

ショックウェーブを考慮した事故リスク分析

兵頭 知¹・吉井 稔雄²

¹学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
E-mail: hyodo.satoshi.07@cee.ehime-u.ac.jp

²正会員 愛媛大学教授 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)
E-mail: yoshii@cee.ehime-u.ac.jp

本研究では、ショックウェーブの伝播と事故発生の危険性との関連に着目し、車両検知器から得られる定点交通流観測データを用いて判別された交通流状態と事故発生との関係を分析した。具体的には、対象区間周辺・直前の交通状況からショックウェーブ速度を推定し、推定されたショックウェーブ速度と事故発生リスクとの関係を分析した。具体的には、阪神高速道路ネットワーク11号池田線を対象に、2006年1月1日から2008年12月31日の3年間のデータを用いて事故発生リスク分析を行った。

Key Words : traffic flow, shock wave, urban expressway, accident risk

1. はじめに

(1) 研究背景・目的

交通事故に関わる多大な社会的損失のため、交通流の安全性の向上は我が国において重要な課題となっている。近年、交通事故発生件数は、減少傾向にはあるものの、平成24年で60万件を超える事故が発生しており¹⁾、また死者数については逡増の傾向を示しており交通事故の削減に向けた努力が求められている。そこで、有効な交通安全対策を実施するためには、交通事故発生に影響を与える事故要因を把握することが重要であると言える。

このような背景の下、これまで交通事故要因に関して多数の分析がなされている。代表的な交通事故要因としては、縦断勾配、曲線半径や分合流部区間といった道路幾何構造要因、天候等の環境要因、渋滞／非渋滞等の交通流要因、あるいはドライバー特性による人的要因の4つが挙げられる。特に、高速道路本線上の事故に関しては、交通流要因が、事故発生に大きな影響を与えることが知られている。例えば、交通密度の高い渋滞流中において発生リスクが高いとの報告²⁾がされている。この他にも、交通状態量と交通事故との関係について、これまでいくつかの研究例が見受けられる。しかしながら、これらは、基本的に対象地点および一時点の交通状態量のみを用いた分析に留まっており、時間的・空間的な交通流状態の遷移について考慮されていないという問題点が残されている。そのため、例えば自由流から渋滞流へ遷移する場合すなわち、高速走行してきた車が突然渋滞車列に遭遇する際に想定される事故危険性を分析するには

至っていない。

そこで、本研究では交通集中渋滞の延伸・縮小時の交通流状態、特に渋滞末尾に着目し、交通流状態別に事故発生リスクを検討した。具体的には、交通流状態と事故発生との関係を把握するため、観測から得られた交通量-密度相関から非渋滞流、渋滞末尾および渋滞内の3種類の状態に分類し、交通流状態別事故発生リスクを算定した。

(2) 本研究の位置づけ

本節では、交通流状態が事故発生に与える影響に関する研究の概観と本研究の位置づけについて述べる。交通事故の危険性と渋滞／非渋滞の関係を示した研究としては、井上³⁾は、阪神高速道路を対象とした分析を行い、2台以上が絡む車両相互の事故は渋滞時に発生しやすく、単独事故は非渋滞時に発生しやすいこと、さらにその合計では、渋滞時が非渋滞時に比べて交通事故が発生しやすいことを示している。さらに、交通事故リスクと交通状態量の関係を示した研究として、交通量と交通容量にて示される混雑度(v/c)と事故リスクとの関係に関する研究が様々な研究者によって報告されている。例えば、Frantzeskakis³⁾は、アテネ近郊の4車線の都市間高速道路を対象に、事故率(件/台・km)と路線の混雑度(v/c)の関係を分析し、人身事故率が、混雑度(v/c)が低い領域と高い領域で高くなる傾向を有すること、物損事故を含む全事故率が混雑度0.65以上で増加する傾向を有することを示した。また、Zhou⁴⁾は、v/cの増加に伴って重大事故発生リスクが低減する傾向にあることを示した。彦坂ら

⁹⁾は、東名高速道路三ヶ日IC~小牧ICを対象として、車両検知器による15分間交通流率を交通容量で除した値を指標に用いた分析を行い、同指標値0.6付近で事故発生リスクが最小になるとの結果を得ている。

