

## 車輪／レール間介在物質の現場分析法の開発

鈴村 淳一\* 曾根 康友\*  
石崎 温史# 山下 大輔# 中島 嘉之#

## In Situ Analytical Method of Interfacial Substances between Wheel and Rail

Junichi SUZUMURA Yasutomo SONE

Atsushi ISHIZAKI Daisuke YAMASHITA Yoshiyuki NAKAJIMA

This paper describes an experimental investigation of on the spot X-ray analysis of interfacial substances between wheel and rail such as iron rusts and lubricants, which have an influence on adhesion coefficient. The field test of the X-ray analysis using portable X-ray analyzer called “XRDF” was carried out. The X-ray diffraction analysis of the corroded rail and the X-ray fluorescence analysis of the solid-lubricated rail were carried out, after the test vehicle passed over it several times. By applying XRDF analysis on the spot to the rail surface substances, we have obtained some knowledge about the alteration process of corrosion layer and spreading characteristic of lubricants while the railway vehicles passed by.

キーワード：車輪，レール，さび，潤滑剤，X線回折分析，蛍光X線分析

## 1. はじめに

車輪とレールの接触面には、車両運転条件や気象条件、レール近傍の雰囲気などに応じて種々の介在物質が存在し、車輪／レール間の粘着係数や摩擦・摩耗現象、軌道回路の短絡等の電気的現象に影響を及ぼすことが知られている<sup>1~4)</sup>。

車輪／レール間介在物質の中で最も頻繁に見られる物質は鉄さびである。降雨や結露などによりレール表面に水滴が付着すると、表面からイオンとして水中に溶出した鉄が空気中の酸素により酸化され、レール表面に一般的に見られる赤さびの成分であるオキシ水酸化鉄(FeOOH)が形成される。FeOOHは結晶構造の違いにより $\alpha$ 型、 $\beta$ 型、 $\gamma$ 型、無定形などの複数の種類があり、それぞれ車輪／レール間の粘着に及ぼす影響は異なる<sup>5) 6)</sup>。例えば、海浜環境などの塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)が存在する湿潤環境下で生成する $\beta$ -FeOOHは、湿潤環境下で生成する $\alpha$ -FeOOHおよび $\gamma$ -FeOOHと比較して摩擦係数が小さく、 $\beta$ -FeOOHおよび無定形FeOOHと水とが共存した場合には特に小さい摩擦係数を示すことが、すべり摩擦試験により明らかにされている<sup>6)</sup>。

さびの摩擦特性の違いが影響を及ぼす車輪／レール間の粘着現象の例として、海底トンネル内の直線レールに

発生する波状摩耗がある<sup>7)</sup>。この現象は上り勾配の力行区間において特に顕著に見られる一方で、同じ路線の山岳トンネルでは発生していないことから、レール上に異なる摩擦係数を持つさびが生成することが波状摩耗の発生要因の一つとして推定された。すなわち、海底トンネルではレール上に $\beta$ -FeOOHを含む数種類のさびからなる層が形成され、車輪／レール間の粘着係数を低下させるため、力行状態の車輪が走行する際に微小な縦すべり(ロールスリップ現象)が発生し、波状摩耗を引き起こすと考えられる<sup>1)</sup>。実際に、トンネル内に約半年間暴露したレールの表面に生成したさびについて、X線回折法により成分分析を行った結果、海底トンネルに暴露したレールには $\beta$ -FeOOHが生成していることが確認された<sup>1)</sup>。

一方、車輪／レールの摩耗防止や、横圧の低減を目的として塗布される潤滑油やグリース、固体潤滑剤などの潤滑剤も車輪／レール間に介在する物質である<sup>8) 9) 10)</sup>。これらの車輪／レール間潤滑剤を効果的に使用するためには、その伸び性や、摩擦係数との定量的な相関などの特性を把握することが重要である。外軌レールの著しい側摩耗が発生している急曲線区間において、固体潤滑剤として二硫化モリブデン(MoS<sub>2</sub>)を含む車輪／レール間潤滑剤を内軌頭頂面に塗布し、試験車両を走行させた際の横圧低減効果や摩擦係数の変化、潤滑剤の伸び性を検証する試験が鉄道事業者により行われている<sup>11)</sup>。

