

show that the simulated results of the performance of safety systems and the effectiveness of safety systems for traffic accident reductions.

予防安全システム評価シミュレータ STREET

森 博子^{†1} 岩瀬 竜也^{†1} 北岡 広宣^{†1}

近年、車車間通信システムや PCS などの予防安全システムの検討や開発がさかんに行われている。その開発にあたっては、たとえば、通信のプロトコルなどが想定どおりに動作するか、および、事故の低減効果があるかを事前に評価する必要がある。しかしながら、従来のシミュレータでは事故再現やシステム評価が不可能である。そこで、予防安全システムの成立性およびシステム導入による事故低減効果の両方を評価可能なシミュレータ STREET (Safety & Traffic REaltime Evaluation Tool) を開発している。それらの目的を達成するために、ドライバの認知・判断・操作をモデル化し、その結果として挙動を再現するようモデル化した。その過程において、認知エラーや判断エラーなど、ヒューマンエラーを起こすことによって、事故を再現する仕組みとした。開発した STREET を用いて、交通流再現性を評価し、適用の一例として車車間通信システムの通信のプロトコルが想定どおりに行えるかを確認した。さらに、ドライバのエラーによる事故を再現し、予防安全システムの事故低減効果評価の動作を試行し、STREET を予防安全システムの成立性と事故低減効果の評価に用いることが可能な構成となっていることを確認した。

A Traffic Simulator for Evaluating Safety Systems: STREET

HIROKO MORI,^{†1} TATSUYA IWASE^{†1}
and HIRONOBU KITAOKA^{†1}

Recently, safety systems such as vehicle safety communication systems and driver assistance systems have been invented and developed. To develop such systems, it is necessary to evaluate their effectiveness before they are actually introduced. However, it is difficult to evaluate them using conventional simulators. Therefore, we have been developing a traffic simulator called STREET which tests whether safety systems perform as designed and evaluates how well safety systems reduce traffic accidents. STREET was composed so as to reproduce traffic flows on road networks and to simulate traffic accidents caused by “human error” in a driver’s behavior. In validation of STREET, its simulated traffic flows almost entirely agree with actual ones. As an example, we

1. はじめに

近年、車車間通信システムやプリクラッシュセーフティシステム (PCS) などの予防安全システムの開発検討が急速に行われている^{1),2)}。予防安全システムの検討には、たとえば、通信のプロトコルが想定どおりに行えるかといった「システムの成立性」や、予防安全システムによってどれくらい事故の低減に有効かといった「事故低減効果」を評価する必要がある。しかしながら、それらを実地では、実フィールド上の実験で事故を発生させることは困難であるため、シミュレーションを用いて実際に近い交通状況を模擬し、その状況において成立性や事故低減効果を検討する必要がある。

交通状況を模擬する手法として、古くから交通シミュレーションによる方法が提案されてきた^{3)–5)}。しかしながら、これらは通常は交通流を再現するモデルであり、車の挙動は一定の車間距離や車頭時間を維持するようにモデル化されており、事故が発生することはない。

そこで、我々は、新たに予防安全システムの成立性と導入による事故低減効果の両方を評価可能なシミュレータを開発している。そのシミュレータを STREET (Safety & Traffic REaltime Evaluation Tool) と名付け、上記目的を達成するために、ドライバの認知・判断・操作をモデル化し、その結果として挙動を再現するようモデル化した。その過程において、認知エラーや判断エラーなど、ヒューマンエラーを起こすことによって、事故を再現する仕組みとした。本論文では、シミュレータの要件を述べ、STREET の構成とモデルを提案する。次に、提案モデルを用いて、交通流再現性を確認し、システムの成立性評価を試行する。さらに、事故を再現し、安全システムの事故低減効果の評価が可能な仕組みとなっているかを確認する。

2. シミュレータ開発の要件と構成

2.1 STREET の要件と全体構成

予防安全システムの成立性を検討するには、たとえば通信を用いた安全システムの場合、確実に通信が成功するか、周辺交通への悪影響はないかなどを検討する必要がある。そこ

^{†1} 株式会社豊田中央研究所
TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.

