

平成 27 年度～平成 28 年度

# 空気膜を利用した橋梁着雪処理装置の 開発および評価

～産学官共同研究報告書～

平成 29 年 10 月

公益財団法人 福井県建設技術公社

## 発刊にあたって

(公財) 福井県建設技術公社は、県および市町の建設技術の向上と良質な社会資本の整備に寄与することを目的として各種の事業を実施しています。

その中の一つであります産学官共同研究支援事業は、産学官が取り組む技術研究開発を推進するため、研究経費を補助するとともに、その研究成果を報告書として作成し、関係機関に配布することをもって技術の普及を図ることを目的としています。

さて、積雪地域では、たびたび雪崩、降雪による交通機能のマヒ、落雪等による雪害により多大な被害が発生しています。

このような中、福井県内においても、道路標識板等、構造物からの落雪による車両の損傷事故が報告されております。

道路管理者では、いろいろな対策をこれまでとってきましたが、多大な労力・時間・コスト等により十分な対策が講じられず、依然として落雪被害が発生している現状であります。

そこで、空気膜を利用した着雪処理技術による、経済的かつ効果的な橋梁からの落雪による被害低減を目指した開発が平成27年度から進められてきました。

このたび「空気膜を利用した橋梁着雪処理装置の開発および評価」として、(産) 福井太陽(株)、(学) 福井大学工学部福原研究室、(官) 福井県建設技術研究センター(現、福井県工業技術センター 建設技術研究部)の共同研究による研究成果がとりまとめられましたので報告します。この研究成果が、積雪地域における落雪対策に寄与できれば幸いです。

最後に、この共同研究にご協力いただきました関係各位に、心から御礼申し上げます。

平成29年10月

公益財団法人 福井県建設技術公社  
理事長 幸道 隆治

# 目 次

<b>1.</b>	<b>研究の概要</b> .....	<b>1</b>
1-1	研究題目 .....	1
1-2	研究目的 .....	1
1-3	研究内容 .....	1
1-4	研究経緯 .....	2
1-5	研究実施体制 .....	3
1-6	研究実施場所 .....	4
<b>2.</b>	<b>橋梁落雪事故</b> .....	<b>5</b>
2-1	当該橋梁における落雪事故事例 .....	5
2-2	その他の落雪事故事例.....	9
2-2-1	その他の橋梁における落雪事故 .....	9
2-2-2	その他の土木構造物からの落雪事故 .....	9
<b>3.</b>	<b>橋梁落雪事故対策</b> .....	<b>11</b>
3-1	下荒井橋の落雪事故対策（実運用あり、試用含む） .....	11
3-2	下荒井橋の落雪事故対策（実運用なし、研究開発のみ） .....	14
3-3	その他、全国の落雪事故対策.....	15
<b>4.</b>	<b>空気膜落雪促進装置の落雪メカニズム</b> .....	<b>17</b>
4-1	斜面の落雪直前の釣り合い .....	17
4-2	空気膜上の接触面積 .....	18
4-3	膜変形に伴う落雪メカニズム.....	18
<b>5.</b>	<b>模擬橋梁および空気膜式橋梁落雪促進製作</b> .....	<b>21</b>
5-1	模擬橋梁 .....	21
5-2	空気膜式橋梁落雪促進システム .....	23
5-2-1	装置概要.....	23
(1)	送風方法 .....	23
(2)	膜寿命.....	23
(3)	落雪のタイミング.....	23
(4)	自動化.....	23
(5)	膜内圧力 .....	23
5-2-2	膜材の検討 .....	24

5-2-3	膜形状の検討 .....	24
(1)	タイプ A (基本形状) .....	25
(2)	タイプ B (偏心) .....	26
(3)	タイプ C (基本形状+チューブイン) .....	27
5-2-4	試験装置配置計画 .....	28
5-3	装置設置場所 .....	29
<b>6.</b>	<b>模擬橋梁を用いた野外落雪試験 .....</b>	<b>31</b>
6-1	平成 27 年度野外落雪試験 .....	31
6-1-1	試験概要 .....	31
6-1-2	試験項目 .....	32
6-1-3	試験道具 .....	33
6-1-4	試験手順 .....	39
6-2	平成 27 年度落雪試験結果 .....	40
6-2-1	気象観測 .....	40
(1)	降雪量 .....	41
(2)	短波および長波放射量 .....	45
(3)	気温および相対湿度 .....	45
(4)	風速 .....	46
(5)	鋼材および膜材温度 .....	46
6-2-2	落雪試験 .....	48
(1)	雪氷観測 .....	48
(2)	落雪試験 (2016 年 1 月 15 日) .....	49
(3)	落雪試験 (2016 年 1 月 21 日) .....	53
(4)	落雪試験 (2016 年 1 月 26 日) .....	55
(5)	落雪試験 (2016 年 2 月 17 日) .....	57
(6)	落雪試験 (2016 年 3 月 1 日) .....	59
(7)	落雪試験まとめ (2016 年 1 月 15 日～2016 年 3 月 1 日) .....	62
6-3	平成 28 年度野外落雪試験 .....	63
6-3-1	試験概要 .....	63
6-3-2	落雪システムの検討 .....	65
(1)	制御方法の検討 .....	65
(2)	送風方法の検討 .....	66
(3)	送風設備ユニットの検討 .....	68
(4)	中央部の落雪処理の検討 .....	72

(5) 制御の検討.....	74
(6) 膜形状の検討.....	75
(7) ライズの検討.....	76
6-3-3 試験装置概要.....	82
(1) 変更前（2016年12月8日～2017年2月9日）.....	82
(2) 変更後（2017年2月9日～2017年3月15日）.....	83
6-4 平成28年度野外落雪試験結果.....	84
(1) 2016年12月28日+遠方自動運転+梁部+ライズ40mm+偏心タイプ+制御変更前.....	84
(2) 2017年1月13日+遠方手動運転(2回)+全景（ライズ40mm）+制御変更後.....	86
(3) 2017年2月3日+現地手動運転(3回)+全景（ライズ40mm）+制御変更後.....	86
(4) 2017年2月10日09:00+遠方手動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	89
(5) 2017年2月10日11:00+手動連続運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	93
(6) 2017年2月10日23:19+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	94
(7) 2017年2月11日0:00および09:00+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後..	95
(8) 2017年2月12日15:25+遠方手動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	96
(9) 2017年2月13日21:05+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	97
(10) 2017年2月14日20:59+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	98
(11) 2017年2月21日0:47+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	99
(12) 2017年2月21日10:39+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	100
(13) 2017年3月8日6:21+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	104
(14) 2017年3月8日9:19+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	105
(15) 2017年3月8日21:33+遠方自動運転+全景（ライズ70mm）+制御再変更後.....	106
7. まとめ.....	107
8. 図表目次.....	109

# 1. 研究の概要

# 1. 研究の概要

## 1-1 研究題目

空気膜を利用した橋梁着雪処理装置の開発および評価

## 1-2 研究目的

本研究では福井県勝山市下荒井橋を対象に橋梁構造部材からの着雪処理装置を開発することを目的とする。

北陸地域を始めとする日本の積雪地域では、道路上の構造物（掲示板、電柱、橋梁など）に積もった雪が落下して、通行中の車両が損傷する事故が雪氷研究大会他で報告されている。毎年のように同様の事故が発生し、2014年度は少雪であったにもかかわらず、当該橋梁では落雪による事故が3件発生したことより、効果的な対策を講じることが道路管理者、道路ユーザーから求められている。

これらの落雪事故に対して、ヒーターや散水による消・融雪、シートや塗料、滑雪板による落雪促進が図られてきたが、コストの増加や経年劣化を理由に、問題解決には至っていない。現在は主に滑雪シートやフッ素系塗料が用いられているが、実際には交通規制（片側通行など）の下で高所作業車による人力除雪を行わなければならない、集中豪雪時には対応が遅れることが懸念され、さらに上述のように事故を完全に防ぐことは残念ながらできていないのが現状である。

（産）福井太陽株式会社、（学）福井大学の研究メンバーは冬季の雪害の7割を占める屋根雪事故防止のために、空気膜を用いた屋根雪処理装置の開発を進めている。2014年度の野外落雪実験では膨張—収縮に伴い膜上の雪塊は雪塊—膜界面における接触面積の減少により凍着力が解消され、迅速な屋根雪処理を可能にした。最大の特徴は熱エネルギーを使わないため、ランニングコストが非常に安く、また落雪時間も短いことが挙げられる。

以上の落雪装置を橋梁構造部材に適用することで福井県が誇るべき新技術および新工法の開発に繋がる。また他県でも例を見ない本技術の開発を進めることは県内産業技術の高度化に繋がることを確信している。加えて、本研究課題は研究シーズを有する大学（学）、技術力を持つ企業（産）、橋梁を管理する福井県（官）が協力して初めて形をなすものであり、産官学の協力体制が整っていることで効率的な研究を実施することができる。

以上、本研究では産官学が連携して橋梁部材からの落雪防止装置の開発を試みる。

## 1-3 研究内容

本共同研究は冬期の橋梁部材からの着雪および落雪問題解決を目指して、空気膜を利用した橋梁着雪処理装置を開発するとともに、模擬橋梁を用いた落雪試験から、本装置の性能評価を行うことを目的とする。以下に実施内容を列挙する。

① 室内落雪試験：

低温実験室内にて膜材表面に雪氷状態（含氷率）を変えた雪氷を積載および凍着させ、送風後の膜形状を測定し、落雪特性を把握する。

② 実験モデル製作および落雪条件の推定：

①の膜材を用いて実験モデルを製作するとともに、膜形状、膜内圧および膜と雪塊の界面状態から膜変形を伴う場合の落雪条件を調べる。これを基に実際の下荒井橋への施工方法を検討する。

③ 模擬橋梁を用いた落雪試験：

勝山市の下荒井橋河川敷に模擬橋梁を設置し、落雪時の膜内空気圧、最大落雪量、落雪時間、界面状況、雪氷物性（含氷率、雪塊温度など）をそれぞれ調べ、野外下における落雪特性を調べる。

## 1-4 研究経緯

先述の通り、下荒井橋の落雪問題は緊急の問題と言える。また下荒井橋のみならず、橋梁の落雪問題は積雪寒冷地域の至る所で起こっており、共通の問題と言える。橋梁の着雪処理装置を開発するためには、膜部材の耐久性やコスト面などの技術面のみならず、落石条件に関する学術面からの検証も必要不可欠である。さらに円滑な交通流を目指す道路管理側からの視点も必要であり、これらの総合的な協力の下で研究開発が実施されることが望ましい。

本研究において具体的に研究を進めるのは、空気膜式雪処理システムである。これは元々、民家の屋根雪処理を目的に福井大学が開発を進めてきたものであり、本研究は、その研究成果をトラス橋等土木構造物からの落雪対策へと適用することを検討するものである。その原理は、橋梁部材の天端等に取り付けた膜構造体を送風機により膨張させ、その上に積もった雪を滑雪させる、というものである。



## 1-5 研究実施体制

本研究に参加したメンバーおよびその役割分担を表1に示す。

表1 役割分担一覧

所属・企業名	氏名	役割分担	主な役割
福井大学 工学部 教授	福原 輝幸	総括、助言・指導	<ul style="list-style-type: none"> <li>・総合管理</li> <li>・研究全般の助言・指導</li> </ul>
福井大学 工学部 特命助教	寺崎 寛章	助言・指導、 実験全般、 実験結果とりまとめ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験全般の助言・指導</li> <li>・実験結果のとりまとめ・分析</li> <li>・実験・観測の実施</li> <li>・実験結果の収集・管理</li> </ul>
福井大学 技官	伊藤 雅基	実験補助	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験補助</li> </ul>
福井太陽(株)	勝本 順三	実験モデル製作・ 運搬・組立、 実験全般	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験モデルの製作・運搬・組立 【空気膜装置】</li> <li>・実験後の空気膜装置の後始末 (実験モデル解体・運搬・処分)</li> </ul>
豊岡建工(株) 代表取締役	豊岡 克己	実験モデル製作・ 運搬・組立	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験モデルの製作・運搬・組立 【実験用架台】</li> <li>・占用許可の作成・提出</li> <li>・実験前後の準備</li> <li>・実験後の空気膜装置の後始末 (実験モデル解体・運搬・処分)</li> </ul>
福日機電(株) 取締役部長	藤井 政志	送風機的设计・ 仕様決定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・関係者との連絡・調整、外部交渉</li> <li>・実験に関する指導</li> </ul>
福日機電(株) 機械課主任	吉崎 哲也	送風機的设计・ 仕様決定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・送風機の仕様の提案および 送風機器関連配管の設計提案</li> </ul>
福井県 建設技術研究 センター 所長	脇本 幹雄 (野村 吉範)	関係機関の調整・ 業務全般	関係機関の調整補助 発注業務補助
福井県 建設技術研究 センター 主任研究員 (旧Gリーダー)	奥田 広行	連絡・調整、指導	<ul style="list-style-type: none"> <li>・関係者との連絡・調整、外部交渉</li> <li>・実験に関する指導</li> <li>・発注業務に関する助言・指導</li> <li>・実験・観測の実施</li> <li>・実験結果の収集・管理</li> </ul>

福井県 建設技術研究 センター 主任研究員	近藤 泰光	実験および実験結果とりまとめの補佐、発注業務全般（福井県）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験フィールドの提供</li> <li>・実験前のフィールド準備（バリケード設置・清掃）</li> <li>・実験モデル製作に関する助言・指導</li> <li>・実験前後の準備</li> <li>・実験・観測の実施</li> <li>・実験結果の収集・管理</li> <li>・実験結果のとりまとめおよび分析の補佐</li> <li>・発注業務の実施・管理</li> <li>・実験後の後始末（バリケード撤去清掃）</li> </ul>
福井県 奥越土木事務所 勝山維持管理課 主任（Gリーダー）	牧野 芳行	下荒井橋落雪関連の情報提供	<ul style="list-style-type: none"> <li>・勝山維持管理課除雪待機および雪庇除去作業に関する情報の提供</li> <li>・下荒井橋落雪に関する情報の提供</li> </ul>
福井県 奥越土木事務所 勝山維持管理課 企画主査	高島 浩一	下荒井橋落雪関連の情報提供	<ul style="list-style-type: none"> <li>・下荒井橋監視カメラ画像の提供</li> <li>・下荒井橋落雪に関する情報の提供</li> </ul>

## 1-6 研究実施場所

野外実験：福井県勝山市下荒井橋付近河川敷

室内実験：福井大学低温実験室

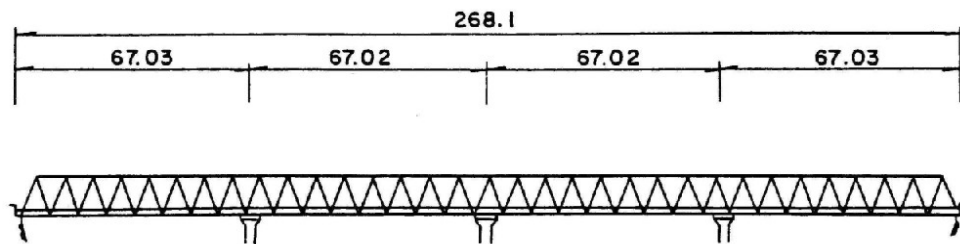
会議等：福井大学工学部会議室

## 2. 橋梁落雪事故

## 2. 橋梁落雪事故

### 2-1 当該橋梁における落雪事件事例

北陸地域を始め、積雪寒冷地域では道路上の構造物（掲示板、電柱、橋梁など）に積もった雪が落下して、通行中の車両が損傷する事故が多数報告されている。本研究で対象とする下荒井橋（図1～図3を参照）では、例えば、平成26年度には一日に橋梁からの落雪事故が3件発生した（図4を参照）。事故前日および当日の降雪量、積雪量はほぼ気象庁福井地方気象台の予報通りであり、近年よく見られる短期集中降雪であった。



(単位：m)

図1 勝山下荒井橋の概略

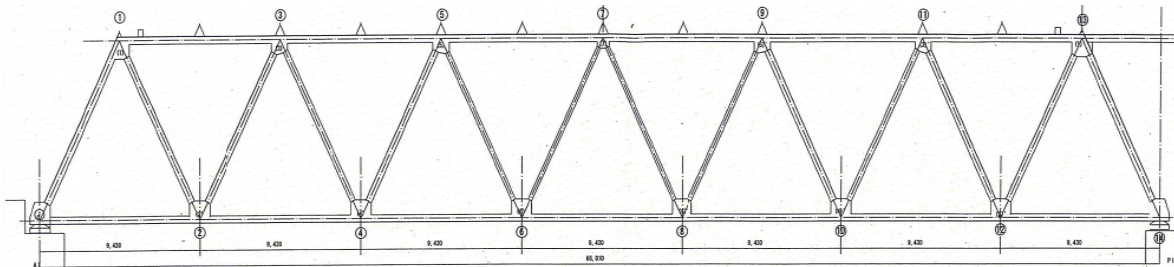


図2 勝山下荒井橋トラス部 側面図

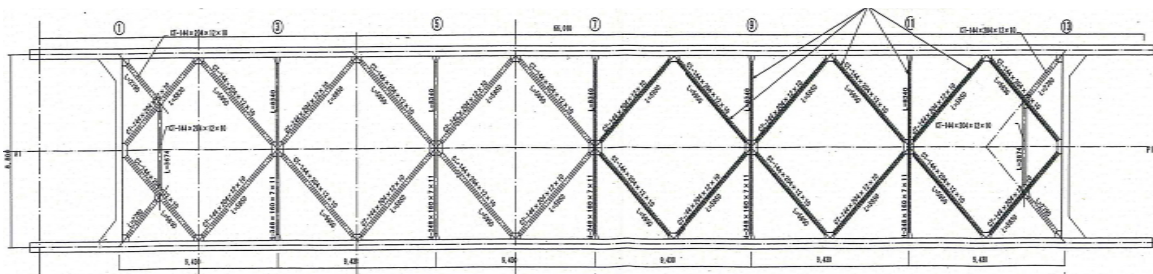


図3 勝山下荒井橋トラス部 上部平面図

【気象庁福井地方気象台による事故前日および当日の降雪予想】

12月5日（金）16:00 発表 翌日9時までの18時間降雪量 ...20cm～40cm

12月6日（土）6:00 発表 翌日9時までの24時間降雪量 ...30cm～50cm

【気象庁福井地方気象台による事故前日および当日の降雪予想】

気象庁福井地方気象台による事故前日および当日の実際の降雪量および積雪量：

12月5日（金）16:00～12月6日（土）16:00までの24時間降雪量 ...35cm

12月5日（金）16:00～12月6日（土）16:00までの24時間積雪量 ...34cm

いずれの場合においても、幸い人身事故には至らなかったが、落雪事故の危険性を十分含む降雪であったと推察される。事前に落雪事故防止対策のための人員配置、除去作業業者の手配、除去作業に伴う交通規制の準備など、除雪体制を整えていたにも関わらず、上記のような短期集中型の降雪が続くと、交通量の確保と事故防止を両立させることは容易ではない。



a) ルーフ部分に落雪（被害：ルーフのへこみ、ルームミラーの落下）



b) フロントガラス部分に落雪（被害：フロントガラスにヒビ）



c) ボンネット部分に落雪（被害：ボンネットにへこみ）

図4 下荒井橋からの落雪事故の一例（平成26年度）

図5は過去10年間の下荒井橋における落雪事故件数と雪庇除去作業回数の推移を示す。同図より、当該橋梁では年間2.4回程度の事故が、また年間4.2回程度の雪庇落とし作業が行われていることが分かる。近年、頻発する短期集中型の降雪が一度生じれば、落雪事故件数や雪庇落とし作業の急増が迫られる恐れがある。なお、落雪事故件数と雪庇除去作業回数の関係（図6を参照）に明瞭な相関関係はみられず、単純に雪庇除去作業回数を増やすことで事故を防ぐことができていないと推察される。

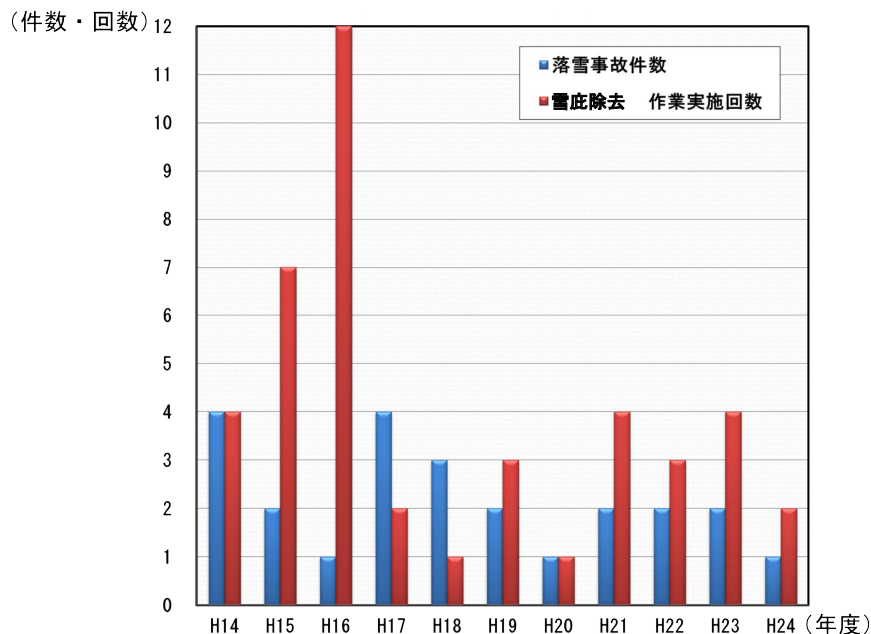


図5 下荒井橋における落雪事故件数と雪庇除去作業回数の推移（過去10年間）

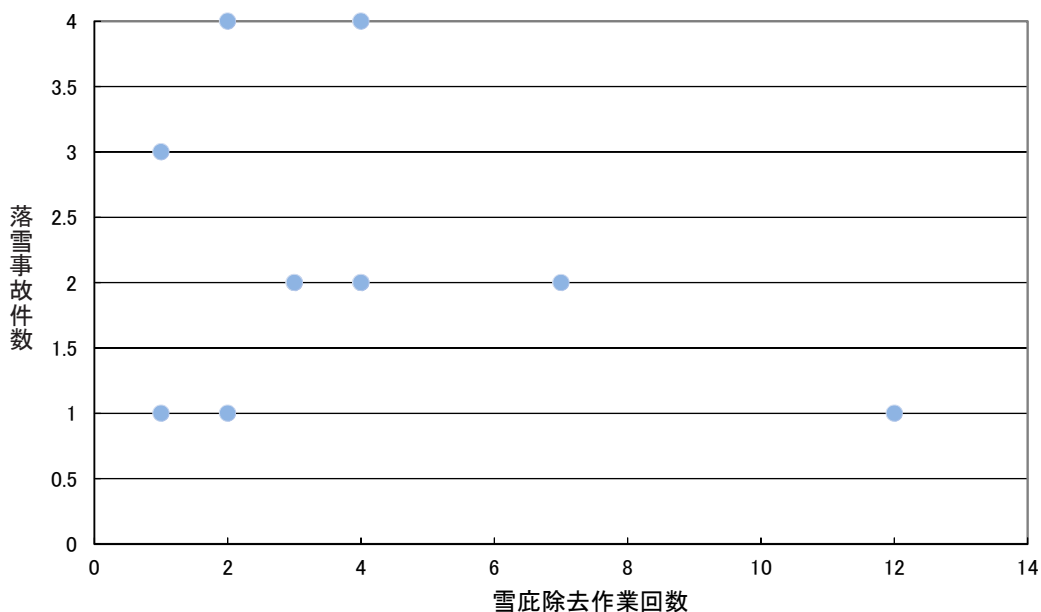


図6 落雪事故件数と雪庇除去作業回数の関係（過去10年間）

図7は大野市における累積降雪量と落雪事故件数の関係を示す。同図より、累積降雪量が増加すると落雪事故件数が増加しているように見えるものの、明瞭な相関関係は見出しがたい。しかしながら、降雪量が増えると作業の必要性は高まり、放置すると事故は増えることは間違いないと考えられる。

図8は大野市における累積降雪量と雪庇落とし作業回数の関係を示す。データにバラつきがあり、降雪量が400cmを超えても降り方によって作業回数は2~12回と変動する。降雪量が増えると事故は増え、作業回数も増加することが予想され、今後もデータの蓄積が必要である。

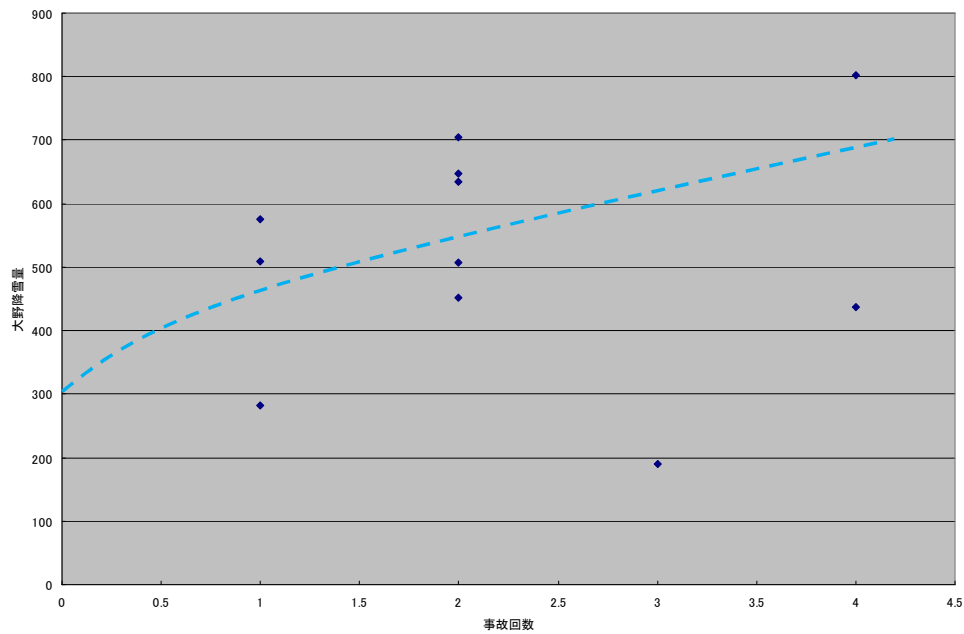


図7 大野市における累積降雪量と落雪事故件数の関係

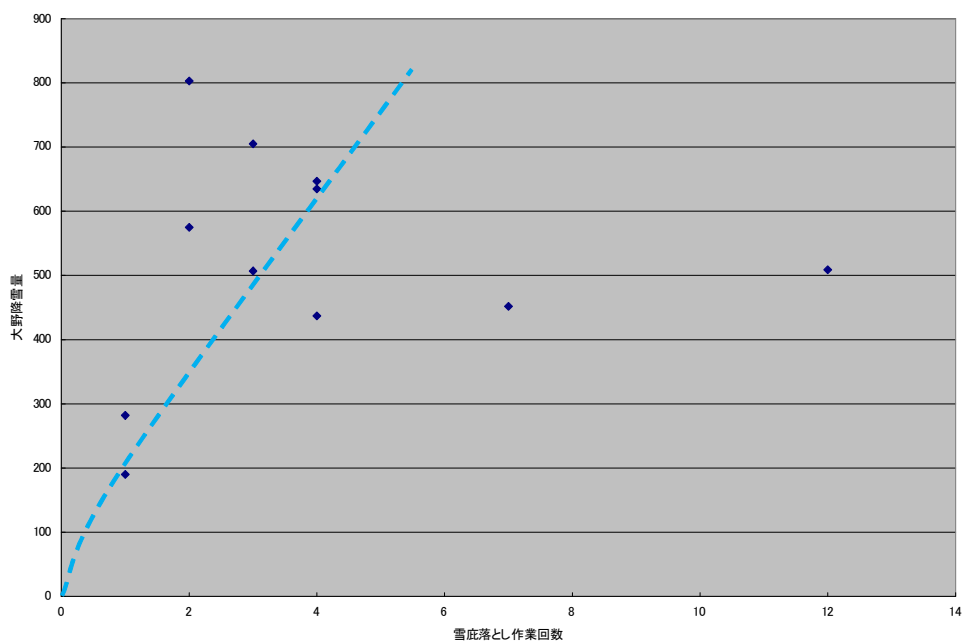


図8 大野市における累積降雪量と雪庇落とし作業回数の関係

## 2-2 その他の落雪事故事例

### 2-2-1 その他の橋梁における落雪事故

その他の橋梁での落雪事故も報告されている。例えば、寺林および穴山によれば、黒部大橋（昭和 32 年完成：鋼ワーレントラス橋：橋長 571.6m、復員 7.8m、9 スパン）で、トラス上部において着雪・堆雪が発生し、雪塊が落下し走行中の車両のフロントガラスを直撃し損傷を与える事故がたびたび発生していることが報告されている。他にも竹内らによれば、斜張橋斜材の冠雪や着雪による落雪事故を懸念している。

