

オープンCAEシンポジウム2024

# 「富岳」を活用した 水まわり住宅設備機器開発のための 混相流シミュレーション



TOTO  
CLEANOVATION

Let's Wash with  
TOTO  
WASHLET

CLEAN SYNERGY  
Technology & Design

The security of  
TOUCHLESS

2024. 11. 8

TOTO株式会社 技術本部 技術統括部  
CAE技術グループ ○佐々木 一真  
池端 昭夫

# 自己紹介

名前 **佐々木 一真** (ささき かずま)

出身 神奈川県

学歴 横浜国立大学大学院

経歴 2016年 TOTO株式会社 入社  
以来、CAE技術グループに所属しシミュレーション技術開発に従事

専門分野 数値流体力学 (気液二相流)

## 富岳利用歴

2020年 HPCI「富岳」 試行的利用課題 (課題番号: hp200243) ※1

2021年 HPCI「富岳」 産業課題A期 (課題番号: hp210013) ※1

2022年 HPCI「富岳」 産業課題A期 (課題番号: hp220046) ※1

### HPCI利用研究課題優秀成果賞受賞

2023年 HPCI「富岳」 産業課題B期 (課題番号: hp230239) ※2

※1 課題代表者 : 池端 昭夫  
※2 課題代表者 : 佐々木 一真

★この数年、「富岳」を活用し水の流れのシミュレーションソフト開発に携わっている

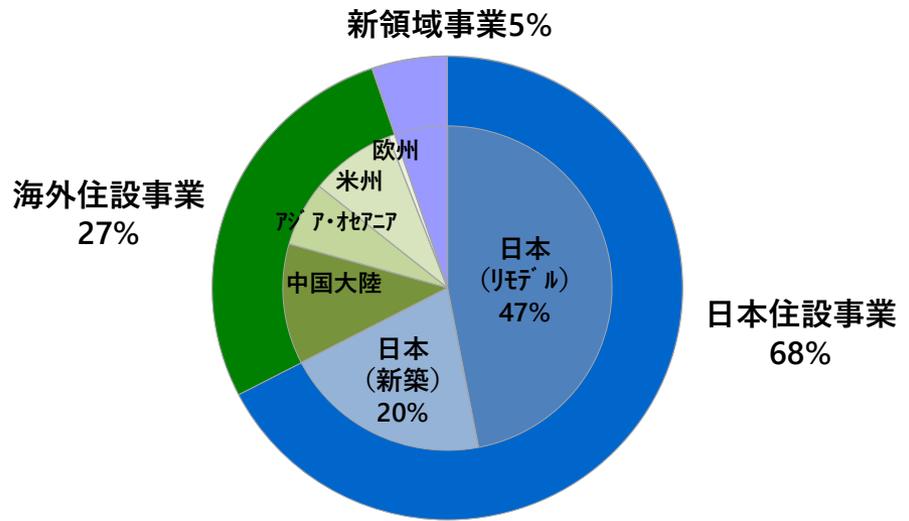
■ 商号	TOTO株式会社 (TOTO LTD.)
■ 創立	1917 (大正6) 年5月15日
■ 本社所在地	福岡県 北九州市
■ 連結売上高	7,022億 8,400万円
■ 連結営業利益	427億 6,600万円
■ 連結経常利益	515億 1,500万円
■ 連結純利益	371億 9,600万円
■ 資本金	355億 7,900万円
■ グループ社員数	33,386名

TOTOはトイレの会社？

---



### 売上構成比



連結売上高 7,023億円(2024年3月期)

### グローバル住設事業 (日本・中国アジア・米州欧州)



### 新領域事業



静電チャック



AD部材

# 会社概要

## ■主要国内販売拠点

(2024年4月現在)

### 【販売拠点】

- ・支社
- ・ショールーム
- ・販売グループ会社

13ヶ所  
98ヶ所  
11社



TOTOミュージアム (本社敷地内)

九州支社

中国支社

四国支社

本社



信越支社

北陸支社

関西支社

北海道支社

東北支社

北関東支社

東京支社

東関東支社

横浜支社

中部支社

(2024年4月現在)

### 【生産拠点】 20ヶ所



**滋賀・滋賀第二工場**

- ・衛生陶器
- ・システムキッチン
- ・洗面化粧台

**小倉第一・第二工場**

- ・衛生陶器・水栓
- ・電温・手すり

**苧田工場**

- ・カウンター
- ・プラスチック
- ・電子部品

**土岐工場**

- ・温水洗浄便座「ウォシュレット」
- ・環境建材

**茨城工場**

- ・温水洗浄便座「ウォシュレット」



**茅ヶ崎工場**

- ・トイレシステム

**豊前工場**

- ・カウンター
- ・プラスチック

**赤穂工場**

- ・ユニットバスルーム
- ・浴槽

**佐倉工場**

- ・ユニットバスルーム
- ・浴槽

**中津工場**

- ・衛生陶器
- ・ニューセラミックス

**茂原工場**

- ・システムキッチン
- ・洗面化粧台

**サンアクアTOTO**

- ・水栓金具（組立）
- ・給排水部品（組立）

**奈良工場**

- ・カウンター
- ・プラスチック

**愛知工場**

- ・衛生陶器

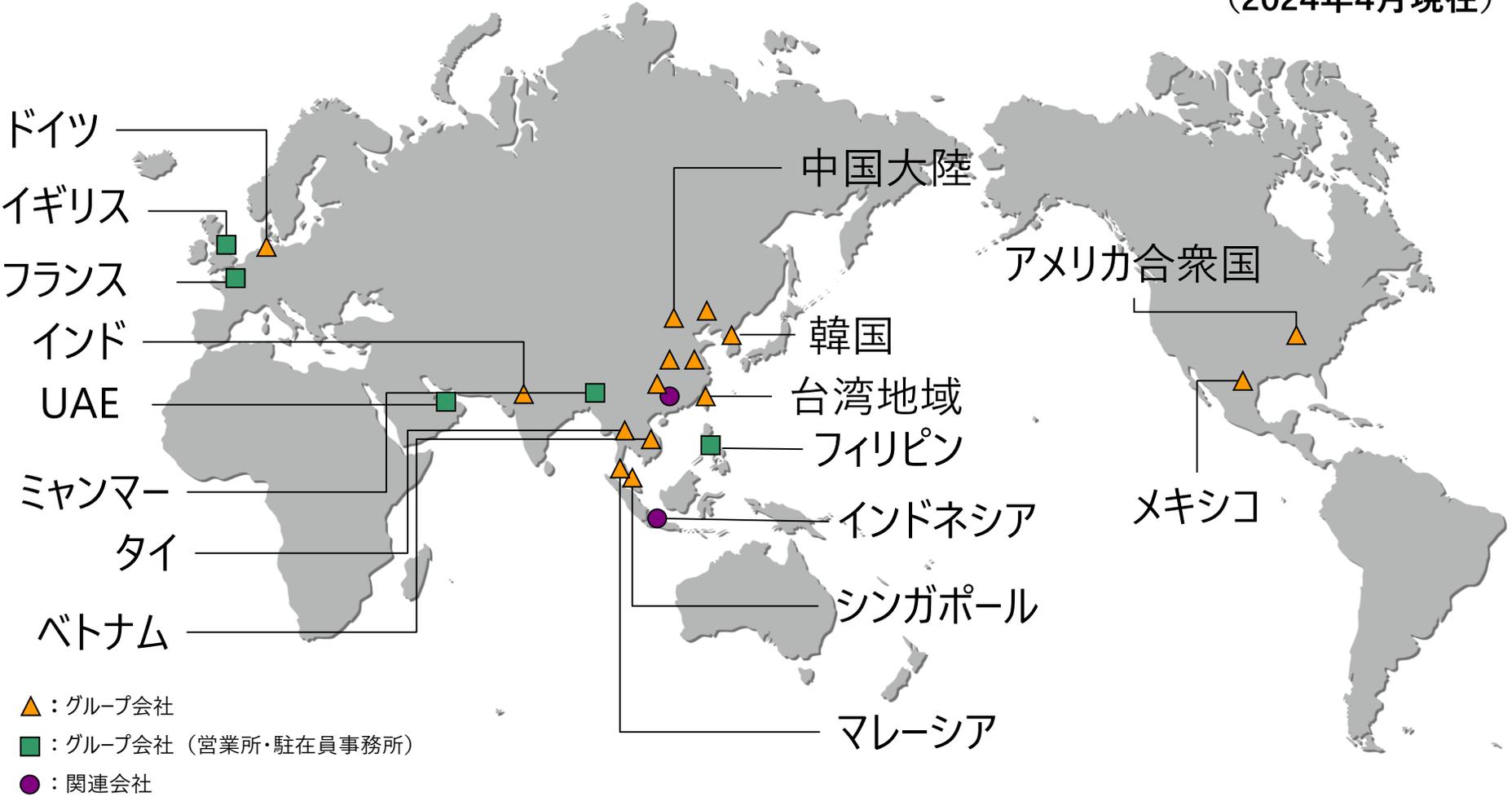
**勝浦工場**

- ・カウンター
- ・プラスチック

**大分工場**

- ・水栓

(2024年4月現在)

