

除雪機械の劣化度評価による維持管理に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 27～平 30

担当チーム：技術開発調整監付（寒地機械技術）

研究担当者：住田則行、山崎貴志、幸田勝

【要旨】

近年の予算縮減により、除雪機械の更新が先送りされて老朽化した機械が増え、故障の発生に伴う除雪作業停止日数が増加し、道路除雪体制の確保に支障を来している。

このため、限られた予算の中、効果的かつ効率的な除雪機械の維持管理が求められている。

本研究では、効果的・効率的な維持管理手法を提案するため、除雪機械の稼働・故障データの収集・分析を行うとともに、除雪機械劣化度の定量的評価にむけて、除雪トラックにおいて信頼性評価手法である FTA (Fault Tree Analysis 故障の木解析) の適応性を検討した。また、重要構成部品の 1 つであるフレームの劣化度を診断するための手法として、フレームの肉厚計測と硬さ計測について検討した。

キーワード：除雪機械、劣化度、FTA、維持管理

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、近年の予算縮減により、除雪機械の更新が先送りされ老朽化した機械が増えている。そのため、重大故障の発生に伴う除雪作業停止日数が増加し、道路除雪体制に支障を来している。

このため、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の削減による道路除雪体制の確保が求められている。

本研究では、効果的・効率的な維持管理手法を提案するため、北海道開発局所有の除雪機械の稼働・故障データを収集・分析し、除雪機械で発生する故障の傾向を把握するとともに、除雪機械劣化度の定量的評価にむけて、除雪トラックにおいて信頼性評価手法である FTA の適応性を検討した。また、除雪機械の重大故障の 1 つであるフレームの亀裂・断裂に関し、フレームの劣化度を診断するための手法を検討した。

2. 除雪機械の稼働・故障データの収集・分析

2. 1 データ基礎整理

北海道開発局より除雪機械（約 1,000 台分）の稼働・故障データ（H19～H26 年度分（約 3,800 件））を収集した。これらのデータは年度毎に記載要領が若干異なっていることから、分析を効率的に進めるため稼働時間・走行距

離、故障箇所について、次のように統一した。故障発生時の稼働時間・走行距離が不明なものも含まれていたため、当該故障発生年度末における稼働時間・走行距離に統一した。建設機械整備標準作業工数表（除雪機械編）¹⁾の作業項目区分を参考に、故障データの内容を踏まえて、除雪機械の種類毎に表 1 のように故障箇所を分類（大項目・中項目・小項目）した。

表 1 故障箇所の分類例（除雪トラック、抜粋）

No.	大項目	中項目	小項目		
1	車両	エンジン	エキゾーストパイプ	マフラー	…
2	車両	冷却装置	ラジエータ	ファン	…
3	車両	燃料装置	インジェクション	アクセルワイヤー	…
4	車両	電気装置	オルタネータ	スタータモータ	…
…	…	…	…	…	…
19	作業装置	G装置	シャーピルス装置	昇降装置	…
20	作業装置	S装置	油圧調整管	ウイングホルダ	…
…	…	…	…	…	…
28	不明				

2. 2 データ分析

前節で整理したデータについて、除雪機械が配置されている沿道環境毎に故障発生件数と故障発生率（機械 1 台あたりの故障発生件数）を求めグラフ化した。また、機械種類毎に使用年数・稼働時間・走行距離別の故障発生件数と故障発生率を求めグラフ化した。沿道環境毎の故障発生件数・発生率を図 1 に、沿道環境毎の年度別故

故障発生件数を図2に、沿道環境毎の年度別故障発生率を図3に示す。また、機械種類毎の故障発生件数・発生率を図4に、機械種類毎の年度別故障発生件数を図5に、機械種類毎の走行距離別故障発生率を図6に示す。



