第42回交通工学研究発表会論文集（研究論文）
（受理日：2022年5月6日）

区画線の状態や日射量が車線逸脱警報システムの検知性能に及ぼす影響

Influence of Traffic Lane Dividing Lines Condition and Solar Radiation on Detection Performance of Lane Departure Warning System

飯田 克弘[1]，藤本 怜央[2]
Katsuhiro IIDA[1]and Reo FUJIMOTO[2]

現在，自動運転の実現に向けた車両の開発・普及状況を踏まえ，道路からの支援について検討が進められつつある．本研究は，走行実験データを分析することで，車線区画線の状態や全天日射量が車線逸脱警報システムの検知性能に及ぼす影響を把握し，車線区画線の管理目安策定に向けた検知性能低下条件の定量化を試みた．劣化状態を疑似的に再現した車線区画線を設置した試験走路で走行実験を行い，車線区画線の検知可否および，車線区画線と路面の輝度，全天日射量を測定した．分析結果から，車線区画線と路面の輝度差と全天日射量は検知性能に及ぼす要因であり，車線区画線の剥離の進行によっても検知性能が低下することが示唆された．

Keywords: 車線区画線，車線逸脱警報システム，輝度差，全天日射量，剥離率

1．はじめに

自動運転の社会実装が進展しており，現在，運転自動化レベル 4 の公道実証実験が検討されている．特にレベル 4 では, 動的運転タスクの作業継続が困難になる条件, すなわち, 自動運転が解除される条件 (以下, 解除条件) を克服する必要がある．そのために，車両の技術開発に期待すると同時に，道路インフラ側も解除条件解消に向けて対応すべきであると提言されている [1]．たとえば，車線区画線（以下，白線）の消えかかりやかすれなどが課題であることが従前より報告されている [1]が，この問題克服に加え，白線や路面標示などの従来の目的と検出性能向上が両立する基準化の必要性が高まっている [2]．

国土交通省国土技術政策総合研究所は，2021 年より，自動運転実現に向けて道路からの支援検討に着手した．その内容の一つとして自動運転に対応した白線の管理目安策定を挙げている [3]．

現在の白線管理目安の一つに目視評価ランク [4]がある．これは人の目視評価に基づく指標であるため，ばらつくこと，そして自動運転が考慮されていないことが課題である．この課題を受け，本研究では，白線，および白線と強い関係がある車線逸脱警報システム [5]に着目し，白線の更新が望ましい状況の定量化を試みる．

先行研究 [6]では白線検知性能に影響を与える指標として輝度差（白線と路面の輝度の差）に着目し，白線の剥離率ごとの検知結果を測定した．結果として，輝度差が検知性能に影響を及ぼす要因の一つであり，剥離が進んだ車線区画線では輝度差が一定値以下になる場合に検知性能が低下する可能性が示唆された．ただし，輝度差が低い状況でも白線の検知が可能であるケースが確認されたことから，輝度差以外の要因について検討することが今後の課題となっている．トンネルなどを除けば，白線や路面の見え方は天候や時間帯などの環境条件によって影響を受ける．また，それらの環境条件によっても白線検知率が低下すること [7]が報告されているため，環境条件に関する他の指標にも焦点を当てることが必要である．

本研究では，路面条件は先行研究 [6]と同様，輝度差と剥離率を対象にし，環境条件は陰と全天日射量を対象とした．劣化状態を擬似的に再現した白線を設置した試験走路で走行実験を行い，１走行ごとに検知結果，白線と路面の輝度，陰の状態および全天日射量を記録した．これらの結果の関係を分析することで，白線の更新が望ましい状況の特定を試みた．