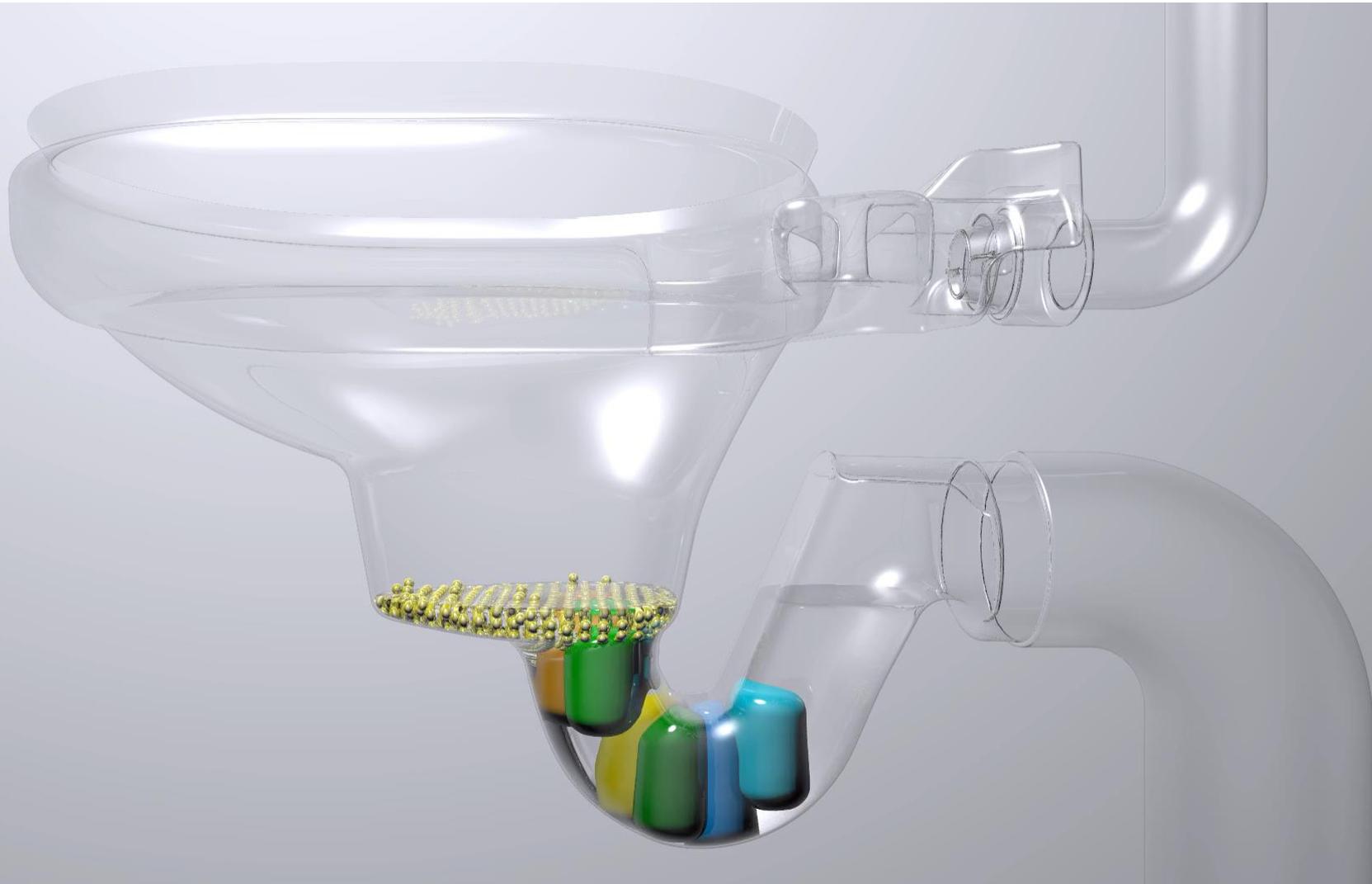


17の国と地域、38の拠点到展開 (日本除く)  
(生産・販売 : 5拠点, 生産 : 21拠点, 販売 : 12拠点)

# TOTO の 混相流解析のご紹介

# TOTO の 混相流解析のご紹介

## ■ 大便器洗浄シミュレーション：ISH※ 2019 (ドイツ・フランクフルト)



※革新的なバスルームデザイン、エネルギー効率に優れた暖房、空調テクノロジーや再生可能エネルギーにおける世界最大の産業見本市

## ■ 気液二相流（混相流）シミュレーションの技術的課題

Navier-Stokes方程式：

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

$F$  : 液相率  
 $\mathbf{u}$  : 流速ベクトル  
 $P$  : 圧力  
 $\rho$  : 密度  
 $\mu$  : 粘性係数  
 $\mathbf{F}_V$  : 外力

気液界面移流方程式：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla F = 0$$

→ 水と空気の流れを表現



## 水と空気の流れのシミュレーションの難しさ

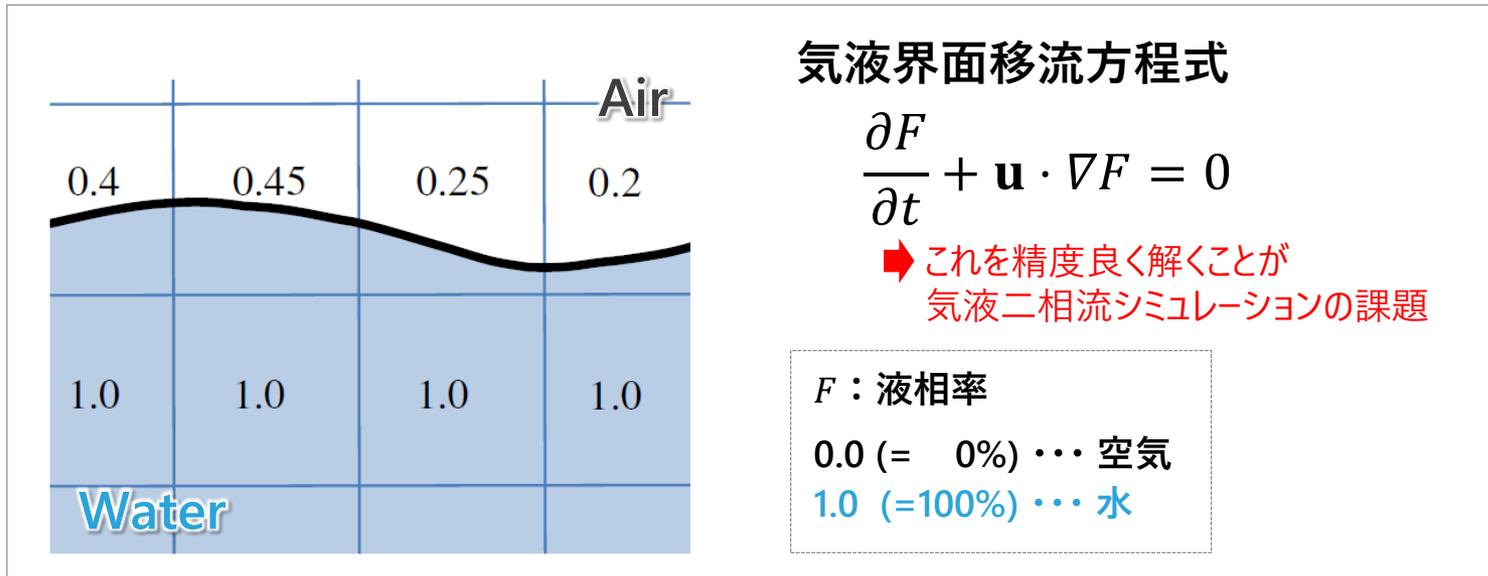
- ①密度比が約1,000倍で、計算安定性の保持が難しい
- ②気液界面移流方程式を精度よく解くのが難しい
- ③時間刻みが小さく、計算量が膨大となる

2011年～

東工大との共同研究による解析手法の開発 + スパコン利用に着手

## ■ 気液界面の計算方法

### VOF法 を用いた有限体積法



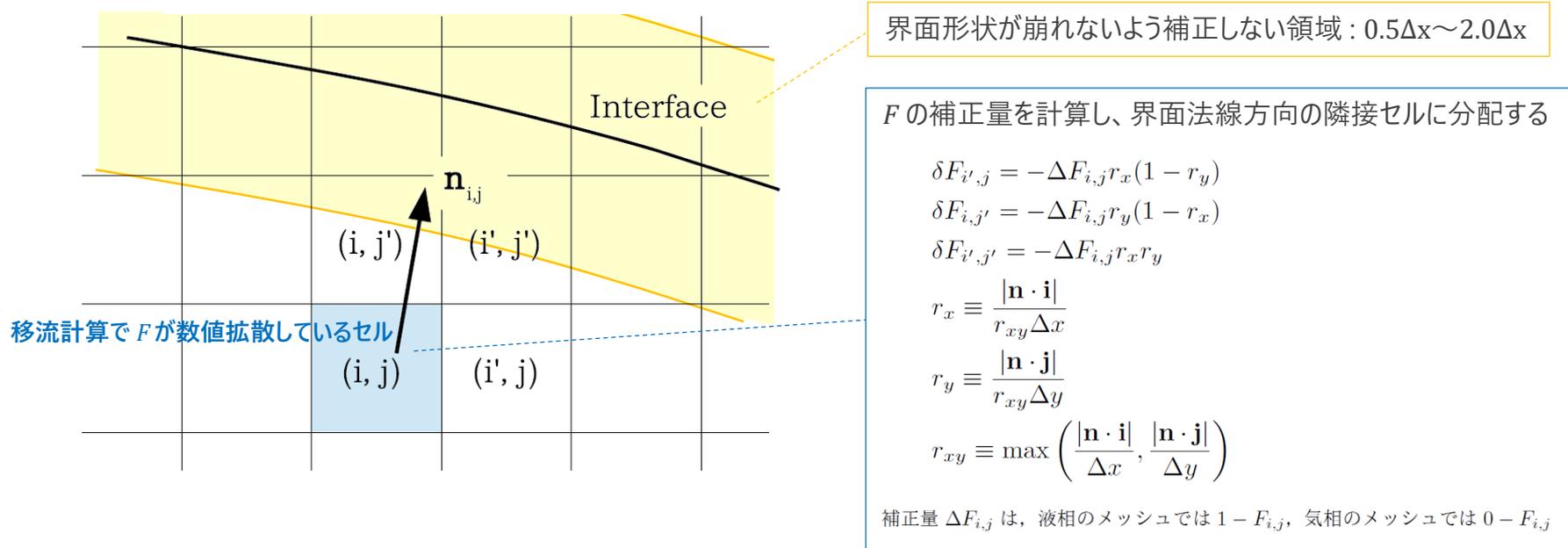
固定メッシュにおいて「液相率」により気液界面を表す



**混相流の複雑な界面変形（気泡生成、飛沫等）**  
を表すことができる

## ■ TOTOが提案する「STAA」法 (Computers and Fluids 論文, 2016年)

- ① 液相率  $F$  について、一般的な移流方程式解法で計算する  
(PLIC, MARS, CICSAM, THINC, ...)
- ②  $F$  の数値拡散を、気液界面の法線ベクトルに沿った“反拡散”フラックスにより補正する  
( **STAA=Surface Tracking by Artificial Anti-diffusion** )

