

鉄道総研報告

▶ 特集：材料技術 ◀

第36巻 第11号

2022年11月

展望解説

- 材料技術に関する研究開発と今後の展望
..... 松井元英 (1)

特集論文

- 左官用ジオポリマーモルタルの開発
..... 上原元樹, 佐藤隆恒 (5)
- 水平面に適用可能なコンクリート表面の水分浸透抵抗性評価手法
..... 西尾壮平 (11)
- 鋼橋におけるめっき・溶射材料への塗装による防食性向上手法
..... 坂本達朗 (17)
- 回折 X 線を用いた表面層の分析によるレール削正量の検討
..... 兼松義一, 松井元英, 上東直孝 (23)
- 車軸軸受のフレッチング摩耗防止に対するセグメント構造炭素膜の効果
..... 岡村吉晃, 鈴木大輔, 生駒一樹, 永友貴史 (29)
- 低温流動性を向上したギヤ油による起動加速度の向上
..... 木川定之, 鈴木淳一, 生駒一樹 (37)
- 自律型損傷検知システムによる車軸軸受の損傷検知
..... 間々田祥吾, 太田達哉, 宮本修史, 岡村吉晃 (43)

特集：材料技術

材料技術に関する研究開発と今後の展望

松井 元英*

R&D Activities and Future Perspectives in Material Technology

Motohide MATSUI

Various kinds of materials are used as components of systems not only in railways but also in other industrial fields. So far, advances in material technology for structural and functional materials have contributed greatly to the development of railways. Current R&D activities mostly focus on materials with longer service life, the clarification of material deterioration mechanisms and so on. However, the pandemic of COVID-19 and rapid changes in the environment with climate change will have a significant impact on future railways. It is necessary that material technology will adapt to this drastic transition in order to keep contributing to the sustainable development of railways.

キーワード：鉄道用材料，構造材料，機能材料，材料開発，現象解明，劣化状態分析

1. はじめに

鉄道に限らず，システムを構成する上で，材料は様々な用途・目的で使用される。大別して，材料にはシステムの構造を維持するために，材料強度や耐久性等を重要視した構造材料や，特徴的な機能発現による新たな特性を付与するために，電気的，磁氣的，光学的，力学的等の特性強化を重要視した機能材料がある。構造材料と機能材料に求められる特性は，一般的にトレードオフで両立は難しい場合が多いため，例えば，構造材料に新たな機能性を付与する場合，必要な部位に別の処理を施すことで，目的とする機能性付与が可能か検討することになる。

鉄道に目を向けてみると，鉄鋼，アルミや銅といった金属系材料，コンクリートやセラミックスといった無機系材料，ゴム，塗料や潤滑油といった有機系材料，炭素系等の複合材料が構造的，機能的な要求・目的に応じて使い分けられている。これらの材料は，150年に及ぶ長い鉄道の歴史の中で，耐久性不足の解消や，新たな機能付加要求等に，繰り返して挑戦してきたことで，発展してきたと言っても過言ではない。しかし，昨今の鉄道を取り巻く環境は，人口減少による労働力不足，コロナ禍による労働環境の変容，デジタル技術革新等で，これまでと比して大きく変化してきている。また，2015年12月にCOP21で採択されたパリ協定に端を発し，持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable Development Goals）の一つである気候変動対策に対して，カーボンニュートラルの実現が謳われている。このような周辺環境の変化に対して，長年培ってきた知識・経験では対応しきれない場合があると予想され，新たに挑戦する気持ちで，柔

軟に適應していくことが，今後の材料技術に求められると考えられる。

本稿では，最近の材料技術分野での取り組みの中で，主に新材料の研究開発，構造材料の劣化機構の解明や劣化状態の評価手法，機能材料を活用した損傷劣化に対する対策手法について，今後の展望とともに紹介する。

2. 最近の材料の研究開発

鉄道総研での材料に関わる研究開発の対象は，車両，軌道，電力，信号通信，土木構造物等多岐にわたる。また，鉄道における材料は供用期間にもともと有していた特性が劣化，変化していくことが多いため，その時点での材料の状態を定量的に評価する手法，その評価手法をもとにした劣化メカニズム解明や，新材料による対策手法等が検討され，鉄道の現場へフィードバックしていくことを目標としている。ここでは，そのうちのいくつかを紹介する。

2.1 寒冷地対応の新幹線車軸軸受油の開発¹⁾

軸受とは，回転する輪軸を両側で支える部材であり，軸受内部は油等で潤滑されている。新幹線の路線網が寒冷地に拡大することで，現行油の低温での流動性の低下が懸念された。この課題を解決するために，当初，合成油を用いて，低温流動性の改善を図った。しかし，経年により赤く変色することが，現場作業員による油の健全状態の判断を難しくし，メンテナンス上の課題となっていた（比較油）。そこで，図1に示すように，高度精製鉱油をベースにして，添加剤を調整することで，経年による赤色化を抑え，メンテナンス上の課題を回避しつつ，低温流動性も確保できる機能を付与した新幹線車軸軸受

* 材料技術研究部長



図1 赤色化を抑えた開発油

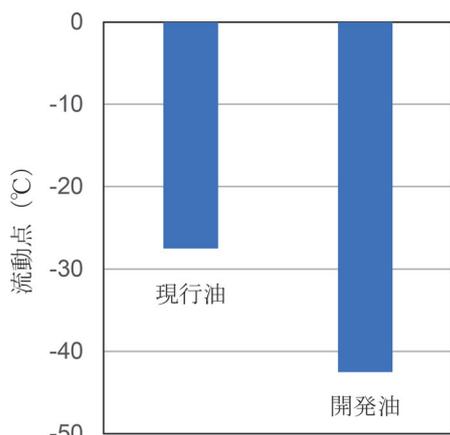


図2 現行油と開発油の流動点比較

油を開発した。

開発油の低温流動性を図2に示す。図の縦軸に示す流動点が高いほど、低温での流動性が高いことを示す。現行の軸受油と比較して、開発したものは -40°C 以下でも流動性を有することがわかった。また、実物の車軸軸受を使用した室内試験を行った結果、80万km相当の耐久試験後においても、開発油に特に異常は認められず、良好な耐久性を有することがわかった。

歯車装置に使用されるギヤ油についても、寒冷地対応を進め、低温流動性を高め、起動加速度を向上させたものを開発しており、これらの成果が寒冷地での新幹線の安定走行に資すると考えられる。

2.2 ジオポリマーを活用した補修材の開発

ジオポリマーは、セメントと比較して、その製造時に産業副産物を大量に活用できるだけでなく、 CO_2 発生量も低減できることから、環境負荷低減の有効な手段の一つとして期待されている構造材料である。また、セメントの劣化要因であるアルカリシリカ反応、酸腐食等に対する耐性が高い特徴を有する。図3に示すように、この特徴を生かして、ジオポリマーを利用したPCまくらぎや短まくらぎをこれまでに開発してきた²⁾。

近年、この高い耐性を利用して、左官作業用ジオポリマーモルタルを開発している³⁾。これは、通常のセメン



(a) PCまくらぎ (b) 短まくらぎ
図3 ジオポリマーを利用したまくらぎ

トモルタルでは、腐食環境下で補修が容易でない箇所への適用が期待される。

2.3 新幹線パンタグラフ停止位置近傍でのトロッコ線摩耗率増加機構の解明⁴⁾

新幹線では、電車線設備を構成する構造材料としてのトロッコ線の摩耗率が高速走行区間に比べて、駅構内等の低速走行区間で高くなることもある。これがトロッコ線の張替頻度の増加を招き、メンテナンスコスト削減の妨げとなっている。この摩耗率増加の原因を探るため、ある駅構内のトロッコ線の摩耗分布と、その区間を走行する車両の走行速度を調べた結果、図4に示すように車両が停止位置に近づき、走行速度が減少するにつれてトロッコ線摩耗率が急激に増加することがわかった。そこで、図5に示すように、室内試験で摩擦係数の速度依存性を調べたところ、低速になるとともに、摩擦係数が急激に増加することが判明した。図6に示すように、この摩擦係数の増加は、剥離状の摩耗（デラミネーション摩耗）を促進していることが使用後のトロッコ線の断面金属組織観察から明らかとなった。

剥離状の摩耗を抑制するため、摩擦係数を低減できるような潤滑方法として、グリース潤滑を試験し、摩耗率が大きく減少することを確認し、今後、実設備での検証を検討していく予定である。

摩耗に限らず、疲労や劣化といった材料を使用していく上で考慮しなければならない初期特性からの時間変化については、その機構の詳細な理解が効果的な対策につながると考えられる。

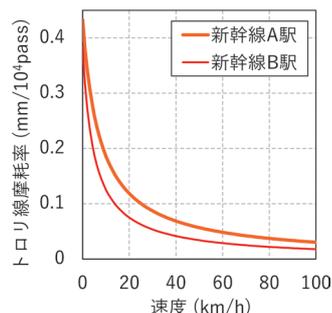


図4 トロッコ線摩耗率の速度依存性

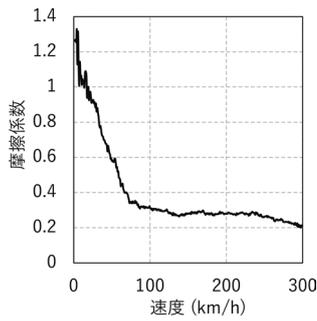


図5 摩擦係数の速度依存性

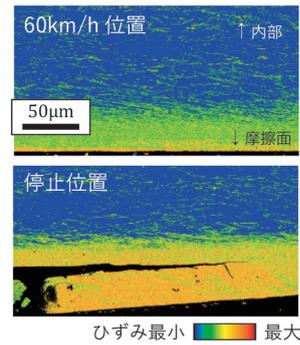


図6 実トロリ線断面のひずみ解析結果

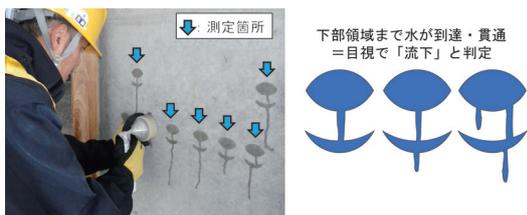
2.4 散水試験によるコンクリートの表層品質評価

鉄道での主要な構造材料の一つで高架橋等で使用される鉄筋コンクリートでは、引張力を負担する鉄筋を腐食させない必要がある。この鉄筋を保護する部分のコンクリートについては、所定の強度を有することに加えて、鉄筋の主な劣化因子となる水分が浸透しないように、一定の厚みと高い水分浸透抵抗性が要求される。しかし、この部分のコンクリートについては、外観上の不具合が見られなくても、施工の仕方に依存して、仕上がり状態が変化する。この仕上がり状態を「表層品質」と称して、表層品質に影響する水分浸透抵抗性を現地で簡易評価する散水試験法を開発してきた⁵⁾。

散水試験とは、乾燥したコンクリートの表面に少量の水を散布して、表層の吸水状態を目視で評価する方法である。図7に示すように、開発した散水試験法（以下、WIST）では、手動のスプレー器具を用いて、同一箇所ですべて一定の間隔で少量の水の散布を繰り返す。図7(a)に示すような形状で、水をスプレー散布し、図7(b)に示すように、散布後の水の流下を目視で確認した時点で測定を終了する。表層品質が高く、吸水しにくい緻密なコンクリートほど少ない散布回数で水が流下する。しかし、WISTは鉛直部材の柱や壁の側面に特化した手法であったため、昨今の床面等の水平箇所での測定ニーズの高まりから、当該箇所でも適用可能な方法を開発している⁶⁾。

2.5 X線回折を用いたレール削正量の検討

構造材料としてのレール上を車輪が繰り返し転がり接触することで、レール上の車輪との接触箇所（転走面）

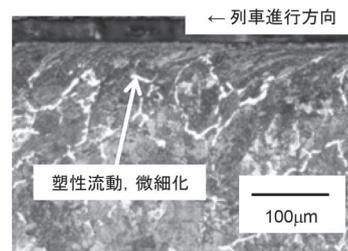


(a) 測定状況 (b) 水の流下状況例

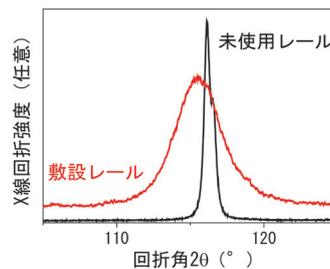
図7 散水試験の概要

で、転がり疲労が発生する。この転がり疲労が蓄積すると、シェリング等のレール損傷に至る場合がある。このレール損傷を抑制する手段の一つとして、事業者では削正車によるレール削正を実施し、転がり疲労を受けた表面層を除去している。しかし、このレール削正には一定の基準があるものの、効率的なレール削正を実施していくには、転がり疲労を受けたレールの表面層の疲労状態を把握する必要がある。

そこで、X線回折（以下、X線フーリエ解析）を用いて、レールの表面層を分析してきた。X線フーリエ解析の特徴として、図8(a)に示すように、転がり疲労を受けたレールの断面金属組織の表面近傍では、もともとの金属組織には見られない変化として、金属組織が一定方向に流れて見える塑性流動や、金属組織の微細化が観察される。このように変化した箇所に対して、X線を照射すると、図8(b)に示すように、未使用レールと比較して、ブロードなX線の回折ピークが得られる。こ



(a) 転がり疲労を受けたレールの断面金属組織



(b) 回折X線の形状変化例

図8 転がり疲労を受けたレール断面金属組織と回折X線の形状に与える変化

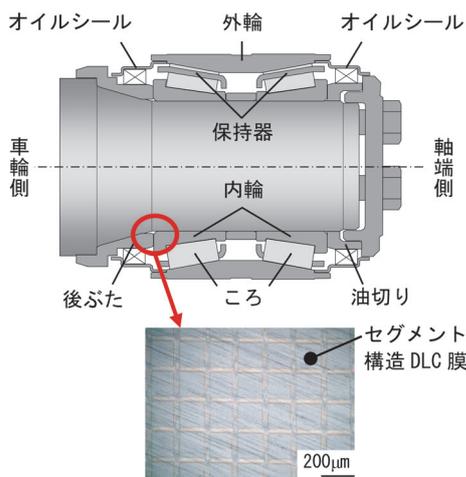


図9 車軸軸受とダイヤモンド状炭素 (DLC) 膜の付与位置

の変化を X 線フーリエ解析で定量化することで、転がり疲労状態を評価することができる。これまで、レール削正履歴のない経年レール等へ当該解析手法を適用してきたが、経年がさらに進んだレール等の評価を行い、効率的なレール削正手法を検討した⁷⁾。

2.6 車軸軸受のフレッチング摩耗抑制へのダイヤモンド状炭素 (DLC: Diamond Like Carbon) 膜の適用

鉄道車両用に使用されている車軸軸受は、車両の重量を支え、輪軸の安定的な回転を維持する車両構成部材の一つである。この構成部材である車軸軸受の部品の一部にフレッチングが発生する場合がある。フレッチングとは、2物体の接触部で発生する微小なすべりに起因する摩耗等の損傷を言う。車軸軸受の場合、フレッチングで生じた摩耗粉が車軸軸受内部に混入すると、軸受部品の摩耗や、潤滑油等の劣化を促進させ、メンテナンス上での問題となる。

このフレッチング摩耗の抑制策として、2つの方向性から検討した。一つは、接触部での接触面圧の緩和である。接触部で発生する不均一な面圧分布や、回転に伴う面圧の振幅がフレッチング摩耗の発生と相関があることを見出し、フレッチング摩耗が発生しやすい現行車軸軸受後ぶたについて、有限要素解析や室内試験を通して、それを抑制できる形状を開発した。もう一つは、図9に示すように、後ぶたの接触部に摩擦係数を低減する機能性被膜を付与することである。機能性被膜として、材質的に後ぶたと密着し、摩擦係数を低くできるセグメント構造化 DLC (ダイヤモンド状炭素膜) を検討し、実物の車軸軸受を用いた室内試験でフレッチング摩耗を抑制

できることを確認した⁸⁾。

3. まとめ

鉄道には様々な材料が構造材料、機能材料として使用されている。これまで、材料に関わる研究開発が鉄道の維持・発展に貢献してきたことは言うまでもないが、引き続き高い安全性、信頼性、耐久性、高機能性等が材料の研究開発には求められると考えられる。しかし、近年、大きく変化している鉄道を取り巻く環境への適応が益々求められると考えられ、これまで以上に、環境負荷低減やカーボンニュートラルといった社会的要請を意識する必要がある。さらに、急速に進歩している AI 等のデジタル技術が、将来的に材料の研究開発手法を大きく変えるかもしれない。このような変化に柔軟に対応し、鉄道の持続的発展を今後も支えていけるように、研究開発を進めていきたいと考えている。

文 献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果 (2021 年度) : <https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2021/1-10.html> (参照日: 2022 年 8 月 2 日)
- 2) (公財) 鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果 (2012 年度) : https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2012/02/02_06.html (参照日: 2022 年 8 月 2 日)
- 3) 上原元樹, 佐藤隆恒: セメントを使用しない左官用ジオポリマーモルタルの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.11, pp.5-10, 2022
- 4) (公財) 鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果 (2021 年度) : <https://www.rtri.or.jp/rd/seika/2021/5-24.html> (参照日: 2022 年 8 月 2 日)
- 5) 西尾壮平: 散水試験によるコンクリート表層品質評価に及ぼす影響要因, 鉄道総研報告, Vol.34, No.10, pp.11-16, 2020
- 6) 西尾壮平: 水平面に適用可能なコンクリート表面の水分浸透抵抗性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.11, pp.11-16, 2022
- 7) 兼松義一, 松井元英, 上東直孝: 回折 X 線を用いた表面層の分析によるレール削正量の検討, 鉄道総研報告, Vol.36, No.11, pp.23-28, 2022
- 8) 岡村吉晃, 鈴木大輔, 生駒一樹, 永友貴史: 車軸軸受のフレッチング摩耗防止に対するセグメント構造炭素膜の効果, 鉄道総研報告, Vol.36, No.11, pp.29-35, 2022

左官用ジオポリマーモルタルの開発

上原 元樹* 佐藤 隆恒*

Development of Plastering Geopolymer Mortar

Motoki UEHARA Takatsune SATO

Geopolymer (GP), which does not use Portland cement, has been attracting attention as a new repair material because of its high CO₂ reduction and acid resistance. However, its poor plastering workability has been a issue to be developed for its practical use. Therefore, we developed a prototype GP mortar for plastering work using fly ash and blast furnace slag fine powder without glass water by the original method named "Si component powder addition in-situ dissolution method". As a result, the developed GP mortar showed good workability, high resistance to acid deterioration, and no cracking under the condition of an alkali component/water molar ratio of 0.15 and a Si component/alkali component molar ratio of 0.20. Judging from these results, the developed GP mortar is feasible for practical purposes.

キーワード：ジオポリマー, 左官, 常温養生, モルタル, 溶解法

1. はじめに

鉄道建設において広く用いられているセメントは、製造時に CO₂ を排出することから、排出量の少ない代替材料が求められている。また、環境保全の観点から廃棄物や副産物の利用促進も課題となっている。ここで、日本コンクリート工学会に設置された「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」において、「セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物水溶液を用いて硬化させたもの」と定義されたジオポリマー（以下、GP）は、計算方法や配合にもよるがセメントコンクリートに対して 80% の CO₂ 削減効果を有すると報告されている¹⁾。また、GP は高炉スラグ微粉末（以下、BFS）やフライアッシュ（以下、FA）等の産業副産物を多量に使用できる点で新しい環境負荷低減材料としても注目されている。

鉄道総研では FA を BFS で一部置換した原料を用いて、GP プレストレストコンクリートまくらぎ²⁾、繊維補強 GP 短まくらぎ³⁾ を蒸気（加温）養生で作製し、それらを営業路線に試験敷設した⁴⁾。また GP の配合、養生温度とその諸特性を検討し、各種作製条件と GP の諸性質との相関を示した⁵⁾。さらに、水ガラスを使用せずに、水ガラスのケイ素（Si）成分を産業副産物であるシリカフェーム（以下、SF）として、CO₂ 排出量をさらに低減し、広い配合範囲で GP を作製可能とした「Si 成分その場添加溶解法」（以下、溶解法と記す）を提案している⁵⁾。

一方、GP の高耐火性、高耐酸性を活かして、それを補修材料とする試みも行われており⁶⁾、高耐糖性や放射性廃棄物への適応等、セメント材料では使用できない箇所への適用も進められている。

しかし、GP は硬化前性状（フレッシュ性状）における粘性の高さから左官性が悪いこと、常温養生では収縮の影響が大きくひび割れが生じやすいこと等⁷⁾、実用化に際して問題が残っていた。そこで、本論文では左官施工用の材料として、実用的に補修に使用できる GP モルタルの開発を志向して種々の検討を行った。

2. GP モルタルの作製と各種試験

2.1 各種試験用 GP モルタル供試体の作製方法

GP モルタルの作製は、一般的には水酸化アルカリ溶液とケイ酸アルカリ溶液（水ガラス）の混合溶液を使用する（以下「一般法」と呼ぶ）。ただし、一般法では凝結時間のコントロールが難しい上に左官作業時の粘性が高く、コテならし性が悪いことから実用化が困難であった。そこで、鉄道総研で開発した図 1 に示す「溶解法」を左官用 GP モルタルの常温養生による作製に適用した。

2.2 各種試験用 GP モルタルの作製配合

表 1 は各種試験用 GP モルタル供試体の作製における使用材料、表 2 はその配合である。なお、筆者らは配合記述法として、使用する水酸化ナトリウム（NaOH）と水（H₂O）の各モル比を A/W 比、SF と NaOH におけるケイ酸（SiO₂）と NaOH の各モル比を Si/A 比、水分量と粉体（SF を除く FA+BFS 分の体積）の体積比を W/P と記述する方法を提案しているため、その記述法

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

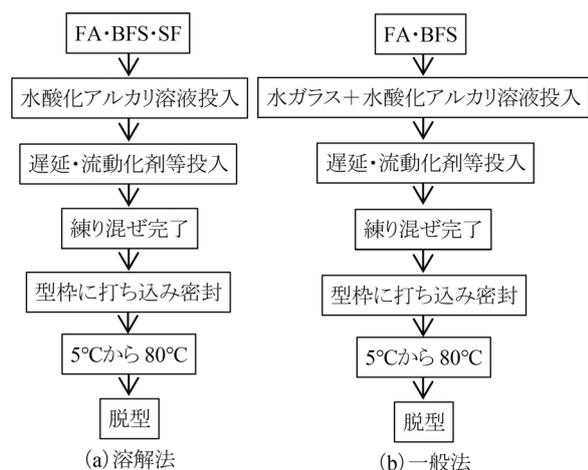


図1 GP作製法の概要

表1 使用材料

材料名	記号	規格等
フライアッシュ	FA	JIS I種 (JIS A6201) 密度：2.40g/cm ³
高炉スラグ微粉末	BFS	ブレン値 4000cm ² /g (JIS A 6206) 石膏添加：無 密度：2.91g/cm ³
細骨材	S	JISセメント強さ試験用標準砂
シリカフェーム	SF	JIS A 6207相当

表2 GPモルタル供試体の配合

配合	FA	BFS	SF	骨材	NaOH	水	GNa	A/W	Si/A	W/P
	kg/m ³						モル比			体積比
1	314.1	254.0	17.3	1570.6	119.8	111.7	2.62	0.15	0.20	0.80
2	315.8	255.4	8.7	1579.2	120.5	112.2	2.63	0.15	0.10	0.80
3	312.4	252.6	25.8	1562.3	119.2	111.1	2.60	0.15	0.30	0.80
4	317.1	256.4	11.6	1585.4	80.6	133.3	2.64	0.10	0.20	0.80
5	404.0	326.6	19.4	1346.7	134.1	125.1	3.37	0.15	0.20	0.69
6	311.4	251.8	22.9	1557.2	158.4	90.5	2.60	0.20	0.20	0.80

GNa: グルコン酸ナトリウム, NaOHは48%濃度の水溶液

表3 コンクリート板への左官用GPモルタルの配合

配合	FA	BFS	SF	骨材	NaOH	水	GNa	A/W	Si/A	W/P
	kg/m ³						モル比			体積比
A	309.3	250.0	18.5	1546.3	245.9*	2.58	0.15	0.20	0.86	
B	305.9	247.3	19.3	1529.3	256.7*	2.55	0.15	0.20	0.91	
C	307.8	248.8	13.2	1538.9	241.8**	2.57	0.10	0.20	0.93	

GNa: グルコン酸, *: 溶液濃度 25.5%, **: 溶液濃度 18.5%

に則って表2は記述した。

表3は表2の配合で作製した供試体試験結果から左官作業性の良い配合1, 低コスト配合4を基に, より実施工に近い形で普通ポルトランドセメント(以下, OPC)モルタル板に左官施工したときの配合であり, それぞれ配合1を基にした配合をA及びB, 配合4を基にした配合をCと記す。

2.3 分析方法

表2の配合のGPペースト部分の生成物を粉末X線回折により同定した。

また, JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して圧縮強度を, JIS R5201「セメントの物理試験方法」に準拠してモルタルフロー値を測定した。

硫酸浸漬試験では, 5%濃度の希硫酸にφ50×100mmのGPモルタル供試体を28日間浸漬し, 上記方法と同様に圧縮強度を測定した。

耐熱性試験では, GPモルタル供試体を電気炉により600~1000℃で2時間保温(昇温速度: 20℃/分, 降温速度: 徐冷)した後, 上記同様に圧縮強度を測定した。また, 文献8に準拠して製氷皿に打ち込んだ棒状GPペースト供試体を電気炉で加熱し, 加熱冷却後の形状から熔融状況を評価した。

2.4 左官作業性及び諸特性確認試験

100mm×100mm×10mmの合板製型枠に表2の配合で作製したGPモルタルを打ち込み, コテ切れ, 伸び等の作業性を評価した。打ち込み試料は20℃環境下に静置し, 白華発生状況, ひび割れの有無を確認した。

表3で示した配合のGPモルタルをハンドミキサーで作製し, OPCモルタル板に縦400×横900×厚さ10mmの寸法で打ち込み, 左官作業性を確認した上で神奈川県横浜市磯子区に屋外暴露した。なお, 施工に当たってモルタル板の表面のほこりを拭き取る程度で特別な処理は行っていない。また, 建研式の接着力試験器によりGPモルタルとOPCモルタル板との付着強度を材齢28日で測定した。

3. フレッシュ性状, 圧縮強度と生成物

図2及び図3に表2の配合で作製したGPモルタルのフレッシュ性状と圧縮強度を示す。流動性の尺度となるフロー値に配合による大きな差は認められず, 特にSi/A比の相違による差は小さかった。一方, 圧縮強度はA/W比0.10の配合4でやや低く, 粉体量が多くW/P比の小さい配合5でやや高かったが, 配合による差は文献⁹⁾における加温養生, 溶解法で作製した試料と比較して小さかった。常温養生では加温養生と比較して, 活性フィラーにおいてBFSの反応割合が増加することが報告されている¹⁰⁾。特に「溶解法」の常温養生では, SFの溶解が遅く, 反応性に富む水ガラス成分が少なくなるためアルカリ刺激によるBFSの反応が主となりA/W比の圧縮強度への影響が小さくなったものと考えられる。

図4は表2のペースト部分の配合で作製したGPペーストのX線回折図である。なお, ペースト部のみの試料となるため配合1とA/W比, Si/A比が同様の配合5の測定は実施していない。結晶質物質はFA起源の石英とムライトである。2θ(CuKα)=29.4°にはBFS起源のケイ酸カルシウム水和物(C-S(A)-H)に起因するブロー

