

粒子法CFDソフトウェアParticleworksの 最近の産業応用事例

プロメテック・ソフトウェア株式会社
戸倉 直

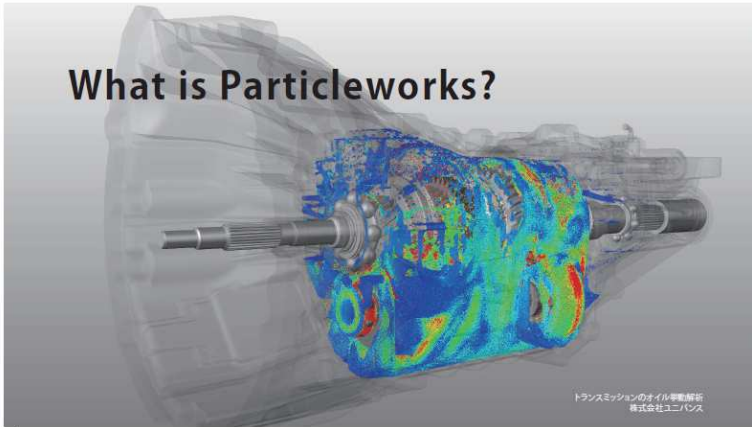


PROMETECH.

内容

- 粒子法MPSの概要およびParticleworksの紹介
- 製造産業における適用事例
 - ◆ 冠水路解析
 - ◆ 被水解析
 - ◆ 泥はね解析
 - ◆ ピストン冷却
 - ◆ モーター冷却
 - ◆ シミュレーションの可視化
 - ◆ 気液2相シミュレーション
 - ◆ 給油シミュレーション
- 並列計算のパフォーマンス
- まとめ

■最新バージョンParticleworks V7.1.2



What is Particleworks?

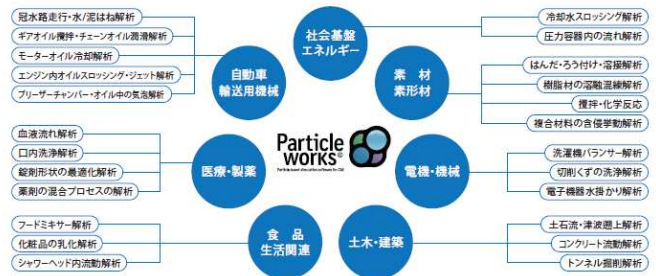
トランスミッションのオイル噴射解析
株式会社ユニバース

メッシュに依存しない、高速で柔軟な解析が可能です

Particleworksは、従来困難と考えられていたCAEの課題を解決するために開発された流体解析ソフトウェアです。パワートレインのオイル噴射、薬品や樹脂などの攪拌・混練、エンジンオイルの冷却などをシミュレーションし、効率的な装置の制御・設計を強力に支援します。直感的なインターフェースで、メッシュ生成が不要、大規模な計算や計算結果の描画を高速に処理することで、製品設計の最適化に役立ち、説得力のある設計課題の可視化を実現します。

最新の研究成果を取り込み、各分野の困難な問題を解決

ParticleworksはMPS法(Moving Particle Simulation Method)を開発した東京大学大学院工学系研究科 経産研一教授(プロメテック・ソフトウェア創業者・現特別顧問)の最新研究成果をベースに開発が行われています。日本発の流体解析ソフトウェアとして、大学の研究室や、ユーザー各社から寄せられる解析ノウハウを継続的に取り込みながら開発を行っています。
2007年より粒子法を用いた解析コンサルティングを始め、2009年にバージョン1.0を発表、従来のCFDソフトウェアでは難しかった問題に対応できるソフトウェアとして多岐にわたる産業分野で導入されています。



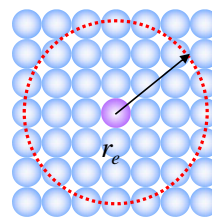
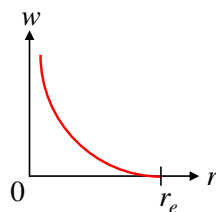
粒子法MPSの概要

■MPS (Moving Particle Simulation)

- ◆モデル化対象 → 非圧縮性流れ
- ◆重み関数(カーネル関数)

