

特集 予見時間可変モデルを用いた可変配光前照灯 (AFS) の有効性評価に関する研究*

Evaluation of the Effectiveness of an Adaptive Front-lighting System Using a Variable Preview time Model

堀井 泰聡

森川 慶祐

土居 俊一

和田 隆広

Yasutoshi HORII

Keisuke MORIKAWA

Shun'ichi DOI

Takahiro WADA

In Recent years, a lot of research regarding the Adaptive Front-lighting System (AFS) has been performed with the aim of achieving safe and comfortable driving at night by ensuring appropriate visibility, and various AFS have been installed in vehicles. However, fulfillment evaluations of the effectiveness of such systems have not been sufficient with consideration for the human control characteristics of the lighting control system. Therefore, in order to confirm the benefits of AFS for drivers, it is necessary to perform an evaluation of the effectiveness and performance by considering the vehicle as a man-machine system that is integrated with human characteristics. In this study, a driving simulator was used to investigate the influence of the lighting control for the driver, and the variable preview time model was used to simulate the driving behavior of the lighting control. Consequently, the effectiveness of the lighting control was confirmed.

Key words: Human-machine-interface / Headlight, AFS, Curve running, Visibility, Driver assist, Driving simulator, Simulation

1. 緒言

ドライバの運転行動は認知・判断・操作の繰り返しである。ドライバは運転に必要な情報の90%を視覚から得ており¹⁾、夜間走行において、ヘッドランプが適切にドライバが見たいエリアを照射しているかどうかは、安全性や快適性を左右する要素のひとつである。そこで、夜間運転の安全性向上を目的として、自動車の前照灯の配光や照射方向を道路形状や速度に応じて変化させる可変配光前照灯 (Adaptive Front-lighting System: AFS) が実用化されている。これに伴い、AFSの有効性を評価するためにドライバの視線移動の変化に関する検討が行われている²⁾。これらの研究はAFSによるドライバの視線移動への支援効果については述べられているが、視線移動の変化がドライバの操作や車両挙動に及ぼす影響までは言及されていない。

人間の基本的な制御特性について考えると、ドライバは視覚、操作力、運動感覚などから運転に必要な情報を得て、目標コースと車両運動の状況を認知し、さらにそれらが適切な関係になると判断してアクセル、ブレーキ、ハンドルを操作しているといえる。

すなわち、夜間の灯火制御システムにおいてもドライバが安全・快適な操作を行う為の最適視界を提供できる灯火制御システムを実現するためには、ドライバの認知・判断への影響、操作への影響を解析し、その結果である車両挙動への影響を含めて複合的に評価し、設計に反映させる必

要がある³⁾。

本研究では、曲路における灯火制御がドライバの認知・判断・操作特性に与える影響を定量化することを目的とし、定置式のドライビングシミュレータ (以下 DS と略記) を用いた実験を行い、AFSがドライバの視線移動、操舵操作および車両挙動へ与える影響を確認した。

また、実験から得られた知見をもとに、前方注視点により車両の位置予測を行い目標軌道との偏差をフィードバックするドライバモデルに対して、灯火制御に応じてドライバの予見時間を可変入力とする予見時間可変モデルを提案し、人間-自動車系シミュレーションを行った。これにより、灯火制御時の運転行動を模擬出来ることを示し、灯火制御システムの効果を検証した。

2. 実験概要

2.1. DS 概要

実験に用いた DS は乗用車の前部分を切り取ったものを運転席として使い、その運転席の前方 2.5 m に 100 インチのスクリーンを配置している。

また、曲路配光制御を行うにあたり様々な曲路を描画する為には、カーブの奥行き等を模擬する必要がある。そこで、本実験では3面表示のスクリーンを用いて現実感を高めて評価を行った。DSはアクセル開度、ブレーキ踏込み量、ハンドルの操舵角度を計測し、その計測データに基づく車

