

第２回 雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会 議事次第

開催日時 : 平成２３年 ８月２９日 (月)

開催場所 : 雲仙岳災害記念館 １Ｆセミナー室

議事次第 :

１．開 会

２．挨 拶

島原市長 横田 修一郎

３．開会挨拶

雲仙復興事務所 所長 田村 圭司

４．検討次第

- (１) 前回の委員会討議結果
- (２) 溶岩ドーム崩壊シミュレーションモデルの選定
- (３) パラメータの設定
- (４) 溶岩ドーム崩落予測計算の実施
- (５) 溶岩ドーム崩壊による影響範囲

５．閉 会

休憩 (配置替えを含む)

６．記者発表会 (継続して行われます)

雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会 設置趣意書

雲仙・普賢岳は平成２年１１月１７日に１９８年ぶりに火山活動を再開し、その活発な噴火活動により火砕流が発生し４４人の尊い人命が奪われ、さらには降雨による土石流の発生により、地域生活や経済活動に長期にわたって甚大な被害を与えた。

雲仙復興事務所は、雲仙普賢岳の噴火活動中から現在まで、噴火災害により被害を受けた地域の安全を確保し、早急な災害対策を進め、地域復興に貢献するため、砂防堰堤、導流堤、監視体制の整備などを進めてきた。

現在、火山活動は終息しているものの、雲仙岳平成新山周辺には、噴火活動に伴い、溶岩ドームと呼ばれる巨大な岩塊群が不安定に存在し、崩落等の危険性が懸念されるため、溶岩ドーム崩落による影響を検討することとした。

検討にあたっては、溶岩ドーム崩落が火山学や地球物理学からも稀な現象であり、火山防災および砂防に関する高度な学術的知見が不可欠であるため、学識経験者から構成される「雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会」を設置することとする。

「雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会」規約

第1条（趣旨）

この規約は、「雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会」（以下「委員会」という。）の設置について必要な事項を定める。

第2条（目的）

本委員会は、溶岩ドーム崩落による影響を検討することを目的とする。

第3条（組織）

委員会は、事務局が設置する。

- 2 委員会の委員は、事務局が委嘱する。

第4条（委員長）

委員会に委員長を置くこととし、委員の互選によりこれを定める。

- 2 委員長は、委員会の運営と進行を総括する。
- 3 委員長に事故があった場合には、委員長が予め委員の中から指名する者が職務を代行する。

第5条（委員会）

委員会は、委員長の了解を得て事務局が招集する。

- 2 委員の任期は原則として2年とし、再任を妨げない。
- 3 委員会は、委員総数の2分の1以上の出席をもって成立する。

第6条（公開）

委員会の公開は、傍聴を認めることにより行うものとする。

- 2 特段の理由がある場合は、委員会の判断により非公開とすることができる。

第7条（オブザーバー）

雲仙岳平成新山周辺の地元関係機関を委員会のオブザーバーとする。

- 2 委員会に参加するオブザーバーは、委員会の提言等をふまえ、必要に応じて事務局が変更するものとする。

第8条（事務局）

委員会の事務局は、国土交通省 九州地方整備局 雲仙復興事務所に置く。

第9条（規約の改正）

本規約の改正は、委員総数の3分の2以上の同意を得てこれを行う。

第10条（雑則）

この規約に定めるもののほか、委員会の運営に関し必要な事項は、委員会に諮って定める。

附則（施行期日）

この規約は、平成23年 3月18日より施行する。

第2回 雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会
委員名簿

(順不同・敬称略)

委員	小橋 澄治	京都大学 名誉教授
	太田 一也	九州大学 名誉教授
	中村 浩之	東京農工大学 名誉教授
	蔣 宇静	長崎大学工学部社会開発工学科教授 (今回欠席)
	清水 洋	九州大学大学院理学研究院附属 地震火山観測研究センター 教授
	里深 好文	立命館大学工学部都市システム工学科 教授
	山田 孝	三重大学大学院生物資源学研究科 教授 (今回欠席)
	田村 圭司	九州地方整備局 雲仙復興事務所 所長

【オブザーバー】

	松永 守	長崎県 土木部砂防課 課長
	武末 和博	長崎県 危機管理監危機管理課 課長
	江口 道信	長崎県 島原振興局 局長
	横田 修一郎	島原市 市長
	渡部 博	南島原市 総務部総務課 課長
	大園 和典	雲仙市 市民生活部市民安全課 課長
	中原 一則	林野庁 長崎森林管理署 署長
	井野 常雄	林野庁 九州森林管理局治山課 治山技術専門官
	加藤 雅寛	環境省 九州地方環境事務所 雲仙自然保護官事務所 自然保護官
	山内 博	福岡管区气象台 総務部業務課 火山監視・情報センター長
	島本 卓三	九州地方整備局 河川部 地域河川調整官

【事務局】

国土交通省九州地方整備局 雲仙復興事務所

第2回

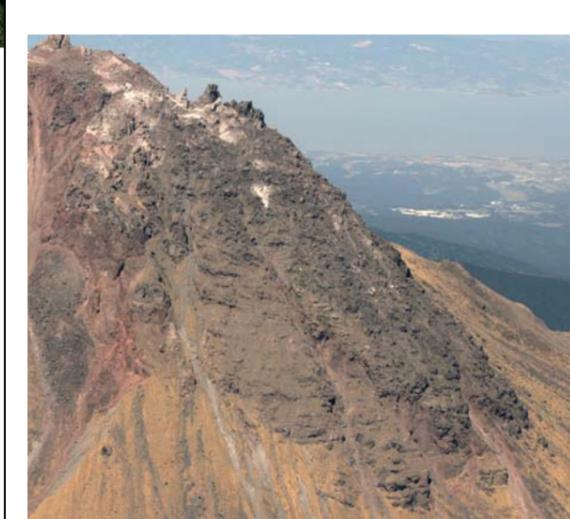
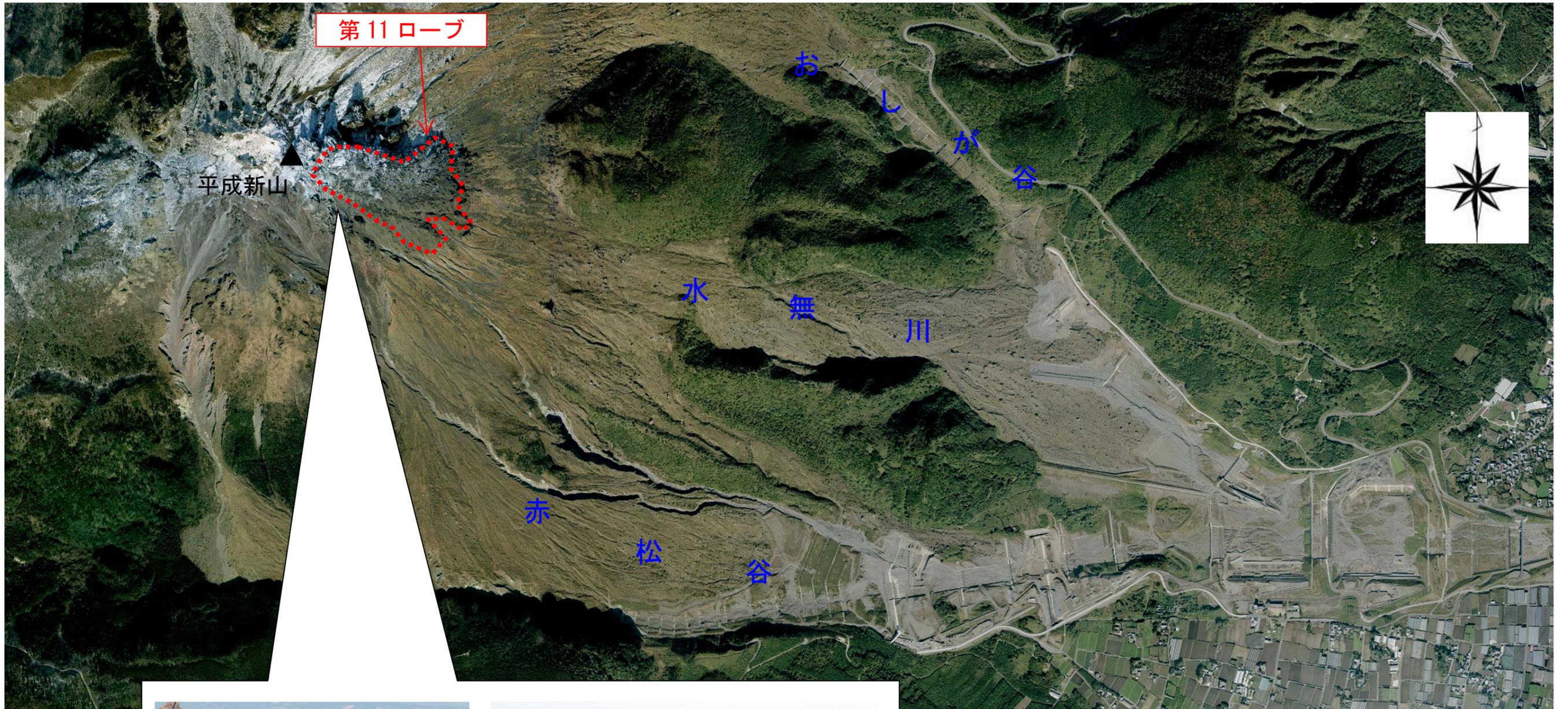
雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会

討議資料

平成 23 年 8 月 29 日

雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会





南側より撮影



北側より撮影

雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会
第2回 討議内容

(1) 前回の委員会討議結果



(2) 溶岩ドーム崩壊シミュレーションモデル
の選定



(3) パラメータの設定
(H3.6.8の岩塊流れの再現計算による)



(4) 溶岩ドーム崩壊予測計算の実施



(5) 溶岩ドーム崩壊ハザードマップの作成



溶岩ドーム崩壊ハザードマップで、現在の砂防施設整備状況での溶岩ドーム崩壊規模とその影響範囲を示す。

<目 次>

1 前回の委員会討議結果	1
2 溶岩ドーム崩壊シミュレーションモデルの選定	2
2.1 DDA 等の不連続変形法モデルの適用可能性	3
2.2 連続体モデル	6
3 パラメータの設定	10
3.1 再現計算の崩壊流量の検討	10
3.2 H3.6.8 岩塊流れ再現計算のパラメータ設定	12
3.3 再現計算結果	13
4 溶岩ドーム崩壊予測計算の実施	14
5 溶岩ドーム崩壊ハザードマップの作成	15

1 前回の委員会討議結果

(1) 開催日時および出席者

日 時：平成23年3月18日（金） 13:00～14:00

場 所：雲仙復興事務所 3F 会議室

出席者：小橋委員長、太田委員、中村委員、蔣委員、里深委員、山田委員、田村委員

（オブザーバー）松守氏、武末氏、古賀氏、横田氏、中島氏、関氏、中村氏、藤田氏、加藤氏、溝上氏

(2) 第1回委員会での討議事項

溶岩ドームの現状と今後想定される現象について討議が行われた。

- ・ 光波計測状況の確認
- ・ 現地調査による不安定要因の確認
- ・ 不安定岩塊の安定性評価
- ・ 溶岩ドーム形成過程から見た崩壊メカニズム

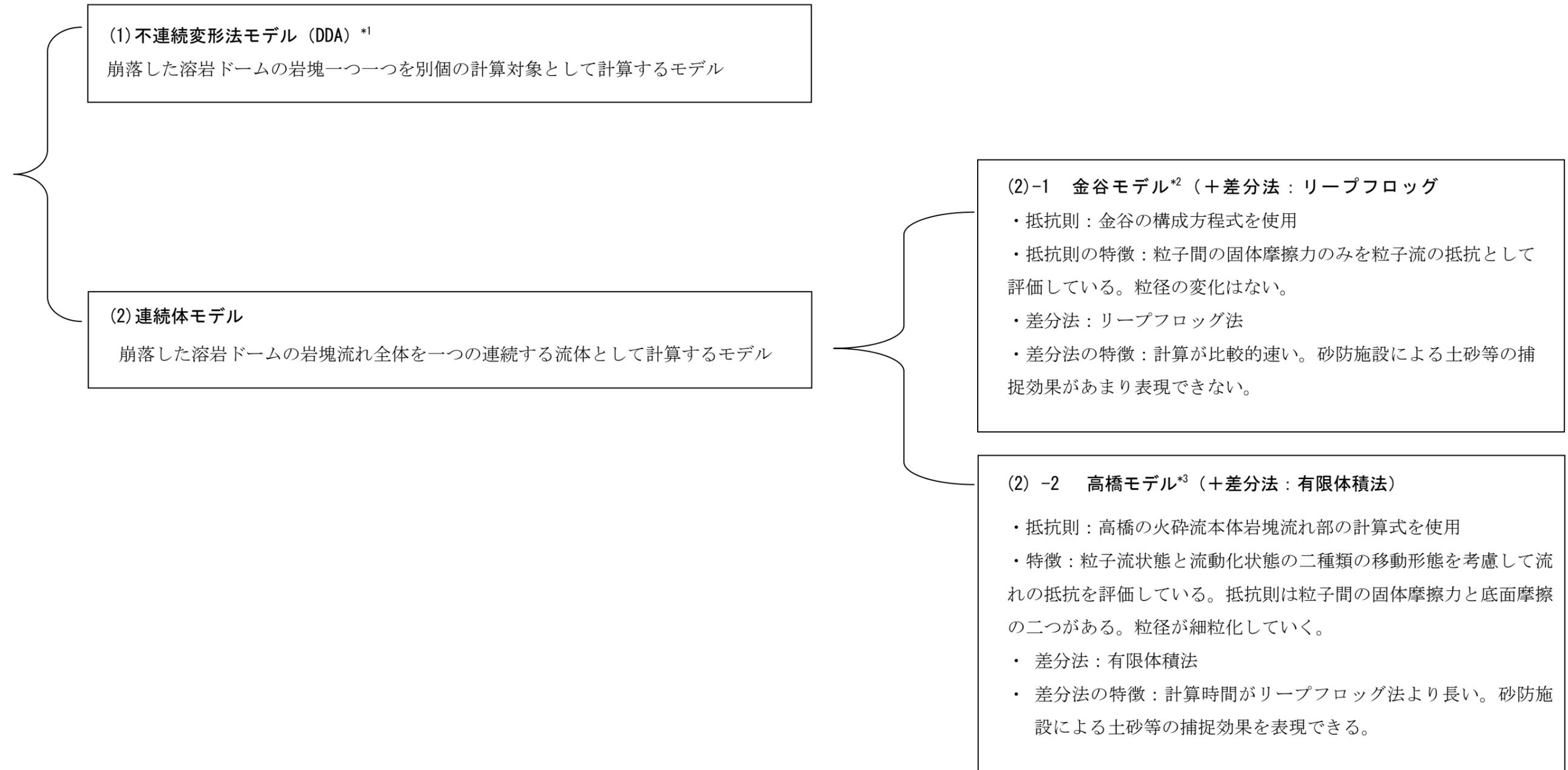
(3) 討議内容

項目		委員からのご意見	事務局対応
溶岩ドームの安定性に関する意見	光波観測結果について	変位の原因は下部の崖錐堆積物（溶岩下部の火砕流堆積物）が締まってきているためと考えている。（太田委員）	溶岩ドームの安定性として、目視で確認できる亀裂部、溶岩ドーム内のせん断破壊が生じる弱面、および溶岩ロープの境界面等を参考に、5つの崩壊パターンを想定する。
		ガスが抜けて山体が縮むイメージは理解できる。しかし、年間4cmをどう理解するかが難しい。通常の崩壊の場合は、変位が加速するが、現在は少なくとも一定という状況である。（小橋委員長）	
	今後想定される現象について	地山（噴火前の地形）は破壊されない想定だが、もともと割れ目が多い地質であることから、破壊されることも想定する必要があるのではないかと。（里深委員）	
		噴火時に破壊されるものは溶岩の流下により破壊されていると考えられるので、地山の破壊まで考える必要はない。（太田委員）	
		材料の観点から考えるとブロック内はセグメント的には固着している可能性はある。ブロックとブロックの境界が弱面となりえる。（蔣委員）	
溶岩の多孔質（自破碎部）な部分は上載荷重で変形していることが想定される。（中村委員）			
今後の検討方針に関する意見	崩壊岩塊のシミュレーションを行う際は物性値の取り方などが非常に難しい。（小橋委員長）	シミュレーションモデルを選定し、H3.6.8の岩塊流れの再現計算を行い、パラメータを設定して物性値を決めていく。	
その他の意見	溶岩ドーム表面に見える大きな亀裂の発達状況を調査した結果はあるか。（山田委員）	現時点で調査結果はない。	

