

市街地における火山灰の降灰への建物影響の数値計算

大塚 清敏 諏訪 仁
野畑 有秀

A Numerical Study on the Influences of Buildings on Volcanic Ashfall in Cities

Kiyotoshi Otsuka Hitoshi Suwa
Arihide Nobata

Abstract

A numerical ashfall calculation code including the effect of inertia of ash particles is developed to study small-scale variations of ashfall distribution in cities resulted from disturbed airflow by buildings. Calculations of fallout of volcanic ash in wind approaching a single building having simple shape show that the flow patterns of ash around the building depend significantly on particle sizes. Ashfall simulations in a built-up area in a city are also carried out. The results indicate that the ashfall amount can locally exceed 1.5 times the ones provided, for example, by large-scale prediction which gives rather smooth ashfall distributions. Implication of the present simulation in considering the mitigation of ashfall-induced damages will briefly be mentioned.

概要

火山から遠隔（遠位領域）に位置する市街地の中での建物による降灰分布への影響を、火山灰粒子の慣性力を考慮した降灰の数値計算によって調べた。遠位領域に到達可能性のある粒径(62.5, 125, 250, 500, 1000, 2000 μm)に対し、風のある条件下で単純形状の単体建物周りの降灰計算を行った。その結果、降灰強度や火山灰空間濃度の分布に対する風速や粒径への大きな依存性が示された。火山灰粒子の慣性力は、通常広域の降灰予測では考慮されないが、本研究の数値計算は、それを考慮したことで現れる効果によって特徴づけられる。さらに、低層～中層の建物が密集するモデル街区に対する降灰計算を行った。計算結果には、建物で乱された気流による降灰分布の不均一性、その粒径や風速による顕著な違いが認められ、局所的には広域分布として与えられる降灰量の1.5倍を超える降灰量となる可能性が示された。ここで得られた結果は、降灰に対する被害軽減策検討のための基礎としての活用が期待される。

1. はじめに

活火山¹⁾の多い我が国では、火山噴火により多くの都市が降灰を受ける可能性がある。将来の発生が予想される富士山噴火に対する首都圏の都市域もそうした例のひとつである。気象庁の降灰階級表²⁾では、火山灰の地面などへの堆積厚さ1mm以上は「多量」に分類され、交通やインフラに大きな影響が出始めるとされるが、富士山噴火を対象に国が行った被害想定³⁾では、降灰予測シミュレーションによって、関東地方南部の広い範囲で堆積厚さが1cmを超える降灰量が予想されている。活発であった1980年代の桜島の噴火活動の際でも、近接する鹿児島市の火山灰の堆積厚さは2mm程度であった^{4),5)}。首都圏のような人口が密集し高度に複雑化した現代の大都市が、国の予想³⁾のようなまとまった量の降灰を受けるのは世界的にも前例が無い⁶⁾。そのため、降灰による被害の軽減のためには、降灰によって生じ得る事象についての理解を深めることが重要である。

噴火による都市への降灰は、火山から遠隔に位置していてもインフラや建物などに重大な機能的被害を生じさせる恐れがある⁵⁾。筆者らは、重要な建物機能のひとつで

ある空調・換気への影響について降灰実験を行い、機器の動作に影響の出る降灰量（降灰の深さ、堆積深さ）を調べてきた^{7),8)}。空調・換気用の機器や設備は必ず外気取入れを行うため、降灰時には吸気に伴う機器への火山灰侵入が起り、それらの動作に影響を与える。その程度は、火山灰の空間濃度や吸気の強さ等に依存する。

降灰の被害想定³⁾では、降灰量として、水平分解能1～数km程度の火山灰の大気拡散・沈降モデル解析⁹⁾から計算格子内の平均量として予測される降灰量を、堆積深さ

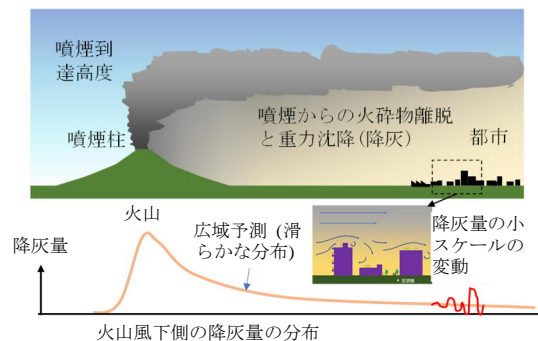


Fig. 1 噴煙と降灰および遠隔にある都市
Eruption Cloud, Ash Fallout and Cities in Distal Area

(mm, cm単位) で表したものが用いられる。しかし、市街地のように建物等の障害物の多い地面では、気流の乱れのため降灰予測モデルの分解能以下の規模での降灰の不均一が生じ、広域予測による降灰量を局所的に大きく超える箇所が出現する可能性がある (Fig. 1)。火山灰空間濃度や降灰の深さの不均一性は、空調換気への影響の出現や積灰による道路の通行可否等に関係するが、これらに関する先行研究はほとんど無い。こうした降灰分布の空間変動の程度を明らかにすることは、被害予測の精度を高める上で重要である。

本研究は、このような観点で、建物の影響による都市での降灰の不均一性の度合いを理解することを目的としている。ここでは、単純形状の単体建物および街区を対象とし、広域予測から得られる降灰量を1とした場合の不均一性(変動)の、相対的な大きさの目安を数値計算によって得ることを試みた。その結果について報告する。

2. 降灰計算の方法

2.1 基本方程式系

降灰計算では、上空から降ってくる火山灰粒子の、建物など地上の障害物によって乱された大気境界層内の気流の中での移流、拡散、重力沈降過程が計算される。基本方程式系を記号の意味とともにTable 1に示す。風と重力の作用による火山灰の空間内の移動は、ともに粒径別にEuler形式で書かれた火山灰空間濃度の保存式 (1)と火山灰粒子の運動方程式(2)とで表される¹⁰⁾。添え字Dは各

Table 1 基本方程式系

Governing Equations and List of Symbols

(方程式系)

■火山灰空間濃度の保存式：

$$\frac{\partial C_D}{\partial t} + \nabla \cdot C_D \mathbf{U}_D = \nabla \cdot k \nabla C_D \quad (1)$$

