

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24年 6月 1日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560176

研究課題名（和文） マルチフィジックススケール対応ボルツマン/ナビエ・ストークス統合解法の研究

研究課題名（英文） Study on a Boltzmann/Navier-Stokes hybrid solver for multi-physics, multi-scale flow problems.

研究代表者

森西 晃嗣 (MORINISHI KOJI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授

研究者番号：20174443

研究成果の概要（和文）：

これまで開発してきた分子の平均自由行程レベルから連続体レベルまでの単純な流動現象を自己完結的にシミュレーション可能なボルツマン/ナビエ・ストークス統合解法で、マルチフィジックスが取り扱えるようにする目的で、ナビエ・ストークス解法部には、仮想流束を導入し、デカルト座標系でオイラー的な流体・固体連成解析を可能にし、レシプロコンプレッサの動作を再現し、その信頼性を実験データと比較することにより確認した。また、ボルツマン解法では、モーメントベース解法を新たに開発し、熱や気液二相流の流動現象が効率よく取り扱えることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

In order to apply the Boltzmann/Navier-Stokes hybrid solver, which had already been developed, to multi-physics flow problems, a virtual flux method is incorporated in the Navier-Stokes solver so that fluid-solid interaction problems can be solved on a Cartesian grid. The reliability of the solver is examined in the numerical simulation about a reciprocating compressor. The obtained numerical results are in good agreement with experiments. For the Boltzmann solver, a novel moment base Boltzmann method is developed to save the necessary computational memory. The moment base Boltzmann method is efficient, especially for applying it to multi-physics problems, such as two-phase flow problems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：計算流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学、シミュレーション工学、マルチスケール、マルチフィジックス

1. 研究開始当初の背景

近年の MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）や NTBS（Nano Technology Based Systems）の開発に関連

して、分子レベルから連続体レベルまでのマルチスケール・マルチフィジックス流動現象に対する信頼性が高く経済的なシミュレーション技術の確立が急務とされている。研究代表者

は、分子レベルから連続体レベルまでの流動現象を自己完結的にシミュレーション可能なオールインワン解法(連続体モデル+気体分子論モデル+分子動力学モデルの完全統合解法)の構築を目指した研究を予てより進め、これまでに分子の平均自由行程レベルから連続体レベルまでの単純な流動現象を自己完結的にシミュレーション可能なボルツマン/ナビエ・ストークス統合解法を完成させた。この解法では、時間・空間ごとに流れの物理量から定めた評価関数を用いて自律的に選択した支配方程式によるシミュレーションが可能で、連続体レベルと自由行程レベルが共存するマルチスケール流れにおいて、従来の方法より 100 倍以上の計算効率の改善を確認している[1]。欧米においても早くから同様の研究が成されてきたが、このような効率の改善は達成されておらず、現時点において世界に先駆けた成果と言える。(例えば、文献 [2] では効率が劣化している。)

この統合解法を MEMS や NTBS を実現するための高度生産技術支援ツールとして活用するためには、単純な流動現象だけでなく、様々なスケールレベルでの様々な物理現象の取り扱いが可能と成ることが重要である。

[1] Koji Morinishi, Multi-Scale Flow Simulation Using a Kinetic/Continuum Hybrid Scheme, Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 16 No. 4, pp. 28-39, (2007).

[2] Wang, W.-L. and Boyd, I. D., Hybrid DSMC-CFD Simulations of Hypersonic Flow Over Sharp and Blunted Bodies, AIAA Paper 2003-3644, (2003).

2. 研究の目的

本研究計画では、近年関心が高まっている MEM や NTBS を実現するための高度生産技術支援ツールとして、研究代表者が予てより進めてきた「分子レベルから連続体レベルまでの流動現象オールインワン解法」の研究開発の一環として、現在完成している分子の平均自由行程レベルから連続体レベルまでの単純な流動現象を自己完結的にシミュレーション出来るボルツマン/ナビエ・ストークス統合解法に、熱や多相流の流動現象や、固体との連成の効果を各スケールごとに組み込み、最終的に流れの物理量や分解能から最適なスケールモデルで様々な物理現象を自律的に再現する、マルチフィジックススケール対応ボルツマン/ナビエ・ストークス統合(ハイブリッド)解法の構築を目指した各解法の個別要素技術の研究開発を行う。

3. 研究の方法

分子の平均自由行程レベルから連続体レベルまでの単純な流動現象を自己完結的にシミュレーション可能なボルツマン/ナビエ・ストークス統合解法で、熱や多相流の流動現象や流体と固体の連成問題など、マルチフィジックスが取り扱えるようにするため、ナビエ・ストークス解法では、仮想流束を導入し、デカルト座標系で流体と固体のオイラー的連成解法を構築する。また、ボルツマン解法では、モーメントベース解法を新たに開発し、これまでのボルツマン解法の欠点の一つであった必要な記憶容量

