

東名高速道路 宇利トンネル照明灯具落下事象調査検討会  
報告書

平成28年3月

## はじめに

2015(平成27)年8月15日、東名高速道路宇利トンネル上り線入口から約250m(258.6KP)付近において、照明灯具1灯、及び電源ケーブルが垂れ下がり、走行中の大型貨物自動車に接触して、左サイドミラーなどを破損させた事故が発生した。なお、照明灯具は車両と接触した後、トンネル内の路肩付近に落下した。

中日本高速道路株式会社は、本事故の発生を踏まえ、原因の究明と、この結果に基づく対応方針について、透明性を確保し公平な立場で、客観的、技術的見地から検討することを決定した。これを受けて、材料、構造、道路附属物、腐食の専門家から構成される「東名高速道路宇利トンネル照明灯具落下事象調査検討会」(以下「調査検討会」という)を設置した。

本調査検討会では、トンネル照明灯具の材質、構造などの内的要因、トンネル内の温湿度、塩化物、硫黄酸化物など腐食に影響を及ぼす外的要因、腐食の状況などについて、さまざまな観点から調査を行った。

調査結果をまとめ、原因を究明する過程で、取付脚と灯具本体の接合部に無塗装の部分があったこと、トンネル内は塩化物や硫黄酸化物などが存在し厳しい腐食環境であったこと、灯具本体の耐腐食性能が高くなったことで結果的に弱い取付脚に影響が出たことなど、照明灯具の腐食に対する材料、環境、設計の最適な組み合わせが必要なことも示唆された。

本報告書は、調査検討会で実施した調査内容及び調査検討会で得られた知見について、今後のトンネル照明灯具などのトンネル内附属物の設計、維持管理の参考となるよう取りまとめたものである。この報告書が、安全な道路空間を提供するための適切な設計、維持管理に広く役立てられることを願っている。

平成28年3月1日

東名高速道路 宇利トンネル照明灯具落下事象調査検討委員会  
委員長 福井大学 副学長 岩井 善郎

# 目 次

1. 発生事象の概要と調査検討会	
1.1 発生事象の概要	1-1
1.2 照明設備に関わる主な経緯	1-2
1.3 調査検討会の設置	1-3
2. トンネル照明灯具の構造と破損状況	
2.1 トンネル照明灯具構造・仕様	2-1
2.2 落下した灯具状況	2-2
2.3 破損箇所の観察	2-3
3. トンネル照明灯具の付着物質分析	
3.1 調査方法	3-1
3.2 調査結果	3-2
4. トンネル内温度・相対湿度調査	
4.1 調査方法	4-1
4.2 調査結果	4-1
4.3 年間のトンネル内相対湿度の推定	4-2
5. 取付金具の残存亜鉛めっき膜厚調査	
5.1 調査方法	5-1
5.2 調査結果	5-2
6. 新品形状サンプルを用いた腐食促進試験	
6.1 試験方法	6-1
6.2 外観状態観察の結果	6-3
6.3 腐食量の計測結果	6-4
7. 金属疲労痕の調査	
7.1 調査方法	7-1
7.2 調査結果	7-2
8. トンネル照明灯具のFEM構造解析	
8.1 解析方法	8-1
8.2 解析結果	8-2
9. 落下に至った経緯の推定	
9.1 落下に至った経緯の推定	9-1
9.2 直近の点検時の取付脚厚さの推定	9-3
9.3 亜鉛の腐食量から推定した鋼の腐食量	9-4

10.	トンネル照明灯具の点検について	
10.1	現在の点検方法	10-1
10.2	点検方法の検証	10-3
11.	今回の事象を受けたトンネル照明灯具の維持管理手法（案）	11-1

（参考資料）

委員会規約	参-1
宇利トンネル周辺の環境（塩分）	参-2
宇利トンネル周辺の環境（雪氷対策作業状況）（塩分）	参-3
宇利トンネル周辺の環境（降水量）	参-4
宇利トンネル周辺の環境（交通量）	参-5
落下灯具付近の漏水状況	参-6
その他の調査結果	参-7

# 1. 発生事象の概要と調査検討会

## 1.1 発生事象の概要

2015(平成27)年8月15日17:30頃、東名高速道路宇利トンネル上り線入口から約250m(258.6KP)付近において、走行車線側のトンネル照明灯具1灯(灯具寸法:縦420mm×横700mm×奥行150mm, 重量:18.5kg)、及び電源ケーブルが垂れ下がり、走行中の大型貨物自動車に接触して、左サイドミラーなどを破損させた事故が発生した。なお、照明灯具は車両と接触した後、トンネル内の路肩付近に落下した。



図 1.1.1 宇利トンネル位置図

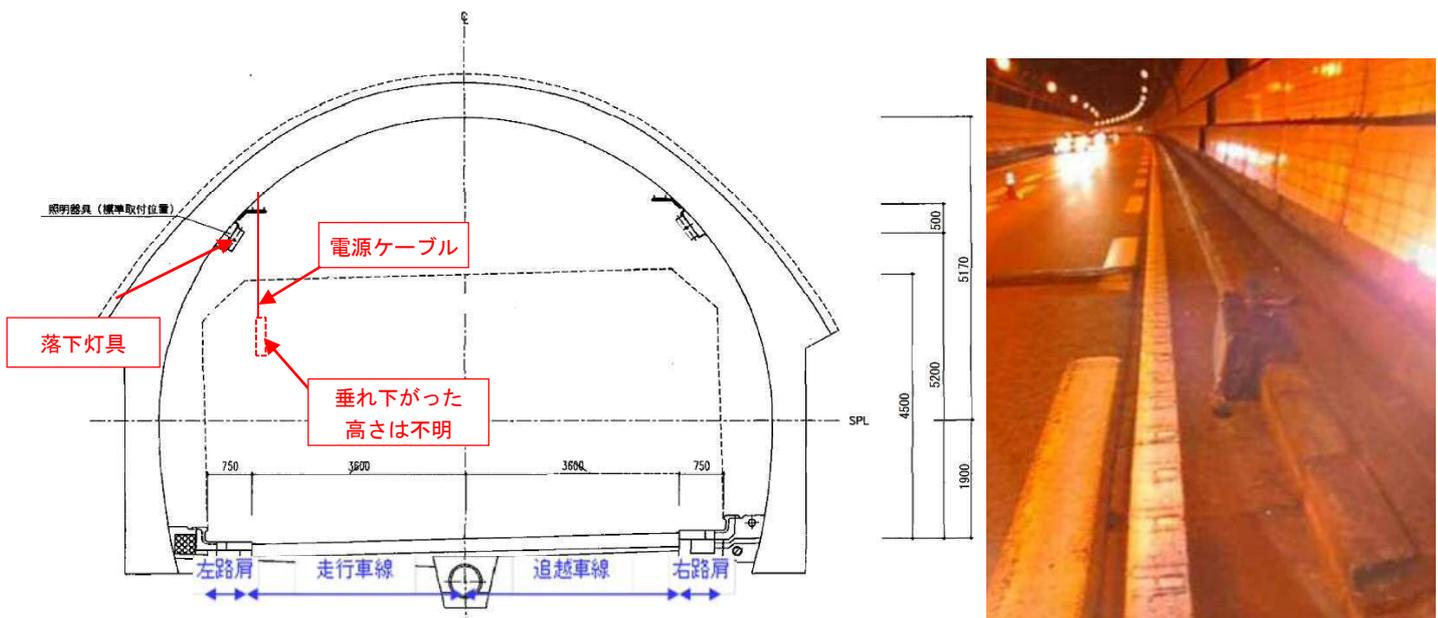


図 1.1.2 トンネル照明器具取付図と落下後の状況

トンネルの諸元

- ・トンネル延長：958m
- ・供用年月：1969（昭和44）年2月
- ・日平均交通量：37,645台/日（2014（平成26）年実績），大型車混入率：42.6%
- ・照明器具設置年月：1996（平成8）年1月
- ・照明器具数：走行側290灯，追越側291灯，合計581灯

1.2 照明設備に関わる主な経緯

落下したトンネル照明灯具は、更新工事により1996（平成8）年1月に設置され、2003（平成15）年、2007（平成19）年、2010（平成22）年に定期的な構造面の点検を実施した。また、筐子トンネル天井板落下事故を受けて、トンネル内の道路附属物一斉点検を2013（平成25）年1月～2月にかけて実施した。

なお、当該トンネルでは、2015（平成27）年3月よりトンネル照明設備の更新工事を実施中であつた。

表 1.2.1 宇利トンネル（上り線）照明設備に関わる主な経緯

No	年月日	事象の経緯
1	1996(平成8)年 1月	トンネル照明(上り線)更新工事しゅん功
2	2003(平成15)年 9月8日～12月8日	日本道路公団の点検要領に基づく施設構造点検(※1)
3	2007(平成19)年10月9日～10月15日	NEXCO中日本の点検要領に基づく施設構造点検(※1)
4	2010(平成22)年10月4日～10月12日	NEXCO中日本の点検要領に基づく施設構造点検(※1)
5	2013(平成25)年1月19日～2月23日	トンネル内道路附属物等の一斉点検(※1)【上り線：2灯撤去】
6	2015(平成27)年3月20日 ～2016(平成28)年3月14日	東名高速道路 宇利トンネル照明設備工事 発注
7	2015(平成27)年8月15日	宇利トンネル(上り線)照明灯具1灯落下事象発生
8	2015(平成27)年8月16日～8月20日	緊急点検：宇利トンネル(上下線)【上り線：15灯撤去】

※1 いずれも点検方法等は同じである。（下表参照）

なお、施設構造点検は、平成13年から実施することになったものである。

項目	内容
① 点検方法	近接目視かつ触診や打音により行うことを原則とし、近接目視等により変状の疑いが確認された場合には非破壊検査を実施する
② 点検頻度	1回以上/5年 ただし、施設設備の新設又は仕様変更から10年経過以降は1回以上/3年とする
③ 点検項目	(a)近接目視かつ触診（亀裂、損傷、腐食及び取付状況） (b)超音波厚さ測定など【必要に応じて実施】 (c)灯具内部近接目視（亀裂、損傷及び腐食状況）【必要に応じて実施】
④ 判定区分	『AA』『A』『B』『C』『OK』の5段階評価

### 1.3 調査検討会の設置

#### (1) 目的

今回の事象を受けて、発生原因の究明を行うとともに、この結果に基づく対応方針について、技術的かつ専門的見地から検討することを目的として「東名高速道路宇利トンネル照明灯具落下事象調査検討会」が設置された。

#### (2) 構成

調査検討会は以下の委員により構成された。

委員長 岩井 善郎 福井大学 副学長

委員 山田 健太郎 名古屋大学 名誉教授

委員 玉越 隆史 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 橋梁研究室長

委員 片山 英樹 国立研究開発法人 物質・材料研究機構

環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価ユニット

腐食解析グループ 主幹研究員

委員 赤坂 俊幸 (株)高速道路総合技術研究所 施設研究部 施設研究担当部長

#### (3) 開催経緯

調査検討会の開催経緯は以下のとおりである。

第1回検討会 2015（平成27）年9月11日

第2回検討会 2015（平成27）年11月18日

第3回検討会 2016（平成28）年3月1日

#### (4) 議事要旨

##### 第1回

■ 検討会として、今回の事象に関して事実関係を確認した。

- ・落下した照明灯具は取付脚が4箇所破断しており、著しい腐食があることを確認した。
- ・緊急点検において撤去した照明灯具にも腐食があることを確認した。
- ・当該トンネルにおいて、落下した照明灯具等の位置を確認した。

■ 検討会として、落下照明灯具の仕様、点検状況、周辺的环境について確認したが、原因の究明にはさらに落下した照明灯具等の詳細な調査が必要である。

■ 今後、詳細な調査を踏まえ、劣化から破断、落下に至るメカニズムについて、さらなる検討を実施していくことを確認した。

##### 第2回

■ 検討会として、調査結果により下記のとおり事実関係を確認した。

- ・取付脚と灯具本体の接合面は無塗装であった。なお、周囲はパテ仕上げが施されていた。
- ・取付脚のさびの層間にナトリウム、塩素、硫黄が検出された。
- ・落下した照明灯具は取付脚4箇所のいずれも、取付脚と灯具本体との接合面において主

に取付脚が減肉している。特に先端部側（取付脚の破断面に近い側）の腐食が著しく、破断箇所には金属部がほとんど見られなかった。

■ 調査結果から、下記のような討議を行った。

- ・腐食メカニズムなどに関して更なる検討が必要
- ・腐食に関与すると考えられる他の物質も更なる調査が必要
- ・今回の照明灯具と同種仕様の維持管理手法について対応方針、更新の考え方について検討する。

### 第3回

宇利トンネル照明灯具落下事象の原因究明と、トンネル照明灯具の今後の維持管理手法に関して審議

■ 宇利トンネル照明灯具落下事象の原因究明について、照明灯具の取付脚が破断に至った経緯を、落下した照明灯具の詳細な調査、トンネル内環境の調査等による推定調査で判明した内容

【トンネル照明灯具の調査】

- ① 取付脚と灯具本体の接合部周囲の充填材（防水パテ）が経年劣化により剥離
- ② 取付脚部分の断面を SEM 観察し、接合部端部が扇型に開口している状況を確認
- ③ 取付脚部分の断面を EPMA マッピング分析し、接合部内側にさび層を確認。扇型の開口のさび層の間に凍結防止剤由来の塩化物 (Cl<sup>-</sup>)、排気ガス由来の硫酸化物 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) を確認
- ④ 灯具の製作過程において、灯具本体と取付脚をスポット溶接による接続したのち、塗装をすることから、接合部内側は無塗装となっていることを確認
- ⑤ 灯具本体の材質が SPCC（冷間圧延鋼板）ではなく SECC（電気亜鉛めっき鋼板）と確認
- ⑥ 塩水噴霧サイクル試験（JIS H8502）では、SECC 製の灯具本体の腐食進行度は SPCC 製と比べて小さいことを確認
- ⑦ FEM 解析では取付脚が4箇所均等に0.05mmまで減肉した場合でも自重では破断しないと推定

【トンネル内の環境調査】

- ⑧ 塩化ナトリウム臨界相対湿度<sup>※1</sup>の75%以上となる時間がかなりの頻度で出現する環境と推定

※1 塩化ナトリウム臨界湿度：NaClの吸湿が始まり、濡れやすくなる湿度

以上のことから、落下に至った経緯を次のように推定

- ・トンネル内は、硫酸化物 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) の影響とともに塩化物 (Cl<sup>-</sup>) が乾湿を繰り返す厳しい腐食環境
- ・取付脚と灯具本体の接合部周囲の充填材（防水パテ）が剥離した隙間から腐食原因物質（水分、塩化物 (Cl<sup>-</sup>)、硫酸化物 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)）が浸入
- ・隙間から侵入した腐食原因物質により、接合部内側の無塗装部分でさびが発生、成長
- ・接合部内部のさびが、灯具本体と取付脚の間に膨張し、接合部の端部が、腐食原因

物質を捕捉、蓄積しやすい形状（扇型）に変形し、灯具本体より腐食しやすい取付脚の腐食が大きく進行

・ 接合部の端部（灯具本体の角部付近）の位置で破断して、落下

■ 今回の事象を受けたトンネル照明灯具の維持管理手法の方針について、落下に至った経緯で抽出された課題に対して、宇利トンネルと同種の灯具、及び同種以外の灯具についてそれぞれに応じた対応を以下のとおり整理

① 二重の安全対策で落下に対する安全性を確保（今年度完了予定）

② 宇利トンネルと同種の灯具（灯具本体：鋼板塗装仕上げ 取付脚：鋼板塗装仕上げ）

・ 灯具本体と取付脚との接合部の点検を着目点として追加

※ 当該灯具を使用しているトンネル 12 本のトンネル（宇利トンネル上り線含む）

うち、6 本については、今年度更新完了予定（宇利トンネル上り線含む）

他 6 本については、来年度以降更新を実施予定

③ 宇利トンネルと同種以外の灯具（灯具本体：ステンレス 取付脚：鋼板溶融亜鉛めっき）

・ 取付金具や取付脚の残存亜鉛めっき膜厚を定期的に測定することを追加し、当該トンネルの腐食環境を把握

④ 宇利トンネルと同種以外の灯具（灯具本体：ステンレス 取付脚：ステンレス）

・ 従来と同様

⑤ トンネル全体の点検結果に応じて計画的に更新を実施

(5) 本報告書の構成

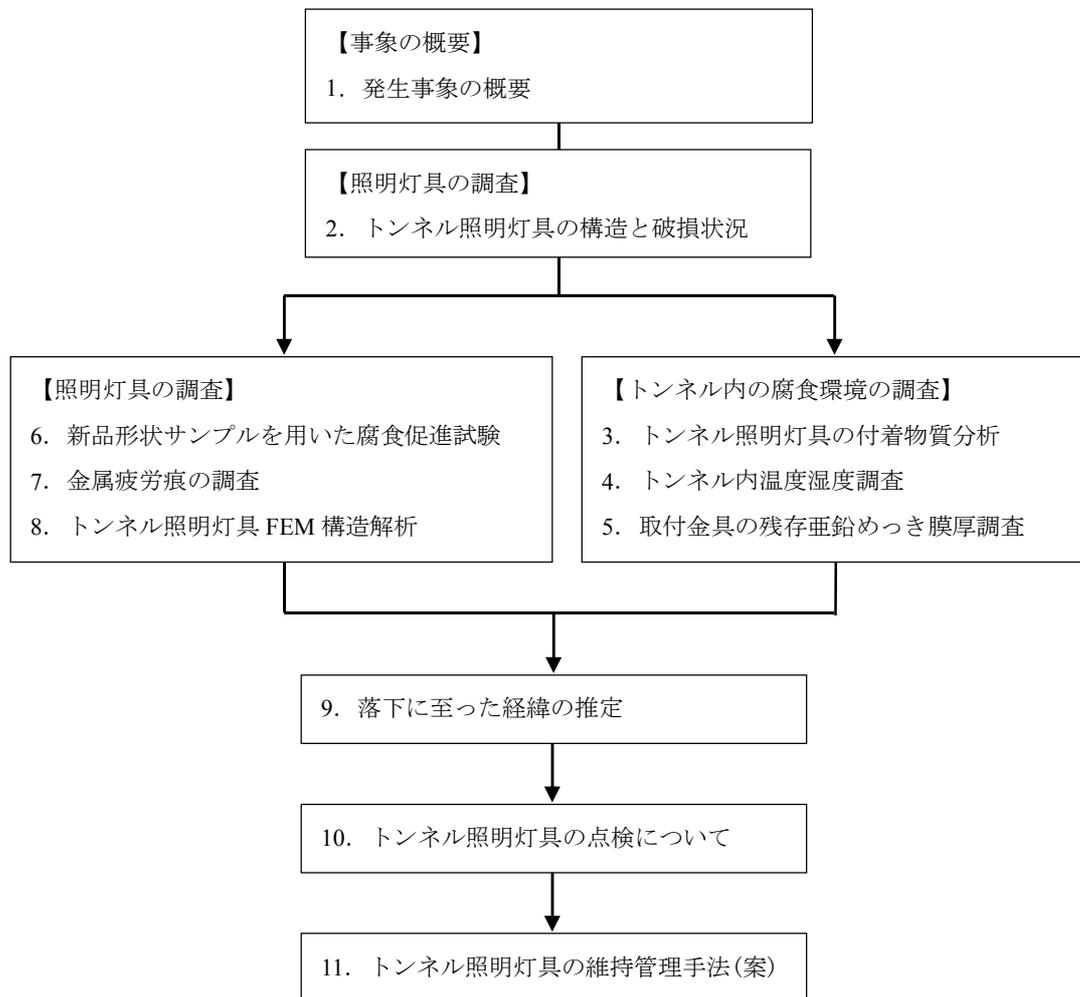


図 1.3.1 本報告書の構成

## 2. トンネル照明灯具の構造と破損状況

### 2.1 トンネル照明灯具構造・仕様

宇利トンネルで使用されていたトンネル照明灯具は、SECC（電気亜鉛めっき鋼板）<sup>※1</sup>を折り曲げと溶接により箱型に加工した灯体に、取付脚と呼ばれる部材をスポット溶接<sup>※2</sup>により接合した後、取付脚周囲の灯体との隙間をパテで埋めて、表面を塗装仕上げとした構造となっている。

トンネル照明灯具の外観、形状、仕様の概要は、次に示すとおりである。

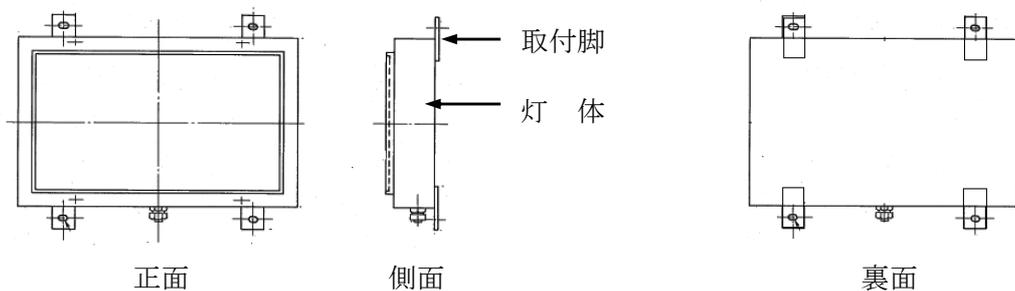


図 2.1.1 落下灯具外観図

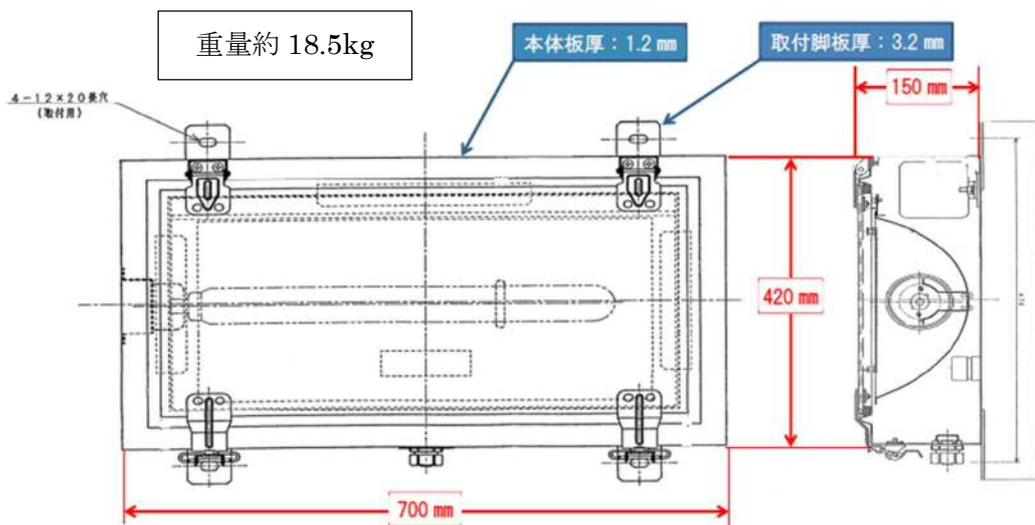


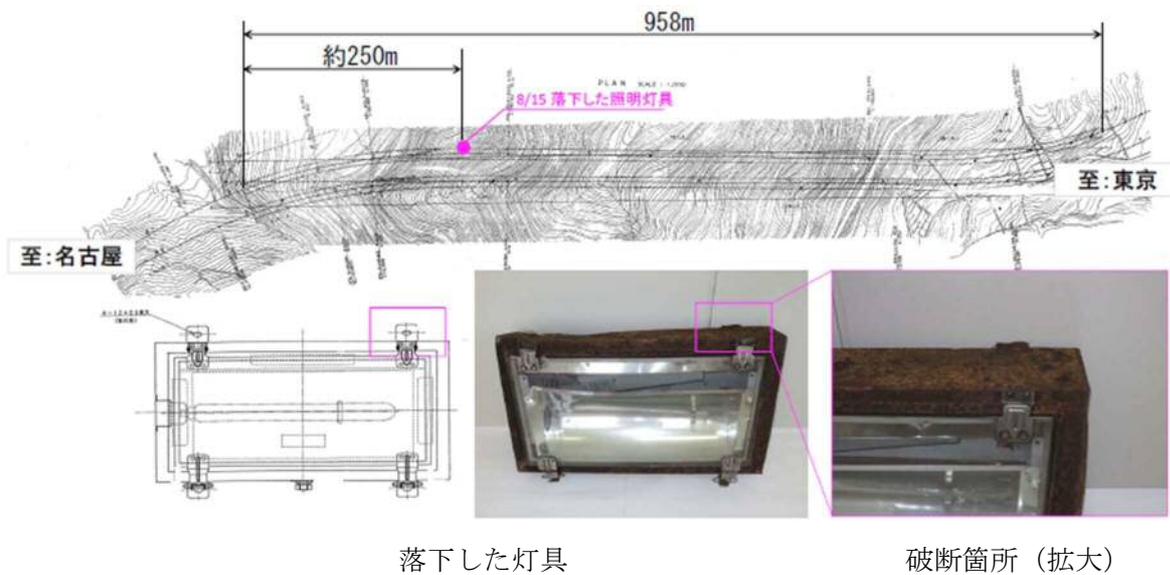
図 2.1.2 落下灯具寸法図

- ・灯体 材質：SECC（電気亜鉛めっき鋼板（原板はSPCC）） 板厚：1.2mm  
※ 標準材質はSPCC（今回調査中にSECCと判明）
- ・取付脚 材質：SPCC（冷間圧延鋼板） 板厚：3.2mm
- ・灯体に取付脚をスポット溶接で接続した後、表面塗装
- ・塗装仕様 エポキシ変性メラミン樹脂塗装

