

除雪機械故障傾向の分析について —ワイブル型累積ハザード解析の試行—

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○伊藤 義和
同 上 植野 英睦
同 上 幸田 勝

近年、除雪機械の維持管理に関する予算の逼迫により、除雪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ことから、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。その維持管理の指標となる除雪機械劣化度の定量的な評価に向けて、道路管理者保有の除雪機械の故障データを用いて、ワイブル型累積ハザード解析で故障傾向の分析を行ったので、その概要と分析事例を報告するものである。

キーワード：除雪機械、維持管理、ワイブル型累積ハザード解析、信頼度

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。

しかし、近年、除雪機械の維持管理に関する予算の逼迫により、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ことから、重大故障の発生に伴う除雪作業停止日数は年々増加しており、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。

その維持管理の指標となる除雪機械劣化度の定量的な評価に向けて、道路管理者保有の除雪機械の故障データを用いて、ワイブル型累積ハザード解析による除雪機械の故障分析を行っている¹⁾²⁾。

本報では、ワイブル型累積ハザード解析による除雪機械の故障分析の概要と、除雪トラック作業装置の分析結果について報告する。

2. 解析対象データ

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件とした。

この故障データを用いて、除雪作業が2日以上停止となった故障（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。除雪トラック作業装置のFT図を図-1に示す。

除雪トラック作業装置の重大故障箇所は15箇所抽出でき、G装置に関する箇所が多い傾向となった。

3. 故障傾向の分析

除雪機械の故障傾向の分析にあたり、信頼性評価手法の一つであるワイブル型累積ハザード解析を行った。

(1) ワイブル分布について³⁾

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、材料の破損確率を統計的に記述するために提案した確率分布である。時間に対する材料

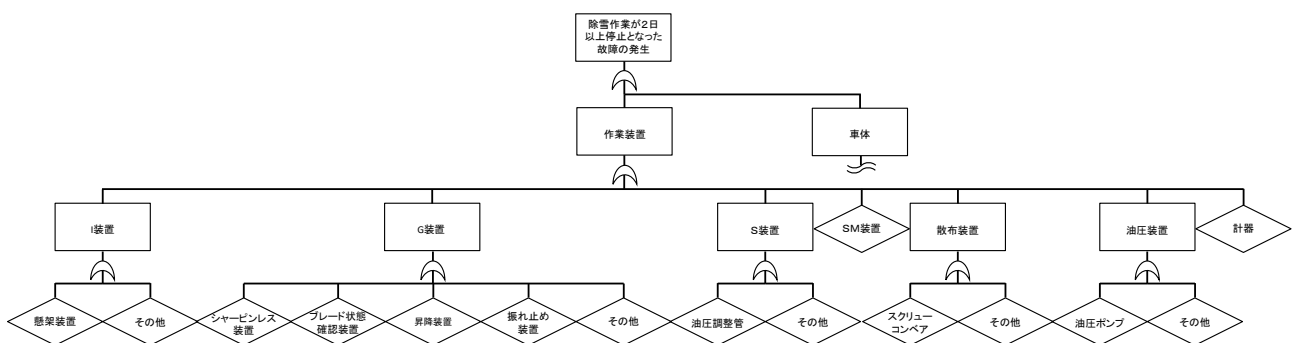


図-1 除雪トラック作業装置のFT図

の劣化現象や寿命を統計的に記述することができ、機械、電気、電子系を問わず、構成部品のどれか一つでも故障すれば機器として故障となる場合の解析によく適合する。

ワイブル分布には、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が変化し、 $0 < m < 1$ 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、γ = 0 ならば最初から故障が起こり始め、γ > 0 は無故障期間があることを表すが、通常は γ = 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 (故障しない確率、残存確率) $R(t)$ は、次式 (3.1)、(3.2) で表される。

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (3.1)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad (3.2)$$

$(t \geq \gamma, m > 0, \eta > 0)$

累積ハザード値 (累積ハザード関数) $H(t)$ は、次式 (3.3) で表される。

$$H(t) = -\ln R(t) = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m \quad (3.3)$$

この解析専用により販売されている確率紙 (ワイブル確率紙、図-2 に示すワイブル型累積ハザード紙等) や、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る。また、パラメータを上記の数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種類 (初期故障、偶発故障、摩耗劣化故障) の判定や特性寿命、信頼度などが算出できる。

(2) ワイブル型累積ハザード解析について⁴⁾

複数の機器を、一斉に使用または耐久試験などを開始し、すべての機器が故障するまで観測し続けた「完全データ」といわれる故障データの場合は、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

