

火山灰が鉄道の電気・信号設備に及ぼす影響の評価と 降灰情報の活用法の提案

西金 佑一郎* 寺田 夏樹** 小西 武史***
浦越 拓野* 河村 祥一*

Evaluation of Impact of Volcanic Ash on Railway Electric and Signal Equipment and
Proposal of Utilizing Information on Ash Fall

Yuichiro NISHIKANE Natsuki TERADA Takeshi KONISHI
Takuya URAKOSHI Shoichi KAWAMURA

Ash fall could have critical impacts on railway such as the failure of shunting of the track circuit and the decrease in insulation performance of insulator. In this study, we experimentally investigated conditions that cause these impacts of volcanic ash. Then, we clarified that over 0.05 mm thick volcanic ash causes the malfunction of shunting and that 1.2 mm thick volcanic ash containing saltwater causes the insulator flashover. Based on the results, we propose prevention actions against ash fall for railway companies to mitigate the impacts, using public information on eruption.

キーワード：降灰，短絡不良，がいし，絶縁性能，火山ハザードマップ，降灰予報

1. はじめに

日本には111の活火山が存在する。そのうち50火山は、今後100年程度の中長期的な噴火の可能性および社会的影響を踏まえ、火山防災のために監視・観測体制の充実等の必要がある火山¹⁾として、常時観測の対象となっている。火山活動により発生する現象は、降灰、噴石、火砕流、火山性地震など様々であり、これらが鉄道に与える影響は多岐にわたる²⁾。これらのうち降灰は風によって火山灰が遠方まで運ばれることにより、影響が広範囲に及ぶ。

降灰による鉄道の被災形態は、視界不良、モーターの不具合、トンネルの動作不良など多種の事例が確認されている²⁾。これらのうち、火山灰がレール上に堆積することによる短絡不良や、がいし表面に付着することによる絶縁性能の低下は、噴火後の鉄道の安全輸送を確保する上での重要な課題である。そこで、本研究では軌道回路（一般的な軌道回路と踏切制御子の2種類）とがいしを対象とし、降灰の条件に応じてこれらの鉄道設備が受ける影響の程度を評価し、さらにその結果を踏まえて降灰時の鉄道の対応方法を提案することを目的とした。本研究ではまず、火山灰の電気的性質を解明するた

めに電気抵抗率を測定した。次に、軌道短絡試験およびがいしの絶縁性能試験を実施し、火山灰が軌道回路やがいしに及ぼす影響の程度やその発生条件を整理した。さらに、その結果を踏まえ、火山ハザードマップや降灰予報などの火山防災に関する公的情報を活用した、鉄道における降灰時の対応方法を検討した。

2. 火山灰の電気的性質

2.1 概要および試料

火山灰の電気的性質を把握し、その性質を踏まえて火山灰が軌道回路やがいしに及ぼす影響を検討するため、火山灰の電気抵抗率試験を実施した^{3) 4)}。火山灰の電気的性質は含水状態によって異なると想定されるため、異なる含水比での電気抵抗率を測定した。また、火山灰と反応した後の水部分の電気的性質を把握するために、懸濁液の電気伝導率および水溶性成分の分析を実施した。これらの試験に用いた火山灰試料を表1に示す。

2.2 試験方法

図1(a)に示す試験容器に含水比を調整した火山灰を充填し、四極子法によって火山灰の電気抵抗率を測定した(図1(b))。火山灰の電気抵抗率 ρ (Ω m)は式(1)で求めることができる。式(1)の A は試験容器の断面積(m^2)、 L は測定用電極間距離(m)、 V_s は印加開始から1分後の測定用電極間の電位差(V)、 V_R は同時刻の抵

