

トラップ封水の変動特性に関する CFD 解析

(その 1) 自由振動と単正弦波強制振動

CFD Analysis on Dynamic Characteristic of Trap Seal Water
(Part1) Free Vibration and Forced Vibration Using Single Sine Wave

学生会員 ○杉田 慎之介 (明治大学大学院) 正会員 坂上 恭助 (明治大学)
 正会員 光永 威彦 (株式会社山下設計) 正会員 酒井 孝司 (明治大学)
 正会員 友成 弘志 (TOTO 株式会社)

Shinnosuke SUGITA*¹ Kyouzuke SAKAUE*¹ Takehiko MITSUNAGA*²

Kouji SAKAI*¹ Hiroshi TOMONARI*³

*¹Meiji University *²YAMASHITA SEKKEI INC. *³TOTO LTD.

As for the CFD analysis in an architectural, environmental field, it is researched to become about one of the main design approaches in the current of air field aggressively. But, it is a stage still experimentally done in the water field. Then, this research analyzed the seal water vibration model in P trap as a basic research to use the CFD analysis for the water field.

はじめに

建築環境分野における CFD 解析は、空調分野等の空気流れにおいては、すでに主要な設計手法の一つとなっているなど精力的に研究が行われている。しかし、給排水分野において CFD 解析は、ほとんど行われていない。

トラップ封水の挙動については、友成らの先駆的な研究がある¹⁾³⁾。しかし、強制振動については検討が行われていない。そこで、本研究では、空気流れの解析によく使用されている熱流体解析プログラム star-CD をトラップ封水の自由振動・強制振動(単正弦波)の 3 次元解析について、適用を試みたものである。

1. 自由振動に関する CFD 解析

1.1 解析目的

トラップ封水の流動現象に関する 3 次元解析を試行するに際して、基礎的な現象であるトラップ封水の自由振動を CFD 解析し、実験と比較・検証することを目的として、解析を行った。

最終的に、CFD 解析により、実験では検証することが困難な交互渦のような流動現象を把握し、各種トラップの耐圧力性能や破封特性を机上にて検討することを目標としている。

1.2 解析方法

トラップ封水変動の数学モデルには、ナビエ・ストークスの運動方程式を採用した。その数値解法として、差分法を適用した。

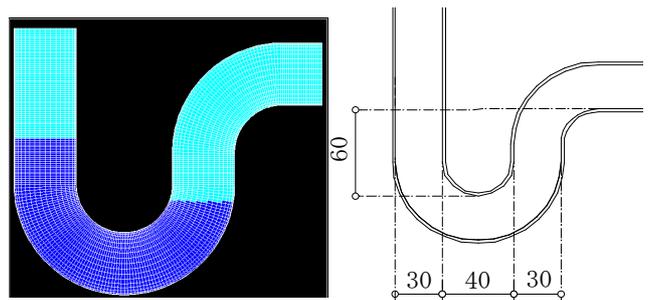


図 1 解析対象モデル (P トラップ)

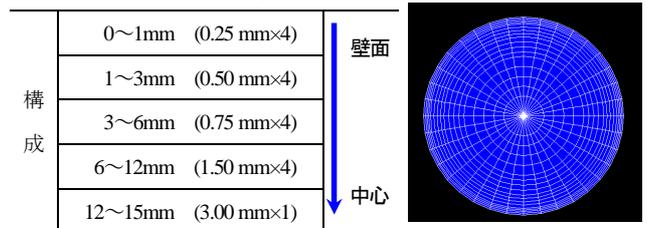


図 2 断面の構成と概要

表 1 自由振動の解析条件

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・移流項) CD (その他)
メッシュ数	158,508
計算時間刻み	0.1ms (10,000Hz)
データ出力刻み	100ms (10Hz)

(1) 解析モデル

本解析で用いる解析対象モデルを図1に示す。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、メッシュを密にした不等間隔メッシュを使用した（図2）。また、トラップ長さ方向は直交座標系とし、1mm間隔で分割した。