■火山灰運動方程式

$$m_D \left(\frac{\partial \mathbf{U}_D}{\partial t} + \mathbf{U}_D \nabla \mathbf{U}_D \right) = - \nabla p_{air} - (m_D - m_{air}) \mathbf{g} - \frac{1}{2} \rho_{air} C_{drag} (R_e) A |\mathbf{U}_D - \mathbf{U}_{air}| (\mathbf{U}_D - \mathbf{U}_{air}) + \mathbf{F} \quad (2)$$

■気流計算

- ・中立非圧縮のReynolds平均流方程式系
- ・乱流粘性係数, 乱流拡散係数は標準k-εモデルによる

(記号：太字はベクトル量)

∇ : 勾配演算子, $\nabla \cdot$: 発散演算子, D:火山灰粒子の粒径(m), C_D :粒径Dの粒子の空間濃度(kgm⁻³), \mathbf{g} :重力加速度(9.8ms⁻²), k:乱流拡散係数(m²s⁻¹), \mathbf{U}_D :粒径Dの粒子の速度(重力落下の速度も含む)(ms⁻¹), m_D :粒径Dの粒子の質量(kg), m_{air} :粒径Dの粒子と同体積の空気の質量(kg), A:粒子の投影面積(m²), \mathbf{U}_{air} :気流速度(ms⁻¹), ρ_{air} :空気密度(kgm⁻³), p_{air} :気圧(Pa), C_{drag} :抗力係数, R_e :粒子-気流速度差と粒径によるReynolds数, F:乱流摩擦力(Nm⁻³), 火山灰粒子密度:2600kgm⁻³

式が粒径Dに関する式であることを示している。太字はベクトル量である。火山灰は重力の作用で落下しながら気流で流されるが、気流と火山灰の運動は、重力落下は別として、粒子に質量(慣性)があるため必ずしも一致しない。そのため多相流体の方法¹¹⁾を参照し火山灰粒子の速度を陽に計算することにした。粒子の運動方程式を導入することの必要性は、水平方向を向いた空調吸気口への火山灰の侵入¹⁰⁾や投影面積の小さい物体への着雪機構¹²⁾の検討でも示されており、その考え方に従うことにした。

式(1)で、重力落下の寄与は、粒子速度 \mathbf{U}_D の鉛直成分に含まれる。右辺は拡散による濃度変化率を表している。式(2)の右辺は、第1項から順に気圧傾度力、重力と浮力、粒子速度 \mathbf{U}_D と気流速度 \mathbf{U}_{air} との間の相対速度 $\mathbf{U}_D - \mathbf{U}_{air}$ による空気抵抗力、および乱流摩擦力である。個々の火山灰粒子の質量に対し同体積の空気の質量は極めて小さいため、気圧傾度力は無視する。さらに、空気の運動は火山灰粒子によって影響を受けない、粒子どうしの衝突による運動量交換は考慮しない、などの単純化を行った。抗力係数 C_{drag} は、粒子と空気との相対運動のReynolds数の関数として表された経験式¹³⁾を用いた。そこに現れる粒子の空気力学的な扁平の度合いを表すパラメータ(sphericity)には0.8を用いた。

2.2 建物のモデル化と計算領域

火山灰の粒径や風の条件による降灰分布への建物の影響を考えるのに、単純形状の単体建物周りを対象にした降灰の基本的性状の把握、および複数の建物が含まれる街区における降灰の不均一性に関する検討を行った。降灰計算は、矩形の計算領域内において直交直線座標で分割された格子上で、差分法によって離散化した基本方程式を時間積分することで行った。計算領域は、中心位置が同じで3段にネスティングされた計算格子からなる。それらは、外側から内側に向かってGrid 1, Grid 2, Grid 3と称す。計算領域の仕様の概要をTable 2およびTable 3に示す。

2.2.1 単純形状単体建物のモデル化 計算用の建物モデルは、長軸が南北方向で屋上北東隅に塔屋(PH)を有する中規模の直方体建物とした。Fig. 2に、建物の外観と各部の寸法、方位が示してある。図中のx, y, zは、それぞれ東, 北, 上向きを表している。建物は、病院等の災害時重要施設や事業所に多く見られる程度の大きさである。建物モデルは、最も内側のGrid3の中で、水平方向は2m, 鉛直方向は1mの分解能で表現されている。

2.2.2 街区のモデル化 計算対象とする街区をFig. 3に示す。2階建住宅程度の低層建物が密集し、その中に高さ20~30mの中層建物が散在する東西200m×南北280mの範囲の市街地を、東西(x), 南北(y)方向ともに2m, 鉛直方向(z)に1mの空間分解能でモデル化したものである (Fig. 3の黄色枠内)。計算領域の中央には、南北方向に幅20m程度の広い道路が通っている。このような街区は、大都市で都心部からやや離れた市街地によく見られ

る。

2.3 数値計算に関する諸条件

計算領域側面境界から気流が流入するが、その風速の高度分布は、建築学会地表面粗度区分Ⅲ¹⁴⁾に相当する指数0.2の地上高度 z の指数関数に従い、高度10mでの風速 V_{10m} が2.5m/s、5.0m/s、7.5m/sとなるような3段階の風速を仮定した。計算では、火山灰は計算領域上端および側面境界から、風速と同じ水平速度で流されながら、粒径別の終端落下速度で計算領域に流入する。計算は火山灰濃度分布が定常になるまで行った。基本方程式の差分による離散化と時間積分については、気流計算は片岡等¹⁵⁾に従い、火山灰は、移流項は1次風上、拡散項は2次中心差分とし、時間積分は刻み幅0.01sのEulerの前方差分とした。

Table 2 計算領域概要(単純形状単体建物計算用)
Computational Grid (for Single Building Simulation)

領域	広さ(東西×南北)	水平分解能
Grid 1	1.44km×1.44km	$\Delta x = \Delta y = 24m$
Grid 2	480m×480m	$\Delta x = \Delta y = 6m$
Grid 3	200m×200m	$\Delta x = \Delta y = 2m$

