

TSUBAME 共同利用 平成 26 年度 産業利用 成果報告書

利用課題名 衛生陶器混相流シミュレーションの商品設計および販促への展開
英文: Multiphase fluid simulations of sanitary wares for designing and promotions

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)

平成 25 年 12 月～平成 26 年 3 月の有償利用により、TSUBAME2.5 においてあらゆる衛生陶器商品の薄膜陶器表面流れをシミュレートできるようになり、現在新商品設計に活用している。次の課題として、洗浄時の水はねの評価を行うための技術開発を実施した。新しい保存型運動量解法を提案し、実機とは異なる「水はね」現象を抑制することができた。また流体解析技術を販売の第一線におけるお客様プレゼンツールとしても活用するための技術開発を併せて行った。レイトレーシング法により複雑な気液混相流を鮮明に可視化することで、展示会や新商品説明において顧客に製品の価値伝達をスムーズに伝えることに寄与した。

英文抄録(100 words 程度)

We are now applying our multiphase simulation code which was developed on our research in TSUBAME projects from November, 2013 to March, 2014 to designing various products. Moreover, we have been developing the evaluation method of droplet motions at water flushing. For the sake of suppressing “spurious motions of droplets” on the numerical solutions, we will propose new numerical method, “Conservative Momentum Method”. On the other hand, we continue to apply our simulation technology to supporting sales of our products as the presentation tools. We contributed to sending “values of our products” to many customers with our visualization tools using Ray-tracing method.

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

背景と目的

少子高齢化の進展により住宅着工戸数が伸び悩む中、住宅設備機器業界ではリフォーム分野に力を入れてきており、取り換え需要喚起の近年の大きな販売施策の柱として、エコ・省エネの観点からの節水型商品の販売が拡大してきている。また国内のみならず海外においても、地球温暖化対応や気候変動による砂漠化問題、発展途上国の衛生問題の観点から、節水型住設機器の輸出や現地生産が拡大している。しかし衛生陶器では競争激化から、12L→6L→4L と急激に節水化が進展し、衛生陶器表面の汚れ残りや衛生面での懸念などの声が上がってきており、お客様の懸念を払拭するための評価技術の開発は急務となっている。実機評価では測定のばらつきや条件設定、測定負荷等の問題により全てをまかなうことは不可能であり、シミュレーションによる洗浄性能評価の実現は積年の課題である。さらに世界的な競争に生き残るため、これらの節水技術を積極的にアピールし顧客からの信頼を獲得する

こともまた求められている。

こういった課題に対し、昨年度まで TSUBAME 有償利用で大規模多相流体解析コードを開発し、陶器表面の薄膜流れの評価が可能となったが、商品開発に適用した段階で、洗浄時の水はねが新たな課題と判明した。これは節水型トイレの場合、規定の洗浄性能をクリアするために流速が増大する傾向にあり、洗浄時の水同士の間隙における水はねを発生しやすくなっているためと推測される。すなわち洗浄性能と水はねは相反する傾向にあり、双方のバランスを取った設計が必要となる。したがって洗浄時の水はね量も、事前評価で定量的にシミュレーションできる技術が新たに求められるようになった。

概要

平成 25 年 12 月～平成 26 年 3 月の有償利用により、TSUBAME2.5 に最適化した大規模並列 GPGPU クラスター対応の混相流シミュレーションコードを開発し、あら

ゆる衛生陶器商品において薄膜陶器表面流れを精度よく再現できるようになった。現在当社での様々な衛生陶器新商品設計に活用している。

次の課題として、洗浄時の水のはねの評価を行うための数値計算手法およびシミュレーションコードを開発し、TSUBAME2.5にて検証を実施する。また流体解析技術を販売の第一線におけるお客様プレゼンツールとしても活用するための高品位可視化処理手法の開発を併せて行い、TSUBAME2.5での混相流シミュレーション結果にて効果を確認する。

結果および考察

1. 水はねシミュレーション

昨年度までに開発した UTI-VSIAM3[1]に基づく混相流シミュレーションコードを 4 種類の衛生陶器製品に適用し、衛生陶器上部への水はね量を計算した。図1に製品Aにおける実験結果との比較を示す。明らかに水はね量が実験よりも過大であり、符合しないことが判明した。

