

TSUBAME 共同利用 平成 25 年度 産業利用 成果報告書

利用課題名 衛生陶器設計のための並列 GPGPU 気液二相流シミュレーション
英文: Numerical simulation of air-water two-phase flow conducted on GPGPU cluster
for designing sanitary ware products

池端 昭夫 吉田 慎也
Akio Ikebata Shinya Yoshida

TOTO 株式会社 生産技術本部
Production Technology Division, TOTO LTD.
<http://www.toto.co.jp>

邦文抄録(300 字程度)

節水化に対応した住宅設備機器を設計するために、混相流シミュレーションコードの開発に力を注いでいる。衛生陶器の表面薄膜流れのような複雑な混相流において信頼性の高いシミュレーション結果を得るために、TSUBAME において大容量メッシュによる高解像度シミュレーションを実施している。さらに、わずか 3.8L しか使用しない「ネオレストハイブリッド」のような超節水商品での薄膜流れ精度を改善するため、物体表面における境界条件の定式化を再検討した。本稿では、我々が提案している気液界面計算方法である STAA 法の一部改良により解析精度の向上を達成したので、その概要について報告する。

英文抄録(100 words 程度)

We have been devoting our efforts to development of an in-house numerical code on multiphase flow for designing water-saving house hold products. In order to get reliable simulation results for complex multiphase flows, such as thin layer flow on ceramic sanitary ware, we have been conducting high-resolution computations with large number of mesh elements on the TSUBAME supercomputer. Moreover, for improving the accuracy of thin layer flows on extremely water-saving sanitary ware products such as the one so called “NEOREST hybrid”, which uses only 3.8 liter water, we have reformulated the numerical boundary conditions on the surface of flow path. In this paper, we will mainly report some new modifications to the interface tracking method, STAA method, to improve numerical accuracy.

Keywords: multiphase flow, house hold equipment, sanitary ware, UTI-VSIAM3, CIP

背景と目的

当社では TOTO GREEN CHALLENGE のスローガンのもと、衛生陶器や水栓、シャワーなどの住宅水まわり機器の節水商品開発に力を入れている。

衛生陶器においては、汚物の洗浄性を確保しつつ大幅な節水化を達成するための流路や陶器形状、水の供給条件を高度に適正化する必要があり、試作評価のみならず、多相流体解析の積極的な活用を進めている。薄膜流れや微小気泡などを高速かつ高精度に計算することを目的として、UTI-VSIAM3 法[1]および STAA 法 [2] による独自流体計算手法を開発し、また TSUBAME2.5 に対応する GPGPU+MPI 並列計算コードに移植した。さらに計算時間短縮のため、MGCG 法による圧力方程式の収束性の向上を図った。一般的な節水型衛生陶器商品での検証では、0.5mm メッシュ

間隔の高解像度シミュレーションにより、実用的な計算時間で極めて良好な精度が得られ[4]、現在多くの商品の開発に適用中である。

本課題では、そのような大容量メッシュでも十分な解析精度が得られない可能性がある最も節水タイプの衛生陶器商品への対処方法を検討する。「ネオレストハイブリッド」は 3.8L という業界最少流量を実現した当社主力の衛生陶器商品であり、ポンプによる洗浄力を併用することで画期的な節水化を達成している。ただしポンプの力が及ばない部位の陶器表面において、設計流速を確保するために水膜の厚みが極めて薄くなっており、0.5mm メッシュでも十分な解像度ではない。今回物体表面における移流や濡れ性などの定式化の見直しを行い、その妥当性を検証した。

概要

1. 流体計算手法

気液二相流の流体方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \mu \nabla \mathbf{u} + \mathbf{T} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla P - \rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla F \quad (3)$$

\mathbf{u} , P , F は流速、圧力、流体率を表す。右辺第一項は全て同じ形であり、移流項とよばれる。この項を精度良く計算することが流体解析における大きな課題である。そこで UTI-VSIAM3 ソルバー[1]を提案している。

UTI-VSIAM3 では、VIA(=体積積分平均値)と SIA(=面積積分平均値)という 2 種類の物理量変数を定義することで、高次精度補間関数を構築し、移流計算における精度および安定性の向上を図っている。VIA の保存性が保証されていること、また簡易な定式化で次元対称性を実現していることが特徴である。