* (社)自動車技術会の了解を得て、「自動車技術会誌学術講演会前刷集」20105420No.5-10 pp. 15-20 より、一部加筆して転載

両運動を車両運動シミュレーションソフトを用いて計算し、車両位置・回転角を算出した。そして、走行路座標に対して視点を移動させた走行風景をコンピュータグラフィックス上で合成して、プロジェクターにより呈示している。

またヘッドランプ配光制御は、ヘッドライトシミュレーションモジュールを用いて計算を行い、配光を制御した。ヘッドライト・シミュレータに用いた配光データは、既存の自動車のヘッドライト配光データを使用した。なお、本実験は左側通行にて実施した。Fig. 1 に本研究で使用した DS の構成図を示す。Fig. 2 に実験に使用したシミュレータの概観図を示す。

2.2 AFS 設定条件

今回の実験では、AFS の制御方式はスイブル制御とナビ協調制御の2種類を用いた。Fig. 3 に AFS のスイブル制御モデルを示す。

スイブル制御は、操舵角と車速に応じてライトをスイブル（左右に回転）させる制御方式で、以下に示すような計算を行い、 t 秒後の自車位置を照らすようにライトをスイブルさせる。

t 秒後の自車到達位置を照射する角度は幾何学的に旋回半径を変数とした式 (1) で求められる。走行中の車両においては、一般に車速と操舵角から定常旋回の理論式を用いて旋回半径を求める方法がある。定常旋回の理論式を式 (2) に示す。

t 値については、ドライバーの危険回避行動や、危険回避に要する時間についての実験結果より、 $t = 3$ 秒が適当とされており、

$$\omega = 180 Vt/2\pi R \dots\dots\dots(1)$$

$$R = (1 + AV^2) \cdot L/\delta \dots\dots\dots(2)$$

- ω : Swivel angle
- V : Vehicle velocity
- R : Turning radius
- A : Stability factor
- L : Wheelbase
- δ : Steering angle
- t : Look-ahead time = 3 [s]

本実験でも、 $t = 3$ 秒として制御を行った⁴⁾。

次にナビ協調制御はスイブル制御よりも発展的な制御で、地図情報から進行方向の道路形状を予測し、カーブ進入・脱出の手前からヘッドランプをスイブルさせる。今回用いたナビ協調制御によるスイブル角度は、スイブル制御の

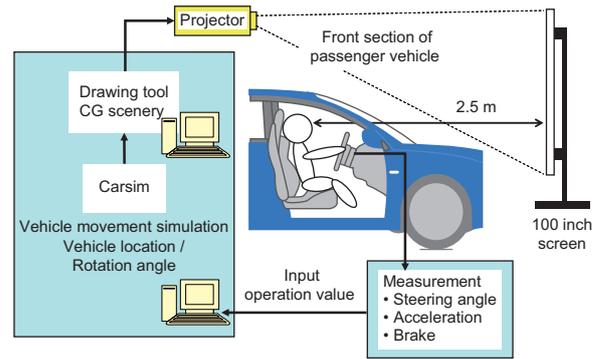


Fig. 1 DS Configuration diagram



Fig. 2 General view of the simulator

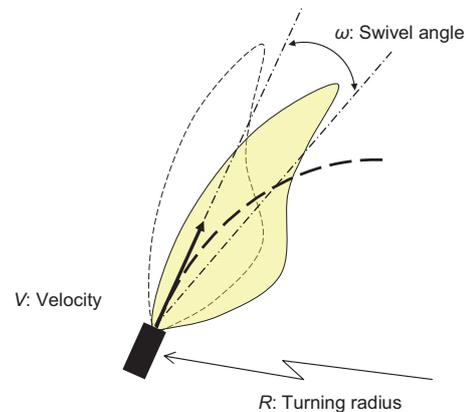


Fig. 3 Swivel light distribution section control Model

スイブル設計モデルを用いて、式 (3) のように表すことができる。 t 値は $t = 3$ 秒として、制御を行った。

$$\omega = 180 Vt/2\pi r (T + t) \dots\dots\dots(3)$$

$r (T + t)$: Curve radius after t sec.

