

雪氷路面における追越行動に関する研究*

A Study on Overtaking Behavior on the Slippery Road*

内田 賢悦**, 岸 邦宏***, 佐藤 馨一****, 中岡 良司*****

By Ken-etsu UCHIDA, Kunihiro KISHI, Keiichi SATOH, Ryouji NAKAOKA

1. はじめに

道路構造令では、対向する2車線道路を走行する自動車に追越機会を与えるために、十分な見通しの確保された区間を設けることを規定している。すなわち、対向2車線道路の線形設計に当たっては追越視距を考慮しなければならない¹⁾。

2車線道路における追越行動に関する研究は、さまざまな観点から行われてきた。ROBERT HERMANら²⁾やCHIU LIUら³⁾は、追越も追越回避もできない状況を追越ジレンマと定義して、解析を行っている。また小林⁴⁾は、追越行動における自然環境(昼間と夜間など)の関係や、尾灯との関係を正常な交通環境での観測を通じ、検討を行っている。HARWOODら⁵⁾は、追越車線設置による交通運用・安全上の効果を検証している。しかしこれまで、雪氷路面に着目した研究はあまりなされてこなかった。

北海道のような積雪寒冷地では、冬期に雪氷路面が出現する。雪氷路面では、自動車の制動停止視距が乾燥路面に比べて大きくなる。そのため道路構造令では、雪氷路面におけるタイヤ路面摩擦係数の低下を考慮して制動停止視距を定めている。

雪氷路面では、自動車は乾燥路面に比べ減速だけではなく加速も困難になる。したがって、制動停止視距と同様に、雪氷路面のタイヤ路面摩擦係数の低下を考慮して追越視距を考える必要がある。さらに、2車線道路における追越は、ドライバーの対向車速度や視距に対する認知誤差に起因する追越回避行動も考慮して総合的に解析を行う必要がある。

本研究では、雪氷路面を考慮した追越行動モデルを構築した。すなわち、雪氷路面の影響として、タイヤ路面摩擦係数を計測し、これと自動車の走行性能曲線より加速度を算出した。これをもとに安全追越視距推計モデルを構築し、雪氷路面での追越行動の解析を行った。さらに追越回避行動モデルを構築することで、雪氷路面での

追越回避行動の解析を行った。

2. 北海道での道路・交通状況

北海道における都市間を連絡する郊外部の2車線と4車線以上の一般道道以上の道路は、総延長約14,800km(平地部約9,900km,山地部約4,900km)であり、そのうち14,400km(97.6%)が2車線道路となっている。

北海道では、冬期に正面衝突事故、追突事故が多く発生している。さらに、正面衝突事故の約6割が直線区間で起こっている。追越を原因とする交通事故は、すべての事故件数の約8%であるが、その致死率は約17%と高い。その他の事故原因による交通事故の致死率が7%であるから、2倍以上の危険度といえる⁶⁾。

北海道における路面状況別の交通事故発生件数は、雪氷路面で50.7%と最も多い。さらに冬期における車両相互事故の割合は約86%であり、夏期の割合が80%未満であることから、冬期には車両相互事故の割合が大きくなることがわかる⁷⁾。ここでの冬期とは、11月~3月までの期間である。

筆者らの経験によると、北海道の人々は夏期における自動車の運転をそのまま、冬期の雪氷路面でも行おうとする傾向があるといえる。たとえば、夏期に60km/hで走行していた道路では、冬期にも同じ速度で走行しようとする人が多い。このことは、1年のうちに4~5ヶ月が雪氷路面となる気候条件での運転に対する馴れが影響していることが考えられる。この馴れによる油断が交通事故の一因になっていると推察される。

3. 追越行動モデル

(1) 自動車による最大加速度の算定法

自動車の駆動力 T が走行抵抗 R を上回った場合、すなわち $T-R>0$ のとき、自動車は加速する。その時の最大加速度 $a_{MAX}[m/s^2]$ は、式(1)より求められる。

$$a_{MAX} = g \cos \theta (T - R) / (W + \Delta W) \quad [m/s^2] \quad (1)$$

ここで、 $W, \Delta W, g, \theta$ はそれぞれ、車両重量、車両回転部相当重量、重力加速度、登坂勾配である。一方 $T-R>W_R$ の場合は、タイヤスリップが生じるため、得られる加速度の上限 $a_{SUP}[m/s^2]$ は、式(2)より求められる。

*キーワード 交通制御, 交通管理, 交通安全

**正会員 博(工) 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻(札幌市北区北13条西8丁目, Tel 011-706-6213, Fax 011-706-6211)

***正会員 博(工) 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻(札幌市北区北13条西8丁目, Tel 011-706-6216, Fax 011-706-6216)

****フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻(札幌市北区北13条西8丁目, Tel 011-706-6209, Fax 011-706-6216)

*****正会員 工博 日本赤十字北海道看護大学

(北海道北見市曙町 664-1, Tel 0157-66-3381, Fax 0157-61-3125)

$$a_{SUP} = g \cos \theta \mu_t W_R / (W + \Delta W) \quad [\text{m/s}^2] \quad (2)$$

ここで、 μ_t 、 W_R はそれぞれタイヤ路面摩擦係数、駆動輪の分担荷重である。ここで座標は、道路面と平行にとっている。 W_R は自動車の駆動方式によって異なる(式(3))。

$$\begin{aligned} W_R/W &= 1.0 & 4WD \text{ 方式} \\ W_R/W &= 0.6 & FF \text{ 方式} \end{aligned} \quad (3)$$

登坂勾配が小さいときは、 $g \cos \theta \doteq g$ とできるため、式(1)および式(2)は、式(4)で表される。

$$\begin{aligned} a_{MAX} &= g (T - R) / (W + \Delta W) \quad [\text{m/s}^2] \\ a_{SUP} &= g \mu_t W_R / (W + \Delta W) \quad [\text{m/s}^2] \end{aligned} \quad (4)$$

本モデルでは JIS 規格を参考にし、 $\Delta W/W=0.08$ (乗用車) とした。したがって、タイヤ路面摩擦係数の影響を考慮した最大加速度 a_{max} は、式(5)で表される。

$$a_{max} = \min(a_{MAX}, a_{SUP}) \quad (5)$$

一方駆動力 T は、最大時出力を $H[\text{PS}]$ 、速度を $V[\text{km/h}]$ 、最大回転時速度を $V_m[\text{km/h}]$ 、および効率を $\eta(=0.95)$ とし、式(6)より求める¹⁾。これらの値は、自動車の走行性能曲線図より得られた値を用いることにする。

$$T = \frac{270}{V_m} H \eta \{1.1 - 1.1(\frac{V}{V_m} - 0.7)^2\} \quad [\text{kg}] \quad (6)$$

また走行抵抗 R は、空気抵抗、路面との転がり抵抗、重力抵抗が主要なものである。一般的に走行抵抗 R は、式(7)より求められる¹⁾。

$$R = W \sin \theta + W \cos \theta \mu_r + \lambda S V^2 \quad [\text{kg}] \quad (7)$$

