

信号交差点における左折車と自転車走行軌跡に着目した錯綜分析

都市基盤計画分野

石見拓也

Abstract

近年、歩行者対自転車事故が増加しており、車道上に自転車レーンを試験的に整備する動きが出ているが、交差点部における処理方法については十分に検討されていない状況にある。一方、海外では、自転車走行空間及び交差点制御方法については安全性や快適性に配慮した様々な事例が見られる。そこで本研究では、日本で試験的に自転車レーンが整備された尼崎と海外で処理方法に工夫が見られるコペンハーゲンの交差点を対象とし、左折車対自転車錯綜について分析を行った。その結果、尼崎では自転車を追い越す挙動が、コペンハーゲンでは自転車を優先させる挙動が多く見られ交差点構造による挙動の違いを明らかにし、優先関係に与える影響を車両の前後関係から定義した錯綜形態及びコンフリクト指標を用いて明らかにした。

1. はじめに

1960年代の急激なモータリゼーションの進展に伴い、日本ではこれまで増大する自動車交通に対応するための道路整備が行われ、自転車に関しては自動車と走行空間を分離した空間整備がされてきた。特に、広く整備されてきた自転車走行空間の多くは自転車歩行者道であり、道路交通法での原則車道走行と矛盾した自転車と歩行者が混在する走行空間となっている。これが近年の歩行者対自転車事故の要因の一つと考えられ、自転車が歩道を通行することは交差点における自転車対自動車事故の重要な原因であることが指摘されている¹⁾。これを踏まえ、2008年には道路交通法の改正とともに、車道上に自転車専用通行帯(自転車レーン)を試験的に整備する動きが出ているが、交差点部における処理方法については、十分に検討されていない状況にある。

一方、海外では、自転車は自動車と同様に車道を走行することが一般的であり、その走行空間および交差点制御方法については安全性や快適性に配慮した様々な事例が見られることから、今後の国内においても参考になるものと考えられる。

そこで本研究では、国内及び国外で自転車レーンが実用されている交差点を対象として、交差点処理及び安全上の課題となる左折車対自転車の錯綜分析を行う。左折車及び自転車の走行軌跡から交差点構造による走行挙動、優先関係の違いを明らかにし、今後日本で整備される自転車レーンの交差点処理方法について知見を得ることを目的とする。

2. 研究対象・方法

2.1 対象交差点

本研究では、日本で試験的に自転車レーンが整備されている尼崎交差点と、交差点処理に工夫が見られるコペンハーゲン交差点を対象とした。

尼崎交差点は、路肩部分を自転車レーンとして整備されており、青色のカラー舗装を施している。停止線手前 27.2m 地点までは破線によって、自転車レーンと自動車通行帯を分離しており、その後停止線までは白線によって分離している。以下、尼崎における構造を「分離型自転車レーン」とする。一方コペンハーゲン交差点は、右端の通行帯が自転車レーンとなっており、カラー舗装は停止線まで施されていない。停止線手前 27.9m 地点までは、段差によって自転車レーンと自動車通行帯を分離しており、その後停止線手前 8.4m 地点までは破線部分となっている。この区間において、左折車(右側通行のため右折車であるが以後統一するために左折車とする)は自転車レーンへと進入し右端の通行帯を自転車と共有して走行することになる。また、停止線手前 8.4m 地点から停止線までは再び白線によって分離している。以下、コペンハーゲンにおける構造を「混在型自転車レーン」とする。

以上のように、両交差点では左折車の処理方法が異なっており、左折車及び自転車の走行挙動を分析することで、交差点処理方法に対する知見を得る。

2.2 分析対象

本研究では、左折車対自転車錯綜に着目して走行軌

跡より錯綜分析を行う。錯綜時の左折車及び自転車については、撮影条件より分析に不適ものを除いて全てを対象とする。また、比較のために左折車及び自転車が単独で自由に走行している場合についても分析対象とする。計測数は、左折車対自転車錯綜と同程度である50件を目安とし、一定時間毎に視認性の良い車両をランダムに抽出した。表-2.1に本研究で分析対象となった車両数を示す。

2.3 研究方法

まず、分離型自転車レーンを有する尼崎交差点と混

表-2.1 分析対象

撮影場所	左折車対自転車錯綜			左折車 単独	自転車 単独	計
	自転車レーン 走行	歩道 走行	小計			
尼崎	29	2	31	58	38	127
コペン ハーゲン	27	-	27	53	45	125
計	56	2	58	111	83	252

