

踏切直前での警報開始に対する ドライバーの運転行動評価

松本 真吾* 羽山 和紀*
島山 直* 柴田 徹*

Evaluation of a Driver's Behavior on Level Crossing Warning

Shingo MATSUMOTO Kazunori HAYAMA
Naoki HATAKEYAMA Toru SHIBATA

We have evaluated the behavior of a driver responding to a warning at a level crossing when the driver goes into the level crossing. An experiment is executed by using a driving simulator. In the experiment, the driver is released from the obligation of a temporary stop at the level crossing. We have evaluated the probability that the driver goes into the level crossing from the position of the car when the warning starts. As a result, it has been found out that the probability of breakage of a crossing barrier due to an unreasonable driving without the obligation of a temporary stop will be six times more than that with the obligation of a temporary stop.

キーワード：踏切，安全性，運転行動，シミュレーション

1. はじめに

踏切通行時の一旦停止は、我が国で実行を義務づけられている規則であるが、ヨーロッパやアメリカにおいては一般には実施されていない。これらの点から、義務の解除を要望する声があるが、解除によって安全性にどれほどの影響があるのか、十分な検討が必要である。

一旦停止が安全性に与える影響の有無を、イベントツリーを活用して評価したところ、一旦停止を行わない場合、以下の2点の事象が増加することがわかった。

- (1) 踏切出口の先詰まりに対する不注意による踏切内での滞留、及びこれによって引き起こされる支障事故
- (2) 通行直前の警報に対する不注意・無視による無謀進入、及びこれによって引き起こされる遮断かん折損及び支障事故

このうち(1)に関しては、実験により一旦停止を行わない場合、一旦停止を行った場合に比べて、滞留可能性が最大4倍程度に増加し、低速になるほど滞留可能性が増加する^{1) 2)}。さらに低速の状況では、時速10キロで50～60%とさらに滞留可能性が高まった^{3) 4)}。この結果、滞留に関しては低速ほど危険であると考えられる。

一方、(2)に関しては、高速であるほど、進入/停止の判断が難しくなると考えられる。現状において、警報開始～遮断開始までの時間は、入口と出口の遮断機が分

かれている二組全遮断の踏切では最低4秒と定められているが、これは警報開始前に進入した車が、遮断開始によって遮断かんに接触することを防ぐためのものである。現行の状況で、一旦停止を行わない場合、踏切を横断するドライバーの判断ミスによる遮断かん折損が増加すると考えられる。

それゆえ、滞留に続いて、横断直前の警報に関しても、一旦停止の有無が安全性に与える影響を、リスクの変動の度合として定量的に評価することとした。その為、ドライビングシミュレータ実験を実施し、踏切接近・通過時のドライバの運転行動から、車速、車両周囲の交通状況の違い等による、直前横断の発生可能性の違いを検討した。具体的には、踏切接近時に警報が開始された場合、踏切通過/直前停止の判断および行為が、踏切の警報開始タイミングおよび40km/h～60km/hの車速条件間でどのように異なるのかを比較した。また、踏切と信号の間の行動の違いの有無を知るため、信号交差点での信号切り替わり時における判断・行為との比較も行った。

2. 警報開始時におけるドライバ行動評価実験

2.1 目的

踏切手前での一旦停止の安全上の効果を測定するため、踏切接近時の警報開始における、踏切通過/停止判断による直前横断/停止の評価を目的とする。以後、実験を「警報開始時におけるドライバ行動評価」と呼ぶ。

* 人間科学研究部（安全性解析）

特集：ヒューマンファクター

2.2 実験装置

実験には、(財)産業技術総合研究所所有のドライビングシミュレータ(以後、「DS」という)を用いた。DSのシステム構成を図1に示す。

DSは、実車と同等の運転感覚が得られるように、車両キャビン、ドライバの全周囲300度の視野環境、電動6軸自由度のモーションシステム、8つのスピーカにより実環境の音場を再現したサウンドシステムなどから構成されている。

ドライバは、実車と同様にステアリング、アクセルペダル、ブレーキペダルを操作する。ドライバの制御データは、自車の位置座標や速度、他車との位置関係などの車両データと共に、サンプリングレート60Hzでホストコンピュータにより記録される。