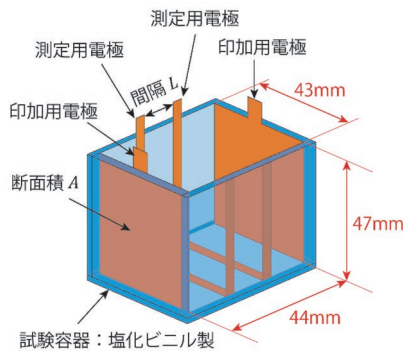
* 防災技術研究部 地質研究室

** 信号技術研究部 信号システム研究室

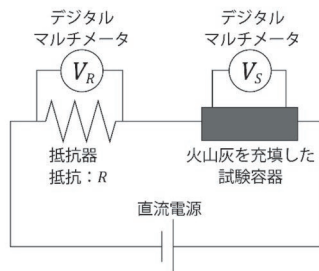
*** 電力技術研究部 き電研究室

表 1 試験に用いた火山灰試料⁴⁾を一部編集

試料番号	火山	説明
Sa	桜島	2014年12月18日の噴火による火山灰を桜島で噴火後数時間以内に採取。
Sb	桜島	鹿児島市内で回収され、屋外で1年以上保管されていた火山灰を2014年に採取。
Aa	阿蘇山	2016年10月8日の噴火による火山灰を噴火後12時間以内に採取。
Ab	阿蘇山	2016年10月8日の噴火による火山灰を10月13日に採取。噴火から採取までの間に降雨あり。
K	霧島(新燃岳)	2018年3月6日の噴火による火山灰を3月7日に採取。
F	富士山	宝永噴火(1707年)によると判断される火山灰および火山礫を静岡県御殿場市の地層から2016年に採取。
T	—	市販品の豊浦砂。



(a) 試験容器



(b) 測定回路

図 1 火山灰の電気抵抗率測定⁴⁾

抗器での電圧降下 (V), R は抵抗器の抵抗 (Ω) である。

$$\rho = \frac{A}{L} \frac{V_S}{V_R} R \quad (1)$$

また、懸濁液の電気的特性については地盤工学会の基準に準拠し、土懸濁液の電気伝導率試験方法 (JGS 0212-2009) および水溶性成分試験方法 (JGS 0241-2009) を実施した。

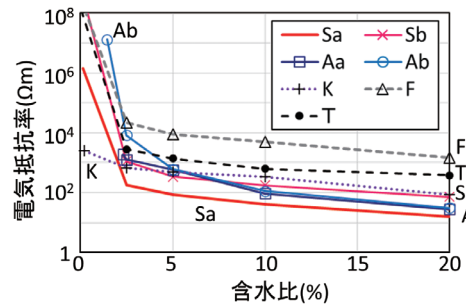


図 2 火山灰の電気抵抗率の測定結果³⁾

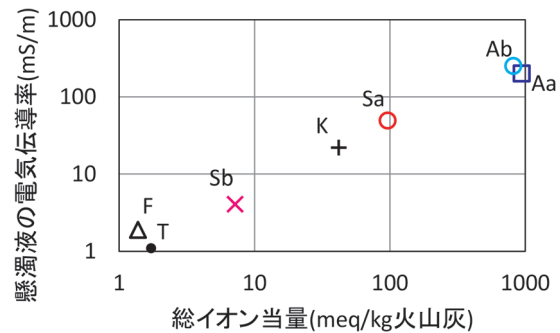


図 3 電気伝導率と総イオン当量の関係³⁾を一部改変

2.3 試験結果および考察

火山灰の電気抵抗率の測定結果を図 2 に示す。K (霧島 (新燃岳)) を除くと、含水比 2% 未満では電気抵抗率が $10^6 \Omega m \sim 10^8 \Omega m$ 以上 (測定限界以上) と高いのに対し、含水比 2.5% では電気抵抗率が $10^2 \sim 10^4 \Omega m$ に急減し、その後も含水比の増加に伴って電気抵抗率は低下した。K は含水比が 0.2% の場合でも電気抵抗率が $10^3 \Omega m$ 程度と比較的低いが、含水率の増加に伴い電気抵抗率が低下する傾向は他の試料と同様であった。また、含水比 5% 以上における電気抵抗率は T と F が比較的高く、その他の試料は比較的低い。同じ含水比条件では、T と F を除く試料毎の電気抵抗率の違いは 10 倍程度であった。

懸濁液の電気伝導率試験および水溶性成分分析の結果を図 3 に示す。水溶性成分は乾燥した火山灰 1kg から溶出した総イオン当量 (E; 式 (2)) で示した。式 (2) の C_i は溶出したイオン i のモル濃度、 Z_i はその価数である。

$$E = \sum_i C_i \times Z_i \quad (2)$$

懸濁液の電気伝導率と総イオン当量には正の相関が認められたことから、火山灰から溶出するイオンが多いほど、懸濁液が電気を通しやすいことが分かる。

また、火山灰試料によって懸濁液の電気伝導率および総イオン当量は異なり、噴火後数日以内に採取した火山灰 (Sa, Aa, Ab および K) では比較的高い結果であっ

