

火山性物質溶出解明のための多孔質中における高・低温流体移流拡散モデルの開発

海洋土木工学専攻 長山昭夫

1. はじめに

2018年4月初旬の霧島連山の硫黄山噴火に伴った川内川水系長江川の白濁により水稲中止・川魚大量死と環境基準を超えたヒ素が検出された報道¹⁾された(図-1)。その後、長江川の橋梁付近地点で環境調査が現在もお継続²⁾されている。前回の硫黄山噴火は250年前といわれており、過去に長江川が白濁した現象は確認できていない²⁾ために硫黄山噴火と河川の白濁現象の因果関係の検討に多くの時間を費やした。しかしながら火山噴火に起因する火山災害の発生頻度自体は低い、もし1度発生すると地域社会に長期間に渡り甚大な影響を与える。一方、長江川の白濁現象は、硫黄山噴火後の降雨後に長江川の堰や橋梁付近で確認され、同時に堰のように一旦、水を滞留させる位置で川魚の死骸が多く発見された²⁾。また噴火により地表面付近に上昇した火山性物質が降雨による地下水(または伏流水)と地下土壤中や地表面で高温のまま攪拌混合された可能性が指摘³⁾されている(図-2)。

地下土壤中における地下水や熱水の数値シミュレーションはこれまでに多くの文献が存在する。例えば地盤中の温度場の解析については、貯留相シミュレータを使用した広域地下水流動場の検討⁴⁾がなされており、地下熱水の解析については2次元熱水卓越単層解析を用いた地熱域熱水滞留の検討⁵⁾がなされている。しかしながら、今回の白濁現象に関連するような降雨による地下水または伏流水が土壤中の熱流体を流下させるといった現象について検討を行った文献は確認できなかった。



図-1 KHK NEWS WEB サイト¹⁾より引用



図-2 UMK テレビ宮崎 FOCUSweb サイト³⁾より引用

2. 目的

そこで本申請は地下土壤中における火山性物質を高温流体と想定し、この高温流体が降雨によって多量に河川に集積した地下水(低温流体と仮定)への溶出現象の解明を試みた。この目的を達成するために申請者がこれまでに構築した熱流体多相流モデルに、新たに地下土壤を再現可能な多孔質モデル(ポーラスモデル)を追加し、地下土壤中の高温流体の移流拡散現象を検討した。

3. 数値モデルの構築

多相流解析にはオープンソースの3次元数値流体ライブラリ群の OpenFOAM(Open Source Field Operation and Manipulation)⁶⁾を利用した。混相流ソルバの基礎式は、連続の式(1)と非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式(2)であり有限体積法で離散化する。

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p^* + \nabla \tau + \rho g + f_s + S_i \quad (2)$$

ここで ∇ :3次元ベクトル微分演算子、 U :流速ベクトル、 ρ :密度、 p^* :擬似動圧、 τ :粘性応力テンソル、 g :重力加速度ベクトル、 f_s :表面張力に相当する体積力である。また S_i :多孔質体による圧力損失であり、これはDarcy-Forchheimer則⁷⁾で以下に定義される。

$$S_i = -(\mu D_{ij} + \frac{1}{2} \rho |U| F) U_i \quad (3)$$

ここで μ :粘性係数、 D :粘性抵抗、 F :慣性抵抗を示す。また気液界面の追跡についてはVOF法 (Volume Of Fluid) を使用し、界面の数値拡散を抑制する人工圧縮項を導入した移流方程式(4)を採用している。

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \nabla \cdot U a + \nabla \cdot U_c a (1 - a) = 0 \quad (4)$$

ここに a :液相の体積占有率、 U_c :液相流速と気相流速差となる。またこの式に気液界面の再現性向上のためにYoungの式をベースとした動的接触角を追加した⁸⁾。この気液界面の再現性については3次元のベンチマークモデルを使用し検討済である。

