

因果推論における
交通コンフリクトの識別問題と定量的評価

山田 健太郎

博士（学術）

総合研究大学院大学

複合科学研究科

統計科学専攻

2017

概要

交通事故対策の代表的なものとして、道路や信号機など道路環境の整備、衝突被害軽減ブレーキなど車両制御技術の向上、標識や警報システムなどドライバーへの注意喚起があげられる。なかでもドライバーへの注意喚起は、多様な交通シーンに対して事故を防止するうえで有用であり、古くから研究がなされている。ドライバーへの注意喚起は、適切な回避行動がとられていないような交通シーンにおいて有用であるが、そのような交通シーンを観察する技術として、ドライバーの回避行動に着目した交通コンフリクトと呼ばれる概念が交通工学の領域で発展してきた。本論文においては、既存の技術と同様にドライバーの回避行動に着目し、そのうえで交通コンフリクトを適切に評価することができる指標の提案を行う。この指標に基づいてドライバーへの適切な注意喚起を実施することを通じて、交通事故削減に貢献することを目指す。ここでは、ICSTCT (Amundsen and Hyden, 1977) によって与えられた交通コンフリクトの定義にある反事実的表現 “there is a risk of collision if their movements remain unchanged” に着目し、回避行動の有無と潜在的な交通事故リスクの関係性に基づいた交通コンフリクトの評価指標として “potential response inspired conflict (PRIC)” を提案する。提案に先立ち、既存の交通事故リスク指標がこの反事実的表現を適切に反映していないケースがあることを指摘する。次に、この反事実的表現を考慮するために、因果推論の枠組みで使われている潜在反応モデルを導入し、PRIC を定義する。PRIC は交絡因子が同定されたとしても識別可能となるとは限らないことを述べたうえで、PRIC が識別可能であるための三つの十分条件を与える。これらの識別可能条件が成り立たない状況においては、いくつかの因果的仮定に基づいて、観察確率による PRIC の存在範囲を定式化する。そのうえで、いくつかの数値例をとおして PRIC と既存の交通事故リスク指標がしたがう基本的な分布を比較する。また、PRIC を “The 100-Car Naturalistic Driving Study” (Dingus et al., 2006) データへ適用し、その有用性について議論する。さらに、提案する PRIC

を拡張し、回避行動の有無のみならず回避行動のタイプに応じて交通コンフリクトを評価することもこころみる。一般に、ドライバーがどのような回避行動をとるかによって衝突事故の危険性は異なると考えるのが合理であり、したがって回避行動のタイプに応じてリスクを評価することは重要である。拡張された PRIC においても、その識別可能条件と存在範囲の式を明らかにし、数値例と Dingus et al. (2006) のデータに適用し、その有用性について議論する。加えて、交通コンフリクトの定義に立ち返ったうえで、その定義について追加の解釈が可能であることを述べ、この解釈が既存のリスク指標である prevented fraction (予防割合) に近い概念であることに着目する。そのうえで、prevented fraction が異なる母集団に基づいて定式化されているため、数学的な意味で割合とならないことを指摘する。この問題を解決するために、潜在反応モデルに基づく予防割合として “counterfactual-based prevented proportion (CPP)” と “counterfactual-based preventable proportion (CPaP)” を提案する。ここでも、CPP と CPaP の識別可能条件と存在範囲の式を明らかにし、そのうえで実データに適用しその有用性について議論する。

目次

第1章 導入	6
1.1 交通事故の概況	6
1.2 交通コンフリクトの概要	10
1.3 問題意識	12
1.3.1 既存の交通事故リスク指標についての考察	12
1.3.2 Davis et al. (2011) の交通コンフリクトについての考察	20
1.4 問題解決のアプローチ	23
1.4.1 潜在反応モデルの概説	23
1.4.2 ICSTCT による交通コンフリクトの定義についての考察	25
1.4.3 交通工学以外の分野における既存のリスク指標についての考察	30
1.5 問題解決により期待される展望	35
1.6 本論文の構成	37
第2章 潜在反応モデルを利用した交通コンフリクトの評価指標の提案	38
2.1 はじめに	38
2.2 潜在反応モデルに基づく交通コンフリクトの評価指標	39
2.2.1 定義とその解釈	39
2.2.2 識別可能条件	44
2.2.3 存在範囲	49
2.3 数値例	53

2.4	“The 100-Car Naturalistic Driving Study”データへの応用	58
2.4.1	背景	58
2.4.2	加害追突に着目したケース	59
2.4.3	被害追突に着目したケース	61
2.5	まとめ	63
第3章	潜在反応モデルを利用した交通コンフリクトの評価指標の拡張	65
3.1	はじめに	65
3.2	回避行動の有無のみに着目した場合の交通コンフリクトの評価指標	66
3.3	回避行動のタイプに着目した場合の交通コンフリクトの評価指標	70
3.3.1	定義とその解釈	70
3.3.2	識別可能条件	71
3.3.3	存在範囲	75
3.4	数値例	79
3.5	“The 100-Car Naturalistic Driving Study”における回避行動タイプが選択可能なデータへの応用	84
3.5.1	背景	84
3.5.2	回避行動の有無と交通事故の程度に着目したケース	84
3.5.3	回避行動タイプと交通事故の程度に着目したケース	86
3.6	まとめ	90
第4章	潜在反応モデルに基づく予防割合	91
4.1	はじめに	91
4.2	既存の指標	94
4.3	提案指標	96
4.3.1	定義とその解釈	97

4.3.2	識別可能条件	100
4.3.3	存在範囲	101
4.4	複数カテゴリーの保護曝露が存在する場合への提案指標の拡張	104
4.5	適用事例	109
4.6	まとめ	110
第5章	総括	112
5.1	本論文で取り組んだ課題と提案手法の特徴	112
5.2	本論文の貢献	113
5.3	今後の課題	115
5.4	まとめと将来展望	116
	謝辞	119
	引用文献	120

第1章 導入

1.1 交通事故の概況

交通事故は、道路交通法において

「道路における車両等(自動車, 原動機付自転車, 自転車などの軽車両, トロリーバス, 路面電車)の交通に起因する人の死傷又は物の損壊」(道路交通法第 67 条第 2 項)

と定義されている。その定義からわかるように、交通事故は、その当事者の日常生活だけでなく、社会に対しても大きな損失を与える社会的問題である (Traffic Accident Causation in Europe (TRACE) project, 2006-2008; Zheng et al, 2014)。科学技術の発展にともなって、日本国内における交通事故の発生件数は減少傾向にあるものの、現在もなお、社会に対して深刻な影響を与えていることに変わりはない (伊藤他, 2015)。そのため、国内外に関係なく、交通事故メカニズムの解明や交通事故原因の究明は、産業界・学术界・行政を巻き込んだ大きな社会活動の一つとして積極的に推進されてきた (Theofilatos and Yannis, 2014; TRACE project, 2006-2008; Wang et al, 2013)。

我が国においては、高度経済成長に伴うモータリゼーションにより自動車登録台数が増加するにつれて、事故の発生件数・負傷者数・死者数が増加し、昭和 45 年にピークを迎えた (図 1.1 参照)。特にその死者数は日清戦争における日本側の死者数を超えたことから、一種の戦争状態と考えられ、“交通戦争”と呼ばれ大きな社会問題となった。その後、事故の発生件数と負傷者数においては増減がみられるものの、死者数は減少傾向にあることが図

1.1. 交通事故の概況

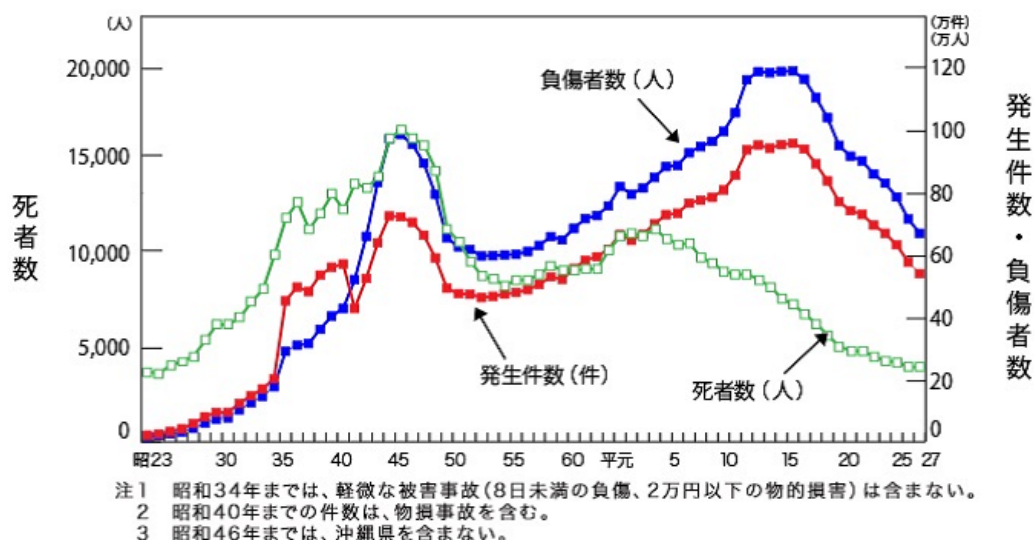
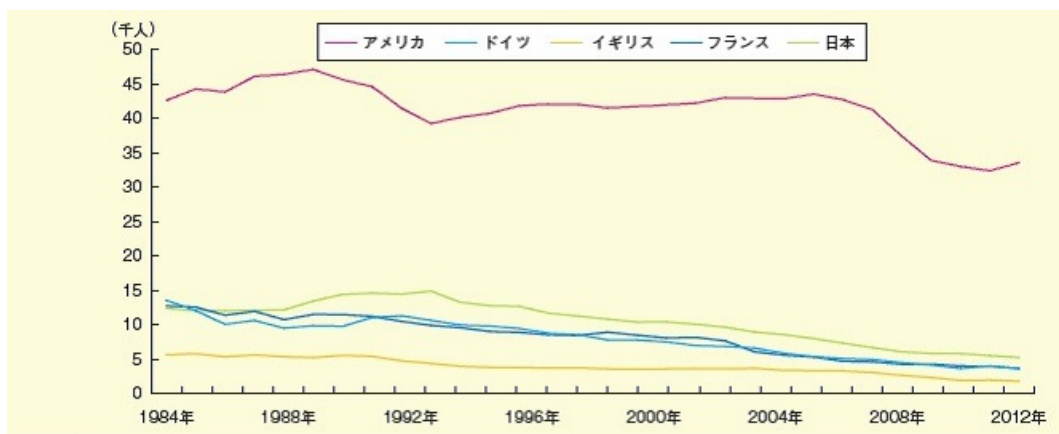


図 1.1: 日本における交通事故発生件数・負傷者数・死者数の推移 (一般財団法人 全日本交通安全協会 Web ページより)

1.1 から確認できる。死者数の減少に関しては、伊藤ら (2015) でも述べられているように、シートベルトの設置義務化 (1969 年～)、シートベルトの装着義務化 (1986 年～)、自動車アセスメントの開始 (1995 年～) に加えて車両の安全性向上、法律改正、救急医療体制の整備など多面的な取り組みが寄与していると考えられている。自動車アセスメントとは、米国で 1979 年より実施されたことから広まった衝突性能安全試験のことである。米国ではこの試験のことを NCAP (New Car Assessment Programme) と呼び、その日本版は JNCAP と称され、独立行政法人自動車事故対策機構により試験が実施されている。2016 年現在は、衝突性能安全試験に基づき、乗員保護性能評価・歩行者保護性能評価・シートベルトリマインダー評価の合計点から 5 段階の星印で新規に発売される車両の衝突安全性能についての格付けが行われている。なお、ヨーロッパにおいては JNCAP と同様に ENCAP と呼ばれる衝突性能安全試験が実施されている。

これらの自動車アセスメントの開始により、それまで各自動車メーカーが自主的に推進

してきた車両の安全性能向上への取り組みがさらに加速した。例えば、衝突シミュレーションによる設計技術に加えて、衝突実験施設やダミー人形を用いた評価技術などに基づいた車両開発により安全性能は進歩し続けている。このような衝突時の安全技術はパッシブセーフティ技術と呼ばれ、衝突時の乗員への被害軽減において重要な役割を果たし、死者数の削減に貢献している。また、各自動車メーカーにおいては、衝突そのものを未然に防ぐ予防安全技術としてアクティブセーフティ技術の開発も行われてきている。代表的なものとして、ABS(アンチロックブレーキシステム)や横滑り防止装置が実用化されるなど、大衆車にも搭載されるほど普及している。また近年においては、一歩進んだアクティブセーフティ技術として車両の周辺をセンシングして、衝突を防ぐために車両を制御する衝突被害軽減ブレーキや車線逸脱防止支援システムなどが商品化されている。このような一連の予防安全技術は先進運転支援システム (ADAS) とも呼ばれ、近年急速に発展している。



- 注 1 IRTAD資料による。
 2 ドイツの値は、1990年までは旧西ドイツ旧東ドイツを合算したもの。
 3 死者数の定義は事故発生後30日以内の死者である。
 ただし、フランスの2004以前の数値及び日本の1992年以前の数値は、30日死者換算数。

図 1.2: 欧米における交通事故死者数の推移 (IRTAD 資料に基づき内閣府が作成したもの : 内閣府 Web ページより)

国際道路交通事故データベース (IRTAD) によると、欧米諸国においても交通事故死者数は日本と同様に減少傾向にあることが図 1.2 から確認できる。一方、欧米諸国や日本などの

1.1. 交通事故の概況

先進国のみならず世界的に交通事故の死者数を鑑みた場合、WHO より発表された Global Status Report on Road Safety (2009) によると、死亡要因の推移において、交通事故の割合は増加すると予測している (図 1.3 参照)。合わせて、世界の人口が増加傾向にあることは広く知られていることから、交通事故の死者数は世界的には増加すると予想される。これは、アジアやアフリカにおける新興国の経済発展が近年目覚ましく、この経済発展に伴うモータリゼーションによる自動車登録台数の増加が見込まれることも関連していると思われる。いずれにせよ、今もこれからも依然多くの尊い命が失われる可能性が高い状況にあることから新たな対策を施す必要性があるといえる。

TOTAL 2004			TOTAL 2030		
RANK	LEADING CAUSE	%	RANK	LEADING CAUSE	%
1	Ischaemic heart disease	12.2	1	Ischaemic heart disease	14.2
2	Cerebrovascular disease	9.7	2	Cerebrovascular disease	12.1
3	Lower respiratory infections	7.0	3	Chronic obstructive pulmonary disease	8.6
4	Chronic obstructive pulmonary disease	5.1	4	Lower respiratory infections	3.8
5	Diarrhoeal diseases	3.6	5	Road traffic injuries	3.6
6	HIV/AIDS	3.5	6	Trachea, bronchus, lung cancers	3.4
7	Tuberculosis	2.5	7	Diabetes mellitus	3.3
8	Trachea, bronchus, lung cancers	2.3	8	Hypertensive heart disease	2.1
9	Road traffic injuries	2.2	9	Stomach cancer	1.9
10	Prematurity and low birth weight	2.0	10	HIV/AIDS	1.8
11	Neonatal infections and other ^a	1.9	11	Nephritis and nephrosis	1.6
12	Diabetes mellitus	1.9	12	Self-inflicted injuries	1.5
13	Malaria	1.7	13	Liver cancer	1.4
14	Hypertensive heart disease	1.7	14	Colon and rectum cancer	1.4
15	Birth asphyxia and birth trauma	1.5	15	Oesophagus cancer	1.3
16	Self-inflicted injuries	1.4	16	Violence	1.2
17	Stomach cancer	1.4	17	Alzheimer and other dementias	1.2
18	Cirrhosis of the liver	1.3	18	Cirrhosis of the liver	1.2
19	Nephritis and nephrosis	1.3	19	Breast cancer	1.1
20	Colon and rectum cancers	1.1	20	Tuberculosis	1.0

図 1.3: 死亡要因の推移予測 (WHO, Global Status Report on Road Safety (2009) より)

交通事故対策の代表的なものとして、道路や信号機など道路環境の整備、衝突被害軽減ブレーキなど車両制御技術、標識や警報システムなどドライバーへの注意喚起があげられる。なかでもドライバーへの注意喚起は、多様な交通シーンに対して事故を防止するうえで有用であり、古くから研究がなされている。ドライバーへの注意喚起は、適切な回避行動がとられていないような交通シーンにおいて有用であるが、そのような交通シーンを観察する技術として、ドライバーの回避行動に着目した交通コンフリクトと呼ばれる概念が交通工学の領域で発展してきた。本論文においては、既存の技術と同様にドライバーの回避行動に着目し、そのうえで交通コンフリクトを適切に評価することができる指標の提案を行う。この指標に基づいてドライバーへの適切な注意喚起を実施することを通じて、交通事故削減に貢献することを目指す。

1.2 交通コンフリクトの概要

交通事故の対策を施すにあたり、まず、交通事故メカニズムの解明や交通事故原因の究明が必要となる。そのためには交通事故が引き起こされる状況を観察することが重要である。しかし、交通事故は散発的にしか発生しないこと、交通事故の程度によっては報告されないことがあるなど (Parker and Zegger, 1989)、交通事故の状況を詳細に観察することが困難となるケースが多い。また、交通事故メカニズムの解明や交通事故原因の究明といった活動の目的が交通事故撲滅にあるにもかかわらず、その目的を達成するために交通事故発生後の状況を観察しなければならないといったジレンマも存在する (Chin and Quek, 1997)。このような問題を回避し、交通事故メカニズムの解明や交通事故原因の究明を行う方策として、交通事故そのものに限らず、交通事故を引き起こす危険性 (本論文では交通事故リスクと呼ぶ) が存在する状況を解析対象とする交通コンフリクト技術が開発され (Perkins and

Harris, 1967), 社会・時代のニーズに応えるべく発展してきた (Zheng et al., 2014).

交通コンフリクトの概念は、1967年にゼネラル・モーターズの研究者であった Perkins and Harris (1967) によって提唱されたことにはじまる。彼らは、自社生産の自動車と他社生産の自動車を比較して、自社生産の自動車にどの程度の交通事故リスクが存在するかを調査した。(Chin and Quek, 1997). その後、交通コンフリクトの定義をめぐって、交通工学分野の研究者や実務家によって数多くの議論が展開され (Hauer, 1978; Hyden, 1987; Migletz et al., 1985; Spicer, 1973), 現在では、ICSTCT (International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques) によって与えられた以下の定義が標準的なものとして採用されている。

“A traffic conflict is an observable situation in which two or more road users approach each other in space and time to such an extent that there is a risk of collision if their movements remain unchanged.” (Amundsen and Hyden, 1977).

この定義に関して、Oppe (1983) は、交通コンフリクト技術は、主観的方法と客観的方法に大別できると述べている。主観的方法は、ブレーキライトや車頭の沈み込み、車線変更をとまなうような回避行動そのものを観測するものである。主観的方法では、回避行動が主たる観測対象となるが、回避行動を伴わない信号無視などの交通違反 (Perkins and Harris, 1967) やドライバーの誤判断により回避行動が行われない場合 (Parker and Zegger, 1989) も含めて興味の対象とするケースもある (元田, 1992).

客観的方法は、時間的・空間的な物理量 (距離, 時間, 減速度) に基づくものであり、近年では交差点付近のビデオカメラによる定点観測や車載ビデオデータの解析を行った事例の報告などが数多く存在する。その中で、交通事故リスクを定量的に評価する指標として、TTC (time to collision; Hayward, 1972), PET (post-encroachment time; Allen et al., 1978), TTC_{2nd} (Barber and Clarke, 1998) などがしばしば用いられてきた。現在もなお、国内外で交通環境に応じた交通事故リスク指標が数多く提案されており、伊藤他 (2015) ではその第二章で体系的な解説が行われるなど、長年にわたって、交通工学分野における重要な研究課題の一

つとして位置づけられている。

1.3 問題意識

1.3.1 既存の交通事故リスク指標についての考察

本節では、交通事故リスク指標の代表的なものについて概説し、その問題について考察する。

自動車が普及して以降、交通環境における不安全や運用上の問題において有益なヒントを得るために交通工学分野における技術者達が観察を続けてきた。しかしながら、いずれも各技術者個人の意見や判断に基づくものであり、一定の基準に従うものではなかった (Parker and Zegger, 1989)。1967年に、ゼネラル・モーターズ・ラボラトリーズの二人の研究者は、交通コンフリクトを“any potential accident situation”であり、それは“evasive action of drivers”を要するような状況、もしくは“traffic violations”の状況から成ると定義し、またその観察手順と記録シートのフォーマットを定めたことを報告している (Perkins and Harris, 1967)。この報告では、交差点のみに着目し、さらに交差点における交通事故シーンを20種類に分けて議論している。実際の観察においては、渋滞の時間帯などを考慮したうえで、12時間を1セッションとし、一つの交差点について3セッション行う。それぞれのセッションの役割も明確にしている。さらに、コンフリクトの有無を判断するうえで重要な基準である“evasive action”の一つとして、ブレーキ操作の有無を対象車両の外側から観察者が判断するためにブレーキライトの点灯の有無を確認する必要があるが、これについても図1.4に示すようにその確認位置についても厳密に定めている。また、図1.5に示すように、観察者がコンフリクトを記録するにあたり、そのシートのフォーマットを定めるなど、実務レ

“Observers Manual” が U.S. Department of Transportation の Federal Highway Administration から出版されている。この、“Observers Manual” は、交通コンフリクト観察初心者へはファーストステップガイドとして、交通コンフリクト観察経験者へはハンドブックとして提供することで、より標準化されたやり方で、出来る限りの統一された記録を行い、“どの場所が最も危険か”、“どのような危険が存在するのか”、“道路構造や道路運用の変更が有効であったか”などについての知見を得るうえで、道路行政への益々の貢献を行ってきた。

これらの観察者の判断に基づいた交通コンフリクト技術は、Oppe (1983) では主観的方法と呼ばれている。その後、各種センシング技術の発展に伴い、これらのセンシングデータに基づいた物理量から算出する交通コンフリクト技術が相次いで提案されている。Oppe (1983) ではこれを客観的方法と呼んでいる。客観的方法による交通コンフリクト技術は、技術者の興味の対象となる交通シーンごとに提案されている。そのため、数多くの算出方法が存在するが、これ以降その一部を紹介する。

客観的方法については、いくつかのレビュー文献 (Debnath et al., 2014; Gettman and Head, 2003; Peesapati et al., 2011; Young et al. 2014; Zheng et al. 2014) が存在する。なかでも Debnath et al. (2014) と Zheng et al. (2014) は、客観的方法を時間的表現によるものとそれ以外の表現 (距離や減速度) によるものに分類して整理している。

まずは、時間的表現による客観的方法について説明する。この種の手法の中で最も古くから広く使われている指標として TTC があげられる。直感的に、TTC は、二台の車両が現状の運転行動 (速度, 角度) を維持したときの衝突するまでの残り時間により定義される。まず、車両 1 と車両 2 のドライバーがそれまでと同じ運転行動をそれぞれ取り続けたときに仮定の衝突位置が存在すると考える。このとき、図 1.6 のように、車両 1 と車両 2 がそれぞれ速度 v_1 と v_2 で走行しており、二台の車両間の距離を d とすると、TTC は

$$\text{TTC} = \frac{d}{v_1 - v_2}, \quad v_1 > v_2$$

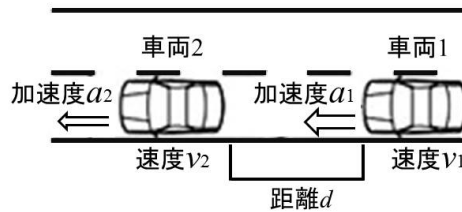


図 1.6: TTC の観測状況 (図は科学技術振興機構ウェブサイトにある画像を加工したもの)

と定義される (Shelby, 2011). TTC が 0 に近いほど衝突事故を起こす危険性が高いことを示しており, TTC の値が 0 以下であれば衝突事故を起こしていると判断される. ここに, 図 1.6 で二つの矢印 (\Leftarrow) の太さが異なっているが, これは一般に車両 1 と車両 2 で加速度の大きさが異なることを表現したものである. TTC がかかえる問題点として, その定義式からわかるように, ドライバーの回避行動による加減速が考慮されないことがあげられる.

一方, Barber and Clarke(1998) は, このような TTC の問題点を解決するために, TTC を改良した交通事故リスク指標として二台の車両の加速度を考慮した TTC_{2nd} を提案した. 伊藤他 (2015) によれば, TTC_{2nd} は

$$TTC_{2nd} = \frac{-(v_1 - v_2) + \sqrt{(v_1 - v_2)^2 - 2(a_1 - a_2)d}}{a_1 - a_2}$$

$(a_1 \neq a_2; (v_1 - v_2)^2 \geq 2(a_2 - a_1)d)$ と定義される. ここに, a_1 と a_2 はそれぞれ車両 1 と車両 2 の加速度である. TTC_{2nd} には, $a_1 = a_2$ のときに定義されないという欠点があるが, このような場合には TTC を用いて交通事故リスクを評価することが多い. なお, TTC_{2nd} が虚数となる場合には衝突判定を行わないなどの工夫がなされている. TTC_{2nd} は, 加減速度をとおしてドライバーの回避行動を反映させることにより, 交通事故リスクを評価することを目的とした指標であると解釈できる. また, ここでの TTC の解説は車両の全長や全幅を考慮していないが, これらを考慮した定義式については, Saunier (2010) を参考にされた

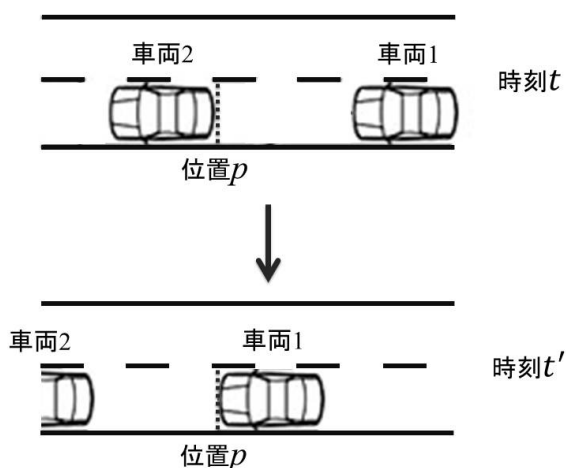


図 1.7: PET の観測状況 (図は科学技術振興機構ウェブサイトにある画像を加工したもの)

い. TTC の適用シーンとしては, Debnath et al. (2014) でも述べられているように, 追突, 正面衝突, 障害物など同一走行レーン上の衝突事故が一般的とされている.

これらの TTC とその派生手法は, “二台の車両のドライバーがそれまでと同じ運転行動をそれぞれ取り続けたときの仮想の衝突位置が存在すること” を前提としている. 若林ら (2003) でも指摘されているように, この前提に基づいた TTC の算出結果が不適切となる事例として, “二台の車両が小さな車間距離を保ちながら追従するケース” が考えられる. この場合は, TTC の値は無限大, すなわち安全と評価される. このようなケースの一例として, 後続車両のドライバーが煽り運転をするなど極めて危険な状態が想定され, TTC の値とは感覚的に大きく異なる. このようなケースに適する指標としては, PET (post-encroachment time; Allen et al., 1978) が広く知られている. “二台の車両が小さな車間距離を保ちながら追従するケース” や “直角方向から二台の車両が互いに接近したものの, かりうじて衝突しなかったケース” のように, 二台の車両が同一地点を異なる時刻に通過する状況のリスク指標として PET は有効であると考えられている (Debnath et al., 2014). 図 1.7 の例では, 車両 2 が地点 p を離れた時刻が t であり, そののち車両 1 が地点 p に到達する時刻が t' であっ

た場合, PET は

$$PET = t' - t$$

と定義される (Saunier, 2010). PET と TTC の最も大きな違いは, Archer (2005) によると “仮定の衝突位置の存在を前提とするか否か” にある. “仮定の衝突位置” が存在することを前提とする TTC はその位置に到達するまでの時間を計算するために二台の車両それぞれの速度とその位置までの距離を計測する必要がある. 一方, PET はこれらを計測する必要がなく上述したような時間のみの計測で済むため, 実験技術上のメリットがあるとされている (Archer, 2005). 図 1.7 による PET の解説は, 若林ら (2003) の事例 (二台の車両が小さな車間距離を保ちながら追従するケース) に基づいたものであり, このような事例においては TTC では適切に評価できないが PET では評価可能であることを表している. TTC や PET の適用方法の詳細については, Canadian Traffic Conflict Techniques (Cooper, 1983) や Dutch Traffic Conflict Technique (van der Horst and Kraay, 1986) や Swedish Traffic Conflict Technique (Hyden, 1987) を参考にされたい. また, PET の派生の手法として, GT (gap time), IAPET (initially attempted PET) などが紹介されている (Archer, 2005; Debnath et al. 2014). その他, 客観的方法のうち時間的表現以外の手法としては, 減速度に着目した DR (deceleration rate) や距離に着目した PSD (proportion of stopping distance) などが Gettman and Head (2003) で紹介されている.

表 1.1 は, 主観的手法と客観的手法のうち代表的な事故リスク指標について, それらの特長をまとめたものである. これまで述べたように, 交通コンフリクト技術は, Perkins and Harris (1967) にはじまり, 各国で独自の発展を遂げたのち, 1977 年にノルウェーのオスロで国際研究集会が開催され, 1.1 節で紹介した ICSTCT (Amundsen and Hyden, 1977) によりその定義がなされている. しかしながら, これまで紹介した主観的方法や客観的方法は, 表 1.1 に示されているように, 交通コンフリクトの定義にある “there is a risk of collision if their movements remain unchanged” のなかにある “their movements” (つまりドライバーの回避

行動) が考慮されていない, もしくは, 回避行動を考慮していても “if ... remain unchanged” (つまり反事実的表現) が考慮されていない. この定義の背後にある反事実的表現を交通コンフリクトに適切に反映するために Davis et al. (2011) は,

“if the movements had remained unchanged then a collision would probably have resulted”

を考慮する必要があることを指摘している. これまで多くの交通工学の技術者により, 各国の交通事情に合わせて様々な交通コンフリクト技術が発展してきた中で, 本論文では, Davis et al. (2011) の指摘は交通コンフリクトの定義に立ち返るうえで重要な意味をなすと考え, 以降議論の重要な柱の一つと位置づける.

