

特集 夜間運転時における歩行者視認性と運転行動の解析* Effective Assessment of Night time Visibility of Pedestrians Using a Driving Simulator

堀井 泰 聡 土 居 俊 一
Yasutoshi HORII Shun'ichi DOI

Pedestrian fatalities are a major road safety issue in Japan. Fatal night time pedestrian collisions occur at a rate that is roughly two times greater than the occurrence of fatal daytime pedestrian collisions. One of the main factors responsible for these collisions is the driver's inability to detect pedestrians from a safe distance. High-beam usage is known as a means to prevent night time pedestrian accidents. However, we need to evaluate the effects of pedestrian visibility illuminated by headlamps while taking into consideration human factors when driving before we can determine whether it is truly helpful for drivers. Therefore, it would be desirable to evaluate the performance of headlamps while regarding a vehicle as a human/machine system integrated with human factors, but it is difficult to fully consider the constraints in testing conditions, etc. We used a fixed-base driving simulator to verify the effects of pedestrian visibility across different headlamp beam patterns. From the tests, we confirmed the effectiveness of high-beam headlamps, based on pedestrian visibility during night time driving.

Key words : Headlight, High-beam, Driver assist, HMI

1. はじめに

2009年における日本の死亡事故を状態別に分析すると、歩行中の事故が35%と最も多く、そのうち夜間の死者数は昼間の2倍以上にも及んでいる¹⁾。これらの事故の原因となる主要要因のひとつに、夜間ではヘッドランプによる照明を頼りに歩行者を認識する必要があるため、ドライバが安全な距離から歩行者を認識できないことがあげられる。運転行動は認知・判断・操作の繰り返しであり、ドライバは運転に必要な情報の90%を視覚から得ている²⁾。夜間走行において、ヘッドランプが適切にドライバの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、夜間の歩行者事故を防ぐ手段としてヘッドランプのハイビーム利用が知られており、ハイビームを使用することで歩行者の認識距離が伸び、安全性が向上する³⁾。

しかしながら、その視認性向上の効果を定量的に正しく把握するためには、車両走行時の人間特性、いわゆるヒューマンダイナミクスの考え方を反映した評価が必要である。すなわち、車両を人間特性と一体化したマン・マシン系とみなして、安全性能の評価をするのが望ましいが、夜間の試験条件の制約や試験の安全性や再現性の確保など、実車を使って十分な検討をすることは困難である。そこで本研究では、Fig. 1に示す固定式のドライビングシミュレータ上に夜間直線路

の走行環境を構築し、歩行者の認知および、飛び出しに対する制動回避と操舵回避の評価をヘッドランプ配光を変えて実施し、その際の歩行者の視認性とその影響を調査した。

測定項目としては、ドライバ情報として、舵角などの運転操作挙動を測定した。また、車両データとして、ヨーレートと車両運動軌跡などの測定を実施した。その結果をもとに、ヘッドランプ配光による歩行者視認性の違いが制動や回避操舵行動に与える影響について定量的に検証した。

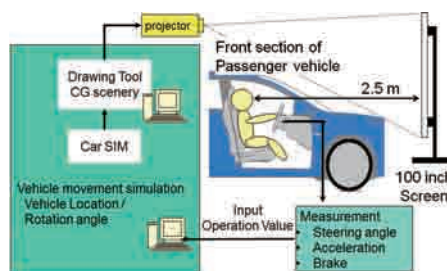


Fig. 1 DS Configuration Diagram

2. 実験概要

2.1 ヘッドランプ設定条件

ヘッドランプの配光はハイビームとロービームの2種類を用いた。ヘッドライトのシミュレーションに用

*SIAの了解を得て、V.I.S.I.O.N conference 2010年10月掲載を和訳、一部加筆して転載

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。Fig. 2(a)にロービーム、Fig. 2(b)にハイビームの見え方の一例を示す。ロービームの照射距離は約50mでハイビームの照射距離は約100mである。

