

ISAによるドライバーの負担推計方法の構築： 総コスト最小化原理に基づく希望走行速度分布を用いて～

松尾 幸二郎¹・廣島 康裕²

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-matsuo@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

近年、ヨーロッパを中心にIntelligent Speed Adaptation (ISA, 最高速度制御) への関心が高まっている。我が国においてもISAを導入することで、事故時損失の軽減、特に死亡・重症事故の低減が期待される。一方で、速度制御のレベルによっては、ドライバーの利便性低下にもつながると考えられる。そこで本研究では、速度が制御された場合のドライバーの負担の推計方法を構築することを目的とする。具体的には、まず総コスト最小化原理に基づく希望走行速度分布の考え方を提案する。次に、様々な道路交通環境条件下における観測データを用いて、提案された希望走行速度分布の推定を行う。さらに推定結果に基づき、単純な交通流シミュレーションを用いてISAを導入した場合のドライバーの負担の推計を試みる。

Key Words : traffic safety, ISA, driving behavior, desired speed, perceived total cost

1. はじめに

我が国の交通事故死傷者数は年々減少傾向にあるものの、平成22年の交通事故死傷者数の5割を、また重傷者数の3割を65歳以上の高齢者が占めており、今後の超高齢化社会を迎えるにあたって、抜本的な交通安全対策の検討が必要だと考えられる。

そのような中、近年、欧州を中心にISA (Intelligent Speed Adaptation) 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、走行している道路区間の速度上限値を取得し、ドライバーが自発的に、もしくは車両が強制的に上限速度を超えないように制御するシステムである。我が国においてもISAを導入することで、交通安全性の向上、特に死亡・重症の低減が期待される。さらに生活道路等においては、交通静穏化や抜け道走行の防止にも寄与し、安心・安全な街づくりへの重要なツールになる可能性も大いに有している。

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ISAの検討に際しては、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議論を行うべきである。しかしながら、速度と交通安全性に着目した研究は多くあるものの、速度制御によるドライバーの負担について定量的に取り扱っている研究はあまりなく、漠然的な議論に留まっている。

そこで本研究では、まず安全性と利便性を考慮した知覚総コスト最小化原理に基づいて、ある道路交通環境条件下における個々のドライバーの希望走行速度決定モデルを構築し、それを用いて強制速度制御によるドライバーの負担推計方法を提案する。次に希望走行速度決定モデルを希望走行速度分布へと拡張する。さらに、単純な交通流シミュレーションにより、ISAによるドライバー集団の負担の推計を試みる。

2. 方法

(1) 個々のドライバーの希望走行速度決定モデル

従来から、個々のドライバーは希望走行速度を有するとされてきたが、それがどのようにして決定されるのかの議論はあまりなされてこなかった。しかしその背景にはなんらかの行動原理があるはずである。本研究では、まず知覚総コスト最小化によって希望走行速度が決定されるとするモデルを構築する。

まず、ドライバー i がある速度で自由走行する際の単位距離あたりの知覚安全性コスト AC_i は道路幅員等の道路交通環境条件ベクトル $\mathbf{E}$ と走行速度 $\mathbf{v}$ 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（式(1)、図-1参照）。

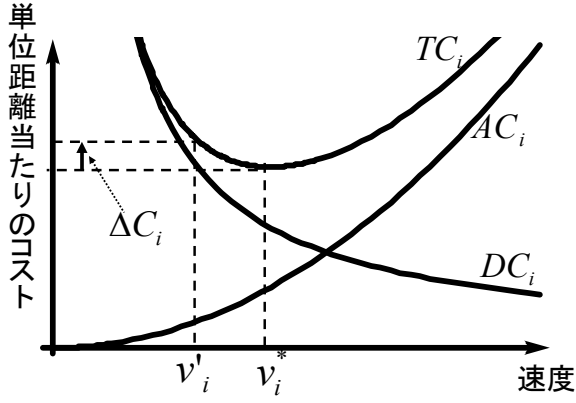


図-1 希望走行速度決定と速度制御による負担の概念

$$AC_i = AC_i(v, \mathbf{E}) \quad (1)$$

一方、単位距離あたりの知覚利便性コスト DC_i は、ドライバーの時間価値 w_i と走行速度 v 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（式(2)、図-1参照）。

$$DC_i = DC_i(v, w_i) \quad (2)$$

そして、ドライバー i は知覚安全性コスト AC_i と知覚利便性コスト DC_i の和である知覚総コスト TC_i が最小となる最適自由速度、すなわち希望走行速度 v_i^* を選択していると考え（式(3)、式(4)、図-1参照）。

