

蔵王山における火口監視カメラの冬季運用に係る実証実験

Demonstration Experiment of Volcano Monitoring Camera,
in Winter Season at Zaozan (Zaosan) volcano

小林 宰¹, 吉開 裕亮¹, 千葉 進也², 草野 富二雄³

KOBAYASHI Tsukasa¹, YOSHIGAI Yusuke¹, CHIBA Shinya², and KUSANO Fujio³

(Received March 31, 2017; Accepted June 24, 2021)

1 はじめに

1940年の蔵王山の噴火では、半年ほど前から火口湖である御釜に、球状の硫黄の噴出や冬季の湖面凍結後の解氷など、火口周辺に表面現象となって異常が確認されている(虎石・富永, 1940a~d; 虎石ほか, 1940)。このように、噴火に先立ち、火口周辺の表面現象に異常が現れることがあるため、火口を監視することは、火山活動を監視・評価する上で、重要かつ効果的である。

気象庁では、2014年9月27日に発生した御嶽山の噴火災害を踏まえ、火山噴火予知連絡会「火山観測体制等に関する検討会」において取りまとめられた「御嶽山の噴火災害を踏まえた活火山の観測体制の強化に関する緊急提言」(2014年11月28日)(気象庁, 2014)に基づき、観測体制の強化に必要な観測機器等の整備が進められた。

東北地方の常時観測火山においても、火山噴火災害の軽減を目的として新たな火山観測施設の整備を進め、その一環として火口の状況を視覚的に観測することを目的とした火口監視カメラの整備を行った。

しかし、積雪の多い北日本の火山で冬季も含め、安定して観測を行うためには課題が多い。特に、樹氷で有名な蔵王山頂の冬季にあっては、低温、着氷及び着雪(以下、本稿では「樹氷化」という。)によって火口

監視カメラの視界がさえぎられてしまうことが容易に想像され、冬季に安定して視覚的な火口監視を可能とするためには、火口監視カメラへの樹氷化防止対策が必須である。

この課題は商用電源を用いてヒーターを活用することで解消できるが、火口付近は商用電源などのインフラ設備が整備されておらず、多くの場合、観測点は太陽光発電による電源供給のため対策が難しい。このような条件下でも実現可能な樹氷化防止対策技術は存在せず、冬季の火口付近がどのような環境下にあるかの知見も十分であるとは言えない。

そこで、蔵王山頂など北日本の火山において、冬季にも安定した火口監視カメラによる観測を行うため、特に樹氷化を防ぐために必要な対処策を検討する目的で、実証実験(以下、「実験」という。)を実施したので、その結果を報告する。本実験結果が蔵王山と同様の課題を抱えている火山の参考になれば幸いである。

2 実験の概要

蔵王山などの北日本の火山で、太陽光発電により、厳冬期を含め、観測機器を安定運用するためには、主に日照不足、観測機器の樹氷化の2つの課題をクリアしなければならない。このうち、日照不足については、

¹ 仙台管区気象台地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Sendai Regional Headquarters.
現所属: 地震火山部火山監視課, Volcanic Observation Division, Seismology and Volcanology Department.

² 仙台管区気象台総務部業務課, Management Division, Administration Department, Sendai Regional Headquarters.

³ 仙台管区気象台地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Sendai Regional Headquarters.
現所属: 特定非営利活動法人 環境防災総合政策研究機構, Crisis & Environment Management Policy Institute (CeMI)

蓄電池の数を増やすことで、火口監視カメラの運用に必要な消費電力をまかなうことは可能である。もうひとつの課題については、観測機器に対する樹氷化防止対策と一言でいっても、観測機器（種目）によって異なる。地震計などは観測装置を収納箱内に入れる対策がとれるが、火口監視カメラはその観測の性質上、常にレンズ部分は外気に接している必要があり、箱で覆ってしまうこともできなければ、樹氷化した状態での観測継続も不可能である。ヒーターを利用すれば対処可能であるが、この場合、膨大な電力が必要となると推測される。結果として、さらに蓄電池の数が増えることになり、施設規模や維持管理を考えたときに現実的ではない。このことから、厳冬期を含め、一年を通じて火口監視カメラを安定運用するには樹氷化防止対策が最大の課題である。

そこで、樹氷化を防ぐ対策として考えられる「①樹氷化を防ぐ効果がありそうな塗料の塗布」、「②ヒーターの加熱によって樹氷を融かす」、「③観測装置の形状を工夫する」などの各方法について実験を行った。各方法の有効性について検証するとともに、観測機器および観測を補助する周辺機器を含めた機器構成設計における今後の参考データを取得する観点から、太陽光発電装置の有効発電量についても検証した。

なお、本実験は東北大学学位プログラム推進機構リーディングプログラム部門グローバル安全学トップリーダー育成プログラム（以下、「東北大学」という。）の協力のもと、連携して実施した。

3 実験場所

実験場所の選定にあたっては、実験環境が実際の設置環境に近いこと（低温、樹氷化する環境）、商用電源が利用できること、実験を行っている場所に適時出向いて実験の経過観察及び維持管理並びに必要な応じて実験の進め方の変更を行うことが可能であることなど考慮し、山形蔵王スキー場の蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅の駅舎屋上（図 1、図 2）を選択した。

4 実験期間

山形大学環境保全センター（2012）によると、樹氷は 12 月上旬から着氷が始まり、2 月上・中旬の壮年期を経て、3 月上旬・中旬に崩壊、着氷終わりを迎えると報告されている。このことから、本実験は、樹氷のライフサイクルを通して観察するために、2015 年 12

月から 2016 年 4 月にかけて実施した。

5 実験装置

実験装置の写真を図 3、4、5、6、7 に示す。実験装置は、カメラハウジング（カメラ本体収納箱）と太陽光パネル（多結晶セル型）をフレームに固定し、環境測定用の温度計 3 つを図 8、9、10、11 に示すところに設置した。なお、図 6、7 に示されるカメラハウジング④、⑤は東北大学が設置したものである。

カメラハウジングは、形状による樹氷化防止能力の違い、着氷防止剤の効果などを比較検証するために、複数個設置した。



図 1：実験実施場所と既設の蔵王山火口カメラ（国土地理院の電子地形図 25000 に追記）。



図 2：蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅の冬季の状況。赤丸が実験装置設置場所。駅周辺の木々は、樹氷化していることがわかる（2016/02/12 地蔵岳から撮影）。