今回の白濁現象は、噴火後の降雨の後に各箇所を確認されているために、多量の降雨が河川に集中したことで火山性物質を流下させた可能性がある。このため今回は河川流下水表面を脈動させるために、流入境界において波を入射させることとした。また造波することで反射波を考慮しなければならないが、この反射波についてはActive boundaryと称するデジタルフィルターを使用し、入射した波の流速と逆向きの流速(5)を与えることで反射波の発生を抑制するolaFoam⁹⁾ソルバを使用した。

$$U_{ca} = -\sqrt{\frac{g}{h}} \eta_R \quad (5)$$

ここで U_{ca} :補正流速、 η_R :反射波高、 h :水深である。また熱流体の移流拡散過程を検討するため以下のエネルギー輸送方程式を追加¹⁰⁾した。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (UT) = (dT) \nabla^2 T \quad (6)$$

ここで、 T :温度、 dT :熱拡散率である。この式の左辺第2項が熱の移流を再現し、右辺第1項が熱の拡散を再現している。まず、この方程式を追加した後に熱の移流と拡散が表現できるかについて確認を行った。その結果、移流と拡散ともに計算可能できることを確認した。

次に本報で使用したモデルは多孔質による圧力損失を粘性抵抗と慣性抵抗の和である(3)式で疑似的に表現するため、多孔質の物性値(例えば透水係数、平均粒径など)をそのまま導入することはできない。そのため粘性抵抗 D が水面変動に与える影響について検討を行った。粘性抵抗 D は以下の式である。

$$D = \frac{k}{k_o} \quad (7)$$

ここで、 k :透水係数、 k_o :透過率である。粘性抵抗 D の値については次元解析を行い、使用するベンチマークモデルの物性値を再現できる値を選定した。次に選定した値を含む9ケースの計算を実行し、各計算値と実験値の水面変動の比較を行った。図-3に初期条件を示す。これは多孔質を有するダムブレイクのベンチマークのひとつでLiuら¹¹⁾による実験によるものである。この図

に示すように、中央部に多孔質ダムが位置し、その左側と底面付近に水塊が設置されている。この条件で実際に実験を行うと左側の水が多孔質ダムに侵入しながら水表面が右側に広がる。図-4に水面の初期設定位置を示す。この図には透過率 k_0 を3通り変化させたものを示しており、例えば $k_0 = 1 \times 10^{-4} [\text{cm}^2]$ の場合、粘性抵抗 D は 1×10^8 となる。また図中の緑色直線部で囲まれた部分が多孔質部になる。図-5には実験結果と k_0 を変化させた3通りの計算結果を示す。これらの図から、構築した数値モデルは多孔質ダмбуレイクの実験結果の水面変動を精度良く再現できていることがわかる。また計算による水面位置は、実験による水面位置よりも総じて低い値をとることがわかる。これは Liu らの実験において多孔質ダムと左側の水塊の間の空白部には鉄板が挿入されており、この鉄板を引き抜くことで左側水塊が多孔質ダムへ侵入し始めるが、計算ではこの鉄板を再現していないためであると推測される。しかしながら、ダム左端部の水面の小さな凸部と右端部の凹部を共に再現できていること、全体としての再現性は高いことがわかる。また今回粘性抵抗 D を変化させて(透過率 k_0 を変化させて)計算を行ったが、指定した範囲内においてはベンチマークモデルの再現精度は高いと判断した。