2 溶岩ドーム崩壊シミュレーションモデルの選定

溶岩ドーム崩壊の影響範囲予想計算を考えると、不連続変形法モデルと連続体モデルがある。

溶岩ドーム崩壊の影響範囲の検討モデルとして以下の3モデルを対象とする。



*1 日本計算工学会(2005)：不連続変形法 (DDA) ，丸善

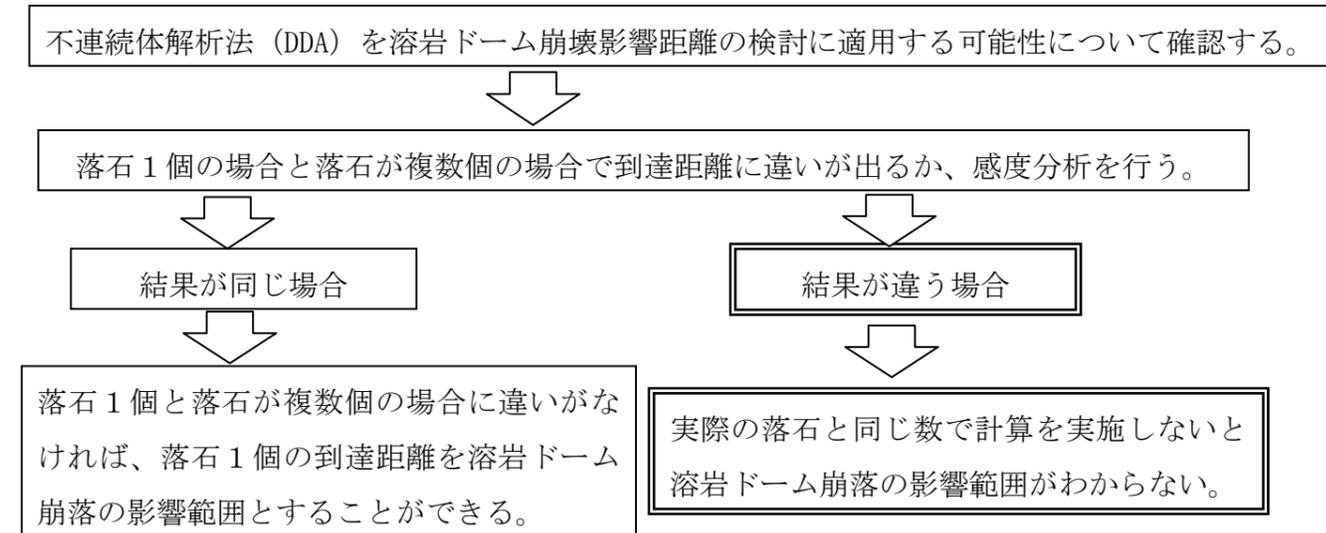
*2 金谷健一(1979)：粒状体の流動の基礎理論 (第2報、発達した流れ) ，日本機会学会論文集 (B) 45-392, p515-522

*3 高橋保(2006)：土砂流出現象と土砂害対策，近未来社, p101-134

2.1 DDA 等の不連続変形法モデルの適用可能性

DDA の二次元計算で溶岩ドーム付近から落石（八角形）を自由落下させて、その到達距離を確認した。

(1) 検討の流れ



(2) 地形モデル

DDA の二次元計算に用いた溶岩ドーム付近から国道 57 号までの地形モデルを以下に示す。

(3) パラメータの概要

DDA の二次元計算のパラメータ概要を以下に示す。

表- 2.1 DDA のパラメータ概要

対象	パラメータ	概要
岩塊	弾性係数	岩塊に力が加わったときの岩塊自身が縮む比率。
	ポアソン比	荷重方向ひずみと荷重に直角方向ひずみの比。
	単位体積重量	岩塊の単位体積重量。
	粘性係数	岩塊自身の振動によるひずみ減衰、空中にある状態でのブロックへの空気抵抗を示す。
岩塊・地盤	摩擦角	岩塊ブロックと地盤の間で生じる摩擦により岩塊が停止する角度。
	速度エネルギー比	岩塊が地盤に衝突した際のエネルギー損失を示す。反発係数に類似したパラメータ。入射速度の 2 乗と反発速度の 2 乗の比。
	ペナルティ係数	地盤が有する反発条件。地盤に岩塊が食い込んだときに食い込んだ量を 0 に戻すばね力の係数。

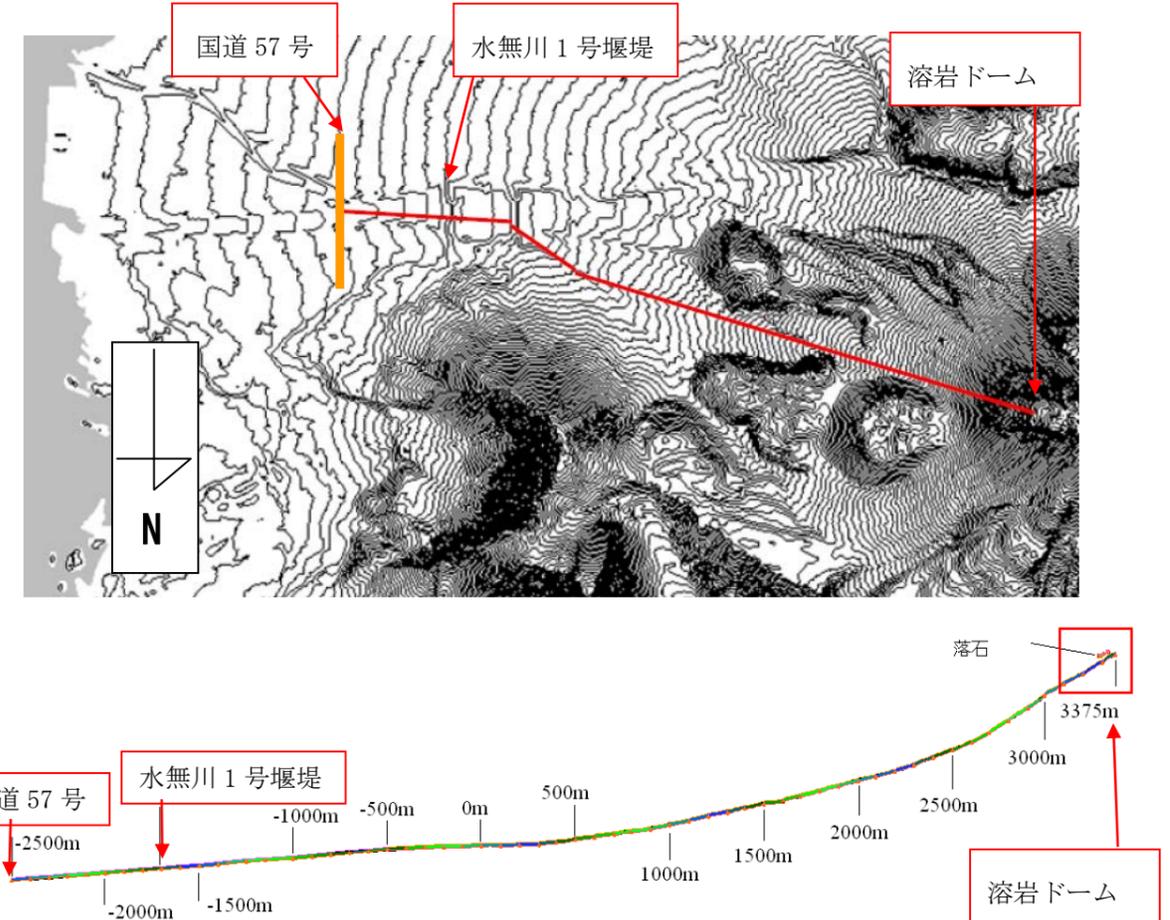


図- 2.1 二次元 DDA モデル（平面図の赤線は縦断測線を示す）

(4) 落石 1 個による到達範囲検討

崩落岩塊が 1 個の場合での到達距離を確認するため落石計算を行った。検討ケースは、パラメータを一般値に設定したもの (Case-1)、Case-1 より落石が転がりやすく過剰な値にパラメータを設定したもの (Case-2)、最も転がりやすくさらに過剰な値にパラメータを設定したもの (Case-3) の 3 ケースとした。

表- 2.2 落石 1 個による検討ケース一覧

対象	パラメータ	Case-1	Case-2	Case-3	備考
岩塊	レキ数		1		寸法：16m×16m 1個
	岩塊弾性係数 (GPa)		1		基盤岩の一般値。
	岩塊ポアソン比		0.3		一般値
	岩塊単位体積重量 (kg/m ³)		2600		池谷ら (1992) *1 の堆積物調査結果より
	粘性係数	0.05	0.03	0.01	値が小さいほど転がる。0.05 は一般値。
岩塊 ・ 地盤	摩擦角 (°)		30	20	値が小さいほど転がる。30° は一般値。
	速度エネルギー比		0.81	0.9	値が大きいくほどよく転がる。0.81 は一般値。
	ペナルティ係数*2 (GPa/m)		1		火砕流堆積物だと基盤岩に比べて軟らかいため転がりにくいが、ここでは転がりやすい基盤岩の値 1 GPa/m を設定。
	計算時間間隔 (秒)		0.005		
	備考	一般値	Case-1 より転がり易い	最も転がり易い	

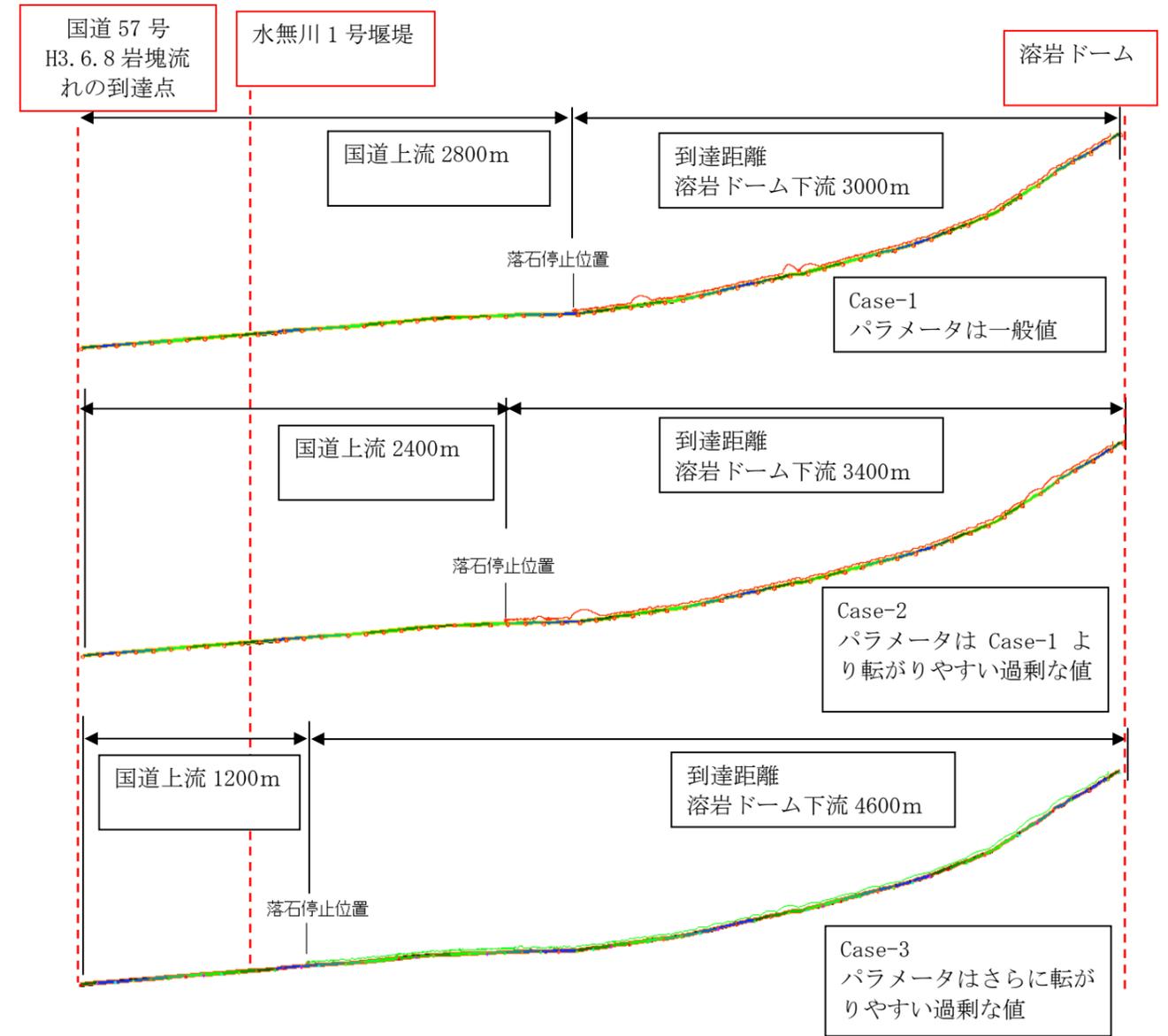


図- 2.2 落石 1 個の DDA 二次元計算結果

* 地形条件に既設砂防堰堤は反映されていない (無施設の地形条件)