走行コースについてはDSの直進のみの市街地道路データベースに踏切を再現した。走行コースの概略を図2、踏切と信号の映像の例を図3に示す。コース内の踏切警報機はプログラムにより点滅、鳴動する。遮断機についても同様である。

信号切り替わり時の運転行動評価は、踏切手前の信号交差点にて実施した。「警報開始時におけるドライバ行動評価」では踏切もしくは信号交差点を通過して50m程走行して終了とした。

2.3 行動評価方法

踏切接近時の警報開始後のドライバ行動についてDS

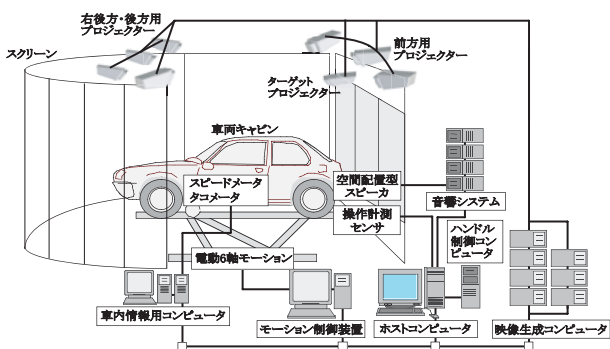


図1 DSのシステム構成図

を用いた実験(以後、DS実験という)を実施して評価した。踏切警報音が鳴動し遮断機が降下し始める状況において、ドライバはその状況を“理解”し、踏切への通過または踏切前での停止を“判断”し、実際に通過または停止という“行為の実行”を行う。

“行為の実行”については、DS実験で実際に被験者の取った行為を記録した。“理解”については、通過/停止の判断をする際に、具体的に次のどの情報を基に判断したのかをアンケートした。

- ・踏切までの距離
- ・自車速度
- ・体感速度
- ・警報音の音量
- ・自ら設定したランドマーク
- ・過去の経験
- ・踏切の向こう側の状況
- ・その他

“判断”については、DS実験で実際に取った行為が予定通りであったか否かをアンケートし、予定通りで無かった回答では、DS実験で取った行為とは逆の判断をしていたと判定した。

“行為の実行”で、ドライバがブレーキを踏まず、踏切を通過しようとした場合、踏切の遮断開始時点で自車の先端が踏切内に入っていない踏切手前の事象(踏切を通過できない事象)を“誤進入”、踏切を通過できた場合を“進入”と判断した。一方、“行為の実行”で、ド

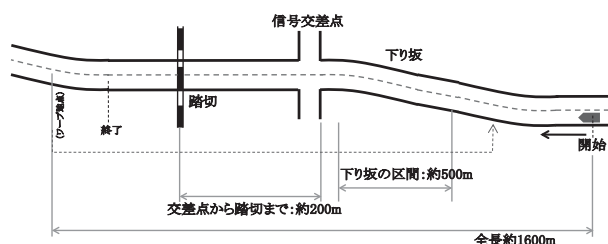


図2 走行コース



図3 踏切及び交差点

ライバがブレーキを踏み、踏切前で停止しようとした場合、自車の停止位置を算出し、踏切内に入って停止する事象（踏切手前で停止できない事象）を“誤停止”、踏切手前で停止できた事象を“停止”と判断した。

DS実験では、踏切の警報開始時という条件と共に、信号交差点での信号の切り替わりという条件も実施した。信号切り替わりにおいても、青から黄信号へ変わった時点を踏切の警報音の鳴動開始時点と同一とみなして、上記と同じ評価を行った。以後、踏切の警報開始時を対象とした実験を「踏切実験」と呼び、信号の切り替わり時を対象とした実験を「信号実験」と呼ぶ。

2.4 実験方法

合計30名の一般ドライバーがDS実験に参加した。平均年齢は、50.0歳（21～72歳）で、男女比率は半々であった。30名の内、27名は2008年度の「踏切内での滞留可能性の評価」^{3) 4)}のDS実験にも参加したドライバーであった。