また、交通流要因に加え、前記の他の要因、道路構造要因、環境要因を同時に考慮した多変量解析手法を用いた事故要因分析についても進められている。複数の交通事故要因を考慮した研究として、Golobら⁶⁾は、30秒単位の検知器データと事故データを組み合わせ、路面状態（湿潤/乾燥）、明るさ（昼間/夜間）別に交通流状態と事故発生リスクとの関係を分析し、平均速度が事故発生リスクに影響を与えること、車両接触事故については、湿潤状態において高い事故発生リスクを有すること、追突事故については昼間の乾燥状態において事故発生リスクが高くなることなどを示した。また、藤井ら⁷⁾は、都市間高速道路を対象に、追突事故率と道路線形、構造要因ならびに交通状況要因の関係を統計的に分析し、時間帯によって追突事故率に影響を及ぼす要因が異なることなどを示した。また、吉井ら⁸⁾は、交通流要因、道路構造要因および環境要因の3要因を考慮した多変量解析を行い、交通流要因が追突事故ならびに車両接触事故発生リスクに対して大きな影響を及ぼすことを示した。これらの研究を通して、交通流状態の差異が事故発生リスクに影響を与えることが示されている。以上で示した研究においては交通流要因として、当該観測地点、観測周期内における交通状態量のみを対象としている。

一方で、観測時間内における交通流の空間的および時間的な遷移は、事故の発生に影響を与える可能性があることをいくつかの研究から指摘されている。例えば、大口ら⁹⁾は、東名高速道路綾瀬バス停付近を対象に、交通流を非拘束状態（自由流）、臨界状態、渋滞状態の3状態に分類し、交通流状態別事故率を検討している。その結果、臨界状態、すなわち自由流から渋滞流あるいは渋滞流から自由流への遷移過程で出現する高密度な非渋滞交通流状態において事故発生リスクが高まることを指摘している。また、三浦ら¹⁰⁾は個別車両の情報が取得可能なパルスデータを用い、事故発生直前の交通流を分析しており、サグ部で発生するショックウェーブの伝搬が追突事故の原因となっていることなどを示している。またXingら¹¹⁾は、統計データおよびビデオ調査から得られた車両挙動より、渋滞と事故との関係性を分析しており、渋滞末尾において重大事故のリスクが高まることなどを示している。以上の研究成果より、渋滞の延伸・縮小時の交通流状態、特に渋滞の末尾（衝撃波）の状況下では事故の潜在的危険性が高いことが考えられる。しかしながら、ショックウェーブの伝搬に着目した上で、交通流状態と事故発生リスクとの関係性に関して定量的な分析はなされていない。

そこで、本研究では交通流状態が時間的に遷移する状況、特に渋滞の延伸・縮小時の渋滞末尾に着目し、ショックウェーブ速度と事故発生リスクの関係を分析する。具体的には、阪神高速道路ネットワークを対象に、本線部の車両検知器における3年分の観測データを用いて、交通流状態が事故発生リスクに与える影響を分析する。