・落石 1 個の場合、パラメータを一般値と比べて転がりやすい値に設定しても、H3.6.8 の火砕流本体岩塊流れの到達範囲を再現することができない。

*1 池谷浩・石川芳治(1992)：雲仙普賢岳で発生した火砕流、土石流災害 (第 2 報)，土木技術資料, vol. 34、No. 6, p52-59

*2 島内哲哉ほか(2011)：DDA による落石解析のための解析パラメータ設定法に関する研究, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, p294-298

(5) 複数の落石（9個）による到達範囲検討

崩落岩塊1個と、複数の場合で到達距離が変わるか確認するため9個の落石計算を、1個の場合と同様のパラメータで行った。

表- 2.3 落石9個による検討ケース一覧

対象	パラメータ	Case-4	Case-5	Case-6	備考
岩塊	レキ数		9		寸法：16m×16m 1個 10m×10m 8個
	岩塊弾性係数 (GPa)		1		基盤岩の一般値。
	岩塊ポアソン比		0.3		一般値
	岩塊単位体積重量 (kg/m ³)		2600		池谷ら（1992）の堆積物調査結果より
	粘性係数	0.05	0.03	0.01	値が小さいほど転がる。 0.05は一般値。
岩塊 ・ 地盤	摩擦角 (°)		30	20	値が小さいほど転がる。 30°は一般値。
	速度エネルギー比		0.81	0.9	値が大きいほどよく転がる。 0.81は一般値。
	ペナルティ係数 (GPa/m)		1		火砕流堆積物だと基盤岩に比べて軟らかいため転がりにくいが、ここでは転がりやすい基盤岩の値1GPa/mを設定。
	計算時間間隔 (秒)		0.005		
	備考	一般値	Case-4より 転がり易い	最も転がり易い	

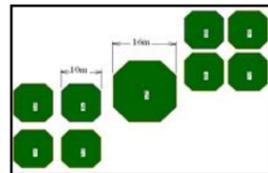


図- 2.3 二次元 DDA モデルの落石形状（落石形状—8 角形）

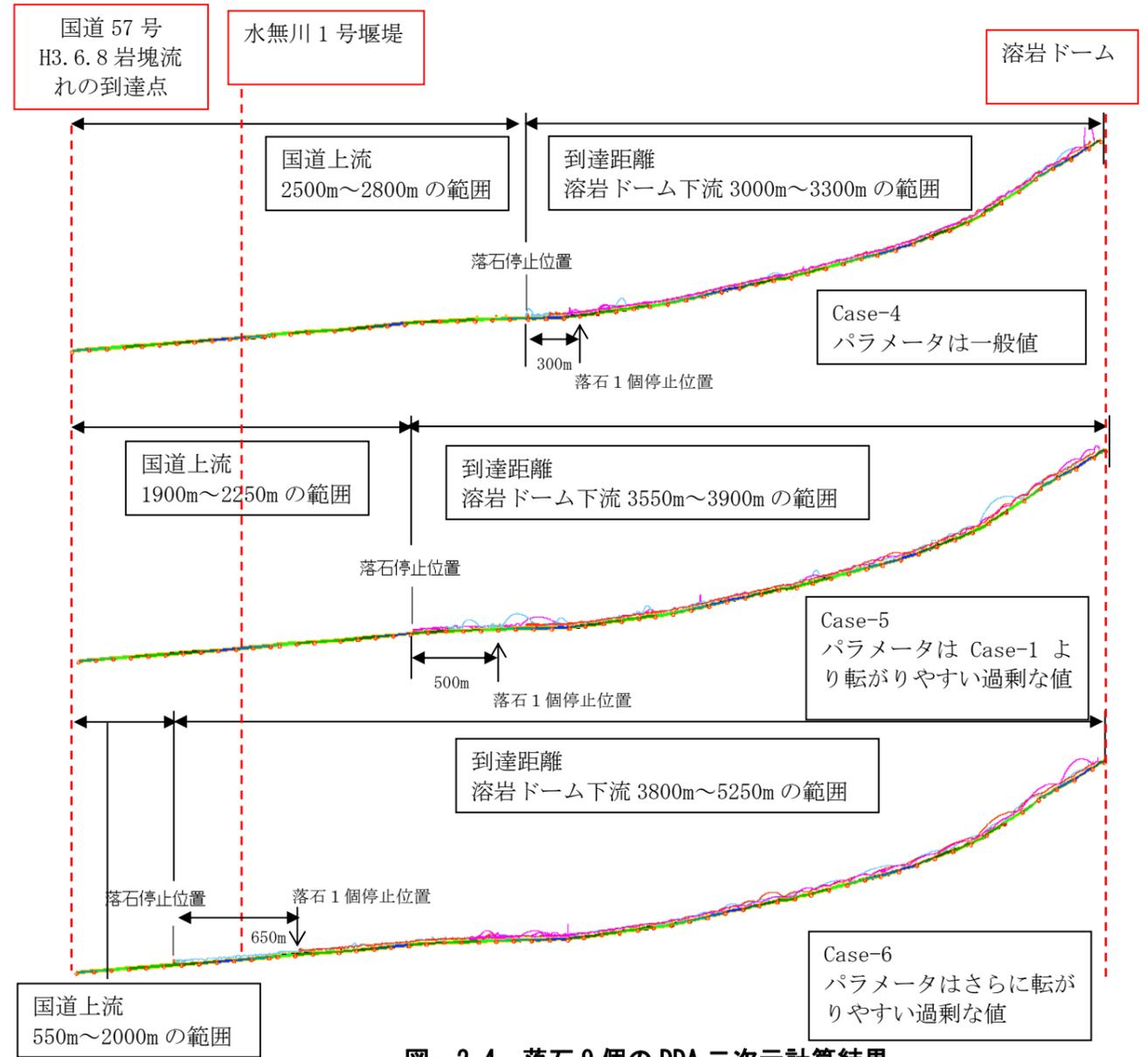


図- 2.4 落石9個の DDA 二次元計算結果

* 地形条件に既設砂防堰堤は反映されていない（無施設の地形条件）

- ・ 落石を9個にした場合、落石1個の場合と比べ、落石同士で反発することで到達距離が伸びるが、転がりやすいパラメータに設定してもH3.6.8岩塊流れの到達範囲を再現できない。
- ・ 落石個数を増やすことで到達範囲が広がると考えられるが、溶岩ドーム崩落計算の対象現象は、最小規模が768万m³であり、落石寸法を一辺10mの立方体とすると7680個となる。現在のモデルでは、7680個の計算時間は1000日程度と予測される。



溶岩ドーム崩壊のように大量の土砂の解析については、不連続体解析法による計算は現実的ではない。

2.2 連続体モデル

連続体モデルには、抵抗則と差分法の組合せから、4つのパターンがあるが、今回の検討では、最も実現象と整合がとれ、合理的と考えられる「抵抗則：高橋モデル」と「差分法：有限体積法」の組合せを採用する。

表- 2.4 連続体計算モデルの組合せ

	差分法 抵抗則	リーブフロッグ法 (陽解法)	有限体積法 (陰解法)
簡易な計算モデル	金谷モデル	○	
合理的な計算モデル	高橋モデル		◎

(1) 抵抗則モデルの比較

金谷モデル：溶岩ドーム崩壊から流下・氾濫まで岩塊流の粒径が変化しない。
また、流下形態も一定で抵抗則のモデルも変化しない

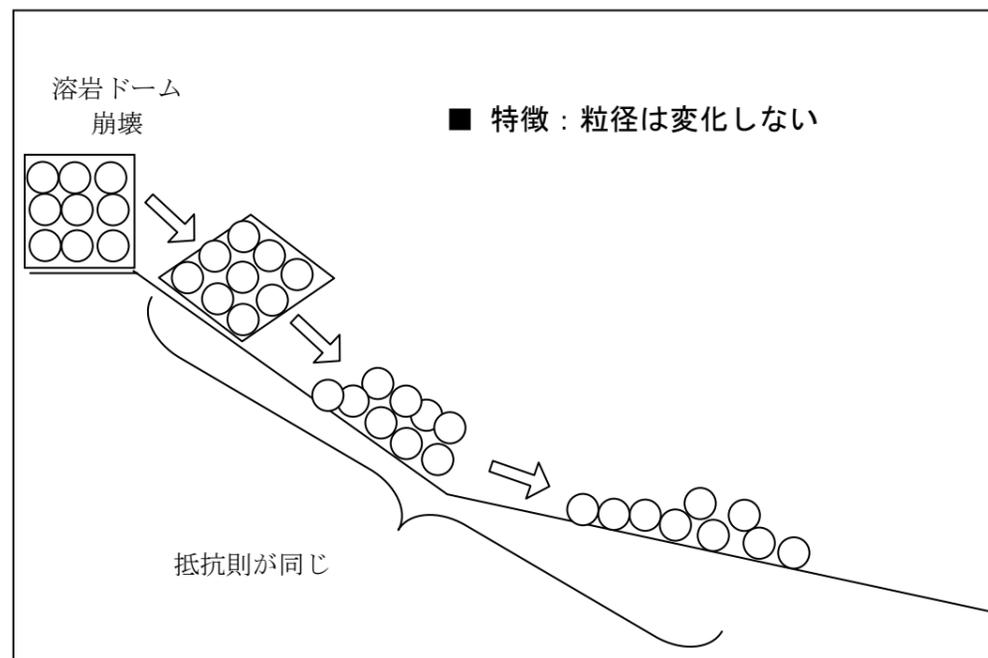


図- 2.5 金谷モデルの概念図

抵抗則の式を下記に示す。

$$\tau_{0x} = \frac{3}{32\sqrt{10}} \frac{c^{4/3}}{[1-(c/c_*)^{1/3}]} T_e \sigma \mu d^2 \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^2} \quad (1) \text{式}$$

ここに c : 砂礫の濃度、 c_* : 充填状態の粒子濃度 (堆積土砂濃度)、 σ : 砂礫の密度、 μ : 粒子間摩擦係数、 d : 砂礫の直径、 T_e : 定数、 u : X方向流速、 v : Y方向流速

高橋モデル：溶岩ドーム崩壊から流下・氾濫にいたる過程での岩塊の衝突による細粒化が表現されている。

溶岩ドーム崩壊直後は粒子流状態で流下するが、岩塊が細粒化し、平均粒径がある値以下になると流動化状態に変化し、抵抗則も変わる。

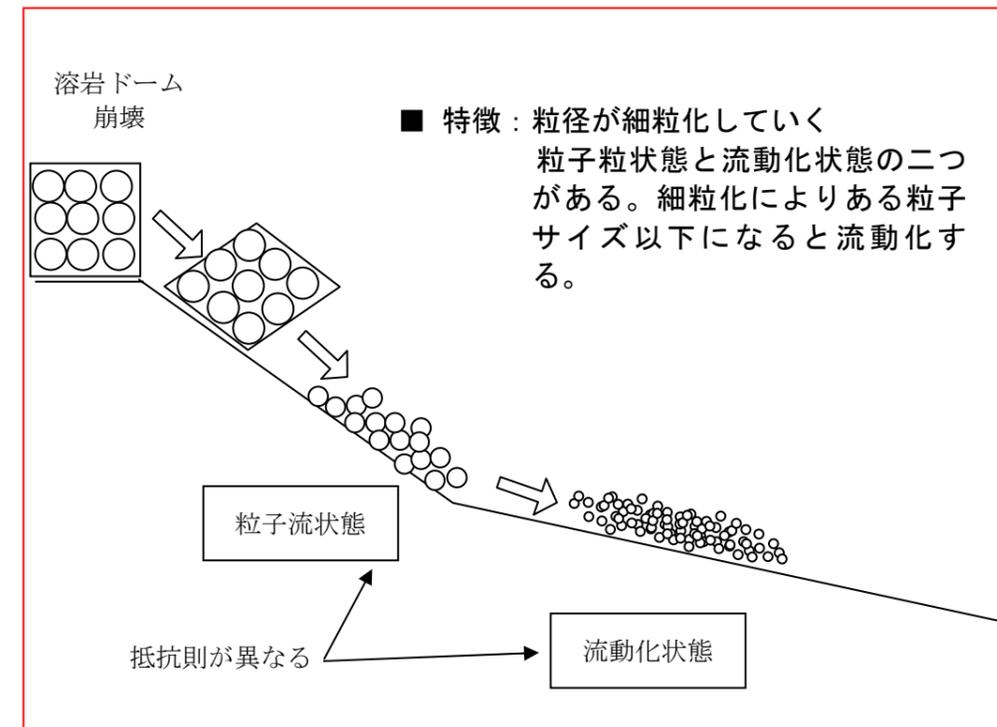


図- 2.6 高橋モデルの概念図

抵抗則の式を下記に示す。

■ 粒子流状態

$$\tau_{bx} = \alpha_s \rho_m g H_f \cos \theta_x \tan \phi + \rho_m f U_f \sqrt{U_f^2 + V_f^2}$$

$$\tau_{by} = \alpha_s \rho_m g H_f \cos \theta_y \tan \phi + \rho_m f V_f \sqrt{U_f^2 + V_f^2}$$

流体内で形成される
流体と底面の摩擦によっ
骨格構造による抵抗
て発生する抵抗

この時、

τ_{bx} 、 τ_{by} : X方向、Y方向の底面せん断力

α_s : 全圧力の静的圧力によって支えられている割合。火砕流の濃度によって以下の式で与えられる。

$$\alpha_s = 0 \quad : C \leq C_{smin}$$

$$\alpha_s = \left(\frac{C - C_{smin}}{C_* - C_{smin}} \right)^{n_s} \quad : C_{smin} \leq C \leq C_*$$

$$\alpha_s = 1 \quad : C_* \leq C$$

この時、

C : 火砕流の濃度 C_{smin} : 火砕流内で骨格構造が形成される濃度 m_n : 定数

ρ_m : 火砕流密度 g : 重力加速度 H_f : 本体部流動深 θ_x, θ_y : 堆積層表面の勾配 ϕ : 内部摩擦角

f : 底面の抵抗を示す係数。以下の式で与える

$$f = \frac{25}{4} \frac{K}{C_m} \left(\frac{d_p}{H_f} \right)^2$$

この時、

$$K = \frac{4\sqrt{15}(1+e)C_m^2 g_0}{75\sqrt{\pi}(1-e)} + \frac{1}{3g_0\sqrt{15\pi}(1-e)}$$

