博士論文

鉄道車両等機械装置の目視検査における作業者の年代および目視対象に応じた適切な局部照明条件の検討

2023 年 3 月

脇水　俊行

岡山大学大学院

自然科学研究科

第 1 章　序論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1　研究背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1.1　鉄道車両の検査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1.1.1　鉄道車両の検査体系・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.1.1.2　鉄道車両等機械装置の検査におけるヒューマンエラーの分析・・・・2
1.1.1.2.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
1.1.1.2.2　方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
1.1.1.2.3　結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4
1.1.1.2.4　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4
1.1.2　鉄道車両の目視検査における局部照明・・・・・・・・・・・・・・・7
1.1.2.1　照明が視覚に与える影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・7
1.1.2.2　目視検査で使用する局部照明光源の LED 化と影響の調査・・・・・7
1.1.3　作業者の高齢化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13
1.1.3.1　鉄道車両の検査に従事する作業者の雇用範囲拡大・・・・・・・・・13
1.1.3.2　加齢による視覚機能変化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・14
1.2　研究の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16
1.3　本論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・16

第 2 章　鉄道車両における目視検査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
2.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
2.2　鉄道車両における目視検査の対象・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・18
2.3　鉄道車両における目視検査の手がかりとなる要素の抽出・・・・・・・・・・20

第 3 章　「立体」の要素に基づく検査における年代別最適局部照明条件・・・・・・・・・21
3.1　「立体」の要素に基づく検査における年代別最適局部照明条件・・・・・・・・21
3.1.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
3.1.2　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
3.1.2.1　実験参加者・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・21
3.1.2.2　試料・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・22
3.1.2.3　実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
3.1.2.4　実験手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
3.1.2.5　分析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・24
3.1.3　結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・25
3.1.3.1　年代および局部照明条件が誤答率に与える影響・・・・・・・・・・25
3.1.3.2　局部照明条件が主観評点に与える影響・・・・・・・・・・・・・・28
3.1.4　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・29

3.2　奥行き弁別課題における周辺環境の影響および個人差の要因の調査・・・・・30
3.2.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30
3.2.2　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30
3.2.2.1　実験参加者・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30
3.2.2.2　試料・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・30
3.2.2.3　実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・31
3.2.2.4　実験手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・31
3.2.2.5　分析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・31
3.2.3　結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・33
3.2.3.1　年代および局部照明条件が誤答率に与える影響・・・・・・・・・・33
3.2.3.2　周辺環境が誤答率に与える影響・・・・・・・・・・・・・・・・・36
3.2.3.3　視力および左右視力の比が誤答率に与える影響・・・・・・・・・・36
3.2.3.4　局部照明条件が主観評点に与える影響・・・・・・・・・・・・・・38
3.2.4　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・39
3.3　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・40

第 4 章　「平面」の要素に基づく検査における年代別最適局部照明条件・・・・・・・・42
4.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42
4.2　実験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42
4.2.1　実験参加者・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・42
4.2.2　試料・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・43
4.2.3　実験条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・44
4.2.4　評価方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・46
4.2.4.1　局部照明条件の評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・46
4.2.4.2　透過率の影響把握・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47
4.2.5　分析方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47
4.3　結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・47
4.3.1　年代が各種別の成績に与える影響・・・・・・・・・・・・・・・・・47
4.3.2　年代および局部照明条件が種別 1 の成績に与える影響・・・・・・・・・・47
4.3.3　年代および局部照明条件が種別 2 の成績に与える影響・・・・・・・・・・48
4.3.4　年代および局部照明条件が種別 3 の成績に与える影響・・・・・・・・・・48
4.3.5　各年代における透過率と課題成績の関係・・・・・・・・・・・・・・・・55
4.4　考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・57
4.5　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・58

第 5 章　結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・59
5.1　研究の成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・59
5.1.1　本研究で得られた知見・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・59
5.1.2　鉄道車両等機械装置における目視検査用ハンディライトの提案・・・・・・61
5.2　今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・63

参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・64

参考資料・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・68
鉄道車両等機械装置の検査におけるヒューマンエラーの分析資料・・・・・・・・・・68

謝辞・・・79

第 1 章　序論

1.1　研究背景

1.1.1　鉄道車両の検査

1.1.1.1　鉄道車両の検査体系

わが国の鉄道は、総営業キロは約 27000km、年間利用者数は約 250 億人（2018 年度)におよび、国内における公共交通機関として社会的基盤の役割を果たしている[1]。鉄道事業者にとっての車両品質は、利用者の安全に直結するだけでなく、サービスのレベルなどにも影響を与えるものであり、品質の維持・向上は重要な課題となっている。

鉄道車両の品質の維持・向上において、日々実施される検査は重要な役割を担っている。鉄道車両の検査は鉄道営業法（明治 33 年 法律第 65 号）第 1 条「鉄道ノ建設、車両器具ノ構造及運転ハ国土交通省令ヲ以テ定ムル規程ニ依ルヘシ」に基づき、鉄道に関する技術上の基準を定める省令（平成 13 年 国土交通省令第 151 号）第 90 条第 1 項により、「施設及び車両の定期検査は、その種類、構造その他使用の状況に応じ、検査の周期、対象とする部位及び方法を定めて行わなければならない。」と定められている。また、同省令第 90 条第 2 項「前項の定期検査に関する事項は、国土交通大臣が告示で定めたときは、これに従って行わなければならない。」とされており、施設及び車両の定期検査に関する告示（平成 13 年国土交通省告示第 1786 号）により車種ごとに定期検査の周期が具体的に定められている(表 1-1)。各鉄道事業者はこれら法令等に基づき、車両の種類や形式ごとに詳細な検査周期、検査内容等実施基準を定め運用している。

鉄道車両の検査は技術の進歩とともに、機械化が進んでいるものの[2,3,4]、作業者の五感を使用して認知・判断を行う官能検査、とりわけ視覚を用いた目視検査が未だに多数存在している。目視検査は非破壊検査の一種であり、確認対象を目で見ることで表面の破損や腐食、形状の不良等を検出するものである。近年では画像処理を用いた自動化手法が鉄道分野でも研究されているものの、ほとんどがレールやトンネル等の構造物を対象としたものである[5,6]。しかし鉄道車両、特に在来線車両では、様々な種類の車両が存在することに加え、同じ種類の車両でも形式によって構造や搭載装置が異なり、それに伴い検査対象や方法も異なることから、コストの面などを理由にほとんど実用化されていない。

表 1-1 鉄道車両の定期検査周期

車両の種類	期間		
	状態・機能検査	重要部検査	全般検査
無軌条電車の電車	一月	一年	三年
蒸気機関車	四十日	一年	四年
貨車	三月	二年六月	五年
懸垂式鉄道、跨座式鉄道及び案内軌条式鉄道の電車	三月	三年（新製した車両に対する使用開始後最初の検査については、使用を開始してから四年）	六年（新製した車両に対する使用開始後最初の検査については、使用を開始してから七年）
内燃機関車及び内燃動車	三月	四年又は当該車両の走行距離が五十万キロメートル（予燃焼室式の内燃機関又はクラッチが乾式である変速機を有するものについては、二十五万キロメートル）を超えない期間のいずれか短い期間	八年
その他の新幹線以外の車両	三月	四年又は当該車両の走行距離が六十万キロメートルを超えない期間のいずれか短い期間	八年
新幹線の電車	三十日又は当該車両の走行距離が三万キロメートルを超えない期間のいずれか短い期間	一年六月（新製した車両に対する使用開始後最初の検査については、使用を開始してから二年六月）又は当該車両の走行距離が六十万キロメートル（主回路の制御方式がタップ切換方式である車両にあっては、四十五万キロメートル）を超えない期間のいずれか短い期間	三年（新製した車両に対する使用開始後最初の検査については、使用を開始してから四年）又は当該車両の走行距離が百二十万キロメートル（主回路の制御方式がタップ切換方式である車両にあっては、九十万キロメートル）を超えない期間のいずれか短い期間
新幹線の貨車	九十日	二年六月	五年
その他の新幹線の車両	九十日	三年又は当該車両の走行距離が二十五万キロメートルを超えない期間のいずれか短い期間	六年

備考一　この表において「状態・機能検査」とは、車両の状態及び機能についての定期検査をいう。二　この表において「重要部検査」とは、車両の動力発生装置、走行装置、ブレーキ装置その他の重要な装置の主要部分についての定期検査をいう。三　この表において「全般検査」とは、車両全般についての定期検査をいう。

1.1.1.2　鉄道車両等機械装置の検査におけるヒューマンエラーの分析

1.1.1.2.1　はじめに

前項で述べたように、鉄道では定期的な検査、整備によりその安全性が保たれているが、これらの作業において、ヒューマンエラーが発生した場合、事故のリスクがあり、各事業者にとってこれらの作業におけるヒューマンエラーを減らし、確実に検査、整備することは重要な使命と言える。

本項では、ヒューマンファクターの観点から過去に発生した事故およびインシデントについて背後要因を特定し、鉄道車両等機械装置の検査においてヒューマンエラーを防止する為に有効な対策について検討した。

1.1.1.2.2　方法

本調査では、鉄道と航空機(大型機に限る)の検査や整備等の作業におけるヒューマンエラーが要因の一端となって事故、もしくは重大インシデントが発生し、運輸安全委員会の事故調査対象となった事例 10 件[7-16]を対象とし、報告書をもとに分析を行った。鉄道車両と航空機は、距離もしくは日数で定められた定期検査を実施しており、官能検査が多数存在す

ることから今回の分析の対象とした。

事象の要因分析についてはなぜなぜ分析を用い、現場での作業経験者 2 名 1 組で行った。なぜなぜ分析は発生した事象に対し、「なぜ」を繰り返して事象の背後要因を特定する方法である。作業におけるヒューマンエラーは作業者単独で発生しているわけではなく、周囲の様々な背後要因に起因する場合がほとんどである。そこで、本調査ではなぜなぜ分析で抽出した背後要因について、m-SHEL モデル[17]を用いて分類を行った（図 1-1）。m-SHEL モデルはヒューマンエラーの背後要因を management、Software、Hardware、Environment、Liveware(作業者本人と関係する他者)の 5 つに分類して評価する考え方であり、モデルの特徴として作業者本人が中心にあり、周りにある要素との調和が必要であることを示している。m-SHEL モデルの中心である「L」を検査および整備の実施者として分類を行った。

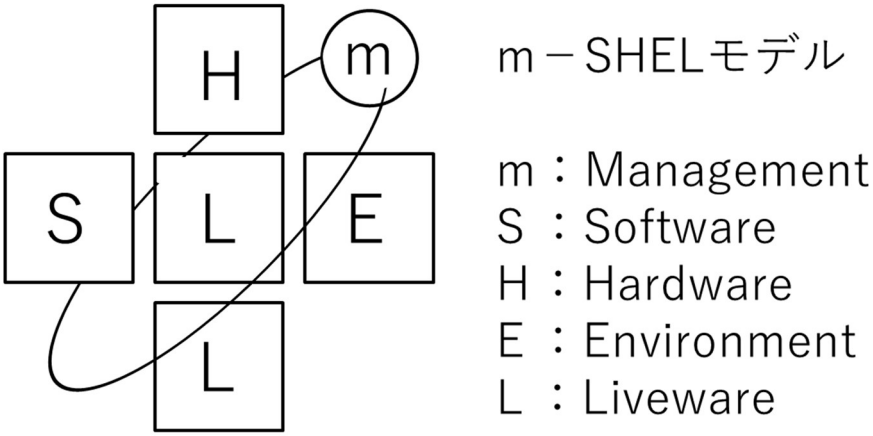


図 1-1　m-SHEL モデル

分析事例として、西日本旅客鉄道株式会社(以下、JR 西日本という)の新幹線における事故[7]の一部を分析した結果を図 1-2 に示す。当該事故は、2015 年 8 月 8 日、JR 西日本の新大阪駅発鹿児島中央駅行き 8 両編成の新幹線列車が四郎丸トンネル内を時速約 295km で走行中、2 両目の車体左側最前部に設置されていた側フサギ板が脱落し、3 両目の車体左側面に衝突、その衝撃で乗客に負傷させたものである。この事故の原因は、側フサギ板の取付ボルトの締め付けトルクが所定のトルク値に達しておらず、列車の走行による振動によりボルトが脱落したことと考えられている。締め付けトルクが所定のトルク値に達していなかった事に関しては、取り付け作業時のミスが運輸安全委員会の報告書において指摘されている。また、取り付け作業から事故が発生するまでに定期検査が実施されていたことから、検査でのミスについても指摘がある[7]。図 1-2 は当該事故の事故調査報告書に記述のある、検査でのミスについて分析したもので、「検査でのエラー」に対して「なぜ？」を繰り返し、背後要因を可視化した。このように、なぜなぜ分析を行った結果、最も深掘りされた項目について、m-SHEL モデルの項目に分類し、集計を行った。

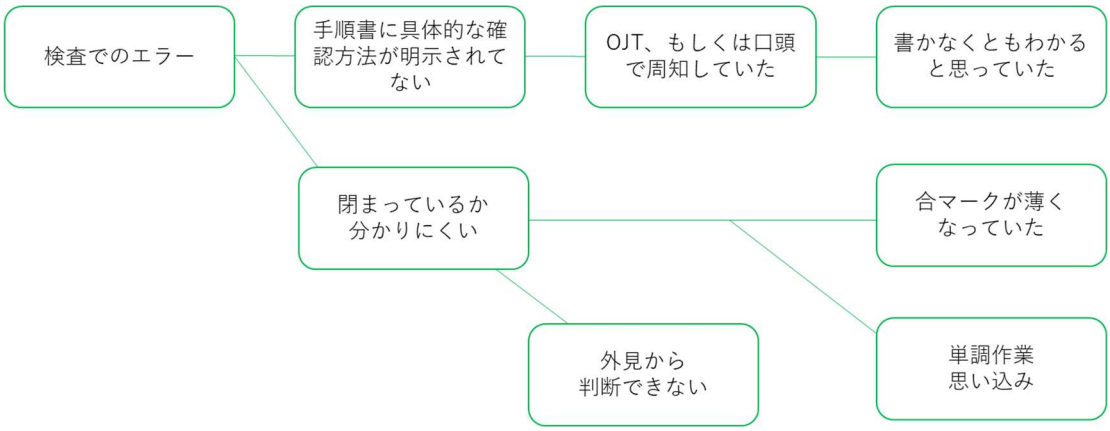


図 1-2 なぜなぜ分析による分析結果の一例

1.1.1.2.3 結果

抽出した背後要因について m-SHEL モデルを用いた分類を行った結果を表 1-2 に示す。対象とした事故および重大インシデントには、全部で 15 の背後要因が見られた。

分析の結果、今回対象とした事故および重大インシデントの背後要因として、最も多くの事例に見られたのは、暗い、狭い、位置的に作業や確認がしづらい等の問題が含まれる「E4: 作業環境の問題」であり、8 割の事例にみられた。次いで、同形式の車両でも構造の違うものがある、明確な標記がない等が含まれる「L-H：構造の問題」、作業の手順書が無い、チェックリストの確認箇所が明確でない等が含まれる「L-S：マニュアル、チェックリストの問題」の 2 つが 6 割の事例に見られた。

また、エラーを起こした本人に関する要因に関しては、ルールが出来た背景の理解不足、作業に使用する電線やフラックス等の特性や注意事項を知らない、経験したことのない作業等が含まれる「L1:理解・経験の不足」が他の要因に比べ高く、全体の半数に見られた。

1.1.1.2.4 考察

分析の結果、8 件の事例に作業環境に関する背景要因が存在することが判明した。この作業環境の問題が事故の予兆を検出できなかった背後要因の一部となった 8 事例について、問題の内訳のうち頻度の多いものに、暗い作業箇所（5 件）、作業や確認がしづらい位置（3 件）があった。G. Nickles らの報告においても、航空機の検査を例に、機械装置の検査における異常の探索に影響を与える要因として、視覚や経験等の個人的な要因、タスクの内容や作業時間等のタスク要因のほか、照明等の環境要因をあげており[18]、同様の結果が得られた。

また、T.W. Faulkner らの研究では難易度の高い目視検査において、容易に対象の色や材

料等の構造を変更するなど対象そのものを変える方法が取れない場合、照明を操作することで作業の難易度を大幅に変えることができると述べてられている[19]。鉄道車両の目視検査においても、対象の構造を変更することが容易ではないことから、適切な照明環境を確保することでヒューマンエラーの防止に寄与できる可能性が考えられる。

検査における照明については、日本工業規格の JIS Z9110 において、作業が詳細になるに従って必要な照度が高くなることが報告されている[20]。また、照度や光源の違いが、目視検査に与える影響について、様々な分野で報告がされている [21,22,23]。しかし、鉄道車両の目視検査に適した照明については十分に検討されていない。

表 1-2 背後要因の分類結果

背景要因			事例分析における一例	件数	発生割合
m	m1	安全文化	故障原因の追究を行わず、対策を打たない	3	30%
	m2	役割分担の問題	トルク締めを行う作業者が決まっていない	2	20%
	m3	リスクの管理	フェールセーフ設計の不備、作業・故障の実態を把握してない	5	50%
	m4	注意喚起	重点確認箇所に集中し、周りに注意がいかない	2	20%
	m5	作業員の管理	作業経験の無い作業者によるOJT(教育の不備)	2	20%
L-S		マニュアル、チェックリストの問題	記入項目が多すぎて、実情にあっていない	6	60%
L-H		構造の問題	標記が無い、同形式車両でも構造が異なる フサギ板が閉まっているか外見で判断できない	6	60%
L-E	E1	めったに無い作業	年に1回程度しかない作業、いつもとは異なる状況	3	30%
	E2	単調作業	同じ作業を何度も繰り返す	1	10%
	E3	タイムプレッシャー	対向列車が来るまでの十数分で点検作業を実施	3	30%
	E4	作業環境の問題	作業箇所が暗く見づらい、作業や確認がしづらい位置 狭く作業しづらい、新人との作業で集中できない	8	80%
L	L1	理解・経験の不足	ルールが出来た意味を理解していない 作業対象や使用する材料について良く知らない	5	50%
	L2	注意力低下	眠気、疲労、他事	1	10%
	L3	思い込み	過去に故障事例がなく大丈夫だろうと考える	4	40%
L-L		コミュニケーションの問題	主任の言う事に疑問をぶつけられない、確認会話の不備	4	40%

1.1.2　鉄道車両の目視検査における局部照明

1.1.2.1　照明が視覚に与える影響

人間にとっての可視光は約 380～750nm の波長範囲の電磁波であり、その波長範囲におけるエネルギー分布に応じて、色や明暗の分布を感じることができる。照明の光色は相関色温度で表すことができる。相関色温度は、完全黒体を高温で熱した際に発せられる光の分光組成が温度によって規則的に変化することが由来となっており、K(ケルビン)で表される。相関色温度は上昇するにつれ青みがかった寒色系の光に、下降するにつれ赤みがかった暖色系の光となる。

1.1.1 項では、目視検査が多数存在する鉄道車両の検査では、ヒューマンエラー低減のため、適切な照明環境を確保することが重要であることを述べた。本項では、照明が視覚に与える影響について、過去の研究を概観した結果を記述する。

照度が視覚に与える影響に関して、労働安全衛生規則（昭和四十七年労働省令第三十二号）第 604 条や、日本工業規格の JIS Z9110 における工場での作業別照度基準[20]において、作業が精密になるほど、必要な照度が高くなることを記述している。また、蒲山らの研究で、2 線視標を用いた実験の結果、光束発散度が 5～5300 rlx の範囲では明るければ明るいほど分離視力が向上することが報告されている。また、注視点をとりまく直径 5°の範囲と周囲 80°の明るさの比が視力に与える影響についても調査しており、中心部が周囲より暗い場合や周囲の光束発散度が 300 rlx 以下の場合、中心部がその 20 倍以上の明るさになったときに視力が低下することも述べている[24]。

また、光色が視覚に与える影響に関して、Mojtaba らは色温度の異なる 2 つの光源を用い、紙面の文字を読む能力に与える影響を調査しており、色温度の高い光源の方が良い結果を得られることを報告している[25]。また、森田らの報告では、背景とランドルト環を 7 種の色の組合せで作成した視標を用い、色温度の異なる 5 種の光源で照らした際、視認性に与える影響を調査した結果を報告しており、照明光源の違いによって、ランドルト環の向きが確認しにくい組合せがあることを述べている[26]。また、不快感や物の見えづらさを引き起こすまぶしさ(以下、グレアという)に与える照明の影響に関して、短波長の成分が多く色温度の高い光源の方が、グレアを感じやすいことも複数の研究において報告されている[27,28]。

1.1.2.2　目視検査で使用する局部照明光源の LED 化と影響の調査

車両の検査は主に車両区所等にある検査および修繕を行うための車庫(以下、検修庫という)で行われる。在来線電車車両の一般的な構造例を図 1-3 に示す。在来線の車両は全長約 20m、全高約 4m、全幅約 3m と巨大な筐体を有している。表 1-1 における重要部検査と全

般検査は車両を解体し、検査対象となる装置や部品を取り外して、詳細に検査を行うものであるのに対し、状態・機能検査にあたる交番検査は車両を解体せず、車両全般について状態および機能を確認する検査であり、特に目視検査が多数存在する検査である。交番検査は車体下部や台車部分の検査も行うことから、ピットのある専用の場所で行われることが多い。しかし、台車部分や機器箱の内部、点検蓋内部等は検修庫の全般照明が届かず影になる場合が多く、そのような箇所の検査にはハンディライト等局部照明が使用されている(図 1-4)。従来、局部照明の光源には白熱電球が主に用いられてきたが、近年では LED が照明光源の多くに採用されており(表 1-3)、鉄道車両の検査に用いる局部照明の光源も白熱電球から LED に置き換わっている。

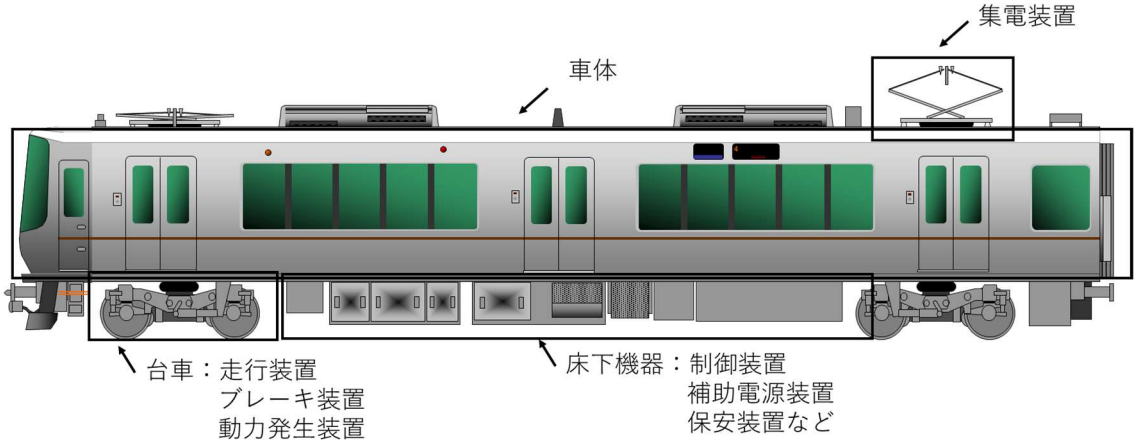


図 1-3 在来線電車車両の構造の一例

(a)ピット内で行う台車の検査

(b)側引戸上部の点検蓋内部の検査

図 1-4 局部照明を用いた検査の様子

表 1-3 照明器具の生産・出荷台数の推移

	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度
白熱灯器具	2,728	2,258	1,870	1,652	1,459
蛍光灯器具	3,988	2,299	1,336	488	317
高圧放電灯器具	230	234	197	229	198
LED器具	56,310	60,379	64,098	61,044	56,885

単位：千個

※一般社団法人日本照明工業会、照明器具年度生産・出荷(販売)統計[29]より作成

これら局部照明の変化が目視検査に与える影響を把握するため、2016 年度に JR 西日本の鉄道車両の検査に従事する作業員を対象としてヒアリング調査を行った。調査内容は、使用している局部照明の光源および LED 局部照明を使用した際のメリットおよびデメリットである。調査の対象は 20 代から 60 代の作業者 34 名(平均年齢 44.03、標準偏差 15.15)であった。対象者に 40 代の作業者が存在しなかったことから、対象者を 40 歳未満の群(N = 15、平均年齢 27.73、標準偏差 4.73)と 50 歳以上の群(N = 19、平均年齢 56.89、標準偏差 2.74)に分け、結果を比較した。

図 1-5 は使用している局部照明の光源についてまとめた結果を示す。調査の結果、ほとんどの作業者が LED の局部照明を使用していることが判明した。また、使用する局部照明の選定には特に決められた基準は存在せず、作業者または各現場の担当者の判断により、同じ LED でも様々な種類の局部照明が使用されていることも明らかとなった。局部照明の選定理由に関して、白色 LED を使用している作業者は、小型で丈夫であることや支給品であること、明るいことをあげていた。電球色 LED や白熱電球の局部照明を使用している作業者も存在しており、これらの作業者は慣れた光色が見やすいことから使用していると回答した。また、白色 LED と白熱電球の局部照明両方を使用している作業者も存在しており、これらの作業者は目視検査の対象に応じて見やすい照明が異なるように感じるため、作業に応じて使い分けていると回答した。

LED 局部照明のメリット、デメリットについて、ヒアリング結果をまとめたところ、下図 1-6、図 1-7 の結果を得た。高い照度をメリットとして挙げる作業者が多数見られた反面、まぶしさをデメリットとして挙げる作業者も多く存在した。特に 50 歳以上の作業者では LED 照明は「平面的な見え」や「見え方に違和感」を持つというネガティブな意見があった。

下図 1-8 はコニカミノルタ製の演色照度計 CL-70F を用いて実際に計測した、白熱電球と蛍光灯、鉄道車両の検査で使用されていた LED 局部照明の分光分布である。各図の横軸は波長、縦軸は各波長の強度を示している。それぞれの光は分光組成が異なっており、その違いにより光色は異なって見える。各光源について、実際に相関色温度を計測した結果、白熱

電球は約 2900K、蛍光灯は約 4200K、現場で使用されていた LED ライトは約 6500K 程度であった。白熱電球と LED では相関色温度に大きな差が存在している。また LED の光は、波長の長い赤外線付近の成分が非常に少ないことから、白熱電球に比べてエネルギー効率がよく、高い照度を出力することができる。これら LED の特徴である高出力、高色温度により、鉄道車両の目視検査における照明環境は大きく変化したと考えられる。

これまで、様々な種類のハンディライトが発売されている中で、鉄道車両の検査現場における適切な局部照明の条件や、これら光源の違いが目視検査にもたらす影響について十分に検討されていないことから、局部照明の選定には明確な基準がなく、職場もしくは作業者個人により判断されている場合が多い。これまで述べた通り、照明は様々な影響を視覚に与えることから、調査において白熱電灯と白色 LED の局部照明を使い分ける作業者がいたように、目視対象に応じて適切な照明は異なる可能性が考えられる。また、50 代以上の作業者において、LED 局部照明に「違和感」や「平面的な見え」を感じている人が複数存在したように、LED 照明の特性が 50 代以上の作業者の目視検査に影響を与えている可能性も考えられることから、局部照明の光源の違いが鉄道車両の目視検査に与える影響について検討することは重要である。