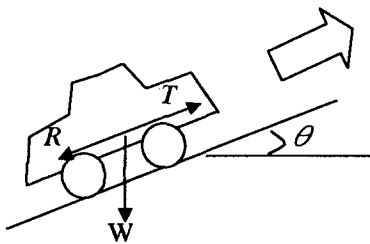


図1. 駆動力と走行抵抗

ここで、 μ_r は転がり抵抗係数、 λ は空気抵抗係数、 S は車両前面投影面積、 θ は登坂勾配 ($i\%$) である。

登坂勾配 θ が小さいとき、 $\sin \theta \doteq i/100$ 、 $\cos \theta \doteq 1.0$ となるため、式(7)は式(8)で表される。

$$R = (W/100) i + W \mu_r + \lambda S V^2 \quad (8)$$

最大加速度は、自動車の走行速度により、駆動力および走行抵抗が異なるため、走行速度の変化を考慮した平均値を用いることにする。

(2) 追越行動のモデル化

追越視距を推計するにあたり、以下に示す5つの仮定を設けた。

- ・ 2 車線道路において追越車が被追越車と等しい速度で追従走行し、そこから追越行動を開始する。
- ・ 追越する際は追越速度まで加速する。
- ・ 追越車と被追越車の車長を導入する。
- ・ ドライバーの反応遅れを導入する。
- ・ 安全車両間隔を導入する。

本モデルでの安全追越視距 ($PSD[\text{m}]$) は、以下に示す4つの距離を合計したものである (式(9))。

$$PSD = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \quad (9)$$

またこれらの距離は、車長を考慮するため自動車の先端部または後端部を基準として考える必要がある。

d_1 : 追越車が追越可能と判断して対向車線に進出し、加速しながら対向車線を走行する距離；

被追越車の速度を $V_0[\text{km/h}]$ 、平均加速度を $a[\text{m/s}^2]$ 、反応遅れ時間を $\varepsilon_1[\text{s}]$ および加速時間を $t_1[\text{s}]$ とし、式(10)より求める。

$$d_1 = (1/3.6) V_0 (t_1 + \varepsilon_1) + (1/2) a t_1^2 \quad (10)$$

d_2 : 追越車が対向車線において追越速度で定速走行し、被追越車との安全な車両間隔を保ち、元の車線に戻るまでに走行する距離；

追越速度を $V[\text{km/h}]$ 、定速走行時間を $t_2[\text{s}]$ とし、式(11)より求める。

$$d_2 = (1/3.6) V t_2 \quad (11)$$

d_3 : 追越完了時での追越車と対向車との車間距離；
道路構造令での実測データとする (表1)。

表1. 安全距離

追越車の速度(km/h)	80	60	40
被追越車の速度(km/h)	65	45	30
車間距離(m)	60	40	25

d_4 : 追越車が追越を完了するまでに対向車が走行する距離；

追越車が追越を始めてから、完了するまでに要する時間が $t_1 + t_2 + \varepsilon_1 [\text{s}]$ より、式(12)より求める。

$$d_4 = (1/3.6) V (t_1 + t_2 + \varepsilon_1) \quad (12)$$

さらに、 $t_1 + \varepsilon_1 [\text{s}]$ の間に被追越車が走行する距離 d_a' (式(13)) と $t_1 + t_2 + \varepsilon_1 [\text{s}]$ の間に被追越車が走行する距離 d_a (式(14)) を考慮し、次に示す2つの場合で考える。

$$d_a' = (1/3.6) V_0 (t_1 + \varepsilon_1) \quad (13)$$

$$d_a = (1/3.6) V_0 (t_1 + t_2 + \varepsilon_1) \quad (14)$$

I) $2L_1 + d_a' \leq d_1$ の場合 ($L_1 \leq L_2$)

追越速度で定速走行しなくても、安全な車両間隔 (L_1) を保てる ($L_1 \leq L_2$) 場合である (図2)。すなわち、追越車が追越速度まで加速した時点で、被追越車との安全な車間距離を確保できるため、 $d_2=0$ となる (式(15))。

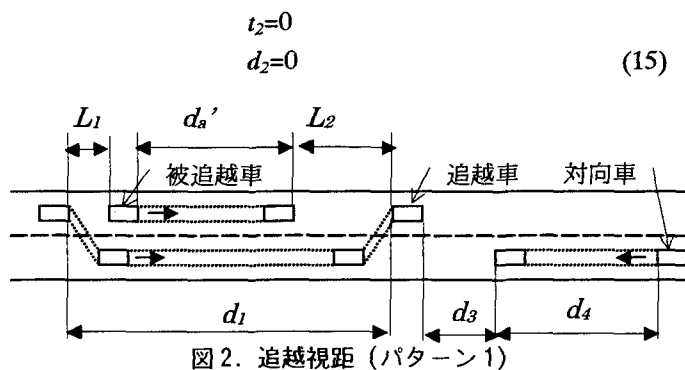


図2. 追越視距 (パターン1)

ここで L_1 は、自動車は追従走行している状態において、先行車が急停止しても安全であるための車両間隔である。 L_2 は、追越終了後の被追越車との車両間隔であり、基本的には L_1 と同じ値をとるが、ここで考えているのは、加速走行終了後に L_1 以上の値をとる場合である。 L_1 は運転者の反応時間を1秒、停止時の余裕長を0mとして、式(16)より求める¹⁾。ここで、 S_m は追従時の車頭間隔[m]、 l は停止時の余裕長[m]、 v は走行速度[km/h]、および μ_t はタイヤ路面摩擦係数である。雪氷路面では L_1 の上限を70mとする。したがって L_1 は、走行速度の増加と路面摩擦係数の低下に伴い増加するが、雪氷路面では70mよりも大きな値はとらない。70mというのは、筆者らが日頃の運転経験から議論して決定したものであるが、厳密には計測を行う必要がある。

$$S_m = l + \frac{v}{3.6} + \frac{v^2}{2g\mu_t \cdot 3.6^2}$$

$$L_1 = S_m \quad \text{乾燥路面}$$

$$L_1 = \min(S_m, 70) \quad \text{雪氷路面} \quad (16)$$

II) $2L_1 + d_a < d_1$ の場合 ($L_1 = L_2$)

追越速度で定速走行し、安全な車両間隔を保ち走行車線へ戻る場合である(図3)。この場合、追越速度まで加速した後に、定速走行を必要とするため、 $d_2 > 0$ となる(式(17))。

$$t_2 = 3.6(d_a + L_1 + L_2 - d_1)/(V - V_0)$$

$$d_2 = (1/3.6)Vt_2 \quad (17)$$

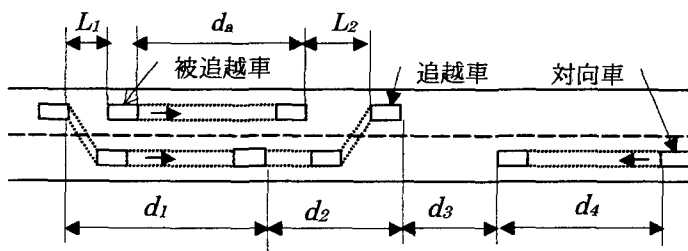


図3. 追越視距 (パターン2)