この時、

e : 礫の反発係数 C_m : 濃度に応じて定められる係数 0.51~0.56

$$g_0 : \text{濃度を示す関数} \quad g_0 = \left\{ 1 - \left(\frac{C}{C_s} \right)^{1/3} \right\}^{-1}$$

d_p : 代表粒径

U_f, V_f : x方向、y方向の流速

■流動化状態

$$\tau_{bx} = \rho_m f U_f \sqrt{U_f^2 + V_f^2}$$

$$\tau_{by} = \rho_m f V_f \sqrt{U_f^2 + V_f^2}$$

流体と底面の摩擦によって発生する抵抗

この時、

f : 底面の抵抗を示す係数。以下の式で与える

$$f = \kappa^2 \left\{ \left(1 + \frac{\pi^2}{8} - \frac{\pi}{2} \right) \frac{h_f}{H_f} - \ln \frac{h_f}{H_f} + \frac{\pi}{2} \right\}^{-2} \quad : h_f \leq H_f$$

$$f = \kappa^2 \left(1 + \frac{\pi^2}{8} \right)^{-2} \quad : h_f > H_f$$

この時、 κ : 流れのスケールを示す定数 (カルマン定数)

$$h_f : \text{本体部底層の密度が濃い層の厚さ} \quad h_f = \frac{g d_p^2 \cos \theta}{1650 b \nu C}$$

この時、

b : 粒子の単位質量当たりに噴出するガス量 ν : ガスの動粘性係数

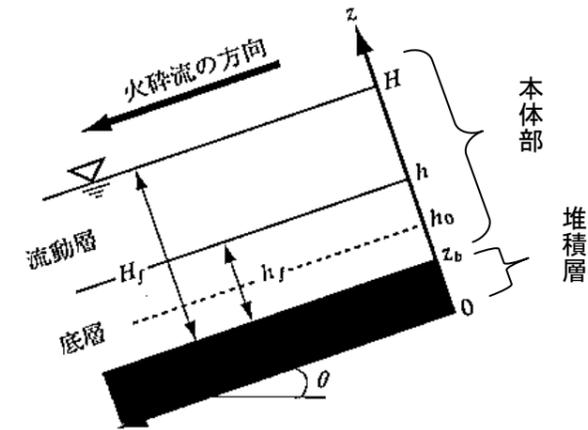


図- 2.7 高橋モデルにおける流動化状態の火砕流モデルの層の概念図

設定の必要なパラメータは

金谷モデル : 粒子間摩擦係数

高橋モデル :

粒子流状態 : 流体内で形成される骨格構造による抵抗 (ϕ, C_{smin}, m_n)

流体と底面の摩擦によって発生する抵抗 (e)

流動化状態 : 流体と底面の摩擦によって発生する抵抗 (κ, b, γ)

となり、高橋モデルの方が設定可能なパラメータが多くより実現に近い抵抗則を再現可能であると考えられる。各パラメータについては、高橋ら (2006) *により、H3.6.3 雲仙普賢岳火砕流本体の岩塊流れの再現計算に用いた値の整理がされている。

表- 2.5 高橋 (2006) *による H3.6.3 雲仙普賢岳火砕流本体の岩塊流れ再現計算時のパラメータ

記号	意味	高橋の設定値	単位	数式への影響
df	初期代表粒径	5m	m	粒子流と流動の状態変化に関係
d_{fp}	代表粒径がこの値を下回った時点で流動化状態とする閾値	1mm	mm	
C_{smin}	濃度がこの値を超えた時点で格子構造による抵抗が発生するとする閾値	0.51	-	粒子流状態時の抵抗に影響
Mn	格子構造による抵抗力にかかる係数	0.5	-	
e	礫の反発係数	0.8	-	流動化状態時の抵抗に影響
b	ガス発生率	0.0001	/s	
ν	ガスの動粘性係数	0.0002	-	
κ	底面の抵抗を示す係数	0.7	-	

*高橋保(2006) : 土砂流出現象と土砂害対策, 近未来社, p101-134

二つのモデルを比較すると、

- 崩落した岩塊流が細粒化していくのを評価可能である。実際、平成3年に発生したいくつかの火砕流において、下流まで流下し堆積した土砂は細粒化していたという証言が得られている。
- 岩塊流の細粒化により、粒子流状態から流動化状態への切り換えが評価可能である。流動形態が変わることで抵抗則も変化する。
また、粒子流状態、流動化状態それぞれの状態に対応した複数のパラメータが設定可能で、実現象に応じた柔軟な設定が可能である。

という二点から、高橋モデルの方が合理的であると考えられる。

(2) 差分法の比較

陽解法の特徴(リ-フ-フロッグ法)

- 時刻 t における値を基にして時刻 $t + \Delta t$ の値を代数的に求め、それを繰り返して時系列を進めていく計算手法。
- 未知数が少なく、代数的に順々に解を求めるため、 Δt 増分当たりの計算量が少なく、計算機の必要メモリ容量も比較的少ない。
- 一般的に、衝突、落下問題などの非線形性が強く、短い時間で起こる現象の解析に適する。

陰解法の特徴(有限体積法)

- 時刻 $t + \Delta t$ における値を仮定し、その仮定値の正否を時刻 t における値との関係式より調べて、誤差がゼロになるように仮定値を収束させて求め、それを繰り返して時系列を進めていく計算手法。
- 未知数が多く、既知数を連立して方程式を解く必要があるため、1時間増分当たりの計算量が多く、計算機の必要メモリ容量が比較的多い。
- 陽解法に比べて静的、準静的な問題、動的な問題でも比較的長い周期で振動するような問題の解析に適する。

陽解法・陰解法にはそれぞれ長所・短所があるが、流体としてモデルを扱う場合については陰解法の方が適していると考えられる。

(参考) 施設効果評価精度の比較

H3.6.8 に発生した火砕流の中を転がる岩塊の流れの再現計算によってパラメータの設定を行った上で、二つのモデルで同条件でのサンプル計算を行った例を下記に示す。

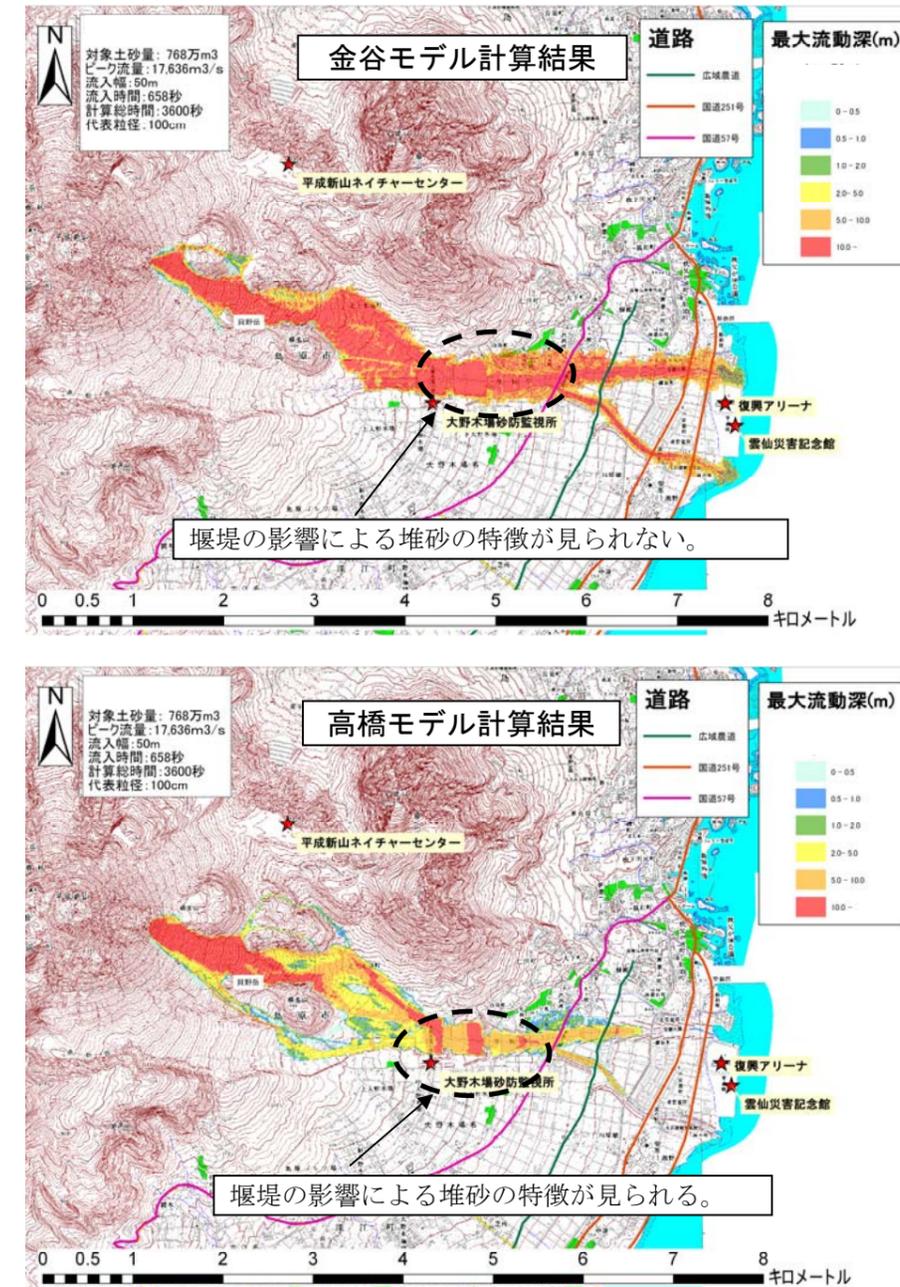


図- 2.8 連続体モデルの計算結果比較

施設効果による堆積形状の変化は高橋モデルの方がよく再現できていると考えられる。

各モデルの比較を以下に示す

表-2.6 各モデルの比較

比較項目	不連続体モデル	連続体モデル	
	不連続変形法 (DDA)	金谷モデル	高橋モデル
モデル	岩塊個別の動きを把握することができるモデル 個々のブロックの幾何形状・荷重条件・材料定数とブロック接触部での力学材料定数より、ブロックの応力・ひずみ・すべり・接触力・運動が計算される。	抵抗則により岩塊流れの動きを表現する連続流体モデル 溶岩ドーム崩壊から流下・氾濫まで岩塊流の粒径が変化せず、流下形態も一定で抵抗則のモデルも変化しない。	抵抗則により岩塊流れの動きを表現する連続流体モデル 高橋により提案されたモデルにより、 <u>崩落後の岩塊の細粒化を表現し、粒径によって粒子流状態から流動化状態への切り換えが可能。抵抗則も変化する。</u>
評価	○	△	○
パラメータの設定	摩擦角、粘着力、粘性係数、ポアソン比等のほか、岩塊の接触時のエネルギー減衰比の設定などパラメータが多く細かい設定が可能	パラメータが少なく、実現象に応じた細かい調整が難しい。	粒子流状態、流動化状態それぞれの状態に対応した複数のパラメータが設定可能で、実現象に応じた柔軟な設定が可能である。
評価	○	△	○
計算時間	岩塊の個数が増えると膨大な計算時間がかかり、現実的には個数の少ない粗いモデルでしか計算できない。(現実的に可能なのは礫径 100mの岩塊で 200 個未満程度)	計算時間は数時間～数日。	計算時間は数時間～数日。
評価	×	○	○
実績	溶岩ドーム崩壊のように大規模現象を扱った実績がない。(研究レベルでは、データ数 10～100 個程度での計算が一般的で実績もある)	火砕流本体岩塊流れの再現計算で実績は多い。	高橋ら (2006) により、H3. 6. 3 雲仙普賢岳火砕流本体の岩塊流れの再現計算に用いた値の整理がされている。
評価	×	○	○
(参考) 施設効果評価	未整理	施設効果による堆積形状の変化の表現の精度は高橋モデルに劣る。	施設効果による堆積形状の変化をよく再現できている。
評価	—	△	○
総合評価	△	○	◎

今回検討したモデルの中では、連続体モデル：高橋モデルの使用が合理的であると考えられる

3 パラメータの設定

2章の検討により、溶岩ドームの崩落影響範囲の検討に連続体モデル「高橋モデル」を使用することとする。パラメータ設定のためのキャブレションの対象として H3.6.8 に発生した火砕流の中を転がる岩塊の流れを選択した。

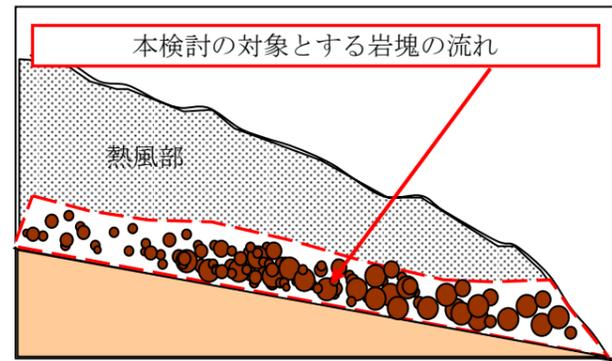


図- 3.1 本検討の対象とする岩塊の流れの概念図

3.1 再現計算の崩壊流量の検討

高橋モデルで再現計算検討を行うにあたり、以下の手順で溶岩ドーム崩壊流量波形の設定を行った。

H3.6.8 に発生した火砕流の気象庁観測資料*1 より、以下のことが判明している。

- ・6/8 の振動計の最大継続時間の実績 (1500 秒=25 分)
- ・既往研究ビデオ解析結果*2 より岩塊流れの平均流速 20m/ s

振動計の記録より、岩塊の流れが流下した時間の合計が 1500 秒であり、この時間を

- ・溶岩ドームが崩壊し岩塊流れが供給され続ける時間
- ・溶岩ドームの崩壊が終わった後最後の岩塊が最下流点まで流下するのにかかる時間

とに分けられると考えられる。

到達距離 5.5 km (地獄跡火口から国道 57 号上流までの直線距離) を平均流速で流下するのに 約 5 分かかると計算される。崩壊が終了し、岩塊流れの供給が止まった段階から、最後に供給された岩塊流れが最下流まで流れて止まるまでを 5 分とし、20 分(25-5)の間、ドームが崩壊して岩塊の流れが発生すると仮定した (表-3.1、図-3.2 参照)。

