

# スロッシング時の配水池沈殿物の舞い上がりに関する水理実験

鍛田泰子<sup>1</sup>・陳時霖<sup>1</sup>・安井國雄<sup>2</sup>・米山望<sup>3</sup>

## Hydraulic Experiment on Sediments Uplifting in Water Distribution Tank During Sloshing

Yasuko KUWATA<sup>1</sup>, Shilin CHEN<sup>1</sup>, Kunio YASUI<sup>2</sup> and Nozomu YONEYAMA<sup>3</sup>

### Abstract

Sediments accumulate at the bottom of water distribution tanks, which are a component of water supply systems. In this study, vibration experiments were conducted using a small rigid water tank to confirm whether the sediments would be lifted by the water flow in the tanks when sloshing occurs during an earthquake. Two types of experiments were conducted under the same shaking conditions: one in which only tracers were placed in the tank to visualize the water flow during sloshing, and the other in which sediments were placed in the tank to measure sediment uplift and turbidity. When sloshing was excited by a sinusoidal wave with a first-order period of the oscillation, it was confirmed that sediment began to rise at the bottom of the tank near the side walls when the water level exceeded a certain level, and turbidity also increased. The turbidity increase due to sediment rising reached a maximum with a time lag after the end of the shaking.

キーワード：スロッシング, 配水池, 濁度, 舞い上がり

Key words: sloshing, water distribution tank, turbidity, floatation

### 1. はじめに

地震時にも安全・安心な水を供給することは、救命や市民生活の維持において重要である。このためには、水道施設の耐震性確保だけでなく、水質基準を満たした水を供給する必要がある。水道

システムの一構成要素である配水池には、底部に微細な物が沈殿するため、数年に1回、清掃ロボットや潜水士が清掃している<sup>1)</sup>。これらの沈殿物は、浄水場の後処理で取り切れなかったフロック（凝集によって生成される綿くず状の沈殿物）

<sup>1</sup> 神戸大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Kobe University

<sup>2</sup> 日本水中ロボット調査清掃協会  
Japan Water Robot Cleaning Association

<sup>3</sup> 京都大学防災研究所  
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

や管路内の汚れが堆積したものと考えられるが、原水の性質や浄水処理方法、浄水場から配水池までの管路延長などによって配水池ごとに沈殿物の特性は異なる。日常時にこれらの沈殿物が配水池から配水されることはない。しかし、地震時のスロッシング（液面揺動）によって励起される水流によってこの沈殿物が舞い上がり、濁度が上昇すれば、下流の管路に配水できなくなることが懸念される。

配水池のような水槽は、地震時の揺れによってスロッシングが生じる。日本では、1964年の新潟地震を契機に、石油タンクのスロッシング被害が問題となり、盛んに研究が進められた。配水池や石油タンク、原子炉容器などの液体貯槽の振動計算では、G. W. Housnerの式が用いられる<sup>2,3)</sup>。Housnerの式は、本来、速度ポテンシャル理論で記述されるべき液体運動を簡略な質点とばねによる振動モデルによって表現し、スロッシングの地震入力を速度応答スペクトルを用いて算定する方法を与えたものであり、長年にわたって広く利用されている。水道施設には剛な水槽が多く、耐震設計指針のスロッシングの検討にはHousnerの式が用いられている。一方で、Housnerの式は剛体貯槽を仮定したもので、柔壁水槽のスロッシング応答には適用できないため、柔壁水槽と液体の連成振動問題を解いた速度ポテンシャルによる解析法の検討も進められてきた<sup>4,6)</sup>。

村田・宮島<sup>7)</sup>は過去の地震発生直後、配水システムに一時的な水圧減少が見られることから、受水槽でのスロッシングとの因果関係について受水槽の数や特性と地震動の周期特性から分析している。なお、短周期地震動によるバルジングによる柔壁配水池の構造安全性が実験や解析によって検討され<sup>8)</sup>、2022年の水道施設耐震工法指針の改訂版にはバルジングの照査が追加された。これらは、地震時の液面揺動や動水圧による水槽構造物の応答に着目したものである。

一方、スロッシング時の水槽内水流については定式化されるものの、沈殿物が舞い上がることについては着目されず深く議論されてこなかった。このため、配水池内の沈殿物がスロッシングで舞

い上がる現象を実験などで確認されることも、また、そのメカニズムも明らかになっていない。沈殿物が舞い上がる現象については、配水池の規模や水深、沈殿物の物性や厚さ、地震外力やその周期特性など、さまざまな要因が関連していると考えられ、実験や解析によって明らかにされるべきである。現状では、沈殿物の舞い上がりが懸念されてこなかったために、配水池で濁度を計測する設備もない。地震時に濁った水を配水池から配水しないためにも、現象解明によって水道事業者での予防対策につなげることが期待される。

本研究は、これら一連のメカニズム解明に向けた研究の端緒として、水槽底面に沈殿物が有る状態でスロッシングが発生した場合に、水槽内の水流によって沈殿物が舞い上がるかを確認するために剛体水槽の振動実験を行った。具体的には、スロッシング時の水流を可視化するために水槽にトレーサのみを入れた実験と、実沈殿物を入れて舞い上がりや濁度を計測する実験の2種類をそれぞれ同一加振条件で行った。実験の結果から、トレーサの挙動と濁度変化を比較して考察を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置

本研究では、神戸大学にある水平一軸の振動装置を用いた。実験に用いた鋼製水槽の内寸は幅1,600 mm、奥行き800 mm、高さ1,000 mmである（図1参照）。水槽天井は、アクリル板とコンパネ材の合板蓋で水密性を確保した。水槽の長手

