

可視化情報学会／

第18回 ビジュアライゼーションカンファレンス

GPGPUスパコンによる住宅水まわり機器の 気液二相流シミュレーション



2012年12月3日

TOTO株式会社

生産技術センター CAE技術グループ

池端昭夫



TOTO株式会社 (2007年に東陶機器株式会社より社名変更)

- **会社創立日**: 1917年(大正6年)5月15日
- **本社所在地**: 福岡県北九州市小倉北区中島2-1-1
- **従業員数(2012年3月末現在)**: 25,092人 (グループ企業含む)
8,316人 (TOTO株式会社のみ)
- **資本金** : 355億7900万円(2012年3月現在)
- **総売上高** : 4,527億円(2012年度)
- **営業利益** : 188億円(2012年度)

会社紹介

■TOTO商品のラインナップ

＜住宅設備機器＞

衛生陶器
 システムトイレ
 腰掛便器用シート(ウォシュレットなど)
 水まわりアクセサリーなど
 浴槽
 ユニットバスルーム
 水栓金具
 システムキッチン
 洗面化粧台
 マーブライトカウンター
 浴室換気暖房乾燥機
 福祉機器など



＜新領域事業商品＞

環境建材(タイル建材
 ハイドロテクト塗料など)
 セラミック(精密セラミックス、光通信部品など)



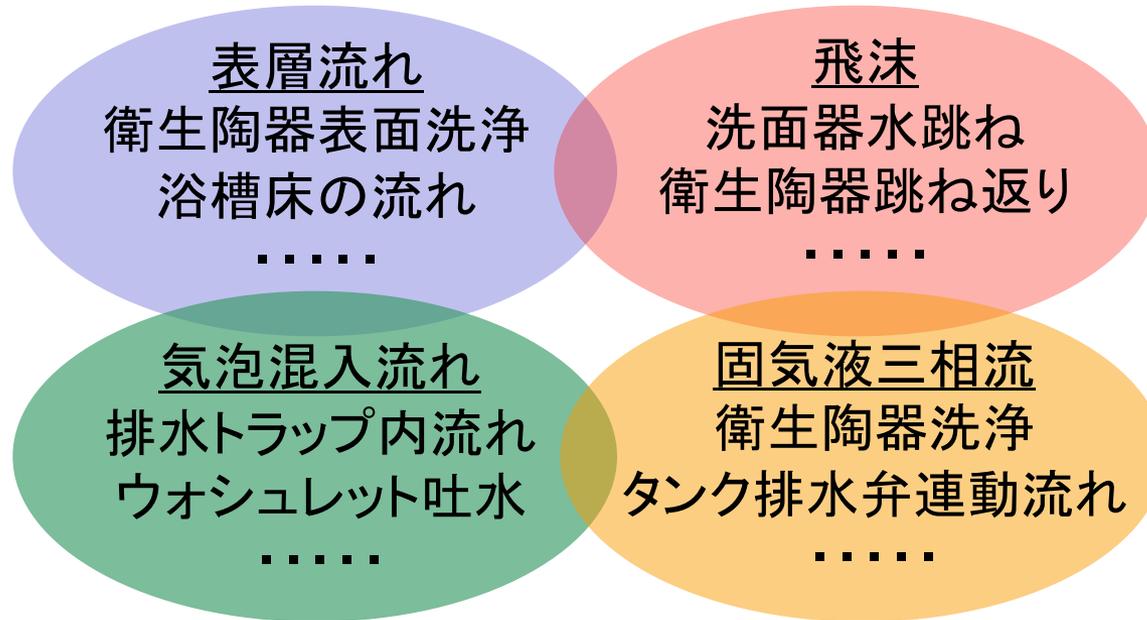
ご報告の概要

- 気液二相流解析手法の開発
- 移流方程式計算手法の詳細検討
- Navier-Stokes 方程式解法 (GPGPU利用)
- TOTO製品への適用例
- 東工大スパコン「TSUBAME2.0」による高精度化

気液二相流解析手法の開発

■多相流解析プログラム開発の目的と経緯

- ・住宅水まわり機器への多相流解析技術の適用例



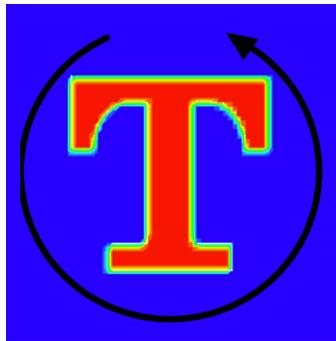
東京工業大学 肖 鋒 准教授ご指導の下、プログラム開発開始
(2001～)

気液二相流解析手法の開発

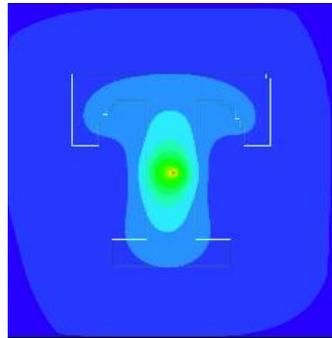
■水と空気の気液界面移流方程式 (F は流体率をあらわす)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0$$

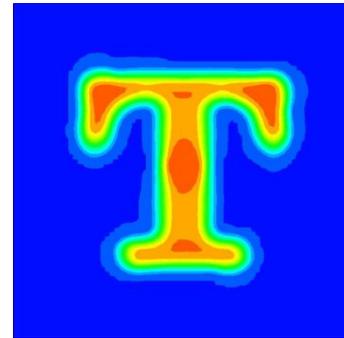
・移流方程式の精度比較 (一回転後の結果)



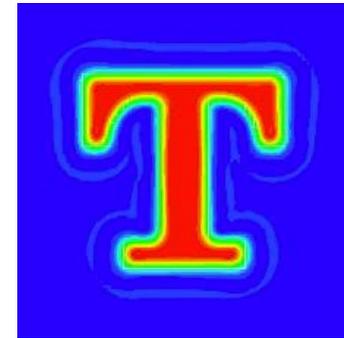
初期値



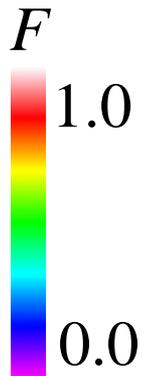
(a) 一次風上差分法



(b) MUSCL法



(c) 保存型CIP法
(CSL2=二次関数)



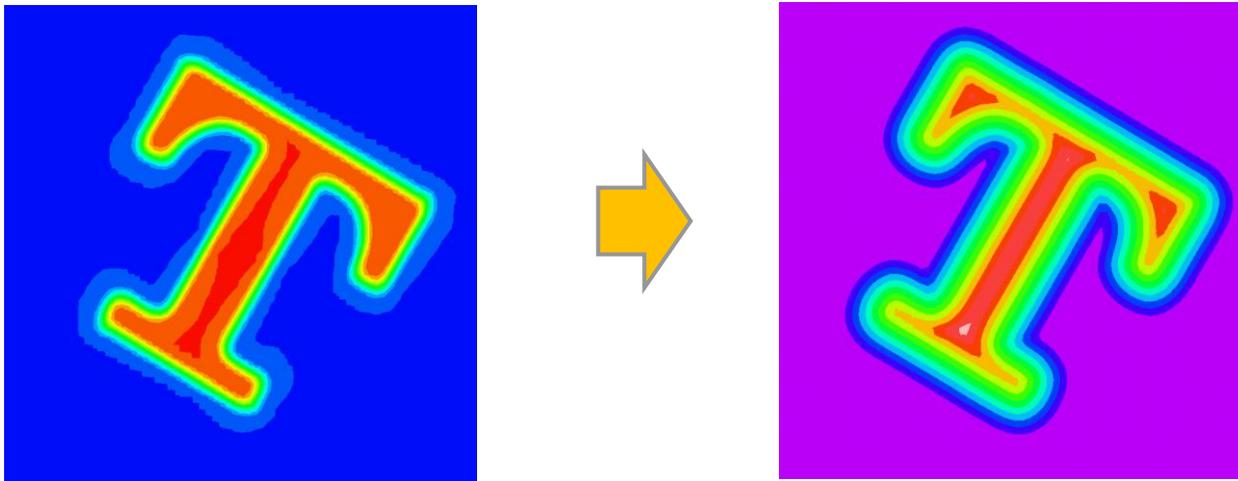
保存型CIP-CSL2法 (Nakamura, Yabe et al., 2001) により高い移流計算精度が得られるが、**気液界面の数値拡散**は残り、このままでは気液界面の計算には精度不十分