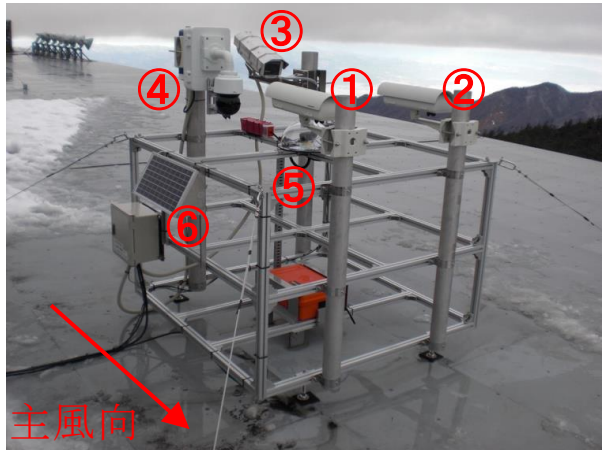


図 3：実験装置。①ダミーハウジング（着氷防止剤塗付なし）、②ダミーハウジング（着氷防止剤塗付あり）、③監視カメラ（AC200W×3＋120W のヒーター付き）、④東北大学カメラ（AC 電源）、⑤東北大学カメラ（DC 電源）、⑥太陽光パネル（公称最大出力 15.5W）。

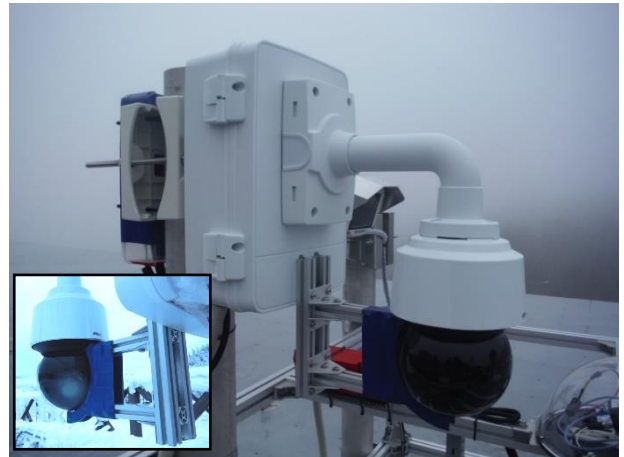


図 6：東北大学設置の監視カメラを内蔵したハウジング④。黒い球形部分が回転及び小刻みに振動する。球形部分と本体部分の接合部には、60W 程度のヒーターが付いている。球形部分に接するようにブレード（左下図の青い部分）を設置し、回転することで表面の付着物を除去する。



図 4：ダミーハウジング①、②。奥側のハウジングには着雪防止剤（フッ素樹脂塗料）を塗布、手前は無塗布。

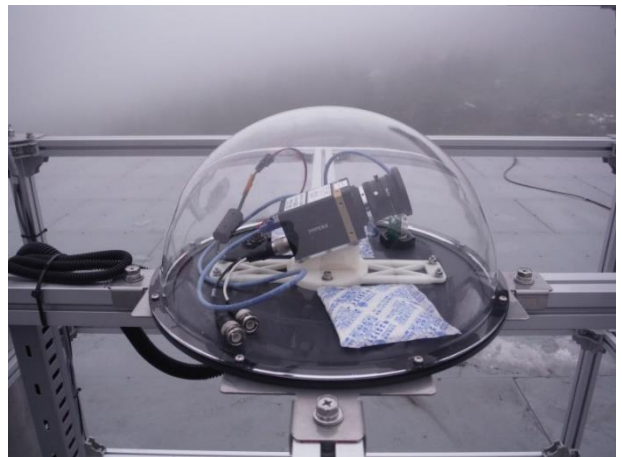


図 7：東北大学設置の監視カメラを内蔵したハウジング⑤。

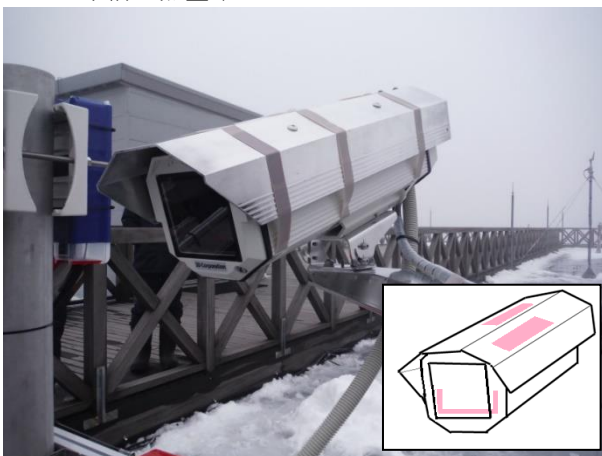


図 5：監視カメラを内蔵したハウジング③。天板内側に 200W ヒーターが 3 枚、ハウジング内部に電熱線型ヒーター 120W が内蔵されている（挿絵のピンク部分がヒーター）。



図 8：ハウジング③の天板内側について 200W×3 枚ヒーター（赤矢印）、ヒーター温度測定センサー（赤丸）。

このうち 3 台には、実際の監視カメラが内蔵され、収録された映像から実験の様子や、監視が可能な状態にあるかどうかの確認に用いた。カメラハウジングの表面材質などの一覧は表 1 に示すとおりである。



図 9：ハウジング③の表面温度測定センサー及びヒーター出力調整センサーの設置位置（赤丸）。ヒーター調整機は 200W×3 枚の出力 OFF/ON を調整する。ハウジング内部の 120W ヒーターも OFF/ON 切り替え可能で、内部温度により作動する。



図 10：太陽光パネルの裏に取り付けた外気温測定センサー（赤丸）。2016/1/29 以降は、センサー位置を移動。



図 11：外気温測定センサーの設置位置（2016/1/29 以降）。塩ビパイプ中にセンサーを設置し、パイプ上部に空気循環用の穴をあけた。

表 1：各ハウジングの表面材質

ハウジング	本体材質	開口部材質	備考
①	本体：ポリカーボネイト 屋根：ABS樹脂	ポリカーボネイト	
②	同上	同上	ハウジング①と同じものに着氷防止剤としてフッ素系樹脂塗料を塗布
③	アルミニウム	ガラス	ヒーター付き：内部 120W×1， 屋根部 200W×3。設定温度により動作制御
④	同上	ポリカーボネイト	開口部が定期的に回転及び振動する 60W 程度のヒーター付き
⑤	—	アクリル	プラスチック系コーティング剤を塗布