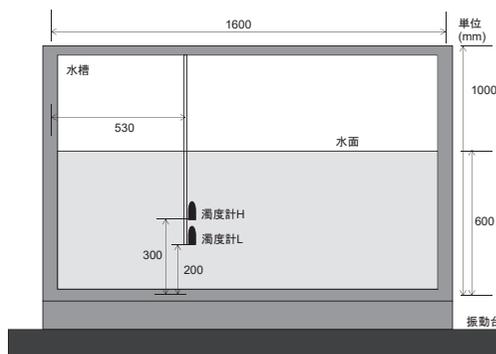


図1 実験水槽の概要



図2 振動台実験に用いた実験水槽

方向の一側面はアクリル板になっており、水槽内部を見ることができる。水面の変位や水槽内の沈殿物の挙動を画像解析で評価するために、アクリル板外壁面に100 mm 四方のメッシュを黒テープで貼り付けた(図2参照)。水槽側面は白色ポリエチレン板で、底面は白色のアルミ板で被覆した。上蓋の前方に15 mm 幅のスリットを開け、アクリル板外部からLED灯で水槽内を照射した。

実験では、デジタル一眼カメラやビデオカメラによってスロッシング時の水槽内の挙動を撮影した。水槽内の水深は600 mmとした。ポータブル濁度計( TOADKK 製 TB-31)は、奥手の剛側面から手前に200 mm、底面から200 mmと300 mmの位置にそれぞれ設置し、沈殿物の舞い上がりによる濁度変化を計測した。以下、底面から200 mmに設置した濁度計を濁度計L、底面から300 mmに設置した濁度計を濁度計Hと呼ぶ。濁度計の位置は、スロッシング時に濁度計が水面より上に出ないこと、また実配水池の排出管の位置を考慮して設定した。濁度計のサンプリングレートは1 sであった。

本実験装置は、実際の配水池の小型模型を想定したものである。水道事業者の配水池の容量は、水道施設の配置や配水区域の特性(給水人口や地形など)によっては異なる。中山間地域になるほど、加圧配水するために配水池の数は増え、小型の容量が多くなる。とくに容量50 m<sup>3</sup>相当の小型配水池の場合、鉄筋コンクリート造で矩形配水池が多くなる。一方、市街地で給水人口が多い大規模配水池の場合、中壁や中柱が配置されるため水

槽内の境界条件が複雑になる。本研究では、前者の鉄筋コンクリート造の単純な矩形配水池を想定した。

配水池の水位は、高水位と低水位の間で日変動する。また、配水池の低い位置に排出管があり、それに配水管が接続されている。低水位よりも水位が低くなると、配水池底部の水を乱して濁水が生じるため、低水位よりも高い位置で水位を維持している。配水池の高水位と低水位の水位差が有効水深であり、それに床面積を乗じたものが配水池容量となる。有効水深は2 mのものも多く、矩形水槽の1辺の長さは3~7 m程度になる。すなわち、本実験の規模は実配水池の1/2から1/4スケール水槽であるといえる。

## 2.2 入力波

矩形水槽のスロッシングの固有周期は、水槽底面幅と水深を用いて算出することができる<sup>9)</sup>。

$$T = 2\pi \left( \frac{(2n-1)\pi g}{L} \tanh\left(\frac{(2n-1)\pi H}{L}\right) \right)^{-0.5} \quad (1)$$

ここに、 $T$ :  $n$ 次スロッシング固有周期(s)、 $H$ : 水深(m)、 $L$ : 加振方向の水槽底面の長さ(m)、 $g$ : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)である。

本水槽で水深 $H$ を600 mmとすると、 $H/L$ は0.375、1次固有周期は1.58 sとなる。前述の小型配水池であれば、水槽の一辺の長さから3~7 mあれば固有周期は1~2 sの範囲に収まる。

本研究では、スロッシングを励起させるために、1次固有周期である周期1.58 sの正弦波で加速度振幅4ケース(5 gal, 10 gal, 15 gal, 30 gal)と入力波数3ケース(5波, 10波, 15波)を組み合わせた12ケースで実施した。

## 2.3 トレーサおよび沈殿物

本研究では、フロックが含まれる実沈殿物の舞い上がり実験とスロッシング中の水流を可視化するためにトレーサのみ水槽に入れた実験の2種類の実験を行った。実沈殿物以外にトレーサを用いたのは、沈殿物が舞い上がれば濁度が上昇し、水槽内の水流を把握することができないと考えたた



図3 実験に用いたトレーサ

めである。

トレーサには、市販の黒色消臭ビーズを用いた(図3参照)。ビーズは、1時間ほど浸水すると直径13 mmの大きさに膨張し、それ以上浸水しても膨張せずに、一定の大きさを保った。含水することで水の比重に近くなり、加振開始時には底部に堆積しているものの、攪拌すればすぐに舞い上がることを予備実験で確認した。ビーズ一粒の密度は $1.01 \text{ g/cm}^3$  (88粒の平均値)であった。なお、メスシリンダーでビーズを落下させて沈降速度を計測したところ、速度は $24.4 \text{ mm/s}$  ( $n=10$ , 標準偏差 $\sigma=1.43$ )であった。トレーサの実験に投入した黒色ビーズは約1,400粒であった。

配水池底部の沈殿物を攪拌させずに回収することが難しいため、本研究では物性上同じものである浄水場沈殿池のスラッジ(水処理過程で生じる沈殿物)を用いた(図4参照)。図5にこのスラッジの粒径加積曲線を示す。本実験で用いたスラッジは、実験の効率性の観点から、砂成分が多く、予備実験で早くに沈降できると確認したものを採



