

レール表面の腐食生成物と腐食孔の関係性について

○ [土] 井戸 達哉 [土] 水谷 淳 [土] 細田 充

[土] 山本 隆一 (鉄道総合技術研究所)

Investigation of the Relationship between Corrosion Products and Corrosion Pits on the Rail Surface

○Tatsuya Ido, Jun Mizutani, Mitsuru Hosoda,

Ryuichi Yamamoto (Railway Technical Research Institute)

We examined the reasons for the correlation between the thickness of corrosion products on the side surface and the fatigue strength of corroded rails. The three-dimensional geometry of the side surface and bottom surface of corroded rails was measured. There was some relationship between the corrosion products and the corrosion pits on the side surface in terms of position and volume, whereas there was little relationship between the thickness of the corrosion product on the side surface and the depth of the corrosion pit on the bottom surface. In the future, it is necessary to devise a method to measure three-dimensional geometry more rapidly and to verify the relationships based on more data.

キーワード : レール, 腐食, 腐食生成物, 腐食孔, 表面形状

Key Words : Rail, Corrosion, Corrosion product, Corrosion pit, Surface topography

1. はじめに

鉄道においてレールの損傷は走行安全性を阻害する原因となるため、適切な保守管理によりレールの損傷を防ぐことが重要である。レールの損傷の要因の一つとして、トンネルや踏切のような湿潤環境下における腐食が挙げられる。レールが腐食すると、母材表面に減肉が生じると同時に錆が形成される。腐食が著しい場合は急峻な腐食孔が生成するが、特にレール底面にそのような腐食孔が存在する場合は、列車通過に伴う応力集中により破断に至る可能性がある。現在は、目視による腐食程度の分類や超音波探傷による底面腐食量の測定を基に、腐食レールの管理および交換を行っている。しかし、目視は評価者によって判定がばらつき、超音波探傷は底部の探傷領域がレール腹部直下に限られるといった課題があり、破断の危険性が高い箇所を十分に判別できていない。

著者らは既報の研究¹⁾において、極値統計理論を用いて算出したレール側面の腐食生成物(錆)の推定最大厚さが大きいほど、レールの疲労強度が低下することを示した。しかし、このような関係性が得られたメカニズムは明らかになっておらず、より信頼性の高い腐食レールの保守管理手法を確立するためには、その解明が必要である。

レール側面の腐食生成物厚さと疲労強度の間に相関が認められた理由は次のように推定できる。腐食環境下にあるレールの側面と底面の腐食程度に相関があると仮定す

れば、側面の腐食孔深さと底面の腐食孔深さには相関があると考えられる。さらに、鋼材の平均腐食生成物厚さと平均腐食孔深さには関係性があると言われている²⁾ことを踏まえると、側面の腐食生成物厚さと側面の腐食孔深さ、さらには底面の腐食孔深さの間に相関があると考えられる。従って、レール側面の腐食生成物が厚いほどレール底面の腐食孔が深く、疲労強度は低下する。

本研究では、上記の推定について検証するため、トンネルから採取した腐食レールの凹凸測定を通して、側面における腐食生成物と腐食孔の関係および側面の腐食生成物と底面の腐食孔の関係について検討を行う。

2. 腐食レール表面の凹凸測定

腐食レールの側面および底面の凹凸を定量的に評価するために、腐食生成物が付着した状態(以下、ブラスト前)のレール側面とブラスト処理を施して腐食生成物を除去した状態(以下、ブラスト後)のレール側面および底面の表面形状を、3D スキャナー3DSL Rhino-01 (株)セイコーウェーブ製)で測定した。なお、側面についてはゲージコーナー側の側面(以下、GC 側面)とフィールドコーナー側の側面(以下、FC 側面)のいずれも測定した。

本研究で測定対象とした供試レールは、トンネルから採取した JIS 60 kg 普通レールである。各供試レールに対して、3D スキャナーで測定した領域を表 1 に示す。なお、同表中の「全長」は供試レールの長手方向の全長(1500 mm

程度)にわたって測定したこと、「中心 200 mm 幅」は供試レールの中心から長手方向に前後 100 mm の範囲を測定したことを示す。3D スキャナーによる取得データは X 方向(レール長手方向)、Y 方向(測定面上でレール長手方向に直交する方向)の測定ピッチが 1 mm で、各(X, Y)座標に Z (高さデータ)が入った 3 次元形状データである。測定領域の概略図を図 1 に示す。

