

JIER-078

# 悪天候下における交通視環境に関する特別研究委員会報告書

平成15年3月31日

社団法人 照明学会 視覚研究専門部会

# 目 次

章.節.項	タイトル	頁
	前書き	1
1	研究調査委員会の研究目的と活動内容	2
1.1	研究の背景	2
1.2	研究の目的	2
1.3	調査研究委員会の活動スケジュール	2
1.4	委員会の構成	3
1.5	調査研究委員会の活動経緯	3
2	悪天候下における交通視環境問題	6
2.1	道路構造と交通視環境	7
2.2	雨天の市街地道路と交通視環境	8
2.3	昼間の霧発生環境下における交通視環境	9
2.4	夜間の霧発生環境下における交通視環境	10
2.5	冬期道路における交通視環境	10
3	交通視環境問題と交通事故	12
3.1	統計資料にみる悪天候と交通事故との関係	12
3.1.1	悪天候の平均的発生状況	12
3.1.2	気象別の交通事故発生状況	12
3.1.3	雨天時の交通事故状況	13
3.1.4	霧発生時の交通事故状況	13
3.1.5	その他の状況	14
3.1.6	まとめ	14
3.2	高速道路の交通視環境と交通事故	15
3.2.1	事故統計	15
3.2.2	事故の対策とその効果	16
3.3	降雪・吹雪時の多重衝突事故	18
3.3.1	研究方法	18
3.3.2	研究結果	19
	第3章 参考文献	20
4	雨・雪・霧の実態調査と各種理論	21
4.1	雨・雪・霧の発生メカニズム	21
4.1.1	降雨のメカニズム	21
4.1.2	降雪のメカニズム	22
4.1.3	霧の発生メカニズム	23
4.2	雨・雪・霧の分類と物理特性	24
4.2.1	雨の分類と物理特性	24
4.2.2	雪の分類と物理特性	26
4.2.3	霧の分類と物理特性	29

4.3	霧に関するシミュレーション技術	30
4.3.1	はじめに	30
4.3.2	霧のシミュレーションの種類と特徴	30
4.3.3	人工霧の発生シミュレーションの概要	31
4.3.4	霧のCGシミュレーションの種類	32
4.3.5	大気中における視認性理論	32
4.3.6	多重散乱を考慮しない霧のCGシミュレーション	35
4.3.7	多重散乱を考慮した霧のCGシミュレーション	36
4.3.8	霧のCGシミュレーション方法のまとめ	39
4.4	雪・霧に関する視程と見え	40
4.4.1	視程	40
4.4.2	霧と視程及び見え	41
4.4.3	雪粒子による視程変動	42
4.5	雨・雪・霧の計測技術並びに発生装置	43
4.5.1	計測技術	43
4.5.2	発生装置	48
4.6	路面の反射率について	50
	第4章 参考文献	53
5	調査・研究事例報告	54
5.1	模擬環境下での実験	54
5.1.1	実霧発生装置による視認性実験	54
5.1.2	霧中における色光の見え方実験	58
5.2	実路環境下での測定並びに実験	61
5.2.1	各種天候下における路面の輝度コントラスト測定実験	61
5.2.2	道路照明機器の吹雪下における視認性研究	66
5.2.3	雨天時における道路照明の視認性について	71
5.2.4	寒地道路における自動車灯火器について	75
5.2.5	霧中におけるリアフォグランプの視認性研究	77
5.2.6	雪下におけるLED表示装置の視認性実験	81
5.3	各種視程における航空灯火の見え方シミュレーション	84
5.3.1	研究の目的	84
5.3.2	滑走路灯火の設置条件	85
5.3.3	視距離と角膜照度	86
5.3.4	シミュレーションによる評価方法	88
5.3.5	まとめ	89
	第5章 参考文献	90

6	特別研究事例	91
6.1	霧中における LED 発光体の光覚閾および色覚閾に関する研究	91
6.1.1	研究の背景と目的	91
6.1.2	実験施設	91
6.1.3	実験方法	92
6.1.4	実験結果	94
6.1.5	考察	99
6.1.6	まとめ	100
6.2	濃霧中における視認特性—粒子直径の差による影響の定量化—	100
6.2.1	研究の背景と目的	100
6.2.2	実験方法	100
6.2.3	実験結果	101
6.2.4	考察	102
	第6章 参考文献	102
7	悪天候下での視覚情報提供・交通視環境改善事例の紹介	103
7.1	道路施設の各種改善（設置事例）	103
7.1.1	道路照明施設	103
7.1.2	誘導システム	104
7.1.3	道路情報板	106
7.2	車載照明機器類による交通視覚情報提供の改善	106
7.2.1	A F S 環境対応型ヘッドランプ	107
7.2.2	暗視システム	107
7.2.3	道路施設並びに道路照明施設への期待	108
7.3	ITS(高度道路交通システム)技術等による視程障害対策	109
7.3.1	背景と目的	109
7.3.2	ITS 技術を用いた走行支援システム	109
7.3.3	試験運用による性能確認	110
7.3.4	まとめ	111
	第7章 参考文献	111
8	まとめ（今後の研究課題）	112
8.1	悪天候下における交通視環境問題	112
8.2	交通視環境と交通事故について	114
8.3	各種理論について	115
8.4	模擬環境下および実路環境下で行われた調査・研究事例報告	116
8.5	特別研究事例	118
8.6	視覚情報提供・交通視環境改善事例	119
8.7	交通視環境の整理と改善方法	120
	第8章 参考文献	120
	後書き	121

## 前書き

近年におけるわが国の経済活動の上昇に伴い、旅客・物資の輸送量は増加の一步を辿っている。また、道路網も全国各地へと張り巡らされている。これらに付随して、交通量も急激な増大を示すと共に、ますます過密化の方向へと向かっている。その結果、交通事故数も増加の傾向を示しており、今日の深刻な社会問題の一つともなっている。

一方、この増大した交通機関を制御し、且つ安全を確保するための手段の一つとして、各種の道路施設（道路付属施設、道路照明装置、道路舗装、その他）や車輛に関しては自動車用照明装置等が存在している。現在では、これらの道路施設や自動車用照明装置なくしては、交通安全はもとより、スムーズな交通量の流れを維持することは不可能といえる。これらの果たすべき役目は日々その重要性を増してきているといえよう。

他方、これらの各種道路付属施設や自動車用照明装置に関しては、まだまだ改善すべき問題点も存在しているのが現状である。

ところで薄暮、夜間、濃霧、降雨、降雪といった、いわゆる悪天候下においては、ドライバーにとっての交通視環境はより一層厳しいものとなると同時に、交通事故数も急増する傾向を示す。したがって天候も考慮に入れた交通視環境全体に関する研究調査や、これらの研究調査結果を踏まえた交通視環境の整備・改革・改善が切に望まれる。

そこで本特別研究委員会では、わが国の交通事故数の抑制を図るべく、関連する各界・各分野から多数の優秀な専門家を招集し、特に「悪天候下における交通視環境に関する特別委員会」と銘打って委員会を構成し、悪天候下での交通視環境に関する研究調査を施行した。

研究調査期間は、平成13年4月から平成16年3月までの3年間、研究調査機関・施設・場所は、特別研究委員会を構成している各委員の所属機関はもとより、悪天候の発生頻度が極めて高い富士山麓、北海道釧路地方から北陸地方にまで及んだ。言い替えれば、本特別研究委員会報告書は長期間並びに広範囲に渡る、「悪天候下における交通視環境」に関する研究調査の集大成となっている。

本特別研究委員会報告書が、悪天候下における交通事故防止のための一助となれば当委員会委員の最も幸いとすところである。

悪天候下における交通視環境に関する特別研究委員会  
委員長 中嶋芳雄

# 第1章 研究調査委員会の研究目的と活動内容

## 1.1 研究の背景

(財)交通事故総合調査分析センター(ITARDA)では、日本の高速道路における死亡率や死者数は経年変化を集計している。その統計結果では夜間は昼間の事故率(件/億台キロ)の3.6倍、路面湿潤時には乾燥時の4.2倍と報告されている。また冬期の悪天候下では重大な多重追突事故が毎年繰り返し報告されているのが現状である。

この自動車運転に必要な情報の内で視覚情報の占める割合は9割以上といわれている。

交通事故対策の観点から、道路、道路施設(道路照明装置、道路付属施設)及び自動車用照明装置は、実道路交通環境下でドライバーに運転操作に必要なより良い視覚情報を提供するように設計されている必要がある。

自動車照明装置や道路照明装置を主とした道路施設の視認性に関する研究は晴天時において数多く見られるが、雨や雪などの悪天候下での研究は十分なされていないのが現状である。また交通視環境と交通安全に関して広範囲に体系づけて調査・解析されていないのが現状である。そこで悪天候下における交通視環境を体系的に調査すると共に道路、道路施設(道路照明装置、道路付属施設)及び自動車用照明装置の課題を明らかにすることを目的に、本学会視覚研究専門部会の下に「悪天候下の交通視環境に関する調査研究委員会」を平成13年4月に発足させた。

## 1.2 研究の目的

道路、道路施設(道路照明装置、道路付属施設)及び自動車用照明装置によりドライバーにより良い交通視環境を実現することは、交通安全上重要である。

そこで本調査研究委員会では本委員会の下に道路交通に係わる公的研究機関及び民間企業の研究者の参加を求め、下記の目的のもとに調査研究に着手した。

- (1) 悪天候下における交通視環境問題の整理
- (2) 悪天候下における交通事故の現状調査(晴天時と悪天候下の比較)
- (3) 悪天候下における見え方理論(シミュレーション技術含む)に関する調査
- (4) 雨、雪、霧の物理現象並びに視認性研究設備に関する調査
- (5) 悪天候下における視認性研究事例の調査

## 1.3 調査研究委員会の活動スケジュール

調査研究委員会は当初、「悪天候下の交通視環境に関する調査研究委員会」として平成13年度と平成14年度の2年間の計画にて開始したが、①研究内容が多岐にわたること、②「霧中での視覚特性」の特別研究を追加する必要が生じ、平成15年度は「悪天候下の交通視環境に関する特別調査研究委員会」として活動した。これを図1に示す。

図1 調査研究委員会の活動経緯

	H13年度	H14年度	H15年度
委員会	調査研究委員会	調査研究委員会	特別調査研究委員会
活動計画の立案	→		
研究事例報告			→
実験の立案と実施		←特別実験1→	←特別実験2→
報告書の作成			→

## 1.4 委員会の構成

委員会の構成と委員の所属、並びに報告書作成担当箇所を表1に示す。

表1 調査研究委員会メンバーの構成と所属

	氏名	所属	報告書作成担当箇所
委員長	中嶋 芳雄	富山大学工学部知能情報工学科教授	前書き・後書き
幹事	高松 衛	富山大学工学部知能情報工学科講師	5.1.2, 6.2
	小林 正自	(株)小糸製作所研究所主管	1, 2, 5.2.1&4, 7.2
	中島賛太郎	星和電機(株)新規事業本部企画部長	5.2.6, 6.1
委員	安藤 和彦	国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路空間高度化研究室主任研究官	3.1
	河合 隆*1	国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路空間高度化研究室	5.2.3
	林堅太郎*3	国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路空間高度化研究室	
	元木正典*2	(財)自動車研究所 安全・情報研究部 人間工学研究グループ主席研究員	
	野田 覚	(財)日本道路交通情報センター調査部次長	3.2
	中山 昌春	東京理科大学理工学部電気工学科専任講師	5.3
	萩原 亨	北海道大学大学院工学研究科助教授	4.4, 5.2.5
	坂本 正悦	松下電器産業(株) パナソニック・システムソリューションズ 社首都圏本部主席技師	7.1
	赤坂 人司	岩崎電気(株)技術開発室技術開発グループ長	5.2.2
	一条 隆	東芝ライテック(株)研究所研究企画・管理担当グループ長	4.6
	松本 泰幸	小糸工業(株)照明・情報システム営業本部課長	8
	伊東 勇人	松下電工(株)中央照明エンジニアリング総合部照明ソフト開発グループ	4.2, 4.3
オブザーバー	加治屋安彦	(独)北海道開発土木研究所道路部防災雪氷研究室室長	3.3
	藤波 研次*2	小糸工業(株)開発本部研究開発部	4.1, 4.5, 5.1
	森 星豪	松下電工(株)中央照明エンジニアリング総合部照明ソフト開発グループ	
	升方 充*1	日本道路公団試験研究所交通研究主幹	7.3

\* 1; 平成15年度より参画

\* 2; 平成14年度より参画

\* 3; 平成13年度・14年度の2年間参画

## 1.5 調査研究委員会の活動経緯

委員会活動はメンバーの研究事例を報告すると共に委員会メンバーで共同実験を企画して行った。調査研究委員会活動は14回開催された。

この間、特別実験1(2002.6.18~19)、公開研究会(2003.4.4)、特別実験2(2003.6.1~12.25)を実施した。各委員会での主要議題並びに研究事例報告を下記に示す。

- 第1回委員会 (2001.10.10)
  - 協議事項；委員会の活動の進め方並びに活動スケジュールの協議
  - 研究事例紹介；「悪天候下における交通視環境調査の事例」--小林幹事
- 第2回委員会 (2001.12.23)
  - 研究事例紹介
    - ◇ 冬期道路安全走行としての発光施設に関する研究--高松幹事
    - ◇ 視界不良時における情報板の視認性検討--中島幹事
    - ◇ 物の見え方を左右する要因とその影響度--野田委員
  - 文献紹介；霧などのシミュレーション関連文献の紹介--伊東委員
- 第3回委員会 (2002.02.22)
  - 研究事例紹介
    - ◇ 紫外線を活用した区画線の霧中時に求められる発光輝度の研究--林委員
    - ◇ 昼間の霧発生時における視線誘導灯の視認性に関する研究. 萩原委員
    - ◇ 道路情報板、視線誘導灯、ガイドライトシステムの紹介--松本委員
    - ◇ 悪天候下における交通視環境の問題点について. 小林幹事
- 第4回委員会 (2002.04.25)
  - 協議事項；悪天候下の視環境問題点整理と共同実験について
  - 研究事例紹介
    - ◇ 低視程時における航空灯火の光度設定--中山委員
    - ◇ 道路照明と自動車前照灯融合時の視認性に関する検討--林委員
  - 文献紹介；視程とその評価に関する論文--野田委員
- 視程障害時における発光体の視認性に関する共同実験 (2002.06.18~19)
- 第5回委員会 (2002.07.02)
  - 協議事項；悪天候下の交通視環境問題の協議と最終報告書の作成について
  - 研究事例紹介
    - ◇ 霧に関する物理現象と各種理論、解析、計測方法について--藤波 OB
    - ◇ レーンマーク認識性能評価システムの研究. 小林幹事
- 第6回委員会 (2002.08.28)
  - 研究事例紹介
    - ◇ 寒冷地における自動車用灯火器の問題--小林幹事
    - ◇ 吹雪時における発光体の見え方--赤坂委員
    - ◇ 路面の反射特性について--一条委員
- 第7回委員会 (2002.10.23)
  - 協議事項；H15年度公開研究会への対応
  - 研究事例紹介
    - ◇ 悪天候と交通事故との関係--安藤委員
    - ◇ 交通視環境と交通事故--野田委員
    - ◇ 霧中におけるシミュレーション理論について--森 OB
    - ◇ 霧発生時の対象物の視認特性に関する研究--萩原委員
    - ◇ 視線誘導灯の霧の中での見え方について--松本委員

- 第8回委員会 (2002.12.17)
  - 研究事例紹介
    - ◇ ITARDA「光環境を考慮した人対車両事故に関する分析」の紹介--小林幹事
    - ◇ ITARDA「気象情報を活用した交通事故統計分析」の紹介--元木委員
    - ◇ 自動車研究「高速道路の霧対策とその効果」の紹介--元木委員
    - ◇ 「色の秘密」(東洋大;野村教授著)--野田委員
- 第9回委員会 (2003.02.26;富山大学)
  - 協議事項;最終報告書のフォームと委員会活動期間の延長について
  - 研究事例紹介
    - ◇ 雪国における景観照明及び街路照明における演色効果の研究--高松幹事
    - ◇ 自動車トンネル内の光幕現象と視認性、他--坂本委員
    - ◇ 霧中におけるLED発光体の光覚閾及び色覚閾に関する研究--中島幹事
- 平成15年度公開研究会 (2003.04.04;北トピア)
  - 「悪天候下における交通視環境とその改善を目指して」
  - VP-03-1;悪天候と交通視環境問題--小林幹事
  - VP-03-2;悪天候と交通事故との関係--安藤委員
  - VP-03-3;霧中でのリアランプの視認性--萩原委員
  - VP-03-4;濃霧中における視認性-陸上交通への応用を目指して--高松幹事
  - VP-03-5;発光ダイオードを用いた多色呈示における最適表示色に関する研究-道路交通視環境へのアプローチ--中島幹事
- 第10回委員会 (2003.05.08)
  - 協議事項;
    - ①特別委員会昇格に伴う研究計画・内容の協議
    - ②悪天候下における交通視環境問題の集約協議
- 第11回委員会 (2003.07.31~08.01;釧路市鳥取コミュニティーセンター)
  - 研究事例紹介
    - ◇ 道路付属物の霧発生時における視認性研究実験経過報告(開土研、宗広氏)
    - ◇ 大分県における霧発生道路における誘導システム(升方OB)
  - その他;北海道開発土木研究所道路部交通研究室の研究設備見学
- 第12回委員会 (2003.11.05)
  - 協議事項;最終報告書の参集状況と今後の作成計画案について
  - 研究事例紹介
    - ◇ 天候による路面状況の検出について(藤波OB)
    - ◇ 点滅刺激色光と誘目性(小林幹事)
    - ◇ 知覚される彩度差と各種色差式による評価値との比較(中山委員)
- 第13回委員会 (2004.01.29)
  - 協議事項;最終報告書の査読
  - 研究事例紹介;霧粒子直径による視認性への影響に関する研究--高松幹事
- 第14回委員会 (2004.03.23)
  - 協議事項;最終報告書の査読
  - 研究事例紹介;霧発生時における道路付属物の視認性評価実験--宗広OB

## 第2章 悪天候下における交通視環境問題

晴天下における交通視環境問題の概要を表2-1に示す。

晴天時の日中の良好な交通視環境も道路照明の存在しない夜間においては、照明が前照灯のみとなるため視覚情報は急減し、遠方路面に存在する障害物や道路構造物の情報は得られ難くなる。また対向車の前照灯によるグレアは視認（視覚探査）時のノイズとなる。

表2-1 晴天下における交通視環境問題の概要

時間帯		夜		薄暮	昼	
照明条件	環境照度 (lx)	0.1	10	30 ~ 200	1,000 ~ 100,000	
	道路照明	なし	あり			
	ヘッドライト	点灯	消灯	消灯		
	一般的な問題	視覚情報の低下		逆光障害	環境輝度均一	
視対象	道路線形	上下	ヘッドライト			
		左右	グレア		山間部での視界不良	
	道路構造	トンネル			トンネル出入口での順応と緩和照明	
	交通	対向車	ヘッドライト		車両存在認知	
		先行車	グレア		距離の低下	
		歩行者	視認距離低下			
		交通信号			誤点灯現象	
		交通標識	視認距離低下			

表2-2 各種天候下における交通視環境問題

気象条件{視程(m)}			現象	視環境問題
雨	雨	<1000	車両の濡れ	ワイパー作動による視界障害
			視対象の濡れ	夜間、視対象物の濡れによる視認距離の低下
			路面の濡れ	路面の反射グレア増加による視認距離低下
			天候変化	日中の路面からの照り返しグレア (雨→晴)
豪雨	<200	路面の冠水	先行車の水はねによる視界障害	
			区画線の視認性低下 (車線維持作業負荷増加)	
霧	霧	<200	光の散乱	光膜グレアによる輝度コントラストの低下
			光の減衰	光の減衰による視対象輝度低下による視認性低下
	濃霧	<50		道路線形の視認性低下 (車線維持作業負荷の増加)
雪	雪	<1000	路面の冠雪	先行車のタイヤの雪巻き上げによる視界の急変
			光の散乱	レーンマーク冠雪による車線維持作業負荷の増加
	光の減衰	道路線形の視認性低下 (車線維持作業負荷の増加)		
	豪雪	<50	着雪、着泥	着雪、着泥による照明機器、表示機器の性能低下
地吹雪	<50	雪の巻き上げ	暴風雪による視界の急変	

また雨天時には視対象物も濡れにより反射率が低下するため、視対象物の視認性は低下すると共に、路面からの照り返しグレアの影響で路面上の視対象物の確認もし難くなる。

そして更に霧や吹雪などの低視程時には前照灯ビームそのものの光量が減衰すると共に、光幕グレアが増加し、運転に必要な視覚情報はますます得られ難くなって来る。

上記は夜間を主体に記述したが、豪雨や豪雪は昼間においても視環境問題を発生させる。豪雨の水没路面走行時やブリザード発生時には、他車両のタイヤによる水はねや雪の巻き上げが瞬間的にドライバーの視界を遮り、運転を危険な状態に追い込む。更に寒冷地の冬期道路においては道路施設（道路標識、信号灯）や自動車用灯火器への着雪はそれらの機能を低下させる原因となる。

前述のように種々の気象環境下で交通視環境は様々に変化する。以下、この交通視環境を低下させる要因を層別し、その要因毎の具体的な事例を示すと共にその問題を概説する。

## 2.1 道路構造と交通視環境

図 2.1-1 は東名高速道路（道路照明装置あり）の昼夜の照明環境である。右の同位置における夜間の写真は路面が湿潤状態であるため、道路照明が路面に映り込み、路面に輝度ムラを発生させているが、防眩柵の効果もあって、対向車のグレアもなく比較的良好な交通視環境であると言える。



(a) 昼間（乾燥路面）



(b) 夜間（湿潤路面）

図 2.1-1 平坦路防眩柵ありの道路交通視環境（東名高速道路）

図 2.1-2 は国道 1 号線の昼夜の交通視環境である。道路は進行方向に上下方向の起伏が存在している。



(a) 昼間（乾燥路面）



(b) 夜間（湿潤路面）

図 2.1-2 起伏路・防眩柵ありの道路交通視環境（国道 1 号線）

昼間は交通視環境上の問題はないが、夜間には道路の上下方向の起伏より防眩柵（ガードレール）越しに対向車のヘッドライトグレアが存在するようになり、遠方路上視対象物の認知の妨げとなっている。

## 2.2 雨天の市街地道路と交通視環境

図 2.2-1 は雨天時における市街地国道の昼夜の交通視環境である。

昼間は車両、道路構造物共に良好に視認できるが、路面については湿潤状態のため天空が映り込み、道路区画線（レーンマーク）が認識し難いものとなっている。

夜間においては先行車のテールランプや商業施設のイルミネーションが路面に映り込み、視覚ノイズとなり、路上の障害物や道路区画線の認識を妨げる作用をしている。

図 2.2-2 は雨天時における市街地交差点の交通視環境である。昼間は前方運転視界全体の情報が得られている。しかし夜間には、照明光不足から周辺や背景の道路構造物の輝度が低下し、それらの情報が得られ難くなると共に、街路照明や対向車ランプの映り込みが視覚ノイズとなり、路面や車両などの視対象物の輝度が濡れの影響により輝度が低下するため、背景の暗さも相まって交差車両や歩行者の認識を一層困難なものとしている。



図 2.2-1 雨天時の市街地国道における道路交通視環境（共に湿潤路面）

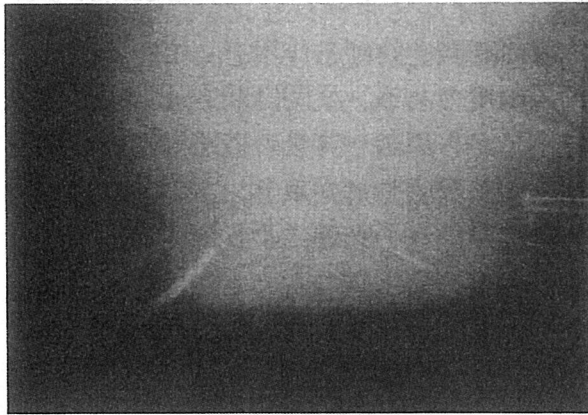


図 2.2-2 雨天時の市街地交差点における道路交通視環境（共に湿潤路面）

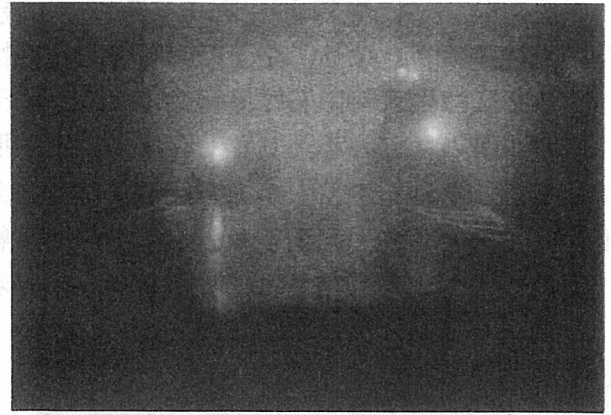
### 2.3 昼間の霧発生環境下における交通視環境

図 2.3-1 は視程 30m 程度の昼間における濃霧の状況である。撮影場所は富士山登山道入口付近である。濃霧により視程 30m より前方の道路は白濁し、道路が確認できない状況となる。図 (b) はその先の料金所入口のランプである。濃霧中ではこのような明るい発光体でも、視程より遠方にそれが存在する場合には霧の中に混在して認識できず、視程近傍の距離まで近づいた所で急に霧の中からわき上がって見える。

濃霧走行中には視対象の視認性がその視程近傍で急激に変化する。



(a) 登山道入口前



(b) 登山道入口直前

図 2.3-1 昼間の濃霧 (富士山登山道)

図 2.3-2 は道路照明の前後で大型車のテールランプの視認性がどのように変化するかを示した写真である。先行車のテールランプは道路照明の光幕現象により道路照明装置通過直後に急激に低下する。



(a) 道路照明の手前側の大型車



(b) 道路照明の前方の大型車

図 2.3-2 昼間の濃霧と道路照明による光幕現象

## 2.4 夜間の霧発生環境下における交通視環境

図 2.4-1 は道路案内表示の濃霧中における視認性を示す写真である。図 (a) は道路照明装置の手前に案内標識が存在している。図 (b) は自発光式案内標識である。

山岳路での案内標識の設置位置は、その視認性の観点から道路照明装置との位置関係を考慮する、加えて自発光式の標識とすることが望まれる。



(a) 案内標識



(b) 自発光式案内標識

図 2.4-1 濃霧中における道路案内標識の視認性

図 2.4-2 は濃霧中における前照灯による照明状況を示す写真である。

濃霧中では前照灯ビームの光幕により区画線（レーンマーク）と路面との輝度コントラストが低下するため、道路線形が確認しづらくなり運転操作を困難なものとする。

道路線形の確認にはガードレール上に設置されたデリニエータが頼りになる。濃霧の多く発生する山岳路には自発光式デリニエータなどの視線誘導灯が有効なものとなる。



(a) ロービーム



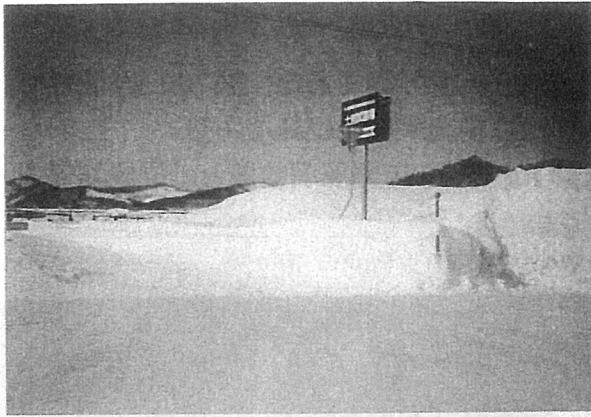
(b) ハイビーム

図 2.4-2 濃霧中における前照灯による照明状況

## 2.5 冬期道路における交通視環境

図 2.5-1 は寒冷地の冬期道路における路面状況を示す写真（晴天時）である。

冬期道路においては積雪により道路境界位置が確認しづらくなり、除雪後の雪壁、路上に設置された道路境界表示（通称；矢羽根）が運転の頼りとなる。



(a) 圧雪路面



(b) 道路境界表示 (矢羽根)

図 2.5-1 寒冷地の冬期道路における路面状況

図 2.5-2 は降雪時における交通視環境である。先行車（大型トラック）の背面は着雪しており、先行車と背景路面との輝度コントラストの低下は先行車の認識を一層困難なものとしている。

また先行車の雪の巻き上げは、先行車自身のテールランプの視認性を低下させると共に、対向車の存在を隠し、ドライバーの交通状況の認識を誤らせる原因ともなる。

このような状況下では昼間でも前照灯やリアフォグランプを点灯することが望まれる。またテールランプなどの後部標識灯は雪の巻き上げによる視認性の低減を抑止するために自動車標識灯は極力、設置位置を高くすることが望まれる。上記のように冬期道路の交通視環境はその他の季節に比べ悪化する。特にブリザード時には車両の前景が真っ白な世界になり、何も見えなくなるホワイトアウトと呼ばれる劣悪な交通視環境になる。



(a) 圧雪路面と車両の存在状況



(b) 前走車の雪の巻き上げ

図 2.5-2 降雪時における交通視環境の一例

### 第3章 交通視環境問題と交通事故

#### 3.1 統計資料にみる悪天候と交通事故との関係

##### 3.1.1 悪天候の平均的発生状況

全国 80 箇所の気象官署のデータ<sup>1)</sup> (1981 年～1990 年の平均値) を平均すると、年間の降水日 (1mm/hr 以上) は約 125 日あり、このうち降雪日は 43 日ある。また、霧発生日は 21 日となっている (図 3.1.1)。

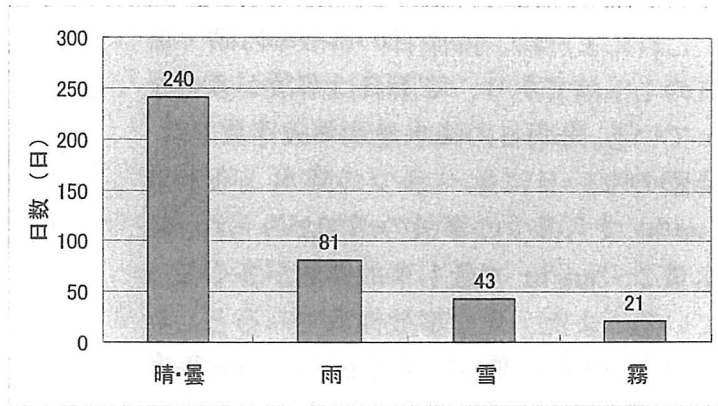


図 3.1.1 気象別の発生日

我が国の気象の特徴として、降雪が比較的高い割合を示していることがわかる。また霧の発生している日が 21 日にのぼり、気象は道路交通への影響を考える上で無視することのできない条件であるといえる。ただし、雨、雪、霧等の悪天候が道路交通に全日にわたって影響を与えることは少なく、気象と事故との関係を把握するためには、時間単位での分析が必要と考えられる。

仮に 1 回の降水時間が平均的に 10 時間程度継続する<sup>2)</sup> とすると、降水時間は 1250 時間となり年間 8760 時間の 14.3% 程度を占めることになる。

##### 3.1.2 気象別の交通事故発生状況

全国の事故発生件数<sup>3)</sup> を、気象別にまとめたものが図 3.1.2 である。

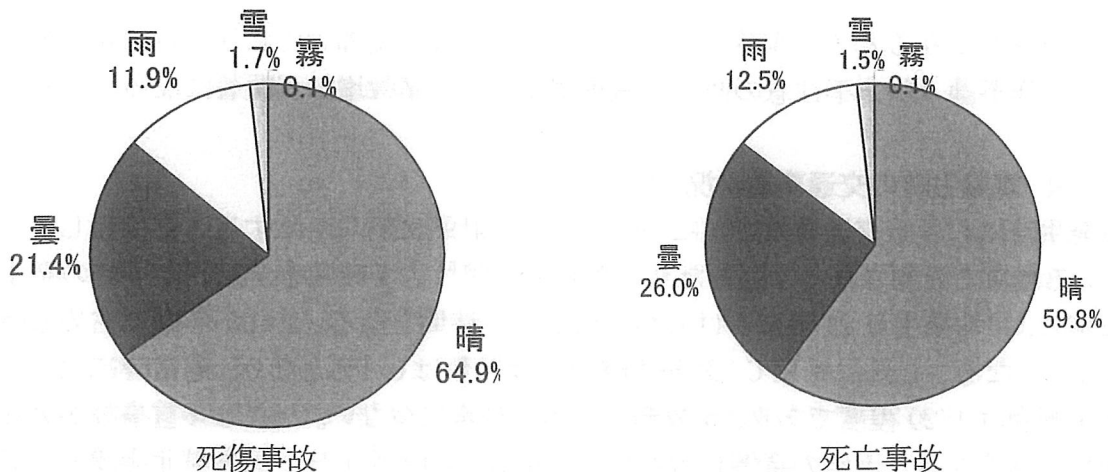


図 3.1.2 気象別交通事故発生件数

雨、霧、雪等の悪天候時の事故発生件数は、全体の約 14% 程度になっている。上述したとおり年間の降水時間が 14% 程度であるとする、通常環境時、悪天候時ともに事故の発生割合としては、ほとんど差はないことになる。なお、死傷事故件数と死亡事故件数の発生割合を比較すると、死亡事故は晴、雪時に多少減少し、曇、雨時に多少増加している。

### 3.1.3 雨天時の交通事故状況

全国的に平均化された事故データでは、悪天候時の事故の特徴は捉えにくい。

幸い、アメダスの気象データと交通事故との関係を分析した報告<sup>4)</sup>があるので、これにより降雨と事故との関係をみしてみる(図3.1.3)みる。

これによれば、降雨日の事故率は晴・曇日の1.1倍であり、降雨日は事故が多くなっている。降雨日の降水量別事故件数では、降雨のない日に比べ多少の降水(降水量1mm/h)でも多少の事故の増加がみられ、降水量2~3mm/hrで最も事故件数が多くなっている。また、死亡事故件数でみると、降水量2mm/hr程度から増加し、4mm/hr程度で急激に多くなり、5mm/hrになると降水量2~3mm/hrと同程度に低下している。

事故を自動車、二輪車、歩行者等の別でみると、自動車乗車中の事故が降水時に大幅に増加している。これは道路視環境が悪化するのだから当然予想されることである。一方、雨天時は歩行者、自動二輪車、自転車などの交通量は減少するので、これらに関連する事故が減少している。しかし、歩行中の事故は降水時に増加しており、歩行者にとって降水時の危険性がかなり高いことがわかる。

法令違反別にみると、操作不適、前方不注意で事故が増加しており、特に死亡事故でみれば、操作不適、前方不注意の他、最高速度違反での事故増加が顕著になっている。

### 3.1.4 霧発生時の交通事故状況

霧発生時における交通事故状況については、統計的に明らかにすることは難しい。例えば、ある地域で計測された1回あたりの霧発生時間<sup>5)</sup>の7時間を全国的な平均の発生時間と仮定し、平均発生日21日にかけて合わせれば147時間となる。これが年間に占める時間数は1.7%となる。これに対して、霧発生時の事故件数は0.1%となり、通常時に比べて事故の発生割合は1/20程度であり、事故割合自体は非常に少ない。ただし多重事故が発生する危険性は高くなる。近年の事例を示すと、平成10年12月1日、福島県北会津村の磐越自動車道でバスを含む16台の車両が多重衝突事故を引き起こしたときは、視程30m程度の濃霧状態であった<sup>6)</sup>。

直接、事故とは関係しないが、霧の多発する地域では霧の発生による通行止めや速度規制が年間約100日にのぼり<sup>5)</sup>、道路利用の利便性に与える影響は大きいものとなっている。

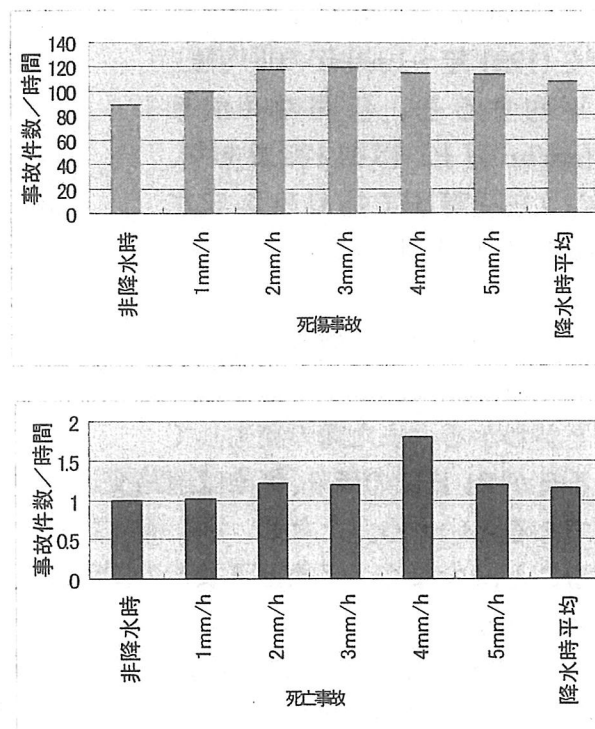


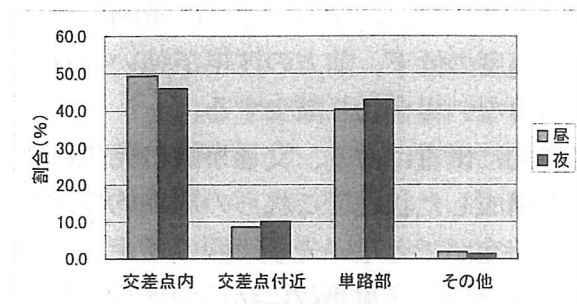
図3.3-2 多重衝突事故の発生要因

### 3.1.5 その他の状況

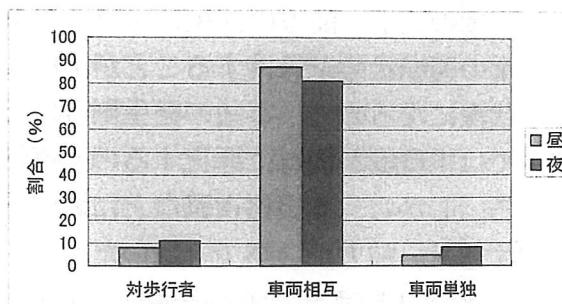
悪天候の範疇には入らないものの、悪天候時と同様に視環境条件が悪くなる夜間や、薄暮時について以下に示す。

#### (1) 夜間における交通事故発生状況

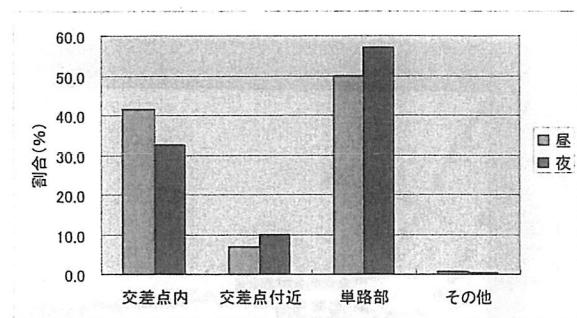
昼間、夜間における交通事故件数の発生状況を比較したものが図3.1.5-1と図3.1.5-2<sup>3)</sup>である。



死傷事故



死傷事故



死亡事故

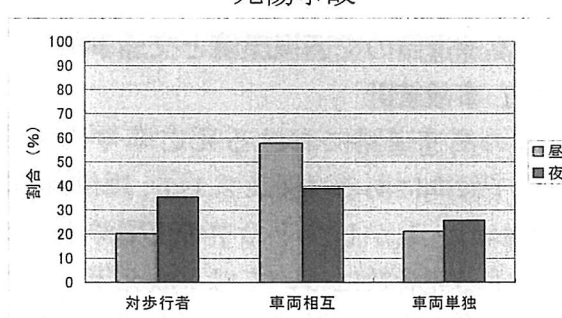


図 3.1.5-2 類型別事故割合の昼夜比較

図 3.1.5-1 簡所別事故割合の昼夜比較

夜間の交通環境の特徴としては、昼間に比べ視認・認知できる環境情報が極端に減少すること、交通量が少なくなること等が上げられる。事故の発生傾向としては、昼間よりも単路部での事故が増加し、また対歩行者および車両単独事故（路外工作物衝突、駐車車両衝突等）が増加している。特に、死亡事故では車両相互事故の割合が大きく低下する反面、対歩行者事故の割合が顕著に多くなっており、夜間に歩行者等が見にくくなり、車両からの発見が遅れることが、歩行者が事故に巻き込まれ、重大事故に至る原因と考えられる。

#### (2) 薄暮時における交通事故発生状況

薄暮時における交通事故の発生についてとりまとめた報告<sup>7)</sup>によれば、薄暮状態が交通事故の主たる要因とはならないことが示されている。すなわち、視認性の低下が直接的に交通事故の増加には影響しないといえる。

悪天候などを含めた視認性の低下は、交通事故のみならず、快適で円滑な道路利用に対する問題としての側面からの検討も必要と考えられる。

### 3.1.6 まとめ

降水（雨、霧等）における事故発生要因の主なものとしては、路面のすべり摩擦抵抗の減少、視環境の悪化等があり、これらと事故の発生には、以下のような関係があるものと考えられる。

降雨があれば、運転者は速度を落とす、前方を注視する等の補償行動をとるのが一般的であるが、例えば小雨の降り始め等では路面はすでに滑り易くなっているにもかかわらず、それ以前の運転行動を大きく変えることは少ないため、乾燥路面であれば事故を避けることができたものが事故になってしまう。また、ある程度の降雨があるときには、路面のすべり摩擦抵抗の低下とともに視環境が悪化し、視対象として小さく、目立ちにくい服装や雨具などを着用している歩行者などを見落としやすくなるが、このような状況に対応した走行（速度の低下、前方の注視）を怠ると事故に結びつくことになる。さらに豪雨になると、通常の運転状態を保持することが困難になり、速度の低下、前方の注視が強いられるような状況になるので、事故の発生割合は降雨量が少ない場合より減少する。

霧中では視環境が極端に悪化するので運転は必然的に慎重になり、交通事故の発生は少なくなる。しかし、高規格道路などにおいて車群を構成した状態でこれらの局地的な気象に遭遇すると、前方が視認できないため進行方向の特定ができない先頭車両の迷走、車線内停止などが引き起こされ、追従した車両が次々と衝突する多重事故に結びつきやすい。

### 3.2 高速道路の交通視環境と交通事故

#### 3.2.1 事故統計

日本の高速道路における死亡率や死者数は年々低下傾向にある（図 3.2.1-1；単位は10件/億台キロ）。しかし、その中の夜間や雨天時の事故による死者数については平成元年まで増加しその後は下降線をたどっている（図 3.2.1-2）。

また、夜間の事故に注目すると昼間の事故率（件/億台キロ）の3.6倍にも達している（図 3.2.1-3）。夜間の事故率が高い原因は、夜間の視界が昼間と比べて悪い点が最も大きいと考えられるが、それ以外に下記3項のような要素も指摘されている<sup>8)</sup>。

- ① 生理的能力の低下、② 飲酒運転、③ 若年層運転者の割合

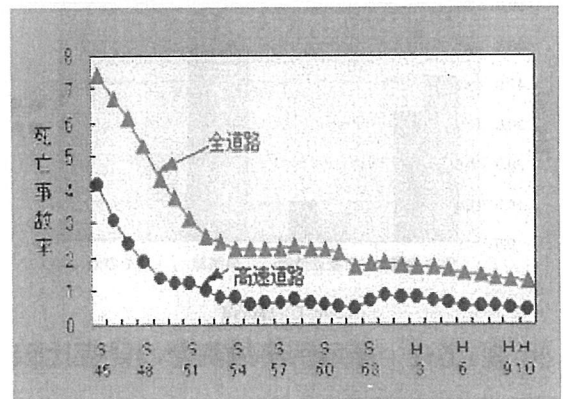


図 3.2.1-1 事故率の推移<sup>5)</sup>

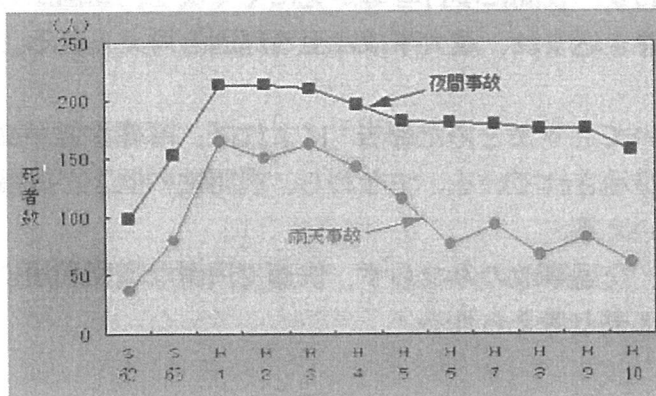


図 3.2.1-2 夜間と雨天の事故率の推移<sup>9)</sup>

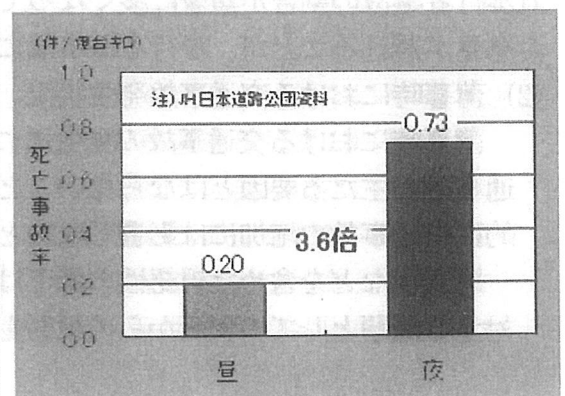


図 3.2.1-3 昼夜の事故率<sup>9)</sup>

①は、人間が元々夜行性の動物ではないために夜間は生理的能力が低下すること、および昼間の仕事を終えた後の疲労による影響がある。③は事故率の高い若年層の運転者が夜

間には多いために、結果として夜間の事故率が高くなるという見解である。

また、天候別の死者数の割合については、晴れ 42%、曇り 29%、雨 22%、雪 5%、霧 1%、と雪や霧発生時の悪天候において特に多くはなっていない（図 3.2.1-4）<sup>10)</sup>。

これはそもそもこのような天候の発生する時間割合が小さいためと考えられ、単位時間当りの率で比較すべきである。しかし、現実には事故から現場検証までの間にはある程度の時間が経過していること、並びに霧のような気象現象が局所的に変動することが多いために、事故発生当時の正確な気象データを把握することは困難である場合が多い。

路面状態別の死亡事故率を見ると湿潤状態では乾燥状態の約 4 倍となっている（図 3.2.1-5）。この原因は、湿潤時には路面の摩擦抵抗が乾燥時よりも小さくなるために制動距離が短くなるため事故率が高くなっていると考えられる。

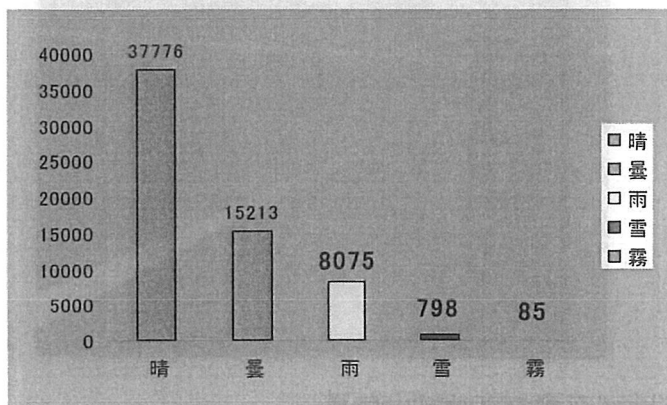


図 3.2.1-4 天候別事故件数<sup>11)</sup>

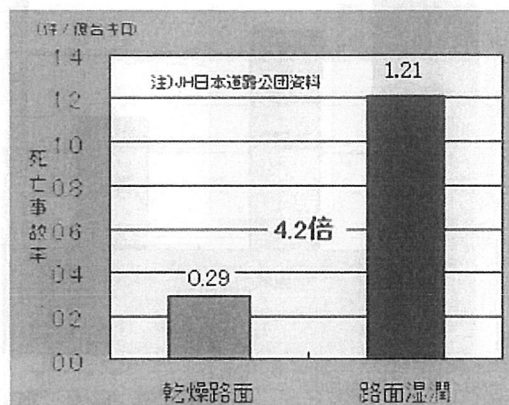


図 3.2.1-5 路面状態別の死亡事故率<sup>5)</sup>

### 3.2.2 事故の対策とその効果

各地で行われた事故の対策とその検証結果について以下に紹介する。

#### (1) 排水性舗装<sup>9)</sup>

路面湿潤状態を回避することにより摩擦抵抗を大きくすると共に、水しぶきの防止・夜間の乱反射防止による視環境の改善を図るために、排水性舗装（日本道路公団では「高機能舗装」と呼んでいる）を行っている。

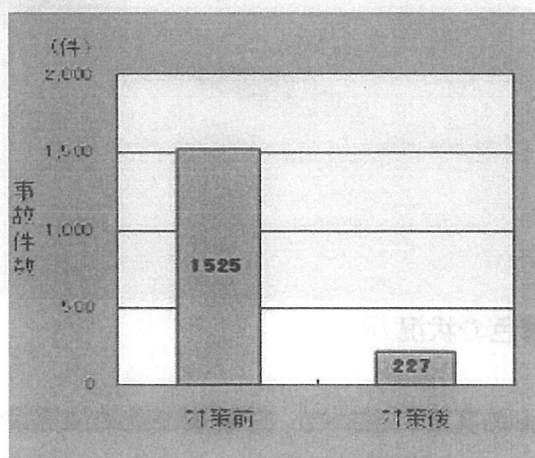


図 3.2.2-1 高機能舗装の事故減少効果

排水性舗装の平均すべり磨耗係数 (0.5) は、蜜粒舗装のそれ (0.44) と比較して停止距離に換算して約 10m の短縮になる。

この舗装により事故件数は従来の舗装と比べて 1/6 以下に激減していることから、効果の大きさがわかる (図 3.2.2-1)。

#### (2) 高視認性区画線<sup>9)</sup>

高視認性区画線とはヘッドランプからの照射光の再帰反射率を高めることにより、区画線 (レーンマーク) の視認性を高めたもので、その対策前後で約 40% 事故件数が減少している (図 3.2.2-2)。

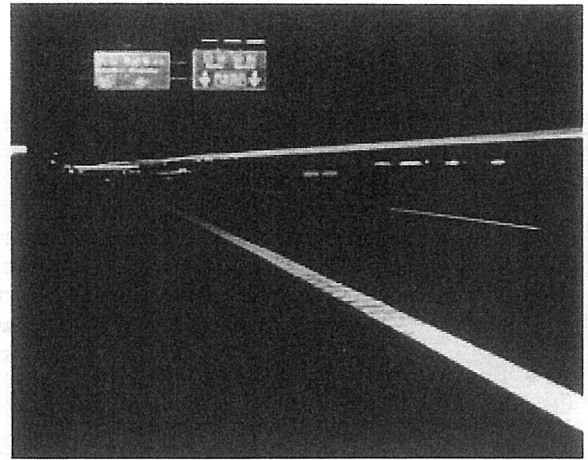
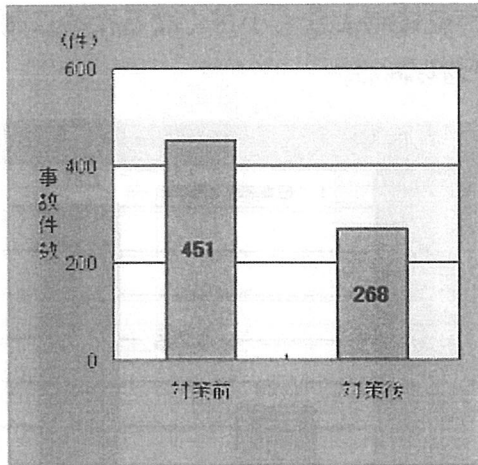


図 3.2.2-2 高視認性区画線の事故減少効果

#### (3) 雪堤着色による視線誘導<sup>11)</sup>

積雪寒冷地では冬季にホワイトアウト現象により位置感覚が麻痺し、道路横断面のどの位置を走行しているかがわからなくなることがある。そこで、雪堤に着色をして道路端を明確にする試みが青森県の高速度道路で行われている (図 3.2.2-3)。現在、青色の食用着色剤を用いて 30~50cm 幅で着色しており、その効果は 4~5 日間持続している。

