

富士山噴火による降灰ハザードと道路機能支障リスクに関する検討 Study on Ash Fall Hazard and Road Function Failure Risk of Mt. Fuji Eruption

○鳥澤 一晃¹, 矢代 晴実²
Kazuaki TORISAWA¹ and Harumi YASHIRO²

¹ 鹿島技術研究所

Kajima Technical Research Institute

² 防衛大学校

National Defense Academy

In large-scale natural disasters, road function failures have a major impact on emergency reconstruction activities in the affected areas. In recent years, there is concern about the influence of the eruption of Mt. Fuji on the metropolitan area, and countermeasures against road malfunction accompanying large scale volcanic ash falls are required. In this study, the probabilistic hazard map of volcanic ash layer thickness was evaluated. In addition, we examined the risk of road malfunction caused by volcanic ash falls and evaluated the influence of the eruption of Mt. Fuji.

Key Words : Volcanic Eruption, Ash Fall Hazard, Road Function Failure Risk, Blocked Road Occurrence Rate

1. はじめに

大規模自然災害において、道路の機能支障は被災地域の応急復旧活動等に多大な影響を及ぼす。近年、富士山噴火時の首都圏への影響についても関心が高まっており、大規模な降灰に伴う道路機能支障への対策も求められている。本研究では、富士山噴火による降灰層厚の確率論的ハザードマップを評価するとともに、降灰に伴う道路機能支障リスクの評価について検討を行なった。

2. 評価手法

(1) 評価フロー

著者ら¹⁾はこれまでに地震・津波による道路機能支障リスク評価について検討を行なってきている。そこでは、計測震度および浸水深を入力として道路通行止めを確率的に評価し、それに基づき通行不能区間を考慮した通行可能量の確率分布をモンテカルロ法で評価した。

本研究では、それと同様の考え方で、噴火時の広域に亘る降灰分布に基づき、降灰層厚を入力として通行不能区間を確率的に評価し、それによって影響を受ける交通量の確率分布を評価する。

本研究における火山噴火時の降灰による道路機能支障リスクの評価フローを図1に示す。これより、降灰層厚分布、通行不能区間、影響交通量の評価を順に行ない、それらを一定回数繰り返し試行して、影響交通量の確率分布を得る。このうち、降灰層厚分布と通行不能区間の評価において確率論的な評価を行っており、次節以降でそれぞれ詳しく述べる。

(2) 降灰層厚分布の確率論的評価

噴火時の広域に亘る降灰分布の確率論的評価については、須藤ら²⁾が過去の噴火時の降灰分布資料から、分布域の形と伸びの方角のデータを取りまとめ、将来の降灰分布を確率論的に求める手法を検討している。ここで、降灰分布の確率論的評価とは、ある火山から、ある量の火山灰が噴出したとき、周囲の各地点である厚さの火山

灰が堆積する確率を求めることを指す。また、糸井³⁾はそれを定式化して示した。

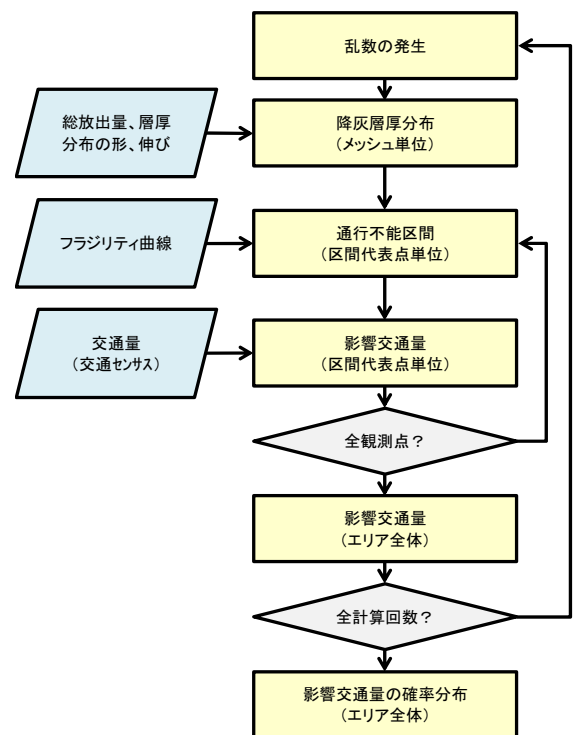


図1 降灰による道路機能支障リスク評価フロー

本研究では、それらの既往研究^{2)、3)}を基本としつつ、GISで面的に評価するに当たり、計算方法の一部を拡張して、降灰層厚の確率論的ハザードマップを評価した。以下にその評価法を記す。