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases}$$

r_e : 影響半径, 通常は $r_e = 3.1 \times$ 粒子径

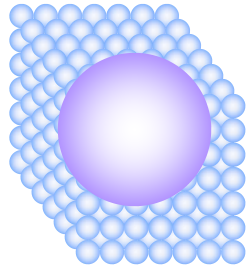


■ "粒子数密度" の定義 (流体の空間充填率)

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|)$$

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (r < r_e) \\ 0 & (r_e \leq r) \end{cases}$$

単純立方格子配列を想定



$w(r)$ の値	× 粒子数	
2.100000	× 6	} 122個の粒子
1.192031	× 12	
0.789786	× 8	
0.550000	× 6	
0.386362	× 24	
0.265570	× 24	
0.096016	× 12	
0.033333	× 30	
↓		
$n_0 = 54.32121$	初期粒子数密度	

■ 解法

◆ 非圧縮Navier-Stokes方程式

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g}$$

⇓ Euler型離散化

$$\frac{\mathbf{u}_i^{k+1} - \mathbf{u}_i^k}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho_0} \langle \nabla P \rangle_i^{k+1} + \nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i^k + \mathbf{g}$$

$$\mathbf{u}_i^{k+1} = \mathbf{u}_i^k + \Delta t \left[-\frac{1}{\rho_0} \langle \nabla P \rangle_i^{k+1} + \nu \langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i^k + \mathbf{g} \right]$$

粒子相互作用モデル

gradient	$\langle \nabla P \rangle_i^{k+1} = \frac{d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{p_j^{k+1} - \hat{p}_i^{k+1}}{ r_j^* - r_i^* ^2} (r_j^* - r_i^*) w(r_j^* - r_i^*) \right]$
----------	--

Laplacian	$\langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i^k = \frac{2d}{\lambda n_0} \sum_{j \neq i} [(\mathbf{u}_j^k - \mathbf{u}_i^k) w(r_j^k - r_i^k)]$
-----------	---

■ 圧力陽解法

◆ 連続の式および運動量保存方程式 (Euler方程式)

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

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial x^2} \quad \text{1次元波動方程式}$$

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)$$

$$\Delta P = c^2 \Delta \rho$$

$$P - P_0 = c^2 (\rho - \rho_0)$$

↓ 基準圧力をゼロとおく $P_0 = 0$

$$P = c^2 (\rho - \rho_0)$$

■ 圧力陽解法

◆ 流体密度と粒子数密度の比例関係より

$$P_i = c^2 (\rho_i - \rho_0) = c^2 \left[\left(\frac{n_i}{n_0} \rho_0 \right) - \rho_0 \right] = c^2 \frac{\rho_0}{n_0} (n_i - n_0)$$

疑似非圧縮条件

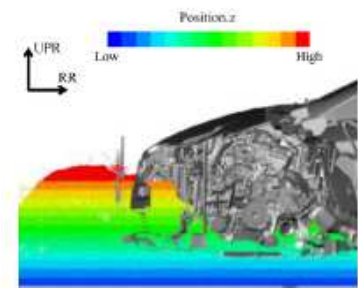
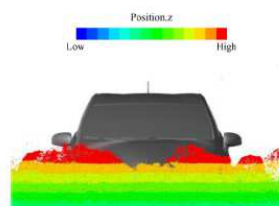
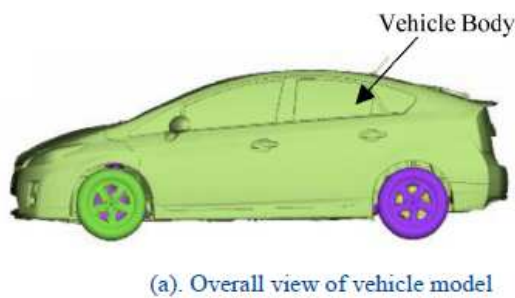
$$Ma = \frac{u}{c} < 0.2 \quad Ma ; \text{Mach数}$$

$$c \approx 5 \times u \quad u ; \text{流速}$$

$$c ; \text{疑似音速}$$

■ Y. Tanaka, et al, (Toyota Motor Corporation), Development of Prediction Method for Engine Compartment Water Level by Using Coupled Multibody and Fluid Dynamics, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. / Volume 10, Issue 2, July 2017

- ◆ エンジンコンパートメント内の水位の変化をシミュレーションで求める
- ◆ エアインテーク内への水の流入などを評価
- ◆ 浮力による車体姿勢の変化を機構解析ソフトで計算



© Prom Figure 14. Comparison of flow field around the vehicle (Case6, Time*=0.8)

PROMETECH.