### 2-2-2 その他の土木構造物からの落雪事故

その他の土木構造物からの落雪事故は橋梁に限ったことではない。道路上の構造物（掲示板、電柱など）からの落雪事故も多数報告されている。例えば、図 9 に示すように福井土木事務所の報告によれば、トンネル坑口上部の雪が落雪して、車に直撃するという事故も報告されている。さらに松澤らによれば、大型の道路案内標識の裏面梁材に積もった冠雪や付着した着雪の落雪による通行車両の破損や視界遮断による事故の危険性を指摘している。北海道では下荒井橋と同様に主に人力による雪落とし作業が実施されているが、先述のように短期集中型の降雪や作業回数を単純に増加するだけで事故を完全に防ぐことはできない。また作業回数の増加はコスト増加につながる。次章で落雪事故対策を詳述する。



図 9 トンネル坑口上部の着雪状況とその落雪による事故状況



## 3. 橋梁落雪事故対策

### 3. 橋梁落雪事故対策

#### 3-1 下荒井橋の落雪事故対策（実運用あり、試用含む）

これまで当該橋梁では塗料の塗布、滑雪板や滑雪シートの設置および雨樋や電熱ヒーターの敷設など様々な落雪・着雪防止対策を講じてきた。以下、下荒井橋の落雪事故対策（3-1-1～3-1-6）を参考文献（近藤ら：冬期道路交通の安全確保のための落雪・着雪対策技術に関する研究・開発（その1））から引用する。

##### <人力による雪庇除去作業>

福井県道路雪対策基本計画では、除雪作業の出動基準は「降雪深が10cm（ただし、最重点除雪路線に関しては5cm）を超え、気象情報等からさらに降雪が予想されるとき」を原則として定めている。また、気象庁（福井地方气象台）から道路管理者へ提供される気象情報としては、大雪警報・注意報、着雪注意報などの注意喚起のために発表される予報や、降雪量、最低気温の予想値などの数値予測データ等がある。これらの出動基準や気象情報、道路雪情報システムから得られる道路交通情報等、様々な情報を総合的に判断した上で、除雪実施計画（道路管理者が策定。福井県の場合は各土木事務所長が策定）のもとに除雪作業が行われている。しかしながら、これらの計画にて定められている除雪作業とは、機械除雪を基本とした車道または歩道の除雪であり、道路空間上空に存在する構造物の除雪は対象としておらず、これらの除雪の実施については明確な基準または規定がないため、道路管理者個々の判断に委ねられているのが現状である。

現在、福井県管理道路における道路空間上空に存在する構造物の除雪、すなわち、雪庇除去作業は、道路管理者または道路除雪パトロールの職員が、WEBカメラまたはパトロールにて構造物上に雪庇を確認した場合に、車道除雪と合わせて人力にて実施している。福井土木事務所への聞き取り調査によると、1箇所当たり1回の作業に要する人員は約6人/回・箇所（作業監督1人、作業員2人、高所作業車オペレーター1人、交通誘導員2人）、作業時間は1時間以上/回・箇所、作業費用は約10万円/回・箇所であった。また、奥越土木事務所の調査資料によると、福井県管理道路にて落雪による被害が最も顕著な下荒井橋における作業回数は、年毎にばらつきがあるものの、記録が残っている最近の13年間平均で3.85回/年となっている。これらの結果より、下荒井橋を例に、概算にて1箇所当たりの10年間の累計作業費用を算出すると以下の通りとなる。

1箇所当たり年間延べ作業人数=6人/回・箇所×3.85回/年=23.1人/年・箇所

1箇所当たり年間延べ作業時間=1h/回・箇所×3.85回/年=3.85h/年・箇所

1箇所当たり年間累計作業費用=10万円/回・箇所×3.85回/年=38万5千円/年・箇所

∴ 1箇所当たり累計作業費用(10年)=38万5千円/年・箇所×10年=385万円/箇所

### <雨樋工法>

道路空間上空に存在する構造物の着雪には、①構造物上面に雪が降り積もって冠雪する冠雪型着雪と、②風によって運ばれた雪片が構造物側面部に衝突して着雪する強風型着雪の2つの原因が考えられている。雨樋工法は、冠雪型着雪への対策として提案されたもので、熱伝導率の高い材料で作った樋状の水路を構造物上面に載せ、その上に薄く水を流すことで、熱を樋の幅全体に伝え冠雪を防ぐものである。梅田、金森らは、熱伝導率の高いアルミニウムで、構造が異なる4種類の樋を製作し、モデル橋や実橋で実証実験を行い、その融雪効果の検証を行っている。彼らが提案した雨樋工法は、設置箇所近傍の井戸から地下水を汲み上げ、その地下水を樋が交差する中央部分（橋梁の場合はガセットプレート）に設置した分流装置を介して、構造物上面（橋梁の場合は上弦材）の各樋に均等に通水させて融雪するものである。

彼らの実験の結果では、少ない流量で確実に融雪が可能であることを実証しているが、今後の課題として、①樋からの排水対策（水じまい処理）が必要であること、②新設の場合は、取水施設が必要で、インシヤルコストが高くなること、③構造物上面の形状が平面であるものに限定されること、などを挙げている。

### <落雪防止ネット工法>

福井県管理道路にて、落雪による被害が最も顕著な下荒井橋においては、道路管理者側で様々な落雪・着雪対策を施している。奥越土木事務所（勝山道路維持管理部）では、繊維製のネットを橋梁トラス下面に設置し、雪塊を一旦ネットで受け止めて、網目以下の小塊に分散させることで落雪を軽減する、落雪防止ネット工法を採用している。そして、実橋への取り付け、運用を通じて、以下の問題点を報告している。

- ① 落雪がネット上に溜まり、融けにくくなるため、除去作業が別途必要になる
- ② ネット上に溜まった雪が、道路の利用者に圧迫感・不安感を与える
- ④ 固定・固結方法に工夫が必要である

平成27年度末では利用していない。

### <塗装滑雪板工法>

人力による雪底除去作業の軽減化を図るため、道路管理者は、落雪・着雪による被害が顕著な危険箇所に対して、様々な工法にて対策を施している。これらの対策方法は、道路空間上空に存在する構造物に、別の構造体を取り付けて、落雪・着雪を防止するというもので、最も一般的な工法が塗装滑雪板工法と呼ばれるものである。塗装滑雪板工法とは、金属製または樹脂製の滑雪板と呼ばれる板の表面に、撥水性や防汚効果が高い特殊な塗料を塗布し、滑雪効果を高めたものである。梅田、金森らは、チタン、ステンレス、アルミニウムと言った熱伝導率の高い金属製の板と、防汚効果の高い光触媒やフッ素系の超撥水塗料を施した板を用いて、モデル橋や実橋で実証実験を行い、その滑雪効果の検証を行っている。その結果、①塗装系の滑雪板では経年劣化に

よる滑雪効果の低減が見られたこと、②60° の傾斜角を与えて設置すると着雪が生じにくいこと、③いずれの滑雪板においても、低温や降雪が連続する場合は滑雪効果が低いこと、などの知見を得ている。そして、福井県の雪質や降雪特性を十分に考慮し、福井県内で適用する際は注意が必要であることを示唆している。

#### <エアーパーキン巻工法>

奥越土木事務所（勝山道路維持管理部）では、橋梁トラス上弦材に滑雪効果の高いエアーパーキン（梱包等に使用される気泡緩衝材）を巻き付けて、着雪を防ぎ、速やかな落雪を促進することで冠雪を防ぐエアーパーキン工法も別途採用している。

そして同様に、実橋への取り付け、運用を通じて、以下の点を指摘している。

- ① エアーパーキンの破れや捲れによる性能低下が生じやすい
- ② エアーパーキンが剥がれやすく、固定・固結方法に工夫が必要である
- ③ エアーパーキンにより鋼材と雪との付着は生じないため、人力による雪庇除去作業の効率は大幅に向上する

平成 27 年度末現在も、人力による雪庇除去作業の効率向上を目的に運用を行っている。

#### <三角発泡スチロール工法>

滑雪板のように、発泡スチロールを三角形に加工し、部材上部に固定することで着雪を防ぐ工法であり、現在の下荒井橋に設置済みである。しかしながら、十分な効果を得られていない。

### 3-2 下荒井橋の落雪事故対策（実運用なし、研究開発のみ）

下荒井橋の落雪事故対策として、実運用はないものの、研究開発が行われた工法を紹介する。ここではその一部を参考文献（近藤ら：冬期道路交通の安全確保のための落雪・着雪対策技術に関する研究・開発（その1））から引用する。

#### < 滑雪シート工法 >

滑雪シート工法とは、繊維製のシート（またはカバー）の表面に、撥水性や防汚効果が高い特殊な塗料をコーティングまたはフィルムを張って、滑雪効果を高めたものである。梅田、金森らは、前節の塗装滑雪板工法と合わせて、滑雪効果が高い繊維シートの表面にアクリル塗料をコーティングしたり、光触媒フィルムを張り付けたりしたシート工法の滑雪効果の検証を行っている。その結果、①紫外線劣化と強風によりシートの破れや捲れが生じ、長期対策には適さないこと、②いずれの滑雪シートにおいても、降雪が連続する場合は滑雪効果が低下すること、などの知見を得ている。そして、前節の塗装滑雪板工法と同様、福井県内で適用する際は注意が必要であるとしている。

#### < 電熱ヒーター工法 >

電熱ヒーター工法（構造物の内部に電熱線等を配し、熱エネルギーで強制的に融雪して、落雪を防ぐ工法）は、融雪水の再凍結により氷柱（つらら）を誘発させる恐れがあるため、移動式ブレード工法（トラス上弦材にスクレーパ台車を設置し、鋼材に付着した雪氷を取り除く工法）は、駆動部の滑車が凍結し不具合が発生する恐れがあるため、両工法ともに実橋への取付、運用までには至っていない。

#### < 鳥かご工法（合掌格子工法） >

鳥かご工法（合掌格子工法）とは、縦棧または格子状の部材を付き合わせて中空状の構造物とし、降り積もった雪を囲い込むことで落雪させないようにしたものである。落雪させないことによる対策工法としては、すでに北海道で類似の工法として、格子フェンス工法が提案され実用化されている。梅田、金森らは、この工法をもとに材料、構造面で検討を加え、鳥かご工法（合掌格子工法）を提案し、モデル橋で実証実験を行っている。その結果、①鳥かごの高さを超える降雪になると、横棧上に冠雪が発生すること、②合掌格子工法では、格子側面に着雪成長した雪庇が落下する恐れがあること、③固定・固結方法に注意を要すること、などの知見を得ている。そして、福井県の雪質や降雪特性を十分に考慮し、福井県内で適用する際は注意が必要であることを指摘している。

### 3-3 その他、全国の落雪事故対策

その他にも全国で様々な落雪防止策が行われている。ここではその一部を参考文献（近藤ら：冬期道路交通の安全確保のための落雪・着雪対策技術に関する研究・開発（その1））から引用する。

#### <その他の工法>

福井県内での施工・設置事例はないが、北海道や新潟県などでは、長大トラス橋を対象に、散水車を用いた放水による雪庇処理の試行、主に法面の雪庇処理として、ワイヤーを活用した工法や破碎剤を活用した工法などの事例・研究開発が報告されている。

## 4. 空気膜落雪促進装置の 落雪メカニズム

## 4. 空気膜落雪促進装置の落雪メカニズム

空気膜による落雪メカニズムを説明するために、雪塊の力の釣り合いおよび空気膜による膨張時の接触面積による凍着力の違いをここで説明する。なお、落雪メカニズムを簡単に説明するために、ここでは斜面上（屋根上）を想定する。

### 4-1 斜面の落雪直前の釣り合い

図10に示すように斜面上にある雪塊の滑雪直前における力の釣り合いは、式(1)で与えられる。

$$F_s = F_f + F_a \quad (1)$$

ここに、 $F_s$ ：滑雪力(N)、 $F_f$ ：静摩擦力(N)および $F_a$ ：凍着力(N)であり、それぞれ次式で与えられる。

$$F_s = mg \sin \theta \quad (2)$$

$$F_f = \alpha f_f A_s = \mu mg \cos \theta \quad (3)$$

$$F_a = \alpha f_a A_s \quad (4)$$

ここに、 $m$ ：雪塊質量(kg)、 $g$ ：重力加速度( $\text{m/s}^2$ )、 $\theta$ ：傾斜角( $^\circ$ )、 $\mu$ ：静摩擦係数(-)、 $f_f$ ：単位面積当りの摩擦力( $\text{N/m}^2$ )、 $f_a$ ：単位面積当りの凍着力( $\text{N/m}^2$ )、 $A_s$ ：雪塊の底面積( $\text{m}^2$ )、 $A_i$ ：雪塊の接触面積( $\text{m}^2$ )および $\alpha(=A_i/A_s)$ ：雪の空隙を考慮した実接触面積比(-)であり、本論文では $\alpha=1$ とみなす。

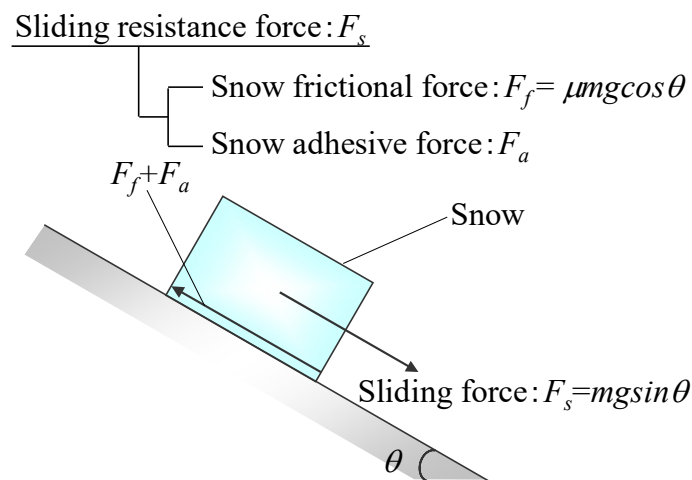


図10 斜面における滑雪直前の力の釣り合い



## 4-2 空気膜上の接触面積

空気袋の膨張によって図 11 のように接触面積が減少する。滑雪時における空気袋の接触面積の減少率を $\beta$ とする。すなわち、

$$\beta = A_c / A_s \quad (\beta \leq 1) \quad (5)$$

ここに、 $A_c$ ：空気袋と雪塊の接触面積( $\text{m}^2$ )である。式(5)を式(4)に代入し、それを式(1)の右辺第2項に代入することにより、滑雪直前の釣り合い式は、式(6)で表される。

$$mgsin\theta = \mu mg \cos\theta + f_a \beta A_s \quad (6)$$

ここで、例えば寺崎らの研究によれば、斜面上の雪塊の落雪抵抗力は凍着力が支配的である。したがって、凍着力を減少させることが落雪を促進するうえで肝要となる。

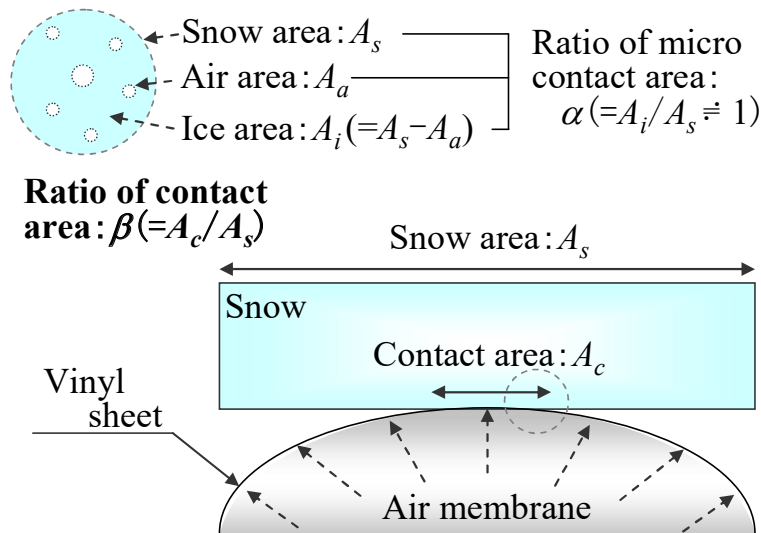


図 11 空気膜膨張時の雪塊と膜材との接触面積

## 4-3 膜変形に伴う落雪メカニズム

屋根雪処理装置から得られた落雪メカニズム、すなわち膜変形によりもたされる主な効果は以下の4つである(図 12 を参照)。すなわち、

- ① 氷着剥離 (摩擦力の低下)
- ② 雪塊の接触面積を減少 (膜袋 における圧力と膜の張りの関係)
- ③ 雪塊のクラック発生
- ④ 雪塊の移動促進

上記の効果のうち、特に膜変形に伴う雪塊の接触面積の減少は落雪抵抗力の主要因となる凍着力を解消することができる。なお凍着力を除けば、落雪抵抗力は摩擦力だけであり、その大きさは凍着時においては 1/10 程度である。また膜の膨張収縮に伴う不規則な変形は雪塊のクラックを

発生させ、雪塊の移動を促進させる。これらの落雪メカニズムは他の落雪防止策とは異なる特徴を有する。

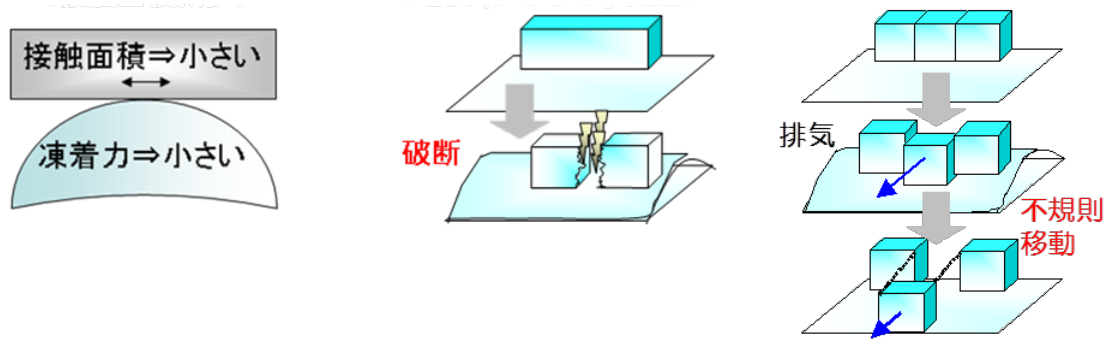


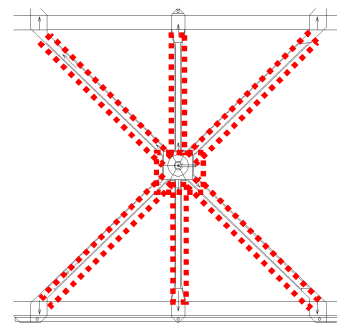
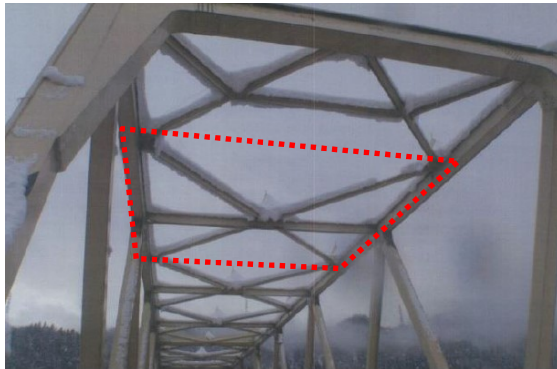
図 12 膜変形による落雪メカニズム

# 5. 模擬橋梁および空気膜 式橋梁落雪促進製作

## 5. 模擬橋梁および空気膜式橋梁落雪促進製作

### 5-1 模擬橋梁

当該装置で対象とする勝山市下荒井橋の1スパン分(1スパン=67m)を制御し、トラス橋天端1ユニットに相当する模擬橋梁を製作し、平成28年度は野外試験を実施し、その結果を検証・評価し、下荒井橋への適用性を検討する(図13および図14を参照)。



(破線部：本研究対象領域)

図13 勝山市下荒井橋の対象ユニット

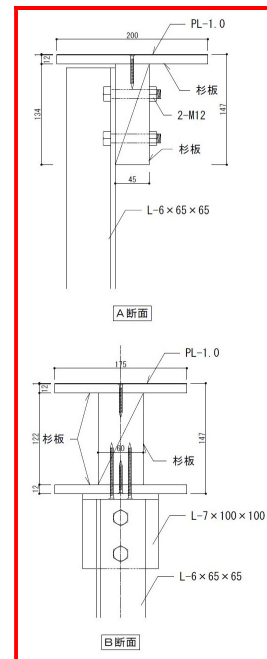
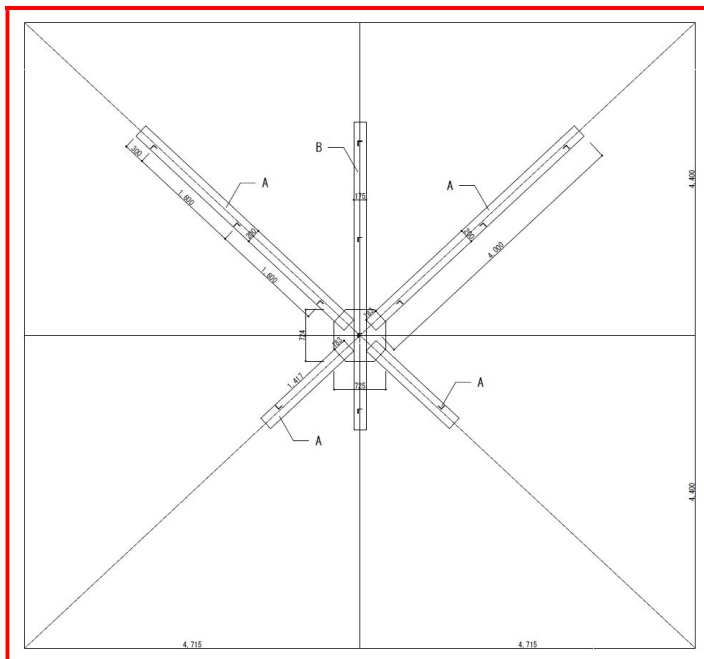


図14 対象ユニット(試験用工作物)の平面図、側面図および断面図

なお、表 2 に示すように当該橋梁の部材総延長は一部の梁部材を除けば約 850m である。

表 2 下荒井橋の総部材延長の概算

部材	部材長 L (mm)	部材数	総部材長(mm)
H-348×160×8×8	8,350	20	167,000
CT-144×204×12×10	5,685	108	613,980
— // —	2,420	16	38,720
— // —	3,370	8	26,960
合計		152	846,660

## 5-2 空気膜式橋梁落雪促進システム

本研究で実用化を目指す橋梁への空気膜式落雪促進装置は、先述のように屋根雪処理装置と同様の落雪メカニズムに基づいて開発が行われる。なお、同装置の橋梁への適用にあたり、研究開発のポイントを整理する。

### 5-2-1 装置概要

#### (1) 送風方法

橋梁のトラス上部全てに空気膜装置を設置すると大変なボリュームになるため、一度に膨らませるのではなく、小スパン（小ユニット）ごとに区切り、それぞれにダクトを設けて順次膨らませる。

#### (2) 膜寿命

橋梁の定期点検要領では5年に一度点検を行うこととしており、これとの整合性を考慮し、最低5年は品質および性能を維持させる構造が必要である。本研究ではテント用膜材を選択した。その耐久性は使用条件により異なることもあり厳密に示されていないものもあるが、7～10年と耐久性の高い製品も存在している。（膜の耐久性については）何年先まで保証できるのが課題であり、一般的なテント倉庫は（膜耐用年数を）8年としており、実際にはそれ以上を使用できるケースもある。ただし、膜に空気圧を与える雪処理装置ではひび割れなどによる空気漏れを考慮する必要があるため、耐用年数は今後の検討課題である。なお、破損などが見つかった場合、小スパン（小ユニット）ごとに補修も可能で全交換は想定していない。

#### (3) 落雪のタイミング

装置を稼働させたときの落雪の状況や落下位置の確認を行い、オペレーションについて十分に検討が必要である。県の職員のパトロール業務で分割して落とす、交通規制をかけてまとめて落とす、などの方法が挙げられる。また、交通量の少なく車が通らない時間帯を選択し、かつカメラなどより車が通行しないことを確認して落雪させる方法も可能であると考えられる。

#### (4) 自動化

研究では落雪のタイミングを調べるためにも主に人的操作による。しかしながら、最終的には降雪センサーやタイマーなどで半自動化および自動化を目指す。

#### (5) 膜内圧力

送風機には、雪を押し上げるための内部圧力を与え、求められる時間に膜袋を膨らませる能力が必要となる。しかし、膜材の経年劣化を考えると必要以上に圧力がかからなくする配慮が必要であり、試験では圧力計および必要以上の圧力が生じた場合にはその圧力を逃がす構造が必要である。なお、予備試験の結果、チューブ（タイプC）では10kPaに耐えられることを確認できている。

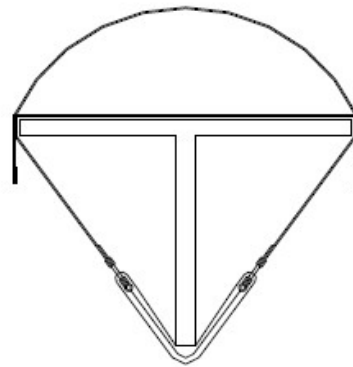
### 5-2-2 膜材の検討

上部空気膜の材質は加工面、経済面および膜強度、耐久性を考慮して、テント用膜材（PVC）を用いる。また、袋体に給排気を行い膜材の変形を生じさせるため、屈曲性も求められる。膜材にはフッ素系樹脂や酸化チタンにより防汚処理されたものもある。粉塵による膜の汚は着雪に影響を及ぼすが、福井大学の基礎実験では、膜変形により雪氷と膜材の剥離が生じることから、素材の検討は防汚処理の有無よりも、耐久性、コストが優先順位としてはより高いと考えられる。また、着氷防止対策で撥水性の素材や塗料の研究が行われているが、その撥水効果の経年劣化は避けられない結果を得ていることから、余分なコストをかけても落雪効果はあまり向上しないと推察される。

