

平成22年5月20日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360078
 研究課題名（和文） 様々な環境にある様々な物質の流動が計算できる数値解法の開発
 研究課題名（英文） Development of numerical method for flows of arbitrary substance in arbitrary conditions
 研究代表者 山本 悟 (YAMAMOTO SATORU)
 所属研究機関・部局・職名 東北大学・大学院情報科学研究科・教授
 研究者番号：90192799

研究成果の概要（和文）：

本研究では、二次元超臨界流体コード2DSCと熱物性データベースPROPATHを融合して、気体、液体、ならびに超臨界状態の相変化を伴う任意物質の流動が解析できる二次元計算コード2DSC+を開発した。さらに、2DSC+を具体的な問題として、二酸化炭素、窒素、水素、ヘリウム、メタン、ならびに水の相変化を伴う気体、液体、超臨界流体における流動問題を計算した。このように統一的に流動を計算できる数値解法は他に類がなく、本研究の成果は世界的に見ても画期的である。

研究成果の概要（英文）：

In this study, two-dimensional computational code (2DSC+) for simulating flows of arbitrary substance in gas, liquid and supercritical state with phase change was developed by combining the existing code (2DSC) developed by our group with the thermo-physical property database, PROPATH. 2DSC+ was applied to several flow problems such as flows of carbon dioxide, nitrogen, hydrogen, methane, and water in gas, liquid and supercritical conditions. Then, the present code could simulate their thermo-physical properties quite accurately.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：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：(1) 数値解法 (2) 気体 (3) 液体 (4) 超臨界流体 (5) 相変化 (6) 任意物質 (7) 任意環境 (8) 自然対流

1. 研究開始当初の背景

これまでに数値流体力学 (CFD) 研究では、主に空気を対象とした圧縮性流れ、もしくは水を対象にした非圧縮性流れが解析できるそれぞれの数値解法が数多く提案されてきた。前者は理想気体を仮定し、後者は密度変化なしと仮定される。これらの仮定に基づいた汎用のCFDソフトウェアも国内外でいくつか市販されており、世界中の研究機関・民間企業で現在広く使用されている。しかしながら、実際には実在する物質のほぼすべてに流動を伴う気体もしくは液体の状態が存在し、さらにそれらの状態 (相) は場の圧力や温度によって (相) 変化する。相変化には、大きな密度変化が生じ、かつ潜熱が放出・吸収されるため、非圧縮性流れの仮定では解くことができない。一方、理想気体の仮定では、液体の熱物性を正確に計算することができない。したがって、相変化を伴う流動の計算には、相変化に伴う熱物性の急激な変化を捕捉することができる計算手法が必要になる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、空気や水のみならず、二酸化炭素、窒素、水素、ヘリウム、メタンなど、実在する任意の物質からなる気体、液体、ならびに超臨界流体の流動現象をそれらの熱物性に忠実に計算することができる数値解法を構築することである。具体的には、これまで開発してきた超臨界流体の数値解法を基に、新たに任意の圧力・温度条件における任意物質の流動が計算できる数値解法を構築する。さらに、相変化を伴う気体、液体、ならびに超臨界流体が計算できる数値解法を構築する。また、数値解法の計算時間を大幅に短縮するための斬新な計算アルゴリズムも開発する。

3. 研究の方法

本研究は数値解法の開発であり、理論研究である。主に、スーパーコンピュータもしくはPCクラスタを用いた数値計算により研究を実施した。

4. 研究成果

本研究では、二次元超臨界流体コード2DSCと熱物性データベースPROPATHを融合して、気体、液体、ならびに超臨界状態の相変化を伴う任意物質の流動が解析できる二次元計算コード2DSC+を開発した。さらに、2DSC+

