

四国に影響を及ぼす降下火山灰に関するシミュレーション解析

(株)四国総合研究所 土木技術部	辻 智大
(株)四国総合研究所 土木技術部	池田 倫治
(株)四国総合研究所 土木技術部	加藤佐代正
四国電力(株) 土木建築部	西坂 直樹
四国電力(株) 土木建築部	大西 耕造

キーワード： 降下火山灰
シミュレーション
TEPHRA2
由布岳
九重山
阿蘇山

Key Words : air-fall ash
Simulation
TEPHRA2
Yufu Volcano
Kuju Volcano
Aso Volcano

Simulation analysis for air-fall ash influences on Shikoku Island.

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Tomohiro Tsuji, Michiharu Ikeda, Sayomasa Kano

Shikoku Electric Power Co., Civil Department

Naoki Nishizaka, Kozo Onishi

Abstract

If the large volcanic eruption occurred at a volcano on Kyushu, the volcanic ash would be transported to Shikoku by the westerlies and affect to electric facilities at the downwind region, although there is no volcano in Shikoku. Especially for nuclear power plants, it is necessary to assess the ash fall hazard to the facilities, considering the targeted volcanoes. The thickness of volcanic ash around Ikata Power Plant has been evaluated to be almost 0 cm based on geological survey. However, it is expected that the ash thicker than a few cm will be fallen on the Ikata site, depend on wind direction. Then we carried out the analytical study using TEPHRA2, simulations of tephra dispersal.

The tephra fall hazard from a future eruption at Yufu, Kuju and Aso volcanoes are simulated. The most effective eruption to the site is the VEI5 eruption from Kuju Volcano (Kj-P1, the eruption mass is 2.03 km³). Based on the calculation using the average wind of each month, the average thickness of the ash fallen on the site is 0.5 cm. The ash fallen on September was thickest (2.2 cm) in twelve months.

In the case that the wind blows from the vent to the site, 4.5 cm-thick-ash fallen on the site. Given that the eruption mass being 6.2 km³, the ash of 6.9 cm-thick deposited at the site.

1. はじめに

四国には火山が分布しないものの、風上に位置する九州の火山が大規模な噴火を起こした場合には、偏西風に乗って四国へ火山灰が降下し、各種電力設備に影響を及ぼす可能性がある。特に原子力発電所の安全対策には万全を期すことが必須であり、原子力規制委員会制定の「原子力発電所の火山影響評価ガイド」において、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山を抽出して発電所運用期間中の噴火規模に対応する降下火山灰を考慮することが求められている。

降下火山灰による影響評価においては、まず敷地付近の地質調査により評価を行うが、敷地南東の宇和盆地における UT コア（守田ほか、2014）など連続的な堆積物中にも考慮する過去の噴火と対応する火山灰層が認められないため、敷地付近への火山灰の降下厚さはいずれもほぼ 0 cm と評価される。しかし、風向きによっては敷地において数 cm 以上の厚さの火山灰が降下することも想定される。そこで、気象条件の不確かさを考慮した火山灰降下リスクを評価するために、降下火山灰シミュレーションを用いた解析的検討を実施する。

2. 研究手法

本研究では、降下火山灰シミュレーションとして実績のある TEPHRA2 を利用する。TEPHRA2 は移流拡散モデル (Bonadonna et al., 2005) に基づいたシミュレーションであり、適当な初期パラメータを与えることによ

り、堆積物の分布を計算できる (萬年, 2013)。短時間で簡易的に計算することができるため、パラメータスタディおよび確率論的評価に適している。解析プログラムは南フロリダ大学のサイト (<http://www.cas.usf.edu/~econnor/vg@usf/tephra.html>) からダウンロードすることができる。計算には、噴火パラメータ、大気パラメータ、粒子パラメータ、グリッドパラメータの 4 つが必要となる。計算結果として、単位面積当たりの降灰量 (kg/m^2) とその粒度組成が得られる。

3. 伊方発電所と四国に影響を及ぼす可能性のある活火山の地理的關係

伊方発電所の風上に位置する九州中部～東部には、北東から南西に、鶴見岳・伽藍岳（敷地からの距離 85 km）、由布岳 (89 km)、九重山 (108 km)、阿蘇山 (131 km) などの活火山が分布している (Figure 1)。その中でも阿蘇山および九重山は過去に大規模な噴火をしており、九重山の噴火による火山灰は過去に四国にも降下している (熊原・長岡, 2002)。また、伊方発電所からの距離が比較的近い由布岳は中規模の噴火であるが火山灰を放出している。鶴見岳・伽藍岳は溶岩を放出する噴火を主体としており、遠方での火山灰の降下は報告されていない。そこで、本研究では、由布岳、九重山および阿蘇山の 3 火山を対象火山とし、それぞれの火山における既往最大の噴火を想定した降下火山灰シミュレーションを行った。