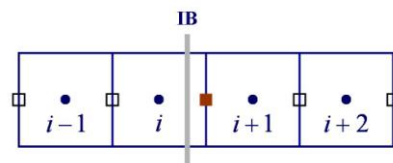


図1 仮想境界

の多さを緩和し、熱や気液二相流の流動現象を効率よく取り扱う解法の構築を行う。

最初に、ナビエ・ストークス方程式解法への仮想流束法の導入を行う。一般に、ナビエ・ストークス方程式の移流項は、

$$(\partial F / \partial x)_i = [F(q_{i+1/2}) - F(q_{i-1/2})] / \Delta x$$

$$q_{i+1/2} = L(q_{i-1}, q_i, q_{i+1}, q_{i+2})$$

のように評価される。ここで、 i は空間の格子番号、 L は物理量を最構築するオペレータである。いま、図1に示すように i 点と $i+1$ 点の間に不透過の相境界が有る場合は、境界をまたいで物理量の再構築をすると不透過の条件に反するので、

$$q_{i+1/2} = L(q_{i-1}, q_i, q_{IB}, \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{IB})$$

や

$$q_{i-1/2} = L(q_{i-2}, q_{i-1}, q_i, q_{IB}, \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{IB})$$

のように変更する。同様な変更を粘性項の評価にも適用すると、デカルト格子上で任意に運動する固体を含めた流体と固体の連成解法がオイラー的に実行できる。

次に、モーメントベースのボルツマン解法について、簡単のため、格子ボルツマン法を例にとり説明する。一般に、2次元9速度

格子ボルツマン法の分布関数は9個のモーメントで表現できる。このうち、連続体レベルの非圧縮流れ、すなわち、非圧縮性ナビエ・ストークス方程式と同等の解は、6個のモーメント、

$$\rho = \sum f_\alpha$$

$$\rho \bar{u} = \sum \bar{e}_\alpha f_\alpha$$

$$\frac{2}{9} \rho s_{ij} = \sum (e_{\alpha i} e_{\alpha j} - \frac{1}{3} \delta_{ij}) f_\alpha - \rho u_i u_j$$

を用いて表した分布関数、

$$f_\alpha = f_\alpha^{eq} + w_\alpha \rho (e_{\alpha i} e_{\alpha j} - \frac{1}{3} \delta_{ij}) s_{ij}$$

により得ることが出来る。ここで、 f_α^{eq} は、平衡分布関数、

$$f_\alpha^{eq} = w_\alpha \rho [1 + 3(\bar{e} \cdot \bar{u}) + 4.5(\bar{e} \cdot \bar{u})^2 - 1.5\bar{u}^2]$$

であり、 w_α は正規分布を近似する重みである。これにより、非圧縮性の単純な2次元の流動現象は6個のモーメントの時間発展を追跡すればよいことになる。3次元流れへの拡張も容易で、3次元15速度や19速度、あるいは、27速度などのモデルによらず、10個のモーメントの時間発展を追跡すればよいことになる。

さらに、例えば、二相流の流動現象を取り扱う場合は、レベルセット関数 φ を表す分布関数として

$$g_\alpha = g_\alpha^{eq} + w_\alpha e_{\alpha i} r_i$$

$$g_\alpha^{eq} = \omega_\alpha \varphi + w_\alpha \varphi [3(\bar{e} \cdot \bar{u}) + 4.5(\bar{e} \cdot \bar{u})^2 - 1.5\bar{u}^2]$$

を導入し、3個のモーメント

$$\varphi = \sum g_\alpha$$

$$r_i = \sum e_{\alpha i} g_\alpha - \varphi u_i$$

と単純な流動現象を表す6個のモーメントの時間発展を求めれば、二相流の流動現象が解析出来る。

4. 研究成果

研究成果の例として、最初に、デカルト座標系での流体と固体のオイラー的連成解法を図2のようなレシプロコンプレッサモデルに適用した例を示す。モデルには作用する流体力により弾性変形する吸入バルブと作用する流体力と復元力により開閉する吐出バルブが組み込まれている。図3は吸入時の吸入バルブ中央断面と吐出バルブ中央断面での流れの様子を示す。同様に、図4は吐出時の流れの様子である。デカルト座標系でオイラー的に流体と固体の連成解析が行え

