

## TSUBAME 共同利用 平成 24 年度 産業利用 成果報告書

Particleworks(流体解析プログラム)の TSUBAME での大規模並列化の試行  
Validation of Particleworks on TSUBAME佐藤 潤一  
Jun'ichi Satoプロメテック・ソフトウェア株式会社  
Prometech Software, Inc.  
<http://www.prometech.co.jp/>

粒子法ベースの商用流体解析ソフトウェア Particleworks を TSUBAME 上で実行し、大規模並列計算の実行確認を行った。300 コア並列で水柱崩壊(約 300 万粒子)とギアボックス内オイルかきあげ(約 200 万粒子)の解析を実行した。25 プロセス × 12 スレッドのハイブリッド並列実行で解析を実行できることを確認した。

We investigated large-scale parallel executions of a particle-based computational fluid dynamics simulation software Particleworks on TSUBAME. We performed simulations of a dam-break case and a gear box oil flow case, whose number of particles are about 3 million and 2 million respectively, with 300 CPU cores. We confirmed that it was possible to simulate these cases with a hybrid parallel execution of 25 processes x 12 threads.

*Keywords:* 流体解析, 粒子法, MPS 法, 並列計算, GPU

## 背景と目的

粒子法は自由表面流れや移動する複雑形状まわりの流れ解析を得意とする手法であり、現在、産業分野も含め広く用いられている。近年、産業分野からの大規模モデル化に対する要求はますます強くなってきており、プロメテック・ソフトウェアとしても大規模並列計算機能を充実させることは重要な課題の一つであると認識している。

粒子法ベース 商用 流体 解析 ソフトウェア Particleworks では大規模並列計算の機能として以下を実装している。

- CPU 並列計算機能<sup>1), 2)</sup>
  - OpenMP による Shared Memory Parallel (SMP) 計算
  - MPI による Massively Parallel Processing (MPP) 計算
  - SMP+MPP ハイブリッド計算
- GPU 計算機能<sup>3), 4), 5)</sup>
  - シングル GPU
  - マルチ GPU

これまで Particleworks の CPU 並列計算実行の最高コア数は、100 コア程度であった。仕様ではさらに多

いコア数での実行が可能であるが、実行できる設備がないため、これまで行われてこなかった。

今回のプロジェクトでは、TSUBAME 上で Particleworks を実行し、300 コアまでの動作確認を行った。その結果について報告する。

## 設定と計算方法

Particleworks は粒子法のひとつである MPS 法<sup>6)</sup>を使った非圧縮性流体解析ソフトウェアである。MPS 法では連続体である流体を粒子で離散化し、その粒子間の相互作用をモデル化することで流体の挙動を表現する。Particleworks には流体計算に加え、産業利用を目的とした機能が多数組み込まれている。例えばギアなど可動部分再現に関する機能も組み込まれており、以下で紹介するようなギアボックス内流れ解析などが可能となっている。

ここでは水柱崩壊とギアオイルかきあげの解析について動作確認を行う。水柱崩壊は非圧縮性流体解法のベンチマークとしてよく用いられる解析である。仕切られた水槽の片側に水を置き、仕切りを取り除いた後の水の挙動を見る。ギアオイルかきあげ解析は Particleworks の産業利用を想定したモデルである。

ボックス内で 3 つのギアが回転し底部にあるオイルをかきあげる。このモデルでは粘性の陰解法計算や乱流モデルを使用しており、水柱崩壊のモデルより計算量が多く、より複雑である。

水柱崩壊の計算体系と解析設定を以下に説明する。図 1 に計算体系の概要を示した。容器内側の大きさは  $30[m] \times 10[m] \times 20[m]$ 、水柱の大きさは  $10[m] \times 10[m] \times 15[m]$  である。流体の密度は  $1000[\text{kg}/\text{m}^3]$  である。重力は  $-z$  方向で大きさは  $9.8[\text{m}/\text{s}^2]$  である。初期粒子間距離は  $0.078[\text{m}]$ 、初期粒子数は 3,096,768 個である。圧力解法は陰解法、粘性計算なし、初期時間刻みは  $2.0 \times 10^{-5}[\text{s}]$  である。

ギアオイルかきあげの計算体系と解析設定は以下のようになっている。図 2 に計算体系の概要を示した。ギアボックスの外形の大きさは  $420[\text{mm}] \times 160[\text{mm}] \times 350[\text{mm}]$  である。ギアは全部で 3 つあり、図 2 の矢

