

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 2日現在

機関番号：12611
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560157
 研究課題名（和文） 細長い領域における流れの数値計算法の開発とその災害予測への応用

研究課題名（英文） Development of a Specialized Numerical Method for Fluid Motion in Region with Large Aspect Ratio and Application for Disaster Preparedness

研究代表者

河村 哲也 (KAWAMURA TETUYA)
 お茶の水女子大学・理事(副学長)
 研究者番号：40143383

研究成果の概要（和文）：本研究は河川、トンネル、パイプなど、正確かつ短時間で数値計算を行うことが難しいアスペクト比の非常に大きい領域における流れに対して有効な数値計算法の開発と、その災害予測への応用を目的とするものである。代表者が考案した、流れを1次元流れと摂動に分け摂動部分に関する方程式を解くという、細長い領域における流れの数値計算法を、自由表面を含む流れと熱を含む流れに拡張し、防災に関連する諸問題に応用した。

研究成果の概要（英文）：Calculation for fluid motion precisely in regions of very large aspect ratio such as river, tunnel or pipe without much computational costs is not easy. A new numerical method that is suitable for the calculation of incompressible flow in such region is developed. The idea of the method is that the original flow is expressed as sum of the "main flow" and the variation from the main flow. In this study, this new method is extended for the calculations of 3-dimensional flows with heat and thermal convection, and those of the flow with free surface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：環境流体力学、数値流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：環境流体力学、数値流体力学、流体、シミュレーション工学、自然災害、防災

1. 研究開始当初の背景

河川の流れやトンネル内の流れ、血管内の流れなど、非常に細長い流路内の非圧縮性の流れは現実によく存在する。このような領域内の流れを数値的に求める場合の大きな問

題点として、連続の式を精度よく満たすことが難しいことがあげられる。すなわち、非圧縮性の流れの数値解法として多用される方法に、MAC系の解法と流れ関数-渦度法があるが、MAC系の解法に共通した欠点とし

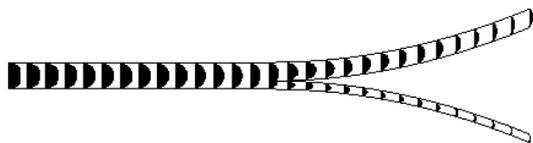
て連続の式が近似的にしか満足されないということがある。一方、流れ関数-渦度法は原理的に連続の式が厳密に満足されるが、2次元（軸対称）流れに適用に限られること、および分岐する流れの場合には分岐後の流量を決めることが難しいという欠点がある。もちろん、MAC系の解法であっても圧力に対するポアソン方程式が十分に精度よく解ければ連続の式の精度も上がるが、その反面、多大な反復計算を必要とし計算時間も非常に増大する。

2. 研究の目的

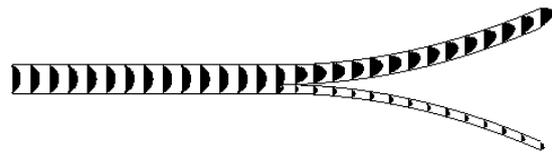
代表者は、対象とする領域が細長い形状であることに着目して、流れを主流とそれからのずれの和で表し、連続の式は主流によりおおよそ満足させるという考え方に基づいた簡便な方法を提案し、分岐のある場合を含むいくつかの細長い流路に解法を適用し、その有効性を検証してきた。具体的には、解を1次元流れ（主流）の厳密解と摂動の和で表し、摂動量の方程式を従来のMAC系の解法により解くことにより、連続の式が精度よく満たされることを明らかにした。ただし、有効性が確かめられているのは、境界の形が固定の場合の非圧縮性流れだけであり、河川の流れのように境界の形が時間的に変化する自由表面を含む流れや、熱対流のように初期には主流が存在せず、時間とともに主流が決まるというメカニズムをもった流れに対しては、その有効性は確かめられていない。そこで本研究では、こういった流れに対して、必要に応じて計算法を修正することによって、より広範な流れに対する計算法の確立を目指している。さらにこの計算法を用いて防災や災害に関連する流れの解析を試みた。