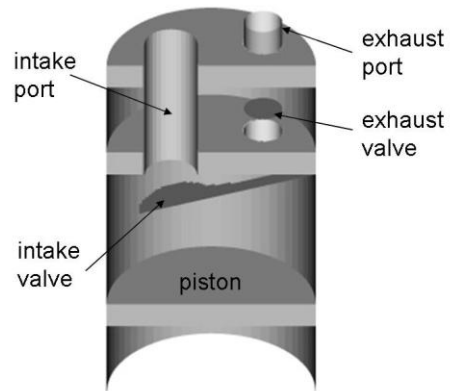


図2 レシプロコンプレッサモデル

ていることが確認できる。また、図5と6は、それぞれ、シリンダー内の圧力とバルブリフトの一周期の時間変化を示している。比較の

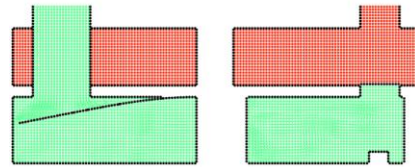


図3 吸入時の吸入・吐出バルブ

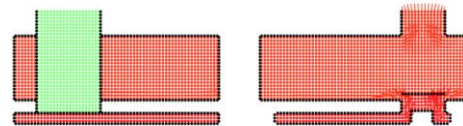


図4 吐出時の吸入・吐出バルブ

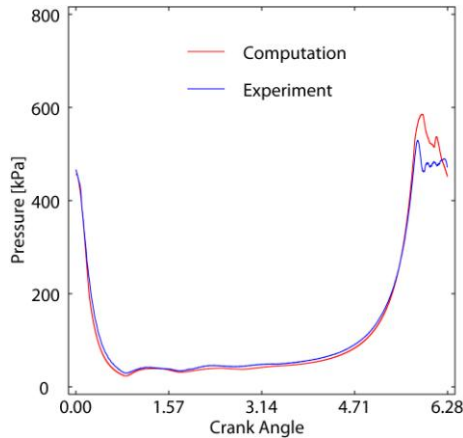


図5 シリンダー内圧力分布の履歴

ため、実験データも表示しているが、シミュレーションによる予測値は実測値を良く再現しており、今回開発した手法の信頼性が確認出来る。

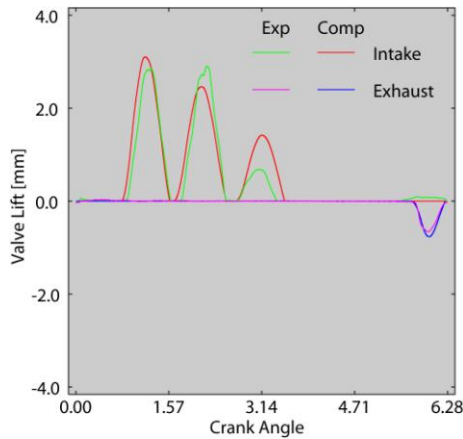


図6 バルブリフトの履歴

次に、モーメントベース格子ボルツマン法で二相流の流動現象を取り扱った例を示す。水と空気を想定して、液相と気相の密度比を833、粘性係数比を56として、単一の気泡上昇問題をシミュレーションした結果を図7に示す。比較のため、レベルセット関数とスタガード格子を用いた標準的な非圧縮性ナビエ・ストークス方程式の解法により得られた同じ条件での結果を図8に示す。両者の結果は非常に良く一致しており、モーメントベース格子ボルツマン法の信頼性が確認できる。さらに、モーメントベース格子ボルツマン法は、標準的な非圧縮性ナビエ・ストークス方程式の解法では必要となるポア