次に、シミュレーションコードに LES 乱流モデルを追加し、再び 4 種類のモデルの計算を実施した。LES モデルは通常のスマゴリンスキーモデルを採用した。図2で明らかのように水はね量は実験値に近づけることができているが、図3に示す 4 種類の製品間の傾向が実験とは一部異なることが分かった。その原因を詳しく確認したところ、製品Bにおいて図4に示すように、実機では観測されない、吐水口での「水はね」が発生していることが分かった。水はねの原因としては、図4の流速ボリュームレンダリング値を見ると、「水はね」直前に赤色で示される高流速の塊が吐水口付近で発生しており、この塊が引き金となって吐水口付近で破裂が生じたものと推測される。しかし単に高流速の塊が生じるだけでは、通常は吐水速度が増大するだけで、進行方向ではない上方向に向かって液滴が上昇する現象は考えにくい。そこで一つの仮説として、吐水口近傍の空気が、高流速の塊によって強く圧縮され、それが出口で解放される際に空気の破裂流速が、液体部に数値計算誤差により拡散し、運動量保存則に見合わない水とびが発生していると推察した。

昨年度までに開発した混相流シミュレーションコー

ドは、一般的な計算手法と同様に、NS 運動方程式

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = (R.H.S) \quad (1)$$

を非保存型の定式化

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \frac{1}{\rho} (R.H.S) \quad (2)$$

に変形した式に沿って流体計算することでロバストなシミュレーションを実現している。これは、水と空気のような密度比が 1000 倍も変わる混相流において、元の NS 運動方程式の形で計算した場合、流速は

$$\mathbf{u} \equiv \frac{\rho \mathbf{u}}{\rho} \quad (3)$$

すなわち運動量を密度で割って計算されるため、気液界面近傍セルにおいて、式(3)の分母の密度の計算誤差により、非常に大きな流速のジャンプを生じる可能性があり、非保存型解法ではこの問題を回避することができるからである。しかしながら、この非保存型方程式では、陽的に運動量保存性を保証していないため、数値計算上の誤差により、運動量保存性が大幅に悪化する可能性がある。今回の水はね不具合は、この運動量保存性の誤差に起因していると推測される。

そこで、従来の非保存型運動量保存式解法に変わり、保存型運動量保存式解法を用いて流速を計算する新しい手法を開発した。式(3)における流速の不安定性を抑制するため、分母の運動量と分子の密度を全く同じ移流計算定式化により更新することにより、流速の安定化を図った。

式(1)の運動量保存則を運動量について計算する際に、同時に質量保存則を密度について計算する。

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (5)$$

式(4)、(5)の左辺第一項により、運動量および密度が更新されるが、このままでは式(3)の問題は解消されない。そこで、各時刻ステップに流速と流体率から運動量と密度を都度計算し、式(4)、(5)に代入して運動量と密度を更新して、式(3)により流速を求める。流速を決めたら、運動量と密度は破棄する。

計算精度とロバスト性を考慮し、式(4)、(5)を次元分割型 CIP-CSL 法により計算する。UTI-VSIAM3 と同様に、物理量の VIA(=Volume Integrated Average)と SIA(=Surface Integrated Average)の 2 種類の値を用いて高次精度計算を行う。

本手法に基づく多相流体解析の具体的な計算手順は次のとおりである。

- 1) 流体率 F^n より、密度 ρ^n の VIA および SIA を計算
- 2) $i=x,y,z$ について、次元分割型移流計算により保存型 CIP 法を用いて計算
 - 2-1) ρ^n の SIA- i を補正
 - 2-2) $(\rho \mathbf{u})^* = \rho^n \mathbf{u}^n - \Delta t \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \mathbf{u})^n$
 - 2-3) $\rho^* = \rho^n - \Delta t \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i)^n$
 - 2-4) $\mathbf{u}^* = (\rho \mathbf{u})^* / \rho^*$
 - 2-5) Time Evolution Converting[2]を用いて SIA- j ($i \neq j$) の \mathbf{u}^* を更新
- 3) 流体率 F^{n+1} を UTI-VSIAM3 および STAA により移流計算
- 4) 粘性項、表面張力項、重力項および圧力項を通常のプロジェクトン法にて計算し、 \mathbf{u}^{n+1} を更新

様々なテスト計算の結果では、上記アルゴリズムのとおり、運動量および密度の移流計算は次元分割型で計算し、一方水と空気の界面を表す流体率の移流計算は従来どおり非次元分割型解法で計算する方法が、計算の安定性の面で最も良い結果が得られた。

