速度選択モデルを用いたISAによるドライバーの負担推計の試み
－生活道路ISAの普及に向けた検討として－

松尾幸二郎[1]・廣畠康裕[2]

[1]正会員　博 (工)　豊橋技術科学大学　建築・都市システム学系 (〒 441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail: k-matsuo@ace.tut.ac.jp
[2]正会員　工博　豊橋技術科学大学　建築・都市システム学系 (〒 441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)
E-mail: hirobata@ace.tut.ac.jp

近年，欧州を中心に Intelligent Speed Adaptation (ISA) が注目されている．我が国の生活道路にも ISA を導入し ISA 搭載車両が普及することで，交通静穏化のための抜本的なツールになることが期待される．一方で ISA はドライバーの利便性を抑制するものでもある．従ってドライバーが ISA 搭載を受け入れるためには，その利便性低下に見合うだけの利得が必要だと考えられる．そこで本研究では，生活道路における強制型 ISA によるドライバーの負担の推計を試みる．具体的には，ドライバーの主観的な安全性と利便性のトレードオフ関係を考慮した速度選択モデルを構築し，実車両を用いた走行実験により得られたデータに適用する．そして，推定された速度選択モデルを用いて強制型 ISA によるドライバーの負担を試算する．

Key Words : *traffic safety, ISA, residential roads, speed selection*

1. はじめに

近年，我が国の交通事故死傷者数は減少傾向にあるが，主に減少しているのは自動車乗車中の事故であり，自転車乗用中および歩行中の事故については顕著な減少は見られない．特に，自転車乗用中の死傷者のうち約 4 割，および歩行中の死傷者のうち約 5 割が 15 歳以下の子供と 65 歳以上の高齢者という現状である．また，15 歳以下と 65 歳以上の死傷者の半数が自宅から 500m 以内で事故に巻き込まれており，依然として住区内生活道路での安全性の欠如が問題視される．今後さらなる高齢者の増加が予想される中で，交通静穏化をよりいっそう促し，生活道路における自転車，歩行者の安心・安全を確保していくことが重要な課題だといえる．

交通静穏化に関しては従来から多くの研究がなされ，実際のコミュニティゾーン形成事業等によってその交通静穏化への一定の有効性が確認されてきた[1)]．また近年ではゾーン 30 の導入も広がりつつあり，その効果の検証が進められている．その一方で，欧州を中心に Intelligent Speed Adaptation (ISA) が注目されている．ISA は主に GPS とデジタルマップを用いて走行している道路の上限速度を取得し，上限速度を超過したドライバーに警告を与えたり（助言型 ISA），上限速度を超過しないように車両側が強制的に制御する（強制型 ISA）システムである．既に欧州では ISA 搭載車両によるフィールド実験が行われており，ISA 導入による速度抑制効果等が報告されている[2)]．日本の生活道路においても ISA が導入され強制型 ISA 搭載車両が普及すれば，交通静穏化に大きく寄与すると考えられる．

しかしながら，ISA は一般にドライバーの利便性を抑制するものでもある．例えば，強制型 ISA による最高速度の上限値を低く設定すれば車両速度の大幅な抑制に繋がるが，その住区内に居住するドライバーの自宅から幹線道路までのアクセス利便性は減少してしまう．山中[3)]によれば，自宅から幹線道路までのアクセス時間が 90 秒を超えると 5 割の人が不便感を訴えるとしている．従って，住区内生活道路への ISA の導入を議論する場合，この安全性と利便性のトレードオフ関係を考慮した上で総合的な評価を行うべきであると考える．また，ドライバーの ISA 搭載を受け入れ，ISA 搭載車両が普及するためには，その利便性低下に見合うだけの利得 (例えば，自動車保険料の減額や自動車税の減税など) が必要だと考えられる．

そこで本研究では，将来的に導入されれば生活道路における交通静穏化に大きく寄与すると考えられる強制型 ISA を念頭に，速度抑制によってドライバーが被る負担の推定を試みる．具体的には，ドライバーの主観的な安全性と利便性のトレードオフ関係を考慮した走行速度選択モデルを構築し，実車両を用いた走行実験により得られたデータに適用する．そして，推定さ