この 20 分で実績流出土砂量 350 万 m³ が流下する矩形の溶岩ドーム崩壊流量波形を設定した (表-3.2、図-3.3 参照)。

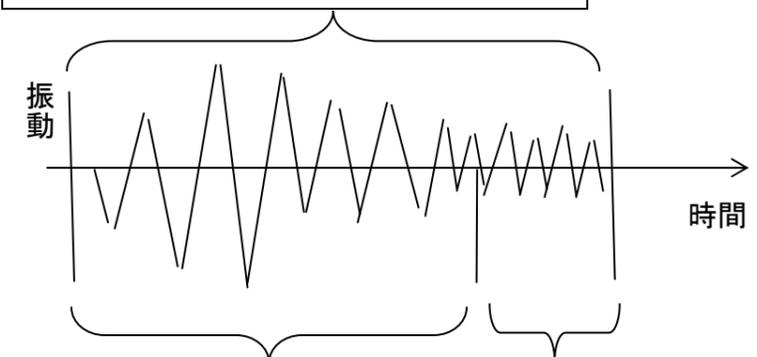
*1 福岡管区気象台(1996)：雲仙・普賢岳の火山活動報告, 福岡管区気象台要報, 第 51 号, p64-65

*2 宝田晋治ほか(1992)：雲仙岳 1991 年噴火の火砕流, 地質調査所月報, Vol. 43, No. 6, p409-410

表- 1.1 岩塊の流れ流出時間 (溶岩ドーム崩壊時間) の整理

項目	数値	根拠
① 岩塊の流れが移動し続ける時間 (分) (振動計が振動を検知した継続時間)	25	気象庁資料：平成 3 年 6 月 8 日 19 : 51 発生
② 岩塊流れ流入点から流下最下流点までの距離 (m)	5, 500	気象庁資料：地獄跡火口から国道 57 号上流までの直線の到達距離
③ 岩塊流れ速度 (m/ s)	20	地質調査所 VTR 解析結果 (10~30m/s) の平均
④ 流入点から最下流点まで流下するのにかかる時間 (分)	5	④=②/③=275 秒÷5 分
⑤ 溶岩ドーム崩壊時間 (分) (流入点から岩塊流れが供給され続ける時間)	20	⑤=①-④

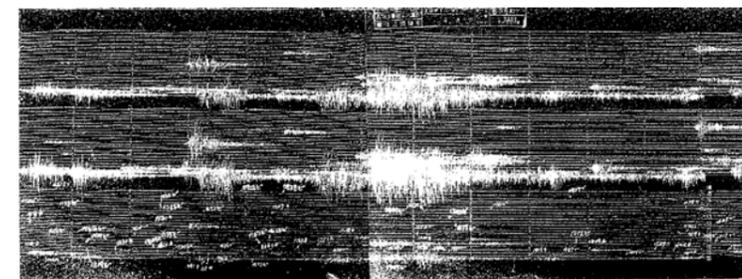
① 岩塊の流れが移動し続ける時間 25 分



⑤ 溶岩ドーム崩壊時間 20 分
(流入点から岩塊流れが供給され続ける時間)

(溶岩ドームの崩壊が終わった後最後の岩塊が)
④ 流入点から最下流点まで流下するのにかかる時間 5 分

図- 3.2 振動計記録を用いた溶岩ドーム崩壊時間算定の模式図



通番	発生時刻 月/日 時:分	継続時間	崩落量	崩落 1 方向 距離	崩落 2 方向 距離
285	06/08 17:23	180	-	E 2.0	
286	06/08 18:28	50	-	X X	
287	06/08 18:29	60	-	X X	
288	06/08 18:34	80	-	X X	
289	06/08 18:44	30	-	X X	
290	06/08 18:45	30	-	X X	
291	06/08 18:50	30	-	X X	
292	06/08 18:52	90	-	X X	
293	06/08 19:00	280	-	X X	
294	06/08 19:12	30	-	X X	
295	06/08 19:14	30	-	X X	
296	06/08 19:18	120	-	X X	
297	06/08 19:48	120	-	X X	
298	06/08 19:51	1500	-	E 5.5	
299	06/08 21:20	120	-	X X	
300	06/08 21:23	50	-	X X	

参考：H3.6.8 火砕流の振動波形 (左) と記録 (右)

表- 3.2 H3.6.8 岩塊流れの流量波形の整理

項目	数値	根拠
①総流出土砂量 (m ³) (空隙込)	350 万	実績地形調査より
②堆積濃度	0.65	高橋 (2006) より
③総流出土砂量 (m ³) (空隙無)	227.5 万	③=①×②
④溶岩ドーム崩壊時間 (秒)	1,200	平成 3 年 6 月 8 日の振動時間から流下時間を控除した時間 (=25 分-5 分)
⑤溶岩ドーム崩壊流量 (m ³ /s) (空隙無)	1,896	⑤=③/④
⑥土砂濃度	0.43	高橋 (2006) より
⑦溶岩ドーム崩壊流量 (m ³ /s) (空隙込)	4,409	⑦=⑤/⑥

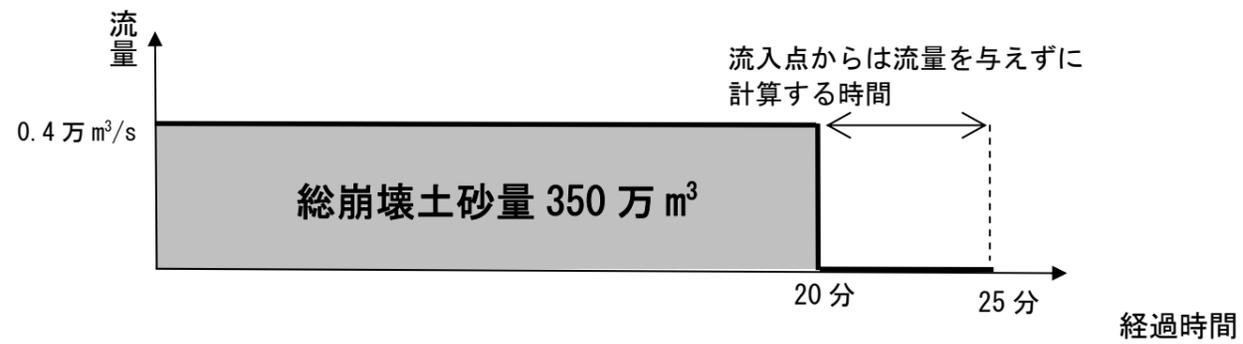


図- 3.3 H3.6.8 流入点に与える岩塊流れの流量波形

3.2 H3.6.8 岩塊流れ再現計算のパラメータ設定

再現計算で、以下に示すパラメータを設定した。

表- 3.3 H3.6.8 岩塊流れ再現計算のパラメータ設定

項目		物理根拠による設定			高橋(2006)によるH3.6.3火砕流再現計算パラメータの参照	再現計算による補正			設定値
記号	意味	設定の可否	数値	根拠	高橋の設定値	数式への影響	数値	備考	
σ	粒子密度	○	2.6	池谷ら(1992)*の堆積物調査結果より	-	-	-	-	2.6
ϕ	内部摩擦角	○	35°	現地の堆積勾配より	-	-	-	-	35°
df	初期代表粒径	×	-		5m	粒子流と流動の状態変化に関係	-	-	5m
d_{fp}	代表粒径がこの値を下回った時点で流動化状態とする閾値	×	-		1mm		-	-	1mm
C_{smin}	濃度がこの値を超えた時点で格子構造による抵抗が発生するとする閾値	×	-		0.51	粒子流状態時の抵抗に影響	-	-	0.51
Mn	格子構造による抵抗力にかかる係数	×	-		0.5		-	-	0.5
e	礫の反発係数 粒子流状態において流体と底面の摩擦によって発生する抵抗に影響	×	-		0.8		-	-	0.8
b	粒子の単位質量あたりに噴出するガス量	×	-		0.0001	流動化状態時の抵抗に影響	-	-	0.0001
ν	ガスの動粘性係数	×	-		0.0002		-	-	0.0002
κ	底面の抵抗を示す係数	×	-		0.7		1.5	今回検証に用いるH3.6.8火砕流は、H3.6.3火砕流の堆積物の上を流下しており、初めて下流まで流れたH3.6.3火砕流とは底面の抵抗が異なると考えられることから、底面抵抗を示す係数で補正を行った。	1.5

直接計測可能なパラメータ

直接計測できないパラメータ

*池谷浩・石川芳治(1992)：雲仙普賢岳で発生した火砕流、土石流災害(第2報)，土木技術資料，vol. 34、No. 6, p52-59

3.3 再現計算結果

平成3年6月8日の岩塊流れの流下実績をもとに、各計算パラメータの妥当性を確認するために再現計算を行った。再現計算の結果、到達範囲が実績と概ね一致した。各計算パラメータの妥当性が確認された。

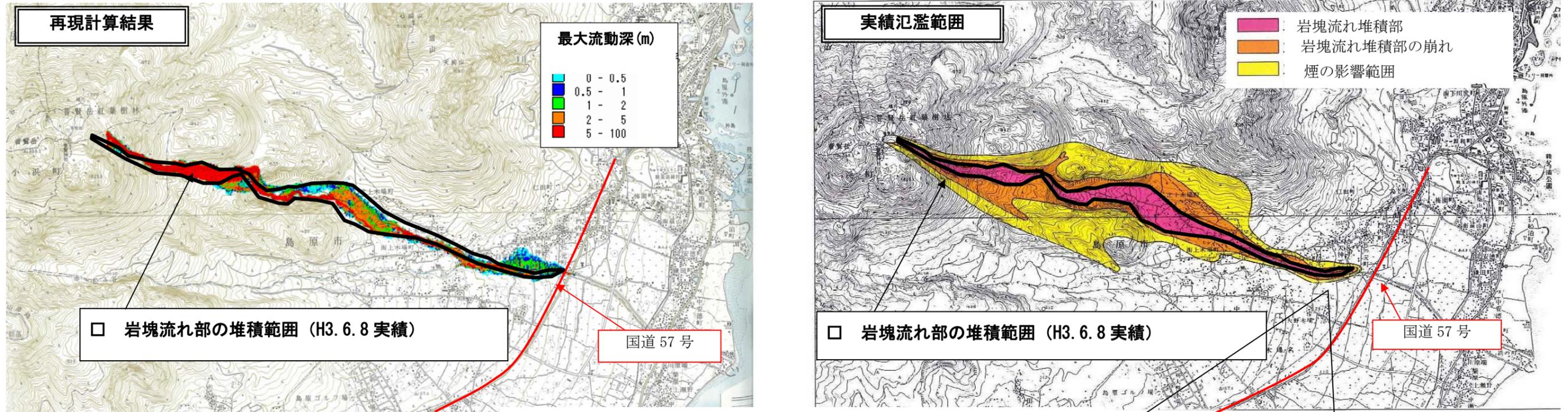


図- 3.4 再現計算氾濫範囲（左）と実績氾濫範囲（右）



H3.6.26に発生した火砕流本体部堆積物の末端部の様子

火砕流本体部（岩塊流れ）の堆積物の末端部は、左写真のように細粒化し、河道に沿って細く伸びる堆砂形状となっている（ただし、左写真はH3.6.8の火砕流ではなくH3.6.26に発生した火砕流のものである）。

岩塊の細粒化を評価する高橋モデルを用いることで、より実現象に近い計算結果が得られていると考えられる。

再現計算により、高橋モデル及び設定したパラメータの妥当性が確認された。

4 溶岩ドーム崩壊予測計算の実施

3章で検討したパラメータを用いて溶岩ドームの崩壊影響範囲の予測計算を行うものとする。

(1) 崩壊規模

降雨、重力等が引き金となり崩壊が起こることを想定する。崩壊規模を設定するにあたり、岩塊が重力作用により引っ張られた場合、岩塊内部のどの部分に破壊が生じ易いのかを、重力による変形に起因した岩塊内部の応力を求めることができる2次元数値解析(個別要素法:DEM)による安定性検討を用いて検証した。

第11ローブを包括する断面を用いて安定性を評価したところ、鉛直方向に生じている亀裂の位置でせん断破壊が発生するのが確認できた。

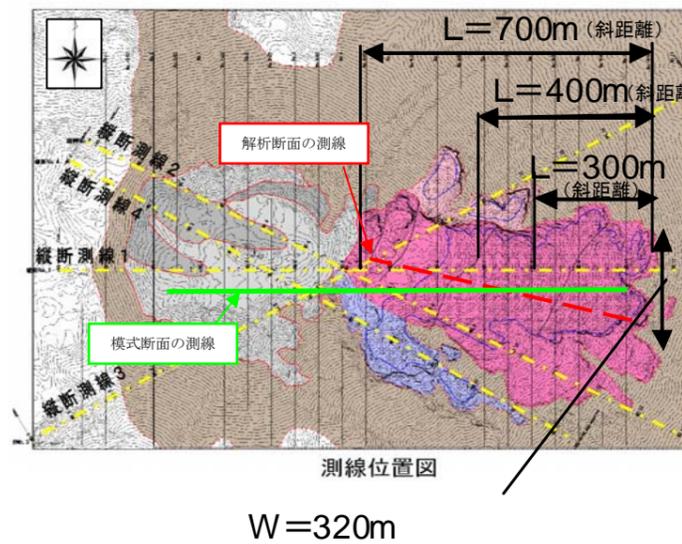


図- 4.1 検証結果

崩壊規模は、第11ローブの安定性検討結果等を参考に、目視による亀裂部、応力解析による応力集中箇所、溶岩ローブの境界部、噴火前の地山との境界部などで、降雨、重力等による侵食が引き金となり崩壊が起こることが考えられるため、5つの崩壊規模を想定した。

表- 4.1 崩壊規模

CASE	想定崩壊	崩壊位置の根拠	崩壊土砂量 (万m³)
1	第11ローブ J1 亀裂部より下方の亀裂部より崩壊	目視による亀裂	768
2	第11ローブの J1 亀裂部より下部が崩壊	応力解析結果より	1,024
3	第11ローブと第4ローブの境界より上部全体が崩壊	溶岩ローブの境界	1,792
4	崩落堆積物と第4ローブの境界より上部が崩壊	溶岩ローブの境界	3,200
5	噴火前の地山の境界で崩壊	噴火前地山との境界	5,376

