

# 共分散構造分析を用いた 追突事故発生要因に関する基礎研究

仙田 昂之<sup>1</sup>・山崎 浩気<sup>2</sup>・宇野 伸宏<sup>3</sup>・中村 俊之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:senda@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:yamazaki@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学経営管理大学院 (〒606-8317 京都府京都市左京区吉田本町)  
E-mail:uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail:nakamura@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究では阪神高速道路 3 号神戸線を対象として、追突事故発生に影響を与える要因を把握するための分析を行った。四つの時間帯を設定し、共分散構造分析を行うことで道路線形・構造が交通状況に影響を及ぼすことを考慮した。追突事故率を被説明変数とし、道路線形・構造要因と交通状況要因を説明変数としてパス図の作成および分析を行った。その結果、昼・夜・深夜時間帯において道路線形・構造要因から交通状況要因への有意な影響が認められた。特に昼・夜時間帯では区間における最大曲率が大きくなるほど、当該区間において渋滞発生比率や速度分散指標の増大が誘引され、交通流が不安定になり追突事故発生に至る関係の導いた。また昼・夜時間帯と深夜時間帯とで道路線形・構造要因から追突事故率への影響が異なることが分かり、運転支援情報を時間帯毎の事故特徴に応じて変更する必要性が示唆された。

**Key Words:** covariance structure model, rear-end accident, inner-city expressway

## 1. はじめに

高速道路は都市内部および都市間に交通網が張り巡らされており、人や物の円滑な移動を支えている。そのため、高速道路上で発生する交通事故は人的・物的損失のみならず、復旧に当たって交通流が遮断されることにより大きな経済的・社会的損失を発生させる。そのため高速道路上での交通事故を分析し、発生原因となる現象を把握して事故対策を行うことで交通事故を削減することが必要である。交通事故分析はこれまでも数多くなされてきており、三浦ら<sup>1)</sup>はサグ部における追突事故の発生構造に関する研究を行った。サグ部上下流側の速度の違いに着目し、二地点の速度を車両検知器データから取得し分析を行うことで、下流側にある上り勾配における周囲の車両の速度低下に反応が遅れた車両が追突事故を起こしているという構造を解明した。また赤羽<sup>2)</sup>らはトンネル入り口付近での追突事故が、下流側のトンネル入り口部で急激な速度低下の発生、その減速波の伝播により発生することを明らかにした。また、兵頭ら<sup>3)</sup>は重回帰分析により、高速道路における交通事故は交通状況要

因、道路線形・構造要因、環境要因に強く影響を受けることを示している。多くの研究ではこれらの要因が交通事故発生に与える影響について分析することで、事故対策・予防策を考案する際の指針となっている。

このような路線ごとの分析結果を基にした安全対策は、科学技術の進歩もあり、事故発生件数の削減効果へと一定程度寄与している。しかしながら交通事故は依然として日々発生しており、より交通事故削減につながる交通安全対策を行うことが必要とされている。原因の一つとして、これらの既存研究では各要因が事故発生に与える影響についてのみ分析しており、要因間に存在する相互関係は考慮されていないことがあげられる。これを考慮した研究として藤井ら<sup>4)</sup>は、交通状況要因は道路線形・構造要因から影響を受けるという構造を考慮するために共分散構造モデルを用いた分析を行い、都市間高速道路での追突事故発生時に両者の間に存在する相互影響を分析した。ただし、都市内高速道路と都市間高速道路では、立地・走行速度や利用者層の観点で道路線形・構造や交通状況が異なることから、事故発生に至る構造が異なることが考えられる。