2.3 実験方法

DS 実験は、プログラムによる速度制御により 40 km/h 一定で行い、被験者には操舵操作のみを行って走行してもらった。

走行条件は AFS 無し、スイブル制御、ナビ協調制御の 3 条件とした。また、被験者は視線計測装置を装着して頭部をヘッドレストに固定し、頭部を動かさないように指示をして実験を行った。被験者は、普通免許所有の学生 5 名である。

実験コースには、曲率半径の大小 2 条件 (曲率半径 $R = 90, 35 \text{ m}$)、曲線長の大小 2 条件 ($L = 75, 35 \text{ m}$) の特徴を持つ三つの右カーブを使用した。Fig. 4 に実験コースを示す。Fig. 4 の A 点はカーブ開始点、B 点はカーブ終了点である。

3. AFS がドライバの運転行動に与える影響の調査

3.1 AFS の有無と視線移動の関係

カーブ区間において、ドライバはコースに追従し安定な走行をするために適切な位置を注視する必要がある⁹⁾。また、夜間走行においてはドライバが利用できる可視性情報の大部分は前照灯で照らされるエリアにあるため、夜間カーブ走行においてはカーブ前方の視認性を向上させる AFS の制御方法によってその効果に差があると考えられる。そこで、ここではドライバの認知行動としての視線移動に着目し、AFS がドライバの視線移動に与える影響の調査を行った。

初めに、走行映像の中に視線計測装置から出力される視点位置を重畳した走行映像を取得し、夜間運転時の視線移動の観察を行った。Fig. 5(a) に右カーブ、(b) に左カーブ走行時のドライバの視点位置を示した走行画像を示す。この映像を観察した結果、ドライバは右カーブ走行時には中央線付近、左カーブ走行時には路肩線付近を注視して走行している事が確認できた。これはドライバが道路区画線の線形変化を注視することによって道路情報の取得に努め、目標とする走行コースをとるための横方向位置制御を行っているためと推測される。

次に、視線計測装置から出力される視点位置(X, Y 座標)をもとに走行時のドライバの注視時間 (= 注視距離 / 車速) の推移を計測した。カーブ走行時におけるドライバの注視時間の推移を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の A 点はカーブ開始点、B 点はカーブ終了点である。

Fig. 6 より、カーブ走行時にドライバは時々刻々注視時間を変化させていることが分かる。次に、灯火制御の違いによる注視時間の変化に注目すると、カーブ走行時に AFS 無し > スイブル制御 > ナビ協調制御で、注視時間が低下することが分かる。

カーブ進入時において、ナビ協調制御は AFS 無しおよびスイブル制御に比べて注視時間の低下率が小さい。また、スイブル制御は AFS 無しに比べて早いタイミングでその後の注視時間が増加している。これは操舵に伴いスイブル角

度が増し視程距離が伸びたことによる効果であると考えられる。

カーブ脱出時においては、スイブル制御、ナビ協調制御は緩やかに注視時間が増加するが、AFS 無しではカーブ終了点に向けて急激に注視時間が増加する。これは、ドライバがカーブの終了点を認知するタイミングが AFS 無しでは遅れるためと考えられる。

以上の結果より、灯火制御がドライバの注視時間に影響を与えることが分かる。

3.2 操縦性安定性および車両挙動への影響

3.1 節において、ドライバの認知に関わるカーブ走行時の注視時間の変化に AFS の有無によって差が見られた事から、これに伴う操舵操作および車両挙動への影響を検証した。