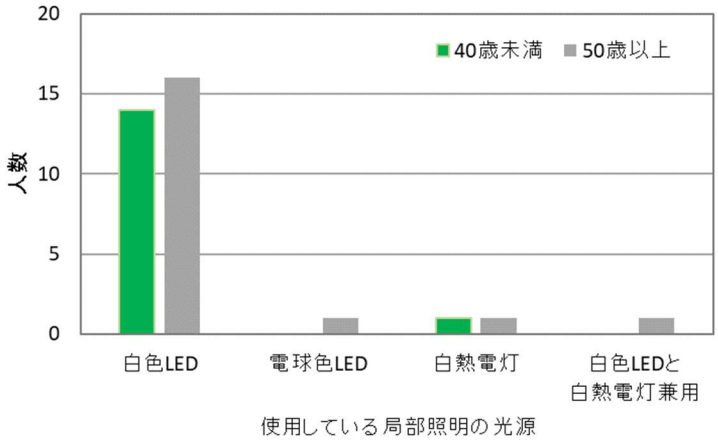


図 1-5　使用中の局部照明の光源の種類

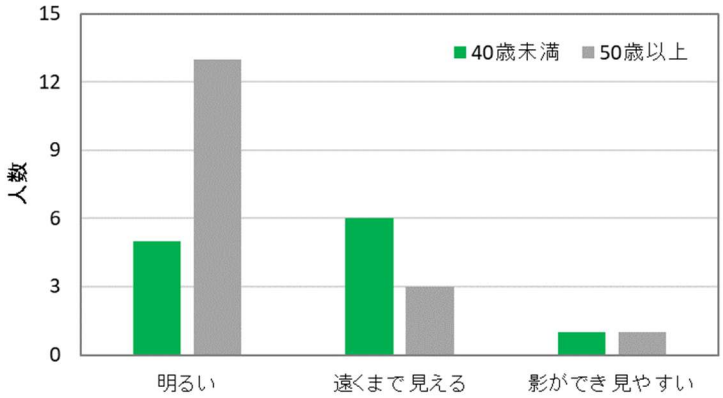


図 1-6　LED 局部照明のメリット

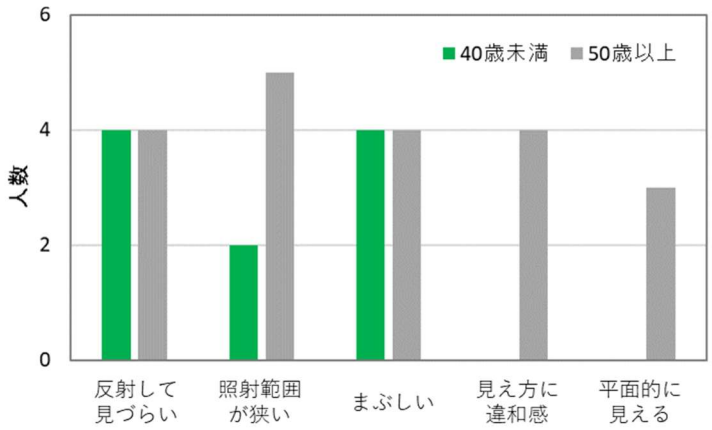
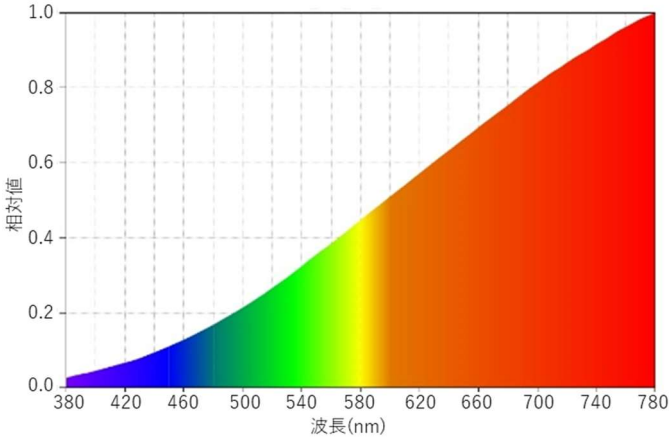
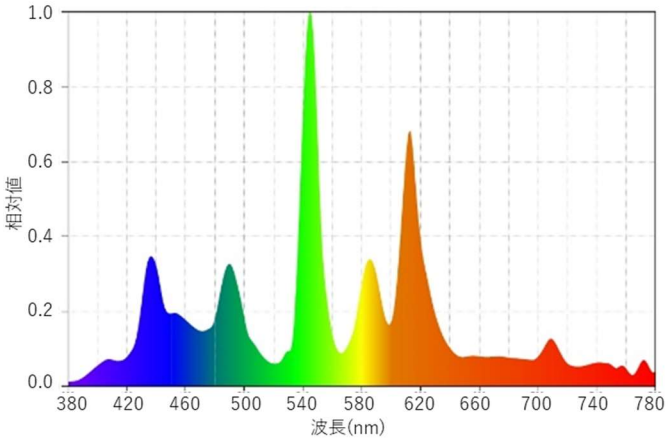


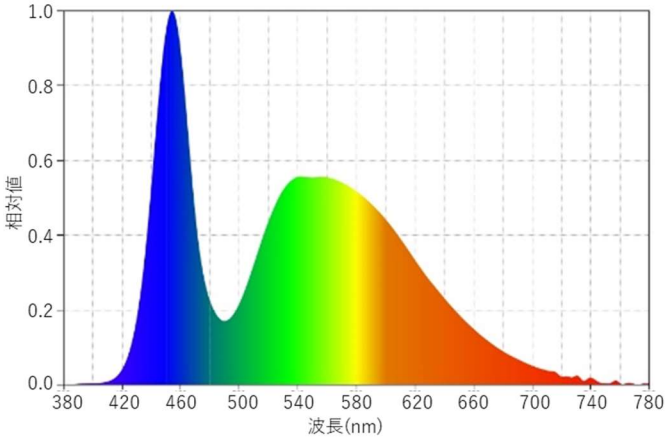
図 1-7　LED 局部照明のデメリット



(a)白熱電球の分光成分の一例



(b)蛍光灯の分光成分の一例



(c)白色 LED の分光成分の一例

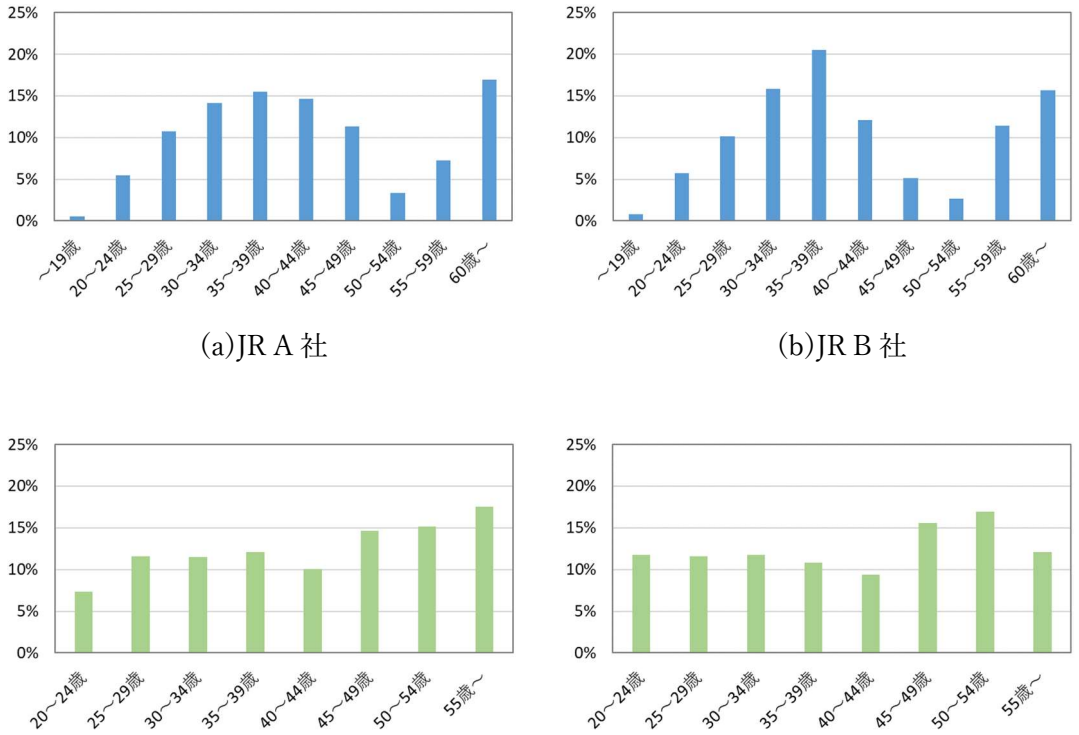
図 1-8 各種光源の分光成分の測定結果

1.1.3　作業者の高齢化

1.1.3.1　鉄道車両の検査に従事する作業者の雇用範囲拡大

わが国では 2012 年の高年齢者等の雇用の安定等に関する法律(昭和四十六年法律第六十八号)(以下、高年齢者雇用安定法という)の改正により、65 歳までの定年引上げ、65 歳までの雇用継続制度導入、定年制の廃止等の措置により希望者に対する 65 歳までの雇用が義務化された。このような法令改正に伴い、鉄道事業者においても再雇用制度が導入され、60 歳以上の作業者が増加しており、検査の現場には 10 代から 60 代まで様々な年代の作業者が存在している。

鉄道事業者の従業員の年齢構成について、JR2 社と大手私鉄 2 社の例を図 1-9 に示す。図 1-9 から、JR2 社の社員年齢構成は非常にいびつで、国鉄時代に採用された 55 歳以上と JR 発足後採用された 30 代が多く、40 代後半から 50 代前半が少ないことが分かる。これは、旧国鉄における 1982 年以降の数年間、経営の悪化を少しでも抑えるため新規採用の停止を行っていたことが要因である[30]。また一部私鉄においては、バブル崩壊以降様々な企業で採用が抑制されたのと同様に、40 歳以下の社員が少なく、40 歳以上の社員が多く存在している。



(a)JR A 社　(b)JR B 社

(c)大手私鉄 C 社　(d)大手私鉄 D 社

図 1-9　鉄道事業者の年齢構成

このように鉄道車両の検査には10代から60代まで様々な年代の作業者が従事している。また高年齢者雇用安定法は 2021 年にも改正され、70 歳までの就業機会確保の努力義務が課されることになった。このような状況の中、今後鉄道車両の検査の現場にも 65 歳を超える雇用の可能性が高まっている。

1.1.3.2　加齢による視覚機能変化

人間の眼は図 1-10 のような構造をしており、光は虹彩の孔である瞳孔から入り、レンズ(水晶体)を通して網膜に至る。網膜に至る光は虹彩によって調節される。またレンズは網膜に焦点を結ぶためのもので、毛様体筋によって厚みを調節している。網膜には視細胞である錐体(cone)と桿体(rod)が存在する。錐体は明所視で中心的役割を担い、鋭敏で色彩のある外界の知覚を行い、桿体は暗所視で中心的役割を担い高い感度を有するが、暗所視は明所視のような鋭敏さと色彩は有しない。網膜に至った光は視細胞によって信号化され、視神経を経由し脳に送られて映像として知覚される[31,32,33]。

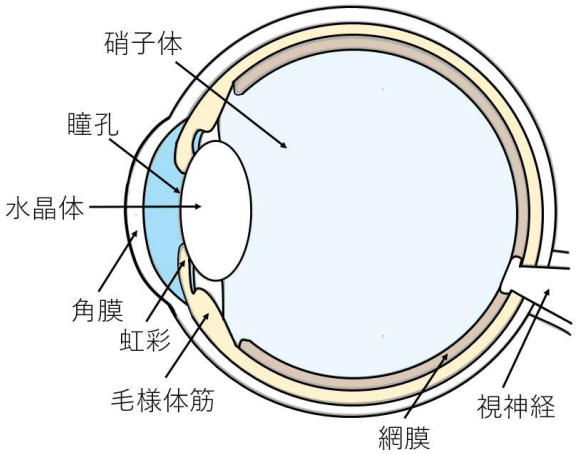


図 1-10　眼球の構造

このように光は眼球を通して知覚されているが、眼球の光学特性は加齢により様々な変化が発生すると言われている[34-37]。加齢による変化として、水晶体の混濁および黄変化、硬質化や毛様体筋の低下、瞳孔の縮小などがあげられる。水晶体の硬質化や毛様体筋の低下は調節力減少の一因となり、老視の要因といわれている。また、瞳孔の縮小および水晶体の混濁は網膜に届く光を減少させるため、同じ明るさでも若年者に比べ高齢者の方が暗く感じていることが明らかとなっている[38]。水晶体の混濁は、水晶体内で光が散乱する要因にもなり、その結果加齢によりグレアを感じやすくなることが報告されている[39]。また水晶体の黄変化により、網膜に届く光の分光成分の変化が報告されている[40,41,42]。

網膜に届く光の分光成分の変化について、J. Pokorny らの研究によると、20 歳から 60 歳

の目のレンズの平均的な分光濃度関数 T_L は下式(1-1)で、60 歳以上の光学濃度は下式(1-2)で表すことができると述べられている[40]

$$T_L = T_{L_1}[1 + 0.02(A - 32)] + T_{L_2} \qquad (1\text{-}1)$$
$$T_L = T_{L_1}[1.56 + 0.0667(A - 60)] + T_{L_2} \qquad (1\text{-}2)$$

式(1-1)、(1-2)において、A は年齢、TL1 と TL2 は波長ごとに決められた定数を示す。TL1 は年齢によって変化する定数成分、TL2 は年齢に関係しない定数成分である。式(1-1)、(1-2)を用い、20 代から 60 代の分光透過率を算出した(図 1-11)。加齢により、短波長成分の光の透過率が減少していることが分かる。このような年代による違いが一因となり、高齢者の色覚特性は若年者と異なると言われており、100hue テストを用いた実験的研究においても高齢者の色弁別能は若年者に比べ明らかに低下すると言われている[43-46]。

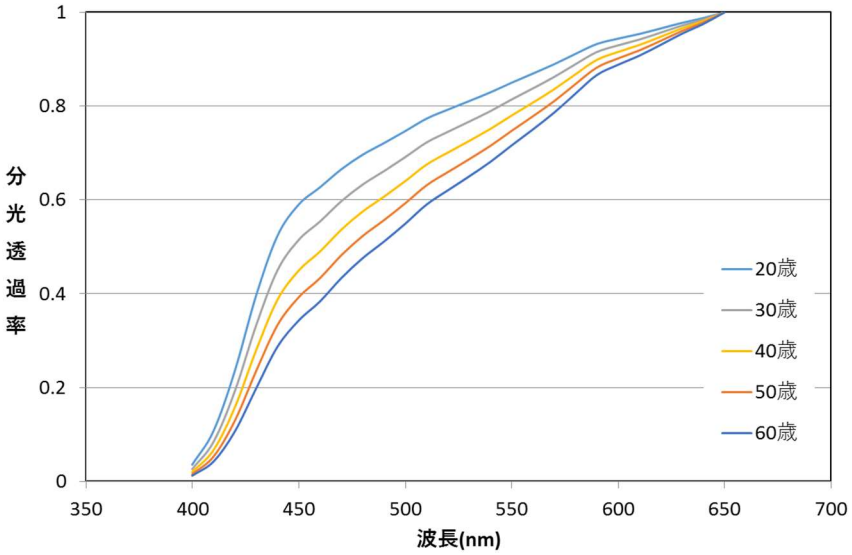


図 1-11 水晶体の分光透過率の加齢変化

加齢による視覚機能変化に伴い、文字を読む作業を行う際に必要な照度が上昇することや[38,47,48]、若年者と高齢者の比較実験により、高齢者のコントラスト感度が低下する照明の条件について報告した研究[49] 等、加齢による視覚機能変化と照明条件の関係については多数報告されている。しかし、多くは視界全体を照らす全般照明や一般的な視作業に関するものが多く、鉄道車両の目視検査で使用する局部照明に関する報告は見当たらない。1.1.3.1 項で説明したように、幅広い年代が従事する鉄道車両の検査において、使用される局部照明を年代によって使い分ける必要があるかは十分に検討されておらず、明確な基準が存在しない。各年代に適した局部照明条件を検討することで目視検査の精度向上の一助になると考えられる。

1.2　研究の目的

1.1.1 項で述べたように、鉄道車両は安全性を確保するため、走行距離や期間に基づき定期的に検査が行われており、依然として作業者の認知・判断による官能検査、特に目視検査が多数存在している。同項では、ヒューマンファクターの観点から適切な照明環境を実現することで、ヒューマンエラーを防止する一助となる可能性を示した。

1.1.2 項では、照明が視覚に様々な影響を与えることを紹介し、鉄道車両の目視検査で使用される局部照明の光源が白熱電球から LED に変化した際の影響について調査した結果を示し、局部照明の光源の違いが鉄道車両の目視検査に与える影響について把握する必要性や、目視対象によって適した照明条件が異なる可能性を述べた。

1.1.3 項では、加齢により視覚機能が変化すること、視覚機能の変化により適した照明が変化することを示し、10 代から 60 代までの幅広い年代が従事する鉄道車両の検査において、年代に応じた局部照明条件を把握する必要性について述べた。

鉄道車両の検査における照明は検修庫の全般照明および作業者が使用する局部照明によって構成されるが、全般照明は使用する作業者や検査対象ごとに照明条件を変えることは難しい。そこで本研究では、鉄道車両の検査における照明環境を改善することによりヒューマンエラーを低減することを目的として、目視検査で使用される局部照明を対象に、目視対象や使用者の年代に応じた局部照明条件について検討することとした。

1.3　本論文の構成

本論文は 5 章から構成される。第 1 章の序論では、本研究の背景として、鉄道車両の検査には目視検査が多く存在し、ヒューマンエラー低減には照明環境の改善が重要であることを述べるとともに、検査で使用しているハンディライト等局部照明の問題点について、現状の作業環境や作業者の高齢化の面から記述した。第 1 章 2 節および 3 節には研究の目的と本論文の構成を述べた。

第 2 章では、鉄道車両の目視検査における作業者の年代と目視対象に応じた局部照明条件を明らかにするための実験設計として、どのような実験課題が必要か検討を行った。まず、鉄道車両の目視検査内容について例を挙げるとともに、検査がどのような手がかりを基に行われているか分析を行った。分析の結果、鉄道車両の目視検査は、「立体」および「平面」の要素に基づく検査の 2 つに分類できること、「平面」の要素は、「輪郭線、コントラスト」と「色」の要素に分けられることを示し、実験課題に必要な要件について記述した。

第 3 章から第 4 章では、鉄道車両の目視検査における年代および目視対象に応じた、適切な局部照明条件を把握するため、3 つの実験調査を実施した結果を記述した。第 2 章で述べた 2 要素について、鉄道車両の目視検査を模した課題を用い、照度および光の分光成分を実験要因として、適切な局部照明条件について年代別に検討を行った。第 3 章では、「立

体」の要素を基に異常を判別する場合に関して記述しており、実験結果をクラスタ分析により分析したところ、50 代以上の作業者には、5000 lx 程度の明るすぎる照明は適さない傾向が見られ、1000 lx 以下の照明を使用する方が弁別率は向上することを示した。対して、20 代、30 代では照度レベルの影響は小さいことが明らかとなった。また、分光成分の影響は年代に関係なく小さいことが判明した。第 4 章では、「平面」の要素を基に異常を判別する場合に関して記述した。実験の結果、「平面」の要素の内、「輪郭線、コントラスト」を基に異常を判別する場合、年代に関係なく照度は 5000 lx 程度の明るい照明が望ましいことや、分光成分の影響が小さいことが明らかになった。また、「色」の要素を基に異常を判別する場合、適切な分光成分は年代により違いがあり、20 代、30 代では分光成分の影響は小さいものの、50 代以上になると目視対象により分光成分を使い分けた方が良い課題成績を得られることが明らかとなった。

第 5 章では、本研究で得られた知見をまとめ、目視検査用ハンディライトの仕様について提案を行うとともに今後の課題についても言及した。

第 2 章　鉄道車両における目視検査

2.1　はじめに

第 1 章では、鉄道車両の定期検査で使用されるハンディライト等局部照明の課題について述べ、作業者の年代および目視対象に応じた適切な局部照明条件を明らかにする必要性について記述した。作業者の年代および目視対象に応じた局部照明条件を明らかにするためには、実際の目視検査の要素を取入れた課題を設定し、課題に与える照明の影響を調査する必要がある。本章では適切な課題設定のため、目視検査が多数存在する在来線車両の定期検査を例に、目視検査の概要を述べ、その対象および内容を分析した結果を紹介する。分析の結果判明した要素を取入れた課題について、局部照明が与える影響を実験により明らかにすることで、鉄道車両の検査に特化した局部照明の提案が可能となると考えられる。

2.2　鉄道車両における目視検査の対象

定期検査の検査項目は鉄道に関する技術上の基準を定める省令および省令の解釈基準を基に、各鉄道事業者が実施基準を設けて行われている。交番検査は表 1-1 の状態・機能検査に該当する検査で、電車の場合 3 か月毎に行われる。交番検査は車両の集電装置、走行装置、電気装置、ブレーキ装置、車体など車両の全体にわたり、その状態、作用および機能について、車両を解体せず点検蓋やカバーを外した状態で行う検査である。交番検査における電車の目視検査対象について、JR 西日本の在来線 223 系電車の交番検査(2018 年度時点)を例に、検査対象と内容を集約した結果を表 2-1 に示す。223 系は大阪府を中心とした京阪神都市近郊区間で主に使用されている電車である。交番検査項目のうち 6 割以上が目視検査に該当した。

表 2-1 について、各検査の概要を以下に示す。鉄道車両は走行中、振動や飛来物による衝撃、温度や湿度の変化にさらされる。そのため、車両全般の各種装置や部品の取付状態の確認や破損、損傷、変形の有無を確認する必要がある。また、構造上応力のかかる部位には、走行中の振動により繰り返し大きな荷重がかかるため、亀裂の発生や部位変形、折損に注意を払う必要がある。また、振動はボルトやナット、ねじなどの締付力が十分でない場合、緩みを発生させる可能性があることから、緩みが発生していないかの確認が必要となる(図 2-1、a)。また、台車等には衝撃の緩和等を目的に、ゴム部品が多く使用されているが、ゴム部品は劣化や衝撃により亀裂や破損が生じる可能性があり、確認を行っている(図 2-1、b)。

鉄道車両には電気装置が多数搭載されている。電気装置において、錆の発生や埃等の介在は導通不良や短絡等の発生要因となりうることから、汚損や腐食、変色の検出は重要である(図 2-1、c)。また、回路の短絡等により過電流が発生した場合は、焦げ跡等の変色が起こることが多く、有無の確認が必要である。

表 2-1　目視検査の検査内容と主な対象箇所

検査内容	主な対象箇所	件数
取付状態不良	各種装置、部品	261
損傷、破損	電気装置、パッキン、機器箱、ゴム部品、電気配線等	77
亀裂	台車、ゴム部品等	60
変形	機器箱、台車部品等	44
汚損	電気装置、客室(吊手、座席、床)等	44
摩耗、欠損	車輪、スリ板、制輪子等	33
変色	電気装置、端子、接点等	32
緩み	ボルト、ナット、ねじ等	31
腐食	機器箱、客室(内張板、吊手)、外板、端子、接点等	29
測定	車輪、輪軸、スリ板、制輪子等	17
漏油、漏水	オイルダンパ、潤滑油等	13
折損	ボルト、金属部品等	13

(a) ねじの緩み、変色(焼損)

(b)ゴムの亀裂

(c)端子に発生した緑青(腐食、変色)

図 2-1　車両に発生した不具合の例

鉄道車両の検査には基準となる寸法が決められており、測定が必要な項目も存在する。ブレーキ装置である踏面ブレーキやディスクブレーキは、車輪やブレーキディスクに合成樹脂製のパッドを押し当て、車両を減速させるものである。また、集電装置で架線と接触する部分は、カーボン製のスリ板となっており、架線からの電気を車両に伝えている。これら制輪子やスリ板は、車輪や架線より強度が低く設定されており、摩耗が前提となっており、交番検査では摩耗量を計測して使用限度内か、また異常な摩耗を起こしていないか確認を行っている。また、輪軸および車輪は、直接レールと接する部分であり、安全で快適な走行のため詳細に管理されており、車輪径や車輪形状、車輪間距離が基準値以内か専用の計測器を用いて計測することになっている。

2.3　鉄道車両における目視検査の手がかりとなる要素の抽出

2.2 項において抽出した目視検査項目について、どのような変化を基に異常/正常の判断を行っているかを基準に分類した結果を図 2-2 に示す。目視検査の内容を精査した結果、変形、損傷のような「立体的な変化」の要素を基に異常を判別する目視検査と、「平面上の変化」として、文字、目盛りを読む、油や水の漏れ、亀裂の有無など、コントラスト感度や空間分解能を用いてとらえた「変化の境界や輪郭」の要素を基に異常を判別する目視検査、変色など腐食、錆の確認を行うような「色」の要素を基に異常を判別する目視検査に分類することができた。これら 2 つの要素に対して、年齢と対象に適した局部照明条件を把握することで、鉄道車両の目視検査用局部照明の提案ができると考え、「立体」および「平面」の要素を基に異常を判別する状況において、年齢と対象に応じた局部照明条件の検討を行うこととした。

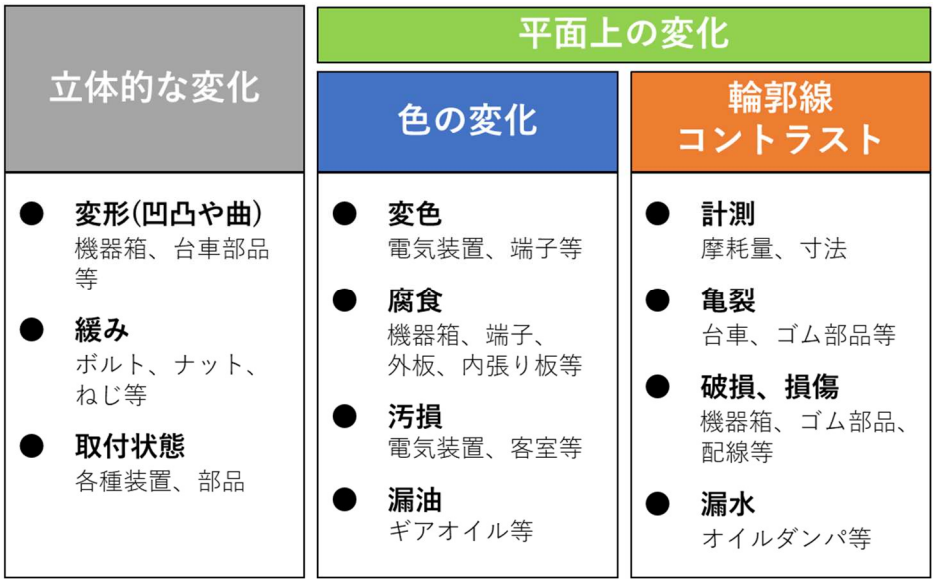


図 2-2　鉄道における目視検査対象の分類

第 3 章　「立体」の要素に基づく検査における年代別最適局部照明条件

3.1　「立体」の要素に基づく検査における年代別最適局部照明条件

3.1.1　はじめに

第 2 章では、鉄道車両の目視検査における異常の判別が、どのような手がかりを基に行われているか分析を行い、「立体」と「平面」の 2 つの要素に基づいて目視検査が行われていることを明らかにした。本章では、「立体」の要素に基づく検査を行う場合に適した年代別局部照明条件を明らかにするために行った実験と結果および考察について述べる。

