

論文 生存時間分析によるレール使用寿命の推定

小松 佳弘¹・谷口 直大²・山根 一樹³・元好 茂¹

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター
(〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町 2-479)
E-mail:ys-komatsu@jreast.co.jp

²日立製作所 公共社会ビジネスユニット 社会シテム事業部

³日立製作所 サービス&プラットフォームビジネスユニットサービスプラットフォーム事業本部

本研究では、生存時間分析を用いて鉄道レールに傷が発生する確率の予測を行い、その結果に基づいてレール傷の観点からレールの使用寿命を推定した。具体的には設備管理 DB に収録された大規模データを用いてレール有ランク傷が発見されるまでの累積通トンに影響を及ぼす要因について cox 比例ハザードモデルにより推定を行った。さらに推定された基準ハザード関数が累積通トン 8 億トン以下の範囲においてレイリー分布に適合したことから、基準ハザード関数をレイリー分布に近似して条件ごとのレール使用寿命の推定を行った。その結果、熱処理レールの普通レールへの変更によりレールの使用寿命が改善される可能性が示された。

Key Words: track maintenance, rail defects, survival analysis, Cox regression analysis

1. はじめに

レールの頭頂面を起点として発生するシェリングやきしみ割れといったレール傷は鉄道の安全・安定輸送に直結するとともにレールの使用寿命を決める大きな要因となっており、線路の保守管理において非常に重要な問題となっている。そのため保線業務のうち多くの労力・コストをレールの探傷やレール交換、レール削正等のレールの管理に費やしている。

したがって保線業務の効率化を図るためには、レール管理の効率化が必要である。実際にこれまでにレール削正によるレール寿命の延伸¹⁾、レール材質の変更によるレール寿命の延伸²⁾など研究・実務の両面から様々な取り組みが行われてきており、一定の成果を挙げている。

しかし一方でレール傷が発生する個所や発生までの期間については、経験的に一定の傾向は知られているものの未だ詳らかではない。そのためレール交換について長期的な保守計画の策定が難しく、鉄道事業者では検査等でレール傷を発見した後にレール交換等の保守作業の計画を行うことが多い。また、検査の結果に伴ってほかの作業計画の変更が発生するケースもしばしば見られる。

今後、より効率的なレールの保守管理を行うためには長期的に最適化された確度の保守計画の策定が必要であると考えられる。そのためにはレール傷が発生する個所や発生までの期間、つまりはレール使用寿命と使用寿命

に影響を及ぼす要因を推定することが必要と考える。

2. 既往研究のレビューと生存時間分析の概要

(1) レール傷の発生に関する既往の研究

レール傷の発生ならびにその進展に関する研究は、これまでも数多く行われてきている。その多くのものはシミュレーションや室内試験あるいは現場調査に基づいた検討であり、その成果はレール内部傷の管理閾値を決めることに利用されている。

一方でレール管理データに対する統計的分析も国内でいくつか試みられている。例えば石田³⁾は東海道・山陽新幹線の検査データについて数量化 I 類によりシェリングの発生率に影響を及ぼす軌道条件について明らかにするとともに、さらにマルコフ過程による推移確率行列に基づきシェリングのき裂進展過程の推定手法を提案している⁴⁾。また加藤⁵⁾らは地下鉄三田線の検査データについてレール損傷に影響を与える要因を数量化 I 類、判別分析により明らかにしている。今井ら⁶⁾は線区毎のシェリングの発生傾向を比較分析し、傷の発生に至る通過トン数を評価するとともにその原因について考察を加えている。その他、深堂ら⁷⁾は検査データに基づき曲線の場合別のシェリングの発生傾向の違いを分析している。

レール削正のレール傷抑制効果の検証について検査デ

ータを分析した例としては西⁸⁾や奥村⁹⁾らがあり、いずれもレール削正によりシェリングの発生が抑制されていることを示している。

これらに対して本研究ではレール傷が発生するまでの期間（通過トン数）に着目し、期間に影響を及ぼす因子を定量的に評価するとともにレールの使用寿命を予測することを企図する。レールを効率的に管理する上で傷が発生する位置、時期、原因の3つを明らかにすることが重要である。またレールの劣化メカニズムを統計的に明らかにすることで将来的にアセットマネジメントへの応用も期待することができる。

また本研究では JR 東日本のデータベースに記録された大規模管理データを用い、網羅的に統計分析を行った。大規模データを使用することで、より汎用的な知見を得ることが期待できる。