以上より、テント膜倉庫などに使われる膜材「E5」（太陽工業㈱）を選定した。また、空気膜の最大の特徴である袋体の作製に際して、ウェルダール着加工により気密性を確保した。以下の図 15 は試作機の外観と鋼材への取り付け案を示す。



外観



断面図

図 15 試作機とトラス橋天端部材への取付案

### 5-2-3 膜形状の検討

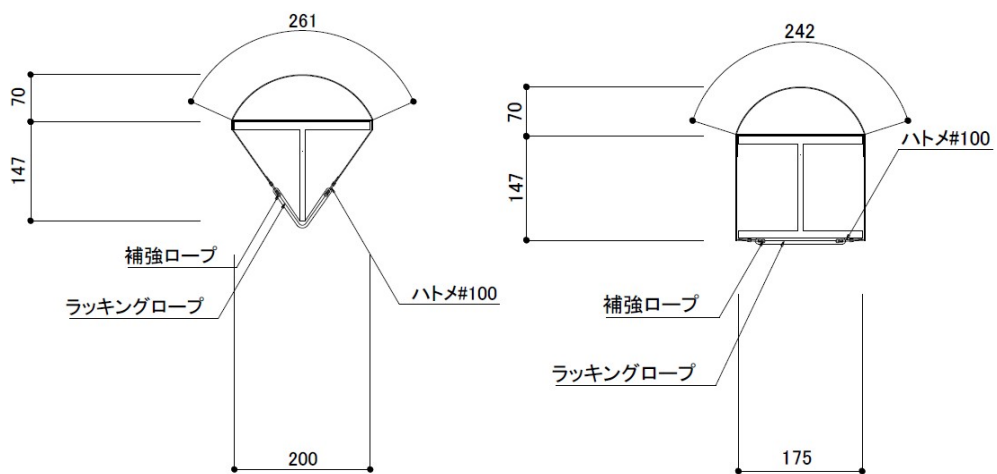
落雪装置の性能を左右する膜形状について、その膨らみの頂点は中心となる。また落雪に必要なライズ（膨らみ寸法）を実験的に決める必要がある。ここでは、落雪に必要なライズ寸法を検証する為に、3つの形状、すなわち、

- ① タイプA：準半円型（一枚膜）
- ② タイプB：偏心型
- ③ タイプC：準半円型（チューブイン）

を試験した。とりわけ、タイプCの準半円型（チューブイン）は二重膜構造にすることでコストは増加するものの、強度・耐久性および安全性が向上するものと考えて、提案した。

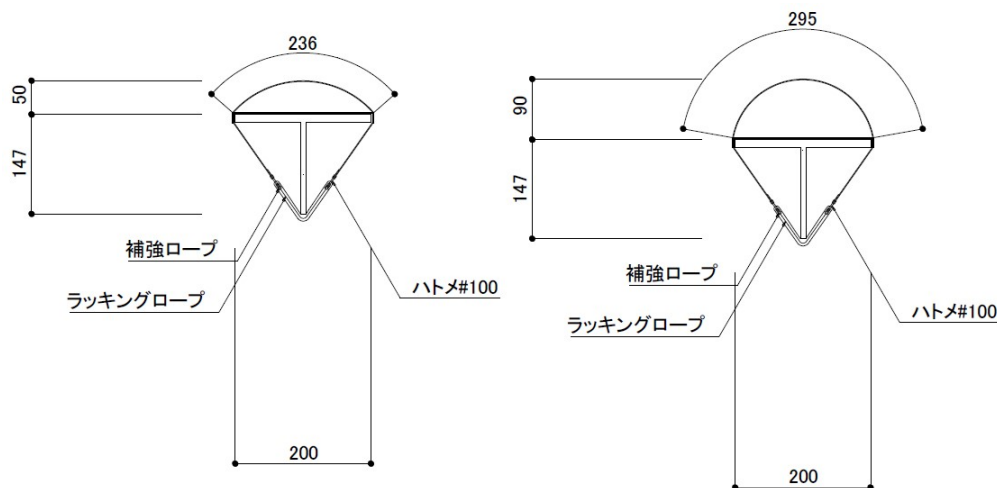
(1) タイプ A (基本形状)

実験においてはライズ 70mm を基本として設計し、ライズの違いによる落雪状況を調べるために 50mm と 90mm のものも試作した (図 16 を参照)。また図 17 は送風前後の膜膨張の様子を示す。



a) 断面詳細図 ライズ 70 (T-147×200)

b) 断面詳細図 ライズ 70 (H-147×175)



c) 断面詳細図 ライズ 50 (T-147×200)

d) 断面詳細図 ライズ 90 (T-147×200)

図 16 膜仕様 (タイプ A)



a) 送風前



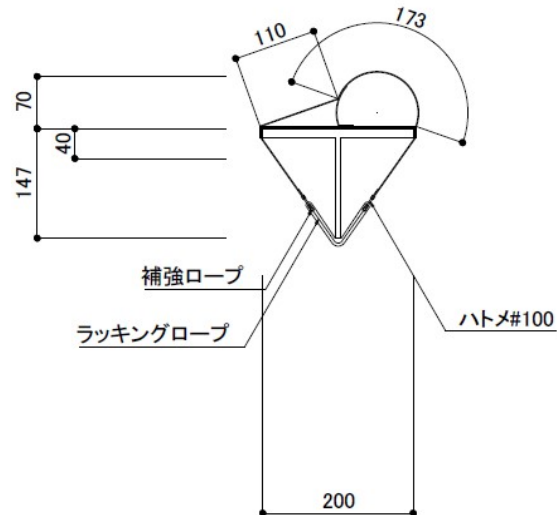
b) 送風後

図 17 送風前後の膜膨張の様子 (タイプ A)



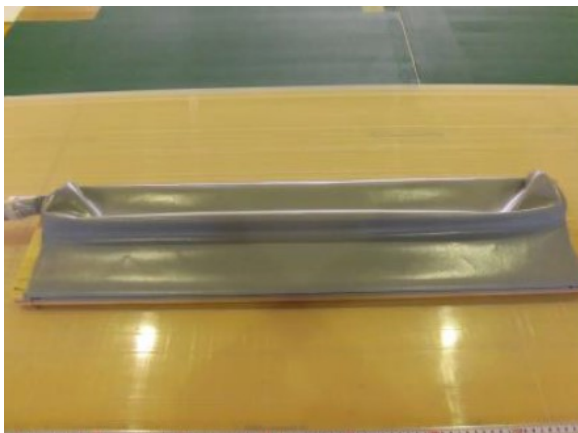
## (2) タイプB (偏心)

落雪場所をコントロールするために、膨らみの頂点を「偏心」させたものを試作した。試験ではタイプAと比較するために、ライズは70mmに設計した(図18を参照)。図19に示すように、送風前後でインナーチューブが偏って膨張していることが分かる。

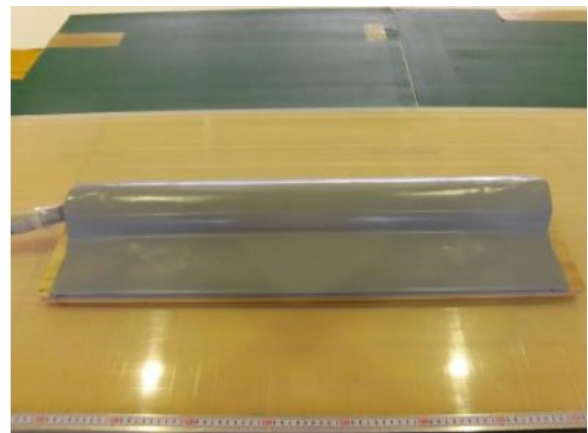


断面詳細図ライズ 70 (T-147×200)

図18 膜仕様 (タイプB)



a) 送風前

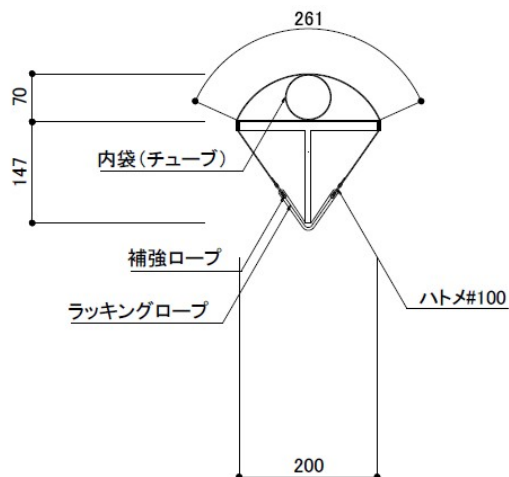


b) 送風後

図19 送風前後の膜膨張の様子 (タイプB)

### (3) タイプ C (基本形状+チューブイン)

袋体への給排気容量を削減させるため、**図 20** に示すように「内袋 (チューブ)」タイプを試作した。タイプ A と比較するために、ライズは 70mm とし、送風容量の削減・膨らみ形状の変化による落雪時間・落雪の変化を検証する。先述のように、強度・耐久性および安全性が向上し、破損による交換作業も容易に行うことができると考えられる。一見すると、送風前後の膜膨張の様子はタイプ A のそれ(**図 17**)と大差はない(**図 21** を参照)。

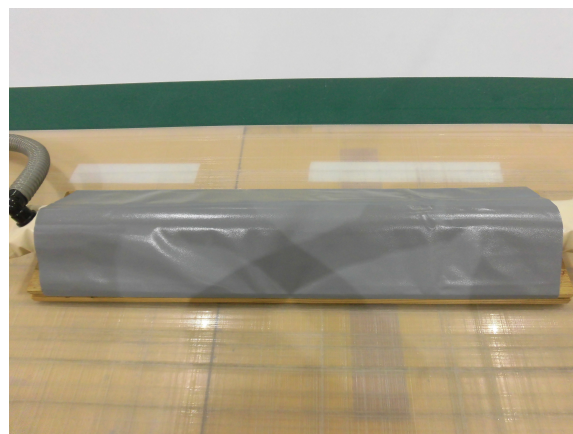


断面詳細図ライズ 70 (T-147×200)

図 20 膜仕様 (タイプ C)



a) 送風前



b) 送風後

図 21 送風前後の膜膨張の様子 (タイプ C)

### 5-2-4 試験装置配置計画

図 22 は試験装置の配置を示す。先述のように、タイプ A を基本とし、タイプ B および C をその付近に設置した。なお、諸般の理由により、右端緑枠で囲った部分の模擬橋梁部材は木製で製作した。また図 23 は試験モデルの設置イメージを示す。

上横構実験モデル概要図

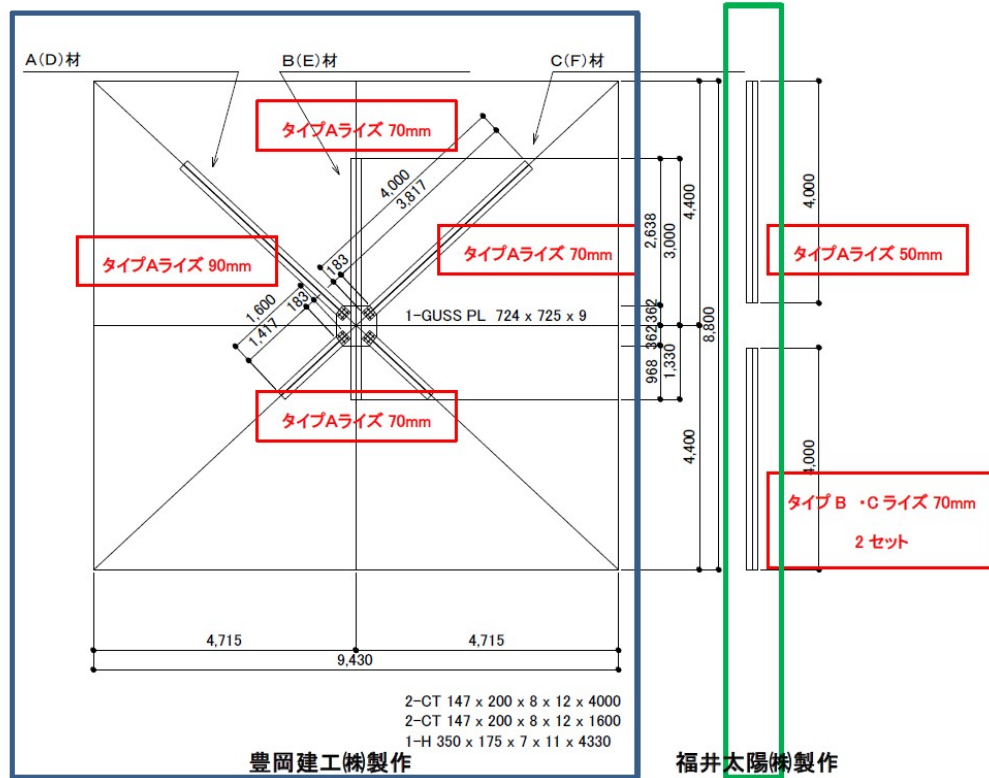


図 22 試験装置の配置

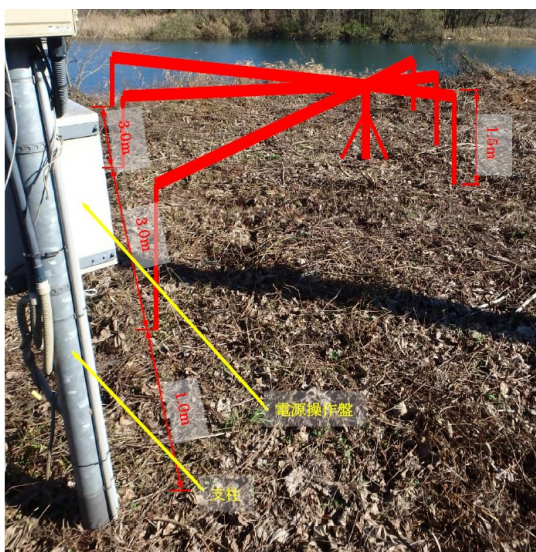


図 23 試験モデルの設置イメージ

### 5-3 装置設置場所

図 24 は試験現場(2015 年 11 月 26 日撮影)の状況を示す。同図から分かるように、実験に際して、周囲を遮るものは何もなく、橋梁上部を除けば下荒井橋と概ね同様の気象条件で行われる。また、同場所にはネットワークカメラと配電盤が既に設置されており、100V 電源の利用が可能である。



図 24 現場状況(2015 年 11 月 26 日)

また試験現場は北緯 36°01'20"、東経 136°30'52"に位置する(図 25 を参照)。なお、本研究期間においては使用許可を事前に得ており、本河川敷における占用部分は図 26 に示す通りである。



図 25 現場位置図

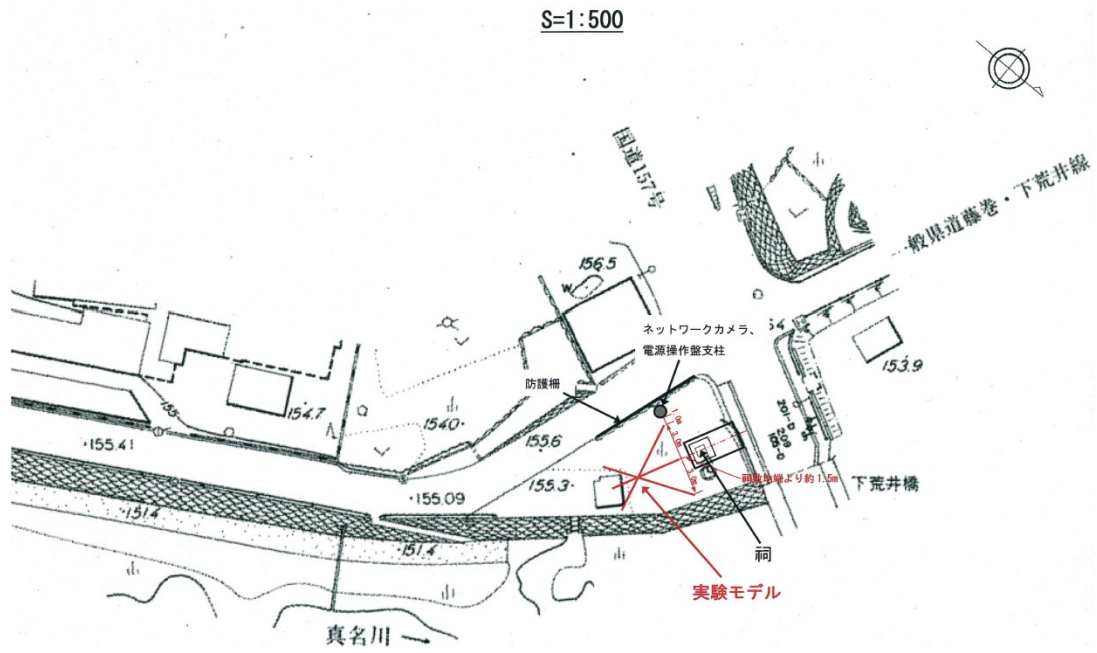


図 26 占用面積および行為面積

## 6. 模擬橋梁を用いた野外 落雪試験

## 6. 模擬橋梁を用いた野外落雪試験

### 6-1 平成 27 年度野外落雪試験

#### 6-1-1 試験概要

野外落雪試験は表 3 に示すように、現地気象の観測、膜処理装置の実験記録、最適運転間隔の検討および膜上の滞留水凍結観測が行われた。気象観測は常時観測を行い、別途、試験時には以下に示す試験道具により、微気象観測を行った。膜処理装置の性能を評価する前段として、専用サンプラー、雪氷含水率計およびメジャー等を用いて、着雪した雪の雪密度、雪氷含水率および高さなどの雪氷観測を行った。その後、膜処理装置の性能を評価するために、落雪までの時間や残雪量、残雪率などを調べた。

表 3 観測概要一覧

	内容	項目	方法	頻度
モデル橋 および 実験ヤード	現地気象の観測	気温、降水量、湿度	気象ステーション (福井大学)	常時観測
		降雪量	ノギスにて計測	//
	膜処理装置の実験記録	着雪した雪の雪密度、 雪氷含水率および高さ	現地計測(専用サンプラ ー、雪氷含水率計およ びメジャー)による	試験時
		装置作動・滑雪の映像 記録	ビデオカメラ	試験時
		その他天候、動作時 間、必要動作回数など	現場計測による	試験時
	最適運転間隔の検討	最適な運転間隔の調査	最初は短時間で動作さ せ、積もっていかないこ とを確認できれば間隔を 延ばしていくことを想定し ていたが、条件が整わず 調査できず	試験時
	滞留水凍結対策の検討	膜上の滞留水凍結観測 および処理実験	必要に応じて、福井大学 低温室にて実験を考え ていたが、モデル橋では 水が溜まる様子は無く、 室内実験は行わず	適時
		上記を踏まえての改良 検討	膜材および袋体の改良 を検討	適時

## 6-1-2 試験項目

気象観測、常時観測および現地観測項目は表 4～表 6 に示すとおりである。

表 4 気象観測項目

No.	測定項目	詳細	備考
1	短波放射量	Kipp & Zonen 製	CH-1,2 設置高 1.5m
2	長波放射量	Kipp & Zonen 製	CH-3,4 設置高 1.5m
3	気温	T型熱電対	CH-5 設置高 1.5m
4	気温・相対湿度	Vaisala 製	CH-6,7 設置高 1.5m
5	風速	牧野応用測器研究所 製	CH-8 装置高に設置
6	降雨量	雨量計	設置高 1.5m
7	降雪量	降雪板	設置高 1.5m

表 5 常時観測項目

No.	測定項目	詳細	備考
1	気象一式	Graphtec 製データロガー	上記 1-8 を計測
2	膜表面温度	T型熱電対(豊建・代表部材 2点)	気象装置 8CH 使用 各温度 6CH 使用+ 太陽・代表部材で 6CH
3	膜内空気温度	T型熱電対(豊建・代表部材 2点)	
4	部材温度	T型熱電対(豊建・代表部材 2点)	

表 6 現地観測項目

No.	測定項目	詳細	備考
1	気温	サーミスタ温度計(SATO製)	実験シート記入
2	雪表面温度	放射温度計(レイテック製)	
3	雪中温度	サーミスタ温度計(SATO製)	
4	含氷計	自作遠藤式含氷計	計算式は実験シート参考
5	雪密度	鋼管+重量計	
6	積雪深さ	精密ノギス	
7	雪氷体積	積雪深さ×上面トラス面積	
8	積雪(堆積)重量	雪密度×雪氷体積	
9	落雪時間	ビデオカメラ 3台	観測後に画像解析
10	落雪速度	画像解析	観測後に画像解析
11	残雪深	精密ノギス	実験シート記入
12	残雪面積	画像解析あるいは実測	
13	残雪量	残雪深×残雪面積	
14	膜内圧力	圧力計	※要確認



### 6-1-3 試験道具

現地雪氷観測道具は表 7 に示すとおりである。また現地微気象観測で用いた各観測機器を図 27～図 37 に示す。

表 7 観測道具一覧

実験用ノート PC	保温瓶（お湯入り）	重量計
エクセル記録シート(PC内)	電気ポット	精密ノギス
サーミスタ温度計	ハンディー温度湿度計	鋼管サンプラー
含氷計	メジャー	ブロワー2台
ビデオカメラ3台	安全帯+ヘルメット	スコップなど除雪道具
防寒着, 長靴および雨合羽	筆記用具	雑巾（水をふき取るため）
電気ドラム	マルチ電源ユニット	ゴミ袋
予備デジタルカメラ	ドライバーなど工具一式	圧力計※
放射温度計	予備乾電池	その他, 必要と思われるもの



図 27 温度・湿度センサー

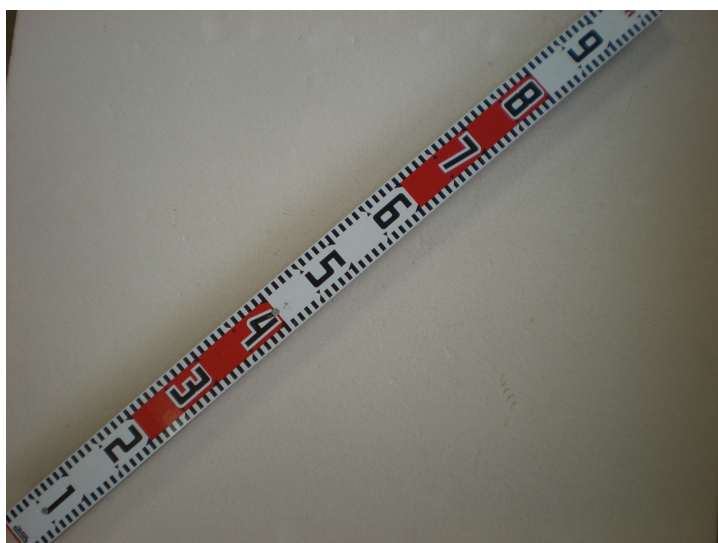


図 28 降雪板



图 29 三杯式風速計



图 30 放射收支計



图 31 遠藤式含水率計



図 32 電子重量計



図 33 サーミスタ温度計



図 34 熱電対



図 35 デジタルノギス



図 36 放射温度計



図 37 ビデオカメラ

図 38 は落雪試験装置の様子を、図 39 は気象ステーションの様子を、それぞれ示す。

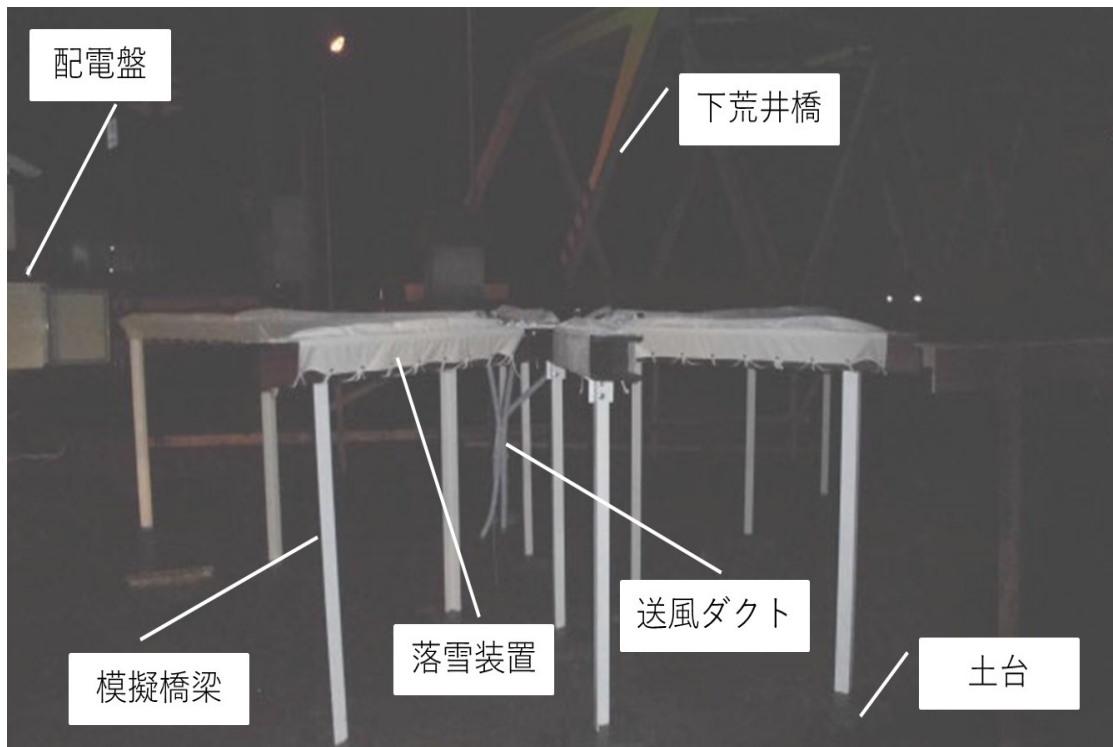


図 38 落雪試験装置（全景）

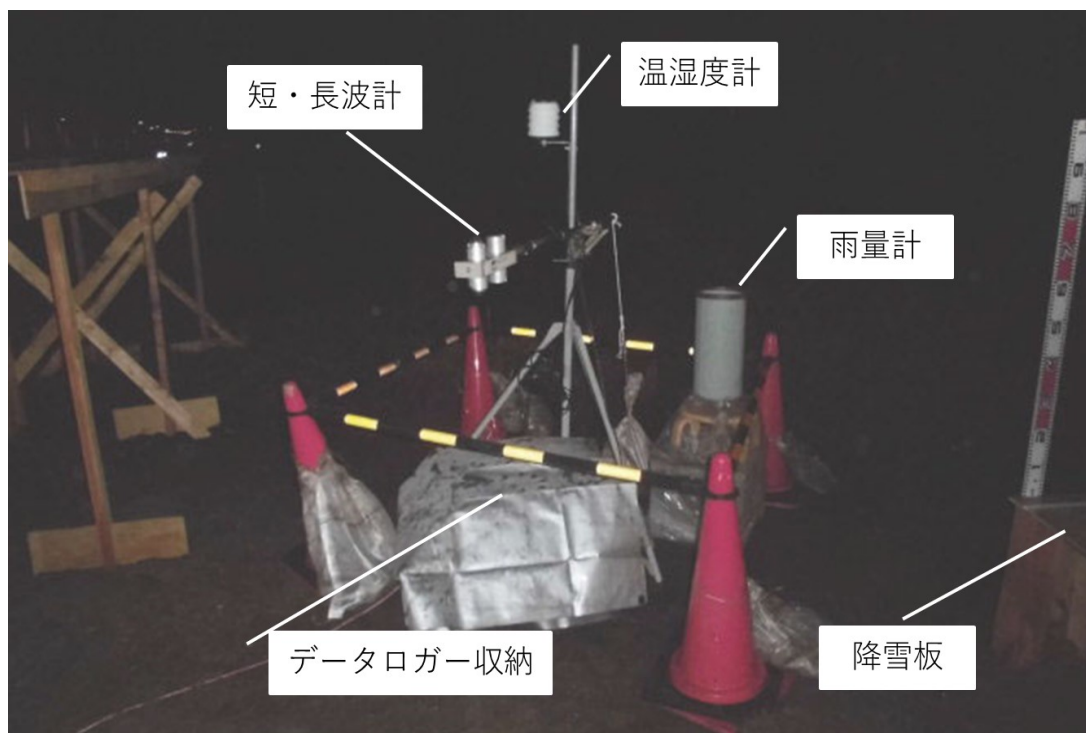


図 39 気象ステーション（近景）

図 40 および図 41 は落雪試験現場の様子を示す。なお、気象観測装置は「身近な気象・気候調査の基礎」を参考にして設置された。



図 40 落雪試験現場状況①



図 41 落雪試験現場状況②

#### 6-1-4 試験手順

実験を実施するか否かを前日 17:00 までに建設技術研究センターが判断し、実施する場合、関係者に連絡する体制をとった。実験の都合上、最少実験員人数（合計）は 4 人で実施するものとし、移動・集合などを確認した。なお、福井大学からは伊藤氏または寺崎先生が、あるいは建設技術研究センターからは近藤氏のいずれかが必ず参加するような体制を整えた。