た。例えば同じ桜島の火山灰でも、1年以上屋外で保管されたSbより、噴火直後に採取されたSaの方が懸濁液の電気伝導率、総イオン当量が高い。これは、噴火直後の火山灰は水に溶けやすい成分を多く含んでいたのに対し、長期間降雨に晒された火山灰は水に溶けやすい成分が溶出したためと考えられる。

懸濁液の電気伝導率と含水比20%での火山灰の電気抵抗率を比較すると、負の相関が認められた(図4)。このことと、懸濁液の電気伝導率は総イオン当量に依存していたことから、試料毎の火山灰の電気抵抗率の違いはイオン溶出量の差に起因し、イオン溶出量が多い火山灰では含水した火山灰の電気抵抗率が低くなると考えられる。

本試験より、火山灰の電気抵抗率は含水比により大きく変化することが分かった。この結果を踏まえ、電気抵抗が高いことで発生しうる軌道回路の短絡不良、電気抵抗が低いことで発生しうるがいしの絶縁性能の低下について、実験的に検討した内容を3章、4章に示す。これらの実験には、十分な量を確保できた桜島の火山灰Sbを主に用いた。Sbは火山灰試料の中で比較的電気抵抗率が高い(図2)ため、降灰後数日以内に採取した火山灰と比較した場合、軌道回路の短絡不良に関する検討では安全側、がいしの絶縁性能の低下に関する検討では危険側の評価結果になる可能性がある。

3. 降灰による軌道回路の短絡不良に関する検討

レール上に堆積した火山灰がレール-車輪間の通電を阻害し、短絡不良を生じさせる可能性がある²⁾が、短絡不良が生じる条件について詳細な検討はなされていなかった。本研究では、鉄道総研の試験線に軌道回路を構成し、レール上に火山灰を散布させた状態で車両を走行させることで、火山灰が軌道短絡に与える影響を調査した^{3) 5)}。

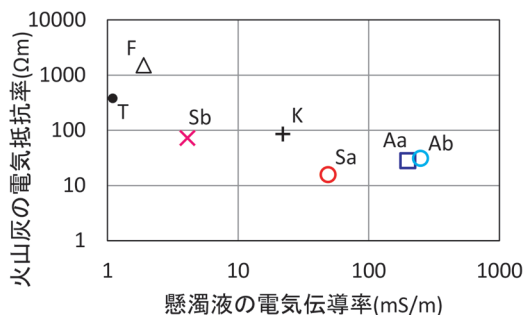


図4 含水比20%での火山灰の電気抵抗率と懸濁液の電気伝導率の関係⁴⁾

3.1 試験方法

試験方法の模式図を図5に示す。軌道回路の起点方端部5~8mの区間のレール上に、ケースごとに設定した厚さの火山灰を散布した(表2)。その状態で車両を起点方から走行させ、車両が試験区間を通過する際の軌道リレーの残留電圧および扨上・落下をメモリハイコーダで計測するとともに、車軸の通過タイミングを車軸検知子で把握した。また、車両の走行によってレール上の火山灰が飛散しないように、走行条件は速度10km/h程度のだ行とした。今回の試験は、一般的な軌道回路(商用周波数回路)と踏切制御子(H型)に対してそれぞれ実施した。試験の際に測定した短絡感度は、一般的な軌道回路で0.12Ω、踏切制御子で1.4Ωであった。以降、単に「軌道回路」と記載した場合は一般的な軌道回路を指す。

本試験では桜島の火山灰Sbを主に用い、ケースごとに火山灰の厚さを変えるほか、乾燥条件と湿潤条件でそれぞれ試験を実施した(表2)。なお、試料Sbの量の不足を補うため、火山灰の厚さ1mmのケースのみ、Sbとは異なる箇所から採取された桜島の火山灰で代用した。湿潤条件では、火山灰を散布した後で洗浄機を用いて水を噴霧した。なお、火山灰の含水比は乾燥条件で1%未満、湿潤条件で5~26%であった。