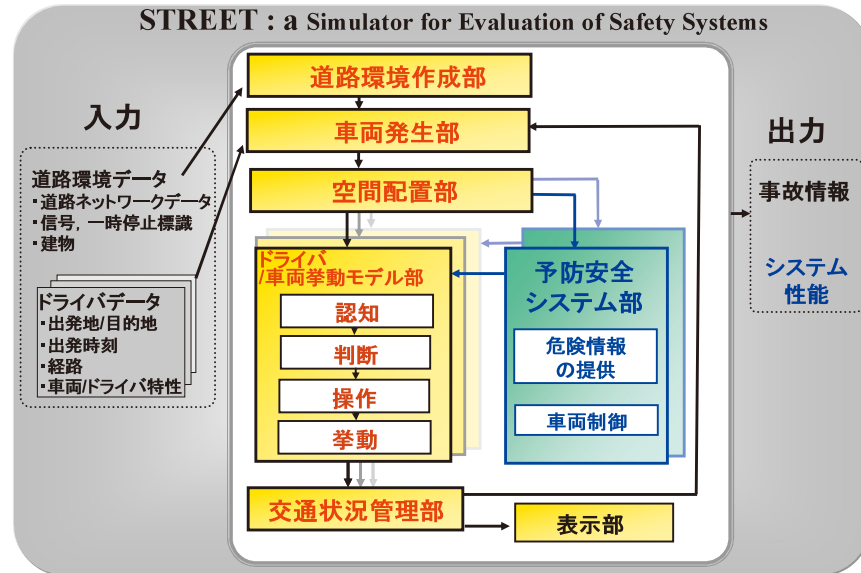


図1 予防安全システム評価シミュレータ STREET の構成
Fig. 1 Components of STREET, a simulator for evaluation of safety systems.

で、事故を起こす 2 台だけではなく道路ネットワーク上の交通流を模擬し、交通量および速度を精度良く再現する必要がある。また、予防安全システム導入による事故低減効果を検討するには、ドライバーの判断操作などの各ステップにおける人間のエラーにより事故を再現し、さらに、安全システム導入によるドライバー挙動を表現できる必要がある。そこで、開発するシミュレータを、図 1 に示すような構成にし、上記を再現可能とした。各部の概要を以下に示す。

道路環境作成部では、リンクデータ、ノードデータ、信号データ、建物などの道路ネットワークデータを入力データとして、車両の走行空間を作成する。

車両発生部では、単位時間あたりの交通量に基づき、各車両をポアソン分布に従い発生させる。

空間配置部では、交通状況で管理されている各車の位置情報や速度情報に従って、各車両を道路空間上に配置する。

ドライバー/車両挙動モデル部では、道路環境作成部や空間配置部から出力する道路および



図2 交通流モデル
Fig. 2 Traffic flow model.

車両状況データ（信号現示、一時停止標識、周辺車両の状況）に基づき、希望速度を判断し、加減速度および移動量を決定する。なお、安全システムの車載機を搭載している車両のドライバーは、安全システム部から危険情報や車両制御を得て、それらに基づく判断や挙動を決定する。詳細は 2.2 節で述べる。

交通状況管理部では、計算ステップごとの個々の車両の位置、速度、加減速度を管理する。

予防安全システム部では、空間配置部から道路や車両の状況を得て、予防安全システムのアルゴリズムに基づき、危険情報の提供や車両制御をドライバーモデル部に与えることにより、事故回避件数などでシステム性能を評価する。また、衝突回数や衝突の程度を安全システム部に出力する。

表示部では、交通状況管理部から道路や車両の状況を得て PC の画面上にシミュレーション実行中の状況を表示する。

2.2 ドライバ/車両挙動モデルと事故再現

ドライバー/車両挙動モデルでは、図 2 に示すように、ドライバーの認知、判断、操作および車両挙動の各部によって交通流を決定する。具体的には、以下のとおりである⁶⁾。

● 認知

道路平面の幾何的な配置により見通しを考慮し、周辺の状況（信号現示の有無や現示色、一時停止標識の有無、周辺車両の位置や速度）を認知する。建物、周辺車両を 3 次元に配置し

