

# 微動計測装置を用いての 貯水槽のバルジング固有振動数の推定に関する研究 A study on estimation the natural frequency of the bulging in water tanks using the micro-tremor measurement device

都市人間環境学専攻 22N3100025J 齊藤 崇  
Shu SAITO

**Key Words :** water tank, bulging, micro-tremor measurement, natural frequency

## 1. はじめに

地震時における貯水槽の被害の一つに、バルジング<sup>1)</sup>が挙げられる。バルジングとは、短周期からやや短周期の地震動による貯水槽の壁面構造体と内容液との連成振動である。この現象により壁面下部や隅角部に損傷被害が生じ、場合によっては破壊に至る。しかし、バルジングに関する設計基準は、水道施設耐震工法指針・解説2022年版（日本水道協会）<sup>2)</sup>で新たに規定が追加されたが、ここでは明確な基準は存在していない。

このような状況で、筆者らは高精度のサーボ型加速度計を内蔵した微動計測装置（以下、微動計）を貯水槽天板に設置する手法を提案し、簡易的にバルジング固有振動数を求められることを確認している<sup>3)4)</sup>。また、材質や規模の異なる貯水槽を対象とし、同様の手法でバルジング固有振動数を推定してきた<sup>5)6)7)</sup>。

以上を踏まえ本研究では、貯水槽天板に設置した微動計と壁面に設置したひずみゲージ型加速度計（以下、加速度計）を用いて同時計測を行い、これらの計測結果と固有振動数解析を比較する。また、微動計単体での計測手法に向け複数の貯水槽を用いて、微動計の設置位置を変更させることで、バルジング固有振動数を推定する上での有用性と汎用性を示すものである。

## 2. 振動計測

### (1) 対象貯水槽

本研究において使用する貯水槽は、写真-1に示すステンレス製一体型水槽である。この水槽は板厚2.0mmであり、壁面はコルゲート構造を有している。材質はSUS444（高純度フェライト系ステンレス鋼）を使用しており、水深1740mmまで注入して計測を行う。ステンレス製一体型水槽の諸元を表-1に示す。

### (2) 計測内容

微動計測には、写真-2に示す白山工業（株）製DATAMARK JU410の微動計を用いる。これを図-1(a)に示す貯水槽天板の中央付近（■印に示す位置）に設置し、貯水槽の長辺方向をx軸、短辺方向をy軸、鉛直方向をz軸としてx, y, z方向の応答加速度を計測する。なお、



写真-1 ステンレス製一体型水槽

表-1 貯水槽諸元

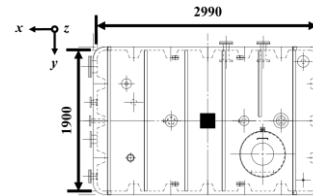
材質	SUS444
幅(mm)	1900
長さ(mm)	2990
高さ(mm)	2000
有効容量(m <sup>3</sup> )	9.5
水位(mm)	1740
屋根板厚(mm)	2.0
側板厚(mm)	2.0
底板厚(mm)	2.0



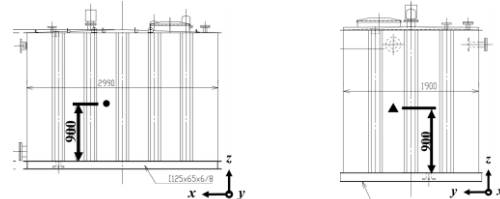
写真-2 微動計測装置(DATAMARK JU410)

表-2 計測条件

Case1	常時微動計測
Case2	長辺壁面を軽く叩く
Case3	短辺壁面を軽く叩く



(a) 天板（平面図）（■：微動計）



(b)長辺壁面（正面図）(c)短辺壁面（右側面図）  
（●：加速度計(y)）（▲：加速度計(x)）

図-1 微動計及び加速度計設置位置

バルジングは壁面を弾性体とし、変形しながら振動を発生する現象であるので、z軸方向の解析まで行うが、本研究では検討の対象外としている。ここで微動計のサンプリング周波数は、1000Hzで行う。

また、微動計の妥当性を確認するため、加速度計を壁面に取り付けて同時計測を行う。加速度計は、（株）共和電業製の小型低容量加速度センサ変換器AS-5GBを

用いる。図-2(b), (c)に示すように、それぞれの壁面の高さ900mmの位置に加速度計を設置し、長辺壁面の●印はy軸方向の応答加速度、短辺壁面の▲印はx軸方向の応答加速度を計測する。ここで加速度計のサンプリング周波数は、1000Hzで行う。