$$TC_i(v, \mathbf{E}, w_i) = AC_i(v, \mathbf{E}) + DC_i(v, w_i) \quad (3)$$

$$v_i^* = \arg \min [AC_i(v, \mathbf{E}) + DC_i(v, w_i)] \quad (4)$$

ここで、ドライバー i は当該道路交通環境条件下において希望走行速度 v_i^* 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速度 v_i' に強制的に下げられた場合の単位距離当りの負担は式(5)の TC_i 増加量 ΔC_i によって表すことができる（図-1参照）。

$$\Delta C_i(v_i', \mathbf{E}, w_i) = TC_i(v_i', \mathbf{E}, w_i) - TC_i(v_i^*, \mathbf{E}, w_i) \quad (5)$$

(2) 希望走行速度決定モデルの特定化

上述の概念に基づき、本研究では希望走行速度決定モデルを式(6)のように特定化する。

$$TC_i = A_i \cdot v^\beta + \frac{w_i}{v}, \quad (A_i = A_i(\mathbf{E}, \mathbf{a}), \beta \geq 1) \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{a}$ （ベクトル）、 β はパラメータである。右辺第1項は AC_i を、第2項は DC_i を表している。 A_i は道路交通環境条件 $\mathbf{E}$ の関数であり、速度が1単位変化したときの知覚利便性コストの変化に対する知覚安全性コストの変化の重み規定する変数であると考えることがで

きる。 TC_i を最小化する希望走行速度 v_i^* は式(7)のように表される。

$$v_i^* = \left(\frac{w_i}{\beta \cdot A_i} \right)^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (7)$$

(3) 希望走行速度分布への拡張

知覚利便性に対する知覚安全性の重みは個人によって異なると考えられる。しかし全ての個人の観測はできないため、式(6)における A_i を確率変数（ $\tilde{A}_i$ で表す）と考えると、希望走行速度も確率変数となり、その分布が希望走行速度分布となる。その際、 $f_A(\tilde{A}_i | \mathbf{a}, \mathbf{E}, \zeta)$ は A_i の確率密度関数であり（ ζ は分散に関するパラメータ）、その期待値は道路交通環境条件 $\mathbf{E}$ によって規定されとする。ここで、式(7)を $g(A_i)$ とするとその逆関数は、

$$g^{-1}(v_i^*) = A_i = \left(\frac{w_i}{\beta \cdot v_i^*} \right)^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (8)$$

と表される。従って、変数変換により v_i^* の確率密度関数は、

$$f_{v^*}(v_i^* | \mathbf{a}, \mathbf{E}, \zeta) = f_A(g^{-1}(v_i^*)) \cdot \left| \frac{dg^{-1}(v_i^*)}{dv_i^*} \right| \quad (9)$$

と表すことができる。なお、 $\tilde{A}_i$ の分布形に対数正規分布を仮定すると有用である。その理由として、i) A_i が非負となること、ii) 式(7)の両辺の対数をとると、

$$\ln v_i^* = \frac{1}{\beta+1} [\ln w_i - \ln \tilde{A}_i - \ln \beta] \quad (10)$$

となり、結局 v_i^* が対数正規分布に従うということが挙げられる。さらに本稿では、 $\tilde{A}_i$ の期待値を式(11)に示す対数線形関数として特定化する。

$$\ln E(\tilde{A}_i) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^K \alpha_k \ln E_k \quad (11)$$

また、時間価値 w_i は車種や時間帯等によって異なると考えられるため、 w_i を式(12)に示す対数線形関数として特定化する。ただし、 W は基準となる時間価値、 X_l は時間価値に影響すると考えられる車種等の変数、 γ_l はパラメータである。

$$\ln w_i = W + \sum_{l=1}^L \gamma_l \ln X_l \quad (12)$$

以上で、実際の観測データを用いてパラメータを推定した上で、速度制御の有無別に交通流シミュレーションを行い、算出された知覚総コスト（単位距離当りの知覚総コストの積み上げ）の差をとることでISAによるドラ

イバー集団のコストの推計を行うことができる。

(4) 希望走行速度分布の推定方法

実際は追従走行中のドライバーの希望走行速度は観測できないため、本研究ではBotma et al.¹⁾による方法を用いて希望走行速度分布のパラメータを推定する。すなわち、観測データを検閲されたデータ (Censored Data) と考え、式(13)で表される対数尤度関数を最大化するパラメータを求める。ここで、 N は観測車両台数、 v_i は車両 i の観測走行速度、 δ_i は車両 i が自由走行状態であれば0、追従走行状態であれば1をとるダミー変数、 $F_{v^*}(\bullet)$ は v_i^* の累積分布関数である。また、希望走行速度の高い車両の方がより大きい車群に属する可能性が高いことを考慮するため、車両 i が属している車群の車群台数 S_{PLTi} (自由走行状態であれば $S_{PLTi}=1$ 台) によって重み付けしている。

$$LL = \sum_{i=1}^N \left[(1-\delta_i) \cdot \ln f_{v^*}(v_i) + S_{PLTi} \cdot \delta_i \cdot \ln(1 - F_{v^*}(v_i)) \right] \quad (13)$$