## 2.2 落下した灯具状況

落下した照明灯具はトンネル壁面に固定された4つの取付金具（図 5.1.1 参照）と、取付脚とをボルト接合により固定する構造となっている。本事故では、4つの取付脚全てが何らかの原因により切断し、灯具本体が支持を失い落下に至ったものである。

落下した照明灯具の設置位置、破断状況を次に示す。



落下した灯具

破断箇所（拡大）

図 2.2.1 トンネル照明灯具落下位置

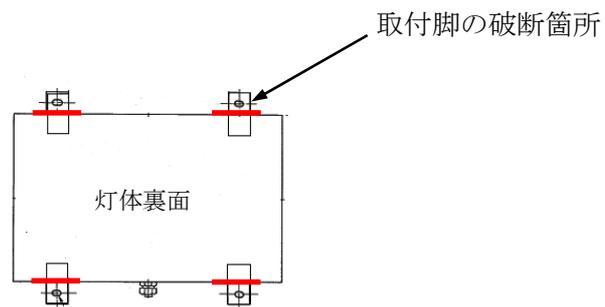


図 2.2.2 落下灯具の取付脚破断状況

### 2.3 破損箇所の観察

破断した取付脚の状況を詳しく観察するために、落下した照明灯具の破断した取付脚と灯体との溶接部を残して灯体の一部を切り取ったものを、破断面と直交方向（取付脚の長辺方向）に切断、研磨し断面標本を作製した。作製した標本を図 2.3.1 に示す。

取付脚と灯体との接合面の隙間部全体にさび層が観察された。取付脚の破断面側（先端部）では、取付脚、灯体とも隙間部が減肉し、扇型に開口していることが確認された。

取付脚は、灯体に比べて著しく腐食し、先端部では、ほとんど鉄素地が残っていないが、外気に接する面（照明灯具本体との接合面の反対側）の腐食は小さかった。

取付脚の根元及び根本と先端部の中間部は、減肉が見られるものの、その程度は小さい。

#### 外観観察（肉眼）状況

落下した照明灯具の取付脚（4箇所）部分を照明灯具本体部材とともに、破断面を垂直方向に切断・研磨し、断面を肉眼観察した。

※左右は照明灯具正面から見た左右で表示している。

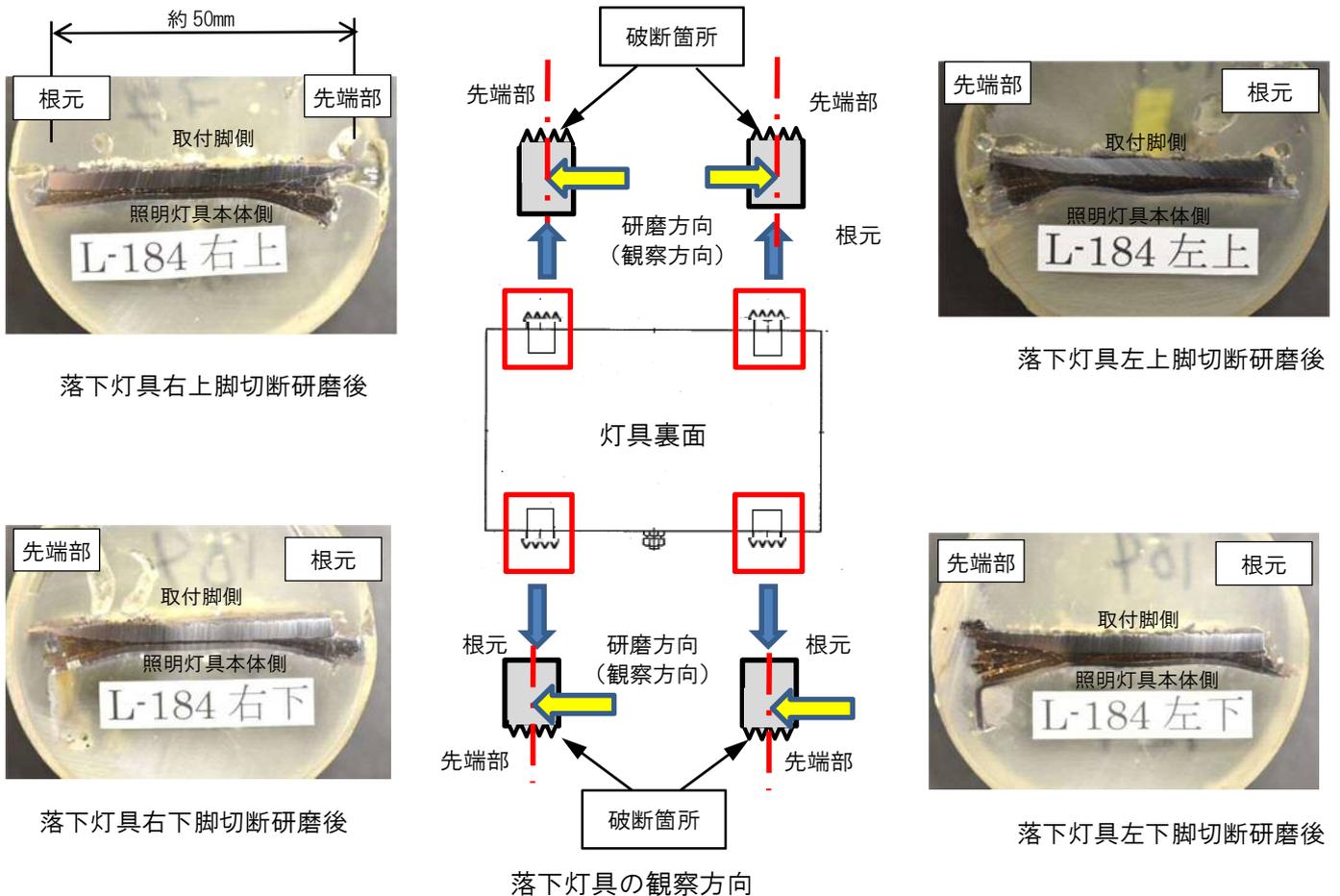


図 2.3.1 落下灯具取付脚部の断面標本

注記)

- ※1 SECC（電気亜鉛めっき鋼板）：SPCC（JIS G3141 冷間圧延鋼板及び鋼帯に規定される一般用鋼板）の原板に電気亜鉛めっきを施したもの（JIS G3313）
- ※2 スポット溶接：2枚の母材（被溶接材料）を電極棒で加圧しつつ電流を流し、その接触面に発生する抵抗熱により母材内部で金属が溶解凝固を起こして溶接する。比較的薄い板の接合に用いられる。

### 3. トンネル照明灯具の付着物質分析

#### 3.1 調査方法

2.3 で作製した断面標本をさらに詳細に調査するために、電子顕微鏡 (SEM) <sup>※1</sup> により観察し、腐食生成物 (さび) や、さび層の間に入り込んだ物質を調査した。

さびの性状を把握するため、トンネル照明灯具の取付脚の破断箇所付近のさびをエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) <sup>※2</sup> により、組成 (元素) を調査した。また、X 線回析 (XRD) 装置<sup>※3</sup> を用いて、その状態 (結晶状態) も調査した。

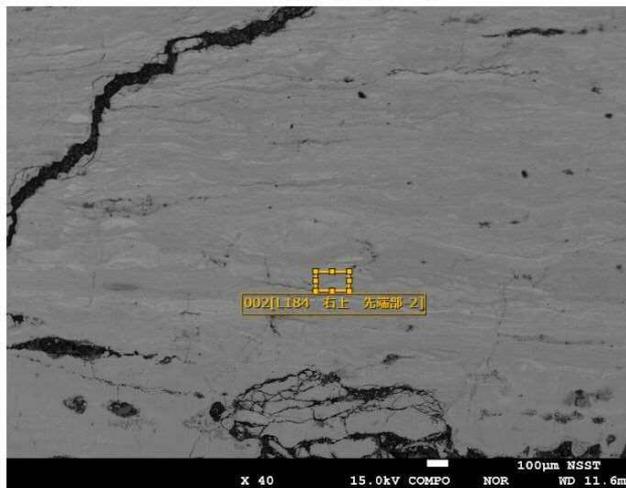
腐食を促進した要因を把握するため、さびの間に含まれる成分と、トンネル照明灯具の外面に付着している成分を分析した。具体には、電子線マイクロアナライザ (EPMA) <sup>※4</sup> を用いて、取付脚の先端部、中央部、根元の 3 箇所にて特定の元素<sup>※6</sup> の分布状況の調査と、トンネル縦断方向の腐食環境の違いも含めて把握するために、イオンクロマトグラフィー<sup>※5</sup> を用いて、トンネル照明灯具に付着していた物質に含まれる特定のイオン<sup>※7</sup> 量の調査を実施した。

### 3.2 調査結果

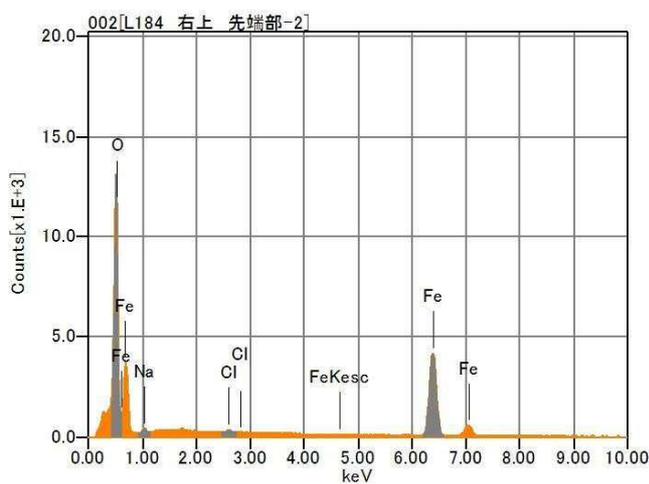
#### (1) エネルギー分散型 X 線分析（法）によるさび層の組成（元素）調査

EDS を用いて さびの組成（元素）を調査した結果を図 3.2.1 に示す。さびを構成する主元素の鉄 Fe、酸素 O<sub>2</sub> 以外に、ナトリウム Na、塩素 Cl が検出された。

002[L184 右上 先端部-2]



加速電圧 : 15.00 kV  
 倍率 : x 40  
 測定日時 : 2015/10/23  
 画素数 : 1280 x 960



測定条件 : 8530F  
 装置 :  
 加速電圧 : 15.00 kV  
 照射電流 :  
 プロセスタイム : T3  
 ライブタイム : 60.00 秒  
 リアルタイム : 63.23 秒  
 デッドタイム : 6.00 %  
 カウントレート : 6373.00 CPS

化学式 質量% 原子% σ 積分強度Kレシオ ライン

図 3.2.1 EDS による元素分析（落下した灯具の右上取付脚先端部）の結果の例

## (2) X線回折(法)による状態(結晶状態)調査

XRDを用いて、さびの状態(結晶状態)を調査した結果を図3.2.2に示す。X線回折パターンから、このさびは、オキシ水酸化鉄( $\alpha$ -FeOOH、 $\beta$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOH)、酸化鉄( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  マグネタイト)と同定した。

一般的に $\beta$ -FeOOHは、塩化物イオン $\text{Cl}^-$ が多い環境で検出され、マグネタイトは濡れ時間が長い環境で検出される。

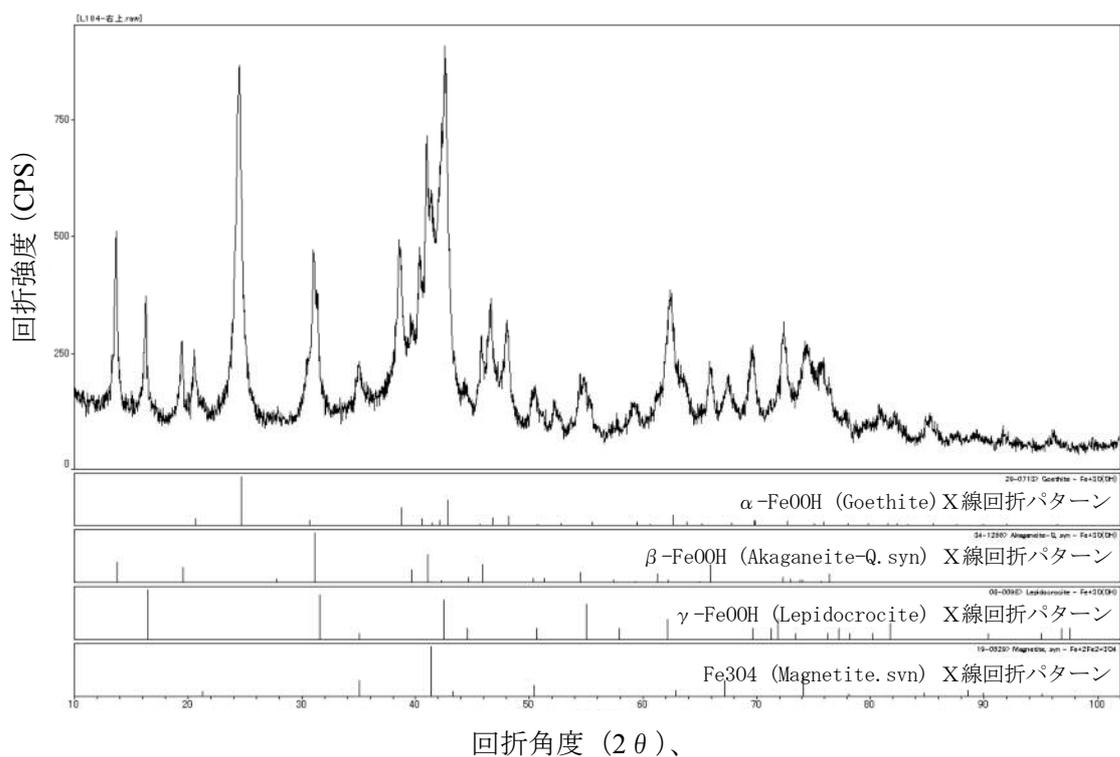


図3.2.2 XRDによる錆の種類分析(落下した灯具の右上取付脚)の結果の例

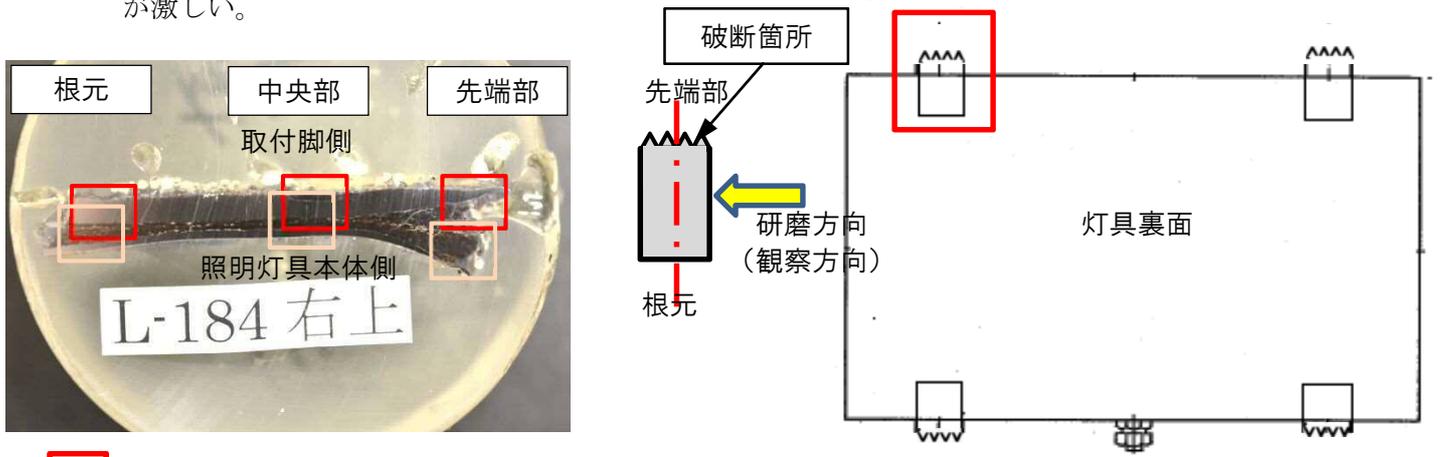
(3) EPMA マッピング分析：電子線マイクロアナライザによる元素分布状況調査

図 2.3.1 落下灯具取付脚部の破断面サンプルの右上取付脚の電子顕微鏡 (SEM) 写真を図 3.2.3 に示す。

SEM 観察によると、母材は、取付脚 3.2mm、灯具本体 1.2mm の厚さであるが取付脚は灯具本体に比べて腐食している。

取付脚の根元、中央部も腐食により減肉しているが先端部に比べて小さく先端部ではほとんど鉄素地が残っており、鋭角な形になっている。

また、取付脚の外側（外気に触れる部分）と内側（灯具本体側）を比較すると、内側の腐食が激しい。



- 取付脚中心のSEM撮影範囲
- 灯具本体中心のSEM撮影範囲

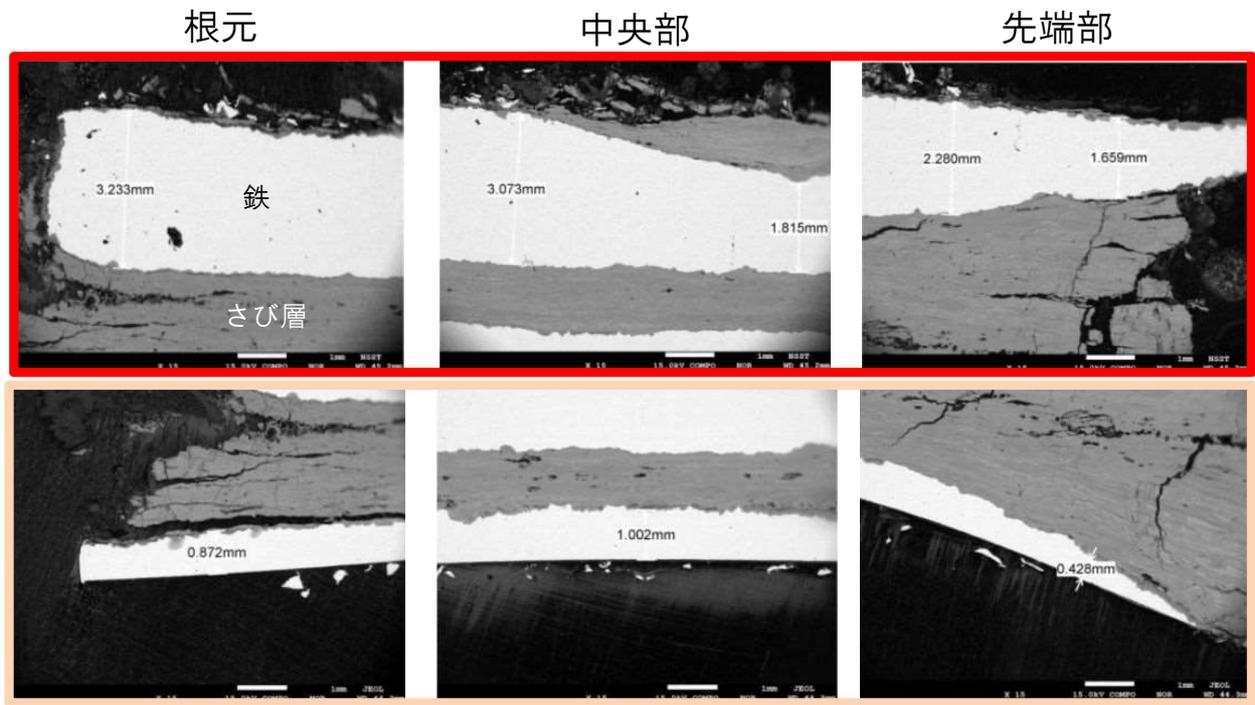


図 3.2.3 落下灯具取付脚部の破断面サンプルの電子顕微鏡写真

EPMA マッピング分析を用いて、取付脚の先端部、中央部、根元の3箇所で、鉄 Fe、ナトリウム Na、カリウム K、硫黄 S、塩素 Cl、酸素 O、炭素 C、亜鉛 Zn、カルシウム Ca の分布とその量を確認した結果を先端部は図 3.2.4 に、中央部は図 3.2.5 に、根元部は図 3.2.6 に示す。