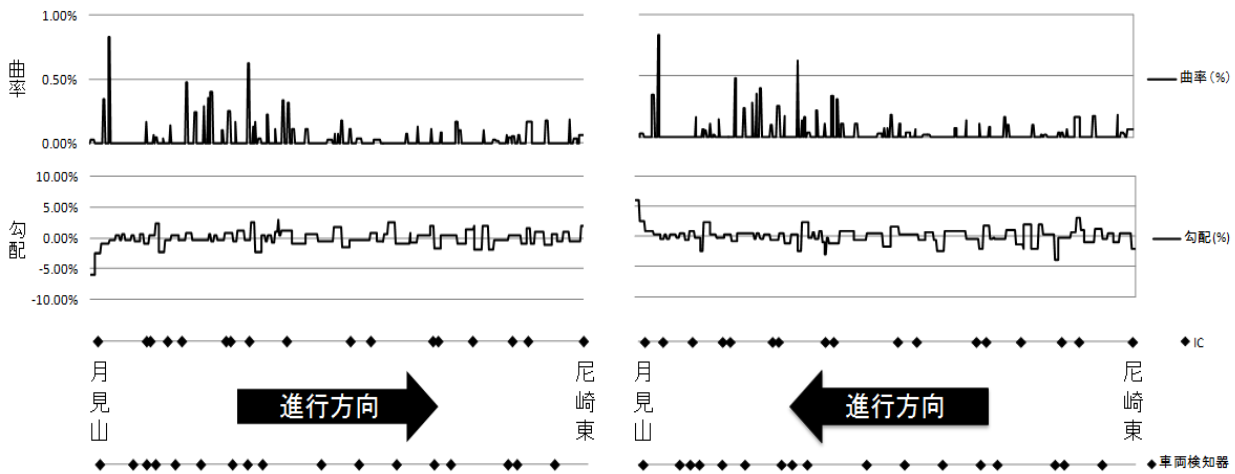


図 1 神戸線線形・構造図 (左：上り線, 右：下り線)

そこで本研究では、分析対象路線である都市内高速道路において同様の手法の利用可能性を検証し、事故発生時の特徴・構造を明らかにすることで更なる交通事故発生防止に役立てることを目的とする。最終的には、都市内高速道路における事故発生要因とその構造に対応した情報提供を行うことによる追突事故抑制の可能性について論説する。

## 2. 分析対象の設定と利用データ

### (1) 分析対象路線

本稿における分析は阪神高速 3 号神戸線 (以下神戸線) の 7.0 キロポスト (以下 KP) (尼崎東 IC) ~ 39.6KP (月見山 IC) 間の上下線、各々約 32.6km となる。神戸線の勾配および曲率、IC、車両検知器設置位置を図 1 に示す。図 1 より神戸線は縦断線形が緩やかであり、平面線形が厳しい地点が多く、都市内高速道路の代表的な特徴を持つことから、今回分析対象とした。

### (2) 分析対象データ

分析対象期間は 2011 年 4 月 1 日 ~ 2013 年 9 月 30 日であり、車両検知器データ、事故日報データならびに道路線形・構造データを用いた。

#### a) 車両検知器データ

車両検知器データは、図に示すように対象区間内に上下線各 17 箇所に設置されている車両検知器により観測されるデータである。今回の分析では総交通量・高車交通量や平均走行速度データを車線別の 5 分間集計値として利用する。

#### b) 事故日報データ

事故日報データには交通事故の発生日時、交通事故の種類、場所 KP が記載されている。分析では事故発生場

所 KP を含む勢力圏へ事故発生件数の割り当てを行った。

### c) 道路線形・構造データ

道路線形・構造データは神戸線の土木建築施設図から勾配、曲線半径・曲率、分合流の有無を 50m ごとに電子データ化したものである。勾配は上りを正値、下りを負値とし、百分率でデータ化した。分合流の有無に関しては、区間に分合流を含む場合は 1、含まない場合は 0 とした。

## 3. 共分散構造モデルの構築

### (1) 分析の前提

#### a) 事故類型

分析対象期間内における神戸線で発生した交通事故の内訳は、追突型 1241 件、車両接触型 286 件、施設接触型 232 件、その他 121 件となっており、神戸線では追突型事故の発生件数が全体の約 66% を占めている。

事故類型毎に事故発生時における各要因の影響は異なることが考えられるため、本研究では神戸線上で特に事故発生件数の多い追突事故を対象を絞って分析を行った。

分析では区間  $i$  内における追突事故発生件数  $A_i$  [件] を総走行台数  $Q_i$  [台] と区間距離  $L_i$  [km] で除した値である追突事故率  $R_i$  [件/億台 km] を算出し (式 1) 被説明変数とした。

$$R_i = \frac{A_i}{Q_i \times L_i} \times 10^8 \quad (1)$$

車両検知器ごとに勢力圏を設定することによって路線を 34 の区間に分けて分析を行った。勢力圏は隣接する車両検知器の間を境界として設定しており、分析に用いた各変数は各区間内での集計値となっている。

b) 交通量と追突事故率

図2は時間別の交通量（左軸）と追突事故率（右軸）である。交通量は6時台で交通量が急激に増加していることが分かる。12, 13時頃に一度交通量は低下するが17時台にピークを迎え減少に転じることが分かる。