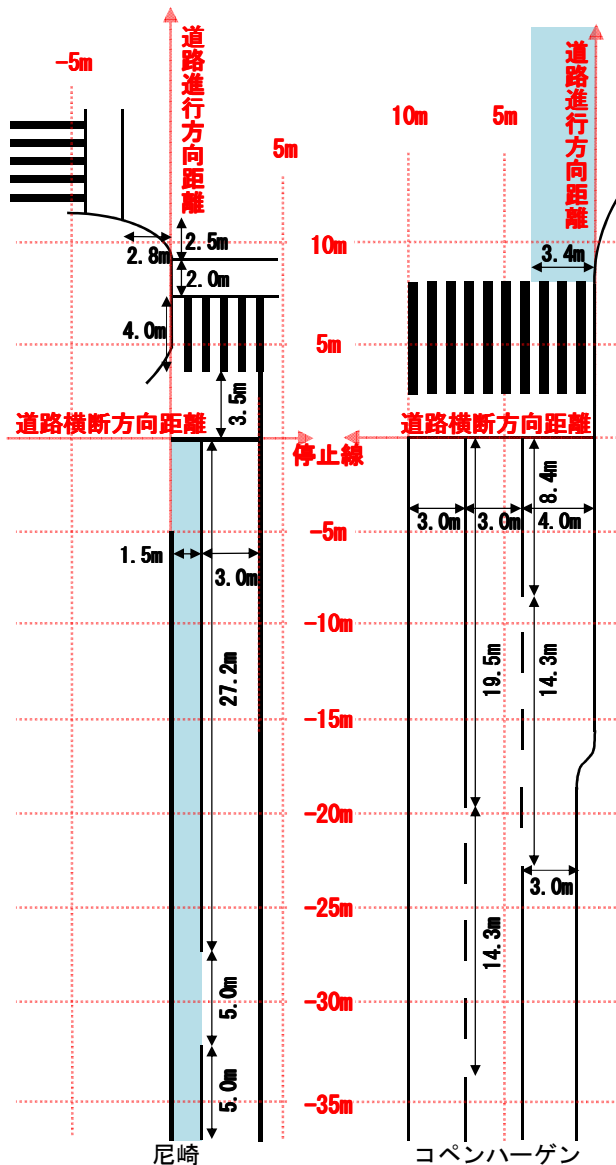


図-2.1 対象交差点平面図

在型自転車レーンを有するコペンハーゲンにおいて、撮影した映像より左折車及び自転車の走行軌跡を抽出する。走行速度と走行位置を錯綜有無別に比較することで、交差点構造による走行挙動の違いを明らかにする。また、コンフリクト指標を用いて交差点構造及び錯綜形態による比較を行うことで、交差点構造が左折車と自転車の優先関係に与える影響を明らかにする。

3. 走行データ分析

3.1 走行速度・位置の算出方法

ビデオ映像から左折車及び自転車の座標を取得するために、画像解析ソフト(Direct社「Dipp-Motion 2D」)を用いた。撮影画角のため、尼崎では交差点内側の後方車輪を、コペンハーゲンでは交差点内側の前方車輪を基準とした座標データを1/10秒毎に取得した。尼崎で取得した座標データについては、前後輪差が自転車で1.0m、自動車で2.7mと仮定して前方車輪の座標データに変換した。また、車両や歩行者の陰に隠れて車輪が確認できない場合、画像解析ソフト上の3点補間によって座標を計算し用いた。

3.2 錯綜の有無による比較

左折車及び自転車走行速度・走行位置について錯綜有無別に比較を行う。停止線から5m毎の地点で、錯綜の有無によって統計的に有意な差があるか検定を行う。走行速度・走行位置は正規分布に従うと仮定し、単独走行時と錯綜時で取得サンプル数が異なるため、等分散性は仮定せずに平均値の差の検定を行った。各地点での観測数が異なっている場合があるが、これは軌跡データを取得出来なかったためである。

