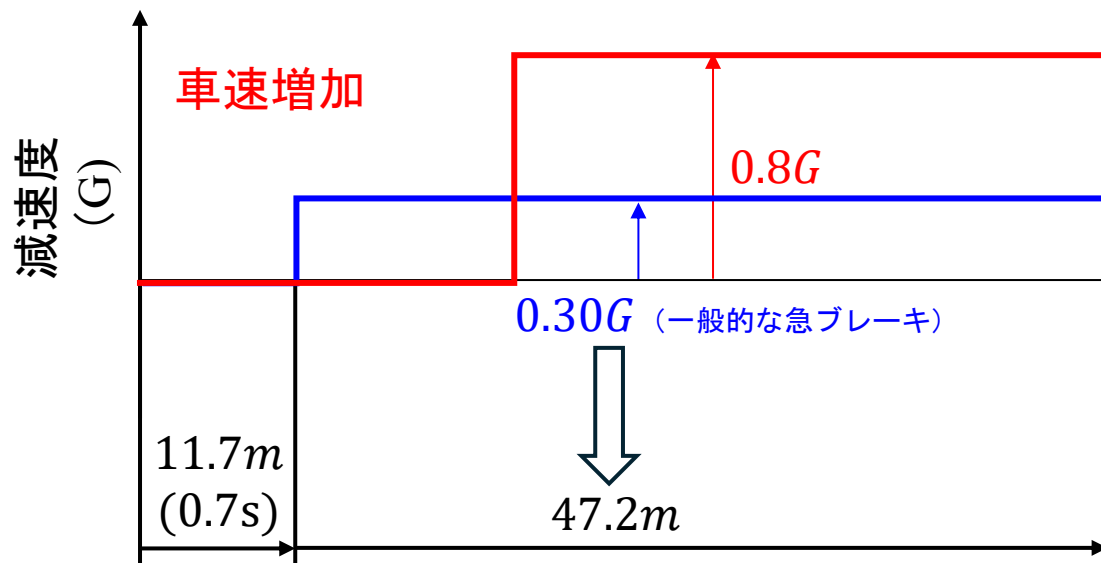
ギリギリ回避可能

車速96km/h

ステップ2

危険運転速度

走行距離(m)



「制動回避」を前提とした外乱空間の危険運転速度

「制動」で外乱空間を生成.

