

安全性と利便性を考慮したドライバー知覚コストモデルによる無信号交差点環境の評価

加川 一輝¹・廣島 康裕²・松尾 幸二郎³

¹学生会員 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:k-kagawa@tr.ace.tut.ac.jp

²正会員 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:hirobata@ace.tut.ac.jp

³学生会員 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:k-matsuo@tr.ace.tut.ac.jp

無信号交差点において重大な交通事故が多々発生しており、事故防止のための様々な安全性対策が実施されている。それらの対策には、自動車ドライバーの利便性の低下を伴うものの、既往研究では対策評価において利便性をも考慮しているものは少ないと言える。そこで、本研究では、ドライバー視点からの安全性と利便性の両方を考慮した無信号交差点環境の評価を目的とし、車両走行実験により取得した運転挙動データをもとに、無信号交差点を通過するドライバーが安全性と利便性に関して知覚するコストを推定するモデルを構築した。さらに、そのモデルを実際の無信号交差点に適用することで、ドライバーがどれほどのコストを知覚しているのかを明らかにするとともに、交差点環境改善による対策効果の試算例を示した。

Key Words : *unsignalized intersections, driving behavior, drivers' perceived cost*

1. はじめに

近年、種々の交通安全対策や自動車性能の向上により、交通事故件数・死傷者数ともに減少傾向にある。しかし、それらの傾向は主に幹線道路で見られるものであり¹⁾、生活道路における事故減少率は小さく、その生活道路を構成する無信号交差点において重大な事故が多く発生している²⁾。また、無信号交差点では、交通量や、道路幅員、側方視距（交差点での左右の見通し距離）といった交差点環境により、事故多発交差点と呼ばれる危険な交差点が構成されることもある。

そのような中で、事故防止のための様々な対策がなされているが、それらの多くは事故件数減少や被害の低減を最終目標とし、具体的には個々の車両速度低下、ドライバーの運転集中度・危険認知率上昇などの安全性の向上を目的として実施されている。しかし、車両速度低下には時間損失の増大、運転集中度・危険認知率上昇にはドライバーの精神的負担の増大といった利便性の低下が伴う。つまり、一般に安全性と利便性はトレードオフ関

係にあり、お互い常に切り離せない存在であると言える。ところが、既往研究は、交差点の安全性向上効果に着目したものがほとんどであり、対策評価において利便性をも考慮した考察を行っている研究は少ない状況にあると言える。

そこで本研究では、ドライバー視点からの安全性と利便性の両方を考慮した無信号交差点の評価を行うことを目的として、まず、セーフティレコーダ搭載車両を用いた車両走行実験により得られた詳細な車両速度データをもとに、交差点通行時にドライバーがどのような行動をとるかを明らかにする。次に、その交差点付近での運転挙動を表す数値的な指標として超過時間を提案し、この指標を用いて、ドライバーが交差点通行の際に安全性と利便性に関して知覚するコストを推定するモデルを複数構築し、それらの適合性の検討を行う。さらに、そのモデルを用いて、実際の無信号交差点の通行に際してドライバーはどれほどのコストを知覚しているのか、また交差点環境の改善によってドライバーのコストがどれほど減少するのかを試算する。

2. 本研究におけるドライバー知覚コストモデルの概念

ドライバーは無信号交差点通行の際に、側方視距や道路幅員といった交差点環境条件から危険性を認知すると減速等の安全性を確保するための危険回避行動をとる。一方、ある時間内に目的地に到達する必要があるドライバーは危険回避行動による時間の損失を避け、利便性を優先した走行を行う。つまり、ドライバーは危険を回避するという安全性と、危険回避による時間損失を避けるという利便性のトレードオフ関係を考慮した上で、総合的な意味での最適な運転挙動を行っていると考えられる。