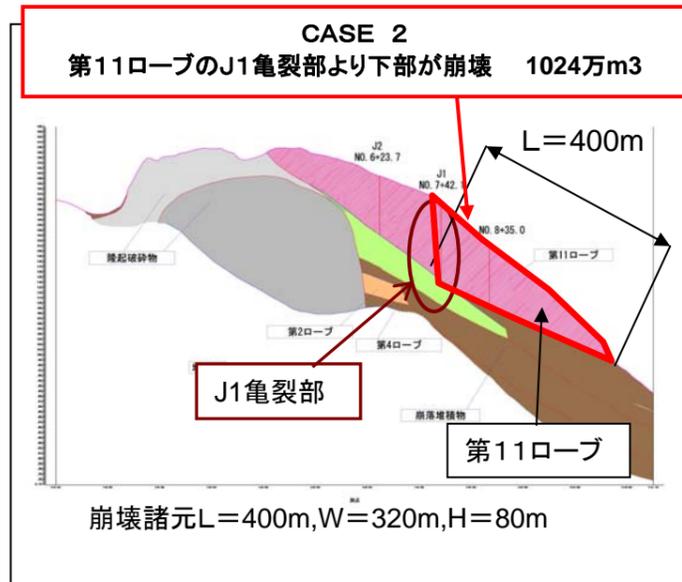


図- 4.2 崩壊規模の模式図

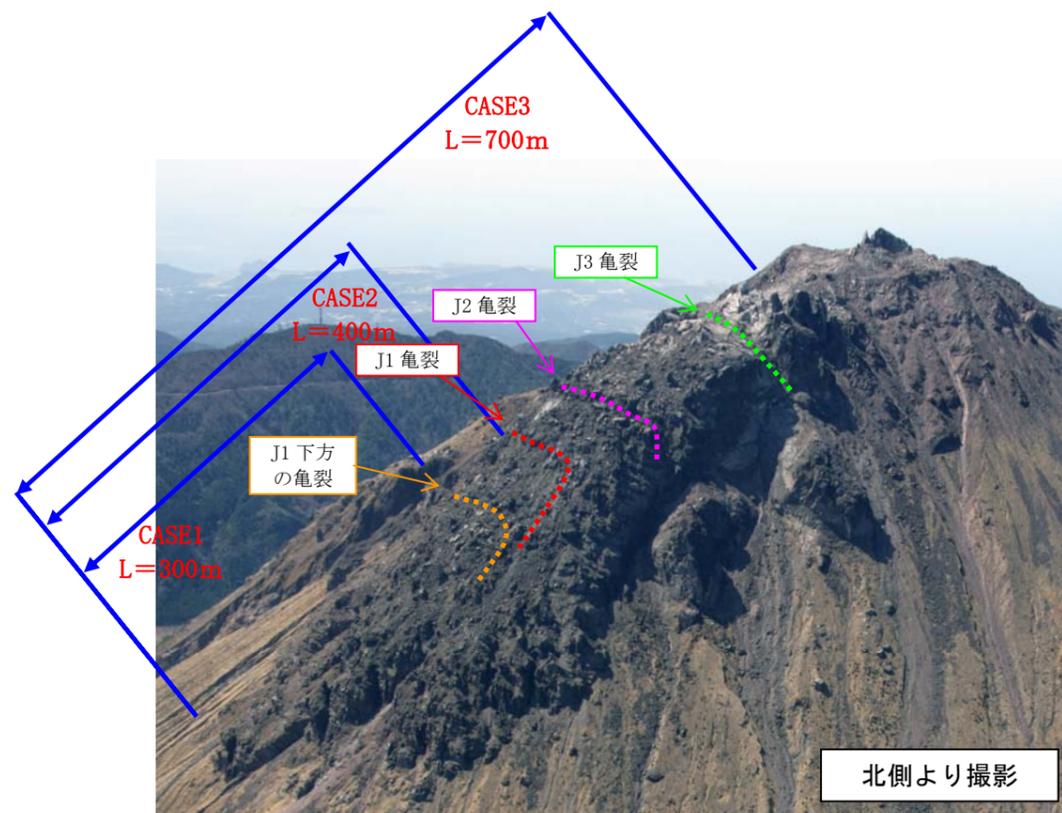
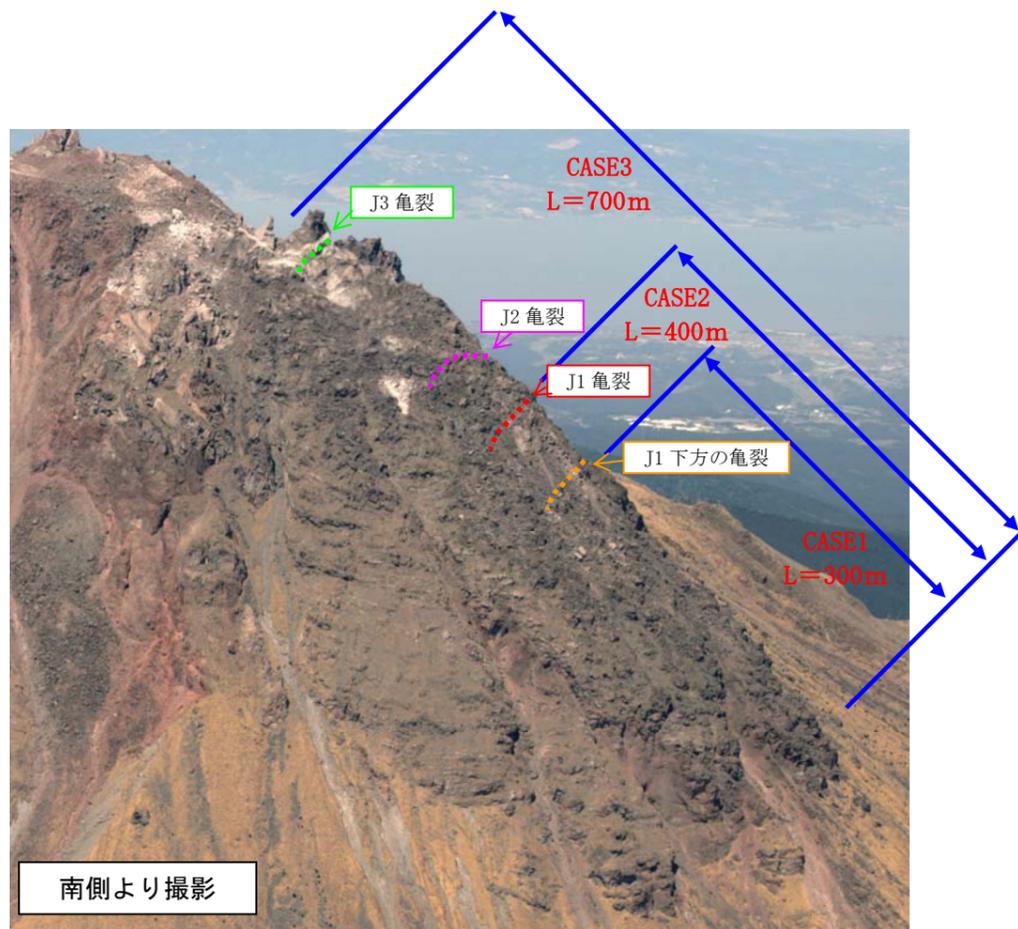


図- 4.3 想定する亀裂の位置関係

(2) 崩壊流量

大規模崩壊の崩壊流量を調査したが、調査範囲内においては、大規模崩壊の崩壊流量、継続時間は不明であった。そのため、平成3年6月8日の岩塊流れが発生した崩壊継続時間が20分であったことをふまえ、検討対象規模の崩壊が20分で発生すると仮定して崩壊流量を設定した。

表- 4.2 崩壊流量

項目	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	備考
①崩壊土砂量 (万m ³) (空隙込)	768	1,024	1,792	3,200	5,376	
②堆積濃度	0.65					高橋 (2006) より
③崩壊土砂量 (万m ³) (空隙無)	499.2	665.6	1,164.8	2,080.0	3,494.4	③=①×②
④崩壊時間 分 (秒)	20 (1,200)					平成3年6月8日 岩塊流れ発生時間 より
⑤崩壊流量 (m ³ /s) (空隙無)	4,160	5,547	9,707	17,333	29,120	⑤=③/④
⑥土砂濃度	0.43					高橋 (2006) より
⑦崩壊流量 (m ³ /s) (空隙込)	9,675	12,899	22,574	40,311	67,722	⑦=⑤/⑥

5 溶岩ドーム崩壊ハザードマップの作成

作成した溶岩ドーム崩壊ハザードマップを次頁以降に示す。

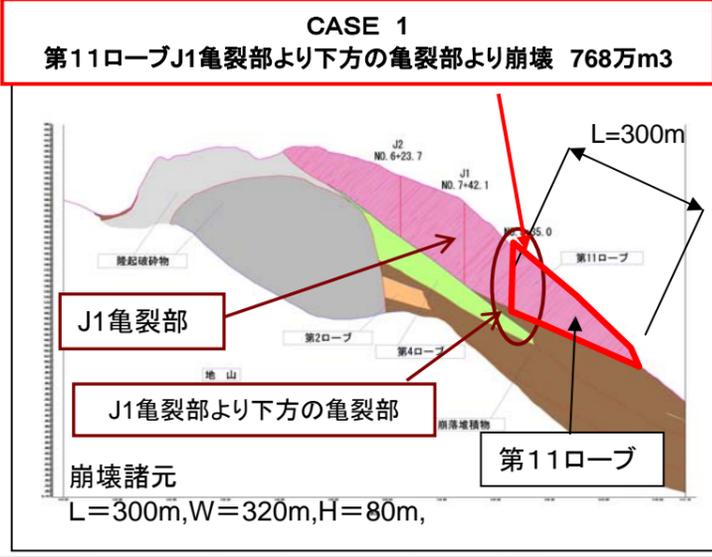


CASE 1

第11ロープ J1 亀裂部より下方の亀裂部より崩壊
 対象土砂量 : 768 万 m³
 ピーク流量 : 9,675 m³/s
 25 分で対象土砂量が流下する
 矩形ハイドログラフを想定 (左下図)
 施設整備条件 : 現計画完了時
 物性値 : 平成 3 年 6 月 8 日に発生した
 火砕流の岩塊流れの再現計算より設定

計算に用いた物性値

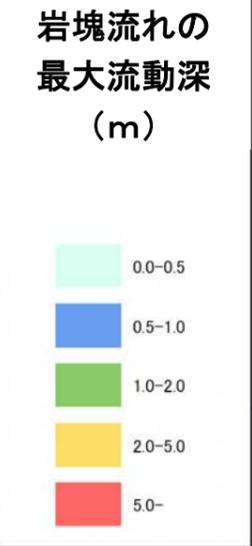
記号	物理的意味	数値
σ	粒子密度	2.6
ϕ	内部摩擦角	35°
d_f	代表粒径	5m
d_{fp}	代表粒径がこの値を下回った時点で移動状態が流動化するとする閾値	1mm
C_{smn}	火砕流濃度がこの値を超えた時点で粒子の格子構造による抵抗が発生する閾値	0.51
Mn	格子構造による抵抗にかかる係数	0.5
e	壁の反発係数。粒子流状態において流体と底面の摩擦によって発生する抵抗に影響	0.8
b	粒子の単位質量当たり噴出するガス量	0.0001
ν	ガスの動粘性係数	0.0002
κ	底面の抵抗を示す係数	1.5



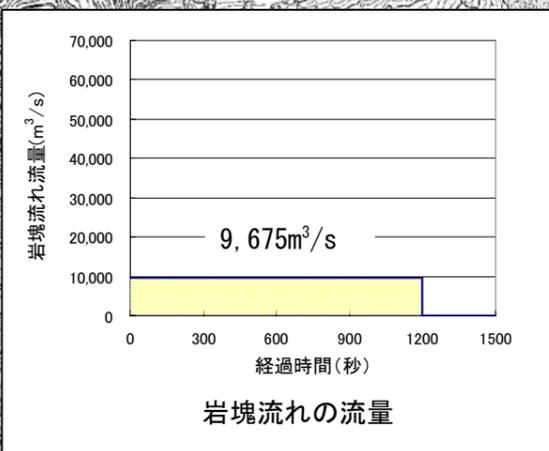
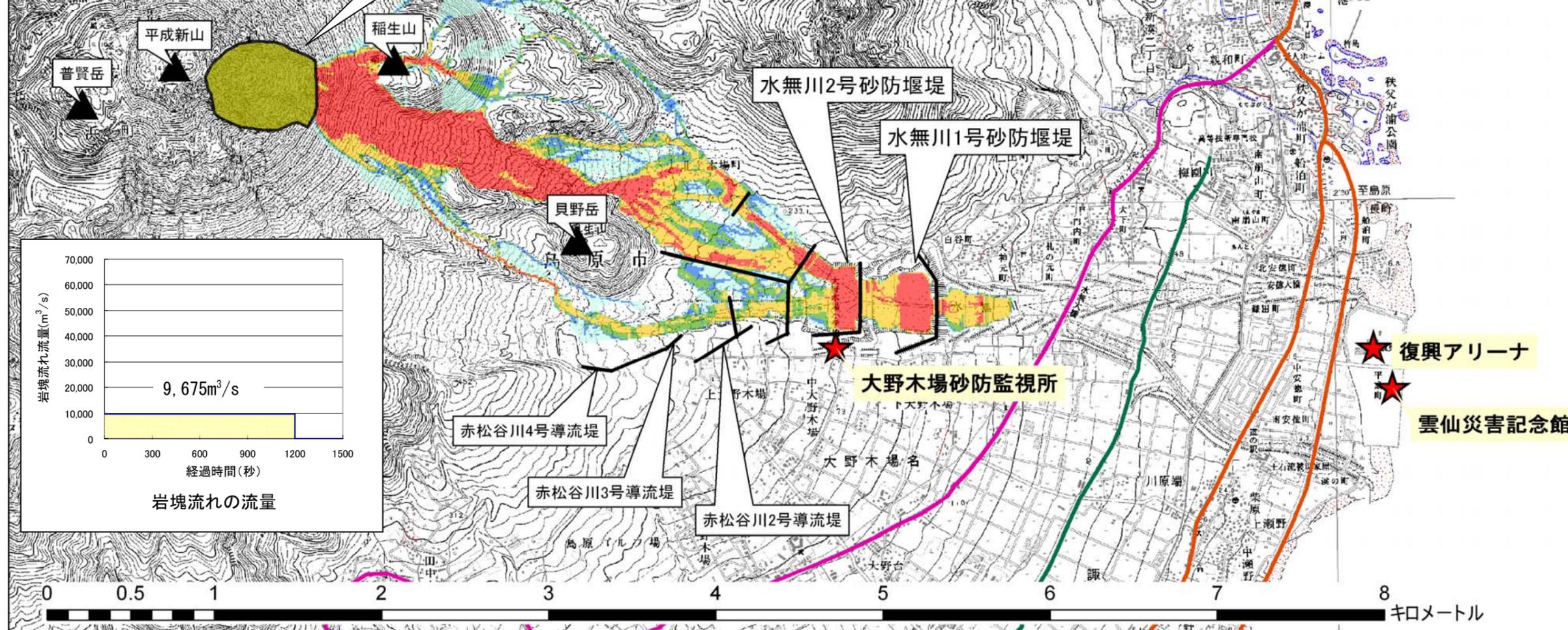
道路

