

火山噴火の降灰による建物被害評価法

Evaluation Method for Building Damage due to Ash Fall of Volcanic Eruption

諏訪 仁 Hitoshi Suwa
 大塚 清敏 Kiyotoshi Otsuka
 野畑 有秀 Arihide Nobata

1. はじめに

2014年の御嶽山の火山噴火などを契機に火山災害への関心が高まっており、富士山の宝永噴火を再現した降灰対策¹⁾が公開されている。首都圏を対象とした降灰シミュレーション²⁾では、一部の地域において火山灰の堆積値が約10cmを超過しており、建物やライフラインなどへの影響が懸念されている。

本報では、建物屋根と熱源系の空調設備、建物の機能維持に必要なライフラインを対象に、火山噴火の降灰による被害評価法を開発したので紹介する。

2. 建物とライフラインの被害評価法

2.1 建物屋根

2.1.1 建物屋根の限界降灰深 建物屋根に作用する積雪荷重を降灰荷重に置換して、降灰に対する建物屋根の安全性を評価する。ここでは、多雪地域を除く一般地域を設定し、積雪荷重と降灰荷重は同時に作用しない条件とする。屋根の安全限界時における積雪の組み合わせ荷重 V は、短期許容応力度に対する余裕率を a とすると次式となる。

$$V = a \times (G + P + S) \quad (1)$$

ここで、 G は固定荷重、 P は積載荷重、 S は積雪荷重となる。鉛直荷重 N は、次式で設定する。

$$N = G + P \quad (2)$$

鉛直荷重 N は常時作用しているため積雪の組み合わせ荷重 V から N を差し引き、降灰荷重が余裕率を考慮した積雪荷重と等しくなる降灰深を限界降灰深 da とする。

$$\gamma \times da = a \times (N + S) - N \quad (3)$$

ここで、 γ は火山灰の単位重量であり、積雪荷重 S は建築基準法施行令により次式で規定される。

$$S = d \times \rho \times \mu b \quad (4)$$

ここで、 d は垂直積雪量、 μb は屋根形状係数、 ρ は積雪の単位重量となり $20\text{N/m}^2/\text{cm}$ とする。余裕率のパラツキを考慮するため a を確率変数に設定すると、限界降灰深の平均値 $E[da]$ と変動係数 $COV[da]$ は次式となる。ここで、鉛直荷重 N は確定値とする。

$$E[da] = \frac{E[a] \times (N + d \times \rho \times \mu b) - N}{\gamma} \quad (5)$$

$$COV[da] = \frac{\sigma[a] \times (N + d \times \rho \times \mu b)}{E[a] \times (N + d \times \rho \times \mu b) - N} \quad (6)$$

ここで、 $E[a]$ 、 $\sigma[a]$ は、それぞれ余裕率の平均値、標準偏差となる。

2.1.2 鉛直荷重と限界降灰深の関係 余裕率 a は2014年2月の大雪による建物屋根の分析結果²⁾をもとに、平均値を1.5、変動係数を0.2に設定した。火山灰は湿潤状態を設定し、単位重量 γ は $166.6\text{N/m}^2/\text{cm}$ とする¹⁾。このとき、屋根勾配を0度を設定し、垂直積雪量 d を30～45cmまで5cm刻みで変化させると、鉛直荷重と限界降灰深の平均値ならびに変動係数の関係はFig. 1となる。

3.2節の建物屋根の評価事例では、限界降灰深のパラツキ形状を対数正規分布に設定して、降灰深と被害確率の関係を評価する。

2.2 熱源系の空調設備

熱源系の空調設備として、屋外に設置され降灰による影響を受けやすい空調室外機と冷却塔を対象に降灰実験を行った。

2.2.1 空調室外機の降灰実験³⁾ 降灰実験に用いた空調室外機と実験装置をPhoto 1に示す。空調室外機は、機器の側面から熱交換器フィンを通じて吸気し、上面のファンから上向きに排気する型式とする。空調室外機の上部に降灰用ふるいを設置し、降灰実験を行った。火山灰は桜島で採取したものであり、火口から遠位領域を想定するため火山灰をふるいで濾過して $250\mu\text{m}$ 以下の粒