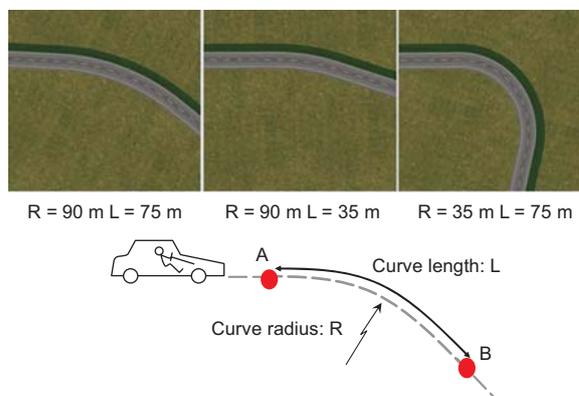
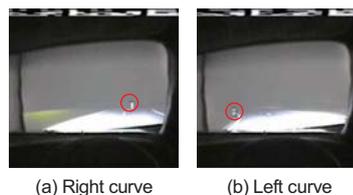


Fig. 4 Test course



(a) Right curve (b) Left curve

Fig. 5 Viewpoint position when traveling a curve

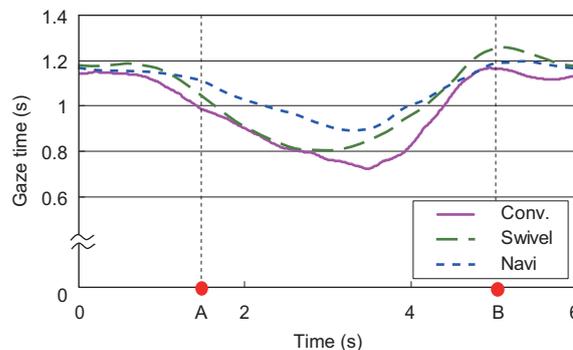


Fig. 6 Gaze time when traveling a curve

実験では、車速は一定とし加減速操作を禁止したため、ドライバはカーブを如何に安定して走行させるかという事を重視して操舵を行ったと考えられる。そこで、評価項目には操舵角に加えて車両の安定性の評価指標として操舵により発生する車両のヨー角加速度を使用した⁶⁾。Fig. 7の(a)～(c)に解析カーブにおける操舵角およびヨー角加速度の結果を示す。

Fig. 7より、操舵角に注目するとAFS無しではカーブ進入・脱出時に急操舵になる傾向が見られる。これに対し、灯火制御時にはカーブ脱出時のハンドル切り戻しのタイミングが早く、その後の操舵をゆっくりと行っている。

また、車両挙動であるヨー角加速度についても制御の違いにより値に差が出る事が分かる。

まず、カーブ進入時にはAFS無し>スイブル制御>ナビ協調制御の順にヨー角加速度が小さくなり、車両が安定する。

またカーブ脱出時には、AFSの有無による差異が特に顕著であり、AFS無しに比べてスイブル制御及びナビ協調制御でヨー角加速度が小さくなり、車両が安定することが分かる。これらの傾向は曲率半径および曲線長の異なるカーブにおいても確認できた。

4. 人間 - 自動車系シミュレーション解析

灯火制御の性能評価やドライバ特性を考慮した制御方法の検討を行うには、灯火制御時のドライバの運転行動モデルを構築する必要がある。ここでは、第3章において得られた灯火制御時のドライバの認知・操作挙動に関するデータベース、特に視認行動に関する調査結果をもとに、夜間灯火制御時の運転行動のモデル化を行った。