■STAA法(Surface Tracking with Artificial Anti-diffusion、池端、肖、2002) の概要

手順1. 移流方程式高精度解法により F の移流計算を行う

手順2. 移流計算後、生じた数値拡散を以下の方法で修正

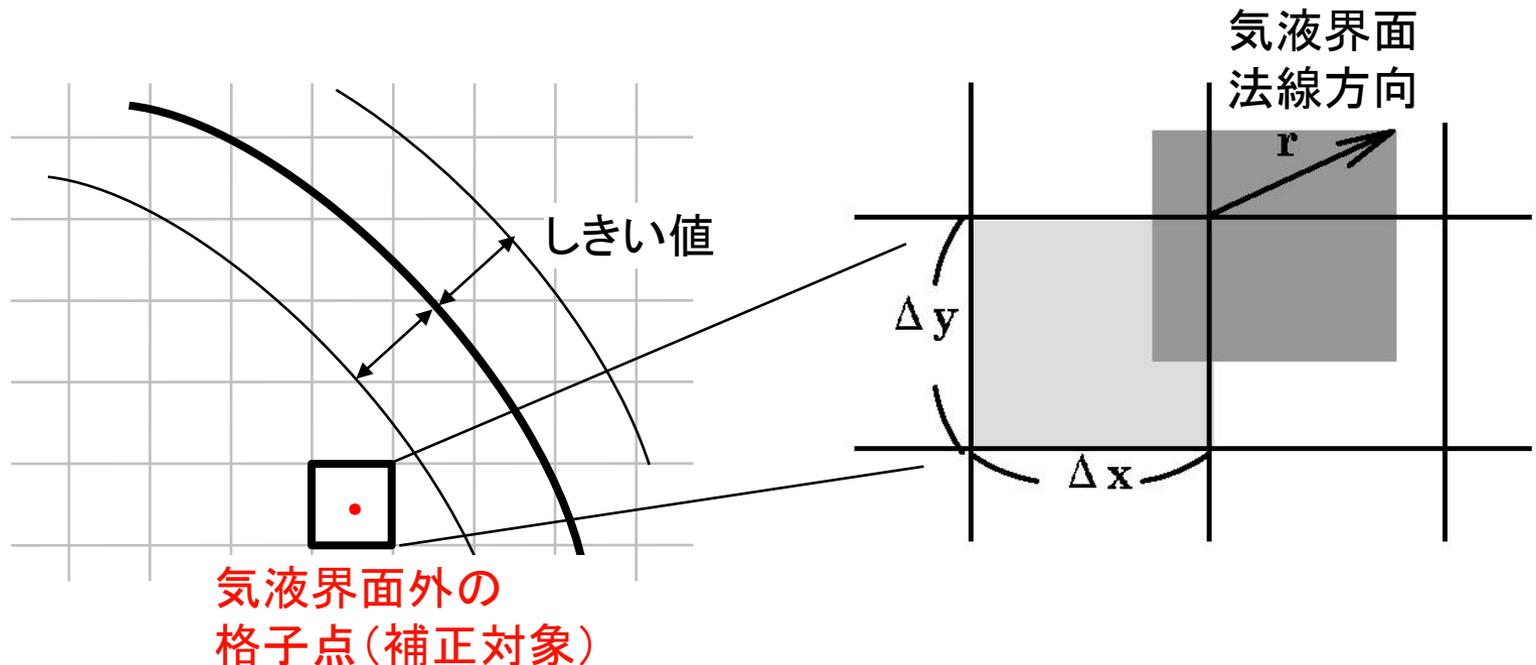
- 2-1. 各メッシュごとに、 F から気液界面からの符号付き距離
(=レベルセット)を都度計算
(Osher、Sussman(1994)とは異なり、移流計算はしない)



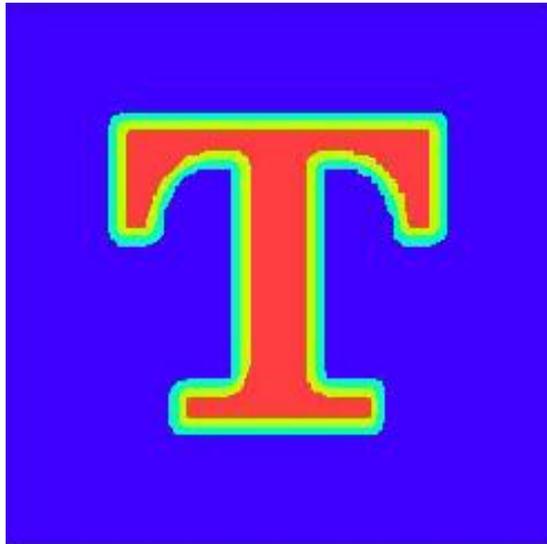
気液二相流解析手法の開発

■STAA法(Surface Tracking with Artificial Anti-diffusion、池端、肖、2002)の概要

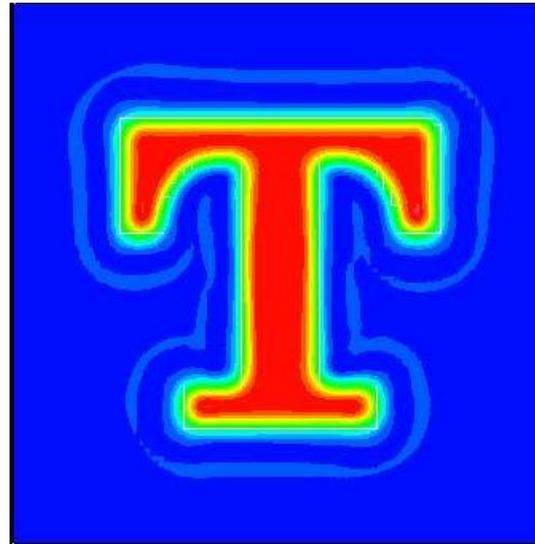
2-2. 気液界面からの距離がある「しきい値」を超えたメッシュについて、そのメッシュで F に数値拡散が生じている場合、不足もしくは余分の流体体積を気液界面法線方向より強制的に移して補正



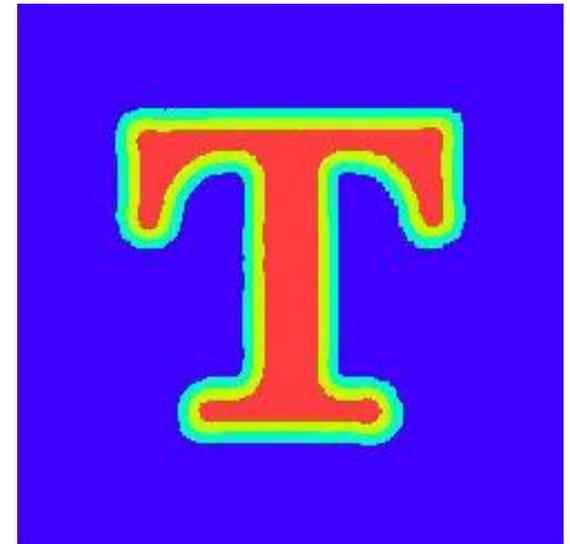
■移流方程式の精度比較結果



初期状態

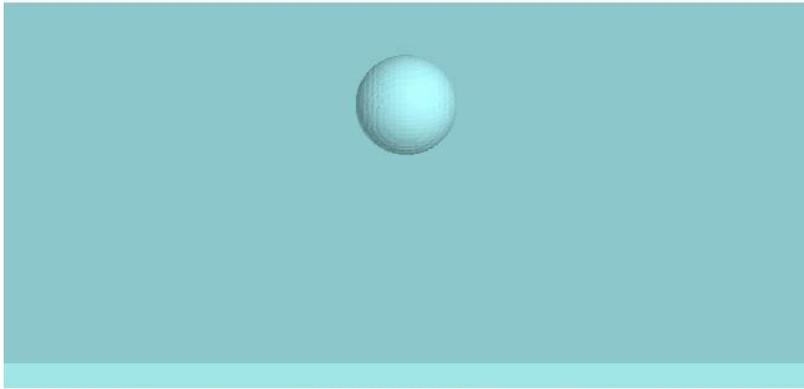


保存型CIP法

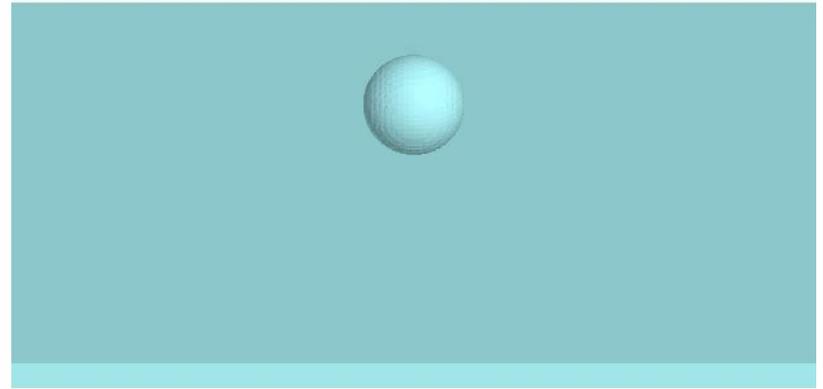


保存型CIP + STAA法

■Milk Drop シミュレーション結果



CSL2+STAA法



PLIC (Rider et al., 1998)