本計測では、微動計を貯水槽天板の中央付近に置いた状態で表-2に示す3種類の計測を行う。

### (3) 計測結果

#### a) 微動計から算出されたパワースペクトル

応答加速度を高速フーリエ変換することでパワースペクトルを算出し、壁面の固有振動数を推定する。

図-2, 3, 4に微動計から算出された各計測でのx, y方向の応答加速度をスペクトル解析した結果を示す。ここで、20Hz以下のローパスフィルタをかけ、窓関数はハミングを使用する。

x方向では、図-2(a)から5.98Hz, 11.11Hz, 14.56Hz, 17.88Hzで、図-3(a)から14.53Hz, 17.40Hz, 18.98Hzで、図-4(a)から14.56Hz, 18.98Hzで卓越している。いずれの計測でも14.5Hz付近で卓越しており、図-3(a), 4(a)から長辺壁面、短辺壁面それぞれを軽く叩くと、19.0Hz付近にも卓越振動数が存在している。よってx方向では、14.5Hz付近、19.0Hz付近が壁面の固有振動数となる可能性がある。

y方向では、図-2(b)から8.42Hz, 14.56Hzで、図-3(b)から8.36Hz, 11.72Hz, 14.53Hz, 18.98Hzで、図-4(b)から14.56Hz, 18.98Hzで卓越している。x方向と同様、いずれの計測でも14.5Hz付近で卓越しており、図-3(b), 4(b)から長辺壁面、短辺壁面それぞれを軽く叩くと、19.0Hz付近にも卓越振動数が存在している。よってy方向でも、14.5Hz付近、19.0Hz付近が壁面の固有振動数となる可能性がある。

ところで、微動計を貯水槽天板の中央付近に設置したことで、計測結果に天板の振動数を含んでいる可能性がある。そこで、天板の固有振動数を把握しやすくするため、計測者が天板を歩行した応答加速度をスペクトル解析した結果を図-5に示す。一般に人間の歩行時の振動数は1~2Hzであることから2~20Hzのバンドパスフィルタをしている。図-5からx方向では5.98Hz, y方向では8.39Hzと図-2とほぼ同じような結果を得られたことから、これらの値は壁面の固有振動数ではなく、天板の固有振動数の可能性がある。このように微動計測で天板の固有振動数が卓越して算出された原因として、貯水槽内部が内容液で満たされていないことで、天板が壁面部分と比べて揺れやすいことが挙げられる。

#### b) 加速度計から算出されたパワースペクトル

図-6, 7, 8に加速度計から算出された各計測での応答加速度をスペクトル解析した結果を示す。ここで、短

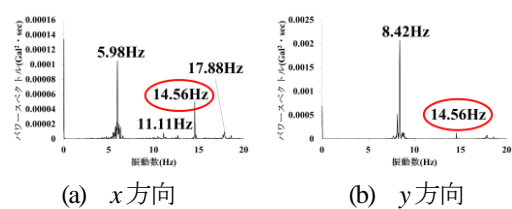


図-2 Case1 パワースペクトル (微動計測)

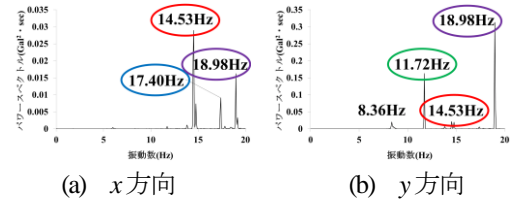


図-3 Case2 パワースペクトル (長辺壁面を叩く)

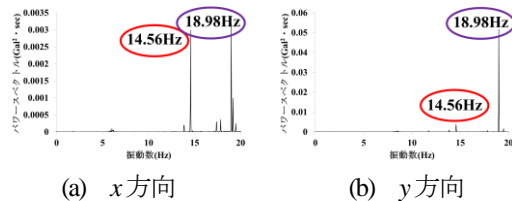


図-4 Case3 パワースペクトル (短辺壁面を叩く)

