

歩車分離制御交差点における利用者挙動の経時的解析*

Time Lapse Analysis of Users' Behaviors at Large-scale Intersections with Separated Traffic Signal Control*

鈴木弘司**・藤田素弘***・山越陽介****

By Koji Suzuki**・Motohiro Fujita***・Yosuke Yamagoshi****

1. はじめに

近年、事故多発信号交差点において歩車分離式信号制御（以下、歩車分離制御）が導入されるケースが増えてきている。歩車分離制御とは、歩行者等と自動車等の交錯が全く生じない信号表示または歩行者等と自動車等の交錯が少ない信号表示により信号制御することをいい¹⁾、スクランブル方式、歩行者専用現示方式、右左折車両分離方式、右折車両分離方式に区分される²⁾。また、警察庁によると、歩車分離式信号機は平成18年3月末の時点で全国に3900基整備されており、これは全体の2%程度に当たる³⁾。しかし、本制御導入にあたり、明確な基準はなく、定量的・客観的に採用の可否判断ができる基準の策定が望まれている。

既存の歩車分離制御の研究に関して、齋藤ら⁴⁾は、歩車分離制御が新規導入された小規模交差点での事前・事後調査により、当制御は車両と歩行者の錯綜減少に寄与し、歩行者に関してフライング抑制の効果があり、安全性が高まることを明らかにした。鈴木ら⁵⁾は、片側2車線以下の小規模交差点における歩車分離制御下での車両の発進時・通過時・停止時挙動分析より、歩車分離制御の方が、ドライバーに戸惑いを与え、危険性の高い車両挙動が見られるなど、歩車分離制御が歩車非分離制御に比べ交差点内の危険性が高い状況にあることを指摘した。小川ら⁶⁾は、シミュレーションモデルを構築し、歩車分離制御導入による交通処理能力の比較を3車線道路において行い、当制御導入に適した自動車交通量、右左折車の混入率、歩行者交通量の範囲について示している。佐々木ら⁷⁾は、意識調査や導入前後の交通量調査より、高齢者、子供に対して安心感を増す対策として有効と述べている。吉田ら⁸⁾は、大規模交差点におけるヒアリング調査から、横断者の安全性向上や事故削減効果を確認している。しかし、近年、都市部の大規模交差点で適用されつつある右左折

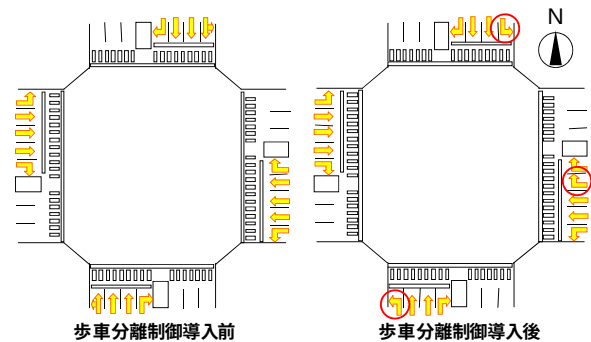


図-1 名駅南3車線運用図（左：事前、右：事後）

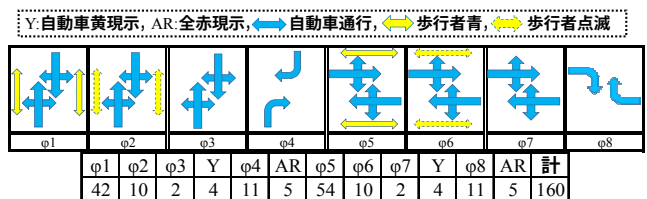


図-2 名駅南3信号現示階梯図（事前）

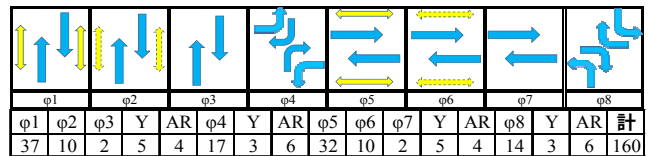


図-3 名駅南3信号現示階梯図（事後）

車両分離方式の歩車分離制御の導入に関して利用者挙動に基づき詳細に効果を検討した事例は存在しない。

本研究では、右左折車両分離方式の歩車分離制御が導入された大規模交差点で調査を行い、導入前から導入後1年までの5時点で利用者挙動を把握し、横断者と右左折車との交錯可能性を経時的に分析する。次に、横断者と左折車の交錯事象に着目し、到着率を考慮した交錯リスク推計手法を提案し、制御導入前後の安全性変化を検証する。また、制御導入による円滑性の変化を分析し、さらに交錯リスクと併せて貨幣換算を行い、調査交差点における歩車分離制御導入効果を検討することを目的とする。

2. 調査概要

本研究では、2007年9月に制御変更が行われた名古屋市中村区名駅南3交差点を対象とし、調査を実施した。対象交差点の車線運用を図-1、信号現示階梯を図-2、図-3に、また、調査日程を表-1に示す。本研究では、事前

*キーワード：交通制御、交通安全、交通管理

**正員、博（工）、名古屋工業大学大学院工学研究科

（E-mail：suzuki.koji@nitech.ac.jp、名古屋市中昭和区御器所町、TEL052-735-7962）

***正員、工博、名古屋工業大学大学院工学研究科

****学生員、名古屋工業大学大学院工学研究科

1 時点、事後4 時点の計5 時点で、横断歩道、交差点内における右左折車および横断者の挙動を取得するビデオ撮影を行っている。本稿では図-4 に示す交差点東側及び南側横断歩道における車両・横断者の交錯事象に着目する。なお、歩行者と横断自転車を区別せず、「横断者」として分析する。また、当交差点では東側流入部から交差点に向かって下り勾配があり、他流入部は平坦な構造である。また、図中に示すように高架構造物の橋脚が交差点周囲に設置されている。調査時映像例を図-5 に示す。

調査時の交通特性として、事前、事後1 年の朝、夕方の方向別交通量を表-2 に示す。これより事後1 年において、交通量が15%程度減少していることがわかる。なお、本研究では上記分析対象における横断者と右左折車との交錯可能性評価に主眼を置くため、事後1 週間、事後1 か月、事後4 ヶ月の調査では対象横断歩道以外の自動車交通量（北側流入部右折、西側流入部左折、直進）が正確に記録されていない。よって、表-2 ではこれらの3 時点の結果を掲載していない。後述する円滑性検討の際にもこれらの3 調査時点を対象としないこととする。また、事前の夕方の西側交通量については一部映像不備により左折車数の計測が困難なケースがあったため、左折車を除いた交通量を示し、進行割合を算出していない。

3. 観測断面通過タイミングに関する分析

図-2、図-3 に示す信号現示階梯図より、当交差点では歩車分離制御導入により右左折車、横断者ともに青時間が短縮され、その一方で赤時間が増加している。これにより、フライング、駆け込みといった利用者の危険行動の誘発が危惧される。なお、本稿では、青現示開始前の通行開始を「フライング」、車両黄現示（横断者は青点滅）終了後の通行開始を「駆け込み」として定義する。ここでは、南側および東側横断歩道の観測断面における利用者の通過タイミングに関する分析を行う。

調査時点、朝夕別の観測断面通過タイミングについて、図-4 中の左折南進 L_{SB} の結果を図-6、左折東進 L_{EB} の結果を図-7 に、図-4 中の右折南進 R_{SB} の結果を図-8、右折東進 R_{EB} の結果を図-9 に、図-4 中の P_{WB} 、 P_{EB} をまとめた東側横断歩道の南北横断者の結果を図-10、 P_{SB} 、 P_{NB} をまとめた南側横断歩道の東西横断者の結果を図-11 に示す。

図-6、図-7 の左折車の観測断面通過タイミングより、 L_{SB} については、赤以降の通過割合が事前の朝では5%程度であるのに対し、事後1 週間では約20%と急増し、事後1 ヶ月で半減し、その後、事後4 ヶ月では増加するなどの変動はみられるが、事後1 年では値が減少している。なお、事後1 年の割合は事前と比べ、約2 倍に増加している。一方、事前の夕方は5%程度であった割合が25%程度まで増加し、1 年経過後においても20%程度存在し