そこで、無信号交差点を通行するドライバーが感じる、安全性と利便性の確保のために負担となる意識の大きさを貨幣尺度で推定するドライバー知覚コストモデルを構築する。ここで、安全性に関する知覚コスト（知覚安全性コスト）は運転挙動と交差点環境条件によって、また利便性に関する知覚コスト（知覚利便性コスト）は運転挙動とドライバーの時間価値との関数によって表されると考える（式(1)、式(2)）。また、このモデルにおけるドライバーの最適な運転挙動とは、知覚安全性コストと知覚利便性コストの和である知覚総コスト（式(3)）が最小となるような運転挙動のことであり、式(4)のように表される。すなわち、本研究では、無信号交差点通行の際に、ドライバーは常に知覚総コストが最小となる最適運転挙動をとると仮定している。

$$AC = AC(x, E) \quad (1)$$

$$DC = DC(x, w) \quad (2)$$

$$TC = AC + DC \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x^* &= \arg \min(AC + DC) \\ &= \arg \min[AC(x, E) + DC(x, w)] \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、

AC : 知覚安全性コスト (Accident Cost)

DC : 知覚利便性コスト (Delay Cost)

TC : 知覚総コスト (Total Cost)

E : 交差点環境条件

w : ドライバーの時間価値

x : 運転挙動値

x^* : 最適運転挙動値。

3. 車両走行実験および測量調査によるデータの取得

(1) 車両走行実験の概要

ドライバー知覚コストモデル構築に際して、無信号交差点通行時のドライバーの運転挙動値を取得するために車両走行実験を実施した。

実験対象とした交差点は、図-1に示す愛知県豊橋市の住宅地区における全19箇所の十字型無信号交差点（交差点2, 9は点滅信号あり）であり、全47進入方向の運転挙動データを計測した。そのうち優先側道路から交差点に進入する場合は23進入方向、非優先側道路から進入する場合は24進入方向であった。被験者数は5人で、いずれも免許取得後1年以上経過した本大学の学生（年齢22～24歳）である。

実験方法としては、各被験者がそれぞれ4走行ずつ、フロントカメラ付属のセーフティレコーダ（datatec製、SRVideo/M68）と、両サイドにビデオカメラの取り付けられた自動車で実験コース（図-1）を走行するものである。なお、実験車両は各被験者所有の自動車とし、実験の際に普段と変わらない運転を心がけるように促した。走行経路は図中のスタート地点から実線矢印、破線矢印、点線矢印の順である。図中の丸で囲まれた番号は交差点番号であり、その周りには番号は進入方向番号（下線付きは非優先側）を示し、それぞれ通過順に番号を振っている。実験コース内の道路はすべて一車線道路で東西に一方通行規制があり、相互通行道路と一方通行道路が混在している。また、いずれの道路においても速度規制はない。

ここで、優先側道路とは一時停止規制のない側の道路であるが、この道路には停止線が引かれており、徐行義務が課せられている。一方、非優先側道路とは一時停止規制のある側の道路であり、「止まれ」の路面表示および道路標識（進入方向9, 18, 35においては点滅信号）が設置されている。

(2) 交差点通行時の運転挙動データの特定と交通状況の確認

セーフティレコーダには、0.1秒ごとの車速パルスデータによる車両速度が記録されているが、これがコース上のどの地点における速度なのかを把握し、交差点付近のデータを特定する必要がある。そこで、車両のサイドに取り付けられたビデオカメラの録画画像をもとに、交差点進入タイミングを特定し、サイドカメラにおける時刻とセーフティレコーダにおける時刻とを同期させることにより、交差点通行時の車両挙動データ（交差点通行時の速度変化）を取り出した。ただし、交差点付近に歩行者や対向車両等の要因の存在により、ドライバーはこれらを避けるために交差点に対して斜めに進入することで、サイドカメラが傾く場合があり、進入タイミングの誤差が大きくなる可能性がある。また、これらの要因は