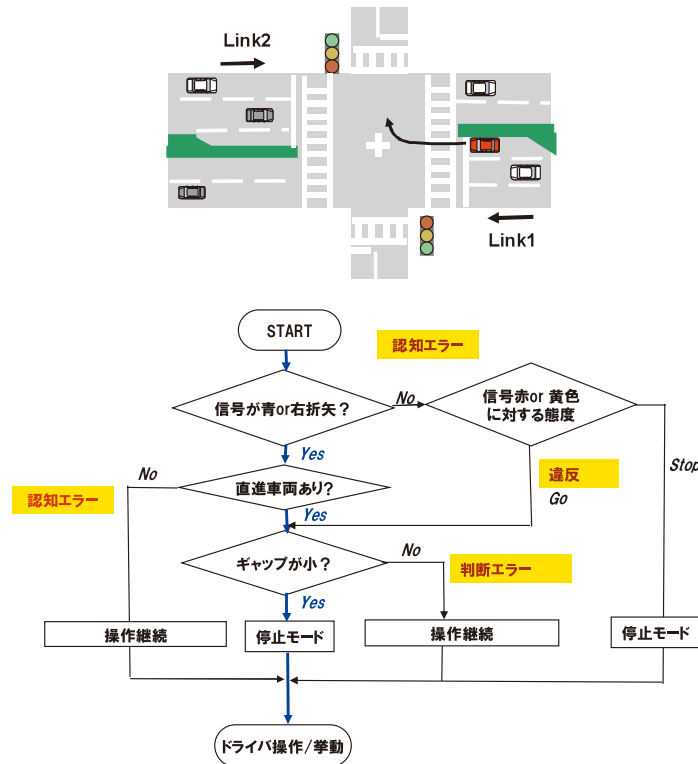


図3 ドライバ/車両挙動モデルにおけるドライバーの認知/判断の例

Fig.3 Example of driver recognition and judgment in the driver and vehicle module.

て、運転者の視点からの視野を再現し、視力、空間分解能、色判別能力などのドライバーの視覚特性や昼夜、天候などの周辺環境を考慮可能である。

● 判断

自車の状況に応じて、認知対象物に対する行動を決定する。ここで、自車の状況とは、交差点からの距離、速度、行動モード（停止、追従、自由走行、加減速）、交差点での進行方向などを指す。たとえば図3に示す交差点右折時の例のように、各状況における判断フローによって行動モードを決定する。同時に、希望速度および希望速度を実現したい現時点からの距離を出力する。

● 操作挙動部

運動方程式により加減速度を決定し、車両や個人の限界値に応じて操作量を決定する。

上記の各ステップに対して、事故を以下の考えに基づき発生させる。たとえば、図3の交差点右折時の認知判断の例では、右折車両のドライバーが、信号、対向直進車およびギャップを確認する際、信号や対向直進車を認知できない、あるいは、対向車両が交差点に到達するまでの時間の判断を誤るエラーが発生することにより、事故を発生させる。これらのエラーは確率的に起こす。また安全システム部からの危険情報を得たドライバーは“エラー対象の車両や信号を認知する”と仮定してエラーは解除される。また車両制御の場合は、安全システムのアルゴリズムに従って衝突までの時間に応じて加減速度が制御される。

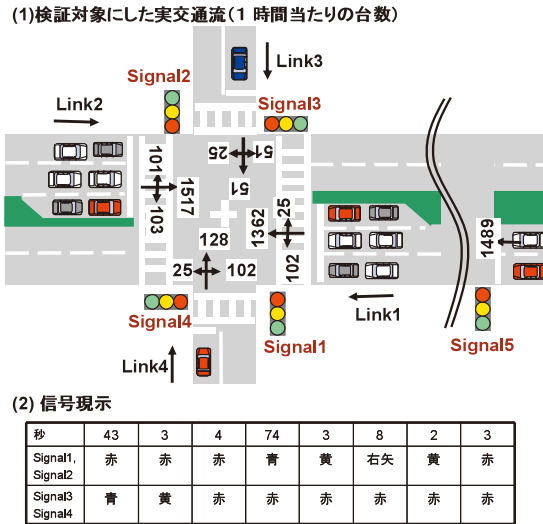
以上のように、ドライバーの認知・判断・操作をモデル化し、その結果として挙動を再現するようモデル化した。その過程において、認知エラーや判断エラーなど、ヒューマンエラーを起こすことによって、事故を再現する仕組みとした。従来の交通シミュレータでは車の挙動が一定の車間距離や車頭時間を維持するようにモデル化されており事故発生が不可能であったのに対し、STREETでは車両挙動をドライバーの認知・判断の結果に基づき表現しているため、認知・判断のなかで起こす人間のエラーを表現可能となった。