表-1 調査日程

調査時期	調査日	調査時間帯
事前	2007/7/26(木)	8:00-9:00 16:30-17:30
事後1週間	2007/10/5(木)	8:00-9:00 16:30-17:30
事後1ヶ月	2007/11/8(木)	8:00-9:00 16:30-17:30
事後4ヶ月	2008/2/11(木)	8:00-9:00 16:30-17:30
事後1年	2008/9/25(木)	8:00-9:00 16:30-17:30
	2008/10/23(木)*	8:00-9:00

*事後1 年の調査は、2008/9/25 調査時取得映像の一部不備があり、2 度実施した。

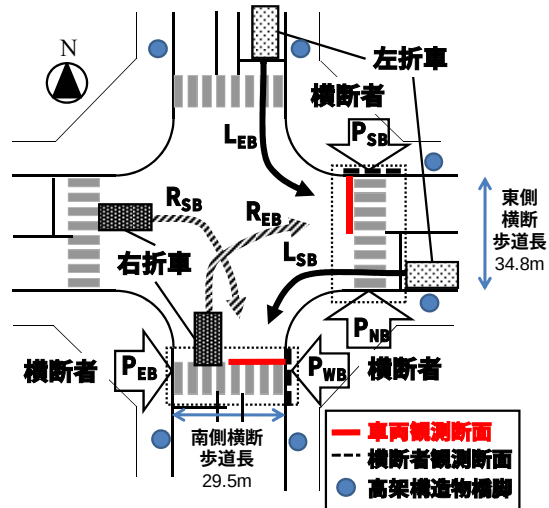


図-4 分析対象交差点の概況



図-5 調査映像例（南側横断歩道・東西方向）

（なお、本写真は調査日とは別の日に撮影したため、日付が異なる）

表-2 調査時の自動車交通量(事前、事後1 年)

調査時期	流入路	交通量 [台/時]	大型車 混入率[%]	進行割合[%]		
				左折	直進	右折
事前・朝	東側	1303	5.6	15.1	68.1	16.8
	西側	1020	6.7	4.0	75.8	20.2
	南側	1325	4.3	7.9	74.9	17.2
	北側	1058	3.0	15.7	75.6	8.7
事後1年・朝	東側	936	7.9	11.0	65.7	23.3
	西側	1040	6.1	3.5	82.7	13.8
	南側	1152	6.2	6.7	75.8	17.5
	北側	864	4.9	8.9	81.7	9.5
事前・夕	東側	1271	4.5	15.7	68.1	16.2
	西側	1033	5.8	-	-	-
	南側	1323	2.0	7.3	76.4	16.4
	北側	1013	3.2	11.6	58.3	6.6
事後1年・夕	東側	1123	4.6	11.2	68.3	20.5
	西側	937	5.9	3.1	75.3	21.6
	南側	1079	3.0	8.8	74.7	16.5
	北側	928	3.6	12.0	78.1	9.9

ているものの、その割合は遜減傾向にあることがわかる。また、朝夕ともに次現示である直進青時間（図-3 のφ5）まで観測断面を通過しており、通行権を分離したはずの横断者と左折車との新たな交錯可能性が発生していることがわかった。 L_{EB} については、 L_{SB} よりも赤以降の通過割合の存在が顕著である。これには青時間（φ4、φ8）

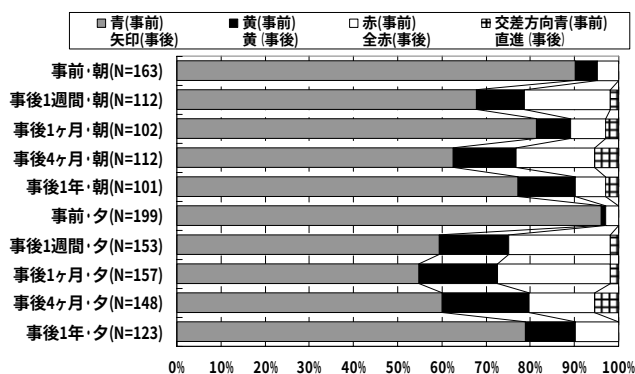


図-6 左折車の観測断面通過タイミング(L_{SB})

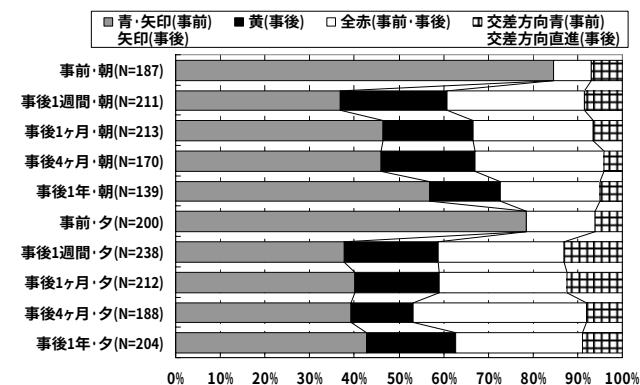


図-8 右折車の観測断面通過タイミング(R_{SB})

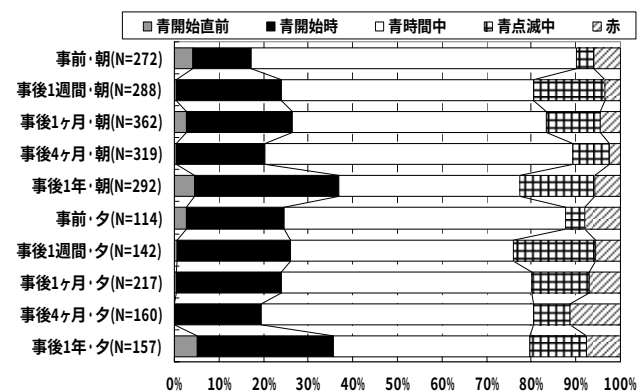


図-10 横断者の観測断面通過タイミング(P_{SB}, P_{WB})

と交通量の違いが影響していると考えられる。つまり、 L_{EB} では、事前に54秒の青時間があるのに対し、朝は1サイクル当たり4.5台、夕方は7.8台と交通量は少ないため、青時間中に十分交通量が捌けていたといえる。事後はサイクル当たりの交通量はそれほど減少していないにもかかわらず、青時間が、14秒に短縮されたため、青時間中に捌けない車両が出現し、その結果、赤以降の観測断面通過車両の増加、すなわち、黄色以降に交差点進入を行う車両の増加につながったと推察される。 L_{EB} よりも L_{SB} の方が赤以降の通過割合が低いのは、 L_{SB} の方が、青時間が3秒長いことによるものと考えられる。これは、交通量が同程度の事後1週間・夕方のケースでの比較により裏付けられる。

図-8、図-9の右折車の観測断面通過タイミングより、 R_{SB} 、 R_{EB} ともに全赤以降の通過が30-40%を占めるなど、

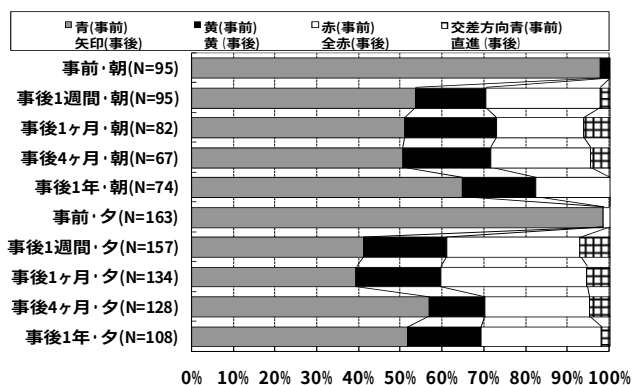


図-7 左折車の観測断面通過タイミング(L_{EB})