※移流方程式のみの比較。運動方程式、圧力解法は全て同じ解法(保存型CIP法+CIP-CUP法)

移流方程式計算手法の詳細検討

移流方程式

(運動方程式の移流項
および気液界面移流
方程式)

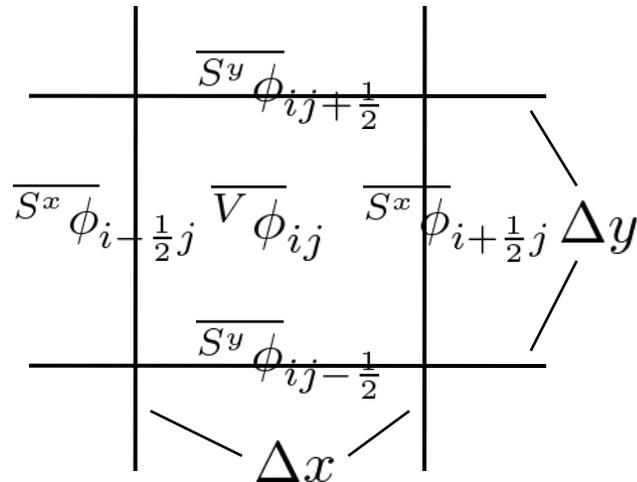
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$



保存形表示

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial u\phi}{\partial x} + \frac{\partial v\phi}{\partial y} = \phi \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

直交構造格子



モーメント(=物理量関連量)の定義

$$\overline{V} \phi_{ij} \equiv \text{Volume Integrated Average (VIA)} \\ \text{体積積分平均値}$$

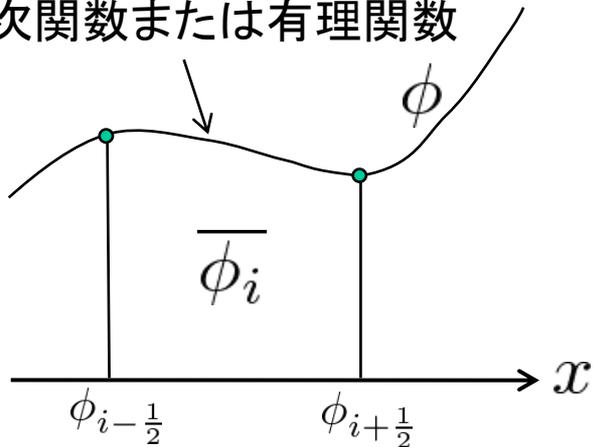
$$\overline{S^x} \phi_{i+1/2j} \equiv \text{Surface Integrated Average (SIA)} \\ \text{面積積分平均値}$$

$$\overline{S^y} \phi_{ij+1/2} \equiv$$

移流方程式計算手法の詳細検討

■一次元移流方程式

二次関数または有理関数

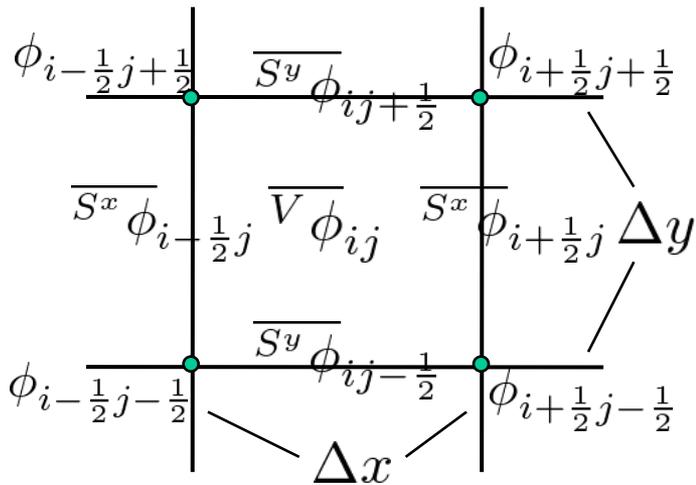


区間 $[x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$ での補間関数を、3つの制約条件 $(\phi_{i-\frac{1}{2}}, \phi_{i+\frac{1}{2}}, \overline{\phi}_i)$ から決定



- $\phi_{i-\frac{1}{2}}$... セミラグランジェにより更新
- $\overline{\phi}_i$... 有限体積法により更新

■二次元移流方程式



保存型CIP法では、次元分割法を用いる (一次元を二回計算する)

- ・4モーメントを用いる必要がある (点値、SIA-X、SIA-Y、VIA)
- ・X、Y軸に対して**非対称な定式化**

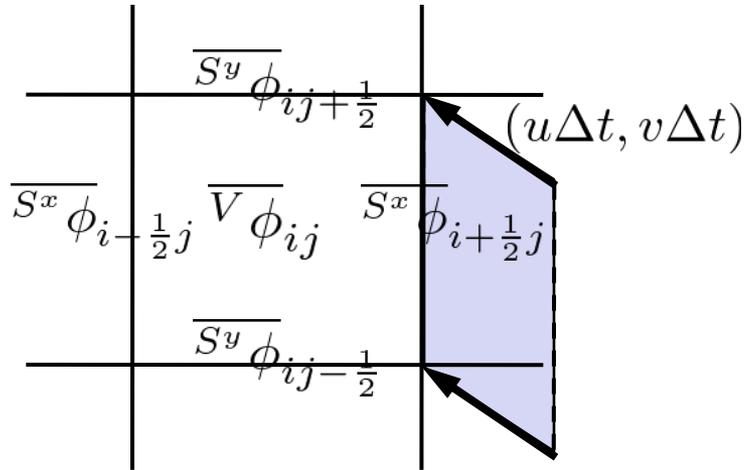
移流方程式計算手法の詳細検討

UTI-VSIAM3 (Ikebata, Xiao, 2011)

= Unsplit Time Integration

VIA and SIA Multi-Moment Method

- ・3モーメントを用いる(SIA-X、SIA-Y、VIA)
- ・X、Y軸に対して**対称な定式化**



- ・メッシュ界面流束計算を、ガウス積分により計算

$$\mathcal{F}_{x_{i+\frac{1}{2}j}} = \frac{u\Delta t}{2} \left\{ \overline{S^x \phi}^n(x_{i+\frac{1}{2}} - g_1 u\Delta t, y_j - g_1 v\Delta t) + \overline{S^x \phi}^n(x_{i+\frac{1}{2}} - g_2 u\Delta t, y_j - g_2 v\Delta t) \right\}$$

$$\mathcal{F}_{y_{ij+\frac{1}{2}}} = \frac{v\Delta t}{2} \left\{ \overline{S^y \phi}^n(x_i - g_1 u\Delta t, y_{j+\frac{1}{2}} - g_1 v\Delta t) + \overline{S^y \phi}^n(x_i - g_2 u\Delta t, y_{j+\frac{1}{2}} - g_2 v\Delta t) \right\}$$

$$g_1 \equiv (3 - \sqrt{3})/6, \quad g_2 \equiv (3 + \sqrt{3})/6$$

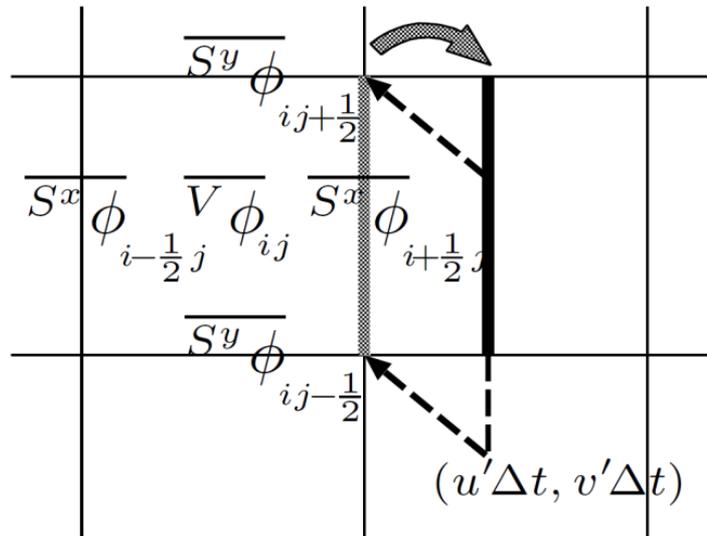
- ・SIAはセミラグランジェにより計算

$$\overline{S^x \phi}^{n+1}_{i+\frac{1}{2}j} = \overline{S^x \phi}^n(x_{i+\frac{1}{2}} - u\Delta t, y_j - v\Delta t)$$

$$\overline{S^y \phi}^{n+1}_{ij+\frac{1}{2}} = \overline{S^y \phi}^n(x_i - u\Delta t, y_{j+\frac{1}{2}} - v\Delta t)$$

