

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月20日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740261

研究課題名（和文） 深海の熱水噴出を例とした超臨界水の流れのダイナミクス

研究課題名（英文） Numerical Study on the Supercritical Water Flow Issuing from the Hydrothermal Vent in the Deep Sea

研究代表者

小紫 誠子（KOMURASAKI SATOKO）

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：90318361

研究成果の概要（和文）：深海底から噴出する超臨界熱水の流れについて、非圧縮流れの数値解析手法により数値シミュレーションを行うための数値モデルを構築した。そして実際に計算コードを構築し、計算を行った。扱う流れは極めて非定常性の強い高レイノルズ数の流れであるため、従来の上流差分を用いた方法でも安定して計算を進めることが困難であったため、新たにスキームを開発し、深海の超臨界熱水の複雑な流れ場を捉えることに成功した。

研究成果の概要（英文）：A flow of the supercritical water heated geothermally from the hydrothermal vent in the deep sea was numerically studied. In order to directly simulate the flow whose temperature rapidly changed from the critical temperature to the low environmental temperature of the deep sea, the new equations were derived from the compressible Navier-Stokes equations. In addition, for the highly-unsteady-flow computation, a new hybrid upwind scheme was developed aimed at stabilizing the high-accuracy computation. The scheme was effective and the supercritical water flow issuing from the hydrothermal vent in the deep sea was simulated for the first time.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，数理物理・物性基礎

キーワード：流体数値シミュレーション，超臨界水，深海熱水，非定常非圧縮流れ，複雑流れ，熱対流，計算モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 深海の熱水と超臨界水

海底からの熱水噴出は、地殻内部における鉱物を含むさまざまな物質の移流はもとより、全マントルのダイナミクスにも関係するこ

とが近年指摘されており、海底の熱水活動の解明が急がれている。海底には熱水噴出孔が多く存在し、水深2000メートルの深海においても300℃を超える熱水の噴出が確認されており、200気圧を超える水圧のため熱水は

気化しない。一方、水の臨界圧力は約 220 気圧、臨界温度は 374℃ほどで、深海における熱水は噴出時に超臨界もしくは亜臨界状態にあり、その後周囲の海水に冷却されて液体に遷移するという過程を経ていると考えられる。超臨界水は液体や気体の水とは物性が大きく異なる流体であり、その流れのメカニズムはよく分かっていない。本研究は超臨界から亜臨界および液体までの水の流れを包括的に扱い、数値シミュレーションによって流れのダイナミクスを捉えるもので学術的に大きな意義がある。

(2) 超臨界水の流れ

超臨界水はその化学的性質から様々な工業的利用が考えられている。一方で超臨界水は、気体の粘性や圧縮性および熱膨張性と液体の密度という気液の特徴を併せ持つ単一相流体であり、その流れのダイナミクスはまだよく知られていない。とくに深海の熱水は超臨界状態から液体への遷移を経る流体である。このような流れのダイナミクスに着目した解析は実験的にも数値的にもまだほとんど行われておらず挑戦の価値ある問題であり、本研究の目的となっている。

(3) 超臨界水の流れの数値計算

深海では水圧が支配的であるため圧力の大きな変動は無く、本質的に流れは非圧縮性流体に近いと考えられ、数値計算においてもこのことを考慮する必要がある。申請者は、非圧縮性流体の数値計算を専門としており、高レイノルズ数流れなど種々の非圧縮性流体の高速高精度計算を行ってきた。とくに高温差や密度成層を伴う熱対流や2種類の拡散物質によって流れが誘起される二重拡散対流など熱を含む非圧縮性流体の数値計算において過去に科学研究費補助金を受け成果を得ており、これらの経験は本研究の遂行において大きく役立つ。

2. 研究の目的

(1) 超臨界水の流れのダイナミクス

超臨界状態から液体へと遷移する水の流れのダイナミクスを数値計算によって捉える。目標とするのは、熱対流の温度降下によって超臨界状態から液体へ遷移する流れ場を定性的に再現し、臨界点を経る際の熱膨張率や粘性などの物性の変化が流れに与える影響を調べ、超臨界水および状態遷移を含む流れのメカニズムまで捉えることである。