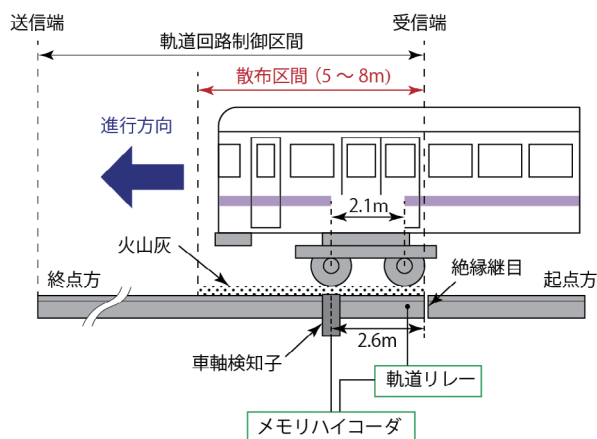


図5 軌道短絡試験の模式図⁵⁾を一部改変

表2 軌道短絡試験における火山灰の散布条件

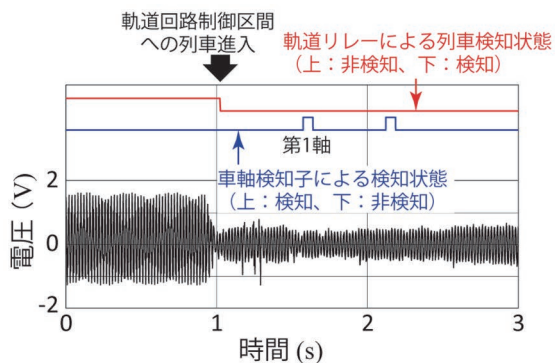
試験対象	火山灰の厚さ(mm)						
	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2	0.5	1
軌道回路	◎	◎	◎	◎	—	◎	◎
踏切制御子	◎	◎	◎	◎	○	—	—

◎：乾燥条件と湿潤条件で実施；○：乾燥条件でのみ実施；—：実施せず

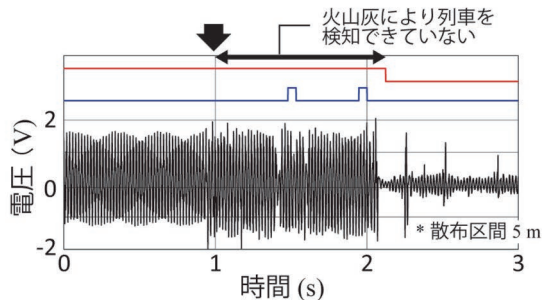
3.2 試験結果

3.2.1 軌道回路の場合

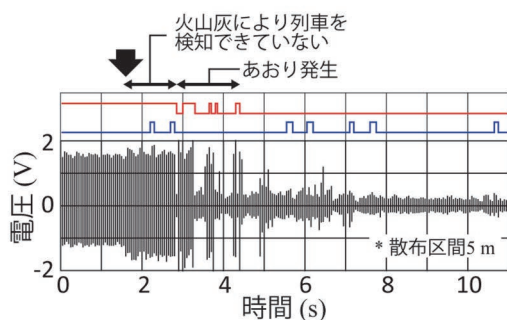
試験結果の例を図6に示す。火山灰を散布しないケース（図6（a））では列車が軌道回路制御区間に進入した時点で、軌道回路が正常に短絡して列車が検知され、その後車軸検知子が車軸の通過を検知している。一方、乾燥状態の火山灰を厚さ0.05mm散布したケース（図6（b））では、車軸検知子が第1軸の通過を検知した時点でも軌道回路が短絡しておらず、列車を検知できていないことがわかる。このケースでは、第1軸が散布区間を通過すると軌道回路は正常に短絡した。また、湿潤状態の火山灰を厚さ0.1mm散布したケース（図6（c））では、第1軸が散布区間を通過する間は軌道回路が短絡せず、



(a) 火山灰散布なし



(b) 火山灰 0.05mm 厚, 乾燥条件



(c) 火山灰 0.1mm 厚, 湿潤条件

図6 軌道短絡試験の結果の例⁵⁾を一部改変

散布区間通過後は短絡と不短絡が繰り返される「あおり」という不安定な状態が発生した。表3に各試験条件での軌道回路の短絡状況を整理する。火山灰の厚さが0.025mm以上では列車検知が不安定な状況となり、0.05mm以上では列車検知ができなかった。また、湿潤条件では散布区間外でも不短絡またはあおりが生じる場合があり、これらの試験時には列車通過後、散布区間外の数m～100mにわたり、レール上に火山灰が付着していた。

3.2.2 踏切制御子の場合

各試験条件における踏切制御子の短絡状況を表4に示す。踏切制御子は軌道回路よりも短絡感度が大きいいため、軌道回路の場合（表3）に比べて検知状況は良いが、火山灰の厚さが0.025mm以上では列車検知が不安定な状況となり、0.2mmでは列車検知ができなかった。