(2) 解析条件

流れの形態は非定常流とし、水-空気の混相流としたナビエ・ストークスの運動方程式について、差分法を適用した。また、計算手法にはオイラー的手法としてVOF（Volume-of-Fluid）法を用いた。

トラップ封水は半水位状態とし、静止平衡位置より、流入側に15mm高くなるように初期水位差を設けた。

さらに、水の動粘性度と管内流速の関係から、レイノルズ数 Re は3000程度の流れと予測でき、遷移流域と考えられるが、層流側の流れとした。

表面張力は、水温20°Cにおける張力とし、トラップ壁面と水との接触角は90°とした。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、本解析に使用した熱流体解析プログラムstar-CD ver.3.24において、もっとも高次であると考えられるMARS（Multi-Interfaces Advection and Reconstruction Solver）を用いた。

計算時間刻みについては、star-CD ver.3.24では時間解放に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容されるが、安定した計算とするため、目標クーラン数が0.5となるよう、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。

さらに、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入入とした。解析条件を表1に示す。

1.3 解析結果と考察

データの比較は、トラップの性能試験法に関する研究（その9、その10）⁴⁾⁵⁾の実験データを使用した。

解析には、計算機Xeon3.20GHz/L3:1MBメモリ2GBを使用し、実時間5.0秒分の計算を行うのに、CPU使用時間を約187時間使用した。

トラップ封水の水位変動と、自由振動波形をFFT処理して求めたパワースペクトル密度分布を図3に示す。このとき、CFD解析における水面は、VOFが0.5となる断面を各時間で格納し、円筒断面の中心近傍にデータ抽出の基準となる軸を設置し、水位変動を抽出した。