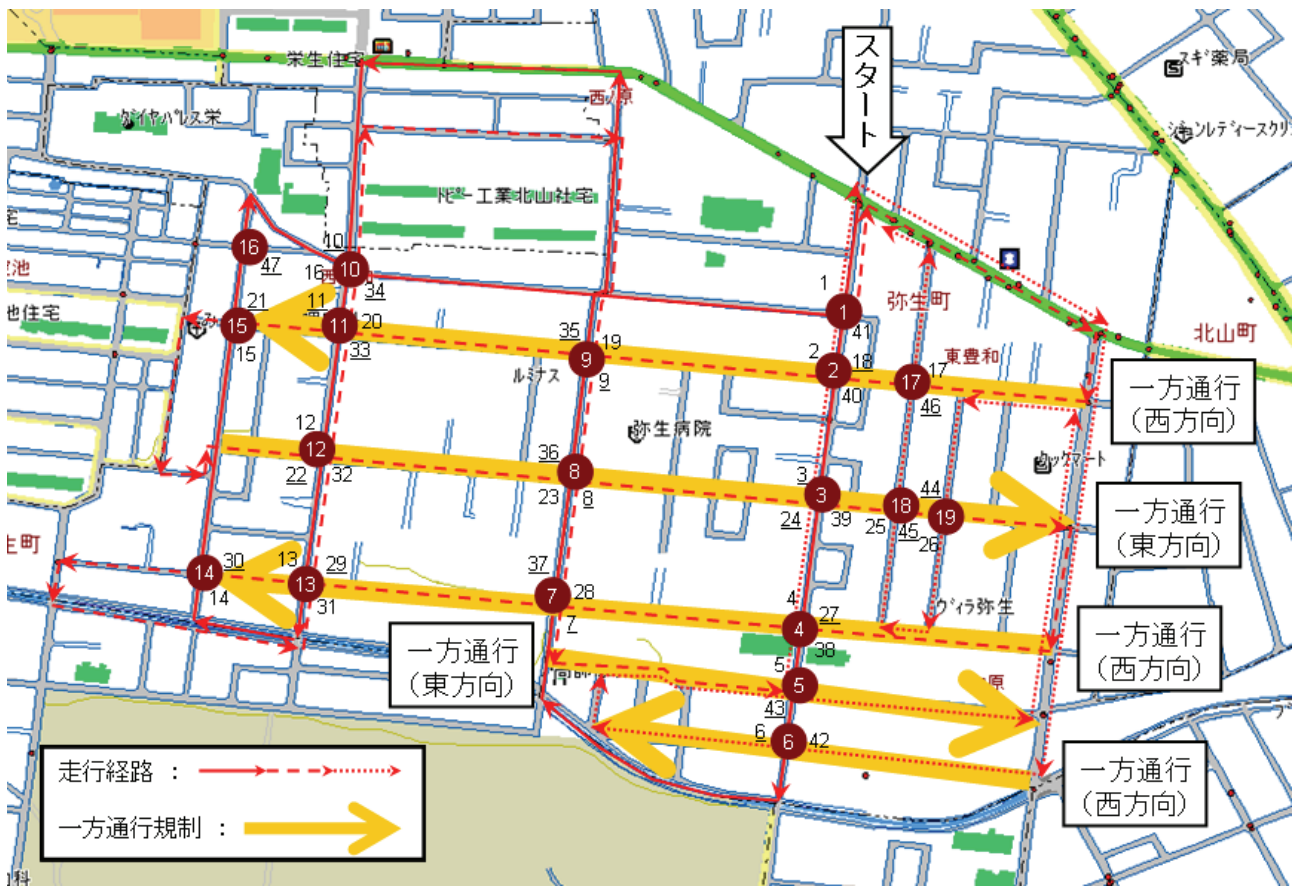


図-1 実験対象地区と車両走行実験コース

ドライバーに減速・加速等の行動を促し、運転挙動に影響を与えていると考えられる。そのため、交差点通行時の交通状況を確認する必要がある。

そこで、フロントカメラとサイドカメラの録画画像をもとに交差点進入前後40m区間付近に、歩行者や対向車等の、交差点進入タイミングに誤差を生み、ドライバーの運転挙動に影響を与えると考えられる要因の有無を分類した。ここで、これらの要因のことを外的要因という言葉で定義する。