図1 沿道環境毎の故障発生件数・発生率

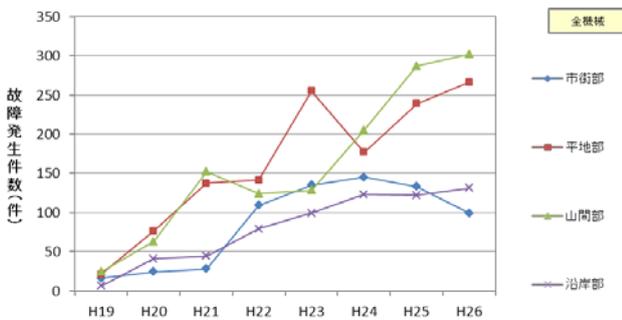


図2 沿道環境毎の年度別故障発生件数

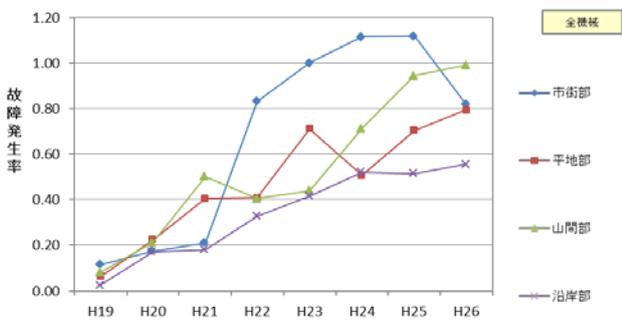


図3 沿道環境毎の年度別故障発生率

沿道環境毎の故障発生件数は平地部、山間部が高いが、発生率は市街部が高い。年度別の故障発生件数・発生率についても近年増加傾向であり、特に山間部については平成24年度から著しく増加している。

機械種類毎の故障発生件数は台数が多い除雪トラックが多いが、故障発生率はロータリ除雪車、小形除雪車が高い。また、近年、故障発生件数が増加傾向にある。ただし、H19およびH20については全ての故障が報告されていない可能性があるとのことで、実際にはもっと多く

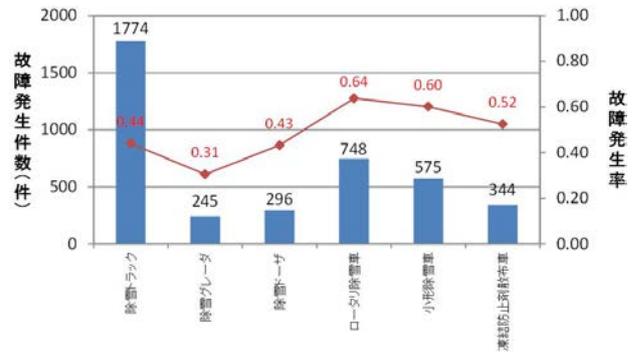


図4 機械種類毎の故障発生件数・発生率

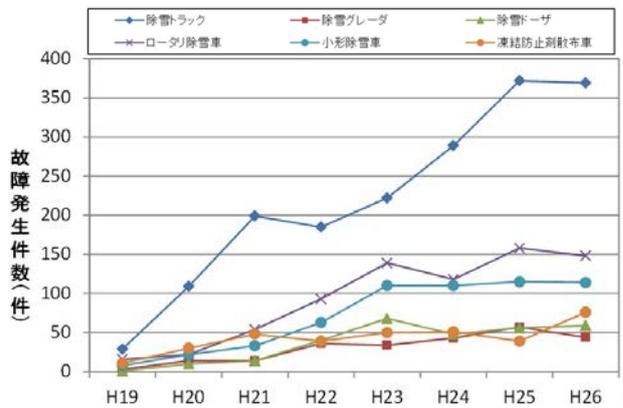


図5 機械種類毎の年度別故障発生件数

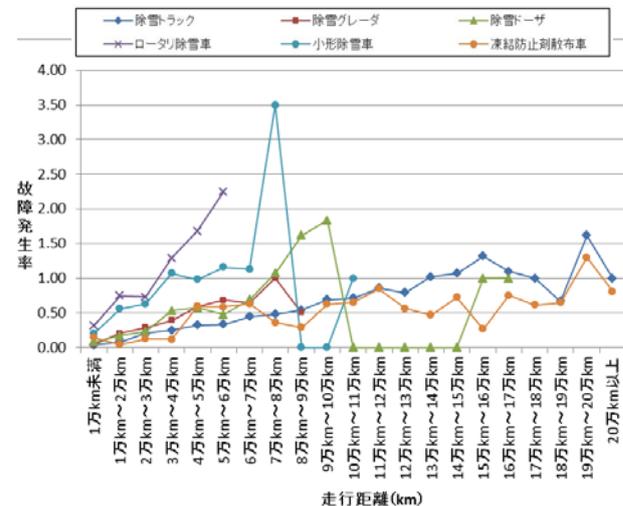


図6 機械種類毎の走行距離別故障発生率

の故障が発生していたことが考えられる。走行距離別の故障発生率については、他の機械に比べてロータリ除雪車や小形除雪車は1万km未満から故障発生率が高い。除雪トラックと比較すると、ロータリ除雪車は5~6万kmで約6倍、小形除雪車は7~8万kmで約7倍と突出して高い傾向である。