を具体的な流動問題の計算に適用して、その妥当性を検証した。2DSC+の検証としてまず、二酸化炭素、窒素、水素、ヘリウム、メタン、ならびに水の常温・常圧における自然対流を計算した。その結果、それぞれの熱物性の違いによる流動現象を正確に計算できることを立証した。次に、水蒸気ならびに液体状態における水の自然対流を計算して、気体、液体状態における水の計算に2DSC+が適用できることを示した。さらに、4°C近傍温度場を含んだ水の自然対流を計算して、微小な密度変化に伴う特異な対流を捕獲することに成功した。一方、超臨界状態の二酸化炭素の強制対流ならびに自然対流を計算したところ、常温状態と比較して臨界点近傍における特異な熱物性が対流に顕著な影響を与えることがあきらかになった。このように統一的に流動を計算できる数値解法は他に類がなく、本研究の成果は世界的に見ても画期的である。さらに具体的な問題として、臨界点を跨いだT字管内超臨界水流れを計算した。この流れ場は、超臨界水熱合成によりナノ金属粒子生成する目的で化学工学の分野で実験的研究が行われている。その結果、超臨界水と亜臨界水の間では臨界点を跨いだ相変化が発生し、かつ臨界点近傍における熱物性の特異性が顕著に表れることが計算によりあきらかになった。ところで、熱物性値を計算するために採用しているPROPATHは、そのまま用いても計算の並列化は困難である。我々はデータ参照テーブルをPROPATHから作成し、かつ元のPROPATHの精度を維持することができる計算アルゴリズムの開発にした。本アルゴリズムを用いることにより、PROPATHを直接計算する場合と比較して、最大160倍計算速度を加速することに成功した。もう一つの具体的な問題として、RESS法として知られている超臨界二酸化炭素を用いたナノポリマー粒子生成プロセスにおける流動を計算した。本プロセスでは、ポリマー物質が溶融した超臨界二酸化炭素をノズルから噴出して超音速膨張させることによりナノ粒子を生成させる。流れ場は静止状態の超臨界二酸化炭素から超音速の二酸化炭素気体へと急激に変化する。2DSC+を本流動に適用して計算したところ、ノズル内における超臨界状態から気体への相変化を熱物性値に正確に計算することに成功した。さらに、超臨界流動場に形成されるマッハディスクを捕獲することにも成功した。マッハディスクの位置

を既存の実験結果と比較したところ、極めて良い一致を示した。

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 27 件)