追突事故率は、6時台で急激に増加していることが分かる。やがて9時台、14時台で一度小さくなり、15時台にピークを迎える。そして17時台を境に追突事故率は急激に減少傾向に転じることが見て取れる。

c) 時間帯分け

既に述べたように、交通事故の発生には交通状況が影響を及ぼすことがわかっている。また図2より交通量・追突事故率は時間毎に異なることが分かる。さらに時間帯によって高速道路の利用者層が異なることから、交通状況も時間帯によって異なることが考えられる。そこで今回共分散構造モデルを構築するに当たって、交通状況の違いによる影響を考慮するために四つの時間帯に分割して分析を行った。時間毎の交通状況や事故発生件数、事故率を基にして、朝時間帯(6:00~10:00)、昼時間帯(10:00~17:00)、夜時間帯(17:00~22:00)、深夜時間帯(22:00~翌6:00)の四つの時間帯とした。

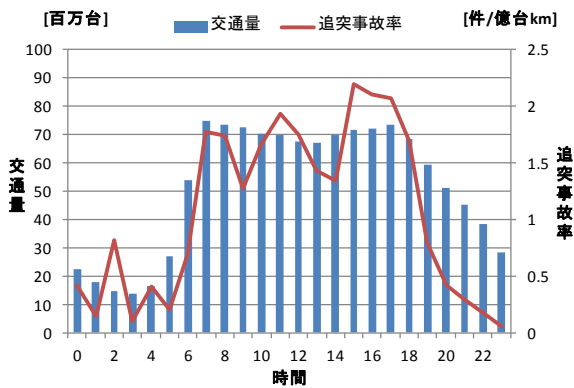


図2 時間別の交通量と追突事故率

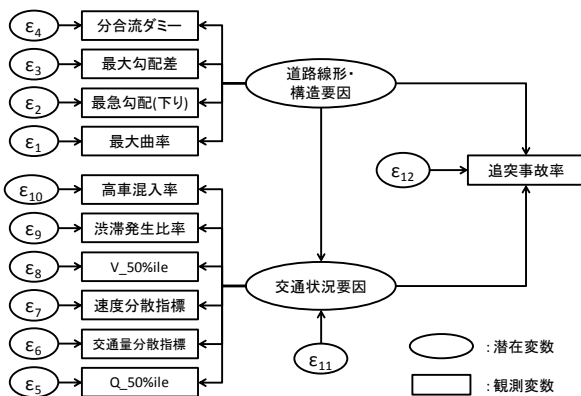


図3 共分散構造分析・パス図

(2) モデルの構築

共分散構造分析は、存在していると考えられる観測されない“潜在変数”を設定し、観測可能な「観測変数」である各要因がこの潜在変数から影響を受けていると仮定する。そして潜在変数間あるいは潜在変数と観測変数間をパスと呼ばれる矢印を描くことで結び付け、モデルを構築する分析手法である。そのため柔軟なモデル構築が可能である。分析では潜在変数として“道路線形・構造要因”と“交通状況要因”の二つを設定し、“交通状況要因”が“道路線形・構造要因”から影響を受けるかを検証するため、両者の間にパスを描くことでこの関係をモデルとして表した（図3）。

各潜在変数に関係すると予想される観測変数を説明変数とし、その定義を表1に示す。また図3中では各変数に対する誤差項をεであらわしている。

本モデルは因子分析モデルにより、観測変数が潜在変数に影響を与えているのかを明らかにし、構造方程式モデルにより潜在変数間の相互関係、そして重回帰モデルにより各潜在変数が追突事故率に与える影響について分析するモデルとなっている。各潜在変数間および潜在変数と観測変数間の影響の大小は描かれているパスの係数から読み取ることができる。

分析を行うにあたり、独立変数となっている潜在変数の“道路線形・構造要因”の分散を1に固定して推定の基準とすることで、結果の出力を行った。

4. 分析結果および考察

(1) 分析結果

図3で仮定したパス構造に対して共分散構造分析を行ったところ、表2のように結果が推定された。各時間帯において有意確率が空欄になっている変数は、推定の際の基準として設定した値である。