(3) 現地測量調査による交差点環境条件の取得

交差点環境条件として、ドライバーの運転挙動に影響を与えると考えられるもの計16項目(表-1)を設定し、現地におけるトータルステーションを用いた細部測量調査の実施により、これらを取得した。まず、細部測量により得られた基準点の座標を紙に打ち出して1/300の現地測量図を作成し、定規によって交差点環境条件の各項目の値の計測を行った。ここでの定規による計測は、0.5mm単位で行っており、実寸法に換算した場合には15cm単位の精度となっている。

4. 運転挙動分析

表-1 交差点環境条件の測定項目

測定項目	概要
通行車道幅員	通行している道路の車道幅員
通行路肩幅員(左)	通行している道路の交差点に向かって左側の路肩幅員
通行路肩幅員(右)	通行している道路の交差点に向かって右側の路肩幅員
交差道路幅員(左)	交差点に向かって左側の交差道路の幅員
交差道路幅員(右)	交差点に向かって右側の交差道路の幅員
交差点手前10m地点の視距(左)	交差点手前10m地点の交差点に向かって左方向の見通し距離
交差点手前10m地点の視距(右)	交差点手前10m地点の交差点に向かって右方向の見通し距離
交差点手前20m地点の視距(左)	交差点手前20m地点の交差点に向かって左方向の見通し距離
交差点手前20m地点の視距(右)	交差点手前20m地点の交差点に向かって右方向の見通し距離
交差点手前30m地点の視距(左)	交差点手前30m地点の交差点に向かって左方向の見通し距離
交差点手前30m地点の視距(右)	交差点手前30m地点の交差点に向かって右方向の見通し距離
カーブミラーの有無(左)	交差点に向かって左方向の交差道路を確認できるカーブミラーの有無
カーブミラーの有無(右)	交差点に向かって右方向の交差道路を確認できるカーブミラーの有無
交差点角の建物の有無(左)	交差点に向かって左側にある建物の有無
交差点角の建物の有無(右)	交差点に向かって右側にある建物の有無
一通規制の有無	通行している道路の一方通行規制の有無

(1) 運転挙動の実態

セーフティレコーダに記録された車両速度データをもとに、交差点進入手前40m地点から進入後40m地点までの運転挙動図(経過時間における速度の変化を示したグラフ)を進入方向ごとに作成し、分析対象とする進入方向の検討を行った。運転挙動図の例を非優先側・優先側に分けて図-2、図-3にそれぞれ示す。ここで、これらの図は一つの進入方向における全被験者・全実験回の運転挙動をまとめたものであり、非優先側・優先側をそれぞれ代表して進入方向3と5のデータを示す。

通行道路が非優先側の場合(図-2)に着目すると、外

的要因が存在しない場合は運転挙動に規則性があり、交差点通行に伴う減加速の様子が顕著に表れている。なお、非優先側は一時停止規制がかかっているにも関わらず、速度が0になっていない車両が存在する。これは法律違反ではあるが、本研究はドライバーの運転挙動実態の分析を目的としているため、そのこと自体の是非は問題としていない。一方で通行道路が優先側の場合（図-3）は、非優先側ほど明確ではないものの交差点通行に伴う減加速の様子が見られる。外的要因が存在する場合の運転挙動は、道路の優先・非優先に関わらず非常に複雑であり、交差点環境条件が運転挙動に与える影響を明らかにすることは困難であると思われる。なお、外的要因の存在により運転挙動が複雑になるという傾向は、他の進入方向においても同様であった。