1. 古澤卓, 山本悟, 相変化を伴う超臨界水熱合成の数値シミュレーション, 日本機械学会論文集B編, (2010), 掲載決定, 査読有.
2. Satoru Yamamoto, Yasuhiro Sasao, Hiroto Kato, Hiroshi Satsuki, Kouichi Ishizaka and Hiroharu Ooyama, Numerical and Experimental Investigations of Unsteady 3-D Wet-steam Flows through Two-stage Stator-rotor Cascade Channels, Proc. of ASME Turbo Expo 2010-Glasgow, GT2010-22796, (2010), in press, 査読有.
3. Takashi Furusawa, Yasuhiro Sasao, Kentaro Sano and Satoru Yamamoto, Acceleration of Supercritical-fluid Flow Computation using an Accurate Look-up Table of Thermophysical Properties, Proc. 8th Asian Computational Fluid Dynamics Conference, (2010), CD-ROM, 査読有.
4. Kentaro Sano, Kazuya Katahira and Satoru Yamamoto, Applying Data-Compression to Enhancing Memory Bandwidth of Custom Computing Machines for Computational Fluid Dynamics, Proc. 8th Asian Computational Fluid Dynamics Conference, (2010), CD-ROM, 査読有.
5. 笹尾 泰洋, 佐野 健太郎, 古澤 卓, 山本悟, 精度保証付き参照テーブルによる超臨界流体計算の高速化, ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム(HPCS2009)論文集, (2009-1), 17-23, 査読有.
6. Kentaro Sano, Yoshiaki Hatsuda, Wang Luzhou, and Satoru Yamamoto, Performance Evaluation of Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Computation Accelerated by FPGA-based Custom Computing Machine, Interdisciplinary Information Sciences, 15-1, (2009-3), 67-78, 査読有.
7. Yasuhiro Sasao, Kazuhiro Monma, Tadashi Tanuma and Satoru Yamamoto, Numerical Prediction of Unsteady Flows through Whole Nozzle-Rotor Cascade Channels with Partial Admission, International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2-3, (2009), 248-253, 査読有.
8. Yasuhiro Sasao, Hiroto Kato, Satoru Yamamoto, Hiroshi Satsuki, Hiroharu Ooyama, and Kouichi Ishizaka, Numerical and Experimental Investigations of Unsteady 3-D Flow through Two-stage Cascades in Steam Turbine Model, Proc. Int. Conf. on Power Engineering 2009, No. 09-205, (2009), 2-479-2-484, 査読有.
9. Satoru Yamamoto, Yasuhiro Sasao, Takashi Furusawa, Ryo Matsuzawa, and Hiroto Kato, Multi-physical CFD Simulations for Condensate Flows and Supercritical-fluid Flows with Phase Change, Proc. 2nd International Symposium on Recent Advances in Thermo-Fluid Engineering, 27-30, (2009), 査読有.
10. Satoru Yamamoto, Takashi Furusawa, and Ryo Matsuzawa, Supercritical-fluids Simulator(SFS) applied to CO2 and H2O Flows with Phase Change, Proc. International Conference on Supercritical Fluid, Supergreen2009, (2009), CD-ROM, 査読有.
11. 水谷恒一郎, 山本悟, 簡単な I B 法による三次元任意形状物体周り流れの数値計算, 日本機械学会論文集 B 編, 74-742(2008), 1347-1353, 査読有.
12. 古澤卓, 山本悟, 任意物質の圧縮性熱対流が計算できる数値解法, 日本機械学会論文集 B 編, 74-746(2008), 2084-2090, 査読有.
13. Takashi Furusawa and Satoru Yamamoto, Accurate Prediction of Transitional Flows among Gas, Liquid and Supercritical Fluids, Proc. 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineerings, ECCOMAS2008-Venice, (2008-7), CD-ROM, 査読有.
14. Kentaro Sano and Satoru Yamamoto, Interactive Flow Simulation with FPGA-based Acceleration of 2D Lattice Boltzmann Method, " Proceedings of the 5th European Congress Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS2008-Venice, (paper#:a560, 2 pages) (2008-7), CD-ROM, 査読有.
15. Satoru Yamamoto and Takashi Furusawa, Numerical Method for Flows of Arbitrary Substance in Arbitrary Conditions, Proc. 5th International Conference on Computational Fluid Dynamics-Seoul, pp.545-550, (2008-7), Springer, 査読有.