一方、追越車と被追越車の車長を考慮した場合は、それぞれの車長を l_1 [m]、 l_2 [m] とし、自動車の先端部を基準として考える。すなわち、追越前と追越完了時の両車両

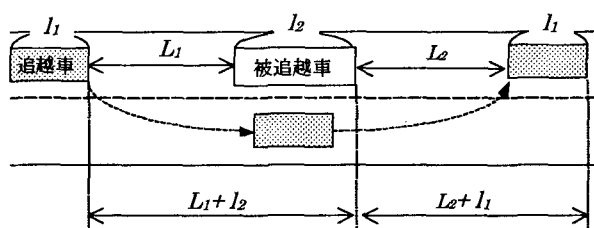


図4. 車長を考慮したときの車両間隔

先端部間の相対距離をそれぞれ L_1^* 、 L_2^* とすると、式(18)で表される(図4)。

$$L_1^* = L_1 + l_2$$

$$L_2^* = L_2 + l_1 \quad (18)$$

したがって、 L_1 、 L_2 は追越車および被追越車の車長を考えない場合の車両間隔であるが、車長を考えた場合は、それぞれ L_1^* 、 L_2^* として計算すればよい。

(3) 追越行動モデルの特徴

追越行動モデルの特徴を以下に示す。

- 1) 追越車が加速しながら対向車線に移行するとして追越視距を算定していること。そのため、追越完了までに、定速走行が必要な場合と、そうでない場合とを区別した追越視距の算定が可能となる。道路構造令による追越モデルでは、追越車が走行車線で追越速度まで加速してから、対向車線に移行すると仮定している。自動車が追越禁止区間を走行し、途中で追越区間になったとき、走行車線で十分に加速可能な車間距離を確保していることはまれであり、この仮定は現実的ではない。実際に追越を行うときは、加速しながら対向車線に移行するのが通常である。
- 2) 雪氷路面における自動車の加速度を算定していること。雪氷路面では、タイヤ路面摩擦係数が著しく低下し、乾燥路面での加速性能は発揮できない。よって、雪氷路面での自動車の加速度を算定した。
- 3) d_4 に追越開始から終了までの全時間($t_1 + t_2 + \varepsilon_1$)が考慮されていること。道路構造令では实际的でないという理由で、 d_4 を $(2/3)d_2$ と仮定している。特に雪氷路面では、自動車の操舵性および制動性の低下があるため、 d_4 は追越車が追越を開始してから、完了するまでの全時間で算定した。
- 4) 追越車の速度、路面状態による適切な車両間隔が導入されていること。そのため、路面状態、走行速度の違いによって車両間隔が異なるという、現実の交通状況を表現可能となる。
- 5) ドライバーの反応時間を考慮していること。したがって、追越行動においてドライバーの反応遅れによる影響が表現可能となる。
- 6) 自動車の車長が考慮されていること。したがって、普通車と大型車を追越する場合等の影響を定量的に表現することが可能となる。

4. 追越回避行動モデル

(1) 自動車による最大減速度の算定法

自動車のブレーキ性能は一般に、車体重量、勾配、路面状態、フロントタイヤとリアタイヤにおける制動力配分比率等に依存する^{8), 9)}。本研究では、自動車の最大減速度($d_{max}[\text{m/s}^2]$)が自動車の車体重量、路面状態(タイヤ路面摩擦係数)および登坂勾配に依存すると仮定して、式(19)より求めることにする。

$$d_{max} = (g\mu_r W \cos \theta + W \sin \theta) / (W + \Delta W) \\ \doteq (g\mu_r W + W i / 100) / (W + \Delta W) \quad [\text{m/s}^2] \quad (19)$$

(2) 追越回避行動のモデル化

3章で示した追越行動モデルでは、追越車のドライバーが認知する追越視距や対向車の速度に誤差があった場合、安全に追越行動を終了することはできない場合がある。ここでは、ドライバーの追越視距と対向車速度に認知誤差があることを仮定し、追越回避行動のモデル化を行うことにする。

追越回避行動のモデル化に当たり、以下に示す5つの仮定を設けた。

- ・追越車のドライバーが認知する追越視距と対向車の速度に誤差がある。この場合、ドライバーが認知する追越視距は、実際に必要な追越視距より短く、対向車の速度は、実際より速いとする。
- ・自動車の車長を導入する。
- ・ドライバーの反応遅れを導入する。
- ・追越車の最低速度を導入する。
- ・追越回避行動の終了時は、被追越車との安全距離($L_3[\text{m}]$)を保って元の車線に戻る。

第1の仮定で示した追越視距と対向車速度に対する誤差の設定は、どちらかの誤差が生じると追越回避行動をとる必要性を示している。本研究では、両方の誤差が生じるものとして分析することにする。

追越行動を開始して $t_a[\text{s}]$ 後に回避行動を開始することを考える。このとき、反応時間を $\varepsilon_2[\text{s}]$ 、 $(t_a + \varepsilon_2)[\text{s}]$ 後の追越車と被追越車の先端部間の相対距離を $x_a[\text{m}]$ とし、さらに被追越車が追越車よりも前にあるときの符号をプラスとする。相対距離 x_a と、そのときの追越車の速度 $V_a[\text{km/h}]$ は、追越車が加速走行をしている場合(図5)と、定速走行をしている場合(図6)とに分けて、それぞれ式(20)、式(21)で表される。

$$\text{when } \varepsilon_1 < t_a + \varepsilon_2 \leq \varepsilon_1 + t_1 \\ x_a = L_1 + L_2 - 0.5a(t_a - \varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2 \\ V_a = V_0 + 3.6a(t_a - \varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (20)$$

$$\text{when } t_a + \varepsilon_2 > \varepsilon_1 + t_1 \\ x_a = L_1 + L_2 - [0.5at_1^2 + \{(V - V_0)/3.6\}(t_a - \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - t_1)] \\ V_a = V \quad (21)$$

すなわち、追越行動を開始したとき($t_a = 0$)は、 $x_a = L_1 + L_2$

となる。反応時間が $\varepsilon_2[\text{s}]$ なので、 $(t_a + \varepsilon_2)[\text{s}]$ 後に減速して、被追越車との車間距離 $L_3[\text{m}]$ を保ちながら元の車線に戻ることになる。また、追越車の減速については、最低速度(V_{min})を20km/hとして設定することにする。すなわち、追越車は減速しても停止することはない。追越回避行動を考えると、追越車が減速をして低速度走行、または停止することは後続車への影響を考慮しても危険である。そこで、本研究では最低速度を20km/hと設定したが、この値にはさらなる検討が必要である。