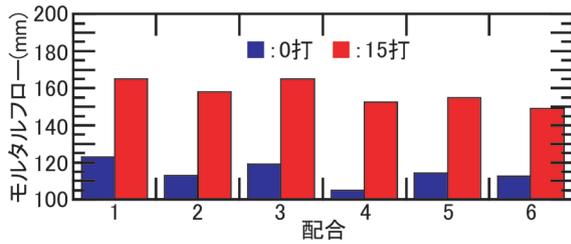


図2 GP モルタルのフレッシュ性状

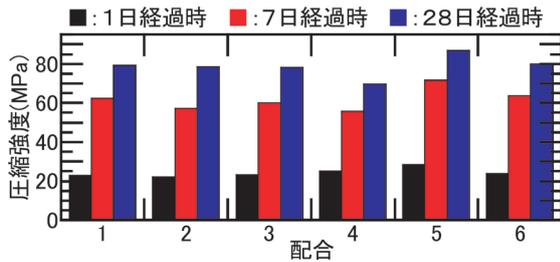


図3 GP モルタルの圧縮強度

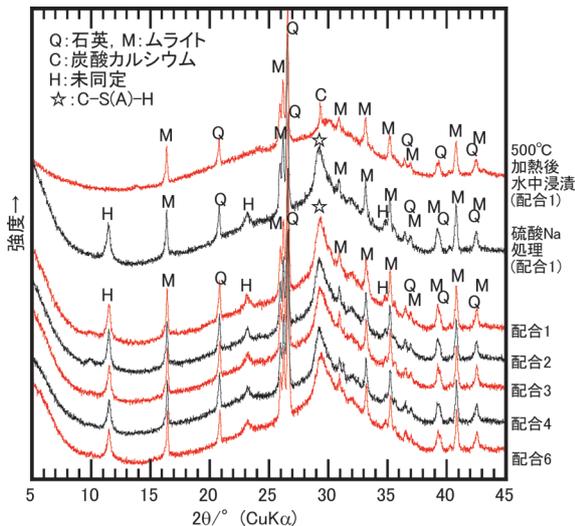


図4 GP ペーストの粉末 X 線回折図

ドなピークが認められた。各配合におけるピーク強度、プロファイルに大きな差は認められず、生成物に大きな差は無い。また、 $2\theta(\text{CuK}\alpha)=11.4^\circ$ に文献⁹⁾等における加温養生で作製した場合に観察されなかったピークが全ての試料で認められた。BFSはアルカリ刺激によりハイドロタルサイトが生じることが報告されている¹¹⁾が、走査型電子顕微鏡で生成物を精査しても、ハイドロタルサイトは確認されず、図4に示すようにハイドロタルサイトの確認試験である硫酸Na溶液処理及び500°C加熱後の水中浸漬において、ピーク位置の移動やハイドロタルサイトに特徴的な再生成¹²⁾が認められなかったことから、現在の所、本物質は同定されていない。

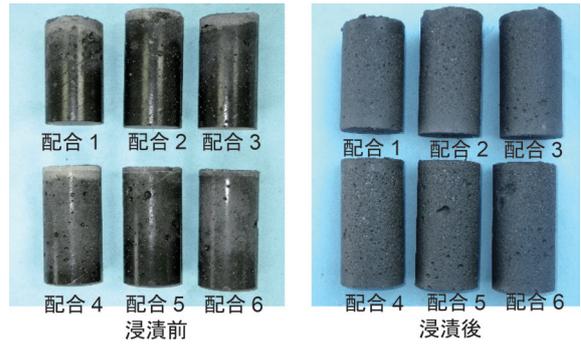


図5 硫酸浸漬前後写真

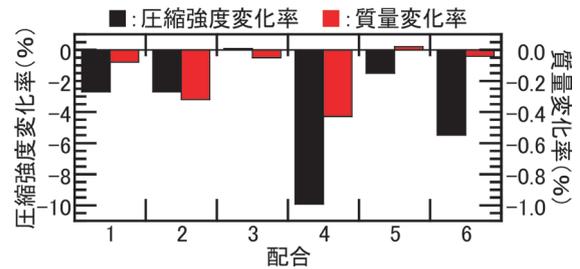


図6 硫酸浸漬試験前後の圧縮強度及び質量の変化率

4. GP モルタルの諸性質

図5はGPモルタルの硫酸浸漬前後の写真であり、図6は硫酸浸漬28日経過時の質量変化率と圧縮強度の変化率を記したものである。硫酸浸漬で各試料表面の光沢がなくなり、最表面は溶脱し、表面から2mm程度の領域で、ざらつく様子が認められたが、特別な析出物等は観察されなかった。また、各試料の質量変化率は $-0.43 \sim -0.02\%$ と小さく、圧縮強度の変化量も小さかった。文献¹³⁾における溶解法で作製した加温養生試料では同様の配合で表面のざらつきも認められないが、質量変化や圧縮強度の変化に関しては文献¹³⁾における加温養生試料と大きな差はなかった。したがって、常温養生、溶解法で作製したGPの耐酸性は、既報告における加温養生試料と大きな相違はないことがわかった。

図7に各配合における加熱温度に対する圧縮強度の変化を記す。配合4、すなわちA/W比0.10で作製した試料は600°C以上で爆裂した。しかし、他の試料に配合による大きな差はなく、600°C加熱試料で圧縮強度は40~50MPa程度、700°C以上では10~15MPaとなり、それ以上低下することなくほぼ一定であった。700°C以上では、後で示すように、加温養生である文献⁸⁾の結果と比較して、圧縮強度の値はやや低かったが、C-S(A)-Hが残存せず、鉱物組成が変化すること等の結果は同様であった。

図8に加熱冷却後の棒状ペースト供試体の外観を、表4に変状一覧を示す。本試験では800°C及び1000°Cで加熱した供試体で、ひび割れや僅かな反り等が認めら

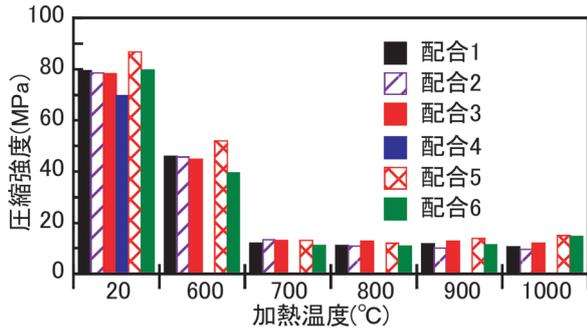


図7 左官用 GP モルタルの加熱温度と圧縮強度

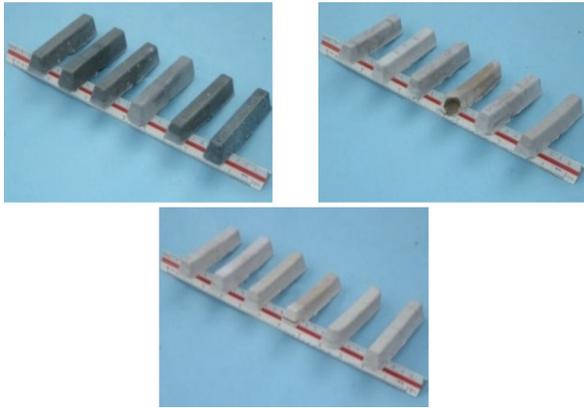


図8 加熱前後の棒状ペースト供試体 (左から配合1～6)

表4 棒状ペースト供試体の変状

配合	1	2	3	4	5	6
A/W	0.15	0.15	0.15	0.10	0.15	0.20
Si/A	0.20	0.10	0.30	0.20	0.20	0.20
1000°C-2h	○	△	△	△	△	△
800°C-2h	○	○	○	△	△	○

○：細かいひび割れ程度，△：大きなひび割れ

れるが、溶融による変形は認められなかった。また、モルタル供試体では A/W 比 0.10 の供試体（配合 4）が 600°C 以上で爆裂したがペーストで爆裂は観察されなかった。なお、モルタルで爆裂が生じた理由は、高粘性の本材料で骨材が存在する場合、練り混ぜ時の巻き込み空気量が増え、その膨張のためと考えられるが詳細は不明である。

図 9 に加熱冷却後のペースト試料の粉末 X 線回折図を示す。C-S(A)-H によるブロードなピークは、500°C では小さくなり、800°C では消失している。このことから、800°C では C-S(A)-H は残存していないことがわかる。なお、図 9 に各加熱温度での生成物同定結果を記したが、ケイ酸塩物質は種々の固溶体を形成するため X 線回折の結果だけで生成物を同定することは困難であり参考として記すものである。800°C 以上では結晶質物質として、高炉スラグ非晶質相から生じるゲーレンナイト-

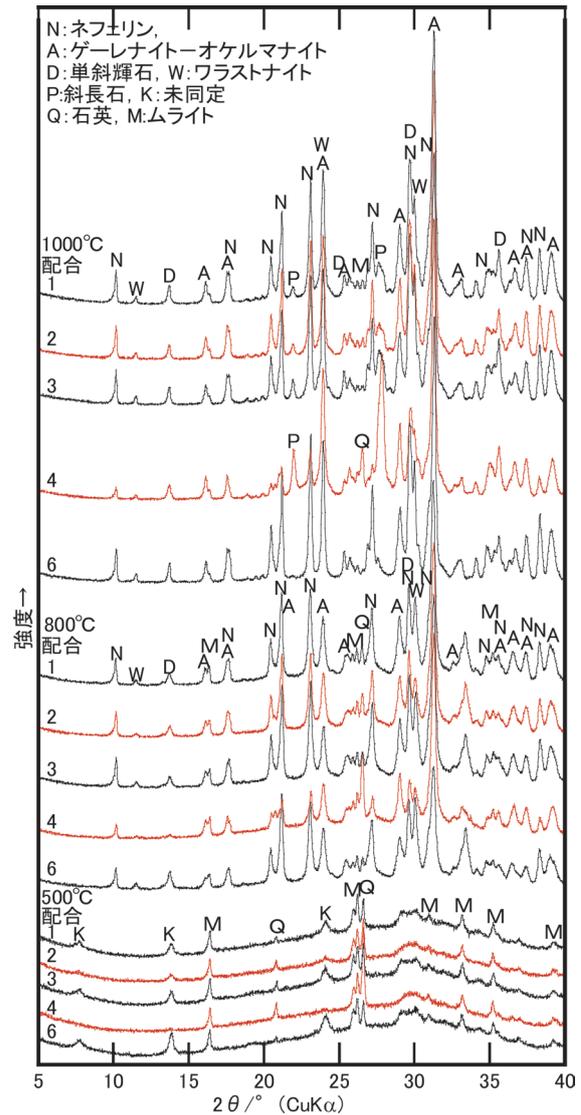


図9 焼成した GP ペーストの粉末 X 線回折図

オケルマナイト系列の物質やネフェリン等が新たに生じた。800°C 以上の硬化体は、鉱物組成が 500°C 以下の硬化体とは全く異なるため同一に論じられないことがわかる。また、配合による生成物の差は大きくなかったが配合 4、すなわち A/W 比 0.10 の試料ではアルカリ成分が少ないことに起因して石英等が残存傾向となり斜長石生成量が多いこと等、焼成後の鉱物組成に若干の差が認められた。

5. 左官作業性及び諸特性の確認（室内試験）

表 5 に GP モルタルのコテ塗り作業を行い、その性状を確認した結果を記す。なお、コテ塗りの作業性評価は、左官作業経験 40 年の左官実務者の評価に基づいている。フロー値では大きな差は無かったがコテ塗りの作業性では差が認められた。配合 1 の試料の仕上がりが良好

表5 GP モルタルの左官作業性性状と仕上り状況

配合	練混ぜ後施工までの時間 (分)						仕上り	白華		
	10	20	30	50	60	85		除去性		
								掃除機	水洗	量
1	○	○	○	△ ₂	×	×	◎	△	○	○
2	△ ₁	△ ₁	△ ₁	△ ₂	×	×	○	×	○	○
3	△ ₁	△ ₁	△ ₁	△ ₂	△ ₂	×	△~×	○	×	○
4	○	○	△ ₂	△ ₂	△ ₂	×	◎~○	△	○	○
5	△ ₁	△ ₁	△ ₂	×	×	×	△	○	○	○
6	△ ₁	△ ₁	△ ₁	×	×	×	△	△	×	○

- (1) コテ作業性評価：◎伸び良好，コテ付着なし，○粘性が高いが，コテ付着は少量，△₁粘性が高くコテに付着，△₂伸びが悪いがコテ作業可能，×硬化によりコテ作業不可
- (2) 仕上り（平滑度の外観評価）：◎良好，○普通，△やや粗い，×粗い
- (3) 白華生成量（生成量を外観から評価）：◎発生無し，○少量，△やや多い，×多い
- (4) 白華除去性（掃除機）：○綿の様で掃除機で簡単に除去可，×掃除機で除去不可
- (5) 白華除去性（水洗）：○：水洗により簡単に除去できる

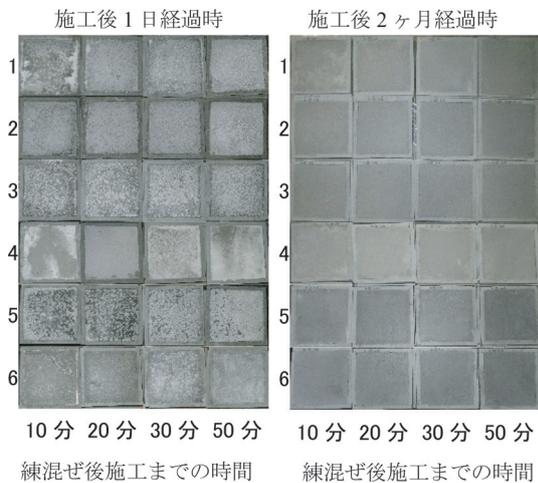


図10 GP モルタル左官施工供試体の外観写真
(1~6の各番号は表2における配合を表す)

で，かつ施工までの時間が30分におけるコテ作業性の評価が高く，次いで配合4の評価が高かった。他の配合の試料はコテに付着してモルタル全体が動いてしまう等，作業性の評価は上記配合と比較して高くなかった。これはフロー値では評価できないGPの粘性が影響しているものと考えられるが，左官作業性の評価は困難であり，今後何らかの指針を考える必要が示唆された。

図10は表5におけるGPモルタル左官施工の外観写真の一部である。全ての試料において，硬化後もひび割れは認められなかった。各試料とも1日後では炭酸ナトリウム (Na₂CO₃) の白華が発生した。配合3と6は比較的硬化体に堅く付着する形で析出したが，他の試料は綿胞子状の白華であるため掃除機で簡単に除去可能であった。また，白華は水溶性のNa₂CO₃であるため，全ての試料において水洗で簡単に除去可能であり，除去後に再び白華が生じることはなかった。

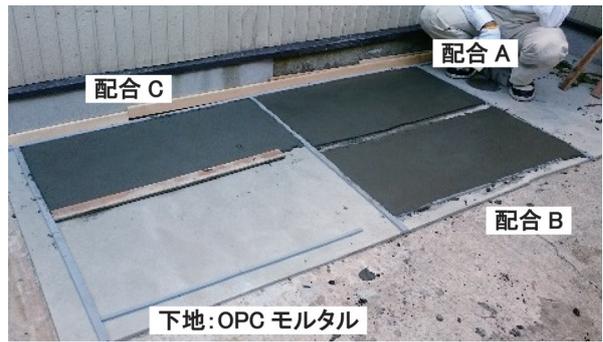


図11 屋外施工時の左官用GPモルタル



図12 材齢8日後の左官用GPモルタル

表6 GP モルタルの左官作業性状と付着強度

配合	15打フロー (mm)	コテ作業性	ひび割れ剥離	付着強度 (MPa)
A	154×156	○	◎	1.89
B	176×178	◎	◎	2.09
C	177×175	◎	◎	2.14

- (1) コテ作業性の評価：◎伸び良好。コテ付着なし，○粘性がやや高いがコテ付着なし
- (2) ひび割れ，剥離の評価：◎2ヶ月経過時にひび割れ及び剥離なし
- (3) 付着強度の評価：材齢28日時の接着力試験結果

6. 左官用GPモルタルの屋外曝露試験結果

図11に屋外施工した左官用GPモルタル及び図12に材齢8日時点の外観を，表6に左官作業性状と付着強度試験結果を示す。

屋外施工に際して，ハンドミキサー等，作製条件を実施施工に準じた結果，コテ作業性の確保のために，表2における基本配合よりW/Pがやや多くなり，結果としてフロー値はやや大きくなった(表6)。なお，表6のA~C全ての配合において作業性は良好であり，実施工における問題は認められなかった(図11)。また，材齢8日時の外観写真に見られるように，左官施工面の平滑度も高く，ひび割れも生じなかった(図12)。なお，現在2年経過後も，特にひび割れ等は生じておらず，8日材齢時の様子をほぼ維持している。一方，付着強度に関して，界面処理を行わなかったが，1.89MPa~2.14MPaと配合による差は小さく，ポリマーセメントモルタルに匹敵する付着強度が得られた。また，どの試料に関しても引張試験において界面で剥離した事象は認められなかつ

たが、配合 A 及び B では下地モルタル板が破壊され、配合 C では GP モルタル部分が破壊された。これは配合 C の A/W 比が低く引張強度が小さいことにより GP モルタル内で破壊が生じたものと推察される。

7. まとめ

左官用 GP モルタルの開発のため、種々の配合の GP モルタルを溶解法、常温養生で作製し、その左官作業性、諸性質を検討した。また、GP モルタルを OPC モルタル下地に 10mm 厚で左官施工して、左官作業の実用性、付着強度を検討した。以下にその結果を記す。

- (1) 種々の性質において配合による差は、既報告の加温養生試料と比較して小さかった。これは、常温養生の GP の生成物が BFS に由来する C-S(A)-H が主なものであることに起因していると考えられる。
- (2) 5% 硫酸溶液による浸漬試験では、表面 2~3mm で溶脱が認められたが、圧縮強度や質量の変化は小さく、高い耐酸性が確認された。
- (3) 左官用 GP モルタルは 600℃ まで 40MPa 程度、700℃ 以上でも 15MPa 程度の圧縮強度を維持した。
- (4) 左官作業性を検討した結果、本配合の中では A/W 比 0.15, Si/A 比 0.20 あるいは A/W 比 0.10, Si/A 比 0.20 の配合が良好であった。
- (5) OPC 下地に左官施工した結果、作業性は良好で、ひび割れも生じなかった。また、下地との付着強度は 1.89~2.14MPa と高く、左官作業用モルタルとして実用的に使える目処が得られた。

現在、本報告の結果を受けて、更に配合や作製方法の改良、プライマーの選定等を検討して実用化を進めている。

文献

- 1) Davidovits, J. : Fales Values on CO₂ Emission for Geopolymer Cement/Concrete published in Scientific Papers, Geopolymer Institute Library, Technical paper #24, Fales-CO₂-values, pp.1-9, 2015.
- 2) 大木信洋, 東原実, 佐藤隆恒, 上原元樹 : ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくらぎの実用化に向けた試作, 土木学会第 73 回年次学術講演会講演要旨集, pp.559-560, 2018
- 3) 佐藤隆恒, 大木信洋, 東原実, 上原元樹 : 石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマーまくらぎの試作, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.2013-2018, 2013
- 4) 上原元樹, 佐藤隆恒, 東原実, 大木信洋 : ジオポリマー PC まくらぎの営業線への試験敷設, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演要旨集, pp.167-168, 2017
- 5) 上原元樹 : ポルトランドセメントを使用しないジオポリマーコンクリートの配合と諸性質およびその開発, 工業材料, Vol.66, No.6, pp.46-49, 2018
- 6) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 畑中重光 : ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1249-1250, 2018
- 7) 河尻留奈, 国枝稔, 上田尚史, 中村光 : ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1943-1948, 2011
- 8) 一宮一夫, 秋永史也, 原田耕司, 池田攻 : フライアッシュ系ジオポリマーのアルカリ水比とフロー値ならびに高温加熱による外観や強度変化の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, pp.1851-1856, No.1, 2018
- 9) 佐藤隆恒, 上原元樹, 南浩輔, 山崎淳司 : ジオポリマー硬化体の種々の配合, 作製法における生成物と pH 等諸性質の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2325-2330, 2016
- 10) 佐藤隆恒, 上原元樹, 山崎淳司 : 低アルカリ/水比, 高ケイ素/アルカリ比のケイ酸アルカリ溶液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2035-2040, 2017
- 11) Song S., Sohn D., Jennings H.M., Mason T.O. : Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag, Journal of Materia Science, Vol.35, pp.249-257, 2000.
- 12) 日比野俊行, 網島群 : インターカレーションによる層状複水酸化物ハイドロタルサイトの機能材料化, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan 7, pp.227-234, 2000
- 13) 佐藤隆恒, 上原元樹 : 高炉スラグ細骨材を使用したジオポリマーモルタルの諸特性 : コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1881-1886, 2018

特集：材料技術

水平面に適用可能な コンクリート表面の水分浸透抵抗性評価手法

西尾 壮平*

Evaluation Method for Water Penetration Resistance of Concrete Structures Applicable to Horizontal Surface

Sohei NISHIO

High durability is required for railway structures constructed on the premise of long-term service as social infrastructure. Technological development that leads to longer life of structures is becoming more important in terms of contributing to decarbonization. A method called WIST (Water Intentional Spraying Test) developed by the author of this paper is becoming widespread as a non-destructive test method that can easily evaluate water penetration resistance that affects the durability of reinforced concrete structures. However, due to the principle of measurement, the application of the WIST was limited to vertical planes. This paper reports a new measurement method developed for applying the WIST to horizontal planes. The new method can be implemented just as easily as the conventional WIST with the same equipment.

キーワード：コンクリート，水分浸透抵抗性，耐久性，表層品質，非破壊試験，散水試験

1. はじめに

鉄道高架橋のような鉄筋コンクリート（RC）構造物を長期間供用可能とするためには、コンクリート内部の鉄筋を腐食させないことが重要である。鉄筋などの鋼材の腐食に対する支配的な要因は水分の浸透であると考えられるため、一般的なRC構造物では鉄筋を所定の深さに配置し、水分浸透抵抗性の高いコンクリートで鉄筋位置に水分が浸透しないようにすることが耐久性確保の基本である。近年、土木構造物の建設において、コンクリートの施工を入念に行うことで耐久性に優れた構造物の構築を実現しようとする動きが見られ、鉄道関連ではJR西日本での新設構造物における品質確保の取組みが目目されている¹⁾。JR西日本の取組みでは新設構造物のコンクリート品質向上を目標に掲げて、鉄道総研で実用化した「散水試験（Water Intentional Spraying Test、以下、WISTと表記する。）²⁾³⁾」によるコンクリートの水分浸透抵抗性に関する品質の簡易評価が導入されており、建設工事の途中段階での品質改善、あるいは類似した工事での品質向上が実現されている⁴⁾⁵⁾。

ここで、WISTとは、乾燥したコンクリート表面に少量の水を散布し、コンクリート表面における水分浸透状況を測定者の目視で把握し、水分浸透抵抗性を評価する非破壊試験である。WISTは実構造物の調査等に対する適用性を重視し、外部電源が不要で省力および省スペースという特長がある。WISTは測定が手軽であり、JR

西日本（図1）のほか、土木構造物を建設する地方自治体の土木部門、建設事業者、大学等の研究機関などで活用され、普及が進んでいる。WISTの測定対象となる部材は、測定者の手が届く範囲で選定されるため、柱や壁とされることが多い。そのため、WISTは柱や壁のような鉛直部材の側面への適用に特化した形で実用化され、測定の原理上、水平面への適用が不可能であった。WISTの普及に伴い、測定対象を床版や梁のような部材に拡大するニーズが高まり、構造物の下面や上面といった水平面に対しても同様に適用できる、簡便な非破壊試験の確立が求められていた。

以上の背景のもと、WISTと同じ測定器具で水平面における水分浸透抵抗性を評価する手法を新たに開発したので、ここに報告する。なお、鉄道高架橋のように構造



図1 WISTの測定状況の例

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

表1 コンクリートの水分浸透抵抗性に関する非破壊試験の代表的な例（数値等は著者の調査による）

名称	概要	水圧	水量	水分浸透領域の面積	水の供給開始から測定開始までの時間
散水試験 (WIST)	鉄道総研の提案手法。JR 西日本等で導入。国土交通省の手引き等に記載。	加圧なし (水を散布)	約 0.3ml ^{※1}	約 2,600mm ² (直径 57mm の円形) ^{※3}	約 0.5 秒 (手動式器具による水の散布時間)
表面吸水試験 (SWAT)	林・細田らの提案手法 ⁶⁾ 。国土交通省の手引き等に記載。	30kPa (測定中に減少)	約 25ml ^{※2}	約 5,000mm ² (直径 80mm の円形)	10 秒 (装置により制御)
ダブルチャンバー透水性試験 (W.A.P.P.法)	豊福らの提案手法 ⁷⁾ 。シーリング材を併用。	55kPa (一定圧)	約 30ml ^{※2}	約 2,000mm ² (直径 50mm の円形)	27 秒 (装置により制御)
ドイツ規格に示される吸水試験	ドイツ規格 DIN 1048 Part5 に規定の Water permeability の測定手段に適合した手法 ⁸⁾ 。	10~600kPa (一定圧)	約 200ml ^{※2}	約 3,000mm ² (直径 62mm の円形)	約 30 秒 (手作業による目安時間)

※1：装置の操作1回あたりに散布される水量。一部の水が治具等に付着するためコンクリートへの供給量は減少する。

※2：コンクリートに接触した容器等の内部に充填される水の量であり、容器の接続部等に溜まる水の量を除く。

※3：鉛直面に適用する WIST-V では円形の範囲内の一部領域に水が散布されず、測定に影響する面積は約 1,000mm² となる。

物の直下を利用する可能性のある構造物においては、部材下面のコンクリートにおける品質確保の重要性が高い。そのため、手法の開発においては、水平面のうち特に構造物の下面に適用できることを前提条件とした。また、測定状況として、建設中の足場等を利用して下面に近接して行われる調査に適用される状況を想定した。

2. 評価手法の概要

2.1 開発コンセプト

表1に、水分浸透抵抗性に関する非破壊試験の代表例を示す。これらの手法は国内で装置が市販され、論文等での検証事例が見られるものである。WISTを除く3種類の手法では、専門的な知識を備えた技術者の手に測定を委ねるのが一般的である。今回、新規手法の開発においては、WISTと同様に鉄道事業者等で建設や保守の各種業務に携わる実務者が自身の手で測定できることを念頭に置き、手法の手軽さを優先した。水分浸透抵抗性を評価するためには、コンクリートに水分を供給し、水分の浸透に伴う変化を何らかの方法により定量化した指標が必要となる。水分の供給方法について、WISTのように水を散布する方式①と、湿らせた物体を接触させて浸潤させる方式②、容器に入れた水を接触させる方式③、などが想定される。表1に示したWISTを除く3種類の手法では、方式③の水を溜めた容器をコンクリート表面に密着させて連続的に水分を供給する方式を採っている。このような方式では水圧が作用するため、より内部までの水分浸透現象を捉えられるメリットがある。一方で、容器を固定するための機構が必要であるため、機材の複雑化や、測定に伴う準備や作業の規模の面でデメリットがあり、手法としての手軽さに欠けるものと判断し、方式③は検討対象から除外した。次に、水を散布する方式①として2種類（霧吹き方式、エアゾール方式）、湿らせた物体の接触による方式②として2種類（湿布・

スポンジの貼付けによる方式、筆やローラーによる塗布方式）を検討した。検討の結果、湿らせた物体の接触による方式②では、実構造物への適用を想定した際に水分の供給量の確認と制御が難しく、実務への導入が困難な手法となることが予想された。そのため、水分の供給はWISTと同様の散布による方式①を採用し、水平面に適用可能な測定手順と評価指標に関する詳細検討を進めることとした。

2.2 測定手順と評価指標

図2に新規開発した手法の測定手順の概要を示す。測定では専用の手動の器具を使用してコンクリート表面に対して一定量かつ微量の水を散布する。水の散布量はスプレー器具の1回の操作あたり約0.3gである。この水はガイド器具により直径57mmの円形の範囲に噴霧され、器具に付着する水量を除くと、コンクリート表面に対して供給される面積当たりの散水量は約0.1mg/mm²となる。このような水の散布の方式は従来のWISTと同一である。そのため、手法の名称は面の種別によらず「WIST」と表記し、手法を区別する必要がある場合は、新規開発した手法を「水平面に適用するWIST (WIST-H)」、従来の手法は「鉛直面に適用するWIST (WIST-V)」といった形で、適用する面の方向を付記して表記する。

図3にWIST-VとWIST-Hの比較を示す。WIST-VとWIST-Hでは評価指標が異なっている。WIST-Vを適用する鉛直面では浸透しなくなった水が表面を流下する状況を目視で確認して評価するのに対して、WIST-Hを適用する水平面では浸透によって表面から水分が消失する状況を目視で確認して評価する方式としている。それぞれ評価指標は「流下時散水回数」と「水沢保持時間」である。このように鉛直面と水平面とで異なる評価指標とした理由は、WISTでコンクリートに供給する水分の浸透挙動には重力の作用が影響し、その影響が不可避であったためである。2種類の指標はそれぞれ異なる現象