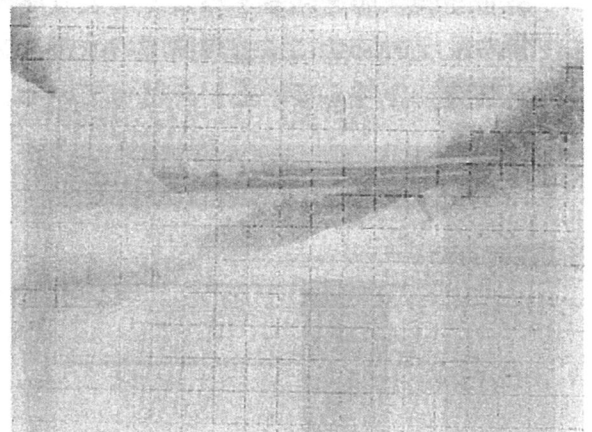


図 3.2.2-3 雪堤着色の状況

#### (4) 道路照明<sup>5)</sup>

関越自動車道渋川伊香保~沼田 IC 間約 10Km の区間において、霧対策のために路側照明が設置されている。その概要を表 3.1 に示す。路側照明の効果として次の点が報告されている。

- ① 静止状態での視認距離が 30m 程度改善された。
- ② 平均速度が 12~17km/hr 上がった (図 3.2.2-4)。
- ③ 追越車線の利用が約 10% 減り走行車線に移った。

表 2.2.2-1 霧対策用照明の概要

ランプ	250W、ハロゲン
ランプ数	3,503 個
間隔	6m (中分ガードポスト上)
路面高	1,500mm
光軸	水平 120° (後方から照射) 垂直 77° (俯角)



図 3.2.2-4 点灯による速度変化

### 3.3 降雪・吹雪時の多重衝突事故

積雪寒冷地では滑りやすい凍結路面に加えて、降雪や吹雪による視程障害事故が多い。特に、最近では郊外の幹線道路や高速道路などで多数の車両が関係する多重衝突事故が頻発している。このような多重衝突事故は長時間にわたって道路交通を閉鎖させ、地域社会に与える影響が極めて大きい。そのため、こうした事故を効果的に防止し、冬期道路交通安全性・確実性を高める対策が求められている。

図 3.3-1 は、札幌市近郊で相次いで多重衝突事故が発生した 1998 年 1 月 7 日のレーダー・エコー図である。降雪域は風向 (北西-南東方向) に沿って何

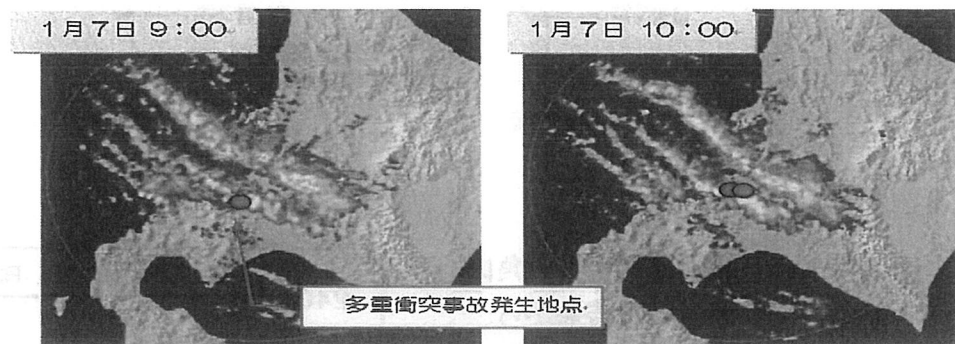


図 3.3-1 レーダー・エコー図による降雪域と多重衝突事故発生地点<sup>14)</sup>

本かの帯状に分布し、幅 10~20km の狭い地域に強い降雪が集中しながら移動していたことが分かる。相次いだ多重衝突事故はこの降雪域ですべて発生した。このことは、著しい視程障害による事故の危険個所を事前にドライバーに知らせることにより、経路や時間の変更を促し、事故の発生を軽減できる可能性を示唆している。

#### 3.3.1 研究方法

筆者らは、降雪・吹雪時の多重衝突事故は気象条件のほか、交通状況や周辺環境、ドライバーの人的要因が複雑に絡んで発生すると考えている。さらに、各要因を統合して把握することにより事故の危険度をある程度定量的に評価できるのではないかと考えている。

このような視点から、本研究では降雪・吹雪時の多重衝突事故の要因分析を行い、事故の危険度の評価方法について検討を行った<sup>12)</sup>。

### 3.3.2 研究結果

降雪・吹雪時の多重衝突事故の発生要因は図 3.3-2 に示すように構造化される。

多重衝突事故の発生には多くの要因が関係するが、環境要因、気象要因、交通要因、人的要因に大別される。このうち、本文では、個々のドライバーの特質に依存される人的要因を除いた環境要因、気象要因、交通要因について述べる。

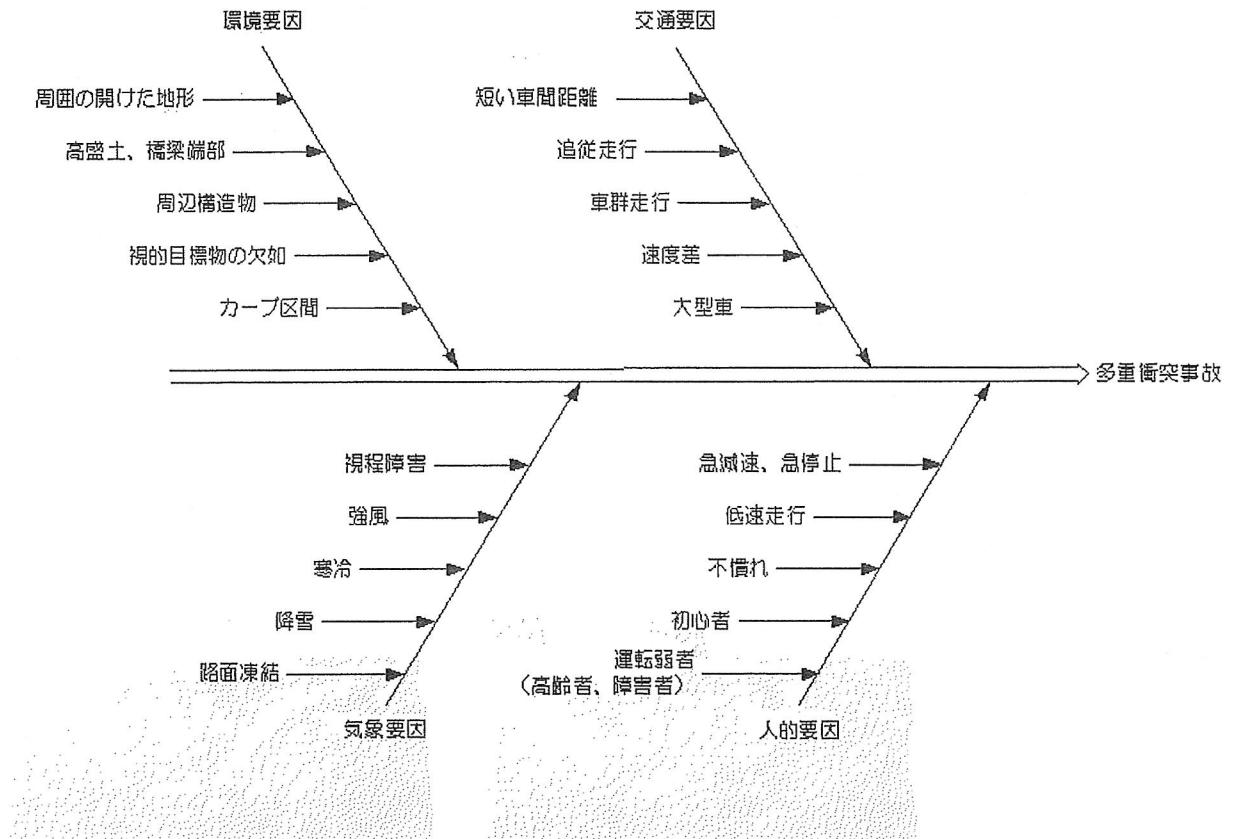


図 3.3-3 は一般国道 275 号・角山での気象・交通量観測の結果から、視程障害時に多重衝突事故や錯綜が発生したときの気象条件を示したものである。錯綜は、吹雪による著しい徐行や駐停車、蛇行、車両間のニアミスと定義し、ビデオ画像から 20 事例を抽出した。

その結果、視程 100m 以上での錯綜事例は 4 例と比較的少なく、視程 50~100m での事故や錯綜 7 例は、視程が 100m 以下になってから 60 分以内に発生していた。この結果は、視

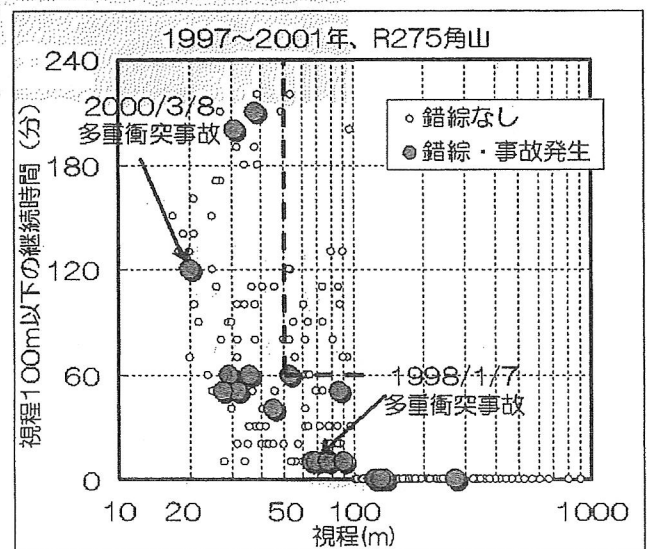


図 3.3-3 錯綜および多重衝突事故発生時の視程<sup>12)</sup>

程の急変直後が特に事故の危険性が高いことを示したものと言える。一方、視程が50m以下の激しい吹雪時には、視程障害の継続時間に関係なく事故や錯綜が発生していた<sup>12)</sup>。

降雪・吹雪時の多重衝突事故の発生要因を、環境要因、気象要因、交通要因から分析すると、その条件を表3.2のようにまとめることができた<sup>12)</sup>。

表 3.2 降雪・吹雪時の多重衝突事故の発生要因とその条件<sup>12)</sup>

種 別	多重衝突事故の発生要因	条 件
環境要因	昼夜の区分	昼間
	道路環境	周囲の開けた郊外部の単路
気象要因	視程	50m 未満
	視程 100m 以下の経過時間	1 時間以内
	路面状況	凍結・積雪
交通要因	車線あたりの 10 分間交通量	40～80 台
	速度の標準偏差	8km/hr 以上
	大型車混入率	10%以上

### < 第3章 参考文献 >

- 1) 理科年表 平成 13 年版
- 2) 国土交通省下水道部；合流式下水道の状況及び改善対策 [http ;  
//www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/information/cso3s2.pdf](http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/information/cso3s2.pdf)
- 3) (財)交通事故総合分析センター；交通統計 平成 13 年版, 平成 14 年 4 月 1 日
- 4) (財)交通事故総合分析センター；なぜ雨の日は事故が多いのか, 運転管理 2002. 6, (社)全日本交通安全協会
- 5) 谷井；高速道路の霧対策とその効果, 自動車研究, Vol. 17, No. 12, 1995. 12, (財)日本自動車研究所
- 6) 気象庁広報室；気象キャンペーン資料 12-12, No. 258, 2000. 9. 10
- 7) 森田；薄暮時における交通事故発生状況の統計的解析, 照明学会誌, Vol. 84, No. 8A, 2000
- 8) 佐藤博栄, 山田耕平, 飯塚徹也；照明設備に関する海外技術導入, 日本道路公団技術情報, No. 97, P. 64, 1989/4
- 9) (財)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, 2000, No. 25
- 10) 効果的な交通安全対策の研究, P. 72, H11. 9, (財)交通事故総合分析センター
- 11) 棟方貴史；雪堤着色による視線誘導, 日本道路公団技術情報, NO. 165, P. 32, 2007/7
- 12) 加治屋安彦, 福澤義文, 松澤 勝, 金田安弘, 丹治和博；吹雪危険度評価に関する一考察(2)－多重衝突事故の発生要因－, 寒地技術論文・報告集, Vol. 18, P. 359～366, 2002. 11

## 第4章 雨・雪・霧の実態調査と各種理論

### 4.1 雨・雪・霧の発生メカニズム

大気中の水蒸気が飽和または過飽和状態になりエアロゾル周りに凝結を起こす。これが上空で発生すると雲になり、地上付近で発生すると霧になる。雪は雲粒が凍結して氷晶が発生し、成長して雪の結晶となり地上に落下したものである。また、雨は雲粒が成長する、もしくは雪の結晶が溶けることにより粒径が 0.2 mm ~ 3 mm 程度の雨粒となって落下してきたものである。

#### 4.1.1 降雨のメカニズム<sup>1),2)</sup>

雨とは、大気中の水蒸気が凝固核の周りに凝結し、大きい水滴が小さい水滴を併合しながら成長し、重力の作用で地上へ落下したものである。

湿潤空気が冷却し飽和すれば凝結が始まる。気塊（数十～数百キロメートルの水平規模で一樣な性質をもつ、地表付近の大気の塊）の温度低下を引き起こす原因としては次の過程があげられる。

- ① 気塊の上昇による断熱膨張冷却
- ② 冷たい海・地表との接触による冷却
- ③ 赤外放射冷却
- ④ 冷氣塊との混合による暖気塊の冷却

このうち、①が大量の凝結を引き起こし、雲を発生させる。なお、②～④は霧の発生をもたらす場合が多い。

湿潤気塊が上昇し、ある程度の過飽和度に達すると微粒子（雲凝固核）のまわりに水分子が集まり微細な雲粒ができる。そして、生成された雲粒の表面に大気中の水蒸気分子が送り込まれ凝着していく拡散過程により次第に大きな雲粒へと成長していく。その後、「暖かい雲の降水過程」または「冷たい雲の降水過程」により直径数 mm 程度に成長し、雨粒として地上に落下してくる。

(1) 暖かい雲の降水過程；氷晶を含まない水雲の降水過程を暖かい雲の降水過程とよぶ。

雲の中には様々なサイズの雲粒があり、その大きさにより、落下速度が異なる。このため大きな雲粒は落下しつつ相対的に小さな雲粒に衝突してそれを併合しながら成長し、これを繰り返して大きな雲粒、さらに雨滴へと成長する。暖かい雲の降水過程で雨滴が形成されるためには、降水粒子が成長できるほど十分な雲粒子密度と雲層の厚さが必要である。なお、雨滴が大きくなると空気抵抗のため不安定となり分裂するため、直径 7 mm 程度以上の雨滴は存在しない。

(2) 冷たい雲の降水過程；氷晶を含む雲の降水過程を冷たい雲の降水過程とよぶ。一般に 0℃より低温であれば水は氷に変化するが、0℃以下の大気中で飽和した水蒸気が直ちに氷に変化するとは限らない。過冷却（0℃より低温）の状態の雲粒（水粒子）も存在する。このような雲の中で氷晶が形成されるためには氷晶核の作用が必要である。

氷晶化の過程としては、

- ① 氷晶核上に水蒸気が昇華して氷晶となる。
- ② 氷晶核が凝固核として作用して雲粒を作り、それが氷晶となる。
- ③ 氷晶核が過冷却水滴に接触して氷晶化を進める。

などの場合がある。

冷たい雲の中では、このようにして生成された氷晶と過冷却水滴が接近して共存している。氷に対する飽和水蒸気圧が水に対する飽和水蒸気圧より大きいことから、過冷却水滴から蒸発した水蒸気は氷晶上に昇華する。この過程により氷晶は雪片へ成長する。更に異なったサイズ・形状の雪片は落下する速度が異なるので、衝突併合して成長する。また、雪片が過冷却雲粒に衝突すると付着凍結して“いが栗”状のあられとなる。

雪片やあられは地上に落下するが、0℃より高温の気層を通過すれば溶けて雨滴となり、異なるサイズの雨滴は衝突併合してさらに大きな雨滴へと成長する。

冷たい雲の場合でも降水が生ずるためには、十分な氷晶と過冷却雲粒の空間密度と雲層の厚さが必要である。

#### 4.1.2 降雪のメカニズム<sup>3)</sup>

雪とは、雲から降ってくる氷の結晶、またはそれが降ってくる現象や地面に積もっている状態をいう。空から降ってくる場合は「降雪」と呼び、地面に積もった場合は「積雪」と呼ぶ。しかし厳密には、降ってくる個々の雪は雪の結晶 (snow crystal)、降ってくる現象は降雪 (snow fall)、積もった雪は積雪 (snow cover) と区別される。

日本では一般に雪の結晶が初期の段階 (約 200 μm 以下) を氷晶 (ice crystal) とし、それ以上大きく成長した結晶を雪の結晶、また雪の結晶が2個以上、ときには数百個付着併合したものを雪片 (snow flake) とし、大きさやその状態で区別している。また、「雪」と「霜」は明確に区別される。さらに、「積雪」は雪粒子と空気の混合物で通気性があるのに対して、「氷」は通気性のないものとして区別される。

前項の冷たい雲の降水過程でも述べたように、雪は塵、埃などを核として大気中の水蒸気が凍って氷の結晶になることによってできる。氷の結晶にさらに水蒸気が凍ってくっついて成長し、雪の結晶ができる。この雪の結晶が地上に落ちてくる途中で水滴になったものは雨となり、溶けずにそのまま落ちてきたものは雪となる。

また、地域により降雪のメカニズムには以下のような特徴がある。

(1) 日本海側；基本的には北西季節風が日本海の対馬暖流上空を通過する際に積乱雲が発生し、その積乱雲が雪を降らす。上空の気温が低い場合には、大気の状態が不安定となるため、降雪量は多くなる。そのため、シベリヤの寒気団が日本海を渡るときには大雪となる場合が多い。更に、日本海側の雪には山沿いと平野部で以下の特徴がある。

① 山雪；山沿いや山間部に多く降る雪をいう。山雪が降るのは次のようなときである。等圧線がほぼ南北に縦縞模様になる。上空の寒気が日本海北部や北日本にある。気象衛星やレーダーでは、雪雲や小低気圧が北西から南東に筋状に並ぶ。このようなときは、北西の季節風が日本列島の脊梁山脈を上昇し、山の風上側に大雪を降らせる。

② 里雪；海岸や平野部に多く降る雪をいう。里雪が降るのは次のようなときである。等圧線が湾曲し、日本海を袋状に包む。上空約5000mでは氷点下40℃前後の寒気が日本海の中・南部に位置する。気象衛星とレーダーでは日本海を帯状の雲とエコーがほぼ東西に走り、この中にいくつかの渦状の雲と小低気圧が見える。このようなときは、平野部では大気の状態がきわめて不安定となり、高さが6～7kmの積乱雲が発達し、雷を伴って雪が激しく降る。小低気圧は海上から上陸して強い

雪を降らせ、ときには山を越えて進み、太平洋側にも雪を降らせることがある。

- (2) 太平洋側；基本的には、低気圧の通過によりもたらされ、低気圧の通過コースにより以下のような特徴がある。
- ① 東シナ海低気圧型；大雪になる代表的なコースで、低気圧の中心が八丈島と鳥島の間を通る。また、低気圧が九州の南海上で発生し、あまり発達せずに進む場合や、本州の南岸沿いに停滞する前線上に次々と小さな低気圧が発生する場合も大雪になることがある。
  - ② 二つ玉低気圧型；低気圧が日本の南岸と日本海にあり、主な低気圧が日本の南岸にある場合。
  - ③ 低気圧横断型；低気圧が山陰沖から中部日本を横断して、関東の東海上に進む場合。
- (3) 北海道；北海道では、日本海側の特徴と太平洋側の特徴の両方の要因により降雪が生じる。
- ① 低気圧型；道東・道南を中心に降る。低気圧がゆっくりと進むので、雪が長く降る。低気圧が非常に発達して北海道を縦断したり、沿岸の近くに接近して進んだりするときには、全道的な暴風雪となり、2～3日続くことがある。
  - ② 季節風型；日本海側で降る。北西の季節風が吹き続けると、山間部や内陸を中心に広範囲に雪が降る。季節風が弱まると西海岸の沖合に発生する小低気圧によって、石狩平野や後志の内陸で局地的に大雪が降る場合もある。

#### 4.1.3 霧の発生メカニズム<sup>4)</sup>

霧の定義は、地面付近に微少な水滴すなわち直径およそ  $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$  ( $0.001\sim 0.002\text{cm}$ ) であり、落下速度は  $0.29\sim 1.3\text{cm/sec}$  で大気中にほとんど浮かんでおり、水平視程が1キロ未満であるとき、これを霧という。雲と霧の違いは、雲は一般に地表から離れた層にできるが、霧は雲の底が地表に接したものと考えられる。また、「視程が1キロ未満の場合は霧」「1キロ以上の場合ほもや」とされている。霧の中では湿っぽく冷たい感じがして湿度は100%に近いが、もやの中では湿度が100%になることはない。なお、霧に煙が混ざるとスモッグと呼ばれる。

一般に、都市に発生する霧は、霧粒は小さいがその数は多い。一方、海上に発生する霧は霧粒が大きく、数は少ない。この原因は霧粒のもとになる凝結核が都市では燃焼核、海上では海塩核が主となるためである。霧水量（霧中の水の量）は、うすい霧では、 $0.02\text{g/m}^3$  であるが、濃い霧では  $3\text{g/m}^3$  にもなる。

霧の発生の仕組みは以下の3通りがある。

- ① 湿った空気の温度が露点まで下がる
- ② 空気が飽和するまで水蒸気が加えられる
- ③ 同時に①と②が起こった場合

のいずれかに霧が発生する。さらに、上記の3つに加えて、次の条件が発生すれば濃霧が最も発生し易い環境となる。

- ① 湿度が高いこと
- ② 大気中に十分な凝結核があること
  - ・吸湿性の凝結核の場合には相対湿度が100%にならなくても霧はできる。

- ③ 地表付近の気層が安定していること
- ④ なんらかの冷却作用があること
- ⑤ 大気の成層が安定であること
  - ・濃霧になる場合は低い高度に安定層がある場合が多い。これは、安定層があると霧は上方に拡散しないので濃い霧になりやすいためである。温暖前線の変形した安定層がある場合には典型的な濃霧になる。
- ⑥ 風が弱い事
  - ・風が強いと霧は吹き飛ばされる。しかし、無風よりは1～2 m/sの風があったほうが発生し易い。山に沿って滑昇するときに見える霧は風が強くても発生する。

霧には、その場所で発生するものと、移動してくるものがある。前者は発生から消滅までに次の三つの段階があると見ることができる。

- (1) 発生段階；霧の発生初期の兆候から比較的広い地域にわたってすき間のない状態になるまでで、移流霧では数分だが放射霧では数時間である。放射霧の厚さは初め薄いのが、散在した濃い地霧として発生する。その後、孤立した塊となり非常に弱い風の中をゆっくりと流れる。
- (2) 最盛段階；霧の種類に関係なく、飛行場の一部または全部を覆うくらい広範囲にすき間なく形成されてから、消滅または消散し始めるまでをいう。この段階の霧は均一な場合が多く、視程は比較的小さくてゆるやかに変化する。目視や透過率計による測定で、かなり正確に表現できる。
- (3) 消滅段階；この段階は広い地域を覆っていた霧が消滅または消散するまでの期間である。この段階で霧の中の視程は大きく変化するが、小さい変動も伴っている。

## 4.2 雨・雪・霧の分類と物理特性

### 4.2.1 雨の分類と物理特性

#### (1) 雨の定義

大気中を落下し、かつ地表面に達する水滴を雨（雨滴）と言う。直径の多くは0.5mm以上であるが、0.5mm未満の小さな水滴がまばらに降ることもある。雨滴の直径と集中度は雨の強さや降り方によりかなり変化する。

#### (2) 雨の分類

成長過程、降り方、強さに基づいて雨を分類した結果を以下に示す。

##### ① 成長過程に基づく雨の分類

- i) 暖かい雨；雲の中の温度が0℃より高く、氷の粒が全く含まない雲から降る。
- ii) 冷たい雨；氷の結晶を含み、0℃以下の温度の雲から降る。日本で降る大部分の雨は冷たい雨である。

##### ② 降り方に基づく雨の分類

- i) 霧雨；直径0.5mm未満の細かい無数の水滴がゆっくり落下し、ほとんど浮遊しているように見える雨
- ii) 地雨（ジアメ）；ほとんど一定の強さで連続的に降る雨
- iii) にかわ雨（しゅう雨）；急に降り出し、短時間降ったあと急にやんだりする雨

### ③ 強さに基づく雨の分類

雨の強さと降っている状況別にまとめた結果を表 4. 2. 1-1 に示す。なお、雨量とは降った雨水が地面にしみ込んだり流れ去ったり蒸発せずに、そのままそこにたまっ  
たときの水の深さを mm 単位で測ったものである。

### (3) 雨の物理特性

雨の性質を特徴づけるパラメータとしては、以下の諸量がある。

- ① 粒径；雨滴の粒径の多くは直径 0.5mm 以上である。大きい雨滴は落下の途中で分裂するため、雨滴の粒径は直径 7mm が限度と言われている。一方、直径 0.5mm 未満の雨滴は霧雨と呼ばれ、細かい無数の水滴がゆっくり落下し、ほとんど浮遊しているように見える。
- ② 雨量・降水量；先に述べたように、雨量とは降った雨水が地面にしみ込んだり流れ去ったり蒸発せずに、そのままそこにたまったときの水の深さを mm 単位で測ったものである。一方、雨ばかりだけでなく、空から雪やひょう、あられ、みぞれなど（降水と総称）が降ってくる場合には、その量を降水量と総称する。
- ③ 落下速度；落下する雨滴は空気の抵抗を受けるため、大粒なものほど下面が平たい形になる。地表近くでの落下速度を以下に示す。
  - i 直径 0.5mm ほどの小粒の雨滴；秒速 2m
  - ii 直径 2mm の普通の雨滴；秒速 7m
  - iii 直径 5mm の大粒な雨滴；秒速 10m

表 4. 2. 1-1 強さと降り方に基づく雨の分類<sup>5)</sup>

1 時間雨量 (ミリ)	用語	雨の降り方
1 未満	小雨	地面がかすかに湿る。傘なしでもレインコートで間に合う。
1～5 未満	弱い雨	シトシト降る。地面がすっかり湿る。
5～10 未満	雨	本降り。地面に所々水たまりができる
10～20 未満	やや 強い雨	ザーザーと降る。地面に一面水たまりができる。雨の音で話がよく聞きとれない（木造住宅）
20～30 未満	強い雨	どしゃ降り。傘をさしていても濡れる。ワイパーを速くしても見づらい。側溝や下水、小川があふれ、小規模の崖崩れが始まる。
30～50 未満	激しい雨	バケツをひっくり返したように降る。道路が川のようになる。車のブレーキが効かなくなる。都市では下水管があふれる。山崩れ・崖崩れが起りやすく、危険地帯では避難の準備が必要。
50～80 未満	非常に 激しい雨	滝のように降る（ゴーゴーと降り続く）。水しぶきであたり一面が白っぽくなり、視界が悪くなる。車の運転は危険。都市では地下街などに雨水が流れ込む場合も。土石流が起りやすい。多くの災害が発生する。
80 以上	猛烈な雨	息苦しくなるような圧迫感がある。恐怖を感じる。大規模な災害の起るおそれが強く、厳重な警戒が必要。

#### 4.2.2 雪の分類と物理特性

##### (1) 雪の定義

空気中の水蒸気が昇華してできた、大気中を落下する氷の結晶を雪と言う。雪は成長、形成される過程での状況により、降り方、大きさ、結晶がかなり変化する（前節参照）。

##### (2) 雪の分類

- ① 雪の大分類；雪の分類は内部構造、特に氷粒子の大きさや形、結合の度合、密度などを参考にして行われる。具体的な分類や名称は世界各国で独自のものが使われているが、わが国で一般に用いられているのは日本雪氷学会(1970)が決めたものである。この分類によると、雪は、新雪、しまり雪、ざらめ雪、および霜ざらめ雪の4種類に大分類される<sup>6)</sup>。分類した結果を表4.2.2-1に示す。また、雪には他にも様々な分類方法がある。

表4.2.2-1 雪の大分類と特徴<sup>6)</sup>

名称	文字記号	図記号	特徴	密度範囲(kg/m <sup>3</sup> )
新雪	N	+	降って間もない期間の雪で、構成粒子は、多かれ少なかれ結晶形を保存している。	30~150
しまり雪	S	○	降雪後数日たち、構成粒子が丸みをおびた雪。粒子同士の結合も発達し、全体としてきめ細かい締まった感じを呈する。粒径は0.3~0.6mm程度。	150~500
霜ざらめ雪	H	∧	温度勾配のために、内部に霜の結晶が成長した雪。粒子は鮮やかな結晶形を示し、粒径は1~5mmに達することもある。	200~400
ざらめ雪	G	●	融解水の介在で生じる粗い感じの雪。粒径は、普通1~3mmもあり、一粒一粒をはっきりと見分けることができる。	300~500

- ② 大きさと形・色に基づく雪の分類；大気中を落下する氷において、結晶になっている場合を雪と言うが、白色で不透明な氷の粒は雪あられ、半透明の氷の粒は氷あられ、氷の小粒または塊はひょうと言う。また、雨と雪とが混在する場合をみぞれと言う。大きさと形・色に基づいて分類した結果を表4.2.2-2に示す。

表4.2.2-2 大きさと形・色に基づく雪の分類

名称	大きさ	形	色	備考
雪	直径0.1mm ~数mm	針状、角柱状、 樹枝状など様々	・白色	・結晶の形は上空の気温や湿度の条件によって決まる
ひょう	直径5mm 以上	・球形 ・不規則	・透明 ・乳白色と透明の層と が交互に混じる	・直径50mm以上になるものもある ・強い雷に伴って降ることが多い
氷あられ	直径5mm 未満	・周囲は薄い 氷層 ・球形又は円錐 形	・透明、半透明の氷の 粒	・気温が0℃以上の初冬に降るが、夏でも降ることがある
雪あられ	直径2~ 5mm	・球形または 円錐状	・白色、不透明の氷の 粒	・気温が0℃以下のときに雪といっしょに降ることが多い

③ 降る強さに基づく雪の分類  
降る強さに基づいて分類した結果を  
表 4.2.2-3 に示す。

表 4.2.2-3 降る強さに基づく雪の分類

名称	強度	瞬間降水強度(mm/時間)
弱い雪	0	0.0~1.0未満
雪*	1	1.0~3.0未満
強い雪	2	3.0以上

④ 降り方に基づく雪の分類  
降り方に基づいて分類した結果を  
表 4.2.2-4 に示す。

表 4.2.2-4 降り方に基づく雪の分類

名称	現象	備考
にわか雪	積雲や積乱雲などの対流性の雲から降る雪を言う。	<ul style="list-style-type: none"> <li>降り方に強弱の変化があり、降ったかと思うと、またやんで青空が見える。</li> <li>北西の季節風が吹くときに降るのがにわか雪で、低気圧が近づいてくるときの層状の雲から降るのは単なる雪である。</li> <li>日本海側ではほとんどの場合がにわか雪なので、毎日の天気予報では単に「雪が降る」と表現することが多い。</li> </ul>
雪しぐれ	さっと降ってはやみ、やんではまた降る雪。	美しいことばだが、気象用語としては定着していない。
風花	青空を背景にして、花びらが舞うようにチラチラと落ちてくる雪。	群馬県では「吹越（ふっこし）」と言う。
風雪	強い風によって横なぐりに降る雪。	平均風速がおおよそ 10m/s を超え、雪を伴う場合に風雪注意報が発表される。
吹雪	降ってくる雪や地上から舞い上げられた雪が、激しい風で空中を乱れ飛ぶ状態。	地上気象観測法では「積もった雪が風のため地上高く吹き上げられ、同時に雪も降る現象」、つまり高い地吹雪と降雪とが同時に起こる現象と定義されている。
地吹雪	いったん降り積もった雪が、風のために地上高く吹き上げられる現象を言う。	風速が毎秒 8~9m/s を超えると、吹き飛ばされる雪が人の目の高さよりも高くなって、見通しが悪くなり、空いっぱい広がって太陽を隠すときもある。これを高い地吹雪と言う。吹き飛ばされた雪が目の高さより低いときを低い地吹雪と言う。
吹きだまり	吹雪や地吹雪によって飛ばされた雪が、地形や建物、樹林などの影響で吹き寄せられ、積雪が山のように多くなっている所を言う。	
ブリザード	もともとは、きわめて冷たい北西の強風を伴う猛吹雪のことだが、今は一般的に暴風雪のことを言う。	南極の昭和基地などでは、強風を伴った吹雪や地吹雪で視程 1km 未満の状態を言う。
暴風雪	雪を伴う激しい雪のこと。	平均風速がおおよそ毎秒 20m を超え、降雪を伴い、重大な災害が起こるおそれのある場合に、暴風雪警報が発表される。

⑤ 降雪、積雪の状態に基づく雪の分類  
降雪、積雪の状態に基づいて分類した結果を表 4.2.2-5 に示す。

表 4. 2. 2-5 降雪、積雪の状態に基づく雪の分類

名称		説明
降雪	粉雪	気温の低いときに降る細かな雪の結晶のことを言う。雪の粒の大きさは直径約2mm、落下速度は毎秒50cm程度である。また、サラサラした粉状の積雪も粉雪と言ひ、空中に舞い上がり地吹雪を起こしやすい。
	湿り雪	気温が高いときに降る水分を多く含んだ重い雪のことを言う。
	ぼたん雪	気温の高い暖かな土地において、空から落ちてくる雪片がいくつか集まって、ぼたんの花のように大きな雪のかけらで降る雪のことを言う。
積雪	新雪	積もりたての雪のことを言う。雪の結晶が残っている。
	しまり雪	新雪が0℃以下の低温にさらされ1週間ぐらいたつと、新雪の結晶は昇華によって氷の結晶に変わり、積雪も落ち着いてくる。これをしまり雪と言う。
	ざらめ雪	しまり雪が気温・日射によって融解・凍結・昇華を繰り返すと、金平糖のような雪に変わる。これをざらめ雪と言う。
	万年雪	しまり雪やざらめ雪を旧雪と言ひ、さらに、夏の融雪期に解けきらずに1年以上越年する旧雪を万年雪(密度0.5~0.6g/cm <sup>3</sup> 程度)と言う。
	べた雪	主として暖気や地熱で解けた水分を含んだ積雪のことで、シャーベット状の雪、スノージャムなどとも言う。
	軽い雪	新雪が低温で乾いている場合は、積雪の密度が0.05g/cm <sup>3</sup> 程度で軽い雪である。
	重い雪	新雪が高温で湿っている場合は、積雪の密度が0.1g/cm <sup>3</sup> 程度で重い雪である。

(3) 雪の物理特性

雪の性質を特徴づけるパラメータとしては、以下の諸量がある。

- ① 粒径・色；粒径は直径  
0.1mm～数mm、色は白色。
- ② 結晶；図4.2.3-1に示すように結晶の形は気温と氷飽和を越える水蒸気密度(過剰水蒸気密度)に依存し、様々に変化する。雪の結晶には星状、角柱状、板状、それらの組み合わせや、不規則な形をしたものがある。
- ③ 降水量；大気中を落下する雪を電熱で解かし、測った水の深さを降水量と言う。

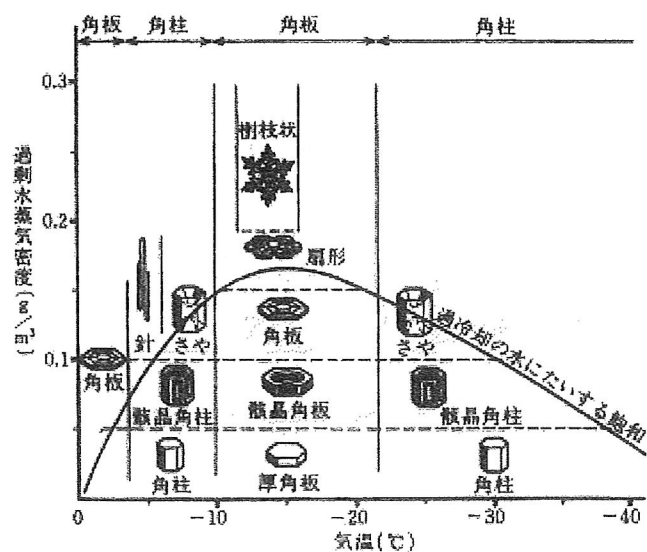


図 4. 2. 3-1 温度と氷飽和を越える水蒸気密度(過剰水蒸気密度)に依存した結晶の形の変化<sup>7)</sup>

※図中の過冷却の水に対する飽和の曲線が示す過剰水蒸気密度は、環境温度における水飽和の水蒸気密度と昇華成長中の氷晶表面の温度における氷飽和の水蒸気密度(>環境温度における氷飽和の水蒸気密度)との差である。

#### 4.2.3 霧の分類と物理特性

##### (1) 霧の定義

霧とは、地表面付近で無数のごく小さな水滴が空気中に浮かび遠くがはっきり見えない現象を言う。人の目の高さの視程が1km未満の場合を霧、1km以上の場合がもやと定義されている。霧の中では、通常湿っぽく冷たい感じがして湿度は100%に近い。もやの中では、湿度が100%になることはない。霧の中は辺りが白っぽく見えるが、煙やちり・ごみが混ざると灰色や黄色みを帯び、霧に煙が混ざるとスモッグと呼ばれる。また、肉眼で見えないごく小さな乾いた粒子が大気中に浮遊して、空気が乳白色に濁って見える現象は煙霧と言う。砂が風のため地面から吹き上げられて起きた風塵が原因のときは、ちり煙霧（例えば黄砂）と呼ばれる。はっきりとした定義はないが、濃霧注意報の基準に達するような霧を濃霧と言う。その基準は地方によって異なるが、視程が陸上で100m以下、海上で500m以下に定められている。

##### (2) 霧の分類

霧は、地表面付近に出来た雲で、水蒸気を含む空気が冷えたり、空気中の水蒸気が多くなり過ぎたりすると出来る。いくつかの原因が重なるので、霧の種類を特定するのはむずかしいが、主に発生原因、発生地域に基づいて分類されることが多い。

① 発生原因に基づく霧の分類方法；表4.2.3-1に示す。

表4.2.3-1 発生原因に基づく霧の分類

用語	説明
放射霧	夜から朝にかけて、晴天で風が弱いとき放射冷却によって出来る霧
移流霧	暖かく湿った空気が冷たい海面上を流れるとき、下層が冷やされて出来る霧
蒸発霧	冷たい空気が暖かい海、川、湖などの上にあるとき、水面から蒸発する多量の水蒸気が冷やされて出来る霧
滑昇霧	湿った空気が山の斜面を昇るとき断熱冷却によって出来る霧
混合霧	暖かく湿った空気と冷たい空気が混合して出来る霧
前線霧	前線付近に発生する霧

② 発生地域に基づく霧の分類方法；表4.2.3-2に示す。

表4.2.3-2 発生地域に基づく霧の分類

用語	説明
海霧	海上に発生する霧。移流霧のことが多い
山霧	滑昇霧、放射霧のことが多い
川霧	蒸発霧
都市霧	都市や工場付近では煙や粉塵が多く、これが凝結核となって発生する霧
盆地霧	盆地に発生する霧。放射霧のことが多い

### (3) 霧の物理特性

霧の性質を特徴づけるパラメータとしては、以下の諸量がある。

- ① 粒径；粒径（霧粒子の直径）は、全部が同じではなく、大小様々なものが混入しており、直径が  $10\mu\text{m}$ ～ $30\mu\text{m}$  のものが最も多い。放射霧の直径は  $10\mu\text{m}$ ～ $15\mu\text{m}$  が多く、前線霧はやや大きい値を示す。海霧は  $30\mu\text{m}$  前後である。
- ② 霧粒数；霧粒子の数は空気  $1\text{cm}^3$  中に数 10 個～数 100 個程度存在する。放射霧の場合、平均 20～40 個の場合が多い。
- ③ 霧水量；霧粒子として空気中に含まれる液体としての水分の量を霧水量といい、空気  $1\text{m}^3$  中に数百 mg 程度である。放射霧の場合  $100\text{mg}/\text{m}^3$ ～ $500\text{mg}/\text{m}^3$  のときが多く、 $1\text{g}/\text{m}^3$  という霧水量の場合には相当な濃霧である。視程に換算すると、霧水量  $100\text{mg}/\text{m}^3$  で 200m、 $500\text{mg}/\text{m}^3$  で 50m、 $1\text{g}/\text{m}^3$  で 30m に相当する。 $1\text{m}^3$  中の空気の質量は約 1kg であるので質量比較の点、霧水量は非常に少ないものである。
- ④ 落下速度；霧粒子は重力を受けて加速され、もし抵抗がなければ、その落下速度は直径の 2 乗に比例し、時間とともに増大する。その一方、落下する霧粒子には空気抵抗が働き、抵抗は落下速度が大きいほど大きい。このため、最終的には重力と摩擦抵抗がバランスする速度に落ち着く。直径  $0.01\text{mm}$  の霧粒の落下速度は約  $0.3\text{cm}/\text{sec}$  であり、直径  $0.04\text{mm}$  では  $4.8\text{cm}/\text{sec}$  となる。

## 4.3 霧に関するシミュレーション技術

### 4.3.1 はじめに

霧中における対象物の視認性を検討するには、まず大気中において光がどのように散乱するかを把握する必要がある。散乱光を発生する原因となる大気中の微粒子としては、霧のほかに、雨、雪等が挙げられる。これらの散乱微粒子の特性、すなわち粒径、屈折率によって、その散乱特性は異なってくるので、大気の減衰係数  $\sigma$  と散乱光の分布との間に一義的な関係はない。そこで、大気や天空状態により散乱光による付加輝度の値がどのように変化するかを解析することが重要となる。しかしながら、これを実測により種々の条件の組み合わせについて詳細かつ正確に行うことは微粒子濃度、粒径分布、散乱光輝度分布等の測定を正確かつ長期的に行うことが要求されるので、極めて困難なものとなる。そのため、霧中における対象物の視認性を現場で詳細に検討した事例は少なく、一般的にはシミュレーションを用いて検討されることが多い。

シミュレーション方法としては、人工霧を発生させた実験室実験による方法（以下、「方法 1」とする）と CG 画像を用いた数値シミュレーションによる方法（以下、「方法 2」または「CG シミュレーション」とする）がある。

### 4.3.2 霧のシミュレーションの種類と特徴

「方法 1」と「方法 2」の要因別特徴を以下に示し、表 4.3.3-1 にまとめた。

#### (1) 実験精度

方法 1；実際と同様な特性をもつ霧を人工的に発生させ、現実に近い環境下において実験できるので実験精度は高い。

方法 2；霧中における視認性理論は確立されており、理論に基づいた複雑な数値シミ

ミュレーションは可能なので実験精度が高い。

(2) 再現性

方法1；現実に近い空間にて実験を行うことができるので再現性は高い。

方法2；精度の高い数値シミュレーションが可能であるので、低輝度レベルの環境条件では再現性は高いが、日中の屋外輝度、光源輝度のような高輝度CG画像を表示できる出力装置が現状では存在しないため、高輝度レベルの環境条件での再現性は低い。

(3) 実験条件の実現

方法1；設備に限界があり、あらゆる実験条件を実現するのは困難である。

方法2；プログラムのパラメータを変更することで対応できるので容易である。

(4) 設備費用

方法1；霧環境を制御する実験装置と広い実験空間を必要とするため、膨大な設備費用がかかる。

方法2；最低限必要な設備はコンピュータと提示装置のみであるが、再現性のレベルにより装置の要求性能が大きく異なるため、必要な設備費用は場合によって異なる。

(5) 場所

方法1；広い実験空間が必要である。

方法2；実験室レベルの場所を確保できれば十分である。

(6) 実験工数

方法1；実験条件の変更に時間を要するため、実験条件が多い場合には非常に実験工数がかかる。

方法2；実験条件の変更は短時間に行うことが可能であるが、実験の種類によりシミュレーション時間が大きく異なるため、実験工数はまちまちである。

(7) 開発の技術的容易さ

方法2は高レベルな数学・物理の知識とプログラミング・スキルを必要とするため、開発が容易ではなく専門家と協力して開発する必要がある。

表 4.3.3-1 方法1と方法2のシミュレーションの特徴

	実験精度	再現性	実験条件の実現	設備費用	場所	実験工数	開発の技術的容易さ
方法1	○	○	×	×	×	×	○
方法2	○	低輝度；○ 高輝度；×	○	×～○	○	×～○	×

4.3.3 人工霧の発生シミュレーションの概要

人工霧の発生とは液体噴霧あるいは液体微粒子化のことを言い、液体に何らかのエネルギーを与えて液柱表面波を作り、液体の表面張力を減少させるなどして表面波分裂を行う

ものである。液体を微粒子化する方法を以下に示す<sup>8)</sup>。

- ① 滴下における微粒子化
- ② 液粒による微粒子化
- ③ 異形噴孔による微粒子化
- ④ 衝突流による微粒子化
- ⑤ 旋回流による微粒子化
- ⑥ 振動による微粒子化
- ⑦ 気流による微粒子化
- ⑧ 回転盤による微粒子化
- ⑨ 回転噴孔による微粒子化
- ⑩ 蒸気および凝結による微粒子化（自然界の霧）

自然界における霧の発生は、気象変化による海、河川、湖沼や大地からの蒸発であるので、これらを実現するシミュレーション方法は、噴射ノズル、超音波加湿、回転噴霧器、および加熱蒸気などが適している。具体的な霧の発生シミュレーション方法に関しては第4章第5節で述べることとする。

#### 4.3.4 霧のCGシミュレーションの種類

霧のCGシミュレーションは、精度の要求レベルにより、大きく分けて2種類の方法がある。霧粒子の散乱光による付加輝度を考慮する場合としない場合である。前者は霧粒子の多重散乱を考慮するため、高精度なシミュレーションを行うことができる。しかしながら、計算に膨大な時間がかかるため、多くの実験工数を必要とし、また、高解像度・高輝度CGを実現するための高性能なコンピュータ設備環境も必要とする。一方、後者の場合は、多重散乱を考慮しない簡易的なシミュレーションであり、精度は高くないものの少ない実験工数および安価な設備にて実現可能である。

#### 4.3.5 大気中における視認性理論

霧のCGシミュレーションを行うには、大気中における対象物の視認性理論を把握しておく必要がある。そこで、まずこれに関して述べる。

##### (1) 大気中における光の減衰

大気中を光が通過するとき、大気微粒子によって光は散乱あるいは吸収されて減衰する。厚さ $l$ の大気層における平行光の減衰は Lambert-Beer の法則から (4.3-1) 式で表される。

$$I/I_0 = \tau = e^{-\sigma l} \cdots (4.3-1)$$

ただし、

$I_0$  ; 光の最初の強さ

$I$  ; 大気層を通過後の光の強さ

$\tau$  ; 大気層の透過率

$\sigma$  ; 大気層における光の減衰係数 である。

大気の混濁として、霧の他にほこり、煙、スモッグの液滴、雨、雲などの水滴があるが、これらのない清浄な大気でも空気分子によって散乱される。一般の大気では、ほこり、煙の場合を除いて、可視光線は主として散乱によって減衰し、吸収はあまり問題にならない。よって、ここでは吸収は考慮せず散乱による減衰のみを考慮することとする。

散乱については Rayleigh 散乱<sup>註1)</sup>、いわゆる光の波長の逆四乗に比例する散乱式がよく知られているが、本散乱式が適用されるのは散乱粒子が波長に比べて小さい場合（波長の 1/10 程度以下）である。霧の水滴の径は数 $\mu$ ～数十 $\mu$ 、煙霧でも数分の 1 $\mu$  程度以上であり、Rayleigh 散乱が適用されるのは、実際には清浄な大気の空気分子の散乱の

場合である。このような場合の可視光線の減衰は小さく、交通照明では問題にならない。よって霧その他の粒子が大きい場合には Mie の散乱式が適用される。Mie の理論に関しては第 4 章第 3 節第 6 項で詳しく述べるものとする。

註 1) Rayleigh 散乱；誘電体の小球に波長  $\lambda$ 、単位放射照度の平行ビームが入射した時、散乱角  $\theta$  で小球からの距離  $l$  における法線放射照度  $E_\theta$  は、

$$E_\theta = \frac{\pi^2 H}{\lambda^4 l^2} (1 + \cos^2 \theta)$$

となる。ただし、 $H$  は小球の誘電率あるいは屈折率で定まる常数である。

(2) 大気中における対象物の可視度

① 対象物の見え方；大気に混濁があると、光の減衰および対象物とその周囲との色および輝度の対比（以下、コントラストと称す）の減少を生じ、視覚による情報伝達が低下する。この現象を一般的に取り扱うのは容易ではないが、昼間の観測における可視度の理論は Koschmieder によってかなり完成されているので、ここでは Koschmieder の理論に基づいて考えることとする。

対象物が識別できるのは、対象物と背景との間に明るさまたは色のコントラストがある場合である。遠距離になると光の散乱によって見かけの輝度および色のコントラストは減少するが、この場合には、色のコントラストのほうが距離による変化が急激なため、対象物の識別限界付近では輝度のコントラストが残るので、野外における可視度においては輝度のコントラストを問題にする。対象物の表面から出て観測者の方向に進む光は図 4.3.4-1 に示すように吸収・散乱により減衰し、また散乱日光が光路に入ってくる。

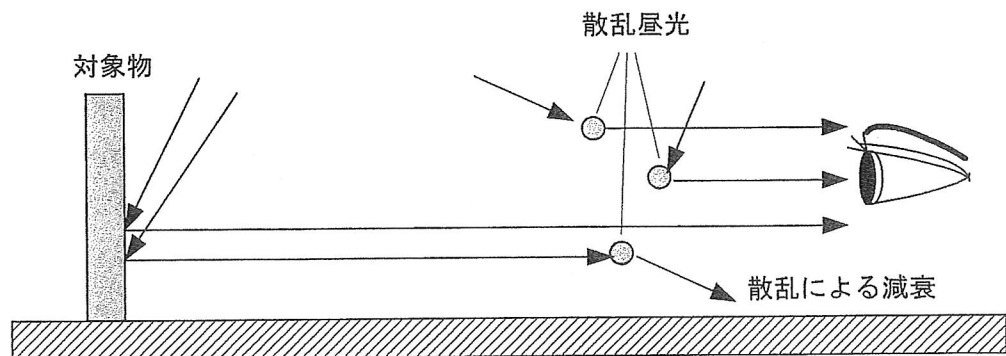


図 4.3.4-1 野外対象物の見かけの輝度の距離による変化の説明

一様な大気中で水平視の場合には、対象物の輝度は (4.3-2) 式で示される。

$$L_l = L_o e^{-\sigma l} + L_H (1 - e^{-\sigma l}) \dots (4.3-2)$$

ただし、  
 $L_o$ ；対象物を近く（距離 0）から見たときの輝度  
 $L_l$ ；対象物を距離  $l$  から見たときの輝度  
 $L_H$ ；対象物がある方向の空の輝度（背景輝度）

であり、右辺の第 1 項は対象物から出る光、第 2 項は散乱光を表す。(4.3-2) 式より、見かけの輝度の距離による変化は大気の混濁が大きいほど大きくなり、また、距離  $l$  が大きくなるにつれて第 2 項の寄与が大きくなるため、対象物の見かけの輝

度はその方向の空の輝度（背景輝度）に近づく（ $L_l$ が $L_H$ に漸近）ことが分かる。

- ② コントラスト；(4.3-2) 式より、対象物および背景の見かけの輝度が距離とともに変化するので、見かけのコントラストも変化する。対象物輝度を  $L_l$ 、背景輝度を  $L_H$  と定義すると、コントラスト  $C_l$  は、

$$C_l = \frac{|L_l - L_H|}{L_H} = \frac{|L_0 - L_H|}{L_H} e^{-\sigma l} = C_0 e^{-\sigma l} \dots (4.3-3)$$

となる。但し、 $C_0$  は対象物を近く（距離 0）から見たときのコントラストである。(4.3-3) 式より、コントラスト  $C_l$  はシルエット視（ $L_l < L_H$ ）、逆シルエット視（ $L_l > L_H$ ）にかかわらず、距離  $l$  が大きくなるにつれ、小さくなることが分かる。一般的に(4.3-3) 式を“Koschmieder の式” という。

- ③ 視程の定義；視程とは、大気の混濁の程度を表す尺度である。対象物（黒い物体）を昼間の空を背景にして、その存在だけでなく形状を肉眼で識別できる最大水平距離として定義される。なお夜間の視程は昼間と同じ明るさにしたと仮定した場合に識別できる最大水平距離である。この定義から、視程は視力に左右されずに見通せる距離へ及ぼす大気の効果を知るものであるから、対象物の大きさは眼の分解能以上である必要がある。ここで観測距離  $l$  の対象物（黒い物体）を見ることを考える。距離 0 のときは背景の空と対象物の黒は明瞭に識別できるが、距離が増大するにつれて(4.3-2)、(4.3-3) 式が示すように、途中の大気の散乱光が入るため対象物の輝度が高くなり背景の空とのコントラストが小さくなるので、やがて識別できなくなる。