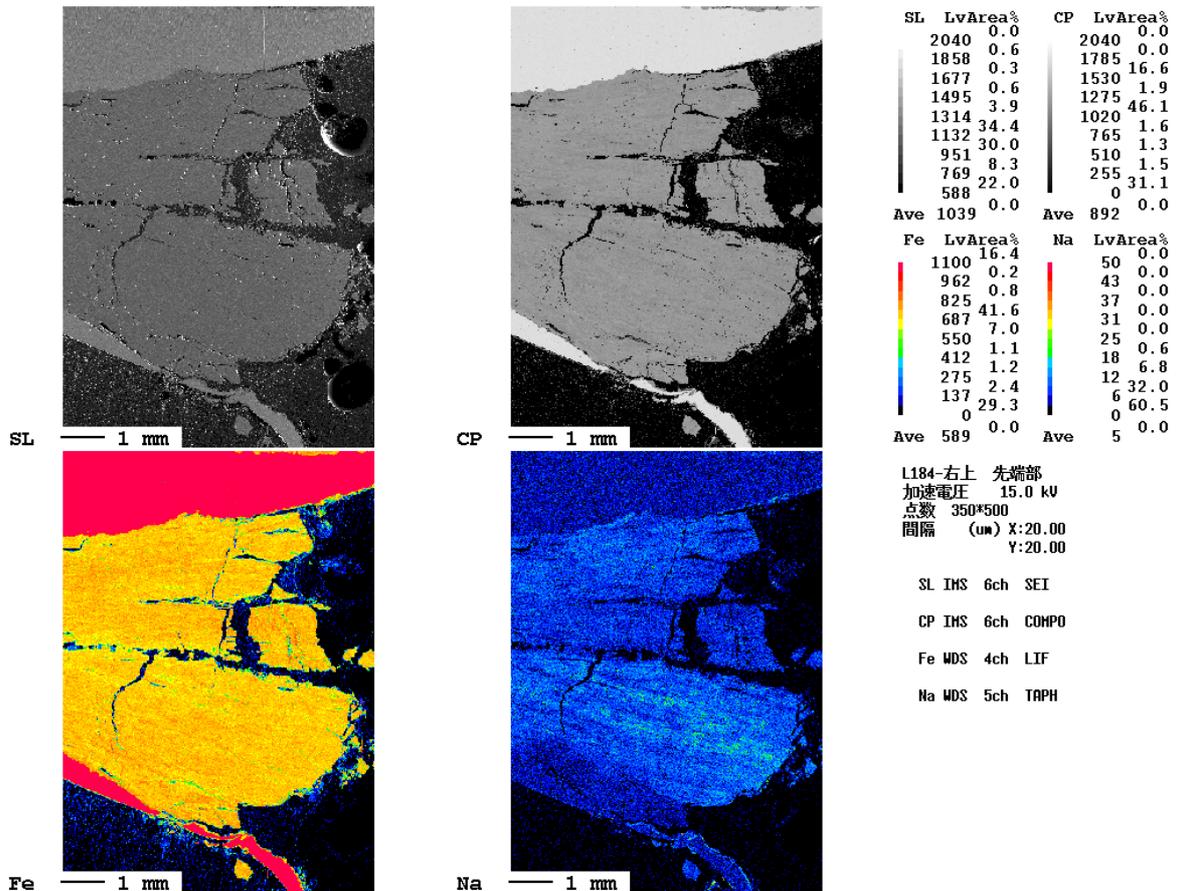


図 3.2.4 (1/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング 【右上取付脚先端部】

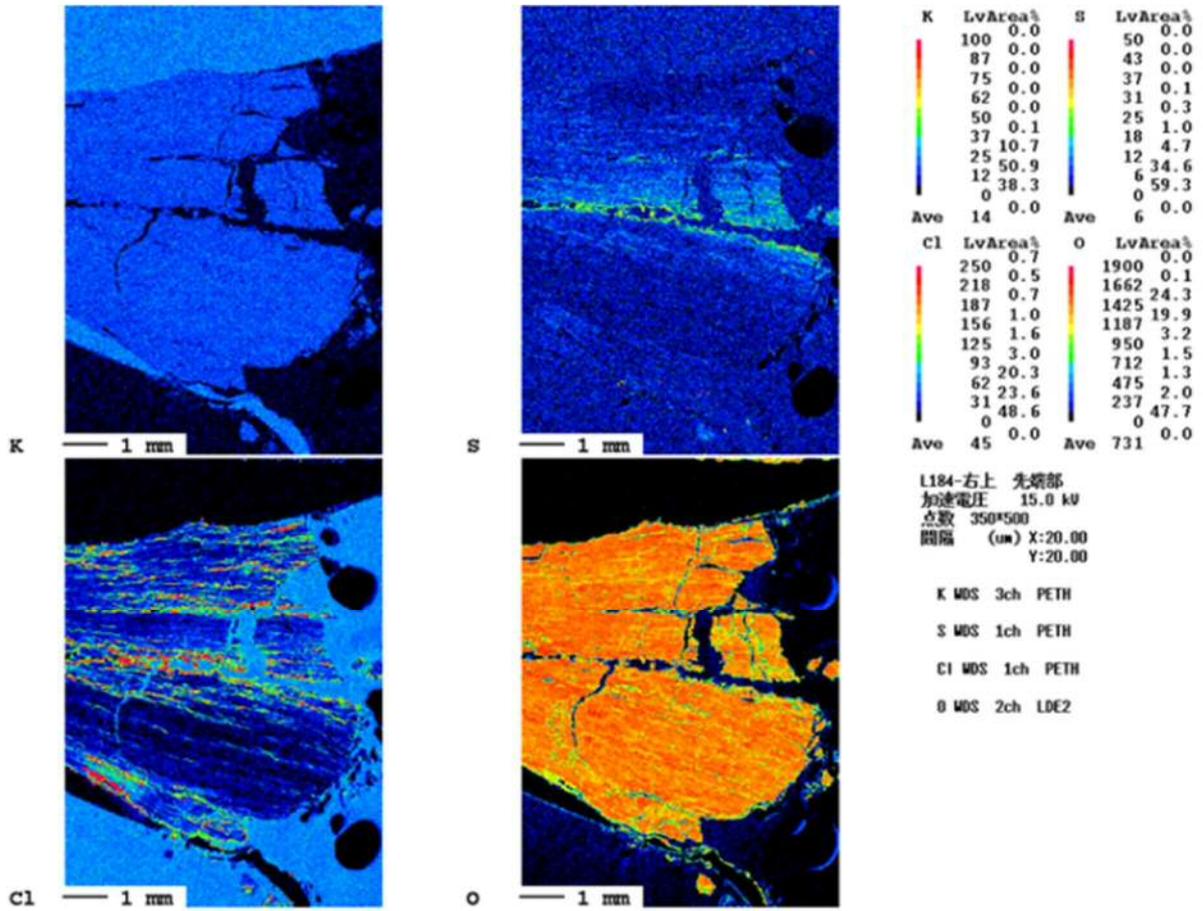


図 3.2.4 (2/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング【右上取付脚先端部】

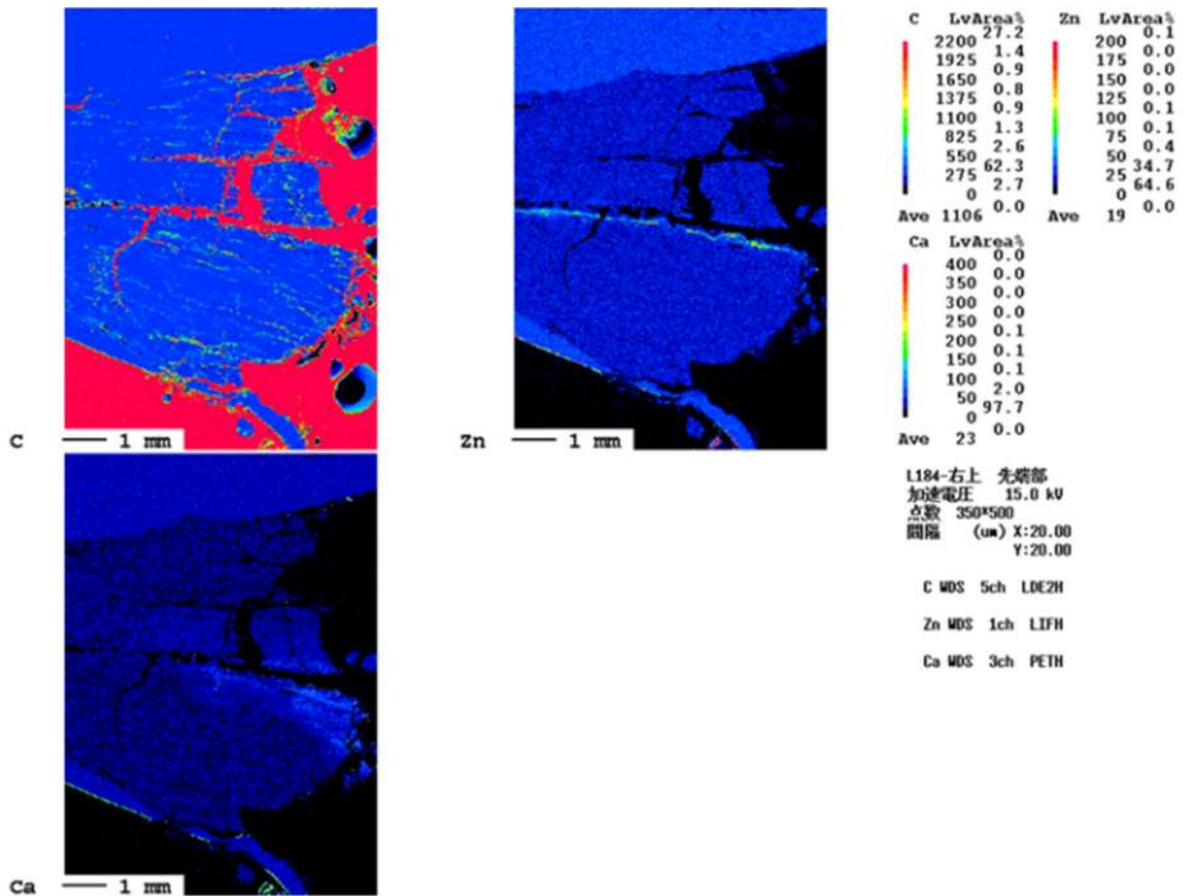


図 3.2.4 (3/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング【右上取付脚先端部】

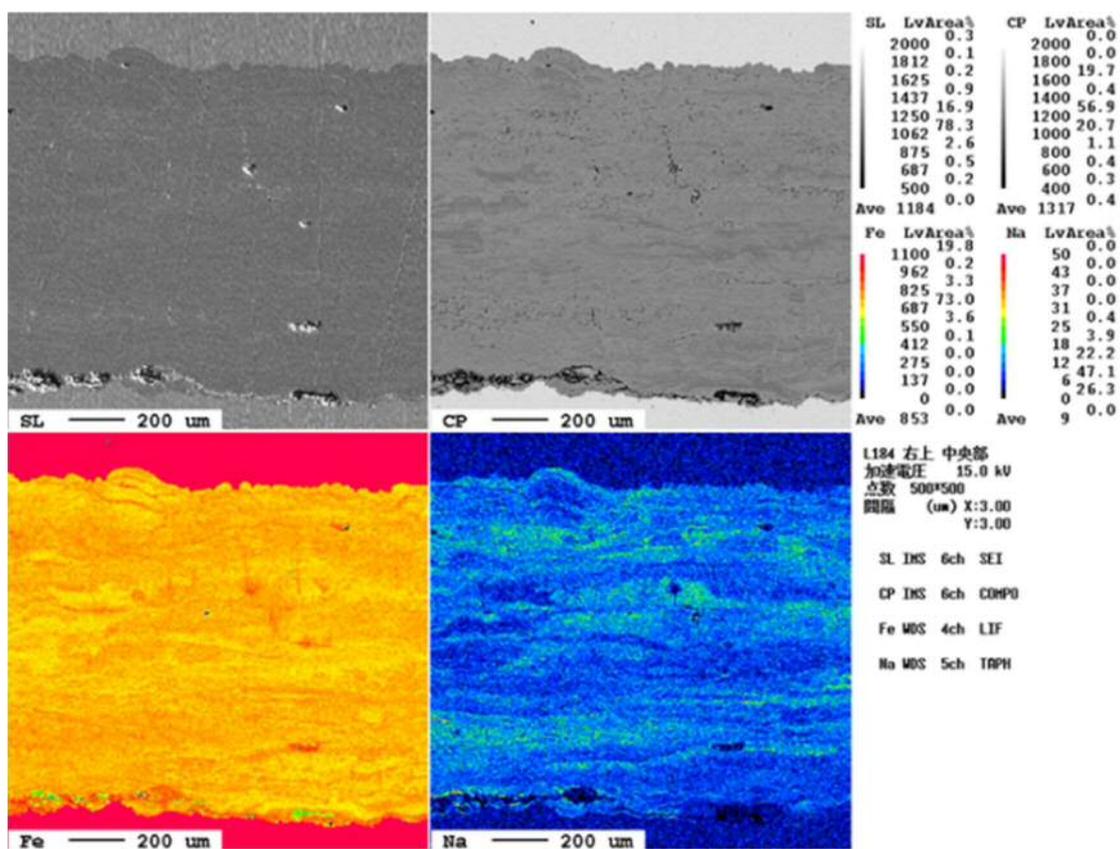


図 3.2.5 (1/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング【右上取付脚中央部】

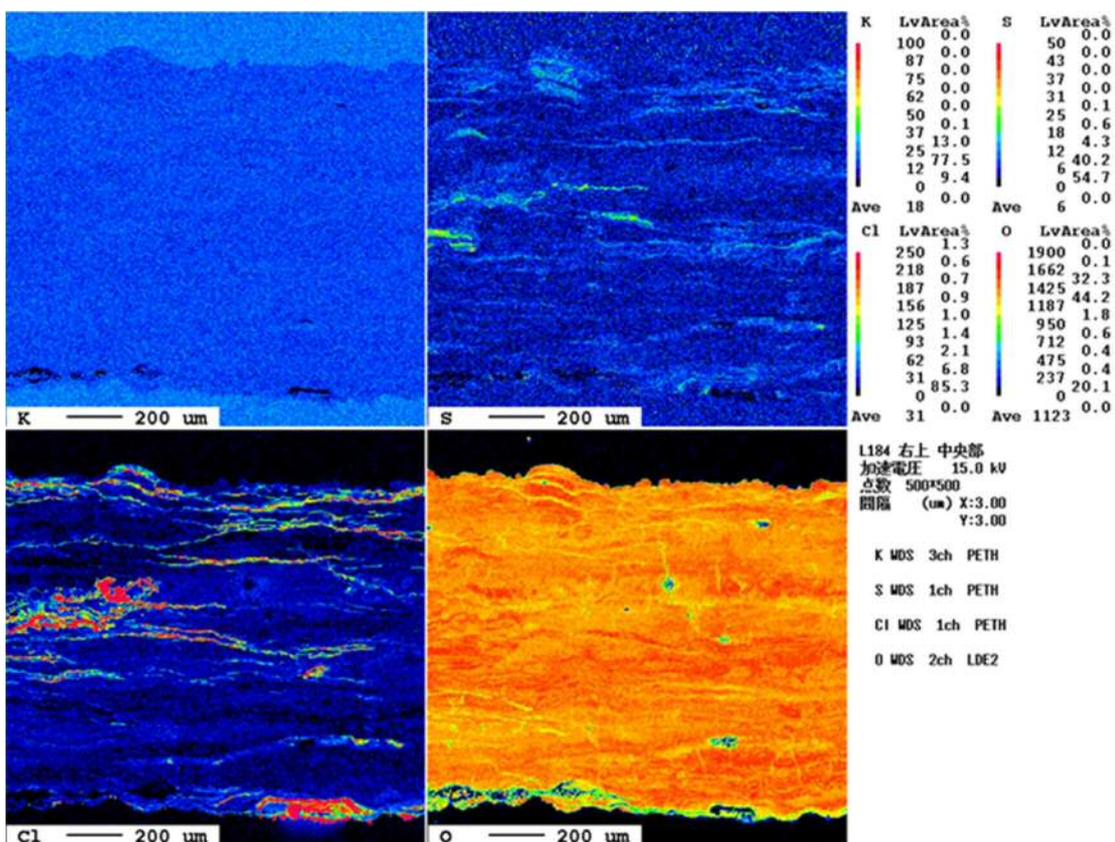


図 3.2.5 (2/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング【右上取付脚中央部】

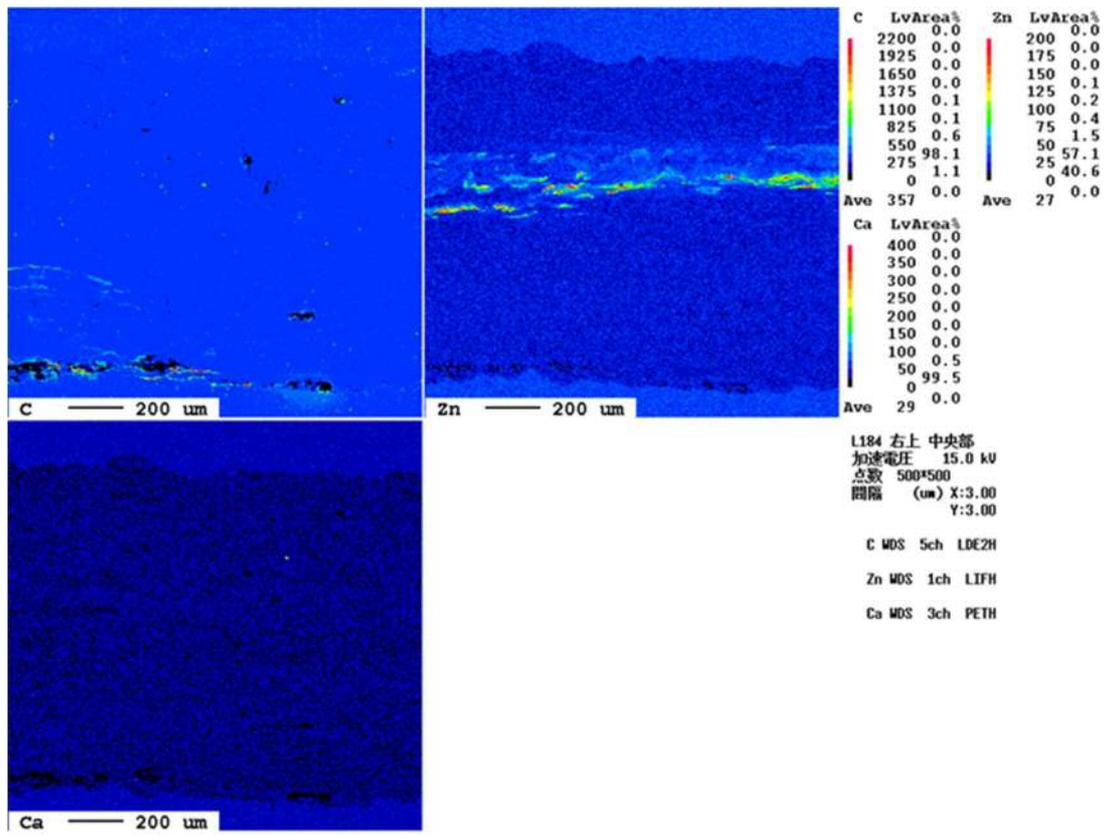


図 3.2.5 (3/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング【右上取付脚中央部】

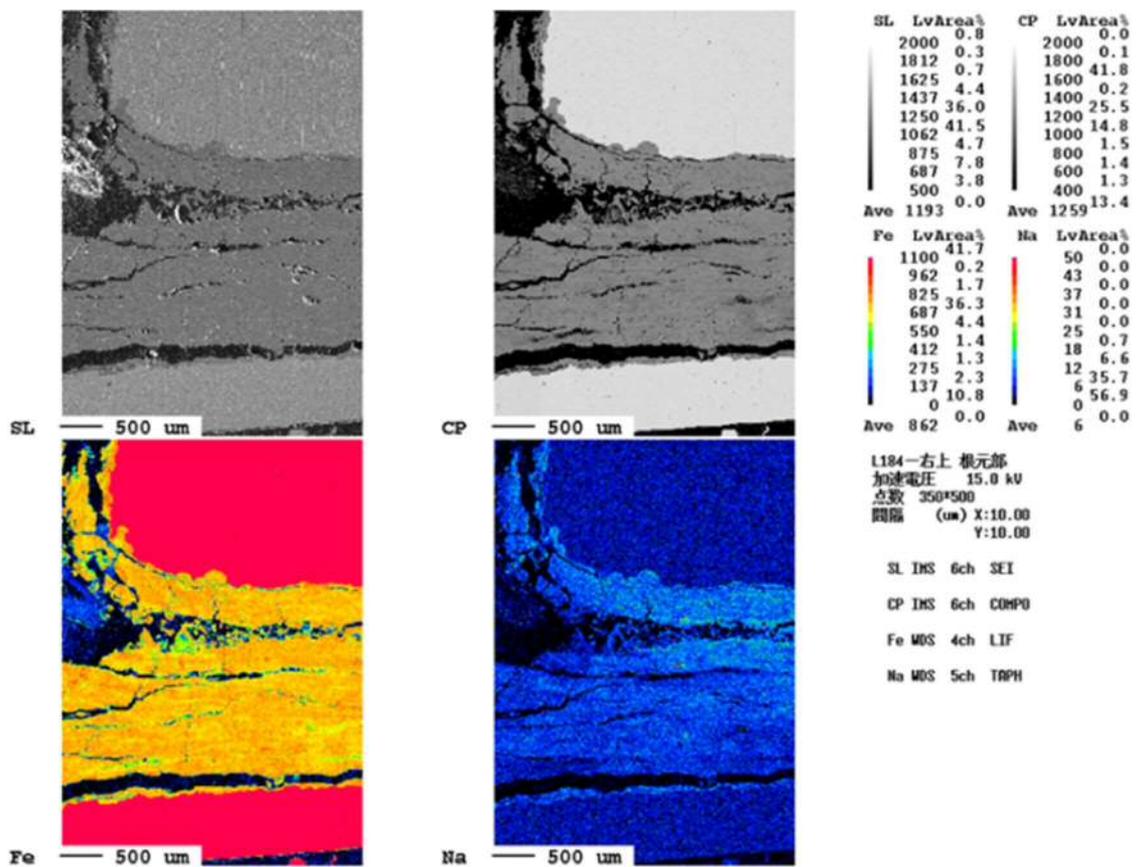


図 3.2.6 (1/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング【右上取付脚根元】

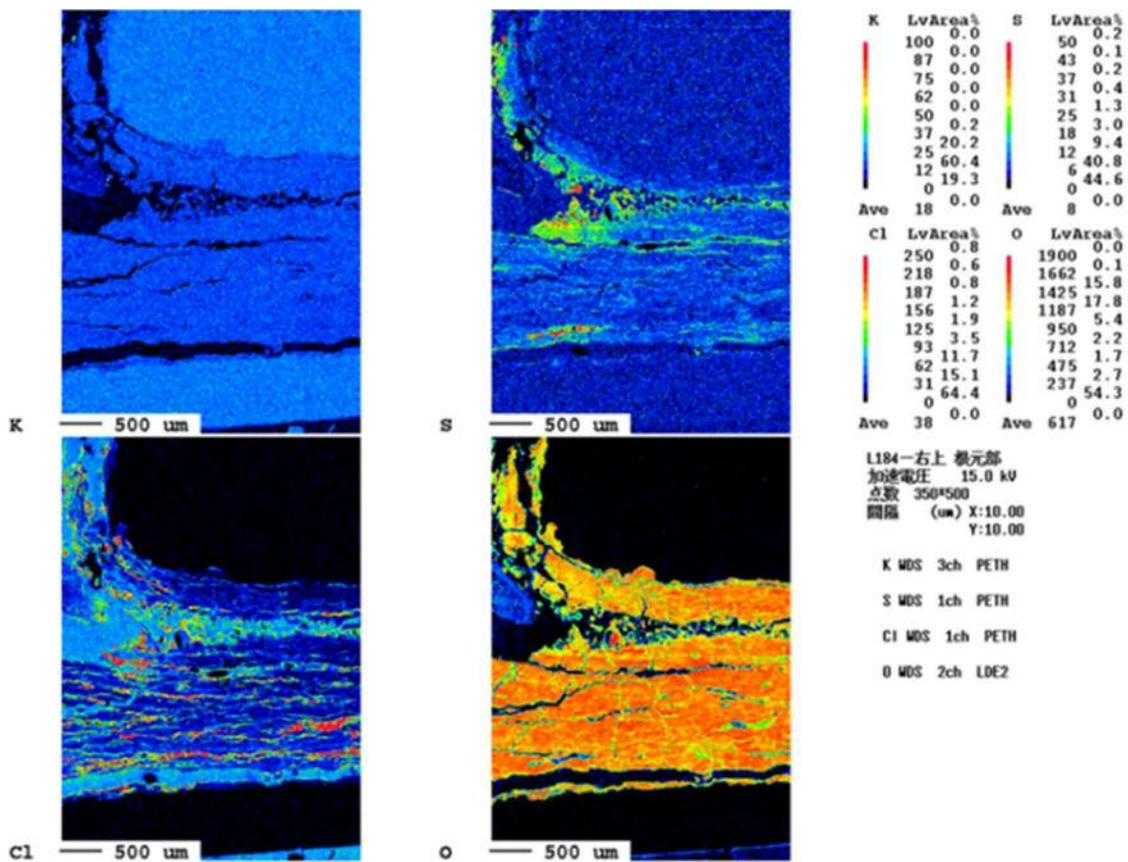


図 3.2.6 (2/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング【右上取付脚根元】

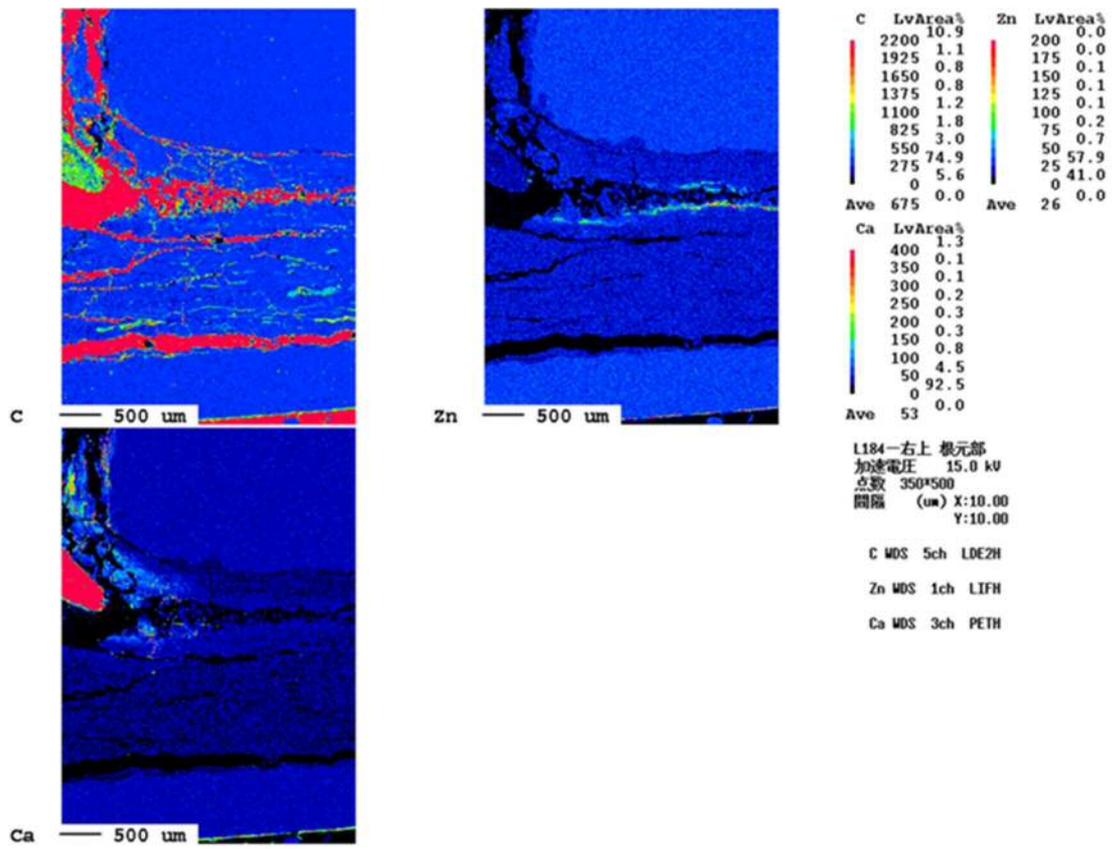


図 3.2.6 (3/3) EPMA (電子線マイクロアナライザ) マッピング【右上取付脚根元】

先端部、中間部、根元部のそれぞれの元素ごとの EPMA マッピングを比較しやすいように並べたものを図 3.2.7 に示す。

ナトリウム Na や塩素 Cl は、全体的に錆の中に層状に分布しているが、これは雪氷対策作業の凍結防止剤由来によるものと推定される。

また、硫黄 S も錆の中に層状に分布しているが、これは車の排気ガスに含まれる SOx 等の硫黄 S 成分由来によるものと推定している。

亜鉛 Zn については、灯具本体側に筋状に見える。これは、灯具本体の材質が電気亜鉛めっき処理を施したものであることから、これに由来する亜鉛の成分と推定している。

カルシウム Ca については、中央部では見えないが先端部の外側に少し確認できる。これは、宇利トンネルが照明灯具取替え工事が直近で行われている段階であったことから、工事でのアンカーボルト削孔によるコンクリートの粉が取付脚の表面に付着したのではないかと推定している。