上記 2-1)の SIA の補正は、2-4)の分母の密度 ρ^* が急激に小さくならないようにするためのものである。具体的には、2-3)の密度の移流計算において、図5のような上流側が空気の気液界面が通過するとき、 ρ^n の SIA- i の急激な密度低下が生じる可能性があるため、上流側の ρ^n -VIA が、空気に近いある一定の値以下になったときに、界面の ρ^n -SIA を上流側の ρ^n -VIA の値に書き換える上流化を行う。この計算手法では ρ^n -VIA については何も補正を行わないので、密

度の保存性については問題が生じないと考えられる。

まず一般的なダム崩壊流れテスト計算により、本手法の妥当性を確認した。図6に計算結果を従来手法と比較して示す。計算の途中経過は従来手法同様極めて安定であり、また計算結果もほぼ同等の結果が得られることが分かった。

次に、気体と液体の密度比が 10^6 倍と極めて大きい条件における液滴運動のベンチマークテスト[3]を実施した。計算条件は、図7の左側から右側方向に水平に 1.0 の流速を円形の液滴に与え、気体部分は初期流速 0 として計算を実施した。計算結果は、図7のとおり従来の非保存型運動量解法では液滴の変形が生じるのに対し、今回の保存型解法では変形が生じることなくほぼ理論解どおりの結果が得られており、計算誤差による異なる相への流速の数値拡散が抑えられていることが分かった。

以上のベンチマークテストの結果を踏まえ、今回の保存型運動量解法を衛生陶器製品Bのシミュレーションに適用した。図8にシミュレーション結果を示す。流速分布を見ると従来手法とは大きな違いは見当たらないものの、従来手法ではどうしても抑えることができなかった上方への水はねが完全に抑制できており、実験と同様の吐水の傾向が得られた。この結果より、今回の保存型運動量解法は運動量の保存性を改善し、水の不自然な動きを解消する効果があることが分かった。

従来型手法における製品Bの計算結果で見られた吐水口の「水はね」は、製品Aおよび製品Cの計算結果ではほとんど生じていないことが判明した。したがって今回の保存型運動量解法により、図3のBの水はね量が他の製品の水はね量よりも相対的に少なくなることが期待される。今後、この保存型運動量解法を他の製品にも同様に適用し、水はね量が実験と同様の傾向を得られるか検証していく。

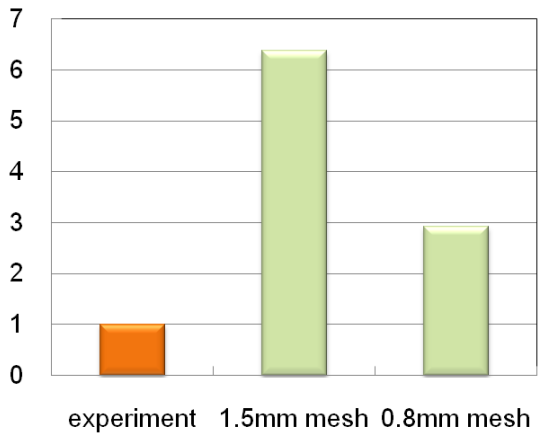


図1. 製品Aの実験と解析の水とび量比較
(実験値=1、乱流モデルなし)

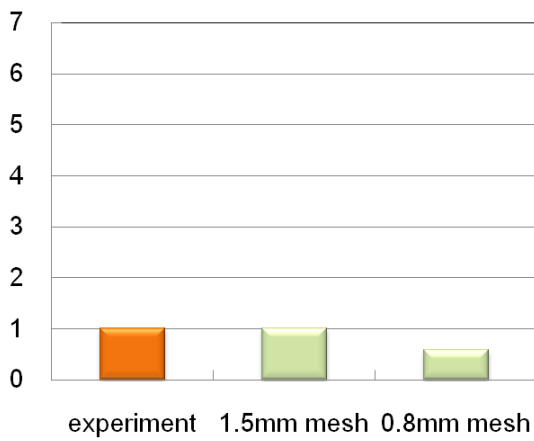


図2. 製品Aの実験と解析の水とび量比較
(実験値=1、乱流モデルあり)

