

VR走行実験データを活用した多重衝突事故発生時の運転挙動に関するモデル分析*

Model analysis of Multi-vehicles accident behavior using Virtual Reality driving experiments data*

林 和史**・平田 輝満***・屋井 鉄雄****
By Kazuhito HAYASHI **・Terumitsu HIRATA ***・Tetsuo YAI ****

1. はじめに

(1) 背景と目的

近年において著しい技術革新、情報化、環境意識の変化により、道路の走行環境においても新しい変化を見せ始めるようになってきている。特に都市部においては、建設用地の不足、周辺環境への配慮などの理由により、地下に道路を設ける地下道路の建設が進んでいると共に、今後さらに増加していくと考えられる。都市内地下道路の走行環境に関しては、壁に囲まれていることで視界が狭くなったり、壁面や照明などの連続的かつ単調な視覚刺激により、眠気や錯覚現象を引き起こすといったトンネル空間特有の現象に加えて、都市特有の交通量や情報量、分合流部の多さなどが運転者に与える心理的負担も大きいと考えられ、事故につながるものが危惧される。

筆者らの先行研究¹⁾²⁾では、都市内地下道路における走行安全性について、主に覚醒水準の低下現象に関する検証を行い、長大トンネルにおける運転では、運転者の覚醒水準が低下する危険性があり、事故の認知から反応までの時間に大きな遅れを生じさせる要因となりうることを示している。また、都市地下道路においては、交通量の多さから、追従走行状態となりやすい環境下にあり、前方で起こる突発的なインシデントに対して、即時に対応できず、重大な事故につながってしまう怖れがある。加えてトンネル内での事故は、閉塞的構造から迅速な事故処理や救助、避難が困難であり、地上部に比べて被害の甚大化につながる可能性が高い。事故防止の観点から考えれば、車両単独による事故の防止が根本的な対策として最重要であるといえるが、本研究で対象としている都市内地下道路においては、単独事故が後続車を巻き込み、複数台の自動車に関係する多重衝突事故に発展させないような防止対策を検討することも同程度に重要であるとする。本研究では都市内地下道路における多重事

故発生時の状況を、複数被験者が同時に同空間を走行可能なドライビングシミュレーションシステム（以下DS）を用いて再現し、多数の走行サンプルを収集し、多重衝突事故発生時の運転挙動に関する基礎的分析を行った。

(2) 本研究の位置付け

これまでに行われてきた多重衝突に関する研究に関しては、井上ら³⁾による追突事故の生起メカニズムをトラフィックシミュレーションを用いて分析を行ったものなどがあるが、主に渋滞や天候、道路形状を事故の誘発因子として考えて統計データや実車走行データにより検証を行ったものが多く見られる。多重衝突の発生メカニズムを解明するためには、詳細な走行実験データによる分析が必要であると考えており、筆者らの先行研究⁴⁾では、ドライビングシミュレータを用いて多重衝突事故に関する実験を行い、挙動に関する基礎的な分析を行っている。山口らは、被験者2名1組で実験を行い、AI制御車と合わせて3台による追従走行中に、AI制御車が事故を起こした時の被験者2人の運転の挙動について調査し、単独事故が多重衝突事故に発展しやすいことや、高齢者の事故の要因として、反応（遅れ）時間が関係する傾向が見られること、前方被験者の事故回避挙動が後方車に影響を与えうることを定量的に示した。本研究は、これらの基礎的研究を踏まえ、さらに詳細な分析を行う継続研究という位置づけにあり、同様の実験におけるサンプル数の増加により統計的信頼性を高めることと、事故衝突の大きさを示す連続量変数の導入と前後車両間のインタラクションのモデル分析を行うことを目的としている。

2. DS (MOVIC-T4)の概要

都市内地下道路のような、次世代型道路を対象とした走行環境の評価・検証は実例が少なく、実走実験や事故統計による検証は難しかったことから、これまで多く行われてこなかった。しかし近年、CG技術の進歩によりDSを活用した再現性の高い仮想空間での走行実験、安全性検証が可能になって来ている。また、DSによる走行実験は実走実験と異なり、周辺走行環境に関するデータや、実走実験では得られない利那の詳細な挙動データ