対象物が黒い場合は  $L_0 \ll L_H$ 、 $C_0 \doteq 1$  となるので、(4.3-3) 式より、

$$C_l = e^{-\sigma l} = \tau^l \dots (4.3-4)$$

となる。ただし、 $\tau$  は大気の単位あたりの透過率である。

コントラストが減衰して、コントラスト閾値  $\varepsilon$  になる距離  $l_v$ （最大水平距離）が視程であるので、(4.3-4) 式にて  $C_l = \varepsilon$  とおくと、

$$l_v = \frac{\ln \frac{1}{\varepsilon}}{\sigma} = \frac{\ln \varepsilon}{\ln \tau} \dots (4.3-5)$$

となる。コントラストの閾値  $\varepsilon$  は対象物の視角サイズ、周囲の明るさなどによって異なるが、野外観測の場合には普通 0.02~0.05 が用いられている。一般的には  $\varepsilon = 0.02$  となる距離  $l_v$  が視程に相当するとされるが、日本では気象分野では 0.02、交通分野では 0.05 として用いられることが多い。

(4.3-5) 式を用いて  $\varepsilon = 0.02$  および  $\varepsilon = 0.05$  の場合の  $l_v$  を求めると、

$$l_v = \frac{-\ln 0.02}{\sigma} = \frac{3.91}{\sigma} \dots (4.3-6)$$

$$l_v = \frac{-\ln 0.05}{\sigma} = \frac{2.99}{\sigma} \dots (4.3-7)$$

となる。  
 $\varepsilon=0.02$  の場合の  $\sigma$  と  $l_v$  および  $\tau$  の関係を図 4.3.4-2 に示す。視程  $l_v$  を求めるには大気透過率計あるいは後方散乱視程計を用いるが、視程の観測から概算することもできる。

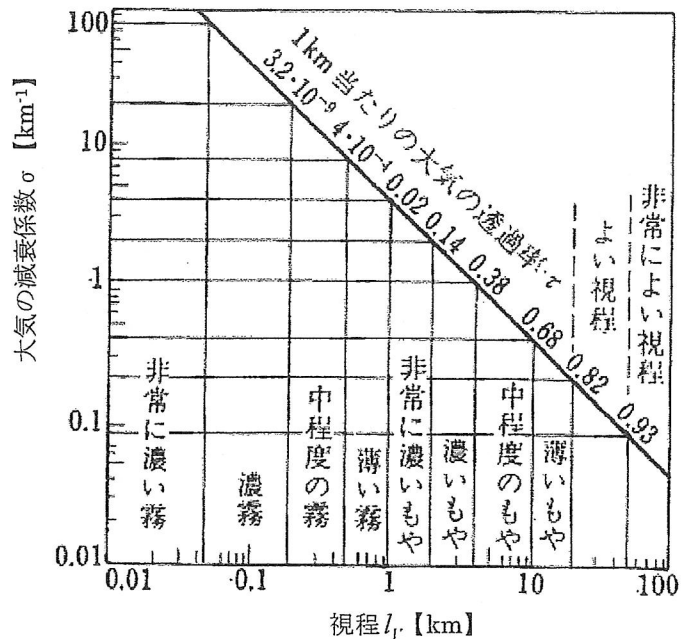


図 4.3.4-2 大気の減衰係数と視程との関係 ( $\varepsilon=0.02$ )<sup>9)</sup>

#### 4.3.6 多重散乱を考慮しない霧のCGシミュレーション

本項では多重散乱を考慮しない霧のCGシミュレーション方法に関して述べる。ここでは、対象物自身が発光する場合と発光しない場合に分けて、シミュレーション方法を検討するものとする。

##### (1) 発光しない対象物の場合

発光しない対象物の場合には、大気中の微粒子散乱による付加輝度の影響が小さいので、多重散乱を考慮しなくても精度の高いシミュレーションを行うことが可能である。そこで、一般的には Koschmieder の理論式に基づいた、大気の減衰係数  $\sigma$ 、背景輝度のみを考慮した (4.3-2) 式を用いてシミュレーションを行う。

ただし、本式は背景輝度がほぼ一様であると仮定できる場合のみ適用できる。

背景輝度が不均一の場合には多重散乱を考慮した方法でシミュレーションを行う必要がある。

##### (2) 発光する対象物の場合

発光する対象物は、その大きさにより一般的に下記の3通りの見え方に分類される<sup>10)</sup>。

① 視角が大きく、形のある面光源として見える場合 (明順応で2分、暗順応で10度以上)

② 中間の大きさの場合

③ 視角が小さく点光源として見える場合 (明順応で0.4分以下、暗順応で20分以下)

①、②の場合は、発光する対象物と背景との輝度のコントラストが識別の因子となるので、発光しない対象物の場合に準じたシミュレーションを行う。一方、③の場合は、発光する対象物による光が観測者の目に生ずる照度 (以下、角膜照度と称す) を識別の因子とする。よって、角膜照度に基づいてシミュレーションを行う。角膜照度は、(4.3-8) 式で示され、これを Allard の式という。

$$E = \frac{I\tau'}{l^2} \times 10^{-6} \dots (4.3-8)$$

$E$  ; 角膜照度 (lx)  $l$  ; 観測距離 (km)

$I$  ; 発光する対象物の光度 (cd)  $\tau'$  ; km あたりの大気の透過率

ここで光度  $I$  が小さくなるか、もしくは観測距離  $l$  が大きくなり、角膜照度  $E$  がある値以下になると見えなくなる。発光体を識別できる最小の角膜照度が閾値  $E_t$  であり、閾値  $E_t$  は背景輝度、色、発光体サイズ、形によって異なる。

#### 4.3.7 多重散乱を考慮した霧のCGシミュレーション

本項では、低視程用の航空灯火システムに関する研究<sup>12)-14)</sup>を行っている(独)交通安全環境研究所の検討方法をもとに、Mie 散乱特性に基づいたモンテカルロ法を用いた、多重散乱を考慮した霧のシミュレーション方法を述べる。

##### (1) Mie 理論

Mie および Debye は、電磁波に対する Maxwell 方程式より、散乱波の強度を求める理論を導き出した。

Mie 理論によると、球状粒子に単位照度平面波の光が入射する時の、散乱強度  $I(\alpha, \theta)$  ( $\alpha$ 、 $\theta$ ) 及び散乱効率  $K(\alpha)$  (散乱断面積  $S$  / 幾何学断面積  $\pi r^2$ ) は、光の散乱角  $\theta$  (入射方向と散乱方向の相対角)、粒子屈折率  $m$ 、サイズパラメータ  $\alpha = 2\pi r / \lambda$  ( $r$  は微粒子の半径、 $\lambda$  は光の波長) の関数となる。

$$I(\alpha, \theta) = \frac{\lambda^2 (i_1 + i_2)}{8\pi^2} \dots (4.3-9)$$

$$K(\alpha) = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{\nu=1}^{\infty} (2\nu+1) (|a_{\nu}|^2 + |b_{\nu}|^2) \dots (4.3-10)$$

$$i_1 = \left| \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2\nu+1}{\nu(\nu+1)} \left\{ a_{\nu} \frac{P'_{\nu}(\cos\theta)}{\sin\theta} + b_{\nu} \frac{dP'_{\nu}(\cos\theta)}{d\theta} \right\} \right|^2 \dots (4.3-11)$$

$$i_2 = \left| \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{2\nu+1}{\nu(\nu+1)} \left\{ b_{\nu} \frac{P'_{\nu}(\cos\theta)}{\sin\theta} + a_{\nu} \frac{dP'_{\nu}(\cos\theta)}{d\theta} \right\} \right|^2 \dots (4.3-12)$$

(4.3.10) ~ (4.3.12) の  $P'_{\nu}(\cos\theta)$  は Legendre 多項式、 $a_{\nu}, b_{\nu}$  は 1 次、2 次 Ricatti-

Bessel 関数  $\Psi_{\nu}$ 、 $\zeta_{\nu}$  及びその導関数からなる。

$$a_{\nu} = \frac{\psi'_{\nu}(m\alpha)\psi_{\nu}(\alpha) - m\psi_{\nu}(m\alpha)\psi'_{\nu}(\alpha)}{\psi'_{\nu}(m\alpha)\zeta_{\nu}(\alpha) - m\psi_{\nu}(m\alpha)\zeta'_{\nu}(\alpha)} \dots (4.3-13)$$

$$b_{\nu} = \frac{m\psi'_{\nu}(m\alpha)\psi_{\nu}(\alpha) - \psi_{\nu}(m\alpha)\psi'_{\nu}(\alpha)}{m\psi'_{\nu}(m\alpha)\zeta_{\nu}(\alpha) - \psi_{\nu}(m\alpha)\zeta'_{\nu}(\alpha)} \dots (4.3-14)$$

$$\psi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z) \dots (4.3-15)$$

$$\zeta_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} \left[ J_{n+\frac{1}{2}}(z) - iN_{n+\frac{1}{2}}(z) \right] = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} \left[ J_{n+\frac{1}{2}}(z) - (-1)^n iJ_{-n-\frac{1}{2}}(z) \right] \dots (4.3-16)$$

以上のことより、各微粒子における散乱特性である散乱効率 $K(\alpha)$ や散乱強度 $I(\alpha, \theta)$ が求まれば、微粒子が複数個存在する空間での散乱光分布が推定できる。

(4.3-9) ~ (4.3-14) 式を Mie の散乱方程式と呼ぶ。

(2) 多重散乱を考慮した解析手法

散乱効率 $K(\alpha)$ により、大気中を光が進行した時の減衰係数 $\sigma$  ( $\text{m}^{-1}$ )が決まる。

$$\sigma = \pi \int_0^\infty \int_0^\infty r^2 n_a(r) f(\lambda) K(\alpha) dr d\lambda \dots (4.3-17)$$

$n_a(r)$  ; 微粒子濃度分布 (個/ $\text{m}^3$ )

$f(\lambda)$  ; 光の波長確率密度分布

この $\sigma$ により、光子が次に散乱するまでの予測距離 $L$ が求まる。

$$L = -\ln(\text{ran}1) / \sigma \dots (4.3-18)$$

$\text{ran}1$  ; 0~1 の一様乱数

また、散乱角確率密度分布 $F(\alpha, \theta)$ は (4.3-19) 式で表される。

$$F(\alpha, \theta) = \int w(\phi) I(\phi) d\phi / \int w(\phi) I(\phi) d\phi \dots (4.3-19)$$

$w(\phi)$  ;  $\phi$ での立体角

これにより、各散乱地点における散乱角 $\theta$ を予測できる。

$$\theta = F^{-1}(\alpha, \text{ran}2) \dots (4.3-20)$$

$\text{ran}2$  ; 0~1 の一様乱数

このようにして、光子が放出してから、どの位置でその方向に散乱してしていくのか、一つ一つ予測していくことができる。その基本概念を図 4.3.4-3 に示す。

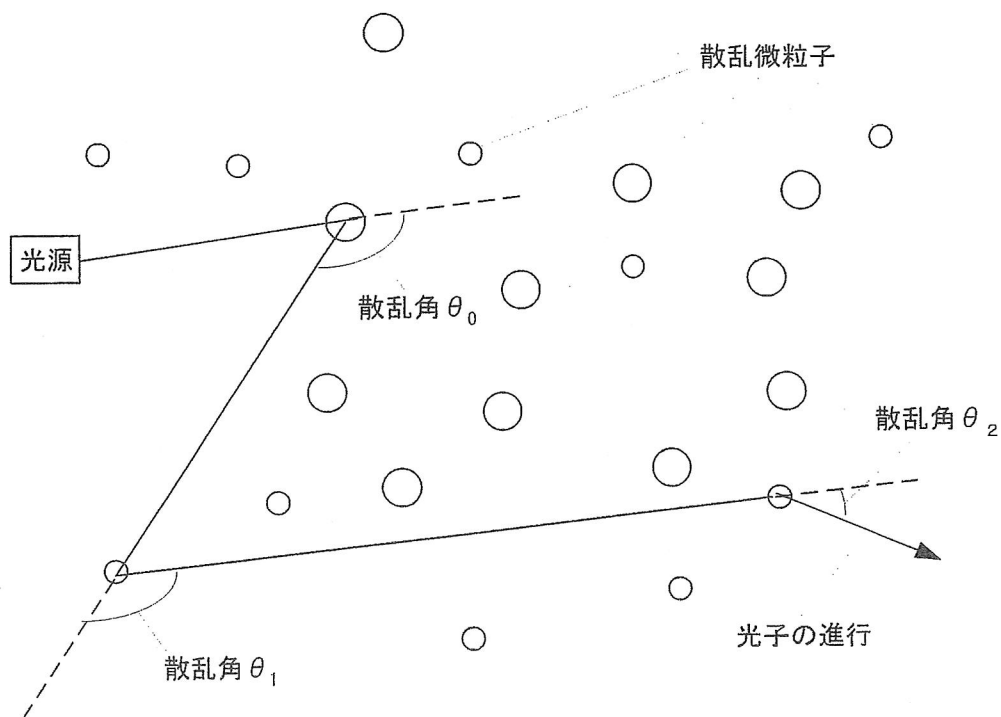


図 4.3.4-3 散乱微粒子を含む大気中を進行する光子

そして、この光子を複数個とり、その進行状況を重ね合わせて統計分布を求めることにより、任意の位置及び方向から散乱微粒子を含む大気を通じて発光体を見たときの輝度分布を推定できる。すなわち、Mie 散乱方程式によって求められる散乱微粒子1個当たりの散乱特性に基づき、モンテカルロ法により、空間に微粒子が複数個存在する時の散乱光空間分布特性を求めることが可能となる。モンテカルロ法による散乱光空間分布解析のフローチャートを図 4.3.4-4 に示す。

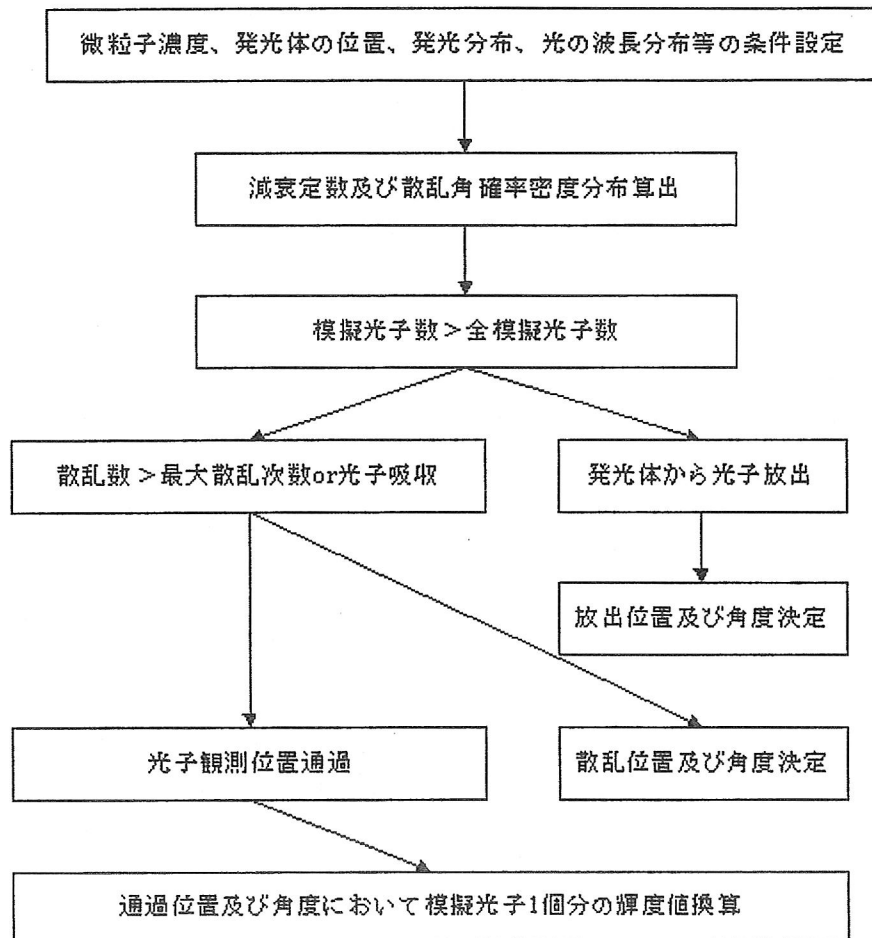


図 4.3.4-4 モンテカルロ法による散乱光空間分布解析のフローチャート

本手法は、全ての位置から全ての方向を見たときの輝度分布が一度のシミュレーション計算で求められ、散乱微粒子の存在位置に制限を与えず、また散乱微粒子の粒径や光波長の影響も考慮することができる等、正確で詳細な解析が可能となるが、計算時間が長くなることが問題点である。

### (3) モンテカルロ法による CG シミュレーション手法

屋外での背景の輝度分布に影響を及ぼし得る発光体や昼光による散乱光の空間分布の算出が、前節の手法により可能となる。そして、それらを重ね合わせることにより、発光体が数個含まれる背景を任意の位置及び方向から見たときの輝度分布をモンテカルロ法により CG シミュレーションすることができる。各発光体の散乱光の空間分布から CG 画像データ  $G(\psi_x, \psi_y)$  を算出するための手順を以下①～⑤に示す。ただし、 $\psi_x, \psi_y$  は観測方

向を示すものである。

- ① 微粒子特性、観測位置、視程  $V_s$ 、昼光データ（天空状態）、定数  $N_L$ 、各灯火の位置及び光軸等の条件設定
- ② 設定された微粒子特性に対する各灯火の散乱光空間分布データ

$P(O, \theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \zeta)$  を入力（直射光成分も含む）

$$P(O, \theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \zeta) = Q(O, \theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \zeta) \times \left( \frac{L_s}{O} \right)^2 = Q(O, \theta_x, \theta_y, \phi_x, \phi_y, \zeta) / \sigma_s^2$$

$Q$  ; 灯火散乱光による輝度分布データ ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

$\sigma_s$  ; シミュレーションでの光減衰係数 ( $\text{m}^{-1}$ )

$L_s$  ; シミュレーションでの各光学深さにおける観測距離 ( $\text{m}$ )

$O$  ; 光学深さ (= 観測距離  $\times$  減衰係数)

$\theta_x, \theta_y$  ; 観測位置から見た光源の方向

$\Phi_x, \Phi_y$  ; 観測方向と  $\theta_x, \theta_y$  との相対角

$\zeta$  ; 観測位置から見た光軸のずれ

- ③ 設定された条件時の昼光散乱による輝度分布データ  $D(\Psi_x, \Psi_y)$  を入力
- ④ 観測位置と各灯火との位置関係（方向  $\theta'_x, \theta'_y$  , 距離  $L'$  及び光学深さ  $O' = 2.996 \times L' / V_s$ ）や、その観測位置での光軸のずれ  $\zeta'$  の算出を行う。
- ⑤ 各観測方向  $\Psi'_x, \Psi'_y$  から見た時の、各灯火からの散乱光による付加輝度を算出し、CG 画像データに加算していく。

$$G(\Psi_x, \Psi_y) = D(\Psi_x, \Psi_y) + \sum_{N=1}^{N_L} P(O', \theta'_x, \theta'_y, \phi'_x, \phi'_y, \zeta') \times \frac{O'^2}{L'^2}$$

このようにして、各発光体についての散乱光の空間分布から CG 画像データが算出できる。本手法では、粒径の異なる微粒子の散乱特性や多重散乱のふるまいを理論的に考慮し、混濁大気での光散乱が正確にシミュレーションできる。

#### 4.3.8 霧のCGシミュレーション方法のまとめ

多重散乱を考慮しない「Koschmieder, Allard の理論式に基づいた方法」は、「Mie 理論に基づいた方法」と異なり、複雑な背景輝度への適用やハレーションによる影響を考慮することができない。しかしながら、前者の方法は、背景輝度に観測方向の水平線上の天空輝度を用いれば、観測距離が視程を大きく超えない範囲では、後者の方法による場合とほぼ同レベルの精度でシミュレーションを行えることが報告されており、また下記のことも明らかとなっている<sup>13)</sup>。

- 対象物の中心部はハレーションによる影響が少ないため、Koschmieder, Allard の理論式に基づいた方法は、背景が一様な輝度空間の場合にはハレーションの効果を入れない中心部ならば近似可能である。
- Mie 理論に基づいた方法は現場実験の結果とほぼ同様になる。
- 発光体のサイズは5分以内であれば点光源として扱ってシミュレーションを行っても差し支えない。
- いずれの方法でも太陽に直接照らされる晴天状態のシミュレーションを行えず、現状では曇天時、夜間時のみのシミュレーションが可能である。

## 4.4 雪・霧に関する視程と見え

### 4.4.1 視程

和達清夫監修「気象の事典」(東京堂出版、1974)において、視程は気象用語として次のように記述されている。

「大気の混濁の程度を表す量で、目視観測による長さで表す。昼間においては、空を背景とした顕著な黒ずんだ目標物、例えば、独立樹木を樹木として、建物を建物として、肉眼によって認め得る最大距離をいう。視程は距離そのまま表すのが最もよいが、通常適当な目標物が得られないことが多いので、視程階級表によって目測する。」

視程の実際の観測には目標物の形、大きさ、色、周囲との対照、観測者との間にある空気層のゆらめき、観測者の眼の状態などが関係する。視程を観測するには、すべての方向性の地平線が見え、なるべく低いところを選ぶ。あらかじめ適当な目標を一方向に偏せずなるべく数多く選定し、その方向と距離を測って図表にしておく。目標物の大きさは鉛直方向の視角  $0.5^\circ$  以上で、左右の幅は  $5^\circ$  以下のものを選ぶ。遠距離の目標としては、丘・山・島等を選定せざるを得なくなってくるが、その視角はなるべく前記の大きさのものを選ぶようにする。空を背景として目標物が選定出来ない場合は、なるべく明るい地物を背景とした黒い目標物を選ぶ。通常、東西南北ほぼ四方向別に観測するが、方向により視程が異なる時には最短視程をとる。

視程を左右する大気の混濁を生ずるのに2種類の原因がある。第1は大気中に砂塵や水蒸気の凝結したものが多量に存在している場合で、煙霧、黄砂、もや、霧、霧雨、雨、雪、氷霧等がこれで、この種のことを機械的混濁という。これらの現象があると、地物から来る光をさえぎるのみならず、散光を反射して眼に来る光量を増すから周囲との対照が悪くなり、結局視程を悪くする。第2は気層中に密度の異なる、したがって屈折率の異なる部分が錯綜介在している場合で、これを光学的混濁という。日中、大気の下層に乱流が生じると、密度の異なる空気が上下に運動し、これを通過してくる光を屈折、反射、散乱するから、視程は悪くなる。

視程は、大気の透明度の良否によるばかりでなく、地物の照らされ具合、背景の明るさ、大気から反射される光の多少等にも関係する。曇天時には視程は四方ほぼ同様であるが、太陽が照っている時は、太陽に向かった方角では視程は小さく、太陽と反対方向では大きい。視程は、昼間の目視から得られる量であり、その定義はあいまいであり、夜間には計測すらできない。そこで、大気の混濁度を測定し、これを視距離に換算し計測する。対象物の見かけのコントラストは、観測距離によって変化する。霧中では観測距離が増すにつれて対象物のコントラストは弱くなる。対象物のコントラストは、下記の式で求める。

$$C_0 = \frac{|L_t - L_b|}{L_b} \quad (4.4-1)$$

$C_0$  ; コントラスト、 $L_t$  ; 対象物の輝度( $\text{cd/m}^2$ )、 $L_b$  ; 背景輝度 ( $\text{cd/m}^2$ )

大気中における光の減衰が散乱のみによるとし、大気の状態が一様であるとする、距離により、見かけのコントラストは(4.4-2)式で表される。

$$C = C_0 \times \exp(-\sigma l) \quad (4.4-2)$$

$C$  ; 距離  $l$ (m)離れたときの見かけのコントラスト、 $C_0$  ; コントラストの初期値、  
 $\sigma$  ; 大気中における光の減衰係数、 $l$  ; 観測距離(m)

視程は、対象物が見えなくなる距離である。コントラストの初期値は、 $L_1$ が黒い物体とすると1とみなすことができる。よって、対象物が見えなくなる限界コントラストを用いて上式を書き換える。

$$C_{th} = \exp(-\sigma V) \quad (4.4-3)$$

$C_{th}$  ; 限界コントラスト、 $\sigma$  ; 光の減衰係数、 $V$  ; 視程(m)

限界コントラストは、経験的に 0.02 や 0.05 が使われる。人間の限界コントラストは、ブラックウエル等による被験者実験からおおよそ推定されている。以上の視程を大気の混濁度（光の減衰係数）から求める理論は、Koschmieder によって見出されたものであり、Koschmieder の式と呼ばれている。一方、大気の混濁度は、透過率計などによって計測される。

#### 4.4.2 霧と視程及び見え

##### (1) 霧と視程

霧とは、直径  $10 \mu\text{m}$  以下の微小な水滴（または氷晶）が大気中に浮かんでいることが原因となって、地表面付近で水平方向の視程が 1km 未満になる現象をいう。視程が 1km 以上 10km 未満である場合をもやといひ、視程障害を引き起こすような霧を濃霧という。濃霧とは、陸上で視程 100~200m 以下のような霧である。微小水滴である霧粒が光を散乱、反射、吸収することから視程が悪くなる。道路公団の交通規制の目安は、視程 200m から 100m で最高速度規制となり、視程 100m から 50m で通行止めとなる。ただし、これらの視程値は概ねの基準である。規制の実施は、巡回や交通管理者との協議によってなされている。（「平成 13 年度・霧による視程障害防止対策に関する検討報告書」、(財) 高速道路技術センター、2002.3.）

##### (2) 霧と見え

一般にもの見え方は、対象物の視覚的大きさ（Visual Acuity）とコントラストにより決定されると言われている。霧による視程障害は、コントラストによる低下が主であり、Visual Acuity の影響は少ないと考えられる。よって、霧中では、対象物のコントラストを考えることが重要である。従来の輝度計による計測では、コントラストの測定は困難であった。しかしコントラストそのものを、画像を用いて計測することも可能となってきており、霧中での対象物の見えの評価は、今後進展すると言えよう。

霧による見え方は、視程が減少すれば、可視距離も当然減少すると言える。しかし、「道路と視程障害」（(財) 高速道路調査会、昭和 47.3）によれば、可視距離の減少程度は、対象及び観測の条件によって異なる。萩原らは、同じ視程であっても霧による背景輝度は照度によって変動し、明るさや背景が可視距離に与える影響について実験データから検証している。

昼間の対象物のとき、その可視距離は、対象物の光学的特性によって「見え」が変化する。例えば、反射率が高い反射材を使っている標識は、通常の対象物より見やすい。道路を背景とするような区画線は、標識のような空を背景とするものより可視距離が視程より長くなる。また、明度の高い黄色や白より、若干明度の低い橙色や赤などの方が可視距離が長くなる。もちろん、大きいものは見やすくなる。

霧中における夜間の対象物の視認性は、照明による影響が大きくなる。非自発光物を夜間において見るとき、なんらかの照明が必要である。道路交通では、道路照明あるいはヘッドライトがそれらを照明する。道路照明のような全般照明の効果は、濃霧の中では非常に減衰する。霧中での光の散乱によって、視野内に光幕が生じ、対象物の見かけのコントラストは減少する。一方、ヘッドライトによっても、後方散乱（自車）や前方散乱（対向車）によって光幕が生じる。しかし、その光を地面に近い部分に照射することより、対象物の見かけのコントラストを高く維持することが可能である。

信号機、視線誘導灯も、霧中では視程より視認距離は長くなるが、可視距離は減少する。特に、昼間は、高いコントラストを成立させるために非常に高い光度が必要である。なぜなら、背景となる霧よりも高い輝度がなければ、非発光体よりコントラストが低くなり、発光の意味がなくなるからである。一方、高い光度のため自分の光の散乱によって幕を作り、視認性が低下する場合がある。夜間では、自発光対象物は濃霧でも高い視認性を示す。ただし、明るくし過ぎないように調光制御が必要となる。

#### 4.4.3 雪粒子による視程変動

##### (1) 雪と視程

吹雪時の視程は、竹内、石本らが1970年前後から長年にわたり調査研究してきている。霧における視程は、光の一樣減衰から計測されている。しかし、吹雪時の視程の目視観測と光の減衰の同時観測の結果、とくに100m以下の低視程時において大きなズレのあることを見出した。この理由は、雪の粒子の大きさ、空間濃度、雪の粒子の流れによる残像とした。また、光の減衰は散乱よりも反射であることを明らかとした。

##### (2) 雪と見え

吹雪時の視程は、積雪表面の雪質や降雪の有無、風速の変化などにより激しく変化する。時間とともに変動するということが霧と著しく異なる点である。石本（「雪粒子による視程変動の研究」開発土木研究所報告第107号、1995）は、霧と雪による視程を同一地点で観測し、その特徴を以下のように記している。霧は、吹雪などに比べ一様に分布していることを反映し、平均視程は低下するものの、変動強度は小さい。透過率計で測定された降雪の視程変動スペクトルは、周期の短い部分でピークを持つが、その変動レベルは吹雪の1/1000程度である。吹雪では、周期が短くて大きな変動幅で視程が変動する。このため、路面が雪氷路面の時、平均視程が同じでも車の速度に与える影響が異なり、吹雪時の視程と車の速度は負の相関を持っている。

#### 4.5 雨・雪・霧の計測技術並びに発生装置

雨は降水量、雪は積雪の深さ・降雪の深さ、霧は粒径分布・霧水量が計測されることが多い。また、これらの気象条件による視環境悪化の程度を示す値として視程が用いられる。

雨・雪・霧の擬似的な発生方法はノズルから水を噴霧することにより可能である。噴霧する水滴の粒径が0.2mm～3mm程度であれば雨、温度を氷点下とすれば雪を擬似的に再現できる。霧は噴霧する水滴の粒径を10～20 $\mu$ m程度にすればよい。霧の場合には水を沸騰・蒸発させたりドライアイスを用いるなどで同様な疑似環境を作ることができる。

##### 4.5.1 計測技術<sup>15), 16)</sup>

(1) 雨；雨は降水量が計測される。降水量とは、一定時間内に降った雨の量のことで、水平面にたまった水深で表す。なお、雨のほかにも、雪、あられ、ひょうなども含まれるが、この場合には融けた水の深さに換算して降水量とする。降水量の測定には、雨量計が用いられる。基本的に雨量計はある口径（通常20cm）の受水口に雨を受け、その深さを測定するか、その重量や容積から深さに換算する。

- ① 貯水型雨量計；受水口に入った雨水をタンクに貯める形式の雨量計である。貯水用のタンクはガラス容器であるものが一般的で、このガラス容器を貯水ビンという。貯水ビンに貯まった雨水などは、メスシリンダ状の雨量ますで秤量する。この雨量ますには目盛りがついており、mm単位で読みとる。最小読みとり目盛りは、0.1mmである。
- ② 自記式雨量計；雨量を自動的に連続記録する計測器を、自記式雨量計という。自記式雨量計には、サイフォン型、転倒ます型などがある。
  - i. サイフォン型自記式雨量計；この雨量計では、容器内に導いた雨水の水位をフロートの上昇により感知し、また、フロートの心棒についているペンにより記録紙に降水量が記録される。容器が満水になると、サイフォンにより自動的に排水される。また、同時にゼロ値となる。
  - ii. 転倒マス型雨量計；受水器からの雨水を左右に分かれたマスの片側へ入るようにし、降水量が0.5mm(1.0mmのものもある)に達するとマスが一杯になり、回転軸を中心にマスが転倒し、雨水を排出する。マスが転倒する際、パルス信号が発生するので、このパルス数を計測することにより降水量が計測できる。転倒マス型雨量計は、長期記録に適しているため、山間部などの雨量観測に利用される。
  - iii. ベクトル雨量計；降雨の方向別の強さを計測するための雨量計で、普通の貯水型雨量計と同じ水平な受水口とともに、東西南北方向を向いた受水口も持つ。山岳地帯のように、風が強く、さまざまな傾斜斜面の雨量の計測に適している。

(2) 雪；雪に関する計測では、積雪の深さ、降雪の深さが計測される。また、それ以外にも降雪水量、積雪水量、吹雪量、飛雪流量や、密度、含水量、粒度などが計測される。ここでは、この中から積雪の深さと降雪の深さについて計測方法を説明する。

- ① 積雪の深さ；積雪深は、雪の計測の中で最も基本となる量の一つであり、ある時刻に自然に地上に堆積している積雪の鉛直方向の深さと定義されている。積雪深は、降雪、融雪、沈降などによって1日のうちでも時間と共に大きく変化するため、時

間を決めて測定する必要がある。気象官署では1日3回（9、15、21時）測定してその最大値をその日の積雪深としているが、1日1回の計測の場合には9時とする。雪の積もり方は周囲の状況の影響を強く受けるため、代表性のよい測定値を得るためには測定器の設置場所に十分な注意を払う必要がある。特に風の影響が大きいので、風が水平に吹く場所を選び、吹き溜まりや吹きさらしになるような所は避ける必要がある。特に樹木や建物の影響は大きいので、それらの高さの4倍以上離れた場所が望ましい。また、日陰を避け、春先の融雪に影響が出ない所を選ぶ。なお、測定に当たっては、測定個所周辺の雪面を乱さないように注意を払う必要がある。積雪深の測定には「雪尺」または「積雪計」が用いられている。

- i. 雪尺；積雪深の計測には「雪尺」を使うのが簡便であるため最も一般的である。雪尺は1cm刻みの目盛りをつけた白い木製の柱であり、その長さは当該地におけるこれまでの積雪状況を参考にして決めている。現在この雪尺を使った測定は、降雪地帯の気象官署をはじめ学校など多くの観測地点で実施されている。積雪深は、融雪期になると融雪によって積雪表面に凹凸ができるため、測定者はある程度遠くから目を雪面の高さ近くにし、雪面の平均的な深さを雪尺から読みとらなければならない。欠点としては、測定時に観測者が必要であり、データ収集の隔測化ができないため、人里離れた地点でのデータが継続して取れない、人間の見方による系統的な誤差が出やすい等がある。
- ii. 積雪計；積雪深の測定を正確にしかも無人で隔測できるように開発されたのが積雪計である。この積雪計の開発に当たっては、様々な方式が提案されてきたが、現在実用化されている積雪計は、超音波式と光学式の2方式に大別される。光学式ではさらに位相差（距離）測定方式、幾何光学（角度測定）式、反射光検出方式がある。どの方式も非接触型センサーであり、積雪面を乱さずに測定できる。以下に各方式の計測原理と特徴を説明する。
  - a. 超音波式；超音波送受波器を観測用ポールの上部に積雪面と垂直となるよう下向きに取り付け、超音波パルスを雪面に向かって一定時間間隔で繰り返し照射し、積雪表面で反射して戻って来る時間を計測し、伝播時間と音速から距離に換算して積雪深を求めている。超音波送受波器の構造が簡単であり、センサー部を軽量化できる。また、消費電力が少ないため、冬期間バッテリーだけでの稼働が可能である。しかし、音波の伝播速度が気温に依存しているため、気温の精密な測定をし、補正する必要がある。さらに、超音波の特性上、雪面の真上に送受波器を設置する必要があり、このため着雪した雪が落下して真下の雪面を乱し、融雪期には積雪密度が周囲より高くなる。また積雪表面の密度が低い雪面（降雪直後）では、超音波は雪面下にも散乱し、1～2cmの誤差を生じることがある。
  - b. 光学・位相差方式；近赤外線の変調光を積雪面に対し斜め（固定）に取り付け、投光部から近赤外線の変調光を斜め下の雪面に照射し、積雪表面で乱反射して戻って来る光の位相差（時間差）を計測し、距離に換算して積雪深を求めている。斜め下の雪面を測定するため、着雪の落下などで測定している雪面を乱すことはなく、気温による補正の必

要もない。しかし、レンズの汚れや結露に対する対策上、ファンを常時回転させているため消費電力が高く、バッテリーのみで冬期間稼働させることは難しく、太陽電池や商用電源との併用が必要である。また雪面の密度の影響を受け、1～2 cm の誤差を生じることがある。

- c. 光学・幾何光学方式；近赤外線の投光器・受光器を観測用ポールの上部に光軸を積雪面に対し斜め（固定）に取り付け、投光器の発する近赤外線により斜め下の雪面を走査し、受光器が雪面上の光点を検出したときの投光器の投射角度を測定し、三角測量方式で積雪の深さを求めている。

斜め下の雪面を測定するため、着雪の落下などで測定している雪面を乱すことはなく、気温の影響も受けない。さらに、雪面の密度による影響も受けない。しかし、精度を上げるため投光器と受光器の距離を大きく取る必要がある。その結果、センサー部が大きくなり、そのためポールも強大となり、基礎工事を含む設置に費用がかかる。また、モーター等の可動部があるため消費電力が大きく、故障の原因となりやすい。

- d. 光学・反射光検出方式；雪尺を一回り大きくした検出ポールの内部に、高さ2 cm 間隔で赤外線の投光部・受光部のペアを設置し、投光部から検出ポールの外に向かって投光すると、積雪層内では反射され受光部で検出されることによって積雪の深さを求めている。

他の積雪計に比べかなり安価であるため、多点設置が可能である。また、構造が簡単であるため、設置も簡単である。しかし湿雪が投光部・受光部の窓に付着すると計測値が高く出る。逆に晴天時、特に融雪期には検出ポール周囲の融雪が進み、くぼみができ計測値が低く出る。

- ② 降雪の深さ；降雪の深さとは、ある時間内に地表に降り積もった雪などの固形降雪の深さのことをいう。計測方法は、雪板による方法と前述の積雪計を利用する方法がある。

- i. 雪板；雪板とは、平らな四角い板の中央に目盛りを刻んだ木製の角柱を立てたものである。この雪板に降った雪の深さを決められた時間（9、15、21 時）に cm 単位で測定し、次の計測に備え計測後は雪板に積もった雪を払っておく。
- ii. 積雪計による計測；積雪計による計測では、前述の積雪計による計測結果から、計測期間の終時と起時の間での積雪の深さの差を求め、これを降雪の深さとするものである。

- (3) 霧；霧の性質を特徴づける物理的なパラメータとしては、粒径、霧粒数、霧水量、霧の落下速度、霧粒の蒸発などがある。この内、視程と一定の関係がある物理量は霧水量と粒径分布である。ここでは、この2つの計測法について述べる。

- ① 霧水量；霧水量とは、霧粒として空気中に含まれる液体としての水分の量をいい、空気  $1\text{m}^3$  中に数百 mg 程度である。
- ② 粒径分布；粒径分布を計測する方法としては下記のものがある。なお、それぞれの計測方法により、異なった粒径分布が得られることが多く、単に粒径の値だけではなく、計測方法との関係で見ることが望ましい。
  - i. 影写真法；粒径  $5\sim 1000\ \mu\text{m}$  を影写真法で大きさを求めるもの。即ち影の大き

さを簡易な処理によって自動的に検出するもので、航空機の翼の下に取り付けて計測を行う際にも利用できる。

ii. 直接写真法；フラッシュ等を用いた瞬間写真撮影により、オフラインで粒子の大きさを調べる方法。粒径分布を求めめるためには多大の労力を要する。

iii. 直接採取法

a. 油；ガラスの表面に鉱油を塗布し、短時間霧の中に露出して、粒（粒径 4～200 $\mu\text{m}$ ）を補足し、オフラインでカウントする。

b. 酸化マグネシウム；酸化マグネシウムのリボンを燃やしてできる白煙をガラス板にまぶす。これに粒子が衝突すると、粒径（8～240 $\mu\text{m}$ ）に応じた痕跡が生ずるのでオフラインでこの痕跡の長さを計測する。

c. カーボン、ゼラチン、レプリカ液；それぞれ、ガラス板に塗布して、粒子の痕跡を観察する。採取できる粒径は、カーボンが 4～1000 $\mu\text{m}$ 、ゼラチンが 2.5～50 $\mu\text{m}$ 、レプリカ液が 4～50 $\mu\text{m}$ 。

iv. レーザー散乱法

a. レーザー光回折法；レーザー光が粒子にあたって回折されたパターンは粒子の大きさによって異なることを利用。粒径分布を仮定して、それと同じ回折光強度分布を示すものとして粒度分布のパラメータを推定するもの。光学系の構成により測定範囲が変わる。

b. 位相ドップラ法；ドイツの Durst 氏の発表「ドップラ信号を異なる 2 点で観測するとその位相のズレは球の直径に比例する」ことを原理に、Bachalo 氏や Bauckhage 氏が発展させた方法。光学系の構成により測定範囲が変わる。

v. 光環現象；霧や雲などの中を太陽光などの平行な光が入射すると回折により粒子の大きさによって異なった大きさの光環が観測できるのを利用したもの。

(4) 視程；霧や雪に対する視程の計測には目視観測や視程計（VI 計、BS 計、FS 計）による自動計測法がある。なお、道路においては VI 型視程計、BS 型視程計が用いられる。

① 目視による視程計測；視程の観測には対象物の識別が基準となるが、この識別に影響する因子は、次の 3 つである。

i. 対象物と背景の間の輝度の対比（コントラスト）；見ようとする対象物と背景との明るさとの差異を定量的に表す尺度として輝度の対比（コントラスト） $C$  が用いられる。

$$C = (L - L_b) / L$$

$L$ ；対象物の輝度、 $L_b$ ；背景の輝度

ii. 対象物の大きさ；視距離を考えて、対象物が目に張る角、すなわち視角  $\alpha$  で表される。

iii. 背景の明るさ；環境輝度  $B_b$  で表される。人間が対象物を背景から識別するための輝度対比の最小値を  $\epsilon$  とすれば、 $\epsilon$  は視角  $\alpha$  と背景の輝度  $B_b$  の関数となる。一般に視角  $\alpha$  が大きくなるにつれて、 $\epsilon$  は小さくなる。すなわち見えやすくなるが、 $\alpha$  がある値以上になると  $\epsilon$  はほとんど変化しなくなる。また、背景の明

るさ  $B_b$  が高くなるにつれて、一定の  $\alpha$  に対する  $\epsilon$  が小さくなる。すなわち、環境が明るくなるほど対象が見えやすくなる。これも  $B_b$  が  $100\text{cd/m}^2$  以上になるとほとんど変化しない。以上から目視によって視程を定めるには、視角  $\alpha$  が  $0.5$  度から  $20$  度の黒ずんだ物体、例えば、森、建物、煙突などを対象とすることを規定している。環境の輝度は  $100\text{cd/m}^2$  以上であればよい。

- ② 透過率型視程計 (VI 計) による視程計測 ; VI 計は Koschmieder の式に基づくものであり、最も標準的な視程計として使用されている。視程は、大気中の煤煙や、霧粒子、雪粒子などによる光の吸収、散乱による減衰の他、見ようとする物体の背景の輝度、物体の大きさ、色、観測者の視力などによって大きく異なる。VI 計は、このような目視による観測の主観的視程に対し、大気の透過率を基にした平均的、あるいは客観的な視程を表すものである。したがって、目視による視程と、透過率による視程との間には、観測条件によりバラツキが生じる。しかし、昼間の目視過程と透過率との間には良い関係があり、これを表したのが Koschmieder の式である。視程と透過率の関係は Koschmieder の式から、次のように与えられる。

$$V = \frac{l \cdot \log \epsilon}{\log T}$$

V ; 視程、T ; 透過率、 $\epsilon$  ; コントラストの識別限界値 (一般に  $0.02 \sim 0.05$ )  
l ; 投・受光器間の距離

この式は次のような仮定の下に成り立っていることを留意する必要がある。

- i. 大気が均質であること。(視程の測定範囲で霧や煤煙の局部的分布が無いこと。現実には均質であることは少ないので、視程と透過率の間のバラツキとなる)
  - ii. 物体の識別限界 (コントラストの域値) は、物体の輝度と背景のコントラストにより決定される。(実際には大きさ、色、視力などにより大きな差がある) 域値  $\epsilon$  は、霧の場合  $0.02 \sim 0.05$  であり、道路や航空では  $0.05$  が採用されている。
  - iii. 目標物は、 $0.5^\circ \sim 5^\circ$  の大きさを持つ完全黒体であること。(自然界には完全黒体は存在しないので、差異となる)
- ③ 後方散乱型視程計 (BS 計) による視程計測 ; 大気中に照射された光  $I_0$  のうち、霧粒子や雪粒子によって散乱され、後方に戻ってくる光  $I_s$  のことを後方散乱光という。この散乱光を測定する方法である。連続した変調光を使用し、外界ノイズを除去しながら、 $I_s/I_0$  の値を連続測定するもので、清浄な大気中では  $I_s/I_0=0$  となるように設置している。霧や雪の発現を迅速に検知し、視程、霧の濃度、降雪の強さが測定できる。 $I_s/I_0$  の値は、霧や雪の粒子が増加すれば増加するため、特定のソフトウェアを付加することにより、現象の定量測定が可能となる。
- ④ 前方散乱型視程計 (FS 計) による視程計測 ; 大気中に照射された光の  $I_0$  のうち、照射前方のある位置において、水蒸気、霧、雪の粒子によって散乱された光  $I_s$  を受光し、測定する方法である。原理は BS 計と同様であるが投光部からの連続変調光の一部の散乱光を受光する方式であり、視程の測定範囲で、吹雪のように局所的な視程変動が大きい場合には、大気の均質性が保たれていないため、視程に差異が生じることがある。大気中の水蒸気や比較的均質な霧に対しては十分な精度を有している。

#### 4.5.2 発生装置

雨・雪・霧の擬似的な発生方法には以下の方法がある。

##### (1) 雨

雨を擬似的に実現する方法は、基本的に空中へ水を噴霧すればよい。最も簡単な方法は、管に無数の穴をあけ天井に吊しその管に水を送ればよい。しかし、この場合だと水滴の粒径の制御や、全面に均一な雨を降らせることは困難である。粒径を均一にするためには工業用のスプレーノズルを利用すると良い。このスプレーノズルには様々なタイプがあり、ノズルを選択することにより様々な雨を擬似的に再現することが可能である。

##### (2) 雪

擬似的な雪の発生方法は主に2つの方法がある。

まず、気温など周囲の環境に影響されず発生させる方法としては、氷を薄く削ったものを適当な空気と混ぜて吹き出させる方法がある。この方法は、比較的容易であり、人工雪が積雪したものも、実際の雪に感覚は似ている。しかし、氷を削ったものなので光学的な特性など物理的な面では必ずしも実際の雪と一致していない。

物理的な特性も比較的似ているものを発生させるためには、後述してある霧の噴霧装置などにより、気温が氷点下の環境へ水滴を噴霧することで発生可能である。しかし、この方法は周囲の環境に大きく依存するため、冬季に氷点下になる地方や大型の保冷庫など周囲の雰囲気制御できる場所で使用する必要がある。

##### (3) 霧<sup>16)</sup>

霧を擬似的に発生させるには代表的なものとして以下の手法がある。

① 蒸気法；水を沸騰・蒸発させて水蒸気とし、それを冷却して再度微粒子として出現させるものである。水粒子として出現させるには、雰囲気内を過飽和の状態にすることが必要で、容積が大きくなるにつれて、雰囲気温度をきめ細かく制御しなくてはならない。このため、発生した微粒子を、大容積の空間に均一な濃度で保存し続けることは困難で、小さな空間での実験に向けた方法である。小空間であれば、水蒸気を供給し続けることで、温度変化しても、過飽和の状態を保ち続けることが比較的容易であるからである。

② ドライアイス法；ドライアイスが温水中で激しく昇華する際に発生する写真写りの良い白いミストを利用する方法で、プロアなどを全く使用せずに数十 m/sec の流速をもつ可視流をきわめて簡単な装置で大量に得ることができる。このミストは無害、無臭かつ清浄な流体で、短期間の内に透明になり室内に充満して視界を悪くすることも無く扱いやすい。しかし、気流に大きな水滴を伴いがちであり、壁面がぬれたり、水滴が付着したりするので注

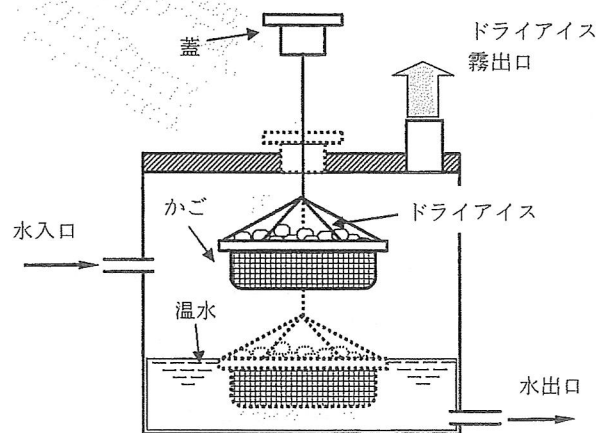


図 4.5.2-1 ドライアイス発生装置の概略図

意を要する。炭酸ガスが空気より重く、また、ミストが冷たいことによる浮力の影響は流速が 5m/s 以下では無視できない。

③ 噴霧法

i. ノズル式；ノズルから高圧の水を噴射することにより霧を発生させる方法である。霧の粒径は使用するノズルによって異なるが、大まかに  $100\mu\text{m}$  以下である。最近では微細な霧を発生させるため液体の他に気体（空気）流を複合させた 2 流体式の空気音響・超音波複合噴霧と呼ばれる方式が主流となっている。また、液体を内孔からノズル出口部において気流と液流を直角に噴出させ、液流を高速気流による空気超音波振動、衝突、せん断、空気音響振動およびノズル本体の超音波振動の複合によって霧化させる方法では数  $\mu\text{m}$  程度のよく揃った極細微粒子が得られる。

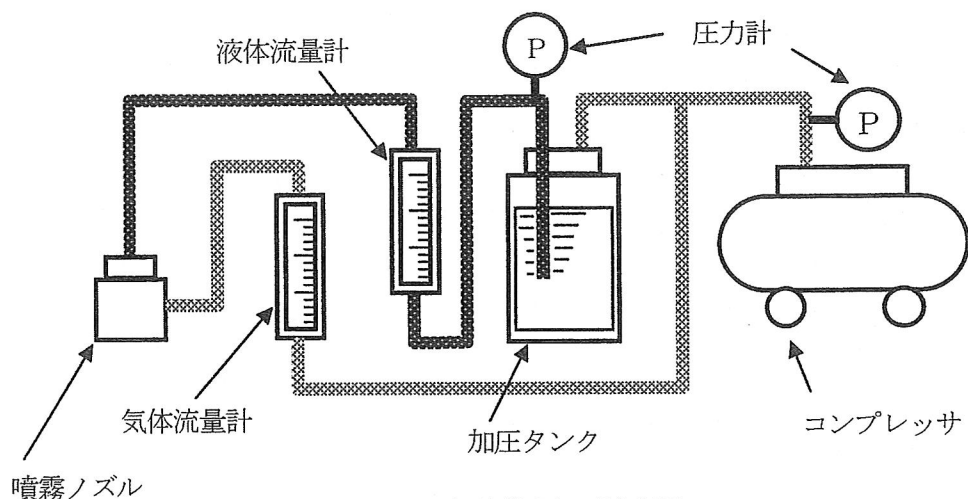


図 4.5.2-2 実験装置の概略図

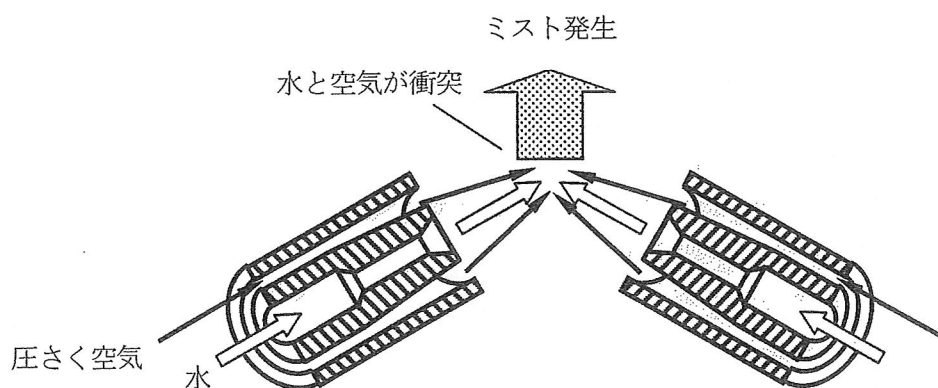


図 4.5.2-3 2 流体ノズルの霧化原理

ii. 超音波式；超音波を用いた噴霧は超音波振動のみによって液体を微粒子化するものと、ノズル式で述べたように従来の装置や新しい装置に、固体あるいは空気の超音波振動を付加する超音波複合噴霧によって霧化性能を改善するものがある。超音波振動のみによる霧化機構はキャピラリ表面波とキャビテーション、その双方説などがある。

