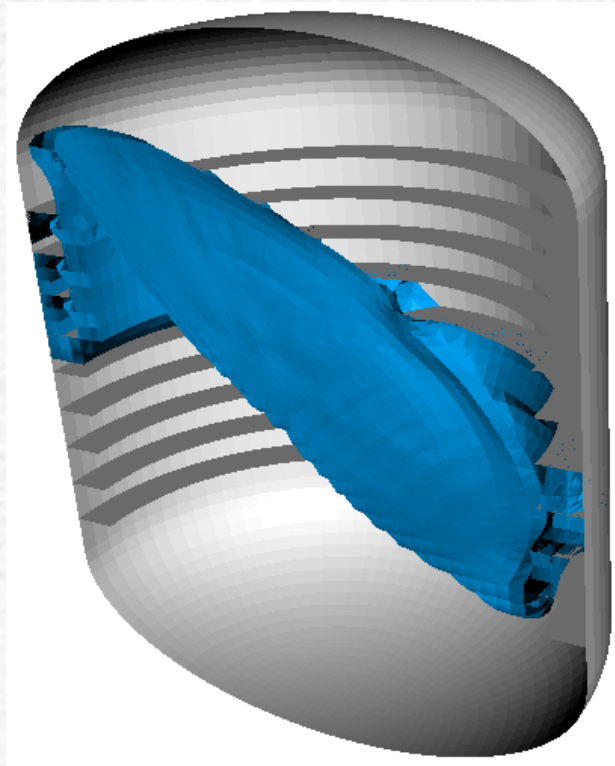


## OpenFOAMの気液二層流問題適用事例



IHIエアロスペースエンジニアリング

開発部 松浦 芳樹

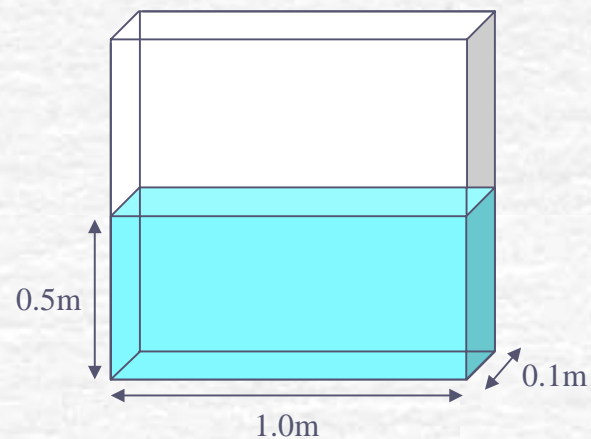
## 液体の動的挙動の把握      スロッシング挙動に関する解析例

- 液体ロケットの発射時重量のうち6～9割は液体燃料が占めている。そのため、液体の動的挙動を把握する事は構造設計・姿勢制御系の設計において非常に重要となる。
- 宇宙機で考慮すべき流体の動的挙動には「スロッシング」「ポゴ」「コースティング中の液体大変形」「ドームインパクト」等が挙げられる
- このうち、スロッシングとは、自由表面を持つ液体の振動を意味する。固有振動モードは無限に存在するが、ロケットの制御上問題となるのは主に横スロッシングである。
- スロッシングはひとたび発生するとなかなか減衰せず、抑制が困難である。そのため、振動抑制用バッフル板等が設置される場合が多い。
- バッフル板を設置した場合のスロッシング減衰特性把握実験例

『NASA TN D-715 An Experimental Investigation of The Damping of Liquid Oscillations in Cylindrical Tanks with Various Baffles』 Milton A. Silveira, David G. Stephens, and H.Wayne Leonard , Langley Research Center (1961)

## スロッシング挙動解析例(その1)

- バッフル板によるスロッシング減衰特性確認に先立ち、一般的なスロッシング挙動についてのCFDによる再現レベルを確認。
- 三次元矩形貯水槽におけるスロッシング挙動の再現解析を実施。
- 試験データの参考文献『Two-dimensional sloshing analysis by the Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element methods』 T.Okamoto, M.Kawahara , Proceeding of JSCE , 1992.