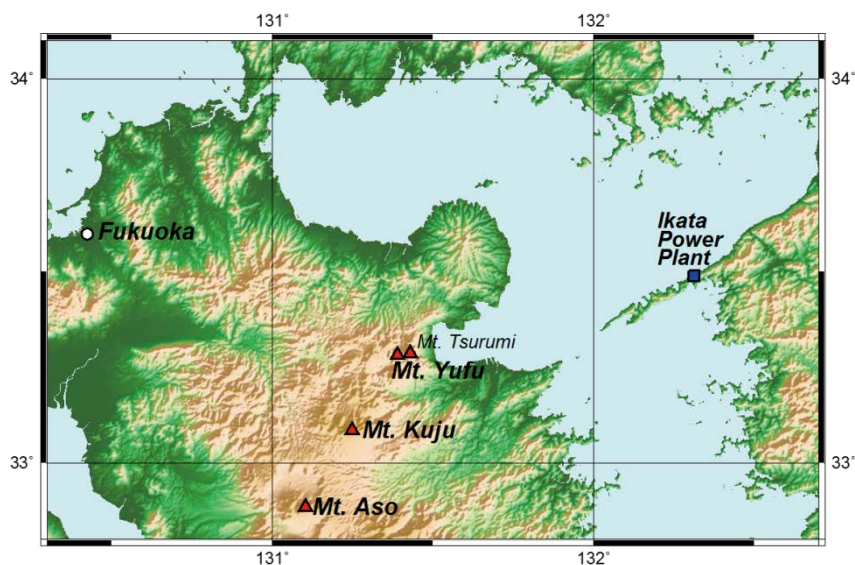


Fig. 1 Localities of Yufu, Kuju and Aso volcanoes with Ikata Power Plant.

4. 由布岳、九重山および阿蘇山の噴火による影響の検討

4.1. 検討方針

本検討では、まず、由布岳、九重山および阿蘇山の3つの火山の噴火による伊方発電所周辺での降灰層厚を算定し、それぞれの火山の噴火による伊方発電所周辺への影響を比較する。その後、伊方発電所への降灰に最も影響を及ぼす火山噴火についてケース検討を実施する。

4.2. 噴火パラメータ

それぞれの火山の既往最大噴火は、由布岳の2 ka 噴火（噴火年代約2000年前、降下火砕物の噴出量 0.05 km^3 （須藤ほか, 2007））、九重山の九重第一降下軽石（噴火年代約5.4万年前（川辺ほか, 2015）、噴出量 2.03 km^3 （須藤ほか, 2007））、阿蘇山の草千里ヶ浜降下軽石（噴火年代約3.1万年前、噴出量 2.39

km^3 （宮縁ほか, 2003））である（Table 1）。

由布岳2 ka 噴火は、噴火規模を示す爆発的噴火指数（Volcanic Explosivity Index, Newhall and Self, 1982）で表すと $\text{VEI} = 3 \sim 4$ となる。Newhall and Self (1982) によると、その規模の噴煙柱高さは $3 \sim 25 \text{ km}$ と推定される。同様に、九重第一降下軽石および草千里ヶ浜降下軽石の噴火規模は $\text{VEI} = 5$ 程度であり、噴煙柱高さは $20 \sim 35 \text{ km}$ と推定される。本検討では、由布岳による2 ka 噴火の噴煙柱高さを 15 km 、九重山および阿蘇山の噴火による噴煙柱高さを 25 km として降下火山灰シミュレーションを行った（Table 1）。

各火山噴火の粒子径（最大粒径、最小粒径、平均粒径および粒子分散）については、現時点で情報が得られていないため、ここでは、Bonadonna et al. (2005) に記載されているTEPHRA2推奨値を適用した（Table 2）。

Table 1 Eruption parameters used in the simulations.

Volcanoes	Yufu	Kuju (Nakadake)	Aso (Nakadake)	References
Height above sea level (m)	1,583	1,791	1,506	Japan Meteorological Agency (2013)
Distance from Ikata site (km)	89	108	130	
Eruptive Mass (km ³)	0.05	2.03	2.39	Sudo et al. (2007), Miyabuchi (2011)
Plume Height (km)	15	25	25	Newhall and Self (1982)
Column Steps	100	100	100	
Maximum Grain Size (phi)	-10	-10	-10	Bonadonna et al. (2005) (Felsic: -10, Mafic:-7)
Minimum Grain Size (phi)	10	10	10	Bonadonna et al. (2005) (Felsic: 10, Mafic: 7)
Median Grain Size (phi)	1.0	4.5	4.5	Plinian eruption (Mount St Helens): 4.5 phi; Subplinian eruption: 1 phi (TEPHRA2 recommendation)
Sorting (phi)	1.5	3.0	3.0	Plinian eruption (Mount St Helens): 3; Subplinian eruption: 1.5 phi (TEPHRA2 recommendation)