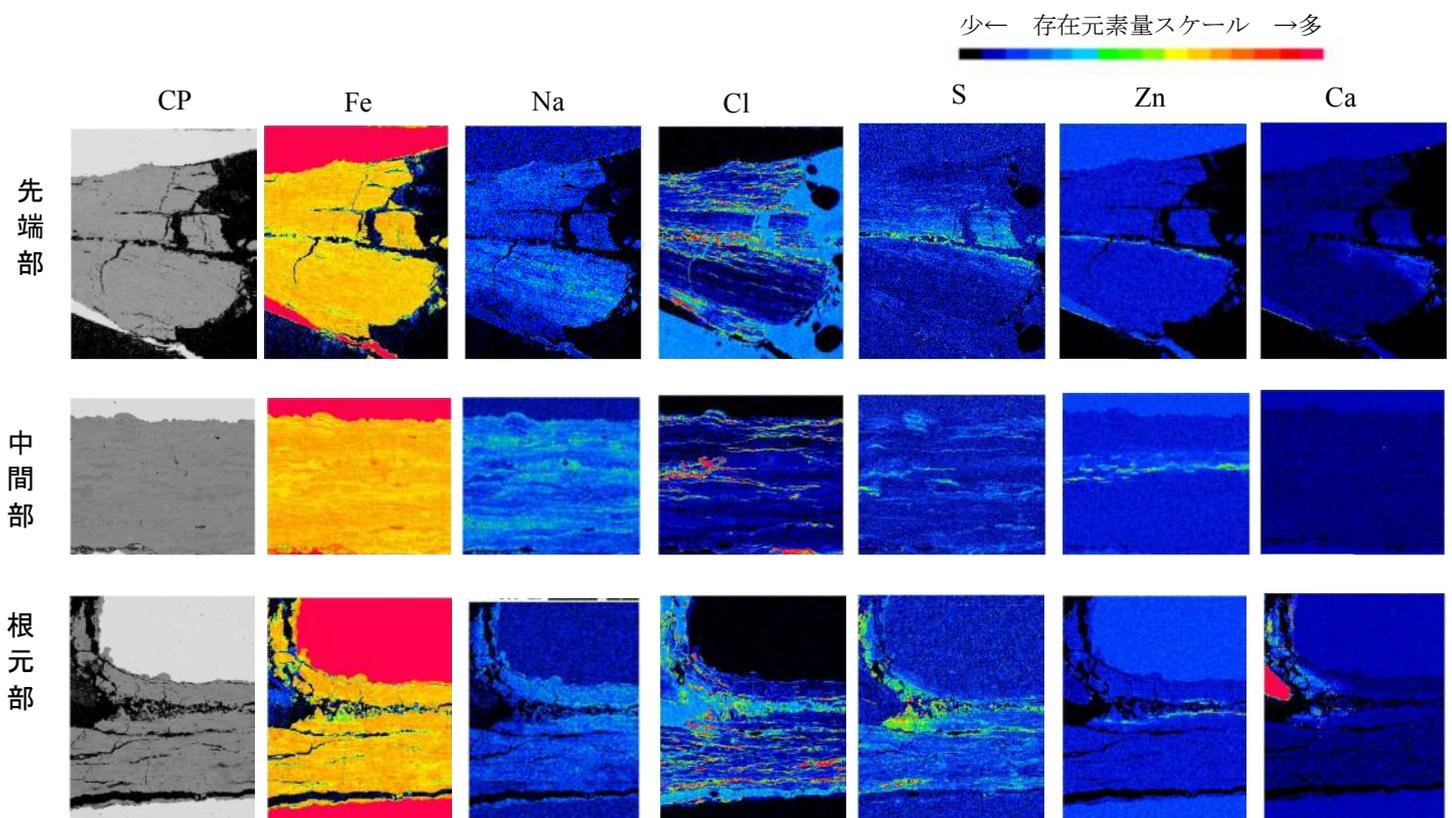


図 3.2.7 取付脚先端部・中間部・根元部の EPMA マッピング比較

(4) 照明灯具の付着物質分析調査：イオンクロマトグラフィーによる付着物質（イオン）調査

トンネル縦断方向の腐食環境（腐食を促進する物質）を把握するために、入口から一定間隔で照明灯具を撤去し、図 3.2.8 に示す裏面上部、裏面下部、上面に付着物を拭き取り、イオンクロマトグラフィー装置を用いて塩素イオン  $\text{Cl}^-$ 、硝酸イオン  $\text{NO}_3^-$ 、硫酸イオン  $\text{SO}_4^{2-}$ 、カルシウムイオン  $\text{Ca}^{2+}$  の量を測定した結果を図 3.2.10～3.2.13 に示す。いずれのイオンもトンネル縦断方向で一様に観察された。



図 3.2.8 照明灯具付着物質採取位置

[ $\text{Cl}^-$ ・ $\text{NO}_3^-$ ・ $\text{SO}_4^{2-}$ ]測定箇所

- ・ 裏面下部：入口から 300m までは概ね 50m 間隔、300m から出口までは概ね 100m 間隔+緊急点検で撤去した灯具
- ・ 裏面上部+上面：入口から 300m までは概ね 100m 間隔、300m から出口までは概ね 200m 間隔
- ・ 裏面下部+上面：落下灯具 L-184(坑口から 251m)
- ・ 裏面上部+裏面下部+上面：坑口付近灯具 R-1(坑口から 31m)、落下灯具の隣接灯具 L-183(坑口から 248m)

[ $\text{Ca}^{2+}$ ]測定箇所

- ・ 裏面上部+上面：入口から 300m までは概ね 100m 間隔、300m から出口までは概ね 200m 間隔
- ・ 上面：落下灯具の隣の灯具 L-183(坑口から 248m)を調査

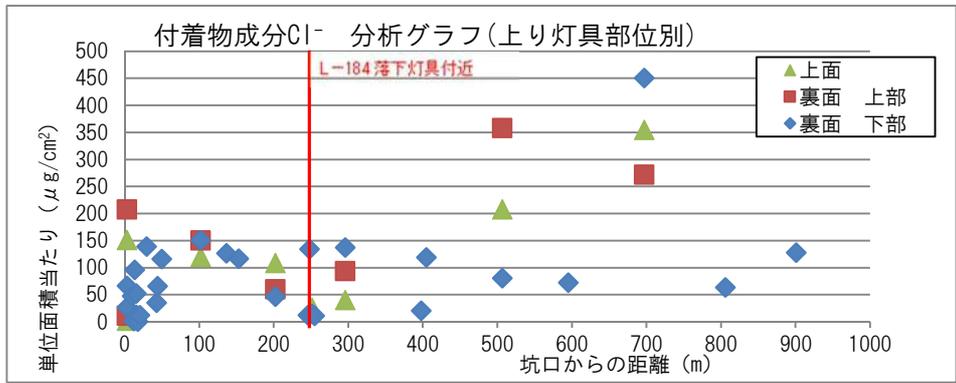


図 3.2.9 付着物質分析結果 (上り線 Cl<sup>-</sup>)

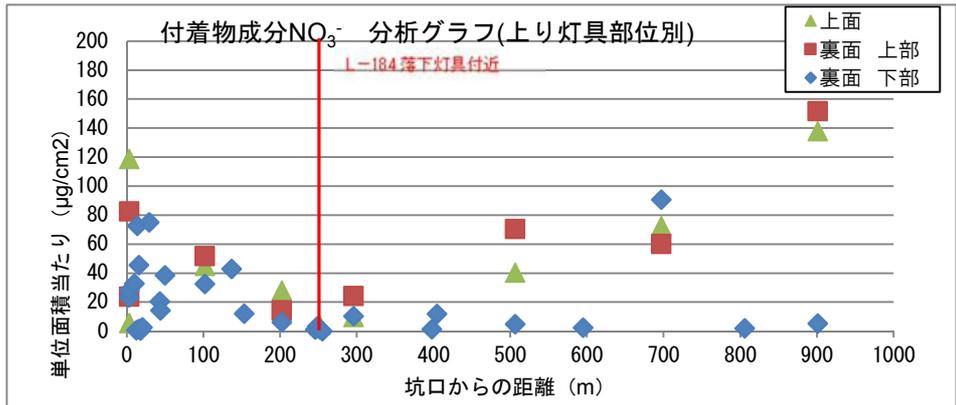


図 3.2.10 付着物質分析結果 (上り線 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

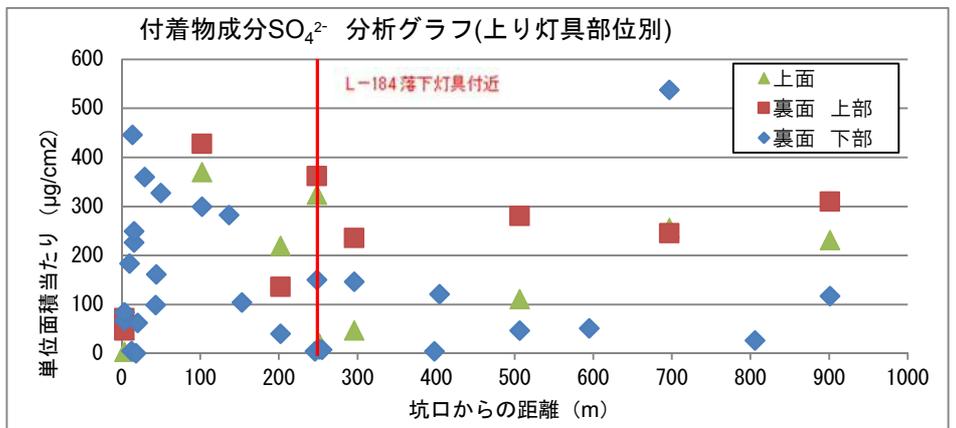


図 3.2.11 付着物質分析結果 (上り線 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

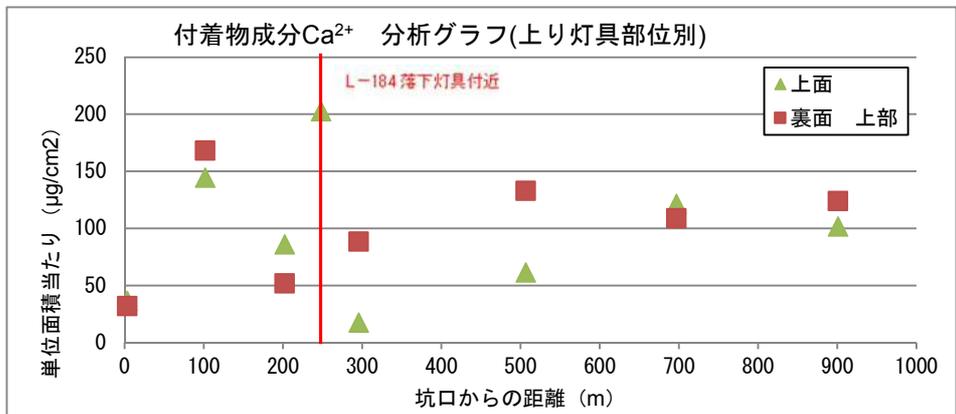


図 3.2.12 付着物質分析結果 (上り線 Ca<sup>2+</sup>)

注記)

※1 (走査) 電子顕微鏡 [SEM : Scanning Electron Microscopy]

走査電子顕微鏡は、真空中で細く絞った電子線で試料表面を走査し、その時試料が出てくる情報(信号)を検出してモニター上に試料表面の拡大像を表示する電子顕微鏡である。真空中で電子線を試料に照射すると、二次電子等が試料から放出される。その他に試料からは反射電子や特性 X 線等も放出される。走査電子顕微鏡では、主に二次電子または反射電子の信号を用いて像を表示する。二次電子は試料の表面近くから発生する電子で、それを検出して得られた像(二次電子像)は試料の微細な凹凸を反映する。一方、反射電子は資料を構成している原子に当たって跳ね返された電子で、反射電子の数は資料の組成(平均電子番号、結晶方位など)に依存する。したがって、反射電子像は、試料の組成分布を反映した像となる。また、走査電子顕微鏡に X 線検出器を装着して元素分析を行う事も可能である。走査電子顕微鏡は試料形状の観察だけでなく、その資料にどんな元素がどの程度含まれているかを調べる X 線分析装置としても活用されている。

※2 エネルギー分散型 X 線分析 [EDS/EDX : Energy Dispersive X-ray Spectrometry]

物質に X 線を照射すると蛍光 X 線が発生し、その中には元素特有の特性 X 線が含まれている。その特性 X 線のエネルギーを強度として計測することにより、非破壊、多元素同時、かつ前処理不要で粉末、液体、固体試料中の元素分析や元素分布を容易に測定することができる。

※3 X 線回折装置 [XRD : X-ray Diffraction]

X 線回折装置は、試料に X 線を照射した際、X 線が原子の周りにある電子によって散乱、干渉した結果起こる回折を解析することを測定原理としている。

この解析情報を用いることにより、粉末資料では、構成成分の同定や定量、結晶サイズや結晶化度、単結晶試料では、分子の三次元構造、加工材料試験では、残留応力や内在する歪み、蒸着薄膜では、密度や結晶性、結晶軸の方向や周期、小角散乱測定では、ナノスケールの粒子の大きさや形状・粒径分布を知ることができる。

※4 電子線マイクロアナライザ (EPMA)

装置の測定原理は SEM/EDX と同じであるが、通常 EPMA と呼ばれる装置は、SEM が試料表面の形状を観察し、構成成分は定性的に分析する装置であるのに対し、主に組成分析を正確に行うことを目的とされた装置である。また、試料を構成している各元素が、どの程度の割合(濃度)で含まれているのかを知るための定量分析も可能であり、指定した面内において各元素の濃度を色相及び濃淡でカラーマップとして表示することができる。

※5 イオンクロマトグラフィー

試料溶液中の各種イオンを分離カラム内で、イオン交換樹脂に対するイオンの相対親和力の差を利用して分離した後、個々のイオンを順番に検出器で測定することにより、イオン種の定性・定量を行う

※6 特定の元素

鉄 Fe、ナトリウム Na、カリウム K、硫黄 S、塩素 Cl、酸素 O、炭素 C、亜鉛 Zn、カルシウム Ca の 9 元素、これらの元素の分布を分析したのは次の理由による

灯具、さびを構成する元素 : Fe、Zn、O

腐食原因となる物質を構成する元素 : Na、Cl (凍結防止剤)、K (飛来塩分(海水))、S、C (排気ガス)、Ca (コンクリート析出物、潮解性)

※7 特定のイオン

塩素イオン Cl<sup>-</sup>、硝酸イオン NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、硫酸イオン SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、カルシウムイオン Ca<sup>2+</sup> の 4 イオン、これらのイオン量を分析したのは、いずれも腐食を促進するためである。なお、Cl<sup>-</sup> は凍結防止剤、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> は排気ガス、Ca<sup>2+</sup> はコンクリートにそれぞれ由来している。

## 4. トンネル内温度・相対湿度調査

### 4.1 調査方法

トンネル照明灯具の腐食状態と温度、相対湿度の相関の確認及び凍結防止剤 NaCl が空気中の水分を吸湿し自然に溶ける潮解が発生する臨界相対湿度であり、腐食環境として厳しくなる条件である相対湿度 75%を超える状態の発生状況の確認のために、トンネルの縦断方向に一定間隔で温度と相対湿度を計測した。

計測は、入口付近から 300m までは概ね 50m 間隔、以降出口まで概ね 100m 間隔で 13 箇所連続して計測した。

### 4.2 調査結果

それぞれの計測地点の 2015（平成 27）年 10 月 14 日～2015（平成 27）年 12 月 14 日までの期間中の平均をトンネル縦断方向に整理した結果を図 4.2.1 に示す。

トンネル内部の温度の計測期間（2015/10/4～2015/12/14）中のそれぞれの計測点の平均値は、トンネル入口から出口に向い上昇していた。温度の上昇に伴い、相対湿度は、トンネル入口から出口に向い下降していた。※1

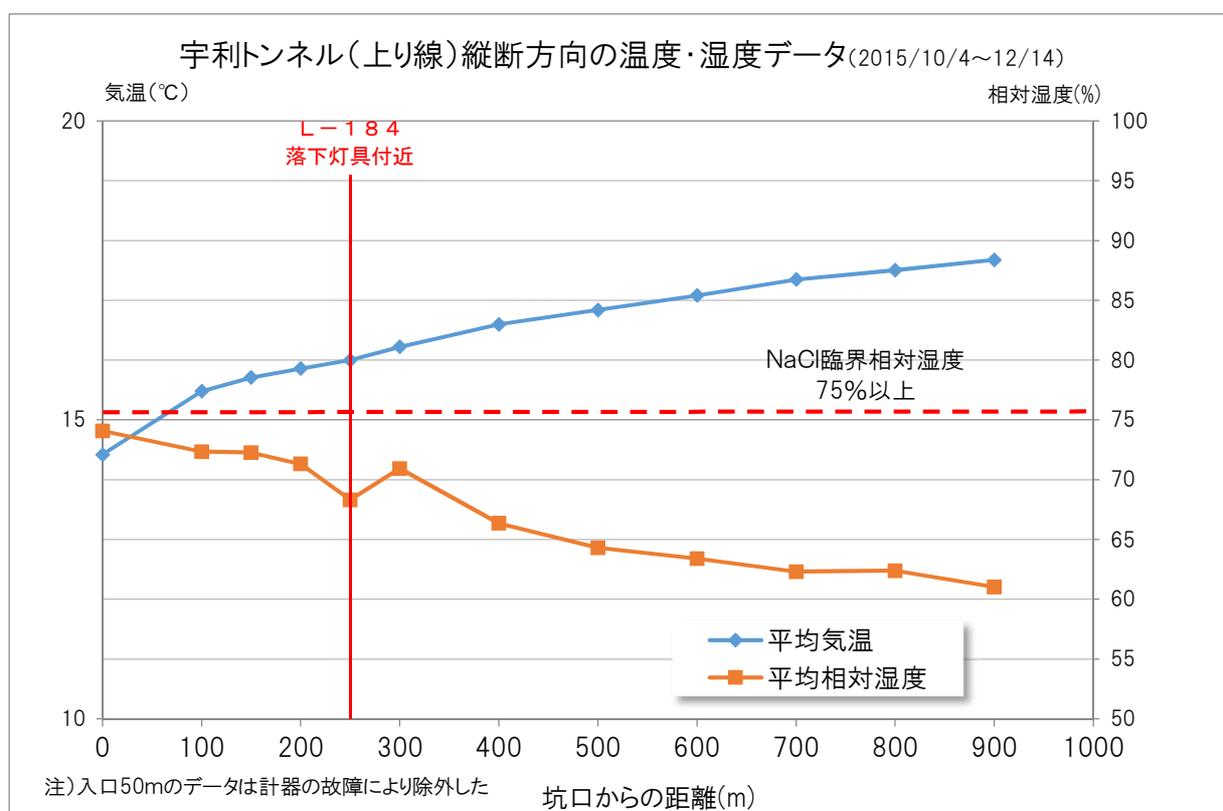


図 4.2.1 宇利トンネル(上り線)縦断方向の温度・相対湿度データ(2015/10/14~2015/12/14)

### 4.3 年間のトンネル内相対湿度の推定

トンネル外部の温度、相対湿度変化（浜松気象台の観測値）と、トンネル内部の温度、相対湿度変化（宇利トンネル（上り線）内の落下灯具付近の計測値）は、同様の推移を示していた。

トンネル内部の相対湿度については、NaCl 臨界相対湿度 75%を境に上下しており、湿潤状態の NaCl が繰り返し存在していたと推測される。

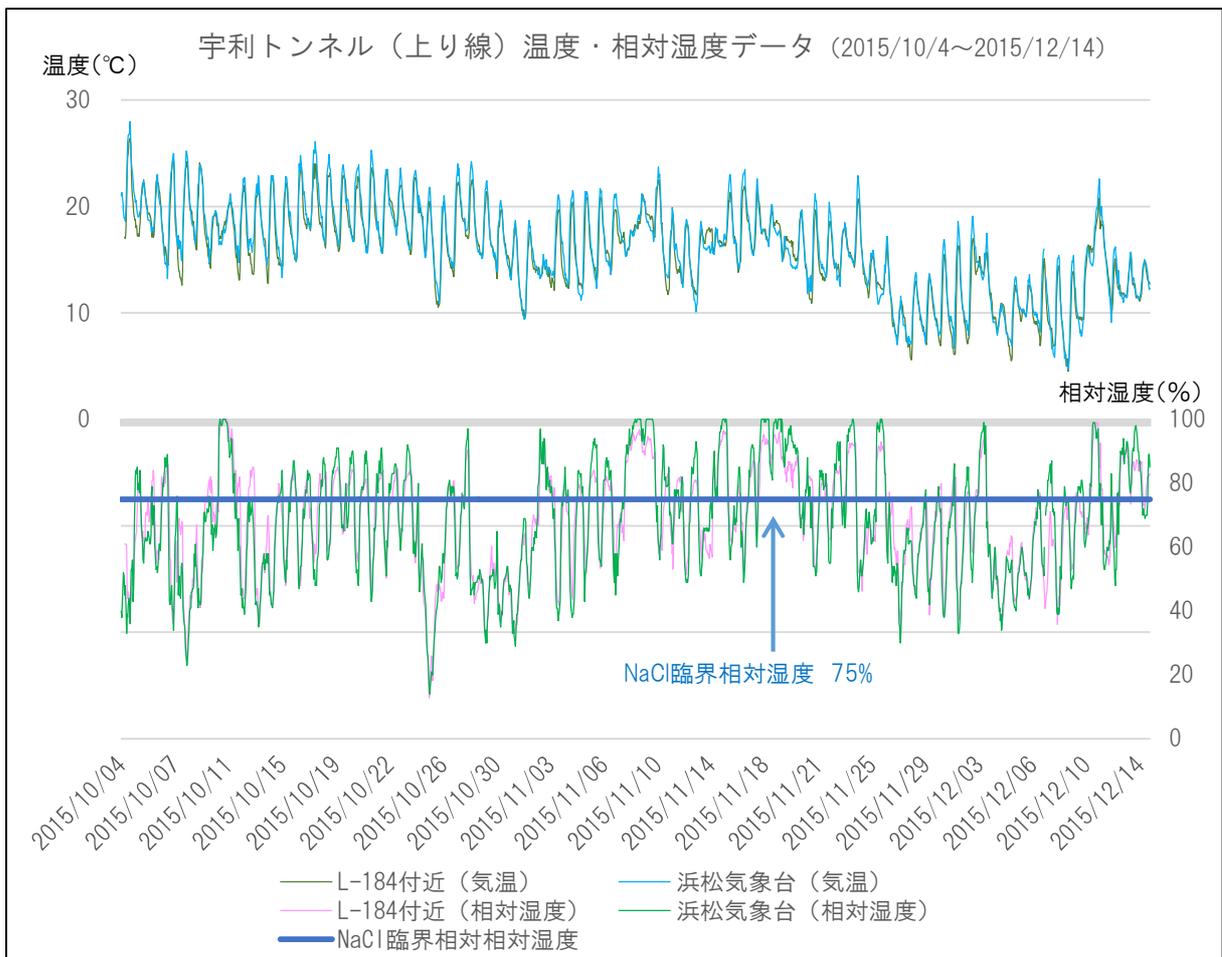


図 4.3.1 宇利トンネル(上り線)と浜松気象台との温度、相対湿度比較  
(2015/10/14～2015/12/14)

浜松気象台における各月の平均気温と平均相対湿度、宇利トンネル内の計測値のうち坑口の計測値の期間（10/14～12/14）中の各月の平均値は表 4.3.1 のとおりである。11月の浜松気象台（気温 15.6℃、相対湿度 74.0%）と、宇利トンネル内の計測値（坑口）（気温 14.6℃、相対湿度 78.8%）は、ほぼ同じである。したがって、宇利トンネル内の年間の相対湿度の状況を浜松気象台の観測値から推定した。

浜松気象台の年間の湿度観測値の相対湿度値毎の発生時間を図 4.3.2 に整理した。これによると、相対湿度 75%以上の時間が年間の約 44%あった。

また、表 4.3.1 より、宇利トンネル内と浜松気象台の温相対湿度がほぼ同じであることから、トンネル内においても NaCl 臨界相対湿度 75%以上となる時間がかんりの頻度で出現する環境と推定される。

表 4.3.1 浜松気象台の気温・相対湿度の月別平均値 (2015 年)

[凡例] 赤字：気温 25℃以上または湿度 75%以上

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均
平均気温[℃]	6.5	6.9	10.4	15.5	20.5	21.8	25.6	27.5	23.3	19.3	15.6	10.7	17.0
平均相対湿度[%]	59.5	57.6	64.4	76.2	69.2	76.8	86.9	80.0	77.7	62.9	74.0	64.2	70.8
湿度 75%以上の割合[%]※	21.2	19.6	34.5	57.2	42.1	60.3	84.4	67.3	58.8	29.8	48.1	28.0	—
							宇利トンネル坑口 気温[℃]			17.5	14.6	10.8	
							宇利トンネル坑口 相対湿度[%]			67.0	78.8	71.0	

