

雪崩予防柵に発生する巻きだれの安定度評価手法について

高橋渉* 1、松下拓樹* 1、高橋丞二* 1、松澤勝* 1

1. はじめに

雪崩予防柵(吊柵を含む)は、山間部を中心に多く設置されており、雪崩発生区対策の有効な手段となっている。しかし、これらの雪崩予防柵上に大きく張り出した雪塊が形成され、一冬を通じてそれらの大きさが増大することがある。この雪塊は、“雪庇(せっぴ)”や“巻きだれ雪”など呼ばれ方は様々ではあるが、ここでは“巻きだれ”と呼ぶ。巻きだれは、落下することによって走行車両に影響を与える可能性があるため、巻きだれが発達した際には除去作業が行われている。しかし、除去に要する時間や費用は、人手不足、作業員の高齢化といった社会情勢の中で大きな負担となっている。また、現時点では巻きだれに関する安定度評価手法が定まっておらず、巻きだれの除去作業の実施は、各現場ごとの経験などによって判断されている。

巻きだれに関する過去の研究として、竹内ら¹⁾によって、危険な巻きだれの見分け方や、除去の判別フローが示されているものの、実際に巻きだれの大きさや強度などを観測し、巻きだれが崩落するときの条件や、安定度評価を数値的に求めた事例はない。雪崩予防柵に発生する巻きだれの形成条件を解明し、その安定度評価手法を提案することで、道路維持作業の省力化、冬期の安全・安心な道路の実現に資するものと考えられる。

本稿では、2016年より観測を行っている幌加内町朱鞠内における巻きだれの現地調査結果と、それに基づく巻きだれの崩落条件の試算結果を報告する。

2. 巻きだれの現地調査について

巻きだれの現地調査を行ったのは、一般国道275号幌加内町朱鞠内の朱鞠内湖畔(KP193.7付近)(以下、朱鞠内という)(**図-1**)の雪崩予防柵設置箇所(北緯44度18分16秒、東経142度15分16秒、標高300m)の柵高は2.0m、斜面勾配は42度である。

観測期間は2016年12月から2017年4月までと、2017年12月から2018年4月までの2冬期である。

観測項目は、巻きだれの静止画記録と、形状の計測、物性調査である。

巻きだれの静止画記録は、1基の静止画記録装置(ノースワン社製:KADEC21-EYE II)を設置し、2016-17年は10分間隔で、2017-18年は1時間間隔で日中(5:00~19:00)の撮影を行った。



図-1 調査箇所

(一般国道275号幌加内町朱鞠内)

巻きだれの形状計測は、2016-17年は同一の柵を対象に、観測期間中5回、1か月おきに計測を行った。計測方法は、雪崩予防柵の基部を基準点とし、そこからの距離をスタッフや雪尺などで計測し、断面形状を求めた。2016-17年は1断面のみの計測であったが、2017-18年は立体的な広がりを観察する目的で、柵幅5.5mの柵については横方向から2断面、正面方向から1断面の計測を行った。

巻きだれの物性調査は、巻きだれの断面を掘り出し、断面を格子状に区切って、雪温、密度、硬度、雪質の観測を行った。観測方法は、「積雪観測ガイドブック」²⁾に従い、2016-17年は2回、2017-18年は3回観測を行った。また、現地の気象を把握するため、調査箇所から西南西8kmの位置にある気象庁朱鞠内アメダスの値³⁾を参照した。

3. 観測期間中における気象の状況について

観測期間中の朱鞠内アメダスにおける日平均気温と日最大積雪深の推移を**図-2**に示す。

図-2より、2016-17年の最大積雪深は2017年2月26日に232cm、2017-18年の最大積雪深は2018年2月25日に296cmを観測した。このうち、2018年2月25日に観測された積雪深296cmは、朱鞠内アメダスが観測開始した1981年から歴代2位の積雪深であった。