表 1.1: 代表的な既存の交通事故リスク技術の一覧

名称	解釈	前提条件	適用しやすい事故状況	計測対象	回避行動の考慮	反事実考の考慮	参考文献
GM 法	急な回避行動もしくは交通違反による危険な状態に陥る頻度	なし	交差点事故	ブレーキライト, 車頭の沈み込み, 車線変更をともしなうハンドル操作	あり	なし	Perkins and Harris (1967)
TTC (time to collision)	二台の車両がそれぞれ速度, 方向を維持した場合の衝突までの残り時間	仮想の衝突位置が存在すること	追突, 正面衝突	車間距離, 相対速度	なし	なし	Hayward (1972)
TA (time to accident)	観測対象のドライバーが回避行動をとった瞬間の TTC	仮想の衝突位置が存在すること	追突, 正面衝突	車間距離, 相対速度	なし	なし	Hyden (1987)
TTC _{2nd}	二台の車両がそれぞれ速度, 加速度, 方向を維持した場合の衝突までの残り時間	仮想の衝突位置が存在すること	追突, 正面衝突	車間距離, 相対速度, 相対加速度	あり	なし	Barber and Clarke (1998)
GT (gap time), THW (time headway)	二台の車両の車間距離に対して観測対象の車両が速度と方向を維持した場合の衝突までの残り時間	仮想の衝突位置が存在すること	追突	車間距離, 速度	なし	なし	Hayward (1972)
PET (post-encroachment time)	右左折車両などの後端が離れた瞬間から観測対象車両の前端がその地点に到達するまでの時間	なし	側面衝突など角度を有する衝突	時間	なし	なし	Allen et al. (1987)
IAPT (initially attempted post-encroachment time)	PET に右左折車両の行動時間 (右左折車両の前端がその地点に侵入してから後端がその地点を離れるまでの時間) を加えたもの	なし	側面衝突など角度を有する衝突	時間	なし	なし	Gettman and Head (2003)
PSD (proportion of stopping distance)	回避行動により得られる停止距離と衝突までの距離の比率	観測対象車両のみの停止により衝突が回避できること	障害物への衝突	距離, 速度, 減速度	あり	なし	Allen et al. (1978)
DR (deceleration rate)	衝突を防ぐのに必要な (一定の) 減速度	仮想の衝突位置が存在すること	追突, 正面衝突, 障害物への衝突	車間距離, 相対速度	なし	なし	Cooper and Ferguson (1976)

1.3.2 Davis et al. (2011) の交通コンフリクトについての考察

前節で述べたように, Davis et al. (2011) は交通コンフリクトの定義に用いられている反事実的表現に着目し, この反事実的表現を反映した交通コンフリクトと衝突事故の関係性について述べている. まず, Davis et al. (2011) は, 背景情報に依存して交通事故リスクの程度が異なることを指摘している. 背景情報とは, ドライバーが実際にとる回避行動の種類や交通事故の結果に影響を受けることのない要因から構成されるものである. その上で, Davis et al. (2011) は交通コンフリクトを適切に評価するためには, 交通事故リスクの程度に応じて背景情報を分類する必要があると述べている. この考察に基づいて, Davis et al. (2011) は, 背景情報を, ICSTCT によって与えられた交通コンフリクトの定義に用いられている反事実的表現に関連づけ, 表 1.2 のように分類することを提案した.

表 1.2: 背景情報の分類

	回避行動あり x_1	回避行動なし x_0
U_1	衝突あり $Y \leq y$	衝突あり $Y \leq y$
U_2	衝突なし $Y > y$	衝突あり $Y \leq y$
U_3	衝突なし $Y > y$	衝突なし $Y > y$
U_4	衝突あり $Y \leq y$	衝突なし $Y > y$

ここに, 表 1.2 は, ドライバーが回避行動 (X) をとるか否か (x_1 : 回避行動あり; x_0 : 回避行動なし) に関心があるケースを表現したものであり, Y は交通事故リスクを表す変数である. また, Y は交通事故リスクを表す変数であり, 与えられた閾値 y に対して, $Y > y$ でか

つ y に近いほどドライバー i が障害物や他車に近い状態にある, あるいは興味ある危険状態に近いことを示し, $Y \leq y$ を満たすとき衝突する, あるいは興味ある危険状態にあることを示す. ここで, 衝突事故を興味の対象と考える. この場合, U_1 はドライバーが回避行動をとるかどうかに関係なく衝突事故を起こすような背景情報, U_2 はドライバーが回避行動をとることで衝突事故を防げるような背景情報, U_3 はドライバーが回避行動をとるかどうかに関係なく衝突事故を起こさないような背景情報を意味する. U_4 としてドライバーが回避行動をとることで衝突事故を起こしてしまうような背景情報も考えられるが, Davis et al. (2011) ではこのような背景情報は存在しないものと仮定されている.

さて, Davis et al. (2011) は, 背景情報としての運転状況 (車間距離, 両車両の速度・加速度, ドライバーの反応時間など) とドライバーの回避行動との相互作用によって危険な状態 (衝突事故やニアミス) が生じると考え, 交通事故は, 図 1.8 のようなデータ生成メカニズムによって視覚的に表現できることを示した. 図 1.8 の U は背景情報を規定する変数全体からなる変数の集合であることを示している. また, 図 1.8 の X から Y への矢線は, X から Y への直接効果が存在する可能性があることを示しており, Y から X への矢線が存在しないことは, Y は X の原因でないことを示している. 加えて, U から X を経由して Y へ向かう有向道は U が X をとおして Y へ影響を与える可能性があることを示している.

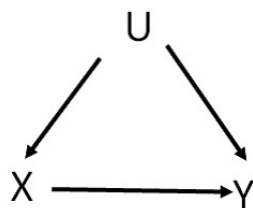


図 1.8: 交通事故の発生メカニズム

Davis et al.(2011) は, 図 1.8 において運転状況を十分な交絡因子 U とみなし, それらが

観測されていることを仮定して、データ生成メカニズムの同定を試みている。ここに、交絡因子は、直感的に、回避行動と衝突事故の両方に影響を与え、因果関係に関する解釈を誤らせる可能性のある要因と解釈することができる。このようなデータ生成メカニズムのもと、Davis et al.(2011) は、ドライバーの回避行動が支配的な状況 U_2 にあるドライバー群に着目し、そのようなドライバーのうち実際に衝突事故を起こすドライバーの割合を“crash-to-conflict ratio” とし、算出のための手順を示している。

以上のように、Davis et al. (2011) は、ICSTCT による交通コンフリクトの定義に着目し、反事実的表現に関する重要な指摘を行った上で、その定義を反映した交通コンフリクトと衝突事故の関係性について議論している。しかしながら、Davis et al. (2011) のフレームワークがかかえる問題点として、背景情報が運転状況(車両の速度・加速度や車両間の距離、そしてドライバーの反応時間など)に限定されていることがあげられる。一般に、ドライバーの回避行動と衝突事故の可能性の関係はこれらの要因だけで規定されるとは限らず、またドライバーがとる回避行動も加減速度といったアクセル操作だけに限らない。また、ドライバー自身がどのような回避行動をとるかも個々のドライバーの特徴に依存すると考えられる。加えて、交通事故リスクを評価するためには、回避行動の判断と回避行動後の車両の動きに影響を及ぼす、たとえば、滑りやすさなどの路面状況やタイヤの摩耗などの車両のメンテナンス状況など、車両挙動に関する要因も考慮する必要がある。近年の急速な交通工学技術の発展により、こういった車両間の速度・車間距離・加速度を計測することが可能になりつつある一方で、観察研究に基づいて個々のドライバーの特徴や車両挙動に関する情報を得ることは容易なことではない (Ewan et al., 2013; Singh and Taheri, 2015)。このように背景情報が十分に考慮されていないことに加えて、識別可能性についても明確に言及されていないことから、Davis et al. (2011) のアイデアを用いても交通コンフリクトと衝突事故の関係性について適切に議論することは困難であると考えられる。以上の考察を踏まえて、本論文では、反事実的表現に基づいた背景情報の分類やその識別可能性について議論するために、潜在反応モデルを導入することを考える。

1.4 問題解決のアプローチ

1.4.1 潜在反応モデルの概説

潜在反応モデルは、対象者に対してある外的操作を行った際に現れる反応を、その対象者が持つ特徴と決定論的に結びつけたうえで、ランダムサンプリングなどの統計的要素を付加して因果効果の定量的評価を試みる統計的アプローチの一つである (Imbens and Rubin, 2015; 黒木, 2014; Pearl, 2009). この潜在反応モデルは、実質科学の分野の多くにおいて、因果推論に関する諸問題を議論するのに重要な役割を果たしている。

X をドライバー i がとる 2 値の回避行動からなる変数 (x_1 : 回避行動あり; x_0 : 回避行動なし) とし、それぞれの値は一意に定義されるものとする (no multiple versions of treatment). また、 Y は交通事故リスクを表す変数であり、与えられた閾値 y に対して、 $Y > y$ でかつ y に近いほどドライバー i が障害物や他車に近い状態にある、あるいは興味ある危険状態に近いことを示し、 $Y \leq y$ を満たすとき衝突する、あるいは興味ある危険状態にあることを示す。ドライバー i が回避行動をとった場合 ($X = x_1$) に起こるであろう交通事故リスクを表す変数 (潜在反応変数) を $Y_{x_1}(i)$ 、回避行動をとらなかった場合 ($X = x_0$) に起こるであろう交通事故リスクを表す変数を $Y_{x_0}(i)$ と記す。定義からわかるように、潜在反応変数はドライバー i が固有にもつ値であるから決定論的である。ドライバー i が実際に回避行動をとった場合 ($X = x_1$) には $Y_{x_1}(i)$ が観測され、 $Y_{x_0}(i)$ が観測されることはなく、ドライバー i が実際に回避行動をとらなかった場合 ($X = x_0$) には $Y_{x_0}(i)$ が観測され、 $Y_{x_1}(i)$ が観測されることはない。このような性質を一致性という (Pearl, 2009; Robins, 1986, 1989). このことからわかるように、一般に、対象者レベルにおいて $Y_{x_1}(i)$ と $Y_{x_0}(i)$ の両方を同時に観測することはできない。一方、個々のドライバーの反応が他のドライバーの回避行動に依存せず (no interference between units), ランダムサンプリングされているような場合

には, $Y_{x_1}(i)$ と $Y_{x_0}(i)$ はそれぞれ確率変数 Y_{x_1} と Y_{x_0} とみなせる. ここで, $Y_{x_j} > y$ である確率を $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ とおく. このとき, $Y_{x_j} > y$ は “ X が x_j であったならばとるのであろう Y の値は $Y > y$ を満たす ($j = 0, 1$)” と解釈される. なお, $\text{pr}(x, y)$ を $(X, Y) = (x, y)$ の同時確率, $\text{pr}(Y = y|X = x) = \text{pr}(y|x)$ を $X = x$ を与えたときの $Y = y$ の条件付き確率, $\text{pr}(X = x) = \text{pr}(x)$ を $X = x$ の周辺確率とする. 他の確率についても同様に記す.

さて, ランダム割りつけが適切に行われ, ドライバーがその割りつけにしたがう場合, X と (Y_{x_1}, Y_{x_0}) は独立とみなせる. この条件を外生性という. 外生性が成り立つとき, $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ は

$$\text{pr}(Y_{x_j} > y) = \text{pr}(Y > y|x_j)$$

により推定することができる ($j = 0, 1$). このように, $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ が観測変数の確率分布によって記述できるとき, $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ は識別可能であるという. 一方, 観察研究においても, 強い意味で無視可能である場合には $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ は識別可能となる (Rosenbaum and Rubin, 1983). すなわち, X について, X と (Y_{x_1}, Y_{x_0}) を条件付き独立にするような変数集合 U が存在するとき, U を与えたときに処理割りつけは無視可能である, あるいは (X, Y) に対して U は SITA (Strongly Ignorable Treatment Assignment) 条件を満たすという. この条件は, Pearl (2009) におけるバックドア基準に対応する (Pearl, 2009). SITA 条件を満たす U を観測できれば $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ は

$$\text{pr}(Y_{x_j} > y) = E_u\{\text{pr}(Y > y|x_j, U)\}$$

で与えられる ($j = 0, 1$). ここに, $E_u\{\cdot\}$ は U の確率分布に基づいて期待値をとることを意味する. ただし, $\text{pr}(Y_{x_j} > y)$ を識別するのに SITA 条件を満たす変数集合の観測が不可欠というわけでないことに注意する (Pearl, 2009; Tian and Pearl, 2002). 潜在反応モデルの詳細については, Imbens and Rubin (2015), Pearl(2009), Rubin (1974, 1978, 1986) を参照されたい.

1.4.2 ICSTCT による交通コンフリクトの定義についての考察

ここで改めて, Davis et al. (2011) が指摘する“ICSTCT による交通コンフリクトの定義の反事実的表現”について振り返る. この定義は, 1977 にオスロで実施された交通コンフリクトについての初めてのワークショップにおいて得られたものである. このワークショップは2日間開催され, 初日の午後と二日目の午前のセッションがグループディスカッションにあてられている. このグループディスカッションにおいては, 3グループ(グループA, B, C)に分けたうえで, 各グループの問題意識とその対策や結論を発表し, 二日目の午後に全員でグループディスカッションの総括を行っている. グループCは, Amundsen 氏, Baker 氏, Cooper 氏, Guttinger 氏, Jorgensen 氏, Linderholm 氏, Merilinna 氏, Nettelblad 氏, Nilson 氏で構成されており, このグループの主要な結論の一つとして, 交通コンフリクトの定義が以下のとおり提案されている.

“A traffic conflict is an observable situation in which two or more road users approach each other in space and time to such an extent that there is a risk of collision if their movements remain unchanged.” (Amundsen and Hyden, 1977).

この定義について, ワークショップにおける総括のセッションにて議論され, 交通コンフリクトの“general definition”として合意に至っている. ただし, いくつかの点においては, 議論が十分でなく, 継続的な検討が必要であるとも結論づけられている.

これを受けて, 多くの研究者たちは, オスロのワークショップを通じて得られた ICSTCT による交通コンフリクトの定義において, その定義の主要な観点(ドライバーの回避行動が考慮された指標であること)を認め, より厳密に定義することを試みている. このことについては, Chin and Quek (1997) が言及している. なかでも, Guttinger (1984) においては, 交通事故に至る一連の事象の中でコンフリクトがどこに位置づけられるかが未だ曖昧であると述べている. 具体的には, 衝突事故を交通コンフリクトに含める立場と含め

ない立場があることを、図 1.9 を用いて指摘している。図 1.9 の左図においては、コンフリクトは衝突の有無の潜在的な要因であると位置づけられている。この場合、衝突事故はコンフリクトのサブセットであり、衝突事故のカウント数はコンフリクトのカウント数に含まれる。一方、図 1.9 の右図においては、コンフリクトはニアミスであり、衝突事故を寸前でかわすことができた結果であると位置づけられている。この場合、衝突とコンフリクトは並列の関係にある概念であり、そのため衝突のカウント数はコンフリクトのカウント数に含まれない。

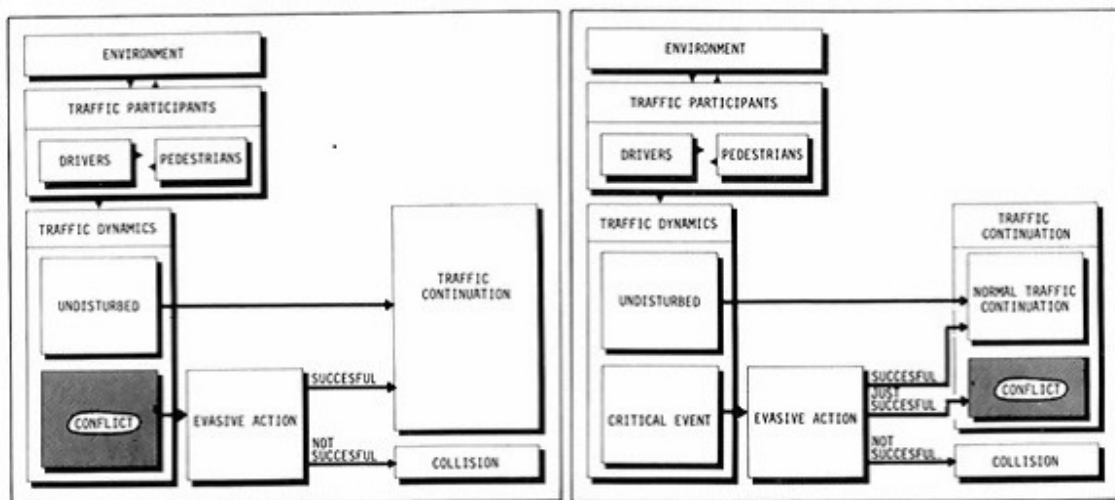


図 1.9: コンフリクトの位置づけの違い (Guttinger, 1984 より抜粋)

交通コンフリクトに衝突事故を含めるか否かについては結論が得られていないが (Davis et al., 2011), 1983 年にコペンハーゲンにて行われた ICTCT meeting においては、その冒頭のスピーチにて Asmussen 氏が、コンフリクトについて議論する際には一連の事象のなかのどの部分を指しているのかを明確にする必要があると述べている。そのうえで、コンフリクトに衝突事故を含めない (コンフリクトは回避行動の結果であると考え) 事例として、図 1.10 に示す事象のフェーズに基づいたモデルを示した (Asmussen, 1983)。

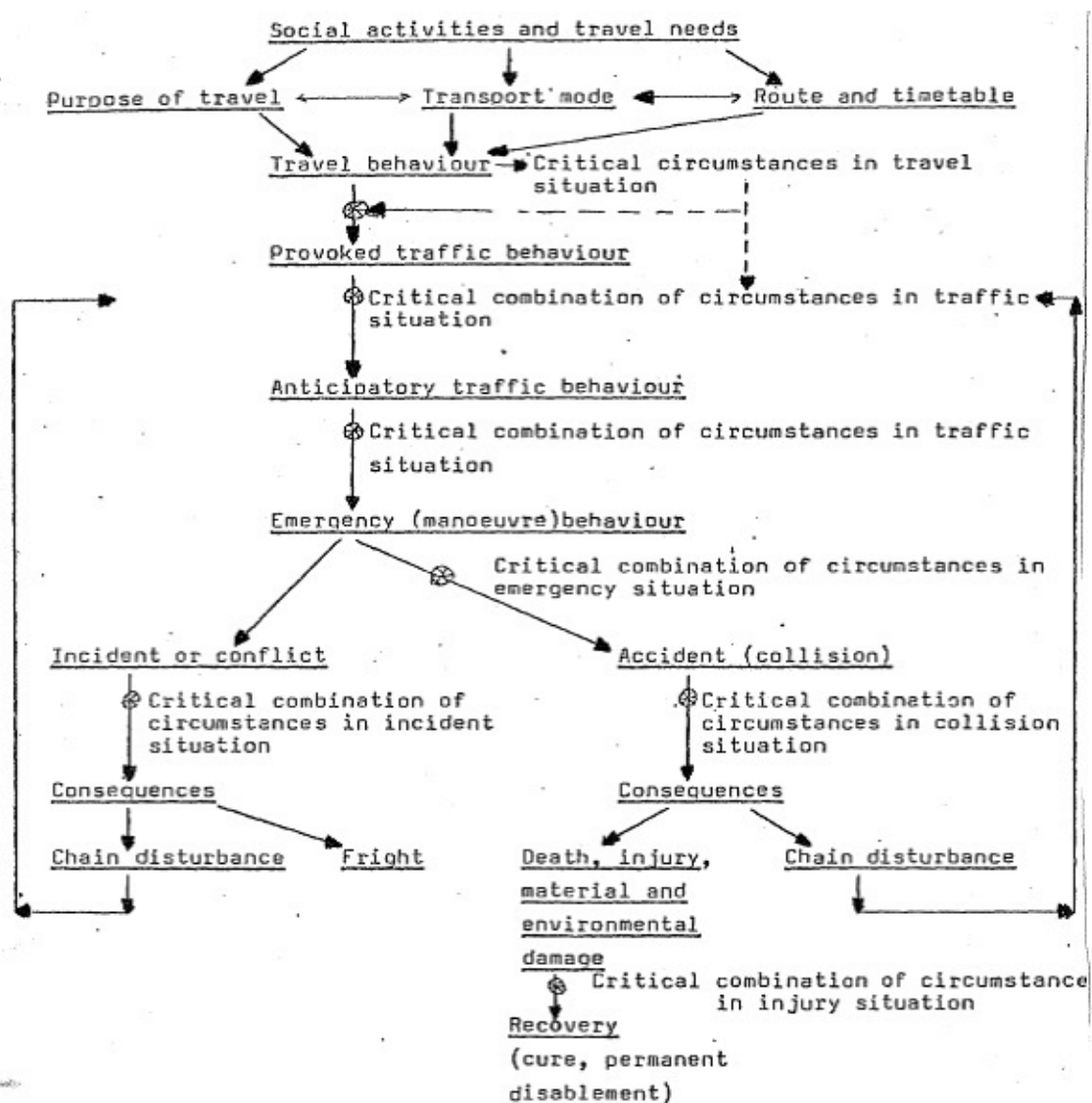


図 1.10: 交通事故における交通事象モデルの一例 (Asmussen, 1983 より抜粋)

本論文における議論の重要な柱と位置付けている Davis et al. (2011) においてもこの議論がなされており,

“That is, is a conflict to be a potential crash, or a potential crash that did not, in fact, result in a crash?”

と述べたうえで,

“In this paper we use the term conflict in the first sense, as a partial specification of a complete event, where the conflict together with the actions of the involved parties then determines whether or not a collision results.”

と、交通コンフリクトに衝突事故を含める (コンフリクトは衝突の有無の潜在的な要因と考える) 立場で議論している。また, Davis et al. (2011) は, “the initiating conditions (conflicts) take values from a denumerable set U ” と述べており, 上述した背景情報 U の分類ごとの頻度でコンフリクトを数えている。さらに, 各分類において, コンフリクトの数のうち実際に衝突事故が起こる数の割合を *crash-to-conflict ratio* と呼ばれる指標で表現している。背景情報 U を四つに分類した場合, U_1 の *crash-to-conflict ratio* は 1 であり, U_3 の *crash-to-conflict ratio* は 0 であり自明な値となるため, 興味の対象は U_2 となる。この U_2 クラスにおける *crash-to-conflict ratio* は,

$$\text{crash-to-conflict ratio} = \text{pr}(Y \leq y|U_2)$$

と表現されている。ここで, 与えられた閾値 y に対して, $Y \leq y$ であるとき衝突することを意味している。紹介したように, Davis et al. (2011) は, 交通コンフリクトに衝突事故を含める (コンフリクトは衝突の有無の潜在的な要因と考える) 立場で議論していることから, 背景情報 U は Guttinger (1984) の示した図 1.9 左のコンフリクトを表しているといえる。一方, Guttinger (1984) の示した図 1.9 右のコンフリクトの確率的表現は $\text{pr}(Y > y|U_2)$ と表現

することができる。これは、crash-to-conflict ratio の余事象の概念にあたる。ところで、Davis et al. (2011) は、ICSTCT による交通コンフリクトの定義の背後にある反事実的表現

“if the movements had remained unchanged then a collision would probably have resulted”

を考慮する必要があることも指摘している。このことは実際には”ドライバーが回避行動をとって衝突事故が起こらなかった”ことを暗に示している。つまり、 $(Y > y|U_2)$ であり、Guttinger (1984) の示した図 1.9 右のコンフリクトの概念に相当する。そこで、本論文におけるコンフリクトは、車両どうしの異常接近のうち、ドライバーの回避行動により衝突事故には至らなかったもの、つまり Guttinger (1984) の示した図 1.9 右のコンフリクトの概念と捉えて議論を進める。ここで、1.4.1 節で紹介した潜在反応モデルを導入すると、 $(Y > y|U_2)$ は、 $\text{pr}(\text{衝突事故なし} | \text{回避行動をとれば衝突事故なし, 回避行動をとらなければ衝突事故あり})$ と解釈できる。この式は、潜在反応変数を用いることで、 $\text{pr}(Y > y|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ と表現される。本論文の 2 章では、交通コンフリクトを評価する確率的リスク評価指標として、 $\text{pr}(Y > y|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ を提案し、その有用性について議論する。

ここまでは、ICSTCT による交通コンフリクトの定義の反事実的表現について注目した Davis et al. (2011) の解釈を中心に議論してきたが、ここで、その定義の原点に立ち返る意味で、定義にある表現を注意深く再度解釈することを試みる。ICSTCT による交通コンフリクトの定義にある表現 “there is a risk of collision if their movements remain unchanged” (Amundsen and Hyden, 1977) を読み解くと、“回避行動をとらなければ衝突事故が起きる状況” のみについてのみ言及しており、回避行動をとった場合に衝突事故が起きたかどうかについては言及していないようにとれる。このことを踏まえたもう一つの交通事故リスク指標として、 $\text{pr}(\text{衝突事故なし} | \text{回避行動をとらなければ衝突事故あり})$ を考えることができる。これについても潜在反応変数を用いることで、 $\text{pr}(\text{衝突事故なし} | \text{回避行動をとらなければ衝突事故あり})$ は、 $\text{pr}(Y > y|Y_{x_0} \leq y)$ と表現される。本論文の 4 章では、交通コン

フリクトを評価するもう一つの指標として, $\text{pr}(Y > y | Y_{x_0} \leq y)$ を提案し, その有用性について議論する.

1.4.3 交通工学以外の分野における既存のリスク指標についての考察

主要層別 (Principal Stratification) と提案指標の関係

本節では, 本論文の2章にて提案するリスク評価指標 $\text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ と因果効果を議論するうえで近年注目されている主要層別との関係性を示す.

主要層別と呼ばれる枠組みが Frangakis and Rubin (2002) により取り上げられて以降, この主要層別は因果効果をはかる様々な領域において多くの研究に用いられている. 特に, 臨床試験をはじめとする医療の領域において主要層別が紹介されることが多く, Frangakis and Rubin (2002) においても治療不順守や死亡による打ち切りなど医療における効果検証の問題に着目したものとなっているため, ここで一旦交通工学から離れ医療の領域における事例を用いながら主要層別を紹介する.

医療の領域においては, 何等かの処置を施したうえで期待する反応が得られた患者についてのみ予後を観察することがしばしばある. ここで, 処置変数を X (処置なし: x_0 , 処置あり: x_1), 期待する反応を処置後変数 S (反応なし: s_0 , 反応あり: s_1), 予後を結果変数 Y (予後良好: y_0 , 予後不良: y_1) と表す. この場合, 反応があった患者に限った解析の結果として以下のような処置効果が得られる.

$$\text{pr}(Y = y_1 | S = s_1, X = x_1) - \text{pr}(Y = y_1 | S = s_1, X = x_0)$$

しかしながら, 異なる集団間での比較となっており, このような処置効果にはバイアスが

生じることが知られている (Robins and Greenland, 1992; Rosenbaum, 1984).

このような問題において主要層別が用いられる。主要層別とは、比較する処置それぞれの処置後変数を潜在的な変数と捉え、これらの潜在的な変数の同時分布により患者を分類する方法である。ここで、1.4.1 節で紹介した潜在反応変数を用いることで、処置なしであったならば反応ありとなる患者を $S_{x_1} = s_1$ 、処置ありであったならば反応ありとなる患者を $S_{x_0} = s_1$ と表すことができる。これらの潜在反応変数の同時分布、つまり処置なしでもありでも反応ありとなる患者は $(S_{x_1} = s_1, S_{x_0} = s_1)$ と表現でき、これを主要層 (Principal Stratum) と呼ぶ。主要層における解析の結果として以下のような処置効果が得られる。

$$\text{pr}(Y_{x_1} = y_1 | S_{x_1} = s_1, S_{x_0} = s_1) - \text{pr}(Y_{x_0} = y_1 | S_{x_1} = s_1, S_{x_0} = s_1)$$

この結果は、同一の集団間での比較となっており、因果的な意味での処置効果となる。

この主要層別の重要なポイントは、潜在反応変数は患者の潜在的な特徴を表しており、性別・年齢などと同様に処置によって影響を受けないということである。ここでは、患者の潜在的な特徴を用いて主要層を

$(S_{x_1} = s_1, S_{x_0} = s_1)$: 処置の有無に関わらず反応ありとなる患者群,

$(S_{x_1} = s_1, S_{x_0} = s_0)$: 処置ありであれば反応ありとなり、処置なしであれば反応なしとなる患者群,

$(S_{x_1} = s_0, S_{x_0} = s_0)$: 処置の有無に関わらず反応なしとなる患者群,

$(S_{x_1} = s_0, S_{x_0} = s_1)$: 処置ありであれば反応なしとなり、処置なしであれば反応ありとなる患者群

の四つに分類することができる。この主要層別についてより踏み込んだ応用可能性や限界点などについての議論は、Chiba and Suzuki (2013), Pearl (2011), VanderWeele (2011) などを参考にされたい。

以上のことからわかるように、本論文にて提案するリスク評価指標 $\text{pr}(Y > y | Y_{x_1} >$

$y, Y_{x_0} \leq y$) は、ドライバーをその背景情報 (潜在的な特徴) ごとに分類した集団について評価するという観点から主要層別の概念に近い。分類のための潜在反応変数は 1.4.1 節にて示したように、ドライバーが回避行動をとった (もしくは、とらなかった) 場合の潜在的な衝突事故の有無である。つまり、衝突事故の有無は、主要層別における処置後変数に位置づけられる。また、衝突事故の有無は、医療における予後の良不良に相当する重要な結果を表す量、つまり結果変数とも位置付けることができる。主要層別の定義 (Frangakis and Rubin, 2002) においては、処置後変数と結果変数が個別に存在する因果構造を想定しているため、提案指標における潜在反応変数を用いたドライバーの分類と主要層別は厳密には異なると考えられる。一方、大局的な観点においては、潜在反応変数に基づき同一の集団について議論するという意味において、提案指標は主要層別と同じ思想に基づいたものとも考えることができる。

既存のリスク指標と提案指標の関係

ここで、次章で提案する交通コンフリクトの評価指標の新規性を確認するために、既存のリスク指標と照らし合わせ、その関係性について紹介する。これまで疫学や生物統計学の分野において、様々なリスク指標が提案され、広く用いられている (Flanders and Klein, 2015; Kleinbaum et al., 2013; Suzuki, 2015)。これらの指標を、ここで議論する交通工学の表現にしたものの一覧を表 1.3 に示す。これら既存指標においては、本論文で提案する交通コンフリクトの評価指標である $\text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ の概念に近いものは見当たらない。もう一つの評価指標である $\text{pr}(Y > y | Y_{x_0} \leq y)$ の概念に近いものとして prevented fraction が挙げられる。しかしながら、prevented fraction は、表 1.3 に記された式からも確認できるが、異なる集団の確率に基づいて定義されていることが問題となる。一方、提案指標においては、潜在反応変数を用いているため、同一の集団の確率に基づいて定義されてい

るといえる. 以上のことから, 本論文で提案する評価指標 $\text{pr}(Y > y|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ と $\text{pr}(Y > y|Y_{x_0} \leq y)$ についての議論が有意義であることが確認できる.