以上の通り、本研究では大規模データセットを用いて、レールの傷の発生要因とその影響力を定量的に評価するとともに、レールの使用寿命の推定を行うことを目的とした。

(2) 生存時間分析¹⁰⁾の概要

生存時間分析は医療分野で人間の寿命解析手法、医療効果の分析手法として始まり、現在では信頼性工学の分野でも広く利用されている。生存時間分析ではある事象（本研究ではレール傷の発生）までの期間（同累積通トン）を取扱う。特に途中までしか観測されない打ち切りデータも含めて取り扱うことが可能である。

本研究では生存時間分析手法の一つであるコックス比例ハザードモデルを用いた。コックス比例ハザードモデルは基準ハザード関数（ある時点での損傷の発生確率を表す関数）に対する比（ハザード比）を推定する手法であり式1で示される。

$$h(t|x) = r(x)h_0(t) \tag{1}$$

$$r(x) = e^{\sum_i \beta_i x_i} \tag{2}$$

t : 累積通トン（百万トン）

x : 説明変数

$r(x)$: ハザード比

$h_0(t)$: 基準ハザード関数

β : 回帰係数

コックス比例ハザードモデルでは事象の発生に影響する複数の因子を同時に評価することが可能であるためノンパラメトリックモデルに比べて本研究の目的に適していると考えた。

故障に関する基準ハザード関数は一般的にワイブル分

布やロジスティック分布などを仮定することが多い。実際に過去の研究においてはレール傷の発生数と累積通トンの関係はワイブル対数分布に従うという結果も得られている¹¹⁾¹²⁾。ただし本研究においては、まずは基準ハザード関数に特定の関数形を仮定しないセミパラメトリックモデルであるコックス比例ハザードモデルで分析を行うこととした。

3. 本研究で用いたデータ

(1) 対象データの概要

a) 利用したデータベース

本研究では設備管理システム内の検査データ（2008年1月から2014年7月）、設備データ（2014年7月時点）およびレール探傷車の摩耗データ（2000年4月から2014年6月）を対象に分析を行った。分析対象としたデータの概要を表-1に示す。

b) 分析対象

本研究では表2に示す35線区を対象として分析を行った。ただし、本研究では本線の複線区間を対象とし、分岐器や伸縮継目は除外した。また5mを1区間として分析の単位とした。

(2) 目的変数の定義

東日本旅客鉄道ではレール傷はその寸法によりランク化を行い、ランクと線区の重要性に応じて処置内容を定め

表-1 分析データの概要

データ種別	データ項目	データ量	データ概要
設備データ	レール、マクラギ、曲線諸元など		2014年7月時点の設備
検査データ	レール損傷検査、軌道変位データなど	約65年分（損傷約30万回）	過去の検査結果を記録したデータ
摩耗データ	摩耗データ	約14年分	5mピッチ摩耗測定データ

表-2 分析対象線区（35線区）

貨物列車	車上塗油	線 級		
		1級線	2級線	3級線
○	○	品鶴線、東海道須賀、根岸線、武蔵野線、東北本線、山手貨物、高崎線、	南武線、武蔵野線、東北本線、東北貨物線、上越線	上越線
○		東海道本線、東海道貨物、東北本線、総武本線、	東北本線、上越線、信越本線、羽越本線、奥羽本線	高島線、上越線、羽越本線、奥羽本線
	○	東海道山手、東海道電車、中央急行、東北山手、東北電車、山手電車、総武本線、京葉線	横浜線	
		東海道地下、東北常磐、埼京線、東北地平、赤羽線、常磐緩行、総武快速	伊東線	常磐緩行

表-3 分析に用いた説明変数

No	説明変数	単位	備考
1	摩耗進み	mm/ 億 t	
2	レール種類	—	ロング/定尺等
3	レール種別	—	60kg, 50N など
4	レール材質	—	熱処理, 普通など
5	外軌/内軌	—	外軌/内軌/直線
6	曲率	1/m	
7	カント不足量	mm	
8	曲線分類	—	入口側緩和曲線, 円曲線など
9	マクラギ種別	—	PC, 木マクラギなど
10	道床種別	—	砕石, スラブ, てん充など
11	高低変位	mm	
12	通り変位	mm	
13	水準変位	mm	
14	軌間実測値	mm	
15	こう配 (上り)	%	
16	こう配 (下り)	%	
17	ホーム	—	ホーム有無
18	貨物運行	—	貨物の有無
19	車上塗油	—	塗油の有無

ている。本研究においては、各区間のレール敷設後のデータを対象に B ランク以上（横裂深さ 10mm 以上、水平裂 30mm 以上、きしみ割れ長さ 32.6mm 以上）の傷が検査で発見されるまでの通過トン数（単位：百万トン）をレールの使用寿命と定義して分析を進めた。なお、シェリングやきしみ割れが一般にレール頭部疲労層を起点としているのに対して、底部腐食・底部横裂、バッター傷は発生のメカニズムが大きく異なることから分析の対象から外した。最終的に対象としたデータ数は 1,369,033 区間であり、その内レール傷の発生箇所は 8,129 区間であった。なお、2014 年 6 月の時点でレール損傷のない区間は打ち切りデータとして扱った。