まず、火山灰の総放出量 V は、次式のように降灰層厚 T と等層厚線が囲む面積 S との積で近似的に求まることが経験的に得られている⁴⁾。

$$V = kST \quad (1)$$

ここで、 k は定数である。過去の噴火時の k 値⁴⁾ を整理すると、その分布は対数正規分布に従い、中央値と対数標準偏差 σ はそれぞれ 11.94、0.202 となる³⁾。

(1)式を T について整理すると、(2)式を得る。

$$\log T = \log V - \log S - \log \bar{k} + \sigma \varepsilon \quad (2)$$

ここで、 ε は標準正規分布 (平均 0、標準偏差 1) に従う確率変数であり、定数 \bar{k} は 11.94 とする。

一方、等層厚線が囲む領域を楕円で近似し、火口位置を楕円の長軸端点にとると、楕円の長軸径に対する短軸径の比が全層厚で一定という仮定の下で、前述した(1)式の関係から総放出量と等層厚線の楕円面積に基づき層厚を推定することが可能である⁵⁾。

降灰分布の等層厚線を楕円で近似し、火口位置を x 軸と y 軸の原点に取ったときの評価地点の位置関係を図2に示す。平面直角座標系を仮定する。評価地点の座標 (東北をそれぞれ x 軸、 y 軸の正) は (x_s, y_s) とする。図中の L_a, L_b はそれぞれ楕円の長軸、短軸の半径であり、長軸半径に対する短軸半径の比を楕円の扁平度 R_E と呼ぶ。 θ_E は降灰分布の伸び (楕円の長軸) の方角 (東から反時計回りを正) である。過去の噴火時の扁平度 R_E や長軸の角度 θ_E の統計については須藤ら²⁾ がまとめており (図3)、解析ではこれらの統計的傾向は 1 回の噴火時では全層厚において等しいと仮定する。

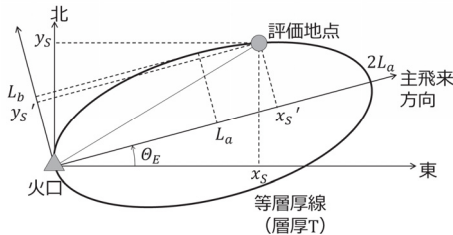
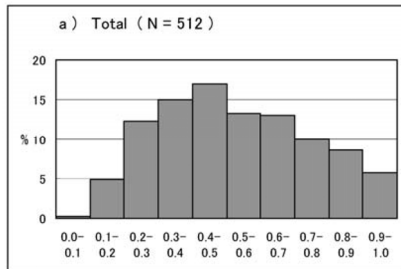
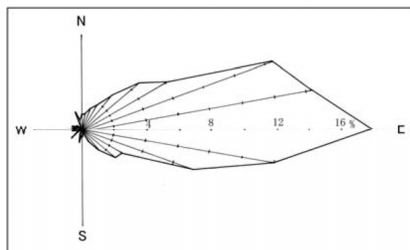


図2 降灰等層厚線の楕円近似と評価地点の座標³⁾



(a) 降灰分布の形 (楕円の扁平度 R_E)



(b) 降灰分布の伸びの方角 (長軸の角度 θ_E)

図3 降灰分布に関する過去の統計²⁾

楕円の長軸と短軸を軸とする座標系を考えると、評価地点の座標 (x'_s, y'_s) は(3)式となる。

$$\begin{Bmatrix} x'_s \\ y'_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_E & \sin \theta_E \\ -\sin \theta_E & \cos \theta_E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \end{Bmatrix} \quad (3)$$

(2)式は楕円近似により、(4)式となる。また、 L_a は x'_s, y'_s, R_E で(5)式のように表すことができる。

$$\log T = \log V - \log \pi R_E L_a^2 - \log \bar{k} + \sigma \varepsilon \quad (4)$$

$$L_a = \sqrt{(x'_s - L_a)^2 + \left(\frac{y'_s}{R_E}\right)^2}$$

$$\therefore L_a = \frac{1}{2} \left(x'_s + \frac{y'_s}{x'_s R_E^2} \right) \quad (5)$$

