

平成22年 6月 8日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19710150
 研究課題名 (和文) 火山噴火で生じる密度流の水域流入現象とそれに伴う津波の発生過程に関する研究
 研究課題名 (英文) A research on density currents entering into water and tsunami generation processes during volcanic eruptions
 研究代表者
 前野 深 (MAENO FUKASHI)
 東京大学・地震研究所・助教
 研究者番号：20444078

研究成果の概要 (和文)：

火山性密度流の海への突流入に伴い発生する津波の規模や、密度流の動きを支配する物理パラメータを明らかにするために、二層流モデルにもとづく水理実験と数値実験を行った。その結果、津波の発生効率には密度流の流量が大きく寄与すること、密度流の動きには主に底面摩擦抵抗が大きく効くことがわかった。また、モデルを1883年クラカタウ火山噴火に適用し、火砕流の海への突流入がこの噴火の津波発生機構として有力であるという結論を得て、モデルと手法の有用性を示した。

研究成果の概要 (英文)：

Physical parameters controlling a scale of tsunami generated by a density current entering sea during volcanic eruptions and a behavior of the density current were examined with laboratory and numerical experiments considering two-layer models. A scale of tsunami is mainly controlled by a flux of density currents, and a behavior of density currents is affected by a bottom friction force of the currents. Application of two-layer models to the 1883 Krakatau eruption and the results suggest that a pyroclastic flow entering into the sea is more plausible mechanism of the huge tsunami during this eruption. The methods and models using this research will be helpful for future studies on volcanogenic tsunamis.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,900,000 | 0 | 1,900,000 |
| 2008年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 2009年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,100,000 | 360,000 | 3,460,000 |

研究分野：火山地質学・火山災害科学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：火山噴火・津波・密度流・自然災害・地質学・堆積学・地球物理学・防災

1. 研究開始当初の背景

豊富な水を湛えた地球上では、火山噴火は浅海や沿岸域で頻繁に発生しており、それに伴う火砕流や岩屑流などの火山性密度流は、しばしば海に流入して大規模な津波を引き起こす。その結果、噴火源から数 100 km 以上離れた遠方沿岸域においても、津波による甚大な災害現象が発生することがある。とくに日本を代表とする島弧火山や海洋島火山において、この現象の報告事例は多く、例えば、火山体崩壊に伴う岩屑流と津波については、国内では北海道駒ヶ岳、雲仙眉山、渡島大島、海外ではハワイ島、ストロンボリ火山がよく知られている。近年では、スプリエールヒルズ火山やストロンボリ火山で火砕流が海へ流入し、津波被害を与えている。このように、火山体近傍の沿岸域は、噴出物による直接の被害だけでなく、火山性津波による災害現象を被る危険にさらされている。そのため、火山性密度流の水域流入現象やそれに伴い発生する津波の規模や堆積物の特徴を明らかにし、噴火源の状態や災害の広がりや水理学的モデルにもとづき定量的に推定する手法を開発することは、それらの地域の火山防災上極めて重要である。

密度流の水域への流入現象は、地震による山体崩壊や、豪雨に伴う斜面崩壊など、必ずしも火山噴火の付随現象に限定されない。近年、そのような非火山性イベントに伴い発生する土石流などの低温高密度流が水域に流入するケースについて、国内外の工学分野で数値モデル化、水理実験等が行われており、現象を支配する物理量の推定が行われ、災害制御に反映させる試みがなされてきた。国内では、浅水理論にもとづく二層流モデルを用い、この現象を密度流どうしの相互作用とみなして議論した例がある。一方、水域に流入する高温の火山性密度流については、その性質（流入率・密度構造・流入角度など）と津波の規模（波高・波長など）との関係、またその結果形成される浅海堆積物の特徴など、多くの事象についてはまだ十分に理解されていない。また、現象理解に役立つはずの沿岸堆積物の地質情報は多くの火山で不足しており、災害評価に貢献するモデルや定量データの提示は十分でない。こうした手法は、災害発生予測の高精度化にも貢献すると考えられる。

2. 研究の目的

噴火活動に伴う火山性密度流（火砕流や岩屑流）の海への突流入現象は、火山性津波の発生過程や火砕物の運搬・堆積過程を理解す

る上で重要である。本研究の目的は、この現象に伴う津波の規模や火山性密度流の動きを支配する物理パラメータを明らかにし、災害軽減に役立つモデルと手法を水理実験や数値実験にもとづき提案することである。

