

3. 2. 2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物

③-1 将来の噴火の可能性に関する検討(白頭山)

○白頭山の噴火履歴及び白頭山苦小牧火山灰(B-Tm)の分布状況は以下のとおりとされている。

【噴火履歴(宮本ほか, 2003)】

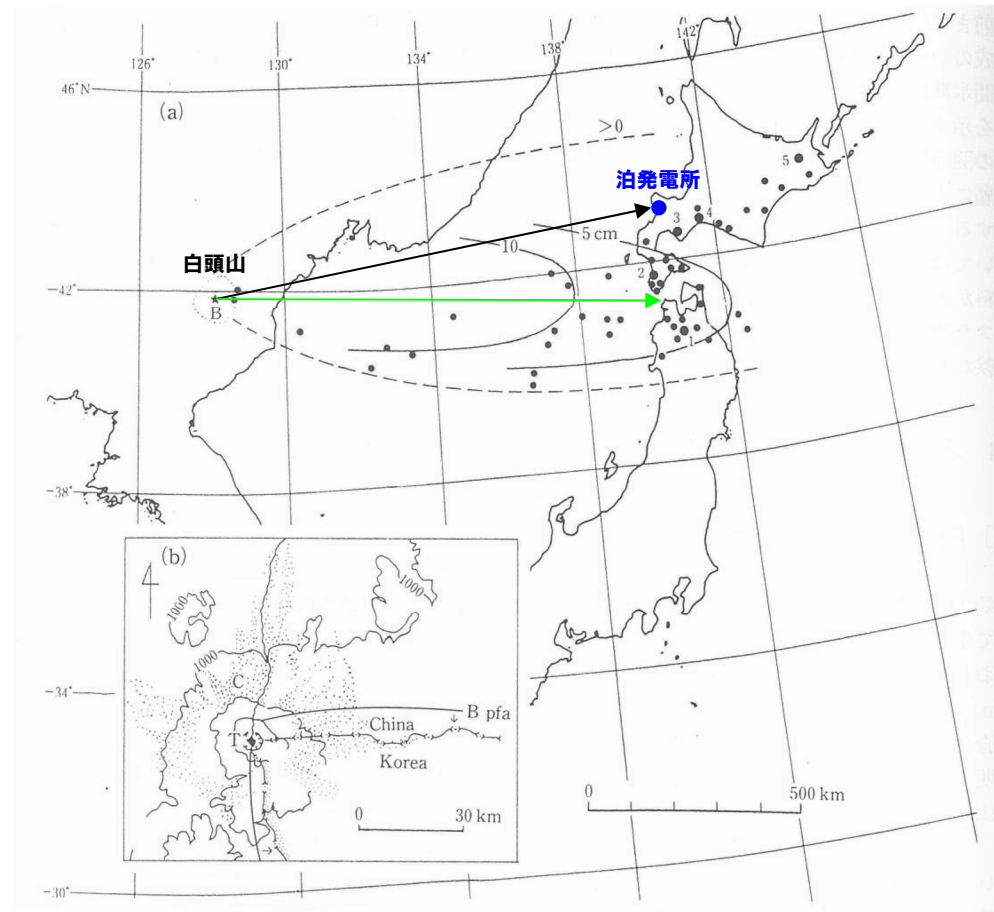
- 白頭山の活動は約2.77Maに開始した。
- 白頭山の活動は以下の3期に区分される。
 - ・第一期:溶岩台地の形成期(2.77-2.12Ma)
 - ・第二期:火山錐の形成期(0.61-0.08Ma)
 - ・第三期:天池カルデラ形成期(後期更新世-現在)

【B-Tmの分布状況(町田・新井, 2011)】

- B-Tmは, 約1,000年前の白頭山の巨大噴火によって生じており, 岩手・秋田県北部以北に分布し, 北海道の広域に出現する。



- 白頭山は, 現在, 天池カルデラ形成期であり, 敷地周辺に到達しているとされているB-Tmと同規模の噴火の可能性を否定できない。
- B-Tmの分布主軸は概ね敷地方向を向いており, 分布主軸上で給源~敷地と同程度の距離の地点での層厚が5~10cmの範囲に該当する。



(凡例)

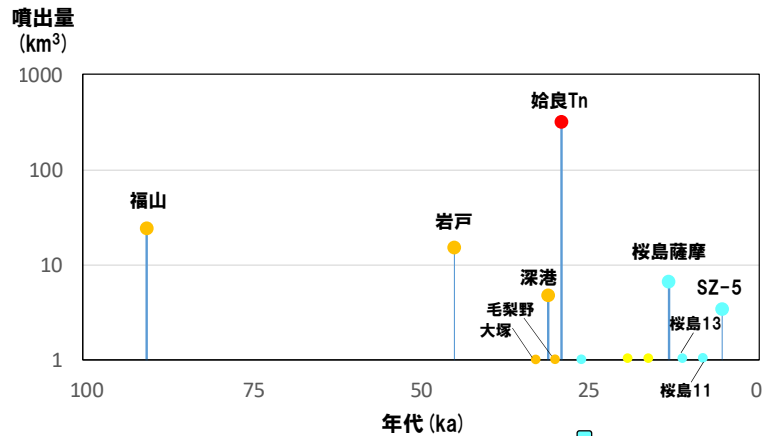
→ 分布主軸上で給源~敷地と同程度の距離

白頭山苦小牧火山灰(B-Tm)の等層厚線図(町田・新井(2011)に加筆)

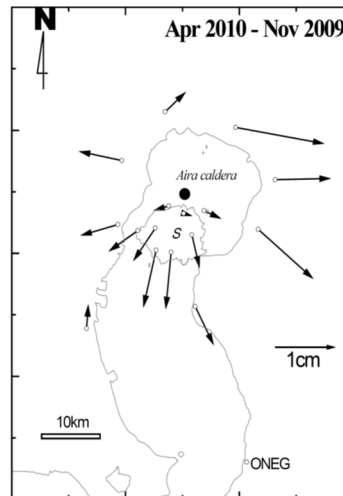
3.2.2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物

③-2 将来の噴火の可能性に関する検討(始良カルデラ(1/2))

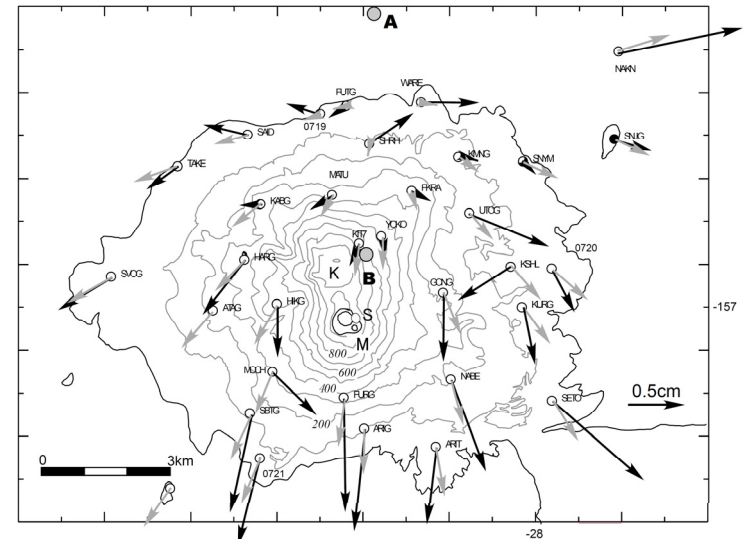
- 巨大噴火の活動間隔(約6万年以上)は、最後の巨大噴火からの経過時間(約3万年)に比べて十分長いこと及び現在、巨大噴火に先行して発生するプリニー式噴火ステージの兆候が認められないことから、巨大噴火までは十分な時間的余裕があると考えられる。
- 始良カルデラにおける現在の噴火活動は、桜島における後カルデラ火山噴火ステージと考えられる。
- 始良カルデラ周辺のマグマ溜まりについては、桜島の地下浅部にマグマ溜まりが確認されているものの、大規模な珪長質マグマ溜まりが存在する可能性は十分小さいと考えられる。



始良カルデラの噴火履歴 (Nagaoka (1988) 及び山元 (2014) を基に作成)



黒矢印: 観測値



黒矢印: 観測値
灰色矢印: 再現計算結果 (圧力源をA及びBに仮定)

始良カルデラ(左)及び桜島(右)の水平変位ベクトル図(井口ほか, 2011)

【井口ほか(2011)】

- GPS連続観測及び高密度繰り返し観測の結果において、始良カルデラ中央部を中心とした放射状の水平変位が認められ、始良カルデラ中央部(右上図のA)の直下の深さ12kmの位置に圧力源が想定されている。
- また、桜島の水平変動において、理論値が系統的に北部において大きく、南部において小さいことから、桜島直下(右上図のB)の深さ6kmの位置に付加的な圧力源が想定されている。

3. 2. 2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物

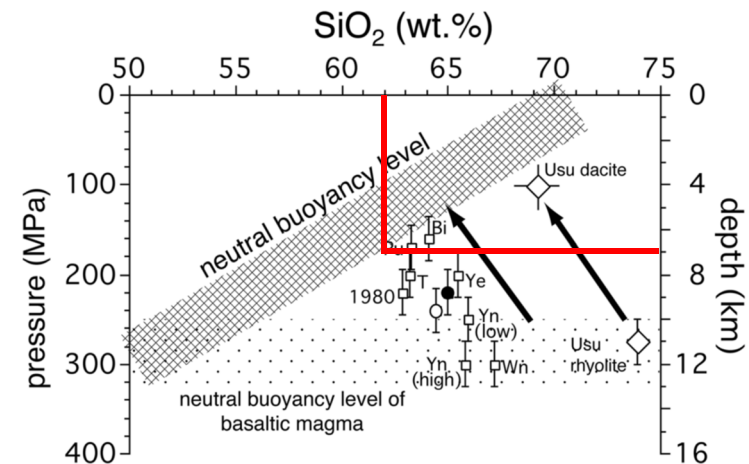
③-2 将来の噴火の可能性に関する検討(始良カルデラ(2/2))



○ATと同規模の噴火の可能性は十分小さい。

マグマのSiO₂と密度の関係(兼岡・井田編(1997)を基に作成)

マグマの種類	玄武岩質	安山岩質	デイサイト質	流紋岩質
マグマの性質	←苦鉄質			珪長質→
SiO ₂ (wt.%)	45~53.5	53.5~62	62~70	70以上
密度 (kg/m ³)	2700	2400	2300	2200



マグマ溜まりの深さとマグマの組成との関係(東宮(2016)に加筆)

【東宮(2016)】

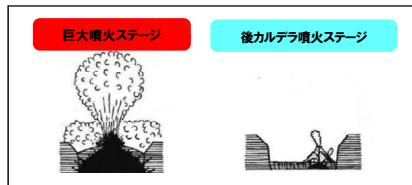
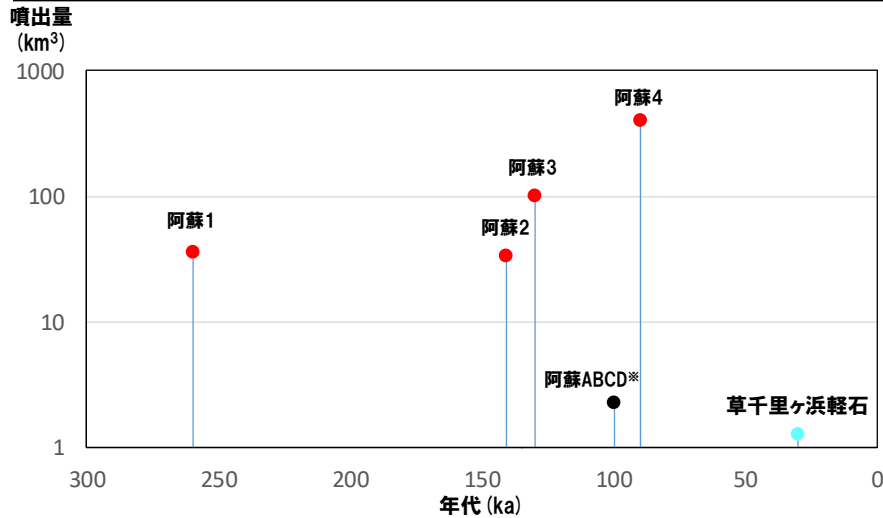
○地殻の密度とマグマの密度が釣り合う深さ(浮力中立点)は、破局的噴火を引き起こす珪長質マグマ(デイサイト質~流紋岩質)であれば、7km程度であるとされている。

余白

3.2.2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物

③-3 将来の噴火の可能性に関する検討(阿蘇カルデラ)

- 巨大噴火の最短の活動間隔(約2万年)は、最後の巨大噴火からの経過時間(約9万年)に比べて短いため、巨大噴火のマグマ溜まりを形成している可能性、巨大噴火を発生させる供給系ではなくなっている可能性等が考えられる。
- 阿蘇カルデラにおける現在の噴火活動は、最後の巨大噴火以降、阿蘇山において草千里ヶ浜軽石等の多様な噴火様式の小規模噴火が発生していることから、阿蘇山における後カルデラ火山噴火ステージと考えられる。
- 苦鉄質火山噴出物及び珪長質火山噴出物の給源火口の分布から、大規模な珪長質マグマ溜まりが存在する可能性は十分小さいと考えられる。

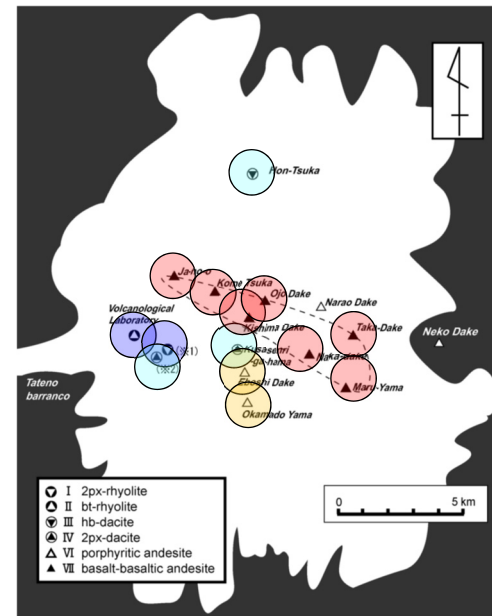


※プリニー式噴火であるものの、噴火ステージは判断できない噴火。

阿蘇カルデラの噴火履歴 (Nagaoka (1988) 及び山元 (2014) を基に作成)



○Aso-4と同規模の噴火の可能性は十分小さい。



- (凡例)
- : 玄武岩質安山岩
 - : 安山岩
 - : デイサイト
 - : 流紋岩

【三好ほか(2005)】

- カルデラ中心部で玄武岩質マグマの活動が活発であり、その周囲でより珪長質なマグマが活動しているという傾向があるとされている。
- もしカルデラ直下に大規模な珪長質マグマ溜まりが存在すると考えた場合、給源火口の分布とそれらの噴出物組成の関係は、中央部でより珪長質、その周囲でより苦鉄質になり、阿蘇の場合とは逆になると考えられるとしている。
- このことから後カルデラ期では、カルデラ形成期の単一の大規模マグマ溜まりは存在しなかったと考えられるとされている。

3.2.2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物

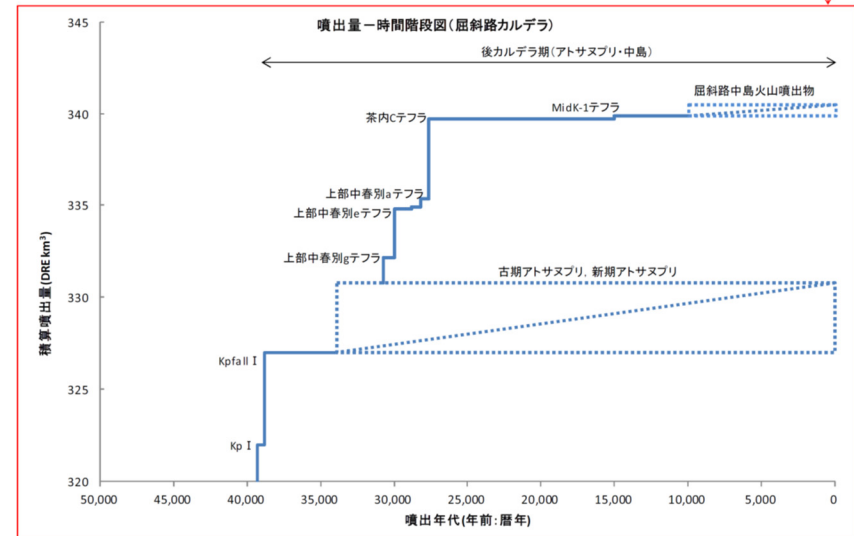
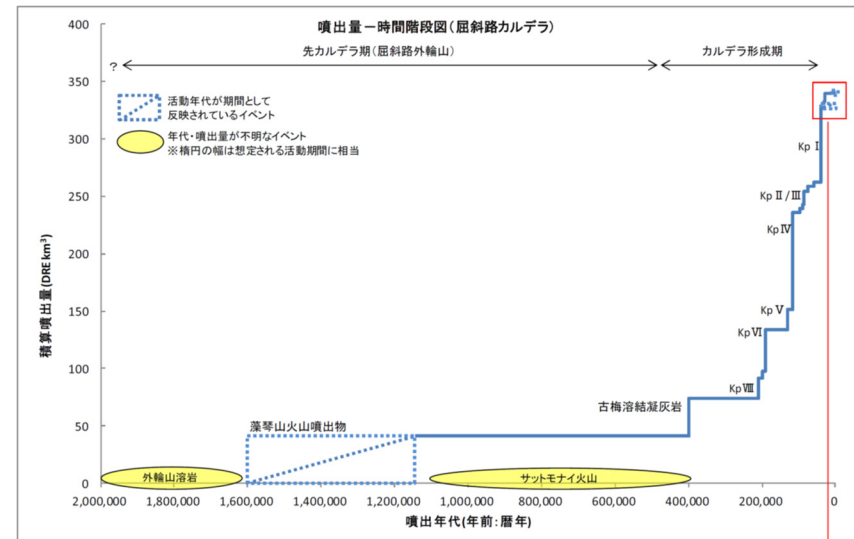
③-4 将来の噴火の可能性に関する検討(屈斜路カルデラ)

- 巨大噴火の最短の活動間隔(約7.8万年)は、最後の巨大噴火からの経過時間(約3.9万年)に比べて十分長いことから、巨大噴火までは十分な時間的余裕があると考えられる。
- 屈斜路カルデラは、アトサヌプリ及び中島において屈斜路中島火山噴出物等の多様な噴火様式の小規模噴火が発生していることから、現在の噴火活動は、アトヌプリ及び中島における後カルデラ火山噴火ステージと考えられる。
- 後カルデラ火山噴火ステージの最大規模の噴火は、屈斜路中島の噴火であり、その噴出量は約4.1km³※である。
- 後カルデラ火山噴火ステージ(アトヌプリ及び中島)の噴火規模は、いずれも屈斜路カルデラ形成時の噴火(KpIV(約84.0km³※))に比べて小規模である。

※マグマ噴出量DRE



- Kc-Hbと同規模の噴火の可能性は十分小さい。



噴出量-年代階段ダイアグラム(山元, 2014)