##### <事前準備>

- (1) 現地到着後、全員で実験現場を除雪して、作業場を確保する。
  - (2) 気象データ取得および空気膜状況確認（エクセルデータで確認）
  - (3) 含氷率計測および雪密度計測（エクセルデータを確認）
  - (4) 含氷率計測補助および雪密度計測補助（エクセルデータを確認）
  - (5) ビデオカメラ設置およびそのアングルを確認（側面・断面・全景撮影は自動記録とする）
  - (6) 気象ステーションのデータ収集およびデータを確認する
  - (7) 実験データをエクセル上に記録し、保存を確認する
- ※ 雪氷観測は合計 6 部材のうち、3 部材を選択する。1 点/部材で 3 箇所計測を基本とする。
- ※ 膜と雪の界面状態が大きく異なるなら、1 部材を選択し、3 点/部材で 3 箇所計測する
- ※ 部材は異なることから、各橋梁部材で 3 箇所（合計 6 箇所）計測する。

##### <試験当日>

- (8) 試験監督の合図・号令により、ブローアで排気（空気送風、膜膨張）および吸気（膜収縮）を繰り返し行う手順を確認する。
- (9) 3 台のビデオカメラで録画スタートおよびストップウォッチをスタートさせる。
- (10) ブローアで送風する
- (11) 脚立の上より、上部より全景を撮影スタートさせる
- (12) 試験終了後、残雪深と残雪面積を測定する
- (13) 次の部材に試験を移行して、作業(8)-(12)を繰り返し行う。

##### <現場での計測項目>

- ・含氷率の計測・記録
- ・試験状況（全体的）のカメラ撮影
- ・試験開始時刻と終了時刻の記録
- ・各実験（3 回）終了後の雪の残った面積の計測（縦×横×厚み、各 3 点ずつ）
- ・パソコンへのデータ入力

## 6-2 平成 27 年度落雪試験結果

### 6-2-1 気象観測

表8は気象観測結果一覧を、図42～図45は短波および長波放射量、気温および相対湿度、風速、鋼材および膜材温度の経時変化を、それぞれ示す。本研究期間において、短波放射量は12月で最大344 W/m<sup>2</sup>、1月および2月で467および489W/m<sup>2</sup>となった。長波放射量は期間を通して、240～400 W/m<sup>2</sup>の変動は見られるものの、観測期間の平均長波放射量は320 W/m<sup>2</sup>程度である。月平均最低気温は12月で-1.6℃、1月で-6.3℃、2月で-5.9℃、3月で-3.2℃となった。また、橋梁鋼材最低温度は-8.6℃を、膜材表面温度は-9.6℃を、それぞれ記録した。したがって、試験装置ならびに膜材の選定には凍結対策や極低温下での動作保証が不可欠である。

表 8 気象観測結果一覧

		短波 放射量	長波 放射量	気温	相対湿度	橋梁鋼材 温度	上部膜材 温度	側面膜材 温度
		W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	℃	%	℃	℃	℃
	期間最大	609.9	396.6	25.1	100.0	59.4	35.3	27.3
	期間最低		242.8	-6.3	12.8	-8.6	-9.6	-6.4
12月	平均	30.8	326.3	4.7	91.9	4.6	4.0	4.6
	最大	344.1	386.4	14.0	100.0	14.9	15.0	13.0
	最低		270.6	-1.6	39.5	-3.0	-4.0	-1.5
1月	平均		317.3	2.5	92.0	2.5	2.1	2.4
	最大	476.5	367.5	17.4	100.0	18.5	15.5	13.0
	最低		250.8	-6.3	32.3	-6.8	-7.9	-5.8
2月	平均		310.3	3.2	84.2	3.2	2.9	3.1
	最大	488.5	378.5	18.3	100.0	22.7	21.8	14.8
	最低		242.8	-5.9	24.6	-8.6	-9.6	-6.4
3月	平均		322.0	7.4	75.1	8.1	8.0	7.8
	最大	609.9	396.6	25.1	100.0	59.4	35.3	27.3
	最低		254.0	-3.2	12.8	-5.3	-6.1	-2.9



(1) 降雪量

表9～表12は2015年12月～2016年3月の平均気温、最低気温、日最大時間降雪量、日累計降雪量および日累計降雪時間の変化を示す。平成27年度冬期は少雪であり、日最大時間降雪量は約7cm/h、日累計降雪量は37cmであり、日累計降雪時間も14hrsに留まった。

表 9 12月の降雪量

日付	平均気温 [°C]	最低気温 [°C]	9時気温 [°C]	日最大時間降雪量 [cm/h]	日累計降雪量[cm]	日累計降雪時間[h]	連続降雪時累積降雪量の日 最大値 [cm]	連続降雪時間の日 最大値[h]
12月1日	7.6	1.6	8.7	0	0	0	0	0
12月2日	10.1	-0.3	6.0	0	0	0	0	0
12月3日	9.5	4.9	12.2	0	0	0	0	0
12月4日	4.6	3.7	4.8	0	0	0	0	0
12月5日	6.2	4.1	5.1	0	0	0	0	0
12月6日	5.7	2.8	4.3	0	0	0	0	0
12月7日	4.3	-0.1	0.9	0	0	0	0	0
12月8日	4.6	-1.4	3.9	0	0	0	0	0
12月9日	5.4	-1.0	3.3	0	0	0	0	0
12月10日	12.9	6.2	12.4	0	0	0	0	0
12月11日	14.2	9.2	18.0	0	0	0	0	0
12月12日	9.0	5.1	8.3	0	0	0	0	0
12月13日	10.0	7.4	9.2	0	0	0	0	0
12月14日	8.0	5.5	6.7	0	0	0	0	0
12月15日	9.8	0.0	8.3	0	0	0	0	0
12月16日	8.7	4.3	9.9	0	0	0	0	0
12月17日	1.1	0.3	0.7	2	2	1	2	1
12月18日	1.8	0.6	1.2	0	0	0	0	0
12月19日	2.9	-1.1	3.2	0	0	0	0	0
12月20日	3.5	-2.9	1.4	0	0	0	0	0
12月21日	6.4	5.4	6.1	0	0	0	0	0
12月22日	6.5	0.6	5.6	0	0	0	0	0
12月23日	6.8	0.0	3.6	0	0	0	0	0
12月24日	9.9	8.4	9.0	0	0	0	0	0
12月25日	7.4	2.3	8.8	0	0	0	0	0
12月26日	2.5	1.3	3.3	0	0	0	0	0
12月27日	2.9	1.1	3.6	0	0	0	0	0
12月28日	2.2	-0.6	0.7	0	0	0	0	0
12月29日	2.6	0.4	1.7	0	0	0	0	0
12月30日	3.6	-0.1	1.5	0	0	0	0	0
12月31日	3.4	1.9	3.0	0	0	0	0	0
月集計	6.3	-2.9	5.7	2	2	1	2	1

※奥越土木事務所提供

表 10 1月の降雪量

日付	平均気温 [°C]	最低気温 [°C]	9時気温 [°C]	日最大時 間降雪量 [cm/h]	日累計降 雪量[cm]	日累計降 雪時間[h]	連続降雪 時累積降 雪量の日 最大値 [cm]	連続降雪 時間の日 最大値[h]
1月1日	3.8	0.4	3.0	0	0	0	0	0
1月2日	5.3	1.5	4.3	0	0	0	0	0
1月3日	6.8	3.3	7.1	0	0	0	0	0
1月4日	7.5	1.8	5.9	0	0	0	0	0
1月5日	5.9	2.4	4.9	0	0	0	0	0
1月6日	6.1	4.6	4.9	0	0	0	0	0
1月7日	4.8	2.7	5.0	0	0	0	0	0
1月8日	2.4	0.3	2.7	2	3	2	3	2
1月9日	2.4	0.3	1.3	1	2	2	4	3
1月10日	2.6	1.5	2.2	0	0	0	0	0
1月11日	4.1	2.7	3.4	0	0	0	0	0
1月12日	3.5	0.7	4.3	0	0	0	0	0
1月13日	1.9	-0.5	1.8	0	0	0	0	0
1月14日	0.6	0.3	0.6	2	7	4	3	2
1月15日	1.3	-0.2	0.3	1	2	2	1	1
1月16日	2.0	0.2	0.9	0	0	0	0	0
1月17日	2.2	-1.5	0.6	0	0	0	0	0
1月18日	5.2	3.1	4.4	0	0	0	0	0
1月19日	-0.9	-2.4	-0.2	6	26	11	10	3
1月20日	1.5	-1.4	3.7	2	6	3	12	3
1月21日	0.8	-2.0	0.8	3	10	6	7	3
1月22日	-1.3	-6.0	-2.6	2	2	1	2	1
1月23日	-0.4	-5.1	-1.9	3	11	7	9	5
1月24日	-3.3	-6.2	-3.6	6	37	14	15	8
1月25日	-3.0	-6.2	-4.1	6	16	4	18	4
1月26日	0.0	-4.4	-4.1	0	0	0	0	0
1月27日	2.1	0.2	0.8	3	4	2	3	1
1月28日	2.5	0.4	2.0	1	3	3	1	1
1月29日	2.3	1.3	2.3	1	1	1	1	1
1月30日	2.8	0.3	2.8	1	3	3	1	1
1月31日	3.2	-1.3	1.3	1	2	2	1	1
月集計	2.4	-6.2	1.8	6	37	14	18	8

※奥越土木事務所提供

表 11 2月の降雪量

日付	平均気温 [°C]	最低気温 [°C]	9時気温 [°C]	日最大時 間降雪量 [cm/h]	日累計降 雪量[cm]	日累計降 雪時間[h]	連続降雪 時累積降 雪量の日 最大値 [cm]	連続降雪 時間の日 最大値[h]
2月1日	1.9	0.3	1.9	1	1	1	1	1
2月2日	2.1	-0.6	0.9	1	1	1	1	1
2月3日	0.6	-4.4	0.4	0	0	0	0	0
2月4日	-0.4	-4.8	-1.4	0	0	0	0	0
2月5日	2.4	0.2	0.5	0	0	0	0	0
2月6日	1.9	0.3	0.9	0	0	0	0	0
2月7日	1.5	-2.8	2.6	0	0	0	0	0
2月8日	1.3	-4.9	-0.7	0	0	0	0	0
2月9日	1.9	0.4	2.0	0	0	0	0	0
2月10日	1.6	-1.9	0.7	0	0	0	0	0
2月11日	1.9	-4.2	-0.3	0	0	0	0	0
2月12日	9.8	5.6	10.8	0	0	0	0	0
2月13日	12.1	10.0	11.7	0	0	0	0	0
2月14日	10.6	7.1	11.5	0	0	0	0	0
2月15日	3.2	0.1	3.6	0	0	0	0	0
2月16日	0.1	-1.5	-1.4	7	22	8	11	4
2月17日	0.6	-1.5	0.5	3	10	4	10	4
2月18日	2.3	-2.6	1.6	1	2	2	1	1
2月19日	5.1	-0.9	4.2	1	1	1	1	1
2月20日	5.3	2.7	5.3	0	0	0	0	0
2月21日	4.7	0.9	5.7	0	0	0	0	0
2月22日	3.6	0.4	2.1	0	0	0	0	0
2月23日	5.1	1.1	4.7	0	0	0	0	0
2月24日	2.6	-0.5	3.7	0	0	0	0	0
2月25日	1.8	-0.9	2.4	0	0	0	0	0
2月26日	0.0	-2.4	0.0	0	0	0	0	0
2月27日	2.0	-3.8	-0.8	0	0	0	0	0
2月28日	7.2	-0.1	1.0	0	0	0	0	0
2月29日	4.7	-1.4	5.5	7	14	3	14	3
月集計	3.3	-4.9	2.7	7	22	8	14	4

※奥越土木事務所提供

表 12 3月の降雪量

日付	平均気温 [°C]	最低気温 [°C]	9時気温 [°C]	日最大時 間降雪量 [cm/h]	日累計降 雪量[cm]	日累計降 雪時間[h]	連続降雪 時累積降 雪量の日 最大値 [cm]	連続降雪 時間の日 最大値[h]
3月1日	-0.4	-2.4	-0.4	3	5	3	3	1
3月2日	0.7	-2.3	1.0	3	7	4	5	2
3月3日	1.1	-2.6	1.4	0	0	0	0	0
3月4日	6.4	-1.7	4.3	0	0	0	0	0
3月5日	11.1	4.5	8.8	0	0	0	0	0
3月6日	15.8	13.2	16.1	0	0	0	0	0
3月7日	13.7	9.8	13.3	0	0	0	0	0
3月8日	10.4	6.8	10.2	0	0	0	0	0
3月9日	6.4	3.4	6.8	0	0	0	0	0
3月10日	4.4	2.0	3.8	0	0	0	0	0
3月11日	3.2	-0.2	5.1	0	0	0	0	0
3月12日	3.8	-1.6	3.8	0	0	0	0	0
3月13日	5.0	-1.8	2.7	0	0	0	0	0
3月14日	5.5	3.8	4.2	0	0	0	0	0
3月15日	5.3	0.0	5.5	0	0	0	0	0
3月16日	6.5	-2.2	5.2	0	0	0	0	0
3月17日	10.2	1.0	8.2	0	0	0	0	0
3月18日	13.5	7.8	15.4	0	0	0	0	0
3月19日	11.9	8.2	12.9	0	0	0	0	0
3月20日	8.3	5.9	8.7	0	0	0	0	0
3月21日	6.4	1.0	7.0	0	0	0	0	0
3月22日	7.5	-1.1	5.6	0	0	0	0	0
3月23日	8.2	4.4	8.1	0	0	0	0	0
3月24日	5.1	1.4	6.7	0	0	0	0	0
3月25日	3.8	1.0	3.1	0	0	0	0	0
3月26日	5.1	-1.5	5.3	0	0	0	0	0
3月27日	8.0	-0.4	7.0	0	0	0	0	0
3月28日	8.2	3.6	9.6	0	0	0	0	0
3月29日	10.0	1.1	7.6	0	0	0	0	0
3月30日	11.2	7.0	12.4	0	0	0	0	0
3月31日	11.7	3.5	10.5	0	0	0	0	0
月集計	7.4	-2.6	7.1	3	7	4	5	2

※奥越土木事務所提供

(2) 短波および長波放射量

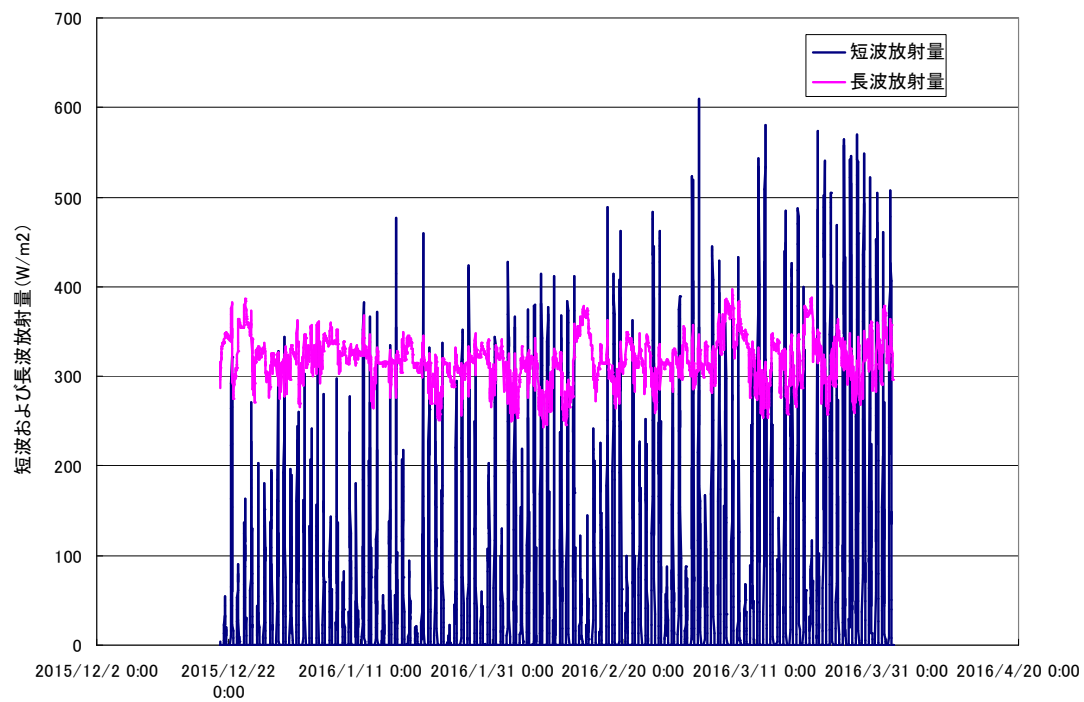


図42 短波および長波放射量の経時変化

(3) 気温および相対湿度

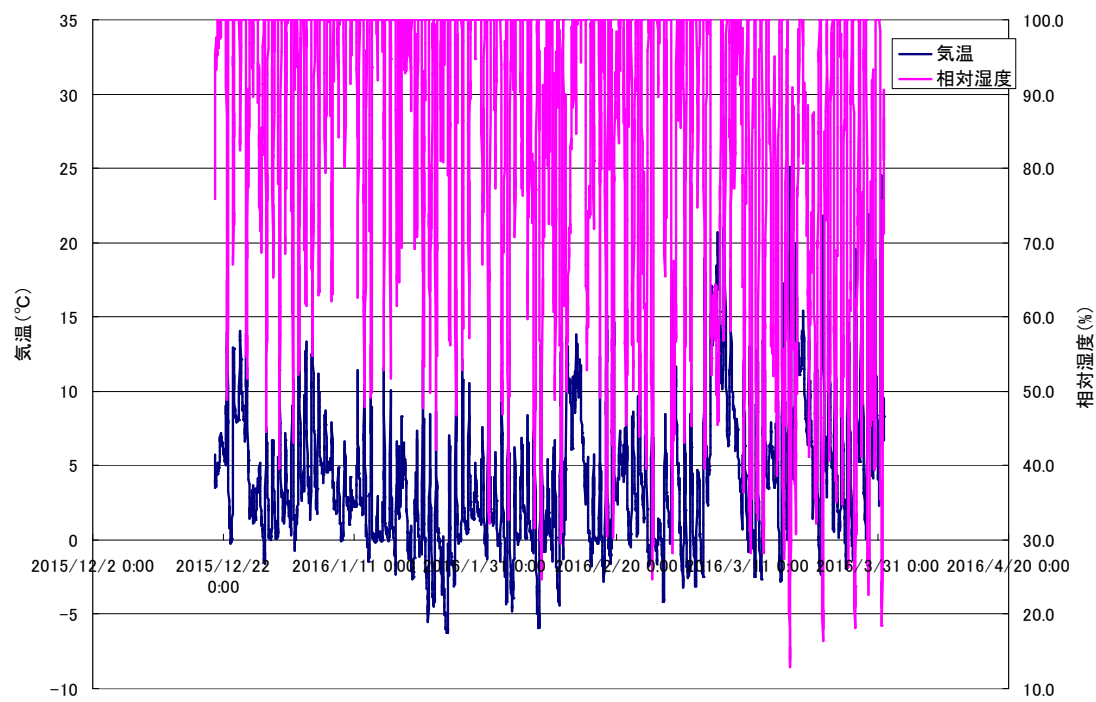


図43 気温および相対湿度の経時変化

(4) 風速

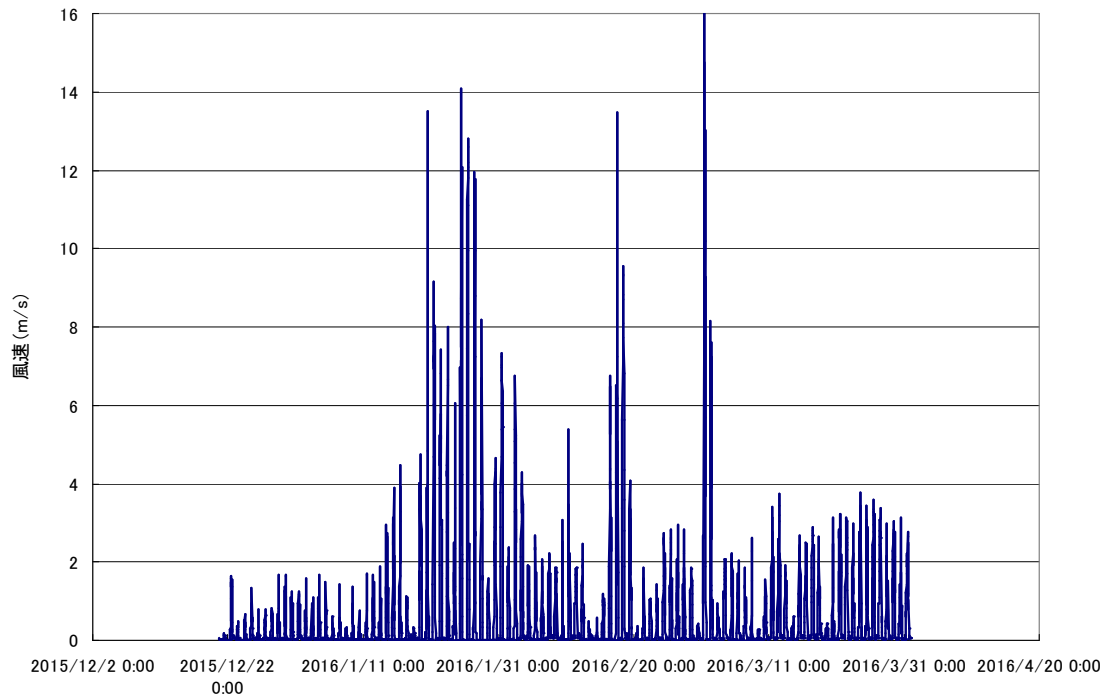


図 44 風速の経時変化

(5) 鋼材および膜材温度

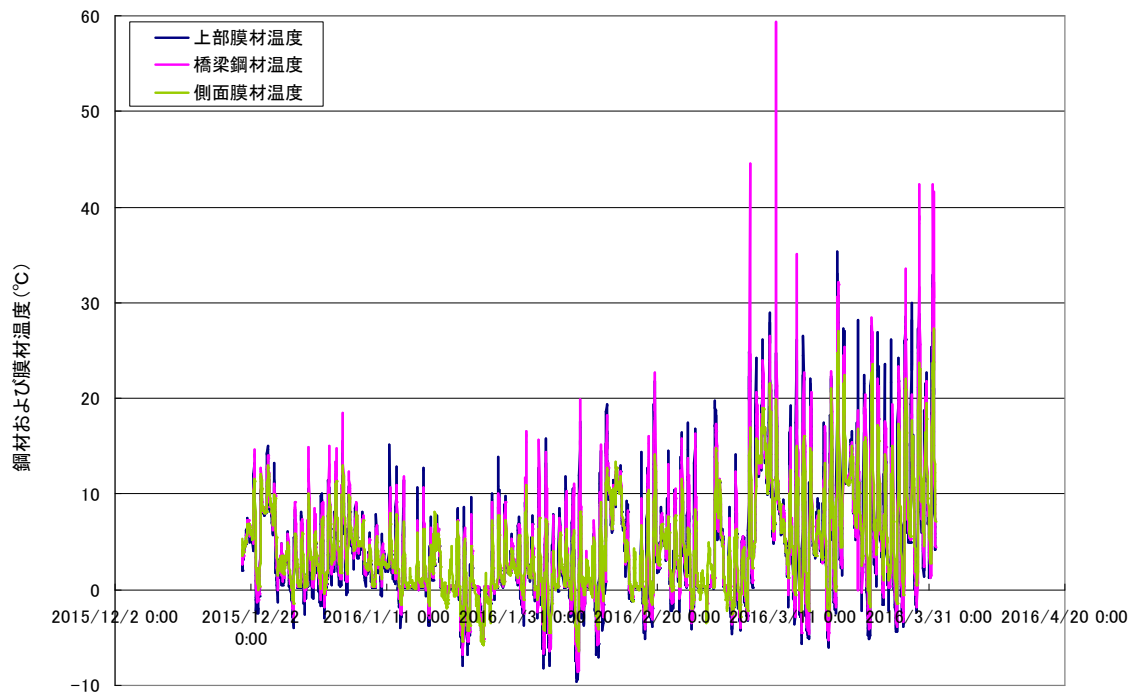


図45 鋼材および膜材温度の経時変化

図46は鋼材温度と気温の関係を、図47は上部膜材温度と気温の関係を、それぞれ示す。両図より、気温から概ね鋼材温度と上部膜材温度を推定することができ、過去の気象データから膜材の耐気候性を調べ、最適な膜材を選定する必要がある。ただし、積雪がある場合は鋼材温度および膜材温度は0℃とみなすことができる。