6 取得データ

6.1 温度データ

温度測定器は HIOKI LR5011 を、温度センサーは同 LR9603 を用いて、測定間隔 1 分で瞬時値を記録した。

6.2 画像データ

ハウジング③内蔵のカメラ動画を 10 秒間隔で現地に画像保存し、現地に赴いた際に、5 分間隔で間引き取得し、現地の実験経過状況を把握した。

また、東北大学設置のハウジング④⑤内蔵のカメラ動画については、5 分間隔で東北大学サーバに画像送信され、準リアルタイムで WEB 閲覧可能であった。

6.3 発電量データ

充放電コントローラ(福島電気株式会社製 SPC-005)のログ機能を利用して、太陽光パネルでの発電電圧、電流、発電量、バッテリーへの充電電圧、電流、充電量、及び充電モードなどを 1 分ごとに記録した。

7 実験結果及び考察

7.1 樹氷の成長及び実験場所環境の年差

図 12 (巻末に掲載) に実験期間中に現地に赴いた際に行った樹氷の定点観測の結果を示す。2015-2016 シーズンは、遅くとも 12 月上旬には着氷が開始した。その後、1 月中旬から 2 月後半にかけて最盛期を迎え、3 月下旬には着氷終わりを迎えた。2015-2016 シーズンの樹氷の成長・衰退も、山形大学環境保全センター(2012)で報告されていたライフサイクルとほぼ同じであった。

実験場所の環境がわかる貴重なデータとして、蔵王ロープウェイ(株)が地蔵山頂駅で行っている気象観測データがある。この資料を基に、地蔵山頂駅における 2014-2015 シーズンと、2015-2016 シーズンの積雪深を図 13 に示す。実験を行った 2015-2016 シーズンの積雪は、2014-2015 シーズンに比べて半分以下であったことがわかる。

次に、山頂の環境とは異なるが、平年との比較の指標として、山形地方気象台で観測された降水量と積雪深の値を表 2 に示す。降水量は蔵王山への水分供給量と相関があると考えられる。樹氷成長期間である 12 月～2 月にかけての降水量の合計は、2015-2016 シーズンは平年並みであるのに対し、積雪深は平年より少ないことがわかる。このことは、報道発表資料(気象庁、2016)からも読み取れる。また、同観測の 2014-2015 シーズンと 2015-2016 シーズンの値を比較すると、12 月

～2 月の降水量、積雪深ともに 2014-2015 シーズンの方が多く、積雪深については地蔵山頂駅における比較結果と整合的である。

これらのことから、実験実施期間の地蔵山頂駅周辺の環境は、平年に比べて穏やかか同程度の環境であったことが想像される。また、シーズン毎の偏差は大きく、2014-2015 シーズンのように、より苛酷な環境となることもあり得る。

実験場である蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅の気温について、本実験で測定したデータと蔵王ロープウェイ株式会社による地蔵山頂駅での気象観測の結果を図 14 に示す。外気温センサーの設置位置変更後の一部の日中時間帯を除き、本実験測定データと蔵王ロープウェイの観測値はよく一致し、整合的である。このことから、蔵王ロープウェイの観測値がない時間帯においても、本実験で測定した結果は実験場の気温を適切に測定していたと考えられる。なお、差が生じた一部の日中時間帯については、日中に温められた空気がパイプ内にこもり、高めの温度測定になっていたと考えられる。

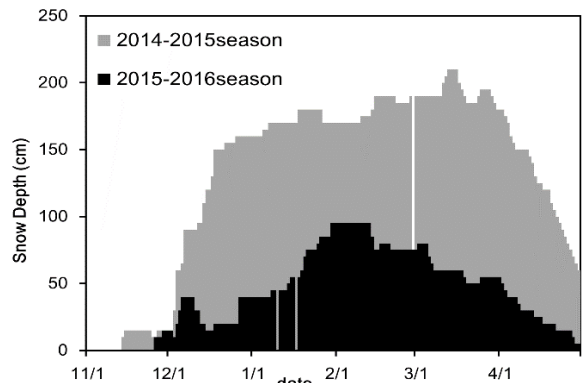


図 13：蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅における 2014-2015 シーズン(灰色)、2015-2016 シーズン(黒色)の積雪深(cm)。実験を行った 2015-2016 シーズンは前シーズンに比べて、積雪深は半分以下であった(地蔵山頂駅気象観測日誌を基に作成)。

表 2：山形地方気象台で観測された降水量、積雪深

期間	月降水量(mm)			最深積雪(cm)		
	2014-2015 season	2015-2016 season	1981～2010 平年値	2014-2015 season	2015-2016 season	1981～2010 平年値
11月	85.0	87.0	84.5	-	-	5
12月	227.0	90.5	82.7	38	2	23
1月	67.0	113.5	83.0	45	38	40
2月	53.5	35.5	62.7	52	30	45
3月	112.0	26.0	68.6	19	13	24
4月	89.5	100.0	68.4	-	-	2