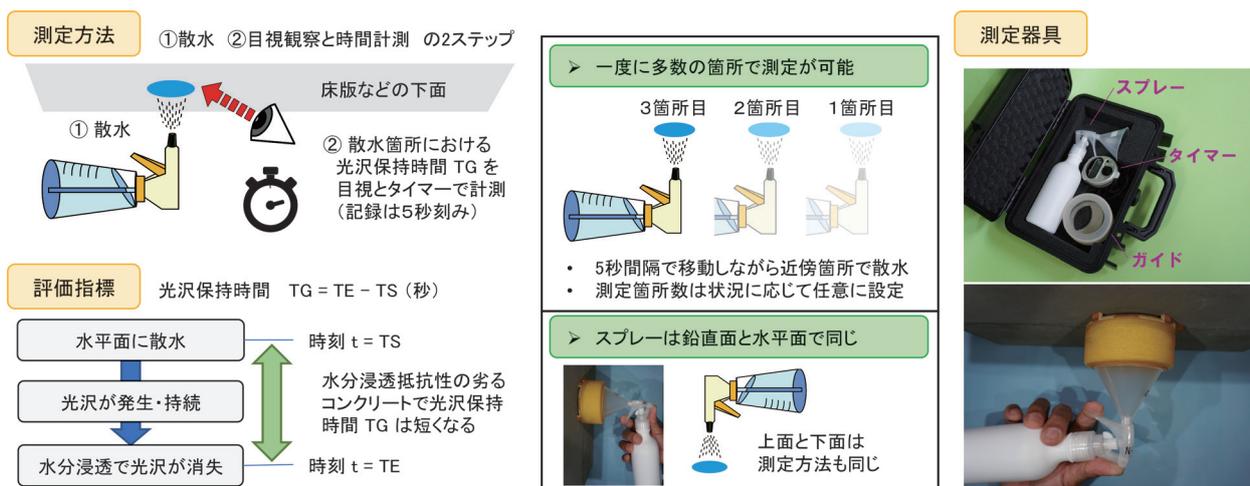


図2 水平面に適用する散水試験 (WIST-H) の概要

で間接的に水分浸透抵抗性を定量化したものであり、水分浸透抵抗性に優れたコンクリートほど流下時散水回数が少なくなるのに対して、光沢保持時間は長くなる。なお、光沢保持時間は水平面のほか、鉛直面を含むあらゆる角度の傾斜面にも適用できると考えられるため、検討を進めている。

図4に水平面の下面における測定状況の例を示す。表1に示したように、WISTの測定の規模は各種の手法と比較して、水分浸透領域の面積は同程度としながら、使用する水の容量、ならびに水の供給から測定開始に要する時間は桁違いに小さい。また、WISTでは水の供給や容器の保持で加圧等を行うための機材や電源を必要としない。これは、WISTでは水の供給を連続的なものとせず、一定量かつ微量の水の散布による供給を、一度だけあるいは一定の時間間隔で断続的に行う方式としている

ことによる。このような特徴により、WISTでは手動式の器具を用いた手軽な測定を実現している。また、測定の作業が軽微であるため、近傍箇所での測定を5秒刻みでずらして同時に進行することで、一度に複数の位置での測定が可能である。著者らの実構造物を対象とした実績では、WIST-Vを1m×1m程度の範囲内で10箇所程度、WIST-Hを15cm程度ずつずらして6m程度の範囲で40箇所での測定を一度に実施した例がある。測定結果のばらつきを考慮すると実構造物では測定データ数を1箇所あたり6点以上とするのが望ましいと考えられるため、一度の測定でこのような多点でのデータが取得できる点は、他手法にないWISTの特長のひとつとなっている。

2.3 評価指標に関する事前検討

鉄道総研におけるこれまでの研究成果⁹⁾においては、水の散布によりコンクリート表面へ水分供給を行った後、水分の浸透に伴う明度の変化を主体に整理してきた。明度変化を定量化する場合、色見本や測色機器を使用する必要があり、開発コンセプトの手軽さは達成されない。そこで、鉄道総研で2017年度に開発した、画像解析に

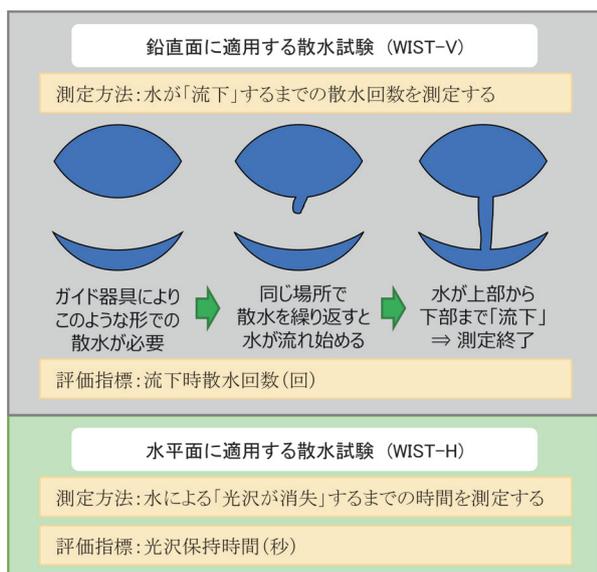


図3 WIST-V と WIST-H の比較



図4 WIST-H の測定状況

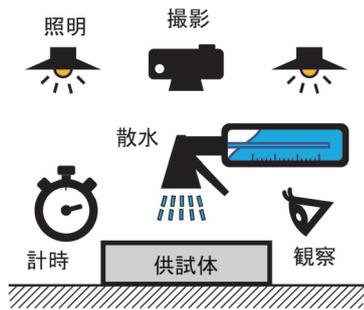


図5 実験の概要



図6 画像解析による抽出画像の例

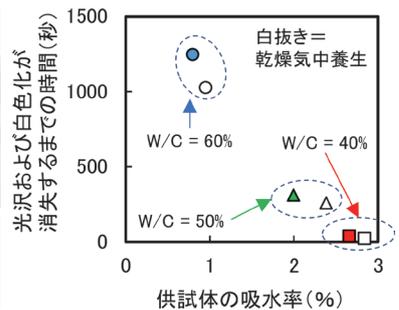


図7 水分浸透に関する実験結果

より明度変化を定量化するシステム¹⁰⁾を利用して、新たな評価指標を模索した。同システムでは画像情報の経時変化に基づいて明度変化を定量化できるため、同システムと目視観察を組み合わせた実験により散水後の光沢変化に関する検証を行った。図5に実験の概要を示す。供試体は、寸法が40×40×80mmで、コンクリートの水セメント比を40・50・60%の3水準、材齢1日で脱型後に材齢28日までの養生方法を標準気中養生(20℃, 60%RH)と乾燥気中養生(20℃, 40%RH)の2水準に設定して作製した6種類を用意した。供試体は材齢28日以降、標準気中養生環境下で保管されたもので、実験時の材齢は約6年である。供試体の水分浸透抵抗性を把握することを目的として、実験に先立って水中浸漬による吸水試験を行った。水分浸透抵抗性の目安としてここでは水中浸漬試験で求めた吸水率を採用した。浸漬時間は2時間とし、吸水率の算出は気中乾燥状態の質量を基準とした。吸水試験の後、供試体を標準気中養生環境下で68日間乾燥させた後に、供試体の打込み面に対して上方から水を散布し、水分浸透状況を目視で観察して時間を計測するとともに画像で記録した。図6に解析結果に基づいて抽出した画像の例を示す。水を散布した領域において、表面に水分が滞留した部位では光の反射によって明るく感じられる状態が引き起こされ、目視では光沢として視認できること、画像では白色化すること、光沢あるいは白色化は水分の浸透と共に消失することが確認された。

図7に散水による供試体表面の光沢と白色化が消失するまでの時間と供試体の吸水率の関係を示す。吸水率が低く水分浸透抵抗性の高いコンクリートで光沢の消失までの時間が長くなることが判明した。同等のW/Cと比較した場合、コンクリートの品質に対して悪影響を及ぼすと考えられる乾燥気中養生の条件(白抜きプロット)でプロットが右下に位置することがわかる。これらの検討結果に基づいて、散水後の光沢発生から消失までに要した時間を水平面における水分浸透抵抗性の評価指標とすることとし、これを「光沢保持時間」と定義した。

なお、目視による光沢の観察の妥当性について、目視

観察と市販の光沢センサーでの比較を簡易な実験で検証している。光沢センサーでは光沢の度合いを定量的に評価できるメリットがあるが、測定領域は直径で数mm程度の範囲に限定される。それに対して目視観察ではセンサーよりも広範囲を観察する形となる。そのため、観察あるいは測定範囲の違いにより光沢保持時間の測定結果には差が生じるが、WIST-Hにおいては作業性を優先して目視を基本とすることとした。また、光沢保持時間はストップウォッチなどを使用して0.1秒単位で計測できるが、図7に示したように水分浸透抵抗性の差異は数十秒や数分といった差で現れる傾向が確認されたこと、計測頻度を減らすことで同時に複数個所での測定が容易となることなどを考慮し、目視による光沢保持状況の確認は5秒刻みで行うこととした。

3. 構造物下面を想定した適用性の検証

3.1 室内試験による検証

構造物下面を想定した室内試験として、コンクリート供試体の底面における吸水抵抗性を検証した。実験の状況は図4左の写真に示すとおりである。供試体は、底面が200×200mmで高さ100mmの扁平な形状で、実際に建設された鉄道高架橋の仕様を反映したレディーミクストコンクリートと合板型枠で作製した。実験では材齢1日での早期脱型の影響を検証したほか、水分浸透抵抗性を意図的に低下させることを目的として打込み直前に約30kg/m³加水した低強度配合のコンクリートで早期脱型したシリーズを用意した。供試体は各条件で3体とし、試験室内で養生し、脱型4日後にWIST-Hの測定を供試体底面の2箇所で行った。散水量は予備実験の結果に基づいて約0.2mg/mm²とした。供試体の物質透過抵抗性の目安とするため、材齢約1年まで試験室内で乾燥させた供試体の表層透気係数をトレント法により測定した。トレント法は底面の5箇所で行った。

図8に、光沢保持時間と表層透気係数の関係を示す。同図では3.2節で後述する構造物Dで取得したデータを併せてプロットした。図の縦軸が対数軸となっているこ

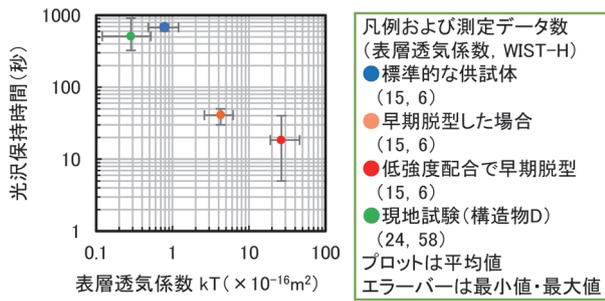


図8 光沢保持時間と表層透気係数の関係

とからわかるように、光沢保持時間は早期脱型の供試体で顕著に減少することが明らかとなった。また、表層透気係数が大きく物質透過抵抗性の低い供試体で光沢保持時間が短くなるのがわかる。光沢保持時間は、コンクリートの物質透過抵抗性の代表的な非破壊評価値である表層透気係数と一定の相関が見られることが確認された。

3.2 実構造物の現地試験による検証

鉄道のRC橋りょうの建設工事現場（構造物A・B・C・Dの4種）にて現地試験を実施し、実構造物の下面に適用するWIST-Hの測定手順の適用性を検証した。図9に現地試験で取得したデータを示す。同図でプロットしたデータに関して、構造物Aで測定した全50点のデータは、10箇所と同時に測定したデータと40箇所と同時に測定したデータを合わせたものである。測定は近傍箇所位置を15cm程度ずつずらしながら実施した。同様に、構造物Bでは全20点の測定データを一度の測定で取得し、構造物Cの全50点のデータは20箇所と30箇所と同時に測定したデータを合わせたもの、構造物Dでは全58点のデータを10箇所ないし9箇所ずつ同時に測定したものである。このように、実構造物での測定においてWIST-Hの同時測定箇所数は40箇所とした場合でも問題なく測定が実施できることを確認した。

一方で、図9に示したデータのばらつきは同一の構造物においても変動係数で20%程度となった。実構造物では供試体に比べてコンクリートの施工が大がかりであるため、コンクリートの打込み、締固め、養生などの条件には部位による差があると見なす必要がある。そのため、同一部材の近傍箇所においてもこのような数値のばらつきを生じたものと考えられる。実構造物の評価においては、数値のばらつきを考慮し、多数の測定データを取得することが必要である。なお、図9に示した光沢保持時間には数十分を超過したデータが多数見られるが、当該構造物の品質が比較的優れていたことのほか、測定時期が冬季で外気温とコンクリート表面温度が約7℃程度であったこと、コンクリートの含水率が計測器の上限値を超過する程度に高い含水状態であったことなどが影響したと考えられる。

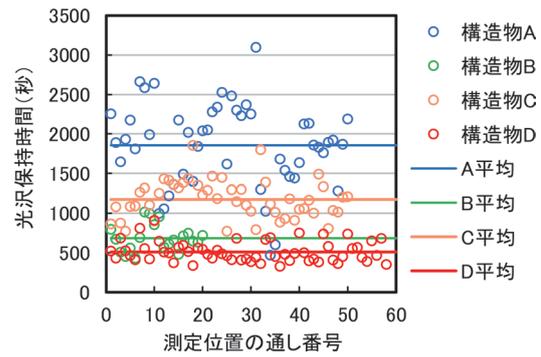


図9 実構造物の測定結果

現地試験では、図4中の右写真に示したようにJRの社員による測定が可能であることを確認した。また、建設工事の現場代理人等を含めた10名以上が測定に立会い、散水後の光沢保持状況の目視観察を体験し、目視での光沢保持時間の測定が可能であることを実感してもらうことができた。このように、目視観察には測定の立会者が誰でも実行可能であるという特徴があり、測定結果が共有できる、不正が行われにくい、同意や見解を求めることができる、といったメリットがあると考えられる。

4. 測定結果に影響をおよぼす各種要因の検討

4.1 目視による測定の個人差

図10は水平面における目視観察による光沢保持時間の測定結果に関する個人差を検証した結果である。前述の実構造物Dの下面を測定対象とし、WISTの熟練者1名と未経験者2名による光沢保持時間を比較した。測定は20箇所で行った。散水は熟練者が行い、光沢保持時間を3名が個々に計測した。その結果、未経験者2名による40件のデータのうち約60%が熟練者の測定値と一致し、約90%の測定結果が10秒程度の差異に収まることを確認された。なお、測定の作業自体は1名で実施可能であるが、複数の人員で測定する場合はコミュニケーションを取りつつ測定を行うことでこのような差は解消できると考えられる。

4.2 測定時の温度条件の影響

同一のコンクリート試験片（寸法約120×120×10mm厚）による測定を異なる温度条件で実施し、測定時の温度条件が光沢保持時間に及ぼす影響を検証した。試験片は水分浸透抵抗性の異なるA・Bの2水準で各3枚を用意し、測定は各試験片で3回実施した。なお、水の温度は20℃で統一した。図11に示すように、標準条件（温度20℃・相対湿度60%）を基準とした場合、試験片A・Bともに光沢保持時間は低温条件（温度5℃・相対湿度50%）で80%程度増加し、高温条件（温度40℃・相対

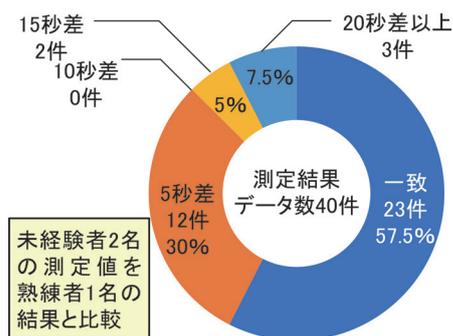


図 10 光沢保持時間の目視計測の個人差

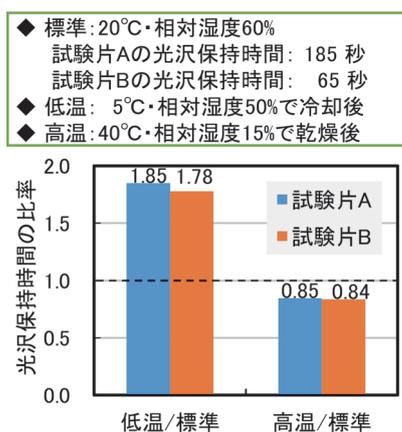


図 11 温度条件の影響

湿度 15%) では約 15% 減少する結果となった。水分浸透抵抗性の異なる 2 種類の試験片のいずれにおいても、高温条件での光沢保持時間の減少の影響よりも低温条件での光沢保持時間の増加の影響の方が大きくなることが確認された。光沢保持時間の測定においては、低温条件での水の性質の変化が強く影響する可能性がある。低温条件では水分浸透抵抗性を過大評価する恐れがある点に留意が必要である。

5. まとめ

本報告では、コンクリートの水分浸透抵抗性を評価する WIST について、水平面に適用する方法を提案した。本報告に整理した知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 水分浸透抵抗性の高いコンクリートでは散水後の水分の存在による光沢が長時間継続する傾向があり、水平面での散水時に見られるこのような光沢の継続時間を「光沢保持時間」と定義した。
- (2) 光沢保持時間は、散水後の目視によって測定でき、物質透過抵抗性の代表的な非破壊評価値である表

層透気係数と一定の相関がある。

- (3) 目視により測定した光沢保持時間の個人差を 3 名の被験者で検証した結果、約 90% の測定結果が 10 秒程度の差異に収まることを確認した。
- (4) 光沢保持時間の測定結果におよぼす環境温度の影響は、高温時よりも低温時で大きい。

なお、光沢保持時間による水分浸透抵抗性の評価基準を定めるためには測定データの蓄積が必須であるため現時点では提唱していない。また、光沢保持時間とコンクリートの各種物性値との関連性についてもさらなる検証が必要であるため、これらは今後の検討課題としたい。

文 献

- 1) 半井健一郎, 半井恵介, 西尾壮平: かぶりコンクリートの役割と検査方法③かぶりコンクリートの品質の確保と評価, コンクリート工学, Vol.57, No.8, pp.585-590, 2019
- 2) 西尾壮平: 散水によるコンクリート表層品質の簡易評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp.5-10, 2016
- 3) 西尾壮平: 散水試験によるコンクリートの表層品質評価におよぼす影響要因, 鉄道総研報告, Vol.34, No.10, pp.11-16, 2020
- 4) 黒川浩嗣, 猿渡隆史: おおさか東線新大阪・放出間における橋りょうの施工品質管理, セメント・コンクリート, No.869, pp.25-30, 2019
- 5) 川端誠, 佐藤雅義, 半井恵介, 田嶋亮佑: 広島高速 5 号線矢賀こ線橋の施工, 橋梁と基礎, Vol.54, No.6, pp.7-12, 2020
- 6) 林和彦, 細田暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013
- 7) 豊福俊泰, 高橋典子, 永松武則, 細川土佐男: ダブルチャンバー透気性試験・ダブルチャンバー透水性試験による表層コンクリートの非破壊検査法の技術開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1801-1806, 2015
- 8) 野中英, 三谷和裕, 清水峻, 湯浅昇: 表層透水試験に関する検討, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.6, pp.175-180, 2018
- 9) 西尾壮平, 上田洋: コンクリート表層品質の簡易な非破壊評価手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.5-10, 2014
- 10) 西尾壮平: 画像解析によるコンクリート表層における吸水性状の評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, V-263, pp.525-526, 2017

鋼橋におけるめっき・溶射材料への塗装による防食性向上手法

坂本 達朗*

Method for Improving Corrosion Protection by Paint Coating over Metal Layer with Plating and Thermal Spraying Materials on Steel Bridges

Tatsuro SAKAMOTO

Steel bridges are generally coated to control the progression of corrosion. Since the corrosion resistance of paint coating tends to decrease with age, a method has been proposed in which a metal coating such as plating or thermal spraying is used as a base coat and then painted over metal coating. However, there are few cases in which the long-term durability of cases using this method has been evaluated. Therefore, in order to understand the long-term durability of combination of various metal coatings and paint coatings, we investigated the deterioration of metal coating under the paint coating on specimens exposed for about 40 years. Furthermore, accelerated degradation tests using newly prepared specimens were conducted to evaluate the long-term durability of metal coating with damage reaching bare metal.

キーワード：鋼橋，腐食，塗膜，めっき，溶射，耐久性

1. はじめに

鋼橋などの屋外鋼構造物を長期間供用する場合、鋼材の腐食による安全性の低下が懸念される。このため、一般には塗料を用いた塗装による防食が行われている。

塗料には様々な材料が配合されており、油脂や樹脂として一般に有機化合物が使用されている。有機化合物は環境因子との化学反応によって加水分解や酸化などを生じて脆化・劣化するため、塗装によって形成される塗膜の防食性は経年とともに低下する可能性がある。このため、塗装単独よりも長期間の耐久性が期待できる手法として、金属めっきや金属溶射といった金属材料（以下、金属皮膜とする）を下地として、塗装を併用する手法が提案されている。

金属皮膜には鋼材よりも腐食しやすい金属が用いられており、これをめっきや溶射によって鋼材表面に被覆させることで犠牲防食作用により鋼材を防食する。環境因子の作用による金属皮膜自体の腐食は塗装を施すことによって防ぐことができるため、金属皮膜に塗装を組み合わせることにより、各々の材料を単独で使用する場合と比較して鋼材を長期間防食できると考えられる。

このような金属皮膜に塗装を組み合わせた防食工法は、これまでに多くの施工実績を有する¹⁾²⁾。ただし、金属皮膜と塗装にはそれぞれ複数の種類が存在し、材料の組み合わせは多岐におよぼほか、同防食工法の長期間の耐久性を評価した事例は多くない。

そこで筆者らは、金属皮膜に塗装を組み合わせた複数

の防食工法の長期耐久性の把握を目的として、約40年間暴露された試験片の劣化状態を調査した。また、鋼材まで達する損傷が生じた際の長期耐久性を評価するため、新規に試験片を作製して促進劣化試験を行った。

2. 暴露試験片の調査

本稿で調査した暴露試験片は、日本ウエザリングテストセンター銚子暴露試験場で約40年間暴露されていたものである³⁾。当該試験場はISO 9223 Corrosion of metals and alloys -Corrosivity of atmospheres- Classification, determination and estimationに記載される腐食性カテゴリC4に相当し、日本国内では比較的腐食性の高い環境に該当するとの報告がある⁴⁾。

ここでは各試験片における塗膜の変状程度を調査するとともに、塗膜下の金属皮膜材料の状態を把握するため、健全と考えられる塗膜下については非破壊での電気化学的手法により評価し、塗膜割れを生じた箇所については断面観察および組成分析により評価した。

2.1 暴露試験片の概要

試験鋼板は寸法300×150×3.2mmの冷間圧延鋼板(SS400)であり、皮膜厚や材質(亜鉛、アルミニウム、亜鉛-アルミニウムの合金)の異なる3種類の溶融めっきまたは5種類の金属溶射を適用後に種々の塗装仕様が施されたものを試験片とした。本稿では、屋外鋼構造物用の塗装仕様である6種類の塗装仕様(以下、塗装仕様C1~C6と呼ぶ)を適用した計48種類の試験片を調査対象とした。各試験片の金属皮膜および塗装仕様の概

* 材料技術研究部 防振材料研究室

表1 各試験片の金属皮膜の概要

溶融めっき			金属溶射		
記号	皮膜の金属種	膜厚(μm)	記号	皮膜の金属種	膜厚(μm)
G1	Zn	80	M1, M2	Zn	40 (M1), 80 (M2)
G2	Zn (99.995%), Al (0.005%)	80	M3, M4	Al	40 (M3), 80 (M4)
G3	Al	80	M5	Zn (70%), Al (30%)	80

表2 各試験片の塗装仕様の一覧

記号	塗料名と目標塗膜厚(それぞれ上段と下段、膜厚の単位は μm)				
	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層
C1	JIS K 5633:1972 イッチングプライマ 1種	JIS K 5627:1972 ジンクロメートさび止め ペイント 2種	JIS K 5627:1972 ジンクロメートさび止め ペイント 2種	JIS K 5616:1972 合成樹脂調合ペイント 2種中塗り用	JIS K 5616:1972 合成樹脂調合ペイント 2種上塗り用
	<10	35	35	30	25
C2	JIS K 5633:1972 イッチングプライマ 1種	フェノール樹脂塗料 ジンクロメートプライマ	フェノール樹脂 MIO 塗料	フェノール樹脂 MIO 塗料	フェノール樹脂 MIO 塗料
	<10	35	50~60	50~60	50~60
C3	エポキシ樹脂塗料 プライマ(ミストコート)	エポキシ樹脂塗料 プライマ	エポキシ樹脂塗料 プライマ	エポキシ樹脂塗料 中塗り用	エポキシ樹脂塗料 上塗り用
	<10	60~80	60~80	30~50	30~50
C4	エポキシ樹脂塗料 プライマ(ミストコート)	ウレタン樹脂塗料 プライマ	ウレタン樹脂塗料 プライマ	ウレタン樹脂塗料 中塗り用	ウレタン樹脂塗料 上塗り用
	<10	50~70	50~70	30	30
C5	JIS K 5633:1972 イッチングプライマ 1種	塩化ゴム塗料 プライマ	塩化ゴム塗料 プライマ	塩化ゴム塗料 中塗り用	塩化ゴム塗料 上塗り用
	<10	40~60	40~60	30	25
C6	JIS K 5633:1972 イッチングプライマ 1種	厚塗り型ビニル樹脂 塗料プライマ	厚塗り型ビニル樹脂 塗料プライマ	ビニル樹脂塗料 中塗り用	ビニル樹脂塗料 上塗り用
	<10	80~100	80~100	40	20

注:<10は目標塗膜厚が10μm以下であることを示す。

要を表1, 表2に示す。以下, 試験片記号として, (金属皮膜の記号) - (塗装仕様の記号) で示す。なお, 塗装仕様C2~C6は当時長期耐久性を有するとして提案された塗装仕様であり, 塗装仕様C1は比較用の塗装仕様である。

試験片の暴露条件はJIS K 5400:1970「塗料一般試験方法」に規定された条件(正南面, 傾斜角度30度)である。1973年7月に暴露が開始され, 2013年1月に現存する全ての試験片を回収した。

回収した試験片には, 暴露前に導入されたクロスカットと, 暴露中に行われた付着性評価試験の補修箇所が確認された。回収した試験片の外観の一例を図1に示す。

なお, 暴露開始時点において無塗装の各種金属皮膜も同時に暴露されており, これらは約10年で全ての金属皮膜で腐食が生じていることが確認されている⁵⁾。



図1 暴露から回収した試験片の一例

2.2 塗膜の健全性評価

塗膜の健全性は, 外観調査, ピンホール検査および塗膜のインピーダンスの測定結果から評価した。外観調査では割れの発生程度を3段階に区分し, 割れが無い場合に塗膜が健全と評価した。ピンホール検査では塗膜表面を湿潤状態のプロープで走査した際にピンホールが存在すると導通することから, 導通の頻度を3段階に区分し, 導通していない場合に塗膜が健全と評価した。インピーダンスの測定にはLCRメータを用いた。測定条件は, 塗膜側の電極径をφ30mm, 印加電圧を1V, 測定周波数を2~100kHzとした。電極が接触する塗膜には3wt%NaCl水溶液を含浸したφ30mmのスポンジを約24時間接触させた。このとき, 本稿の塗装仕様のような複合塗膜の周波数2Hzにおけるインピーダンスは概ね10⁶Ω以上である⁶⁾。そこで, 周波数2Hzにおけるインピーダンスが10⁶Ω以上の場合に塗膜が健全と評価した。

2.3 塗膜下の金属皮膜の状態評価

2.3.1 健全な塗膜下の評価方法

健全と評価した試験片に対して, インピーダンスの測定と同一の電極を用いてカレントインタラプタ法による電気化学的測定を行った。カレントインタラプタ法とは微小電流の印加により塗膜下の金属の腐食状況を評価可能な手法とされており⁷⁾, 測定される塗膜の分極抵抗が

ら塗膜下の金属皮膜の腐食状態を評価した。

2.3.2 割れを生じた箇所の塗膜下の評価方法

塗膜割れを生じた箇所については断面観察および元素分析を行い、塗膜/金属皮膜間における金属皮膜の状態を評価した。切断面は鏡面仕上げとし、元素分析には電子プローブマイクロアナライザー（EPMA）による波長分散形 X 線分光法を用いた。

2.4 調査結果と考察

2.4.1 塗膜の健全性評価

各種試験での測定・評価結果を表3に示す。ここで、網掛け箇所は2Hzにおけるインピーダンスが $10^6\Omega$ 未満であることを示している。塗装仕様C1を適用した試験片、および塗装仕様C5を適用した大半の試験片において、塗膜割れによるものと考えられる外観変状またはピンホールの発生が確認された。塗装仕様C2ではフェノール樹脂MIO塗膜の顔料が露出しており、塗膜状態を視認することが困難だったが、ピンホール検査では多数の導通が確認されたことから、塗膜割れを生じていることが推定された。また、塗装仕様C4、C6を適用した試験片はいずれも外観変状やピンホールの発生は確認されなかった。これより塗装仕様が同一の場合、金属皮膜の種類に関わらず類似した塗膜変状が生じる傾向にあることを確認した。

一方、塗装仕様C3を適用した試験片についてはピンホールが発生する場合としない場合が確認された。当該仕様は紫外線に対して脆弱なエポキシ樹脂塗料で仕上げられていることから、経年により塗膜が消耗し、初期から膜厚の小さな箇所でピンホールが生じたと推定される。

なお、外観調査またはピンホール検査で健全と評価されなかった試験片はいずれも周波数2Hzでのインピーダンスが $10^6\Omega$ 未満となった。このように、外観調査と

