

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26610119

研究課題名(和文) 海底熱水系の超臨界流体モデルによる数値解析

研究課題名(英文) Simulation of a supercritical fluid flow at hydrothermal system

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの研究を発展させて、深海の超臨界熱水の噴出流を数値シミュレーションで扱うためのより現実に近い数値モデルを構築し、密度などの物性値が温度によって激しく変化しかつレイノルズ数の高い流れを圧力一定の下で圧縮性Navier-Stokes方程式を高速高精度かつ計算上安定性の高いスキームを開発して計算を進めた。その結果、深海の超臨界熱水の噴出流の流れ場を再現することに成功した。とくに高温液体の亜臨界熱水噴出流と比較した場合の流れ場の違いは顕著であり、極めて非定常性が強く、噴出後すぐに対称性が崩れ流れ場が複雑化する様子がとらえられた。一方で高温の領域は噴出孔付近の領域に限られるという結果も得られた。

研究成果の概要(英文)：Hydrothermal convective flows found in geothermally heated water issuing from hydrothermal vents at the seafloor are numerically studied. The heated water in the deep sea sometimes is in the supercritical state because its temperature and pressure exceed the critical values. The issued supercritical water is cooled by the cold ambient water and rapidly changes into a liquid state, which is accompanied by significant changes in the density and the other physical properties.

To investigate the flow structure of the sub- and supercritical water in the deep sea, the compressible Navier-Stokes equations are solved using a method usually used in incompressible flow computations introducing a highly robust scheme to stabilize the high-accuracy computation. The computational results clearly showed that complexity and the unsteadiness of the flow were significantly influenced by whether the issuing high temperature water was in the supercritical state or not.

研究分野：計算流体力学

キーワード：熱水噴出流 超臨界状態 流体計算 圧縮性ナビエ・ストークス方程式 非圧縮数値計算 流体構造
非定常流 高レイノルズ数

1. 研究開始当初の背景

海水は海底の広範囲から海底下に浸み込み、地熱によって暖められながら地殻内を流れ、様々な鉱物類を溶け込ませて海底熱水噴出孔から海洋中に噴出する。低温の海洋中に放出された鉱物類は沈殿・固結し、噴出孔周りにチムニーなどの構造物を形成して噴出孔周辺の環境を変化させ、条件が整えば海底熱水鉱床を形成する。この一連の熱水活動を海底熱水系という。一方、海嶺や海溝付近には熱水噴出孔が多く存在し、水深 2000m 以上の深海で 400 に達する高温の熱水噴出も確認されている。このような環境下で、熱水は臨界圧力 22MPa および臨界温度 374 を越えて超臨界状態となる。とくに、臨界点付近にある水は、液体の水よりもはるかに多くの熱を輸送し物質を溶解させることができるため、物質輸送の観点から極めて大きな役割を果たすと考えられる。このことは、近年話題に上るようになった海底熱水鉱床形成においても関係があると思われる。一方で、その極限環境から、深海探索は容易ではなく、熱水噴出流のような流れ場についてはよく知られていない。とくに高圧環境下で高温の熱水が低温の深海中に噴出する超臨界熱水噴出流は実験室での再現も困難であり、未知流れである。その流れの解析においては数値シミュレーションが極めて有用である。なお、すでに海嶺や海溝の規模での海底熱水噴出による熱等の移流拡散現象については大規模シミュレーションが行われているが、局所的な熱水噴出流の流体構造を対象とした計算はほとんど実施されていない。

2. 研究の目的

科研費若手(B) (22740261) (平成 22 年度～24 年度)の研究課題において、超臨界状態の熱水流れの数値計算を実施し、その複雑な流れ場を扱う計算スキームの開発を行っている。本研究ではこれを応用して、海底熱水系を流体力学的見地からとらえ、海底熱水系における熱水とくに超臨界熱水の流れと、噴出孔から熱水とともに海洋中に噴出される物質の移流拡散と析出・沈殿を流体数値シミュレーションによって解析することを目的とする。そして、深海の超臨界水噴出流の詳細な流体構造を明らかにすることで、熱水に溶け込んだ地殻内物質の海洋中での移流拡散における「流れの役割」を明らかにする。

3. 研究の方法

まず、一定高圧下での超臨界流体噴出流の数値モデルを完成させる。深海の超臨界水噴出流を扱うための数値モデルをこれまでの研究において開発しているが、そこでは潜熱が考慮されていないなど、非現実的な仮定が含まれている。潜熱に関しては、エネルギー方程式においてエンタルピーそのものを解くようモデルを変更する。また、より現実に近い数値シミュレーションの実現のために、