◇タンク形状 : 左図参照

◇液面高さ : 0.5m

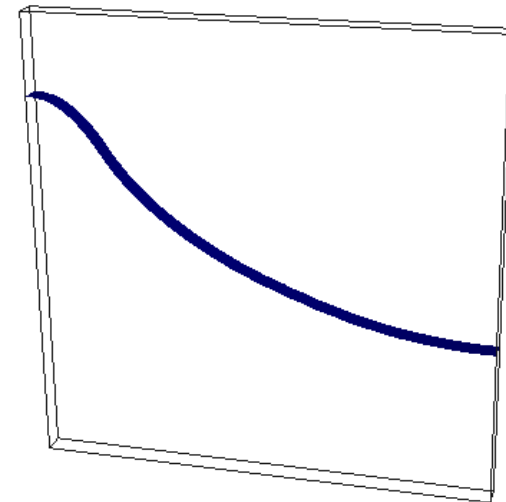
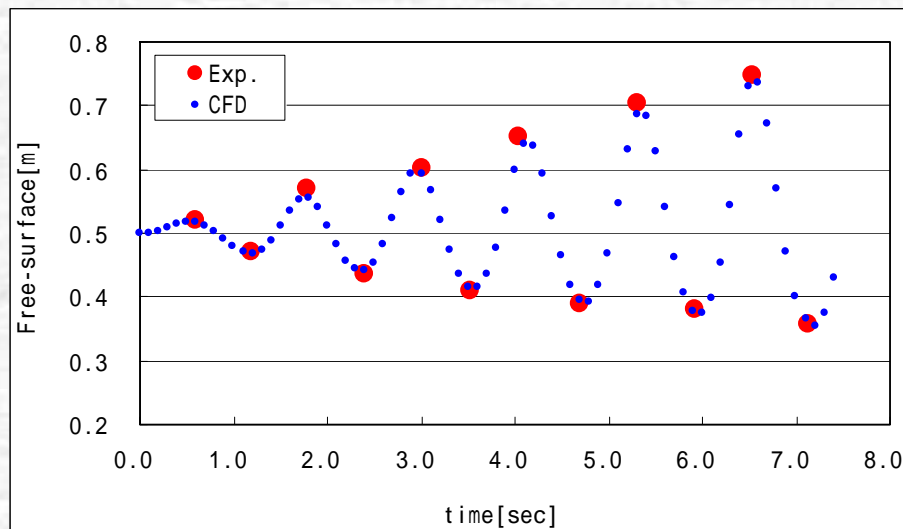
◇液体 : 水

◇加振加速度 :  $A \sin(\omega t)$  m/s<sup>2</sup>

$A=0.0093$  m ,  $\omega=5.311$  rad/s

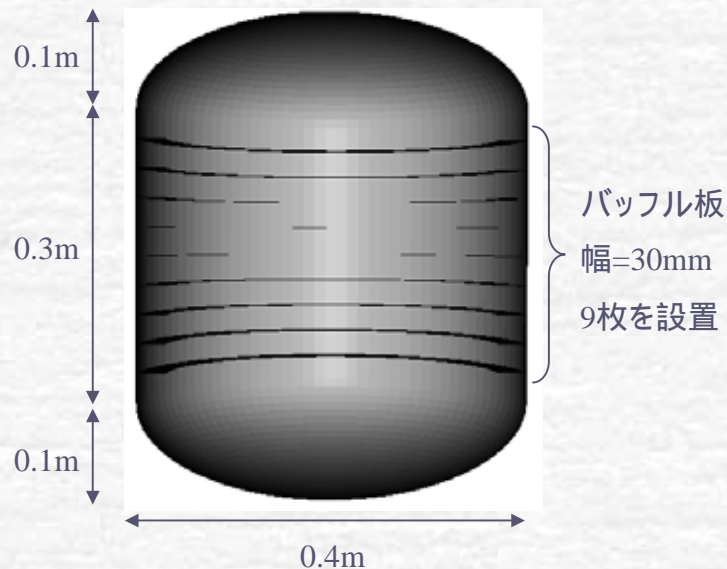
## スロッシング挙動解析例(その1)