以上のように、種々の摩擦係数を持つさびに起因するレールの波状摩耗を抑制する対策や、車輪／レール潤滑

\* 材料技術研究部 潤滑材料研究室

# 理研計器株式会社 研究部

特集：材料技術

剤の効果的な適用方法を検討する場合には、車輪／レール間に介在し、トライボロジー特性に影響を及ぼす物質の種類や量を正確に把握することが必要である。

従来、車輪／レール間介在物質に対して、車輪やレールの表面を、セラミックスクレイパー等で削り取る方法や、溶剤を含漬させたガーゼで拭き取る方法を用いて対象物質を採取し、それを赤外吸収分光法（IR法）、蛍光X線分析法（XRF法）、X線回折分析法（XRD法）、誘導結合プラズマ発光分析法（ICP法）などの採取試料の種類や形態に合致した最適な機器分析法を用いて定性分析や定量分析を行ってきた。一方でこの方法では、採取から分析までの期間における試料の組成変化の影響を考慮する必要がある。また、車輪転走の直前及び直後におけるレール表面の状態変化に関する情報を得ることができない。そこで、車輪やレール表面のごく狭い範囲について、その場で非破壊的に分析を行う、「現場分析法」の確立が求められている。

車輪／レール間介在物質の現場分析法に関する検討としては、過去に可搬型ラマン分光分析装置を使用してレール表面分析を実施し、海底トンネル内に暴露したレール表面に $\beta$ -FeOOHが生成していることを確認した事例が報告されている<sup>12)</sup>。

本報告では、X線分析法によるレール表面付着物の現場分析について報告する。X線分析法のうち、XRD法はさびなどの結晶性を有する物質を同定するのに極めて有効な分析法である。また、XRF法は代表的な元素分析法であり、車輪／レール間潤滑剤に含まれる物質を定量する手法として適用可能である。本研究では、可搬型複合X線分析装置（XRDF）を使用し、鉄道総研試験線においてレール表面分析を行った。塩水を散布してさびを発生させたレールについて、車輪転走の前後でのさびの種類と量の変化をXRD法により調べた。また、レールに固体潤滑剤として $\text{MoS}_2$ を含む車輪／レール間潤滑剤を塗布し、車輪転走後にレール表面に付着しているモリブデン（Mo）と硫黄（S）の量をXRF法で測定することにより、その伸び性について調べた。以下にその結果を報告する。

2. 可搬型複合X線分析装置の概要

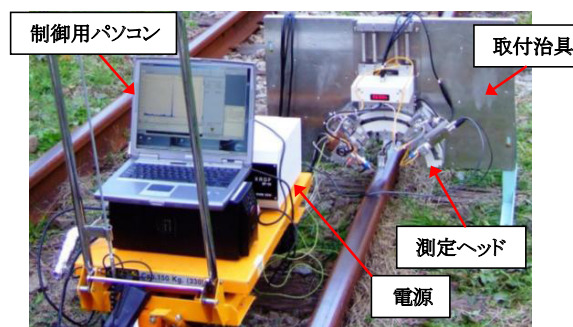
本研究で使用した可搬型複合X線分析装置（XRDF）は、主に遺跡や壁画等の文化財を非破壊で分析することを主目的として開発された装置であり、XRD法による結晶構造解析とXRF法による元素分析を同一測定点で実施することが可能である<sup>13)</sup>。測定点の大きさは直径1～6mmと狭い範囲の測定が可能であり、ヘッド部のX線発生装置等に接触しない限り測定対象の大きさや形状に制限がない。XRDF装置は電源と測定ヘッド部で構成

され、付属のパーソナルコンピュータで測定等の操作が可能になっている。一般に、X線分析装置はサイズが大きく、現場での使用は困難であるが、XRDFは測定ヘッド部、電源ともに持ち運び可能なサイズであり、現場での使用が十分可能である。

