

37. 除雪機械の重大故障に関する分析

(国研) 土木研究所寒地土木研究所 ○ 伊藤 義和
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 植野 英睦
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 斉藤 勉

1. はじめに

積雪寒冷地における冬期の円滑な道路交通の確保は、地域住民の生活にとって必要不可欠であり、確実な道路除雪体制が求められている。

近年、購入・整備費などの予算の制約により、機械の更新が先送りされ老朽化した機械が増加している。

重大故障の発生に伴う除雪作業停止日数も年々増加しており、道路除雪体制への影響が懸念される。

そのため、限られた予算の中、効果的かつ効率的に除雪機械の維持管理を行い、重大故障に伴う除雪作業停止日数を削減する必要がある。

その維持管理に重要な、除雪機械の劣化に対する定量的評価手法を検討するにあたり、道路管理者所有の除雪機械の故障データを用いて FTA (故障の木解析) を行い、重大故障箇所を抽出した。さらに、信頼性データ解析の一つであるワイブル型累積ハザード解析で、抽出した箇所に関する故障傾向の分析を行っている¹⁾²⁾。

本報は、その 1 事例として除雪グレーダ (写真-1) の分析結果を報告する。

2. FTA による重大故障箇所の抽出

解析対象データは、国土交通省北海道開発局が保有している除雪機械の平成 19～27 年度に発生した故障データ約 4,900 件を用いた。



写真-1 除雪グレーダ³⁾

このうち、2 日以上作業停止となった故障 (以下、「重大故障」という) 箇所を除雪機械毎に FTA (故障の木解析) で抽出した。

FTA は論理線図解析であり、論理ゲートと事象記号を用いて故障を可視化した図に展開し、因果関係の評価を進めるものである。このとき描かれる階層図が、樹木の形に展開されることから「故障の木解析」とよばれている。

この FTA は、論理線図の最上位に好ましくない故障事象を明示し、その発生要因を逐次下位の段階まで展開することによって、因果関係を掘り下げていくトップダウン型の解析手法である⁴⁾。

除雪グレーダに関する FT 図を示す (図-1)。

建設機械整備標準作業工数表 (除雪機械編)⁵⁾ の作業項目区分に準じて整理した結果、中項目単位で 2 項目、小項目単位で 3 項目の計 5 項目を抽出した。

3. 重大故障に関する分析

FTA で抽出した重大故障箇所について、ワイブル型累積ハザード解析を行い、故障傾向の分析とともに信頼度 (残存確率) を算出した。

3.1 ワイブル分布について⁶⁾

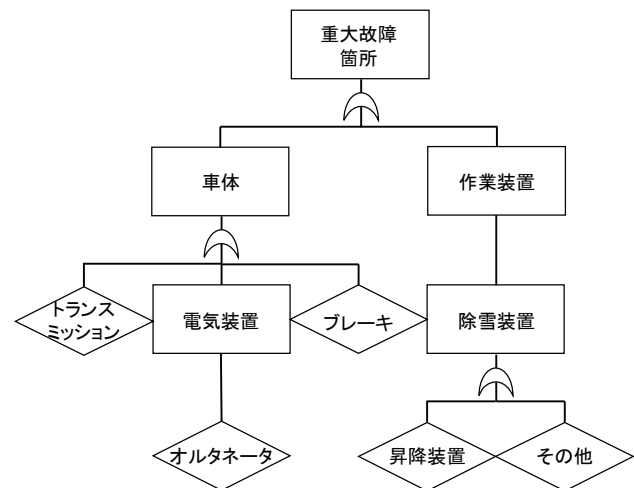


図-1 除雪グレーダ FT 図

ワイブル分布は、スウェーデンの科学者ワイブルが材料強度の研究において、材料の破損確率を表す分布関数として提唱したものである。その後、別の科学者が真空管の寿命に関しても、この分布があてはまることを示した。