計算コードの並列化を行い、並列計算による高速化を狙う。さらに高性能計算機を導入することで、より高速で高精度の数値計算の実施を目指す。

さらに、熱水噴出孔に至る海底下の熱水流路や周囲の温度、圧力などの諸条件が詳細に解明されているわけではなく、熱水噴出孔下の計算条件の適切なモデルを考案する必要がある。本計算では、熱水噴出孔に至る海底下流路をできるだけ簡素にモデル化するため、より高圧環境であると考えられている海底下において、流路内の熱水に速度を与えること等でモデルを構築する。

本計算ではすでに高レイノルズ数の非圧縮非定常流れを高精度で扱う数値モデルを採用しているが、計算をさらに安定に進めるため、エネルギー方程式の数値解法において新たなスキームを開発する。

一方、現実の深海の高温熱水噴出流に関する観測データはごく限られているため、本計算の検証においては、既の実験が行われている超臨界流体の別の問題を取り上げ、計算を別途行う。

4. 研究成果

本研究では、これまでの研究を進展させて、まず、深海の超臨界熱水の噴出流を数値シミュレーションで扱うためのより現実に近い数値モデルを構築した。想定する流れは、深海の高圧一定の条件下で、臨界温度を上回る温度の熱水が、深海の低温の海水中に噴出するという、極めて大きな温度変化を伴う流れである。本計算では 23MPa の圧力下で水温 275K の深海中に 675K の超臨界水が噴出する状況を仮定し、モデル構築を行った。なお計算では海水ではなく真水の物性値を用いており、臨界値も真水のものをを用いている。

計算に用いた 23MPa の圧力は水の臨界圧力を少し上回る。このとき定圧比熱が極大となる温度が擬臨界温度であるが、感覚的には臨界点(臨界温度、臨界圧力)を通る蒸気圧曲線をそのまま延長したような曲線に乗る温度である。臨界点付近と同様に、この擬臨界温度付近で流体の密度や拡散係数、熱物性が温度変化に伴って大きく変化する(図 1)。本計算で用いた熱水は擬臨界温度を越える 675K の超臨界状態にあり、深海の低温の水で冷やされる際に擬臨界温度を経て液体に転移する。一方、熱水噴出孔付近の流れはおおよそ $10^4 \sim 10^6$ の高レイノルズ数領域であるが、流速は音速に比べて小さい。以上のことより、本計算では、非圧縮流れの数値計算で通常用いられる方法と同様の方法で、圧力一定の仮定の下で圧縮性 Navier-Stokes 方程式を解く方法を採用した。

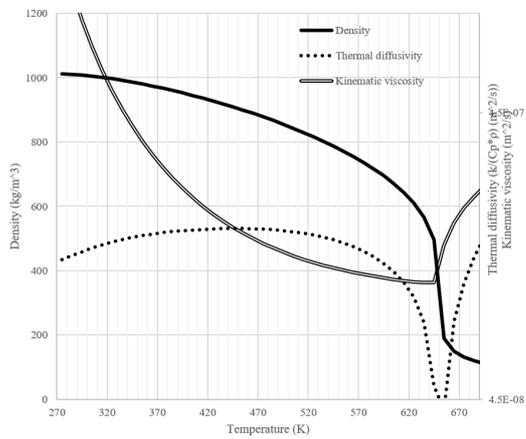
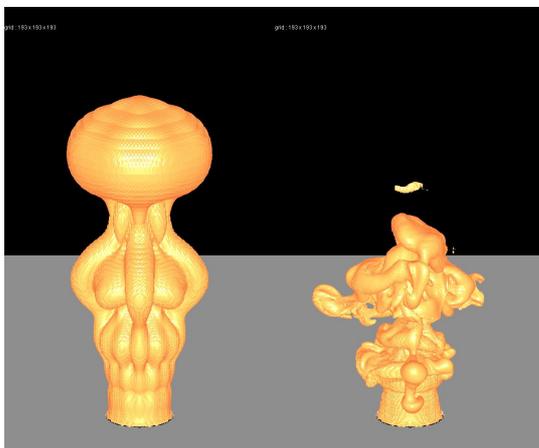
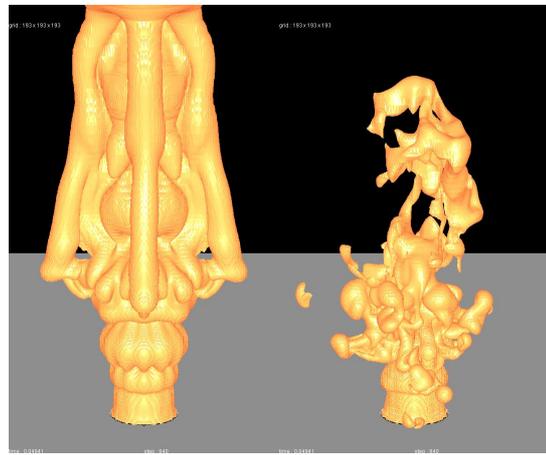


図1 圧力23MPaのときの水の密度(Density), 熱拡散率(Thermal diffusivity), 動粘性率(Kinematic viscosity)の温度による変化. 擬臨界温度付近で各値が大きく変化する.