3. 2. 2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物

③-5 将来の噴火の可能性に関する検討(洞爺カルデラ)

- 洞爺カルデラにおける現在の噴火活動は、洞爺中島及び有珠山における後カルデラ火山噴火ステージと考えられる。
- 後カルデラ火山噴火ステージの最大規模の噴火は、洞爺中島の噴火であり、その噴出量は約 5.0km^3 *である。
- 後カルデラ火山噴火ステージ(洞爺中島及び有珠山)の噴火規模は、いずれも洞爺カルデラ形成時(Toya(約 99.6km^3))に比べて小規模な噴火である。

※マグマ噴出量DRE

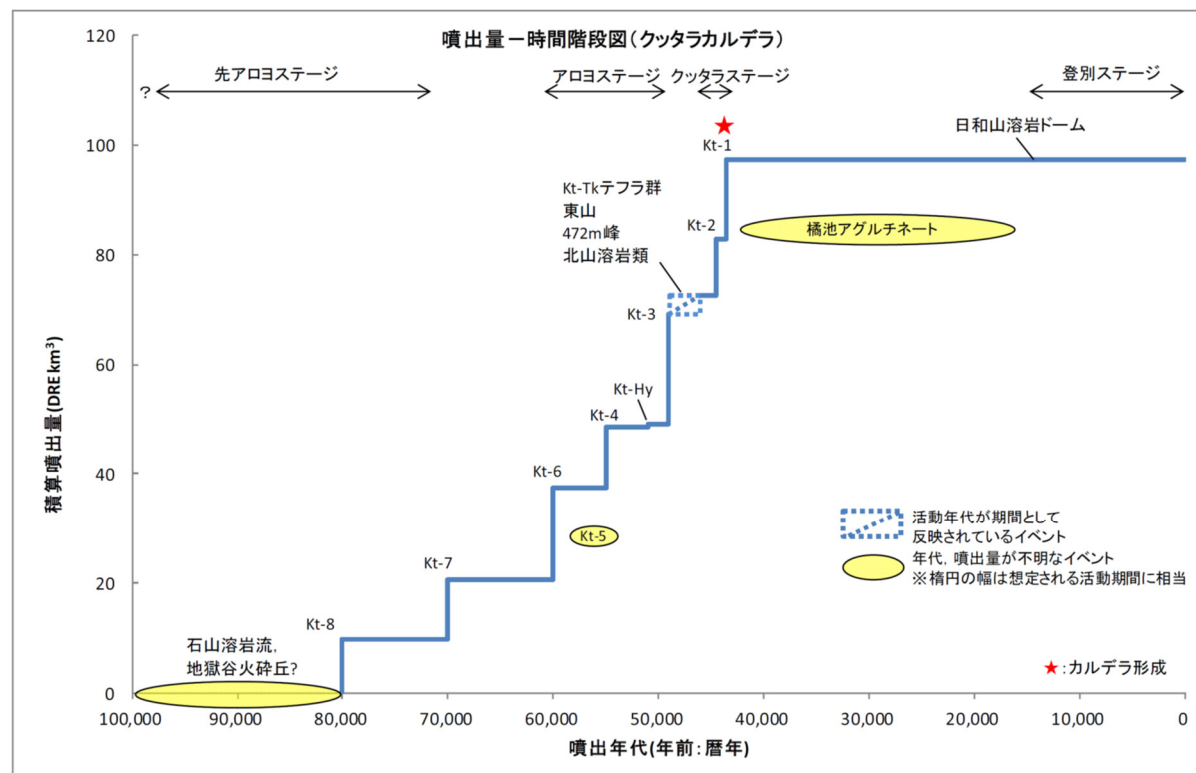


- Toyaと同規模の噴火の可能性は十分小さい。

3.2.2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物

③-6 将来の噴火の可能性に関する検討(倶多楽・登別火山群)

- 巨大噴火の最短の活動間隔(約0.1万年)は、最後の巨大噴火からの経過時間(約4.4万年)に比べて短いため、巨大噴火のマグマ溜まりを形成している可能性、巨大噴火を発生させる供給系ではなくなっている可能性等が考えられる。
- 倶多楽・登別火山群は、クッタラカルデラを形成したKt-1の噴火を最後に、その後4万年間は火山活動度が低下しており、現在の噴火活動は、登別ステージであると考えられる。
- 登別ステージにおける最大規模の噴火は、日和山溶岩ドームの活動であり、その噴出量は約0.04km³である。
- 登別ステージの噴火規模は、クッタラカルデラ形成時の噴火(Kt-1(約14.4km³※)及びKt-2(約10.2km³※))に比べて小規模である。



噴出量-年代階段ダイアグラム(山元, 2014)



○Kt-2と同規模の噴火の可能性は十分小さい。

3. 2. 2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物

④ まとめ

○文献調査及び地質調査において抽出された以下の火山における将来の噴火の可能性について検討した。

【文献調査結果】(P221参照)

- 降下火砕物の分布範囲に敷地を含む地理的領域外及び地理的領域内の火山は、それぞれ以下のとおり。
- ・地理的領域外の火山：白頭山(B-Tm)、始良カルデラ(AT)、阿蘇カルデラ(Aso-4)、屈斜路カルデラ(Kc-Hb)
 - ・地理的領域内の火山：洞爺カルデラ(Toya)、倶多楽・登別火山群(Kt-2)

【地質調査結果】(P222～P237参照)

- 敷地近傍において、降灰層準に相当する箇所を確認した火山は以下のとおり。
- ・地理的領域外の火山：阿蘇カルデラ(Aso-4)
 - ・地理的領域内の火山：洞爺カルデラ(Toya)

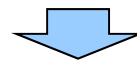
【将来の噴火の可能性の検討結果】(P238～P246参照)

(地理的領域外の火山)

- ・始良カルデラ、阿蘇カルデラ及び屈斜路カルデラは、敷地周辺に到達しているとされている降下火砕物を噴出する噴火と同規模の噴火の可能性は十分に小さい。
- ・白頭山は、現在、天池カルデラ形成期であり、敷地周辺に到達しているとされているB-Tmと同規模の噴火の可能性を否定できない。
- ・B-Tmの分布主軸は概ね敷地方向を向いており、分布主軸上で給源～敷地と同程度の距離の地点での層厚が5～10cmの範囲に該当する。

(地理的領域内の火山)

- ・洞爺カルデラ及び倶多楽・登別火山群は、敷地周辺に到達しているとされている降下火砕物を噴出する噴火と同規模の噴火の可能性は十分に小さい。



- 敷地周辺に到達しているとされている降下火砕物を噴出する噴火と同規模の噴火の可能性が否定できない火山は白頭山(B-Tm)である。
- B-Tmと同規模の噴火において噴出される降下火砕物の層厚は、敷地において最大でも5～10cmと評価される。

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

① 降下火砕物シミュレーション(結果概要)

- 敷地における降下火砕物(火山灰)の層厚を評価するため、Tephra2※を使用し、降下火砕物シミュレーションを実施した。
- シミュレーションによる評価対象となる降下火砕物として、P250～P251に示すフローに従い、En-a(恵庭岳)及びYo-1(羊蹄山)を抽出した。
- Tephra2によるシミュレーションのフローを以下に示す。

※Tephra2:南フロリダ大学で開発された粒子で構成された噴煙柱を設定し、重力による落下と風の影響を考慮する移流拡散モデル(プログラムのバグについては次頁参照)

【評価対象となる降下火砕物の抽出】

敷地との距離、噴出物量等の関係から、シミュレーションによる評価対象となる降下火砕物を抽出した。



【再現解析】

文献の等層厚線を再現できるパラメータをパラメータスタディにより検討し、以降の影響解析に用いるパラメータを決定した。



【影響解析】

(影響解析に用いる仮想風の検討)

敷地方向への仮想風を作成するため、月別の風を用いた解析を実施し、最も敷地に影響のある月を選定した。

(敷地方向への仮想風を用いた検討)

上記で選定した月の風を用いて敷地方向への仮想風を作成し、解析を実施した。



- シミュレーションによる敷地における降下火砕物(火山灰)の層厚は、以下の通りである。

- ・En-a(恵庭岳):16cm
- ・Yo-1(羊蹄山):4.1cm

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

(参考) 降下火砕物シミュレーション (Tephra2のバグ修正)

- 敷地における降下火砕物の層厚評価において、アメリカの南フロリダ大学が公開しているプログラム「Tephra2」を用いて、降下火砕物シミュレーションを実施している。
- 平成28年10月に行われた日本火山学会秋季大会のポスターセッションにおいて、大阪大学の佐伯准教授が、Tephra2の解析コードのうち、粒子の落下速度の式に一部バグがあることを発表した。
- この指摘を受け、当社使用のTephra2の解析コードを確認したところ、佐伯准教授が指摘したバグ(下記参照)があることを確認したため、解析コードを修正し、計算を実施した。

○粒子の落下速度の原理式

$$V_t = \frac{gd^2(\rho_p - \rho_a)}{18\mu} \quad Re < 6$$

$$V_t = d \left[\frac{4g^2(\rho_p - \rho_a)^2}{225\mu\rho_a} \right]^{1/3} \quad 6 \leq Re < 500$$

$$V_t = \left[\frac{3.1gd(\rho_p - \rho_a)}{\rho_a} \right]^{1/2} \quad 500 \leq Re$$

V_t : 粒子の落下速度

g : 重力加速度

d : 粒径

ρ_p : 粒子密度

ρ_a : 大気密度

μ : 大気の粘性

○解析コード(当該箇所の抜粋)

【修正前】 (=A/B×C)

```
temp1 = GRAV_SQRD_x_4 * part_density * part_density /
      AIR_VISCOSITY_x_225 * rho;
vti = ashdiam * pow(temp1, ONE_THIRD);
```

分母となる「AIR_VISCOSITY_x_225 (大気の粘性 $\mu \times 225$)」及び「rho (大気密度 ρ_a)」が括弧で括られていないため、「rho」が分子となっている。

【修正後】 (=A/ (B×C))

```
temp1 = GRAV_SQRD_x_4 * part_density * part_density /
      (AIR_VISCOSITY_x_225 * rho);
vti = ashdiam * pow(temp1, ONE_THIRD);
```

括弧を追加。

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

② 評価対象となる降下火砕物の抽出 (1/2)

- シミュレーションによる評価対象となる降下火砕物(火山灰)として、以下のフローに従い、En-a(恵庭岳)及びYo-1(羊蹄山)を抽出した。
- なお、以下に示す火山灰の噴出量、等層厚線図等については、補足説明資料2.1章に示す。

【文献調査(町田・新井, 2011)により敷地周辺に到達しているとされている火山灰(P221参照)】

・B-Tm(白頭山) ・AT(始良カルデラ) ・Aso-4(阿蘇カルデラ) ・Kc-Hb(屈斜路カルデラ) ・Kt-2(倶多楽・登別火山群) ・Toya(洞爺カルデラ)

【地質調査により敷地近傍において降灰層準に相当する箇所を確認した火山灰(P222参照)】

・Toya(洞爺カルデラ) ・Aso-4(阿蘇カルデラ)

【原子力発電所に影響を及ぼし得る火山による火山灰】

地質調査により敷地近傍において降灰層準に相当する箇所を確認した火山灰は、Toya(洞爺カルデラ)及びAso-4(阿蘇カルデラ)のみであることを踏まえ、文献において火山灰の分布状況が広がり有するとされているものを対象として以下を抽出^{※1, ※2}。

- ・Spfa-1(支笏カルデラ)
 - Ta-a(樽前山)
 - En-a(恵庭岳)
 - n.En-b(風不死岳)
- ・Kt-1(倶多楽・登別火山群)
- ・Toya(洞爺カルデラ)
 - Us-b(有珠山)
 - Nj-Os(洞爺中島)
- ・Yo-1(羊蹄山)
- ・Ko-d(北海道駒ヶ岳)

※1 複数のテフラを噴出している火山は、最大規模のテフラを記載。後カルデラ火山も、同様に最大規模のテフラを記載。

※2 ニセコ・雷電火山群は、抽出条件に該当する文献が確認されないこと及び溶岩流主体の噴火様式であること(P252参照)から評価対象として抽出されない。

END

- ・AT(始良カルデラ)
- ・Aso-4(阿蘇カルデラ)
- ・Kc-Hb(屈斜路カルデラ)
- ・Kt-1(倶多楽・登別火山群)
- ・Kt-2(倶多楽・登別火山群)
- ・Spfa-1(支笏カルデラ)
- ・Toya(洞爺カルデラ)

除外

現状において同規模の噴火
の可能性があるテフラを抽出

抽出

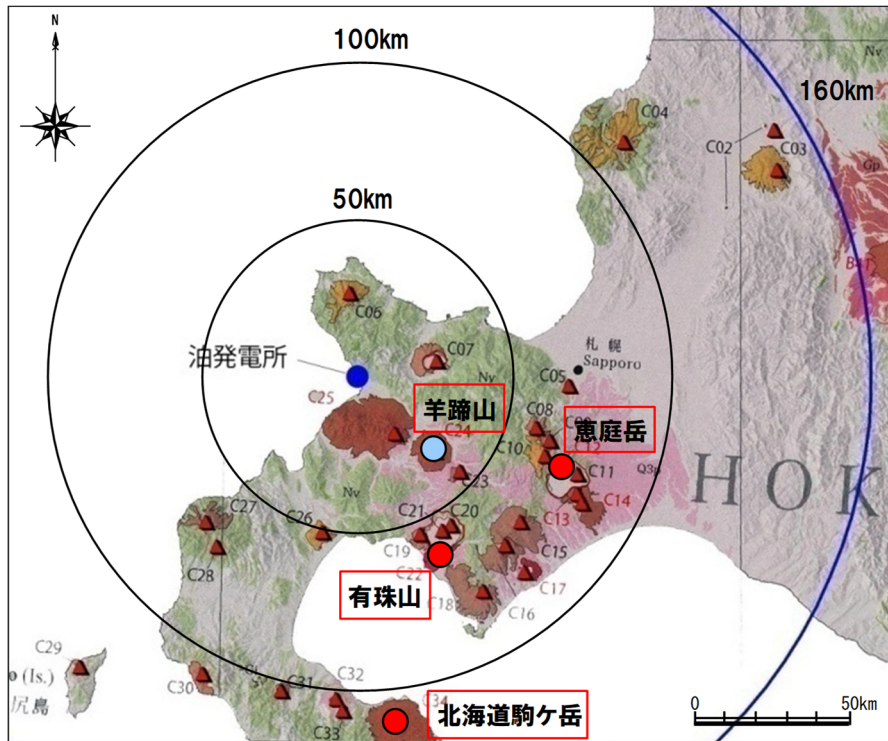
- ・B-Tm^{※3}(白頭山)
- ・Ta-a(樽前山) ・En-a(恵庭岳) ・n.En-b(風不死岳)
- ・Us-b(有珠山) ・Nj-Os(洞爺中島)
- ・Yo-1(羊蹄山)
- ・Ko-d(北海道駒ヶ岳)

※3 B-Tmの分布主軸は概ね敷地方向を向いており、分布主軸上で給源～敷地と同程度の距離の地点での層厚が5～10cmの範囲に該当することから、B-Tmと同規模の噴火において噴出される降下火砕物の層厚は敷地において最大でも5～10cmと評価される(P247参照)。このためB-Tmについては、評価対象から除外する。

↓ (次頁へ続く)

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

② 評価対象となる降下火砕物の抽出 (2/2)

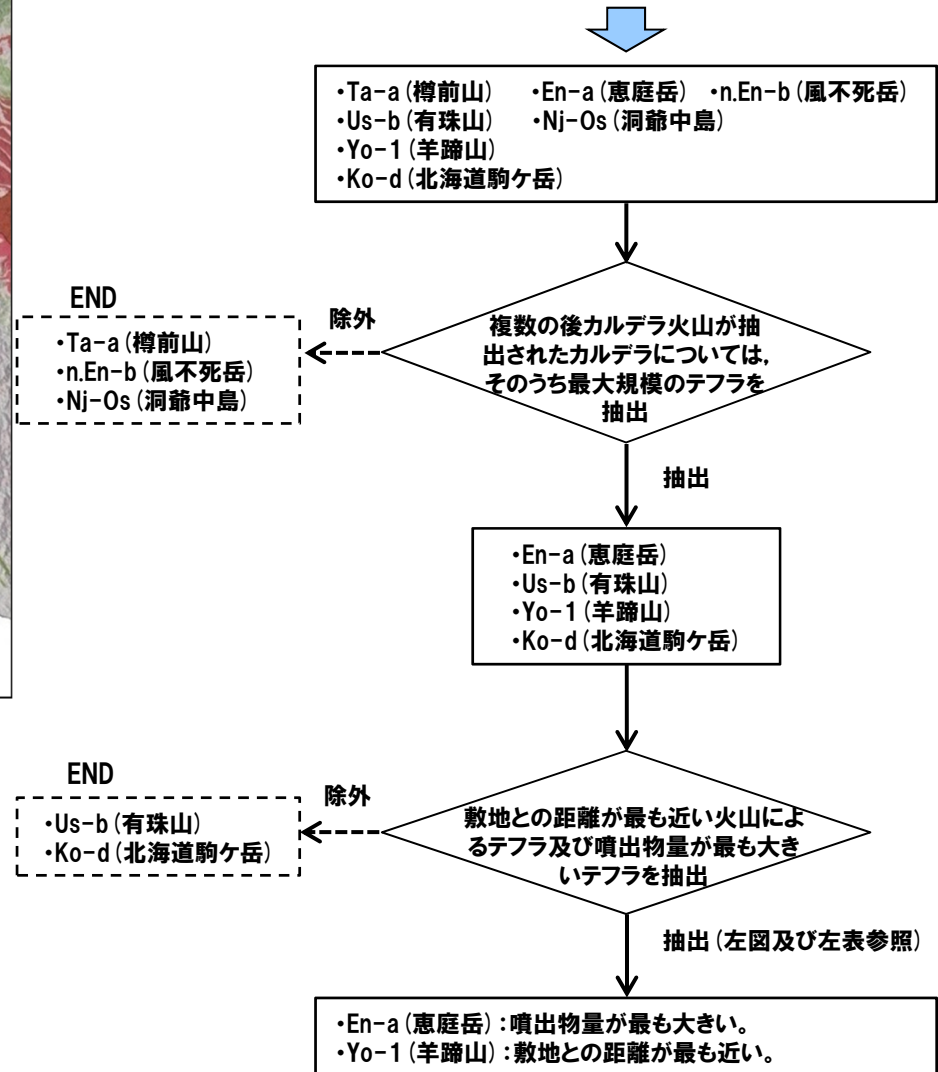


4火山の位置図(○:VEI4, ●:VEI5)

敷地との距離及び噴出物量

火山名	敷地との距離 (km)	テフラ	噴出量 (km ³) 須藤ほか(2007)より
C12 恵庭岳	68.6	En-a	5.64 (VEI5)
C22 有珠山	60.7	Us-b	1.29 (VEI5)
C24 羊蹄山	33.8	Yo-1	0.53 (VEI4)
C34 北海道駒ヶ岳	109.0	Ko-d	1.54 (VEI5)