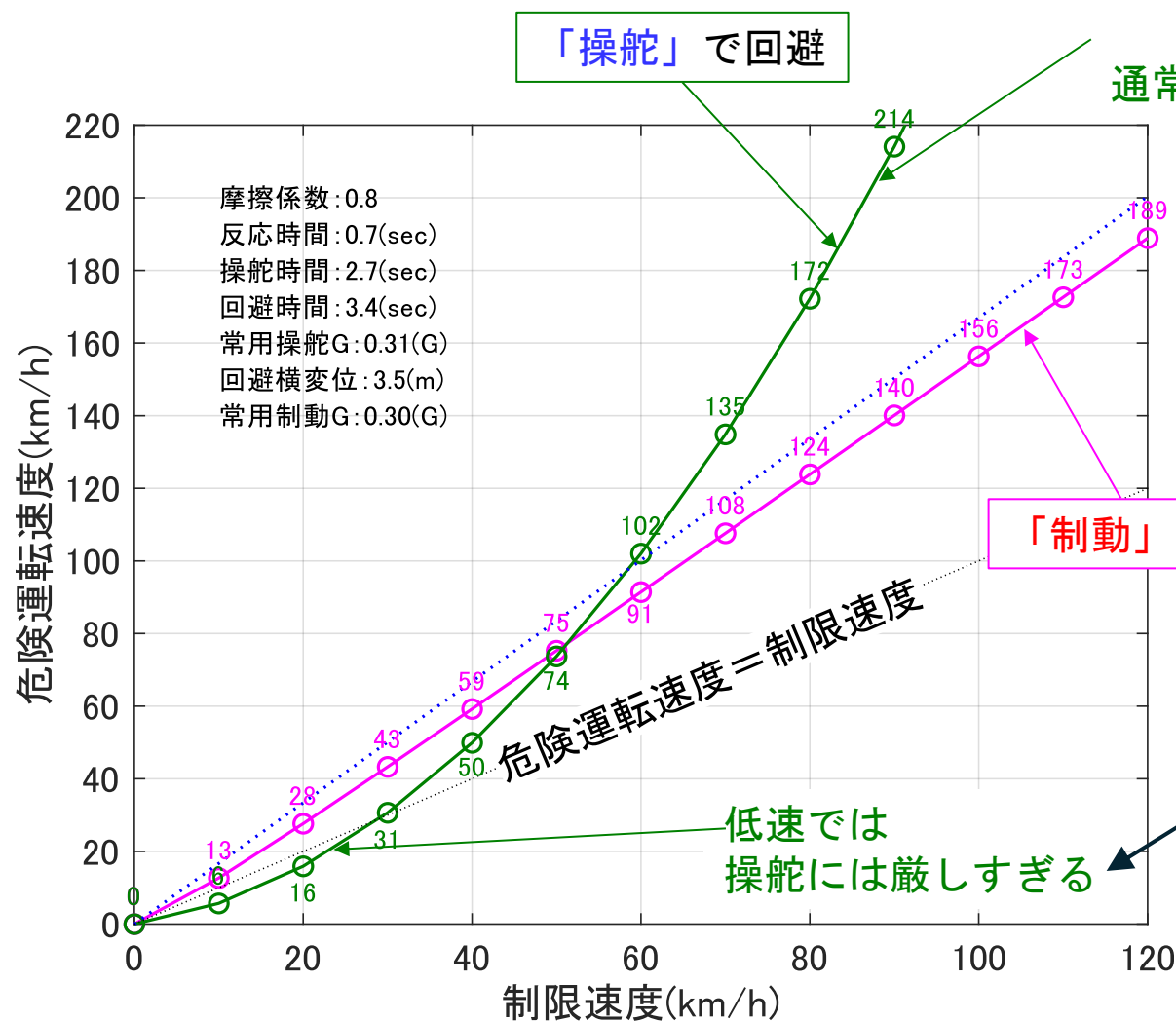


「制動」. 「操舵」で回避する.