本図では、歩行者は車両進行方向の約60m先の道路右側歩道に立っており、その見え方は配光パターンによって異なる。



(a) Low beam light distribution



(b) High beam light distribution

Fig. 2 Light Distributions

2.2 実験方法

実験は、まず初めに路肩に立たせた歩行者の認知実験を実施し、その後、右側から道路を横断する歩行者を回避する歩行者回避実験を行った。車速は、目標速度40km/h・80km/hとし、できるだけ一定で走行してもらった。実験コースは市街地を模擬した、全長約1.2km、幅約7mの直線路を使用した。走行条件は昼間条件、夜間ロービーム条件、夜間ハイビーム条件の3条件とした。被験者は、普通免許所有の男子学生12名である。なお本実験は左側通行にて実施した。

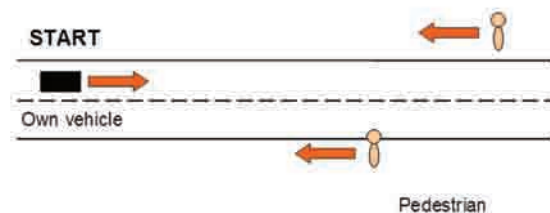
2.2.1 歩行者認知実験の方法

歩行者は、Fig. 3(a)に示すように道路端の左右に一人数ずつを配置し、歩道上を時速4.0km/hで車両に向か

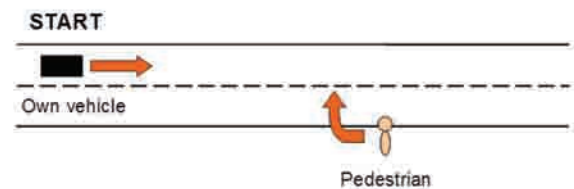
って歩行している。被験者には目標速度で走行し、歩行者を認識した時点でハンドル上のスイッチを押すように指示した。また、左右の歩行者が同時に視界に入らないよう配置し、出現位置はランダムとした⁴⁾。

2.2.2 歩行者回避実験の方法

Fig. 3(b)に示すように走行車線右側の歩道上に歩行者を配置し、被験者が目標速度で走行中に、歩道から歩行者が飛び出すシナリオを作成した⁵⁾。歩行者の飛び出しは、道路上での歩行者までの距離が現在の車速のまま走行すると4秒後に衝突する距離となった時点で実施し、歩道から自車線に向かって飛び出しをするものとした。この時、被験者には飛び出しに対して必ず回避を行うよう教示した。また実験では、ブレーキ操作による回避とハンドル操作による回避をそれぞれ実施した⁶⁾。



(a) Pedestrian detection experiment



(b) Pedestrian avoidance experiment

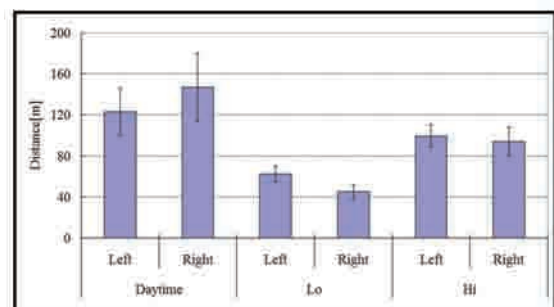
Fig. 3 Test Course

3. 実験結果

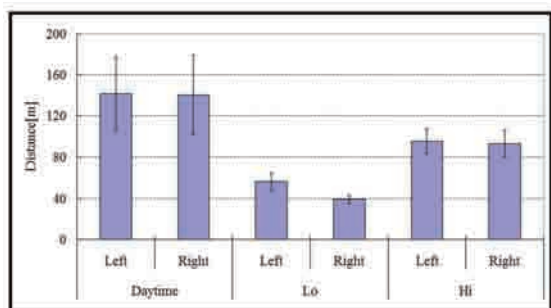
3.1 歩行者認知実験の結果

ハンドル上のスイッチを押した時点での自車と歩行者との位置関係から、歩行者認知距離を計測した。

Fig. 4(a)及びFig. 4(b)にそれぞれ40km/hと80km/hにおける歩行者との距離の平均値と標準偏差を示す。なお、図のLeftは左側の歩行者、Rightは右側の歩行者に対する認知距離を表している。