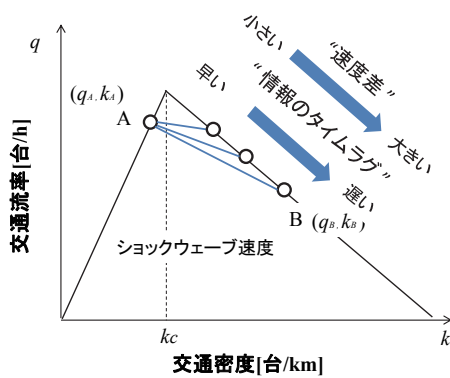
2. ショックウェーブ速度と事故リスク

本研究では、ショックウェーブ速度の違いが、事故発生リスクに影響を与えるものと考えられる。また、渋滞末尾のショックウェーブを対象として分析を行う。

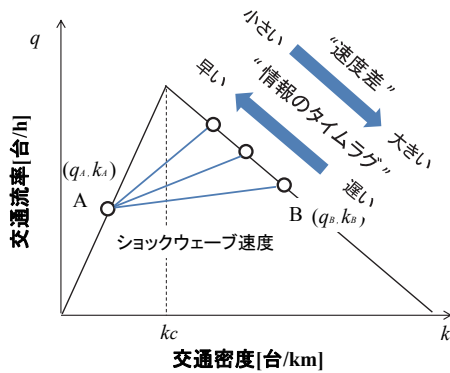
ここでは、ショックウェーブ速度の正負の違いにより、**図-1(a), (b)**には、延伸・縮小の各渋滞末尾の状況下において、想定される上流区間と下流区間の交通流状態を示す。なお、**図中**のAは上流側、Bは下流側の交通流状態として、それぞれの交通流率、交通密度を用いて表現される。上流と下流の速度差については、延伸時においては、ショックウェーブが速いほど、速度差が大きく、縮小時においては、ショックウェーブが遅いほど、速度差は大きくなる。一方で、渋滞に巻き込まれるドライバーの多くが事前に渋滞末尾位置に関する情報を得ていると考えられる。ここで、渋滞末尾位置情報を提供するためには、検知器等による交通観測データを加工するための時間が必要となる。加えて、情報を得たドライバーが現実に渋滞末尾に到達するまでには一定の時間を要する（以下では、両時間を合わせた時間を“情報のタイムラグ”と呼ぶ）。この情報のタイムラグの影響により、情報による渋滞末尾位置とドライバーが経験する渋滞末尾位置は必ずしも一致しない。また、情報による渋滞末尾位置と経験する渋滞末尾位置の乖離は情報のタイムラグとショックウェーブ速度の積に比例する。

本研究では、渋滞末尾における「自由流と渋滞流の速度差が大きくなれば事故リスクが高まる」、ならびに「情報による渋滞末尾位置と経験する渋滞末尾位置の乖離が大きくなれば事故リスク高まる」との仮説を推定する。

このとき、**図1**が示すように、渋滞延伸時においては、ショックウェーブ速度が増大するに従って、速度差ならびに渋滞末尾位置の乖離いずれも大きくなる。一方で、渋滞縮小時には渋滞末尾位置の乖離は大きくなるものの速度差は小さくなる。よって、上記の仮説の下では、渋滞延伸時の事故リスクは、ショックウェーブ速度の単調増加関数となるが、渋滞縮小時には必ずしも単調増加関数とはならないと考えられる。



(a) 延伸時



(b) 縮小時

図-1 交通密度と交通流率

3. 交通状況の概観

本章では、車両検知器から得られる交通流観測データを基に、分析対象道路区間の交通状況を概観する。

(1) 対象ネットワークの交通状況

図-2 に分析対象ネットワーク内の車線毎の交通密度と交通流率の相関を示す。同図に示すように、Q-K 平面上において2つの交通流状態すなわち自由流の領域と渋滞流の領域が確認できる。さらに、同図においては、以上2つの領域の間にいくつかのプロットが確認される。著者ら¹²⁾は、自由流、渋滞流の2相に加え、時間的・空間的に両交通流状態が混在する、この3つ目の交通流状態を混合流と命名している。

(2) 混合流領域について

上記で述べた混合流の出現状況としては、先行研究¹²⁾で示したように以下の2つが考えられる。1つは交通流状態の時間的偏りによって出現するもの（以下、「時間混合流」）例えば、渋滞延伸時のショックウェーブ伝搬によって、観測時間の前半部が自由流、一方、後半部は渋滞流などの状況が考えられる。もう一つは交通流状態の空間的偏りによって出現するもの（以下、「空間混合

流」）つまり、車線毎に交通状況が異なる状況下において出現することが想定される。

(3) 交通流状態と領域区分

本研究では、交通流観測データを用いて交通流状態を決定する。ここで用いるデータは5分間の交通流観測データである。ここでは、車線ごとに集計された交通流観測データから、各車線交通量を合計した全車線交通量と車線数を用いて1車線当たりの交通流率 Q [台/h] を算出し、車線平均速度と各車線交通量とを用いて調和平均した空間平均速度 V_s [km/h] を算出し、分析に用いる。なお、交通密度 K [台/km] については、1車線当たりの交通流率 Q [台/h] を空間平均速度 V_s [km/h] で除して算出される。図-3 に示す交通量-交通密度の関係 (Q-K 図) から、自由流領域 (図-3 中の「自由流」)、混合流領域 (図-3 中の「混合流」)、渋滞流領域 (図-3 中の「渋滞流」) の3つの領域に分類する。自由流領域は、平均速度 $V_s \geq 60$ [km/h] かつ交通密度 $K \leq 30$ [台/km] である交通流状態領域とする。渋滞流領域は平均速度 $V_s \leq 15$ [km/h] の領域または、交通密度 $K > 30$ [台/km] かつ $Q = 20K + 2400$ の直線の「上側」の領域とする。さらに自由流領域と渋滞流領域の内側の交通流状態領域を混合流領域とする。