そこで、外的要因が存在する場合は、交差点進入タイミングの誤差も大きく、運転挙動も複雑であるため、この場合のデータを除外した。ここで、全データ893のうち、外的要因が存在しない場合のデータは416であり、この416データを以降の分析に用いることとした。

(2) 超過時間の提案

ドライバー知覚コストを構成する、交差点進入前後の運転挙動を数値的に示す指標として、超過時間を提案した（図-4）。これは、交差点進入手前20m地点の速度を基準として、この速度で交差点を通行するとした場合の交差点進入前後20m区間の所要時間を実際にこの区間に要した時間から差し引いて算出される。既往研究⁷⁾で運転挙動を表す指標として交差点進入時の区間速度が用いられているが、これは交差点進入前の挙動を示すものに過ぎなかった。そこで、本研究では無信号交差点進入前後の全体的な挙動を考慮するためにこの指標を提案した。

5. ドライバー知覚コストモデルの構築とコストの推定

(1) ドライバー知覚コストモデルの特定化

知覚コストおよび最適運転挙動の概念については2章で述べたが、運転挙動を示す指標として前章で提案した超過時間を用いると、ドライバーの知覚コストは超過時間によって図-5のように変化すると考えられる。この関係を関数化すると、ドライバー知覚コストモデルは式(5a)、式(6a)、式(7a)のように表される（いずれも第1項が式(3)におけるAC、第2項が式(3)におけるDCに対応している）。これらの3つのモデルより、知覚総コストが最小（ $dTC/dt=0$ ）となる最適超過時間は、それぞれ式(5b)、式(6b)、式(7b)のように導かれる。ドライバー知覚コストモデルは、知覚安全性コストと知覚利便性コスト