(a) 40km/h



(b) 80km/h

Fig. 4 Pedestrian Detection Distance

本図より、歩行者認知距離は昼間>ハイビーム>ロービームとなり視程距離に比例し、速度に関わらずほぼ一定となった。

また、夜間ロービーム条件は、左側の歩行者には約60[m]で認知しているのに対し、右側では約40[m]で認知しており、これはロービームの配光パターンによるものだと考えられる。

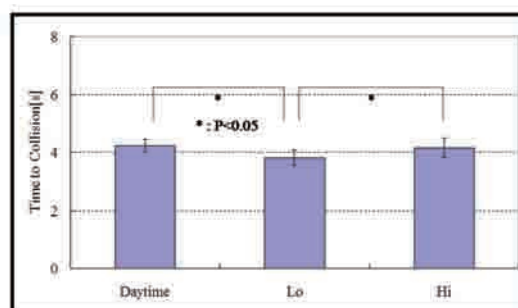
夜間ハイビーム条件では、ロービーム条件に比べより遠くから歩行者を認知しており、ハイビームがドライバの歩行者認知に与える効果が確認できた。

3.2 ブレーキ回避実験結果

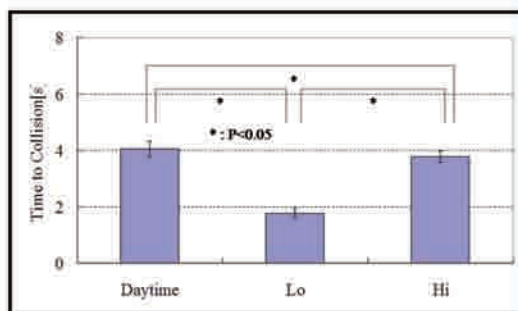
3.1節において、ドライバの歩行者を認知する距離が、配光パターンの違いによって差が生じたことから、これに伴う操作および車両挙動への影響をブレーキ回避実験にて調査した。操作への影響として、歩行者のとび出しに対するブレーキオン時の衝突余裕時間（歩行者までの距離／車速）：Time To Collisionの平均値とその標準偏差および各条件間の有意差（*：有意水準5%で有意差あり）をFig. 5(a)及びFig. 5(b)に示す。本図の衝突余裕時間が短いほど、衝突の危険性は高くなる。

Fig. 5(a)より各条件に於いてブレーキ操作のタイミングは衝突余裕時間：約4秒となることが分かる。ロ

ービーム条件では他の条件に比べ余裕度がわずかに減少する。Fig. 5(b)より、速度が増加すると、昼間条件では40km/hと同様に衝突余裕時間：約4秒でブレーキ操作を行っているのに対してハイビーム条件ではわずかに余裕度が低下する。また、ロービーム条件では衝突余裕時間：2秒以下と著しく減少する。これは3.1節の結果から、ロービーム条件での歩行者認知距離が約40mであるため、速度増加に伴って衝突余裕時間が減少するためである。



(a) 40km/h

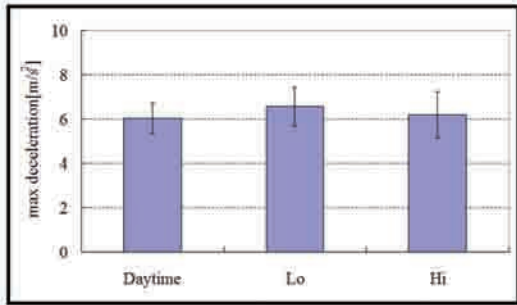


(b) 80km/h

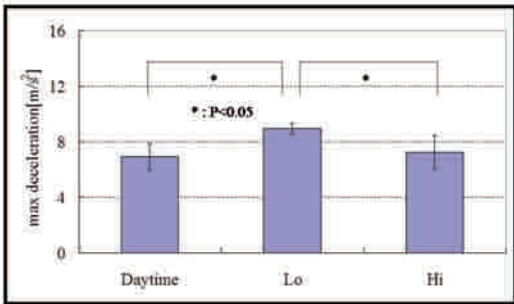
Fig. 5 TTC of Brake Operation

次に、車両挙動として歩行者飛び出し時のブレーキ回避時の最大減速度を調査した。Fig. 6(a)及びFig. 6(b)に最大減速度の平均値と標準偏差および各条件間の有意差を示す。本図の最大減速度が大きいほど急ブレーキにより車両が停止したことを示す。