4.3. 大気パラメータ

本検討では、至近 22 年間(1988~2010 年)の毎日午前 9 時の地表~高度約 30 km までの各高度 (hPa を高度に換算) の風向・風速観測値を月別に平均化した月別平年値 (気象庁「高層気象観測年報」) を使用した (Figure 2)。解析には、3 火山および伊方発電所に最も近い福岡における高層気象観測データを用いた (Figure 1)。我が国では、上空約 8~15 km

付近の対流圏上層にジェット気流と呼ばれる風速が大きい偏西風が流れている (Figure 2)。特に冬季には風速が大きく、平均的に 30 m/s 程度になり、中には 70 m/s 程度を超えることもある。なお、夏季は冬季の半分程度以下の風速となる。上述した 3 火山の上空においても、このジェット気流が流れていると考えられる。このため、火山が噴火した場合、火山灰がこのジェット気流により東方向に運搬さ

れ、季節によって降灰領域が変化することが予想される。

4.4. 粒子パラメータ

粒子パラメータの設定には、軽石密度、岩片密度、拡散係数 (Diffusion Coefficient)、落下時間の閾値 (Fall Time Threshold) および噴煙モデル等の各データが必要である。これらについては萬年 (2013) を参考にした (Table 2)。それぞれの噴火による影響を比

較するため、これらのパラメータを3つの火山で共通して用いた。

4.5. グリッドパラメータ

本検討では、国土地理院の数値地図 (50 mDEM) と産総研の数値地図 (1 kmDEM) を基に 2 km グリッドメッシュを作成し、これを利用した。なお、計算開始点は、噴火が既存の火口から始まると仮定した。火口の座標については気象庁 (2013) を参考にした。

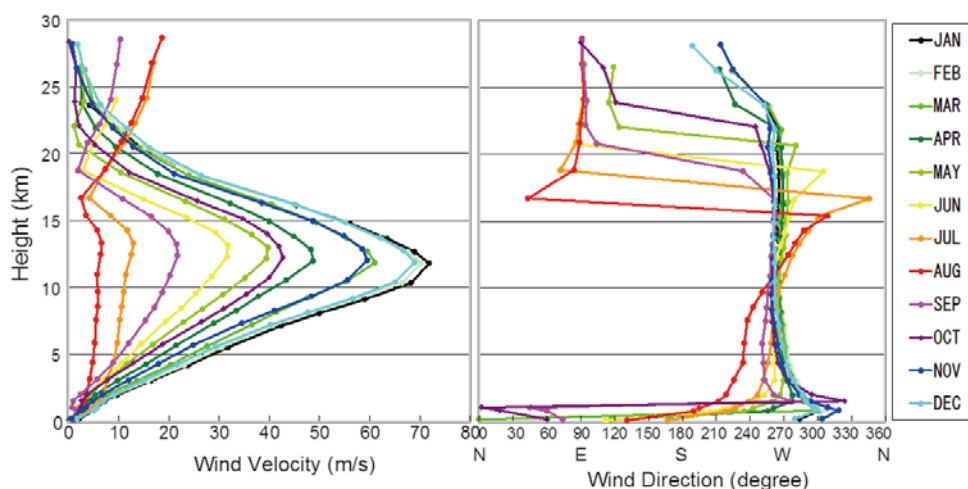


Fig. 2 Upper-air wind velocity (a) and wind direction (b) averaged every month sampled every 09:00 local time from 1 March 1989 through 31 December 2010 at Fukuoka (Fig.1a) (Japan Meteorological Agency, 2012).

Table 2 Grain parameters used in the simulations

Parameters	Unit	Value	References
Lithic Density	kg/m ³	2600	TEPHRA2 recommendation
Pumice Density	kg/m ³	1000	TEPHRA2 recommendation
Diffusion Coefficient	m ³ /s	200	Mannen (2013)
Eddy Constant	m ² /s	0.04	Suzuki (1983)
Fall Time Threshold	s	3600	Mannen (2013)
Plume Model		0 (uniform)	Mannen (2013)
Plume Ratio		0.1	TEPHRA2 recommendation

5. 由布岳、九重山および阿蘇山の噴火による影響の比較

由布岳、九重山、阿蘇山の噴火について、それぞれ月別平年値の風を用いて解析した結果の概要を Table 3 に示す。なお、各表における降灰層厚は、降灰の密度を 1000 kg/m^3 と仮定して換算した値である（例えば、降灰量 1 kg/m^2 だと降灰層厚は 0.1 cm となる）。

月別の解析の結果、冬季（11月～5月）における伊方発電所における降灰層厚は $0 \sim 0.2 \text{ cm}$ であり、夏季（6月～10月）と比較して、格段に薄い（Table 3）。この傾向は3つの火山噴火で共通していたため、九重山の噴火による結果のみを Figure 3 に示す。由布岳、九重山および阿蘇山の火山噴火による敷地での降灰層厚はそれぞれ月平均で 0.1 cm 、 0.5 cm および 0.2 cm であり、九重山の噴火で最大となり、阿蘇山、由布岳と小さくなっている