車速条件は、40km/h、50km/h、60km/hとした。踏切実験ではこの3つの車速条件で実施し、信号実験では、この内2条件（40km/hと60km/h）を実施した。ドライバーがブレーキを踏んだ場合の自車の減速度は -3m/sec^2 とした。これは接近している信号交差点で、黄信号へ切り替わった時にドライバーが急停止する状況で想定される減速度である。DSに構築した踏切環境では、警報の開始から遮断機の降下開始までを4秒と設定した。信号においても同様に、黄信号から赤信号への切り替わり時間を4秒とした。

DS実験では、踏切の警報開始時、あるいは信号が青から黄に切り替わる際の、自動車から踏切迄の距離を、自車の速度に応じて（踏切に）「最も近い距離」「近い距離」「中間距離」「遠い距離」「最も遠い距離」の5段階に、停止限界距離及び通過限界距離を考慮して設定した。ここで停止限界距離とは、ドライバーが警報を確認し、ブレーキを踏み自車が停止するまでの走行距離と定義する。停止限界距離は、警報確認からブレーキを踏むまでの反応時間（1秒）の空走距離と減速度 -3m/sec^2 での制動距離の和である。この距離よりも自車から踏切までの距離が近い領域は、自車は踏切前に停止できない停止不可の領域である。また、通過限界距離は、ドライバーがブレーキを踏まず、警報開始から遮断開始までの時間（4秒間）、あるいは信号が黄から赤に変わるまでの時間（4秒間）に自車が走行する距離と定義する。この距離よりも自車から踏切までの距離が長い領域は、自車は踏切を通過できない通過不可の領域と判断される。図4に、自車の走行速度に応じた停止限界距離および通過限界距離を示す。

図中の、停止限界よりも踏切までの距離が短い領域が、停止不可領域、通過限界よりも踏切までの距離が長い領

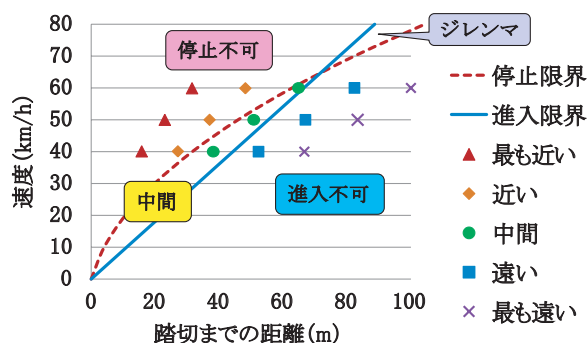


図4 警報開始タイミング

域が進入不可領域である。中間領域は、停止不可領域でも通過不可領域でもない領域、ジレンマ領域は、停止不可領域と通過不可領域の共通領域である。

停止不可領域から、減速し停止する行為は、誤停止と判定される。また、進入不可領域から、減速せずに通過する行為は、誤進入と判断される。

DS実験における「最も近い距離」は停止限界距離の1/2、「中間距離」は停止限界距離と通過限界距離の中間、「最も遠い距離」を通過限界距離の1.5倍と定義し、「近い距離」は「最も近い距離」と「中間距離」の中間、「遠い距離」は「中間距離」と「最も遠い距離」の中間とした。

各車速条件にて、警報が開始しない/信号が変わらないダミー条件を2走行ずつ設定した。今回は、誤進入の場合の加速は考慮しないため、DSのスピードリミッター機能を使用して、アクセルを踏み放しで各車速条件までの速度までしか出せないようにした。

滞留に関するDS実験と同じように、各条件の繰り返し回数は3回とした。被験者は1日に各条件を1回走行し、合計実験日数は3日であった。1日の走行回数の合計は、踏切実験：車速条件3×警報タイミング5+ダミー走行6（車速3×2）=21、信号実験：車速条件2×警報タイミング5+ダミー走行4（車速2×2）=14であった。各条件の提示順序は、踏切実験と信号実験の区別なく、被験者間でランダムに設定した。