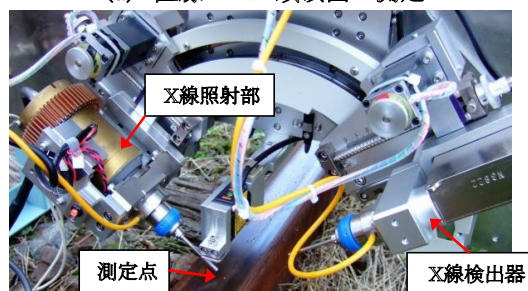
3. さびの測定

3.1 試験方法

鉄道総研所内試験線のレールに対して、3%の食塩水を約20分間継続して散布し、さびを発生させた。レールを自然乾燥させた後、XRDFによるさびの分析を行った。本研究では、軌道内で効率的にXRDFによる分析を行うために、測定するレールを跨ぐようにXRDFの測定ヘッド部を固定するための取付治具を製作し、使用した。これによりレール頭頂面の直上に測定ヘッド部を固定することができるほか、30°傾けて取り付けることにより、外軌レールのゲージコーナーも容易に測定することができる。XRDFによるレール測定状況を図1に示す。



(a) 直線レール頭頂面の測定



(b) 測定部の拡大



(c) ゲージコーナーの測定(30°傾斜させて取付け)

図1 XRDFによるレール測定の様子

さびを発生させた試験レールの上を、2両編成の試験車両（R291系電車）を5往復走行させ、1往復走行後と5往復走行後にレールの分析を行い、試験レール上の同一測定点におけるさびの種類と量の変化について調べた。また、レールの配置（直線レールの頭頂面/曲線レールの外軌ゲージコーナー）や、車両の速度、車両の運転条件（力行/ブレーキ/惰行）が車両の走行によるさびの変化に与える影響の違いについて考察するために、表1に示す3種類の異なる条件で試験車両を走行させた。

表1 試験車両の走行条件

No	レール	速度 (km/h)		運転条件	
		往路	復路	往路	復路
1	直線レール頭頂面	30	40	力行	ブレーキ
2	直線レール頭頂面	10	10	惰行	惰行
3	外軌ゲージコーナー	10	15	力行	ブレーキ

3.2 結果と考察

3.2.1 塩水を散布したレールの測定

塩水散布前後のレールについて、XRDFによるXRD測定を行った結果を図2に示す。図に示したX線回折パターンは横軸が入射X線と回折X線との間の角度 $2\theta$ （CuK $\alpha$ 線に換算）、縦軸が回折X線の強度を示す。さびの量について定量的な考察を行うために、回折X線の強度は、レール下地の鉄に由来する $2\theta=44.8^\circ$ のピーク強度で除算して規格化した、相対X線強度の値で表した。

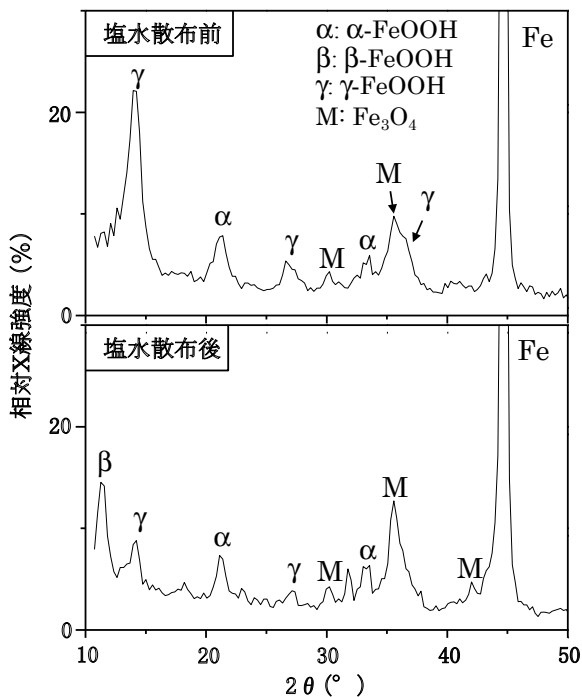


図2 塩水散布前後のレールのXRD測定結果

塩水散布前のレールでは、 $\alpha$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOH、 $Fe_3O_4$ （マグネタイト）の3種類のさびが存在することが分かった。これらのさびは雨水や結露により生成し、車輪の転走により薄く層状に付着した状態であると考えられる。一方、塩水散布後のレールでは、上記の3種類のさびに加えて、 $\beta$ -FeOOHが生成していることが分かった。 $\beta$ -FeOOHは他のさびのようにレールに強固に付着している状態ではなく、いわゆる「浮きさび」の一部としてレール表面に存在すると考えられる。