(前頁からの続き)



3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

(参考) ニセコ・雷電火山群由来の火山灰について

○小嶋ほか編(2003)では、ニセコ・雷電火山群について、以下の通り整理している。

・地形的にニセコ火山群は、ワイスホルン・ニセコ(狭義)・雷電の3火山群に分けられる。

・ワイスホルン

ワイスホルン火山(標高1045m, 径10km)は山頂部が放射谷によって深く浸食されているが、中腹に溶岩ドーム, 厚い溶岩流の地形を保持する溶岩ドーム火山である。

・ニセコ火山

アンヌプリ, イワオヌプリなどの15余個の溶岩ドームと小型成層火山などの集合からなる安山岩質の成層火山(比高1300m, 底径15-20km, 体積17km³)である。

・雷電火山

雷電火山(標高1212m, 径15km)はニセコ火山の西に接する溶岩ドーム群(安山岩, SiO₂, 55-61%)を主体とし, 140-49万年前にかけて活動した(新エネルギー総合開発機構, 1985・1986)。雷電山・岩内岳・目国内岳など標高1000mをこえ, 厚い溶岩流を四方へ流出させている大型の溶岩ドームを中心に, 10余個の溶岩ドームからなる。

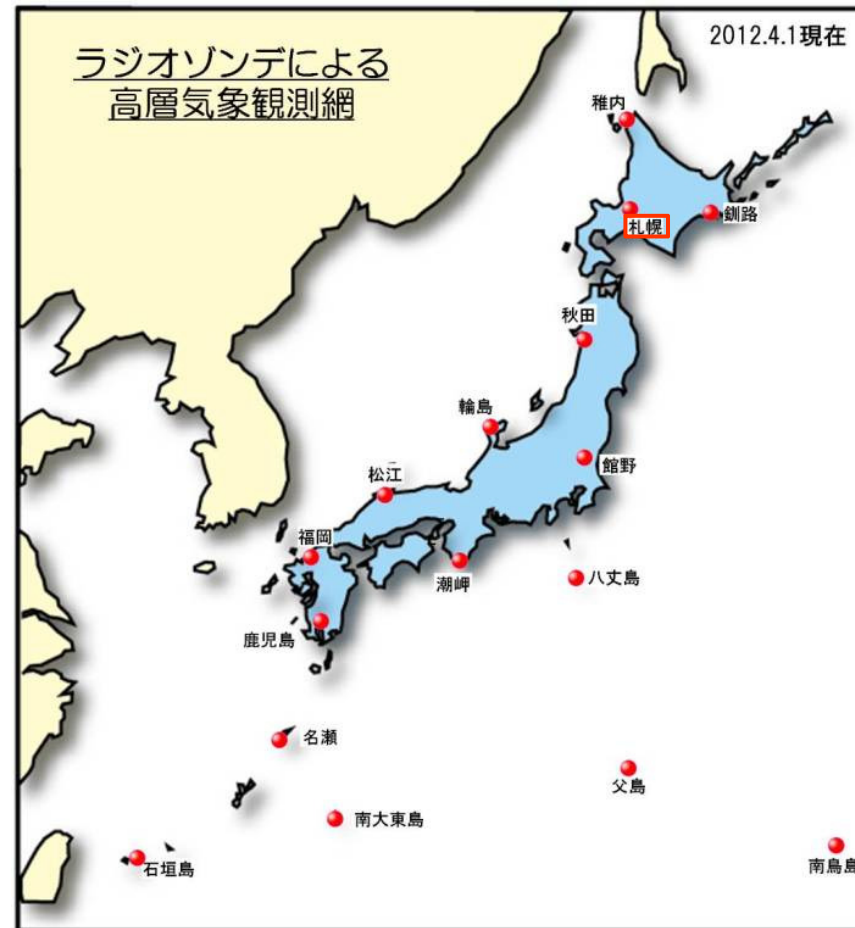
3.2.3 降下火砕物シミュレーション

③ 降下火砕物シミュレーションに使用した風向・風速データ

一部修正 (H26/3/12審査会合)

- 気象庁では、1日2回(9時, 21時)ラジオゾンデを打ち上げており、地上から高度約30km間での大気の状態を観測している。
- このうち、泊発電所に最も近い札幌管区気象台の気象データを使用した。
- シミュレーションにおいては、過去30年間(1983~2013年)の風向・風速データ*を使用した。

*気象庁「気象観測統計指針」に従う。



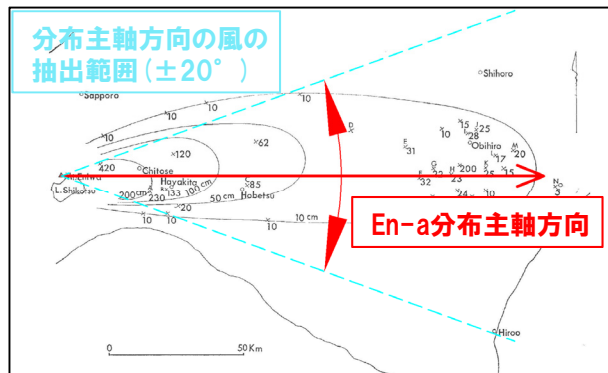
ラジゾンデ打ち上げ位置(気象庁HPより)

3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

④-1 En-a (恵庭岳) -再現解析 (1/8) -

- 影響解析に用いるパラメータを決定するため、再現解析を実施した。
- 再現解析においては、文献に示されるEn-a (恵庭岳) の等層厚線を再現できるパラメータを検討した。
- パラメータは主に文献を基に設定し、噴煙柱高度及び拡散係数については、文献の記載に幅があるため、これらについてはパラメータスタディを実施し、春日井ほか (1968) の等層厚線を再現できるパラメータを検討した^{※1}。
- 春日井ほか (1968) の等層厚線図を左下図に、入力パラメータを下表に示す。
- 再現解析には、春日井ほか (1968) の等層厚線図の主軸方向から $\pm 20^\circ$ の風を抽出した仮想風を用いた。

※1 粒径のうち、最大粒径及び中央粒径については、春日井ほか (1974) に基づき設定した。春日井ほか (1974) においては、複数地点の試料に対して粒度分析を実施しており、最大粒径及び中央粒径についてTephra2に関する文献^{※2}に基づく値を用いるよりも再現性が向上することを確認している (補足説明資料2.2章参照)。



等層厚線図 (春日井ほか (1968) に加筆)

入力パラメータ一覧及び設定根拠

パラメータ		単位	値	設定根拠	
パラメータスタディ	噴煙柱高度	km	20, 25, 30	町田・新井 (2011) によるVEI5の噴煙柱高度 (25km~) を参考に設定	
	拡散係数	m ² /s	500, 1000 5000, 10000	萬年 (2013) を参考に設定	
その他パラメータ	噴出物量	kg	5.64E+12	須藤ほか (2007) より設定	
	粒径	最大粒径	φ	-7	春日井ほか (1974) より設定
		最小粒径	φ	10	Tephra2に関する文献 ^{※2} より設定
		中央粒径	φ	-0.5	春日井ほか (1974) より設定
		標準偏差	φ	3	Tephra2に関する文献 ^{※2} より設定
	密度	岩片密度	kg/m ³	2600	Tephra2に関する文献 ^{※2} より設定
		軽石密度	kg/m ³	1000	Tephra2に関する文献 ^{※2} より設定
	みかけ渦拡散係数	m ² /s	0.04	萬年 (2013) より設定	
落下時間閾値	s	3600	萬年 (2013) より設定		
計算分割高	m	約100	萬年 (2013) より設定		

※2 Forecasting Tephra Dispersion Using TEPHRA2, Michigan Technological University

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

④-1 En-a (恵庭岳) -再現解析 (2/8) -

- 噴煙柱高度及び拡散係数についてパラメータスタディを実施し、文献の等層厚線を再現できる最適ケースを選定した。
- 最適ケースの選定フローを以下に示す。

噴煙柱高度 (3ケース) × 拡散係数 (4ケース) の12ケースの解析を実施 (P257～P258参照)



【手順① (P259参照)】

火山灰の分布形状が以下の2つの条件を満たすケースを抽出

- 解析主軸*方向: 恵庭岳から約69km (恵庭岳から敷地までの距離) 地点前後において、解析結果の等層厚線と文献の等層厚線が調和的である。
- 解析主軸*直交方向: 解析結果の等層厚線と文献の等層厚線の広がり調和的である。



【手順② (P260参照)】

解析主軸*上において、解析層厚 > 文献層厚となる点が最も多いケースを抽出

- 文献層厚は、解析主軸*付近に分布するものを対象とする。
- 解析層厚は、恵庭岳からの距離が上記文献層厚と等しい地点を対象とする。
- 比較範囲は、恵庭岳から敷地までの距離が約69kmであることを考慮する。



【手順③ (P261参照)】

手順②で比較した地点において、解析層厚が文献層厚により近い地点が最も多いケースを最適ケースとして選定

※ 給源と解析結果の50cm等層厚線上で最も遠い点を結んだ方向

3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

④-1 En-a (恵庭岳) -再現解析 (3/8) -

【最適ケース】

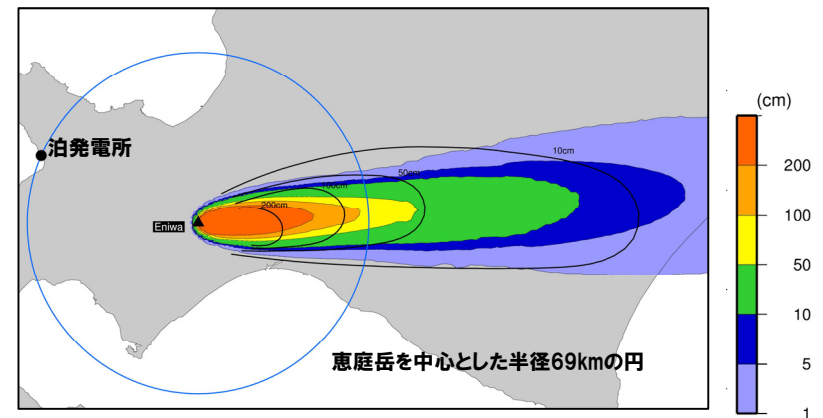
- 前頁に示すフローに従い、以下のケースを最適ケースとして選定した。
- 以降の影響解析は、最適ケースのパラメータを用いて実施した。

パラメータスタディの最適ケース

パラメータ	単位	パラメータスタディ
噴煙柱高度	km	20, 25, 30
拡散係数	m ² /s	500, 1000, 5000, 10000

最適ケースのパラメータ

パラメータ	単位	値	設定根拠
噴出物量	kg	5.64E+12	須藤ほか(2007)より設定
噴煙柱高度	Km	25	パラメータスタディの結果に基づき設定
拡散係数	m ² /s	5000	パラメータスタディの結果に基づき設定
粒径	最大粒径	φ	-7 春日井ほか(1974)より設定
	最小粒径	φ	10 Tephra2に関する文献*より設定
	中央粒径	φ	-0.5 春日井ほか(1974)より設定
	標準偏差	φ	3.0 Tephra2に関する文献*より設定
密度	岩片密度	kg/m ³	2600 Tephra2に関する文献*より設定
	軽石密度	kg/m ³	1000 Tephra2に関する文献*より設定
みかけ渦拡散係数	m ² /s	0.04	万年(2013)より設定
落下時間閾値	s	3600	万年(2013)より設定
計算分割高	m	約100	万年(2013)より設定