*キーワード：都市内地下道路，DS，多重衝突事故，仮想停止車間距離

**非会員 修士(工学)，マツダ株式会社
(広島県安芸郡府中町新地3-1, TEL 082-282-1111)

***正会員 博士(工学)，運輸政策研究所
(東京都虎ノ門3丁目18番19号)

****正会員 工博，東京工業大学総合理工学研究科
(神奈川県緑区長津田町4259)

を取得する事が容易に出来る。本実験で使用しているDS (MOVIC-T4) は、走行画面は頭部に装着して目の前に画面を表示させるヘッドマウントディスプレイ (以下HMD) を使用するとともに頭部トラッキングセンサーにて被験者の顔の向きを捉え、HMDと連動させることにより360度全方位の視界を再現している。これにより、VR空間への高い没入感を得ることが出来る。また、走行時の体感加速度については2軸のモーションベースにより再現している。本実験ではDSを2台使用したネットワーク走行を行う事で、2名の被験者が同じ仮想空間を同時に走行する事が可能となっている。これにより、本研究で必要な2台の被験者車両による相互の影響を考慮した走行データを取得する事が可能となっている。

3. 多重衝突事故統計調査

高速道路において、実際にどのような事故が起こっているのかを把握するため、近年の事故の統計を調べ、事故の現状把握を行った。調査は朝日新聞のデータベースを用いて過去3年間 (2003年1月-2006年4月) に発生した事故を対象に「高速道路」、「事故」というキーワードで検索を行い、結果発見できた事故件数は637件であった。これらの事故件数のうち、トンネル内において発生している事故の件数は89件 (14%) であり、そのうち41件 (46%) は3台以上が関係する大規模な多重事故に発展しているものであった (表-1)。なお、本研究では3台以上が関係する事故を多重衝突事故と定義している。本調査のみから正確なことは言えないが、地上部とトンネル部の距離の割合から考えてもトンネル内での事故の発生する危険性は比較的高いことが示唆される。

また、表-2には調査したトンネル内の事故の原因別に集計したものであるが、最も多いのは「側壁に衝突」した事故であり、ついで「停車車に追突」、「走行中の追突」といった結果となった。これらの事故原因の割合は合計で76%にまで及んでおり、先行研究で示しているように、トンネル空間に見られる覚醒水準の低下傾向が、事故原因を誘発し、トンネル内での事故件数増加につながっていると考えている。

4. 多重衝突事故実験の概要

(1) 実験目的

本実験の目的は、追従走行時における前方車の急な事故に対して、後続車がどのような挙動をとるかを調査し、多重衝突事故の発生時の挙動データを取得することにある。そして、事故車両に追従していた2台の車両の緊急回避挙動を分析することで、多重事故発生時の車両相互

表-1 トンネル内の事故の関係車両数

台数	件数	割合
1台	21件	23.6%
2台	27件	30.3%
3台	11件	12.4%
4台	14件	15.7%
5台以上	16件	18.0%

表-2 トンネル内の事故の原因

事故の種類	件数	割合
停車車に追突	23件	25.8%
走行中の追突	19件	21.3%
側壁に衝突	25件	28.1%
逆走・正面衝突	11件	12.4%
その他・不明	11件	12.4%
	89件	100.0%