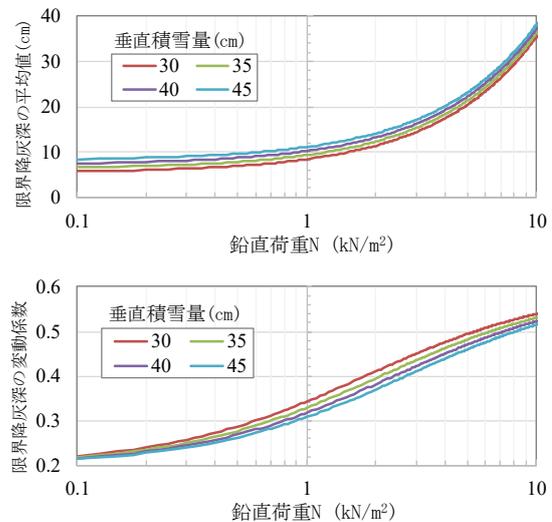


Fig. 1 限界降灰深の平均値と変動係数 Expectation and Coefficient of Variation of Limit Ash Fall

径のみを用いた。

実験ケースを、Table 1 に示す。ファンの稼働条件として、「降灰後稼働」は空調室外機を停止しファンの上部から降灰させた後に稼働させるケースであり、「稼働中の降灰」は空調室外機の稼働中にフィンの側面に降灰させるケースとなる。降灰がファンの稼働状態に与える影響を検討するため、実験条件としてファン回転数を一定値に制御した上で、ファン運転電流と回転数の経時変化を計測した。

実験 1 では、降灰深が増加するに従いファン稼働時の動作がやや鈍くなるものの、稼働時の振動で火山灰はほとんど脱落し、降灰深 50mm までファンは正常に稼働した。実験 2 におけるファン運転電流とファン回転数の変化を Fig. 2 に示す。降灰深が 30mm を超過した付近よりファン運転電流がわずかに上昇する傾向が見られるが、ファン回転数はほぼ一定値になっている。実験 3 では降灰深が 20mm のときファン起動時に異常発生した後にファンが稼働したが、降灰深が 50mm のとき Fig. 3 のようにファン運転電流と回転数がパルス的に上下した後にファンが停止した。ファンに堆積した火山灰を Photo 2 の左図に示す。このファンの停止は、ファン電動機が過大な降灰荷重により、瞬時過電流を検知したためである。しかし、後日にファンを再稼働すると、火山灰に含まれた水分の蒸発や火山灰の一部が落下して降灰荷重が多少減少したため、ファンは正常に稼働した。実験 4 では、実験開始の直後から Photo 2 の右図に示すようにフィンへの火山灰の付着が急速に進行した。ファン回転数は一定値に制御されているため、フィン表面に火山灰が付着して通風抵抗が増加し、降灰深が約 15mm を超過した付近からファン運転電流にわずかな上昇が見られた。

2.2.2 冷却塔の降灰実験⁴⁾ 冷却塔は開放型とし、上面に送風ファン、側面片側に充填材が付属した型式とする。冷却水は充填剤の内部を垂直に落下し、外気は冷却塔側面から吸気され水平方向に充填剤を通過する。降灰実験装置は、冷却塔と冷却水配管、送水ポンプ、補給水管より構成される。配管の途中には、流量調整バルブ、逆止弁、ストレーナ、流量計、圧力計、水温計が付属している。実験では稼働中の冷却塔への降灰を設定し、送風と冷却水循環を行っている状態で、冷却塔側面の上部からふるいを用いて火山灰を落下させた。火山灰は桜島で採取したものであり、火山灰をふるいで濾過して 250 μ m 以下の乾燥状態の粒径のみを用いた。

冷却塔のファン回転数と消費電力を Fig. 4 に示す。降灰深の時間推移も併せて示す。ファン回転数と消費電力はほぼ一定値に維持されており、降灰によるファン回転軸など機械的な駆動部分への影響は見られない。

冷却水の流量変化を Fig. 5 に示す。流量は降灰深が約 20mm までは定格流量が維持されているが、降灰深が約 20~30mm を超過する付近からパルス状の変動が発生しており、降灰深が増加するに伴いその頻度が増えている。パルス状の変動が生じている間は、流量がほぼゼロにな



Photo 1 空調室外機と実験装置
Exterior Section of Air Conditioning and Experimental Equipment

