

粒子法を用いたトラップ封水の自由振動に関する CFD の試行 Trail Studies on Free vibration of Trap seal water using the particle method

学生会員 ○渡部 晟也 (明治大学)

技術フェロー 坂上 恭助 (明治大学)

正会員 光永 威彦 (山下設計)

正会員 藤村 和也 (三菱地所設計)

Seiya WATABE*¹

Kynosuke SAKAUE *¹

Takehiko MITSUNAGA*²

Kazuya FUJIMURA*³

*¹Meiji University *²Yamashita sekkei Inc. *³Mitsubishi jisho sekkei Inc.

”Particle Method” of a new method for discretization method proposed by Dr.Koshitsuka which can overcome the above bad point is expected to be a new analysis method of CFD. Applying a drainage system by the new method is already tried, but it has not been enough to verify its effectiveness. In this study, we performed the comparison inspection between particle method and Grid Method in the analysis model using free vibration of seal water in drainage trap for the purpose of effectiveness verification of particle method.

1. はじめに

CFD (Computational Fluid Dynamics) による解析は、コンピュータで作成した仮想空間において、流体の挙動を再現することができ、排水モデルの組み立て、測定機器の設置などに必要な時間や工事費の削減を可能とする。また、不可視な流体現象の確認や、流体に加わる力の測定が可能であるため、流体の新たな測定方法として期待されている。従来用いられてきた CFD の「格子法」による解析は、空気調和設備の分野においては、普及が進んでおり、自然換気、ビル風および大規模空間の空調効率の検証など、数多の解析事例が存在する¹⁾。

一方で、給排水衛生設備の分野においては、解析対象が水と空気の間相流となることが多く、その境界となる自由表面が複雑な形状であるため、解析に対して格子数(メッシュ数)が多くなり、解析時間を多分に要し活用の機会が少なかった。一方で、越塚により提案された新たな離散化の方法である「粒子法」(Moving Particle simulation)では前記の短所が改善されており、CFD の新たな解析方法として期待されている。排水システムへの適用の試行もすでに行われているが、まだその有効性の検証は十分とはいえない²⁾。

そこで本研究では、粒子法の有効性の検証を目的とし、自由表面の変動が比較的少ない排水トラップの封水の自由振動を解析モデルとした格子法と粒子法の解析方法および結果の比較・検証を行った。

2. 解析目的

トラップ封水の共振現象は封水損失に大きな影響を及ぼすため、トラップの固有振動数を把握することが性能を評価する上で重要となる。トラップの固有振動数を算出するためには自由振動実験を行う必要があるが、CFD によって簡易に再現することが可能となれば、トラップの商品開発に寄与できると考えられる²³⁾。

一方で、格子法は、モデルや格子条件の設定に時間を要することから、格子法による解析は簡易であると言いが難い。そこで本研究では、比較的モデルや解析条件の設定が容易であり解析時間が短い粒子法を用いて、トラップ封水の自由振動を再現し、実験、格子法と比較することで、その有効性を検証することを目的とする。

3. 解析モデル

3.1 解析対象

本研究における解析モデルは、洗面器で用いられる標準的な形状のトラップである P トラップとした。また、その内径を 30mm、封水深(排水トラップの封水の深さ)を 60mm とした。封水は半水位状態とし、初期水位を平衡位置より流入口側に 15mm 高く設定し、封水を封水損失なしに自由振動させる解析モデルとした(図 1)。

なお、解析には、格子法、粒子法ともに汎用商用ツールを用い、格子法を用いた解析には有限体積法を用いた汎用商用ツールである Star-CD vol.3.24 を、粒子法を用いた解析には Particle works vol.5.1.0 を用いた。