以上の方法により霧を擬似的に再現することが可能である。なお、人工霧に

は以下のような問題点があるので、実験では留意する必要がある。

- ① 粒径分布の空間的不均一性；これは主として粒径による落下速度の違いによって生じる。すなわち、粒径の比較的大きいものは早く落下し、小さいものは空気中を漂い落下が遅いため、実験室上部は粒径が比較的小さいものが多く分布し、下に行くほど粒径の大きな物が分布することになる。これは時間とともに変化する。また、空気中で霧粒同士が衝突結合して、より大きな粒を形成し、粒径分布を変化させると同時に、上記理由により空間的分布の変化を加速させることとなる。このことから、非供給式を採用した場合には特に各パラメータの変化に注意を払う必要がある。供給式の場合においては、これらの変化を考慮して粒径による供給量の制御を行い定常状態の維持が必要となる。このためには、粒径階級によりノズルを個別に設け、排出量を個別に制御しておくことが必要である。
- ② 部分空間における特性の不可制御性；実際の霧にあつては、濃度が空間的に均一でない場合も多い。特に山霧のような場合にはその差が大きい。このような状況を再現しようとする、側方から濃度の異なる霧を供給し、反対の側面から吸引するというような装置が必要となる。しかし、これによっても空間中に異なる濃度の霧を自由に再現できるわけではない。
- ③ 移動方向の不可制御性；霧が流れるとは部分的に濃い霧の塊が風に乗って流れる現象であり、これは人工霧の装置としては再現できない。試験装置として実現できる霧の流れは、側方もしくは前(後)方からの一定の密度を持った霧の流れだけである。
- ④ 霧径の微視的機構における実際の霧との不一致；霧は通常「核」と呼ばれる物質の周りに水が凝結して形成される。この核は霧の種類によっても異なり、塩や微少なダストである。一方、人工の霧は水道水などであるので、センシング原理が物質の組成に敏感である場合には注意が必要である。

#### 4.6 路面の反射率について

夜間、自動車運転者が安全に走行するためには、前方の障害物輝度やレーンマーク輝度と、背景となる路面輝度とが、適切な関係になっていなければならない。

道路灯下の路面輝度は、CIE 報告書<sup>17),18)</sup>や道路照明施設設置基準<sup>19)</sup>で設計される。これらの基準で対応している舗装の種類は、コンクリート舗装と(密粒)アスファルト舗装である。近年、高速道路などで採用されている排水性舗装の反射特性は、研究調査<sup>20)</sup>が始まったところである。自動車前照灯での路面反射特性は、小林・八木・小松ら<sup>21),22),23)</sup>によって調査されており、次のように報告されている。

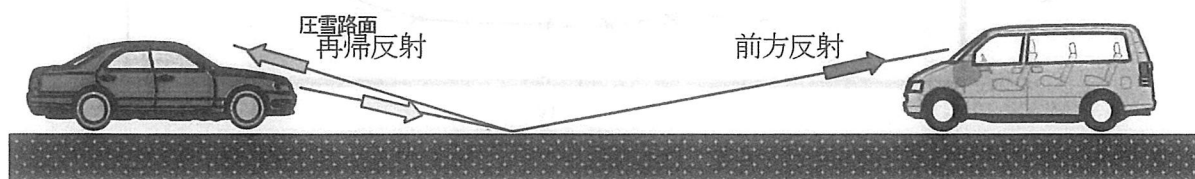


図 4.6-1 再帰反射特性と前方反射特性の説明図

(1) 再帰反射特性

再帰反射特性は、自車の前照灯で照射された光が、路面で反射され、運転者へどのぐらい戻るかを表す特性である。この反射率が高い程、路面輝度は高くなり、前方の障害物やレーンマークの見え方に影響する。測定の結果、以下のことが分かった<sup>2)</sup>。

- 路面の輝度係数（輝度／照度；単位  $\text{cd}/\text{m}^2/\text{lx}$ ）は、乾燥時、湿潤時とも経年使用後の密粒アスファルト舗装が最も高い。
- 湿潤時の輝度係数の低下率は、経年使用後の密粒アスファルトが最も高く、排水性舗装が最も低い。
- レーンマークの輝度係数は、高輝度タイプが高く、湿潤時の低下率は一般品が高い。
- レーンマークの輝度係数は、遠方に行くほど高くなる傾向が見られた。

※ 図中の略号は各々、密（密粒アスファルト舗装）、排（排水性舗装）、経（経年使用品）、未（未使用品）、乾（乾燥）、湿（湿潤）を表し、実験サンプルと路面の状態を表している。

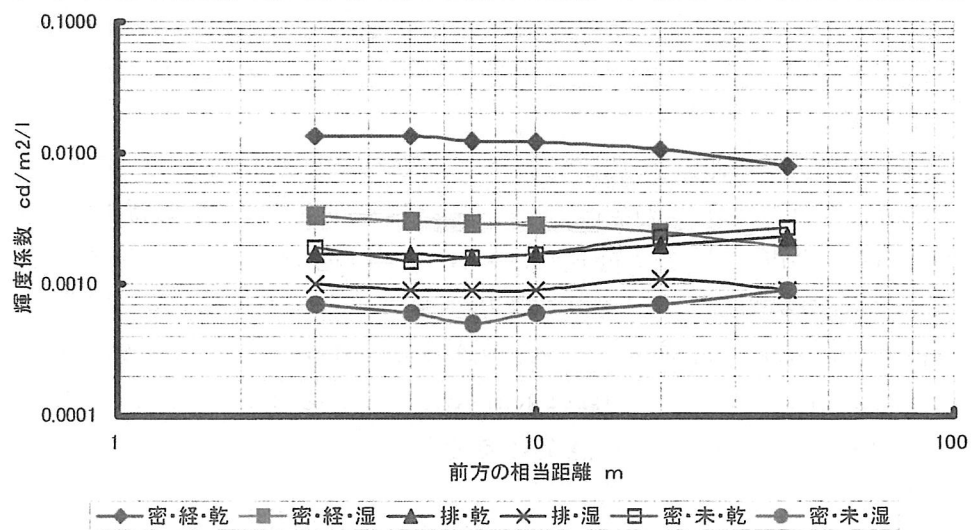


図 4.6.2 路面輝度係数（再帰反射）

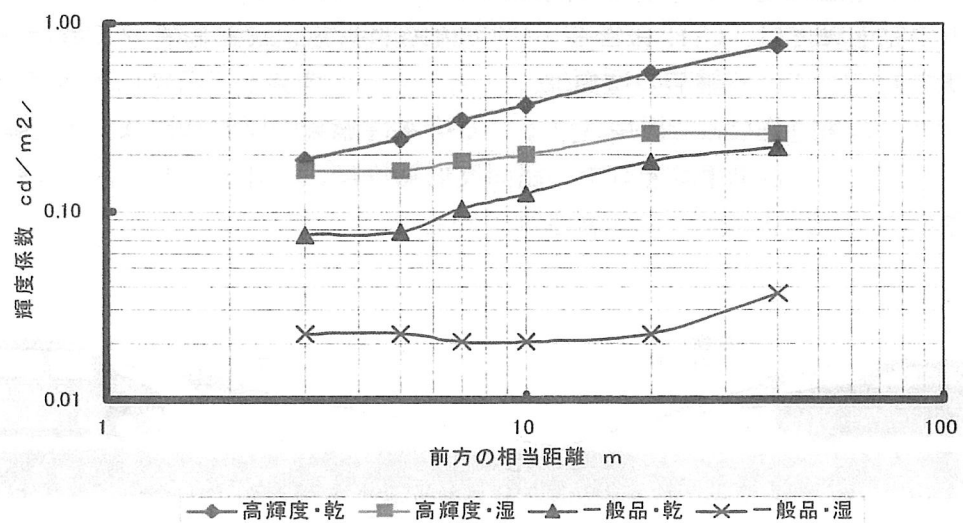


図 4.6.3 レーンマーク輝度係数（再帰反射）

(2) 前方反射特性

前方反射特性は、図 4.6-1 において、自車の前照灯から照射された光が、路面で反射され、対向車の運転者へどのくらい届くかを表す特性である。この反射率が高すぎると、照り返しが多くなり、対向車の運転者へグレアを与える可能性がある。測定の結果、以下のことが分かった<sup>22)</sup>。

- 路面の前方反射輝度係数は光線の入射角と観測角が等しくなる付近(光源と観測者の中間)で最大となる。また乾燥状態から湿潤状態への変化に伴い 1.3~1.6 倍に増加する。
- 密粒アスファルト舗装未使用品の前方反射輝度係数は、経年使用品に比べ約 10 倍である。
- 一般レーンマーク (LM) の前方反射輝度係数は、光源からの距離が増大するに従って低下する。
- 乾燥状態から湿潤状態への変化に伴い、前方輝度係数は約 3 倍に増加する。

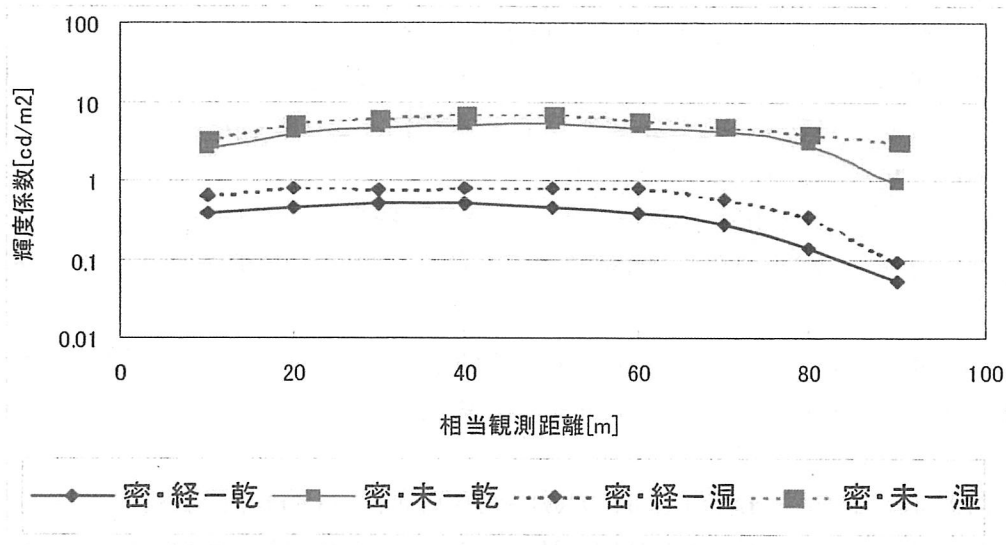


図 4.6-4 路面輝度係数 (前方反射)

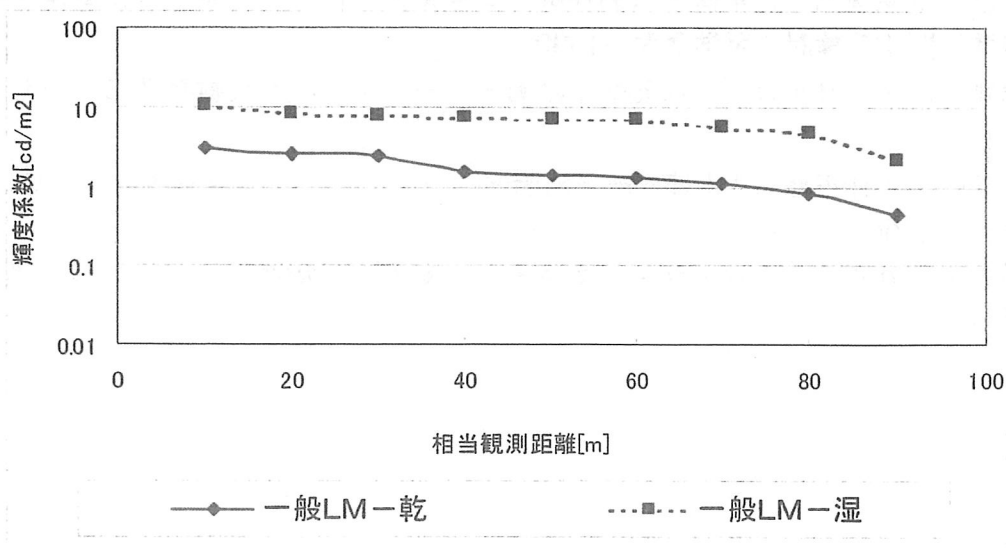


図 4.6-5 レーンマーク輝度係数 (前方反射)

< 第4章 参考文献 >

- 1) 二宮洸三；図解 気象の基礎知識，オーム社，2002
- 2) 天気予報技術研究会；気象予報士のための天気予報用語集，東京堂出版，1996
- 3) 和達清夫；最新 気象の事典，東京堂出版，1993
- 4) 中山 章；最新 航空気象，東京堂出版，1996
- 5) NHK 放送文化研究所編；「NHK 気象ハンドブック」，NHK 出版.
- 6) 前野紀一／黒田登志雄；「雪氷の構造と物性」，古今書院，P.132，1999
- 7) 気象庁；「地上気象観測指針」，1993
- 8) 千葉近著；超音波噴霧，山海堂，1990.
- 9) 正木光、田中一；照明学会誌，Vol. 47，P. 234，1962
- 10) 照明学会編；「ライティングハンドブック」，オーム社，P. 488，1994
- 11) NHK 放送文化研究所編；「NHK 気象ハンドブック」，NHK 出版，P.186，2001
- 12) 青木義郎ほか；「大気中の微粒子を考慮したモンテカルロ法による散乱光の空間分析解析」，照明学会誌，Vol. 77，No. 2，P. 28-35，1993
- 13) 青木義郎ほか；「大気中の微粒子による散乱光を考慮した灯火システムのコンピュータグラフィックス（その1）－モンテカルロ法による CG 画像の算出精度－」，照明学会誌 Vol. 80，No. 2，P. 21-28，1996
- 14) 青木義郎ほか；「大気中の微粒子による散乱光を考慮した灯火システムのコンピュータグラフィックス（その2）－CG 画像を用いた灯火の視認性評価－」，照明学会誌，Vol. 80，No. 2，P. 89-95，1996
- 15) 日本農業気象学会；気象・生物・環境計測器ガイドブック，日本農業気象学会，2002
- 16) SSVS 用知的状況認識システム研究会；状況認識システムの耐候性評価，(財)自動車走行電子技術協会
- 17) CIE Pub. No.47， ROAD LIGHTING FOR WET CONDITIONS，1979
- 18) CIE Pub. No.66， ROAD SURFACES AND LIGHTING，1984
- 19) (社)日本道路協会，道路照明施設設置基準・同解説，昭和56年4月
- 20) 例えば、伊東勇人・鈴木徹・大橋利彦・石倉丈士・竹之内光彦；多孔質弾性舗装の反射特性に関する検討，照学全大，1999
- 21) 八木誠一郎・小林正自・小松元弘；路面・レーンマークの反射特性について，照学全大，1999
- 22) 小松元弘・小林正自・八木誠一郎；路面・レーンマークの反射特性について（Ⅱ），照学全大，2000
- 23) 増田剛・小林正自・小松元弘・田中秀忠；路面の反射特性について（Ⅲ），照学全大，2001

## 第5章 調査・研究事例報告

### 5.1 模擬環境下での実験

#### 5.1.1 実霧発生装置による視認性実験

噴霧法により人工霧を発生させた疑似環境で視認性の実験を行った。その結果を研究事例として報告する。

- (1) 目的；道路では案内板や情報板などによりドライバーへ様々な情報を提供している。これらは明るさや色の変化をつけることで視認性を向上させ、ドライバーへ情報を提供している。しかし霧などにより視程が低下した際には、ドライバーへの情報提供が困難になる。

そこで本実験では、視程が低下した際に情報板などの見え方を検討するための基礎データの収集を目的として、人工霧を発生させた疑似環境で目標物のコントラストと色の変化の測定を行った。

- (2) 実験方法；本実験は噴霧法（ノズル式）による人工霧を発生させた疑似環境で実験を行った。実験の概略を図4.1.1-1に示す。幅2.0m×高さ1.5m×奥行き20mのテント内に人工霧発生用のノズルを設置し人工霧を発生させ、内照型の情報板を模擬した目標のコントラストおよび色の変化を測定した。

テント内には視対象物、目標の輝度・色度を計測するための色彩輝度計と透過率計を設置し、テント内の明るさが変化するように透明のビニルシートで覆い外光が入射するようにした。目標は冷陰極管を用いた面光源を用いて、白（約130cd/m<sup>2</sup>）と黒の領域（約1.00[cd/m<sup>2</sup>]）がある目標1と、赤（約480cd/m<sup>2</sup>）と青（約600[cd/m<sup>2</sup>]）の領域がある目標2の2種類を用意した。この目標を用いて以下の測定および評価を行った。

- ① 目標1；目標から5m離れた位置に設置した輝度計により目標の黒と白の領域の輝度を測定した。また、測定した輝度から(5.1.1-1)式によりコントラスト比  $C_r$  を求め評価した。

$$C = \frac{L_B - L_W}{L_W}$$
$$C_r = \frac{C}{C_0} \quad (5.1.1-1)$$

$L_W$ ；白領域の輝度、 $L_B$ ；黒領域の輝度、 $C$ ；コントラスト、  
 $C_0$ ；初期状態でのコントラスト

なお、測定は昼間（水平面照度 397 lx、鉛直面照度 247 lx）と夜間（水平面照度 1.12 lx、鉛直面照度 0.97 lx）の条件で実施した。

- ② 目標2；目標から12m離れた位置に設置した色彩輝度計により目標の赤と白の領域の色度を測定した。また、色の変化の評価は以下のように行った。まず、測定した色度から(5.1.1-2)式により  $C_H$ （以下、この値を色度差とする）を求める。

$$C_H = \sqrt{(x_r - x_b)^2 + (y_r - y_b)^2} \quad (5.1.1-2)$$

$(x_r, y_r)$ ；赤領域の色度、 $(x_b, y_b)$ ；青領域の色度

次に、この色度差  $C_H$  と初期状態の色度差  $C_{H0}$  との比  $C_{Hr}$  (以下、この値を色度差比とする) を式 4.1.1-3 により求める。

$$C_{Hr} = \frac{C_H}{C_{H0}} \quad (5.1.1-3)$$

この色度差比  $C_{Hr}$  を用いて色の変化の評価を行うこととした。なお測定は昼間 (水平面照度 1810lx、鉛直面照度 1500lx と水平面照度 1190lx、鉛直面照度 2510lx) と夜間 (水平面照度 1.65lx、鉛直面照度 2.98lx) の条件で実施した。

表 5.1.1-1 に本実験で使用した機材を示した。

表 5.1.1-1 実験使用機器一覧

項目	機器名	型式	製造者	備考
環境測定機器	色彩輝度計	CS-100	MINOLTA	
	照度計	T-1	MINOLTA	
透過率計測機器	透過率計	****	****	VI 計型・近赤外 LED 使用
	データロガ	NR-1000	KEYENCE	
目標	光源	不明	USHIO	*面光源 *前面にパネルを取付
人工霧発生装置	噴霧ノズル	MF-1	Spraying Systems	
	エアコンプレッサ	GH-08D	明治機械製作所	

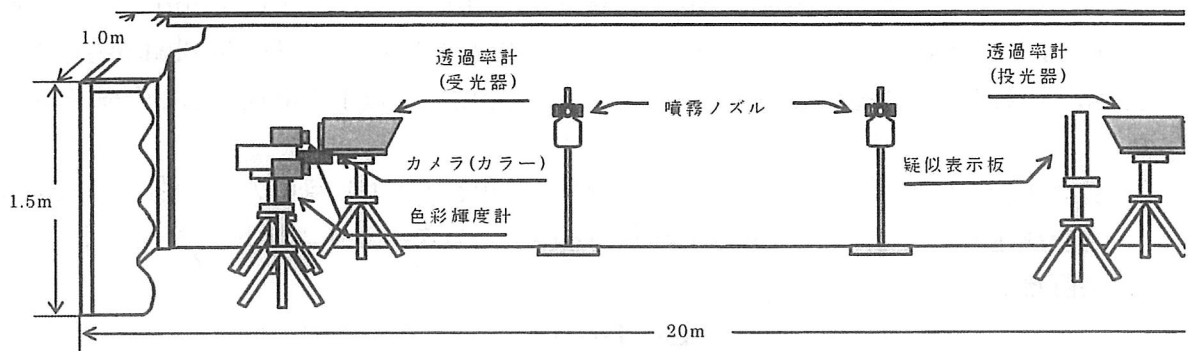


図 5.1.1-1 実験装置概略図

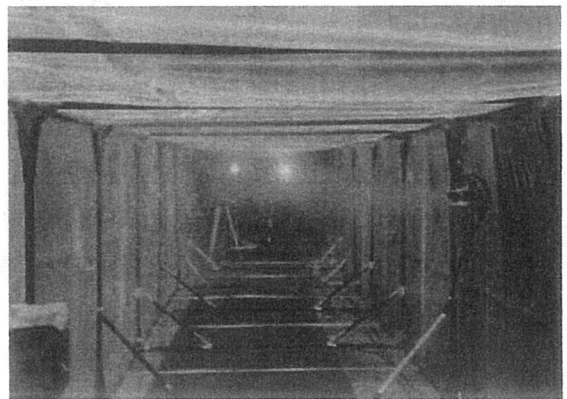
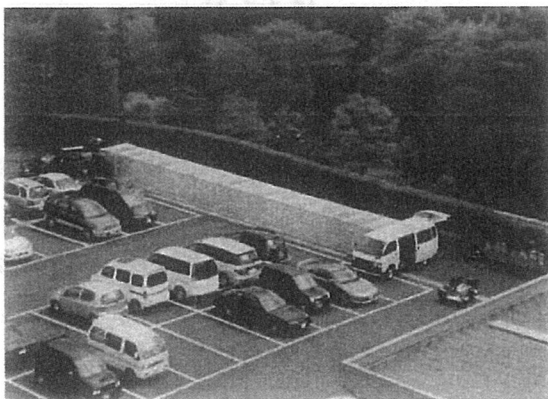
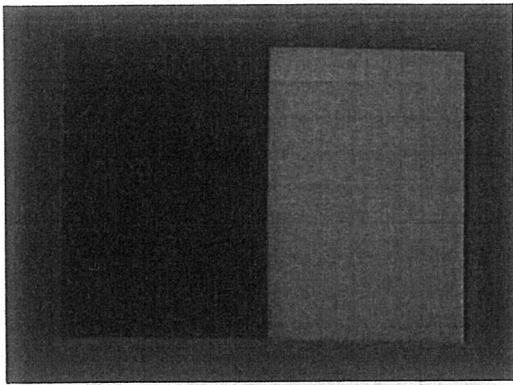
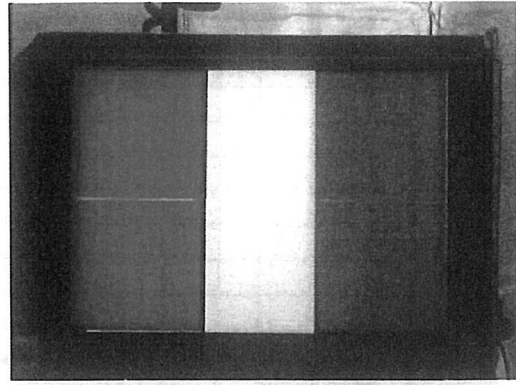


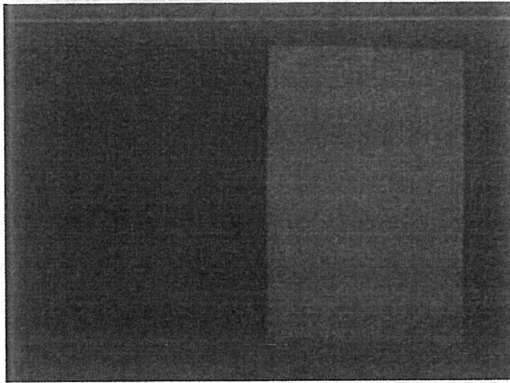
図 5.1.1-2 実験写真 1



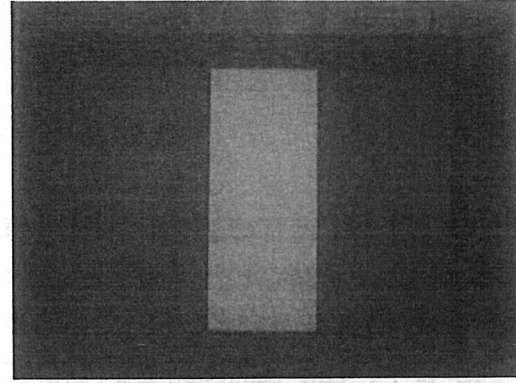
i. 初期状態



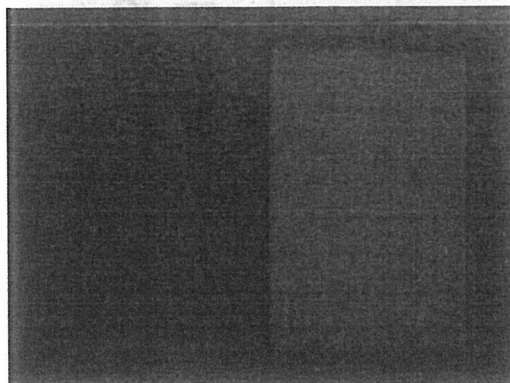
i. 初期状態



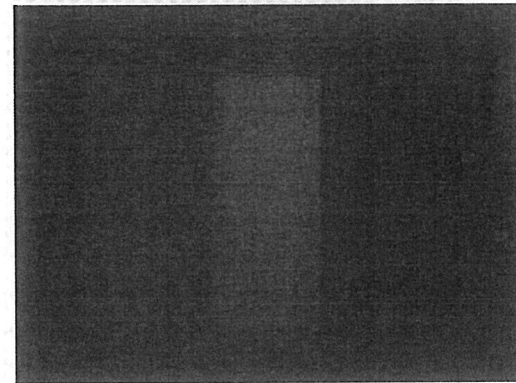
ii. 人工霧噴霧開始時



ii. 人工霧噴霧開始時



iii. 人工霧充満状態



iii. 人工霧充満状態

① 目標 1

② 目標 2

図 5.1.1-3 実験写真 2

(3) 結果；図 5.1.1-4 は目標 1 を用いた透過率に対するコントラストの変化を測定した結果である。図は透過率計により測定した透過率と、その透過率のときの輝度計によって測定した輝度より求めたコントラスト比を示しており、図中のプロットは○が日中、△が夜間に測定した結果である。この結果では、コントラスト比が夜間より日中で透過率の低下の影響を著しく受けていることがわかる。これは、夜間の場合は目標 1 の白の領域から観測点に達する光が透過率に比例して減衰するが、黒の領域はほとんど変化がないことによる。一方、日中の場合には白の領域が夜間と同様に減衰するのと同時に、周囲光が霧により散乱して発生した光幕のため、黒の領域の輝度が高くなっていく。従って、日中にはコントラスト比が低下しやすい。

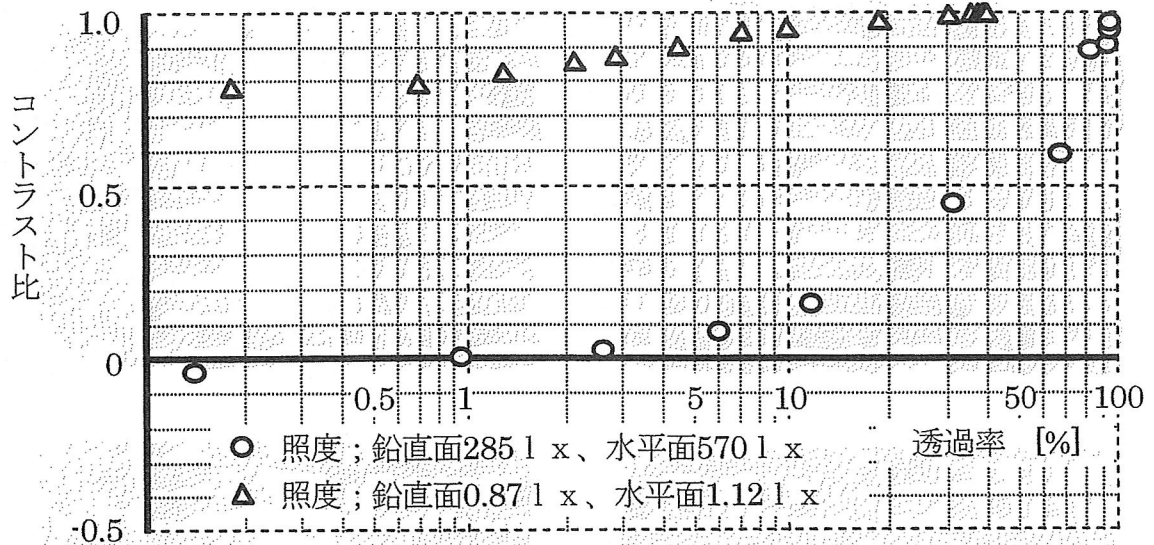


図 5.1.1-4 コントラスト比測定結果

次に図 5.1.1-5 は目標 2 を用いた透過率に対する色の変化を測定した結果である。図は透過率計により測定した透過率と、その透過率のときの色彩輝度計によって測定した色度から式 4.1.1-2 と式 4.1.1-3 により求めた色度差比を示しており、図中のプロットは○と△が日中に測定した結果である。

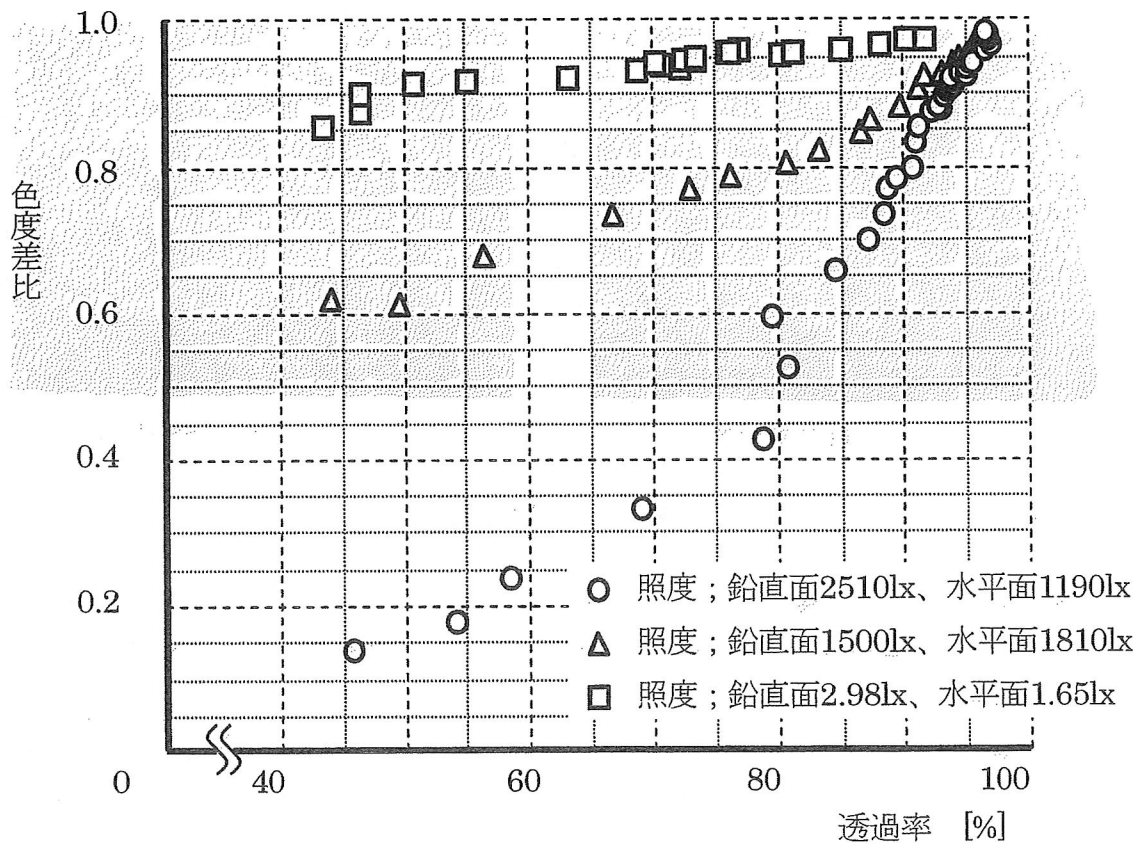


図 5.1.1-5 色度差比測定結果

図から、夜間では色の変化がほとんど無いのに対して、日中で透過率の低下の影響を受け、さらに日中でも鉛直面照度が高い場合のほうが透過率の低下の影響を受けやすいことがわかる。色では、目標からの光が霧などにより変化することはほぼ無いと考えられる。しかし、周囲の光による光幕の影響は大きく、目標からの色と光幕の色が混色して観測点では色に変化していくように見えるものと考えられる。本実験の場合には、実験を午後1時前後に実施したため、自然光により発生する光幕の色はほぼ無彩色（白）で、目標の色は霧の濃度が高くなるに従い色度差比（彩度）が低下していくように観測できた。

- (4) まとめ；本実験では、人工霧を発生させた疑似環境で目標物のコントラストと色の変化の測定を行い、視程が低下した際にどのような影響があるかを検討した。その結果、同じ目標物でも周囲が明るい場合のほうが、コントラスト、色ともに見えにくくなるということがわかった。特に、色は夜間ではほとんど変化が無いのに対し、日中では見えにくくなるという結果を得た。

以上の結果から、道路などでは視程低下時には周囲が明るくならないような対策が必要であると考えられる。特に夜間の道路照明などは視程低下時には消灯したほうが、視線誘導灯や情報板、先行車両の尾灯などが見やすくなる。このような、視程低下の影響を考慮した照明方法などは、今後十分検討する必要がある。

### 5.1.2 霧中における色光の見え方実験

- (1) 研究の背景と目的；日常我々は、視覚、聴覚、臭覚、味覚、触覚のいわゆる五感を通して、外部の刺激情報を収集している。この五感の中でも、とりわけ視覚は情報収集においては際立った働きをしており、その割合は9割以上になるとも言われている。

この視覚による情報伝達は何らかの原因により阻害されるときわめて重大かつ深刻な意味を持つといえよう。例えば、濃霧や豪雨などによる悪天候のために、一寸先も視認できないような状況下においては、如何に優れた五感を備えたドライバーといえども、通常の走行はきわめて困難なものとなり、安全性への影響も多大なものとなる。

霧による光の散乱特性の解析について検討を試みた研究例はいくつか存在するが<sup>1)</sup>、濃霧中における色光の視覚特性あるいは色覚特性に関する基礎的かつ定量的な研究報告例はきわめて少ない。そこで本特別研究調査委員会では、濃霧中における色光に関する視認特性を心理物理学的手法により定量的に解析するとともに、その基礎的データを提供することを目的とした。

- (2) 実験装置と実験方法；実験装置の概略図を図5.1.2-1に示す。

- ・霧発生装置：長さ1.8m、高さ、幅共に0.45mの発泡スチロールによる直方体のケースを用いた。内部は余計な光の乱反射を極力防ぐために、必要最小限のスペース以外はすべて黒色に塗ってある。
- ・刺激呈示装置：CRTモニターを用いて、刺激光の呈示を行った。
- ・霧濃度測定器：光源及び照度計の受光器により、霧発生装置内の霧濃度を測定する。すなわち霧の無い状態で照度計が450lxを指し示すように予め光源の光量を設定し、その減衰率により濃度を決定した。なお本研究では、照度計値で100lx（透過率換算22%）、150lx（同33%）及び200lxにおける霧濃度を用いた。

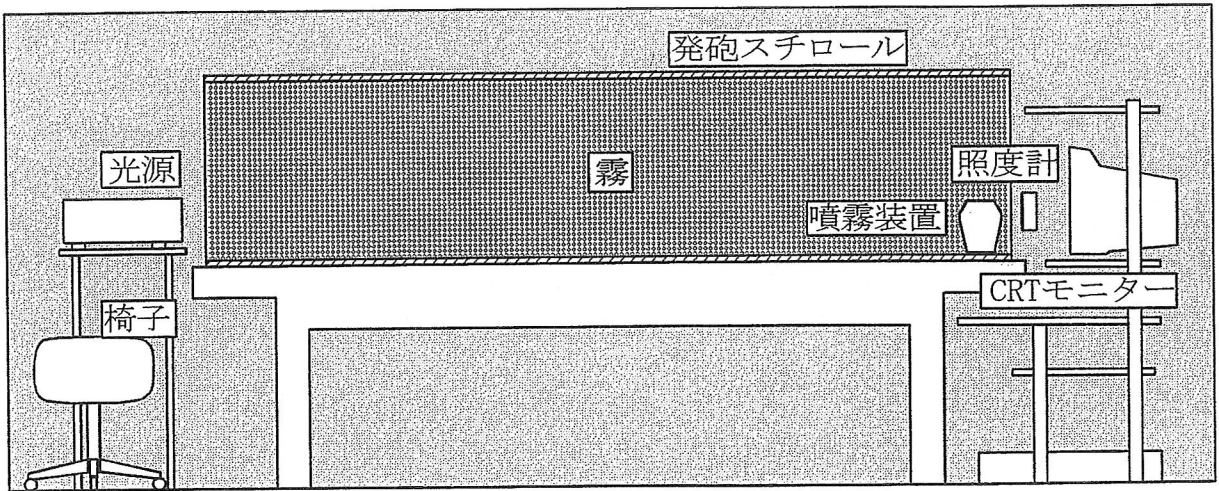


図 5.1.2-1 実験装置概略図

一方、CRT モニター上には2つの円形刺激光が呈示される。右側に  $0.1\text{cd/m}^2$  の白色参照光を、左側にはそれと明るさマッチングを行った 12 種類のテスト刺激光の内の 1 種類である。なお、用いた 12 種類は R、Y、G、B の 4 色に加えて、それぞれの中間色 2 色ずつである。なお、これらテスト刺激光間の色差は一定にそろえてある。また、表 5.2.1-1 に明るさマッチングを行った際の各テスト刺激光の輝度を示す。

表 5.2.1-1 各テスト刺激光の明るさマッチング時における輝度値

色相	テスト刺激光												
	W	R	YR	RY	Y	GY	YG	G	BG	GB	B	RB	BR
輝度( $\text{cd/m}^2$ )	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.10	0.24	0.11	0.09

次に実験方法を示す。まず、ケース内部に霧が発生していない状態にて、照度計の目盛りが  $450\text{lx}$  を指し示すように光源の光量を調節する。その後、ケース内部に十分な濃度の霧を発生させる。次に、照度計がある値を指し示したとき、霧を通さないで観測している右側白色参照光の明るさを 10 点として、霧を通して観測している左側テスト刺激光の明るさを相対評価する。

なお、実験はすべて暗室にて行った。従って、夜間における道路交通視環境に対応したものと見なすことができる。また、被験者は 4 名であり、いずれも色覚正常者である。観測は各色 5 回行い、その平均を測定値とした。

- (4) 実験結果及び考察；実験結果を示す。図 5.1.2-2 は、横軸に色相(Hue)、縦軸に明るさ評価値(Point)をとる直交座標系に被験者 K.I.の結果をプロット

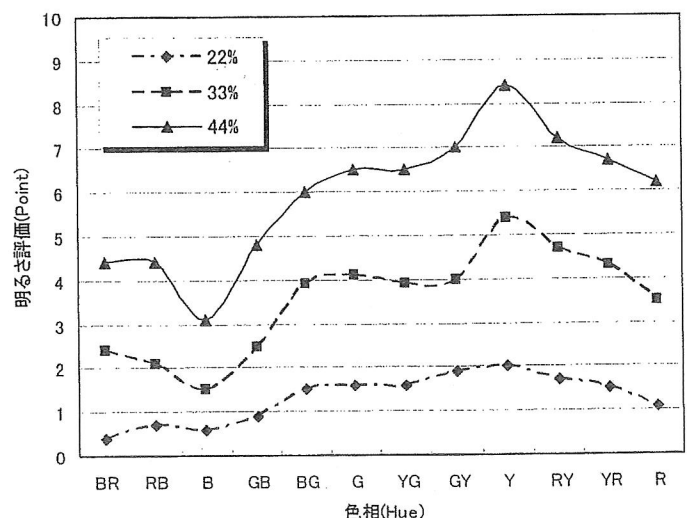


図 5.1.2-2 色相と明るさ評価特性

したものである。なおパラメータは透過率を示しており、この値が低い程ケース内部にはそれだけ濃い霧が発生していることを示している。

結果によれば、いずれの透過率すなわちいずれの霧濃度においても、Y成分を含む色相の明るさ評価値は高い値を示している。またこの明るさ評価値は、Y成分領域からB成分領域へと移行するに従って低下し、Bにおいて最小値をとるという傾向を示している。さらにこの傾向は、霧の濃度が低くなるに従って、より顕著となっている。

一方、4名の被験者の平均値を極座標表示したものを図 5.1.2-3 に示す。円周方向には色相、半径方向には原点を0とした明るさ評価値をとっている。パラメータは透過率である。霧の濃度が高い場合、閉曲線で囲まれる面積はきわめて小さく、濃度が次第に低くなるに従い、面積は徐々に大きくなっている。言い替えれば、霧の濃度の低下に従って、テスト刺激光の明るさすなわち視認性が次第に上昇していくことが示されている。この傾向は、特に極座標の右半分、すなわちY成分を含む色相近辺で顕著であることが分かる。

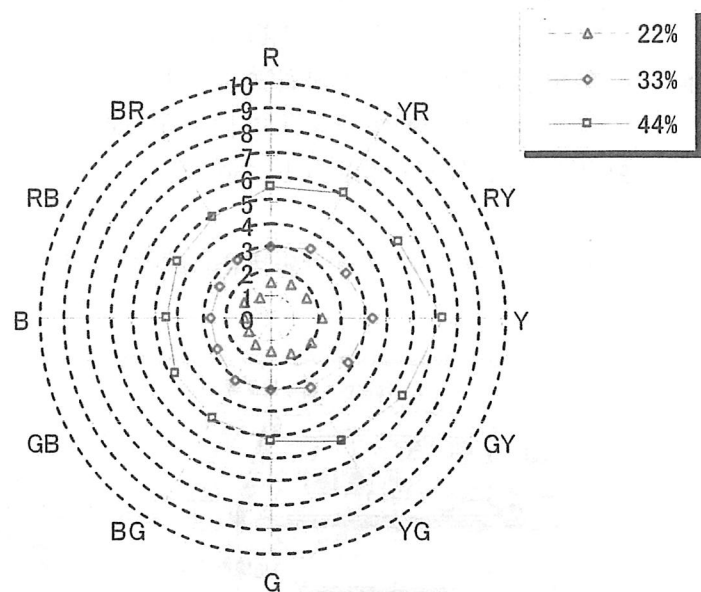


図 5.1.2-3 極座標系による色相と明るさ評価特性

さらにこれらを横軸に色相、縦軸に明るさ評価、奥行き方向に透過率をとり、三次元表示したものを図 4 に示す。この図からも、特にY成分を含む色相の明るさ評価値が高いことがよく示されている。また先程と同様、明るさ評価値はY成分領域からB成分領域へと移行するに従って減少し、Bで極小値となっている。

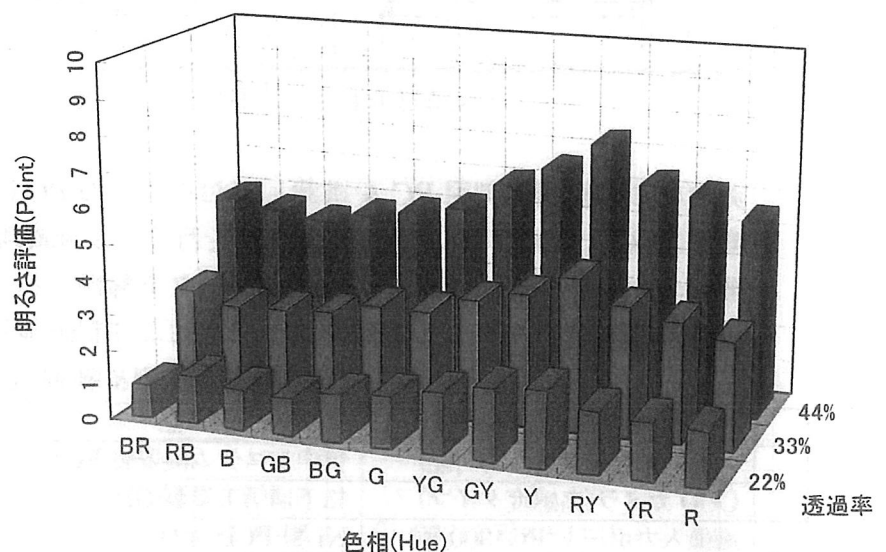


図 5.1.2-4 三次元表示による色相と明るさ評価特性

さらにこの傾向は、霧の濃度が低くなるに従って、すなわち後列のヒストグラムになる程、より顕著に現われてくる。

以上のことより、濃霧中においては、Y成分を含む色相の明るさ評価値は高く、B成分を含む色相の明るさ評価値が低いことが示された。

## 5.2 実路環境下での測定並びに実験

### 5.2.1 各種天候下における路面の輝度コントラスト測定実験

自動車運転の観点からは走路が見易いことが望まれる。(財)自動車走行電子技術協会ではこの走路の見易さの1基準として、路面輝度 ( $B_R$ ) とレーンマーク輝度 ( $B_L$ ) の輝度コントラスト  $C = (B_L - B_R) / B_R$  を取り上げ、実道路環境にて計測を行った<sup>3)</sup>。

計測は下記の2項である。

- 実走行計測実験；東名高速道路（密粒アスコン舗装／排水性舗装、道路照明有り無し）を中心に各種気象環境下（晴／雨、夜路／昼）で路面輝度、レーンマーク輝度とその間の輝度コントラストを計測した。
- 実霧発生環境下での計測実験；富士山麓の霧発生環境下で路面輝度、レーンマーク輝度とその間の輝度コントラストを計測した。

計測方法と結果の概要を以下に述べる。

#### (1) 計測方法

計測は走行環境データ収集用実験車を用いた。これを図 5.2.1-1 に示す。

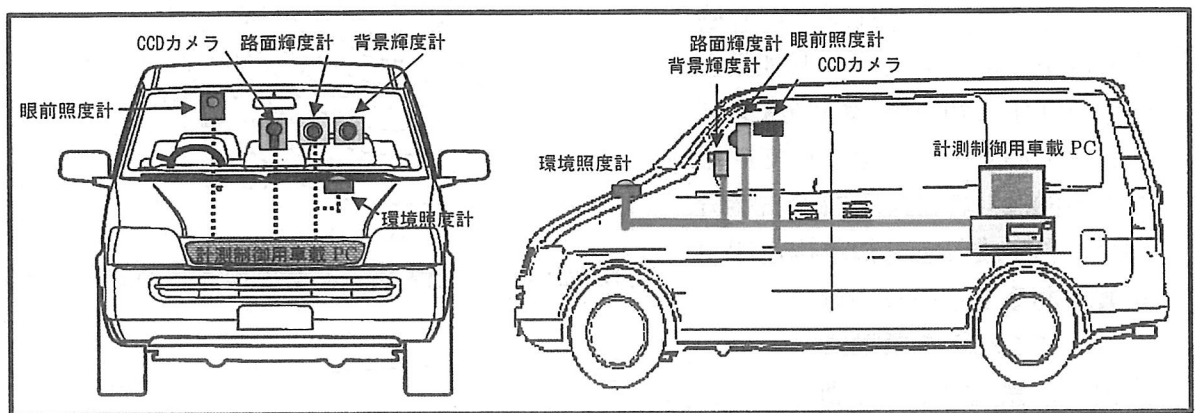


図 5.2.1-1 走行環境データ収集用実験車

実験車には計測制御用 PC を搭載しており、この PC により各種環境照度および環境輝度を記録し、CCD カメラの露光調整を行う。路面輝度、レーンマーク輝度とその間の輝度コントラストはこの CCD 画像データを解析することにより行った。

道路環境測定システムの機器構成と測定および制御項目を表 5.2.1-1 に示す。

表 5.2.1-1 車載機器と計測&制御項目の概要

	車載計測&制御機器	製品名	測定&制御項目
1	CCD カメラ(露光制御可能)	竹中システム機器製-FC1300	路面輝度、レーンマーク輝度
	CCD カメラ(高感度タイプ)	松下通信工業製-GP-MF	路面輝度、レーンマーク輝度
2	画像入力ボード(FC1300 用)	NI 製-PCI-1424	デジタル画像
	画像入力ボード(GP-MF602 用)	NI 製 PCI-1409	アナログ画像
3	輝度計(視野角 2°) × 2 台	Topcon 製-BM-8	前方路面輝度、背景輝度
4	照度計 × 2 台	Topcon 製-IM-5	環境照度、眼前照度
5	マルチ I/O ボード	NI 製-PCI-6025E	環境データ収集
6	車載 PC	開発ソフト NI 製-Labview	計測・制御、データ記録

(2) 実走行計測結果

東名高速道路の密粒アスファルト舗装区間、排水性舗装区間において、昼／夜および晴／雨の走行環境下における測定結果を表 5.2.1-2 に示す。

結果の概要は下記のように述べられている。

- レーンマーク輝度コントラストは日中に比べ夜間に高くなる（レーンマークの再帰反射特性の効果）。
- 夜間雨天時にはレーンマークと路面の輝度コントラストが低下し、視認性が低下する。
- 輝度コントラスト低下率は排水性舗装より密粒アスファルト舗装の方が大きい。
- 夜間雨天時には道路照明、自動車灯火器の路面反射光によりレーンマークの視認性が低下する。

総論として雨天時におけるレーンマークの視認性を改善することは走行の安全性を向上させるために重要であり、そのためには①排水性舗装などタイヤのスプラッシュによる瞬間的な視界障害が発生しにくく、輝度コントラストの少ない舗装路面の拡充、②排水性舗装路面で高輝度反射を実現するレーンマーク材料並びに工法の開発の必要性が述べられている。

表 5.2.1-2 道路舗装種類・気象条件と路面輝度コントラスト

時間帯	舗装の種類	天候	$L_L$	$L_R$	C
日中	密粒	晴	5247	3787	0.38
		雨	211.0	155.1	0.36
	排水性	晴	4905	1346	2.65
		雨	193.2	122.8	0.58
夜間	密粒	晴	2.06	0.33	5.20
		雨	0.41	0.14	1.98
	排水性	晴	2.19	0.28	6.91
		雨	0.45	0.09	4.10

◇  $L_L$ はレーンマーク輝度、 $L_R$ は路面輝度；輝度の単位は  $cd/m^2$ 。

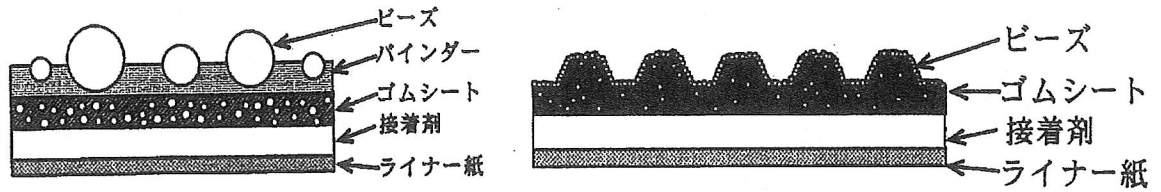
◇ Cは輝度コントラスト =  $(L_L - L_R) / L_R$ 。

(3) 実霧発生環境下での計測結果；静岡県所轄富士山麓駐車場（標高約 1000m）に 3 種類のレーンマークを設置し、晴、雨、霧発生環境下で路面輝度、レーンマーク輝度とその間の輝度コントラストを測定した。

① 実験サンプル；レーンマークサンプルとしては住友スリーエム(株)社製、一般材タイプ(6330)、ii. 高輝度エンボスタイプ(380)、iii. 降雨対応タイプ(SV0100)3種類を用いた。

3種のレーンマークの構造を図 5.1.2-2 に、それらの仕様を表 5.2.1-3 示す。

一般材 6330 はアスファルト舗装路面に一般的に設置されている平滑タイプのレーンマークであり、高輝度タイプ 380 と降雨対応タイプ SV0100 はエンボス形状であり、共に豪雨時にレーンマーク水没を防ぐ構造となっている。また、降雨対応 SV0100 のガラスビーズ(再帰反射素材)は一般材より屈折率の高いものを使用している。



(a) 6330 断面図

(b) 380、SV0100 断面図

図 5.1.2-2 実験に使用したレーンマーク（住友スリーエム(株)社製）の構造

表 5.2.1-3 実験に使用したレーンマークの仕様

製品名	6330	380	SV0100
テープ表面形状	平面加工	エンボス加工	エンボス加工
反射素子(表面)粒径	200~300 $\mu\text{m}$	100~200 $\mu\text{m}$	50~100 $\mu\text{m}$
反射素子素材	ガラス微粒子	セラミック微粒子	ガラス微粒子
反射素子屈折率	1.5	1.75	.....
ゴムシート内	ガラスビーズ含有	ガラスビーズ含有	ガラスビーズ含有
反射性能(湿潤時) <sup>※</sup>	300 (—)	700 (—)	400(500)

※ 単位；mcd/m<sup>2</sup>/lux (かっこ)内は湿潤時データ、入射角 86.5° 観測角 1.0° ただし、SV0100のみ観測角 1.5° (住友スリーエム株式会社提供の資料より抜粋)