（Table 3）。伊方発電所における降灰層厚は、いずれの火山噴火でも9月に最大となり、由布岳、九重山、阿蘇山でそれぞれ 0.3 cm 、 2.2 cm 、 1.0 cm である（Figure 4）。3つの火山噴火による層厚が異なる要因としては、各火山と敷地との位置関係、噴火規模および風向が挙げられる。由布岳は3つの火山の中で最も伊方発電所までの離隔が小さいものの、噴火規模が小さいため、9月を含めた各月の平年風の風速では敷地に厚く降灰しない。阿蘇山は3つの火山の中で最も伊方発電所との離隔が大きく、位置が南に位置していることから、西風の卓越する冬季には敷地にほとんど降灰しない。また、西南西の風が卓越する9月においても降灰の中心は敷地より南側を向いているため、敷地での降灰は 1.0 cm に留まる（Table 3）。

Table 3 Calculated thickness of volcanic ash fallen on Ikata Power Plant. Yellow marker shows the maximum thicknesses.

Volcanoes		Yufu	Kuju	Aso
Thickness at Ikata Site (cm)	Jan	0.0	0.0	0.0
	Feb	0.0	0.0	0.0
	Mar	0.0	0.0	0.0
	Apr	0.0	0.1	0.1
	May	0.1	0.2	0.1
	Jun	0.2	0.6	0.2
	Jul	0.2	1.5	0.7
	Aug	0.0	1.1	0.7
	Sep	0.3	2.2	1.0
	Oct	0.2	0.2	0.1
	Nov	0.0	0.1	0.0
	Dec	0.0	0.0	0.0
	Average	0.1	0.5	0.2

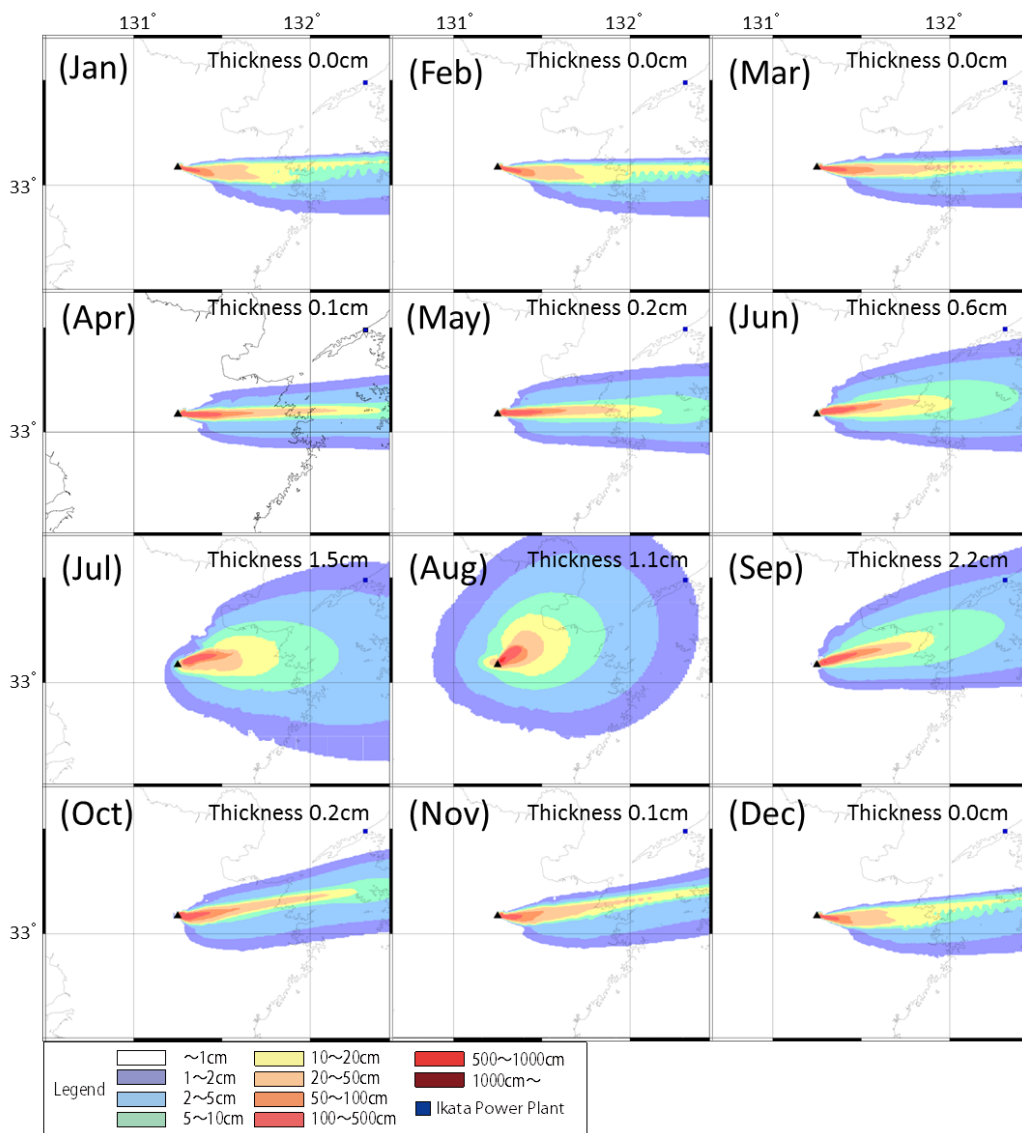


Fig. 3 Isopack maps of ash from Kuju computed for each month.