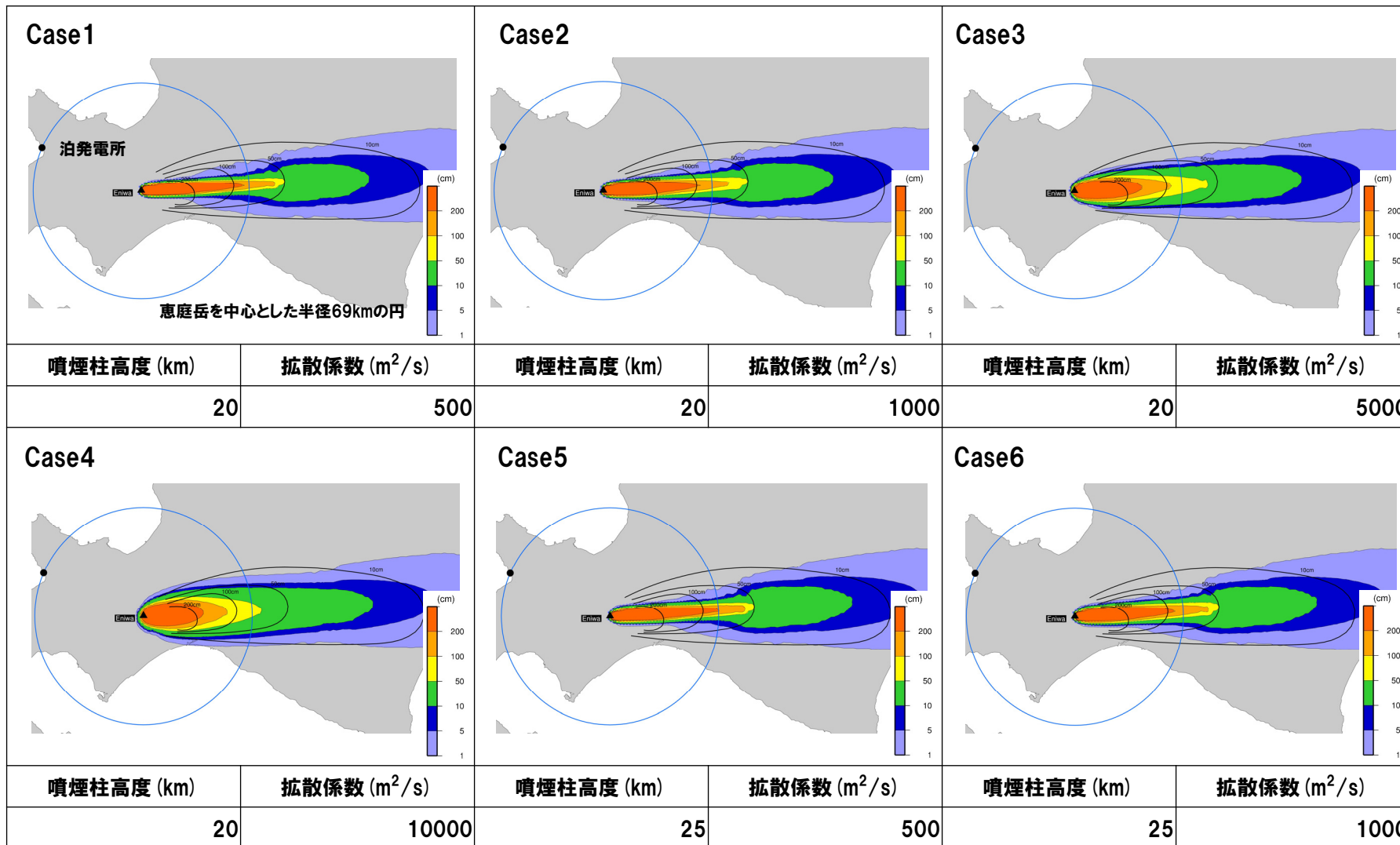
春日井ほか(1968)の等層厚線及び最適ケースの結果

* Forecasting Tephra Dispersion Using TEPHRA2,
Michigan Technological University

3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

④-1 En-a (恵庭岳) -再現解析 (4/8) -

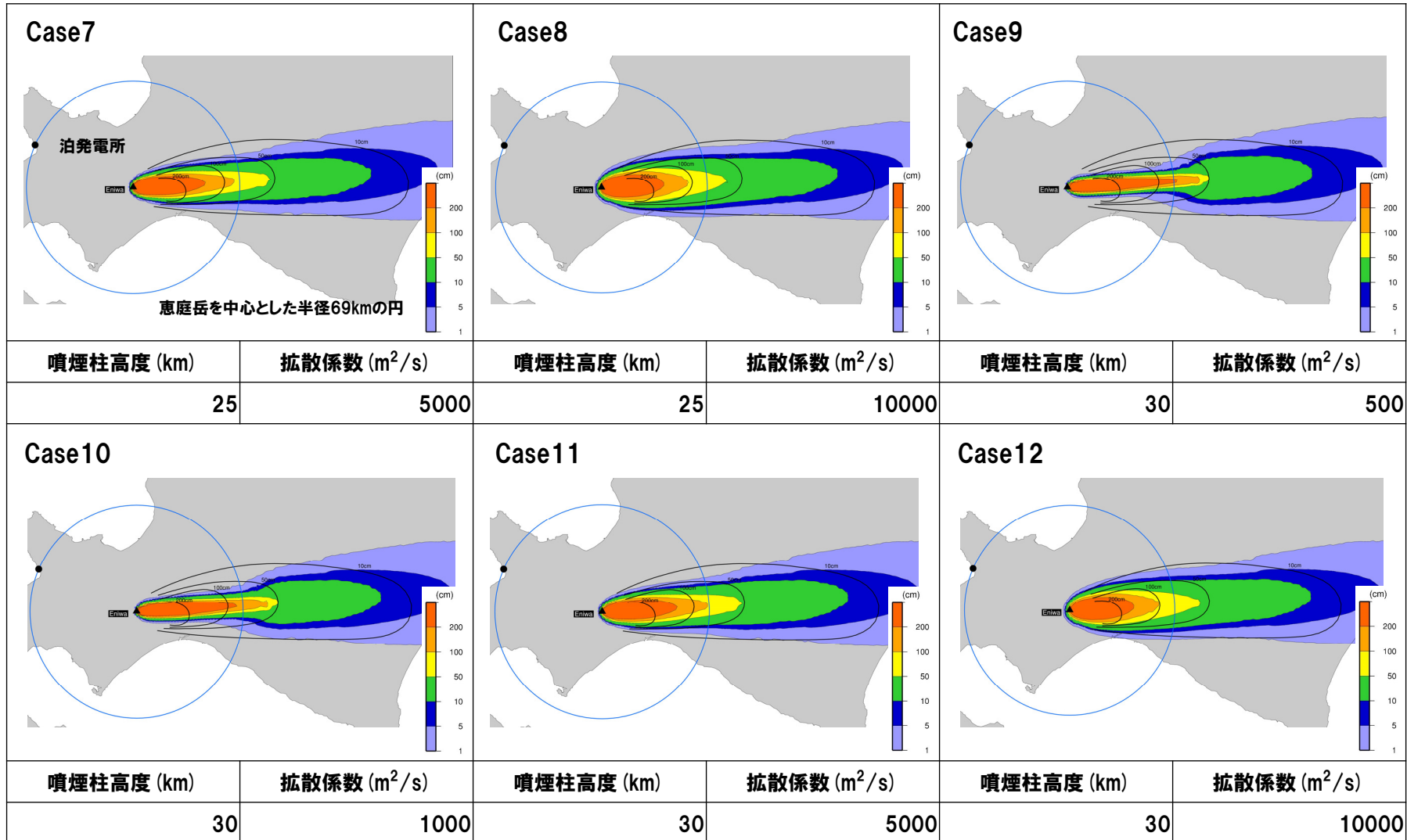
○各ケースの解析結果を以下に示す (Case1~Case6)。



3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

④-1 En-a (恵庭岳) -再現解析 (5/8) -

○各ケースの解析結果を以下に示す (Case7~Case12)。



3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

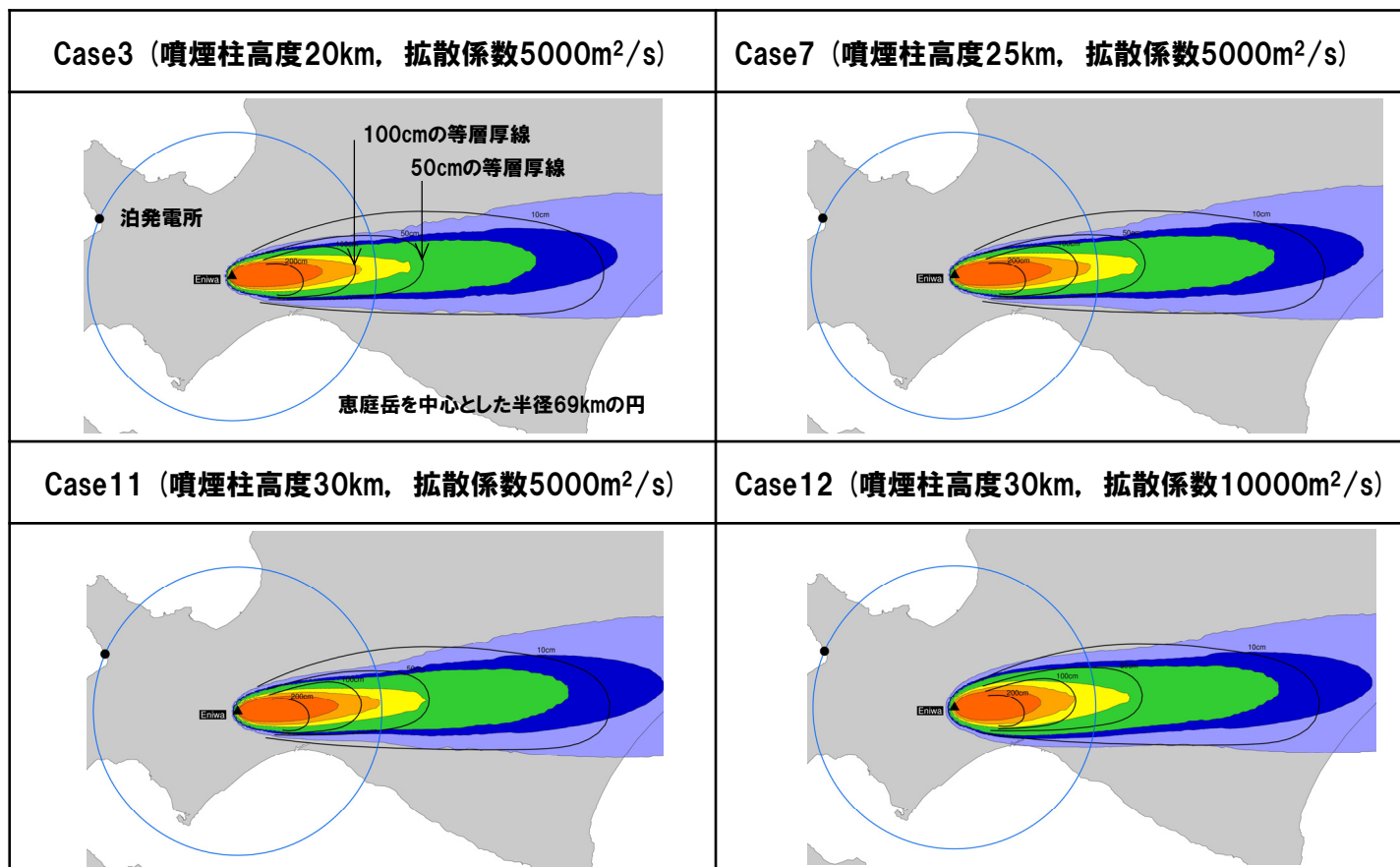
④-1 En-a (恵庭岳) -再現解析 (6/8) -

【最適ケースの選定(手順①)】

○解析を実施した12ケースから、以下の2つの条件を満たす4ケース (Case3, Case7, Case11及びCase12) を抽出した。

- ・解析主軸※方向: 恵庭岳から約69km (恵庭岳から敷地までの距離) 地点前後において、解析結果の等層厚線と文献の等層厚線が調和的である。
- ・解析主軸※直交方向: 解析結果の等層厚線と文献の等層厚線の広がり調和的である。

※ 給源と解析結果の50cm等層厚線上で最も遠い点を結んだ方向



3.2.3 降下火砕物シミュレーション

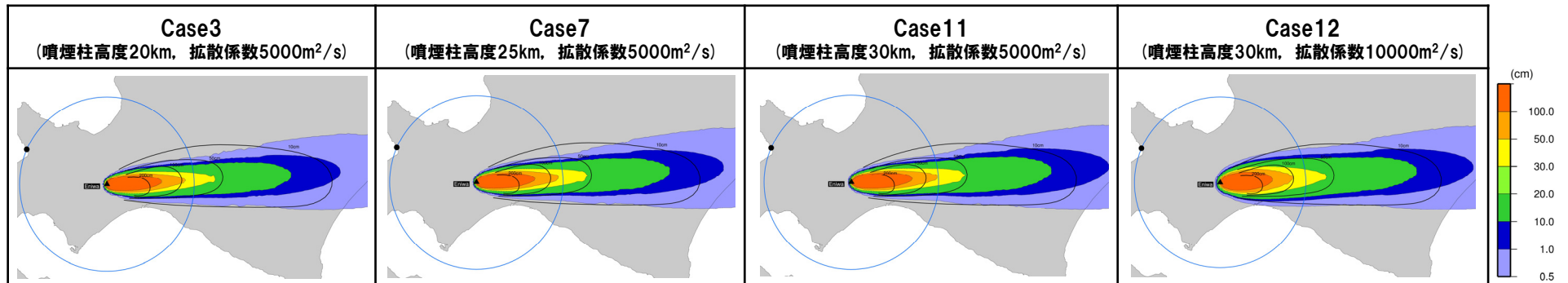
④-1 En-a(恵庭岳)-再現解析(7/8) -

【最適ケースの選定(手順②)】

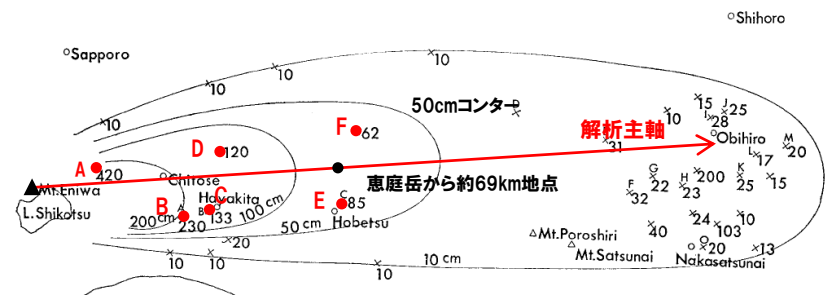
○手順①で抽出した4ケースから、解析主軸※¹上において解析層厚>文献層厚となる点が最も多い2ケース(Case7及びCase11)を抽出した。

- ・文献層厚は、解析主軸※¹付近に分布するものを対象とする(右下図に示す地点A~F)。
- ・解析層厚は、恵庭岳からの距離が上記文献層厚と等しい地点を対象とする。
- ・比較範囲は、恵庭岳から敷地までの距離が約69kmであることを考慮する。

※¹ 給源と解析結果の50cm等層厚線上で最も遠い点を結んだ方向



検討地点		文献※ ² 層厚 (cm)	解析主軸上における解析層厚(cm)※ ³			
地点記号	恵庭岳からの距離 (km)		Case3	Case7	Case11	Case12
A	15	420	1253	1269	1183	864
B	33	230	361	401	428	316
C	40	133	243	278	295	222
D	43	120	212	250	265	202
E	70	85	74	86	97	69
F	74	62	66	76	80	62



等層厚線図(春日井ほか(1968)に加筆)

※² 春日井ほか(1968)

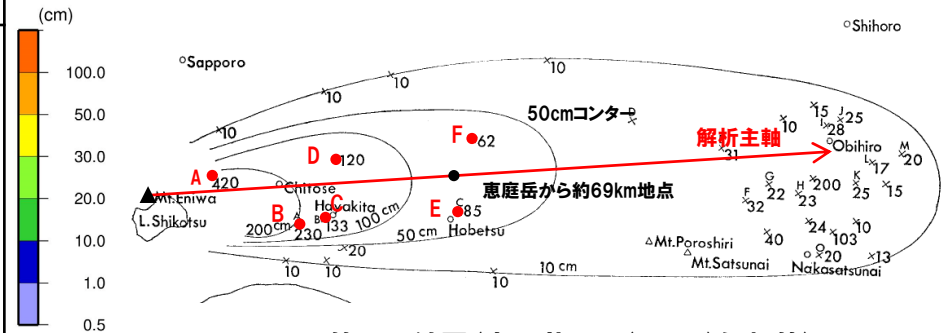
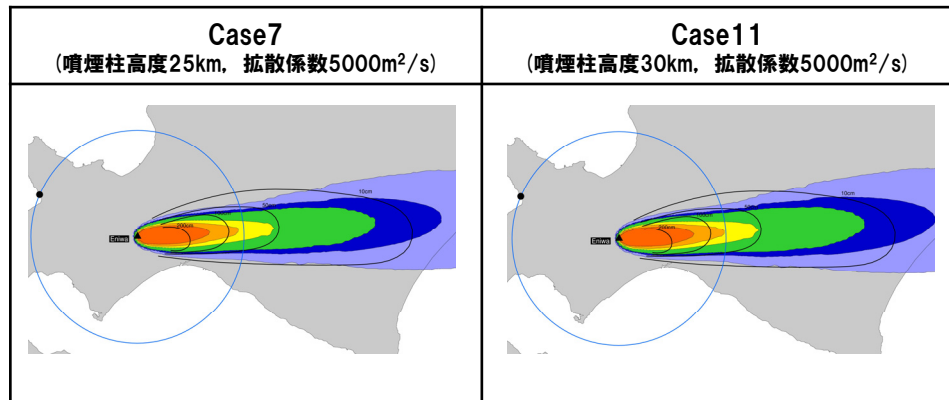
※³ 解析層厚>文献層厚となる地点を桃色ハッチング

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

④-1 En-a (恵庭岳) -再現解析 (8/8) -

【最適ケースの選定 (手順③)】

○手順②で抽出した2ケースから、手順②で比較した地点において、解析層厚が文献層厚により近い地点が最も多いCase7を最適ケースとして選定した。



等層厚線図 (春日井ほか (1968) に加筆)

検討地点		文献※1層厚 (cm)	解析主軸上における解析層厚(cm)※2	
地点記号	恵庭岳からの距離 (km)		Case7	Case11
A	15	420	1269	1183
B	33	230	401	428
C	40	133	278	295
D	43	120	250	265
E	70	85	86	97
F	74	62	76	80

※1 春日井ほか (1968)

※2 解析層厚が文献層厚により近い地点を赤字で表示

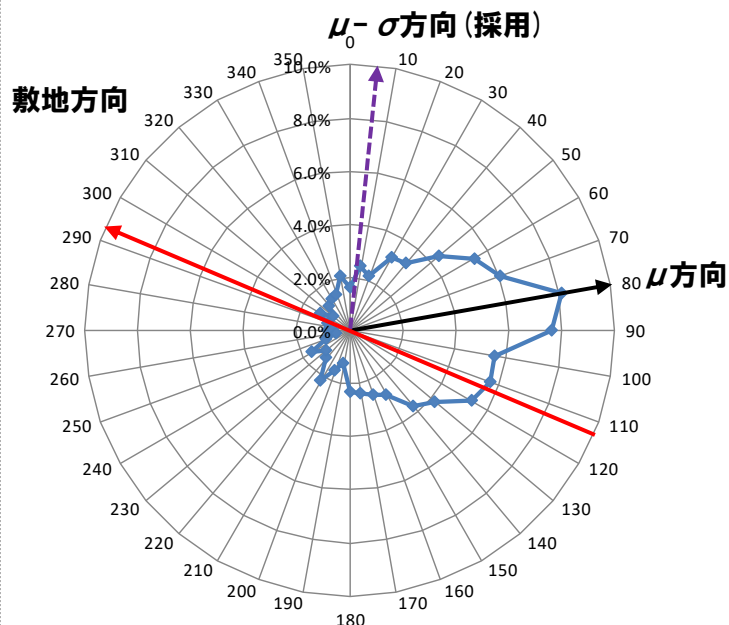
3.2.3 降下火砕物シミュレーション

④-2 En-a(恵庭岳)-影響解析(1/4)-

【影響解析に用いる仮想風の検討】

- 敷地方向への仮想風を作成するため、月別の風を用いた解析を実施し、最も敷地に影響のある月を選定した。
- 選定にあたっては、以下の風向及び風速を使用した。
 - ・風向はバラツキを考慮するため、各標高において頻度分布を正規化し、 $(\mu - \sigma)$ 又は $(\mu + \sigma)$ のうち、より敷地に近づく方向を採用した。
 - ・風速は、合成風速とした。
- 例として、7月における風向頻度分布を以下に示す。

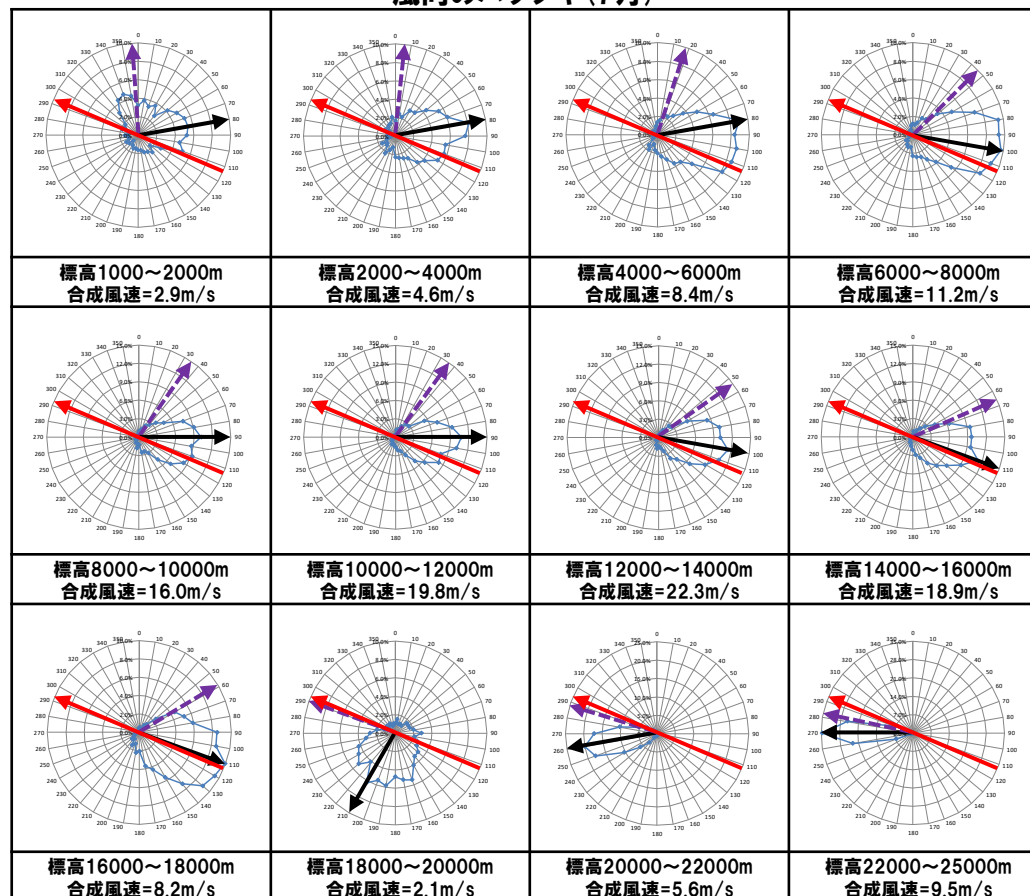
風向のバラツキ検討例(標高2000~4000m)



標高2000~4000mの風向頻度分布(7月)

- ← 恵庭岳から泊発電所への方角
- ← μ 方向
- ← バラツキ採用方向

風向のバラツキ(7月)