- OpenFOAM InterFoam による再現解析を実施
- 自由表面位置の履歴を実験結果と比較



## スロッシング挙動解析例(その2)

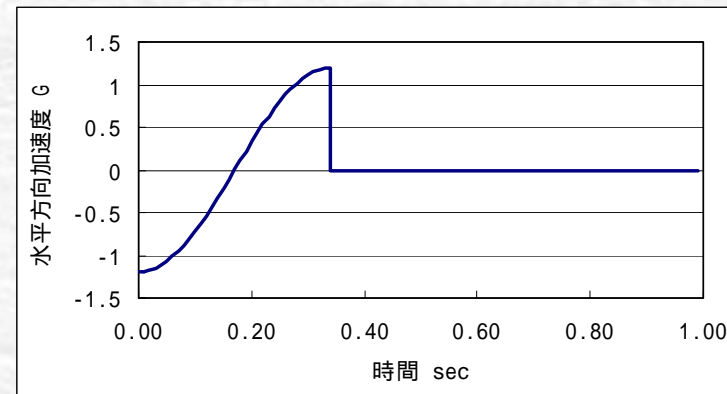
- バッフル板を有したタンクによるスロッシング挙動の再現解析を実施。
- 試験データの参考文献『バッフル板によるスロッシング抑制効果の数値解析 Numerical Investigation on Sloshing with Damping Devices』 姫野,野中,青木 第21回数値流体力学シンポジウム



◇タンク形状 : 左図参照

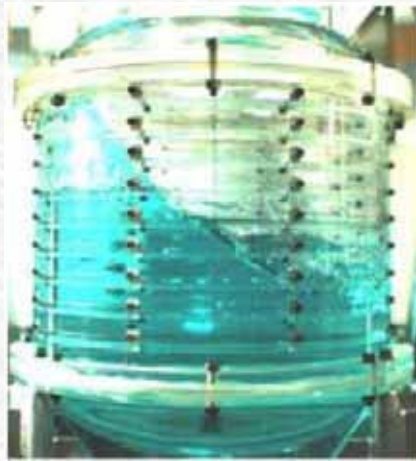
◇液体 : 水

◇加振加速度 : 下図参照

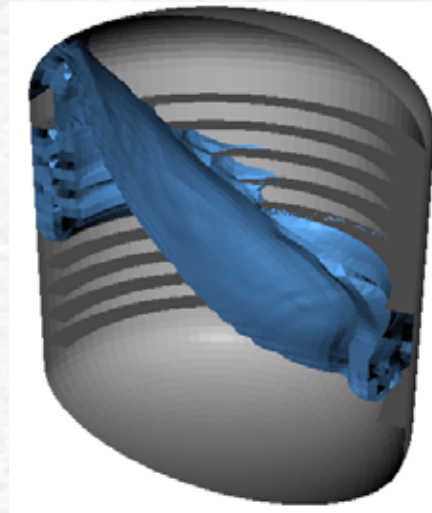
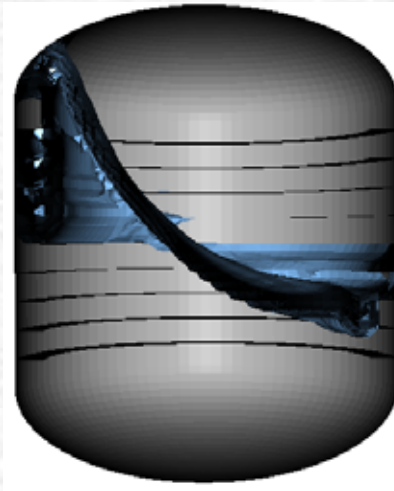