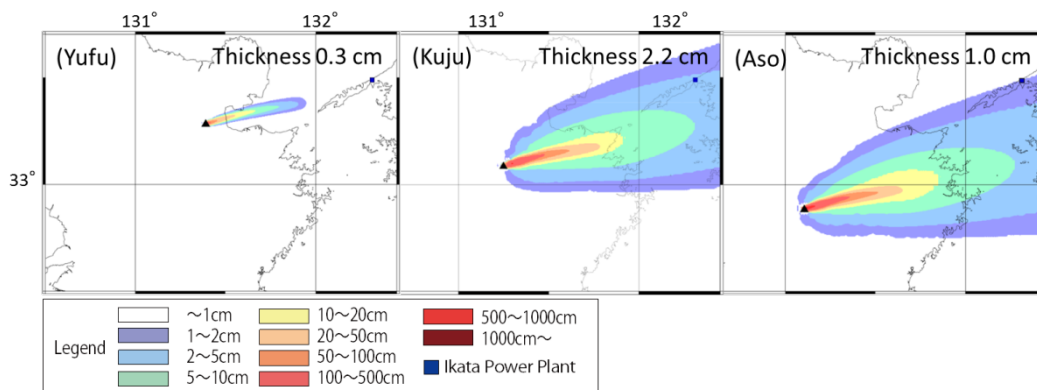


Fig. 4 Isopack maps of ash deposits from Yufu, Kuju and Aso computed for September.

6. 九重山における噴火・大気パラメータの検討

敷地への降灰に最も影響が大きい九重山の噴火に関し、噴煙柱高度および噴出量等の噴火パラメータ、大気パラメータを変化させたケース検討を行い、各パラメータの影響について考察し、敷地周辺における火山灰層厚の評価を行う。その際、12ヶ月のうち、敷地で最も厚い火山灰厚さとなる9月の風を用いた降下火山灰シミュレーションを基本ケースとする (Table 4)。

6.1. 噴煙柱高度のケース検討

九重第一降下軽石を放出した噴火は VEI = 5 であり、その噴煙柱高さは~25 km と推定される。ただし、同程度の規模の噴火であっても、噴煙柱高度はばらつきの大きいパラメータであることから、基本ケースである 25 km から±5 km 変化させたケース検討を行った (Table 4)。以下の検討で用いた粒子パラメータは Table 2 と同じである。

6.2. 噴出量のケース検討

九重第一降下軽石の噴火規模については、これまで火山灰の等層厚線図を基に噴火規模を見積もった須藤ほか (2007) による 2.03 km³ が示されてきた。しかし近年、長岡・奥野 (2014) は給源付近における層厚分布のデータを拡充し、算出方法は示していないものの、九重第一軽石の噴火規模として 6.2 km³ を提案した。自然現象の評価と将来予測には不確かさが残るため、噴出量を基本ケースの 2.03 km³ 対して大きく見積もった場合の噴出量 6.2 km³ を用いて検討を行った (Table 4)。

6.3. 風向・風速のケース検討

実際の気象条件を考えると、風速を固定したまま風向のみを変化させることは現実的ではない。そこで、高層気象観測年報の9月の平年風から、敷地方向に吹く風を抽出し、それらを平均化して仮想的な風を作成して風向の影響を検討した (Table 4)。尚、風速のばらつきの影響を検討するため、高層気象観測年報の9月の平年風から、風速を±1σ 変化させた検討も行った (Table 4)。

Table 4 Eruption and atmospheric parameters used for parameter studies. Yellow markers show the tested parameters in each case.

Cases	Primal Case	Plume Height Study	Eruption Mass Study	Wind Direction Study	Wind Velocity Study
Plume Height (km)	25	20, 30	25	25	25
Eruption Mass (km ³)	2.03	2.03	6.2	2.03	2.03
Wind Direction	Ave. Sep.	Ave. Sep.	Ave. Sep.	Blow to Ikata	Ave. Sep.
Wind Velocity	Ave. Sep.	Ave. Sep.	Ave. Sep.	Ave. Sep.	+/- 1 sigma of Ave. Sep