領域高さ:500m, 鉛直分解能: $\Delta z = 1m$ (高度40m以下), 40m以上は一定割合で増加, 全67層

Table 3 計算領域概要(都市街区計算用)

Computational Grid (for Built-up Area Simulation)

領域	広さ(東西×南北)	水平分解能
Grid 1	1.2km×1.2km	$\Delta x = \Delta y = 24m$
Grid 2	480m×480m	$\Delta x = \Delta y = 6m$
Grid 3	200m×280m	$\Delta x = \Delta y = 2m$

領域高さ, 鉛直分解能はTable 2と同じ

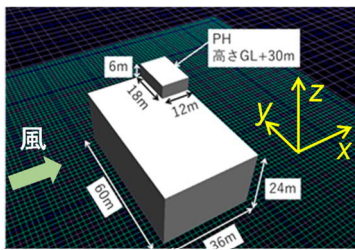
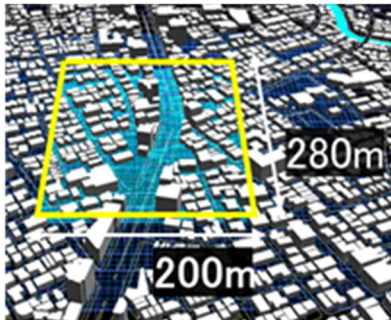


Fig. 2 単純形状の単体建物
A Simple Shaped Building



(©2023 ZENRIN CO., LTD. (Z09KA 第039号))

Fig. 3 モデル街区(黄色の範囲)
A Computational Model of Built-up Area

なお、地面や建物屋根に降り積もった火山灰の風による再飛散は扱っていない。

火山噴出物のうち固体成分を火砕物といい、噴煙として上空に達した後に重力の作用で地上に落下してくるものを降下火砕物という。降下火砕物の中で粒径2mm以下の粒子が火山灰と称される。火山からの遠隔地では、火山灰が主たる降下火砕物である。火山灰の中で、ここでは62.5、125、250、500、1000、2000 μm の6つの粒径を対象とした。これらの粒径は、富士山噴火に関する国の被害想定で、首都圏の都市域の降灰予測結果に現れる粒径である³⁾。富士山宝永噴火(1707年)の時の江戸では最大で粟粒大(1~2mm)の火山灰が降った¹⁶⁾。噴煙の高さや気象条件によってこれらのどの粒径の降灰も起こり得るため、ここでは特定の粒径に重点はおかない。ただし、粒径による降灰性状の違いを明瞭に示す便宜上、本報告では粒径125 μm と2000 μm とに対する結果を主に示した。

以下に示す結果では、主に地表や建物屋根への降灰強度(下向き火山灰質量流束密度 $F_{ash} = CwD$ ($kg/m^2/s$)のこと、 w は火山灰粒子速度の鉛直成分)や空間濃度 C (kg/m^3)を扱うが、これらは全て計算領域上端でのそれらの値に対する比率として、「降灰強度比」、「空間濃度比」として与える。無次元量を使うことで、建物を考慮しない広域の予測降灰量を1とした場合に対する不均一性の相対的な大きさ(比率)を見ていることになる。

3. 計算結果

3.1 単体建物について

3.1.1 本計算手法の特徴 基本方程式系に火山灰の運動方程式を含む本研究の計算手法の特徴的側面を示すため、Fig. 4に $V_{10m} = 5.0m/s$ に対する塔屋(PH)中心を通る東西-鉛直断面内、建物北東隅の塔屋付近の屋根面上1.5mでの水平面内における、気流、火山灰粒子の流速ベクトル、および火山灰の空間濃度比分布を、粒径125 μm 、2000 μm

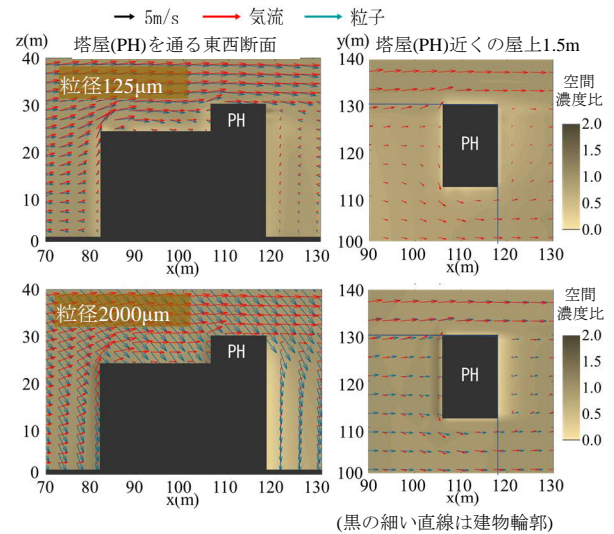


Fig. 4 火山灰粒子、気流ベクトルと火山灰空間濃度比
Ash and Air Flow Vectors and Concentration

について示す(図の煩雑さを避けるためベクトルは2格子点毎に表記)。鉛直断面図で、気流(赤い矢印)の建物風上側端部での剥離や、端部からやや離れた屋上で再付着などが、また、平面図では塔屋を避ける流れが明瞭である。火山灰粒子の流れには、粒径の大小による慣性力の大小の違いが出ている。粒径 $125\mu\text{m}$ は建物による気流の変化にかなり追従して流れており、気流と粒子それぞれの速度ベクトルが判別し難い。気流に乗って建物を避けるように流れるため、建物風上の壁面近くや屋上では火山灰の空間濃度比がやや低くなっている。一方、粒径 $2000\mu\text{m}$ では、慣性力が粒径 $125\mu\text{m}$ のそれより大きく、気流への追従性がよくない。建物、塔屋のいずれも風上側壁面に火山灰が衝突するように流れ、その付近には周囲より高濃度の部分が現れている。建物風下側には両方の粒径ともに空間濃度比が低い範囲があるが、 $125\mu\text{m}$ に比べ $2000\mu\text{m}$ の方が狭いがはっきりしている。これらの違いは、気流変化への粒径による空気力学的応答の違いによるものである。