2. 気液界面の追跡方法

気液界面の追跡方法として、STAA 法を提案している[2]。STAA 法は UTI-VSIAM3 法と組み合わせられ、移流計算後に生じた数値拡散を補正することで、気液界面を精度良く保持するものである。STAA 法では、まず移流計算された流体率より、気液界面からの符号付距離、すなわちレベルセットを計算する。一般に液体側が正、気体側が負で表される。以下の反復式により求める。

$$G^{n+1}(\mathbf{x}) = G^n(\mathbf{x} - C\mathbf{u}') + C \operatorname{sgn}(G^n) \quad (4)$$

$$\mathbf{u}' = \operatorname{sgn}(G^n) \mathbf{g} \quad (5)$$

$$\mathbf{g} = \frac{\nabla G^n}{|\nabla G^n|} \quad (6)$$

(4)式の右辺第一項は、双線形補間関数により計算する。 C は最小メッシュ間隔 \times クーラン数を表すが、 $G^n(\mathbf{x}) \cdot G^n(\mathbf{x} - C\mathbf{u}') \geq 0$ となるようにセル単位で調整される。

次に、得られたレベルセットを用いて数値拡散の補正を行う。気液界面からの距離がある一定値を超えているセルにおいて、流体率 0 もしくは 1 からの誤差量分を、界面法線方向 $-\mathbf{u}'$ の隣接セルに強制的に移流さ

せる。これを各移流計算ステップで計算することで、気液界面の数値拡散を抑制することが可能となる。

3. 表面張力の計算手法

気液二相流においては表面張力を精度良く計算する必要がある。我々のシミュレーションコードにおいては、表面張力について、STAA 法で生成するレベルセット関数 G を用いて、以下のように定式化している。

$$\mathbf{T}_{surf} = \frac{1}{\rho} \sigma \kappa \nabla F \quad (7)$$

σ は表面張力係数、 κ は曲率である。また ρ は、計算安定性のために水の密度と空気の密度を平均化したものを定数として用いる。さらに界面曲率 κ は G の中心差分により求められるが、曲率の精度改善のため、Yokoi の手法[3]に類似した曲率補正を行っている[4]。STAA 法のレベルセット生成の方法を応用し、以下の式を反復計算する。

$$G^*(\mathbf{x}) \equiv G^n(\mathbf{x} - C'\mathbf{u}') \quad (8)$$

$$\kappa^{n+1}(\mathbf{x}) = \kappa^n(\mathbf{x} - C'\mathbf{u}') \quad (9)$$

(8)および(9)式の右辺は、レベルセット計算同様に双線形補間関数により計算する。 $G^n(\mathbf{x}) \cdot G^*(\mathbf{x}) \geq 0$ となるように C' は調整される。(8)~(9)の計算を繰り返すことで、 $G = 0$ 近傍の曲率が、界面法線方向に伝播し均一化していく補正効果が得られる。

壁面での固・気・液三相界面における表面張力、すなわち濡れ性は、接触角モデルを使用して計算する。壁メッシュを仮想セルとみなし、(7)式で表面張力を計算する際に都度、仮想セルにレベルセット値を外挿補間する。外挿方法として以下の簡易な手法を用いている。壁面内向き法線ベクトルを \mathbf{n} 、接触角度を θ とおくと、

$$\mathbf{s} \equiv \mathbf{g} - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (10)$$

$$\mathbf{g}_n' \equiv \cos \theta \mathbf{n} + \sin \theta \frac{\mathbf{s}}{|\mathbf{s}|} \quad (11)$$

$$\mathbf{g}_n \equiv \frac{\mathbf{g}_n'}{|\mathbf{g}_n'|} \quad (12)$$

$$G_v = G_{nb} + (\mathbf{x}_v - \mathbf{x}_{nb}) \cdot \mathbf{g}_{n,nb} \quad (13)$$

により仮想セルを外挿する。 v は仮想セル、 nb は仮想セルに隣接する流体セルを表す。STAA 法によりレベルセット G を計算した後、(12)式の \mathbf{g}_n を計算して保存しておくことにより、(13)式で簡単に仮想セルにおけるレベルセットの外挿値を取り出すことができ、壁面近傍