ここで、当該手法の妥当性を検証するため、単純な交通流シミュレーションを用いて、あらかじめ希望走行速度分布のパラメータを設定した上で仮想的な観測データを生成し、希望走行速度分布の推定を行った。対象は追い越し不可能な両側2車線道路で、交通流シミュレーションにおいては、塩見ら²⁾を参考に、「各車量は先行車両に追いつくまで希望走行速度を維持するが、車頭時間が閾値以下になった時点以降、その車頭時間を維持しつつ先行車両の走行速度と等しい速度で走行する」という仮定をおいた。希望走行速度分布を対数正規分布、追従車頭時間の閾値を4秒とし、表-1に示す条件の組み合わせの下で希望走行速度の期待値を推定した場合の、追従車割合と推定誤差率の関係を図-2に示す。車群サイズによる重み付け無の推定の場合に追従車割合が高くなるにつれて誤差が大きくなっている一方で、重み付け有りの推定の場合には追従車割合が0.8以下であれば誤差が十分小さいことが分かる。

3. データ概要

提案した希望走行速度決定モデルを現実のデータに適用するため、観測調査を行った。対象地点は、豊橋市内の両側2車線道路もしくはそれよりも規模の小さい道路19地点 (36方向) である。信号交差点の影響の無い単路部において、ビデオカメラを用いて各車両の速度と車頭時間、車種等を取得した。自由走行状態か追従走行状態かの判断に関しては種々の方法が考えられるが、本研究では車頭時間4秒以下の車両を追従走行状態にあると判

表-1 推定手法検証のためのシミュレーション条件

希望走行速度の設定期待値 (Km/h)	40、60、80、100-
分散に関するパラメータ ζ	0.05、0.10、0.15
発生車両台数 (台)	100、1000、10000
観測地点 (m) (車両発生地点からの距離)	0、1000、5000、 10000、100000
乱数 SEED 値	2種類

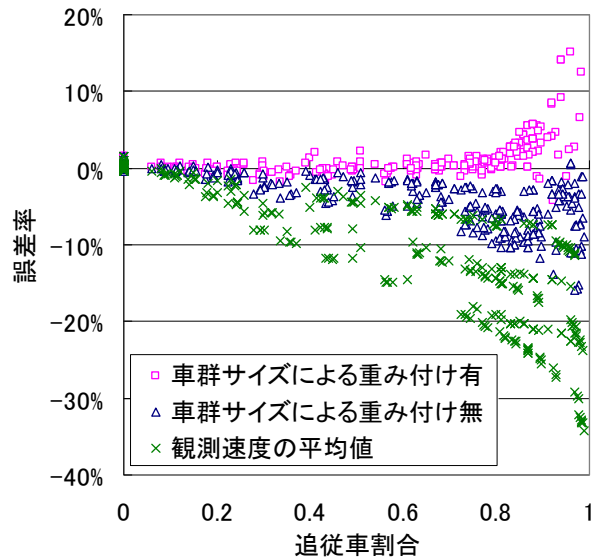


図-2 希望走行速度の推定誤差率

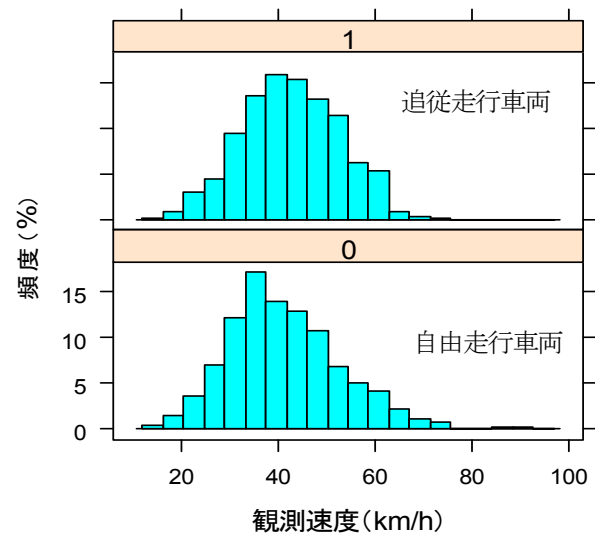


図-3 自由走行車両および追従走行車両の観測速度分布

断した。また、各地点 (各方向) における様々な道路交通環境条件も取得した。図-3に自由走行車両および追従走行車両の観測速度のヒストグラムを、表-2に本稿の分析で用いる主な道路交通環境条件をに示す。