3.1.2 建物周りの降灰強度比と空間濃度比 Fig.5に東西-鉛直断面内の空間濃度比、および屋根・地面への降灰強度比の平面分布を粒径 $125\mu\text{m}$ 、 $2000\mu\text{m}$ について示す。地面や屋根に降った火山灰の風による再飛散は考慮されていない。断面図はFig.4と同じく塔屋中心を通る断面である。平面図には、上空から見たように建物屋根上と塔屋の屋根上を合わせて示してあり、細い黒い直線は建物や塔屋の輪郭である。値を見やすくするため1.0の等値線も引いてある。

粒径 $125\mu\text{m}$ では屋上や建物前面では平均的に濃度が低い。粒子が軽く、建物を越える気流に乗りやすいため

ある。降灰強度もそれを反映した分布になっており、屋上風上端部近くでは気流の剥離の影響で降灰がほとんど無い。これに対し $2000\mu\text{m}$ では、建物や塔屋の風上側壁面の前面で高濃度であり、降灰強度比も地面や屋上の対応する場所で大きい。これは、Fig.4の説明で述べたように、粒子が慣性力により建物や塔屋を越える気流から外れ、壁面に衝突するように流れるためである。図示はしないが、粒径 $500\mu\text{m}$ では同 $125\mu\text{m}$ 、 $2000\mu\text{m}$ の2つの粒径の中間的な分布であったが、 $2000\mu\text{m}$ の方に近かった。風下側の火山灰の低濃度の範囲(1.0未満)は、粒径が大きいほどはっきりするが、風下への広がりも小さくなっている。

3.1.3 慣性力考慮の有無 慣性力考慮の有無の影響を見るため、慣性力無しの場合の空間濃度比、降灰強度比をFig.6に示す。慣性力無しの場合、火山灰は気流と同じ速度で移動しながら鉛直方向にはさらに終端落下速度が加わるとして計算している。慣性力が通常考慮されない広域の降灰予測と同じ計算法である。空間濃度比の分布は粒径 $125\mu\text{m}$ では慣性力ありに似ている。これに対し、粒径 $2000\mu\text{m}$ では建物風下側の低濃度や風上側の高濃度部分が不明瞭など、Fig.5と大きく異なっている。広域の降灰予測における気流場は建物近傍のような気流の急な変化は無いため、式(2)のような粒子の運動方程式まで解く必要は無いが、建物などの地上の障害物近くを扱う場合は十分ではないといえる。

3.2 街区への降灰について

Fig.3で示した街区モデルに対し、降灰計算を行った。その結果について述べる。

3.2.1 地表降灰強度分布 まず、降灰強度に対する

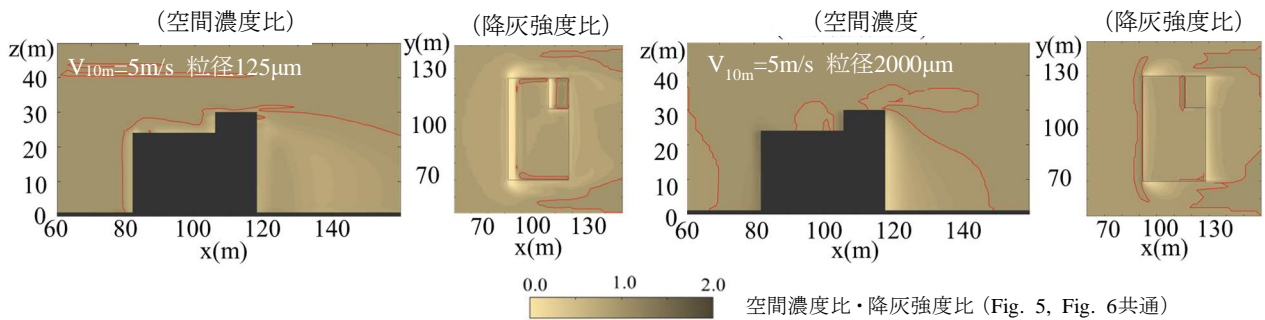


Fig. 5 空間濃度比および降灰強度比 (左2枚は粒径 $125\mu\text{m}$ 、右2枚は粒径 $2000\mu\text{m}$)
Ash Concentration and Ashfall Rate (Left two and right two panels are for diameters of $125\mu\text{m}$ and $2000\mu\text{m}$)

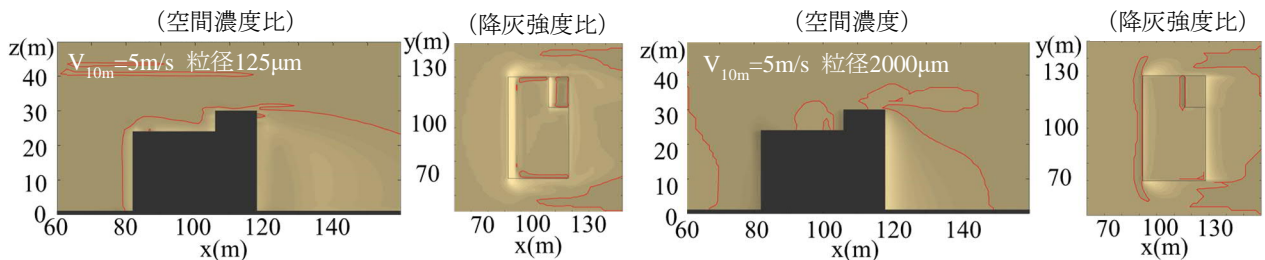


Fig. 6 慣性力なしの場合の空間濃度比および降灰強度比 (カラースケールはFig.5と共通)
Same as Fig.5, but for the Cases Without Inertia Force

粒子の大きさの影響について見る。Fig. 7に西風($V_{10m}=5$ m/s)の場合の地面での降灰強度比(粒径62.5, 125, 250, 2000 μm)を示す。水色の矢印は風向、黒いハッチは建物である。建物と建物との間は道路あるいは駐車場などの空地であり、図のほぼ中央を南北(上が北)に延びる建物の無い部分は幅の広い道路である。前節と同様に、地面や屋根上の火山灰の風による再飛散は含まれていない。参照の便宜のため1.0の等値線も併記してある。