- $\overline{S^x \phi}^n(x_{i+\frac{1}{2}} - u'\Delta t, y_j - v'\Delta t)$ 、 $\overline{S^y \phi}^n(x_i - u'\Delta t, y_{j+\frac{1}{2}} - v'\Delta t)$ の2ステップ計算法

STEP 1. 1次元 CIP-CSL により中間値(*)を計算



•X軸方向

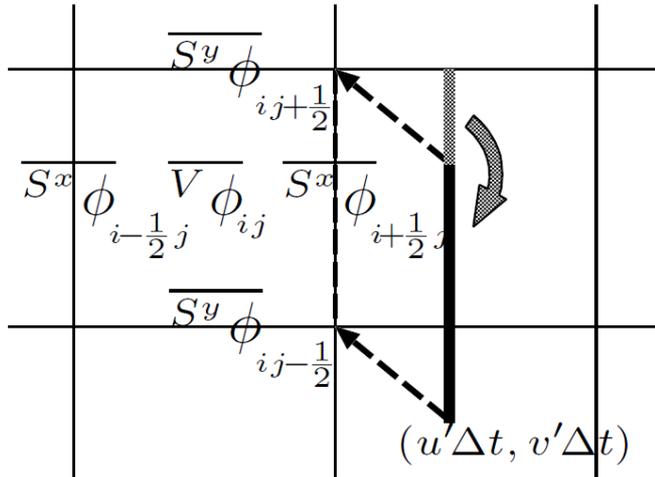
SIA $\overline{S^x \phi}^*(x_{i+\frac{1}{2}} - u'\Delta t, y_j)$ 、流束 $\mathcal{F}_x^*(x_{i+\frac{1}{2}} - u'\Delta t, y_j)$ を計算

•Y軸方向

SIA $\overline{S^y \phi}^*(x_i, y_{j+\frac{1}{2}} - v'\Delta t)$ 、流束 $\mathcal{F}_y^*(x_i, y_{j+\frac{1}{2}} - v'\Delta t)$ を計算

移流方程式計算手法の詳細検討

STEP 2. STEP 1の中間値から、SIAを更新



•SIA-Xの更新 (SIA-Yの更新はSIA-Xと同様)

$$\overline{S^x \phi}^n(x_{i+1/2} - u' \Delta t, y_j - v' \Delta t) = \overline{S^x \phi}^*(x_{i+1/2} - u' \Delta t, y_j) - \Delta t \left\{ \frac{\partial v' \phi}{\partial y} - \phi \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial v' \phi}{\partial y} = \frac{F^+ - F^-}{\Delta y}$$

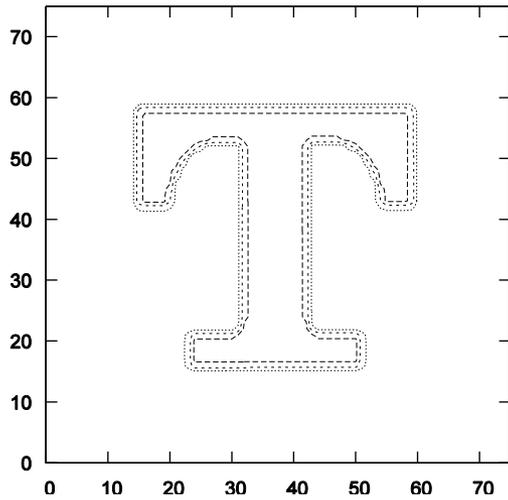
$$F^+ \equiv \left(\frac{1}{2} + \xi \right) \underline{\mathcal{F}_y^*(x_i, y_{j+1/2} - v' \Delta t)} + \left(\frac{1}{2} - \xi \right) \underline{\mathcal{F}_y^*(x_{i+1}, y_{j+1/2} - v' \Delta t)}$$

$$F^- \equiv \left(\frac{1}{2} + \xi \right) \underline{\mathcal{F}_y^*(x_i, y_{j-1/2} - v' \Delta t)} + \left(\frac{1}{2} - \xi \right) \underline{\mathcal{F}_y^*(x_{i+1}, y_{j-1/2} - v' \Delta t)}$$

$$\xi = u' \Delta t / \Delta x$$

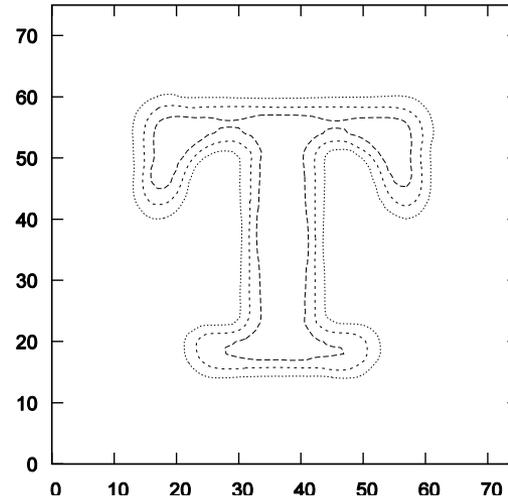
STEP1で計算済み

■二次元移流方程式精度検証(UTI-VSIAM3)

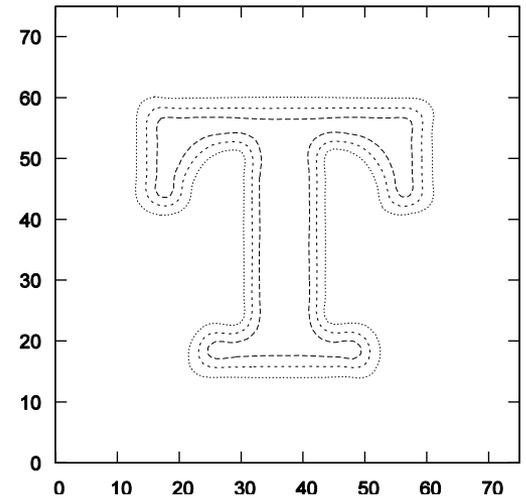


初期状態

1回転



MUSCL



UTI-VSIAM3

■多相流におけるNavier-Stokes方程式 (Fは表面張力等の体積力)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla : \mathbf{T} + \mathbf{g} + \mathbf{F}$$
$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) F = 0$$

フラクショナルステップ法に基づき順次計算
(移流項計算 → 非移流項計算 → 圧力項計算)

■圧力ポアソン方程式 (CIP-CUP 法)

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right) = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{1}{\rho C_s^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u}^* \right)$$

対角スケーリング前処理による共役勾配法で陰的に計算

- OpenCLを利用 (今後も含めた様々なハードウェアの互換性のため)
- 精度を考慮した完全倍精度演算
- 社内で解析ソースコードを広く共有利用するため、ローカルメモリ利用などの高度な高速化手法の利用は最小限とした
- 独自のラッパー関数 (TOTO_CLライブラリ)を作成し、コードの複雑さを排除

(例)