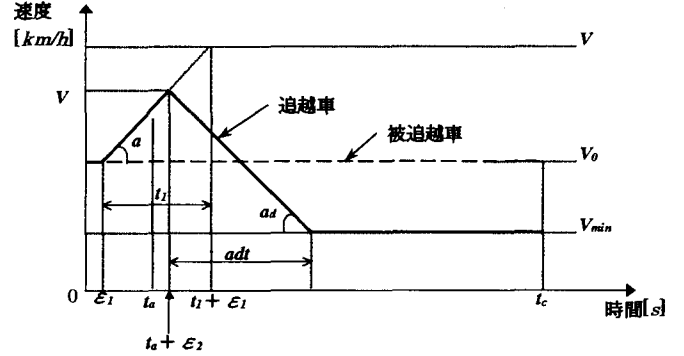


図5. 追越車が加速走行中に回避行動をとる時の速度と時間の関係

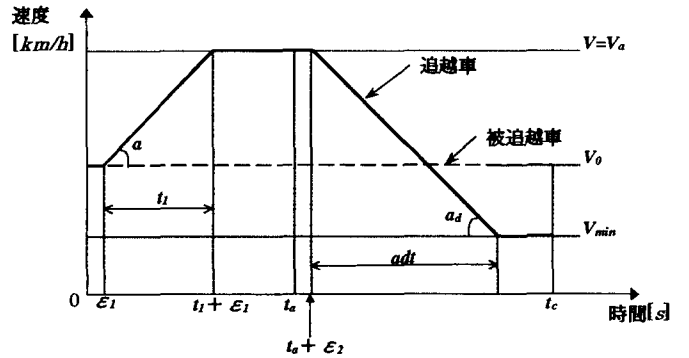


図6. 追越車が定速走行中に回避行動をとる時の速度と時間の関係

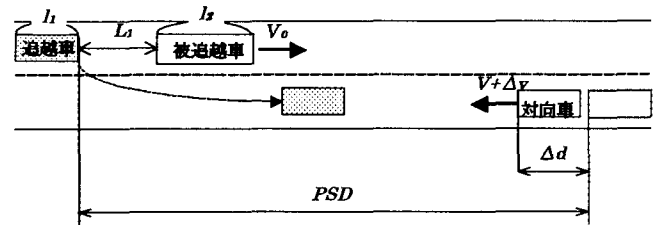


図7. 対向車と被追越車との関係

一方、追越行動を開始してから対向車と被追越車の先端部がすれ違うまでの時間(t_c)は、追越視距と対向車速度の誤差をそれぞれ Δd 、 Δv とすると、式(22)で表される(図7)。

$$t_c = (PSD - \Delta d - L_1 - L_2) / \{(V_0 + V + \Delta v) / 3.6\} \quad (22)$$

追越回避行動は $t_c - (t_a + \varepsilon_2)$ の時間内、すなわち、追越行動を開始してから対向車と被追越車の先端部がすれ違うまでに終了しなければならないと仮定する。

一方、追越車の減速度を $a_d[m/s^2]$ とし、最低速度までの減速時間 $adt[s]$ とすると、 adt は式(23)で表される。

$$adt=(V_a-V_{min})/(3.6a_d) \quad (23)$$

また、 $t_c-(t_a+\varepsilon_2)$ の間に追越車と被追越車が走行する距離をそれぞれ、 d_f, d_s とする。このとき、 d_f, d_s は追越車が最低速度まで減速する場合と、そうでない場合とに分けて、それぞれ式(24)、式(25)で表される。

$$\begin{aligned} \text{when } t_c-(t_a+\varepsilon_2)>adt \\ d_f &= \{(V_a-3.6a_d \cdot adt)/3.6\}(t_c-t_a-\varepsilon_2)+0.5a_d \cdot adt^2 \\ d_s &= (V_0/3.6)(t_c-t_a-\varepsilon_2) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{when } t_c-(t_a+\varepsilon_2)\leq adt \\ d_f &= \{(V_a-3.6a_d(t_c-t_a-\varepsilon_2))/3.6\}(t_c-t_a-\varepsilon_2) \\ &\quad +0.5a_d(t_c-t_a-\varepsilon_2)^2 \\ d_s &= (V_0/3.6)(t_c-t_a-\varepsilon_2) \end{aligned} \quad (25)$$

このとき、追越回避行動を安全に終了するための条件は、被追越車の車長を考慮すると式(26)で表される (図8)。

$$x_a+(d_s-d_f)-(L_3+l_2)\geq 0 \quad (26)$$

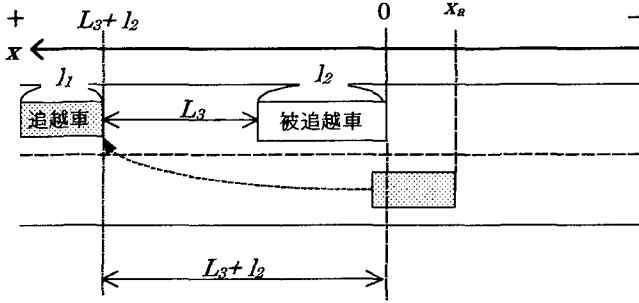


図8. 追越回避行動終了時の相対位置

ここで L_3 は、最大余裕長を 70[m]、さらに l_1 も考慮して式(27)で表すことにする。

$$L_3=\min(L_1, 70) \quad (27)$$

本研究では、式(26)を満たす最大の時間を t_a^{max} (式(26)が等号となる場合) とし、 $t_a^{max}+\varepsilon_2$ までに追越車が走行する距離を追越回避安全距離 (D_a) と定義し、追越視距に対する比率、すなわち、追越回避安全比率 D_R (式(28))に着目して解析を行うことにする。

$$D_R=D_a/PSD \quad (28)$$

ここで、 D_a は追越車が時間 t_a^{max} までに走行した時間であり、式(29)で表される。

$$\begin{aligned} \text{when } t_a^{max}+\varepsilon_2\leq t_1+\varepsilon_1 \\ D_a &= (V_0/3.6)(t_a^{max}+\varepsilon_2)+0.5a(t_a^{max}-\varepsilon_1+\varepsilon_2)^2 \\ \text{when } t_a^{max}+\varepsilon_2>t_1+\varepsilon_1 \\ D_a &= (V_0/3.6)(t_1+\varepsilon_1)+0.5a(t_1-\varepsilon_1)^2 \\ &\quad +(V_0/3.6)(t_a^{max}+\varepsilon_2-t_1-\varepsilon_1) \end{aligned} \quad (29)$$

追越回避安全比率は、その値が小さくなるほど追越回

避行動が困難になることを示している。たとえば、この値が 0% のときは、追越行動を開始すると安全に終了も回避もできないことを意味する。また 100% のときは、現実にはあり得ないが、追越を安全に終了してからも、追越前における被追越車との相対位置に安全に戻ることができることを意味する。