* 1 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所

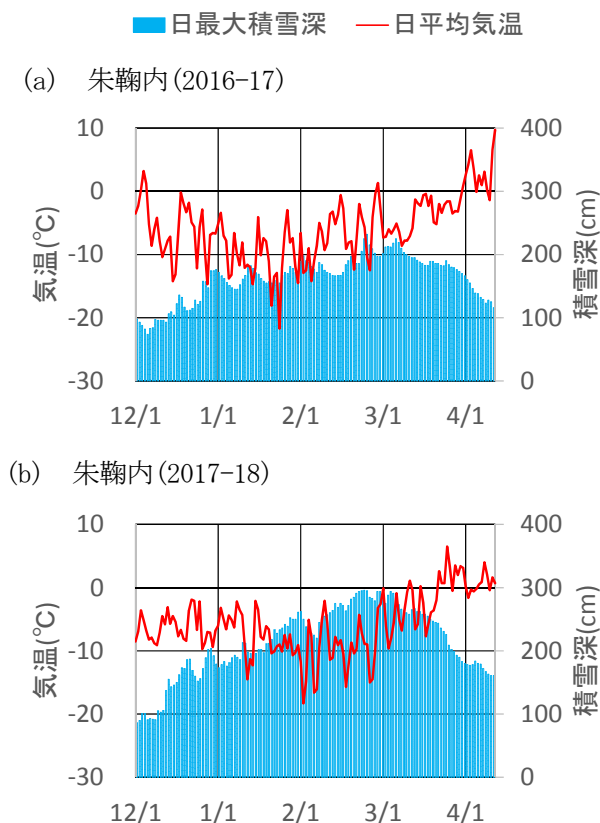


図-2 朱鞠内アメダスにおける日平均気温と日最大積雪深の推移
(a) 2016-17 (b) 2017-18

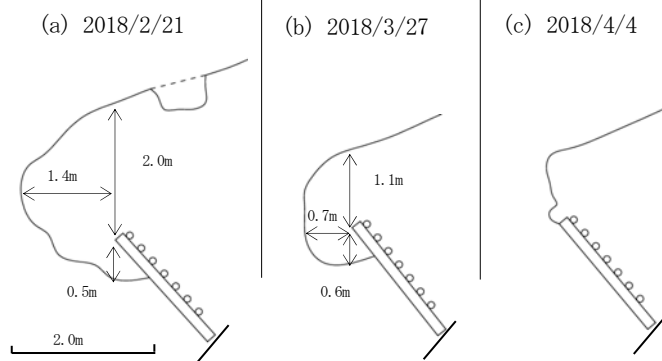
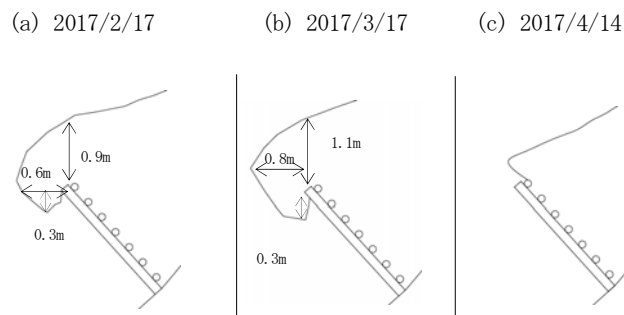
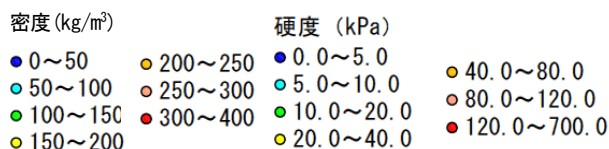


図-3 巻きだれ形状調査結果

上段 2016-17年 下段 2017-18年



4. 巻きだれの発達状況について

巻きだれの形状計測結果を図-3 に示す。2016-17年、2017-18年とも、積雪深が最も大きい時期(a)、積雪の密度が増して雪圧が最も大きくなる時期⁴⁾(b)、融雪が進む時期(c)に計測を行った。ここで、巻きだれの大きさは、雪崩予防柵の上端から鉛直方向の線より前にせり出したものと定義した。

2016-17年は2/17の観測(図-3 上段(a))では雪崩予防柵の上方に0.9mの積雪があり、前方に0.6mせり出し、下方に0.3mほど垂れ下がる巻きだれの形状が確認できた。この形状は1/19の観測の時点でも確認することができる。3/17の観測(図-3 上段(b))では上方に1.1m、前方に0.8m、下方に0.3mとなり、2/17の観測からも一回り大きくなっていた。しかし、4/14の観測(図-3 上段(c))では巻きだれは消滅していた。これは、静止画記録装置や、4/4に現地を確認した限りでは、崩落によるものではなく、融雪によって融けたものと思われる。