(1) 尼崎

尼崎での錯綜有無別左折車・自転車走行速度と走行位置推移について表-3.1、図-3.1に示す。

まず左折車の走行データより以下のことが明らかになった。

- ① 停止線手前5m地点を除いた停止線手前25mから停止線奥5m地点までにおいて、5%有意で差があると判定され、特に停止線手前25mから15mの地点において1%有意で走行速度に差があると判定された。
- ② 錯綜有無別で走行位置に大きな違いはなく、有意差も見られなかった。

以上のことから、左折車は単独走行時に比して錯綜時では進入速度が低下しているため、停止線手前25mより上流部において減速行動を取っていると考えられる。また、尼崎交差点では対向1車線の車道の両端に

自転車レーンが整備されている。そのため、自転車が近くに存在した場合、中央線を越えて自転車と間隔を取ることは難しい。よって、やむを得ず狭い間隔で走行した結果、走行位置で大きな違いが見られなかったと考えられる。

次いで自転車の走行データより以下のことが明らかになった。

- ① 単独走行時に比して錯綜時に走行速度が 0.5m/s 程度低下しているが、5%有意で差があると判定されたのは停止線手前 15m と 10m 地点のみであった。
- ② 錯綜の有無にかかわらず、道路端から 0.6m 付近を走行しており、自転車レーン幅員が 1.5m であることから、少し道路端寄りに走行している。
- ③ 停止線手前 5m 地点から停止線奥 5m 地点までの区間では、錯綜の有無によって 5%有意で走行位置に差があると判定された。

以上のことから、自転車は停止線手前 15m~10m 地点でのみ 5%有意で差が見られ、錯綜時には停止線手前 20m 地点で減速を行っていると考えられる。また、停止線手前 5m 地点で自転車レーンと歩道との分離が柵によるものから段差へと変わっており、この地点において、左折車が近づいたことを自転車運転者が気付き、歩道側へ回避行動を行った結果によるものと考えられる。

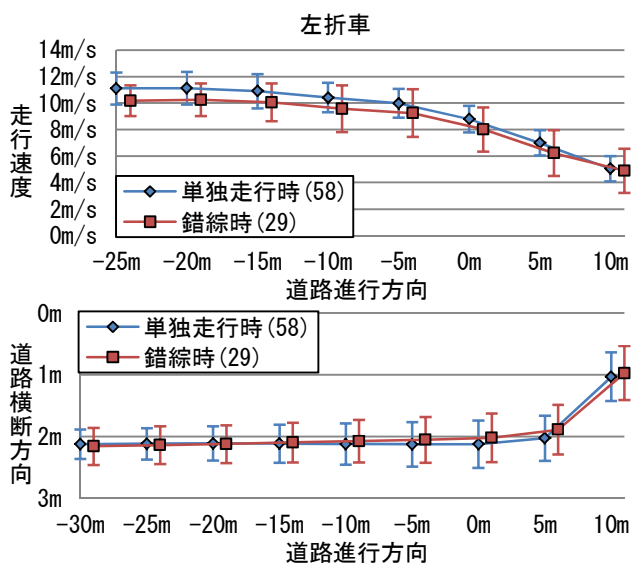
(2) コペンハーゲン

コペンハーゲンでの錯綜有無別左折車・自転車走行

表-3.1 平均値の差の検定結果：t 値(尼崎)

道路進行方向距離		-30m	-25m	-20m	-15m	-10m	-5m	0m	5m	10m
左折車	走行速度		3.52**	3.13**	2.73**	2.35*	2.02	2.33*	2.23*	0.46
	走行位置	-0.55	-0.34	-0.16	0.25	0.61	0.87	1.15	1.56	0.63
自転車	走行速度		1.67	1.90	2.02*	2.05*	1.93	0.94	0.06	0.82
	走行位置	1.00	1.41	1.62	1.61	1.06	2.19*	2.18*	2.47*	0.39

$\alpha=0.05$ **:1%有意 * :5%有意



速度と走行位置推移について表-3.2、図-3.2に示す。

まず左折車の走行データより以下のことが明らかになった。

- ① 単独走行時に比して錯綜時に走行速度 2~3m/s 程度低下しており、停止線手前 25m から停止線奥 5m までの全地点で 1%有意で差があると判定された。
- ② 単独走行時に比して錯綜時に交差点内側に走行位置を寄せる傾向が見られ、停止線手前 5m 地点で最も差が大きくなっている。また、停止線手前 20m 地点では 5%有意で、停止線手前 15m から停止線奥 5m までの地点では 1%有意で差があると判定された。