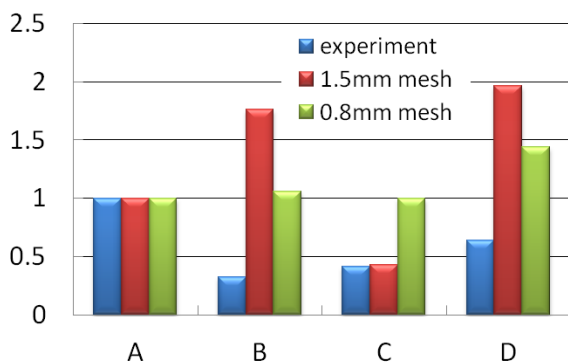


図3. 製品A~Dの実験と解析の水とび量比較
(製品A=1、乱流モデルあり)

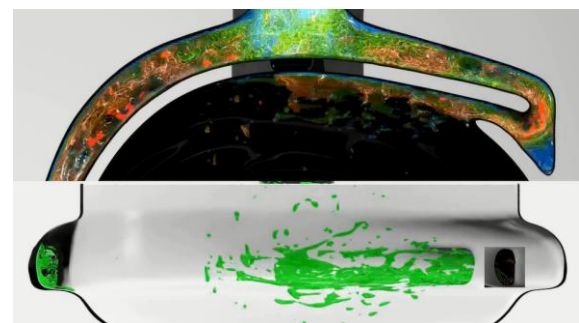
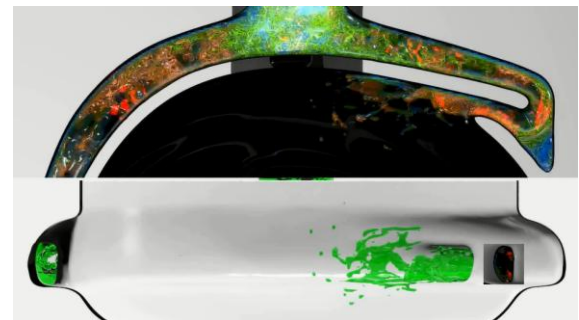
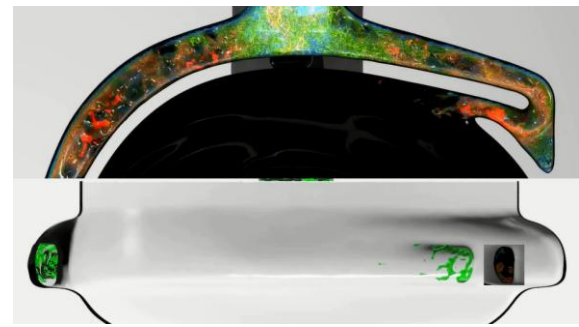