ピンホール検査における塗膜の健全性の評価は、インピーダンス測定における塗膜の健全性の評価と一致した。

2.4.2 健全な塗膜下の評価

塗膜が健全と評価した試験片、すなわち表3の網掛けしていない試験片に対してカレントインタラプタ法での測定を行った。その結果、いずれの試験片においても分極抵抗が $10^9\sim 10^{12}\Omega$ となった（表3）。先行研究において、分極抵抗が $5.5 \times 10^6\Omega$ 以上の場合には塗膜下での腐食は生じていないとの測定結果がある⁸⁾。このことから本試験においても、健全と評価した塗膜の下では金属皮膜および鋼材の腐食は生じていないと推定される。

2.4.3 金属皮膜の組成分析

分析対象の試験片は、全ての試験片で塗膜割れを生じている塗装仕様C1を主体とした。ただし一部の溶融めっき（G1、G2）を適用した試験片は現存していないため、当該の金属めっきを適用した試験片については、塗膜割れを生じていたG1-C5およびG2-C5を分析対象とした。

分析結果を図2に示す。ここでは、鉄（Fe）、亜鉛（Zn）、アルミニウム（Al）、酸素（O）の各元素マッピングを示している。塗膜中には亜鉛や酸素を含む材料が含まれており、当該の元素マッピングでも塗膜部分が青色になっている。この色相から塗膜割れの形状が確認でき、各試験片の塗膜割れは金属皮膜まで達していることが分かる。図中には塗膜割れを生じた箇所を点線で囲った。これをみると、M1-C1およびM2-C1では鋼素地の分析範囲がわずかではあるものの、いずれの試験片とも鋼素地に該当する箇所で酸素が検出されていない。従って塗膜割れを生じた場合でも鋼材は腐食に至らないと考えられる。

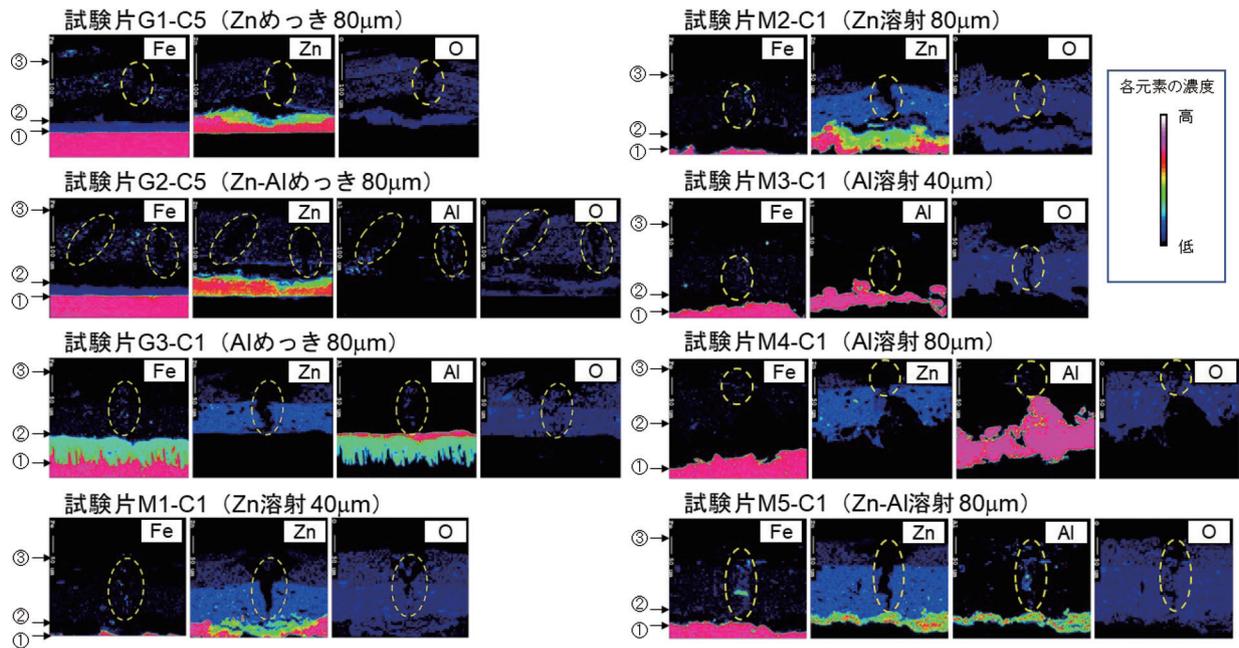
続いて、亜鉛を主体とする溶融めっきおよび溶射皮膜を適用した試験片（G1-C5、G2-C5、M1-C1、M2-C1）では、塗膜割れ近傍における金属皮膜について、亜鉛の元素マッピングの色相が変化しており、元素の濃度低下、すなわち金属皮膜の腐食が確認された。一方で、アルミニウムめっき、アルミニウム溶射、亜鉛-アルミニウム溶射を適用した試験片（G3-C1、M3-C1、M4-C1、M5-C1）では、塗膜が被覆する箇所と塗膜割れのそれぞれの直下における金属皮膜について、アルミニウムや亜鉛の元素マッピングの色相は同一であった。したがって、塗膜割れの有無にかかわらず金属皮膜の組成は大きく異なっていない。これより、本試験片の暴露環境では塗膜変状を生じていても、アルミニウムを用いた金属皮膜では腐食を生じにくく、亜鉛を用いた場合には塗膜変状箇所の直下で金属皮膜の腐食を生じることがわかった。この要因の一つに、アルミニウムは亜鉛と比較して不動態皮膜を形成しやすく、皮膜が腐食しにくいことが挙げられる。

なお、いずれの金属皮膜においても塗膜に割れが生じ

表3 各種試験での測定・評価結果

金属皮膜			塗装系					
種別	金属種	記号	C1	C2	C3	C4	C5	C6
溶融めっき	Zn	G1	外観/ピンホール検査 分極抵抗 (log)	●/△	△/△	△/△	△/△	○/○
	Zn-Al	G2	外観/ピンホール検査 分極抵抗 (log)	●/×	△/△	△/△	△/△	○/○
	Al	G3	外観/ピンホール検査 分極抵抗 (log)	×/×	●/△	△/△	△/△	○/○
金属溶射	Zn	M1	外観/ピンホール検査 分極抵抗 (log)	●/×	○/○	○/○	○/○	○/○
	Zn	M2	外観/ピンホール検査 分極抵抗 (log)	△/△	●/△	○/△	○/△	○/○
	Al	M3	外観/ピンホール検査 分極抵抗 (log)	×/△	●/×	△/△	△/△	○/○
	Al	M4	外観/ピンホール検査 分極抵抗 (log)	×/×	●/×	○/△	○/△	△/△
	Zn-Al	M5	外観/ピンホール検査 分極抵抗 (log)	△/△	●/×	○/○	○/○	△/△

注1：斜線箇所は腐食による暴露中止などで試験片が現存していないことを示す。
 注2：外観での割れの分類は以下の通り。○（割れ無し）<△<×（全面での割れ）
 注3：外観における●はフェノール樹脂MIO塗膜の顔料が露出していて塗膜状態の評価が困難であることを示す。
 注4：ピンホール検査での分類は以下の通り。○（導通無し）<△<×（全面で導通）
 注5：網掛け箇所は2Hzにおけるインピーダンスが $10^6\Omega$ 未満であることを示す。
 注6：分極抵抗におけるハイフンは、測定を実施していないことを示す。



注：黄色の点線は塗膜割れの箇所を示し、①～③は次に述べる各材料の表面の位置を示す。①…鋼材 ②…金属皮膜 ③…塗装仕様

図2 各試験片のEPMA分析結果

ていない箇所では金属皮膜の腐食は確認されないことから、前述したように無塗装の各種金属皮膜は約10年で腐食を生じたことを考慮すると、金属皮膜に塗装することで長期耐久性の向上が期待できると考えられる。

3. 新規に作製した試験片の促進劣化試験

外力によって鋼材まで達する損傷を受けた場合の金属皮膜および塗膜の挙動は、暴露試験片に施されたクロスカット部分の調査から評価可能と考えられる。しかしながらその切削方法に関する記録が無く、断面観察などの調査を実施した結果、損傷部の耐久性を十分に評価することができなかった⁹⁾。そこで本稿では新規に損傷部（以下、スクラッチとする）を設けた試験片を作製して金属皮膜の挙動を評価した。スクラッチの切削方法はISO 20340 Paints and varnishes -Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures- に規定される方法を採用し、複合サイクル試験によって各仕様の試験片の耐久性を評価した。

3.1 新規試験片の概要

試験鋼板は寸法150×70×3.2mmのSS400または溶融亜鉛めっき鋼とした。金属溶射の試験片は、金属溶射への塗装仕様が記載されている鋼道路橋防食便覧¹⁰⁾を参考にして、3通り（亜鉛、アルミニウムまたは亜鉛-アルミニウム擬合金）の金属溶射に対して規定の塗装仕様を適用した。なお、金属溶射皮膜の膜厚はいずれも約150μmとした。金属めっきの試験片は、JIS H 8641「溶

表4 新規に作製した試験片の塗装仕様

記号	MS-1	MS-2	MS-3	GS-1	PS-1
概要	金属溶射+塗装			金属めっき+塗装	塗装系のみ
鋼材種	SS400			溶融亜鉛めっき鋼 JIS H 8641 HDZT 77	SS400
素地調整	プラスト処理 ISO Sa 2 1/2 以上			スウィーププラスト処理 ISO Sa 1 程度	プラスト処理 ISO Sa 2 1/2 以上
金属皮膜 ^{注1}	擬合金 常温金属 溶射 ^{注2} Zn-Al系	Al 溶射	Zn 溶射	溶融亜鉛めっき	有機ジンクリッチプライマ
封孔処理	エポキシ樹脂系 封孔処理剤			-	-
1層目	厚膜型変性エポキシ樹脂系塗料 スプレー540g/m ²			亜鉛めっき面用 変性エポキシ樹脂系塗料 下塗 スプレー200g/m ²	厚膜型 変性エポキシ樹脂系塗料 スプレー350g/m ²
2層目	ポリウレタン樹脂塗料用中塗 スプレー160g/m ²			ポリウレタン樹脂塗料用中塗 スプレー160g/m ²	厚膜型 変性エポキシ樹脂系塗料 スプレー350g/m ²
3層目	ポリウレタン樹脂塗料上塗 スプレー140g/m ²			ポリウレタン樹脂塗料上塗 スプレー140g/m ²	水系ポリウレタン樹脂塗料上塗 スプレー140g/m ²

注1：溶射皮膜の厚みは、いずれも約150μmである。
注2：亜鉛とアルミニウムの質量比はZn:Al = 72:28である。

融亜鉛めっき」に規定されるHDZT 77の溶融亜鉛めっき鋼板に対して鋼構造物塗装設計施工指針¹¹⁾に記載の塗装仕様を適用したものとした。塗装仕様だけの試験片は、鋼構造物塗装設計施工指針に記載される長期耐久型塗装仕様であるL-2をベースとし、有機ジンクリッチプライマを適用した仕様とした。各試験片の塗装仕様の一覧を表4に示す。以下、本表に示す記号に従って試験片を示す。

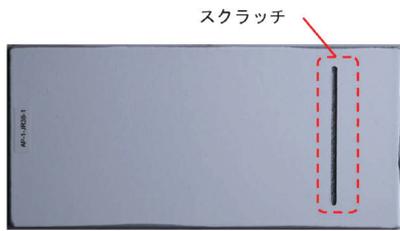


図3 鋼材までスクラッチを施した試験片の一例

表5 鉄道総研式複合サイクル試験条件¹¹⁾

工程	試験名	試験時間	次の工程
1	オゾン暴露	12h	2
2	人工海水噴霧	4h	3
3	模擬濃縮雨水噴霧	44h	4
4	乾燥	48h	2

工程1	↓	2時間以内	工程2
工程2	↓	20分以内	工程3
工程3	↓	15分以内	工程4
工程4	↓	20分以内	工程1

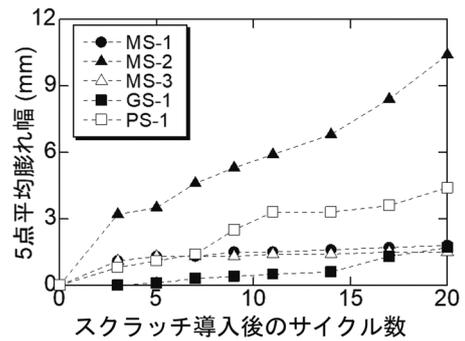
スクラッチの切削方法はISO 20340の複合サイクル試験方法に準じ、エンドミルを用いた機械的切削によって寸法50×2mmのスクラッチを導入した。このとき金属皮膜の損傷程度による防食性の違いを評価するため、塗膜のみを切削して金属皮膜を露出させた場合と塗膜および金属皮膜を切削して鋼材を完全に露出させた場合の2通りのスクラッチを導入した。図3は鋼材までスクラッチを施した新規試験片の外観を示す。なお、PS-1については金属皮膜に該当する有機ジンクリッチプライマの膜厚が20μm以下と非常に小さいため、塗膜のみの切削は行わなかった。

3.2 室内促進劣化試験

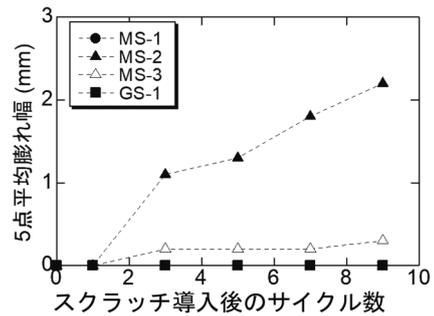
室内促進劣化試験には、複合塗膜の耐久性評価試験方法として用いられる鉄道総研式複合サイクル試験を適用した¹¹⁾。本サイクル試験の試験条件を表5に示す。塗装仕様の耐久性は、スクラッチ部およびそれ以外の箇所（一般部と呼ぶ）の塗膜変状程度から評価した。このときスクラッチ部については、スクラッチ部から生じる塗膜膨れの膨れ幅を大きな順に5つ測定し、その平均値に基づいて塗装仕様の耐久性を評価した。

3.3 試験結果と考察

一般部については、いずれの仕様においても塗膜の変状は確認されなかった。続いてスクラッチ部の評価結果については図4に示す塗膜膨れ幅を用いて述べる。塗膜鋼材が露出するまでスクラッチを導入した場合、20サイクル経過した段階においても、金属皮膜に亜鉛を用いた試験片（MS-1、MS-3、GS-1）では塗膜膨れが2mm以下であるのに対して、アルミニウム溶射皮膜を適用し



(a) 鋼材が露出するまでスクラッチを導入した場合



(b) 塗膜のみスクラッチを導入した場合

図4 スクラッチ部の塗膜膨れ幅

た試験片（MS-2）では約10mm、塗装仕様のみの試験片（PS-1）では約4mmの塗膜膨れが生じた（図4(a)）。なお、いずれの試験片でも膨れ内部は金属皮膜の腐食生成物で充填されていた。この結果から、スクラッチからの膨れ程度から塗膜の耐久性を評価する場合、金属皮膜を適用した塗装仕様はアルミニウム溶射皮膜を除き、従来の塗装仕様よりも高い耐久性を期待できることが分かった。

塗膜のみを切削して金属皮膜が露出するまでスクラッチを導入した場合、鋼材が露出した場合と類似の傾向が認められ、アルミニウム溶射皮膜を適用した試験片（MS-2）に最も大きな塗膜膨れが生じた（図4(b)）。ただし、いずれの試験片においても同サイクル数で比較した場合の塗膜膨れの大きさは鋼材が露出するまでスクラッチを導入した場合と比較して遥かに小さくなることが分かった。

前章で述べた暴露試験や、過去に報告された沿岸部での各種溶射皮膜の暴露試験結果¹²⁾では、アルミニウムの金属皮膜の方が亜鉛のものよりも良好な耐食性を示しており、本稿の促進劣化試験結果と異なる。この要因について、スクラッチの形状から考察した。

暴露試験や文献12における金属皮膜の腐食は塗膜/金属皮膜間、すなわち金属皮膜の表面で生じており、鋼材を介さない電気化学的反応による腐食と考えられる。この場合、金属皮膜の表面状態が重要となり、不動態皮膜を形成しやすいアルミニウムが高い耐久性を示したと

推定される。一方で、室内促進試験における塗膜膨れ（金属皮膜の腐食による変状）の発生箇所は、完全に鋼材が露出したスクラッチ近傍であり、露出した鋼材に対して金属皮膜が犠牲防食作用を生じたと考えられる。

また、当該試験環境下で主に生じると考えられる不溶性の腐食生成物は、亜鉛の場合には塩基性炭酸亜鉛、アルミニウムの場合には水酸化アルミニウムであり、両金属が同一モル数で腐食すると水酸化アルミニウムの方が大きな体積膨張を示す。このため、電極電位の違いに伴う両金属の犠牲防食作用の程度や、腐食生成物の物理的／化学的性状の違いなどにより、鋼材が露出するまでスクラッチを導入した試験片ではアルミニウム溶射を用いた金属皮膜で大きな膨れを生じたことが推定される。また、塗膜までスクラッチを導入した試験片では腐食生成物の物理的／化学的性状の違いにより、アルミニウム溶射を用いた金属皮膜において、わずかではあるものの大きな膨れを生じたことが推定される。

また、金属溶射を用いた場合については、皮膜が多孔質のために溶射後に適用される封孔処理剤の充填程度も影響した可能性がある。空隙が連続的でない場合には封孔処理剤が影響せず、空隙が残ることになる。本試験のように鋼材までスクラッチを導入した場合、このような空隙の残存する箇所、すなわち表面積が比較的大きい部分が露出するため、金属皮膜が腐食しやすくなったことが推定される。ただし、この推定の妥当性は本試験から明らかにすることはできなかったため、今後の検討課題としたい。

4. まとめ

金属皮膜と塗装を組み合わせた防食工法の長期耐久性の把握を目的として、約40年間暴露した試験片の塗膜変状箇所の調査および断面分析を行った。また、外力によって損傷を受けた場合の金属皮膜および塗膜の挙動を評価するため、新規に作製してスクラッチを導入した試験片を室内促進劣化試験に供して、従来の塗装仕様との耐久性比較を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 暴露試験片について、外観およびインピーダンス測定から健全と考えられる塗膜下では、カレントインタラプタ法での分極抵抗測定や断面分析から、金属皮膜および鋼材に腐食を生じていないと考えられる。
- (2) 暴露試験片について、塗膜割れを生じた箇所の直下では、亜鉛を用いた金属皮膜のみ腐食が見られる。
- (3) 新規に作製した試験片では、金属溶射にアルミニウムを用いた仕様において、スクラッチが金属皮膜または鋼材まで達した場合に金属皮膜の腐食が比較的早期に生じる。ただし、それ以外の組み合わせにおいては大きな変状は確認されない。

- (4) 以上の結果と、無塗装の各種金属皮膜が暴露から約10年で腐食を生じたことを考慮すると、金属皮膜に塗装処理を施すことで長期耐久性の向上が期待できると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、日本ウエザリングテストセンターおよび長期防錆対策研究会の関係各位に多大なご助言およびご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

文 献

- 1) 宮川等, 安田扶律, 植野軍二: 鋼構造物へのアルミニウム溶射施工事例について, 防錆管理, Vol.32, No.5, pp.139-153, 1988
- 2) 大庭哲也, 前田博, 富山禎仁, 守屋進: 腐食環境の厳しい場所(沖縄地区)における鋼構造物試験体溶射施工部の耐久性確認試験, 防錆管理, Vol.57, No.5, pp.173-179, 2013
- 3) 坂本達朗, 太田達哉, 高根由光, 紺野晃弘, 桑原圭介, 後藤宏明, 山本基弘, 江成孝文, 橋本康樹, 藤井忠彦, 木村武久, 真田祐介: 塗装した金属溶射又は金属めっき試験片の長期耐久性評価のための基礎検討, 防錆管理, Vol.57, No.12, pp.443-450, 2013
- 4) (財)日本ウエザリングテストセンター, 大気暴露試験ハンドブック [II] 金属編, 2007
- 5) 瓜谷昭夫, 関雅雄, 伊藤哲司: 金属被覆塗装材料の耐候性について, 耐候性の標準化に関する調査研究成果発表会, p19-30, 1983
- 6) 水場翔大, 富山禎仁, 宮田敦士, 佐野真, 増田清人: 鋼道路橋用防食塗膜の電気化学的測定, 材料と環境, Vol.67, No.7, pp.287-291, 2018
- 7) 松本剛司, 新内敏和, 関根功: 走査型超音波顕微鏡およびカレントインタラプタ法による防食塗膜の劣化評価, 材料と環境, Vol.58, No.1, pp.29-32, 2009
- 8) 岩瀬嘉之: 耐久・防食講座(第6講) 塗膜診断による鋼構造物の維持管理, 色材協会誌, Vol.88, No.3, pp.85-89, 2015
- 9) 太田達哉, 坂本達朗, 高根由充, 紺野晃弘, 桑原圭介, 塚平博之, 江成孝文, 橋本康樹, 山本基弘, 藤井忠彦, 岡浩司, 大澤隆英: 塗装した金属溶射皮膜および金属めっき皮膜の約40年暴露後の皮膜特性評価, 防錆防食技術発表大会講演予稿集, Vol.34, pp.83-88, 2014
- 10) (公社)日本道路協会: 鋼道路橋防食便覧, 2014
- 11) (公財)鉄道総合技術研究所: 鋼構造物塗装設計施工指針, 2013
- 12) 大柴雅紀, 松野英則, 近藤照夫, 長屋五郎, 奥野真司: 金属溶射材料の種類と防食機構, 防錆防食技術発表大会講演予稿集, Vol.28, pp.75-78, 2008

回折 X 線を用いた表面層の分析によるレール削正量の検討

兼松 義一* 松井 元英** 上東 直孝*

Study of Rail Grinding Amount by Surface Layer Analysis Using X-ray Diffraction

Yoshikazu KANEMATSU Motohide MATSUI Naotaka UEHIGASHI

Rail grinding is so far carried out by many railway companies because of its effectiveness in suppressing squat. However, few studies have examined the amount of grinding required for rails which have never been grinded before. Hence, using a quantitative evaluation method of material state by diffraction X-ray analysis, the depth of surface layer affected by rolling contact was evaluated for rails with cumulative passing tonnage ranging from 100 to 700 million tons. As a result, it was found that the depth affected by rolling contact tends to increase to 0.5 to 1.5 mm with increase in cumulative passing tonnage.

キーワード：レール、転がり接触、X線フーリエ解析、硬さ試験、結晶方位解析

1. はじめに

レールは、車輪との繰り返し転がり接触により金属組織に影響を受け、その状況によっては微小なき裂が形成され、シェリング等の転がり接触疲労に起因した損傷へと進展する場合がある。レールの車輪転走面に形成された加工硬化層（以降、転がり接触疲労層という）を除去するレール削正は、シェリング抑制効果があり、国内外で検討・実施されている¹⁾²⁾。国内においては、転がり接触疲労層除去を目的としたレール削正では、通過トン数0.5億トンにつき削正量0.1mmが、指標として用いられることが一般的である³⁾⁴⁾。

レールのメンテナンスコスト低減に向けた取り組みの一環として、鉄道事業者ではレール削正の適用範囲の拡大やレール削正車の新規導入が進められてきた⁵⁾。その際、これまで削正を実施していないレールを削正する場合に、どの程度の削正量が適切であるかを知る必要があるが、これまで検討された事例は少ない。また、レール表面の転がり接触疲労層の除去を目的としたレール削正における削正量を検討するにあたっては、車輪との繰り返し接触によって生じたひずみ等の材料変化を定量的に把握したうえで削正量を検討することが望ましい。

これまでレール表面の転がり接触疲労層の評価の手段として、金属組織の顕微鏡観察や硬さ分布測定⁶⁾、X線回折を用いた集合組織の測定⁷⁾や結晶方位解析⁸⁾等が提案されてきた。しかし、上述の手法は定性的な評価に留まることや、車輪と転がり接触するレール最表面状況を十分に評価できないことが課題であった。著者らは、回折X線のラインプロファイル解析（以降、X線フー

リエ解析と呼ぶ）を適用した転がり接触による塑性変形程度の定量化について検討⁹⁾しており、X線フーリエ解析から算出される二つの指標（転位密度と結晶子サイズ）を用いたレールの転がり接触疲労層の評価への適応の可能性について報告した⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

X線フーリエ解析をレール削正量の検討に資するために、従来の評価手法との相関性を確認する必要がある。そこで、累積通過トン数7億トンのレールについて、硬さ分布測定、結晶方位解析およびX線フーリエ解析を実施し、X線フーリエ解析での評価手法の特徴を明らかにした。また、これまでに削正を実施していない累積通過トン数1~7億トンのレールについて、X線フーリエ解析によって、転がり接触疲労層深さを評価¹²⁾し、各レールのレール削正量を検討した結果を報告する。

2. レールの転がり接触とX線フーリエ解析

2.1 転がり接触と金属組織の変化

図1には敷設された列車進行方向断面の金属組織写真の例を示す。また、図2にレールの転がり接触による金属組織の変化の模式図を示す。レール鋼の金属組織は主にパーライト組織を有する結晶粒の集合体である。レールが繰り返し転がり接触を受けると結晶粒内に転位が発生し塑性ひずみが蓄積される。転位は再配列すると新たな結晶粒界を形成し、金属組織が微細化しながら変化していく。これらより、繰り返し転がり接触を受けたレールには、転がり接触の履歴に対応した金属組織の微細化や車輪とのすべり接触による塑性流動が形成される。

2.2 X線フーリエ解析

レールなど結晶性の物質にX線を照射した際に、Braggの回折現象によって得られる回折X線は、様々

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 材料技術研究部

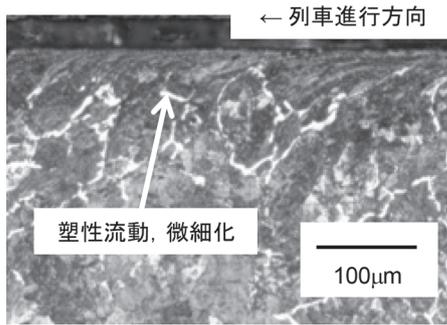


図1 転がり接触を受けたレールの金属組織の例

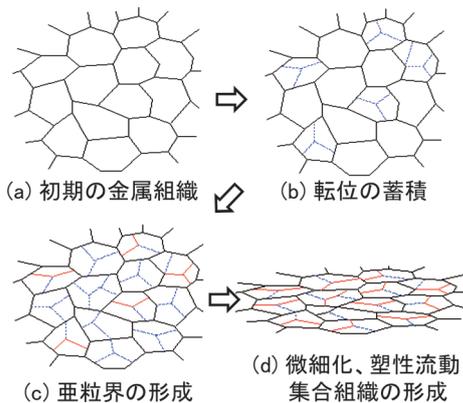


図2 転がり接触による金属組織の模式的变化

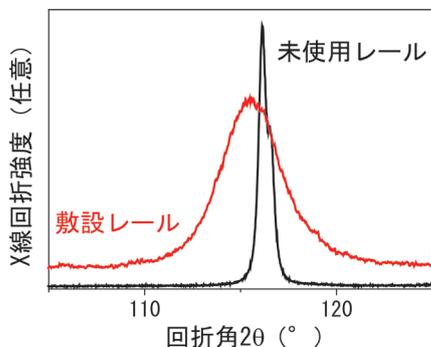


図3 未使用レールと敷設レールの回折X線の形状変化の例

な要因によってその高さ、形状が変化する。例えば、結晶が一様にひずめば、その回折X線の回折角度が移動し、回折に寄与する結晶数が増減すればその積分強度が増減し、不均一なひずみが増えれば回折X線形状が広がる。図3に敷設レールから得られたフェライト相の回折X線ピークの一部の変化を示す。転がり接触を受け、塑性変形することで、図3で示すように回折X線の回折角度がシフトし、ブロードになっていることが分かる。

回折X線の変化は理論的に計算できることから、回折X線ラインプロファイルを逆解析することで、結晶材料中の格子欠陥に関する情報を得ることができる。回折X線の広がりに対する結晶子サイズと格子ひずみによる影響を

分離する方法の1つが Williamson-Hall プロット¹³⁾である。なお、ここでの結晶子とは、回折に寄与する最小単位で結晶粒の中で単結晶としてみなせる部分のことであり、金属組織観察で確認される結晶粒とは異なる。よって、結晶子サイズは結晶粒径より小さいか、もしくは等しくなる¹⁴⁾。

Williamson-Hall プロットは、結晶方位によるひずみの異方性を考慮していない。このため、鉄鋼材料についてこれらの方法を用いた解析は定性的な評価にとどまっていた。Ungárらは結晶の弾性異方性や、転位によるひずみの結晶方位異方性を考慮した新たな解析手法を modified Williamson-Hall 法および modified Warren-Averbach 法として提案した¹⁵⁾¹⁶⁾。これらは回折X線に現れる拡がりの異方性を考慮しており、この方法により信頼性の高い転位密度等の解析が実現した。