人は 3 次元空間知覚のために様々な手がかりを用いている。距離と奥行きの手がかりとなるものとして調節、運動視差や既知対象の大きさがあり、距離の手がかりとなるものとして輻輳や開散角があり、奥行きの手がかりとなるものとして両眼視差、網膜像の大きさ、陰影、きめの密度勾配、網膜像の大きさ等が存在し、これら複数の手がかりをもとに 3 次元空間知覚を実現している[50~52]。第 2 章で述べたように、鉄道車両の目視検査では、凹凸や曲損、ねじの緩みなどの微小な立体的変化を検出することが重要である。このような微小な変化を検出する際、特に重要となるのは相対的奥行き感度である。しかし、奥行き弁別に与える照明環境については、ほとんどが全般照明を用いたものであり、課題に関しても、画面上に課題を投影するものが多く[53、54]、現実条件で局部照明を用いた鉄道の目視検査を模擬した奥行き弁別課題に与える局部照明条件の影響に言及したものは無い。

3.1.2　実験方法

3.1.2.1　実験参加者

加齢による影響について調査するため、JR 西日本安全研究所の規定に基づき、実験倫理審査により承認後、書面によるインフォームド・コンセントを得た 20 代、30 代の実験参加者 14 名(平均年齢 31.5 歳、標準偏差 6.7)、50、60 代の実験参加者 17 名(平均年齢 58.8 歳、標準偏差 5.8)、合計 31 名を対象に実験を行った。実験参加者は、鉄道車両の検査に従事していない一般から募集を募っており、虹彩色はすべて茶系であった。また、条件統制のため、矯正視力が 1.0 以上かつ白内障や緑内障等眼疾患の既往がない者とし、カラーコンタクトおよびブルーライトカット仕様の眼鏡の使用は禁止した。

3.1.2.2　試料

図 2-2 で示したように、鉄道車両の目視検査では、数多く使用されているボルトやねじの緩みや車体などに生じる凹凸など、「立体的」な変化を検出する必要がある。そのため、1.1.2.2 項の調査において、図 1-7 で示したように、LED を光源とする局部照明の使用によって「平面的な見え」が実際に生じているのであれば異常を見逃す大きなリスクとなる。鉄道車両の目視検査では、周囲との違いを手がかりとする場面が多くあることから、絶対距離の知覚よりも相対距離の知覚が重要といえる。そこで本実験においては、微小な相対的奥行き感度を観察するため、アルミの金属板を用いて試料を制作した(図 3-1)。金属板の寸法は縦 60mm 横 70mm であり、表面に直径 17.5mm の円形の溝を左右に 2 つ設けた。

円形の溝の深さの弁別に関して、事前に予備調査を行ったところ、左右の円形溝の深さの差と弁別率の関係は表 3-1 のようになった(n = 6、平均年齢 44.5 歳、標準偏差 8.5)。弁別率とは差がある課題に対し差があると回答したものと差がない課題に対し差がないと回答した回答率である。予備調査は暗室環境中で行い、金属板の円形溝が視角 1 度となるよう視認距離は 1 m とし、実験参加者と弁別試料の間に設けた局部照明により、弁別試料の鉛直面照度を 200 lx に設定した。予備実験の結果から、最小の弁別可能な円形溝の深さの差の閾値は約 0.4mm と推測し、この閾値条件下において、照明条件と視覚機能がどのように影響するか観察することで検査精度の向上に寄与できると考え、この条件を採用した。そのため、円形の溝は左側が深さ 1mm、右側の溝が深さ 1mm のもの(以下、金属板 1 と言う)と、左側が深さ 1mm、右側が深さ 0.6mm のもの(以下、金属板 2 と言う)の 2 種類を作成した。この差は一般的な目視検査に求められる弁別よりも微小なもので、この条件での正しい判別率が向上すれば、目視検査の精度向上が望める。また照明の反射を抑えるため、金属板表面には、つや消しアルマイト加工を施した。

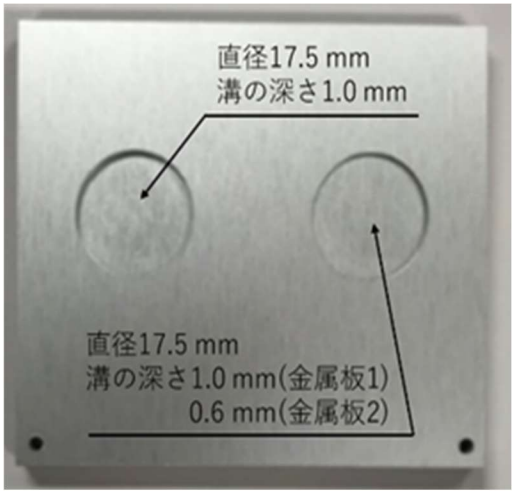


図 3-1　弁別試料

表 3-1　予備調査における円形溝深さの差と弁別率

溝深さの差(mm)	0.8	0.6	0.4	0.2
弁別率	100.0%	98.3%	82.5%	36.3%

3.1.2.3　実験条件

実験室内は暗室とし、弁別試料を照らす局部照明を実験参加者と試料の間に設置した(図 3-2)。局部照明条件は弁別試料の鉛直面照度が 50 lx、1000 lx、5000 lx の 3 水準、分光成分は電球、蛍光灯、白色 LED を模したもの 3 水準の合計 9 条件である。分光成分の 3 水準に関して、これまで目視検査で使用されるハンディライトの光源は主に白熱電球もしくは蛍光灯であったことから LED との比較対象として採用した。照度レベルについては、50 lx と 1000 lx は白熱電球を光源とするライトの暗い部分と明るい部分の明るさを、5000 lx は LED ライトの明るさを基準に設定した。局部照明装置には、LED Motive 社の spectra tune lab を用いた。spectra tune lab は波長の異なる 10 種の LED が内蔵されており、それぞれの出力を個別に調整することで様々な波長の光を再現可能な波長可変光源である。コニカミノルタ製の演色照度計 CL-70F を用い、spectra tune lab により再現した光と実際の光を計測した結果を表 3-2 に示す。表 3-2 中の Δuv は色度図上の黒体軌跡との色差を示す。分光成分の 3 水準に関して、電球を模した光の色温度は 2784K、蛍光灯を模した光の色温度は 4838K、白色 LED を模した光の色温度は 6869K であった。照射角度は 10 度とした。

3.1.2.4　実験手順

実験参加者には 1m離れた位置から弁別試料を目視し、左右の溝の深さに差があるかないか判断させる課題を課した(図 3-2)。一般的に目視検査では頭部の位置や照射角度を変えながら判断を行うことが多いが、狭い箇所を覗くような場合、頭部や照射角度を変えることが困難な場合もあるため、今回の実験では頭部位置と照射角度を固定した。

今回の実験課題では、溝の深さに差がない金属板 1 に対し、差があると回答する False Alarm と溝の深さに差がある金属板 2 に対し、差がないと回答する miss の 2 種類の誤答が存在する。鉄道車両の検査において、false alarm はその後の確認で安全性が担保されるが、miss は異常を見逃したまま車両を営業に供することに繋がるため、miss の削減が重要視される。よって、課題は 1 セット 50 回とし照明 9 条件毎に 50 回を 1 セットとして実施し、1 セットの内 10 回は金属板 1、残り 40 回は金属板 2 の割合でランダムに提示した。

また、課題 1 セット終了ごとに 1 セット中の主観的な見やすさについて、鉄道信号の視認性評価に用いられる評価尺度[55]を参考に、「全然見えない：1」～「非常に見やすい：5」までの 5 段階で評価させた(表 3-3)。なお、視覚的疲労の影響を排除するため、2 日間に分

けて実験するとともに、各セット間に 4 分間の小休憩、3 セット終了後には 10 分間の休憩を設ける等十分配慮を行い、実験参加者の誤答率が時系列で上昇していないことを確認した。

3.1.2.5　分析方法

年代別に局部照明条件と誤答率の関係を調査するため、実験参加者間要因は年代 2 水準、実験参加者内要因は照度レベル 3 水準と分光成分 3 水準の混合計画 3 要因分散分析を行った。また局部照明条件が誤答率に与える影響を観察するため、実験参加者ごとに誤答率を平均値 0、分散 1 に標準化したデータを用い、クラスタ分析を行った。クラスタ分析には Ward 法を用い、ユークリッド距離が 5.0 以上離れているものを別クラスタとなるよう分類した。主観評点に関しては、順序尺度を用いており、母集団の分布に正規分布を仮定できないため、年代別の照度と分光成分による差については、フリードマン検定を行った。

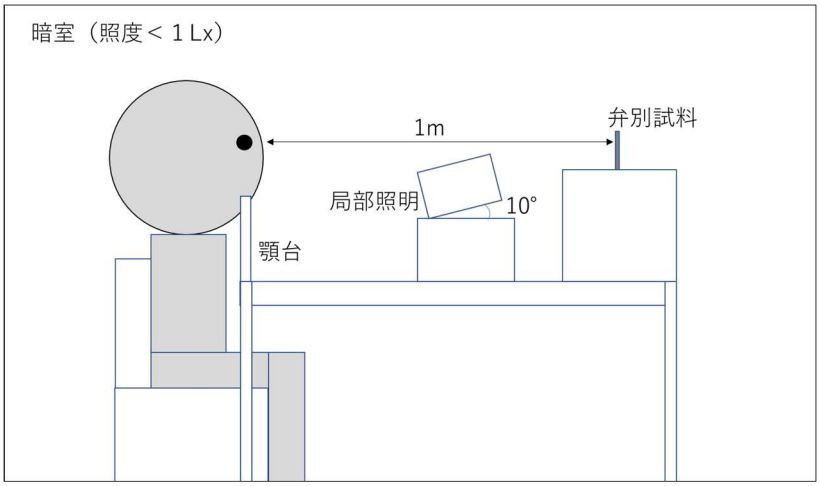


図 3-2　実験概略図

表 3-2　Spectra Tune Lab による各種照明機器の再現

光源	実際のライトの光			Spectra Tune Labによる再現光		
	色温度	Δuv	演色性	色温度	Δuv	演色性
電球	2700	0.0001	99.7	2784	0.0006	89.5
蛍光灯	4907	0.0007	83.5	4838	0.0012	77.5
白色LED	6878	0.0004	74.5	6869	0.0022	75.1

表 3-3 主観的見やすさの評価尺度

評点	今回の光での見え方
1	全然見えない
2	何とか見えるが、あまり自信が無い。
3	見えるけれども、奥行き差まで完全に見えるわけではない。
4	大体普通に見えるが、もっと見やすくなる余地が残っている気がする
5	非常に見やすい。ちょうど適当な気がする。

3.1.3 結果

3.1.3.1 年代および局部照明条件が誤答率に与える影響

誤答率について、平均値±2SD の範囲外の結果が見られた実験参加者(20 代、30 代 1 名、50 代、60 代 3 名)のデータを外れ値とし、最終的に 20 代、30 代 13 名、50 代、60 代 14 名について分析を行った。誤答率の平均値および標準偏差は 0.213±0.138 であった。年代別の誤答率および、実験参加者全体照明 9 条件の誤答率について、照度レベルと分光成分別に集計した結果、図 3-3~3-5 のような結果となった。

各照明条件における誤答率に関し、年代(20 代、30 代と 50 代、60 代)と照明条件(照度 3 水準、分光成分 3 水準)の 3 要因混合型分散分析を行った結果、照度と分光成分の交互作用が有意であった(表 3-4)。また、各要因の主効果は見られなかった。照度と分光成分の交互作用が有意であったことから、照度 3 水準×分光成分 3 水準の 9 群において、Holm 法による多重比較を行ったところ、各群の間に有意差は見られなかった。

分散分析において、局部照明条件の影響が見られなかった要因の 1 つとして、群内分散である個人差が大きいことがあげられる。そこで、局部照明条件が誤答率に与える傾向を分析するため、誤答率を標準化したデータを用い、クラスタ分析を行った。クラスタ分析では、照度 3 水準および分光成分 3 水準にまとめた 3 群のデータについて誤答率の変化の傾向が似たグループに分類するものを 2 通り行った。クラスタ分析の結果、照度と分光成分が誤答率に与える影響について、それぞれ 3 クラスタに分類できた。

照度が与える影響に関して、クラスタ 1 は照度レベルが低いほど誤答率の低下を示すグループ、クラスタ 2 は中間の照度レベルで誤答率の低下を示すグループ、クラスタ 3 は照度レベルが高いほど誤答率の低下を示すグループであった(図 3-6)。各クラスタにおける実験参加者の年代別所属人数について表 3-5 に示す。

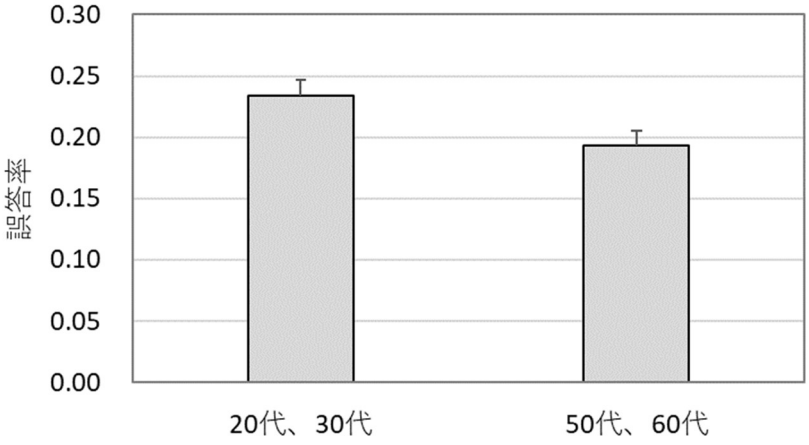


図 3-3　年代別誤答率

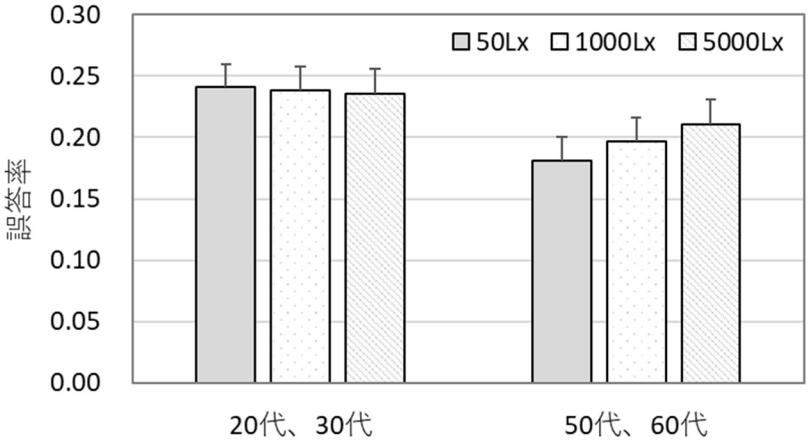


図 3-4　誤答率と照度

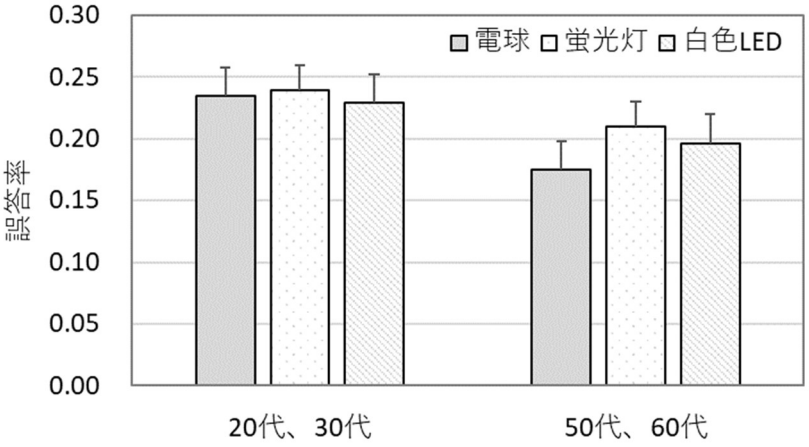


図 3-5　誤答率と分光成分

表 3-4 分散分析結果

変数名	F 値	p 値	
年代	$F(1,25) = 0.724$	$p = .403$	
照度	$F(2,50) = 0.687$	$p = .497$	
分光成分	$F(2,50) = 2.552$	$p = .088$	
年代×照度	$F(2,50) = 1.233$	$p = .299$	
年代×分光成分	$F(2,50) = 1.695$	$p = .194$	
照度×分光成分	$F(4,100) = 2.977$	$p = .028$	*
年代×照度×分光成分	$F(4,100) = 0.917$	$p = .450$	

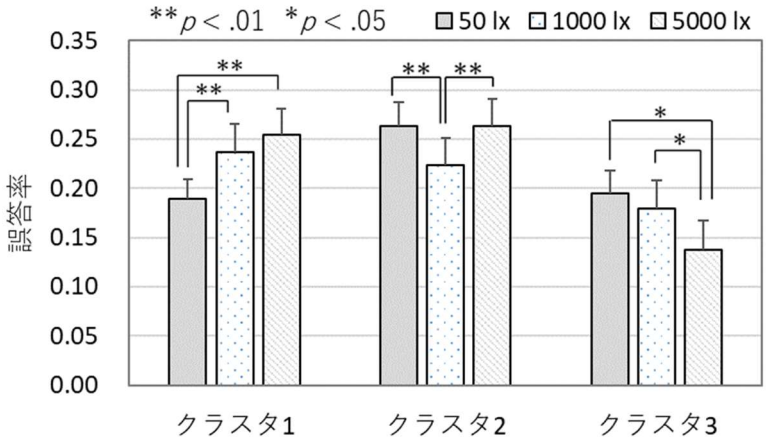


図 3-6 各クラスタにおける照度と誤答率の関係

表 3-5 各クラスタにおける年代別所属人数

	クラスタ1	クラスタ2	クラスタ3
20代、30代	5	2	6
50代、60代	7	5	2

分光成分が与える影響に関して、クラスタ 1 は白色 LED の分光成分で誤答率の低下を示すグループ、クラスタ 2 は分光成分が誤答率に与える影響が小さいグループ、クラスタ 3 は電球の分光成分で誤答率の低下を示すグループであった(図 3-7)。 各クラスタにおける実験参加者の年代別所属人数について表 3-6 に示す。

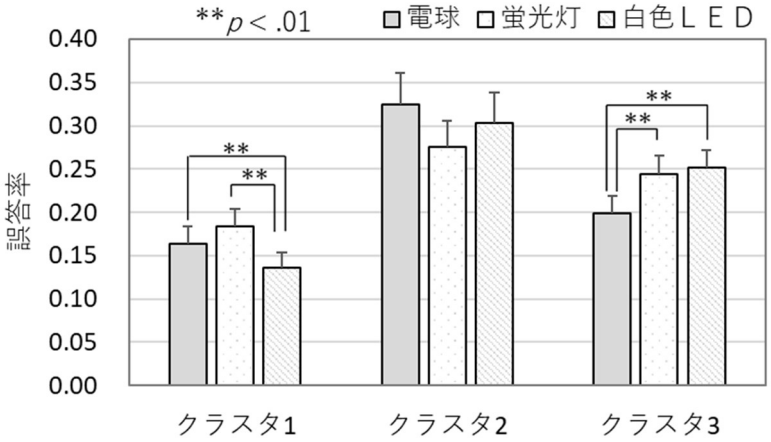


図 3-7 各クラスタにおける分光成分と誤答率の関係

表 3-6 各クラスタにおける年代別所属人数

	クラスタ1	クラスタ2	クラスタ3
20代、30代	6	3	4
50代、60代	5	1	8

3.1.3.2 局部照明条件が主観評点に与える影響

実験参加者全体照明 9 条件が主観評点に与える影響について、照度レベルと分光成分別に集計した結果、図 3-8、3-9 のような結果となった。主観的見易さを示す主観評点に関して、フリードマン検定を行ったが、有意差は見られなかった。

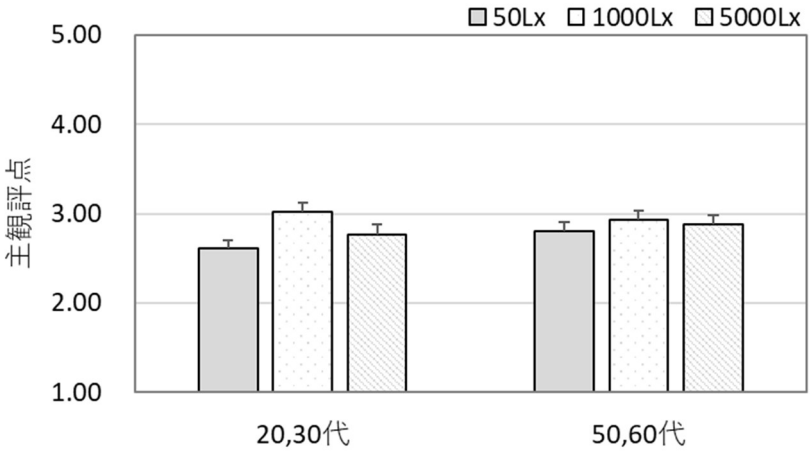


図 3-8 主観評点と照度

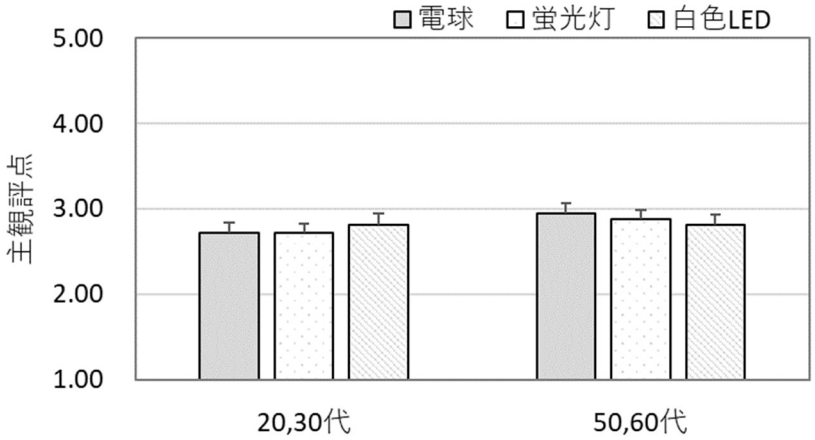


図 3-9 主観評点と分光成分

3.1.4 考察

今回の試料を用いた課題において求められるのは微小な奥行きの知覚である。実験中に手がかりについてヒアリングを行った結果、ほとんどの実験参加者が陰影を手がかりに差があるか無いか判断していると回答した。よって、今回の条件では陰影が重要な手がかりの1つである可能性がある。

図 3-3 および表 3-4 の通り、年代の主効果が見られなかった。J. F. Norman のステレオグラムを用いた実験の報告においても、高齢者の立体視が多くの点で若年者の立体視と機能的に同等であることを示しており[56]、微小な奥行き弁別が求められるような目視検査においては、加齢による視機能の変化が与える影響は小さく、50 代、60 代の作業者においても、20 代、30 代と同等の精度を期待できると考えられる。また、今回の調査では下方から照射角 10 度で試料を照射しており、金属板 1 と金属板 2 の円形溝下部にできる陰影の大きさは計算上、金属板 1 は約 0.18mm、金属板 2 は約 0.11mm と詳細な影の知覚が必要となる。陰影の知覚にはコントラスト感度が影響するが、大森らの報告[57]によると、コントラスト感度に関して、20-44 歳の群と 45–64 歳の群、65–79 歳の群で比較したところ、20-44 歳と 45–64 歳の群間に差はほとんど見られず、中、高空間周波数帯で 65–79 歳群の低下が見られたと報告しており、今回の調査と同じ結果が出た。よって、今回の実験条件においても、より高い年齢群と比較すれば、差が表れる可能性がある。

局部照明条件が誤答率に与える影響について、図 3-4、3-5、表 3-4 の通り、分散分析の結果局部照明条件が誤答率に与える影響は見られなかった。この一因として、非常に大きな個人差があることが考えられる。個人差の影響を取り除くため、標準化した誤答率のデータに対し、クラスタ分析を行った結果を示す図 3-6、表 3-5 において、50、60 代の参加者の多く(14 名中 12 名)が、1000 lx 以下の条件で最も良い成績を示したクラスタ 1 およびクラスタ 2 に属していることから、50、60 代の実験参加者は、5000 lx のような高い照度レベル

において、奥行き弁別能が低下している可能性が考えられる。この要因として、加齢によるグレアの許容限界輝度低下[39]が影響していると考えられる。このことから、50 代以上の作業者にとって高照度の LED ハンディライトは異常の見逃しや誤認の原因となる可能性が考えられる。また、図 3-7、表 3-6 の通り、分光成分が誤答率に与える影響や年代による違いは見られなかった。

主観評点に関して、図 3-8、3-9 の通り、照度や分光成分の影響は見られず、今回の実験条件では、局部照明条件は見やすさに与える影響は小さいと考えられる。

3.2　奥行き弁別課題における周辺環境の影響および個人差の要因の調査

3.2.1　はじめに

3.1 項の調査において、暗室における局部照明条件下で 0.4mm の溝の深さの差を見分ける課題を課した結果、年代によって適した照明に違いが見られたほか、年代にかかわらず非常に大きな個人差が見られた。本調査では同様の課題を用いて光源が複数ある状況下で課題成績がどのような影響を受けるか、また大きな個人差の要因について検討を行った。

3.2.2　実験方法

3.2.2.1　実験参加者

加齢による視覚機能変化の影響を観察するため、20 代、30 代、50 代、60 代各 10 名ずつ、計 40 名の実験参加者を対象に実験を実施した。実験データは比較的若い 20 代、30 代と、比較的高齢である 50 代、60 代に分けて分析を行った。20 代、30 代の平均年齢は 28.7 歳（20-38 歳、標準偏差 6.3）、50 代、60 代の平均年齢は 57.6 歳（50-66 歳、標準偏差 5.1）であった。実験参加者は、鉄道車両の検査に従事していない一般から募集を募っており、虹彩色はすべて茶系であった。また条件統制のため、実験参加者には事前に白内障等の疾患が無いことを確認し、カラーコンタクトおよびブルーライトカット仕様の眼鏡の使用は禁止した。実験開始前には、JR 西日本安全研究所の規定に基づき、実験倫理審査により承認後、実験参加者に書面によるインフォームド・コンセントを得た。

3.2.2.2　試料

3.1.2.2 項の試料と同じものを使用した。

3.2.2.3　実験条件

鉄道車両の検査は主に検修庫で行われる。鉄道車両の構造上、検修庫は縦に長い長方形の構造をしており、多くの場合長辺側に採光窓が設置されている。そのため、鉄道車両のサイドから機器箱や車体下を目視する際は後部の採光窓からの光を背負う形になることが多い。よって、今回の調査では実験室の照明を、実験参加者の背後に蛍光灯を配し、その参加者と弁別資料との間に局部照明を設け、検修庫での目視検査に近い状況を模擬した。蛍光灯は常時点灯しており、室内の弁別試料部分は薄明環境である約 30 lx で照らされている(図 3-10)。この状態でハンディライトを模した局部照明条件を変え、弁別率がどう変化するか観察した。局部照明条件は 3.1 項の実験と同様に、弁別試料の鉛直面照度が 50 lx、1000 lx、5000 lx の 3 水準、分光成分は電球、蛍光灯、白色 LED を模したもの 3 水準の合計 9 条件である。局部照明装置には、LED Motive 社の spectra tune lab を用いた。