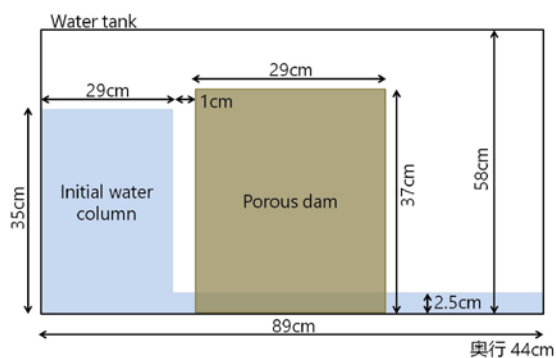


図-3 計算領域

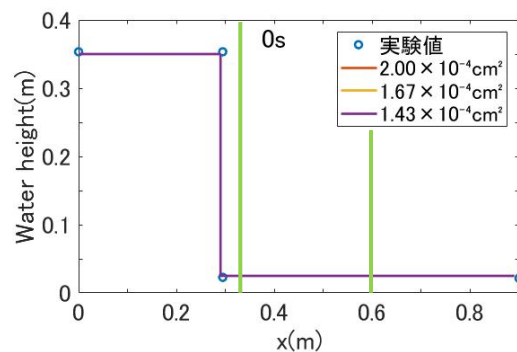


図-4 水面の初期設定位置

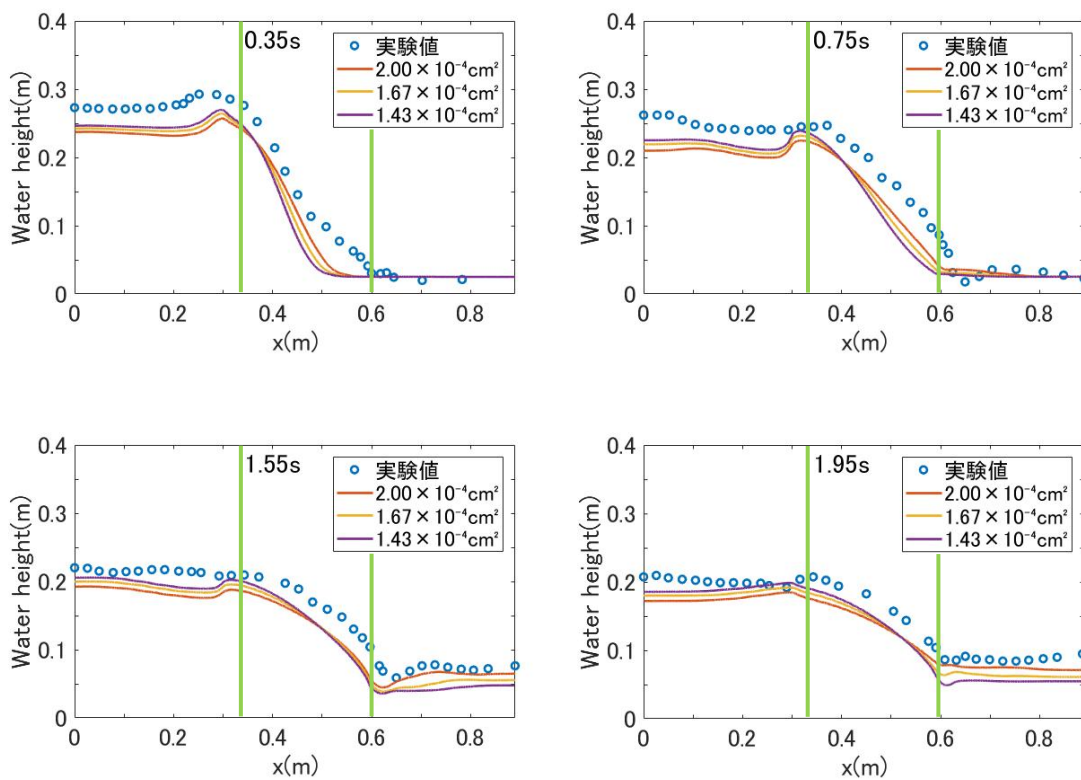


図-5 各時刻における水面変動結果

次に熱流体の多孔質中における自然対流の検討を行った。ベンチマークには鳥生ら¹²⁾による実験結果を使用した。図-6に計算条件を示す。図(a)は計算領域を示し $S_1=S_2=0.066$ [m]、 $S_3=0.33$ [m]である。図(b)は多孔質の配置図であり、粒径 $d=0.011$ [m]の球体が敷き詰められている。また球体の空隙部は全て水で満たされている。図(c)には温度場の初期条件であり、全体としては 300 [K]に設定され、左側側面が 325 [K]、右側側面が 300 [K]で固定されている。図-7は実験における温度場の分布の一例を示しており右端部の図が定常状態のものを示す。側面が加熱と冷却されることで高温部分が上面、低温部分が下面になることと、中央付近は高温と低温の中間温度が広く分布する結果となっている。