3.2 粒子法による解析モデル

粒子法と格子法による解析モデルを図2と図3に示す。粒子法では計算対象の3Dモデルを離散化することによって粒子としてモデルを形成する。そこで、管径が30mmと小径管であることから、管内で粒子のつまりを抑制すること、また流体の挙動を緻密に表現することを目的として粒子径を1.0mmとした。また、粒子法において流体の3Dモデルを離散化の際に、壁面-粒子、粒子-粒子の間でわずかに隙間が生まれることから、水封量の減少が確認された。そこで、水封量の減少を抑制することを目的とし、壁面と隣接する位置から粒子の配置を行った。なお、総粒子数は90,868個となった。

3.2 格子法による解析モデル

円筒断面は円筒座標系とし、断面のメッシュ数は612メッシュ（半径方向：17分割、円周方向：36分割）とした。壁近傍では、流速変化が大きいためメッシュを密にした不等間隔メッシュを使用した（図3、表1）。トラップ長さ方向は直角座標系とし、1.0mm間隔で分割し、原則、安定的に計算が行えるよう六面体のメッシュ形状とした。なお、総メッシュ数は158,508メッシュとなった。液相領域は、封水の対象範囲のメッシュに、水の物性値を設定することにより決定する。そのため、メッシュ形状が必ずしも水平ではないため、図2(a)の流出側にあるように、水と空気の境界面に凹凸ができる。

4. 解析条件

4.1 粒子法における解析条件

粒子法における解析設定条件の一覧を表2に示す。計算手法はラグランジュ的手法としてMPS法（Moving Particle simulation）を用いた。圧力条件と粘性条件の解法としては、落下問題などの非線形性が強く、短い時間で起こる現象の解析に適する陽解法を用いた。流体の密度、動粘性係数、表面張力係数は水温20℃に近い値として設定を行い、トラップ壁面と流体の接触角は90°とした。圧力条件、粘性条件、初期時間刻みは、管内流速から安定した計算とするため、0.01ms（100,000Hz）とし、データ出力間隔は20ms（50Hz）とした。相互間作用を抑制することを目的として、衝突距離0.9mm、影響半径を2.1mmに、液面付近での粒子の挙動を安定化させることを目的として表面判定係数を0.5mmに設定した²³⁾。

4.2 格子法における解析条件

格子法における解析設定条件の一覧を表3に示す。計算手法は、オイラー的手法としてVOF（Volume-of-Fluid）法を用いた。水の動粘性度と管内流速の関係から、レイノルズ数Reが最大で3,000程度の流れと推察され、遷移流域と考えられるが、徐々に小さくなることから、層流側の流れとした。表面張力は、水温20℃における張力と

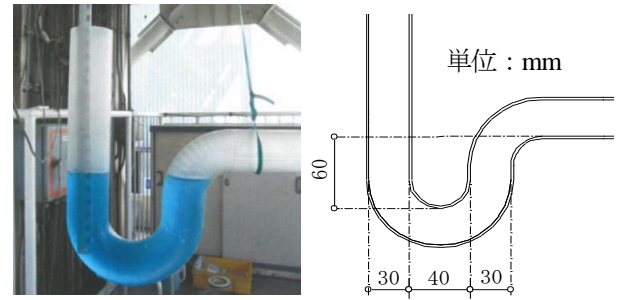
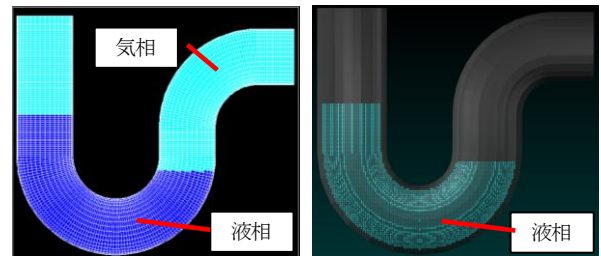
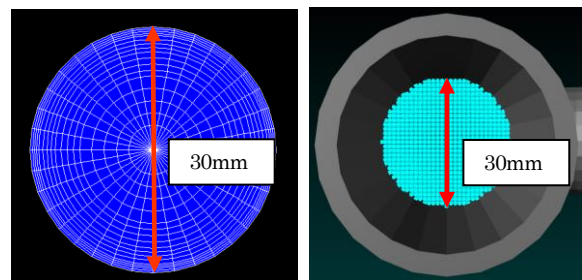