ただし、三角関数には周期性があるため、上式をそのまま適用すると、原点に対して点対称の位置に同じ図形が描画される。したがって、GIS で面的に評価する際には、以下のように複数の条件で場合分けを行なう。

$\theta_E \leq 90$ または $270 < \theta_E$ の場合

$$x_s < \left(y_s / \tan \left(\theta_E + \frac{\pi}{2} \right) \right) \text{ のとき, } T = 0$$

それ以外するとき、(4)式

$180 < \theta_E \leq 270$ の場合

$$x_s > \left(y_s / \tan \left(\theta_E + \frac{\pi}{2} \right) \right) \text{ のとき, } T = 0$$

それ以外するとき、(4)式

$90 < \theta_E \leq 180$ の場合

$$y_s < \left(x_s / \tan \left(\theta_E + \frac{\pi}{2} \right) \right) \text{ のとき, } T = 0$$

それ以外するとき、(4)式

以上より、火山灰の総放出量 V 、降灰分布の形 (楕円の扁平度 R_E)、降灰分布の伸びの方角 (長軸の角度 θ_E)、 ε の確率分布から、降灰層厚 T の確率分布を面的に求めることができる。具体的には、対象範囲の 3 次メッシュの重心を評価地点として、各確率変数の値をそれぞれ独立した乱数で定めて、繰り返し計算を行なう。

(3) 通行不能確率 (機能的フラジリティ) の評価

噴火時の降灰によって道路が通行不能となった事例は多数あり、気象庁⁶⁾ が図4のようにまとめている。図中の○が通行不能となった事例の降灰層厚を示すが、0.1cm から 7.5cm まで大きくバラつくことが分かる。また、◇は富士山ハザードマップ検討委員会⁷⁾ が被害想定のために設定した値で、乾燥時は 5cm、降雨時は 0.5cm の降灰で通行不能になるとした。内閣府⁸⁾ では過去の噴火時における道路の災害査定基準等も考慮し、乾燥時は 1~2cm、降雨時は数 mm の降灰で通行に支障をきたすとしている。

1mmの厚さを重さに換算すると1000~1700g/m2となる。

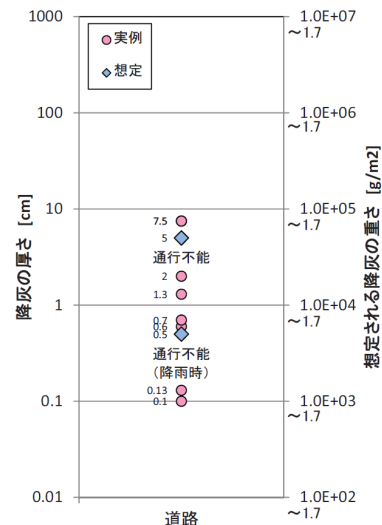


図4 道路通行不能となる降灰層厚⁶⁾

以上より、降灰層厚に対して通行不能事象発生は一意

に決まらず、不確実性を有していることが分かる。その評価には降灰層厚を入力とした通行不能確率の予測関数が望ましい。降灰による道路通行への影響は、路面への灰堆積に伴うスリップ事故や移動困難、巻き上げられた灰による視界不良等道路の機能的な面であることから、機能的フラジリティといえる。その先行研究事例として、玉置ら⁹⁾は2011年の霧島山新燃岳噴火での降灰分布と道路通行規制のデータを構築し、降灰量 x [kg/m²]のときの通行規制確率 $P(x)$ を、標準正規分布の累積分布関数 Φ を用いて次式でモデル化した。回帰で得られた μ_x と σ_x はそれぞれ21.8、10.1である。

$$P(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right) \quad (6)$$

(6)式の横軸を降灰量から降灰層厚に換算して、図5に示す。数mm程度で通行規制が発生し、約2cm超で半数(確率0.5)、約5cmではほぼ全数が通行規制となるという結果であり、前述した過去の事例とも概ね整合している。