本研究で、水域に流入する火山性密度流の特徴（流入率・密度構造、流入角度）と津波の規模（波高・波長）との関係を規定する要因を明らかにできれば、浅海・沿岸域における火山噴火に伴う災害現象の予測を行う上で重要な、津波や密度流の物理量（噴出率や継続時間など）に関する基礎データを社会に提供でき、火山防災に大きく貢献するはずである。また、陸域（大気圏）から水域（水圏）にまたがる環境下での火砕物の運搬・堆積過程や、堆積物の特徴と津波の規模との関係については、まだ十分に理解が進んでいない。それらの過程や関係に定量的制約を与えることは、火山学、堆積学、災害科学など関連する分野においても重要である。

3. 研究の方法

(1) 水理模擬実験による現象の観察とモデル化（平成 19～20 年度）

さまざまな密度をもつ密度流の水域流入現象を水理模擬実験により再現し、それを詳細に観察するとともに、密度流及び津波の物理データを計測して現象を支配する物理量に制約を与える。またその結果をもとにして本現象について水理学的観点から考察し、モデルを構築する。先行研究の多くは、火山性密度流を海水よりも密度が重い流れ、すなわち、土石流や低温岩屑流のような濃密な流れに近似してモデル化を行っている。しかし、火山性密度流の場合には、密度流本体の分離が起こり、海水よりも密度が低く希薄な流れが派生するなど、必ずしも高密度流体と水との単純な混合プロセスが起こっているわけではないようである。本研究で行う水理実験では、火山性密度流を、(1) 水よりも低密度の流れ（火砕流の低密度部分や火砕サージ）が水面上を流走する場合、(2) 水よりも高密度の流れ（火砕流の高密度基底部や高温岩屑流）が水面下に流入する場合に分け、それぞれの現象を支配する物理量（流入率、密度構造、流入角度）と、その結果生じる水波の規模（波高・波長）との関係について調べる。以上の実験結果を踏まえて、従来の研究で用いられている浅水理論にもとづく二層流モデルの本現象への適用性について検討する。また、水理学的考察にもとづき新たなモデルを考案する。

(2) 実際の現象と堆積物のコンパイル (平成 19~21 年度前半)

実際の火山噴火で発生した火山性密度流の水域流入現象について、その特徴や堆積物の地質構造を、フィールド調査や文献資料にもとづきコンパイルする。取り扱う具体的事例は、(a) 1883 年クラカタウ噴火、(b) スプリエールヒルズ火山の近年の噴火、(c) 7.3 ka 鬼界カルデラ噴火、(d) ベスビオ火山の有史以降の噴火である。火山性密度流の水域流入現象の実例 (a) ~ (d) について、とくに観察記録や堆積物の分布、地質構造をコンパイルする。水理模擬実験とほぼ平行して行う予定である。(a) 1883 年クラカタウ噴火、及び (b) スプリエールヒルズ噴火については、主に文献にもとづきその特徴についてまとめる。(d) ベスビオ火山の有史以降の噴火では、火砕流が水域に流入し津波が発生した記録があるが、その密度流の特徴や水域流入現象、そして沿岸域への影響については詳しく評価されていない

(3) 数値解析及び災害評価 (平成 20 年度後半~21 年度)

(1) で考案したモデルを (2) の噴火事例へ適用し、火山性密度流の水域流入現象と津波の挙動について数値解析を行い、それに伴う津波の発生・伝播過程、沿岸域での遡上過程について調べる。計算に際しては、密度流の流入率や密度などの物理量をできる限り地質学的根拠にもとづき類推し、それにもとづきパラメータ・スタディを行う。津波の発生場に対する制約は、沿岸域における噴火堆積物や津波堆積物の分布である。そして、水理実験及び数値解析結果と実際の地質学的データや文献史料とを照合することにより、噴出源や沿岸域における物理量を推定する。これらの結果にもとづき、数値モデルの実際の火山噴火への適用性について検討し、それを用いた災害発生予測の手法や精度についても議論を行う。計算に際しては、密度流の流入率や密度構造などの物理量をできる限り地質学的根拠にもとづき類推し、それにもとづきパラメータ・スタディを行う。例えば、密度流が噴火前の山体から流出し、周囲の海域に流入する場合を考え、流入率や継続時間を変化させ、それらが津波の挙動に与える影響について調べる。火山性密度流の水中での分布や、津波の伝播・遡上過程についても調べる。津波の発生場に対する制約は、沿岸域における噴火堆積物や津波堆積物の分布である。得られた解析結果を、(2) でコンパイルする地質学的データや文献史料と照合することにより、沿岸域や噴出源における物理量を推定する。とくに 1883 年クラカタウ噴火については、海底堆積物の分布や観測データが残されているので、それらを制約条件