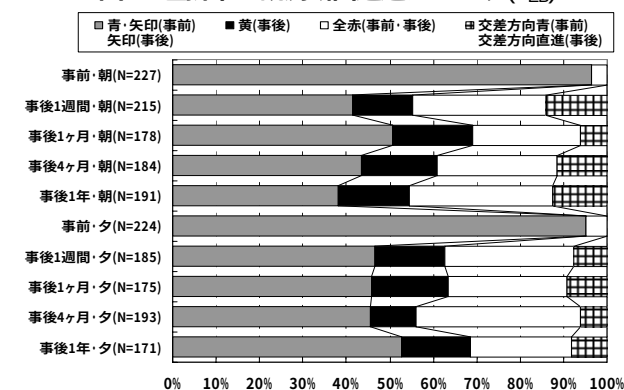


図-9 右折車の観測断面通過タイミング(R_{EB})

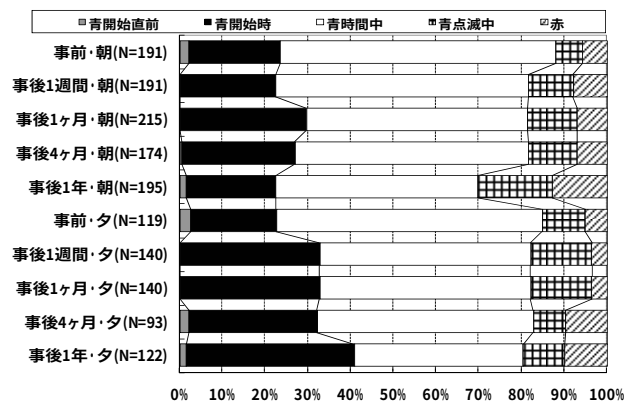


図-11 横断者の観測断面通過タイミング(P_{SB}, P_{NB})

事後において、危険な駆け込みが増加していることがわかる。図中の交通量より、 R_{SB} については事前・事後ともに1サイクルあたり9-10台程度、 R_{EB} については、事前は1サイクルあたり9-10台、事後は7-8台程度の右折車両を捌く必要がある。表-2に示した事前の交通特性からも読み取れる通り、本交差点では対向直進車がそれほど多くないため、事前では、青丸時間中にも右折可能な時間が存在していた。その時間を使うことで、右折専用現示が11秒でも駆け込みをあまり生じさせず右折車両を捌くことができていたが、事後は青丸時間がなくなり、実質的に通行可能な青時間が短縮された。結果として、事前と同程度の車両数を捌くために、駆け込みが増加したといえる。また、 R_{SB} の事前において、次現示の交差方向青時間でも数%の値が生じているが、今回の計測断面は、交差点流出部であり、この事象が交差方向交通との

交錯に与える影響はそれほど大きくないと思われる。また、 R_{EB} に比べ R_{SB} の事前の駆け込み割合が高い。これは、**図-4**に示す交差点付近の高架構造物橋脚の影響により、歩行者青点滅後の駆け込み横断者の発見に注意を払う必要があることや下り勾配を利用し、高速で進入する交差点東側からの横断自転車に留意する必要がある、流出右折車両が低速で通行する必要がある。その結果、同程度の交通量を捌くにも余分に時間を要するため、全赤以降の通過が増加したものと推察される。

図-10、**図-11**の横断者の横断歩道端（観測断面）通過タイミングより、南側横断歩道、東側横断歩道の通過タイミングの内訳や経時的な傾向は似ているといえる。両横断歩道においても事後4ヶ月の朝の結果を除き、青点滅以降の通過が増加していることが読み取れる。これは、事前に比べ、事後の方が、赤時間が長くなり、それを回避すべく横断者が危険行動をとることによる影響と考えられる。また、青開始時の横断者割合については、事前に比べ、事後の方が多いことがわかる。これについても赤時間が長くなったことが影響したと推察される。すなわち横断者が赤時間に到着する機会が増えたと考えられる。青開始直前のフライングに関しては、事前は朝夕、両横断歩道において数%発生していたが、事後では発生する場合と発生しない場合がある。これには、交差方向青（**図-3**のφ1、φ5）での駆け込み左折車両の存在が影響していると考えられる。つまり、駆け込み車両がいることで、横断者は交錯を回避するために、その車両の通過待ちを強いられるため、フライングが抑制されるといえる。このことは、**図-6**、**図-7**の左折車両の交差方向青進入割合、**図-10**、**図-11**の横断者のフライング割合との対応関係から確認される。

以上の歩車分離制御導入前後の経時的な通過タイミング分析より、右左折車の駆け込み、横断者の青点滅開始後通過が増加傾向にあることがわかった。

4. 信号切り替わり時の歩車交錯事象に関する分析

前章の分析より、歩車分離制御導入後の信号切り替わり時の歩車の駆け込み増加が明らかとなった。本章では、その危険行動が歩車交錯にどのように影響を与えているかを分析する。ここで、信号切り替わり時（Inter Green, 以後、IG）において、歩車分離制御では、①横断者がフライングを冒し、左折車両が駆け込みを冒したとき、②横断者が駆け込みを冒し、右折車両がフライングを冒したときの2パターンでは交錯の可能性はある。一方、歩車非分離制御では、③車両黄現示終了後以降に、横断者の駆け込み、左折車の駆け込みが同時に生じた場合、また、④右折専用現示開始後の右折車両の通行時間帯に横断者が駆け込む場合の2パターンの交錯が考えられる。

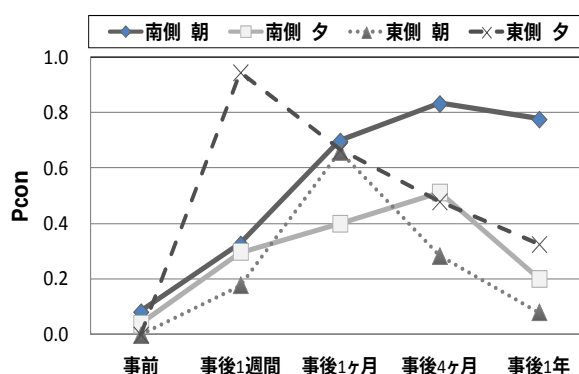


図-12 歩車交錯率（左折車×横断者）

以下、左折車両・横断者・右折車両のIGでの危険行動率に着目し、1回のIGにおいて発生し得る歩車交錯率を P_{con} とし、横断者対左折車両、横断者対右折車両の交錯タイプ別に定式化して評価する。

(1) 横断者と左折車の交錯事象

まず、左折車と横断者の関係に着目する。歩車分離制御導入後のIGでは①のケースで、一方、歩車分離導入前（歩車非分離制御）のIGでは③のケースで交錯が発生する。そのため、IGにおける横断者と左折車との歩車交錯率 P_{conL} を事前、事後別に次のように定義する。

$$P_{conL_before} = P_{PrL} \cdot P_{VLru} \quad (1)$$

$$P_{conL_after} = P_{Pfl} \cdot P_{VLru} + P_{Pac} \cdot P_{VLac} \quad (2)$$

ここに、 P_{conL_before} ：歩車非分離制御での左折×横断者交錯率、 P_{conL_after} ：歩車分離制御での左折×横断者交錯率、 P_{PrL} ：横断者が車両黄現示後に観測断面を通過する確率、 P_{Pac} ：横断者が青時間開始時に観測断面を通過する確率、 P_{Pfl} ：フライング横断確率、 P_{VLru} ：左折車両の全赤時間中通過確率、 P_{VLac} ：左折車両の左折時間終了後（直進青開始以降）通過確率

通過タイミングデータより、IG1回あたりの各確率を算出し、式(1)、(2)より事前、事後の4時点、朝夕、横断歩道別に歩車交錯率 P_{conL} を求めた結果を**図-12**に示す。