2017-18年は2/21の観測(図-3 下段(a))では上方に2.0m積雪があり、前方に1.4mせり出しており、下方に0.5m垂れ下がる大きな巻きだれが形成されていた。3/27の観測(図-3 下段(b))では上方に1.1m、前方に0.7m、下方に0.6mとなった。4/4の観測(図-3 下段(c))では、

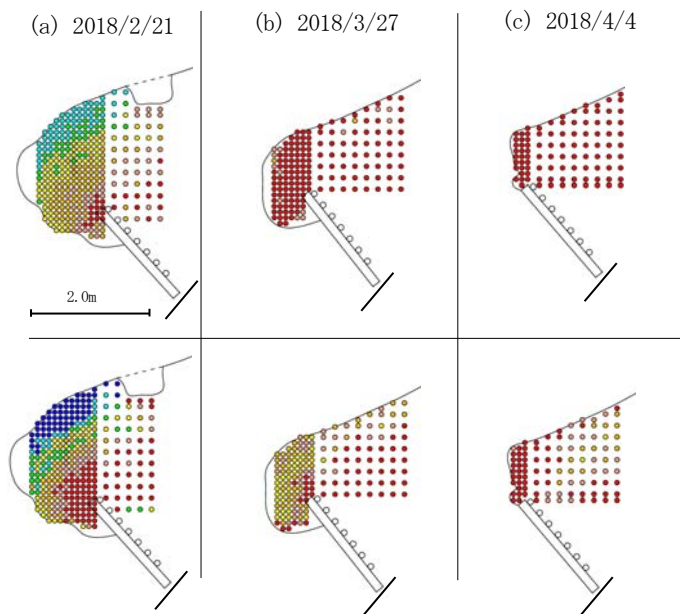


図-5 巻きだれ物性調査結果(2017-18)

上段 積雪の密度 下段 積雪の硬度

3/27の段階では存在していた巻きだれが崩落していた。このことは、静止画記録装置においても3/27から3/28の夜間と、3/28から3/29の夜間に崩落している様子が確認できた。巻きだれが崩落したときの詳細については6章で

述べる。

5. 巻きだれの物性値について

過去2冬期の巻きだれの物性調査のうち、本稿では、巻きだれが発達した2017-18年の観測結果について記載する(図-4)。

2017-18年の朱鞠内においては、2/21、3/27、4/4に巻きだれの物性調査を実施した。朱鞠内の2018年2月25日に最大積雪深を観測している。2/21の観測(図-6(a))は最大積雪深を迎える直前の時期で、巻きだれ部分の積雪密度は斜めの層状に分布しており、雪崩予防柵に近い部分は200~250kg/m³の積雪密度があり、表面は100kg/m³以下の積雪密度となっていた。3/27の観測(図-6(b))になると、積雪深は最大積雪深の80%程度となり、日最高気温もプラスとなり融雪が進んでいる状況であった。積雪密度はほとんどの箇所で300kg/m³を超えていた。その後、巻きだれの崩落があったため、4/4の観測(図-6(c))では雪崩予防柵背後の部分の観測しかできなかったが、積雪の密度の測定値は3/27の観測とほぼ同じであった。

硬度も同じように斜めの層状に分布しており、2/21の観測では雪崩予防柵に近い部分は120kPa以上、表面5kPaという分布であった。3/27の観測になると巻きだれ部分は硬度が20~80kPaを示しており、雪崩予防柵の背面は120kPaを超える値が観測された。4/4の観測では巻きだれ部分がなくなったが、雪崩予防柵背面の部分は3/27の観測と同様に120kPa以上の結果を示していた。

6. 巻きだれ崩落時の状況について

2017-18年の朱鞠内の観測において、3/27の調査時には存在していた巻きだれが、4/4の調査時には崩落していた。このことは、静止画記録装置からも確認することができる(図-7)。3/27に雪崩予防柵全体を覆っていた巻きだれが、3/28の朝の段階で端部が欠けた形となり、雪崩予防柵の支柱が確認できる。また、3/29の朝の段階で、さらに巻きだれが崩落して雪崩予防柵の半分が見えるようになった。

表-2は3/29より前5日間の気温と積雪深の推移である。3/21以降日中の気温がプラスとなる日が続いて、最高気温が5℃以上の日が続き、崩落直前の3/28には最高気温12.0℃となった。また、積雪深は3/20に258cmあったが、3/29には209cmとなり、急速に雪解けが進んだことが判る。また、前日の3/28の日中に南南西の風5m/s吹き続けていたことも、崩落を進めた要因として考えられる。以上より、朱鞠内における巻きだれの崩落は、融雪が進行する中で起きたと考えられる。