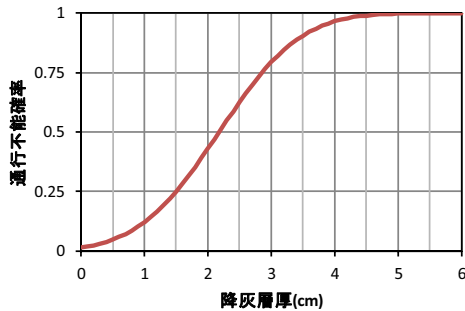


図5 降灰層厚による機能的フラジリティ曲線⁹⁾
(灰の重さ1 kg/m²を厚さ0.1 cmに換算して表示)

本研究では、当該フラジリティ曲線を用いて通行不能区間を評価することにした。具体的には、道路区間*i*の通行不能確率 $P_i(x)$ を算出し、それと0~1の範囲で発生させた一様乱数 u_i を比較して、 $P_i(x) \geq u_i$ のとき、道路区間*i*は通行不能と判定する。

なお、フラジリティ曲線については、今後、別の噴火事例に対する検証や降雨時のフラジリティ曲線の検討等が必要である。

3. 事例解析

(1) 解析対象

富士山噴火による降灰ハザードと道路機能支障リスクの評価を目的として、事例解析の対象は図6に示す範囲(2次メッシュ5238, 5239, 5240, 5338, 5339, 5340の領域)の3次メッシュと道路データとした。道路データは交通センサスの区間中心線と区間代表点を用いた。図中の赤線は高速道路、青線は一般国道、橙線は主要地方道、緑線は一般県道・市道である。

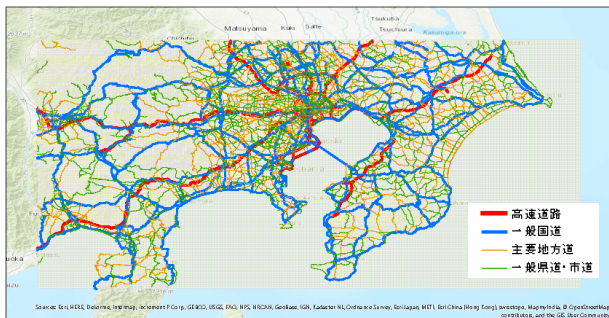
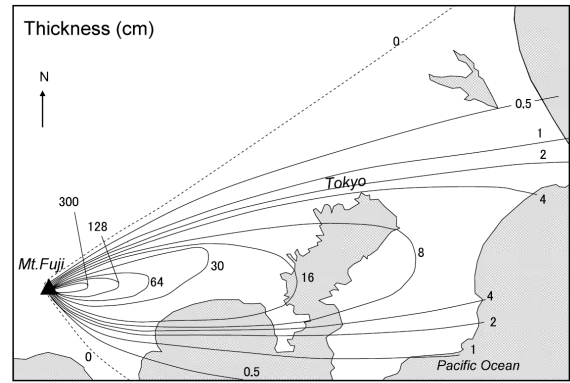


図6 解析対象範囲

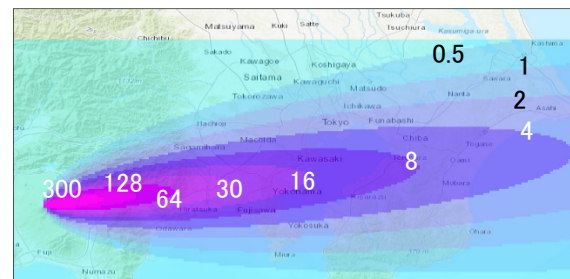
(2) 降灰層厚のハザードマップ

富士山噴火の発生頻度には現状でいくつかの考え方があるため、本研究では発生頻度は考慮せず、富士山噴火が発生したという条件下での降灰層厚の確率分布を評価することにした。

まず、最初に、今回の方法で1707年宝永噴火と同じ総放出量1.7 km³¹⁰⁾を仮定した場合の計算結果(楕円の扁平度 R_E と長軸の角度 θ_E は一定)を、実際の堆積物調査に基づく推定等層厚線と比較して図7に示す。これより、等層厚線を楕円で近似する今回の方法でもある程度妥当な結果が得られることが確認できた。