ワイブル型累積ハザード解析は、この分布を用いた信頼性データ解析手法の一つである。

ワイブル分布は、次の3つのパラメータが使われる。

m：形状パラメータ

η：尺度パラメータ

γ：位置パラメータ

m (形状パラメータ) の値によって、ワイブル分布の形状も変化し、 $0 < m < 1$ の場合は故障率減少型の初期故障、 $m = 1$ の場合は故障率一定型の偶発故障、 $m > 1$ の場合は故障率増加型の摩耗劣化故障を表すこととなる。

η (尺度パラメータ) は、m の値に関係なく信頼度 (累積故障確率) $F(t) = 1 - e^{-1}$ (約 63.2%) となる観測値 t を基準化した際の寿命の尺度を表し、特性寿命ともいう。

γ (位置パラメータ) は、故障が始まる位置を表し、 $\gamma = 0$ ならば最初から故障が起こり始め、 $\gamma > 0$ は無故障期間があることを表すが、通常は $\gamma = 0$ と考える。

信頼度 (累積故障確率、累積分布関数ともいう) $F(t)$ と、信頼度 (残存確率) $R(t)$ は、次に示す式(1)、式(2)で表される。

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (2)$$

累積ハザード値 (累積ハザード関数) $H(t)$ は、次に示す式(3)で表される。

$$H(t) = -\ln R(t) = -\ln\{1 - F(t)\} = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m \quad (3)$$

この解析専用に市販されているワイブル確率紙やワイブル型累積ハザード紙、表計算ソフトウェアを使用することにより、3つのパラメータの推定ができ、上記の式に当てはめることにより、バスタブ曲線で表される故障の傾向 (初期故障、偶発故障、摩耗劣化故障) の判定や特性寿命、信頼度 (残存確率) などが算出できる。

3.2 ワイブル型累積ハザード解析について⁷⁾

複数の機器を一斉に使用または試験を開始し、すべての機器が故障するまで観測し続けた「完全データ」といわれる場合は、ワイブル確率紙を用いたワイブル解析が有効である。

しかし、除雪機械は購入年度が異なり、また、機械が更新に達しても故障に至らないこともある。そのため、故障データの解析については、より有効である累積ハザード法を用いたワイブル型累積ハザード解析を適用した。

観測値を稼働時間とした表-1の故障データ例で、ワイブル型累積ハザード紙を用いた解析手法の手順を示す。

手順1：解析する故障データを観測値 t が小さい方から並べ替える。同じ観測値で故障の有無がある場合は、故障のあるデータを前に、故障のないデータを後に並べる。

手順2：観測値 t の大きいデータから小さいデータへ向かって、1, 2, …, 6 と逆方向の順位 (逆順位) を振る。データが n 個あれば、最も観測値の小さいデータの順位は n となる。

手順3：故障のあるデータに対して、逆順位の逆数を求める。この値をハザード値という。

手順4：手順3のハザード値を観測値 t の小さいデータから順次加えていく。この値を累積ハザード値という。

手順5：故障のあるデータの観測値 t、累積ハザード値の対のデータを図-2に示すワイブル型累積ハザード紙などにプロットする。

手順6：プロットされた点に直線 A をあてはめ、この直線と平行でハザード紙上の定点である m 推定点 (上横軸 $\ln t = 1$ 、右縦軸 $\ln H(t) = 0$ の交点) を通る直線 B を引く。

手順7：直線 B と、上横軸 $\ln t = 0$ との交点を求め、そこから水平線を右に伸ばして右側縦軸の目盛りを読む。読み取った値の絶対値が m (形状パラメータ) となる。(m ≒ 1.4)

手順8：直線 A と右縦軸 $\ln H(t) = 0$ との交点より下横軸へ垂線を下ろし目盛りを読む。読み取った値が η (尺度パラメータ) となる。(η ≒ 7,000)

表-1 故障データ例

手順1	手順2	手順3	手順4
観測値 t	故障の有無	逆順位	累積ハザード値 (累積ハザード関数) H(t)
2,000	有	6	(1/6)=0.166→17%
2,000	無	5	-
3,000	無	4	-
4,000	有	3	(1/6)+(1/3)=0.5→50%
8,000	無	2	-
10,000	有	1	(1/6)+(1/3)+(1/1)=1.5→150%