2．走行実験

2.1　実験概要

本研究では, 性能確認試験走路「道夢道」[8] (**図 1** 参照) で実験を実施した．

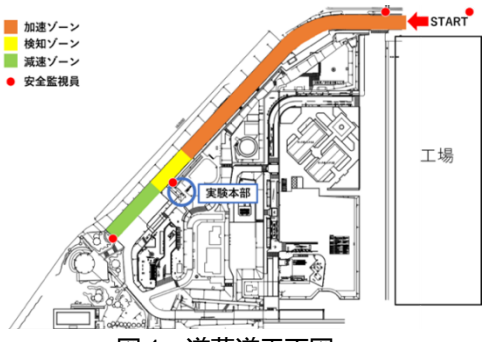

図 1　道夢道平面図

1　正会員，博士（工学），大阪大学大学院工学研究科
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1　e-mail: iida@civil.eng.osaka-u.ac.jp　Phone: 06-6879-7611
2　非会員，修士（工学），東京電力パワーグリッド株式会社

（受理日：2022年5月6日）

車線逸脱警報システムと ACC を搭載した S 社の自動車を実験車両として採用した．2020 年 12 月 1 日および同 10 日，の計 2 日間で実施した．時間帯は，午前 8 時から午後 5 時までとした．

2.2 実験条件

(1)白線劣化状態の再現方法

先行研究[6]と同様に，**図 1** の検知ゾーンの白線上に，開孔したシート（**図 2**）を被せ，白線劣化状態を再現した．剥離率は，幅 150mm 長さ 160mm を 1 単位とし，残存部と非残存部の面積の比率によって定義した．たとえば，剥離率が 70%の場合，白線の 70%はシートによって覆われて露出しない．つまり 70%は劣化しているとみなした．剥離率について本研究では 60%と 70%を対象とした．ここで，剥離率 50%以下は残存部が充分に多く，実験車両の白線検知性能では検知が可能として本研究では対象外とした．また，剥離率 80%以上の場合は，剥離が著しく進行しており，更新が必要だと判断されると考え，本研究では対象外とした．

また，先行研究[6]と同様に，剥離率 60%，70%における白線の N 値にはそれぞれ 5.5，5.0 を採用した．

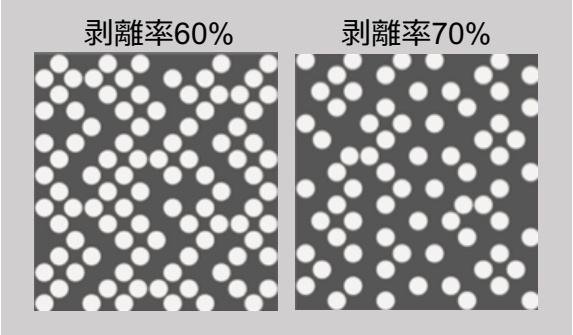

図 2　剥離模様例（出典：積水樹脂株式会社）

(2)試行回数

本研究では，先行研究[6]のデータと本研究で得たデータを合わせて使用する．先行研究[6]は，各実験日の中で時間帯ごとに剥離率を変化させながら実験を行ったが，時間帯に偏りがあったため，本研究では，実験日ごとに同じ剥離率を対象とした実験を行った（12 月 1 日は剥離率 70%，12 月 10 日は剥離率 60%）．**表 1** に各剥離率の合計試行回数を示す．

表 1　試行回数

剥離率	明度(N値)	試行回数
60%	5.5	201
70%	5.0	161

2.3 実験手順

運転者と記録員の 2 名が実験車両に乗車し，記録員は走行ごとに白線検知の可否，時刻，天候を記録した．試験走路（**図 1**）の車線延長，実験車両の加速性能を考慮し，ACC の設定速度は 55km/h とした．**図 1** の START 位置から走行を開始し，加速ゾーンまで加速するが，運転者はアクセル操作を一切行わない．その後検知ゾーンで運転者のハンドル操作によって白線を乗り越え，反対車線に車線変更を行った．この際，白線検知できているかを確認し，記録員が結果を記録した．なお，全ての試行でハンドル操作を同様に行うため，路面に走行軌跡の目印となる線を引き，それに沿って走行した．ここで，検知ゾーンを実験車両が通過した直後に，実験本部に待機している担当者が，輝度を測定した．この走行と測定を合わせて 1 試行とし，**表 1** に示す試行回数を実施した．