図4 浄水場沈殿池のスラッジ

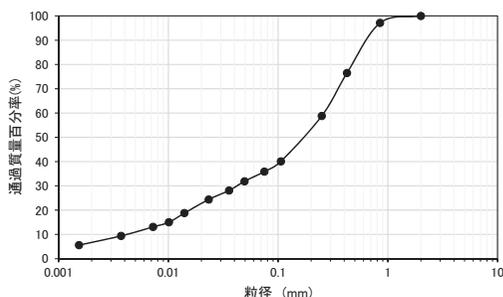


図5 浄水場沈殿物スラッジの粒径加積曲線

用している。粒径は粘土から中砂まで広く分布している。適度に凝集剤が含まれているため、500 mmのメスシリンダーにスラッジを入れて緩く攪拌して放置すると、30分程度でスラッジは完全沈降し、上の水域では濁度 $0 \text{ mg/l}$ になることを確認している。実験では水槽底部に厚さ20 mmに相当するスラッジを投入した。沈殿物を入れた実験では同一スラッジを用い、加振・沈降を繰り返し実施した。ただし、加振全12ケースの内、実験工程の制約から30 gal-5波の加振ケースは実施できなかった。

### 3. スロッシングと水位

まず、本実験で励起されるスロッシングの特徴を整理しておく。加振実験では、アクリル板側面をビデオカメラで撮影し、水槽の右端部の水面の画像解析により元の静水面からの水位(上向きを正とした。)を測定した。なお、アクリル板側面の縁には鋼材フレームがあるため、測定は右側壁から70 mm中央寄りの位置で評価したものである。カメラのフレームレートは30 fpsで、画像解析も同じフレームレートで行った。また、振動台の水平変位は、地面に固定した棒も映し、棒と水槽との水平方向の相対変位から変位を算出し、時刻を同期させた。本研究ではカメラは水槽中央の高さに固定して設置しているため、トレーサの浮上りや軌跡確認において水槽底面近くでは奥行方向に誤差が生じるが、後述の濁度との比較において濁度計位置における誤差の影響が小さくなるようにした。上述の画像分析方法は、トレーサや沈殿物の実験でも共通している。

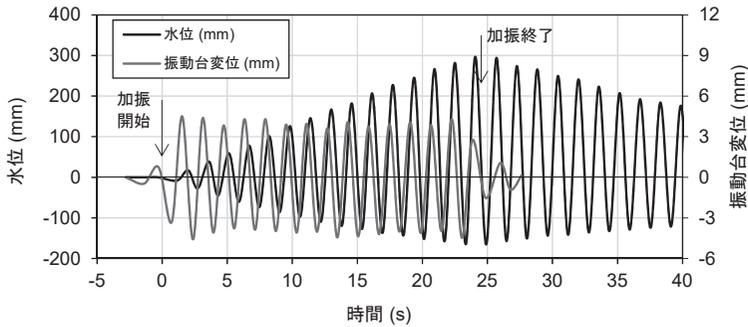


図6 もとの静水面からの水位と振動台変位との関係（正弦波10 gal 15波のケース）

例として、図6は正弦波10 gal-15波加振時の水槽右端部の水位と振動台変位を示している。実験では正弦波の加振開始直後から、水面は1次の振動モードで揺動し、加振波数に応じて正側の水位は比例的に増加した。一方、負側の水位も同様に波数に応じて増加するが、正側の水位よりも小さくなった。これらの挙動は、遠田ら<sup>9)</sup>の矩形水槽に1次の固有周期で加振させたスロッシング実験からも同様な結果が示されている。

水位は振動台の水平変位と同波長で揺動し、さらに水平変位に対して1/4波長の位相おくれを生じながら水位が上昇した。スロッシングの1次固有周期と同周期で正弦波入力する場合、入力変位と応答変位には位相おくれが生じ、減衰の大小にかかわらず位相おくれが $\pi/2$ となることも整合している<sup>10)</sup>。加振終了後の自由振動領域における

各サイクルの最大水位から算定した揺動の減衰定数は0.6%であった。

後述のトレーサや沈殿物を水槽に入れた実験でも、同一入力に対して同じ水位応答をしていることを確認しており、同一加振ケースにおいて応答結果には差異がないといえる。

図7は、加速度5, 10, 15, 30 galの正弦波加振時の右側壁での各サイクルの最大水位を示している。入力波数が増加するにつれて水位は比例的に上昇し、各実験ケースの最大水位は最終波数時となった。この内、表1に示す加速度5 galと10 galの全波数ケースと15 galの5波の加振ケースは、水位が天井に到達せず自由水面が保持されていた加振ケースであるが、それ以外は波が水槽天井にあたり砕波した加振ケースであった。本研究ではこれらのケースでも水槽天井に波が到達し

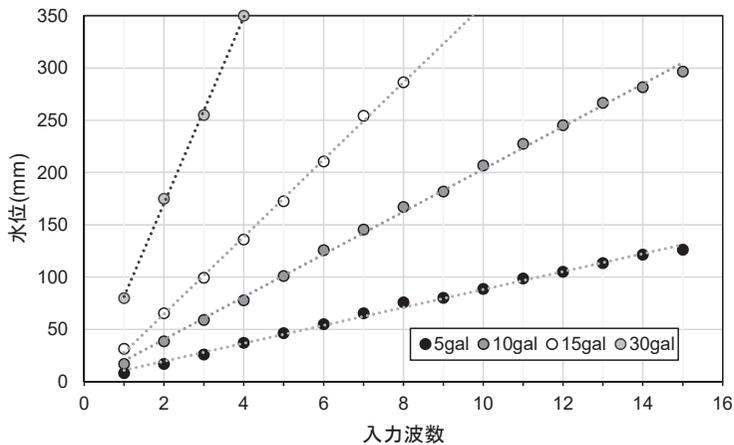


図7 正弦波加振による水槽右端の水位と入力波数との関係

表1 実験ケースごとの水位の天井到達の有無

		正弦波振幅			
		5 gal	10 gal	15 gal	30 gal
入力波	5波	○	○	○	×
	10波	○	○	○	×
	15波	○	○	×	×

注) ○：天井に到達しなかった, ×：天井に到達

た後も所定の波数まで加振した。波が水槽天井に当たり砕波することにより、水位やエネルギーの関係は非連続なものになり、沈殿物が舞い上がることも影響すると考えられる。しかし、本研究ではこれらの影響については今後の課題として、設定波数加振による沈殿物の挙動について議論をする。