(3) 説明変数の設定

レール傷の発生に影響を及ぼす因子について既往の研究¹⁹⁾などを参考にし、表-3 に示す変数を説明変数として考慮することとした。質的データは各水準ごとに該当する場合を 1、該当しない場合を 0 とするダミー変数に変換し、説明変数に加えた。なお各説明変数は以下の通り算出した。

まずレール摩耗進みはレール探傷車の摩耗データおよび検査記録に基づく摩耗量（レール交換から 2014 年 6 月まで）を目的変数、累積通トンの説明変数とし、切片を 0 とした単回帰分析を行い、得られた傾きを摩耗進み量とした。

説明変数に用いる軌道変位は以下の方法で計算した。まず軌道変位として軌道検測車で測定した高低変位（10m 弦正矢）、通り変位（10m 弦正矢）、水準変位、軌間実測値を用いた。ここで軌間実測値は規定値（1,064mm）とスラックと変位の和である。次に各軌道変位ごとに区間（5m 単位）内で絶対値が最も大きい箇所の値を区間代表値とする。区間代表値についてレール交換以降の全データの絶対値平均（軌間実測値のみ平均値）を算出し、説明変数として用いた。

カント不足量は当該曲線の通過速度、カント量、曲線半径から算出した。本研究では実際の列車通過速度を得ることが出来なかったため列車運転速度表に定める最高速度を用いた。また曲率や勾配は対象区間内の延長に応じて加重平均して算出した値を用いた。

曲線分類は、列車進行方向に対して出発側の緩和曲線区間を「入口側緩和曲線」、到着側の緩和曲線区間を「出口側緩和曲線」と定義した。また出口側緩和曲線の緩和曲線終端から 20m 間の直線区間を「曲線出口から 20m 間」と定義した。

その他の設備等は区間内で占める割合が最も高いものとした。

塗油の有無については車両情報¹⁹⁾にもとづきレール塗油装置が搭載されている車両が定期運用されている線区を塗油区間として扱った。

なお、説明変数は一つずつ追加し、多重共線性を示した項目（VIF>10）を除外して分析を繰り返した。また曲率を追加した結果、推定結果が不安定になったため除外し、曲線半径を三段階（ $R<500\text{m}$, $500\text{m}\leq R<800\text{m}$, $800\text{m}\leq R$ ）に分類するカテゴリカル変数を導入した。

4. コックス比例ハザードモデルによるレールの劣化因子の推定

(1) 分析結果

以上に基き推定したコックス比例ハザード分析の結果を表-4 に示す。ここでは各因子のレール傷発生への寄与ならびに偏回帰係数（非標準化）を確認するため、ステップワイズ法等による変数選択を実施しない結果について記載する。

表-4 に示すハザード比は一定の期間におけるレール傷発生確率の比を表している。すなわちハザード比が 1 よりも大きい場合にはレール傷が発生しやすく、反対に 1 を下回る場合にはレール傷が発生しにくいことを意味している。

(2) 結果の考察

分析結果より各変数のレール傷への影響について、特

表4 コックス比例ハザード分析の結果

	項目	非標準化 回帰係数	ハザード比	s. e.
摩耗	摩耗進み	.016	1.016	.001 **
カント	カント不足量	-.003	.997	.001 *
軌道変位	高低変位	.076	1.079	.005 **
	通り変位	.007	1.007	.002 **
	水準変位	.130	1.139	.006 **
	軌間実測値	-.062	.940	.007 **
勾配	上り勾配	.015	1.015	.003 *
	下り勾配	.004	1.004	.003 **
レール種類	ロングレール	-.555	.574	.033 **
	接着絶縁レール	.473	1.605	.102 **
	中継レール	.115	1.122	.171
	定尺レール	0*	1*	-
レール種別	50N	.818	2.265	.029 **
	60kg	0*	1*	-
レール材質	熱処理レール	.797	2.219	.036 **
	普通レール	0*	1*	-
曲率	曲率	-	-	+
外軌/内軌	内軌	-.821	.440	.061 **
	外軌	1.189	3.285	.049 **
	直線	0*	1*	-
曲線分類	入口側緩和と曲線	-.351	.704	.047 **
	円曲線	-.156	.855	.041 **
	出口側緩和と曲線	-	-	+
	曲線出口から20m内	-.038	.963	.070
曲線半径	直線	0*	1*	-
	R<500m	.450	1.568	.065 **
	500m≦R<800m	.638	1.892	.042 **
	800m≦R	0*	1*	-
マクラギ種別	合成マクラギ	.732	2.079	.164 **
	木マクラギ	.798	2.220	.073 **
	分岐マクラギ	-.477	.621	.198 *
	合成分岐マクラギ	.596	1.815	.709
	短マクラギ	.859	2.361	.365 *
	その他	.300	1.350	.211
	PCマクラギ	0*	1*	-
道床	無道床	-.672	.511	.125 **
	てん充	.805	2.237	.073 **
	舗装・コンクリート	-1.330	.264	.234 **
	その他	-1.475	.229	.719 *
	スラブ	-1.946	.143	.264 **
	ふるい砂利	.129	1.137	.193
ホーム	砕石	0*	1*	-
	ホーム有無ダミー	.201	1.223	.044 **
	貨物有無ダミー	.536	1.709	.037 **
	塗油有無	-1.333	.264	.033 **