これより、どのケースにおいても、事後に P_{con} が増加していることがわかる。**図-6**、**図-7**に示した直進青開始後の進入 P_{VLac} が事前には0であったのが、事後に増加していることが影響したと考えられる。また、**図-10**、**図-11**に示すように、歩車分離制御導入により青開始時横断者が増えることもこの結果に影響したといえる。また、事後4ヶ月と事後1年の比較より、時間経過に伴い、全パターンにおいて P_{con} が減少傾向を示している。これは、**図-6**、**図-7**から読み取れるように、左折車の赤以降通過が逡巡していることが影響していると考えられる。なお、事後（朝）の P_{con} の減少幅が小さいのは横断者のフライング割合が高いことが影響しているといえる。

(2) 横断者と右折車の交錯事象

次に、横断者と右折車の交錯事象について述べる。歩車分離制御導入後は、上述の②のケースで、歩車分離制御導入前（歩車非分離制御）は、上述の④のケースにおいて、IG 中の交錯が発生する。そこで、右折車と横断者との歩車交錯率は、以下のように定義できる。

$$P_{conR_before} = P_{Pred} \cdot P_{RV} \quad (3)$$

$$P_{conR_after} = P_{Pred} \cdot P_{Rfl} \quad (4)$$

ここに、 P_{conR} ：右折×横断者交錯率、 P_{Pred} ：横断者が事前の右折矢以降、事後の全赤以降における観測断面通過率、 P_{RV} ：右折車両が事前に右折矢以降に観測断面を通過する確率、 P_{Rfl} ：事後、右折専用現示前の全赤時間通過確率

左折車同様にIG1 回あたりの各確率を観測結果より算出し、事前と事後の4時点、朝夕、横断歩道別に歩車交錯率 P_{con} を求めた結果を図-13に示す。

これより、東側横断歩道に関しては全時点において $P_{conR}=0$ であるが、南側横断歩道に関しては事前には0.1程度の交錯率があり、導入後、その値が減少していることがわかる。この要因として、事前では青時間が必要以上に長く、飽和交通流が途絶えた後にも車両青表示が長く継続し、その間の車両交通需要の到着交通量が必ずしも多くないため、車両間隔が大きく空くことがあり、この間を利用して歩行者が横断を試みるものがあつたことが考えられる。一方、事後は車両青時間が短いため、青時間中に飽和交通流で車両が通過する状態の時間割合が高くなり、その車両が飽和流で捌けている時間帯に歩行者が横断を試みることはないことが影響しているといえる。

以上のIGに関する分析より、調査交差点では歩車分離制御導入後において、右折車と横断者の交錯よりも左折車と横断者の交錯の方が起こりやすいことが示された。

5. 通過台数・人数割合を考慮した左折車と横断者の交錯リスク推計

前章において実測データから左折車両・横断者のIG中の交錯可能性の高いことが示されたが、歩車分離制御と歩車非分離制御の性能比較のためにはIG中の交錯事象だけでなく、青時間中の事象も含め、信号サイクル全体を通して交錯可能性を評価することが必要である。

本研究では、歩車非分離・歩車分離両制御下での交錯可能性を時々刻々変化する横断者と車両の観測断面通過人数割合および通過台数割合に着目してサイクル全体で定量化することを試みる。今回、図-5に示すような車両の流出部で歩車交錯の起こり得る領域をコンフリクトゾーン（以下、CZ）と捉え、そこを横断者と車両が同時に通過する場合を交錯事象の発生とし、それを交錯リスクがある事象と定義する。本章では、まず横断者、車両の

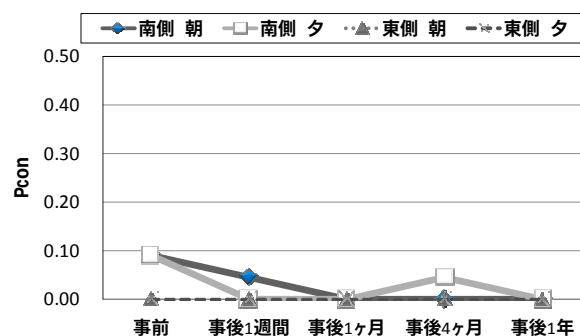


図-13 歩車交錯率（右折車×横断者）

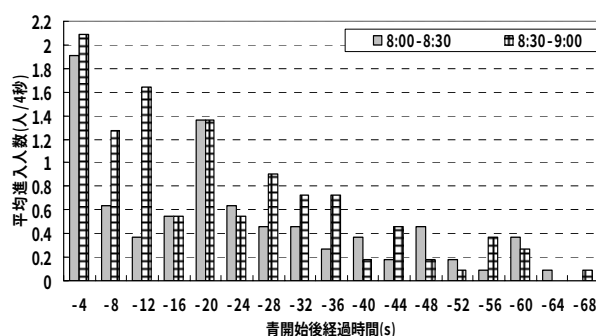


図-14 CZ への進入タイミング別の通過人数分布（南側横断歩道の横断者・事前・朝）

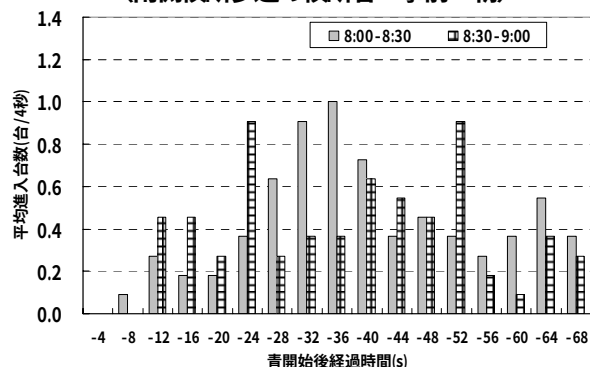


図-15 CZ への進入タイミング別の通過台数分布（左折南進・事前・朝）

CZ通過分布特性を検討し、そのうえで交錯リスクを推計する。なお、本稿では前章において交錯事象が歩車分離制御導入後で顕著に見られた左折車と横断者の交錯に焦点をあてて分析を行うこととし、右折車と横断者との分析については今後の課題とする。

(1) 歩車非分離制御下でのCZへの進入タイミング別の通過人数・通過台数分布

歩車分離制御導入前（事前）について、横断者と左折車のCZへの進入タイミング別の通過人数・通過台数分布を示す。ここで、歩車非分離制御下では東側横断歩道、南側横断歩道の横断者、また、左折東進、左折南進の通過分布の形状、傾向が似ていたため、以下、南側横断歩道の横断者、左折南進車 L_{SB} の通過人数・通過台数分布についてのみ検討する。なお、分布特性を把握しやすくするため、観測時間帯（朝 8:00-8:30、8:30-9:00、夕方

16:30-17:00, 17:00-17:30) 別, 横断者・左折車別に, 青開始時点とを 0 とし, その後 4 秒間隔で車両青時間終了(図-2: $\phi 5 \sim \phi 7$) までを集計することとする。集計結果を図-14 から図-17 に示す。ここで, 図の y 軸は, 各 4 秒間隔に, あるサイクルでの到着する交通量を示すが, これは各観測時間帯 30 分 (11 サイクル) での平均値を示したものである。

図-14 の事前・朝の横断者通過人数分布より, 8:30-9:00 の方が, 8:00-8:30 よりも, 青開始後しばらく横断者が多い状態が続いていることがわかる。全体的な傾向としては, 両者ともに青開始後から時間経過とともに通過人数が減少する右下がりの傾向にあるといえる。一方, 図-15 の朝の左折車通過台数分布より, 8:00-8:30, 8:30-9:00 の両時間とも青開始直後は 0 となり, しばらくの間, CZ 通過交通が少ないことがわかる。これは前述の横断者の横断待ちを行う影響によるものと考えられる。8:00-8:30 はその後, 青時間の経過に従い, 左折車の通過台数が緩やかに増加する傾向にあり, 一方, 8:30-9:00 については増加傾向が見られない。これは横断者通過人数の減少とのトレードオフ関係の影響によるものといえる。8:00-8:30 については, 青時間の後半 (33 秒) 以降は, 交通量が減少に転じ, 0.4 程度の数値に収束している。また, 図-16 の夕方の横断者通過人数分布より, 時間経過に伴う通過交通量の減少傾向は, 朝の横断者の通過人数分布特性と似ているが, 交通量が少ないため, 値が半分程度になっている点が異なる。16:30-17:00 に比べ, 17:00-17:30 の交通量が多いのは, 夕方の帰宅時間帯と重なっていることが影響していると推察される。図-17 の夕方の左折車通過台数分布より, 朝の通過台数分布と比べ, 青開始後から青前半部の増加傾向, 青後半部以降の減少から収束傾向が顕著にみられる。これは, 横断者交通量が朝と比べて少なく, 横断者の影響を受けることなく交差点を通過可能な状況と考えられる。