## 4. 実験結果

### 4.1 トレーサによる水流

トレーサを用いた水槽の加振実験では、いくつ

かの実験ケースでトレーサが振動しながら浮上するケースがあった。

以下、トレーサが浮上した正弦波30 gal-15波ケースを取り上げて、流速やトレーサの挙動について詳細に検討した。図8は、加振開始からの水槽内挙動のスナップ画像で、アクリル板のある可視範囲を台形補正したものである。加振開始すぐに水面は1次振動モードで揺動し、5波目で右端の水位は天井に達し、その後の天井に当たりながらスロッシングが継続した。トレーサは、10波目までは水槽底面でスロッシングと同じ周期で水平方向に移動し、10波目で左右の側壁からそれぞれ200～300 mm 内側の位置で二つのトレーサの群れが上昇し始めた。その後、このトレーサ群が200～300 mm の範囲を水平振動しながら徐々に上昇した。これらトレーサの上昇は加振終了時には600 mm 近く上昇し、加振終了後さらに顕著になった。その後、柱状のトレーサ群は加振終了後

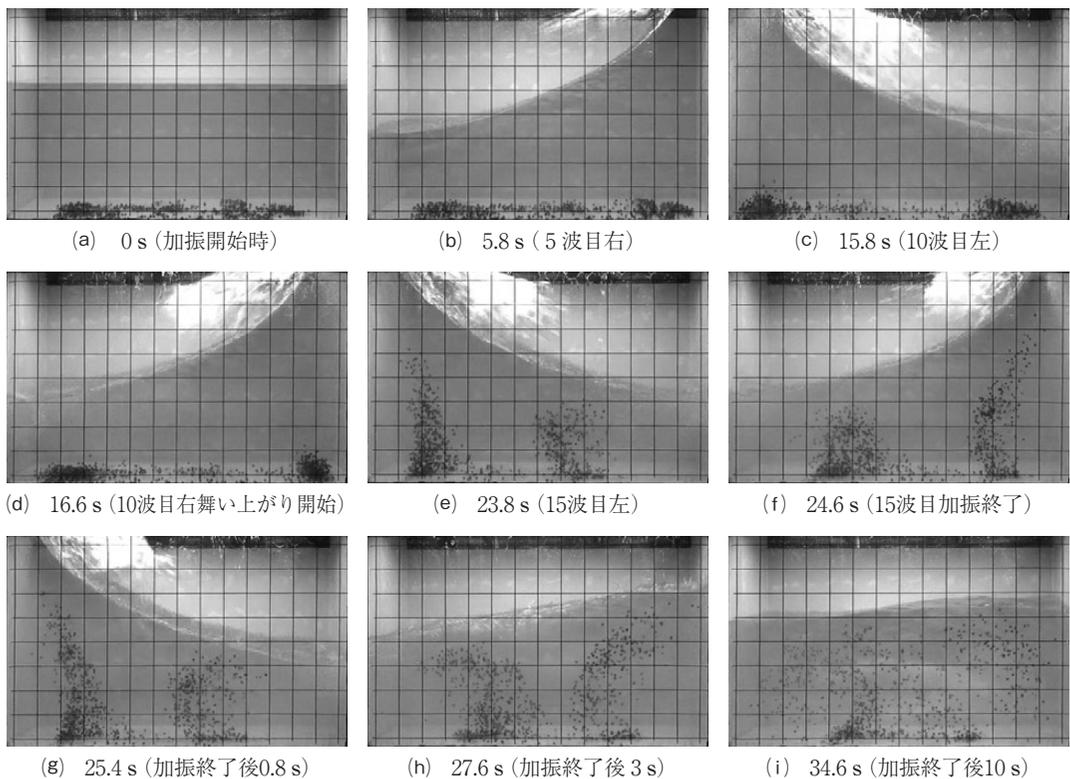


図8 正弦波30 gal-15波加振時のトレーサのスナップ

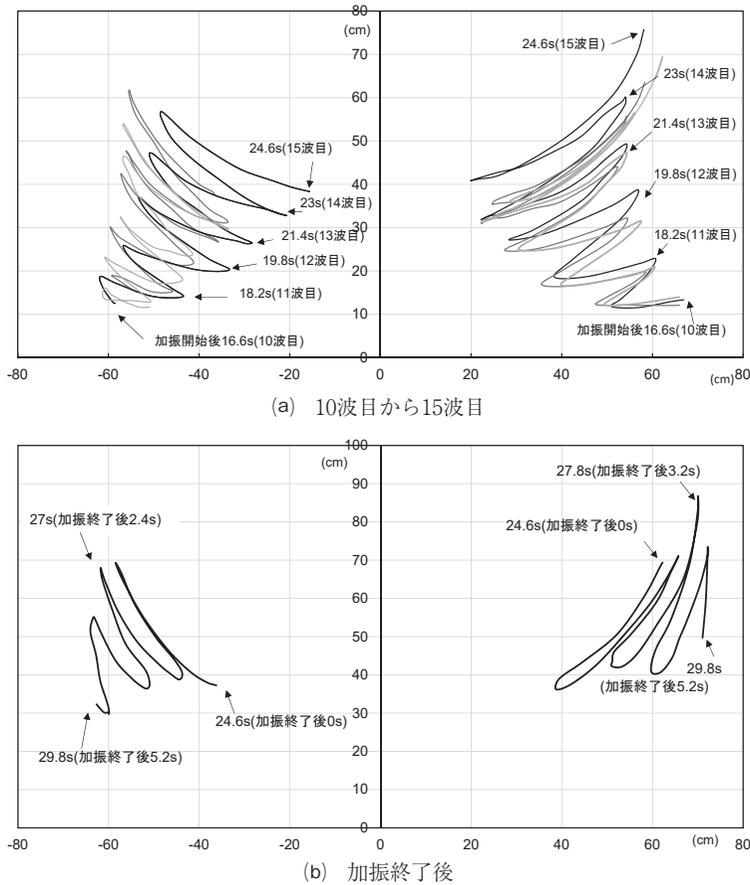


図9 正弦波30 gal-15波ケースの粒子軌跡

20 sほどで中央に寄り、水面近くに達したトレーサは、液面揺動のモードに近い動きをしながら徐々に落下していくことが確認できた。

図9は、図8に示した正弦波30 gal-15波のケースでトレーサが舞い上がり始めた10波目から15波目までと、加振終了後について、それぞれ水槽内トレーサの軌跡を可視化したものである。水槽の左右半面におけるトレーサの座標を、加振中は8/30 sごと、加振終了後は3/30 sごとに画像から読み取り、これらの座標を基にした軌跡を示している。なお、加振中の図9(a)については、最大上昇量の上位三つのトレーサを対象にして、その軌跡について線の色を変えて表示させた。スナップ画像では柱状のトレーサ群であるが、それら一粒は水面形状と同じような1次モードでの上昇と水

平移動を繰り返しながら上昇することがわかった。また、1サイクル(1.58 s)の水平移動量は柱状の水平移動と同じく200~300 mmであり、水面近くになると水平移動量は400 mmに増加した。加振終了後は、上下移動が卓越していた。

振幅4ケース、波数3ケースの合計12ケースの実験で確認できたトレーサの最大上昇量を表2に

表2 実験ケースにおけるトレーサ上昇量 (mm)

		正弦波振幅			
		5 gal	10 gal	15 gal	30 gal
入力波	5波	-	-	-	212
	10波	-	-	182	618
	15波	-	163	476	768

注) 上昇量：トレーサ最大上昇時の上位15個の平均  