3.2.2 車両走行後のレールの測定（走行条件1）

力行またはブレーキ状態とした試験車両を、速度30～40 km/hで走行させた後の直線レール頭頂面についてXRDFによるXRD測定を行った結果を図3に示す。また、車両の走行による $\alpha$ -FeOOH（ $2\theta=21.1\sim 21.4^\circ$ ）、 $\gamma$ -FeOOH（ $2\theta=14.0\sim 14.2^\circ$ ）、 $\beta$ -FeOOH（ $2\theta=11.2\sim 11.8^\circ$ ）のピーク強度の変化を図4に示す。

$\alpha$ -FeOOHおよび $\gamma$ -FeOOHでは、試験車両の走行によるピーク強度の変化はほとんど見られなかった。一方、 $\beta$ -FeOOHでは、試験車両の走行によりピーク強度が大きく減少した。 $\beta$ -FeOOHは塩水散布により新たに生成した浮きさびであり、 $\alpha$ -FeOOHおよび $\gamma$ -FeOOHのような強固な膜を形成していないため、車輪の転走により容易に除去されたものと考えられる。

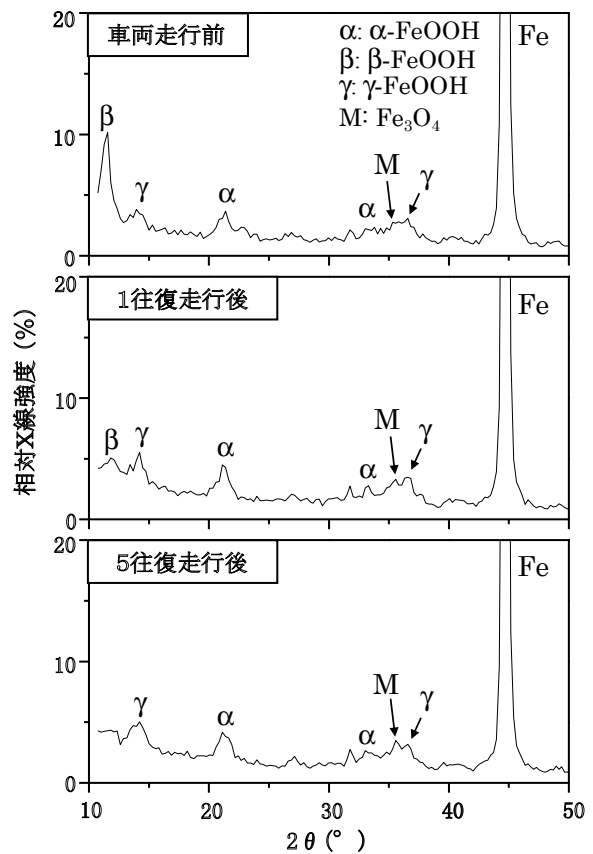


図3 車両走行後のレールのXRD測定結果(走行条件1)

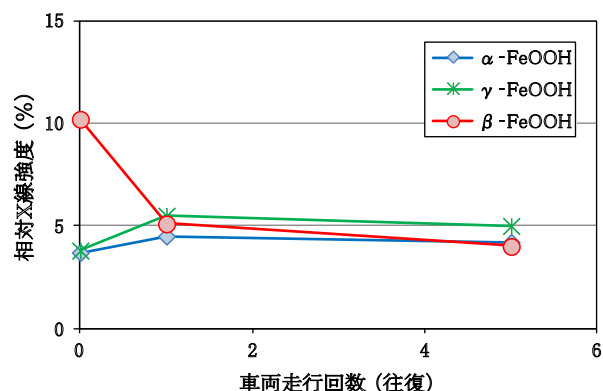


図4  $\alpha, \beta, \gamma$ -FeOOH のピーク強度変化 (走行条件 1)