(3) 追越回避行動モデルの特徴

追越回避行動モデルの特徴を以下に示す。

- 1) ドライバーの認知誤差による追越回避行動モデルであること。そのため、認知誤差による追越回避行動の解析が可能である。
- 2) 雪氷路面における自動車の減速度を算定していること。
- 3) 追越車の速度、路面状態による適切な車両間隔が導入されていること。
- 4) ドライバーの反応時間を考慮していること。
- 5) 自動車の車長が考慮されていること。

5. 雪氷路面でのタイヤ路面摩擦係数

自動車の加速度を算定するに当たり、タイヤ路面摩擦係数を決定する必要がある。北海道大学交通システム工学講座では、北大式滑り抵抗測定車を用いてさまざまな路面の滑り抵抗値を過去 20 年にわたり調査してきた。これらの測定値は、データベース (SKIDS: SKId resistance Database System) 化されている。SKIDS に記録されている全測定点数は約 10,000 であり、測定条件も広範囲にわたっている。なお、計測に用いたタイヤは、市販のスタットレスタイヤである。

表2に SKIDS による各路面状態におけるスキッドナンバーを示す。ここで示す値は、凍結防止剤が無散布のときのスキッドナンバー測定値である。

表2. 路面別、気温別の滑り抵抗値の平均値と標準偏差

路面の分類	気温の分類			
	5℃～0℃	0℃～-5℃	-5℃～-10℃	-10℃～-15℃
圧雪 平均値	36.1	31.5	30.1	33.3
標準偏差	12.4	11.5	11.8	14.4
データ数	22	969	1164	777
アイス 平均値		24.8	23.8	24.4
バーン 標準偏差		7.6	7.9	7.6
データ数		190	168	28
乾燥 平均値	64.2	69.0	68.7	70.1
標準偏差	15.3	7.8	8.8	4.8
データ数	6	90	93	126

湿潤路面では、速度によりタイヤ路面摩擦係数が変化することがわかっている¹⁰⁾。しかし、一般に乾燥路面や積雪路面においては、速度によるタイヤ路面摩擦係数の変化は小さい。そこで本研究では、乾燥路面と雪氷路面を対象とするため、速度によるタイヤ路面摩擦係数の変化はなく、一定と考えることにする。

表 2 から、路面状態を乾燥、圧雪、アイスバーンに分類し、タイヤ路面摩擦係数を定めた (表 3)．アイスバーン路面では、スキッドナンバーが 20 を下回る値も多いが、それらは交差点の停止線付近に集中しているため、本研究の対象とする追越行動ではそれほどの影響はないと考えられる．そのため、アイスバーン路面のタイヤ摩擦係数は 0.2 とした．これらの路面摩擦係数を用いて自動車の加速度および減速度を求めることにする．

表 3. タイヤ路面摩擦係数

路面状態	乾 燥	圧 雪	アイスバーン
タイヤ路面摩擦係数	0.7	0.3	0.2

6. 自動車の加速度，減速度の算定

自動車の加速度，減速度を算定するに当たり，モデル車としてホンダのシビックフェリオ (E-EK3 1493cc, FF 駆動式) をとりあげた．走行抵抗の算出に当たっては，表 4 に示す値¹¹⁾を用いた．また，勾配の影響は登坂勾配のみを考えることにし，下り勾配では追越禁止規制となる場合が多いため，考えないことにする．

表 4. 走行抵抗算出に用いた値

車体重量	転がり抵抗係数	空気抵抗係数	車体前面面積
1.235t	0.013	0.0017	1.97m ²

表 5 に式(5)より求めた自動車の最大加速度を示す．

表 5. 最大加速度[m/s²]

登坂勾配	路 面	追越車の速度変化(km/h)		
		30－40	45－60	65－80
0%	乾 燥	1.730	1.889	1.135
	圧 雪	1.342	1.342	1.135
	アイスバーン	0.895	0.895	0.895
3%	乾 燥	1.462	1.622	0.867
	圧 雪	1.342	1.342	0.867
	アイスバーン	0.895	0.895	0.867
6%	乾 燥	1.195	1.354	0.600
	圧 雪	1.195	1.328	0.600
	アイスバーン	0.895	0.895	0.600

表 6 に式(19)より求めた、自動車の最大減速度を示す．

表 6. 最大減速度[m/s²]

登坂勾配	乾燥路面	圧雪路面	アイスバーン
0%	6.24	2.67	1.78
3%	6.26	2.70	1.81
6%	6.29	2.73	1.84

CHIU LIU³⁾らは、乾燥路面において速度が 0～80[km/h]での最大減速度[m/s²]および最大加速度[m/s²]を AASHTO のデータを用いて、速度[km/h]を説明変数とした指数関数による回帰式を示している．加速度および減速度の回帰式をそれぞれ式(30)、式(31)に示す．なおこれらの式で

は、登坂勾配は考慮されていない．

$$a=6.87exp(-0.0013v) \quad [m/s^2] \tag{30}$$

$$d=4.30exp(-0.0014v) \quad [m/s^2] \tag{31}$$

ここで、 a 、 b 、 v はそれぞれ、最大加速度、最大減速度、速度である．最大減速度の回帰式は、重相関係数が 0.94 と大きくなっている．同式による最大減速度は、速度によって異なるが、6.2～6.9m/s²である．したがって本研究で求めた値はおおむね妥当であると考えられるため、この値を最大減速度とする．

また最大加速度は、同回帰式によると 3.8～4.3m/s²であるため、本研究で求めた値の約 2 倍の値となっている．しかし、最大加速度は自動車の性能に大きく依存するため、本研究で求めた値を最大加速度とする．

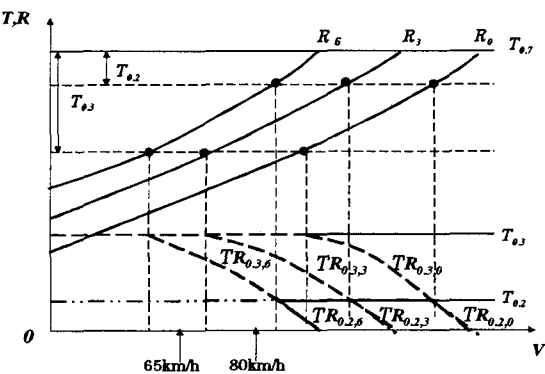


図 9. 実際に働く駆動力の関係

表 5 より乾燥路面と圧雪路面における加速度は、登坂勾配の影響を受けるが、アイスバーン路面では、それほどの影響を受けていないことがわかる．この理由を示したのが図 9 である．図 9 における縦軸は自動車の駆動力 T および走行抵抗 R であり、横軸は自動車の走行速度 V である． T_x は路面摩擦係数が x のときのタイヤがスリップせずに実際に発揮できる (タイヤ路面摩擦係数で決定される) 自動車駆動力の最大値である．曲線 R_y は、勾配が $y\%$ のときの走行抵抗である．また、 TR_{xy} は路面摩擦係数が x 、登坂勾配 $y\%$ のときの走行抵抗を考慮した実際に発揮できる自動車の駆動力である．ここでは簡単のため $T_{0.7}$ を自動車の駆動力と考えることにする．