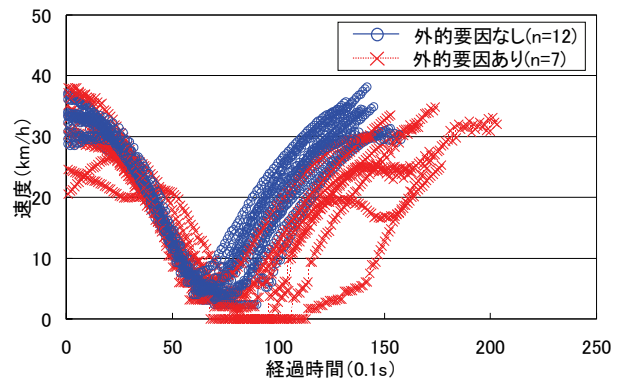


図-2 進入方向3（非優先側）の運転挙動

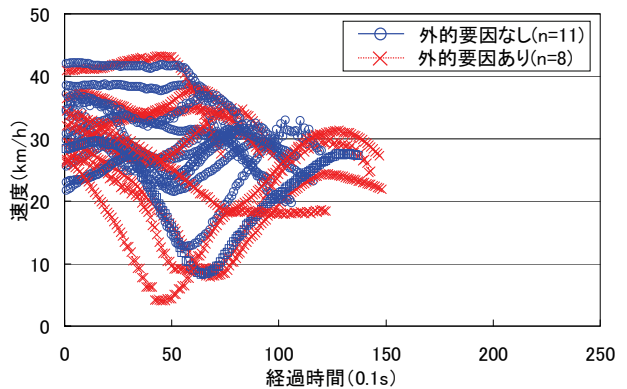


図-3 進入方向5（優先側）の運転挙動

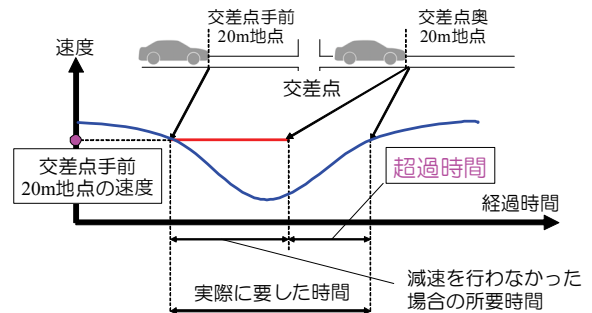


図-4 超過時間の定義

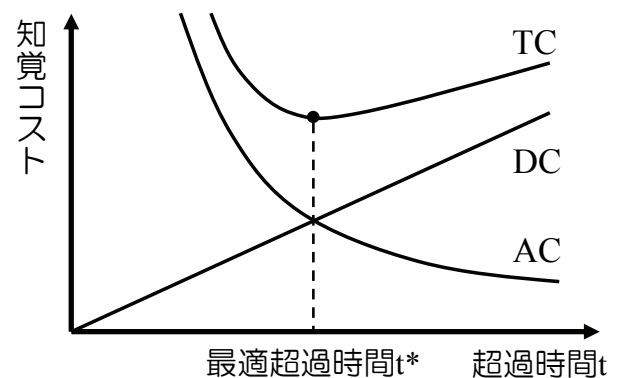


図-5 超過時間と知覚コストの関係の概念図

の和として表されるが、このような関数形を仮定した根拠は以下のとおりである。

一般に無信号交差点通行の際の時間消費が大きいと、安全確認に要する時間が確保されるため、知覚安全性は向上すると考えられる。つまり、超過時間の増加によってドライバーの知覚安全性コストは減少すると考えることは妥当である。また、無信号交差点通行時の知覚安全性は、道路幅員や視距などの交差点環境条件の影響により変化すると考えられる（例えば、同じ超過時間で通行した場合でも見通しの悪い交差点では、見通しの良い交差点と比較して危険性が高いと考えられる）。これらのことを考慮して知覚安全性コストは、交差点環境条件の影響を受けつつ、超過時間とともに反比例的に変化する非線形関数を仮定した。ただし、その関数形については3つの案が考えられた。

一方、ドライバーの知覚利便性は、交差点通行に伴う時間消費の増大によって低下すると考えられる。このことは、一定時間以内に目的地に到着したいという状況下におけるドライバーの心理を考えると妥当な関係であると言える。知覚利便性コストにおいても、知覚安全性コストと同様に非線形関数である可能性を否定できないが、このことによって式展開が困難になり、パラメータ数も増える。そこで本研究では、簡単化のために知覚利便性コストは、時間価値を係数として超過時間とともに直線的に変化する線形関数を仮定した。

● モデル1：

$$TC = e^{-\alpha_1 \cdot t + \sum \beta_{1i} \cdot E_i + \gamma_1} + w \cdot t \quad (5a)$$

$$t^* = \sum \frac{\beta_{1i}}{\alpha_1} E_i - \frac{1}{\alpha_1} \left[\ln \left(\frac{w}{\alpha_1} \right) - \gamma_1 \right] \quad (5b)$$

● モデル2：

$$TC = e^{-(\alpha_2 + \sum \beta_{2i} \cdot E_i)t + \gamma_2} + w \cdot t \quad (6a)$$

$$t^* = \frac{1}{\alpha_2 + \sum \beta_{2i} \cdot E_i} \left(\gamma_2 - \ln \frac{w}{\alpha_2 + \sum \beta_{2i} \cdot E_i} \right) \quad (6b)$$

● モデル3：

$$TC = \frac{\sum \beta_{3i} \cdot E_i + \gamma_3}{t^{\alpha_3}} + w \cdot t \quad (7a)$$

$$t^* = \left[\frac{\alpha_3}{w} (\sum \beta_{3i} \cdot E_i + \gamma_3) \right]^{\frac{1}{\alpha_3 + 1}} \quad (7b)$$

ここに、

E_i ：交差点環境条件に関する i 番目の説明変数

t ：超過時間

t^* ：最適超過時間

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{3i}, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ ：パラメータ。