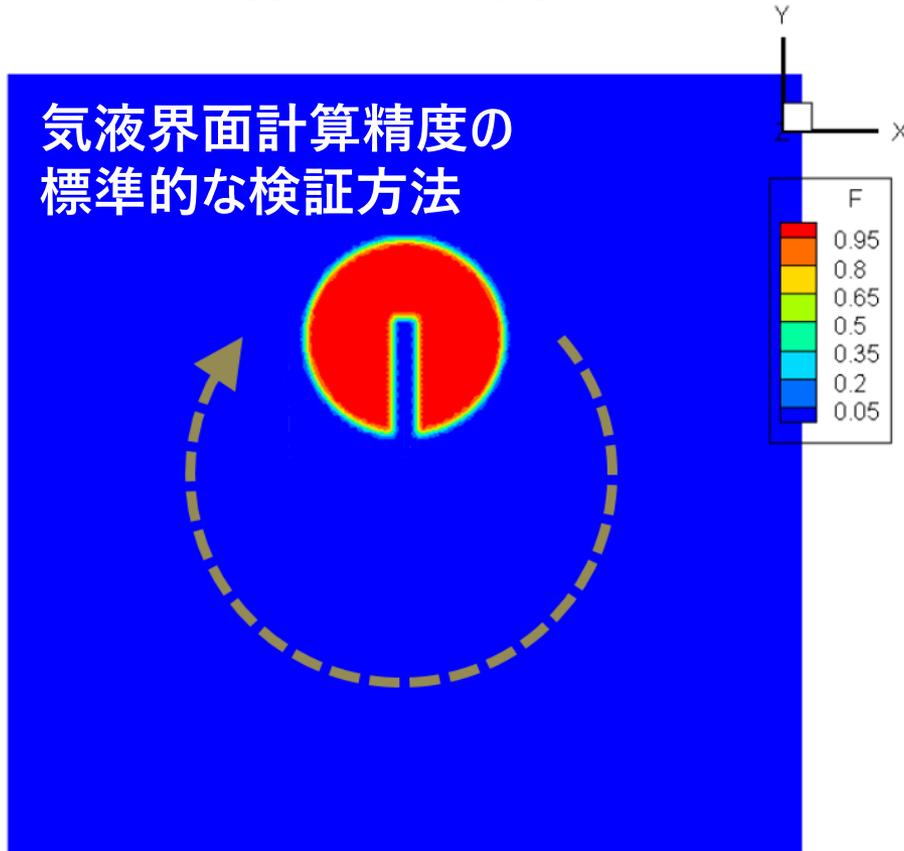


簡易かつ高精度な手法で、スパコン計算にも対応しやすい

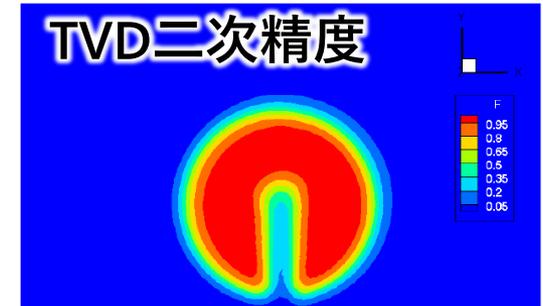
## ■ 計算精度 ベンチマークテスト (Rudman, M., 1997)

剛体回転流れ場で  
切り欠き円形状の初期分布が  
どれだけ維持されるかを検証

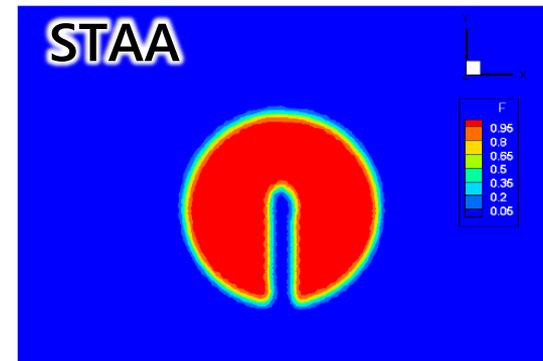
気液界面計算精度の  
標準的な検証方法



一回転後

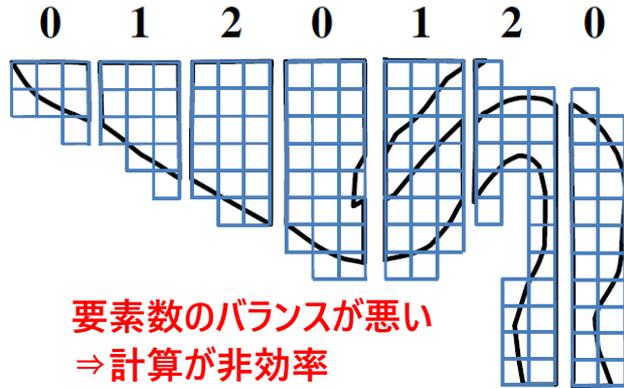


通常の流れ方程式解法では  
「数値拡散」が発生する

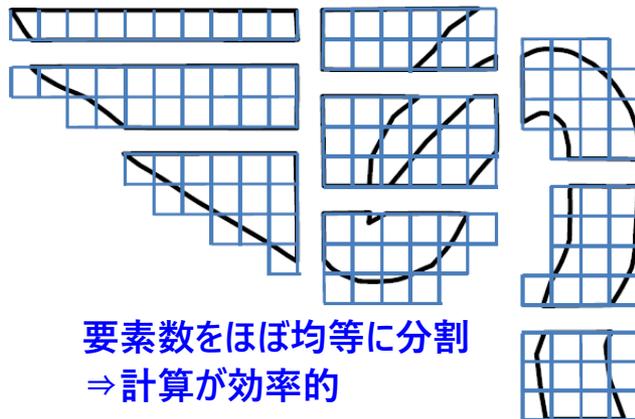


TOTOの開発した「STAA」は  
良好な解析精度を得られる

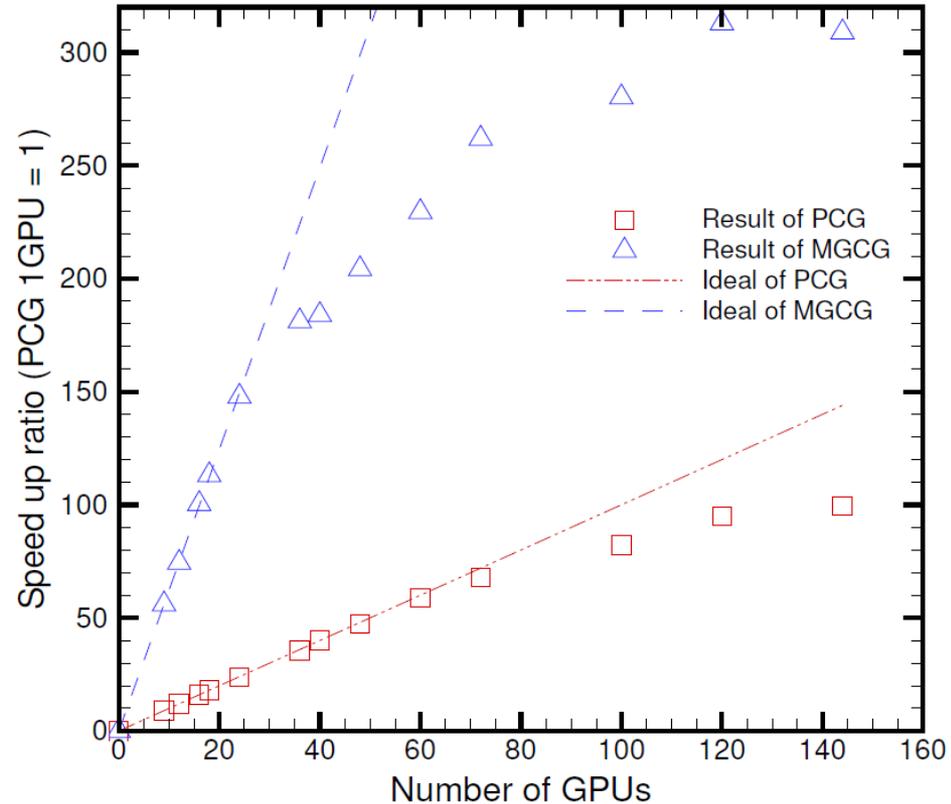
## ■ TOTOが提案する「境界不整合領域分割法」(情報処理学会論文, 2016年)



既存手法 (サイクリックブロック分割法)



提案手法 (多次元分割)