3D スキャナーによる取得データの例として、レール A のブラスト前の FC 側面における取得データの一部と、それに対応する部分の写真を図 2 に示す。この例では、こぶ状の腐食生成物が生成されており、最大 12 mm 程度の凹凸が生じている。

表 1 各供試レールの測定領域

レール	ブラスト前			ブラスト後		
	GC 側面	FC 側面	底面	GC 側面	FC 側面	底面
A	全長	全長	—	—	—	中心 200 mm 幅
B	全長	全長	—	全長	全長	全長
C	全長	全長	—	—	—	中心 200 mm 幅
D	全長	全長	—	—	—	中心 200 mm 幅
E	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
F	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
G	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
H	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
I	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
J	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
K	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
L	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
M	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
N	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅
O	—	—	—	—	—	中心 200 mm 幅

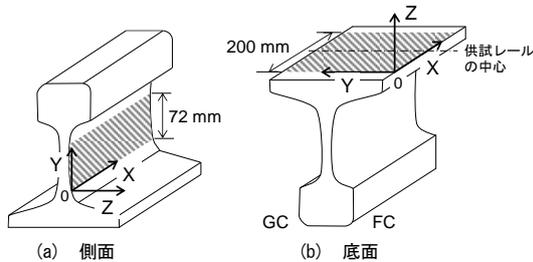


図 1 測定領域の概略図

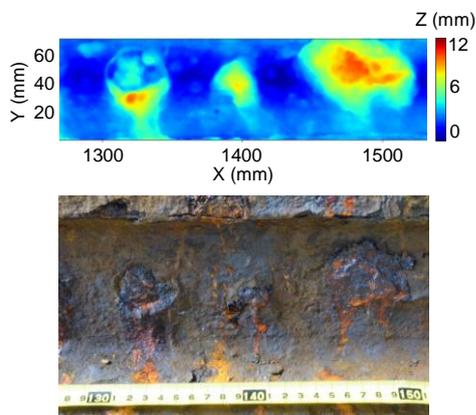


図 2 3D スキャナーによる取得データと外観の例 (レール A, ブラスト前, FC 側面)

3. レール側面の腐食生成物と腐食孔の関係

鋼材の平均腐食生成物厚さと平均腐食孔深さに関係性があることは報告されているものの、腐食レールの疲労強度に影響するような局所的な腐食孔と、その表面に付着した腐食生成物の間にも関係性があるかは不明である。両者に全く関係性がないのであれば、「レール側面の腐食生成物厚さとレール側面の腐食孔深さ、さらにはレール底面の腐食孔深さの間に相関がある」とは言えない。そこで本章では、レール B の GC 側面に対して、ブラスト前とブラスト後の 3 次元形状データを比較することで、腐食生成物と腐食孔の位置、厚さと深さ、体積の関係性を検討した。

腐食生成物とその直下の腐食孔の関係について議論するためには、レール表面において周囲から独立した部分として腐食生成物または腐食孔を定義する必要がある。腐食生成物と見なす厚さの閾値が 3 mm 以下の場合、腐食生成物が全面にわたって連なり独立せず、閾値が 5 mm 以上の場合、腐食生成物と見なされる部分が極端に少なくなる。従って、腐食生成物を基準面から 4 mm 以上の厚さの部分と定義した。同様の検討を行い、腐食孔を基準面から 2 mm 以上の深さの部分と定義した。腐食生成物を赤色、腐食孔を青色に色付けした 3 次元形状データの一部を図 3 に示す。なお、測定装置の都合上、レールの Y 方向についてはブラスト前後で完全に同じ位置を参照できないため、数 mm 程度のずれが生じている可能性がある。同図において、おおよそ一続きの赤色部分、青色部分をそれぞれ一つの腐食生成物、腐食孔と見なし、一つの腐食生成物の中の最大値および腐食孔の中の最小値の位置を黒点で示した。黒点を腐食生成物または腐食孔の位置として代表させて、その(X, Y)座標をまとめて表 2 に示す。同表中の No. は、評価対象範囲の左側に位置する腐食生成物または腐食孔から順に割り振ったものである。同表より、No. 1 や No. 9 のように対応する腐食生成物または腐食孔が見当たらない場合も一部あるが、大部分において同じ No. の腐食生成物と腐食孔の位置はほぼ一致している。このことから、厚い腐食生成物の直下には比較的深い腐食孔が存在する可能性が高いことが分かる。