降灰強度比の分布にはいくつかの特徴が見られる。小さい粒径(62.5, 125 μm)ほど1.0未満の範囲が多い。これは小さい粒子は重力落下の終端落下速度が小さく(62.5 μm で約0.3m/s, 125 μm で約0.7m/s), Fig. 4で見たような建物風上側の壁面での建物を越える上向きの気流(上向き風速の大きさの程度は今回対象とした市街地の建物の大きさでは1~2m/s程度)によって、地面への落下が抑制されやすくなるためと考えられる。市街地のように建物等の障害物が多数ある地面では、小さい粒子の地面への落下が平坦な地面よりもやや抑制される可能性がある。この場合、ある場所で地面への落下を免れた粒子はさらに下流に運ばれると考えられるが、この可能性については、より広い領域での降灰計算などで確かめる必要がある。

街区全体における降灰強度の面的な不均一性は粒径62.5 μm が最も顕著であり、粒径が大きくなるにつれ次第に小さくなっている。これに対して街区の中を詳細に見ると、建物風上側で1.0以上、風下側で1.0未満といった、個々の建物の風上側・風下側での降灰量の差が次第に明瞭になっている。その程度は粒径が大きいくほど大き

い。一方、小さい粒子、特に粒径62.5 μm , 125 μm では、狭い路地の多くでは降灰強度比が小さく、0.5未満の箇所もある。中央を南北に通る道路では、平均的に東側での降灰が相対的に多い。道路の西側は建物による遮蔽の影響をより強く受けやすいからである。また、特に粒径62.5 μm では、非常に大きな降灰強度が、建物風上側のいくつかの箇所にみられるが、それは、小さい粒子は終端落下速度が小さいため、無次元の降灰強度の分母となる広域の降灰の落下速度(\propto 降灰強度)も小さく、建物周辺の鉛直流の変動による比率の増減が強調されやすいことも関係していると思われる。

Fig. 7の降灰分布に見られた特徴は、粒径による落下速度の違いや粒子の慣性力の影響によるものである。同じ密度の粒子では粒径が大きいくほど気流の変化に対して応答しにくくなるため、対象とした粒子の中で最も大きい粒径2000 μm が、気流変化の影響を最も受けにくく地表への降灰強度比の一様性が最も高くなったといえる。

3.2.2 鉛直断面内での特徴 粒子の大きさの違いによる降灰や空間濃度の違いをみるため、東西-鉛直断面内の火山灰の空間濃度比、および気流、火山灰粒子それぞれの速度ベクトル(Fig. 4と同様に2格子毎に表示)を粒径125 μm , 2000 μm についてFig. 8に示す。建物と道路との配置の関係で、現象の特徴が見やすい東風に対して示す。断面図はFig. 7(62.5 μm)にある直線A-Bに沿った断面である。ベクトルは気流が赤色、火山灰粒子流が濃い青色である。

粒径125 μm では、空間濃度比の低い範囲が建物風下側

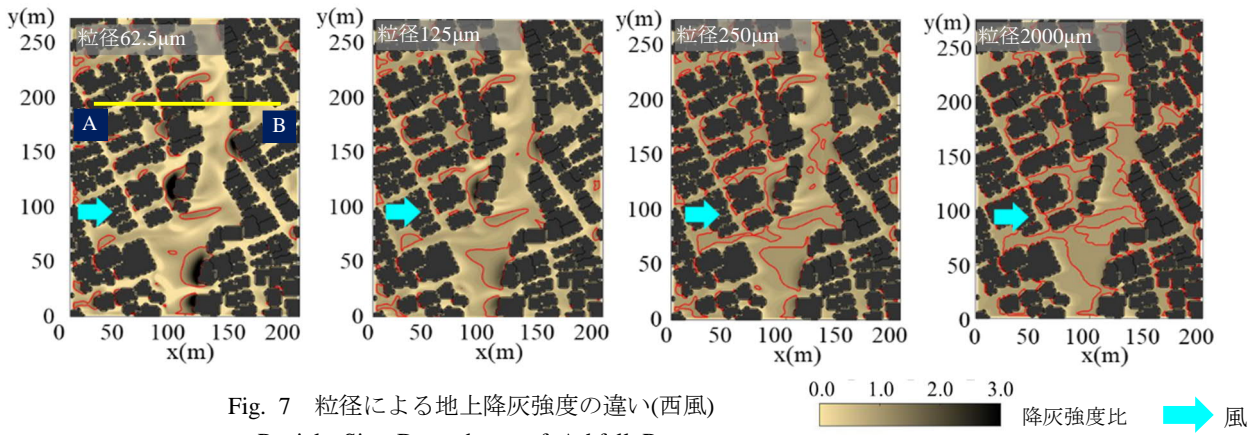


Fig. 7 粒径による地上降灰強度の違い(西風)
Particle Size Dependence of Ashfall Rate

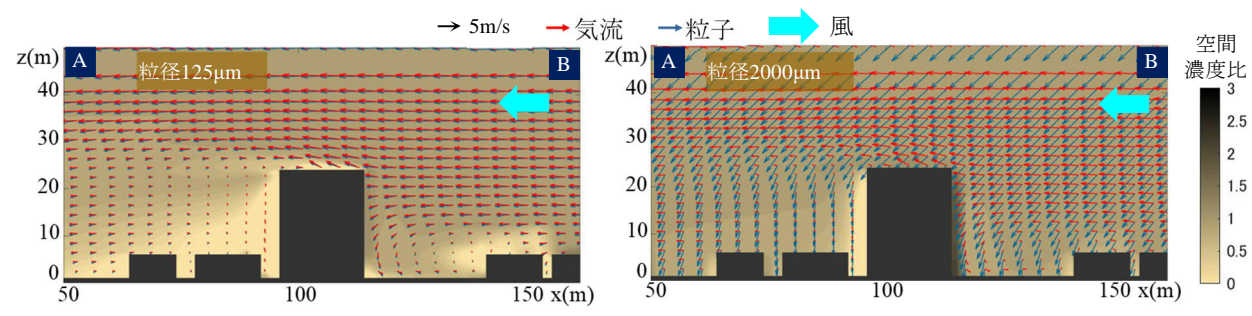


Fig. 8 気流と火山灰の流れ、および空間濃度比の東西-鉛直断面 (Fig. 7(粒径62.5 μm)の直線A-B上)
East-West Vertical Cross Section of Air and Ash Flow Vectors and Ash Concentration