図4. 製品Bの吐水口の「水はね」
上図: 上方から見た流路の流速の絶対値
下図: 側方から見た水はねのようす

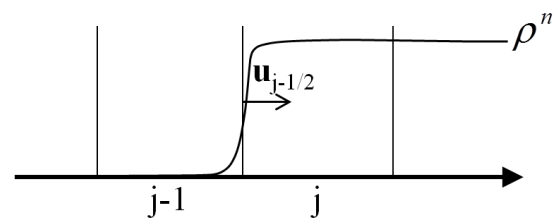


図5. 界面j-1/2において ρ^n -SIAが急激に低下する状況の例

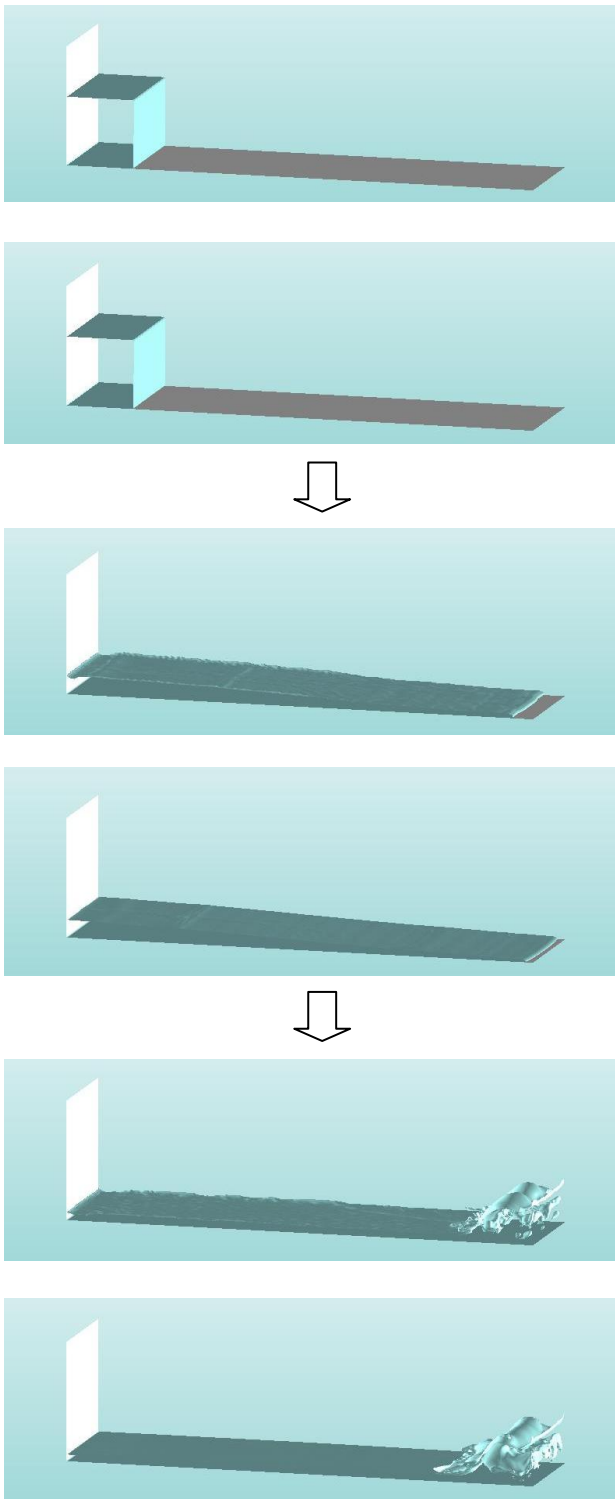


図6. ダム崩壊テスト計算結果
上図: 従来の非保存型運動量解法
下図: 今回の保存型運動量解法

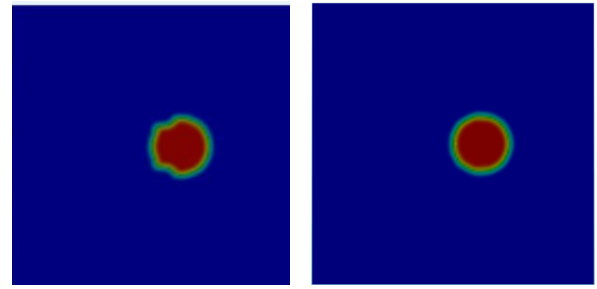


図7. 液滴移動ベンチマークテスト結果(密度比 10^6)
左図: 従来の非保存型運動量解法
右図: 今回の保存型運動量解法

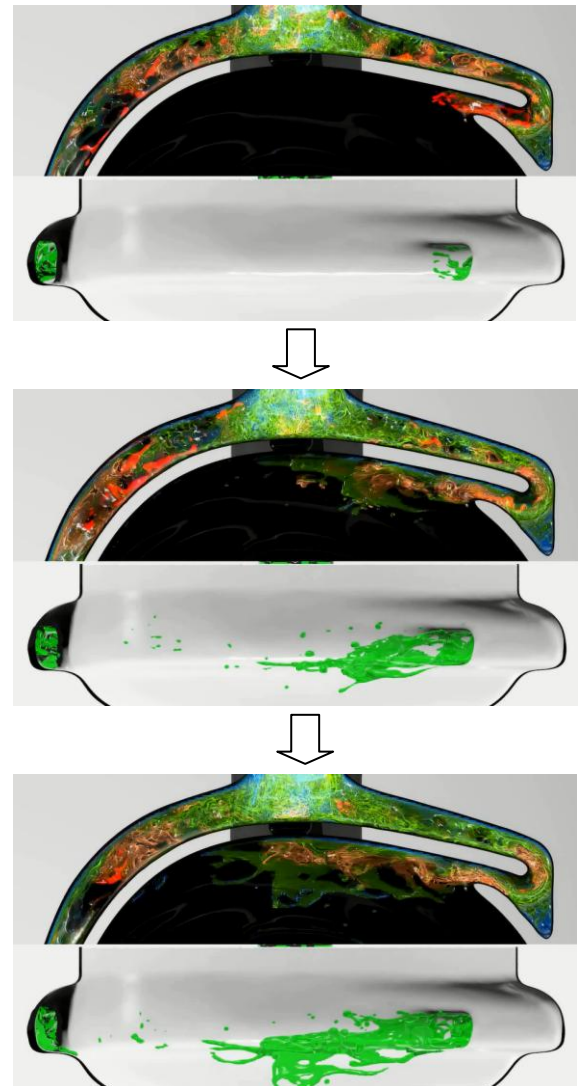


図8. 非保存型運動量解法による製品Bの計算結果
上図: 上方から見た流路の流速の絶対値
下図: 側方から見た水はねのようす

2. 混相流シミュレーションのコミュニケーションツールへの適用

TSUBAME により非常に細かいメッシュサイズのシミュレーションが可能となり、実製品の流れの傾向を良く表せるようになってきたことから、TSUBAME のシミュレーションを実物に変わる代替可視化ツールとしても利用できるようになってきた。衛生陶器の流れの場合、水の流れは至るところで渦や乱流が発生し複雑な流れ場となるが、これらの流れを分かりやすく可視化することで、製品ごとの流れの特徴を第三者に明確に伝えることができる。このためには、

- ①流体シミュレーションの精度が十分高いこと
- ②シミュレーション結果の可視化精度が十分高いことの2点の条件が必要である。これまでの検討で①はかなり達成できるようになってきたことから、今回②についても検討を行う。

流体シミュレーション結果の可視化精度とは、各時刻における水や空気、物体などのシーンにおける各構造体に対して行う照明シミュレーションの精度に相当する。水の場合は透過体であるため、水の表面に到達した光線は屈折および反射を繰り返して、複雑な光線経路を辿る。この複雑な計算を実施する手法として、レイトレーシングが広く用いられている。レイトレーシングは一般的にCGの手法として認識されているが、本来は忠実に光線追跡を実行し、実写と同様の画像を得る照明シミュレーション手法である。