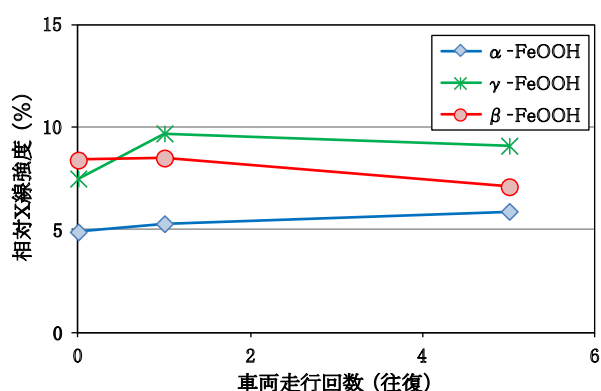


図6  $\alpha, \beta, \gamma$ -FeOOH のピーク強度変化 (走行条件 2)

### 3.2.3 車両走行後のレールの測定 (走行条件 2)

惰行状態とした試験車両を、速度 10 km/h で走行させた後の直線レール頭頂面について XRDF による XRD 測定を行った結果を図 5 に示す。また、車両の走行による  $\alpha, \gamma, \beta$ -FeOOH のピーク強度の変化を図 6 に示す。

この条件では、 $\beta$ -FeOOH についても試験車両の走行によるピーク強度の変化はほとんど見られなかった。車両が惰行状態で運転される場合は、力行またはブレーキ制動状態で運転される場合と比較して、車輪がレール上を転走する際にすべり運動が発生する割合が小さく、レール表面の付着物を除去する効果が小さいと考えられる。

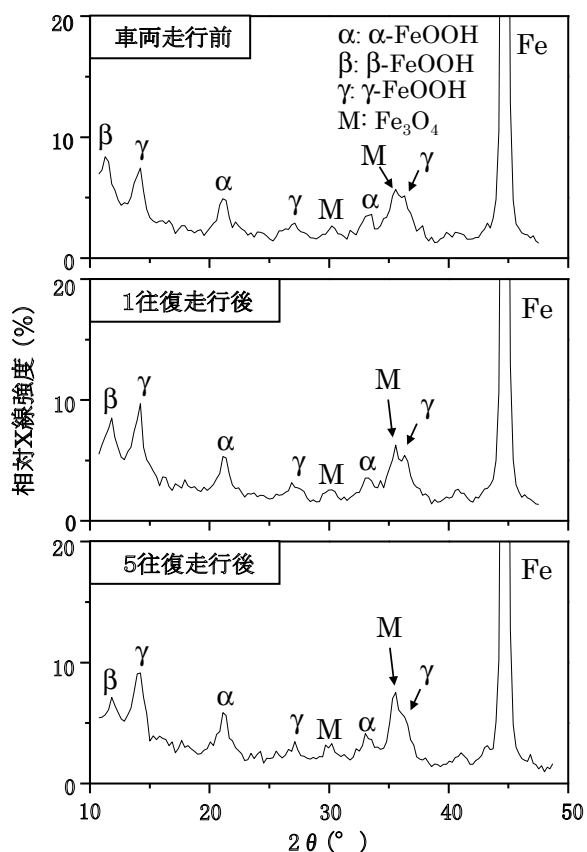


図5 車両走行後のレールの XRD 測定結果(走行条件 2)

### 3.2.4 車両走行後のレールの測定 (走行条件 3)

力行またはブレーキ状態とした試験車両を、速度 10 ~ 15 km/h で走行させた後の緩曲線レール外軌ゲージコーナーについて XRDF による XRD 測定を行った結果を図 7 に示す。また、車両の走行による  $\alpha, \gamma, \beta$ -FeOOH のピーク強度の変化を図 8 に示す。

この条件では、レールに強固に付着している  $\alpha$ -FeOOH および  $\gamma$ -FeOOH についても、試験車両の走行によりピーク強度が大きく減少した。曲線レールの外軌ゲージコーナーでは、車輪のフランジ部が接触し直線区間よりもすべり運動の割合が大きいため、強固に付着し