## スロッシング挙動解析例(その2)

- OpenFOAM InterFoam による再現解析を実施
- 文献による液体挙動のスナップショットと比較



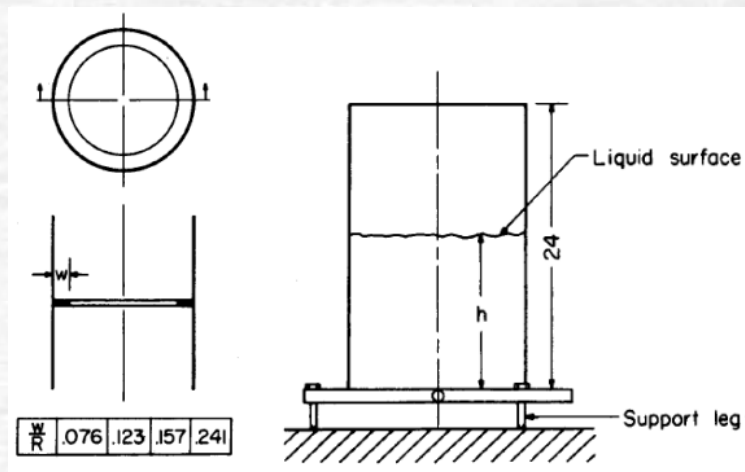
0.27 sec時点液面挙動



同時刻での計算結果

## 文献(NASA TN D-715)における減衰特性把握実験

- 円筒タンク内部にバッフル板を設置
- タンク台座に歪ゲージorロードセルを設置し、内部流体を一定の応答レベルが確認される所まで振動させる。
- タンク内部流体への外力の入力を停止し、応答の減衰状況を確認する。