また、崩落した巻きだれの大きさは、直前の断面計測の結果(図-4(b)下段)より、上方に1.1m、前方に0.7m、下方に0.6mと考えられる。

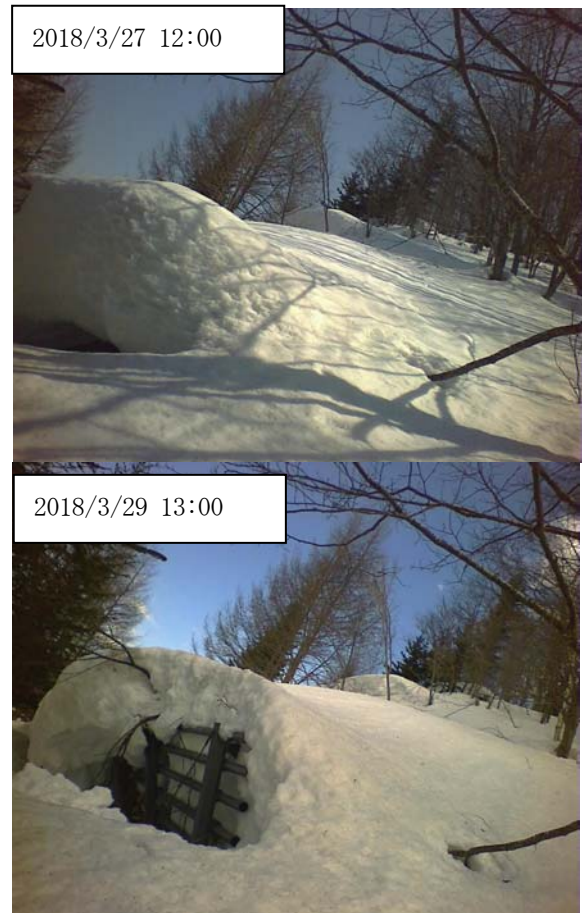


図-7 巻きだれ崩落時の静止画記録装置の画像

表-2 巻きだれ崩落前の気象状況

	積雪深(cm)	日平均気温(℃)	最高気温(℃)	最低気温(℃)
2018/3/24	245	-2.0	5.9	-12.8
2018/3/25	244	2.6	5.7	0.0
2018/3/26	236	0.7	6.2	-6.0
2018/3/27	231	0.7	8.9	-10.5
2018/3/28	226	6.5	12.0	-2.8
2018/3/29	209	3.3	7.6	-4.4

7. 巻きだれの崩落条件について

雪崩予防柵に発生する巻きだれの崩落条件について、巻きだれ形状をモデル化して、巻きだれが破壊して崩落するときの力学的な解を求めることを試みた。巻きだれ形状のモデルは、図-8に示す形状とした。これは、壁から梁が出ている構造とし、破壊する部分は壁と梁の接合部分としている。

接合部(図-8の破線)には、梁部分の自重による引張力とせん断力が作用している。ここで、接合部の面積を A 、梁部分の質量を m とすると、曲げモーメント M と断面係数 Z の関係から、接合部に作用する引張応力 σ_t (Pa)、せん断応力 σ_s (Pa)は次のように表される⁵⁾。