除雪作業に対する影響が大きい故障箇所について検討

するため、除雪機械の種類毎に中項目単位で、不稼働日数に関係なく故障が多い箇所、不稼働日数が2日以上
の故障が多い箇所、不稼働日数が5日以上
の故障が多い箇所のそれぞれ上位3箇所を抽出し（表2）、これらの箇所について故障発生傾向の分析を行った。

抽出した箇所の1つである除雪トラックのエンジンのについて、使用年数別の故障発生件数・発生率を図7に、稼働時間別の故障発生件数・発生率を図8に示す。

表2 代表的な故障箇所の抽出結果

除雪機械	代表的な故障箇所
除雪トラック	・エンジン ・電気装置 ・クラッチ ・トランスミッション ・G装置
除雪グレーダ	・電気装置 ・トランスミッション ・灯火装置 ・G装置
除雪ドーザ	・エンジン ・電気装置 ・アクスル及びサスペンション ・ブレーキ ・ブレード装置 ・油圧装置
ロータリ除雪車	・電気装置 ・トランスミッション ・オーガ ・プロウ ・シュート装置 ・油圧装置
小形除雪車	・エンジン ・アクスル及びサスペンション ・オーガ ・プロウ ・シュート装置 ・油圧装置
凍結防止剤散布車	・エンジン ・トランスミッション ・アクスル及びサスペンション ・散布装置 ・油圧装置

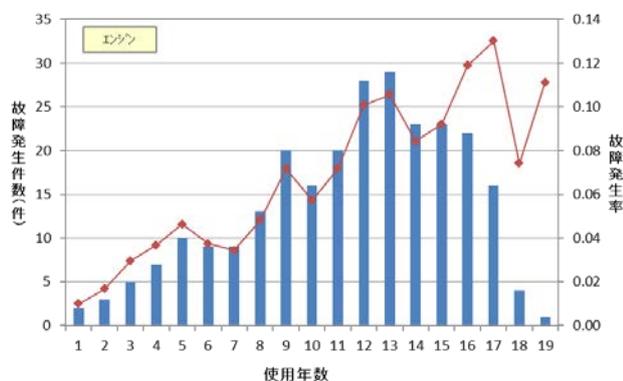


図7 使用年数別故障発生件数・発生率
(除雪トラック・エンジン)

除雪トラックのエンジンの故障発生件数は、使用年数では13年目、稼働時間では5,000~6,000hがピークで、使用年数6、7年目や10年目等の例外はあるものの、各ピークまで増加傾向である。故障発生率は、発生件数のピークよりも使用された段階（使用年数では17年目、稼働時間では10,000h以上）でピークとなっている。

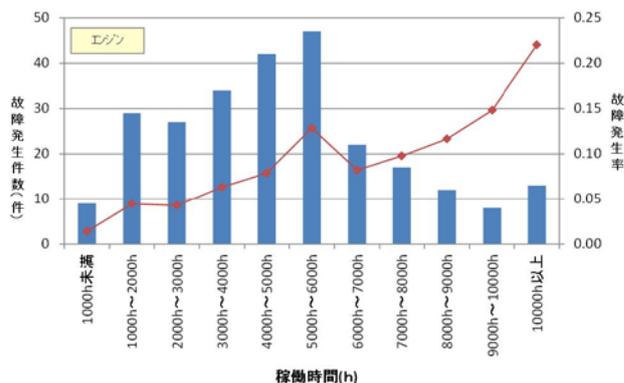


図8 稼働時間別故障発生件数・発生率
(除雪トラック・エンジン)

3. 劣化度の定量的評価手法の検討

除雪機械の劣化度を定量的に評価する手法として、前節のデータ分析において故障件数が最も多かった除雪トラックについて、信頼性評価手法の一つであるFTAの適応性を検討した。

FTAは、その発生が好ましくない事象（トップ事象）について、発生経路、発生原因および発生確率を論理記号を用いて樹形図（FT図）に展開し解析する手法であり、故障等の分析に対する取り組み方がトップダウン方式である。ここでは、次に示す手順1~5で、トップ事象が発生する確率の算定が可能な検討した。