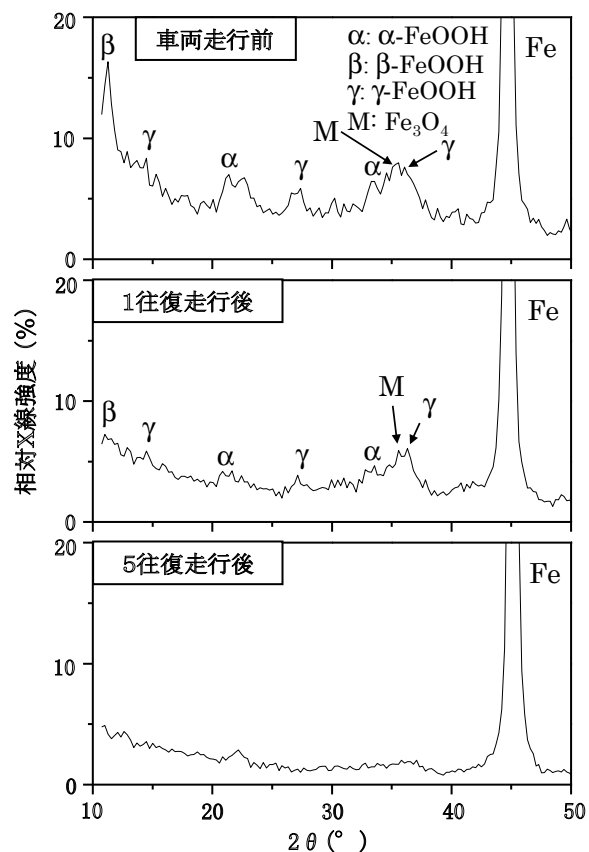


図7 車両走行後のレールの XRD 測定結果(走行条件 3)

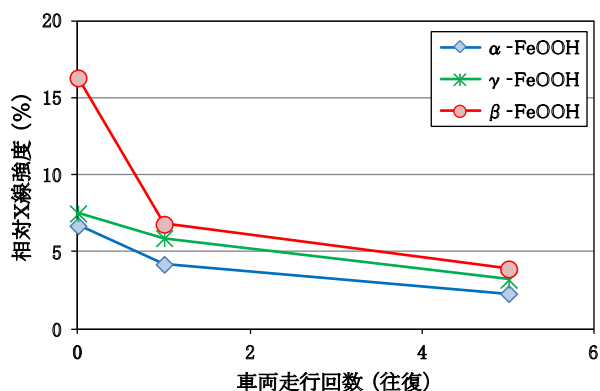


図8  $\alpha, \beta, \gamma$ -FeOOH のピーク強度変化 (走行条件 3)

たさび膜についても容易に除去されたものと考えられる。

以上のように、XRDF によるレール測定の結果、レール上に形成されたさびが車輪の転走により変化する過程は、さびの種類やレールの配置、車両の速度、車両の運転条件に依存することが実験的に明らかになった。すなわち、短時間の降雨により生じた浮きさびは容易に除去されるが、比較的長い期間車両に踏み固められてきた層状のさびについては、数回の車両の通過では除去されにくい。また、曲線レールの外軌ゲージコーナーは頭頂面よりもさびは除去されやすい。車両が力行またはブレーキ制動状態で運転される場合は、惰行状態で運転される場合よりもさびを除去する効果大きい。

海底トンネル内では、塩水・湿潤環境であるため、終列車から始発列車までの間に、レール表面に  $\beta$ -FeOOH を含む浮きさびの皮膜が形成され、始発列車が通過すると、波状摩耗が発生している上り勾配の区間では、力行状態の車両がさびを除去しながら走行していると考えられる。車輪の転走によりさびが除去される過程で、摩擦係数の小さいさびにより微小なすべりが発生し、波状摩耗が形成される要因の一つになっていると考えられる。今後、XRDF によりさび膜が形成される過程を測定し、さびと摩擦係数との相関を明らかにすることにより、波状摩耗発生メカニズムの解明に資するものと期待される。

#### 4. 車輪／レール間潤滑剤の測定

##### 4.1 試験方法

鉄道総研所内試験線の直線レール頭頂面に、車輪／レール間潤滑剤 3.5ml を、図 9 のように塗布した。塗布区間は、車輪外周の長さに相当する距離である 3m とした。使用した潤滑剤は、カナダ・Kelsan 社製の、摩擦調整剤と総称されている製品のうち、「HPF」と呼ばれる、固体潤滑剤として  $\text{MoS}_2$  を含有する粘性液体状の潤滑剤で、レール脇に設置された塗布装置からレール頭頂面に