16. Kazuhiro Monma, Yasuhiro Sasao, Tadashi Tanuma, Satoru Yamamoto, Numerical Investigation of Unsteady Flow through Partial Admission Stage of Steam Turbine, Proc. of 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, (2008-10), CD-ROM, 査読有.
 17. Kentaro Sano, WANG Luzhou, Yoshiaki Hatsuda and Satoru Yamamoto, Scalable FPGA-Array for High-Performance and Power-Efficient Computation Based on Difference Schemes, Proc. the International Workshop on High-Performance Reconfigurable Computing Technology and Applications (HPRCTA'08), digital library (DOI: 10.1109/HPRCTA.2008.4745679, 9 pages), (2008-11), 査読有.
 18. Kentaro Sano, Takeshi Nishikawa, Takayuki Aoki and Satoru Yamamoto, Evaluating Power and Energy Consumption of FPGA-based Custom Computing Machines for Scientific Floating-Point Computation, Proc. the International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT2008), (2008), CD-ROM, 査読有.
 19. 笹尾泰洋, 山本悟, 石坂浩一, 大山宏治, 多段タービン翼列を通る湿り蒸気流れの数値シミュレーション, 日本機械学会論文集B編, 73-728(2007), 936-941, 査読有.
 20. Satoru YAMAMOTO, Shinichi YANO, Akira ISHIGAME and Takashi FURUSAWA, A Supercritical-fluids Simulator Applied to Flows of Arbitrary Substance in Arbitrary Conditions, Proceedings of 5th Joint ASME-JSME Fluids Engineering Conference, FEDSM2007-37154 (2007), CD-ROM, 査読有.
 21. Satoru YAMAMOTO and Koichiro MIZUTANI, A Very Simple Immersed Boundary Method Applied to Three-dimensional Incompressible Navier-Stokes Solvers using Staggered Grid, Proceedings of 5th Joint ASME-JSME Fluids Engineering Conference, FEDSM2007-37153(2007), CD-ROM, 査読有.
 22. Satoru Yamamoto, Yasuhiro Sasao, Kentaro Sano, Hiroshi Satsuki, Kouichi Ishizaka and Hiroharu Ooyama, Parallel Computation of Condensate Flows through 2-D and 3-D Multistage Turbine Cascades, Proc. International Gas Turbine Congress 2007 Tokyo, (2007), CD-ROM, 査読有.
 23. Satoru Yamamoto, Supercomputing of Flows with Complex Physics and the Future Progress, Proc. 5th Teraflops Workshop-Sendai, High Performance Computing on Vector Systems 2007, (2007), 61-69, Springer, 査読有.
 24. Kentaro Sano, Syoichiro Sato, Yasuhiro Sasao and Satoru Yamamoto, "Hybrid Parallel Computation for LU-SGS Implicit Time Integration," Proceedings of the International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics (ParCFD2007), (2007), CD-ROM, 査読有.
 25. Kentaro Sano, Takanori Iizuka and Satoru Yamamoto, Systolic Architecture for Computational Fluid Dynamics on FPGAs, Proceedings of the 15th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM2007), 107--116, April, 2007, 査読有.
 26. Satoru Yamamoto, Yasuhiro Sasao, Shoichiro Sato and Kentaro Sano, Parallel-Implicit Computation of Three-dimensional Multistage Stator-Rotor Cascade Flows with Condensation, Proc. 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA 2007-4460, (2007), CD-ROM, 査読有.
 27. Kentaro Sano, Oliver Pell, Wayne Luk and Satoru Yamamoto, FPGA-based Streaming Computation for Lattice Boltzmann Method, Proceedings of the International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT2007), pp.233-236, December, 2007, 査読有.
- [学会発表] (計 2 2 件)
1. 古澤卓, 山本悟, 相変化を伴う液体・超臨界流体の数値シミュレーション, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009.9.6, 盛岡.
 2. 松澤遼, 古澤卓, 山本悟, 相変化を伴う超臨界二酸化炭素の超音速流動シミュレーション, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009.9.6, 盛岡.
 3. 加藤寛人, 笹尾泰洋, 山本悟, 実機規模蒸気タービン試験を対象とした湿り蒸気流れの数値シミュレーション, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009.9.6, 盛岡.