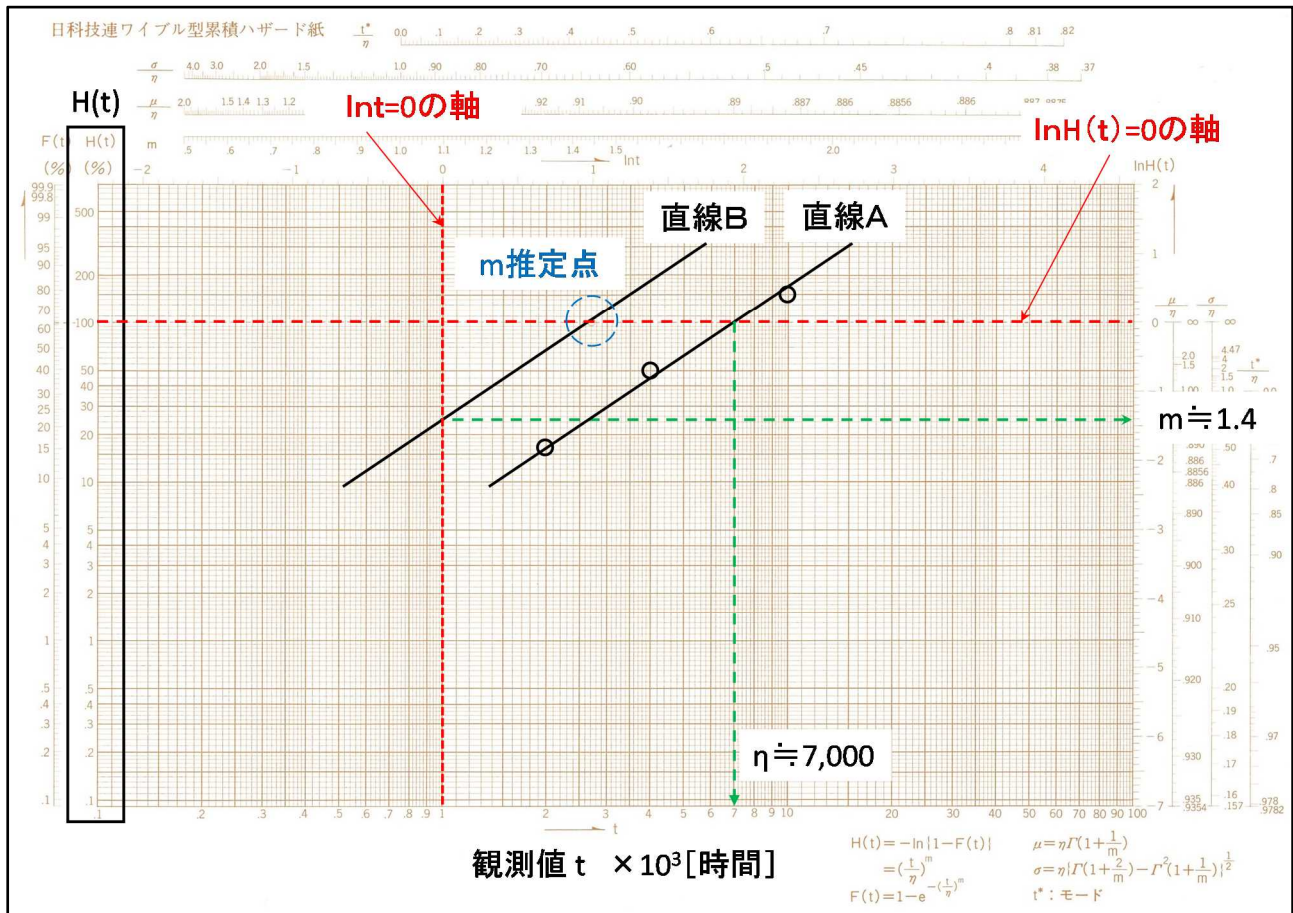


図-2 ワイブル型累積ハザード紙

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	ハザード値 h(t) 累積ハザード値 (累積ハザード関数) H(t)
2,000	有	6	1/6 (1/6)=0.166→17%
2,000	無	5	-
3,000	無	4	-
4,000	有	3	1/3 (1/6)+(1/3)=0.5→50%
8,000	無	2	-
10,000	有	1	1/1 (1/6)+(1/3)+(1/1)=1.5→150%

更新に達しても故障に至らないこともある。このようなデータを「不完全データ」といい、今回の故障分析では、この「不完全データ」に対して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行った。

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

手順1：解析する故障データを観測値 t が小さい方から並び替える。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で求めた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：図-2に示したワイブル型累積ハザード紙などに、故障のあるデータの観測値 t と累積ハザード値の交点をプロットする。

手順6：プロットした各点に対して直線Aをあてはめ、この直線と平行でハザード紙上にあらかじめ記載されている定点である 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 0 との交点を求め、そこから水平線を右に伸ばして右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 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-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

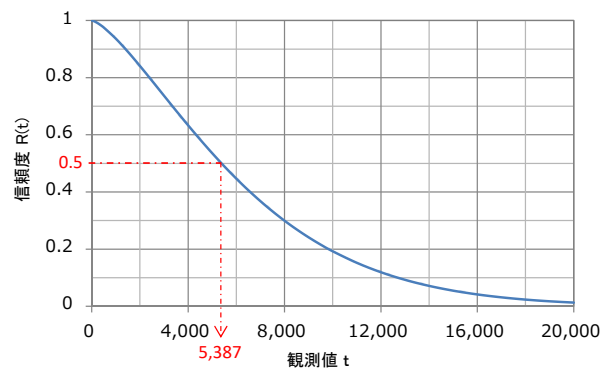


図-3 算出した信頼度 (グラフ)