3.2.2.4　実験手順

実際の目視検査では目視距離は対象により様々で、1 つの対象を詳細に見る場合、目視方向や距離を変えながら観察する。しかし、本研究では照明条件の影響を観察することが主目的であるので、実験参加者と弁別試料の距離は実際の目視検査で最も一般的と考えられる 1 mとし、実験参加者の頭部は顎台により固定させた(図 3-10)。各照明条件下で 2 分間目を順応させた後、弁別試料の左右の溝の深さに違いがあるかないか判断させる課題を課した。照明条件の順序は実験参加者毎にランダマイズした。課題は 3.1.2.4 項と同様に局部照明条件ごとに 50 回行い、金属板 1 は 10 回、金属板 2 は 40 回の割合でランダムに提示した。また、課題 1 セットごとに主観的な見やすさについて、鉄道信号の視認性評価に用いられる評価尺度[55]を参考に、表 3-7 のヒアリング表を用いて、「全然見えない：1」-「非常に見やすい：9」までの 9 段階で評価させた。なお、視覚的疲労の影響を排除するため、2 日間に分けて実験するとともに、各セット間に 4 分間の小休憩、3 セット終了後には 10 分間の休憩を設ける等十分配慮を行い、実験参加者の誤答率が時系列で上昇していないことを確認した。

3.2.2.5　分析方法

年代別に局部照明条件と誤答率の関係を調査するため、実験参加者間要因は年代 2 水準、実験参加者内要因は照度レベル 3 水準と分光成分 3 水準の混合計画 3 要因分散分析を行った。また、局部照明条件が誤答率に与える影響を観察するため、実験参加者ごとに誤答率を平均値 0、分散 1 に標準化したデータを用い、クラスタ分析を行った。クラスタ分析には Ward 法を用い、ユークリッド距離が 5.0 以上離れているものを別クラスタとなるよう分類

した。主観評点に関しては、順序尺度を用いており、母集団の分布に正規分布を仮定できないため、年代別の照度と分光成分による差については、フリードマン検定を行った。周辺環境が誤答率に与える影響を観察するため、3.1 項の実験の誤答率と、本調査での誤答率を対応のない t 検定により比較し、違いがあるかどうか調べた。3.1 項の実験では、暗室条件において局部照明条件と奥行き弁別課題成績の年代別の関係に関して報告を行っており、20、30 代の実験参加者 14 名(平均年齢 31.5 歳、標準偏差 6.7)、50、60 代の実験参加者 17 名(平均年齢 58.8 歳、標準偏差 5.8)、合計 31 名を対象に実験を行っており、同じ局部照明条件を用いている。視機能と誤答率の関係についてはランドルト環視力および左右視力比と誤答率との相関係数を求め、相関分析を行った。

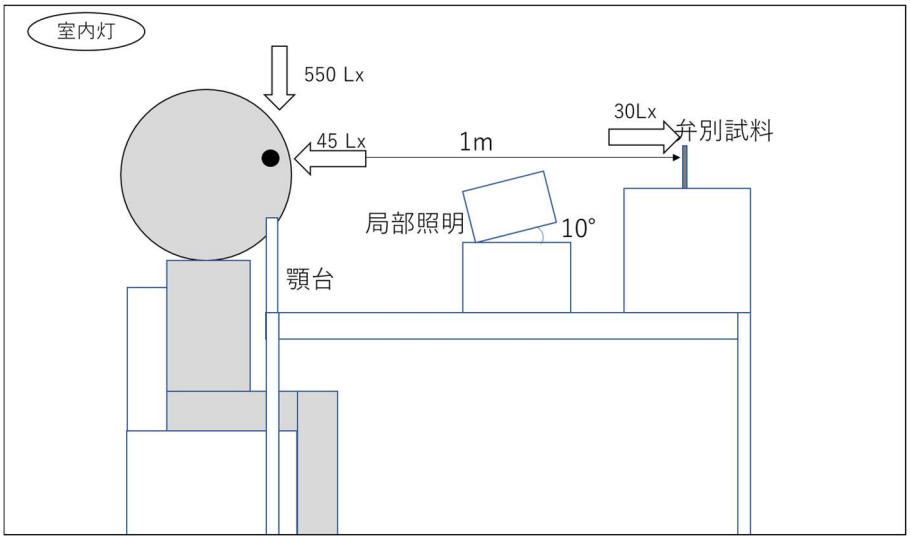


図 3-10 実験概略図

表 3-7 主観的見やすさの評価尺度

評点	今回の光での見え方
1	全然見えない
2	１と３の間
3	何とか見えるが、あまり自信が無い。
4	３と５の間
5	見えるけれども、奥行き差まで完全に見えるわけではない。
6	５と７の間
7	大体普通に見えるが、もっと見やすくなる余地が残っている気がする
8	７と９の間
9	非常に見やすい。ちょうど適当な気がする。

3.2.3　結果

3.2.3.1　年代および局部照明条件が誤答率に与える影響

誤答率について、平均値±2SD の範囲外の結果が見られた実験参加者(50 代、60 代 1 名)のデータを外れ値とし、最終的に 20、30 代 20 名、50、60 代 19 名について分析を行った。誤答率の平均値および標準偏差は 0.285±0.150 であった。年代および局部照明条件が誤答率に与える影響について示すため、年代別誤答率を図 3-11 に、誤答率と照度レベルの関係を図 3-12 に、誤答率と分光成分の関係を図 3-13 に示す。図中のバーは標準誤差を示す。誤答率に与える影響について、年代および局部照明条件(照度および分光成分)の混合計画の 3 要因分散分析を行った結果、各要因の主効果および交互作用について、表 3-8 の結果が得られた。表中の「×」は交互作用を示す。

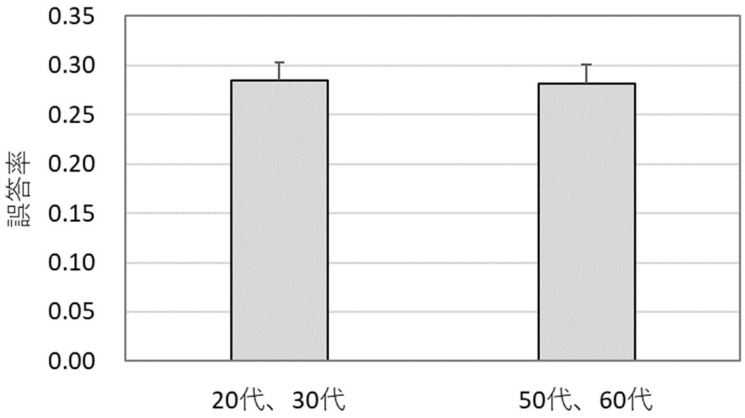


図 3-11　年代別誤答率

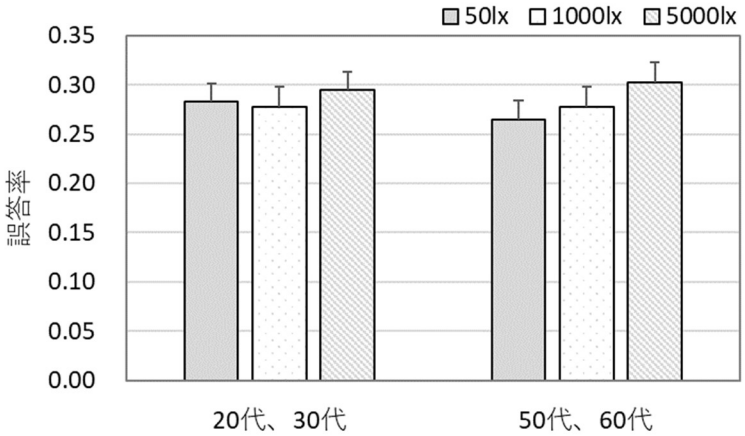


図 3-12　誤答率と照度

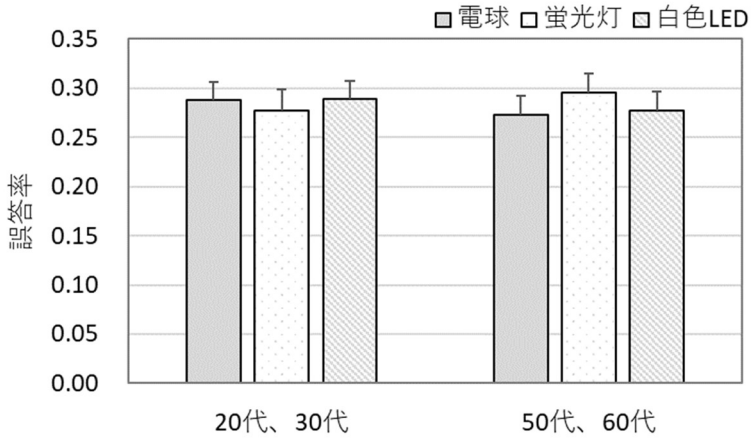


図 3-13 誤答率と分光成分

表 3-8 分散分析結果

変数名	F 値	p 値
年代	$F(1,37) = 0.006$	$p = .938$
照度	$F(2,74) = 2.014$	$p = .144$
分光成分	$F(2,74) = 0.154$	$p = .855$
年代×照度	$F(2,74) = 0.518$	$p = .587$
年代×分光成分	$F(2,74) = 1.396$	$p = .254$
照度×分光成分	$F(4,148) = 0.741$	$p = .565$
年代×照度×分光成分	$F(4,148) = 1.941$	$p = .107$

3.1 項の実験と同様に、分散分析において局部照明条件の影響が見られなかった要因として、群内分散である個人差が大きいことがあげられる。そこで、照明条件(照度レベル、分光成分)が誤答率に与える傾向を分析するため、誤答率を標準化したデータを用い、クラスタ分析を行った。クラスタ分析では、照明 9 条件の誤答率を、照度 3 水準にまとめた 3 群のデータについて誤答率の変化傾向を分類したものと、分光成分 3 水準にまとめた 3 群のデータについて誤答率の変化傾向を分類するものを 2 通り行った。クラスタ分析の結果、照度と分光成分が誤答率に与える影響について、それぞれ 3 クラスタに分類できた。

照度が与える影響に関して、クラスタ 1 は照度レベルが低いほど誤答率の低下を示すグループ、クラスタ 2 は中間の照度レベルで誤答率の低下を示すグループ、クラスタ 3 は照度レベルが高い条件で誤答率の低下を示すグループであった(図 3-14)。各クラスタにおける実験参加者の年代別所属人数について表 3-9 に示す。

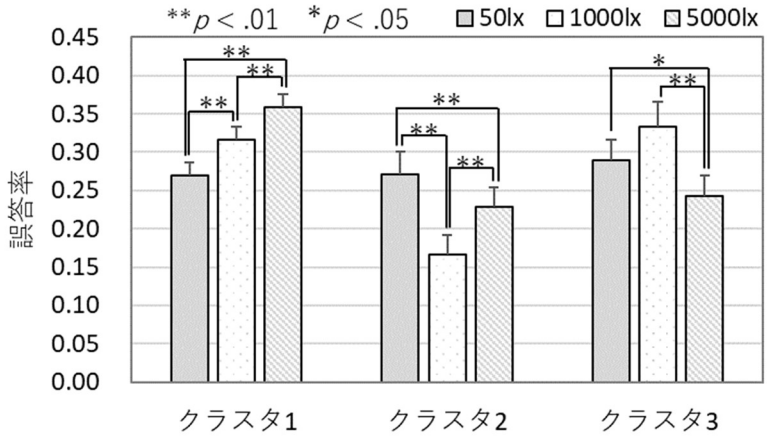


図 3-14 各クラスタにおける照度と誤答率の関係

表 3-9 各クラスタにおける年代別所属人数

	クラスタ1	クラスタ2	クラスタ3
20代、30代	9	7	4
50代、60代	11	4	4

分光成分が誤答率に与える影響に関して、クラスタ 1 は蛍光灯の分光成分で誤答率の上昇を示すグループ、クラスタ 2 は白色 LED の分光成分で誤答率の上昇を示すグループ、クラスタ 3 は電球の分光成分で誤答率の上昇を示すグループであった(図 3-15)。 各クラスタにおける実験参加者の年代別所属人数について表 3-10 に示す。

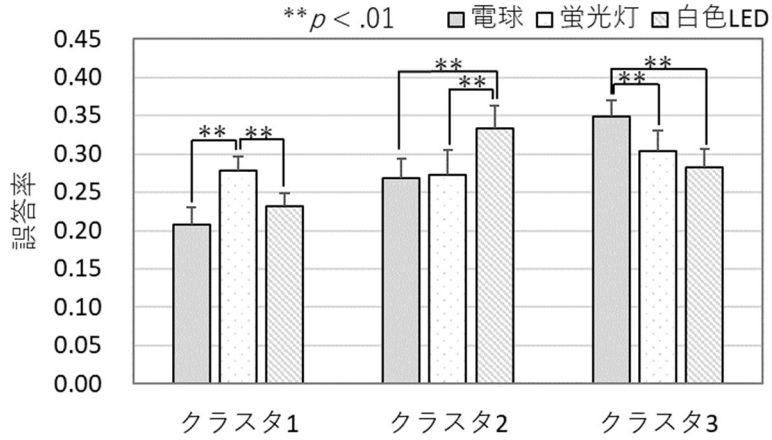


図 3-15 各クラスタにおける分光成分と誤答率の関係

表 3-10 各クラスタにおける年代別所属人数

	クラスタ1	クラスタ2	クラスタ3
20代、30代	6	7	7
50代、60代	6	5	8

3.2.3.2 周辺環境が誤答率に与える影響

3.1 項において、暗室条件における局部照明条件と奥行き弁別課題成績の年代別の関係に関して報告を行った。本調査では、採光窓からの光を蛍光灯で模し、実験参加者の背後から照らす環境下において、局部照明を用い奥行き弁別課題について実験を行った。そこで、周辺環境の違いが誤答率に与える影響を観察するため、両実験での誤答率の比較を行った(図 3-16)。対応のない t 検定の結果、誤答率に関して 20 代、30 代と 50 代、60 代ともに有意差が見られた(20 代、30 代：$t(295) = -2.93$、$p < .01$、50 代、60 代：$t(295) = -5.20$、$p < .01$)。なお、20 代、30 代の両条件の誤答率の平均値および標準偏差について、暗室条件の平均値および標準偏差は 0.234±0.138 であった。また、薄明条件では、0.285±0.150 であった。50 代、60 代において暗室条件では 0.194±0.135、薄明条件では、0.282±0.150 であった。

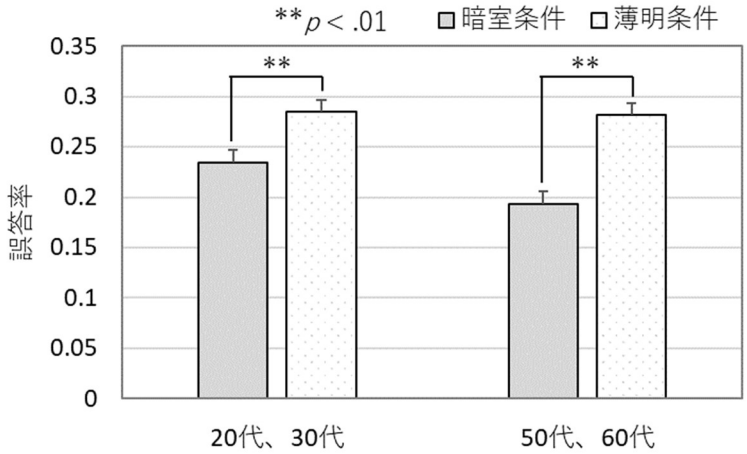


図 3-16 周辺環境が誤答率に与える影響

3.2.3.3 視力および左右視力の比が誤答率に与える影響

誤答率とランドルト環視標を用いて計測した視力および視力比の関係に関して、図 3-17、3-18 にまとめた。図中の線形は回帰直線を示す。なお視力の計測は矯正状態で行われた。視力比について、左右単眼でランドルト環視力を計測し、右目もしくは左目で視力の良いほうを基準に比率を求めた。ミス率と視力および視力比の相関分析結果を表 3-11 に示す。50

代、60 代において、誤答率と視力比の間に負の相関関係が見られた。

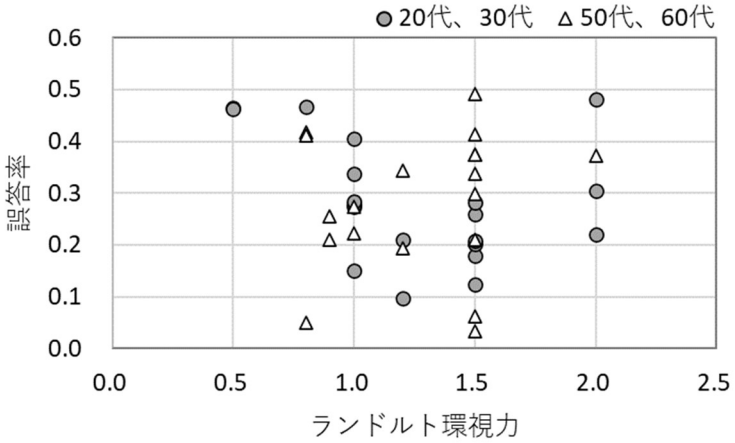


図 3-17 ランドルト環視力と誤答率

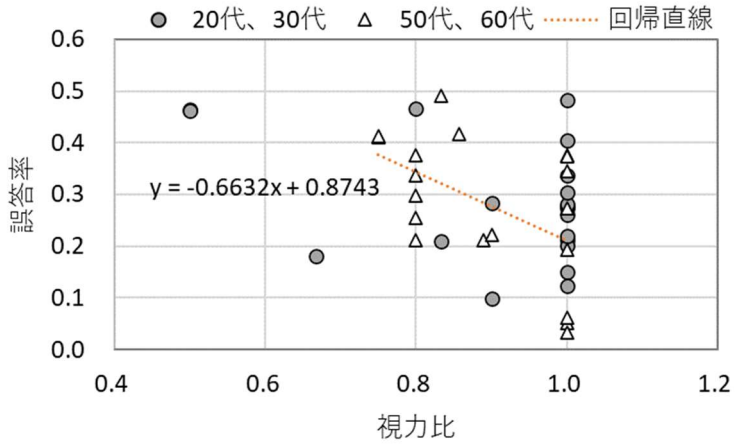


図 3-18 左右視力比と誤答率

表 3-11 誤答率と視力および視力比の相関分析結果

年代	対象	相関係数	t 値	p 値	
20代、30代	両眼視力と誤答率	r = -.340	t(18) = -1.533	p = .143	
	視力比と誤答率	r = -.400	t(18) = -1.854	p = .080	
50代、60代	両眼視力と誤答率	r = -.148	t(17) = -0.619	p = .619	
	視力比と誤答率	r = -.502	t(17) = -2.395	p = .028	*

3.2.3.4　局部照明条件が主観評点に与える影響

主観評点における年代別の局部照明条件の影響を観察するため、フリードマン分析により年代別に各要因の影響を調査した。年代別主観評点の照度レベル、光色との関係について、図 3-19、3-20 に、各検定の検定統計量および p 値を表 3-12 に示す。また、表 3-12 で照度レベルの有意差があったことから、Holm 法により多重比較を行った結果、20 代、30 代において、照度レベルが 50 lx と比較して 1000 lx では主観評価の値が有意に高かった(p = .013)。

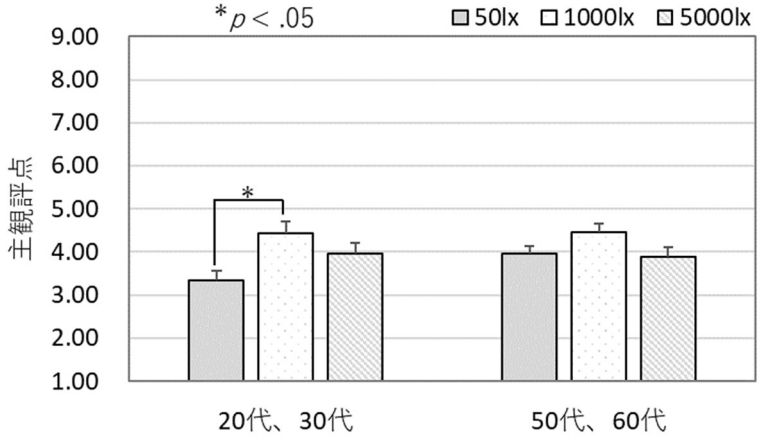


図 3-19　照度レベルと主観評点

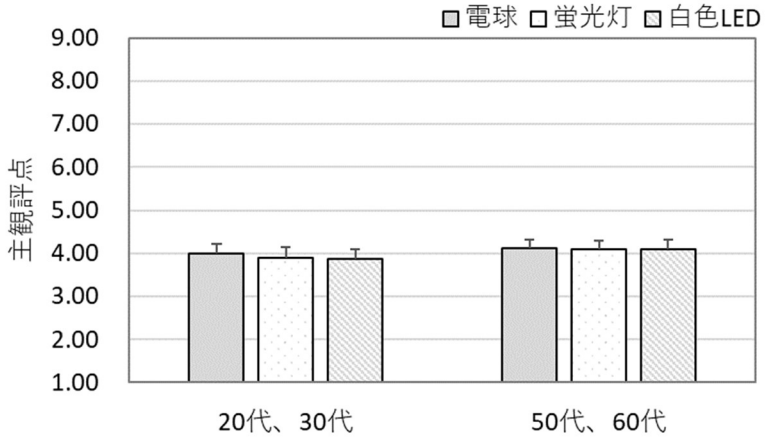


図 3-20　分光成分と主観評点

表 3-12 主観評点の検定統計量と p 値

対象	要因	検定統計量	p 値
20代、30代	照度	$\chi^2(2) = 8.842$	$p = .012$*
	分光成分	$\chi^2(2) = 0.767$	$p = .681$
50代、60代	照度	$\chi^2(2) = 4{,}137$	$p = .126$
	分光成分	$\chi^2(2) = 0.583$	$p = .747$

3.2.4 考察

3.1 項の実験結果と同様に、図 3-11 および表 3-8 の通り、誤答率に与える年代および局部照明条件(照度および分光成分)の影響は見られなかった。年代の主効果が見られなかったことから、複数の光源が存在する状況下においても、微小な奥行き弁別が求められるような目視検査では、加齢による視機能の変化が与える影響は小さく、50 代、60 代の作業者も、20 代、30 代と同等の精度を期待できると考えられる。局部照明条件が誤答率に与える影響について、図 3-12、3-13、表 3-8 の通り、3.1 項の実験と同様に分散分析の結果局部照明条件が誤答率に与える影響は見られなかった。この一因として、非常に大きな個人差があることが考えられる。個人差の影響を取り除くため、標準化した誤答率のデータに対し、クラスタ分析を行った結果を示す図 3-14、表 3-9 において、50 代、60 代の 8 割弱(19 名中 15 名)が 50 lx 条件で誤答率が低下するクラスタ 1 と 1000 lx 条件で誤答率が低下するクラスタ 2 に所属していることから、3.1 項の実験と同様に、50、60 代の実験参加者は、5000 lx のような高い照度レベルにおいて、奥行き弁別能が低下している可能性が考えられる。また、図 3-15、表 3-10 の通り、分光成分が誤答率に与える影響や年代による違いは見られなかった。

周辺環境の影響に関して、暗室中で局部照明のみ点灯した場合と、本調査での誤答率を比較した結果、本調査の条件で顕著な成績の低下が見られた(図 3-16)。今回の課題において陰影が大きな弁別手がかりであると考えられるが、陰影は配光の影響を強く受けるため、本条件のように複数の光源がある場合に弁別率が低下したと考えられる。実際の検修庫において局部照明を用いるような場合、局部照明の他、天井照明や採光窓からの光が存在する場合が多い。よって、実際の現場においても、本実験で使用した課題のように、陰影を手がかりの 1 つとするような検査を行う際に、複数方向から光の照射がある場合は、弁別能が低下している可能性を考慮して注意深く検査を行う必要がある。

視覚機能と誤答率の関係について、20 代、30 代では誤答率との間に相関関係は見られなかったが、50 代、60 代においては視力比と誤答率に負の相関が見られた(図 3-17、3-18、表 3-11)。浅川らの報告において、故意に左右視力差を設定し、Titmus stereo test、TNO stereo test、Frisby stereo test の 3 種を用いた調査において、視力差が大きいほど、テストの結果が低下することを報告している[58]。よって、今回の条件のような微小な奥行きの弁

別においても、両眼視力差が手がかりの 1 つとなっている可能性がある。よって、実際の目視検査においても、左右眼の視力は均一に近いほうが良いと言える。しかし、表 3-11 の通り、相関分析の結果、視力比と誤答率において、50 代、60 代にのみ有意差が見られ、20 代、30 代に有意差は見られなかった。そのため、先行研究とは異なる結果となったが、その要因は今回の調査では明らかにならなかった。

また、主観評点に関して、図 3-19 および、表 3-12 の通り、20 代、30 代にのみ照度の主効果に有意差があり、多重比較では 50 lx と 1000 lx 間に有意差が見られたが、表 3-9 に示すように、20 代、30 代において、50 lx 条件で誤答率が低下したクラスタ 1 の所属人数は 9 名、1000 lx 条件で誤答率が低下したクラスタ 2 に所属する人数は 7 名と大きな差はなく、主観的な見やすさと実際の見え方は関連が小さく、照明選択の場面において、主観的な評価だけではその照明が作業者に適さない可能性が考えられる。また、図 3-20、表 3-12 の通り、分光成分が主観的な見やすさに与える影響は小さいと考えられる。

なお、通常の目視検査においては多数の「差がない」ものの中にごく少数現れる「差がある」を検出する必要があることから、「差がある」条件の提示回数を多くしている。よって、通常の目視検査では今回の結果と異なる可能性がある。

3.3　まとめ

本章では、「立体」の要素に基づく検査を行う場合に適した年代別局部照明条件を明らかにするため、鉄道車両の目視検査を模擬した奥行き弁別課題を用いた実験により、年代別に適した局部別照明条件を検討した結果を記述した。

調査の結果、3.1 項および 3.2 項のどちらの実験環境下においても、50 代以上の参加者の多くは 1000 lx 以下の照度レベルで最も良い成績を示す参加者が多く存在した。よって、年齢に応じて適切な照度レベルを保つことで異常の見落としを減らすことができると考えられる。1.1.2.2 項において、50 代以上の作業者の複数が LED の局部照明を使用した際、「平面的な見え」や「違和感」があると回答したことを述べたが、本実験の結果においても 50 代以上の実験参加者は 5000 lx のような高い照度で微小な奥行きの知覚低下が示唆されており、高すぎる照度が「平面的な見え」や「違和感」の要因だと考えられる。

年代による違いに関して、局部照明を用いた目視検査で微小な凹凸を確認する場合、20 代、30 代と 50 代、60 代では課題成績に差が見られないことが判明した。よって、50 代以上の作業者においても、20 代、30 代の作業者と同等の検査精度を期待できるといえる。

また、視覚機能と照明条件に関しては、特に 50 代以上の作業者において作業にあたり視力の左右差は小さいほうが望ましいこと、目視検査を行う周囲の環境に関しては、光源が複数あるような場合、奥行き弁別能が低下することが明らかになった。

主観的な見やすさについて、実際の見え方との関連は小さく、照明選択の場面において、主観的な評価だけではその照明が作業者に適さない可能性が考えられる。

なお本実験では、溝の深さに差がある金属板 2 の試行回数を溝の深さに差が無い金属板 1 の試行回数より多く設定し、miss と false alarm の回数をまとめたものを誤答率として分析を行ったが、各金属板の試行回数を調節し、miss と false alarm を詳細に分析することでより実際の現場で応用できる知見が得られる可能性がある。