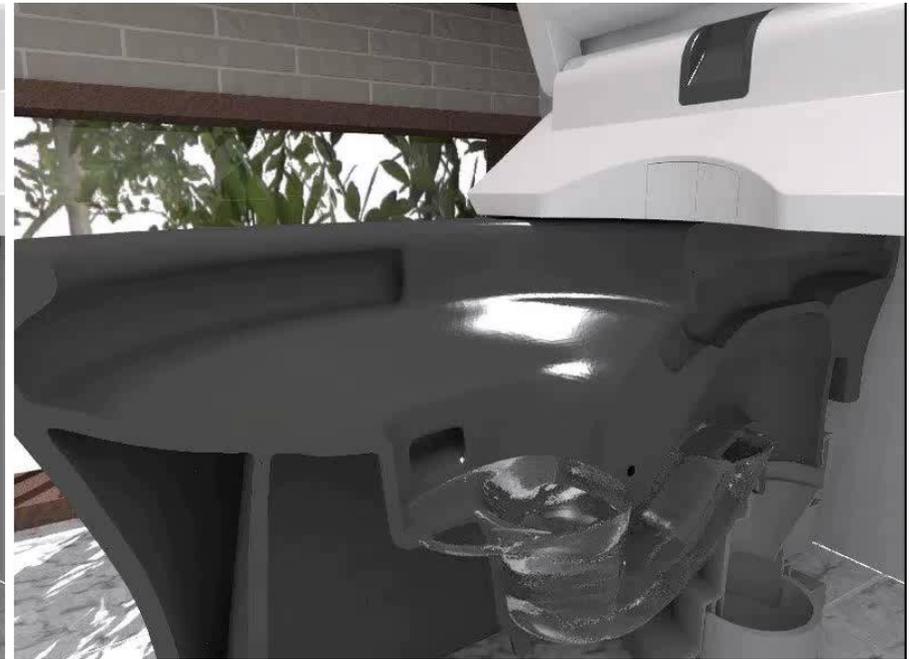
衛生陶器シミュレーション  
強スケーラビリティ結果  
※ホットスポット部のみ(圧力計算)

## 複雑製品モデルにおいても良好な並列化効率

## ■ 衛生陶器シミュレーション（自社開発ソフトウェア、2013年）



東工大スパコン「TSUBAME」  
衛生陶器シミュレーション結果  
(メッシュ間隔**0.5mm**)



社内GPUサーバー  
衛生陶器シミュレーション結果  
(メッシュ間隔**1.5mm**)

スパコン「TSUBAME」の100GPU 利用  
社内サーバーよりも飛躍的に計算精度を向上できた

# TOTO の 混相流解析のご紹介 ～非構造格子による高精度化～

## ■ 直交格子から非構造格子へ（2014年～）

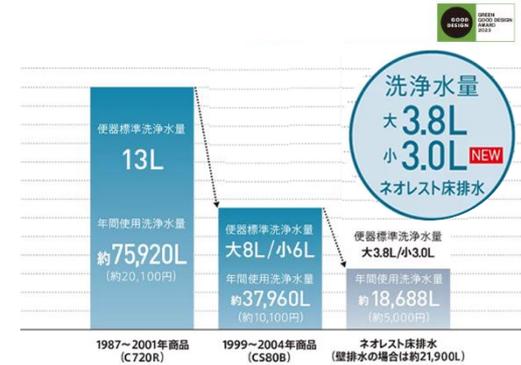
### 大便器は節水に

⇒ 物体表面を流れる水が薄い膜になる  
少ない水でもちゃんと汚物を流す必要がある

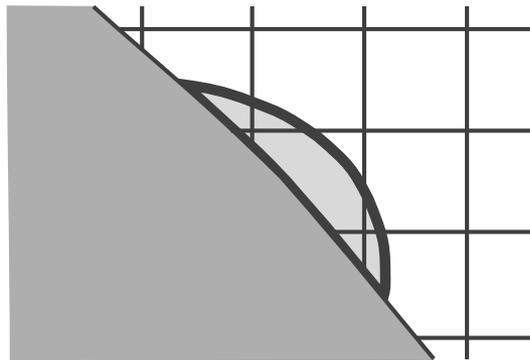
※シミュレーションを使ってこのような性能を分析・評価している



※TOTOホームページより

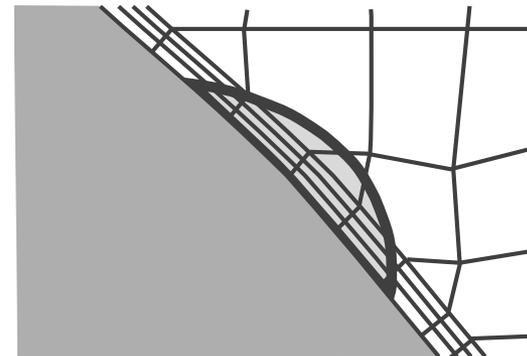


### 薄膜流れや複雑製品の流路形状に対応するために



薄い水膜の流れが再現できない

直交格子



物体形状に沿ったメッシュを配置

任意多面体型 非構造格子  
(直交格子から自動変換)

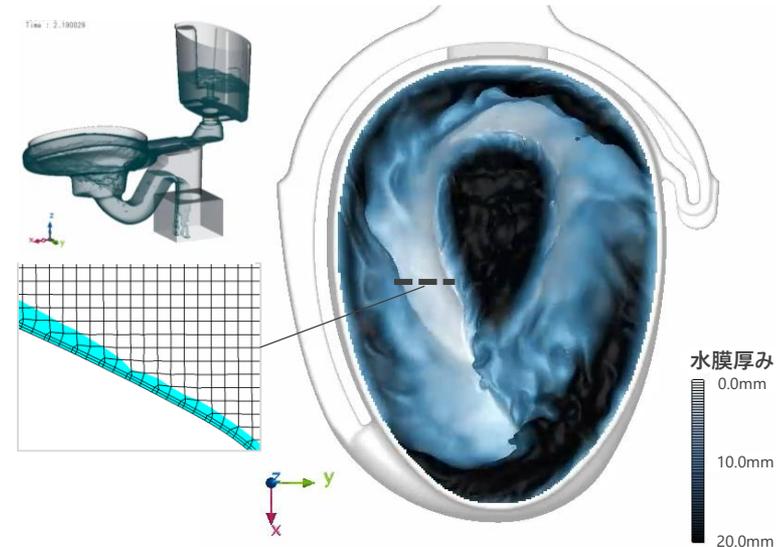
非構造格子を用いることにより

物体表面の薄膜流れや複雑製品流路形状に対応が可能となる

## ■ 衛生陶器シミュレーション（社内GPUサーバー利用：約700万メッシュ）



実機



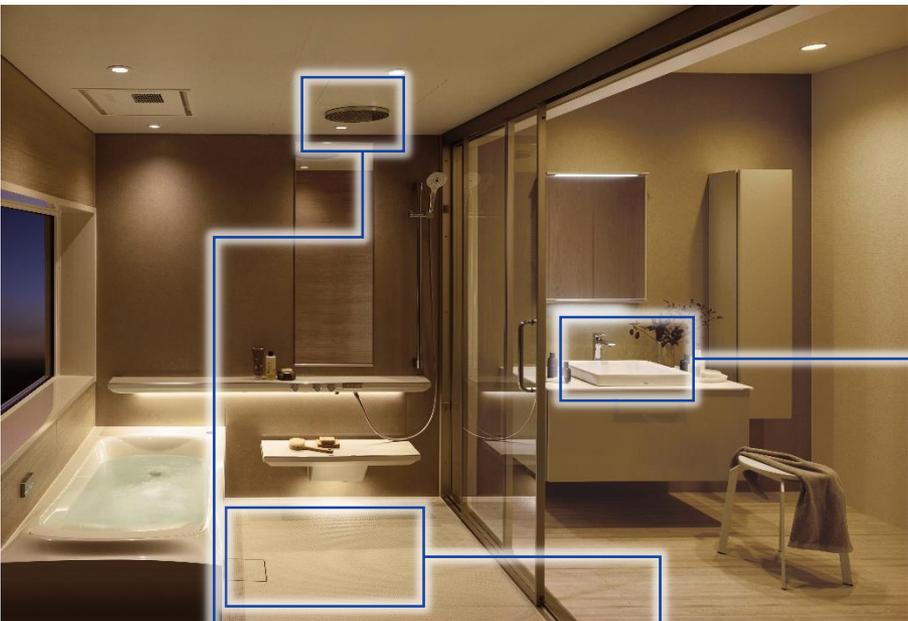
非構造格子シミュレーション結果

(NVIDIA V100 x4GPU : 約8時間)

1mm程度の薄膜のシミュレーションが  
実用レベルの計算時間・計算精度で実施可能

# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 (2020年～2024年)

# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 ～より広い水回り空間へ～



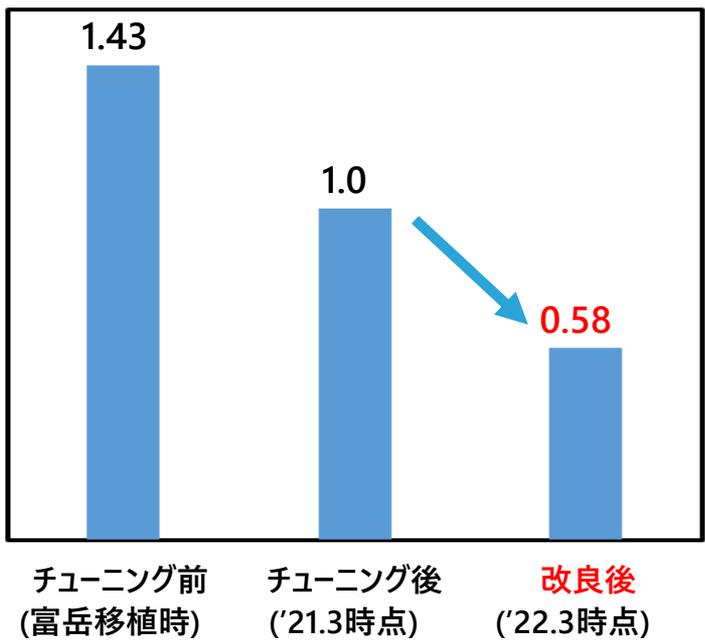
## 微小水滴飛散・薄膜流れが生じる製品全般へ適用拡大

## ■ 大規模計算対応のための計算性能向上検討と結果

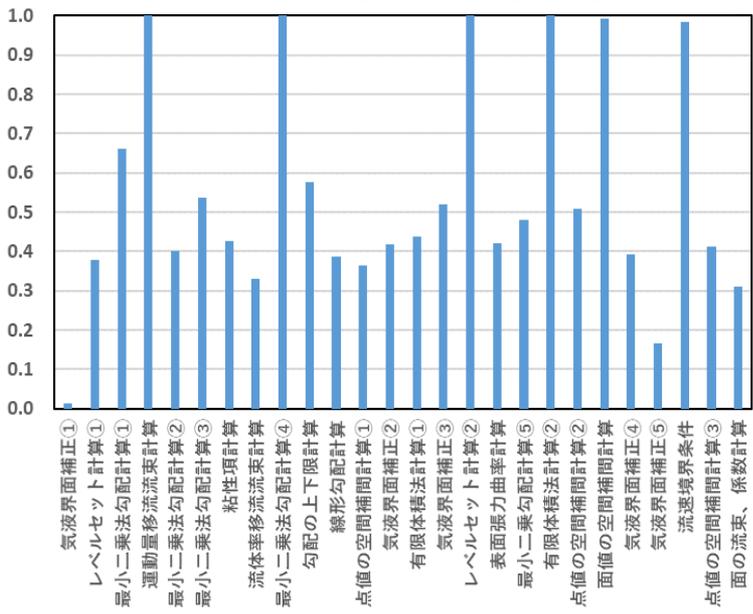
「富岳」CPUの **A64FX に適したプログラミング手法を理解することで**、  
 これまでのGPUプログラムをもとに、A64FXの性能を活用できるプログラム※に改修