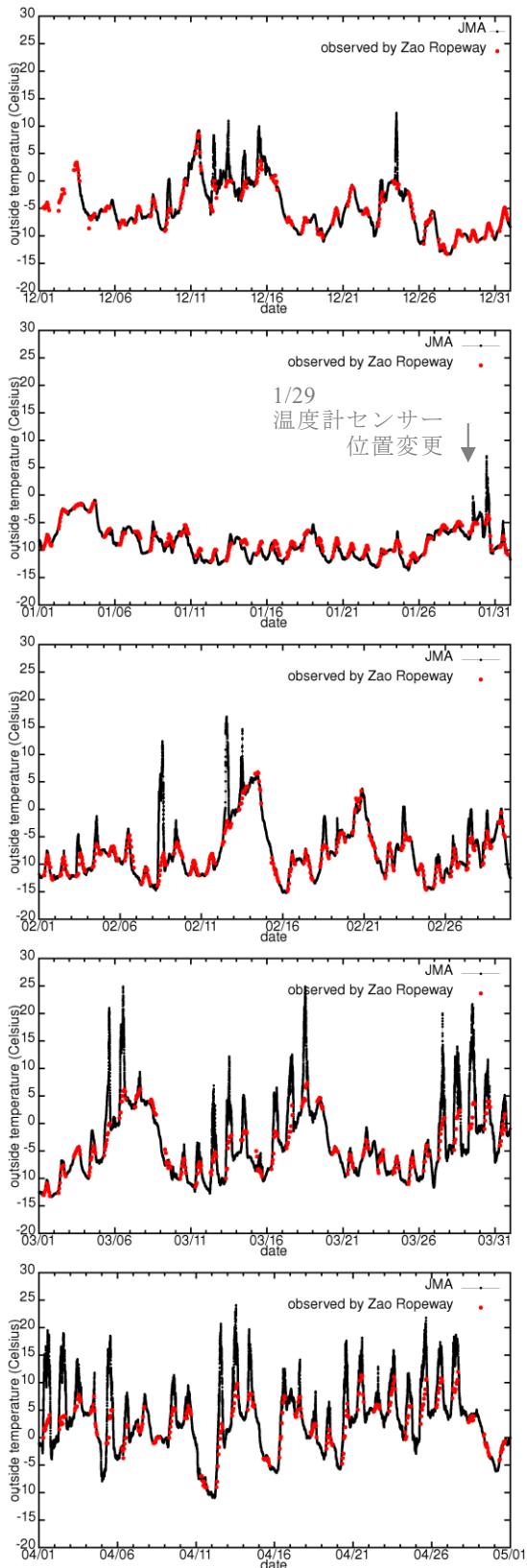


図 14：蔵王ロープウェイ地蔵山頂駅の気温。黒線が本実験で測定した外気温。赤点が蔵王ロープウェイ株式会社による地蔵山頂駅での気象観測の結果。最低気温はマイナス 15 度近くになる。

観測した温度データから山頂駅では、シーズンを通すと最低マイナス 15 度程度に達することがわかる。山岳気象報告（中央気象台，1951）によれば，1945 年 2 月の地蔵山の山頂における最低気温はマイナス 20.1℃であり，より標高が高い刈田岳や熊野岳において，年によっては，さらに低温になる可能性がある。よって，本報告で示す結果は，厳冬期運用する上での下限条件であり，実際には，より過酷な環境に耐える機器仕様が要求されると考えられる。

7.2 樹氷防止対策

7.2.1 着氷防止剤

厳冬期の蔵王山のような過酷な場所ではない一般的な市街地においても，構造物が着雪・着氷することは珍しくない。その対策の一つとして着氷防止剤を構造物の表面に予め塗布しておく方法がある。既設の観測点に対しても今後対応可能な手法であり，有効性が確認できれば，最も導入の障壁が低い手法になりえる。一般的な市街地で雪がハウジング等の固体に付着する主な要因は，湿った雪の場合には雪とハウジング間の表面張力によるものであり（水野・若浜，1977），両者間の付着力を弱めるために，高い撥水性が認められるフッ素樹脂系を主原料とした塗料が，着氷防止材として用いられている。

設置してから一晩経過したときの監視カメラ③の画像を図 15 に示す。右側が着氷防止剤を塗布していないダミーハウジング①，左側が着氷防止剤としてフッ素系樹脂塗料を 4 回重ね塗りのしたダミーハウジング②である。この画像から，両ハウジングの着雪・着氷程度に大きな差は見られない。蔵王山頂の厳冬期の環境における着氷に対しては，着氷防止剤のみの対策では，不十分であると言える。

山形大学環境保全センター（2012）によると，蔵王山頂付近での着氷（樹氷化初期の）プロセスは，過冷却水滴を含んだ季節風が蔵王山の斜面を吹き上げられ，山頂付近で植物などに衝突して，その瞬間に着氷すると報告されており，一般的な市街地における着氷・着雪プロセスとは異なる。

このことから，撥水効果を高めたとしても，過冷却水滴が大量に供給され，水滴の衝突と同時に着氷する環境では，大きな効果が得られなかったのではないかと考えられる。一方で，機器表面に付着した水分を効率的に排水できることから，機器表面の付着水滴が凍

結することを軽減し、ヒーターなどと併用した場合には、水滴を加熱するエネルギーロスを軽減できるなど、補助手段としての効果が期待できると考える。



図 15：設置してから一晩経過したときの監視カメラ画像。左側のダミーハウジング②は着氷防止剤を塗布してあり、右側の同①は、着氷防止剤を無塗布。

7.2.2 ヒーターによる観測機器の保温

実験装置全体が樹氷化したときの写真を図 16 に示す。このような場合であっても、ヒーターが付いているハウジング③は樹氷化していない。このことから、ヒーターによる樹氷化防止対策は効果絶大であることが、改めて確認できた。

しかし、冒頭で述べたように、ヒーターが必要とする膨大な消費電力量をまかなうことは非常に困難である。少しでも消費電力量を減らすために、今回の実験では、200W×3 枚のヒーター出力が ON・OFF する温度を設定変更することで、監視に必要（樹氷化を防ぐ最低必要温度）な機器表面の温度も検討した。

付表 2 に、ハウジング③のヒーターの設定、外気温、ハウジング③の表面温度、ヒーター温度、ヒーター動作時間、ヒーター動作にかかる消費電力量、監視カメラのカメラレンズ状況などを示した。この表から、カメラが凍結して監視できなかった日のうち、表面温度の日最低値の最大値は 6.2℃であったことがわかる。このことから、機器の表面温度が 10℃程度あれば、監視カメラの運用ができると考えられる。同表より、監視カメラが凍結し監視できなかった日のうち、200W×3 枚のヒーターに係る一日の消費電力量の最大値は 5740Wh となる（一日あたり、5740Wh の消費電力量を費やしても、観測できない日が存在する）。

また、観測ができる範囲で、保温温度を最低にした

場合でも、一日平均 5000Wh 程度の電力量が必要となる。冬期間（150 日）を 12V100Ah の蓄電池で本実験のヒーターを動作させると、900 個近くの蓄電池が必要になる（放電深度を 0.7 とした）。

一方で、ハウジング③において、ヒーターを内蔵する天板部分には、着氷がないに関わらず、カメラのレンズ付近が着氷していたために、監視が不可能となるときがあった。このことから、監視に必要な部分へヒーター熱が効率的に使われておらず、無駄に電力を消費していたと考えられる。ヒーターの取り付け位置や取付方法を改善すれば、消費電力を減らしつつ、監視可能な時間を増やせる可能性がある。また、使用するヒーター熱の絶対量を減らすためには、監視に必要な不可欠な部分（具体的には開口部分）の面積を小さくすることも効果的であり、カメラハウジング自体を小型化及び形状を再考することで、より消費電力を減らすことができる可能性はある。

なお、本実験ではヒーターの消費電力量を直接測定していない。ヒーター温度測定値（分値）が 1 分前より 1℃以上上昇しているときにヒーター出力が ON だったと仮定・積算し、200W×3 枚のヒーターに係る一日の消費電力量を推算した。