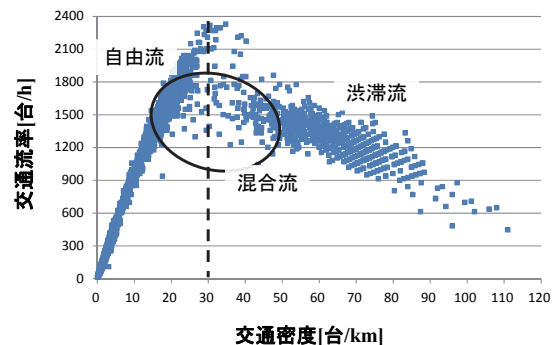


図-2 交通密度と交通流率(11号池田線上り6.5kp)

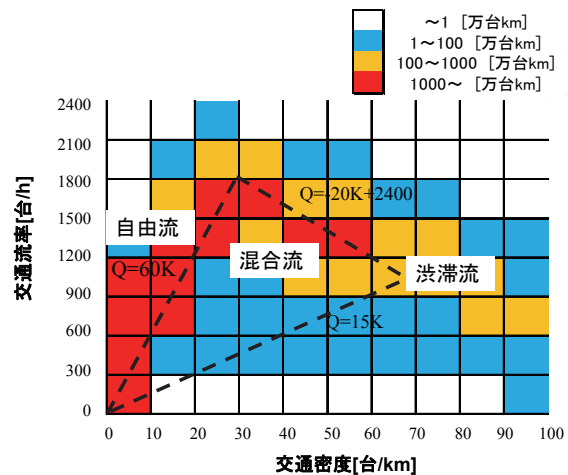


図-3 交通流状態領域別の総走行台キロ

(4) 渋滞末尾の判定について

ここでは、渋滞末尾を考慮するため、交通流状態については、当該地点の上流および一時点前の車両感知器データより時間・空間的な変動を総合的に勘案して判定される。すなわち、図-4 に示すように時空間に連続した交通状況から、当該区間と直前の時間帯および直近上流の地点との変化状況を用いて、当該地点の交通流状態の判定を行う。具体的には、交通状況として、i) 当該地点の交通流状態が自由流領域の場合（以下、“非渋滞流”）、ii) 当該地点の状態が混合流/渋滞流領域、直近上流の状態が自由流領域である場合あるいは、当該地点の状態が混合流/渋滞流領域、前時間帯の状態が自由流領域の場合を（以下、“渋滞末尾”）、iii) 前時間・直近上流および当該地点のすべての状態が混合流/渋滞流領域の場合（以下、“渋滞内”）の3種類に分類される。

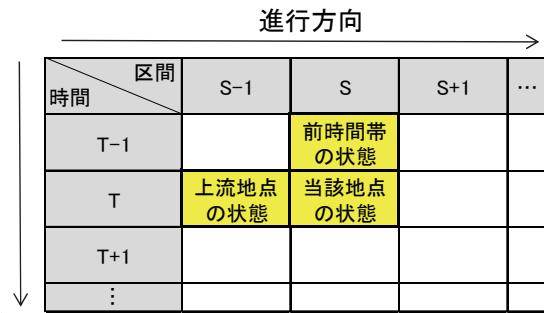


図-4 交通流状態判定のイメージ

表-1 交通流観測データ

日時	検知器番号	交通量 [台/5分]	オキュパンス [%]	平均速度 [km/h]
2006/1/1 0:00	1	26	2	77
2006/1/1 0:05	1	24	1	80
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表-2 道路構造データ

路線	系統番号	路線名	KP	車線数
3	1	11号池田線上り	0.9	2
3	1	11号池田線上り	1.0	2
3	1	11号池田線上り	1.1	2
3	1	11号池田線上り	1.2	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4. 分析概要

