共 同 研 究 報 告

整理番号　第　547　号

寒冷地特性を考慮した火山泥流検知システムの開発に関する研究
共同研究報告書

令和　４年　３月

国立研究開発法人土木研究所　寒地土木研究所

日　本　工　営　株　式　会　社

株　式　会　社　　拓　和

共 同 研 究 報 告 書
第 547 号 2022 年 3 月

寒冷地特性を考慮した火山泥流検知システムの開発に関する研究

国立研究開発法人　土木研究所　寒地土木研究所
（平成26年度までは　独立行政法人　土木研究所　寒地土木研究所）

研究調整監付上席研究員	藤浪　武史
寒地河川チーム　上席研究員（平成25年度）	伊藤　丹
寒地河川チーム　上席研究員（平成25、26年度）	船木　淳悟
寒地河川チーム　上席研究員（平成28、29年度）	矢部　浩規
寒地河川チーム　研究員（平成25～28年度）	阿部　孝章
寒地河川チーム　研究員（平成29年度）	伊波　友生

日本工営株式会社

課長	早川　智也
課長補佐	松岡　暁
課長補佐（平成28～29年度）	永野　統宏

株式会社　拓和

システム技術部　課長	村越　貴行
システム技術部　課長代理	宮下　勉
システム技術部　課長代理	柳町　年輝
システム技術部	高木　康佑
札幌支店　課長代理（平成25、26年度）	結城　大介
課長代理（平成27、28年度）	小倉　純一
課長代理（平成29年度）	田口　亮

要旨

積雪寒冷地である北海道では、災害履歴から火山噴火に伴う融雪型火山泥流の発生及び流下に備えた検知システムが必要である。特に長期観測への耐性が求められ、また泥流現象を面的に把握するための多点観測や経済的で精度の高い検知システムの開発が求められている。本共同研究は、近年進歩が著しいセンサ等の小型化や省電力化等専門的な技術を有する民間企業と協働し、積雪寒冷地における火山防災対策の高度化に資することを目的とする。具体的な研究方法としては、積雪層の性状把握、振動型検知センサや新たな接触型検知センサの冬期屋外実験、小電力型通信システムの冬期屋外試験およびこれらの可搬電源の冬期確保等を実施した。その結果、いずれの検知システムも火山泥流検知機能を有すると推察された。

キーワード　　融雪型火山泥流、振動型検知、接触型検知、小電力通信、冬期屋外試験

目　次

１．まえがき　1

２．研究目的
　２．１　研究目的　2
　２．２　本研究で目指す火山泥流検知システムのイメージ　2

３．共同研究参加者の研究方法の概要
　３．１　共同研究参加者の研究方法の概要　4
　３．２　積雪等の性状把握　8
　　３．２．１　十勝岳山麓の積雪密度調査
　　３．２．２　積雪の沈降力
　　３．２．３　十勝岳山麓の積雪期の気温変化
　　３．２．４　積雪層の振動減衰効果

４．共同研究参加者が検討・開発したセンサシステム
　４．１　振動検知システム（市販部品使用型）　15
　４．２　接触型検知システム　18
　４．３　非接触マルチセンサ検知システム　22

５．結論　28

謝辞　28

参考文献　29

1.　まえがき

積雪期の火山噴火は融雪型火山泥流を引き起こす場合があり、北海道では現在の上富良野町および美瑛町で 1926 年 5 月の十勝岳噴火により、大正泥流と呼ばれる融雪型火山泥流が発生し 144 名の命が奪われた（**写真-1**）。泥流災害の特徴は、高速移動すること、流動性が高く遠方まで到達するため被災範囲が広いこと、さらに流木移動を伴うとさらに甚大な被害が発生すること等である[2)]。したがって、下流市街の住民や、噴火活動に備えた緊急的な防災工事等の安全確保のため、泥流発生の早期検知が重要である。1988 年十勝岳噴火以降、現地では泥流の検知に接触型のワイヤセンサが多用されてきている（**写真-2**）。土砂移動によるワイヤ切断によって泥流の発生と見なすことは、検知原理上わかりやすく確実である。しかし、積雪寒冷地では積雪沈降力によるワイヤの切断など維持管理に特に苦慮している。また、ワイヤセンサは一度切断されると再接続の手間が生じるため、噴火活動が活発化し立入りが規制されるとそれ以降の検知再開が困難となる。さらに、ワイヤセンサは、支柱基礎、支柱およびワイヤ等で構成され、老朽化した施設の更新に当たり費用面の負担の重さが考えられる。加えて、ワイヤセンサによる泥流等の検知は、獣などによる接触や電気的ノイズ等による誤作動が生じることもあり、二重設置等により誤検知除去の対策が考慮されている。以上の背景から、移動土砂塊に対して非接触型の振動センサの活用も拡大しつつある。振動検知センサには、「振動検知式土石流センサーを活用した土石流監視手法に関する共同研究報告書」[3)]および「振動検知式土石流センサー設置マニュアル（案）」[4)] という指針が発刊され、普及を支援している。土石流の振動検知に関する技術開発はこれらの資料でほぼ完成形と考えられ、本共同研究を進める上でこれらの資料を参考にした。しかし、積雪寒冷地の火山泥流検知では、火山活動が活発化することによる入山規制、入山規制中の観測継続、積雪層が及ぼす影響および寒冷期の観測や通信機器の耐寒性などの問題がある。

写真-1　十勝岳の融雪型火山泥流　1926 年 5 月 24 日発生　　気象庁ホームページ[1)]から引用

写真-2　積雪期（12 月中旬）のワイヤセンサ

２．　研究目的

２．１　研究目的

本共同研究は、近年進歩が著しいセンサ等の小型化や省電力化等専門的な技術を有する民間企業と協働し、積雪寒冷地における火山防災対策の高度化に資することを目的とする。そのため、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所（以下、寒地土木研究所という）が研究内容を提案し参加者を公募した。その結果、本共同研究に日本工営株式会社および株式会社拓和の二者が参画した。その研究期間は、平成 25 年 11 月 25 日から平成 30 年 3 月 30 日までである。

２．２　本研究で目指す火山泥流検知システムのイメージ

火山泥流の検知に当たり、センサによる泥流の検知、検知したことを集中監視箇所に伝達および伝達された情報の評価が、システムとして必要である。そのシステムに求められる性能を以下に列記する。

・泥流流下等の検知が可能な精度が必要である。しかし地球物理的な観測精度までは求めないこと。

・これまでの検知システムの一部を代替可能な機能を持ち、検知システムの維持管理の簡素化が可能となること。

・検知システム全体が経済的であり、多点観測を可能とすること。

・火山活動の活発化確認後、入山規制までの期間中に検知システム配置が可能な簡素なシステムであること（観測機器等の軽量性、免許取得が不要な通信手段の使用等）。

・入山規制後でも入山規制範囲内で泥流流下等の継続検知を可能とする電源機能の継続性を有すること。

これらのイメージを模式的に表すと**図-1** の赤破線の範囲となる。

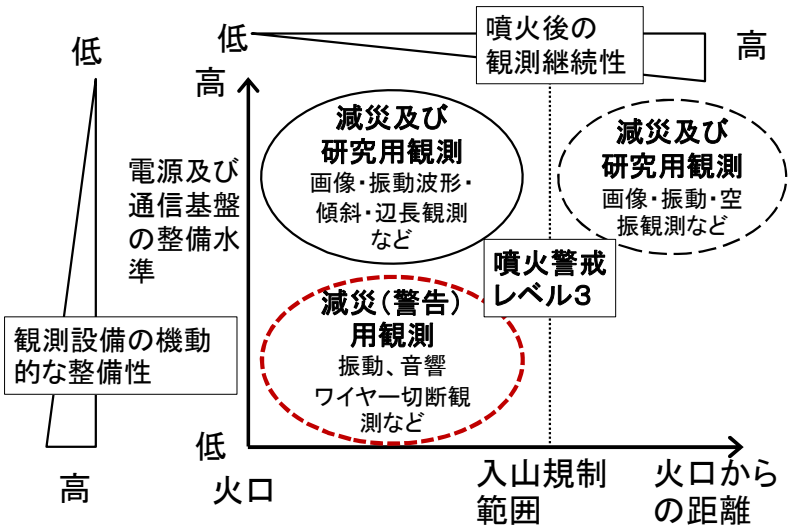

図-1　火山噴火に関する観測内容の模式図

３．　共同研究参加者の研究方法の概要

３．１　共同研究参加者の研究方法の概要

寒地土木研究所、日本工営株式会社および株式会社拓和の三者は、情報交換を密に行いながら、各者の得意分野を活かし主に実験的なアプローチにより、火山泥流検知システムの開発に取り組んだ（**表-1**、2)。検知システムは積雪寒冷地での使用を前提にしていることから、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部の協力を得て十勝岳山麓の直轄砂防事業エリアを現地試験の場として借用した（**図-2**、3、4)。また、北海道石狩市域にある石狩水理実験場（寒地土木研究所が所有）も使用した（**図-5**)。併せて立地条件である積雪深、積雪密度および積雪層による振動減衰の性状について把握に努めた。

寒地土木研究所は、自作可能なシステム構成を意識し半導体ショップで購入可能な静電容量型MEMS （Micro Electro Mechanical Systems） 3 軸加速度センサと Zigbee 規格の通信モジュールを使用して、積雪層の振動減衰効果、雪中センサおよび地上アンテナによる冬期の検知および通信試験を実施した。

日本工営株式会社は、十勝岳山麓を含む火山砂防現場に詳しい強みを活かして、火山山麓における複数年の積雪深および積雪密度試験を実施した。さらに新たな接触型センサとしてえん堤等に設置済みの金属片が泥流により移動あるいは脱失することで磁場の変化を検知する磁性体センサ等を開発した。その実用性試験を北海道上川町の黒岳沢に整備された砂防ダム堆砂域で実施した。

株式会社拓和は、土石流検知センサの実績とノウハウおよび電源管理や通信システム設計の強みを活かして、レーザを用いた積雪深観測、振動検知式センサおよび低消費電力かつ長距離の通信方法 LPWA（Low Power Wide Area）を用いて観測局および監視局をセンサネットワークで構築した。これらは IoT/M2M（Internet of Things / Machine to Machine）クラウド技術を活用して一括して監視することができ、その実証実験を十勝岳山麓において行った。