第 4 章　「平面」の要素に基づく検査における年代別最適局部照明条件

4.1　はじめに

第 2 章では、鉄道車両の目視検査における異常の判別が、どのような手がかりを基に行われているか分析を行い、「立体」と「平面」の 2 つの要素に基づいて目視検査が行われていることを明らかにした。「立体」の要素に基づく検査を行う場合に適した年代別局部照明条件は第 3 章で紹介した実験により明らかにすることができた。本章では、「平面」の要素に基づく検査を行う場合に適した年代別局部照明条件を明らかにするために行った実験と結果および考察について述べる。

鉄道車両の目視検査では、詳細な寸法の計測、亀裂や損傷など空間分解能を用いた輪郭線の把握やコントラスト感度が重要な検査や変色、腐食、漏油など色の変化の知覚が重要な検査が存在する。1.1.2.1 項で述べたように、照明は文字の読みや色の識別に影響を与えていることが多数の研究で報告されているが、鉄道車両の目視検査に使用する局部照明に関する報告は見当たらない。

4.2　実験方法

4.2.1　実験参加者

現在の JR 西日本の検査･修繕現場における雇用範囲は再雇用を含め 60 代までであるが、過去の雇用調整により 40 代の人数は他と比較して少ない。そこで、本調査では、加齢による視覚機能変化の影響を観察することを目的に、虹彩色が茶系である一般の男女 50 名(20 代、30 代、50 代、60 代、70 代、各 10 名)を対象に実験を行った。実験データは現在の雇用範囲の中で若年世代である 20 代、30 代と、中高年世代である 50 代、60 代、より加齢による変化の特徴を掴み、かつ今後の雇用範囲の拡大の可能性を考慮して 70 代の 3 群に分けて分析を行った。各群の平均年齢および標準偏差は、20 代、30 代の平均年齢 30.3 歳、標準偏差 6.8、50 代、60 代の平均年齢 58.8 歳、標準偏差 4.7、70 代の平均年齢 71.4 歳、標準偏差 1.6 であった。各群の平均両眼視力について、20 代、30 代 logMAR -0.08(小数視力換算：約 1.2)、50 代、60 代 logMAR 0.08(小数視力換算：約 0.8)、70 代 logMAR 0.20(小数視力換算：約 0.6)であった。視力の計測は矯正状態で行った。視力の矯正には実験参加者が普段常用している眼鏡等を使用したが、照明の影響を観察するためブルーライトカット等の機能がついたものは使用不可とした。小数視力は、数値の増減に対する視角の変化の比が異なるため、統計処理には向いていない。そのため次式(4-1)で定義される logMAR 視力を使用

した。なお、d は小数視力である。また、JR 西日本安全研究所の規定に基づき、実験倫理審査により承認後、書面によるインフォームド・コンセントを得た。

$$logMAR = -log_{10}d \qquad (4\text{-}1)$$

4.2.2　試料

図 2-2 で示したように、鉄道車両の目視検査では「色」の変化や「輪郭線、コントラスト」を手がかりとする、「平面」の要素に基づく検査が存在する。錆や腐食、漏油などの異常は色の変化として現れることが多く、色の違いを検出することが重要となる。また、寸法の計測やヘアクラックとして現れる場合が多い亀裂の検出では、細い線を正確に知覚する必要があることから、コントラスト感度や空間分解能が重要となる。鉄道車両の検査周期は 1.1.1.1 項で示したように数か月～数年と間隔が長期に及ぶため、走行中の風化や汚れの付着が要因となり、異常と正常な周囲の部分のコントラストが低下し検出しづらくなる場合もある。そこで本実験においては、空間分解能を調べる課題として配色の異なる 3 種の試料を用いた。種別 1 は白黒コントラスト、種別 2、3 は特定の色配置での空間分解能を観察する課題であり、それぞれ漏油、緑青を模した配色としており、それぞれ 1 枚の板に向きの異なる 3 つのランドルト環を配置している(図 4-1)。

図 4-1　試料

課題は第 2 章の分析結果に加え、現役の作業者にヒアリング調査を行い決定した。ヒアリング調査の結果、焼損や錆、腐食、汚損による変色や油漏れの検出が色の違いを手がかりとして異常を見分けるものとしてあげられ、最も回答の多い緑青と油漏れ 2 種を実験課題の対象とした。種別 1~3 の背景およびランドルト環の配色および反射率について、xy 色度形式で表したものを表 4-1 に示す。3 種の試料はそれぞれ、ランドルト環の大きさが logMAR 0.7 ~ -0.2(小数視力換算：約 0.2~1.6)まで 0.1 刻みで 10 種とランドルト環の透過率が 20 パ

ーセント刻みで 0%~80%の 5 種の合計 50 枚を 1 セットとした(図 4-2)。透過率は Adobe Illustrator CC 上で設定したもので、ランドルト環と背景の色度を徐々に近づけ、異常箇所が風化や汚れで見づらくなった状態を再現しており、透過率があがるにつれ背景とランドルト環のマイケルソンコントラストおよび色差は小さくなる。試料は Adobe Illustrator CC を用いて作成し、株式会社ミマキエンジニアリング社製のプリンタ JV150-130 により印刷した。

4.2.3　実験条件

弁別試料と実験参加者の間にハンディライトを模した局部照明を設置し、暗室中で局部照明条件を変え、課題成績がどう変化するか観察した。局部照明条件は鉛直面照度が 200 lx、1000 lx、5000 lx の 3 水準、分光成分は電球、蛍光灯、LED を模したもの 3 水準の合計 9 条件とした。分光成分の 3 水準に関して、電球、蛍光灯、LED を模した光の色温度はそれぞれ 2784K、4838K、6869K であった。局部照明装置には、LED Motive 社の波長可変光源 spectra tune lab を用いた。また、比較条件として実験室の天井蛍光灯を点灯した室内灯条件(鉛直面照度 1000 lx)を設けた。また各照明条件での背景輝度および色度について、表 4-2、表 4-3 に示す。

表 4-1　試料の配色

試料	部位		反射率	色度	
				x	y
種別1	背景(白)		87.980	0.3129	0.3336
	ランドルト環(黒)	透過率0%	3.29	0.3151	0.3274
		透過率20%	7.81	0.3061	0.3275
		透過率40%	17.67	0.3082	0.3319
		透過率60%	30.93	0.3130	0.3347
		透過率80%	48.52	0.3130	0.3338
種別2	背景(灰色)		28.543	0.2783	0.3324
	ランドルト環(黄色)	透過率0%	52.8	0.4692	0.4713
		透過率20%	46.36	0.4382	0.4601
		透過率40%	40.17	0.4006	0.4253
		透過率60%	36.69	0.3640	0.3909
		透過率80%	32.91	0.3362	0.3622
種別3	背景(黄土色)		47.099	0.4399	0.4216
	ランドルト環(緑色)	透過率0%	25.73	0.2740	0.4713
		透過率20%	27.76	0.3091	0.4587
		透過率40%	31.95	0.3465	0.4455
		透過率60%	36.89	0.3820	0.4386
		透過率80%	40.56	0.4100	0.4290

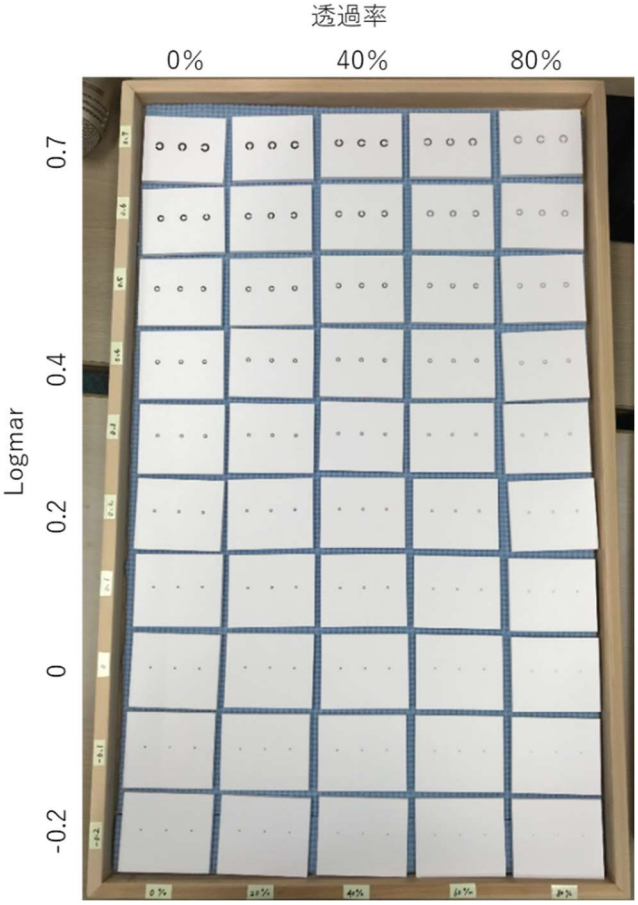


図 4-2 試料 1 組の外観

表 4-2 照度レベルと背景輝度(単位:cd/m2)

	種別 1	種別 2	種別3
5000 lx	1453	602	951
1000 lx	280	111	187
200 lx	65	26	43
室内灯条件	259	82	144

表 4-3 分光成分と背景色(xy 色度)

	種別 1		種別 2		種別3	
電球	0.4485	0.4025	0.4480	0.4010	0.5115	0.4210
蛍光灯	0.3445	0.3630	0.3450	0.3610	0.4270	0.4240
LED	0.2980	0.3150	0.2980	0.3140	0.3880	0.4055
室内灯条件	0.3545	0.3730	0.3560	0.3690	0.4585	0.4345

4.2.4　評価方法

4.2.4.1　局部照明条件の評価

実験参加者には 1 枚ずつ提示された試料を両眼で目視し、ランドルト環の向きを口頭で回答させる課題を課した。課題は照明条件毎に種別 1~3 を各 1 セット実施し、1 セット 50 枚のうち正解した枚数の合計を得点として記録した。試料 1 枚に配置された 3 つのランドルト環すべて正答したもののみ正解とした。照明条件の影響を観察するため、目視位置は固定し、試料と実験参加者の距離は実際の検査でも平均的な距離である 1m とした(図 4-3)。照射角度について、事前に 5 名の協力者を募り、1m 離れた対象をハンディライトで照らした際のライトの角度の平均が 21°であったことから 20°とした。各照明条件での視認性を評価する際、視力の個人差の影響を排除するため、室内灯条件で種別 1~3 の課題を実施させた後、各局部照明条件下で課題を実施し、次式(4-2)のように各照明条件の評価値を定義した。

$$\text{評価値} = \frac{\text{各局部照明条件での得点}}{\text{室内灯条件での得点}} \times 100(\%) \qquad (4\text{-}2)$$

評価値 100%は全般照明である室内灯条件と同等の視認性を維持していることを示す。局部照明条件は順序効果を排除するため実験参加者毎にランダマイズした。また、視覚的疲労の影響を排除するため、照明条件を変更する毎に 4 分間の小休憩、約 30 分経過した際には 10 分間の休憩を設ける等十分配慮を行い、実験参加者の誤答率が時系列で上昇していないことを確認した。

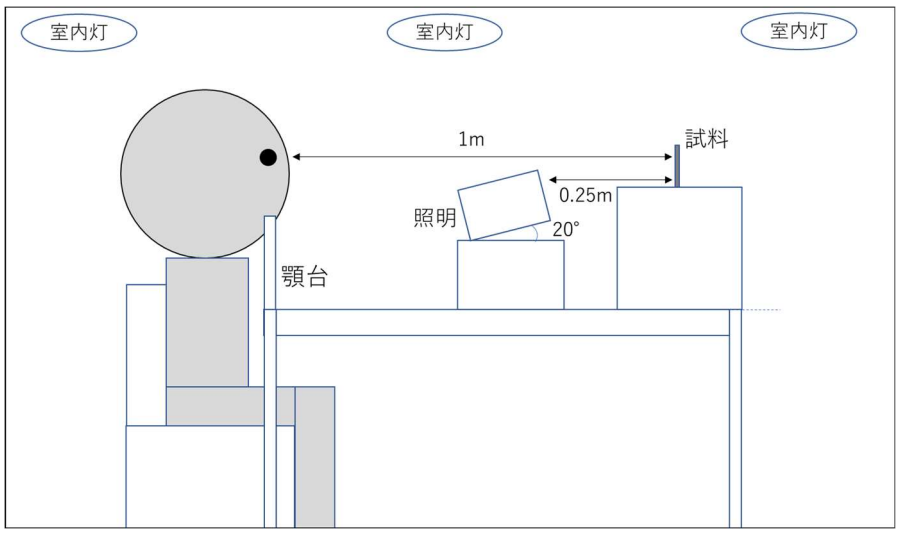


図 4-3　実験概略図

4.2.4.2　透過率の影響把握

ランドルト環の透過率が低下した際の影響を観察するため、次式(4-3)により、透過率 0%条件の正解枚数を基準(100%)として、各透過率での正解枚数を比率で表した値(以下、R という)を年代間で比較した。

$$R = \frac{\text{各透過率での正解枚数}}{\text{透過率0\%の正解枚数}} \times 100(\%) \qquad (4\text{-}3)$$

4.2.5　分析方法

統計解析については以下の通り。年代の影響に関して、実験参加者間要因：年代 3 水準と実験参加者内要因：種別 3 水準の混合要因分散分析を行った。また、照明条件の影響に関しては、実験参加者間要因：年代 3 水準、実験参加者内要因：照度 3 水準、分光成分 3 水準の混合要因分散分析を行った。上記の分析において、主効果および交互作用に 5%水準で有意差がみられた場合、どの群間に差があるか求めるため、Holm 法による多重比較を行った。また、透過率の影響に関しては、従属変数を R 値、固定因子を年代、共変量を透過率として回帰の平行性の検定を行なった。5%水準で交互作用に有意差が見られた場合、Bonferroni 法による多重比較を行った。

4.3　結果

4.3.1　年代が各種別の成績に与える影響

各種別について、局部照明条件別に logMAR 視力を計測した結果、図 4-4～図 4-6 の結果が得られた。図 4-4～図 4-6 の結果について、式(4-2)を用いて各年代別に種別 1~3 のすべての照明条件での評価値平均を求めた(図 4-7)。分析の結果、年代と種別の主効果が有意であった(年代：$F(2,41) = 5.795$、$p < .01$、種別：$F(2,82) = 5.021$、$p < .01$)。多重比較の結果、20 代、30 代と 70 代間および 50 代、60 代と 70 代間に有意差が見られた(20 代、30 代と 70 代間：$p < .05$、50 代、60 代と 70 代間：$p < .01$)。

4.3.2　年代および局部照明条件が種別 1 の成績に与える影響

種別 1 に関して、照度と評価値および分光成分と評価値の関係についてグラフにまとめた(図 4-8、図 4-9)。年代と局部照明条件(照度および分光成分)の混合要因分散分析の結果、

表 4-4 の結果が得られた。分析の結果、年代と照度、分光成分に 2 次の交互作用が見られた。下位検定の結果、70 代においてのみ照度と分光成分の交互作用に有意差があり、200 lx 条件の場合のみ分光成分の主効果が有意($p < .05$)であった。

年代の影響に関して、Holm 法による多重比較の結果、20 代、30 代と 70 代、50 代、60 代と 70 代間に有意差があった(20 代、30 代と 70 代間：$p < .01$、50 代、60 代と 70 代間：$p < .01$)。また、照度に関して、多重比較の結果、60 代以下の群についてはすべての照度レベル間に、70 代は 200 lx-5000 lx と 1000 lx-5000 lx 間に有意差があった。分光成分の主効果は見られなかった。

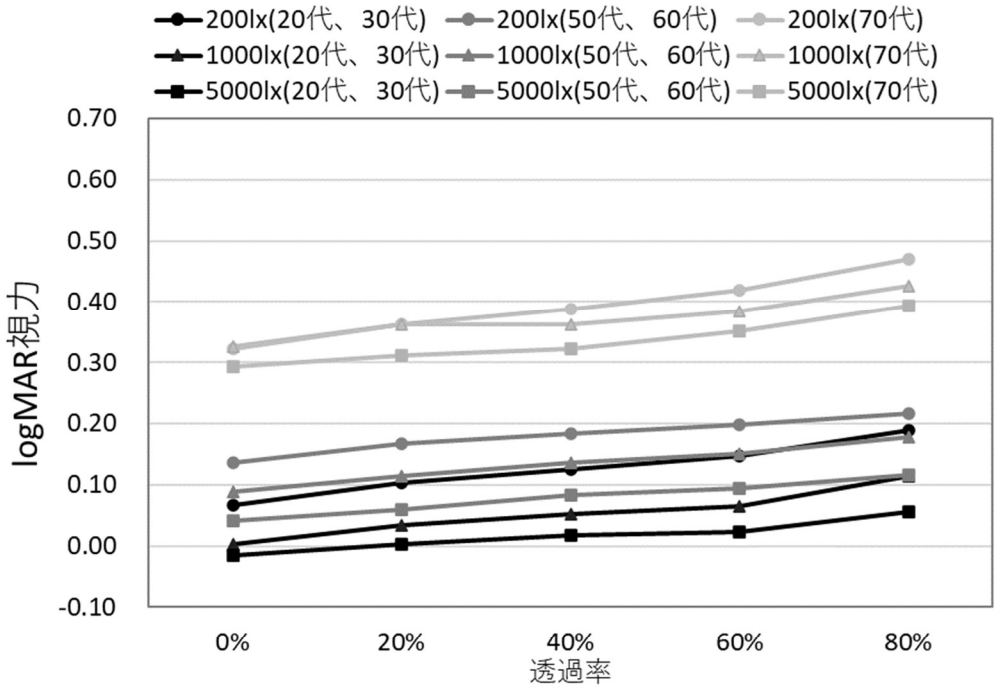
4.3.3　年代および局部照明条件が種別 2 の成績に与える影響

種別 2 に関して、照度と評価値および分光成分と評価値の関係についてグラフにまとめた(図 4-10、図 4-11)。年代と局部照明条件(照度および分光成分)の混合要因分散分析の結果、表 4-5 の結果が得られた。分析の結果、年代と分光成分に交互作用が見られた。下位検定の結果、70 代においてのみ分光成分の主効果が有意であり、多重比較の結果、電球-蛍光灯間、蛍光灯-LED 間に有意差があった(電球-蛍光灯間：$p < .01$、蛍光灯-LED 間：$p < .05$)。

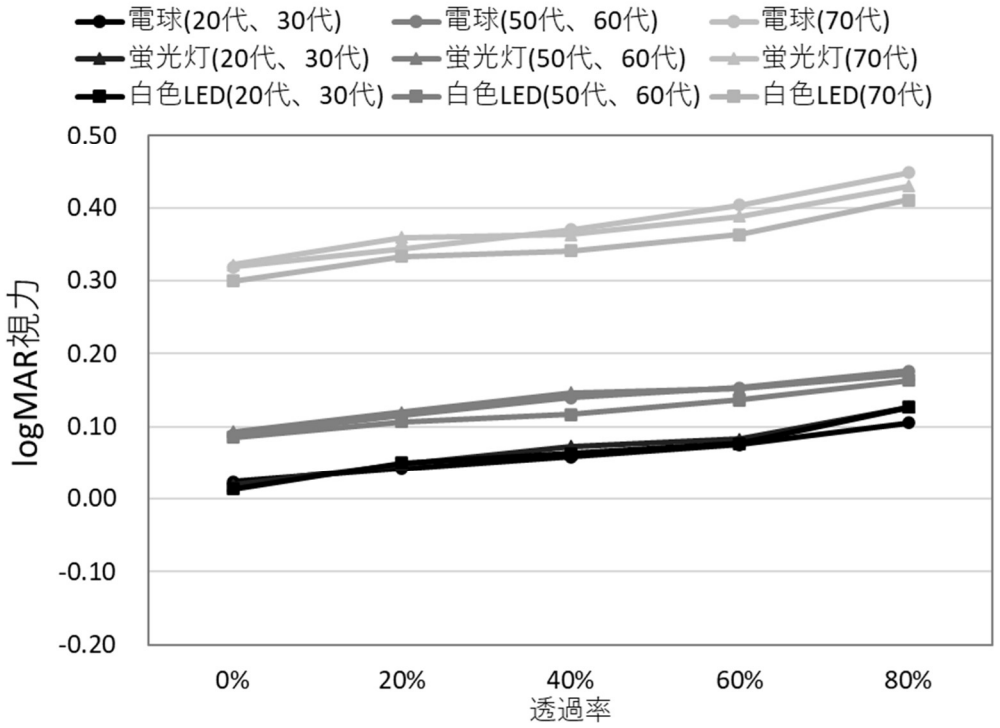
年代の影響に関して、Holm 法による多重比較の結果、50 代、60 代と 70 代間に有意差があった($p < .05$)。また、照度の影響について、多重比較の結果、すべての年代において、すべての照度レベル間に有意差があった。

4.3.4　年代および局部照明条件が種別 3 の成績に与える影響

種別 3 に関して、照度と評価値および分光成分と評価値の関係についてグラフにまとめた(図 4-12、図 4-13)。年代と局部照明条件(照度および分光成分)の混合要因分散分析の結果、表 4-6 の結果が得られた。分析の結果、年代と照度、分光成分に 2 次の交互作用が見られた。下位検定の結果、50 代、60 代と 70 代にのみ照度と分光成分の交互作用がみられ、どちらの群も 5000 lx 条件でのみ分光成分の主効果が有意であった。また、年代と分光成分の交互作用も有意であり、下位検定では、50 代、60 代と 70 代にのみ分光成分の主効果が有意であった。Holm 法による多重比較の結果、50 代、60 代の群において、電球-蛍光灯間に有意差があり($p < .01$)、70 代においては電球-蛍光灯間、電球-LED 間に有意差があった(電球-蛍光灯間： $p < .01$、電球-LED 間： $p < .01$)。また、照度の影響について、Holm 法による多重比較の結果、すべての年代において、すべての照度レベル間に有意差があった。年代間の差は見られなかった。

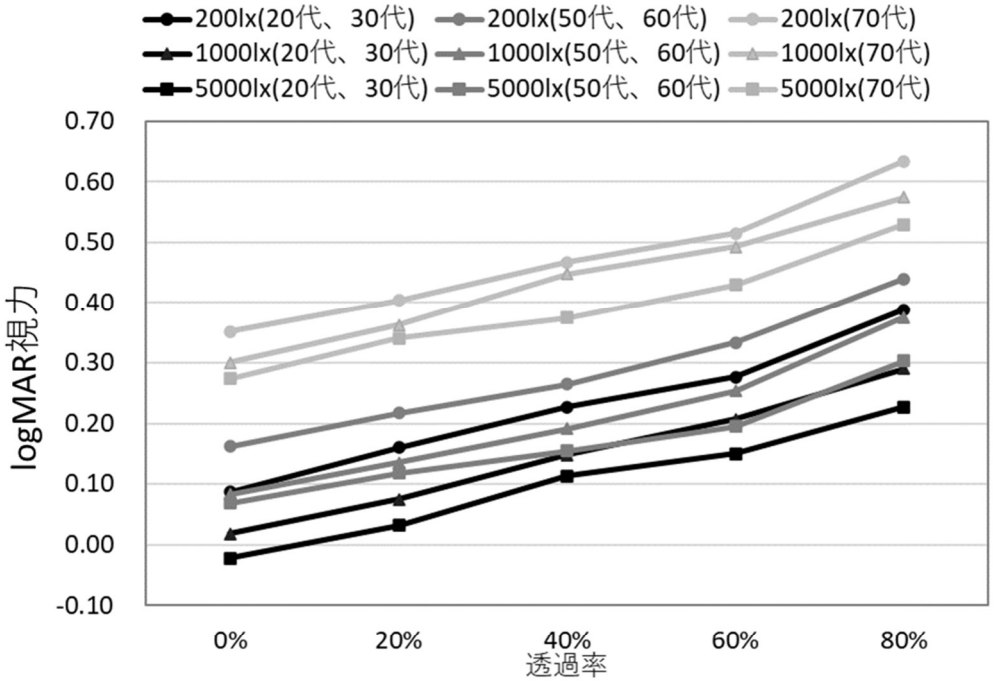


(a)照度とlogMAR視力

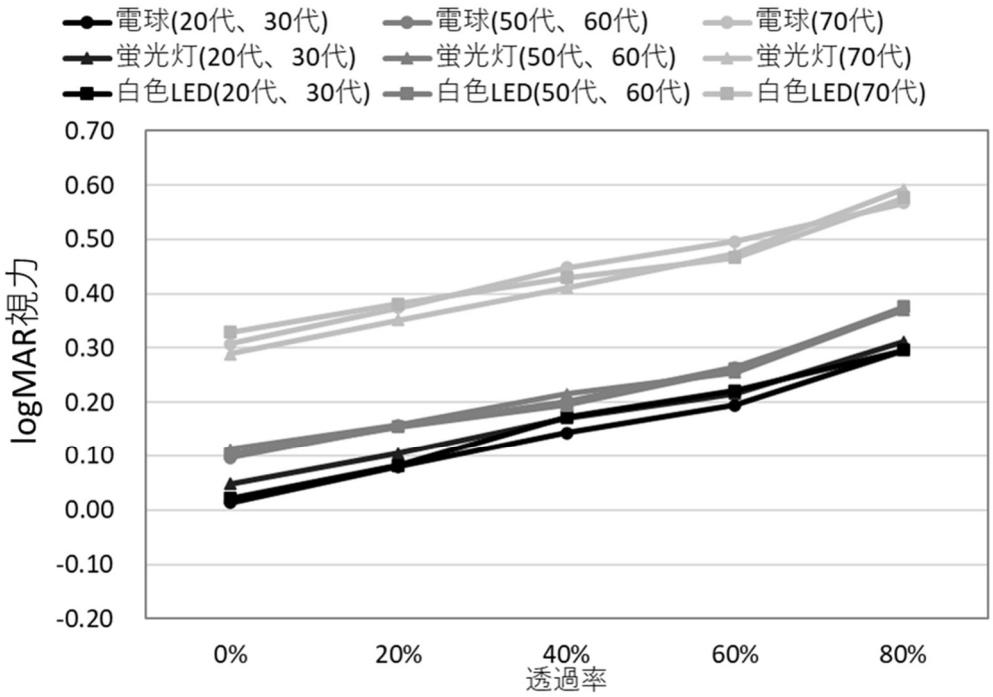


(b)分光成分とlogMAR視力

図 4-4 logMAR 視力に与える照度および分光成分の影響(種別 1)