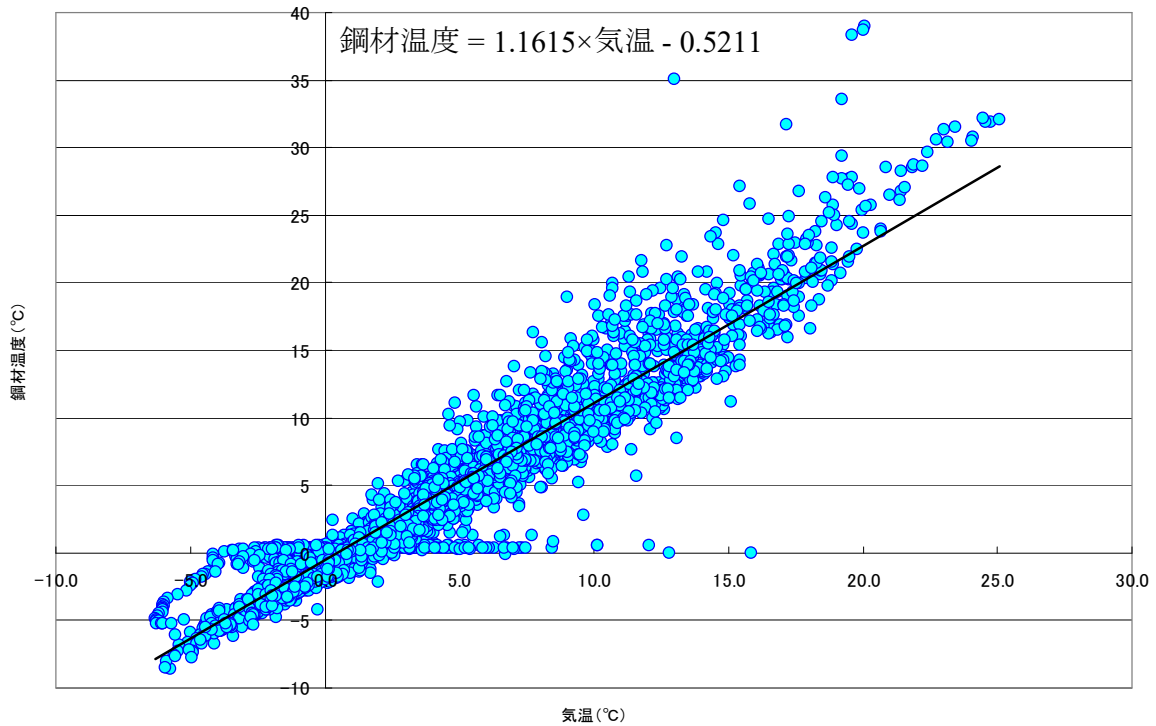


図46 鋼材温度と気温の関係

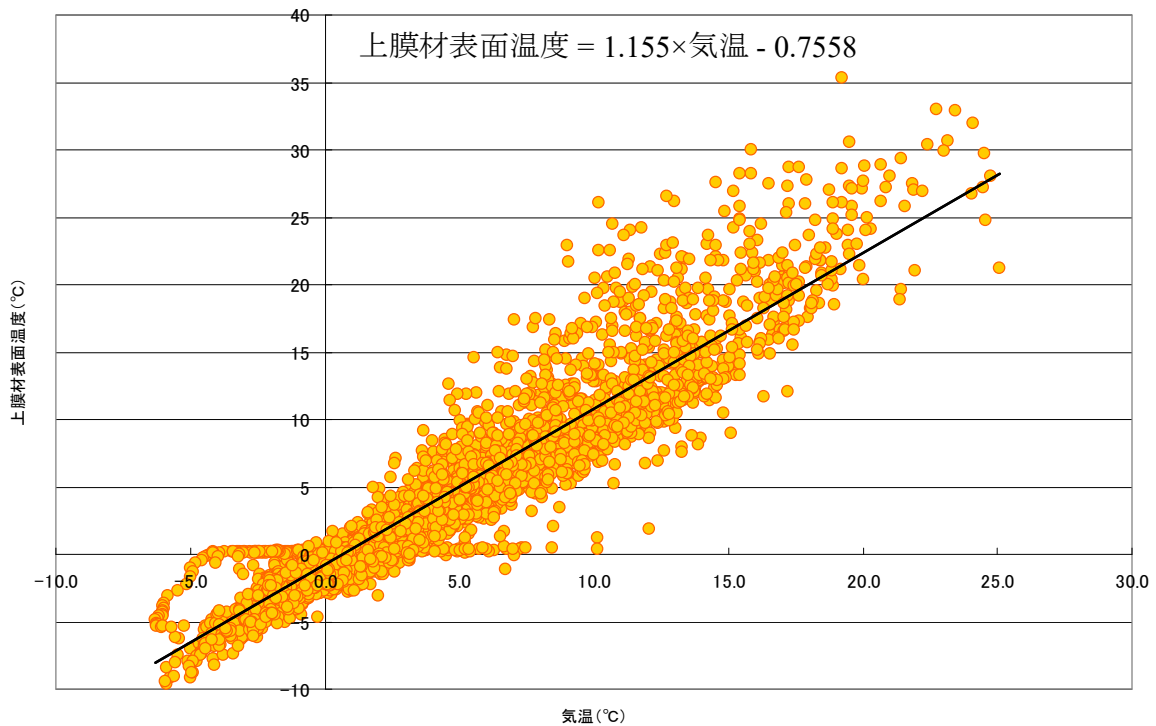


図47 上部膜材温度と気温の関係

## 6-2-2 落雪試験

### (1) 雪氷観測

図 48～図 50 は雪氷観測の様子を示す。



図 48 雪氷サンプリングの様子



図 49 雪氷温度観測の様子

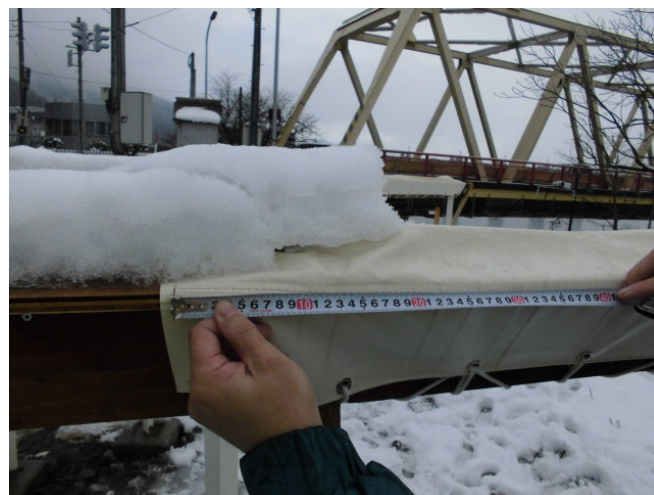


図 50 残雪状況の様子



## (2) 落雪試験 (2016年1月15日)

1回目の落雪試験は2016年1月15日の10:00~12:00頃にかけて行われた。天候は曇りで、気温は3℃、降雪量は9.7cmであった。

### a. 積雪状況

図51は試験開始前の積雪状況を示す。両図から分かるように、試験部材の上部に概ね均一に積雪していることが分かる。また図52より、膜材と雪塊の界面は融解していることが分かる。したがって、凍着力は殆ど働いていないものと推察される。

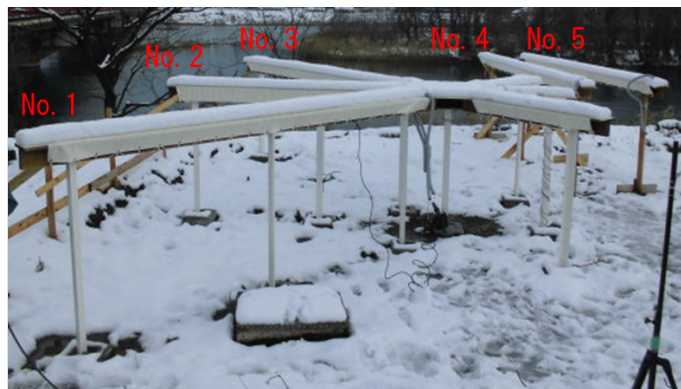


図51 試験開始前の積雪状況 (2016年1月15日)



図52 積雪状況 (2016年1月15日、近景、No.1部材)

b. No.3 部材

図 53 は 2016 年 1 月 15 日に行われた落雪試験の様子 (No.3 部材) を示す。



0 秒後



0.5 秒後



1 秒後



1.5 秒後



2 秒後



3.5 秒後



4 秒後



5 秒後

図 53 落雪状況 (2016/1/15-No. 3)

c. No.5 部材

図 54 は 2016 年 1 月 15 日に行われた落雪試験の様子 (No.5 部材) を示す。



0 秒後



0.5 秒後



1 秒後



1.3 秒後



1.5 秒後



2 秒後



2.5 秒後



3 秒後

図 54 落雪状況 (2016/1/15-No. 5)

表 13 実験結果一覧 (2016/1/15)

気象に関する計測項目	1 回目 (2016/1/15)	
天候	くもり	
気温 (°C)	3.0	
降雪量 (cm)	9.7	
空気膜の状態に関する計測項目	1 回目 (2016/1/15)	
雪表面温度 (°C)	2.5	
雪中温度 (°C)	0.1	
界面状態	融解	
空気膜表面温度 (°C)	5.5	
鋼材表面温度 (°C)	5.6	
雪の状態に関する計測項目	1 回目 (2016/1/15)	
含水率 (%) 上層	10.15	
含水率 (%) 中層	10.67	
含水率 (%) 下層	42.27	
含水率 (%) 平均	21.03	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 上側	193.08	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 下側	253.57	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 平均	223.33	
積雪重量 (kg)	13.3	
落雪状況に関する計測項目	1 回目 (2016/1/15)	
落雪時間 (sec) No.1	7	
落雪時間 (sec) No.2	4	
落雪時間 (sec) No.3	4	
落雪時間 (sec) No.4	3	
落雪時間 (sec) No.5	3	
落雪時間 (sec) 平均	4.2	
落雪率 (%) No.1	91.39	
落雪率 (%) No.2	93.59	
落雪率 (%) No.3	94.26	
落雪率 (%) No.4	92.39	
落雪率 (%) No.5	100.00	
落雪率 (%) 平均	94.33	

(3) 落雪試験 (2016年1月21日)

図55は2016年1月21日に行われた落雪試験の様子 (No.1部材) を示す。



0秒後



1秒後



1.5秒後



2秒後



2.5秒後



3秒後



5秒後



6秒後

図55 落雪状況 (2016/1/21-No.1)

表 14 実験結果一覧 (2016/1/21)

気象に関する計測項目	2回目 (2016/1/21)	
天候	晴れ	
気温 (°C)	5.7	
降雪量 (cm)	22.1	
空気膜の状態に関する計測項目	2回目 (2016/1/21)	
雪表面温度 (°C)	1.9	
雪中温度 (°C)	0.1	
界面状態	融解	
空気膜表面温度 (°C)	6.6	
鋼材表面温度 (°C)	6.8	
雪の状態に関する計測項目	2回目 (2016/1/21)	
含水率 (%) 上層	22.28	
含水率 (%) 中層	13.83	
含水率 (%) 下層	32.74	
含水率 (%) 平均	22.95	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 上側	35.05	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 下側	163.67	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 平均	99.36	
積雪重量 (kg)	6.9	
落雪状況に関する計測項目	2回目 (2016/1/21)	
落雪時間 (sec) No.1	6	
落雪時間 (sec) No.2	3	
落雪時間 (sec) No.3	4	
落雪時間 (sec) No.4	3	
落雪時間 (sec) No.5	積雪無し	
落雪時間 (sec) 平均	4.0	
落雪率 (%) No.1	97.12	
落雪率 (%) No.2	99.73	
落雪率 (%) No.3	99.03	
落雪率 (%) No.4	98.81	
落雪率 (%) No.5	100.00	
落雪率 (%) 平均	98.94	

(4) 落雪試験 (2016年1月26日)

図56は2016年1月26日に行われた落雪試験の様子 (No.1部材) を示す。

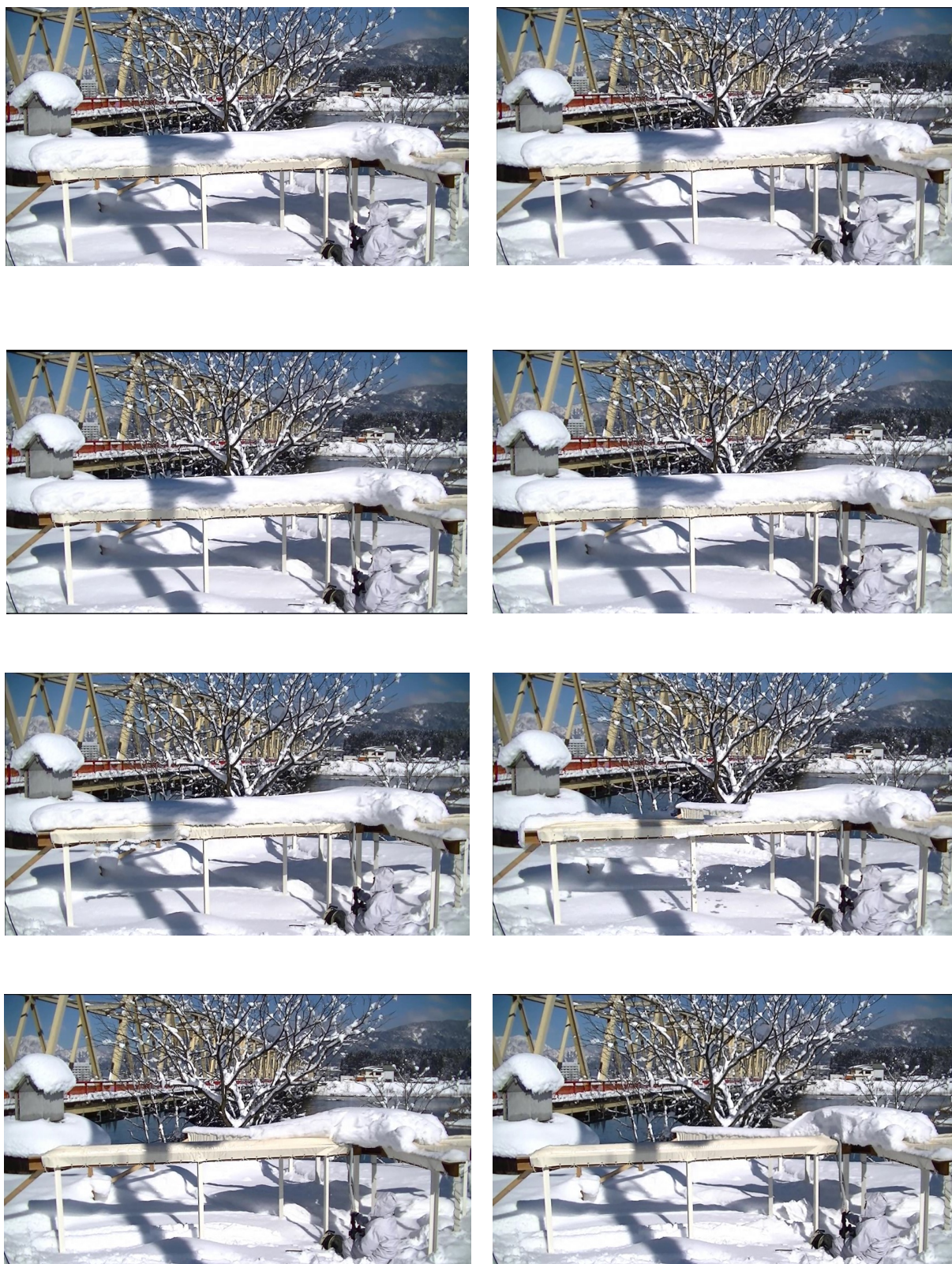


図 56 落雪状況 (2016/1/26-No. 1)

表 15 実験結果一覧 (2016/1/26)

気象に関する計測項目	3回目 (2016/1/26)	
天候	晴れ	
気温 (°C)	2.8	
降雪量 (cm)	32.0	
空気膜の状態に関する計測項目	3回目 (2016/1/26)	
雪表面温度 (°C)	2.1	
雪中温度 (°C)	0	
界面状態	融解・凍着混合	
空気膜表面温度 (°C)	5.3	
鋼材表面温度 (°C)	5.5	
雪の状態に関する計測項目	3回目 (2016/1/26)	
含水率 (%) 上層	14.81	
含水率 (%) 中層	22.37	
含水率 (%) 下層	20.01	
含水率 (%) 平均	19.06	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 上側	観測エラー	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 下側	観測エラー	
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 平均	観測エラー	
積雪重量 (kg)	観測エラー	
落雪状況に関する計測項目	3回目 (2016/1/26)	
落雪時間 (sec) No.1	8	
落雪時間 (sec) No.2	4	
落雪時間 (sec) No.3	6	
落雪時間 (sec) No.4	3	
落雪時間 (sec) No.5	3	
落雪時間 (sec) 平均	4.8	
落雪率 (%) No.1	100.00	
落雪率 (%) No.2	97.48	
落雪率 (%) No.3	95.49	
落雪率 (%) No.4	99.20	
落雪率 (%) No.5	100.00	
落雪率 (%) 平均	98.43	



(5) 落雪試験 (2016年2月17日)

図57は2016年2月17日に行われた落雪試験の様子 (No.5部材) を示す。



0 秒後



0.5 秒後



1 秒後



1.5 秒後



2 秒後



2.5 秒後



3 秒後



4 秒後

図 57 落雪状況 (2016/2/17-No. 5)

表 16 実験結果一覧 (2016/2/17)

気象に関する計測項目	4回目 (2016/2/17)
天候	くもり
気温 (°C)	2.6
降雪量 (cm)	20.1
空気膜の状態に関する計測項目	4回目 (2016/2/17)
雪表面温度 (°C)	3.2
雪中温度 (°C)	0.1
界面状態	融解
空気膜表面温度 (°C)	5.1
鋼材表面温度 (°C)	4.9
雪の状態に関する計測項目	4回目 (2016/2/17)
含水率 (%) 上層	14.94
含水率 (%) 中層	27.52
含水率 (%) 下層	37.60
含水率 (%) 平均	26.69
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 上側	観測エラー
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 下側	観測エラー
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 平均	観測エラー
積雪重量 (kg)	観測エラー
落雪状況に関する計測項目	4回目 (2016/2/17)
落雪時間 (sec) No.1	4
落雪時間 (sec) No.2	4
落雪時間 (sec) No.3	3
落雪時間 (sec) No.4	4
落雪時間 (sec) No.5	3
落雪時間 (sec) 平均	3.6
落雪率 (%) No.1	97.69
落雪率 (%) No.2	99.53
落雪率 (%) No.3	92.51
落雪率 (%) No.4	97.19
落雪率 (%) No.5	100.00
落雪率 (%) 平均	97.38

(6) 落雪試験 (2016年3月1日)

図58および図59は2016年3月1日に行われた落雪試験の様子 (No.4および5部材) を示す。

a. No.4 部材



0 秒後



0.5 秒後



1 秒後



1.5 秒後



2 秒後



2.5 秒後



3 秒後



4 秒後

図 58 落雪状況 (2016/3/1-No. 4)

b. No.5 部材



0 秒後



0.5 秒後



1 秒後



1.5 秒後



2 秒後



2.5 秒後



3 秒後



4 秒後

図 59 落雪状況 (2016/3/1-No. 5)

表 17 実験結果一覧 (2016/3/1)

気象に関する計測項目	5回目 (2016/3/1)
天候	くもり
気温 (°C)	2.2
降雪量 (cm)	16.3
空気膜の状態に関する計測項目	5回目 (2016/3/1)
雪表面温度 (°C)	1.2
雪中温度 (°C)	0.1
界面状態	凍着
空気膜表面温度 (°C)	4.7
鋼材表面温度 (°C)	2.5
雪の状態に関する計測項目	5回目 (2016/3/1)
含水率 (%) 上層	22.77
含水率 (%) 中層	20.34
含水率 (%) 下層	40.15
含水率 (%) 平均	27.75
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 上側	観測エラー
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 下側	観測エラー
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 平均	観測エラー
積雪重量 (kg)	観測エラー
落雪状況に関する計測項目	5回目 (2016/3/1)
落雪時間 (sec) No.1	5
落雪時間 (sec) No.2	4
落雪時間 (sec) No.3	4
落雪時間 (sec) No.4	3
落雪時間 (sec) No.5	3
落雪時間 (sec) 平均	3.8
落雪率 (%) No.1	97.76
落雪率 (%) No.2	97.32
落雪率 (%) No.3	99.80
落雪率 (%) No.4	97.77
落雪率 (%) No.5	100.00
落雪率 (%) 平均	98.53

(7) 落雪試験まとめ (2016年1月15日～2016年3月1日)

平成27年度は近年稀に見る少雪であったことから、試験を十分に行うことが出来なかった。表18に示すように5回実施された試験からいずれの橋梁部材においても10秒以内に95%以上の落雪を確認することができた。また模擬橋梁部材端部の落雪装置が設置されていない箇所および中央部のガゼットプレートで残雪の多くが確認された。

表 18 実験結果まとめ

気象に関する計測項目	平均
天候	くもり～雪
気温 (°C)	3.3
降雪量 (cm)	20.1
空気膜の状態に関する計測項目	平均
雪表面温度 (°C)	2.2
雪中温度 (°C)	0.1
界面状態	-
空気膜表面温度 (°C)	5.4
鋼材表面温度 (°C)	5.1
雪の状態に関する計測項目	平均
含氷率 (%) 上層	16.99
含氷率 (%) 中層	18.95
含氷率 (%) 下層	34.55
含氷率 (%) 平均	23.50
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 上側	114.065
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 下側	208.62
雪密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 平均	161.343
積雪重量 (kg)	10.1
落雪状況に関する計測項目	平均
落雪時間 (sec) No.1	6.0
落雪時間 (sec) No.2	3.8
落雪時間 (sec) No.3	4.2
落雪時間 (sec) No.4	3.2
落雪時間 (sec) No.5	3.0
落雪時間 (sec) 平均	4.1
落雪率 (%) No.1	96.79
落雪率 (%) No.2	97.53
落雪率 (%) No.3	96.22
落雪率 (%) No.4	97.77
落雪率 (%) No.5	100.00
落雪率 (%) 平均	98.54

## 6-3 平成 28 年度野外落雪試験

### 6-3-1 試験概要

野外落雪試験は表 19 に示すように、現地気象の観測、膜処理装置の実験記録、最適運転間隔の検討が行われた。気象観測は平成 27 年度同様に気象ステーションにより観測し、降雪量や装置作動・滑雪の映像記録、その他天候、動作時間、必要動作回数などは、新たにネットワークカメラを導入して、動画や静止画を記録した。これは雪処理装置の自動制御実験では、降雪によって装置が予期せぬタイミングで動作することになるため、動作前に現地に参集して雪質を調査することは事実上困難となる。またそのタイミングは昼夜問わないものとなるため、人手により継続して調査することにも限界があるため、平成28年度は遠方監視を主とした自動運転および参集時の手動運転に切り替えた。なお、雪密度や雪氷含水率の計測は、今年度は注目すべき気象条件(大雪や放射冷却が著しい時など)あるいは(モデル上の)雪処理(システム)の不調が現れた時に、現地計測を行うことにした。

表 19 観測概要一覧

	内容	項目	平成 27 年度	平成 28 年度
モデル橋 および 実験ヤード	現地気象の観測	気温、降水量、湿度	気象ステーション (福井大学)	常時観測
		降雪量	ノギスにて計測	ネットワークカメラ を梁と水平に配置 し積雪を計測
	膜処理装置の実験記録	着雪した雪の雪密度、 雪氷含水率および高さ	現地計測(専用サ ンプラー、雪氷含水 率計およびメジャ ー)による	注目すべき気象 条件あるいは雪処 理の不調が現れ た時に現地計測 をする。
		装置作動・滑雪の映像 記録	ビデオカメラ	ネットワークカメラ で動画配信を主と する。(録画操作: 手動)
	その他天候、動作時 間、必要動作回数など	現場計測による	「動作時間」は上 記映像で確認可 能。「残雪量」は 静止画で確認す る他ないが、斜め からの撮影であり 撮影が困難であ る。	

	内容	項目	平成 27 年度	平成 28 年度
モデル橋 および 実験ヤード	最適運転間隔の検討	最適な運転間隔の調査	最初は短時間で動作させ、積もっていないことが確認できれば間隔を延ばしていくことを想定する。ただし平成 27 年度は条件が整わず調査できず	平成 27 年度同様
	滞留水凍結対策の検討	膜上の滞留水凍結観測および処理実験	必要に応じて、福井大学低温室にて実験を考えていたが、モデル橋では水が溜まる様子は無く、室内実験は行わず	平成 27 年度同様
		上記を踏まえての改良検討	膜材および袋体の改良を検討	平成 27 年度の内容に加えて、制御方法・ブローア一等の改良を検討

なお、平成 28 年度の試験に用いた試験道具や試験項目は平成 27 年度と概ね同様であり、紙面の都合上ここでは割愛する。



## 6-3-2 落雪システムの検討

### (1) 制御方法の検討

表 20 は落雪装置の制御方法案を示す。検討した結果、交通閑散時運転方式では車両通行がないということは期待できず、積雪量観測方式では梁の上に積雪計を設置し維持していくことは極めて困難であること、遠方手動制御方式では監視カメラ映像だけで安全判定してよいのか疑問が残ることを理由に当該橋梁への適用を見送った。なお、通常時はア) 降雪時常時運転方式を、臨時ではオ) 直接手動制御方式を、今後経済面、信頼性や安全面からそれぞれ詳細に検討する。

表 20 制御方法（案）一覧

方式	規制	具体的方法	当否
ア) 降雪時常時運転方式 (自動・シーケンス制御)	交通規制 必要なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・雪が降る度に落とし、雪を積もらせない方式。</li> <li>・運転の開始は降雪センサーでの降雪検知による。</li> <li>・運転開始後はタイマーで一定時間経過後に落雪運転。</li> <li>・運転の停止は、降雪センサーの降雪非検知および一定時間経過を条件とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 制御的には最もシンプルで安心できる。</li> <li>△ 車両に対する交通安全の証明が難しい。</li> <li>× 電気代が嵩むこと。一般の目には無駄で過剰な動作をしているように見える可能性が高い。</li> </ul>
イ) 交通閑散時運転方式 (自動・シーケンス制御)	交通規制 必要なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通量が小さい夜半にタイマーにより落雪運転する（定刻での1日1回の運転）。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ランニングコストが最も廉価。</li> <li>× 国道上であり、閑散時であれば車両通行がないということは期待できない。1日分溜まった雪を車両に落としかねないものであり、それを技術的に回避することも困難。</li> </ul>
ウ) 積雪量観測方式（自動・フィードバック制御）	交通規制 必要なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・膜材上の積雪を観測し、設定した高さ（3cm程度）になる毎に落雪運転。</li> <li>・計器は超音波式積雪計による</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 最適な動作頻度を実現する方式である。</li> <li>○ 設定値により1回の動作で落とす雪の量が定まるため、交通安全上の評価がやり易い。</li> <li>× 梁の上に積雪計を設置し維持していくことは極めて困難。</li> </ul>
エ) 遠方手動制御方式	交通規制 必要なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・監視カメラで梁上の積雪状態を確認し、人間の判断により落雪運転操作。積もらないうちに操作</li> <li>・インターネット上から操作する。</li> <li>・もし雪を貯めすぎた場合はオ) をすればよい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>△ 担当者の技量および責任感への依存度が極めて大きい。</li> <li>× 監視カメラ映像だけで安全判定してよいのか疑問が残る。</li> </ul>
オ) 直接手動制御方式	交通規制 必要なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・片側交互通行規制を取り、或いは除雪車の作業に合わせ、現場で手動操作により除雪する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× 交通規制を要する。</li> <li>× 落雪運転のタイミングが不定期で判断を要するため、作業に遅れてしまう恐れがある。</li> <li>○ 車両には最も安全な方法である。</li> </ul>