手順1: 発生してはならない重大な故障であるトップ事象を「2日以上にわたって除雪作業不能となる故障」に設定。

手順2: 対象故障データの内容を整理し、トップ事象に直結する1次要因（故障箇所の「中項目」単位）を設定。

手順3: 対象故障データの内容から、故障の箇所・状況を掘り下げて、1次要因の下位要因である2次要因（故障箇所の「小項目」単位）や最終的な要因（基本事象）に至るFT図を作成。

手順4: トップ事象に対して影響の大きい基本事象（ここでは故障5件以上）を抽出し、これら事象の発生率を算定する近似式を相関が最も高い使用状況（使用年数・稼働時間・走行距離）を用いて導出。

手順5: 評価を行いたい除雪トラックについて、使用状況（使用年数・稼働時間・走行距離）を手順4で導出した近似式に代入し各事象の発生率を算定。これらの和によりトップ事象の発生率を算定。なお、手順4で抽出されない影響の小さい事象は対象外とした。

以上の手順により作成したFT図を図9に、抽出事象の発生率の近似式を表3に示す。また、代表例としてクラッ

チディスク摩耗とオルタネーター経年劣化の発生状況と近似式について図10、図11に示す。

さらに、手順5で算定した除雪トラック506台分の故障発生率を図12に示す。なお、この故障発生率の算定には、各除雪トラックの平成26年度末での総稼働時間、総走行距離を使用した。

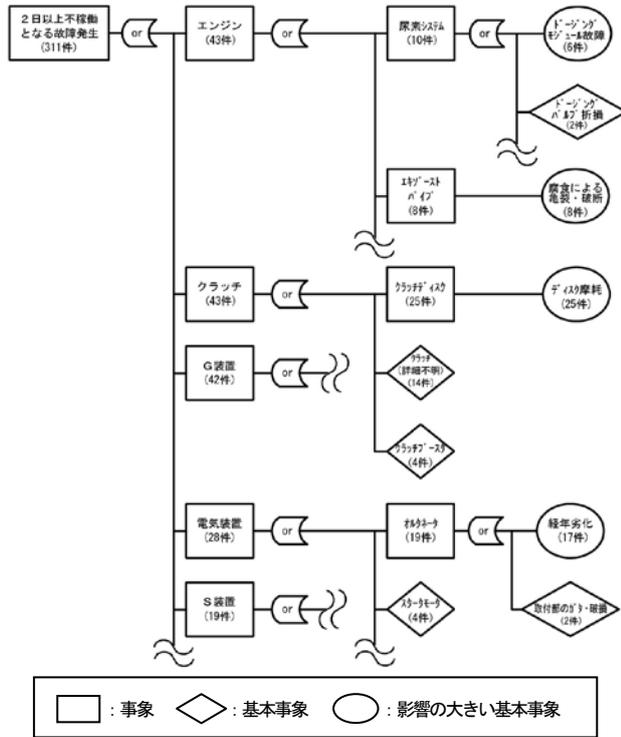


図9 F T 図 (抜粋)

表3 抽出事象の発生率の近似式

故障(トップ事象)	使用状況の分類	故障発生率の近似式
クラッチディスクの摩耗	使用年数	$y = 0.000001934x^3 - 0.000102574x^2 + 0.001821136x - 0.002414486$
オルタネーターの経年劣化	走行距離	$y = -0.000000716x^3 - 0.000015272x^2 + 0.000289100x - 0.000399274$
インジェクタの不良	稼働時間	$y = 0.000011880x^3 - 0.000242584x^2 + 0.001509317x + 0.001310164$
エキゾーストパイプの腐食による亀裂・破断	稼働時間	$y = 0.000005442x^3 - 0.000145046x^2 + 0.001265497x - 0.001098434$
尿素システムのドージングモジュールの故障	走行距離	$y = 0.000000776x^3 - 0.000039789x^2 + 0.000621998x - 0.00077363$
ラジエーターのコア等の劣化・腐食	走行距離	$y = -0.000000244x^3 + 0.000002180x^2 + 0.000152993x - 0.000319025$
パワーステアリングパイプの劣化	使用年数	$y = 0.000000662x^3 - 0.000005216x^2 - 0.000004938x + 0.000035276$
G装置振れ止め装置の取付部品劣化	走行距離	$y = -0.000000117x^3 - 0.000003456x^2 + 0.000223501x - 0.000492535$

y: 故障発生率 x: 下表による

x	使用年数	稼働時間	走行距離
1	1年目	1000h未満	1万km未満
2	2年目	1000~2000h	1万~2万km
...