4. 結果と考察

(1) 希望走行速度決定モデルの推定結果

観測調査により得られたデータを用いて、希望走行速度決定モデルのパラメータ推定を行った結果を表-3に示す。ここで、基準となる時間価値 W を2400円/時、 β を1に固定して推定している。また、対数線形関数であるため、ダミー変数は1もしくは2をとる変数としている。表-3の上8つの説明変数は式(11)に対応するため、 α_k が正であれば、対応する説明変数値の増加によりドライバーの知覚安全性コスト AC_i が増加し、その結果希望走行速度 v_i^* は減少する。一方、表-3の中段3つの説明変数は式(12)に対応するため、 γ_l が正であれば、対応する説明変数値の増加によりドライバーの知覚利便性コスト DC_i が増加し、その結果希望走行速度 v_i^* は増加する。表-3の再右列は、それぞれの変数値に対する希望走行速度 v_i^* の弾力性を表している。

まず、適合度指標 ρ^2 が0.533であるため、モデルの適合は比較的良好といえる。具体的に見ていくと、知覚安全性コストに関する説明変数、すなわち道路交通環境条件の内でも最も影響の大きいのは「全幅員」であり、幅員が広がる程ドライバーの知覚安全性コストは減少することがわかる。また、住区エリアおよび商業エリアの方が郊外に比べて知覚安全性コストが高いことが分かる。これは住区エリアや商業エリアでは、郊外に比べ一般に見通しが悪い、歩行者の飛び出し等が多い、路肩に電柱等の障害物ある等のためだと考えられる。有意とならなかった道路交通環境条件は「センターラインの有無」と「自転車（左）交通量」であった。

一方、知覚利便性コストに関しては、「通勤時間帯ダミー」のパラメータが有意で負値である。これは通勤時間帯のドライバーが比較的急ぐ傾向にあるために、時間価値が高くなっているためだと考えられる。また、「車種（軽）ダミー」および「車種（大型ダミー）」のパラメータが有意で負値であることから、普通車に比べ大型車や軽自動車のドライバーが時間価値が高いことが示唆される。しかし、大型車や軽自動車のドライバーの方が知覚安全性コストが高いためにこのような結果になったということも十分考えられるため、より詳細な調査が必要である。

(2) ISAによるドライバー集団の負担の推計

次に、推定された希望走行速度決定モデルと単純な交通流シミュレーションを用いて、ISAによる強制速度制御がドライバー集団に与える負担の推計を試みる。交通流シミュレーションについては、2章(4)節において希望走行速度分布の推定方法検証の際に用いた仮定を同様に用いることとした。対象とする道路交通環境条件は、比

表-2 主な道路交通環境条件

道路交通環境条件	平均値等
車道幅員 (m)	5.34
路肩幅員 (m)	0.81
全幅員 (車道+路肩) (m)	7.02
歩道 (左側) の有無	8 方向
センターラインの有無	22
歩行者 (左側) 交通量 (人/時)	5.33
自転車 (左側) 交通量 (台/時)	15.7
観測地点周辺での流入車台数 (台/時)	72.6
住区エリア	10 方向
商業エリア	14 方向
郊外エリア	12 方向

表-3 希望走行速度決定モデルの推定結果

説明変数	パラメータ		t値	v_i^* への影響
定数	α_0	13.63	5.43	-
全幅員 (m)	α_1	-1.52	-18.0	0.758
歩道 (左) ダミー	α_2	-0.224	-6.14	0.112
センターライン ダミー	α_3	-0.034	-0.73	0.012
住区エリアダミー	α_4	0.693	11.0	-0.346
商業エリアダミー	α_5	0.428	10.7	-0.214
歩行者 (左) 交通量 (人/時)	α_6	0.090	10.4	-0.045
自転車 (左) 交通量 (台/時)	α_7	-0.008	-0.92	0.004
流入入車 (台/時)	α_8	0.038	3.20	-0.019
車種 (軽) ダミー	γ_1	-0.094	-3.46	-0.047
車種 (大型) ダミー	γ_2	-0.182	-3.65	-0.091
通勤時間帯ダミー (7:00~10:00)	γ_3	0.193	5.78	0.096
分散に関する パラメータ	ζ	0.465	59.4	-
	β	1.0	-	-
	W	2400	-	-
サンプル数			2504	
調整済み ρ^2			0.553	