2.4 取得データ

(1)輝度データ

本研究では，先行研究[6]を参考に，残存部白線輝度（先行研究では開孔部白線輝度と記載），新品白線輝度（先行研究では N9.0 白線輝度と記載），路面輝度を測定した．

(2)陰の分類

実験中，陰による検知性能への影響が示唆されたため，実験車両の後部座席に設置したビデオカメラの録画映像から，「直射日光」「陰」「一部陰」の 3 つの条件に分類した．検知対象となる白線に直射日光が当たる試行を「直射日光」（**図 3**），完全に陰に覆われている試行を「陰」（**図 4**），部分的に陰が存在する試行を「一部陰」（**図 5**）とした．なお，天候が曇の場合は，白線全体が陰に覆われているため，「陰」とした．

図 3　直射日光の例

図 4　陰の例

図 5　一部陰の例

(3)日射量データ

各試行の全天日射量を測定した.

3．路面条件が白線検知性能に及ぼす影響

3.1　輝度差が白線検知性能に及ぼす影響

(1)剥離率 60%における輝度差の影響

図 6 に剥離率 60%における白線検知結果別の輝度差のヒストグラム（階級幅：50cd/㎡）を示す．この結果より，輝度差が 450cd/㎡以下の条件下で検知性能が低下する様子が確認された．輝度差 450 cd/㎡を境界として検知率を比較した結果，輝度差 450 cd/㎡以下の全試行の検知率 64%（94/148）と輝度差 451 cd/㎡以上の全試行の検知率 78%（45/58）の差には有意傾向が確認された（Z 検定，p<0.1）.

次に，輝度差 300 cd/㎡を境界とした輝度差分布について考察する．輝度差 301~350 cd/㎡の検知率 40%（6/15）と比較し，輝度差 251~300 cd/㎡の検知率が 78%（7/9）であり検知率の上昇が確認できる．路面条件が悪くなる状況で検知率が上昇する原因は正確には把握できないが，自動車メーカーの発表資料 [9]によると，輝度パターンにより白線を検知していること，ステレオカメラの認識ソフトウエアが認識困難な状況（大雨や大雪等）を判断する場合，運転支援機能の一部制限や，ドライバーへの告知が行われることが記載されている．以上のことから，運転支援機能の一部制限になる前段階として，輝度パターンの評価が難しくなる状況下では，白線検知のシステムが補正される可能性が推測できる.

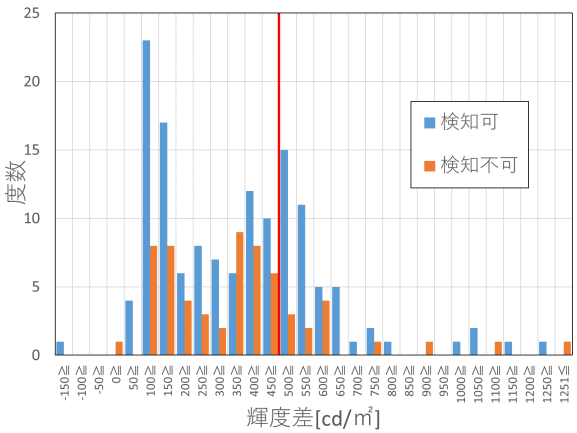

図 6　剥離率 60%における検知結果別の輝度差分布

(2)剥離率 70%における輝度差の影響

図 7 に剥離率 70%における白線検知結果別の輝度差のヒストグラムを示す．この結果から，輝度差 350 cd/㎡以下の条件下で検知性能が低下する様子が確認された．輝度差 350 以下の検知率 51%（69/136）と輝度差 351 以上の検知率 92%（23/25）には有意差が確認された（Z 検定，p<0.05）.