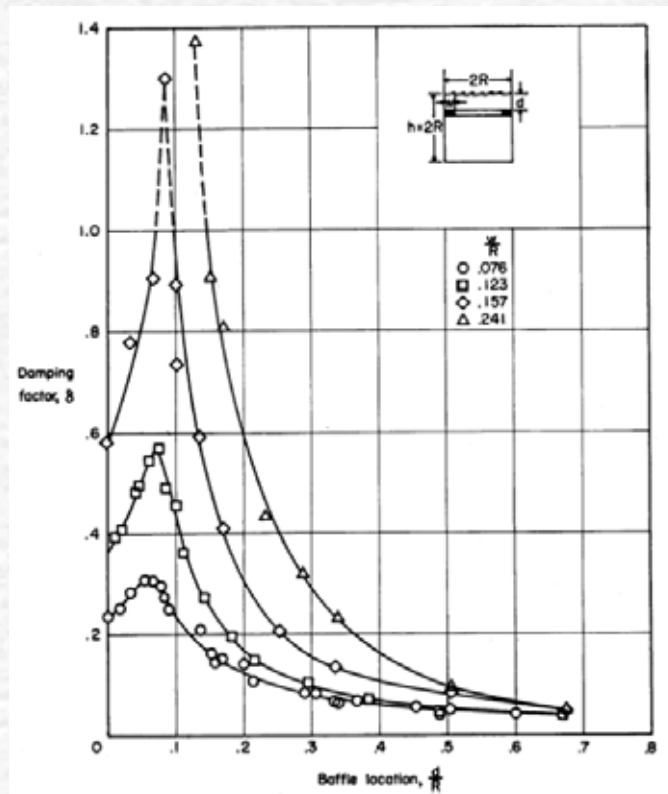
Fixed ring , 12-inch-diameter tank

◇文献では複数径のタンクで試験実施されている。

◇バッフル板の種類も複数が試験されている。

◇今回は、左図の組み合わせでの再現解析を実施。

## 実験結果例



$$\sigma = \frac{1}{n} \log_e \frac{M_0}{M_n}$$

... Damping factor

$n$  : サイクル数

$M_0$  : 初期状態 (外力停止後) における応答ピーク値

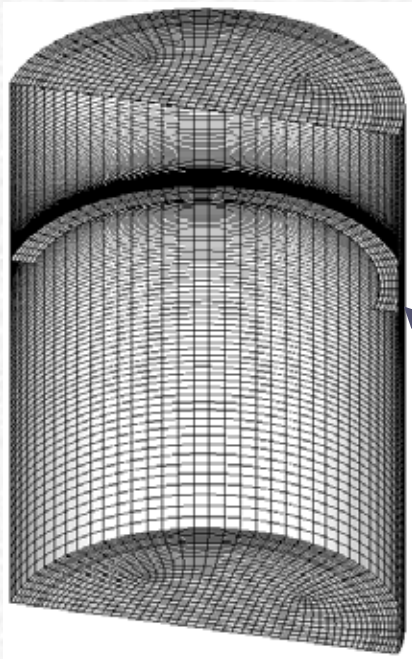
$M_n$  :  $n$  サイクル目における応答ピーク値

補足)  $M_n$   $0.3M_0$ となるサイクル数までのデータで減衰率を整理



## 計算モデル(1 / 2)

### 幾何形状



### 計算方法

解析プログラム OpenFOAM - InterFoam

非圧縮、等温度

一定物理量(密度、粘性、表面張力)

層流

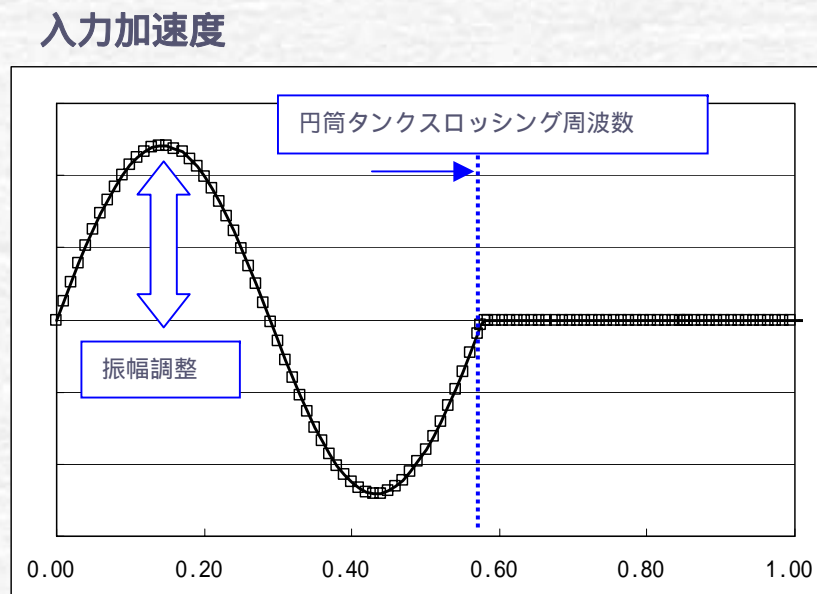
壁面 - NonSlipWall

内部流体 空気 + 水

**バッフル** slosh baffle

板厚=0.0のNonSlip指定境界面として設定

## 計算モデル(2 / 2)



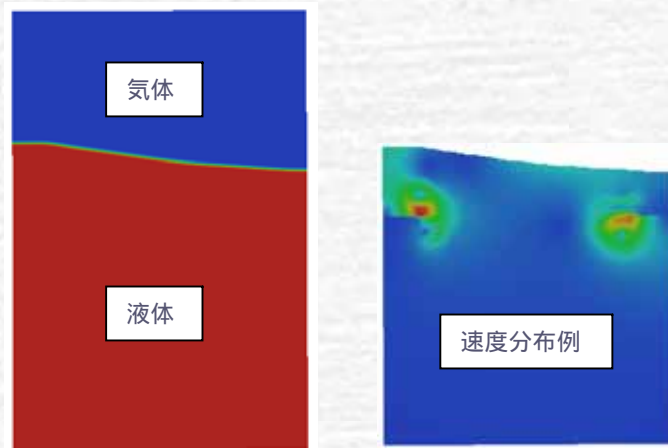
### 解析手順

◇初期液面形状の作成は、Sin波形状による水平方向加速度を1サイクル入力する事で実現。入力Sin波は円筒タンクスロッシング周波数に一致させることで大変形を実現する。