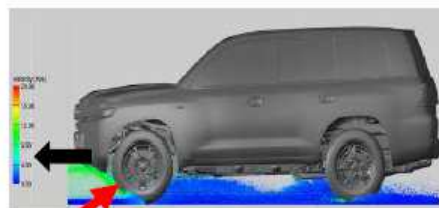
■ 渡辺治行他(トヨタ自動車), 自動車の防錆評価における被水解析技術の開発, 自動車技術会春季大会学術講演, 2021

- ◆ 有限体積法(FVM)と粒子法(MPS)によるタイヤ水はねシミュレーションの比較
- ◆ "タイヤが水を跳ね上げる挙動は、ともに実車状態を表現できているが、MPSは、より実車状態に近く、計算量も少ない"
- ◆ 車体の防錆対策、モーター、センサー等電子機器の防水対策に適用

Actual vehicle

FVM

MPS



FVM Calculation time(by 192 cores) :7days
(Mesh size:Min.4mm, Mesh number:54 million)
MPS Calculation time(by 192 cores) :0.5day
(Particle size:φ4mm, Particle number:8 million)

Fig.2 Water splash by front tire

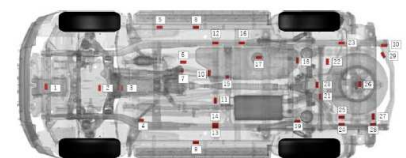
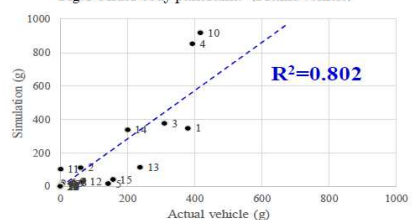


Fig.4 Under body panorama (Frame vehicle)



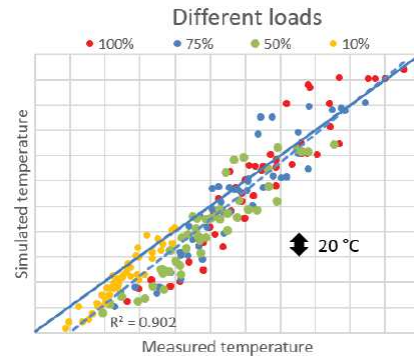
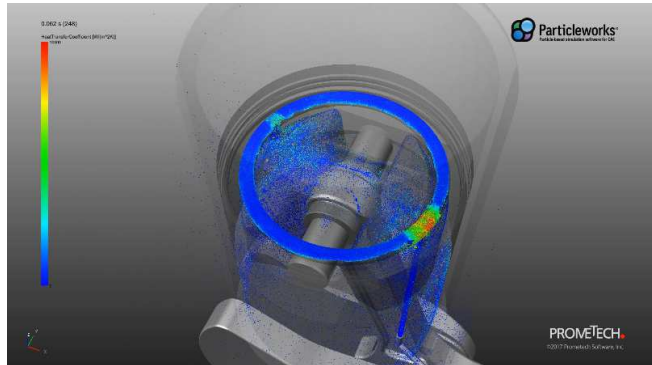
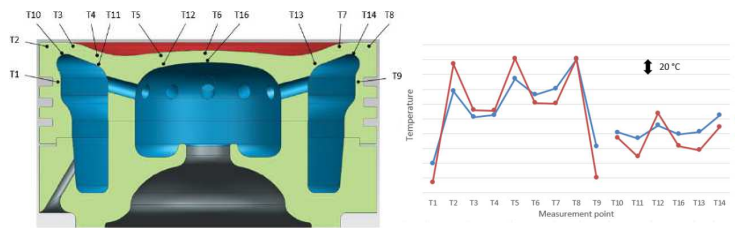
Vehicle speed: 30 km/h, Water depth: 60 mm

Fig. 5 Results of water splash for full vehicle

■ Sami Ojala, Wärtsilä Finland, Designing and analysing the cooling of a medium speed engine piston using MPS method, International CAE Conference, 2018