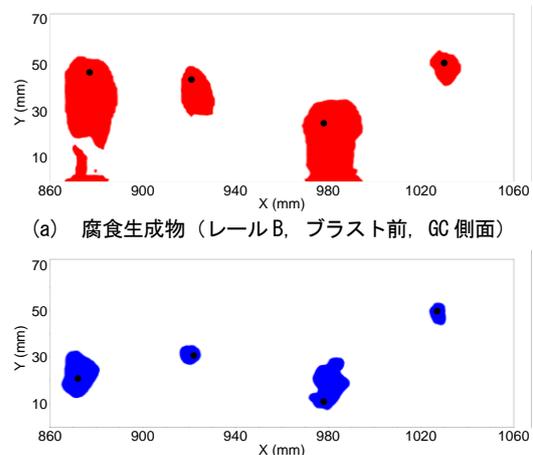


図 3 腐食生成物および腐食孔の形成状態の例

表2 腐食生成物および腐食孔の位置（レールB, GC 側面）

No.	ブラスト前 腐食生成物 (X, Y)	ブラスト後 腐食孔(X, Y)	No.	ブラスト前 腐食生成物 (X, Y)	ブラスト後 腐食孔(X, Y)
1	(197, 15)	—	11	(921, 44)	(922, 31)
2	(264, 43)	—	12	(978, 25)	(978, 11)
3	(453, 47)	(450, 44)	13	(1030, 51)	(1027, 50)
4	(541, 51)	(543, 48)	14	(1128, 43)	(1121, 25)
5	(613, 55)	—	15	(1225, 46)	(1213, 41)
6	(685, 28)	(681, 23)	16	(1258, 42)	(1259, 28)
7	(765, 38)	(759, 17)	17	(1389, 46)	(1382, 26)
8	(821, 72)	(812, 68)	18	(1496, 46)	(1484, 35)
9	—	(843, 24)	19	(1574, 71)	—
10	(877, 47)	(872, 21)			

次に、一つの腐食生成物の中の最大値をその腐食生成物の厚さ、一つの腐食孔の中の最小値（最深値）をその腐食孔の深さと定義し、同じ No. の腐食生成物厚さを横軸、腐食孔深さを縦軸にとったグラフを図4に示す。同図より、腐食生成物の厚さと腐食孔の深さに明確な相関は認められない。このことから、単に腐食生成物の厚さを確認するだけでは直下の腐食孔の深さは推測できないと考えられる。そこで、腐食生成物と腐食孔の体積の関係に着目する。図3で色付けされた腐食生成物と腐食孔の体積を、 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ の正方形の底面と4点の高さデータで作られる立体の体積の総和として算出した。同じ No. の腐食生成物の体積を横軸、腐食孔の体積を縦軸にとったグラフを図5(a)に示す。相関性を調べるために他の値から大きく外れた No.18 のデータを除くと、図5(b)に示すように腐食生成物と腐食孔の体積は中程度の正の相関を示す。このことから、腐食生成物の体積を確認すれば直下の腐食孔の体積がある程度推測できると考えられる。

4. レール側面の腐食生成物と底面の腐食孔の関係

4.1 中心 200 mm 幅におけるレール側面の腐食生成物と底面の腐食孔の比較

腐食レール側面の腐食生成物と底面の腐食孔の形成状態に関係性があるか検討するため、各レールの中心 200 mm 幅の範囲における側面の腐食生成物の最大厚さと底面の腐食孔の最大深さの比較を行う。

表1に示したように、レール A, B, C, D の4本以外はブラスト前のレール側面の3次元形状データを取得していない。そのため、側面の腐食生成物の最大厚さと底面の腐食孔の最大深さの関係性を検討する上で、データ量が十分ではないと考えられる。そこで、既報の研究の電磁膜厚計による腐食生成物厚さの測定結果を3Dスキャナーによる測定結果に換算することを試みる。具体的には、レール A, B, C, D の4本について、中心 200 mm 幅の範囲の側面において、電磁膜厚計で測定された腐食生成物厚さの最大値と3Dスキャナーで測定された最大厚さの関係性を