3. 研究の方法

下図は通常の方法（MAC法）で分岐管内の流れを計算した場合の流速ベクトルの図である。下流に進むにつれて明らかに流量が減少している。



これは圧力の方程式（ポアソン方程式）が十分に精度よく解けていないことに起因するため、圧力の方程式の収束に十分に注意を払えばある程度改善するものの、代償として計算時間が非常に長くなる。一方、本方法で同じ問題を解いた結果は



のようになり、同じ計算時間でも流量の保存をよく満たしていることがわかる。

このように、もっとも単純な条件（固定壁の領域に、端から流れが入ってくる）のもとで成功している現在の提案手法を、実用的な応用に役立てるのに必要な条件のもとで適用できるように、年度ごとに段階を踏んで拡張した。特に防災上重要な流れに焦点を絞って、河川の流れおよび熱対流の解析を行った。

(1) 自由表面を含む流れ

提案手法が自由表面を含む流れにも適用可能かどうかを調べるために

- ①直線境界の細長い領域
- ②合流をもつ細長い領域

における3次元流れの計算を順に行った。

その後、複雑な形状をした実際の河川への応用を念頭において

- ③波型の境界をもつ細長い領域
- ④分岐をもつ細長い領域

における3次元流れの計算を順に行った。

(2) 熱対流

同様に、まずは

- ①直線境界の細長い領域
- ②分岐をもつ細長い領域

における3次元流れの計算を行った。

その後、地下鉄構内などにおける火災の計算を行うことを目指して

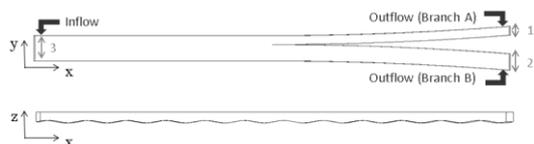
- ③波型の境界をもつ細長い領域
- ④領域内部に障害物がある場合
- ⑤細長い領域が互いに接続された場合

における3次元流れの計算を順に行った。

4. 研究成果

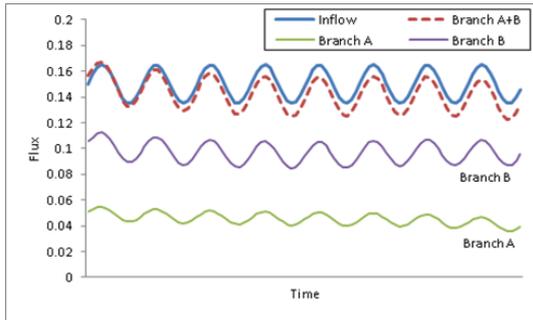
(1) 自由表面を含む流れ

ここでは「④分岐をもつ細長い領域」の結果を紹介する。下図のように、領域の途中で1:2の太さに分岐する細長い領域を考える。領域のz軸方向の上側は自由表面、z軸方向の下側は波型の形状をした固定壁とする。