2.3 X線フーリエ解析手順⁹⁾

X線フーリエ解析による定量評価は、X線回折測定から得られた波形情報をもとに以下のように行った。まず、式(1)に示す理論式から結晶子サイズの初期値 a_0 を得る。

$$\Delta K = a_0 + \varepsilon K \quad (1)$$

ここで、 K は $K = 2\sin\theta/\lambda$ であり、X線測定において回折ベクトルと呼ばれている。 θ と λ は回折角および入射X線の波長である。これは、Williamson-Hallの式と呼ばれ、最小二乗法による直線近似により、結晶子サイズと不均一ひずみ ε を得る。しかし、前述したように弾性異方性が、式(1)では考慮されておらず、鉄鋼材料への適用が難しかった。そこで、T. Ungárらは弾性異方性を考慮して次式を含めたX線フーリエ解析を考案した。

$$\Delta K = a + \beta K \bar{C}^{1/2} + O(K^2 \bar{C}) \quad (2)$$

ここで、 β と O は転位密度に関係する定数である。 \bar{C} は転位コントラスト因子と呼ばれるもので、弾性異方性を考慮するために導入された。この \bar{C} 因子はX線回折の波形情報から実験的に求める場合と理論値から見積もる場合とがあり、塑性変形状態に依存する。

式(1)で得られた a_0 を変化させて、最小二乗法によるフィッティングを繰り返しながら、式(2)を満たすような、 \bar{C} 因子、 a 、 β および O を決定する。次に、実験的に転位密度を見積ることが可能な式(3)を利用し、決定した \bar{C} 因子を代入することで転位密度を算出する。

$$\ln A(L) = \gamma - \rho L^2 - \frac{\pi b^2}{2} \ln \left(\frac{R_c}{L} \right) K^2 \bar{C} + P(K^2 \bar{C})^2 \quad (3)$$

ここで、 $A(L)$ はレール鋼のFe結晶から得られた各結晶面でのX線波形情報を擬フーリエ関数(ガウス関

数とローレンツ関数の組合せ関数)で近似した時の実部フーリエ係数である。 L はフーリエ長さである。 b はパーガスベクトルと呼ばれる材料固有値で、レール等の鋼(bcc-Fe)の場合、 0.248nm となる。 Re と P は転位密度に関係する定数であり、 γ は定数である。

式(3)において、フーリエ長さを変化させて最小二乗法によるフィッティングを行い、右辺第二項を求め、第二項中の $\ln(L)$ に対する傾きを求めることで、実験的に転位密度 ρ を見積もることが可能となる。本研究では式(2)および式(3)の結晶子サイズ a と転位密度 ρ を転がり接触疲労層の評価指標として求めた。

3. 解析用レールの諸元

解析対象としたレールは同一線区内(複線区間)の駅間・直線区間とし、レール削正は未実施のものである。また、レール種別は60kgレール、当該区間の通過列車の車輪形状は修正円弧踏面である。表1に解析レールの諸元を示す。以降、各レールは目標通トン数で表記する。

X線フーリエ解析を含めた材料評価は、評価できる試料の大きさに限りがあるため、レール長手方向および幅方向(まくらぎ方向)から試料を採取する位置を考慮する必要がある。レール長手方向の試料採取位置の選定は、解析レールの長さ約1.2mのうち、車輪との接触条件が厳しいと考えられる箇所を選定することとした。そこで、レール頭頂面凹凸測定器(HTR-8:原田製作所製)を用いて、レール幅中心にてレール長手方向1m区間の凹凸測定を行い、その結果から凹凸の凸部分から試料を採取した。また、車輪の転走面である照面が転がり接触を受けていることから、レール幅方向(まくらぎ方向)は照面から採取した。

4. X線フーリエ解析結果と従来評価方法(硬さ分布・結晶方位解析)の比較

これまで、転がり接触疲労層を評価する手法として、加工硬化(塑性ひずみ量)に対する硬さ変化⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾、X線による集合組織および結晶方位解析による結晶情報の変

表1 解析レールの通過トン数

No.	解析用レールの目標通トン数	採取レールの累積通過トン数
1	1億トン	1.3億トン
2	2億トン	2.1億トン
3	3億トン	2.9億トン
4	4億トン	3.9億トン
5	5億トン	4.9億トン
6	6億トン	5.7億トン
7	7億トン	7.1億トン

化⁽¹⁹⁾が検討されてきた。今回のX線フーリエ解析と従来評価手法との対応を確認するために、7億トンレールについて、硬さ測定や結晶方位解析を実施した。

4.1 X線フーリエ解析

測定X線にはCu-K α を線源とするX線発生装置(リガク社製, Smart Lab)を用いた。レールは一般的にパーライト組織(フェライト相とセメント相の層状組織)であり、フェライト相はセメント相と比べると硬さが低い。これまでの報告⁽²⁰⁾では、フェライト層に転がり疲れによるき裂が形成される傾向がある。そこで、回折X線から得られたフェライト相の回折X線ピークを解析対象とした。得られた回折X線について、専用解析ソフトウェアによってバックグラウンド除去の後、K α 1とK α 2を分離した。K α 1とK α 2は二重ピークであるため、強度の高いK α 1を解析対象とした。そして、分離したK α 1の回折X線に対して、各回折角 θ [rad]における積分強度を測定し、2章で記載した式よりフェライト中の格子ひずみ ϵ を求めた。また、測定した回折面は、(110), (200), (211), (220), (310)および(222)である。なお、測定装置に起因する回折X線の幅の広がりを除去するための標準サンプルとして、LaB6パウダー(SRM 660b, NIST)を用い、測定装置に起因する幅広がりを除去した。試料の深さ方向の評価のために、X線測定後、エメリー紙による研磨および電解研磨を用いて所定の深さまで除去する逐次電解研磨によって測定を繰り返した。

7億トンのレールの車輪転走面である照面(GC約3mm~35mmで車輪との接触による金属光沢)の中央付近から10×10×10mmの試験片を採取し、表層から深さ方向に電解研磨をしながら、各深さ位置において3回測定を行い、X線フーリエ解析で評価した。X線フーリエ解析から得られる結晶子サイズおよび転位密度の平均値の結果を図4に示す。ここで、結晶子サイズと転位密度は

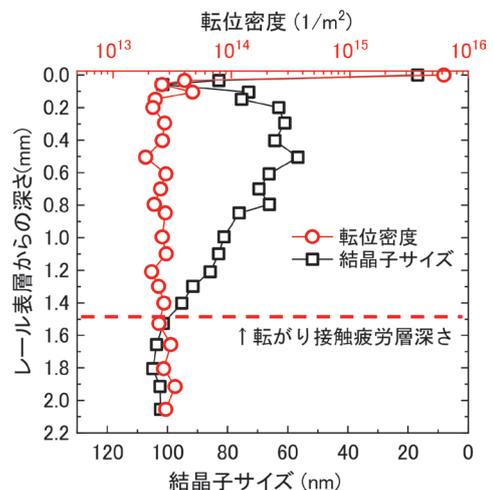


図4 7億トンレールのX線フーリエ解析結果

ともにX線フーリエ解析で見積ることができる指標で塑性ひずみ量に関係があり、塑性ひずみが蓄積されると結晶子サイズは小さく、転位密度は大きくなると考えられる。

レール表層の転位密度は測定深さ中最も高い値であり、転位密度はレール鋼の二円筒試験において微小き裂が形成されると考えられる転位密度の閾値¹¹⁾である 1×10^{15} を超えていた。また、結晶子サイズはレール表層が最も小さい値であった。算出された両方の指標の変化が漸減し、母材レベルまで低下した深さを転がり接触疲労層深さとする、約1.5mmまで影響があることが明らかとなった。この結果はX線を照射した面積中（レール幅方向約10mm×レール長手方向約3mm）の平均的な値である。

4.2 硬さ分布測定

7億トンレールの車輪転走面である照面（GC約3mm～35mmで車輪との接触による金属光沢）のうち照面中央付近のGCから22.5mm位置および30.0mm位置のレール幅方向断面について、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて、レール表層から深さ方向に分布測定を行った。試験荷重は表層からの深さ0.5mmまでは1N、それ以降は3Nとした。保持時間は15秒である。各測定深さにおいて3回測定を実施した。

図5に、硬さ測定結果の平均値の分布を示す。レール表層では転がり接触の影響による加工硬化のため、硬さ値が上昇しており、GC22.5mm断面では約310HV、GC30.0mm断面では約360HVであった。また、表層から内部にかけてGC22.5mm断面では約0.2～0.3mm深さ、GC30.0mm断面では0.5～0.75mm深さまで硬化していることがわかる。

硬さ分布測定は、転がり接触によるひずみが蓄積した結果として表れる加工硬化を評価するのに適し、一般的かつ簡便な手法であるが、図5のように測定する断面・位置によって、その最大値や深さが異なることが明らかとなった。また、硬さ分布測定は、任意の位置について硬さを連続的に評価する1次元的な評価にとどまるため、評価可能な領域は限

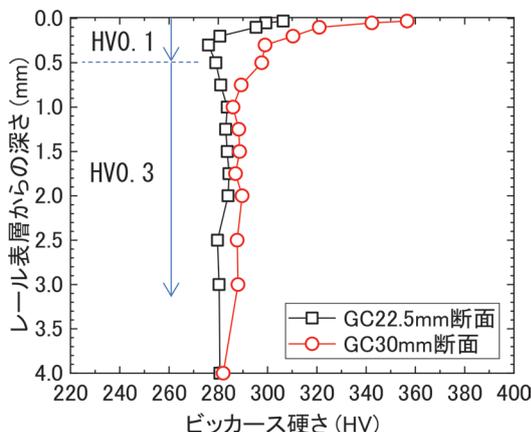


図5 7億トンレールの断面硬さ分布測定結果

定的であり、適切な評価位置を選択することが困難である。

4.3 結晶方位解析

結晶方位解析は、走査型電子顕微鏡の後方散乱電子回折パターンを解析することで、微視的な結晶方位や結晶系を測定することができる手法である。7億トンレールの照面のうちGCから19.5mm位置および24.5mm位置のレール幅方向断面について、結晶方位解析を行った。なお、試験片は鏡面研磨後に電解研磨によって表層の加工歪みを除去する必要があるため、4.2節の硬さ分布測定を実施した断面から数mm程度移動した断面とした。測定条件は、倍率：90倍、測定領域：レール長手方向1mm×レール深さ方向2mm、測定間隔：1 μ mとした。

7億トンレールのGC19.5mm断面およびGC24.5mm断面の逆局点図（IPF）を図6に示す。逆局点図とは各測定点のND方向（本測定ではレールの高さ方向）と垂直になっている結晶面の面指数を求め、カラーキーにしたがって表示したものであり、レール高さ方向から見たときに、どの結晶面が見えているかを示すものである。

両観察面とも、レール表層から約1mm深さまでは青色の部分が多く、(111)の集合組織が形成されていると判断した。これは既往研究¹⁹⁾と一致する結果である。各断面とも最表層は転がり接触によって結晶粒が微細化しており、結晶粒が母材レベルに戻る傾向がある。結晶方位解析は任意の断面を評価するため、2次元的な評価と言える。そのため、レールの照面のようなレール幅方向およびレール長手方向に広がりがあり、かつ深さ方向の影響深さを評価する場合には、観察断面によってその

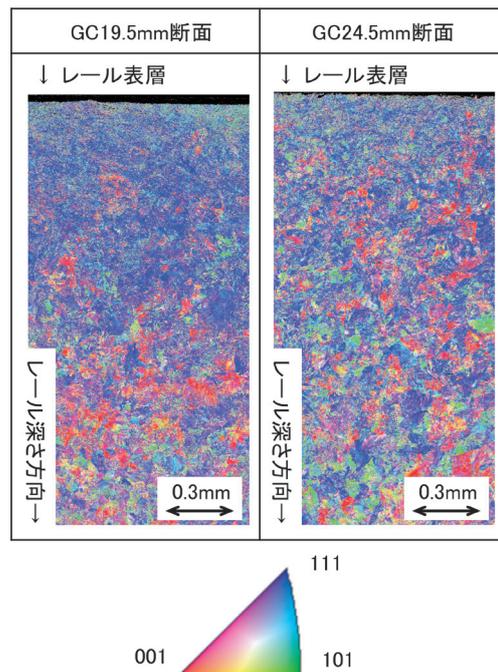


図6 7億トンレールの結晶方位解析結果

結果は異なることがわかる。

4.4 従来評価方法との比較に関する考察

4.2節の硬さ分布測定および4.3節の結晶方位解析による転がり接触疲労層の評価は、定量的な値が得られるが、評価断面によってその傾向が変わる。

レール削正の目的のひとつは、レールに形成された転がり接触疲労層を除去することである。その削正量を検討するためにはレール幅方向に広がりを持つ車輪転走面についてできる限り広範に評価することが適切であると考える。X線フーリエ解析では、解析試料のサイズに制限を受けるが、その解析結果はX線を照射した面積中の結晶の平均的な値をとり、車輪転走面を平均的に評価できる。そのため、X線フーリエ解析がレール削正の深さの検討に妥当な手法であると考えられる。

5. 通トン別レールのX線フーリエ解析

5.1 X線フーリエ解析結果

表1の各種レールについてそれぞれ3回ずつX線フー

リエ解析を実施した。X線フーリエ解析から得られる結晶子サイズおよび転位密度の解析結果の平均値を図7に示す。いずれのレールも表層において結晶子サイズは最も小さく、転位密度の値は測定した深さ領域のうち最も大きい値となった。表層における結晶子サイズや転位密度の値は、レールの使用履歴に依存すると思われるが、今回対象とした解析レールの使用履歴の条件において、転位密度は微小き裂が形成されると考えられる閾値¹¹⁾である 1×10^{15} を超えていた。

算出された両方の指標の変化が漸減し、母材レベルまで低下した深さ（転がり接触疲労層深さ）を図7中の破線で示す。また、図7中に、各レールの転がり接触疲労層深さの一覧を記す。累積通過トン数の増加に伴い、転がり接触疲労層深さも増加する傾向にあることが分かった。

5.2 レール削正量の検討

今回のX線フーリエ解析結果では、転がり接触疲労層の深さは、1億トンレールで0.5mm、7億トンレールでは1.5mmであった。レール削正の目的である転がり接触疲労層を除去することを考慮し、母材レベルまで復

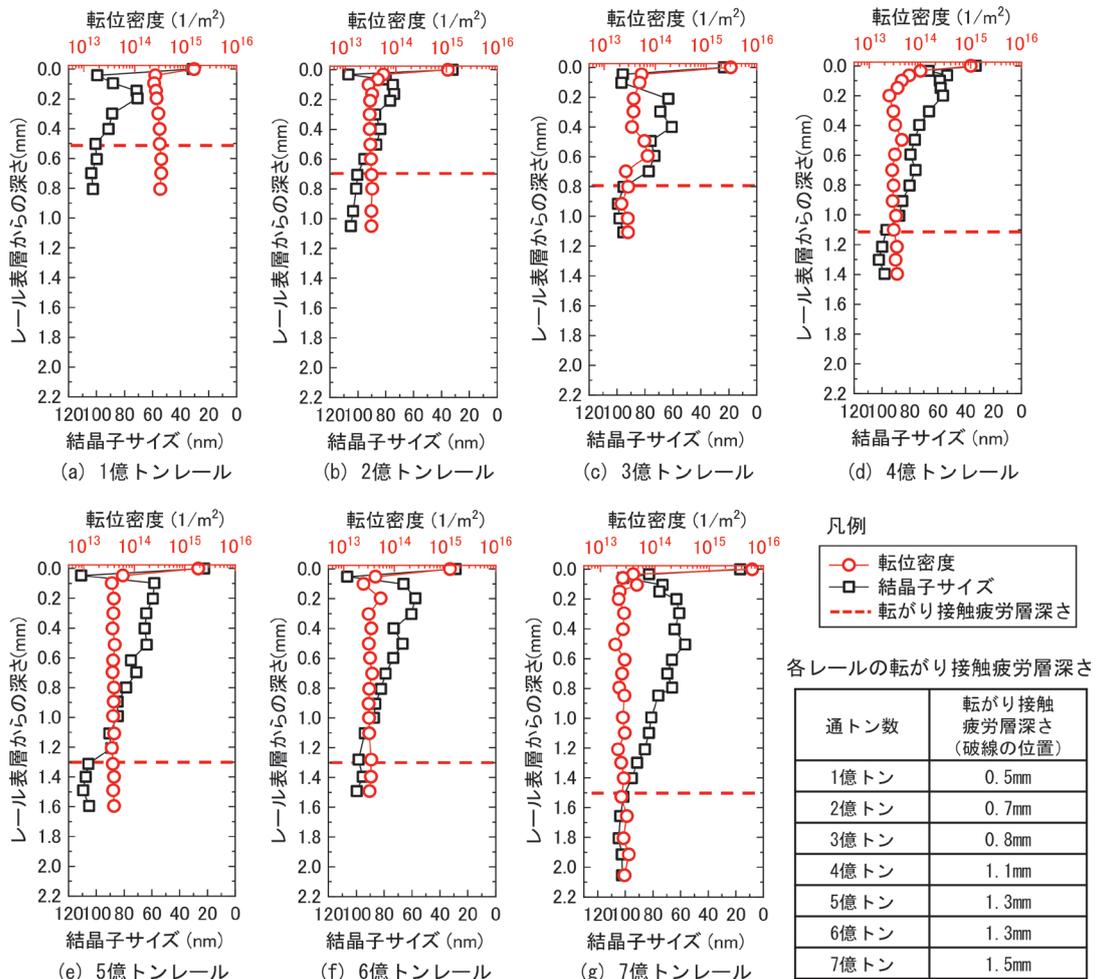


図7 各種レールのX線フーリエ解析結果

元する場合には、たとえばミリング式のレール削正車を活用することや、削正量を増やした削正パターンでのレール削正を実施することが必要になると考えられる。一方で、図7で示したように微小なき裂が形成される程度の材料変化（転位密度が 1×10^{15} 以上）が生じている深さは、どの通過トン数のレールにおいても0.1mm以内であり、一般的に使用されている削正量でも、最も除去すべき領域が除去できると考えられ、削正の効果があると考えられる。そのため、削正する線区の通過トン数や削正車の運用・削正コスト等に応じて削正量を検討することが必要となる。なお、文献21では削正後0.5億トン経過時のレールのX線フーリエ解析結果に基づき、効率的な削正間隔や削正量を報告している。これらの解析結果を蓄積し、より効率的なレール削正を検討する必要がある。

6. まとめ

回折X線を用いたレールの転がり接触疲労層の程度を評価する手法を実レールへ適用するにあたり、従来の評価手法である硬さ分布測定および結晶方位解析と比較した。また、レール削正に必要な削正量の検討に資するため、レールの転がり接触疲労層深さを推定した。同一線区の1~7億トンのレールについて、X線フーリエ解析を行った結果、以下のことが分かった。

- ① 硬さ分布測定および結晶方位解析による転がり接触疲労層の評価は、評価断面によってその傾向が変わること、すなわち観察する断面で転がり接触疲労層深さが変わることが明らかとなった。
- ② X線フーリエ解析では、X線を照射した面積中の結晶の平均的な値をとり、車輪との転走面を平均的に評価できる。そのため、X線フーリエ解析がレール削正の深さの検討に妥当な手法であると考えられる。
- ③ 1~7億トンのX線フーリエ解析の結果、いずれのレールも最表層において結晶子サイズと転位密度の値は導入されたひずみの程度が大きいことを示していた。今回解析対象としたレールの使用履歴に依存すると思われるが、レール鋼の二円筒試験において微小なき裂が形成される転位密度の閾値である 1×10^{15} を超えていた。
- ④ 各レールの転がり接触疲労層深さは、通過トン数の増加に伴い、増加する傾向があり、1~7億トンに対して、0.5~1.5mmであった。

文 献

- 1) 高山宜久, 山崎久彰: 在来線レール削正車の導入と効果に

ついて, 日本鉄道施設協会誌, 第39巻, 第7号, 2001

- 2) Grassie, S.L, "Appropriate specification of grinding requirements for heavy haul railways," IHHA'99 STS-conference, 1999.
- 3) Ishida, M., Abe, N. and Moto, T., "The effect of preventive grinding on rail surface shellings," Quarterly Report of RTRI, 39-3, pp.136-141, 1998.
- 4) 大石隆明, 石川智志: レール削正車によるレール削正, 新線路, 69, 4, 2015
- 5) 今井啓貴, 今西進也, 辰己新太郎: ミリング式レール削正車の効率的な稼働に向けた取組み, 新線路, 67, 3, 2013
- 6) 佐藤幸雄: 新幹線レールのころがり接触面における塑性変形挙動, トライボロジスト, 36, 8, p.693, 1991
- 7) 柏谷賢治: レール頭頂面変形層における集合組織の発達について, 材料, 36, 407, p.786, 1987
- 8) Y. Satoh and K. Iwafuchi, "Effect of rail grinding on rolling contact fatigue in railway rail used in conventional line in Japan," Wear, 265, p.1342, 2008.
- 9) 松井元英: 鉄道レールの転がり疲労状態把握に向けたX線フーリエ解析の適用, 日本信頼性学会誌, 38, 3, 2016
- 10) Motohide Matsui, Yuji Kamiya, "Evaluation of material deterioration of rails subjected to rolling contact fatigue using x-ray diffraction," Wear, vol.304, Issues 1-2, 2013.
- 11) Motohide Matsui, Yoshikazu Kanematsu, Hiraku Tanimoto, "Application of X-ray Fourier Analysis to quantification of cumulative RCF in rail," 10 th International Conference on Contact Mechanics proceedings, 2015.
- 12) 兼松義一, 松井元英: レールの回折X線による転がり疲れの影響深さと累積通トンの関係, 鉄道工学シンポジウム論文集, 25, 2021
- 13) G.K. Williamson, W.H. Hall, Acta Metal., 1, 22, 1953
- 14) 熊谷正芳, 横山亮一: X線回折ラインプロファイル解析による微視組織評価法, 材料, Vol.69, No.3, 2020
- 15) B.E. Warren, B.L. Averbach, J. Appl. Phys., 21, 595, 1950.
- 16) T. Ungár, A. Borbély, Appl. Phys. Lett., 69, 3173, 1996.
- 17) 高田憲一, 仲尾浩: 近鉄におけるレール削正作業への取り組み, 新線路, vol.57, no.8, 2003
- 18) 柏谷賢治, 井上靖雄, 佐藤幸雄: 転がり接触疲労によるレール材試験片表面下の集合組織の発達, 材料, vol.37, 1988
- 19) 佐藤幸雄, 岩淵研吾: 結晶方位解析によるレール頭頂面の転がり接触損傷度の評価, 鉄道総研報告, Vol.18, No.10, 2004
- 20) Garnham, J.E, "The role of deformed rail microstructure on rolling contact fatigue initiation," Wear, 265, pp.1363-1372, 2008.
- 21) 松井元英, 兼松義一, 辻江正裕: 経年したレールの内部を診る, RRR, Vol.76, No.2, 2019

車軸軸受のフレッチング摩耗防止に対する セグメント構造炭素膜の効果

岡村 吉晃* 鈴木 大輔* 生駒 一樹* 永友 貴史*

Effects of Segment-structured Carbon Film on Fretting Wear Prevention of Axle Journal Bearings

Yoshiaki OKAMURA Daisuke SUZUKI Kazuki IKOMA Takafumi NAGATOMO

In an axle journal bearing of railway vehicles, it is necessary to mitigate the fretting wear that occurs between the contact surfaces of the inner ring and the backing ring. In this work, we investigated the preventive effect of segment-structured carbon film on the fretting wear through rotation tests of full-scale railway axle bearings with the backing ring side face coated with the film. As a result, we have found that the film is effective in suppressing the fretting wear generated on the contact surfaces between the inner ring and the backing ring of the axle bearings.

キーワード：車軸軸受，フレッチング，摩耗，ダイヤモンド状炭素膜，セグメント構造

1. はじめに

鉄道車両用車軸軸受は、車体重量によって作用するラジアル荷重と走行中の車両の揺れなどによって発生するアキシャル荷重を支える。車軸軸受がラジアル荷重を負荷されながら回転すると、車軸軸受が取り付けられた車軸に回転曲げによるたわみが発生するため、車軸軸受の車輪側の内輪と車軸軸受の軸方向の取付け位置を決定する後ぶたの接触部において微小な相対すべり運動による損傷、すなわちフレッチングが生じる¹⁾。フレッチングによって発生した金属摩耗粉が車軸軸受の内部に侵入すると、軸受の摩耗や潤滑剤の劣化が懸念される。さらに、車軸軸受の軸方向の取付け位置の不整を引き起こす可能性も考えられる。車軸軸受のフレッチング対策として車輪側の内輪と後ぶたの間にOリング²⁾や軸受材料よりも軟質な黄銅板の外周部にゴムが成形されたゴム付き当板³⁾を挿入する方法が実用されているが、どちらもフレッチング摩耗粉の軸受内部への侵入を防止することは可能であるものの、フレッチングそのものの発生を防止するには至っていない。また、内輪と後ぶた間に部品を挿入することは、部品点数が増えるうえ、組立て作業時に取付けミスを引き起こす可能性がある。そのため、部品点数を増やすことなく、車軸軸受のフレッチング摩耗の対策を講じる手法を開発することは有意義であるが、これについて取り組まれた事例はほとんど見当たらない。

フレッチング摩耗を防止するためには、「設計改善」や「材料選択」のアプローチについて検討する必要がある⁴⁾。「設計改善」の観点から、筆者らは、現用の後ぶ

たのオイルシールしゅう動面に円周方向の溝を加工して後ぶたの剛性を低下させることによって内輪と後ぶたの接触面間における半径方向の圧力分布をできるだけ均一に近づけると、フレッチング摩耗が現用後ぶたを用いた車軸軸受より低減できることを報告した⁵⁾。

一方、「材料選択」の観点からは、後ぶたの内輪との接触面（以下、「後ぶた接触面」という）を摩擦係数が低く、密着性が高い上、後ぶたの変形にも追従できる硬質膜で被覆することが有効であることを明らかにした⁶⁾。硬質膜の一種であるダイヤモンド状炭素（DLC, diamond-like carbon）膜では、被覆した面の変形に追従できる成膜法としてセグメント構造化が考案されている⁷⁾⁸⁾。そこで本稿では、車軸軸受のフレッチング摩耗を防止することを目的に、内輪との接触面をセグメント構造DLC膜（以下、「S-DLC膜」という）で被覆した後ぶたを用いて車軸軸受の台上回転試験を実施し、S-DLC膜によるフレッチング摩耗の防止効果について検討した結果を報告する⁹⁾。

2. 試験条件

2.1 試験軸受

台上回転試験に使用する軸受は、既報¹⁾⁵⁾と同様、鉄道車両用車軸軸受として広く使用されているグリース密封形複列円すいころ軸受とした。図1にその概略図を示す。車軸軸受は、2列の軌道面を有する外輪と、内輪、ころおよび保持器が一体となった組立品、ならびにオイルシール、油切りおよび後ぶたによって構成されている。内輪の材質は機械構造用合金鋼（SNCM420相当）の浸炭材で、その表面硬さは58-62HRC（653-746HV相当）

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

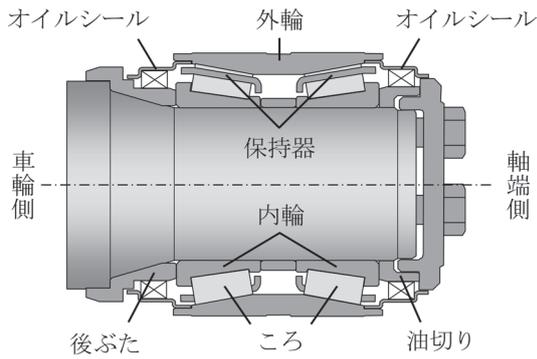


図1 車軸軸受の概略図

である。一方、後ぶたの材質は機械構造用炭素鋼 S45C の焼ならし材で、硬さは 167-229HBW (173-243HV 相当) である。軸受の外径、内径および幅の各寸法は、それぞれ $\phi 220\text{mm}$ 、 $\phi 120\text{mm}$ および 155mm である。なお、内輪と後ぶたは車軸に締めりばめで取り付けられている。

2.2 ダイヤモンド状炭素 (DLC) 膜

金属材料の表面をセラミックスなどの硬質膜で被覆すると、しゅう動性、耐摩耗性、耐焼付き性および耐腐食性等が向上することが知られている。そこで、内輪と後ぶたに発生するフレッチング摩耗を防止するため、表面処理の加工性や車軸軸受の生産性を考慮した上で、後ぶたの内輪との接触面を DLC 膜で被覆することにした。DLC の成膜は化学蒸着 (CVD, Chemical Vapor Deposition) 処理の一種であるプラズマ CVD 法によって行い、その成膜処理温度は 523K 以下である。DLC 膜の種類は水素化非晶質炭素 (a-C:H, Hydrogenated Amorphous Carbon) 膜であり、密着性を向上させるために基材 (後ぶた) との間にけい素 (Si) の中間層を設けた。後ぶた接触面にはりん酸塩被膜処理が施されているが、硬質膜の密着性を向上させるため、成膜前にりん酸塩被膜を研削加工によって除去して平滑にした。その結果、研削加工前の後ぶた接触面の算術平均粗さ Ra は $0.78\mu\text{m}$ であったが、研削加工によって Ra は $0.13\mu\text{m}$ になった。