表-1　共同研究参加者の工程

寒冷地特性を考慮した火山泥流検知システムの開発に関する研究

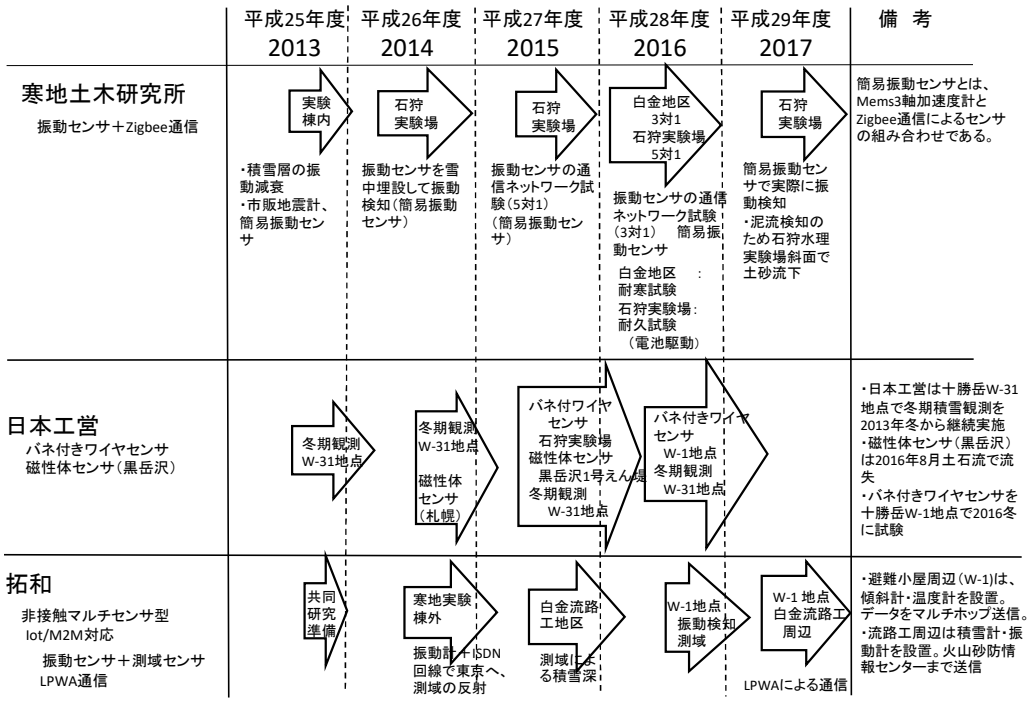

表-2　共同研究参加者が検討・開発したセンサ等の特徴

	振動検知システム（市販部品使用型）	接触型検知システム	非接触マルチセンサ検知システム
開発の方向性	・市販部品を使用し自作できる省電力型振動検知・通信システム	・ワイヤセンサの問題点である積雪による誤検知や維持管理の手間を改善した、融雪型火山泥流検知のための接触型センサの開発	・一つのセンサでは捉えにくい現象を、それぞれの特徴を活かした複数のセンサを用いて頑健な検知システムの構築 ・IoT/M2Mクラウド技術を活用した観測情報監視
積雪に関する試験	・積雪層の振動減衰	・十勝岳山麓の積雪密度調査、気温調査	－
泥流検知の方法	・振動検知 MEMS3軸加速度センサ　KXR94-2050	接触型検知　2種類 ・磁性体センサ　M-GAGE Q7M Flat-Pak ・バネ付きワイヤセンサ	・振動検知 ・振動センサ ・MEMS3軸加速度センサ（発生予測センサ）
流体の量的把握	－	－	・測域センサ（レーザセンサ）による流体断面積の連続把握による
主たる通信方法	Zigbee通信 2.4GHz　帯 通信距離（実験の最大） 約800m	－	LPWA通信のうちLoRa 920MHz帯 通信距離（実験の最大） 約6km
電源	・振動検知・通信試験は乾電池を使用	・ソーラーパネル＋蓄電池	・通信試験に乾電池あるいはソーラーパネル＋蓄電池を使用 ・観測および通信であれば1冬シーズンの耐久性OK
集約したデータの遠隔監視	－	－	IoT/M2Mクラウド技術を活用し、携帯回線等でネットワーク上のサーバに伝送することで、webページにて閲覧可能

図-2　十勝岳周辺における主な冬期現地試験位置　国土地理院地図から引用

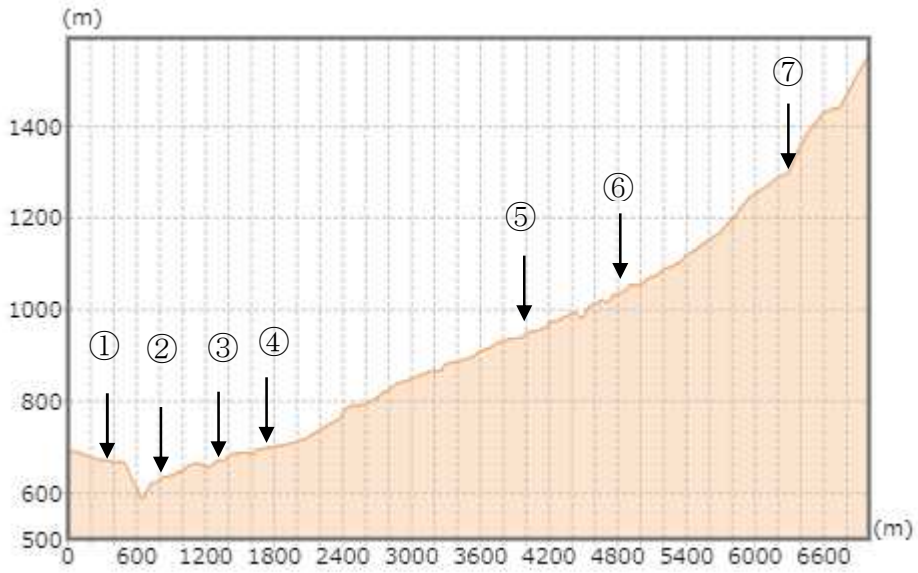

図-3　十勝岳山麓の現地試験箇所断面図　（国土地理院地図から断面図を作成）

① 火山砂防情報センター　② 白金流路工地点　③ 1号ダム地点
④ 3号ダム地点　⑤ 望岳台地点　⑥ W-31 地点
⑦ W-1 地点（避難小屋近傍）

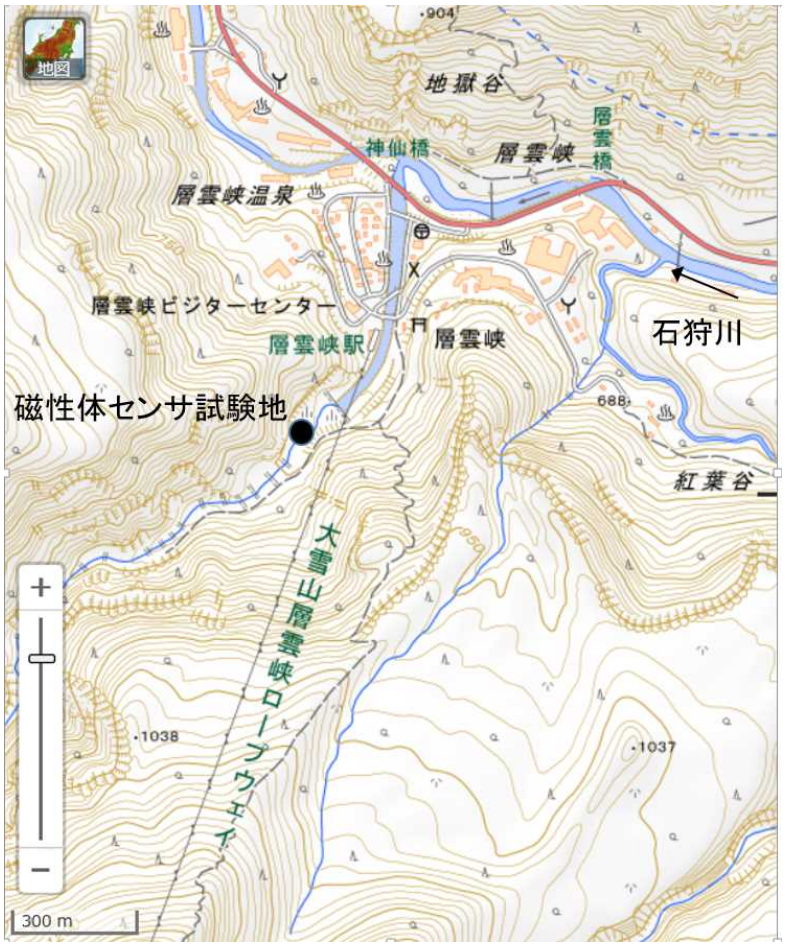

図-4　磁性体センサ試験地位置（北海道上川町層雲峡）
国土地理院地図から引用

図-5　石狩水理実験場位置（北海道石狩市）
国土地理院地図から引用

３．２　積雪等の性状把握

３．２．１　十勝岳山麓の積雪密度調査

十勝岳山麓には国土交通省が設置した 2 点の積雪深観測所がある。どちらも平衡斜面に設置されている。上位には十勝岳積雪深観測所（十勝岳避難小屋地点）標高約 1,320m、下位には望岳台積雪深観測所 標高約 930m がある。国土交通省が提供する水文水質データベースを基に、2013 年冬から 2017 年春までの 4 シーズンの積雪深変化を**図-6** に示す。積雪深については 3 つの特徴が見られ、年によって積雪深に大小の差が大きいこと、特に 3 月以降例年とくらべ積雪深が増加する場合があること、および 5 月後半には各年とも積雪深は 0cm となる例が多いことである。なお、2013 年～2014 年のシーズンの望岳台観測所は欠測である。

積雪密度は、2014 年 4 月、2015 年 4 月、2016 年 4 月および 2017 年 4 月の 4 回、十勝岳山麓にて調査を実施した。調査地点は、十勝岳山麓に設置しているワイヤセンサ 31 号（W-31）近傍で、北緯 43 度 26 分 26.67 秒、東経 142 度 39 分 07.84 秒の沢地形の箇所であり標高約 1,020m である（**図-7**、**表-3**）。併せて定点カメラにより積雪状況を撮影し、画像から積雪深を判読した（**写真-3**、4、5、 **図-8**、9）。

図-7 から観測地点の積雪密度は、地表 0.5m 以深は 0.5g/cm^3 で概ね一定と考えられる。

なお、積雪密度調査時の積雪深は 2014 年 4 月が約 3.5m、2015 年 4 月が約 3.8m、2016 年 4 月が約 3.0m および 2017 年 4 月が約 3.7m であった。