※ 各月の湿度値の発生時間のうち、相対湿度 75%以上となる時間の割合を示す。

観測期間  
2015/10/17  
~12/14

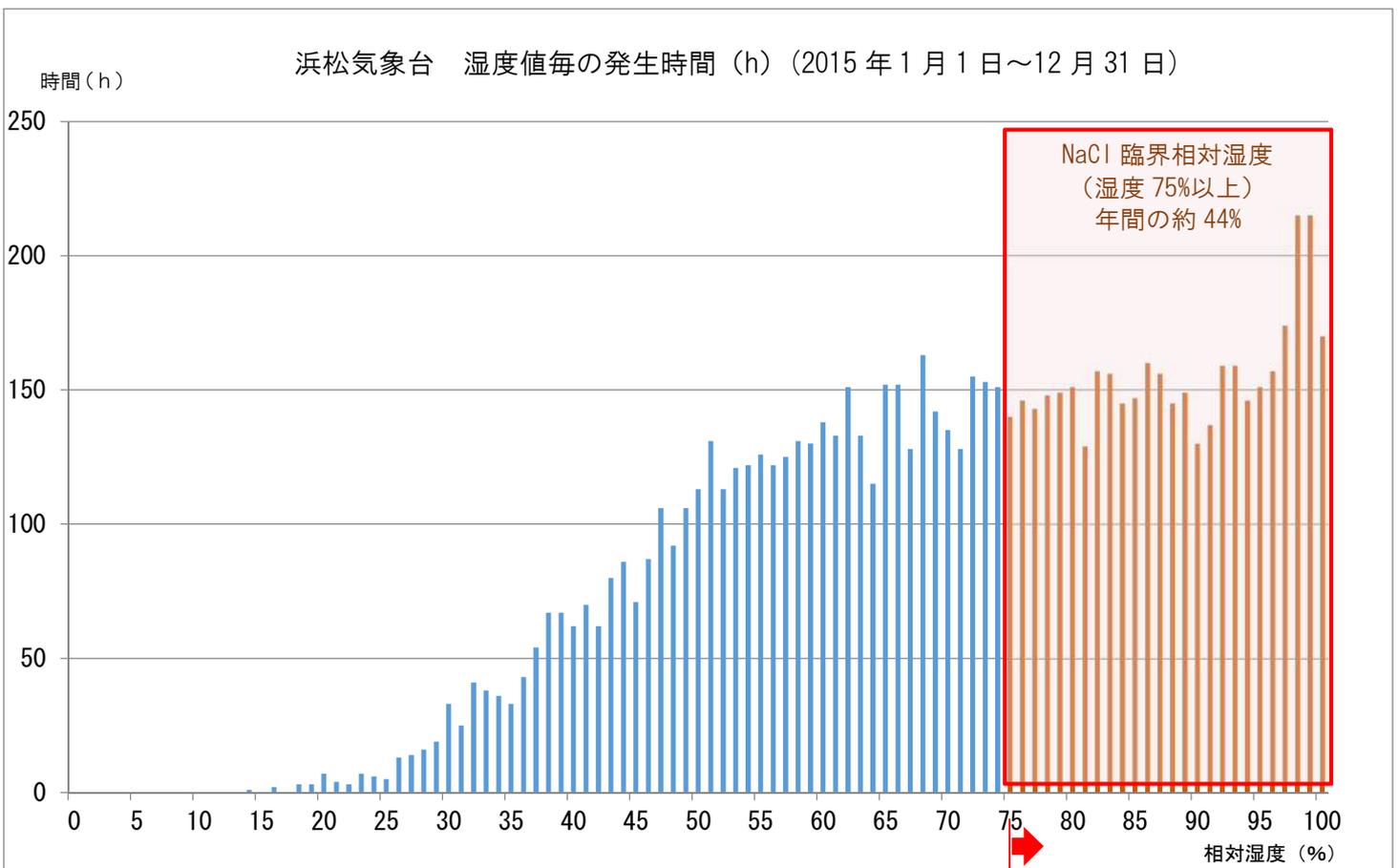


図 4.3.2 相対湿度値毎の発生時間 (h)

※1 落下した灯具付近の相対湿度計測値が前後と比較して小さいのは、当該温度湿度計がトンネルの上部（路面からの高さ約 5.7m 付近）に設置しており、他の温度湿度計がトンネルの下部（路面からの高さ約 1.9m 付近）に設置している影響と考慮される。

## 5. 取付金具の残存亜鉛めっき膜厚調査

### 5.1 調査方法

トンネル縦断方向の腐食環境を把握するために、照明灯具をトンネル壁面に固定する取付金具（図 5.1.1、図 5.1.2 参照）の溶融亜鉛めっきの残存めっき膜厚を SEM で観察、測定し亜鉛の腐食量を調査した。

調査したトンネル照明灯具は、落下灯具と、入口から 300m までは概ね 50m 間隔、300m から出口までは概ね 100m 間隔に撤去した灯具を対象とした。

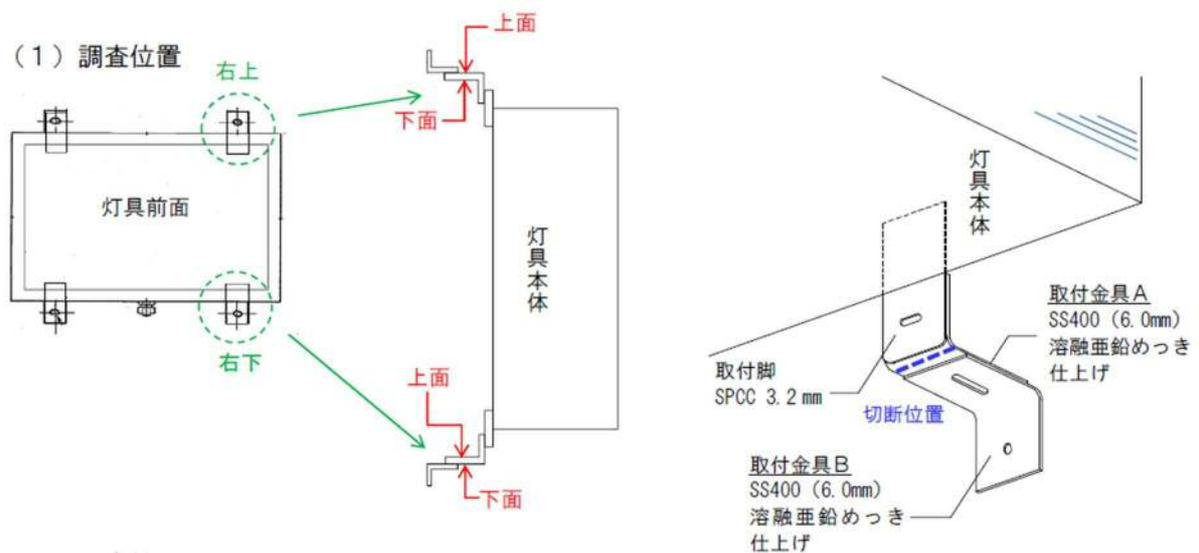


図 5.1.1 取付金具調査位置

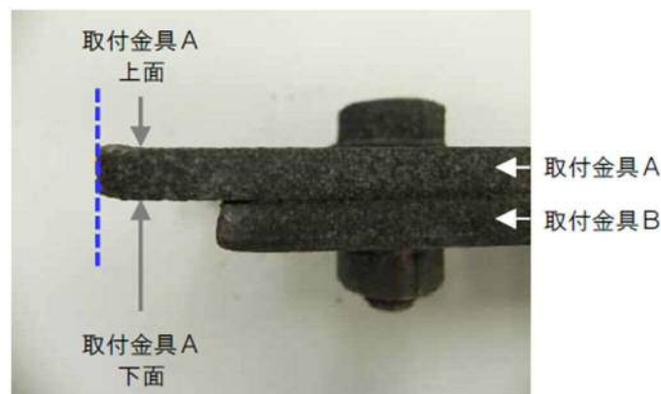


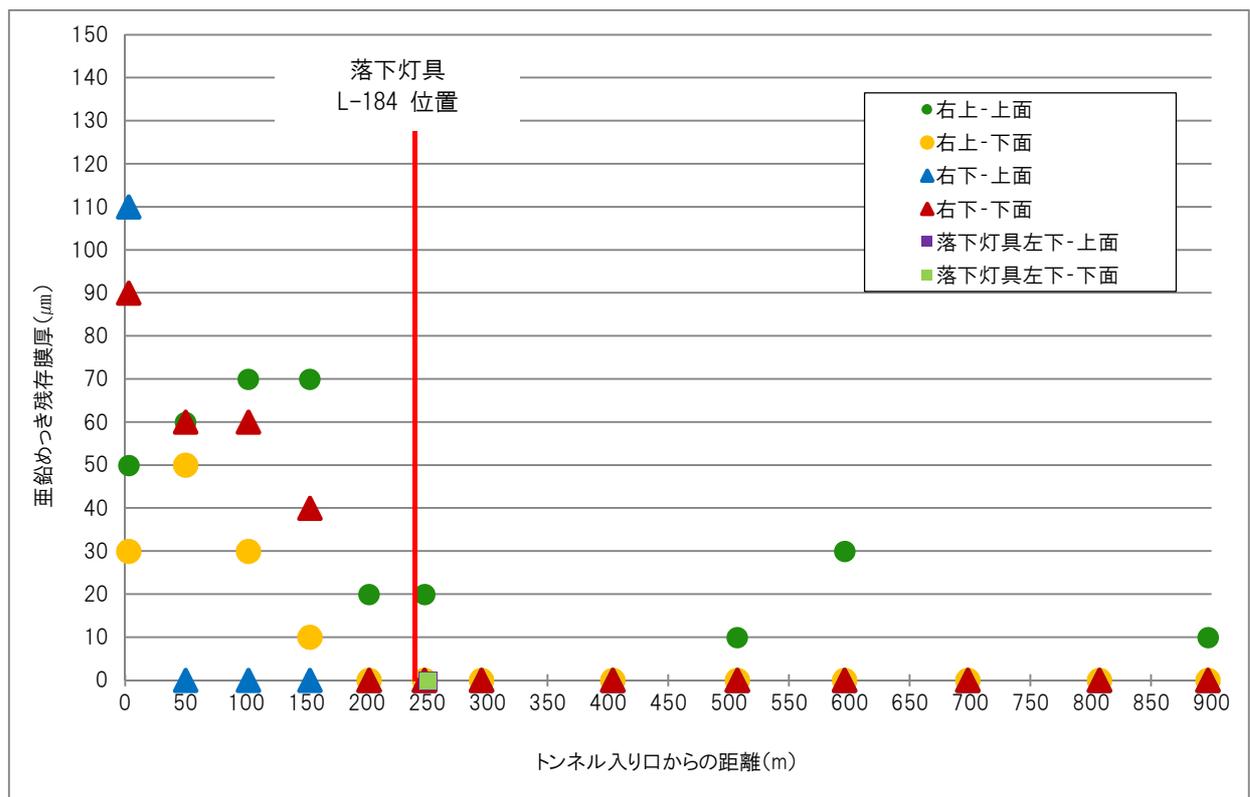
図 5.1.2 取付金具調査位置 (SEM 観察箇所)

## 5.2 調査結果

設置時の亜鉛めっき量は、亜鉛めっき試験成績表より  $621\text{g}/\text{cm}^3$ 、亜鉛の膜厚に換算して  $86\ \mu\text{m}$  であることがわかっている。

SEM 写真から残存膜厚を測定し結果を整理したものを図 5.2.1 に示す。入口から約 150m までは、亜鉛めっきの残存が確認できたが、入口から 200m 以降は、ほぼ亜鉛めっきは消失しており、一部では母材（鉄）へのさびの侵食も確認された。

各試料の SEM 写真を図 5.2.2 に示す。



灯具番号		L-1	L-37	L-83	L-123	L-159	L-183	L-184	L-195	L-211	L-226	L-239	L-254	L-270	L-284	
入り口からの距離(m)		3	50	102	153	202	248	251	295	404	507	596	698	807	897	
残存めっき 膜厚(μm)	右上	上面	50	60	70	70	20	20	—	0	0	10	30	0	0	10
		下面	30	50	30	10	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0
	(左下)	上面	110	0	0	0	0	0	(0)	0	0	0	0	0	0	0
		下面	90	60	60	40	0	0	(0)	0	0	0	0	0	0	0

図 5.2.1 取付金具亜鉛めっき残存膜厚調査結果

灯具番号	L-1	L-37	L-83	L-123
入口からの距離	3m	50m	102m	153m
右上	上面 SEM 観察 残存めっき膜厚 50 μm 鋼板 亜鉛めっき 50 μm	上面 SEM 観察 残存めっき膜厚 60 μm	上面 SEM 観察 残存めっき膜厚 70 μm $50(\mu\text{m}) \times 3/5 = 30(\mu\text{m})$	上面 SEM 観察 残存めっき膜厚 70 μm
	下面 SEM 観察 延長比 3/4 $40(\mu\text{m}) \times 3/4 = 30(\mu\text{m})$ 残存めっき膜厚 30 μm	下面 SEM 観察 延長比 3/4 50 μm 残存めっき膜厚 50 μm	下面 SEM 観察 延長比 3/5 50 μm 残存めっき膜厚 30 μm	下面 SEM 観察 延長比 1/3 $30(\mu\text{m}) \times 1/3 = 10(\mu\text{m})$ 残存めっき膜厚 10 μm
右下	上面 SEM 観察 残存めっき膜厚 110 μm	上面 SEM 観察 残存めっき膜厚 -- μm	上面 SEM 観察 残存めっき膜厚 -- μm	上面 SEM 観察 残存めっき膜厚 -- μm
	下面 SEM 観察 90 μm 残存めっき膜厚 90 μm	下面 SEM 観察 60 μm 残存めっき膜厚 60 μm	下面 SEM 観察 60 μm 残存めっき膜厚 60 μm	下面 SEM 観察 40 μm 残存めっき膜厚 40 μm

図 5.2.2 (1/4) 取付金具亜鉛めっき残存膜厚調査結果 SEM 写真 (L1~L123)

灯具番号	L-159	L-183	(参考) 落下灯具 L-184	L-195
入口からの距離	202m	248m	251m	295m
右 上	上面 SEM 観察  残存めっき膜厚 20 μm  40 μm 40 μm  延長比 1/2 40(μm) × 1/2 = 20(μm)	上面 SEM 観察  残存めっき膜厚 20 μm  40 μm 40 μm  延長比 1/2 40(μm) × 1/2 = 20(μm)		上面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm
	下面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm	下面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm		下面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm
右 下 (L-184については左下)	上面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm	上面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm	(参考) 落下灯具左下-上面 残存めっき膜厚 -- μm	上面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm
	下面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm	下面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm	(参考) 落下灯具左下-下面 残存めっき膜厚 -- μm	下面 SEM 観察  残存めっき膜厚 -- μm

図 5.2.2 (2/4) 取付金具亜鉛めっき残存膜厚調査結果 SEM 写真 (L159~L195)

灯具番号		L-211	L-226	L-239	L-254
入口からの距離		404m	507m	596m	698m
右 上	上面 SEM 観察	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 10 μm</p> <p>延長比 1/3 30 (μm) × 1/3 = 10 (μm)</p>	<p>残存めっき膜厚 30 μm</p> <p>30 μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>
	下面 SEM 観察	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>
右 下	上面 SEM 観察	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>
	下面 SEM 観察	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>	<p>残存めっき膜厚 -- μm</p>

図 5.2.2 (3/4) 取付金具亜鉛めっき残存膜厚調査結果 SEM 写真 (L211~L254)

灯具番号		L-270	L-284		
入口からの距離		807m	897m		
右 上	上面 SEM 観察	<p>残存めっき膜厚 -- <math>\mu\text{m}</math></p>	<p>残存めっき膜厚 10 <math>\mu\text{m}</math></p> <p>延長比 1/3 30 (<math>\mu\text{m}</math>) <math>\times</math> 1/3 = 10 (<math>\mu\text{m}</math>)</p>		
	下面 SEM 観察	<p>残存めっき膜厚 -- <math>\mu\text{m}</math></p>	<p>残存めっき膜厚 -- <math>\mu\text{m}</math></p>		
右 下	上面 SEM 観察	<p>残存めっき膜厚 -- <math>\mu\text{m}</math></p>	<p>残存めっき膜厚 -- <math>\mu\text{m}</math></p>		
	下面 SEM 観察	<p>残存めっき膜厚 -- <math>\mu\text{m}</math></p>	<p>残存めっき膜厚 -- <math>\mu\text{m}</math></p>		

図 5.2.2 (4/4) 取付金具亜鉛めっき残存膜厚調査結果 SEM 写真 (L270~L284)

## 6. 新品形状サンプルを用いた腐食促進試験

### 6.1 試験方法

落下した灯具の灯体の材質が、灯具が設置された平成8年当時の灯具の標準仕様と材質が異なることが今回の調査中に判明した。これを受け灯体の材質の違いが腐食に影響があったのかを確認するために、灯体の材質 SECC（落下した灯具と同材質）、SPCC（標準の灯具と同材質）の2種類について腐食促進試験を行い灯体と取付脚の接合部内側（無塗装部分）の腐食状況について比較調査を行った。

サンプルの形状は、図 6.1.1 に示す照明灯具と取付脚のカットモデルを製作工場にて作成した。通常の製作過程でサンプルを作成したのち、取付脚周囲のパテは、この部分が劣化したことで接合部内側に水分等が浸入したと考えられることから、除去した上で試験を実施した。

また、トンネル内の取付環境に合わせて、取付金具を取り付けた状態で試験を実施した。なお、灯体本体内側にあたる部分は、外気に接触しない面であるため、塩水噴霧の影響がないようコーティングを施した。

試験サイクルは、JIS H8502 中性塩水噴霧サイクル試験（1cycle=8 時間（噴霧 2 時間 35℃、乾燥 4 時間 60℃、湿潤 2 時間 50℃））で実施した。試験機などの詳細は次のとおりである。サイクル試験機の外観を図 7.1.2 に、試験機内でのサンプル吊り下げ状態を図 7.1.3 に示す。

#### 試験機等

- ・ 中性塩水噴霧サイクル試験（JIS H8502）  
1cycle=8 時間（噴霧 2 時間 35℃、乾燥 4 時間 60℃、湿潤 2 時間 50℃）  
塩水濃度：5% NaCl  
試験機：スガ試験機製 複合サイクル試験機  
170cycle 実施（H27.12.8～H28.2.4 58日間）
- ・ サンプル形状：取付脚周囲のパテ及び塗装の劣化を想定して、接合面の4面全てのパテと塗装を除去

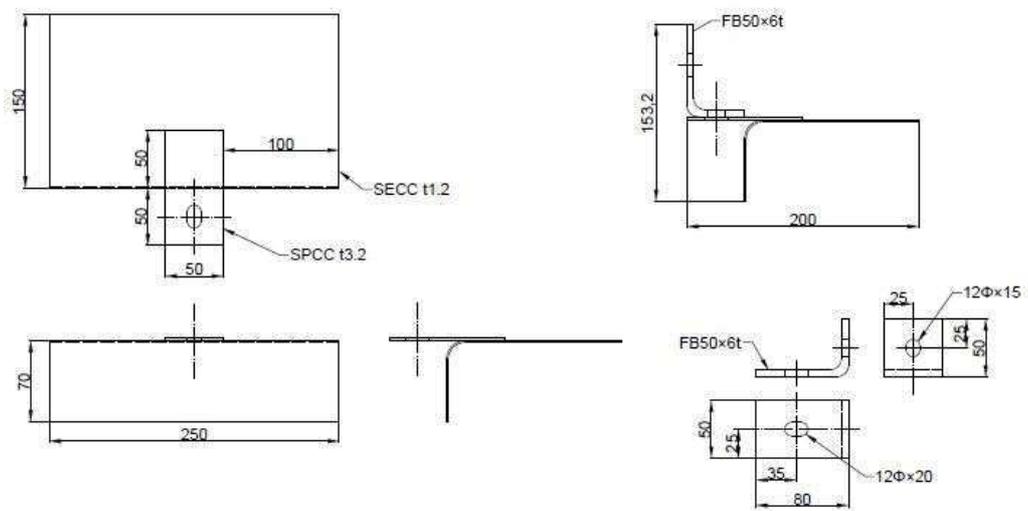


図 6.1.1 腐食促進試験サンプル形状と仕上げ



図 6.1.2 複合サイクル試験機外観

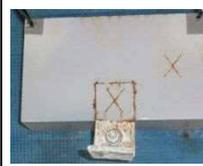


図 6.1.3 サンプル吊り下げ状態

## 6.2 外観状態観察の結果

過去の知見では、17 サイクルがトンネル内環境の1年相当とされており、10年相当の170 サイクルを実施した。

落下した灯具と同じ材質（灯体 SECC）をサンプル A、標準の灯具と同じ材質（灯体 SPCC）をサンプル B として、47 サイクル（ $8 \times 47 = 376$  時間 約 16 日）、90 サイクル（ $8 \times 90 = 720$  時間 30 日）、170 サイクル（ $8 \times 170 = 1360$  時間 約 57 日）経過後の状況を図 6.2.1 に示す。

サンプル	当初	47 サイクル	90 サイクル	170 サイクル
A 取付脚 : SPCC 灯具本体 : SECC				

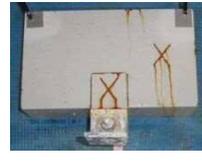
サンプル	当初	47 サイクル	90 サイクル	170 サイクル
B 取付脚 : SPCC 灯具本体 : SPCC				

図 6.2.1 サンプル(A)(B)と暴露後の状況

### 6.3 腐食量の計測結果

170 サイクル経過後のサンプルを 2.3 同様、取付脚の長辺方向に切断、研磨し断面標本を作製し、SEM 写真で観察し、取付脚と灯体の残存している板厚を測定した。SEM 観察をするためにサンプルを切断した位置と、SEM 観察箇所を図 6.3.1 に示す。

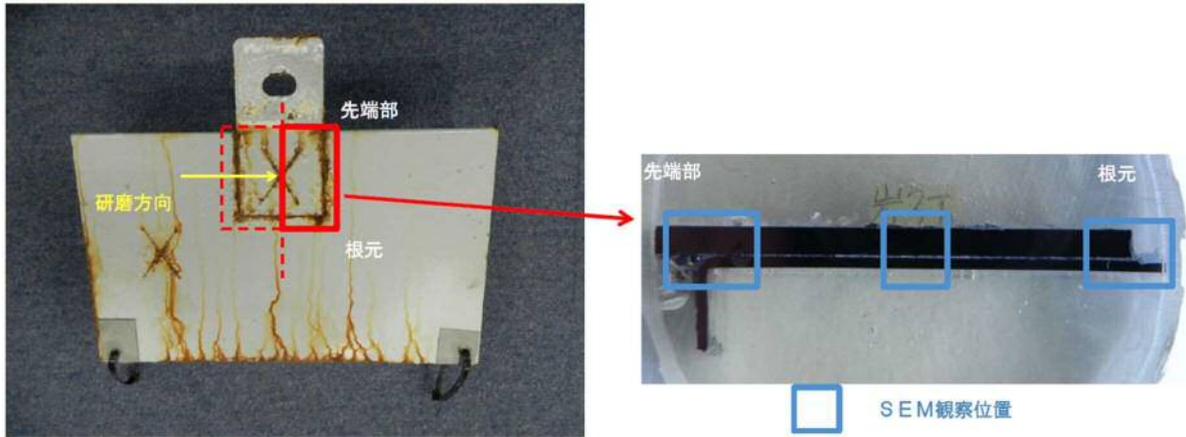
取付脚と灯具本体の合わせ部（内側未塗装箇所）で対向する取付脚と灯具本体の鉄部の厚さを測定した。灯具本体の内側はコーティングされていること、取付脚の外側は塗装が施されていることから、いずれも内側からのみ腐食が進行（取付脚の外側（塗装面）に部分的に発錆が見られるため、測長時には発生箇所を避けた位置で測長）したと推定した。

腐食進行値の算定にあたっては、素材（SPCC）の厚さの許容差が板幅により $\pm 0.16\text{mm} \sim 0.20\text{mm}$ ある（JIS G3141）ことから、この影響を除くため、中央部の測定値を初期値とした。中央部の測長結果は初期値として使用したこと、先端部については、曲げ加工されており正確な測長ができないことから、誤差の要因の少ない根元部で比較した。

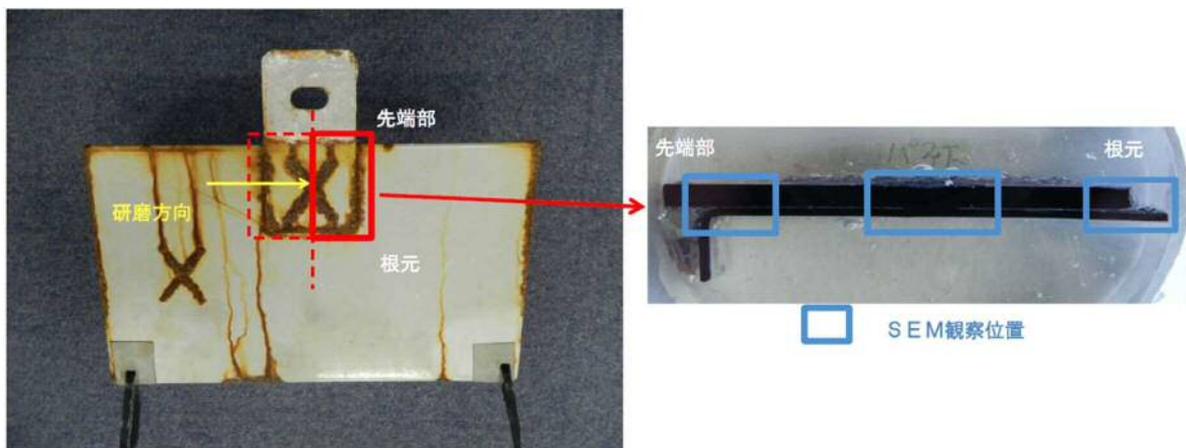
測定結果は、サンプル A（灯体 SECC、落下灯具と同材質）とサンプル B（灯体 SPCC、標準灯具と同材質）の腐食進行度（板厚の初期値と試験後の測定値の差）は、サンプル A が  $0.046\text{mm}$ 、サンプル B が  $0.068\text{mm}$  と大差がない。

サンプル A の灯具本体の腐食進行度は、サンプル B の  $0.104\text{mm}$  と比べ、 $0.010\text{mm}$  と極めて小さい。

それぞれのサンプルの取付脚部、灯体の SEM 写真と、板厚の測定状況を図 6.3.2、図 6.3.3 に示す。



サンプル A (灯体 SECC 落下灯具と同材質)



サンプル B (灯体 SPCC 標準灯具と同材質)

図 6.3.1 サンプル外観と切断面の SEM 観察箇所

表 6.3.1 腐食促進試験後の板厚測定結果

部位	灯具本体材質	測定・計算結果	先端部 (mm)	中央部 (mm)	根元部 (mm)
取付脚	灯具本体が SECC	測定値	3.068	3.174	3.128
		腐食進行度	0.106	↑基準値	<b>0.046</b>
	灯具本体が SPCC	測定値	3.254	3.324	3.256
		腐食進行度	0.070	↑基準値	<b>0.068</b>
灯具本体	灯具本体が SECC	測定値	曲げ加工され ており未測定	1.226	1.216
		腐食進行度		↑基準値	<b>0.010</b>
	灯具本体が SPCC	測定値		1.234	1.130
		腐食進行度		↑基準値	<b>0.104</b>