図 2 に DLC 膜で被覆した後ぶた接触面の半径方向の断面組織を示す。断面組織は走査電子顕微鏡 (SEM, 加速電圧 15kV) を用いて観察した。なお、腐食液には 5% 硝酸アルコール溶液 (ナイタール) を用いた。DLC は基材の形状に沿って成膜されており、その平均膜厚は $1.7\mu\text{m}$ であった。また、後ぶたの材質は S45C の焼ならし材のため、フェライトとパーライトの二相組織が認められる。

DLC 膜の特性を表 1 に示す。なお、DLC 膜の押し込み硬さ (H_{IT}) は、計装化押し込み硬さ試験の試験方法について定めた ISO 14577-1¹⁰⁾ に準拠したナノ押し込み硬さ試験機を用いて、圧子の押し込み深さが DLC 膜の厚さの

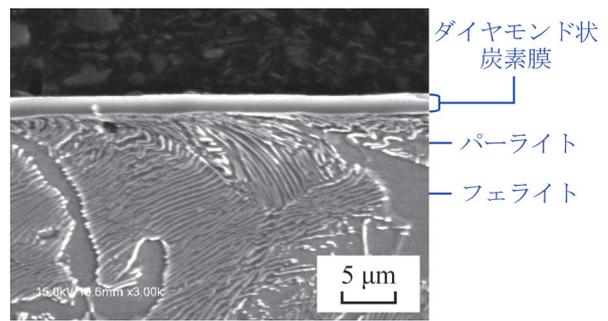


図2 ダイヤモンド状炭素膜で被覆した後ぶた接触面の断面組織

表 1 使用したダイヤモンド状炭素膜の特性

押し込み硬さ	16.5 GPa
膜厚	$1.7\mu\text{m}$
摩擦係数*	0.17-0.21

* 乾燥摩擦条件下での軸受鋼 (SUJ2) に対する摩擦係数

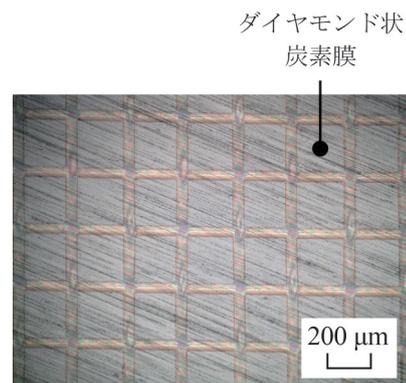


図3 セグメント構造ダイヤモンド状炭素膜の拡大写真

約 1/10 になる試験力で測定した。

S-DLC 膜は後ぶた接触面にタングステン製メッシュワイヤを配置した状態で DLC 膜を被覆することで形成される。メッシュワイヤは平織であり、メッシュワイヤの太さおよび目開きをそれぞれ $50\mu\text{m}$ および $204\mu\text{m}$ とした。図 3 に後ぶた接触面を被覆した S-DLC 膜の拡大写真を示す。メッシュワイヤを配置したことにより、一辺が約 $200\mu\text{m}$ のセグメント構造が形成されている。

図 4 に S-DLC 膜で被覆した後ぶた接触面の外観および断面曲線を示す。なお、断面曲線は表面粗さ測定機を用いて半径方向の内径側から外径側に向けて測定した。S-DLC 膜で被覆した後ぶた接触面の算術平均粗さ Ra は $0.33\mu\text{m}$ であり、被覆前の算術平均粗さより大きい。これは、接触面を S-DLC 膜で被覆したことによって表面に凹凸が生じたためである。

2.3 台上回転試験

台上回転試験には鉄道総研が所有する車軸軸受耐久試験装置を用いた。試験方法および試験条件は既報¹⁾⁵⁾と同じで、車軸軸受の分解検査が行われる一般的な走行距離である60万km相当に達するまで回転試験を行った。なお、運転中の軸受外輪の表面の最高上昇温度は周囲温度に対して約55Kで、車軸軸受の性能試験方法について定めたJRIS J 0455¹¹⁾の規格値内(周囲温度+70K以

下)であった。

3. 試験結果

3.1 外観観察および摩耗深さ分布測定

図5および図6にS-DLC膜で被覆した後ぶたを用いた車軸軸受の回転試験後の後ぶた接触面および車輪側の内輪大端面の外観と摩耗深さ分布を示す。摩耗深さ分布

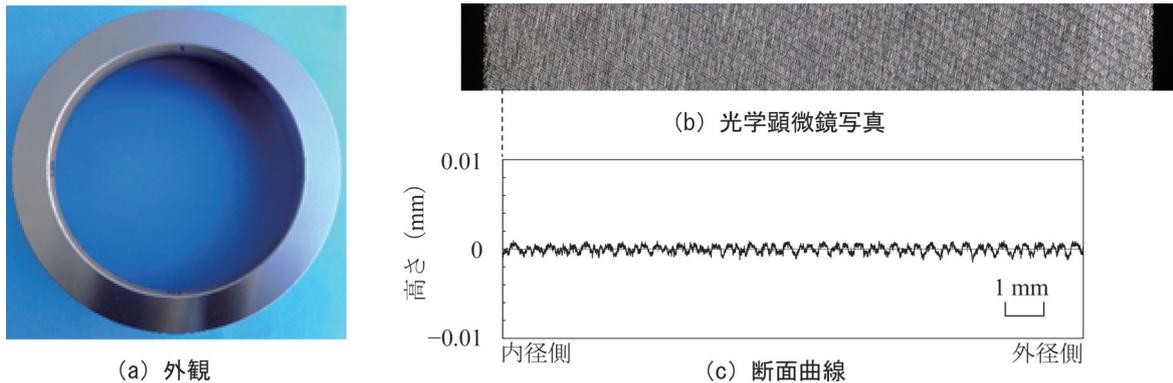


図4 セグメント構造ダイヤモンド状炭素膜で被覆した後ぶた接触面の外観および断面曲線

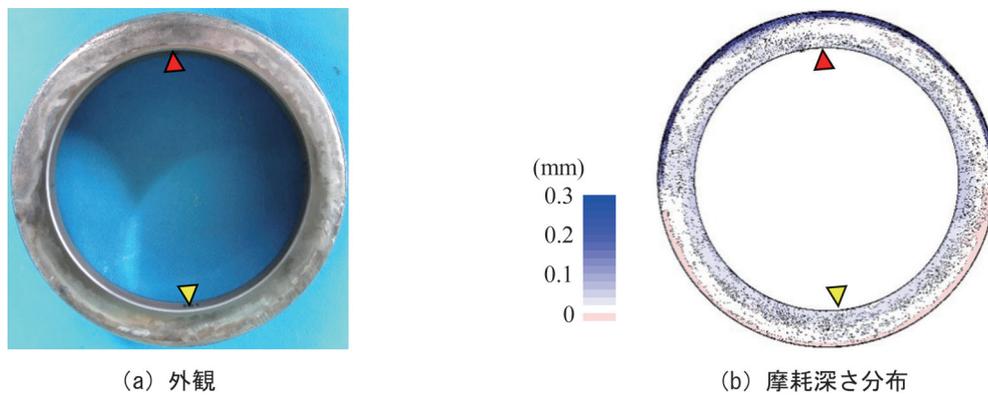


図5 回転試験後の後ぶた接触面の外観および摩耗深さ分布

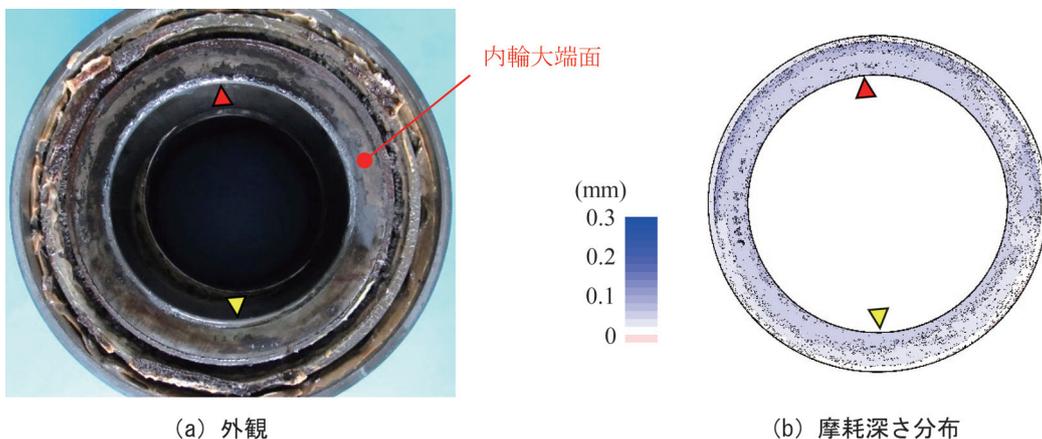


図6 回転試験後の車輪側の内輪大端面の外観および摩耗深さ分布

は2次元レーザ変位計を用いて円周方向に測定した。どちらの面にも摩耗が認められ、内輪には赤褐色に変色したグリースが付着している。一般にフレッチング摩耗粉は赤褐色の酸化鉄(III) ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) といわれている¹²⁾ ため、フレッチング摩耗粉が混入したグリースは赤褐色を呈する。当該軸受の使用状況からフレッチング摩耗以外の理由でグリースが赤褐色に変化したとは考えにくいことから、S-DLC膜で被覆した後ぶた接触面と内輪大端面の摩耗はフレッチング摩耗であったといえる。後ぶた接触面の摩耗は全域で発生しているが、特に最外径で著しい。一方、内輪大端面の摩耗は後ぶたと接触していた領域ではほぼ一様に発生している。

3.2 表面観察および断面曲線測定

図5(b) および図6(b) に示した摩耗深さ分布において、フレッチング摩耗が著しかった領域(図中の赤印部)と比較的軽微であった領域(図中の黄印部)のそれぞれについて、表面観察と断面曲線測定を実施した。回転試験中、後ぶたと内輪は円周上の同位相で互いに接触していた。

初めに、フレッチング摩耗が著しかった領域の後ぶた接触面および内輪大端面の拡大写真と断面曲線を図7および図8に示す。図7に示した後ぶた接触面のフレッチング摩耗は半径方向の外径側で著しく、摩耗深さは最

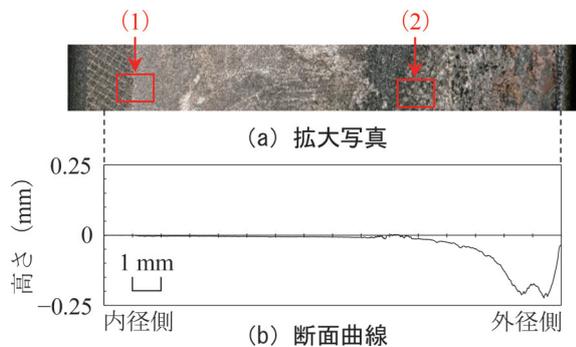


図7 回転試験後に摩耗が著しかった領域の後ぶた接触面の拡大写真と断面曲線

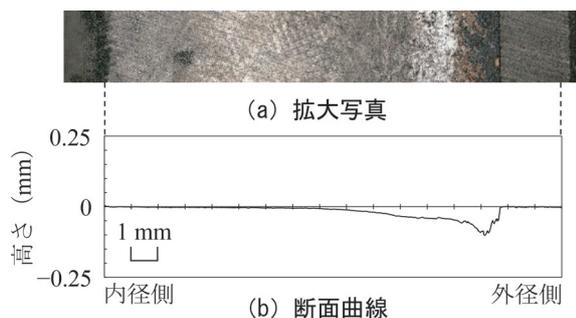


図8 回転試験後に摩耗が著しかった領域の内輪大端面の拡大写真と断面曲線

大よ0.22mmである。また、内径側の表面にはセグメント構造が認められないものの、摩耗は軽微である。一方、図8に示した内輪大端面のフレッチング摩耗は半径方向の中央から外径側にかけて発生しており、摩耗深さは最大約0.10mmである。

次に、フレッチング摩耗が比較的軽微であった領域の後ぶた接触面と内輪大端面の拡大写真と断面曲線を図9および図10に示す。図9に示した後ぶた接触面にはセグメント構造が認められ、摩耗はほとんど生じていないことがわかる。図10に示した内輪大端面においてもフレッチング摩耗はほとんど認められない。また、後ぶたとの接触によって内輪大端面にはセグメントが転写されている。図10(c)に示すように、転写された箇所の断面

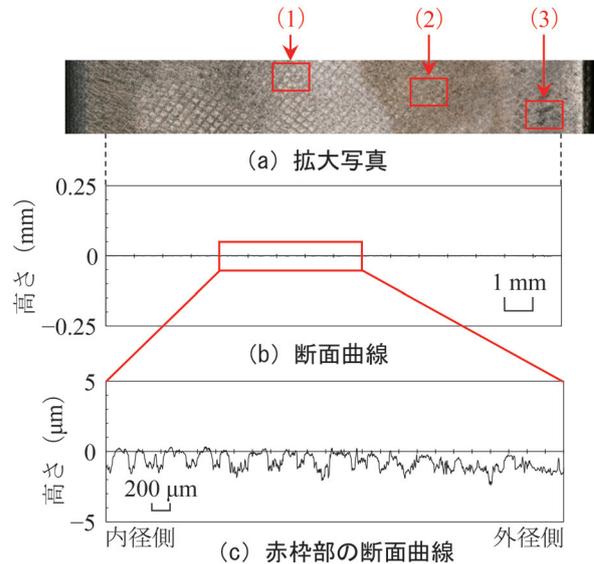


図9 回転試験後に摩耗が比較的軽微であった領域の後ぶた接触面の拡大写真と断面曲線

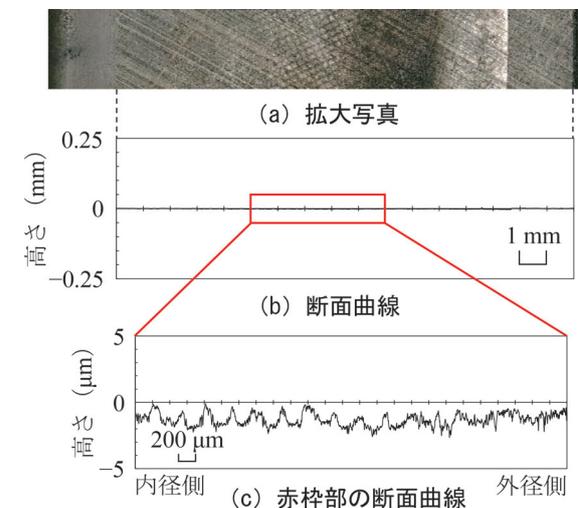


図10 回転試験後に摩耗が比較的軽微であった領域の内輪大端面の拡大写真と断面曲線

曲線を拡大すると、後ぶた接触面を被覆した S-DLC 膜の凹凸が押し付けられたことによって、内輪大端面の表面が塑性変形して凹凸の形状を示していることがわかる。

3.3 エネルギー分散 X 線 (EDX) による表面分析

後ぶた接触面を被覆した S-DLC 膜が回転試験後に残存しているかを確認するため、後ぶたの接触表面を走査電子顕微鏡 (SEM, 加速電圧 15kV) で観察し、SEM に取り付けられているエネルギー分散 X 線分析装置 (EDX) を用いて元素分析を実施した。分析対象の元素は鉄 (Fe)、および基材と DLC 膜の中間層に含まれる Si とした。

図 11 に、フレッチング摩耗が著しかった領域である図 7(a) の赤枠部 (1) および (2) における SEM/EDX 像を示す。S-DLC 膜で被覆した回転試験後の後ぶた接触面には Si が検出されていないことから、DLC 膜がすべてはく離したことを確認できる。なお、内径側に S-DLC 膜が残存しているが、ここは内輪と接触していなかった部分である。

次に、図 12 にフレッチング摩耗が比較的軽微であった領域の図 9(a) の赤枠部 (1)~(3) における SEM/EDX 像を示す。表面観察においてセグメント構造が認められた図 9(a) の赤枠部 (1) では、S-DLC 膜が完全に残存している。また、表面観察において茶色く変色していた図 9(a) の赤枠部 (2) では、S-DLC 膜がわずかに残存していることが確認できる。さらに、表面観察においてやや黒く変色していた図 9(a) の赤枠部 (3) では、S-DLC 膜は残存していない。以上のことから、S-DLC 膜の摩耗は半径方向の外径側に向かうにしたがい、著しくなっていることがわかる。

3.4 グリース中の鉄分の定量

S-DLC 膜によるフレッチング摩耗の防止効果を確認するため、回転試験後に車軸軸受の車輪側の内輪組立品から、保持器柱部の内側およびころ大端部に付着していたグリースを採取し、走査型蛍光 X 線分析装置を用いて鉄分を定量した。その結果を表 2 に示す。なお、表中には内輪との接触面を DLC 膜で被覆していない現用後

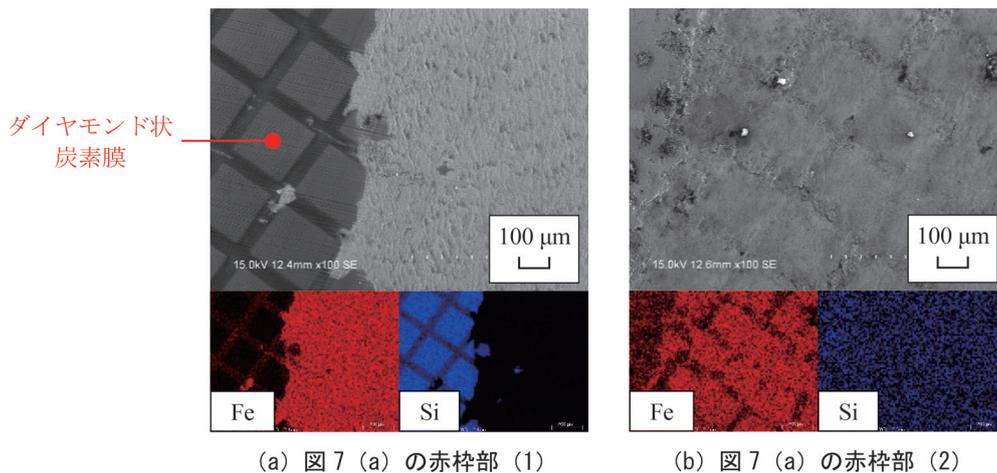


図 11 回転試験後に摩耗が著しかった領域の後ぶた接触面の SEM/EDX 像

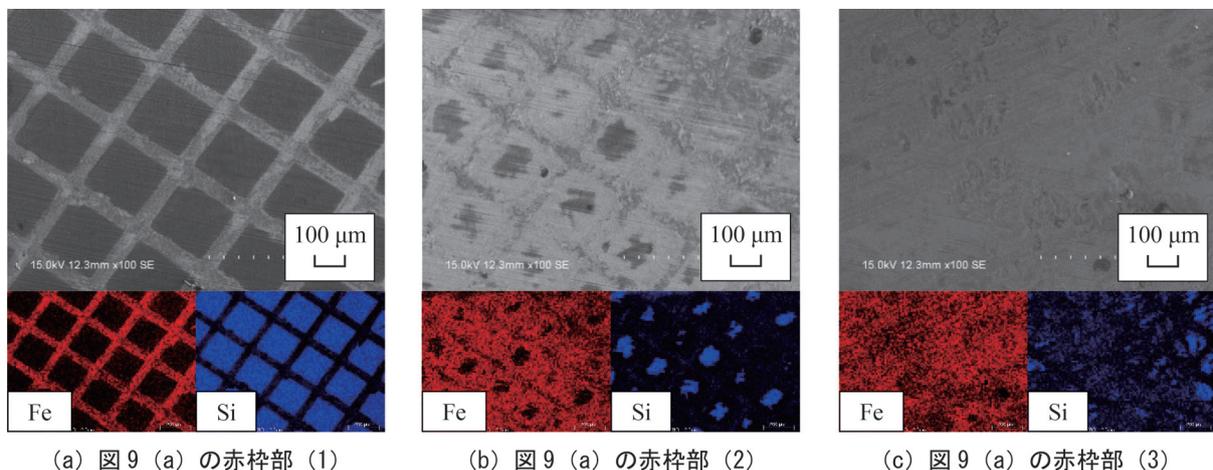


図 12 回転試験後に摩耗が比較的軽微であった領域の後ぶた接触面の SEM/EDX 像

表2 回転試験後のグリース中の鉄分

後ぶた	保持器柱部	ころ大端面
S-DLC 被覆品	0.13 mass%	0.34 mass%
現用品	0.21 mass%	2.88 mass%

ぶたの車軸軸受の結果も示している。

どちらの採取位置においても、S-DLC 被覆品のグリース中の鉄分は現用品より低い。特に、後ぶたとの接触部に近い、ころ大端面から採取したグリースの鉄分の低下が顕著である。

4. 考察

台上回転試験の結果、外観観察によって S-DLC 膜で被覆した後ぶたにフレッチング摩耗が認められたが、S-DLC 膜が後ぶた接触面に残存していたため、後ぶたの摩耗は軽微であった。また、3.4 節で述べたように、S-DLC 膜で被覆した後ぶたを用いた車軸軸受の内輪から採取したグリースに含まれる鉄分は現用品よりも低かった。これらの結果は後ぶたのフレッチング摩耗が S-DLC 膜によって低減できることを示している。以下では、S-DLC 膜によって車軸軸受のフレッチング摩耗が低減した理由について考察する。

車軸軸受を車軸に圧入すると、現用後ぶたは車軸のテーパ部をせり上げるようにして半径方向に拡大し、後ぶたの内輪との接触面が変形する¹⁾。そのため、現用後ぶたの接触面を硬質膜で被覆しただけでは車軸の回転曲げにともなう繰返しの変形に追従できず、硬質膜にき裂やはく離が発生した⁶⁾。一方、硬質膜をセグメント構造化すると後ぶた接触面が変形しても被膜に生じる応力が緩和される⁷⁾ため、S-DLC 膜は後ぶた接触面の変形に追従できたと考えられる。その結果、台上回転試験後にも S-DLC 膜が残存していたと考えられる。また、3.2 節に示したように、S-DLC 膜で被覆した後ぶたと接触していた内輪大端面にはセグメント構造が転写されていた。内輪大端面にセグメント構造が転写された領域では、後ぶた接触面と内輪大端面のフレッチング摩耗はどちらも軽微であった。この理由は、後ぶた接触面に被覆された S-DLC 膜が内輪大端面に食い込んで内輪と後ぶた間の半径方向の相対すべり運動が拘束されることによって、フレッチング摩耗が抑制されたためと考えられる。以上のことから、S-DLC 膜は車軸軸受のフレッチング摩耗を抑制する効果があると考えられる。

5. まとめ

鉄道車両用車軸軸受の内輪と後ぶたの接触面で発生す

るフレッチング摩耗を防止するため、車軸の回転曲げにともなう後ぶた接触面の変形に追従して硬質膜のき裂やはく離の発生を抑制できるセグメント構造ダイヤモンド状炭素膜（以下、「S-DLC 膜」という）の効果について検討した。後ぶた接触面を S-DLC 膜で被覆した車軸軸受を用いて台上回転試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 後ぶた接触面に S-DLC 膜が残存した領域では、フレッチング摩耗はほとんど生じていなかった。また、炭素膜が残存した領域と接触していた内輪大端面には、S-DLC 膜の凹凸が押し付けられたことによって、セグメント構造が転写されていた。これは、後ぶた接触面の S-DLC 膜が内輪大端面に食い込んで内輪と後ぶた間の半径方向の相対すべり運動が拘束されることによって、フレッチング摩耗が抑制されたためと考えられる。
- (2) 台上回転試験後の内輪から採取したグリースに含まれる鉄分は、後ぶた接触面を S-DLC 膜で被覆したことによって低下する。

以上のことから、後ぶた接触面を S-DLC 膜で被覆すると、車軸軸受のフレッチング摩耗を抑制できることがわかった。

文 献

- 1) 岡村吉見, 深貝晋也, 鈴木大輔, 高橋研, 梅原大樹, 永友貴史: 車軸軸受のフレッチング摩耗の発生機構, 鉄道総研報告, Vol.31, No.8, pp.11-16, 2017
- 2) 高野浩二, 浅井寿: 車軸軸受装置, 日本国特許第 3529691 号, 2004
- 3) 岡竜太郎: 鉄道車両車軸軸受の高速化と長寿命化への対応, トライボロジスト, Vol.58, No.7, pp.479-484, 2013
- 4) 志摩政幸, 地引達弘: フレッチング摩耗, トライボロジスト, Vol.53, No.7, pp.462-468, 2008
- 5) 岡村吉見, 鈴木大輔, 深貝晋也, 高橋研, 永友貴史: 車軸軸受のフレッチング摩耗を低減する後ぶたの提案, 鉄道総研報告, Vol.33, No.11, pp.23-30, 2019
- 6) 岡村吉見, 鈴木大輔, 高橋研, 永友貴史, 宇都宮裕: 鉄道車両用車軸軸受のフレッチング摩耗の硬質被膜による抑制効果, 鉄と鋼, Vol.104, No.6, pp.303-311, 2018
- 7) Aoki, Y., Ohtake, N., "Tribological properties of segment-structured diamond-like carbon films," Tribology International, Vol.37, pp.941-947, 2004.
- 8) Takashima, M., Kuroda, T., Saito, M., Ohtake, N., Matsuo, M., Iwamoto, Y., "Development of antiwear shim inserts utilizing segment-structured DLC coatings," Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.3, No.6, pp.841-852, 2009.

- 9) Okamura, Y., Suzuki, D., Ikoma, K., Nagatomo, T., Utsunomiya, H., "Effects of segment-structured DLC film on the fretting wear of railway axle journal bearings," Mechanical Engineering Journal, Vol.6, No.1, DOI: 10.1299/mej.18-00446, 2019.
- 10) 国際標準化機構 (ISO) 規格：金属材料－計装化押込み硬さ試験及び材料パラメータ第1部：試験方法, ISO 14577-1, 2015
- 11) 日本鉄道車輛工業会規格 (JRIS)：鉄道車両－車軸軸受の性能試験方法－, JRIS J 0455, 2009
- 12) R.B. Waterhouse (佐藤準一訳)：フレッチング損傷とその防止法, 養賢堂, pp.80-87, 1984

低温流動性を向上したギヤ油による起動加速度の向上

木川 定之* 鈴村 淳一* 生駒 一樹*

Improvement of Starting Acceleration by use of Gear Oil with Improved Low-temperature Fluidity

Sadayuki KIKAWA Junichi SUZUMURA Kazuki IKOMA

This study explores effects of gear oil with improved low-temperature fluidity on improvement of starting acceleration of trains running in cold districts. In starting performance tests at -20°C , temperature rise of gearbox in acceleration region was suppressed using the gear oil with improved low-temperature fluidity. Suppressing effects on temperature rise of gearbox using gear oil with improved low-temperature fluidity was also confirmed under condition where starting acceleration was increased up to 2.9km/h/s. Accordingly, from these results, it is found that the use of gear oil with improved low-temperature fluidity is effective in improving starting acceleration in cold environment. Moreover, it is confirmed that the use of gear oil with improved low-temperature fluidity tends to suppress gear oil temperature rise under conditions of operation at maximum speed.