(2) 歩車分離制御下での CZ への進入タイミング別の通過人数・通過台数分布

次に, 歩車分離制御導入後の CZ への進入タイミング別の横断者通過人数・左折車通過台数分布を示す。ここでは, 南側, 東側の横断歩道別の横断者の通過人数分布, 左折東進, 左折南進別の左折車の通過台数分布を検討する。なお, 横断者および左折車の信号無視実施の実態に基づき, 両者の交錯を検討する時間帯を, 南側横断歩道, 左折南進については $\phi 4$ 終了後の全赤開始時を 0 とし, 歩行者青時間 ($\phi 5$) 終了まで, また, 東側横断歩道, 左折東進については, $\phi 8$ 終了後の全赤開始時を 0 とし, 歩行者青時間 ($\phi 1$) 終了までとする。また, 歩車分離では $\phi 4$ (もしくは $\phi 8$) 終了から $\phi 5$ (もしくは $\phi 1$) 開始

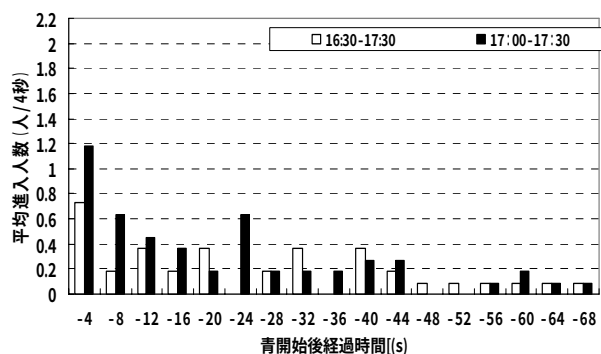


図-16 通過人数分布 (南側横断者・事前・夕方)

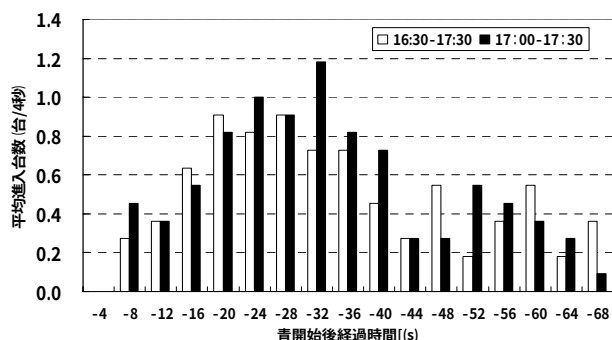


図-17 通過台数分布 (左折南進・事前・夕方)

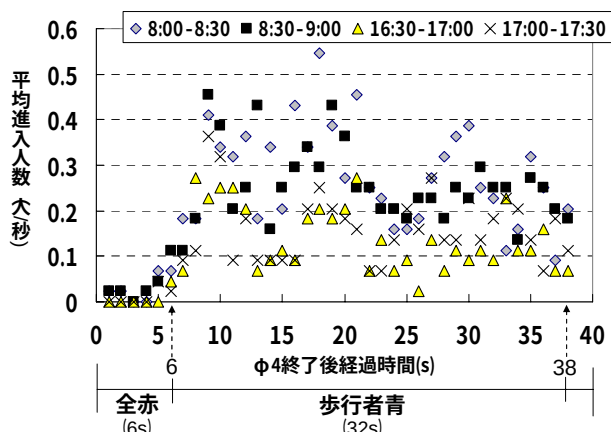


図-18 横断者の通過人数分布 (南側・事後)

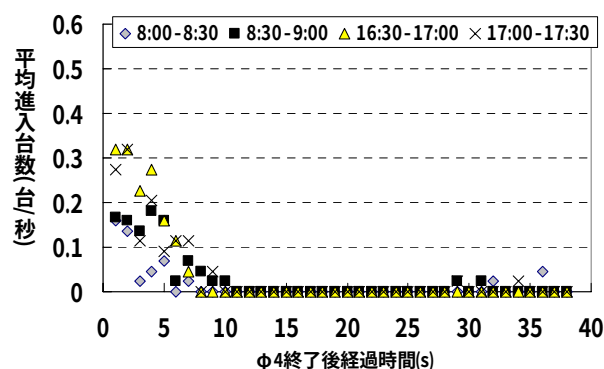


図-19 左折車の通過台数分布 (南進・事後)

数秒程度の信号切り替わり時の交錯事象の発生が集中することが予想されるため, 1 秒単位で通過分布を表す。また, 調査時点別の交通量にあまり変化がなかったため, 経過時間 1 秒ごと, 事後 4 時点のデータを平均化した結果を使用する。これらの結果を図-18 から図-21 に示す。

図-18 の南側の横断者の通過人数分布より, どの調査

時間帯においても、全赤時間終了時である6秒付近から通過人数が急増する傾向にある。その後、経過時間10秒前後でピークを迎え、その後は、朝の時間帯は0.2-0.3人程度、夕方の時間帯は0.1-0.2程度に分布している。

図-19の左折南進車両の通過台数分布より、どの時間帯においても全赤開始時に通過台数が多く、歩行者青開始後数秒程度で通過台数が0に収束している。また、全赤開始直後で、朝に比べて、夕方の値が大きい。図-6に示すように、夕方の方が、横断者が少ないため、左折車が駆け込みしやすい状況にあることが影響したと考えられる。なお、歩行者青後半の30秒前後において、「歩行者青かつ車両赤」であるにも関わらず車両の通過がわずかながら認められる。これは、横断者がいないことを確認した上で意図的に信号無視をする、もしくは矢印信号による方向別制御の意味を理解していない不慣れたドライバーによる通過車両が存在していたと推察される。

図-20の東側の横断者の通過人数分布より、南側の結果と同様、全赤終了から通過人数が増加する傾向にあるが、急激な増加はみられない。これは南側に比べ横断者が少ないことが影響したと考えられる。

図-21の左折東進の通過台数分布より、図-19と同様の傾向を示しているが、夕方の時間帯において、全赤時間中の通過台数が左折南進のケースより多い。また、20秒前後のφ1中間に信号無視車両の存在が見受けられる。

以上の横断者、左折車の通過分布特性より、歩車分離制御下では、全赤から歩行者青開始数秒間が交錯機会を生じやすく、歩行者青時間中においても信号無視をする左折車両によって交錯の危険性があることがわかった。

(3) 通過台数・通過人数割合に基づいた交錯リスク推計

前節までの横断者、左折車の通過人数分布、通過台数分布を用いて、ここでは交錯リスク R_{LP} を推計する。前述のように、本研究では、ある時刻において横断者と左折車がCZを同時通過する場合を交錯事象とする。時々刻々生じる交錯事象を1秒毎に捉え、信号1サイクルで和を取り、さらに時間あたりのサイクル数を乗ずることで1時間あたりの交錯可能性、「交錯リスク」として以下のように定義する。

$$R_{LP} = N_{hour} \sum_{t=1}^C \left(\frac{x_{LT}(t)}{N_{obs}} \times \frac{x_{ped}(t)}{N_{obs}} \right) \quad (4)$$