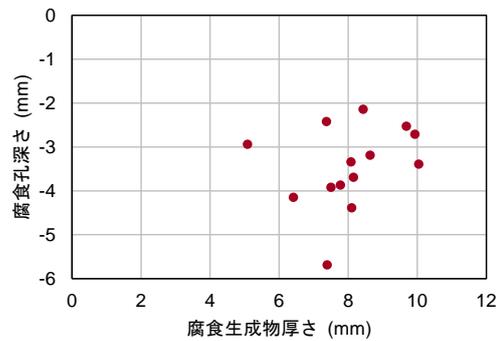
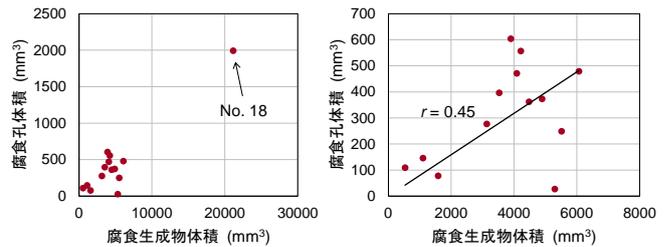


図4 同位置における腐食生成物厚さと腐食孔深さの関係（レールB, GC 側面）



(a) 全データ (b) No. 18 以外

図5 同位置における腐食生成物体積と腐食孔体積の関係（レールB, GC 側面）

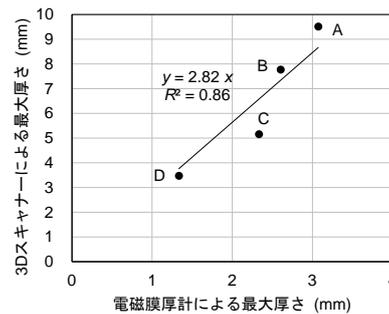


図6 電磁膜厚計で測定された腐食生成物厚さの最大値と3Dスキャナーで測定された最大厚さの関係

を求める。その関係性を基に、他のレールについて電磁膜厚計で測定された腐食生成物厚さの最大値を3Dスキャナーにおける推定最大厚さに換算する。

レール A, B, C, D の中心 200 mm 幅の範囲の側面において、電磁膜厚計で測定された腐食生成物厚さの最大値を横軸に、3Dスキャナーで測定された最大厚さを縦軸にとったグラフを図6に示す。同図より、原点を通る近似曲線 $y = 2.82x$ で $R^2 = 0.86$ と高い決定係数を示す。そこで、レール E~O の電磁膜厚計における腐食生成物厚さの最大値を2.82倍して3Dスキャナーにおける推定最大厚さに換算した。この換算結果を基に、中心 200 mm 幅の範囲における側面の腐食生成物の最大厚さを横軸に、底面の腐食孔の最大深さを縦軸にとったグラフを図7に示す。同図より、レール A~D の実測値のみの場合および推定値を含めた場合のいずれにおいても、側面の腐食生成物の最大厚さと底面の腐食孔の最大深さに明確な相関は認められない。

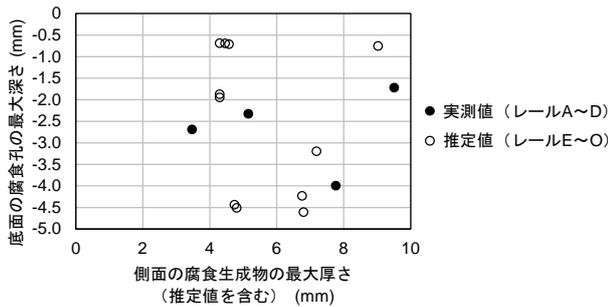


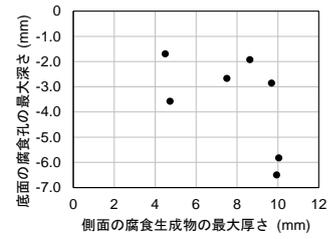
図7 中心 200 mm 幅における側面の腐食生成物の最大厚さと底面の腐食孔の最大深さの関係