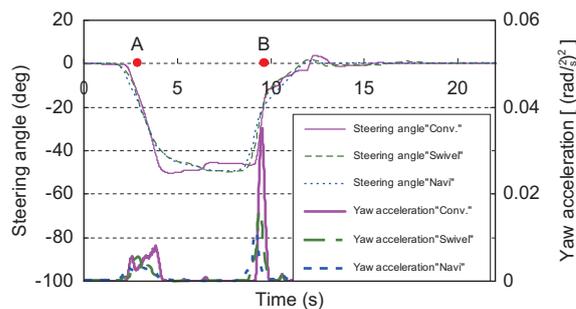
4.1 ドライバモデルの構築

第3章において夜間のカーブ走行における視線移動に注目した調査により以下の知見が得られている。

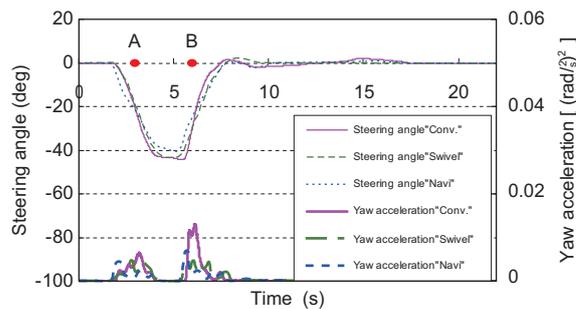
- ① 道路区画線を注視することで道路線形を認知している
- ② ドライバは時々刻々注視時間を変化させる
- ③ 灯火制御による視程距離の違いにより注視時間が変化する

本章では、これらの知見をもとに灯火制御時の運転行動をモデル化する。

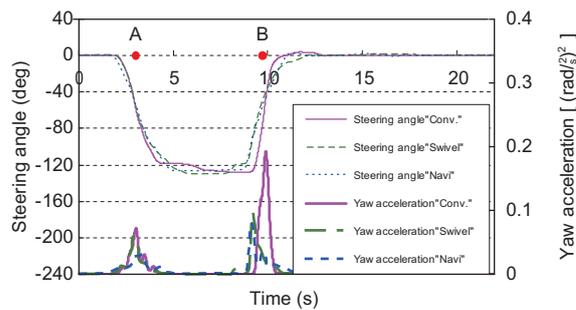
まず①の知見より、夜間走行においてドライバは前方の道路区画線を中心に注視することにより、目標コースと車両将来位置との偏差を感知し、その偏差に応じたフィードバック主体の操舵を行っていると推測される。そこで、予測モデルには前方注視モデル(二次予測モデル⁷⁾)を用いることとする。



(a) R = 90 (m), L = 75 (m)



(b) R = 90 (m), L = 35 (m)



(c) R = 35 (m), L = 75 (m)

Fig. 7 Steering wheel angle/yaw acceleration (DS)

次に②③の知見より、カーブ走行においてドライバは時々刻々注視時間を変化させており、さらに灯火制御による視程距離の違いにより注視時間が変化することから、この注視時間推移を上記の二次予測モデルの予見時間推移に置き換えた「予見時間可変モデル」を提案する。なお、予見時間とは前方注視モデルにおいて「目標コースとの偏差を最小にしようとしている地点に現在の車両速度で到達するまでの時間」、すなわち前方注視モデルにおける注視点までの距離Lを車両速度で割った値である。

4.2 予見時間可変モデル

Fig. 8に②③の知見(Fig. 6)をもとに仮定した予見時間可変モデルにおける各制御条件時での予見時間入力値の概念図を示す。

予見時間変化については、スイブル制御は操舵角連動

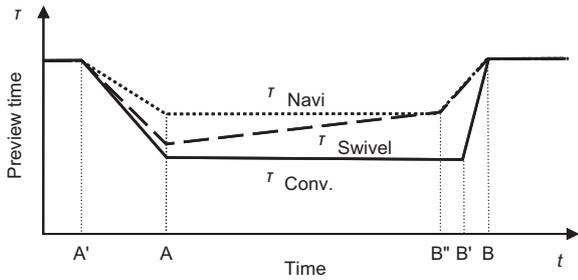


Fig. 8 Variable preview time model

型であるため操舵を行わないカーブ進入時には AFS 無しと予見時間に大きな違いは無く、操舵によるスィブルに伴い予見時間が改善されると考えた。またナビ協調制御では、カーブの進入前に進行方向に向かって配光が動くため、制御量だけカーブ進入時の予見時間を調整した。カーブ脱出時においては、スィブル制御・ナビ協調制御は AFS 無しに比べ早いタイミングで予見時間が回復すると仮定し、旋回中の予見時間に応じて脱出時の予見時間推移を調整した。