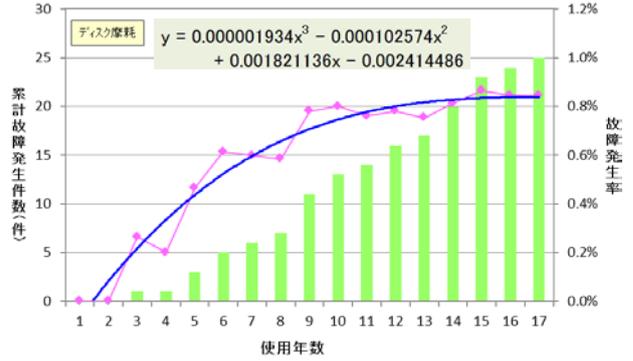


図10 クラッチディスク摩耗の発生状況と近似式

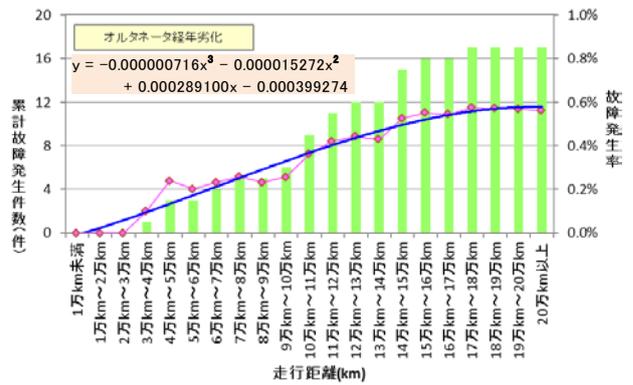


図11 オルタネーター経年劣化の発生状況と近似式

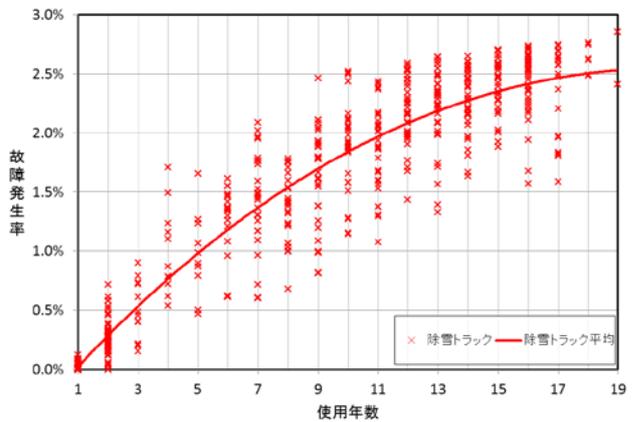


図12 除雪トラックの故障発生率

このように使用状況(使用年数・稼働時間・走行距離)からトップ事象の発生率を算定することができ、この発生率は劣化度の定量的評価における重要な指標となると考えられる。

しかし、今回の検討では、故障内容を細分化した結果、故障発生率を算定できた事象が8事象しかなく、データ数の少ない故障項目は故障発生率の算定が難しいことがわかった。さらには、除雪トラックより故障件数の少ない除雪機械では、故障発生率の算定がより難しくなるということが想定される。

今後、劣化度の評価精度を上げるには、整備内容、整備費用などのデータを収集し、それらのデータも加味した評価手法の検討が必要である。

4. 重要構成部品の劣化度診断手法の検討

除雪機械の故障の1つにフレームの亀裂があり、亀裂の状態によっては修理期間が長期化する場合がある。さらに、亀裂が進行してフレーム断裂に至ると修理することができずに廃車となってしまう可能性もある。

このように、フレームは除雪機械を構成する部品として非常に重要であるため、劣化度を把握することが望ましいが、現状では目視による確認しか行われていない。そこで、亀裂が発生する前に劣化度を定量的に診断する手法として、フレームの肉厚計測と硬さ計測について検討した。

4. 1 肉厚計測

フレームの亀裂は、フレームに掛かる荷重(衝撃荷重、繰り返し荷重)がある閾値を超えた場合に発生する。フレームの肉厚が腐食により減少するとフレームに掛かる荷重に対する強度も減少することから、亀裂が発生しやすくなると考えられる。このことからフレームの肉厚を把握することが重要であり、その方法について検討した。