図1 供試Pトラップ



(a) 格子法 総格子数：約16万
(b) 粒子法 総粒子数：約9万

図2 解析対象モデル（立面）



(a) 格子法 断面格子数：612
(b) 粒子法 断面粒子数：699

図3 解析対象モデル（断面）

表1 格子法モデルの断面シェルの格子構成

構成	径範囲 (mm)	格子構成 (mm×4)	位置
	0~1	(0.25 mm×4)	壁面 ↓ 中心
	1~3	(0.50 mm×4)	
	3~6	(0.75 mm×4)	
	6~12	(1.50 mm×4)	
	12~15	(3.00 mm×1)	

表2 粒子法における解析設定条件

種別	解析条件
計算手法	MPS法
解法（圧力条件）	陽解法
音速	10m/s
β	1
γ	1
解法（粘性条件）	陽解法
解法（表面張力）	ポテンシャル法
物性	流体：水（Polygon） 個体：壁面（Polygon）
接触角	90°
初期粒子間距離	1.0mm
初期時間刻み	0.01ms（100,000Hz）
クーラン数	0.2
表面判定係数	0.5
衝突距離	0.9
衝突係数	0.2
影響半径	2.1
データ出力間隔	20ms（50Hz）

し、トラップ壁面と水との接触角は90°とした。解法は、精度の良い解析とするため、移流項とVOFの差分スキームは、本解析に使用した汎用商用ツールにおいて、最も高次であると考えられるMARS (Multi-Interfaces Advection and Reconstruction Solver) を用いることとした。計算時間刻みは、時間解法は、汎用商用ツールでは完全陰解法を用いていることから、最大クーラン数がある程度許されるが、安定した計算とするため、目標クーラン数が0.5以下となるように、0.1ms (10,000Hz) とした。

また、データ出力刻みは100ms (10Hz) とし、実時間5秒分の計算を行った。実際のトラップで大気開放されている境界面は、pressure境界とし、水と空気ともに自由流出入とした。

4.3 PC スペック

粒子法と格子法の解析に用いたPCのスペックについて表4に示す。格子法の解析において、プロセッサ: Xeon 3.20Ghz/L3:1M、使用メモリ: 2GBのPCを、粒子法の解析においてプロセッサ: intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v2、使用メモリ: 128GBのPCを用いた。

5. 予備検証

5.1 自由振動実験

5.1.1 実験目的

実験により、供試Pトラップの半水位状態における固有振動数を求めることを目的として、自由振動実験を行った。

5.1.2 実験方法

初期水位を半水位とした状態から流入側の水位を15mm高く設定し、自由振動を生じさせた。水位変動は容量式水位計により測定し、水位変動にFFT処理をすることでパワースペクトル密度分布を求め、その最大値の振動数を固有振動数とした。

なお、サンプリング時間間隔は20ms (50Hz) とし、管材に透明樹脂を適用し、水位変動を可視化できるPトラップを用いた。

5.1.3 実験結果

トラップ封水の水位変動を図4に、自由振動波形から算出したパワースペクトル密度分布を図5に示す。これより、供試トラップの半水位状態における固有振動数は2.002Hzとなった。

5.2 粒子法における適正水位に関する検証

5.2.1 検証目的

予備解析の結果、粒子法において水粒子を離散化する際、解析直後に初期水位が約1.5mm減少する現象が確認された。この現象は類似の解析モデルでも報告されており、流体モデルを離散化する際に、粒子間にわずかな隙間が生まれることに起因とする³⁾。ただし、粒子法において粒子間にわずかな隙間が生じることは必然であ