ここに、 C ：サイクル長(s)、 $x_{LT}(t)$ ：時刻 t における左折車通過台数、 $x_{LT}(t)/N_{obs}(t)$ ：時刻 t における左折車通過台数割合、 $x_{ped}(t)$ ：時刻 t における横断者通過人数、 $x_{ped}/N_{obs}(t)$ ：時刻 t における横断者通過人数割合、 N_{hour} ：1時間当たりのサイクル数、 N_{obs} ：通過台数（人数）割合の算出に使用する観測サイクル数（今回は11サイクル）

なお、 $R_{LP}=1$ とは、1時間に1回、CZ同時進入の交錯

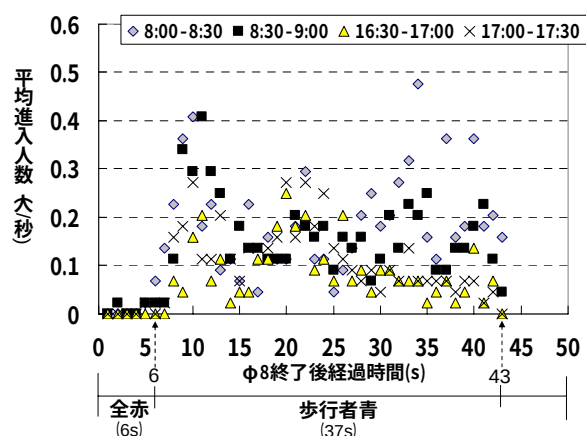


図-20 横断者の通過人数分布（東側・事後）

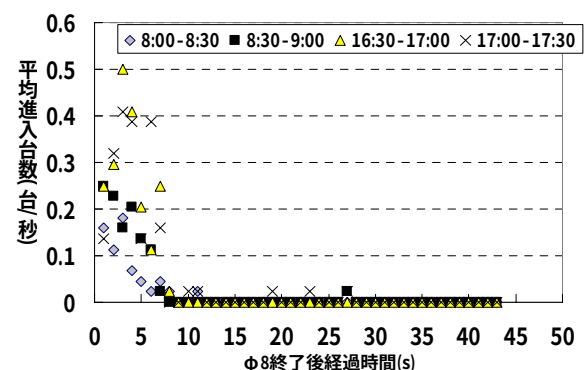


図-21 左折車の通過台数分布（東進・事後）

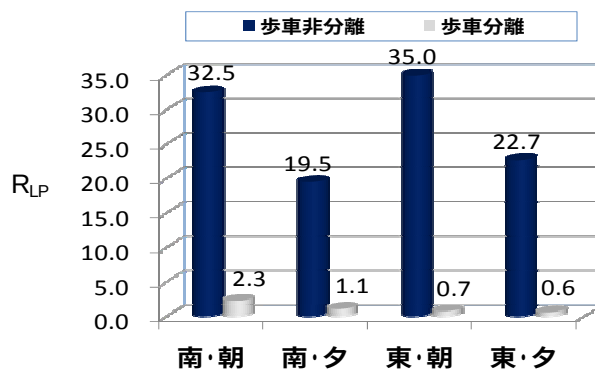


図-22 歩車交錯リスクの比較

事象が発生することを意味する。ここでは、南側横断歩道でのCZ、東側横断歩道でのCZにおける朝・夕時間帯別に、歩車分離制御・歩車非分離制御別に R_{LP} を算出することで、歩車分離制御導入による影響を評価する。なお、次章において、円滑性を含めた調査交差点の評価を行うため、ここでは、交通量データが取得できていない導入後1週間、1ヶ月後、4ヶ月後の3時点と導入前との比較は行わない。算出結果を図-22に示す。

歩車非分離制御と歩車分離制御の R_{LP} 値の比較より、制御の変更によって交錯リスクが93-98%減少しており、歩車分離制御導入により安全性の向上が定量的に示された。特に、横断者の多い朝の時間帯において、減少幅が大きいことがわかる。これは、通行権分離により、CZを同時に通過する時間帯が短くなったことが大きく影響したと

いえる。また、制御導入後では、南側CZ・朝の値が最も大きい。この値を下げるためには、挙動実態に即して青時間の適正化を図ることや待ち時間を短くするなど現示設定の変更を行うことで駆け込み、フライングの危険行動を抑制することが一方策といえる。なお、信号制御の見直しによる交錯リスクの変化、また、横断者、左折交通量など利用状況の異なる状況下での評価等、詳細な分析については今後の課題とする。

6. 歩車分離制御導入による円滑性の変化

本章では、歩車分離制御導入による自動車交通の円滑性および横断者の待機損失時間の変化について分析する。

(1) 自動車交通に関する円滑性評価

歩車分離導入前後における交差点の総遅れに着目し、交差点の円滑性変化を評価する。なお、今回の観測調査では車両の遅れ時間を実測していないため、本稿では交差点の総遅れを求めるにあたり、Websterの平均遅れを用いる⁹⁾。任意の流入路における車両1台当りの平均遅れは、以下の式で与えられる。

$$\bar{d} = \frac{(1-g)^2}{2(1-\lambda)}C + \frac{X^2}{2q(1-X)} - 0.65 \left(\frac{C}{q^2} \right)^{1/3} X^{(2+5G)} \quad (5)$$

ここに、 $\bar{d}$: 任意の流入路の車両1台当りの平均遅れ、 C : サイクル長(s)、 G : 青時間(s)、 g : 当該流入路のスプリット(=G/C)、 q : 当該流入路の需要交通流量、 s : 当該流入路の飽和交通流量、 λ : 需要率(=q/s)、 X : degree of saturation(=q/(gs))

式(5)に各現示の交通需要流量 q_i を乗じ、全現示について和を求めると以下の交差点全体の1時間当たりの総遅れ D となる²⁾。

$$D = \sum_{i=1}^n (q_i \cdot \bar{d}) \quad (6)$$

ここに、 q_i : 当該流入路現示需要交通流量、 n : 流入路数
 需要率算定にあたり、歩車非分離制御は事前8:00-9:00(朝)、16:30-17:30(夕)、歩車分離制御は事後1年時点の8:00-9:00(朝)、16:30-17:30(夕)の調査結果を用いる。
 また、飽和交通流量 s は、今回、全流入部の実測値を取得していないため、基本交通流量に補正率を乗ずる方法²⁾で算定した。なお、道路構造要因による補正として幅員、勾配があるが本交差点では補正は不要であった。また、式(5)、(6)に適用する各種交通データは表2、表3上段、信号現示データは図2、図3の値を使用する。なお、表2に示すように、歩車非分離(夕)の西側左折交通量は映像不備により進行方向割合が計測できていないため、歩車非分離(朝)の進行方向割合を利用して、遅れを算出している。これらにより、平均遅れ、総遅れを算出し

表3 交通特性と制御別の遅れ

	歩車 非分離(朝)	歩車 非分離(夕)	歩車 分離(朝)	歩車 分離(夕)
自動車1時間 交通量(台)	4706	4640	3992	4066
1時間横断者数 (人)	463	233	487	233
対象1時間の交 差点総遅れ(s)	200,216	203,503	218,717	221,773
1台当たり 平均遅れ(s/台)	42.5	43.9	54.8	54.5
交差点の需要率	0.61	0.63	0.62	0.56

【補足】横断者数は、南側横断歩道、東側横断歩道の2方向合計値。

表4 横断者の待機時間特性

時点		平均待機 時間(s)	待機時間 標準偏差 (s)	t値(事前と の比較)	待機横断 者 (人/時)	総横断者 (人/時)
南側・朝	事前	32.9	22.1	—	114	281
	事後1週間	41.2	27.6	2.69	143	275
	事後1ヶ月	45.0	28.6	3.91	152	350
	事後4ヶ月	36.6	22.7	1.42	140	331
	事後1年	43.8	26.3	3.72	159	294
	事後4時点	41.9	26.6	3.85	594	1250
南側・夕	事前	35.0	26.9	—	54	118
	事後1週間	46.7	30.3	2.30	73	143
	事後1ヶ月	49.2	30.3	3.12	124	219
	事後4ヶ月	51.2	32.6	3.20	86	161
	事後1年	44.5	30.3	1.97	93	159
	事後4時点	48.0	30.8	3.27	376	682