表 1.3: 疫学・生物統計学の分野で利用されるリスク指標の (交通工学的表現) 一覧

名称	定義式	解釈
risk ratio	$\frac{\text{pr}(Y \leq y x_0)}{\text{pr}(Y \leq y x_1)}$	回避行動をとらなかったドライバー群において交通事故を起こすリスクが、回避行動をとったドライバー群において交通事故を起こすリスクに比べて、何倍高くなるかを示す指標
causal risk ratio	$\frac{\text{pr}(Y_{x_0} \leq y)}{\text{pr}(Y_{x_1} \leq y)}$	全てのドライバーが回避行動をとらなかった場合に交通事故を起こすリスクは、全てのドライバーが回避行動をとった場合に交通事故を起こすリスクに比べて、何倍高くなるかを示す指標
causal risk ratio among unexposed*1	$\frac{\text{pr}(Y_{x_0} \leq y x_0)}{\text{pr}(Y_{x_1} \leq y x_0)}$	回避行動をとらなかったドライバー群において、そのドライバー群全員が回避行動をとらなかった場合に交通事故を起こすリスクは、そのドライバー群全員が回避行動をとった場合に交通事故を起こすリスクに比べて、何倍高くなるかを示す指標
rate ratio*2	$\frac{\left(\frac{\text{pr}(Y \leq y x_0)}{\text{pr}(Y > y x_0)}\right)}{\left(\frac{\text{pr}(Y \leq y x_1)}{\text{pr}(Y > y x_1)}\right)}$	回避行動をとらなかったドライバー群における交通事故の有無の比率が、回避行動をとったドライバー群における交通事故の有無の比率に比べて、何倍高いかを示す指標
causal rate ratio*3	$\frac{\left(\frac{\text{pr}(Y_{x_0} \leq y)}{\text{pr}(Y_{x_0} > y)}\right)}{\left(\frac{\text{pr}(Y_{x_1} \leq y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y)}\right)}$	全てのドライバーが回避行動をとらなかった場合の交通事故の有無の比率は、全てのドライバーが回避行動をとった場合の交通事故の有無の比率に比べて、何倍高いかを示す指標
risk difference	$\text{pr}(Y \leq y x_0) - \text{pr}(Y \leq y x_1)$	回避行動をとらなかったドライバー群の交通事故発生リスクが、ベースライン (回避行動をとったドライバー群) のリスクに対して、どの程度高くなるかを示す指標
causal risk difference	$\text{pr}(Y_{x_0} \leq y) - \text{pr}(Y_{x_1} \leq y)$	全てのドライバーが回避行動をとらなかった場合の交通事故発生リスクは、全てのドライバーが回避行動をとった場合の交通事故発生リスクに対して、どの程度加減するかを示す指標
number needed to treat	$\frac{1}{\text{pr}(Y \leq y x_0) - \text{pr}(Y \leq y x_1)}$	交通事故の発生を防ぐために、回避行動をとるべきであったドライバーの数を示す指標
etiologic fraction	$\frac{\text{pr}(Y \leq y) - \text{pr}(Y \leq y x_0)}{\text{pr}(Y \leq y)}$	交通事故を起こしたドライバー群のうち、回避行動をとらないことで交通事故を防ぐことができるドライバーの割合を示す指標
etiologic fraction among the exposed	$\frac{\text{pr}(Y \leq y x_1) - \text{pr}(Y \leq y x_0)}{\text{pr}(Y \leq y x_1)}$	回避行動をとって交通事故を起こしたドライバー群のうち、回避行動をとらないことで交通事故を防ぐことができるドライバーの割合を示す指標
prevented fraction	$\frac{\text{pr}(Y \leq y x_0) - \text{pr}(Y \leq y)}{\text{pr}(Y \leq y x_0)}$	回避行動をとらずに交通事故を起こしたドライバー群のうち、交通事故を防ぐことができるドライバーの割合を示す指標
prevented fraction among the exposed	$\frac{\text{pr}(Y \leq y x_0) - \text{pr}(Y \leq y x_1)}{\text{pr}(Y \leq y x_0)}$	回避行動をとらずに交通事故を起こしたドライバー群のうち、回避行動をとることで交通事故を防ぐことができるドライバーの割合を示す指標
preventable fraction	$\frac{\text{pr}(Y \leq y) - \text{pr}(Y \leq y x_1)}{\text{pr}(Y \leq y)}$	交通事故を起こしたドライバー群のうち、回避行動をとることで交通事故を防ぐことができるドライバーの割合を示す指標

*1 Suzuki (2015) で紹介されているリスク指標であるが、式でのみ紹介されており名称については述べられていないため、本論文では便宜上これを causal risk ratio among unexposed と呼ぶことにする。

*2 rate ratio と数学的に等価であるが解釈が異なる指標として odds ratio がある。odds ratio は、「交通事故を起こしたドライバー群における回避行動の有無の比率が、交通事故を起こさなかったドライバー群における回避行動の有無の比率に比べて、何倍高いかを示す指標」と解釈される。

*3 Flanders and Klein (2015) で紹介されているリスク指標であるが、そこでの名称は causal risk odds ratio とされている。しかし、本指標は rate ratio の因果的表現と捉え、causal rate ratio と呼ぶことにする。

1.5 問題解決により期待される展望

本論文では上述した問題点を解決するために、ICSTCT (Amundsen and Hyden, 1977) の定義にある反事実的な観点を反映した交通コンフリクトを適切に評価することができる指標を提案すること、および曖昧であった交通コンフリクトの位置づけについて明確に議論したうえで各位置づけに基づいた交通コンフリクトの評価指標を提案することを課題として設定した。ここで、提案する交通コンフリクトの評価指標をどのように交通事故対策に役立てていくのか、その展望について紹介することで本研究の目的意識を明らかにする。

交通コンフリクトに関する研究は、1960年代からはじまったものであるが、当時のセンシング技術を用いて交通事故リスクの程度を計測するのは困難であった。そのため、ブレーキライトの点灯や車線変更など目視により容易に観察できる回避行動に基づいて交通事故のリスクの程度を評価する交通コンフリクト技術が発展し、交通コンフリクトの定義においてもドライバーの回避行動が言及されるに至っている (Chin and Quek, 1997)。また、回避行動が交通事故の防止に対して支配的である場合においては、交通事故の対策としてドライバーに回避行動をとらせることが有用であるのは明らかである。一方で、交通事故のリスクがあるような場面は、必ずしもドライバーの回避行動が交通事故の防止に対して支配的とは限らない。そのような場面として、例えば、路面が凍結していてブレーキもハンドル操作も有効でないような極端な状況を考える。この場合は、ドライバーの回避行動の有無を観察しても、その対策を施すうえで有用な情報は得られない。何等かの方法によりその原因を特定し、凍結防止など道路環境整備の観点で対策をうつ必要がある。このような場面では、その原因が多岐にわたるため、その対策も多様である。

本論文で提案する指標は、多様な対策を要するような交通事故状況ではなく、ドライバーによる回避行動といったシンプルな対策により交通事故を防ぐことができる状況において有用であると考え。例えば、回避行動が交通事故の防止に対して支配的であるにもかかわらず回避行動を実際にとったドライバーが少なく交通事故が多く発生するような状況を

提案指標により検出できた場合、ドライバーに回避行動をとらせるような対策をうつことで多くの交通事故を防ぐことができる。つまり、本論文で提案する指標は、ドライバーへの回避行動の喚起が効果的に働く状況の検出といった実用的な役割が期待される。

ドライバーの回避行動が交通事故の防止に対して支配的な状況において、ドライバーへの回避行動の喚起が有効である場合とそうでない場合があるが、このことはドライバーが回避行動をとらなかった要因に依存する。“回避行動をとらない”という行為について、その要因をいくつかに分類することができる。危険を十分に察知しているものの、運転技能の欠如や個人の性格により冷静な対応をとることができないなどといった要因があり、これらが要因の場合においては回避行動の喚起は有効とはならず、先進運転支援システム(ADAS)などによる車両制御といったより強い介入が必要となる。一方、迫りくる危険に気づかない、例えば、わき見運転のように視覚的な要因やハザード知覚を正しく行えていないなどといった交通心理学的な要因もあり、これらが要因の場合においては回避行動の喚起は有効であると思われる。なお、ハザード知覚とは運転中の危ない対象を見つけ出すことである(蓮花・向井, 2012)。このような知覚が正しく行えていないドライバーに対しては、どのようなハザードが存在するかを適切にドライバーに伝えることにより、ドライバーが危険を感じていなかったとしても、回避行動の喚起を受け入れて実施に回避行動をとることで交通事故を防げることが期待される。

昨今、交通社会における安全へのニーズが高まっていることから、今後の先進運転支援システム(ADAS)の発展に伴い、センシングデバイスから得られる情報(ドライバーの状態、車両の状況、車両周辺の状況など)が増加することが想定される。これらの情報に基づいて、回避行動に関する要因分析を行ったり、ハザードの推定を行うことが可能となってくると思われる。回避行動に関する要因分析やハザード推定結果に基づいて集計したデータにおいて本論文で提案する指標を用いることで、ドライバーへの回避行動の喚起がどの程度効果的に働くか見積もることが可能となり、交通シーンに応じてドライバーへの適切な注意喚起を行うことが期待される。このように、本論文は、今後の自動車技術の発展を見

据えたうえで提案するものであり,これにより交通事故の削減を目指すものである.

1.6 本論文の構成

まず,2章では,Davis et al. (2011)のアイデアを出発点としながら,ドライバーの回避行動の有無に着目したうえで,潜在反応モデルに基づいた新たな交通コンフリクトの評価指標を提案する(山田・黒木,2016).3章では,2章で提案した交通コンフリクトの評価指標において,ドライバーの回避行動タイプに着目して議論する(Yamada and Kuroki, 2016a).4章では,交通コンフリクトの定義について1.4.2節で追加した解釈に近い既存のリスク指標である prevented fraction に着目し,その問題点を述べたうえで,解決策として潜在反応モデルを導入した新たな評価指標を提案する(Yamada and Kuroki, 2016b).最後に,5章において,本論文で提案する評価指標の総括を行い,今後の課題と展望を述べる.

第2章 潜在反応モデルを利用した交通コンフリクトの評価指標の提案

本章では, 新たな交通コンフリクトの評価指標として, potential response inspired conflict (PRIC) を提案し, その性質を示すとともに適用例を通じてその有用性を示す. なお, 本章の内容は, ドライバーの回避行動の有無のみに着目した交通コンフリクト評価指標を提案した山田・黒木 (2016) の報告をまとめたものである.

2.1 節では, Davis et al.(2011) のフレームワークの問題点について改めて確認する. 2.2 節では, 潜在反応モデルに基づく交通コンフリクトの評価指標を定式化しその性質について述べる. さらに, その識別可能条件と存在範囲について議論する. 2.3 節では, 数値例を通して, 提案する評価指標と既存の評価指標の関数形の違いを示す. 2.4 節では, 観察実験への適用事例として 100-Car Study (Dingus et al., 2006) のデータに本評価手法を適用し, その有用性と問題点について議論する.

2.1 はじめに

Davis et al. (2011) は, 運転状況 (車間距離, 両車両の速度, 加速度, ドライバーの反応時間など) とドライバーの回避行動との相互作用によって危険な状態 (衝突やニアミス) に陥るものと考え, 運転状況を交絡因子とみなした上で, それらが十分に観測されていることを仮定して, データ生成メカニズムの同定を試みている. このことは, 1.4.1 節で述べたよ

うに, SITA 条件を満たす U が観測されることに相当する. しかし, Davis et al. (2011) のフレームワークにおける U は車両間の速度・空間的位置関係に基づくものであり, 回避行動後の結果に影響を及ぼす, たとえば, 滑りやすさなどの路面状況やタイヤの摩耗などの車両のメンテナンス状況など, 車両挙動に関連する重要な要因が考慮されていない. また, たとえこれらの要因を考慮したとしても, 現在の交通工学技術では, 観察研究において, 車両挙動に関する詳細な情報を得ること自体が困難である (Ewan et al., 2013; Singh and Taheri, 2015). それゆえに, Davis et al. (2011) が提案した交通コンフリクト技術に基づいて, 観察データから衝突事故の可能性と回避行動の有無の関係を定量的に評価することは容易なことではないと考える.

2.2 潜在反応モデルに基づく交通コンフリクトの評価指標

2.2.1 定義とその解釈

本節では, Davis et al. (2011) のアイデアにしたがって, 潜在反応モデルに基づいて交通コンフリクトの評価指標を定式化する. まず, 図 1.8 の状況において, Y がとるある閾値 y に対して, 興味あるドライバーからなる母集団が以下のように分割できるものと仮定する.

$(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y)$: 回避行動の有無に関わらず衝突事故を起こさないドライバー群. 本論文では, この群に属するドライバーを「安全なドライバー」とよぶことにする.

$(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$: 回避行動をとれば $(X = x_1)$ 衝突事故を起こさず, 回避行動をとらなければ $(X = x_0)$ 衝突事故を起こすドライバー群. 本論文では, この群に属するドライバーを「標準的なドライバー」とよぶことにする.

$(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y)$: 回避行動の有無に関わらず衝突事故を起こすドライバー群. 本論文で

は, この群に属するドライバーを「危険なドライバー」とよぶことにする.

$(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y)$: 回避行動をとらなければ $(X = x_0)$ 衝突事故を起こさず, 回避行動をとれば $(X = x_1)$ 衝突事故を起こすドライバー群. 本論文では, この群に属するドライバーを「不運なドライバー」とよぶことにする.

この分割にしたがって, Amundsen and Hyden(1977) の考え方にに基づき, 本論文では以下の三つの指標を考える:

$$\text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y). \quad (2.1)$$

$$\text{pr}(Y > y | x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y). \quad (2.2)$$

$$\text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y). \quad (2.3)$$

ここに, (2.1) 式と (2.3) 式では $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \neq 0$ が, (2.2) 式では $\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \neq 0$ が仮定されていることに注意する. $\text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ は標準的なドライバーが実際に回避行動をとり衝突事故を起こさない確率を意味している. $\text{pr}(Y > y | x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ は標準的なドライバーが実際に回避行動をとったときに衝突事故を起こさない確率を意味している. $\text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ は標準的なドライバーが実際に衝突事故を起こさない確率を意味しており, Davis et al. (2011) が crash-to-conflict ratio と呼んでいたものに関連している.

ここで, (2.1) 式, (2.2) 式, (2.3) 式から導かれる基本的な性質を述べる. まず, 任意の閾値 y に対して, (2.2) 式は

$$\begin{aligned} & \text{pr}(Y > y | x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ &= \frac{\text{pr}(x_1, Y > y, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)}{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} = \frac{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)}{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} = 1 \end{aligned}$$

と変形することができる。また, (2.3) 式は

$$\begin{aligned}
 & \text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &= \text{pr}(x_0, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) + \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &= \text{pr}(x_0, Y_{x_0} > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) + \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &= \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

となり, (2.1) 式と一致する。以上のことから, 本論文では, (2.1) 式を興味の対象とし, これを potential response inspired conflict (PRIC) と呼ぶことにする。なお, 一致性より,

$$\text{pr}(x_1, Y \leq y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(x_1, Y_{x_1} \leq y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 0$$

であるから, (2.1) 式は

$$\begin{aligned}
 & \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &= \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) + \text{pr}(x_1, Y \leq y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &= \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

とも書き換えることができる。したがって, Davis et al. (2011) においても指摘されていることであるが, (2.4) 式と (2.5) 式より, 標準的なドライバー群において回避行動をとる程度と衝突事故を起こす程度は一致することがわかる。

ちなみに, (2.1) 式に関するもう一つの基本的性質として, 異なる閾値 y と y' について, $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | x_0) > 0$ と $\text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y' | x_0) > 0$ であるとき,

$$\frac{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | x_1)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | x_0)} = \frac{\text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y' | x_1)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y' | x_0)} \quad (2.6)$$

の符号と

$$\text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) - \text{pr}(x_1, Y > y' | Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \quad (2.7)$$

の符号が一致することを示そう。

まず, (2.6) 式より,

$$\begin{aligned} & \frac{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | x_1)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | x_0)} - \frac{\text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y' | x_1)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y' | x_0)} \\ &= \frac{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_0)}{\text{pr}(x_0, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_1)} - \frac{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \text{pr}(x_0)}{\text{pr}(x_0, Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \text{pr}(x_1)} \\ &= \frac{\text{pr}(x_0) \left(\begin{array}{c} \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \\ - \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \end{array} \right)}{\text{pr}(x_0, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_0, Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \text{pr}(x_1)} \end{aligned}$$

であり, (2.7) 式より,

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) - \text{pr}(x_1, Y > y' | Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \\ &= \frac{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} - \frac{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y')}{\text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y')} \\ &= \frac{\left(\begin{array}{c} \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \\ - \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \end{array} \right)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y')} \end{aligned}$$

である。したがって, どちらの式も

$$\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') - \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$$

に依存して符号が決まることが確認できる。これらのことから, $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | x_1) / \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | x_0)$ を X から $(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ へのリスク比とみなすと, このリスク比が y

に関する増加関数である場合には PRIC も y に関する増加関数となり, 減少関数である場合には PRIC も y に関する減少関数となることがわかる.

また, (2.5) 式より,

$$1 - \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(x_0, Y \leq y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$$

であることに注意すると, (2.1) 式は

$$\begin{aligned} \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) &= 1 - \text{pr}(x_0, Y \leq y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ &= 1 - \frac{\text{pr}(x_0, Y \leq y, Y_{x_1} > y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} = 1 - \frac{\text{pr}(Y_{x_1} > y | x_0, Y \leq y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} \text{pr}(x_0, Y \leq y) \quad (2.8) \end{aligned}$$

と

$$\begin{aligned} \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ &= \frac{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} = \frac{\text{pr}(Y_{x_0} \leq y | x_1, Y > y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} \text{pr}(x_1, Y > y) \quad (2.9) \end{aligned}$$

の2とおりの形式に変形することができる. したがって, ある閾値 y を与えたとき, $\text{pr}(Y_{x_1} > y | x_0, Y \leq y) = 0$ の場合には (2.8) 式より PRIC は 1 となり, $\text{pr}(Y_{x_0} \leq y | x_1, Y > y) = 0$ の場合には (2.9) 式より PRIC は 0 となることがわかる. $\text{pr}(Y_{x_1} > y | x_0, Y \leq y)$ は実際には回避行動をとらずに衝突事故を起こしたドライバーが回避行動をとったならば衝突事故を起こさなかったであろう反事実の確率であり, 因果推論においては, Pearl(2009) によって十分性の確率と呼ばれているものに相当する. $\text{pr}(Y_{x_0} \leq y | x_1, Y > y)$ は現実には回避行動をとって衝突事故を起こさなかったドライバーが回避行動をとらなかったならば衝突事故を起こすであろう反事実の確率であり, Pearl(2009) によって必要性の確率と呼ばれているものに相当する (Pearl, 1999). 必要性の確率, 十分性の確率から生まれる自然な概念として必要十分性の確率を考えることができるが, この確率は PRIC の分母である $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$

に相当する。必要十分性の確率は回避行動をとることが衝突事故を起こさない必要かつ十分な原因である程度を表したものと解釈することができる。原因の必要性, 十分性, 必要十分性について, 一般的な議論については黒木 (2014), Pearl(1999, 2009), Tian and Pearl (2000) を, 交通工学の観点からの議論については Davis et al. (2000) を参照されたい。

2.2.2 識別可能条件

前節の議論からわかるとおり, PRIC は, 一般に, 観察確率 $\text{pr}(x, Y \leq y)$, $\text{pr}(x, Y > y)$ と反事実確率 $\text{pr}(x, Y_{x'} \leq y)$, $\text{pr}(x, Y_{x'} > y)$ ($x, x' \in \{x_1, x_0\}, x \neq x'$) のいずれか一方のみの情報ではもちろんのこと, 仮に両方の情報が得られたとしても何らかの因果的仮定を付加しなければ識別可能とはならない。ここに, PRIC が識別可能であるとは, PRIC が観測変数の確率分布によって記述できることをいう。

このことを踏まえて, PRIC の識別可能条件を明らかにするために, まず, ある閾値 y を与えたもとで母集団が標準的なドライバーから構成される場合, すなわち, ある閾値 y に対して $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1$ であるケースを考えよう。このとき,

$$\text{pr}(x_0, Y > y) = \text{pr}(x_0, Y_{x_0} > y) \leq \text{pr}(Y_{x_0} > y) = 0$$

$$\text{pr}(x_1, Y \leq y) = \text{pr}(x_1, Y_{x_1} \leq y) \leq \text{pr}(Y_{x_1} \leq y) = 0$$

より, $\text{pr}(x_0, Y > y) = \text{pr}(x_1, Y \leq y) = 0$ であることに注意すると

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ &= \text{pr}(x_1, Y > y) = \text{pr}(x_1, Y > y) + \text{pr}(x_0, Y > y) = \text{pr}(Y > y) \end{aligned} \quad (2.10)$$

および

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ &= \text{pr}(x_1, Y > y) = \text{pr}(x_1, Y > y) + \text{pr}(x_1, Y \leq y) = \text{pr}(x_1) \end{aligned} \quad (2.11)$$

を得ることができる。Y が TTC などの既存の交通事故リスク指標に基づいて定義されているとき、(2.10) 式は、閾値 y の下で標準的なドライバーしか存在しないならば、その条件の下で PRIC が既存の交通事故リスク指標に関する確率的評価指標となっていることを示唆する。つまり、与えられた閾値 y の下で母集団が標準的なドライバーに限定されるような場合においては、その条件の下で TTC など既存の交通事故リスク指標を用いても交通コンフリクトを統計的な観点で適切に評価できることを示唆している。また、 $Y > y$ は衝突事故が起こっていない事象を示していることから、PRIC の値が大きい場合には衝突事故を起こさない確率が高く、PRIC の値が小さくなるほど衝突事故を起こす確率が高くなることを意味している。一方、(2.11) 式において $\text{pr}(x_1)$ はドライバーが回避行動をとった確率であることから、PRIC の値が大きい場合には回避行動をとったドライバーの割合が多く、PRIC の値が小さくなるほど回避行動をとったドライバーの割合が小さくなることを意味している。(2.10) 式と (2.11) 式からただちに導かれる興味深い性質として、

$$\text{pr}(x_1) = \text{pr}(Y > y) \quad (2.12)$$

がある。したがって、 $\text{pr}(x_1) \neq \text{pr}(Y > y)$ である場合、上述の考察から導かれる命題「ある閾値 y に対して $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1 \Rightarrow \text{pr}(x_1) = \text{pr}(Y > y)$ 」の対偶を取ることで、 $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \neq 1$ となることがわかる。したがって、 $\text{pr}(x_1) \neq \text{pr}(Y > y)$ である場合、母集団の中に標準的なドライバー以外のドライバーが存在することを意味する。この性質は、回避行動の有無と衝突の有無が集計されているデータにおいて、母集団の中に標準的なドラ

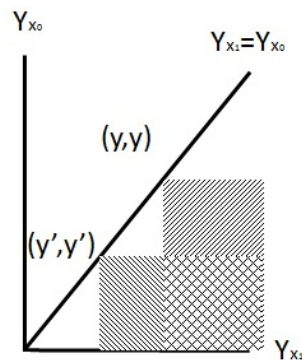


図 2.1: 閾値 y に対して標準的なドライバーしかいない状況

イバー以外のドライバーが存在することを統計的に判断するのに重要な役割を果たす。なお、自明なことであるが、 $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1$ と $\text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y) = 1$ が同時に成り立つことはないことに注意されたい。すなわち、 $\text{pr}(x_1) = \text{pr}(Y > y)$ と $\text{pr}(x_0) = \text{pr}(Y > y)$ のそれぞれを帰無仮説とする仮説検定問題を考えたとき、その両方が棄却されない可能性があるが、そのときに $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1$ と $\text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y) = 1$ が同時に正当化されるわけではない。それぞれの必要条件に対応する $\text{pr}(x_0) = \text{pr}(Y > y)$ と $\text{pr}(x_1) = \text{pr}(Y > y)$ が棄却されなかったことが統計的に確認されただけであり、一般に興味ある母集団がどのようなドライバーから構成されているのかを判断するためには交通工学的知見の導入が不可欠である。

ここで、閾値 y に対して標準的なドライバーしかいないケースであっても、その母集団に属するドライバーに異なる閾値を与えた場合にも標準的なドライバーしかいないということにはならないということに注意する。このことを図 2.1 に基づいて考察する。 Y がとりうる値 y と y' に対して ($y > y'$)、図 2.1 の右上がり斜線部分は ($Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y$) のみ成り立つ領域、右下がり斜線部分は ($Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y'$) のみ成り立つ領域、両方の斜線で描かれた部分は ($Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y$) と ($Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y'$) の両方が成り立つ領域を表している。

図 2.1 において y に対して標準的なドライバーしか存在しないと仮定したうえで(この仮定の下では, 右下がり斜線部分の領域は存在しないことになる), この母集団に対して y とは異なる閾値 y' を与えると, 右上がり斜線部分, すなわち, $(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y')$ を満たさない領域が現れる. この領域に属する対象者は, 閾値 y に関しては標準的であるが y' に関しては安全なドライバーである. したがって, 閾値 y に対しては標準的なドライバーしかいないものの, それとは異なる閾値 y' を与えた場合には標準的なドライバーと安全なドライバーが混在する状況となり, $\text{pr}(Y_{x_1} > y', Y_{x_0} \leq y') \neq 1$ となる. この状況の下では, 一般に, $\text{pr}(x_1) = \text{pr}(Y > y)$ であっても $\text{pr}(x_1) = \text{pr}(Y > y')$ が成り立つことは保証されない. このようにみると, 閾値 y に対して $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1$ が成り立つという仮定は極めて厳しいものにみえるかもしれない. しかし, 2.4 節の適用事例より, Y が離散変数として扱われるケースでは, この仮定は必ずしも非現実的なものではないことがわかる.

次に, 外生性を仮定すると, X と (Y_{x_1}, Y_{x_0}) は独立であることから, 任意の閾値 y について

$$\text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(x_1) \quad (2.13)$$

を得ることができる. Perkins and Harris (1967) は

“Over 20 objective criteria for traffic conflicts (or impending accident situations) have been defined as to specific accident patterns at intersections. Essentially, these traffic conflicts are defined by the occurrence of evasive actions, such as braking or weaving, which are forced on a driver by an impending accident situation or a traffic violation.”

と述べ, 回避行動の有無という観点から交通コンフリクトの概念を導入しているが, (2.11) 式はある特定の条件の下で標準的なドライバーしか存在しない状況, そして (2.13) 式は外生性が仮定できる状況においては, Perkins and Harris(1967) の考察が統計的な観点から正

当化されることを示唆している。

最後に、母集団が標準的なドライバーに限定されることもなく、外生性も仮定できない場合について考えよう。このとき、興味ある母集団に属するドライバーが $Y_{x_1} \geq Y_{x_0}$ を満たすと仮定する。この仮定は単調性と呼ばれており、不運なドライバーが存在しないことを意味する。単調性の仮定の下では $\text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y) = 0$ が成り立つことに注意すると、任意の閾値 y について

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ &= \frac{\text{pr}(x_1, Y > y) - \text{pr}(x_1, Y_{x_0} > y) + \text{pr}(x_1, Y \leq y, Y_{x_0} > y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y) - \text{pr}(Y_{x_0} > y) + \text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y)} \\ &= \frac{\text{pr}(x_1, Y > y) - \text{pr}(x_1, Y_{x_0} > y)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y) - \text{pr}(Y_{x_0} > y)} = \frac{\text{pr}(Y_{x_1} > y | x_1) - \text{pr}(Y_{x_0} > y | x_1)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y) - \text{pr}(Y_{x_0} > y)} \text{pr}(x_1) \end{aligned}$$

が得られる。閾値 y を与えたとき、 $\text{pr}(Y_{x_1} > y | x_1) - \text{pr}(Y_{x_0} > y | x_1)$ は実際に回避行動をとったドライバー群を対象としたときの因果リスク差であり、 $\text{pr}(Y_{x_1} > y) - \text{pr}(Y_{x_0} > y)$ は母集団全体を対象としたときの因果リスク差となっている (Rothman et al., 2008)。したがって、これら二つの因果リスク差の比は、回避行動による衝突事故への影響が母集団全体と実際に回避行動をとったドライバー群でどの程度異なるのかを示した尺度となっている。また、SITA 条件を満たす共変量集合 U が観測可能であるとき、一致性より

$$\text{pr}(Y_{x_0} > y | x_1) = E_u(\text{pr}(Y > y | x_0, U) | x_1),$$

$$\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y) = \text{pr}(x_1, Y > y),$$

$$\text{pr}(Y_{x_0} > y) = E_u(\text{pr}(Y > y | x_0, U)),$$

$$\text{pr}(Y_{x_1} > y) = E_u(\text{pr}(Y > y | x_1, U))$$

となる。ここに、 $E_u(\cdot | x_1)$ は $X = x_1$ を与えたときの U の条件付き分布に基づく期待値を意

味する. したがって, 単調性の仮定の下で SITA 条件を満たす共変量集合 U が観測可能であれば, PRIC は識別可能となる. なお, 単調性の仮定の下では,

$$\begin{aligned} \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) &= \text{pr}(Y_{x_1} > y) - \text{pr}(Y_{x_0} > y) + \text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y) \\ &= \text{pr}(Y_{x_1} > y) - \text{pr}(Y_{x_0} > y) \end{aligned}$$

$$\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y) = \text{pr}(Y_{x_0} > y) - \text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y) = \text{pr}(Y_{x_0} > y)$$

$$\text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(Y_{x_1} \leq y) - \text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} > y) = \text{pr}(Y_{x_1} \leq y)$$

となり, $\text{pr}(Y_x > y)$ ($x \in \{x_0, x_1\}$) が識別可能であれば, 母集団における標準的なドライバー群, 安全なドライバー群, 危険なドライバー群のいずれの割合も識別可能となることに注意されたい.