3. 安全システムの成立性評価

3.1 再現性の検証

STREETを用いて、交通流の再現性を検証した。交通流の再現性評価の対象とした交差点を図4に示す。図4(1)に示すように、東西方向（Link1およびLink2）は片側2車線＋右折ポケット、南北方向（Link3およびLink4）は片側1車線道路に対し、図に示す単位時間あたりの交通流を発生させた。信号現示は図4(2)に示すとおりに設定した。

図4のLink1（2車線＋右折ポケット）における実測およびシミュレーションの交通量および速度の比較結果をそれぞれ図5および図6に示す。信号が青になった時点からのリンク下流端における累積通過交通量を図5に示す。図中の1本の線は信号1サイクルあたりにおける累積交通量（1点が1台を示す）を示しており、シミュレーションおよび実測値のそれぞれ3サイクル分の例を示している。たとえば“シミュレーション3”の場合、青信号になってから車両が平均約1秒間隔で通過し始め、6秒後から19秒後に交通流が中断し、最終的には74秒後に52台の車両が通過していることを示している。図5より、シミュレーションで実測とほぼ同様に時間に対する通過交通量が再現できていることが分かる。実測ではサイクルごとに通過交通量のばらつきがみられるが、シミュレーションでもほぼ同程度に



Signal5の信号は、Signal1とサイクル長は同じ。
オフセットは10秒。Signal1が青になった10秒後にSignal5が青になる。

図 4 現況再現の検証のシミュレーション条件
Fig. 4 Traffic conditions used in validation.

交通が通過している。また、図の丸で示す部分は、青信号になって滞留していた交通流が通過した後、上流側の信号が青になって次の車群が流れてくるまでの中断していた状況を示しており、シミュレーションでも、同様の傾向を実現した。次に信号が青になった時点からの交差点手前 20 m 区間通過時の速度を図 6 に示す。図 6 より、シミュレーションでほぼ実測と同程度に速度が再現できていることが分かる。実測値の平均 10.7 m/s、標準偏差 7.2 m/s に対し、シミュレーションは平均 11.3 m/s、標準偏差 9.0 m/s となり、ほぼ同等の平均およびばらつきであった。以上より、STREET でほぼ実際に近い交通流を再現できるといえる。

なお、計算処理時間について、パーソナルコンピュータ (CPU: Pentium(R)4 2.8 GHz, Memory: 1.0 Gbyte) を用い、スキャンインターバルを 100 ミリ秒として計算した。その計算に要した時間は 1 時間あたりの交通流の計算で約 2 分である。STREET は、1~数交差点規模を対象にしたシミュレーションであり、計算処理時間も問題がないことを確認した。

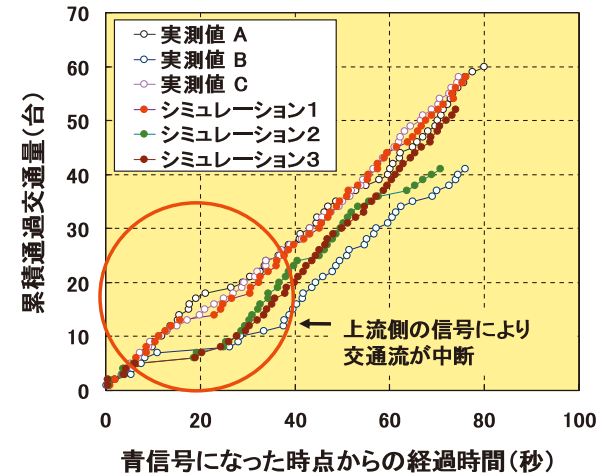


図 5 交通量の検証結果例
Fig. 5 Validation of traffic volume simulation example.

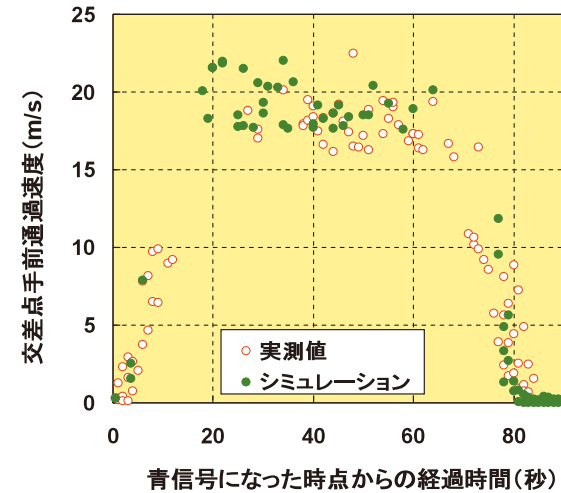


図 6 速度の検証結果例
Fig. 6 Validation of velocity simulation example.