として噴出源の状態について考察し、また、周辺地域における災害現象との整合性についても評価を行う。数値計算の結果をもとにして、水理実験及び数値解析から推定される現象と、実際の火山性密度流や津波に由来する堆積物の地質学的データとの整合性について総合的に評価する。また、数値モデルの天然への適用性について検討し、それを用いた災害予測の手法や精度について議論を行う。

4. 研究成果

平成 19 年度は、主にこの現象を観察・解析するための水理模擬実験装置の製作・改良を進め (図 1)、以下のような水理実験を行った。水槽中に二層構造 (下層: 着色した食塩水, 上層: 水) をつくり、この二層構造に対してゲートから放たれた密度流を斜面から流入させる。密度流は、5~15 % 食塩水にガラスビーズ~10 vol.% を混入させた粒子混濁流体である。天然での観測事例から推測されるように、流入流体が水槽底面まで潜り込み津波が発生する Dense-type の現象、二層界面の間に貫入しつつ津波を発生させる Light-type の現象を再現し (図 2)、これらの結果について波の規模や密度流の時間変化を観察・解析した。

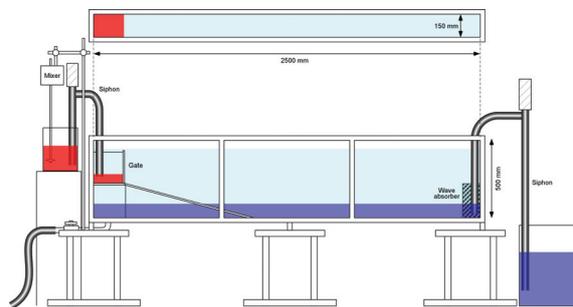


図 1 使用した水理模擬実験装置の模式図



図2 密度流の流入実験の一例

(左図) Dense-type, 15 %-saline, No particles, $\rho_c = 1109.6 \text{ kg/m}^3$, $g' = 1.093 \text{ m/s}^2$ (右図) Light-type, 4 %-saline, 1 vol.% 4 ϕ particles, $\rho_c = 1026.8 \text{ kg/m}^3$, $g' = 0.280 \text{ m/s}^2$. どちらも 1.4 秒毎.

数値実験では、これら2つのタイプの現象に対して二層流モデルを用いて表現した。重要となるパラメータとして界面抵抗係数と乱流摩擦係数が挙げられるが、過去の実験との比較からそれぞれ 0.08, 0.01 と推定した。

平成 20 年度には、引き続き水理模擬実験装置の改良と塩水を用いた実験を実施し、流体の密度と突入速度が波高に与える影響について調べた。また、浅水理論を用いた数値計算により同一の現象を解析した結果と、実験結果が整合的であることを確認した。なおこの研究では、水よりも軽い密度流が流入するケースについて新たに考案したモデルを用いた (図 3)。さらに、数値計算結果について、理論的に予想される密度比—突入速度—津波波高のエネルギー・バランス式により説明できることを確かめた。

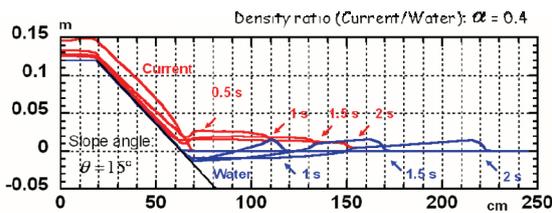
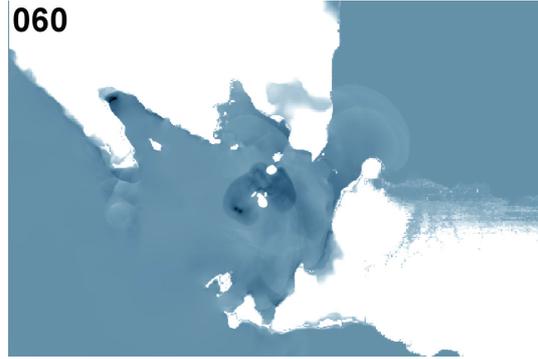
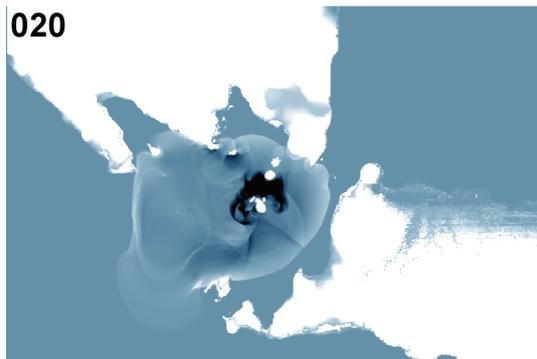
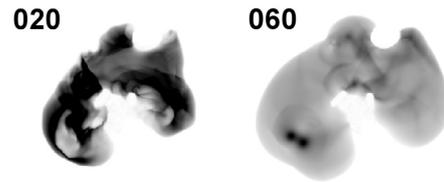