以上のことから、左折車は錯綜時に停止線手前 25m 地点ですでに減速が始めていると考えられ、これより上流部で減速行動を取り始めていると考えられる。また、自転車を内側に進入させないため錯綜時により早く自転車レーンに進入し、道路端に車体を寄せていると考えられる。

次いで自転車の走行データより以下のことが明らかになった。

- ① 単独走行時に比して錯綜時に走行速度が 1m/s 程度低下しており、停止線手前 25m から停止線奥 5m までの全地点において 1%有意で差があると判定された。
- ② 錯綜有無別で走行位置に大きな違いはなく、有意差は見られなかった。

以上のことから、尼崎と違い、自転車は走行速度で

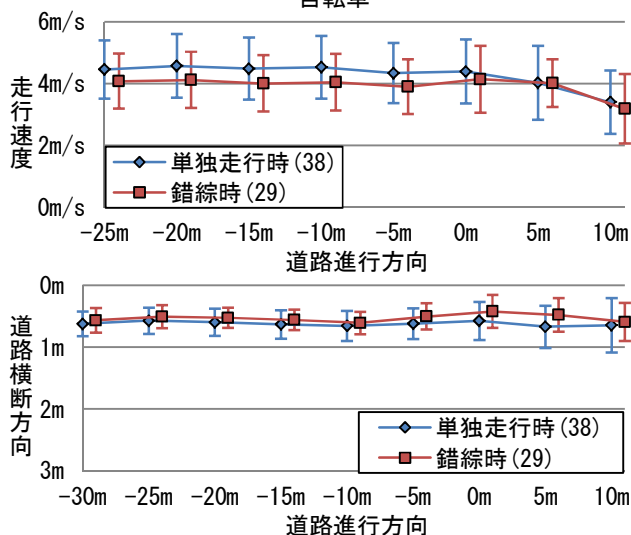


図-3.1 左折車及び自転車走行速度・走行位置推移(尼崎)

表-3.2 平均値の差の検定結果：t 値(コペンハーゲン)

道路進行方向距離		-30m	-25m	-20m	-15m	-10m	-5m	0m	5m
左折車	走行速度		6.54**	7.49**	7.14**	7.08**	6.23**	5.21**	3.62**
	走行位置	1.44	1.83	2.25*	3.21**	3.71**	3.71**	3.58**	2.90**
自転車	走行速度		3.51**	3.62**	3.65**	3.37**	3.21**	2.98**	2.83**
	走行位置		-1.20	-0.85	-0.10	0.18	0.42	0.37	0.45