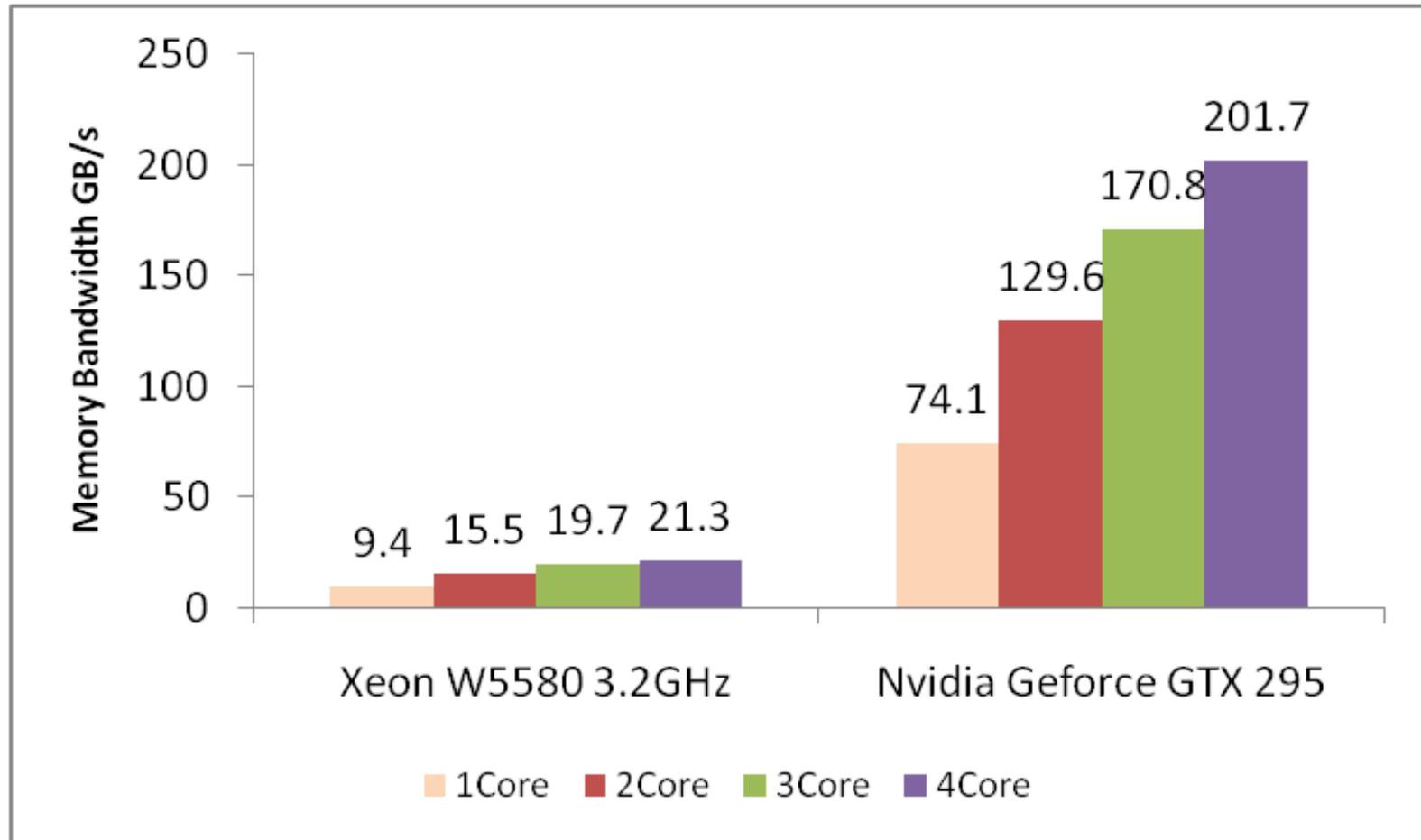
| | | |
|--|---|---------------------------|
| <code>clSetKernelArg + clEnqueueNDRangeKernel</code> | → | <code>CL_Exc</code> |
| <code>clEnqueueWriteBuffer(9 引数)</code> | → | <code>CL_Put(4 引数)</code> |

- CUDAプラットフォームでの実行速度向上のため、TOTO_CLおよびOpenCL形式をCUDA Driver APIに内部変換してコンパイル

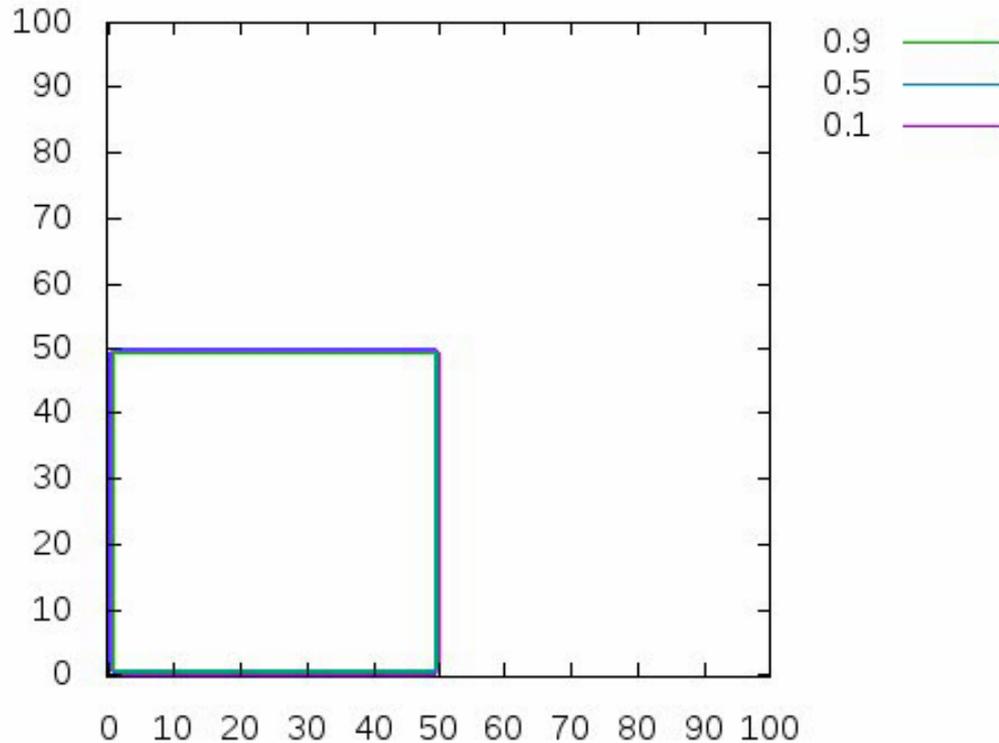
(例)

| | | |
|-------------------------------|---|------------------------------------|
| <code>CL_CREATE_KERNEL</code> | → | <code>cuModuleGetFunction</code> |
| <code>__kernel</code> | → | <code>extern "C" __global__</code> |

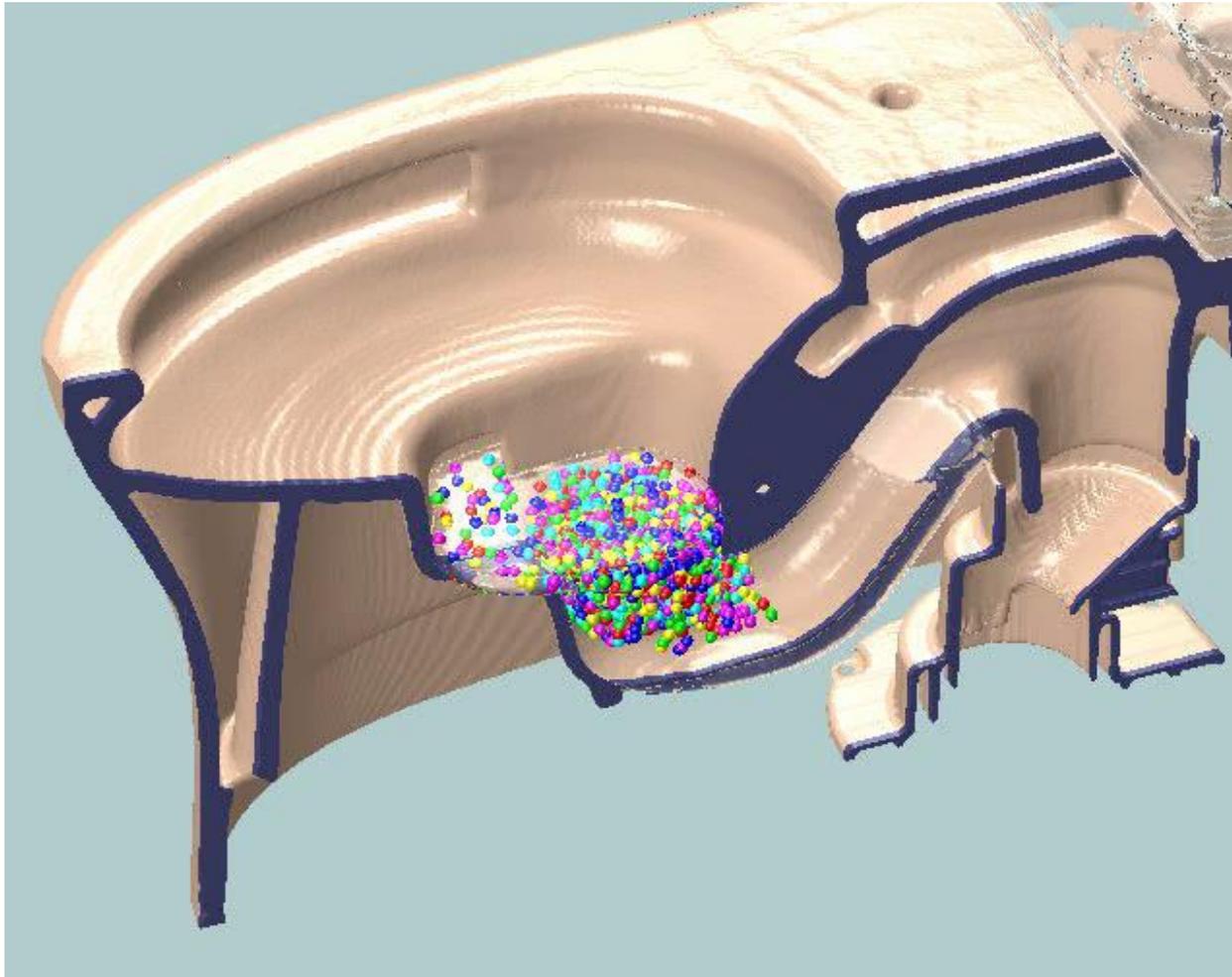
■PCG解法のベンチマークテスト結果 (1,117,866 cells, 677 iterations)