 -：底部フレーム(70 mm)よりも上昇しなかった

示す。最大上昇量は、トレーサの最大上昇時の上位15個の底面からの上昇量の平均値より算出した。表中で「-」を示す実験ケースでは、水槽底面から70 mmの高さまで水槽のフレームがあるため、それよりも低い位置でのトレーサの上昇は確認できていない。これらの加振波の特徴として入力加速度が小さく、波数も少なかった。一方、前述の表1に示したように加振中に水面が天井に達した加振ケースではトレーサが水面近くまで上昇することを確認できたが、それらの多くは加振終了後に上昇したものであった。トレーサが上昇したケースでは加振中の底面部でのトレーサの水平振動、トレーサが上昇し始める位置、柱状のトレーサ上昇群など、全般的なトレーサの挙動については前述のケースと共通していた。

#### 4.2 沈殿物による濁度計位置での濁度変化

沈殿池スラッジを用いてトレーサと同じ加振条件で実験を行った。本実験では、同一スラッジを繰り返し加振・沈降させながら計測しているため、加振による攪拌でフロックが徐々に細分化される。沈降しにくい微粒子が浮遊するため、加振終了後に一時間経過しても濁度は0 mg/lまで戻らない。そのため、濁度5.0 mg/l以下になった時点で次の加振を実施した。

図10は加速度5, 10, 15, 30 galで同一加振波数のケースごとに、濁度計で観測された濁度の推移を示している。また、表3, 表4は、各正弦波加振ケースにおける最大濁度の値を整理したものである。前述したように30 galの5波と30 galの10波の濁度計Hの記録は欠測などのため結果がない。横軸の時間0 sは加振開始時である。濁度計Lの方が濁度計Hよりも濁度は大きくなり、最大濁度時刻もやや早い。濁度の推移は二つの濁度計とも類似していた。最大濁度は、同一加振波数のケースにおいて加速度30 galが最大で、次いで15 gal, 10 gal, 5 galとなった。加速度が大きくなるにつれて、沈殿物が舞い上がることで濁度が上昇したが、15 galと30 galの入力によって濁度の最大値に大きな差はみられなかった。一方、5 galのように加速度が小さい場合に

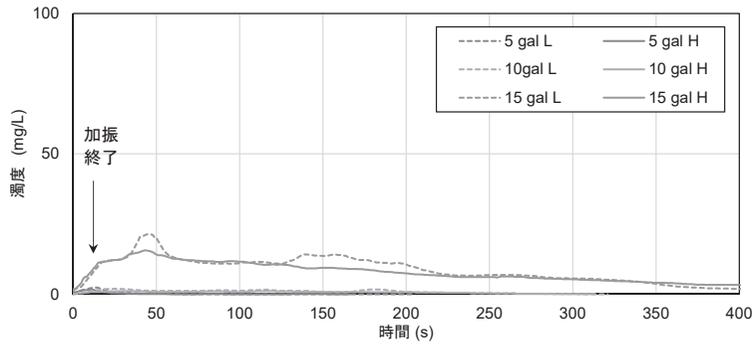
は、沈殿物は舞い上がらず、濁度も上昇しないこともわかった。また、濁度上昇の特徴として、濁度は時間0 sの加振開始から加振終了まで緩やかに上昇し、加振終了後に急激に上昇してピークを迎え、その後、緩やかに減少した。最大濁度時を迎えるタイミングは最大水位となる加振終了時ではなく、加振終了後であった。

#### 5. 考察

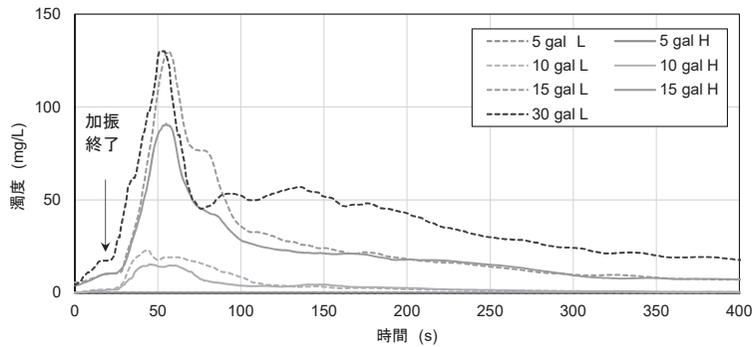
本研究ではトレーサと沈殿物を用いた実験をそれぞれ実施した。以降では、加振からの同時刻における水位とトレーサの動き、濁度の比較から沈殿物の舞い上がりについて考察を行う。