(2) 深海の熱水噴出流

極めて高圧な環境である深海での超臨界熱水噴出の流れを解析することで、深海環境への影響に関する知見を得る。海底の熱水噴出孔の形状や付近の海底地形形成において

は、熱水と共に噴出される地殻内物質の移流堆積も関係していることが考えられる。また、鉱物類などの地殻内物質の移流拡散を理解することは海底資源開発にも役立つことであり、超臨界熱水流れの解析は将来的に様々な有益な知見を与えると思われる。

3. 研究の方法

(1) 深海の超臨界熱水流れのモデル構築

超臨界状態から液体へ遷移する水の流れを包括的に扱う、数値シミュレーションモデルの構築を行う。深海の熱水噴出における超臨界水の流れは、定圧の下で臨界温度を境に熱膨張率と粘性が変化する、高温差を伴う非圧縮性流れの問題として扱うことができる。申請者は過去に高温差を伴う熱対流モデルを構築しており、これを拡張して熱膨張率と粘性の変化を考慮したモデルを構築する。その際、超臨界水はとくに臨界点付近で物性値が大きく変化するため、実測値を用いて式を立てる。

(2) 高速高精度数値計算コードの開発

構築したモデルを基に計算コードを完成させる。超臨界水はとくに、その高密度低粘性という特徴から高レイノルズ数流れとなるため、計算コードにおいては、その複雑な流れ構造を捉えるために、計算精度の維持と安定に計算を進められるものであることが不可欠である。とくに、非圧縮性流体において極めて重要な圧力ポアソン方程式の計算に関して、高速高精度計算スキームを組み込むことで、数値計算の高精度化を図る。また、高レイノルズ数流れを扱う上で重要な上流差分スキームの改良を図る。

(3) 数値計算

深海の熱水を想定し、超臨界水流れの2次元および3次元計算を実行する。計算で得られる流れ場の理論的考察等から、モデルの検証を行う。また、公募研究「熱水プルームの流体数値シミュレーションによる拡散過程の解析」において得られる知見も参考にしながら、モデルの確立と計算コードを完成させる。

数値計算では、超臨界熱水とより温度の低い熱水の流れを比較しながら、流れ場の解析を進める。臨界温度付近では温度変化によって物性値が大きく変化するため、液体熱水と流れ場が異なるが、その違いから物性値の温度変化の影響を考察し、流れ場を解析する。

4. 研究成果

(1) 超臨界水流れの数値モデル

深海の熱水噴出孔下の海底下の熱水で見られる超臨界水を数値的に解くための物理・数学モデルを構築した。高精度高効率計

算を実現するため、密度を温度のみの関数と仮定した下で圧縮性ナビエ・ストークス方程式を非圧縮性方程式に準ずる方程式に変形し支配方程式の定式化を行った。超臨界状態では、通常温度のみならず圧力が変化した場合でも密度が大きく変化するが、本研究のように高压の深海における熱水では、圧力は水圧が支配的であるため圧力はほとんど変化しないものと考え、温度によって密度が定まるものと仮定した。すなわち、質量保存を保障する連続の式は、温度を支配するエネルギー保存の式を用いて、密度を温度の関数で書き換えた式に変形して、圧力ポアソン方程式に組み込む。構築された支配方程式は以下の通りである。

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial u_j}{\partial x_j}$$

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \delta p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \left(\frac{1}{\rho} - 1 \right) g_i$$

$$\frac{D}{Dt} \left[\left(1 + \frac{p_0}{C_v \rho_0} a_m \right) T + \frac{p_0}{C_v \rho_0} \frac{b_m}{T_0} \right] = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

u_i : 速度ベクトル, T : 温度, ρ : 密度, p : 圧力

$\delta p = p - p_b$, $p_b = p_b(x_3)$: 静水圧

p_0 : 代表圧力, ρ_0 : 代表密度, g : 重力加速度,

C_v : 定圧比熱, Re : レイノルズ数, Pr : プラントル数

密度や Re および Pr に含まれる粘性係数や熱拡散係数は温度に依存して変化するため、すでに実験的に得られているこれらの物性値の温度変化表を用いて温度の1次補間多項式を構成して求める。たとえば密度に関しては以下の通りとなる。密度に関しては、その物理的性質から密度の逆数を温度の1次式で置き換える。

$$\frac{1}{\rho} = a_m T + b_m, \quad T_m \leq T < T_{m+1}$$

$$(T_{\min} - \varepsilon < T_0 < \dots < T_m < T_{m+1} < \dots < T_M < T_{\max} + \varepsilon)$$