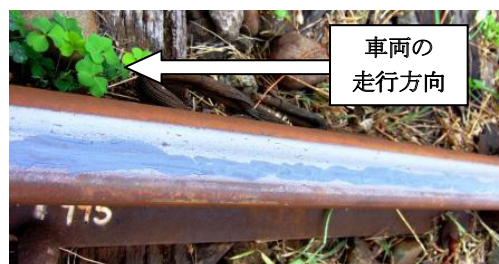


図 9 摩擦調整剤の塗布状況

押し出され、車輪の通過によって進行方向に引き伸ばされ、横圧や騒音の低減等の効果を発揮するタイプのものである。

摩擦調整剤塗布後、ただちに 2 両編成の試験車両 (R291 系電車) を一方向に 1 回走行させ、摩擦調整剤を進行方向に引き伸ばした。車両通過後、塗布地点から車両進行方向に向かって 0m, 5m, 10m, 15m 離れた地点で XRDF による XRF 測定を行い、摩擦調整剤中の  $\text{MoS}_2$  に由来する Mo と S の量を調べた。

##### 4.2 結果と考察

摩擦調整剤を塗布した地点 (0m) の XRF 測定結果を図 10 に示す。横軸が蛍光 X 線のエネルギー、縦軸が蛍光 X 線強度を示す。スペクトル中に、 $\text{MoS}_2$  に由来する元素であるモリブデン (Mo) と硫黄 (S) のピークが観測された。これらのほかに、Fe とクロム (Cr) の強いピークも観測されたが、これはレールの材料に由来する元素である。また、ケイ素 (Si)、カルシウム (Ca)、チタン (Ti) のピークも観測された。これらの元素は摩擦調整剤に含まれている可能性もあるが、土壌や塵埃等にも通常見られる元素である。従って、摩擦調整剤にのみ由来すると考えられる Mo と S の量から摩擦調整剤の付着量を考察することとした。

Mo と S の量について定量的な考察を行うために、蛍光 X 線の強度は、鉄の蛍光 X 線 ( $\text{FeK}\beta$  線) のピーク強度で除算して規格化した、相対 X 線強度の値で表した。各測定点における Mo と S の相対 X 線強度を図 11 に示す。塗布地点から 15m の地点での  $\text{MoS}_2$  の付着量は、塗布地点の約半分となっているが、1 回の車両の走行により、摩擦調整剤が少なくとも 15m の距離までは引き伸ばされることが分かった。

今後、車両の通過回数や測定地点を実際に使用する路線に近い条件として現車試験を行い、XRDF による摩擦調整剤の付着量測定と、摩擦係数や横圧、騒音の測定等を組み合わせることにより、摩擦調整剤の使用を検討している鉄道事業者に対して、費用対効果の観点から最適な塗布量や塗布装置の位置等を決定する際に有用なデータを提供することができると期待される。

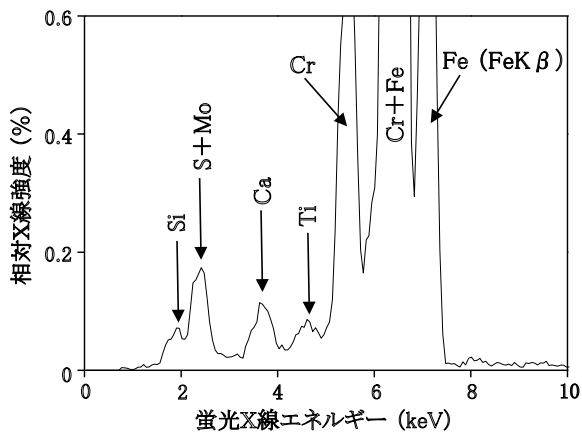


図 10 車両走行後のレールの XRF 測定結果(0m 地点)