Table 1 実験ケース
Case of Experiments

実験 No	室外機の稼働部位	室外機の稼働条件	火山灰の状態	降灰深 (mm)
1	ファンのみ	降灰後稼働	乾燥	約 2~50
2		稼働中の降灰		
3		降灰後稼働	湿潤	
4		稼働中の降灰		

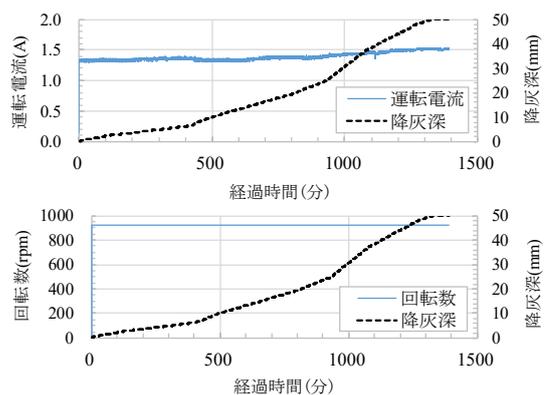


Fig. 2 ファン運転電流とファン回転数(実験 2)
Electric Current and Number of Rotation of Fan (No.2)

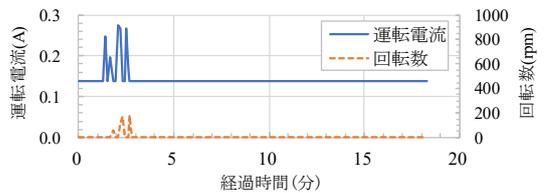


Fig. 3 ファン運転電流とファン回転数(実験 3)
Electric Current and Number of Rotation of Fan (No.3)



Photo 2 空調室外機に付着した火山灰(実験 3~4)
Volcanic Ash Attached to Exterior Section of Air Conditioning (No.3~4)

るなど水流が非常に不安定となり、圧力計の数値が0MPa近くまで急減した。Photo 3に、冷却塔側面(左図)と冷却塔内部(右図)の様子を示す。側面には火山灰が付着し内部の水槽釜場には火山灰が堆積しており、排水口の狭窄などで冷却水の流量が変動したと考えられる。

降灰深が約56mmに達したとき、ポンプから漏水が発生した。ポンプを分解すると、モータの動力軸と回転羽根の接続部のメカニカルシールに著しい摩耗が確認できた。メカニカルシールを新品に交換し、冷却塔を稼働すると漏水は解消された。

2.2.3 降灰深と被害確率の関係 空調室外機と冷却塔を対象に、動作不良が発生した降灰深を用いて降灰深と被害確率の関係を評価する。降灰深と被害確率の関係を対数正規分布に設定し、最尤法を用いて両者の関係を求めると Fig. 6 となる。図中には、被害データの対数正規分布への適合性を見るため、次式の被害確率をプロットしている。降灰深と被害確率の関係は、対数正規