0*: カテゴリカル変数の基準, *: 5%水準で有意,

**: 1%水準で有意, +: 多重共線性の影響で除外

微的なものを以下に述べる。

a) 軌道構造の影響

軌道構造については木まくらぎ、短まくらぎ、50N レール、てん充道床がハザード比が1を上回る結果でありレール傷が発生しやすい傾向を示した。一方でスラブ軌道、分岐マクラギ、ロングレールはハザード比が1を下回り、レール傷が発生しにくい傾向を示している。てん充道床を除けば所謂弱小設備でレール傷の発生が多い傾向を示しており、例えば PC まくらぎ化などの設備強化がレール傷の抑制に対しても有効である可能性が示唆された。

b) 線路線形の影響

次に線路線形の影響について検討を行う。図-1 は表4 に示した外軌、各曲線半径、各曲線分類のパラメータから式(2)に基づき、直線に対する条件別のハザード比を

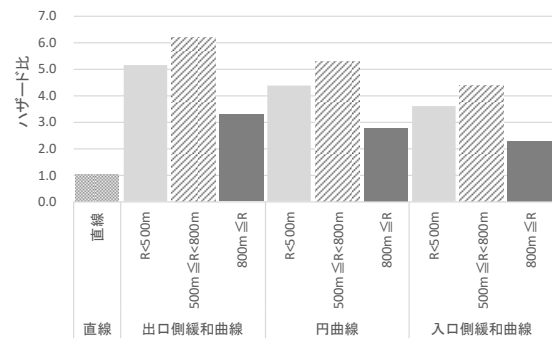


図-1 外軌レールの線形別ハザード比 (直線基準)

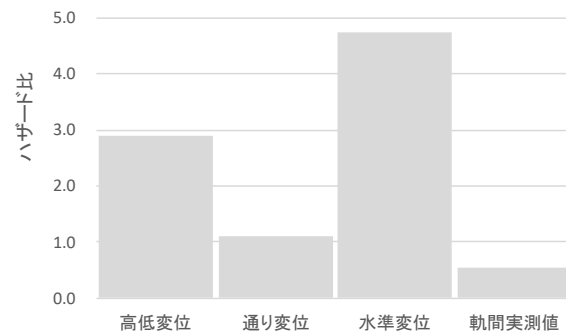


図-2 軌道変位(管理目標値 (95km/h を超える線区) 相当) ごとハザード比

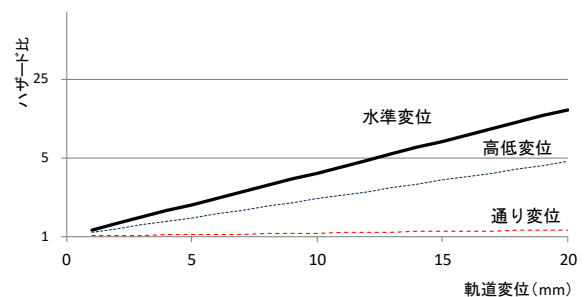


図-3 軌道変位の変化とハザード比

計算した結果である。ただし、出口側緩和と曲線は多重共線性により説明変数から除外しているため曲線分類に関する非標準化係数を0として計算している。

曲線区間では、レール傷の発生率が高くなり、緩曲線部 (500m≤R<800m) の出口側緩和と曲線の外軌で最大 (直線部の 6.22 倍) となる傾向が示された (図 1)。緩曲線部¹⁵⁾や出口側緩和と曲線でレール傷の発生が多いことは既往の研究⁷⁾でも報告されており、従来の知見と符合する結果となった。