これまでTSUBAMEではGPGPU並列処理を用いたレイトレーシングプログラムが開発された事例[4]があるが、今回は水の高品位レンダリングを目的とするため汎用ツールPOV-Ray Ver3.7を利用した。Ver3.7では、処理ピクセルごとに光線追跡深度に大きなばらつきを生じる水のレンダリングをマルチスレッド並列処理により効率的に処理可能である。ただしPOV-Ray自体に水を忠実に表示するマテリアルは用意されていないため、水の屈折率は実物に近い値を使用する一方、拡散反射係数、鏡面反射係数などの各物体表面物性は、レンダリング結果を見ながら細かく調整していった。またもう一つの重要な点として照明の強さや位置、個数の最適化も行った。これは、水自体には本来色がないため、水の存在を可視化する

ためには、水の反射や屈折による輝度の変化を適切に表現する必要があるからである。水の流れの実験を高速度カメラで動画撮影するときにはストロボやレフ板の位置を細かく調整するのと全く同様であり、可視化という点において両者に違いはないといえる。これまで当社のレンダリングでは、色が無い水の識別を際立たせるために背景に様々な物体を置いて、その背景像が屈折することで流れを可視化するという一般的な手法を用いていたが、今回の高品位レンダリングでは、照明の調整を最適化することにより、背景の物体を配置することなく水の動きを明確化することを目指した。

図9に当社の衛生陶器海外市場向け新製品におけるTSUBAMEシミュレーション結果を可視化レンダリングにより作成した動画の一例を示す。本シミュレーションは、0.8mmメッシュを使用している。本動画により、当社が「トルネード洗浄」とよんでいる螺旋状の渦流れが、大小無数の気泡の動きによりの確に捉えられ、螺旋状の渦が固体を巻き込むように排出していく過程が分かりやすく示されている。このことにより、当社製品独自の流れである「トルネード洗浄」の商品価値を分かりやすく顧客に伝えることが可能となった。図10には、内部流れを微小のトレーサーにより可視化した例を示す。トレーサーは非常に軽いと仮定し、水の各時刻、各座標における流速ベクトルに沿って並進させ、その流速ベクトルの $rot \mathbf{u} = \nabla \times \mathbf{u}$ を計算し粒子の各軸方向の三次元角速度を計算して回転させる方法を用いた。この粒子の動きを追跡することにより、時々刻々変化する内部の大まかな三次元流れ構造を把握することができる。