$\alpha=0.05$ **:1%有意 *:5%有意

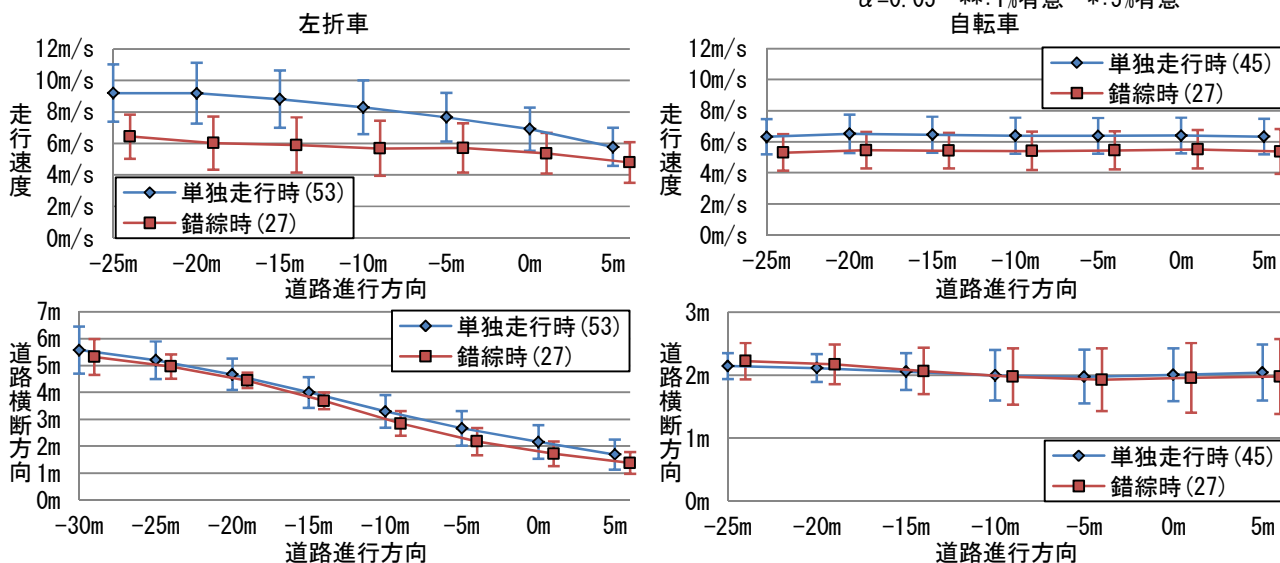


図-3.2 左折車及び自転車走行速度・走行位置推移(コペンハーゲン)

単独走行時に比して錯綜時に観測区間ではすでに自転車走行速度に差があるため、停止線手前 25m より上流部において左折車の影響を受け減速している、または自転車の走行速度が低いため左折車との錯綜が起りやすい可能性があると考えられる。また、錯綜有無別で走行位置に有意差が見られなかったことから、錯綜の有無が自転車の走行位置に与える影響は無く、自転車通行の優先が強いと考えられる。

4. 錯綜形態による分析

4.1 錯綜形態

左折車 1 台と自転車 1 台が錯綜する形態には、前後関係及び追い越しの有無によって 4 つのパターンが考えられ、タイムスペース図に表すと図-4.1 のようになる。タイムスペース図は時間軸と距離軸を持ち、走行線の傾きが速度を表す図である。

①追従型は、自転車を前方とした状態で交差点へ進入し、左折車が自転車の後方に追従するため減速するものである。②追越型は、追従型と同じく自転車を前方とした状態で交差点へ進入し、自転車を追い越すため速度を上げ(落とさず)に自転車の前方へと出るものである。③優先型は、左折車を前方とした状態で交差点へ進入し、左折車が自転車を前方に追い越させるために減速し自転車の後方に追従するものである。④先行型は、左折車を前方とした状態で交差点へ進入し、追い越し行動がなくそのままの前後関係を維持するものである。

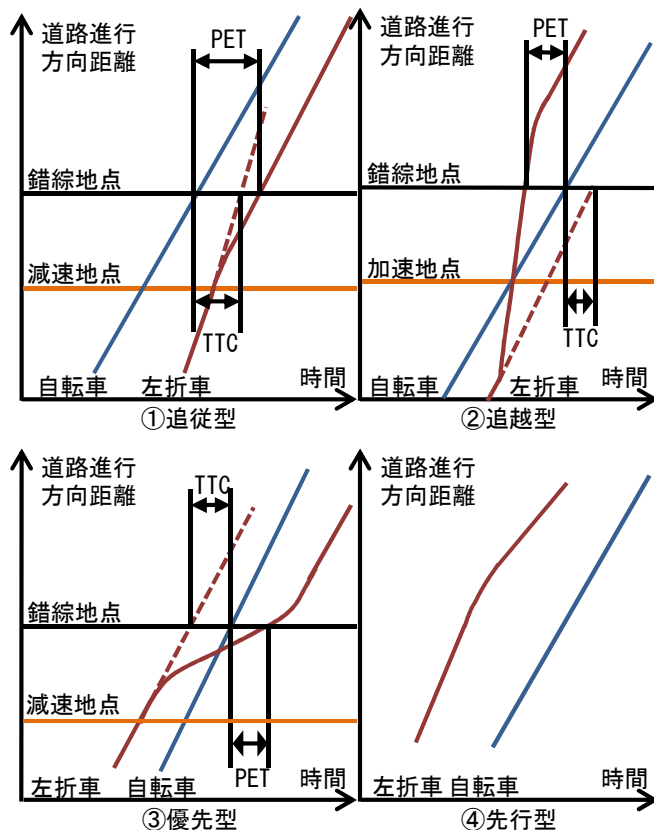


図-4.1 錯綜形態の分類

表-4.1 錯綜形態別件数

交差点	錯綜形態				計
	追従型	追越型	優先型	先行型	
尼崎	13	12	1	3	29
コペンハーゲン	16	0	4	7	27
計	29	12	5	10	56