較のため、ビデオ観測を行った道路のうち、住区エリアの道路と郊外エリアの道路から1つずつ選んだ。対象とする道路交通環境条件等を表-4に示す。シミュレーションを行う区間は500mとし、車両の発生は、平均車頭時間が観測データに合うように一様分布で与える。また、推定された A_i の分布に従い、各車量にそれぞれ A_i の値を設定した。これにより、式(7)から車両ごとに希望走行速度が設定されるとともに、式(6)を用いて、ある走行速度における知覚総コストを算出することができる

(ただし、 $W=2400$ 円/時、 $\beta=1$ に固定)。

表-5、表-6に、地点A（住区）と地点B（郊外）それぞれにおいて、ISA無しの場合およびISAによりにより車両走行速度が様々な上限値に制御された場合に算出された知覚総コストとその増加両、増加率を示す。なお追従走行時は強制的に速度を抑制されていると考え、同様に式(6)で知覚総コストを算出した。また、発生車両台数は1000台として知覚総コストを算出し、地点別の交通量を用いてあらためて1時間当りの知覚総コストに換算している。さらに表の右側には、シミュレーション内での車両の平均速度と、ISAによる平均速度変化率を示している。

どちらの地点においても、速度上限値が大きくなるにつれ、知覚総コスト増加率は急激に大きくなっており、地点Aについてはより顕著である。平均速度変化率と比較すると、地点Aでは知覚総コスト増加率3.6%に対して平均速度が21.9%減少していることが分かる。一方、地点Bでは知覚総コスト増加率15%に対して平均速度は28.3%の減少に留まっている。地点Aにおいて上限速度を20km/h~30km/hの当りに設定することは、地点Bに比べると効率的であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、個々のドライバーの希望走行速度決定モデルを希望走行速度分布に拡張することで、強制速度制御によるドライバー集団の負担推計方法を提案した。さらに、道路交通環境条件の異なる複数地点における観測データを用いて、モデルのパラメータを推定した。その結果、本モデルが一定の適用性を有していることが確認できた。また、道路交通環境条件がドライバーの知覚安全性コストに与える影響のみならず、通勤時間帯に走行しているドライバーの知覚利便性コストがその他の時間帯に走行しているドライバーに比べ高いことなども分かった。

最後に、推定された希望走行速度決定モデルと単純なシミュレーションモデルを用いて、様々なレベルの最高速度制御によるドライバーの負担の推計を行った。その結果、住区エリアの道路では上限速度を20km/h~30km/hの当りに設定すると、比較的効率がよいという示唆を得ることができた。今後は走行実験等により、ISAによる負担推計結果の妥当性を検証していく必要がある。

表-4 シミュレーション対象道路の概要

道路交通環境条件	地点 A	地点 B
エリア	住区	郊外
全幅員 (m)	6.65	9.2
歩道 (左側)	無	有
センターライン	無	有
歩行者 (左側) (人/時)	36	1
自転車 (左側) (台/時)	42	12
流出入車台数 (台/時)	54	96
自動車交通量 (台/時)	77	494
平均車頭時間 (秒)	46.8	7.3
観測速度平均 (km/h)	31.3	53.5
A_i の期待値	1.929	0.517
希望走行速度の期待値 (km/h)	35.3	68.2

表-5 ISA による知覚総コスト増加率 (地点 A)

ISA 上限 速度	TC (円/1時間)	TC 増加量 (円/1時間)	増 加 率 (%)	平均 速度 (km/h)	平均 速度 変化 率(%)
無	5182	-	-	37.5	
30km/h	5368	186	3.6	29.3	-21.9
20km/h	6208	1026	19.8	19.9	-46.9
10km/h	10173	4991	96.3	10.0	-73.3

表-6 ISA による知覚総コスト増加率 (地点 B)

ISA 上限 速度	TC (円/1時間)	TC 増加量 (円/1時間)	増 加 率 (%)	平均 速度 (km/h)	平均 速度 変化 率(%)
無	17838	-	-	59.6	
60km/h	18069	231	1.3	55.8	-6.4
50km/h	18777	939	5.3	49.1	-12.0
40km/h	20507	2669	15.0	40.0	-28.3

参考文献

- 1) Botma H., P. Bovy,: Free Speed Distribution at Arterial Highways: Estimation Approaches, The Proceedings of 9th WCTR, 2001.
- 2) 塩見康博, 吉井稔雄, 北村隆一: 希望走行速度分布に基づく車群台数分布推定手法, 交通工学, Vol. 45, pp. 58-67, 2010.