(1) 分析対象とするネットワーク

片側2車線区間である阪神高速池田線上り方面を分析対象道路区間とする。なお、同区間の延長は約20kmである。

(2) 分析に使用したデータ

対象とするデータは、2006年1月1日から2008年12月31日までの3年間分の以下3種類のデータである。

a) 交通流観測データ

交通流観測データは、分析対象ネットワーク内の約500m間隔に設置された15地点30個の車両検知器による5分間の観測集計値データを用いる。対象とした車両検知器はいずれの設置地点でもすべての車線に設置されている。データ項目は、交通量、高車交通量、時間オキュパンス、平均速度である。表-1にデータの一部を示す。ただし、交通流状態が与える影響を的確に捉えるため、検知器の故障等のエラーデータは分析対象外とした。

b) 道路幾何構造データ

道路幾何構造データからは、100m単位の各キロポストに対応する道路区間毎に区間番号、車線数などの情報を獲得することができる。本分析では、車線数の項目のみを利用した。表-2にデータの一部を示す。

c) 交通事故データ

交通事故データからは、発生した各事故の事故形態、発生路線・キロポスト、発生日時などの情報が獲得される。本分析では、発生日時、発生路線・キロポスト、事故形態の項目を利用した。表-3にデータの一部を示す。なお、分析対象期間中、対象ネットワーク内において発生した事故件数は、計756件であった。

表-3 交通事故データ

発生日時	路線	系統番号	KP	事故形態
2006/1/1 10:45	3	1	6.1	追突
2006/1/1 12:40	3	1	2.1	追突
2006/1/1 17:25	3	1	3.1	追突
2006/1/2 10:25	3	1	4.1	追突
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

5. 交通流状態別事故発生リスク分析

本章では、3章で示した交通流状態が高速道路における事故発生リスクに与える影響を定量的に把握することを目的に、同交通流状態別に事故発生リスク分析を行う。

(1) 事故発生リスク

本研究においては、先行研究¹²⁾に習い、交通流状態領域カテゴリー別に

$$R_{ij} = \frac{N_{ij}}{L_i} \times 10^8 \quad (1)$$

R_{ij} : 交通流状態*i*の事故形態*j*の事故発生リスク[件/億台km]

N_{ij} : 交通流状態*i*で発生した事故形態*j*の事故件数[件]

L_i : 交通流状態*i*で走行した総走行台キロ[台km]

にて算定する。

(2) 事故形態

本研究では、以下の事故形態別に事故発生リスク要因分析を行う。なお、追突事故は、前車の後方部車両接触

を、車両接触事故は車両側面接触をそれぞれ示す。

- 1) 追突事故
- 2) 車両接触事故

(3) 交通流状態別事故発生リスク

以下では、事故形態別に非渋滞流、時間混合流および渋滞流の交通流状態別に事故発生リスクを算定した結果を示す。

a) 追突事故

交通流状態別の追突事故件数ならびに事故発生リスクを算定した結果を表-4、図-5にそれぞれ示す。結果に示すように、渋滞末尾および渋滞内において事故発生リスクが大きくなるとの結果が示された。

b) 車両接触事故

交通流状態別の車両接触事故件数ならびに事故発生リスクを算定した結果を表-5、図-6にそれぞれ示す。結果に示すように、渋滞末尾において極めて事故発生リスクが大きくなるとの結果が示された。

(4) Shock Waveの伝搬と事故発生リスクとの関係分析

ここでは、Shock Wave (以下、ショックウェーブ)の伝播時の交通流状態に着目し、車両検知器から得られるデータを基に、ショックウェーブの伝搬と事故発生リスクとの関係を調べる。

a) Shock Wave 伝搬速度の算出について

本研究では、検知器による観測データから当該区間の直近上流地点および直近下流地点の交通流状態を用いて、以下の式 (5) からショックウェーブの伝搬速度を算定する。ショックウェーブの速度は、上流地点の交通流状態 A と下流地点の交通流状態 B のそれぞれの交通流率および交通密度を用いて表現される。なお、同手法により算出された値は、観測周期内に検知器設置地点を通過したすべての車が、一定の速度で通過したという定常状態を仮定した上で算出される。

$$\omega_{AB} = \frac{q_A - q_B}{k_A - k_B} \quad (5)$$

ただし、

q : ある地点を通過する交通流率 [台/h]

k : 空間平均交通密度 [台/km]

ω : ショックウェーブの速度 [km/h]

A : 上流地点, B : 下流地点

である。

b) Shock Wave 伝搬速度帯別事故発生リスク

本研究では、渋滞末尾における事故に着目し、ショックウェーブの伝搬速度帯別の事故発生リスクの違いを検証する。ここでは、伝搬速度の正負の違いにより渋滞の縮小・延伸を区別し、ショックウェーブの速度の違いに