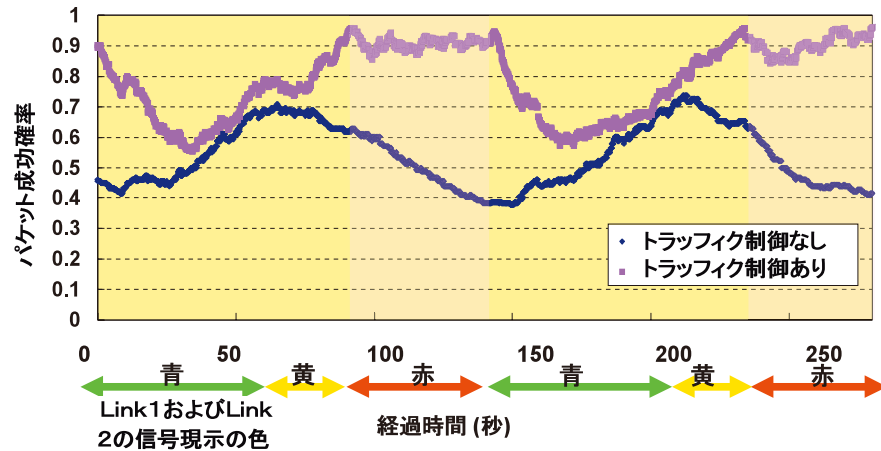


図7 車車間通信安全システムの成立性評価例—パケット成功率の時間的変化
Fig.7 Evaluation of vehicle-to-vehicle communication safety system performance.

3.2 安全システムの成立性の評価例

ここでは、安全システムの成立性の評価例として車車間通信システムの通信成功率の評価例を示す。シミュレーションの方法として、まず、交通流シミュレータで道路構造、信号現示、他車両との関係に基づき、交通状況を模擬する。次に、車両位置および速度から、100 ミリ秒ごとに各車両が半径 100 m 以内に車々間通信を行った場合のパケット成功率などの通信性能を評価する。

通信方式として、本例では、ALOHA 方式⁷⁾を用いた。ALOHA 方式の通信確率 p_s は式 (1) で表現される。

$$p_s = e^{-2G} \quad (1)$$

ここで、

$$G = \frac{n}{C}$$

n : 通信量

C : 通信容量

また、ALOHA 方式に対して、全車両同じ時間間隔で通信するのではなく、速度が小さくなるほど安全になると判断し、式 (1) の通信量 n を式 (2) に示すように、速度が小さい場

合は通信間隔を長くする制御を行った。

$$n = \sum_i \frac{V_i}{a} \quad (2)$$

ここで、 V_i : 車両 i の速度

a : パラメータ

これらの方式を、図 4 に示す交通状況に対しシミュレーションを行った。パケット成功率の時間変化の結果例を図 7 に示す。図 7 に示すように、トラフィック制御を行っていない場合、赤信号になると車両が停止し、車両台数が増えていくため、通信成功率が悪くなる。そこで、トラフィック制御を行った場合、赤信号時点でのパケット成功率が低下することなく、また青信号や黄色信号時点でもトラフィック制御なしの場合に比べて制御した方が良いことが分かる。

以上の例のように、STREET を通信評価に適用することが可能である。

4. 安全システムの事故低減効果評価

4.1 事故再現方法と再現性のためのパラメータ設定

次に、STREET を用いて事故低減効果の評価を行った。ここでは、実事故の中で件数の多い類型である、交差点での右折時の対向直進車との衝突事故を対象とする（具体的には、平成 17 年度の全事故の半数以上が交差点での事故で、さらにその 20% が右折直進事故である⁸⁾）。