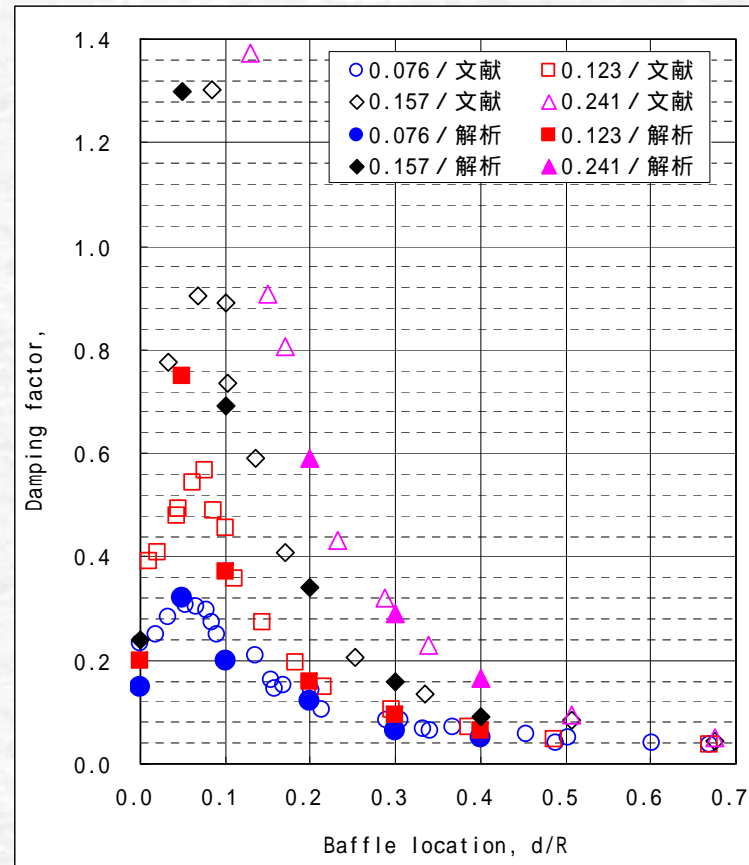
◇減衰率の確認は、タンク壁面で検出される圧力の積分値の時間履歴データに基づき実施。

◇ $d/R=0.3$ のケースで実験結果を概ね再現可能となる入力振幅レベルを確認し、同一の設定で $d/R$ をパラメータとした解析を実施。

## 解析結果と実験との比較



スナップショット(円筒断面)