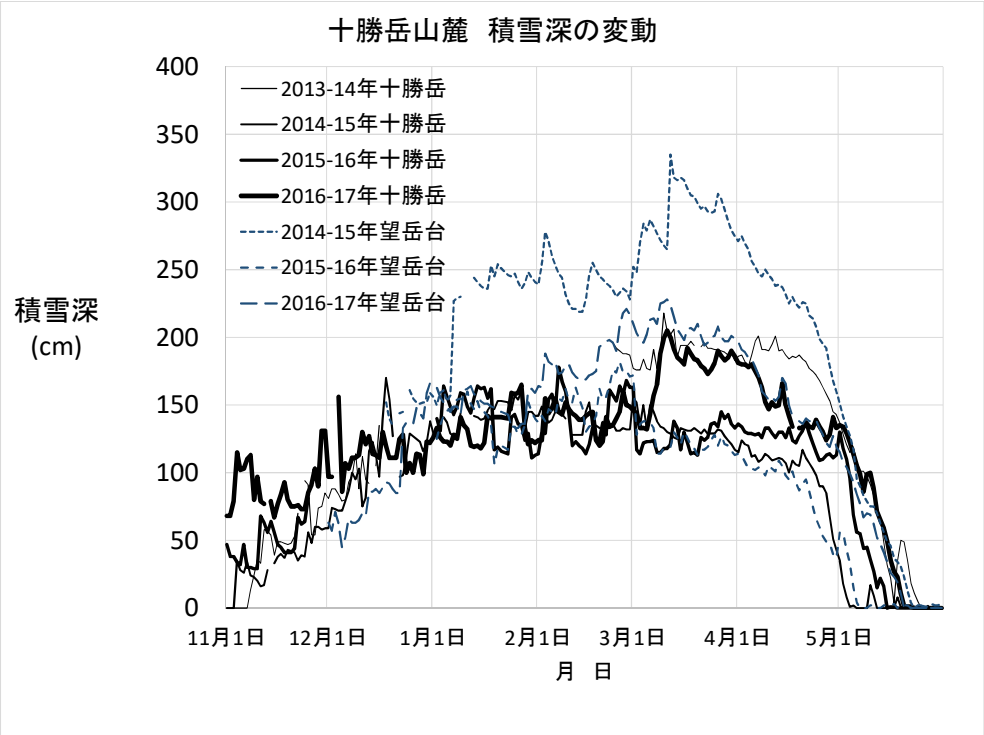

図-6　十勝岳観測所および望岳台観測所の積雪深（午前 9 時値）の変化

表-3　積雪密度の調査値

	地表からの深さ(m)	積雪密度(g/cm3)
2014年 4月24日調査	0.55	0.457
	0.55	0.487
	1.45	0.519
	1.45	0.567
	2.45	0.521
	2.45	0.507
2015年 4月10日調査	0.4	0.452
	0.4	0.474
	1.2	0.543
	1.2	0.465
	2.8	0.471
	2.8	0.567
2016年 4月20日調査	0.5	0.532
	0.5	0.523
	1.3	0.538
	1.3	0.516
	2.3	0.514
	2.3	0.404
2017年 4月21日調査	0.5	0.507
	0.5	0.498
	0.9	0.526
	0.9	0.523
	2.5	0.536
	2.5	0.543
	3.2	0.576
	3.2	0.530

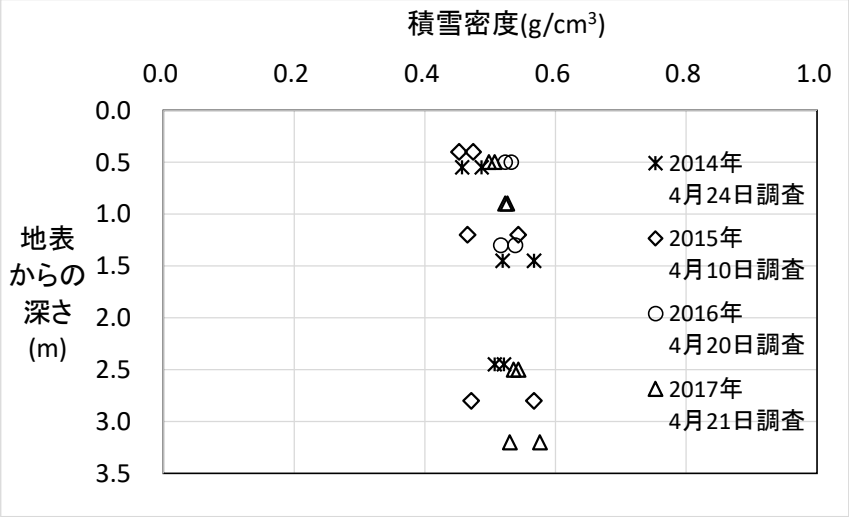

図-7　十勝岳山麓（W-31）の積雪密度

写真-3　定点カメラ設置状況

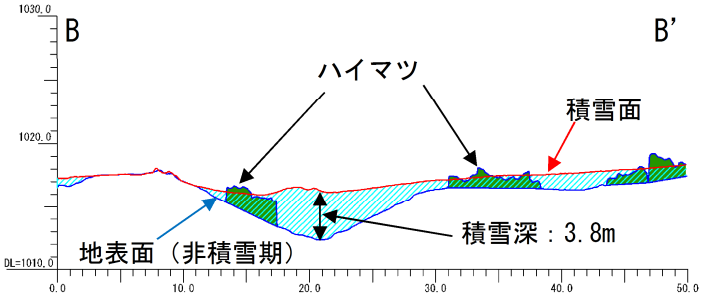

図-8　積雪深撮影断面

写真-4　積雪深判読の事例

写真-5　W-31 支柱に設置した観測機器

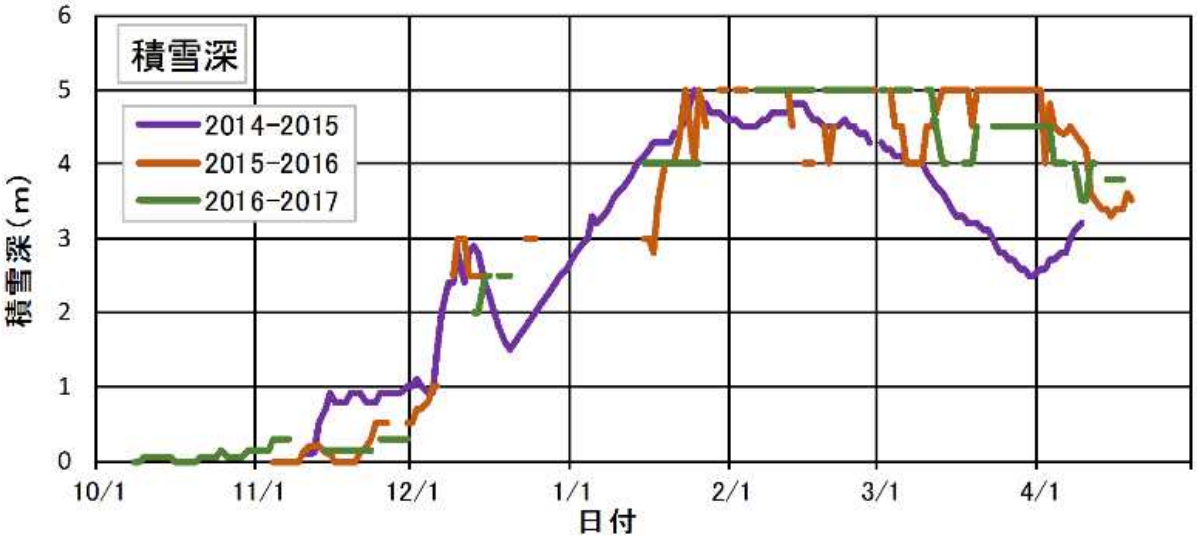

図-9　W-31 地点付近の窪地の積雪深変化

３．２．２　積雪の沈降力

ワイヤセンサの切断の要因として積雪の沈降力と、ワイヤに付着した雪氷の回転等（**写真-6**）が考えられる。また、沈降力に影響する積雪密度変化は、調査地点付近で 3 月中旬から始まる融雪期にあたり、積雪後の圧縮等や融雪および再凍結の影響により密度が上昇すると考えられる（**図-10**）。長田ほかは、幅 0.1m、長さ 1.6m の積雪荷重計測用の梁を複数の地上高さに設置して、積雪の沈降荷重を計測した[5)]。**図-11** の 1967 年から 1968 年の積雪シーズンのグラフの見方は、計測用梁を地上高さ 30cm から 30cm ごとに地上高 180cm まで設置し、それらの最大沈降荷重をプロットしたものである。そしてそのシーズンの最大積雪深 332cm を沈降荷重 0 とみて線で結んだものである。この図により雪面から積雪深の 1/2 から 2/3 の深さで沈降力が最大になる傾向（**図-11**）が見られる。これら現地の積雪密度の実測は、ワイヤセンサの切断防止策を検討する上で、重要な基礎資料となる。

写真-6　ワイヤセンサの着氷状況

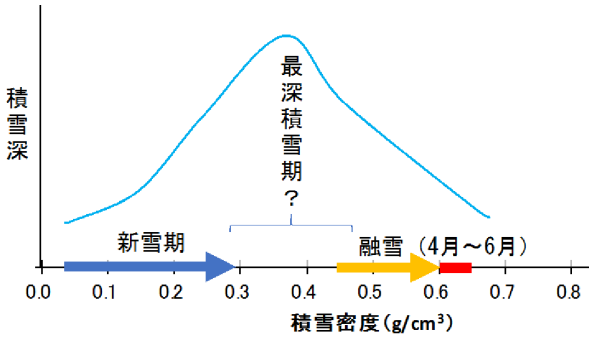

図-10　新雪から融雪までの積雪密度変化の概念

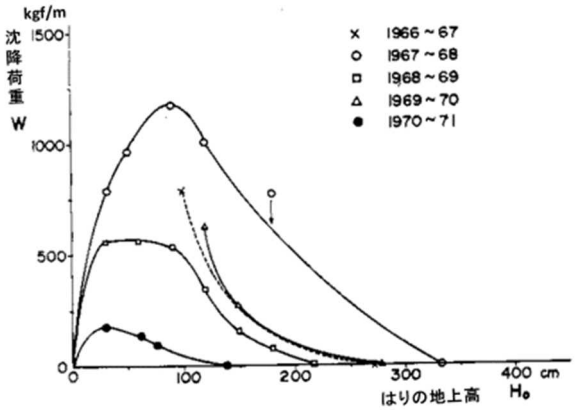

図-11　積雪深による積雪沈降荷重　参考文献 5)から引用

３．２．３　十勝岳山麓の積雪期の気温変化

W-31 地点の積雪期の 2014 年～2015 年と 2016 年～2017 年の２冬シーズンの気温変化（日最高気温は実線、日最低気温は破線）を実測した（**図-12**）。気温計はワイヤセンサ支柱の地上約 1.0m に設置した。現地は平衡斜面のため吹きさらしである。