■三次元ダム崩壊テスト問題(100 × 50 × 100 cells)



水と空気の密度比は
1000倍を設定
(終始計算は安定)



衛生陶器の流れ
シミュレーション
(UTI-VSIAM3+STAA)

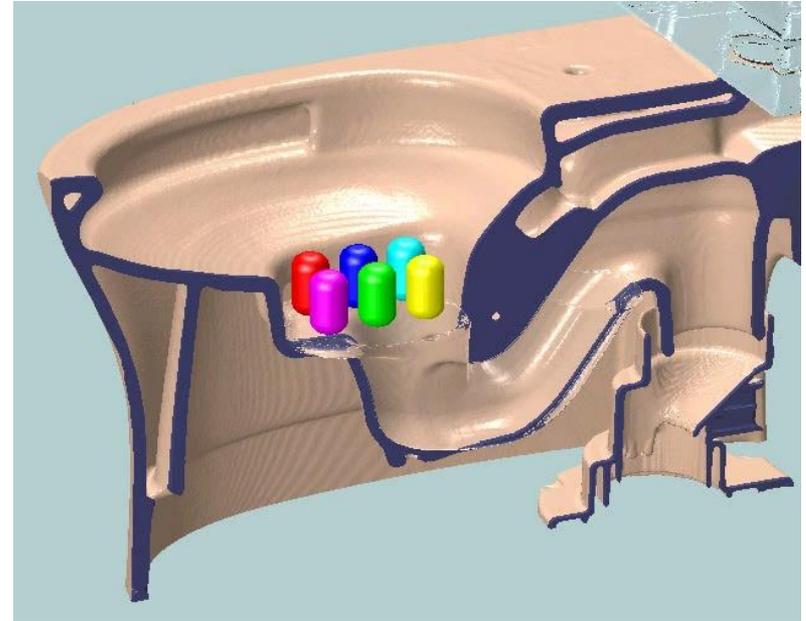
構造格子:
297 × 150 × 280 cells

粒子：浮力を持った
マーカー粒子

■固気液三相流への適用



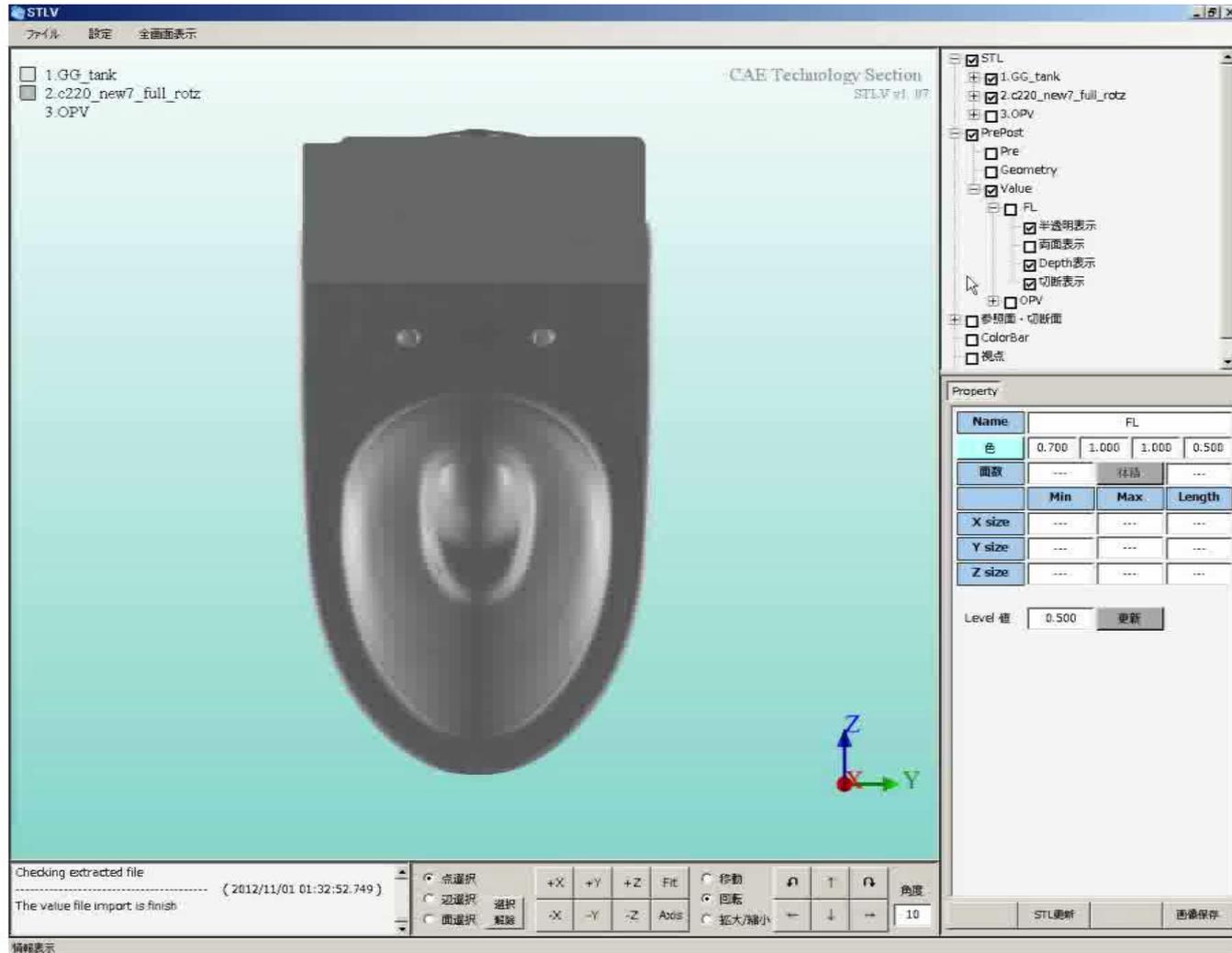
キッチンシンク



衛生陶器

- 自由表面、気泡、飛沫、物体運動のシミュレートに成功
- 物体運動も含めて、ほぼ100%のGPGPUコード化達成
⇒ 並列GPGPU高速多相流解析プログラムを開発完了、流体解析の様々な商品設計適用におけるリードタイム短縮を実現

■ 自社製プリポストソフトウェア (Visual C# + OpenTK)



■目的

TOTOでは2017年環境ビジョン「TOTO GREEN CHALLENGE」を掲げ住宅機器水まわり商品の節水化・CO2削減を推進中



機器節水化の技術課題の一つとして、製品表面の汚れを残さず洗い流すための効率的な流し方の技術確立が必要



- 東工大「先端研究施設共用促進事業」利用の目的
 1. スパコン“TSUBAME2.0”を高効率に利用できる気液二相流体解析ソフトウェアを開発し、大容量メッシュによる高精細なシミュレーションを実施、実製品の流れを再現
 2. 本技術を機器設計に展開し、技術課題解決に寄与

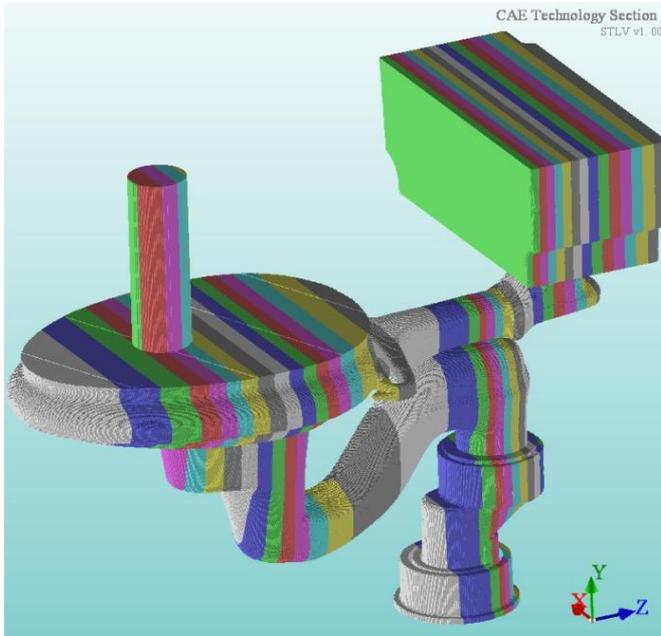
■シミュレーション結果の機器設計への適用



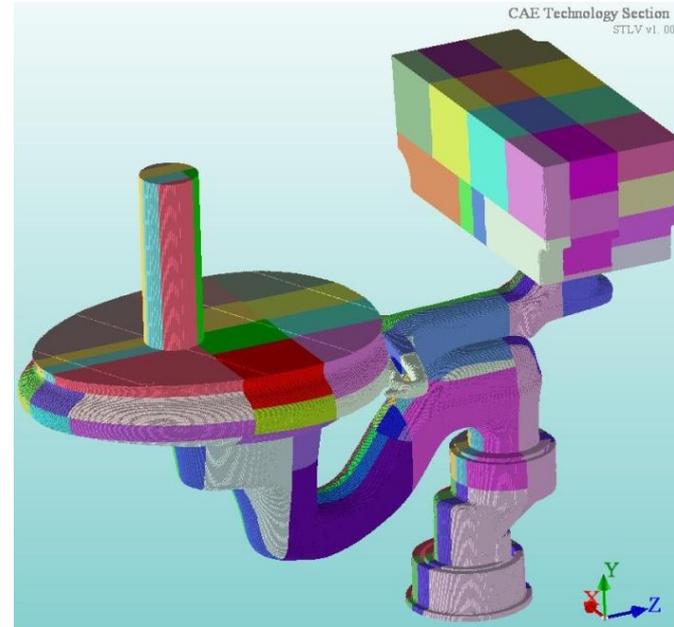
(例)
衛生陶器における
表面流速分布

- シミュレーションにより得られた各時刻の流速、圧力等の値および分布より、汚れの洗浄性能を定性的、定量的に評価する
- シミュレーション精度を高精度化することにより、設計への適用信頼性が向上し、シミュレーションの有効性が高まる