次に縦勾配については、上り勾配が大きいほどレール傷の発生リスクが大きくなる傾向が統計的に有意に示された。勾配区間では車輪/レール間の滑りが発生しやすく、白色層を起点としたシェリングが発生しやすいと考えられており¹⁶⁾少なくとも上り勾配においては、それを支持する結果となった。その一方で下り勾配に関しては統計的に有意な影響は見られなかった。

c) レール種別の影響

熱処理レールの方が普通レールに比べてレール傷の発生リスクが高い傾向が有意に示された（普通レールの2.22倍）。

d) 軌道変位の影響

各軌道変位が管理目標値（95km/hを超える線区）相当の場合のハザード比を図-2に示す。図-2より高低変位、通り変位、水準変位が大きいほどレール傷の発生リスクが大きい傾向が見られる。特に水準変位が与える影響が大きい（水準変位12mmでハザード比4.74）傾向が示された。

次に軌道変位量を変化させた場合のハザード比の変化を比較した（図-3）。その結果、高低変位や水準変位が大きい場合には軌道構造の影響や線形に比べて著しくレール損傷の発生リスクに影響を及ぼすことが示唆された。

一方で軌間実測値は大きいほどレール傷の発生率が小さい傾向が示された。

ただし本研究では軌道変位の時系列変化について分析を行っていない。そのため、有ランクに達する前のレール傷初期の凹凸を原因とした輪重変動により高低変位や水準変位が大きくなった可能性を否定できない。そのため、軌道変位とレール傷の発生に関する因果関係については今後検証を行う必要があると考える。

e) レール摩耗進み

レール摩耗進みが大きいほどレール傷の発生確率が高い傾向が示された。ただしレール摩耗進みが5mm/1億トン（2000万トンの線区で1mm/年）増加した場合に、損傷の発生率が8.3%増加する程度であり、線形などの他の因子に比べて影響は小さかった。

これまでの研究からレール摩耗による自己削正効果により、シェリングが抑制できることは材料学的にも実証的にも示されており、既往の研究¹⁾に反する結果である。このような結果が得られた原因として本研究で用いた摩耗データの精度（位置、大きさ）等が推定結果に影響を及ぼしている可能性が考えられる。そのため、摩耗データの処理方法について今後検討が必要である。

f) その他の影響

その他の影響について下記に整理する。

まず貨物線区の方が非貨物線区に比べて傷の発生確率が高い（1.71倍）傾向が示された。これは貨物列車の軸重が旅客列車に比べて大きいことがレール傷発生に影響を及ぼしているためと考えられる。

一方で塗油線区の方が非塗油線区に比べて傷の発生確率が低い（0.26倍）傾向が示された。

またホーム区間で傷の発生確率が高くなる（1.22倍）傾向が示された。列車駆動・制動がレール傷の発生に影響を及ぼすことはこれまでに指摘されている¹³⁾。またシ

ェリングの原因のひとつである白色層の生成にも列車の駆動・制動が影響を及ぼすと考えられる¹⁶⁾ため、ホーム停車・出発時の列車の影響を評価できたと考えられる。

カント不足量が小さいほど（つまり走行速度に対してカントが大きいほど）傷の発生リスクが大きくなる傾向が見られた。ただし、本研究でカント不足量の算出に用いた速度よりも実際の通過速度が小さいためカント不足量を過大評価している可能性が考えられることに注意が必要である。

5. レール使用寿命の推定

(1) 基準ハザード関数の推定

本研究で推定した基準累積ハザード関数 $H_0(t)$ を図-4で示す。なお基準累積ハザード関数とハザード関数の関係は式3で表される。

$$H_0(t) = \int_0^t h_0(z) dz \quad (3)$$

通トンの増加に従って累積ハザード関数の傾きは増加し続け、概ね8億トンで傾きが変化し、約10億トンで一定の値となった。ただしJR東日本では累積通トンに基づく交換基準を定めており、レール削正を行わない場合は最大で8億トンでレール交換を行っている（レール削正を行う場合10億トン）。そのため8億トン以上のデータについてはサンプルが少なく信頼性が低いと考えられる。また多くの場合8億トンでレール交換を行うため、8億トン以下の範囲でレール傷の発生率を推定できれば実用上問題ないと考えられる。