ここで朝時間帯に関しては最適解を求めることができなかった。そのため分析結果に関しては他の三つの時間帯にて考察を行う。

表1 説明変数

要因	変数名	定義
道路線形・構造要因	分合流ダミー	勢力圏内での分合流の有無
	最大勾配差	勢力圏内でのサグ部のうち勾配の変化が最も急な地点の勾配の変化量
	最急勾配(下り)	勢力圏内での最も急な下り坂の勾配
	最大曲率	勢力圏内での最も大きな値の曲率
	高車混入率	勢力圏内での高車交通量を総交通量で除したもの
交通状況要因	渋滞発生比率	勢力圏内での30[km/h]以下の速度が発生した時の交通量を総交通量で除したもの
	V_50%ile	勢力圏内での5分間平均速度の50パーセンタイル値
	速度分散指標	勢力圏内での5分間平均速度の標準偏差
	交通量分散指標	勢力圏内での5分間交通量の標準偏差
	Q_50%ile	勢力圏内での5分間交通量の50パーセンタイル値

表 2 時間帯別のモデル推定結果

		朝				昼			
χ <sup>2</sup> 乗		110.169				92.156			
GFI		0.641				0.665			
RMSEA		0.222				0.190			
		推定値	標準誤差	標準化係数	有意確率	推定値	標準誤差	標準化係数	有意確率
分合流ダミー	<--- 道路線形・構造要因	0.043	0.080	0.092		-0.110	0.101	-0.234	
最大勾配差	<--- 道路線形・構造要因	-0.002	0.004	-0.181		-0.002	0.003	-0.117	
最急勾配下り	<--- 道路線形・構造要因	-0.002	0.004	-0.181		0.006	0.003	0.444	**
最大曲率	<--- 道路線形・構造要因	0.000	0.001	0.139		0.001	0.001	0.666	***
高車混入率	<--- 交通状況要因	-0.176	0.172	-0.188		0.204	0.082	0.425	**
渋滞発生比率	<--- 交通状況要因	1.000		0.699	***	1.000		0.938	***
V 50%ile	<--- 交通状況要因	63.951	47.756	0.247		-24.139	29.074	-0.150	
速度分散指標	<--- 交通状況要因	89.590	37.193	0.941	**	45.151	8.216	0.797	***
交通量分散指標	<--- 交通状況要因	-2.953	23.400	-0.023		10.277	9.214	0.200	
Q 50%ile	<--- 交通状況要因	-79.201	69.673	-0.209		52.965	38.602	0.245	
交通状況要因	<--- 道路線形・構造要因	0.040	0.065	0.855		0.047	0.023	0.510	**
追突事故率	<--- 交通状況要因	-5489.703	66511.991	-5.364		655.098	190.444	0.904	***
追突事故率	<--- 道路線形・構造要因	316.088	3142.852	6.599		-31.573	18.899	-0.471	*

		夜				深夜			
χ <sup>2</sup> 乗		89.590				49.814			
GFI		0.707				0.826			
RMSEA		0.185				0.075			
		推定値	標準誤差	標準化係数	有意確率	推定値	標準誤差	標準化係数	有意確率
分合流ダミー	<--- 道路線形・構造要因	-0.091	0.100	-0.195		-0.116	0.101	-0.247	
最大勾配差	<--- 道路線形・構造要因	-0.002	0.003	-0.170		0.000	0.003	-0.021	
最急勾配下り	<--- 道路線形・構造要因	0.005	0.003	0.430	**	0.007	0.003	0.595	**
最大曲率	<--- 道路線形・構造要因	0.001	0.001	0.674	***	0.001	0.000	0.445	**
高車混入率	<--- 交通状況要因	0.226	0.087	0.445	*	-0.005	0.002	-0.444	**
渋滞発生比率	<--- 交通状況要因	1.000		0.904	***	0.000	0.000	-0.178	
V 50%ile	<--- 交通状況要因	-27.233	34.047	-0.146		1.000		0.922	***
速度分散指標	<--- 交通状況要因	66.490	11.492	0.836	***	0.150	0.081	0.337	*
交通量分散指標	<--- 交通状況要因	10.446	11.476	0.166		-0.211	0.060	-0.636	***
Q 50%ile	<--- 交通状況要因	68.596	42.991	0.286		-0.506	0.161	-0.569	***
交通状況要因	<--- 道路線形・構造要因	0.041	0.018	0.579	**	-4.904	1.935	-0.686	**
追突事故率	<--- 交通状況要因	698.101	228.319	0.970	***	0.830	0.894	0.462	
追突事故率	<--- 道路線形・構造要因	-26.127	17.088	-0.515		6.951	6.965	0.541	
		判定: ***1%有意				**5%有意 *10%有意			