実験前に、被験者に以下を教示した。

- ・速度制限が設定されているため、どれだけアクセルを踏んでも設定速度以上は出せないが、アクセルペダルはエンジン回転数が2000～2500くらいになるように踏むこと。
- ・走行する実験対象について（これからの走行が踏切実験か信号実験のどちらであるか）。
- ・踏切通過の前に、一旦停止する必要はないこと。
- ・踏切進入時に警報が鳴った場合、遮断機が降り始める前に踏切に入れると思ったら、アクセルを踏み続けること。警報が鳴った後、遮断機が降り始める前に踏切に入れないと思ったら、ブレーキを踏むこと。
- ・信号を通過する場合も同様で、信号が黄に変わった後、

特集：ヒューマンファクター

赤になる前に交差点に入れるかどうかで、アクセルのままかブレーキを踏むかを選択すること。

なお、DS酔いを防ぐことを目的として、踏切や信号前でフルストップしなくても良いように、踏切の警報開始後や黄信号へ切り替わり後、ドライバがブレーキを踏み込んでから1秒経過した時点で警報の解除もしくは信号の青表示への変換を行った。このようにフルストップする必要のないことも実験前に被験者へ教示した。

3. 警報開始時におけるドライバ行動評価結果

3.1 実験結果

各車速における警報開始タイミング別の結果を、図5（踏切実験）および図6（信号実験）に示す。

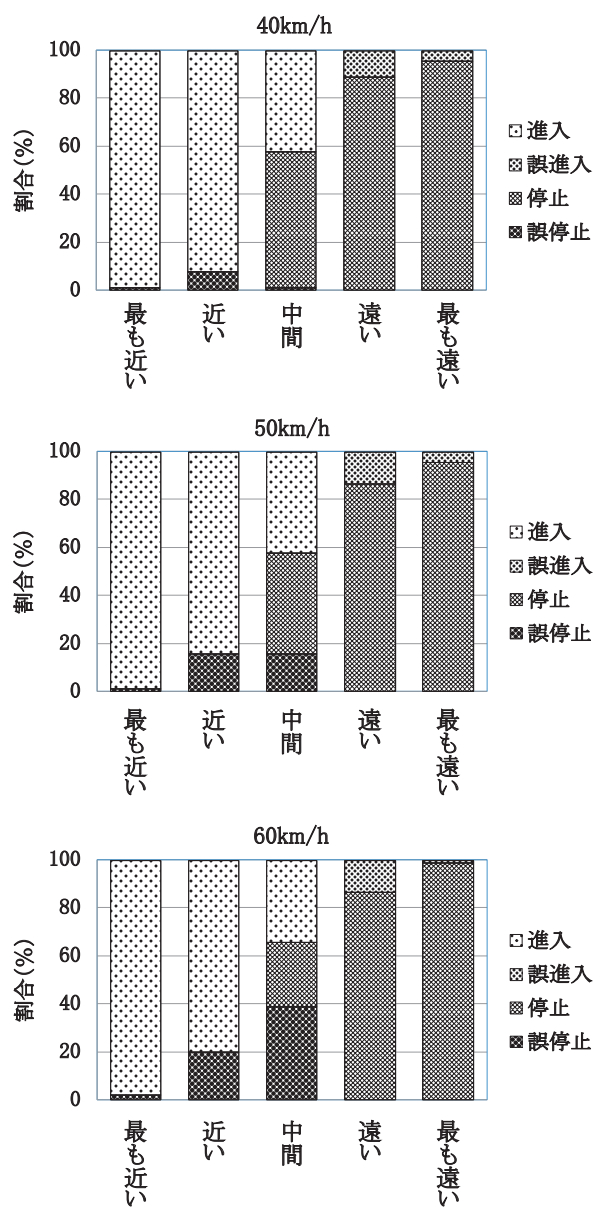


図5 警報開始タイミングとドライバーの判断・行為 (踏切実験)