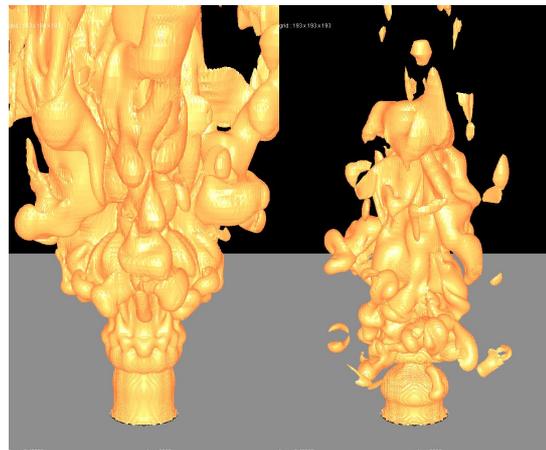
数値シミュレーション結果を図2~4に示す. 各図では, 比較のために計算した熱水温度625Kの亜臨界水の結果(左)と675Kの超臨界水(右)の結果を表している. 図2では, 噴出孔からの熱水噴出開始後からの温度場の時間発展の様子を示し, 図3,4では十分時間が経った後の熱水噴出流の瞬間の流れ場の様子を表示している. これらの結果から, 超臨界熱水噴出流では, 噴出後すぐに流れの対称性が崩れ, 渦は噴出流に特有の概形を持ちながらも大小の渦が非対称に複雑に絡み合っている様子を示している. 非定常性も極めて強く, 実際, 短時間に激しく変化しながら流動する様子がシミュレーションによりとらえられている. 一方で, 超臨界熱水の場合は噴出時の速度が大きくこのときに鉛直方向速度は最大となるが, その後は直ちに速度は鈍り, 亜臨界熱水と比較して, 高温域が上方まで到達しにくい. これは, 噴出後の高レイノルズ数の流れが周囲の低温水との混合を促進し, 熱水温度が直ちに下がり, これにより浮力も失われることが原因と考えられる.



$t = 0.031s$



$t = 0.049s$



$t = 0.403s$

図2 等温面(300K)による温度場の噴出開始後からの時間発展の様子.

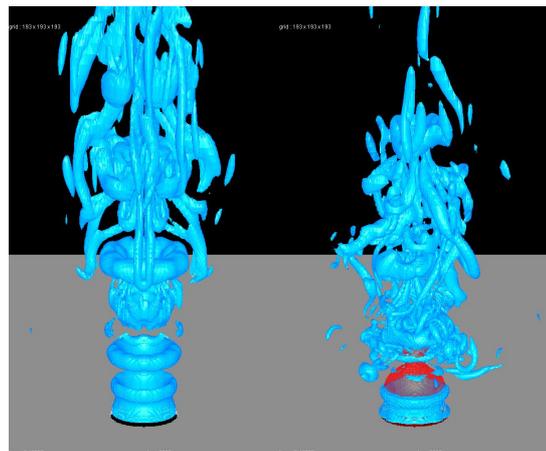


図3 速度勾配テンソルの第2不変量正值の等値面(渦の強い領域).

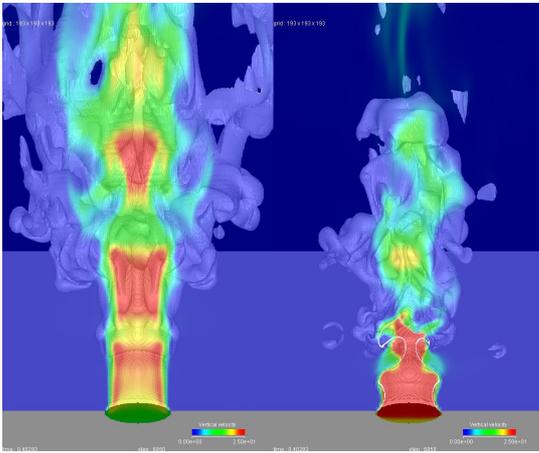


図4 噴出孔中心を通る鉛直断面における鉛直方向速度分布．上向きの速度が大きい領域を赤で表示．

本研究の成果のひとつは、深海の超臨界熱水噴出流をより現実に近い状況で数値シミュレーションにより再現したことである。そして、亜臨界熱水とは大きく異なる超臨界熱水の流れ場をとらえた。