3.3 考察

軌道回路においてレール上に0.05mm程度、踏切制御子においては0.2mm程度の厚さの火山灰が堆積すると、不短絡となるリスクが発生する可能性がある。ただし、本試験はレール上の火山灰が飛散しないように低速で車両を走行させるという、不短絡が生じやすい条件で実施したため、実際には上記の厚さ以上の火山灰が堆積しても正常に短絡する場合があると考えられる。特に、乾燥状態にあるレール上の火山灰は走行時に飛散する可能性がある。また、湿潤状態で散布区間外においても不短絡

表3 軌道回路の短絡試験結果⁵⁾

火山灰の厚さ	短絡結果	
	乾燥条件	湿潤条件
0.01mm	短絡	短絡
0.025mm	あおり発生	あおり発生
0.05mm	不短絡	不短絡
0.1mm	不短絡	不短絡 (散布区間外であおり発生)
0.5mm	不短絡	不短絡 (散布区間外であおり発生)
1mm	不短絡	不短絡 (散布区間外でも不短絡)

表4 踏切制御子の短絡試験結果⁵⁾

火山灰の厚さ	短絡結果	
	乾燥条件	湿潤条件
0.01mm	短絡	短絡
0.025mm	あおり発生	短絡
0.05mm	あおり発生	あおり発生
0.1mm	あおり発生	あおり発生
0.2mm	不短絡	—

* —は試験を実施していないことを示す。

やあおりが発生した原因については、湿潤状態の火山灰が車輪に付着した状態で車両が散布区間外を走行したためと考えられる。

4. 降灰によるがいしの絶縁性能の低下に関する検討

降灰時に電力会社で停電が発生した事象が報告されており、その原因は火山灰ががいしに付着することで漏れ電流が増加したためと推定されている⁶⁾。鉄道の電気設備でも、降灰によって同様の事象が生じる可能性がある。そこで、火山灰の付着状態ががいしの絶縁性能に与える影響を実験的に検討した^{3) 7) 8)}。

4.1 試験方法

火山灰を付着させたがいしの絶縁抵抗測定ならびに交流または直流の課電装置を用いた漏れ電流試験を実施した。図7に交流による課電試験時の試験回路を示す。試験に供したがいしは表5に示すA～Cの3種類とした。がいしA、Bは懸垂がいし、がいしCは長幹がいしである。懸垂がいしの場合は吊り下げたがいしに対し図8に示す4パターンの範囲に火山灰を付着させた状態で、長幹がいしの場合は水平にしたがいしの上面のみに火山灰を付着させた状態で試験を行った(図9)。火山灰は桜島の火山灰Sbを使用し、がいしの水平投影面積1m²あたりに付着させる火山灰の量(以降、付着密度)は0.2kg/m²と1.2kg/m²の2パターンとした。これらの付着密度は、火山灰の密度を1g/cm³とすると、それぞれ厚さ0.2mmおよび1.2mmに相当する。また、火山灰を付着させる際には水道水を噴霧した。さらに、火山灰と塩分の両者ががいしに付着した場合の塩害のリスクについて検討するため、水道水の代わりに3%食塩水を噴霧

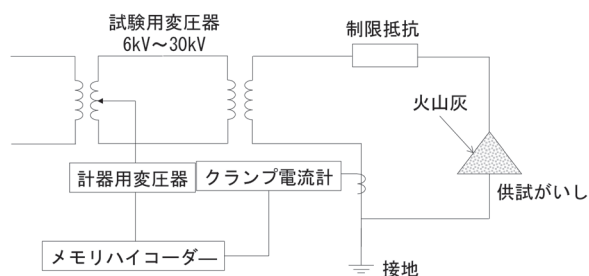


図7 課電試験時の試験回路(交流の場合)⁷⁾

表5 試験に用いたがいし

番号	種別	材質	説明
A	懸垂	磁器	長径: 180mm
B	懸垂	磁器	長径: 250mm
C	長幹	磁器	笠数: 6

した場合の試験も実施した。

4.2 試験結果および考察

がいしA、Bに関して、火山灰付着時の絶縁抵抗と交流課電時の漏れ電流の測定結果を図10にまとめる。ここでは火山灰を付着させる際に水道水を用い、がいしAには10kV、Bには20kVの交流電圧を印加した。