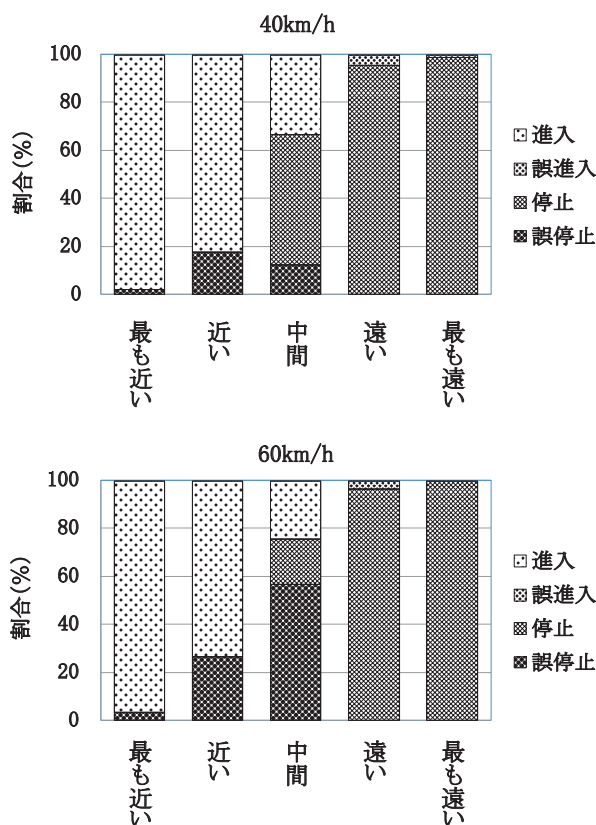


図6 警報開始タイミングとドライバーの判断・行為 (信号実験)

前章で定義した5つの警報発生タイミングのうち、“中間”では、車速が高いほど、踏切あるいは信号手前で停止できない誤停止の割合が高くなった。車速が高い場合には、踏切からより遠い位置で警報が開始する、あるいは信号が切り替わるため、判断に迷いが生じ、反応が遅くなったために誤停止となったと考えられる。

車速40km/h及び60km/hの場合に踏切実験と信号実験を比較すると、踏切実験の方が通過する割合が高く、特に“近い”、“中間”、“遠い”の3条件で顕著であった。“遠い”では、誤進入の割合は踏切実験の方が信号実験に比べて高かった。一方、“近い”と“中間”では、誤停止の割合は信号実験の方が踏切実験に比べて高かった。信号交差点では、信号機が交差点の向こう側にあるため、ドライバからは信号までの距離を遠く感じ、通過できないと思って停止した可能性が考えられる。踏切では、警報機が進入する側に設置されているため、ドライバは踏切までの距離を近く感じて、通過できると思って通過した可能性が考えられる。また、踏切は、開かずの踏切と言われることもあるように一回閉まると開くの時間が掛かるという思いがあり、そのために出来るだけ通過しようとした可能性も考えられる。

警報開始時の自動車位置と速度から踏切迄の到達時間を求め、実験結果をプロットした上で、ロジスティック

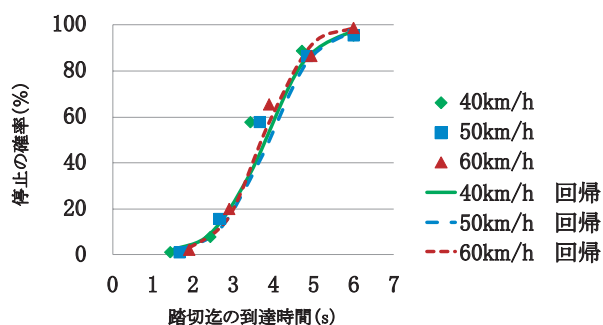


図7 停止の確率の推定

回帰式に基づく推定を行った結果、踏切手前での停止確率は、速度によらず、自動車が踏切に到達する時間により決まると推定される（図7）。

行動を起こす判断の基となる状況理解に関するアンケート調査の結果については、踏切実験と信号実験で目立った相違は無く、基本的に、「踏切あるいは信号までの距離」と「車速（自車速度と体感速度）」で状況を理解し、通過または停止の判断をしていた。踏切実験では、「警報音の音量」については停止の判断に用いられる割合が高かったものの、「踏切までの距離」や「車速」に比べるとその割合は小さかった。