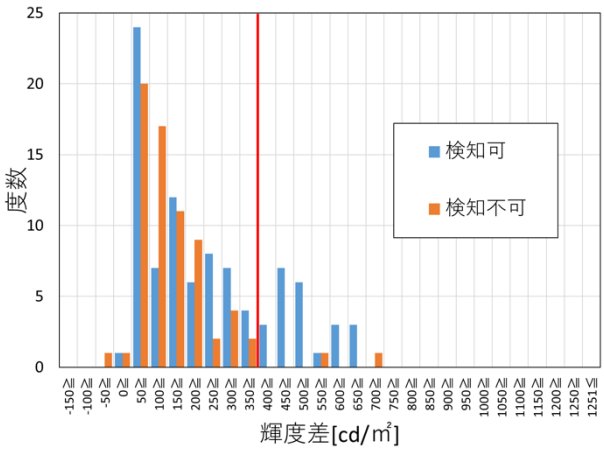

図 7　剥離率 70%における検知結果別の輝度差分布

3.2　剥離率が白線検知性能に及ぼす影響

図 6 と**図 7** を比較し，剥離率が増加することによる検知性能への影響を把握する．各剥離率での検知率を比較すると，剥離率 60%は検知率 69%(139/201)，剥離率 70%は検知率 57%(92/161)であり，両者には有意差が確認された（Z 検定，p<0.05）.

さらに，輝度差 300 cd/㎡以下に着目すると，剥離率 60%では試行数の増加に伴い，検知可が増加しているのに対し，検知不可の増加は抑制されていることが確認できた．一方，剥離率 70%では，試行数の増加に伴い，検知可・検知不可の両者の増加が確認できた

以上の結果から，剥離率 70%では，検知性能が低下することが確認された.

4．環境条件が白線検知性能に及ぼす影響

1 章で述べた通り，本研究では，陰および全天日射量が検知性能に及ぼす影響を把握する.

4.1　陰が白線検知性能に及ぼす影響

走行実験実施の際，白線が陰に覆われることで検知性能が低下する可能性が確認されたため，「直射日光」「陰」「一部陰」の 3 種類に条件分類し，それぞれの検知率を比較する.

表 2 に陰の条件別検知率を示す．剥離率 70%における一部陰の条件は試行回数が 2 回だったため，分析対象外とする.

表 2　陰の条件別検知率

	剥離率60%			剥離率70%	
	直射日光	陰	一部陰	直射日光	陰
試行回数	91	80	30	32	127
検知可	77	48	14	27	63
検知率	85%	60%	47%	84%	50%

剥離率60%における直射日光での検知率85%と陰での検知率 60%には有意差が確認された（Z 検定，p<0.05）．次に，剥離率 70%における直射日光での検知率 84%と陰での検知率50%にも有意差が確認できた（Z検定, p<0.05）．この結果から，陰が検知性能に影響を与える可能性が示唆された．また，剥離率 60%における一部陰の検知率は47%となっており，陰の場合よりも低下していることが読み取れるが両者に有意差は確認できなかった．以上の結果から，白線が陰に覆われると検知性能が低下することが確認された．

ここで，陰による分類は解除条件の判断材料としては有用であると考えられるが，同じ陰に分類されても白線の見え方が異なる場合がある．そこで，次節では定量的な指標を用いた分析を行う．