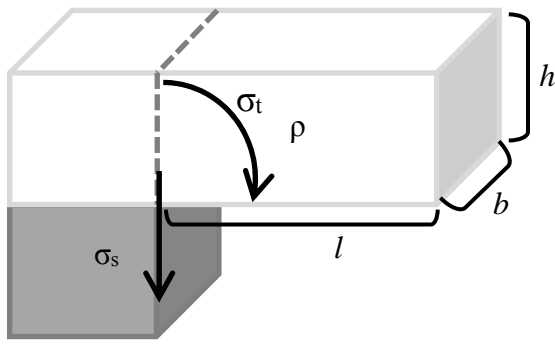


図-8 巻きだれ形状のモデル

$$\sigma_t = \frac{|M|}{Z} = \frac{3mg}{h^2 b} l \quad (1 a)$$

$$\sigma_s = \frac{mg}{A} = \frac{mg}{bh} \quad (1 b)$$

ただし、

$$M = -\frac{mg}{2} l \quad Z = \frac{h^2 b}{6} \quad A = hb$$

ここで、 h は接合部の高さ(m)、 b は接合部の奥行き(m)、 l は張部分の長さ(m)、 ρ は雪の密度(kg/m^3)である。

一方、雪の引張強度 Σ_t (Pa)とせん断強度 Σ_s (Pa)は、Watanabe⁶⁾と山野井・遠藤⁷⁾による湿雪の密度との関係式を用いて推定した。

$$\Sigma_t = 9.36 \times 10^{-5} \rho^{3.23} \quad (2 a)$$

$$\Sigma_s = 4.97 \times 10^{-4} \rho^{2.91} \exp(-0.235\theta) \quad (2 b)$$

ここで、 ρ は雪の密度(kg/m^3)、 θ は体積含水率(%)である。

(1)式の応力と(2)式の強度の比較から、巻きだれの崩落条件の検討を2018年3月27日の朱鞠内で計測した結果から試みる。図-4下段(b)より、巻きだれの形状は接合部分と、下に垂れている部分を合計した高さ1.7m、長さ0.7m、奥行き5.5m(=雪崩予防柵の柵幅)の直方体の形状をしているものとする。よって、巻きだれの体積 $V=6.5\text{m}^3$ となる。これに、図-6の巻きだれ部分の雪の密度の観測値は 350kg/m^3 なので、 $m=2275\text{kg}$ が巻きだれの質量である。また、接合面は、図-4と図-6より、高さ1.1m、奥行き5.5mの長方形の形状をしているものとする。よって、接合面の面積 $A=6.1\text{m}^2$ 、断面係数 $Z=1.1\text{m}^3$ 、曲げモーメント $M=7803\text{N}\cdot\text{m}$ となり、式(1)より引張応力 $\sigma_t=7093\text{Pa}$ 、せん断応力 $\sigma_s=3655\text{Pa}$ となる。

図-6から積雪の密度 350kg/m^3 、体積含水率を5%と仮定すると、(2)式より、接合面の引張強度 Σ_t は 15438Pa 、せん断強度 Σ_s は 3884Pa となる。この結果より、崩落直前の巻きだれの安全率 $F=3884/3655=1.06$ となり、実際に作用

しているせん断応力に対してほとんど余裕がないことが判る。また、(2)式より、融雪が進んで、巻きだれの含水率 θ が大きくなると、せん断強度 Σ_s はさらに小さくなる。現地調査において、巻きだれの含水率を実測していないが、融雪が顕著に進行して、積雪含水率が5%以上となれば、せん断強度はさらに小さくなってせん断応力を下回り、巻きだれ崩落に至ったと考えられる。

8. まとめ

雪崩予防柵に発生する巻きだれの崩落条件などの安定度評価手法の確立を目的として、2箇年にわたり現地の雪崩予防柵設置箇所において、巻きだれの調査を行った。現地調査の結果を基に、力学的なモデルで巻きだれ崩落条件を試算したところ、実際の挙動と合致した。よって、本稿で提唱したモデルを用いて巻きだれの数値的な崩落条件を検討できるものと考えられる。

今後は安定度評価手法を提案するため、どのような時期に崩落の危険度が増すかといった、巻きだれの発達過程について、さらなる調査を進めていきたい。

参考文献

- 1) 竹内政夫、成田英器、佐々木勝男：巻きだれ雪の形成と消滅 - 危険な巻きだれの見分け方、北海道の雪氷、30、pp.111-114、2011.
- 2) 日本雪氷学会編：積雪観測ガイドブック、朝倉書店、p.136、2010.
- 3) 気象庁ホームページ：http://www.jma.go.jp(2018年9月10日確認)
- 4) 高橋渉、原田裕介、松澤勝：雪崩予防柵に作用する雪圧の設計値と観測値の比較 - 国道230号中山峠における観測事例一、寒地土木研究所月報、No.760、pp.60-64、2016.
- 5) 土木学会構造力学公式集編集委員会：構造力学公式集、478pp、1974.
- 6) Zempachi Watanabe: The Influence of Snow Quality on the Breaking Strength, *Sci. Rep Fukushima Univ*, 27, pp.27-35, 1977.
- 7) 山野井克己、遠藤八十一：積雪におけるせん断強度の密度および含水率依存性、雪氷、64、pp.443-451、2002.