れた速度選択モデルを用いて強制型 ISA によるドライバーの負担を試算する．

2. 方法

(1) 走行速度選択モデルの概念

ドライバーは生活道路を走行する際に，道路幅員や沿道状況などの道路交通環境条件から危険性を知覚し，速度を下げることで一定の安全性を確保しようと考えるだろう．一方，ある時間内に目的地に到達する必要のあるドライバーは，速度を上げることで利便性を確保しようと考える．すなわち，ドライバーは主観的な安全性と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速度を選択していると考えられる．そこで本研究では，ドライバーの知覚安全性コストと知覚利便性コストによって説明される走行速度選択モデルを構築する．このとき単位距離あたりの知覚安全性コスト AC(Accident Cost) は道路交通環境条件 $\mathbf{E}$(ベクトル) と走行速度 x によって規定され，速度が増加するにつれて知覚安全性コストも増加すると考える ((1) 式，**図–1** 参照)．

$$AC = AC\left(x, \mathbf{E}\right). \tag{1}$$

一方，単位距離あたりの知覚利便性コスト DC(Delay Cost) は，ドライバーの時間価値 w と走行速度 x によって規定され，走行速度が減少するにつれて知覚利便性コストが増加すると考える ((2) 式，**図–1** 参照)．

$$DC = DC\left(x, w\right). \tag{2}$$

そして，ドライバーは知覚安全性コスト AC と知覚利便性コスト DC の和である知覚総コスト TC(Total Cost) が最小となる主観的に最適速度 x^* を選択していると考える ((3) 式，(4) 式，**図–1** 参照)．

$$TC\left(x, w\right) = AC\left(x, \mathbf{E}\right) + DC\left(x, w\right). \tag{3}$$

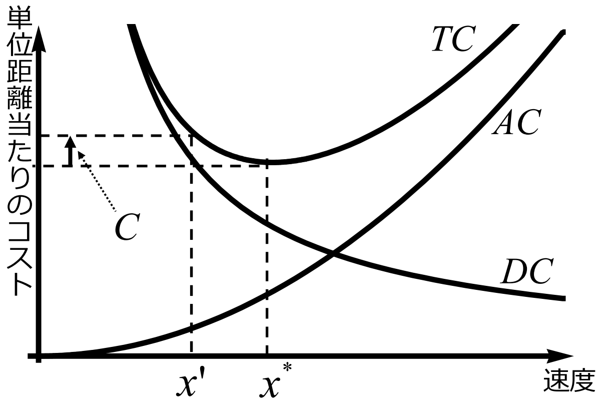
$$x^* = \arg\min\left[AC\left(x, \mathbf{E}\right) + DC\left(x, w\right)\right]. \tag{4}$$

ここで，ある道路交通環境条件下においてドライバーは x^* を最適速度と考えているのに対し，道路交通環境条件が変わらずに強制型 ISA によって速度 x' に下げられた場合の単位距離あたりの TC 増加量 C は，(5) によって算出できる (図–**1** 参照)．

$$C\left(x', \mathbf{E}, w\right) = TC\left(x', \mathbf{E}, w\right) - TC\left(x^*, \mathbf{E}, w\right). \tag{5}$$

(2) 速度選択モデルの定式化

走行速度選択モデルを定式化するにあたり，以下の 2 つのモデルを検討する ((6) 式，(8) 式)．両モデルとも第 1 項が知覚安全性コスト AC，第 2 項が知覚利便性コスト DC を表している．なお走行速度 の逆数は単位距離を走行するのにかかる時間であり，本モデルでは知



図–1 速度選択モデルと速度減少による負担の概念

覚利便性コストが時間と直線的な関係にあると考えている．また，(7) 式，(9) 式は，それぞれモデル 1 とモデル 2 について知覚総コスト TC を最小にする最適速度 を導出したものである．実際の生活道路における道路環境条件と走行速度のデータを用いてパラメータの推定を行い，適合度等によってモデル間の比較を行う．

走行速度選択モデル **1**：

$$TC = \left(\alpha_0 + \sum_k \alpha_k E_k\right) x^{\beta} + \frac{w}{x}, \quad (\beta > 1) \tag{6}$$

$$x^* = \left(\frac{w}{\beta\left(\alpha_0 + \sum_k \alpha_k \cdot E_k\right)}\right)^{\frac{1}{\beta+1}} \tag{7}$$