安価で精度の高い肉厚計測機器として、ノギス、マイクロメータなどがある。しかし、フレームには塗装がされており、これらを用いて金属部分の肉厚を直接計測するには塗装の除去が必要である。また、フレームの内側には各種配線や補強部材等があることも計測の困難さを高めている。

これらを考慮し、片側方向のみのアプローチで、かつ塗装上からの計測が可能な超音波による肉厚計測などの手法について、今後、適応性を検証する予定である。

4. 2 硬さ計測

金属材料の破断は一般的に塑性変形後に起こり、この塑性変形に伴い加工硬化が生じる。

既往の文献では、地震後に原子炉機器に生じる塑性変形について、材料表面の硬さ、組織変化、相変態、応力状態等から評価する方法が検討されており、材料表面の硬さと塑性変形との間に高い相関があることが報告されている²⁾。

このことから、除雪機械においてもフレームの表面硬さを計測することにより、亀裂発生の予兆を把握することが可能と考え、計測機器を調査した。

金属材料の表面硬さを計測する機器として、現場での作業性や可搬性を考慮し、ビッカースダイヤモンド圧子の押しつけによって形成されるくぼみの大きさを直接計測する方式、前者と同様に形成されるくぼみの大きさを超音波の周波数変化を利用して計測する方式、インパクトボディを材料に衝突させ衝突前後の速度比から計測する方式(リバウンド方式)の3つの機器を抽出した。

直接計測方式と超音波方式は材料表面に生じるくぼみを計測するため、材料表面の塗装の除去が必要である。リバウンド方式も塗装の除去が必要とされているが、健全箇所との比較計測等、方法によっては材料表面の塗装の除去が不要になる可能性がある。

現場で劣化度診断を行うにあたり、計測の手軽さは重要な要素であり、塗装の除去が不要であるメリットは大きい。これらのことから、今後、リバウンド式硬さ計測の適応性について検証するとともに、その他の計測手法についても検討したい。

5. まとめ

北海道開発局所有の除雪機械の稼働・故障データを収集・分析した結果、除雪機械が配置されている沿道環境、除雪機械の種類や使用状況により、故障の発生傾向が異なっていることを確認した。

除雪機械劣化度の定量的評価にむけて、除雪トラックにおいて信頼性評価手法であるFTAの適応性を検討した。その結果、劣化度の定量的評価の重要な指標である重大故障発生率を使用状況から算定できることを確認した。しかし、正確な故障発生率の算定にはより多くの故障データが必要になるなどの課題があること、また、除雪トラックより故障件数の少ない除雪機械では、故障発生率の算定が難しくなることが想定される。

除雪機械の重要構成部品の1つであるフレームの劣化度を診断する手法として、フレームの肉厚と硬さ計測について検討した。抽出した計測手法の適応性などについて、今後、検証する予定である。

参考文献

- 1) 建設機械整備技術委員会：建設機械整備標準作業工数表(除雪機械編)(平成22年度版)、2010
- 2) 有限責任中間法人日本原子力技術協会 中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会：中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価 平成20年度中間報告、2009

MAINTENANCE AND MANAGEMENT OF SNOW REMOVAL EQUIPMENT BASED ON DETERIORATION EVALUATION

Budget : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY 2015-2018

Research Team : Director for Cold-Region Technology Development
Coordination(Machinery Technology Research Team)

Author : SUMITA Noriyuki
YAMAZAKI Takashi
KODA Masaru

Abstract : Due to budget reductions in recent years, the replacement of snow removal equipment has been postponed and thus the number of devices that are approaching obsolescence has increased. Mechanical breakdowns cause idle periods during snow removal to be extended, hindering the functionality of snow removal systems.

Accordingly, the effective and efficient management of snow removal equipment that can be achieved within small budgets is required.

To propose effective and efficient management of snow removal equipment, data on deployment and inoperability were gathered and analyzed in this study. At the same time, the applicability of Fault Tree Analysis (FTA) for evaluating the reliability of snow plow trucks was examined for quantitative evaluation of deterioration in snow plow trucks. In addition, measurements of frame thickness and hardness were examined to determine whether such measurements would be useful in diagnosing the deterioration level of the frame, which is an important mechanical component snow plow trucks.

Key words : snow removal equipment, deterioration level, FTA, management and maintenance