図 3 数値計算による水より軽い密度流が水に流入する水理実験の再現結果の一例。

H21 年度は、水理実験の結果や新たなモデルを用いて、1883 年インドネシア・クラカタウ火山噴火における津波発生メカニズムの解明を試みた。この研究では、噴火前後の地形変化や噴出源の位置、噴出量に関してパラメータ・スタディを実施し、また、従来よりも細かい計算メッシュを用いることにより計算精度を向上させた (図 4)。



-30 m 30 m



0 m 30 m

図 4 1883 年クラカタウ火山噴火に伴う津波 (上) と火砕流 (下) の数値シミュレーション結果の一例。単位は分。火砕流流量: $10^8 \text{ m}^3/\text{s}$, 密度: 900 kg/m^3 。単位は分で、それぞれ 20 分後と 60 分後の状態。

その結果、火砕流の突流入モデルを地質学的に妥当と考えられる流量 (およそ 10^8 kg/s) のもとで用いた場合、沿岸部の津波波高や、バタビア (現ジャカルタ) で観測された津波波形の特徴を従来の研究よりも良く再現できることがわかった (図 5, 6)。このことから、火砕流の海への突流入現象がこの噴火の津波発生メカニズムとして有力であるという結論を得た。

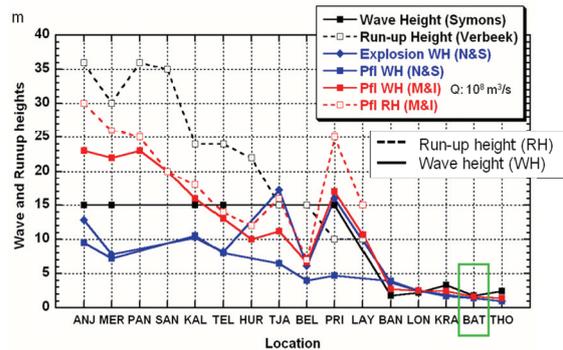


図 5 クラカタウ津波についての本研究による数値計算結果 (赤) と地質・観察記録 (黒) および過去の研究 (青) との比較結果。横軸は比較した地点で、左側が給原に近い地域、右側が給原から離れた地域。WH は波高, RH は遡上高を示す。

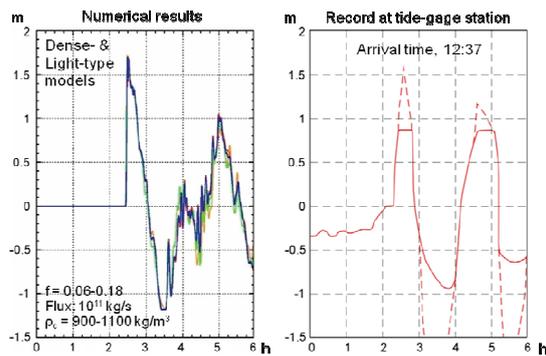


図 6 クラカタウ津波のバタビアにおける数値計算結果(左)と観測記録(右)との比較。到達時間、波高、周期がよく一致する。

また、水理実験や数値実験にもとづく、火砕流の体積より流量が津波の発生効率に大きく寄与することが明らかとなった。火山性密度流の形状や動きについては、流れの密度よりも流れの底面における摩擦抵抗が最も大きく効いていることがわかった。係数については水理実験と数値実験との整合性をもとに決定しているが、その物理的意味付けについては不十分であり、今後の課題である。本研究で提案した火山性密度流の水への流入モデルを鬼界カルデラやクラカタウ火山の噴火に適用することにより、噴火の物理量に関して新たな知見が得られ、津波発生メカニズムに制約が与えられた点は大きな成果である。今後、国内外の火山噴火イベントについてこのモデルを適用し、過去の噴火活動の解明や災害予測に役立てる試みを継続していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1. 前野 深 (2010) 海底カルデラ —巨大噴火ジオハザード— (総特集 IODPの将来のテーマ--IODP第二期にむけた日本版白書より). *月刊地球*, 32, 89-93.
2. Maeno, F., Yokose, H., Kimura, J-I., Shimano, T. and participants of the Geohazard domestic workshop (2009) Exploration into unprecedented volcanic catastrophes in the ocean: unveiling impact of gigantic caldera-forming eruption. *INVEST White Paper*, 7 p.
3. Maeno, F. and Taniguchi, H. (2009)