Fig. 6より40km/hの場合ではデータ間の有意差はなかったが、80km/hの場合には、昼間条件と比較して夜間ロービーム条件では最大減速度の値が増加しており、急な減速となっていることがわかる。また、夜間ハイビーム条件は昼間条件に比べて最大減速度の有意差がなく、昼間と同様にゆっくりと余裕を持った減速ができていくことがわかる。



(a) 40km/h



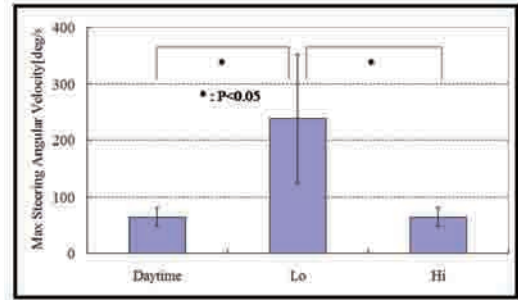
(b) 80km/h

Fig. 6 Maximum Deceleration During Braking

3.3 ハンドル回避実験結果

次に、ハンドル回避実験についてドライバーの操作および車両挙動を調査した。

歩行者のとび出しに対するハンドル回避時の最大操舵角速度の平均値と標準偏差および各条件間の有意差（*：有意水準5%で有意差あり）をFig. 7(a)及びFig. 7(b)に示す。本図の最大操舵角速度が大きいほど、ドライバーは急なハンドル操作を行ったことを示す。図より、40km/hの場合ではデータ間の有意差はなかったが、80km/hの場合には、夜間ロービーム条件において最大操舵角速度の値が増加しており、（有意水準5%で有意差あり）急なハンドル操作になっていることがわかる。また標準偏差の値も大きくなり、操作にばらつきが生じていることが分かる。



(b) 80km/h

Fig. 7 Maximum Steering Velocity while Steering to Avoid Pedestrians

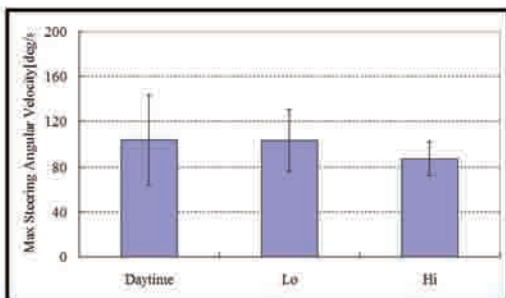
次にハンドル回避実験における車両挙動の影響を分析するために、車両安定性の評価を行った。ここでは、車両の安定性を評価するために、指標 Y_n を用いた。

$$Y_n = \sum_{i=1}^n \dot{\gamma}_i^2 \quad [1]$$

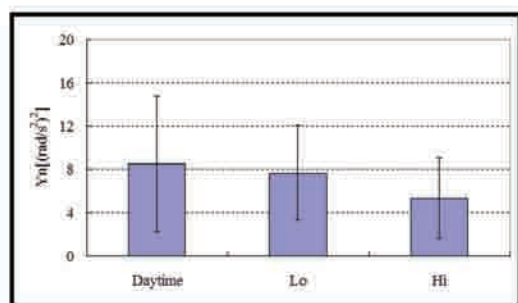
ここで、 $\dot{\gamma}^2$ ：ヨーレートの加速度、 i ：サンプリング回数、 n ：サンプリング数である。