図11は正弦波15 gal-15波のケースのトレーサの実験と沈殿物の実験を加振開始から同時刻における水槽内の様子を比較しながら示している。水面形状はほぼ同じで加振実験の再現性を確認することができる。加振開始直後は、トレーサの実験と同様で、底面に堆積した沈殿物が水平振動し、沈殿物の界面に小さな渦ができた。これは、界面近くにあるフロックの粒径が不均質であるために、小さな粒が飛ばされやすく、大きな粒を巻き込むように移動する砂漠の風紋と同様なメカニズムで渦ができると考えられる。

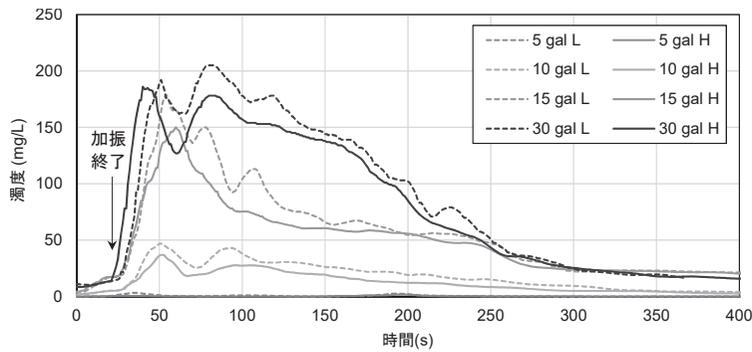
図11のケースでは加振終了まではとくに沈殿物の上昇は確認できなかった。加振終了後7 s(図11(c))で、側壁から200~300 mm内側で沈殿物が上昇し始め、水槽底部の左右に二つの濁った三角形形状が確認できる。その後、時間の経過とともに濁りの塊は水槽中央に寄って来るとともに、水槽内の濁度はさらに上昇した。濁度についても、加振中に濁度は上昇し始めるが、ピークは加振終了後30 s(図10(c), 図11(e))で水槽の両側の濁りが中央に寄ってくるタイミングと整合する。つまり、加振中とその後の時間によって、水槽内の水流は変化し、水位のピーク時である加振終了時から時間差をもって沈殿物が舞い上がるということがわかった。トレーサと沈殿物の画像を加振開始から同時刻で比較すると、トレーサも沈殿物内のフロックも軽いため早く上昇するが、濁度の値を左右しているのは沈殿物内の粒径の大きい砂の上昇であると



(a) 加振波数5波



(b) 加振波数10波



(c) 加振波数15波

図10 正弦波加振波数ごとの濁度の推移

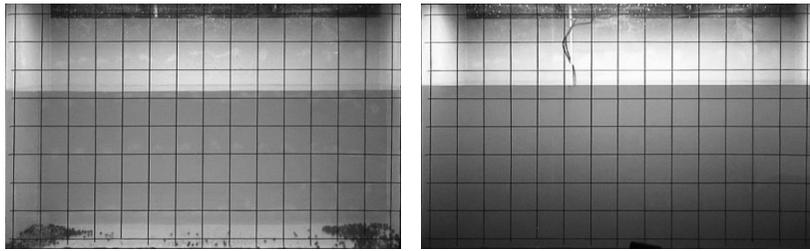
表3 濁度計Lによる最大濁度 (mg/L)

		正弦波振幅			
		5 gal	10 gal	15 gal	30 gal
入力波	5波	2.4	2.0	21.4	/
	10波	0.1	23.1	130.0	130.0
	15波	3.2	46.8	179.0	205.0

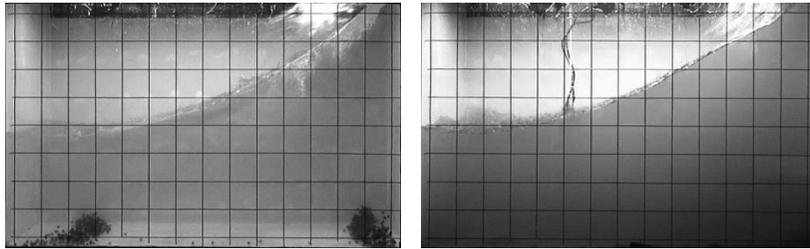
表4 濁度計Hによる最大濁度 (mg/L)

		正弦波振幅			
		5 gal	10 gal	15 gal	30 gal
入力波	5波	1.6	1.1	15.6	/
	10波	0.1	15.4	91.0	*
	15波	1.7	37.0	150.0	186.0

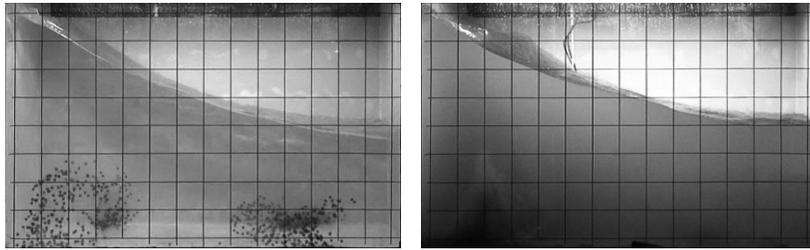
注) \* : 計測不良



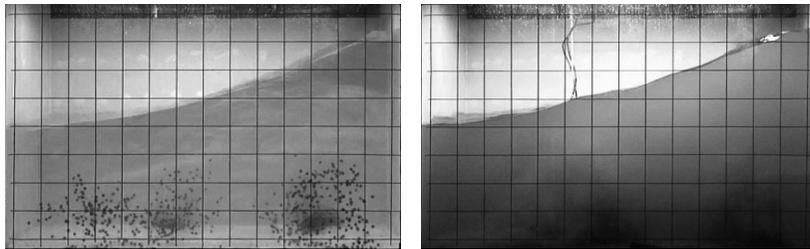
(a) 0 s (左：トレーサ, 右：沈殿物)