走行速度選択モデル **2**：

$$TC = \alpha x^{\left(\beta_0 + \sum_k \beta_k \cdot E_k\right)} + \frac{w}{x} \tag{8}$$

$$x^* = \left(\frac{w}{\alpha\left(\beta_0 + \sum_k \beta_k E_k\right)}\right)^{\frac{1}{\beta_0 + \sum_k \beta_k E_k + 1}} \tag{9}$$

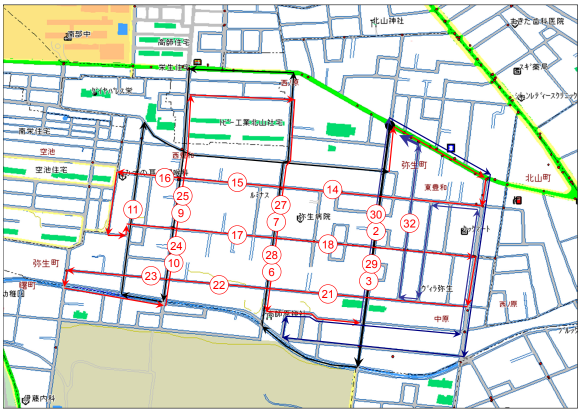
ここで，TC：単位距離あたりの知覚総コスト (円/km)，w：ドライバーの時間価値 (円/時)，E_k：k 番目の道路交通環境条件，$\alpha, \alpha_0, \alpha_k, \beta, \beta_0, \beta_k$：パラメータ

3. データの概要

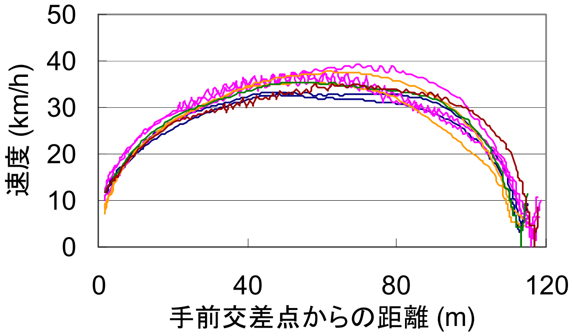
著者らはこれまでに，生活道路や無信号交差点 (以下本稿では「交差点」と呼ぶ) でのドライバーの挙動を詳細に分析するために，実車両を用いた走行実験を行っている．そこで本研究では，この走行実験の結果から走行速度選択モデル推定のためのデータを得た．以下に走行実験およびデータ概要を簡潔に述べる．

(1) 車両走行実験

走行実験の対象エリアは，愛知県豊橋市の住区内である．被験者は 5 人 (22〜24 歳) でそれぞれ 4 回ずつ，



図–2　車両走行実験コースとリンク番号



図–3　リンク走行時の速度変化の一例 (リンク 7)

被験者の所有する車両にセーフティレコーダとビデオカメラ (フロント，両サイド) 設置し，実験コース (**図–2** 参照) を走行して 0.1 秒ごとの走行速度を含む車両挙動データを取得した．実験時は普段と変わらない運転を心がけるよう促した．また，実験終了後にビデオカメラの映像から，各交差点や交差点間の道路 (以下「リンク」と呼ぶ) において，道路環境条件以外でドライバーの挙動に影響与えうる「外的要因 (前方車，対向車，歩行者，自転車等)」の有無を調べている．

(2)　走行速度の取得

交差点とリンクではドライバーの挙動が大きくことなるため，分けて分析する必要があるが，本稿ではリンクにおける速度選択に限定して分析を行う．また，本研究では基礎的研究としてまず道路環境要因のみの影響を知るため，走行時に外的要因があったリンク走行データは分析対象外とした．しかし，外的要因は走行速度選択に大きく影響する要因であるため，今後の研究おいて検討していく予定である．