ここでヨー角加速度の変化が大きいほど、車両は不安定な動作を行っているものと推定されるため Y_n の値が大きいほど車両は不安定となる^{5) 6)}。

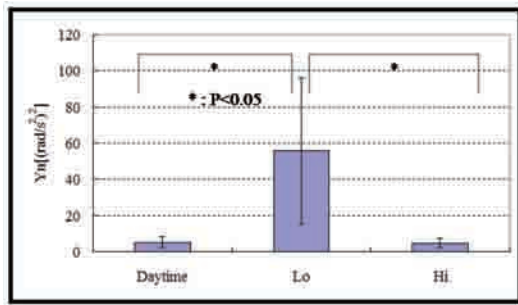
Fig. 8(a)及びFig. 8(b)にそれぞれ40km/hと80km/hにおける各条件での Y_n の平均値と標準偏差および各条件間の有意差（*：有意水準5%で有意差あり）を示す。図より40km/hの場合では、操舵行動と同様にデータ間の有意差はないが、80km/hでのヨー角加速度の積算値を比較すると、昼間条件・ハイビーム条件に対しロービーム条件で積算値が大きく増加し、標準偏差も大きくなる結果となった。



(a) 40km/h



(a) 40km/h



(b) 80km/h

Fig. 8 Integrated Value Yn of Squares of Yaw Acceleration

4. 考察

ドライバーは前方の情報から、車両の将来位置を予測しながら操舵を行う必要がある。これを人-自動車系モデルで表すと Fig. 9 に示すドライバーモデルで表すことが出来る⁷⁾。ドライバーが歩行者の認知～回避行動を行うには予見時間が必要になるが、配光条件により予見時間が不足した場合、その後の操舵に影響を与えることが予想される。

しかしながら、Fig. 10 に示すように昼間のブレーキタイミングである TTC=4秒に対して、ロービーム 80km/h 条件では歩行者認知が遅れることで、予見時間が不足するため安定した回避行動が取れずに車両の安定性が低下するものと思われる。

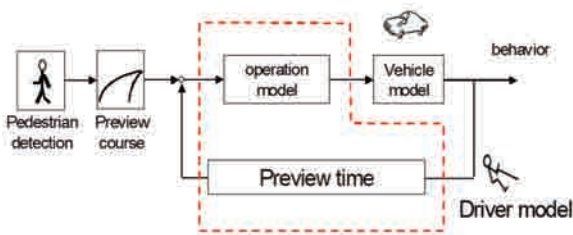


Fig. 9 Driver Model

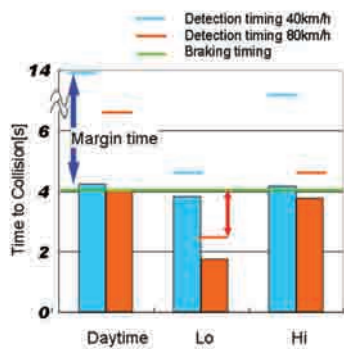
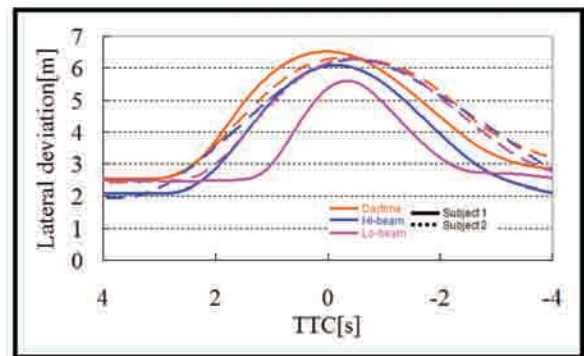


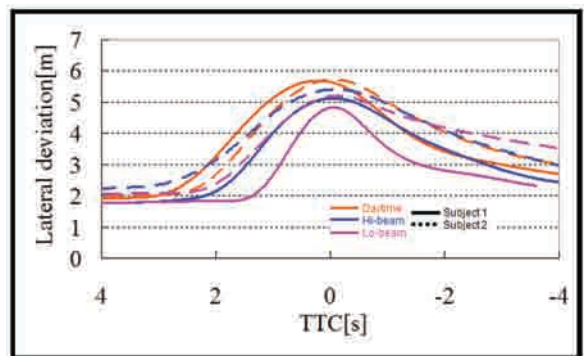
Fig. 10 Margin Time for Braking

Fig. 11(a)及びFig. 11(b)に被験者2名の各配光条件下での走行軌跡を示す。図の横軸はTTC、縦軸は道路左端からの変位を示す。本図より40km/h条件では予見時間が4秒あるために余裕を持って操舵しているが、80km/hでは予見時間が2秒と短くなるため、操舵が急操舵になり、続く車両のコントロールに影響を与えているものと思われる。またロービーム80km/h条件では走行軌跡が人に近いところを走行している。