4.2　日射量が白線検知性能に及ぼす影響

(1)陰と日射量の関係

図 8 に，陰の条件別での補正日射量（一部の条件での全天日射量を補正した日射量，次項で詳述）のヒストグラム（階級幅：50W/㎡）を示す．

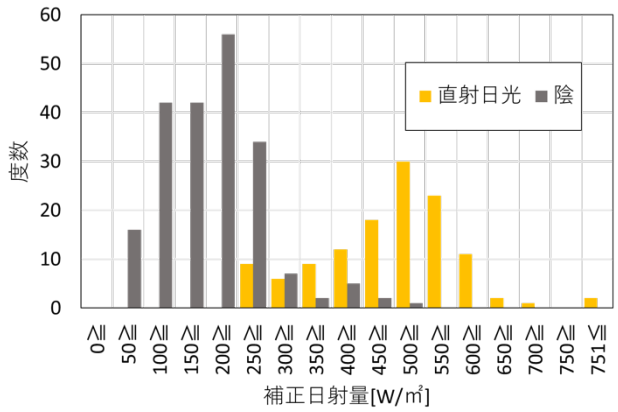

図 8　陰の条件別での補正日射量分布

この結果から，陰と日射量には関連性が伺えるため，本研究では，環境条件に関する定量的な指標として日射量を採用する．

(2)日射量の補正

本研究で使用した日射計は，試験走路上ではなく，試験走路がある敷地の建物屋上に設置されている．そのため，天候が晴かつ白線が陰に覆われている場合（以下，補正条件）は，直射日光の全天日射量が測定されるが，白線へ実際照射される日射量とは異なる．この差異の補正を試みる．

明度が一定であること，検知対象となる白線の付近に存在していることから，補正には新品白線輝度を使用する（**図 9**）．この新品白線は，シートで覆われており，実験車両通過後の輝度計測の際に，調査員がシートを捲り，輝度を計測した（2.3 参照）**図 10** に，日射計と白線への全天日射量に差異が無いと考えられる場合の全天日射量と新品白線輝度の散布図を示す．

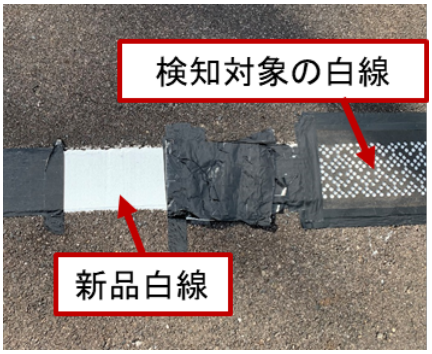

図 9　新品白線

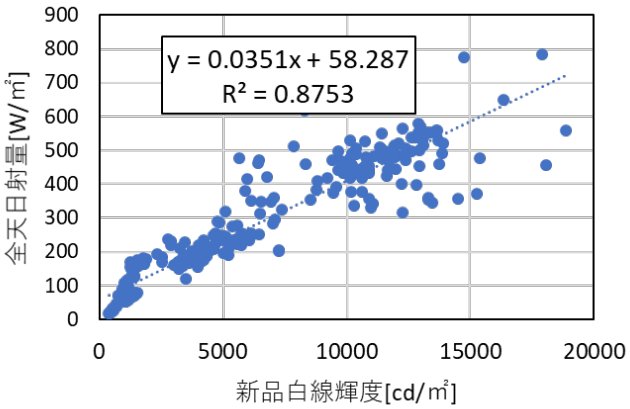

図 10　全天日射量と新品白線輝度の関係

この結果より，全天日射量と新品白線輝度は相関が高い（相関係数は 0.936，p<0.05）ことが読み取れる．両者の関係を表す近似直線に補正条件の新品白線輝度を代入することで，補正された全天日射量を推定する．以降の分析では，補正条件以外での日射量は測定した全天日射量，補正条件における日射量は補正された全天日射量を使用し，統合した指標を補正日射量と示す．

(3)補正日射量の影響

図 11，**図 12** に剥離率 60%，剥離率 70%における白線検知結果別の補正日射量のヒストグラム（階級幅：50W/㎡）を示す．剥離率 60%と 70%の両者に共通する結果として，補正日射量が 250W/㎡以下で，検知不可が一定数現れることが読み取れる．剥離率 60%において，250 W/㎡以下の検知率 63%（65/103）と 251 W/㎡以上の検知率 76%（74/98）の差には有意傾向が確認された（Z 検定，p<0.1）．そして剥離率 70%においても，補正日射量 250 W/㎡以下の検知率 47%（55/116）と 251 W/㎡以上の検知率 82%（37/45）には有意差が確認された（Z 検定, p<0.05）．この結果から，補正日射量の低下に伴い，検知性能も低下する可能性が読み取れる．