ソン方程式の解法を必要としないので、計算効率では格段に優れている点に注意する必要がある。

なお、ここでは結果を示さないが、モーメントベース格子ボルツマン法は、熱流動にも容易に応用出来る。

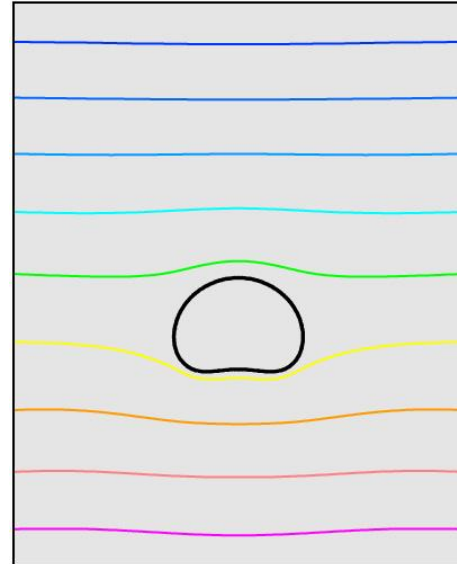


図7 単一気泡まわりの圧力分布（モーメントベース格子ボルツマン法による結果）

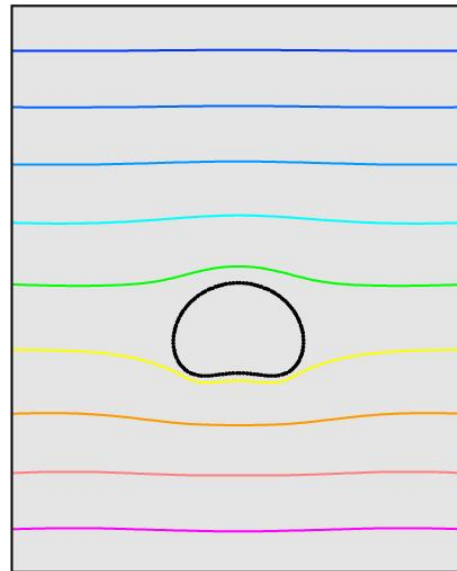


図8 単一気泡まわりの圧力分布（標準的な非圧縮性ナビエ・ストークス方程式解法による結果）

なお、以上も成果のうち、仮想流束法を

用いた流体と固体の連成解析については、以下の[3]~[6]で発表済みである。また、モーメントベース格子ボルツマン法については、[7]で関連する内容について発表済みであり、2相流や熱の流動現象に対する適用は、[8]および[9]で発表予定である。

[3] K. Morinishi, Fluid-structure coupling simulations using a virtual flux Method, Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics, June 14-17, 2010, LNEC, Lisbon, Portugal.

[4] K. Morinishi, An Eulerian Approach for Fluid and Elastic Structure Interaction Problems, Sixth International Conference on Computational Fluid Dynamics, July 12-16, 2010, Azimuth Hotel, St. Petersburg, Russia.

[5] K. Morinishi, T. Fukui, An Eulerian Approach for Fluid and Elastic Structure Interaction Problems, Computational Fluid Dynamics 2010, Springer, pp. 701-708, (2011).

[6] K. Morinishi, T. Fukui, An Eulerian approach for fluid-structure interaction problems, Computers & Fluids, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.02.009>.

[7] M. Izham, T. Fukui, and K. Morinishi, Application of Regularized Lattice Boltzmann Method for Incompressible Flow Simulation at High Reynolds Number and Flow with Curved Boundary, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.6, No.6, pp. 812-822, (2011).

[8] K. Morinishi, T. Fukui, Moment base lattice Boltzmann approach for multiphysics flow problems, Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics, July 9-13, 2012, Mauna Lani Bay Hotel, Island of Hawaii, USA.

[9] K. Morinishi, T. Fukui, Moment base lattice Boltzmann approach for incompressible two-phase flows with large density ratio, ECCMAS2012, September 10-14, 2012, University of Vienna, Vienna, Austria.

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4件)

①I. Tanno, K. Morinishi, N. Satofuka, Y. Watanabe, Calculation by artificial compressibility method and virtual flux method on GPU, Computers & Fluids, Vol. 45, pp. 162-167, (2011). 査読有

②K. Morinishi, T. Fukui, An Eulerian approach for fluid and elastic structure interaction problems, Computational Fluid Dynamics 2010, Springer, pp. 701-708,

(2011). 査読有

③ M. Izham, T. Fukui, and K. Morinishi, Application of Regularized Lattice Boltzmann Method for Incompressible Flow Simulation at High Reynolds Number and Flow with Curved Boundary, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.6, No.6, pp. 812-822, (2011). 査読有

④K. Morinishi, T. Fukui, An Eulerian approach for fluid-structure interaction problems, Computers & Fluids, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.02.009>. 査読有

[学会発表] (計5件)

①K. Morinishi, Moment base lattice Boltzmann approach for incompressible two-phase flows with large density ratio, Sixth European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, September 10-14, 2012, University of Vienna, Vienna, Austria.

②K. Morinishi, Moment base lattice Boltzmann approach for multiphysics flow problems, Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics, July 9-13, 2012, Mauna Lani Bay Hotel, Island of Hawaii, USA.

③K. Morinishi, Fluid-Structure Interactive Simulation Using a Virtual Flux Method, ASM E-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, July 29, 2011, ACT CITY Congress Center, Hamamatsu, Japan.

④K. Morinishi, An Eulerian Approach for Fluid and Elastic Structure Interaction Problems, Sixth International Conference on Computational Fluid Dynamics, July 12-16, 2010, Azimuth Hotel, St. Petersburg, Russia.

⑤K. Morinishi, Fluid-structure coupling simulations using a virtual flux Method, Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics, June 14-17, 2010, LNEC, Lisbon, Portugal.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森西 晃嗣 (MORINISHI KOJI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号：20174443

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号