※非構造格子FVMで主要な「要素対要素」ループに対し、最内ループ長を調整しSIMD化することで性能を引き出す

プログラム全体計算時間の比較



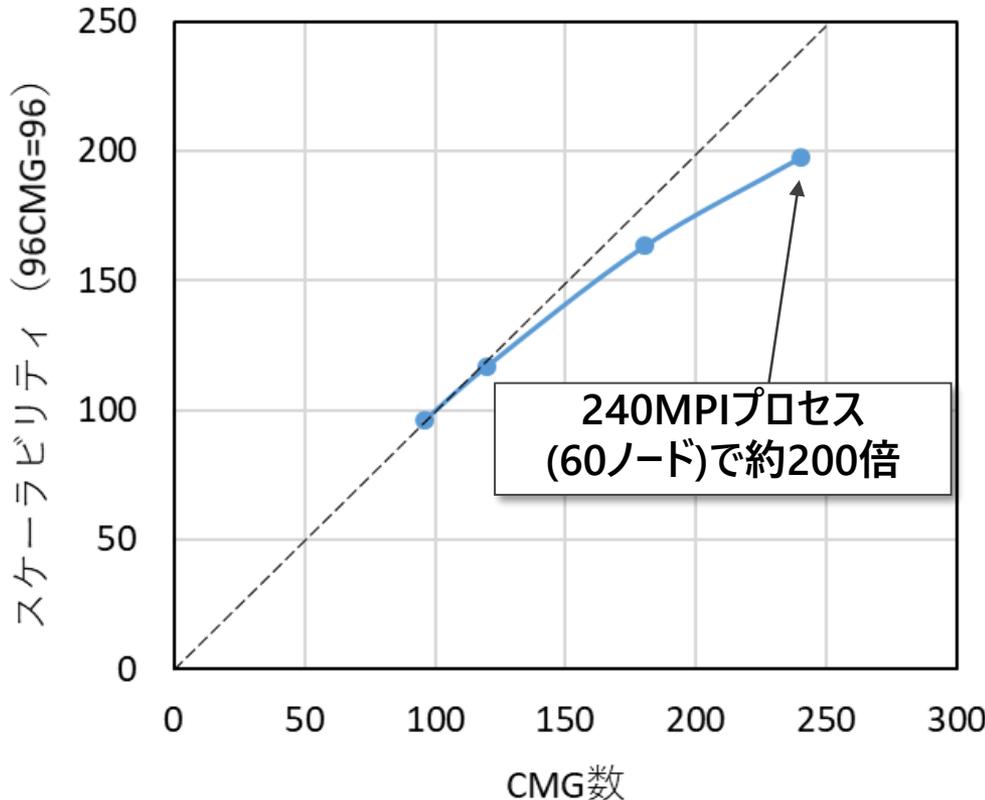
プログラム各部の計算時間の比較  
 (「チューニング後」と「改良後」との比較)



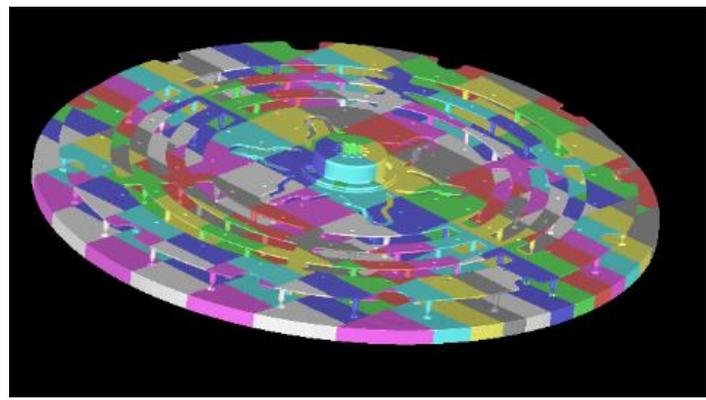
■ 計算時間比 ( '22.3時点 ÷ '21.3時点)

# GPU ⇒ 富岳 プログラム移植を実施、計算性能向上を達成

## ■ (令和3年度) 富岳産業利用による成果：並列化効率結果 (プログラム全体)



240MPIプロセス  
(60ノード)で約200倍



シャワーモデル内部流路 計算メッシュ  
(96並列例、領域を色分け)

シャワーモデル 1億5000万メッシュ  
内部流路シミュレーション  
強スケーラビリティ結果(96CMG≒96)

### 実製品複雑流路において実用的なスケーラビリティを得た

## ■ シャワーのシミュレーションの難しさ

当社製品 コンフォートウェーブシャワー



内部流路は複雑

特に吐水口は1mm以下にもなる

➡ μオーダーサイズ、億レベルのメッシュ数の非構造格子FVM

High Performance Computing が必須

↓ ファイル出力

数百μm～数mmの液滴が広い空間を飛散

格子法では富岳でも計算できない（メッシュ解像度、計算時間）

➡ FVMの結果をインプット条件としたSPH粒子法

吐水口からの時系列出力の  
粒子法形式出力ファイル  
(時刻、粒子X,Y,Z座標、粒子速度U,V,W)

← ファイル入力

「吐水後～人に当たるまで」計算可能

### シャワーの設計・開発

- ・ 品質（既定圧力で仕様流量が全ノズルから安定して出るか？止めた後に水が垂れてこないか？など）
- ・ 性能（浴び心地はどうか？など）

高品位なシャワーを効率的に開発するためのCAE技術構築を進めてきた

## ■ カルマン渦の原理を用いたシャワーのウェーブ吐水

### シャワーのウェーブ吐水を実現する流体素子の機構



(令和4年度「富岳」利用) 定式化変更

表面張力

$$f = \sigma \kappa \nabla F \quad \Rightarrow \quad f = \sigma \kappa \delta(\phi) \mathbf{n}_\phi$$

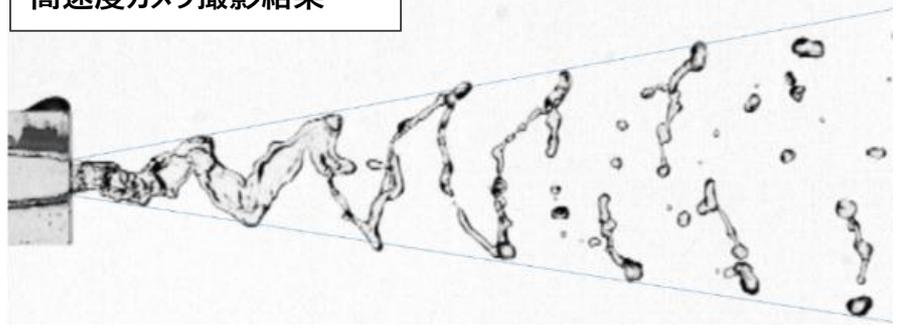
壁面粘性応力<sup>(1)</sup>

$$\tau_{nn} = 2\mu \left( \frac{\partial v_n}{\partial n} \right)_{wall} = 0, \quad \tau_{nt} = \mu \left( \frac{\partial v_t}{\partial n} \right)_{wall},$$

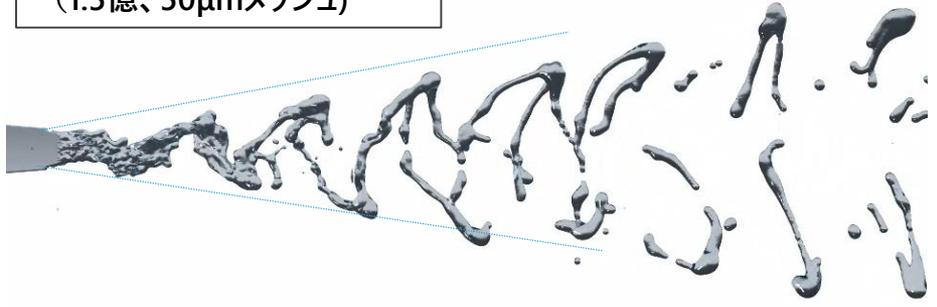
$$\mathbf{v}_t = \mathbf{v} \cdot \mathbf{t}, \quad \mathbf{t} = \frac{\mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}}{|\mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}|}$$

(1)小林敏雄、大島伸行、坪倉誠訳、コンピュータによる流体力学、丸善出版、245-249 (2012).