の界面曲率 κ を迅速に計算することができる。

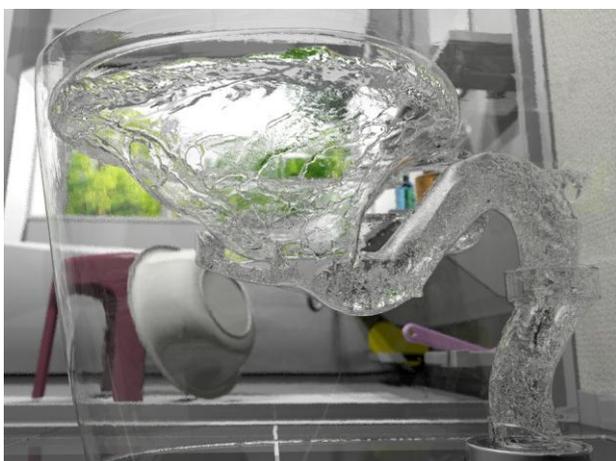
結果および考察

1. トラップ内の微小気泡混在流れの検証

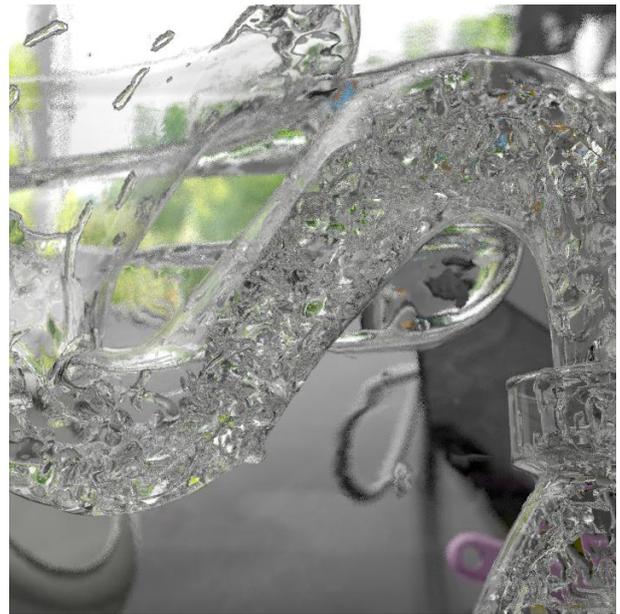
図1に、ネオレストハイブリッドの内部流れにおける TSUBAME2.5 と PC との比較結果を示す。この製品は 3.8L という超節水を実現するため、ポンプにより水流を加圧しており、サイホン現象による効率的な搬送を実現している。このサイホン発生時に水面が降下し、トラップ内に引き込まれる際に空気も同時に巻き込んで無数の微小気泡が発生する。PC の 1.5mm メッシュ計算ではこの気泡の解像度が不足し実機のサイホン現象を完全には捉えることができなかったが、TSUBAME の 0.5mm メッシュ計算により、ほぼ実現象に沿った微小気泡混入流れおよびサイホン作用を再現することに成功した。これにより、汚物の搬送性能を正確に事前予測できるようになった。



TOTO-PC(1.5mm メッシュ)



TSUBAME2.5(0.5mm メッシュ)



TOTO-PC(1.5mm メッシュ) トラップ部拡大



TSUBAME2.5(0.5mm メッシュ) トラップ部拡大

図1. ネオレストハイブリッドにおける内部流れの
PC と TSUBAME2.5 との比較

2. 陶器表面薄膜表層流れの精度検証

ネオレストハイブリッドにおける陶器表面流れのTSUBAMEシミュレーションと実機との比較結果を図2に示す。吐水の先端が3/4周を超えた1.34秒後におけるフローパターンにて検証している。シミュレーション結果の色は流速の絶対値を表し、空白部は水が1.34秒時点において到達していないことを示している。実機と比較して、衛生陶器表面の水の広がりが少ないことが分かる。これは以前の検証で用いた製品と比較して、節水効果を高めるため陶器表面を流れる流量が小さく水膜の厚みが薄くなっており、シミュレーション精度が悪化していると推測される。

式(10)～(13)の濡れ性接触角モデルにおいて、接触角度を小さくし水が広がる条件にて計算した結果が図3である。しかし精度改善効果はほとんど見られないことが分かった。このことから、接触角モデルのシミュレーション結果に与える影響は、0.5mmメッシュを用いている本シミュレーションでは小さいことが判明した。

水が広がらない原因が接触角条件によるものではないことが分かったため、次にシミュレーション精度に起因するものと推測した。すなわちミリ単位の厚みの水膜において0.5mmメッシュでは解像度が不足していることが原因と考えられる。しかし、例えば単純にメッシュ間隔を半分にする、X、Y、Z および T(時間)の各軸方向の分割数が2倍となるため、全体の計算量は $2^4=16$ 倍となり、TSUBAMEといえども実用的な計算時間でシミュレーションすることは困難である。局所細分化格子技術を利用する方法も考えられるが、薄膜流れは広い計算領域にわたって生じる可能性があるため、やはり大幅な計算量の増大は避けられない。