(a) 実際の堆積物調査に基づく推定等層厚線¹⁰⁾



(b) 宝永噴火と同じ総放出量により推定した等層厚線
図7 1707年宝永噴火の降灰層厚分布の比較

次に、総放出量 V の確率分布を既往研究³⁾に倣い図8のように仮定し、降灰層厚の確率分布を評価した。計算繰り返し回数は5,000回とした。

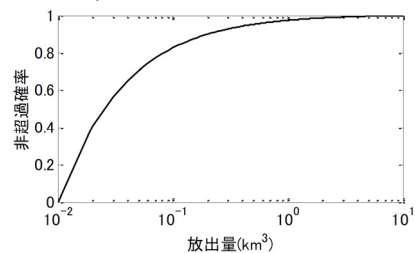


図8 富士山の火山灰総放出量 V の確率分布の仮定³⁾

得られた降灰層厚の確率分布に基づき算出した期待値と95%非超過値のマップをそれぞれ図9と図10に示す。降灰分布の形が特徴的であるが、これは前述した扁平度 R_E や長軸の角度 θ_E の統計が反映された結果である。また、これらより、例えば、小田原での降灰層厚の期待値は0.5cm~1cmであるが、95%非超過値は2cm~4cmであり、約4倍になることが分かる。

また、降灰層厚の確率分布に基づき、ある厚さ以上に堆積する確率を求めることも可能である。図11には降灰

層厚が 0.5cm 以上となる確率のマップを示す。これより、小田原では 0.5cm 以上堆積する確率は 10%~20% である。

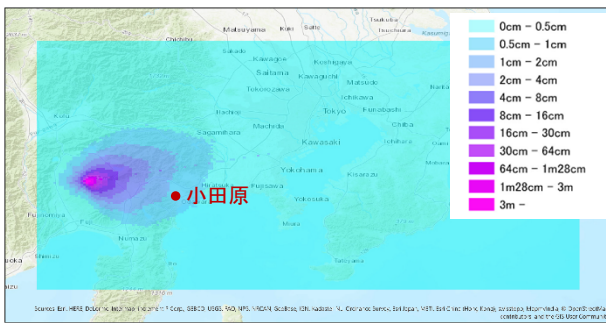


図9 富士山噴火時の降灰層厚の期待値マップ

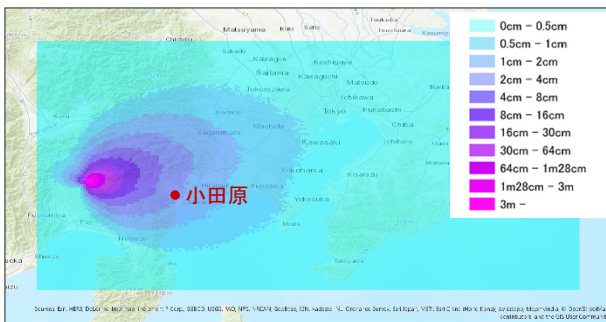


図10 富士山噴火時の降灰層厚の95%非超過値マップ

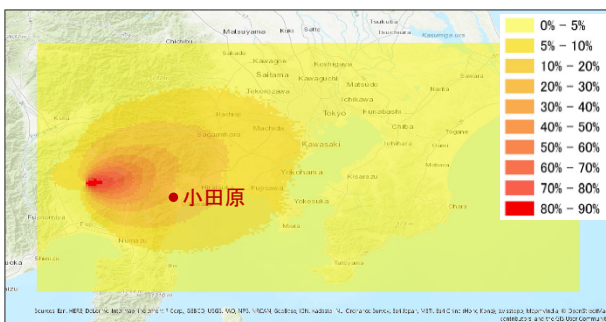


図11 富士山噴火時の降灰層厚 0.5cm の超過確率マップ

(3) 降灰による道路機能支障リスク

前節で求めた降灰層厚の 5000 サンプルに対して、それぞれ通行不能区間を評価し、道路機能支障リスクとして降灰による影響交通量の確率分布を評価した。交通量には 12 時間交通量を用いた。道路区間ごとの影響交通量の期待値と 95%非超過値のマップをそれぞれ図 12 と図 13 に示す。期待値では対象地域全体において影響交通量が見られるが、95%非超過値では火山口近傍で影響交通量が極めて大きくなる。次に、影響交通量のリスクカーブを図 14 に示す。全体では、確率 0.1 で約 300 万台、確率 0.01 で約 3,000 万台の影響交通量が生じる。道路種別ごとに集計した結果では、一般国道の機能支障リスクが相対的に高く、高速道路や主要地方道は確率が小さい領域では一般国道と同程度のリスクとなること分かる。