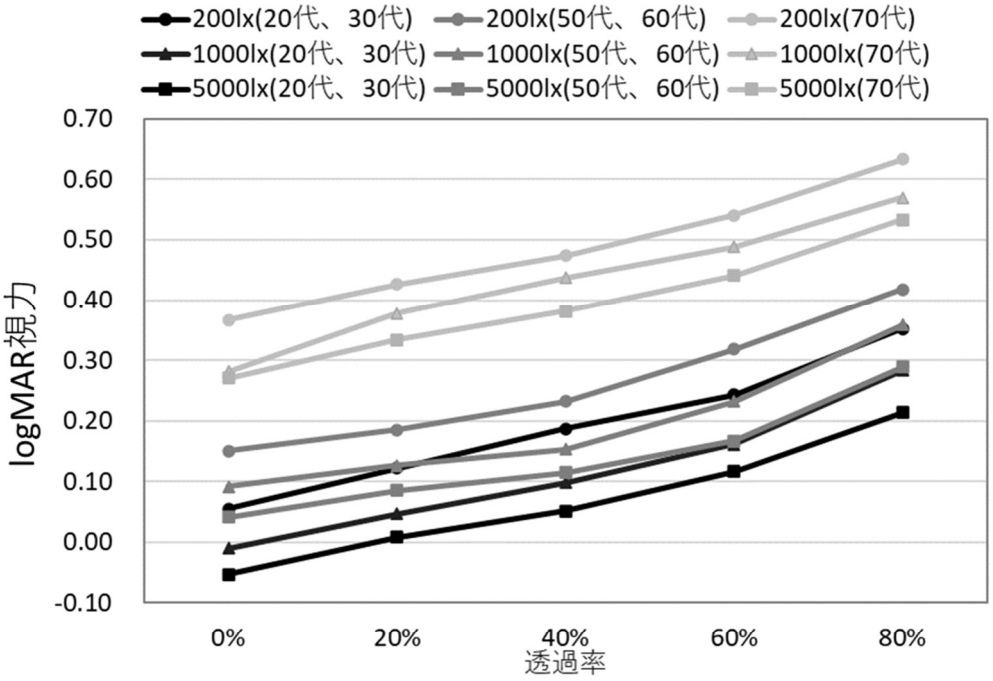


(a)照度とlogMAR視力

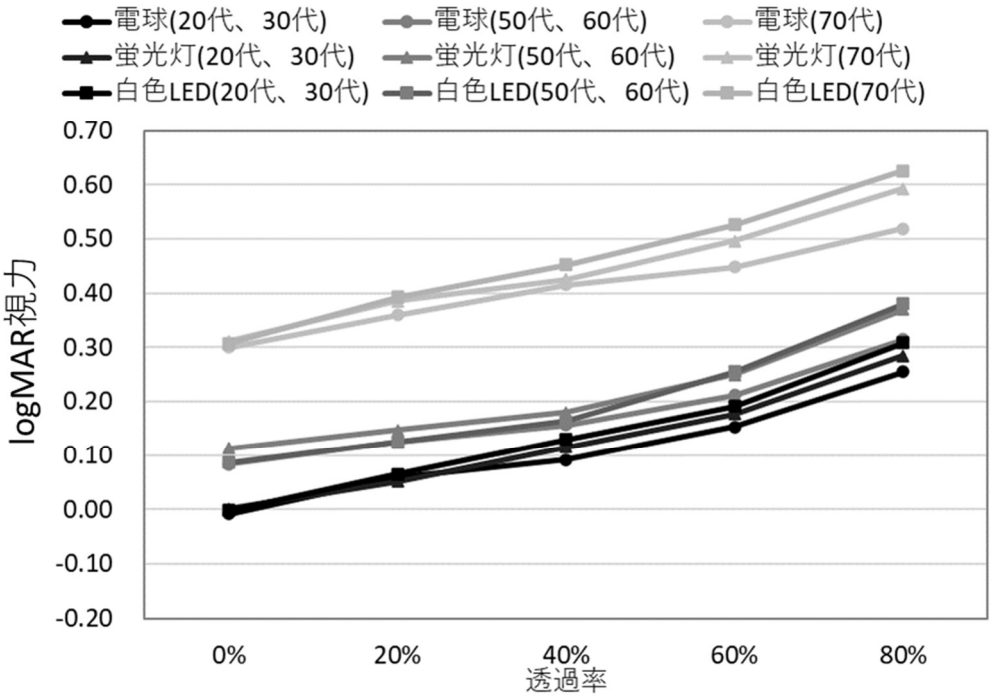


(b)分光成分とlogMAR視力

図 4-5 logMAR 視力に与える照度および分光成分の影響(種別 2)



(a)照度とlogMAR視力



(b)分光成分とlogMAR視力

図 4-6 logMAR 視力に与える照度および分光成分の影響(種別 3)

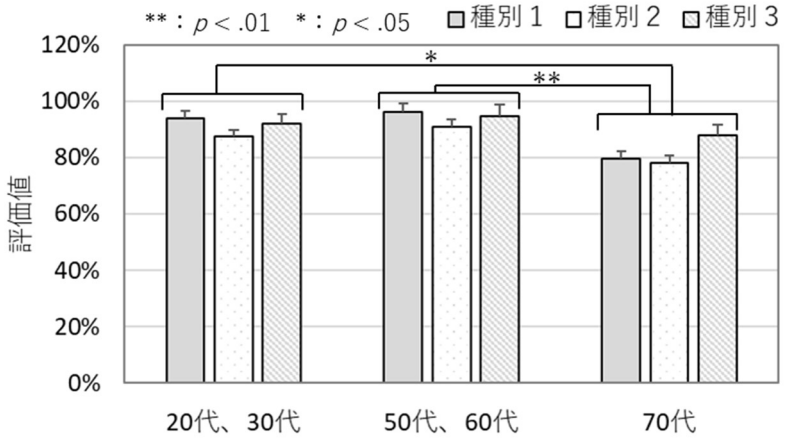


図 4-7　年代別各種別の評価値

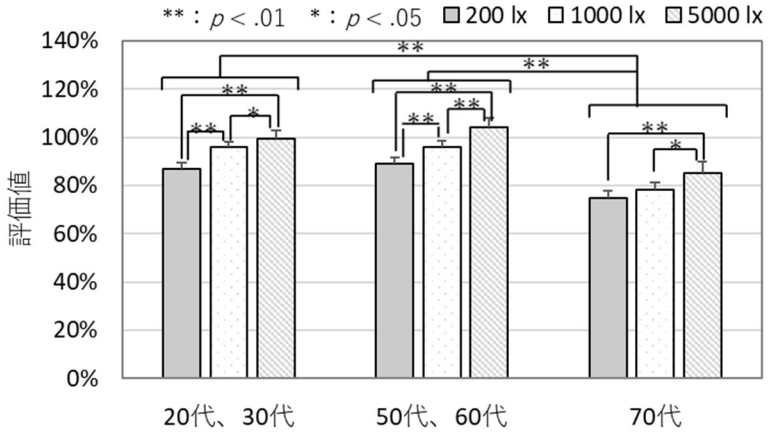


図 4-8　照度と評価値(種別 1)

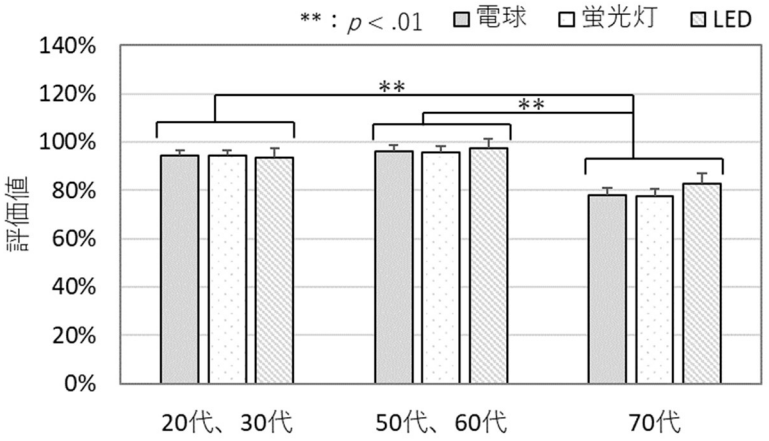


図 4-9　分光成分と評価値(種別 1)

表 4-4 分散分析結果(種別 1)

変数名	F 値	p 値
年代	$F(2,41) = 7.691$	$p = .001$ **
照度	$F(2,82) = 57.15$	$p = .000$ **
分光成分	$F(2,82) = 1.668$	$p = .198$
年代×照度	$F(4,82) = 1.642$	$p = .179$
年代×分光成分	$F(4,82) = 0.919$	$p = .450$
照度×分光成分	$F(4,164) = 1.369$	$p = .249$
年代×照度×分光成分	$F(8,164) = 2.374$	$p = .021$ *

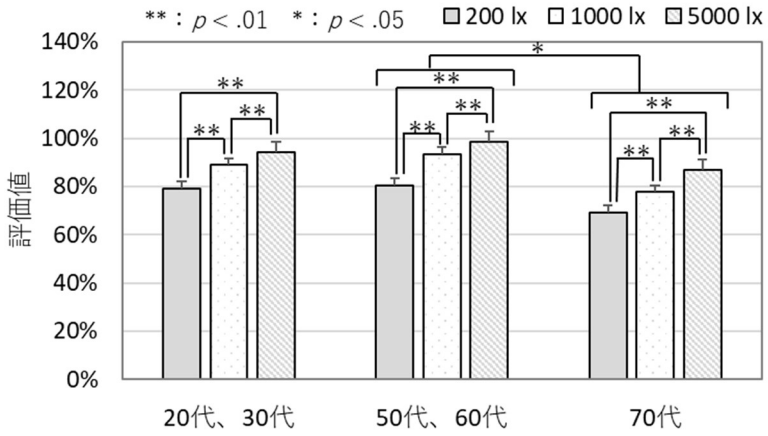


図 4-10 照度と評価値(種別 2)

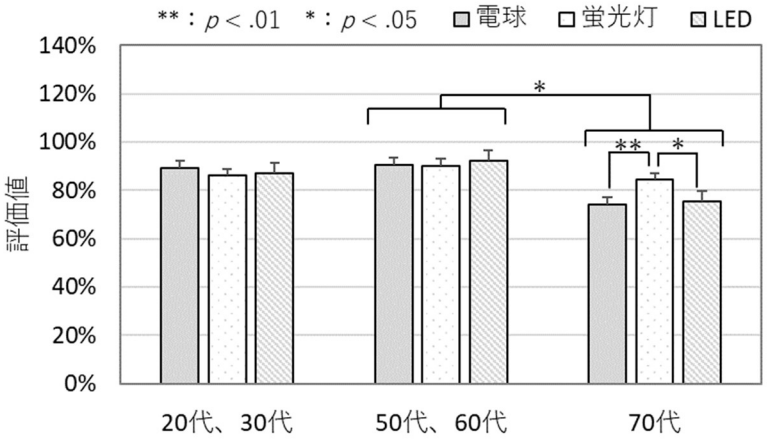


図 4-11 分光成分と評価値(種別 2)

表 4-5 分散分析結果(種別 2)

変数名	F 値	p 値
年代	$F(2,41) = 3.563$	$p = .037$ *
照度	$F(2,82) = 99.72$	$p = .000$ **
分光成分	$F(2,82) = 1.152$	$p = .320$
年代×照度	$F(4,82) = 0.976$	$p = .425$
年代×分光成分	$F(4,82) = 3.677$	$p = .009$ **
照度×分光成分	$F(4,164) = 1.409$	$p = .238$
年代×照度×分光成分	$F(8,164) = 0.859$	$p = .541$

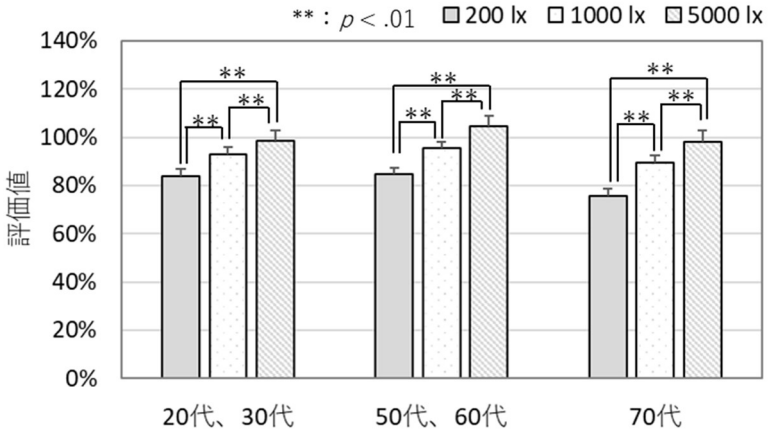


図 4-12 照度と評価値(種別 3)

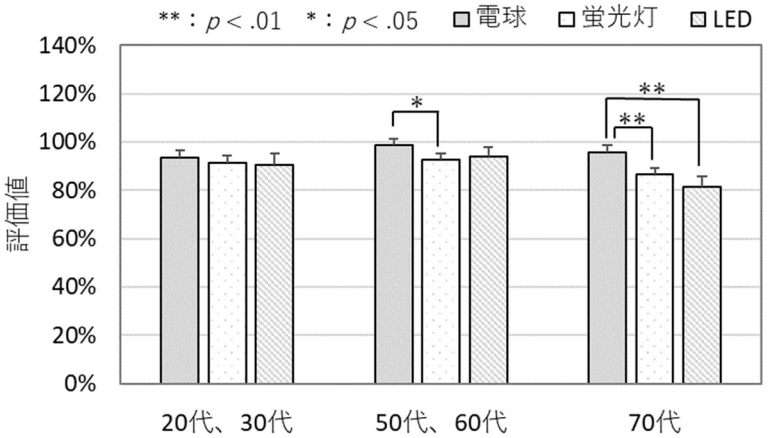


図 4-13 分光成分と評価値(種別 3)

表 4-6 分散分析結果(種別 3)

変数名	F 値	p 値
年代	$F(2,41) = 1.106$	$p = .340$
照度	$F(2,82) = 135.7$	$p = .000$ **
分光成分	$F(2,82) = 16.33$	$p = .000$ **
年代×照度	$F(4,82) = 2.331$	$p = .075$
年代×分光成分	$F(4,82) = 3.100$	$p = .021$ *
照度×分光成分	$F(4,164) = 1.964$	$p = .106$
年代×照度×分光成分	$F(8,164) = 2.553$	$p = .014$ *

4.3.5 各年代における透過率と課題成績の関係

種別 1~3 に関して、年代と色差、コントラストの関係を観察するため、図 4-14～図 4-16 にまとめた。図の縦軸は R 値、横軸は透過率を示しており、右にいくほど色差およびマイケルソンコントラストが小さくなることを示している。

種別 1 に関して、回帰の平行性の検定を行った結果、年代と透過率の間に交互作用が見られた($F(2,214) = 14.539$ 、$p < .01$)。Bonferroni 法による多重比較の結果、20 代、30 代と 70 代間、50 代、60 代と 70 代間に有意差が見られた(20 代、30 代と 70 代間：$p < .01$、50 代、60 代と 70 代間：$p < .01$)。

種別 2 に関して、回帰の平行性の検定を行った結果、年代と透過率の間に交互作用が見られた($F(2,214) = 15.976$ 、$p < .01$)。Bonferroni 法による多重比較の結果、20 代、30 代と 70 代間、50 代、60 代と 70 代間に有意差が見られた(20 代、30 代と 70 代間：$p < .01$、50 代、60 代と 70 代間：$p < .01$)。

種別 3 に関して、回帰の平行性の検定を行った結果、年代と透過率の間に交互作用が見られた($F(2,214) = 14.246$ 、$p < .01$)。Bonferroni 法による多重比較の結果、20 代、30 代と 70 代間、50 代、60 代と 70 代間に有意差が見られた(20 代、30 代と 70 代間： $p < .01$、50 代、60 代と 70 代間：$p < .01$)。

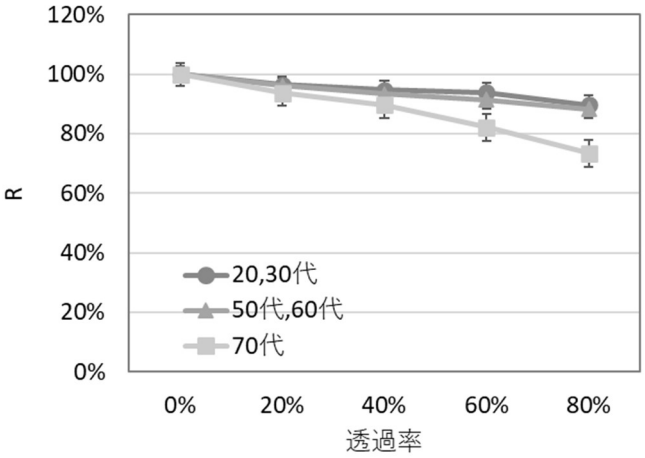


図 4-14　年代別透過率の影響(種別 1)

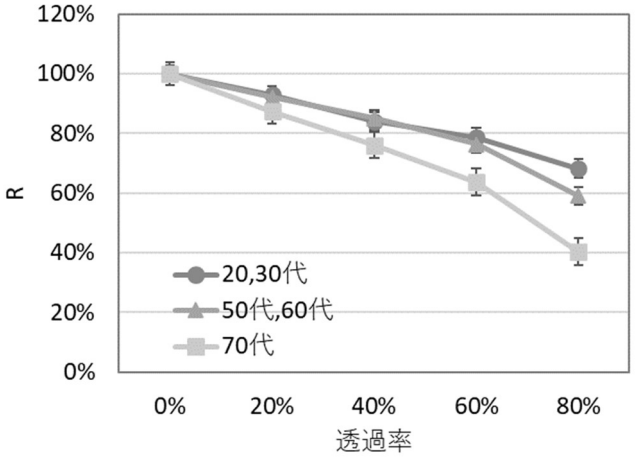


図 4-15　年代別透過率の影響(種別 2)

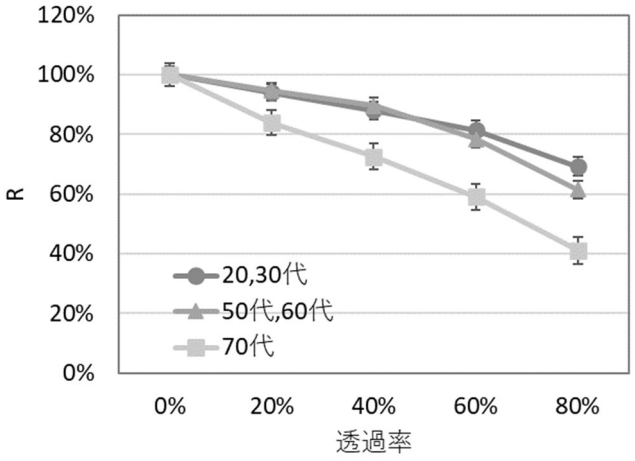


図 4-16　年代別透過率の影響(種別 3)

4.4　考察

図 4-7 に関して、60 代以下に比べ 70 代以上の群において、室内灯条件と比べ局部照明条件での評価値の低下が大きく、ハンディライトを使用する環境下において、視認性が低下することが分かった。蒲山の報告[24]によれば、注視点の明るさが周囲の明るさの 20 倍を超えるような過度に対比が大きい場合、視力が低下することを報告している。今回の実験において、背景輝度と注視点の輝度比は局部照明条件で 100 倍以上と非常に大きな対比が発生しており、特に 70 代の群にこれらの影響が強く見られ、視認性が低下したと考えられる。実際の現場において、現時点では再雇用を含め雇用範囲は 60 代までであるため、視認性低下の影響は少ないと考えられるが、今後雇用範囲の拡大等により 70 代が作業を行う場合、作業内容の選定に注意を払う必要があるといえる。

また、図 4-8、図 4-10、図 4-12 について、すべての年代で照度が高いほど視認性が向上することが判明した。川口らの報告[43]では、100 hue test を用いた調査において、照度が高いほどエラースコアが低下することを示している。本調査においても同様の傾向が見られたと考えられ、年代に関わらず目視対象が平面である場合は、高い照度により、異常の検出精度向上が期待できる。

分光成分の影響に関して、無彩色である種別 1 については分光成分の影響は見られなかった(図 4-9)。しかし有彩色である図 4-11、図 4-13 については分光成分の影響を見ることができた。図 4-11、図 4-13 のどちらにおいても 30 代以下では分光成分が評価値に与える影響は見られなかったが、図 4-11 では 70 代の群において蛍光灯色の光で視認性が向上することが判明し、図 4-13 では 50 代以上において電球色の光で視認性が向上することが判明した。D. Van Norrin らの報告[59]によれば、色覚の基礎となる錐体細胞について、加齢による減少は 50 歳以降に発生することを報告している。こうした影響により、加齢によって色彩弁別能力は低下すると言われているが、鉄道車両等機械装置の目視検査では、目視対象に応じた分光成分を選択することで、識別能力の低下を補うことができると言える。また、図 4-11、図 4-13 において、50 代、60 代よりも 70 代の群で分光成分による差が顕著に表れている。今回の調査において、この分光成分による差の要因特定には至らなかったが、加齢による視覚機能の変化が進むにつれ、より詳細な目視対象に沿った分光成分の選択が必要となっていくと考えられる。

図 4-14～図 4-16 において、すべての種別において、目視対象のマイケルソンコントラストと色差が低下するにつれ、透過率 0%に対する R 値の低下傾向は 70 代が大きいことが判明した。大森らの報告[57]によれば、20 歳から 79 歳までの 100 名を対象とした調査において、中周波数領域と高周波数領域での空間周波数のコントラスト感度は 65 歳以上で低下していたことが報告されている。鉄道車両に搭載される機器は、数年~十数年単位で使用されるものが多く、風化や走行中についた汚れ等で異常が目視しづらくなる状況が多々ある。こういった異常の見逃しを防ぐため、適切な作業環境の確保と、作業者に合った照明環境の

確保は重要であるといえる。

4.5　まとめ

本研究は鉄道車両の検査修繕に用いるのに適したハンディライトの条件を明らかにするため、様々な照明条件下で平面上の白黒コントラスト及び色の空間分解能の変化を調査したものである。実験の結果、今回の実験条件において、照度に関しては年代に関係なく 5000 lx 程度の高い照度が必要であること、光色に関して、50 代以上の作業者は、色の空間分解能向上のために目視対象に応じた光色の選択が必要となると考えられる。特に 70 代において、局部照明環境やコントラストおよび色差の低い目視対象の場合、視認性が低下する可能性が見られた。

第 5 章　結論

5.1　研究の成果

5.1.1　本研究で得られた知見

本研究は、鉄道車両等機械装置の目視検査に用いられるハンディライト等局部照明を対象に、使用者の年代や目視対象に応じた適切な局部照明条件について検討したものである。調査に先立ち、鉄道車両の目視検査項目を「立体」および「平面」の要素を基に異常を判別するものに分類し、それぞれの代表的な事例を一般化した課題を用いることで年代、目視対象に応じた局部照明条件の検討を行った。

第 3 章では「立体」の要素に基づく検査を行う場合に適した年代別局部照明条件を明らかにするため、鉄道車両の目視検査を模擬した奥行き弁別課題を作成し、局部照明条件(照度および分光成分)を実験要因として行った実験結果および考察について記述した。実験の結果から、得られた知見を以下に示す。

(1) 20 代、30 代では局部照明条件(照度および分光成分)が奥行きの弁別に与える影響が小さく、今回の実験で用いた条件の範囲内(照度 50 lx～5000 lx、色温度 2700～6800K)であれば弁別課題の成績に差が出ない。
(2) 視覚機能の加齢変化が出る 50 代、60 代では、局部照明の分光成分が奥行きの弁別に与える影響は小さい一方、5000 lx 程度の明るすぎる照度では弁別課題の成績が低下する
(3) 「立体」要素に基づく検査を行う場合において、複数方向から目視対象を照らす場合弁別課題の成績が低下するため、一層注意が必要であること
(4) 微小な奥行きを弁別する際、主観的な見やすさは実際の誤答率と一致しない可能性があり、主観的な判断で適切な局部照明を選択するのは困難であること

また、奥行き弁別能力について、以下のことが明らかになった。

(5) 弁別課題の成績に関して、20 代、30 代と 50 代、60 代の成績間に有意な差は無く、視覚機能の加齢変化が出る 50 代、60 代においても、20 代、30 代と同等の奥行きの弁別能力を有すること
(6) 奥行の弁別能力には大きな個人差が存在するが、特に 50 代、60 代では、個人差の 1 要因として左右眼の視力差が存在するため、左右の視力差は眼鏡等を用い、矯正したほうが良いこと

第 4 章では「平面」の要素に基づく検査を行う場合に適した年代別局部照明条件を明ら

かにするための実験結果および考察について記述した。「平面」の要素には、「輪郭線、コントラスト」と「色」の要素が含まれることから、それぞれの要素について、ランドルト環を用いて鉄道車両の目視検査を模擬した課題を作成し、局部照明条件(照度および分光成分)を実験要因として実験を行った。

「輪郭線、コントラスト」の要素を模した課題は、無彩色のランドルト環および背景を設定した。「輪郭線、コントラスト」の課題を用いた実験の結果から、得られた成果を以下に示す。

(7) 「輪郭線、コントラスト」の要素に基づく検査では、年代に関係なく照度は 5000 lx 程度の明るい照明が適していること
(8) 「輪郭線、コントラスト」の要素に基づく検査を模した課題のように、無彩色の対象を目視する場合、年代に関係なく局部照明の分光成分の影響は小さいこと

「色」の要素に基づく検査を模した課題として、「漏油」と「緑青」を一般化した課題を用いた。「漏油」の課題はランドルト環をギアオイルの色、背景色を鉄道車両の台車によく使用される灰色 1 号とし、「緑青」の課題はランドルト環を緑青の色、背景色を銅の色としている。「色」の課題を用いた実験の結果から、得られた成果を以下に示す。

(9) 「漏油」、「緑青」を模した課題どちらにおいても、年代に関係なく 5000 lx 程度の明るい照明が適していること
(10) 「漏油」を目視対象とした場合、60 代以下では分光成分の影響は小さい一方、70 代では電球および白色 LED の分光成分に比べ、蛍光灯の分光成分である色温度 4800K 程度の照明で視認性が向上すること
(11) 「緑青」を目視対象とした場合、20 代、30 代では分光成分の影響は小さい一方、50 代、60 代では蛍光灯の分光成分に比べ電球の分光成分で視認性が向上し、70 代では蛍光灯および白色 LED の分光成分に比べ電球の分光成分で視認性が向上するなど、50 代以上の群において、色温度 2800K 程度の照明で視認性が向上すること

また、「平面」の要素に関する実験結果により以下のことも明らかになった。

(12) 「平面」の要素に基づく検査を行う場合、(7)および(9)から、年代に関係なく 5000 lx 程度の明るい照明が適していること
(13) 「色」の要素に基づく検査を行う場合、(10)および(11)から、加齢による視覚機能変化に伴い、目視対象に合わせてより詳細な照明の分光成分の選定が必要となること
(14) 60 代以下に比べ 70 代の群では、部屋全体を照らす全般照明環境を基準とした場合、局部照明環境での視認性が大きく低下すること

(15) 目視対象と背景のコントラスト差が低下した場合、60 代以下に比べ 70 代で視認性の低下が大きいこと

(16) (13)、(14)の結果より、60 代以下に比べ 70 代で視認性が低下する場面が明らかになったが、現時点では再雇用を含め雇用範囲は 60 代までであるため、視認性低下の影響は少ないこと

5.1.2　鉄道車両等機械装置における目視検査用ハンディライトの提案

5.1.1 項で記述した本研究で得られた知見から、年代と目視対象別に適切な照明条件をまとめ、鉄道車両等機械装置の目視検査用局部照明の提案を行う(図 5-1~図 5-3)。縦軸は照度、横軸は色温度を示す。図中の四角の枠は、凡例の通り、目視対象別に適した照明の範囲を示しており、これらの枠が重なる部分の照明を用いることで、鉄道車両等機械装置の目視検査の様々な場面に対応できることを示している。また、星印は鉄道車両の目視検査でよく使用されている白色 LED を光源とした局部照明の照度および色温度を示している。図 5-1~図 5-3 から、現在よく使用されている高照度の白色 LED を搭載した局部照明は 20 代、30 代については使用に問題はない一方、50 代以上では「立体」や「平面」の「色」の要素に基づく検査を行う場面に適していないことが示された。