4.3 車両モデル

車両モデルは、Fig. 9 に示す二輪モデルを使用した。Fig. 9 中の記号は以下の通りである。

- m : Vehicle mass
- I : Yaw moment of inertia
- V : Vehicle velocity
- δ : Front wheel angle
- K_f, K_r : Cornering power
- ψ : Yaw angle
- γ : Yaw rate
- l_f, l_r : Length between center of gravity and each axle
- β : Slip angle

Fig. 9 より式 (4)、式 (5) に示す横方向運動とヨー方向運動方程式からなる2自由度の運動方程式を得る。

$$mV(\dot{\beta} + \gamma) = -2K_f(\beta + l_f\gamma/V - \delta) - 2K_r(\beta - l_r\gamma/V) \dots (4)$$

$$I\dot{\gamma} = -2K_f(\beta + l_f\gamma/V - \delta)l_f + 2K_r(\beta - l_r\gamma/V)l_r \dots (5)$$

4.4 人間 - 自動車系モデルの構成

本章において説明したドライバモデルおよび車両モデルを用いて、灯火制御時の運転行動を模擬可能な人間 - 自動車系モデルの構築を行った。Fig. 10 にモデルのブロック図を示す。

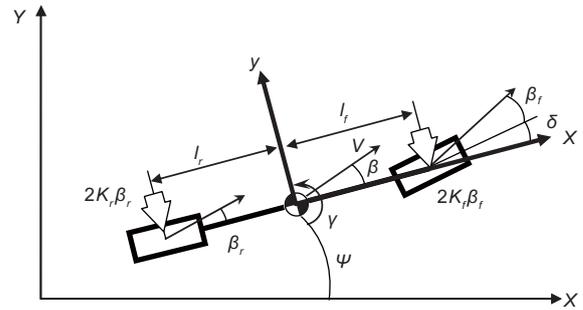


Fig. 9 Plane vehicle model

予測部は車両状態量及び 4.2 節で設定した予見時間を基に式 (6) を用いて車両将来位置 (X^*, Y^*) を予測するブロックであり、操舵部では予見時間秒先の目標コース $(X_r(t + \tau), Y_r(t + \tau))$ と車両将来位置 (X^*, Y^*) との偏差 ε に応じて操舵角を決定する。式 (7) に偏差の計算式、式 (8) に操舵方程式を示す。K はドライバゲイン、 T_s は操舵機構及び筋骨格系の遅れ時定数である。

$$\begin{cases} X^* = x + V \int_0^\tau \cos(\psi + \gamma \cdot t) dt \\ Y^* = y + V \int_0^\tau \sin(\psi + \gamma \cdot t) dt \end{cases} \dots (6)$$

$$\varepsilon = \sqrt{(X_r(t + \tau) - X^*)^2 + (Y_r(t + \tau) - Y^*)^2} \dots (7)$$

$$T_s \dot{\delta} + \delta = K \int \varepsilon dt \dots (8)$$

4.5 シミュレーション結果と考察

予見時間可変モデルを含む人間 - 自動車系モデル (Fig. 10) を用いて、灯火制御による予見時間変化がモデルの制御成績に及ぼす影響を確認した。実験コースは DS 実験と同様であり、車速は 40 km/h 一定とした。Fig. 11 の (a) ~ (c) にシミュレーション結果を示す。

図の A 点はカーブ開始点、A' 点は操舵開始点、B 点はカーブ終了点、B' 点は AFS 無しでの操舵開始点、B'' 点はスィブル制御及びナビ協調制御での操舵開始点である。

Fig. 11 より、AFS 無しでは進入・脱出時に急操舵になる傾向が見られる。一方、制御有りでは脱出時の操舵タイミングが AFS 無しに比べて早く、その後の操舵もゆっくりと行っており、DS 実験結果を模擬できている。