- 広域農道
- 国道251号
- 国道57号

溶岩ドーム



平成新山ネイチャーセンター



CASE 2

第11ロープのJ1亀裂部より下部が崩壊

対象土砂量 : 1,024 万 m³

ピーク流量 : 12,899 m³/s

25分で対象土砂量が流下する
矩形ハイドログラフを想定(左下図)

施設整備条件: 現計画完了時

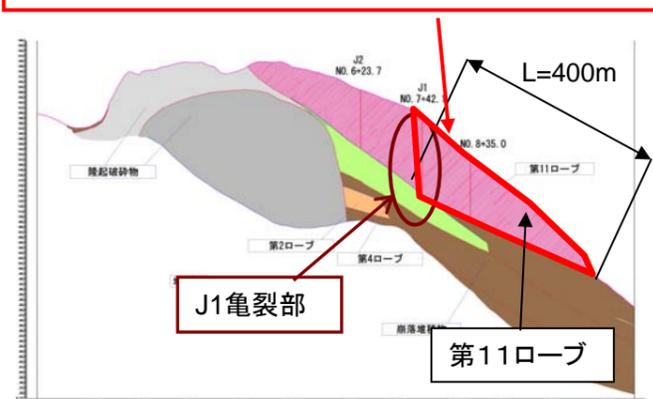
物性値 : 平成3年6月8日に発生した
火砕流の岩塊流れの再現計算より設定

計算に用いた物性値

記号	物理的意味	数値
σ	粒子密度	2.6
ϕ	内部摩擦角	35°
df	代表粒径	5m
d_{50}	代表粒径がこの値を下回った時点で移動状態が流動化するとする閾値	1mm
C_{amin}	火砕流濃度がこの値を超えた時点で粒子の格子構造による抵抗が発生する閾値	0.51
Mn	格子構造による抵抗力にかかる係数	0.5
e	礫の反発係数。粒子流状態において流体と底面の摩擦によって発生する抵抗に影響	0.8
b	粒子の単位質量当たりに噴出するガス量	0.0001
ν	ガスの動粘性係数	0.0002
κ	底面の抵抗を示す係数	1.5

CASE 2

第11ロープのJ1亀裂部より下部が崩壊 1024万m³

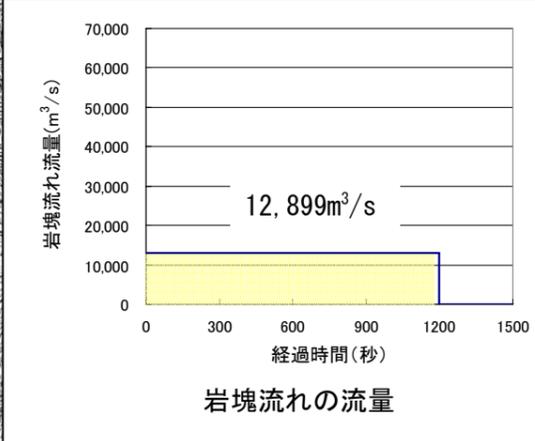
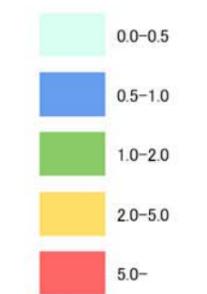


道路

- 広域農道
- 国道251号
- 国道57号

溶岩ドーム

岩塊流れの最大流動深 (m)



平成新山ネイチャーセンター

大野木場砂防監視所

復興アリーナ

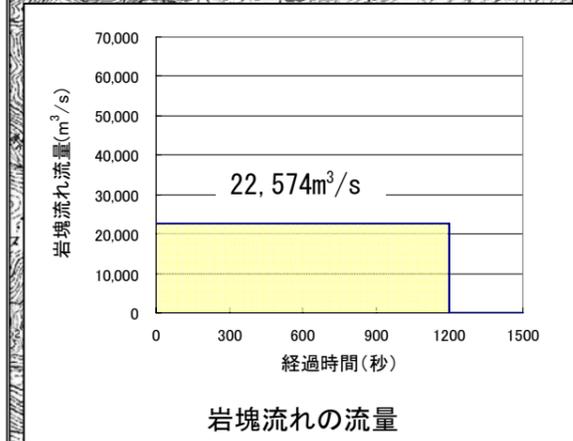
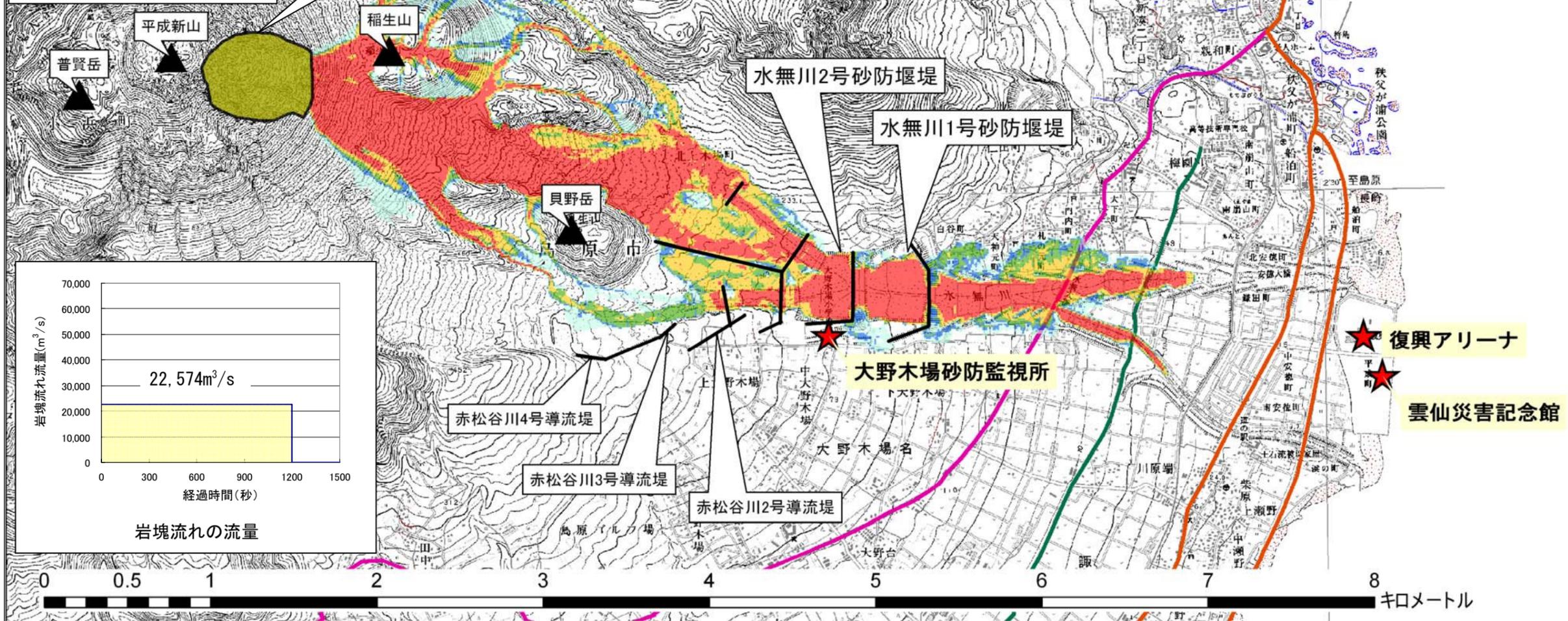
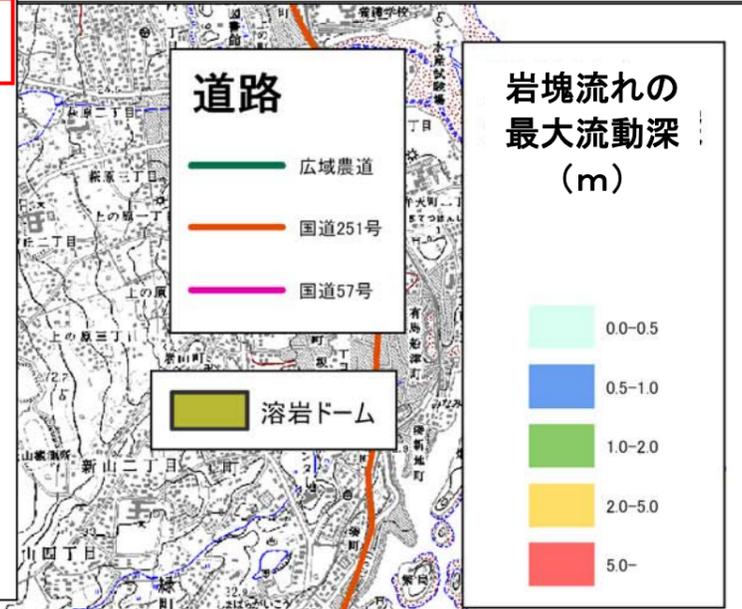
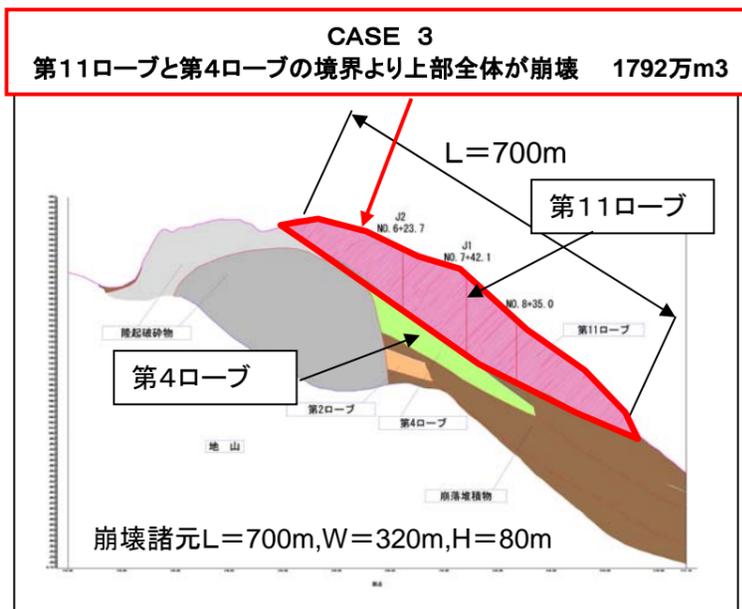
雲仙災害記念館



CASE 3
 第11ロープと第4ロープの境界より上部全体が崩壊
 対象土砂量 : 1,792万m³
 ピーク流量 : 22,574m³/s
 25分で対象土砂量が流下する
 矩形ハイドログラフを想定(左下図)
 施設整備条件: 現計画完了時
 物性値 : 平成3年6月8日に発生した
 火砕流の岩塊流れの再現計算より設定

計算に用いた物性値

記号	物理的意味	数値
σ	粒子密度	2.6
ϕ	内部摩擦角	35°
d_f	代表粒径	5m
d_{fp}	代表粒径がこの値を下回った時点で移動状態が流動化するとする閾値	1mm
C_{amin}	火砕流濃度がこの値を超えた時点で粒子の格子構造による抵抗が発生する閾値	0.51
Mn	格子構造による抵抗力にかかる係数	0.5
e	壁の反発係数。粒子流状態において流体と底面の摩擦によって発生する抵抗に影響	0.8
b	粒子の単位質量当たりに噴出するガス量	0.0001
ν	ガスの動粘性係数	0.0002
κ	底面の抵抗を示す係数	1.5

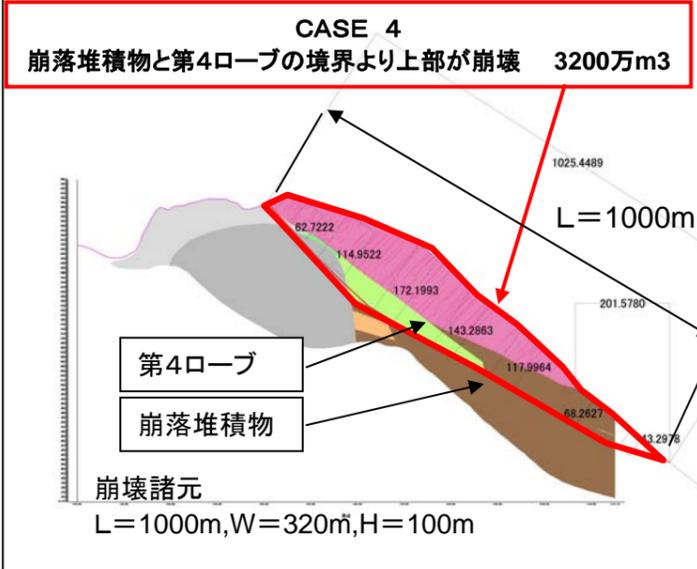


CASE 4

崩落堆積物と第4ロープの境界より上部が崩壊
 対象土砂量 : 3,200万 m³
 ピーク流量 : 40,311m³/s
 25分で対象土砂量が流下する
 矩形ハイドログラフを想定(左下図)
 施設整備条件: 現計画完了時
 物性値 : 平成3年6月8日に発生した
 火砕流の岩塊流れの再現計算より設定

計算に用いた物性値

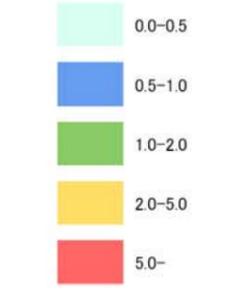
記号	物理的意味	数値
σ	粒子密度	2.6
ϕ	内部摩擦角	35°
d_f	代表粒径	5m
d_p	代表粒径がこの値を下回った時点で移動状態が流動化するとする閾値	1mm
C_{smin}	火砕流濃度がこの値を超えた時点で粒子の格子構造による抵抗が発生する閾値	0.51
Mn	格子構造による抵抗力にかかる係数	0.5
e	裸の反発係数。粒子流状態において流体と底面の摩擦によって発生する抵抗に影響	0.8
b	粒子の単位質量当たりに噴出するガス量	0.0001
ν	ガスの動粘性係数	0.0002
α	底面の抵抗を示す係数	1.5