また表 2 より昼時間帯と夜時間帯では推定値の符号、標準化係数の大小そして推定値において有意となる変数が類似していることから、この二つの時間帯における結果をまとめて考察していく。

またモデルのあてはまりの良さを表す指標として GFI 値と RMSEA 値を算出している。各値については一般に、GFI 値に関しては 1 に近いほど説明力のあるモデル、RMSEA 値に関しては 0.05 以下のときにモデルとしての当てはまりが良いとされている。

### (2) 朝時間帯における考察

朝時間帯において最適解が求まらなかった理由として、分析結果を見ると各潜在変数から追突事故率へのパス係数の有意確率が 1 に近い値をとっていることが挙げられる。つまり朝時間帯に関しては共分散構造分析における「交通状況要因は道路線形・構造要因から影響を受けている」という仮定が成立していないことが考えられる。これは、今回考慮できていない他の要因による潜在変数が存在し、「追突事故率」に影響を及ぼしている可能性がある。

### (3) 昼・夜時間帯における分析結果および考察

昼・夜時間帯に関しては GFI 値と RMSEA 値共に基準を満たしていないため、あまり当てはまりの良いモデル、

説明力のあるモデルとはいえないが、推定値の大きさ、符号から読み取れることがいくつかある。

まず因子分析モデルについて見ていく。有意確率・標準化係数、推定値の符号に着目すると、「交通状況要因」が大きくなると、「渋滞の発生、走行車両および高車の割合の増加、速度・交通量にばらつきが生じ、走行速度が低下する」と言える。このことから“交通状況要因”という潜在変数は「交通流の不安定性」に影響を与える変数であると言える。

次に“道路線形・構造要因”についてであるが、同様に見ていくと、“道路線形・構造要因”が大きくなると、「曲率の大きな急カーブがあり、勾配やサグが小さく平坦で、分合流も少なくなる」と言える。このことより“道路線形・構造要因”は「平面線形」に影響を与える変数であると言える。

構造方程式モデルに着目すると、“道路線形・構造要因”から“交通状況要因”へのパス係数が 5%有意で正値で推定されている。潜在変数の解釈を基にするとこれは、「平面線形が厳しくなると、交通流が不安定になる」と言い表すことができ、両者の間に相互関係が存在することが分かる。

重回帰モデルでは、“交通状況要因”からのパス係数は 1%有意を満たしているが、“道路線形・構造要因”からのパス係数では有意確率が大きくなっている。標準化係

数の値と符号に着目すると、「交通流が不安定」になり、「平面線形が緩やかで、縦断線形や構造が厳しい」区間が追突事故発生へと寄与することがわかる。「道路線形・構造要因」から「追突事故率」へのパス係数が小さいことを考慮すると、「道路線形・構造要因」は「交通状況要因」へ影響を与えることにより間接的に追突事故発生に影響を及ぼすことが分かった。これより昼・夜時間帯では、「道路線形・構造要因」である急カーブの存在により渋滞が発生し、「交通流が不安定」になることで追突事故が発生している可能性がある（図4）。

図では、各潜在変数の解釈と、影響を与える要因、追突事故発生に至る構造を示している。有意な関係性がある観測変数と潜在変数に関して、濃い色で表現している。

#### (4) 深夜時間帯における分析結果および考察

深夜時間帯のモデルの適合度としては GFI 値と RMSEA 値共に基準にはわずかに満たないものの、ある程度説明力のあるモデルであるということが出来る。昼・夜時間帯と同様に考察を行う。

因子分析モデルに関しては、有意確率の大小は異なるものの「道路線形・構造要因」は昼・夜時間帯と同様に「平面線形」に影響を与える変数であると言える。

一方「交通状況要因」に関しては昼・夜時間帯と異なり、「交通状況要因」が大きくなると「走行車両および高車の割合が減少し、渋滞が解消し交通量も安定し、速度が速い車両と遅い車両が混在しながら全体として流動性を持つ」と言える。このことから深夜時間帯において「交通状況要因」は「交通流の安定性」に影響を与える変数であると言える。