本評価では、現況再現として実事故と同様の件数が発生する状況を構築し、その状況に対して予防安全システム導入時の事故再現を実施し、相対的に事故低減効果を評価した。事故発生割合は、ドライバーの出現確率だけでなく、そのときの交通量にも依存する。本評価では、交通状況として図 4 の交差点の 24 時間交通量の実測値を用いた。

まず、2 章で説明した事故を再現するモデルを用いて、事故再現性のためのパラメータ設定を行った。今回のシミュレーションでは、安全不確認が原因による事故を例にあげる。これは、図 8 の破線で示す認知エラーに相当する。具体的には、対向直進車両を「見なかった」あるいは「見えなかった」と仮定する。

全国事故統計によると、安全不確認が原因での右折直進事故は、全国で年間 6,000 件発生⁸⁾しており、事故多発交差点約 4,200 力所⁹⁾ で除すると、平均では 1 交差点あたり 5 年間で約 7 件発生していることになる。そこで、事故多発交差点である図 4 の交差点を対象に、5 年間のシミュレーションを行い、安全不確認が原因での右折直進事故を 7 台発生するようにパラメータ設定を行った。その結果、図 4 の規模の交差点の交通量を基準にして安

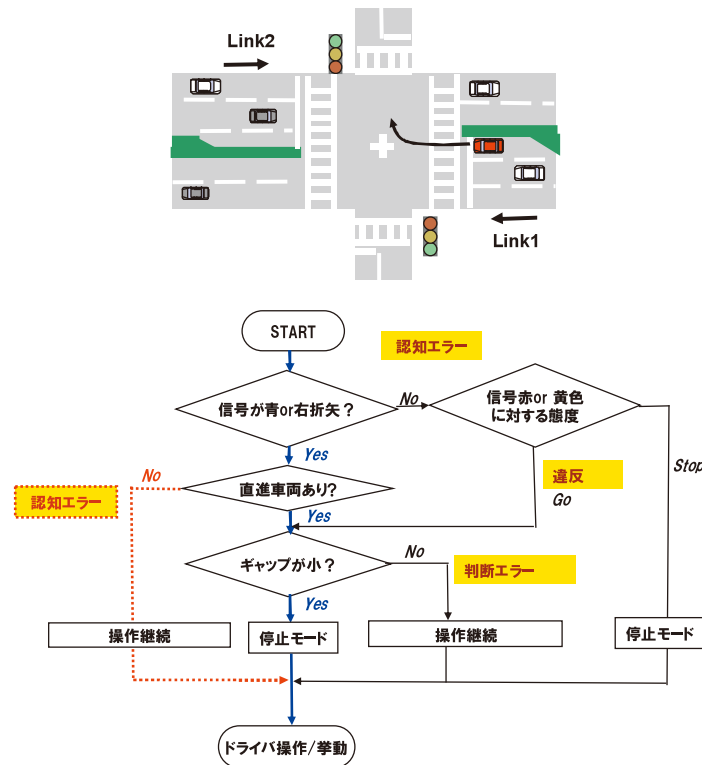


図 8 ドライバの認知エラーの例

Fig. 8 Example of driver recognition error.

全不確認の割合を算出した結果、安全不確認車両は 92,000 台に 1 台の割合で出現することとした。

4.2 事故発生および予防安全システムによる事故低減効果評価例

以上のモデルを用いて、事故発生および予防安全システム搭載時のシミュレーションを行った。シミュレーション条件を図 9 に示す。シミュレーション条件として、道路、交通量、信号は図 3 と同様とした。ただし、パラメータとする Link2 の交通量に関しては、右左折直進車割合のみを図 4 と同様にして、交通量は 600~2,400 台/時間を 600 台/時間刻みで変化させた。また安全システム搭載車両を 0~100%を 25%刻みで変化させ、シミュレー

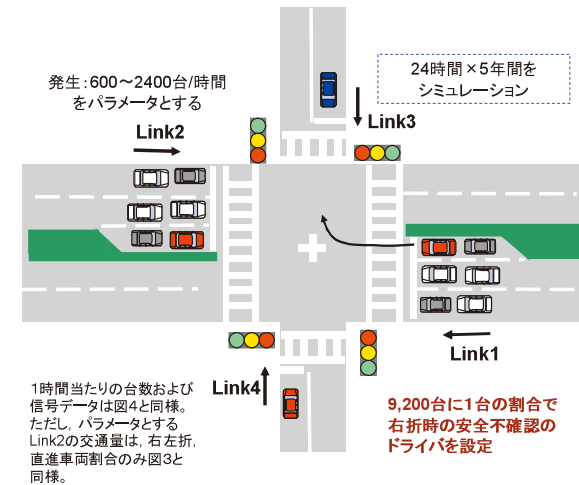


図 9 事故再現の評価のシミュレーション条件

Fig. 9 Traffic conditions used in evaluation of a traffic accident by a safety system.