高速度カメラ撮影結果



シミュレーション結果  
(1.5億、50μmメッシュ)



## カルマン渦効果による吐水の脈動・広がりを概ね再現

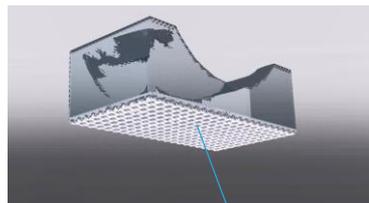
シミュレーションの精度を確認した

# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 ～全身シャワー解析適用～

## ■ (令和3年度) 富岳産業利用による成果 : シャワー吐水・被水解析の実用化

※レンダリングは自社製ソフト使用 (Ray-tracing法)

当社製品 オーバーヘッドシャワー



ノズル内部のメッシュフィルターを「簡易抵抗力」でモデル化

(富岳の超高解像度計算で得られた知見)

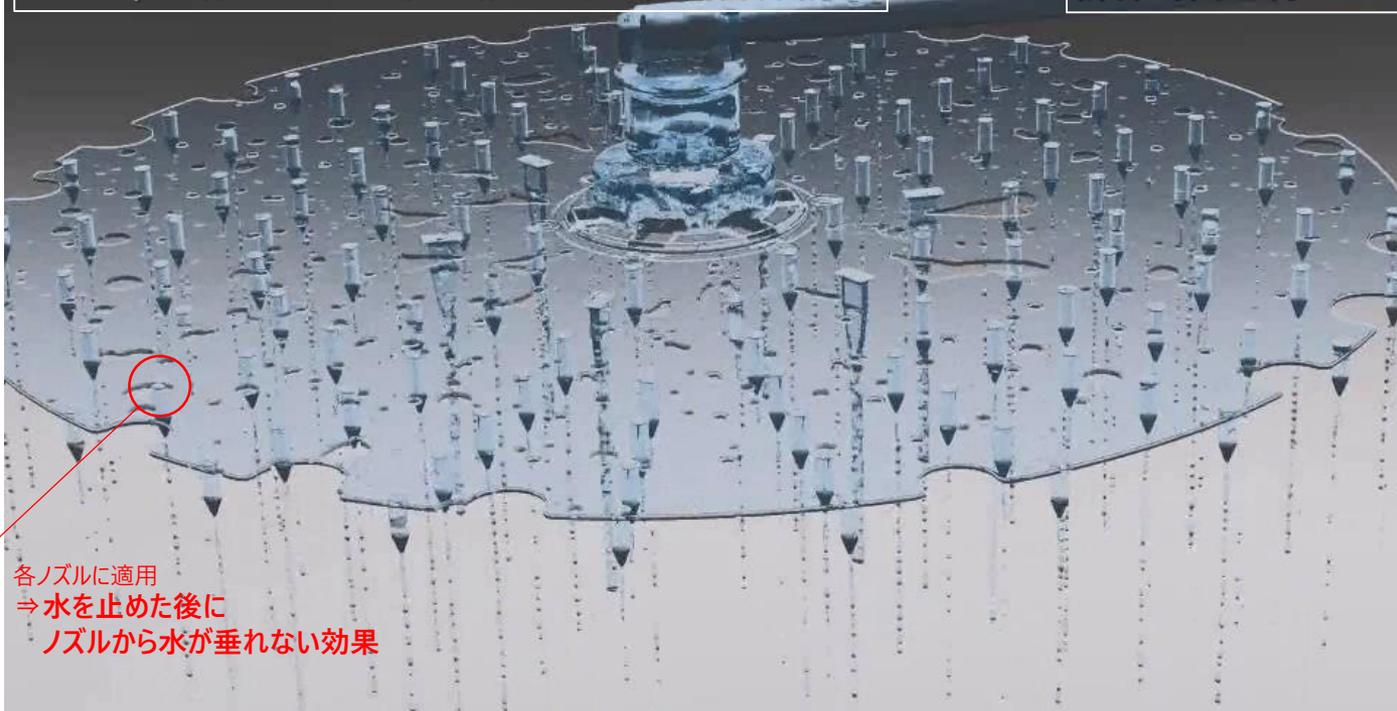
※参考資料あり



数十 $\mu\text{m}$ メッシュでないと計算できないフィルターの影響を  
数百 $\mu\text{m}$ メッシュで計算 (約10倍のダウンサイジング実現)

0.1mm, 1.5億メッシュ内部流路～吐水の富岳計算結果

計算時間：約150h



各ノズルに適用  
⇒ 水を止めた後に  
ノズルから水が垂れない効果

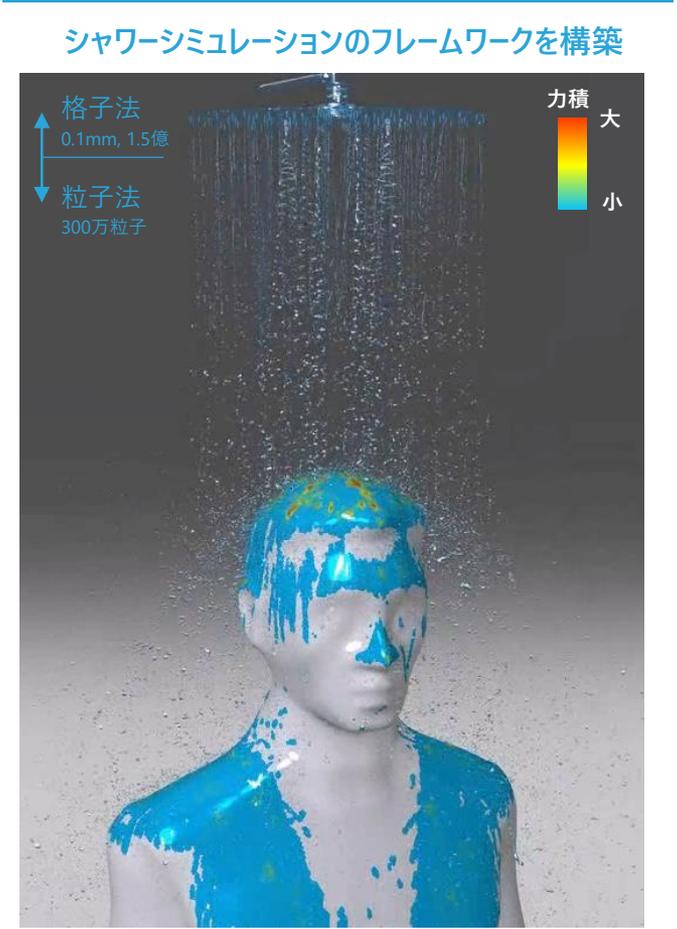
## 大径のオーバーヘッドシャワーの気泡混入流れを評価可能

ノズル位置検討や詳細な内部流路の設計に活用

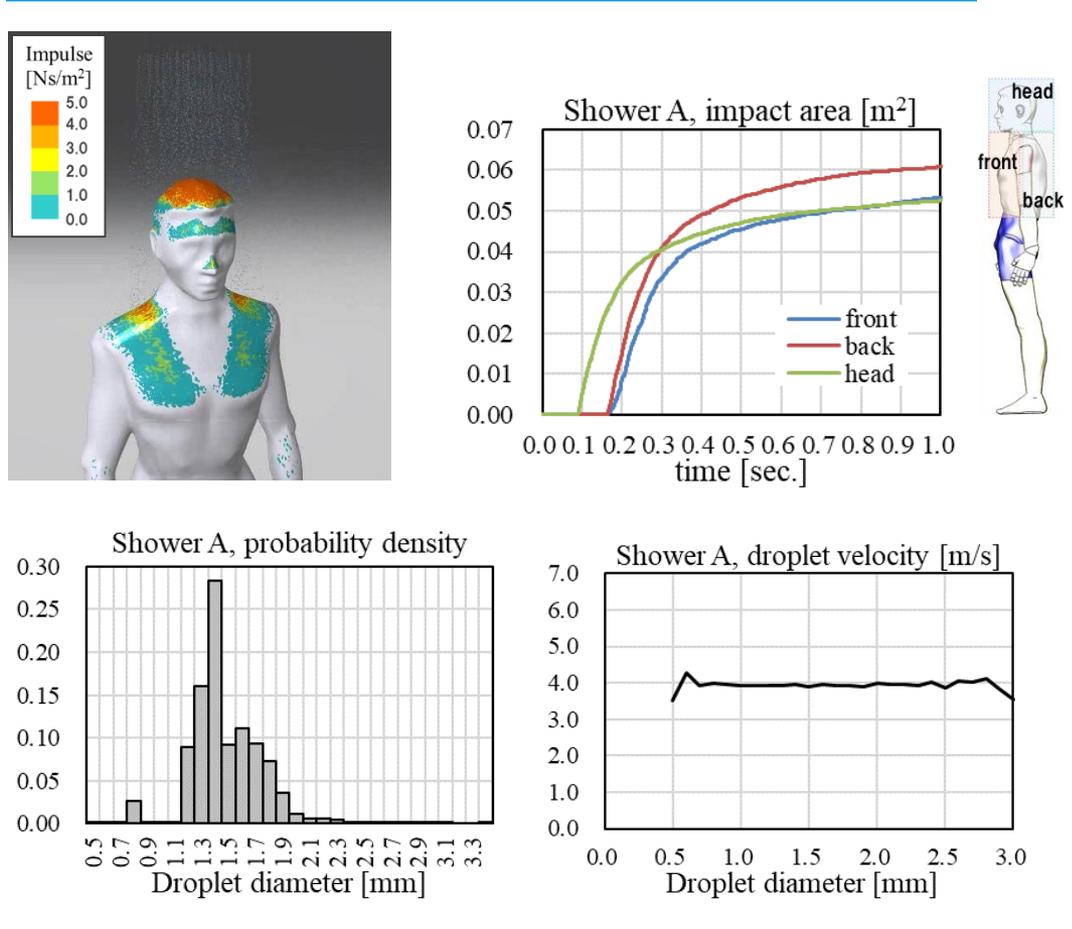
# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 ～全身シャワー解析適用～