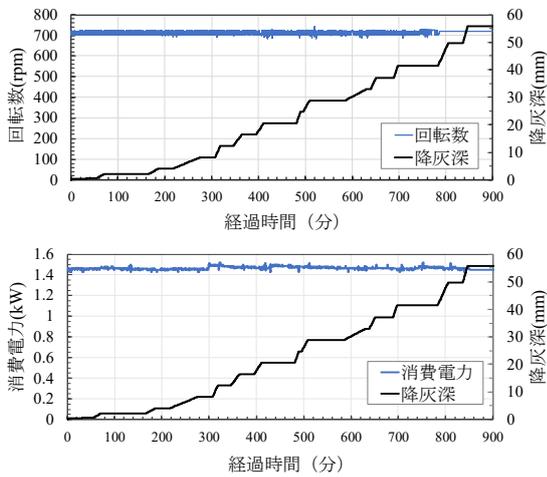


Fig. 4 ファン回転数と消費電力

Number of Rotation of Fan and Power Consumption

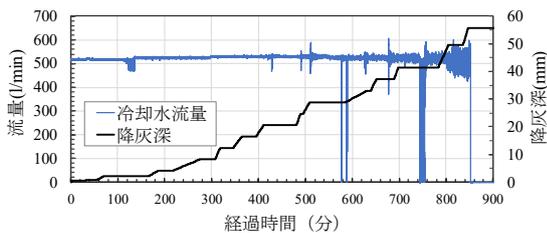


Fig. 5 冷却水流量

Flow Rate of Cooling Water

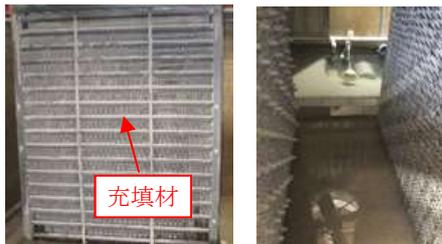


Photo 3 冷却塔に付着した火山灰
Volcanic Ash Attached to Cooling Tower

分布を用いて概ね回帰される。

$$q_i = \frac{i}{N+1} \quad (7)$$

ここで、Nは被害データの総数、i(=1~N)は累積被害データ数となる。

2.3 ライフライン

火山噴火によるライフラインへの影響を評価するため、国内および海外で発生した被害事例を調査した⁹⁾。以下、ライフラインの被害事例の特徴について述べる。

2.3.1 電力 降灰による被害事例として閃絡がある。閃絡は碍子などの絶縁体に付着した火山灰に沿って放電する現象であり、粒径の小さい火山灰が湿潤状態で付着した場合に発生しやすい。また、降灰荷重による断線がある。発電所などでは吸気系から火山灰が侵入し、火山灰の研磨性によりタービンの摩耗が発生している。

2.3.2 上水道 降灰による影響として、水道水の濁度の上昇、pHの低下および成分の変化などがある。なお、pHの低下あるいは成分の変化は、火山ガスに含まれる硫化水素や亜硫酸ガスなど水に溶けて酸性を示す成分量に依存する。浄水施設の降灰対策として、鹿児島市ではろ過池に覆蓋を設置している。また、ろ過装置の目詰まり

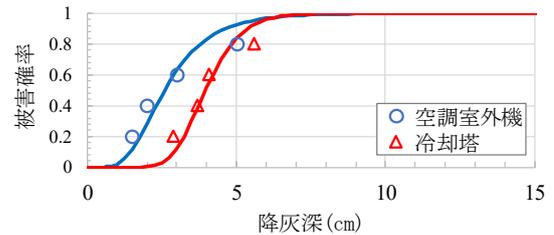


Fig. 6 空調室外機と冷却塔の被害確率
Damage Probability of Exterior Section of Air Conditioning and Cooling Tower

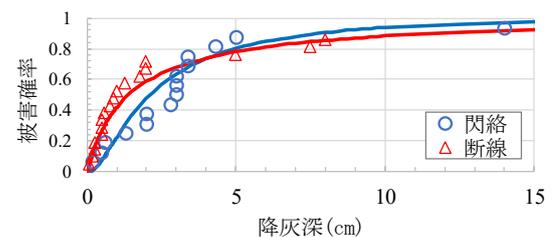


Fig. 7 電力の被害確率

Damage Probability of Electric Power

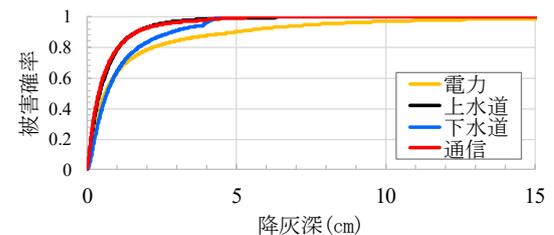


Fig. 8 ライフラインの被害確率
Damage Probability of Lifeline

やタービンの摩耗なども発生している。

2.3.3 下水道 除灰作業などで洗い流された火山灰が管路に堆積して閉塞が生じて、二次災害として浸水被害も発生している。また、火山灰の研磨性により管路の摩耗などが発生している。

2.3.4 通信 携帯電話に火山灰が侵入し、通話や表示画面などの障害が発生している。なお、2000年の有珠山噴火のように、通信不調が発生しなかった事例もある。

2.3.5 降灰深と被害確率の関係 2.2.3節の手法を用いて、降灰深と被害確率の関係を評価する。一例として、電力の降灰深と被害確率の関係と被害データのプロットをFig. 7に示す。つぎに、ライフラインの降灰深と被害確率の関係をFig. 8に示す。