7. 結果

7.1. 噴煙柱高度の検討

噴煙柱高度を変化させた結果を比較すると、噴煙柱高さ 20 km の場合でも 25 km の場合でも、伊方発電所における降灰層厚は 2.2 cm で変わらない (Figure 5)。噴煙柱高度 20 km の結果の方が噴煙柱高度 30 km 結果よりも、厚く降灰する領域 (例えば層厚 25 cm 以上の領域) が遠くまで及んでいるものの、全体的な傾向としては、噴煙柱高度 20~30 km の範囲では、噴煙柱高度の変化が降灰層厚分布に及ぼす影響は比較的小さい (Figure 5)。

7.2. 噴出量の検討

噴出量を 6.2 km³にした場合、9月の平年値の風で敷地周辺における層厚は 6.9 cm となった (Figure 6)。噴出量 2.03 km³の場合、敷地での降灰層厚は 2.2 cm であり、噴出量の変化とともに層厚も基本ケースのおよそ 3 倍程度となった。

7.3. 風向・風速の検討

風速を変化させて、敷地周辺に堆積する火山灰層厚がどのように変化するか検討した。基本ケースの風速-1 σ および+1 σ の場合、敷地での降灰層厚はそれぞれ 2.6 cm および 1.4 cm となった (Figure 7)。基本ケースでは、層厚分布の軸は敷地よりやや南側を通っており、軸から離れるほど降灰層厚は薄くなる。風速を-1 σ 小さくした場合、基本ケースよりも降灰分布の幅が広がるため、基本ケースよりも敷地における降灰層厚が厚くなった。一方、風速を+1 σ 大きくした場合、基本ケースよりも狭小な降灰分布となるため、軸から離れると層厚が極端に薄くなり、敷地における降灰層厚が薄くなった。

風向が敷地向きとなる仮想的な風を想定した場合、敷地周辺における層厚は 4.5 cm となった (Figure 8)。風向が層厚に大きく影響することを確認できた。

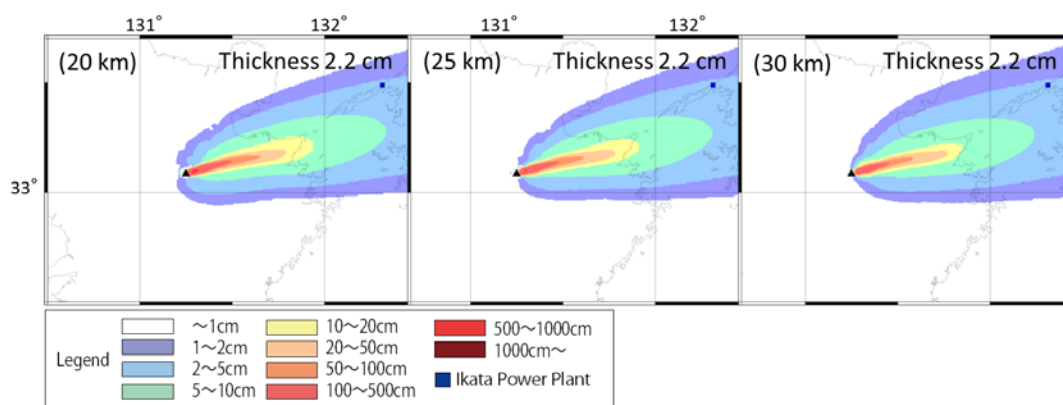


Fig. 5 Isopack maps of ash from Kuju computed for column heights of 20, 25 and 30 km.

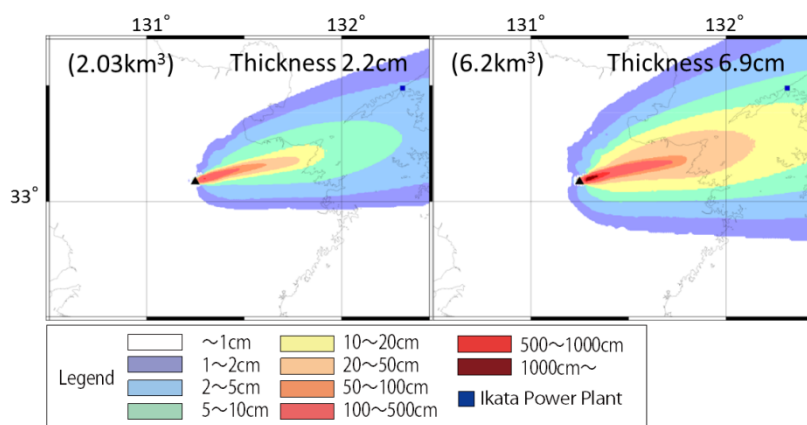


Fig. 6 Isopack maps of ash from Kuju computed in the case of 2.03 km³ (left) and 6.2 km³ mass volume (right).