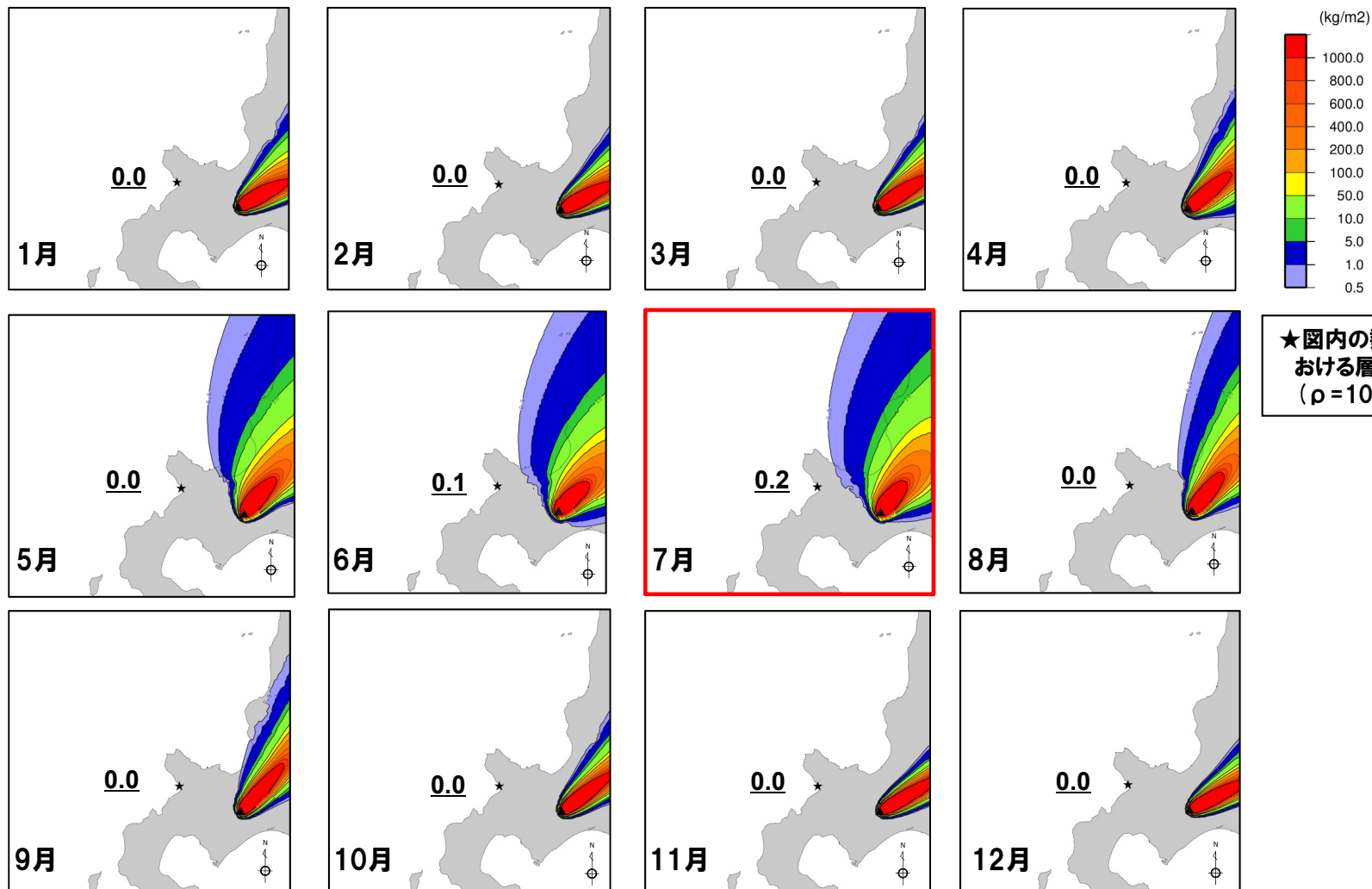


3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

④-2 En-a (恵庭岳) - 影響解析 (2/4) -

【影響解析に用いる仮想風の検討】

○風向のバラツキを考慮した月別解析を実施した結果、敷地においては7月の降下量が最大となり、層厚0.2mmとなった。



3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

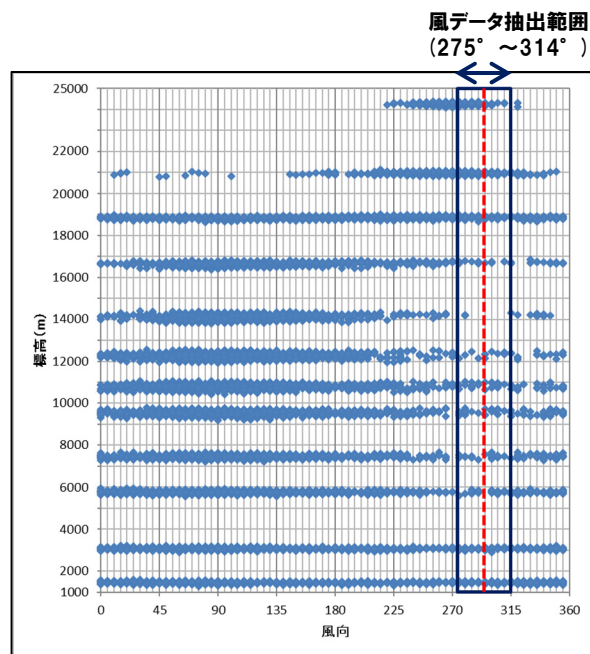
④-2 En-a (恵庭岳) - 影響解析 (3/4) -

【影響解析に用いる仮想風の検討】

- 風向のバラツキを考慮した月別解析の結果, 最も敷地に影響のある7月を対象に, より厳しい条件を考慮した検討として, 敷地方向への仮想風を作成した。
- 仮想風については, 恵庭岳から敷地方向への主軸から±20° の風を抽出し, 作成した。

敷地方向への仮想風の作成手順

① 敷地方向への風データの抽出

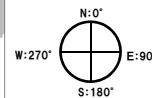
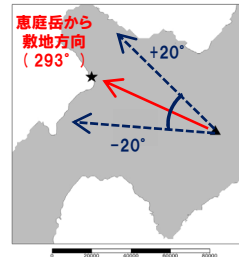


風向データ (7月)

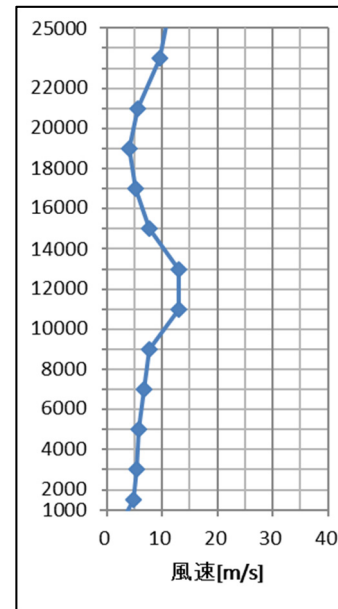
風データ抽出範囲
(275° ~ 314°)

風向275° ~ 314° の
出現頻度 (7月)

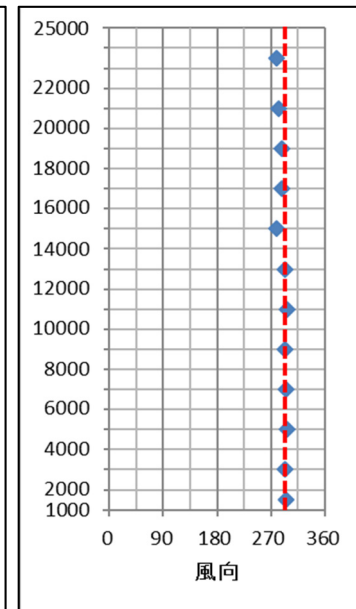
標高	出現頻度
1000 ~ 2000m	6.3%
2000 ~ 4000m	3.7%
4000 ~ 6000m	1.7%
6000 ~ 8000m	1.2%
8000 ~ 10000m	1.2%
10000 ~ 12000m	1.2%
12000 ~ 14000m	0.5%
14000 ~ 16000m	0.1%
16000 ~ 18000m	0.6%
18000 ~ 20000m	5.5%
20000 ~ 22000m	20.0%
22000 ~ 25000m	34.3%
平均	6.4%



② 抽出した風データの合成⇒仮想風



風速 (仮想風)



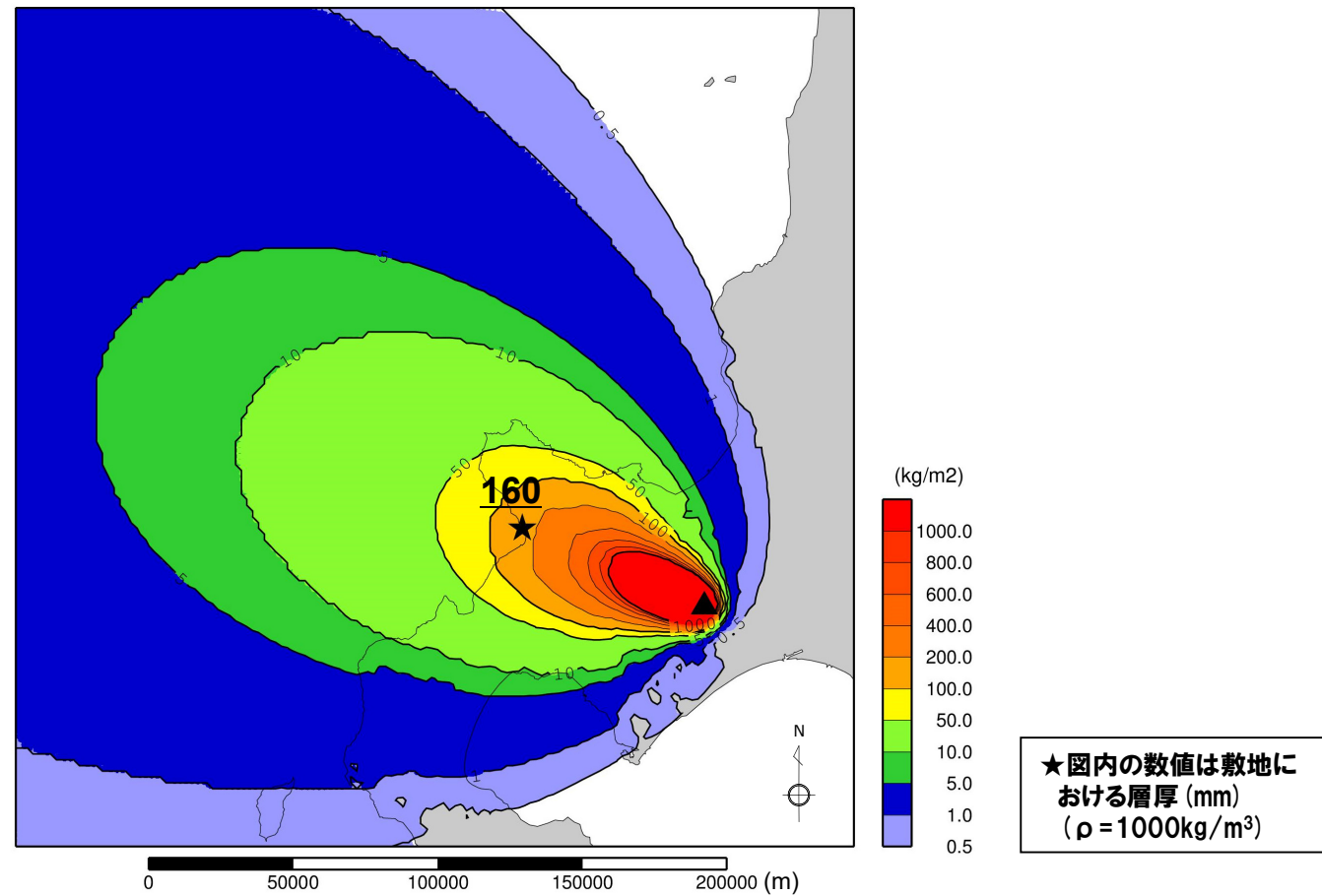
風向 (仮想風)

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

④-2 En-a (恵庭岳) - 影響解析 (4/4) -

【敷地方向への仮想風を用いた検討】

○敷地方向への仮想風を用いた解析を実施した結果、敷地における降下火砕物(火山灰)の層厚は16cmとなった。



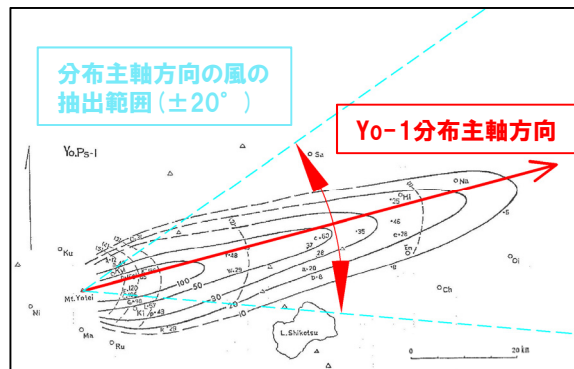
3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

⑤-1 Yo-1 (羊蹄山) -再現解析 (1/8) -

- 影響解析に用いるパラメータを決定するため、再現解析を実施した。
- 再現解析においては、文献に示されるYo-1 (羊蹄山) の等層厚線を再現できるパラメータを検討した。
- パラメータは主に文献を基に設定し、噴煙柱高度及び拡散係数については、文献の記載に幅があるため、これらについてはパラメータスタディを実施し、柏原ほか (1976) の等層厚線を再現できるパラメータを検討した※1。
- 柏原ほか (1976) の等層厚線図を左下図に、入力パラメータを下表に示す。
- 再現解析には、柏原ほか (1976) の等層厚線図の主軸方向から±20° の風を抽出した仮想風を用いた。

※1 粒径のうち、最大粒径及び中央粒径については、柏原ほか (1976) に基づき設定した。柏原ほか (1976) においては、複数地点の試料に対して粒度分析を実施しており、最大粒径及び中央粒径についてTephra2に関する文献※2に基づく値を用いるよりも再現性が向上することを確認した (補足説明資料2.2章参照)。

入力パラメーター一覧及び設定根拠



等層厚線図 (柏原ほか (1976) に加筆)

パラメータ		単位	値	設定根拠	
パラメータ スタディ	噴煙柱高度	km	15, 20, 25	町田・新井 (2011) によるVEI4の噴煙柱高度 (10~25km) を参考に設定	
	拡散係数	m ² /s	500, 1000 5000, 10000	萬年 (2013) を参考に設定	
その他 パラメータ	噴出物量	kg	5.30E+11	須藤ほか (2007) より設定	
	粒径	最大粒径	φ	-6	柏原ほか (1976) より設定
		最小粒径	φ	10	Tephra2に関する文献※2より設定
		中央粒径	φ	-1.5	柏原ほか (1976) より設定
	密度	標準偏差	φ	1.5	Tephra2に関する文献※2より設定
		岩片密度	kg/m ³	2600	Tephra2に関する文献※2より設定
		軽石密度	kg/m ³	1000	Tephra2に関する文献※2より設定
	みかけ渦拡散係数	m ² /s	0.04	萬年 (2013) より設定	
落下時間閾値	s	3600	萬年 (2013) より設定		
計算分割高	m	約100	萬年 (2013) より設定		

※2 Forecasting Tephra Dispersion Using TEPHRA2,
Michigan Technological University

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

⑤-1 Yo-1 (羊蹄山) -再現解析 (2/8) -

- 噴煙柱高度及び拡散係数についてパラメータスタディを実施し、文献の等層厚線を再現できる最適ケースを選定した。
- 最適ケースの選定フローを以下に示す。

噴煙柱高度 (3ケース) × 拡散係数 (4ケース) の12ケースの解析を実施 (P269～P270参照)



【手順① (P271参照)】

火山灰の分布形状が以下の2つの条件を満たすケースを抽出

- 解析主軸*方向: 羊蹄山から約34km (羊蹄山から敷地までの距離) 地点前後において、解析結果の等層厚線と文献の等層厚線が調和的である。
- 解析主軸*直交方向: 解析結果の等層厚線と文献の等層厚線の広がり調和的である。



【手順② (P272参照)】

解析主軸*上において、解析層厚 > 文献層厚となる点が最も多いケースを抽出

- 文献層厚は、解析主軸*付近に分布するものを対象とする。
- 解析層厚は、羊蹄山からの距離が上記文献層厚と等しい地点を対象とする。
- 比較範囲は、羊蹄山から敷地までの距離が約34kmであることを考慮する。



【手順③ (P273参照)】

手順②で比較した地点において、解析層厚が文献層厚により近い地点が最も多いケースを最適ケースとして選定

※ 給源と解析結果の50cm等層厚線上で最も遠い点を結んだ方向

3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

⑤-1 Yo-1 (羊蹄山) -再現解析 (3/8) -

【最適ケース】

- 前頁に示すフローに従い、以下のケースを最適ケースとして選定した。
- 以降の影響解析は、最適ケースのパラメータを用いて実施した。

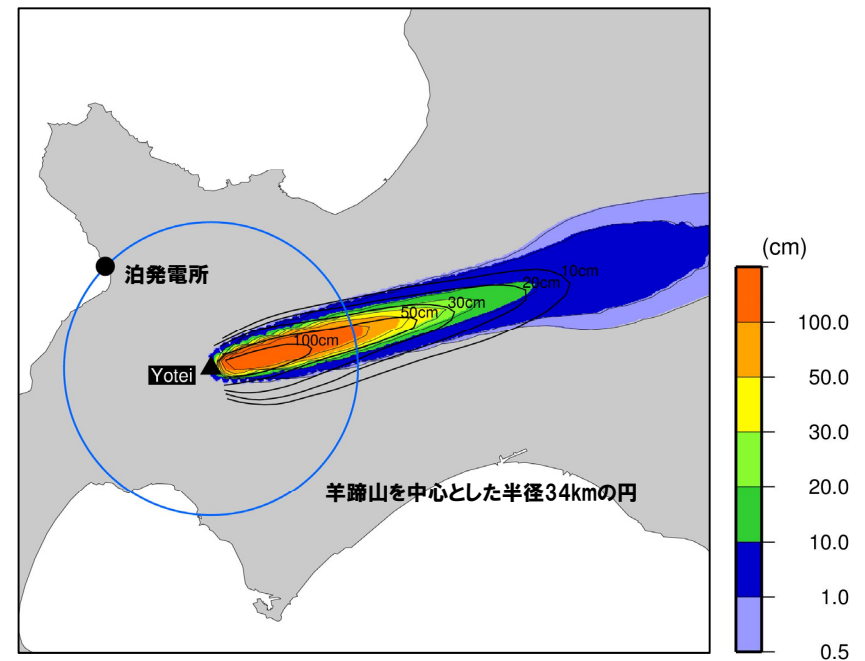
パラメータスタディの最適ケース

パラメータ	単位	パラメータスタディ
噴煙柱高度	km	15, 20, 25
拡散係数	m ² /s	500, 1000, 5000, 10000

最適ケースのパラメータ

パラメータ	単位	値	設定根拠
噴出物量	kg	5.30E+11	須藤ほか(2007)より設定
噴煙柱高度	Km	25	パラメータスタディの結果に基づき設定
拡散係数	m ² /s	1000	パラメータスタディの結果に基づき設定
粒径	最大粒径	φ	-6 柏原ほか(1976)より設定
	最小粒径	φ	10 Tephra2に関する文献※より設定
	中央粒径	φ	-1.5 柏原ほか(1976)より設定
	標準偏差	φ	1.5 Tephra2に関する文献※より設定
密度	岩片密度	kg/m ³	2600 Tephra2に関する文献※より設定
	軽石密度	kg/m ³	1000 Tephra2に関する文献※より設定
みかけ渦拡散係数	m ² /s	0.04	萬年(2013)より設定
落下時間閾値	s	3600	萬年(2013)より設定
計算分割高	m	約100	萬年(2013)より設定