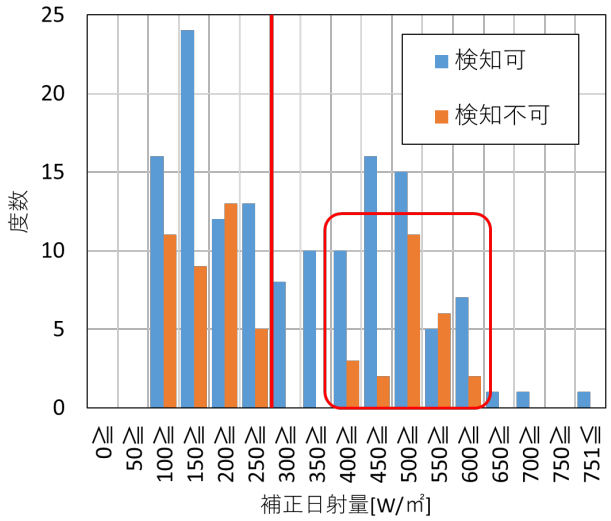

図 11　剥離率 60%における検知結果別の補正日射量

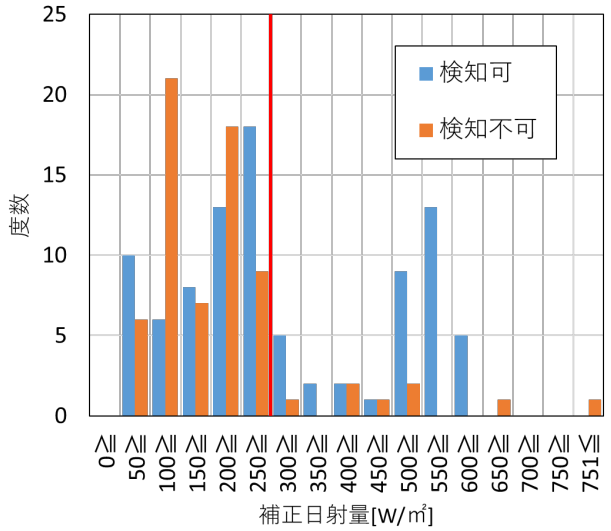

図 12　剥離率 70%における検知結果別の補正日射量

ここで，剥離率 60%において，補正日射量 351~600 W/㎡にも検知不可が一定数現れていることが読み取れる．この検知不可の原因を分析する．補正日射量 351~600 W/㎡の検知不可の試行は，24 回中 9 回が一部陰，12 回が直射日光条件下での 12 時台の試行である．試験走路の構造上，12 時台の走行は逆光による路面の照り返しが強く，車内から白線を視認しにくいことが確認された．逆光の影響を把握するため，直射日光条件下での 12 時台の試行と 12 時台以外の試行を比較する．　**表 3** に剥離率ごとの検知率を示す．この結果から，12 時台の試行は検知率が低下することが読み取れる．剥離率 60%における 12 時台の検知率 52%と 12 時台以外の検知率 97%，剥離率 70%における 12 時台の検知率 0%と 12 時台以外の検知率 96%には有意差が確認された（Z 検定，p<0.05）．この結果から，逆光による路面の照り返しによって検知性能が低下することが示唆された．

表 3　剥離率別での 12 時台と 12 時台以外の検知率

	剥離率60%		剥離率70%	
	12時台	12時台以外	12時台	12時台以外
走行回数	23	67	4	28
検知可	12	65	0	27
検知率	52%	97%	0%	96%