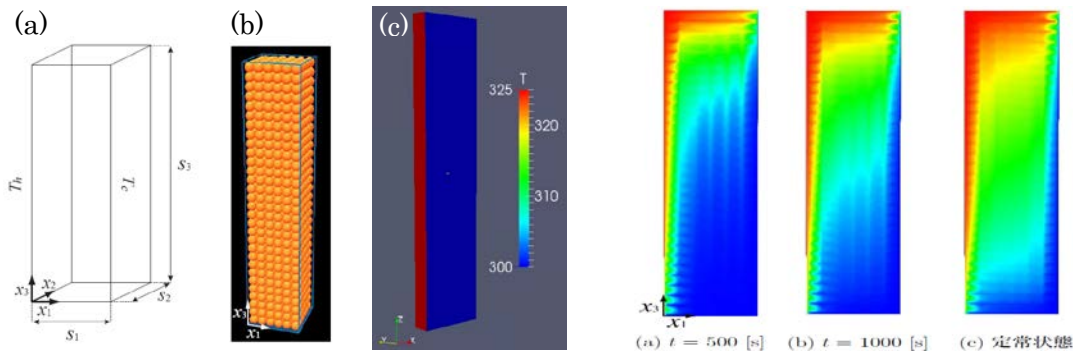


図-6 計算条件(a)計算領域(b)多孔質配置(c)温度場

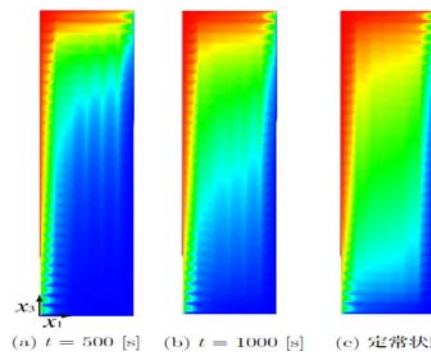


図-7 温度場の実験結果の一例 11)から引用

図-8に透過率 k_o を変化させた場合の温度場の分布を示す。図の(a)(a')(a'')は $t=500$ [s]時、図の(b)(b')(b'')は $t=1000$ [s]時、図の(c)(c')(c'')は定常状態を示している。定常状態について着目すると今回の k_o の設定値の範囲においては実験結果の再現性が高いことがわかる。また(b)(b')(b'')に注目すると、 k_o が大きいほど熱の広がり方が早いことがわかる。つまり粘性抵抗 D が小さいほど熱の拡散速度が大きいことを示している。このように透過率の値により拡散速度に変化がみられた。

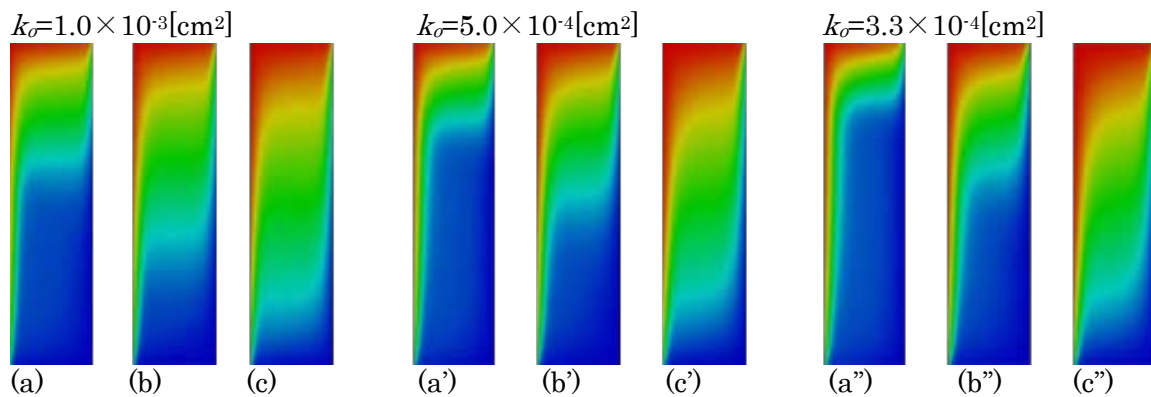
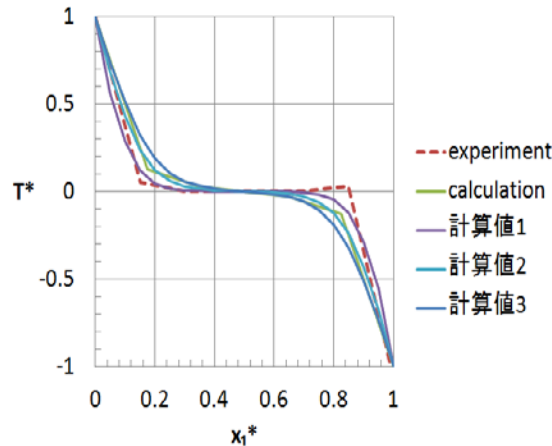
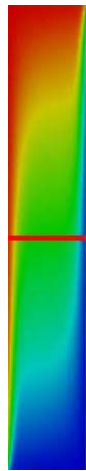