火山灰の付着範囲と付着密度の増大に応じて絶縁抵抗は低下し、交流課電時の漏れ電流は著しく上昇した。例えば付着密度1.2kg/m²でがいしAの表裏全面に火山灰を付着させた場合、絶縁抵抗は1MΩを下回り、10kV印加時の漏れ電流は100mAに達した。このように、付着密度1.2kg/m²、表裏全面付着の条件で絶縁性能が著しく低下することが分かった。なお、がいしBの表裏1/4に1.2kg/m²の火山灰を付着させた条件では放電が発生してせん絡に至った。このケースの漏れ電流は、過電流によって試験装置が停止する直前に計測された最大値を図10に示した。この結果から、耐張吊りのがいしなど両面に火山灰が付着しうる設置状況にあるがいしでは、火山灰によるせん絡のリスクが相対的に高いと考えられる。

次に、火山灰に水道水を噴霧した場合と食塩水を噴霧した場合の試験結果を図11に示す。この試験では、がいしA、Bは表裏全面に、がいしCは上面に火山灰を付着させ、がいしAに直流1.8kVを、がいしB、Cに交流10kVを印加した。なお、がいしCでは火山灰の付着密度を1.2kg/m²の1パターンのみで実施した。電源は直流課電装置では10mA、交流課電装置では100mAに達すると停止に至るため、停止に至った場合は装置の上限電流値をプロットした。

水道水と食塩水の結果を比較すると、後者の絶縁抵抗がより低く、漏れ電流がより大きい傾向が見られた。ま

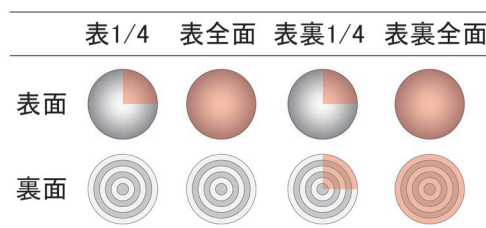


図8 懸垂がいしへの火山灰の付着パターン



図9 長幹がいしへの火山灰の付着状況の例³⁾

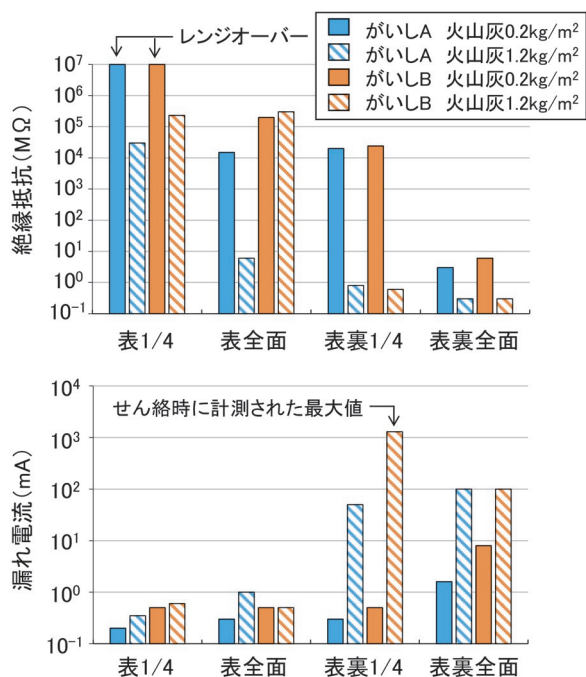


図 10 火山灰付着時のがいの絶縁抵抗と交流課電時の漏れ電流測定結果



(a) がいし B (付着密度 1.2kg/m²; 食塩水)



(b) がいし C (付着密度 1.2kg/m²; 食塩水)