に大きく広がっている。一方、中央の大きな建物の東側（風上）では、建物に衝突して生じる下向きの気流に乗るように火山灰も下向きに流れ、さらに、地面付近で気流が建物から離れる向きに変化すると火山灰も同じように流れの向きを変えている。空間濃度比の分布は、火山灰のそうした流れを反映したものとなっている。

一方、粒径 $2000\mu\text{m}$ では、中央の建物東側のそのような気流の変化にあまり追従することなく、上空から落下しながら建物に衝突するように流れている。大きな粒子の気流の影響を受けにくい運動様式を反映し、空間濃度比は東側外壁に沿って高濃度を示し、風下側（西側）の低濃度の部分も $125\mu\text{m}$ のものより狭い。建物の東側は道路であるが、粒径の違いによる道路上への降灰強度の違いがこれらの図から推察される。街区におけるこうした傾向は、前節で述べた単体建物の周りの降灰分布の特徴と似ている。

3.2.3 地上降灰強度への風向の影響 Fig. 9に、風向が南および南西の場合の地表面での降灰強度比分布を粒径 $250\mu\text{m}$ について示す。Fig. 7の粒径 $250\mu\text{m}$ の西風の場合と比べ、南風では中央を通る道路上の降灰強度分布の

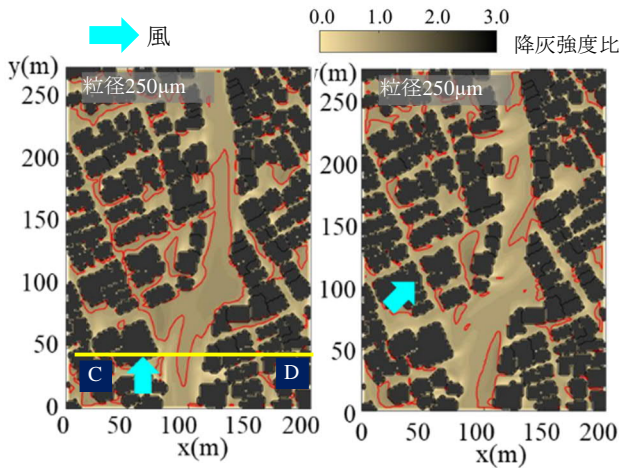


Fig. 9 南および南西風に対する地上降灰強度比
Ashfall Rate for Southerly and Southwesterly Winds

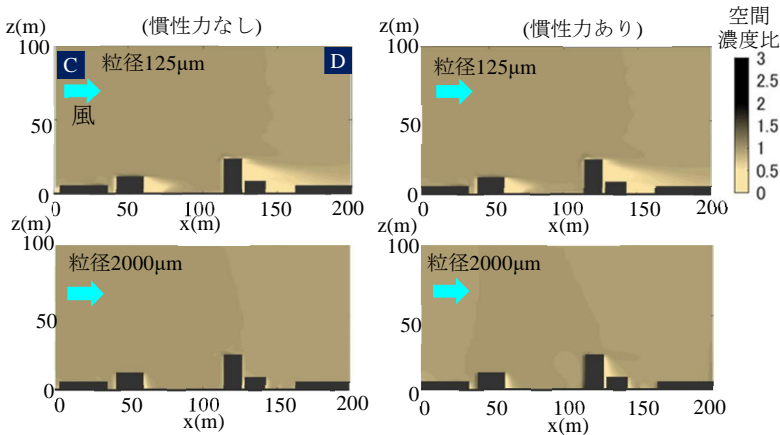


Fig. 11 空間濃度比の慣性力の有無による違い (Fig.9の直線CD上)
Comparison of Concentrations between with and without Inertia Force

一様性が増している。これは風が道路に沿った方向に吹く場合、道路上への降灰に対する障害物の影響が少ないためである。図示しないが道路の走行と平行に近い北風についても同様であった。南西の風では、道路西側の建物の遮蔽の影響がやや出ており、道路東側に降灰の多い部分が偏っている。こうした降灰分布の風向による違いは、道路交通への支障の程度に対し、降灰時の主たる風向が大きく影響することを示している。

3.2.4 空間濃度 火山灰の空間濃度は、降灰時の空調や換気設備の動作に大きく影響する。降灰時には空調・換気の吸気口から外気と一緒に火山灰も吸い込まれるからである。火山灰の空間濃度が高いほど吸い込まれる火山灰の量は多くなる。Fig. 10に、地上高度 14.5m を例に、そこにおける西風に対する空間濃度比の平面分布を粒径 $125\mu\text{m}$ 、 $2000\mu\text{m}$ について示す。参照の便宜のため、 1.0 の等値線も赤い線で示してある。地上高度 14.5m は、居住用建物5階程度の高さにあたる。

粒径 $125\mu\text{m}$ では風下側に低濃度の範囲が大きく伸びている。また、建物風上側のごく近傍に空間濃度比が 1.0 未満の範囲がある。一方、 $2000\mu\text{m}$ では建物風上面に近接す

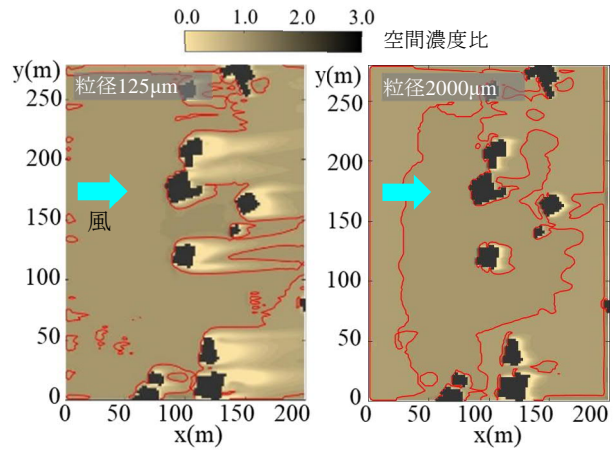


Fig. 10 高度 14.5m における空間濃度比
Ash Concentration at 14.5m above Ground Level

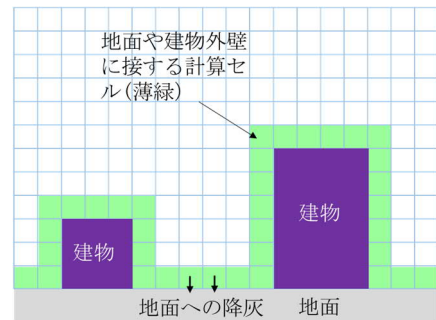


Fig. 12 出現頻度ののに用いた格子セル (薄緑)
Cells used to count Frequencies (light green)