図 16：観測装置全体が樹氷化しているが、天板にヒーターが付いたハウジング③は樹氷化していない（2016/01/08 撮影）。

7.2.3 設置向き（主風向を考慮して）

矢野（1989）、及び山形大学環境保全センター（2012）でも報告されているように、樹氷は風上に向かって成長する。本実験においても、図 17 に示すように、その様子が明瞭に見て取れる。主風向に向かって監視カメラを設置した場合、図 18 のように、樹氷の成長によ

り、監視が不可能となってしまう可能性が大きくなる。このことから、実際に監視カメラを設置する場合には、主風向（季節風の風向）を考慮し、設置位置を検討することが大切である。



図 17：風上に向かって、樹氷が成長していく様子（2016/02/12 撮影）。主風向（図中矢印）である西に向かって樹氷は成長する。

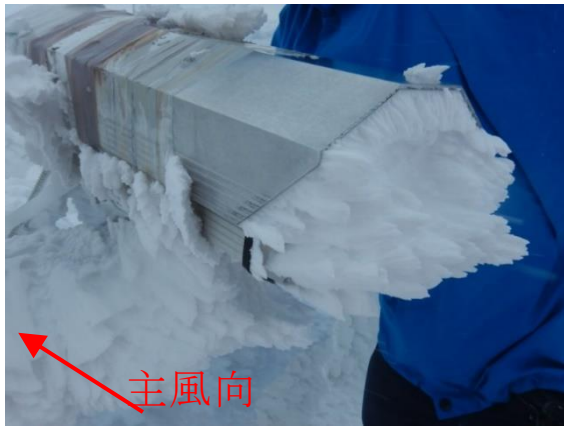


図 18：主風向に向かってカメラを向けたとき（2016/02/24 撮影）。カメラハウジングの開口部に着雪し、監視が不可能となる。

7.2.4 ハウジング形状

ハウジングの形状も樹氷の成長に影響を与える可能性がある。樹氷の成長初期の観察、および形状の違いによる樹氷化のしやすさを比較することで、ハウジングの形状がどのように樹氷化に関係があるか考察した。

図 19 から、樹氷はハウジング表面の小さな突起部分から成長していることが分かる。

図 20 から、球形のハウジングにおいては、風上側に着雪はあるものの、風下側への着雪はほとんどないことがわかる。

矢野（1989）や山形大学環境保全センター（2012）によれば、本来付着力を持たない 0°C 以下の乾いた雪片が固着して樹氷となるためには、風上側の正面の溝や溝の両端に付くライム群のような雪片を補足する隙間、深い窪みの存在が必要であり、隙間や窪みに入り込んで出られなくなった雪片が焼結作用で固着し成長し、風下側では、まわり込んだ雪や過冷却水滴が氷になってゆっくりと積み重なると報告されている。

カメラハウジング③のように、突起や隙間がある形状は、樹氷成長において好都合であり、複雑な形状のハウジングはこのような環境には不向きである。反対に、ハウジング④の風下側に着雪・着氷が少ない要因の1つは滑らかな表面をしたハウジング形状の効果であると考えられる。球形ハウジング④のように突起がなく、表面が滑らかなものは、過冷却水滴の衝突を軽減できると考えられ、樹氷化を軽減できる可能性がある。風上側に樹氷が成長した要因として、雪払いブレード、及び機器収容箱や取り付け用ポールが近くにあったことで、凹凸部から樹氷が伸び成長したと考えられる。なお、風下側が樹氷化しなかった理由については、さまざまな要因が、複合的に重なり樹氷化を防げたと考える。その他の要因として考えられる、ハウジングに取り付けた雪払いブレードや振動による樹氷防止効果は、後述するとおりである。

一方で、図 21 に示すように、同じように滑らかな球形の表面をもつが、鉛直上向きに半球形をしたハウジング⑤は、実験開始後すぐに着氷をはじめ、順調に樹氷が成長し始めた。機器設置日である 12 月 3 日の日中から夕方にかけて、現地の天候が雨から雪に変わったことで、ハウジングに湿った付着力の強い雪が上向きの半球面上にトラップされ、表面が凸凹に固まったことで、過冷却水滴を衝突・固着させやすくしたと考えられる。

ハウジング形状において、ハウジング表面が滑らかであること、付着物がトラップされないようにすることが重要である。

7.2.5 防護壁

図 20 のハウジング④において、風上側に成長した樹氷が風下側に対して防護壁となり、もしくはいくらかの整流効果をもたらし、風下側での過冷却水滴のハウジングへの衝突を軽減させた可能性がある。



図 19：ハウジング表面の突起凹凸部分から樹氷が成長していく様子(2016/02/24撮影).
ハウジング③の前面を下から撮影.



図 20：球形のハウジング④による着氷防止効果.
風上側に着氷はあるものの、風下側への着氷はほとんど見られない.

7.2.6 雪払いブレード

ハウジング④は黒い球状部分が、装置の凍結を防止するため1分おきに回転するように設定されている。この回転と雪払いブレードの効果で、球状部分の表面に付着したものは除去され、樹氷化防止につながったと考えられる。しかし、過冷却水滴の供給が大きい場合には、回転部分もしくは、ブレードと接する部分が凍結・固着し、回転機能不能となるときがある。また、可動部位を設けることは、火口近くというアクセスしにくい環境を考えると、メンテナンスフリーに反することとなり、現状では有効策とは言い切れない。

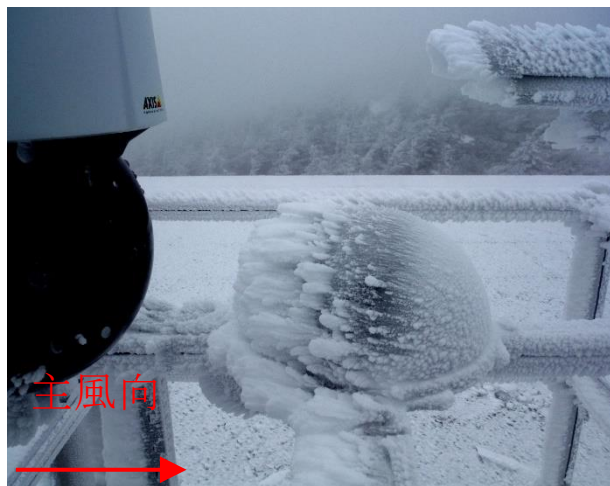


図 21：球形のハウジング⑤による着氷防止効果。雨から雪に変わる過程で、湿った付着力の強い雪が着雪・着氷することにより、一度、表面の滑らかさが失われてしまえば、その突起部分から樹氷は成長を始める(2015/12/04撮影)。