5. 輝度差と日射量の影響

本章では，輝度差と補正日射量を組み合わせ，検知性能が低下する条件の特定を試みる．具体的には，検知結果を目的変数，輝度差と補正日射量を説明変数とした判別分析を用いて検知可能と予測される輝度差と補正日射量の組み合わせを算出する．ここで，分析対象外の試行を示すため，輝度差[cd/㎡]を x 軸，補正日射量[W/㎡]を y 軸，度数を z 軸とした，検知結果別の 3 次元ヒストグラムを**図 13, 図 14** に示す. 図中の円柱で囲まれた領域は，低輝度差かつ低補正日射量であるが，検知可が多数存在していることが読み取れる．この結果は，この領域以外での傾向や，通常の運転感覚からは乖離している．先述したシステム補正の影響の可能性が考えられるが，このロジックが明らかでないため，本研究ではこの領域の試行は判別分析の対象外とする．また，剥離率 60%における輝度差 701 cd/㎡以上の試行に関しても，サンプル数が少なく，剥離率 70%では確認されていないことから対象外とする．

判別分析で得られた標準判別係数を**表 4** に示す．この結果から，輝度差と補正日射量は検知性能に同程度の影響があると読み取れる．**図 15** に剥離率ごとに判別関数をプロットしたグラフを示す．ここで，破線で示した箇所については，先述したシステム補正の可能性やサンプル数が少ないことから分析対象外とした箇所である．分析結果から，青の領域は検知可，赤の領域は検知不可と予測される．この結果より，一定の補正日射量でも輝度差によって検知結果が分類されることが確認できた．道路点検への適用を考えると，例えば補正日射量が 400 W/㎡の場合に輝度差を測定し，約 450 cd/㎡以上であれば白線更新の必要は無いと判断する管理方法が可能になる．

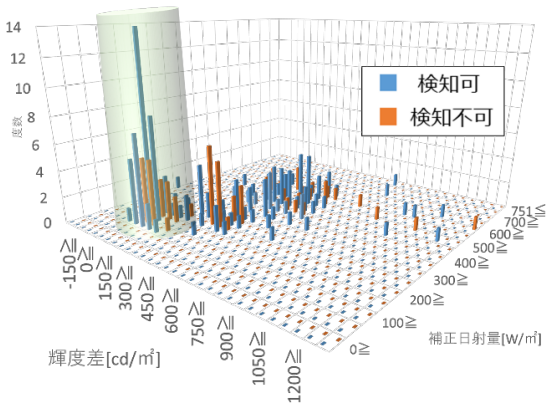

図 13　輝度差と補正日射量の分布（剥離率 60%）

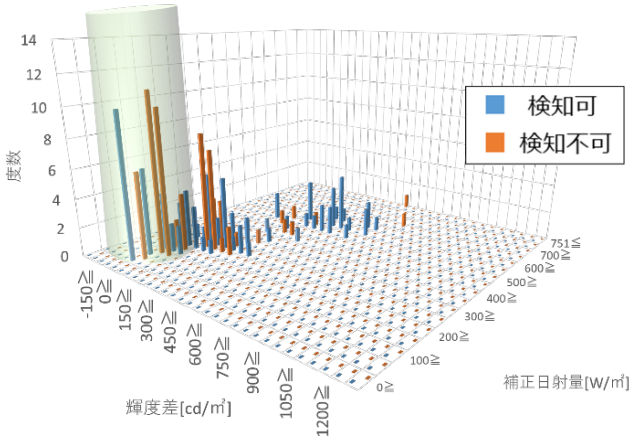

図 14　輝度差と補正日射量の分布（剥離率 70%）

表 4　剥離率ごとの標準判別係数

	剥離率60%		剥離率70%	
	標準判別係数	P値	標準判別係数	P値
輝度差	5.9E-01	1.8E-06	5.4E-01	9.9E-03
補正日射量	6.8E-01	4.3E-08	5.7E-01	7.5E-03