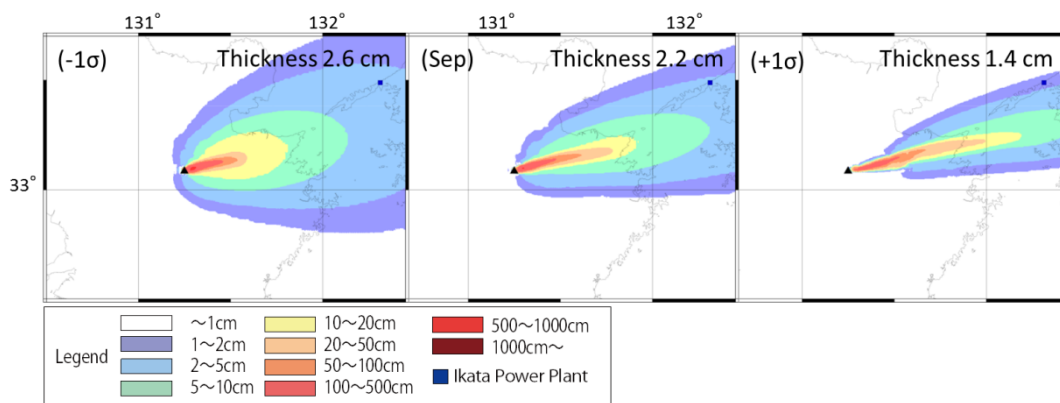


Fig. 7 Isopack maps of ash from Kuju computed for the wind of slower (-1σ from average wind of September) (left), of September and of faster ($+1\sigma$ from that of September) (right).

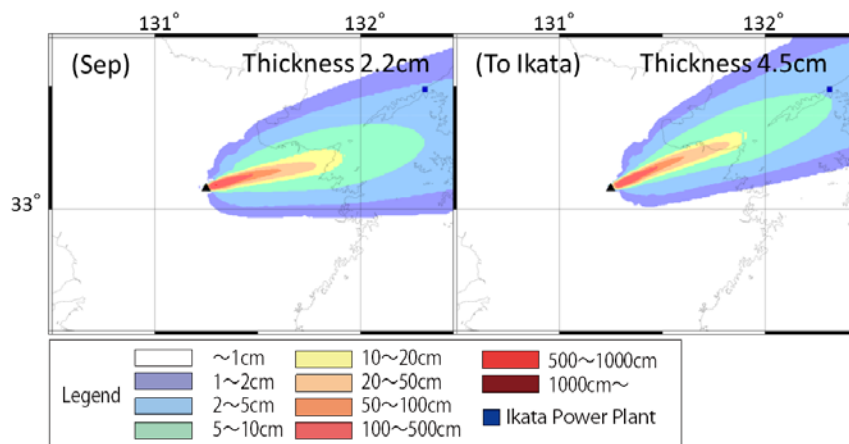


Fig. 8 Isopack maps of ash from Kuju computed for the average wind of September (left) and of the day when the wind blow to Ikata Power Plant (right).

8. 考察

今回実施した九重山の噴火に関する検討ケースの中で、降灰層厚分布に大きく影響するパラメータとして、風向・風速および噴出量が挙げられる。噴出量を 2.03 km^3 から 6.2 km^3 へ約 3 倍にすると、降灰量は単純に約 3 倍になった (Figure 6)。しかし、風向が敷地方向へ向かなければ、たとえ噴出量が 6.2 km^3 であっても降灰層厚はほぼ 0 cm である。そういった意味では、敷地における降灰層厚に最も影響を与えるパラメータは風向・風速である。特に風向による影響が大きい。風向と風速は相互に関連しているため、両者を独立して扱うことはできない。

例えば、冬季は強いジェット気流の影響で指向性が強くなり、層厚分布が狭小となるため、火山灰が厚く堆積する領域は少なくなる。これに加えて、西～西北西の風で安定することにより (Figure 2)、伊方発電所より南側へ降灰する (Figure 3)。それに対して、夏季はジェット気流が弱まり、風向がばらつくため、火山灰が堆積する領域は広がる。一方で、風速が弱まるため、火山灰が厚く堆積する領域は火口近傍 (九州付近) に留まる傾向がある (Figure 3)。9月の風は、Figure 2 に示す通り、高度 15 km より低い標高の風がほぼ一様に 240° (北方から時計回りの角度) より若干大きい方角から吹いていることから、この方位の風下側に位置する伊方発電所の降灰層厚に大きく影響していると考えられる。

本研究では、地表から高度約 30 km までを 25 程度の高度に区切って計測された気象庁の風向・風速データを用いたが、各高度において風向が敷地方向に揃うというのは極めて稀な気象条件であり、実際には高度毎の風向・風速は不揃いである。そのため、火口か

ら東北東方向に 108 km 離れた伊方発電所に火山灰が厚く堆積する可能性は極めて低い。

また、TEPHRA2 では、ジェット気流だけでなく、それより低層の風の変化も結果に大きく影響する。これは TEPHRA2 が均質な噴煙柱を想定しており、そこから火山灰粒子が一樣の落下速度で落下しながら、各標高に仮想した水平層における風向・風速の元で拡散することに起因している。すなわち、ジェット気流の風は噴煙柱の高層から落下した粒子のみに影響を与えるが、低層の風は噴煙柱の低層から落下した粒子にも高層から落下した粒子にも影響を与えるためである。