図 5-1 に示すように、鉄道車両等機械装置の目視検査に使用する照明条件として、30 代以下の現在の雇用範囲の中で若い層に関しては、5000 lx 程度の高い照度を出力できるものであれば、光源の分光成分は影響しないと考えられる。しかし図 5-2 のように、50 代~60 代では、「立体」の要素に基づく検査を行う場合は 1000 lx 以下の照度、「平面」の要素である「輪郭線、コントラスト」、「色」に基づく検査を行う場合は 5000 lx 程度の照度と、照明を使い分けたほうが検査精度の向上が期待できる。光源の分光成分に関して、「緑青」や「漏油」など「色」の要素に基づく検査を行う場合には電球の分光成分が適していることから、電球色 LED を搭載した照度可変のライトを用いることが望ましいと考えられる。電球色 LED を搭載した照度可変のライトは、20 代、30 代においてもすべての場面に対応していることから、鉄道事業者の大多数が採用する雇用範囲である 60 代以下全体に対応しているため、1 種類の局部照明で作業者全体に対応可能である。さらに図 5-3 のように、70 代になると「漏油」の場合は蛍光灯の分光成分、「緑青」の場合は電球の分光成分というように、細かな目視対象に合わせた照明の変更が必要で、照度の切り替えの他、電球色と蛍光灯色の光色が切り替え可能なもの、もしくは目視対象に合わせてライトを持ち替えることが望ましい。

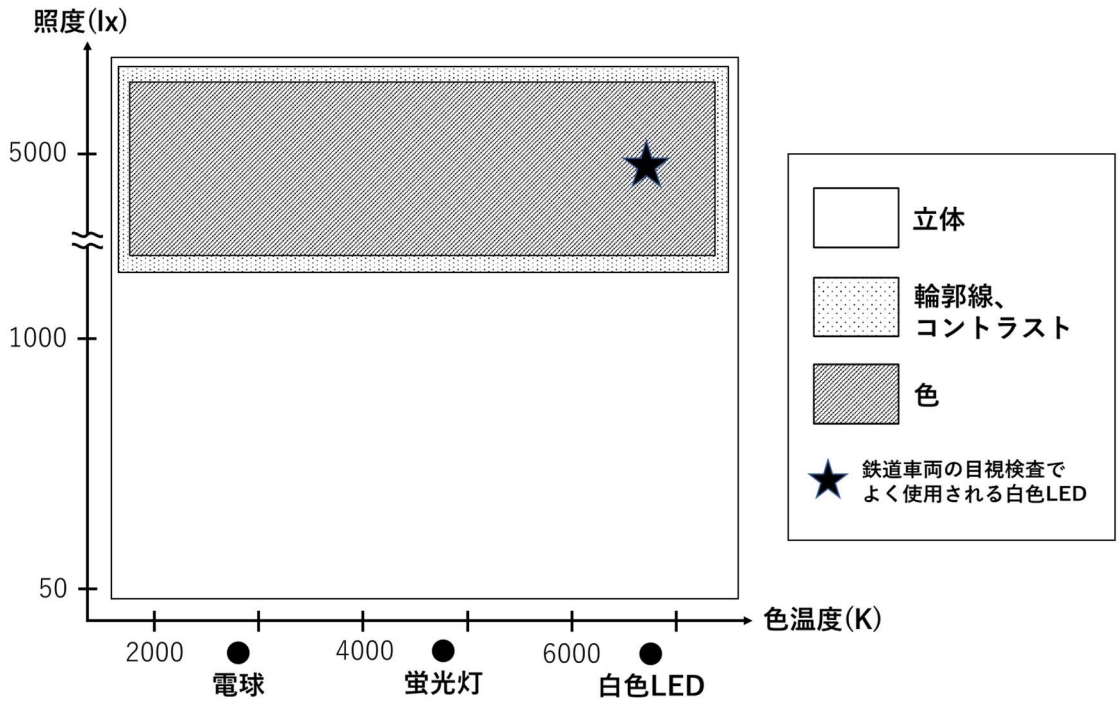


図 5-1　年代別鉄道車両等機械装置の検査に適した照明条件（20 代、30 代）

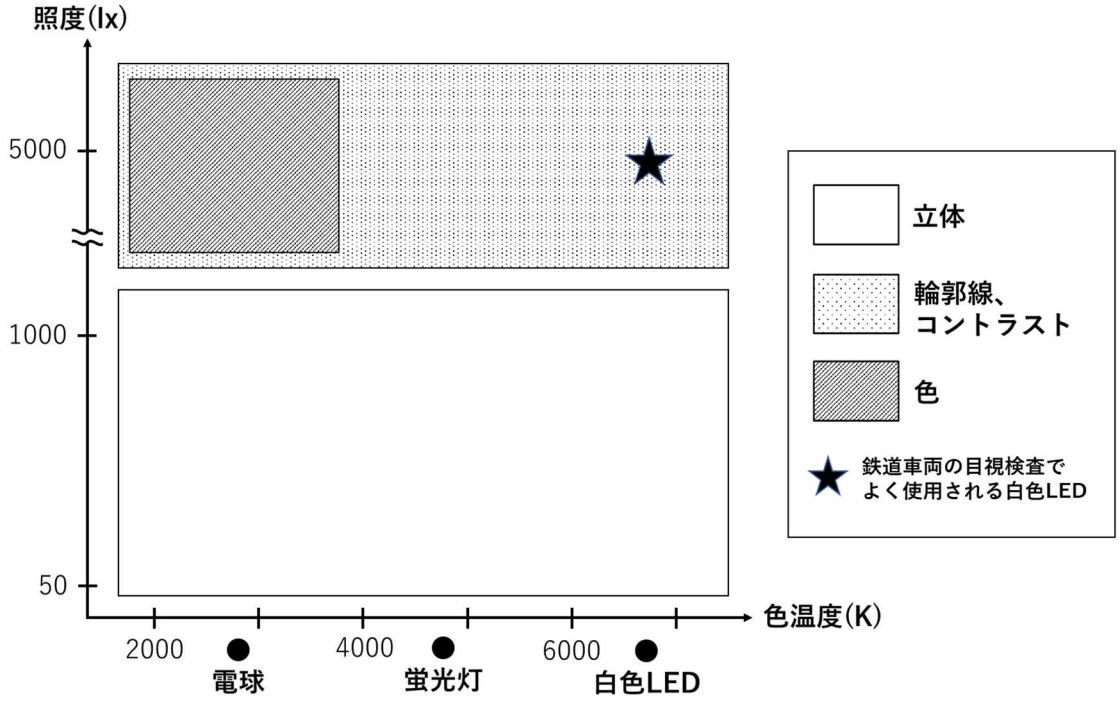


図 5-2　年代別鉄道車両等機械装置の検査に適した照明条件(50 代、60 代)

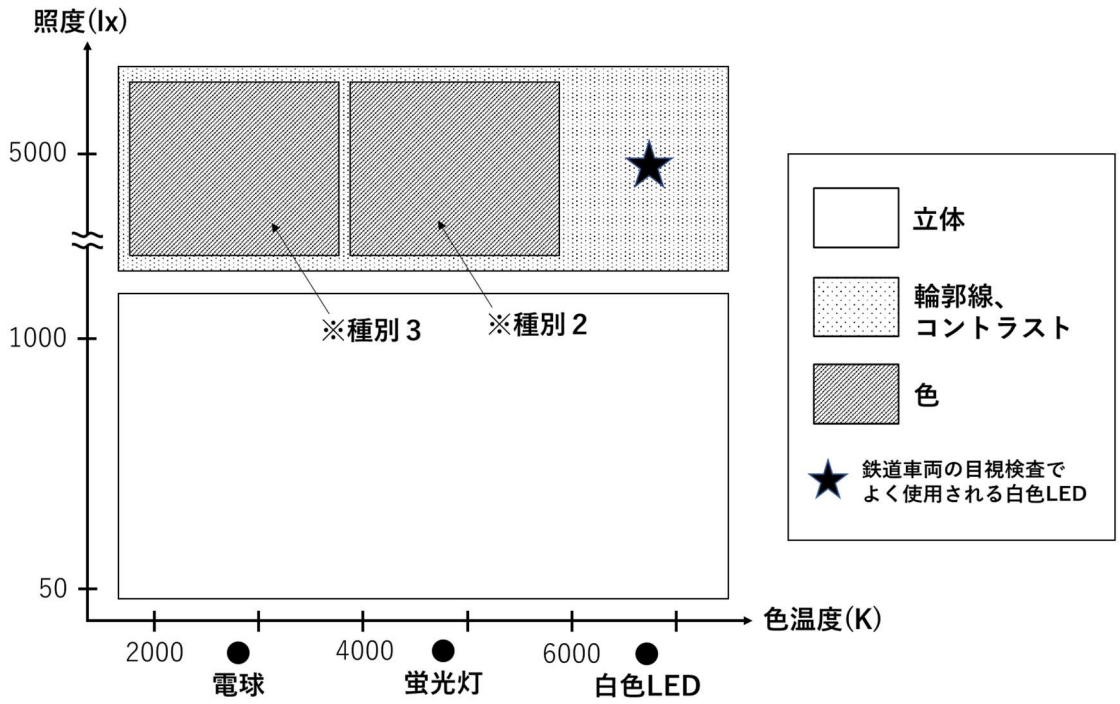


図 5-3　年代別鉄道車両等機械装置の検査に適した照明条件(70 代)

5.2　今後の課題

本研究は、鉄道車両等機械装置の目視検査に用いられるハンディライトを対象に、使用者の年代や目視対象に応じた適切な局部照明条件について実験室実験を行い検討したもので、実際の目視検査における導入の効果は計測できていない。よって今回提案した局部照明を、鉄道車両の目視検査に導入し、使用感などについて調査を行う必要がある。

また、本研究の実験では、目視角度および照明の照射角度は固定して行った。実際の目視検査では、目視角度および照明の照射角度は探索的に変化させながら行うことが多々ある。よって、目視角度および照明の照射角度を探索的に変化させた場合も今回提案した局部照明条件が適用可能か確認する必要がある。

参考文献

[1]　国土交通省：鉄道統計年報[令和元年度]，available from https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000053.html.

[2]　廿日出悟：鉄道車両の状態をモニタリングする，RRR，66(2)，2-5，2009.

[3]　牧野一成：車両に潜むきずの検査法，RRR，65(5)，2-5，2008.

[4]　石塚弘道：鉄道車両のメンテナンス技術の動向，溶接学会誌，77(6)，27-31，2008.

[5]　F. Marino, A. Distante, P.L. Mazzeo and E. Stella：A Real-Time Visual Inspection System for Railway Maintenance, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C，37(3), 418-428，2007.

[6]　S.-N. Yu, J.-H. Jang and C.-S. Han：Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel，Automation in Construction，16(3)，255-261，2007.

[7]　運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書(RA2016-5)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2016-5-1.pdf.

[8]　運輸安全委員会：鉄道重大インシデント調査報告書(RI2019-2)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-inci/RI2019-2-1.pdf.

[9]　運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書(RA2018-5)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2018-5-1.pdf.

[10]　運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書(RA2014-8)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2014-8-1.pdf.

[11]　運輸安全委員会：鉄道重大インシデント調査報告書(RI2014-3)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-inci/RI2014-3-1.pdf.

[12]　運輸安全委員会：航空事故調査報告書(AA2018-5)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/rep-acci/AA2018-5-2-HL7534.pdf.

[13]　運輸安全委員会：航空事故調査報告書(AA2009-7)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/rep-acci/AA2009-7-2-B18616.pdf.

[14]　運輸安全委員会：鉄道重大インシデント調査報告書(RI2009-4)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-inci/RI2009-4-1.pdf.

[15]　運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書(RA2006-1)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2006-1-7.pdf.

[16]　運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書(RA2004-4)，available from https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2004-4-2.pdf.

[17]　村田厚生：ヒューマンエラーの科学，日刊工業新聞社，2008.

[18]　G. Nickles, H. Him, S. Koenig, A. Gramopadhye and B. Melloy：A Descriptive Model of Aircraft Inspection Activities, available from https://www.faa.gov/about/initiatives/maintenance_hf/library/documents/#HumanFactorsMaintenance.

[19]　T.W. Faulkner and T.J. Murphy：Lighting for Difficult Visual Tasks, Human Factors, 15(2)，149-162，1973.

[20]　日本産業規格：JIS Z9110 照明基準総則，2010.

[21]　草野 舞子，岩田 利枝：LED照明による布の見え方に関する従来照明との比較，日本建築学会環境系論文集，75(653)，569-576，2010.

[22]　荒巻卓見，大塚秀三，高橋宏樹，三井実，中田善久，降旗翔：コンクリート表面の色むらの官能評価に及ぼす検査条件の影響，ものつくり大学紀要，5，41-48，2014.

[23]　中嶋良介，内野友貴，肥田拓哉，松本俊之：周辺視野を活用した目視検査における照明の明るさが欠点検出に及ぼす影響に関する研究，人間工学，54(4)，153-163，2018.

[24]　蒲山久夫，本橋昭男，佐藤麗子：明視照明のための基礎的研究，照明学会誌，46(3)，92-106，1962.

[25]　M. Navvab：Visual Acuity Depends on the Color Temperature of the Surround Lighting，Journal of the Illuminating Engineering Society，31(1)，70-84，2002.

[26]　森田純行，鈴木里佳，堀江良典，福井宏和，大内啓子：各種照明下における色の視認性，人間工学，37(Supplement)，190-191，2001.

[27]　S.M. Berman, M.A. Bullimore, I.L. Bailey and R.J. Jacobs：The Influence of Spectral Composition on Discomfort Glare for Large Size Sources，Journal of the Illuminating Engineering Society，25(1),34-41，1996.

[28]　謝明燁，宗方淳，平手小太郎：光色の違いがグレア感の評価と許容度に与える影響に関する研究，照明学会誌，89(11)，788-793，2005.

[29]　一般社団法人日本照明工業会：照明器具年度生産･出荷(販売)統計，available from https://jlma.or.jp/index.htm.

[30]　財団法人運輸政策研究機構編：日本国有鉄道 民営化に至る15年，株式会社成山堂書店，2000.

[31]　J. Pinel著，佐藤敬，泉井亮，若林孝一，飛鳥井望訳：バイオサイコロジー 脳－心と行動の神経科学，西村書店，2005.

[32]　松田隆夫：視知覚，培風館，1995.

[33]　R.L. Gregory著，近藤倫明，三浦佳世，中溝幸夫訳：脳と視覚―グレゴリーの視覚心理学，ブレーン出版，2001.

[34]　W. Kosnik, L. Winslow, D. Kline, K. Rasinski and R. Sekuler：Visual Changes in Daily

Life Throughout Adulthood, Journal of Gerontology, 43(3), 63-70, 1988.
[35] G. Haegerstrom-Portnoy, M.E. Schneck and J.A. Brabyn：Seeing into old age: vision function beyond acuity, Optometry and vision science, 76(3), 141-158, 1999.
[36] 岡嶋克典：視覚の加齢変化 基礎と応用, 照明学会誌, 94(3), 171-175, 2010.
[37] 石松 一真, 三浦 利章：高齢者の視機能と視覚的注意, 光学, 37 (9), 518-525, 2008.
[38] 岡嶋克典, 岩田三千子：水晶体加齢モデルによる高齢者の照明シミュレーションと最適照度の検討, 照明学会誌, 82(8A), 564-572, 1998.
[39] 矢野正, 金谷末子, 市川一夫：高齢者の不快グレア－光色との関係－, 照明学会誌, 77(6), 296-303, 1993.
[40] J. Pokorny, V. Smith and M. Lutze：Aging of the human lens. Applied Optics, 26(8), 1437-1440, 1987.
[41] D.J. Lund, J. Marshall, J. Mellerio, T. Okuno, K. Schulmeister, D. Sliney, P. Söderberg , B. Stuck, D. Van Norren and J. Zuclich：A computerized approach to transmission and absorption characteristics of the human eye(CIE203), CIE, 2012.
[42] K. Sagawa and Y. Takahashi：Spectral luminous efficiency as a function of age, Journal of the Optical Society of America A, 18(11), 2659-2667, 2001.
[43] 川口順子, 庄山茂子, 栃原裕, 團野哲也：100 hue testによる高齢者と若齢者の色彩弁別能力の比較, 日本生理人類学会誌, 10(3), 101-108, 2005.
[44] 栗木一郎, 石井渉, 内川 恵二：加齢による水晶体黄変が色覚におよぼす効果, 照明学会誌, 84(2), 107-116 , 2000.
[45] 佐藤千穂：加齢に伴う色の見えの変化, 照明学会誌, 82(8), 530-537, 1998.
[46] 矢野正, 下村容子, 橋本健次郎, 金谷末子：高齢者の色識別性, 日本色彩学会誌, 17 (2), 107-118, 1993.
[47] 田辺吉徳, 大竹史郎：高齢者の文字の読みやすさと所要照度に関するVisibility Levelの観点からの検討, 照明学会誌, 83(5), 278-287, 1999.
[48] Y. Inoue and Y. Akitsuki：The Optimal Illuminance for Reading (Effects of Age and Visual Acuity on Legibility and Brightness), Journal of Light & Visual Environment, 22(1), 23-33, 1998.
[49] 岩田美千代, 岡島克典, 氏家弘裕：照度レベルに依存するコントラスト感度の加齢変化, 照明学会誌, 85(5), 352-359, 2001.
[50] 斎田真也：立体知覚をめぐる視覚計測技術の最近の動向, バイオメカニズム学会誌, 15(3), 118-123, 1991.
[51] 勝山成美：人間の視覚情報処理～陰影による奥行き知覚の例～、映像情報メディア学会誌, 68(1), 46-51 , 2014.

[52]　辻雄太，鈴木広隆：両眼立体視における立体感の支配要因に関する研究，日本建築学会環境系論文集，71(605)，111-117 ，2006.

[53]　井上浩義, 渡辺功:奥行き知覚に及ぼす陰影のハイライトの位置の効果, 心理学研究, 76(1)，51-56，2005.

[54]　N.-C. Tai and M. Inanici：Depth perception as a function of lighting, time and spatiality, available from https://faculty.washington.edu/inanici/Publications/.

[55]　小美濃幸司，笠原悦夫：高速進行信号の確認に必要な視力の調査，RTRI REPORT, 27(3)，33-38，2013.

[56]　J.F. Norman, H.F. Norman, A.E. Craft, C.L. Walton, A.N. Bartholomew, C.L. Burton , E.Y. Wiesemann and C.E. Crabtree：Stereopsis and aging，Vision Research，48(23-24)，2456-2465，2008.

[57]　大森正子，石垣尚男，長谷川聡，宮尾克：加齢に伴うコントラスト感度及び各種視機能の変化，人間工学会誌，40(Supplement) ，494-495，2004.

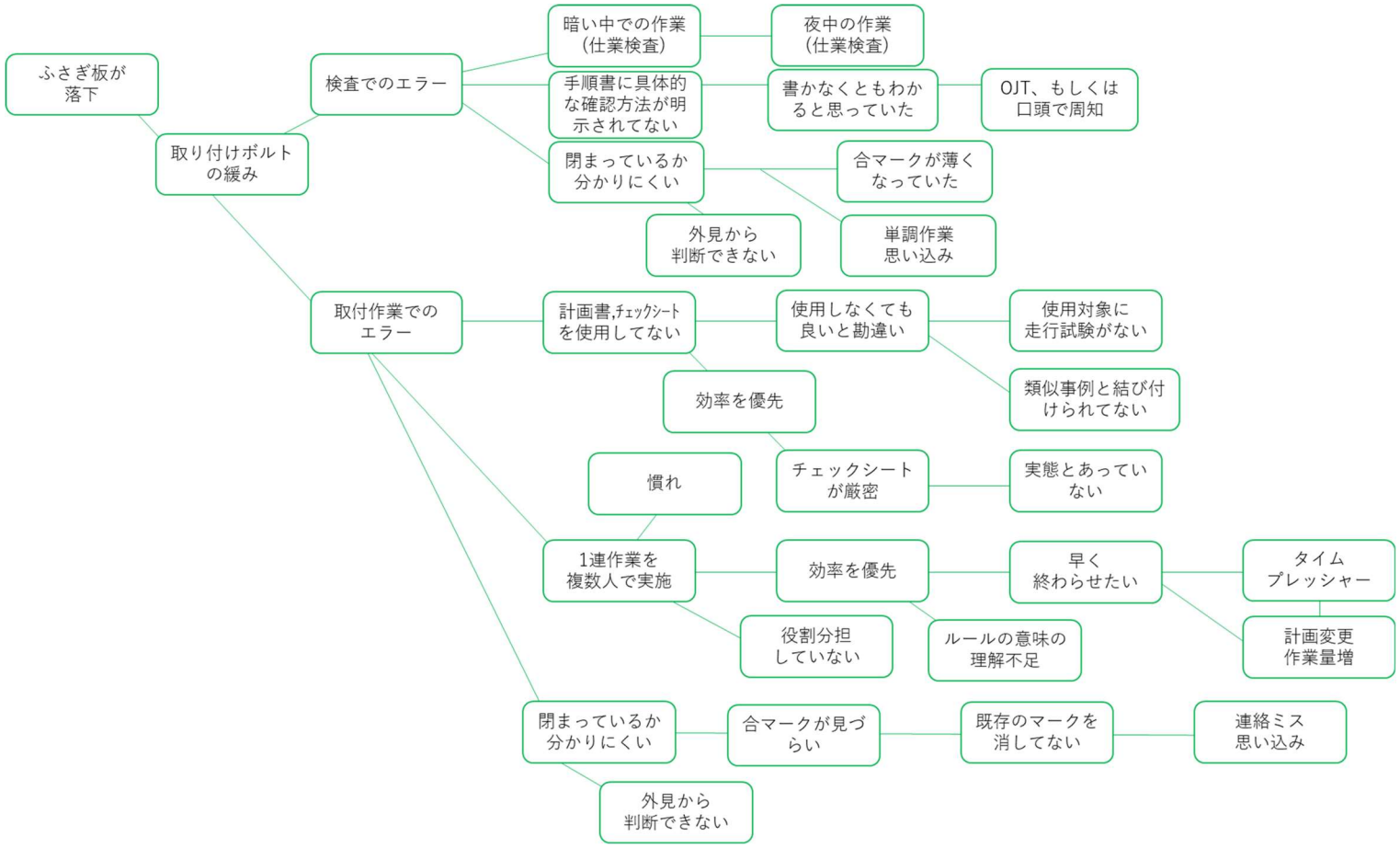
[58]　浅川賢，魚里博：立体視の成立に必要な条件と許容限界，視覚の科学，32(1)，3-7，2011.

[59]　D. Van Norrin and G.J. Van Meel：Density of human cone photopigments as a function of age．Investigative Ophthalmology & Visual Science，26(7) ，1014-1016，1985.

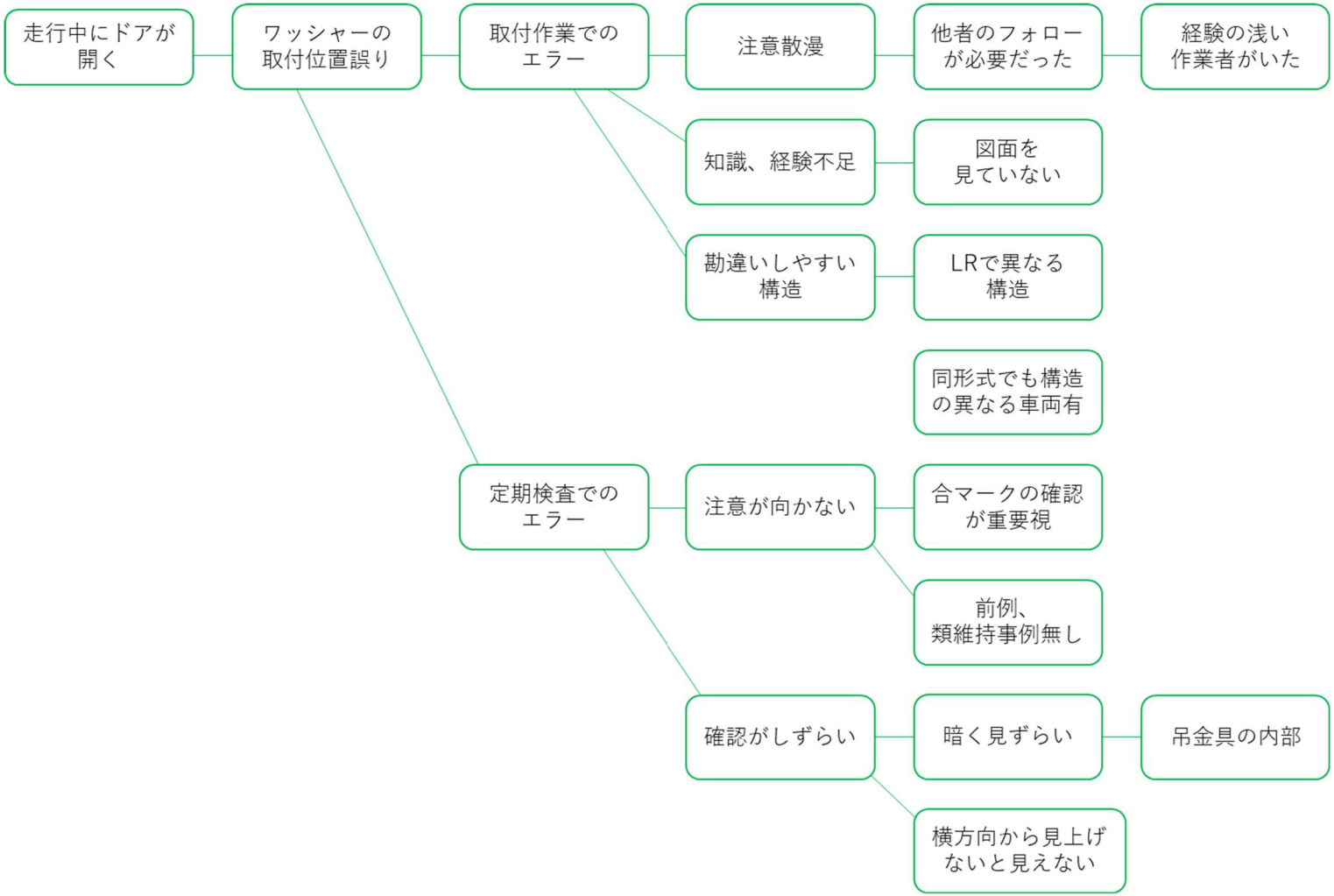
参考資料

鉄道車両等機械装置の検査におけるヒューマンエラーの分析資料

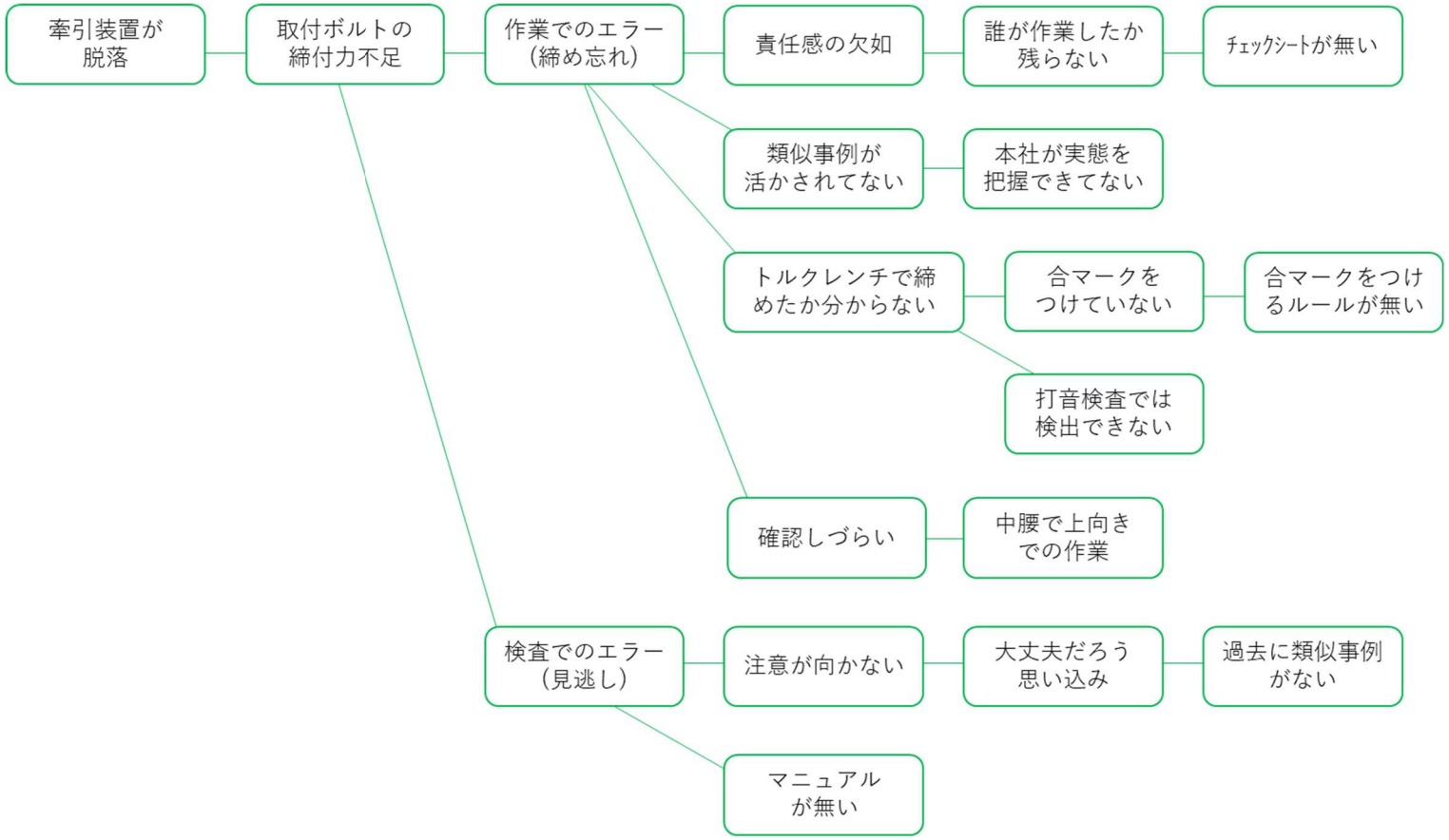
なぜなぜ分析による分析結果(鉄道事故調査報告書 RA 2016-5 [7])