7.2.7 振動

ハウジング④は、1分おきの回転に加え、小刻みに振動する機能がある。もともとこの機能は雨滴のすばやい排水を助けるものである。この振動がハウジング表面の付着物除去に効果があった可能性がある。振れ幅は異なるが、振動の有効性が推測される例として、冬季の蔵王刈田岳山頂の社務所のシャッターの事例がある。悪天候時の状況は不明だが、天気の良い日に現地にアクセスしたとき、シャッターに着氷していないということがいくつかの写真から明らかになっている。風によって励起されたシャッターの振動によって、付着した氷や雪が除去されている可能性があり、振動する機構をもったハウジングが着氷除去に効果がある可能性がある。

7.3 太陽光パネルによる発電量

太陽光パネルによる発電については、付表2に示されるとおりである。樹氷の成長期、最盛期である12月～1月にかけて発電したときは、太陽光パネルの公称最大出力に対して最大87%の効率で発電できている。しかし、発電できた日は該当期間89日中9日間で、それらの日は、現地調査で太陽光パネルへの積雪を除雪した日、もしくは樹氷成長段階初期のたまたま天候に恵まれた日であった。

それ以外の日では、着氷・着雪によってソーラーパネルが埋もれてしまい、発電することはできなかった。

パネル設置方法を検討改善すれば、着雪・着氷をいくらか緩和できる可能性はある。しかし、ハウジング同様に着雪・着氷を完全に防ぐことは困難であり、また、蔵王山の気温は 0℃を上回ることはほとんどないことから、融雪することにも期待できない。

3 月以降は、降雪が少なくなったことから、発電している状況が多く見られる。

これらのことから、少なくとも 12 月～2 月の蔵王山頂において、太陽光パネルによる発電は期待できないと言える。

また、着氷・着雪以前の問題として、厳冬期の蔵王山頂付近は雲の中にあることが多い。気象庁では火山活動監視目的で麓の監視カメラから山体の様子を常時観測している。冬季の山頂付近の状況を把握するために、参考にこの記録を調査すると、2015 年 12 月から 2016 年 2 月の 90 日間のうち、09 時、15 時の両時間で蔵王山の山頂付近を視認できなかった日は 58 日 (64%) であった。2014 年 12 月から 2015 年 2 月に至っては、89 日中 75 日 (84%) で山頂付近を視認できなかった。このことから、厳冬期の山頂付近では、雲がかかるなど天候不良の状況にあることが多いことがわかる。

7.4 その他

上述した各項目についての検証を進めた中で、次のことも明らかになったので記録に残しておく。

強い風が吹く場所に設置した観測装置のような障害物のまわりには、雪の吹き溜まりができて周囲よりも積雪が多くなることがある (竹内, 2000)。例えば、周囲の積雪が 1m であっても、観測装置の高さが 2m であれば、観測装置は 2m 程度の雪の中に埋もれてしまうことがある。また、竹内 (2000) によれば山の尾根の風下側斜面も吹き溜まりが発生しやすいので、設置場所を選定する場合には注意が必要である。

8 まとめ

本実験は例年に比べて穏やかな気象環境下での実施であったが、実験を開始して早々、樹氷の成長スピード及びスケール共に想像より、はるかにすさまじいことを思い知らされた。

本実験により明らかとなったことは次のとおりである。

a) 冬季には火口監視カメラ装置全体が樹氷化する。このため、火口監視カメラの開口部は雪氷が付着して

監視対象物を見ることができなくなる期間が長い。

b) 樹氷化を防ぐ最も効果的な対策は、適切に配置したヒーターによって樹氷を融かすことであるが、多くの電力が必要となる。ヒーターを用いた対策は商用電源を利用することが可能である場合に限定される。

c) 商用電源を使うことが可能な場合、ヒーターでハウジング表面を数℃程度に保温することで、安定した運用が可能となる。

d) 着氷防止剤を利用する方法は、今回の実験ではその効果の有効性は確認できなかった。一方で、撥水塗料を塗布することにより機器表面に付着した水分を効率的に排水することは、ヒーターの熱効率を高め、さらに機器表面へ雪や氷が付着することを軽減するので、補助手段として重要である。

e) カメラハウジングの形状は、過冷却水滴の衝突を軽減させ、かつ降雪が溜らない形がよく、球形などの表面が滑らかなハウジングが樹氷化しにくいと考えられる。また、ヒーターを用いるときは、機器を小型化し、効率的に熱を利用できるように設計設置する必要がある。

f) 樹氷は冬季の主風向 (季節風) に対して、風上側に成長するので、監視領域が風下側に来るように観測点設置位置を選定することが重要である。また、ハウジングの風上側に風当たりを防ぐ背板等を設けることによって、樹氷化を軽減できる可能性がある。

g) 今回の実験における寄与度は不明だが、機器の小刻みな振動は樹氷化防止につながる可能性がある。また、風などの自然エネルギーを用いて、機器の一部を振動させれば、悪天回復後すみやかに樹氷を除去できる可能性がある。

h) 観測装置のような障害物のまわりは雪の吹き溜まりができやすく、観測装置設置点の積雪は周囲より、多くなることもある。設置架台を含めた観測装置全体の幅を可能な限り狭くすることで、このような吹き溜まりの影響を軽減させる効果がある。また、吹き溜まりは、山の尾根の風下側斜面でも発生しやすいので設置場所選定時には注意が必要である。

i) 冬季は太陽光パネルに着雪・着氷することに加えて、ほとんどの期間が雲の中となり日照時間が極めて短いことから、太陽光パネルによる発電は、ほとんど期待できない。

j) 本実験は例年に比べて穏やかな気象状況下での実施であった。長期間に渡る火口監視カメラの運用にあ

たつては、本実験で得られたデータ以上に厳しい環境下での運用となることへの留意も必要である。

- k) 冬季に24時間完全な監視を継続することは、観測装置が樹氷化することや観測地点がほとんどの期間が雲の中であること等の気象状況と、観測装置の整備経費等を考慮すると、ほとんど実現不可能である。現実的な観測目標値を設定して、その目標達成に必要な機器構成を検討することが必要である。