図-8 透過率 k_o を変動させた場合の温度場の変動

次に実験装置中央部の温度分布について検討を行った。図-9に温度分布測定位置を赤色直線で示しおり、図-10は距離と温度を右図に示す方法で無次元化した無次元温度分布を示す。また図中のexperimentとcalculationは鳥生らの実験結果であり、計算1から3までが透過率を変化させて計算した結果となる。この図より、今回のモデルにおける無次元温度分布の計算結果は実験結果の再現性は高いことがわかる。一方で温度勾配が急激な部分においては、この勾配がなまるといった結果となった。これは離散化手法を検討することで改善可能であるため今後の課題としたい。



$$x_i^* = \frac{x_i}{S_i}$$

$$T^* = \frac{T - T_1}{T_h - T_1} \frac{2^{S_3}}{2^{S_3}}$$

透過率 k_0

計算値1: $1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2$
 計算値2: $5.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2$
 計算値3: $3.3 \times 10^{-4} \text{cm}^2$

図-9 温度分布測定位置 図-10 無次元化温度分布

4. 白濁現象再現計算

次に、白濁現象を検討するため、土壤地下中の熱流体が河川流下水により溶出する現象の再現を試みた。今回の噴火では高温の火山性物質が地表面または河床表面まで溶出したことが想定されるため、河床近くに火山性物質を想定した熱流体を設置した。さらに大量の降雨により火山性物質が流下したことが想定されるため河川水面の脈動を造波で再現する条件とした。図-11 に計算領域の寸法と初期の温度場を示す。計算領域は長さ 150.0[m]、高さ 14.0[m]とし土壤地盤を想定した多孔質が高さ 4.0[m]の位置までとした。河床水面は高さ 9.0[m]としこの高さまでは水で満たされている条件とした。一方、空気層は上面の 5.0[m]とした。また温度場は、高熱流体を 370[K]とし、その他は全て 300[K]に設定した。造波については、左側端部を入射波境界とし、右側端部を動的反射波抑制境界とした。また多量の降雨による河川水の脈動と溶出現象を再現するために波高は 2.0[m]、周期 10[s]と比較的大きな値を設定した。また多孔質領域における粘性抵抗 D は 1×10^3 とし碎石岩石の中でも粘性抵抗が小さい値を採用し、脈動による流速が土壤内部でも減衰しにくい条件とした。