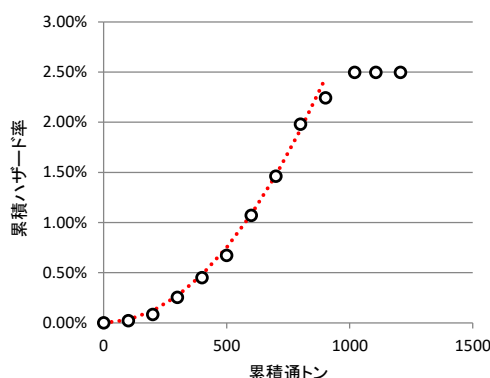


図-4 基準累積ハザード関数の推定結果

表-5 パラメータの推定結果

パラメータ	推定値	標準誤差
λ	3.004×10^{-8}	4.239×10^{-8}

$R^2=0.998$

そこで 8 億トン以下の範囲で基準累積ハザード関数 $H_0(t)$ を式 4 に示す二次関数でフィッティングした。その結果、 $R^2=998$ と高い重決定係数を示した。式 4 は生存時間がワイブル分布の一種であるレイリー分布¹⁸⁾に従うことを意味しており、時間（通トンの増加）とともにレール傷の発生率が高くなることを意味している。結果を表-5 に示す。

$$H_0(t) = \lambda t^2 \quad (4)$$

式 2 ならびに式 3 より基準ハザード関数は式 5 で表される。

$$h_0(t) = 2\lambda t \quad (5)$$

本研究では分析の第一歩としてノンパラメトリックな手法を用いたが、以上の結果よりワイブル分布の一種であるレイリー分布を適用することが妥当であると考えられる。この結果は既往の研究に一致する^{11),12)}。

また、生存確率 $S(t|x)$ とハザード関数には以下の関係が成り立つ。

$$\log S(t|x) = -r(x) \int_0^t h_0(t) = -r(x) H_0(t) \quad (6)$$

式 4 と式 6 より

$$\log S(t|x) = -r(x) \lambda t^2 \quad (7)$$

ゆえに $p\%$ 生存確率は式 8 で表される。

$$t = \sqrt{-\frac{\log(p/100)}{r(x)\lambda}} \quad (8)$$

またレール傷の発生までの通トンの期待値（以下、期待寿命と呼ぶ）は以下の式 9 で表すことができる。

$$E(T) = \frac{1}{\sqrt{r(x)\lambda}} \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{r(x)\lambda}} \quad (9)$$

(2) レール期待寿命の推定

2017 年度にレール傷が発見された箇所の一部について

表-6 レール傷発生箇所の期待寿命と信頼区間（百万トン）

線名	発生時 通トン	期待 寿命	95%信頼区間	
			下限	上限
羽越本線	85.2	689.3	123.8	1494.0
東北本線	710.6	3152.1	565.9	6831.3
中央線	318.2	1742.4	312.8	3776.2
山手電車	241.4	1137.8	204.3	2466.0
総武本線	210.0	1159.9	296.4	2265.8

式 8 および式 9 から期待寿命および 95% 信頼区間を算出した。結果を表-6 に示す。

表-6 に示すように発生時通トンと期待寿命の間に大きな乖離が見られた。また今回確認した 5 箇所中 3 箇所は実際の有ランク傷の発生時の通トンが推定値の 95% 信頼区間内に収まったものの、信頼区間幅がかなり広がった。このことから本研究の分析結果を基に特定の箇所のレール傷の発生を細かく精度よく予測することは難しいと考えられる。

レール期待寿命の推定結果のばらつきが大きい原因として、本研究で用いた変数以外に考慮すべき説明変数が存在している可能性がある。そのため、より精度良く推定を行うためには、入力データの精度を上げるとともに考慮する変数を増やして分析を行う必要がある。

推定精度を向上することができれば、レール弱点箇所の抽出や対策方法の選定など、保守の長期計画への反映が可能となると考えられる。

6. レール使用区分の検討

近年、レール傷の抑制を企図してレール材質の変更¹⁹⁾やレール使用区分の変更²⁰⁾が検討されている。そこで前章の分析結果に基づきレール使用区分の試検討を行った。

まず条件別のレール傷発生の期待寿命を計算した。5 章において、特定の箇所に対するレール傷発生までの通トンの推定結果は十分な精度を示さなかったが、条件ごとの期待値を比較する上では一定の信頼性があるものと考えられる。条件はバラスト軌道、PC マクラギ、ロングレール、外軌（曲線）、60kg レール、高低変位 8mm、通り変位 8mm、水準変位 6mm（整備目標値の約 1/2）である。結果を表 7 に示す。

(1) 曲線半径と線区条件

前述したとおり、JR 東日本では 60kg レールのロングレールは累積通トン 8 億トンで交換している（レール削正なしの場合）。レール交換を計画的に行うためには、通トン交換基準に達するまでにレール傷が発生する確率が低い方が好ましい。そこで、本研究では通トン基準である累積 8 億トンを基準に評価を行った。表-7 の網掛け