謝辞

蔵王ロープウェイ株式会社から実験場所並びに気象観測データの提供など多大なるご協力を頂いたことにより有益な実験を実施することができました。本実験を連携して進めた東北大学の関係者の皆さまからは本実験で得た観測データの提供などを頂きました。仙台管区気象台地震火山課長谷川嘉彦氏、同火山監視・警報センター谷口貴康氏、同業務課下山利浩氏をはじめ、蔵王山火口カメラ通年化に係る検討チーム(所属は2015年度)の皆様には、多大なご協力を頂きました。また、気象庁地震火山課の福井敬一氏には丁寧に原稿を読んで頂き、本稿の改善に大変有益なご助言を頂きました。記して感謝の意を表します。

文献

- 気象庁 (2014): 御嶽山の噴火災害を踏まえた活火山の観測体制の強化に関する緊急提言について, 平成 26 年 11 月 28 日報道発表資料, http://www.jma.go.jp/jma/press/1411/28a/yochiren_kansoku_kinteigen141128.html (参照 2021-03-12).
- 気象庁 (2016): 冬 (12~2 月) の天候, 報道発表資料, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1603/01d/tenko161202.html> (参照 2021-04-14).
- 蔵王ロープウェイ(株): 地蔵山頂駅気象観測日誌.
- 竹内政夫 (2000): 吹雪とその対策 - 吹きだまりの発生機構と形 -, 雪氷, **62**, 41-48.
- 中央気象台 (1951): 山岳気象報告, 243-247.
- 虎石成美・富永齊 (1940a): 蔵王山お釜の鞠状硫黄, 科学, **10**, 3-4.
- 虎石成美・富永齊 (1940b): 蔵王山お釜の活動 (第 2 報), 科学, **10**, 123-124.
- 虎石成美・富永齊 (1940c): 蔵王山お釜の観察 (第 4 報), 科学, **10**, 234.
- 虎石成美・富永齊 (1940d): 蔵王山お釜の活動 (第

5 報), 科学, **10**, 461-462.

虎石成美・廣江正五・富永齊 (1940): 蔵王山お釜についての観察 (第 3 報), 科学, **10**, 194-196.

水野悠紀子・若浜五郎 (1977): 湿雪の付着強度, 低温科学, **35**, 133-145.

矢野勝俊 (1989): 蔵王山のアイスモンスター (樹氷), 日本雪工学会誌, **5**, 23-32.

山形大学環境保全センター (2012): 環境保全 No.15, 樹氷・蔵王特集号.

山形地方気象台 : 地上気象観測原簿.

(編集担当 山本哲也)

付表 1：主な行動記録

2015. 7.30	蔵王ロープウェイ（株）に実験用地提供等の協力依頼.
2015. 8. 4	東北大学と打合せ.
2015. 8.17	蔵王ロープウェイ（株）に実験概要の説明と現地確認.
2015. 9.16	蔵王ロープウェイ（株）に実験で設置する工作物の説明.
2015.10. 5	蔵王ロープウェイ（株）に実験用地提供等の協力を依頼する文書発出.
2015.10.28	実験用地賃貸契約書締結（蔵王ロープウェイ（株））.
2015.10.28	国有林野の共同使用に係る申請書提出（山形森林管理署）.
2015.11.19	蔵王ロープウェイ（株）と実験工作物設置工事に関する打合せ.
2015.11.27	蔵王山監視カメラの冬季運用実験に係る申合せ締結（東北大学）.
2015.12. 2	実験機材設置工事と機器調整.
2015.12. 3	実験機材設置工事と機器調整. 実験開始.
2015.12. 4	実験機材設置工事と機器調整.
2015.12. 4	特別保護区内非常災害応急措置届出書提出（山形県）.
2015.12.10	機器点検・調整とデータ回収.
2015.12.16	機器点検・調整とデータ回収.
2015.12.22	機器点検・調整とデータ回収.
2016. 1. 8	機器点検・調整とデータ回収.
2016. 1.26	機器点検・調整とデータ回収.
2016. 1.29	機器点検・調整とデータ回収. 外気温センサー取付け位置変更.
2016. 2.12	機器点検・調整とデータ回収. ヒーター付きハウジングの開口部の向きを風上側に変更.
2016. 2.23	機器点検・調整とデータ回収.
2016. 2.24	機器点検・調整とデータ回収.
2016. 3.10	機器点検・調整とデータ回収.
2016. 3.29	機器点検・調整とデータ回収.
2016. 5. 2	機器点検・調整とデータ回収. 電源断. 実験終了.
2016. 6. 6	実験機材撤去作業.
2016. 6.15	特別保護区内非常災害応急措置終了届出（山形県）.

蔵王山における火口監視カメラの冬季運用に係る実証実験

付表2 (つづき) : 毎日の実験結果まとめ (2016年4月1日~4月30日).