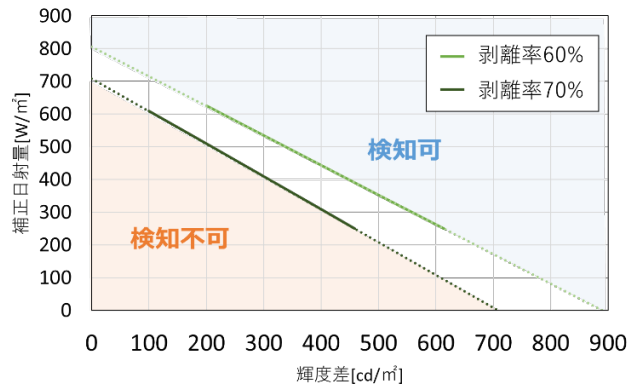

図 15　剥離率別での判別関数

6．おわりに

本研究では，劣化状態を擬似的に再現した白線を設置した試験走路で走行実験を行い，検知結果別の輝度差分布や日射量分布を分析することで，各指標が検知性能に与える影響を把握し，検知性能が低下する条件の特定を試みた．以下に，本研究で得られた成果を示す．

- 剥離率 60%の場合は輝度差 450cd/㎡以下，剥離率 70%の場合は，輝度差 350 cd/㎡以下で検知性能の低下が確認された．剥離率 60%と比較して，剥離率 70%の場合は検知率の低下も確認された．
- 剥離率 60%，70%の両者において，白線が陰に覆われる場合，補正日射量が 250 W/㎡以下になる場合は検知性能が低下することが確認された．また，補正日射量が高い状況でも，逆光等の影響によって検知性能が低下することが示唆された．
- 判別分析によって，検知可と予測される輝度差と補正日射量の組み合わせを把握した．

本研究では，晴または曇の朝から夕方までを実験対象としているため，今後は夜間や雨天での評価が可能である指標を追加検討する必要がある．

謝辞

本研究は，大阪大学と一般社団法人全国道路標識・標示業協会関西支部大阪府協会との共同研究であり，ここに感謝の意を表します．

参考文献

1) 自動運転に対応した道路空間に関する検討会：自動運転に対応した道路空間のあり方「中間とりまとめ」~政府目標達成のために道路インフラが早急に取り組むべき事項を提言~, https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road_space/pdf/chu-matome.pdf，2019.（最終閲覧日：2022 年 1 月 11 日）
2) 一般社団法人　日本自動車工業会　自動運転検討会　副主査　加藤昌彦：自動運転の実用化と普及に向けて~道路インフラとの連携~, https://www.mlit.go.jp/common/001195130.pdf　，2017.（最終閲覧日：2022 年 1 月 11 日）
3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：共同研究の公募要領, http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/kisya20210806_1.pdf ，2021（最終閲覧日：2022 年 1 月 11 日）
4) 全国道路標識・標示業協会：路面標示ハンドブック第 5 版，2018.
5) TOYOTA：高速道路を走るとき：車線はみ出しアラート 車線逸脱警報機能 https://toyota.jp/safety/scene/highway/index2.html?padid=ag461_safety_about_tss_link03#support01.（最終閲覧日：2022 年 1 月 11 日）
6) 飯田克弘・藤本怜央：路面と車線区画線の輝度差が車線逸脱警報システムの検知性能に及ぼす影響の把握，交通工学論文集，7(2)，p. A_38-A_43，2021
7) 磯島駿介・小野口一則：A-4-12 夜間・雨天時の白線に関する研究，電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ/NOLTA ソサイエティ大会講演論文集，pp.198, 2016.
8) 積水樹脂株式会社：性能確認試験走路「道夢道」，https://www.sekisuijushi.co.jp/dome/，2021.（最終閲覧日：2022 年 2 月 1 日）
9) SUBARU：オートモーティブ・ソフトウエア・フロンティア 2020 SUBARU の運転支援技術，2020.（最終閲覧日：2022 年 2 月 1 日）