より、上流側と下流側の速度差を区別することとする。

表-6および図-7(a), (b)は、ショックウェーブの速度帯別に追突事故、車両接触事故の事故発生リスクをそれぞれに集計したものである。

この集計結果から、伝搬速度の正負によるリスクの違いを比較すると、伝搬速度が正の領域において、事故発生リスクが高いことが示された。すなわち、渋滞の延伸時に比べ縮小時に事故発生の危険性が高まることを示している。また、速度帯別に着目すると20~30[km/h]において、追突事故ならびに車両接触事故発生リスクともに最も高い事故発生リスクを示した。

表-4 交通流状態別追突事故発生リスク

交通流状態	事故発生件数 [件]	総走行台キロ [万台/km]	事故発生リスク [件/億台km]
非渋滞流	117	40,684	28.8
渋滞末尾	109	3,874	281.4
渋滞内	292	11,083	263.5
計	518	55,640	93.1

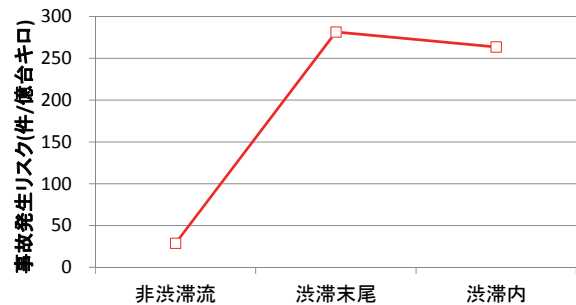


図-5 交通流状態別追突事故発生リスク

表-5 交通流状態別車両接触事故発生リスク

交通流状態	事故発生件数 [件]	総走行台キロ [万台/km]	事故発生リスク [件/億台km]
非渋滞流	76	40,684	18.7
渋滞末尾	21	3,874	54.2
渋滞内	30	11,083	27.1
計	127	55,640	22.8

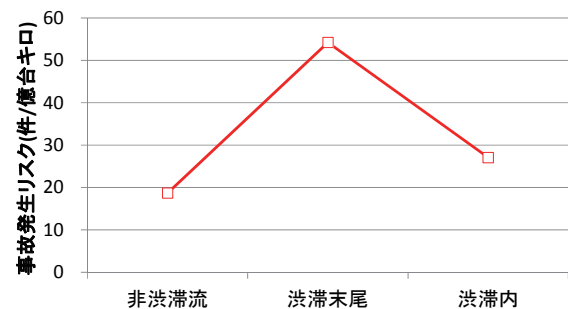
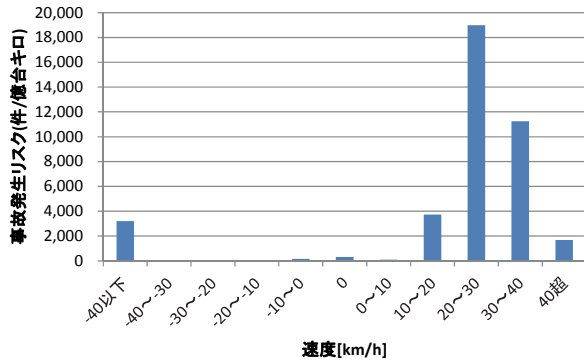


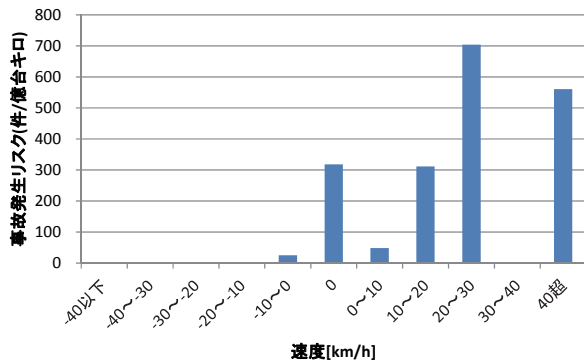
図-6 交通流状態別車両接触事故発生リスク

表-6 Shock Wave 伝搬速度帯別事故発生リスク

ショックウェーブ速度 [km/h]	総走行台キロ [台/km]	事故件数[件]		事故発生リスク [件/億台km]	
		追突事故	車両接触事故	追突事故	車両接触事故
-40以下	124,869	4	0	3203.3	0.0
-40~-30	30,721	0	0	0.0	0.0
-30~-20	72,382	0	0	0.0	0.0
-20~-10	163,553	0	0	0.0	0.0
-10~0	7,838,793	13	2	165.8	25.5
0	314,695	1	1	317.8	317.8
0~10	29,168,861	30	14	102.8	48.0
10~20	642,630	24	2	3734.7	311.2
20~30	142,165	27	1	18992.1	703.4
30~40	62,248	7	0	11245.4	0.0
40超	178,508	3	1	1680.6	560.2
計	38,739,425	109	21	281.4	54.2