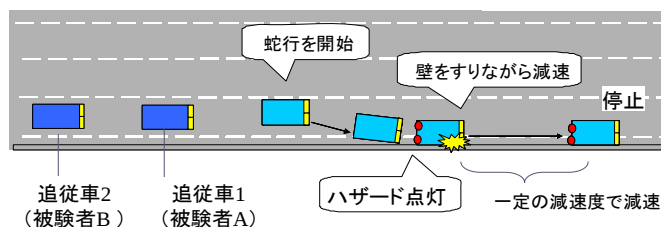


図-2 本実験のシナリオ

の影響を調査する。

(2) 実験概要とシナリオ

実験は2名の被験者 (それぞれ被験者A、Bと呼ぶ) に同時にDSに乗ってもらい、同じVR道路空間内を走行させた。実験時被験者に与えた指示はそれぞれ前方を走行している車を追従するというものとし、運転時の車間距離、速度などは日常の運転時と同じように運転させた。被験者Aは事故を起こすように設定された制御車 (大型車) を、被験者Bは被験者Aの運転する走行車 (乗用車) を追従する形になり、制御車と2名の被験者が運転する2台の走行車とで、計3台の追従状態を作り出している。事故発生のシナリオは図-2に示しているように先頭を走行する制御車が追い越し車線上を時速約90kmで走行し、しばらく走行した後、急に蛇行運転を始め、その後右側壁に衝突し、ハザードを点灯しながら停止するというものである。

実験被験者は、被験者は学生113名、高齢者99名を対象として、1実験2名で行うため計212名106組に対して行った。被験者の組み合わせは、前方車と後方車がそれぞれ学生と学生、学生と高齢者、高齢者と学生、高齢者と高齢者の4通りの組み合わせとなるように分けて実験を行い、被験者の順序を入れ替えてもう一度実験を行っている。これにより合計212組の走行データを取得して

いる。

表－3 組み合わせ別衝突結果

5. 実験結果と運転挙動分析

(1) 実験結果の基礎的分析

まず、本分析では3台の車両が追従状態にあることを前提としていることや、DSを用いた実験においてVR画面の解像度等の問題によりあまりに離れた前方車両が識別できないといった特性もあることから、車間距離150m以上のサンプルは分析対象から除外している。最終的なサンプル数は全212サンプル中137サンプルとなっている。

a) 属性・衝突結果別比較分析

実験は学生、高齢者の組み合わせで4通りで実施しているが、その結果から組み合わせ別による比較分析を行った。組み合わせ別の衝突結果を表－3に示す。実験結果では、3台以上が関係する多重衝突事故は全体の5割を超えた結果となった。全体的にみても前方車、後方車とも衝突しているケースが最も多いことがわかる。前方車が学生、後方車が高齢者の組み合わせ時には多重衝突事故に発展する確率が最も高くなっている。ハンドルを切った被験者の割合は前方車が14.6%、後方車が9.5%となったが、学生、高齢者別では、ハンドルの割合に大きな差は見られなかった。

b) 挙動別比較分析

本研究では、2台の追従車を前方追従車、後方追従車、また、事故を起こす車両を制御車と定義している。表－4は前方追従車、後方追従車の運転挙動の回避行動別（ハンドル操作をしたか、ブレーキ操作のみか、衝突したか回避したか）の挙動の結果を示している。後方車においては、前方車がどのような挙動を行ったかによって、その挙動も異なってくるため、前方車の挙動別に分類して示している。ここでは、前方車がブレーキ停止を行ったケースについては、後方車もブレーキ停止を行う傾向が見られるほか、前方車がブレーキ操作を行った結果衝突している場合においては後方車も衝突する割合が高く、回避した場合では後方車も回避出来ている割合が高いという結果が見られた。2台目の衝突した、回避したという結果が後方車の衝突に大きく影響しており、当然といえば当然であるが、多重衝突事故の3台目の衝突を防止するには、2台目の衝突を防止することが重要であると考えることが出来る。