図–3 はある交差点進入から次の交差点進入までの速度変化の例を示したものであるが，交差点進入前後 40m 以内では交差点の影響を受け減速していることが分かる．その他のリンクでもほぼ同様であった．そこで，前後交差点間が 80 m 未満のリンクではドライバーの選好する速度まで加速しているかが明らかでないため，**図–2** に示す 80m 以上の 22 リンクを分析対象とした (進行方向が逆の場合，異なるリンクとしている)．走行速度は各リンク中心での速度とし，各走行についてリンク走行速度を取得した．各リンクについて被験者別にこれらの平均値を算出し，走行速度選択モデル推定に用いる．なお，全てのリンクの走行速度が 30～40(km/h) の間に入っていた．

4.　結果

(1)　速度選択に影響を与える道路環境条件の分析

ドライバーの走行速度選択に影響する要因を把握するため，道路環境条件，および被験者（A～E）を表すダミー変数を説明変数とした重回帰分析を行った．その結果，車道幅員，左側の路肩幅員，沿道建物密度，一方通行の有無が有意に影響していることが分かった．自動車が左側通行のため，速度選択に左側の路肩幅員が影響していると考えられる．また，沿道建物密度とはリンク距離に対する沿道に接している建物幅の割合 (最大 1.0) であり，沿道に接している建物が多いほど，飛び出しの危険性や圧迫感からドライバーが速度を下げていると考えられる．また，被験者により走行速度が有意に異なることが明らかになった．

(2)　走行速度選択モデルの推定

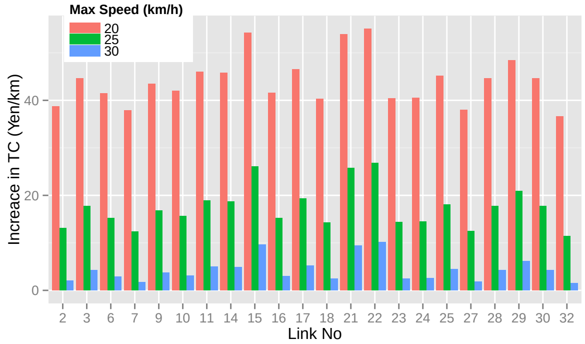
重回帰分析で有意となった変数を道路環境条件 $\mathbf{E}$ とし，非線形回帰により速度選択モデル 1 およびモデル 2 の推定を行った．なお，被験者ダミー変数も道路環境条件と同様の形で説明変数として含めた．このとき両モデルともパラメータが多いため，モデル 1 ではパラメータ β を固定して推定するという手順を様々な β に対して，モデル 2 では同様の手順を様々な α に対して行ったが，適合度にほとんど変化が見られなかったため，それぞれ $\beta = 4.0$，$\alpha = 1.0$ とした．$\beta = 4.0$ としたのは，自動車の制動距離が走行速度の 2 乗に比例すること，および衝突時の運動エネルギーが衝突速度の 2 乗に比例するという 2 点を考慮したためである．各モデルの適合度 (実測値と予測値の相関係数 R および残差平方和 RSS(km/h)) を**表–1** に示す．どちらのモデルも重回帰分析の際の適合度よりも適合度がやや高く，本速度選択モデルの仮定の一定の妥当性が確認できる．また，モデル 1 の方が適合が良いため，以降の分析ではモデル 1 を用いる．モデル 1 の推定結果を**表–2** に示す．

表–1 各モデルの実測値と予測値の相関係数

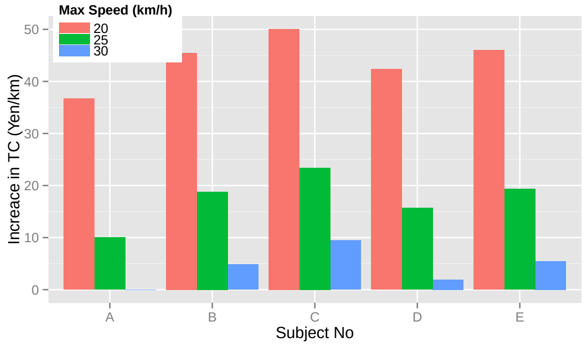
重回帰	速度選択モデル 1	速度選択モデル 2
$R = 0.75$ $RSS = 492$	$R = 0.77$ $RSS = 471$	$R = 0.76$ $RSS = 485$
サンプル数		108