(a) 追突事故



(b) 車両接触事故

図-7 Shock Wave 伝搬速度帯別事故発生リスク

6. まとめ

本研究では、2006年から2008年までの3年間の交通事故データと交通流観測データ、道路幾何構造データを用いて、片側2車線の道路区間を対象に交通流状態別に事故発生リスクを算定した。その結果、追突事故・車両接触事故の事故形態の違いに関わらず、いずれも渋滞末尾において高い事故発生リスク値を示した。すなわち、時間的に自由流から渋滞流へ、あるいは渋滞流から自由流へと遷移する状況下において事故発生リスクが高まるという結果が示された。さらに、同状況下においてショックウェーブの速度帯別に事故発生リスクの比較を行い、正

の速度帯、すなわち渋滞縮小時において高い事故発生リスクを示した。また、速度帯別の比較から、20~30[km/h]において、事故発生リスクのピークを持つとの結果が得られた。これは、本稿で指定した仮説「自由流と渋滞流の速度差が大きくなれば事故リスクが高まる」ならびに「情報による渋滞末尾位置と経験する渋滞末尾位置の乖離が大きくなれば事故リスク高まる」を支持するものである。

今後は、道路幾何構造要因ならびに環境要因を考慮し各種要因を統合的に取り扱った分析を行う予定である。

参考文献

- 1) 警察庁交通局：平成24年版交通事故統計年報
- 2) 交通工学研究会：阪神高速道路の交通管制に関する研究報告書，1978.
- 3) Frantzeskakis, J. M., and Iordanis, D. I. : Volume-to-capacity ratio and traffic accidents on interurban four-lane highways in Greece, *Transp. Res. Rec.*, 1112, 29-38, 1987.
- 4) Zhou, M., and Sisiopiku, V. : Relationship between volume-to-capacity ratios and accident rates, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. TRB, National Research Council, Washington, DC*, 1581, pp.47-52, 1997.
- 5) 彦坂崇夫, 中村英樹：高速道路単路部における交通状況と事故発生リスクとの関連に関する統計的分析，第21回交通工学研究発表会論文報告集，pp.173-176, 2001.
- 6) Golob, T. and Recker, W. : A method for relating type of crash to traffic flow characteristics on urban freeways, *Transportation research Part A*, No.38, Issue 1, pp.53-80, 2004.
- 7) 藤井大地, 宇野伸宏, 嶋本寛, 塩見康博：都市間高速道路における追突事故発生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論文集(CD-ROM), 2011.
- 8) 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(CD-ROM), 2011.
- 9) 大口敬, 赤羽弘和, 山田芳嗣：高速道路交通流の臨界領域における事故発生リスクの検討，*交通工学*, 第39巻3号, pp.41-45, 2004.
- 10) 三浦久, 洪性俊, 桑原雅夫, 割田博, 後藤秀典, 高田潤一郎, 川崎洋輔, 田中伸治, 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，第9回ITSシンポジウム pp.348-353, 2010.
- 11) Jian Xing, 大西隆信, 高橋亮介, 加藤哲：車両挙動及び危険性指標による渋滞と事故の関係性分析，第33回交通工学研究発表会論文集(CD-ROM), 2013.
- 12) 兵頭知, 吉井稔雄, 高山雄貴：都市内高速道路における

交通流状態領域別車線数別事故発生リスク, 土木計画学
研究・講演集, vol.46, No.107, 2012.

traffic flow on long crowded roads, The Proceedings of the Royal Society,
LONDON, series A 229(1178), pp313-345, 1955.

13) Light hill, M.J. and GB.Whitham: On Kinematic Waves II. A theory of

(2014. 4. 25 受付)

AN ANALYSIS OF TRAFFIC ACCIDENT RISK CONSIDERING SHOCKWAVE

Satoshi HYODO, Toshio YOSHII