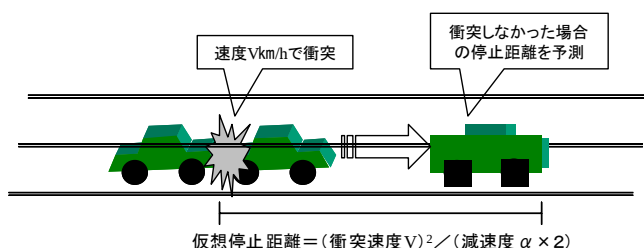
c) 事故の規模を示す指標を用いた考察

先行研究⁴⁾では衝突か回避かの離散値で分析をしてい

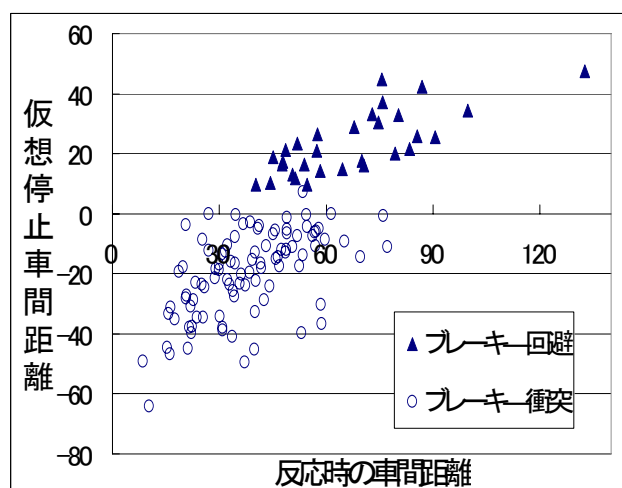
制御車	前方被験者	後方被験者	学生	学生	学生	高齢者	高齢者	学生	高齢者	高齢者	計
			学生	学生	学生	高齢者	高齢者	学生	高齢者	高齢者	
ハンドルを切った人数			2/41人 (4.8%)	2/41人 (4.8%)	9/35人 (25.7%)	5/35人 (16.7%)	5/29人 (17.2%)	4/29人 (13.8%)	4/32人 (12.5%)	2/32人 (6.25%)	
多重衝突事故 (3台以上が絡む事故)	collision—collision		18/41組 (40.6%)		17/35組 (48.6%)		11/29組 (37.9%)		14/32組 (43.8%)		60/137組 (43.8%)
	not collision—collision		2/41組 (4.8%)		6/35組 (17.1%)		2/29組 (6.9%)		3/32組 (9.4%)		13/137組 (9.5%)
事故	collision—not collision		9/41組 (21.9%)		4/35組 (11.4%)		9/29組 (31.0%)		5/32組 (15.6%)		27/137組 (19.7%)
	not collision—not collision		12/41組 (29.2%)		8/35組 (22.8%)		8/29組 (27.6%)		10/32組 (31.3%)		38/137組 (27.7%)

表－4 挙動結果とサンプル数

前方車挙動	サンプル数	後方車挙動	サンプル数
ハンドル回避	20	ハンドル回避	5
		ブレーキ衝突	6
		ブレーキ回避	9
ブレーキ衝突	93	ハンドル回避	8
		ブレーキ衝突	63
		ブレーキ回避	23
		ハンドル回避	1
ブレーキ回避	31	ブレーキ衝突	6
		ブレーキ回避	24



図－3 仮想停止車間距離の算出



図－4 仮想停止車間距離と反応時の車間距離グラフ

たが、本研究では、事故の規模を表す連続量指標として仮想停止車間距離という指標を新たに考えた。この指標は、衝突したケースについては衝突速度を用いて仮に衝

突しなかったと仮定した時に停止していたと推測される距離を求め車間距離（マイナスの値となる）を算出したものであり（図－3），衝突しなかったケースについては実際の観測値である停止時の車間距離を用いている。仮想停止車間距離と反応時車間距離との散布図を図－4に示す。仮想停止車間距離の値は衝突したケースの値が負の値として算出されており，負の値が大きいほど，事故の衝突の規模，つまり事故の規模が大きいことを示す指標となる。逆に正の値が大きいほど，停止時の車間距離が大きく，回避に余裕があったと考える事が出来る。図－4より，車間距離が大きいほど回避に余裕があり，車間距離が小さいほど，事故の規模が拡大していることがわかる。反応時の車間距離が40m以下であった場合にはほぼすべてのサンプルにおいて衝突しており，60m以上あった場合には多くのサンプルが回避出来ている事が分かる。反応時の車間距離40-60m間においては，衝突，回避のサンプルが混在しており，車間距離以外の異なる要因が影響していると考えられる。