4.2 錯綜形態別分類結果

各交差点で観測した左折車対自転車錯綜を、4つの錯綜形態で分類したものを表-4.1に示す。尼崎では、追従型が最も多く見られ、次いで追従型が多い結果となった。優先型は1件しか見られず、自転車を前方へ優先させるケースは少ない結果となった。コペンハーゲンでは、追従型が最も多く見られ、次いで先行型、優先型が多い結果となった。追従型は観測されず、自転車を追い越すケースは少ない結果となった。

以上から、分離型自転車レーンを有する尼崎では、自転車を前方に優先させず、自転車の前方へ出る傾向が、また混在型自転車レーンを有するコペンハーゲンでは自転車を前方に優先させ、自転車の後方に追従する傾向が強いと言える。

5. コンフリクト指標による分析

5.1 コンフリクト指標

本研究では危険度評価を行うために、コンフリクト指標であるPET及びTTCを用いる。

PET(Post Encroachment Time)²⁾は、錯綜を起こす2者が錯綜地点に到達する時刻の差で定義されるものである。一方TTC(Time to Collision)³⁾は、速度と進行方向を維持すると仮定した衝突までの時間で定義されるものである。本研究では、計算を簡略化するためにPET及びTTCをタイムスペース図上にて算出する(図-5.1)。

PETは、タイムスペース図に左折車及び自転車の走行線を描き、錯綜地点(左折車と自転車の走行軌跡交点)での到達時刻差で算出する。TTCは、自転車の走行線と減速を行わずに速度を維持した場合の左折車走行線を描き、錯綜地点での到達時刻差で算出する。

また、PETとTTCの差を「必要回避時間」、錯綜地点・左折車走行線・速度を維持した場合の左折車走行

線の3線で囲まれる面積を「減速面積」と定義する。

5.2 交差点構造による特徴

まず、追従型におけるPETとTTCの関係について図-5.2に示す。両交差点共に、TTC=-1付近を頂点として下に凸な2次曲線を描く傾向が得られた。TTC=0ではなく、TTC=-1を頂点としている理由として、前輪の座標データを元にTTCを算出しており、TTC=-1~0は衝突を表しているためと推測される。コペンハーゲンに比して尼崎では2次曲線が急になっている。つまり同一のTTCでもより大きなPETを示す傾向があり、結果として錯綜地点で時刻差の大きい通過を行っている。

次いで、必要回避時間と減速面積の関係について図-5.3に示す。TTCは減速しなかった場合の到達時刻差であり、PETは減速を行った結果の到達時刻差、つまり運転者が安全と感じる到達時刻差と解釈することが出来る。運転者は必要回避時間分の減速行動を取ることになり、より上流部で減速を開始するほど減速面積は大きくなる。よって、減速面積が大きければ優先関係も早期に決定されると考えられる。