(2) ハイブリッド上流差分スキーム

ここで扱われる流れは、超臨界状態から深海の低温海水によって一気に冷やされ液体に戻る水の、極めて温度変化の大きい熱対流現象である。温度に伴う物性の変化も大きく、流れの構造は極めて複雑となる。高レイノルズ数の流れ場と高低差の大きい温度場を同時に解く非圧縮流れの数値計算はほとんど行われておらず、差分法を採用する本計算において新たなハイブリッド上流差分スキームを開発し用いることで高精度かつ安定に計算を進めることが可能となった。

3次精度上流差分スキームは高レイノルズ数流れの非定常計算において有用な方法であり、流れ場の解析に用いられる。温度場においては、本研究では、精度は低いはその効

き方が異なる1次精度上流差分と、3次精度上流差分を組み合わせたハイブリッド上流差分スキームを構築して用いた。このスキームによって、局所的に温度変化の大きい不連続点を数値的に安定に扱うことが可能となり、深海の超臨界熱水の噴出流れの数値計算が初めて実現した。例えば、温度の x 方向の移流項に対して以下のようにハイブリッド上流差分スキームを適用する：

$$u \frac{\partial T}{\partial x} \approx Adv_3 + (\alpha \cdot Dif_1 + (1-\alpha) \cdot Dif_3)$$

$$Adv_3 = u_k \frac{-T_{k+2} + 8(T_{k+1} - T_{k-1}) + T_{k-2}}{12\Delta x}$$

$$Dif_3 = \frac{|u_k| \Delta x^3}{4} \frac{T_{k+2} - 4T_{k+1} + T_k - 4T_{k-1} + T_{k-2}}{\Delta x^4}$$

$$Dif_1 = \frac{|u_k| \Delta x}{2} \frac{-T_{k+1} + 2T_k - T_{k-1}}{\Delta x^2}$$

$$\alpha = \min \left(1, \frac{|D_{xx}\phi_+ + D_{xx}\phi_-|}{4(l_+ + l_-)} \right)$$

$$\phi_{+1} = \frac{T_{k+1} - T_k}{x_{k+1} - x_k}, \quad \phi_{+2} = \phi_{+1} + \frac{T_{k+2} - T_{k+1}}{x_{k+2} - x_{k+1}}, \quad \phi_0 = 0$$

$$\phi_{-1} = \frac{T_k - T_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}, \quad \phi_{-2} = \phi_{-1} - \frac{T_{k-1} - T_{k-2}}{x_{k-1} - x_{k-2}}$$

$$l_+ = \sqrt{l^2 + \phi_{+1}^2}, \quad l_- = \sqrt{l^2 + \phi_{-1}^2}$$

$$D_{xx}\phi_+ = \frac{\phi_{+2} - 2\phi_{+1} + \phi_0}{2}, \quad D_{xx}\phi_- = \frac{\phi_0 - 2\phi_{-1} + \phi_{-2}}{2}$$

ハイブリッド上流差分において1次精度上流差分と3次精度上流差分の重み α は、対象となる温度曲線の滑らかさによって自動的に決まり、調整パラメータが不要であることが本スキームの最大の特徴である。