(2) モデルの適合度の検討およびパラメータ推定結果

式(5b)、式(6b)、式(7b)を用いて、超過時間を目的変数とし、交差点環境条件の各項目を説明変数として非線形回帰分析を行った。ここで、交差点環境条件としては優先・非優先それぞれにおいて有意性を示す項目を採用している。また、時間価値は所与とし、簡単化のために、50円/(分・台)を秒単位に換算して0.83円/(秒・台)という値を用いている。

いずれのモデルにおいても、変数の数に対してパラメータ数が多いため、各パラメータのうちの1つを固定させる必要がある。そこで、各モデルにおける $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ の値を順次変動をさせながら、他のパラメータの推定を行った。モデル1は、 α_1 の固定値による決定係数 R^2 の変動がなく、モデル2は、 α_2 の固定値と決定係数 R^2 との関係が明確でなかった。そのため、モデル1およびモデル2においては、 α_1, α_2 の固定値として妥当な値を推定することは困難であると言える。一方で、モデル3においては、 $\alpha_3 = 1.0$ としたときの決定係数 R^2 が最大になったことから、この値は固定値として妥当な値であると考えられる。なお、モデル3における α_3 は最適運転挙動時の知覚安全性コストと知覚利便性コストの比を示すパラメータであるが、この値が1.0という値に推定されたことから、ドライバーは無信号交差点通行時に、知覚安全性と知覚利便性について同程度の意識を持っていると考えられる。以下では、モデルの解釈・取り扱いの容易さからモデル3について検討する。モデル3のパラメータ推定結果は表-2のとおりであり、この値を適用した場合の平均的な交差点環境条件下での超過時間に対する各コストの変化状況は図-6に示すようになる。

(3) 知覚コストモデルを用いた環境改善効果の試算

知覚コストモデルの活用によって各交差点進入方向の知覚コスト推定することが可能になる。図-7は、モデル3を用いて、交差点手前10m地点における視距を最低30m以上確保する整備が行われた場合の効果について示したものである。現状では一般的なドライバーは、1走行あたり優先側で1円程度、非優先側では7円程度のコストを知覚していることが分かる。また、環境改善の効果について着目すると、整備後は優先側ではほとんどの交差点においてコストは0円になり、非優先側では0.5円程度減少することが確認できる。

6. おわりに

本研究では、まず、ドライバー視点からの安全性と利便性の両方を考慮した無信号交差点の評価を行うべく、車両走行実験を用いた詳細な運転挙動分析により、ドライバーは無信号交差点通行の際にどのような挙動をとっているのかを明らかにした。次に、運転挙動を数値的に示す指標として提案した超過時間と交差点環境条件の関係の分析に基づき、知覚コストモデルの構築を行った。そして、本モデルを実際の無信号交差点に適用することにより、ドライバーがどれほどのコストを知覚して無信号交差点を通行しているのかを算出するとともに、交差点環境条件が改善された場合の効果を、貨幣尺度の試算例で示した。

しかしながら、本研究でのモデル構築には、車両走行実験により得られたデータを用いている。このときのドライバーは、特に急いだ運転を行う目的がないため、普段と比べれば、利便性よりも安全性を意識した運転挙動をとっている可能性がある。そこで、今後は観測調査の実施により、実際に無信号交差点を通行しているドライバーの運転挙動データを取得し、これをもとにしたパラメータ推計を行いたい。また、今回、分析を行ったのは、外的要因がない場合といった限定的条件におけるものであるため、これらの要因を考慮したモデルの構築が必要であると考えている。