Sedimentation and welding processes of dilute pyroclastic density currents and fallout during a large-scale silicic eruption, Kikai caldera, Japan. *Sedimentary Geology*, 220, 227-242, doi:10.1016/j.sedgeo.2009.04.015.

4. 前野 深 (2009) 大規模珪長質マグマ噴火におけるカルデラ形成のダイナミクス. *火山*, 54, 113-121.
5. Maeno, F. and Imamura, F. (2007) Numerical investigations of tsunamis generated by pyroclastic flows from the Kikai caldera, Japan. *Geophysical Research Letter*, 34, L23303, doi:10.1029/2007GL031222.
6. Maeno, F. and Taniguchi, H. (2007) Spatiotemporal evolution of a marine caldera-forming eruption, generating a low-aspect ratio pyroclastic flow, 7.3 ka, Kikai caldera, Japan: implication from near-vent eruptive deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167, 212-238, doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.05.003.

[学会発表] (計 11 件)

1. Maeno, F. and Imamura, F., Numerical investigation of pyroclastic flow and tsunami during the 1883 Krakatau eruption, Indonesia., *Cities on Volcano 6*, 31 May 2010, Tenerife, Spain
2. 前野 深・今村文彦, 1883年クラカタウ火山噴火における火砕流と津波の数値実験, 日本火山学会秋季大会, 2009年10月12日, 神奈川・小田原.
3. 前野 深・今村文彦, 1883年クラカタウ火山噴火における津波の発生過程—火砕流流入モデルによる検討—, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月25日, 千葉・幕張.
4. 前野 深・今村文彦, 海域での大規模噴火に伴う火砕流・カルデラ陥没・津波によるインパクト—1883年クラカタウ噴火と7.3 ka 鬼界カルデラ噴火の例—, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月27日, 千葉・幕張.
5. 前野 深・今村文彦, 水より軽い火砕物密度流により津波は発生するか? 日本火

山学会秋季大会, 2008年10月13日, 岩手・岩手大学.

6. 前野 深, 鬼界カルデラにおける 7.3 ka 噴火のダイナミクスとマグマ溜り, 日本鉱物科学会, 2008年9月22日, 秋田・秋田大学 (招待講演) .
7. Maeno, F. and Imamura, F., Impacts of pyroclastic density currents entering sea and tsunami generation processes in coastal/marine explosive eruptions., International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth Interior (IAVCEI) General Meeting, 19 August 2008, Iceland University, Reykjavik, Iceland.
8. 前野 深・今村文彦, 海に流入する火砕流とそれに伴い発生する津波の振る舞い, 日本地球惑星科学連合 2008年大会, 2008年5月26日, 千葉・幕張.
9. Maeno, F., Imamura, F. and Taniguchi, H., Numerical investigations of tsunamis generated by pyroclastic flows from the Kikai caldera, Japan., Cities on Volcanoes 5, 20 November 2007, Shimabara, Japan.
10. Maeno, F. and Taniguchi, H., Evolution of a marine caldera-forming eruption, generating a low-aspect ratio pyroclastic flow, 7.3 ka, Kikai caldera, Japan: implication from near-vent eruptive deposits, International Union of Geodesy and Geophysics, 7 July 2007, Perugia, Italy.
11. 前野 深・谷口宏充, Near-vent sedimentation processes during a plinian phase of a marine caldera-forming eruption, Kikai volcano, Japan. 日本地球惑星科学連合 2007年大会, 2007年5月21日, 千葉・幕張.

[図書] (計 1 件)

1. 今村文彦・前野 深 (2009) 第3章6節 火山性津波. 井田喜明・谷口宏充編 「火山爆発に迫る—噴火メカニズムの解明と火山災害の軽減—」, 東京大学出版会, 161-174.

[その他]

ホームページ等

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/STAFF2/fmaeno.html>

・2008年5月27日「2008年度日本火山学会研究奨励賞」受賞

・2008年8月19日「国際火山学及び地球内部化学協会 (IAVCEI) George Walker Award」受賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前野 深 (MAENO FUKASHI)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 20444078