た結果を表3に示す。

これより、事後、交通量がそれぞれ15.2%、12.4%減少しているにもかかわらず、車両1台あたりの平均遅れ $\bar{d}$ は、事前(朝)が42.5(s)であるのに対し、事後(朝)は54.8(s)と30%程度増加し、夕方についても同程度増加していることがわかった。これらの値を用いて算出した交差点の総遅れについては、歩車分離の方が総遅れ時間が大きく、朝・夕方の交通状況では、歩車分離制御の方が18,000秒程度、すなわち約5時間分損失時間が大きいことが示された。

よって、現在の交通状況、信号制御の設定では、歩車分離制御を導入することで自動車交通の損失時間が小さくなることがわかった。

(2) 横断者交通に関する待機損失時間の変化

次に、歩車分離制御導入による横断者の赤信号待ちによる待機損失時間(以下、待機時間)の変化について検討する。待機時間の計測にあたり、横断者の隅角部への到着タイミングを正確に把握する必要がある。そのため、今回は、この到着タイミングが正確に記録できていた南側横断歩道の横断者のみに着目する。朝・夕別、調査時点別の平均待機時間とそのばらつきを表す標準偏差、待機横断者数、総横断者数をまとめた結果を表4に示す。なお、待機横断者とは、赤信号待ちをした横断者のことであり、事後4時点とは導入後1年までの4時点のデータをまとめたものである。また、事前の平均値との差の検定結果として、統計量(t値)を併せて示す。

これより、朝・夕ともに事前に比べ、事後のどの時点

においても平均待機時間が長くなっていることがわかり、また、事前と事後4時点の比較より、朝は9秒、夕方は13秒、平均待機時間が長くなっている。この結果には、歩車分離制御により青時間が短縮され、通過機会が減少し、赤信号待ちをする横断者が増加したことが影響していると考えられる。このことは、表中の待機横断者数と総横断者数の比率の比較を行うことで確認できる。

よって、左折車同様、歩車分離制御導入により、横断者の待機時間も増加したことがわかった。

7. 経済評価による歩車分離制御の特性分析

本章では、前章までに計量した円滑性・安全性の損失をそれぞれ貨幣換算し、その合計値を算出することで、制御方式別の経済評価を行い、調査交差点における歩車分離制御導入効果について検討する。

(1) 円滑性の損失価値

円滑性の評価指標としては、前章にて示した総遅れを用いることとし、総遅れを基に、以下の式より、損失時間価値(Value of loss time, V_{lt})を算定する。

$$V_{lt} = \sum_{i=1}^n (\alpha \cdot D) \quad (7)$$

ここで、 α ：乗用車種の時間価値原単位（円/分・台）

本交差点は名古屋駅に近い幹線道路にあり、バスなどによる大型車混入も観測されたため、時間価値原単位については、費用便益分析マニュアル¹⁰⁾より乗用車種の72.45（円/分・台）とした。なお、横断者の損失時間についても評価の必要性はあるが、表3、表4より、自動車に比べ、交通量も非常に少なく、影響が小さいこと、また、横断者属性が不明な点から、時間価値原単位の設定が困難なことから本稿では考慮せず、今後の課題とする。

(2) 安全性の損失価値

5章で提案した交錯リスクの評価指標 R_{LP} では、 $R_{LP}=1$ は、1時間に1件CZ同時進入が発生することを意味する。本稿では、この R_{LP} と交通事故とを関連づけ、事故1件あたりの損失額を乗ずることで各制御における安全性の損失価値を定量化することを試みる。

そのため、まず、年間の事故発生件数 N_{acc} を、8760時間で除して事故発生件数の1時間換算値 n_{acc} とする。この換算値を1時間交錯リスクで除すことで、交錯リスク R_{LP} 一単位あたりの事故発生件数が推計できる交錯リスク・事故換算率 r_{acc} が求められる。今回、当交差点における左折に関する事故件数（件/年）は、愛知県警中村署へのヒアリングより把握しており、歩車非分離について、H18年度の実績値は3件であった。また、1時間交錯リスクとして、図-22に示した東側横断歩道CZ、南側横断歩道

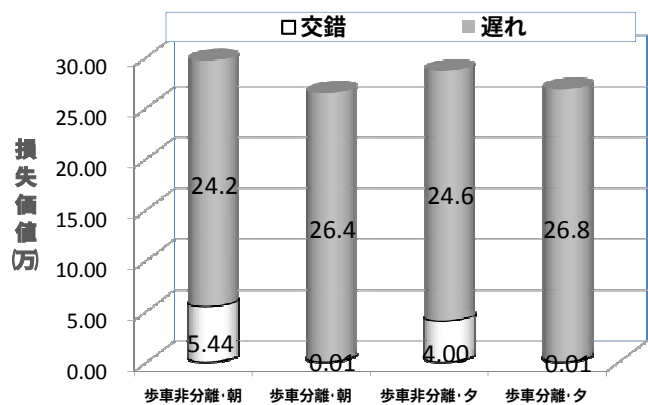


図-23 朝・夕時間帯の制御別損失価値

CZにおける4時間分の交錯リスクの平均値（＝27.4）を用いることとする。一方、歩車分離については導入後時間が経っておらず、H19年10月～H20年5月では事故実績もなかったため、今回は、歩車非分離で求めた交錯リスク・事故換算率 r_{acc} に、歩車分離制御での R_{LP} と歩車非分離制御での R_{LP} の比率（4時間分のデータを用いて、歩車分離 R_{LP} の平均値（＝1.18）を歩車非分離 R_{LP} の平均値（＝27.4）で除す）を乗じた値を歩車分離制御下の交錯リスク・事故換算率 r_{acc}' として扱う。

$$n_{acc} = \frac{N_{acc}}{8760} \quad (8)$$

$$r_{acc} = \frac{n_{acc}}{R_{LP}} \quad (9)$$

ここに、 N_{acc} ：事故件数（件/年）、 n_{acc} ：事故件数（件/時）、 r_{acc} ：事故換算率（事故件数/CZ同時進入件数）、 R_{LP} ：1時間あたり交錯リスク

ここで、交錯リスク・事故換算率 r_{acc} 、 r_{acc}' を求めた結果、 $r_{acc}=1.25 \times 10^{-5}$ 、 $r_{acc}'=5.38 \times 10^{-7}$ となる。この値については、前者は R_{LP} が80,000で1件程度の事故、後者は R_{LP} が約186万で1件の事故発生を意味する。

次に、事故1件あたりの損失額について、本研究では以下のように考慮する。すなわち、発生する事故の程度によって事故損失額は異なると考えられ、様々な事故形態もあり得るが、ここでは、事故を重大事故、軽傷事故の2つの区分で考えることとする。その上で、両者の発生件数の比をハインリッヒの法則を用いて推定する。本法則では、1件の重大な事故の裏には、29件の軽傷事故と300件のヒヤリハットが存在することが知られている¹¹⁾。そこで、交錯リスクより換算された事故1件を軽度の事故とみなし、その1/29の確率で重大な事故が発生していると仮定することで、次式より損失生命価値(Value of loss life, V_{ll})を算定する。

$$V_{ll} = \sum_{i=1}^n \left(r_{acc} \cdot R_{LP} \left(\frac{1}{29} \alpha_{cr} + \alpha_{li} \right) \right) \quad (10)$$