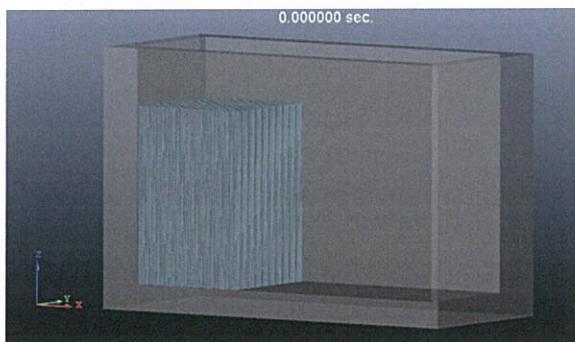


図1:水柱崩壊の計算体系。初期状態を表している。容器は灰色半透明で表わされている。流体は水色の粒子で表わされている。粒子数は 3,096,768 個である。

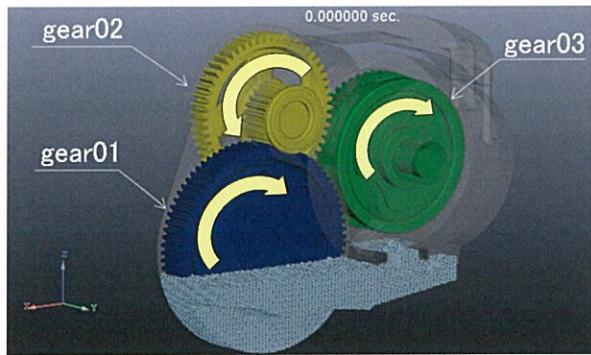


図2:ギアオイルかきあげの計算体系。初期状態を表している。容器は灰色半透明、流体は水色の粒子で表わされている。3つギアがあり、それぞれ gear01, gear02, gear03とする。それぞれのギアは図中の矢印の向きに回転する。粒子数は 2,028,237 個である。

印の方向に回転する。回転数は gear01 が 500[rpm]、gear2 が 1784[rpm]、gear3 が 1771[rpm] である。流体の密度は  $800[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、動粘性係数は  $8 \times 10^{-6}[\text{m}^2/\text{s}]$ 、表面張力係数は  $0.036[\text{N}/\text{m}]$ 、流体と容器およびギアとの接触角は  $10^\circ$  とした。水柱崩壊のときと同様に重力は  $-z$  方向にかかっている。初期粒子間距離は  $0.79[\text{mm}]$ 、粒子数は 2,028,237 個である。圧力と粘性計算には陰解法を用いた。また計算には表面張力と乱流の効果を再現するために表面張力モデルと乱流モデルが入っている。

使用した Particleworks のバージョンは ver 4.5 であり、MPI ライブラリには OpenMPI を用いた。

### 結果および考察

上記 2 つの解析モデルに対して、TSUBAME 上で 25 ノードを用い CPU300 コアの並列計算を行った。具体的には 25 プロセス(MMP)  $\times$  12 スレッド(SMP)のハイブリッド計算である。

水柱崩壊とギアオイルかきあげの計算結果のスナップショットを図 3 と図 4 にそれぞれ示す。計算結果は定性的に問題ないことがわかる。Particleworks が CPU 300 コアで動作することが確認できた。

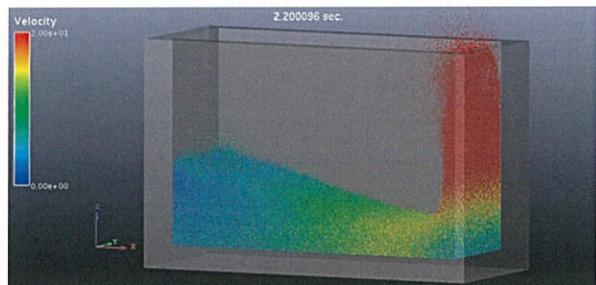


図3:水柱崩壊計算結果のスナップショット。流体粒子に付いている色は速度を表している。

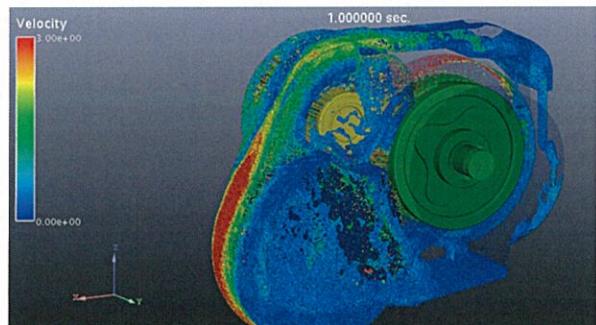


図4:ギアオイルかきあげ計算結果のスナップショット。流体粒子に付いている色は速度を表している。

### まとめ、今後の課題

今回のプロジェクトではTSUBAMEを使い商用流体解析ソフトウェア Particleworks の CPU300 コアでの動作確認を行った。25 プロセス × 12 スレッドのハイブリッド並列計算により解析を実行できることがわかった。

今後は他の解析事例での動作確認を進めるとともに、さらに多くの CPU を使った解析と数十、数百レベルのマルチ GPU での解析を行いたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 入部綱清, 藤澤智光, 柴田和也, 越塚誠一, "MPS 法を用いた流体並列解析に関する基礎的研究", Transactions of JSCES, Vol. 2006, 20060015, (2006)
- 2) 入部綱清, 藤澤智光, 越塚誠一, "粒子法による大規模解析におけるノード間通信の低減", Transactions of JSCES, Vol. 2008, 2008020, (2008)
- 3) 原田隆宏, 政家一誠, 越塚誠一, 河口洋一郎, "GPU 上での粒子法シミュレーションの空間局所性を用いた高速化", Transactions of JSCES, Vol. 2008, 20080016, (2008)
- 4) 原田隆宏, 政家一誠, 越塚誠一, 河口洋一郎, "複数の GPU を用いた粒子法シミュレーションの並列化", 情報処理学会論文誌, 49, 4067-4079 (2008)
- 5) T. Harada, I. Masaie, S. Koshizuka, Y. Kawaguchi, "Massive particles: Particle-based simulations on multiple GPUs", ACM SIGGRAPH Talks, Los Angeles, USA, Aug. 11-15, 2008 (2008)
- 6) 越塚誠一, 粒子法, 丸善, (2005)