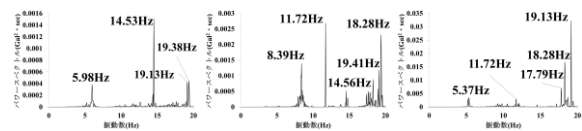


図-5 貯水槽天板歩行時のパワースペクトル

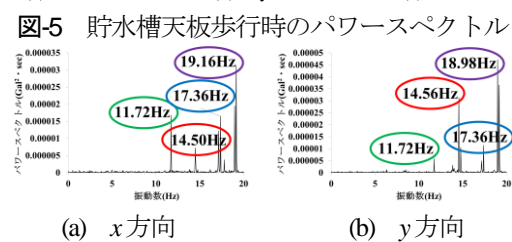


図-6 Case1 パワースペクトル (微動計測)

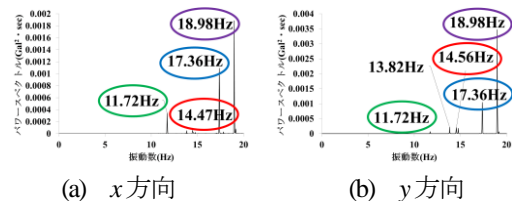


図-7 Case2 パワースペクトル (長辺壁面を叩く)

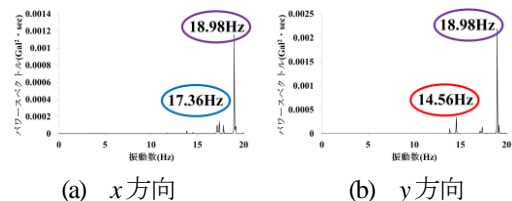


図-8 Case3 パワースペクトル (短辺壁面を叩く)

辺壁面のパワースペクトルはx方向の振動数を、長辺壁面のパワースペクトルはy方向の振動数を示す。なお微動計と同様、加速度計でも20Hz以下のローパスフィル

タをかけ窓関数はハミングを使用する。

短辺壁面 (x方向) では、**図-6(a)**から11.72Hz, 14.50Hz, 17.36Hz, 19.16Hzで、**図-7(a)**から11.72Hz, 14.47Hz, 17.36Hz, 18.98Hzで、**図-8(a)**から17.36Hz, 18.98Hzで卓越している。いずれの計測でも17.3Hz付近, 19.0Hz付近に卓越しており、**図-6(a)**, **7(a)**から11.7Hz付近, 14.5Hz付近にも卓越振動数が存在している。よって, x方向は11.7Hz付近, 14.5Hz付近, 17.3Hz付近, 19.0Hz付近が壁面の固有振動数となる可能性がある。

長辺壁面 (y方向) では、**図-6(b)**から11.72Hz, 14.56Hz, 17.36Hz, 18.98Hzで、**図-7(b)**から11.72Hz, 13.82Hz, 14.56Hz, 17.36Hz, 18.98Hzで、**図-8(b)**から14.56Hz, 18.98Hzで卓越している。いずれの計測でも14.5Hz付近, 19.0Hz付近で卓越しており、**図-6(b)**, **7(b)**から11.7Hz付近, 17.3Hz付近にも卓越振動数が存在している。よってy方向は11.7Hz付近, 14.5Hz付近, 17.3Hz付近, 19.0Hz付近が壁面の固有振動数となる可能性がある。

### 3. 固有振動数解析

#### (1) 解析概要

計測結果との比較を行うため、貯水槽の固有振動数解析を行う。ここで汎用有限要素解析ソフトウェアのADINA<sup>®</sup>を用いる。本解析で用いる貯水槽の解析モデルを**図-9**に示す。ここで短辺壁面に直交方向をx軸, 長辺壁面に直交方向をy軸, 鉛直方向をz軸とする。基礎方程式は、ポテンシャルベース3次元流体方程式を用いることで解析を実施する。解析条件を表-3に示す。

本解析では、解析の範囲を0~20Hzとし、竹本ら<sup>9)</sup>が提案した1Hz毎に固有振動数解析を行い、それぞれ1000modeの範囲で固有振動数を算出する。ここで算出された刺激係数は、以下の手順でバルジング固有振動数の確認を行う。

- ① x, y方向の刺激係数を確認し、 $10^4$ より大きい刺激係数を抽出。
- ② ①で確認した刺激係数に対応するモード図を算出。

#### (2) 解析結果

算出された固有振動数と刺激係数を**表-4**に示す。また、算出した刺激係数から推定されたモード図と固有振動数を**図-10**に示す。

8.504Hzは天板にモードが現れていることから、天板の固有振動数であると推定される。よって、壁面の固有振動数からバルジング固有振動数を推定する場合、8.504Hzを除外して考える。