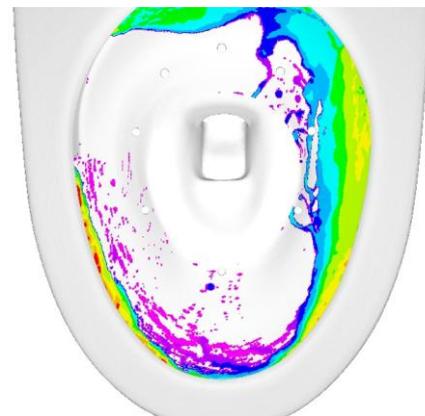
そこでシミュレーションで用いている定式化の見直しを行った。水が広がらないという条件は、水膜の厚みが均一と仮定すると、人工的に「水をはじく」効果が生じていると考えられる。そのような効果を生じる定式化としては、気液界面追跡を計算するSTAA法の可能性が高いと考察した。すなわち、メッシュ解像度限界に近い水膜が生じたときに、STAA法ではこの薄い水膜を、実際に生じている水膜とは解釈せず、気液界面で生じた「数値拡散」と誤って判別するため、水を内部方向に向かって「寄せる」補正効果が生じていると考えられる。そ

こで判別方法において、あるセルの壁からの距離が規定値以内の場合、数値拡散補正を行わないという定式化をプログラムに追加した。再度のシミュレーション結果を図4に示す。図2と比較して大幅に精度が向上していることが分かった。図の左下部分の水の広がりはまだ不十分であるが、図の右側部分はほぼ実測に符合する結果となっている。左下部分の水膜は極めて薄く、洗浄力への寄与は小さいと考えられるため、この誤差分はシミュレーションによる洗浄性能評価に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

以上のことより、最もシミュレーションが困難な超節水タイプの商品においても薄膜表層流れの実用的なシミュレーション精度に到達したと考えられるため、今後あらゆる衛生陶器製品の開発にTSUBAMEを用いた本シミュレーション技術は活用可能になったといえる。



実機流れ(吐水開始 1.34 秒後)



シミュレーション結果(吐水開始 1.34 秒後)

図2. ネオレストハイブリッドにおける表層流れの実機とシミュレーションとの比較

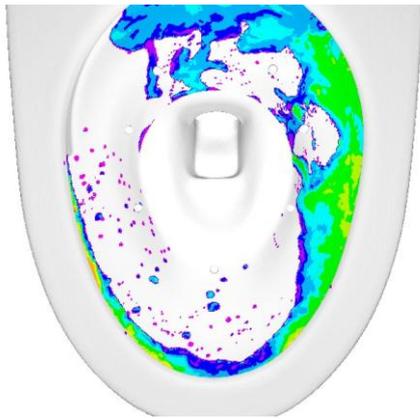


図3. 接触角度を小さくしたシミュレーション結果

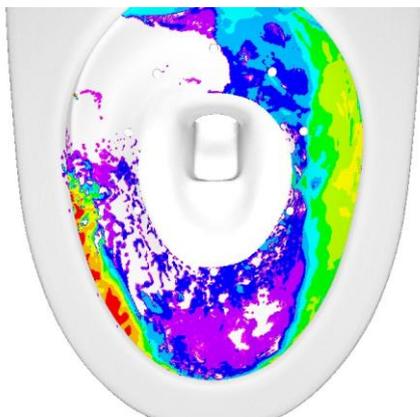


図4. STAA 法を補正したシミュレーション結果

まとめ、今後の課題

TSUBAME の高解像度メッシュ計算においても局部的に格子解像度が不足するような薄膜流れを生じる超節水型衛生陶器に対し、妥当な精度で解析するためのプログラム改良を実施した。このような部位においては濡れ性のモデル化を調整しても、解像度の問題により効果は得られないことが分かった。一方物体境界面における気液界面追跡計算では数値計算上の「高角度接触角」が発生することを新たに見出し、界面計算手法を調整することにより大幅な精度改善を達成することができた。以上より、あらゆる衛生陶器製品における洗浄性能の評価が可能となった。

今後は、衛生陶器設計における様々な製品仕様を迅速に事前評価できるようにするための機能追加や、より一層の計算精度、計算速度の向上、さらには排水管も含めたより大きな系での大規模シミュレーションやその他の水まわり住宅設備商品設計への適用拡大を図っていきたい。

参考文献

- [1] A. Ikebata, Y. Muraoka, F. Xiao: Multiphase Fluid Simulations on a Multiple GPGPU PC Using Unsplit Time Integration VSIAM3, Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, 2, pp.491-497 (2011)
- [2] 池端昭夫, 肖鋒: 保存型自由表面捕獲スキームと固液気 3 相流への適用, 日本機械学会 2002 年度年次大会, 3, pp.301-302 (2002)
- [3] K. Yokoi: A practical numerical framework for free surface flows based on CLSVOF method, multi-moment methods and density-scaled CSF model, Numerical simulations of droplet splashing” J. Comput. Phys. 232, pp.252 (2013)
- [4] 池端昭夫, 吉田慎也, 肖鋒: 住宅設備機器開発のための混相流シミュレーション, 第 27 回数値流体力学シンポジウム講演論文集 (CD-ROM) E05-4 (2013)