表-7 曲線半径と線区条件ごとの期待寿命（百万トン）の推定結果

貨物有無	ホーム有無	こう配	曲線半径	熱処理レール			普通レール		
				入口側 緩和曲線	円曲線	出口側 緩和曲線	入口側 緩和曲線	円曲線	出口側 緩和曲線
無	無	レベル	直線	1891.6			2817.5		
無	無	レベル	800	1244.0	1128.5	1043.6	1853.0	1680.8	1554.5
			600	904.4	820.4	758.7	1347.1	1221.9	1130.1
			400	993.5	901.3	833.5	1479.9	1342.4	1241.5
有	無	レベル	800	951.7	863.3	798.4	1417.6	1285.9	1189.2
			600	691.9	627.6	580.4	1030.5	934.8	864.6
			400	760.1	689.5	637.7	1132.2	1027.0	949.8
無	有	レベル	800	1125.0	1020.5	943.8	1675.7	1520.0	1405.8
			600	817.8	741.9	686.1	1218.2	1105.0	1022.0
			400	898.5	815.0	753.8	1338.3	1214.0	1122.7
無	無	上り 10%	800	1154.2	1047.0	968.3	1719.3	1559.6	1442.3
			600	839.1	761.2	704.0	1249.9	1133.8	1048.6
			400	921.8	836.2	773.4	1373.1	1245.6	1151.9
有	有	レベル	800	860.6	780.7	722.0	1281.9	1162.9	1075.5
			600	625.7	567.6	524.9	931.9	845.4	781.8
			400	687.4	623.5	576.6	1023.8	928.7	858.9

は期待寿命の推定値が基準を下回った条件である。

まず R500m 以上 800m 未満の出口側緩和曲線において熱処理レールの期待寿命は基準を下回る結果となった。また貨物線区、ホームトラックにおいては R500m 以上 800m 未満の円曲線や入口側緩和曲線においても熱処理レールの期待寿命は基準を下回る結果となった。

一方で普通レールの場合の期待寿命は基準を上回る結果となった。例えば貨物線区の曲線半径 600m の出口側緩和曲線において熱処理レールから普通レールに変更することで、期待寿命が伸びる可能性があるという結果が示された。

また R500m 未満の急曲線においてもホームトラックの出口側緩和曲線や貨物線区の曲線内で期待寿命が基準を下回る結果となったが、同様に普通レール化することで期待寿命が延伸できる可能性が示された。

(2) 軌道状態の影響の評価

次に軌道変位の影響について検討を行った(60kg レール、熱処理レール、外軌)。結果を表-8 に示す。なお表-7 同様に表-8 の網掛けは期待寿命の推定値が基準を下回った条件である。水準変位が 3mm から 6mm になることで期待寿命が約 18%短くなる等、軌道変位の悪化により期待寿命が大きく低下する可能性が示された。

以上の結果から、軌道変位が生じやすい箇所では積極的に普通レールを敷設することが有利である可能性が示唆された。また、同様の箇所においては単に軌道変位の抑制目的のみではなくレール傷抑制の観点からも、PC マクラギ化などの構造強化を行うことが有利である可能性が示唆された。

表-8 軌道変位ごとの期待寿命（百万トン）の比較

	入口側 緩和曲線	円曲線	出口側 緩和曲線
熱処理レール			
高低4mm	1053.6	955.7	883.9
高低8mm	904.4	820.4	758.7
高低16mm	666.4	604.5	559.0
水準3mm	1098.7	996.6	921.7
水準6mm	904.4	820.4	758.7
水準12mm	612.8	555.9	514.1
普通レール			
高低4mm	1569.3	1423.5	1316.6
高低8mm	1347.1	1221.9	1130.1
高低16mm	992.6	900.4	832.7
水準3mm	1636.5	1484.5	1372.9
水準6mm	1347.1	1221.9	1130.1
水準12mm	912.8	828.0	765.8

(3) まとめ

曲線半径 500m から 800m にかけて熱処理レールの期待寿命が低く、参考値とはなるが現行の通トン交換基準である 8 億トンを下回る傾向を確認した。さらに上記の範囲において熱処理レールから普通レールに変更することでレール傷に係る期待寿命を延伸できることが示された。一部の事業者では普通レールの敷設範囲を拡大²⁰⁾しており、本研究の結果はこれらの取り組みの妥当性を示す結果であると考えられる。

一方で同一の曲線半径であっても線区の条件や軌道状態により期待寿命が変わることが明らかとなった。このことから曲線半径に応じた一律のレール使用区分ではなく、現場状況に応じたレールの使用がより適切であることが強く示唆される。