表3 格子法における解析設定条件

計算手法	自由表面流れ (VOF 法)
流体	第1流体: 空気 (default) 第2流体: 水 (default)
流れ形態	層流
表面張力	0.072 N/m (壁面接触角: 90°)
解法	PISO (最大コレクター数 = 50, 緩和係数 = 0.8)
差分スキーム	MARS (VOF・UVW) CD (DENS)
計算時間刻み	0.1ms (10,000Hz)
データ出力刻み	100ms (10Hz)

表4 各解析に用いたPCスペック

種別	粒子法 (Case3)	格子法
プロセッサ	intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v2	Xeon 3.20Ghz/L3:1M
使用メモリ [GB]	128	2

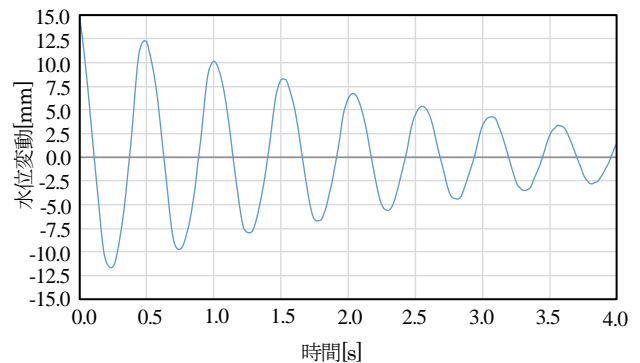


図4 自由振動実験による水位変動

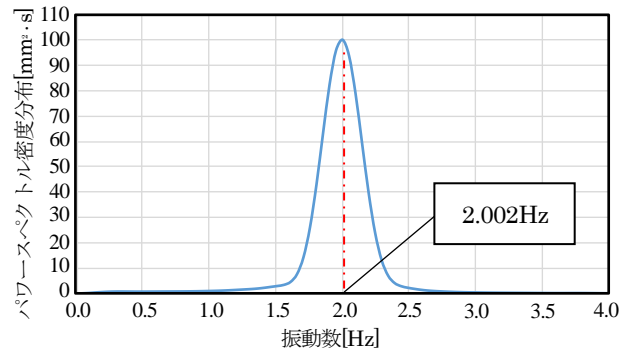


図5 自由振動実験によるパワースペクトル密度分布

表5 粒子法における封水の初期水位条件

封水深	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
流入部 [mm]	45.0	46.0	47.0	48.0	49.0
流出部 [mm]	15.0	16.0	15.0	15.0	15.0

表6 粒子法における自由振動解析後の封水深

種別	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
封水深 [mm]	28.5	29.5	30.0	30.5	31.0
実験値との差 [mm]	-1.5	-0.5	0.0	+0.5	+1.0

表7 各解析のCPU使用時間

種別	粒子法 (Case3)	格子法
実時間 [s]	10.0	5.0
CPU使用時間 [h]	58	187

り、特有かつ不可避な現象と考えられる。

一方で、封水深は固有振動数に大きな影響を及ぼすため、解析においても封水深を適正とする必要があるため、その補正値を検討する。

5.2.2 検証方法

封水の水位減少後に半水位状態の水量となるように、予め、流入部および流出部の初期水位条件を設定し解析を行った（表5）。

5.2.3 検証結果

各水位条件で自由振動解析を行った結果を表6に示す。Case3が初期水量と同様の封水深を有する結果となり、格子法との比較のための粒子法の解析モデルでは、Case3の水位設定を採用することとする。

6. 解析結果

6.1 格子法

実時間5.0秒分の計算を行うために、PCにおいて、CPU使用時間を約187時間（実時間1秒あたり37.4時間）要した。

6.2 粒子法

実時間10.0秒分の計算を行うために、PCにおいて、CPU使用時間を約58時間（実時間1.0秒あたり5.8時間）要した。また、解析直後において水面から粒子が飛散する現象が確認できた。これは壁面近傍の粒子が壁面から強い斥力を受けたために起きた現象であると考えられる。