なお、2015 年～2016 年の冬シーズンの気温データは欠測である。

日最低気温に着目すると、マイナスの期間は 11 月初頭から翌年 4 月半ばである。またシーズン最低気温は 1 月中旬から 2 月上旬にかけてマイナス 20 度を下回った。観測できた期間に限定すると、最低気温の下限はマイナス 25 度程度と考えられる。また、同一日の気温変動は大きい場合でも概ね 15 度とみられる。

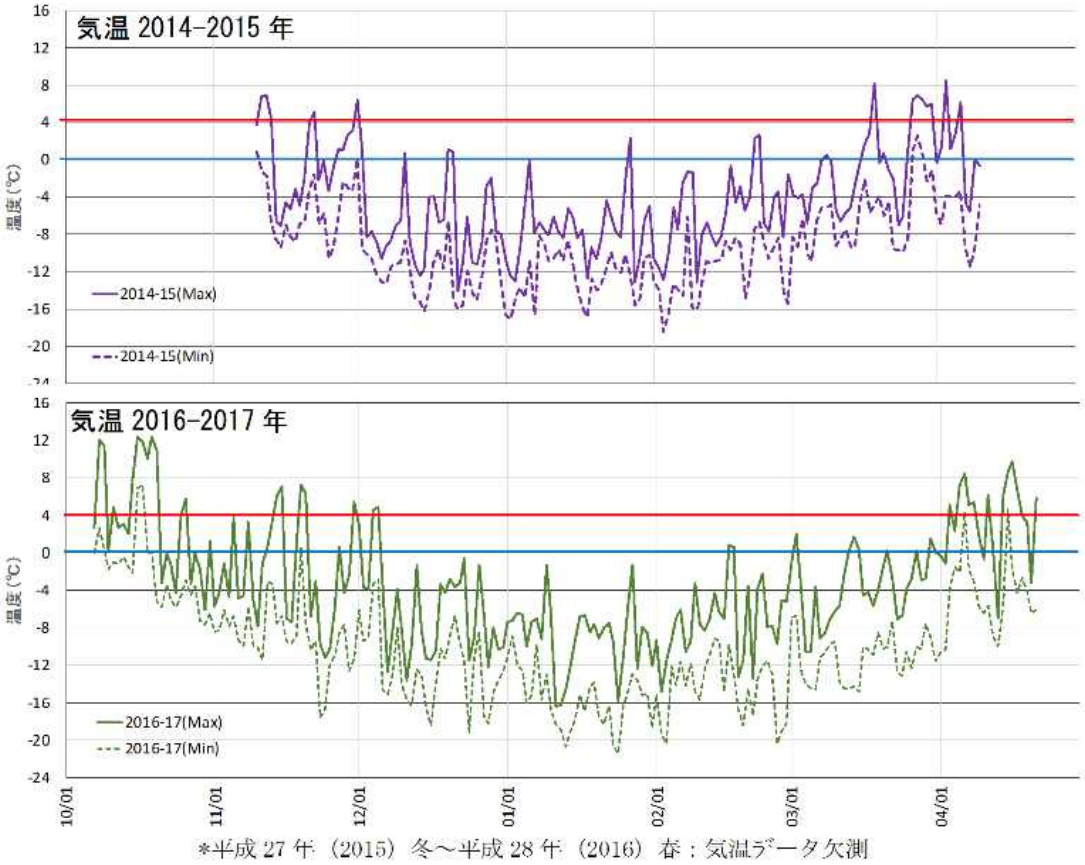

図-12　W-31 地点の積雪期の日最高気温（実線）と日最低気温（破線）の変化

また、2016 年 1 月下旬から 4 月下旬まで、白金流路工地点（標高約 635m）において、振動センサを地表下 0.5m に埋設した。この振動センサは常時通電型で変換器を伴い、電源はソーラーパネルと蓄電池である。この設置箇所はほぼ全期間積雪しており外気温から保護されているため、地中埋設した変換器の温度は、期間中プラス 3 度程度でほぼ一定であった。このことから、積雪寒冷地における冬期の可搬電源の機能持続には、地中埋設が有効であると考えられる。

３．２．４　積雪層の振動減衰効果

土石流や火山泥流の振動検知にあたり、積雪層の存在が振動減衰に与える影響に関する知見は非常に少ないと考えられる。そのため、室内実験により積雪層厚と振動との関係について求めた（**図-13**）。

剛性を高めた長さ 5.0m、幅 1.0m、高さ 1.2m の木製水路に、下層を土層とし上層を積雪層とし、土層中に振動センサを埋設した。センサは、2Hz 3 成分速度型地震計（CDJ-S2C-2 Chongqing Geological Instrument Factory 製，中国）、**写真-7** のオレンジ円柱）と MEMS 3 軸加速度センサ（KXR94-2050（Kionix Inc.製，米国）、**写真-7** の白プラスチック容器内に収納）の 2 種類を使用した。2Hz 3 成分速度型地震計は地震の野外観測に実績があるため、市販の MEMS 3 軸加速度センサに対して観測精度面の比較対照として選定した。

ここでは、重さ約 5.1kg のボウリング球落下による起振（**写真-8**）に関して述べる。

図-14、15 から、積雪層の厚さが大きくなると、ボウリング球落下による検知速度の振動波形の振幅が指数関数的に逓減することがわかった[6),7),8)]。

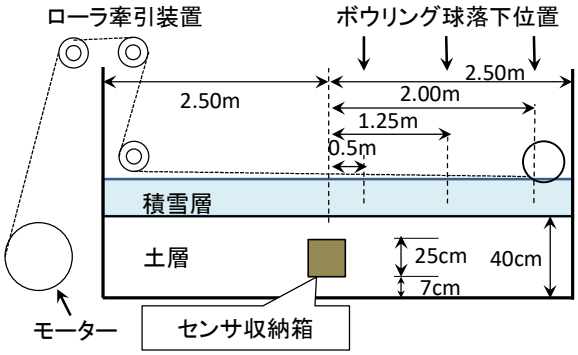

図-13　実験装置の断面模式

写真-7　振動検知センサの埋設

写真-8　ボウリング球落下による起振

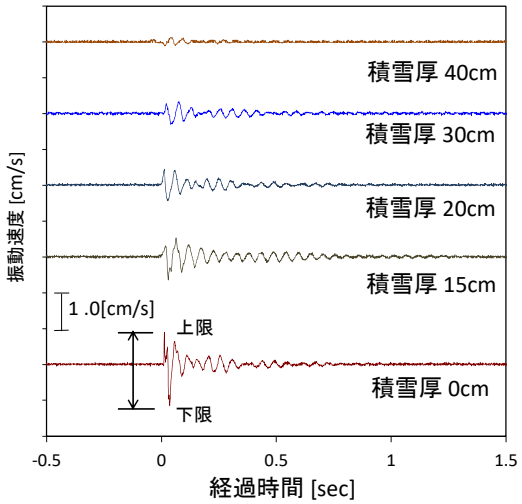

図-14　ボウリング球 1.0m 落下による上下方向の振動速度
（落下地点はセンサ収納箱中心からの離隔 1.25m）

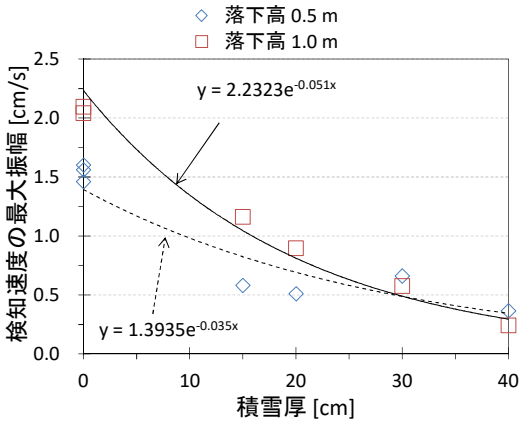

図-15　ボウリング球 1.0m および 0.5m の落下による上下方向検知速度の最大振幅
（落下地点はセンサ収納箱中心からの離隔 1.25m）

４．　共同研究参加者が検討・開発したセンサシステム

４．１　振動検知システム（市販部品使用型）

寒地土木研究所が目指した泥流検知システムは、安価なため老朽化してもすぐ交換でき、多点観測も可能なシステムである。いずれも半導体ショップ等で市販されている、汎用小型マイコンボード　Arduino UNO R3 互換ボード（Saint Smart 製, 米国）に、MEMS 3 軸加速度センサー（KXR94-2050）および通信モジュール（XBee ZB(S2C)）等で構成され（**写真-9**）、1 台当たり 1 万円程度で自作できる [9]。

MEMS 3 軸加速度センサに関して、積雪層の振動減衰実験 [5]における、速度型地震計と MEMS 3 軸加速度センサの検知波形を比較（**図-16**）し、MEMS 3 軸加速度センサが実用に耐える検知精度であることがわかった。

野外実験により、MEMS 3 軸加速度センサーを使用して火山泥流を模した流体の振動検知を行った [10),11)]。その結果、泥流の流下時間帯の振動を計測できており、泥流検知機能を有していることがわかった（**写真-10**、**図-17**、**18**）。

Zigbee 通信モジュールによる伝搬試験は、公称最大通信距離 1,200m の市販品を使用して、冬期の十勝岳火山砂防情報センター付近で乾電池電源により実施した。1.8kW 級ランマーやハンマー打撃により人為的に起振し、通信距離約 400m、約 600m および約 800m の通信を確認できた。Zigbee 通信では、マルチホップ機能と呼ばれる、端末同士が通信を中継しあい、バケツリレーのようにデータを届ける機能を有している。しかし、この伝搬試験では、観測地点数 3 に対して受信地点 1 のスター型多対 1 試験を実施した（**写真-11**、**12**、**13**）。阿部ほか [12)]の報告の通り試験中に吹雪に遭遇し、受信地点から発信地点の目視ができない状態であっても、通信は可能であった。また、公称最大通信距離 120m の通信モジュール（XBee ZB）を使用し、石狩水理実験場で伝搬試験を行った。通信距離別、電源別、送信部の雪中埋設 [9),13),14)]を実施したほか、通信間隔別、観測地点数 5 に対して受信地点 1 のスター型多対 1 試験を実施した [15)]。