また、ヨー角加速度に注目すると、DS 実験同様に灯火制御の違いにより差が出ている。AFS 無しではカーブ進入時と脱出時で差が大きく、脱出時には操舵の切り戻しが遅れることによってヨー角加速度のピークも遅れ、その後の車両挙動も不安定となる。さらに、スィブル制御とナビ協

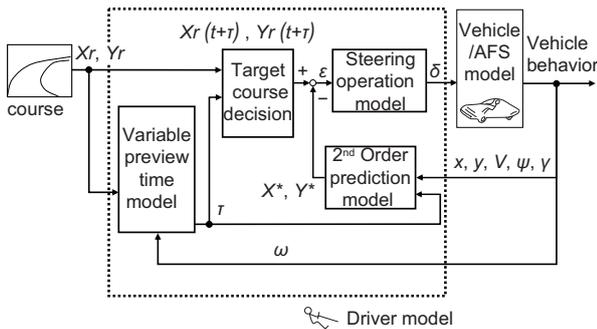


Fig. 10 Block diagram

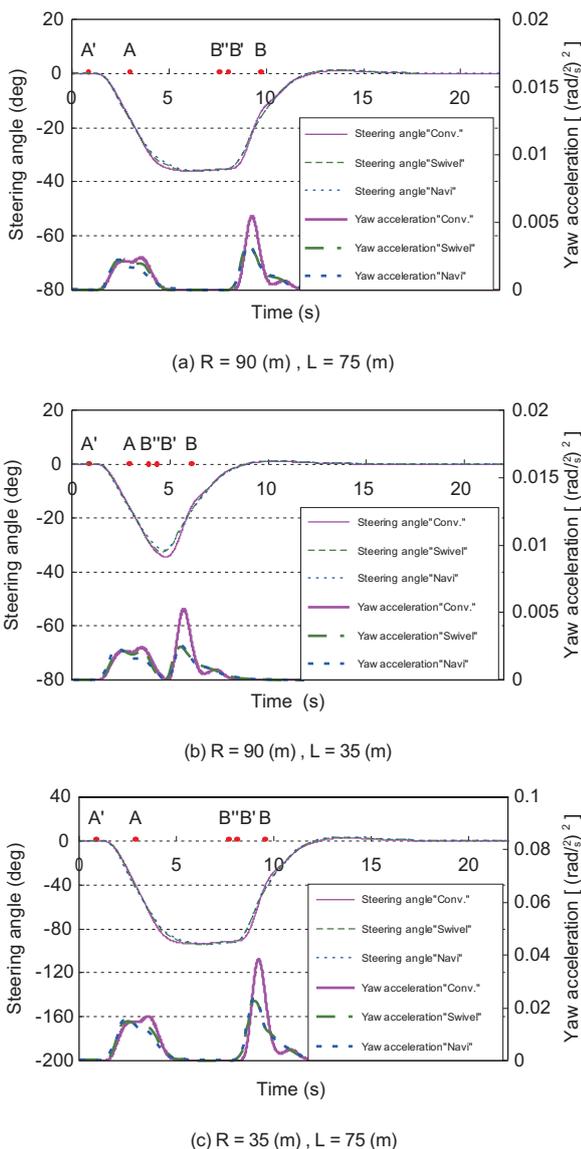


Fig. 11 Steering wheel angle/yaw acceleration (simulation)

調制御の関係についても、カーブ進入前の注視時間の変化を模擬したナビ協調制御の条件でヨー角加速度の値が小さくなっており、DS実験結果を模擬できている。これらの傾

向は、曲率半径および曲線長を変化させたカーブにおいても同様に模擬できている。

以上の結果より、提案する予見時間可変モデルは夜間カーブ走行における灯火制御時のドライバの認知・判断・操作のつながりをよく表現できている。また、曲率半径や曲線長の違うカーブにおいても適用可能なモデルであることから、夜間カーブ走行時の灯火制御効果を説明するモデルとして妥当であると思われる。