9.592Hzは刺激係数の値が大きいが、これは同じく刺激係数の値が大きい18.749Hzのほぼ1/2の振動数であることから、9.592Hzは18.749Hzの倍振動の影響を受けているものと考えられる。また、微動計では9.5Hz付近に卓越振動

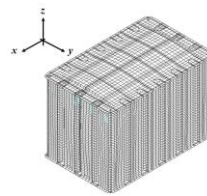


図-9 貯水槽の解析モデル

表-3 解析条件

水槽部	Shell要素
流体部	ポテンシャルベース3D要素
流体表面	自由水面
要素数	78,030
	水槽部: 15,938 流体部: 62,092
境界条件	底面4辺固定

表-4 固有振動数と刺激係数

固有振動数(Hz)	刺激係数		
	x	y	z
...	...	...	...
8.504	-322.351	-28.78	12.845
...	...	...	...
9.592	-128797	417.589	-474.548
...	...	...	...
11.796	0.205	-0.018	0.059
...	...	...	...
13.089	0.295	0.191	-0.076
...	...	...	...
13.975	0	0.196	0.002
...	...	...	...
14.163	0.002	-0.201	-0.010
...	...	...	...
18.749	1310.710	-1054.380	162.957

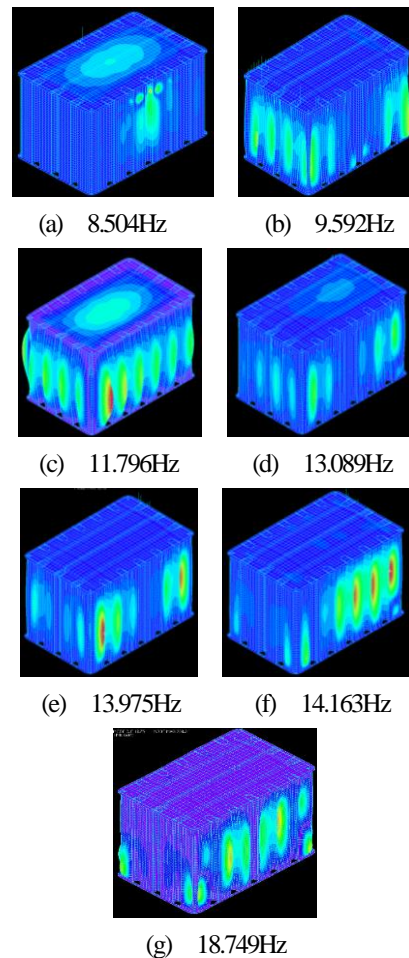


図-10 モード図と固有振動数

数が算出されていないことから、9.592Hzは壁面のバルジング振動への影響は小さいと考えられる。

11.796Hzは長辺壁面 (y方向) で顕著にモードが出ている。また、短辺壁面 (x方向) や天板にもモードが出

ていることから、貯水槽の天板を含む壁面全体の固有振動数である可能性が高い。

13.089Hz, 13.975Hz, 14.163Hz, 18.749Hzは、長辺壁面(y方向)にモードが発現していることから、これらの値が壁面の固有振動数である可能性が高い。

以上の解析結果から、バルジング固有振動数は、11.796Hz, 13.089Hz, 13.975Hz, 14.163Hz, 18.749Hz付近に存在する可能性が高い。

#### 4. 計測結果と固有振動数解析結果の比較

微動計と加速度計の計測結果から、x方向、y方向ともに11.7Hz付近、14.5Hz付近、19.0Hz付近に卓越振動数が存在している。一方、固有振動数解析でも11.796Hz, 14.163Hz, 18.749Hzが計測結果と近接する値を有している。これらのことから、微動計を貯水槽天板の中央付近に設置することで、簡易的に貯水槽壁面の固有振動数を把握できたと考える。これにより、貯水槽のバルジング固有振動数を算出できていると考えられる。

#### 5. 複数の貯水槽への適用結果

微動計単体での計測手法の確立および汎用性を示すため、材質、形状や規模の異なる計7貯水槽を対象とし、微動計を天板中央に設置し常時微動計測をした場合と壁面近傍に設置しプラスチックハンマーで軽く叩いた場合の固有振動数を比較した結果を図-11に示す。なお、凡例の括弧は、各貯水槽の有効容量を表す。また、前章までと同様、パワースペクトルから卓越振動数を算出している。