写真-9　振動検知センサ（右）と通信モジュール（左）

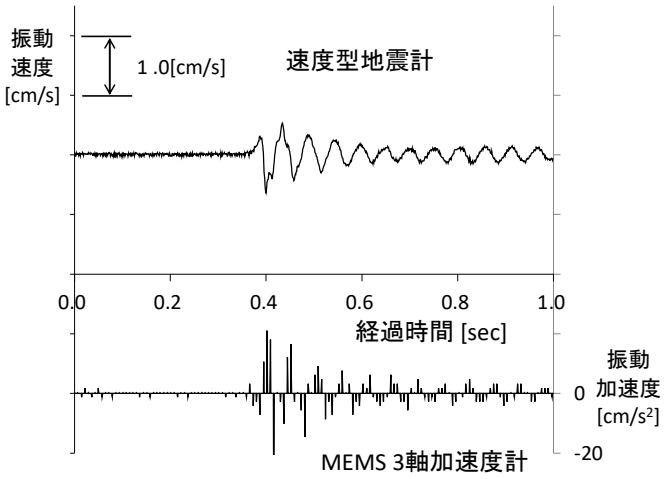

図-16　ボウリング球 1.0m 落下、積雪深 15cm による上下方向検知速度および検知加速度
（落下地点はセンサ収納箱中心からの離隔 1.25m）

写真-10　泥流流下検知試験の状況

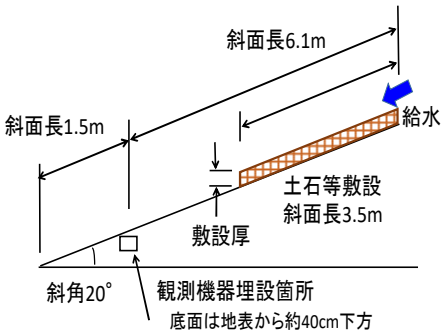

図-17　実験斜面の模式図

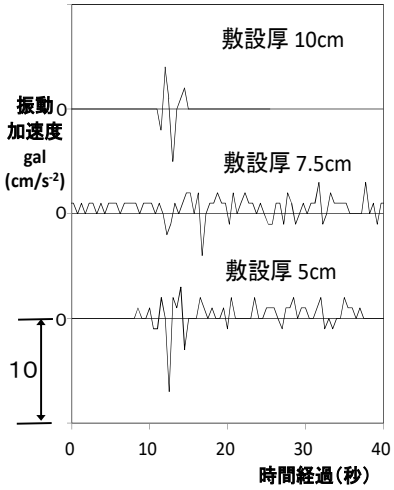

図-18　試作センサによる敷設厚別泥流の波形

写真-11　白金地区通信試験
（流路工部から対岸の火山砂防情報センターまで約 600m の通信試験）

写真-12　白金地区通信試験
（1 号ダム袖部から対岸の火山
砂防情報センターまで
約 800m の通信試験）

写真-13　白金地区通信試験（受信地点の十勝岳
火山砂防情報センター）

４．２　　接触型検知システム

日本工営(株)　札幌支店が目指した泥流検知システムは、接触型センサの長所である検知のわかりやすさを活かし、ワイヤセンサの短所である切断後の再検知不可や誤作動を改良した検知システムである。実用化にあたり、接触型センサと非接触型センサとの組合せによる信頼性向上という基本方針は不変である。

本共同研究では、検知原理の異なる接触型センサを 2 種類試作した。一つは磁性体センサであり、もう一つはバネ付きワイヤセンサである。

磁性体センサは、センサ周辺の金属など磁性体の動きに反応するセンサである。2014 年～2015 年の積雪シーズンに、磁性体センサを札幌市内の野外に設置し降雪や積雪に反応しないことを確認した。また、実験水路側面に磁性体センサを設置し、礫、砂および水の流下に反応しないことも確認した。これらを踏まえ、磁性体センサを 2 種類試作した。一つは磁性体センサを固定し、泥流の流下において設置した鋼板が流失することで磁場が変化する「固定式センサ」である。もう一つは、磁性体センサ自身の変位あるいはセンサ保護具（本研究では車のコイルスプリング）の変位により相対的な磁場の変化を検知する「可動式センサ」である（**写真-14、15**）。可動式センサは相対的な磁場の変化を検知するため、1 基の設置でも複数回の泥流検知が可能な場合もある。しかし、固定式センサおよび可動式センサともに設置高を変えて複数設置することで複数回の泥流検知の信頼性が向上すると考えられる。

磁性体センサの現地試験は、2015 年 10 月から 2016 年 6 月にかけて、上川町層雲峡地区の砂防ダム堆砂敷において実施した。センサの設置時、調整時およびデータ回収時には両方式の磁性体センサが反応したことから、実用的な検知精度を保有すると考えられる。

残念なことに、2016 年 8 月 23 日に発生した土石流により、磁性体センサによる検知システムが流失したため、検知実績は得られなかった。また、試作品の流失のため、以降の観測は実施できな

写真-14　磁性体センサの設置状況
上位は可動式、下位は固定式
（2015 年 11 月撮影）

写真-15　磁性体センサの設置状況
白線は 2016 年 8 月土石流の堆砂面
（2015 年 11 月撮影）

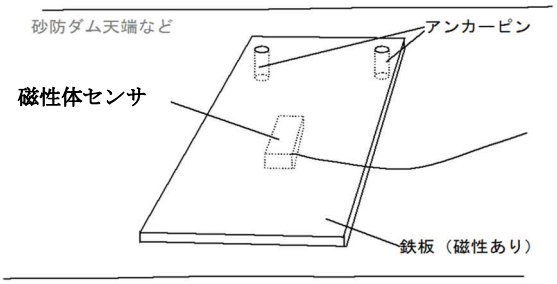

図-19　固定式磁性体センサの現地試験仕様

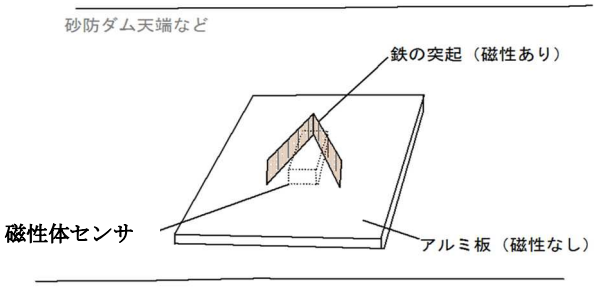

図-20　固定式磁性体センサの改良案

かった。しかし、厳寒で多雪地の北海道上川町層雲峡地区で 1 冬シーズンを、12V バッテリー 65Ah 2 個と 90W ソーラーパネル 2 面で観測持続できた実績は残った。併せて、固定式センサおよび可動式センサともに改良案を考案した。固定式センサにおいては、泥流が堆積傾向にある場合でも金属板が確実に外れるか（**図-19、20**）に着目した。可動式センサについては複数回の泥流を検知するため、センサ本体の破損を防ぎ保護具が下流側から変形しないことを目的に、車両スプリングから板バネ使用等への変更検討を行った。

バネ付きワイヤセンサは、ワイヤ部にバネ構造を組合せることにより、フレキシビリティを持たせ、切断防止を企図し、風や雪による影響を除外した土砂や泥流の流下だけを検知すること（**図-21、22**）を目指すものである。この方法は、鉄道線路脇の斜面などに設置実績を有する「落石監視システム」の応用である。そして、バネ付きワイヤセンサには落石監視システム[16]に採用したワイヤスイッチ方式（特許登録第 4365874 号）を採用している。

バネ付きワイヤセンサの現地試験は、寒地土木研究所石狩水理実験場（**写真-16、図-23**）において 2016 年 1 月から 4 月まで、十勝岳山麓 W-1 地点（**図-24**）において 2016 年 12 月から 2017 年 6 月まで実施した。電源はいずれも商用電源を使用した。いずれの箇所でも 1 冬シーズンを観測持続に成功した。とくに十勝岳山麓 W-1 地点は厳寒地である。

なお、バネ付きワイヤセンサ試作品は、想定した積雪深によるワイヤの伸び量に対して、ワイヤをその分、あらかじめ弛ませておくことで、積雪によるワイヤロープの切断防止を期待した（**図-22**）。石狩水理実験場を使用した現地実験では、ワイヤの弛み量を 37cm として設置した。結果的に設置期間中の積雪や融雪（積雪深最大 1.2m）によるワイヤの伸び量は 26cm であり、ワイヤの切断は無かった（**図-23**）。十勝岳山麓 W-1 地点における現地実験では、積雪に関連すると思われるループ（弛み）長は 2 月 21 日の 180cm を初期値とし、その総変化量は 5 月 24 日までで 130cm である（**図-24(C)**）。融雪により積雪が減少している間でも、ループ長が減少している。欠測期間のループ長の減少状況は不明だが、4 月 20 日以降の緩やかな変化傾向とは異なり、急な減少を示す時期が、4 月 20 日以前にあったことが推察される（**図-24(C)**）。これらの結果、観測期間中のワイヤの切断はなかった。