2.2.3 存在範囲

前節の議論からわかるように, 特別な仮定を置かない限り, PRIC は一般に識別可能ではない. PRIC が識別可能でない場合はその定義式からわかるように, 因果的仮定を付加しない限り, その存在範囲は $[0, 1]$ で与えられるという意味で有用な情報を得ることが難しくなる. そこで, 2.2.1 節で定義したドライバー群に対していくつかの因果的仮定を置き, 観察確率 $\text{pr}(x, Y \leq y)$ や $\text{pr}(x, Y > y)$ ($x \in \{x_1, x_0\}$) を用いて PRIC の存在範囲を求めることにする.

まず,

$$\text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \leq \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \quad (2.14)$$

を仮定したとき, 両辺に $\text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ を加えることによって

$$\text{pr}(x_0|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) + \text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1 \leq 2\text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$$

となることから, $1/2 \leq \text{pr}(x_1, Y > y|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \leq 1$ という存在範囲が得られる.

次に,

$$\text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \geq \max\{\text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y), \text{pr}(x_1|Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y)\} \quad (2.15)$$

$$\text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) \geq \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y) \quad (2.16)$$

が成り立つと仮定する. 第一の仮定は, 標準的なドライバーが実際に回避行動をとる割合は安全なドライバーや危険なドライバーが実際に回避行動をとるドライバーの割合より多いことを意味しており, 安全なドライバーや危険なドライバーと比較して標準的なドライバーが回避行動をとる傾向にある状況を想定するものである. また, 第二の仮定は, 安全なドライバーよりも危険なドライバーが多いことを意味している. これらの仮定が成り立つと思われる状況としては, カーブの走行や前走車に追従して走行するなど, ドライバーが交通事故リスクの程度を適切に認知しやすい運転状況が想定される.

ここで, これらの仮定より

$$\text{pr}(Y_{x_0} \leq y|x_1, Y > y) \geq \text{pr}(Y_{x_1} > y|x_0, Y \leq y) \quad (2.17)$$

が得られることを示そう。まず,

$$\begin{aligned}
 & \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_0, Y \leq y) - \text{pr}(x_0, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_1, Y > y) \\
 &= \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_0, Y \leq y) \\
 &\quad - \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_1, Y > y) \\
 &= \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad \times (\text{pr}(x_0, Y \leq y, Y_{x_1} > y) + \text{pr}(x_0, Y \leq y, Y_{x_1} \leq y)) \\
 &\quad - \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad \times (\text{pr}(x_1, Y > y, Y_{x_0} > y) + \text{pr}(x_1, Y > y, Y_{x_0} \leq y)) \\
 &= \{ \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad \times \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad - \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad \times \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y) \} \\
 &\quad + \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad \times (\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) - \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y))
 \end{aligned}$$

と変形できることに注意すると、この式の第一項は、(2.15)式と(2.16)式より

$$\begin{aligned}
 & \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad - \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y) \\
 &\geq \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad - \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y) \\
 &\geq \text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \text{pr}(x_0 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
 &\quad \times (\text{pr}(Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) - \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y)) \geq 0
 \end{aligned}$$

となる。また、第二項は、明らかに

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)\text{pr}(x_0|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ & \times (\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) - \text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)) = 0 \end{aligned}$$

である。これらをまとめることにより、

$$\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)\text{pr}(x_0, Y \leq y) \geq \text{pr}(x_0, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)\text{pr}(x_1, Y > y)$$

すなわち、(2.17) 式を得ることができる。したがって、PRIC の存在範囲は、(2.17) 式を用いることによって、

$$\begin{aligned} & \frac{\text{pr}(x_1, Y > y)}{\text{pr}(x_1, Y > y) + \text{pr}(x_0, Y \leq y)} \leq \text{pr}(x_1, Y > y|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ & = \frac{\text{pr}(Y_{x_0} \leq y|x_1, Y > y)\text{pr}(x_1, Y > y)}{\text{pr}(Y_{x_0} \leq y|x_1, Y > y)\text{pr}(x_1, Y > y) + \text{pr}(Y_{x_1} > y|x_0, Y \leq y)\text{pr}(x_0, Y \leq y)} \\ & \leq 1 \end{aligned} \tag{2.18}$$

で与えられることがわかる。これにより、識別可能条件が成り立たない場合においても、(2.18) 式で与えた下界は観察確率のみから算出可能であることがわかる。この下界は、回避行動の有無が実際の衝突事故の有無につながったドライバーのうち、実際に回避行動をとって衝突事故を回避したものの割合を意味している。ここに、自明なことであるが、PRIC は、標準的なドライバーが全員回避行動をとるような場合、すなわち、 $\text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1$ となる場合には上界である 1 と一致する。また、(2.15) 式において等号が成り立つ特別な場合として、標準的なドライバー群、安全なドライバー群、危険なドライバー群のいずれにおいても回避行動をとるドライバーの割合が同じ、すなわち

$$\text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} > y) = \text{pr}(x_1|Y_{x_1} \leq y, Y_{x_0} \leq y) \tag{2.19}$$

であるとき, (2.16) 式で等号が成り立つならば, PRIC は (2.18) 式で与えた下界と一致する.

ここで, たとえば, (Y_{x_1}, Y_{x_0}) の定義域が非負で与えられる確率分布にしたがうとき, (2.16) 式において $y \simeq 0$ とおけばわかるように, 一般に, これらの仮定の下では PRIC が定義されないような閾値 y の範囲が $y = 0$ 付近に存在することに注意する. また, $\text{pr}(x_1|Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \simeq 0$ が起こる状況として, 標準的なドライバーの多くがニアミス状態あるいはそれよりも危険な状態にありながら回避行動をとらなかったケースが想定される. なお,

$$\frac{\text{pr}(x_1, Y > y)}{\text{pr}(x_1, Y > y) + \text{pr}(x_0, Y \leq y)} \leq \frac{\text{pr}(x_1, Y > y)}{\text{pr}(x_0, Y \leq y)}$$

より, 下界の関数は y の値が大きくなるにつれて 0 に近づいていくことがわかる.

2.3 数値例

本節では, $\text{pr}(Y > y)$ と PRIC の関数形の違いを明らかにするために, $X = x_j$ を与えたときの (Y_{x_1}, Y_{x_0}) の条件付き密度関数が Gumbel 型の二変量指数分布 (Gumbel, 1960; Kotz et al., 2000)

$$f(y_{x_1}, y_{x_0}|x_j; \alpha_j) = \{(1 + \alpha_j y_{x_1})(1 + \alpha_j y_{x_0}) - \alpha_j\} \\ \times \exp(-y_{x_1} - y_{x_0} - \alpha_j y_{x_1} y_{x_0}) \quad y_{x_1} > 0, y_{x_0} > 0; 0 \leq \alpha_j \leq 1 \quad (2.20)$$

によって与えられているものとする ($j = 0, 1$). これは, TTC などの既存の交通事故リスク指標が経験的にガンマ分布やワイブル分布にしたがう (St-Aubin et al., 2011; Wang and Wets, 2012) との指摘がなされていることから, その中でもっとも簡単な確率分布として取り上げたものである. (2.20) 式において, $\alpha_j = 0$ のとき, $X = x_j$ を与えたときに Y_{x_1} と Y_{x_0} はそ

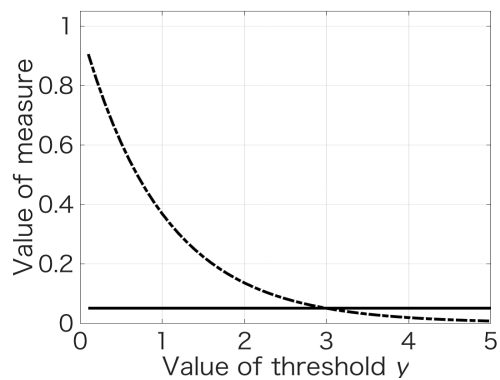
それぞれ独立に平均を 1 とする標準指数分布にしたがい、 α_j の値が大きくなるにしたがって Y_{x_1} と Y_{x_0} の従属関係は強くなる。しかし、相関係数が

$$-1 + \int_0^{\infty} \frac{\exp(-u)}{1 + \alpha_j u} du$$

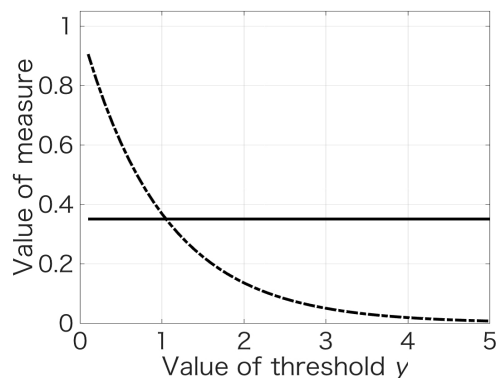
で与えられることから、 $\alpha_j = 1$ であっても Y_{x_1} と Y_{x_0} の相関係数は 1 とはならないことに注意する。

まず、(2.20) 式のパラメータを $(\alpha_0, \alpha_1) = (0.50, 0.50)$ とし、 $\text{pr}(x_1)$ の値を 0.05, 0.35, 0.65, 0.95 と変えたときのそれぞれの $\text{pr}(x_1)$ の値における PRIC と $\text{pr}(Y > y)$ の関係を図 2.2 に示す。このケースでは、 $\alpha_0 = \alpha_1$ であることから X と (Y_{x_1}, Y_{x_0}) は独立となるため、外生性が成り立つ状況とみなせる。この場合、(2.13) 式より PRIC は $\text{PRIC} = \text{pr}(x_1)$ という y に依存しない関数となるが、図 2.2 からこのことを読み取ることができる。一方、 $\text{pr}(Y > y)$ は $\text{pr}(x_1)$ の値に関わらず y に関する減少関数となっており、回避行動の有無が反映されていないことがわかる。

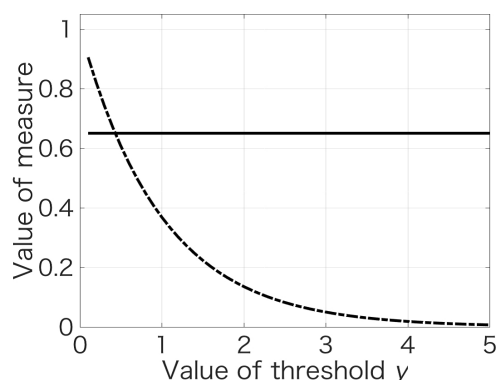
次に、(2.20) 式のパラメータを $(\alpha_0, \alpha_1) = (0.10, 0.90)$ とし、 $\text{pr}(x_1)$ の値を 0.05, 0.35, 0.65, 0.95 と変えたときのそれぞれの $\text{pr}(x_1)$ の値における PRIC と $\text{pr}(Y > y)$ の関係を図 2.3 に示す。このケースでは $X = x_1$ を与えたときの (Y_{x_1}, Y_{x_0}) の条件付き分布と $X = x_0$ を与えたときの (Y_{x_1}, Y_{x_0}) の条件付き分布が異なることから、交絡因子が存在する状況を反映したものとみなせる。図 2.3 から、PRIC は、 $\text{pr}(x_1)$ の値が大きくなるにつれて増加していること、そして $\text{pr}(x_1)$ の値それぞれに対して PRIC は右側に裾をひいた単峰型のグラフとなっていることがわかる。これに対して、 $\text{pr}(Y > y)$ は、 $\text{pr}(x_1)$ の値に応じて多少の変化はみられるものの、おおむね図 2.2 と同様な形状をとっており、回避行動の有無が十分には反映されていないことがわかる。



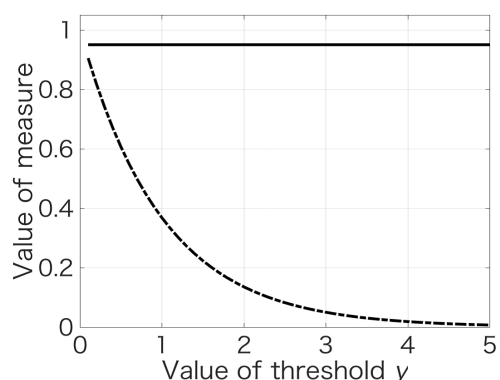
(a). $\text{pr}(x_1) = 0.05$ の場合



(b). $\text{pr}(x_1) = 0.35$ の場合



(c). $\text{pr}(x_1) = 0.65$ の場合



(d). $\text{pr}(x_1) = 0.95$ の場合

図 2.2: $(\alpha_0, \alpha_1) = (0.50, 0.50)$ とし, 外生性が成り立つ状況を想定した場合 (実線は PRIC, 鎖線は $\text{pr}(Y > y)$ の関数形をそれぞれ表す)

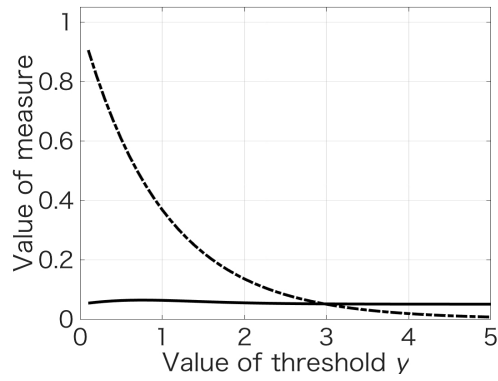
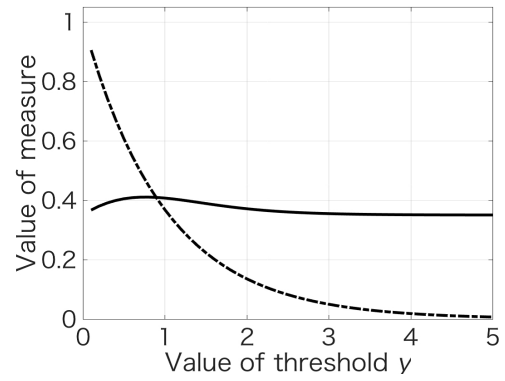
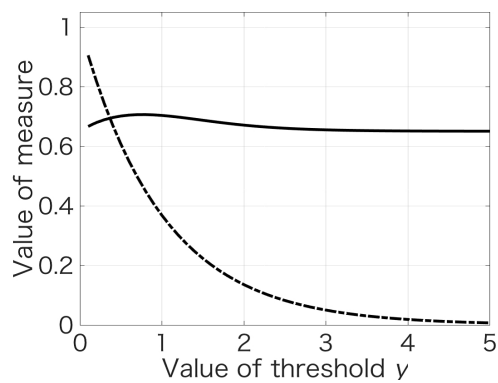
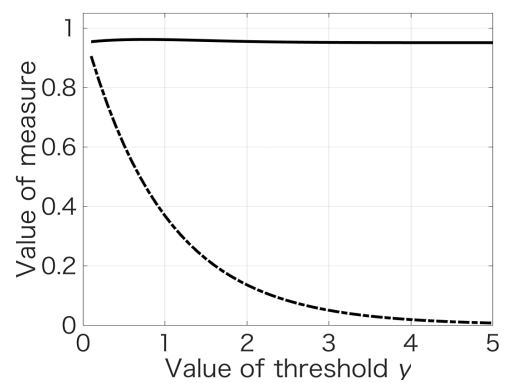
(a). $\text{pr}(x_1) = 0.05$ の場合(b). $\text{pr}(x_1) = 0.35$ の場合(c). $\text{pr}(x_1) = 0.65$ の場合(d). $\text{pr}(x_1) = 0.95$ の場合

図 2.3: $(\alpha_0, \alpha_1) = (0.10, 0.90)$ とし, 交絡因子が存在する状況を想定した場合 (実線は PRIC, 鎖線は $\text{pr}(Y > y)$ の関数形をそれぞれ表す)

2.3. 数値例

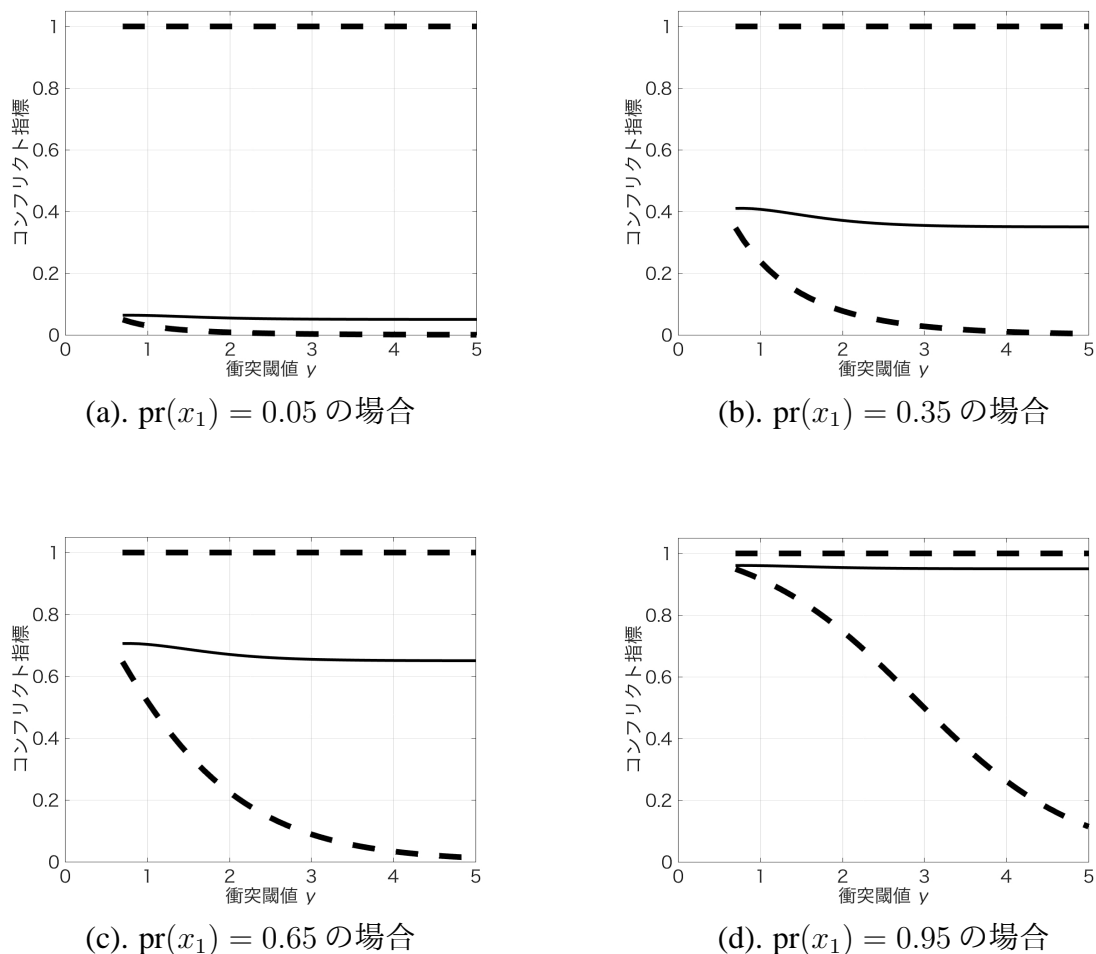


図 2.4: PRIC と存在範囲の関係 (実線は PRIC, 破線は存在範囲の上下界をそれぞれ表す)

最後に, (2.15) 式と (2.16) 式を仮定したうえで, 図 2.3 と同じパラメータ設定に基づいて, PRIC と (2.18) 式を比較したものを図 2.4 に与える. まず, 本数値例において付加した因果的仮定が成立しない $y = 0$ の周辺領域においては PRIC の上界と下界を与えることができないことが確認できる. また, 下界の関数は, $\text{pr}(x_1)$ の値によらず, y に関する減少関数となっており, y が大きくなるにしたがって 0 に近づいていることが確認できる. このような PRIC と下界の関係は, 前節で得られた考察と一致する.

2.4 “The 100-Car Naturalistic Driving Study”データへの応用

2.4.1 背景

本節では、前節までの結果を Dingus et al. (2006) によって与えられた “The 100-Car Naturalistic Driving Study (以降, 100-Car Study と呼ぶ)” データに適用する。このデータは、多様かつ複雑な衝突事故の状況に対するドライバーの認知心理学的な側面を明らかにするために、2003年1月から2004年7月の期間に100人のドライバーから約1年以上をかけて、National Highway Traffic Safety Administration と Virginia Department of Transportation によって収集されたものである。ドライバーは新聞広告をとおして募集されており、“naturalistic” なデータが収集されていることから、100-Car Study は典型的な観察研究であると判断できる。Dingus et al. (2006) は、このデータに基づいて、ドライバーの運転操作や行動、周辺車両状況や天候などを含む運転環境などと衝突事故の発生可能性との関連性について詳細な報告を行っている。

本節では、100-Car Study におけるコンフリクトのうち最も多く観測された追突事故状況をとりあげることとする。ここに、回避行動あり ($X = x_1$) は、車両性能の限界に近いブレーキング、ステアリング、加速(減速)やそれらの組み合わせによる運転操作を表しており、回避行動なし ($X = x_0$) は、ドライバーが回避行動を一切とらないことを示している。また、Dingus et al. (2006) は衝突事故が引き起こされる可能性の程度を、(a) 加減速度の値、(b) 車間距離と相対速度、(c) ドライバー自身による「イベントボタン」の押下や分析者によるビデオ画像に基づいた判断といった主観的評価、の三つの観点から総合的に判断し、4段階で評価している。この4段階のうち、衝突に次ぐ段階を Dingus et al. (2006) は near-crash と呼

び, その “glossary of terms”の中で次のように定義している.

“**Near-crash** - Any circumstance that requires a rapid, evasive maneuver by the subject vehicle, or any other vehicle, pedestrian, cyclist, or animal to avoid a crash. A rapid, evasive maneuver is defined as a steering, braking, accelerating, or any combination of control inputs that approaches the limits of the vehicle capabilities.”

このことから, Dingus et al. (2006)における near-crash は, 本論文で議論の対象としている狭義の意味でのニアミス (Guttinger, 1984) と同義であるとみなす. なお, この4段階は順を追うにしたがって衝突事故が起こる可能性が低くなるようにレベル分けされているが, 本論文では, 議論を簡単にするために, 交通事故を引き起こす可能性の低い二つのレベルを無視することにする. その上で, 観測対象車両が他の車両や物体に接触することのないものの衝突寸前の差し迫る危険な状態 (ニアミス) を「衝突なし」とみなして $Y > y$ に対応させて y_1 と記し, 観測対象車両が他の車両や物体に接触している状態を「衝突あり」とみなして $Y \leq y$ に対応させて y_0 と記す.

2.4.2 加害追突に着目したケース

まず, 後続車両を回避行動の観察対象車両とした加害衝突の状況に注目し, そのデータを表 2.1 に与える. さて, 加害衝突の状況においては, 一般に後続車両のドライバーの回避行動が衝突に対して支配的であると考えられるため, 危険なドライバーや不運なドライバーが存在する割合は小さい, すなわち, $\text{pr}(x_1, y_0) \simeq 0$ とみなして, 標準的なドライバー群が母集団, つまり $\text{pr}(Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_0) \simeq 1$ と仮定するのが自然であると考えられる. その一

表 2.1: 加害衝突データ

	衝突あり (y_0)	衝突なし (y_1)
回避行動なし (x_0)	7	0
回避行動あり (x_1)	8	380

方で, 表 2.1 より, $\text{pr}(x_0, y_0)$ の推定値も小さい値をとっていることが確認できる. しかし, この確率に対応するセルには標準的なドライバーが含まれている可能性があること, そして, 加害衝突の状況においては一般に後続車両のドライバーの回避行動が衝突に対して支配的であるという考察にしたがって, $\text{pr}(x_0, y_0)$ の推定値は小さな値ではあるものの 0 ではないと仮定する. これらの仮定の下では,

$$\text{pr}(x_1, Y = y_1 | Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_0) \simeq \text{pr}(y_1) \simeq \text{pr}(x_1) \quad (2.21)$$

となる. そこで, 表 2.1 の事例をとおして (2.21) 式が成り立つかどうかを確認してみよう. 表 2.1 に基づいて $\text{pr}(y_1)$ の推定値 $\hat{\text{pr}}(y_1)$ と $\text{pr}(x_1)$ の推定値 $\hat{\text{pr}}(x_1)$ をそれぞれ計算すると, $\hat{\text{pr}}(y_1) = 380/395 = 0.962$ (標準誤差:0.010) であり, $\hat{\text{pr}}(x_1) = 388/395 = 0.982$ (標準誤差:0.007) が得られる. このことから, $\hat{\text{pr}}(x_1)$ と $\hat{\text{pr}}(y_1)$ に有意な差はなく, データに基づいて $\text{pr}(Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_0) \simeq 1$ という仮定が積極的には否定されないことが示唆される. そこで, $\text{pr}(Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_0) \simeq 1$ が成り立つものと仮定すると, この解析結果から, ドライバーの多くが差し迫る危険について適切に認知できる状況にあり, 回避行動をとって衝突事故を起こさなかったものと推察される.

2.4.3 被害追突に着目したケース

次に, 100-Car Study において, 前走車両を回避行動の観察対象車両とした被害衝突の状況について考えてみよう. このデータを表 2.2 に与える. 表 2.2 に基づいて $\text{pr}(y_1)$ の推定

表 2.2: 被害衝突データ

	衝突あり (y_0)	衝突なし (y_1)
回避行動なし (x_0)	7	21
回避行動あり (x_1)	5	49

値 $\hat{\text{pr}}(y_1)$ と $\text{pr}(x_1)$ の推定値 $\hat{\text{pr}}(x_1)$ をそれぞれ計算すると, $\hat{\text{pr}}(y_1) = 70/82 = 0.854$ (標準誤差:0.039), $\hat{\text{pr}}(x_1) = 54/82 = 0.659$ (標準誤差:0.052) となる. このことから, 2.2.2 節で述べたように, $\text{pr}(Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_0) \simeq 1$ を仮定することは適切ではないと推察される. 実際, 被害衝突事故の場合は, 一般に前走車両のドライバーの回避行動が衝突に対して支配的であるとは考えにくく, 解析対象となる母集団にはさまざまなドライバーが存在していると考えるのが自然である. このような状況においては, 既存の交通事故リスク指標を用いて交通コンフリクトを評価することは困難となる. 一方, 単調性が仮定できる場合には, X と Y について SITA 条件を満たす共変量集合 U を観測することで, 被害衝突事故のような状況においても, PRIC を用いて交通コンフリクトを定量的に評価することができる. この場合には, 共変量として, 路面状況 (滑りやすさなど) や車両メンテナンス状況 (タイヤの摩耗など) などを解析に加える必要があると推察されるが, 100-Car Study ではこれらの共変量は観測されていないため, SITA 条件に基づいて PRIC を推定することはできない. そこで, 2.2.3 節で述べたように, いくつかの因果的仮定を加えて PRIC の存在範囲を与えることを

試みる。被害衝突事故は後続車両の運転状態と密接に関わるため、観察対象ドライバーが衝突事故の可能性を適切に認知しにくい複雑な運転状況であることが想定される。そこで、本節では

$$\text{pr}(x_1|Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_0) \leq \min\{\text{pr}(x_1|Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_1), \text{pr}(x_1|Y_{x_1} = y_0, Y_{x_0} = y_0)\} \quad (2.22)$$

$$\text{pr}(Y_{x_1} = y_0, Y_{x_0} = y_0) \leq \text{pr}(Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_1) \quad (2.23)$$

を仮定する。第一の仮定は、標準的なドライバーが実際に回避行動をとる割合は安全なドライバーや危険なドライバーが実際に回避行動をとるドライバーの割合より少ないことを意味しており、標準的なドライバーが回避行動をとらない(あるいは、回避行動をとりにくい)状況を想定している。また、第二の仮定は、危険なドライバーよりも安全なドライバーが多いことを意味している。(2.22)式は、一般的な交通状況において前走車両のドライバーが後続車両が回避行動をとることを期待したり、後続車両の接近に気がつかずに回避行動をとらない傾向があることを反映したものである。このことは、蓮花・向井(2012)の第六章でも述べられているように、ドライバーが差し迫る危険を特定する”ハザード知覚”を正しく行えていないことや、そのハザードの発生可能性を見積もる”リスク知覚”を正しく行えていない状況に対応する。一方、(2.23)式は、被害衝突事故が前走車両のドライバーの回避行動の有無よりも後続車両のドライバーがとる回避行動に大きく依存することを考慮したものである。

このときの PRIC の存在範囲は、(2.18)式と同様な議論により

$$0 \leq \text{pr}(x_1, y_1|Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_0) \leq \frac{\text{pr}(x_1, y_1)}{\text{pr}(x_1, y_1) + \text{pr}(x_0, y_0)}$$

で与えられ、これに (2.14) 式が付加的に成り立つと仮定すると

$$\frac{1}{2} \leq \text{pr}(x_1, y_1 | Y_{x_1} = y_1, Y_{x_0} = y_0) \leq \frac{\text{pr}(x_1, y_1)}{\text{pr}(x_1, y_1) + \text{pr}(x_0, y_0)}$$

が得られる。この存在範囲の上界の推定値は 0.875(標準誤差:0.044)であるから、PRIC の存在範囲は追加した仮定の下で [0.500, 0.875] となり、 $\hat{\text{pr}}(y_1) = 0.854$ や $\hat{\text{pr}}(x_1) = 0.659$ を含むことが確認できる。

2.5 まとめ

本章では、因果推論の枠組みに基づいて、交通コンフリクトの新たなリスク評価指標として“potential response inspired conflict (PRIC)”を提案し、その性質を明らかにした。そのうえで、いくつかの仮定の下では、PRIC をとおして、既存の交通事故リスク指標が ICSTCT (Amundsen and Hyden, 1977) が与えた交通コンフリクトの定義を反映した指標となっていることを示した。交通事故が引き起こされる可能性の程度が既存の交通事故リスク指標によって適切に評価されていることが前提であるが、このことは、交通工学的に合理的な条件下では、回避行動に基づく主観的方法、時間的・空間的な物理量に基づく客観的方法、あるいは Dingus et al. (2006) のような主観的方法と客観的方法の両方に基づく総合的判断による交通コンフリクトの定量的評価が、PRIC をとおして統計的な観点から正当化されることを示唆する。また、(a) 外生性が成り立つ、(b) 単調性が成り立ち、かつ十分な共変量集合を観測できるといった状況では、PRIC は識別可能であることを示した。加えて、特定の条件下で標準的なドライバーしか存在しない場合、その条件下で PRIC が識別可能となることを示した。この識別可能条件から導かれる PRIC の式は、母集団が異質なドライバー群によって構成されることを統計的な観点から正当化するのに重要な役割を果たす。さら

に, 交通コンフリクト技術においては, 一般に交絡因子は同定されていないことを踏まえて, いくつかの因果的仮定の下で, 観察確率を用いて PRIC に対する存在範囲を与えた. 最後に, 数値例および “The 100-Car Naturalistic Driving Study”(Dingus et al., 2006) データへの応用をとおして, PRIC の有用性を考察した. 本章の結果より, PRIC は, 交通コンフリクトの定義にある反事実的表現を踏まえたものであり, 交通コンフリクトを適切に評価するのに重要な役割を果たすものと考えられる.