6.3 格子法と粒子法の比較

6.3.1 解析時間

格子法と粒子法の解析時間を比較すると、格子法による解析は粒子法と比較して、約7倍の解析時間を要した（表7）。ただし、PC環境が異なるため、粒子法と格子法における解析時間の優劣は単純には判断できない。

6.3.2 水位変動と固有振動数

実験、格子法および粒子法における時刻別の自由振動を図6に、パワースペクトル密度分布を図7に示す。各種測定値における水位変動を比較すると、それぞれの解析値の波形は実験値の波形に近似している。またそれぞれの水位の減衰を比較すると、格子法における水位の減衰が実験と粒子法の値と比較して小さくなった。トラップの自由振動解析において、粒子法による解析が格子法と比較して、より適合していることが明らかとなった。

一方、粒子法、格子法の解析より算出した固有振動数は実験値と近似していることが明らかとなった（表8）。

7. まとめ

本研究では、自由振動モデルにおいて粒子法を用いた解析を行った。その結果をまとめると、次になる。

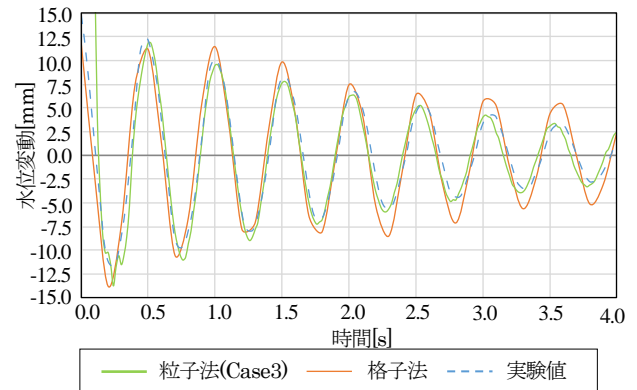


図6 実験、各解析における水位変動の比較

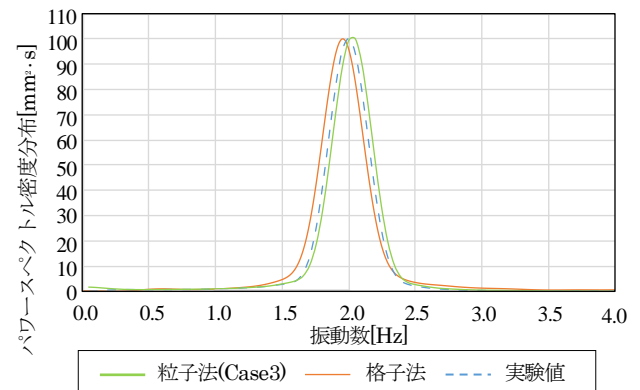


図7 実験、各解析におけるパワースペクトル密度分布

表8 固有振動数の比較

算定方法	粒子法 (Case3)	格子法	実験
固有振動数 [Hz]	2.050	1.963	2.002
実験値との差異 [Hz]	0.048	-0.049	基準

- 1) 粒子法を用いた流体解析において、3Dモデルを離散化すると粒子間に隙間ができるため、流体の体積が減少することが明らかとなり、粒子法を用いて振動解析を行う際に、流体の減少を補うに3Dモデルを作成する必要があると考えられる。
- 2) 固有振動数に関して、粒子法と格子法の解析値と実験値とを比較すると、それぞれの値が近似しており、粒子法が自由振動の解析に適応していることが明らかとなった。

今後の排水分野における粒子法の適用について、本研究のように管内制圧力の変動に影響を受けない水位変動や水の挙動の把握には適しているが、気相部の圧力把握が困難なため、それらの計算を必要とする排水モデルにおいては、さらに検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) C. W. Hirt et al: Volume of Fluid (VOF) method for the Dynamics of Free Boundaries, J-Comput. Phys, pp. 39-201, 1981
- 2) 越塚誠一他: 粒子法入門, 丸善出版株式会社, pp1-105, 2014
- 3) 越塚誠一, 粒子法, 計算力学レクチャーシリーズ5, 丸善出版株式会社, pp1-50, 2007