図 12 課電時に放電が生じた状況の例³⁾

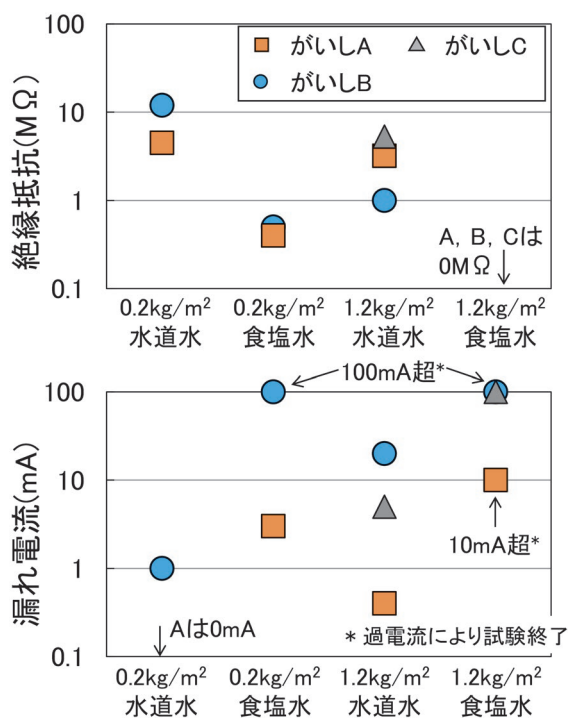


図 11 水道水を噴霧した場合と食塩水を噴霧した場合の測定結果の例³⁾ を一部改変

た、水道水を噴霧した場合は、付着密度 1.2kg/m² では放電が生じるケースがあったが、付着密度 0.2kg/m² ではすべてのケースで放電は生じなかった。一方、食塩水を噴霧した場合は、付着密度に関わらず試験したすべてのケースで課電時に放電が認められた。課電時に放電が

生じた状況の例を図 12 に示す。本結果より、沿岸地域においてがいに火山灰が付着した場合、せん絡のリスクがより高まると想定される。

5. 公的情報を活用した降灰時の対応方法

以上の結果を踏まえ、降灰に関する公的情報を有効に活用した、鉄道における降灰時の対応方法について検討する。

降灰に関する公的情報には、火山防災協議会が作成する火山ハザードマップと、気象庁が公表する降灰予報がある。火山ハザードマップは、火山灰等の各火山災害要因の影響が及ぶ恐れのある範囲を地図上に特定し、視覚的に分かりやすく描画したものである。このうち火山灰については、過去の噴火時の実績、または噴火規模や風向・風速等を仮定した場合のシミュレーション結果から、想定される火山灰の堆積厚さごとの到達範囲が示されている。これを活用することにより、相対的に降灰による影響が発生するリスクが高い箇所をあらかじめ把握することが可能である。

降灰予報には、噴火が起きたと仮定した場合の降灰範囲を予測する「降灰予報 (定時)」、噴火直後に発表され、1 時間先までの降灰量分布を予測する「降灰予報 (速報)」、噴火から概ね 30 分後に発表され、6 時間先までの降灰量分布の時間変化を予測する「降灰予報 (詳細)」の 3 種類がある⁹⁾。降灰予報 (速報) と (詳細) では、降灰厚さが「少量 (0.1mm 未満)」、「やや多量 (0.1mm

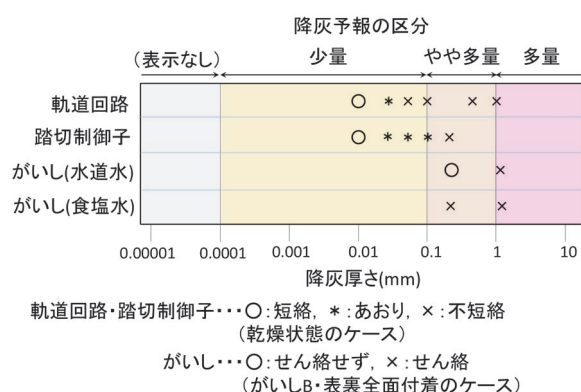


図 13 降灰予報の区分と試験結果の比較³⁾ を一部改変

～1mm)], 「多量 (1mm 以上)」の3段階で発表される。ここで、少量とは0.1 μ m～0.1mmに相当する厚さである。この降灰厚さの区分と3章、4章の試験結果を合わせて図13に示す。この図から、降灰予報で「多量」とされる範囲では、軌道回路や踏切制御子の不短絡ならびにがいしの絶縁性能低下に伴うせん絡が生じるリスクがあると考えられる。一方、表示がない範囲(0.0001mm未満)についてはこれらが生じるリスクは小さいと考えられる。ただし、今回試験に用いた火山灰Sbは電気抵抗率が比較的高いため、軌道回路や踏切制御子の不短絡が生じやすく、がいしの絶縁性能の低下が生じにくい火山灰であったと想定される。そのため、軌道回路や踏切制御子の不短絡のリスクについては安全側、がいしのせん絡のリスクについては危険側の評価となっている可能性がある。また、降灰予報は数値計算に基づく予測情報であり、実際の降灰範囲や降灰厚さとは異なりうることに留意する必要がある。

以上を踏まえると、例えば表6に示したような公的情報の活用例が考えられる。平常時は、火山ハザードマップに基づき火山灰の影響が想定される範囲を把握しておく。これは、除灰用具の配備箇所の検討等に利用できる。噴火警戒時には、連絡体制の確立や降灰時の対応の確認を実施する。なお、実際の噴火では、「噴火警報」が発表されずに噴火に至る場合がある。噴火後には、降灰予報に基づき降灰が予測される範囲を絞り込んだうえで、目視による降灰状況の確認等を行う。この際、図13に基づき火山灰の厚さを踏まえて発生しうる事象を検討し、対応方法を検討する。