このように本計算では、極めて大きな温度変化を伴い、不連続に近い温度勾配を含むような場を安定に取り扱う必要がある。そのため、エネルギー方程式の非線形移流項における1次精度3次精度ハイブリッド上流差分の適用に加えて、同方程式で解くエンタルピーを別の空間に変換して解くことで、不連続に近い温度勾配から計算上発生する高周波成分の振幅を抑え込み、安定に計算を進めることに成功した。しかし、一般の上流差分法のように高周波成分そのものを除去するのではなく、かえって蓄積してしまうことから、将来的にはさらに高性能なハイブリッド上流差分法のようなスキームの開発が必要であると考えている。

本研究において大きな課題であったのが数値計算の検証であった。現実の深海の熱水噴出流はその極限環境から観測や実験が困難であり、熱水噴出流の流れ場そのものと計算結果の比較は現実的ではない。そこで、二酸化炭素を超臨界流体として用いたホットワイヤからの熱対流の実験などを参考に、数値モデルの検証を試みた。実験で扱った流れでは、超臨界状態と液体の界面における界面直力の影響が無視できなかったことから、数値モデルに新たに界面張力を考慮した簡易的なモデルを導入して計算を行った。その結果、定性的には実験結果に近い結果を得ることができたが、より詳細に、定量的な検証を行えるには至らなかった。細かいホットワイヤからの熱対流現象そのものが、計算上難しい問題であったこともある。このような過程を経て、現在も検証計算の継続中であり、速やかに検証を終えて、本来の熱水噴出流の数値解析を今後も進めていきたいと考えている。

さらに深海の超臨界熱水の流れ場について、すでに亜臨界熱水とは大きく異なる流れが再現されていることもあり、より詳細にその流体構造を解析すると共に、超臨界熱水噴出流による海底下からの物質の移流拡散現象についても解析していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

小紫誠子, 深海の低温水中に噴出する超臨界熱水流れ, 第31回数値流体力学シンポジウム講演論集, 査読無, A08-2, 2017

小紫誠子, Simulation of a hydrothermal flow with a large temperature difference at a supercritical pressure, Proceedings of the 9th JSME-KSME Thermal and Engineering Conference, 査読有, TPEC9-1289, 2017

小紫誠子, 超臨界圧力下における熱流体シミュレーション, 日本流体力学学会年会2016講演論文集, 査読無, 265.pdf, 2016

小紫誠子, Simulation of a Supercritical Fluid Flow with Large Temperature Difference using the Method for Incompressible Flow Computations, Proceedings of the 27th International Symposium on Transport Phenomena, 査読無, ISTP27-189, 2016

小紫誠子, 超臨界流体による熱対流の数値シミュレーション, 第29回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 査読無, B04-1, 2015

小紫誠子, 亜臨界状態への移行を伴う超臨界水の流れの数値シミュレーション, 日本流体力学学会年会2014講演論文集, 査読無, 157.pdf, 2014

〔学会発表〕(計 9 件)

小紫誠子, 深海の低温水中に噴出する超臨界熱水流れ, 第31回数値流体力学シンポジウム, 2017

小紫誠子, Simulation of a hydrothermal flow with a large temperature difference at a supercritical pressure, The 9th JSME-KSME Thermal and Engineering Conference, 2017

小紫誠子, 流れによる4次元空間の可視化, 可視化情報全国講演会2016超次元の可視化ワークショップ, 2016

小紫誠子, 超臨界圧力下における熱流体シミュレーション, 日本流体力学学会年会2016, 2016

小紫誠子, Simulation of a Supercritical Fluid Flow with Large Temperature Difference using the Method for Incompressible Flow Computations, The 27th International Symposium on Transport Phenomena, 2016

小紫誠子, 超臨界流体による熱対流の数値シミュレーション, 第29回数値流体力学

シンポジウム, 2015

小紫誠子, Simulation of a
Supercritical Fluid Flow with Large
Temperature Difference under the
Assumption of Constant Pressure, 68th
Annual Meeting of the American Physical
Society, Division of Fluid Dynamics, 2015

小紫誠子, Simulation of a
supercritical fluid flow with extremely
high temperature gradients, 67th Annual
Meeting of the American Physical Society,
Division of Fluid Dynamics, 2014

小紫誠子, 亜臨界状態への移行を伴う超
臨界水の流れの数値シミュレーション, 日
本流体力学会年会 2014, 2014

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 : 9 0 3 1 8 3 6 1