■TSUBAME2.0への実装



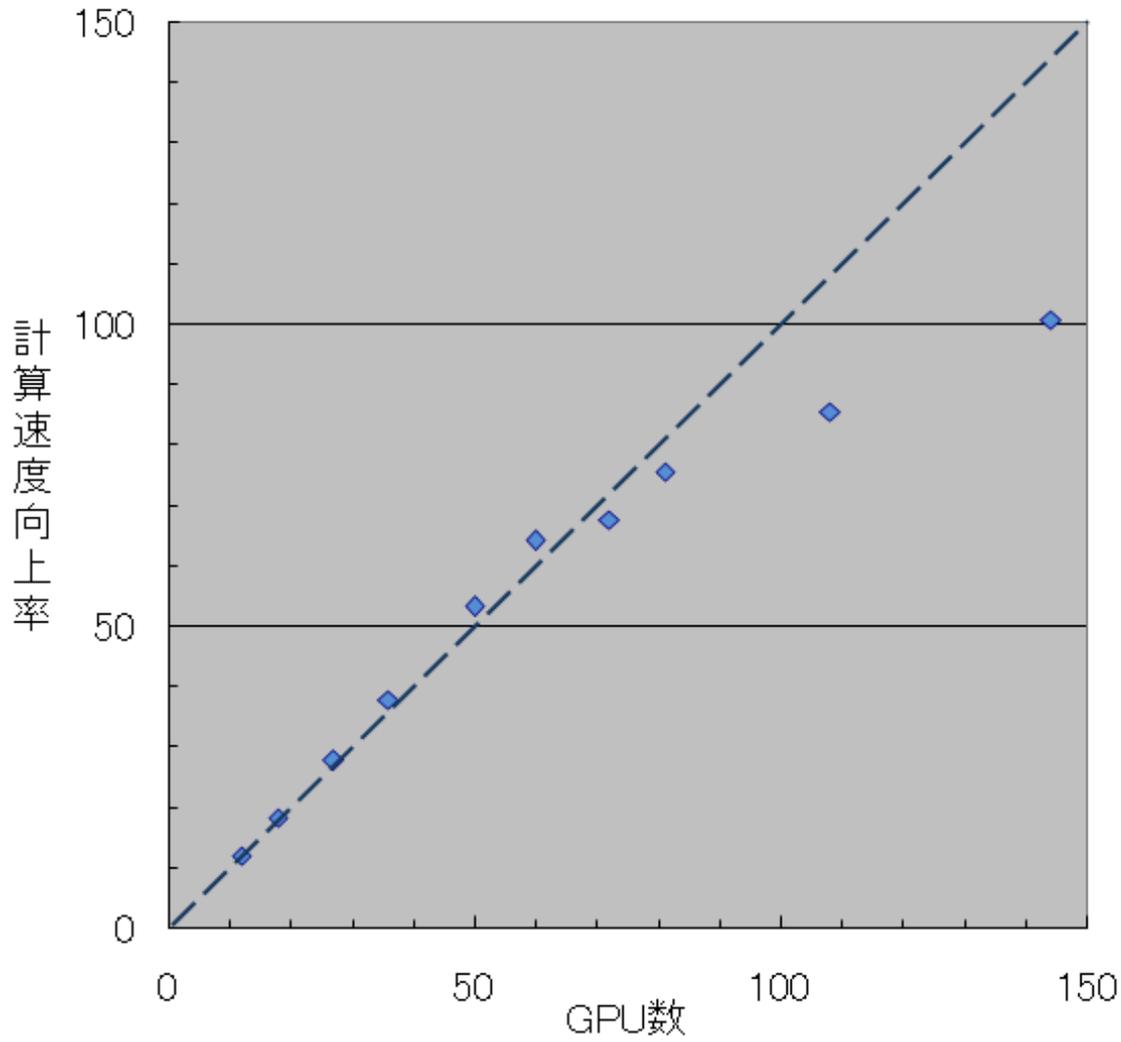
従来手法：一次元領域分割



新並列計算手法：三次元領域分割

- MPIオーバーラップ通信、非同期一斉通信(MPI_Waitall)による分散メモリ並列
- 「境界不連続三次元領域分割法」により複雑製品流路における多数ノードでの並列化効率向上