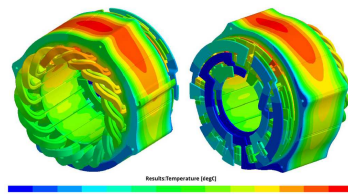
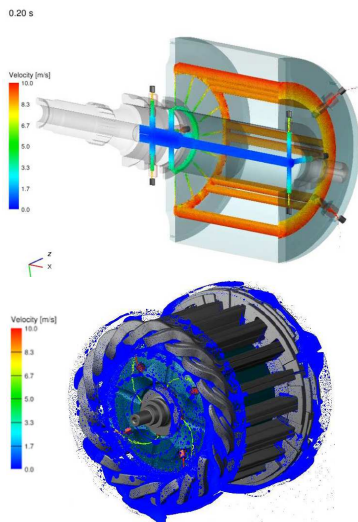
■ 共役熱伝導とMPSの連携解析

- ◆ ピストンヘッドのオイル冷却性能を評価
- ◆ オイルとピストン壁面の熱伝達係数をMPSにより計算
- ◆ 構造解析ソフトで熱伝導解析を実行し実験と比較



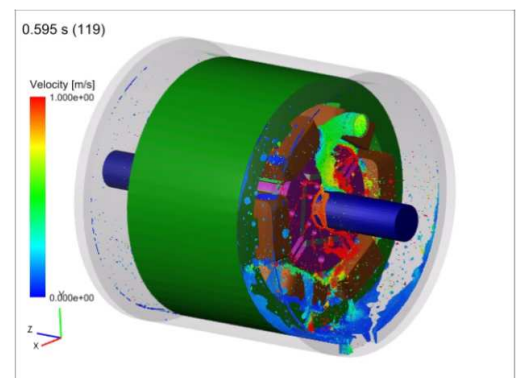
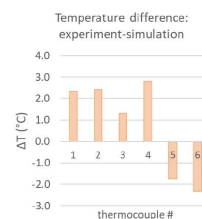
■ Martin Brada (Ricardo China), Thermal Simulation of an Oil Cooled E-Motor, International CAE Conference, 2018

- ◆ モーター冷却のオイルジェットの配置・分配量を決定
- ◆ モーター回転による気流の影響を考慮
- ◆ Particleworksに熱伝導解析機能を実装



FE Thermal Simulation - Validation

- The results have been evaluated in terms of absolute difference between the measured temperature and temperature from the simulation
- Ricardo aim for a match within $\pm 5^\circ\text{C}$
- All points met this criterion with a maximum difference of $+2.8^\circ\text{C}$



■最新のComputer Graphics技術を用いたVisualizationサービス

- ◆解析結果、CAD データ、図面、写真資料などをもとに特殊表現や高品質でフォトリアルなCG 映像を作成
- ◆動画だけではなく、インタラクション可能なXR(VR/AR/MR) コンテンツにも対応



12

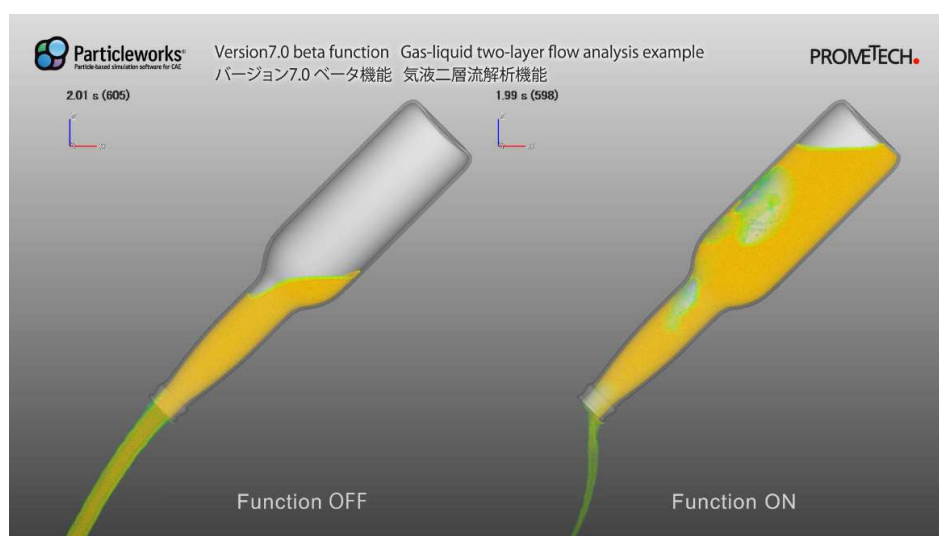
© Prometech Software, Inc.