ハイブリッド上流差分スキームを1次元移流方程式に適用した結果を図1に示す。

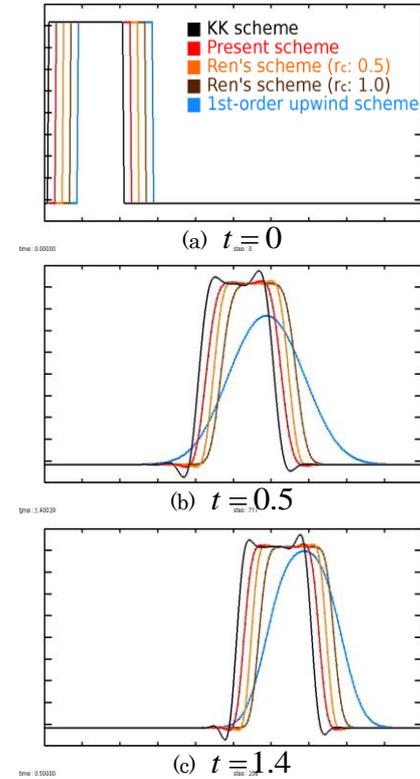


図1 移流方程式の計算

表示しているグラフは、(a)初期条件（矩形波）、(b) $t = 0.5$ のときの解、(c) $t = 1.4$ のときの解で、KK スキーム（3次精度上流差分のみ）、ハイブリッド上流差分(Present scheme)、Ren のハイブリッドスキーム（圧縮性流に用いられるハイブリッドスキームで調整パラメータ $r_c = 0.5$ の場合）、同じく Ren のスキームで $r_c = 1.0$ の場合、1次精度上流差分のみ、の5種類のスキームを用いてそれぞれ計算した結果である。移流方程式の解は初期の波形が移流していくので、矩形形状が維持されているものほど計算結果として良好であるといえる。KK スキームでは矩形波の不連続的な傾きが最も維持されているが、その不連続点付近でグラフがオーバーシュートしていることがわかる。1次精度上流差分のみ適用した場合は数値粘性の影響が大きすぎて比較に値しないが、他の3つはオーバーシュートも見られず、数値粘性の影響で若干異なる結果になっている。本ハイブリッド上流差分スキーム(Present scheme)を適用した場合は、調整パラメータ無しで良好な結果が得られている。同様に Ren のスキームもよく似た結果を出しているが、問題に応じて適切なパラメータ r_c の設定が必要であり、一般の問題に用いるには調整が困難である。

(3) 数値計算と計算結果

支配方程式におけるその他の微分項にも差分法を適用し、熱水噴出孔の中心を通る軸に関して軸対称性を仮定（図2）した2次元計算を実行した

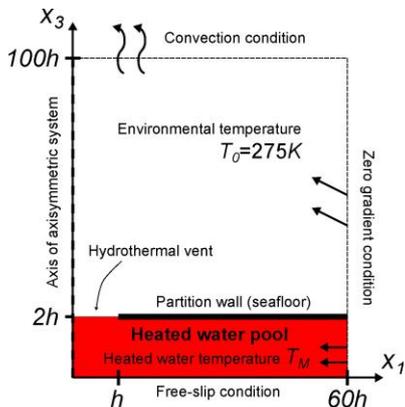


図2 x_3 軸に関する軸対称を仮定した計算領域

水深 2000m を超える深海を想定し、海底付近の海水温度は $T_0 = 275\text{K}$ 、海底熱水噴出孔から噴出する熱水温度は $T_M = 625\text{K}$, 675K の2 ケースを仮定した。前者は高温であるが液体、後者は超臨界状態に達した温度である。図4, 5 は各ケースの温度場について噴出開始時の時間発展の様子を示したものである。

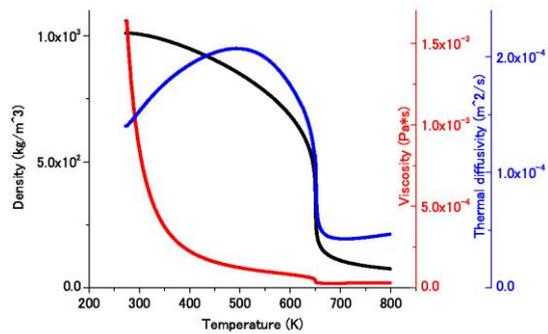


図3 水の物性値の温度による変化

温度が臨界温度を超えた超臨界状態の熱水では噴出流の発達に極めて速く、流れ場も非常に複雑となる。図5における黒線は臨界温度を示しており、超臨界状態と液体との境界を表している。特に臨界温度付近で温度変化による物性値の変化が大きく、流れ場を複雑にしている。図3は温度変化による水の密度(黒)、粘性率(赤)、熱拡散係数(青)の変化を表したものである。水の臨界温度はおよそ 647K であり、この温度付近で各物性値が大きく変化し流れ場に影響を与える。

図6は、超臨界状態の熱水の流れ場の、流れが十分に発達したあとの短時間 ($3.347 \sim 3.424\text{s}$) における時間発展の様子を示している。短時間の間に流れが複雑に変化し、流れの非定常性が極めて強い。

(4) 研究成果のインパクトと今後の展望

本計算により、極めて非定常性が強く複雑な構造を持つ流れが再現され、深海底から噴出する超高温熱水の姿を初めて捉えることができた。これらの計算により、高温熱水でも臨界温度前後の液相と超臨界相で流れ場が大きく異なることが明らかになった。すなわち、高温の液体熱水では上昇速度は速いながらも安定し定常的に渦が流れていくのに対し、超臨界熱水は爆発的に発達しながら上昇し、非定常的に渦が生成されて流れていく。とくに、噴出流の根本の噴出孔付近において上方で生成された渦が上から滑り落ちてくるような状況も確認され、たとえば熱水に混合している地殻内鉱物類が噴出孔の極めて近い場所に堆積するというような、熱水噴出に付随して起こる現象も予測される。