5. 結言

本研究では、曲路上における灯火制御の効果を人間 - 自動車系として評価することを目的とし、灯火制御がドライバの運転行動に与える影響を調査した。

その結果、以下の知見が得られた。

- (1) DS実験により夜間カーブ走行時の視線移動傾向を確認した結果、ドライバはカーブ走行時に注視時間を時々刻々変化させていることが確認できた。また、灯火制御（AFSの有無、ナビ協調制御）の違いによる注視時間への影響を確認した。
- (2) DS実験により灯火制御（AFSの有無、ナビ協調制御）の違いによる操縦性安定性及び車両安定性への影響を確認した結果、カーブ進入時と脱出時で効果が異なる事を明確にした。カーブ進入時にはAFS無し>スイブル制御>ナビ協調制御の順にヨー角加速度が小さくなり、車両が安定する。また、カーブ脱出時には制御による効果が特に顕著であり、AFS無しに比べてスイブル制御およびナビ協調制御で車両が安定する。
- (3) DS実験と人間 - 自動車系モデルを用いたシミュレーションの比較により、予見時間を可変としたドライバモデルを使用することで、灯火制御（AFSの有無、ナビ協調制御）の違いによる運転行動への影響を検証した。

本稿の検討により、灯火制御がドライバの認知・判断行動に対して注視時間変化という形で影響を与え、この認知・判断プロセスにおける情報の差が操舵行動に反映され、それにより車両の制御成績が変化するという人間 - 自動車系としての灯火制御の有効性を明確にした。また、予見時間可変モデルを用いることで灯火制御の効果検証や、ナビ協調制御のような新しい灯火制御の性能予測を行うことができた。

今後の研究では、前照灯技術やセンサシステムの発展に伴う次世代の灯火制御技術に対して、操縦性安定性への影響の更なる詳細な検討に加え、ドライバの周辺環境認知特性を考慮した人間 - 自動車系としてのアプローチを行う予定である。

<参考文献>

- 1) E. Hartman: Driver Vision Requirement, SAE, 700392, pp. 692-630, (1970).
- 2) F. Panerai, D. Toffin, D. Paille, A. Kameny: Eye Movement patterns in nighttime driving: conventional and swiveling headlights, Driving Simulation Conference, (2008).
- 3) S. Doi, T. Wada, M. Morishita, Y. Horii, Y. Chigusa: Investigation of Adaptive Front-lighting Systems in Human-Machine Interface as Driver Assistance, International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, Germany (2007).
- 4) K. Ishiguro, Y. Yamada: Control Technology for Bending Mode AFS, SAE 2004 - Annual - 633, (2004).
- 5) 堀井泰聡, 土居俊一, 和田隆広, 森川慶祐: 可変配光前照灯 (AFS) の有効性評価に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 40, No.6, pp. 1593-1598, 2009.
- 6) Y. Horii, S. Doi, T. Wada, K. Morikawa: Investigation of Adaptive Front-lighting System in human machine interface as driver assistance, Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Advance Conditions and Night Driving, France, (2008).
- 7) 吉本堅一: 予測を含む操だモデルによる人間 - 自動車系のシミュレーション, 日本機械学会誌 第 71 卷 第 596 号 (1968).
- 8) 景山一郎, 野崎佳之: 危険感を用いた自動操縦車両の操舵制御, 日本機械学会第 4 回交通・物流部門大会講演論文集, No.95-36, (1995).



<著 者>



堀井 泰聡
(ほりい やすとし)
走行安全技術 2 部
灯火制御システムの開発・
設計に従事



森川 慶祐
(もりかわ けいすけ)
2010 年 4 月デンソーに入社



土居 俊一
(どい しゅんいち)
香川大学 工学部 知能機械システム
工学科 知能機械設計工学 工学博士
車両運動制御, 人間機械系・
予防安全システム設計の研究に従事



和田 隆広
(わだ たかひろ)
香川大学 工学部 知能機械システム
工学科 知能機械設計工学 工学博士
車両運動制御, 人間機械系・
予防安全システム設計の研究に従事