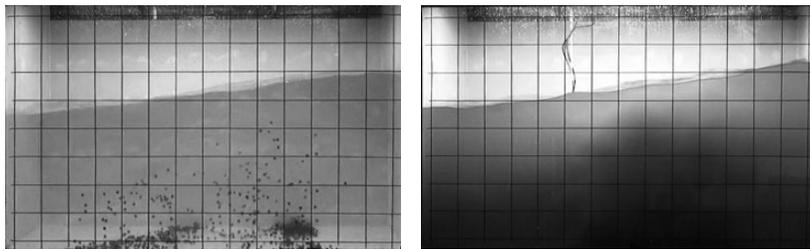
(b) 24.6 s 15波目加振終了 (左：トレーサ, 右：沈殿物)



(c) 31.6 s 加振終了後7 s (左：トレーサ, 右：沈殿物)



(d) 37.1 s 加振終了後12.5 s (左：トレーサ, 右：沈殿物)



(e) 55.0 s 加振終了後30.4 s (左：トレーサ, 右：沈殿物)

図11 正弦波15 gal-15波のトレーサと沈殿物の舞い上がり比較

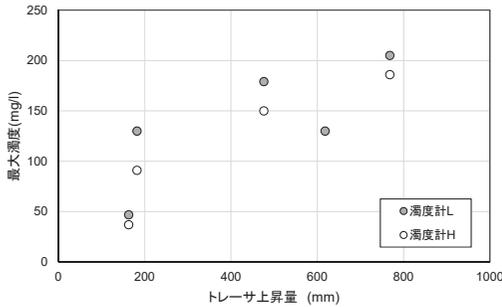


図12 同一加振ケースによるトレーサ上昇量と最大濁度との関係

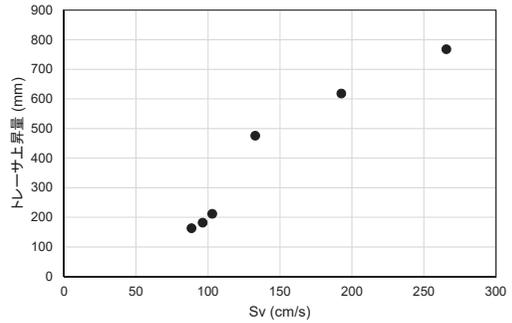


図13 Sv (h=0.6%) とトレーサ上昇量との関係

考えられる。

図12は同一加振ケースでの表2に示したトレーサ上昇量と表3、表4に示した最大濁度との関係を示している。トレーサ上昇量が70 mm以下のケースは計測できなかったため省いている。トレーサ上昇量と最大濁度とは正の相関があるといえる。一方、水槽底面に近い濁度計Lの方が濁度計Hよりも最大濁度は大きくなる傾向はあるが、両方の濁度推移に大きな差異はなかった。

また、表2で示したように、底部の鋼製フレームよりトレーサの上昇が確認できなかったケースでは、表3の濁度計Lの最大濁度は23 mg/l以下に留まっていた。一方、濁度が30 mg/lを超える実験ケースでは、濁度5 mg/l以下になるまでには30分から1時間程度を要した。

本実験では、スロッシングによって水槽底部にあるトレーサや沈殿物が上昇することを確認した。しかし、これらの上昇はある程度の加振サイクル後に生じた。表2に示したようにトレーサが200~400 mm上昇した15 galの10波、15波と30 galの5波の3ケースでは、いずれも加振終了後にトレーサが上昇している。一方、600 mm近くトレーサが上昇した加速度30 galの10波、15波のケースでは、10波目近くで舞い上がり開始した。加振中にトレーサや沈殿物が顕著に舞い上がらない理由について、図9の加振中と加振終了後のトレーサ軌跡を参考にすると、加振中は1サイクルの鉛直移動量よりも水平移動量の方が卓越しており、加振終了後はその逆となる。加振が終了し、鉛直移動量が卓越すると沈殿物は舞い上がりやす

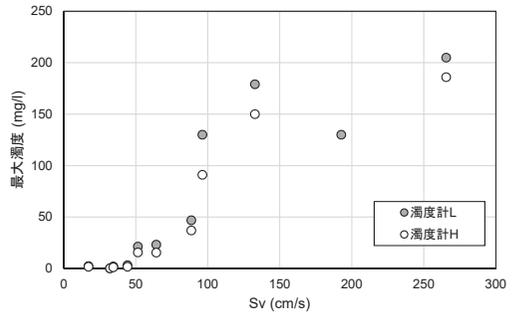


図14 Sv (h=0.6%) と最大濁度との関係

くなると考えられる。

実験ケースで水位の上昇量が最大となるのは入力波数の最終波時直後となる。スロッシング時の矩形水槽の水位は、水槽の速度応答スペクトルの関数として説明される。速度応答スペクトルは、ある減衰をもつ振動系の固有周期ごとに速度応答の最大値  $S_v$  (以下、 $S_v$  を用いる) を示したものである。そこで、実験に用いた水槽のスロッシングの一次固有周期1.58 s、減衰定数  $h=0.6\%$  で各加速度・波数の正弦波入力時の  $S_v$  を算出し、各実験ケースにおける  $S_v$  とトレーサ上昇量の関係、 $S_v$  と最大濁度との関係をそれぞれ図13、図14に示した。最大水位を指標にして評価をしないのは、表1で示したように多くの実験ケースで水面が天井に当たり、自由水面を適切に評価できないためである。

本実験ケースの結果から  $S_v$  とトレーサ上昇量には比例関係があるといえる。また、最大濁度においても、ばらつきがあるものの  $S_v$  とは正の相関があるといえる。これらのばらつきは、実験経