このとき乾燥路面を基準として考えると、駆動力から走行抵抗を差し引いた値が実際に発揮できる自動車の駆動力となる．しかし、圧雪路面とアイスバーン路面ではその最大値 ($T_{0.3}$ および $T_{0.2}$) があるため、駆動力から走行抵抗を差し引いた値が最大値を上回ってもタイヤスリップが生じることとなり、実際の駆動力は制限される．

一方、走行速度が速くなり走行抵抗が大きくなるにつれて、実際の発揮できる駆動力も下がり始める．この駆動力が下がり始める速度が圧雪路面よりアイスバーン路面の方が速いため、アイスバーン路面での加速度は、登坂勾配の影響をそれほど受けない．逆に、乾燥路面、圧雪路面における加速度は、登坂勾配の影響を受け、その

度合いは乾燥路面の方が大きい、一般に雪氷路面での加速度は、走行速度が低速のときは、路面摩擦係数で決定され、走行速度が高速になると登坂勾配の影響も受けることになる。

追越行動において最大加速度、追越回避行動において最大減速度を適用することを考えると、最大減速度の適用に注意を払う必要がある。最大減速度は主に、路面状態によるタイヤ路面摩擦係数を最大限に活用して得られる値である。そのため、最大減速度を追越回避行動モデルに適用すると、スリップによる交通事故の可能性が大きいと考えられる。一方、最大加速度を考えるとスリップしても直接交通事故につながる可能性は小さい。そのため、本研究では追越行動における加速度には、最大加速度を適用し、追越回避行動モデルにおける減速度には、最大減速度の60%に相当する値を適用して解析を行うことにする(表7)。60%にした根拠は乾燥路面を基準に考えると、たとえばこの値を70%にすると、減速度は約(1/2)g(gは重力加速度)となり、運転中に相当な衝撃があると考えられ、現実的ではないと判断した。そのため、これよりも10%小さい60%という値を選択した。

表 7. 追越回避行動における減速度[m/s²]

登坂勾配	乾燥路面	圧雪路面	アイスバーン
0%	3.74	1.60	1.07
3%	3.76	1.62	1.09
6%	3.77	1.64	1.10

7. 解析結果

(1)追越・追越回避行動の解析

解析に用いた設定値を表8に示す。

表 8. 計算の設定値

反応遅れ: $\varepsilon_p, \varepsilon_d$ [s]	車 長[m]		認知誤差	
	普通車	大型車	視距	対向車速度
0.2	4.0	10.0	0.1PSD	0.1V

ここで、車長を普通車が4.0m、大型車が10.0mとしたのは、それぞれシビックフェリオと大型トラックを想定して設定したためである。追越行動や追越回避行動をとっているときは、緊張度が高い状態にあると考えられる。そこで本研究では、反応遅れを視覚反応時間と対応させ、その値の最小値としての0.2secを設定した¹²⁾。認知誤差については、個人差、走行速度、対向車の色等のさまざまな要因の影響が複雑に関わってくるため、一意的な値

表 9. 登坂勾配が0%のときの追越視距(被追越車が普通車)

	登坂勾配0%								
	乾燥路面($\mu=0.7$)			圧雪路面($\mu=0.3$)			アイスバーン($\mu=0.2$)		
追越車および対向車の速度 (km/h)	80	60	40	80	60	40	80	60	40
被追越車の速度 (km/h)	65	45	30	65	45	30	65	45	30
平均加速度 (m/s ²)	1.135	1.889	1.73	1.135	1.342	1.342	0.895	0.895	0.895
加速時間 + 反応時間: $t_1 + \varepsilon_1$ (s)	3.9	2.4	1.8	3.9	3.3	2.3	4.9	4.9	3.3
速度一定走行時間: t_2 (s)	20.2	12.3	11.7	33.7	19.1	16.4	33.2	24.7	20.1
対向車線走行時間: $t_1 + t_2 + \varepsilon_1$ (s)	24.0	14.7	13.5	37.6	22.4	18.6	38.1	29.6	23.4
追越前の車両間隔: L_1^* (m)	46	28	17	74	43	24	74	56	30
追越車加速走行距離: d_1 (m)	78	35	17	78	48	22	97	70	32
追越車速度一定走行距離: d_2 (m)	448	205	130	749	319	182	738	412	223
追越後の車両間隔: L_2^* (m)	46	28	17	74	43	24	74	56	30
対向車車間距離: d_3 (m)	60	40	25	60	40	25	60	40	25
対向車走行距離: d_4 (m)	534	245	150	835	374	207	846	493	260
安全追越距離: $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ (m)	1119	524	323	1721	780	435	1740	1015	540

表 10. 登坂勾配が0%のときの追越視距(被追越車が大型車)

	登坂勾配0%								
	乾燥路面($\mu=0.7$)			圧雪路面($\mu=0.3$)			アイスバーン($\mu=0.2$)		
追越車および対向車の速度 (km/h)	80	60	40	80	60	40	80	60	40
被追越車の速度 (km/h)	65	45	30	65	45	30	65	45	30
平均加速度 (m/s ²)	1.135	1.889	1.73	1.135	1.342	1.342	0.895	0.895	0.895
加速時間 + 反応時間: $t_1 + \varepsilon_1$ (s)	3.9	2.4	1.8	3.9	3.3	2.3	4.9	4.9	3.3
速度一定走行時間: t_2 (s)	21.6	13.7	13.9	35.1	20.6	18.5	34.6	26.2	22.2
対向車線走行時間: $t_1 + t_2 + \varepsilon_1$ (s)	25.5	16.1	15.7	39.0	23.9	20.8	39.5	31.0	25.5
追越前の車両間隔: L_1^* (m)	52	34	23	80	49	30	80	62	36
追越車加速走行距離: d_1 (m)	78	35	17	78	48	22	97	70	32
追越車速度一定走行距離: d_2 (m)	480	229	154	781	343	206	770	436	247
追越後の車両間隔: L_2^* (m)	46	26	17	74	43	24	74	56	30
対向車車間距離: d_3 (m)	60	40	25	60	40	25	60	40	25
対向車走行距離: d_4 (m)	566	269	174	867	398	231	878	517	284
安全追越距離: $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ (m)	1183	572	371	1785	828	483	1804	1063	588

表 11. 追越視距と追越回避安全比率(被追越車が普通車)