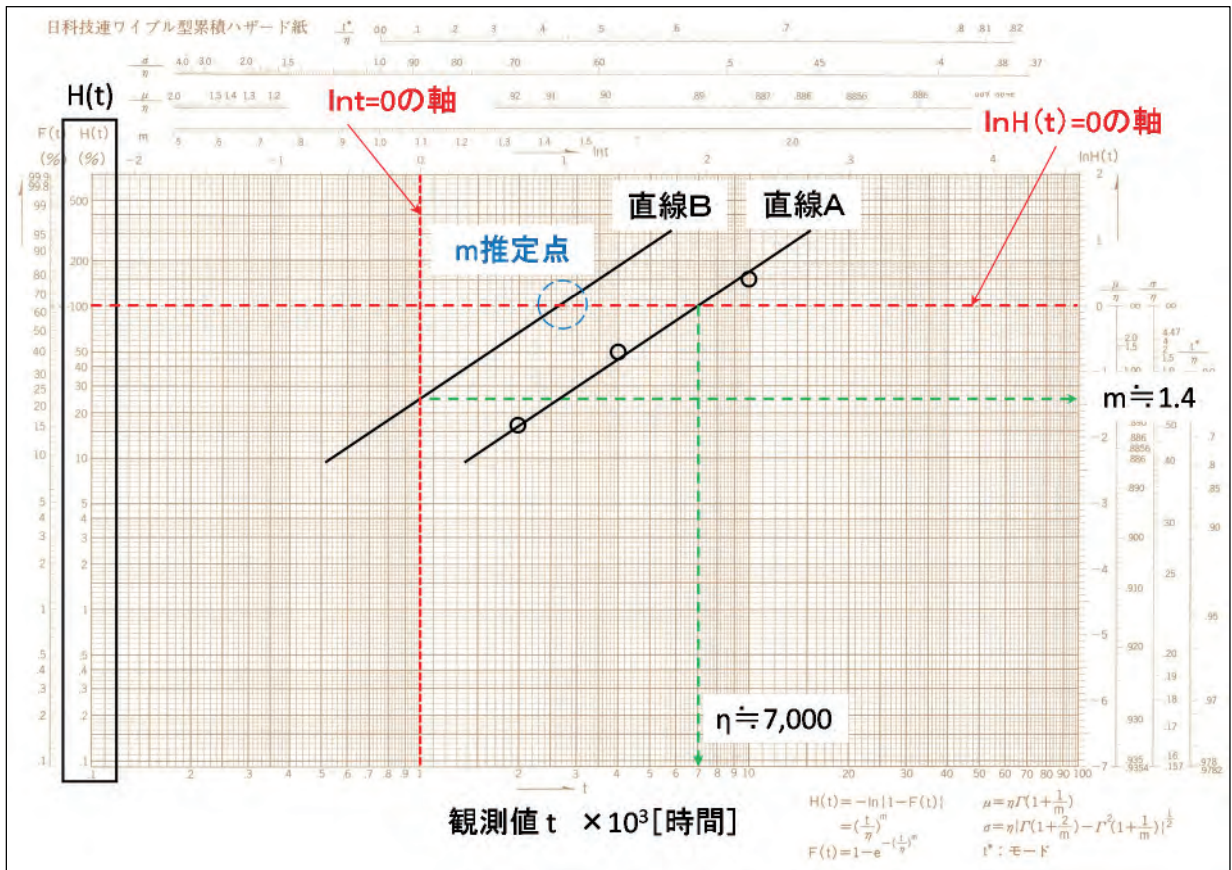


図-2 ワイブル型累積ハザード紙

以上の手順により導出したパラメータを信頼度の算出式(2)に当てはめることで、信頼度の算出が可能となる。当てはめた式を式(4)に示す。

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^m \right] = \exp \left[- \left(\frac{t}{7,000} \right)^{1.4} \right] \quad (4)$$