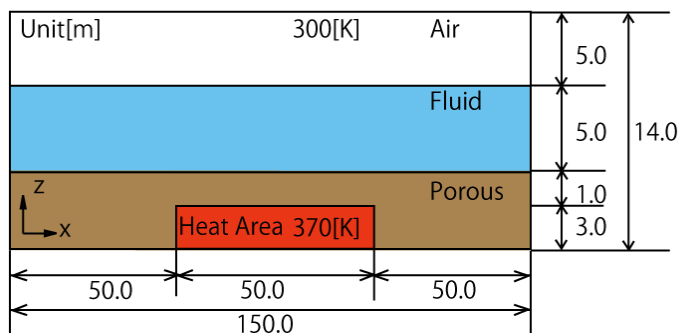


図-11 計算領域寸法と初期温度場

気液界面・土壤中流れ場・温度場の計算結果を図-12 にまとめた。図中左上に計算時間 T を示す。(a) $T=0$ [s]の初期条件での各場を示す。気液界面においては、青色が空気を示し、赤色が水を示している。(b) $T=14$ [s]においては、左境界から波は入射することがわかり、それに連動する形で、土壤中の流速も増加し、熱流体が拡散と移流し始めることがわかる。この時、土壤中流速は最大で 0.2 [m/s]と多孔質中においては大きな値となる。これは造波自体が大きく、粘性抵抗 D を小さく設定したためである。今回は熱流体の拡散移流過程の再現を試みているため多孔質中の流速が大きくなる条件としたが、現実でも同様な現象が作用した可能性がある。(c) $T=300$ [s]においては、波の作用により継続的に土壤中に大きな流速が発生することで熱流体が広範囲に広がり土壤から河川水内に溶出していることがわかる。図中の黒色点線部が多孔質領域である。