4.2 測定範囲を拡大した場合のレール側面の腐食生成物と底面の腐食孔の比較

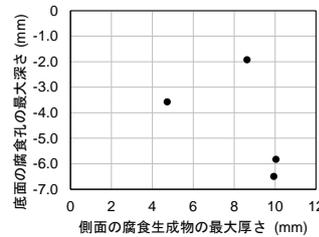
前節で側面の腐食生成物の状態と底面の腐食孔の状態に明確な相関が認められなかったのは、測定範囲が供試レールの中心 200 mm 幅の狭い範囲に限定されていたことが原因であった可能性が考えられる。そこで本節では、測定範囲を 200 mm よりも可能な限り拡大した場合のレール側面の腐食生成物とレール底面の腐食孔の関係について検討する。

表 1 に示したように、中心 200 mm 幅以外の範囲においてブラスト前のレール側面とブラスト後のレール底面のいずれの 3 次元形状データも取得されているのは、レール B のみであるため、ここではレール B を解析対象とする。レール B の全長はおよそ 1600 mm であるため、測定位置として 200 mm 幅で 7 箇所、300 mm 幅で 4 箇所、400 mm 幅で 3 箇所をそれぞれ設定し、各測定箇所における側面の腐食生成物の最大厚さを横軸に、同測定箇所の底面の腐食孔の最大深さを縦軸にとったグラフを図 8 に示す。同図(a)より、測定範囲が 200 mm の場合、前節と同様に側面の腐食生成物の最大厚さと底面の腐食孔の最大深さに明確な相関は認められない。また、同図(b)(c)より、測定範囲を 300 mm、400 mm に拡大したとしても、側面の腐食生成物厚さとレール底面の腐食孔深さの間に明確な相関は認められない。

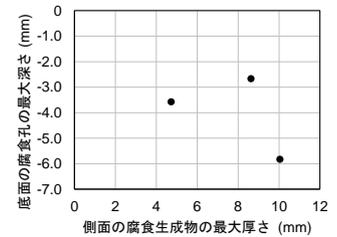
以上より、本章で行った検討では、レールの側面の腐食生成物と底面の腐食孔の関係性は見出せなかった。しかし、トンネルにおけるレールの腐食は漏水に起因するものであり、側面に付着した水分は底面まで伝わっていずれも腐食させる可能性は高く、両者の腐食の程度に何らかの関係性が存在する可能性も捨てきれない。本研究において扱ったレール表面の 3 次元形状データの長さは合計 3 m 程度と限られており、データが少ないためにばらつきに埋もれて関係性が見出せなかった可能性がある。今後は、3D スキャナーよりも高速で測定が行える方法を考案し、より多くのデータを取得した上で側面と底面の腐食状態の関係性について検証を行う必要がある。



(a) 測定範囲 200 mm



(b) 測定範囲 300 mm



(c) 測定範囲 400 mm

図8 測定範囲を変更した場合の側面の腐食生成物の最大厚さと底面の腐食孔の最大深さの関係 (レール B)

5. まとめ

信頼性の高い腐食レールの保守管理手法を確立するため、腐食レールの凹凸測定を実施し、レール側面の腐食生成物とその直下の腐食孔の関係および側面の腐食生成物と底面の腐食孔の関係について検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) レール側面に形成された厚い腐食生成物の直下には比較的深い腐食孔が存在する可能性が高いこと、および両者の体積には中程度の正の相関が存在することが分かった。
- (2) 複数の腐食レールを対象とした解析の結果、200 mm 幅の範囲で測定した側面の腐食生成物の最大厚さと底面の腐食孔の最大深さの間に明確な相関は認められなかった。測定範囲を拡大した場合でも、同様に明確な相関は認められなかった。

本研究では、扱った 3 次元形状データは合計 3 m 程度であり、データが少ないために側面と底面の腐食状態の関係性が認められなかった可能性がある。今後は、より多量のデータを取得した上で関係性の検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) 水谷淳, 細田充, 山本隆一: 極値統計法による腐食レールの最大さび厚の推定および腐食程度毎のレールの疲労強度の解明, 保全学, 印刷中。
- 2) 貝沼重信, 山本悠哉, 伊藤義浩, 林秀幸, 押川渡: 腐食生成物層の厚さをを用いた無塗装普通鋼材の腐食深さとその経時性の評価方法, 材料と環境, Vol. 61, No. 12 pp. 446-453, 2016。