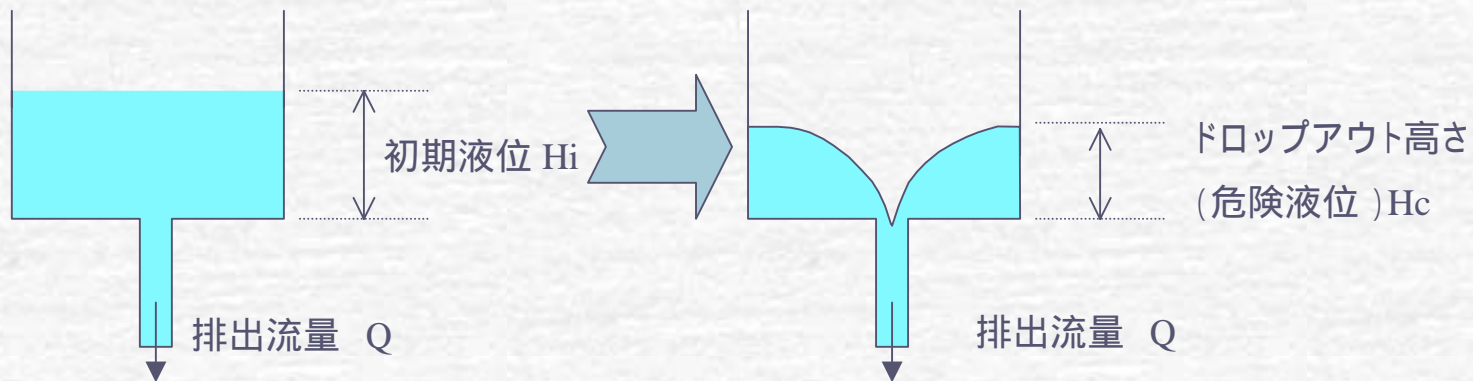
## ドロップアウト予測

- 液体ロケットはタンク内蒸気がエンジン系に流入する前にできるだけ燃料を使わなければならない。
- 一度蒸気が系に流入した場合、エンジン停止となる。エンジン系に取り込まれた蒸気はキャビテーションを誘引し、非定常推力 (POGO) の要因となる。
- 早めのエンジン停止は、打ち上げ軌道が低くなる事を意味する。
- 余分な推薬 (重量増) は不利となる。
- ドロップアウト高さの正確な知識が必要。
- ドロップアウト高さの実験相関式

『The formation of a dip on the surface of a liquid draining from a tank』  
Lubin, Barry T. & Springer, George S. 1966 , J.Fluid Mech.(1967), vol.29, part2,  
pp.385-390

## 文献における実験

- 円筒タンクに流出口を設置
- 多くの異なる流体（水+空気、シリコンオイル、ケロシン等）による実験。
- ドロップアウト高さ（危険液位）と流量の実験相関式を開発。



タンク直径 : 5.5 or 9 inch

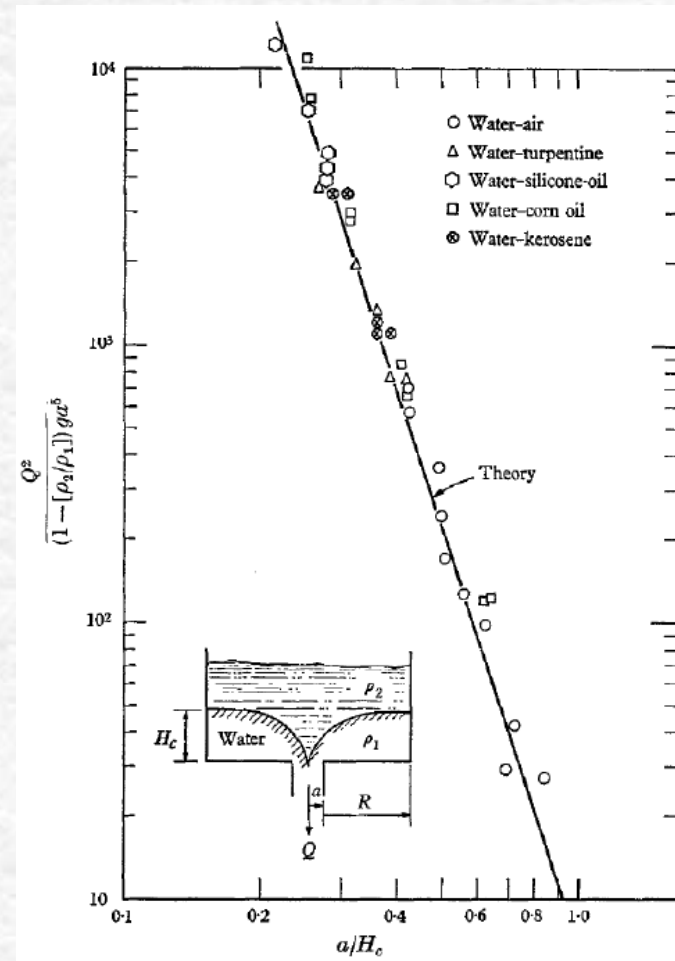
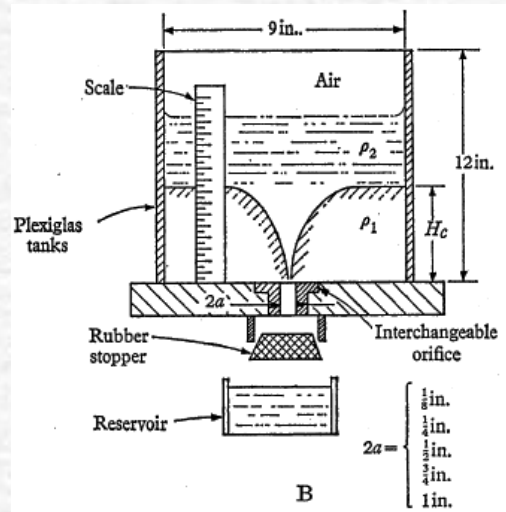
排出口直径 : 1/8 , 1/4 , 1/2 , 3/4 , 1 inch