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(3.2)に当てはめることで、この故障データにおける信頼度の算出が可能となる。当てはめた式を次式(3.4)に示す。

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t-y}{\eta} \right)^m \right] = \exp \left[- \left(\frac{t}{7,000} \right)^{1.4} \right] \quad (3.4)$$

数式(3.4)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)除雪トラック作業装置の分析結果について

FTA で抽出した除雪トラック作業装置の重大故障箇所 15 項目について、ワイブル型累積ハザード解析で故障分析を行った。

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。「G装置・ブレード状態確認装置」の故障を「稼働時間」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 0.99 (残存確率 99%) における走行距離、稼働時間及び使用年数を表-3

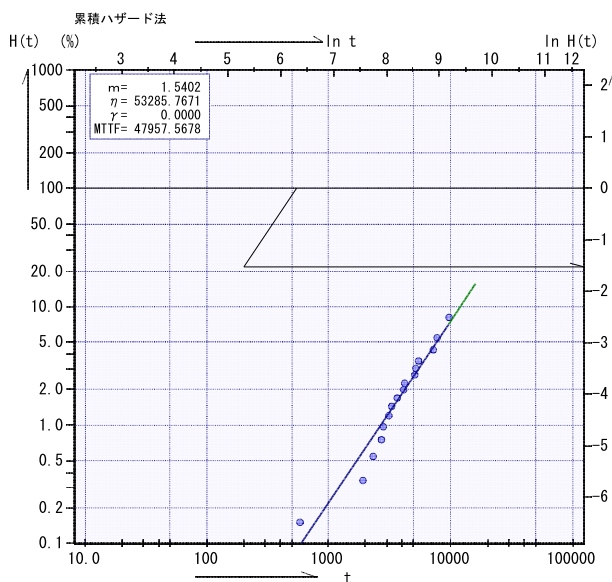


図-4 「G装置・ブレード状態確認装置」故障の確率紙プロット結果 (稼働時間)

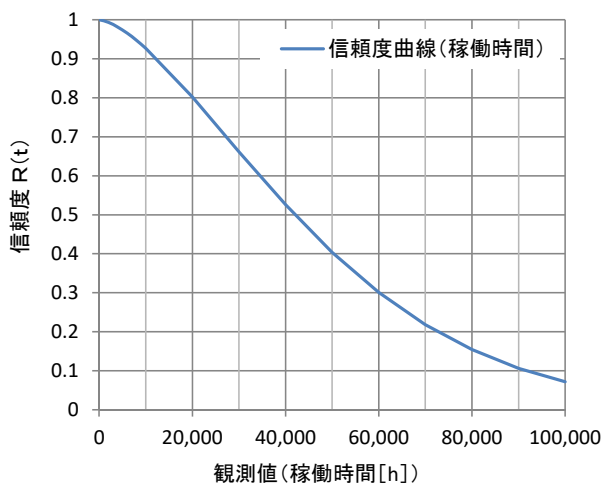


図-5 「G装置・ブレード状態確認装置」信頼度曲線図 (稼働時間)

表-3 m , η , $R(t)$ の算出式及び信頼度 0.99 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	1.7285	1.5402	3.0014
η	761,494	53,286	46.5
$R(t)$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{761,494}\right)^{1.7285}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{53,286}\right)^{1.5402}\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{46.5}\right)^{3.0014}\right]$
$t_{(R(t)=0.99)}$	53,193[km]	2,688[h]	10.04[y]

に示す。

確率紙にプロットした結果、 $m \approx 1.54$ であることから、「G装置・ブレード状態確認装置」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。

稼働時間の信頼度曲線図は、使用開始から 50,000 時間程度までほぼ一律に低下する曲線となった。

走行距離及び使用年数でも $m > 1$ 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 0.99 (残存確率 99%) になる期間は、走行距離で約 53,000km、稼働時間で約 2,700 時間、使用年数で約 10 年となった。

なお、信頼度が 0.99 (残存確率 99%) というのは、解析対象台数である平成 19~27 年度に所有していた 701 台の 1%にあたる約 7 台に、除雪作業停止日数 2 日以上

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種類 (初期故障、偶発故障、摩耗劣化故障) を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、整備コストなど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を行えると考える。

4. まとめ

除雪機械劣化度の定量的評価に向けて、道路管理者保有の除雪機械の故障データを用いて、ワイブル型累積ハザード解析による除雪機械の故障分析を行った。

その結果、確率紙で推定した形状パラメータの値から、故障の種類を判定できた。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、除雪作業停止日数が 2 日未満の故障データも含めてワイブル型累積ハザード解析で故障分析を行い、故障発生全体の像を把握するとともに、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、第 31 回ゆきみらい研究発表会、2018
- 3) 益田昭彦、石田勉、横川慎二、信頼性データ分析、pp. 68-75、日科技連出版社、2009
- 4) 同上 3)、pp. 129-131