る形で1.0以上の範囲が現れている。これは、Fig. 4, Fig. 8 についての説明のように、小さい粒子は建物を避けて流れる気流に追随しやすいが、大きな粒子は慣性力の影響で気流変化に追随できず建物に衝突しやすくなることの現れである。図から判読し難いが空間濃度比の値は、いずれの粒径でも、およそ0.0~1.5程度の範囲にある。別の高度(図示なし)では、粒径2000 μm では風上側建物外壁近くで2.0を超える個所もあった。

3.2.5 慣性力の考慮の有無の比較 街区の降灰計算に対しても慣性力の有無による降灰分布の違いを見てみた。Fig. 11に西風の場合について、Fig. 9の直線C-D上の断面内の空間濃度比の慣性力の有無による違いを示す。粒径125 μm では分布状況の違いは少ないが、粒径2000 μm では、建物に対する風上、風下間での濃度比分布の差などの違いがはっきりと認められる。市街地では降灰の影響を受けやすい箇所、そうでない箇所の差が明瞭に現れやすいと見られ、それは災害軽減や復旧計画の検討に関わってくる。市街地への降灰分布予測では、広域の降灰予測で用いられる手法の単なる高解像度化では十分でないことが示唆される。

3.2.6 降灰強度・空間濃度の出現頻度 街区での降灰の不均一性の程度を量的に見るために、降灰強度比、空間濃度比の空間的出現率(相対出現頻度)を調べた。地面降灰強度比の出現率は、計算領域(Fig. 3, Table 2のGrid 3)内で、建物の無い部分での地面上1番目の格子セルの総数に対し、降灰強度比がある値をとる格子セル数の割合を百分率(%)で表したものである。空間濃度比については、建物の無い部分の地面上1番目の格子セルに加え、建物外壁に接する格子セルも対象とし(Fig. 12の薄緑のセル)、その全数に対する、空間濃度比がある値をとる格子セル数の割合(%)である。空間濃度比は空調設備への降灰影響に対する重要な量であるため^{7),8)}、濃度出現率は機器が設置されることのない外壁や屋上に接する格子セルも空間濃度の出現率の算出対象に含めた。

西風の場合について、今回考慮した6つの粒径に対する地面での降灰強度比の出現率をFig. 13に示す。出現率は、横軸の降灰強度比の値0.0~0.1, 0.1~0.3, ..., 0.9~1.1, 1.1~1.3, ...のように、刻み幅0.2毎に求められている。

出現率の分布は、粒径が小さい方ほど裾広がりであり、不均一の度合いが大きくなっている。一方、粒径250 μm 以上では、降灰強度比が1.0(0.9~1.1の区間)でピークを持ち、さらに500 μm 以上の粒径ではそのピークがより尖っている。図には示していないが、空間濃度比の出現頻度も降灰強度比に似た分布をしている。降灰強度比、空間濃度比ともに1.4(1.3~1.5の階級)を超える値まで数~10%程度の出現頻度が見られた。

出現率に対する風向と風速への依存性を見るためFig. 14に、16風向に対する地面での降灰強度比(実線)と地面および建物近傍の空間濃度比(破線)の出現率を、粒径125 μm , 2000 μm について示す。風速は $V_{10m}=2.5\text{m/s}$,

5.0m/s, 7.5m/sの3通り考慮した。図には、風向別に求められた出現率分布が16風向分重ねて描いてある。図の凡例に125 $\mu\text{m_C}$ のように「_C」が付されているのは空間濃度比のグラフであることを表している。

図の横軸である無次元量の範囲内(0.0~2.5)で、降灰強度比、空間濃度比ともに16本のグラフの最大、最小の差は、いずれの粒径、風速でも最大で10%程度に収まっている。これから、出現率分布の風向による差はそれほど大きくないといえる。ただし、風向に関するこの結果は、単純には一般化できないと考えられる。今回対象とした街区では、建物の大きさや高さが比較的揃っており

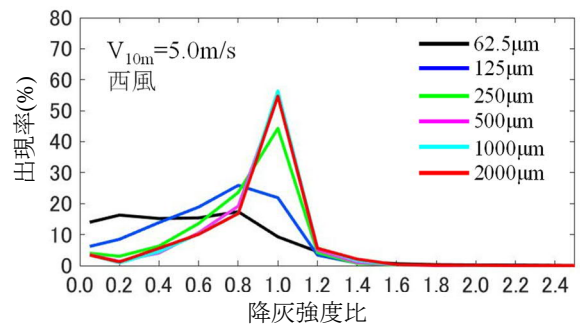


Fig.13 降灰強度比の出現率(西風)
Frequencies of Ashfall Rates at the Ground

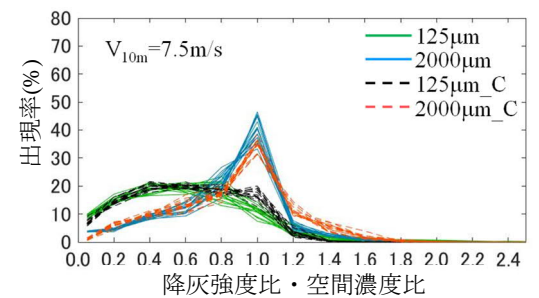
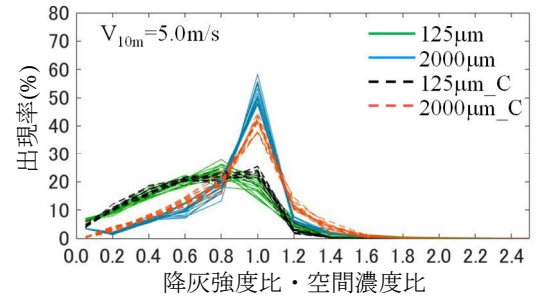
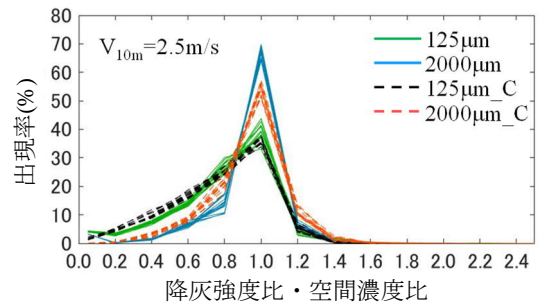