尼崎とコペンハーゲン両交差点で必要回避時間と減速面積に比例関係が見られた。また、尼崎に比してコ

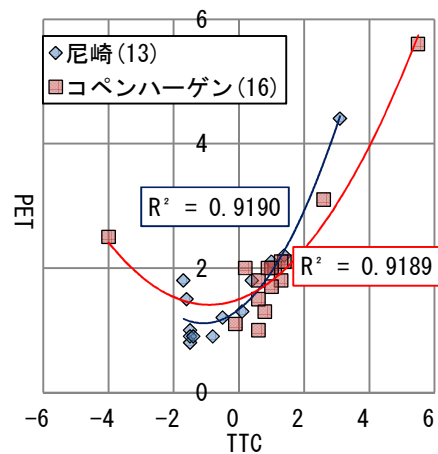


図-5.2 追従型におけるPETとTTCの関係

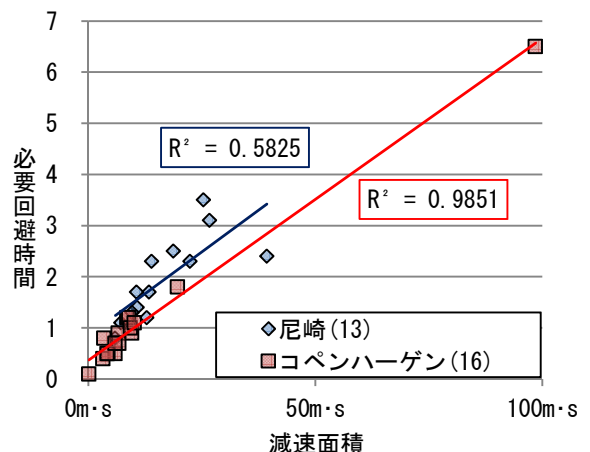


図-5.3 必要回避時間と減速面積の関係

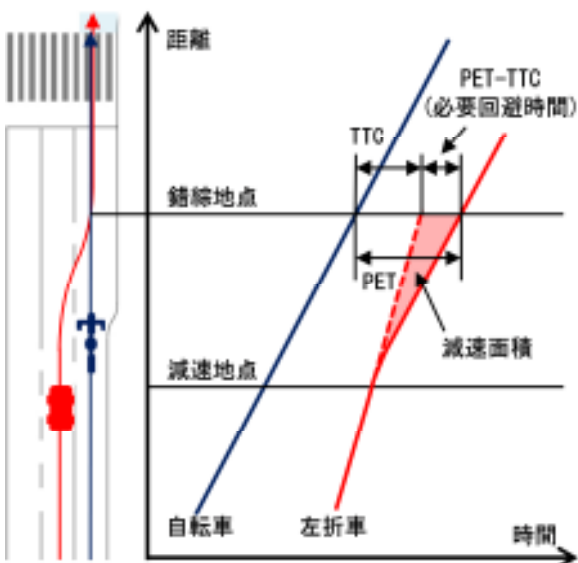


図-5.1 コンフリクト指標

ペンハーゲンでは、同一の必要回避時間でも減速面積が大きい傾向にあり、コペンハーゲンではより上流部で左折車と自転車の優先関係が決定される傾向にあり、危険な錯綜が起りにくいと推測できる。

5.3 錯綜形態による特徴

コンフリクト指標と優先関係の決定について分析を行うため、錯綜形態別に PET と TTC の関係を図-5.4 に示す。

自転車を前方とした状態で交差点に進入する追従型と追越型に着目すると、尼崎では $TTC=-2$ を境界として、大きな値では追従型が、小さな値では追越型が観測された。 $TTC=0$ は衝突を表すものであり、それ以上小さい値を取る場合、追従するためにはかなりの減速行動が必要になる。そのため、 $TTC=-2$ を境界として、左折車は自転車に追従するのではなく、自転車を追い越す行動を取るのではないかと考えられる。また、コペンハーゲンでは追越型が観測されなかったものの、 $TTC=-1$ を境界として、それ以上小さい値では追従型がほとんど観測されず、尼崎と同様の傾向が窺える。

これらより、交差点構造によってある TTC を境界に追い越しの有無が決定されると考えられる。また、尼崎では $TTC=-2$ 、コペンハーゲンでは $TTC=-1$ を境界としていることから、尼崎でより無理な追い越し行動が発生していると推測される。

また、尼崎では追従型と追越型が比較的多く観測されたため、追越地点について分析を行う。追従型と追越型では、左折車が自転車の前方スペースを基準に追

い越すか否かの判断を行っていると考えられる。そこで、追従型では減速しなかった場合に追い越す地点を、追越型では実際に追い越した地点を図-5.5 に比較した。停止線手前 6m 付近で追従型と追越型に分かれていることから、追い越す際に前方に約 20m のスペースがある場合を判断の基準にしていると考えられる。また、本研究では停止線手前 6m を境界として追従型と追越型に分かれたが、停止線手前 10m~0m の地点では追従型と追越型が混在して分布すると推測され、左折車が追い越しをするか否かの判断を迷う可能性があり、危険な錯綜になりやすいと考えられる。

6. まとめと今後の課題

本研究では、交差点構造が左折車及び自転車走行速度と走行位置に与える影響を明らかにし、また、自動車錯綜に用いられているコンフリクト指標を左折車対自転車錯綜に適用し、優先関係の特徴を明らかにした。

また、優先関係をより上流部で決定し、交差点近傍での追い越し行動を抑制するためには、以下のような構造が望ましいと考えられる。

- ① 停止線近傍では優先関係を明確な状態とするため、事前に左折車と自転車の優先関係を決定させる混在区間を設ける。
- ② 停止線手前 10m 地点で左折車が自転車を追い越す場合、左折車は追い越しを行うか判断を迷う傾向にある。そのため、この地点において左折車が追い越しを行えないような分離構造を設ける。