実験時のレーンマークの配置状況と霧発生環境下における昼夜の撮影画像の代表例を図 5.1.2-3 に示す。

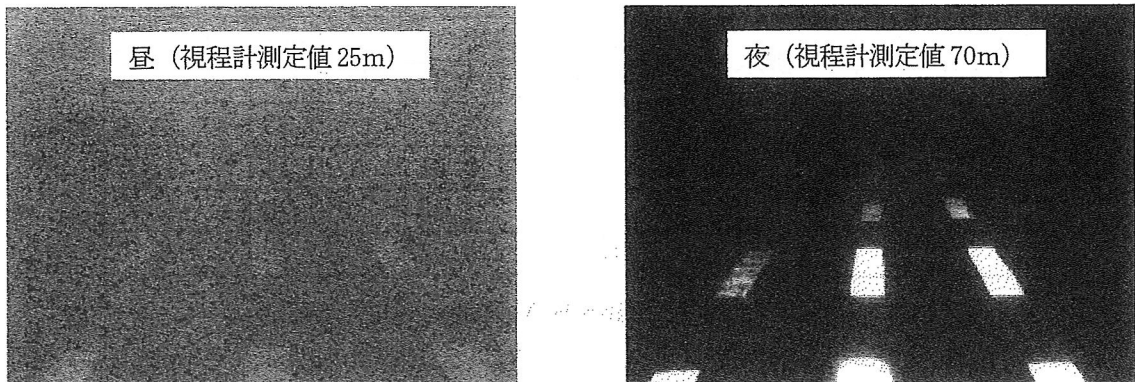


図 5.1.2-3 霧時での撮影画像（レーンマーク；左から 6330、SV0100、380）

② 日中での気象条件の違いにおける輝度コントラストの測定結果；図 5.1.2-4 参照  
 a)は晴天時の日中、b)は雨天時の日中、c)は視程 25m の霧発生時の結果である。  
 なお、縦軸は輝度コントラスト、横軸はレーンマークの計測距離(m)である。

- 実験に使用したレーンマーク材が新品であることもあるが、各レーンマーク材とも日中の晴・雨の環境下において十分な輝度コントラストを有しているが、視程 25m の濃霧時には各レーンマーク材とも急激に低下し、視程 25m 以上の計測距離では輝度コントラストが限界コントラスト以下となり視認できないレベルに低下することが報告されている。

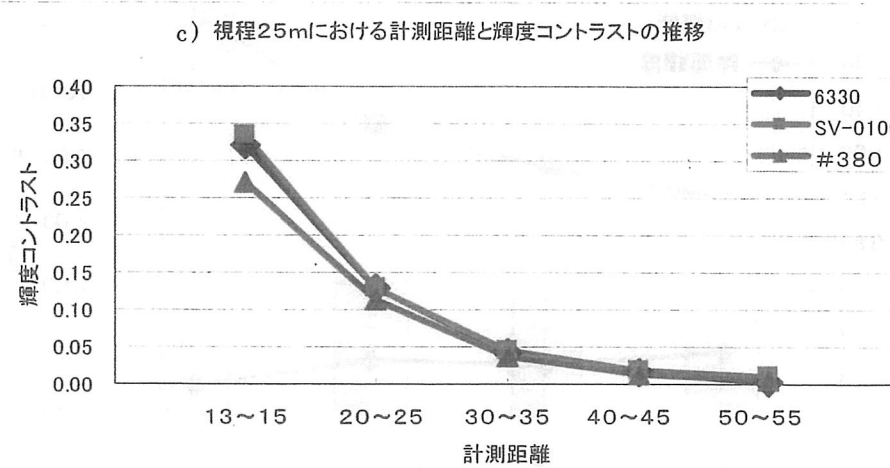
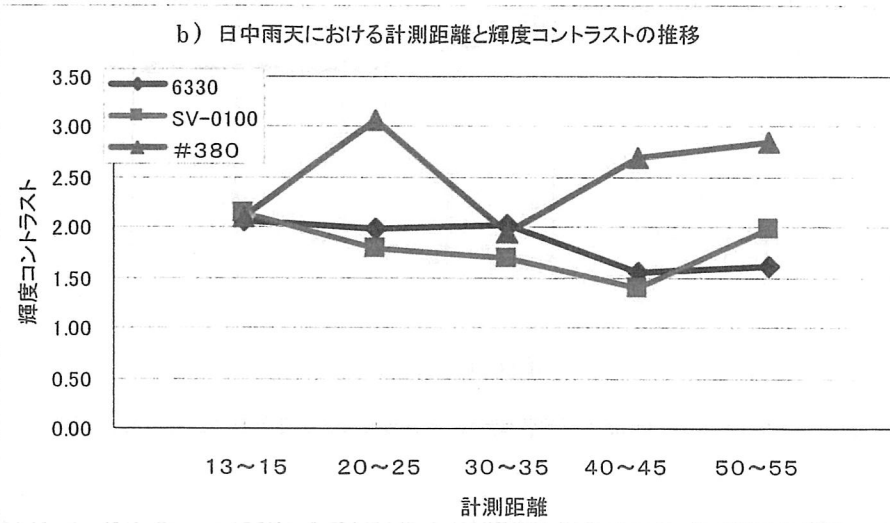
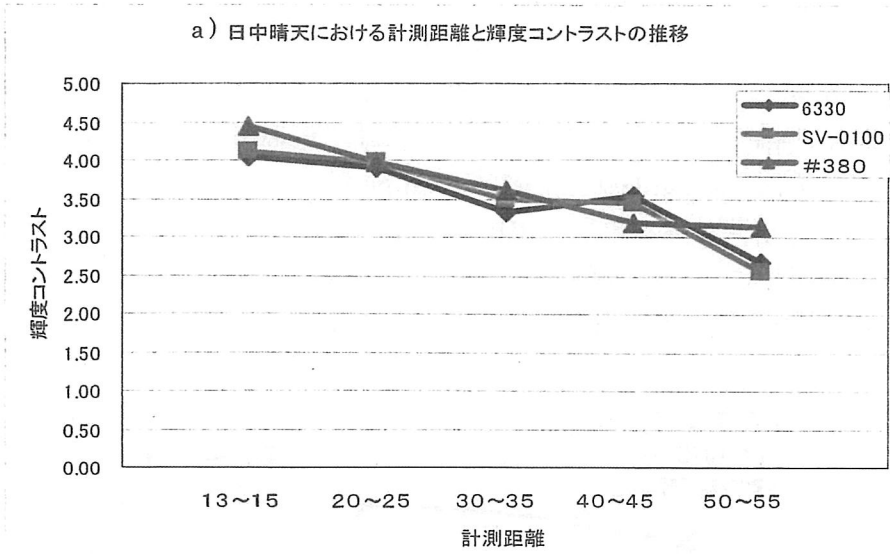


図 5.1.2-4 日中の異なる気象条件における輝度コントラストの測定結果

- ③ 日中／夜間の各種霧濃度におけるレーンマークの輝度コントラスト測定結果  
 レーンマーク一般材 6330 における日中の測定結果を図 5.2.1-5 に、夜間の測定結果を図 5.2.1-6 に示す。図の横軸は視程に換算した霧濃度であり縦軸は輝度( $\text{cd}/\text{m}^2$ )を左軸に、輝度コントラストを右軸に記載している。なおレーンマーク(LM と略す)及び路面の測定位置は 20m 前方である。
- 日中・夜間とも霧発生下の視程の低下と共にレーンマークの輝度コントラストが低下するが、夜間はヘッドライトの光芒による光幕グレアの発生により一層低下し、視認性が低下することが報告されている。

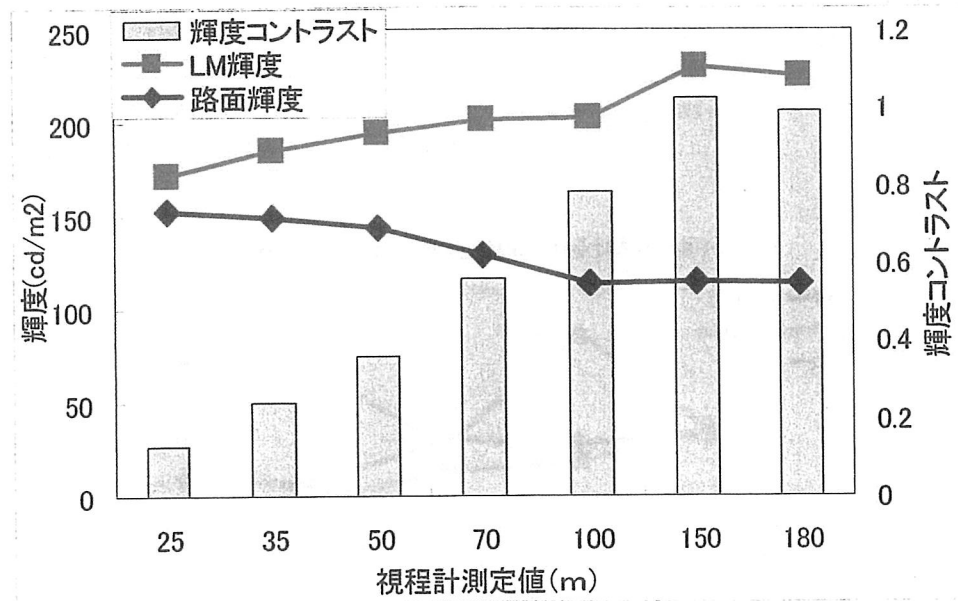


図 5.2.1-5 日中における霧の濃度と輝度および輝度コントラストの関係

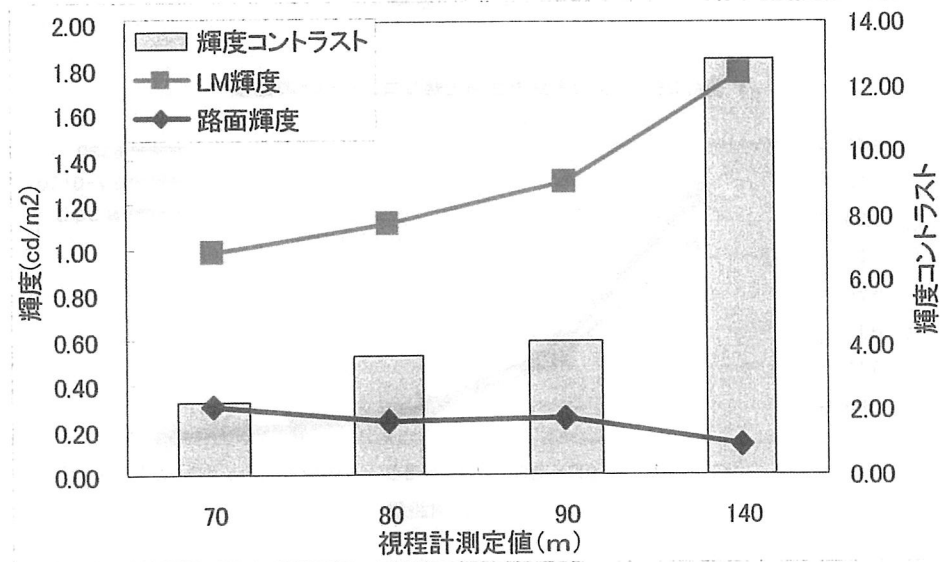


図 5.2.1-6 夜間における霧の濃度と輝度および輝度コントラストの関係

(4) まとめ；報告されている測定結果および考察を下記に示す。

- ① レーンマークの視認性は雨天時に低下する。
- ② 現状の道路に多く採用されている密粒アスファルト舗装は豪雨時にタイヤのスプラッシュによる視界の一時的遮断が発生することから、排水性舗装に改修することが望まれる。
- ③ 晴天時における排水性舗装上のレーンマークは視認性が密粒アスファルト舗装に比べ低く、レーンマーク材並びに施工方法の更なる改善が必要である。
- ④ 豪雨発生地域ではレーンマークの水没が発生しない或いは水没時にも視認性の低下が少ないレーンマークの施工が望まれる。
- ⑤ 濃霧時にはレーンマークの視認性は著しく低下し、道路線形の確認が不能になる。自発光式レーンマーク、視線誘導灯など道路施設側の対応が必要である。
- ⑥ 雨天時にレーンマークの視認性を改善するためには道路照明による路面反射グレアの低減が必要である（図 2.1-1 参照）。
- ⑦ 雨天時、霧発生時にレーンマークの視認性を向上させるとともに路面反射グレアを低減させるヘッドライトの開発が必要である。

#### 5.2.2 道路照明機器の吹雪下における視認性研究

(1) 目的；北海道内の交通事故の年間発生状況を調査したところ、夜間（日没から日の出）事故の発生場所の5割強が、交差点及び交差点付近の事故であった。また、冬期（11月から3月）交通事故の内、車両相互の事故は交差点付近での追突事故が5割強を占め、人対車両の事故は、横断歩道上での人身事故が6割強を占めることが分かった。

このように交差点部において交通事故が多発するのは、吹雪時、前方の障害物の見え方が低下することが、事故の一因ではないかと推測される。そこで上記の事故調査データを踏まえ、平成10年度は交差点照明下の視程障害時における障害物の見え方の主観評価実験を行った。翌平成11年度は、交差点や横断歩道上における障害物（乗用車、歩行者）の監視カメラによる見え方実験を行い、交差点照明下での安全走行支援に必要な検討資料を得ることとした。

(2) 方法；平成8年度は、雪の特性、吹雪の性状および吹雪時の視認性に関する文献調査を行った。そして平成9年度および平成10年度は、(独)北海道開発土木研究所石狩吹雪実験場においてフィールド実験を晴天時・吹雪時に下記の①から④項目に関して実験を行った。

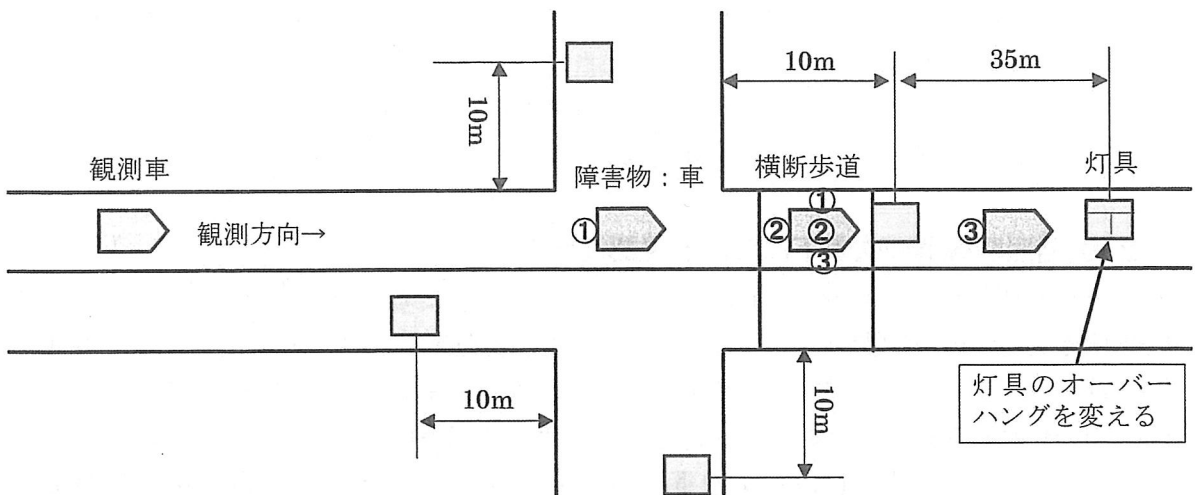
- ① 照明器具配光と視認性；照明器具の配光（カットオフ形、セミカットオフ形）の相違による障害物（観測車；黒色、白色乗用車及び歩行者；着衣の反射率10、30、50%）の見え方実験を行った。
- ② 照明器具の光量と視認性；照明器具の光束{セミカットオフ形；18,940 lm(100%)、カットオフ形；19,180 lm(100%)}を50%に変えた場合の障害物の見え方実験（全点灯（100%）時の平均路面輝度 $\div 1.2\text{cd/m}^2$ ）を行った。
- ③ オーバーハングの長短と視認性；灯具高さ10mにてオーバーハングの長短（0.9m、0m）による障害物の見え方実験を行った。
- ④ 監視カメラによる見え方評価実験；石狩吹雪実験場に設置した定点監視カメラ（日

立電子製のモニター画像を確認することにより障害物の見え方評価を行った。

平成9年度は、障害物の見え方の主観評価実験を図5.2.2-1に示すように、観測車を走行車線中央に停止し、前方50mの障害物を観測車内より被験者(10~13名)に静止観測させて、実験項目①から③における障害物の見え方を7段階評価(等間隔尺度)により主観評価を行った。主観評価尺度を表5.2.2-1に示す。

表 5.2.2-1 評価尺度

評点	評価尺度
1	まったく見えない
2	見ると見えないの境界
3	見えるけれど努力を要する(実用上の下限値)
4	細かいところまでは完全に見えない
5	だいたい見える(実用上の上限値)
6	見え易い
7	非常に良く見えた



障害物(歩行者)の横断歩道上での提示位置：①路肩近傍、②車線中央、③車道中央  
 障害物(乗用車)の交差点上での提示位置：①交差点中央、②横断歩道上、③横断歩道の外側

図 5.2.2-1 見え方評価実験配置図

実験項目④の監視カメラによる障害物の見え方については、図5.2.2-2に示す配置条件にてVTR記録して画像解析を行い、監視カメラによるモニター画面上での見え方評価を行った。

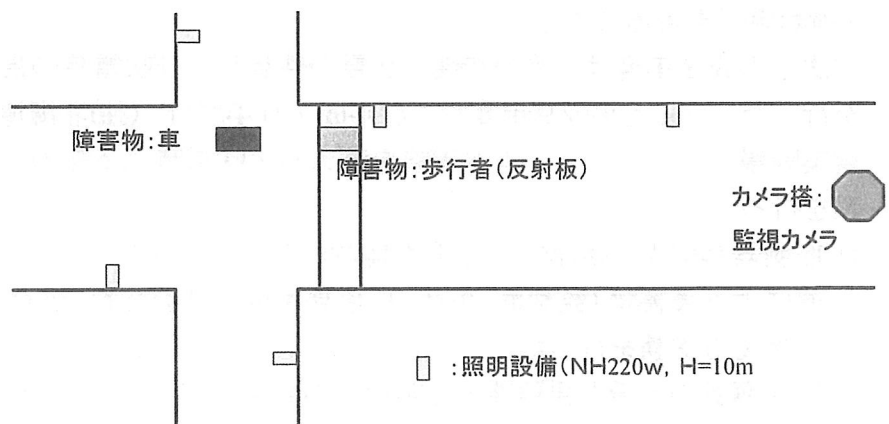


図 5.2.2-2 監視カメラによる実験配置図

(3) 結果及び考察；夜間の晴天時における照明器具配光の違いによる障害物の見え方の主観評価は、母平均の差検定検の結果(以下、同じ)、有意差のないことが分かった。

また、横断歩道上歩行者の配光の違いによる見え方には、検定では有意な差は出なかったが、図 5.2.2-3 に示すように、総じてセミカットオフ形よりカットオフ形照明器具で見え方が良い傾向にあることが分かった。

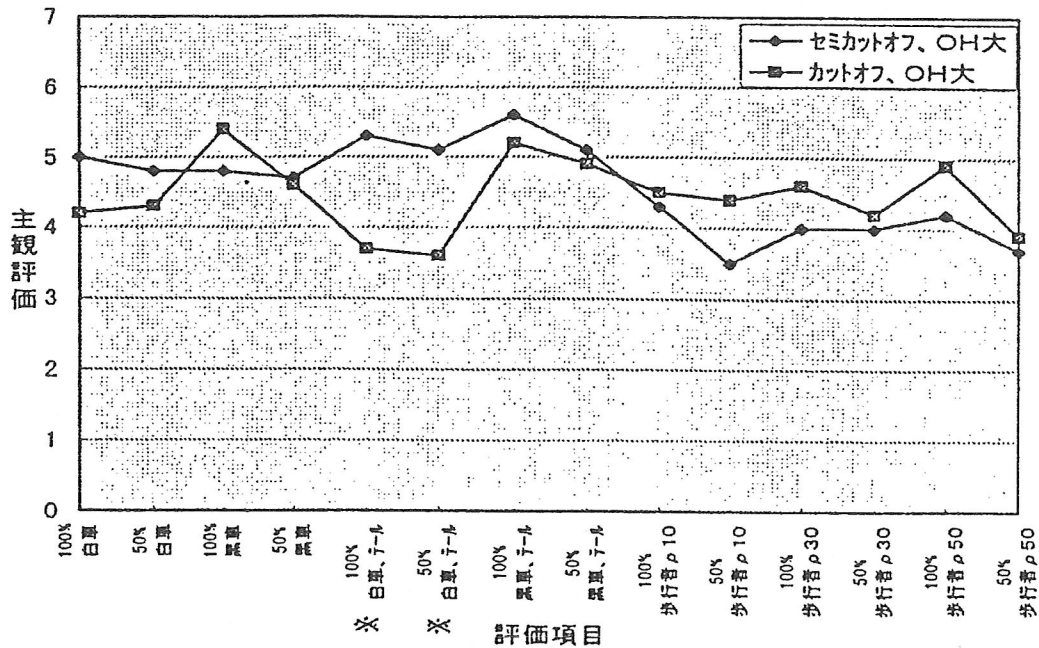


図 5.2.2-3 視認性アンケート調査 (車、歩行者; 横断歩道中央に配置)

照明器具の光束の違いおよび照明器具のオーバーハングの違いによる障害物の主観評価は、母平均の差検定の結果、晴天時において、図 5.2.2-4 及び図 5.2.2-5 に示すように障害物の見え方に有意差のないことが分かった。

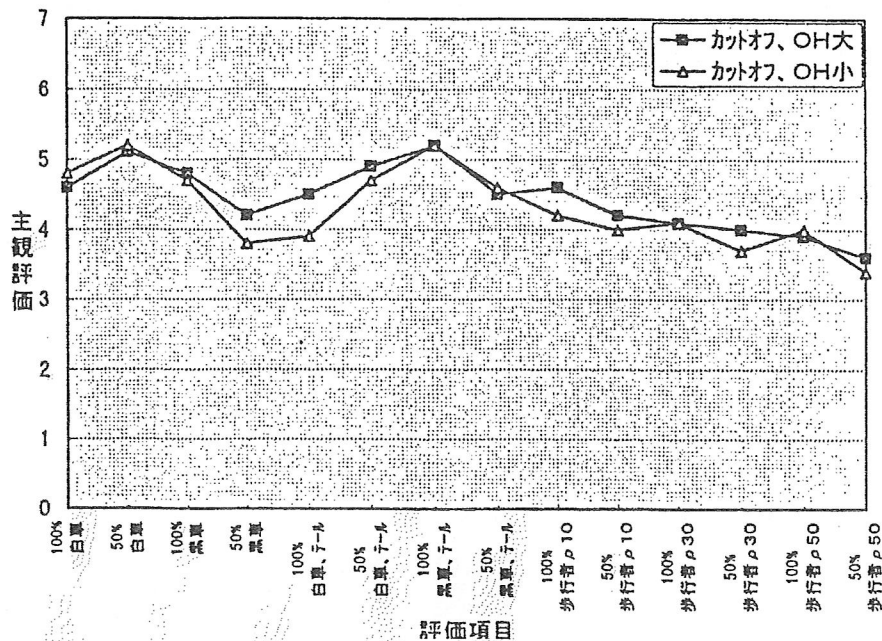


図 5.2.2-4 視認性アンケート調査 (車; 交差点中央に配置、歩行者; 路肩近傍に配置)

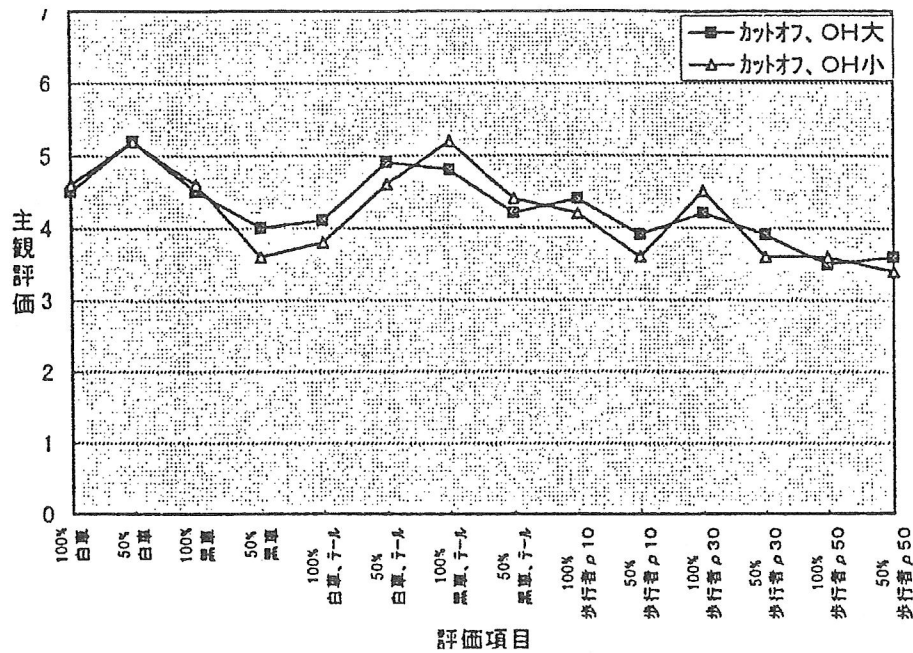


図 5.2.2-5 視認性アンケート調査 (車;横断歩道の外側配置、歩行者;車道中心に配置)

吹雪時、セミカットオフ形照明器具の方がカットオフ形照明器具より、約5～10倍の等価光幕輝度が発生して視認性が悪くなることから、図 5.2.2-6 の実験結果から推測される。

夜間の晴天時、器具配光の違いによる障害物の監視カメラによるモニター画面上での見え方には、母平均の差検定の結果、有意差のないことが分かった。

また、夜間の吹雪時、照明器具の配光の違いによる障害物の見え方は、図 5.2.2-7 より、カットオフ形照明器具を使用した場合の方が、全体レベルに対する輝度レベル差の比率の占有割合が高くなり、監視カメラで得られるモニター画像は見やすいことが分かった。

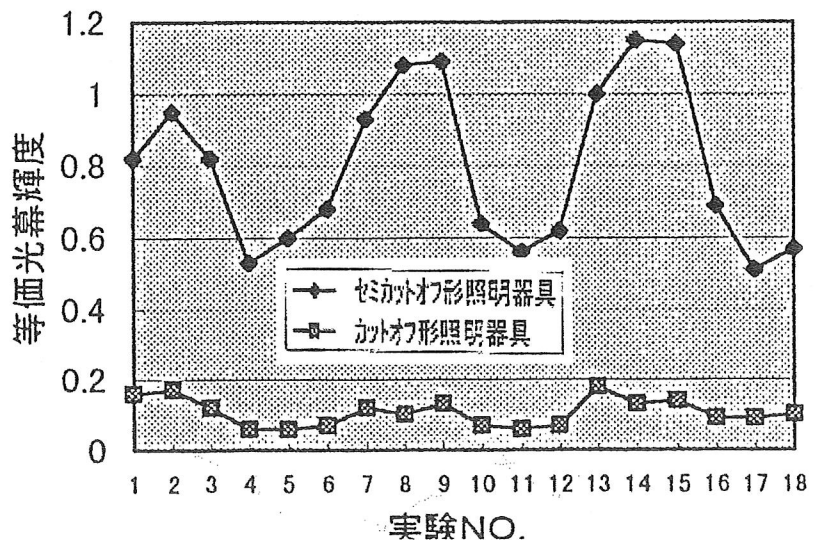


図 5.2.2-6 等価光幕輝度

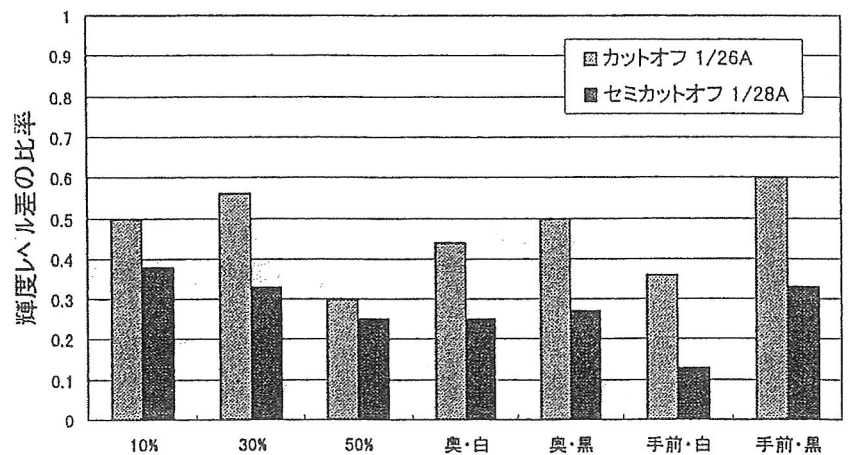


図 5.2.2-7 照明器具配光の違いと見え方 (吹雪、光量50%時)

なお、記録画像の測定は、輝度レベル差の比率を次式で求めるものとした。

輝度レベル差の比率=障害物の輝度レベル差(代表値)/画面全体の輝度レベル差(代表値)

平成9年度の照明実験では吹雪時、セミカットオフ形照明器具はカットオフ形照明器具の約5倍～10倍の光幕輝度が発生し、視認性が悪くなる事が推測された。また同一配光のカットオフ形照明器具による交差点照明はオーバーハングが長い時よりも短いときの方が路肩近傍の雪山の山頂と側壁間のコントラストが増大するため道路幅員が明瞭となり、視線誘導性が良くなることが示唆された(図5.2.2-8、図5.2.2-9参照)。

監視カメラによる見え方実験では、カットオフ形照明器具を使用した場合の方が、吹雪時、光量100%及び50%時とも、全体の輝度レベル差に対する被写体輝度レベル差が大きくなり、監視カメラで得られるモニター画像は見え易いことが分かった。

また、晴天時、照明器具配光の違いによる全体の輝度レベル差に対する被写体輝度レベル差の比率の割合には有意差のないことが分かった。

- (3) まとめ ; 吹雪時における交差点照明の視認性実験を、(独)北海道開発土木研究所の石狩吹雪実験場にて平成10年から平成13年にかけて行った。本実験条件(道路照明施設設置基準に準拠した配置)での交差点照明においては、吹雪時、光量を100%から50%に調光し、光幕輝度の発生をセミカットオフ形の1/5～1/10程度に抑制できるカットオフ形を採用することにより、交差点部における運転者の主観評価結果やモニター画面の見え方も良いことが分かった。またオーバーハングも小さい方が雪山に陰影ができて視線誘導性の良くなることが示唆された。



図5.2.2-8 輝度分布図(カットオフ形照明器具、オーバーハング長い)



図5.2.2-9 輝度分布図(カットオフ形照明器具、オーバーハング短い)

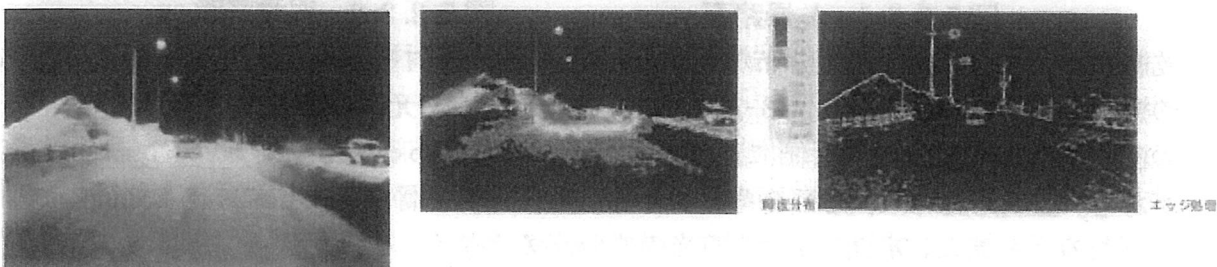


図5.2.2-10 輝度分布図(セミカットオフ形照明器具、オーバーハング長い)

課題としては、吹雪の性状、雪質の違い、光源の発光色により障害物の見え方にどのように影響するのかが課題である。

### 5.2.3 雨天時における道路照明の視認性について

#### (1) 概要

夜間の良好な視環境を運転者に提供するための道路照明は、路面の反射特性と密接な関係がある。たとえば路面が湿ったり、雨水の膜で覆われると、鏡面性が増して照明効果が低下する。ここでは、旧建設省土木研究所で行われた「高機能道路照明に関する検討」<sup>4)</sup>を中心に、湿潤路面の反射特性と道路照明器具の配光特性およびオーバーハングの違いによる路面輝度の変化について紹介する。

#### (2) 路面状態による路面輝度の変化

道路照明下において運転者は、路面上の障害物（落下物、横断歩行者など）を明るい路面を背景としたシルエットで視認しており、運転者が障害物を確実に認識するためには、障害物と背景となる路面との輝度コントラストが適切でなければならない。そのために道路照明では下記の性能が必要とされている<sup>5)</sup>。

- ・ 路面の平均輝度が適切であること
- ・ 路面の輝度分布が適切な均斉度を有すること

路面の平均輝度が適切でなければ、障害物を視認するために十分な輝度コントラストが得られない。また、均斉度が悪く路面に輝度ムラがあれば暗い部分での見落としが発生する。障害物の視認性を確保するには、路面輝度と均斉度を適切に設定することが重要である。しかし、これらの要件は対象となる路面の反射特性に大きく左右され、路面の状態によって路面の輝度分布が変化する。ここで、乾燥路面の状況を図 5.2.3-1 に、湿潤路面の状況を図 5.2.3-2 に示す。乾燥路面では走行車線および対向車線ともほぼ均一に明るく照らされ路面の輝度ムラが少ないことが分かる。それに対して湿潤路面では、走行車線の路面は乾燥路面よりも光輝しているが、対向車線が暗くなっている。また、路肩付近にある水たまりは完全に暗くなっており、路面の均斉度が悪くなっているのが分かる。



図 5.2.3-1 乾燥路面



図 5.2.3-2 湿潤路面

乾燥路面と湿潤路面で輝度分布が異なるのは、路面の反射特性の変化によるものであり、その概念を表したものを図 5.2.3-3 に示す。乾燥路面への光は路面の骨材に直接当たり、その凹凸の加減により運転者側に正反射する光と横方向あるいは反対方向に乱反射する光がある。湿潤路面では、路面の骨材と骨材の間に雨水が溜まり、全体的な路面の反射率が高くなる。また、水面で正反射する光の成分が多くなる。このため、湿潤路面は乾燥路面と比べ輝度の高い部分がより高くなることから路面の輝度均斉度が著しく低下する。

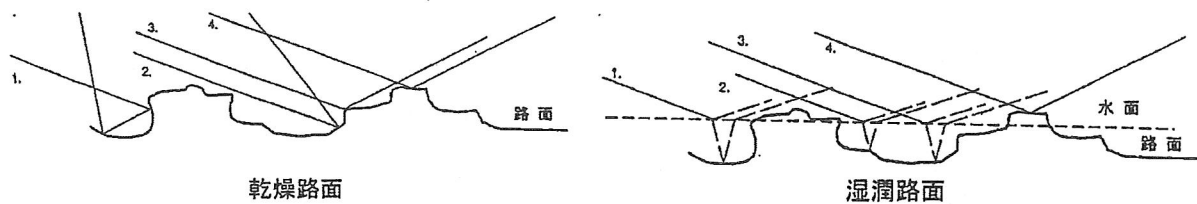


図 5. 2. 3-3 乾燥路面と湿潤路面の反射特性

### (3) 湿潤路面の反射特性

雨天時における道路照明の照明効果を検討するためには、まず、湿潤路面の反射特性を把握しなければならない。しかし、路面の状況は降雨状態や乾燥に至る過程において連続的に変化するため、全ての状況の路面の反射特性を検討するのは非常に困難である。そこで国際照明委員会(以下 CIE)では「道路照明における路面輝度・照度の計算と測定」(CIE Pub, No, 30-2) <sup>6)</sup>において、「標準的な湿潤路面状態」を「湿度 50%、温度 25°C で 1 時間に 5mm の模擬的な降雨の停止 30 分後の道路サンプルに発生する湿潤状態の路面」と定めている。この標準的な湿潤状態の数々の道路サンプルの測定から、CIE の「湿潤時における道路照明」(CIE Pub, No, 47) <sup>7)</sup>では湿潤状態における路面のクラスを W クラスと定め、道路の路面タイプによって路面の反射特性を W1 から W4 の 4 段階に分けている。

表 5. 2. 3-1 に路面のタイプと W クラスの関係を示す。我が国の道路の舗装には主に密粒アスファルトコンクリートが採用されており、最大の粒子サイズは 10mm 以上となる。これより、湿った路面の W クラスは W3 と W4 となる。

表 5. 2. 3-1 湿潤時の路面の反射特性の分類

路面のタイプ	W クラス	
	少～中程度の交通量の路面	交通量の多い路面
アスファルトコンクリート 最大粒子サイズ；10mm 未満	W 4	W 4 以上
アスファルトコンクリート 最大粒子サイズ；10mm 以上	W 3	W 4
被覆されたチップングの路面 最大粒子サイズ；10mm 以上	W 2	W 3
セメントコンクリート 表面の凹凸が小さいもの	W 4 以上	
セメントコンクリート 表面の凹凸を研磨、切削その他の 方法で改善したもの	W 4 以下	
良好な状態の路面処理	W 2 以下	
排水性の路面	W 2 以下	

なお、乾燥路面の反射特性は一般的に CIE の「路面と照明」(CIE Pub, No, 66) <sup>8)</sup>で定められている C クラスの C2 を用いている。

乾燥路面の照明特性として路面の総合均斉は  $U_0=0.4$  以上必要とされており、湿潤路面の条件においてもある程度の総合均斉度を確保する必要がある。「湿潤時における道路照明」(CIE Pub, No, 47) <sup>7)</sup> では湿潤路面の総合均斉度を定めており、W3 の場合では総合均斉度は  $U_0=0.2$  以上、W4 では総合均斉度は  $U_0=0.15$  以上必要としている。

(4) オーバーハング

雨天時の路面輝度と照明器具のオーバーハングには密接な関係がある。

図 5. 2. 3-4 に照明器具、観測点、及び観測者の幾何学的関係を表す。照明器具から照射された光は観測点 P で反射し、観測者の目に入射する。この光は輝度として表され、照明器具の配光は乾燥路面の反射特性を考慮し、それぞれの観測点 P の輝度が極力一様になるように設計されている。しかし、降雨により路面が湿潤状態になると路面での光の反射特性が変化し、全体的に反射率が増加し、中でも正反射率が著しく増加する。図 5. 2. 3-4 において入射角と観測角のなす角  $\beta$  が小さくなる位置関係の観測点 P の輝度が著しく増加することになる。照明器具のオーバーハングは入射角と観測角のなす角  $\beta$  と関連しており、オーバーハングを小さくするほど路面上におけるそれぞれの観測点 P の入射角と観測角のなす角  $\beta$  が大きくなる。つまりオーバーハングを小さくするほど湿潤路面での輝度上昇を抑えることができ、輝度均斉度の低下も抑えることができる。道路照明施設設置基準 <sup>8)</sup> では、雨天時の照明効果が極端に悪くならないようにするために、路面上に点在する水の膜による輝度分布を考慮してオーバーハングを 0 とすることが望ましいとしている。

- $\alpha$  ; 観測角
- $\gamma$  ; 光の入射角
- O ; 観測者 (h=1.5m)
- $\beta$  ; 入射面と縦断面のなす角
- $\delta$  ; 道路の軸と縦断面のなす角
- L ; 照明器具

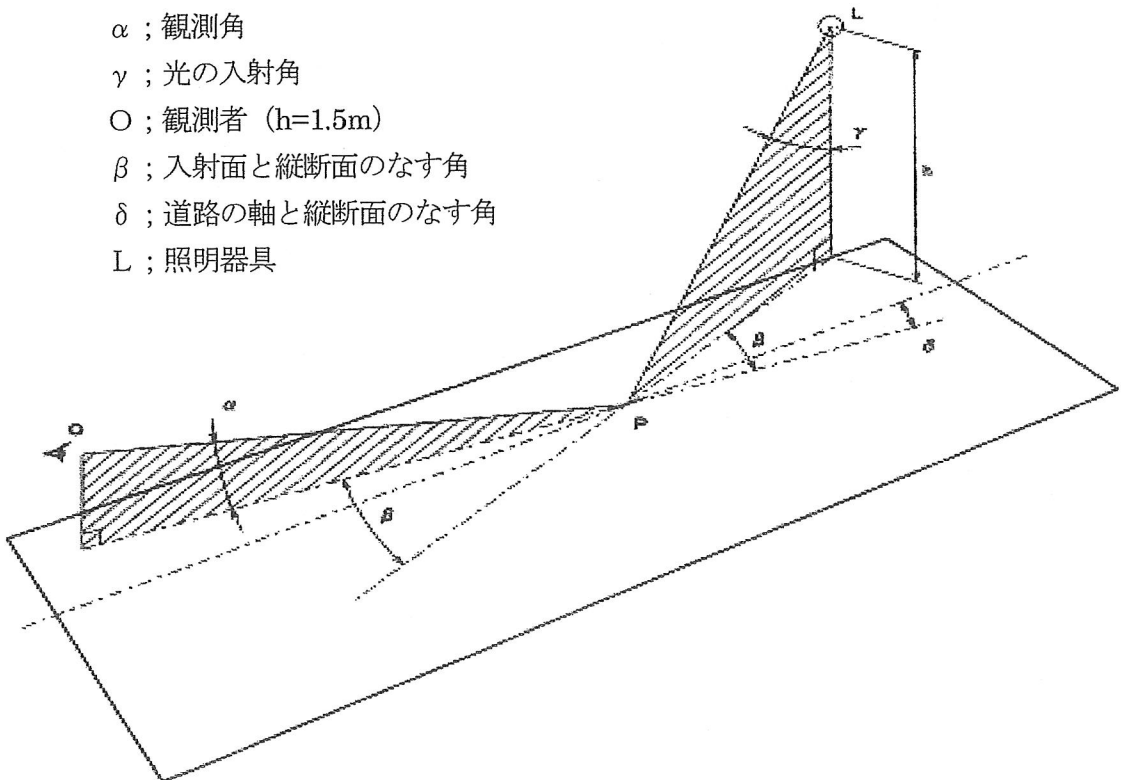


図 5. 2. 3-4 照明器具 (L)、観測点 (P) および観測者 (O) の幾何学的関係

(5) 輝度分布

路面状態とオーバーハングの違いによる輝度分布を確認するため、CIE の路面の反射特性を用い机上計算を行った。

① 計算条件；表 5.2.3-2

表 5.2.3-2 計算条件

に計算条件を表す。乾燥路面の反射特性は C2、湿潤路面の反射特性は W4 を用いた。照明器具は (社)建設電気技術協会の道路照明器材仕様書に規定されている KSC-4 と KSH-2 を用いた。KSC-4 はアームポールに取り付けて使用するもので、我が国で最も多

路面の反射特性	乾燥路面；C2、湿潤路面；W4 (CIE Pub. No.66 CIE Pub. No47)
道路の断面形状	2車線道路、車線幅 3.25m、車道幅 6.5m
照明器具	KSC-4 と KSH-2 の 2 種類
光源 (高压ナトリウムランプ)	KSC-4；NH220FL KSH-2；NHT220L
保守率	M=0.7
照明器具の取付け高さ	H=10m
照明器具の設置間隔	S=35m
照明器具の配列	片側配列
照明器具の取付け角度	KSC-4；アームポールに取り付けるため 5° KSH-2；直線ポールに取り付けるため 0°
オーバーハング	KSC-4；0 m KSH-2；-2 m

く設置されている道路照明器具である。KSH-2 は直線ポールに取り付けて使用するもので、配光特性上オーバーハングを小さくすることができる。経済性に優れているため、近年、普及が進んでいる。

② 計算結果；それぞれの照明器具の乾燥路面と湿潤路面における輝度分布を机上計算により作成した。図 5.2.3-4 にそれぞれの輝度分布図を、表 5.2.3-3 に計算結果の一覧を表す。

乾燥路面と湿潤路面を比較すると、いずれの照明器具も湿潤路面では最大輝度および平均路面輝度が著しく上昇し、最小輝度も若干低下しているため、総合均斉度が低下している。照明器具別で比較すると、乾燥路面では平均路面輝度および総合均斉度も差異はほとんどないが、湿潤路面ではオーバーハングの小さい KSH-2 の方が最大輝度及び平均路面輝度の上昇が少なく、総合均斉度の低下が少ない。オーバーハングを小さくすることにより、路面が湿潤状態での照明効果の低下を抑制できることがわかる。

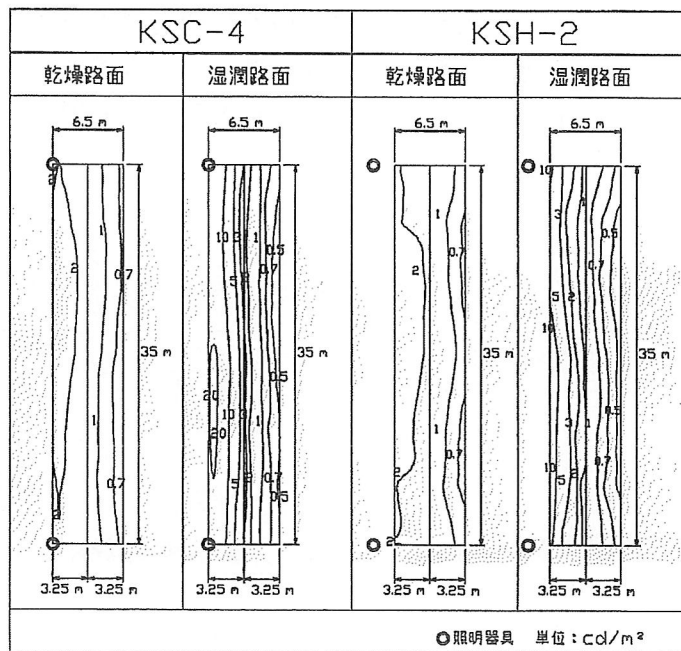


図 4.2.3-4 輝度分布図

表 5. 2. 3-3 計算結果一覧

路面状態	KSC-4				KSH-2			
	平均路面輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	最大輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	最小輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	総合均斉度 U0	平均路面輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	最大輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	最小輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	総合均斉度 U0
乾燥路面	1.45	2.57	0.60	0.41	1.59	2.87	0.64	0.40
湿潤路面	5.77	21.39	0.41	0.07	2.86	12.32	0.42	0.15

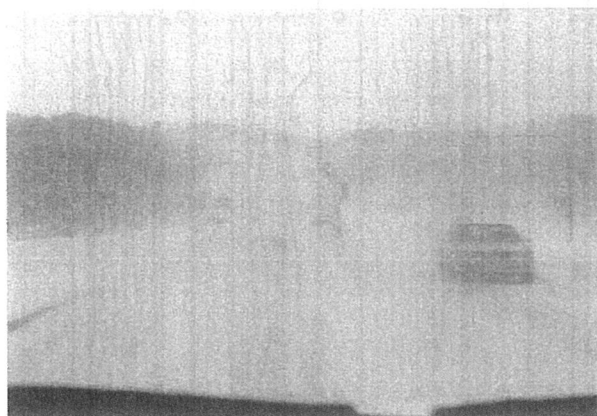
(6) まとめ

路面が湿った状態では道路照明の照明効果は低下するが、照明器具のオーバーハングを極力小さくすることで照明効果の低下を改善することができる。しかし、路面の輝度分布は路面の反射特性に大きく依存しているため、路面の乾湿に関わらず道路照明の照明効果を維持するには路面乾湿時の反射特性の変化が少なく、なおかつ水たまりが発生しにくいように凹凸が無く、排水性に優れた舗装に改良することが最も効果的であると考えられる。

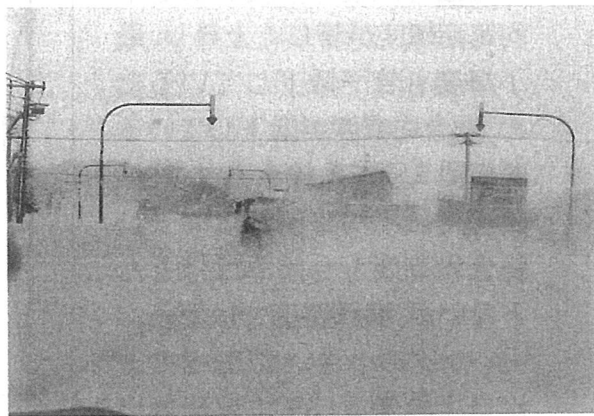
5. 2. 4 寒地道路における自動車灯火器について

2. 5 節において冬期道路における交通視環境の問題を論じた。その問題の概要を下記に示す。

- 冬期道路においては積雪により道路境界位置が確認しづらくなり、除雪後の雪壁、路上に設置された道路境界表示（通称；矢羽根）が運転の頼りとなる。
- 図 5. 2. 4-1 は降雪時における交通視環境である。先行車（大型トラック）の背面は着雪しており、先行車と背景路面との輝度コントラストの低下は、先行車の認識を一層困難なものとしている。
- 先行車の雪の巻き上げは、先行車自身のテールランプの視認性を低下させると共に、対向車の存在を隠し、ドライバーの交通状況の認識を誤らせる原因ともなる。
- 上記のように冬期道路の交通視環境はその他の季節に比べ悪化する。特にブリザード時には車両の前景が真っ白な世界になるとともに何も見えなくなる、通称「ホワイトアウト」と呼ばれる劣悪な交通視環境も存在する。



(a) 圧雪路面と車両の存在状況



(b) 前走車の雪の巻き上げ

図 5. 4. 2-1 降雪時における交通視環境の一例

そこで、寒地道路における①自動車灯火器への着雪の調査、を行うと共に、吹雪時に有効であると言われている②リアフォグの視認性の調査を行った。結果を以下に示す。

(1) 寒地道路における自動車灯火器への着雪の調査結果  
北海道において実施した調査結果の一例を図 5. 2. 4-2 に示す。

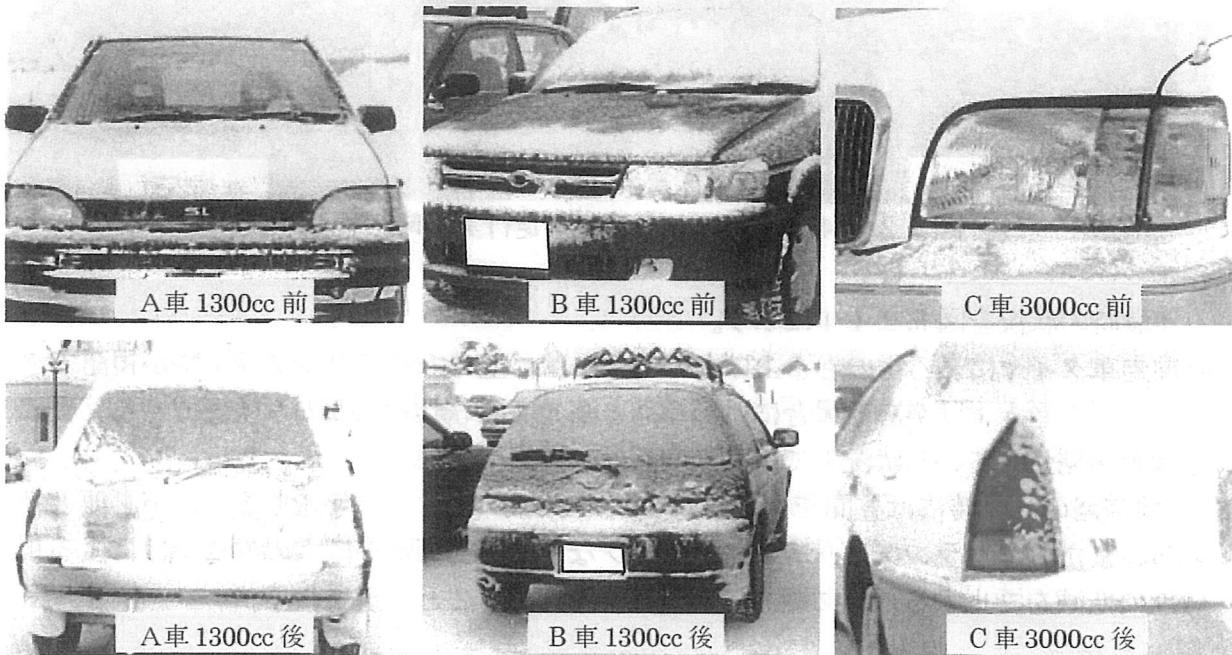


図 5. 2. 4-2 自動車灯火器への着雪状況の一例

- 車両の巻き上げる雪煙によりヘッドランプレンズやリアランプレンズに着雪が生じる。
- 特に、リアランプへの着雪が多い。
- リアランプの内、常時、高光度で点灯させるリアフォグランプへの着雪は少なかった。
- バンパーとランプ下端が近いものはバンパー上面への蓄雪の影響も受け着雪しやすい。
- リアランプの車体側面側には着雪しにくい。

自動車灯火器への着雪は、灯火器の発光輝度を低下させ、後続車への情報伝達を妨げ、またヘッドランプグレアを増加させる。交通安全、交通視環境改善の観点から自動車灯火器のみならず道路施設への着雪対策、融雪対策を拡充する必要があると考える。