第3章 潜在反応モデルを利用した交通コンフリクトの評価指標の拡張

本章では、前章で提案した交通コンフリクトの評価指標である PRIC を拡張した形で再定義し、改めて PRIC の有用性を示す。なお、本章の内容は、ドライバーがとる回避行動のタイプに着目した Yamada and Kuroki (2016a) の報告をまとめたものである。

3.1 節では、前章で提案した PRIC を拡張し、複数の回避行動タイプに対応することの意義について述べる。3.2 節では、回避行動の有無のみに着目した場合の PRIC について振り返る。そのうえで、3.3 節では、複数の回避行動タイプを扱うために、PRIC を改めて定式化し、その性質について述べる。さらに、その識別可能条件と存在範囲について議論する。3.4 節では、実験研究の報告を参考にした交通事故リスクの分布に基づいた数値例を通して、PRIC と既存の交通事故リスク指標の関数形の違いを明らかにする。3.5 節では、観察実験への適用事例として 100-Car Study (Dingus et al., 2006) において回避行動タイプごとに集計されたデータに拡張した PRIC を用い、その有用性と問題点について議論する。

3.1 はじめに

2 章では、Davis et al. (2011) のアイデアに基づいて、反事実的表現を反映した交通コンフリクトの評価指標として、potential response inspired conflict (PRIC) を提案した。この PRIC は回避行動の有無を興味の対象としたときの潜在的な交通事故リスクを確率的に評価する

ものであった。一方、日常の運転行動についての観察研究では (Dingus et al. 2006), ドライバーは様々な回避行動をとることが報告されている。Dingus et al. (2006) で最も多く観測された追突事故状況においても、ブレーキング, 車線変更, 加速またはそれらの組み合わせによる回避行動をとっている。一般に、ドライバーがどのような回避行動をとるかによって衝突事故の危険性は異なると考えるのが合理であり、したがって回避行動のタイプに応じてコンフリクトを評価することは重要である。しかし、2章で提案した PRIC は、ブレーキング, 車線変更, 加速などといった回避行動のタイプを考慮せずに定式化されている。そこで、本章では、複数の回避行動タイプを表すことができる潜在反応変数を用いたうえで PRIC を改めて定式化し、その有用性を示す。回避行動タイプに着目した場合における交通コンフリクトの評価指標の定式化に先立って、まず、回避行動の有無のみに着目した場合における交通コンフリクトの評価指標について振り返るとともに、Guttinger (1984) で述べられている交通コンフリクトの位置づけとの関連性について確認する。

3.2 回避行動の有無のみに着目した場合の交通コンフリクト の評価指標

まず、2章で提案した PRIC について振り返るとともにその解釈についての深堀を行う。2章では、Amundsen and Hyden(1977) の交通コンフリクトの定義に従って、以下の三つの確率的評価指標を (2.1) 式と (2.2) 式と (2.3) 式に示した。(2.1) 式は $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \neq 0$ を仮定したうえで

$$\text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$$

と表され、標準的なドライバーが実際に回避行動をとり衝突事故を起こさない確率を意味している。(2.2)式は $\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \neq 0$ を仮定したうえで

$$\text{pr}(Y > y | x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$$

と表され、標準的なドライバーが実際に回避行動をとったときに衝突事故を起こさない確率を意味している。(2.3)式は $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \neq 0$ を仮定したうえで

$$\text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$$

と表され、標準的なドライバーが実際に衝突事故を起こさない確率を意味している。ここで、(2.3)式に関連して、

$$\text{pr}(Y \leq y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = 1 - \text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$$

と表現される式は、標準的なドライバーが実際に衝突事故を起こした確率を意味しており、Davis et al. (2011) が“crash-to-conflict ratio for the initial events U_2 ”と呼んでいたものに相当する。また、Davis et al.(2011)では、交通コンフリクトの定義に着目したうえで、以下の二つのポイントについて言及している。

“First, the situation referred to appears to have three components:
an initial condition, the actions of the road users, and a collision-related outcome. Second, an observed event qualifies as a conflict only if it satisfies a counterfactual test”

(2.1)式、(2.2)式、(2.3)式はそれぞれ、初期状況 U_2 と回避行動 X と衝突事故の結果 Y から構成されており、Davis et al. (2011) が言及した第一のポイントに合致している。また、 Y_x は反事実的記述を数学的に表現したものであり、(2.1)式、(2.2)式、(2.3)式は、観察実験により

得られる事実と反事実を定量的に反映した因果的な量に基づくため, Davis et al. (2011) が言及した第二のポイントに合致している. したがって Davis et al. (2011) が言及した二つのポイントは本論文で提案した上記の三つの指標に反映されていると考えることができる. ところで, Guttinger (1984) は交通コンフリクトについて以下のように考察している.

“For some, the conflict is an event that precedes an evasive action that can be either successful or not (collision). For others, it is the same as a near-miss situation after an evasive action. In this last view, a conflict can not lead to a collision but is an event parallel with a collision.”

(2.1) 式は, 実際にとった回避行動を考慮に入れていることから, Guttinger の記述における第二の考察について評価しているものと考えられる. 一方, (2.2) 式も実際にとった回避行動を考慮に入れているが,

$$\begin{aligned} & \text{pr}(Y > y | x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\ &= \frac{\text{pr}(x_1, Y > y, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)}{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} = \frac{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)}{\text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} = 1 \end{aligned}$$

より, (2.2) 式はいかなる y に対しても常に 1 となることから, 評価指標として適切でないことがわかる. (2.3) 式については, その式の表現において, 実際にとった回避行動を考慮に入れていないようにみえるため, Guttinger の記述における第一の考察について評価しているものと考えられるかもしれない. しかしながら, 回避行動の有無にのみ着目した場合に

おいては,

$$\begin{aligned}
& \text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
&= \text{pr}(x_0, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) + \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
&= \text{pr}(x_0, Y_{x_0} > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) + \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) \\
&= \text{pr}(x_1, Y_{x_1} > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(x_1, Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)
\end{aligned}$$

となることから (2.3) 式は (2.1) 式と等しく, (2.3) 式においても回避行動が反映されていると考えることができる.

ここで, Guttinger の記述における第一の考察に関連する確率的なリスク評価指標として, 潜在反応モデルの枠組みに基づいた $\text{pr}(z | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ を考えることができる. ここで, Z は回避行動に影響されない共変量を表すものである. この指標は

$$\text{pr}(z | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \frac{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | z)}{\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)} \text{pr}(z)$$

のように変形できることから, 必要十分性の確率である $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ (PNS; Pearl, 1999, 2009), と Z が与えられたときの条件付き必要十分性の確率である $\text{pr}(Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y | z)$ (conditional PNS; Kuroki and Cai, 2011) の比率を意味していることがわかる. PNS は回避行動の有無が衝突事故に対する実際の原因となっている程度を表したものと解釈することができる. $\text{pr}(z | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$ の識別可能性など PNS の詳細については, Kuroki and Cai (2011), Pearl (1999, 2009), Tian and Pearl (2002) を参照されたい.

3.3 回避行動のタイプに着目した場合の交通コンフリクトの評価指標

3.3.1 定義とその解釈

前節では、回避行動の有無にのみに着目した場合の交通コンフリクトの評価指標についての概要を述べた。しかし、一般に、ドライバーがどのような回避行動をとるかによって衝突事故の危険性は異なると考えるのが合理である。前節で紹介した山田・黒木 (2016) によって提案された PRIC の式は、ブレーキング、車線変更、加速などといった回避行動のタイプを考慮せずに定式化されている。この問題を解決するために、ドライバーが回避行動を複数タイプ $\{x_0, \dots, x_p\}$ から選択する場合について考える。この考えに基づいて、PRIC を

$$\text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \quad (3.1)$$

$(j, k = 0, 1, \dots, p; j \neq k)$ のように拡張する。ここでは、 $\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \neq 0$ を満たすものとする。 $\text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y)$ は、回避行動 $X = x_j$ をとれば衝突事故を起こさず、回避行動 $X = x_k$ をとれば衝突事故を起こすドライバー群において、実際には回避行動 $X = x_j$ をとり衝突事故を起こさない確率を意味している。なお、 X が2値変数である場合 ($x \in \{x_0, x_1\}$) には、(3.1) 式において $j = 1, k = 0$ とおくことで、(3.1) 式は (2.1) 式と一致することがわかる。そこで、本論文では、両者を区別することなく PRIC と呼ぶことにする。さて、一貫性より、

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_j, Y \leq y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\ &= \text{pr}(x_j, Y_{x_j} \leq y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) = 0 \end{aligned}$$

であるから, PRIC は

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\ & = \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \end{aligned} \quad (3.2)$$

とも書き換えることができることに注意する. 特別なケースとして, X が2値変数である場合には ($x \in \{x_0, x_1\}$),

$$\text{pr}(x_1 | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y) = \text{pr}(Y > y | Y_{x_1} > y, Y_{x_0} \leq y)$$

が成り立つ(山田・黒木, 2016).

3.3.2 識別可能条件

PRIC は, 一般に, 観察確率 $\text{pr}(x, Y \leq y)$, $\text{pr}(x, Y > y)$ と潜在反応変数の反事実確率 $\text{pr}(x, Y_{x'} \leq y)$, $\text{pr}(x, Y_{x'} > y)$ ($x, x' \in \{x_0, x_1, \dots, x_p\}, x \neq x'$) のいずれか一方のみの情報ではもちろんのこと, 仮に両方の情報が得られたとしても何らかの因果的仮定を付加しなければ識別可能とはならない.

このことを踏まえて, PRIC の識別可能条件を明らかにするために, まず, 閾値 y に対して $\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) = 1$ であるケースを考えよう. このとき, (3.2) 式より, ただちに

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\ & = \text{pr}(x_j, Y > y) = \text{pr}(x_j) \end{aligned} \quad (3.3)$$

を得ることができる. このことは, (3.3) 式が, 「与えられた y において母集団が ($Y_{x_j} >$

$y, Y_{x_k} \leq y$) を満たすドライバー群のみによって構成されている」という交通工学的考察をデータに基づいて正当化する根拠の一つとなることを示唆している. 一方, (3.3) 式について待遇をとることにより「 $\text{pr}(x_j, Y > y) \neq \text{pr}(x_j)$ ならば $\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \neq 1$ が成り立つ」といった命題が導かれる. この命題は母集団が異質なドライバー群によって構成されていることをデータに基づいて検証できることを示している.

なお, 自明なことであるが, $\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) = 1$ と $\text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} > y) = 1$ が同時に成り立つことはないことに注意されたい. 適用例でも紹介するが, $\text{pr}(x_j) = \text{pr}(x_j, Y > y)$ と $\text{pr}(x_k) = \text{pr}(x_k, Y > y)$ のそれぞれを帰無仮説とする仮説検定問題を考えたとき, その両方が棄却されない可能性がある. しかし, そのときに $\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) = 1$ と $\text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} > y) = 1$ が同時に正当化されるわけではなく, 統計的に必要条件が成り立つことが確認されただけに過ぎない. この仮定を正当化するためには, 交通工学的知見による判断が不可欠となる (山田・黒木, 2016).

次に, 外生性よりゆるやかな条件として $X = x_j \perp (Y_{x_j}, Y_{x_k})$ を仮定する. 本論文では, この条件を $X = x_j$ に関する外生性とよぶことにする. このとき, 任意の y について, PRIC を

$$\text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) = \text{pr}(x_j) \quad (3.4)$$

と変形することができる. Perkins and Harris (1967) は

“Over 20 objective criteria for traffic conflicts (or impending accident situations) have been defined as to specific accident patterns at intersections. Essentially, these traffic conflicts are defined by the occurrence of evasive actions, such as braking or weaving, which are forced on a driver by an impending accident situation or a traffic violation.”

と述べ, 回避行動の観点から交通コンフリクトの概念を導入している. (3.3) 式は, 与えられた閾値 y において回避行動 $X = x_j$ では衝突事故を起こさないものの回避行動 $X = x_k$ で

は衝突事故を起こすようなドライバーしか存在しない状況, そして (3.4) 式は, $X = x_j$ に関する外生性が仮定できる状況においては, Perkins and Harris(1967) の考察が統計的な観点から正当化されることを示唆している. ここに, ドライバー群を限定することで得られた (3.3) 式と $X = x_j$ に関する外生性という仮定に基づいて得られた (3.4) 式とは見かけ上は一致しているものの, その解釈は異なることに注意されたい. 前者は与えられた閾値 y の下で成り立つ性質であり, $\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) = 1$ が成り立つ場合において, 閾値 y と異なる閾値 y' の下で $\text{pr}(Y_{x_j} > y', Y_{x_k} \leq y') = 1$ が成り立つとは限らない. これに対して, 後者は, $X = x_j$ に関する外生性という仮定の下で, 任意の y に対して成り立つ性質である.

最後に, $\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) = 1$ でもなく, $X = x_j$ に関する外生性も仮定できないケースについて議論する. このとき, 興味ある母集団に属するドライバーが $Y_{x_j} \geq Y_{x_k}$ を満たすと仮定する. Davis et al. (2011) はこの仮定を単調性と呼んでおり, 2.2.1 節のケースに当てはめた場合, 危険なドライバーが存在しないことを意味する. 単調性の仮定の下では, $x_j > x_k$ ($j > k$) に対して $\text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} > y) = 0$ が成り立つことに注意すると, 任意の y について

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\ &= \frac{\text{pr}(x_j, Y > y) - \text{pr}(x_j, Y_{x_k} > y) + \text{pr}(x_j, Y \leq y, Y_{x_k} > y)}{\text{pr}(Y_{x_j} > y) - \text{pr}(Y_{x_k} > y) + \text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} > y)} \\ &= \frac{\text{pr}(x_j, Y > y) - \text{pr}(x_j, Y_{x_k} > y)}{\text{pr}(Y_{x_j} > y) - \text{pr}(Y_{x_k} > y)} = \frac{\text{pr}(Y_{x_j} > y | x_j) - \text{pr}(Y_{x_k} > y | x_j)}{\text{pr}(Y_{x_j} > y) - \text{pr}(Y_{x_k} > y)} \text{pr}(x_j) \end{aligned}$$

が得られる. ある y を与えたとき, $\text{pr}(Y_{x_j} > y | x_j) - \text{pr}(Y_{x_k} > y | x_j)$ は実際に回避行動 $X = x_j$ をとったドライバー群における $X = x_j$ と $X = x_k$ の因果リスク差と呼ばれるものであり, $\text{pr}(Y_{x_j} > y) - \text{pr}(Y_{x_k} > y)$ は母集団における因果リスク差と呼ばれるものとなっている (Rothman et al., 2008). したがって, これら二つの因果リスク差の比は, 回避行動による衝突事故への影響が母集団全体と回避行動 $X = x_j$ をとったドライバー群でどの程度異なる

のかを示した尺度となっている。また, SITA 条件を満たす変数集合 U が観測可能であるとき, 一致性より

$$\text{pr}(Y_{x_k} > y | x_j) = E_u(\text{pr}(Y > y | x_k, U) | x_j),$$

$$\text{pr}(x_j, Y_{x_j} \geq y) = \text{pr}(x_j, Y > y),$$

$$\text{pr}(Y_{x_k} > y) = E_u(\text{pr}(Y > y | x_k, U)),$$

$$\text{pr}(Y_{x_j} > y) = E_u(\text{pr}(Y > y | x_j, U))$$

となる。ここに, $E_u(\cdot | x_j)$ は $X = x_j$ を与えたときの U の条件付き分布に基づく期待値を意味する。したがって, 単調性の仮定の下で SITA 条件を満たす変数集合 U が観測可能であれば, PRIC は識別可能となる。また, 単調性の仮定の下で $\text{pr}(Y_x > y)$ が得られる場合, 各ドライバー群の割合はそれぞれ以下の式で求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) &= \text{pr}(Y_{x_j} > y) - \text{pr}(Y_{x_k} > y) + \text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} > y) \\ &= \text{pr}(Y_{x_j} > y) - \text{pr}(Y_{x_k} > y) \end{aligned}$$

$$\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} > y) = \text{pr}(Y_{x_k} > y) - \text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} > y) = \text{pr}(Y_{x_k} > y)$$

$$\text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} \leq y) = \text{pr}(Y_{x_j} \leq y) - \text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} > y) = \text{pr}(Y_{x_j} \leq y)$$

3.3.3 存在範囲

一般に、観察研究においては、前節で与えた識別可能条件が常に成り立つとは限らない。また、単調性が成り立つ状況であっても、 $\text{pr}(x, Y_{x'} > y)$ ($x, x' \in \{x_0, x_1, \dots, x_p\}, x \neq x'$) を得られない限り、PRICを適切に推定することはできない。その場合、PRICの定義式からわかるように、因果的仮定を付加しない限り、その存在範囲は $[0, 1]$ で与えられるという意味で有用な情報を得ることが難しくなる。そこで、いくつかの因果的仮定を置き、観察確率 $\text{pr}(x, Y \leq y)$ や $\text{pr}(x, Y > y)$ を用いて PRIC の存在範囲を求めることにする。

まず、

$$\begin{aligned} \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\ \geq \max\{\text{pr}(x_l | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y), \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} > y)\} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\text{pr}(x_k | Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} \leq y) \geq \text{pr}(x_k | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \quad (3.6)$$

$$\text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} \leq y) \geq \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} > y) \quad (3.7)$$

が成り立つことを仮定する。このことは、直感的には、 $X = x_j$ が衝突事故を防ぐのに効果的であることが知られているような状況においては、ドライバーは他の回避行動よりも $X = x_j$ をとる傾向にあることを意味している。これらの仮定の下では、(3.1) 式の存在範囲は以下に与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\text{pr}(x_j, Y > y)}{p \times \text{pr}(x_j, Y > y) + \text{pr}(x_k, Y \leq y)} \\ \leq \text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \leq 1 \end{aligned} \quad (3.8)$$

ここで、上記に付加した因果的仮定から (3.8) 式の下界が得られることを確認する。まず、

その第一ステップとして、次の式が得られることを示す。

$$\text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \geq \text{pr}(Y_{x_j} > y | x_k, Y \leq y) \quad (3.9)$$

上記仮定より、

$$\begin{aligned} & \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_k, Y \leq y) - \text{pr}(x_k | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_j, Y > y) \\ &= \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_k | Y \leq y, Y_{x_j} \leq y) \text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} \leq y) \\ & \quad - \text{pr}(x_k | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_j | Y > y, Y_{x_k} > y) \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} > y) \\ &\geq \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_k | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} \leq y) \\ & \quad - \text{pr}(x_k | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} > y) \\ &\geq \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_k | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\ & \quad \times (\text{pr}(Y_{x_j} \leq y, Y_{x_k} \leq y) - \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} > y)) \geq 0 \end{aligned}$$

と変形することができる。これにより以下の式、つまり (3.9) 式を得る。

$$\text{pr}(x_j, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_k, Y \leq y) \geq \text{pr}(x_k, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(x_j, Y > y),$$

第二ステップとして、(3.5) 式、(3.6) 式、(3.7) 式から以下の式が得られることを示す。

$$\begin{aligned} \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) &\leq p \times \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y) \\ &\quad + \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_k, Y \leq y) \end{aligned} \quad (3.10)$$

まず, 以下のように式を変形する.

$$\begin{aligned}
 \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) &= \sum_{l=0}^p \text{pr}(x_l, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\
 &= \sum_{l \neq j, k} \text{pr}(x_l, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) + \text{pr}(x_j, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\
 &\quad + \text{pr}(x_k, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\
 &= \sum_{l \neq j, k} \text{pr}(x_l, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) + \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y) \\
 &\quad + \text{pr}(Y_{x_j} > y | x_k, Y \leq y) \text{pr}(x_k, Y \leq y)
 \end{aligned}$$

ここで, 上記の式の第一項と第三項は (3.9) 式と付加した因果的仮定よりそれぞれ次のように変形できる.

$$\begin{aligned}
 \sum_{l \neq j, k} \text{pr}(x_l, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) &= \sum_{l \neq j, k} \text{pr}(x_l | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\
 &\leq \sum_{l \neq j, k} \text{pr}(x_j | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\
 &= (p-1) \text{pr}(x_j, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) = (p-1) \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y),
 \end{aligned}$$

$$\text{pr}(Y_{x_j} > y | x_k, Y \leq y) \text{pr}(x_k, Y \leq y) \leq \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_k, Y \leq y)$$

これらの式を組み合わせることで, (3.10) 式を得る.

最後のステップとして, (3.10) 式から, 以下のように式変形することで,

$$\begin{aligned}
 \text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) &= \frac{\text{pr}(x_j, Y > y, Y_{x_k} \leq y)}{\text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y)} \\
 &= \frac{\text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y)}{\left(\begin{array}{l} \sum_{l \neq j, k} \text{pr}(x_l, Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\ + \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y) \\ + \text{pr}(Y_{x_j} > y | x_k, Y \leq y) \text{pr}(x_k, Y \leq y) \end{array} \right)} \\
 &\geq \frac{\text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y)}{\left(\begin{array}{l} p \times \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y) \\ + \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_k, Y \leq y) \end{array} \right)} \\
 &= \frac{\text{pr}(x_j, Y > y)}{p \times \text{pr}(x_j, Y > y) + \text{pr}(x_k, Y \leq y)}
 \end{aligned}$$

となり, (3.8) 式の下界を導出できる. ここで, (3.5) 式, (3.6) 式, (3.7) 式は, 与えられた y の値によっては成立せず, PRIC の下界が定義されない場合があることに注意する.

加えて, $\text{pr}(Y_x > y)$ と $\text{pr}(x, Y > y)$ が得られる場合, PRIC は

$$\begin{aligned}
 &\text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \\
 &= \frac{\text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y)}{\left(\begin{array}{l} \text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y) \text{pr}(x_j, Y > y) \\ + \text{pr}(Y_{x_j} > y | x_k, Y \leq y) \text{pr}(x_k, Y \leq y) \\ + \sum_{l \neq j, k} \text{pr}(Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y | x_l) \text{pr}(x_l) \end{array} \right)}.
 \end{aligned}$$

と変形できる. したがって, $\text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y)$ と $\text{pr}(Y_{x_j} > y | x_k, Y \leq y)$ がそれぞれ $[\alpha_l(x_k, x_j), \alpha_u(x_k, x_j)]$ と $[\beta_l(x_k, x_j), \beta_u(x_k, x_j)]$ の範囲にある場合, PRIC の存在範囲は以

下に与えられる.

$$\frac{\alpha_l(x_k, x_j) \times \text{pr}(x_j, Y > y)}{\alpha_l(x_k, x_j) \times \text{pr}(x_j, Y > y) + \beta_u(x_k, x_j) \times \text{pr}(x_k, Y \leq y) + \sum_{l \neq j, k} \text{pr}(x_l)} \leq \text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y)$$

$$\text{pr}(x_j, Y > y | Y_{x_j} > y, Y_{x_k} \leq y) \leq \frac{\alpha_u(x_k, x_j) \times \text{pr}(x_j, Y > y)}{\alpha_u(x_k, x_j) \times \text{pr}(x_j, Y > y) + \beta_l(x_k, x_j) \times \text{pr}(x_k, Y \leq y)}$$

ここで, $\text{pr}(Y_{x_k} \leq y | x_j, Y > y)$, $\text{pr}(Y_{x_j} > y | x_k, Y \leq y)$ は, Tian and Pearl (2000) で議論されている原因の確率に相当する. Tian and Pearl (2000) より, $\alpha_l(x_k, x_j)$, $\alpha_u(x_k, x_j)$, $\beta_l(x_k, x_j)$, $\beta_u(x_k, x_j)$ はそれぞれ以下の式で与えられる.

$$\alpha_l(x_k, x_j) = \max \left\{ 0, \frac{\text{pr}(Y > y) - \text{pr}(Y_{x_k} > y)}{\text{pr}(x_j, Y > y)} \right\} \quad (3.11)$$

$$\alpha_u(x_k, x_j) = \min \left\{ 1, \frac{\text{pr}(Y_{x_k} \leq y) - \text{pr}(x_k, Y \leq y)}{\text{pr}(x_j, Y > y)} \right\} \quad (3.12)$$

$$\beta_l(x_k, x_j) = \max \left\{ 0, \frac{\text{pr}(Y_{x_j} > y) - \text{pr}(Y > y)}{\text{pr}(x_k, Y \leq y)} \right\} \quad (3.13)$$

$$\beta_u(x_k, x_j) = \min \left\{ 1, \frac{\text{pr}(Y_{x_j} > y) - \text{pr}(x_j, Y > y)}{\text{pr}(x_k, Y \leq y)} \right\} \quad (3.14)$$

3.4 数値例

2.3 節では, TTC などの既存の交通事故リスク指標はガンマ分布やワイブル分布に従うことが知られていることを述べたうえで, 既存の交通事故リスク指標が従う基本的な分布

として Gumbel 型の二変量指数分布を想定し, 数値実験を行った. 一方, 様々な交通シーンを想定した実験研究においては, 既存の交通事故リスク指標が従う分布としてワイブル分布が用いられることも多い (Chin et al., 1992, Sun and Benekohal, 2005; Wang et al., 2003). そこで本節では, (Y_{x_1}, Y_{x_0}) は $X = x_j (j = 0, 1)$ が与えられた下で二変量ワイブル分布に従うものと仮定した数値実験を通して, PRIC と $\text{pr}(Y > y)$ の関数形の違いを明らかにする. ここで, 本論文の対象とする二変量ワイブル分布の生存関数は以下の式に従うものとする (Kotz et al., 2000; Lu and Bhattacharyya, 1990).

$$\begin{aligned} & \text{pr}(Y_{x_0} > y_0, Y_{x_1} > y_1 | X = x_j; \gamma_{j0}, \gamma_{j1}, \lambda_{j0}, \lambda_{j1}, \alpha_j) \\ &= \exp \left(- \left(\left(\frac{y_0}{\lambda_{j0}} \right)^{\frac{\gamma_{j0}}{\alpha_j}} + \left(\frac{y_1}{\lambda_{j1}} \right)^{\frac{\gamma_{j1}}{\alpha_j}} \right)^{\alpha_j} \right) \\ & \quad y_k > 0, \gamma_{jk} > 0, \lambda_{jk} > 0, 0 < \alpha_j \leq 1; j, k = 0, 1. \end{aligned} \quad (3.15)$$

$\gamma_{jk}, \lambda_{jk}, \alpha_j$ はそれぞれ形状パラメータ, 尺度パラメータ, 関連パラメータを表す ($j, k = 0, 1$).

これまでの実験研究 (e.g., Chin et al., 1992; Sun and Benekohal, 2005) では, TTC をはじめ, 時間に基づく既存の交通事故リスク指標は, 形状パラメータが 1.0~2.5 程度のワイブル分布に従うことが報告されている. このようなパラメータ設定を行った場合, (3.15) 式の周辺分布は, 右に裾をひいた単峰型のグラフとなる. また, 尺度パラメータにおいては, その値を小さくした場合は, 実際の回避行動 $X = x_j$ が与えられた下でドライバーが反事実の回避行動 $X = x_k$ をより衝突に近い状況でとる傾向にあることが想定される. 尺度パラメータの値を大きくした場合は, $X = x_j$ が与えられた下でドライバーが回避行動 $X = x_k$ を衝突から遠い状況でとる傾向にあることが想定される. 更に, 関連パラメータにおいては, その値を小さくした場合は, $X = x_j$ が与えられた下で潜在反応変数 Y_{x_0} と Y_{x_1} の依存関係が強い状況が想定される. 関連パラメータの値を大きくした場合は, $X = x_j$ が与えられた下で潜在反応変数 Y_{x_0} と Y_{x_1} の依存関係が弱い状況が想定され, 特に関連パラメータの値を 1 とした場合はランダム化試験が行われている状況を想定することができる.