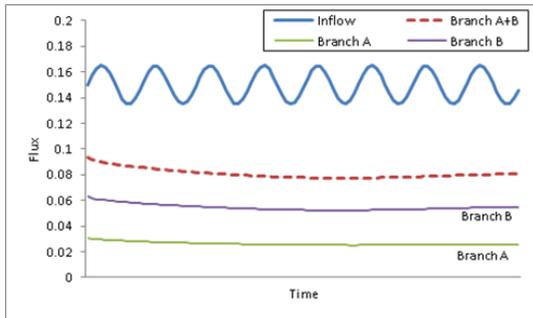


図の左側から適当な脈動流が流入したときの、流入口・分岐Aの流出口・分岐Bの流出口にて定点観察した流量の時間変化をグラフに示す。ここで流量とは「ある断面を通

過する流体の平均速度×断面積」で、非圧縮性流体の場合、領域内のどの断面においても一定に保たれるはずのものである。



提案手法

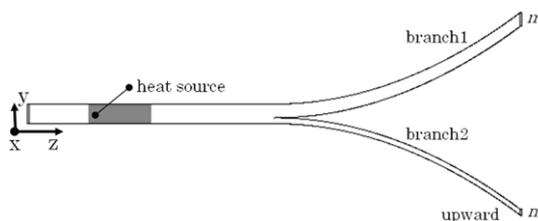


計算時間が同程度の従来手法

「Inflow (青線)」が、図の左側から流入する脈動流の流量を示す。「Branch A (緑線)」は細い方の、「Branch B (紫線)」は太い方の分岐の出口における流量を示す。赤い点線は、2本の分岐管出口での流量を合計したものである。従来手法では流入口での流量を流出口まで保てず大幅に流量を失っており、また脈動流の影響も保てていないことがグラフからわかる。それに対し、提案手法では流出口まである程度の流量と、脈動流の影響も保っている。もちろん、計算時間を充分にとって圧力のポアソン方程式をきちんと収束させれば、従来手法でも流量および脈動流の影響を保つことができる。

(2) 熱対流

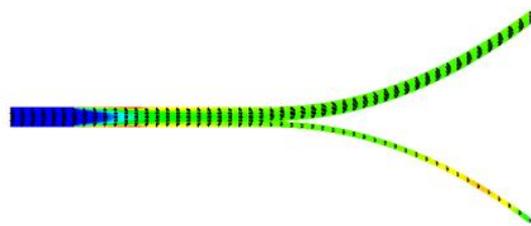
代表して「②分岐をもつ細長い領域」の結果を紹介する。河川の場合と同様、領域の途中で1:2の太さに分岐する細長い3次元領域を考える。



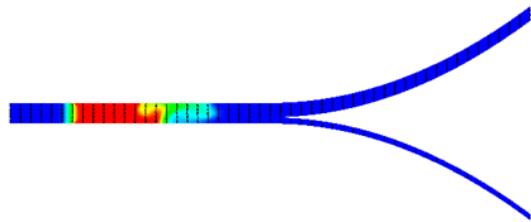
分岐前の領域の断面は正方形である。鉛直方向に直立したパイプの下部の壁を熱する

ことにより、上昇気流が起こる。紙面の都合上、図は全て90度右回転してある。すなわち浮力は図の右方向(z軸方向)に向かって働く。

充分時間がたった後の、流れ場の様子を示す。色は温度(赤が高温・青が低温)表している。初期状態においては領域全体が低温で、パイプ下部の壁面のみ熱されている。時間が経つにつれて浮力による上昇流(紙面右方への流れ)が起こり、自由流境界条件を課している流出口から流出する。同時に紙面左方の流入口からは同量の流体が流入する。提案手法では以上の現象が計算できたのに対し、計算時間が同程度の従来手法では細長い領域の流出口まで流れが及ばず、熱源付近に流れが不自然に滞留している様子が見取れる。

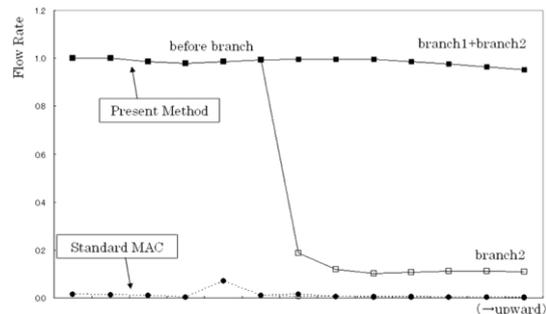


提案手法



計算時間が同程度の従来手法

また、その際の流量のグラフを示す(時間変化の定点観察ではなく、充分時間がたった後のある瞬間の、流入口から流出口までの各断面での流量)。提案手法(Present Method)では、分岐前(before branch)から分岐後(branch1+branch2)まで流量を一定に保っていることがわかる。もちろん、計算時間を充分にとって圧力のポアソン方程式をきちんと収束させれば、従来手法でも流量を保つことができる。



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)