構造方程式モデルに着目すると、「道路線形・構造要因」から「交通状況要因」へのパス係数が 5% 有意で負値で推定されている。符号に注意するとこれは昼・夜時間帯と同様に、「平面線形が厳しくなると、交通流が不安定になる」と言い表すことができ、両者の間に相互関係が存在することが分かる。

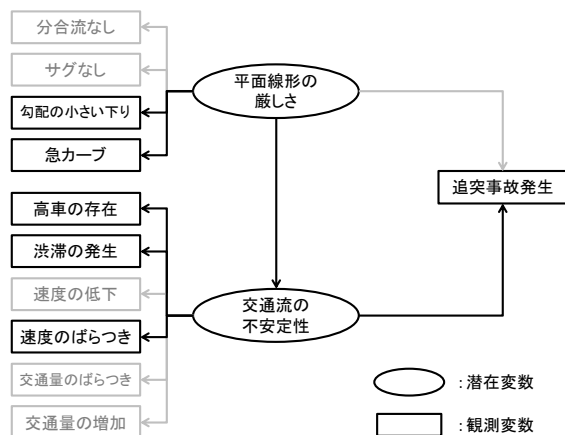


図4 昼・夜時間帯における追突事故発生要因間の構造

重回帰モデルについて見ると、パス係数の符号から「交通流が安定」になり、「平面線形が厳しい」区間が追突事故発生へと寄与することがわかる。標準化係数の値に着目して見ると各潜在変数が「追突事故率」へ与える影響の大きさにはあまり差がないことから、「追突事故率」に対して、「道路線形・構造要因」の寄与の方が大きい場合と「交通状況要因」の寄与の方が大きい場合の二通りの構造が考えられる。

前者の場合（図5）、「道路線形・構造要因」が「交通状況要因」に寄与することによる間接的な影響が比較的小さく追突事故発生に直接影響を与えていることが分かる。つまり「平面線形の厳しさ」により追突事故が発生していることになる。これは、深夜時間帯では交通量が少なく周囲の走行車からはあまり影響を受けず、また周囲も暗く視認性が低いことから急カーブの存在が追突事故発生につながる事が考えられる。

一方後者の場合（図6）、「道路線形・構造要因」が「交通状況要因」に寄与することによる間接的な影響が比較的大きく、「縦断線形や構造の厳しさ」により「交通流が安定」することで追突事故が発生していることになる。これは「急カーブがなく、勾配やサグが大きく、分合流を含む」区間において「交通量が少なく安定しており、