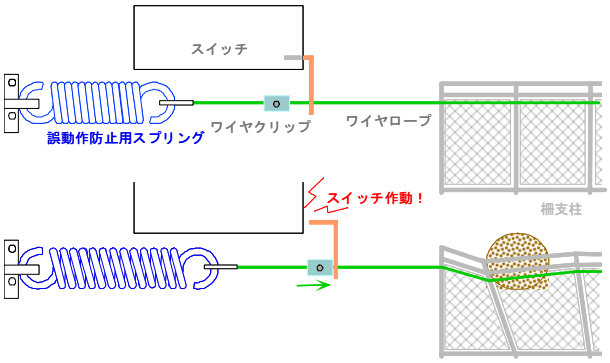

図-21　バネ付きワイヤセンサの実績例

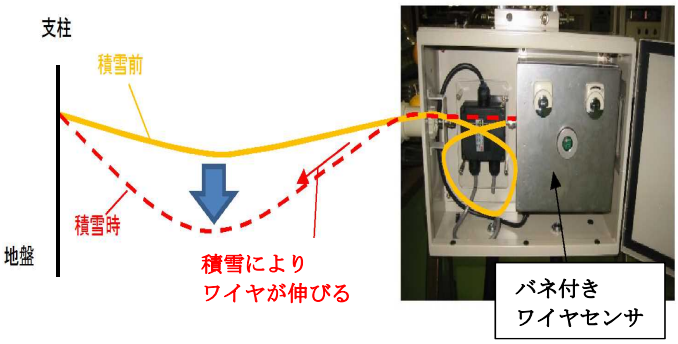

図-22　バネ付きワイヤセンサ試作品の模式

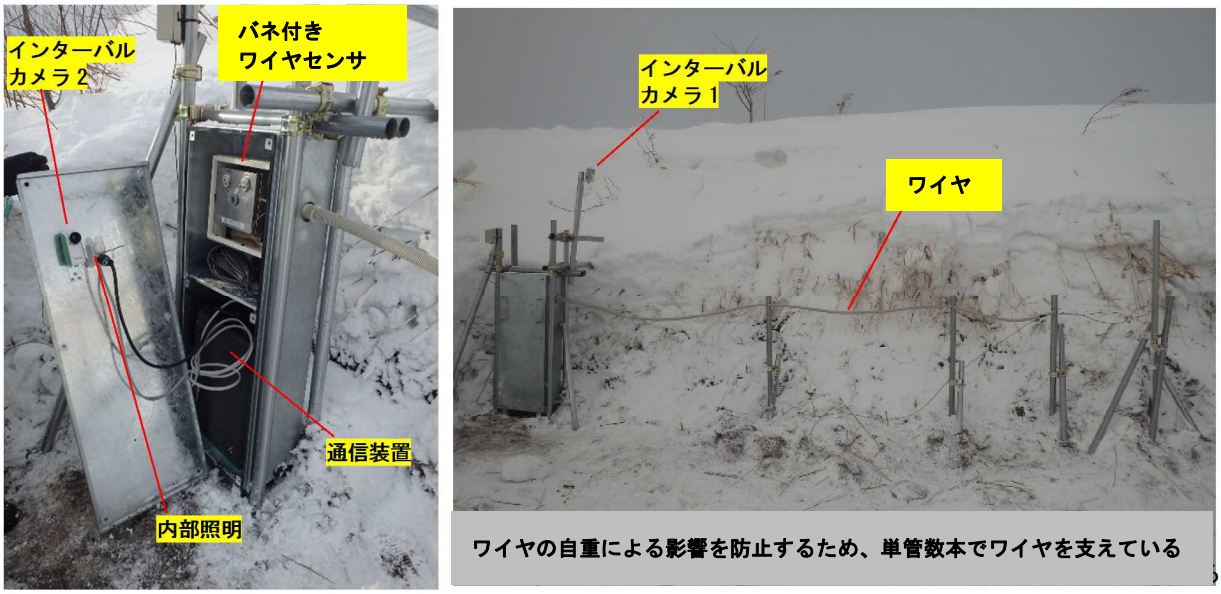

写真-16　バネ付きワイヤセンサの現地試験状況（石狩水理実験場）

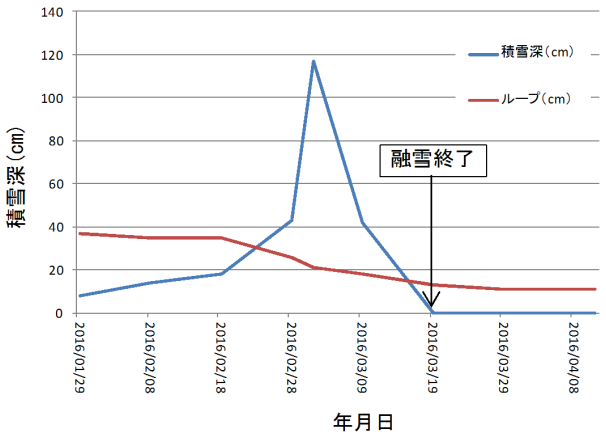

図-23　ワイヤ弛み量が 37cm から 11cm に減少（石狩水理実験場）

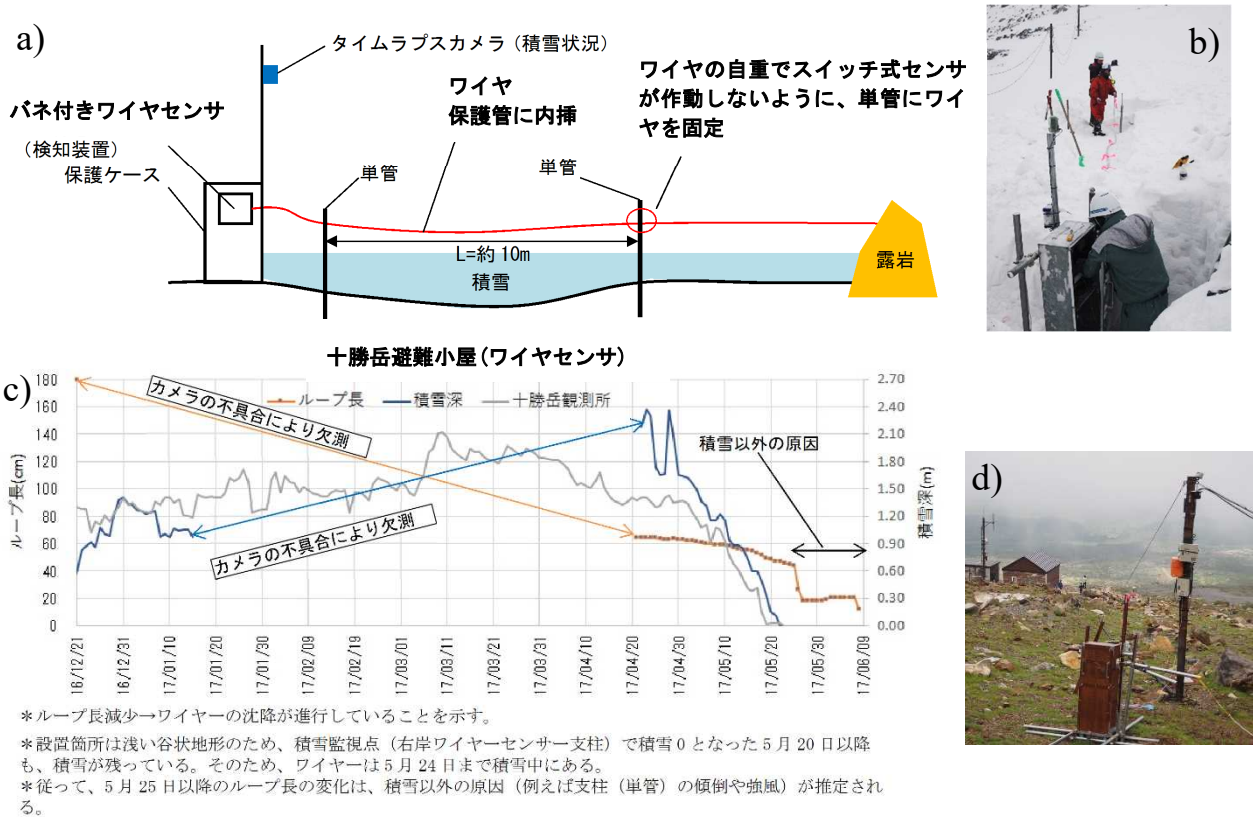

図-24　a）W-1 地点におけるバネ付きワイヤセンサの現地実験模式
b）バネ付きワイヤセンサの設置状況（ピンクテープ部がワイヤ）
c）バネ付きワイヤセンサのループ長（弛み長）の時間変化
d）検知装置保護ケース（茶色箱）の設置状況

４．３　非接触マルチセンサ検知システム

株式会社拓和が目指した泥流検知システムは、一つのセンサでは捉えにくい現象をそれぞれの特徴を活かした複数のセンサを用いて頑健な検知システムの構築である。それぞれの特徴とは、より火口に近いと電源整備が期待できないことから、簡易で設置が容易なセンサを乾電池電源等で観測や長距離通信することであり、電源状況が改善される中腹部や下流側では、詳細なデータ取得が可能な振動センサやレーザセンサにより観測しその値を連続的に通信することである。

例えば、新しく開発した発生予測センサには、泥流の発生を検知する振動センサに MEMS 3 軸加速度センサを使用した。また温度センサを搭載し、併せて他のセンサの検知信号を入力、伝送する機能に加え、無線中継機能を一つのパッケージとして持たせた。これらの電源は乾電池である。発生予測センサの使用環境条件は厳しいと考えられることから MEMS 3 軸加速度センサの中でもテストにより安定性の高い製品を使用した。その発生予測センサで泥流流下を検知したことを契機に下流側の振動センサや測域センサ（レーザセンサ）を起動させる（**図-25**）[17]。電源基盤や高速通信基盤が整備されている下流側の振動センサは、加速度波形の観測および通信が可能となる。

測域センサは流体の断面積を連続的に測ることで流体量を把握するものである。このためには電源基盤や高速通信基盤の整備が前提となる。測域センサは、レーザ光の反射により測距するもので、反射強度により水面、雪面および火山灰面が判別できる。2016 年 1 月から 3 月にかけて、十勝岳火山砂防情報センター脇の積雪面高を観測し、寒冷期の実用性を確認した[18]。さらに 2017 年 12 月から 2018 年 3 月にかけて、W-1 地点において積雪面高を観測し、観測信頼性の確認を行った（**図-26**）[19]。