キーワード：歯車装置，ギヤ油，起動加速度，低温流動性，低温起動性能試験

1. はじめに

歯車装置は、電車の走り装置において、駆動用電動機である主電動機の駆動力を輪軸に伝える。この歯車装置の潤滑剤として用いられるギヤ油は、図1に示すように、小歯車（主電動機軸側の歯車）と大歯車（車軸側の歯車）のかみ合い部の潤滑を担っている。また、回転する大歯車によるギヤ油のはねかけにより、それぞれの歯車軸に取り付けられている軸受の潤滑にも寄与している。

電車の歯車装置用のギヤ油に求められる性能として

は、歯面や軸受の各接触面での高荷重（高接触面圧）に耐えうる耐荷重性、高速回転時のかくはん熱などで劣化しない耐熱性、台車検査・全般検査までの期間交換せずに使用できる長期耐久性等のほか、低温における流動性も挙げられる。潤滑油は一般に低温になると粘度が増大し流動性が悪くなるため、寒冷地での留置などにより歯車装置が長時間低温にさらされると、ギヤ油の流動性が低下し、歯車装置の起動時に油が軸受の潤滑を必要とする接触面に十分行き渡らずに潤滑不良となり、焼付き等が発生して起動不良となることがある。新幹線ネットワークが北海道をはじめとする寒冷地に拡大するにあたり、新幹線車両の歯車装置に使用されるギヤ油は、低温流動性の向上が求められている。これに対応し、鉄道総研では過去に、 -30°C の低温環境で安定した起動性能を発揮する新幹線車両向けギヤ油（以下「寒冷地対応ギヤ油」）を開発した。この寒冷地対応ギヤ油については、これまで台車での低温起動性能試験による低温流動性の評価、台上回転試験および現車走行試験による長期使用時の劣化の評価をそれぞれ実施し、 -30°C 以下における十分な流動性、1台車検査期間の使用に対する十分な耐久性を有していることをそれぞれ確認した¹⁾²⁾。

ところで、この寒冷地対応ギヤ油では、低温から常温にかけての動粘度が新幹線車両で現在使用されているギヤ油（以下「現行ギヤ油」）と比較して小さく抑えられていることなどから、 -30°C の環境で走行する車両以外への適用においても、性能向上の効果が期待される。そのひとつに、車両の起動加速度の向上がある。寒冷地を走行する車両では、低温環境でのギヤ油の流動性の低下により、起動時に軸受の潤滑不良が発生する可能性があるため、起動加速度が制限される。このとき、想定さ

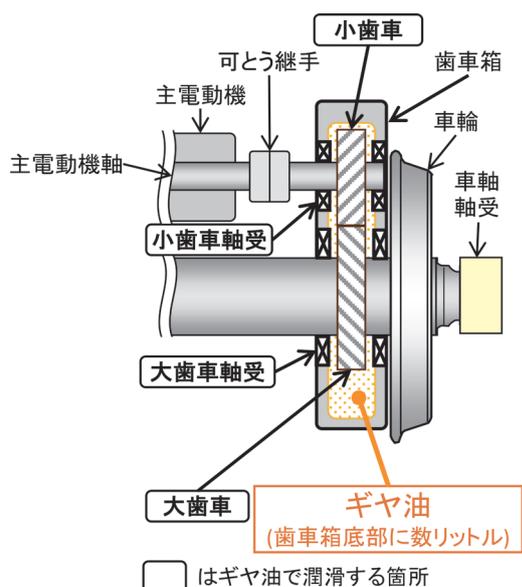


図1 電车用歯車装置の構造とギヤ油で潤滑される箇所

* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

れる低温環境においてギヤ油が十分な流動性を有していれば、起動加速度を向上できる可能性がある。そこで、新幹線車両用歯車装置を使用した台上試験として、起動加速度を向上した条件での低温起動性能試験（-20℃環境）を実施し、寒冷地対応ギヤ油による新幹線車両の起動加速度向上の実現可能性を検討した。また、同じく新幹線車両用歯車装置を使用した台上試験として、常温での回転試験を実施し、寒冷地対応ギヤ油使用時の各部の温度上昇の特性を現行ギヤ油使用時と比較した。

2. 寒冷地対応ギヤ油の概要

寒冷地対応ギヤ油は、1章で述べたように、-30℃の低温環境で安定した起動性能を有するギヤ油として開発したものである。寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の組成、代表性状、および低温起動性能試験結果の比較を表1¹⁾に示す。寒冷地対応ギヤ油では、高度精製鉱油（グループIII）を主体とした基油の採用、および粘度指数向上剤の配合により、高温での粘度を現行油と同程度としながら低温流動性を大幅に改善している。このほか、寒冷地対応ギヤ油では現行ギヤ油と比較して酸化安定性が向上していること、潤滑性能が同等以上であることを試験により確認している。歯車装置の低温起動性能については実車の歯車装置を用いた-30℃での起動試験により、実使用環境での耐久性については1台車検査期間の現車走行試験によりそれぞれ確認している¹⁾。

3. 低温起動性能試験

寒冷地対応ギヤ油による起動加速度向上の可能性について検討するため、新幹線車両用の歯車装置を使用し、-20℃の環境下において、起動加速度を向上した条件

での低温起動性能試験を実施した。なお、使用した歯車装置は実車使用品を再整備したものであり、また低温起動性能試験に先立って実施した常温回転試験（4章に詳細を示す）にも用いている。

3.1 試験方法

試験に供するギヤ油を入れた歯車装置を台上試験用の装置に設置（図2）したのち室内を-20℃に冷却し、回転試験を実施した。試験中は、小歯車軸受、大歯車軸受それぞれの外輪温度、油温（排油栓内）、および試験室内温度を測定し、2秒ごとに記録した。

起動良否の判定は、軸受外輪の10秒ごとの温度上昇を指標にし、過去の実施例¹⁾にならって以下のように設定した。

- ・ 良好判定…試験中に、潤滑不良によるとみられる顕著な温度上昇が発生しない場合（目安：温度上昇3.0℃/10s以下）。
- ・ 不良判定…試験中に、軸受が焼き付くような温度急上昇が発生した場合。

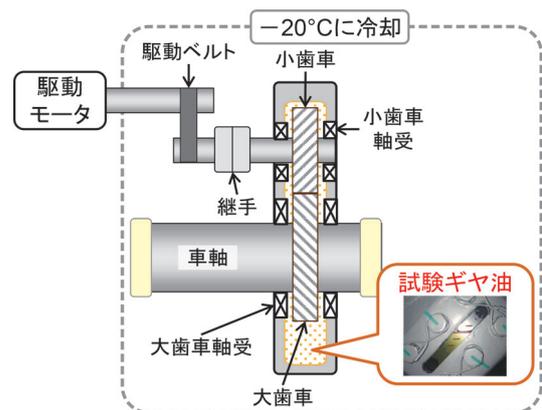


図2 低温起動性能試験における試験装置の構成

表1 寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の組成、代表性状および低温起動性能試験結果¹⁾

油種	寒冷地対応ギヤ油		現行ギヤ油	
組成	基油	高度精製鉱油（グループIII）主体*	鉱油（グループI）	
	添加剤配合	粘度指数向上剤	なし	
		摩擦調整剤	モリブデン系	なし
代表性状 低温流動性	動粘度（mm ² /s）	40℃	51.86	78.74
		100℃	8.986	9.908
	粘度指数	154	105	
	粘度（-20℃）（mPa・s） （ブルックフィールド粘度計法）	2600	10900	
	流動点（℃）	-40.0	-32.5	
低温起動性能試験結果	低温起動性能試験（-30℃） 最高速度320km/h相当、通常油量 最高速度360km/h相当、規定下限油量		良好 良好	温度上昇大 （試験実施せず）

*：少量のエステル油（グループV）を配合

低温起動性能試験の試番と試験条件は表2に示すとおり、寒冷地対応ギヤ油4試番、現行ギヤ油2試番とした。

試験に供したギヤ油の動粘度および粘度指数の実測値を表3に示す。寒冷地対応ギヤ油では起動加速度を現行の起動加速度以上の2.0~2.9km/h/sの条件で試験を実施した。現行ギヤ油では起動加速度を現行の加速度に最も近い2.0km/h/sのみとし、寒冷地対応ギヤ油の試験から継続して使用した軸受で1試番(試番5)の試験を実施したのち小歯車軸受を未使用品に交換し、同条件での試験を逆転のみ実施した(試番6)。なお、試番1の実施前には寒冷地対応ギヤ油によるフラッシング、試番5および試番6の実施前には現行ギヤ油によるフラッシングを実施している。油量は、潤滑状態が厳しい条件での試験を行うため、油面計長線(規定の油面位置 油量4.2L)から-2目盛相当(3.4L)とした。また、歯車装置の姿勢は大小歯車軸水平(定員乗車相当)とした。エンドブレイ値は、試番1~5では常温試験実施前に20℃

表2 低温起動性能試験の試番と試験条件

試番	油種	起動加速度 (km/h/s)	油量	最高回転数
1	寒冷地 対応 ギヤ油	2.0	長線 -2目盛 (3.4L)	5606 min ⁻¹ (最高走行 速度相当)
2		2.3		
3		2.6		
4		2.9		
5	現行 ギヤ油	2.0		
6*		2.0 (逆転のみ)		

*：試験実施前に小歯車軸受を未使用品に交換

表3 試験に使用したギヤ油の動粘度および粘度指数の実測値

油種	動粘度 (mm ² /s)		粘度指数
	40℃	100℃	
寒冷地対応 ギヤ油	52.76	9.271	159
現行ギヤ油	75.90	9.716	107

換算で小歯車側 0.12mm (使用した歯車装置における整備基準値：0.12~0.18mm)、大歯車側 0.12mm (使用した歯車装置における整備基準値：0.12~0.15mm)にそれぞれ調整した状態で実施し、試番6においては軸受交換後に小歯車軸側のみ20℃換算で0.12mmに再調整した。

回転パターンは、試験歯車装置を使用している車両の性能をもとに決定した運転曲線を3段階で加速するパターン(図3)に近似し、設定する加速度ごとに小歯車軸回転数と運転時間の関係をそれぞれ表4のように定めた。最高速度相当の回転数(5606min⁻¹, R₃)に到達後は、1800秒回転させたのち試験終了とした(t₃~t₄)。

3.2 試験結果

3.2.1 寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の低温起動性能の比較

低温起動性能試験において起動加速度を2.0km/h/sとした試番の試験結果について表5に示す。また、試験中の軸受外輪温度(最大温度上昇値が最も大きかった小歯車軸受の車輪側(以下PW軸受))の推移を図4、油温の推移を図5に示す。開始温度-20℃、起動加速度2.0km/h/sの条件では、表5に示すように、寒冷地対応ギヤ油、現行ギヤ油とも良判定であり、また現行ギヤ油で小歯車軸受交換後の試番6においても良判定である。

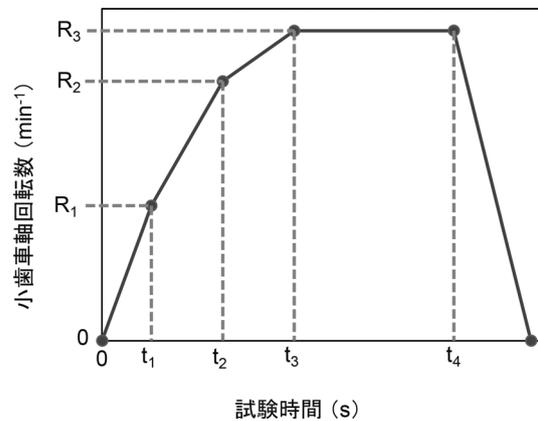


図3 低温起動試験の回転パターン

表4 低温起動性能試験における各試番の運転パターン

試番	加速度 (km/h/s) *			加速度切替時の 小歯車軸回転数 (min ⁻¹)			運転時間 (s)			
	0→R ₁ (起動)	R ₁ →R ₂	R ₂ →R ₃	R ₁	R ₂	R ₃	0→t ₁	t ₁ →t ₂	t ₂ →t ₃	t ₃ →t ₄
1・5・6	2.0	1.13	0.60	2446	4689	5606	60	97	75	1800
2	2.3	1.28	0.65	2161	4383		46	85	93	
3	2.6	1.42	0.68	1916	4118		36	76	107	
4	2.9	1.56	0.71	1712	3935		29	70	116	

*：車輪径φ790mm, 歯数比85:28として計算

しかし、温度上昇の最も大きいPW軸受外輪の温度推移を比較すると、図4に示すように、正転、逆転とも、寒冷地対応ギヤ油使用時の起動直後からの温度上昇が現行ギヤ油使用時と比較して小さい傾向が認められる。特に逆転においては、表5に示すように最大温度上昇値に差があるほか、PW軸受外輪温度において300秒付近で8~12℃の差が生じている。これより、-20℃の環境下

で加速度を2.0km/h/sまで向上した条件においては、寒冷地対応ギヤ油を使用することにより現行ギヤ油使用時と比較して起動直後の温度上昇を抑制でき、より安定して歯車装置を起動可能であると推定される。

また、図5に示す油温の比較においては、正転、逆転とも最高回転数での回転時に寒冷地対応ギヤ油の温度が低い傾向が認められる。

表5 低温起動性能試験（環境温度-20℃） 試験結果（起動加速度2.0km/h/s）

試番	油種	起動加速度 (km/h/s)	回転方向	判定	最大温度上昇値* (°C/10s)
1	寒冷地対応ギヤ油	2.0	正転	良	2.0
			逆転	良	1.9
5	現行ギヤ油	2.0	正転	良	1.9
			逆転	良	2.2
6	現行ギヤ油	2.0	逆転	良	2.3

*：いずれの試番も最大の温度上昇はPW軸受外輪で発生

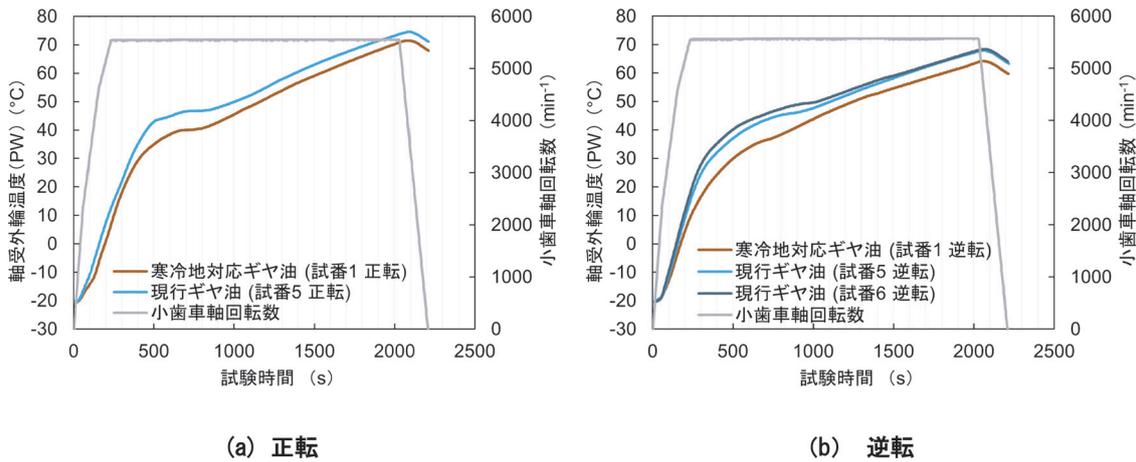


図4 低温起動性能試験（環境温度-20℃）における寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の軸受外輪温度（PW）の推移の比較（起動加速度2.0km/h/s）

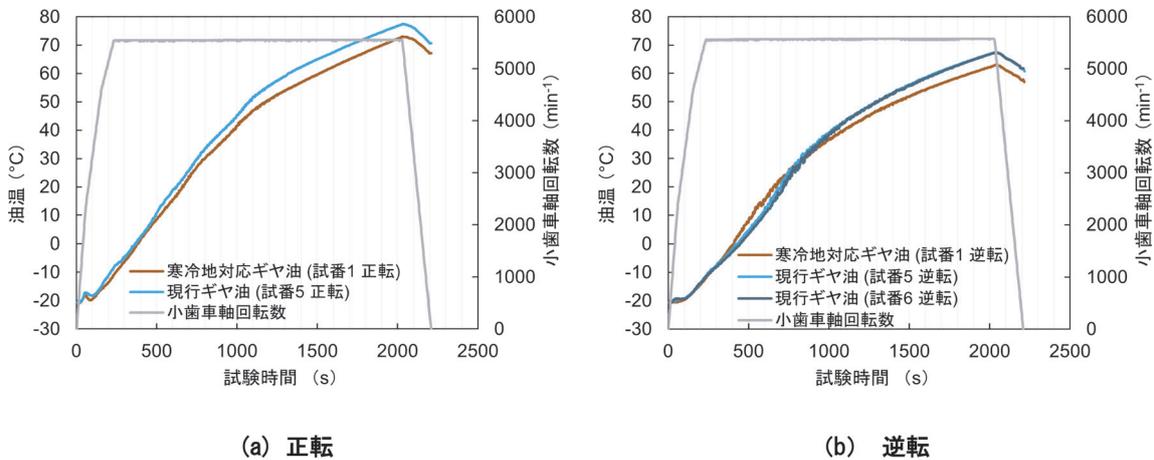


図5 低温起動性能試験（環境温度-20℃）における寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油の油温の推移の比較（起動加速度2.0km/h/s）

3.2.2 寒冷地対応ギヤ油における加速度向上と温度推移の関係

寒冷地対応ギヤ油を使用し、加速度 2.0~2.9km/h/s とした試番の試験結果を表 6、試験中の軸受外輪温度の推移を図 6 に示す。表 6 に示すように試験結果はすべて良判定である。また、図 6 に示すとおり、正転、逆転とも 2.9km/h/s に加速度を向上しても PW 軸受外輪温度の推移に顕著な差は認められず、さらに起動時の PW 軸受外輪の温度上昇は現行ギヤ油で加速度 2.0km/h/s としたとき（図 4）と比較して低減されている。これより、寒冷地対応ギヤ油は、-20℃下で加速度を 2.9km/h/s まで向上しても安定して歯車装置を起動できる低温流動性を有すると推定される。

以上 3.2.1~3.2.2 項に示した結果から、-20℃の環境下で起動加速度を向上した条件において、寒冷地対応ギヤ油を使用することにより、現行ギヤ油を使用する場合と比較してより安定して、またより高い加速度まで歯車装置を起動可能であることが認められる。

4. 常温回転試験

開始時の油温を 30℃として最高走行速度相当の回転数での回転試験を実施し、寒冷地対応ギヤ油使用時と現行ギヤ油使用時の常温から高温における温度上昇を比較した。なお、3章で述べたように、常温回転試験は低温起動性能試験に先立って実施している。

4.1 試験方法

試験ギヤ油を入れた歯車装置について、試験室中で油温を 30±1℃に調整したのち、歯車装置を使用する車両の最高速度走行相当の回転数（5606min⁻¹）で回転試験を実施した。試験は正転、逆転各 1 試番を寒冷地対応ギヤ油と現行ギヤ油それぞれで実施した。最高回転数までの加速度は、いずれの試番も車両の加速度に換算して約 1.5km/h/s 相当（概ね 30.6min⁻¹/s）とした。

試験中は低温起動性能試験と同様に軸受外輪温度、油温、および試験室内温度を測定し、軸受外輪温度または油温のうちいずれか 1 点が 100℃に達した時点で試験終了とした。測定した温度は 2 秒ごとに記録した。油量は

表 6 低温起動性能試験（環境温度-20℃）試験結果（寒冷地対応ギヤ油 起動加速度 2.0~2.9km/h/s）

試番	油種	起動加速度 (km/h/s)	回転方向	判定	最大温度上昇値* (°C/10s)
1	寒冷地対応ギヤ油	2.0	正転	良	2.0
			逆転	良	1.9
2		2.3	正転	良	2.0
			逆転	良	2.0
3		2.6	正転	良	2.0
			逆転	良	2.1
4		2.9	正転	良	2.0
			逆転	良	2.0

*：いずれの試番も最大の温度上昇はPW 軸受外輪で発生

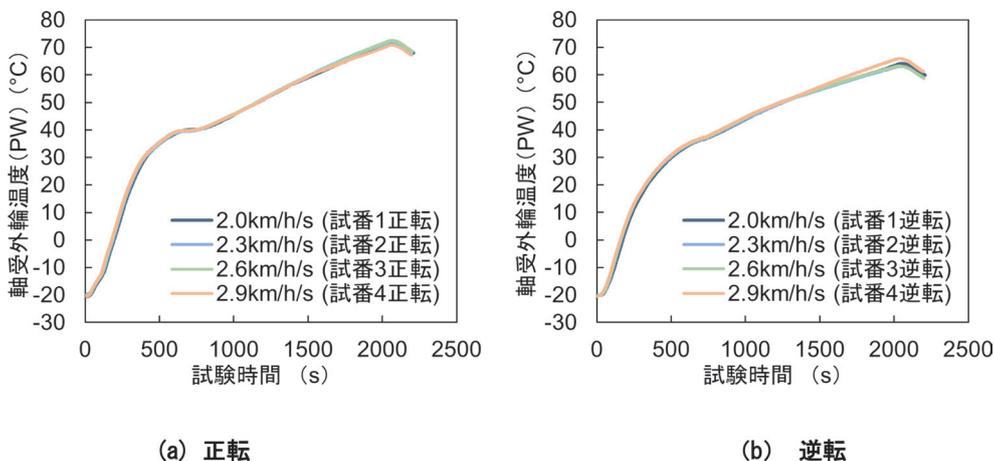


図 6 低温起動性能試験（環境温度-20℃）における起動加速度に対する軸受外輪温度（PW）の推移の比較（寒冷地対応ギヤ油）

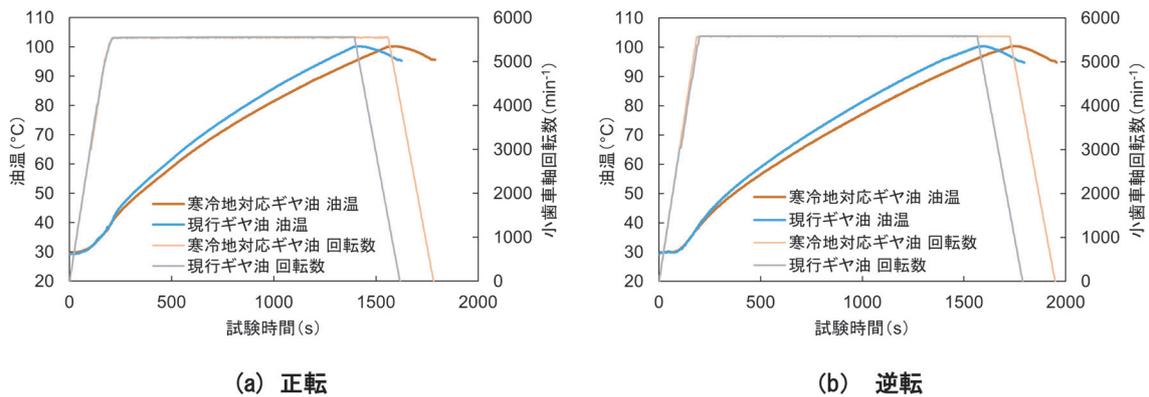


図7 常温回転試験における油温の推移の比較

表7 常温回転試験における油温100°C到達までの試験時間

試番	油種	油温100°C到達までの試験時間 (s)	
		正転	逆転
1	現行ギヤ油	1188	1368
2	寒冷地対応ギヤ油	1354	1540

油面計長線 (4.2L), 歯車装置姿勢は大小歯車軸水平 (定員乗車相当) とした。エンドプレイ値は最もすきまが小さく厳しい条件として, 20°C換算で小歯車側 0.12mm (基準値 0.12~0.15mm), 大歯車側 0.12mm (基準値 0.12~0.18mm) にそれぞれ調整した。

4.2 試験結果

各試番での試験終了までの時間を表7に, 正転時, 逆転時それぞれの試験中の油温の推移を図7に示す。現行ギヤ油, 寒冷地対応ギヤ油どちらも油温が最も早く100°Cに到達し, また異常を示すような急激な温度上昇は軸受外輪温度, 油温とも認められなかった。

表7に示すように, 寒冷地対応ギヤ油使用時に油温が100°Cに到達するまでの時間を現行ギヤ油使用時と比較すると, 正転, 逆転とも寒冷地対応ギヤ油が180秒程度長い。また, 図7に示す油温の比較より, 寒冷地対応ギヤ油使用時の油温の上昇が現行ギヤ油使用時と比較して小さいことがわかる。

以上から, 寒冷地対応ギヤ油を使用した場合, 現行ギヤ油を使用した場合と比較して, 歯車装置の温度上昇を抑制できる可能性が考えられる。ただし, 実車走行時の歯車装置の油温や軸受温度については, 歯車装置の回転に起因する上昇のほかに, 運転パターンや走行風など,

走行条件も寄与することに留意する必要がある。

5. まとめ

低温流動性を向上した新幹線車両用ギヤ油 (寒冷地対応ギヤ油) を用いることによる起動加速度向上の検討として, 起動加速度を増加させた条件での歯車装置の台上回転試験による低温起動性能の評価, 常温での台上回転試験による温度上昇の評価を実施した。-20°C環境下における低温起動性能試験では, 現行より高い起動加速度である 2.0km/h/s の条件で寒冷地対応ギヤ油使用時における起動時の温度上昇が現行ギヤ油使用時と比較して抑制されること, 寒冷地対応ギヤ油使用時は起動加速度 2.0~2.9km/h/s の範囲で温度上昇が同程度であることから, 寒冷地対応ギヤ油を使用することによって現行ギヤ油を使用する場合と比較してより安定して, またより高い起動加速度まで歯車装置を起動可能であると認められた。また, 常温での台上回転試験において油温が100°Cに達するまでの時間を比較し, 正転, 逆転とも現行ギヤ油と比較して寒冷地対応ギヤ油がより長い傾向にあることを確認した。

以上から, 新幹線車両の起動加速度向上のための方策として, 寒冷地対応ギヤ油を用いることは有用であると認められる。

文献

- 1) 木川定之, 鈴木淳一, 沓掛久志: 低温流動性を向上した新幹線車両用ギヤ油の開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.10, pp.23-28, 2018
- 2) 関川翔子, 長恵美子, 鈴木史比古, 岩波健, 島宗亮平: 新幹線用低温対応ギヤ油の開発, JR EAST Technical Review, Vol.57, pp.33-36, 2017

自律型損傷検知システムによる車軸軸受の損傷検知

間々田 祥吾* 太田 達哉* 宮本 修吏** 岡村 吉晃***

Autonomous Damage Detection System for Damage of Axle Bearings of Railway Car Bogies

Shogo MAMADA Tatsuya OHTA Masashi MIYAMOTO Yoshiaki OKAMURA

Axle bearings of railway car bogies are important parts that support the running of the cars. It is desirable to detect damage to axle bearings at an early state. Therefore, an autonomous damage detection system (ADDS) was developed that does not require a power supply nor wiring and notifies axle bearing damage to the vehicle after detecting. The ADDS utilized an anti-vibration rubber with a built-in piezoelectric element and wireless transmitter; which was installed on the axle box. The damage detection performance of the ADDS was evaluated using a test machine. In the case of a damaged bearing, the power generated by the piezoelectric element built-in the rubber could drive the radio transmitter, and the damage could be notified.