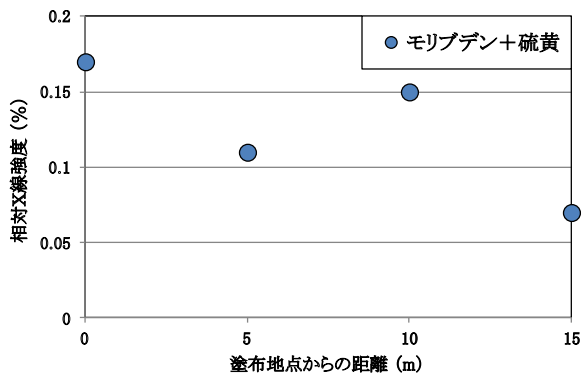


図 11 Mo と S の相対 X 線強度

5. まとめ

車輪／レール間介在物質の現場分析法の一つとして、XRDF を用いて、XRD 分析および XRF 分析を行う方法を提案した。この方法により、レール表面のさびおよび車輪／レール間潤滑剤の分析を行った。車輪転走の前後でのさびの種類と量の変化と、レールに塗布した潤滑剤の伸び性について調べた。以下にその結果を要約する。

- (1) XRDF の測定ヘッド部を固定するための取付治具を使用することにより、軌道内で外軌レールのゲージコーナーについて効率的に分析することが可能になった。
- (2) レール上に形成されたさびが車輪の転走により変化する過程は、さびの種類やレールの配置、車両の速度、車両の運転条件に依存することを XRDF による現場分析により、実験的に示した。
- (3) 1 回の車両の走行により、摩擦調整剤が少なくとも 15m の距離までは引き伸ばされることが分かった。

XRDF によるさびや摩擦調整剤の現場分析は、潤滑油等の有機物質の分析に適した可搬型ラマン分光分析装置による分析等と組み合わせることにより、車輪／レール間介在物質に起因するさまざまな現象について解析する際に有効な手段になることが期待される。今後、現地試験等により現場分析法の精度および簡便性のさらなる向上に取り組む予定である。

文 献

- 1) 石田誠, 青木宣頼, 曾根康友, 伴巧, 白水健介: 塩水環境における波状摩耗の発生原因に関する一考察, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.11-16, 2005
- 2) 陳樺, 曾根康友, 白官錫, 中原綱光, 石田誠: 車輪とレール間のさびが粘着係数に及ぼす影響の基礎試験, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, pp.5-10, 2007
- 3) 伴巧: 車輪とレールの間に介在する物質が起こす現象, RRR, Vol.65, No.8, pp.10-13, 2008
- 4) 福田光芳, 板垣朋範, 寺田夏樹: 軌道回路の短絡不良要因と改善手法, 鉄道総研報告, Vol.21, No.11, pp.5-10, 2007
- 5) 伴巧, 大野薫: レール表面に生成する鉄さびの摩擦特性, トライボロジー会議予稿集, pp.388-390, 1997-11
- 6) 大野薫, 小川喜次: 車輪・レール間の粘着への錆の影響, 鉄道技術研究所速報, No.A-83-70, 1983
- 7) 瀬川祥, 利倉亮一, 石田誠, 瀧川光伸: 海底トンネルにおけるレール波状摩耗説明および対策検討, 鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail) 予稿集, pp.57-58, 2001
- 8) 陸康思: 摩擦調整剤の技術, 鉄道車両と技術, Vol.123, No.8, pp.15-21, 2006
- 9) 伴巧, 深貝晋也, 松田博之, 名村明, 石田誠: 摩擦緩和材最近の動向, 鉄道車両と技術, Vol.148, No.9, pp.6-10, 2008
- 10) 桜庭隆: 地下鉄におけるレール塗油, 新線路, Vol.50, No.5, pp.16-18, 1996
- 11) M. Kusuda, Y. Yamaguchi, S. Fukagai, "The effect of friction modifiers on reducing lateral force and rail renewal cost in shinkansen track," presented at 8<sup>th</sup> International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), Firenze, Italy, September 15-18, 2009.
- 12) Y. Sone, J. Suzumura, T. Ban, F. Aoki, M. Ishida, "Possibility of in situ spectroscopic analysis for iron rust on the running band of rail," *Wear*, Vol.265, pp.1396-1401, 2008.
- 13) M. Uda, S. Yoshimura, A. Ishizaki, D. Yamashita, Y. Sakurada, "Tutankhamen's golden mask investigated with XRDF," *Int. J. PIXE*, Vol.17, pp.65-76, 2007.