## （令和3,4年度） 富岳産業利用による成果： シャワー吐水・被水解析の定量評価

### シャワー吐水～飛散～着水の一連の解析



### 人体に着水する面積、液滴径分布、液滴速度等の定量評価



シャワー性能を数値的に精緻に評価することができるようになった

## ■ ミスト状微小水滴飛散シミュレーション

当社製品 コンフォートウェブシャワー-3モード  
 <ナチュラルケアミスト> 2024年8月発売

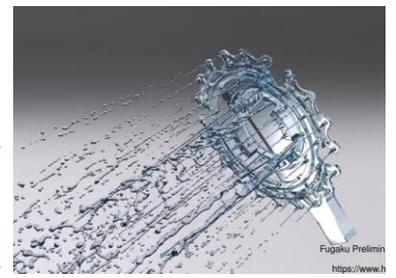


微小液滴のシミュレーション：μmオーダーの液滴

➡ 空気抵抗を無視できない  
 (ミスト状の液滴が減速しない)

これまでのシミュレーション：mmオーダーの液滴

【液滴飛散】  
 一般的なSPH法  
 空気抵抗は無視



### 粒子法への空気抵抗のモデル化 (概要)

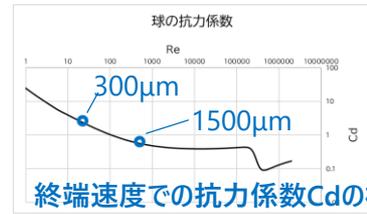
粒子が受ける  
 空気抵抗力[N]  $F_p = K(V_d - V_p)$  粒子の流速[m/s]

抵抗係数[kg/s] 空間の流速[m/s]

$$K = \frac{mk}{r}, k = 1.4 \times 10^{-3}$$



液滴の自由落下計算 (格子法)  
 により抵抗係数を同定



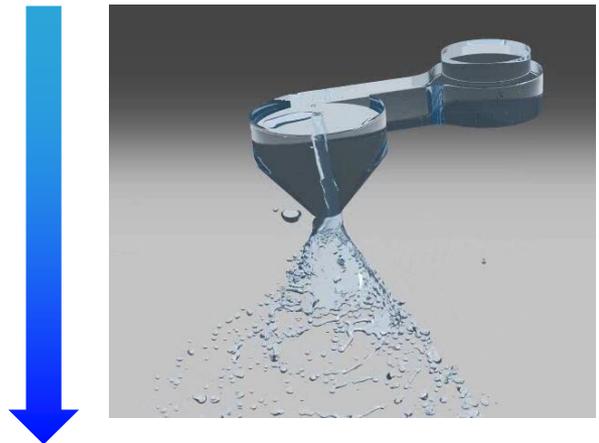
SPH粒子法に組み込み  
 ミスト飛散を計算する

## 空気抵抗をモデル化しミスト飛散を計算するSPH粒子法プログラムを構築

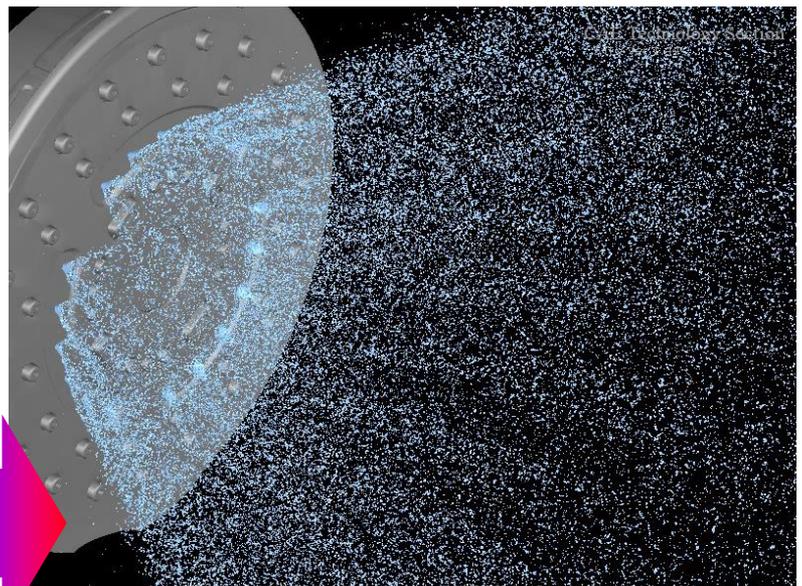
# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 ～富岳CPUでの高速化～

## ■ (令和5年度B期) 富岳産業利用による成果 : ミストシャワーの計算フレームワーク構築

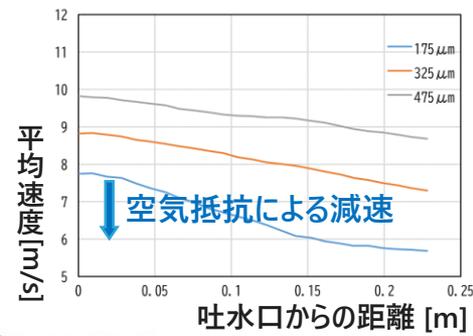
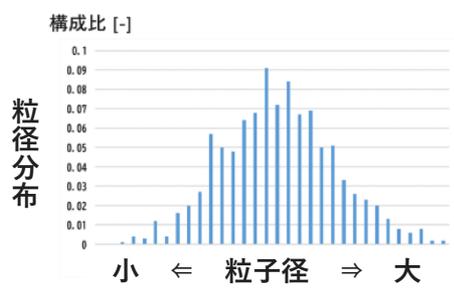
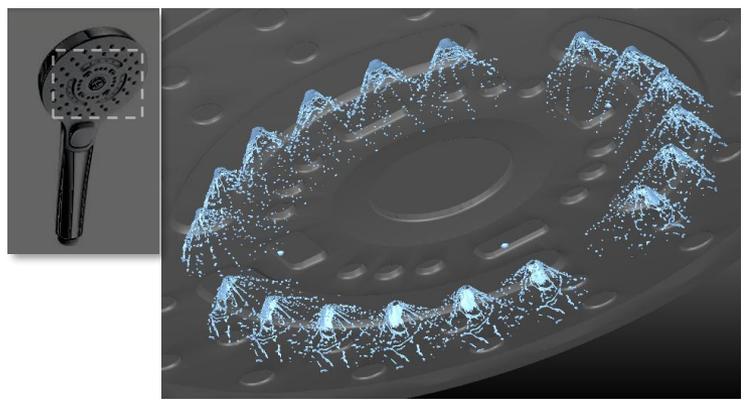
ミストノズル1個の計算 (FVM 3.7億メッシュ)



ミストシャワー吐水～飛散の計算 (FVM+SPH with 空気抵抗)



ミストノズル18個の計算 (1個の結果をコピー)



## ミスト状微小液滴の計算フレームワークを構築できた

ノズル設計における粒径や流速の最適化、ミスト飛散範囲～将来的に浴び心地評価に活用



## 特徴

使用後はパターンの溝に水が引き込まれ、素早く水がはける  
翌朝にはカラリと乾く  
(靴下で入っても濡れない)

数mmの細かい形状  
1mm未満の薄い水の流れ  
数十秒の長い現象時間

➡ μオーダーサイズ、数十～数百万タイムステップの非構造格子FVM

当社製品 ほっカラリ床

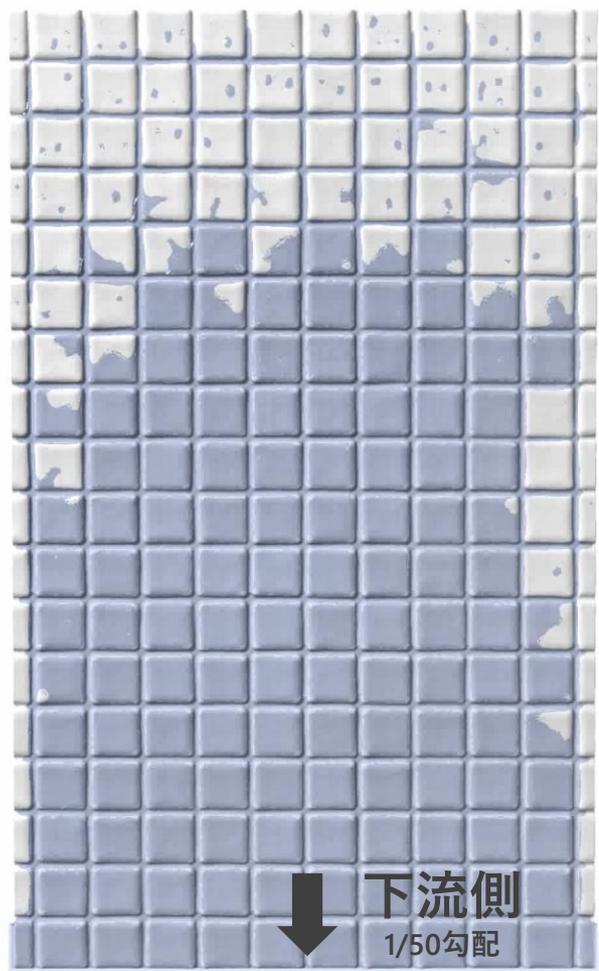
## 浴室床の設計・開発

- ・ 性能 (水はけの良い溝パターンや溝の形状は?)