※ Forecasting Tephra Dispersion Using TEPHRA2,
Michigan Technological University

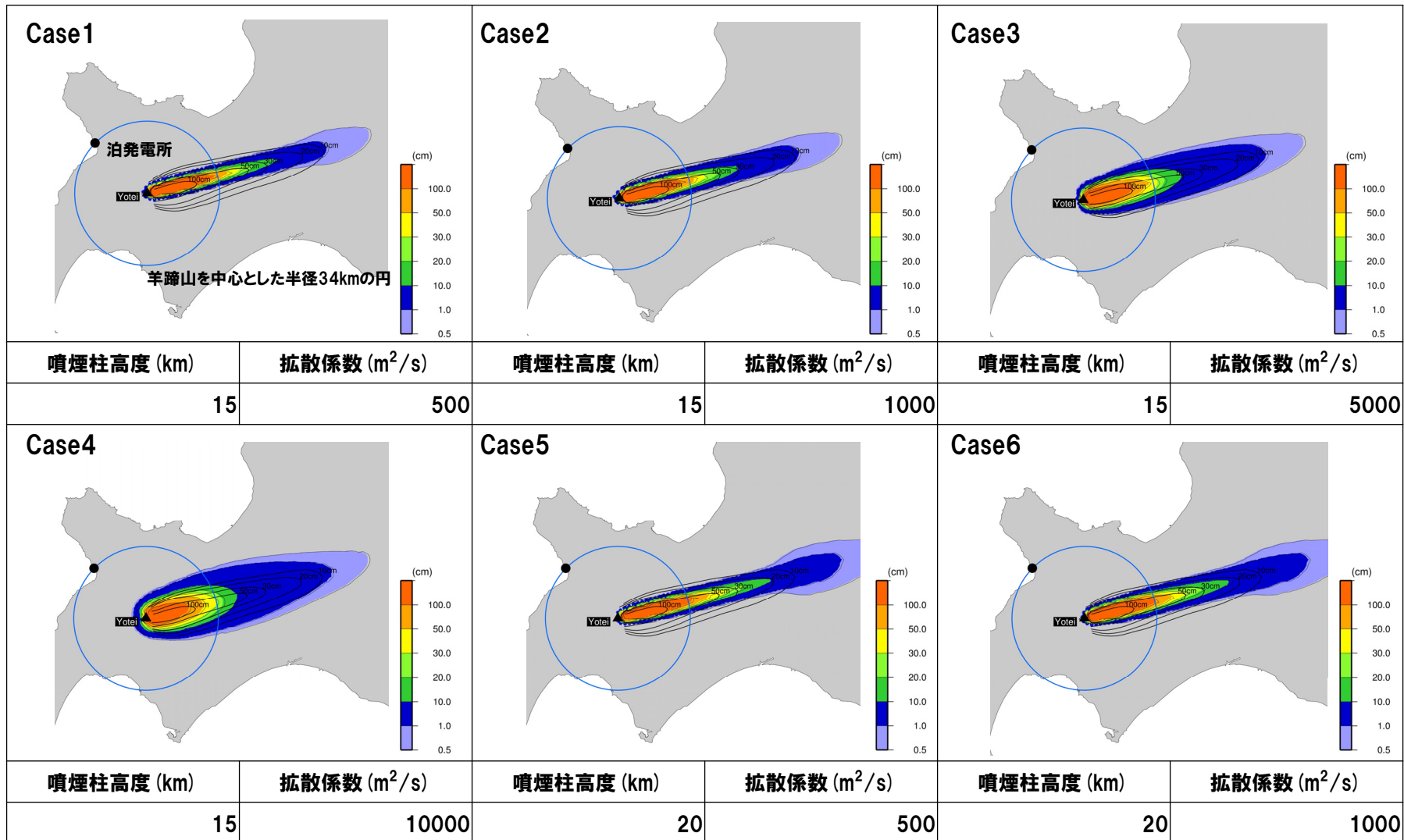


柏原ほか(1976)の等層厚線及び最適ケースの解析結果

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

⑤-1 Yo-1 (羊蹄山) -再現解析 (4/8) -

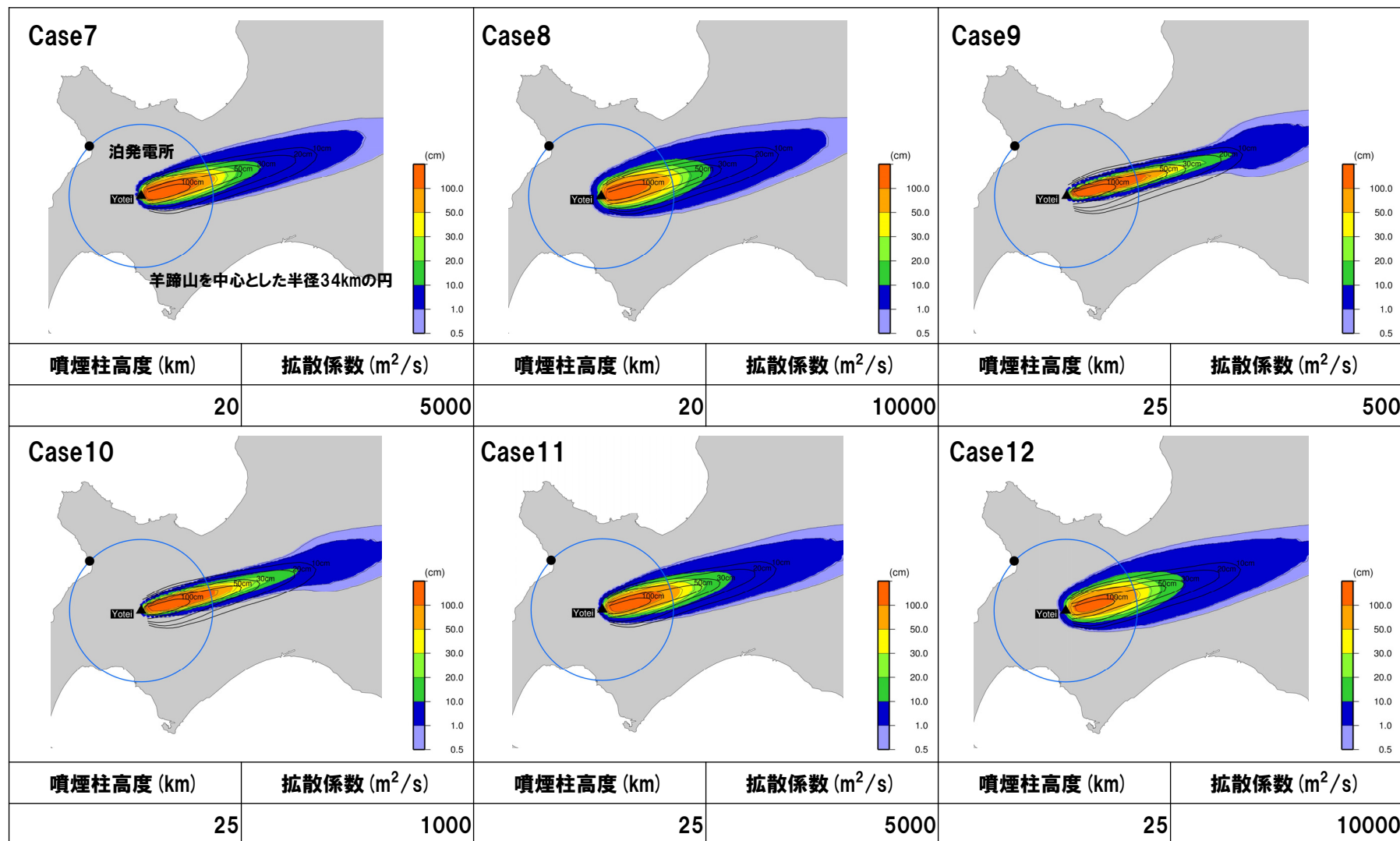
○各ケースの解析結果を以下に示す (Case1~Case6)。



3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

⑤-1 Yo-1 (羊蹄山) -再現解析 (5/8) -

○各ケースの解析結果を以下に示す (Case7~Case12)。



3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

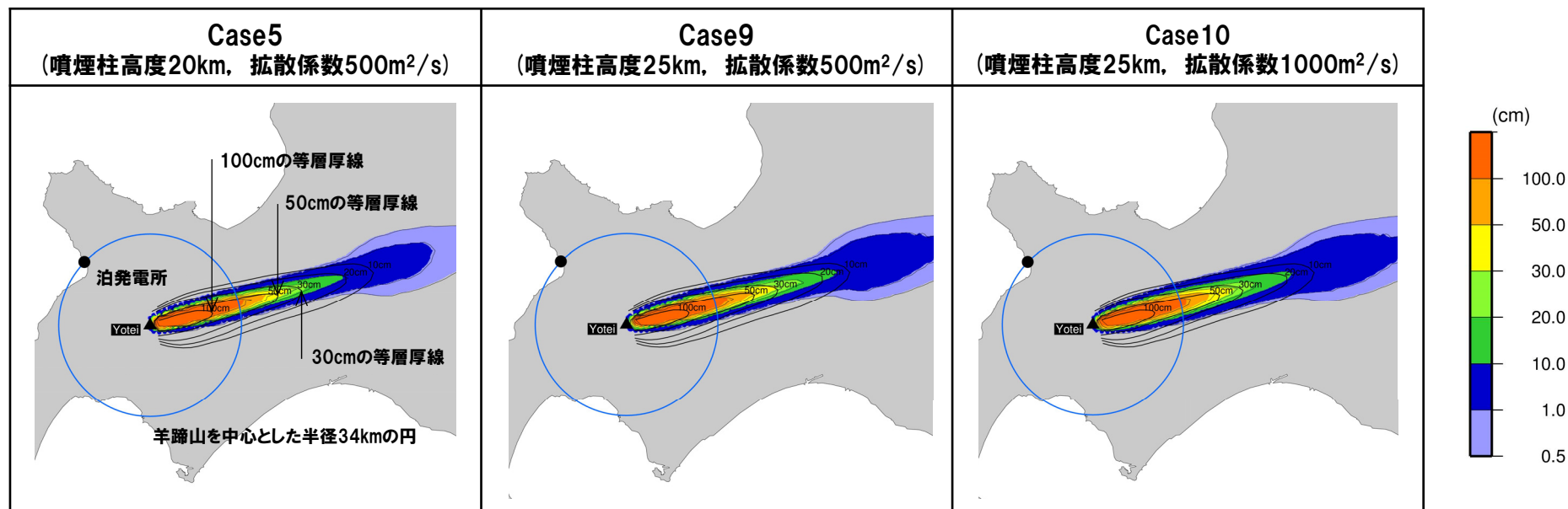
⑤-1 Yo-1 (羊蹄山) -再現解析 (6/8) -

【最適ケースの選定(手順①)】

○解析を実施した12ケースから、以下の2つの条件を満たす3ケース (Case5, Case9及びCase10) を抽出した。

- ・解析主軸※方向:羊蹄山から約34km (羊蹄山から敷地までの距離) 地点前後において、解析結果の等層厚線と文献の等層厚線が調和的である。
- ・解析主軸※直交方向:解析結果の等層厚線と文献の等層厚線の広がり調和的である。

※ 給源と解析結果の50cm等層厚線上で最も遠い点を結んだ方向



3.2.3 降下火砕物シミュレーション

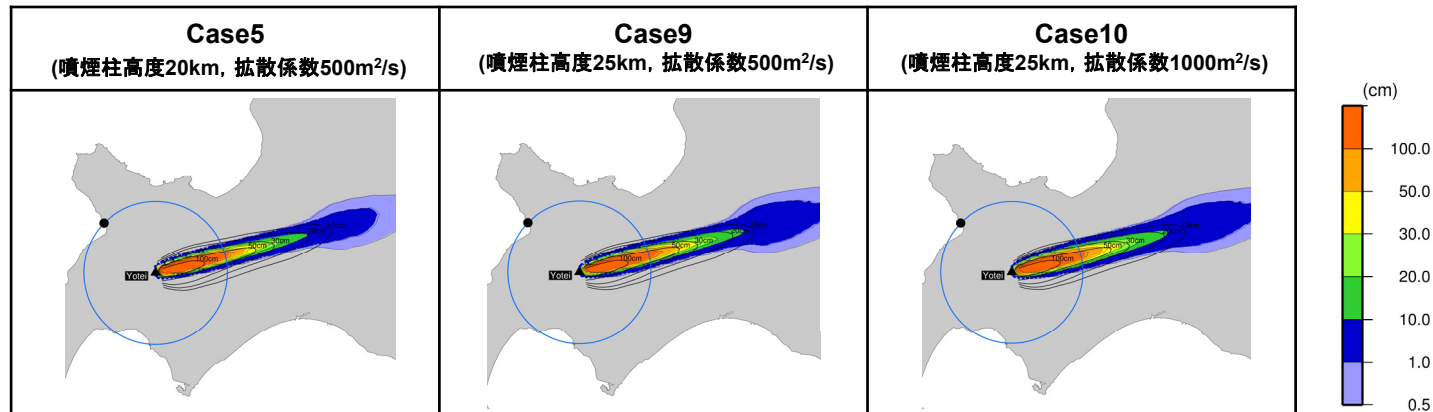
⑤-1 Yo-1 (羊蹄山) -再現解析 (7/8) -

【最適ケースの選定(手順②)】

○手順①で抽出した3ケースから、解析主軸^{※1}上において解析層厚>文献層厚となる点が最も多いケースを検討した結果、3ケースとも同様な結果(5地点において、解析層厚>文献層厚)であることから、3ケース(Case5, Case9及びCase10)が抽出される。

- ・文献層厚は、解析主軸^{※1}付近に分布するものを対象とする(右下図に示す地点A~F)。
- ・解析層厚は、羊蹄山からの距離が上記文献層厚と等しい地点を対象とする。
- ・比較範囲は、羊蹄山から敷地までの距離が約34kmであることを考慮する。

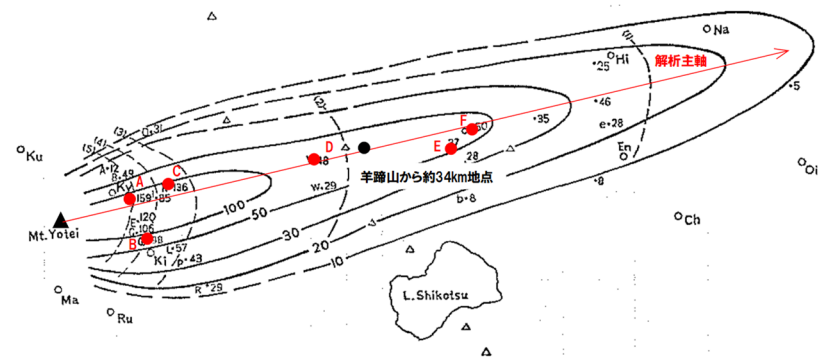
※1 給源と解析結果の50cm等層厚線上で最も遠い点を結んだ方向



検討地点		文献 ^{※2} 層厚 (cm)	解析主軸上における解析層厚(cm) ^{※3}		
地点記号	羊蹄山からの距離 (km)		Case5	Case9	Case10
A	8	159	564	442	375
B	10	98	340	290	287
C	13	136	526	453	363
D	29	48	201	136	184
E	43	37	46	59	53
F	46	60	50	43	51

※2 柏原ほか(1976)

※3 解析層厚>文献層厚となる地点を桃色ハッチング



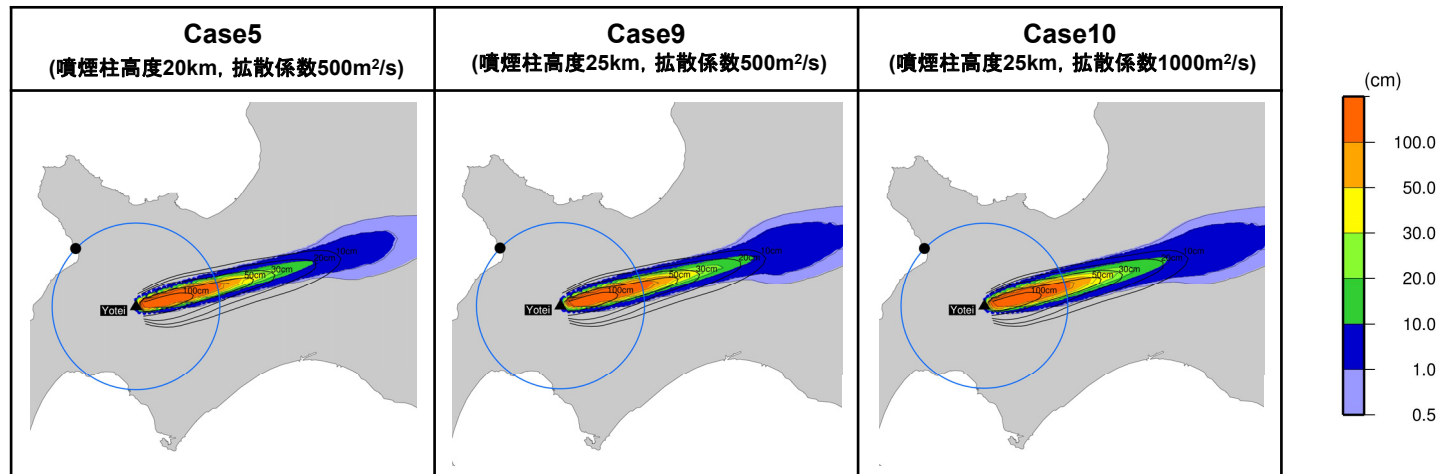
等層厚線図(柏原ほか(1976)に加筆)

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

⑤-1 Yo-1 (羊蹄山) -再現解析 (8/8) -

【最適ケースの選定(手順③)】

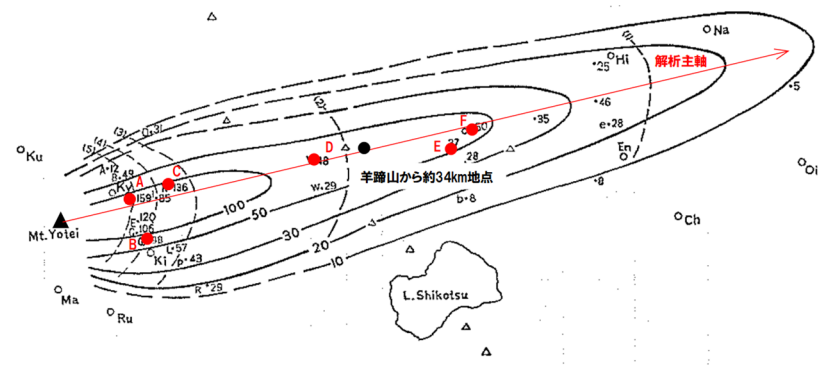
○手順②で抽出した3ケースから、手順②で比較した地点において、解析層厚が文献層厚により近い地点が最も多いCase10を最適ケースとして選定した。



検討地点		文献※1層厚 (cm)	解析主軸上における解析層厚(cm)※2		
地点記号	恵庭岳からの距離 (km)		Case5	Case9	Case10
A	8	159	564	442	375
B	10	98	340	290	287
C	13	136	526	453	363
D	29	48	201	136	184
E	43	37	46	59	53
F	46	60	50	43	51

※1 柏原ほか(1976)

※2 解析層厚が文献層厚により近い地点を赤字で表示



等層厚線図(柏原ほか(1976)に加筆)

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

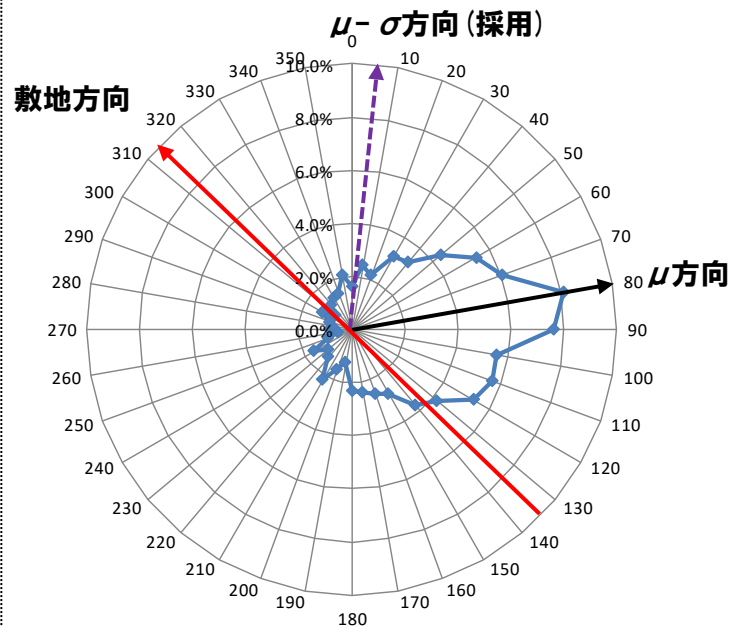
⑤-2 Yo-1 (羊蹄山) - 影響解析 (1/4) -

一部修正 (H26/3/12審査会合)