ションを行った。安全システム搭載車両は、対向車接近の警報を受けることとし、それによりドライバーは、安全を確認して右折するように設定した。なお、ここで用いる警報は、3章で示した車車間通信システムではなく、単に、“システム搭載の全車両が警報を受けるシステム”と仮定した。また、エラーは右折時の安全不確認のみとし、他のエラーや違反はないこととした。

対向車両台数および安全システム搭載率に対する事故割合の結果を図 10 に示す。事故割合とは、対向車両台数 1,800 台/時間および安全システム搭載率 0%のときの事故台数を 1.0 とした場合に対する各割合を示す。図 10 より、対向車両台数が少ない場合は、右折タイミングによって不確認車両が事故を起こさず通過できる場合があるため、事故割合が少ない。対向車両が増えるに従って事故割合が増えてくるが、たとえば安全システム搭載率 0%のとき 1,800 台/時間以上になると、右折車は青信号では右折できず右折矢印（対向側の信号は赤で直進車は停止）時に右折する機会が増えるために事故割合は増えない。また、安全システム搭載率が大きくなるに従って、多少ばらつきはあるが、事故割合は減少傾向にある。交通量の大小に関係なく、事故を半減させるには、搭載率は 50%以上必要であることが分かる。

以上のように、STREET を用いて事故発生および予防安全システム搭載時の事故低減効

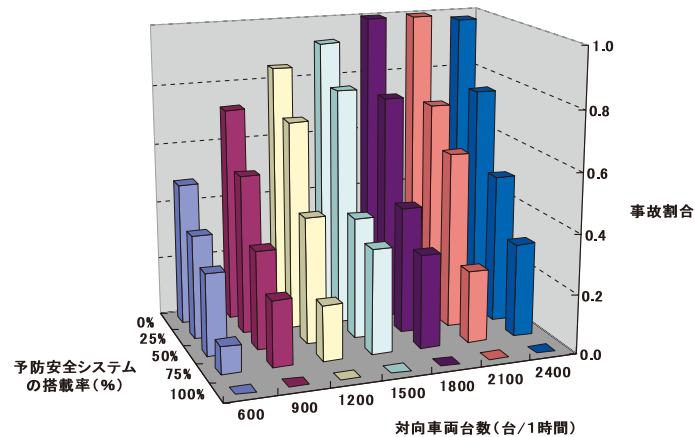


図 10 事故再現と安全システムの評価結果

Fig. 10 Simulation results for evaluation of a traffic accident by a safety system.

果を試算した。

4.3 考察と課題

今回は、提案した構成でエラーを起こした場合に事故が想定どおりに発生するかを確認するため、相手車両を「見なかった」、「見えなかった」などのようにエラーを直接的に起こし、確率的に発生させた。しかしながら、本来、エラーは意図したものではなく、脇見などの別の要因から誘発されるものである⁶⁾。

そこで今後は、エラーの確率を定義するのではなく、「カーナビ操作をする」「脇見をする」などエラーを誘発するイベントの発生を確率的に定義する。そして、各イベントについて、視力の低下、視野範囲の縮小、判断遅れなど、能力などの低下で表現する。これらのイベントは、各ドライバーで均一に起こるものではなく、「法遵守傾向が低い」、「意識水準が低い」などのドライバーは、運転に集中していないため発生頻度が高くなる。安全システムはこれらの能力を正常化や回復させることで表現する。

上記のイベントは、運転行動中に普通に起きることで、観測可能な指標である。実走行やドライビングシミュレータを用いて調査¹⁰⁾し、事故の再現性を向上させていく。

5. まとめ

予防安全システムの成立性と導入による事故低減効果の評価を目的とした、予防安全シス

テム評価シミュレータ STREET を開発している。それらの目的を満すために、道路ネットワーク上の交通流を現実に近い状況で模擬可能とし、ドライバーの判断操作などの各ステップにおける人間のエラーにより事故を再現できるシミュレータの構成とした。