キーワード：車軸軸受，自律型損傷検知システム，軸ばね防振ゴム，圧電素子，無線送信機

1. はじめに

鉄道車両の台車の車軸軸受は、車体を支持しながら車軸の円滑な回転を保持する重要な部品である。車軸軸受に損傷が発生して進展した場合、軸受が焼付き、自走が困難になる可能性がある。そのため、車軸軸受に発生した損傷は早期に検知されることが求められる¹⁾²⁾。

現在、車軸軸受は温度によって監視されることが一般的であり、在来線の一部では特定の温度で色が変わる不可逆性示温シール¹⁾、新幹線では高温時に内部のケーブルが切断する軸温検知センサ²⁾が車軸軸受を収納する軸箱に取り付けられている。しかしながら、これらによって検知される程度にまで軸箱の温度が上昇した場合、損傷は相当に進行していることが想定される。

筆者らはこれまで、図1に示す軸箱上に設置される軸ばね防振ゴムに圧電素子を内蔵させ、車軸軸受の損傷に起因する異常振動を検知する手法を検討してきた。圧電素子は加わった振動に応じて、電気信号を発生させる特性がある。その結果、圧電素子から発生した電気信号を解析することにより、軸箱の温度が上昇する前に軸受の損傷を検知できることがわかった³⁾。一方、本手法では軸ばね防振ゴムに内蔵した圧電素子から車上までケーブルで配線した上で、得られた電気信号を解析する必要がある。実車両においてこれらの作業をすることは煩雑であり、本手法における課題であった。このような課題を解決する手法の一つとして、無線装置を用いて損傷の検知を通知する手法が想定されるが、軸箱上では無線装置

の送信機を駆動させる電源の確保が困難である。

そこで、送信機を駆動させる電力を確保する技術として、圧電素子のように電気信号を発生させる材料から生じる微小な電力を蓄えて活用するエネルギーハーベスティングの活用を検討した⁴⁾。この技術を活用し、車軸軸受の損傷に起因して発生する異常振動によって軸ばね防振ゴムに内蔵した圧電素子から発生する電力を送信機の駆動に活用できれば、自律して損傷を検知し、さらに通知するシステム（以下、自律型損傷検知システム）となることが想定された。本論文では本想定に基づき、作製した自律型損傷検知システムの概要を示すとともに、基本性能および損傷検知性能を評価した結果について示す。

2. 自律型損傷検知システムの概要

自律型損傷検知システムは、同システム用の軸ばね防振ゴム（以下、損傷検知用防振ゴム）および無線装置の受信機で構成される。以下にシステムの概要を示す。

2.1 損傷検知用防振ゴム

損傷検知用防振ゴムの概略図を図2に示す。図2に

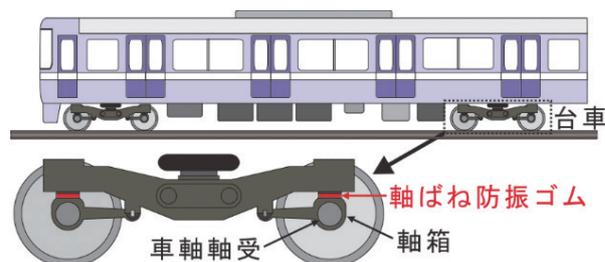


図1 軸ばね防振ゴムの設置箇所

* 材料技術研究部 防振材料研究室
 ** 材料技術研究部 防振材料研究室(現 株式会社フコク)
 *** 材料技術研究部 潤滑材料研究室

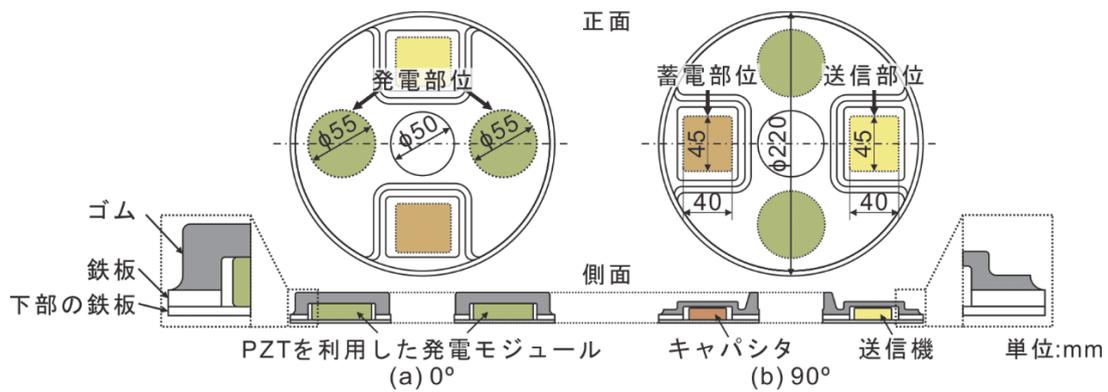


図2 損傷検知軸ばね防振ゴムの概略図

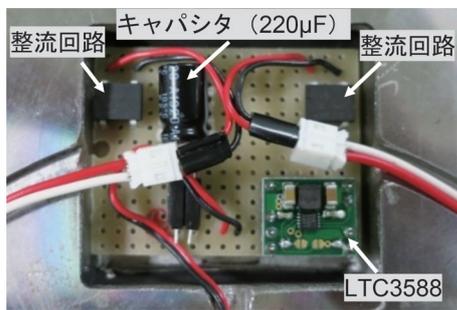


図3 蓄電部位の状況

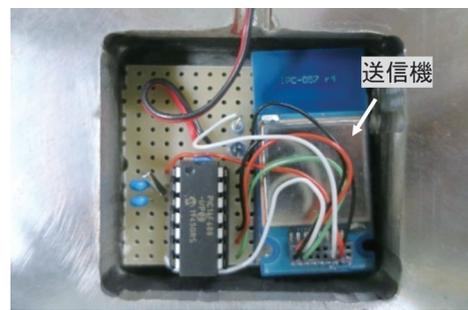


図4 送信部位の状況

示すように、損傷検知用防振ゴムには、発電部位、蓄電部位および送信部位の3つの部位を設けた。各部位はゴムに溝を設けることによって各部位を構成する部材を収納できる。以下に、各部位の概要を示す。

2.1.1 発電部位

発電部位には、圧電素子としてチタン酸ジルコン酸鉛（以下、PZT）を利用した発電モジュールを収納した。発電部位は2箇所あり、それぞれに発電モジュールが1体ずつ収納される。発電モジュールは直径50mm、厚さ2mmの円盤状のPZTを2枚積層したものを利用した。なお、積層する際にはPZTと電極の間に直径50mm、厚さ0.5mmの導電ゴムを介在させた。これは、過去の知見において、導電ゴムを介在させた場合に発電モジュールの発電性能が向上することが見出されたためである⁵⁾。また、図2に示すように、発電部位の厚さは、蓄電部位および送信部位よりも厚くした。これは、収納した発電モジュールに確実に荷重を加えるためである。

2.1.2 蓄電部位

蓄電部位には、発電モジュールから発生する電力を整流するダイオードを利用した整流回路、整流された電力を蓄電するキャパシタ、キャパシタの端子間電圧が5Vに達した場合にキャパシタから送信機に電力を供給するスイッチングレギュレータ回路LTC3588（アナログ・デバイセズ株式会社製）を収納した（図3）。整流回路

は2体の発電モジュールから発生する電力に個別に対応するため2系統とし、個々の発電モジュールから発生した電力を足し合わせてキャパシタに蓄電できる。また、キャパシタの静電容量は、送信機を駆動させるために最低限必要な電力を考慮して220µFとした。

2.1.3 送信部位

送信部位には、無線装置の送信機を収納した（図4）。送信機には、大きさや消費電力を考慮し、周波数315MHz帯、送信出力0.3mWの特定小電力無線局を利用するIM-315TRX（インタープラン株式会社製）を選定した。なお、蓄電部位および送信部位の厚さを発電部位よりも薄くしたのは、同部位に直接荷重が加わることによって、収納した部材が損傷するのを防止するためである。

2.2 無線装置の受信機

無線装置の受信機は送信機と同じIM315TRX（インタープラン株式会社製）とした。受信機は送信機からの無線を受信した場合、LEDが約1秒点灯した後に自動的に消灯し、次の電波が受信されるまで待機状態となる。

3. 自律型損傷検知システムの基本性能

3.1 損傷検知用防振ゴムの静的ばね定数

損傷検知用防振ゴムは現用の軸ばね防振ゴムと交換し

て使用することを想定している。そのため、防振ゴムとしての防振性能を示すばね定数は、現用の軸ばね防振ゴムと同等とする必要がある。

そこで、作製した損傷検知用防振ゴムに、2体の発電モジュールを収納した状態で静的載荷試験を実施し、ばね定数を測定した。その結果、損傷検知用防振ゴムのばね定数は現用の軸ばね防振ゴムのばね定数の±10%の範囲内に収まることがわかった。また、台車に設置した場合に想定される最大荷重を負荷した場合でも、蓄電部位および送電部位には荷重が直接加わらなかった。

3.2 損傷検知用防振ゴムの発電性能

損傷検知用防振ゴムの発電性能を評価するため、損傷検知用防振ゴムを動的加振試験機に設置し、厚さ方向に正弦波の荷重を加える加振試験を実施した。加振試験の状況を図5に示す。

加振試験の条件は、台車に設置した際に加わる荷重を想定し、平均荷重を50kN、振幅荷重を1kN、5kNおよび10kN、加振周波数を0.1Hz、1Hzおよび10Hzとした。加振試験では、損傷検知用防振ゴムの発電性能を評価するため、キャパシタの端子間電圧を測定した。

加振試験における加振時間とキャパシタの端子間電圧の関係の結果例を図6に示す。図6(a)は振幅荷重1kNにおける加振周波数0.1Hz、1Hzおよび10Hzの結果を示し、図6(b)は加振周波数1Hzにおける振幅荷重1kN、5kNおよび10kNの結果を示す。

図6(a)より、同じ振幅荷重の場合、同じ加振時間における端子間電圧は10Hzが最も大きく、次いで、1Hz、0.1Hz順であった。また、図6(b)より、同じ加振周波数の場合、同じ加振時間における端子間電圧は10kNが最も大きく、次いで、5kN、1kN順であった。これらの結果より、損傷検知用防振ゴムの発電性能は加振周波数および振幅荷重の増加に伴って向上することがわかった。また、図6(b)に示すように、振幅荷重5kNおよび10kNの場合、キャパシタの端子間電圧が5Vに達した後、約3.5Vまで急激に低下している。これは、キャパシタの

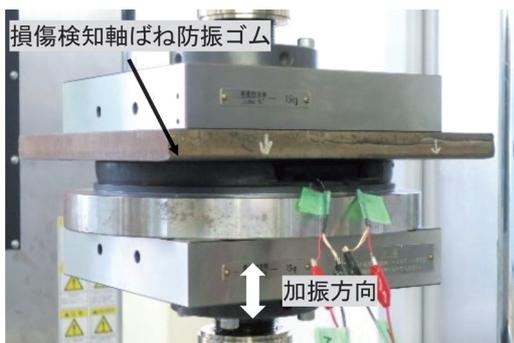
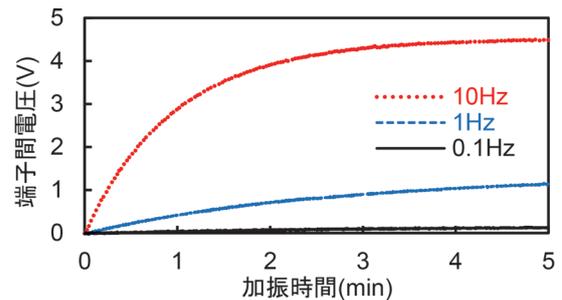


図5 加振試験の状況

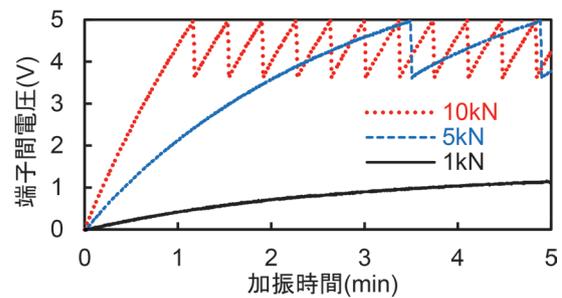
端子間電圧が5Vに達したことによって蓄電部位のスイッチングレギュレータが動作し、送信機に電力が供給されたためである。この際、受信機において電波が送信されたことを確認した。また、電力量が約3.5Vに減少した後は、再び5Vになるまで増加し、再度送信機に電力が供給されて電波が送信された。

次に、送信機を駆動させるための条件を検討した。圧電素子を用いてキャパシタに蓄電する場合、入力される電圧が高いほど蓄電されやすい⁶⁾。そこで、加振試験において発電モジュールから発生する電圧を測定し、最大値と最小値の差を発生電圧として求めた。振幅荷重と発生電圧の関係を図7に示す。発生電圧は2体の発電モジュールのうち、小さい方の値である。また、図中の網掛けは送信機が駆動し、無線が送信した条件である。

図7より、発生電圧は振幅荷重に比例して増加し、加振周波数の増加に伴って増加している。これは、キャパシタの端子間電圧と同様の傾向である。発電モジュールの発生電圧が振幅荷重および加振周波数の増加に伴って



(a) 振幅荷重 1kN



(b) 加振周波数 1Hz

図6 加振時間とキャパシタの端子間電圧の関係

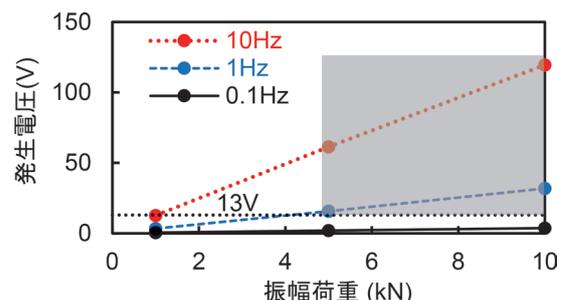


図7 加振試験における発生電圧

増加した要因としては、過去の検討において PZT 自体の発生電圧が同様の傾向を示す結果が得られている⁶⁾ことから、PZT の特性によるものと考えられる。また、本加振試験では、どちらか一方の発電モジュールからの発生電圧が約 13V 以上の場合に端子間電圧が 5V 以上となり、送信機から電波を送信できることがわかった。

以上、加振試験の結果、損傷検知用防振ゴムに加わる振動に伴う荷重振幅が大きく、周波数が高いほど発電性能が向上することがわかった。また、送信機を駆動させるための電力を確保するためには、一定以上の発電モジュールからの発生電圧が必要であることがわかった。

4. 自律型損傷検知システムの損傷検知性能

自律型損傷検知システムの損傷検知性能は、鉄道総研が所有する車軸軸受耐久試験装置に人工的な損傷を付与した軸受（以下、損傷軸受）を取付けて実施した試験（以下、損傷検知性能評価試験）によって評価した。試験状況を図 8 に示す。

4.1 損傷軸受

試験に用いた損傷軸受は、外輪軌道面に人工的に圧こんを付与した後、圧こんを起点としたはく離を発生させたものである。外輪のはく離は軸受に発生する損傷の一つであり、はく離が進展した場合、はく離片がグリース中に混入して潤滑不良などを引き起こし、焼付きに至る

可能性がある。

損傷軸受のはく離は、圧こんの付与後に試験装置に取り付け、鉛直方向に約 50kN の荷重を荷重させたまま主軸を速度 300km/h 相当で回転させ、水平方向に 14.7kN の荷重を 5 秒おきに 5 秒間繰り返して負荷させることによって発生、進展させた。はく離の発生、進展状況を図 9 に示す。図 9 に示すように、100,000km 走行相当の回転以降に明確なはく離が発生し、走行距離の増加に伴って進展している。なお、200,000km 走行相当の回転後のはく離の大きさでは軸箱の温度での検知は困難である。

4.2 損傷検知性能の評価方法

自律型損傷検知システムの損傷検知性能は、損傷検知用防振ゴム内のキャパシタの端子間電圧および発電モジュールからの発生電圧を測定して評価した。測定は圧こんの付与前（0km）、および圧こんの付与後 50,000km 走行相当毎に実施した。測定の際は、鉛直方向に約 50kN の荷重を荷重させた状態で主軸を 30km/h～300km/h の速度に相当する回転数で回転させた。はく離の位置は、図 8 に示すように荷重が最も加わる負荷圏中央とした。また、損傷検知用防振ゴムの配置は、図 10 に示すように、発電部位がはく離の直上になる配置（以下、配置 A）および蓄電部位および送信部位がはく離の直上になる配置（以下、配置 B）の 2 種類の配置とした。

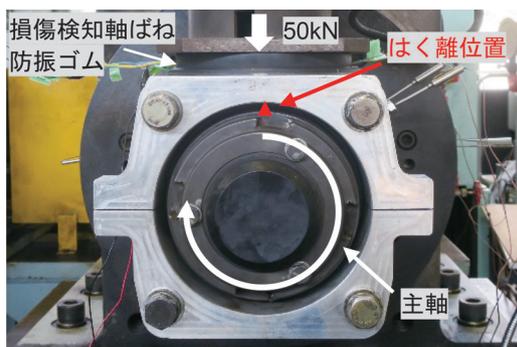


図 8 損傷検知性能評価試験の状況

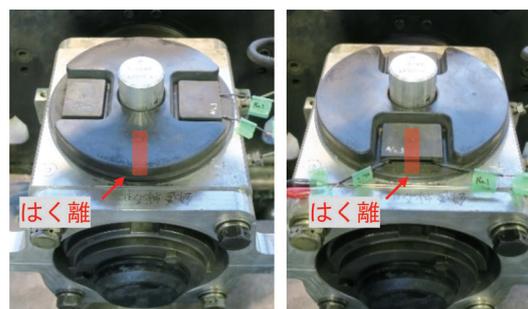


図 10 試験における損傷検知用防振ゴムの配置

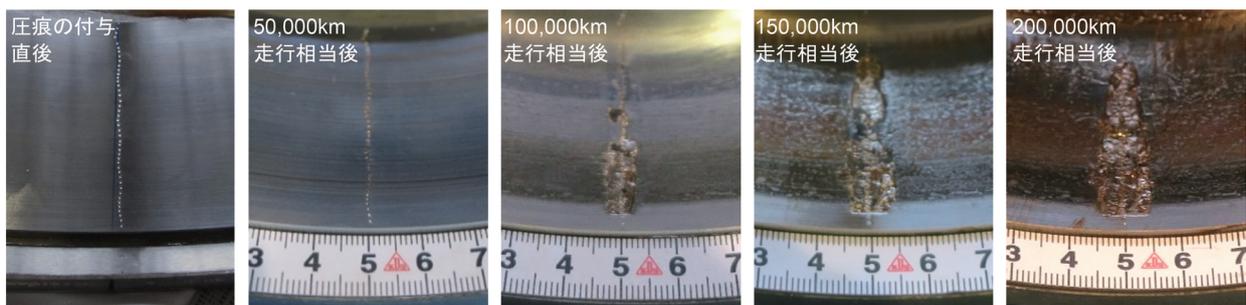


図 9 損傷検知性能評価試験で用いた損傷軸受のはく離の発生および進展の状況

4.3 自律型損傷検知システムによる損傷検知性能

測定後5分間での端子間電圧の最大値を図11に示す。同図(a)は配置A、(b)は配置Bの結果である。なお、5分間で端子間電圧が5Vに達しない場合、端子間電圧はその後もほとんど増加せず、送信機も駆動しなかった。

図11に示すように、配置A、Bともに走行距離の増加に伴って端子間電圧が増加している。これは、走行距離の増加に伴ってはく離が進展し、はく離の進展に伴って軸箱の振動が増加することにより、損傷検知用防振ゴム内の発電モジュールに加わる荷重が増加するためと考えられる。なお、本試験において別途測定した軸箱の振動加速度は、走行距離の増加に伴って増加していた。一方、同じ試験条件における端子間電圧の最大値を配置AとBで比較した場合、配置Aの方が大きく、発電性能が高いことがわかった。なお、配置Aでは、はく離が発生した後、50,000km~100,000km 走行相当の回転後に70km/h以上相当で回転した場合に検知できる可能性がある。

4.4 無線送信機を駆動させるための条件

図11に示したように、端子間電圧の最大値は配置AとBで異なる結果となった。この要因を把握するため、加振試験と同様に、端子間電圧および発生電圧の測定結果を用いて、端子間電圧が5Vに達し、送信機を駆動させるための条件を検討した。

配置A、Bにおける測定開始直後の端子間電圧、発生電圧の結果の例として、100,000km 走行相当の回転後における回転速度が110km/hの場合の結果を図12に示す。同図(a)は端子間電圧、(b)は発生電圧である。

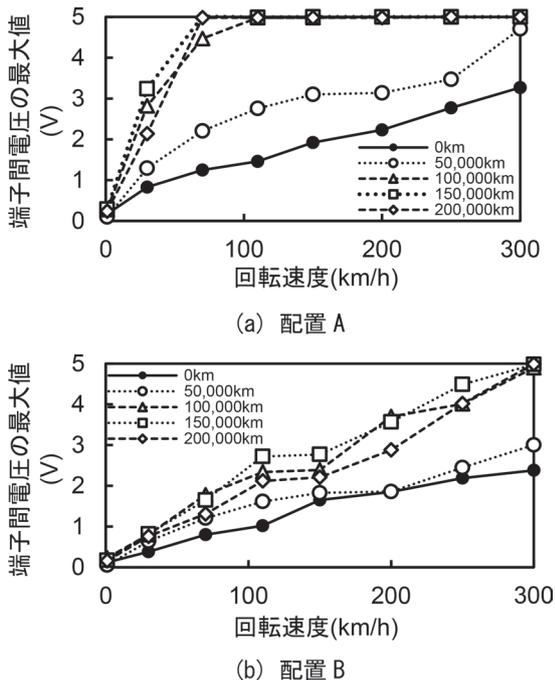


図11 端子間電圧の最大値

図12より、配置Aは配置Bよりも端子間電圧、発生電圧ともに大きい。そこで、配置Aと配置Bにおける発電性能の違いを評価するため、測定開始1秒後の端子間電圧の結果から、以下の式を用いて電力量を算出した。

$$W = \frac{1}{2} CV_{is}^2 \quad (1)$$

ここで、 W は電力量 (J)、 C は静電容量 (C/V)、 V_{is} は測定開始1秒後の端子間電圧 (V) である。

図12(a)の結果から算出した電力量 W は配置Aが0.21mJ、配置Bが0.02mJであった。この結果より、電力量が大きいほど端子間電圧が向上することが想定された。そこで、全ての試験条件における電力量と端子間電圧の最大値の関係を求めた結果を図13に示す。

図13より、配置A、Bともに、電力量の増加に伴って端子間電圧の最大値が増加する傾向がある。その一方

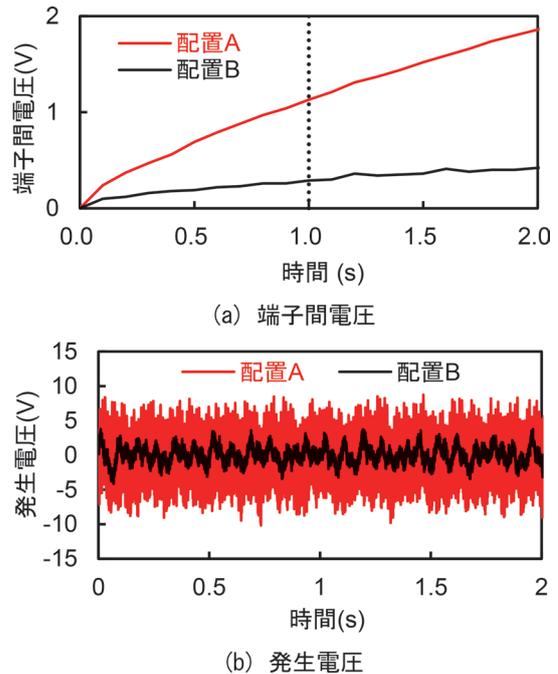


図12 端子間電圧および発生電圧の測定結果例 (100,000km 走行相当回転後、回転速度 110km/h)

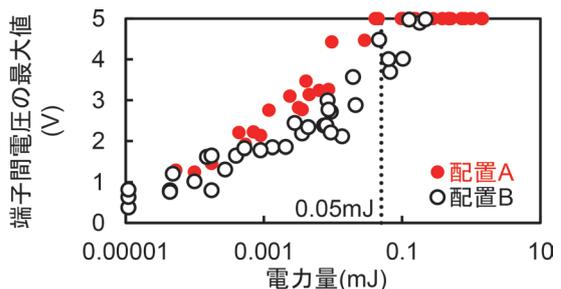


図13 端子間電圧と電力量の関係

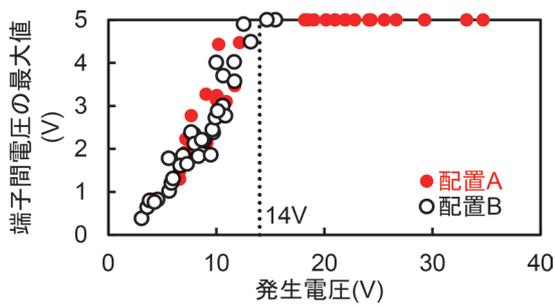


図 14 発生電圧と端子間電圧の関係

で、同じ電力量における配置 A と配置 B の端子間電圧を比較すると、配置 B の端子間電圧が全体的に低い。また、端子間電圧が 5V に達する電力量の条件として、配置 A の場合は 0.05mJ 以下の場合もあるが、配置 B の場合は 0.05mJ 以上でも達しない場合がある。この結果より、電力量の大きさは配置によって違いがみられ、端子間電圧が 5V に達する条件としては、電力量以外の要因が影響する可能性があることがわかった。

そこで、加振試験の場合と同様の方法で発生電圧の影響について検討した。例として、図 12(b) に示した結果の場合、配置 A では約 18.9V、配置 B では約 7.9V である。発生電圧と端子間電圧の最大値の関係を図 14 に示す。ただし、図には加振試験の場合と同様に、2 体の発電モジュールのうち、小さい方の発生電圧を示す。

図 14 より、配置 A、B ともに発生電圧の増加に伴って端子間電圧は増加し、発生電圧が約 14V 以上の場合に端子間電圧が 5V に達している。この値は、加振試験で得られた結果（約 13V）とほぼ同等である。

以上の結果より、送信機を駆動させるには、発電モジュールからの発生電圧の大きさの影響が大きいことがわかった。また、配置 B と比較して配置 A の発生電圧が高く、送信機を駆動しやすい要因としては、配置 A の場合、損傷検知用防振ゴムの発電部位がはく離の直上である負荷圏中央に位置しており、発電モジュールに荷重が加わりやすいことが考えられる。

5. 実際の走行における損傷検知手法の提案

損傷検知用防振ゴムを実際の台車に設置した場合は、走行時に発生する様々な振動が防振ゴムに加わるため、通常の走行時でも無線が送信される可能性がある。その一方で、車軸軸受に損傷が発生した場合は、無線の送信頻度が高くなると考えられる。そのため、図 15 に示すように、通常の走行と損傷発生時の走行における無線の送信間隔の違いによって損傷を検知できると考えられる。

さらに、実際の車両に自律型損傷検知システムを設置する場合、受信機は車体に設置することを想定しているため、受信感度などによる設置位置の選定が必要となる。

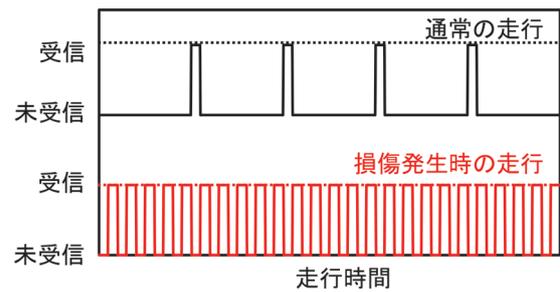


図 15 実際の走行における損傷検知のイメージ

6. まとめ

自律型損傷検知システムとして、圧電素子および無線装置の送信機を内蔵した損傷検知用防振ゴムを作製し、基本性能および損傷検知性能を評価した。

その結果、基本性能として、損傷検知用防振ゴムに加わる荷重の振幅が大きく、周波数が高いほど圧電効率が増加することがわかった。また、損傷検知性能として、軸受に損傷が発生した場合、50,000km～100,000km 走行相当の回転後に 70km/h 以上相当で回転することにより、損傷検知用防振ゴム内の圧電素子が発生する電力によって無線装置の送信機を駆動させ、損傷の発生を通知できることがわかった。さらに、送信機を駆動させるには、損傷検知用防振ゴムに収納した圧電素子を利用した発電モジュールから 13V～14V 以上の電圧を発生させる必要があることがわかった。

文 献

- 1) 千葉智, 石井圭介: TC 型軸箱温度検知システムの信頼性の向上および実用化, JR EAST Technical Review, No.29, pp.31-34, 2009
- 2) 上村裕二, 仲田圭吾, 大庭拓也, 平野正敏: 新幹線台車軸箱温度検知装置の開発, JREA, Vol.56, No.5, pp.37714-37717, 2013
- 3) 野木村龍, 間々田祥吾, 岡村吉晃, 山中翔, 鈴木康大: センサ防振ゴムを用いた軸受の損傷検知手法の開発, 第 24 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, S2-7-5, 2017
- 4) 吉田善紀, 小林祐介, 内村太郎: 鋼鉄道橋の振動発電を利用したモニタリングシステムの開発, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.2, pp.282-294, 2014
- 5) 間々田祥吾, 竹中宏行, 太田達哉, 高橋研, 鈴木大輔: 圧電素子を内蔵した鉄道車両用歯車箱吊り用ゴムによる歯車箱軸受の損傷検知 (定置試験における損傷検知性能の評価), 日本機械学会論文集, Vol.86, No.890, 2020
- 6) 藤本滋, 今井健嗣, 一木正聡: 圧電素子を用いた振動発電手法に関する研究, 設計工学, Vol.52, No.9, pp.567-582, 2017

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕 松井元英

■企画・監修

鈴木浩明	川崎邦弘	長倉 清	日比野有
伊積康彦	石毛 真	神田政幸	重枝秀紀
桃谷尚嗣	布川 修	新井英樹	福田光芳
松井元英	上半文昭	斉藤実俊	水上直樹
富田 優	小島謙一		

鉄道総研報告 第36巻 第11号

2022年11月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2022 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

► Special Features: Materials Technology ◀

Vol. 36 No. 11

Nov. 2022

PERSPECTIVE

- R&D Activities and Future Perspectives in Material Technology
..... ·M.MATSUI (1)

PAPERS

- Development of Plastering Geopolymer Mortar
..... ·M.UEHARA, T.SATO (5)
- Evaluation Method for Water Penetration Resistance of Concrete Structures Applicable to Horizontal Surface
..... ·S.NISHIO (11)
- Method for Improving Corrosion Protection by Paint Coating over Metal Layer with Plating and Thermal Spraying Materials on Steel Bridges
..... ·T.SAKAMOTO (17)
- Study of Rail Grinding Amount by Surface Layer Analysis Using X-ray Diffraction
..... ·Y.KANEMATSU, M.MATSUI, N.UEHIGASHI (23)
- Effects of Segment-structured Carbon Film on Fretting Wear Prevention of Axle Journal Bearings
..... ·Y.OKAMURA, D.SUZUKI, K.IKOMA, T.NAGATOMO (29)
- Improvement of Starting Acceleration by use of Gear Oil with Improved Low-temperature Fluidity
..... ·S.KIKAWA, J.SUZUMURA, K.IKOMA (37)
- Autonomous Damage Detection System for Damage of Axle Bearings of Railway Car Bogies
..... ·S.MAMADA, T.OHTA, M.MIYAMOTO, Y.OKAMURA (43)