ここに、 α_{cr} ：重大事故の人身損失価値原単位（円/件）、 α_{li} ：軽度な事故の人身損失価値原単位（円/件）

内閣府によると、交通事故による1名当りの人身損失額は死亡事故で33,515,000(円)、後遺障害が認められる場合11,517,000(円)、傷害が認められる場合で652,000(円)とされている。なお、人身損失額とは、被害者の過失相殺相当額を控除する前の治療関係費、慰謝料、休業損害、逸失利益等を合計した総額をいい、被害者本人又はその遺族が受け取った保険金の支払額とは必ずしも一致しない¹²⁾。本研究では、死亡事故と後遺障害が認められる場合を重大事故とみなし、死亡者12,858人に1名あたりの人身損失額33,515,000円を乗じた金額に後遺障害被害者48,751人に1名あたりの人身損失額11,517,000円を乗じた人身損失総額を、被害者数(死亡者12,858人、後遺障害48,751人の和)で除した加重平均値を、重大事故の人身損失価値原単位 $\alpha_{cr}=16,108,055$ (円/件)とし、また、軽度な事故の人身価値原単位は、傷害が認められる場合の人身損失額を利用して $\alpha_l=652,000$ (円/件)とした。

(3) 実測値を用いた損失価値の評価

本節では、(1)、(2)で定義した手法を用いて損失価値の現況再現を行う。各制御による総損失価値は以下の式で定義される。

$$V_{total} = V_{lj} + V_{lj} \quad (11)$$

ここに、 j : 制御方式(歩車非分離、歩車分離)

朝・夕の2時間分のデータより、制御方式別に、1時間当たりの損失価値を求めた結果を図-23に示す。なお、今回の調査では、南側、東側の2横断歩道のみ計測しており、全4横断歩道の観測結果がないため、本節で示す安全性の損失価値は、2横断歩道での実測値を2倍することで交差点全体の損失として推計する点を補足する。

これより、本交差点の朝・夕の両時間帯の交通状況で、歩車非分離よりも歩車分離の方が経済的な損失は少なく、調査交差点では歩車分離制御の導入効果が得られていることがわかる。安全性に着目すると、制御変更によって経済的損失が激減しており、安全性向上の効果が大きいことがわかる。一方、円滑性に着目すると、歩車分離制御導入により損失額が増加しており、円滑性の面では歩車非分離制御に劣る場合もあることがわかった。また、夕方の結果では、歩車分離、歩車非分離の損失額の差が朝の結果に比べて小さい。これは横断者が少ない状況であり、非車分離においても交錯による損失が小さくなったことが影響したと推察される。このことは横断者の需要の少ない交差点で歩車分離制御を導入すると交錯による損失以上に、遅れ損失が大きくなり、結果として歩車非分離制御の方が優位になる可能性があることを示唆している。今後、この点を検証すべく、具体的に横断者数、左折交通量の変更を可能とする交錯リスク推計モデルの構築を進める。また、今回、経験的法則を適用し、事故

損失額を推定したが、今後、より詳細な検討を加える。

8. おわりに

本研究では、右左折車両分離方式の歩車分離制御が導入された大規模交差点において、まず観測調査データに基づいて横断者、右左折車の挙動変化を経時的に分析した。次に、横断者と左折車のCZの同時通過に着目した交錯可能性評価手法を提案し、調査交差点での安全性評価を行った。さらに、円滑性、安全性を考慮した貨幣換算による経済評価により、歩車分離制御の適用効果を検討した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- ・ 歩車分離制御導入前後の経時的な分析より、右左折車、横断者すべてにおいて、導入後の駆け込みが増加傾向にあることがわかった。
- ・ 信号切り替わり時の交錯可能性は歩車分離制御の方が高く、また、横断者対右折車両の交錯より対左折車両の方が、交錯可能性が高いことがわかった。
- ・ 通過台数・通過人数割合に基づいた交錯リスク値を計量することで、歩車分離制御導入によって交錯リスクが朝夕共に90%以上減少し、安全性の向上が示された。
- ・ 安全性、円滑性を考慮した経済評価より、調査交差点では朝・夕時間帯の交通状況において、歩車分離制御の方が、損失価値が小さいことがわかった。

本研究では、左折車×横断者の交錯のみを考慮したが、車×車の追突、横断者×右折の交錯事象についても今後検討し、歩車分離制御の適用性について詳細に分析する。また、本稿では観測断面における歩車分離制御導入前後の利用者挙動に基づく経時的分析を行い、交錯リスク算定を行ったが、信号制御パターンと停止線付近での車両挙動の時系列的な変化を捉えるなど、歩車分離制御が与える影響を他の観点からも検討する。また、経済評価に関して、データの蓄積が不十分であり、今回歩車非分離制御の事故実績と交錯リスクとの関係より、歩車分離制御の事故数を推定したが、今後当該交差点における事故実績の追跡を行い、さらに同規模の歩車分離交差点での事故実績などからも事故換算率の検証を行う。

参考文献

- 1) 警察庁: 歩車分離信号に関する指針の制定について(通達)、警察庁丁規発第86号、平成14年9月12日
- 2) 交通工学研究会: 改訂交通信号の手引き、丸善、150p、2006
- 3) 警察庁HP 歩車分離式信号に関するQ&A、<http://www.npa.go.jp/koutsuu/kisei/h17hosya.pdf>
- 4) 齋藤豊、安井一彦: 歩車分離式信号導入による効果と課題に関する研究、第23回交通工学研究発表会論文報告集、pp.61-64、2003
- 5) 鈴木理、浜岡秀勝: 車両挙動から見る歩車分離式信号交差点の安全性に関する研究、土木計画学研究・論文集vol.24, No.4,

- pp.781-789, 2007.
- 6) 小川圭一, 川居卓也: 交通処理能力からみた歩車分離式信号の導入効果に関する研究, 第28回交通工学研究発表会論文報告集, pp.109-112, 2008.
 - 7) 佐々木克志, 浅野光行: 歩車分離式信号の評価に関する研究～千葉県船橋市習志野台交番前交差点を事例として～, 第22回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 41-44, 2002.
 - 8) 吉田長裕, 日野泰雄, 澤田康夫, 上野精順: 歩車分離信号の導入評価と効果的運用方法に関する基礎研究, 第23回交通工学研究発表会論文報告集, pp.65-68, 2003.
 - 9) F.V.Webster: Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paper, No.39, Her Majesty's Stationary Office, London, 1958.
 - 10) 国土交通省道路局都市・地域整備局: 費用便益分析マニュアル, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/ir-hyouka.html>
 - 11) H.W.ハインリッヒ, D.ピーターセン, N.ルース: ハインリッヒ産業災害防止論, 海文堂, 306p, 1982.
 - 12) 内閣府: 「交通事故による経済的損失に関する調査研究」報告書概要, <http://www8.cao.go.jp/koutu/chou-ken/sonshitsu.pdf>
-

歩車分離制御交差点における利用者挙動の経時的解析*

鈴木弘司**・藤田素弘***・山越陽介****

本研究では、大規模交差点における歩車分離制御導入による影響について、事前1時点、事後4時点の観測調査データに基づいて横断者、右左折車の挙動の変化を経時的に分析した。次に、交錯を起こす左折車、横断者の通過台数・人数分布に着目して、歩車交錯リスクの推計手法を提案し、実データに基づいた現況評価を行うことで、歩車分離制御導入による安全性の向上効果を定量的に示した。さらに、制御方式別に、円滑性、安全性への損失について貨幣換算し、経済評価を行うことで、調査交差点の朝夕時間帯の交通状況では、歩車分離制御により円滑性低下による損失を被るものの、それ以上に安全性向上により得られる効果が大きいことがわかった。

Time Lapse Analysis of Users' Behaviors at Large-scale Intersections with Separated Traffic Signal Control *

By Koji SUZUKI **, Motohiro FUJITA ***, Yosuke YAMAGOSHI****

This study revealed the characteristics of users' behaviors at large-scale signalized intersections with separated traffic signal control through time lapse analysis. And we proposed a conflict risk estimate method between left-turn vehicles and pedestrians at signalized intersections and analyzed the performance of both types of traffic signal control at the surveyed intersection from the viewpoints of safety. After that, we confirmed the economic effects, which are based on the both aspects of safety and smoothness, by the introduction of separated traffic signal control for pedestrians.