【影響解析に用いる仮想風の検討】

- 敷地方向への仮想風を作成するため、月別の風を用いた解析を実施し、最も敷地に影響のある月を選定した。
- 選定にあたっては、以下の風向及び風速を使用した。
 - ・風向はバラツキを考慮するため、各標高において頻度分布を正規化し、 $(\mu - \sigma)$ 又は $(\mu + \sigma)$ のうち、より敷地に近づく方向を採用した。
 - ・風速は、合成風速とした。
- 例として、7月における風向頻度分布を以下に示す。

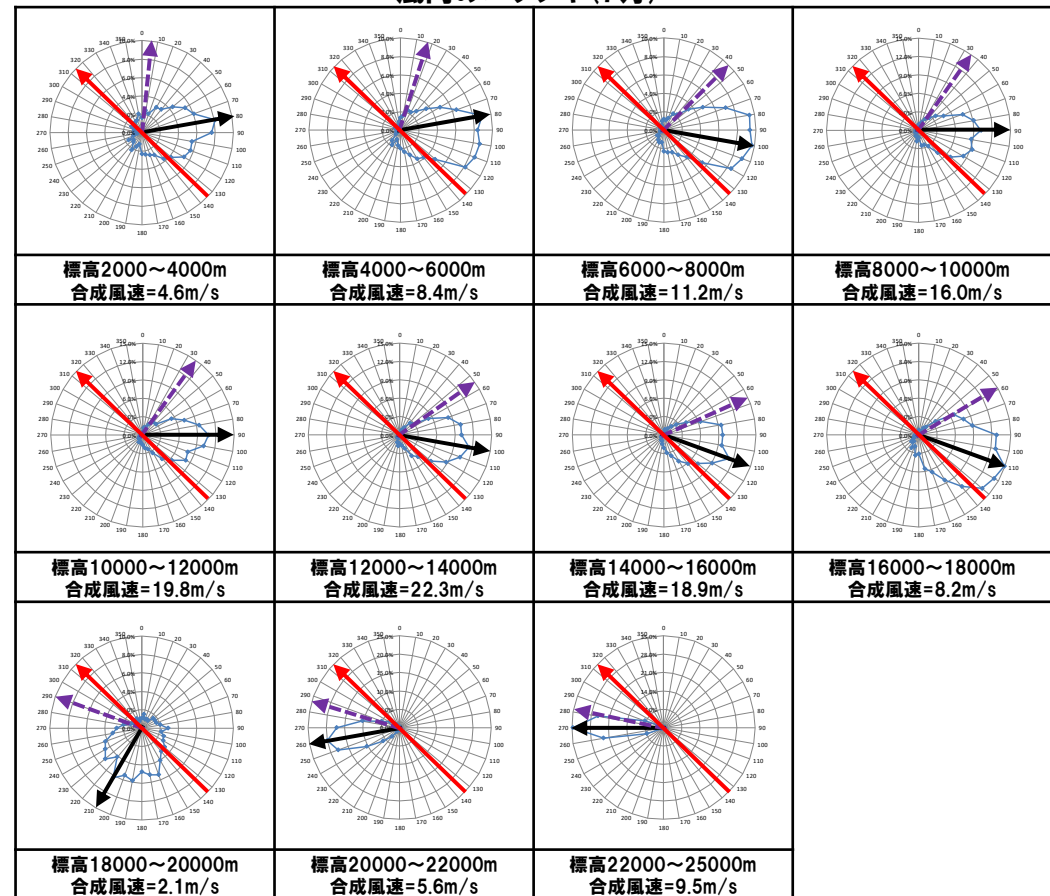
風向のバラツキ検討例 (標高2000~4000m)



標高2000~4000mの風向頻度分布 (7月)

- ← 羊蹄山から泊発電所への方角
- ← μ 方向
- ← バラツキ採用方向

風向のバラツキ (7月)

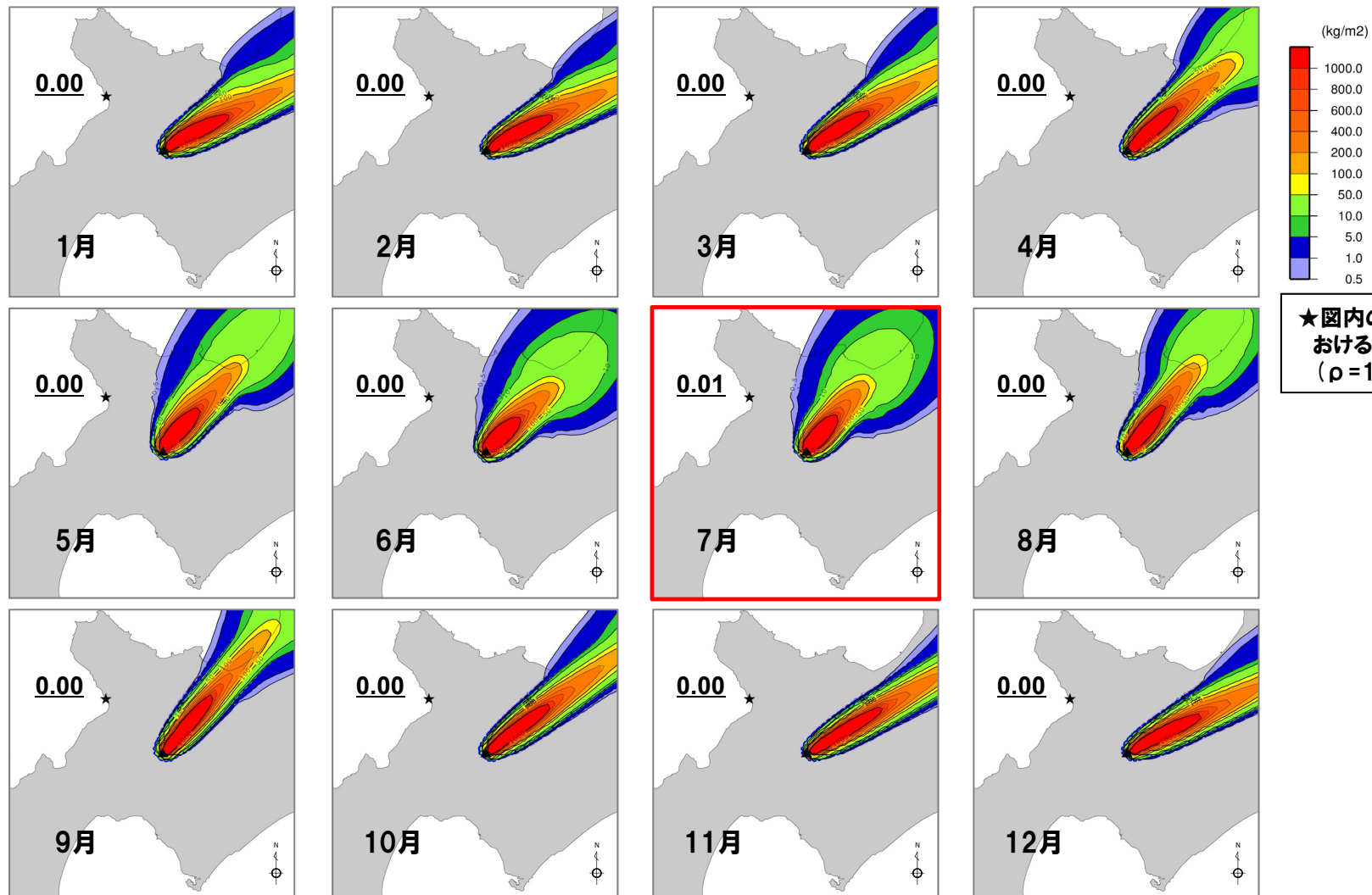


3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

⑤-2 Yo-1 (羊蹄山) -影響解析 (2/4) -

【影響解析に用いる仮想風の検討】

○風向のバラツキを考慮した月別の解析を実施した結果、敷地においては7月の降下量が最大となり、層厚0.01mmとなった。



3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション

⑤-2 Yo-1 (羊蹄山) -影響解析 (3/4) -

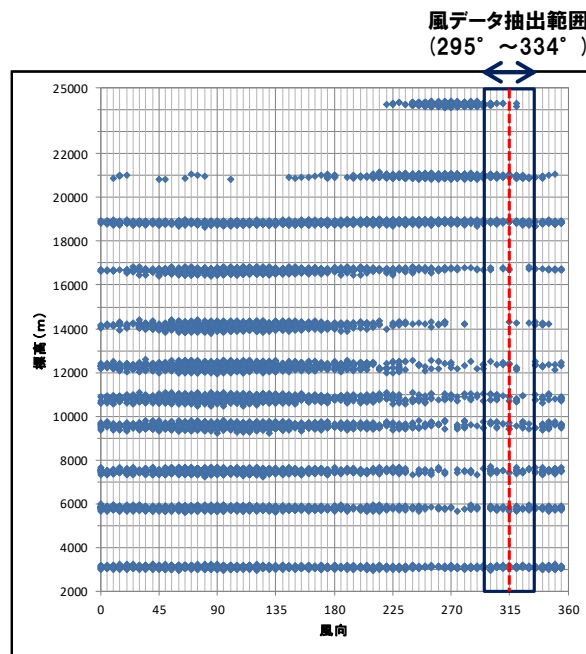
一部修正 (H26/3/12審査会合)

【影響解析に用いる仮想風の検討】

- 風向のバラツキを考慮した月別解析の結果, 最も敷地に影響のある7月を対象に, より厳しい条件を考慮した検討として, 敷地方向への仮想風を作成した。
- 仮想風については, 羊蹄山から敷地方向への主軸から±20° の風を抽出し, 作成した。

敷地方向への仮想風の作成手順

①敷地方向への風データの抽出

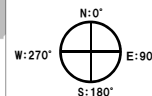
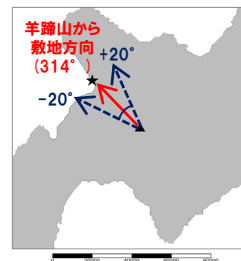


風向データ (7月)

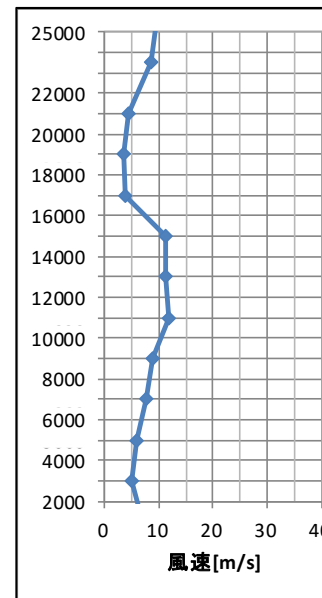
風データ抽出範囲
(295° ~ 334°)

風向295° ~ 334° の
出現頻度 (7月)

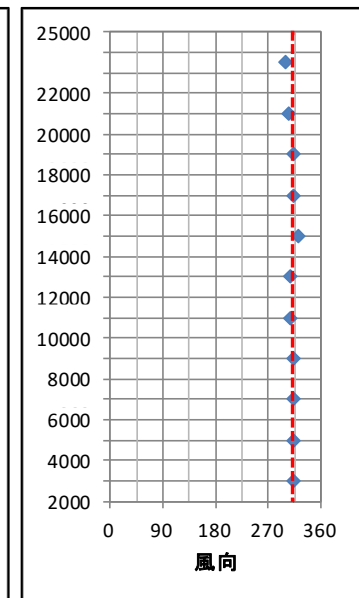
標高	出現頻度
2000 ~ 4000m	4.6%
4000 ~ 6000m	1.9%
6000 ~ 8000m	1.5%
8000 ~ 10000m	1.3%
10000 ~ 12000m	1.2%
12000 ~ 14000m	0.6%
14000 ~ 16000m	0.2%
16000 ~ 18000m	0.5%
18000 ~ 20000m	4.3%
20000 ~ 22000m	6.1%
22000 ~ 25000m	1.6%
平均	2.2%



②抽出した風データの合成⇒仮想風



風速 (仮想風)



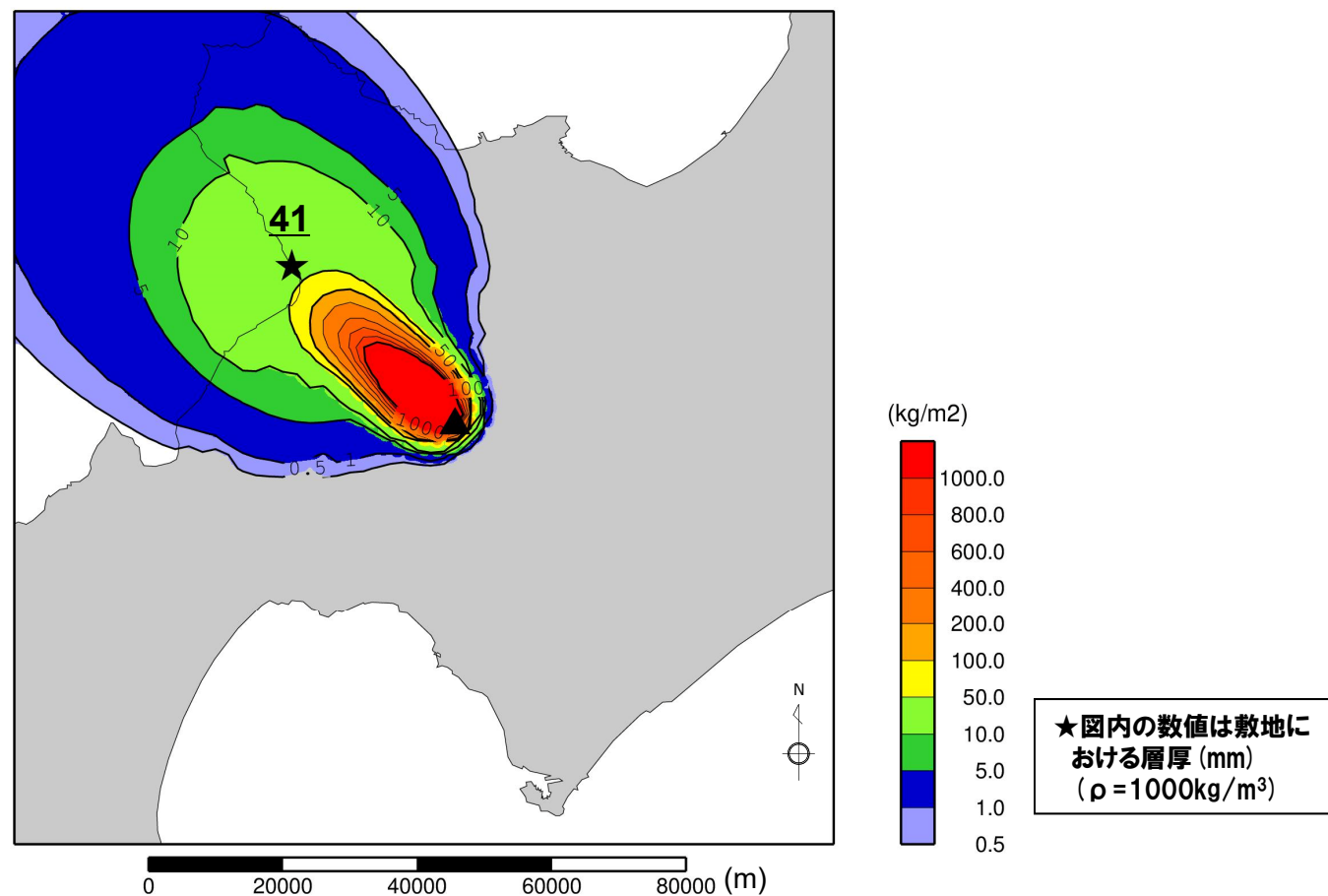
風向 (仮想風)

3.2.3 降下火砕物シミュレーション

⑤-2 Yo-1 (羊蹄山) - 影響解析 (4/4) -

【敷地方向への仮想風を用いた検討】

○敷地方向への仮想風を用いた解析を実施した結果、敷地における降下火砕物(火山灰)の層厚は4.1cmとなった。



3.2.4 設計に用いる降下火砕物の層厚

層厚評価結果

【敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物】

- 敷地周辺に到達しているとされている降下火砕物を噴出する噴火と同規模の噴火の可能性が否定できない火山は白頭山(B-Tm)である。
- B-Tmと同規模の噴火において噴出される降下火砕物の層厚は、敷地において最大でも5～10cmと評価される。

【降下火砕物シミュレーション】

- En-a(恵庭岳)及びYo-1(羊蹄山)の層厚は、降下火砕物シミュレーションを実施した結果、以下の通りである。
 - ・En-a(恵庭岳):16cm
 - ・Yo-1(羊蹄山):4.1cm



- 最も層厚の厚いEn-a(恵庭岳)のシミュレーション結果16cmを踏まえ、敷地における降下火砕物(火山灰)の層厚は、20cmとする。

3.2.5 降下火砕物の密度・粒径

設計で考慮する火山灰の密度・粒径

一部修正 (H25/12/18審査会合)

○敷地において明瞭な火山灰を含む地層が認められないことから、設計で考慮する火山灰の密度及び粒径について、文献に示される値から保守的に設定した。

【密度】

- 宇井編(1997)では、「乾燥した火山灰は密度が0.4-0.7であるが、湿ると1.2を超えることがある。」とされている。
- 八木・三浦(2003)では、敷地周辺の広域降下火山灰である支笏火山灰(Spfa-1)について、乾燥密度0.41-0.66g/cm³、湿潤密度0.75-1.36g/cm³と記載されている。
- 以上から、密度は、飽和状態も考慮し、保守的に以下の数値を設定した。
 - ・湿潤密度：1.5g/cm³
 - ・乾燥密度：0.7g/cm³

【粒径】

- 鈴木ほか(1973)に示される給源からの距離に応じた降下火砕物の粒径分布(右図)を踏まえて設定する。
- 降下火砕物シミュレーションの対象とした恵庭岳の敷地までの距離は68.6kmであることから、右図の58km及び82kmの粒径分布曲線を踏まえ、以下の数値を設定した。
 - ・粒径：4.0mm以下

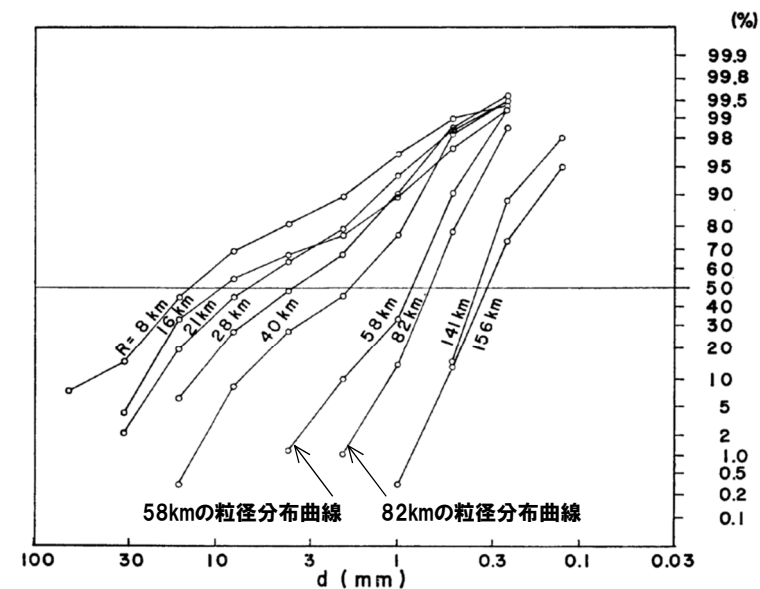


Fig. 10. Cumulative weight-percentage curves of the particle size distribution of Ta-b₆ deposit plotted on logarithmic probability paper. The samples are collected along the distribution axis of pumice-fall. Arabic numerals are distance from Mt. Tarumai.