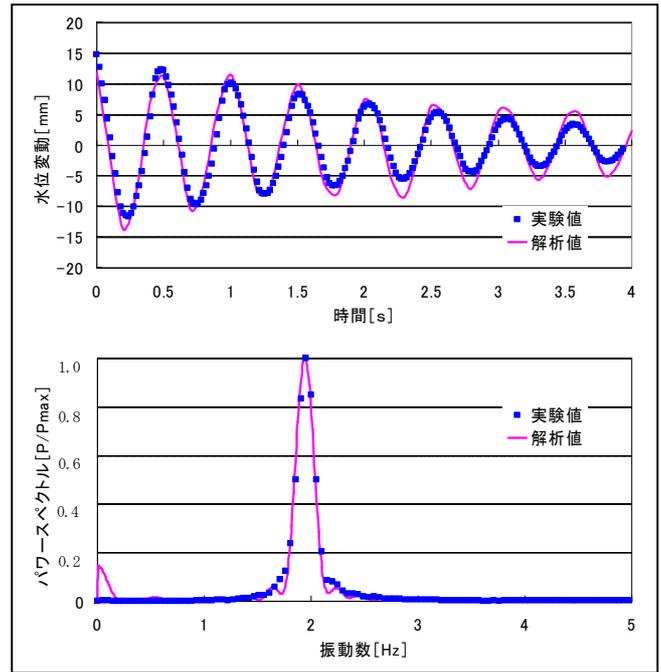


図3 水位変動・パワースペクトル密度分布の実験値と解析値の比較

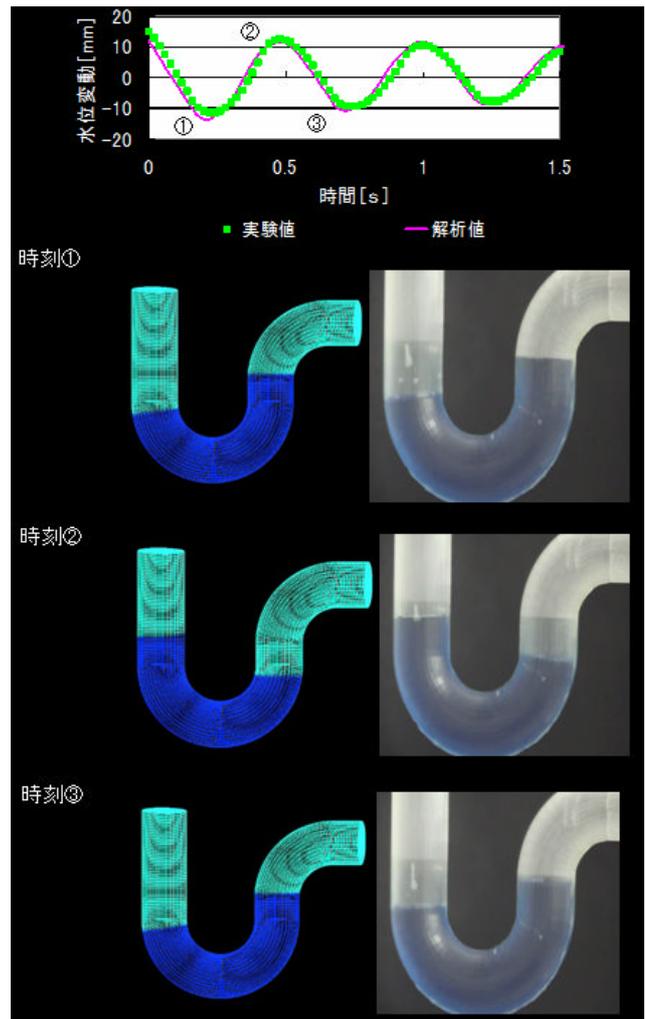


図4 CFD解析と実験による可視化画像の比較

実験結果と CFD 解析の結果を比較すると、水位変動が $\pm 5\text{mm}$ 以上となる約 2 秒後まではほぼ一致しているが、それ以降は、最大で 3mm 程度の差異がみられた。これは、解析結果に関して、時間の制約により、メッシュ数や計算時間刻みを一部粗くしたこと、遷移流において層流条件として解析を行ったことなどが、影響を与えていると考えられる。今後は、流水抵抗を含めて研究課題としたい。一方、固有振動数におけるパワースペクトル値（最大値との比）については、実験値と解析値は、ほぼ一致していた。

次に、CFD 解析と実験による可視化画像の比較を図 4 に示す。CFD 解析による可視化画像の水面の傾きは、実験による可視化画像の水面の傾きとほぼ一致している。

以上より、CFD 解析によってトラップ封水の自由振動が概ね再現できたといえる。

2. 強制振動に関する CFD 解析

2.1 解析目的

実際のトラップ封水は、管内圧力で変動する。封水振動の基礎として、単正弦波による強制振動を CFD 解析し、実験値と比較・検証することを目的とした。

2.2 解析方法

(1) 解析モデル

本解析で用いる解析対象モデルは、1 章の自由振動に関する CFD 解析で用いたものと同様である。しかし、本解析は、乱流モデルであるため、円筒断面は円筒座標系とし、断面のメッシュ数は 540 メッシュ（半径方向：15 分割、円周方向：36 分割）の等間隔とした。また、トラップ長さ方向は直交座標系とし、 1mm 間隔で分割した。

(2) 解析条件

本解析は、star-CD ver.3.24 では、圧力ファイルの追加に不具合があるため、star-CD ver.3.26 を使用した。

乱流モデルは、標準 $k-\epsilon$ モデルとした。また、計算手法はオイラー的手法として、VOF (Volume-of-Fluid) 法を用いることとした。

このとき、トラップ封水は半水位状態とし、静止平衡とした。また、強制振動させるために用いた単正弦波は、 1Hz と、実験に使用した P トラップの固有振動数である 2Hz の 2 種類とした。

計算時間刻みは、前章で述べたように、 0.1ms ($10,000\text{Hz}$) とした。また、データ出力刻みは 20ms (50Hz) とし、 1Hz 、 2Hz においてそれぞれ、実時間 2.5 秒分の計算を行った。その他の解析条件は、前節で用いたものと同様である。