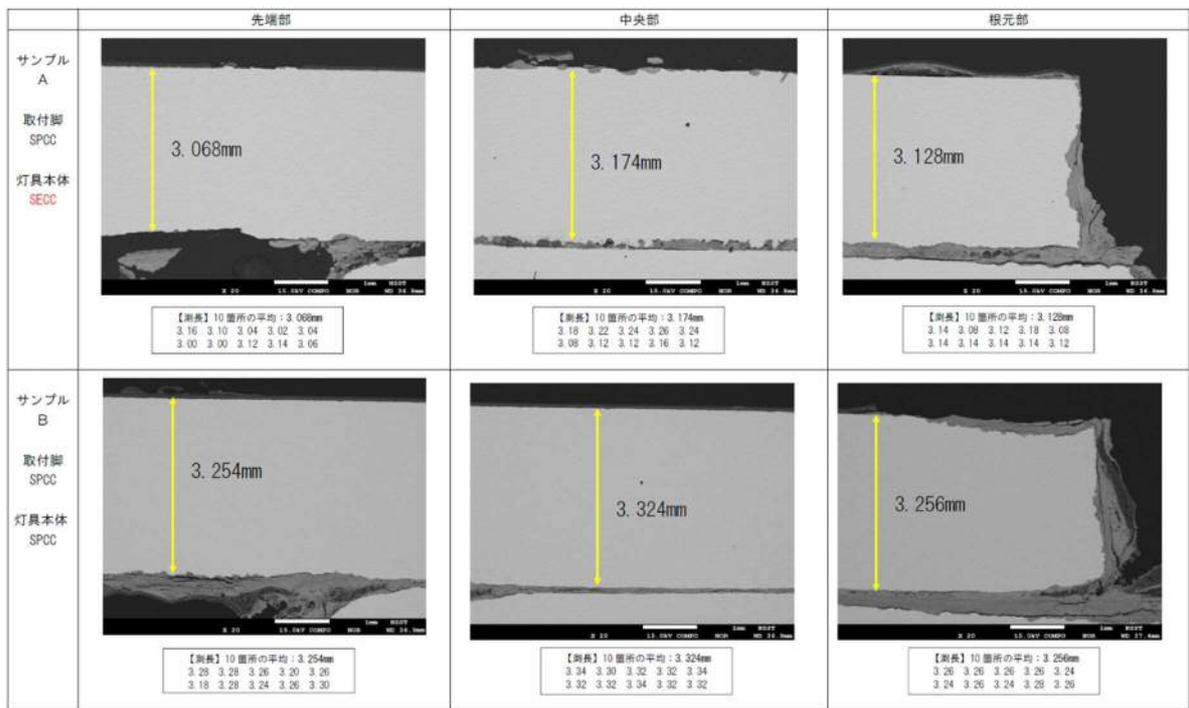


図 6.3.2 取付脚部の SEM 写真と板厚測定

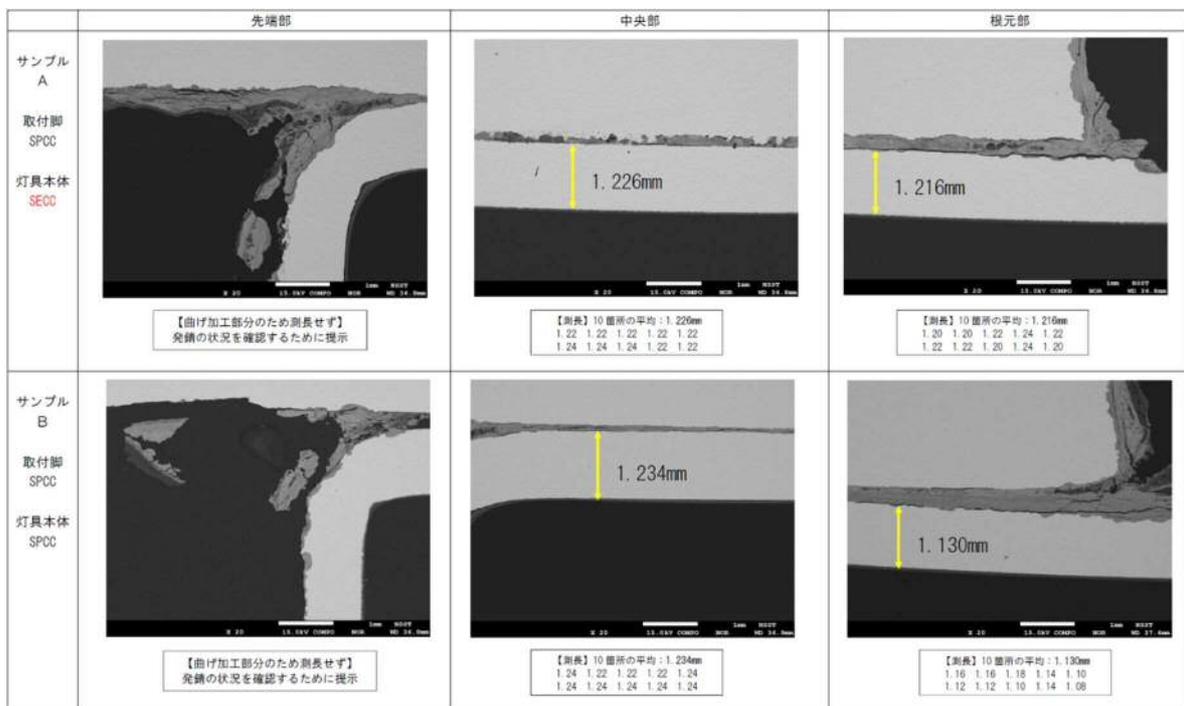


図 6.3.3 取付脚部の SEM 写真と板厚測定

## 7. 金属疲労痕の調査

### 7.1 調査方法

落下した照明灯具の取付脚の疲労や、取付脚破断の最終段階での疲労破壊の可能性を確認するため、落下した灯具の4箇所の取付脚のうち、破断面に金属面の残存が確認された左下取付脚の破断面をSEMで観察した。加えて、入口付近及び落下した照明灯具に隣接した灯具も調査した。

【金属疲労痕の調査状況（落下灯具L184）】

#### 1) 全体観察



図 7.1.1 落下灯具 L184 と疲労調査箇所

## 7.2 調査結果

取り外した取付脚の破断面の様相を SEM で観察した結果、破断面の大半はナイフエッジ状となっており、腐食減肉により鉄部がほとんどない状態であった。破断様相はディンプル（穴ぼこ状の模様）が観察される延性破壊の様相を呈しており、この破断面では、疲労破面の様相（図 7.2.6 参照）は見られなかった。また、入口付近の灯具、落下灯具に隣接した灯具にも、疲労痕跡は確認できなかった。

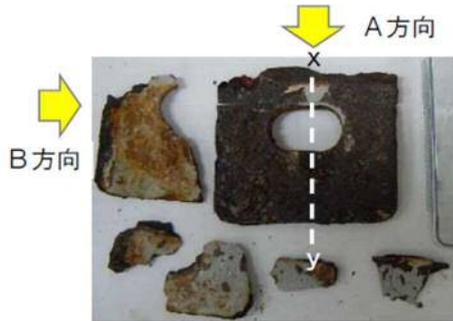


図 7.2.1 取り外した取付脚

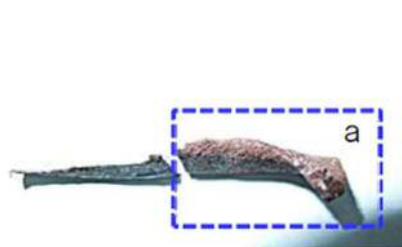


図 7.2.2 A 方向破断面

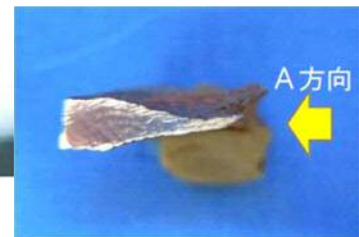


図 7.2.3 X-Y 断面

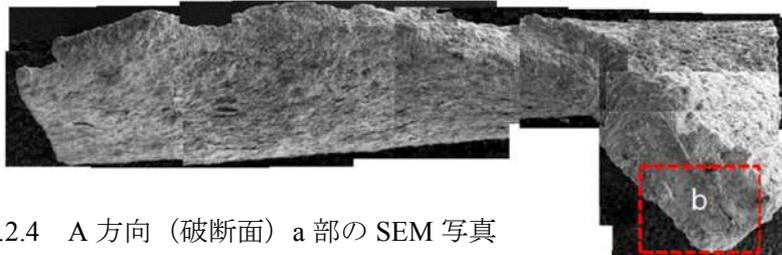


図 7.2.4 A 方向（破断面）a 部の SEM 写真

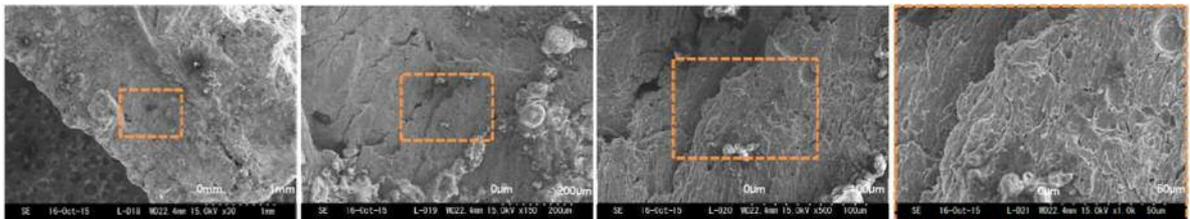


図 7.2.5 b 部 SEM 拡大写真

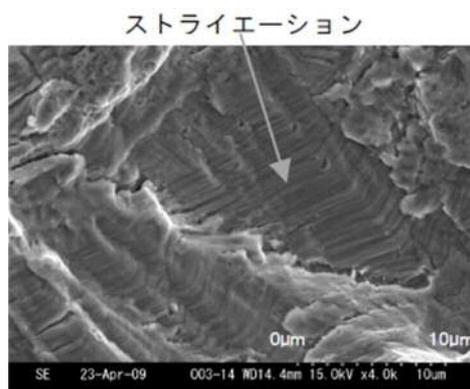


図 7.2.6 疲労破面に見られるストライエーション（参考）

## 8. トンネル照明灯具 FEM 構造解析

### 8.1 解析方法

落下照明灯具取付脚の破断落下に至るメカニズムを推定するために、取付脚の腐食減肉により取付脚部分に発生する応力について調査した。

落下照明灯具モデルを再現し、自重 (18.5kg) のみの場合に取付脚に発生する応力について、取付脚を 4 箇所均等に、当初 (板厚 3.2mm)、1/2 (1.6mm)、1/4 (0.8mm)、1/8 (0.4mm)、1/32 (0.1mm)、1/64 (0.05mm) 減肉させた状態について FEM 解析を行った。FEM 解析を行った減肉モデルを図 8.1.1 に示す。

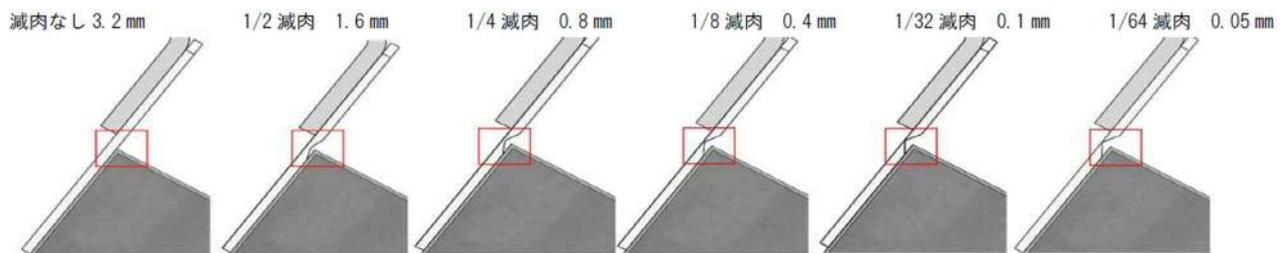


図 8.1.1 取付脚部分の減肉状況

減肉なし 3.2mm のモデルは、照明灯具を設置した当初の状態ですべての板厚 3.2mm の状態のものである。

1/2 減肉 1.6mm～1/64 減肉 0.05mm の各モデルは、照明灯具の取付脚の腐食減肉が進行し当初の板厚が 1/2、1/4、1/8、1/32、1/64 となった状態を一様に減肉させたモデルとして参考に解析を行ったものである。

## 8.2 解析結果

4つの取付脚の板厚毎に解析した結果を、最大応力の値とその発生した部位、解析図を図 8.2.1 に示す。

照明灯具取付脚を一様に厚さ 0.05mm（当初板厚 3.2mm に対し 1/64）まで減肉した場合の発生応力は、97.9MPa であり、SPCC の引張強度 270MPa に対して大きく下回る。

以上の解析結果から今回の落下した照明灯具は取付脚部が腐食減肉が進行しても取付脚部に発生する応力が非常に小さいため、金属部分がほとんど残っていないさび層の状態でも最終的に落下したものと想定される。

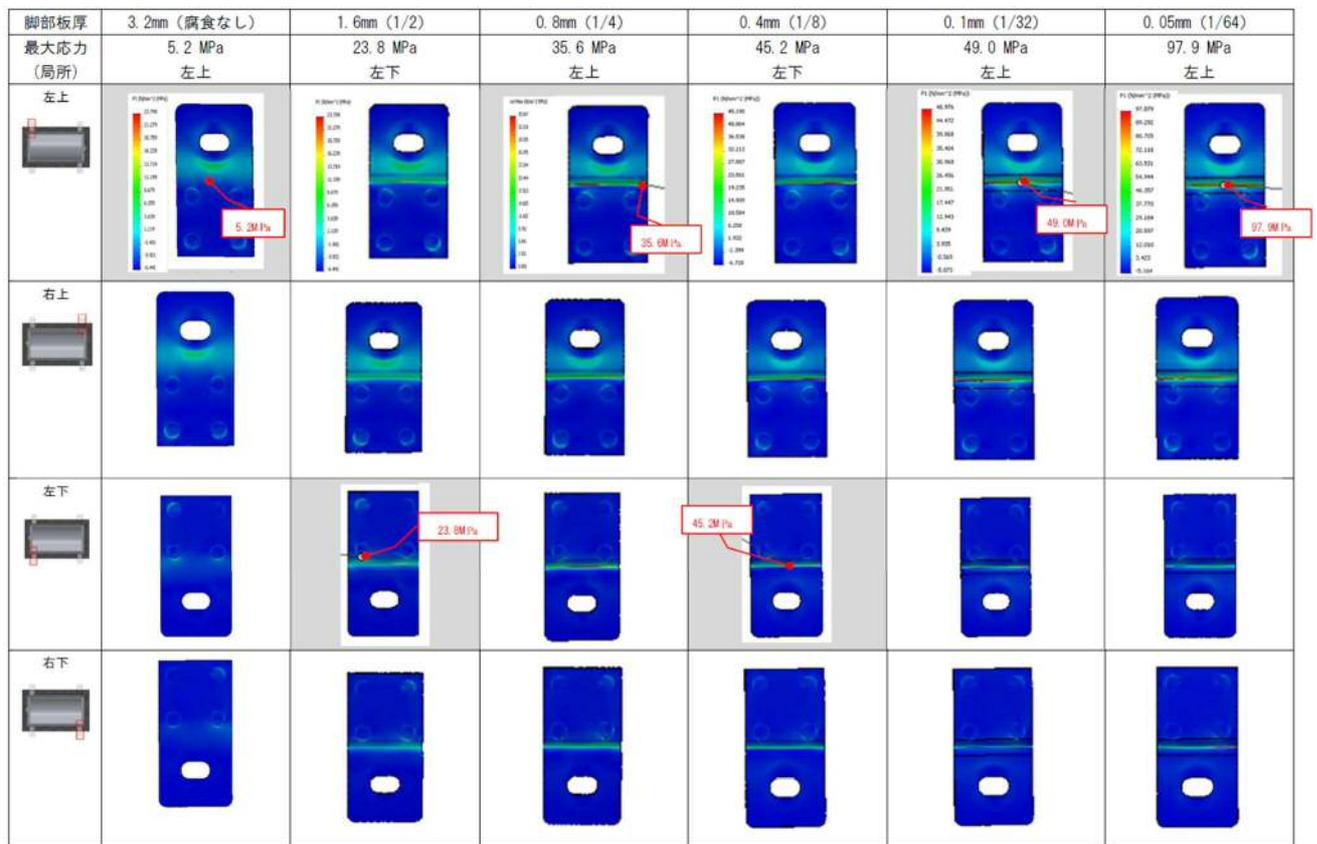


図 8.2.1 FEM 解析結果から得られた板厚毎の最大応力

## 9. 落下に至った経緯の推定

### 9.1 落下に至った経緯の推定

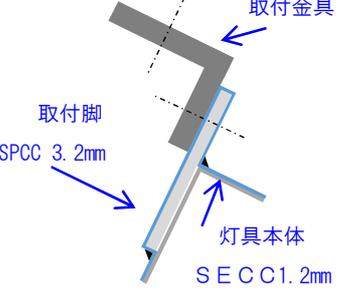
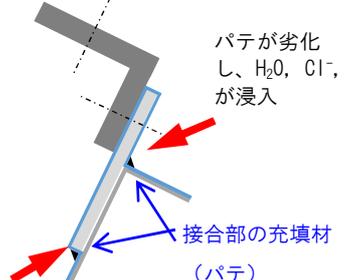
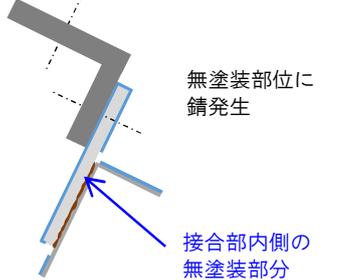
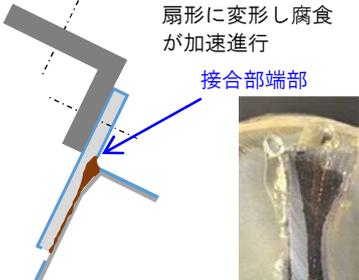
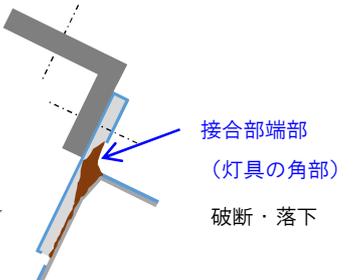
これまでの調査の結果から、落下に至った経緯を次のように推定した。

- ① トンネル内は、硫黄酸化物 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) の影響とともに、塩化物 ( $\text{Cl}^-$ ) が乾湿を繰り返す腐食環境であった。
- ② 取付脚と灯具本体 (灯体) の接合部周囲の充填材 (防水パテ) が剥離した隙間から腐食原因物質 (水分、塩化物 ( $\text{Cl}^-$ )、硫黄酸化物 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )) が浸入した。
- ③ 隙間から侵入した腐食原因物質により、接合部内側の無塗装部分でさびが発生し成長
- ④ 接合部内側の錆が、灯具本体と取付脚の間で膨張し、接合部の端部が、腐食原因物質を捕捉、蓄積しやすい形状 (扇形) に変形し、灯具本体より腐食しやすい取付脚の腐食が大きく進行
- ⑤ 接合部の端部 (灯具本体の角部付近) の位置で破断して落下

この推定に至った理由は、照明灯具、トンネル内の環境を調査したところ、次の状況を確認したことによる。

- ・ 取付脚と灯具本体の接合部周囲の充填材 (防水パテ) が経年劣化により剥離したこと
- ・ 灯具の製作過程において、灯具本体と取付脚をスポット溶接による接続したのち、塗装をすることから、接合部内側は無塗装となっていること
- ・ 取付脚部分の断面を SEM 観察し、接合部端部が扇型に開口していたこと
- ・ 取付脚部分の断面を EPMA マッピング分析し、接合部内側にさび層を確認。扇型の開口のさび層の間に凍結防止剤由来の塩化物 ( $\text{Cl}^-$ )、排気ガス由来の硫黄酸化物 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) を確認したこと
- ・ 灯具本体の材質が SPCC (冷間圧延鋼板) ではなく SECC (電気亜鉛めっき鋼板) であり、塩水噴霧サイクル試験 (JIS H8502) では、SECC 製の灯具本体の腐食進行度は SPCC 製と比べて小さいこと
- ・ FEM 解析では取付脚が 4 箇所均等に 0.05mm まで減肉した場合でも自重では破断しないと推定
- ・ 塩化ナトリウム臨界相対湿度<sup>\*1</sup> の 75%以上となる時間がかなりの頻度で出現する環境と推定

表 9.1.1 落下に至った経緯

推定される落下に至った経緯		調査で判明した内容
 <p>取付金具 取付脚 SPCC 3.2mm 灯具本体 SECC 1.2mm</p>	<p>トンネル内は、硫黄酸化物 (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>) の影響とともに、塩化物 (<math>\text{Cl}^-</math>) が乾湿を繰り返す腐食環境</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>トンネル縦断方向の照明灯具の付着物質を分析し、凍結防止剤由来の塩化物 (<math>\text{Cl}^-</math>)、排気ガス由来の硫黄酸化物 (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>) などを検出</li> <li>塩化ナトリウム臨界相対湿度 75%以上となる時間がかかなりの頻度で出現する環境と推定</li> <li>灯具本体の材質が SPCC (冷間圧延鋼板) ではなく、SECC(電気亜鉛めっき鋼板)と確認</li> </ul>
 <p>パテが劣化し、<math>\text{H}_2\text{O}</math>、<math>\text{Cl}^-</math> が浸入 接合部の充填材 (パテ)</p>	<p>取付脚と灯具本体の接合部周囲の充填材 (防水パテ) が剥離した隙間から腐食原因物質 (水分、塩化物 (<math>\text{Cl}^-</math>)、硫黄酸化物 (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>) が浸入</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取付脚と灯具本体の接合部周囲の充填材 (防水パテ) の経年劣化による剥離を確認</li> <li>取付脚部分の断面を EPMA マッピング分析し、接合部内側に錆層を確認、扇形の開口の錆層の間に塩化物 (<math>\text{Cl}^-</math>)、硫黄酸化物 (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>) を確認</li> </ul>
 <p>無塗装部位に錆発生 接合部内側の無塗装部分</p>	<p>隙間から侵入した腐食原因物質により、接合部内側の無塗装部分で錆が発生、成長</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取付脚部分の断面を EPMA マッピング分析し、接合部内側に錆層を確認、扇形の開口の錆層の間に塩化物 (<math>\text{Cl}^-</math>)、硫黄酸化物 (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>) を確認</li> <li>灯具の製作過程において、灯具本体と取付脚をスポット溶接により接続したのち、塗装をすることから、接合部内側は無塗装となっていることを確認</li> </ul>
 <p>扇形に変形し腐食が加速進行 接合部端部</p>	<p>接合部内側の錆が、灯具本体と取付脚の間で膨張し、接合部の端部が、腐食原因物質を捕捉、蓄積しやすい形状 (扇形) に変形し、灯具本体より腐食しやすい取付脚の腐食が大きく進行</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取付脚部分の断面を SEM 観察し、接合部端部が扇形に開口している状況を確認</li> <li>取付脚部分の断面を EPMA マッピング分析し、接合部内側に錆層を確認、扇形の開口の錆層の間に塩化物 (<math>\text{Cl}^-</math>)、硫黄酸化物 (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>) を確認</li> <li>塩水噴霧サイクル試験(JIS H 8502)では、SECC 製の灯具本体の腐食進行度は SPCC 製と比べて小さいことを確認</li> </ul>
 <p>接合部端部 (灯具の角部) 破断・落下</p>	<p>接合部の端部 (灯具本体の角部付近) の位置で破断して落下</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>FEM 解析では取付脚が 4 箇所均等に 0.05mm まで減肉した場合でも、自重では破断しないと推定</li> </ul>

腐食経緯

## 9.2 直近の点検時の取付脚厚さの推定

直近の平成25年1月の一斉点検時の取付脚の板厚について、次のように推定した。

第8章の結果から、落下時の板厚を0、また、接合面の反対側からの腐食を0.2mm程度として、新設時から腐食が始まった場合を最小板厚と想定すると、19.5年で3.0mm腐食したことになる。一斉点検から落下まで2.5年であったことから、 $3.0\text{mm}/19.5\text{年} \times 2.5\text{年} = 0.385\text{mm}$ となる。

また、想定される最大の板厚は、9.3に示すとおり、SPCCの腐食量0.44mm/年を最大腐食量、落下時の板厚を0とすると、 $0.44\text{mm}/\text{年} \times 2.5\text{年} = \text{約}1.1\text{mm}$ となる。