噴煙柱高度は、降灰量分布にはさほど大きく影響しなかった (Figure 5)。これは、高度 20 km 以上では風速が小さいため、 20 km 以上における噴煙柱高度の変化が結果に影響しにくいと考えられる。しかし、本来は噴煙柱高度が高くなるということは噴出率が大きくなり、傘型噴煙を形成することでより広域に火山灰が広がる事が考えられる (例えば、1991年 Pinatubo 噴火)。当然、それによって降灰量分布も変わるはずである。TEPHRA2 ではこういった傘型噴煙からの粒子の落下を模擬できていないことが指摘されており、現在解析コードの改善が進められているところである (萬年, 2013)。噴煙柱高度の設定については、今後、野外での噴出物の粒度分布に基づき推定する (Carey and Sparks, 1986) ことが重要である。

9. まとめ

伊方発電所の火山影響評価においては、原子力発電所に影響を及ぼし得る火山を抽出して、発電所運用期間中の噴火規模に対応する降下火山灰を考慮する必要がある。そこで、

考慮対象である由布岳、九重山および阿蘇山の噴火について、月別平年値の風で降下火山灰シミュレーションを行った結果、伊方発電所に最も影響のある噴火は九重第一降下軽石（噴出量 2.03 km³）であり、敷地における降下火山灰厚さは月平均で 0.5 cm、最大である 9 月の平年値の風で 2.2 cm であった。また、正確な見積もりが難しいことや最近の研究動向を踏まえて噴出量 6.2 km³ と噴火規模を大きく見積もった場合、最大である 9 月の平年値の風で敷地における降下火山灰厚さは 6.9 cm であった。さらに、敷地方向に吹く仮想的な風を考慮した場合、敷地における降下火山灰厚さは 4.5 cm であった。

四国西部には伊方発電所以外にも多数の電力設備が立地しており、本研究で示した降下火山灰シミュレーション結果は、送電鉄塔、変電所、水力発電所等において火山影響評価を行う上でも有用である。今後、九重第一軽石について、給源近傍における降下火山灰厚さ、粒度分布を詳細に把握するとともに、四国南西部宿毛市において報告された九重第一軽石の産状についてデータを拡充し、フィールドデータに基づき降下火山灰シミュレーションを高度化していくことが重要である。

[謝辞]

本研究を実施するにあたり、神奈川県温泉地学研究所の萬年一剛博士および西日本技術開発株式会社の稲倉寛仁博士に TEPHRA2 についてご教示頂いた。また、長崎大学故長岡信治教授および電力中央研究所の三浦大助博士には降下火山灰に関してご教示をいただいた。㈱四国総合研究所の鈴木富美子氏には TEPHRA2 解析および図化に御協力いただいた。ここに記して深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 守田益宗・須貝俊彦・古澤 明・大野裕記・西坂直樹・辻 智大・池田倫治・柳田 誠, 2014, 宇和盆地の花粉分析からみた MIS15 以降の植生変遷史, 植生史研究, 23, 3-19.
- 2) Bonadonna, C., C. B. Connor, B. F. Houghton, L. Connor, M. Byrne, A. Laing, and T. K. Hincks, 2005, Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 110, B03203, doi:10.1029 / 2003JB002896.
- 3) 萬年一剛, 2013, 降下火山灰シミュレーションコード Tephra2 の理論と現状—第四紀学での利用を視野に, 第四紀研究, 52, 173-187.
- 4) 熊原康博・長岡信治, 2002, 四国南西部, 松田川流域における九重第一テフラの対比と低位段丘の年代, 第四紀研究, 41, 213-219.
- 5) 須藤茂・猪股隆行・佐々木寿・向山栄, 2007, わが国の降下火山灰データベース作成, 地質調査研究報告, 58, 261 - 321.
- 6) 川辺禎久・星住英夫・伊藤順一・山崎誠子, 2015, 九重火山地質図. 火山地質図 19, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 7) 宮縁育夫・星住英夫・高田英樹・渡辺一徳・徐勝, 2003, 阿蘇火山における過去約 9 万年間の降下軽石堆積物, 火山, 48, 195-214.
- 8) Newhall, C. G. and Self, S., 1982, The

- volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87 (C2), 1231-1238.
- 9) 気象庁編, 2013, 日本活火山総覧 (第 4 版), 気象業務支援センター.
- 10) 気象庁編, 2012, 高層気象観測年報, 気象業務支援センター.
- 11) Suzuki, T., 1983, A theoretical model for dispersion of tephra. In Shimozuru, D. and Yokoyama, I. (Eds) *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, 95-116.
- 12) 長岡信治・奥野充, 2014, 九重火山のテフラ層序, *月刊地球*, 36, 281-296.
- 13) Carey, S. N. and Sparks, R. J., 1986, Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 48, 109-125.