## 実験結果 (文献より抜粋)

### 理論式

$$\frac{Hc}{a} = 0.69 \left[ \frac{Q^2}{(1 - \rho_2 / \rho_1) g a^5} \right]^{1/5}$$

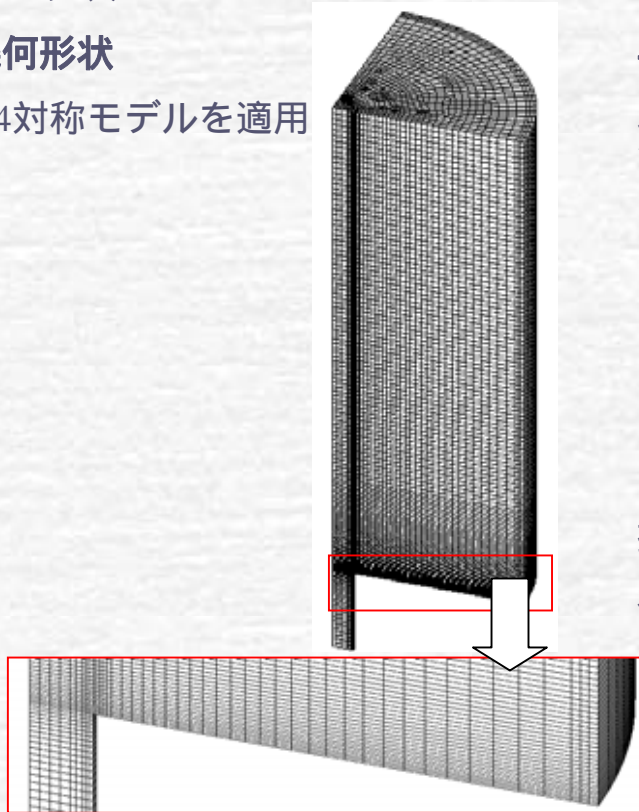
### 試験コンフィギュレーション



## 計算モデル

### 幾何形状

1/4対称モデルを適用



### 計算方法

解析プログラム OpenFOAM - InterFoam

非圧縮、等温度

一定物理量(密度、粘性、表面張力)

層流 壁面 - NonSlipWall

内部流体 空気 + 水

円筒タンク直径 9インチ

排出孔直径 1インチ

初期液位 理論解より得られる $H_c \times 5$

## 解析結果

- ◇定性的には、概ね妥当な解析結果が得られている。
- ◇低流量ケースでは、比較的再現性が低下する結果となっている。
- ◇解析は、全体的にドロップアウト高さを低い側へ予測する傾向が見られる。
- ◇試験再現性の向上が今後の課題。