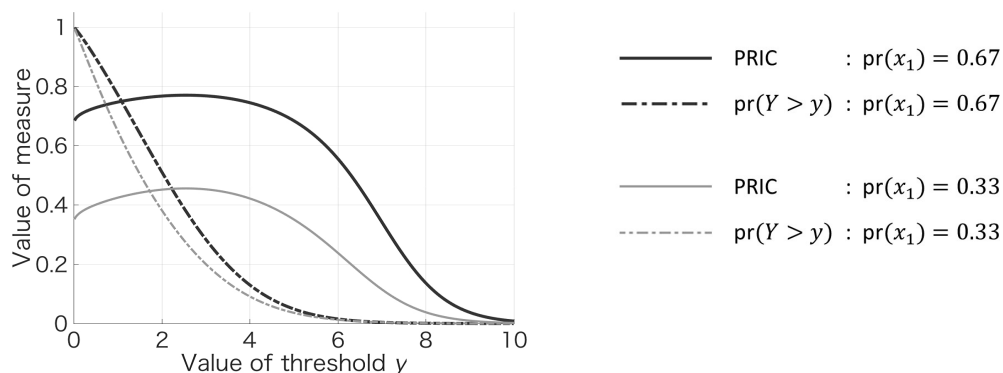


図 3.1: PRIC と $\text{pr}(Y > y)$ の関数形の比較 (1)

これまでの観察研究に基づいて、まず各パラメータを以下のように設定して数値実験を行った。

$$(\gamma_{00}, \gamma_{01}) = (1.10, 1.50), (\gamma_{10}, \gamma_{11}) = (1.10, 2.00),$$

$$(\lambda_{00}, \lambda_{01}) = (1.50, 2.50), (\lambda_{10}, \lambda_{11}) = (1.50, 3.00), \alpha_0 = \alpha_1 = 0.10,$$

図 3.1 に PRIC と $\text{pr}(Y > y)$ の関数形の違いを示す。図 3.1 より、PRIC は単峰型のグラフとなっていることがわかる。PRIC は、 $y = 0$ において $\text{pr}(x_1)$ の値と等しい値をとり、また $y = 2.55$ において $\text{pr}(x_1) = 0.33$ の場合は最大値 0.770 をとり $\text{pr}(x_1) = 0.67$ の場合は最大値 0.456 をとることが確認できる。一方、 $\text{pr}(Y > y)$ は、 y に関する減少関数になっており、 $\text{pr}(x_1) = 0.33$ のときと $\text{pr}(x_1) = 0.67$ のときの関数形に大きな違いがないことがわかる。このことから、PRIC はドライバーの回避行動を反映できているが、 $\text{pr}(Y > y)$ はドライバーの回避行動を十分に反映できていないことが示唆される。

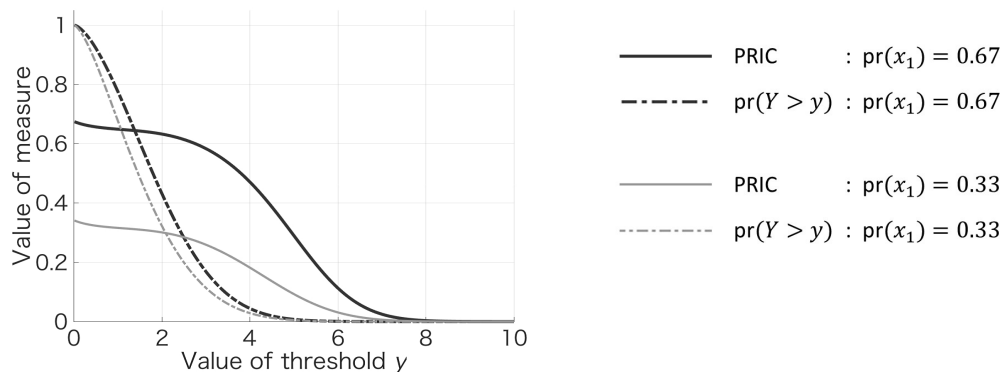


図 3.2: PRIC と $\text{pr}(Y > y)$ の関数形の比較 (2)

続いて各パラメータを以下のように設定して数値実験を行った。

$$(\gamma_{00}, \gamma_{01}) = (1.50, 1.70), (\gamma_{10}, \gamma_{11}) = (1.50, 2.20),$$

$$(\lambda_{00}, \lambda_{01}) = (\lambda_{10}, \lambda_{11}) = (1.50, 2.50), \alpha_0 = 0.90, \alpha_1 = 0.10,$$

図 3.2 に PRIC と $\text{pr}(Y > y)$ の関数形の違いを示す。図 3.2 より、PRIC と $\text{pr}(Y > y)$ はどちらも減少関数になっていることが確認できるが、PRIC のほうが $\text{pr}(Y > y)$ に比べてその傾斜が緩やかである。また、PRIC は $\text{pr}(x_1)$ の値に大きく依存しており、 $\text{pr}(Y > y)$ に比べてドライバーの回避行動を反映していることが改めて確認できる。

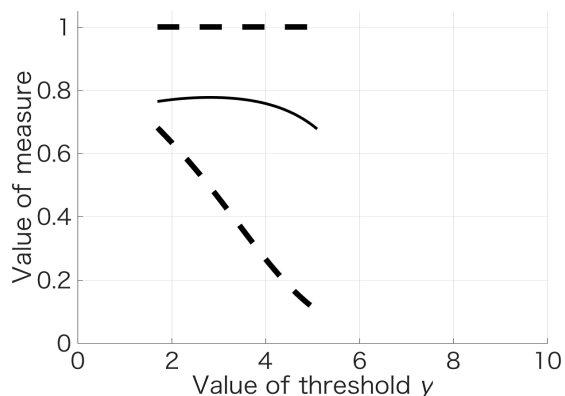


図 3.3: PRIC とその存在範囲 ($\text{pr}(x_j) = 0.67$ のとき : PRIC は実線, , 上界と下界は点線でそれぞれ表示)

最後に, 図 3.1 と同じパラメータ設定における PRIC と (3.8) 式の関係性を図 3.3 に示す. この例においては, y の値が 1.690 より小さい場合と 5.190 より大きい場合においては, 付加した因果的仮定が成立しないため PRIC の上界と下界を与えることができないことに注意されたい.

3.5 “The 100-Car Naturalistic Driving Study”における回避

行動タイプが選択可能なデータへの応用

3.5.1 背景

2.4 節と同様に本節でも, PRIC を Dingus et al.(2006) によって与えられた 100-Car Study データに適用し, 回避行動のタイプに着目した場合における PRIC の有用性について考察する. また, 2.4 節においては, 衝突事故の有無にのみ着目して解析を行ったが, 本節では衝突事故に加えてニアミスに陥ったか否にも着目して解析する. Dingus et al.(2006) では, 衝突に次いで深刻な状態を near-crash と呼んでいるが, 2.4 節でも紹介したように, 本論文では near-crash を ニアミスと呼んでいる. また, ニアミスほど深刻でないが通常の運転状態に比べて危険な状態を Dingus et al.(2006) では, インシデントと呼んでいる. ここで, 衝突事故を (y_0) , ニアミスを (y_1) , インシデントを (y_2) と表すことにする. これらの交通事故の程度から, $y_0 < y_1 < y_2$ であることを本論文では仮定する. 100-Car Study の詳細については Dingus et al.(2006) を参考にされたい.

3.5.2 回避行動の有無と交通事故の程度に着目したケース

本節では, 回避行動のタイプ X が多値の場合に先立って, 回避行動 X が二値の場合についてまず議論する. ここでは, 100-Car Study において, 追突事故状況にある後続車両のドライバー (加害衝突) を対象とし, そのデータを表 3.1 に示す. 表 3.1 において, 回避行動あり (x_1) はドライバーがなんらかの回避行動 (例えば, ブレーキングやハンドル操作やアクセル操作, またそれらの組み合わせ) をとることを表しており, 回避行動なし (x_0) はドライ

バーが回避行動を一切とらないことを表している。

表 3.1: 加害衝突: 回避行動 X が二値の場合のデータ

	衝突 (y_0)	ニアミス (y_1)	インシデント (y_2)
回避行動なし (x_0)	7	0	29
回避行動あり (x_1)	8	380	5754

追突事故状況における後続車両のドライバーに着目した場合, そのドライバーの回避行動の有無が衝突事故の有無に強く影響すると考えることは合理である. したがって, 危険なドライバーや不運なドライバーは無視できるほどに少なく, $\text{pr}(Y_{x_1} > y_0, Y_{x_0} = y_0) \simeq 1$ を仮定することができる. この仮定のもとでは, 2.2.2 節より,

$$\text{pr}(x_1) \simeq \text{pr}(Y > y_0). \quad (3.16)$$

が成り立つ. このことを, 表 3.1 について確認する. 表 3.1 より, このデータが多項分布に基づいて生成されているという仮定のもとで, $\text{pr}(x_1)$ と $\text{pr}(Y > y_0)$ の不偏推定量である $\hat{\text{pr}}(x_1) = 0.9942$ (標準誤差: 0.0010) と $\hat{\text{pr}}(Y > y_0) = 0.9976$ (標準誤差: 0.0006) を得る. したがって, $\text{pr}(x_1)$ と $\text{pr}(Y > y_0)$ に有意な差はなく, 表 3.1 は, y_0 が与えられた場合, 標準的なドライバー群で構成されていると考えることができる. このとき, PRIC, つまり, $\text{pr}(x_1, Y > y_0 | Y_{x_1} > y_0, Y_{x_0} = y_0)$ を $\hat{\text{pr}}(x_1)$ 及び $\hat{\text{pr}}(Y > y_0)$ により評価することができる. 一方, 3.16 式が成立しないことが想定されるような交通事故状況について解析を行う場合, PRIC を $\hat{\text{pr}}(x_1)$ や $\hat{\text{pr}}(Y > y_0)$ で評価するべきではない. この場合, 追加の因果的仮定を置いたうえで, PRIC の存在範囲により評価することが望ましい. 100-Car study においては, 後続車両のドライバーは衝突事故の可能性を適切に認識しやすい状況にあると想定される

ことから, y_0 が与えられた場合, (2.15) 式と (2.16) 式が成立すると考えられる. (2.18) 式より, $\text{pr}(x_1, Y > y_0 | Y_{x_1} > y_0, Y_{x_0} = y_0)$ における存在範囲の下界は 0.9989 (標準誤差:0.0004) となり, その存在範囲 $[0.9989, 1.0000]$ を得る. このことは, 標準的なドライバのほとんどが回避行動をとって衝突事故を起こさなかったことを示している.

続いて, ニアミスより深刻な状態に陥ったか否かについて着目したケースについて議論する. $\text{pr}(x_1, Y > y_1 | Y_{x_1} > y_1, Y_{x_0} \leq y_1)$ においては, $\text{pr}(Y > y_1)$ の不偏推定量は 0.9361 (標準誤差:0.0031) で与えられ, $\text{pr}(x_1)$ と $\text{pr}(Y > y_1)$ は異なっていると考えらる. したがって, $\text{pr}(Y_{x_1} > y_1, Y_{x_0} \leq y_1) \simeq 1$ は成立しない. $\text{pr}(x_1, Y > y_0 | Y_{x_1} > y_0, Y_{x_0} = y_0)$ で議論したときと同様に, y_1 について (2.15) 式と (2.16) 式が成立することを仮定する. このとき, $\text{pr}(x_1, Y > y_1 | Y_{x_1} > y_1, Y_{x_0} \leq y_1)$ の下界は 0.9988 (標準誤差:0.0005) となり, その存在範囲 $[0.9988, 1.0000]$ を得る. このことは, 標準的なドライバのほとんどが回避行動をとってニアミスより深刻な状態に陥らなかったことを示している.

3.5.3 回避行動タイプと交通事故の程度に着目したケース

本節では, 回避行動のタイプに着目した場合, つまり回避行動 X が多値であるような場合について議論する. 一般にドライバーは運転状況に応じてブレーキングやハンドル操作やアクセル操作を使い分けるため, 回避行動 X について多値を想定することは回避行動 X について二値を想定することに比べてより現実的であるといえる. Dingus et al.(2006) においては, ドライバーの回避行動をブレーキング単独・ハンドル操作単独・アクセル操作単独またはこれらの組み合わせで分類して集計を行っている. これに基づき, 車両性能の限界に近いブレーキングのみを行うことを通常回避行動 (x_1), ハンドル操作を行うこと (通常回避行動との組み合わせも含む) を積極回避行動 (x_2) と位置づける. また, アクセル操作 (積極回避行動との組み合わせも含む) を熟練回避行動 (x_3), ドライバーが回避行動を一切

3.5. “THE 100-CAR NATURALISTIC DRIVING STUDY”における回避行動タイプが選択可能なデータへの応用

とらないことを回避行動なし (x_0) と位置づける. これらの回避行動の定義からわかるように, 包含関係があることから, $x_0 < x_1 < x_2 < x_3$ といった順序関係があるものと仮定する. そのうえで, 100-Car Study における, 追突事故状況にある後続車両のドライバー (加害衝突) を対象としたデータを表 3.2 に示す. なお, 表 3.2 におけるドライバーの合計人数と表 3.1 におけるドライバーの合計人数が異なるが, これは表 3.2 において回避行動のタイプが不明であった 10 名のドライバーを除外したためである.

表 3.2: 加害衝突: 回避行動 X が多値の場合のデータ

	衝突 (y_0)	ニアミス (y_1)	インシデント (y_2)
回避行動なし (x_0)	7	0	29
通常回避行動 (x_1)	6	265	4930
積極回避行動 (x_2)	1	111	746
熟練回避行動 (x_3)	0	4	69

表 3.2 において, まず次の式の成立性について確認する (x_j, x_k and y_l ($j, k = 0, \dots, 3; j \neq k; l = 0, 1$)).

$$\text{pr}(x_j) \simeq \text{pr}(x_j, Y > y_l). \quad (3.17)$$

ここで, 表 3.2 は多項分布に基づいて生成されているという仮定のもとで, 表 3.3 に各推定値を示す. 表 3.3 のそれぞれの確率について, 一行目はその不偏推定量を, 二行目はその標準誤差を示す.

まず, 衝突事故の有無に着目したケースについて議論する. 表 3.3 より, $\text{pr}(x_j)$ と $\text{pr}(x_j, Y > y_0)$ ($j = 0, 1, 2, 3$) に有意な差はないといえるものの, これらの結果からは PRIC において $X = x_j$ は他のどの回避行動と比較されたものかが不明である. また, $\text{pr}(Y_{x_j} > y_0, Y_{x_k} = y_0) = 1$ を全ての組み合わせ ($j, k = 0, 1, 2, 3 (j \neq k)$) について考えたときに, 2.2.2 節で述べたように同時に複数の組み合わせにおいて本条件が成立することはない. これらのこと

表 3.3: 不偏推定量と標準誤差

	$\hat{\text{pr}}(x_j)$	$\hat{\text{pr}}(x_j, Y > y_0)$	$\hat{\text{pr}}(x_j, Y > y_1)$
No evasive action (x_0)	0.0058 (0.0010)	0.0047 (0.0009)	0.0047 (0.0009)
Ordinary evasive action (x_1)	0.8432 (0.0046)	0.8423 (0.0046)	0.7993 (0.0051)
Aggressive evasive action (x_2)	0.1391 (0.0044)	0.1389 (0.0044)	0.1209 (0.0042)
Skilled evasive action (x_3)	0.0118 (0.0014)	0.0118 (0.0014)	0.0112 (0.0013)

に加えて, $\hat{\text{pr}}(x_0, Y > y_0)$ は他の確率に比べて相対的に小さい値をとっていることから, $\text{pr}(Y_{x_1} > y_0, Y_{x_2} > y_0, Y_{x_3} > y_0, Y_{x_0} = y_0) \simeq 1$ が成立することが想定できる. このことは, 表 3.3 の結果と矛盾しておらず, 表 3.2 は, いずれかの回避行動をとれば $Y > y_0$ となり, 回避行動をとらなければ $Y = y_0$ となるドライバー群で構成されていることを示唆する. この考察は, 3.5.2 節で議論した回避行動 X が二値の場合の結果と一致しており, PRIC, つまり $\text{pr}(x_j, Y > y_0 | Y_{x_j} > y_0, Y_{x_0} = y_0)$ を $\hat{\text{pr}}(x_j)$ と $\hat{\text{pr}}(x_j, Y > y_0)$ により評価できることがわかる.

続いて, ニアミスより深刻な状態に陥ったか否かについて着目したケースについて議論する. $\text{pr}(x_2)$ と $\text{pr}(x_2, Y > y_1)$, そして $\text{pr}(x_1)$ と $\text{pr}(x_1, Y > y_1)$ においては有意な差が確認されることから, $\text{pr}(Y_{x_2} > y_1, Y_{x_k} \leq y_1) = 1$ ($k = 0, 1, 3$) や $\text{pr}(Y_{x_1} > y_1, Y_{x_k} \leq y_1) = 1$ ($k = 0, 2, 3$) が成立することを示すのは困難となる. このことは, 3.5.2 節の結果と矛盾しておらず, このような場合においては PRIC の存在範囲を用いて評価することが望ましい. 加えて, 対象ドライバーが様々な群のドライバーから構成されると考えられる場合, (3.17) 式は成立しない. このとき, PRIC, つまり $\text{pr}(x_j, Y > y_1 | Y_{x_j} > y_1, Y_{x_k} \leq y_1)$ は, たとえ帰無仮説 (3.17) 式が棄却されなかったとしても, $\hat{\text{pr}}(x_j)$ や $\hat{\text{pr}}(x_j, Y > y_1)$ ($j = 1, 2; k = 0, 1, 2, 3; j \neq k$) で

3.5. “THE 100-CAR NATURALISTIC DRIVING STUDY”における回避行動タイプが選択可能なデータへの応用

評価されるべきではない。ここで、(3.5) 式と (3.6) 式と (3.7) 式が、 y_0 と y_1 について成立することが合理であると考えられることから、PRIC の下界は表 3.4 に与えられる。表 3.4 の下三角の各数値は、 $\text{pr}(x_j, Y > y_1 | Y_{x_j} > y_1, Y_{x_k} \leq y_1)$ ($j > k$) の下界を示しており、表 3.4 の上三角の各数値は、 $\text{pr}(x_j, Y > y_0 | Y_{x_j} > y_0, Y_{x_k} = y_0)$ ($j > k$) の下界を示している。表 3.4 のそれぞれの下界の値について、一行目はその推定量を、二行目はその標準誤差を示す。

表 3.4: PRIC の下界

	No(x_0)	Ordinary(x_1)	Aggressive(x_2)	Skilled(x_3)
No(x_0)	-	0.3332	0.3324	0.3230
	-	(0.0001)	(0.0003)	(0.0040)
Ordinary(x_1)	0.3332	-	0.3326	0.3244
	(0.0001)	-	(0.0003)	(0.0037)
Aggressive(x_2)	0.3323	0.2973	-	0.3318
	(0.0004)	(0.0023)	-	(0.0015)
Skilled(x_3)	0.3224	0.1444	0.2163	-
	(0.0043)	(0.0111)	(0.0117)	-

表 3.4 より、 $\hat{\text{pr}}(x_j, Y > y_0 | Y_{x_j} > y_0, Y_{x_k} = y_0)$ の下界は、 $\hat{\text{pr}}(x_j, Y > y_1 | Y_{x_j} > y_1, Y_{x_k} \leq y_1)$ の下界より全ての組み合わせ ($j, k = 0, 1, 2, 3; j > k$) について上回っていることがわかる。また、表 3.4 の下界は、回避行動 X が二値を想定した場合の下界に比べて下回っていることが確認できる。直感的には、回避行動 X が二値の場合においては、ドライバーが何らかの回避行動をとることにより衝突やニアミスを防ぐことができる状況に着目しているため、実際に何らかの回避行動をとって衝突やニアミスを防ぐことができた割合は高くなると考えられる。一方で、回避行動 X が多値の場合においては、そのドライバーが特定の回避行動をとることで衝突やニアミスを防ぐことができる状況に着目しているため、実際に特定の回避行動をとって衝突やニアミスを防ぐことができた割合は相対的に低くなると考

えられる。

3.6 まとめ

本章では、前章で提案された potential response inspired conflict (PRIC) の拡張をこころみた。前章では、回避行動の有無にのみ着目して議論したが、実際の運転状況においては、ドライバーがどのような回避行動をとるかによって衝突事故の危険性は異なると考えるのが合理である。この課題に応えるために、回避行動を表す変数 X が多値をとるケースに PRIC を拡張し、定式化した。この場合においても、回避行動を表す変数 X が二値の場合と同様に、観察研究において交通事故を引き起こす背景情報を十分に把握することは困難であるという問題認識に基づき、PRIC を定義している。この問題意識がゆえに、やみくもにデータを採取しては PRIC を推定することはできず、適切な研究計画を立案し、それにしたがってデータをとることが重要となる。この問題を解決する方策の一つとして、本論文では、PRIC が識別可能となるための十分条件を与えると同時に、これらの識別可能条件が成り立たない場合に対応するために、付加的な仮定を置いたうえで、PRIC の存在範囲を定式化した。また、PRIC を 100-Car Study における加害衝突事故データに適用し、回避行動 X が二値の場合および多値の場合における交通コンフリクトの評価を行った。その結果、加害衝突事故においては、回避行動 X が二値の場合は“標準的なドライバー群が母集団である”という仮定をおくことが非現実的なものではないことが明らかになった。一方、回避行動 X が多値の場合は、回避行動のタイプによっては識別可能条件を満たさず、追加の因果的仮定により PRIC の存在範囲を得ることで有用な情報を与えられることが確認された。本章の結果より、回避行動のタイプに着目した場合においても、PRIC が交通コンフリクトを適切に評価するのに重要な役割を果たすものと考えられる。

第4章 潜在反応モデルに基づく予防割合

本章では, 1.4.3 節で述べたように ICSTCT による交通コンフリクトの定義の原点に立ち返り, 新たな交通コンフリクトの評価指標として $pr(\text{衝突事故なし} | \text{回避行動をとらなければ衝突事故あり})$ を考える. なお, 本章の内容は, Yamada and Kuroki (2016b) の報告をまとめたものである. ここでは, この指標に概念的に近い既存のリスク指標である, 疫学や生物統計学の領域で広く用いられている prevented fraction に着目する. 4.1 節では, 疫学調査の事例を交えながら, リスク指標の代表的な研究を紹介する. 4.2 節では, 既存のリスク指標のうち, 本論文で着目する prevented fraction について概説するとともに, その問題点を明らかにする. 4.3 節では, 因果推論における潜在反応モデルを導入したうえで, 新たな指標を提案し, その問題の解決をこころみる. 4.4 節では, 保護曝露のタイプが複数存在する場合に対応するために提案指標を拡張する. 4.5 節では, 実験研究への適用事例として, 腸チフス Vi ワクチンの調査研究データに本提案指標を用い, その有用性について述べる. 本章においては, 交通工学の領域ではなく, prevented fraction が広く用いられている疫学や生物統計学の領域において議論することとする.

4.1 はじめに

医療の分野において, 保護曝露 (処置) を受けなければ疾患が発症するであろうという状況の中で, 保護曝露によりどの程度疾患を防ぐことができるかを調査することは重要な課

題の一つとして認識されている。そのような調査の事例として、1970年に米国テキサス州テクサーカナで小児を対象に実施された麻疹ワクチンに関する疫学調査がある。この調査について、Landriean (1972) は、麻疹ワクチンの効果は95.9%であると報告している。Gregg (2008) は、この結果は、ワクチンを接種した小児のうち、ワクチンを接種しなければ疾患を発症したであろうケースの96%がワクチンによって疾患の発症を防ぐことができたことを意味すると報告している。別の事例として、米国ネブラスカ州で発生した水疱瘡の大流行に関する調査がある。この調査について、Centers for Disease Control and Prevention (2006) は、水疱瘡ワクチンを接種したにも関わらず水疱瘡を発症した小児のケースに着目し、ワクチンの効果は約81%であると報告している。Gregg (2008) は、この結果は、ワクチンを接種した小児のうち、ワクチンを接種しなければ疾患を発症したであろうケースの80%がワクチンによって疾患を発症を防ぐことができたことを意味すると報告している。

このような試験において、ワクチン接種の影響をはかる指標として、1915年に Greenwood and Yule (1915) が、ワクチン有効率を提案している。ワクチン有効率は、ワクチンを接種せずに疾患を発症したケースにおいて、理想的な条件の下で、ワクチンを接種していれば疾患を発症しないであろう割合と定義されている (Porta, 2014)。Gregg (2008) によると、ワクチン有効率は、曝露や介入に関する研究における *prevented fraction among the exposed* に相当すると考えらる。加えて、Weinberg and Szilagyi (2010) は、ロタウイルスワクチン（一般のものと1価のもの両方）に関して、理想的な条件（ダブルブラインド、ランダム化、統制した臨床試験）の下でワクチン有効率が最も適切な指標であると述べている。疫学の分野においては、Miettinen (1974) が保護曝露の効果を評価するために *prevented fraction* を定式化している。生物統計においては、Gargiullo et al. (1995) は、クロスセクション研究において、最尤法に基づいて *prevented fraction* の分散を推定する方法を提案している。Benichou (2001) は、*prevented fraction* を含む割合尺度の推定問題についてレビューを行っている。Laaksonen (2010) は、コホート研究において、*prevented fraction* やその関連指標の算出法について議論している。このように様々な研究が古くから今日まで報告されていることから、

ワクチン有効率や prevented fraction は、保護曝露の評価において古典的な問題でありながら今日現在においても重要なトピックであることがうかがえる。

これらの文献のなかでも、Miettinen (1974) では、prevented fraction に関する基礎的な解釈について言及されていることから、本論文では、Miettinen (1974) に着目し、以降議論をすすめる。Miettinen (1974) では、

“the preventive (prevented) fraction is the proportion of cases prevented by the factor among the totality of cases that would have developed in the absence of the protective factor”(Miettinen, 1974),

と記述されており、prevented fraction は、一般的な統計の枠組みのみで扱われるものでなく、因果推論の枠組み、特に反事実的観点を考慮したうえで定式化されるべきものであると考えられる。しかしながら、疫学や生物統計学における研究者や実務家による prevented fraction を用いたこれまでの報告では、この反事実的な観点が十分に考慮されていないことが多い。また、それらの研究においては、異なる集団の確率に基づいて定式化されているため、付加的な仮定がない場合においては、算出される結果は数学的な意味での「割合」とはならず、区間 $[0, 1]$ 外の値をとることがある。

この問題を解決するために、本論文では、潜在反応モデルに基づいた指標を新たに提案する。提案指標は単一の集団について定式化されるため、数学的な意味で「割合」として解釈することができる。本論文と同様の考え方に基づいた研究としては、Suzuki et al. (2012) が excess fraction, attributable fraction, etiologic fraction について議論し、その存在範囲を定式化している。しかしながら、その中で、prevented fraction については言及されておらず、また外生性の仮定のもとでそれらの存在範囲を定式化している。本論文では、因果効果と観察確率の両方が得られる場合、負値単調性のもとで提案指標が識別可能であることを示す。加えて、負値単調性が成立しない場合においては、提案指標の存在範囲を定式化する。その結果として、既存の prevented fraction は、提案指標に対して小さな値をとることを示

す。さらに、負値単調性と外生性が成立する場合においては、提案指標が既存の指標と一致することも示す。そのうえで、本提案指標を腸チフス Vi ワクチンの調査研究データに適用し、その有用性を述べる。

4.2 既存の指標

本章では既存の prevented fraction に関する指標について概説するが、まず、それら指標を数学的に表現するために用いる変数について説明する。X を 2 値の保護曝露 (もしくは介入) を表す変数とし、Y を 2 値の結果変数とする。x と y はそれぞれ X と Y がとる値である ($x \in \{x_0(\text{保護曝露なし}), x_1(\text{保護曝露あり})\}$, $y \in \{y_0(\text{発症なし}), y_1(\text{発症あり})\}$)。また、 $\text{pr}(X = x, Y = y) = \text{pr}(x, y)$, $\text{pr}(X = x) = \text{pr}(x)$, $\text{pr}(Y = y|X = x) = \text{pr}(y|x)$ は、それぞれ $(X, Y) = (x, y)$ の同時確率、 $X = x$ の周辺確率、 $X = x$ が与えられたときの $Y = y$ の条件付き確率を表している ($x \in \{x_0, x_1\}$, $y \in \{y_0, y_1\}$)。

ここで、既存の代表的な prevented fraction に関する三つの指標 (prevented fraction in the population (PF_p), prevented fraction among the exposed (PF_e), preventable fraction (PaF_p)) を紹介する。

保護曝露を受けなければ疾患を発症するであろう全てのケースにおける保護曝露の潜在的な影響に着目する場合について、Miettinen(1974) は、 PF_p を提案し、以下のように定式化した。

$$\text{PF}_p = \frac{\text{pr}(y_1|x_0) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1|x_0)} \text{pr}(x_1) \quad (4.1)$$

Miettinen(1974) によると、 PF_p は、保護曝露を受けなければ疾患を発症するであろう全てのケースのうち保護曝露により疾患の発症を防ぐことができた割合と解釈される。

また、Miettinen(1974) と Kleinbaum et al. (1982) は、疫学や生物統計学の研究者や実務家

4.2. 既存の指標

にとって、保護曝露を受けた群のなかで保護曝露を受けなければ疾患を発症するであろうケースに着目して評価することが応用の観点から有用であることを想定し、 PF_e を以下のように定式化した。

$$PF_e = \frac{\text{pr}(y_1|x_0) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1|x_0)} \quad (4.2)$$

PF_p と異なり、 PF_e は、保護曝露を受けた群のなかで保護曝露を受けなければ疾患を発症するであろうケースにおける保護曝露の潜在的影響に注目していると解釈される (Kleinbaum et al., 1982). Spasoff (1999) によると、 PF_e は、臨床疫学の分野で Sackett et al. (1991) によって提案された relative risk reduction に相当し、この指標は曝露群においてどの程度リスクが減少したかを非曝露群と相対的に比較するものである。この指標は、ワクチン試験の文脈においては、Greenwood and Yule (1915) によって最初に議論された ワクチン有効率にも相当する。

prevented fraction は、しばしば preventable fraction として解釈され利用されることがあるが、これらは区別して議論されるべきである。これについて Boslaugh (2007) は、以下のように述べている。

“With protective risk factors, researchers and policy analysts are often interested in how much of the current disease risk in the total target population is potentially preventable if everyone in the population were exposed. This measure, called the preventable fraction, should be distinguished from the prevented fraction. Whereas the PF_p reflects the previous impact of being exposed in the population, the PaF_p reflects the potential impact in the future if everyone were to become exposed” (Boslaugh, 2007).