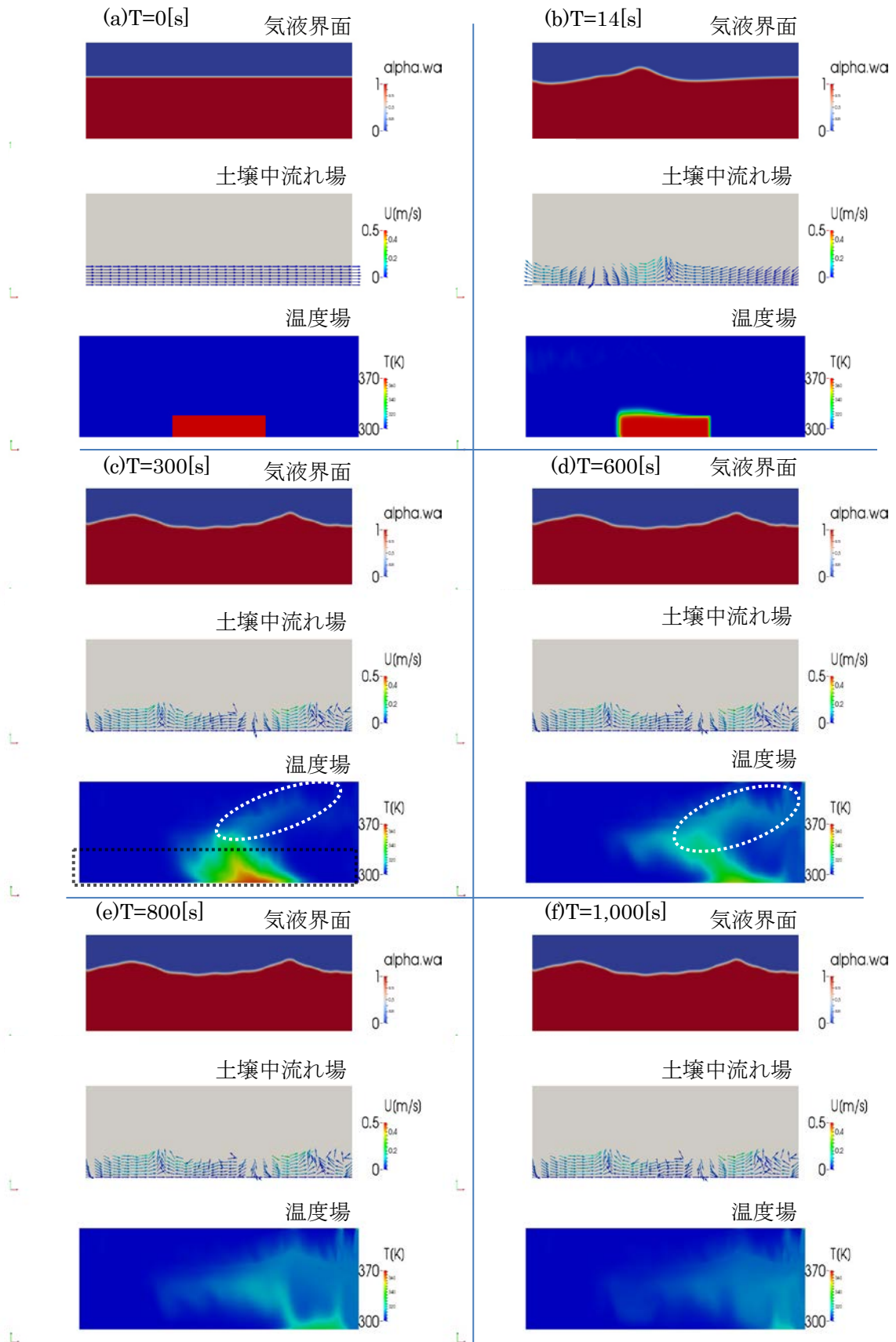


図-12 気液界面・土壌中流れ場・温度場の計算結果

またさらに河川水内に溶出することで界面付近に熱が移流することが確認できる。この部分を白色点線で示す。これは界面付近の流速が他の箇所と比べて相対的に速いためであると考えられる。そしてこの特徴は(d) $T=600$ [s]でも継続することがわかる。つまり波により土壤中の熱流体が河川水内に溶出するとその溶出部(熱部)は水表面まで移動しその他の部分よりも速く流下すると一連の挙動が推測される。(e) (f)においては、継続して波の影響を受けると、土壤中の熱源は拡散移流し高温を保てないことがわかる。さらに土壤中に留まっていた熱源も徐々に流下しながら低温になることがわかった。

5. まとめ

本報では河床付近まで上昇してきた火山性物質が降雨集積により発生した河川水面脈動から受ける影響とその河川流下水による拡散移流現象の再現を試み、その結果以下のことがわかった。

- 1) これまでに構築した多相流解析モデルに温度場の支配方程式と多孔質モデルを追加し、その再現性について検討した結果、構築したモデルが妥当性を有していることを確認した。
- 2) 火山性物質を想定した熱流体が河床付近まで上昇し、その後多量の降雨による河川水の脈動により土壤中に大きな流速が発生する。この継続的な流速が発生することで土壤中の火山性物質は、河床まで上昇し河川水と混合され流下する。
- 3) 河川水と混合した火山性物質は、河川水表面まで上昇し、水表面で一気に流下するといった現象が確認できた。また同時に土壤中の火山性物質は、徐々に流下し、最終的には高温を維持できないことがわかった。

6. 今後の検討

今後は開発した数値モデルを3次元に拡張しその再現性の検討を行いたい。また現地観測を継続し硫黄山噴火に伴う長江川白濁現象の詳細な検討を行いたい。

7. 謝辞

長江川白濁現象について鹿児島県湧水町役場栗野庁舎の方々には情報提供をいただいた。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) NHK NEWS WEB, <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20180428/k10011422071000.html>
- 2) 広報ゆうすい, <https://www.town.yusui.kagoshima.jp/uploaded/attachment/688.pdf>
- 3) UMK テレビ宮崎 FOCUSweb サイト, <https://www.umk.co.jp/udoki/focus/>
- 4) 中尾・信典, 菊地恒夫・玉生志郎, 熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動の数値シミュレーション地質調査研究報告, 59巻1-2号 pp. 53-64, 2008年
- 5) 前野詩朗・小川誠・道奥康治, 鉛直2次元モデルによる多孔質堰を通過する多孔質流れの解析, 土木学会論文集 B, Vol. 63, No. 1, pp16-28, 2007年
- 6) The open source CFD toolbox, <https://www.openfoam.com/>
- 7) Porous Media in OpenFOAM, http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2008/HaukurElvarHafsteinsson/haukurReport.pdf
- 8) Akio NAGAYAMA, Tomotaka TANAKA, Toshiyuki ASANO, Effects of Front Slope of a Breakwater on Tsunami Jet Flow Characteristics, The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2018
- 9) OpenFOAMWiki, <https://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/olaFlow>
- 10) OpenFOAMWiki, How to add temperature to icoFoam, http://openfoamwiki.net/index.php/How_to_add_temperature_to_icoFoam
- 11) Philip L.-F. Liu; Pengzhi Lin; Kuang-An Chang; and Tsutomu Sakakiyama, Numerical Modeling of Wave Interaction with Porous Structures, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Volume 125 Issue 6 - November 1999
- 12) 鳥生大祐, 牛島省, 熱伝導性を有する多孔質体中の自然対流現象に対する多相場モデルの適用性, 土木学会論文集 A2, Vol. 69, No. 2, I_71-I_78, 2013年