以上の結果および、これまでのAFSの評価結果から夜間に安定した走行を行うためには十分な予見時間を持って走行する必要があることが分かっている。そこで歩行者認識、回避に関しても同様に配光制御を適用することで、予見時間を増やし安定・安全な走行を行うことが出来ると予想できる。



(a) 40km/h



(b) 80km/h

Fig. 11 Vehicle Travel Path with Low-beam

5. おわりに

本研究では、直線路における夜間走行時のヘッドランプ配光の違いによる歩行者視認性の向上効果を人間-自動車系として評価することを目的とし、配光による視認性向上がドライバーの運転行動に与える影響をDS実験により調査した。

その結果、以下の知見が得られた。

1) 歩行者認知実験の結果、歩行者の認知距離は視程距離に比例し、速度に関わらず、ほぼ一定となった。ドライビングシミュレータを用いて、ハイビーム時のドライバの歩行者認知に与える効果が確認できた。ロービーム条件ではヘッドランプの配光パターンにより左右の歩行者の認知距離に差が生じる。

2) ブレーキ回避実験の結果、昼間条件では、速度に関わらず衝突余裕時間TTC：約4秒でブレーキ操作を始めることがわかった。また、ロービーム条件では時速80km/hになると、TTCが2秒以下と著しく減少する。これはロービーム条件では歩行者認知距離が約40mであり、速度増加に伴って衝突余裕時間が減少するためである。

3) ハンドル回避実験の結果、ロービーム条件において80km/hでは、40km/hに対して最大操舵角速度の値が増加し、急なハンドル操作になるとともに車両の安定性を表すYnが増加し車両が不安定になることが分かった。これは配光による予見時間の減少が歩行者認知後の操舵行動に反映されその後の車両コントロールに差が生じたためである、その際に標準偏差の値が大きくなるのはその回避行動の方策に個人差がある可能性が示された。

今後の課題としては、夜間走行時の事故防止に寄与するとともにドライバの操縦性安定性向上を目的とした次世代の灯火制御技術の開発に際して、走行条件や環境に応じてドライバにとって最適な配光を提供するために、環境認知特性を考慮した人間-自動車系を用いた要件定義を行うことが重要である。

<参考文献>

- 1) 交通事故総合分析センター: イタルダ・インフォメーションNo.83, 2010
- 2) E.Hartman: Driver Vision Requirement, SAE, 700392, pp.692-630, 1970
- 3) John M. Sullivan, Michael J. Flannagan : Characteristics of Nighttime Pedestrian Crashes Implications for Headlighting, UMTRI2007-3, 2007
- 4) 田中雅樹ほか: ドライビングシミュレータを用いた夜間運転支援システムの効果評価, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.137-06, pp.5-10 (2006)
- 5) Y.Horii, K. Morikawa, T. Wada, S. Doi : 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
- 6) 堀井泰聡,森川慶祐,和田隆広,土居俊一: 予見時間可変モデルを用いた可変配光前照灯(AFS)制御時の運転行動解析, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.5, pp.987-992, 2010
- 7) 天野也寸志,羽田昌敏,土居俊一: 通常走行から緊急時に至るドライバの運転動作モデル, 豊田中央研究所R&Dレビュー, Vol.33 No1, 1998

<著者>



堀井 泰聡
(ほりい やすとし)
DENSO SALES SWEDEN Info
& Safety Engineering
工学博士
予防安全製品の開発, 拡販に従事



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教授 工学博士
人間特性に基づく支援機械システムの研究に従事