また、Last (1983) や Porta et al. (2014) は PaF_p を次のように定式化している。

$$\text{PaF}_p = \frac{\text{pr}(y_1) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1)} = \frac{\text{pr}(y_1|x_0) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1)} \text{pr}(x_0) \quad (4.3)$$

そのうえで、“the proportion of the disease (in the population) that would be prevented if the whole population were exposed to the factor”(Last, 1983) と解釈している。

ここで、 PF_p , PF_e , PaF_p は異なる集団 (保護曝露群と非保護曝露群) について定式化されていることに注意されたい。したがって、これらの指標は、追加の仮定がない場合は数学的な意味での割合とはならず、範囲 $[0, 1]$ 外の値をとる可能性がある。範囲 $[0, 1]$ 内の値をとるようにするために、生物統計の研究者や実務家は、しばしば “exposure to a given factor is believed to protect against a disease” (Last, 1983; Porta et al., 2014) や

$$\frac{\text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1|x_0)} \leq 1 \quad (4.4)$$

を仮定している (Gregg, 2008; Miettinen, 1974)。しかしながら、“protect against a disease” は統計的な関連性のみならず原因と結果の関係について言及することが求められるため、一般的にこのような仮定の成立性を観察データから確認することはできない。加えて、未観測の交絡因子が存在する場合、このような仮定は (4.4) 式と必ずしも一致しない。

4.3 提案指標

本章では、提案指標である counterfactual-based prevented proportion と counterfactual-based preventable proportion を潜在反応変数を用いて定義する。

4.3.1 定義とその解釈

Counterfactual-based Prevented Proportion (CPP)

保護曝露を受けなければ疾患を発症したであろう全てのケースにおける保護曝露の潜在的な影響について議論するために、ここで counterfactual-based prevented proportion in the population (CPP_p) を以下に定義する。

$$CPP_p = \text{pr}(y_0|y_{1,x_0}) \quad (4.5)$$

CPP_p は、保護曝露を受けなければ疾患を発症したであろうケースに対して実際に疾患を発症しなかった割合と解釈できる。また、保護曝露を受けた群のうち保護曝露を受けなければ疾患を発症したであろうケースにおける保護曝露の潜在的な影響について議論するために、ここで counterfactual-based prevented proportion among the exposed (CPP_e) を以下に定義する。

$$CPP_e = \text{pr}(y_0|x_1, y_{1,x_0}) \quad (4.6)$$

CPP_e は、保護曝露を受けた群のうち保護曝露を受けなければ疾患を発症したであろうケースに対して実際に疾患を発症しなかった割合と解釈できる。ここで $\text{pr}(x_0, y_0, y_{1,x_0}) = 0$ であることから、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} CPP_p &= \text{pr}(x_1, y_0|y_{1,x_0}) + \text{pr}(x_0, y_0|y_{1,x_0}) \\ &= \text{pr}(x_1, y_0|y_{1,x_0}) = CPP_e \text{pr}(x_1|y_{1,x_0}) \leq CPP_e \end{aligned} \quad (4.7)$$

このことは、 CPP_p と CPP_e はそれらの関係性を等式により表現することはできないものの、互いに無関係ではないことを示している。加えて、(4.7) 式から、 CPP_e の方が CPP_p より

も大きな値をとることがわかる. 続いて, CPP_p と CPP_e の基本的な性質について述べよう.

まず, $\text{pr}(x_1, y_{1,x_0}) = \text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(x_0, y_1)$ より,

$$CPP_p = \text{pr}(y_{1,x_0}|x_1, y_0) \frac{\text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(y_{1,x_0})} \quad (4.8)$$

$$CPP_e = \text{pr}(y_{1,x_0}|x_1, y_0) \frac{\text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(x_0, y_1)}. \quad (4.9)$$

を得る. したがって, $\text{pr}(y_{1,x_0}) \neq \text{pr}(x_0, y_1)$ の条件のもとで, $\text{pr}(x_0, y_1) = 0$ である場合に

$CPP_p = CPP_e$ となることがわかる. 次に, 正值単調性, つまり $\text{pr}(y_{0,x_1}, y_{1,x_0}) = 0$ である場

合, (4.7) 式より CPP_p と CPP_e は 0 となることがわかる. さらに, 外生性のもとでは,

$$CPP_p = \text{pr}(x_1)CPP_e, \quad CPP_e = \text{pr}(y_{0,x_1}|y_{1,x_0}) \quad (4.10)$$

となることが確認できる.

Counterfactual-based Preventable Proportion (CPaP)

本節では, PaF に関して, 反事実的な観点を考慮した指標を提案する. 指標を提案するにあたり, まず第一に, attributable proportion in the population と attributable proportion among the exposed がそれぞれ $\text{pr}(y_{0,x_0}|y_1)$ と $\text{pr}(y_{0,x_0}|x_1, y_1)$ として提案されていること (Suzuki et al., 2012), 第二に, Boslaugh (2007) において ‘the PaF_p (preventable fraction) is equivalent to the population attributable fraction (AF_p) in which “exposed” and “unexposed” categories are reversed’ と記述されていることに注意しておく. ここに, counterfactual-based preventable proportion in the population (CPaP_p) と counterfactual-based preventable proportion among the

unexposed (CPaP_u) をそれぞれ以下に定式化する.

$$\text{CPaP}_p = \text{pr}(y_{0,x_1}|y_1), \text{CPaP}_u = \text{pr}(y_{0,x_1}|x_0, y_1) \quad (4.11)$$

(4.11) 式における CPaP_u は, Kuroki and Cai (2011), Pearl (1999, 2009), Tian and Pearl (2000) で議論されている原因の確率に相当するものとみなせる. また,

$$\begin{aligned} \text{CPaP}_p &= \text{pr}(x_0, y_{0,x_1}|y_1) + \text{pr}(x_1, y_{0,x_1}|y_1) \\ &= \text{pr}(x_0, y_{0,x_1}|y_1) = \text{CPaP}_u \text{pr}(x_0|y_1) \leq \text{CPaP}_u \end{aligned} \quad (4.12)$$

であることから, $\text{pr}(x_0, y_1) \neq 0$ の仮定のもとで, $\text{pr}(x_1, y_1) = 0$ である場合に $\text{CPaP}_p = \text{CPaP}_u$ となることがわかる. 次に, (4.12) 式より, 正值単調性の仮定のもとで, CPaP_p と CPaP_u は 0 となることがわかる. さらに, 外生性の仮定のもとでは,

$$\text{CPaP}_u = \text{CPP}_e \quad (4.13)$$

となることが確認できる.

予防割合と PRIC の関係

ここで, 本章で議論している潜在反応モデルに基づく予防割合と PRIC の関係性について述べる. PRIC は交通工学の観点において定義した指標であるが, 臨床研究の観点で改めて解釈すると,

$$\text{PRIC} = \text{pr}(y_0|y_{1,x_0}, y_{0,x_1}) \quad (4.14)$$

と表現され、保護曝露を受けなければ疾患を発症しかつ保護曝露を受ければ疾患を発症しない集団において実際に疾患を発症しなかった割合と解釈される。4.3.1節より $\text{pr}(y_0|y_{0,x_1}, y_{1,x_0}) = \text{pr}(x_1|y_{0,x_1}, y_{1,x_0})$ であることと (4.5) 式より、 CPP_p は

$$\begin{aligned} \text{CPP}_p &= \text{pr}(x_1|y_{0,x_1}, y_{1,x_0})\text{pr}(y_{0,x_1}|y_{1,x_0}) \\ &= \text{pr}(y_0|y_{0,x_1}, y_{1,x_0})\text{pr}(y_{0,x_1}|y_{1,x_0}) \leq \text{PRIC} \end{aligned} \quad (4.15)$$

のように変形できることから、PRIC は CPP_p より大きな値をとることがわかる。

4.3.2 識別可能条件

前節で提案した CPP_p , CPP_e , CPaP_p , CPaP_u は潜在反応変数により与えられる確率をその定義式に含んでいるため、データ生成メカニズムに基づいた追加の仮定を加えない限り観察データのみからは識別可能でない。本節では、負値単調性の仮定のもとで、因果効果 $\text{pr}(y_x)$ と観察確率 $\text{pr}(x, y)$ が得られる場合、 CPP_p , CPP_e , CPaP_p , CPaP_u が識別可能であることを示す。負値単調性は、prevented fraction と preventable fraction の議論において、“exposure to a given factor is believed to protect against a disease”(Last, 1983; Porta, 2014) と述べられていることからわかるように重要な仮定であり、

$$\frac{\text{pr}(y_{1,x_1})}{\text{pr}(y_{1,x_0})} \leq 1 \quad (4.16)$$

を導く。ただし、(4.16) 式から負値単調性を導けるわけではないことに注意する。

$\text{pr}(y_x)$ と $\text{pr}(x, y)$ が得られるとき、負値単調性の仮定のもとで、それぞれ以下のように変

形できる.

$$CPP_p = \frac{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(y_1)}{\text{pr}(y_{1,x_0})} = \frac{\text{pr}(y_{1,x_0}|x_1) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_{1,x_0})} \text{pr}(x_1) \quad (4.17)$$

$$CPP_e = \frac{\text{pr}(y_{1,x_0}|x_1) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_{1,x_0}|x_1)} = \frac{\text{pr}(y_{1,x_0})}{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(x_0, y_1)} CPP_p \quad (4.18)$$

$$CPaP_p = \frac{\text{pr}(y_1) - \text{pr}(y_{1,x_1})}{\text{pr}(y_1)} = \frac{\text{pr}(y_1|x_0) - \text{pr}(y_{1,x_1}|x_0)}{\text{pr}(y_1)} \text{pr}(x_0) \quad (4.19)$$

$$CPaP_u = \frac{\text{pr}(y_1) - \text{pr}(y_{1,x_1})}{\text{pr}(x_0, y_1)} = \frac{\text{pr}(y_1|x_0) - \text{pr}(y_{1,x_1}|x_0)}{\text{pr}(y_1|x_0)} = \frac{\text{pr}(y_1)}{\text{pr}(x_0, y_1)} CPaP_p \quad (4.20)$$

重要な考察として、負値単調性と外生性の仮定のもとで、 $\text{pr}(y_x) = \text{pr}(y|x)$ であることから、

$$CPP_p = \frac{\text{pr}(y_1|x_0) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1|x_0)} \text{pr}(x_1) \quad (4.21)$$

$$CPP_e = CPaP_u = \frac{\text{pr}(y_1|x_0) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1|x_0)} \quad (4.22)$$

$$CPaP_p = \frac{\text{pr}(y_1) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1)} = \frac{\text{pr}(y_1|x_0) - \text{pr}(y_1|x_1)}{\text{pr}(y_1)} \text{pr}(x_0) \quad (4.23)$$

のように変形できる. これより、 CPP_p 、 CPP_e 、 $CPaP_p$ はそれぞれ PF_p 、 PF_e 、 PaF_p と等しくなることがわかる. 負値単調性と外生性の仮定のもとでは、 $\text{pr}(y_1|x_1)/\text{pr}(y_1|x_0) \leq 1$ を得ることができることから、 PF_p 、 PF_e 、 PaF_p は常に範囲 $[0, 1]$ 内の値をとることが確認できる.

4.3.3 存在範囲

一般に、 $\text{pr}(y_x)$ と $\text{pr}(x, y)$ の両方が得られる場合においても、(4.5) 式、(4.6) 式、(4.11) 式は、追加の仮定を置かない限り識別可能とはならない. 追加の仮定を置くことができない場合の解決策として、その存在範囲を定式化することで有用な情報の提供をこころみる. 存在範囲の導出方法として、ここに Tian and Pearl (2000) のアイデア (原因の確率についての存在範囲) を用いることにする.

追加の仮定を置くことができず, $\text{pr}(y_x)$ と $\text{pr}(x, y)$ のみが与えられている場合は, Tian and Pearl (2000) に従って

$$\max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(y_1) \end{array} \right\} \leq \text{pr}(x_1, y_0, y_{1,x_0}) \leq \min \left\{ \begin{array}{c} \text{pr}(x_1, y_0) \\ \text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(x_0, y_1) \end{array} \right\} \quad (4.24)$$

$$\max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \text{pr}(y_{0,x_1}) - \text{pr}(y_0) \end{array} \right\} \leq \text{pr}(x_0, y_1, y_{0,x_1}) \leq \min \left\{ \begin{array}{c} \text{pr}(x_0, y_1) \\ \text{pr}(y_{0,x_1}) - \text{pr}(x_1, y_0) \end{array} \right\} \quad (4.25)$$

を得ることができる. (4.24) 式より, CPP_p の存在範囲は

$$\max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(y_1)}{\text{pr}(y_{1,x_0})} \end{array} \right\} \leq \text{CPP}_p \leq \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{\text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(y_{1,x_0})} \\ \frac{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(x_0, y_1)}{\text{pr}(y_{1,x_0})} \end{array} \right\} \quad (4.26)$$

で与えられる. このことから, $\text{pr}(x_1, y_0) = 0$ もしくは $\text{pr}(y_{1,x_0}) = \text{pr}(x_0, y_1)$ の場合, CPP_p は 0 となることがわかる. また, $\text{pr}(x_1, y_1) = 0$ もしくは $\text{pr}(y_{0,x_0}) = \text{pr}(x_0, y_0)$ の場合,

$$\text{CPP}_p = \frac{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(y_1)}{\text{pr}(y_{1,x_0})} \quad (4.27)$$

を得る. 加えて, (4.25) 式より, CPaP_p については

$$\max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{\text{pr}(y_{0,x_1}) - \text{pr}(y_0)}{\text{pr}(y_1)} \end{array} \right\} \leq \text{CPaP}_p \leq \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{\text{pr}(x_0, y_1)}{\text{pr}(y_1)} \\ \frac{\text{pr}(y_{0,x_1}) - \text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(y_1)} \end{array} \right\} \quad (4.28)$$

であることから, $\text{pr}(x_0, y_1) = 0$ もしくは $\text{pr}(y_{0,x_1}) = \text{pr}(x_1, y_0)$ の場合, CPaP_p は 0 となることがわかる. また, $\text{pr}(x_0, y_0) = 0$ もしくは $\text{pr}(y_{1,x_1}) = \text{pr}(x_1, y_1)$ の場合,

$$\text{CPaP}_p = \frac{\text{pr}(y_{0,x_1}) - \text{pr}(y_0)}{\text{pr}(y_1)} \quad (4.29)$$

を得る. CPP_e と $CPaP_u$ の存在範囲については, CPP_p と $CPaP_p$ の存在範囲における各分母の $\text{pr}(y_{1,x_0})$ と $\text{pr}(y_1)$ をそれぞれ $\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(x_0, y_1)$ と $\text{pr}(x_0, y_1)$ に置き換えることにより

$$\max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(y_1)}{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(x_0, y_1)} \end{array} \right\} \leq CPP_e \leq \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{\text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(y_{1,x_0}) - \text{pr}(x_0, y_1)} \\ 1 \end{array} \right\} \quad (4.30)$$

$$\max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{\text{pr}(y_{0,x_1}) - \text{pr}(y_0)}{\text{pr}(x_0, y_1)} \end{array} \right\} \leq CPaP_u \leq \min \left\{ \begin{array}{c} \frac{\text{pr}(y_{0,x_1}) - \text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(x_0, y_1)} \\ 1 \end{array} \right\} \quad (4.31)$$

で与えられる.

加えて, 外生性の仮定のもとでは, $\text{pr}(y_{i,x_j}) = \text{pr}(y_i|x_j)$ ($i, j = 0, 1$) が成立することから, これらの存在範囲の上下界の式より, $CPP_p, CPaP_p, CPP_e$ は PF_p, PaF_p, PF_e をそれぞれ下回らないことがわかる. また, X が二値の場合において, 外生性のもとでは, 4.30 式と 4.31 式より, CPP_e と $CPaP_u$ の存在範囲は一致する. ここに, 実験研究や観察研究において得られる共変量の情報を活用することで (4.26) 式, (4.28) 式, (4.30) 式, (4.31) 式より狭い存在範囲を得ることができることに注意する. より狭い存在範囲を導出するための手順については, Cai et al. (2007, 2008) や Kuroki and Cai (2011) を参照にされたい.

最後に, 追加の仮定を置くことができず, $\text{pr}(x, y)$ のみが得られる場合, CPP_p と $CPaP_p$ の存在範囲は

$$0 \leq CPP_p \leq \frac{\text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(x_1, y_0) + \text{pr}(x_0, y_1)}, \quad 0 \leq CPaP_p \leq \text{pr}(x_0|y_1) \quad (4.32)$$

によりそれぞれ与えられる. CPP_p の上界は, 以下の導出により得ることができる. $CPaP_p$

の上界も同様の導出により得ることができる。

$$\begin{aligned} \text{CPP}_p &= \frac{\text{pr}(y_0, y_{1,x_0})}{\text{pr}(x_1, y_{1,x_0}) + \text{pr}(x_0, y_1)} = \frac{\text{pr}(x_1, y_0, y_{1,x_0})}{\text{pr}(x_1, y_0, y_{1,x_0}) + \text{pr}(x_1, y_1, y_{1,x_0}) + \text{pr}(x_0, y_1)} \\ &= \frac{\text{pr}(y_{1,x_0}|x_1, y_0)\text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(y_{1,x_0}|x_1, y_0)\text{pr}(x_1, y_0) + \text{pr}(y_{1,x_0}|x_1, y_1)\text{pr}(x_1, y_1) + \text{pr}(x_0, y_1)} \\ &\leq \frac{\text{pr}(x_1, y_0)}{\text{pr}(x_1, y_0) + \text{pr}(x_0, y_1)} \end{aligned}$$

ここに、追加の仮定を置くことができず $\text{pr}(x, y)$ のみが得られる場合においては、 CPP_e と CPaP_u の存在範囲は $[0, 1]$ で与えられるという意味で有用な情報を得ることができないことを述べておく。

4.4 複数カテゴリーの保護曝露が存在する場合への提案指標の拡張

前節まで、曝露変数が二値である場合について、counterfactual-based prevented proportion と counterfactual-based preventable proportion を定式化し、議論してきた。本節においては、 X が複数カテゴリーの保護曝露であり、 $x \in \{x_0, x_1, \dots, x_l\}$ のいずれかをとる場合について議論する。

Counterfactual-based Prevented Proportion (CPP) の拡張

まず、 CPP_e について、(4.6) 式を

$$\text{CPP}_e^k = \text{pr}(y_0|x_k, y_{1,x_0}) \quad (4.33)$$

と拡張する. また,

$$\text{CPP}_p = \sum_{k=0}^l \text{pr}(y_0|x_k, y_{1,x_0})\text{pr}(x_k|y_{1,x_0}) = \sum_{k=0}^l \text{CPP}_e^k \times \text{pr}(x_k|y_{1,x_0}) \quad (4.34)$$

であることから, 外生性の仮定のもとで,

$$\text{CPP}_p = \sum_{k=0}^l \text{pr}(y_0|x_k, y_{1,x_0})\text{pr}(x_k|y_{1,x_0}) = \sum_{k=0}^l \text{CPP}_e^k \times \text{pr}(x_k) \quad (4.35)$$

$$\text{CPP}_e^k = \text{pr}(y_{0,x_k}|y_{1,x_0}) \quad (4.36)$$

を得る. 加えて, $x \in \{x_1, \dots, x_l\}$ について $\text{pr}(y_{1,x}, y_{0,x_0}) = 0$ を仮定すると

$$\begin{aligned} \text{CPP}_e^k &= \frac{\text{pr}(y_{0,x_k}|x_k) - \text{pr}(y_{0,x_0}|x_k) + \text{pr}(y_{1,x_k}, y_{0,x_0}|x_k)}{\text{pr}(y_{1,x_0}|x_k)} \\ &= \frac{\text{pr}(y_0|x_k) - \text{pr}(y_{0,x_0}|x_k)}{\text{pr}(y_{1,x_0}|x_k)} \end{aligned} \quad (4.37)$$

と変形できる ($k = 1, \dots, l$). このことから,

$$\text{CPP}_p = \sum_{k=0}^l \frac{\text{pr}(y_0|x_k) - \text{pr}(y_{0,x_0}|x_k)}{\text{pr}(y_{1,x_0}|x_k)} \text{pr}(x_k) \quad (4.38)$$

を得る. したがって, 負値単調性と外生性の仮定のもとでは,

$$\text{CPP}_p = \sum_{k=0}^l \frac{\text{pr}(y_0|x_k) - \text{pr}(y_0|x_0)}{\text{pr}(y_1|x_0)} \text{pr}(x_k) \quad (4.39)$$

を得ることができる. Miettinen (1974) においても, prevented fraction に関する議論の中で “for polytomous indicator of protection” と述べられ, 複数カテゴリーの保護曝露が存在する場合について言及されている.

一般に, ランダム割り付けが行われていた場合においても, 追加の仮定を置かない限り, (4.33) 式は識別可能とはならない. 追加の仮定を置くことができない場合の解決策として,

その存在範囲を定式化することが考えられる。

まず、追加の仮定をおくことができず、 $\text{pr}(y_x|x')$ と $\text{pr}(x, y)$ のみが与えられている場合 ($x \neq x'; x, x' \in \{x_0, \dots, x_l\}$), CPP_e^k の存在範囲が

$$\max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{\text{pr}(y_0|x_k) - \text{pr}(y_0, x_0|x_k)}{\text{pr}(y_1, x_0|x_k)} \end{array} \right\} \leq \text{CPP}_e^k \leq \min \left\{ \begin{array}{c} 1 \\ \frac{\text{pr}(y_0|x_k)}{\text{pr}(y_1, x_0|x_k)} \end{array} \right\} \quad (4.40)$$

であることから、 CPP_p の存在範囲は

$$\sum_{k=0}^l \max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{\text{pr}(y_0|x_k) - \text{pr}(y_0, x_0|x_k)}{\text{pr}(y_1, x_0)} \end{array} \right\} \text{pr}(x_k) \leq \text{CPP}_p \quad (4.41)$$

$$\text{CPP}_p \leq \sum_{k=1}^l \min \left\{ \begin{array}{c} 1 \\ \frac{\text{pr}(y_0|x_k)}{\text{pr}(y_1, x_0)} \end{array} \right\} \text{pr}(x_k) \quad (4.42)$$

で与えられる。

また、追加の仮定を置くことができず、 $\text{pr}(x, y)$ のみが得られている場合、 CPP_p の存在範囲は

$$0 \leq \text{CPP}_p \leq \frac{\text{pr}(y_0) - \text{pr}(x_0, y_0)}{\text{pr}(y_0) - \text{pr}(x_0, y_0) + \text{pr}(x_0, y_1)} \quad (4.43)$$

で与えられる。なお, CPP_p の上界は, 以下の導出により得られる。

$$\begin{aligned}
 CPP_p &= \frac{\sum_{k=0}^l \text{pr}(x_k, y_0, y_{1,x_0})}{\sum_{k=0}^l \text{pr}(x_k, y_0, y_{1,x_0}) + \sum_{k=0}^l \text{pr}(x_k, y_1, y_{1,x_0})} \\
 &= \frac{\sum_{k=0}^l \text{pr}(y_{1,x_0} | x_k, y_0) \text{pr}(x_k, y_0)}{\sum_{k=0}^l \text{pr}(y_{1,x_0} | x_k, y_0) \text{pr}(x_k, y_0) + \sum_{k=0}^l \text{pr}(y_{1,x_0} | x_k, y_1) \text{pr}(x_k, y_1)} \\
 &\leq \frac{\sum_{k=1}^l \text{pr}(x_k, y_0)}{\sum_{k=1}^l \text{pr}(x_k, y_0) + \text{pr}(x_0, y_1)} = \frac{\text{pr}(y_0) - \text{pr}(x_0, y_0)}{\text{pr}(y_0) - \text{pr}(x_0, y_0) + \text{pr}(x_0, y_1)}
 \end{aligned}$$

ここに, 追加の仮定を置くことができず, $\text{pr}(x, y)$ のみが得られる場合においては, CPP_e^k の存在範囲は $[0, 1]$ で与えられるという意味で有用な情報を得ることができないことを述べておく。

Counterfactual-based Preventable Proportion (CPaP) の拡張

まず, $CPaP_p$ と $CPaP_u$ について, (4.11) 式を

$$CPaP_p^k = \text{pr}(y_{0,x_k} | y_1), \quad CPaP_u^k = \text{pr}(y_{0,x_k} | x_0, y_1) \tag{4.44}$$

と拡張する。また,

$$CPaP_p^k = \sum_{m=0}^l \text{pr}(y_{0,x_k} | x_m, y_1) \text{pr}(x_m | y_1) \tag{4.45}$$

であることから、外生性の仮定のもとで、

$$\text{CPaP}_p^k = \sum_{m=0}^l \text{pr}(y_{0,x_k} | y_{1,x_m}) \text{pr}(x_m | y_1) \quad (4.46)$$

$$\text{CPaP}_u^k = \text{pr}(y_{0,x_k} | y_{1,x_0}) \quad (4.47)$$

を得る. 加えて, $x \in \{x_1, \dots, x_l\}$ について $\text{pr}(y_{1,x}, y_{0,x_0}) = 0$ を仮定すると

$$\begin{aligned} \text{CPaP}_u^k &= \frac{\text{pr}(y_{0,x_k} | x_0) - \text{pr}(y_{0,x_0} | x_0) + \text{pr}(y_{1,x_k}, y_{0,x_0} | x_0)}{\text{pr}(y_1 | x_0)} \\ &= \frac{\text{pr}(y_{0,x_k} | x_0) - \text{pr}(y_0 | x_0)}{\text{pr}(y_1 | x_0)} \end{aligned} \quad (4.48)$$

と変形できる. しかしながら, CPaP_p^k はこの仮定のもとでは識別可能とはならない. また, $x \in \{x_0, \dots, x_l\}$ について $\text{pr}(y_{1,x_k}, y_{0,x}) = 0$ を仮定すると

$$\text{CPaP}_p^k = \sum_{m=0}^l \frac{\text{pr}(y_{0,x_k} | x_m) - \text{pr}(y_0 | x_m)}{\text{pr}(y_1 | x_m)} \text{pr}(x_m | y_1) \quad (4.49)$$

を得る.

ここで, 追加の仮定を置くことができず, $\text{pr}(y_x | x')$ と $\text{pr}(x, y)$ のみが与えられている場合 ($x \neq x'; x, x' \in \{x_0, \dots, x_l\}$), CPaP_u^k の存在範囲は

$$\max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{\text{pr}(y_{0,x_k} | x_0) - \text{pr}(y_0 | x_0)}{\text{pr}(y_1 | x_0)} \end{array} \right\} \leq \text{CPaP}_u^k \leq \min \left\{ \begin{array}{c} 1 \\ \frac{\text{pr}(y_{0,x_k} | x_0)}{\text{pr}(y_1 | x_0)} \end{array} \right\} \quad (4.50)$$

で与えられる. また, CPaP_p^k の存在範囲は

$$\sum_{m=0, m \neq k}^l \max \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{\text{pr}(y_{0,x_k} | x_m) - \text{pr}(y_0 | x_m)}{\text{pr}(y_1 | x_m)} \end{array} \right\} \text{pr}(x_m | y_1) \leq \text{CPaP}_p^k \quad (4.51)$$

$$\text{CPaP}_p^k \leq \sum_{m=0, m \neq k}^l \min \left\{ \begin{array}{c} 1 \\ \frac{\text{Pr}(y_0, x_k | x_m)}{\text{Pr}(y_1 | x_m)} \end{array} \right\} \text{pr}(x_m | y_1) \quad (4.52)$$

で与えられる.

また, 追加の仮定を置くことができず, $\text{pr}(x, y)$ のみを得られている場合, CPaP_p^k の存在範囲は

$$0 \leq \text{CPaP}_p^k \leq 1 - \text{pr}(x_k | y_1) \quad (4.53)$$

で与えられる. このように, 追加の仮定がなく $\text{pr}(x, y)$ のみを得られる場合においては, CPaP_u^k の存在範囲は $[0, 1]$ で与えられるという意味で有用な情報を得ることができないことを述べておく.

4.5 適用事例

本節では, 提案した指標の適用事例を示す. 本事例においては, 中国の広西チワン族自治区で実施された腸チフス Vi ワクチン効果調査におけるランダム化試験データを用いる. 本試験における報告によると (Levine, 2013; Yang et al., 2001), 65,287 人が $30\text{-}\mu\text{g}$ の Vi ワクチンを接種し ($X = x_1$ と表す), 65,984 人がコントロールとして生理食塩水を接種した ($X = x_0$ と表す). ワクチンを投与した時点では, 92% の被験者が 5 歳から 19 歳の未成年者であった. 19 カ月にわたるフォローアップにおいて, 血液培養により確定された腸チフス ($Y = y_1$) がワクチン接種群において 7 ケース検出され, コントロール群において 23 ケース検出された. その結果, ワクチン有効率は 69% であると報告されている. 本試験の詳細については, Levine (2013) や Yang et al. (2001) を参考にされたい.

ここで, 4.3 章の結果に基づいて, CPP_p , CPP_e , CPaP_p , CPaP_u を上述の腸チフス Vi ワクチン試験データに適用する. このデータはランダム化試験から得られたものであるこ

とから, $\text{pr}(y_{1,x_1}) = \text{pr}(y_1|x_1) = 7/65,287$, $\text{pr}(y_{1,x_0}) = \text{pr}(y_1|x_0) = 23/65,984$, $\text{pr}(x_1) = 65,287/(65,287 + 65,984)$ を得る. $\text{pr}(x, y)$ を $\text{pr}(y|x) \times \text{pr}(x)$ で評価した場合, CPP_p , CPP_e , CPaP_p , CPaP_u の存在範囲はそれぞれ $[0.344, 0.497]$, $[0.692, 1]$, $[0.531, 0.767]$, $[0.692, 1]$ で与えられる. このとき, CPP_e と CPaP_u が等しくなることが確認できる. このことは, 4.3.3 節における, 外生性を仮定した場合の考察とも一致する. 加えて, CPP_e と CPaP_u の範囲は CPP_p と CPaP_p の範囲よりも広がっていることがそれぞれ確認できる.