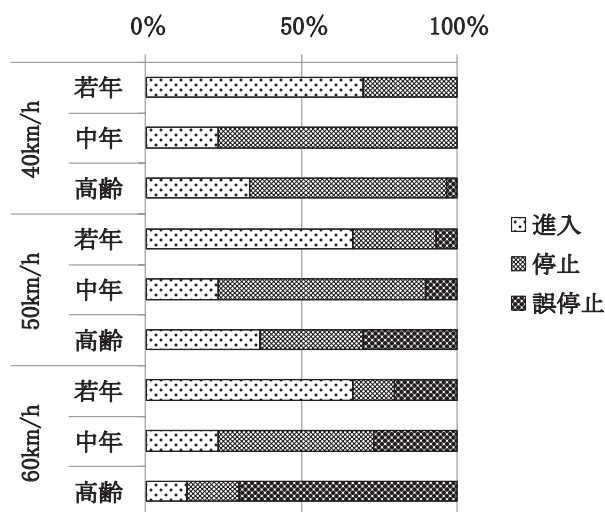


図8 年齢別行動の違い（踏切実験）

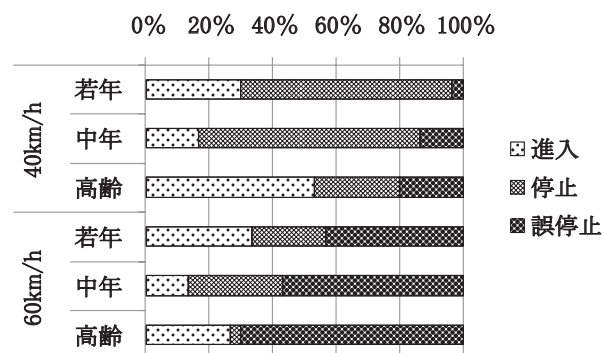


図9 年齢別行動の違い（信号実験）

ドライバ行動の違いについて、5つの警報発生タイミングのうちの“中間”タイミングにおいて、被験者の年齢間で比較した結果を図8（踏切実験）および図9（信号実験）に示す。

20～30代の若年、40～50代の中年、60代以上の高齢の3群に分類した。なお各群の被験者数は同じであった。踏切でも信号でも、基本的には若年の方が高齢に比べて通過の割合が高い結果であった。高齢では停止の割合が高いが、中でも、反応の遅さから誤停止の割合が他の年齢群に比べて高い結果であった。特に、車速60km/hの中間領域では、踏切でも信号でも、高齢の誤停止の割合が非常に高かった。高車速の場合、反応時間の遅れの影響が大きくトリコになる可能性が高いといえる。

3.2 実験のまとめ

図4に示す中間領域では、車速が高くなるにつれ誤停止と判断して実行する傾向が高くなった。ドライバに対するアンケート調査から、ドライバは基本的には踏切までの到達時間を基に通過/停止の判断をしていると考えられるため、高速では制動時間が足りなくなると考えられる。踏切では通過と判断して実行する傾向が信号に比べて高いことが示されたが、これは、踏切の警報機は踏切の手前にあり、交差点の信号機は交差点の先にあるという警報機/信号機の建植位置の違いが一因と考えられる。

4. 直前横断のリスク評価

踏切遮断に間に合わない箇所からの誤進入は、遮断かん折損につながる。また踏切前の停止に間に合わない箇所での誤停止も、遮断かん折損及び支障につながる。

図7による踏切迄の到達時間別の停止の確率から、車の到着の分布を指数分布と仮定した場合の踏切1遮断あたりの誤進入及び誤停止の確率を求めた。前者の誤進入確率は道路交通量によって増加する（図10）。また後者の誤停止の確率は、制動距離にも関わるため、道路交通量だけでなく、車速の増加によっても増加する（図11）。

誤進入について、ある地域の踏切遮断かん折損の実績値及び踏切の道路交通量分布に基づいて、計算した結果を表1に示す。

一旦停止を行わない場合、警報開始から遮断開始までの時間が現行の4秒のままとして、遮断かん折損に至る状況を、遮断開始から2秒後（警報開始から6秒後）以降に進入した場合と想定しても、遮断かん折損は現状に対して約6倍の増加となることがわかる。