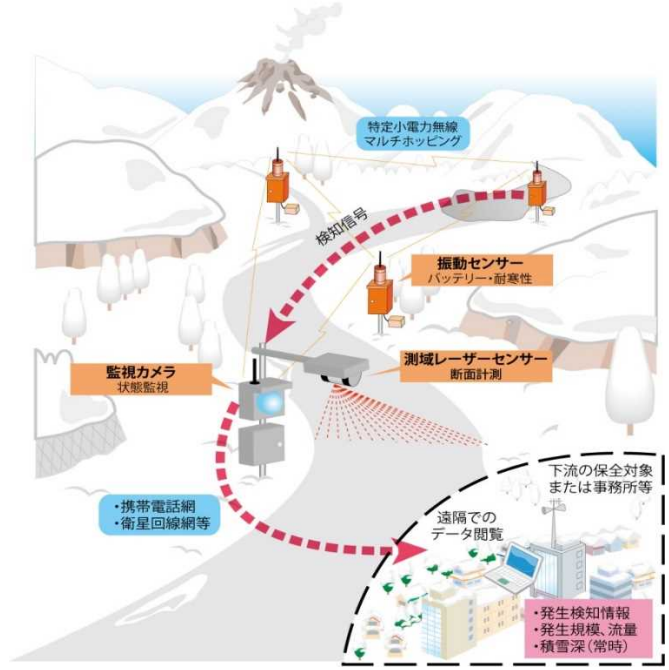

図-25　非接触マルチセンサ型火山泥流検知システム模式

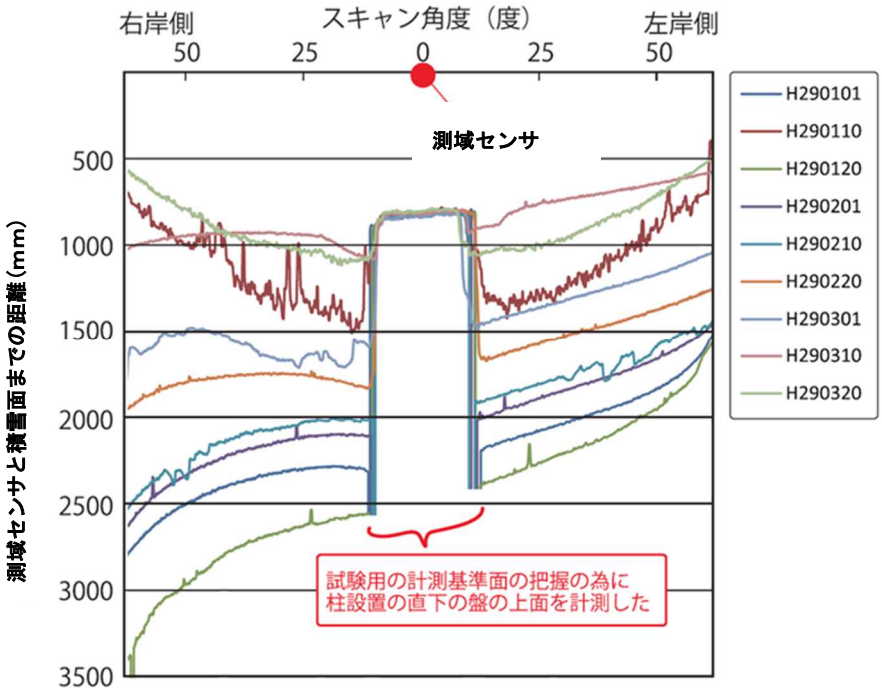

図-26　W-1 地点の支柱に取り付けた測域センサの積雪面高観測の結果

通信試験は、免許申請が不要で消費電力が小さく、数 km の伝送が可能な LPWA（Low Power Wide Area）通信を使用した。低速である LPWA 通信は、閾値の超過による警報や当該時点の観測値の出力および通信に適している。W-1 地点から十勝岳火山砂防情報センターまでの約 6km を観測点 8 箇所、受信地点 1 箇所を LPWA 通信の特徴を生かし、マルチホップ機能を使用して結んだ。マルチホップ機能とは、端末同士が通信を中継しあい、バケツリレーのようにデータを届ける仕組みのことである（**表-4、5、写真-17、18、19、20**）[20]。火山砂防情報センターは、流路工地点から比高約 50m の台地面にあり、通信上、地形的な支障が想定された。それを抑制するため、3 階テラスおよび駐車場脇に無線中継点を配置した。通信試験の実施時期は 2017 年 12 月下旬から 2018 年 3 月までである。このうち、特に寒さが厳しいと考えられる 2018 年 2 月 2 日から 17 日までの 2 週間を精査すると、W-1 地点から火山砂防情報センター3 階監視室までの区間では、ほとんどの期間でデータ収集成功率 100%、受信強度 110dBm（±5dBm 程度）、成功率 99.6～97.8%が数回あったが、安定したデータ転送が可能であることを確認した（**図-27**）。また、中継機能の特徴である中継経路を自動に最適経路に変更・伝送する機能も確認できた（**図-28**）。なお、通信量は 3 軸加速度センサの X、Y、Z 軸の加速度と温度および振動センサ等からの警報信号 1 点の 5 量のデータを 15 秒間隔で送信した。無線中継装置を含む発生予測センサの乾電池は、2017 年 12 月下旬から 2018 年 3 月まで余力を持って電源機能を持続した。また、泥流等により発生予測センサ設置箇所が傾いた場合、受信側で 3 軸加速度からセンサの傾斜に変換が可能である。

これらのように、実際の火山泥流監視状態を想定して、上・中・下流の観測局および監視局をセンサネットワークで構築し、振動、積雪面高等の観測情報等の情報を監視局に集約した。これらの

情報は、IoT/M2M（Internet of Things / Machine to Machine）クラウド技術を活用し、携帯回線等でネットワーク上のサーバに伝送することにより、通信状況および通信経路を含む一括した監視システムが構築でき、それらを実証した。

表-4　十勝岳山麓の観測地点と電源

設置地点	観測機器等	電源
W-1地点	振動センサ（地中埋設） 発生予測センサ （3軸加速度センサ、温度センサ、無線中継装置）	商用電源（振動センサ） 乾電池（発生予測センサ）
W-31地点	発生予測センサ （構成内容はW-1地点と同一）	乾電池
望岳台	発生予測センサ （構成内容はW-1地点と同一）	乾電池
3号ダム袖部	発生予測センサ （構成内容はW-1地点と同一）	乾電池
1号ダム袖部	発生予測センサ （構成内容はW-1地点と同一）	乾電池
流路工（すばる橋下流右岸）	振動センサ（地中埋設） 測域センサ 簡易webカメラ 発生予測センサ （構成内容はW-1地点と同一）	（ソーラーパネル（85W×1, 50W×1）＋蓄電池（100Ah×1））（振動センサ、測域センサ、簡易webカメラ） 乾電池（発生予測センサ）
火山砂防情報センター 3階テラス	発生予測センサ （構成内容はW-1地点と同一）	乾電池
火山砂防情報センター 駐車場脇	発生予測センサ （構成内容はW-1地点と同一）	乾電池
火山砂防情報センター 3階監視室	受信地点、データ集約装置	商用電源

表-5　発生予測センサの諸元

項目	詳細	備考
駆動電源	単一乾電池　6個	
内蔵センサ	3軸加速度センサ 温度センサ	3軸加速度データは受信側でセンサの傾斜に変換可能
センサ入力	ワイヤセンサ警報接点入力　1ch 振動センサ警報接点入力　1ch	既設センサを有効活用し、伝送装置のみ更新する場合も想定
センサ出力	警報接点出力	閾値超過を出力
使用周波数	920MHz帯	
変調方式	GFSK変調　： ARIB STD-T108準拠	ノイズに強く（他の電波に干渉されにくく）、より長距離通信に向けて、スペクトラム拡散方式等も今後検討予定
最大伝送距離	十勝岳山麓の現地試験で約6km	
最大ノード・ホップ数	100台、10ホップ	
センサ筐体サイズ	198×280×100mm	