4.6 まとめ

医療分野において, 保護曝露 (処置) を受けなければ疾患が発症するであろうという状況の中で, 保護曝露によりどの程度疾患の発症を防ぐことができるかを評価する指標として prevented fraction と preventable fraction は広く用いられている. しかしながら, これらの既存の指標は異なる集団に基づいて定式化されているため, 数学的な意味で「割合」とはならず, 追加の仮定を置かない限りその範囲 $[0, 1]$ 外の値をとる可能性があり, 実用上不都合が生じる. この問題を解決するために, 保護曝露と反応が二値の場合において, 潜在反応モデルに基づいた四種類の新たな指標を提案した. また, これらの指標を拡張し, 保護曝露が複数カテゴリーの場合についても議論した. 新たに提案した指標は, 同一の集団のみに基づいて定式化されているため, 数学的な意味で「割合」として扱うことができ, そのため範囲 $[0, 1]$ 内の値を常にとることを示した. 加えて, 因果効果と観察確率の両方が得られる場合, 負値単調性の仮定のもとで提案指標は識別可能であることを示した. 負値単調性は, “exposure to a given factor is believed to protect against a disease” を正当化する因果的仮定と考えられることも述べた. また, 負値単調性に加えて外生性の仮定のもとでは, 提案指標と既存の指標が一致することを示した. さらに, 負値単調性が成立しない場合においては,

4.6. まとめ

提案指標の存在範囲について定式化をおこなった。提案指標は、保護曝露を受けなければ疾患が発症するケースのうち何パーセント程度の疾患が保護曝露を受けることでその疾患の発症を防ぐことができたかを調査するうえで、疫学や生物統計学における研究者や実務家に有益なツールとなりえることを明らかにした。

第5章 総括

5.1 本論文で取り組んだ課題と提案手法の特徴

本論文で取り組んだ課題は、ICSTCT (Amundsen and Hyden, 1977) の定義にある反事実に客観的な観点から交通コンフリクトを適切に評価することができる指標を提案すること、および曖昧であった交通コンフリクトの位置づけについて明確に議論したうえで各位置づけに基づいた交通コンフリクトの評価指標を提案することであった。これらの課題に対し、第2章では、因果推論の枠組みを用いた交通コンフリクトの評価指標を新たに提案した (山田・黒木, 2016)。そのうえで、第3章では、第2章の提案指標を拡張し、ドライバーの回避行動のタイプに着目した交通コンフリクトの評価指標を提案した (Yamada and Kuroki, 2016a)。そして、第4章では、交通コンフリクトの評価指標を発想の起点としながらも、疫学や生物統計学の分野で広く用いられる *prevented fraction* に着目し、ここでも因果推論の枠組みを用いた指標を新たに提案した (Yamada and Kuroki, 2016b)。

それぞれの課題に対して本論文で提案した手法の特徴を以下に記述する。課題の一つ目に対しては、ICSTCT (Amundsen and Hyden, 1977) で定義された交通コンフリクトの反事実に客観的な表現の重要性に着目した Davis et al. (2011) のアイデアを出発点としながら議論を進めた。しかしながら、Davis et al. (2011) の指標においては、背景情報が十分に考慮されておらず、また識別可能性についても明確に言及されていないことが問題点として挙げられる。この問題を解決するために、本論文では、潜在反応モデルを用いた交通コンフリクトの評価指標である PRIC を提案し、識別可能問題について言及しその条件を明らかにした。PRIC

においてその識別可能条件が成り立たない場合においては、付加的な因果的仮定を置いたうえで PRIC の存在範囲を定式化した。また、回避行動 X が二値の場合の PRIC に加えて、回避行動 X が多値の場合へも概念を拡張した PRIC を提案した。

課題の二つ目に対しては、Guttinger (1984) を参考にしながら、衝突事故に至る一連の事象の中で交通コンフリクトがどこに位置づけられるかについて議論を進めた。第一の位置づけとして、交通コンフリクトは、ドライバーの回避行動に先立って観測される共変量であるとみなされ、Davis et al. (2011) はこの観点で交通コンフリクトの評価指標を提案していることを示した。第二の位置づけとして、交通コンフリクトは、ドライバーが回避行動をとった (もしくはとらなかった) 後に生じる結果変数、あるいは中間変数とみなされ、本論文ではこの観点で PRIC を提案した。第一と第二の位置づけについては、Guttinger (1984) によって明確に述べられているが、加えて本論文では第三の位置づけが存在することについて言及した。第三の位置づけとして、交通コンフリクトを、ドライバーが回避行動をとった後に生じる結果変数とみなすものであり、これについては既存のリスク指標である prevented fraction に関連づけた CPP_p を提案した。

5.2 本論文の貢献

ICSTCT (Amundsen and Hyden, 1977) で定義された交通コンフリクトの反事実的表現の重要性に着目した Davis et al. (2011) の交通コンフリクトの評価指標の問題点は、識別可能性について明確に言及されていなくにある。本論文で提案した PRIC は因果推論の枠組みにある潜在反応モデルに基づいており、その識別可能性についてはデータのみならずその生成メカニズムを考慮しなければならないことについて言及している。この問題意識がゆえに、やみくもにデータを採取しては PRIC を推定することはできず、適切な研究

計画を立案し、それにしたがってデータをとることが重要であることを本論文を通じて示している。本論文で提案した交通コンフリクトの評価指標である PRIC は、(a) 外生性が成り立つ、(b) 単調性が成り立ちかつ十分な共変量集合を観測できるといった状況では、識別可能となることを示している。加えて、特定の条件の下で標準的なドライバーしか存在しない場合、その条件の下においても PRIC が識別可能となることを示している。この識別可能条件から導かれる PRIC の式は、母集団が異質なドライバー群によって構成されることを統計的な観点から正当化するのに重要な役割を果たしている。さらに、交通工学の観点においては、多くの交通事故状況において、これらの識別可能条件は成り立たないことが考えられることから、いくつかの因果的仮定の下で、観察確率を用いて PRIC に対する存在範囲を与えることで有用な情報を与えられることを示している。また、ICSTCT で定義された交通コンフリクトにおいては、回避行動の有無のみに着目した反事実的表現が用いられているが、実際の運転状況においては、ドライバーがどのような回避行動をとるかによって衝突事故の危険性は異なると考えるのが合理であり、本論文ではこの状況に対応して PRIC を拡張している。したがって、本論文の結果は、交通コンフリクトの定義にある反事実的表現を踏まえたものでありかつ実際の運転状況に対応したものであり、交通コンフリクトを適切に評価するのに重要な役割を果たすものとする。

本論文では、交通コンフリクトの評価指標を発想の起点としながらも、概念的に近い既存のリスク指標として疫学や生物統計学の分野で広く用いられる *prevented fraction* にも着目して議論している。既存の *prevented fraction* の問題点は、異なる集団に基づいて定式化されているため、数学的な意味で「割合」とはならず、追加の仮定を置かない限りその範囲 $[0, 1]$ 外の値をとる可能性があり、実用上不都合が生じる点にある。本論文で提案した CPP は因果推論の枠組みにある潜在反応モデルに基づいており、その識別可能性についてはデータのみならずその生成メカニズムを考慮しなければならないことを言及している。ここにおいても、適切な研究計画を立案し、それにしたがってデータをとることが重要となることを改めて示している。本論文で提案した CPP は、同一の集団のみに基づいて定式

化されているため、数学的な意味で「割合」として扱うことができ、そのため範囲 $[0, 1]$ 内の値を常にとるものである。加えて、因果効果と観察確率の両方が得られる場合、負値単調性の仮定のもとで提案指標は識別可能であることを示している。さらに、負値単調性が成立しない場合においては、提案指標の存在範囲についての定式化をおこなっている。負値単調性に加えて外生性の仮定のもとでは、提案指標と既存指標が一致することを示している。したがって、提案指標は、保護曝露を受けなければ疾患が発症するケースのうち何パーセント程度の疾患が保護曝露を受けることでその疾患の発症を防ぐことができたかを調査するうえで、疫学や生物統計学における研究者や実務家にとって有益なツールとなりえる。

以上のことから、潜在反応モデルに基づいた PRIC や CPP は、交通コンフリクトの原点である ICSTCT の定義に立ち返ったうえで提案された新たな理論的枠組みであり、これにより交通コンフリクトが適切に評価されることが期待される。

5.3 今後の課題

今後の課題として、まず最初に CPP_p を交通事故データに適用することが考えられる。そのうえで、PRIC と比較し、それぞれの適切な活用方法について議論する必要がある。

また、PRIC の適用事例として用いた 100-Car Study データにおいては、SUTVA を構成する重要な仮定である “no interference between units” が成立するものとして解析を行ったが、実際のところ、同一被験者が繰り返し衝突事故やニアミスを起こしている可能性は否めない。100-Car Study の被験者ごとのデータを入手するなどして、本件について確かめるとともに、その結果に基づいて、より信頼性の高い解析を行う必要がある。国内における被験者ごとのデータとして、人間生活工学研究センターより “運転行動データベース” が提供されている。このデータベースにおいては、一般のドライバーだけでなく自動車教習所の指導

員といった運転技能の異なるドライバーのデータも提供されている。また、各ドライバーごとの心理的側面に関するデータも含まれている。このようなドライバーの運転技能や心理的側面に応じて層別を行ったうえで解析を実施することで、より詳細の知見を得られる可能性がある。

加えて、本論文で提案した交通コンフリクトの評価指標は複数の車両の回避行動を同時に興味の対象としていないが、一般には衝突事故は複数の車両のインタラクションにより発生するのが自然であることから、複数車両の回避行動を同時に興味の対象とすべきであるという点があげられる。このように、複数の車両の回避行動を同時に興味の対象としたケースに提案指標を適用する場合においては、回避行動を複数のドライバーの行動として定義するなどといった改良を施す必要がある。

最後に、本論文では、時間情報を十分に考慮せずにデータ解析を行っているが、本来であれば継時的な扱いが必要となる点が考えられる。加えて、提案指標は衝突事故について特定の発生過程に依存しないノンパラメトリックな指標となっていることがあげられる。このような発生過程について事前情報を入手可能である場合に、その情報を提案指標に取り入れることでより信頼性の高い評価を行うことが可能となる。

5.4 まとめと将来展望

本論文の冒頭で示した“ICSTCT (Amundsen and Hyden, 1977) によって与えられた交通コンフリクトの定義にある反事実的表現”に対して“既存の交通事故リスク指標がこの反事実的表現を適切に反映していないケースがある”という問題において、反事実的表現を考慮に入れた交通コンフリクトの評価指標は提案されているものの、その識別可能性についてはこれまで言及されていなかった。この問題点を解決するために提案した潜在反応モ

デルに基づく交通コンフリクトの評価指標を用いることで、今後は、どのような実験条件や解析対象であれば交通コンフリクトを適切に評価できるかについての検討がなされることが期待される。また、その条件を満たさない場合においても、PRICの存在範囲を提供することで、有用な情報を定量的に提供することも可能となりえる。

交通コンフリクトの適切な評価が可能となった際の将来展望として、ドライバーに適切な回避行動を喚起する警報システムへの活用などが考えられる。例えば、回避行動が交通事故の防止に対して支配的であるにもかかわらず回避行動を実際にとったドライバーが少なく交通事故が多く発生するような状況を提案指標により検出できた場合、ドライバーに回避行動をとらせるような対策をうつことで多くの交通事故を防ぐことができる。つまり、本論文で提案した指標は、ドライバーへの回避行動の喚起が効果的に働く状況の検出といった実用的な役割が期待される。

ドライバーの回避行動が交通事故の防止に対して支配的な状況において、ドライバーへの回避行動の喚起が有効である場合とそうでない場合があるが、このことはドライバーが回避行動をとらなかった要因に依存する。“回避行動をとらない”という行為について、その要因をいくつかに分類することができる。危険を十分に察知しているものの、運転技能の欠如や個人の性格により冷静な対応をとることができないなどといった要因があり、これらが要因の場合においては回避行動の喚起は有効とはならず、先進運転支援システム(ADAS)などによる車両制御といったより強い介入が必要となる。一方、迫りくる危険に気づかない、例えば、わき見運転のように視覚的な要因やハザード知覚を正しく行えていないなどといった交通心理学的な要因もあり、これらが要因の場合においては回避行動の喚起は有効であると思われる。なお、ハザード知覚とは運転中の危ない対象を見つけ出すことである(蓮花・向井, 2012)。このような知覚が正しく行えていないドライバーに対しては、どのようなハザードが存在するかを適切にドライバーに伝えることにより、ドライバーが危険を感じていなかったとしても、回避行動の喚起を受け入れる可能性が高い。つまり、伊藤ら(2015)においても述べられているような“警報システムに対する不信”の問題への対

策ともなりうる。

昨今、交通社会における安全へのニーズが高まっていることから、今後の先進運転支援システム (ADAS) の発展に伴い、センシングデバイスから得られる情報量 (ドライバーの状態, 車両の状況, 車両周辺の状態など) が増加することが想定される。これらの情報に基づいて、回避行動に関する要因分析を行ったり、ハザードの推定を行うことが可能となってくると思われる。回避行動に関する要因分析やハザード推定結果に基づいて集計したデータにおいて本論文で提案した指標を用いることで、ドライバーへの回避行動の喚起がどの程度効果的に働くか見積もることが可能となり、交通シーンに応じてドライバーへの適切な注意喚起を行うことが期待される。このように、本論文における評価指標は、今後の自動車技術の発展を見据えたうえで提案したものであり、回避行動の要因分析とハザード推定を追加することで交通事故削減のための強力な手法となりえる。

謝辞

本研究を推進するにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました。学位論文の作成においては、統計数理研究所の山下智志教授、黒木学教授、逸見昌之准教授、愛知工科大学の荒川俊也教授、長崎大学の高橋啓准教授から多くのご助言を頂きました。主査の山下教授には、ご専門である土木工学と統計科学の観点から本研究の発展の可能性についてのご助言頂き、加えて激励のお言葉も頂戴し、大変幸甚でありました。荒川教授には、本研究の応用の観点からご助言、ご評価頂き、御礼申し上げます。主任指導教官の黒木教授には、統計的因果推論について熱心にご指導頂き、また研究者としての心構えなど書ききれないほどの多岐にわたりご鞭撻賜りました。特に、社会人学生であることや今後の私が向かう方向性に関してもご配慮頂き、ときには家族のことまでも考えてくださり、厳しくもかつ心温まる、まさに「恩師」である、と心より感謝しております。

引用文献

- Allen, B. L., Shin, B. T. and Cooper, P. J. (1978). Analysis of traffic conflicts and collisions. *Transportation Research Record* 667, 67-74.
- Amundsen, F. and Hyden, C. (1977). *Proceedings of the First Workshop on Traffic Conflicts*, Oslo.
- Archer, J. (2005). Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modeling: A Study of urban and suburban intersections. Dissertation, Lund University.
- Asmussen, E. (1983). Introduction speech and closing remarks at the preparatory ICTCT-meeting for the joint international calibration study of traffic conflict techniques.
- Barber, P. and Clarke, N. (1998). Advanced collision warning systems. *Industrial Automation and Control: Applications in the Automotive Industry, IEE Colloquium* 234.
- Benichou, J. (2001). A review of adjusted estimators of attributable risk. *Statistical Methods in Medical Research* 10, 195-216.
- Boslaugh, S. (2007). *Encyclopedia of Epidemiology*, Sage Publications, Thousand Oaks.
- Cai, Z., Kuroki, M., Pearl, J. and Tian, J. (2008). Bounds on direct effects in the presence of confounded intermediate variables. *Biometrics* 64, 695-701.
- Cai, Z., Kuroki, M. and Sato, T. (2007). Non-parametric bounds on treatment effects with non-compliance by covariate adjustment. *Statistics in Medicine* 26, 3188-3204.
- Centers for Disease Control and Prevention (2006). Varicella outbreak among vaccinated

- children - Nebraska, 2004. *Morbidity and Mortality Weekly Report* 55. 749.
- Chiba, Y. and Suzuki, E. (2013). Causal inference with intermediates: Simple methods for principal strata effects and natural direct effects. *Current Topics in Public Health*, InTech.
- Chin, H. C. and Quek, S. T. (1997). Measurement of traffic conflicts. *Safety Science* 26, 169-185.
- Chin, H. C., Quek-S. T. and Cheu R. L. (1992). Quantitative examination of traffic conflicts. *Transportation Research Record* 1376, 86-91.
- Cooper, P. J. (1983). Experience with traffic conflicts in Canada with emphasis on “post encroachment time” techniques. *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on International Calibration Study of Traffic Conflict Technique*.
- Cooper, D. F. and Ferguson, N. (1976). Traffic studies at t-junctions: A conflict simulation model. *Traffic Engineering and Control* 17, 306-309.
- Davis, G. A. (2000). Accident reduction factors and causal inference in traffic safety studies: A review. *Accident Analysis and Prevention* 32, 95-109.
- Davis, G. A., Hourdos, J., Xiong, H. and Chatterjee, I. (2011). Outline for a causal model of traffic conflicts and crashes. *Accident Analysis and Prevention* 43, 1907-1919.
- Debnath, A. K., Wilson, A. and Haworth, N. (2014). Proactive safety assessment in roadwork zones: a synthesis of surrogate measures of safety. *Proceedings of the 2014 Occupational Safety in Transport Conference*, 18-19.
- Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J., Perez, M. A., Hankey, J., Ramsey, D., Gupta, S., Bucher, C., Doerzaph, Z. R., Jermeland, J. and Knippling, R. R. (2006). The 100-car naturalistic driving study: Phase II-results of the 100-car field experiment. DOT HS-810 593.
- Ewan, L., Al-Kaisy, A. and Veneziano, D. (2013). Remote sensing of weather and road surface

conditions: Is technology mature for reliable intelligent transportation systems applications?

Transportation Research Record 2329, 8-16.

Flanders, W. D. and Klein, M. (2015). A general, multivariate definition of causal effects in epidemiology. *Epidemiology* 26, 481-489.

Frangakis, C. E. and Rubin D. B. (2002). Principal stratification in causal Inference. *Biometrics* 58, 21-29.

Gargiullo, P. M., Rothenberg, R. B. and Wilson, H. G. (1995). Confidence intervals, hypothesis tests, and sample sizes for the prevented fraction in cross-sectional studies. *Statistics in Medicine* 14, 51-72.

Gettman, D. and Head, L. (2003). Surrogate safety measures from traffic simulation models. Federal Highway Administration, FHWA-RD-03-050, Department of Transportation, U.S.

Greenwood, M. and Yule, G. U. (1915). The statistics of anti-typhoid and anti-cholera inoculations, and the interpretation of such statistics in general. *Proceedings of the Royal Society of Medicine* 8, 113-194.

Gregg, M. B. (2008). *Field Epidemiology, the 3rd edition*, Oxford University Press, New York.

Gumbel, J. (1960). Bivariate exponential distributions. *Journal of the American Statistical Association* 55, 698-707.

Guttinger, V. A. (1984). Conflict observation in theory and practice. *International Calibration Study of Traffic Conflict Techniques*, Springer, 17-24.

Hauer, E. (1978). Traffic conflict surveys: Some study design considerations. *TRRL Supplementary Report* 352.

Hayward, J. C. (1972). Near-miss determination through use of a scale of danger. *Highway Research Record* 384, 24-34.

- Hyden, C. (1987). The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish traffic conflict technique. Dissertation, Lund University, Department of Traffic Planning and Engineering.
- Imbens, G. W. and Rubin, D. B. (2015). *Causal Inference in Statistics, Social, and Biomedical Sciences*, Cambridge University Press, New York.
- 伊藤誠, 平岡 敏洋, 和田隆広, 北島創, 安部 原也, 丸茂喜高 (2015). 交通事故低減のための自動車の追突防止支援技術, コロナ社.
- Kleinbaum, D. G., Kupper, L. L. and Morgenstern, H. (1982). *Epidemiologic Research: Principles and Quantitative Methods*, John Wiley and Sons, New York.
- Kleinbaum, D. G., Sullivan, K. M. and Barker, N. D. (2013). *ActivEpi Companion Textbook*, Springer.
- Kotz, S., Balakrishnan, N. and Johnson, N. L. (2000). *Continuous Multivariate Distributions, volume 1: Models and Applications, the 2nd edition*, John Wiley and Sons.
- 黒木学 (2014). 「統計的因果推論における原因の確率とその評価」, 統計数理 62, 45-58.
- Kuroki, M. and Cai, Z. (2011). Statistical analysis of “probabilities of causation” using co-variate information. *Scandinavian Journal of Statistics* 38, 564-577.
- Laaksonen, M. (2010). Population attributable fraction (PAF) in epidemiologic follow-up studies. National Institute for Health and Welfare, Research 34.
- Landriean, P. J. (1972). Epidemic measles in a divided city. *Journal of the American Medical Association* 221, 567-570.
- Last, J. M. (1983). *A Dictionary of Epidemiology*, Oxford University Press, New York.
- Levine, M. M. (2013). Typhoid fever vaccines. *Vaccines, the 6th edition*, Eds: Plotkin, S. A. and Orenstein, W. A. Philadelphia: W.B. Saunders, 781-814.

- Lu, J-C. and Bhattacharyya, G. K. (1990). Some new constructions of bivariate Weibull models. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 42, 543-559.
- Miettinen, O. S. (1974). Proportion of disease caused or prevented by a given exposure, trait or intervention. *American journal of epidemiology* 99, 325-332.
- Migletz, D. J., Glauz, W. D. and Bauer, K. M. (1985). Relationships between traffic conflicts and accidents volume2: Final technical report. FHWA-RD-84-042, Federal Highway Administration.
- 元田良孝 (1992). 道路の安全性評価と錯綜手法に関する研究, 東京工業大学博士論文.
- Oppe, S. (1983). Joint international study for the calibration of traffic conflict techniques. Institute for Road Safety Research SWOV, The Netherlands, R-83-50.
- Parker, M. R. and Zegger, C. V. (1989). Traffic conflict techniques for safety and operations: Observers manual. FHWA-IP-88-027, Federal Highway Administration.
- Pearl, J. (1999). Probabilities of causation: Three counterfactual interpretations and their identification. *Synthese* 121, 93-149.
- Pearl, J. (2009). *Causality: Models, reasoning, and inference, the 2nd edition*, Cambridge University Press (黒木学訳 (2009). 統計的因果推論 -モデル・推論・推測-, 共立出版).
- Pearl, J. (2011). Principal stratification: A goal or a tool? *The International Journal of Biostatistics* 7, 1-13.
- Peesapati, L., Hunter, M., Rodgers, M. and Guin, A. (2011). Profiling Based Approach to Safety Surrogate Data Collection. *Proceedings of the 3rd International Conference on Road Safety and Simulation*.
- Perkins, S. R. and Harris, J. I. (1967). Traffic conflict characteristics: Accident potential at intersections. *General Motors Research Publication GMR-718*.

- Porta, M., Greenland, S., Hernan, M., dos Santos Silva, I. and Last, J. M. (2014). *A dictionary of Epidemiology, the 6th edition*, Oxford University Press: New York.
- 蓮花一巳, 向井希宏 (2012). 交通心理学, 放送大学教育振興会.
- Robins, J. M. (1986). A new approach to causal inference in mortality studies with a sustained exposure period: Application to control of the healthy worker survivor effect. *Mathematical Modeling* 7, 1393-1512.
- Robins, J. M. (1989). The analysis of randomized and non-randomized AIDS treatment trials using a new approach to causal inference in longitudinal studies. Health Service Research Methodology: A Focus on AIDS, Eds: Sechrest L., Freeman H., Mulley A., National Center for Health Services Research, U.S. Public Health Service, 113-159.
- Robins, J. M. and Greenland, S. (1992). Identifiability and exchangeability of direct and indirect effects. *Epidemiology* 3, 143-155.
- Rosenbaum, P. R. (1984). The consequences of adjustment for a concomitant variable that has been affected by the treatment. *The Journal of the Royal Statistical Society, Series A* 147, 656 - 666.
- Rosenbaum, P. R. and Rubin, D. B. (1983). The central role of propensity score in observational studies for causal effects. *Biometrika* 70, 41-55.
- Rothman, K. J., Greenland, S. and Lash, T. L. (2008). *Modern Epidemiology, the 3rd edition*, Lippincott Williams and Wilkins.
- Rubin, D. B. (1974). Estimating causal effects of treatments in randomized and nonrandomized studies. *Journal of Educational Psychology* 66, 688-701.
- Rubin, D. B. (1978). Bayesian inference for causal effects: The role of randomization. *The Annals of Statistics* 6, 34-58.
- Rubin, D. B. (1986). Which ifs have causal answers; Comment on Holland (1986). *Journal*

- of the American Statistical Association* 81, 961-962.
- Sackett, D. L., Haynes, R. B., Tugwell, P. and Guyatt, G. H. (1991). *Clinical Epidemiology: A Basic Science for Clinical Medicine, the 2nd edition*, Brown and Company: Boston.
- Saunier, N. and Sayed, T. (2010). Surrogate Safety Analysis. The report is available for download at <http://n.saunier.free.fr/saunier/stock/saunier12surrogate-course.pdf>.
- Shelby, S. G. (2011). Delta-V as a measure of traffic conflict severity. *TRB 90th Annual Meeting Compendium of Papers*.
- Singh, K. B. and Taheri, S. (2015). Estimation of tire-road friction coefficient and its application in chassis control systems. *Systems Science and Control Engineering* 3, 39-61.
- Spasoff, R. A. (1999). *Epidemiologic Methods for Health Policy*, Oxford University Press: Oxford.
- Spicer, B. A. (1973). Study of traffic conflicts at six intersections. *TRRL Report LR551*.
- St-Aubin, P., Miranda-Moreno, L. F. and Saunier, N. (2011). Analysis of driver behavior and collision risks for protected freeway entrance and exit ramps: Trajectories and surrogate safety measures. *The 21st Canadian multidisciplinary road safety conference*.
- Sun, D. and Benekohal, R. F. (2005). Analysis of work zone gaps and rear-end collision probability. *Journal of Transportation and Statistics* 8, 71-86.
- Suzuki, E. (2015). Commentary: Generalized causal measure: The beauty lies in its generality. *Epidemiology* 26, 490-495.
- Suzuki, E., Yamamoto, E. and Tsuda, T. (2012). On the relations between excess fraction, attributable fraction, and etiologic fraction. *American Journal of Epidemiology* 175, 567-575.
- Theofilatos, A. and Yannis, G. (2014). A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. *Accident Analysis and Prevention* 72, 244-256.

- Tian, J. and Pearl, J. (2000). Probabilities of causation: Bounds and identification. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 28, 287-313.
- Tian, J. and Pearl, J. (2002). A general identification condition for causal effects. *Proceedings of the the Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence*.
- Traffic Accident Causation in Europe (TRACE) project (2006-2008). All TRACE reports are available for download at <http://www.trace-project.org>.
- van der Horst, A.R.A. and Kraay, J.H. (1986). The Dutch conflict observation technique “DOCTOR”. *Proceedings of the workshop “Traffic Conflicts and Other Intermediate Measures in Safety Evaluation”*.
- VanderWeele, T. J. (2011). Principal stratification: Uses and limitations. *International Journal of Biostatistics* 7, 1-14.
- 若林拓史, 高橋吉彦, 新美栄浩, 蓮花一己 (2003). 「交通流ビデオ解析システムを用いた交通コンフリクト分析と新しい危険度評価指標の提案」, 土木計画学研究・論文集 20, 949-956.
- Wang, Y., Ieda, H. and Mannering, F. (2003). Estimating rear-end accident probabilities at signalized intersections: Occurrence-mechanism approach. *Journal of Transportation Engineering* 129, 377-384.
- Wang, C., Quddus, M. A. and Ison, S. G. (2013). The effect of traffic and road characteristics on road safety: A review and future research direction. *Safety Science* 57, 264-275.
- Wang, W. and Wets, G. (2012). *Computational Intelligence for Traffic and Mobility*, Springer Science and Business Media.
- Weinburg, G. and Szilagyi, P. (2010). Vaccine epidemiology: Efficacy, effectiveness, and the translational research roadmap. *Journal of Infectious Diseases* 201, 1607-1610.
- World Health Organization (2009). *Global Status Report on Road Safety*.

Yang, H. H., Wu, C. G., Xie, G. Z., Gu, Q. W., Wang, B. R., Wang, L. Y., Wang, H. F., Ding, Z. S., Yang, Y., Tan, W. S., Wang, W. Y., Wang, X. C., Qin, M., Wang, J. H., Tang, H. A., Jiang, X. M., Li, Y. H., Wang, M. L., Zhang, S. L. and Li, G. L. (2001). Efficacy trial of Vi polysaccharide vaccine against typhoid fever in south-western China. *Bulletin of the World Health Organization* 79, 625-631.

山田健太郎, 黒木学 (2016). 潜在反応モデルを利用した交通コンフリクト指標の定式化. 応用統計学会 45, No. 1 and 2, 1-24.

Yamada, K. and Kuroki, M. (2016a). New traffic conflict measures based on potential outcome approach. *Accident Analysis and Prevention*, under review.

Yamada, K. and Kuroki, M. (2016b). Counterfactual-based prevented proportions. *Journal of Causal Inference*, under review.

Young, W., Sobhani, A., Lenne, M. G. and Sarvi, M. (2014). Simulation of safety: A review of the state of the art in road safety simulation modeling. *Accident Analysis and Prevention* 66, 89-103.

Zheng, L., Ismail, K. and Meng, X. (2014). Traffic conflict techniques for road safety analysis: Open questions and some insights. *Canadian Journal of Civil Engineering* 41, 633-641.