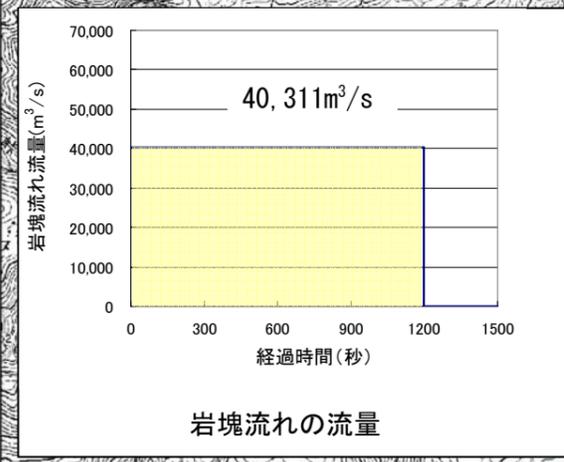
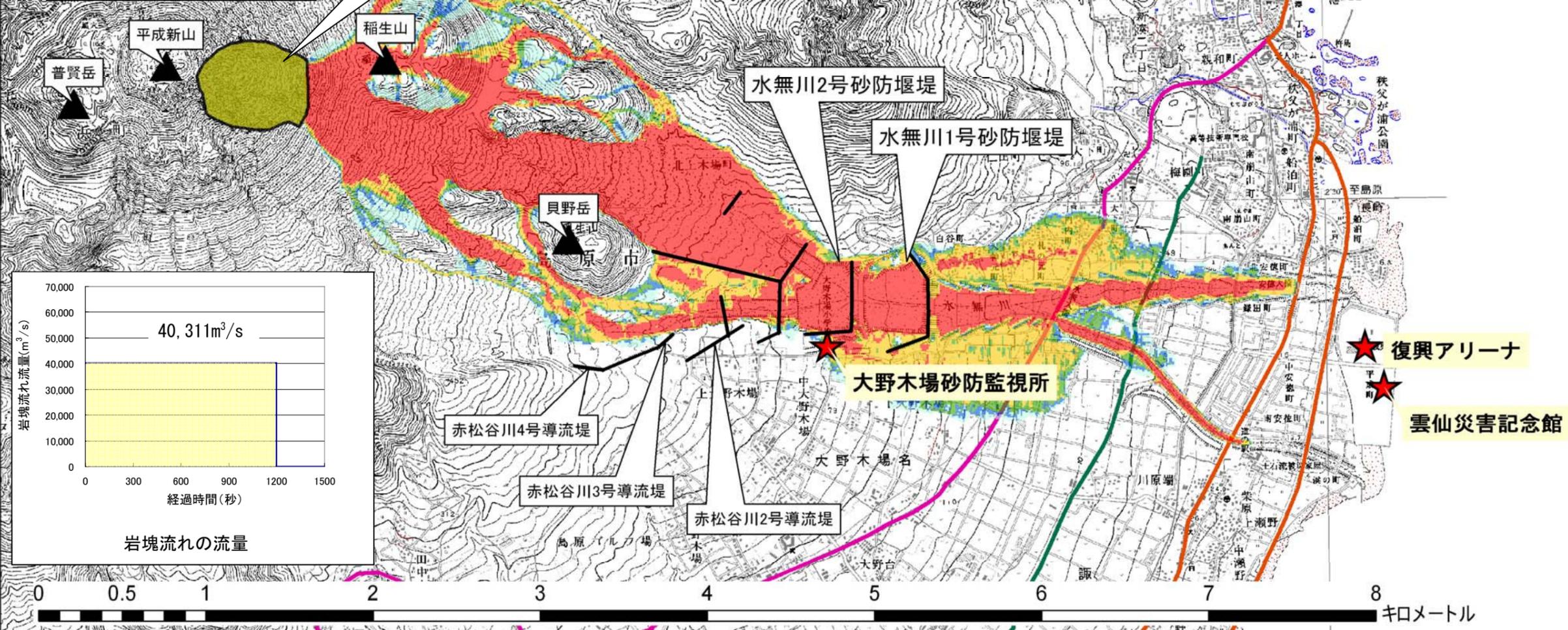
道路

- 広域農道
- 国道251号
- 国道57号
- 溶岩ドーム

岩塊流れの最大流動深 (m)



平成新山ネイチャーセンター





CASE 5

噴火前の地山の境界で崩壊

対象土砂量 : 5,376 万 m³

ピーク流量 : 67,772 m³/s

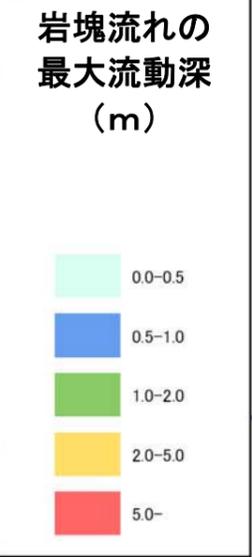
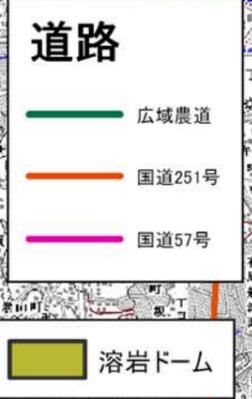
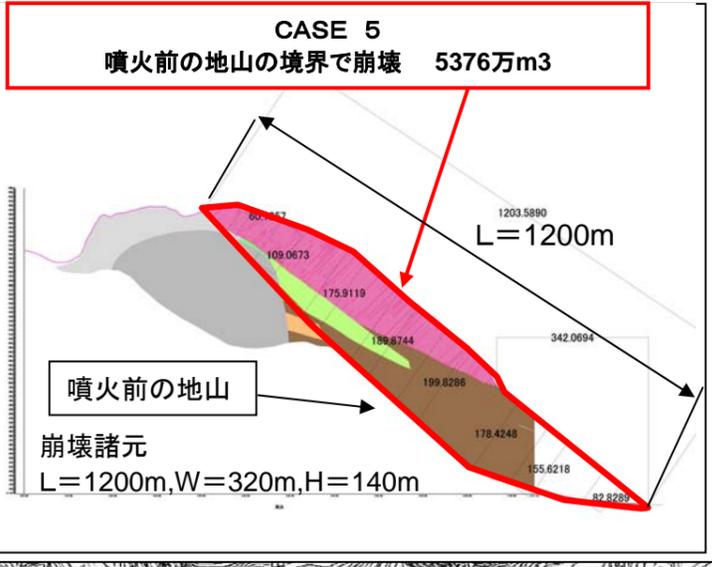
25分で対象土砂量が流下する
矩形ハイドログラフを想定(左下図)

施設整備条件: 現計画完了時

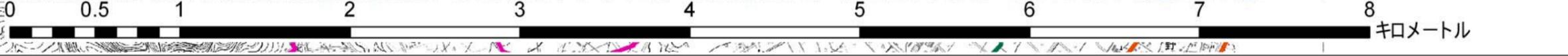
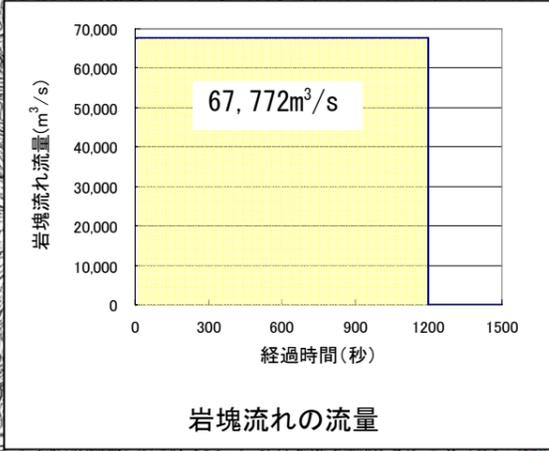
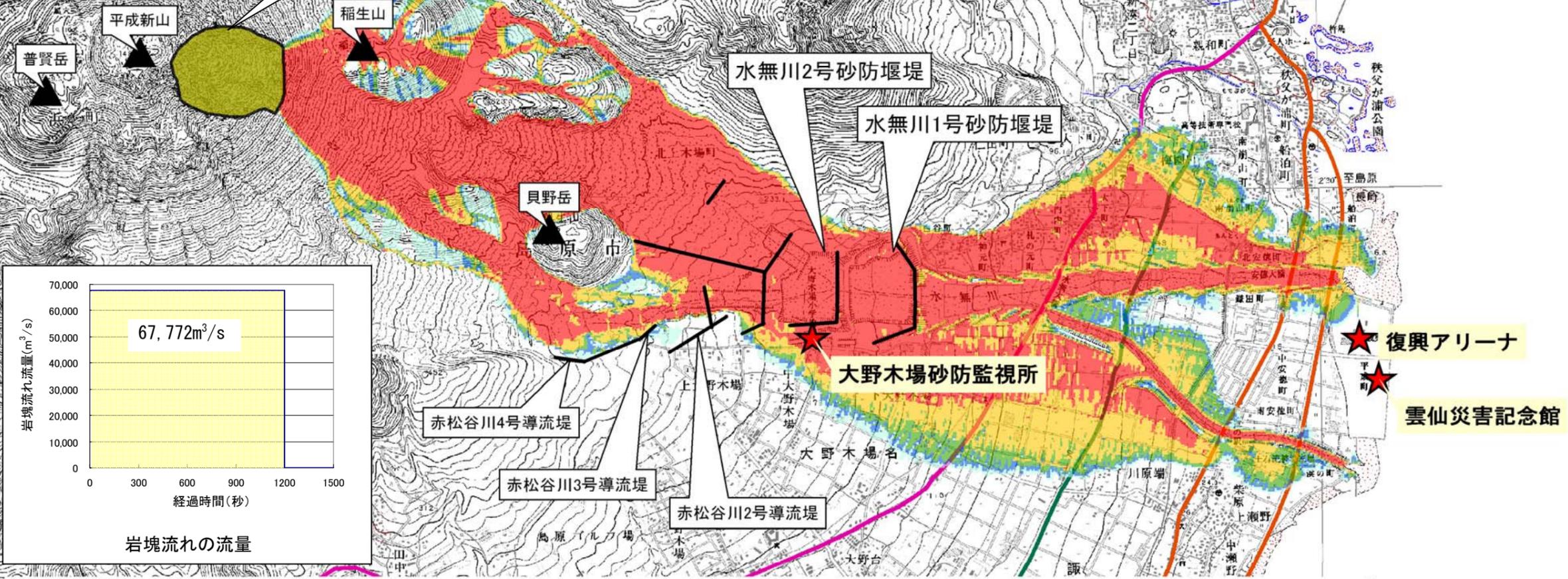
物性値 : 平成3年6月8日に発生した
火砕流の岩塊流れの再現計算より設定

計算に用いた物性値

記号	項目	物理的意味	数値
σ	粒子密度		2.6
ϕ	内部摩擦角		35°
d_f	代表粒径		5m
d_{sp}	代表粒径がこの値を下回った時点で移動状態が流動化するとする閾値		1mm
C_{amin}	火砕流濃度がこの値を超えた時点で粒子の格子構造による抵抗が発生する閾値		0.51
Mn	格子構造による抵抗力にかかる係数		0.5
e	壁の反発係数。粒子流状態において流体と底面の摩擦によって発生する抵抗に影響		0.8
b	粒子の単位質量当たりに噴出するガス量		0.0001
ν	ガスの動粘性係数		0.0002
κ	底面の抵抗を示す係数		1.5



平成新山ネイチャーセンター



計算結果の整理を以下に示す。

ケース	想定崩壊	対象土量 (万m ³)	パラメータ			計算結果
			レート (m ³ /s)	流入 時間 (s)	計算 時間 (s)	
case1	第11ローブJ1亀裂部より下方の亀裂部より崩壊	768	9,675	1,200	1,500	氾濫なし
case2	第11ローブのJ1亀裂部より下部が崩壊	1,024	12,899			氾濫なし
case3	第11ローブと第4ローブの境界より上部全体が崩壊	1,792	22,574			氾濫(国道57号上流に狭い範囲。深さ2m以内)
case4	崩落堆積物と第4ローブの境界より上部が崩壊	3,200	40,311			氾濫(水無川2号砂防堰堤～広域農道の広範囲。深さ5m以内)
case5	噴火前の地山の境界で崩壊	5,376	67,722			氾濫(水無川2号砂防堰堤～国道251号の広範囲。深さ10m以内)

- CASE1, CASE2 の崩壊土砂量については、現況の施設で氾濫が発生しなかった。
- CASE3 においては、現況では国道 57 号上流の狭い範囲で深さ 2m 以内の氾濫が発生した。
- CASE4 においては、現況では水無川 2 号砂防堰堤から広域農道の広い周囲で深さ 5m 以内の氾濫が発生した。
- CASE5 においては、現況では水無川 2 号砂防堰堤から国道 251 号までの広い周囲で深さ 10m 以内の氾濫が発生した。

第2回 雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会

蒋委員、山田委員からのご意見

■ 蒋委員からのご意見

- 第2回委員会での検討の方向性はよいと思う。
- 今後、溶岩ドームの崩壊規模を予測するために、下記の調査観測事項が必要である。
 - ・ 現在、溶岩ローブ末端部の動きだけを観測しているが、将来的には、溶岩ローブ全体及び溶岩ローブ脚部斜面の崩落堆積物の動きも観測していく。
 - ・ 噴火直後と現在の斜面を航空写真判読等で比較して、溶岩ローブ脚部斜面の変動があるか確認する。
 - ・ 安全な範囲で溶岩ローブ脚部斜面の物性値を調査する。調査は、簡易貫入試験、シュミットハンマー試験（表面の風化層を取り除く）、簡易ボーリング調査（風化下1m程度）が考えられる。

■ 山田委員からのご意見

- 溶岩ドームの崩壊による岩屑流本体の影響範囲を高橋モデルの中の火砕流低層部のモデルを援用して計算し、その結果をもとにハザードのエリアを検討することは良いと思う。
- 溶岩ドームの崩落現象が発生した場合は、いわゆる火砕流熱風部のようなダストの流れも岩屑流本体に付随して発生すると思う。ダストの中には細かな岩屑も多量に含まれていて岩屑流本体と同等の高速状態で流れてくると思われるため、それによる被害も大いに懸念される。高橋モデルの中の熱風部のモデルを援用した計算も実施し、低層部の影響範囲よりも広めの範囲をダストの危険範囲として取り扱うことが考えられる。

第2回 雲仙普賢岳溶岩ドーム崩落に関する危険度評価検討委員会
記者発表会配席図(於:雲仙岳災害記念館、1Fセミナー室)