3. 降灰による建物被害評価例

3.1 降灰条件

富士山の1707年宝永噴火を再現した降灰シミュレーション結果¹⁾を用いて、建設地の降灰深を求める。降灰ケースは、Table 2に示すように風向に応じて2ケース設定する。建設地を東京都新宿区に設定すると、15日間の累積降灰深はTable 2となる。

3.2 建物被害評価例

S造の建物屋根を対象に、降灰被害を評価する。屋根はデッキプレート上にコンクリートを打設した構造形式とし、固定荷重は実建物の設計例を参照して5.9kN/m²、積載荷重は1.8kN/m²として鉛直荷重を7.7kN/m²に設定した。新宿区の垂直積雪量は30cmで規定されているため、Fig. 1の限界降灰深の平均値と変動係数を用いて、建物屋根の降灰深と被害確率の関係を評価する。つぎに、熱源系の空調設備は室外空調機とし、空調室外機と電力のいずれかに被害が発生したときに被害有りとする。

建物屋根と空調設備の被害確率をFig. 9に、Table 2の降灰深を対象にFig. 9から被害確率を求めるとFig. 10となる。建物屋根の被害確率は約0.01以下となるが、空調設備の被害確率は約0.3以上となり、降灰により空調設備への影響が大きくなる。

4. まとめ

本報では、建物屋根、熱源系の空調設備ならびにライフラインを対象に、火山噴火の降灰による被害評価法について紹介した。今後は、降灰による被害評価法の精度向上に努めるとともに、建物被害評価例を踏まえて降灰で影響を受けやすい屋根、空調設備の降灰対策に向けて取り組む所存である。

謝辞

本報は、文部科学省の次世代火山研究・人材育成総合

Table 2 降灰ケース¹⁾

Case of Ash Fall		
	ケース1	ケース2
規模・噴出率	宝永噴火の規模・噴出率	
継続時間	15日間	
風向	西風卓越	西南西風卓越
降灰分布	神奈川県と千葉県に降灰分布の中心	神奈川県と東京都に降灰分布の中心
新宿区の降灰深(cm)	0.3	9.0

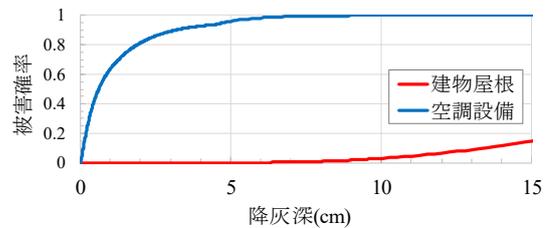


Fig. 9 建物屋根と空調設備の被害確率
Damage Probability of Building Roof and Air Conditioning Equipment

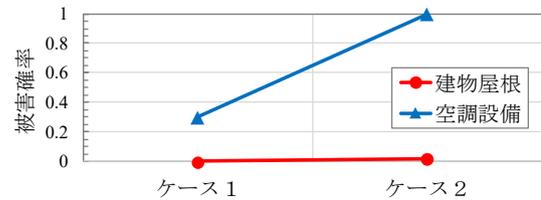


Fig. 10 各ケースの被害確率
Damage Probability of Each Case

プロジェクトの一部として行われました。防災科学技術研究所の宮城洋介様、宮村正光様、山梨県富士山科学研究所の久保智弘様には、貴重なご意見を頂きました。

参考文献

- 1) 中央防災会議 防災対策実行会議 大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ：大規模噴火時の広域降灰対策について—首都圏における降灰の影響と対策—（報告），2020.4
- 2) 社会資本整備審議会 建築分科会 建築物等事故・災害対策部会：建築物の雪害対策について 報告書，平成26年10月
- 3) 大塚清敏，野畑有秀，諏訪仁，久保智弘，宮村正光：空調室外機の降灰実験その1～その3，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 5-10，2018
- 4) 大塚清敏，野畑有秀，諏訪仁，久保智弘，宮村正光：建物空調の冷却塔を対象とした降灰実験その1～その2，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 29-32，2019
- 5) 文部科学省研究開発局，防災科学技術研究所：次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 次世代火山研究推進事業 課題 D 火山災害対策技術の開発 サブテーマ3 平成31年度成果報告書，2020.5