本研究の成果により、実験も観測も極めて困難な 2000m 以上の深海底において、しかし活発な活動を続ける熱水系の、流体力学的見地からの解析に道を開いた。とくに超臨界熱水のような高温熱水では海底下の鉱物類の移流拡散も活発であり、熱水噴出孔周辺の生物環境への影響や将来の地下資源の探索など広範囲に寄与する可能性があるものである。

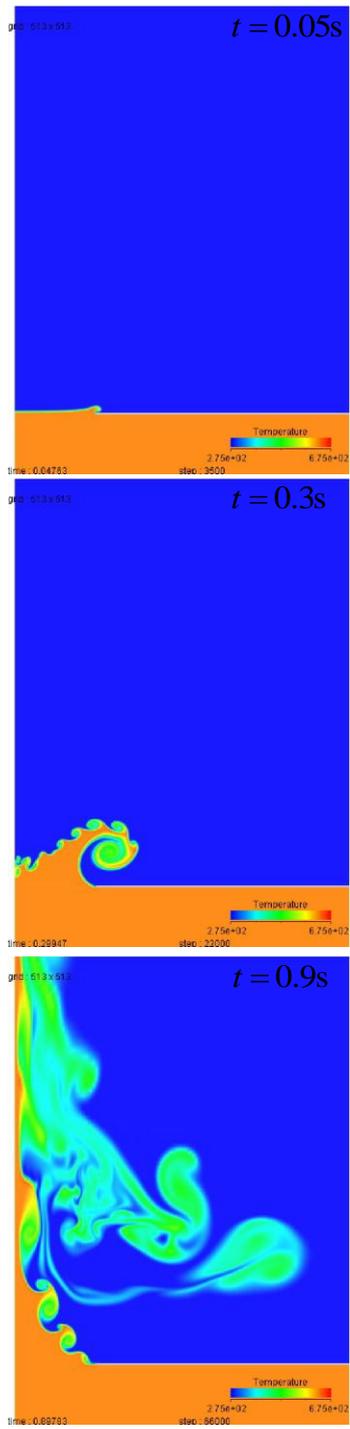


図4 温度場の時間発展 (625K)

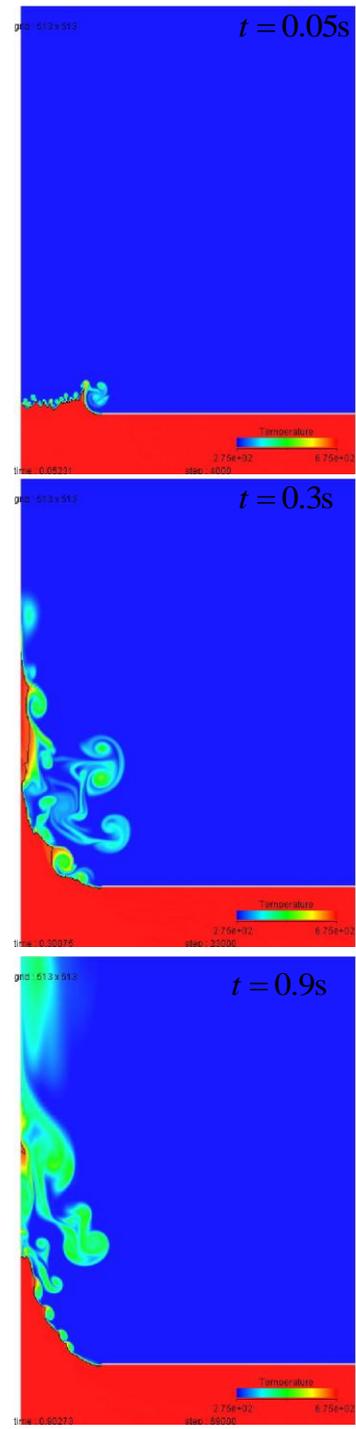


図5 温度場の時間発展 (675K)