ただし、本研究ではレール材質の変更による摩耗量の

変化について考慮していない。熱処理レールから普通レールに変更することで摩耗量が過大となる恐れが当然ある。そのため今後は摩耗量についても検討を行い、レール種別ごとの敷設範囲を決める必要がある。

7. まとめ

本研究では設備管理システムなどのデータに基づいて生存時間分析によりレール傷の発生リスクを分析し、影響を及ぼす諸変数について定量的に評価した。その結果、特に軌道構造強化によりレール傷の発生を抑制できる可能性が示された。またハザード関数をレイリー分布で仮定することでレールの期待寿命を算出することができる可能性を示し、その結果に基づいてレール敷設の使用区分について試験検討を行った。

ただしレール摩耗量など既往の知見と異なる傾向も示された。このような結果の原因として使用するデータの精度（位置・大きさ）や考慮する変数の不足などが考えられる。したがって推定精度を向上するためには上述の問題を改善することが求められる。この点については今後の課題である。

将来的にはデータベースの連携による横断的な分析などを含め、より推定手法を深度化させて、レール管理の効率化につなげたい。

参考文献

- 1) レールシェリングに関する転動疲労試験結果と予防削正効果, 石田誠他, 鉄道総研報告, Vol.6, No.11, 1992.11
- 2) 耐シェリング用ベイナイトレールの開発, 佐藤幸雄他, 鉄道総研報告, vol.12, No.10, 1998年10月
- 3) レールシェリングと軌道環境の関係, 石田誠他, 鉄道総研報告, Vol.2, No.8, 1988.8
- 4) レールシェリングのき裂進展に関する一考察—レールシェリングの推移確率行列と進展曲線—, 鉄道総研報告, 石田誠, Vol.5, No.1, 1991.1
- 5) 地下鉄におけるレール損傷と発生要因分析の事例について, 加藤幸彦他, 土木学会第64回年次学術講演会, IV-332, 2009.9
- 6) シェリング傷の発生傾向に基づくレール削正計画の検討と試行(軌道状態の改善), 今井啓貴他, 新線路, Vol.70, No.3, 2016.3
- 7) 曲線外軌レールにおける損傷個所の発生の傾向と分析について, 深堂暢之他, J-RAIL2015
- 8) シェリング傷の発生と効率的保守管理に関する研究, 西亮樹, 土木学会第59回年次学術講演会, IV-078, 2004年9月
- 9) レール傷の現況と今後のレール削正について, 奥村悠樹他, 土木学会第65回年次学術講演会, IV-308, 2010.9
- 10) 21世紀の統計化学II—自然・生物・健康の統計科学—, 小西貞則他編, 東京大学出版会, 2008年7月
- 11) シェリング発生実態の二, 三の特徴とレール頭頂面削正の効果, 杉山亨他, 鉄道技術研究所速報, 1984.8
- 12) The Art and Science of Rail Grinding, Allan M. Zarembski, Simmons-Boardman book Inc., p.48, 2005.
- 13) 例えばWHEEL-RAIL BEST PRACTICE HANDBOOK, Felix Schmid etc, University of Birmingham Press, 2010. Definitive guidelines on the use of different rail, Innotrack Guideline, Deliverable report D4.1.5GL,
- 14) JR車両編成表2014夏, 交通新聞社
- 15) レールきしみ割れの現状と試験機による再現試験, 瀧川光伸, 日本鉄道施設協会誌, Vol.44, No.9, p.710-713, 2006
- 16) ベイナイトレールにおける白色層起因シェリングの予防削正周期, 辻江正裕他, 鉄道総研報告, Vol.31, No.12, 2017.12
- 17) 例えば, 車輪/レール接触問題の最前線, 石田誠, RRR, 2008.8
- 18) 養谷千風彦, 統計分布ハンドブック, 朝倉書店, 2003.
- 19) 近年の曲線外軌の損傷事例と新型熱処理レール, 兼松義一, 新線路, Vol.70, No.7, 2016.7
- 20) JR西日本におけるレール折損抜本対策, 堀克則他, 新線路, Vol.63, No.7, 2009.7

(2018. 4. 6 受付)

ESTIMATION OF RAIL LIFETIME BASED ON SURVIVAL ANALYSIS

Yoshihiro KOMATSU, Naohiro TANIGUCHI, Kazuki YAMANE, Shigeru MOTOYOSHI

In this study, we try to estimate a probability of occurrence of defect on rail head based on survival analysis and to estimate a rail lifetime. In detail, we analyzed factors ,which affects accumulated tonnage at find of rail defect, based on cox regression analysis using big data. And we estimated a rail life time by applying Rayleigh distribution to baseline hazard function. As a result, it was suggested that rail lifetime would be improved by using unheated rail.