表–2 走行速度選択モデル 1 の推定結果

説明変数	パラメータ		p 値
定数	α_0	$3.5 * 10^{-5}$	0.000
車道幅員 (m)	α_1	-4.3×10^{-6}	0.001
路肩幅員 (左)(m)	α_2	-1.7×10^{-5}	0.000
沿道建物密度	α_3	7.4×10^{-6}	0.000
一方通行ダミー	α_4	-4.4×10^{-6}	0.000
被験者 A	α_5	6.7×10^{-6}	0.000
被験者 C	α_6	-2.7×10^{-6}	0.008
被験者 D	α_7	2.1×10^{-6}	0.108
被験者 E	α_8	-3.7×10^{-7}	0.747
	β	4.0	
	w	3000	
サンプル数		108	



図–4 リンク別・上限速度別の平均知覚総コスト TC 増加量



図–5 被験者別・上限速度別の平均知覚総コスト TC 増加量

(3) ISA によるドライバーの負担の分析

推定された走行速度選択モデルと (5) 式を用いて，各リンクの道路環境条件のもとで，ISA によって一定速度まで減少した場合のドライバーの単位距離辺り知覚総コスト TC の増加量 C を算出する．この際，ISA の設定速度は 30，25，20(km/h) とした．リンク別・上限速度別に TC 増加量を平均した結果を**図–4** に示す．これを見ると，30(km/h) まで速度が減少した場合，TC 増加量は 1〜10(円/km) 程度であるのに対し，20(km/h) の場合 35〜55(円/km) 程度となっていることが分かる．リンク間での TC 増加量の違いは，リンクの道路環境条件によるものである．すなわち，車道幅員は広いなどもともと走行速度が高くなる道路は，ISA による速度抑制幅が大きいため，TC 増加量も大きくなる．

次に，**図–5** に，被験者別・上限速度別に全リンクの TC 増加量を平均した結果を示す．上限速度が 20(km/h) の場合，TC 増加量に被験者間で 35〜50(円/km) 程度のばらつきがあることが分かる．

ここで，例えば被験者 C が生活道路を毎日 1km 程度走行していることを想定すると，強制型 ISA によって 30(km/h) まで速度を抑制された場合の年間負担量は，10(円/km) × 1.0(km/day) × 365(day/year)=3,650(円/year) となる．従って，年間の自動車保険料の減額などによって少なくとも 3,650 円以上の利得が得られなければ，ISA 機器を搭載することに対するインセンティブが働かないことが示唆される．

5. おわりに

本研究では，生活道路における交通静穏化対策として期待される強制型 ISA によってドライバーが被る負担の定量的な評価を目的として，ドライバーの知覚安全性コストと知覚利便性コストにより説明される走行速度選択モデルを構築した．その結果，重回帰モデルに比べ，走行速度選択モデルの適合度がやや高く，モデルの仮定に一定の妥当性があることが確認された．さらに走行速度選択モデルを用いて ISA によるドライバーの負担を試算したところ，ISA による上限速度が 30(km/h) の場合 1〜10(円/km) 程度，20(km/h) 場合 35〜50(円/km) 程度の知覚総コストの増加があることが試算された．しかしながらこれらの試算では，時間価値を一般的な 3000(円/時) としており，ISA により自由な走行が阻害されることに対する煩わしさなどが考慮されておらず，実際の負担はより大きいことが予想される．今後は実際に ISA 機器を搭載した車両による走行実験などにより，実証的な検討を行っていく．

参考文献

1) 例えば：橋本成人・坂本邦宏・的場映・高宮進：三鷹市コミュニティ・ゾーンの供用後評価，第 19 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.209-212，1999.
2) 例えば:O. M. J. Carsten, F. N. Tate: Intelligent Speed Adaption: Accident Saving and Cost-Benefit Analysis, *Accident Analysis and Prevention*, Vol.37(3), pp.407-416, 2005.
3) 山中英生：くらしを支える人と車のための道路－ 6．生活道路の具備すべき条件，交通工学，Vol.29(3)，pp. 41-49，1994.

Estimating the Burdens on Drivers due to ISA Based on a Speed Selection Model: Discussion for Penetrating ISA on Residential Roads

Kojiro MATSUO and Yasuhiro HIROBATA