PROMETECH.

気液2相流のシミュレーション

■液体と空気との相互作用の考慮した課題への取り組み

- ◆空気を粒子でモデル化することは可能ではあるが粒子数が膨大になる
- ◆粒子法で空間を完全に充填することが困難
- ◆有限体積法(FVM)で空気をモデル化 → MPSとFVMの連成機能



13

© Prometech Software, Inc.

PROMETECH.

■ 給油ガンによるガソリンの給油

- ◆ 給油量30 L/minの場合 → 吹きこぼれなし
- ◆ 給油量50 L/minの場合 → 吹きこぼれ発生



並列計算パフォーマンス

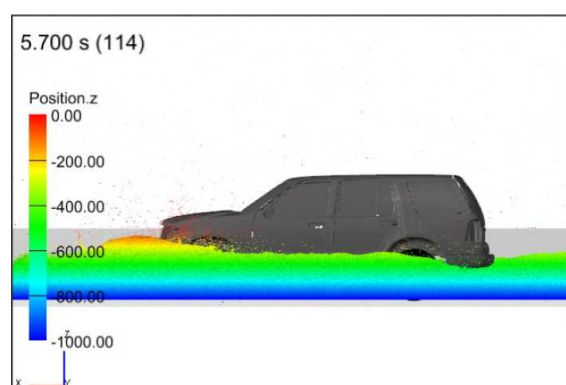
■ マルチCPU

- ◆ モデル諸元
 - 3,500万粒子
 - 現象時間 8秒
- ◆ 計算環境
 - 2 node 12 core
- ◆ 計算時間 112時間

■ マルチGPU

- ◆ モデル諸元
 - 1,200万粒子
 - 現象時間 12秒
- ◆ 計算環境
 - NVIDIA Tesla V100 4枚
- ◆ 計算時間 2.5時間

マルチGPUでの推定計算時間 5時間

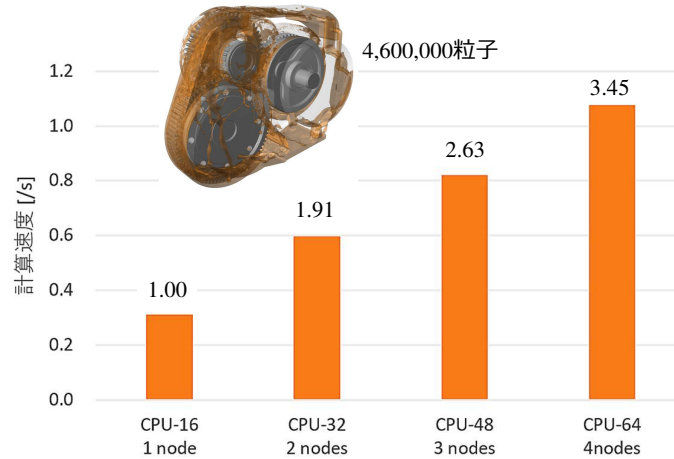


メモリーの制約により、大規模モデル（粒子数+距離関数）ではマルチCPUでの計算が必要となる

■マルチCPU, GPUによるスケーラビリティの測定例

◆圧力陽解法

マルチCPU



Intel Xenon E5-2660 v3 2.6 GHz 25 MB

© Prometech Software, Inc.

PROMETECH.

まとめ

■Particleworksの最近の産業応用事例と新機能について紹介した

- ◆ 共役熱伝導解析機能 (流体-固体間)
- ◆ 有限体積法 (FVM) による気流ソルバーおよびMPSとの連成解析機能
- ◆ マルチGPUスケーラビリティの性能向上 (Particleworks V.7~)

■粒子法の特長が活かされる応用分野では高速な計算が評価されている

- ◆ 車体の被水解析、冠水路走行解析
- ◆ ピストン冷却、モーター冷却

■今後の課題

- ◆ 雪のモデル化および着雪のシミュレーション
- ◆ 高粘性流体
- ◆ 計算の高精度化
- ◆ etc...