今後の課題としては、本研究では左折車 1 台に対して自転車 1 台の錯綜に着目して分析を行ったが、自転車複数台と錯綜するケースも観測された。自転車交通量が多くなった場合、左折車が群をなした自転車との錯綜処理が重要になると考えられ、知見を得る必要がある。また、交通量の増加に伴い安全性と交通処理能力の両立が困難となるため、交通量に着目した錯綜分析が必要であると考えられる。

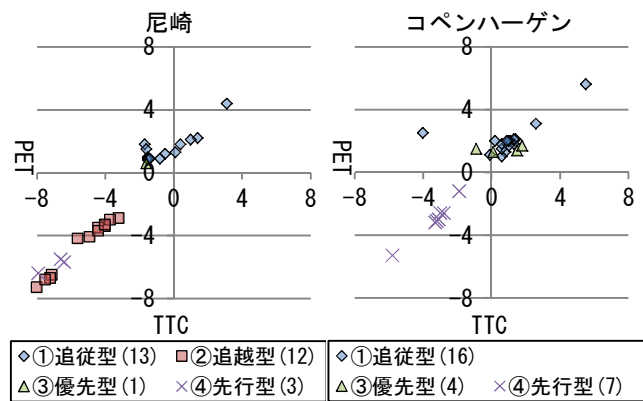


図-5.4 錯綜形態別から見た PET と TTC の関係

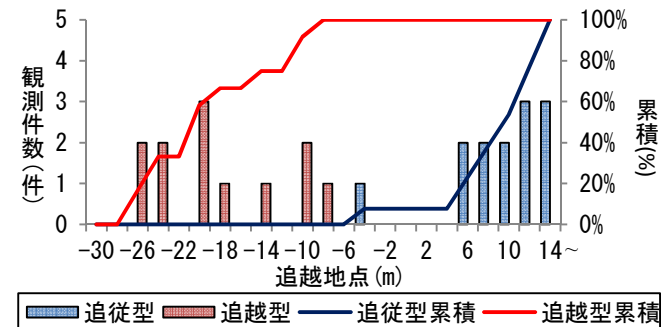


図-5.5 尼崎における錯綜形態別追越地点

参考文献

- 1) 警察庁、自転車対策検討懇談会 自転車の安全利用に関する提言(2010年1月27日確認)
<http://www.npa.go.jp/koutsuu/kikaku71/20061130-2.pdf>
- 2) Hayward, J.C : Near-miss determination through use of a scale of danger, Highway Research Record, 384, pp.24-34, 1972
- 3) Allen, B.L., Shin, B.T. and Cooper, D.J. : Analysis of traffic conflicts and collision, Transportation Research Record, 667, pp.67-74, 1978

討 論 等

◆討議[鈴木 広隆]

静止画から3次元の位置を決定しているのか。高さは一定としているのか。

◆回答：本研究では、現地で計測した8点を使ってキャリブレーションを行った結果より位置を決定している。キャリブレーションの精度は、観測区間端点において±0.15m以内となっている。また、計測する座標は、撮影映像上で車両の交差点内側前輪と道路接地部分の座標であり、高さは道路部分となっている。

◆討議[横山 俊祐]

自転車走行に関する歴史や地域性等の違いはどう考えるか。

◆回答：地域性、自転車車種及び走行速度の違いは考えられるが、本研究では、交差点構造による走行挙動の違いに着目しており、日本にコペンハーゲンと同様の構造を整備した場合も同様の走行挙動を示すとして分析を行っている。

◆討議[高田 大康]

自転車にも様々な種類があり、走行速度が異なる。その走行速度によって優先関係も影響するのではないか。

◆回答：自転車の走行速度が低ければ、左折車との相対速度も大きくなり、追い越す挙動は多く観測されることが考えられる。コペンハーゲンでは、速度が遅い自転車にも関わらず追い越さず優先させる挙動も観測されたため、構造による影響の方が大きいのではないかと考えられる。

◆討議[吉田 長裕]

錯綜を処理する時間との関係は。

◆回答：混在型自転車レーンを有するコペンハーゲンでは、左折車の速度を抑える構造となっており、錯綜を処理する時間は増える。交通量が増加すると、錯綜を処理出来なくなるため、異なった構造で処理しなければならないと考えられる。