日付	ヒーター設定			温度計データ										チャージコントローラ記録のPVデータ					監視カメラの画像データ			備考		
	200W×3枚 OFF温度設定	200W×3枚 ON温度設定	120W内蔵 ヒーター電源	外気温			表面温度			ヒーター温度			ヒーター 動作時間	消費 電力量	充電 時間	発電量	充電量	見掛けの 発電効率	フロート 充電時間	画像からの天気	カメラレンズ凍結		山形の天気 (参考)	着氷除去, 実験環境の変更点など
	℃	℃	OFF/ON	ave	max	min	ave	max	min	ave	max	min												
2016/4/1	15	5	OFF	5.1	19.5	-3.9	17.6	33.0	7.5	21.5	60.1	6.6	320	3200	510	40.56	40.78	30.8	254	晴	なし	晴後薄曇		
2016/4/2	15	5	OFF	6.6	19.0	-1.4	17.9	30.9	8.5	22.2	60.0	7.8	308	3080	498	44.08	46.65	34.3	253	晴	なし	晴時々曇		
2016/4/3	15	5	OFF	6.5	14.3	2.1	17.5	30.2	8.8	20.7	60.2	8.4	329	3290	314	27.96	27.58	34.5	131	晴時々曇り一時雨	なし	曇		
2016/4/4	15	5	OFF	2.8	11.8	-7.0	15.9	28.3	4.9	22.4	56.9	4.3	452	4520	69	4.91	4.66	27.6		雨	なし	雨後一時曇		
2016/4/5	15	5	OFF	2.2	18.5	-7.9	15.8	31.3	5.7	20.4	62.7	3.7	375	3750	409	33.29	32.93	31.5	243	晴	朝方一部凍結有	晴一時薄曇		
2016/4/6	15	5	OFF	0.5	8.2	-4.0	15.7	27.7	5.4	19.9	55.2	2.5	482	4820	218	20.3	19.11	36.1	230	雪のち晴	着雪有	晴		
2016/4/7	15	5	OFF	3.4	7.9	0.4	15.8	30.9	8.0	22.2	61.2	7.3	483	4830						雨	なし	大雨一時曇		
2016/4/8	15	5	OFF	0.0	3.1	-1.0	13.8	23.3	6.2	18.5	44.2	3.6	564	5640						不明一雨	全面着氷一落水	曇		
2016/4/9	15	5	OFF	3.6	11.4	-1.7	16.1	26.5	6.9	19.5	49.3	4.2	460	4600	479	45.97	44.97	37.2	225	晴時々雨	なし	薄曇時々晴		
2016/4/10	15	5	OFF	3.5	9.5	-1.5	16.4	27.1	7.7	20.2	52.6	6.1	449	4490	279	20.31	19.61	28.2	144	曇のち晴	なし	薄曇一時晴		
2016/4/11	15	5	OFF	-7.8	-1.2	-10.5	12.8	28.2	3.2	20.9	67.0	-2.0	574	5740	48	3.85	3.52	31.1		雪時々曇り	着雪有	晴時々曇一時雨		
2016/4/12	15	5	OFF	0.0	20.7	-10.9	15.5	32.2	3.4	19.9	59.7	-1.2	426	4260	108	8.11	7.35	29.1	329	晴	なし	晴後一時薄曇		
2016/4/13	15	5	OFF	7.7	24.1	1.1	16.8	29.4	8.1	19.8	54.8	6.8	294	2940	150	11.06	10.23	28.5	341	曇	なし	曇		
2016/4/14	15	5	OFF	7.0	19.7	2.3	15.6	29.4	7.1	18.9	55.6	4.9	347	3470	259	20.26	19.15	30.3	225	曇時々雨	なし	曇後一時晴		
2016/4/15	15	5	OFF	-3.8	2.4	-5.9	13.7	23.2	4.7	26.2	68.0	1.7	540	5400	1	0.05	0.06	19.4		不明	全面着雪	晴時々雨		
2016/4/16	15	5	OFF	3.0	12.5	-6.4	16.6	29.5	4.9	21.0	59.8	2.7	379	3790	271	22.04	20.74	31.5	293	曇時々晴れ間	落雪	薄曇時々晴		
2016/4/17	15	5	OFF	5.4	14.2	0.7	15.8	29.3	6.7	20.3	55.5	4.2	413	4130	96	9.61	9.14	38.8		曇時々雨一時晴れ間	なし	雨時々晴一時曇, 雪を伴う		
2016/4/18	15	5	OFF	0.7	8.4	-2.7	14.8	25.4	6.5	18.4	50.0	3.2	523	5230	114	8.27	7.57	28.1		雨のち曇	なし	曇		
2016/4/19	15	5	OFF	-0.8	6.5	-5.1	14.9	27.4	5.8	19.7	52.1	2.9	519	5190	208	16.83	15.4	31.3	145	晴のち曇のちみぞれ	なし一タ方着雪	晴時々曇		
2016/4/20	15	5	OFF	2.9	17.6	-5.7	15.9	30.8	4.7	19.6	56.6	2.9	390	3900	165	12.47	10.98	29.3	297	曇時々晴れ間	なし	薄曇時々晴		
2016/4/21	15	5	OFF	7.1	18.2	2.7	16.6	30.6	8.3	20.8	58.1	7.9	303	3030	227	13.87	12.35	23.7	59	曇時々雨	なし	曇後一時雨		
2016/4/22	15	5	OFF	5.4	12.9	1.9	17.7	31.6	8.8	21.9	58.4	7.8	358	3580	94	5.62	5.1	23.1		雨時々曇	なし	曇一時雨		
2016/4/23	15	5	OFF	7.2	15.9	1.8	16.3	29.6	8.2	19.0	57.2	6.9	340	3400	276	21.86	20.47	30.7	356	晴のち曇	なし	薄曇時々晴		
2016/4/24	15	5	OFF	3.3	11.7	-2.9	17.7	30.7	8.0	21.2	60.5	6.1	381	3810	122	10.58	10.07	33.6	341	晴時々曇り	なし	晴後薄曇		
2016/4/25	15	5	OFF	7.7	21.8	-2.2	17.2	30.2	8.4	20.2	59.1	9.1	241	2410	118	8.55	7.82	28.1	374	晴時々薄曇	なし	晴後一時薄曇		
2016/4/26	15	5	OFF	8.6	17.4	3.9	16.6	28.8	9.1	18.8	56.0	9.0	259	2590	142	10.48	9.94	28.6	371	晴時々薄曇	なし	晴後薄曇		
2016/4/27	15	5	OFF	9.3	18.7	3.3	16.8	30.2	9.0	19.1	57.5	9.2	207	2070	138	9.88	9.32	27.7	315	曇時々晴れ	なし	薄曇時々晴		
2016/4/28	15	5	OFF	4.0	5.1	2.9	16.7	28.6	8.3	24.6	56.2	7.8	469	4690						曇のち雨	なし	雨		
2016/4/29	15	5	OFF	-1.4	3.3	-5.3	13.4	21.5	5.1	22.4	62.1	2.9	571	5710	16	1.01	0.92	24.4		雨→不明	なし→全面凍結	晴一時曇後雨		
2016/4/30	15	5	OFF	-2.6	0.0	-6.1	14.0	24.3	4.2	23.7	56.8	4.1	536	5360	31	1.63	1.38	20.4		不明	全面凍結	晴後曇一時雨		



2015/12/02



2015/12/03



2015/12/04



2015/12/10



2015/12/16



2015/12/22

図 12：地藏山頂駅付近の樹氷の定点観測結果。写真右手が西側であり、季節風が吹きつける向きである。12月から着雪・着氷している。



2016/01/08



2016/01/26



2016/01/29



2016/02/12



2016/02/23



2016/02/24

図 12 (つづき)：地蔵山頂駅付近の樹氷の定点観測結果。写真右手が西側であり、季節風が吹きつける向きである。樹氷化の最盛期の 2 月には、まるまる太った樹氷が見て取れる。



2016/03/10



2016/03/29



2016/05/02

図 12 (つづき) : 地藏山頂駅付近の樹氷の定点観測結果. 写真右手が西側であり, 季節風が吹きつける向きである. 3月上旬に, 衰退している.