(2) リアフォグランプの視認性調査結果

実験車バンパー下に 3 種のリアフォグランプを装着(図 5. 2. 4-3)し、実験を行った。



図 5. 2. 4-3 実験に使用したリアフォグランプと実験車への取付け状況



図 5.2.4-4 リアフォグランプ走行実験時の視認状況

実験時の状況を図 5.2.4-4 に示す。

前走車タイヤによる雪の巻き上げがない場合には、全てのリアフォグランプが視認できるが、雪の巻き上げがある場合には標準品と高光度品(規格外品)のみ視認できる。更に地吹雪が発生している状況下では高光度品のみ視認できた。

寒地道路の降雪時には昼間でも前照灯やリアフォグランプを点灯することが必要と考える。またテールランプやリアフォグランプなどの後部標識灯は雪の巻き上げによる視認性の低減を抑止するために極力、設置高を高くすることが望まれる。

## 5.2.5 霧中におけるリアフォグランプの視認性研究

### (1) はじめに

本研究では、霧中の視線誘導に寄与すると思われる昼間における先行車のリアランプの視認性について検討した。具体的には、昼間の霧中におけるリアランプの主観的視認性評価を行った。しかし、主観評価のみでは、実施した実験条件のみでの視認性評価となり、網羅的な条件下でのリアランプの視認性を検討できない。そこで、霧の濃度と照度により変化する昼間の霧中におけるリアランプのコントラストを推定し、昼間の霧中におけるリアランプの視認性評価を行った。

### (2) 実験方法

実験は、富士山水ヶ塚公園駐車場(静岡県裾野市須山 2308 番 5 外)にて 2001 年の 6 つに実施した。評価したリアランプは、8 種類であった。内訳は、ストップランプ 3 種類、テールランプ 3 種類、リアフォグランプ 2 種類である。図 5.2.5-1 (表) は、これらのリアランプの平均光度と発光面積を示している。図 5.2.5-1 は、8 種類のリアランプの配置を示している。図 5.3.5-2 は、実験場所での測定機器の配置を示している。車間距離 50m にて先行車を追従している状況を模擬した。

2 台のノートパソコンがデータ計測とリアランプの点灯制御を行った。透過率(10m)・輝度・照度のデータ記録を主観評価と同時に行った。4 名の被験者がリアランプの主観的視認性評価を行った。被験者に提示した評価軸の左端は「見えない」、右端は「よく見える」と表示した。被験者は、2 秒間提示されたリアランプの視認性が、これらの指標間のどこに相当するかを主観的に決定した。解析では、「見えない」を 1 点とし、「良く見える」を 7 点とした。

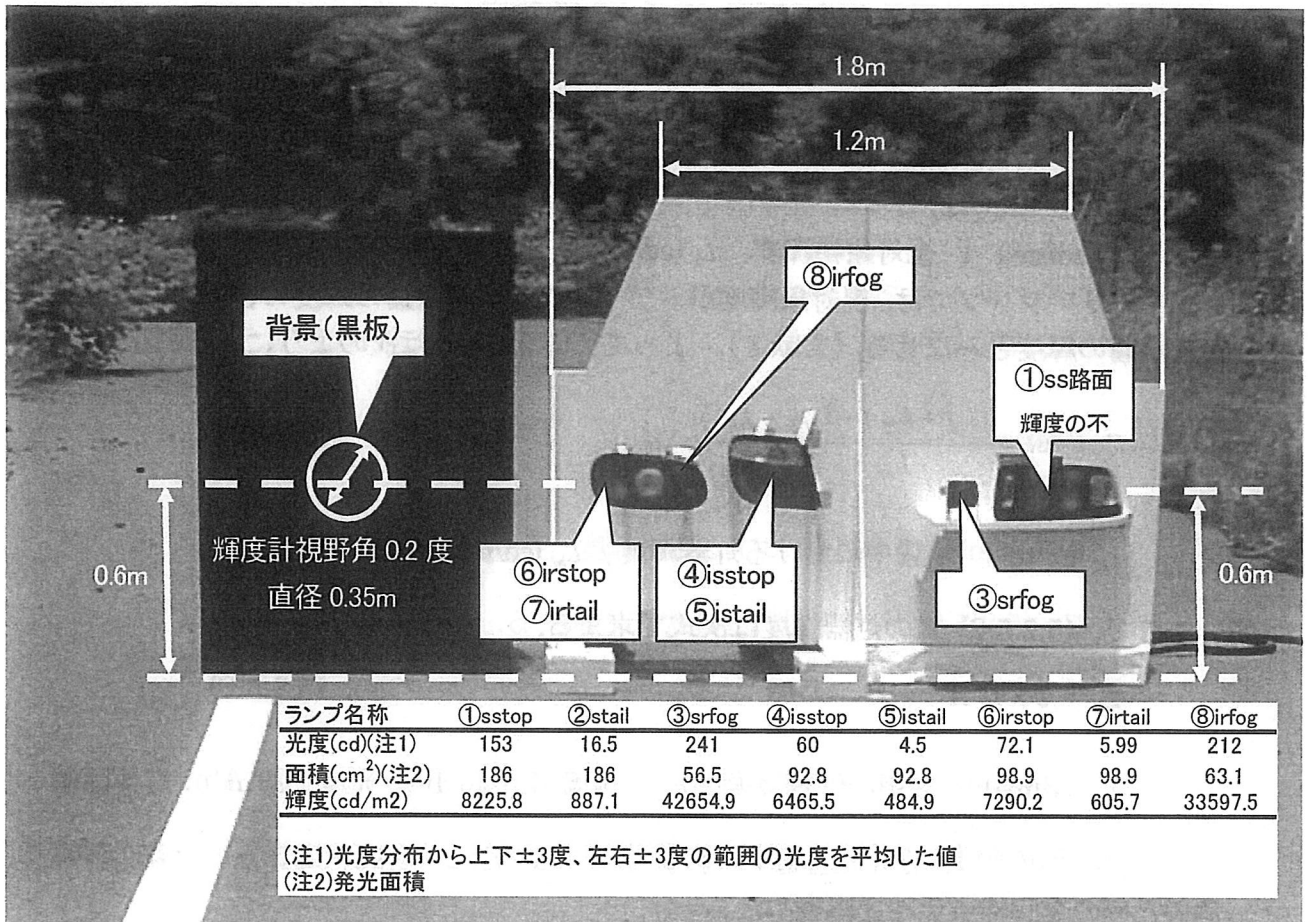


図 5.2.5-1 実験に用いたリアフォグランプの性能と配置

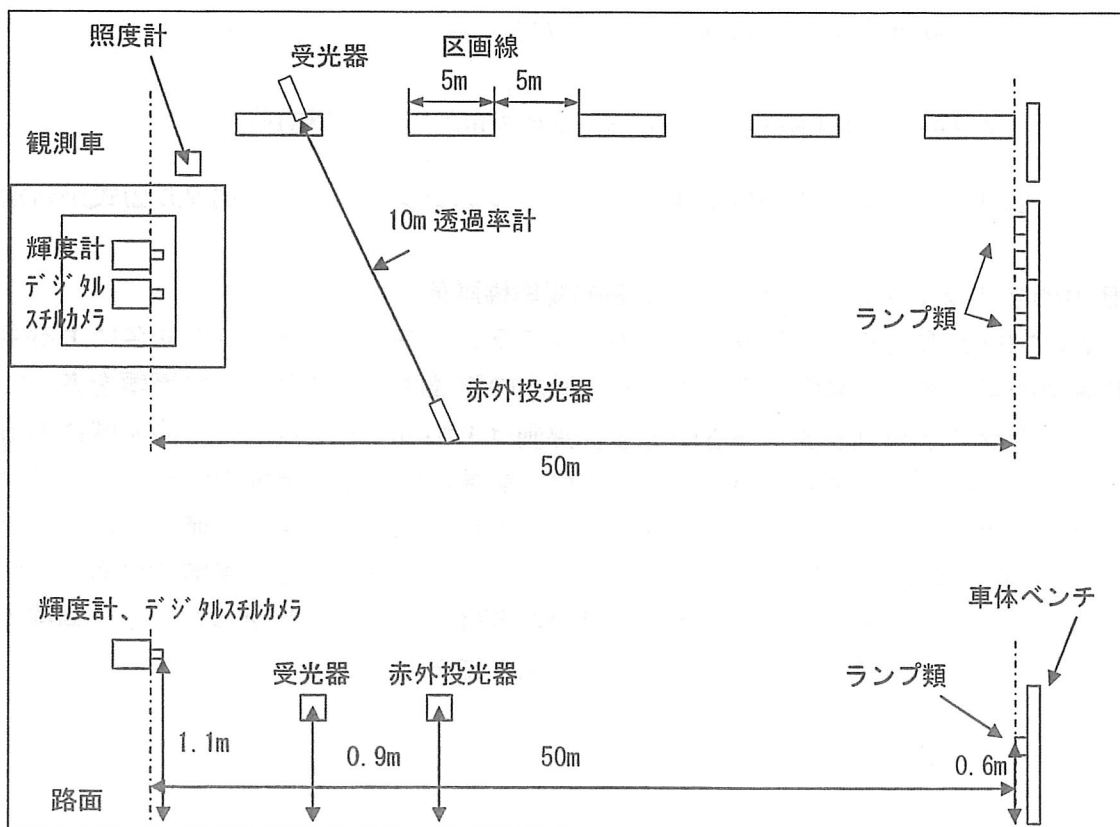


図 5.2.5-2 実験場における観測機器とリアランプの配置

### (3) 霧中におけるリアランプの輝度コントラスト推定

輝度差と輝度コントラスト（以降、単にコントラストと記す）が、視認性評価視標としてよく知られている。コントラストは、(5.2.5-1)式で通常定義される。

$$Contrast = \frac{|L_t - L_b|}{L_b} \quad (5.2.5-1)$$

$L_t$  (cd/m<sup>2</sup>) ; 視対象物輝度、 $L_b$  (cd/m<sup>2</sup>) ; 背景輝度

霧中のリアランプでは、視対象輝度がリアランプの輝度と霧の輝度の合計となり、背景輝度が霧の輝度とみなせる（文献1）。よって、(5.2.5-1)式は次のようになる。

$$Contrast = \frac{|(L_{lf} + L_{bf}) - L_{bf}|}{L_{bf}} = \frac{L_{lf}}{L_{bf}} \quad (5.2.5-2)$$

$L_{lf}$  (cd/m<sup>2</sup>) ; 霧中における灯器輝度、 $L_{bf}$  (cd/m<sup>2</sup>) ; 霧の輝度

ここで、(5.2.5-2) 式の灯器輝度は次式で求まる。

$$L_{lf} = \varepsilon \times I / A \quad (5.2.5-3)$$

$L_{lf}$  (cd/m<sup>2</sup>) ; 霧中の灯器輝度、 $\varepsilon$  ; 透過率、 $I$ (cd) ; 光度、 $A$ (m<sup>2</sup>) ; 灯器面積

一方、霧の輝度は、照度と透過率の影響を受ける。それらを説明変数とした霧の輝度予測のための重回帰モデルを構築した。

その結果、

$$L_{bf} = -0.09688x_1 + 0.000928x_2 + 5.760752 \quad (5.2.5-4)$$

$L_{bf}$  ; 霧の輝度 (10<sup>2</sup> cd/m<sup>2</sup>)、 $x_1$  ; 透過率(10m)、 $x_2$  ; 照度(lx)

を得た。以上から、本研究では霧中のリアランプのコントラストを(5.2.5-2)式から求めた。

### (4) 霧中のリアランプコントラストと主観的視認性評価

図 5.2.5-3 は、(5.2.5-2)式を用いて求めたリアランプのコントラストと 4 名による主観的評価値の平均値との関係を示している。図中の記号は、リアランプの種類を表している。コントラストが 0.1 より小さいとき、評価は 1 から 2 となった。この領域にあるリアランプは、ほとんど見えないと言ってよい。記号から、この領域のデータは、ほとんどがテールランプであった。コントラストが 0.1 から 1.0 のとき、評価は 3 から 6 となった。そこそこ見えると考えられる。ストップランプのデータがこの領域では多かった。コントラストが 1.0 より大きいとき、視認性評価は、6 から 7 となった。この領域のデータは、ほとんどがリアフォグランプによるものであった。

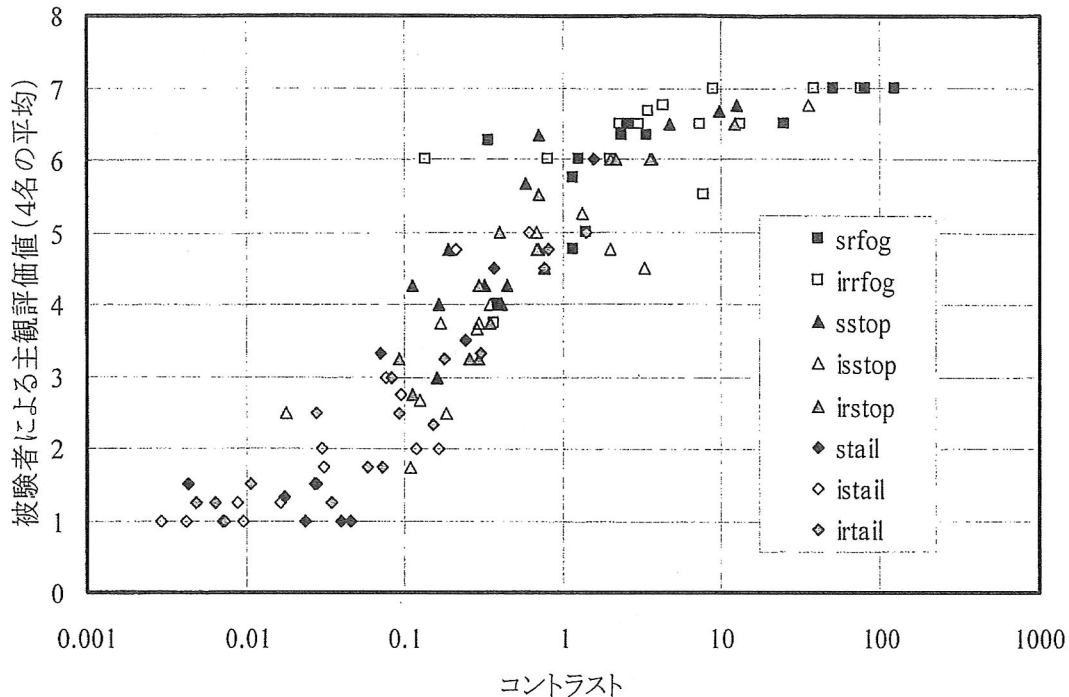


図 5.2.5-3 リアフォグランプのコントラストと主観評価

(5) まとめ

本研究では、車両のリアにあるテールランプ、ストップランプ、リアフォグランプを用いて昼間の霧中における視認性実験を実施した。実験は、屋外の霧中にて静止状態で行った。リアフォグランプは、日中の濃霧でも十分な視認性を発揮すると言えた。しかし、テールランプは同様な条件下でほとんど見えない結果となった。

リアランプの発光光度が視認性に与える効果を評価するため、リアランプのコントラストを推定した。8種類のリアランプのコントラストを様々な視環境条件で推定した。コントラストが0.1となる距離を発見可能距離とし、霧の濃度・照度・リアランプの輝度がリアランプの被視認性に与える影響を評価した。テールランプは日中の霧発生時にほとんど見えない結果となった。特に、照度による影響が大きく、比較的薄い霧でも照度が高ければ、その発見可能距離は短いものと言えた。一方、リアフォグランプは十分な視認性を日中の霧の中でも確保できると言える。

実験及び推定の結果から、リアフォグランプの装着は急がれるべきと考える。高速道路を走行中の車両は、霧中においてテールランプを点灯している場合が多い。しかし、その被視認性は低い。テールランプの被視認性の低さが、霧中における車群内の車間距離を短くする原因の一つとなっている可能性が高い。一方、濃霧中においてストップランプの視認距離は40m前後であり、テールランプが見えないまま突然ストップランプが目飛び込む可能性もある。もし、リアフォグランプがあるとストップランプより視認距離が長く、しかもその距離は安全な距離となる。リアフォグランプの装着は、霧発生時においても車間距離を安全なものとし、追突事故及び多重衝突事故の回避に寄与することが期待できる。  
**【謝辞】** 本研究の実験の実施にあたり(社)日本自動車部品工業会、(株)小糸製作所、市光工業(株)、スタンレー電気(株)の方々にご協力を戴きました。また、北海道職業能力開発大学の西野先生には計測システムの開発にご協力を戴きました。ここに感謝の意を表します。

## 5.2.6 雪下におけるLED表示装置の視認性実験

### (1) 概要

積雪地域の冬期道路において、雪や吹雪による視程障害発生時の重要な走行支援設備として、道路線形を表示する視線誘導灯が設置されている。これら視線誘導灯の視認性を確保するためには、「発光輝度」および「発光色」が大きな要素となる。

一方、寒冷地の降雪時期における道路交通視環境の特徴として、対象物である視線誘導灯の背景が雪（白色）となる可能性が大きい。降雪時においても同様に、ドライバーは白色または灰色背景の中で視線誘導灯の色光を視認することとなる。そこで、積雪地域に使用する視線誘導灯は冬期道路の特有な環境条件に整合した機能が必要になると考えられる。

色と視認性に関する研究のひとつとして、背景色を白にした場合の物体色の視認性に関する実験の結果、背景が明るい時は、青～紫の視認が良くなることが報告されている<sup>10)</sup>。しかしながら視線誘導灯は自発光体であるため、発光色に関する視認性の研究が必要である。これに関しては、発光色が持つ波長の特性により降雪中の可視光、赤外光の減衰係数は波長とともに大きくなるという研究報告<sup>11)</sup>があり、積雪・降雪道路の視線誘導灯として青色が視認しやすいということが推測される。

そこで我々は、平成9年度に積雪寒冷地域での気象条件下で視線誘導灯の「発光輝度」と「発光色」が視認性にどのような影響を与えるかを調査するため、冬期道路の気象条件下における視線誘導灯の視認性基礎実験を行なった。しかしながら、実験期間中に視程障害となる悪天候・吹雪に遭遇することができず、積雪を背景とした晴天時における評価データを基に解析を行った。翌平成10年度には、前年度において得られなかった吹雪・降雪時における視認性のデータを確実に収集するため、ビデオによる連続観測を行なった。以下にこれらの実験の概要と得られた結果について紹介する。

### (2) 平成9年度の実験

- ① 目的；本実験の目的は、積雪寒冷地における吹雪などの低視程気象条件下において、近年数多く設置されているLED（発光ダイオード）を光源とした視線誘導灯の視認性について最適な「発光色」と「発光輝度」を求めることとした。

- ② 実験に使用した供試品の仕様；発光体の光源には、赤・黄・緑・青・白色の発光ダイオードを集合体にしたものを使用した。従来の視線誘導灯としては電球色やオレンジ色のLEDによるものが一般的になっているが、青色や白色のLEDも実用可能な製品が得られるようになった

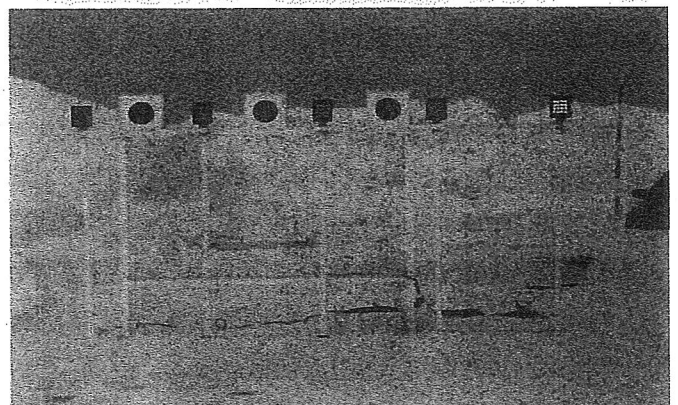


図 5.2.6-1 実験風景

ため、従来の発光色にとらわれずに広い範囲の色を評価することとした。

発光部の大きさは現状製品化されている視線誘導灯の大きさや視線誘導標設置基準<sup>12)</sup>などを参考に120×120mmとした。また、発光体の設置高さは実使用条件が

ら道路路面上 2m とした (図 5.2.6-1)。発光体の発光輝度は、各色とも「高」4600cd/m<sup>2</sup>、「中」2500cd/m<sup>2</sup>、「低」400cd/m<sup>2</sup>の 3 段階とした。

③ 実験方法；実験は(独)北海道開発局開発土木研究所石狩吹雪実験場にて行った。被験者は、発光体から観測距離 50m の位置で普通乗用車に乗車し評価を行なった。評価方法は、アンケート方式による 7 段階評価とした。その評価内容は、「視線誘導灯の明るさとして適切だと感じる明るさ」を評価の中心とした 7 段階評価とした (表 5.2.6-1)。被験者は 12 名である。

表 5.2.6-1 評価尺度

評価	評価点
まぶしい (直視できない)	7
まぶしさを感じ始める	6
使用上の上限値	5
適切な明るさ	4
使用上の下限値	3
かろうじて見える	2
見えない	1

④ 実験時の環境状態；本実験中の天候は、昼夜間を通して「晴れ」であった。積雪状況は、道路面は圧雪状態、路肩に除雪後の雪山が形成されていた。従って、発光体の背景は雪の白色と空の色である。

⑤ 実験結果；図 5.2.6-2 に昼間の視認性評価結果を示す。また、図 4.2.6-3 は夜間の視認性評価結果である。晴天時における発光ダイオードによる各発光色の視認性は、昼間で発光体の背景が白色の雪山の場合、青色と赤色の視認性が最も良く、次に緑、黄色の順で白色の視認評価が最も悪いという結果であった。白色は、発光輝度が同一でありながら、他の 4 色と比べてかなり評価の悪い結果となった。

また、夜間の晴天時における発光色による発光体の視認性は、各色とも優劣の差が出ない結果であった。従って、昼間積雪下で白色発光体の視認性が低下するのは、背景が白色であることが主体原因であると考えられる。

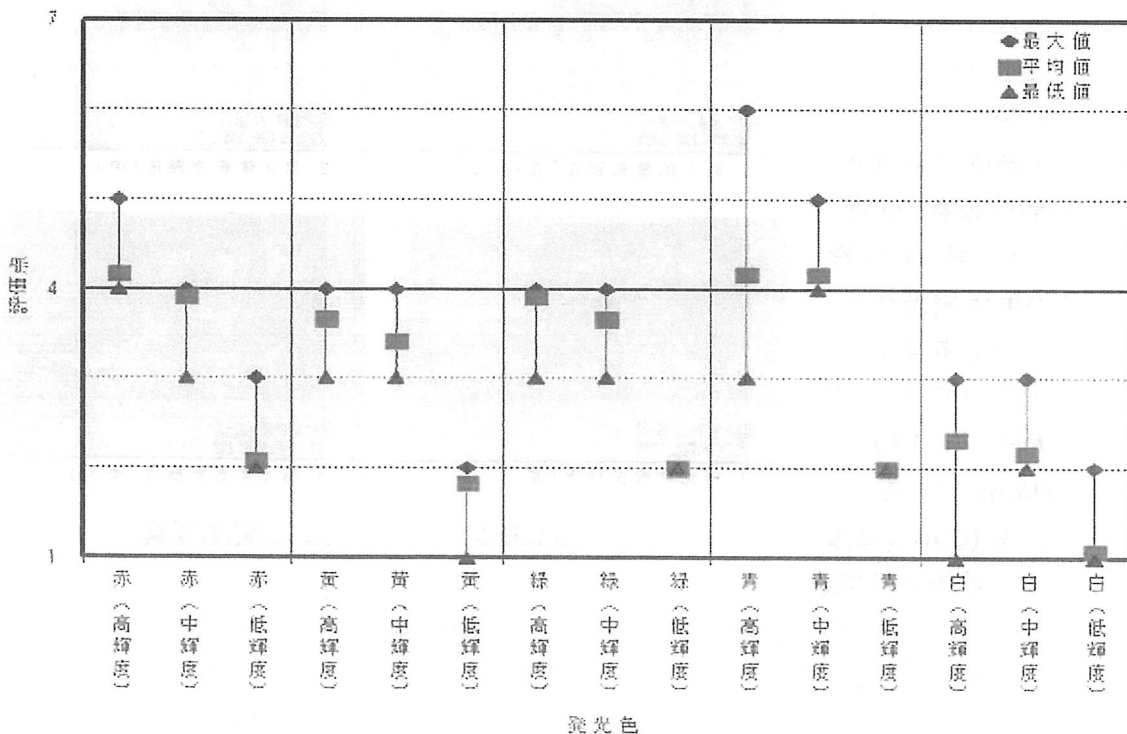


図 5.2.6-2 昼間の視認性

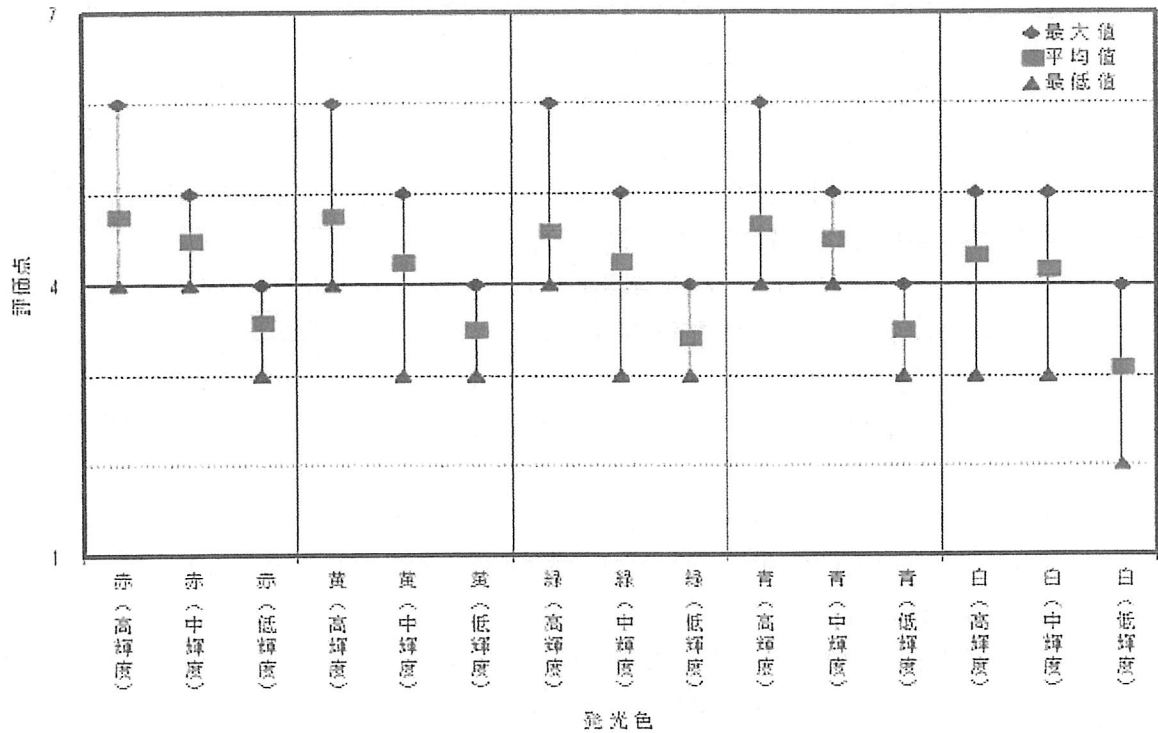


図 5.2.6-3 夜間の視認性

(3) 平成 10 年度の実験

① 実験概要；平成 9 年度は実験期間中に低視程条件が得られなかったため、平成 10 年度に改めて実験を行った。

発光体は平成 9 年度の実験と同様に、赤・黄・緑・青色の単色発光ダイオードを集合体にしたもので、発光部の大きさは 120×120mm である。

平成 10 年度は確実に吹雪時の観測結

果を得るために、視程計測とビデオによる連続観測を並行して実施した。連続的にカメラ画像を録画して、視程データと映像をつきあわせることにより、ビデオ映像による見え方の主観評価を行なうこととした。撮影したビデオ映像のクリップを図 5.2.6-4 に示す。

測定日時：1999年2月6日 9時7分  
 天候：雪 気温：-4.2℃  
 視程：100～400m

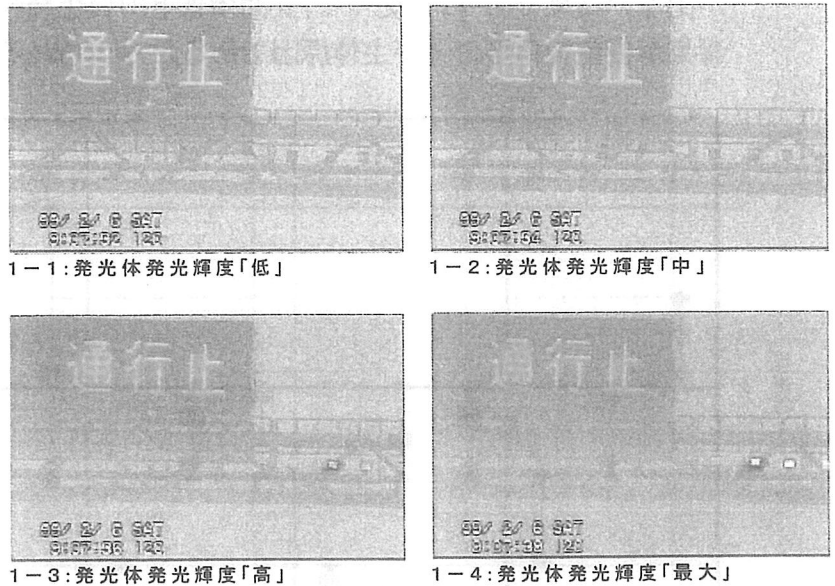


図 5.2.6-4 ビデオによる観測写真

② 実験結果；平成 10 年度の実験では低視程条件に遭遇することができたため、一定の評価結果が得られた。概要を以下に記す。

- ・ 吹雪時においても、同一輝度状態で視認性が良い発光色は青、赤であった。
  - ・ 視程 100～400m においては 4600cd/m<sup>2</sup>以上の輝度がないと視認できない。
  - ・ 視程が大きく低下した吹雪時において、各 LED の最大輝度（定格フルパワー）で点灯すると、定格輝度における光度が最も高い緑の視認性が良かった。
- なお、夜間は映像がハレーションをおこした状態となり評価不能であった。

#### (4) 考察

平成 9 年度の評価実験から、昼間における背景を白色とした場合の発光色は青色と赤色の視認性が比較的に良好であることがわかった。また、夜間においては発光色による優劣の差はあまりないという結果が得られている。

平成 10 年度は、前年度でデータ収集できなかった吹雪時における視認性を確認するため、ビデオによる連続撮影を行い映像による評価を試みた。昼間の低視程状態（吹雪）において、同一輝度で点灯している発光体映像を用いた感応評価は、青－赤－緑－黄の順で視認性が良好であるという結果となった。

ビデオによる映像と人が直接見た場合が等価であるとは一概には言えないが、この結果は前年度に得られた晴天時の視認性評価と同様の結果であり、降雪・吹雪時においても青色の光が視認性の良い発光色という傾向は得られたと考える。以上のことから将来、積雪寒冷地域での冬期道路安全走行支援のための発光施設として、冬期の降雪時期以外は「黄色」の発光色、雪や吹雪などの視程障害時は、「青色」や「緑色」の発光色、事故発生時などの警告表示として「赤色」といったように、気象条件や伝達すべき情報によって灯火色を使い分ける高機能な視線誘導システムが提案できると考える。

【謝辞】本研究は(独)北海道開発土木研究所が積雪寒冷地の ITS 技術の研究開発を目的に行った共同研究「冬期道路の安全走行支援システムの開発に関する研究」において同時実施したもので、関係各位の多大なご協力に感謝致します。

### 5.3 各種視程における航空灯火の見え方シミュレーション

#### 5.3.1 研究の目的

航空灯火は航空機の安全運航上重要な視覚援助施設である。航空灯火には高々度飛行時、離着陸時、飛行場での地上走行時など、場面に応じた視覚情報提供のため、種々のものがある。

本研究の目的は、国際民間航空機関（ICAO）によって勧告されている灯火配光特性に基づく滑走路灯火の見え方について、着陸時におけるパイロットの目から見た各灯火の明るさと、灯列としての灯火パターンを見え方を、コンピュータシミュレーションによって調べ、各種視程条件の下での灯火の運用条件<sup>13)</sup>を評価するものである。

なお、道路交通における信号灯火の見え方を評価する際には、ドライバーが見るのは比較的近距离からであることから、灯火面積を考慮した輝度で見え方を評価するのも有効であろう。しかし、航空灯火に関しては、パイロットがそれらの灯火を視認するのは、ほとんどの場合、遠方からである。それ故、航空灯火の見え方評価に関しては、灯火を点光源として扱うことができ、その光度と、観測者の目の位置における照度、即ち角膜照度とで、

検討するのが一般的である。

以下に本研究のシミュレーションの概要とその評価方法について報告する。

### 5.3.2 滑走路灯火の設置条件

世界各地の主要民間空港では ICAO 勧告に基づく設置・運用を行っており、日本でも ICAO 勧告に基づきながら航空法を定め、その規定に沿った日本独自の運用を行なっている。灯火の見え方に関わる基本的な規定は配光特性と背景輝度および視程や雲高条件に応じた運用時における設定光度である。本研究のシミュレーションでは日本の代表空港である新東京国際空港（成田）の 16 R 進入滑走路の灯火配置を模擬しており、各灯火の光度分布は実際の灯器が有している光度分布ではなく、ICAO の条件を最低限満足する数学的関数で近似したものをを用いている。

光度分布に関する ICAO の条件は、

図 5.3-1 に示す等光度図と呼ばれる配光図で定められている<sup>14)</sup>。そこでは主ビームの平均光度ならびにその最小光度値、そして 10% および 5% 副ビームの最小光度値が灯火ごとに定められ、かつ、水平角 — 鉛直角の平面内に各ビームの最小光度値の等光度図を表した時に、その形状が楕円形になるように規定されているだけである。よって、空港の管理・設置者はその要件を満たす灯器を開発して、実際の運用時にはその特性が維持されるように保守管理を行なっている。表 1 に光軸の設置角度とあわせて各灯火の配光特性を示す。

図 5.3-2 に関数近似した光度分布の一例として、進入中心線灯の配光特性を 3 次元表示で示す。

本研究で評価対象としている灯火の種類は、進入灯システムの中心線灯、クロスバー灯、サイドバレット灯(赤色)、そして、滑走路上の末端灯(緑色)、末端補助灯(緑色)、中心線灯、接地帯灯、滑走路灯(側列灯)そして進入角指示灯の 9 種類である。

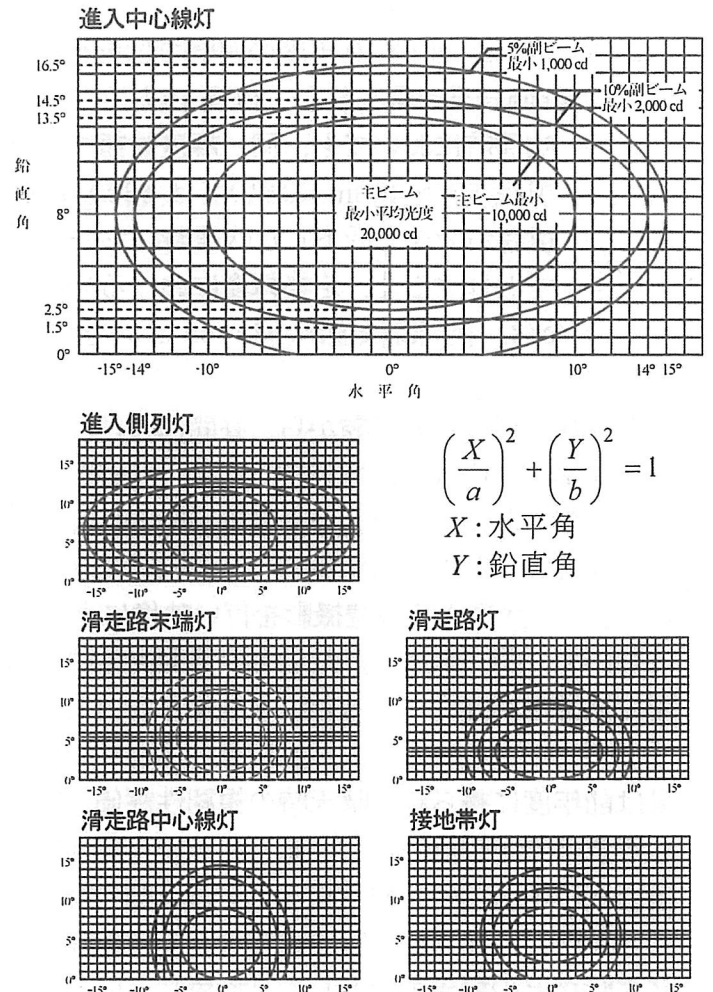


図 5.3-1 各灯火の等光度図

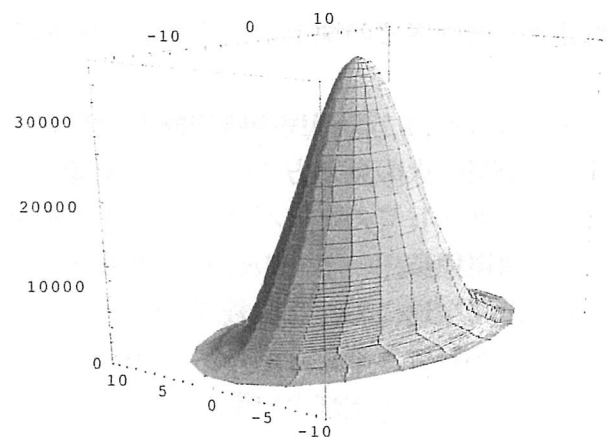


図 5.3-2 ICAO 配光を関数近似した光度分布

表1 ICAOによる各灯火の配光特性 (第14付属書1995第2版)

灯火	色	主ビーム	10% 副ビーム	5% 副ビーム	光軸の 振向角	最小平均 光度 [cd]
進入中心線灯 クロスバー灯	白	H; 10.0° V; 5.0°	H; 14.0° V; 6.5°	H; 15.0° V; 8.5°	H; 0° V; 0~13.5°	20,000
進入側列灯	赤	H; 7.0° V; 5.0°	H; 11.5° V; 6.0°	H; 16.5° V; 8.0°	H; 2.0° V; 0~11.5°	5,000
滑走路末端灯	緑	H; 5.5° V; 4.5°	H; 7.5° V; 6.0°	H; 9.0° V; 8.5°	H; 3.5° V; 5.5°	10,000
滑走路灯 (60m幅)	白	H; 6.5° V; 3.5°	H; 8.5° V; 6.0°	H; 10.0° V; 8.5°	H; 4.5° V; 3.5°	10,000
滑走路中心線灯 (15m間隔)	白	H; 5.0° V; 4.5°	H; 7.0° V; 8.5°	H; 8.5° V; 10°	H; 0° V; 3.6°	5,000
接地帯灯	白	H; 5.0° V; 3.5°	H; 7.0° V; 6.0°	H; 8.5° V; 8.5°	H; 4.0° V; 5.5°	5,000

※各ビームの角度は水平 (H)、鉛直 (V) 方向の光軸からの広がり角。光軸の振向角で水平角 (H) は滑走路中心線方向への内向き角度、鉛直角 (V) は水平面からの上向き角度。

### 5.3.3 視距離と角膜照度<sup>15)</sup>

#### (1) 視程と滑走路視距離

灯火の見え方を予測する方法として、視認可能な距離でもって表す視程(Visibility)がある。この用語には卓越視程、最短視程、気象視程、飛行視程など他にも類似したもの多数あるが、航空管制上では主として物理的測定による5%気象視程と滑走路視距離(Runway Visual Range ; RVR)が多く用いられる。5%気象視程 ( $V_5$ ) は Koschmieder の式における輝度対比の識別限界値を5%としたもので、視距離 (この場合は視程) と大気の混濁による減衰係数あるいは透過率との関係として表される。

RVR はある背景の下で、ある光度の灯火を点灯した時の視認限界距離を表しており、減衰係数あるいは透過率だけでなく灯火光度の設定条件と背景の明るさに対応した目の視認閾値に関する量である。

(5.3-1)式と(5.3-2)式にこれら二つの視距離の関係式を示す。なお、以下の記述では減衰係数  $\sigma$  を用いて表現するが、透過率  $\tau$  との関係を知りたいければ  $\sigma = -\ln(\tau)$  を用いて変換すればよい。

$$V_5 = \ln(0.05)/\sigma = 2.996/\sigma \quad (5.3-1)$$

$$E_t = I_0 e^{-\sigma \frac{RVR}{l}} / RVR^2 \quad (5.3-2)$$

ここで、 $l$  は  $\sigma$  の測定区間距離、 $E_t$  は背景輝度に応じた閾値角膜照度、また、 $I_0$  は灯火光度であるが、 $E_t$  と  $I_0$  に関して、航空関係では次の値が用いられる。

夜間時 ;  $E_t = 7.7 \times 10^{-7}$  [lx] 薄明時 ;  $E_t = 1.0 \times 10^{-5}$  [lx] 昼間時 ;  $E_t = 3.9 \times 10^{-4}$  [lx]

Tap 5 ;  $I_0 = 10,000$  [cd] Tap 4 ;  $I_0 = 2,500$  [cd] Tap 3 ;  $I_0 = 500$  [cd]

Tap 2 ;  $I_0 = 100$  [cd] Tap 1 ;  $I_0 = 20$  [cd]

なお、Tap とは灯火の点灯電流を段階的に可変するために設けられた電気回線のタッ

プ（引き出し端子）のことで、Tap 5 が定格電流による点灯（Full 点灯）を指し、以下その 1/4、1/20、1/100、1/500 の光度になる電流による点灯を意味する。現在の主要空港では 5 段階制御が採用されている。

(5.3-1)式では減衰係数によって一意的に視程が決まるが、(5.3-2)式の RVR は減衰係数が同じでも灯火の光度によって視距離が変わる。それ故、視程あるいは視距離の値から灯火の点灯制御を行なう航空管制では安全を考えて透過率の低い（減衰係数の大きい）方の視距離を採用することになっている。透過率と視程および RVR の関係のグラフを図 5.3-3 に示すが、例えば昼間 RVR(Tap5)および夜間 RVR(Tap1)（これら 2 本の曲線は重なっている）では視距離が約 1,100m の所で  $V_5$  の曲線と交差しているのので、その距離より短い視距離の場合は RVR の値を、逆にその距離より長い視距離の場合には  $V_5$  の値を使用することになる。

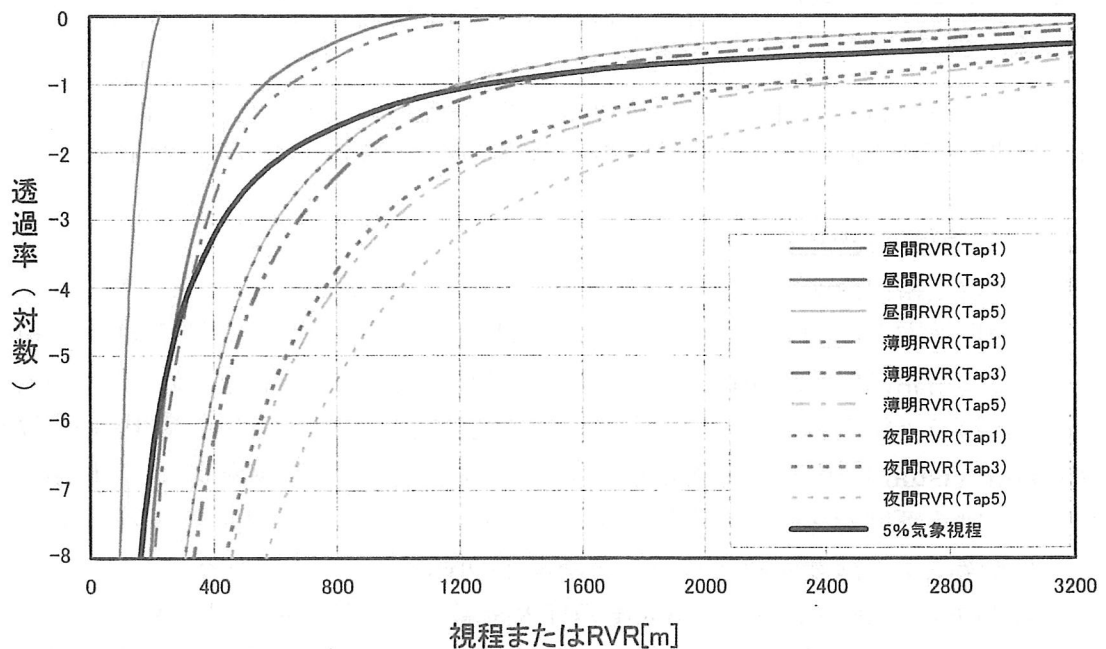


図 5.3-3 透過率と視程または RVR との関係

### (3) 角膜照度

光源を点光源とみなせる十分に隔たった距離でその光源を観測する際、眼の位置と光源を結ぶ線分と垂直な平面に生ずる照度、即ち法線照度を角膜照度という。

前項で記した視程あるいは RVR は、閾値としてのぎりぎり見える最大距離を知るには都合がよいが、ある光度の灯火がどの程度の明るさに見えるかは判らない。その角膜照度を推定するには Allard の法則を利用するとよい。減衰がないクリアーな大気中で光源を点光源とみなせる距離においては、光源の光度を  $I$  [cd] とすると、光源から距離  $R$  [m] 隔てた位置での照度は逆 2 乗の法則で  $I/R^2$  [lx] で与えられるが、混濁する大気中では透過光のエネルギーは  $I/R^2$  よりさらに減少する。光路に渡って均一な混濁度を仮定すると、光度と照度との関係は (5.3-3) 式で与えられる。一般に Allard の式と呼ばれる。

$$E = \frac{I}{R^2} \exp(-\sigma R) \quad (5.3-3)$$

本研究のシミュレーションでは、航空機の位置と視距離および灯火の点灯 Tap 値を入力すると、これらの関係式を利用して各灯火によって生じる角膜照度を計算する仕組みである。

#### 5.3.4 シミュレーションによる評価方法

航空機が着陸する際、パイロットは自機が正規の進入コース上を飛行しているかどうかを判断し、外れていれば当然パイロットの操縦経験に基づく修正を行なうであろう。その際の判断は搭載機器の計器指示とパイロット自身の目を見た風景や地上航空灯火による視覚情報に頼ることになる。この地上航空灯火の視覚情報として必要な条件は先ず見えなくてはならない。しかし、またまぶしい程に明るすぎてもいけない。適正な明るさであることが必要である。パイロットは灯火列全体の形状を見て、自機の高度や位置などをパターン認識によって判断している。それ故、シミュレーションによる見え方の評価には灯火の明るさと地上に配置されている灯火列のパターンについて検討する必要がある。

シミュレーション結果の1例として VDT 上の表示画像を図4に示す。画面上では、パイロットの目から見た地上に配置された灯火の灯列パターンが画面の右サイドに、パイロットの眼の位置における角膜照度のグラフが画面左サイドに表示されている。灯列パターンでは縦軸が視角としての地平線からの鉛直角と横軸が水平角を取って表現してある。角膜照度のグラフは縦軸に灯列パターンと同じ鉛直角を取り各灯火の位置と対応付けて、横軸に角膜照度として各灯火によって生じる値を表現している。画面下部に条件設定のダイアログ・ウィンドウを表示して、観測位置（進入方向の距離、地面からの高さ、横方向の位置）、視程、背景条件、各灯火の Tap 値の設定ができるようになっている。

灯火パターンでは視程に応じて見えない部分の灯火は表示せず、見えるものだけを表現するようにしてあるので、視程条件に対応したイメージパターンを模擬している。

角膜照度のグラフで下端付近に長・中・短の縦の直線群が表示されているが、これは灯火の明るさを評価する際に参考にするもので、過去に照明学会の受託研究の一環で行なわれた視覚実験<sup>16)</sup>に基づく各灯火の見え方レベルの角膜照度を表示したもので、長線が信号灯火としての上限、中線が適正、短線が下限レベルの角膜照度を表示している。この視覚実験に基づく角膜照度とシミュレーションによる計算値と比較することによって見え方としての明るさ評価を行なうことができる。

なお、図5.3-4の表示例は、ILS（計器着陸システム）の電波が滑走路末端から344mの滑走路脇の位置から発射されているとして、そのグライドパス（航空機がILS電波を利用して、滑走路に対して正しい進入角で進入する経路）に乗って着陸しようと降下中のB747機が滑走路末端から456mの地点に到達した時のパイロットの目から見たイメージに相当する。なお、カットバックアングル（操縦席の窓を通して見ることが出来る水平面から下方の視界）を $17.3^{\circ}$ に設定してある。

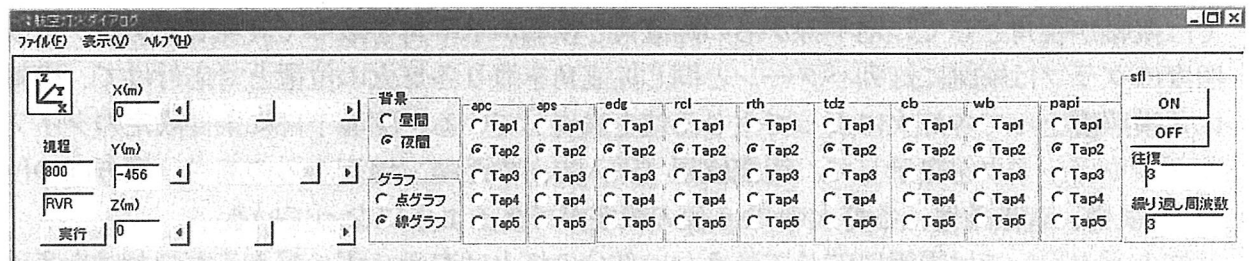
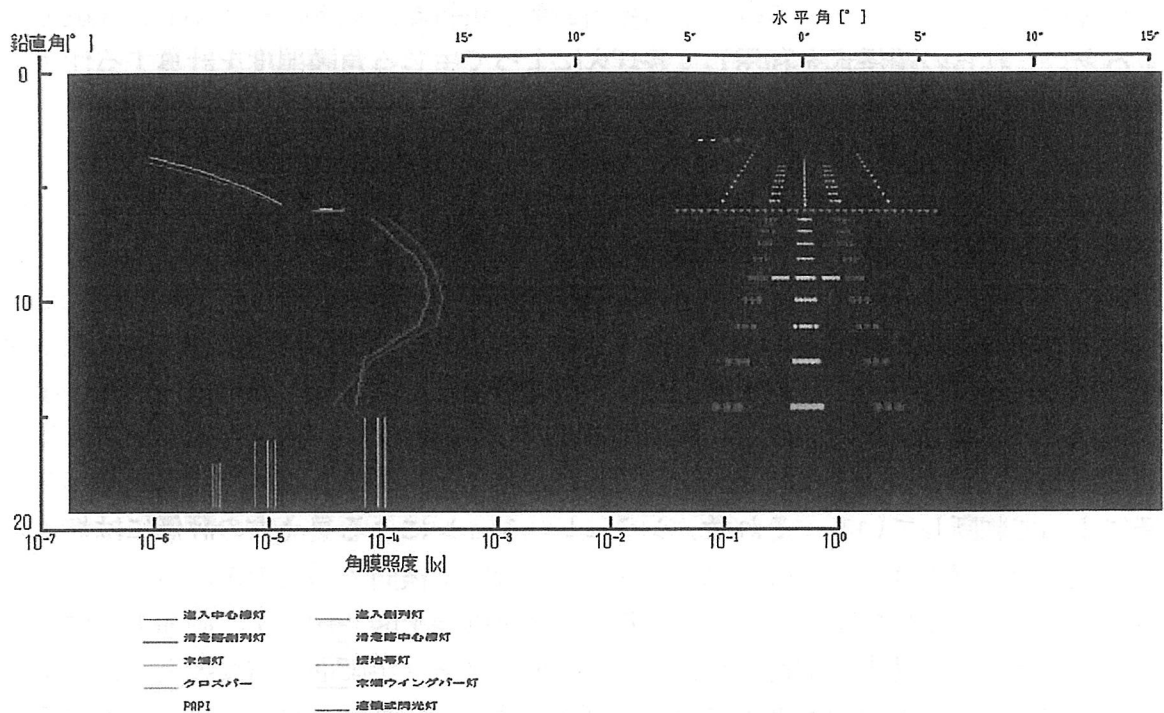