6. まとめ

本研究では、降灰の条件に応じて軌道回路やがいしが受ける影響の程度を評価し、その結果を踏まえて降灰時の対応を提案することを目的とし、火山灰を用いた実験的検討および公的情報を活用した降灰時の鉄道の対応方

表 6 鉄道における公的情報の活用例⁵⁾

タイミング	関連する公的情報	活用例
平常時	火山ハザードマップ	降灰による影響範囲の想定 除灰用具の配備箇所の決定 軌道回路やがいしの状況把握
噴火警戒時	噴火警戒レベル	対策本部等の設置, 連絡体制の確立
	降灰予報(定時)	除灰要員の手配, 用具の準備
噴火後	降灰予報(速報, 詳細)	設備点検
降灰後	降灰予報(詳細) 天気予報(降水量)	除灰範囲, タイミングの決定

法の検討を行った。本研究によって得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 火山灰の電気抵抗率は含水比に強く依存し、含水比が2%程度未満では電気抵抗率が概ね10⁶ Ω m程度以上であることに対して、含水比が20%では10～100 Ω m程度となることを明らかにした。
- (2) 軌道短絡試験の結果、レール上に堆積する火山灰の厚さが0.025mm程度ではあおりが発生し、0.05mm以上では不短絡が発生する可能性があることを示した。さらに、踏切制御子でも火山灰により列車検知が不安定になる場合があることを示した。
- (3) がいしの絶縁性能試験の結果、火山灰の付着量の増加に伴い絶縁性能が低下し、1.2mm程度の火山灰の付着によりせん絡が発生する可能性があることを示した。さらに、食塩水を含有させた場合、絶縁性能の低下が著しくなり、せん絡のリスクが高まることを示した。
- (4) 上記の結果に基づき、火山灰が軌道短絡やがいしの絶縁性能に影響を及ぼし得る条件を整理した。さらに、公的情報を活用した降灰時の鉄道の対応方法を提案した。

これらの成果は、鉄道事業者が防災計画を策定する際や、軌道短絡やがいしの絶縁性能の観点から降灰に対する対応を検討する際に活用できる。

謝辞

阿蘇火山博物館の渡邊一徳博士より火山灰試料の一部を提供して頂いた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 気象庁活火山とは：https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/katsukazan_toha/katsukazan_toha.html (参照日：2023年6月13日)
- 2) 浦越拓野, 西金佑一郎, 川越健：国内の火山活動における鉄道の被災及び対策事例, 鉄道総研報告, Vol.29, No.1, pp.47-52, 2015
- 3) 浦越拓野, 河村祥一, 寺田夏樹, 小西武史：火山灰の電気的性質と軌道短絡やががいしに及ぼす影響, 日本鉄道施設協会誌, Vol.65, No.10, pp.59-62, 2019
- 4) Urakoshi, T., Nishikane, Y., Kawamura, S., "Resistivity of volcanic ash and Its Relation to Elemental Composition," in Ohta, T., Ito, T., Osada, M., "Rock mechanics and engineering geology in volcanic fields," CRC Press, pp.34-41, 2023.
- 5) Nishikane, Y., Terada, N., Urakoshi, T., Kawamura, S., "Resistivity of volcanic ash and Its Relation to Elemental Composition," in Ohta, T., Ito, T., Osada, M., "Rock mechanics and engineering geology in volcanic fields," CRC Press, pp.107-113, 2023.
- 6) 川畑秋馬, 入佐俊幸, 上妻生朗：火山灰汚損がいしの漏れ電流特性, 電気学会論文誌B, Vol.115, No.8, pp.956-963, 1995
- 7) 平川慎太郎, 小西武史, 西金佑一郎：火山灰が付着した電気鉄道用がいしの性能検証, 平成30年電気学会全国大会論文集, No.5-246, pp.406-407, 2018
- 8) 小西武史, 平川慎太郎, 西金佑一郎：電気鉄道用がいしの火山灰付着による絶縁性能低下の実験検証, 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.9-3-19-9-3-20, 2018
- 9) 気象庁降灰予報の説明：https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/qvaf/qvaf_guide.html (参照日：2023年6月13日)