現状で、東京都において踏切障害事故は年間16件程度起きている。過去の実績等により、遮断かん折損をその25倍程度と推定すると、年間400件程度起きている計

特集：ヒューマンファクター

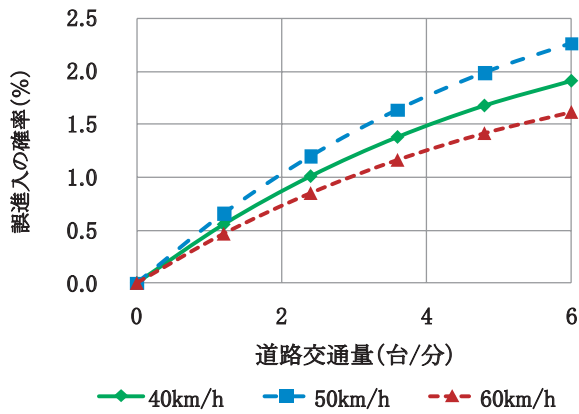


図 10 誤進入の確率

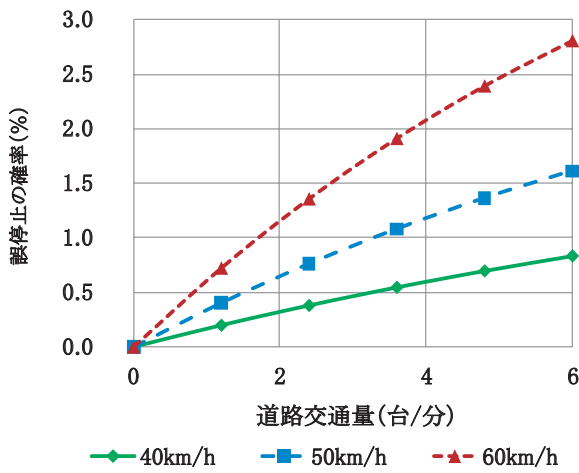


図 11 誤停止の確率

算になる。一旦停止を行わない場合、2組全遮断の踏切で、警報開始、遮断開始時間を現状のままとした場合、約2,400件と大幅に増加し、踏切の安全性が低下すると考えられる。

なお、遮断かん折損の増加にともない、踏切事故及び支障も増加すると考えられるが、その増加率に関しては、遮断かん折損の増加率を当てはめるのは適当でなく、別途、実験等による評価が必要となろう。

表 1 現状での遮断かん折損率および一旦停止解除時の誤進入率

	警報開始から遮断開始の時間	折損率 1 遮断あたり
現状	4 秒	0.001%

	警報開始から踏切進入の時間	誤進入率 1 遮断あたり
一旦停止義務解除時	4 秒以降	0.11%
	6 秒以降	0.006%
	8 秒以降	0.0015%

文 献

- 1) 松本真吾・柴田徹 通行時の一旦停止義務解除が安全性に与える影響 鉄道総研報告, Vol.22, No.7, pp.37-42, 2008
- 2) 佐藤稔久・赤松幹之・柴田徹・松本真吾・樋田航 踏み切り前での一旦停止解除における先行車停止に応じない踏み切り進入可能性の評価 自動車技術会論文集, Vol.39, No.6, pp.259-264, 自動車技術会, 2008
- 3) 羽山和紀・松本真吾・柴田徹・畠山直・赤松幹之・佐藤稔久 踏切通行時の滞留可能性に関する研究(その1) 人間工学, Vol.45, supplement, pp280-281, 人間工学会, 2009
- 4) 佐藤稔久・赤松幹之・柴田徹・松本真吾・畠山直・羽山和紀 踏切前での一旦停止義務解除時における踏切内での停滞可能性の評価—第2報：徐行時での停滞可能性と先々行車による影響— 自動車技術会学術講演会, 自動車技術会, 2009
- 5) 羽山和紀・松本真吾・柴田徹・赤松幹之・佐藤稔久踏切直前での踏切音鳴動に対する自動車ドライバーの運転行動評価 人間工学, Vol.46, supplement, pp336-337, 人間工学会, 2010