また図11には、他社製品との流れの違いを、流速ベクトルとともに比較したものを示す。他社製品は両側から水が流れるため中心で両者がぶつかり、エネルギーロスを起こしているが、当社製品は均一な反時計回りの流れを生成するため、無駄なエネルギーロスがなくしっかり陶器表面を洗い流せることが明確になった。

このようにして作成された可視化動画を元に映像用に加工されたものは、海外大規模展示会KBIS(米、2015.1)およびISH(独、2015.3)にて展示され、来場

者に当社製品の独自性と価値を伝達することに寄与した。

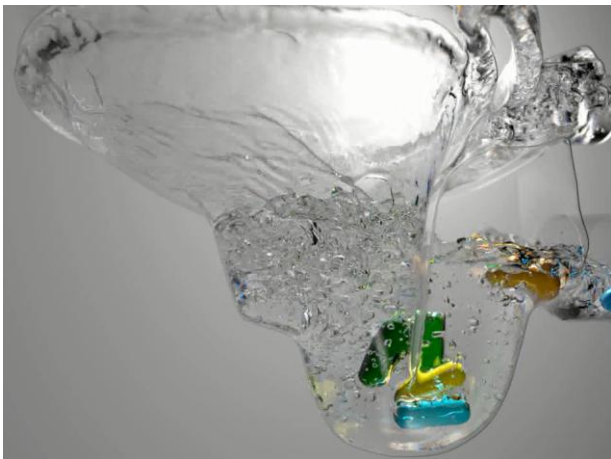


図9. 海外市場向け衛生陶器製品流れ
(固体を含む内部の流れの可視化)

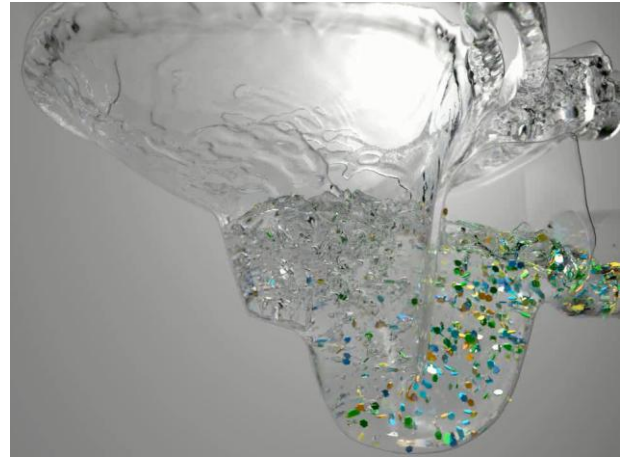


図10. 海外市場向け衛生陶器製品流れ
(トレーサー微粒による内部流れの可視化)



図11. 海外市場向け衛生陶器製品流れ
(他社製品との流れの比較、上: 当社、下: 他社)

まとめ、今後の課題

スケールへの飛翔) 成果報告書 (2010)

衛生陶器の流体シミュレーションは、TSUBAME 上での高精度な流体解析により、以前の PC ベースのシミュレーションよりも画期的に適用範囲が拡大しており、これまではシミュレーション精度や可視化品質の面で活用できなかった洗浄時の水はね評価や営業支援に応用範囲を拡大している。本年度の検討では、水はね評価について本来実機では発生しない数値計算上の「水はね」という課題が明らかになり、保存型運動量解法に基づく新しい計算手法の提案および検証を行い、課題の解決を確認した。また営業支援については、TSUBAME の高精細なシミュレーション結果を活用して、従来のポストプロセッサと比較して内部の複雑流れの大幅に鮮明な可視化を達成した。

今後は保存型運動量解法による新しいシミュレーションコードを他の衛生陶器製品にも適用し、水はね量の傾向が実機と一致するか検証していく。また可視化については様々な製品の営業支援に展開していく予定である。

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] F. Xiao: Unified formulation for compressible and incompressible flows by using multi-integrated moments I: one-dimensional inviscid compressible flow, Journal of computational physics, 195, pp.629-654 (2004)
- [3] M. Raessi, H. Pitsch: Consistent mass and momentum transport for simulating incompressible interfacial flows with large density ratios using the level set method, Computers & Fluids, 63, pp.70-81 (2012)
- [4] P. V. PHUC: 建築物の室内外環境の連成解析とその高速化技術の開発, 共同利用(産業利用)トライアルユース: 先端研究施設共用促進事業『みんなのスパコン』TSUBAME によるペタ