(2) 送風方法の検討

図 60 はファン運転フロー図を示す。片吸込形ファンによる運転フローを表したものであり、これは三方弁によって送風と排風を切り替えるものである（図 61 を参照）。また、タイマーの設定時間は想定値となっており、自動制御と手動制御、降雪が多い場合と少ない場合でモードを切り替えることができるものとなっている。片吸込形ファン運転の主な特徴として、風量は大きいが風圧が弱いことが挙げられる。なお、図には示さないが、ボルテックスブロワーを用いた運転も可能であるが、200V 電源を使うなど異なった電力を使うほか、風量は小さくなる（ただし、風圧が強い）などのデメリットを有する。検討した結果、風圧はそれほど強いものは必要なく、風量が大きく、空気膜を早く膨らませられるものが好ましく、商用電源で動作可能なファン運転を採用した。

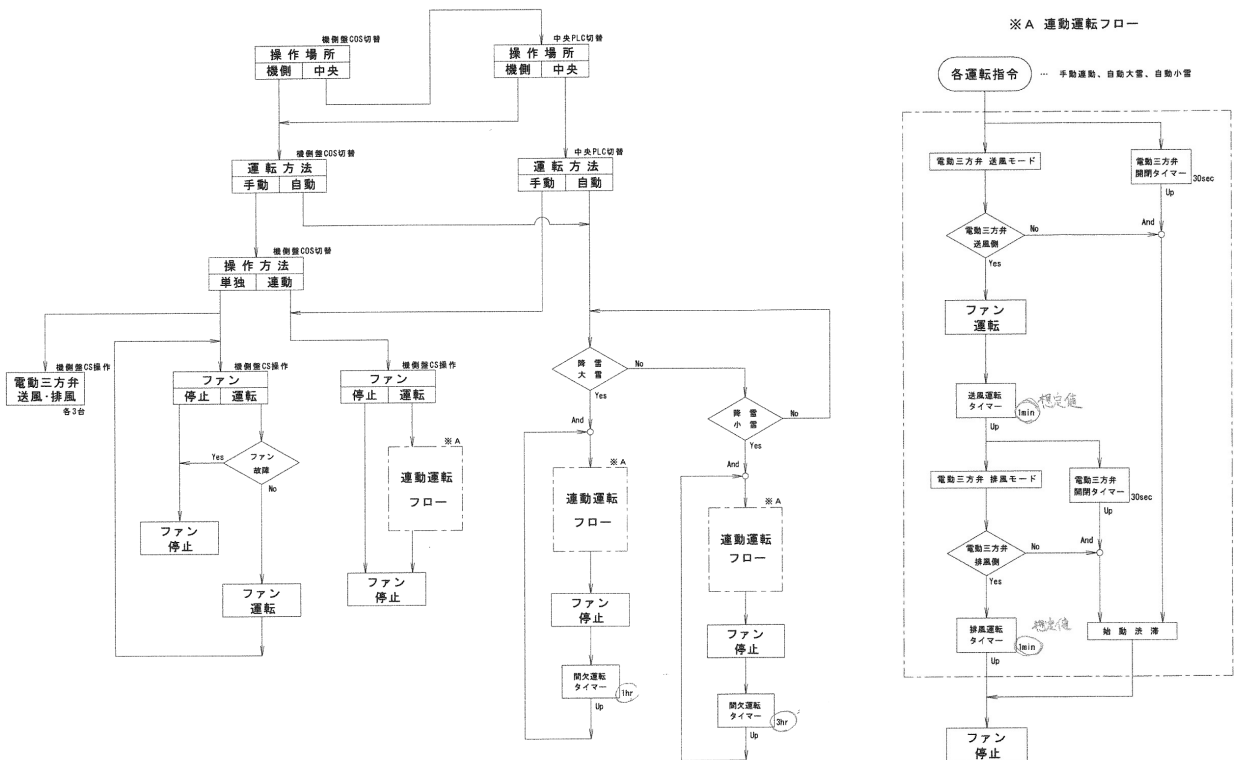


図 60 ファン運転フロー図

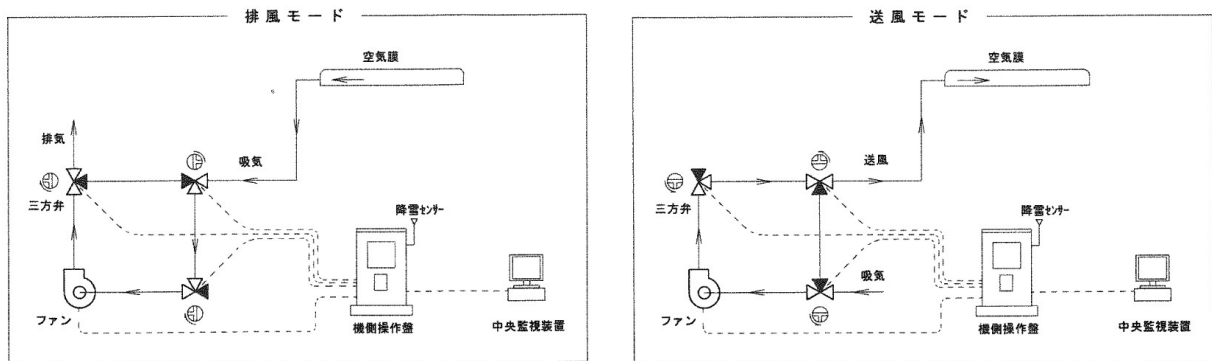


図 61 排風および送風の切り替え運転フロー図



図 62 送風機の配電盤内部

a. 自動運転から手動運転への切り替え

1. 盤内状況の操作前確認

- ①自動手動切り替えスイッチ（写真上段左端）が「自動」になっている。
- ②単独連動切り替えスイッチ（写真上段中央）が「連動」になっている。  
（なっていない場合は「連動」に切り替える）
- ③運転停止スイッチ（写真上段右端）が「運転」になっている。
- ④携帯電話で遠方制御のモードを確認する。

2. 運転停止スイッチを「停止」に切り替える。

3. 自動手動切り替えスイッチを「手動」に切り替える。

4. 運転前の計測を済ませる。

5. 運転停止切り替えスイッチを「運転」に切り替える。自動的に以下の工程が進む。

- ①電動弁の動作。10秒程度。
- ②送風開始（11秒）。表示灯「送風」「ファン運転」が点灯。
- ③電磁弁の動作。10秒程度。
- ④排風開始（8.5秒）。表示灯「排風」「ファン運転」が点灯。

6. 運転停止切り替えスイッチを「停止」に切り替える。

b. 手動運転から自動運転への切り替え

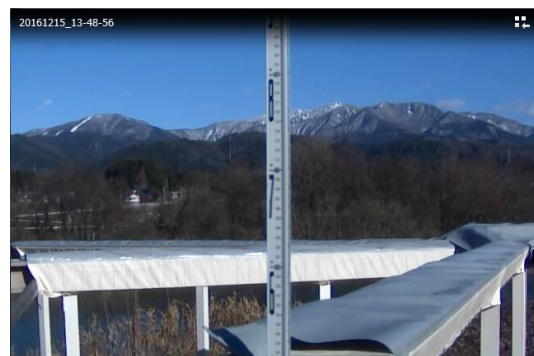
- ①自動手動切り替えスイッチ（写真上段左端）を「自動」にする。
- ②単独連動切り替えスイッチ（写真上段中央）を「連動」を確認する。
- ③運転停止スイッチ（写真上段右端）を「運転」を確認する。

### (3) 送風設備ユニットの検討

送風機は、ターボファン（KT-010S-BH-R）を選定した。ターボファンによる試験装置の膜膨張は図 63 に示す通りであり、十分に膨らんでいるとは言い難かった



a) 0 秒後（送風開始直前）



b) 2 秒後



c) 4 秒後



d) 6 秒後



e) 8 秒後



f) 10 秒後



g) 12 秒後



※ 最大限に膨らんだ場合

図 63 ターボファンによる膜膨張

そこで送風機を再選定した結果、図 64 および図 65 に示すような性能を有するブロアー（VB-001S-E）を導入し、後述する落雪実験を行った。なお、ブロアーの送風量は  $0.35\text{m}^3/\text{min}$  であり、送風時の圧力は  $4.0\text{kPa}$ （全閉状態時： $6.7\text{kPa}$ ）である。



図 64 送風設備配管外観（VB-001S-E）

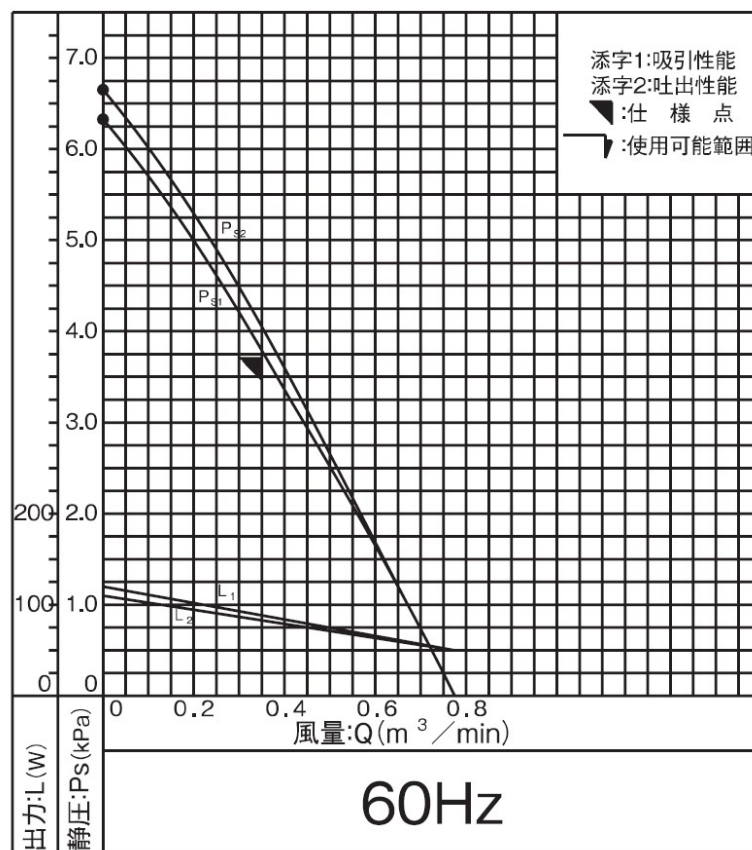


図 65 送風機の性能曲線（VB-001S-E）

図 66 はブロアーの送風設備配管ユニットの平面図および各矢視図を示す。また図 67 はブロアーの送風設後の各装置の膨張の様子を示す。同図に示すように、概ね設計通りに膨張していることが分かる。なお、過剰な加圧の防止策として、圧力逃し配管および圧力ゲージも設置した。なお、タイマーの設定値は現地で調整しながら、過剰圧力がかからぬよう、設定した。

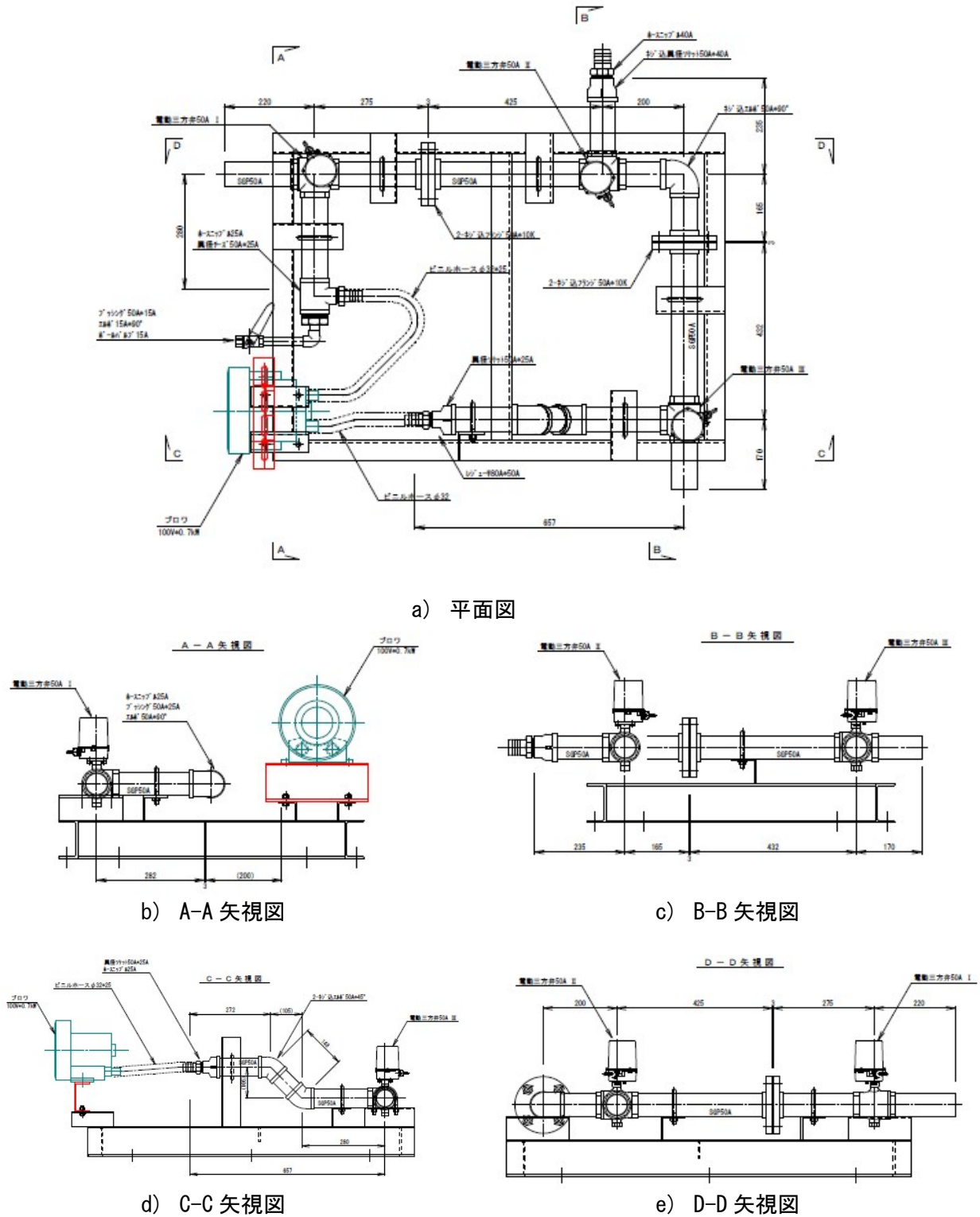
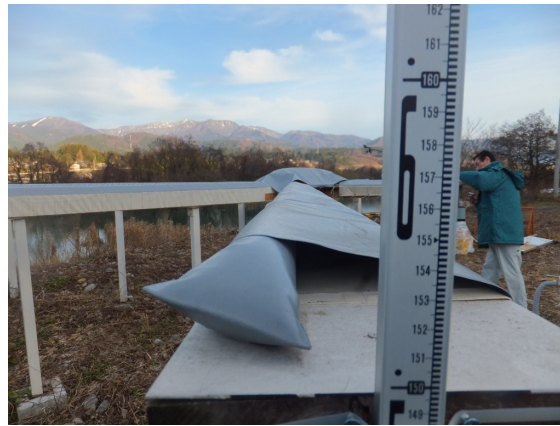


図 66 送風設備配管ユニット図 (ブロアー-VB-001S-E)



No. 1



No. 2



No. 3



No. 4

図 67 ブロアー (VB-001S-E) 送風後の膜膨張の様子 (ライズ 40mm)

#### (4) 中央部の落雪処理の検討

ガセットプレート部は図 68 に示すように残雪しやすい。そこで、図 69 に示すようなチューブタイプの装置を検討した。ガセットプレート部上膜の固定は、膜の膨らみに追従する納まりとしなければ排気時にきれいに萎まなくなるため、分岐する上弦材の膜装置に覆われる納まりとする（図 70 を参照）。なお、各膜袋（チューブ）への給排気はガセットプレート部を拠点として行われるものとする。



図 68 中央部の残雪状況

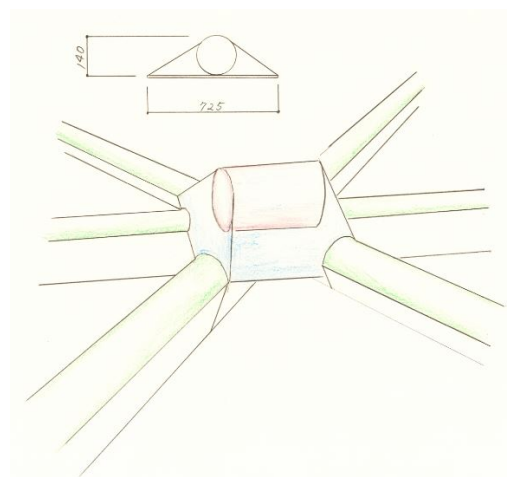


図 69 中央部の落雪装置の概略



図 70 中央部の落雪装置外観



図 71 および図 72 は中央部の落雪装置の内部および配管の様子を示す。なお、後述するように中央部では膜の収縮により水が滞留しやすく、それが氷となって落下することを防ぐために図 73 に示すように収縮時においても水が溜まりにくいように板を設置し、その上部でチューブを膨らませる。

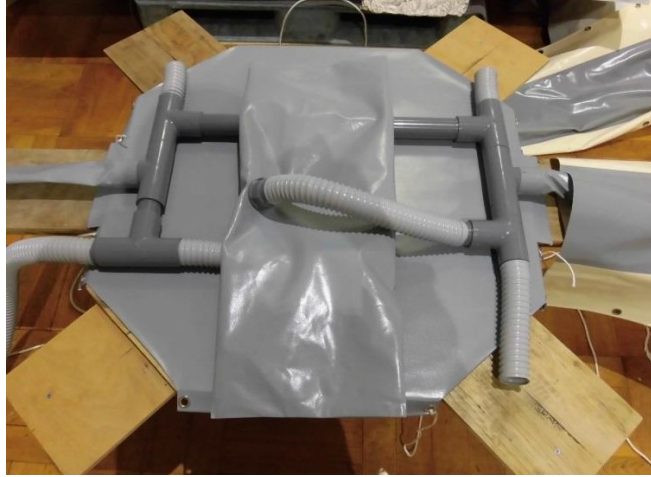


図 71 中央部の落雪装置の配管

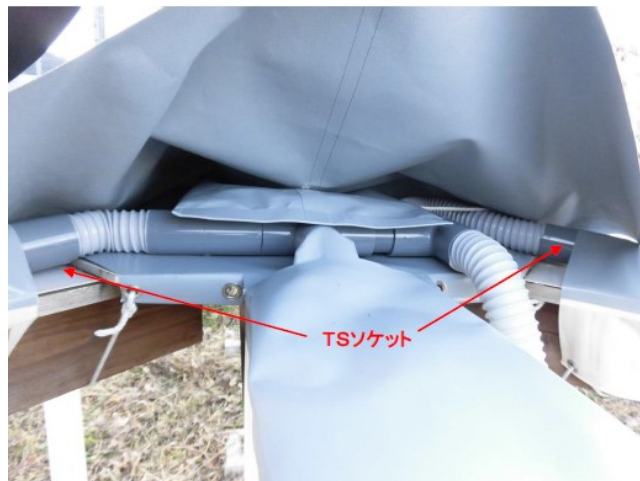


図 72 中央部の落雪装置内部の様子



図 73 改良した中央部の落雪装置内部（コの字配管+板）

## (5) 制御の検討

表 21 は制御の設定を示しており本試験期間中、制御変更を行った。変更前は 30 分を下回る短時間の降雪は検知せず、省電力化であるが、膜材上に数 cm の積雪が観測されたため、変更に至った。また、膜が膨らみ切らないうちに送風が終わってしまっている可能性があるため、送風運転時間を 8.5 秒から 11 秒に延長させた。これより、降雪があれば 30 分後には必ず 1 回は動作するように再設定した。

なお、後述するようにライズの変更や落雪性能を調べるために、送風時間や排風時間を表 22 に示すように変更した。2 月 9 日より、降雪があれば 30 分後には必ず 3 回は送風・排風するように設定したが、過電流による温度上昇により、送風機の動作が一時的に中断した。これは吸気時にチューブ内の空気が排風され、結果、大きな負圧になったためだと考えられる。それゆえ、2 月 10 日より、排風時間間隔を 8.5 秒から 5 秒に変更した。

表 21 制御変更

	変更前	変更後	再変更後
対象期間	2015 年 12 月 16 日～	2016 年 1 月 12 日～	2017 年 2 月 9 日～
降雪検知信号の維持タイマー (スノーアイコントロールボックスのタイマー)	10 分	30 分	30 分
積雪待機タイマー	30 分	30 分	30 分
送風運転タイマー	8.5 秒	11 秒	5 秒
作動の特徴	30 分を下回る短時間の降雪は検知しない	降雪があれば 30 分後には必ず 1 回は送風・排風する	降雪があれば 30 分後には必ず 3 回は送風・排風する

表 22 送風および排風時間の記録一覧

	送風時間間隔	排風時間間隔
2016 年 12 月 8 日	15 秒	15 秒
2016 年 12 月 22 日	15 秒→8.5 秒	15 秒→8.5 秒
2017 年 1 月 12 日	8.5 秒→11 秒	
2017 年 2 月 2 日	8.5 秒→20 秒	
2017 年 2 月 10 日		8.5 秒→5 秒
2017 年 2 月 14 日	20 秒→15 秒	
2017 年 2 月 21 日	15 秒→10 秒	

## (6) 膜形状の検討

チューブイン方式（二重膜構造）の採用を前提として考えたが、チューブ位置は図 74 のように偏心タイプや中央タイプが考えられる。平成 27 年度の試験結果（ライズ 70mm）では落雪性能に両者違いはなかった。いずれのタイプでも内袋（チューブ）は内部で固定させるために溶着させる必要がある。両者に性能に違いがないとすれば、極力省略化（コスト縮減の観点）するために偏心タイプ、中央タイプに加えて、チューブを溶着しないフリータイプも検討した。（図 7 4 参照）

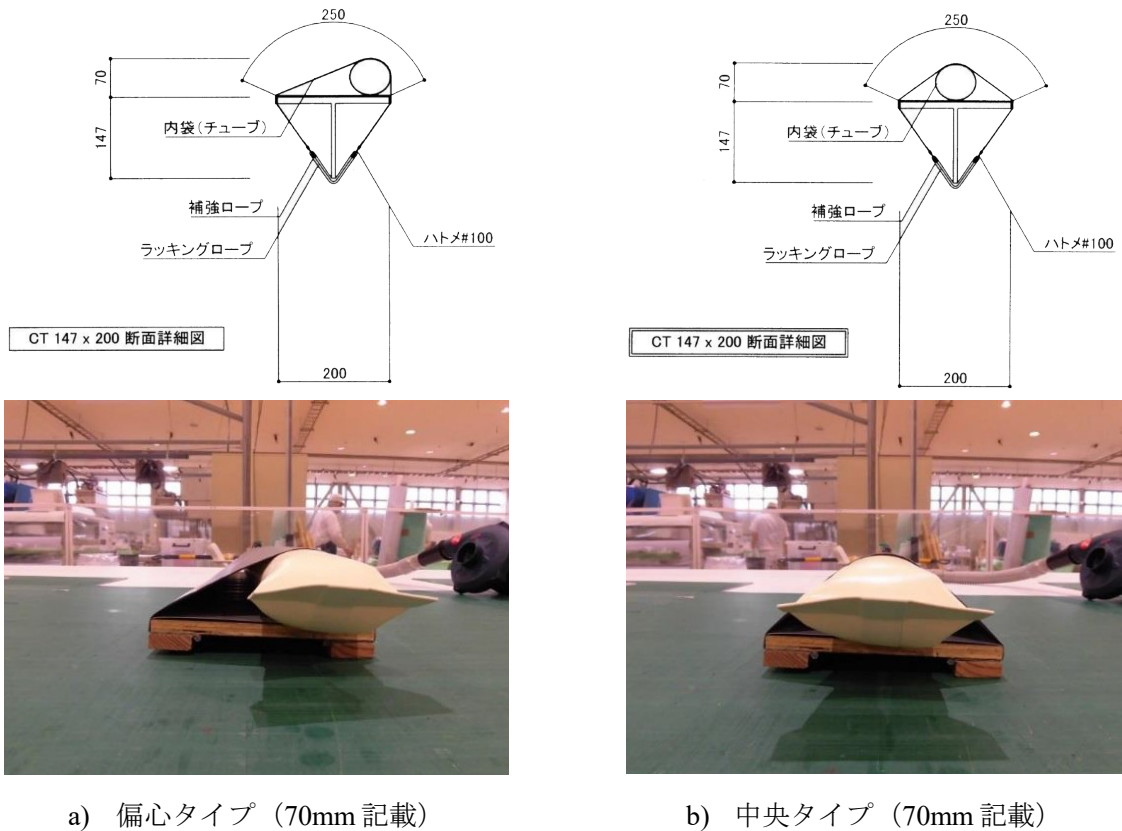


図 74 チューブ構造の偏心タイプおよび中央タイプ

## (7) ライズの検討

### a. ライズ 50mm

平成 27 年度には図 75 に示すように、ライズやチューブ位置を変更させて検討を行った。平成 28 年度には膜への給排気効率点や対候性の改良や維持管理が容易になることから、図 76 および図 77 に示すチューブイン方式（二重膜構造）を採用する。なお、ライズ（膜の膨らみ高さ）は昨年度と同様に 70mm とし、テント倉庫における落雪屋根の勾配（4/10）に基づいて設定した。ただし、平成 27 年度の試験結果および膜形状から、ライズ 50mm でも処理できているので、コスト削減の観点からライズを 50mm に設定した。