登坂勾配	路面	追越車の速度変化(km/h)		
		30-40	45-60	65-80
0%	乾 燥	323	524	1119
		21.0%	24.3%	29.4%
		435	780	1721
	圧 雪	19.1%	21.5%	27.0%
		540	1016	1741
		18.3%	20.4%	23.8%
3%	乾 燥	326	530	1142
		21.2%	24.4%	29.7%
		435	780	1744
	圧 雪	19.1%	21.6%	27.2%
		540	1016	1744
		18.4%	20.6%	24.0%
6%	乾 燥	330	537	1185
		21.4%	24.6%	30.0%
		438	781	1787
	圧 雪	19.3%	21.7%	27.6%
		540	1016	1787
		18.4%	20.7%	24.5%

表 12. 追越視距と追越回避安全比率(被追越車が大型車)

登坂勾配	路面	追越車の速度変化(km/h)		
		30-40	45-60	65-80
0%	乾 燥	371	572	1183
		21.0%	24.4%	29.6%
		483	828	1785
	圧 雪	19.3%	21.8%	27.2%
		588	1064	1805
		18.5%	20.7%	24.1%
3%	乾 燥	374	578	1206
		21.2%	24.6%	29.8%
		483	828	1808
	圧 雪	19.3%	21.8%	27.4%
		588	1064	1808
		18.6%	20.9%	24.3%
6%	乾 燥	378	585	1249
		21.3%	24.7%	30.1%
		486	829	1851
	圧 雪	19.4%	21.9%	27.7%
		588	1064	1851
		18.6%	20.9%	24.7%

を設定するのは困難である．そこで本研究では，追越視距と対向車速度については，それぞれ10%の誤差があるものと仮定して分析を行うことにする．

表 9，表 10 は，登坂勾配が 0%のときの追越視距を示しており，それぞれ被追越車が普通車と大型車の場合である．

表 11，表 12 にそれぞれ被追越車が普通車，大型車の場合における，登坂勾配の変化も考慮したときの追越視距[m]と追越回避安全比率[%]を示す．表の上段が追越視距，下段が追越回避安全比率を示している．

(a)道路構造令との比較

道路構造令による全追越視距は，追越車の速度変化が 30～40 km/h，45～60km/h，65～80 km/h の場合でそれぞれ，200m，350m，550m となっている．本モデルにおいては，被追越車が普通車で路面状態が乾燥の場合でそれぞれ，323m，524m，1119m となっている（表 11）．このことより，道路構造令による全追越視距は過小評価されていることがわかる．この主な原因は，3 章(3)で示したように，追越車の加速走行はないものとし，さらに d_4 の値を実際よりも小さく計算していることであるが，その他にも車長や反応遅れが考慮されていない点が挙げられる．

(b)被追越車における車長の影響

表 13 に被追越車が大型車，普通車のときにおける追越視距の差[m]と追越回避安全比率の差[%]（大型車の値から普通車の値を引いたもの）を示す．表の上段が追越視距の差，下段が追越回避安全比率の差を示している．表 13 に示した追越視距の差より，車長の違いは追越視距には大きく影響することがわかる．すなわち，追越車の速度変化が 30～40km/h および 45～60km/h の場合は，48m の差であり，また速度変化が 65～80 km/h の場合は，64m の差であるが，路面状態，登坂勾配の影響はなく，一定である．このことにより，大型車を追越する際の困難性が示された．

表 13. 被追越車が大型車と普通車のときの差

登坂勾配	路面	追越車の速度変化(km/h)		
		30-40	45-60	65-80
0%	乾 燥	48	48	64
		0.0%	0.1%	0.2%
	圧 雪	48	48	64
		0.2%	0.3%	0.2%
	アイスバーン	48	48	64
		0.2%	0.3%	0.3%
3%	乾 燥	48	48	64
		0.0%	0.2%	0.1%
	圧 雪	48	48	64
		0.2%	0.2%	0.2%
	アイスバーン	48	48	64
		0.2%	0.3%	0.3%
6%	乾 燥	48	48	64
		-0.1%	0.1%	0.1%
	圧 雪	48	48	64
		0.1%	0.2%	0.1%
	アイスバーン	48	48	64
		0.2%	0.2%	0.2%

表 13 に示した追越回避安全比率の差より，車長の違い

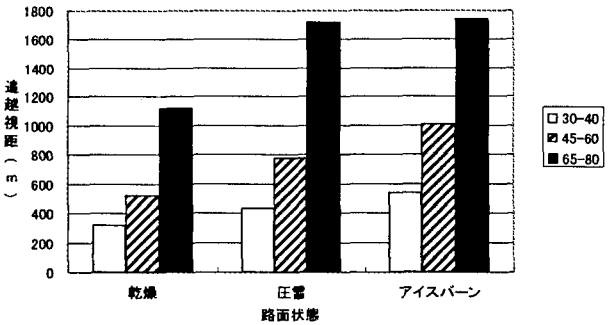


図 10. 速度変化による追越視距の比較

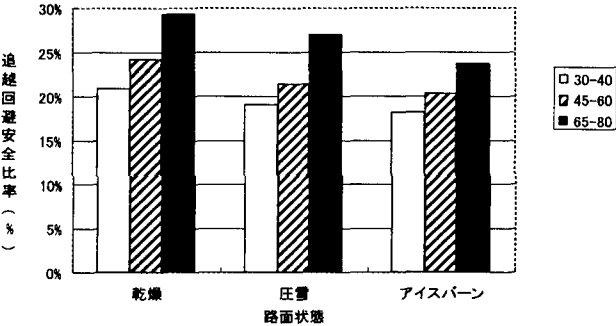


図 11. 速度変化による追越回避安全比率の比較

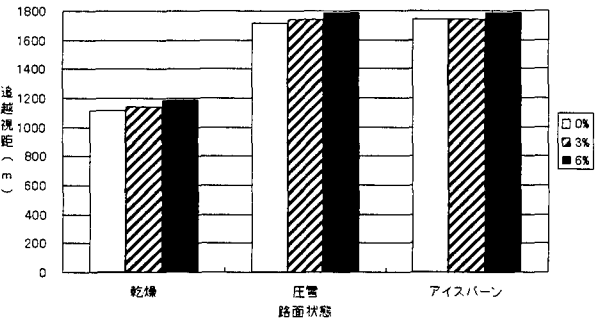


図 12. 登坂勾配による追越視距の比較

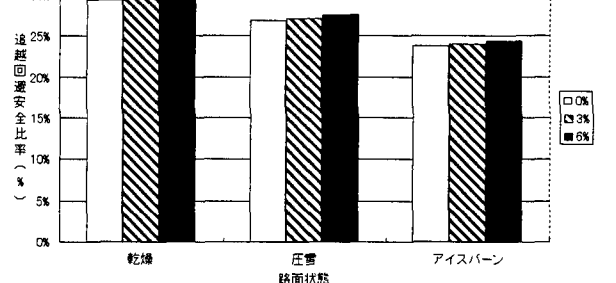


図 13. 登坂勾配による追越回避安全比率の比較

による追越回避安全比率の影響はほとんどない．すなわち，追越車の速度変化，路面状態，登坂勾配の違いに関係なく追越回避安全比率に差が生じないことが明らかになった．これは式(19)，式(26)に示したように，本モデルにおける車長の影響は，車両間隔が変化するため，その分追越車が走行する距離が増えるが，その影響は回避終了時の車両間隔に相殺されるためである．