■PCG法ベンチマーク結果

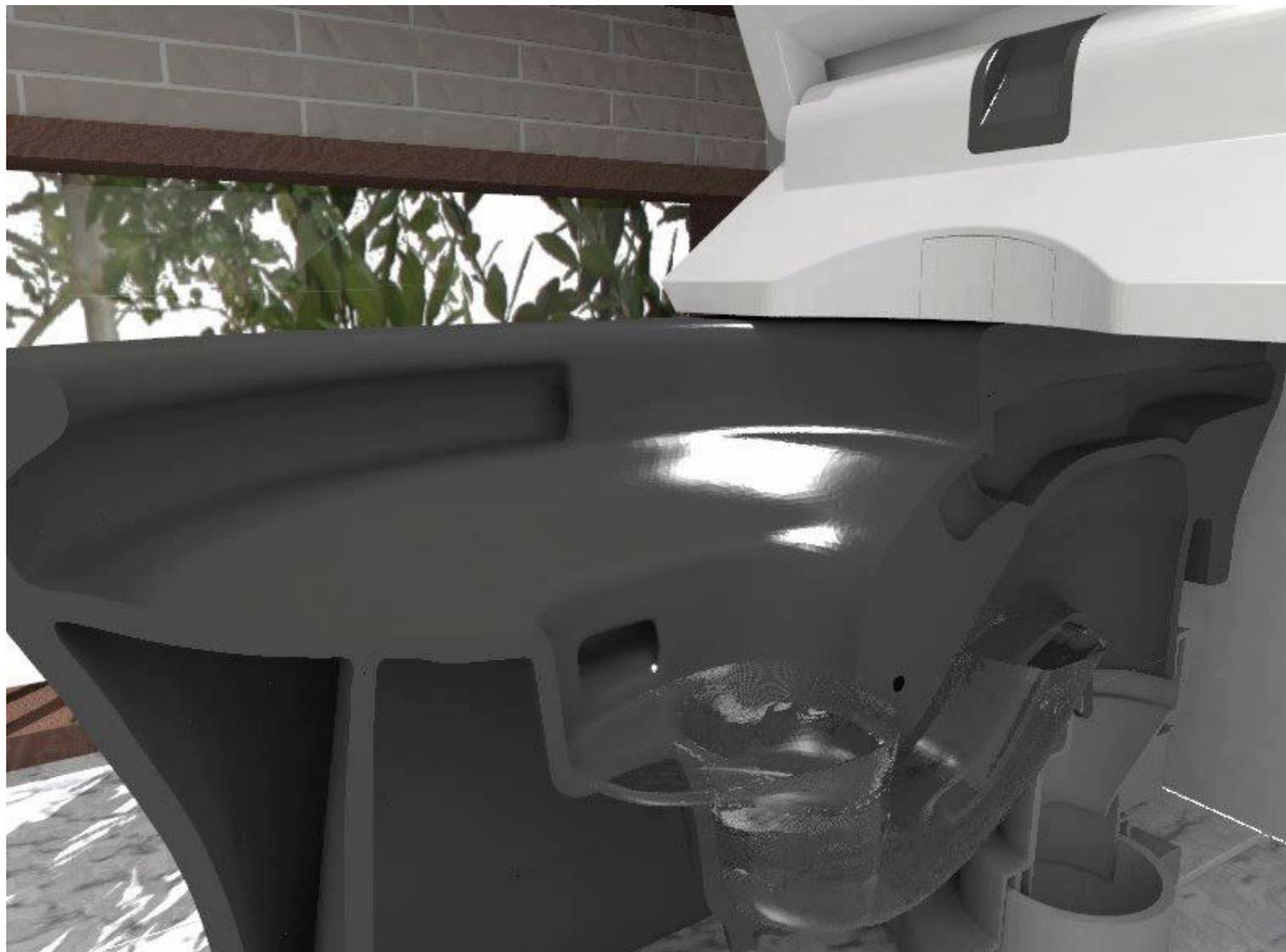


計算領域メッシュ数:
159,481,345 cells
空間解像度:
0.5mm/cell

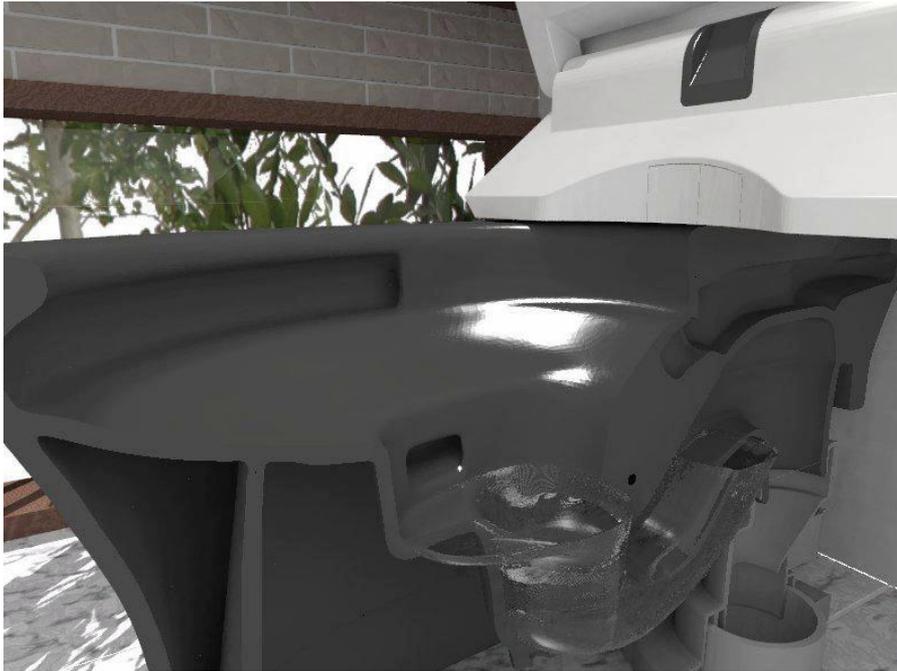
■シミュレーション結果（可視化処理はTSUBAMEのPOV-Ray利用）



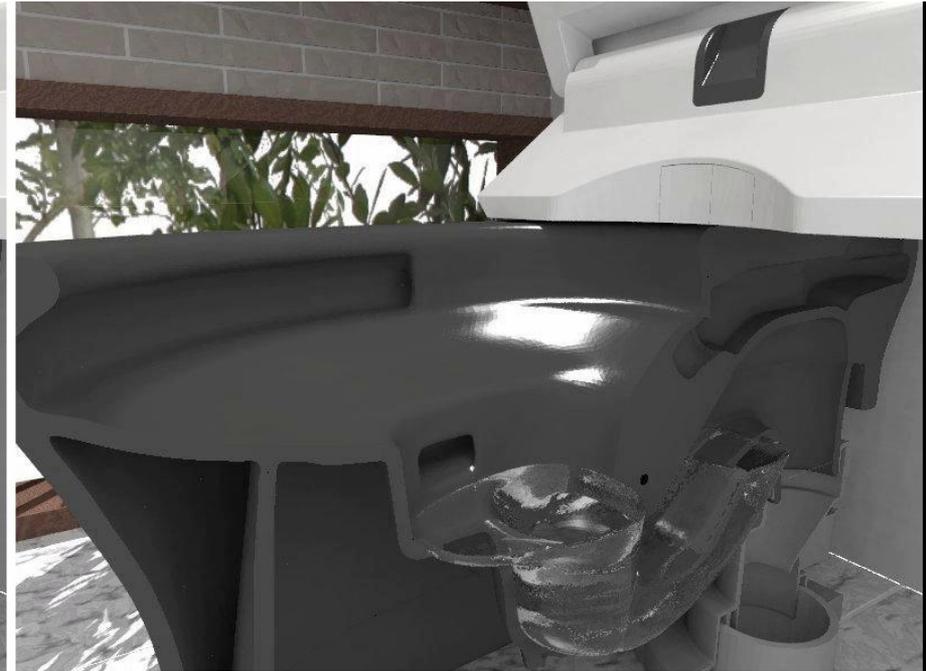
■シミュレーション結果（可視化処理はTSUBAMEのPOV-Ray利用）



- シミュレーション結果の従来との比較
(可視化処理は全てTSUBAMEのPOV-Ray利用)



TSUBAMEでの
シミュレーション結果



TOTO社内PCでの
シミュレーション結果

■解析精度の検証



実機流れ
(吐水開始直後)



従来結果



TSUBAME結果

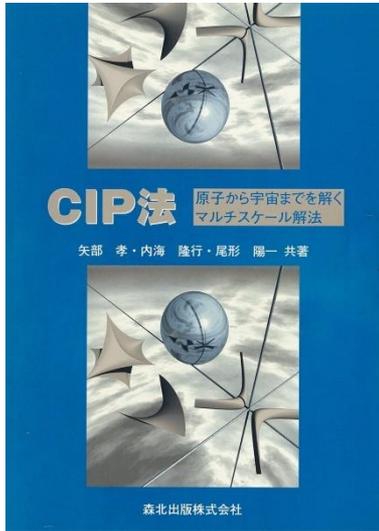
- 微細気泡、薄膜流れの精度が大幅に向上
- 実機との若干の差は残っている ⇒ 今後の課題

- TOTOでは、住宅水まわり商品開発への適用を目的に、東工大肖准教授ご指導の下、多相流体解析プログラムを開発している
- 「STAA法」により、数値拡散を低減した気液二相流解析を実現
- 保存型CIP法をベースに開発した「UTI-VSIAM3」と組み合わせることにより、比較的精度良好かつGPGPUなどの並列・高速化技術に適したNS方程式解法が完成
- ベンチマークテストや商品への適用テストにより実用的な解析精度およびパフォーマンスを確認、商品開発に適用してきている
- 水まわり商品への節水へのニーズ増大に伴い、東工大スパコンを用いたシミュレーションのさらなる高精度化に取り組み中
- 複雑製品流路において並列GPGPUスパコンに適合した境界不連続三次元領域分割法を開発し、大規模計算において良好なスケーラビリティを達成。従来よりも飛躍的に高精細なシミュレーションを可能とした
- シミュレーション精度は大幅に向上したが、今後もさらなる高精度化に取り組んでいく

謝辞

- 多相流体解析プログラム開発におきましては、東京工業大学 肖 鋒 准教授に多大なるご指導、ご協力を頂きましたことを深謝致します。
- 大規模流体解析プログラム開発におきましては、文部科学省「先端研究施設共用促進事業」に基づく「みんなのスパコンTSUBAMEによるペタスケールへの飛翔」の採択利用課題として推進しています。ここに青木 尊之 教授をはじめとする東京工業大学 学術国際情報センター各位に多大なるご支援、ご協力を頂きましたことを深謝致します。

ご紹介(宣伝です、すみません)



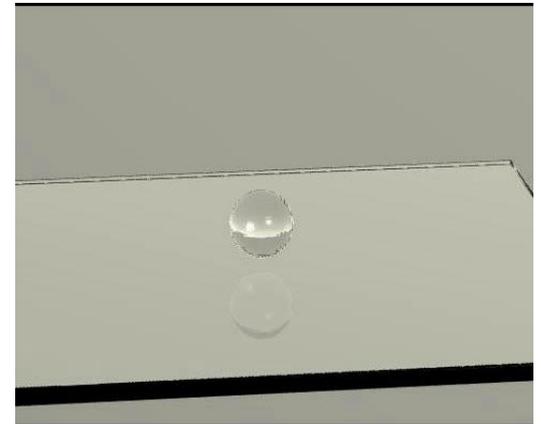
森北出版「CIP法」(2004)

- ・初出版のCIP法教科書
- ・著者はCIP法を発明した東工大矢部教授他
- ・発表者は、第8章「CIP法の新たなる発展」において、STAA法およびシミュレーション実施例を提供



コロナ社出版「計算流体力学」(2009)

- ・VSIAM3等の最新保存型CIP法教科書
- ・著者は共同研究を行っている東工大肖准教授他
- ・発表者は、第6章「さまざまな展開」において、STAA法およびシミュレーション実施例を提供



ご清聴ありがとうございました

TOTO