# 浴室床の設計・開発にも混相流シミュレーションを適用する

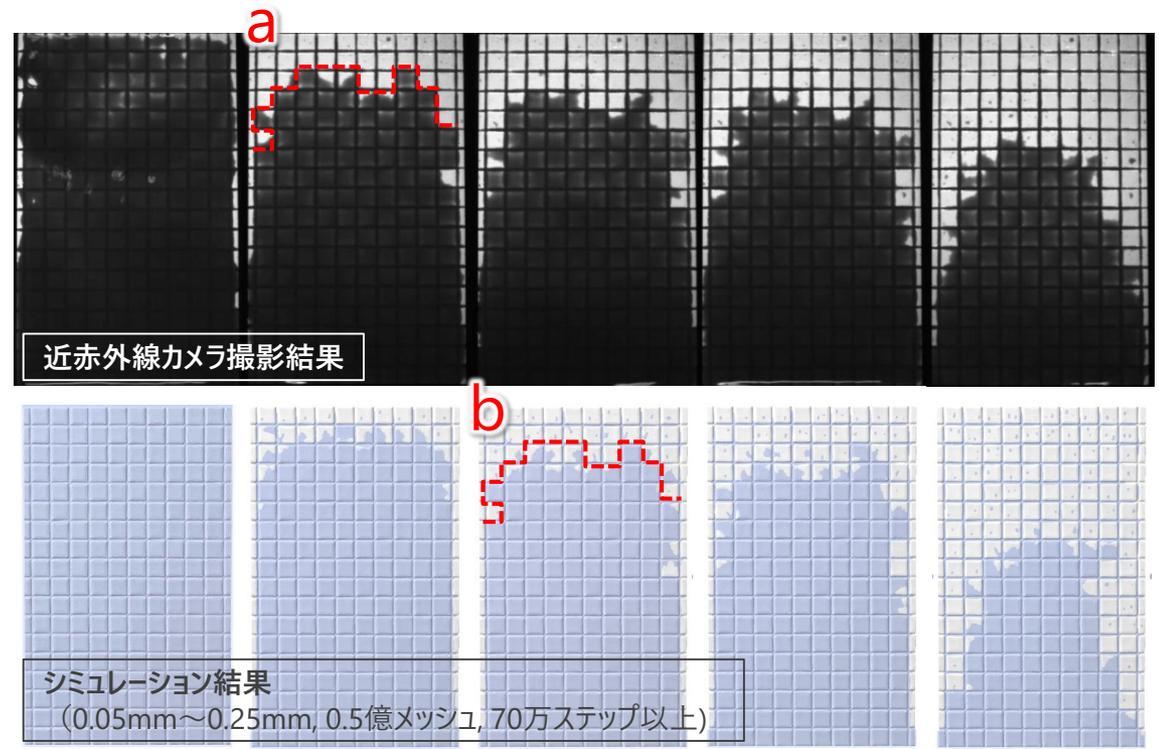
# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 ～浴室床への適用～

## ■ シミュレーションの妥当性検証 : ほっকারい床の水はけ



全体的な排水スピードは少し差異があるものの定性的には実機の流れをよく表現できている。

a, b を比較すると、パターンのめくれかたを再現できている

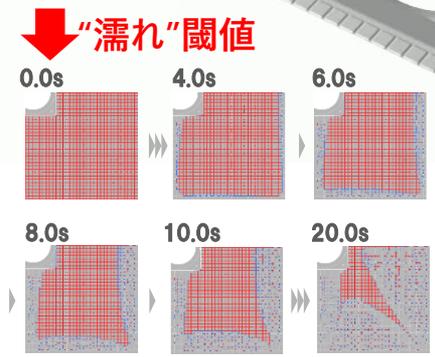
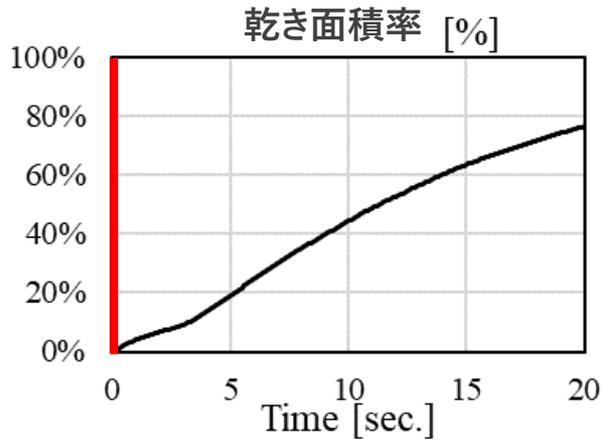
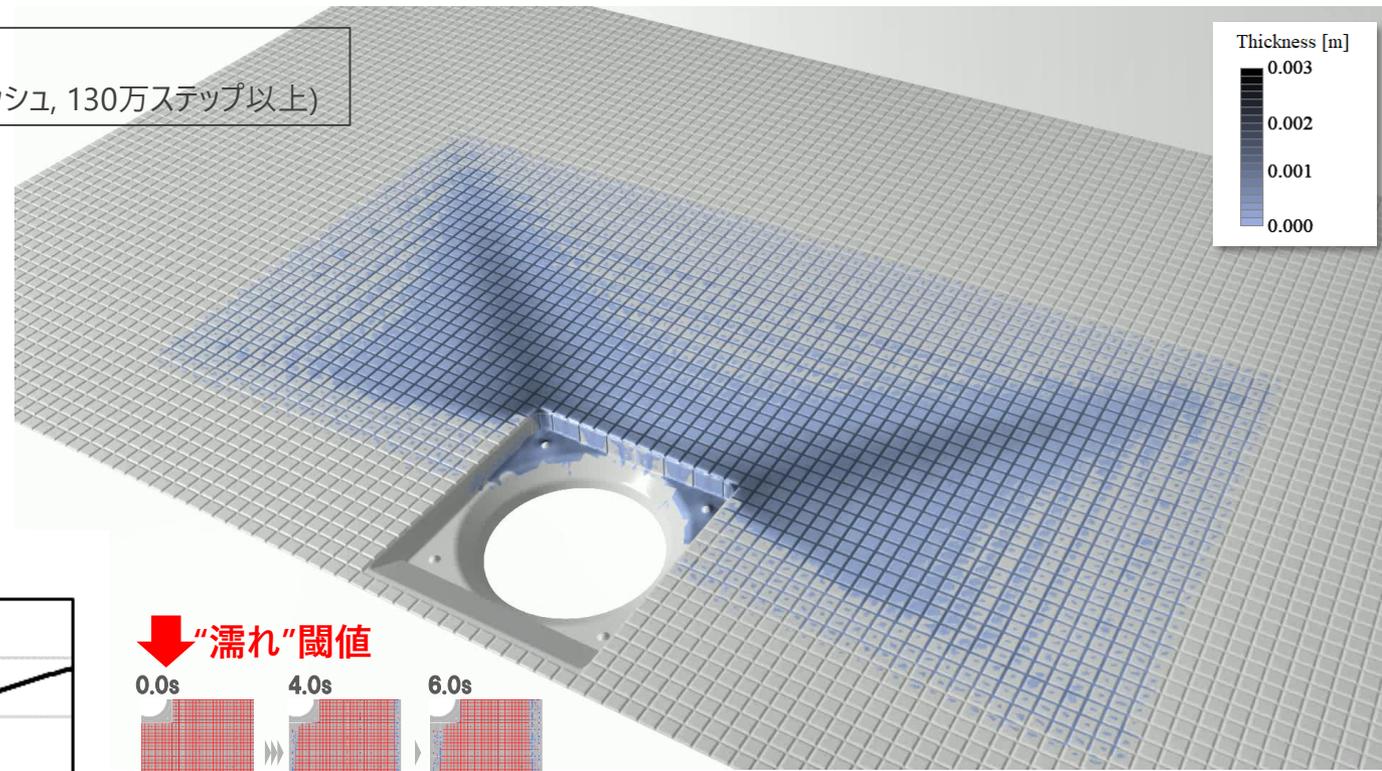


### 溝パターンの水のはけ方の特徴を良く再現している

# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 ～浴室床への適用～

## ■ (令和4年度) 富岳産業利用による成果 : 浴室の排水シミュレーション

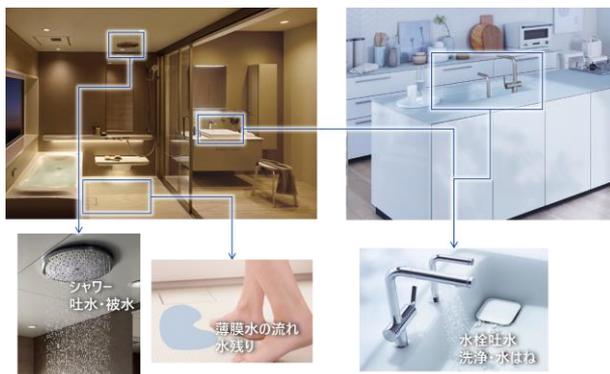
「富岳」シミュレーション結果  
(0.075mm~0.375mm, 0.36億メッシュ, 130万ステップ以上)



視覚的、定量的に排水性能を評価するフレームワークを構築した  
今後、実際の商品開発で活用をしていく

# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 ～まとめ～

- 非構造格子流体計算において、「富岳」のA64FXの性能を発揮するためにプログラムのループ構造を改変し、**2倍近い高速化・高並列化効率**を達成した
- シャワーのシミュレーションにおいて、**吐水～飛散～着水のフレームワーク**を構築し、実験では数値化が困難な物理量を**定量的に評価**できるようになった
- ミスト状微小液滴の飛散において、**SPH粒子法に空気抵抗モデルを追加し、ミスト吐水～飛散のフレームワーク**を構築した
- 浴室床の排水性能**をシミュレーションにより**定性的・定量的に評価**できるようになった



これまで衛生陶器製品に限定されていた  
混相流シミュレーションが  
シャワーや浴室など他の部位にも  
適用できることが分かった

今後は詳細な精度検証を行い  
商品開発でのシミュレーションの効果的な活用に取り組んでいく

# 「富岳」による大規模混相流解析の研究 ～まとめ～

## 富岳利用歴

2020年	HPCI「富岳」	試行的利用課題	(課題番号：hp200243) ※1
2021年	HPCI「富岳」	産業課題A期	(課題番号：hp210013) ※1
2022年	HPCI「富岳」	産業課題A期	(課題番号：hp220046) ※1
<b>HPCI利用研究課題優秀成果賞受賞</b>			
2023年	HPCI「富岳」	産業課題B期	(課題番号：hp230239) ※2

※1 課題代表者 : 池端 昭夫  
※2 課題代表者 : 佐々木 一真

## 謝辞

本研究は、上記課題番号のHPCI システム利用研究課題を通じて、スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け、実施しました。

あしたを、ちがう「まいにち」に。

**TOTO**