以上示したように，車長の違いによって追越視距は変化するが，追越車の速度変化で決まる一定の変化量である．また，追越回避安全比率は追越車の速度，路面状態，

登坂勾配の影響はほとんど受けない。したがって以下の解析では、被追越車が普通車の場合をとりあげることにする。

(c) 追越車の速度変化による影響

登坂勾配が 0% のときの、追越車の速度変化による追越視距と追越回避安全比率をそれぞれ図 10、図 11 に示す。図 10 より、追越車の速度変化による追越視距は、大きく異なっていることがわかる。これは、走行速度が速くなると、安全車間距離を大きくとって追越を完了することが主に影響している。

図 11 より、追越車の走行速度が大きくなるにつれて、追越回避安全比率が大きくなっていることがわかる。これは、追越回避行動における減速度が追越行動における加速度よりも大きいいため、追越車の速度が速くなるにつれて追越に要する距離は増大するが、それに対して追越回避行動を終了するまでの距離が相対的に短くなったためである。したがって、追越車の速度が速くなるにつれて追越回避行動が容易になることを示すものではない。

(d) 路面状態の変化による影響

図 10 より、乾燥路面、圧雪路面、アイスバーン路面の順に追越視距が大きくなっていることがわかる。これは、雪氷路面による加速度の低下によるものである。また、路面による追越視距の差は、6 章で示した加速度の違いによるものと考えられる。

図 11 より、乾燥路面、圧雪路面、アイスバーン路面の順に追越回避安全比率が小さくなっていることがわかる。これは、雪氷路面による減速度の低下によるものである。すなわち、雪氷路面になると追越回避行動の困難性が増大することを示している。

(e) 登坂勾配の変化による影響

図 12、図 13 に追越車の速度変化が 65~80km/h における、登坂勾配を変化させたときの追越視距と追越回避安全比率を示す。図 12 より、登坂勾配が大きくなるほど追越視距が大きくなるが、その差はわずかである。これは、登坂勾配により加速度は低下するが、加速時間の差はそれほど変わらないため、追越視距に差が現れなかったことによる。しかし、追越車における速度の変化幅が大きくなると、より顕著に追越視距の差が現れると考えられる。

図 13 より、登坂勾配による追越回避安全比率の差はそれほど大きくはないが、登坂勾配が大きくなるにつれ、追越回避安全比率が大きくなることがわかる。これは、登坂勾配によって減速度がわずかに変化しているためと考えられる。

8. まとめ

本研究では追越行動モデルおよび追越回避行動モデルを構築して、雪氷路面における追越視距と追越回避安全比率の解析を行った。

本モデルによる追越視距は、被追越車の車長、追越車の速度変化、路面状態に大きく影響される一方で、登坂勾配の影響はそれほど受けないことが明らかになった。

また追越回避安全比率は、追越車の速度変化、路面状態に影響されるが、登坂勾配、被追越車の車長による影響はそれほど受けないことが明らかになった。

追越視距は路面状態によって大きく異なるが、運転者が的確にその値を知ることは現実的に不可能である。さらに、タイヤ路面摩擦係数は天候により時々刻々と変化するものと考えられる。そのため、積雪寒冷地における追越視距は、交通事故防止の観点からも、冬期の路面摩擦係数の低下を考慮して設定する必要があると考えられる。

最近の技術では、赤外線を対象物に照射することで対象物までの距離、および対象物の速度を正確に計測することが可能である。さらに、映像から路面状態によるタイヤ路面摩擦係数を予測することが可能なら、本モデルを適用することで、リアルタイムで追越可能かどうかをドライバーに示すことが可能になると考えられる。本モデルが ITS の 1 つのツールとして、適用可能性があると考えられる。

謝辞

本研究を進めるに当たり、北海道大学技官小野寺雄輝さん、および北海道庁高橋圭さんに多大なご協力と、ご助言を頂いた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，pp252~272，1983。
- 2) ROBERT HERMAN and TENNY LAM: A dilemma in overtaking on two-lane roads, TRAFFIC ENGINEERING & CONTROL October 1972, pp.276~282, 1972.
- 3) CHIU LIU and ROBERT HERMAN: Passing Sight Distance and Overtaking Dilemma on Two-Lane Roads, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1556, PP.64~70, 1996.
- 4) 小林実：二車線道路での追越動作について，交通工学 No.1, pp.15~20, 1968.
- 5) D.W.HARWOOD et al: 2 車線道路に設置した追い越し車線の交通運用上および交通安全上の効果，高速道路と自動車第 29 巻，pp.72~80, 1986.
- 6) 斉藤和夫ほか：北海道における正面衝突事故に関する統計的分析，土木学会北海道支部論文報告集，第 54 号 (B)，pp378~383, 1998.
- 7) 北海道開発局：平成 9 年度版北海道の交通事故統計ブック，1998.
- 8) (社)自動車技術会：自動車の安全技術，朝倉書店，1996.
- 9) Thomas D. Gillespie: Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc. 1992.
- 10) 市原薫，小野田光之著：改訂版路面のすべり，技術書院。
- 11) 新型シビックフェリオのすべて，三栄書房，1995.
- 12) 稲葉正太郎：交通事故と人間工学，コロナ社，pp.107~109, 1988.

雪氷路面における追越行動に関する研究

内田 賢悦, 岸 邦宏, 佐藤 馨一, 中岡 良司

雪氷路面上では、タイヤ路面摩擦係数が低下するため、2 車線道路における追越行動は困難となる。本研究は、雪氷路面の影響を考慮した追越行動モデルを構築し、解析を行ったものである。すなわち、追越視距推計モデルと追越回避行動モデルにより雪氷路面における追越行動および追越回避行動の解析を行った。追越視距は、被追越車の車長、追越車の速度変化、路面状態に大きく影響され、また追越回避行動は、追越車の速度変化、路面状態に大きく影響されることが明らかになった。

A Study on Overtaking Behavior on the Slippery Road

By Ken-etsu UCHIDA, Kunihiro KISHI, Keiichi SATOH , Ryouji NAKAOKA

Overtaking behavior on a two-lane and slippery road becomes more difficult because tire-road friction coefficient drops. In this study, overtaking behavior model considering slippery roads is developed and analysis of overtaking behavior is conducted. That is, by developing passing sight distance estimation model and aborting model, analysis of overtaking and aborting behavior on slippery road is conducted. As a result, the following facts are clarified. The length of overtaken vehicle, overtaking vehicle's speed and road conditions affect passing sight distance. The overtaking vehicle's speed and road conditions affect aborting behavior.