参考文献

- 1) 伊藤克広, 本田肇, 高橋治, 金子正洋: 生活道路における狭さく速度抑制効果に関する研究, 伊藤克広 土木計画学研究・講演集, vol. 41, CD-ROM, 2010
- 2) 警視庁, 国土交通省: 交通安全マップ～交通事故統計情報提供, <http://www.kotsu-anzen.jp/>
- 3) Wilde, G. J. S.: Risk homeostasis theory and traffic accidents: propositions, deductions, and discussion of dissension in recent reactions, Ergonomics, vol. 31, pp. 441-468, 1988.
- 4) Jørgensen, F., Wentzel-Larsen, T: Optimal use of warning signs in traffic, Accident Analysis and Prevention, vol.31, issue. 6, pp. 729-738, 1999.
- 5) 鈴木弘司, 藤田素弘, 小塚一人, 串原善之: 利用者のリスクテイキング/回避行動を考慮した信号交差点の運用評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, vol. 22, no. 4, pp.853-862, 2005.
- 6) 松尾幸二郎, 廣島康裕, 中西仁美: 安全性と利便性のトレードオフ関係を考慮した安全対策評価のための運転挙動分析モデル, 土木計画学研究・論文集, vol. 25, no. 4, pp. 989-996, 2008.

表-2 パラメータ推定結果 (モデル3)

説明変数		優先側		非優先側	
		偏回帰係数	t値	偏回帰係数	t値
通行車道幅員 E_1 (m)	(β_1)	-0.535	-2.44	—	—
交差点道路幅員 E_2 (m)	(β_2)	—	—	2.52	2.70
交差点手前10m地点の視距 E_3 (m)	(β_3)	-0.0318	-2.70	-0.113	-3.82
一方通行規制ダミー E_4	(β_4)	-0.346	-1.96	-1.86	-2.25
定数	(γ)	2.73	3.13	4.20	0.833
決定係数 R^2 (サンプル数)		0.341 (21)		0.580 (21)	

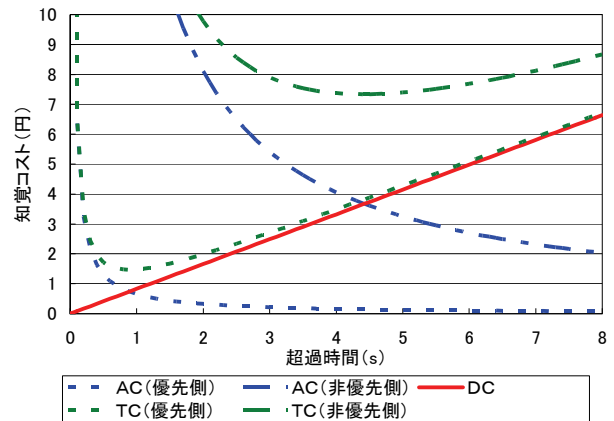


図-6 超過時間に対する各知覚コストの変化状況

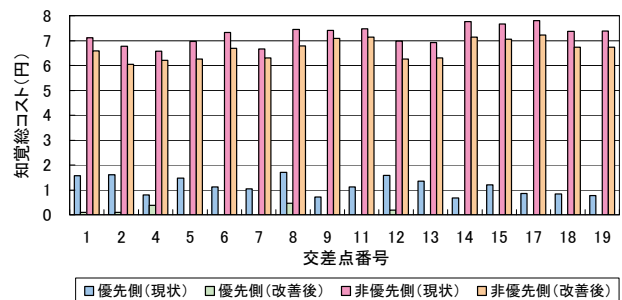


図-7 視距改善による知覚総コストの減少効果

- 7) Matsuo, K., Hirobata, Y: An analysis on the driving behavior considering the trade-off between safety and travel utility, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 8, pp. 2080-2094, 2010.
- 8) 伊藤孝祥, 廣島康裕, 村田直樹: 住居系地域内の無信号交差点における車両挙動を考慮した交通事故件数の因果構造分析, 土木計画学研究・論文集, vol. 21, no. 4, pp. 853-860, 2004.
- 9) Yamanaka, H., Mitani, T: Vehicle behavioral safety assessment for unsignalized small intersections to evaluate collision avoidance system, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 2667-2675, 2005.