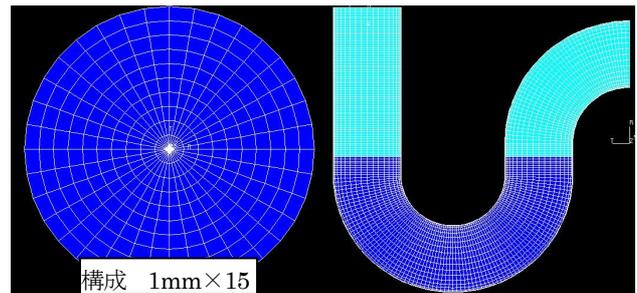


図 5 解析対象モデル (P トラップ)

表 2 強制振動の解析条件

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)
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
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・移流項) CD (その他)
メッシュ数	139,860
計算時間刻み	0.1ms ($10,000\text{Hz}$)
データ出力刻み	20ms (50Hz)

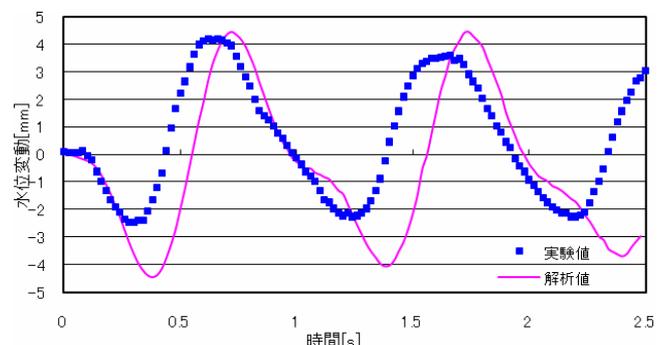


図 6 水位変動の実験値と解析値の比較(1Hz)

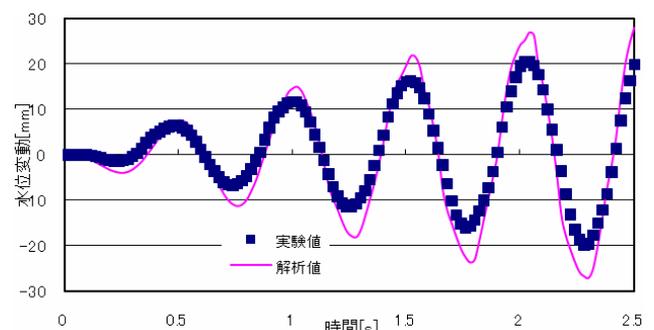


図 7 水位変動の実験値と解析値の比較(2Hz)

解析条件の一覧を表2に示す。

2.3 解析結果と考察

本解析のデータの比較も、トラップの性能試験法に関する研究(その9、その10)⁴⁾⁵⁾の実験データを使用した。

1Hzの圧力波において、実時間2.5秒分の計算を行うのに、CPU使用時間を約28時間、2Hzにおいては、約50時間を使用した。

それぞれの単正弦圧力波によるトラップ封水の水位変動を図6と図7に、強制振動波形をFFT処理して求めたパワースペクトル密度分布を図8と図9に示す。このとき、CFD解析における水面は、VOFが0.5となる断面を各時間で格納し、円筒断面の中心近傍にデータ抽出の基準となる軸を設置し、水位変動を抽出した。

単正弦圧力波1Hzにおける実験結果と、CFD解析の結果を比較すると、解析値が実験値より大きくなるという結果となり、最大で2.5mm程度の差異がみられた。これは、計算時間の短縮のため解析モデルのメッシュが粗くしたこと、管壁面の摩擦条件、水面の振動条件などが原因と考えられる。また、実験値の水位変動が約-2mm~4mmということから、実験精度にも問題があると考えられる。