この結果から、x方向、y方向ともに概ね5%以内の誤差に収まっているが、SUS角形水槽(有効容量800m<sup>3</sup>)のx方向は、この範囲から外れている。このように大型貯水槽を対象とする場合、常時微動計測のみでは煩雑な結果となり壁面の固有振動数を推定するのは難しいとされている<sup>7)</sup>。また、前章までのように天板に外乱を与えて天板の固有振動数を除外して考える必要があること<sup>3)</sup>、正確な固有振動数を推定するには固有振動数解析の結果を補完すること<sup>3)4)</sup>など、微動計単体での計測手法に関して課題を残しているのが現状である。よって、材質や形状が異なる場合は、微動計を天板の中央付近に設置し、常時微動計測を行うことで簡易的に壁面の固有振動数を算出できるが、貯水槽の規模が大きい場合は算出できない可能性があることが確認された。したがって、本研究の提案手法により簡易的にバルジング固有振動数を推定する上で有益な情報を得た。

#### 6. おわりに

本研究では、ステンレス製一体型水槽を用いて、微動計と加速度計から壁面の固有振動数を算出し、固有振動数解析との比較を行った。この比較により、微動

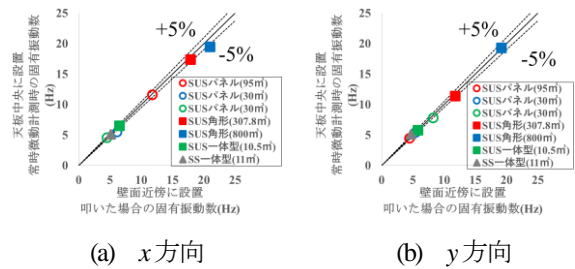


図-11 微動計を天板中央に設置した場合と壁面近傍に設置した場合との固有振動数の比較

計ならびに加速度計から得られる値は、固有振動数解析で算出された値と概ね一致した。このことから、本研究で提案した貯水槽天板に微動計を設置し、常時微動計測や壁面を軽く叩くことで、簡易的に貯水槽のバルジング固有振動数を求められる可能性が示された。なお、本研究で使用した貯水槽のバルジング固有振動数は、11.7Hz付近、14.5Hz付近、19.0Hz付近に存在することが確認された。落合の研究<sup>9)</sup>から10Hzを超える振動数については、耐震設計強度上の考慮が不要であるため、バルジングについて安全であるといえる。

また、微動計単体での計測手法の確立に向け、微動計の設置位置に注目し、複数の貯水槽を対象に計測を行った。これにより、本研究で提案された手法で簡易的に壁面の固有振動数を算出できることを確認し、バルジング固有振動数を推定する上で有益な情報を得た。

参考文献

- 1) 小野泰介：貯水槽における異なる振動現象の把握とその耐震設計に関する研究，中央大学博士学位請求論文，2022。
- 2) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2022年版，2022。
- 3) 齊藤崇他：微動計測装置を用いた貯水槽のバルジング固有振動数の推定，土木学会構造工学論文集，Vol.69A，pp.253-261，2023。
- 4) 平井秀他：振動計測と固有振動数解析による実機貯水槽のバルジング固有振動数の推定，土木学会論文集 A2(応用力学) 特集号，Vol.80，No.15，2024。(掲載決定)
- 5) 齊藤崇他：微動計測装置を用いた実機ステンレス製貯水槽のバルジング固有振動数の推定，空気調和・衛生工学会，D-65，2023。
- 6) 齊藤崇他：微動計測装置を用いて10Hz以下に着目した貯水槽のバルジング固有振動数の推定，土木学会全国大会第78回年次学術講演会，CS10-38，2023。
- 7) 齊藤崇他：微動計測装置を用いた現地計測での大型貯水槽のバルジング固有振動数の推定，第51回関東支部技術研究発表会，2024。(発表予定)
- 8) 竹本純平他：ステンレス製パネルタンクの流体と構造を連成しての時刻歴応答解析，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.76，No.2，pp.153-162，2020。
- 9) 落合兼寛：原子力発電所の耐震性能を知る-地震発生後の電力安定供給のために，日本原子力学会誌，Vol.56，No.2，pp.12-16，2014。