2012年度

- ① Anna KUWANA, Kanako IKEDA and Tetuya KAWAMURA, "A Numerical Simulation in Region with Very Large Aspect Ratio Using Some Sub Domain Grids", Natural Science Report of the Ochanomizu University, **63**(2), 2013, pp. 23-31 (査読有)
<http://hdl.handle.net/10083/52646>
- ② Kanako IKEDA, Anna KUWANA, and Tetuya KAWAMURA, "A New Numerical Method for Some Region of Very Large Aspect Ratio with Free Surface like River", Natural Science Report of the Ochanomizu University, **63**(2), 2013, pp. 33-38 (査読有)
<http://hdl.handle.net/10083/52666>

2011年度

- ③ Y. SATO and T. KAWAMURA, "New Numerical Method for Calculation of Flow in a Long Region with Free Surface", Theoretical and Applied Mechanics Japan, **60**, 2011, pp. 73-78 (査読有)
- ④ A. KUWANA and T. KAWAMURA, "A Numerical Method for Thermal Convection in a Vertical Long Pipe", Theoretical and Applied Mechanics Japan, **60**, 2011, pp. 155-162 (査読有)

2010年度

- ⑤ 桑名杏奈, 大島裕子, 河村哲也, "数値シミュレーションによる高温高压容器内の熱対流の解析", 京都大学数理解析研究所講究録, **1724**, 2011, pp. 126-130 (査読無)
- ⑥ Kuwana Anna, Tetuya Kawamura, "Numerical Simulation of Formation of a Strange Shaped Rock", Natural Science Report of the Ochanomizu University, **60**(2), 2010, pp. 1-6 (査読有)

[学会発表] (計9件)

2012年度

- ① 赤池環, 鹿毛あずさ, 最上善広, 河村哲也, "生物対流パターン形成の数値シミュレーション", 第26回数値流体力学シンポジウム, 2012年12月20日, 東京
- ② 池田佳奈子, 桑名杏奈, 河村哲也, "細長い領域における新しい数値計算法の河川への応用", 流体力学会年会 2012,

2012年9月16日, 高知

- ③ 吉田有香, 桑名杏奈, 河村哲也, "3段サボニウスロータまわりの流れのシミュレーション", 流体力学会年会 2012, 2012年9月17日, 高知
- ④ 桑名杏奈, 池田佳奈子, 河村哲也, "大きなアスペクト比をもつ複雑領域における熱対流の数値シミュレーション", 流体力学会年会 2012, 2012年9月17日, 高知

2011年度

- ⑤ 景山彩璃, 河村哲也, "マンホールからの水の噴き上げのシミュレーション", 第25回数値流体力学シンポジウム, 2011年12月20日, 大阪
- ⑥ 桑名杏奈, 河村哲也, "複雑形状パイプ内の熱対流の数値計算", 第25回数値流体力学シンポジウム, 2011年12月21日, 大阪
- ⑦ 合田智美, 河村哲也, "種々の容器内における水面波の伝播", 第25回数値流体力学シンポジウム, 2011年12月21日, 大阪

2010年度

- ⑧ 佐藤祐子, 河村哲也, "河川の流れに対する新しい数値計算法", 第60回理論応用力学講演会, 2011年3月8日, 東京
- ⑨ 桑名杏奈, 河村哲也, "非常に細長いパイプ内の熱対流の数値計算", 第60回理論応用力学講演会, 2011年3月9日, 東京

[図書] (計1件)

2012年度

- ① 河村哲也, インデックス出版, "数値計算入門 (エンジニアのためのExcelナビシリーズ)", 2012, 277p

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河村 哲也 (KAWAMURA TETUYA)
お茶の水女子大学・理事(副学長)
研究者番号: 40143383

(2) 研究分担者

佐藤 祐子 (SATO YUKO)
お茶の水女子大学・情報基盤センター・講師
研究者番号: 60365070
(2010-2011年度)

桑名 杏奈 (KUWANA ANNA)
お茶の水女子大学・シミュレーション科学
教育研究センター・助教
研究者番号: 00624628
(2012年度)