(2) 事故の規模に関する分析

前節で用いた仮想停止車間距離について，事故発生時の走行条件から定量的にモデル分析を行う。ここで，前述の通り，多重衝突事故を議論する際には後続車への事故被害の波及について着目すべきであるため，ここでは前方車の事故規模が後続車の事故規模にどのように影響を与えるかにも着目して分析を行った。分析は重回帰分析を適用しており，非説明変数として仮想停止車間距離，説明変数として，前方車に関しては前方車反応時の車間距離・反応時間・反応時の速度・反応時の減速度，後続車については上記説明変数に加え前方追従車の仮想停止距離の推定値（表－5で求めた回帰式に観測値を投入して算出したもの）を投入している。前方車に関する結果を表－5，後続車に関する結果を表－6に示している。

表－5より，前方車反応時の車間距離が小さいほど，反応時の減速度が小さいほど，反応時間が遅いほど，反応時の速度が大きいほど，仮想停止車間距離が小さくなり，つまり事故の規模は大きくなることが分かる。表－6からは前方車の仮想停止車間距離が統計的に有意に後続車の仮想停止車間距離に影響を与えていることがわかる。前方の衝突の程度が後続にどのように後続に波及するか定量的に示しているが，この関係からさらに後続車への影響を推察することも可能である。これらの点については今後の課題としたい。

(3) まとめ

多重事故実験結果に関する基礎集計から，2台目の衝突を防止する事で，3台目の衝突も高い確率で回避でき

表－5 前方車の仮想停止車間距離の分析結果

調整済み R2 乗	0.820	
従属変数: 前・仮想停止車間距離(m)	パラメータ	t値
前・前方車反応時の車頭距離(m)	0.863	20.530
前・反応時の速度(km/h)	-2.023	-12.609
前・反応時間(s)	-19.777	-15.843
前・反応時減速度(m/s ²)	-5.591	-8.871
(定数)	130.578	8.947

表－6 後方車の仮想停止車間距離の分析結果

調整済み R2 乗	0.729	
従属変数: 後・仮想停止車間距離(m)	パラメータ	t値
後・前方車反応時の車間距離(m)	0.648	13.764
後・反応時の速度(km/h)	-1.314	-9.674
後・反応時間(s)	-13.988	-12.003
後・反応時減速度(m/s ²)	-4.637	-5.780
前・仮想停止車間距離推定値(m)	0.356	5.572
(定数)	84.057	7.111

ることが示唆された。また，前方車の起こした事故の規模が後方車の事故に有意に影響を与えていることを示した。今後は基礎集計で得られた傾向（後方車も衝突し，回避した場合，後方車も回避する確率が高いといった傾向など）との関係も考察しながら，さらに多数の車両が関与した衝突事故について分析を行い，多重衝突事故のメカニズムを明らかにしたい。

5. 終わりに

本研究では，複数被験者が同時に同じ道路空間を走行できるDSを活用し多重衝突事故を模擬した走行実験を行い，多重衝突事故時の運転挙動データを多数取得した。それら取得データから衝突規模に影響を与える因子を定量的に分析し，さらに前方から後続へとその被害の程度が波及することを簡易なモデルではあるが示した。今後は複数車両間の相互作用をより詳細に考慮した分析や多重衝突事故の防止対策の検討などを行う必要がある。

参考文献

- 1) 平田輝満，馬原崇史，屋井鉄雄：MOVIC-T4を活用した都市内地下道路の走行安全性分析，土木計画学研究・論文集，Vol.23[4]，pp.797-804，2006.
- 2) Terumitsu HIRATA, Tetsuo YAI and Tsuyoshi TAKAGAWA: Development of Driving Simulation System MOVIC-T4 and its Validation using Field Driving Data., Tsinghua Science and Technology, Vol.12, No.2, pp.141-150, 2007.
- 3) 井上博司，尾上一馬，飯田祐三：シミュレーションによる多重追突の生起メカニズム分析とその対策に関する研究，第37回土木計画学シンポジウム論文集，2001. 5
- 4) 山口晋弘，平田輝満，屋井鉄雄：都市内地下道路における多重衝突事故の発生メカニズムに関するVR研究 第34回土木計画学研究・講演集，Vol.34,CD-ROM, 2006