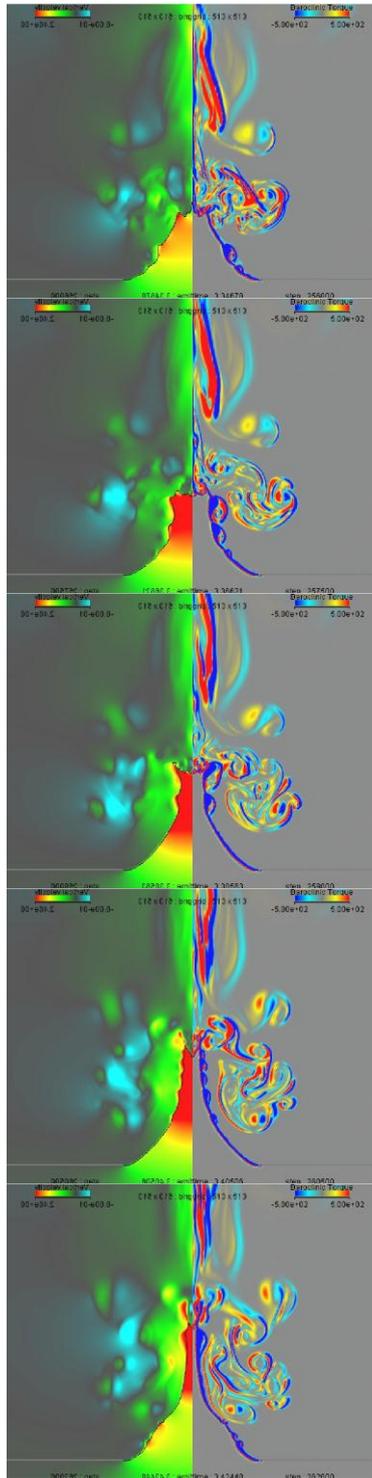


図6 鉛直方向速度分布(左), パロクリニックトルク(右)の流れ場発達後の時間発展(上から下)(675K)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① 小紫 誠子, ハイブリッド上流差分を用いた熱対流の数値計算, 査読無, 第26回数値流体力学シンポジウム・講演論文集, 2012, A02-2 (デジタル)
- ② 小紫 誠子, 高圧下における高温熱水対流の数値シミュレーション, 査読無, 日本流体力学

学会年会 2012・講演論文集, 2012, 63 (デジタル).

③ 小紫 誠子, A Hydrothermal Convective Flow at Extremely High Temperature, Proceedings of The Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics, 査読有, ICCFD7-2012, 2012, 3001.

④ 小紫 誠子, 大西 植平, 茂田 正哉, 福西 祐, 深海カルデラ内の熱水活動によって誘起される流れの数値解析, 査読無, 数理解析研究所講究録「複雑流体の数理解析と数値解析」, 1724, 2011, pp.118-125.

⑤ 小紫 誠子, 大西 植平, 茂田 正哉, 福西 祐, 深海カルデラ内における熱水噴出の数値シミュレーション, 査読無, 日本流体力学会年会 2010・講演論文集, 2011, 37 (デジタル).

[学会発表] (計7件)

① 小紫 誠子, ハイブリッド上流差分を用いた熱対流の数値計算, 第26回数値流体力学シンポジウム, 2012. 12.

② 小紫 誠子, Simulation of highly-unsteady hydrothermal convection above the critical temperature in the deep sea, 65th Annual Meeting of the American Physical Society, Division of Fluid Dynamics, 2012. 11.

③ 小紫 誠子, 高圧下における高温熱水対流の数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2012, 2012. 9.

④ 小紫 誠子, A Hydrothermal Convective Flow at Extremely High Temperature, The Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics, 2012. 7.

⑤ 小紫 誠子, Simulation of a submarine hydrothermal convection using a numerical model for a supercritical water flow, 64th Annual Meeting of the American Physical Society, Division of Fluid Dynamics, 2011. 11.

⑥ 小紫 誠子, 大西 植平, 茂田 正哉, 福西 祐, 深海カルデラ内の熱水活動によって誘起される流れの数値解析, 数理解析研究所「複雑流体の数理解析と数値解析」研究会, 2010. 9.

⑦ 小紫 誠子, 大西 植平, 茂田 正哉, 福西 祐, 深海カルデラ内における熱水噴出の数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2010, 2010. 9.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小紫 誠子 (KOMURASAKI SATOKO)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号: 90318361