よって、直近の点検時の落下した灯具の取付脚の板厚は、0.4mm～1.1mmの範囲内にあったものと推定できる。

それぞれの設置からの経過年数と板厚の関係を図9.2.1に示す。

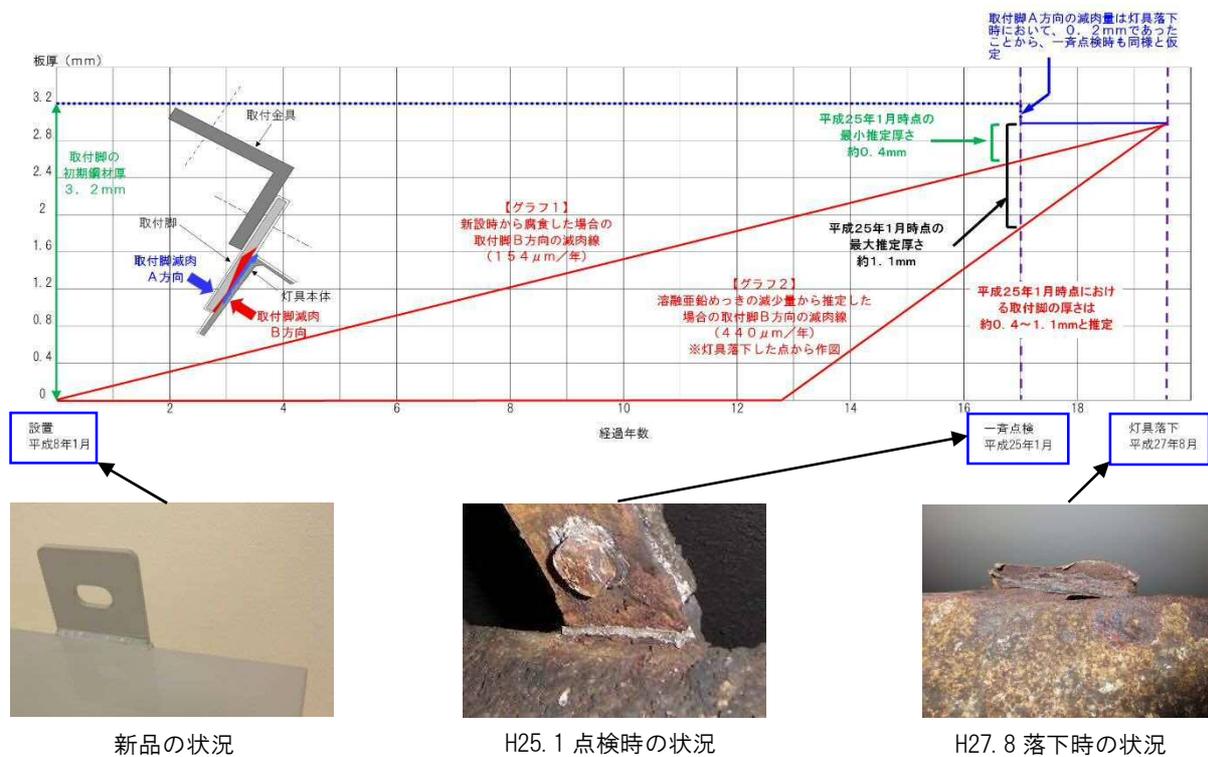


図 9.2.1 落下灯具取付脚の経過年数と推定板厚

### 9.3 亜鉛の腐食量から推定した鋼の腐食量

第5章「取付金具の残存亜鉛めっき膜厚調査」で示したとおり、取付金具における片面の亜鉛めっき量は  $621\text{g/m}^2$  (Zn 密度  $7.2\text{g/cm}^3$  で計算すると残存亜鉛めっき膜厚は平均  $86\ \mu\text{m}$ ) であった。

設置からの経過年数 19.5 年で全てのめっきが消失していることから、亜鉛の腐食速度は  $31.8\text{g/m}^2/\text{年}$  ( $4.4\ \mu\text{m}/\text{年}$ ) となる。

図 9.3.1 で示した知見により、一般に炭素鋼は亜鉛めっきと比較して 10~100 倍の腐食速度を示すと言われていることから、落下灯具の取付金具における溶融亜鉛めっきの腐食速度から取付脚 SPCC の腐食速度を推定すると、 $44\sim 440\ \mu\text{m}/\text{year}$  程度と考えられる。

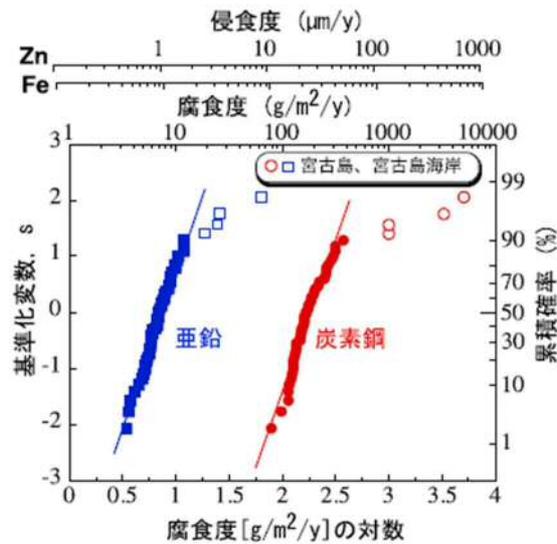


図 9.3.1 国内 25 箇所での炭素鋼 (SM400) および亜鉛の 1 年暴露試験結果の対数正規プロット

[出典] 篠原 正：表面技術、Vol. 62, 25 (2011).

## 10. トンネル照明灯具の点検について

今回の落下事象は、前回点検から2.5年で発生した。標準灯具（灯体がSPCC）、及び灯具部材が標準でない灯具（灯体がSECC）に対して現在の点検手法の有効性について検証する。

### 10.1 現行の点検方法

現在の点検要領に規定されているトンネル照明灯具の点検方法を表 10.1.1 に示す。

表 10.1.1 トンネル灯具点検方法

点検箇所	点検部位	点検項目
トンネル灯具	全般	1. 近接目視かつ触診（亀裂、損傷、腐食及び取付状況）
		2. 超音波厚さ測定など（必要に応じて実施）
		3. 灯具内部近接目視（亀裂、損傷及び腐食状況）（必要に応じて実施）

トンネル照明灯具の構造面の点検は、近接目視かつ触診、必要に応じて、超音波厚さ測定、灯具内部近接目視を実施することとされている。また、変状が発生し易い部位などを点検時の着目点として規定（図 10.1.1）し、照明灯具を両手で支えて上下前後左右に揺することも規定（図 10.1.2）している。

内部近接目視では、図 10.1.3 のように内面へのさびの発生状況を確認するために実施している。

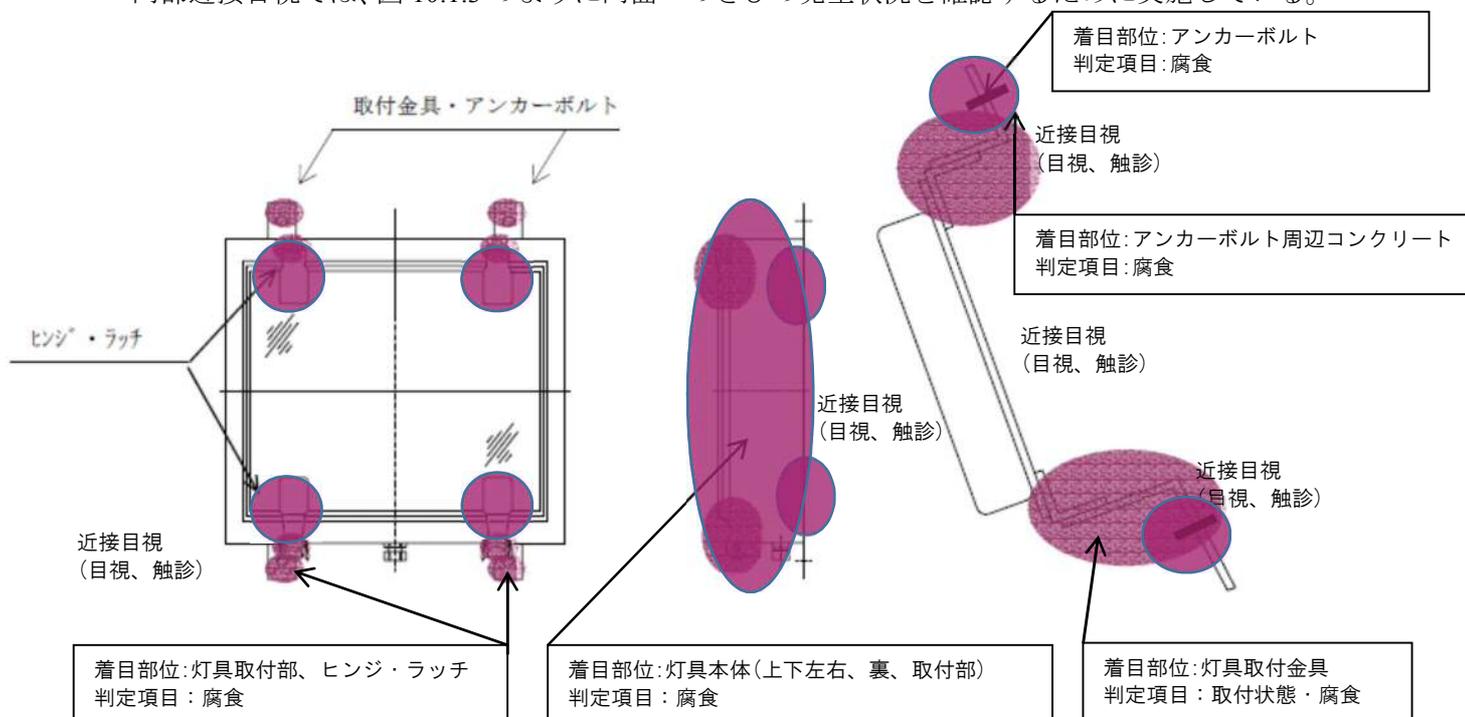


図 10.1.1 灯具点検の着目点

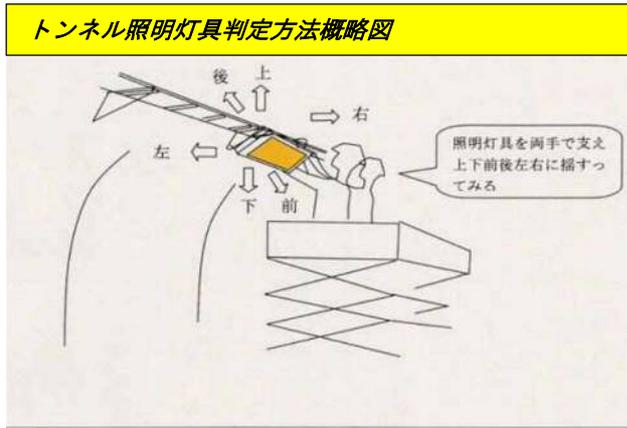


図 10.1.2 点検概略図

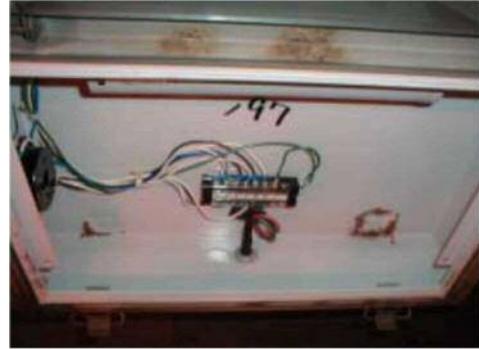


図 10.1.3 灯具内部近接目視

## 10.2 点検方法の検証

灯具本体と取付脚が同一の材質の場合は、肉厚が薄い灯具本体に変状が発生する。過去の知見では3箇所の取付脚周辺の灯具本体が健全であっても、1箇所の取付脚周辺の灯具本体に穴が開いている状況では「揺すり」により変状を発見可能と報告されている。

加えて、灯具本体は外面から錆始め、腐食が進行すると錆は内面にまで達することから、内面への錆の発生状況を確認(図 10.1.3)することで、穴が開く前兆を確認可能とされている。図 10.2.1 に灯具本体が SPCC の場合の変状の例を示す。



図 10.2.1 灯具本体が SPCC の場合の変状（これまでの知見）

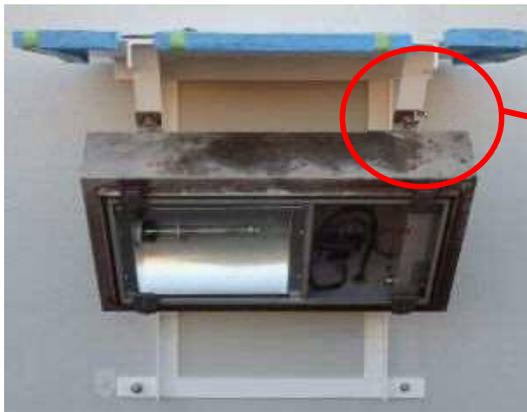
今回のように取付脚が腐食減肉した変状が「揺すり」点検によって判定可能か、図 10.2.2 のように灯具を治具で固定し「揺すり」点検を再現して検証した。

再現試験は、取付脚4箇所の板厚を均等に削り、第9章で推定した最小板厚 0.4mm まで加工(図 10.2.3)し再現したところ「正常」と判定された。次に4箇所の取付脚のうち1箇所を破断させ点検を再現(図 10.2.4)したところ「異常」と判定された。

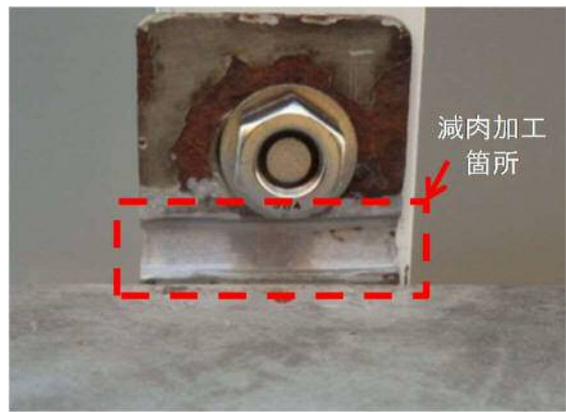
これらの検証の結果、灯具本体と取付脚が同じ材質(SPCC)の場合、変状は灯具本体側に多く発生しており、その形態の変状に対しては、現行の点検は有効である。しかしながら、今回確認された「取付脚」の減肉が先行して発生する変状状態については、発見そのものが困難である。



図 10.2.2 揺すり再現試験



試験照明灯具



脚部減肉加工（模擬）

図 10.2.3 照明灯具の加工



図 10.2.4 揺すり再現試験時の状況（1 か所）

## 11. 今回の事象を受けたトンネル照明灯具の維持管理手法（案）

今回の事象を受けたトンネル照明灯具の維持管理手法の方針について、前章までの落下に至った経緯で抽出された課題を踏まえて、宇利トンネルと同種の灯具、及び同種以外の灯具について、より安全に維持管理を行うための対応を次のとおり提案する。

- ① 二重の安全対策で落下に対する安全性を確保
- ② 宇利トンネルと同種の灯具（灯具本体：鋼板塗装仕上げ 取付脚：鋼板塗装仕上げ）
  - ・ 灯具本体と取付脚との接合部の点検を着目点として追加
  - ・ 近接目視かつ触診により腐食に伴う変形、亀裂などの状況確認を追加
  - ・ 腐食による変形、亀裂などが確認された場合は取替を実施
  - ・ トンネル全体の点検結果に応じて計画的に更新を実施

※ 当該灯具を使用しているトンネル 12 本のトンネル（宇利トンネル上り線含む）  
うち、6 本については、今年度更新完了予定（宇利トンネル上り線含む）  
他 6 本については、来年度以降更新を実施予定
- ③ 宇利トンネルと同種以外の灯具（灯具本体：ステンレス 取付脚：鋼板溶融亜鉛めっき）
  - ・ 取付金具や取付脚の残存亜鉛めっき膜厚を定期的に測定することを追加し、当該トンネルの腐食環境を把握
  - ・ 取付金具や取付脚の残存亜鉛めっき膜厚、及びトンネル全体の点検結果に応じて計画的に更新を実施
- ④ 宇利トンネルと同種以外の灯具（灯具本体：ステンレス 取付脚：ステンレス）
  - ・ 従来と同様
- ⑤ トンネル全体の点検結果に応じて計画的に更新を実施

灯具種別と維持管理手法（案）

種 別	SPCC 製の灯具		SPCC 製以外の灯具	
	1987(昭和 62)年 4 月	1996(平成 8)年 4 月	2000(平成 12)年 4 月	2005(平成 17)年 7 月
標準仕様書制定(改訂)時期				
灯具本体と取付脚の仕様	<u>灯具本体：SPCC（塗装）</u> <u>取付脚：SPCC（塗装）</u> <u>灯具本体と取付脚は溶接接続</u>	灯具本体：SUS（塗装なし） <u>取付脚：SS（溶融亜鉛めっき）</u> 灯具本体と取付脚はビス止め	灯具本体：SUS（塗装） <u>取付脚：SS（溶融亜鉛めっき）</u> 灯具本体と取付脚はビス止め	灯具本体：SUS（塗装） 取付脚：SUS（塗装） 灯具本体と取付脚はビス止め
これまでの検討結果から判明した点	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 灯具本体と取付脚との接合部内側に無塗装部分があった</li> <li>➢ 灯具本体がSECCの場合、灯具本体の耐腐食性能が向上したことで、灯具本体と比較して取付脚の腐食が先行する形態となった</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 溶融亜鉛めっきとして、塗装に比べると耐腐食性能は向上しているが、亜鉛めっきも経年により消失する</li> <li>➢ 亜鉛めっき消失後の素材はSS（鉄）であることから腐食する</li> </ul>		
対応方針	二重の安全対策で落下に対する安全性を確保する			
	腐食に対する点検手法による対応が必要	腐食に対する点検手法による対応が必要		
維持管理手法（案）	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 灯具本体と取付脚との接合部の点検を着目点として追加する</li> <li>➢ 近接目視かつ触診により腐食に伴う変形、亀裂などの状況確認を追加する</li> <li>➢ 腐食による変形、亀裂などが確認された場合は取替を実施する</li> <li>➢ トンネル全体の点検結果に応じて計画的に更新を実施する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 取付金具や取付脚の残存亜鉛めっき膜厚を定期的に測定することを追加し、当該トンネルの腐食環境を把握する</li> <li>➢ 取付金具や取付脚の残存亜鉛めっき膜厚、及びトンネル全体の点検結果に応じて計画的に更新を実施する</li> </ul>		従来と同様

- 二重の安全対策については、今年度完了予定
- 宇利トンネルと同種灯具のトンネル 12 本の対応状況
  - ・ 6 本（宇利トンネル含む）については、今年度更新完了予定
  - ・ 他 6 本については、来年度以降更新を実施予定

※上記 12 本のトンネルで灯具本体が SECC の灯具は宇利トンネルのみ

## 参考資料

東名高速道路宇利トンネル照明灯具落下事象調査検討会規約

参考-1：宇利トンネル周辺の環境（塩分）

参考-2：宇利トンネル周辺の環境（雪氷対策作業状況）

参考-3：宇利トンネル周辺の環境（降水量）

参考-4：宇利トンネル周辺の環境（交通量）

参考-5：落下灯具付近の漏水状況

参考-6：その他の調査結果

## 「東名高速道路 宇利トンネル照明灯具落下事象調査検討会」規約

(名称)

第1条 この調査検討会は、東名高速道路宇利トンネル照明灯具落下事象調査検討会（以下「調査検討会」という）という。

(目的)

第2条 この規約は、2015（平成27）年8月15日 東名高速道路 宇利（うり）トンネル（上り線）照明灯具及び電源ケーブルの垂れ下がり事象を受けて、発生原因の究明を行うとともに、この結果に基づく対応方針について、技術的かつ専門的見地から検討することを目的とする。

(調査検討会の構成員)

第3条 本調査検討会の構成員は、別表のとおりとする。

(委員長)

第4条 調査検討会に委員長を置く。

- 2 委員長は、調査検討会の議長となり、構成員の招集及び議事の進行にあたる。
- 3 委員長に事故があるときは、構成員のうちから委員長が指名する者がその職務を代理する。

(調査検討会の事務)

第5条 調査検討会は、次の各号に掲げる事項について調査・検討及び審議を行う。

- 一 原因の究明
- 二 今後の対応方針
- 三 その他調査検討会が必要と認める事項

(調査検討会幹事会の設置)

第6条 調査検討会が必要と認めた場合には、調査検討会幹事会を設けることとする。

(関係機関との協力)

第7条 調査検討会は、必要に応じ、関係機関に審議に必要な資料の提供又は調査検討会への出席を求めることができる。

(議事の公開)

第8条 調査検討会は、非公表、非公開とする。事務局は、調査検討会資料及び議事要旨について、調査検討会の確認を得たのち、速やかにホームページで公開する。

(守秘義務)

第9条 調査検討会の構成員は、調査検討会の活動上知ることができた内容について守秘義務を負う。ただし、中日本高速道路株式会社に対する関係では、これを適用しない。

(雑則)

第10条 この規約に定めるもののほか、調査検討会の運営に関して必要な事項は、委員長が調査検討会に諮って定める。

附則

1 この規約は、平成27年9月11日から施行する。

## 参考-1. 宇利トンネル周辺の環境（塩分）

事象発生箇所から海岸（湖）までの距離は下記のとおりであり、飛来塩分の影響は少ないと考えられる。

### 【海岸（湖）までの距離】

- ・南に 17.73km（遠州灘まで）
- ・南西に 18.59km（三河湾（渥美湾）まで）
- ・南東に 4.49km（浜名湖まで）浜名湖は汽水湖



図参考 1.1 宇利トンネルから海岸（湖）までの距離

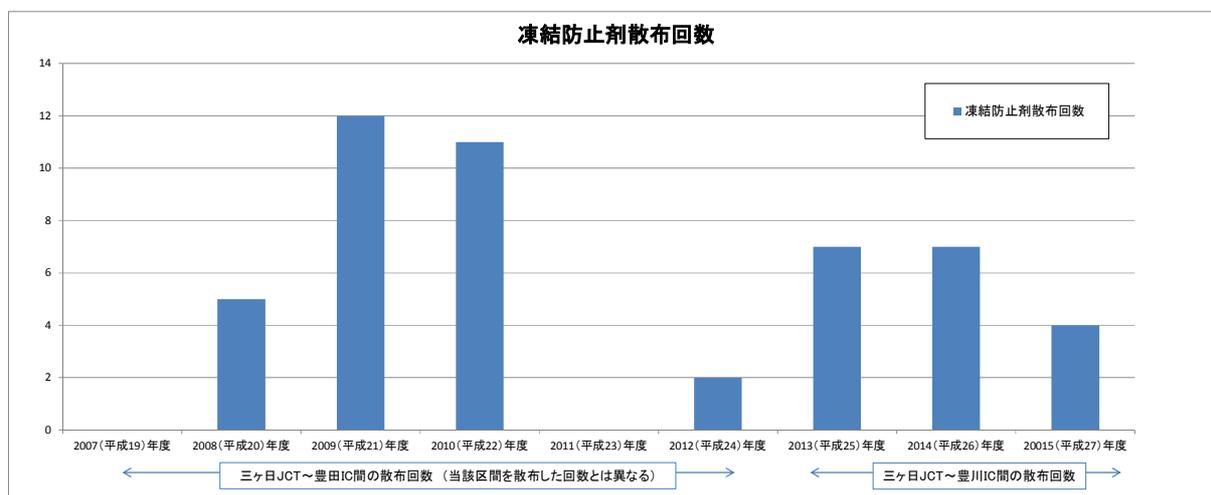
## 参考-2. 宇利トンネル周辺の環境（雪氷対策作業状況）

雪氷対策作業（凍結防止剤の散布作業）の回数は、年平均 6 回程度である。〔2013（平成 25）年から 2015（平成 27）年までの平均〕

1 回の散布量は、約 30g/m<sup>2</sup> である。2 車線の道路で 10m 間の凍結防止剤の散布量は、約 2.2kg/回である。（標準）

冬季において、路面凍結防止のため塩化ナトリウム（NaCl）を散布していることから、過去の散布回数を下記に示す。

年度	2007 (平成 19)	2008 (平成 20)	2009 (平成 21)	2010 (平成 22)	2011 (平成 23)	2012 (平成 24)	2013 (平成 25)	2014 (平成 26)	2015 (平成 27)
対象区間	東名高速道路 (路線単位のための記録のため、三ヶ日 IC～豊川 IC 間に限る回数は不明)						東名高速道路 (三ヶ日 IC～豊川 IC 間)		
散布回数	0	5	12	11	0	2	7	7	4



図参考 2.1 年度毎の凍結防止剤散布回数

### 参考-3. 宇利トンネル周辺の環境（降水量）

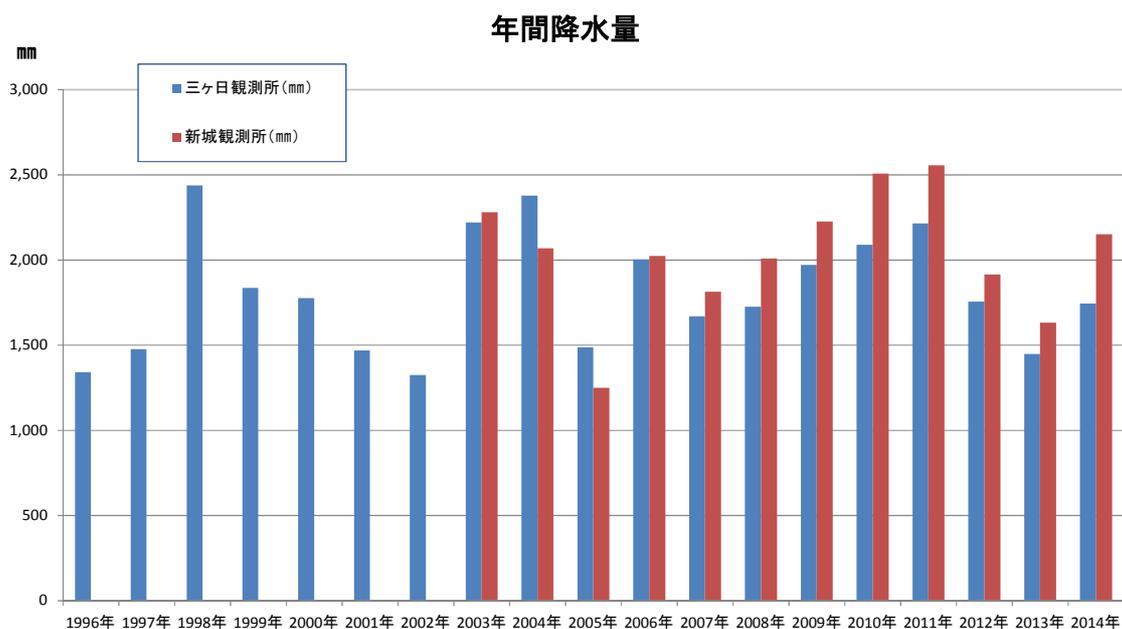
過去 19 年間の年間最大降水量は、2,556mm〔新城観測所 2011(平成 23)年で、年間最小降り水量は、1,249mm〔新城観測所 2005(平成 17)年〕である。