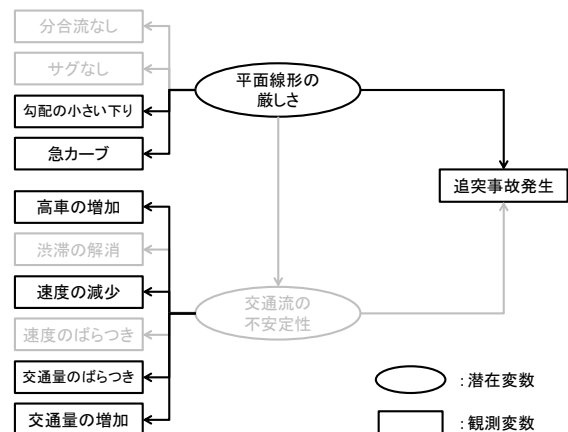


図5 深夜時間帯における追突事故発生要因間の構造 1

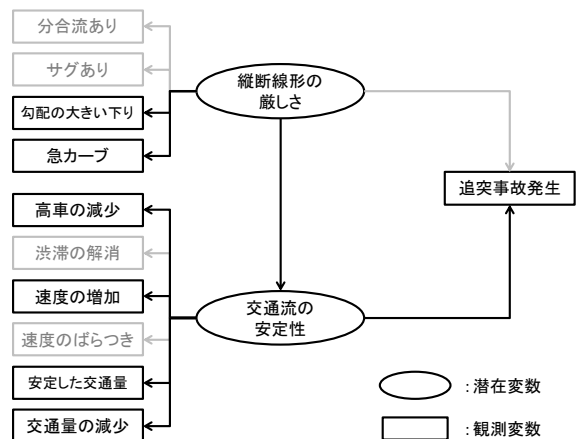


図6 深夜時間帯における追突事故発生要因間の構造 2

速度が増加して低速車と高速車が混在する」ことにより追突事故が発生していると考えられる。

#### (5) 今後の事故対策法への考察

昼・夜時間帯に関しては、事故発生要因となっているのは「交通流の不安定性」であり、追突事故発生につながる構造としては図4の関係性が顕著である。そこで昼・夜時間帯においては急カーブに差し掛かった際の急ブレーキを抑制することができれば、速度のばらつきや渋滞の発生を抑えることができると考えられる。そのため低速車の存在など周囲の走行車の走行速度に関する情報を早急に検知・提供することによって、適切な速度調整を促し、追突事故発生を予防する対策が考えられる。

一方、深夜時間帯に関しては、道路線形・構造に合わせて別々の情報を提供する必要がある。すなわち急カーブが存在するような区間においては、事前に運転者に急カーブの存在を伝え、速度調節やハンドル操作を適切に行えるような情報提供を行うことが対策として挙げられる。一方下り勾配が存在するような区間においては、下りによる車両速度の増加に対する注意や低速車の存在など周囲の走行車の走行速度に関する情報提供を行うことで追突事故の発生を抑えることができると考えられる。

### 5. まとめと今後の課題

今回の分析では追突事故発生に影響を与える要因として大きく二つの要因を想定し、都市間高速道路で行われた先行研究と同じ、「道路線形・構造要因」が「交通状況要因」に影響を与える構造を仮定した共分散構造分析結果について考察した。交通状況の違いを考慮して一日を四つの時間帯に分割して分析を行った結果、朝時間帯では想定した関係が見られなかったものの、他の時間帯では「道路線形・構造要因」からの有意な影響が認められた。また各要因に大きな影響を与える変数は時間帯によって異なること、事故発生を引き起こす構造も異なることが分かった。そのため追突事故発生防止に向けた対策を行う際にこれらの時間帯毎に異なった対策・情報提供を行うことによって、より大きな効果が得られる可能性が示された。

一方で、朝時間帯においてモデル推定が行えなかったこと、昼・夜時間帯のモデルの適合度が低いこと、ならびに深夜時間帯における追突事故を誘発する構造を断定しきれないことなどの問題点があげられる。その原因として、時間帯の分割の仕方があげられる。今回は時間帯を四つに分けることによって交通状況の違いを表しているが、実際の交通状況はさらに細かな時間毎に変動していることが考えられる。そこでモデルの推定精度向上のために、時間帯の更なる細分化を行う必要がある。さらに、交通状況の違いは平休日や季節により生じることが考えられるため、今後のモデル構築の際には考慮していきたい。また今回の分析では事故発生に影響を及ぼす要因として「道路線形・構造要因」と「交通状況要因」との二つを考慮しているが、このほかにも「環境要因」が影響していることが知られているため、今後モデルにおいて考慮することでより実際の事故発生状況に近いモデルの構築が可能になると考えられる。

**謝辞：**本研究は、「阪神高速道路における交通安全性評価、情報提供に関する共同研究」にて得られた成果であり、データをご提供いただいた(一財)阪神高速道路技術センターに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 三浦久, 洪性俊, 田中伸治, 桑原雅夫: 首都高速道路における追突事故リスク予測に関するミクロ的分析, 土木学会論文集, vol.68, No.5, pp.43-48, 2012.
- 2) 赤羽弘和, 長谷川潤, 森田緯之: 都市高速道路における追突時事故発生状況の感知器データによる分析, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.20, pp.41-44, 2000.
- 3) 吉井稔雄, 兵頭知, 倉内慎也: 都市内高速道路における事故発生リスク要因分析, 第31回交通工学研究発表会論文集, pp.93-98, 2010
- 4) 藤井大地, 宇野伸宏, 嶋本寛, 塩見康博: 都市間高速道路の追突事故影響要因に関する統計的分析, 第31回交通工学研究発表会, pp.87-91, 2011.

## A FUNDAMENTAL ANALYSIS OF REAR-END COLLISION INDUCTION FACTORS ON INNER-CITY EXPRESSWAY BASED ON COVARIANCE STRUCTURE ANALYSIS

Takayuki SENDA, Hiroki YAMAZAKI, Nobuhiro UNO, Toshiyuki NAKAMURA