STREET を用いて、現状再現性の検証を行ったところ、時間に対する交通量および速度変化に関して、ほぼ実測に近い状況が再現できることが分かった。さらに、車車間通信安全システムの通信成功確率の評価例を示し、速度を指標としたトラフィック制御などの検討に用いることが可能であることを確認した。

さらに、STREET の動作を確認するために、事故再現と安全システムを試算した。安全システムの事故低減効果評価例として、安全不確認による右直事故の例を示した。対向直進車の交通量および安全システム搭載率をパラメータとしてシミュレーションしたところ、対向直進車の交通量が大きくなるほど、安全システム搭載率が小さいほど事故割合が多いことが示され、事故再現および予防安全システムの事故低減効果の計算が可能な構成であることを確認した。

今後、事故再現性や安全システムの信頼性を持たせるために、ドライバー/車両挙動モデルの改良や追加を行っていく予定である。

謝辞 本研究を行うにあたり、(財)交通事故総合分析センター ITARDA より貴重なデータのご提供をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Makido, S.: Traffic Management Issues for Vehicle Safety Communication Systems, *Proc. 2005 IEICE General Conference*, Vol.39, No.2, p.326, 21st-25th (2005).
- 2) Umemura, Y.: Driver Behavior and Active Safety (Overview), *R&D Review of Toyota Central R&D Labs., Inc.*, Vol.39, No.2, pp.1-8 (2004).
- 3) Smith, M., Duncan, G. and Druitt, S.: PARAMICS: Microscopic Traffic Simulation For Congestion Management, *Dynamic Control of Strategic Inter-Urban Road Networks*, London: Institution of Electrical Engineers, pp.8/1-8/3 (1995).
- 4) Barcelo, J.: Microscopic Traffic Simulation: A Tool For The Design, Analysis And Evaluation of ITS, *Journal of Intelligent and Robotics Systems*, Vol.44, No.2, pp.173-203 (2002).
- 5) Nicholas, E.L. and Randy, B.M.: VISSIM: A multi-parameter sensitivity analysis, *Proc. 38th Conference on Winter Simulation*, Winter Simulation Conference, pp.1406-1413 (2006).
- 6) 北岡広宣, 倉橋哲郎, 岩瀬竜也, 町田貴史, 森 博子: 予防安全システム評価シミュレータ STREET: 認知・判断モデルの開発, 自動車技術会秋季大会学術講演前刷集,

114-20075815 (2007).

- 7) Abramson, N.: The Throughput of Packet Broad casting Channels, *IEEE Trans. Communications*, Vol.COM-25, No.1 (1977).
- 8) 財団法人交通事故総合分析センター：交通統計平成 17 年版 (2005).
- 9) 国土交通省道路局道路事業評価手法検討委員会：交通事故減少便益の原単位の算出方法，参考資料 5-7 (2003).
- 10) 町田貴史，倉橋哲郎，岩瀬竜也，森 博子，北岡広宣：ドライバの視認行動モデルの開発，信学技報，PRMU2007-183, pp.145-152 (2008).

(平成 19 年 8 月 28 日受付)

(平成 20 年 3 月 4 日採録)



森 博子 (正会員)

1993 年筑波大学大学院社会工学研究科経営工学専攻にて修士取得。同年 (株) 豊田中央研究所入社。以来，交通流シミュレーション，交通状況予測，予防安全評価技術，歩行者行動モデル開発に関する研究に従事。現在，走行安全研究センター安全・情報システム研究部 ITS 第 1 研究室に所属。交通工学研究会会員。2007 年および 2008 年に情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞を受賞。



岩瀬 竜也 (正会員)

2000 年東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻修了。同年日本アイ・ピー・エム株式会社入社。2002 年 SRA America, Inc. 入社。2005 年 (株) 豊田中央研究所入社。以来，予防安全システムおよび交通シミュレーションに関する研究に従事。現在，走行安全研究センター安全・情報システム研究部 ITS 第 1 研究室に所属。



北岡 広宣

1992 年千葉大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。同年 (株) 豊田中央研究所入社。以来，交通状況予測および予防安全評価技術に関する研究に従事。現在，走行安全研究センター人間特性研究室に所属。交通工学研究会会員。