過とともに沈殿物の性状が変化しているものと考えられ、今後は実験ケース間で均質な沈殿物を使用するための工夫が必要である。また、これらの図から  $S_v$  が  $70 \text{ cm/s}$  以下であれば、濁度が上昇しても  $23 \text{ mg/l}$  程度であり、15分程度で濁度は元の状態に低下することも確認できた。これは、入力レベルに応じた最大濁度やその影響時間が推定可能であるといえる。ただし、本研究で得られた結果は、本実験装置で設定した条件の水槽と使用したスラッジに限ったことである。今後、他の条件でも実験で確認する必要がある。その一方で、実験で再現できることには限界があるため、より詳細な現象解明や様々な条件での挙動の予測には、実験を十分な精度で再現できることを確認した数値解析手法の活用が有効と思われる。

実験に用いた濁度計では、加振中に視覚的に確認できるフロックの舞い上がりよりも、沈殿物内の砂の舞い上がりに対して強く反応した。実務面で地震時のスロッシングによる水質管理を検討する上では、原水や浄水処理方法の違いによる配水池沈殿物の特性を明らかにすること、比重の異なる液相の舞い上がりや沈降についても明らかにすることなど、今後の課題は多いといえる。

## 6. 結論

本研究は、配水池底面に沈殿物が有る状態でスロッシングが発生した場合に、配水池内の水流によって沈殿物が舞い上がるかを確認することを目的に、沈殿物が入った小型水槽を用いて振動実験を行った。本研究の結論は、以下の通りにまとめられる。

- ・水槽をスロッシングの1次固有周期で加振することで、スロッシングが励起され、水面がある水位を超えると底部にあるトレーサや沈殿物が舞い上がることを実験で確認した。
- ・スロッシングが生じて、加振の振幅や波数によって沈殿物が上昇しないケースもあった。
- ・沈殿物が舞い上がり、濁度が上昇したケースでは、加振中の底面底部での水平振動、トレーサが上昇し始める位置、柱状のトレーサの上昇群、最終的に水槽中央への集合する傾向など、全般

的に沈殿物の挙動は類似していた。

- ・沈殿物が舞い上がる現象について、先に比重の小さいフロックから舞い上がり視覚的に確認することができるが、濁度計による最大濁度は比重の大きい砂が舞い上がるタイミングに左右されるため、加振時と最大濁度時には時間差があることがわかった。
  - ・スロッシングの最大速度応答とトレーサ上昇量、最大速度応答と最大濁度には正の相関関係があることがわかった。沈殿物の性状が明らかになれば、最大濁度や配水池からの配水再開可能時間を設定できるといえる。
- また、本研究を通して、以下に挙げる事項が今後の課題であることも確認した。
- ・配水池の沈殿物は原水の特徴や浄水処理方法によって千差万別であり、本実験に用いた沈殿物よりも沈降速度が遅いものもある。沈殿物の性状によって濁度のピークや濁りの継続時間が変わると考えられ、配水池沈殿物の特性について整理する必要がある。
  - ・模型スケールや水深などの実験条件の違いによって、沈殿物の舞い上がり現象にどのような影響があるかを明らかにする必要がある。
  - ・実験で現象を再現できることには限界がある。より詳細な現象解明や様々な条件での挙動の予測には、実験を十分な精度で再現できることを確認した数値解析手法の活用が有効と考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本水中ロボット調査清掃協会：水中ロボット清掃技術指針2018, p. 8, 2018.
- 2) Housner, G. W.: Earthquake Pressures on Fluid Containers, California Institute of Technology, 1954.
- 3) Housner, G. W.: The dynamic behavior of water tanks, Bulletin of the Seismology Society of America, Vol. 53, No. 2, pp. 381-387, 1963.
- 4) 坂井藤一：液体貯槽の耐震設計研究に関する現状と課題, 土木学会論文集, 第362号 /I-4, pp. 1-11, 1985.
- 5) 箕輪親宏：長方形水槽の振動解析, 日本建築学会論文報告集, 第285号, pp. 23-32, 1979.
- 6) 河野和間・山本鎮男・河田毅治・清水信行・山

- 田信自：円筒貯槽の地震入力，圧力技術，18巻，4号，pp. 170-176, 1980.
- 7) 村田幸一・宮島昌克：受水槽のスロッシングが地震直後に発生する水圧・水量の異常挙動に及ぼす影響，日本地震工学会論文集，7巻，1号，pp. 27-42, 2007.
- 8) 井上涼介・坂井藤一・大峯秀一：矩形水槽におけるバルジング地震応答挙動の有限要素法解析，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，75巻，4号，pp. I\_36-I\_50, 2019.
- 9) 遠田豊・井田剛史・平野廣和・佐藤尚次：矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象，土木学会論文集 A2 (応用力学)，68巻，2号，pp. I\_637-I\_644, 2012.
- 10) 小坪清真：入門建設振動学，森北出版，1996.
- (投稿受理：2023年4月7日  
訂正稿受理：2023年6月30日)

## 要 旨

水道システムの一構成要素である配水池の底部には沈殿物が堆積している。本研究は，配水池底面に沈殿物が有る状態で地震時にスロッシングが発生した場合に，配水池内の水流によって沈殿物が舞い上がるかを確認するため，小型の剛体水槽を用いて振動実験を行った。スロッシング時の水流を可視化するために水槽にトレーサのみを入れた実験と，沈殿物を入れて舞い上がりや濁度を計測する実験の2種類を同一加振条件で振動させた。水槽の液面揺動の1次周期をもつ正弦波でスロッシングを励起させたところ，ある水位を超えると水槽底部で側壁に近い位置で沈殿物が舞い上がり始め，濁度も上昇することが確認された。また，沈殿物の舞い上がりによる濁度上昇は，加振終了後に時間差をもって最大になることが実験でわかった。