4. 笹尾泰洋, 門間和弘, 山本 悟, 部分流入タービンノズル段の全周流動解析による性能予測, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009.9.6, 盛岡.
5. 松澤遼, 山本悟, 古澤卓, 臨界点を跨ぐ二酸化炭素の超音速流動シミュレーション, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009.12.16, 仙台.
6. 古澤卓, 山本悟, 超臨界流体の相変化を伴う流動シミュレーション, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009.12.16, 仙台.
7. 加藤寛人, 笹尾泰洋, 山本 悟, 多段静動翼列における三次元湿り蒸気流れの数値シミュレーション, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009.12.16, 仙台.
8. 笹尾泰洋, 山本 悟, 部分流入タービン初段の非定常流動解析に基づく性能解析, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009.12.16, 仙台.
9. 初田義明, 佐野健太郎, 山本 悟, 反復解法のストリーム実行のためのパイプライン型専用計算機に関する一検討, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009.12.16, 仙台.
10. 片平和也, 佐野健太郎, 山本 悟, 数値データ圧縮ハードウェアによる格子ボルツマン法専用計算機のメモリ帯域向上に関する一考察, 第23回数値流体力学シンポジウム, 2009.12.16, 仙台.
11. 笹尾泰洋, 山本 悟, 梶月浩史, 大山宏治, 石坂浩一, 蒸気タービン多段翼列を通る非定常湿り蒸気流れの数値解析, 日本ガスタービン学会第36回ガスタービン定期講演会, (2008), CD-ROM, 査読無.
12. 笹尾泰洋, 門間和弘, 山本 悟, 田沼唯士, 部分流入を考慮したタービン初段静動翼列全流路流れの数値解析, 日本ガスタービン学会第36回ガスタービン定期講演会, 2008.10.15, 日立.
13. 古澤卓, 山本悟, 任意条件における気体・液体・超臨界流体の数値シミュレーション, 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008.10.15, 日立.
14. 笹尾泰洋, 山本 悟, 実機規模モデルタービンを通る非平衡凝縮流れの数値解析, 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008.12.17, 東京.
15. 門間和弘, 笹尾泰洋, 山本 悟, 部分流入タービン初段全周を通る非定常流れの数値解析, 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008.12.17, 東京.
16. 佐野 健太郎, 山本 悟, 数値流体力学専用計算機における実効メモリ帯域向上に関する一考察, 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008.12.17, 東京.
17. 王 陸洲, 佐野 健太郎, 初田 義明, 山本 悟, 差分法に対するアレイ型専用計算機のスケラビリティに関する一考察, 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008.12.17, 東京.
18. 山本悟, 笹尾泰洋, 佐藤昭一郎, 佐野健太郎, タービン多段翼列を通る湿り蒸気流れの陰的並列計算, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 2007.9.9, 大阪.
19. 古澤卓, 山本悟, 任意物質の熱流動が計算できる前処理型数値解法の開発, 第85期日本機械学会流体工学部門講演会, 2007.11.11, 広島.
20. 古澤卓, 山本悟, 任意条件における任意物質流体が計算できる数値解法, 第21回数値流体力学シンポジウム, 2007.12.19, 東京.
21. 笹尾泰洋, 堀田翼, 山本悟, タービン多段静動翼列を通る非定常三次元湿り蒸気流れの数値シミュレーション, 第21回数値流体力学シンポジウム, 2007.12.19, 東京. 水谷恒一郎, 山本悟, 三次元任意形状移動物体周り流れの IB ソルバー, 第21回数値流体力学シンポジウム, 2007.12.19, 東京.
22. 佐野健太郎, 王陸州, 初田義明, 山本悟, FPGAによる数値流体力学専用計算機の設計と評価, 第21回数値流体力学シンポジウム, 2007.12.19, 東京.

[図書] (計5件)

1. 山本悟, 蒸気タービン翼列における湿り蒸気流れの数値解法の現状, ターボ機械, (2009-4), 37-44.
2. Satoru Yamamoto, Finite-Difference Method for Heat Conduction Equation and Excel Calculation, Special Issue: Heat Transfer; Combustion and Drying, Journal of the Technical Association of Refractories, Japan, 28-4(2008), 239-244.
3. 山本悟, マルチフィジックスCFDシミュレーションの産業応用, タービン多段静動翼列を通る湿り蒸気流れの大規模計算, 日本流体力学会誌「ながれ」, 27(2008-5), 121-126.
4. 山本悟, 機械工学年鑑, 流体工学, タービン流れ, 日本機械学会誌, 110-1065, (2007-8), 27-28.
5. 山本悟, 熱伝導方程式の差分解法とExcelを用いた計算, 耐火物技術協会誌, 59-9, (2007-9), 460-466.

[産業財産権]

該当なし

[その他]
ホームページ
<http://www.caero.mech.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織
(1) 研究代表者

山本 悟 (YAMAMOTO SATORU)
東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：90192799

(2) 研究分担者

佐野 健太郎 (SANO KENTARO)
東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：00323048

笹尾 泰洋 (SASAO YASUHIRO)
東北大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号：50431549