式(4)を用いて、観測値 t を 0~20,000 時間までの 1,000 時間ごとに算出した信頼度は表-2 となり、グラフ化すると図-3 になる。

この故障データの解析結果は、m (形状パラメータ) が 1.4 であることから故障率増加型の摩耗劣化故障である。算出された信頼度は使用開始直後から低下し、信頼度が 0.5 (残存確率が 50%) で全体の半数が故障する時間は 5,387 時間と推定できる。

3.3 除雪グレーダの分析結果について

除雪グレーダの重大故障箇所 5 項目について、ワイブル型累積ハザード解析で分析を行った。

観測値については、故障データに記載されている「走行距離」、「稼働時間」及び「使用年数」で解析を行った。【電気装置：オルタネータ】の故障を「走行距離」で確率紙にプロットした結果を図-4 に、確率紙で推定した各パラメータから算出した信頼度曲線図を図-5 に、m (形状パラメータ)、η (尺度パラメータ)、R(t) (信頼度) の算出式及び信頼度が 0.95 (残存確率 95%) における走行距離、稼働時間及び使用年数を表-3 に示す。

表-2 算出した信頼度

観測値 t	信頼度 R(t)	観測値 t	信頼度 R(t)
0	1.000		
1,000	0.937	11,000	0.152
2,000	0.841	12,000	0.119
3,000	0.737	13,000	0.093
4,000	0.633	14,000	0.071
5,000	0.536	15,000	0.055
6,000	0.447	16,000	0.042
7,000	0.368	17,000	0.031
8,000	0.300	18,000	0.023
9,000	0.241	19,000	0.017
10,000	0.193	20,000	0.013

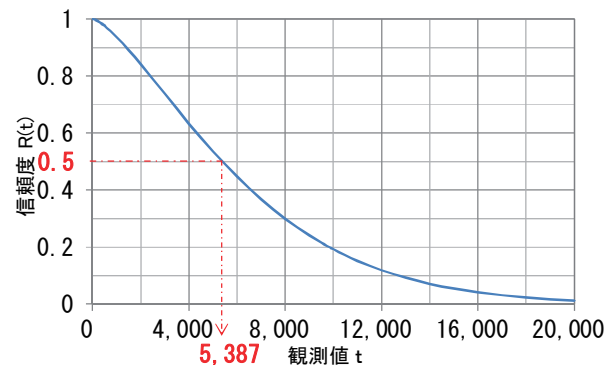


図-3 算出した信頼度 (グラフ)

確率紙にプロットした結果、 $m=3.06$ であることから、【電気装置：オルタネータ】の故障は、故障率増加型の摩耗劣化故障であることがわかる。

走行距離の信頼度曲線図は、使用開始後、約30,000kmを経過した時点で、信頼度が急に低下する曲線となった。

稼働時間及び使用年数でも $m > 1$ であることから、故障率増加型の摩耗劣化故障を示しており、信頼度が0.95（残存確率95%）になる期間は、走行距離で約34,000km、稼働時間で約3,600時間、使用年数で約14.6年となった。