鈴木ほか(1973)に加筆

H28.2.5 審査会合以降の経緯及び主な変更点	P. 4
1. 原子力発電所の火山影響評価ガイドの概要	P. 8
2. 立地評価	P. 10
2. 1 原子力発電所に影響を及ぼし得る火山の抽出	P. 14
2. 2 抽出された火山の火山活動に関する個別評価	P. 18
2. 3 過去に巨大噴火が発生した火山(洞爺カルデラ)の個別評価	P. 27
2. 4 過去に巨大噴火が発生した火山(支笏カルデラ)の個別評価	P. 95
2. 5 過去に巨大噴火が発生していない火山(ニセコ・雷電火山群)の個別評価	P.126
2. 6 過去に巨大噴火が発生していない火山(羊蹄山)の個別評価	P.158
2. 7 モニタリング	P.175
2. 8 立地評価まとめ	P.200
3. 影響評価	P.204
3. 1 敷地において想定される火山事象	P.207
3. 2 降下火砕物(火山灰)の評価	P.220
3. 2. 1 降下火砕物の層厚評価の概要	P.220
3. 2. 2 敷地及び敷地近傍で確認される主な降下火砕物	P.221
3. 2. 3 降下火砕物シミュレーション	P.248
3. 2. 4 設計に用いる降下火砕物の層厚	P.278
3. 2. 5 降下火砕物の密度・粒径	P.279
3. 3 影響評価まとめ	P.281
参考文献	P.282

影響評価結果

一部修正 (H28/2/5審査会合)

【火山事象の抽出】

- 敷地において想定される火山事象として、降下火砕物(火山灰)を抽出した。
- 降下火砕物(火山灰)以外の火山事象については、敷地との距離、火山噴出物の分布、地形状況等から影響はないと評価される。

【降下火砕物(火山灰)の影響】

- 層厚の評価は、文献調査、地質調査及び降下火砕物シミュレーションの結果を踏まえ設定した。
- 密度については、密度試験の結果及び文献から保守的に設定した。
- 粒度については、粒度試験結果より設定した。

降下火砕物(火山灰)による影響

項目	影響	設定根拠
降下火砕物層厚	20cm	文献調査、地質調査及び降下火砕物シミュレーション結果を踏まえ設定
密度	湿潤密度	1.5g/cm ³
	乾燥密度	0.7g/cm ³
		文献を考慮し保守的に設定
粒径	4.0mm以下	文献に示される値を踏まえ設定

- (1) 兼岡一郎・井田喜明編(1997):火山とマグマ, 東京大学出版会.
- (2) 中野俊・西来邦章・宝田晋治・星住英夫・石塚吉浩・伊藤順一・川辺禎久・及川輝樹・古川竜太・下司信夫・石塚治・山元孝広・岸本清行編(2013):日本の火山(第3版), 200万の1地質編集図, No.11, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.
- (3) 中川光弘・松本亜希子・島谷太郎・小杉安由美(2013):東北日本弧北端の第四紀火山活動の時空変遷: 活動年代の再検討とマグマ組成, 日本地質学会第120年学術大会講演要旨, R3-0-3, p.44.
- (4) 町田洋・新井房夫(2011):新編 火山灰アトラス[日本列島とその周辺], 東京大学出版会.
- (5) 産業技術総合研究所編(2003):20万分の1数値地質図幅集「北海道南部」.
- (6) 山縣耕太郎(1994):支笏およびクッタラ火山のテフロクロノロジー, 地学雑誌, Journal of Geography, 103(3), pp.268-285
- (7) 山元孝広(2014):日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図, 地質調査総合センター研究資料集, No.613, 産総研地質調査総合センター.
- (8) 国土地理院(2000):2万5千分1 火山土地条件図 有珠山.
- (9) 山縣耕太郎(1996):テフラ層序に基づく洞爺火山の噴火史, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 1996巻, p.710.
- (10) 青木かおり・町田洋(2006):日本に分布する第四紀後期広域テフラの主元素組成-K₂O-TiO₂図によるテフラの識別, 地質調査研究報告, 57(7/8), pp.239-258.
- (11) 気象庁編(2013):日本活火山総覧(第4版).
- (12) 西田泰典(1983):洞爺カルデラにおける磁気測量, 日本火山学会講演予稿集, 第2集, 28(2), p.176.
- (13) 森濟・井口正人・味喜大介・伊藤壮介・大島弘光・田村真・前川徳光(2000):--2000年有珠山噴火に伴う地殻変動--洞爺カルデラと有珠山周辺の地殻変動--, 日本火山学会講演予稿集, 2, p.46.
- (14) Gualda, G.A.R., Pamukcu, A.S., Ghiorso, M.S., Anderson, A.T., Jr., Sutton, S.R. and Rivers, M.L. (2012): Timescales of Quartz Crystallization and the Longevity of the Bishop Giant Magma Body, PlosOne, Vol.7, Issue.5, e37492, pp.1-12.
- (15) Druitt, T.H., Costa, F., Deloule, E., Dungan, M. and Scaillet, B. (2012): Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano, Nature, 482, 77-82. pp.1-13.
- (16) 安藤忍(2013):気象研究所技術報告 第69号, マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究, 地震火山研究部, pp.65-88.
- (17) 気象庁(2021):第148回 火山噴火予知連絡会資料.
- (18) 気象庁(2020):第147回 火山噴火予知連絡会資料.
- (19) 下司信夫(2016):大規模火砕噴火と陥没カルデラ: その噴火準備と噴火過程, 火山, 61, pp.101-118.
- (20) Nakajima, J., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. (2001): Three-dimensional structure of Vp, Vs and Vp/Vs beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids, Journal of geophysical research, Vol.106, No.B10, pp.21843-21857.
- (21) 中島淳一(2016):プレートの沈み込みと島弧マグマ活動, 火山, 61, pp.23-36.

- (22) Kita, S., Nakajima, J., Hasegawa, A., Okada, T., Katsumata, K., Asano, Y. and Kimura, T. (2014) :Detailed seismic attenuation structure beneath Hokkaido, northeastern Japan: Arc-arc collision process, arc magmatism, and seismotectonics, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, pp.6486-6511.
- (23) Zhao, D., Yamada, T., Hasegawa, A., Umeno, N. and Wei, W. (2012) :Imaging the subducting slabs and mantle upwelling under the Japan Islands., *Geophysical Journal International*, *Geophys. J. Int.*, 190, pp.816-828.
- (24) 中島淳一 (2017) :東北地方の火山周辺の地震波速度・減衰構造:地殻構造と低周波地震・S波反射面との関係, *地震研究所彙報*, 92, pp.49-62.
- (25) 下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明・中田節也編 (2008) :火山の辞典 (第2版), 朝倉書店.
- (26) Alanis, P.K., Miyamachi, H., Yakiwara, H., Goto, K., Kobayashi, R., Tameguri, T. and Iguchi, M. (2012) :Seismic velocity structure of the crust beneath the Aira Caldera in Southern Kyushu by tomography of travel times of local earthquake data, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, Vol.57 (4) , pp.227-234.
- (27) Abe, Y., Ohkura, T., Shibutani, T., Hirahara, K. and Kato, M. (2010) :Crustal structure beneath Aso Caldera, Southwest Japan, as derived from receiver function analysis, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 195, pp.1-12.
- (28) 国土地理院 (2004) :阿蘇山周辺の地殻変動, pp.106-110.
- (29) Sudo, Y. and Kong, L.S.L. (2001) :Three-dimensional seismic velocity structure beneath Aso Volcano, Kyushu, Japan., *Bull. Volcano*, 63, pp.326-344.
- (30) Matsubara, M., Sato, H., Uehira, K., Mochizuki, M., Kanazawa, T., Takahashi, N., Suzuki K. and Kamiya, S. (2019) :Seismic Velocity Structure in and around the Japanese Island Arc Derived from Seismic Tomography Including NIED MOWLAS Hi net and S net Data, *Seismic Waves Probing Earth System*, IntechOpen, pp.1-19.
- (31) 今泉俊文・宮内崇裕・堤浩之・中田高 (2018) :活断層詳細デジタルマップ [新編], 東京大学出版会.
- (32) Zhao, D., Horiuchi, S., Hasegawa, A. (1992) : Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands., *Tectonophysics*, 212, pp.289-301.
- (33) Matsubara M., H. Sato, T. Ishiyama, and Horne, A.V. (2017) Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophysics*, 710-711, pp.97-107.
- (34) 第四紀火山カタログ委員会編 (1999) :日本の第四紀火山カタログ, 日本火山学会.
- (35) 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*, 第58巻, 第9/10号, pp.261-321.
- (36) Sheridan, M.F. (1979) :Emplacement of pyroclastic flows: A review, *Geological Society of America, Special Paper* 180, 1979, pp.125-136.
- (37) Iverson, R.M. (1997) :THE PHYSICS OF DEBRIS FLOWS, *Reviews of Geophysics*, 35, 3, pp.245-296.
- (38) 富士山ハザードマップ検討委員会 (2004) :富士山火山防災マップ 防災業務用 (試作版), pp.22-24.
- (39) Anderson, J. and Flett, J. (1903) :Report on the Eruptions of the Soufriere in St. Vincent in 1902 and on a Visit to Montagne Pelee, in Martinique Part I.

- (40) Lacroix (1904) : La montagne Pelée et ses éruptions In: Annales de Géographie, t. 14, n° 74, 1905, pp.97-110.
- (41) Fisher, R.V., Smith, A.L. and Roobol, M.J. (1980) : Destruction of St. Pierre, Martinique, by ash -cloud surges, May 8 and 20, 1902
- (42) Perret (1937) : The Eruption of Mt. Pelée 1929-1932.
- (43) Taylor, G.A. (1958) : THE ERUPTION OF MOUNT LAMINGTON, PAPUA.
- (44) Murai, I. and Hosoya, Y. (1964) : The Eruptive Activity of Mt. Asama from 1958 to 1961 and the Associated Minor Pyroclastic Flows, Earthquake Research Institute.
- (45) Moore and Melson (1969) : Nuées Ardentes of the 1968 Eruption of Mayon Volcano, Philippines.
- (46) 荒牧重雄 (1973) : 浅間火山1973年2~3月の噴火の際に発生した小型火砕流, 火山, 第2集, 18巻, 第2号, pp.79-94.
- (47) Hoblitt, R.P. (1980) : Observations of the Eruptions of July 22 and August 7, 1980, at Mount St. Helens, Washington.
- (48) 古川竜太・中川光弘 (2009) : 後支笏カルデラ, 風不死火山の爆発的噴火活動と年代, 日本火山学会講演予稿集, 2009年度秋季大会, pp.41.
- (49) 古川竜太・中川光弘 (2010) : 樽前火山地質図, 地質調査総合センター.
- (50) 中村忠寿 (1973) : 恵庭火山の中期噴出物の14C年代-日本の第四紀層の14C年代(82)-, 地球科学, 27巻, 第1号, pp.42-43.
- (51) 中川光弘・増田健介・勝井義雄 (1994) : 後支笏カルデラ, 恵庭火山の最新の噴火活動, 火山, 第39巻, 第5号, pp.237-241.
- (52) 小疇尚・野上道男・小野有五・平川一臣編 (2003) : 日本の地形2 北海道, 東京大学出版会.
- (53) 松尾良子・中川光弘 (2017) : 北海道南西部ニセコ火山群, イワオヌプリ火山の形成史と活動年代, 日本地球惑星科学連合2017年大会講演要旨, SVC50-P13.
- (54) 奥野充 (2003) : ニセコ・イワオヌプリ, 大雪山・旭岳, 屈斜路・アトヌプリにおける最新噴火の年代学的研究, 文部省科学研究費重点領域研究 北海道における完新世火山の火山活動特性の評価 研究成果報告書, pp.13-23.
- (55) 大場与志男 (1960) : ニセコ火山群の岩石について, 地質学雑誌, 第66巻, pp.788-799.
- (56) 新エネルギー総合開発機構 (1986) : 昭和60年度全国地熱資源総合調査(第2次) 火山性熱水対流系地域タイプ①(ニセコ地域) 調査 火山岩分布年代調査報告書 要旨.
- (57) 新エネルギー総合開発機構 (1987) (1) : 昭和61年度全国地熱資源総合調査(第2次) 火山性熱水対流系地域タイプ①(ニセコ地域) 地熱調査成果図集.
- (58) 新エネルギー総合開発機構 (1987) (2) : 全国地熱資源総合調査(第2次) 火山性熱水対流系地域タイプ① ニセコ地域火山地質図1:50,000, ニセコ地域地熱地質編図1:100,000 説明書.
- (59) 日本地質学会編 (2010) : 日本地方地質誌1 北海道地方, 朝倉書店.
- (60) 児玉浩・宇井忠英・中川光弘 (1998) : ニセコ火山群の火山活動史, 日本岩石鉱物鉱床学会 平成9年度学術講演会予稿集, p.8.
- (61) 勝井義雄・岡田弘・中川光弘 (2007) : 北海道の活火山, 北海道新聞社.

- (62) 大原正則・宮本邦明・桑野修司・矢澤昭夫・山下伸太郎 (1990) : 桜島の溶岩流, 平成2年度砂防学会研究発表会概要集, pp.296-299.
- (63) 家田泰弘・大坪隆三・山下伸太郎・安養寺信夫・酒井敦章 (2009) : 桜島における昭和噴火時の溶岩流の数値シミュレーションによる再現, 平成21年度砂防学会研究発表会概要集, p.240.
- (64) 内閣府 (防災担当)・消防庁・国土交通省水管理・国土保全局砂防部・気象庁 (2013) : 火山防災マップ作成指針, pp.59-62.
- (65) 江草匡倫・中川光弘・藤田豪平 (2003) : 西北海道, 羊蹄火山の活動史: 埋積された古羊蹄火山の発見と噴出率の時間変化, 日本火山学会講演予稿集 2003年秋季大会, p.57.
- (66) 上澤真平・中川光弘・江草匡倫 (2011) : 南西北海道, 羊蹄火山の完新世噴火史の再検討, 火山, 第56巻, 第2・3合併号, pp.51-63.
- (67) 佐々木竜男・片山雅弘・富岡悦郎・佐々木清一・矢沢正士・山田 忍・矢野義治・北川芳男 (1971) : 北海道における腐植質火山灰の編年に関する研究, 第四紀研究, 10 (3), pp.117-123.
- (68) 柏原信 (1970) : 野幌丘陵南部における低位段丘堆積物の14C年代-日本の第四紀層の14C年代 (58) -, 地球科学, 24 (4), pp.149-150.
- (69) 藤山広武・田沼穰 (1972) : 十勝平野に分布する内陸古砂丘の14C年代-日本の第四紀層の14C年代 (72) -, 地球科学, 26 (3), pp.136-137.
- (70) 大貫康行・井島行夫・春日井昭・佐藤博明 (1997) : “N, U_{s-c}” 降下軽石層の14C年代-羊蹄火山のテフラとの層位関係について (115) -, 地球科学, 31 (2), pp.87-89.
- (71) 佐藤博之 (1969) : 最近測定された北海道の火山活動に関する14C年代測定, 地質ニュース, 178, pp.30-35.
- (72) 熊野純男 (1970) : 支笏熔結凝灰岩の年令-日本の第四紀層の14C年代 (57) -, 地球科学, 24 (4), pp.148-149.
- (73) Mogi, K. (1958) : Relations between the Eruptions of Various Volcanoes and Deformations of the Ground Surfaces around them., BULLETIN OF THE EARTHQUAKE RESEARCH INSTITUTE, Vol.36, pp.99-134.
- (74) Kozono, T., Ueda H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A. and Suzuki, Y. (2013) : Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. Bull Volcanol, 75, 695, pp.1-13.
- (75) 吉川周作 (1999) : 火山灰降灰層準について, 第四紀研究, 31, pp.43-50.
- (76) 宮本毅・中川光弘・長瀬敏郎・菅野均志・大場司・北村繁・谷口宏充 (2003) : 白頭山 (長白山) の爆発的噴火史の再検討, 東北アジア研究, 7, pp.93-110.
- (77) Nagaoka S (1988) : The Late Quaternary Tephra Layers from the Caldera Volcanoes in and around Kagoshima Bay, Southern Kyushu, Japan, Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University, 23, pp.49-122.
- (78) 井口正人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鐵郎・市川信夫 (2011) : 桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測2010年~2011年, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成22年度報告書

- (79) 東宮昭彦 (2016) : マグマ溜まり: 噴火準備過程と噴火開始条件火山, 61, pp.281-294.
- (80) 三好雅也・長谷中利昭・佐野貴司 (2005) : 阿蘇カルデラ形成後に活動した多様なマグマとそれらの成因関係について, 火山, 50, pp.269-268.
- (81) 春日井昭・木村方一・小坂利幸・松沢逸巳・野川潔 (1968) : 十勝平野に分布するいわゆる“帯広火山砂”について, 地球科学, 22巻, 3号, pp.137-146.
- (82) 春日井昭・石橋敦子・大貫康行・柏原信・鈴木久恵・田中秀樹・松田紘一 (1974) : 恵庭火山の降下軽石層-分布と層準についての改定-, 地球科学, 28巻, 4号, pp.115-127.
- (83) 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 pp.173-187.
- (84) 柏原信・広瀬保志・香河正人・管恵一・春日井昭・山岸一夫 (1976) : 羊蹄火山のテフラ-降下軽石・スコリア堆積物とその¹⁴C年代について-, 第四紀研究, 第15巻, 第2号, pp.75-86.
- (85) 宇井忠英編 (1997) : 火山噴火と災害, 東京大学出版会.
- (86) 八木一善・三浦清一 (2003) : 破砕性を有する火山灰土の力学特性とその評価法-北海道の火山灰地盤における検討-, 応用地質, 第44巻, 第3号, pp.142-153.
- (87) 鈴木建夫・勝井義雄・中村忠寿 (1973) : 樽前降下軽石堆積物Ta-b 層の粒度組成, 火山, 第18巻, 第2号, pp.47-63.

(WEB)

- (88) 産業技術総合研究所地質調査総合センター編 (2020) 20万分の1日本火山図 (ver. 1.0d), 産総研地質調査総合センター:
<https://gbank.gsj.jp/volcano/vmap/>
- (89) 産業技術総合研究所 日本の火山データベース:<https://gbank.gsj.jp/volcano/>
- (90) 気象庁 火山活動解説資料:https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly_vact.php
- (91) 防災科学技術研究所:https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/sokudo_kozo/
- (92) Forecasting Tephra Dispersion Using TEPHRA2:<http://www.cas.usf.edu/~cconnor/vg@usf/tephra.html/>