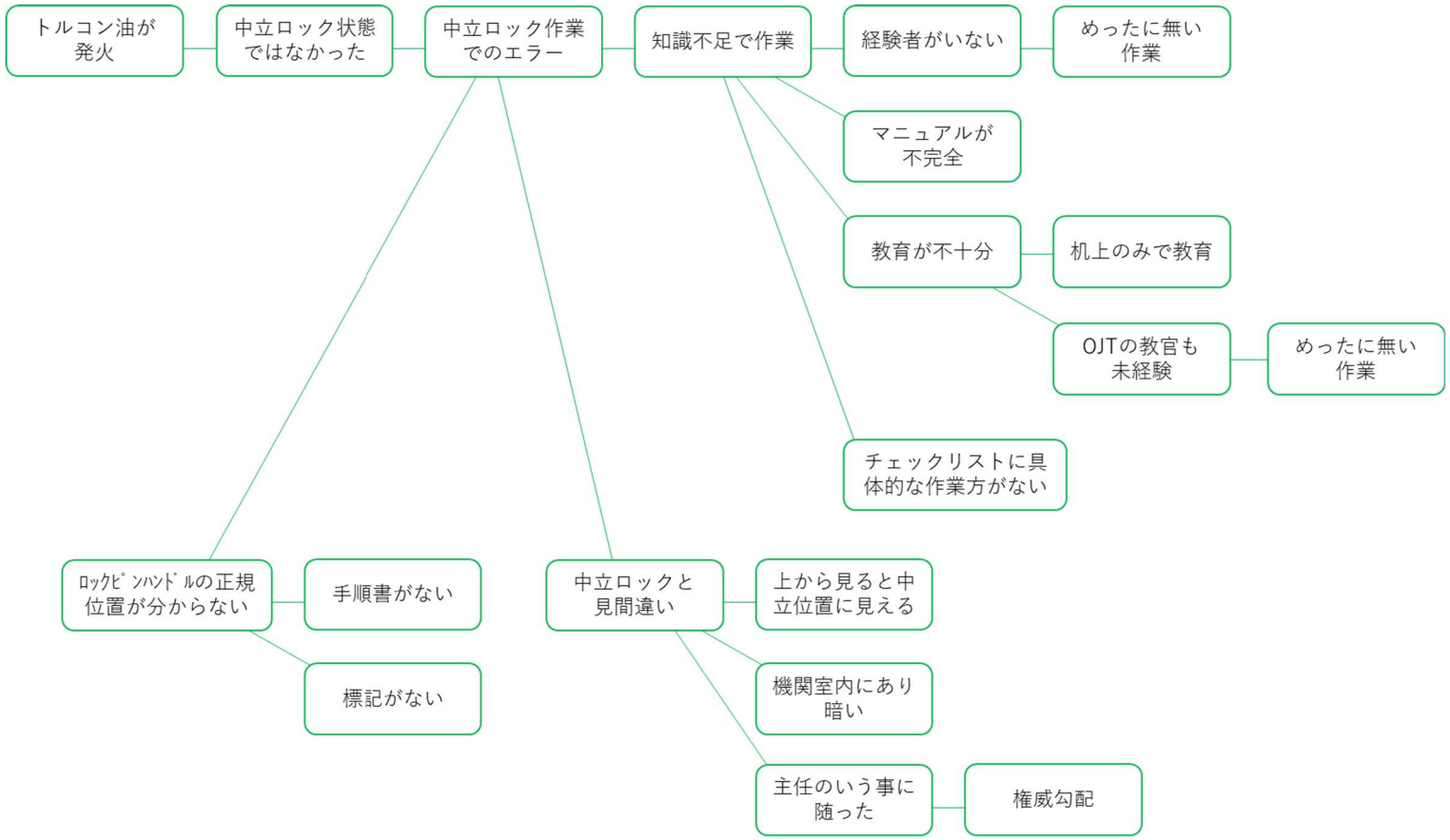
なぜなぜ分析による分析結果(鉄道重大インシデント調査報告書 RI2019-2 [8])



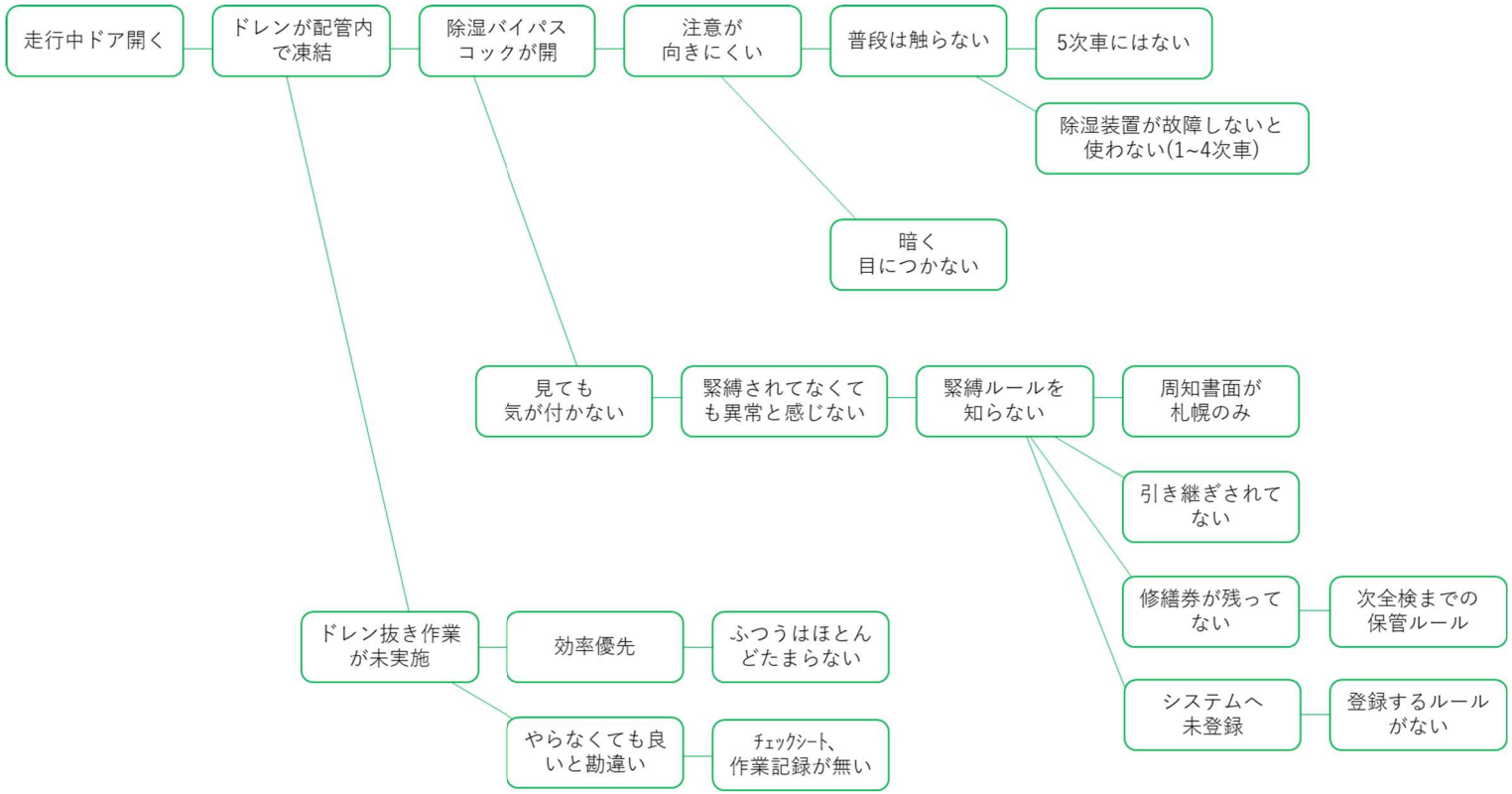
なぜなぜ分析による分析結果(鉄道事故調査報告書 RA2018-5 [9])



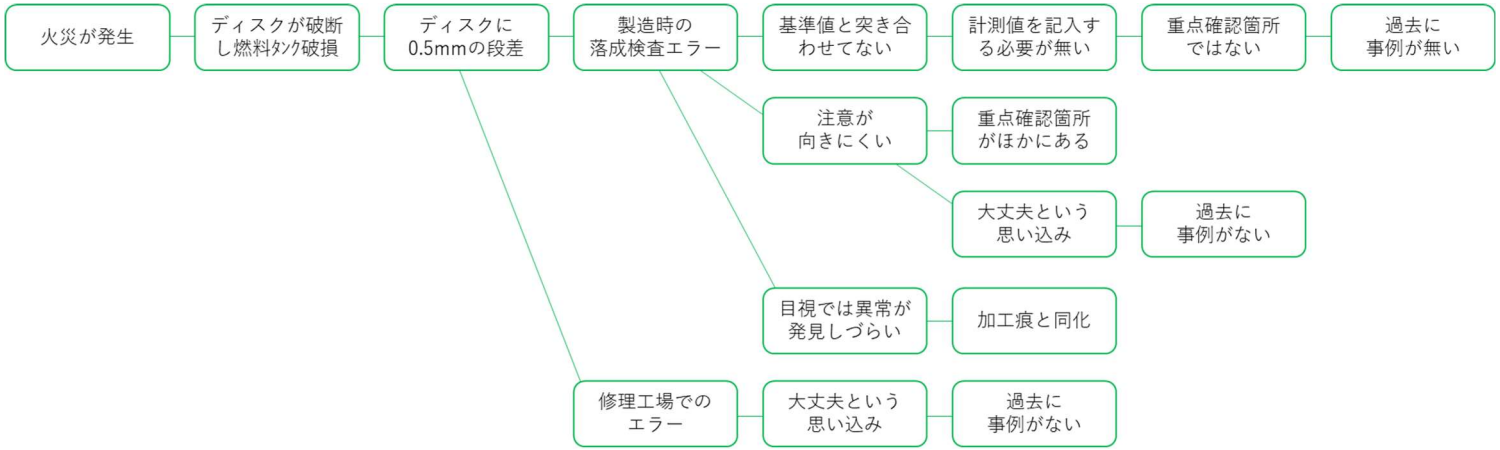
なぜなぜ分析による分析結果(鉄道事故調査報告書 RA2014-8 [10])



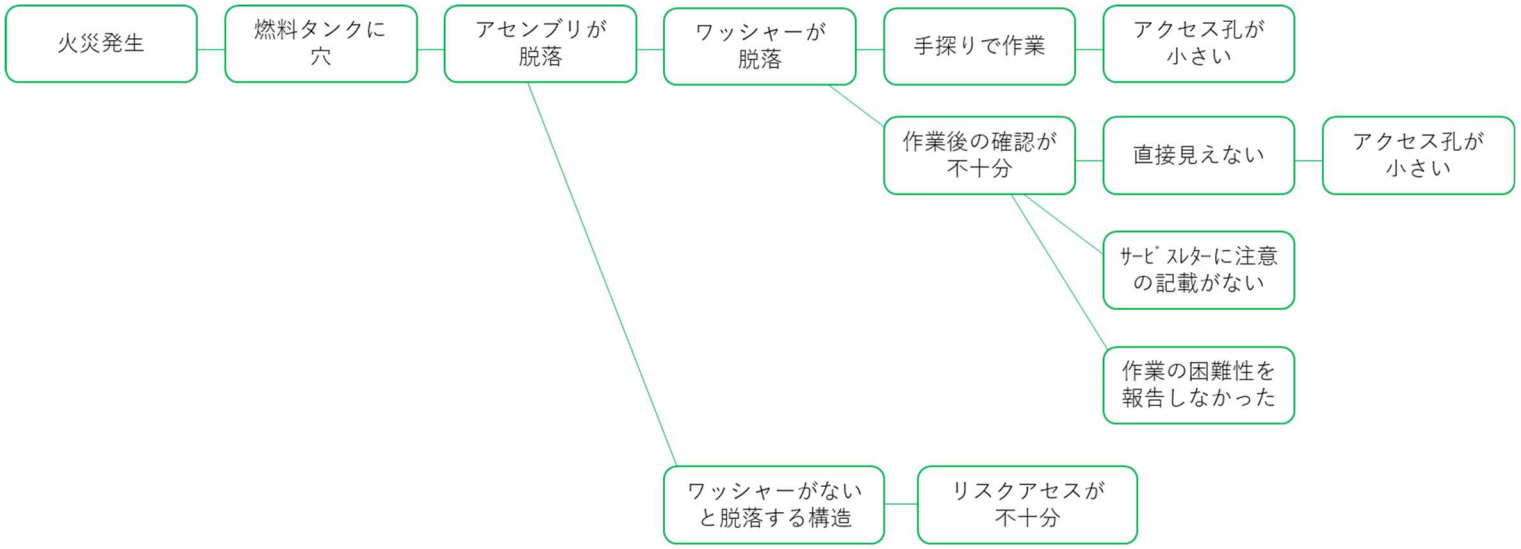
なぜなぜ分析による分析結果(鉄道重大インシデント調査報告書 RI 2014-3 [11])



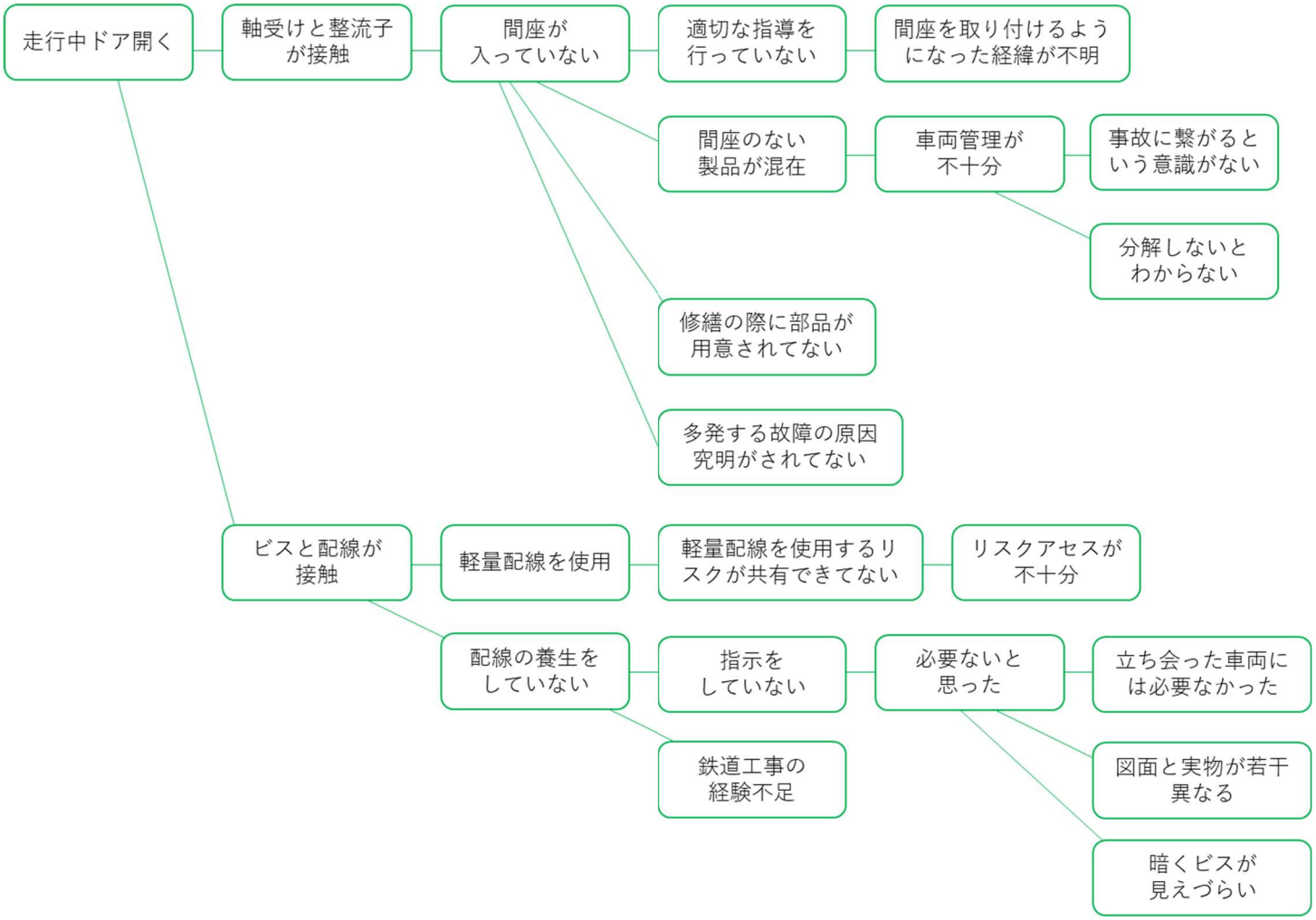
なぜなぜ分析による分析結果(航空事故調査報告書 AA2018-5 [12])



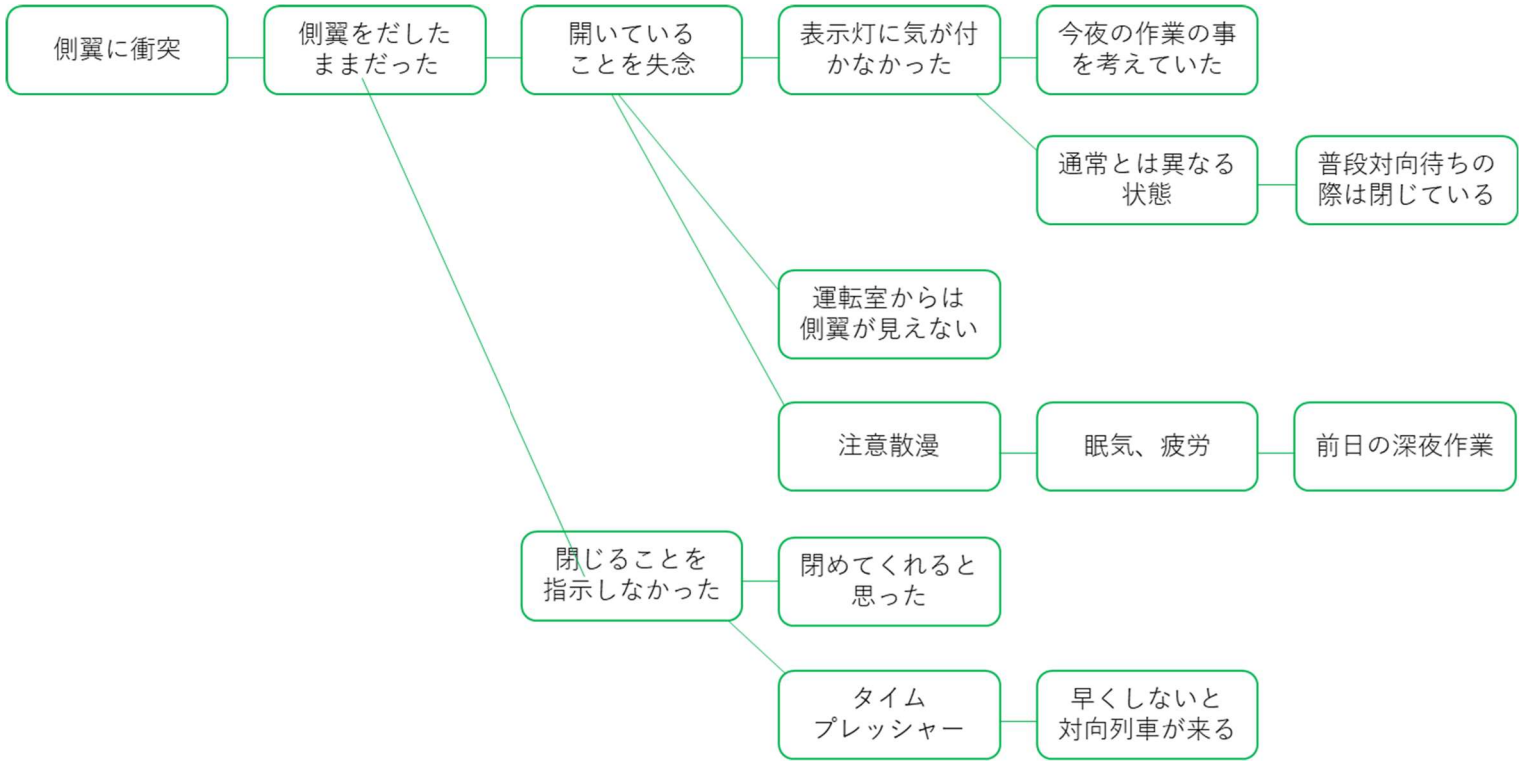
なぜなぜ分析による分析結果(航空事故調査報告書 AA2009-7 [13])



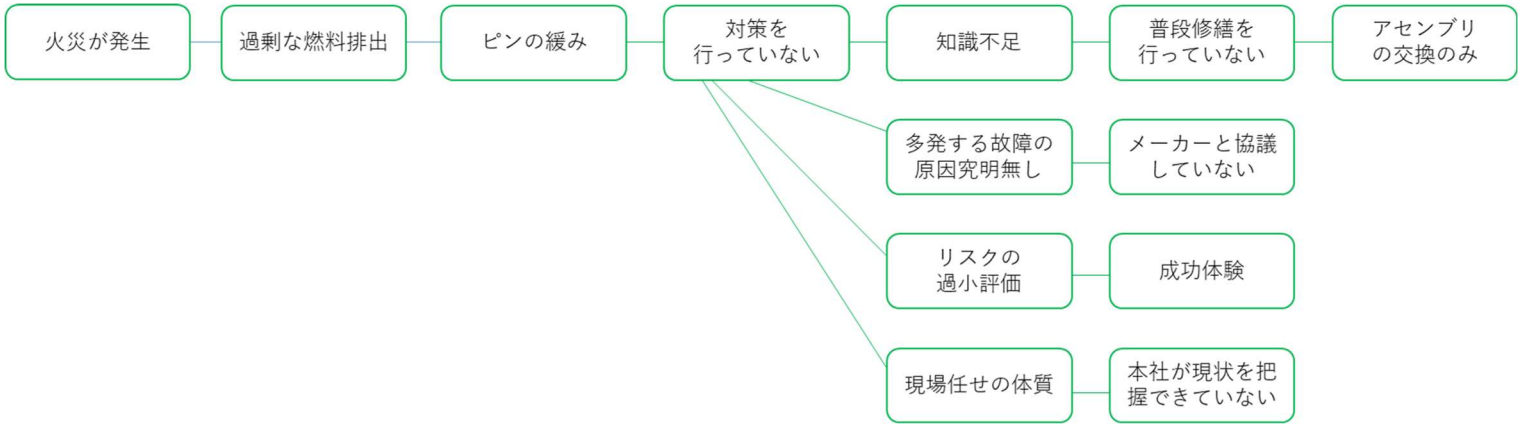
なぜなぜ分析による分析結果(鉄道重大インシデント調査報告書 RI 2009-4 [14])



なぜなぜ分析による分析結果(鉄道事故調査報告書 RA 2006-1 [15])



なぜなぜ分析による分析結果(鉄道事故調査報告書 RA2004-4 [16])



謝辞

本研究の遂行にあたり、多大なご指導を賜りました岡山大学学術研究院自然科学学域 村田厚生教授に深謝申し上げます。また、本論文をまとめるまで長い期間を要し、ご心配とご迷惑をお掛けしたことを改めてお詫び申し上げます。

岡山大学学術研究院ヘルスシステム統合科学学域 五福明夫教授ならびに同大学学術研究院自然科学学域 神田岳文教授、同学域 柳川佳也准教授には、本論文に関するご鞭撻を賜りましたことを深く感謝申し上げます。大阪公立大学大学院生活科学研究科(前岡山大学学術研究院助教) 土井俊央講師には、本研究に関する多数の助言を頂きましたことを感謝いたします。

博士課程への進学を斡旋して頂きました西日本旅客鉄道株式会社安全研究所 河合篤前所長に深く感謝申し上げます。また、本論文をまとめるにあたり助言を頂いた西日本旅客鉄道株式会社安全研究所 中井義之氏、本論文 1.1.1.2 項の分析にご協力頂いた同社安全研究所 吉田裕氏ならびに同社網干総合車両所 福田啓介氏、本論文 1.1.2.2 の調査実施に尽力して頂いた株式会社 JR 西日本テクノス 上杉卓正氏、西日本旅客鉄道株式会社吹田総合車両所 田渕耕平氏に感謝します。

最後に、幼少の頃から暖かい目で見守って育ててくれた両親に感謝します。