この差異を減らすため、管壁面の摩擦を一般的なElog9から、Elog1.5、Elog5と条件を変え、再度計算を行ったが、結果に違いはみられなかった。

次に、実験に使用したトラップの固有振動数である単正弦圧力波2Hzにおける実験結果と、CFD解析の結果を比較すると、この場合も解析値が大きくなる結果となったが、共振現象を概ね再現できたといえる。その差異は、最大で7mm程度となった。

一方、固有振動数におけるパワースペクトル値の比は、実験値と解析値は、ほぼ一致していた。

以上より、CFD解析によってトラップ封水の単正弦波強制振動が概ね再現できたといえる。

3. まとめ

トラップ封水の自由振動、単正弦波強制振動を実験値とCFD解析の比較・検討し、次の結果が得られた。

- 1) トラップ封水の水位変動は、実験値よりCFD解析値の方が若干大きくなる傾向がみられるが、封水の流動状況はほぼ再現することができる。
- 2) 解析条件として、管壁面の摩擦条件を変えても結果に違いは得られなかった。
- 3) CFD解析により、封水の自由振動と強制振動(共振現象を含む)を概ね再現することができる。

4) 強制振動解析は、与える圧力波の周期が短くなると計算時間が長くなる。

今後は、実験値と解析値との差異を小さくしていくことが課題である。また、実験値の精度の問題も考えられるため、再実験の検討も必要である。

さらに、他形状のトラップにおいてもCFD解析を行い比較・検討していく予定である。

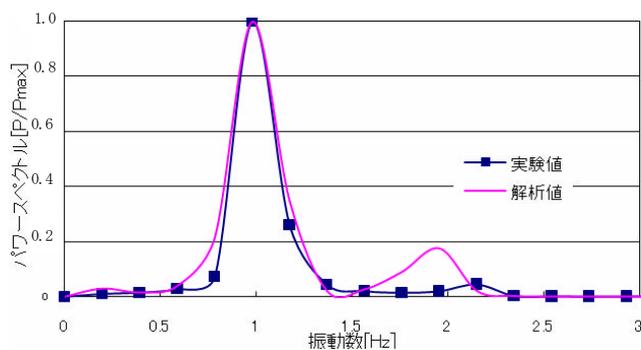


図8 パワースペクトル値の実験値と解析値の比較(1Hz)

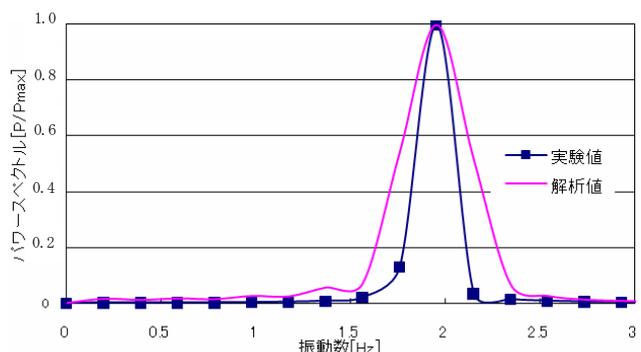


図9 パワースペクトル値の実験値と解析値の比較(2Hz)

【参考文献】

- 1) 友成弘志ほか：トラップ内の封水流動の数値解析(第1報) モデルトラップの封水の固有振動数算定法の検討、空気調和衛生工学会論文集、pp.49-57、2001
- 2) 友成弘志ほか：トラップ内の封水流動の数値解析(第2報) トラップの形状因子と封水の固有振動数の関係、空気調和衛生工学会論文集、pp.87-96、2002
- 3) 友成弘志ほか：トラップ内の封水流動の数値解析(第3報) 一般トラップの破封振動数と封水の固有振動数の関係、空気調和衛生工学会論文集、pp.729-732、2002
- 4) 柳澤義己ほか：トラップの性能試験法に関する研究(その9) 各種トラップおよび実管内圧力の振動特性に関する研究、空気調和衛生工学会論文集、投稿中、2008
- 5) 栗山華ほか：トラップの性能試験法に関する研究(その10) 簡易型圧力発生装置を用いた試験法の検討、空気調和衛生工学会論文集、投稿中、2008