近年（直近 3 か年）の年間累計降水量は、1,449mm～2,150mm の範囲で推移している。

事象発生箇所付近に設置の気象庁観測所（新城・三ヶ日）による過去 19 年間の降水量データを下記に示す。

年	1996 (H8)年	1997 (H9)年	1998 (H10)年	1999 (H11)年	2000 (H12)年	2001 (H13)年	2002 (H14)年	2003 (H15)年	2004 (H16)年
三ヶ日観測所 mm]	1,341	1,476	2,438	1,836	1,776	1,470	1,325	2,221	2,377
新城観測所 [mm]	—	—	—	—	—	—	—	2,279	2,069

2005 (H17)年	2006 (H18)年	2007 (H19)年	2008 (H20)年	2009 (H21)年	2010 (H22)年	2011 (H23)年	2012 (H24)年	2013 (H25)年	2014 (H26)年
1,488	2,003	1,668	1,726	1,970	2,090	2,215	1,755	1,449	1,744
1,249	2,023	1,814	2,009	2,226	2,506	2,556	1,914	1,633	2,150



図参考 3.1 宇利トンネル周辺の年間降水量

参考-4. 宇利トンネル周辺の環境（交通量）

（上り線の交通量について）

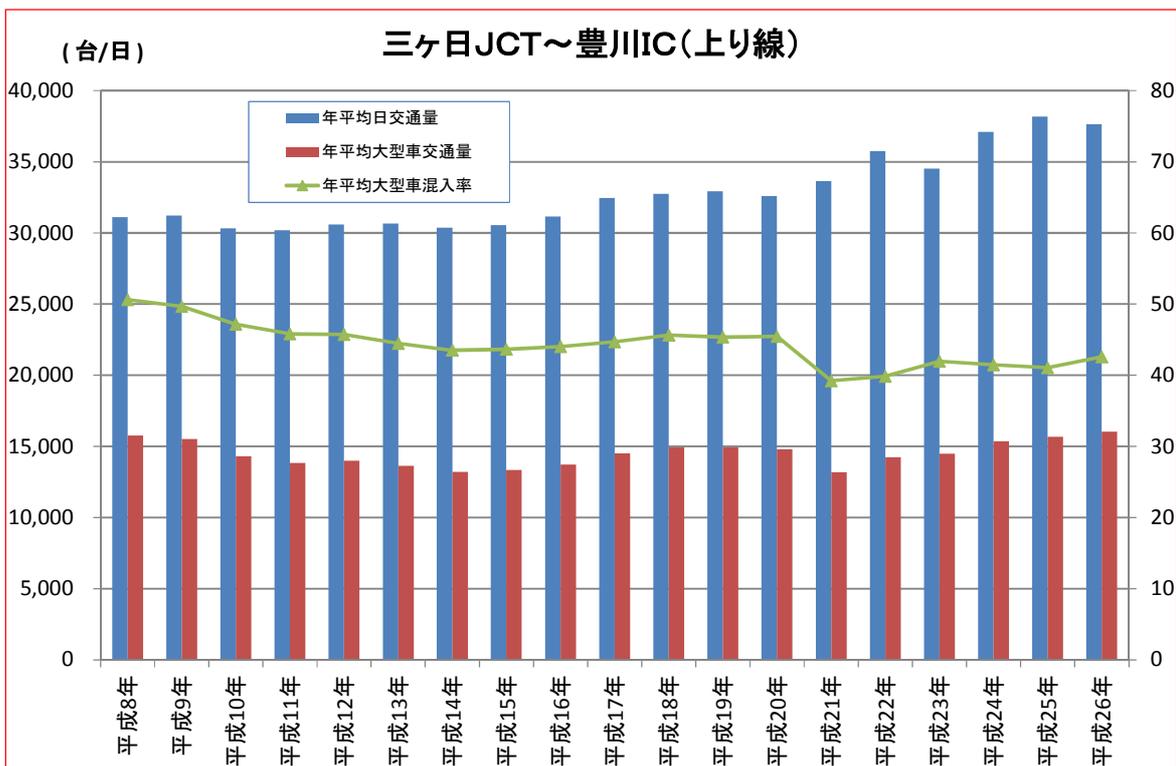
日平均交通量は、1996(平成8)年頃が31,000台/日程度、2010(平成22)年から35,000台/日程度、2012(平成24)年から37,500台/日程度となっている。

大型車の日交通量は、平均14,500台/日程度で、13,000台/日～16,000台/日の範囲で推移している。

年平均断面交通量 [1996(平成8)年～2014(平成26)年]

区間	方向	項目	1996 (平成8)年	1996 (平成9)年	1997 (平成10)年	1998 (平成11)年	1999 (平成12)年	2000 (平成13)年	2001 (平成14)年	2002 (平成15)年	2003 (平成16)年
三ヶ日 JCT	上り	年平均日交通量	31,121	31,221	30,315	30,196	30,584	30,659	30,378	30,560	31,157
		年平均大型車交通量	15,753	15,501	14,299	13,834	13,986	13,634	13,216	13,337	13,719
		年平均大型車混入率	50.6	49.6	47.2	45.8	45.7	44.5	43.5	43.6	44.0
I	下り	年平均日交通量	31,182	31,298	30,288	30,065	30,466	30,527	30,293	30,458	30,969
		年平均大型車交通量	15,884	15,666	14,384	13,838	13,949	13,601	13,181	13,278	13,607
		年平均大型車混入率	50.9	50.1	47.5	46.0	45.8	44.6	43.5	43.6	43.9
豊川 IC	上下	年平均日交通量	62,304	62,518	60,603	60,262	61,050	61,186	60,671	61,018	62,126
		年平均大型車交通量	31,636	31,166	28,683	27,673	27,935	27,235	26,396	26,615	27,326
		年平均大型車混入率	50.8	49.9	47.3	45.9	45.8	44.5	43.5	43.6	44.0

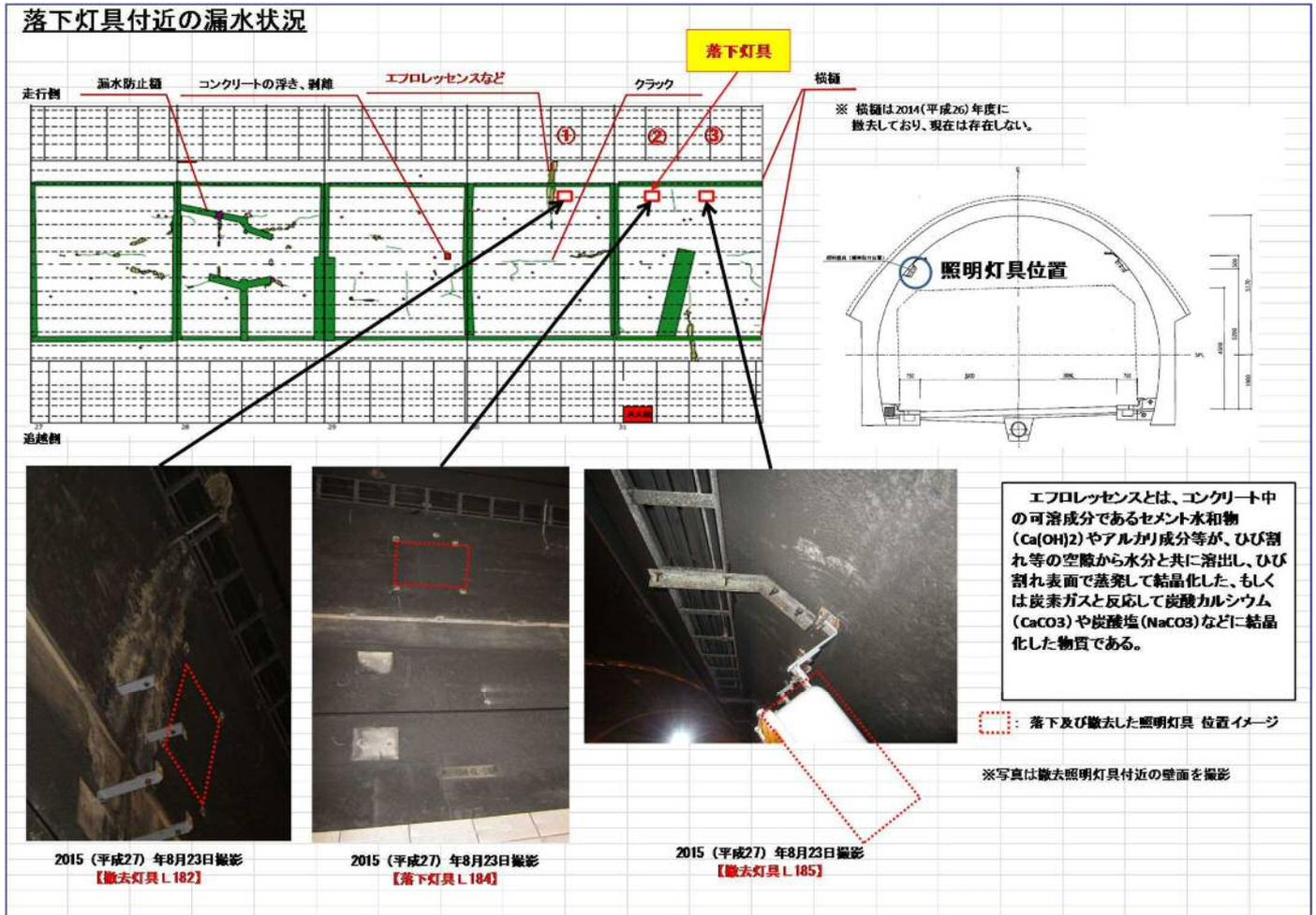
2004 (平成17)年	2005 (平成18)年	2006 (平成19)年	2007 (平成20)年	2008 (平成21)年	2009 (平成22)年	2010 (平成23)年	2011 (平成24)年	2012 (平成25)年	2013 (平成26)年
32,454	32,741	32,937	32,587	33,642	35,755	34,520	37,095	38,180	37,645
14,500	14,936	14,937	14,815	13,190	14,245	14,485	15,375	15,682	16,033
44.7	45.6	45.4	45.5	39.2	39.8	42.0	41.5	41.1	42.6
32,176	32,467	32,504	32,131	33,136	35,110	33,883	36,434	37,446	36,909
14,272	14,656	14,529	14,375	12,746	13,761	13,922	14,967	15,209	15,547
44.4	45.1	44.7	44.7	38.5	39.2	41.1	41.1	40.6	42.1
64,630	65,207	65,442	64,718	66,778	70,865	68,403	73,529	75,626	74,554
28,771	29,592	29,465	29,190	25,936	28,006	28,407	30,342	30,891	31,580
44.5	45.4	45.0	45.1	38.8	39.5	41.5	41.3	40.9	42.4



図参考 4.1 宇利トンネルの交通量

## 参考-5. 落下灯具付近の漏水状況

落下灯具付近で漏水跡は確認できなかった。



## 参考-6. その他の調査結果

今回の調査結果では、本編で記載したものの他に、灯具が点灯することの温度上昇の影響、通過車両が発生させる交通換気力による繰返し荷重についても調査した。

結果的には、今回の落下事象の原因にはならなかったと考えているが、得られた知見を、今後の維持管理に資するために、ここに調査結果を参考に記載する。

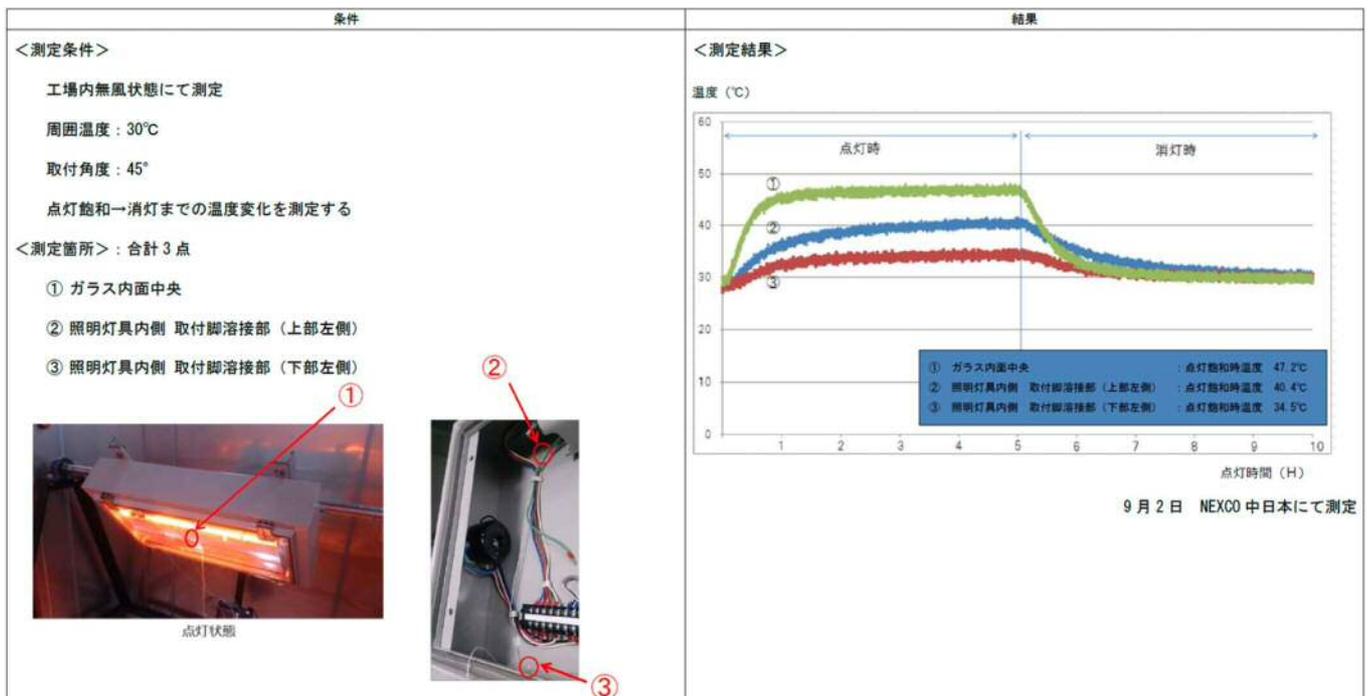
### 6-1. 照明点灯による温度上昇と点灯時間

照明灯具を通常の設定状態（前面ガラスを閉じた状態）で、内部のガラス面、内部の上部取付脚付近、外部の取付脚付近の温度を、定常状態から点灯→消灯させ計測した。

最も温度が上昇するガラス面中央で  $30^{\circ}\text{C} \rightarrow 47.2^{\circ}\text{C}$ 、上部取付脚付近で  $28^{\circ}\text{C} \rightarrow 40.4^{\circ}\text{C}$ 、下部取付脚付近で  $28^{\circ}\text{C} \rightarrow 34.5^{\circ}\text{C}$  であった。灯具本体は厚さ 1.2mm の鋼製であることから、灯具の外側でもほぼ同じ程度に温度上昇があると推定される。

トンネル照明は、トンネルの外の明るさに応じて、灯具の点灯、消灯により、トンネル内の明るさを制御しているため、灯具によって、点灯時間が異なる。点灯時間が長いものは、前記の結果から温度が高い時間が長くなる。腐食は、温度が上昇すれば進行は早くなる。また、温度の上昇と、低下を繰り返すことで、乾燥と湿潤を繰り返すことも腐食を進行する要因（第4章参照）となると考えられることから、点灯時間の調査も実施した。

結果は、点灯時間の長短による劣化（腐食の進行）に顕著な差異は見られず、影響は確認できなかった。



図参考 6.1.1 点灯による灯具の温度上昇試験結果

落下した灯具と、落下事象発生後の点検で撤去した灯具の日平均点灯時間の調査結果を図参考 1.2 に示す。

同じ点灯時間となる灯具のグループがあり、最右欄に点灯時間が同じグループの灯具数と、撤去した灯具数を記載している。例えば、最上段、1日平均0:24点灯する灯具が、36灯あり、そのうち撤去した灯具が1灯ということを示している。

点灯時間の短い灯具の撤去数が多い傾向はあるものの顕著な差異はなく、また、設置場所（入口からの距離）の影響もあることから、点灯時間と劣化の程度との間に有意な関係性は見出されなかった。

配置	照明灯具番号	光源種別	各年度における日平均点灯時間					備考	該当照明灯具数 /同一点灯時間 照明灯具全数
			2013 (平成 24) 年度	2014 (平成 25) 年度	2015 (平成 26) 年度	2016 (平成 27) 年度	平均		
走行側	L- 11	NH360	0:23	0:17	0:23	0:24	短い 0:24	緊急撤去した照明灯具	1/36
	L- 7	NH360	1:10	0:48	0:59	0:33	0:52	緊急撤去した照明灯具	2/35
	L-184	NX 90						落下した照明灯具	
	L- 4	NH360	5:52	5:51	5:29	5:41	5:43	緊急撤去した照明灯具	2/40
	L-182	NX 90						緊急撤去した照明灯具	
	L- 9	NX180	9:41	9:33	9:25	10:49	9:58	緊急撤去した照明灯具	1/40
	L-185	NX 90	11:48	11:42	11:39	13:32	12:10	緊急撤去した照明灯具	1/69
	L-210	NX 90	18:07	18:05	18:28	18:23	18:16	緊急撤去した照明灯具	1/35
		24:00	24:00	24:00	24:00	長い 24:00		0/35	
追越側	R- 5	NH360	0:23	0:17	0:23	0:24	短い 0:24	緊急撤去した照明灯具	1/37
	R- 7	NH360	1:10	0:48	0:59	0:33	0:52	緊急撤去した照明灯具	3/36
	R- 19	NH360						緊急撤去した照明灯具	
	R- 31	NH360						緊急撤去した照明灯具	
			5:52	5:51	5:29	5:41	5:43		0/40
	R-111	NX135	9:41	9:33	9:25	10:49	9:58	緊急撤去した照明灯具	1/39
	R- 1	NX 90	11:48	11:42	11:39	13:32	12:10	緊急撤去した照明灯具	1/34
	R- 2	NX 90	18:07	18:05	18:28	18:23	18:16	緊急撤去した照明灯具	1/67
	R- 32	NX 90	17:45	17:42	17:15	19:12	17:58	緊急撤去した照明灯具	1/34
			24:00	24:00	24:00	24:00	長い 24:00		0/4

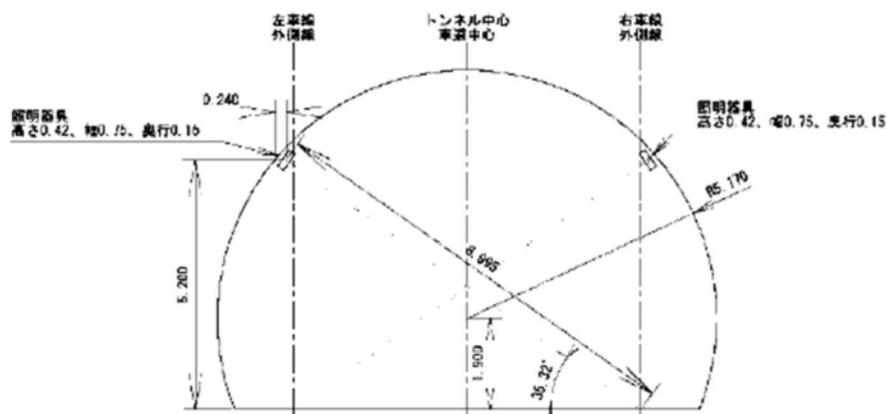
図参考 6.1.2 点検で撤去した灯具の点灯時間

## 6-2. トンネル内風圧のシミュレーションによる推定

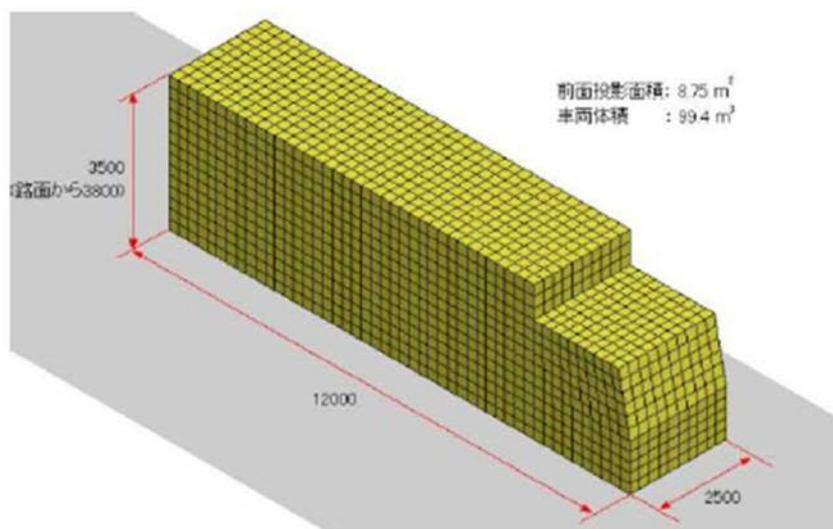
落下した宇利トンネル照明灯具に対し、トンネル内風圧により生じる繰り返し荷重の疲労への影響を確認するために、シミュレーションにより風圧を推定する。

宇利トンネルの内空断面、トンネル照明灯具、照明灯具位置をシミュレーション上で再現し、車両制限令上で最大サイズ（車長：12m車幅：2.5m車高3.5m）の大型車モデルが左側車線を通過した際の照明灯具に作用する風圧を推定した。

結果は、照明灯具に係る風圧は、大型車が照明灯具直下を通過した際に最大となり、照明灯具に作用する力は、灯具垂直面で0.31N、灯具側面で2.78N、灯具上面で0.63Nと非常に小さいと推定できる。これは灯具の疲労に及ぼす影響はほとんどないと考えられるレベルの値である。



図参考 6.2.1 シミュレーションで用いたトンネル断面と照明灯具



図参考 6.2.2 通過する大型車モデル

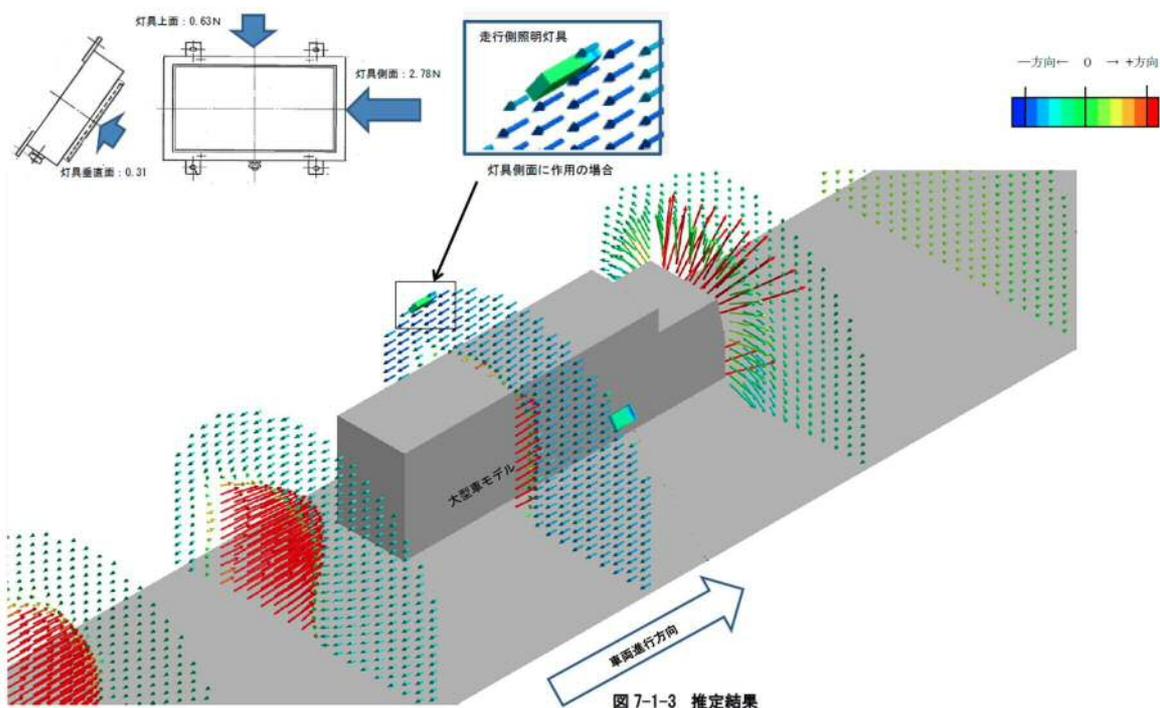


図 7-1-3 推定結果

図参考 6.2.3 風圧のシミュレーションによる推定結果