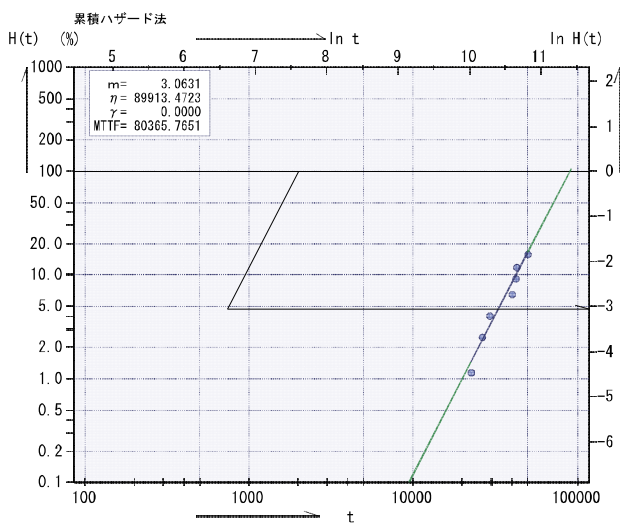


図-4 【電気装置：オルタネータ】故障の確率紙プロット結果（走行距離）

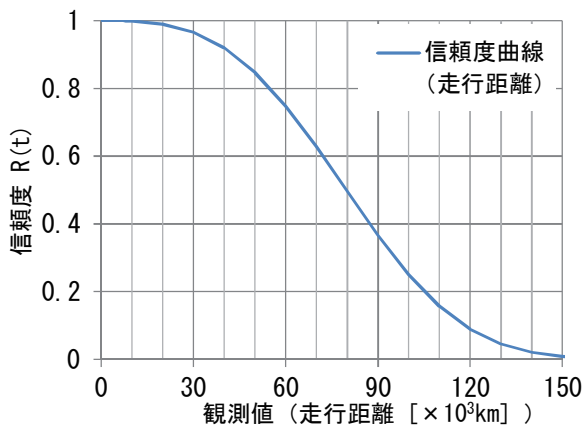


図-5 【電気装置：オルタネータ】信頼度曲線図（走行距離）

表-3 m , η , $R(t)$ の算出式及び信頼度0.95における走行距離、稼働時間及び使用年数

	走行距離	稼働時間	使用年数
m	3.0631	3.4764	5.2880
η	89,913	8,455	25.6
$R(t)$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{89,913}\right)^{3.0631}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{8,455}\right)^{3.4764}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{25.6}\right)^{5.2880}\right]$
$t_{(R(t)=0.95)}$	34,096[km]	3,598[時間]	14.6[年]

なお、信頼度が0.95（残存確率95%）というのは、保有台数を100台と仮定した場合、その5%にあたる約5台に、除雪作業停止日数2日以上以上の故障の発生が推定されることを意味している。

これらの結果から、ワイブル型累積ハザード解析により、除雪機械における故障の傾向（初期故障、偶発故障、摩耗劣化故障）を m （形状パラメータ）の値から判定でき、信頼度と観測値の関係を信頼度曲線図で可視化できることを確認した。

この信頼度を除雪機械劣化度の定量的評価の指標とし、重大故障を未然に防止できる信頼度の閾値を、整備コストや路線の重要度を考慮して設定することで、効果的で効率的な除雪機械の維持管理が可能と考える。

4. まとめ

除雪機械の劣化に対する定量的評価手法を検討するにあたり、道路管理者所有の除雪機械の故障データを用いてFTA（故障の木解析）を行い、重大故障箇所を抽出した。さらに、信頼性データ解析の一つであるワイブル型累積ハザード解析で、抽出した箇所に関する故障傾向の分析を行った。

その結果、ワイブル分布の m （形状パラメータ）の値から、故障の傾向を判定できた。また、使用継続による信頼度（残存確率）の変化を、信頼度曲線図で可視化することができた。

今後、除雪機械劣化度の定量的評価に向けた信頼度の閾値の設定方法の検討などに取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 伊藤義和・植野英睦・幸田勝：ワイブル型累積ハザード解析を用いた除雪機械の故障傾向の把握，寒地土木研究所月報，No.784，pp.29～34，2018
- 2) 伊藤義和・植野英睦・幸田勝：除雪機械の故障分析に関する検討ーワイブル型累積ハザード解析の試行ー，ゆきみらい2019in新庄，2019.2，http://www.thr.mlit.go.jp/yukimirai_shinjyou/assets/doc/58.pdf（2019年7月18日確認）
- 3) 国土交通省北海道開発局網走開発建設部ホームページ掲載の写真を一部加工：維持除雪機械の紹介，https://www.hkd.mlit.go.jp/ab/douro_seibi/v6dkjr0000002gns.html（2019年7月18日確認）
- 4) 福井泰好：入門信頼性工学，pp.113，2006
- 5) 社団法人日本建設機械化協会北陸支部：建設機械整備標準作業工数表（除雪機械編）（平成22年度版），pp.68～75，2010
- 6) 益田昭彦・石田勉・横川慎二：信頼性データ解析，pp.68～75，2009
- 7) 益田昭彦・石田勉・横川慎二：信頼性データ解析，pp.129～131，2009