図 5.3.4 RVR800m時の滑走路末端から 456m の位置におけるシミュレーション画面

### 5.3.5 まとめ

日本の主要空港である新東京国際空港（成田）あるいは東京国際空港（羽田）などは利用航空機の数が増大している。このような中、気象条件の悪化に伴う離着陸の中断が起こればその影響は甚大である。成田空港はA滑走路だけであるがカテゴリⅢa、東京国際空港の羽田はC滑走路がカテゴリⅡに対応した設備を有している。カテゴリⅢaは規格上、RVR200m以上、カテゴリⅡはRVR350m以上の運航が可能であるが、低視程時における実際の運用は個々の空港が独自に定めている運用マニュアルによって行なわれる。規格上の最低気象条件がそう度々発生するものでないとはいえ、このような低視程時における灯火の見え方を検証することは安全上重要なことである。しかし、実際の低視程気象条件の中で実地調査をすることは困難であることから、本研究のシミュレーションによる評価は有効であると考えられる。

本研究の現状は進入時の航空機が滑走路へ接地するまでのシミュレーションが可能であるが、この先、接地してから地上走行してスポットインするまでの、誘導路走行時の誘導路路灯や誘導案内灯あるいはストップバーなどの見え方についてのシミュレーションの構築を現在進めているところである。

< 第5章 参考文献 >

- 1) 正木光, 田中一; 大気中における光の減衰計数の算出, 照明学会誌, Vol.47, No.6, 234-239, 1963
- 2) 藤井克人, 高橋貞雄, 吉田博; 人工霧に対する色光の透過性, 照明学会誌, Vol.49, No.6, 15-20, 1965
- 3) Masayoshi Kamijo, Shoji Kobayashi, et.al.; Visibility Evaluation of Lane Marking - Key Factors for Visibility and Analysis of Real World Data, Preprints CD-ROM of Transportation Research Board 80th annual meeting, 2001
- 4) 建設省 土木研究所; 「道路照明の高機能化に関する検討業務」, 土木研究資料第 3668号, 平成 11 年 9 月
- 5) (社)日本道路協会; 「道路照明施設設置基準・同解説」, 昭和 56 年 4 月
- 6) CIE Pub. No.30-2; Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighting, 1982
- 7) CIE Pub. No.47; Road Lighting for Wet Condition, 1979
- 8) CIE Pub. No.66; Road Surface and Lighting, 1984
- 9) Toru Hagiwara, et al.; Background Luminance as a function of Illuminance Conditions and Visual Range in Fog, Proceedings of 15th Biennial Symposium on Visibility of TRB, 2000
- 10) 神作 博; 信号と交通標識の色について, 照明学会誌, Vol.55, No.3, p59, 1971
- 11) Seagraves, M. A.; Visible and Infrared Extinction in Falling Snow, Appl. Opt., Vol.25-7, 1986
- 12) (社)日本道路協会; 視線誘導灯設置基準・同解説, 1984
- 13) "AERODROME DESIGN MANUAL Part 4 Visual Aids", ICAO, 1993
- 14) 航空振興財団; 「国際標準及び勧告方式 飛行場 国際民間航空条約第 14 付属書」, 1996
- 15) 航空振興財団; 「視覚ガイダンスシステム」, 1999
- 16) 照明学会; 「進入・滑走路灯火の試験研究報告書」, 昭和 54 年 (1979)

## 第6章 特別研究事例

### 6.1 霧中における LED 発光体の光覚閾および色覚閾に関する研究

#### 6.1.1 研究の背景と目的

晴天時には前方の道路状況や前車の走行状況がよく見えるため、スムーズな自動車運転を行えるが、雨・雪・霧など、いわゆる悪天候時には道路状況が悪化し、安全走行を維持するためには晴天時より多くの視覚情報が必要となる。ところが、悪天候時の自動車運転は十分な視界が得られないため、運転者は特に緊張を強いられることとなる。夜間を含め視界不良時には、前車のリアランプおよび道路の線形を表すガードレールやセンターラインを頼りに運転することが多く、これらの視認性を高めることは運転支援の観点から極めて重要であろう。

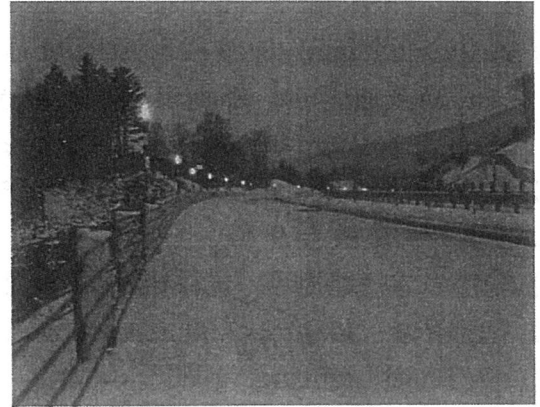


図 6.1-1 視線誘導灯

悪天候による低視程をカバーするために、山間部や急カーブ地帯には発光体を装備した視線誘導灯が数多く設置されている（図 6.1-1）。近年は、発光部に LED を応用したこれらの発光表示装置が増加しているが、これまで濃霧中における LED 色光による視認特性に関する研究報告事例はきわめて少ない。そこで照明学会「悪天候下の交通視環境に関する研究調査委員会」では、濃霧による低視程条件下における LED 発光体の発光色および発光輝度と視認性の関係を把握することを目的に、国土交通省国土技術政策総合研究所と協力して濃霧条件下における光覚閾および色覚閾に関する基礎実験を行うこととした。なお、発光体は赤、黄、緑、青、白の LED を用いることとした。

#### 6.1.2 実験施設

実験は国土技術政策総合研究所の標識屋内実験施設（図 6.1-2）において実施した。本施設は道路空間の高度化研究の一環として、霧中における標識等の視認実験の実施が可能なものである。本施設では天井に設置されたノズルから噴霧された霧を実験室内に充満させることにより人工的に霧の環境を作り出すことができるものである。室内に充満した霧は自然に解消し徐々に視界が良くなっていく。この連続的に変化する環境下で供試体である LED 発光体の光度を変化させながら被験者の応答により各色の光覚閾および色覚閾を求める。霧の濃度は同室内に設置されている測定距離 10m の透過率計にて測定した。

本実験は昼間と夜間を想定して行った。昼間は実験室天井に設置された照明器具（水銀灯および白熱灯）を全点灯するとともに、供試体背面のスクリーンに後方から白熱灯による投光器で照射することにより背景輝度を作り出している。実験時の環境を表 6.1-1 に示す。路面照度および背景輝度は霧のない状態で測定したものである。また、記載した霧の粒径は装置の仕様に基づくものである。

気象視程への換算は Koschmieder の理論により、実験場内に設置した透過率計の値を基に次の関係式 (6.1-1) 式により求めた<sup>1),2),3)</sup>。

$$V = \frac{L \cdot \log \varepsilon}{\log T} \quad (6.1-1)$$

ここで V ; 視程 (m)、L ; 透過率計の距離 (10m)、T ; 透過率、ε ; 識別域値(0.05)。

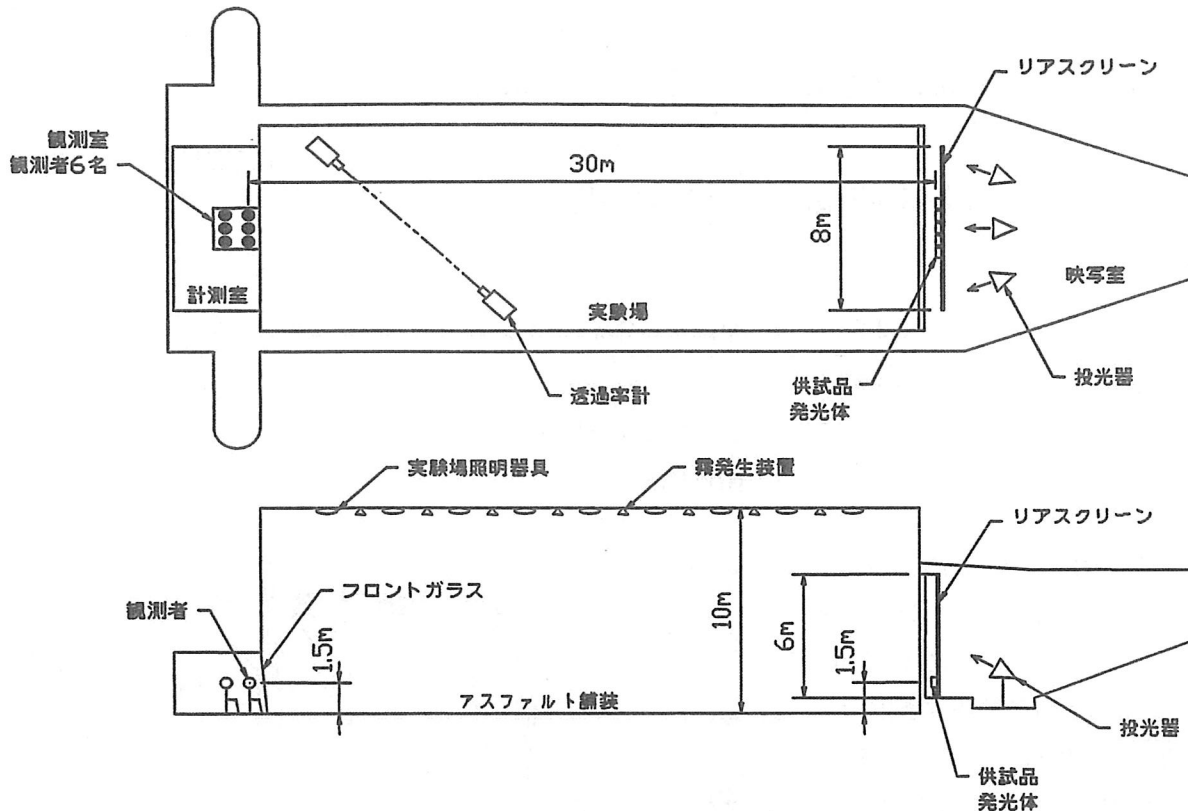


図 6.1-2 実験施設

表 6.1-1 実験環境

観測距離	30m
路面照度	昼間実験 ; 2200 lx 夜間実験 ; 0 lx
背景輝度	昼間実験 ; 49 cd/m <sup>2</sup> 夜間実験 ; 0 cd/m <sup>2</sup>
気象視程調整範囲	0m~30m
霧の平均粒径	105 μm
室温	23°C

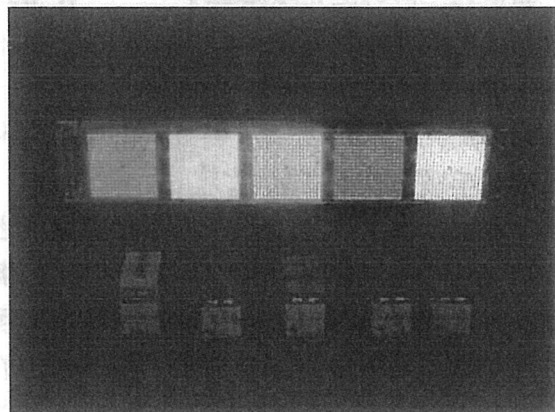


図 6.1-3 実験に使用した供試体

### 6.1.3 実験方法

実験に使用した供試体は赤、黄、緑、青、白の LED ランプを集合し縦横 150mm角のエリアに敷き詰めた (図 6.1-3)。この供試体を白色スクリーンの前に設置し、実験室内に発生させた霧を通して 30m 離れた観測室から被験者が観測した。

供試体の光度はあらかじめ暗室にて測定した。供試体の正面 5m の距離に照度計(トプコン IM-5)を設置して、供試体の点灯率を変えながら各ステップにおける照度値を記録するのである。ただし、照度計の分光感度曲線を標準比視感度曲線に完全に合致させられないため、色光測定の場合には一般的に誤差を生じる。この誤差を補正するための係数を色補正係数といい (6.1-2) 式で計算する 4)。

$$K = \frac{\int_{380}^{760} E_T(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{760} E_S(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_{380}^{760} E_S(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{760} E_T(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \quad (6.1-2)$$

- $E_S(\lambda)$  : 標準電球の分光エネルギー分布 (標準の光 A)
- $E_T(\lambda)$  : 試験光の分光エネルギー分布
- $S(\lambda)$  : 照度計の分光感度分布
- $V(\lambda)$  : 標準比視感度

実験に用いた供試体のスペクトル分布は図 6.1-4 に示すとおりであり、上式に当てはめて計算した結果各供試体の色補正係数は、赤 ; 1.054、黄 ; 1.009、緑 ; 1.010、青 ; 1.135、白 ; 1.020 であった。これらにより測定した照度値を補正し、さらに光度換算することで供試体各色について、各々の点灯率における光度値を求めた。

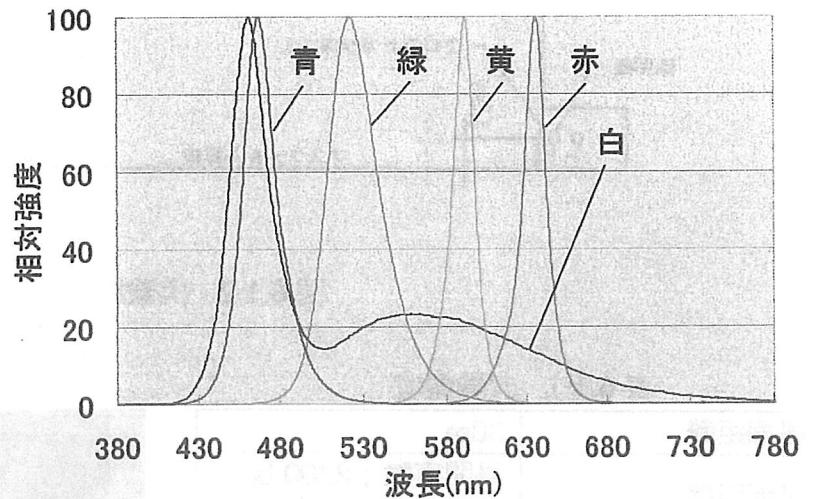


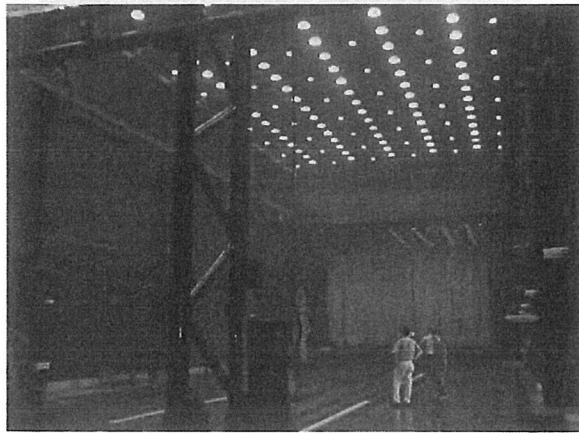
図 6.1-4 実験に使用した LED の発光スペクトル分布

実験手順を以下に記す。

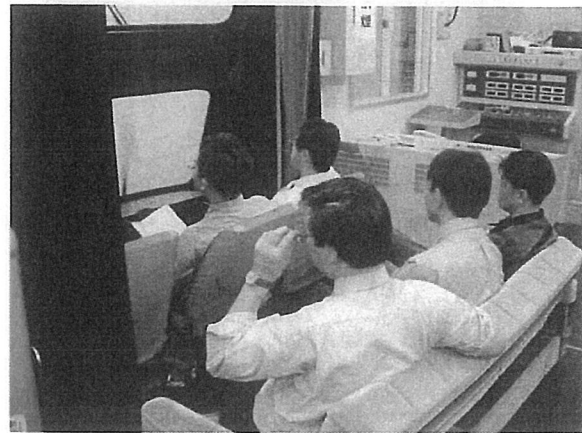
はじめに実験室内に十分な霧を発生させ、制御プログラムに基いて一つ目の供試体を消灯状態から徐々に光度を増して行く。被験者は観測室から霧を通して供試体を両眼にて観測し、発光体の存在を確認した時点で1回目のスイッチを押す。さらに光色を確認した時点で2回目のスイッチを押す。各々のスイッチが押されたときの供試体の光度と実験室内の霧の透過率が自動的に記録されるようになっている。全ての被験者の応答が終了した時点で次の色に切り替え同様に実験を進める。5色の供試体各々について同様の実験を繰り返し、これを1セッションとする。この間、実験室内の霧濃度は徐々に薄れて行き、視界が良好になった時点で再度実験室内に霧を充満させて実験を継続した。この方法により、さまざまな霧濃度下におけるデータを収集した。学習効果を防ぐために発光色の順序はランダムとした。

実験は昼間と夜間を想定して行った。実験室内はアスファルト舗装されており天井に設置された照明を全点灯させることで昼間状態（照度 2200 lx）とした。

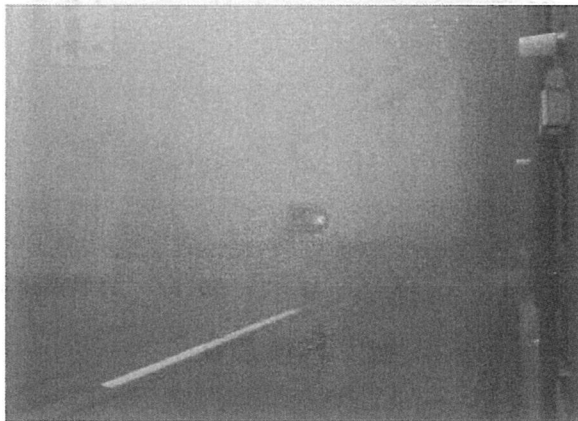
図 6.1-5 に実験風景を示す。被験者は運転席を模した座席に着席し、フロントガラス越しに発光体を観測した。本実験では、昼間、夜間それぞれ 20 セッションを実施した。被験者は色覚正常者 6 名であった。



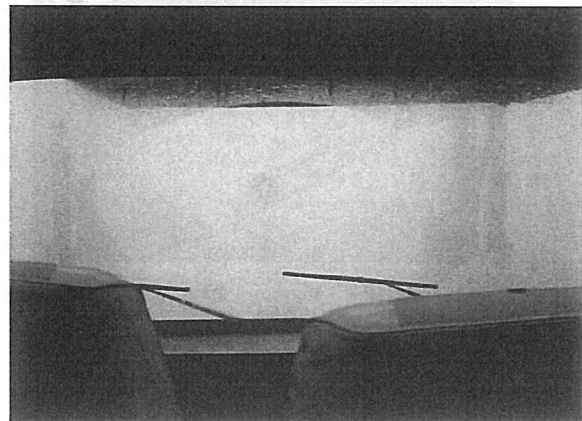
(a) 実験室内



(b) 被験者ブース



(c) 霧中点灯状況



(d) 被験者の視点

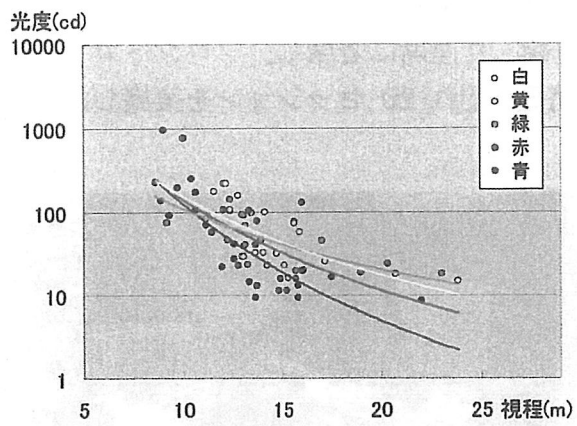
図 6.1-5 実験風景

#### 6.1.4 実験結果

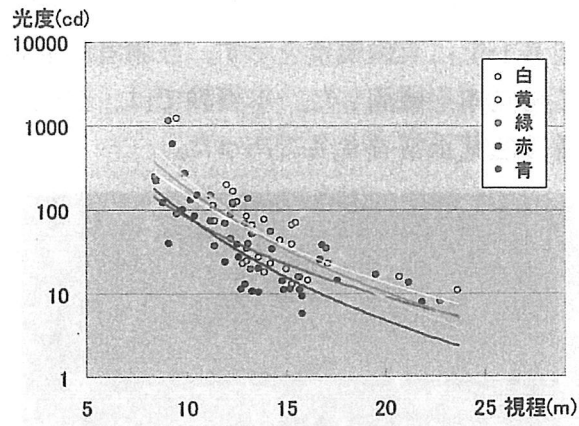
供試体までの距離は 30m で実験を行った。なお、実験時の視程であるが、透過率計の測定データを基に視程に換算した結果 5m~30m 相当であった。この霧状況下では不点灯状態の発光体は視認不能レベルであり、視覚特性はこのような状況下における結果である。

この霧中条件下における光覚閾と色覚閾の測定結果を図 6.1.6~6.1.9 に示す。各々のグラフは縦軸に供試体の光度を、横軸に霧の視程を表している。

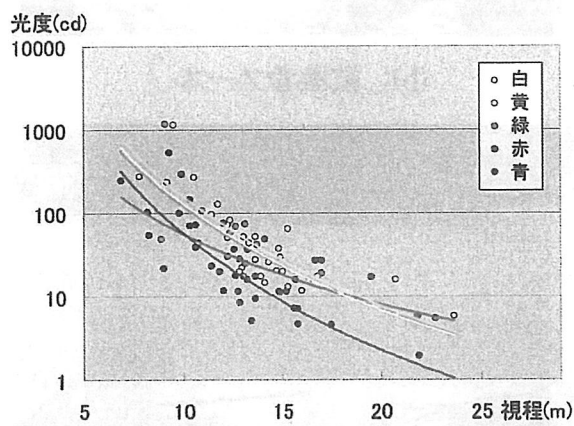
図 6.1-6 は昼間実験における発光色による視程と光覚閾の特性を被験者ごとに示したものであり、図 6.1-7 は夜間実験の結果である。また、図 6.1-8 は昼間実験における視程と色覚閾の特性を示したものであり、図 6.1-9 は夜間実験の結果である。視程を完全に均一にコントロールすることは困難であり、収集されたデータにばらつきが見られるが、発光色により閾値に差がある様子が伺える。



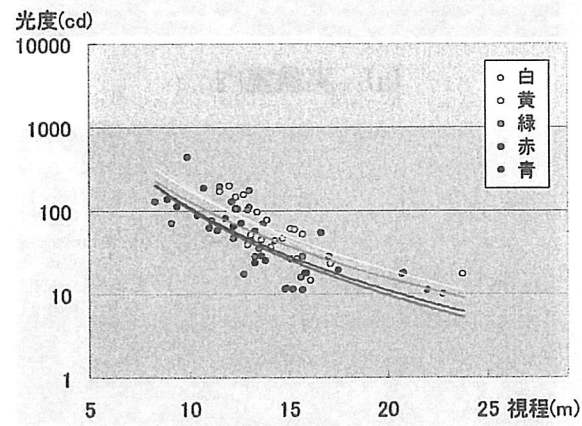
(a) 被験者 A



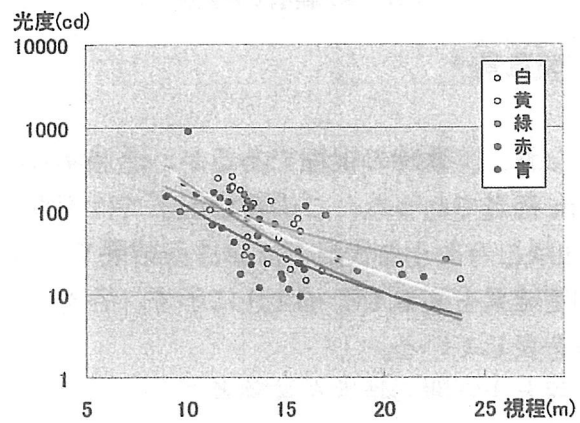
(b) 被験者 B



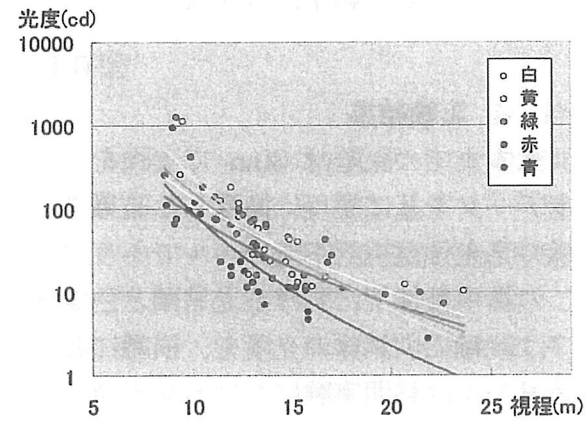
(c) 被験者 C



(d) 被験者 D

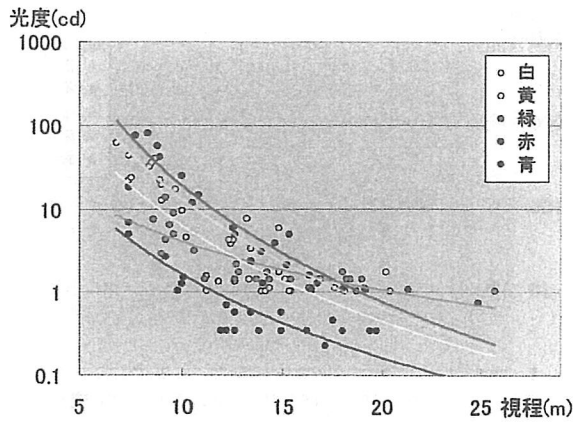


(e) 被験者 E

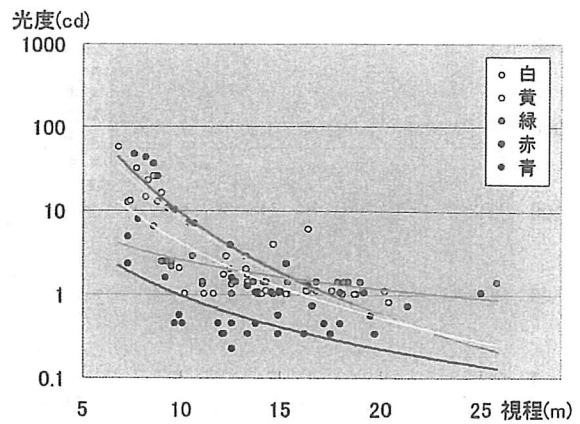


(f) 被験者 F

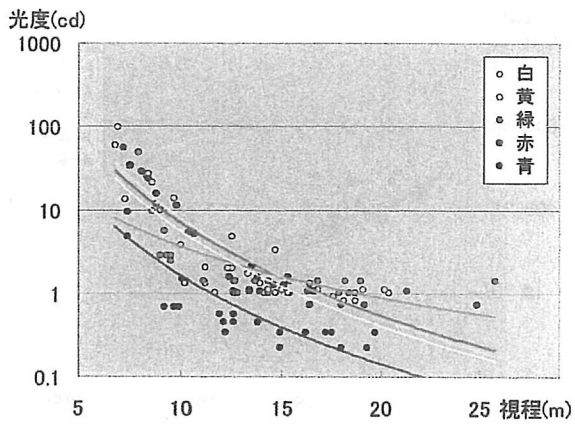
図 6.1-6 発光色による視程／光覚閾特性（昼間実験）



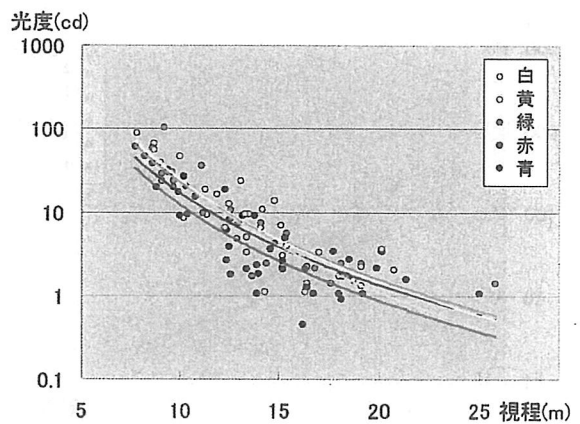
(a) 被験者 A



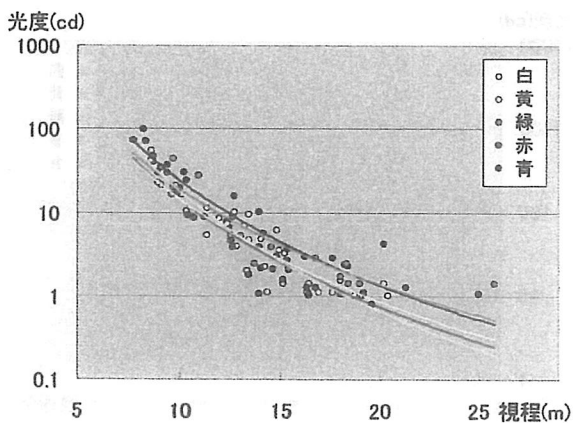
(b) 被験者 B



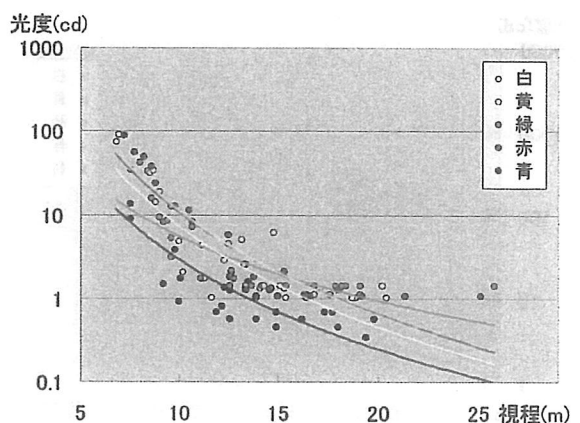
(c) 被験者 C



(d) 被験者 D

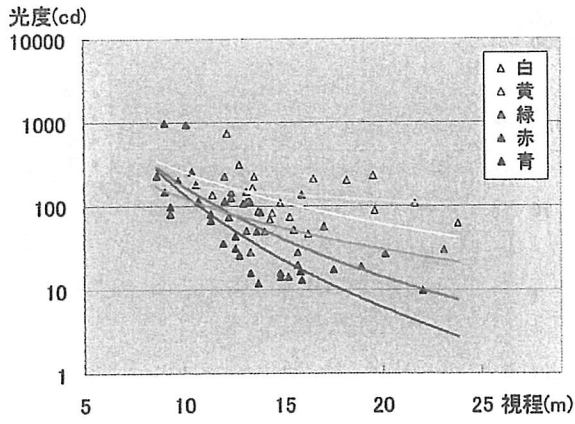


(e) 被験者 E

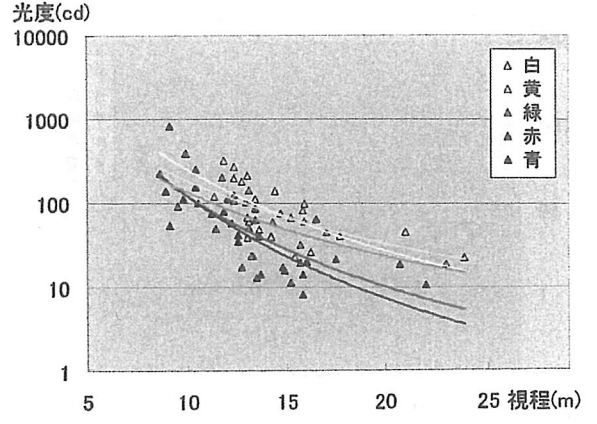


(f) 被験者 F

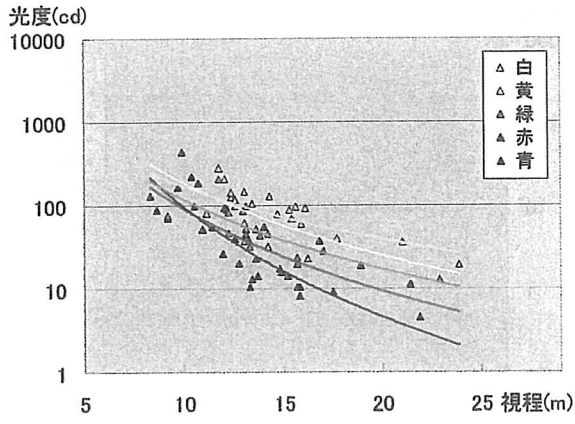
図 6.1-7 発光色による視程／光覚閾特性（夜間実験）



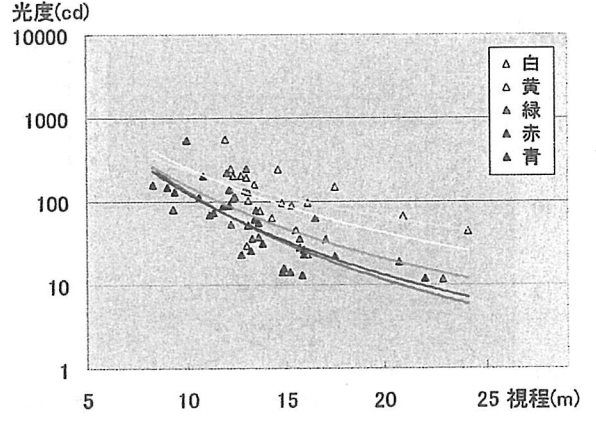
(a) 被験者 A



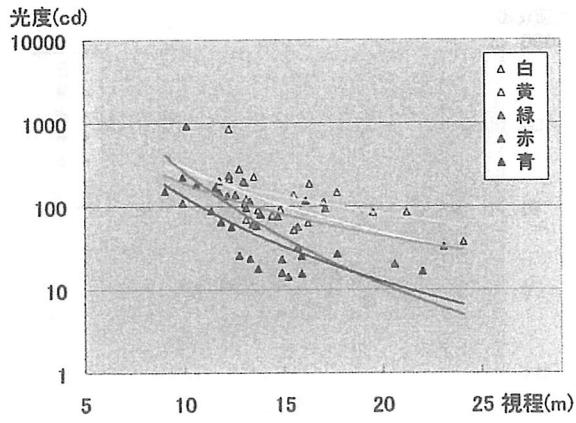
(b) 被験者 B



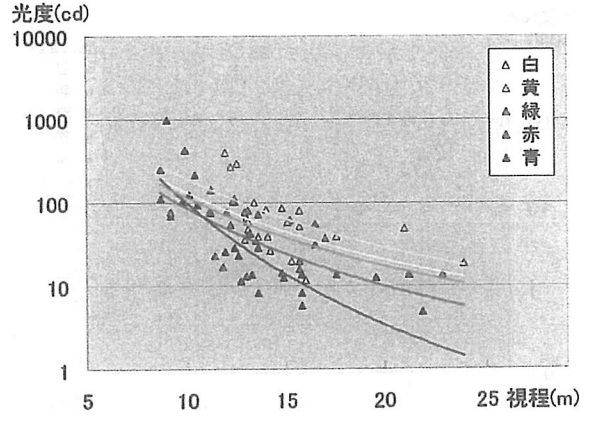
(c) 被験者 C



(d) 被験者 D

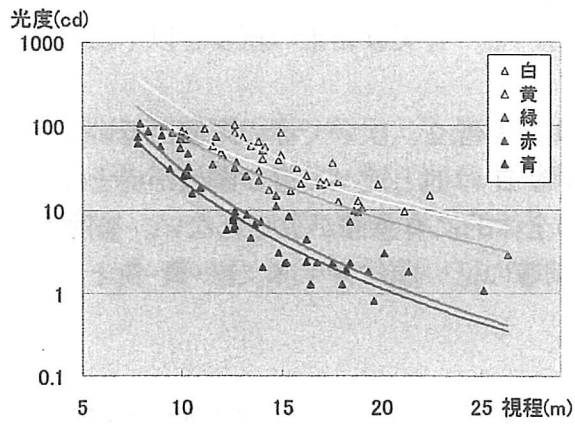


(e) 被験者 E

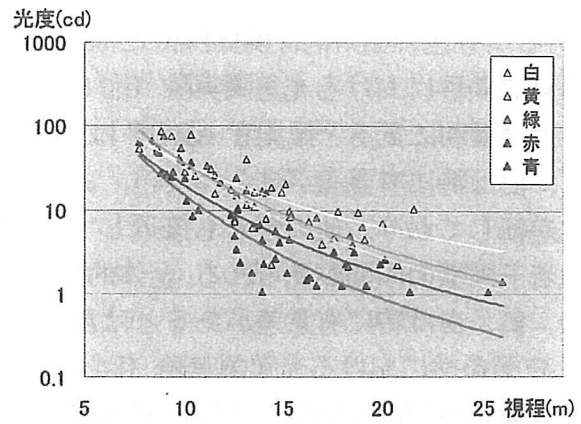


(f) 被験者 F

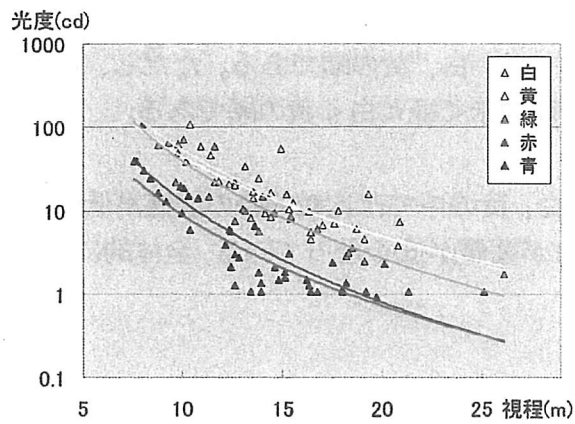
図 6.1-8 発光色による視程/色覚閾特性 (昼間実験)



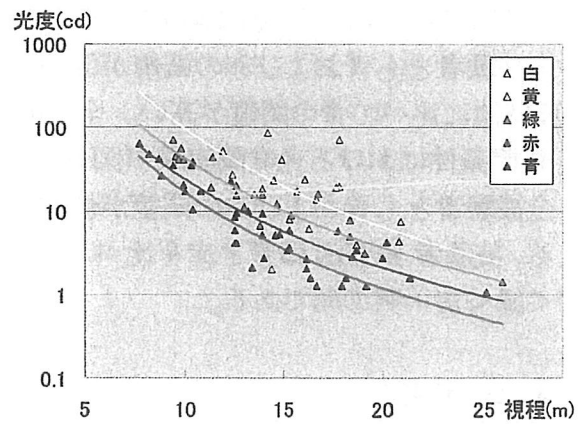
(a) 被験者 A



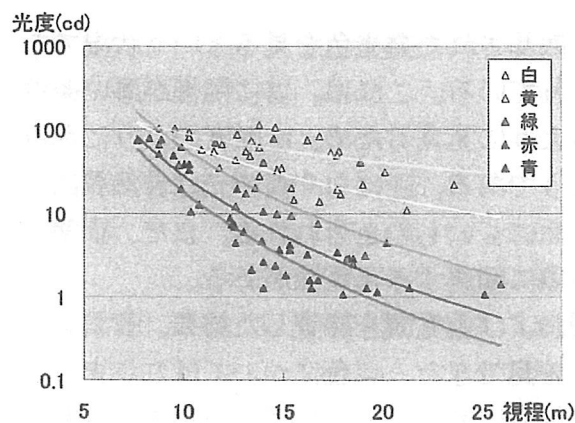
(b) 被験者 B



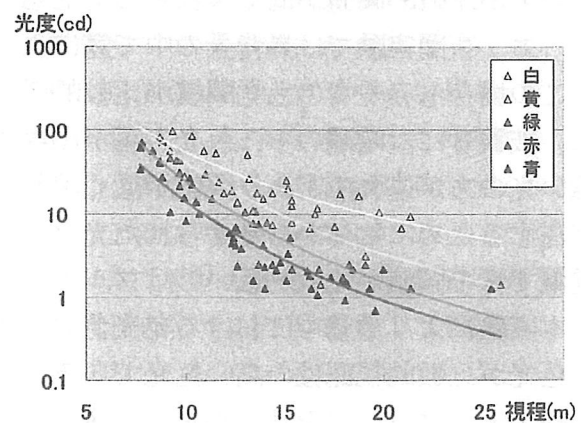
(c) 被験者 C



(d) 被験者 D



(e) 被験者 E



(f) 被験者 F

図 6.1-9 発光色による視程/色覚閾特性 (夜間実験)

これらのグラフから、視距離 30m の発光体を視程 5m~30m の濃霧中で観測した結果、発光色により光覚閾および色覚閾に差があることが確認された。閾値の絶対値には個人差があるが各色の相対的な関係は似た傾向を示している。各実験結果の概要を以下に示す。

#### (1) 昼間条件における光覚閾実験 (図 6.1-6)

被験者別に見ると観測者 ABCF は青の閾値が最も低く、次いで赤の閾値が低い。緑、黄、白は特に有意差が見られない。また、被験者 D は他と比べて青の閾値が赤と同等又は逆転しており、他の色とも接近しているため全体的に有意差が見られない。被験者 E も若干同様の傾向が見られる。全体的に見ると閾値の低い順に青<赤<緑・黄・白となる。緑、黄、白は特に有意差があるとは言えない。

#### (2) 夜間条件における光覚閾実験 (図 6.1-7)

被験者 ABCF は明らかに青の閾値が低い。他の色の中では白が比較的閾値が低いが本実験だけでは有意差があるとは言いきれない。被験者 DE は共に青の感度が悪く、色による閾値の有意差が見られない。全体的には、青<白・緑・黄・赤の順である。ただし、青は個人差が大きいと言える。

#### (3) 昼間条件における色覚閾実験 (図 6.1-8)

全被験者とも青および赤の閾値が低い。次いで緑、白、黄の順である。ただし、被験者 DE は他に比べて青の閾値が高い。全体的には青<赤<緑<白<黄の順である。

#### (4) 夜間条件における色覚閾実験 (図 6.1-9)

全被験者とも青および赤の閾値が低い。緑、白、黄の中では比較的緑の閾値が低いと言える。被験者 BCDE は青と赤を比べると赤の方が閾値が低くなっている。全体的には赤・青<緑<白・黄の順である。

### 6.1.5 考察

昼間実験では、光覚閾、色覚閾とも青および赤の閾値が比較的低いという結果が得られた。昼間実験の場合は照明光が霧で散乱するため、被験者には白(灰)色背景の中に輪郭が不明確な発光色が浮かび上がってくるように見える。このため、白(灰)色と色差が大きい色が比較的閾値が低く現れるのであろう。

一方、夜間実験では黒背景の中で霧によって散乱された発光色を見るという状況であるがこの場合も赤や青の色覚閾値が比較的低く現れている。これは、特に視程が悪い条件では、被験者には暗闇の中に色光の幕が出現するように見えるため、赤や青のように色みの強い光の方が違和感があり閾値が低く現れるようである。逆に白や黄の光は自然界に多く存在するために物体から発せられた光として捉えにくいものと思われる。また、夜間の光覚閾で青の閾値が比較的低いのはプルキンエ現象に関連する可能性がある。

本実験により濃霧中における発光色の光覚閾および色覚閾を調査した結果、青および赤の色光が比較的視認性の高い色光であることが確認できた。赤色についてはこれまでも車両のストップランプをはじめとして多くの危険信号に使われているが、我が国では青色に関する応用例はまだ少ない。これまでは青色光源は比較的効率が悪く暗かったために実用化されてこなかったが、青色の超高輝度 LED が実用化されたことによってこれらの制約がなくなり、今後は積極的に青色光を用いた応用を考えることが可能となってきた。

### 6.1.6 まとめ

これまで実フィールド霧発生状況下で各種実験が実施されているが、必要な霧の環境に遭遇することが困難でかつ再現性に乏しいために多大な労力を費やすことが多かった。今回の実験では国土技術政策総合研究所の標識屋内実験施設を利用することにより、比較的安定した環境でデータを採取することができた。実験結果として視程 5m~30m 程度の霧の環境下における LED 発光体の視認特性として、青色光の閾値が比較的低いことが確認され、霧中における交通安全関連施設としての新たな応用も示唆された。

本実験は照明学会「悪天候下の交通視環境に関する研究調査委員会」における共同研究として実施されたもので、委員各位ならびに国土交通省国土技術政策総合研究所の多大なご協力に感謝の意を表します。

## 6.2 濃霧中における視認特性—粒子直径の差による影響の定量化

### 6.2.1 研究の背景と目的

前項「5.1.2 霧中における色光の見え方実験」において、霧の中での光源色の見え方（明るさの知覚）に関する定量的評価について述べた。しかしながら、この実験においては霧の粒子直径は $10\mu\text{m}$ 一定として実験を行っている。一方、「第4章 雨・雪・霧の実態調査と各種理論」の項でも詳しく述べられているように、自然界においては発現の機構によって様々な種類の霧が発生し、また霧粒の大きさも当然のことながら一様ではない。

濃霧中における視認特性に関する研究についてはいくつかの報告がなされていることはすでに述べたが、一方で、霧の粒子直径の違いによる見え方への影響について言及した研究は極めて少ないのが現状である。しかし実際の応用面への適応を考慮すると、霧の粒子直径の違いによる見え方への影響についての基礎的データは極めて重要な意味を持つと考えられる。

そこで本研究では、霧の粒子直径の違いによる濃霧中での見え方への影響について、ランドルト環を用いて定量的に測定することをその目的とした。

### 6.2.2 実験方法

実験装置については、5.1.2 項「霧中における色光の見え方実験」と同様であり、ここでは省略する。以下に、本実験と異なる点についてのみ述べる。

まず、被験者が観測するCRT上の刺激パターンについて変更を加えた。そのモニター画面を図6.2-1に示す。黒色背景上に、R色相のランドルト環を呈示した。通常ランドルト環は、白色背景上に黒色で呈示されるが、本実験では色相による見え方への影響の差も明らかにするため、この手法を用いた。用いた色相は12種類であり、これについては5.1.2項と同様である。

被験者の手元にはスイッチが設置されており、これによりモニター上のランドルト環の大きさを自由に変化させることができる。同様に、大きさを一定にしたまま、切れ目の向きだけをランダムに変化させることも可能となっている。

実験手順を以下に示す。まず被験者は、霧の無い状態でランドルト環の大きさを手元のスイッチにより任意に変化させ、切り欠きの方向が視認できる最小の大きさを測定する。次に、噴霧装置によりケース内部に十分な濃度の霧を発生させる。この時被験者は、ケー

ス内部に発生された霧を通してCRTモニター画面を観測している。透過率が22%及び11%の霧の濃度となった時点で、被験者は手元のスイッチを操作し、霧の無いときに測定したのと同様に最小のランドルト環の大きさを測定する。

これら一連の測定を12色の色相及び4段階の粒子直径条件下にて行う。

霧の粒子直径としては、実際に自然界に発生する霧の大きさの分類を参考に、 $10\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の4段階を採用した。被験者は色覚正常者4名であり、いずれも20代前半の男子学生である。測定は各被験者5回行い、その平均値を評価値とした。また、実験は全て暗室にて行った。従って、夜間における交通視環境に対応したものと見なすことができる。

### 6.2.3 実験結果

結果の一例を図6.2-2に示す。透過率22%における測定結果である。横軸には色相(Hue)を、縦軸には視角(Visual Angle)をとる直交座標上に、全被験者平均をプロットしたものである。またパラメータには霧の粒子直径をとっている。

結果によれば、霧の粒子直径が小さい場合、すなわち $10\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ の条件下においては、Y、RY、YR色相の視角が全体として小さく、他の色と比較して濃霧中での識別

(可読)が容易になる傾向を示した。反対に、この視角はB成分を含む色相で大きくなっており、これらの色相の濃霧中での識別性(可読性)低下も明らかとなった。

なお、霧の粒子直径が $50\mu\text{m}$ 以上においても前述のY、RY、YR色相の識別性が高いという傾向ははっきりと示されているが、一方で、 $50\mu\text{m}$ 及び $100\mu\text{m}$ の実験結果はほぼ近似した値を示した。このことは、霧の粒子直径が $50\mu\text{m}$ 以上においては、粒子直径の変化による識別性への影響はあまり無いことを示唆していると言える。

一方、透過率11%、すなわち最も霧の濃い条件下での測定結果を図6.2-3に示す。

結果より、 $10\mu\text{m}$ の粒子直径下では、前述の傾向がはっきりと示されている。一方で粒子直径が $30\mu\text{m}$ 以上ではその傾向は崩れ、さらに被験者毎のばらつきも大きくなることが明

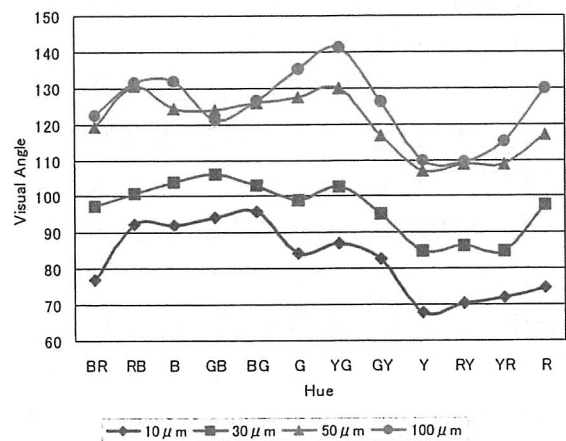


図 6.2-2 色相と視角特性、但し透過率 22%の場合

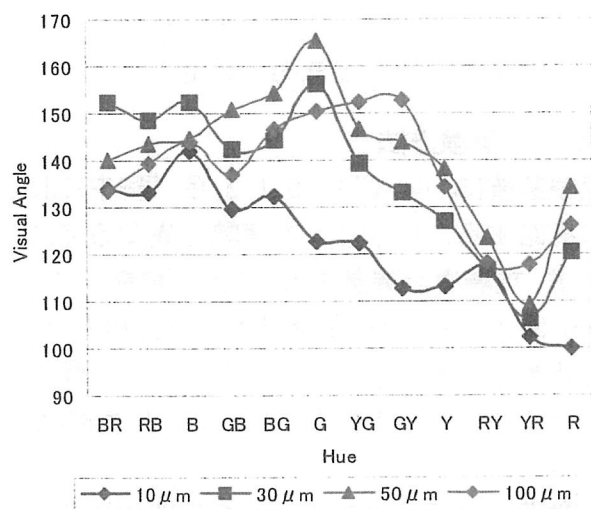


図 6.2-3 図 2 と同じ、但し透過率 11%の場合

らかとなった。これは、本実験のランドルト環を用いた手法では、ある程度ランドルト環が大きくなると対象がはっきり見えていなくてもだいたいの切り欠きの方向が分かってしまうため、色相による影響を取り出せなくなったものと考えられる。従って、これらの観測条件下（霧濃度：透過率で11%、粒子直径：30 $\mu$ m以上）での色相による見え方の違いについては、また別の方法を検討する必要があると言える。

#### 6.2.4 考察

本研究結果より、濃霧中においてはY、RY、YR色相の視角が小さく、濃霧中での識別・可読が容易である事が明らかとなった。また霧の濃度が一定であれば、粒子直径が大きいほどこの識別性は低下しやすいこと、一方で、その現象は粒子直径50 $\mu$ mより大きくなると出現しないことも明らかとなった。

ところで、本実験では観測すべき対象としてランドルト環を用いた、特に色相による影響を調査すべく、背景の色については黒色としている。しかし、実際の交通視環境では、霧の中では光の散乱が発生するため（光幕現象）、背景色の条件が本実験とは異なってくる。従って、霧に光を投射し擬似的に光幕現象を発生させた条件下での同様の測定、あるいは背景色を白色とした場合の条件下での測定が必要になってくるものと思われる。

#### < 第6章 参考文献 >

- 1) 満田 他；霧中用視線誘導灯の視認性，建設省土木研究所土木技術資料 27-12，P.38，1985
- 2) (社)照明学会；ライティングハンドブック[交通照]，P.487，1987
- 3) 松本 他；霧中における後部灯火の視認性について，交通安全公害研究所報告 第3号，P.13,1975-3
- 4) 株式会社トプコン；照度計に関する技術資料

## 第7章 悪天候下での視覚情報提供・交通視環境改善事例の紹介

本章では悪天候下での視覚情報提供並びに交通視環境改善事例を道路施設改善、車載照明機器の改善、そしてIT活用事例について概説する。

### 7.1 道路施設の各種改善（設置事例）

道路施設を、視覚情報の伝達手段から①道路照明施設、②誘導システム、③道路情報板の三つに分類して報告することとした。道路照明施設は視対象物を照明することにより視認性を確保するもの、誘導システムは信号や光パターンによって視覚情報を伝達するもの、道路情報板は図形や文字によって視覚情報を伝達するものである。

#### 7.1.1 道路照明施設

道路照明施設は交通安全施設の一つであり、特に雨天時に事故防止効果が大いと言われている。雨天時に路面が濡れると水膜により鏡面反射の状態となるため、自動車の前照灯から放射された光は前方に反射されてしまい、運転者の方向に反射されない。これに対して、道路照明施設、中でも一般的なポール照明施設の場合は、ポール直下から手前(運転者側)の路面に放射された光(の一部)は運転者の方向に反射されるため、雨天時においても一定の視認性を得ることができる。

霧対策としても一般的なポール照明施設が設置される。東名高速道路の大井松田インターチェンジ(I.C.)～御殿場 I.C.には、ポール照明施設による連続照明が設置されているが、これはこの区間において霧の発生が多いことを考慮して設置されたものである。

##### (1) 関越道・沼田地区の路上照明灯<sup>1)</sup>

関越自動車道の渋川伊香保 I.C.～沼田 I.C.には、霧対策としての路上照明灯が設置されている。これは沼田地区において、梅雨期および秋雨期に濃霧が多く発生することから、霧発生時の対策として設置されたものである。