制動での外乱生成は現実的でない



例えば 生成される外乱空間は
90km/h 123m先
120km/h 212m先
180km/h 416m先 であり、
通常走行では操舵で避けているはず



現実的でないため、
検討対象としない

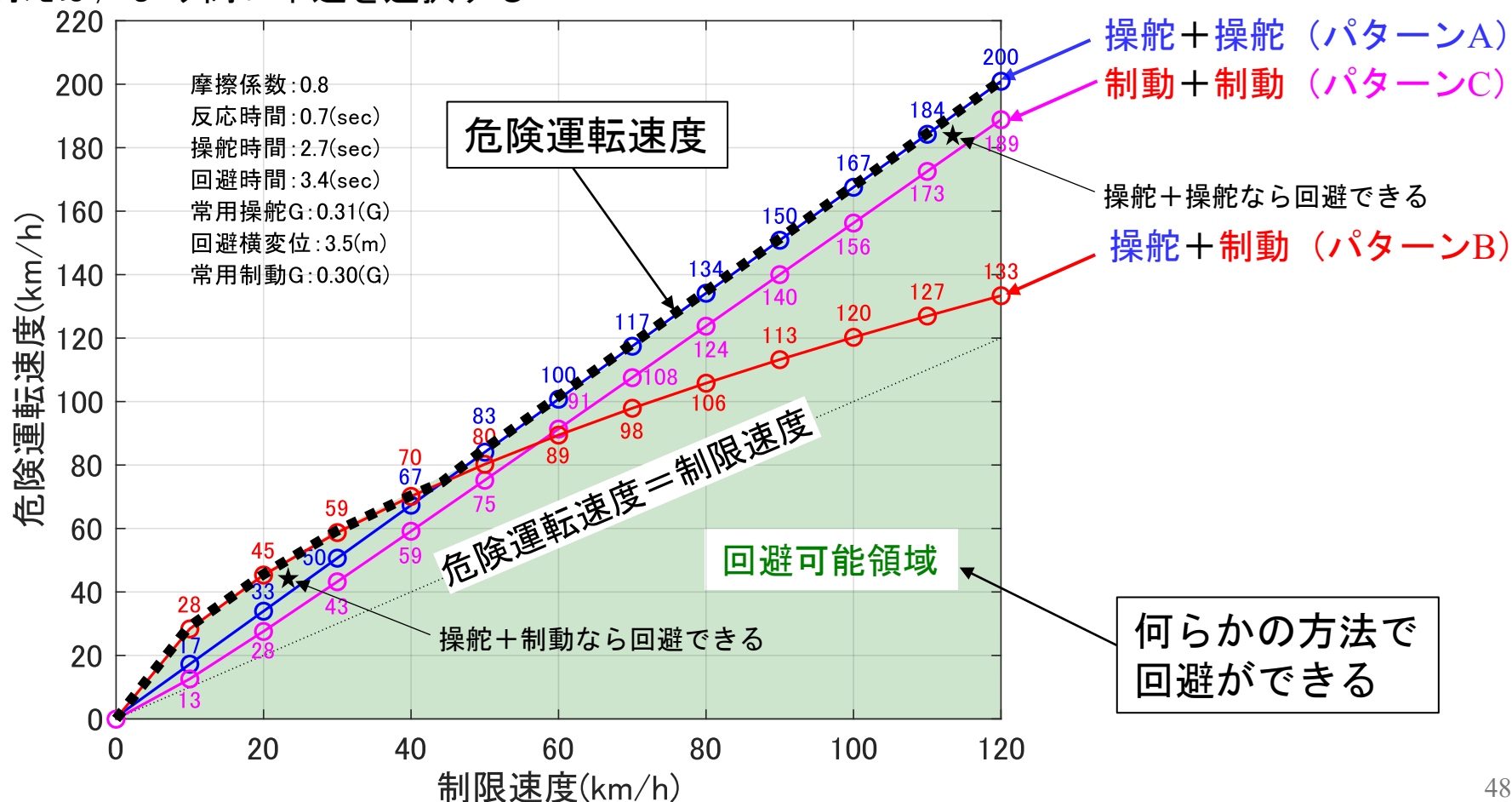
「危険運転速度」 計算方法

一般ドライバが
ブレーキで回避するのか、
ハンドルで回避するのか
は、特定できない。（車速にもよる）



回避可能，不可能境界は，
例えば，より高い車速を選択する。

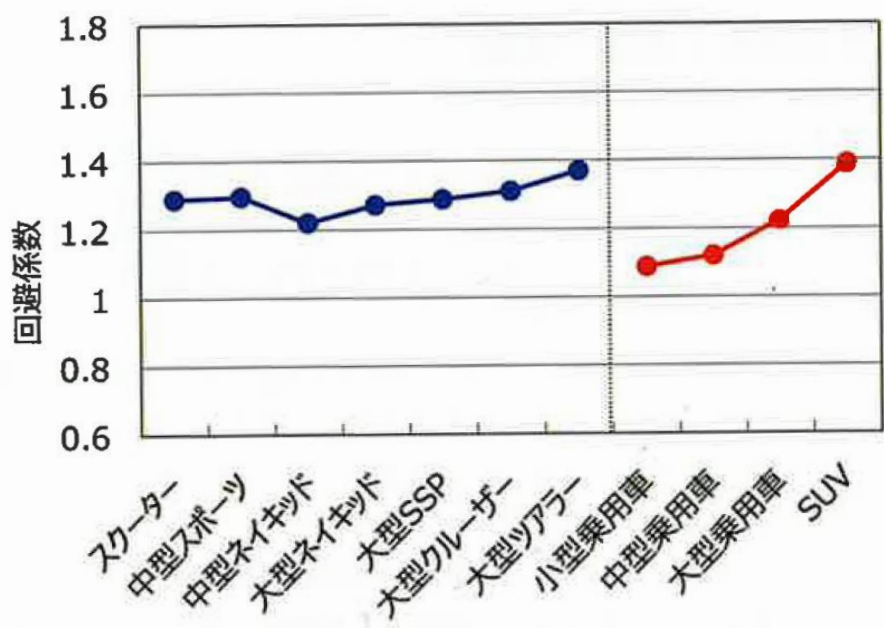
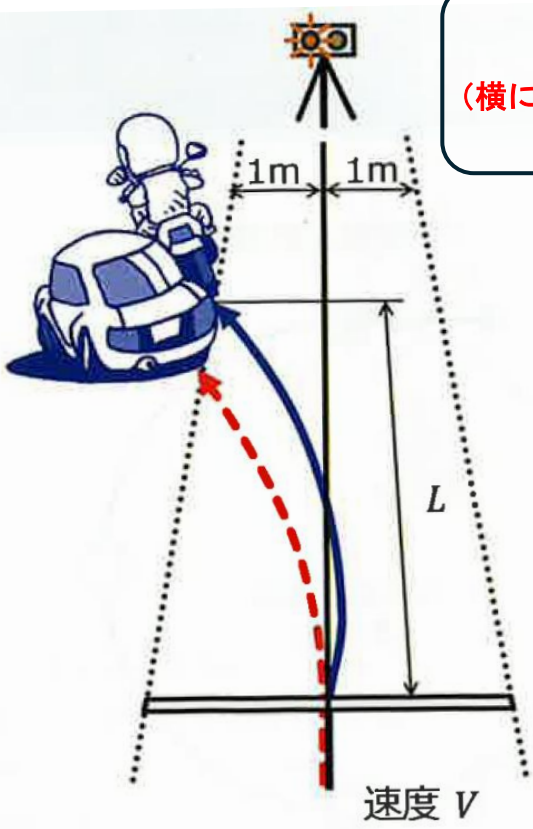
	ステップ1 (外乱空間生成)	ステップ2 (危険速度計算)
パターンA（操舵， 操舵）	操舵	操舵
パターンB（操舵， 制動）	操舵	制動
パターンC（制動， 制動）	制動	制動



この危険運転速度は二輪車にも当てはまるのか？

- ・回避係数でみると，四輪車よりも長い走行距離が必要
- ・二輪車は車両の幅が小さい
- ・二輪車は内側に傾いて車線変更をする

二輪車は四輪車と同等



遅い



速い

図 3-30 回避時の挙動と回避係数の比較