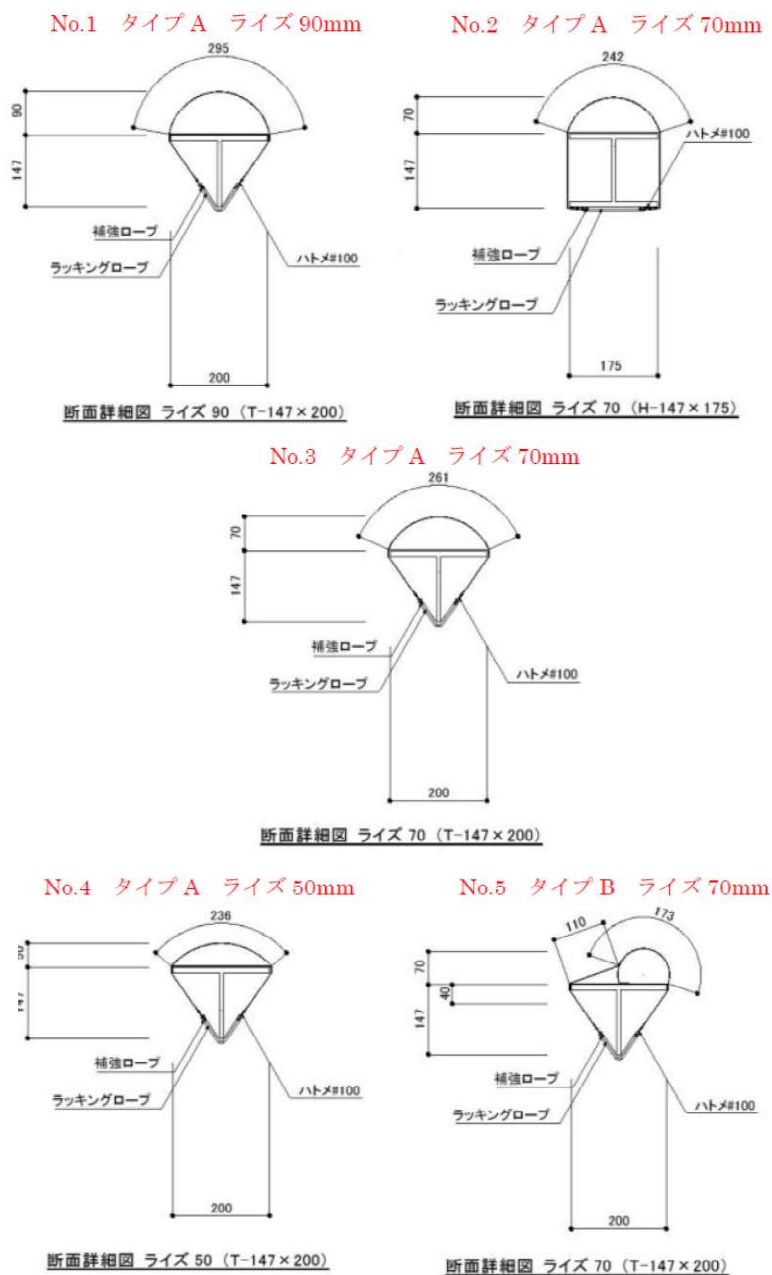
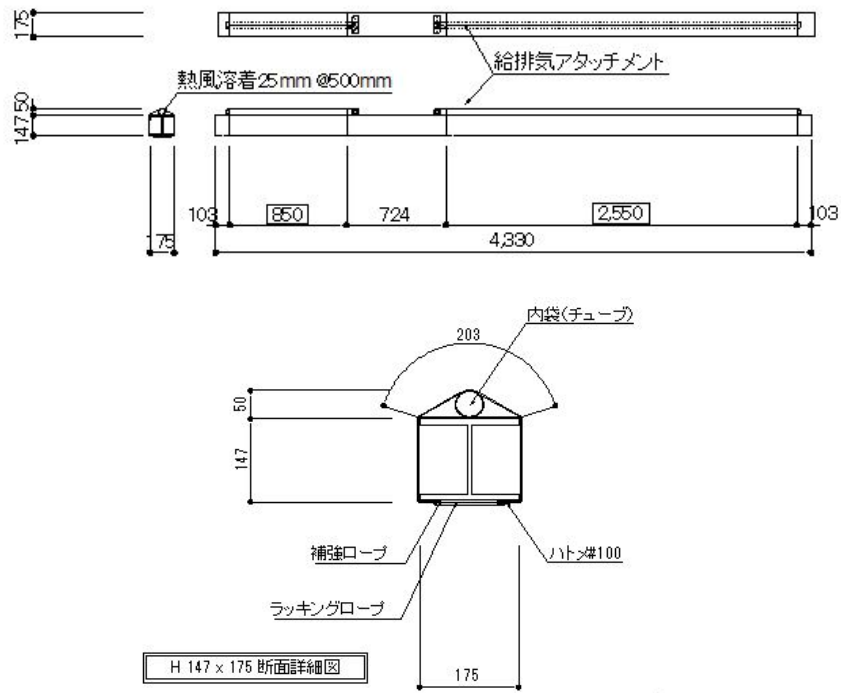


図 75 膜形状一覧（平成 27 年度）

1-H 350 x 175 x 7 x 11 x 4330



2-CT 147 x 200 x 8 x 12 x 4000  
2-CT 147 x 200 x 8 x 12 x 1600

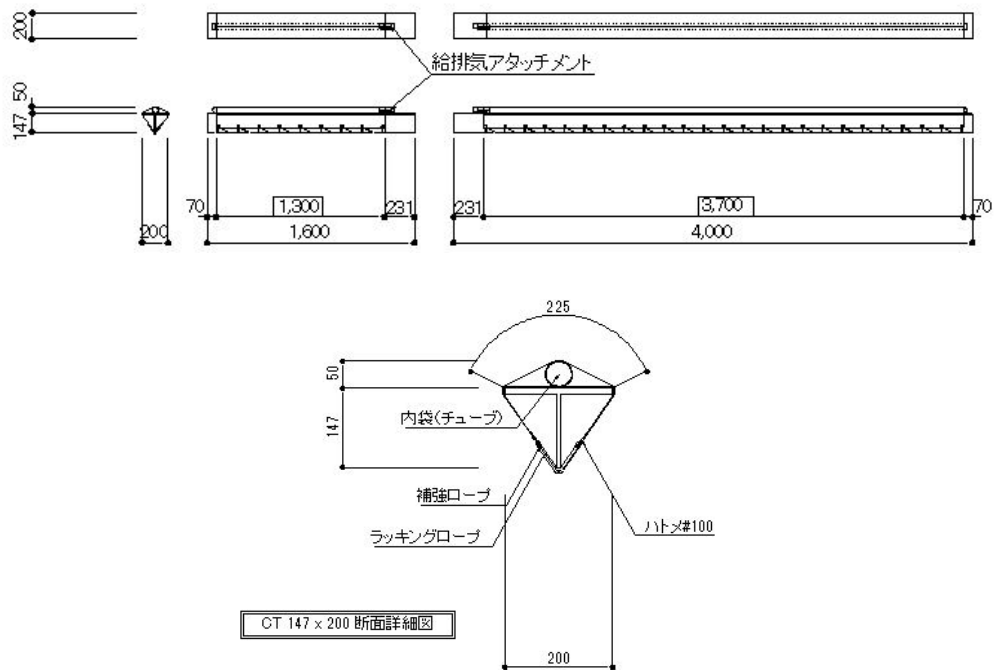
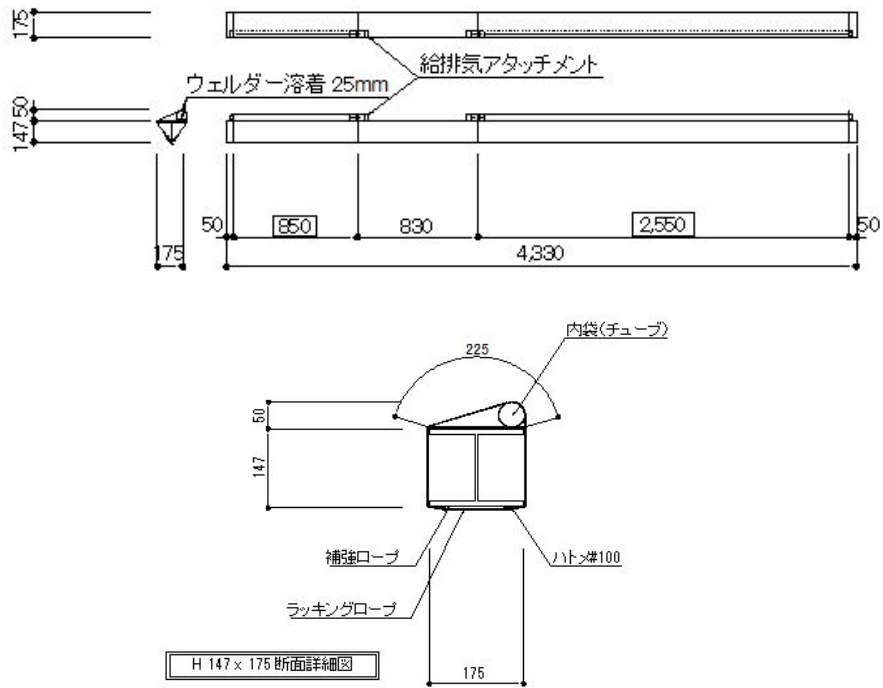


図 76 チューブ構造空気膜式雪処理装置① (中央タイプ : ライズ 50mm)

1-H 147 x 175 x 7 x 11 x 4330



2-CT 147 x 200 x 8 x 12 x 4000  
2-CT 147 x 200 x 8 x 12 x 1600

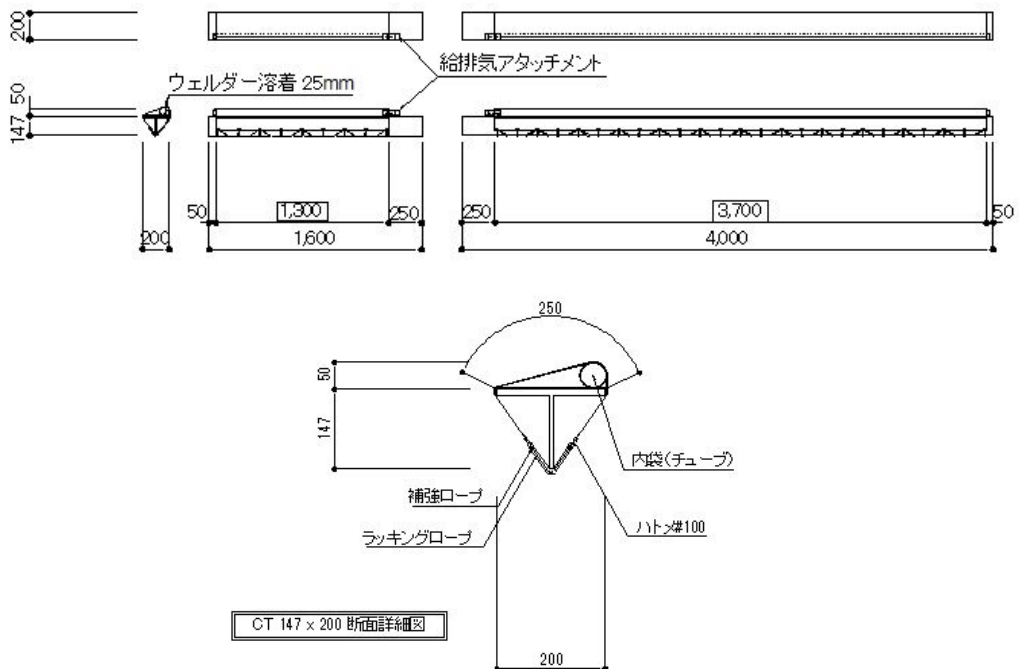


図 77 チューブ構造空気膜式雪処理装置 (偏心タイプ : ライズ 50mm)

なお設計上は 50mm としたが、実際のライズを図 78 および図 79 に示すように調べた結果、製作・施工上の問題で約 40mm となった（表 23 を参照）。



図 78 ライズ検証実験の様子

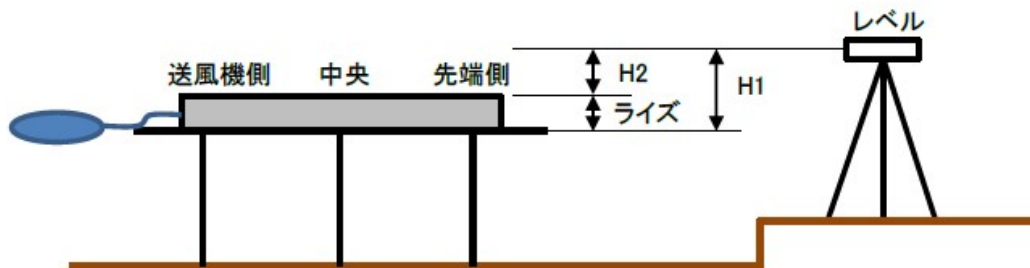


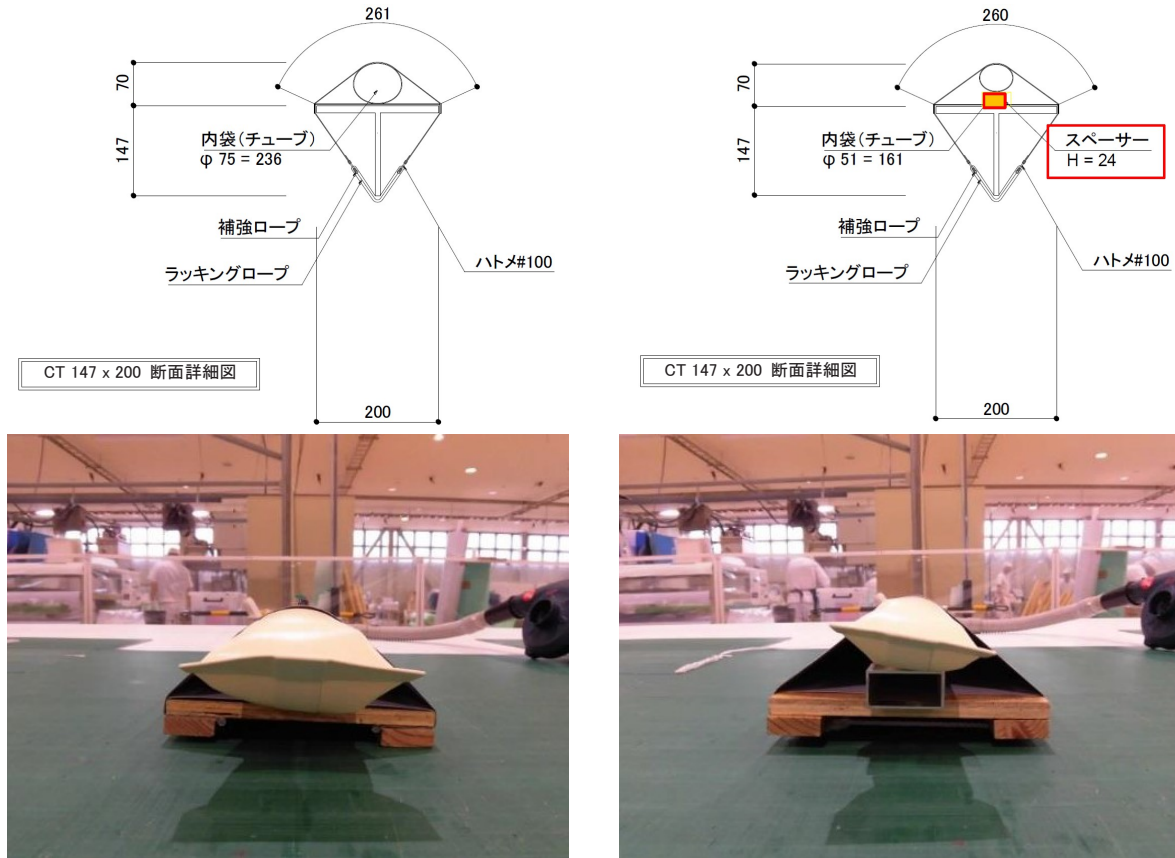
図 79 ライズ検証実験概要

表 23 ライズ検証結果一覧

単位:mm

上弦材	測定位置	停止時(H1)	給排気装置(福日機電株)		ブロワ(RYOBI)	
			膨張完了時(H2)	ライズ	膨張完了時(H2)	ライズ
No.1	先端側	408	366	42	365	43
	中央	411	373	38	372	39
	送風機側	419	379	40	377	42
No.2	先端側	417	379	38	379	38
	中央	420	382	38	382	38
	送風機側	422	380	42	379	43
No.3	先端側	416	384	32	381	35
	中央	420	377	43	374	46
	送風機側	424	381	43	382	42
No.4	中央	422	382	40	381	41
No.5	中央	418	374	44	372	46
No.6	中央	420	377	43	377	43
G.PL	中央	415	234	181	232	183

b. ライズ 70mm



a) ライズ 70mm

b) ライズ 70mm+スペーサー

図 80 ライズ改良後の膜処理装置平面図



a) ライズ 70mm

b) ライズ 70mm+スペーサー

図 81 ライズ改良後の膜処理装置の実際の様子

後述するように残雪量を減少させるために設定ライズを設定 50mm から 70mm に変更した (pp.80-82 を参照)。図 80 はライズ改良後の膜処理装置平面図を示す。両者の違いはチューブ下部におけるスペーサーの有無である。スペーサーを設けることでチューブの容積を削減でき、また膜袋の膨張および収縮時ではその形状が異なる。なお、加工誤差や取付け時に生じる施工誤差



がライズに大きな影響を与えるため、裁断寸法は上膜がライズ 70mm+10mm の 80mm で算出した。なお、チューブは直径 80mm としないで 75mm とした。その理由は、完全な円形では「上膜」を張る力が弱いこと、および 80mm にすると楕円の形状から中央部の勾配が緩くなる範囲が大きくなることである。図 81 はライズ改良後の膜処理装置の実際の様子を示す。これにより、見かけ上ライズを大きくすることが可能である。

### 6-3-3 試験装置概要

#### (1) 変更前 (2016年12月8日~2017年2月9日)

上記の検討を行った結果、図 82 に示すような配置で実験を行った。なお、表 24 は各梁における試験装置のチューブタイプを示す。

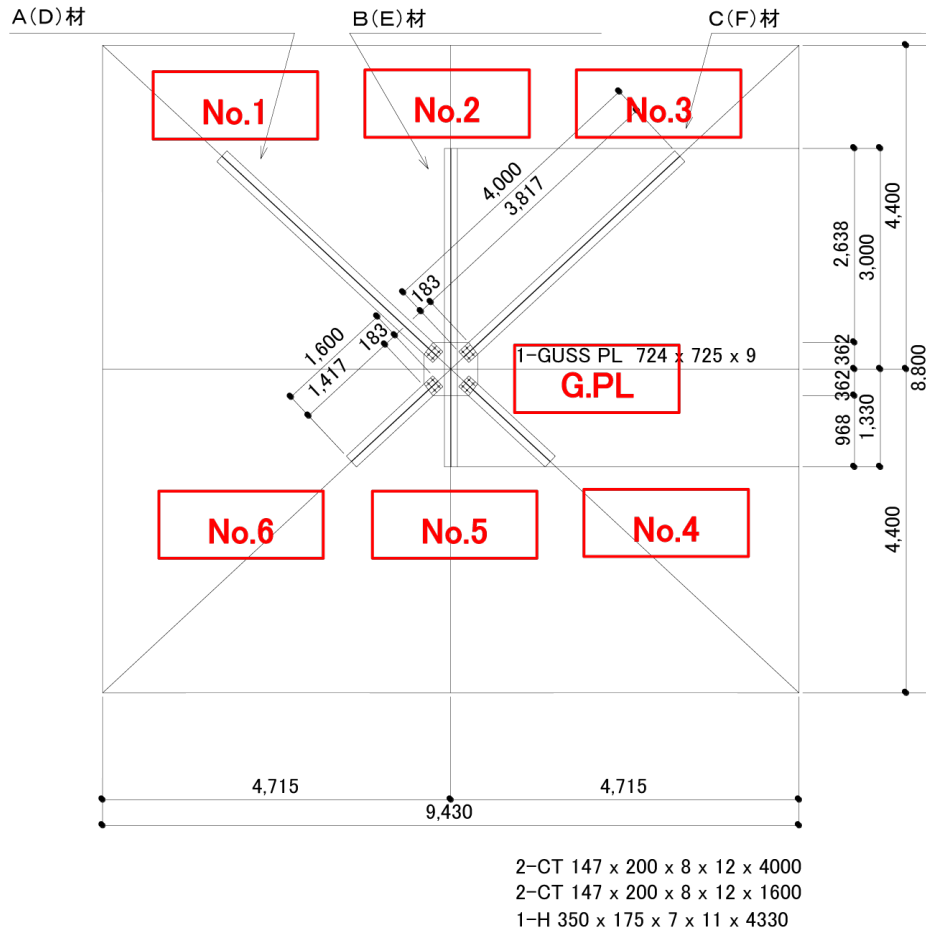


図 82 変更前の試験装置の配置図

表 24 試験装置概略 (変更前)

No	仕様	チューブ位置
No.1	CT147×200×8×12×4000	偏心タイプ
No.2	H147×175×7×11×4330	フリータイプ
No.3	CT147×200×8×12×4000	中央タイプ
No.4	CT147×200×8×12×1600	中央タイプ
No.5	No.2 と同じ	フリータイプ
No.6	CT147×200×8×12×1600	偏心タイプ

(2) 変更後 (2017年2月9日~2017年3月15日)

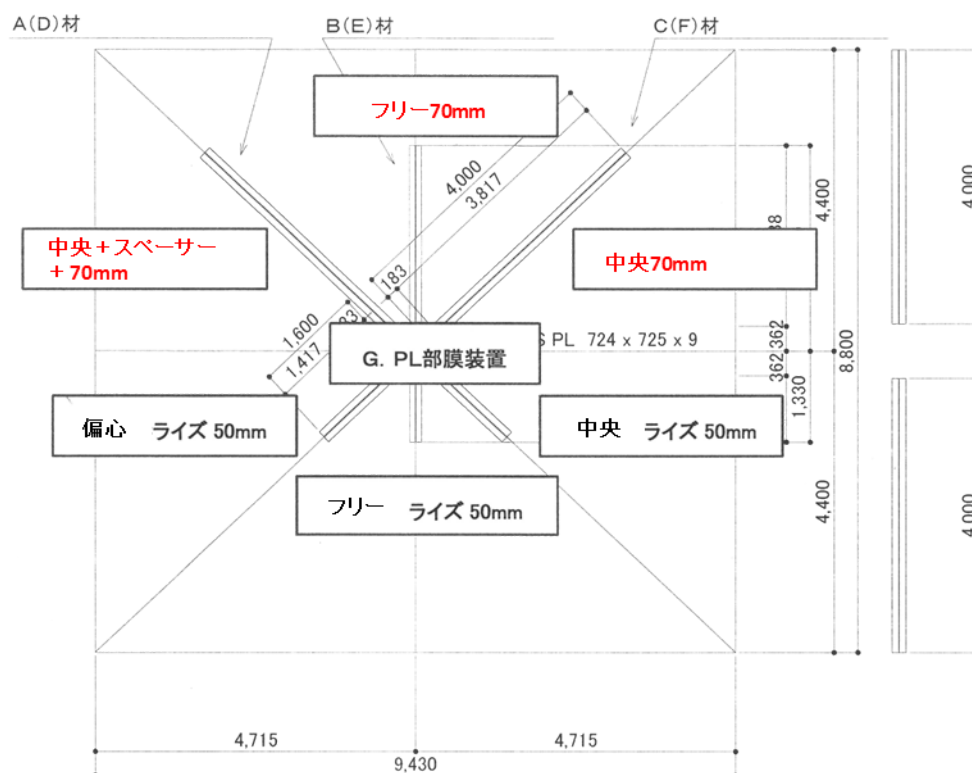


図 83 変更後の試験装置の配置図

後述するようにライズ 40mm では想定していた落雪が生じなかったため、図 83 に示すような配置で実験を再開した。

## 6-4 平成 28 年度野外落雪試験結果

### (1) 2016 年 12 月 28 日+遠方自動運転+梁部+ライズ 40mm+偏心タイプ+制御変更前

図 84 は 12 月 28 日に自動運転を記録した際のライズ 40mm による偏心タイプの膜膨張の様子を示す。同図から雪密度の低い新雪では膜変形に伴い膜上の雪塊も追隨して変形してしまうため、落雪しがたいことが分かる。また膜が十分に膨らんでおらず、制御の変更が必要である。

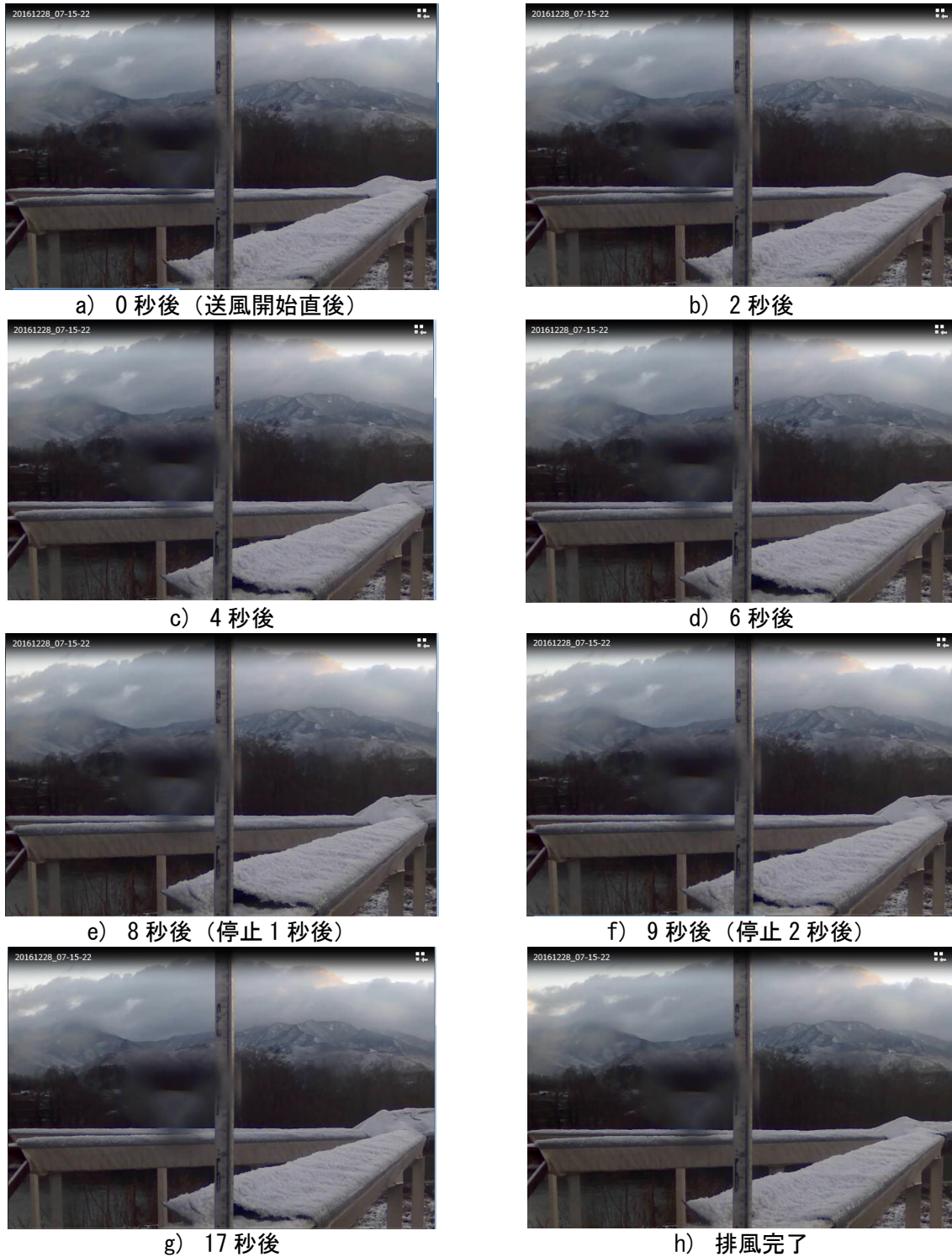


図 84 ライズ 40mm による膜膨張の様子(偏心タイプ)

雪密度が軽い場合、たとえ積雪深が大きくても落雪しがたいことが報告されている。例えば、福井大学が2012年に実施した屋根雪処理装置の実験でも同様の結果が得られている（図85を参照）。なお、福井大学の実験によれば、図85に示す屋根上の雪は翌日落雪することができたことを確認している。