霧中においては、自動車の前照灯から放射された光が霧によって散乱され、いわゆる光幕現象が発生する。霧中での輝度対比は次式で表わされる。

$$C = C_0 \times L_0 / (L_0 + L_s)$$

但し、Cは霧中での輝度対比、 $C_0$ は清浄大気中での輝度対比、 $L_0$ は視対象物の輝度、 $L_s$ は運転者と視対象物との間の空間で発生する光幕輝度である。

霧中においては光幕が発生することにより、清浄大気中に比べて輝度対比が低下することは避けられない。しかし、光幕輝度を抑制することにより、輝度対比を改善できる可能性はある。本路上照明灯は、側方から照明すると光幕の発生が少ないことを利用したものである。図7.1-1に路上照明灯の配置図を示す。

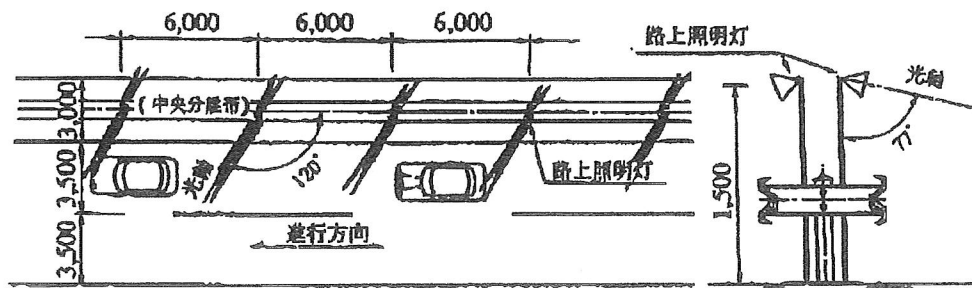


図 7.1-1 路上照明灯の配置図

灯具高さは1.5m、灯具間隔は6mで、光軸は水平方向120°、鉛直方向77°で中央分離帯に設定され、光源は250Wのハロゲンランプである。

路上照明灯の効果は視認距離、運転者へのアンケート調査、実勢速度によって検証された。路上照明灯の設置により視認距離が約30m長くなり、運転者の81%が走りやすくなったと回答し、実勢速度が63km/hから75~80km/hに上昇した。なお、実勢速度の上昇が重大事故につながる恐れがあるため、適正速度に抑制するための対策が必要と考察されている。

### 7.1.2 誘導システム

誘導システムには、いわゆる「視線誘導標」を自発光式とし、視程計等と連動して点灯させるものと、道路線形表示・対向車警戒といった運転に関わる情報を一定のルール(光色、輝度、点滅パターン)で点灯させることにより、運転者に伝える「ガイドライトシステム」がある。

#### (1) 札幌市の視程障害対策システム<sup>2)</sup>

札幌市の主要道である札幌当別線は、冬期に石狩湾低気圧の影響で北西からの風が吹き込み、西側に障害物のない平坦な地形から、吹雪が頻繁に発生し、視程障害による通行止めが年に数回発生している。

そこで、視程計により視界の状況を把握し、自発光式デリニエータで吹雪時の視線誘導を行なうとともに、現地の状況を遠方から監視するITVカメラ、現地の情報を適切に運転

者に伝える道路情報板を設置した(2001年度整備)。現地の吹雪状況を図7.1-2に示す。

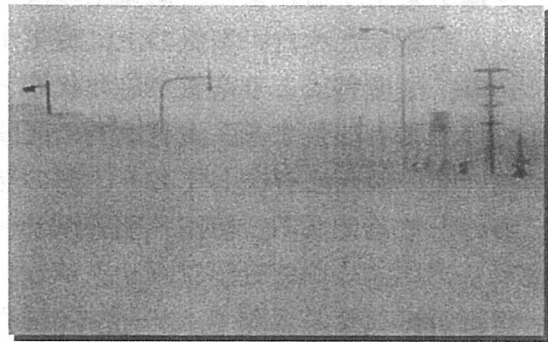


図 7.1-2 現地の吹雪状況

#### (2) 青森県の道路線形視認システム<sup>3)</sup>

国道7号線は、青森県内陸部を南北に縦貫する主要幹線道路である。当該箇所は、青森市と浪岡町境の峠部にあり、2~4%の下り勾配、曲率半径300mのカーブ区間である。冬期には最大積雪深150cm前後となる地域であり、降雪日数も多く、路面凍結・圧雪等の影響により、冬期には事故が発生しやすい区間となっている。そこで、レーザー光線を用いた視線誘導装置が設置された。レーザー光線は、指向性に優れているため、低出力で高輝度な点表示を行なうには最適である。本システムではこの点表示を前後に振ることにより、“光の壁”を発生させるものである。レーザー光の発生状況を図7.1-3に示す。



図 7.1-3 レーザー光の発生状況

レーザー光の発生状況を図7.1-3に示す。

(3) 青森県の地吹雪対策視線誘導システム<sup>4)</sup>

青森県の国道4号線、青森東バイパス 新野内川橋～貴船川橋の約1km間において、約40mピッチで中央分離帯に視線誘導灯を設置し、視程計、降雪計、自動調光装置との連動により、点灯制御するシステムである。光源には約4万時間の平均寿命を有する無電極蛍光ランプが採用された。図7.1-4に地吹雪対策システムの設置状況を示す。

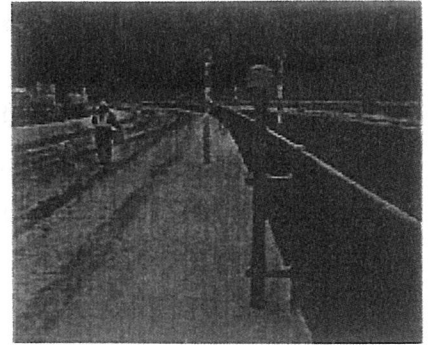


図 7.1-4 地吹雪対策システム

(4) 大分県の霧対策視線誘導灯

大分自動車道の別府地区では、別府湾の湿った空気が山の斜面をはい上がって冷やされ、空気中の水分が飽和状態に達して滑昇霧が発生する。また、低気圧の接近に伴い、滞留した冷たい空気の上に暖気が流れ込み、温度差により空気が飽和状態となって移流霧も発生する。大分県内の区間は標高の高い場所に存在しており、霧の発生が多いところである。特に、別府湾サービスエリア(S.A.)から日出ジャンクション間は濃霧が多発する区間で、30m先や50m先が見えないような視界状態がたびたび発生する。濃霧は年間を通じて発生するが、冬には少なく夏(特に梅雨時期)に最も多い。濃霧による通行止め回数は多い年には約30回に及ぶ。そこで、視線誘導灯が連続して設置され、濃霧内での走行を支援している。今までは白熱電球を用いた視線誘導灯が設置されていたが、霧中での視認性向上、省エネルギー等を考慮して高輝度タイプの発光ダイオード(LED)式誘導灯に改修中である。図7.1-5に別府湾サービスエリア(S.A.)に設置された視線誘導灯を示す。



図 7.1-5 別府湾 S.A.の視線誘導灯



図 7.1-6 スノーポール

(5) 北海道のスノーポール

自発光式視線誘導標の中、地吹雪等の雪氷対策として設置されるもので「スノーポール」と呼ばれている。図7.1-6は北海道に設置されているスノーポールであり、光源には緑色のLEDが採用されている。

(6) 北海道の自発光式矢羽根

積雪時に側帯が見えにくい状態において、側帯上の空間に設置した矢羽根によって車道幅員を知ることができる。自発光式矢羽根は矢羽根にLED等の光源を設置することによって夜間や吹雪時の視認性の向上を図ったものである。図7.1-7は北海道における自発光式矢羽根の施設例である。



図 7.1-7 自発光式矢羽根

## (7) ガイドライトシステム

ガイドライトシステムは、建設省・土木研究所(当時)が、(財)道路新産業開発機構との共同研究により開発したものであり、同機構傘下の開発ワーキングにはメーカー8社も参加した。

ガイドライトシステムは、発光体を道路軸方向に一定間隔で設置し、車両の走行に応じて点滅制御することにより、「道路線形表示」、「対向車警戒」等の機能を持たせたシステムである。システム構成図(例)を図7.1-8に示す<sup>5)</sup>。

調査した範囲内では、以下の施設例がある。

- 宮崎県の国道10号線(東臼杵郡北側町)<sup>5)</sup>
- 静岡県(三島市山中新田及び市山新田)<sup>5)</sup>
- 愛媛県の国道33号線(松山市久谷町)<sup>6)</sup>
- 岩手県の国道45号線(釜石市両石地内)<sup>7)</sup>
- 高知県の国道56号線(佐賀町市ノ瀬)<sup>7)</sup>

これらは、特に悪天候への対策を意図したものではないが、悪天候下においても視環境の改善効果が期待できるシステムである。

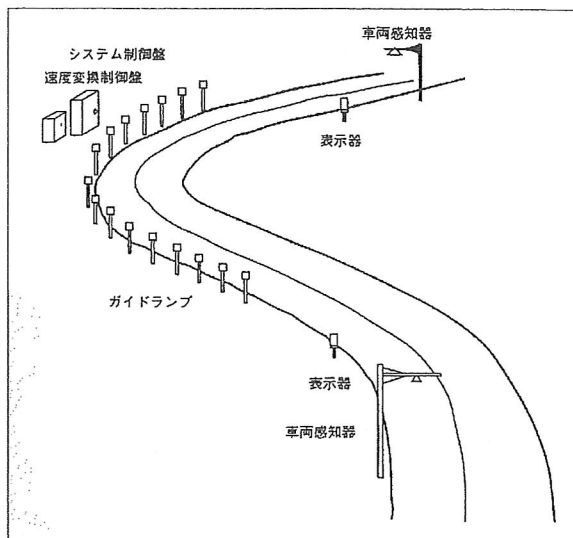


図7.1-8 システム構成図(例)

### 7.1.3 道路情報板

道路情報板は、冒頭でふれたとおり、図形や文字によって視覚情報を伝達するシステムであり、7.1.2項で述べた誘導システムにも採用されている。雨・霧・吹雪といった悪天候時にも視認性が高い道路情報板が望まれているが、今回調査した範囲では、悪天候を対象として情報板の視認性を改善した事例は見当たらなかった。しかし、道路情報板についてもLEDを用いたフルカラー化が進められており、多色化、指向性改善等によって視認性の向上が図られている。

## 7.2 車載照明機器類による交通視覚情報提供の改善

悪天候は地域による特徴はあるが、あらゆる場所で発生することから道路施設側で対応するには限界がある。そこで車載照明機器類を改善し、対応しようとする動きがある。本節ではそれらの代表例として下記を概説すると共に道路照明施設への期待を述べる。

- AFS (Adaptive Front Lighting System) 環境対応型ヘッドランプ
- 暗視システム
- 道路施設並びに道路照明施設への期待

### 7.2.1 AFS環境対応型ヘッドランプ

現状のヘッドランプは上向き(ハイ)ビームと下向き(ロー)ビームの2種類からなるが、必ずしも悪天候下などで走行しやすいビームであるとは言えない。そこで現在、国連で各種走行環境に個別に対応すべく配光の規格化を進めている。それらのビームを下記に示す。

- AFS Class C Beam ; すれ違いビームである。
- AFS Class E Beam ; 防眩柵などがある高速道路で使用するビームである。
- AFS Class V Beam ; 市街地走行用ビームであり対向車へ与えるグレアを抑制。
- AFS Class W Beam ; 雨天などの濡れた路面で使用するビームである。

AFS Class W Beam は雨天時の濡れた路面環境下で①近側方におけるレーンマークの視認性の向上、②遠方の視対象物の視認性、③対向車へ与える路面反射グレアの低減を目的に、現状のロービームの改良を目指したビームである。

ここでは②の遠方視対象物の視認性の例を図7.2-1に示す。

上段の写真は現状のロービームであり、下段はAFS W Beamである。

現状のロービームに対して遠方の照明光度を約2倍程度に高め、遠方の障害物などの視認性を高めている。

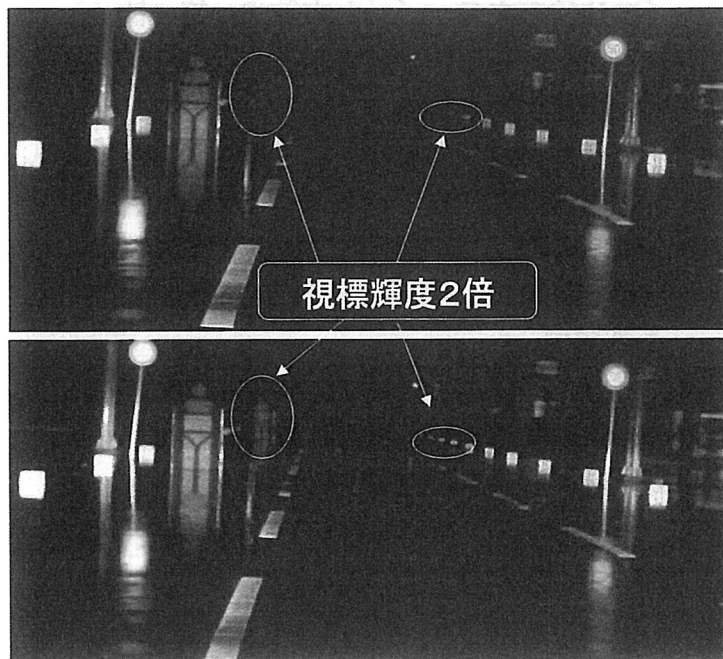


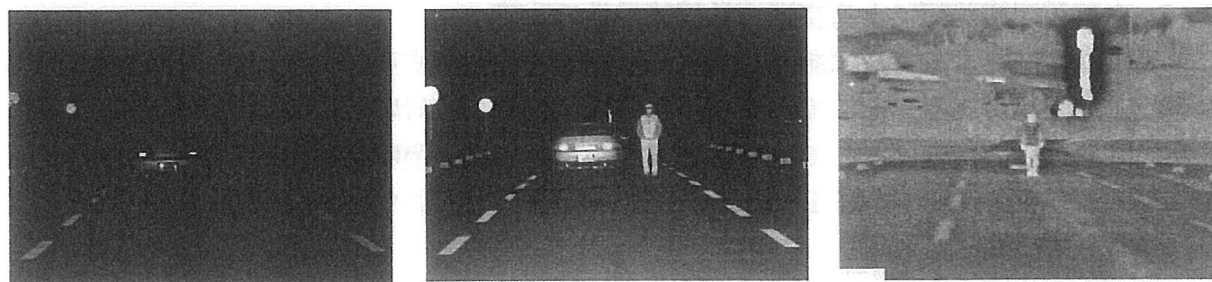
図7.2-1 現状ロービーム(上段)とAFS(下段)の比較

### 7.2.2 暗視システム

現状のロービームは対向車へのグレア抑制の観点から上方光をカットしているため、ハイビームに対して遠方の視対象物の視認性が劣る。この対応としてロービームで得られる視界を補助する暗視システムが実用化されている。暗視システムには下記の2方式がある。

- 近赤外照明器+近赤外線CCDカメラ方式; 近赤外照明器(IRランプ)で照明し、その映像を近赤外線CCDカメラで捉える方式である。
- 遠赤外線カメラ方式; 遠赤外線カメラで遠方映像を捉える方式である。

実写した現状ロービーム映像、近赤外映像、遠赤外映像を図7.2-2に示す。



(a) ロービーム映像

(b) 近赤外方式

(c) 遠赤外方式

図7.2-2 現状ロービーム映像、近赤外映像、遠赤外映像の比較

暗視システムは人間の眼には見えない映像を可視化するため、専用の表示装置が必要である。この表示装置としてはヘッドアップディスプレイ (HUD) 装置が一般的であり、この装置は撮像した映像をフロントウインドシールドに投影させてドライバーに提示するようにしている。これを図 7.2-3 に示す。

なお、近赤外線方式は夜間や雨天時の夜間に有効であり、遠赤外線方式は熱線検知方式であるため濃霧や降雪時にも人体等の発熱源を検知するのに有効であると言われている

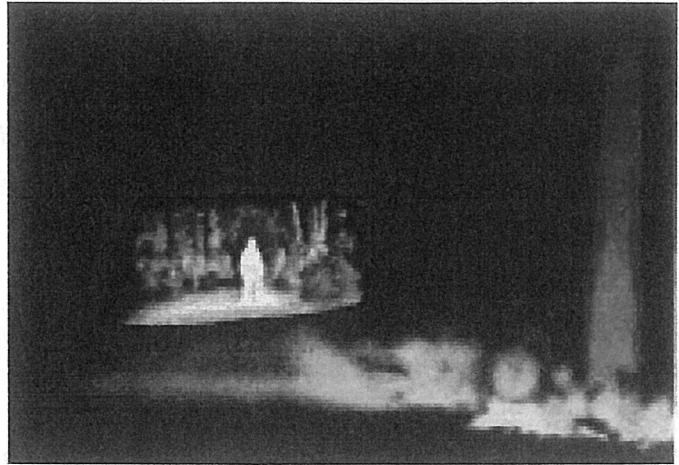


図 7.2-3 HUD 表示例

### 7.2.3 道路施設並びに道路照明施設への期待

2.1 節の「道路構造と交通視環境」に記したが、道路の上下方向の起伏は対向車へのグレア増加の原因ともなる。また雨天時には道路照明やネオンサインが路面に写り込み路上障害物の認知上の障害ともなる。排水性舗装の拡充並びに道路照明施設の改善が望まれる。

本項では雨天下でも路面照射性能に優れた道路照明施設を紹介する。

図 7.2-4 は熱海の熱函道ブリッジの高欄照明である。本道路照明設備は約 2 m の高さの高欄に蛍光灯を配設している。この方式では、対向車が存在する状況下でも路上障害物やレーンマークが明瞭に確認でき優れた照明方式であると言える。



(a) 対向車無し



(b) 対向車有り

図 7.2-4 熱函道ブリッジの高欄照明

## 7.3 ITS（高度道路交通システム）技術等による視程障害対策

### 7.3.1 背景と目的

高速道路の通行止めは平成9年から平成11年の3ヵ年平均で年間約27,000時間（区間・方向）も発生している。図7.3-1は通行止め時間を要因別に整理したものであるが、全体の65%は気象が原因となっており、さらに、その約半分を降雪や霧の発生による視程障害が占めている。

日本道路公団では、霧による視程障害対策として、これまでに路上照明、視線誘導灯、防霧ネットの設置などインフラ整備の他、ITS（Intelligent Transport System；高度道路交通システム）技術を用いた管理用車両の走行支援に関する検討を行っている。しかし、路上照明は夜間の霧に対する視程改善効果は確認されているが、それ以外の際に発生する霧に対しては有効とはいえない。視線誘導灯は前方の道路線形を明確にする効果があるが、視程それ自体が改善されず、前方の障害物の検知能力が向上するわけではない。以上、2つの対策とも一長一短がある。

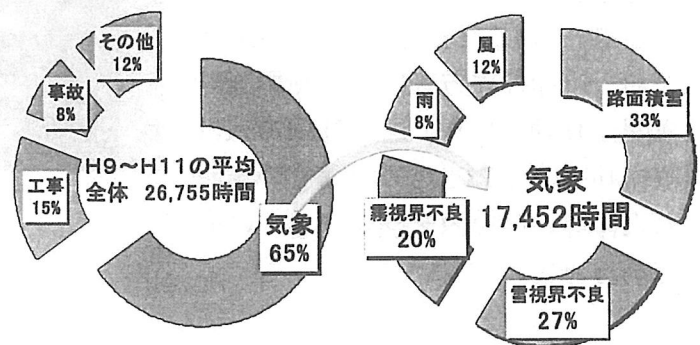


図 7.3-1 通行止めの内訳 (H9~H11)

本報では最近、視程障害対策として現地の高速道路で実施されたITS技術を用いた走行支援システムについて述べる（7.1.2項(4)の大分自動車道の別府地区）。

### 7.3.2 ITS技術を用いた走行支援システム

#### (1) 視程障害時走行支援システム

一部の霧多発路線においては管理用車両（以下「特別巡回車両」）による特別巡回を実施している（図7.3-2）。これは、霧発生時に一般通行車両の走行速度を抑制し均一化させることを目的に、警告を与えながら巡回を行うものである<sup>8)</sup>。しかしこの特別巡回は、視程が著しく低下した中で、一般車両を追従させた状況下で走行しているにも関わらず、前方の安全確認は人間の視覚に頼るしかない状況となっている。このため、特別巡回車両のドライバーには多大な負担を強いているのが現状である。



図 7.3-2 視程障害時の特別巡回

このため、上記特別巡回ドライバーの負担軽減および安全性向上の支援として、「前方監視機能」と「前方道路線形の表示機能」とを併せ持った「視程障害時走行支援システム」の開発に取り組んでいる。

- ① 前方監視システムの開発；視程障害時の前方監視には、車載が可能で性能が天候に左右されないレーダーが必要となる。一般に電磁波は波長が長くなるほど霧や雨、雪などの天候の影響を受け難くなるため、前方監視システムでは波長の長いミリ波レーダーを採用した<sup>9)</sup>。
- ② 前方道路線形表示システムの開発；前方道路線形情報については、座標計算により作成された簡易なCGを、GPSの測位データと連動させて、リアルタイムの動画表示により提供する。
- ③ システムの統合；①に述べた「前方監視システム」と、②に述べた「前方道路線形表示システム」を「視程障害時走行支援システム」として、一つのシステムに統合する。システムの作動内容を表 7.3-1 に示す。本走行支援システムは、上記表示画像を合成し、道路線形CGの上に障害物情報を重ね合わせる方法で、車載ディスプレイに表示するものである。

表 7.3-1 システムの作動内容

前方監視システム部	ミリ波レーダーの信号をECUで処理し、車載PCに障害物情報として表示する。
前方道路線形表示システム部	DGPSで走行中の自車の座標位置を測定し、車載PCに出力する。車載PCには道路線形CGデータが構築されており、測位された座標値に基づき適切なCGを表示する。

### 7.3.3 試験運用による性能確認

視程障害時走行支援について、試験運用システムを構築し、特別巡回車両1台に搭載した。障害物及び道路線形情報は、車載ディスプレイに出力される(図 7.3-3)。

システムでは、検知可能な距離以内ならば、報知対象範囲(原則自車線)内の障害物のうち最も近いものを報知対象とし、黄色の□印で表示する。障害物が報知設定距離(任意に変更可能)以内に近づくと、赤の△印に表示が切り替わり、同時に警報音を鳴らす。報知対象以外の検知物(自車線外道路付属物等)は、緑の□印で表示される。

図 7.3-4 及び図 7.3-5 は実際の霧発生状況下で、試験運用システムを稼働している状況である(同時、同位置)。

図 7.3-4 は、助手席からの撮影で、

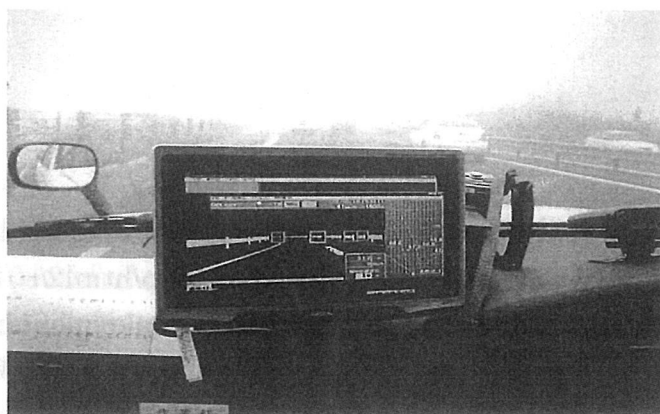


図 7.3-3 車載ディスプレイ



図 7.3-4 霧発生時の視界

約 90m前方に車両が存在するが、目視では確認できない。一方、図 7.3-5 はシステムの出力画像で、車両が中央部に黄色の□印で表示されている。この結果より霧中におけるシステムの有効性を十分に確認することができる。

試験運用システムは、検知物の図形表示の他、検知物との距離、相対速度、自車両走行位置のキロポスト等を車載ディスプレイに表示している。視程障害時に、これらの情報をリアルタイムに提供することにより、特別巡回時における安全な走行を支援できる。

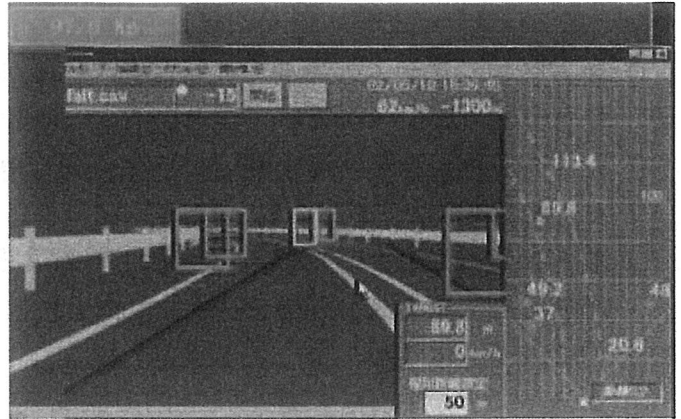


図 7.3-5 システムの出力画像

#### 7.3.4 まとめ

視程障害時の走行支援システムは、平成 14 年 4 月より、大分自動車道において、試験的に稼働している。同年 6～7 月の霧多発時期において、システム搭載車両による特別巡回を 11 日 (61 回) 実施した。今後、実証データを引き続き蓄積しながら、問題点、改善点を洗い出し、より実用的なシステムとして仕上げていく予定である。

#### < 第 7 章 参考文献 >

- 1) 谷井敬春；高速道路の霧対策とその効果，自動車研究，Vol.17，No.12(1995)
- 2) [http ; //www.jice.or.jp/itschiiki-j/top/html2/e01.html](http://www.jice.or.jp/itschiiki-j/top/html2/e01.html)
- 3) [http ; //www.jice.or.jp/itschiiki-j/deployment/html\\_2/10\\_2.html](http://www.jice.or.jp/itschiiki-j/deployment/html_2/10_2.html)
- 4) 鈴木徹ほか；地吹雪対策視線誘導システムの開発，照学全大，No.70(2003)
- 5) 斎藤孝ほか；ガイドライトシステムの開発，松下電工技報(1996)
- 6) 安達富夫；ガイドライトシステム施工事例紹介，IWASAKI 技報，No.2(2000)
- 7) [http ; //www.jice.or.jp/itschiiki-j/benefits2002/html/04-24.html](http://www.jice.or.jp/itschiiki-j/benefits2002/html/04-24.html)
- 8) 九州支社；大分道（別府地区）の霧対策．E X T E C．Vol. 13, No. 4, pp. 19（2000-3）
- 9) 三本雅，春山鉄男；センシング分野に実用化進むミリ波レーダー技術，電子技術，pp. 44-47（2000-1）

## 第8章 まとめ

悪天候下の道路交通視環境について、3年間にわたり研究調査委員会（最終年は特別研究委員会）の活動を行った。その活動内容で特徴的なものは、委員会開催時の各委員による研究事例発表、国土技術政策総合研究所の施設を利用した霧発生時の視認実験、北海道開発土木研究所が連続試験を行っている霧誘導対策施設の見学等、その検討内容は多岐にわたり、今までにない研究調査委員会活動を行った。

主な検討項目としては、悪天候下における交通視環境問題、悪天候と交通事故、悪天候になる気象のメカニズム、今まで行われた調査研究や悪天候対策としての施設事例等で、それらの内容をまとめると次のとおりである。

### 8.1 悪天候下における交通視環境問題

ドライバーの処理プロセスを図8-1に示す<sup>1)</sup>。

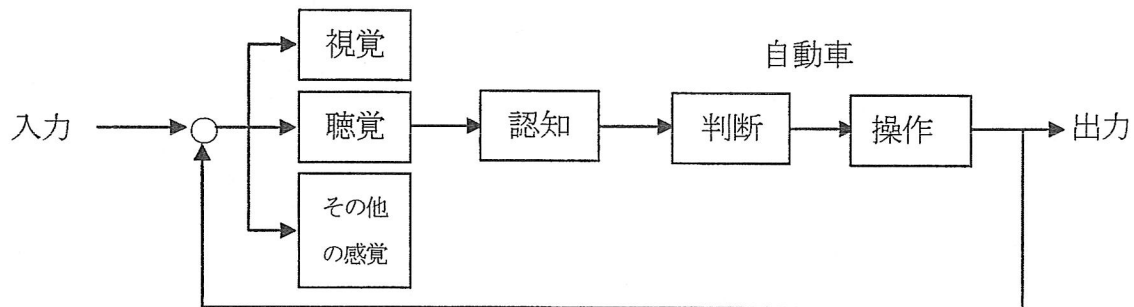


図8-2 ドライバーの処理プロセス

自動車の運転においてドライバーは交通環境から情報を入手し、それに対応した運転操作を連続して実施している。情報入力部は視覚、聴覚、その他の感覚器であるが、運転に必要な情報の内、視覚情報の占める割合は90%以上と言われている<sup>2)</sup>。従って運転を安全にそして快適なものとするためには交通視環境を良好なものにする必要がある。この良好な交通視環境とは、「運転操作が車線維持、障害物回避、進路選択、周囲の車両との協調を行う」ことを考慮すれば、

① 道路線形、歩行者及び車両を含む路上物体、そして案内板などが背景と十分な輝度コントラストもしくは色差を持つこと、

② 上記の条件が急変しないこと、

が良い交通視環境の条件となり、このような条件下では、運転に必要な視覚情報は容易に得られることとなる。

記①、②の観点から委員会活動で悪天候下の交通視環境の問題を集約した特性要因図を図8-2に示す。



### (3) 自動車灯火器

- ① 前照灯のグレア
- ② 濃霧・吹雪時における照明機能、信号・標識機能の低下
- ③ 冬期道路におけるレンズ面への着雪

なお、霧並びに降雪は経時変化するため、路上並びに車載機器はそれらに対応して制御することが望まれる。

## 8.2 交通視環境と交通事故について

(1) 概略結果；過去の文献や事故統計から以下のことが分かった。

- ① 高速道路の交通視環境と交通事故については、日本の高速道路における死亡率や死者数は経年変化を（財）交通事故総合分析センター（ITARDA）の統計結果では、夜間は昼間の事故率（件/億台キロ）の3.6倍、路面湿潤時には乾燥時の4.2倍となっていて、これらの事故対策として高視認性区画線や排水性舗装が有効である。
- ② （財）交通事故総合分析センターでは、アメダス気象情報と交通事故データを統合した分析システムを構築して、降水量と交通事故の関係について時間帯別/時間当たり死亡事故件数及び死傷事故件数を分析した結果、降水時には非降水時より事故件数が多く、その傾向は夜間に顕著であるとしている。
- ③ 降水（雨、霧等）における事故発生要因の主なものとしては、路面のすべり摩擦抵抗の減少、視環境の悪化等がある。
- ④ 路面湿潤時の摩擦抵抗低下が少なく走行車両による水はねの少ない排水性舗装により、事故件数は従来の舗装と比べて1/6以下に減少している。
- ⑤ 高視認性区画線の対策後には約40%事故件数が減少している。
- ⑥ 夜間の死亡事故では、車両相互事故の割合が大きく低下するが、対歩行者事故の割合が顕著に多い。路側照明の効果として、静止状態での視認距離が30m程度改善され、平均速度が12~17km/hr上がった事例がある。
- ⑦ 積雪寒冷地では降雪や吹雪による視程障害事故が多く、特に、郊外の幹線道路や高速道路などで多重衝突事故が頻発している。これは視程100m以下になってから1時間以内に発生していることが判った。

(2) 課題；事故対策評価要領

交通事故は、視環境以外に人的・交通環境・道路環境要因などの複数の要因が重なって発生する。そのため、異なる場所で同じ事故対策の検証を行おうとした場合に、交通量や道路条件が異なることにより評価結果が異なってしまう可能性がある。

また、評価項目を単なる事故件数の増減だけか、環境問題にまで言及するのか、或いは総合的な費用対効果で行うのかという問題もある。

従って、場所や評価者が異なっても客観的な評価が出来るように、評価要領（またはマニュアル）を作成する必要があると考える。

### 8.3 各種理論について

#### 8.3.1 雨・雪・霧の発生メカニズム

発生メカニズムとしては、大気中の水蒸気が飽和または過飽和状態になりエアロゾル周りに凝結を起こし、これが上空で発生すると雲になり、地上付近で発生すると霧になる。雪は雲粒が凍結して氷晶が発生し、成長して雪の結晶となり地上に落下したものである。また、雨は雲粒が成長する、もしくは雪の結晶が溶けることにより粒径が0.2mm～3mm程度の雨粒となって落下してきたものである。

また、雨・雪・霧を物理的な状態、粒径、降り方等による分類方法は、①雨の特性；直径の多くが0.5mm以上の水滴と降る強さにより細分化される。②雪の特性；粒径や形状により雪、ひょう、あられに分類される氷粒子、または降り方や結晶の形等により細分化される。③霧の特性；直径の多くが10～30 $\mu\text{m}$ の微細な水滴で霧水量と粒径により視程が変化し、霧ともやに分類される。また発生原因・地域により細分化されることが判った。

視程は、目標物を背景から識別できる最大距離が視程の定義である。視程は心理物理尺度であり、その計測方法は様々である。道路空間での視程は、一定ではなく空間的・時間的な変動を含む場合が多い。霧は雪に比べて一様に分布しており、変動強度は小さい。雪では、周期が短く大きな変動幅で視程が変動する。道路周辺の地形や運転者の視点によっても大きく異なる。

#### 8.3.2 霧・雪下での視認性評価理論

運転者が霧や雪で視覚対象物を視認できるかどうかは、視覚対象物の輝度とその背景輝度との間に十分な差があるかどうかによって決まる。背景輝度が比較的一様であることから、Blackwell (1946) による限界コントラストの適用が可能である。ただし、雪では、粒子の流れや大きさによって見え方が異なると言われている。

#### 8.3.3 シミュレーション技術の現状と課題

霧中における対象物の視認性を検討する際に用いるシミュレーション方法としては、人工霧を発生させた実験室実験による方法とCG画像を用いた数値シミュレーションによる方法がある。実験室実験による方法は、実際と同様な物性、サイズの霧粒子を発生し、実験室の外部状況の影響を受けずに実験を実施できるため、実験の再現性が高く、また実験システムの開発も比較的容易であるが、設備費用や実験工数がかかる。一方、CG実験による方法は、光源のような高輝度レベルの再現が現状ではハードウェアの性能上実現不可能であり、また、高精度な実験を行うには正確に様々な状態の霧粒子の物性や挙動を把握し、実現する必要があるため、システム開発は非常に困難であるが、実験室実験と比較すると多様な実験条件を短い工数で検討でき、設備費用が比較的安価といった利点がある。

霧のCGシミュレーションの代表的な方法としては、Koschmieder、Allardの理論式に基づく方法とMie散乱の数値計算により散乱光分光分布を求める方法の2通りがある。前者は計算量が少なく動画描画が容易であるが、不均一な背景や微小光源が存在する空間への適用は困難である。一方、後者は前者に比べて膨大な計算量を必要とし動画描画が困難であるが、不均一な背景や微小光源が存在する空間への適用は容易である。

実際には、用途や予算に応じて、どのようなシミュレーションを用いるかを選択する必要があるが、いずれの場合においても、実際の霧中における視認性は非常に複雑であるため、解決できていない技術的課題も多く、目的に応じて妥協してシミュレーションを行っ

ているのが現状である。今後はこのような技術的課題を解決し、実際により近い高精度なシミュレーションができるように、霧中における対象物の視認性理論を明確にし、システム開発を行っていく必要がある。

#### 8.3.4 雨・雪・霧の計測技術並びに発生装置

雨は降水量、雪は積雪の深さ・降雪の深さ、霧は粒径分布・霧水量が計測されることが多い。また、これらの気象条件による視環境悪化の程度を示す値として視程が用いられる。

これらを計測する装置としては以下のような装置がある。

- ① 降水量 ; 貯水型、サイフォン型、転倒マス型、ベクトル雨量計
- ② 積雪深、降雪深 ; 雪尺、雪板、超音波式、光学式
- ③ 霧の粒径 ; 影写真法、直接写真法、直接採取法、レーザー散乱法、光環現象
- ④ 視程 ; VI計、BS計、FS計

雨・雪・霧の擬似的な発生方法はノズルから水を噴霧することにより可能である。噴霧する水滴の粒径が0.2mm~3mm程度であれば雨、温度を氷点下とすれば雪を擬似的に再現できる。霧は噴霧する水滴の粒径を10~20 $\mu$ m程度にすればよい。霧の場合には水を沸騰・蒸発させたりドライアイスを用いるなどで同様な疑似環境を作ることができる。

しかし、これらの疑似環境は、物理的な特性や空間での均一性など必ずしも一致しているものではないため、疑似環境による実験ではそれぞれの特徴を十分考慮した上で実施することが重要である。

### 8.4 模擬環境下および実路環境下で行われた調査・研究事例報告

#### 8.4.1 路面およびレーンマークの反射率について

夜間、自動車運転者が安全に走行するためには、前方の障害物輝度やレーンマーク輝度と、背景となる路面輝度とが、適切な関係になっていなければならない。自動車前照灯で照射された光が、路面やレーンマークで反射され、運転者へどのぐらい戻るかを表す再帰反射特性については、次のことが分かっている。路面の輝度係数(輝度/照度)は、乾燥時、湿潤時とも経年使用後の密粒アスファルト舗装が最も高く、湿潤時の輝度係数の低下率は、経年使用後の密粒アスファルトが最も高く、排水性舗装が最も低い。また、レーンマークの輝度係数は高輝度タイプが高く、湿潤時の低下率は高輝度タイプが低い。

前照灯では、照り返しの影響を把握できる前方反射特性についても測定されている。今後の課題として、道路灯下の排水性舗装反射特性についても、湿潤時および経年使用後の測定が望まれる。

#### 8.4.2 実霧発生装置による視認性実験

噴霧法により人工霧を発生させた疑似環境で視認性の実験を行った。実験では、人工霧を発生させた疑似環境で視対象物のコントラストと色の変化の測定を行い、視程が低下した際にどのような影響があるかを検討した。その結果、同じ目標物でも周囲が明るい場合の方が、コントラスト並びに彩度が低下することから見えにくくなるということが分った。特に、夜間は色が異なっても見えやすさがほとんど変化が無いのに対して、日中は色によっては見え難くなるという結果を得た。

#### 8.4.3 各種天候下における路面の輝度コントラスト

路面とレーンマークの輝度コントラストを東名高速道路（密粒アスコン舗装／排水性舗装、道路照明有り無し）を中心に各種気象環境下（晴／雨、夜路／昼）で収集した。その結果、①雨天時にはレーンマークと路面の輝度コントラストが低下する。②その低下レベルは密粒アスコンが大きい、③密粒アスコン舗装路面における道路照明は雨天時にはレーンマークの視認性を低下させる、ことなどが分かった。

#### 8.4.4 道路照明機器の吹雪下における視認性研究

吹雪時における道路照明の視認性実験を、北海道開発土木研究所の石狩吹雪実験場にて平成10年から平成13年にかけて行った。実験の結果、吹雪時、道路照明器具配光はセミカットオフ形より、カットオフ形の方が光幕輝度の発生が1/5から1/10程度に抑制され、交差点部における主観評価の結果においても障害物（歩行者、自動車）の見え方が良いことが分かった。

#### 8.4.5 雨天時における道路照明の視認性について

夜間の良好な視覚環境を運転者に提供する道路照明は路面の反射特性と密接な関係がある。例えば路面が濡れたり雨水の膜で覆われたりすると鏡面性が増して照明器具の設置位置によっては視認性が低下する場合がある。ここでは、濡れた路面の反射特性と道路照明器具の配光特性および設置位置との関係による視認性などについて紹介した。

#### 8.4.6 寒冷地における自動車灯火の視認性研究

北海道の冬期道路にて悪天候が自動車照明装置の性能に与える影響を調査した。その結果、寒冷地に於いては自動車灯具への着雪・着泥が問題であること、吹雪などの低視環境下ではリアランプの被視認性の向上が必要であること、またリアフォグランプなどの有用性を明らかにした。

#### 8.4.7 霧中におけるリアフォグランプの視認性研究

霧中における先行車のリアフォグランプの視認性について、霧の濃度と照度により変化する昼間のリアフォグランプのコントラストを推定し評価実験を行った。その結果、テールランプは日中の霧発生時にほとんど見えず、濃霧時においてもストップランプの視認距離は40m前後で安全な視認距離は得られない。リアフォグランプにおいては、ストップランプより視認距離は長く、その距離は安全な距離となったことから、リアフォグランプの装着は、霧発生時においても車間距離を安全なものとし、追突事故及び多重衝突事故の回避に寄与できると考える。

#### 8.4.8 雪下におけるLED表示装置の視認性実験

赤・黄・緑・青・白のLED表示灯を用いて積雪道路における視認性の比較実験を行った。その結果、積雪や吹雪の条件では昼間は青および赤の視認性が比較的良く、白は視認性が悪いという結果が得られた。一方夜間は色による優劣が見られない。このことから、昼間積雪下で白色発光体の視認性が低下するのは背景が白色であることが主な原因であると考えられ、青や緑の発光体の応用の可能性が示唆される。

#### 8.4.9 各種視程における航空灯火の見え方シミュレーション

道路交通の場合、ドライバーが信号灯火を見るのは比較的近距離からであることから、灯火面積を考慮した輝度で見え方を評価することも必要であるといえる。しかし、航空灯火の見え方に関しては、パイロットがそれらの灯火を視認するのは遠方からであるため、

灯火を点光源として扱い、大気中での光の減衰を考慮したアラードの法則を利用して観測者の目の位置における照度（角膜照度）を算出して検討するのが一般的である。この研究は、コンピュータシミュレーションによる灯火光度設定に関わる運用要件を評価する手法を示したもので、航空機の着陸時におけるパイロットの目から見た滑走路灯火の明るさと灯列パターンの見え方を、視程条件と灯火の光度をパラメータとした角膜照度分布の解析によって評価している。

気象条件の悪化に伴う離着陸の中断が起こればその影響は甚大である。規格上の最低気象条件がそう度々発生するものでないとはいえ、このような低視程時における灯火の見え方を検証することは安全上重要なことである。しかし、実際の低視程気象条件の中で実地調査をすることは困難であることから、このようなシミュレーションによる評価手法も有用であると言える。現段階では進入時の航空機が滑走路へ接地するまでのシミュレーションが可能となっているが、継続して、接地してから地上走行してスポットインするまでの、誘導路走行時の誘導路灯や誘導案内灯あるいはストップバーなどの見え方についてのシミュレーションの構築が進められている。

## 8.5 特別研究事例

### 8.5.1 霧中におけるLED発光体の光覚閾および色覚閾に関する研究

霧中におけるLED発光体の見え方に関する研究として、濃霧中に置いた赤・黄・緑・青・白のLED発光体の光覚閾および色覚閾を求めたものである。悪天候による低視程をカバーするために、山間部や急カーブ地帯には発光体を装備した視線誘導灯が数多く設置されており、発光部にLEDを応用した発光表示装置も増加している。そこで、霧中における発光体の知覚研究として本実験を実施した。

昼間を想定した実験では、光覚閾、色覚閾とも青および赤の閾値が比較的低いという結果が得られた。昼間実験の場合は照明光が霧で散乱するため、被験者には白（灰）色背景の中に輪郭が不明確な発光色が浮かび上がってくるように見える。一方、夜間を想定した実験では黒背景の中で霧によって散乱された発光色を見るという状況であるが、この場合も赤や青の色覚閾値が比較的低く現れている。これは、特に視程が悪い条件では、赤や青のように色みの強い光の方が違和感があり、閾値が低くなるようである。逆に白や黄の光は自然界に多く存在するために物体から発せられた光として捉えにくいものと思われる。

赤色光はこれまでも車両のストップランプをはじめとして多くの危険信号に使われているが、我が国では青色の応用例はまだ少ない。これまでは青色光源は比較的効率が悪く暗かったために実用化されてこなかったが、青色の超高輝度LEDが実用化されたことによって制約がなくなり、今後は積極的に青色光を用いた応用を考えることが可能となってきた。

### 8.5.2 霧中における視認性特性—粒子直径の差による影響の定量化

濃霧中での視認性評価として霧の粒子径が視認性に及ぼす影響を検討した実験である。自然界に発生する霧は粒子径が数 $\mu$ から百数十 $\mu$ と言われ、雨は数百 $\mu$ から数ミリメートルに達する。悪天候時に視界を遮る水の粒子径が視認性に及ぼす影響はあまり知られていないため興味深い。そこで本委員会において、霧の粒子径と視認性との関係を求めるための実験を行った。また、視対象に複数の表示色を用いることによって、表示色と視認性の

関係に関する実験も行った。

この実験は、CRT を用いて黒背景に 12 色のランドルト環を表示し、霧を通して観測することにより、霧の粒子径が識別性(可読性)の低下に及ぼす影響を求めた。評価方法は、霧のない状態と濃霧中における識別可能な最小ランドルト環サイズの比を求めることにより、霧による識別性への影響を測定した。霧の粒子径は  $10\mu\text{m}$ ・ $30\mu\text{m}$ ・ $50\mu\text{m}$ ・ $100\mu\text{m}$  とし、同時に表示色の影響も求めるため 12 色のランドルト環を表示して実験を行った。

実験の結果、透過率 22%の霧濃度において、霧の粒子径が  $10\mu\text{m}$ ・ $30\mu\text{m}$ ・ $50\mu\text{m}$  と大きくなるほど、識別性低下が大きくなることが示された。ただし粒子径が  $50\mu\text{m}$  と  $100\mu\text{m}$  では顕著な差がなかったため、粒子径が  $50\mu\text{m}$  を超えると識別性に対する影響は変わらないことが示唆された。一方、霧の濃度がさらに高くなると、粒子直径による影響は低下し、 $30\mu\text{m}$  以上では変化が観測されなくなった。

一方、色相による識別性(可読性)への影響度の違いを比較すると、黄および黄赤で最も少なく、青が最も顕著に低下するということがわかった。ただし黒地に色文字(ランドルト環)を表示した場合の結果であり、今後の研究として背景色を白とした場合や光幕現象の場合についてさらに検討することが望ましい。

## 8.6 視覚情報提供・交通視環境改善事例

悪天候下での視覚情報提供ならびに交通視環境改善事例を、道路施設改善、車載照明機器の改善、IT 活用事例について紹介した。その中の道路施設改善事例では、道路照明施設、誘導システム、道路情報板に分類し報告した。

霧対策として、光幕輝度を抑制する側方からの照明を利用した路上照明灯の配置、及び省エネルギーを考慮した高輝度タイプ発光ダイオードを使用した視線誘導灯の連続設置などがある。

吹雪による視程障害対策として、視線誘導標を自発光デリニエータとし視程計と連動して点灯させるとともに、ITV カメラなどとも連動し現地の道路情報を適切に道路情報板を設置して伝える事例がある。さらには、降雪日数の多い地区で冬季の事故多発区間では、カーブ区間に指向性の優れている特徴を生かしたレーザー光線を用いた視線誘導装置の設置や地吹雪個所での視線誘導灯を連続設置した誘導システムなどの事例がある。

視線誘導標を自発光デリニエータとし視程計と連動して点灯させるとともに、道路線形表示、対向車警戒といった運転にかかわる情報を一定のルールで点灯させることにより運転者に伝える「ガイドライトシステム」、北海道地区での地吹雪等対策として光源に緑色の LED を採用した「スノーポール」や積雪時、夜間や吹雪時の視認性向上を図った自発光式矢羽根などがある。

車載照明機器では悪天候下での走行しやすいビームをねらった AFS 環境対応型ヘッドランプ。遠方の視対象物の視認性向上を目指した暗視システムなどがある。

霧の視程障害対策の研究では、特別巡回ドライバーの負担軽減および安全性向上の支援として ITS 技術を活用した前方監視機能と前方道路線形の表示機能を持つ「視程障害時走行支援システム」がある。

## 8.7 交通視環境の整理と改善方法

悪天候下においても自動車運転を安全にそして快適なものとするためには交通視環境を良好なものとする必要がある。この観点から車両、道路・道路施設、自動車灯火器の要因毎に改善事項を下記にまとめる。

### (1) 車両

- ① タイヤからの水はね、雪の巻き上げの低減
- ② 車体への着雪防止
- ③ ミリ波レーダーの活用

### (2) 道路・道路施設

- ① 道路及び道路施設の定期的補修、排水性舗装の拡充並びに路面の融雪対策
- ② 高輝度レーンマークの拡充と前照灯グレア防止用防眩柵の拡充
- ③ 山岳部道路や寒冷地道路への視線誘導灯、自発光式案内板などの拡充
- ④ 光幕グレア及び路面反射グレアの少ない道路照明装置の拡充
- ⑤ 気象環境に対応した道路照明・信号・標識の制御
- ⑥ 安価で精度の良い視程計測装置やセンサーの開発

### (3) 自動車機器類

- ① 前照灯のグレアの低減と悪天候下での前方照明性能の改善
- ② リアフォグランプの拡充とレンズ面への着雪対策
- ③ テールランプ設置高の改良（後続車へのグレア許容レベル内で）
- ④ 暗視装置等の拡充

以上、悪天候下における交通視環境問題と道路交通関連装置類の改善事項を述べてきたが、悪天候下では交通視環境が急変する場合もある。悪天候下において安全走行を確実なものにするためには、ITS を活用して道路施設からドライバーへの危険情報の提供並びにドライバーへの悪天候下での運転上の基礎知識提供といった教育も重要であると考ええる。

また、各種環境下で視認性の良い機器を開発するためには、昼夜や各種気象条件下での発光体の被視認性の定量的な検討が必要である。さらにそれらの条件下で実験を確実に実施できるよう、実験装置の一層の拡充が必要であると共に、シミュレーションによる研究の効率化も必要と考える。

## < 第8章 参考文献 >

- 1) 神作博；交通心理学，自動車技術会中部支部，第35回自動車技術講習会資料，1991年9月20日
- 2) (社)自動車技術会編集；自動車の安全技術，朝倉書店，P.1～4、1996

## 後書き

経済活動の増大、生活水準の向上、利便性の追及等により、近年におけるわが国の交通量は益々増大しつつある。それに伴って、交通事故数も増加傾向を示している。さらにまた、高齢社会の進行やシルバードライバーの増加と共に、高齢者が関係する交通事故数の増大も深刻な社会問題の一つとなっている。

このような社会状況の下、わが国の交通事故数を抑制すべく、照明工学、人間工学、交通工学、視覚工学、情報工学、心理学、土木工学、画像工学、気象学等を専門とする、大学、国立及び企業の研究機関の優秀な研究者並びに技術者が参集し、「悪天候下における交通視環境」に関する研究調査を行った。

研究調査期間は、平成 13 年 4 月から平成 16 年 3 月までの 3 カ年の長さであった。委員会の開催回数は年平均 6 回であった。

また平成 15 年 4 月には、「悪天候下における交通視環境に関する研究調査委員会」は「悪天候下における交通視環境に関する特別研究委員会」に昇格し、研究活動にも一層拍車がかかった。

ちなみに、平成 13 年度は主に、①研究計画の立案と検討、②一般及び悪天候下における交通視環境に関する調査並びにデータの収集、等を行った。そのなかには、道路構造が交通視環境やドライバーの視覚特性に及ぼす影響、交通事故多発地域の視環境等に関する調査も含まれている。

平成 14 年度は主に、①天候・視覚についての基礎的な物理特性に関する実験並びにデータの収集、②交通視環境及び視覚特性に関する実験並びにデータの収集、③各種天候下における基礎的及び応用的「共同実験」並びにデータの収集、④シンポジウムへの企画・参加、等を行った。

平成 15 年度は主として、①交通視環境及び視覚特性に関する調査並びに実験結果に対する解析とそのまとめ、②シンポジウムの企画・開催、③特別委員会報告書（研究調査報告書）の作成、等を行った。

また特に、平成 15 年度(社)照明学会研究・教育助成を得て行った「濃霧中における視認特性」と題した特別実験は、高松幹事（富山大学講師）が中心となって、富山大学内における実験装置を使用して遂行したものであり、報告書のなかの目玉の一つとなっている。

本特別委員会報告書はもとより各委員多忙中にも拘らず、委員全員による委員会への積極的な協力と労力の提供の賜であると考えられる。委員各位には心より感謝申し上げたい。

また本報告書をまとめるにあたり、実験の協力、貴重な資料の提供等でいろいろとご協力を頂いた関係各位にも、心より感謝申し上げます。

本報告書が、わが国の交通事故抑制のための一助となれば委員全員の最も幸せとするところである。

最後に、本研究調査は一部、平成 15 年度(社)照明学会研究・教育助成を得て行われたものである。

悪天候下における交通視環境に関する特別研究委員会  
委員長 中嶋芳雄

## 研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は（社）照明学会に帰属します。

複写をされる方に

本報告書に掲載された著作物は、政令が指定した図書館で行うコピーサービスや、教育機関で教授者が講義に利用する複写をする場合等、著作権法で認められた例外を除き、著作権者に無断で複写すると違法になります。