Fig.14 降灰強度比と空間濃度比の出現率(16風向)
Frequencies of Ashfall Rate and Concentration

(Fig.3参照), 超高層建物など, 建物単体で周囲に与える影響が風向によって大きく変化するような建物が含まれていないことが, 要因のひとつと考えられる。

一方, 風速に関しては降灰強度比, 空間濃度比ともに風速の変化に対する明らかな傾向がある。風速 $V_{10m}=2.5m/s$ では, 粒径 $125\mu m$, $2000\mu m$ の両方で, 横軸の無次元量 1.0 に最大があるが, 風速が上がると $125\mu m$ ではピークが鈍くなり, 1.0 未満の範囲の出現の割合が増えてきている。これに対し, 粒径 $2000\mu m$ では 1.0 での最大が保たれているものの, 風速の増加とともに最大値が小さくなり, 頻度分布の裾が広がってきている。無風で火山灰が垂直に落下する場合は, 降灰強度比や空間濃度比は上空と同じ値でほぼ一樣になるが (横軸 1.0 において出現率 100%), 風速 $2.5m/s$ は他の風速と比べそれに近く, 横軸 1.0 での頻度が大きい。一方, より大きな風速では, 複数の建物の存在によって, 境界層内での地上までの降下の際に風に流されて下流に位置する建物の影響を受ける機会が多くなるため, 降灰の不均一性が大きくなると考えられる。降灰強度比, 空間濃度いずれも 1.5 を超える部分があり, 広域予測に対して少なくともこの程度までは, 降灰量の幅を見る必要がある。

4. まとめ

市街地での建物の影響による, 降灰分布の不均一性について, 火山灰粒子の慣性力を考慮した数値計算によってその程度を調べた。その結果, 以下のことがわかった。

- 1) 建物周りの地上への降灰強度や空間濃度の分布は, 粒径の影響を大きく受ける。
- 2) 建物影響により, 局所的に広域の降灰量に対し, 1.5 倍を超える箇所が出現する可能性がある。
- 3) 降灰の不均一性の程度は, 粒径が小さいほど大きい。風速の増加は不均一性を高める方に作用する。

降灰計算により, 市街地での降灰の状況がある程度把握できた。ここで得られた結果は, 影響を受けやすい箇所, 対策を優先すべき箇所を含めた被害軽減策の検討に, 基礎的な知見として資すると考えられる。また, ここでは含まれなかった火山灰の再飛散は次の検討課題である。

謝辞

本研究は文部科学省「次世代火山研究・人材育成プロジェクト」の課題 D3 として行われた研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ: https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/katsukazan_toha/katsukazan_toha.html (参照: 2023-5-24)
- 2) 気象庁ホームページ: https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/qvaf/qvaf_guide.html (参照: 2023-9-18)
- 3) 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-~富士山噴火をモデルケースに~(報告), 降灰シミュレーションのパラメータと計算結果 2020.4
- 4) 中村政道: 桜島の総降灰量の推移, 験震時報, 第 65 巻, pp.135-143, 2002
- 5) Wilson, T. M. et al.: Volcanic ash impacts on critical infrastructure, Phys. and Chem. of the Earth, Parts A/B/C, vol. 45, pp. 5-23, 2012.1
- 6) Mannen, K. et al.: Simulations of tephra fall deposits from a bending eruption plume and the optimum model for particle release. J. Geophysical. Res., Solid Earth, 125, e2019JB018902. <https://doi.org/10.1029/2019JB018902>, 2020
- 7) 大塚, 他: 空調室外機および冷却塔の降灰実験, 日本建築学会技術報告集, 第 65 巻, pp. 580-585, 2021.2
- 8) 大塚, 他: エアフィルタに関する降灰実験, 2021 年度日本建築学会大会(東海) 学術講演梗概集, 構造 I, pp. 29-30, 2021.9
- 9) Connor, L. and C. Connor: Tephra2 User's Manual, 2011, https://vhub.org/resources/756/download/Tephra2Users_Manual.pdf (accessed: 2021-12-28)
- 10) Otsuka, K. et al.: A consideration on volcanic ash ingress into the horizontal air intake of air conditioning, J. Disaster Research, Vol. 17, No.5, pp. 818-825, 2022.8
- 11) Ongaro, T. E. et al.: Multiphase flow dynamics of pyroclastic density currents during the May 18, 1980 lateral blast of Mount St. Helens," J. Geophys. Res. Vol. 117, B06208, doi:10.1029/2011 JB009081, B 062081, 2012
- 12) 大塚, 他: 大きさの異なる物体への着雪についての基礎的考察, 2015 年度日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集, 構造 I, pp. 105-106, 2015.9
- 13) Dare, R. A.: Sedimentation of volcanic ash in the HYSPLIT dispersion model, CAWCR Tech. Rep., No. 079, p. 3, 2015
- 14) 日本建築学会: 建築物設計用荷重指針・同解説, pp. 323-326, 2015
- 15) 片岡, 他: 風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発, 大林組技術研究所報, No. 64, pp. 49-54, 2002
- 16) 宮地直道, 小山真人: 富士火山 1707 年噴火(宝永噴火)についての最近の研究成果, 荒巻重雄, 藤井敏嗣, 中田節也, 宮地直道編, 富士火山, 山梨県富士山科学研究所, pp.339-348, 2007