4. まとめ

本研究では降灰による道路機能支障リスク評価手法を検討し、富士山噴火を対象に事例解析を行なった。今回は降灰の時間的推移やロードスーパーによる降灰除去の効果については考慮しておらず、今後の課題である。

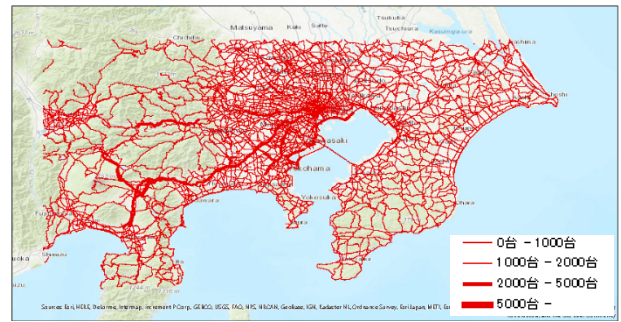


図12 富士山噴火時の影響交通量の期待値マップ

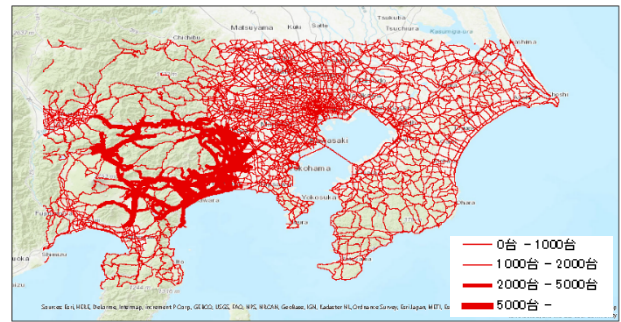


図13 富士山噴火時の影響交通量の95%非超過値マップ

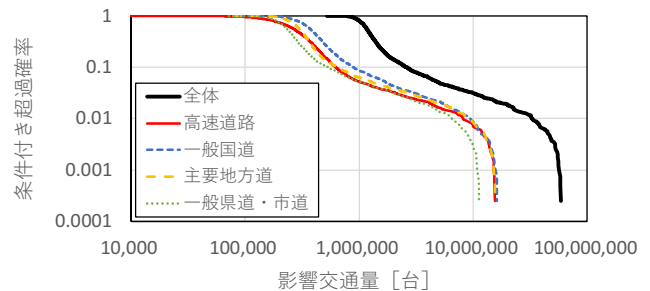


図14 富士山噴火時の影響交通量のリスクカーブ

参考文献

- 1) 鳥澤一晃ほか：サプライチェーンのBCPのための道路網被害予測と事業継続への影響評価、日本地震工学会論文集、第14巻、第2号、pp.84-103、2014。
- 2) 須藤茂ほか：過去の降下火山灰分布公表資料から推測されるわが国の降灰確率予測図作成試案、火山、第55巻、第1号、pp.13-20、2010。
- 3) 糸井達哉：統計データに基づく降灰の確率論的ハザード評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1 分冊、pp.65-66、2016。
- 4) Hayakawa Y.: Pyroclastic Geology of Towada Volcano, Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo, Vol.60, pp.507-592, 1985。
- 5) 武澤永純ほか：火山噴火初動時に対応した降灰厚分布即時推定システムについて、土木学会第63回年次学術講演会、pp.879-880、2008。
- 6) 気象庁：降灰の影響及び対策、降灰予報の高度化に向けた検討会第1回参考資料、2012。
- 7) 富士山火山防災協議会：富士山ハザードマップ検討委員会報告書、2004。
- 8) 内閣府 広域的な火山防災対策に係る検討会：大規模火山災害対策への提言、2013。
- 9) 玉置哲也、多々納裕一：降下火山灰による道路機能障害評価とその復旧順序決定手法の提案、自然災害科学、Vol.33、特別号、pp.165-175、2014。
- 10) 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、富士火山、pp.339-348、2007。