※福井大学提供

図85 雪密度の軽い新雪時の屋根雪落雪試験（2012年）

すなわち、膜材と雪塊の海面が十分に凍結しておらず、自重が軽い雪塊は先述の落雪抵抗である摩擦力により膜上に留まる。これらの新雪を落雪させるためには、

- ① 摩擦力の小さい、例えば、撥水加工を施した膜材を使用する
- ② 送風時間などの送風に関する設定を見直す
- ③ 膜変形の大きな形状に変更する（ライズの変更）

などが考えられるが、前者は5-2-2で述べたようにコスト面から難しいと判断される。本研究では②および③を検討した。

(2) 2017年1月13日+遠方手動運転(2回)+全景(ライズ40mm)+制御変更後



図 86 遠方手動で2回動作後の落雪の様子(2017年1月13日)

図 86 は1月13日の遠方手動で2回動作した後の落雪の様子を示す。なお、本試験では雪荷重で送風量が低下することが分かったため、表 21 に示すように降雪検知信号の維持タイマー(スノーアイコントロールボックスのタイマー)、積雪待機タイマーおよび送風運転タイマーの設定を変更した。

同図より、No.2とNo.3(中央およびフリータイプ)は梁部を含め、中央部のガセットプレート上の一部の雪塊も概ね落雪しているように見える。一方、No.1の偏心タイプでは殆ど落雪していないことが分かる。また梁No.4,5に関して3分の1の範囲で雪が残っていることが分かる。画像から判断すると、ライズが小さく、先述の落雪メカニズムの円弧状の膜変形が生じず、勾配のみ変化したことで凍着力の解放や滑雪抵抗力(摩擦力)が働いていたことに起因すると推察される。また梁部と中央部は連結しているために、仮に梁部の膜上の雪塊の凍着力が解消されていたとしても、中央部で残雪していれば、雪の粘着力が働いて落雪しがたいことも考えられる。

(3) 2017年2月3日+現地手動運転(3回)+全景(ライズ40mm)+制御変更後

図 87 は2月3日の手動による落雪試験の様子を示す。図 86 と異なり、フリータイプでも端部で残雪している事が分かる(図中の赤丸)。これはチューブを固定していないことにより、吸気-排気の繰り返しにともない、チューブが偏ったためだと考えられる。なお、偏心タイプでは他のフリータイプや中央タイプに比べて、膜の変形が少なく、落雪し難いことが再確認された。

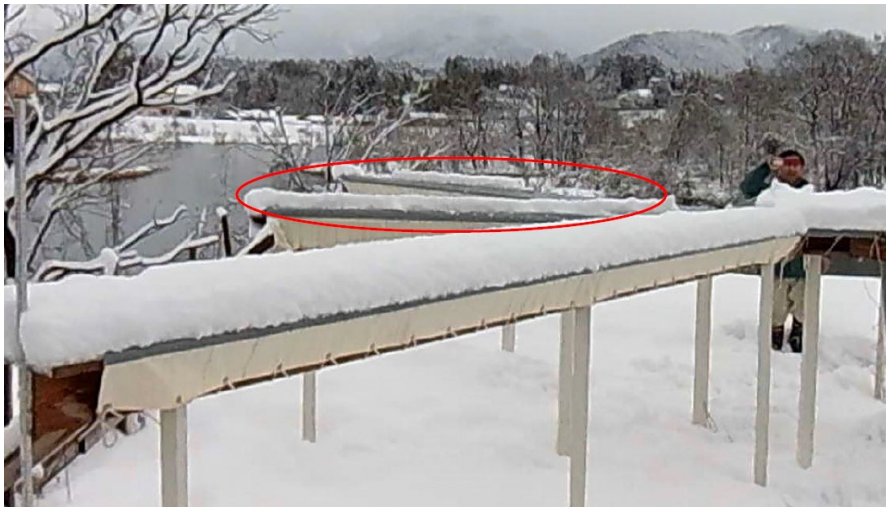


図 87 現地手動運転による落雪試験の様子 (2017 年 2 月 3 日)

平成 28 年度の膜装置において梁上部以外は昨年度のものを流用している。膜の汚れから撥水効果が失われ、側面での着雪が生じている。また、**図 88** に示すようにガセットプレート取り付け部でつららが大きく成長し易くなっており、固定に紐を使用しているためこの部分でもつららが生じている。膜装置を取付けることによって生じる問題についても注視していかなくてはならない。



**図 88** 落雪試験前の様子（2017 年 2 月 2 日）



(4) 2017年2月10日 09:00+遠方手動運転+全景（ライズ 70mm）+制御再変更後

図 89 は 1 月 13 日の遠方手動運転により動作した前後（9:00 および 9:15）の落雪の様子を示す。まず、始めに落雪が生じたのは No.3 の梁部であり、先端部から落雪が生じている。次に、No.2 の梁部で落雪が生じ、No.1 へと連鎖して落雪が生じている（図 90 を参照）。中央部は梁部での落雪に追随するように落雪が生じたが、十分に落雪しているとは言い難い。なお、ライズ 70mm 変更および制御再変更直後の落雪試験では短い梁部と中央部を除けば、約 15 秒後に落雪が完了した。図には示さないが、吸気および排気を繰り返しても、9:15 時点では中央部の落雪は生じなかった。中央ガセットプレート部においてはチューブの直径を大きくし、膜の変形を大きくするなどの工夫を施す必要がある。装置の形状、梁部との連結を含めて、中央部は今後の課題としたい。

【No.1~3 全て落雪（ほぼ 1 回目で落雪）、No.4~6 落雪なし、中央ガセット一部落雪】



送風直前（0 秒）



送風 5 秒後

図 89 遠方手動運転による落雪試験の様子（2017年2月10日 9:00 頃）



送風 6 秒後



送風 8 秒後



送風 9 秒後

図 89 遠方手動運転による落雪試験の様子 (2017 年 2 月 10 日 9:00 頃)



送風 9.5 秒後



送風 13 秒後



送風 15 秒後

図 89 遠方手動運転による落雪試験の様子 (2017 年 2 月 10 日 9:00 頃)



送風直前 (0 秒)



送風直前 (9 秒)



送風直前 (12 秒)

図 90 遠方手動運転による No.1 梁部の落雪の様子 (2017 年 2 月 10 日 9:00 頃)

(5) 2017年2月10日 11:00+手動連続運転+全景(ライズ70mm)+制御再変更後

図91は遠方自動運転による落雪後(11:00)の様子を示す。9:15以降に送風排風を53秒周期(送風20秒、排風8秒)で繰り返し作動させた結果、図91に示すように短い梁部の落雪が生じ、中央部のみ残雪が生じた。膜上の雪塊が融解し、滑雪しやすい状態となっていたにもかかわらず、中央部の雪が残っている。膜が十分に膨らみきらず、吸気後も膜のしわに雪塊が引っかかることから、装置の更なる改良が必要である。【No.4~6全て落雪、中央ガセット一部落雪】



No.1 正面



No.2 正面



No.3 正面



No.3~No.4 間



No.5~No.6 間



No.5 正面

図91 遠方自動運転による落雪試験の様子(2017年2月10日 11:00頃)

(6) 2017年2月10日 23:19+遠方自動運転+全景（ライズ 70mm）+制御再変更後

図 92 は 2 月 10 日 23:19 の遠方自動運転による落雪の様子を示す。数 cm の積雪に対して、1 回目の送風排風で 90%以上を、2 回目の送風排風でほぼ全ての膜上の雪が滑落した。画像で見る限りは、1 回目の落雪でほぼ全ての雪塊と膜が剥離を起こしていることが分かる。



1 回目膨張前（全景）



1 回目膨張前（No. 1）



1 回目膨張中（全景）



1 回目膨張中（No. 1）



2 回目膨張後（全景）



2 回目膨張後（No. 1）

図 92 遠方自動運転による落雪試験の様子（2017年2月10日 23:19）

(7) 2017年2月11日0:00および09:00+遠方自動運転+全景(ライズ70mm)+制御再変更後

図93は2017年2月11日0:00頃の遠方自動運転による落雪試験の様子を示す。深夜0:00から夜中から未明まで図のように降雪があり、落雪を繰り返しており、中央部を除けば、膜上には積雪していないことが分かる。

図94は2017年2月11日9:30頃の遠方自動運転による落雪試験の様子を示す。部分的落雪が生じており、上弦材No.3(スペーサ無し)の方が落雪しやすいように見える。これはスペーサがない方がより大きな膜の変形が生じ、接触面積がより減少し、凍着力が解消されたためと考えられる。



2017年2月11日0:00



2017年2月11日0:15

図93 2017年2月11日の落雪試験の様子(0:00頃)



2017年2月11日9:30



2017年2月11日9:15

図94 2017年2月11日の落雪試験の様子(9:00頃)

(8) 2017年2月12日 15:25+遠方手動運転+全景（ライズ 70mm）+制御再変更後

図 95 は 2 月 12 日の遠方手動運転による落雪の様子を示す。送風排風回数は 3 回であり、No.1～5 は全て落雪し、No.6（ライズ 40 mm の偏心タイプ）のみ半分程度残雪した。No.6 ではひび割れはなく、全体を持ち上げるだけで、落雪は生じがたく、No.3～4 の間も一部残雪した。なお、雪を取り除いてみると、膜の裾野の張りが弱く、これらに原因があるように思われる。中央部の残雪に関して、短い上弦材の雪塊が落雪していないことも要因の一つだと考えられる。



図 95 遠方手動運転による落雪試験の様子（2017年2月12日 15:25）



(9) 2017年2月13日 21:05+遠方自動運転+全景 (ライズ 70mm) +制御再変更後

図 96 は 2 月 13 日の遠方自動運転による落雪の様子を示す。1cm 未満の積雪に対して、送風排風を 3 回実施して、落雪を試みたが十分に落雪しなかった。これは先述のように雪密度が小さく、雪塊が膜材の変形に追従したため、凍着剥離が生じたためだと推察される。



膨張前 (全景)



膨張前 (No. 1)



膨張後 (全景)

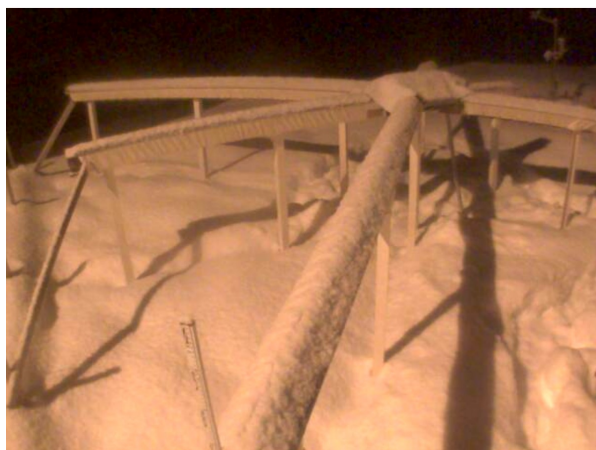


膨張後 (No. 1)

図 96 遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年2月13日 21:05)

(10) 2017年2月14日 20:59+遠方自動運転+全景（ライズ 70mm）+制御再変更後

図 97 は 2 月 14 日の遠方自動運転による落雪の様子を示す。1cm 程度の積雪に対して、送風排風を 3 回実施して、落雪を試みたが十分に落雪しなかった。これは前日の実験と同様の結果であり、その理由も同じだと推察される。



膨張前（全景）



膨張前（No. 1）



膨張後（全景）



膨張後（No. 1）

図 97 遠方自動運転による落雪試験の様子（2017年2月14日 20:59）

(11) 2017年2月21日 0:47+遠方自動運転+全景 (ライズ 70mm) +制御再変更後

図 98 は 2 月 14 日の遠方自動運転による落雪の様子を示す。1cm 程度の積雪に対して、送風排風を 3 回実施して、落雪を試みたが前日の実験と同様に落雪しなかった。



膨張前 (全景)



膨張前 (No. 1)



膨張後 (全景)



膨張後 (No. 1)

図 98 遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年2月21日 00:47)

(12) 2017年2月21日 10:39+遠方自動運転+全景（ライズ 70mm）+制御再変更後

図 99 は2月21日の遠方自動運転による No.1 部材の落雪の様子を示す。1cm 程度の積雪に対して、送風開始から約 8 秒後から落雪し始め、送風開始から約 12 秒後（排風 1 回目）には概ね全ての膜上の雪が落雪した。その後、1 回目では中央部のガセットプレート上に残雪しているが、雪塊は膜から剥離していることが見て取れる。さらに 2 回目の送風および排風動作で中央部のガセットプレート上の雪塊も落雪した。図 100 は2月21日の遠方自動運転による落雪試験（全景）の様子を示す。なお、写真を見る限りでは、雪塊と膜は凍結状態ではなく、融解状態であったと思われる。ゆえに、平成 27 年度と同様に、日中の融解しやすい状態では落雪が促進されることが分かった。



00 秒後



08 秒後

図 99 遠方自動運転による落雪試験 (No. 1) の様子 (2017 年 2 月 21 日 10:39)



09 秒後



12 秒後



58 秒後

図 99 遠方自動運転による落雪試験 (No. 1) の様子 (2017 年 2 月 21 日 10:39)



00 秒後



05 秒後



06 秒後

図 100 遠方自動運転による落雪試験(全景)の様子 (2017年2月21日 10:39)



07 秒後



09 秒後



53 秒後

図 100 遠方自動運転による落雪試験(全景)の様子 (2017年2月21日10:39)

(13) 2017年3月8日6:21+遠方自動運転+全景(ライズ70mm)+制御再変更後

図101は3月8日の遠方自動運転による落雪試験の様子を示す。18cm程度の積雪に対して、膜のタイプ毎にその落雪率に差が生じ、最も落雪率が高かったものは、タイプA70mm(中央タイプ)であった。一方、スペーサーを入れたNo.1部材では残雪しやすい結果となった。



膨張前(全景)



膨張前(No.1)



1回目膨張後(全景)



1回目膨張後(No.1)



2回目膨張後(全景)



2回目膨張後(No.1)



3回目膨張後(全景)



3回目膨張後(No.1)

図101 遠方自動運転による落雪試験の様子(2017年3月8日06:21)

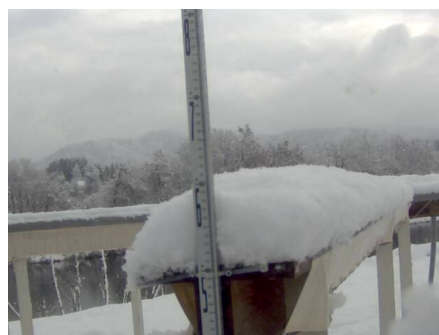


(14) 2017年3月8日9:19+遠方自動運転+全景(ライズ70mm)+制御再変更後

図102は3月8日の遠方自動運転による落雪試験の様子を示す。10cm程度の積雪に対して、送風排風を繰り返すことで落雪量は増加したが、いずれの膜においても局所的に残雪が確認できる。



膨張前(全景)



膨張前(No.1)



1回目膨張後(全景)



1回目膨張後(No.1)



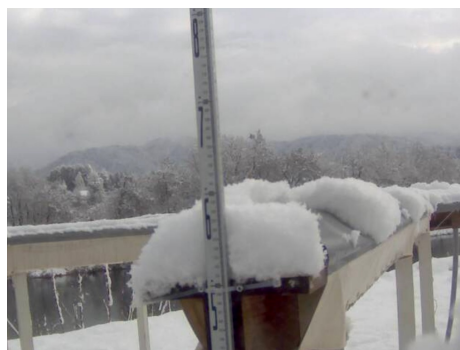
2回目膨張後(全景)



2回目膨張後(No.1)



3回目膨張後(全景)



3回目膨張後(No.1)

図102 遠方自動運転による落雪試験の様子(2017年3月8日06:21)

(15) 2017年3月8日 21:33+遠方自動運転+全景 (ライズ 70mm) +制御再変更後

図 103 は 3 月 8 日の遠方自動運転による落雪試験の様子を示す。3cm 程度の積雪に対して、No.3 ~6 はほぼ全て滑雪したのに対して、No.2 は 1/4 程度落雪し、中央部は落雪し難かった。



膨張前 (全景)



膨張前 (No. 1)



1 回目膨張後 (全景)



1 回目膨張後 (No. 1)



2 回目膨張後 (全景)



2 回目膨張後 (No. 1)



3 回目膨張後 (全景)



3 回目膨張後 (No. 1)

図 103 遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年3月8日 21:33)

## 7. まとめ

## 7. まとめ

本研究では空気膜を用いて、橋梁部材からの着雪防止装置の開発およびその評価を行うことを目的として、実際の橋梁を模擬した実験装置を製作し、下新井橋河川敷にその模擬橋梁を設置した。

平成 27 年度の落雪試験（手動運転）では、最大ライズ（膨らみ寸法）70mm が中央に位置するタイプ A、それを偏心させたタイプ B、チューブ（内袋）を入れたタイプ C をそれぞれ作製し、ハンドブローアーにて手動運転して、実験を行った。その結果、

1. 雪塊と膜材の界面状態が融解している状態（主に気温の高い日中）では、合計 5 回の試験においては 10 秒以内に上弦材上の 95% 以上の雪塊が落雪した、
2. 落雪装置タイプ A の両端部においては膜変形が小さいため、落雪が生じにくく、また模擬橋梁部材端部の落雪装置が設置されていない端部でも残雪が生じた、

ことが明らかとなった。

平成 27 年度は少雪であったため、十分な検討を行うことが出来なかった。平成 28 年度は①コスト削減からライズを変更（昨年の 70mm から 40mm、その後 75mm に変更）し、②膜材の高耐久化を目指して、膜材にチューブを挿入したタイプ C を基本形（実験途中からタイプ A に変更）とし、さらに③将来的に交通規制が必要なく、雪が降る度に落とし、雪を積もらせない降雪時常時運転方式（自動・シーケンス制御）による送風機の自動運転（実験では手動運転も実施）を行い、落雪試験を行った。その結果、

3. ライズ 40mm では十分な膜の変形が生じず、チューブの配置位置（フリー、偏心、中央）にかかわらず本研究の気象および雪氷条件下では落雪しがたい、
4. 本研究で対象とする 1 ユニット分の膜材（約 440ℓ）を積雪荷重下で十分に膨らませるためには、送風量  $0.35\text{m}^3/\text{min}$ 、送風時圧力 4.0kPa（全閉状態時 6.7kPa）以上の性能を有するブローアーが必要である、
5. 本研究の範囲内においては、経験的に降雪時には 30 分以内に 3 回以上の送風および排風運転を行う必要があり、送風時間は 8.5 秒程度、排風時間は 5 秒程度が望ましいと考えられるが、気象や装置の膨張体積、雪質の変化に伴い、上記の設定が適切であるとは言えず、今後のデータの蓄積により、最適な値を設定する必要がある、
6. ライズは 70mm 以上が、膜の形状はタイプ A が最も落雪しやすい、
7. 積雪深が 1cm 程度で、雪密度が小さい雪塊は膜の変形に伴い、雪塊がその変形に追従するために落雪しがたい、
8. 全ての積雪条件で落雪させることはコストを増大させ、装置スペックが過大になる恐れがあるため、コスト面と安全面の両方を兼ね備えた設計が必要になる、
9. 本研究で提案した中央ガセットプレート部の装置では十分な膜変形が生じず、また梁部材の残雪によりガセットプレート部の落雪が妨げられることから残雪が生じやすい、

10. 中央部の残雪に関しては、梁部の残雪が中央部の落雪の妨げになっている可能性が示唆され、梁部および中央部の雪処理を複合的に考える必要がある、
  11. 半日程度、膜上に雪塊を積雪させ、手動制御させた結果、ライズ 70mm の雪処理は中央のガセットプレート部を除けば、良好に落雪させることができる、
  12. 強風時にガセットプレート部の落雪装置の上膜がめくれ上がることで、および粉塵による膜材の汚れにより膜材側面にも着雪やつららが発生することもあり、装置の取付け方法や納まりを今後熟慮する必要がある
- ことが分かった。

## 8. 圖表目次

## 8. 図表目次

図 1	勝山下荒井橋の概略.....	5
図 2	勝山下荒井橋トラス部 側面図.....	5
図 3	勝山下荒井橋トラス部 上部平面図 .....	5
図 4	下荒井橋からの落雪事故の一例（平成 26 年度） .....	6
図 5	下荒井橋における落雪事故件数と雪庇除去作業回数の推移（過去 10 年間） .....	7
図 6	落雪事故件数と雪庇除去作業回数の関係（過去 10 年間） .....	7
図 7	大野市における累積降雪量と落雪事故件数の関係 .....	8
図 8	大野市における累積降雪量と雪庇落とし作業回数の関係 .....	8
図 9	トンネル坑口上部の着雪状況とその落雪による事故状況 .....	9
図 10	斜面における滑雪直前の力の釣り合い .....	17
図 11	空気膜膨張時の雪塊と膜材との接触面積 .....	18
図 12	膜変形による落雪メカニズム .....	19
図 13	勝山市下荒井橋の対象ユニット .....	21
図 14	対象ユニット（試験用工作物）の平面図、側面図および断面図 .....	21
図 15	試作機とトラス橋天端部材への取付案 .....	24
図 16	膜仕様（タイプ A） .....	25
図 17	送風前後の膜膨張の様子（タイプ A） .....	25
図 18	膜仕様（タイプ B） .....	26
図 19	送風前後の膜膨張の様子（タイプ B） .....	26
図 20	膜仕様（タイプ C） .....	27
図 21	送風前後の膜膨張の様子（タイプ C） .....	27

図 22	試験装置の配置 .....	28
図 23	試験モデルの設置イメージ .....	28
図 24	現場状況(2015年11月26日) .....	29
図 25	現場位置図 .....	29
図 26	占有面積および行為面積 .....	30
図 27	温度・湿度センサー .....	33
図 28	降雪板 .....	33
図 29	三杯式風速計 .....	34
図 30	放射収支計 .....	34
図 31	遠藤式含水率計 .....	34
図 32	電子重量計 .....	35
図 33	サーミスタ温度計 .....	35
図 34	熱電対 .....	35
図 35	デジタルノギス .....	36
図 36	放射温度計 .....	36
図 37	ビデオカメラ .....	36
図 38	落雪試験装置(全景) .....	37
図 39	気象ステーション(近景) .....	37
図 40	落雪試験現場状況① .....	38
図 41	落雪試験現場状況② .....	38
図 42	短波および長波放射量の経時変化 .....	45
図 43	気温および相対湿度の経時変化 .....	45
図 44	風速の経時変化 .....	46



図 45	鋼材および膜材温度の経時変化 .....	46
図 46	鋼材温度と気温の関係 .....	47
図 47	上部膜材温度と気温の関係 .....	47
図 48	雪氷サンプリングの様子 .....	48
図 49	雪氷温度観測の様子 .....	48
図 50	残雪状況の様子 .....	48
図 51	試験開始前の積雪状況 (2016 年 1 月 15 日) .....	49
図 52	積雪状況 (2016 年 1 月 15 日、近景、No. 1 部材) .....	49
図 53	落雪状況 (2016/1/15-No. 3) .....	50
図 54	落雪状況 (2016/1/15-No. 5) .....	51
図 55	落雪状況 (2016/1/21-No. 1) .....	53
図 56	落雪状況 (2016/1/26-No. 1) .....	55
図 57	落雪状況 (2016/2/17-No. 5) .....	57
図 58	落雪状況 (2016/3/1-No. 4) .....	59
図 59	落雪状況 (2016/3/1-No. 5) .....	60
図 60	ファン運転フロー図 .....	66
図 61	排風および送風の切り替え運転フロー図 .....	66
図 62	送風機の配電盤内部 .....	67
図 63	ターボファンによる膜膨張 .....	68
図 64	送風設備配管外観 (VB-001S-E) .....	69
図 65	送風機の性能曲線 (VB-001S-E) .....	69
図 66	送風設備配管ユニット図 (ブローア- VB-001S-E) .....	70
図 67	ブローア (VB-001S-E) 送風後の膜膨張の様子 (ライズ 40mm) .....	71

図 68	中央部の残雪状況 .....	72
図 69	中央部の落雪装置の概略.....	72
図 70	中央部の落雪装置外観.....	72
図 71	中央部の落雪装置の配管.....	73
図 72	中央部の落雪装置内部の様子 .....	73
図 73	改良した中央部の落雪装置内部（コの字配管＋板） .....	73
図 74	チューブ構造の偏心タイプおよび中央タイプ.....	75
図 75	膜形状一覧（平成 27 年度） .....	76
図 76	チューブ構造空気膜式雪処理装置①（中央タイプ：ライズ 50mm） .....	77
図 77	チューブ構造空気膜式雪処理装置（偏心タイプ：ライズ 50mm） .....	78
図 78	ライズ検証実験の様子.....	79
図 79	ライズ検証実験概要 .....	79
図 80	ライズ改良後の膜処理装置平面図.....	80
図 81	ライズ改良後の膜処理装置の実際の様子 .....	80
図 82	変更前の試験装置の配置図 .....	82
図 83	変更後の試験装置の配置図 .....	83
図 84	ライズ 40mm による膜膨張の様子(偏心タイプ) .....	84
図 85	雪密度の軽い新雪時の屋根雪落雪試験（2012 年） .....	85
図 86	遠方手動で 2 回動作後の落雪の様子（2017 年 1 月 13 日） .....	86
図 87	現地手動運転による落雪試験の様子（2017 年 2 月 3 日） .....	87
図 88	落雪試験前の様子（2017 年 2 月 2 日） .....	88
図 89	遠方手動運転による落雪試験の様子（2017 年 2 月 10 日 9:00 頃） .....	89
図 90	遠方手動運転による No. 1 梁部の落雪の様子（2017 年 2 月 10 日 9:00 頃） .....	92

図 91	遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年2月10日 11:00頃)	93
図 92	遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年2月10日 23:19)	94
図 93	2017年2月11日の落雪試験の様子 (0:00頃)	95
図 94	2017年2月11日の落雪試験の様子 (9:00頃)	95
図 95	遠方手動運転による落雪試験の様子 (2017年2月12日 15:25)	96
図 96	遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年2月13日 21:05)	97
図 97	遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年2月14日 20:59)	98
図 98	遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年2月21日 00:47)	99
図 99	遠方自動運転による落雪試験(No. 1)の様子 (2017年2月21日 10:39)	100
図 100	遠方自動運転による落雪試験(全景)の様子 (2017年2月21日 10:39)	102
図 101	遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年3月8日 06:21)	104
図 102	遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年3月8日 06:21)	105
図 103	遠方自動運転による落雪試験の様子 (2017年3月8日 21:33)	106
表 1	役割分担一覧	3
表 2	下荒井橋の総部材延長の概算	22
表 3	観測概要一覧	31
表 4	気象観測項目	32
表 5	常時観測項目	32
表 6	現地観測項目	32
表 7	観測道具一覧	33
表 8	気象観測結果一覧	40
表 9	12月の降雪量	41

表 10	1月の降雪量 .....	42
表 11	2月の降雪量 .....	43
表 12	3月の降雪量 .....	44
表 13	実験結果一覧 (2016/1/15) .....	52
表 14	実験結果一覧 (2016/1/21) .....	54
表 15	実験結果一覧 (2016/1/26) .....	56
表 16	実験結果一覧 (2016/2/17) .....	58
表 17	実験結果一覧 (2016/3/1) .....	61
表 18	実験結果まとめ .....	62
表 19	観測概要一覧.....	63
表 20	制御方法(案) 一覧.....	65
表 21	制御変更.....	74
表 22	送風および排風時間の記録一覧.....	74
表 23	ライズ検証結果一覧.....	79
表 24	試験装置概略(変更前) .....	82