写真-17 W-1 地点の支柱に発生予測センサ等を設置。上の丸枠内は測域センサ。矢印の地中に振動センサを埋設。奥の建物は十勝岳避難小屋

写真-18 3 号ダム地点の発生予測センサ（無線中継装置）

写真-19 流路工地点の振動観測、積雪深観測および発生予測センサ（無線中継装置）。丸枠内は測域センサ

写真-20　火山砂防情報センター3 階テラスの発生予測センサ（無線中継装置）

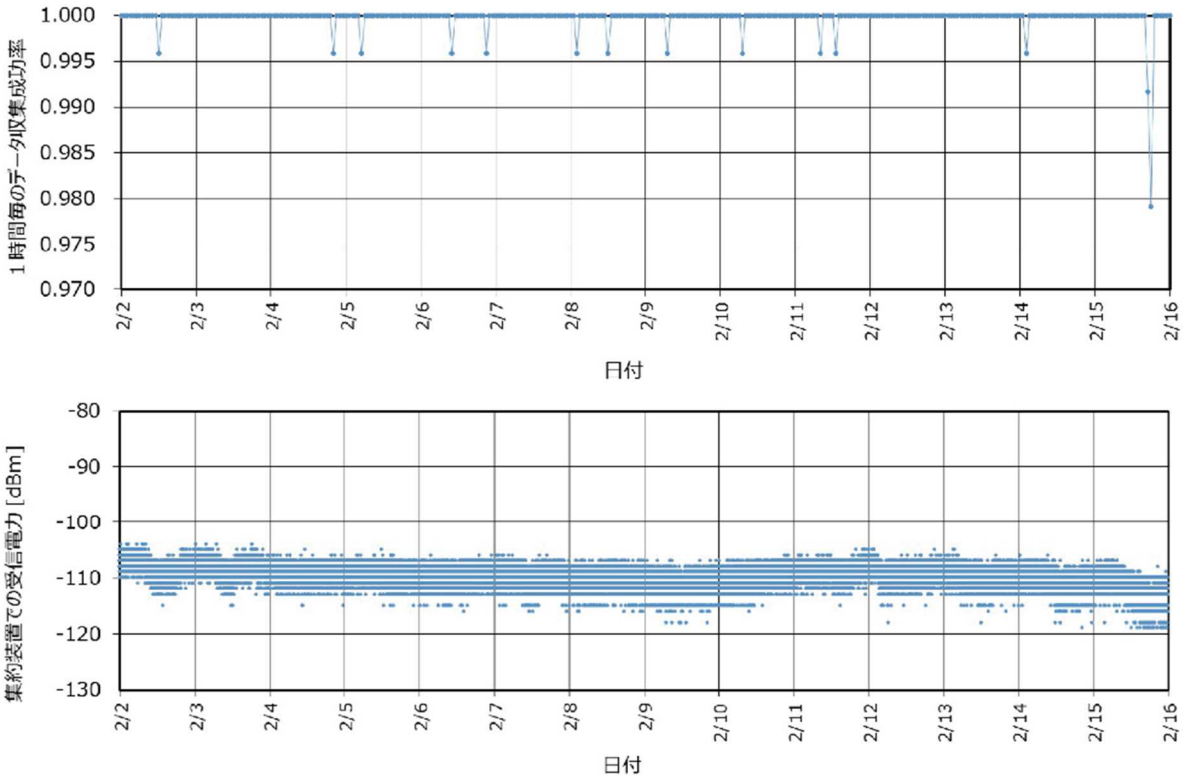

図-27　W-1 地点から火山砂防情報センター3 階監視室までの無線伝送のデータ収集率（上）、受信電力（下）

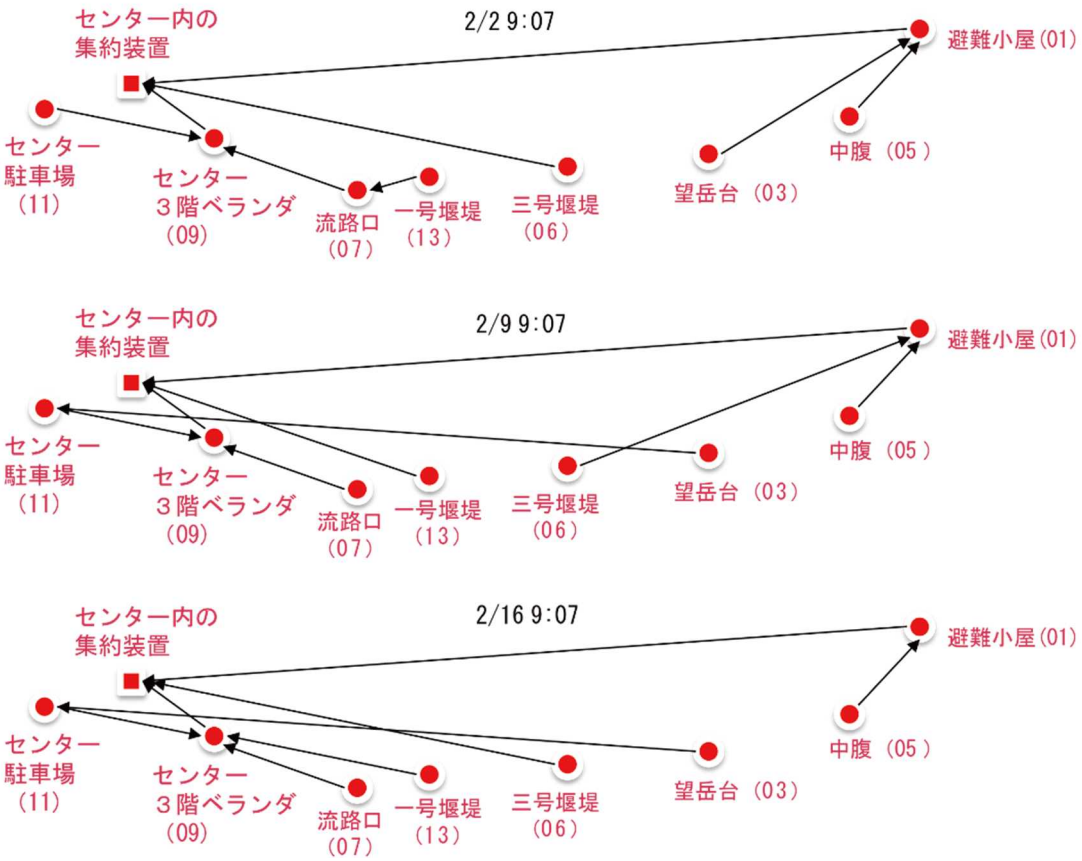

図-28　無線中継における経路変更例（避難小屋は W-1 地点、中腹は W-31 地点を表す。）

発生予測センサは小型軽量なため、火山活動が活発化し噴火までの短期間に人力により多数設置することが可能と考えられる。またこれまで観測を行っていない火山に新たな観測網を整備するに当たり、観測と通信に適する箇所の選定が重要である。通信に着目すると、その良否は、現地の対向試験が重要であり、事前にペーパーロケーションや目視可否、中継器が設置可能なポールなどの見立てが必要と考えられる。

通信上、地形的な支障が想定された火山砂防情報センターと流路工地点との間には、420MHz 帯通信の特定小電力無線通信試験も併せて実施した[17]。420MHz 帯通信は、LPWA 通信（920MHz 帯）よりも波長が長く回折性も良いことが知られ、この試験結果から送受信が良好であることがわかった。これらから、LPWA 通信はメッシュネットワークが容易に形成でき長距離通信に強いこと、420MHz 帯通信は回折性が良く地形的な支障に強いこと、それぞれの長所が明確になった。

５．　結論

これまでの火山泥流検知は、商用電源や大型ソーラーパネルなどの電源基盤および光ファイバーケーブルあるいは高速大容量無線通信などの通信基盤の整備が前提であった。その場合、経年的な老朽化に対して、更新等の対応が予算面で難しいことが課題であった。また、大規模な泥流等の土砂移動によって電源基盤や通信基盤が喪失した場合、以降の火山泥流検知が困難となる。

本共同研究では、乾電池、蓄電池および小規模なソーラーパネル程度の電源整備と、免許が不要な小電力通信による火山泥流検知システムの開発を目指した。そして、火山泥流検知のための非接触型の振動検知センサ、接触型の磁界変化型（磁性体）センサおよび複数回検知型ワイヤセンサ（バネ付きワイヤセンサ）を開発した。融雪型火山泥流の発生頻度は非常に小さいため、本共同研究では火山泥流や土砂移動を模擬した室内実験や屋外試験を行い、その適用性について検討を行った。泥流検知試験において、人為的に発生させた振動、センサ調整時の磁界の変化およびワイヤセンサの弛み長の変化をとらえており、泥流検知機能を有していると考えられた。また、近年向上が著しい通信技術に着目して、免許不要の長距離通信（LPWA）試験も実施した。積雪寒冷期に行った現地試験は、それぞれの参加者が行い、冬シーズンの耐寒性および機能性を確認した。そして、これらのシステムは、既存の火山泥流検知システムを補完し、また既存システムの維持管理の簡素化につながる可能性を大きく有している。

将来予測される検知技術、通信技術および省電力技術の向上に応じて、入山禁止区域内における情報を長期間取得できる状況等、現場担当者がより使いやすい火山泥流検知システムに向け、改良されることを期待する。

謝辞

本共同研究では、検知システム使用者の視点からご指摘をいただき、また現地実験において関係行政機関等との調整に関して、国土交通省北海道開発局旭川開発建設部から多大なご指導およびご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1） 旭川地方気象台：十勝岳の火山防災，http://www.jma-net.go.jp/asahikawa/shosai/kazan/tokachidake_leaf_browsing.pdf, 2022 年 1 月 28 日参照，2021.

2） 例えば，南里智之，榑林基弘，山廣孝之，名取哲哉，金子幸正，長谷川浩二，新谷融：1926 年十勝岳火山泥流の体験情報聞き取り・現地痕跡調査による流下特性，砂防学会誌，Vol.56，No.5，pp.33-44，2004.

3） 独立行政法人土木研究所　土砂管理グループ　火山・土石流チーム：振動検知式土石流センサーを活用した土石流監視手法に関する共同研究報告書，共同研究報告書第 445 号，pp.3-6，pp.33-34，pp.62-66，2012

4） 独立行政法人土木研究所　土砂管理グループ　火山・土石流チーム：振動検知式土石流センサー設置マニュアル（案）平成 17 年 7 月

5） 長田忠良，三日月晋一，小林俊市：積算降雪深による積雪沈降荷重の推定，国立防災科学技術センター研究速報，第 13 号，1975.

6） 藤浪武史，阿部孝章，船木淳悟：積雪層を介した土砂移動の振動検知に関する実験的検討，土木学会西部支部，第 7 回土砂災害に関するシンポジウム，pp.13-18，2014.

7） 阿部孝章，　藤浪武史，伊藤丹，西村義：汎用小型マイコンボードの泥流振動検知への適用に関する基礎的検討，平成 26 年度砂防学会全国大会，P1-61，2014.

8） 阿部孝章，　藤浪武史，船木淳悟：小型マイコンボードを用いた積雪層上の振動計測のための簡易センサの構築，第 30 回寒地技術シンポジウム，pp.86-91，2014.

9） 阿部孝章，　藤浪武史，田中忠彦，矢部浩規：汎用小型マイコンボードを用いた無線式簡易振動センサの構築と冬期屋外試験への適用，第 32 回寒地技術シンポジウム，pp.130-135，2016.

10） 藤浪武史，伊波友生：MEMS 振動センサを用いた泥流検知に関する実験的研究，土木学会西部支部，第 9 回土砂災害に関するシンポジウム，pp.37-42，2018.

11） 藤浪武史，伊波友生，矢部浩規：泥流の振動検知に関する実験的研究，平成 30 年度砂防学会全国大会，V-078，2018.

12） 阿部孝章，　藤浪武史，田中忠彦，矢部浩規：汎用小型マイコンボードを活用した無線式簡易振動センサの冬期現地試験への適用について，平成 29 年度砂防学会全国大会，Pb-80，2017.

13） 藤浪武史，阿部孝章，船木淳悟：簡易振動センサによる寒冷環境下での検知及び通信に関する検討，平成 27 年度砂防学会全国大会，P2-091，2015.

14） 阿部孝章，　藤浪武史：高密度土砂移動モニタリングのための無線式簡易振動センサの構築及び屋外試験への適用，土木学会北海道支部，平成 27 年度年次技術研究発表会，A-34，2016.

15） 藤浪武史，阿部孝章，船木淳悟：無線式簡易振動センサネットワークによる検知及び通信に関する検討，平成 28 年度砂防学会全国大会，P2-097，2016.

16） 岸滋，鈴木修，島村誠：長大延長を一括監視可能な落石監視システムの開発，*JR EAST Technicality Review* 第 21 号，pp.50-53，2007.

17） 柳町年輝，結城大介，藤浪武史，阿部孝章：降雪地域を考慮した非接触火山泥流検知システムの開発，平成 27 年度砂防学会全国大会，P1-096，2015.

18） 柳町年輝，結城大介，藤浪武史，阿部孝章：IoT/M2M クラウドによる非接触火山泥流検知システムの開発および十

勝岳実証試験について，平成 28 年度砂防学会全国大会，P2-055，2016.

19） 柳町年輝，結城大介，藤浪武史，阿部孝章：IoT/M2M クラウドによる非接触火山泥流検知システムの十勝岳上流部における実証試験について，平成 29 年度砂防学会全国大会，Pa-103，2017.

20） 柳町年輝，田口亮，藤浪武史，伊波友生：非接触火山泥流検知システム十勝岳実証試験による LPWA 無線通信の積雪寒冷地特性について，平成 30 年度砂防学会全国大会，P-192，2018.

共同研究報告書
COOPERATIVE　RESEARCH　REPORT　of　P.W.R.I.
No. 547　　March　2022
編集・発行　　©国立研究開発法人　土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人　土木研究所
寒地土木研究所　寒地技術推進室
〒062-8602　北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号　　電話　011-590-4046